

(옆면)

(앞면)

2014000
540004

보안 과제(), 일반 과제(√) / 공개(√), 비공개()발간등록번호()

토양·지하수 오염방지 기술개발사업 제4차 연도 최종 보고서

R&D / 2014000540005

한국형 표토침식 예측모델 개발
최종 보고서

2018

환경부

한국환경산업기술원

한국형 표토침식 예측모델 개발 최종보고서

2018. 05.

주관연구기관 / 공주대학교 산학협력단

환경부
한국환경산업기술원

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 토양유실 예측에 이용되는 범용토양유실에 대한 개선이 필요함 - 연평균 접근 방법에서 계절적 특성을 반영할 수 있도록 월별 접근 방법으로서의 개선 - 작물의 지역별(4대강으로 구분) 및 계절별(월 단위로 구분) 특성을 반영할 수 있도록 하는 데이터베이스를 구축 ○ 디지털 자료를 이용한 토양유실량 예측 기회 제공이 필요함 - 임의 지점에 대한 토양유실량 예측이 가능하도록 수치표고모형, 토지이용도, 토양도 자료에 의한 토양유실을 예측하는 툴 개발 - 토양유실 우려지역에 대한 등급화 방법 및 기능 개발				
연구개발성과	○ 토양유실의 계절적 특성 및 기상 변화를 반영할 수 있는 방법을 제안하였음 - 과업을 통해 ‘표토의 침식 현황 조사에 관한 고시’에 제시된 강우침식능인자는 최근 우리나라의 기상변화 및 계절적인 특성을 반영할 수 없음을 지적 - 국내 임의 지점에 대해서 임의 기간에 대한 월 강우량에 의해 강우침식능인자를 산정할 수 있는 방법을 제안하면서, 동시에 작물의 생장이 토양유실량에 미치는 영향을 고려할 수 있는 기회 제공 - 이에 대한 논문 게재 5편 및 학술발표회 5편의 성과를 도출 ○ ArcGIS 소프트웨어에서 토양유실량을 예측할 수 있는 툴을 개발하였음 - 월별 토양유실량 예측에 필요한 데이터베이스를 구축하였으며, 일반적으로 사용되고 있는 디지털 형식의 자료인 수치표고모형, 토지이용도, 토양도를 이용하여 토양유실량 예측에 필요한 인자를 구축하고 이를 이용하여 토양유실량을 예측할 수 있는 툴 개발 - 임의 구역에서 예측 토양유실량에 대한 등급화를 수행할 수 있는 기능 개발 - 이에 대한 논문 게재 2편 및 학술발표회 2편의 성과를 도출 ○ 월별 토양유실량에 근거한 ‘표토의 침식 현황 조사에 관한 고시’의 예비조사 개정안 제시				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 본 과업은 ‘표토의 침식 현황 조사에 관한 고시’의 예비 조사 방법 개선에 주목적을 두었으며, 이 예비 조사에 즉시 이용될 수 있음 ○ 제안된 토양유실량 산정에 필요한 입력 자료는 타 연구 및 사업에 즉시 이용이 가능함 ○ 본 과업의 결과 중 하나인 표토침식 취약지역 지도를 효율적 표토침식 관리 대상지역 설정에 활용될 수 있음				
국문핵심어 (5개 이내)	범용토양유실공식	지리정보시스템	토양유실 등급화	토양유실량 예측	토양유실 우심지역
영문핵심어 (5개 이내)	USLE	ArcGIS	Soil loss classification	Soil loss estimation	Area of concern for soil loss

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	11
1-1. 연구개발 목적	11
1-2. 연구개발의 필요성	13
1-3. 연구개발 범위	14
(1) 한국형 토양유실 공식 확립을 위한 인자 개선	14
(2) 표토침식 취약지역 취약 지역 설정 및 침식 방지 대책 수립	14
(3) 표토침식 모델링 기법 개발	14
2. 연구수행내용 및 성과	15
2-1. 연구 내용	15
가. 범용토양유실공식의 연구동향	15
(1) 범용토양유실공식의 개요	15
(2) 범용토양유실공식 인자의 연구동향	16
나. 범용토양유실공식 인자의 산정	34
(1) 강우침식능인자(R)의 산정	34
(2) 토양침식성인자(K) 및 지표피복인자(C)의 산정	54
(3) 경사장·경사도인자(LS)의 산정	85
(4) 경작방법인자(P)의 산정	99
다. ArcSATEEC의 개발 및 적용(한국형 토양유실 공식)	113
(1) ArcGIS 10을 기반으로 하는 ArcSATEEC의 개발	114
(2) 한강유역에 대한 적용	119
(3) 낙동강유역에 대한 적용	121
(4) 금강유역에 대한 적용	123
(5) 영산강유역에 대한 적용	125
(6) 섬진강유역에 대한 적용	127
(7) ArcSATEEC을 이용한 4대강의 토양유실가능성 추정치	130
라. 한국형 토양유실 공식의 개선	133
(1) 보전관리인자 지도 산정 모듈 개선	133
마. 표토침식 우려지역 선정	136
(1) 표토침식 우려지역 선정을 위한 대상유역	137
(2) 한강유역의 토양유실량 등급화	140
(3) 낙동강유역의 토양유실량 등급화	143
(4) 금강유역의 토양유실량 등급화	146
(5) 영산강유역의 토양유실량 등급화	149
(6) 섬진강유역의 토양유실량 등급화	152
(7) 표토침식 우려지역 확대 적용 예시	155

바. 유달률 산정방법 검토	157
(1) 대상 유역의 선정 및 월별 부유사량 산정	158
(2) 한국형 토양유실공식에 의한 월별 토양유실량 예측	160
(3) 유달률을 적용한 부유사량 예측	163
2-2. 연구 개발 성과	167
2-3. 연구 결과	168
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	169
3-1. 목표	169
3-2. 목표 달성여부	169
3-3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)	169
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	171
붙임. 참고문헌	172

<표 목차>

<Table 2-1> Annual mean R factor from 1981 to 2010	20
<Table 2-2> The concentrations of chemicals of each land use soil in Han river basin	21
<Table 2-3> Sediment yield and Estimation of USLE P Factor as fraction to baseline	25
<Table 2-4> 전국 강우침식능인자 산정 결과	37
<Table 2-5> 지점별 월 강우침식능인자 회귀식 개발 결과	52
<Table 2-6> 금강 유역에 대해 적용된 작물 재배 일정	58
<Table 2-7> 낙동강 유역에 대해 적용된 작물 재배 일정	59
<Table 2-8> 섬진 영산강 유역에 대해 적용된 작물 재배 일정	60
<Table 2-9> 한강 유역에 대해 적용된 작물 재배 일정	61
<Table 2-10> 개략토양도의 토양 성분 함량 및 토양침식성인자 ($\text{Mg}\cdot\text{hr}/\text{MJ}\cdot\text{cm}$)	62
<Table 2-11> 대청댐유역에서의 월별 토양침식성인자($\text{Mg}\cdot\text{hr}/\text{MJ}\cdot\text{cm}$)	63
<Table 2-12> 임하댐유역에서의 월별 토양침식성인자($\text{Mg}\cdot\text{hr}/\text{MJ}\cdot\text{cm}$)	68
<Table 2-13> 주암댐유역에서의 월별 토양침식성인자($\text{Mg}\cdot\text{hr}/\text{MJ}\cdot\text{cm}$)	73
<Table 2-14> 소양강댐유역에서의 월별 토양침식성인자($\text{Mg}\cdot\text{hr}/\text{MJ}\cdot\text{cm}$)	78
<Table 2-15> 대청댐 유역에 대한 회귀식 계수	81
<Table 2-16> 소양강댐 유역에 대한 회귀식 계수	82
<Table 2-17> 임하댐 유역에 대한 회귀식 계수	82
<Table 2-18> 주암댐 유역에 대한 회귀식 계수	82
<Table 2-19> 유역별 회귀식에 의한 토양침식성인자 평가	83
<Table 2-20> 해상도에 따른 유역의 경사장·경사도 인자의 최대값	95
<Table 2-21> 평균값과 해상도에 따른 유역의 경사장·경사도 인자의 최대값	96
<Table 2-22> 해상도에 따른 유역의 경사장·경사도인자의 표준편차 산정 결과	96
<Table 2-23> 해상도에 따른 토양유실량 산정 결과(metric ton/ha/yr)	98
<Table 2-24> 해상도에 따른 경사장·경사도인자의 표준편차 산정 결과	98
<Table 2-25> 한국의 관리방법 별 경작방법인자	104
<Table 2-26> 국내 경작지 형태에 따른 경작방법인자	112
<Table 2-27> 계단전에 적용되는 경작방법인자	112
<Table 2-28> 대상유역별 토지이용현황	116
<Table 2-29> 4대강 유역별 월단위 토양유실가능성 추정치 (Unit: $\text{Mg}/\text{ha}/\text{Month}$)	130
<Table 2-30> Description of input data source	137
<Table 2-31> 대상유역별 토지이용현황	138
<Table 2-32> Ranges of factors in 2003~2016	140
<Table 2-33> Ranges of factors in 2003~2016	143
<Table 2-34> Ranges of factors in 2003~2016	146
<Table 2-35> Ranges of factors in 2003~2016	149
<Table 2-36> Ranges of factors in 2003~2016	152
<Table 2-37> 유역별 면적, 평균경사, 토지이용현황 비율	160
<Table 2-38> 각 유역별 유달률 산정식의 매개변수	164
<Table 2-39> 각 유역별 보정 및 검정 결과	165

<그림 목차>

<Fig. 2-1> Tamiraparani 유역에서 발생한 면상 및 세류 침식에 대한 현장 사진	27
<Fig. 2-2> 객체 지향성 분류 기법을 이용한 토양 침식 및 퇴적에 대한 공간적인 분포	28
<Fig. 2-3> 우회수로 설치에 따른 경사지 밭에서의 토양 유실 저감 효과 모의	29
<Fig. 2-4> High Impact Targeting	30
<Fig. 2-5> STEPL 모형의 인터페이스	32
<Fig. 2-6> STEPL WEB 의 유사량 산정 및 최적관리기법에 의한 유사량 저감 산정 과정	33
<Fig. 2-7> WEPP Watershed Online GIS 2011의 인터페이스	34
<Fig. 2-8> 강우침식능인자 산정 지점	36
<Fig. 2-9> 전국 강우침식능인자 재산정 결과	40
<Fig. 2-10> 동두천 회귀식 분석 결과	42
<Fig. 2-11> 춘천 회귀식 분석 결과	43
<Fig. 2-12> 서울 회귀식 분석 결과	44
<Fig. 2-13> 인천 회귀식 분석 결과	45
<Fig. 2-14> 군산 회귀식 분석 결과	46
<Fig. 2-15> 전주 회귀식 분석 결과	47
<Fig. 2-16> 강화 회귀식 분석 결과	48
<Fig. 2-17> 양평 회귀식 분석 결과	49
<Fig. 2-18> 인제 회귀식 분석 결과	50
<Fig. 2-19> 홍천 회귀식 분석 결과	51
<Fig. 2-20> 대청댐유역에 대한 SWAT 모형의 입력자료	56
<Fig. 2-21> 임하댐유역에 대한 SWAT 모형의 입력자료	56
<Fig. 2-22> 주암댐유역에 대한 SWAT 모형의 입력자료	57
<Fig. 2-23> 소양강댐유역에 대한 SWAT 모형의 입력자료	57
<Fig. 2-24> 대청댐유역에서의 토양 Af에 대한 월별 토양침식성인자	64
<Fig. 2-25> 대청댐유역에서의 토양 An에 대한 월별 토양침식성인자	64
<Fig. 2-26> 대청댐유역에서의 토양 Ap에 대한 월별 토양침식성인자	64
<Fig. 2-27> 대청댐유역에서의 토양 Ma에 대한 월별 토양침식성인자	64
<Fig. 2-28> 대청댐유역에서의 토양 Mm에 대한 월별 토양침식성인자	65
<Fig. 2-29> 대청댐유역에서의 토양 Ms에 대한 월별 토양침식성인자	65
<Fig. 2-30> 대청댐유역에서의 토양 Mu에 대한 월별 토양침식성인자	65
<Fig. 2-31> 대청댐유역에서의 토양 Mv에 대한 월별 토양침식성인자	65
<Fig. 2-32> 대청댐유역에서의 토양 Ra에 대한 월별 토양침식성인자	66
<Fig. 2-33> 대청댐유역에서의 토양 Re에 대한 월별 토양침식성인자	66
<Fig. 2-34> 대청댐유역에서의 토양 Rs에 대한 월별 토양침식성인자	66
<Fig. 2-35> 대청댐유역에서의 토양 Rv에 대한 월별 토양침식성인자	66
<Fig. 2-36> 임하댐유역에서의 토양 Af에 대한 월별 토양침식성인자	69
<Fig. 2-37> 임하댐유역에서의 토양 An에 대한 월별 토양침식성인자	69
<Fig. 2-38> 임하댐유역에서의 토양 Ap에 대한 월별 토양침식성인자	69
<Fig. 2-39> 임하댐유역에서의 토양 Ma에 대한 월별 토양침식성인자	69
<Fig. 2-40> 임하댐유역에서의 토양 Mm에 대한 월별 토양침식성인자	70

<Fig. 2-41> 임하댐유역에서의 토양 Ms에 대한 월별 토양침식성인자	70
<Fig. 2-42> 임하댐유역에서의 토양 Mu에 대한 월별 토양침식성인자	70
<Fig. 2-43> 임하댐유역에서의 토양 Mv에 대한 월별 토양침식성인자	70
<Fig. 2-44> 임하댐유역에서의 토양 Ra에 대한 월별 토양침식성인자	71
<Fig. 2-45> 임하댐유역에서의 토양 Rs에 대한 월별 토양침식성인자	71
<Fig. 2-46> 주암댐유역에서의 토양 Af에 대한 월별 토양침식성인자	74
<Fig. 2-47> 주암댐유역에서의 토양 An에 대한 월별 토양침식성인자	74
<Fig. 2-48> 주암댐유역에서의 토양 Ap에 대한 월별 토양침식성인자	74
<Fig. 2-49> 주암댐유역에서의 토양 Ma에 대한 월별 토양침식성인자	74
<Fig. 2-50> 주암댐 유역에서의 토양 Mm에 대한 월별 토양침식성인자	75
<Fig. 2-51> 주암댐유역에서의 토양 Ms에 대한 월별 토양침식성인자	75
<Fig. 2-52> 주암댐유역에서의 토양 Mu에 대한 월별 토양침식성인자	75
<Fig. 2-53> 주암댐유역에서의 토양 Ms에 대한 월별 토양침식성인자	75
<Fig. 2-54> 주암댐유역에서의 토양 Ra에 대한 월별 토양침식성인자	76
<Fig. 2-55> 주암댐유역에서의 토양 Rv에 대한 월별 토양침식성인자	76
<Fig. 2-56> 소양강댐유역에서의 토양 Af에 대한 월별 토양침식성인자	79
<Fig. 2-57> 소양강댐 유역에서의 토양 An에 대한 월별 토양침식성인자	79
<Fig. 2-58> 소양강댐 유역에서의 토양 Ma에 대한 월별 토양침식성인자	79
<Fig. 2-59> 소양강댐 유역에서의 토양 Mm에 대한 월별 토양침식성인자	79
<Fig. 2-60> 소양강댐유역에서의 토양 Mu에 대한 월별 토양침식성인자	80
<Fig. 2-61> 소양강댐유역에서의 토양 Ra에 대한 월별 토양침식성인자	80
<Fig. 2-62> 소양강댐유역에서의 토양 Re에 대한 월별 토양침식성인자	80
<Fig. 2-63> DEM 생성 구조	86
<Fig. 2-64> 입력되지 않은 등고선 수치의 오류	87
<Fig. 2-65> 연속적이지 않은 등고선 수치의 오류	87
<Fig. 2-66> 대권역 분류	90
<Fig. 2-67> 수정된 DEM(Index No. 37810062, NGII)	91
<Fig. 2-68> 최종 생성된 5m × 5m DEM	92
<Fig. 2-69> 해상도에 따른 유역의 LS factor비율 통계	94
<Fig. 2-70> 해상도에 따른 경사장·경사도인자의 비교	95
<Fig. 2-71> 해상도에 따른 유역의 토양유실산정 결과	97
<Fig. 2-72> 경작방법인자 조사를 위한 대상유역 모식도	100
<Fig. 2-73> 수치지도를 이용한 농경지 추출	101
<Fig. 2-74> P값 조사를 위한 현장조사 양식	102
<Fig. 2-75> 해안면의 경작지 현황	105
<Fig. 2-76> 자운리의 경작지 현황	105
<Fig. 2-77> 반변천 상류의 경작지 현황	106
<Fig. 2-78> 금강(미호A2)의 경작지 현황	106
<Fig. 2-79> 영산강중류(봉황천)의 경작지 현황	107
<Fig. 2-80> 해안면의 경작지 경사도 비교 결과	108
<Fig. 2-81> Google Earth를 이용한 필지별 경사도 산정	108
<Fig. 2-82> 환경부 “표토침식 현황조사에 관한 고시”에 의해 선정된 경작방법인자	110

<Fig. 2-83> ArcSATEEC의 인터페이스	114
<Fig. 2-84> 월별 토양유실량 추정을 위한 ArcSATEEC 모형의 흐름도	115
<Fig. 2-85> ArcSATEEC 적용을 위한 한강유역 토지이용도	116
<Fig. 2-86> ArcSATEEC 적용을 위한 낙동강유역 토지이용도	117
<Fig. 2-87> ArcSATEEC 적용을 위한 금강유역 토지이용도	117
<Fig. 2-88> ArcSATEEC 적용을 위한 영산강유역 토지이용도	118
<Fig. 2-89> SATEEC 적용을 위한 섬진강유역 토지이용도	118
<Fig. 2-90> 한강유역의 SATEEC 입력자료 구축	121
<Fig. 2-91> 낙동강유역의 SATEEC 입력자료 구축	123
<Fig. 2-92> 금강유역의 SATEEC 입력자료 구축	125
<Fig. 2-93> 영산강유역의 SATEEC 입력자료 구축	127
<Fig. 2-94> 섬진강유역의 SATEEC 입력자료 구축	129
<Fig. 2-95> 한강유역의 토양유실량 월별 변화 및 고시값 비교	131
<Fig. 2-96> 낙동강유역의 토양유실량 월별 변화 및 고시값 비교	131
<Fig. 2-97> 금강유역의 토양유실량 월별 변화 및 고시값 비교	132
<Fig. 2-98> 영산강유역의 토양유실량 월별 변화 및 고시값 비교	132
<Fig. 2-99> 섬진강유역의 토양유실량 월별 변화 및 고시값 비교	133
<Fig. 2-100> 토지이용별 보전관리인자 산정 흐름도	134
<Fig. 2-101> 개선된 보전관리인자 지도 생성 모듈 예시를 위한 토지이용도	135
<Fig. 2-102> 전 지역에 대한 보전관리인자 정의 예시	135
<Fig. 2-103> 농경지 지역에 대한 선택적 보전관리인자 정의 예시	136
<Fig. 2-104> 물환경정보시스템 표준유역도(KRF)	136
<Fig. 2-105> 4대강 유역의 입력자료	139
<Fig. 2-106> 한강유역의 ArcSATEEC 구축자료 및 결과	142
<Fig. 2-107> 한강유역 소유역 등급화 결과	143
<Fig. 2-108> 한강유역 주요 토양유실 우려지역	143
<Fig. 2-109> 낙동강유역의 ArcSATEEC 구축자료 및 결과	145
<Fig. 2-110> 낙동강유역 소유역 등급화 결과	146
<Fig. 2-111> 낙동강 유역 주요 토양유실 우려지역	146
<Fig. 2-112> 금강유역의 ArcSATEEC 구축자료 및 결과	148
<Fig. 2-113> 금강유역 소유역 등급화 결과	149
<Fig. 2-114> 금강 유역 주요 토양유실 우려지역	149
<Fig. 2-115> 영산강유역의 ArcSATEEC 구축자료 및 결과	151
<Fig. 2-116> 영산강유역 소유역 등급화 결과	152
<Fig. 2-117> 영산강 유역 주요 토양유실 우려지역	152
<Fig. 2-118> 섬진강유역의 ArcSATEEC 구축자료 및 결과	154
<Fig. 2-119> 섬진강유역 소유역 등급화 결과	155
<Fig. 2-120> 섬진강 유역 주요 토양유실 우려지역	155
<Fig. 2-121> 표토침식 우려지역 예시	157
<Fig. 2-122> 월별 부유물질량 수집 대상 유역	159
<Fig. 2-123> 황성댐 유역에 대한 월별 토양유실량 예측	161
<Fig. 2-124> 섬진강댐 유역에 대한 월별 토양유실량 예측	161

<Fig. 2-125> 주암댐 유역에 대한 월별 토양유실량 예측	162
<Fig. 2-126> 임하댐 유역에 대한 월별 토양유실량 예측	162
<Fig. 2-127> 남강댐 유역에 대한 월별 토양유실량 예측	163
<Fig. 2-128> 횡성댐 유역의 부유사량 예측 보정(좌) 및 검정(우) 결과	165
<Fig. 2-129> 섬진강댐 유역의 부유사량 예측 보정(좌) 및 검정(우) 결과	165
<Fig. 2-130> 주암댐 유역의 부유사량 예측 보정(좌) 및 검정(우) 결과	166
<Fig. 2-131> 임하댐 유역의 부유사량 예측 보정(좌) 및 검정(우) 결과	166
<Fig. 2-132> 남강댐 유역의 부유사량 예측 보정(좌) 및 검정(우) 결과	166

1. 연구개발과제의 개요

1-1. 연구개발 목적

토양 유실은 전 세계적으로 가장 중요한 환경적 문제 중의 하나로 인식되어왔다. 토양 유실은 토양 구조의 파괴, 유기물의 손실, 경작 가능한 토심의 깊이 절감 등 다양한 부정적 영향을 유발한다. 최근에는 다양한 지구 물리학적 특징과 토양 침식 과정의 연관성을 이해하고 토양 유실에 대한 적절한 대안 관리 기법 및 시나리오 분석을 위해 Universal Soil Loss Equation (USLE) 기반의 모형이 광범위하게 활용되고 있다. 그러나, 다양한 토지이용에 대한 USLE 모형의 유용성이 검증되었음에도 불구하고, 모형의 매개변수 산정 및 계산 능력 면에서 간소화에 대한 요구가 계속되고 있는 실정이다. 특히, 인구 증가나 산업 기술의 발달로 자원 수요가 증가하고, 농경지에서의 과도한 시비 및 관개활동, 산불 등과 같은 이유로 지나치게 토양유실이 발생하고 있다.

고랭지 밭 등의 경사가 급한 경작지의 경우 강우에 의해 발생한 지표유출수로 인해 다량의 토양유실로 이어질 수 있다. 기후변화센터에 따르면 우리나라는 보통 여름철에 연강수량의 70%가 집중되며, 경사가 급한 지형 특성과 빈번하게 발생하는 국지성 호우가 토양유실을 가속화하고 있다. 영농활동이 행해지는 농촌지역의 경우 비료나 농약의 사용에 의해 영양염류 및 유해물질에 의한 수질문제가 대두되고 있으며, 기후변화에 의한 유역에서의 강우강도와 지표유출량의 증가는 유기물이 포함하고 있는 표층 토양유실의 원인이 되며, 유역의 농업생산능력을 저하시킬 수도 있다(Ye et al., 2009). 또한, 토양유실량의 증가는 수생태계 파괴, 댐 등을 비롯한 수리구조물의 기능저하, 상수원으로 사용될 수자원의 가치 하락 등과 같은 환경적·경제적 문제를 야기하고 있는데, 유역 내 토양침식 및 토양유실의 원인으로 농경지에서의 영농활동이 상당부분 차지하고 있다는 연구사례도 찾아볼 수 있다(Brown, 1984).

이러한 토양유실을 방지하기 위해서는 먼저 그 양을 예측할 필요가 있는데, 범용토양유실 공식(Universal Soil Loss Equation; USLE)(Wischmeier and Smith, 1978)이 국내외에서 이용되어 왔다. 더욱이 국내에서는 토양유실 방지와 관련된 정책에서도 이 공식을 이용할 것을 제시하고 있다(환경부, 2012). 범용토양유실공식은 방대한 양의 자료를 근거로 하여 개발된 공식으로, 5개의 입력 자료만이 필요하며 더욱이 계산방법이 간편하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 이 범용토양유실공식은 연평균 토양유실량 예측만이 가능하기 때문에 우리나라와

같이 토양유실량이 계절에 따라 달라질 경우에는 한계가 있는 것으로 보인다.

토양유실 예측 기술 개발 및 개선에 관한 연구와 함께 이루어질 필요가 있는 부분이 디지털 형식의 자료를 이용하는 소프트웨어의 개발 기술이다. Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC; Lim et al., 2003) 모형은 범용토양유실공식에 의해서 토양유실량을 추정할 수 있도록 개발된 GIS 기반의 모형이다. 수치표고모형(Digital elevation model; DEM), 토지이용도, 토양도와 같은 GIS 기반의 자료를 범용토양유실공식의 인자들 변환부터 토양유실량 산정에까지 사용자에게 편의를 제공하고 있다. 그러나, SATEEC 모형은 장기간에 걸친 연평균 토양유실량을 예측하기 때문에 여름에 집중되는 우리나라 강우 특성을 반영하는 데에는 한계가 있다. 또한, GIS 기반의 소프트웨어인 ArcGIS 10에 의해 구동되는 것이 아니라 ArcView 기반으로 되어 있기 때문에 모형의 사용이 제한이 된다. 현재 사용되고 있는 ArcGIS 소프트웨어는 ArcPy 프로그래밍 언어에 의한 코딩과 인터페이스 개발 체제를 지원하고 있다. 따라서 기존의 사용자에게 의한 입력 자료를 범용토양유실공식의 각 인자로 변환하는 과정과 토양유실량을 추정하기 위한 과정이 ArcPy로 다시 코딩될 필요가 있으며, 설치 및 사용에 있어 오류를 최소화하기 위해서 ArcGIS에서의 툴박스 형식의 인터페이스를 가지도록 할 필요가 있다. 연평균 토양유실량을 추정하는 데에 사용이 가능하였던 기존 SATEEC 모형을 우리나라의 계절성을 반영하여 토양유실량을 추정할 수 있도록 강우 침식능인자와 지표피복인자를 월별로 산정할 수 있도록 개선이 필요하다.

따라서, 본 과업의 목적은 국내 여건을 반영할 수 있도록 범용토양유실공식을 개선하여 토양유실량 예측 기술을 개발하는 것이며, 이 기술을 이용할 수 있는 소프트웨어를 개발하여 활용성을 높이는 것이다.

1-2. 연구개발의 필요성

- 표토는 인간이 살아가는 삶의 터전으로써 수자원의 저수와 보전, 오염물의 정화, 홍수 조절, 식량 및 에너지 생산 등 다양한 기능을 제공해주는 중요한 자원임
- 특히 표토는 생성되기 위해서는 몇 천 년이 소요된다는 연구보고가 있을 정도로 한번 유실된 표토가 다시 재생되기 위해서는 매우 긴 시간을 필요로 하기 때문에 표토 보전에 대한 관심은 국내·외적으로 증대되고 있는 상황임
- 표토는 흐르는 물, 바람, 기타 지형학적 요인에 의해 자연계에서도 지속적으로 유실되지만 농업, 산림 개발 등 인간의 활동으로 유실되는 표토의 양과 속도가 가속화 되고 있는 상황임
- 특히, 우리나라의 경우 산악지형이 많아 경사가 급하며 여름철 집중강우에 의한 표토유실 문제가 심각한 상황이며 2008년 OECD 28개국에 대한 표토 침식 위험도 평가 결과 8위로 평가됐음
- 토양침식에 영향을 미치는 인자들 역시 시·공간적으로 변화하지만, 현재 이러한 변화특성을 고려한 토양유실산정에 관한 연구는 미비한 실정임
- 뿐만 아니라 최근 들어 기후변화로 인해 극한강우사상의 발생빈도가 증가함에 따라 물 관련 자연재해 발생 빈도와 그 심각성 또한 커지고 있으며, 특히 극한강우사상으로 인한 표토 유실로 인한 피해 복구에 많은 양의 예산이 사용되고 있음
- 이에 환경부에서는 2012년 표토의 침식 현황 조사 및 대책 등에 관한 고시를 제정하여 현장조사를 기반으로 한 표토 침식 대책 방안을 마련하고자 노력하고 있음
- 현행 환경부 고시에서는 USLE 모델을 기반으로 표토침식량을 산정하고 있으나, USLE 모델 활용을 위해 필요한 인자들을 산정하기 위한 국내 데이터가 미비하여 일부 인자값은 외국 데이터를 사용하는 등의 한계가 존재함
- 따라서 정확한 표토침식량 산정을 위해서는 국내 환경여건에 맞는 각각의 인자들을 개선하거나 산정하여 한국형 모델로의 개발 또는 개선이 필요하며, 이를 위해서는 각 인자들의 검증 및 평가가 필요함

1-3. 연구개발 범위

- (1) 한국형 토양유실 공식 확립을 위한 인자 개선
 - (2) 표토침식 취약지역 취약 지역 설정 및 침식 방지 대책 수립
 - (3) 표토침식 모델링 기법 개발
- 본 연구진은 연구단 과제의 2차년도부터 참여하였으며, 2~4차년도의 연도별 목표는 아래와 같음
- ① 2차년도 : 한국형 토양유실 공식 확립, 한국형 토양유실 공식의 비교평가
 - ② 3차년도 : 한국형 토양유실 공식을 위한 표토침식 DB 구축, 한국형 토양유실 공식의 입력자료 확대, 한국형 표토침식 취약지역 침식방지 대책 I
 - ③ 4차년도 : 한국형 토양유실 공식의 검토, 유달률 산정 방법 검토, 표토침식 취약지역 침식방지 대책 II

2. 연구수행내용 및 성과

2-1. 연구 내용

본 연구에서는 국내 4대강 유역을 대상으로 최근 기상 변화 및 작물의 식생 성장 변화를 고려하여 토양유실량을 예측하고자 하였으며, 물환경정보시스템의 표준유역도를 기준으로 하여 금강, 낙동강, 영산강, 섬진강, 한강 유역내 소유역의 토양침식성 위험에 대한 등급화를 수행하였다.

가. 범용토양유실공식의 연구동향

(1) 범용토양유실공식의 개요

범용토양유실공식(Universal Soil Loss Equation; USLE)(Wischmeier and Smith, 1978)은 토양유실량의 예측을 위해 여러 나라에서 사용되고 있으며, 우리나라에서도 널리 이용되고 있다. 범용토양유실공식은 장기간 동안의 연평균 토양유실량을 산정할 수 있는 경험적인 모형이며, 토양유실량 예측을 위하여 강우침식능인자(Rainfall erosivity factor; R factor), 토양침식성인자(Soil erodibility factor; K factor), 지형인자(Slope and slope steepness factor; LS factor), 지표피복인자(Crop and cover management factor; C factor), 보전관리인자(Conservation practice factor; P factor)의 5개 인자를 필요로 한다(Renard et al., 1997; Wischmeier and Smith, 1965, 1978)〈식 1〉.

강우침식능인자(USLE R Factor)는 토양유실량 예측 대상 지역에서 강우량 및 강우강도와 관계를 가지는 침식성 인자이며, 토양침식성인자(USLE K Factor)는 발생한 토양유실량과 강우에 의한 타격 및 지표유출수에 의한 토양유실 가능성을 표현하는 강우침식능인자에 의해 계산이 된다. 지형인자(USLE LS Factor)(L=침식 경사면의 길이, S=침식 경사면의 경사)는 사면길이 22.13 m, 표면경사 9%를 기준으로 하여 경사장 및 경사도에 의한 토양유실 가능성을 고려할 수 있는 인자이다. 지표피복인자(USLE C Factor)는 농경지에서 작물의 종류나 토지이용현황과 같은 지표피복상태를 고려하기 위한 인자이다. 보전관리인자(USLE P Factor)는 농경지에서 작물이나 영농방법(멀칭, 고랑방향)이 토양유실량에 주는 영향을 반영하기 위한 인자이다.

범용토양유실공식은 유역에서 발생하는 연간 토양유실량을 산정하기 위하여 제시된 경험적으로, 유역의 강우 특성, 토양특성, 지형특성, 토지이용특성, 경작방법 특성에 관련된 변수

를 이용하여 그 유역의 토양유실량을 추정할 수 있다.

$$\langle \text{식-1} \rangle A = R \times K \times LS \times C \times P$$

여기서, A는 단위 면적에서 침식되어 유실되는 토양유실 가능성 추정치(ton/ha/yr)이며, R은 강우침식능인자(MJ · mm/ha · yr · hr), K는 토양침식성인자(Mg · hr/MJ · mm), LS는 지형인자(무차원), C는 지표피복인자(무차원)이며, P는 보전관리인자(무차원)이다.

개정범용토양유실공식(RUSLE; Revised Universal Soil Loss Equation)은 범용토양유실공식을 보완하고 컴퓨터 프로그램으로 사용하여 계산할 수 있도록 개선한 것으로 범용토양유실공식의 기본적인 형태는 유지하도록 하였으나, 계수 산정기법을 수정하고 특정조건을 반영할 수 있도록 하였다. 강우침식능인자는 강우가 고인 물을 타격하는 영향을 고려할 수 있도록 하였으며, 토양침식성인자는 결빙 및 해빙과 식물의 생장에 따른 토양함수율 변화에 의한 압밀 등을 고려하여 시간에 따른 영향을 반영할 수 있도록 하였으며, 열대성 화산토양 및 지층 중 암석조각의 영향도 반영할 수 있도록 하였다. 지형인자는 세류와 세류간 침식의 비를 반영하기 위해 경사장과 경사도의 범위를 확대하였다. 지표피복인자는 계절별 토양침식비를 선 토지이용을 나타내는 부인자(지면피복, 지면조도, 천개정도, 토양함수비)의 곱의 형태로 표현한 연속함수 형태를 개선하였다.

(2) 범용토양유실공식 인자의 연구동향

박찬원 등(2016)은 기상청 ‘81~ ‘10 강우량 자료를 통해 강우인자(R factor)를 산정하여 토양침식량 계산에 이용하였다(Park et al., 2011). 토양침식성인자(K factor)는 토양구 단위로 세분하여 유기물 함량, 자갈함량 등급을 이용하여 계산하였으며(Jung et al., 1999; Jung et al., 2004), 지형인자(LS factor)는 수치지형도(DEM)와 1:5,000 세부정밀토양도에서 간접 측정한 경사장 인자를 이용하여 계산하였다. 식생피복인자(C factor)는 Wischmeir and Smith (1965, 1978)의 초지와 임지에 대한 값을 기존의 값과 비교 검토하였고, 환경부 토지피복분류도에 근거한 토지피복 분류별 식생피복인자를 13개로 구분하여 인자값을 적용하였다. 그리고 보전관리인자(P factor)는 환경부 토지피복분류도를 이용하여 임지, 초지, 과수원: 1, 논: 0.1(계단전), 밭: 0.5(등고선 재배)를 적용하여 수치 지도화 하였다. 본 연구에서는 농촌진흥청에서 구축한 우리나라의 분포형 토양침식지도를 이용하여 낙동강 상류지역인 35개 표준유역(안동댐 유역 18개, 임하댐유역 17개)에 대하여 환경부 토지피복도와 중첩분석을 통하

여 토지이용별 토양침식위험성을 평가하여 토양침식위험지를 구분하였으며, 이를 정량화 하였다. 추정된 대상유역 총 토양유실량은 2,013천 Mg/yr 이었으며, 면적당 평균 토양유실량은 5.6 Mg/ha/yr 이었다. 중권역 단위로 살펴보면 토양유실량은 각각 안동댐 유역 979,000 Mg/yr, 임하댐 유역 1,034,000 Mg/yr 이었고, 면적당 평균 토양유실량은 각각 안동댐 유역 6.0 Mg/ha/yr, 임하댐 유역 (2002) 5.2 Mg/ha/yr 이었다. 임하댐과 안동댐 유역내 농경지에서 발생하는 면적당 토양유실량을 비교해 보면 각각 안동댐 유역 24.0 Mg/ha/yr, 임하댐 유역 20.7 Mg/ha/yr 으로 안동댐 유역의 값이 컸지만, 전체 농경지에서 발생하는 토양유실량은 각각 479,242 Mg/yr, 612,285 Mg/yr 로 임하댐 유역이 더 많은 양의 토양침식이 농경지에서 발생할 것으로 추정되었고, 이는 임하댐 유역 전체에서 발생하는 추정 토양침식량의 임하댐 59%에 해당하는 값이었다. 토양의 모재별 특성으로 전체 35개 소유역을 구분 후 소유역별 면적당 추정 토양유실량을 비교한 결과 “퇴적암 그룹” (6.4 Mg/ha/yr) > “혼합지역 그룹” (5.8 Mg/ha/yr) > “변성암 그룹” (5.5 Mg/ha/yr) > “화성암 그룹” (4.3 Mg/ha/yr) 순이었으며, 이는 토양유실에 영향을 미칠 수 있는 토양인자인 토성, 경사도 등을 잘 반영하고 있었다.

김민정 등(2010)은 강우량 변화에 따른 토양환경의 취약성을 평가하기 위해 1:25,000 수치정밀토양도를 이용하여 전국 시군별 발토양을 5,586개 그룹으로 구분하고, 각 그룹에 해당하는 RUSLE 인자를 대입하여 연평균 토양유실량을 산정하였다. A1B 기후변화 시나리오를 이용하여 강우량과 토양유실량을 분석한 결과 21세기말에는 강우량이 17% 증가하는 것으로 예상되고 있으며, 이에 따라 우리나라 발토양의 단위면적당 토양 유실량은 2003년 대비 7.6% 증가하고, 총 토양 유실량은 2003년 대비 12.9% 증가하는 것으로 예측하였다. 그러나, 본 연구에서는 우리나라 강우량 변화 시나리오에 따른 토양 침식을 예측에 있어 미래의 작물, 토지이용의 변화 및 지구단위별 지형 변경 등의 인자는 분석에 적용되지 못하였으며, 태풍빈도, 토지피복의 변화 등의 영향은 충분히 반영되지 않아 향후 기후변화에 따른 토양유실 방지를 위해서는 보다 면밀한 대책이 필요하다고 하였다.

이진영 등(2003)은 남한강 유역의 토양침식을 실험한 결과 자연상태에서 연간 토양유실량은 평균 12.54 ton/acre/year였으며, 최소 0.10 ton/acre/year, 최대 34.06 ton/acre/year로 나타났다. USLE에 의해 계산된 연간 토양유실량은 17.15 ton/acre/year로서 실험지역 결과와는 많은 차이가 있다고 하였다. 이는 토양유실량 산정에 필요한 다양한 조건을 정량화하는 과정에서 발생하였을 가능성이 높은 것으로 판단되며, USLE식에 활용되는 인자의 적용방법에 따라서도 토양유실량 산정결과는 커다란 차이를 보였다고 했다. 따라서 USLE식에 의해 산정된 침식량의 사용을 위해서는 신중을 기해야 할 것으로 사료된다고 하였다.

김민석 등(2007)은 USLE와 GeoWEPP 모델을 이용하여 경기도 이천시 소유역을 대상으로 토사유출량을 비교하였다. 연구기간동안의 유출된 토사량은 실제관측결과 270.54 ton, USLE 모델 적용 시 358.1 ton, 그리고 GeoWEPP 모델 적용 시 283.30 ton으로 산출되었다고 하였다. 모델을 적용한 산출량은 실제 산출량보다 과대하게 산출되었으며, 산출결과만을 볼 때, GeoWEPP 모델을 적용한 토사유출량이 USLE 적용 산출량 보다 관측량에 더 근사한 산출량을 보였다고 하였다. 모델 적용 산출량이 과대산출 된 원인으로는 실험웨어를 월류하여 빠져나간 부유물에 대한 양이 포함되지 않았기 때문이라고 하였다.

(가) 강우침식능인자(USLE R factor) 연구동향

강우침식능인자는 강우에 의한 침식능력을 뜻하며 이를 기준으로 연평균 토양유실량을 추정하도록 개발되었다. 연평균 강우침식능인자의 산정은 과거의 강우기록을 이용하여 각각의 강우사상에 대한 강우침식능인자를 구한 다음 연 단위로 더하고 이를 다시 연도에 대한 평균으로 구할 수 있다. 강우운동에너지 및 강우침식능인자를 산정하기 위한 식은 다음과 같다(정필균 등, 1983)<식 2 ~ 4>.

$$\langle \text{식-2} \rangle KE = 210.3 + 89 \log I$$

$$\langle \text{식-3} \rangle EI_{30} = (\sum KE \cdot P / 100) \times I_{30 \min \text{Max}}$$

$$\langle \text{식-4} \rangle R = EI_{30}$$

여기서, KE(Kinetic Energy(ton · m/ha/cm of rain) 1 cm 단위강우량에 의한 운동에너지, I는 강우강도(cm/hr), P는 강우량(cm), I30minMax는 지속시간 30분 최대강우강도(cm/hr)이다.

박찬원 등(2011)은 강우침식인자 계산을 위해 USLE 모형에서 강우사상은 1회 강우량이 12.7 mm 이상이며, 강우 간 간격이 6시간 내외 일 때는 1회 강우사상, 6시간 이상일 때는 2회 강우사상으로 정의하고 있다. 또한, 1회 강우가 12.7 mm 이하인 경우라도 15분 이내의 강우량이 6.25 mm 이상인 경우에는 1회 강우사상으로 고려한다(Wishmeier and Smith, 1978). 하지만, 본 연구에서는 60분 단위 강우자료를 이용하였기 때문에 15분 이내 6.25 mm 이상의 강우는 강우사상으로 포함하지 않았다. 이렇게 60분 단위 자료를 이용함으로써 무시된 15분 이내 6.25 mm 이상의 강우사상은 발생빈도와 해당 강우에 대한 강우운동에너지 값이 매우 적기 때문에 전체 강우인자 에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

전국단위 토양유실량 예측을 위하여 기상청 산하 전국 60개 지점의 30년 동안 (1981~2010

년)의 60분 단위 강수량자료를 이용하여 강우침식인자를 산출하였고, 분석된 결과를 이용하여 지역/시기/계절 별 강우패턴변화와 강우운동에너지 변화를 분석하였다. 강우침식인자를 계산한 결과 우리나라 평균 강우침식인자는 $4,147 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{yr} \cdot \text{hr}$ 이었다. 지역별로 보면, 제주도를 제외하고 전남 및 경남 해안지방, 경기도 북서 및 서울지역이 높은 강우침식인자 값을 보였다. 시기별 강우침식 인자는 1981~1990년 기간에는 3,988, 1991~2000년 기간에는 $4,085 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{yr} \cdot \text{hr}$, 그리고 2001~2010년 기간에는 $4,370 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{yr} \cdot \text{hr}$ 으로 증가하는 경향을 보였으며, 특히 여름철이 강우침식인자에서 차지하는 비율은 1981~1990년 기간에는 69.8%, 1991~2000년 기간에는 73.7% 그리고 2001~2010년 기간에는 74.2%으로 여름철 강우가 절대적 수치값 뿐만 아니라 상대적인 비율도 점차 증가하고 경향이였다.

<Table 2-1> Annual mean R factor from 1981 to 2010

(Unit: MJ · mm/ha · yr · hr)

Location (code)	R-factor	Location (code)	R-factor
Sokcho (90)	3,479	Yangpyeong (202)	5,332
Daegwallyeong (100)	4,443	Icheon (203)	4,474
Chuncheon (101)	4,010	Inje (211)	3,318
Gangneung (105)	4,150	Hongcheon (212)	4,798
Seoul (108)	5,746	Jecheon (221)	4,340
Incheon (112)	4,458	Boeun (226)	3,647
Wonju (114)	4,098	Cheonan (232)	3,677
Suwon (119)	4,464	Boryeong (235)	4,457
Chungju (127)	3,415	Buyeo (236)	4,612
Seosan (129)	4,086	Geumsan (238)	3,381
Ulsan (130)	1,946	Buan (243)	3,526
Cheongju (131)	3,361	Imsil (244)	3,613
Daejeon (133)	4,189	Jeongeup (245)	3,690
Chupungnyeong (135)	2,432	Namwon (247)	3,956
Pohang (138)	2,708	Suncheon (256)	5,100
Gunsan (140)	3,464	Jangheung (260)	5,289
Daegu (143)	2,474	Haenam (261)	4,253
Jeonju (146)	3,792	Goheung (262)	5,303
Ulsan (152)	3,279	Yeongju (272)	3,205
Gwangju (156)	4,355	Mungyeong (273)	2,900
Busan (159)	5,231	Yeongdeok (277)	2,252
Tongyeong (162)	4,176	Uiseong (278)	2,307
Mokpo (165)	3,049	Gumi (279)	2,324
Yeosu (168)	4,502	Yeongcheon (281)	2,232
Wando (170)	5,204	Geochang (284)	3,371
Jeju (184)	4,811	Hapcheon (285)	3,814
Seongsan (187)	7,864	Miryang (288)	3,301
Seogwipo (189)	6,885	Sancheong (289)	5,343
Jinju (192)	4,572	Geoje (294)	7,339
Ganghwa (201)	5,885	Namhae (295)	7,160

신상훈 등(2015)은 강우의 공간분포에 따른 토사유출의 특성을 토조 실험을 통해 연구하였다. 강우의 공간분포는 강우 집중위치를 사면의 중앙부와 상류부로 각각 설정함으로 조정하였으며, 토사유출의 시간적 변동성을 충분히 포착하기 위해 장시간(8시간)의 실험시간 동안 높은 시간해상도(10분)로 직접유출량, 지하수유출량, 토사유출량을 측정하였다. 분석결과 강우를 토조의 상류부에 위치시킬수록 토사유출량곡선의 첨두값은 감소하고 누적토사유출량은 증가하였다. 누적토사유출량은 시간에 따라 선형적으로 증가하였으나, 그 증가율이 2 시간을 기준으로 급격히 감소하였다. 이는 총량 위주로 기록되어있는 토사유출 실측자료를 사용함에 있어 고려해야 하는 조건이라고 하였다.

(나) 토양침식성인자(USLE K factor) 연구동향

토양침식성인자는 경사장 22.13 m, 경사도 9%의 시험포에서 측정된 토양유실량에 대한 강우침식인자의 비율을 의미한다. 토양침식성인자는 토양의 모래 및 유기물 함량과 토양구조, 침투능 등과 같은 토양특성에 따라 결정된다. 토양침식성인자는 Wischmeier에 의한 추정도표를 이용하거나 Wischmeier and Smith(1965) 및 Erickson(1997)의 삼각형 도표 및 보정표를 이용하여 추정할 수 있다. 이 도표는 영국 단위제로 되어 있기 때문에 미터제에 적용하기 위해서는 도표로부터 구한 토양침식인자를 7.59로 나눌 필요가 있다. 토양의 실트 함유량이 70% 이하의 경우 Wischmeier의 토양침식성인자 추정방법은 다음에 의해 구할 수 있다<식 5 ~ 6>.

$$\langle \text{식-5} \rangle K = \frac{[2.1 \times 10^{-4} (12 - OM) M^{1.14} + 3.25 (s - 2 + 2.5 (p - 3))]}{100 \times 7.59}$$

$$\langle \text{식-6} \rangle M = (\% \text{실트\&클레이}) \times (100 - \% \text{점토})$$

여기서, K는 토양침식성인자(ton/ha/R), OM은 유기물 함유 백분율, M은 입자크기 변수이다.

김민희 등(2011)은 지목별로 논, 밭, 과수, 임야, 대지, 하천, 축사로 구분하여 총 4,759개 토양시료를 채취 하였으며, 총유기탄소, 총질소, 무기태질소, 총인, 치환성 인을 시험 분석하였다. 지목별 면적과 유역 내 지목의 면적당 평균 토양 유실량, 지목별 평균 영양염류 농도를 통해 유역별 유출되어지는 양분부하지수를 산출하여 수질 유량 측정망 자료와의 연관성을 도출하였다. 지목별 토양 분석결과는 아래 <Table 2-2>와 같으며, 결과를 이용한 유역별 경작지 면적에 따라 유실지수는 크게 차이가 날 것이라고 하였다.

<Table 2-2> The concentrations of chemicals of each land use soil in Han river basin

Land use	pH (1:5)	EC	TOC	TN	Ex-N	TP	Ex-P
			mg/kg				
Orchard	6.53	10.98	19,564.75	2,160.46	94.33	1,043.25	13.45
Paddy	6.42	6.21	17,732.23	1,868.53	64.29	1,056.46	3.99
Land for house	7.05	8.80	13,973.72	1,521.60	61.70	947.52	4.76
Upland	6.45	11.07	18,336.13	1,939.61	86.57	1,342.62	12.89
Forest	6.19	5.50	20,373.48	2,096.61	67.46	966.99	3.60

국내에서는 주로 Wischmeier and Smith(1965)에 의해 제안된 토양침식인자 산정 공식을 이용하거나, Wischmeier(1971)의 추정도표법, Erickson(1997)이 제안한 삼각 도표법, 개략토양도를 이용한 추정법(건설부, 1992)이 주로 사용되고 있다.

최진규 등(1998)은 Wischmeier and Smith(1965)가 제안한 공식에서 U.S 단위의 토양침식인자를 SI단위로 변환할 수 있는 변환계수에 대한 연구를 진행하였으며, 정강호 등(2004)은 토양침식인자 산정시 자갈의 지피효과를 고려하기 위해 Box(1981)가 제안한 공식으로 보정하여 산출하였다. 또한 이근상 등(2003)은 개략토양도와 정밀토양도를 이용한 토양침식량 산정을 위하여 토양도 축척에 따른 적정 해상도 분석에 관한 연구를 진행하였다. 하지만 이러한 연구들은 토양의 물리적·구조적 특성이 시간에 따라서 불변한다는 가정 하에 연중 토양침식인자를 산정하며, 특히 대부분이 강우가 많이 발생하는 하절기를 바탕으로 토양침식인자를 산정하고 있다.

일반적으로 임의의 지점에서 토양 특성(모래, 이토, 점토 %)의 시간에 따른 변화는 매우 미비하다. 그러나 봄철에는 농민들이 논·밭작물의 파종을 위하여 경운, 파쇄, 쪼레 등의 농업 활동이 이루어지기 때문에 토양의 입단구조가 느슨한 상태로 변하게 되며 적은 강우에도 토양유실이 여름철과 비교하여 상대적으로 쉽게 발생하게 된다. 또한 겨울동안 동결되어 있는 토양이 봄 기간에 해빙하게 되며, 이 과정에서 토양층의 입단구조가 느슨해지기 때문에 적은 강우에도 많은 양의 토양유실이 발생하게 된다. 그러나 여름철에는 강우의 낙하하는 힘뿐만 아니라 작물이 성장함에 따라 작물의 뿌리가 표토층을 경화·고정화되기 때문에 봄철의 교란된 느슨한 토양과 비교하여 토양유실량에 차이가 발생하게 된다. 이는 어느 임의의 지역에서 토양의 물리적 특성 자체는 계절에 따라 변화하지 않지만 자연적·인위적인 활동에 의해서 토양의 구조적 특성은 크게 변화하기 때문에 이러한 인위적·자연적 활동을 고려한 토양침식인자 산정이 필요하다.

(다) 지형인자(USLE LS factor) 연구동향

강우에 의해 토양이 유실될 때, 지형적인 요인이 토양유실량에 영향을 줄 수 있다. 따라서 경사도와 경사장을 반영할 필요가 있으며, 이를 위한 인자가 지형인자이다<식 7 ~ 9>.

$$\langle \text{식-7} \rangle \quad L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m$$

$$\langle \text{식-8} \rangle \quad m = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

$$\langle \text{식-9} \rangle \beta = \frac{11.16 \sin \theta}{3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56}$$

여기서, λ 는 사면의 길이(m), m 은 지수, β 는 유출에 의해 발생하는 세류침식과 빗방울의 충격에 의해 주로 발생하는 세류사이의 침식간의 비를 의미하고, θ 는 사면의 경사각($^{\circ}$)이다.

사면경사도 인자(S)는 사면길이가 5 m보다 큰 경우 경사도인자(S)는 다음과 같이 산정할 수 있다<식 10 ~ 11>.

$$\langle \text{식-10} \rangle S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \text{slope} < 9\% \\ 16.8 \sin \theta - 0.51 & \text{slope} \geq 9\% \end{cases}$$

여기서, θ 는 사면경사각($^{\circ}$)이다. 만일 사면길이가 5 m보다 작은 경우 다음 식을 이용하여 산정한다.

$$\langle \text{식-11} \rangle S = 3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56$$

(라) 지표피복인자(USLE C factor) 연구동향

지표피복인자는 토양 표면의 피복에 따른 토양유실량의 비율로서 정의 되는데, 식생의 종류 및 성장상태, 경작 형태 등을 토양유실가능성 추정에 반영하기 위한 인자이다. 즉, 지표침식을 제어하는 식물의 크기, 지표면 부근의 피복 상태 등의 조건에 따라서 달라질 수 있는 인자이다. 강우, 토양, 지형조건이 동일한 경우에 작물이나 피복조건에서 발생한 토양유실량과 밭의 작물 조건에서 토양유실량과의 비를 의미하며, 경사지의 식생피복, 윤작조건, 수확량의 수준, 재배기간, 경운방법, 작물잔재 등의 복합적인 영향을 반영할 수 있다. 식생피복 상태는 시간 혹은 계절에 따라 변화하므로 지표피복인자 또한 변화할 필요가 있으며, 지표피복인자 식생이 성장하기 전의 나지상태에서는 1에 가까운 값을 적용할 필요가 있고, 식생이 성장할수록 감소되는 값을 적용할 필요가 있다. 산림 등의 식생이 밀집된 지역이나 논과 같이 담수상태가 오래 지속되는 지역, 혹은 토양입자가 불투수층으로 포장되어 있는 상태에서는 0.01의 작은 값으로 결정할 수 있다. 식생피복은 빗방울 입자의 타격으로부터 토양표면을 보호하면서 토양 입자의 교란을 막기 때문에, 투수능력을 향상시킴으로서 지표유출수의 양을 감소시켜 토양유실량을 감소시킨다. 그래서 강우의 양 및 분포, 토양, 지질,

지형 등과 같이 인위적으로 변화시키기 어려운 자연적인 조건과 달리 식생피복은 인위적인 방법에 의해 조절이 가능하여 나지의 산림조성 및 작물경작은 토양유실량을 줄일 수 있는 방법이 될 수 있다.

(마) 보전관리인자(USLE P factor) 연구동향

보전관리인자는 등고선 경작, 등고선 대상재배, 등고선 단구효과, 지표 하 배수, 건조한 농경지의 조도의 효과를 평가하기 위해서 사용된다. 밭에서 고랑이 경사와 같은 방향을 이루는 상하경(up and downhill culture)에 의한 토양유실량을 기준으로 침식조절관행에 따른 토양유실량의 비를 나타내는 무차원수이다. 침식조절관행에는 등고선경작(contouring), 등고선 대상재배(contour strip cropping), 테라스 등고선경작(terracing)등이 있으며, 강우, 토양, 지형 등의 조건이 동일하고, 토양유실방지만을 위해서 경작하는 작물의 종류나 작부체계를 바꾼다는 것이 어렵다는 점을 고려한다면 토양유실량을 줄일 수 있는 중요한 요소 중 하나로 여겨진다. 장원석 등(2010)은 강우강도를 고려하여 시험포에서의 토양유실을 고려할 수 있는 Vegetative Filter Strip Model-W(VFSMOD-W: Munoz-Carpena and Parsons, 2005)모형의 VFSM 모듈을 이용하여 경사도별 보전관리인자를 산정할 수 있는 회귀식을 제시하였다.

이동준 등(2014)은 식생매트 투수률과 다별형 식생수로관, 플룸관, 투수률 시험포 모니터링 결과값을 활용하여 USLE P 인자를 산정한 후 수문/비점 모형인 SWAT 모형에 적용시켜 유역단위에서 최적관리기법들의 토양유실 및 유사저감 효과를 평가하였다. 또한 고령지 농업지역인 해안면 유역의 경작지를 대상으로 대조구와 기존의 2가지 최적관리기법 및 새로 개발된 2가지의 최적관리기법의 USLE P 값을 적용시켜 토양유실 저감 효과와 유사저감 효과를 모의하였다. 분석결과 6차례 강우 후 각 최적관리기법 별 유실된 유사의 무게와 산정된 USLE P 값을 산정한 결과 다발형 식생 수로관과 식생매트 투수률의 값은 0.06과 0.11로 산정되었으며, 플룸관과 투수률의 인자 값은 0.54와 0.22로 산정되었다고 하였다. 또한 해안면 전체 지역의 6.3%인 경작지를 관리함으로써 경작지에서 발생하는 토양유실을 59%, 유역 전체에서 발생하는 유사의 11.8%를 저감한다면 자원으로써의 표토를 보전할 수 있으며, 수질 또한 개선시킬 수 있을 것이라 판단하였다. 그러나 봄철 강우에 대한 연구가 조사되지 않았으며, 경사도가 10% 내외인 단일 경사도에서 측정한 자료, 옥수수 단일 작물만을 모니터링 한 결과로써 한계점이 존재한다고 하였다.

<Table 2-3> Sediment yield and Estimation of USLE P Factor as fraction to baseline

Storm event Best Management practices	First Event (kg)	Second Event (kg)	Third Event (kg)	Fourth Event (kg)	Fifth Event (kg)	Sixth Event (kg)	Sum (kg)	USLE P value
Control field	137.10	4.77	2.24	2.95	0.54	0.57	11.08	1.00
Conventional flume pipe	62.50	3.00	1.22	1.41	0.20	0.17	5.99	0.54
Infiltration roll	17.39	1.57	0.38	0.39	0.04	0.05	2.42	0.22
Vegetation mat with Infiltration roll	3.65	0.68	0.28	0.25	0.03	0.03	1.26	0.11
Roll type vegetation channel	2.15	0.17	0.21	0.21	0.03	0.03	0.66	0.06

Shin et al.(2009)은 벚짚매트에 의한 토양유실량 저감 효과를 VFSMOD-W모형 내 보전관리인자를 이용하여 산정하였다. 벚짚매트 설치 시 각 경사도별(5%, 10%, 20%) 보전관리인자는 각각 0.30, 0.37, 0.41로 나타났으며, 경사도에 따라 벚짚매트에 의한 유사저감 효과를 고려하기 위한 보전관리인자는 선형적 관계를 보였으며, <식 12>를 이용하여 산정할 수 있다.

$$\text{<식-12> } USLE\ P\ factor = 0.0069 \times Slope(\%) + 0.28$$

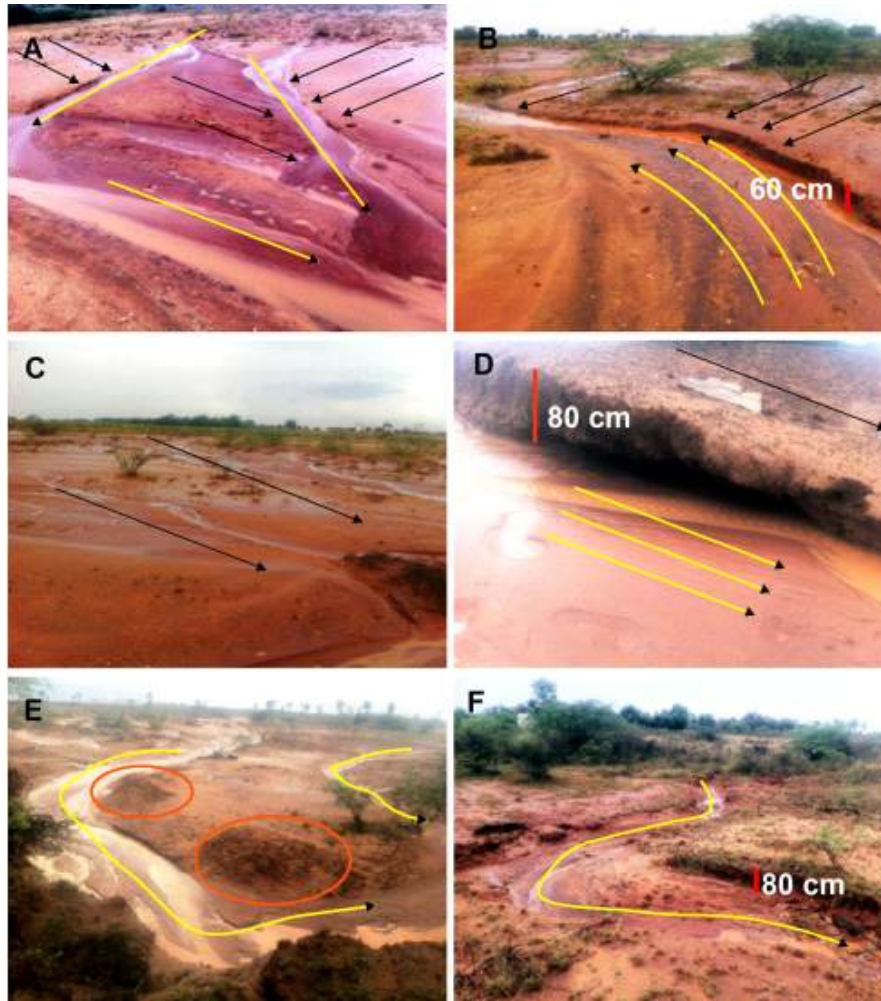
(바) 토양유실량 산정을 위한 모델링 연구동향

Di Stefano 등 (2016)은 Modified USLE (USLE-M) 모형에 대해 강우 사상별 (event) 및 연 단위 척도로 유사량 산정의 적정성을 평가하였다. 위 연구에서는 기존 연구 방법과는 달리 연구 유역을 형태학적 단위 (유역의 형상, 길이, 경사도 등)로 분류하여 USLE-M 모형을 적용하였다. 또한, 토양 상태의 계절적인 변동을 모의하기 위해 모형의 인자들 중 작물 인자와 각 형태학적 단위의 유사 전달률 β 계수에 대한 분석 수행하였다. 연구 결과 강우 사상별 유사량 모의 시 작물 인자의 계절적 변동의 고려 없이 평균 β 계수의 적용으로 모의 정확성을 개선(인자의 간소화)하였다. 반면, 연 단위 척도에서는 작물 인자의 계절적 변동을 반영하여 정확한 모의 결과를 얻을 수 있었다. Mancino 등 (2016)은 지중해 지역을 대상으로 토지이용 변화에 따른 토양침식 위험성에 대해 장기 평가 연구를 수행하였다. 위 연구에서는 Modified USLE 모형을 활용하여 토지이용 변화(1960년, 1990년, 2010년)가 모형의 모의 수행능력과 모의 결과의 신뢰성에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, Modified USLE 모형의 매개변수들을 간소화하였고 고해상도 자료들의 적용하였으며, 이를 기반으로 토양 침식 위

험성 평가를 수행하였다. 연구 결과 지중해 지역을 대상으로 신뢰할 수 있는 토양 유실의 장기 예측 결과를 보여주면서 고해상도 자료의 활용과 함께 모형의 탄력적 활용성을 향상시킬 수 있음을 보여주었다.

Khaleghpanaha 등 (2016)은 자연 강우에 의한 단일 강우 사상 자료를 활용하여 유출 및 토양 유실 모의에 있어 EUROSEM과 RUSLE2 모형을 비교분석하였다. 민감도 분석과 모형의 보정 결과에서는 포화수리전도도가 EUROSEM 모의 결과에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. EUROSEM 모형의 검정 결과를 통해 경사지에서 유출과 토양 유실 모의 정확성이 유효함을 보여주었다. RUSLE2 모형의 경우, 개별 강우에 대해서 토양 유실을 잘 예측하는 것으로 나타났으나, 높은 EI30에 대해서는 그 불확실성이 다소 증가했다. 두 모형의 비교 결과, 소수의 경사지에서는 보정된 RUSLE2 모형이 EUROSEM 모형보다 높은 모의 수행 능력을 보여주었으나, 사상별 토양 유실 예측에 대해서 EUROSEM 모형이 보정된 RUSLE2 모형보다 더 높은 효율을 보여주었다. 또한, 강우 패턴은 두 모형의 산정 결과에 유효한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이렇게 최근 다양한 연구들에서 USLE 기법이 토양 유실 및 침식 위험도 평가 등에 활용되고 있으며, 매개변수 간소화 및 고해상도 입력자료 구축 등 모형의 활용성 개선에 많은 연구가 진행되고 있다.

최근 토양 유실 평가 모의를 위해 전 세계적으로 다양한 모형들이 개발되고 적용되어 오고 있다. Magesh and Chandrasekar (2016)는 잠재적인 토양 침식 및 유사량 판정을 위해 GIS 기반의 자동화된 RUSLE-SY 모형을 개발하였다. 입력 자료로는 지형자료, 대상지역 경계, 토지이용도, 토양도, 연간 강우자료, 위성 영상 이미지로부터의 NIR과 Red bands가 있다. 위 연구에서는 인도의 Tamiraparani 유역에서 발생한 토양의 면상 및 세류 침식 <Fig. 2-1>에 대해서 RUSLE-SY 모형을 활용하여 그 침식 분포와 유사량을 모의하였다. 연구 결과 토양 침식 및 유사량 모의에 있어 해당 유역의 기후학적 다양성 및 지형의 전반적인 패턴을 잘 반영하는 것으로 나타났다.



<Fig. 2-1> Tamiraparani 유역에서 발생한 면상 및 세류 침식에 대한 현장 사진 (Magesh and Chandrasekar, 2016)

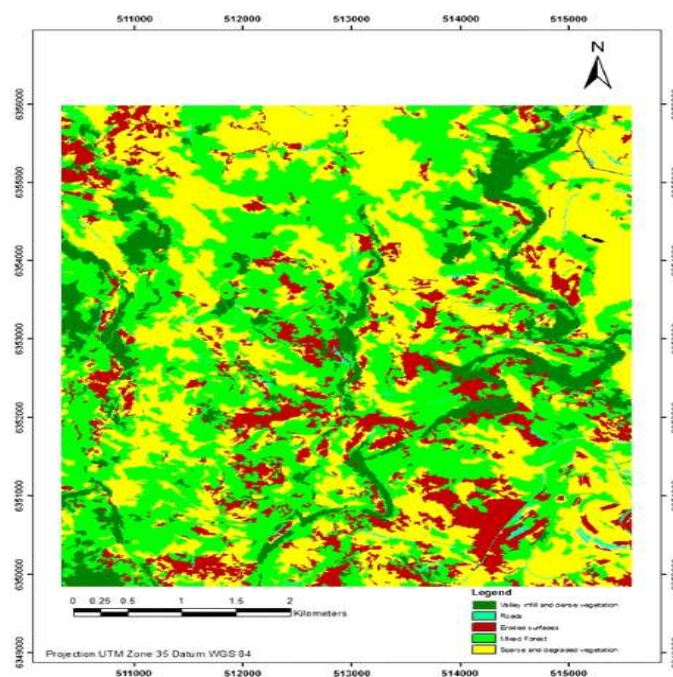
Bieger 등(2015)은 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 모형을 활용하여 중국 Xiangxi 유역을 대상으로 Hydrologic response unit(HRU)의 공간적인 단위에서 지표 유출 및 유사량 모의를 평가하였다. 연구 결과 유역 내 최적관리 기법의 정확한 평가에 있어 소유역 단위에서의 모의결과와 비교하였을 때 HRU 단위에서의 모의 결과가 보다 적절한 것으로 분석되었다. 뿐만 아니라, HRU 단위의 모의는 유역 내 발생하는 지표 유출 및 유사량의 공간적인 변동성의 평가가 가능하다는 것을 보여주었다.

William and Bahram (2015)은 도시 개발 시 공사 현장에서 발생할 수 있는 토양 침식 및 유사량에 대한 연구를 수행하였다. 위 연구에서는 공사 현장을 대상으로 침식 및 유사량 평가를 위해 다중 선형 회귀식 (Multiple linear regression, MLR)과 Artificial Neural Networks (ANN)를 이용하여 새로운 모형을 개발하였다. 위 모형은 공사 현장에서 침식과 유사량 조절을 위한 진단 및 설계 도구로서 활용될 수 있으며, 공사 단계에서 급격한 토지이용 상태의

변화를 고려하면서 다이나믹한 예상 시나리오 분석에 활용될 수 있다.

Lieskovsky and Kenderessy (2012)는 토양 유실 발생이 심각한 여러 경작지 중 하나인 Vineyard를 대상으로 토양 유실에 대한 다양한 최적관리 기법의 영향을 평가하였다. 토양의 침식과 퇴적은 수준측량 방법으로 산정되었으며 이를 바탕으로 WATEM/SEDEM 분포형 토양 침식 모형을 보정하였다. 모형 적용 결과 토양 침식에 대해서는 잘 모의가 되었으나, 토양 퇴적 모의에서는 부정확한 결과를 보였다. 또한 여러 최적관리 기법 중 식생 피복에 대해서 상당히 낮은 토양 유실이 발생하는 것으로 분석되었다.

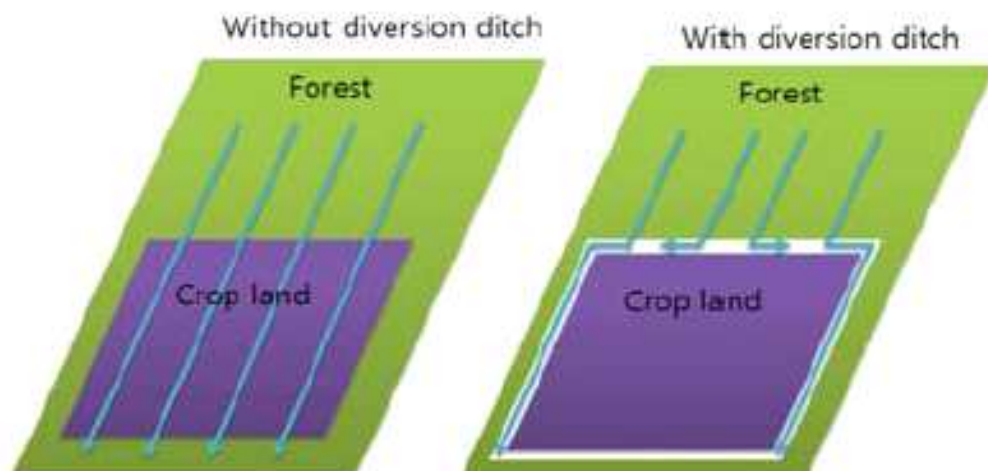
Mhangara 등(2012)은 Keiskamma 유역을 대상으로 GIS 기반의 Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC) 모형을 이용하여 토양 침식 위험성 분석을 위해 토양 유실의 공간적인 패턴을 분석하였다. SATEEC 모형은 Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) 기법을 기반으로 유역 내 토양 유실 및 유수량 그리고 공간적으로 분포된 유사 전달률을 산정한다. 연구 결과 SATEEC 모형으로 Keiskamma 유역 내 토양 유실 분포를 잘 예측할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 위 연구에서는 인공위성 영상 자료를 활용하여 객체 지향성 분류 기법을 통해 결리 침식에 대한 공간적인 분석을 수행하였다. 따라서 GIS 기반의 토양 유실 모의 모형 (SATEEC) 모형과 영상자료의 객체 지향성 분류 기법을 통해 토양 유실량 산정 및 토양 침식 패턴의 공간적인 분석이 가능함을 보여주었다.



〈Fig. 2-2〉 객체 지향성 분류 기법을 이용한 토양 침식 및 퇴적에 대한 공간적인 분포 (Mhangara 등, 2012)

최근 국내에서도 토양 유실 평가 관련 다양한 연구가 수행되고 있다. 최철현 등 (2013)은 잠재적인 토양 유실량과 침식 위험도 분석을 위해 RUSLE 기법을 활용하였으며, 경주국립공원 전체 지구를 대상으로 재해방지 계획 설립과 토양 생태계의 지속적인 보전을 위한 기초 자료 구축의 목적으로 연구를 수행하였다. 위 연구에서는 경주국립공원의 지형적 특성을 분석하고 토지피복 및 지형에 따른 토양 침식량을 산정하였다. 이를 통해 토양 침식 취약지에 대한 재해방지 및 수생태계의 건강성 확보를 위한 방안을 제시하고 있다.

전지홍 등 (2014)은 임하호 유역을 대상으로 SATEEC 모형을 활용하여 토양 유실 발생 경사지 밭에서의 우회수로 설치에 따른 저감 효과를 분석하였다. 우회수로 설치 모의를 위해 해당 경사지 밭의 DEM을 분류하여 상류지역의 흐름누적면적을 제거한 후 RUSLE 기법의 인자 중 LS 인자를 새롭게 산정하였다(Fig. 2-3). 이렇게 산정된 LS 인자를 RUSLE 기반의 SATEEC 모형에 적용하여 경사지 밭에서의 우회수로 설치에 따른 토양 유실 저감 효과를 보여주었다.



〈Fig. 2-3〉 우회수로 설치에 따른 경사지 밭에서의 토양 유실 저감 효과 모의 (전지홍 등, 2014)

이기하 등(2015)은 토양침식 모형의 매개변수 산정 시 그 불확실성을 개선하기 위해 자료 동기화 기법 중 파티클 필터 기법을 활용한 매개변수 추정 연구를 수행하였다. 이를 통해 토양 침식 모형의 다양한 매개변수를 추정하였으며, 각 매개변수에 대한 불확실성 및 시변성을 갖는 매개변수에 대한 특성을 고려하였다.

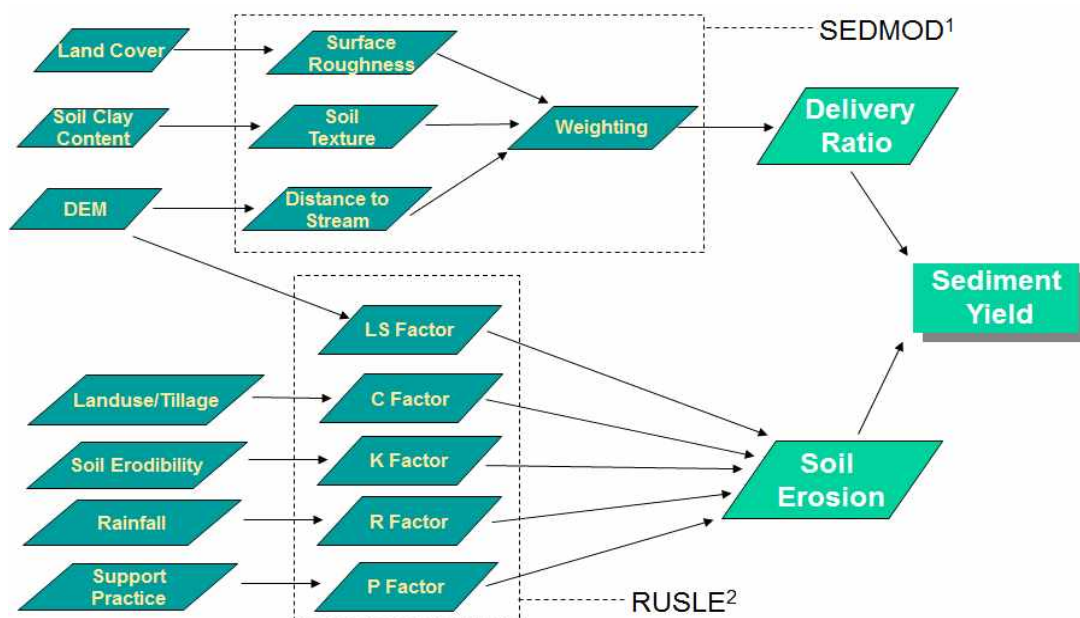
신승숙 등(2013)은 대규모 산지유역에서의 토양침식 모의를 위해 SEMMA 모형을 개선하고 국립방재연구소에서 운영하는 시험유역에 적용하였다. 위 연구에서는 NDVI 기반의 식생 피복지수를 고려하기 위해 기존 모형을 개선한 SEMMA-Ic 모형을 개발하였다. 모형 적용 결

과 상관계수 및 모의효율계수는 감소하였으나 매개변수들의 유의성 검토에서는 양호한 것으로 나타났으며 실측 토사유출량과 유사한 경향을 보여주었다.

김지혜 등(2016)은 범용토양유실공식을 이용하여 다수의 필지에 대한 토양유실량을 산정할 수 있는 Microsoft Excel 기반의 개발하여, 사용자가 수집된 자료(토양부호, 토지이용 등)를 필지별로 입력을 하면 각 필지에서 발생하는 연평균 토양유실량을 연산할 수 있도록 하였다. 또한 계산된 연평균 토양유실량에 의한 토양침식등급(미소침식: 1-50ton/ha/yr; 중간침식: 51-100ton/ha/yr; 고도침식: 101-200ton/ha/yr; 극고도침식: 200ton/ha/yr)(Gupa, 2001)을 정의할 수 있도록 하였다.

① High Impact Targeting (HIT)

HIT은 웹기반의 모형으로 미시간 주립 대학교에서 개정범용토양유실공식(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)과 Sediment Delivery Model(SEDMOD; Fraser, 1999)를 기반으로 하여<Fig. 2-4>, 그레이트 레이크 (Great Lakes) 유역에 대한 연간 토양유실량과 부유사 부하량 산정을 위해 개발되었다. 이 모형은 토양유실 산정에 필요한 모든 자료를 웹상에서 제공하며 이를 이용하여 결과를 도출할 수 있도록 하고 있는데, 공간적으로 분포된 토양유실의 정도를 표시할 뿐만 아니라 유역 전체에서 발생된 토양유실량을 수치적으로 표시할 수 있다. 초기에는 토양유실량 산정의 주된 목적이었으나, 최근에는 최적관리기법에 의한 토양유실저감량을 함께 고려할 수 있도록 개선되었다.



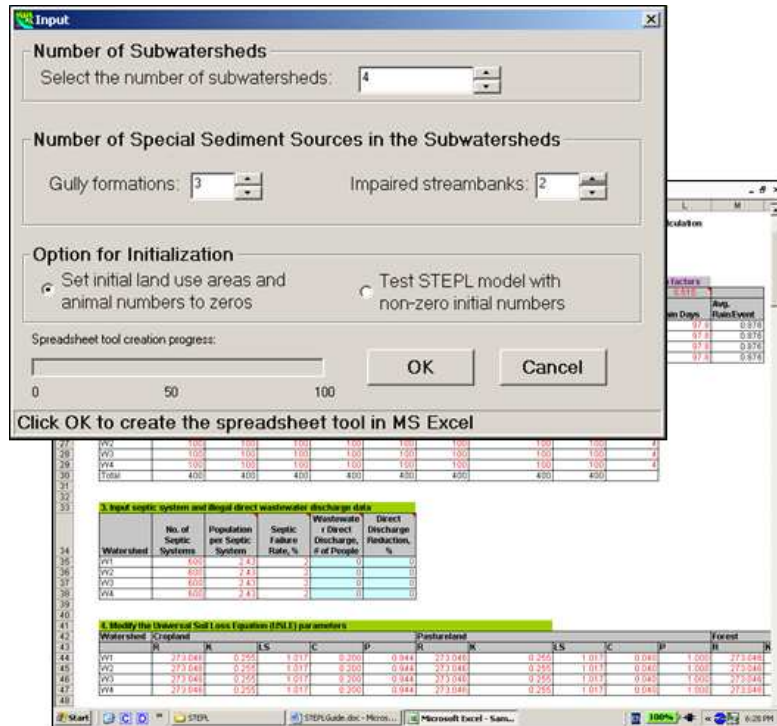
<Fig. 2-4> High Impact Targeting (<http://www.iwr.msu.edu/hit2/about.htm>)

② Spreadsheet Tool for Estimating Pollutant Load (STEPL)

STEPL 모형(Tetra tech, 2011)은 미국 환경보전국(U. S. Environmental Protection Agency, USEPA)에서 오염총량제(Total Maximum Daily Load, TMDL) 계획 수립을 위해 제공하고 있는 모형이다. 이 모형은 Microsoft사의 Excel 소프트웨어를 기반으로 하기 때문에 사용자에게 모형 사용에 대한 전문지식을 필요로 하지 않는다<Fig. 2-5>. STEPL 모형은 연평균 직접 유출량과 함께, 연평균 유수량, 질소, 인, 생화학적 산소 요구량(BOD)에 대한 모의가 가능할 뿐만 아니라, 오염원 저감을 위한 약 50개의 최적관리기법(Best Management Practices) 및 저영향개발(Low Impact Development)에 대한 반영이 가능하다.

STEPL 모형은 토지이용과 수문학적 토양 분류(Hydrologic Soil Group, HSG)에 의해서 Curve Number(CN)를 산정한 후, 모형에 구축된 미국 내 주 및 카운티에 대한 강우 자료를 사용하여 연평균 직접유출량을 산정한다. 그리고 오염부하량에 대해서는 두 가지 부분으로 구성되는데, 첫 번째는 범용토양유실공식에 의한 연평균 유수량과 유수에 의해 하천으로 유입되는 질소 및 인의 부하량이며, 두 번째는 연평균 직접유출량과 오염원의 단위 농도에 의한 연평균 오염부하량이다. 이 두 부분에 의해서 계산된 연평균 오염부하량을 합쳐 대상 유역 혹은 구역에서의 최종적인 연평균 오염부하량으로 산정한다.

최적관리기법 및 저영향개발에 대해서 산림, 농경지, 도시, 축사에 대해서 총 50여개의 기법이 적용가능하며, 각 기법들은 유수량, 질소, 인, 생화학적 산소요구량에 대한 저감 효율(%)을 가지고 있다. 이 저감 효율에 의해 대상 유역 혹은 구역에서의 오염부하량 저감량을 산정을 하며, 이는 오염총량제에 대한 계획 수립의 기초자료로 활용이 가능하다.



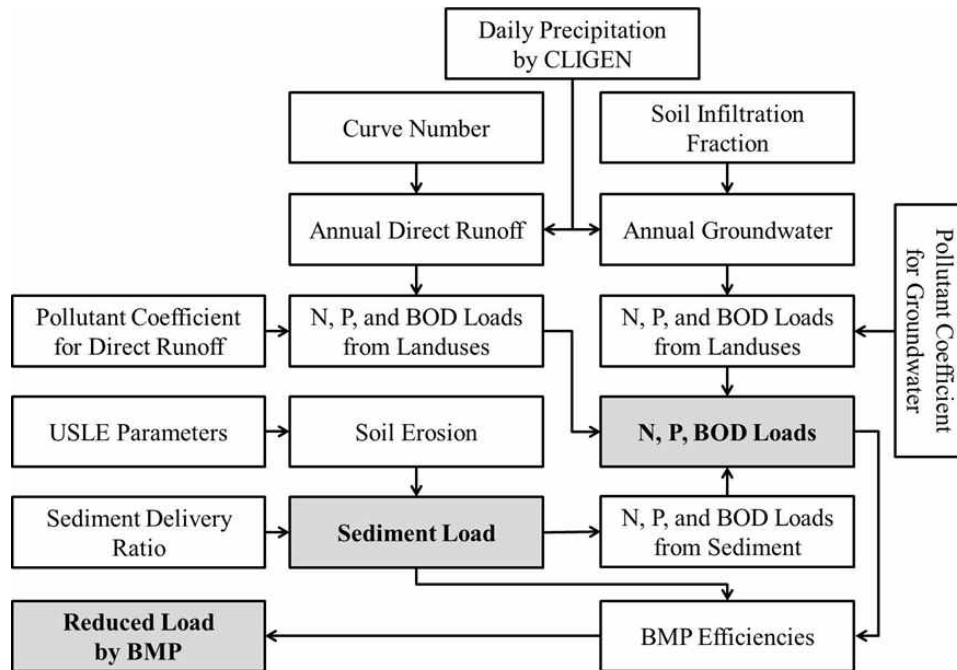
〈Fig. 2-5〉 STEPL 모형의 인터페이스

③ Web-based Spreadsheet Tool for Estimating Pollutant Load (STEPL WEB)

STEPL 모형은 연평균 오염부하량을 산정하기 위해서 연평균 직접유출량을 산정하는데, 연단위 강우사상에 대한 평균 유출량을 산정한다. 이 경우 일단위 강우자료와 CN을 이용하여 산정하였을 경우에 비해 적지 않은 차이를 발생할 수 있기 때문에, 이에 보완하여 웹 기반의 모형인 Web-based STEPL(STEPL WEB; Park and Engel, 2014)가 개발되었다. STEPL WEB은 미국내 주요 지점에 대해서 일단위 강우자료를 CLIGEN(Nicks and Lane, 1989)을 이용하도록 하였으며, 일 별 직접유출량을 산정한 뒤, 연간 직접유출량을 산정하여 STEPL 모형에서 가능한 오염부하량을 산정한다(Fig. 2-6).

STEPL WEB은 실측치와 비교하여 모형의 매개변수를 보정할 수 있는 두 개의 모듈을 제공하는데, 첫 번째 모듈은 유전자 알고리즘을 이용하며, 두 번째 모듈은 이분법을 이용한다. 유전자 알고리즘은 자연의 진화과정에 근거한 최적화기법으로, 다양한 문제를 해결하기 위해서 여러 분야에서 사용이 되고 있다. 이분법은 최적의 값이 존재하는 것으로 추정되는 폐구간을 선택하면서 이 폐구간은 임계값까지 좁혀가면서 찾아가는 방법으로 주어진 문제의 독립변수와 종속변수가 연속함수이면서 선형함수 혹은 지수함수의 관계를 가질 때 적용이 가능한 방법이다. 이 모형은 CN, 토양침투비, 오염원의 농도값, 유달률 조정계수를 사용자에게 의해서 두 가지 모듈 중 하나에 의해 조정한다. 또한, 오염원저감을 위한 최적관리기법이나

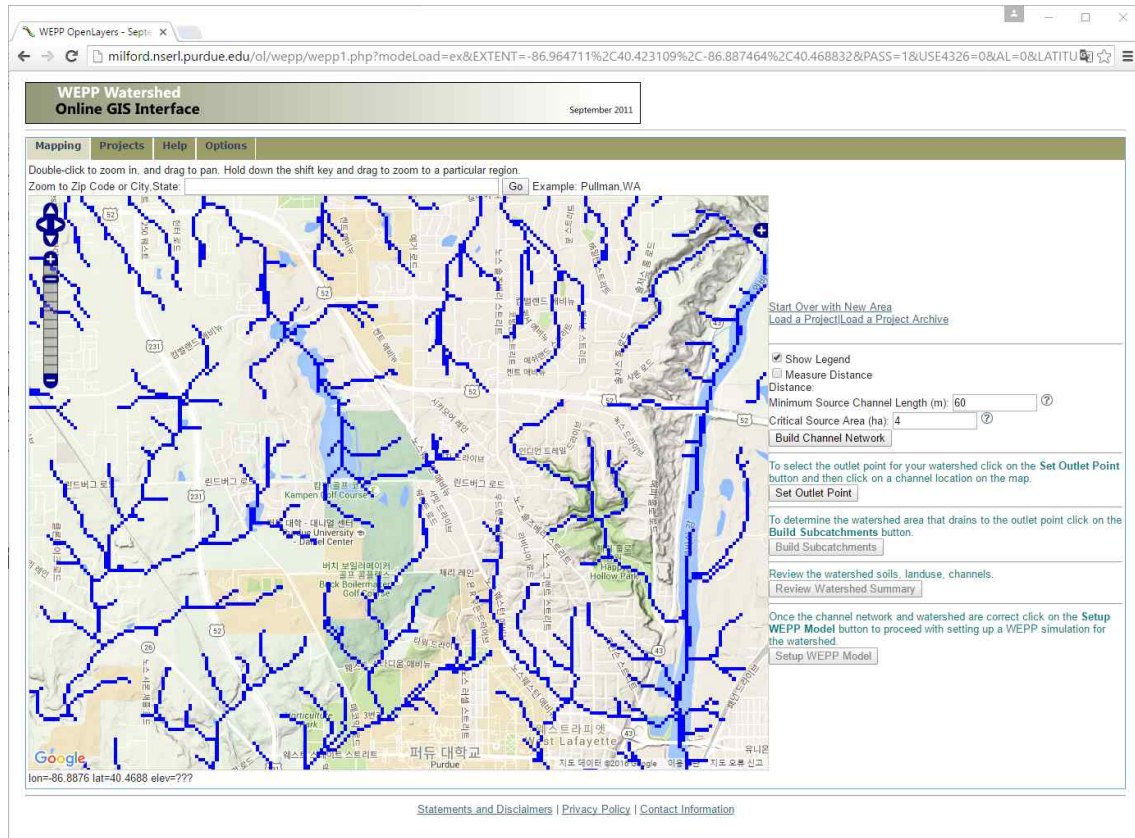
저영향개발에 대한 설치비용 및 유지비용을 고려하여 필요한 저감량을 만족시키기 위해서 최적의 기법 선정과 기법의 규모 결정에 도움을 주는 모듈을 제공하고 있다.



<Fig. 2-6> STEPL WEB 의 유사량 산정 및 최적관리기법에 의한 유사량 저감 산정 과정 (Park and Engel, 2014)

④ WEPP Watershed Online GIS 2011

Water Erosion Prediction Project(WEPP; Flanagan and Livingston, 1995)는 범용토양유실공식을 기반으로 하고 있으나, 분단위 강우자료나 단일 강우사상에 대한 유출 및 토양유실량 모의가 가능한 모형이다. 초기에는 텍스트 형식의 파일을 입력자료로 하여 텍스트 형식의 결과를 출력하는 포트란 기반의 모형이었으나, C++ 언어에 의한 모형으로 개선된 후, GIS 기반의 모형인 GeoWEPP(Renschler, 2002)가 개발되었다. 그리고 웹 기반의 WEPP 모형인 WEPP Watershed Online GIS 2011 (Frankenberger et al., 2011; <http://milford.nserl.purdue.edu/wepp/>)이 개발되어 현재 2013 버전까지 업데이트 되어왔다 <Fig. 2-7>. WEPP Watershed Online GIS 2013은 기존 여러 WEPP과 마찬가지로 기상, 강설 및 용설, 관개, 수문, 토양수분 및 증발산량을 연산하기 위한 모듈 등을 포함하고 있으며, 웹 기반으로 구동되기 위하여 PHP와 HTML로 인터페이스를 구축하였으며, 이와 함께 OpenLayers를 통해 웹기반의 지도를 제공하고 있다. 특히, 기상자료는 CLIGEN 모형에 의해서, 토지이용도는 NLCD 2001, 토양도는 SSURGO에 의해서 사용자가 바로 사용할 수 있도록 입력자료를 제공하고 있다.



<Fig. 2-7> WEPP Watershed Online GIS 2011의 인터페이스

나. 범용토양유실공식 인자의 산정

(1) 강우침식능인자(R)의 산정

(가) 강우침식능인자 산정방법

USLE의 인자 중 강우 침식 능력을 의미하는 강우침식능 인자(Rainfall Erosivity Factor)는 단순 강우량을 이용하는 것이 아닌 강우가 지표에 낙하될 때 발생하는 운동 에너지로 환산하여 산정하게 된다. 운동에너지 산정에 관해 Wischmeier and Smith(1978)은 강우사상에 대한 강우인자 산정 방법을 다음과 같이 제시하였다.

우선 강우사상 구분은 강우 간격 6시간 이내일 경우 1회의 강우사상으로 정의하며, 표토 침식이 발생하는 한계 강우량은 강우사상 12.7mm 이상이다. 그러나 한계 강우량 12.7mm 이하일 지라도 15분 이내 강우량이 6.25mm 이상인 경우에는 한계강우량과 상관없이 표토침식이 발생하는 강우사상으로 정의한다. 이렇게 정의된 강우사상에 대한 강우침식능인자 값은 다음과 같은 <식 13 ~ 16>에 의해 계산된다.

$$\langle \text{식-13} \rangle \quad IF \quad I \leq 76mm/hr \rightarrow e = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I$$

$$\langle \text{식-14} \rangle \quad IF \quad I > 76mm/hr \rightarrow e = 0.283$$

$$\langle \text{식-15} \rangle \quad E = \sum (e \cdot P)$$

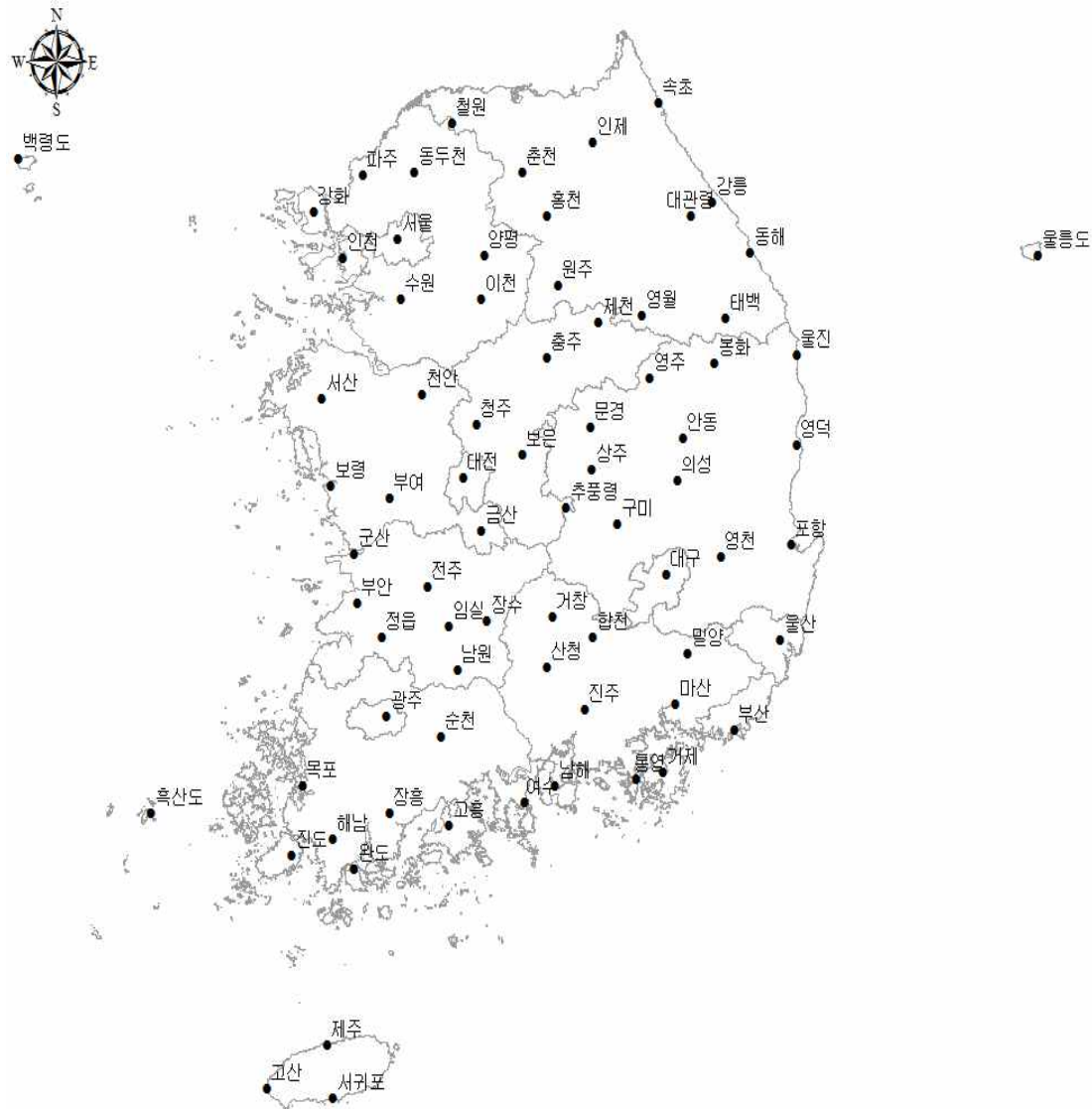
$$\langle \text{식-16} \rangle \quad R = E \cdot I_{30\max}$$

여기서, I 는 강우강도(mm/hr), e 는 강우사상의 시간단위별 운동에너지(Kinetic energy, MJ/ha · mm), P 는 강우사상의 시간단위별 강우량(mm), E 는 강우사상별 운동에너지(MJ/ha), $I_{30\max}$ 는 지속시간 30분 최대강우강도(mm/hr) 그리고 R 은 강우침식능인자(MJ · mm/ha · hr)이다.

이렇게 산정된 강우사상별 강우침식능인자 값을 연도별로 합한 후 이를 연도에 대해 평균해서 강우침식능인자(MJ · mm/ha · yr · hr)를 산정하게 된다.

최근 국내에서 강우자료를 활용한 강우침식능인자 값 산정 연구에서는 60분단위 강우자료를 이용하여 전국 60개 지점을 대상으로 강우침식능인자를 재 산정하였다(박찬원 등 2011). 하지만 박찬원 등(2011)의 연구에서는 60분 단위 강우자료를 이용하였기 때문에 정확한 30분 최대 강우강도 산정과 15분 이내 강우량 6.25mm 이상의 강우사상에 대한 강우 운동에너지 값을 고려하지 못한 한계점이 있다.

이에 본 연구에서는 전국 지상 관측소에서 1997년부터 1분 단위로 측정하고 강수 자료를 기상청으로부터 제공받아 10분 단위 강수자료로 변환한 후 강우침식능인자를 산정하였다. 2014년 기준 전국 80개 지점에서 지상관측소가 운영되고 있지만 최근에 신설된 관측소는 강우인자를 산정하기에 충분한 자료가 확보되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 최소 10년 이상 운영되고 있는 75개 기상청 관측소 지점(Fig. 2-8)의 지상관측소 강수자료를 활용하였다. 또한, 강우침식능인자를 회귀식과 월별 강우량을 이용하여 산정할 수 있는 방법을 제시하고 있기 때문에 임의의 기간에 대한 강우침식능인자 산정이 가능하다.



<Fig. 2-8> 강우침식능인자 산정 지점

(나) 강우침식능인자 산정 결과

총 76개 지점에 대한 강우침식능인자 산정 결과는 <Table 2-4>와 같으며 전국 평균 강우 침식능인자 값은 $6,250 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{yr} \cdot \text{hr}$ 로 나타났다. 이는 환경부 “표토의 침식 현황 조사에 관한 고시”의 “표토의 침식량 산정 방법”에 고시된 전국 평균 강우침식능인자 값 $4,457 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{yr} \cdot \text{hr}$ 에 비해 1.4배 높아진 결과이다. 이는 최근 기후변화에 따른 극한 사상 발생 빈도 및 강우강도 증가에 따른 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 산정된 강우침식능인자 값은 $2,942 \sim 11,328 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{yr} \cdot \text{hr}$ 이며, 최소값은 백령도, 최대값은 거제 지점으로 나타났다. “표토의 침식 현황조사에 관한 고시”의 “표토의 침식량 산정 방법”에 고시된 동일 지점을 대상으로 강우침식능인자 비교 결과 수도권과 남해안 지역의 강우침식능인자 변동 폭이 큰 것으로 나타났다. 특히 제주도 및 도서지역을 제외한 내륙지

방에서 거제와 순천 지점의 강우침식능인자 값은 고시되어 있는 강우침식능인자에 대해 최대 4,000 MJ · mm/ha · yr · hr 이상 차이가 나는 것으로 나타났으며, 각각 185%, 160% 증가하였다.

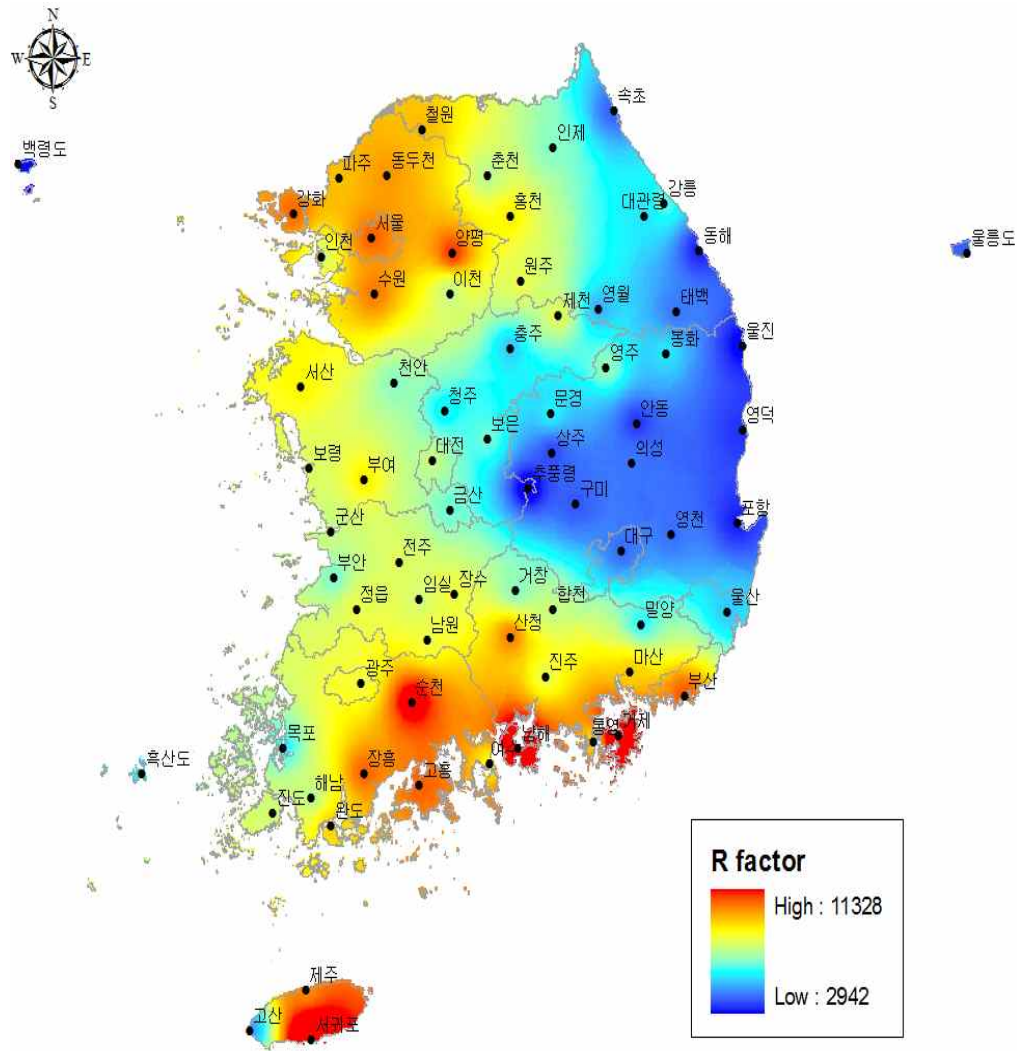
〈Table 2-4〉 전국 강우침식능인자 산정 결과

지점번호	지점이름	시작년도	종료년도	자료기간	신규 강우인자	기존 강우인자	차이
90	속초	2000	2015	16	4,086	3,784	302
95	철원	1999	2015	17	7,608	4,440	3,168
98	동두천	1999	2015	17	7,905	4,976	2,929
99	파주	2001	2015	15	7,576	5,301	2,275
100	대관령	2001	2015	15	5,043	-	-
101	춘천	1999	2015	17	6,144	4,242	1,902
102	백령도	2000	2015	16	2,942	-	-
105	강릉	1999	2015	17	5,495	4,111	1,384
106	동해	1997	2015	19	3,553	3,975	-422
108	서울	1999	2015	17	8,348	5,152	3,196
112	인천	1999	2015	17	6,381	5,557	824
114	원주	2000	2015	16	6,678	4,429	2,249
115	울릉도	1999	2015	17	4,078	-	-
119	수원	1999	2015	17	8,147	4,913	3,234
121	영월	1999	2015	17	4,669	4,032	637
127	충주	2001	2015	15	4,834	4,091	743
129	서산	1999	2015	17	7,064	4,982	2,082
130	울진	1999	2015	17	3,377	3,027	350
131	청주	1997	2015	19	5,137	4,389	748
133	대전	1999	2015	17	6,271	4,509	1,762
135	추풍령	1997	2015	19	3,108	-	-
136	안동	1999	2015	17	3,746	3,054	692

지점번호	지점이름	시작년도	종료년도	자료기간	신규 강우인자	기존 강우인자	차이
137	상주	2001	2015	15	3,888	3,186	702
138	포항	1999	2015	17	3,556	2,778	778
140	군산	1999	2015	17	6,242	4,190	2,052
143	대구	1999	2015	17	4,178	3,062	1,116
146	전주	1999	2015	17	6,544	4,259	2,285
152	울산	1999	2015	17	4,844	4,276	568
155	마산	2000	2015	16	7,474	5,417	2,057
156	광주	1999	2015	17	6,757	4,615	2,142
159	부산	1999	2015	17	8,383	5,496	2,887
162	통영	1999	2015	17	7,273	5,527	1,746
165	목포	1999	2015	17	5,247	3,557	1,690
168	여수	1999	2015	17	6,970	5,799	1,171
169	흑산도	2000	2015	16	5,128	-	-
170	완도	2000	2015	16	7,464	5,281	2,183
175	진도	2002	2015	14	6,363	4,674	1,689
184	제주	1999	2015	17	8,034	4,348	3,686
185	고산	2000	2015	16	4,570	-	-
189	서귀포	1999	2015	17	10,766	6,035	4,731
192	진주	1997	2015	19	6,701	5,238	1,463
201	강화	1997	2015	19	8,274	-	-
202	양평	1997	2015	19	8,651	4,956	3,695
203	이천	1997	2015	19	6,196	4,762	1,434
211	인제	1997	2015	19	5,726	3,367	2,359
212	홍천	1997	2015	19	7,177	4,323	2,854
216	태백	1997	2015	19	4,229	3,662	567
221	제천	1997	2015	19	6,621	4,128	2,493
226	보은	1997	2015	19	5,595	3,875	1,720

지점번호	지점이름	시작년도	종료년도	자료기간	신규 강우인자	기존 강우인자	차이
232	천안	1997	2015	19	5,757	4,646	1,111
235	보령	1997	2015	19	6,494	5,230	1,264
236	부여	1997	2015	19	7,190	5,104	2,086
238	금산	1997	2015	19	5,586	3,934	1,652
243	부안	1997	2015	19	5,658	4,111	1,547
244	임실	1997	2015	19	6,352	3,861	2,491
245	정읍	1997	2015	19	6,685	4,245	2,440
247	남원	1997	2015	19	6,718	4,279	2,439
248	장수	1997	2015	19	6,769	4,045	2,724
256	순천	1997	2012	16	9,420	5,067	4,353
260	장흥	1997	2015	19	8,316	5,691	2,625
261	해남	1997	2015	19	6,158	4,785	1,373
262	고흥	1997	2015	19	8,339	6,076	2,263
271	봉화	1997	2015	19	5,065	3,431	1,634
272	영주	1997	2015	19	5,870	3,752	2,118
273	문경	1997	2015	19	5,136	3,278	1,858
277	영덕	1997	2015	19	3,704	2,668	1,036
278	의성	1997	2015	19	4,255	2,814	1,441
279	구미	1997	2015	19	4,000	2,728	1,272
281	영천	1997	2015	19	4,187	2,723	1,464
284	거창	1997	2015	19	5,755	3,807	1,948
285	합천	1997	2015	19	6,239	4,145	2,094
288	밀양	1997	2015	19	5,282	3,843	1,439
289	산청	1997	2015	19	8,097	5,106	2,991
294	거제	1997	2015	19	11,328	7,076	4,252
295	남해	1997	2015	19	10,799	-	-

이렇게 산정된 지점별 강우침식능인자 값을 <Fig. 2-9>와 같이 공간보간법을 이용하여 전국단위 강우침식능인자 격자형 그리드 DB를 구축하였다. 본 연구에서는 “표토의 침식량 산정 방법”에 고시된 방법과 동일한 Inverse Distance Weighted(IDW) 방법을 이용하여 공간 보간을 하였다.



<Fig. 2-9> 전국 강우침식능인자 재산정 결과

본 연구를 통해 산정된 강우침식능인자는 기존 고시에 비해 강원도 131%, 경기도 142%, 경상남도 153%, 경상북도 140%, 전라남도 138%, 전라북도 155%, 충청남도 134%, 충청북도 134%, 포항광역시 128%, 광주광역시 146%, 대구광역시 136%, 대전광역시 139%, 부산광역시 153%, 서울특별시 162%, 울산광역시 113%, 인천광역시 115%, 제주특별자치도 150% 증가하는 것으로 나타나 서울특별시가 강우침식능인자의 증가 폭이 가장 컸으며, 울산광역시와 인천광역시가 강우침식능인자의 변동 폭이 가장 적은 것으로 나타났다.

(다) 월 강우침식능인자 산정을 위한 회귀식 개발

우리나라는 월별/계절별 강우 특성이 뚜렷하며 특히 몬순기후대에 위치하여 토양유실 산정의 다른 인자에 비해 강우인자는 중요한 기후인자로서 값의 변동성이 다른 인자에 비해 비교적 크다. 특히 최근 기후변화로 인하여 강우특성의 변동성이 더욱 커질 것으로 판단되며, 이에 따라 강우인자 변동성 또한 커질 것이다. 또한 박재현 등(2014)은 우리나라 강우특성은 7~8월에 강우가 집중되고, 지역마다 강우 특성도 다르게 나타나므로 각 지역별 강우특성을 고려할 필요가 있다고 하였다.

정필균 등(1983)은 각 지역별로 8~21년 정도의 강우자료를 바탕으로 월 단위로 표토침식량을 산정할 수 있는 월 강우인자 산정 방법을 개발하였다. 그러나 월 단위 강우인자 산정 방법은 수원지점에서 유도된 회귀식을 적용한 것이기 때문에 타지역에 적용하기에 한계점이 있다.

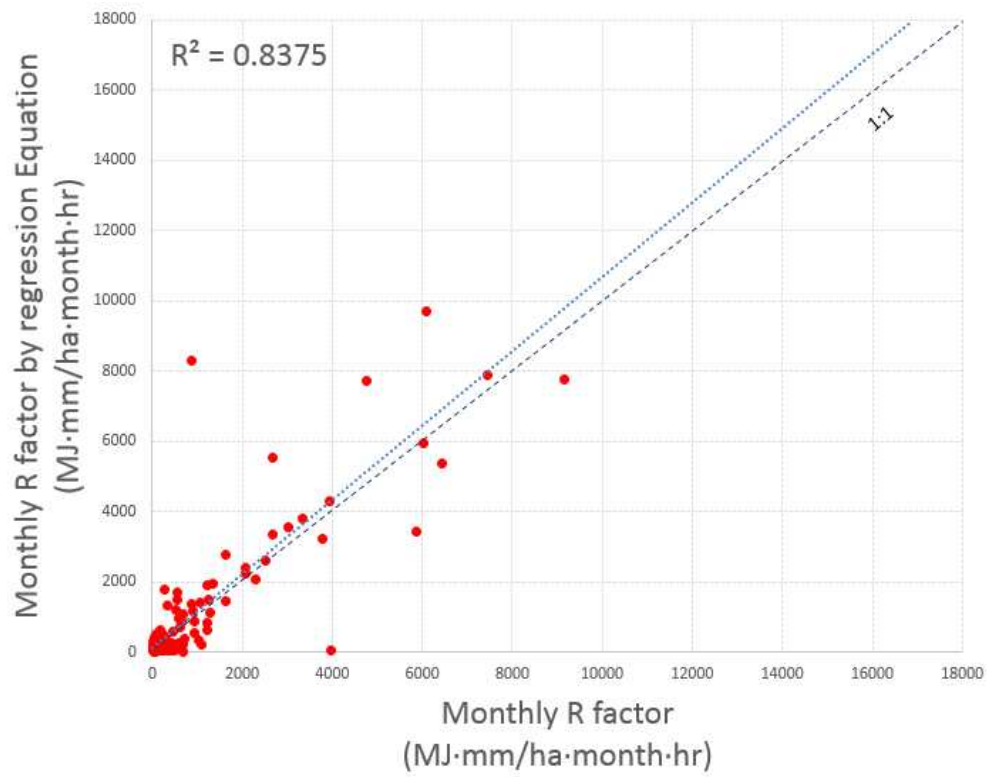
$$\langle \text{식-17} \rangle R = 0.0378 \cdot X^{1.4190}$$

여기서 X는 월강수량(mm)이며 R은 월 강우침식능인자이다.

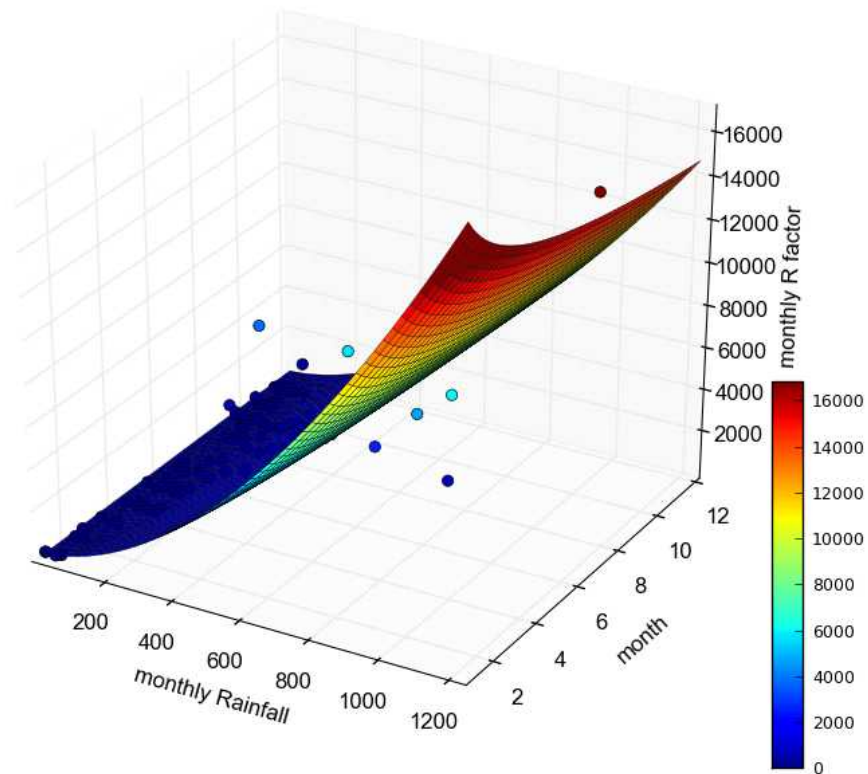
이에 본 연구에서는 지역별 월 강수량을 이용한 월 강우침식능인자를 산정할 수 있도록 회귀식을 개발하였다. 회귀식은 최적의 회귀식을 도출할 수 있는 CurveExpert Professional(v.2.2.0)을 활용하였다. CurveExpert는 상용소프트웨어로서 기본적으로 60개 이상의 회귀모델을 제공하고 있으며, curve fitting 결과와 데이터 분석을 동시에 제공해주는 cross-platform 프로그램으로 다양한 선형 회귀모델과 비선형 회귀모델을 제공해준다. 본 연구에서는 월별 강우침식인자 값과 월을 매개변수로 입력하여 최적의 회귀식을 선정하였다.

(라) 월 강우침식능인자 산정을 위한 회귀식 개발 결과

총 76개 지점에 대해 회귀 분석 결과 상관계수 R^2 는 0.2에서 0.92로 나타났으며, 상관계수가 높은 10개 지점에 대한 2000년도부터 2014년도까지의 상관성 분석 결과 및 CurveExpert에서 제공한 3차원 그래프는 다음과 같다.

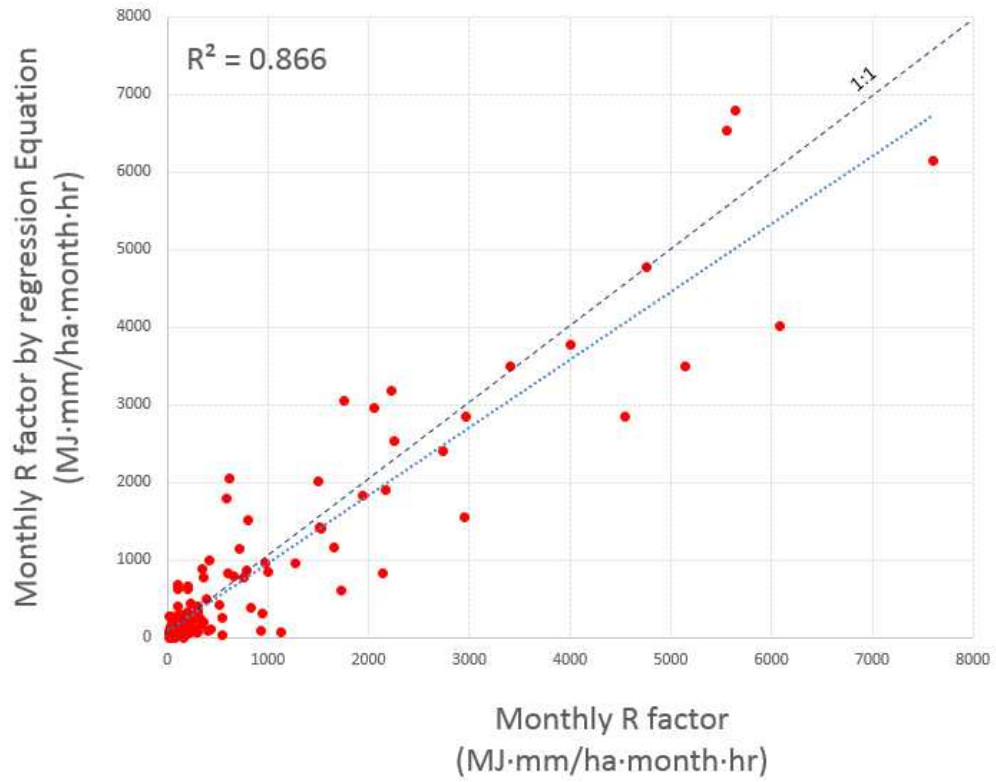


(a) 1:1 상관성 그래프

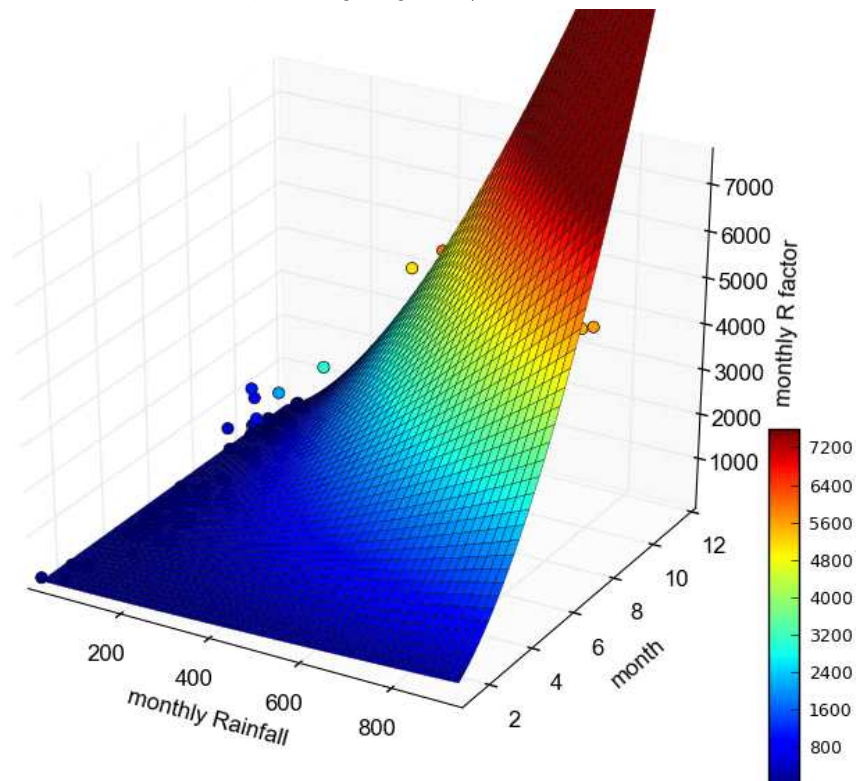


(b) 3차원 그래프

<Fig. 2-10> 동두천 회귀식 분석 결과

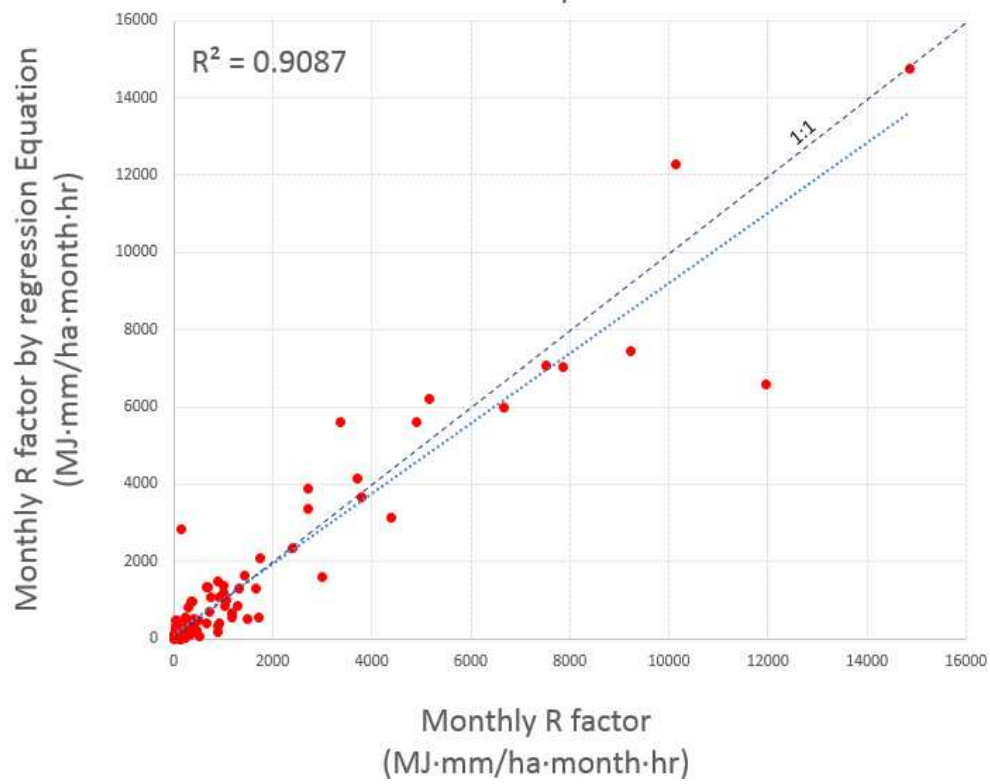


(a) 1:1 상관성 그래프

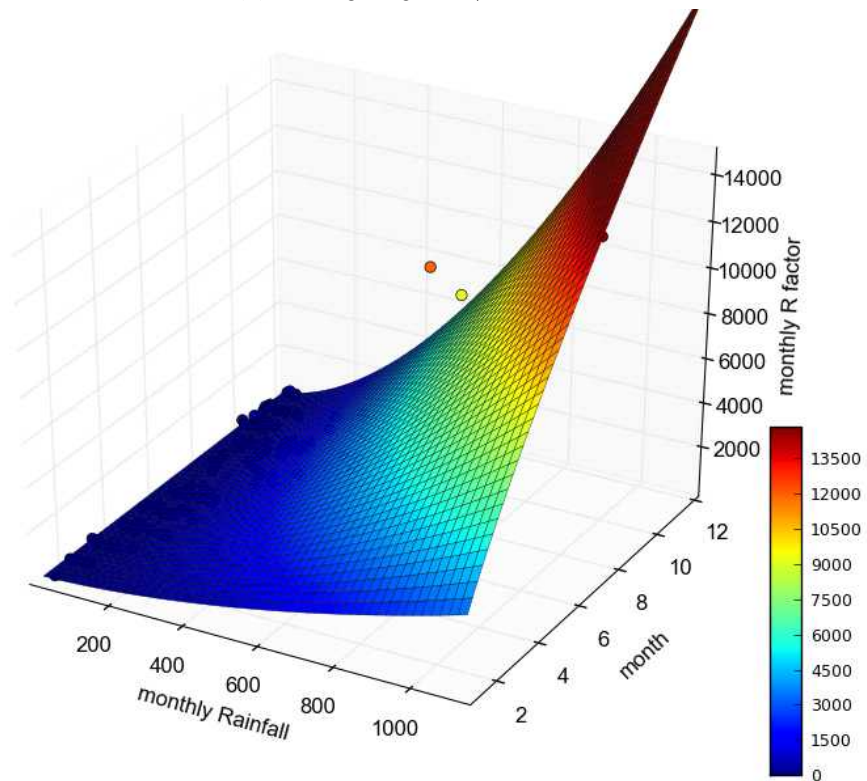


(b) 3차원 그래프

<Fig. 2-11> 춘천 회귀식 분석 결과

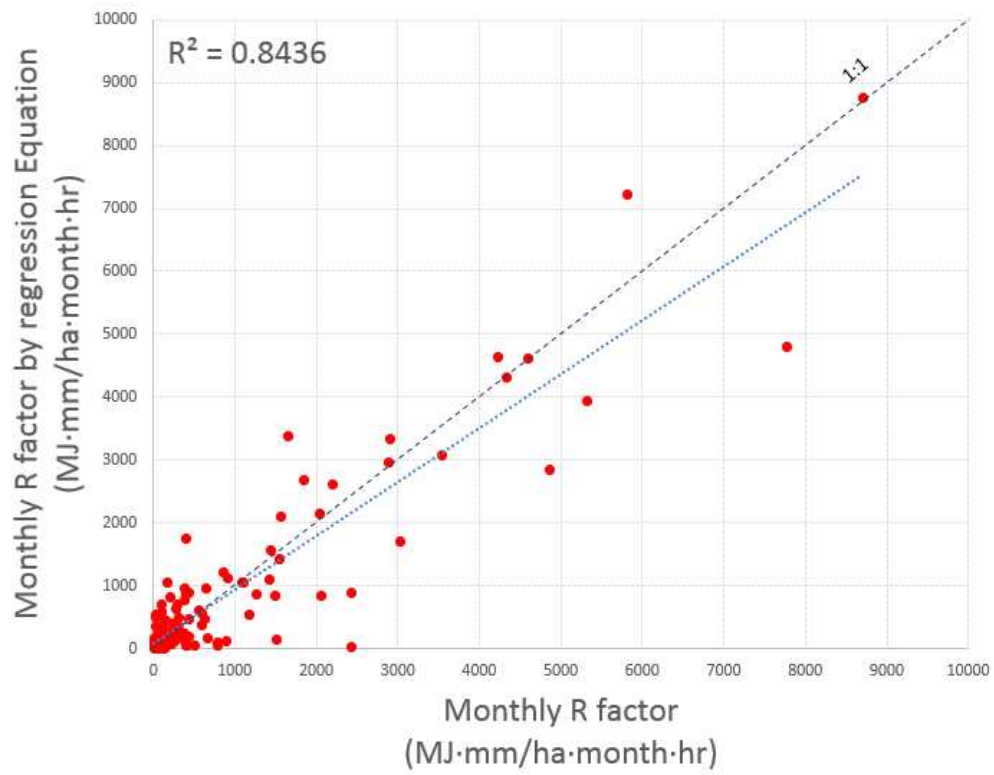


(a) 1:1 상관성 그래프

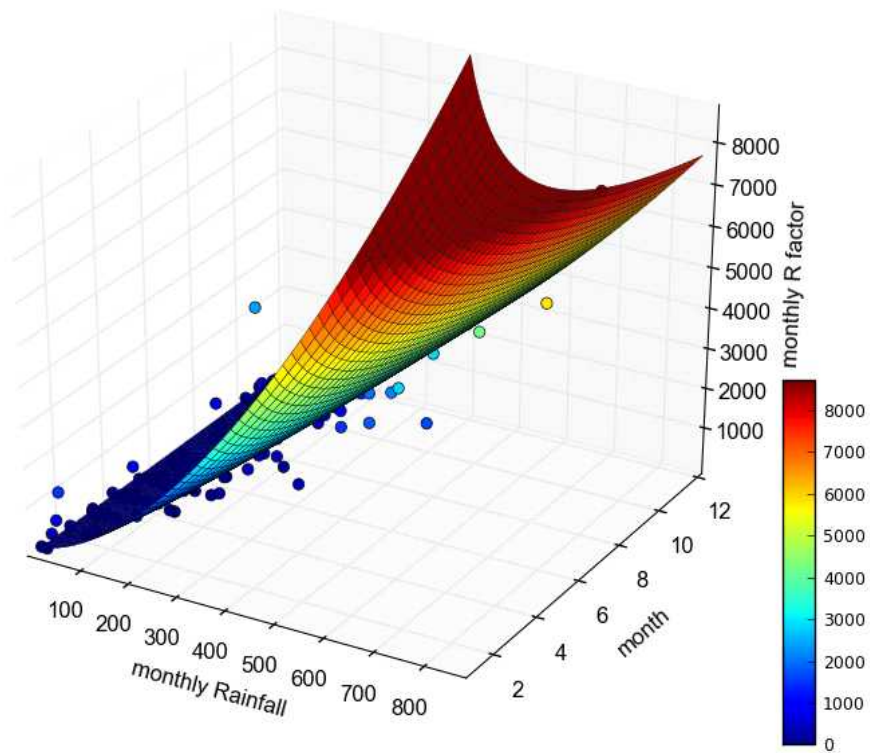


(b) 3차원 그래프

<Fig. 2-12> 서울 회귀식 분석 결과

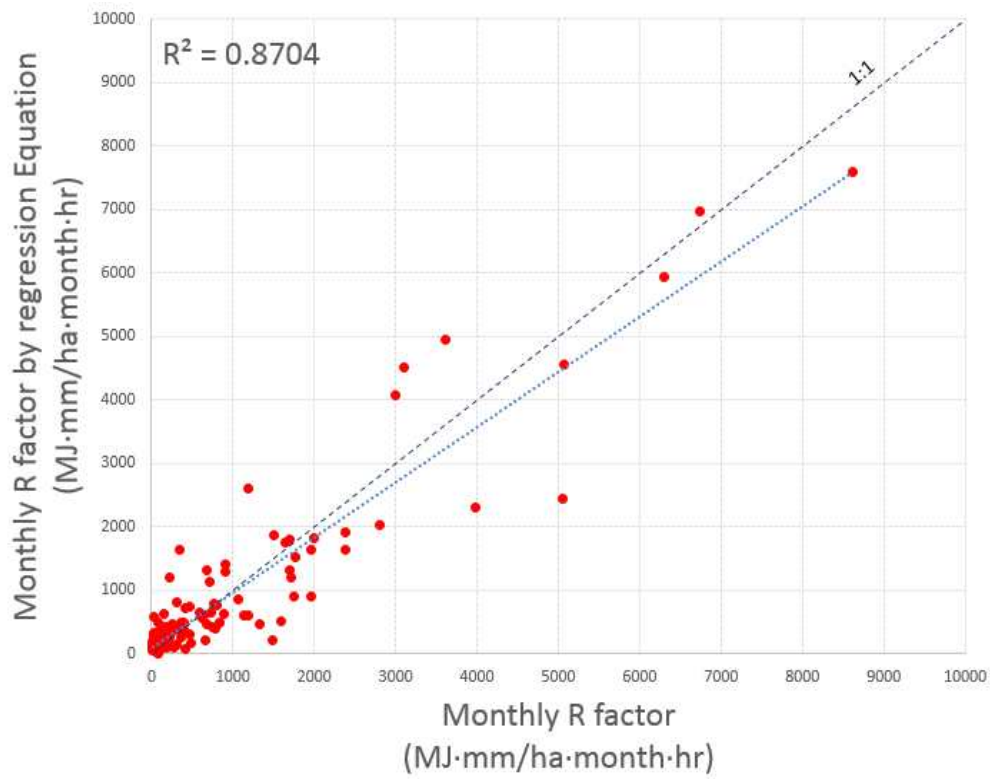


(a) 1:1 상관성 그래프

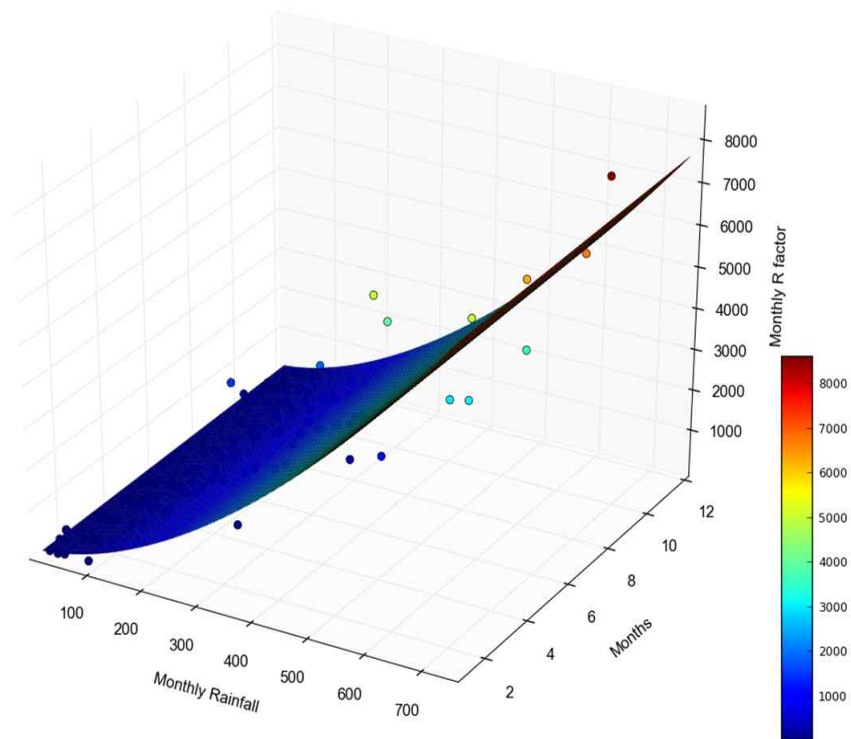


(b) 3차원 그래프

<Fig. 2-13> 인천 회귀식 분석 결과

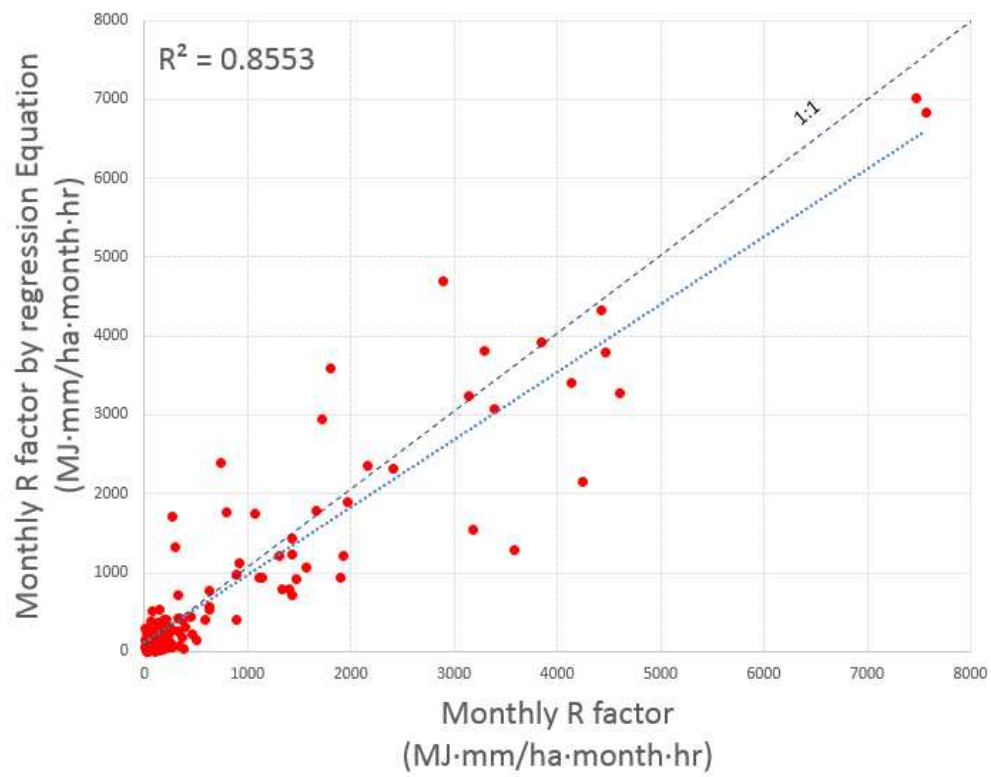


(a) 1:1 상관성 그래프

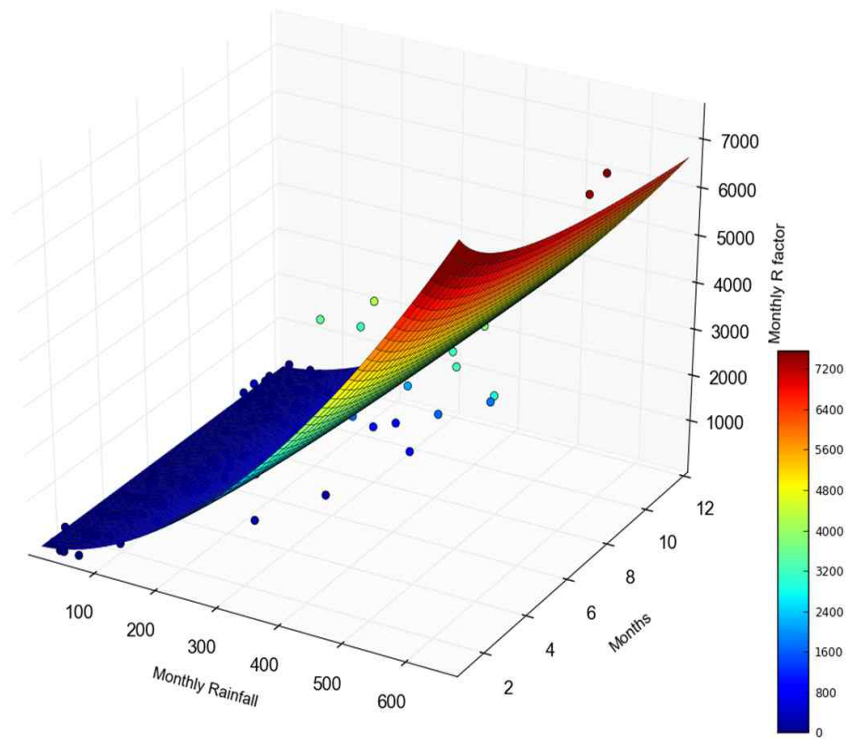


(b) 3차원 그래프

<Fig. 2-14> 군산 회귀식 분석 결과

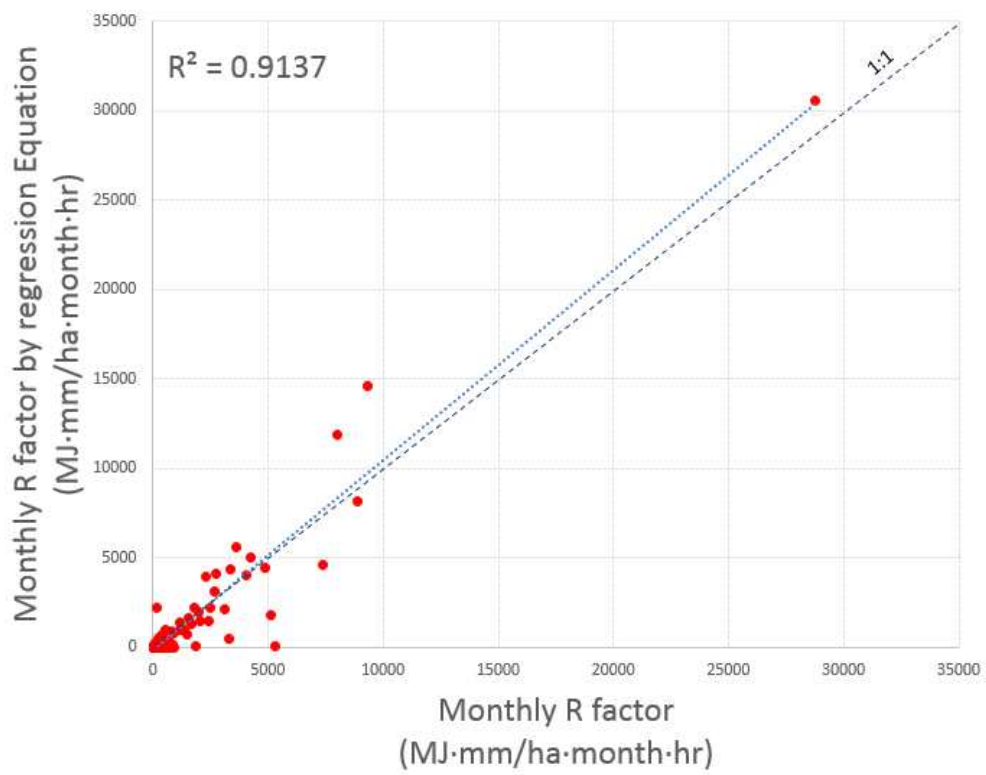


(a) 1:1 상관성 그래프

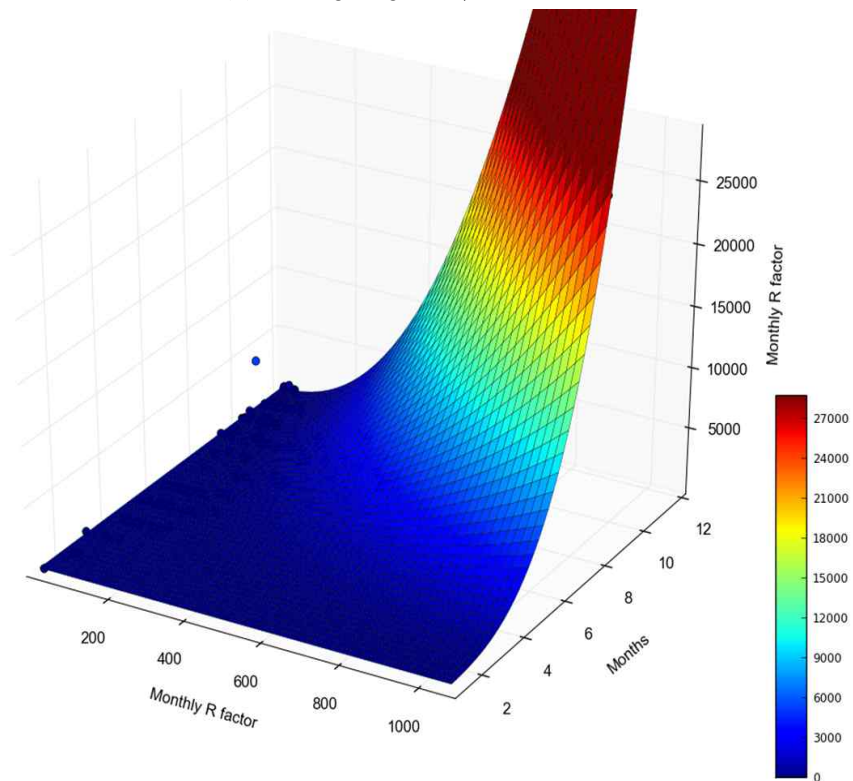


(b) 3차원 그래프

<Fig. 2-15> 전주 회귀식 분석 결과

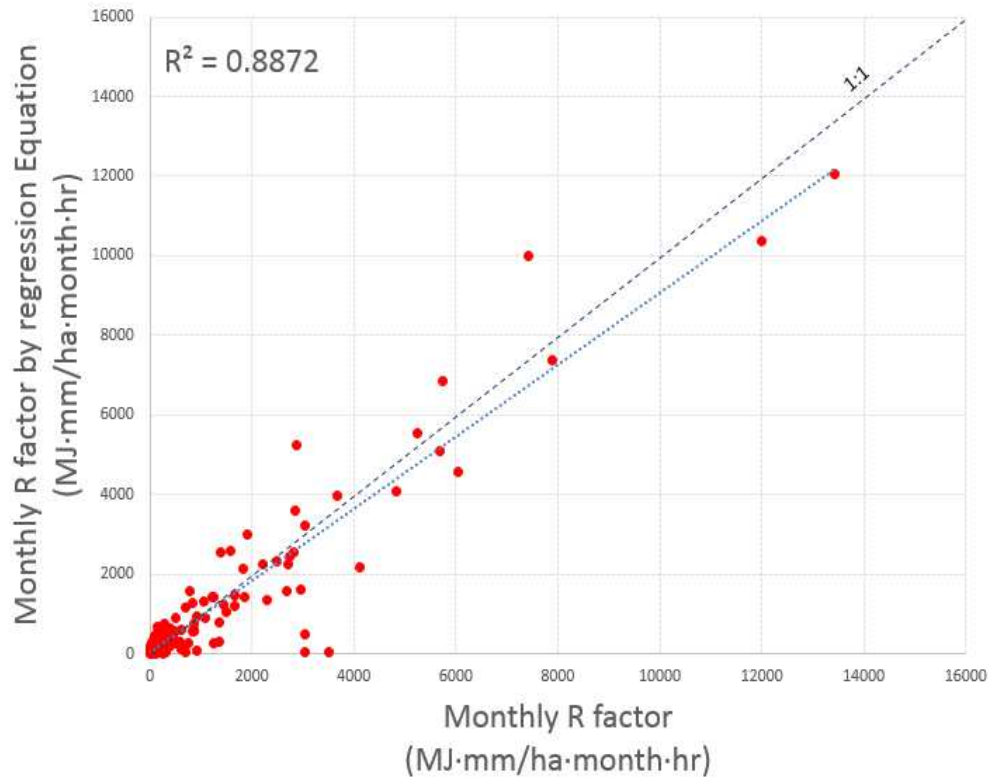


(a) 1:1 상관성 그래프

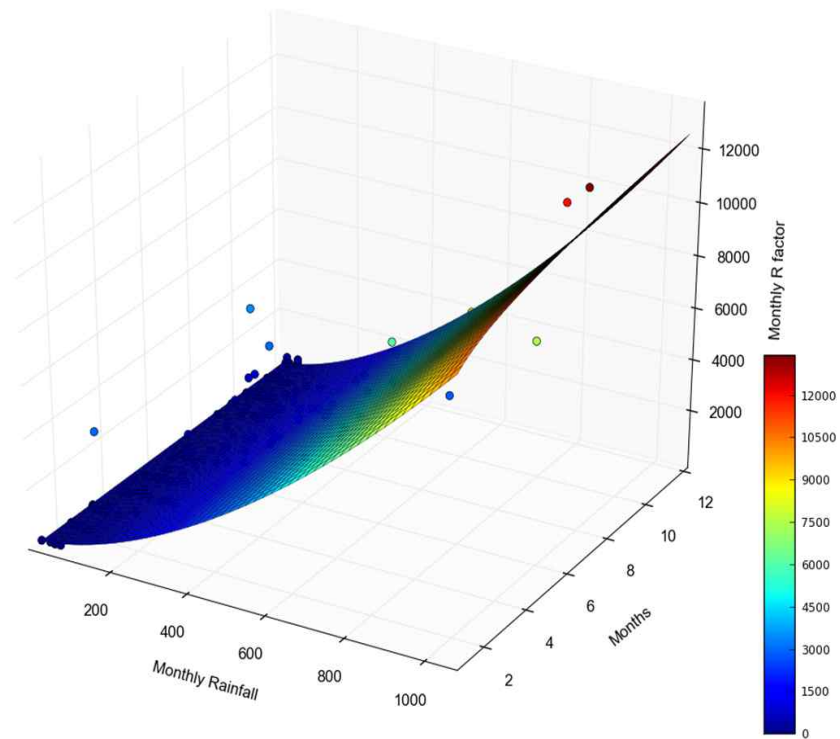


(b) 3차원 그래프

<Fig. 2-16> 강화 회귀식 분석 결과

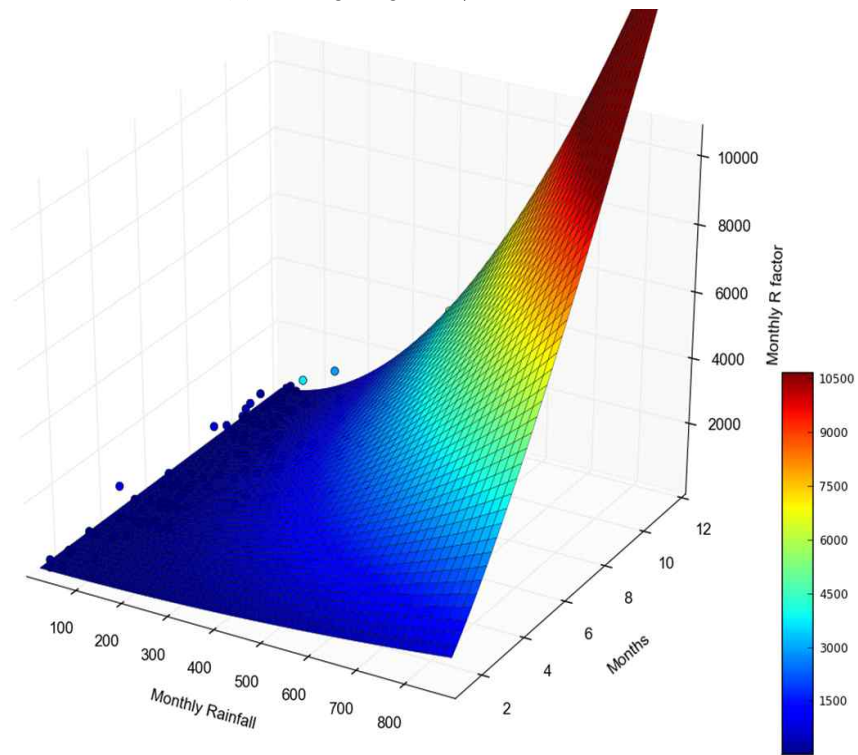
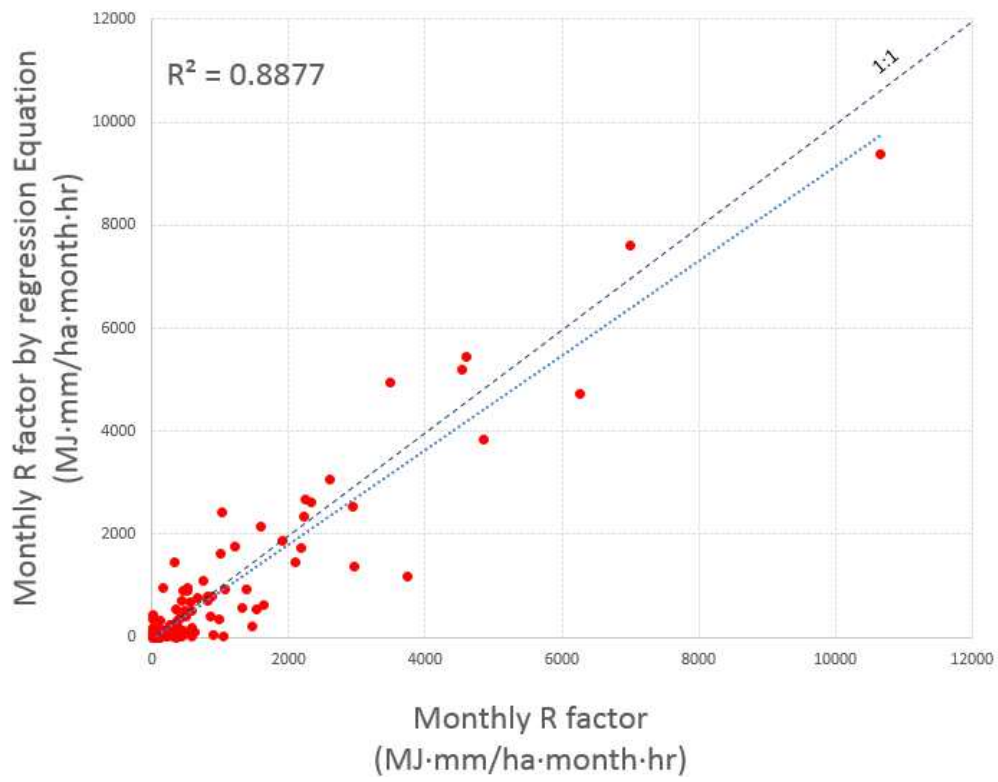


(a) 1:1 상관성 그래프



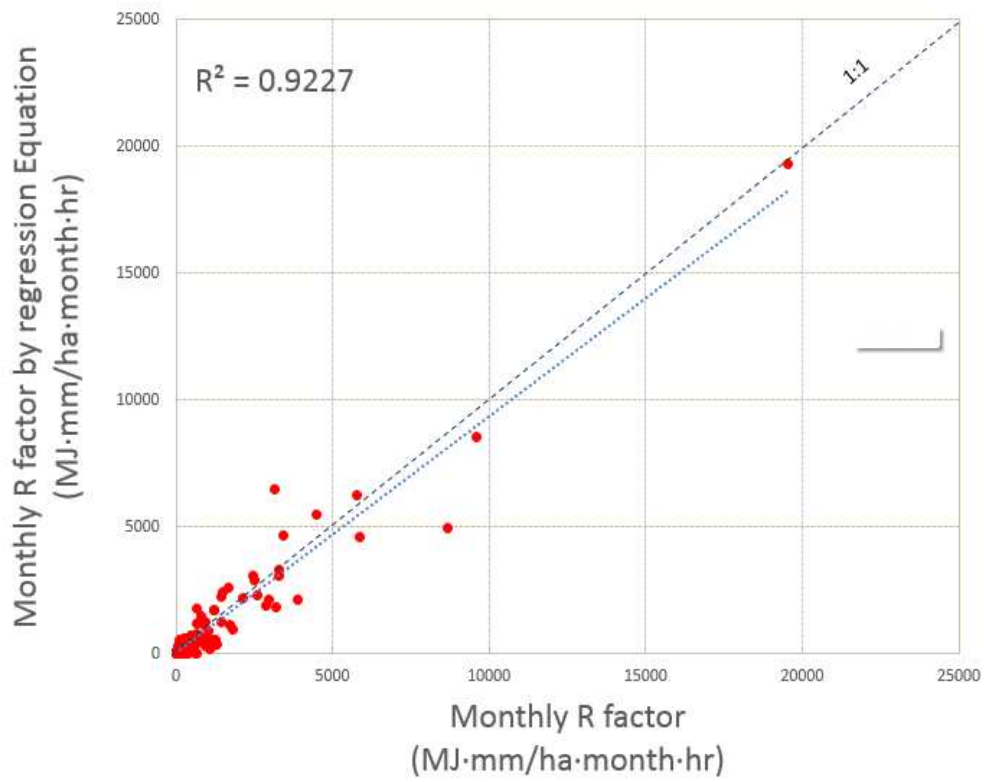
(b) 3차원 그래프

<Fig. 2-17> 양평 회귀식 분석 결과

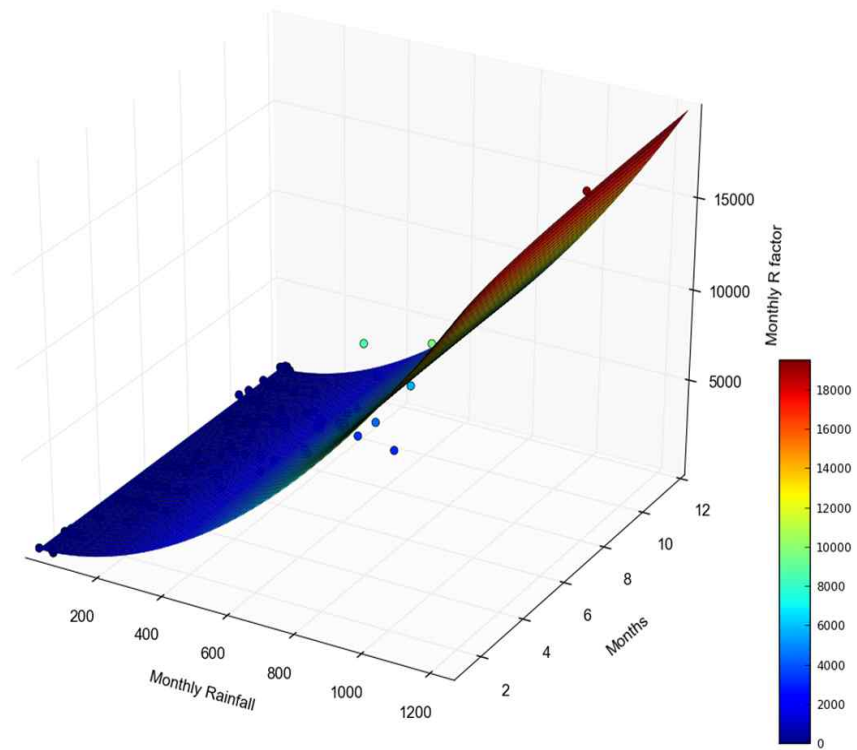


(b) 3차원 그래프

<Fig. 2-18> 인제 회귀식 분석 결과



(a) 1:1 상관성 그래프



(b) 3차원 그래프

<Fig. 2-19> 홍천 회귀식 분석 결과

본 연구에서는 R^2 0.6 이하는 월 강우침식능인자와 월강수량과 상관성이 약하다고 판단되어 R^2 0.6 이상인 47 지점에 대해 회귀식을 제시하였다<Table 2-5>. 아래 <Table 2-5>의 자료는 향후 각 지역별 강우 특성(강우량 및 강우강도)을 고려한 R값 산정의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 신뢰할만한 결정계수의 값의 경계(본 연구의 경우 0.6)에는 객관적 근거를 정의할 수 없고, 개발자의 주관적인 측면이 배제될 수 없는 것으로 보인다.

<Table 2-5> 지점별 월 강우침식능인자 회귀식 개발 결과

지점번호	지점이름	R^2	회귀식	월강수량의 범위(mm)
95	철원	0.83	$R = 0.00115P^{1.65047} \times M^{2.326238}$	3.2~1,009.2
98	동두천	0.83	$R = 0.09084P^{1.7294} \times M^{-0.11967}$	3.8~1,223.5
101	춘천	0.86	$R = 0.009758P^{1.4863} \times M^{1.69049}$	6.9~932.5
102	백령도	0.64	$R = 0.002542P^{2.309417} + 32.7684M^{0.92132}$	7.5~392.0
108	서울	0.90	$R = 0.025638P^{1.67671} \times M^{0.757307}$	6.5~1,131.0
112	인천	0.84	$R = 0.291819P^{1.591707} \times M^{-0.23258}$	5.0~864.2
114	원주	0.78	$R = 0.289734P^{1.423463} \times M^{0.26482}$	10.5~930.2
115	울릉도	0.70	$R = 0.078166P^{1.564785} \times M^{0.301962}$	18.8~623.3
121	영월	0.67	$R = 0.074849P^{1.391642} \times M^{0.92272}$	13.6~758.9
127	충주	0.78	$R = 0.24249P^{1.3512} \times M^{0.50685}$	9.8~666.9
129	서산	0.80	$R = 0.3319P^{1.5138} + 0.2964M^{2.0677}$	1.8~707.0
130	울진	0.61	$R = 0.717303P^{1.253419} + 3.8125M^{1.491632}$	7.6~704.6
131	청주	0.63	$R = 0.432398P^{1.404596} \times M^{0.13816}$	6.8~531.9
133	대전	0.80	$R = 0.2527P^{1.4575} \times M^{0.2518}$	9.8~587.3
140	군산	0.87	$R = 0.12092P^{1.6680} + 6.8367M^{1.127702}$	8.5~748.4
146	전주	0.85	$R = 0.119445P^{1.7191} \times M^{-0.100273}$	3.9~666.0
156	광주	0.68	$R = 0.133436P^{1.63131} + 10.3128M^{1.3287}$	7.4~607.4
159	부산	0.64	$R = 0.0017P^{2.32057} + 158.59M^{0.47304}$	2.0~886.1
162	통영	0.74	$R = 0.007357P^{2.31622} \times M^{-0.61649}$	2.0~794.8
169	흑산도	0.75	$R = 0.011690P^{1.71941} \times M^{1.112783}$	8.0~624.8

지점번호	지점이름	R^2	회귀식	월강우량의 범위(mm)
170	완도	0.71	$R = 0.223303P^{1.364637} \times M^{0.56809}$	3.4~652.7
184	제주	0.76	$R = 0.01806P^{1.77664} \times M^{0.6487}$	1.8~880.0
185	고산	0.62	$R = 0.005772P^{1.9270} \times M^{0.8717}$	6.5~407.5
189	서귀포	0.80	$R = 0.040442P^{1.598898} \times M^{0.7816}$	18.8~926.7
192	진주	0.67	$R = 0.403109P^{1.24209} \times M^{0.60309}$	4.5~760.1
201	강화	0.91	$R = 0.000002P^{2.3510} \times M^{3.39209}$	3.5~1,069.0
202	양평	0.88	$R = 0.150650P^{1.599636} \times M^{0.077535}$	5.2~1,058.3
203	이천	0.75	$R = 0.363415P^{1.472747} \times M^{-0.023684}$	3.5~861.0
211	인제	0.88	$R = 0.001917P^{1.908183} \times M^{1.261008}$	8.8~886.0
212	홍천	0.92	$R = 0.027928P^{1.877257} \times M^{0.035298}$	2.2~1,244.5
216	태백	0.67	$R = 0.7789P^{1.26966} \times M^{0.010653}$	8.0~811.0
221	제천	0.64	$R = 0.084462P^{1.28375} \times M^{1.264819}$	3.8~1,111.0
226	보은	0.75	$R = 1.151644P^{1.188996} \times M^{0.186387}$	5.5~689.0
232	천안	0.62	$R = 0.157095P^{1.277386} \times M^{1.024175}$	4.5~645.1
235	보령	0.63	$R = 0.276848P^{1.37414} \times M^{0.53735}$	3.8~723.1
236	부여	0.70	$R = 0.055469P^{1.57566} \times M^{0.726647}$	10.6~626.5
238	금산	0.79	$R = 0.37805P^{1.290668} \times M^{0.47935}$	6.8~681.5
243	부안	0.66	$R = 0.093719P^{1.38782} \times M^{0.917404}$	5.4~677.0
244	임실	0.78	$R = 0.058295P^{1.54611} \times M^{0.708547}$	9.1~731.0
245	정읍	0.65	$R = 0.186953P^{1.516213} \times M^{0.24888}$	10.5~660.5
247	남원	0.77	$R = 0.4253P^{1.32885} \times M^{0.357302}$	3.5~768.0
248	장수	0.69	$R = 0.498316P^{1.301265} \times M^{0.309336}$	8.2~789.5
260	장흥	0.72	$R = 0.17208P^{1.287065} \times M^{0.975558}$	5.5~809.0
272	영주	0.62	$R = 2.04461P^{1.102205} \times M^{0.0140714}$	12.3~751.5
273	문경	0.76	$R = 0.230614P^{1.317071} \times M^{0.58916}$	8.1~671.0
278	의성	0.64	$R = 0.28617P^{1.26431} \times M^{0.661323}$	3.5~738.5
284	거창	0.65	$R = 0.827671P^{1.195192} \times M^{0.32956}$	5.0~838.0

(2) 토양침식성인자(K) 및 지표피복인자(C)의 산정

본 연구에서는 한국에 대한 토양침식성인자 및 지표피복인자의 산정을 위해서 Soil and Water Assessment Tool(SWAT; Arnold et al., 1994) 모형을 이용하였다. SWAT 모형은 강수량, 상대습도, 기온, 풍속, 일조량과 같은 시계열 자료와 함께, 수치지표고모형, 토지이용도, 토양도와 같은 공간적 자료를 필요로 하는 시공간적 특성을 고려할 수 있는 모형이다. SWAT 모형은 유역에서의 수문 및 오염원 거동을 위해서, 유역을 소유역(subwater shed)으로 분할한 뒤, 이를 다시 수문학적 반응단위(Hydrological Response Unit, HRU)로 구분한다. 그리고 유사량을 산정하는 과정에서 지표피복인자를 산정하는데, 토양잔유물이나 기상에 따른 작물의 생육상태 등을 고려한다. 따라서 모형을 이용하여 지표피복인자를 산정할 경우 대상 유역에서의 기상조건을 반영할 수 있을 것으로 생각된다. Park et al.(2010)은 유역에서 작물에 대한 지표피복인자를 일단위로 산정하기 위해서 SWAT 모형의 소스코드 수정을 하였으며, 이를 통해 10일단위의 지표피복인자 데이터베이스를 구축한 바 있다. 이에 본 연구에서도 같은 방식으로 SWAT 모형의 소스코드를 수정하여 일단위 지표피복인자를 출력하도록 하였으며, 2012년에 배포된 소스코드를 사용하였다.

토양의 침식성은 유기물 함량에 따라 달라질 수 있는 것으로 여겨지며, 이를 반영하여 토양침식성인자를 산정할 필요가 있는 것으로 생각된다. Sharpley and Williams(1990)은 유기물 함량(OM)을 고려한 토양침식성인자 산정식(식 18)을 제안한 바 있는데, 이 식은 모래질 토양의 함량(%sand), 실트질 토양의 함량(%silt), 점토질 토양의 함량(%clay)을 필요로 한다. 현재 SWAT 모형은 일별로 유기물 함량을 모의하지만, 이를 토양침식성인자에는 반영을 하지는 않는다. 따라서 본 과업에서는 위의 식을 이용하여 모형에서 토양침식성인자를 산정하도록 소스코드를 수정하였다.

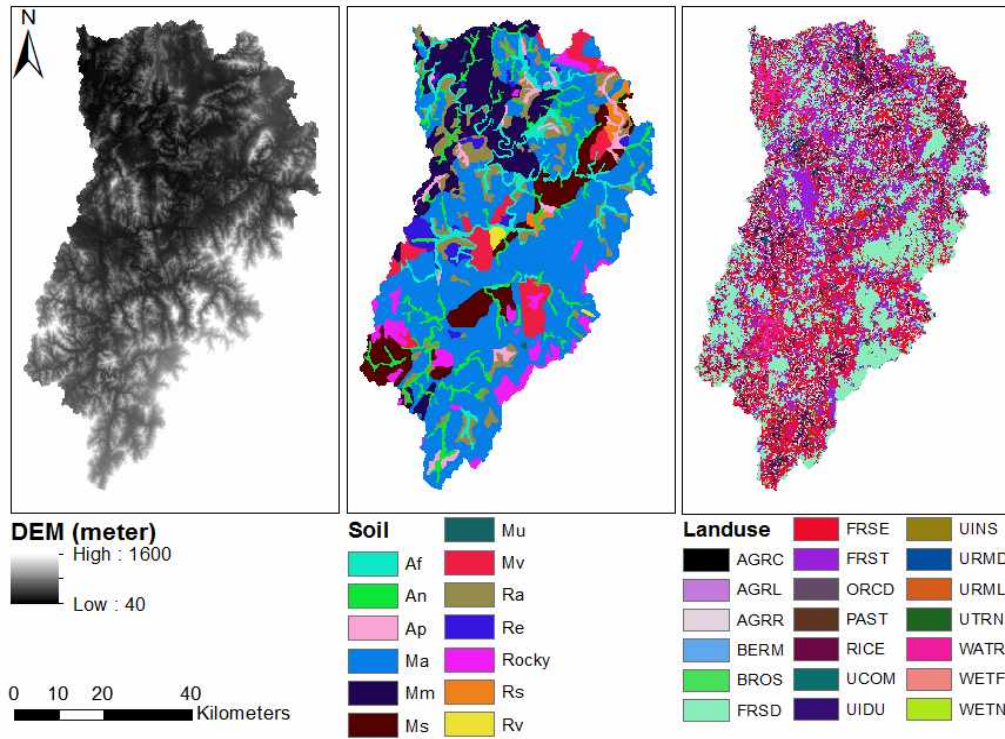
$$\begin{aligned} \text{〈식-18〉 } K = & 0.2 + \exp[-0.0256\%sand(1 - \%silt/100)](\%silt/\%clay + \%silt)^{0.3} \\ & \times [1 - 0.25\%OM/(\%OM + \exp(3.72 - 2.95\%OM))] \\ & \times [1 - 0.7(1 - \%sand)/((1 - \%sand) + \exp(-5.51 + 22.9(1 - \%sand)))] \end{aligned}$$

토양침식성인자 및 지표피복인자를 산정하는 과정에서 유기물 함량이나 작물의 생장상태 등이 SWAT 모형에 의해서 고려되는데, 이는 기상 특성 및 지역적인 차이가 적지 않은 영향을 줄 것으로 생각된다. 따라서 본 과업에서는 단일의 유역이 아니라, 대청댐(충청북도, 유역면적 : 4,190 km²), 임하댐(경상북도, 유역면적 : 1,965 km²), 주암댐(전라남도, 유역면적 : 1,027 km²), 소양강댐(강원도, 유역면적 : 2,631 km²)을 유역의 유출구로 하는 4 개의 유역을 각

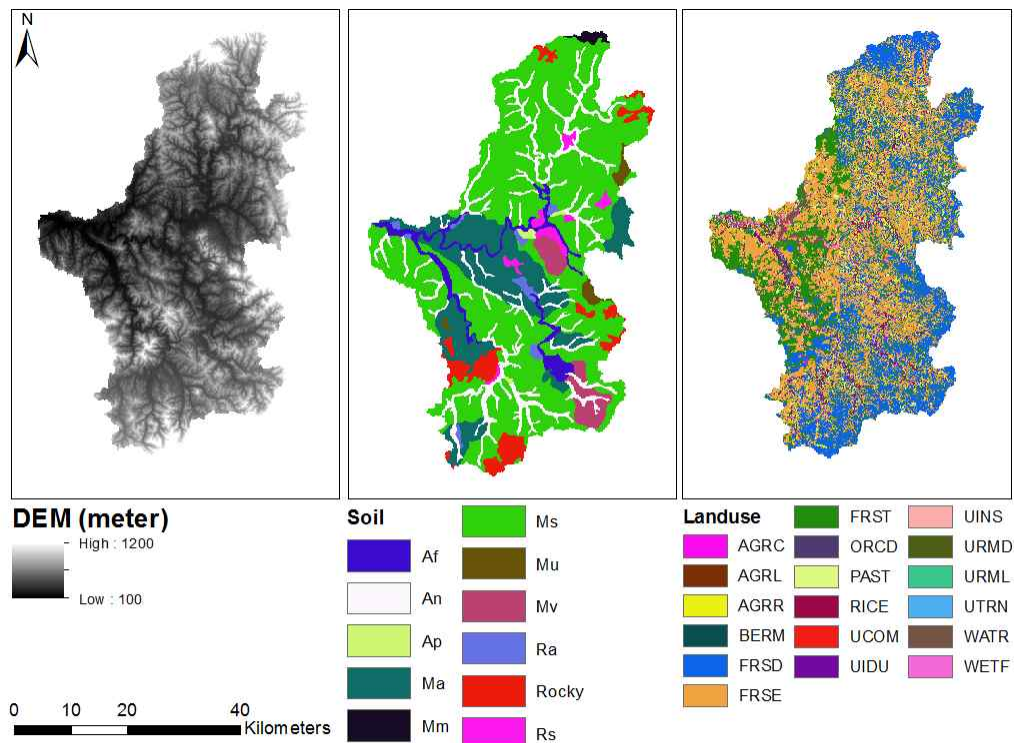
지역에서의 대표성을 가진다고 가정하고 선정하였다. 각 유역에 대해서 30m의 격자를 가지는 공간자료를 구축하였는데, 수치표고모형은 국립지리원에서 제공하는 수치지도(1:5,000)를 이용하였고, 토양도는 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공하는 개략토양도(1:50,000)를 이용하였으며, 토지이용도는 환경부 환경공간정보서비스에서 제공하는 2005년 대분류 토지피복도(1:25,000)를 이용하였다<Fig. 2-20 ~ 2-23>. 기상자료는 기상청에서 제공하는 2000년부터 2014년까지 15년에 대한 강수량, 풍속, 일사량, 상대습도, 기온 자료를 사용하였으며, 대청댐 유역에 대해서는 보은지점, 청주지점, 추풍령지점, 대전지점, 구미지점, 임실지점, 장수지점, 전주지점, 문경지점의 9개 지점 자료가 사용되었으며, 임하댐 유역에 대해서는 안동지점, 봉화지점, 의성지점, 울진지점, 포항지점, 영천지점, 영덕지점의 7개 지점 자료가 사용되었다. 주암댐 유역에 대해서는 고흥지점, 광주지점, 장흥지점, 남원지점의 4개 지점 자료가 사용되었으며, 소양강댐에 대해서는 북강릉지점, 춘천지점, 대관령지점, 강릉지점, 홍천지점, 인제지점, 속초지점의 7개 지점 자료가 사용되었다.

지표피복인자의 경우 SWAT 모형에서 작물의 생장을 고려하여 이를 인자 산정에 반영하며 이를 위해 작물의 파종 및 수확시기를 필요로 한다. 작물의 파종, 수확시기, 재배형태(작형)은 웹 검색을 통해 이루어졌으며, 농사로(<http://www.nongsaro.go.kr>), 농촌진흥청 농업경영종합정보시스템(<https://amis.rda.go.kr>), 흥농종묘사(<http://www.ihungnong.com>), 신젠타종묘(<http://www3.syngenta.com>), 농우바이오(<http://www.nongwoobio.co.kr>), 네이버지식백과(<http://terms.naver.com>)를 이용하였다<Table 2-6 ~ 2-9>.

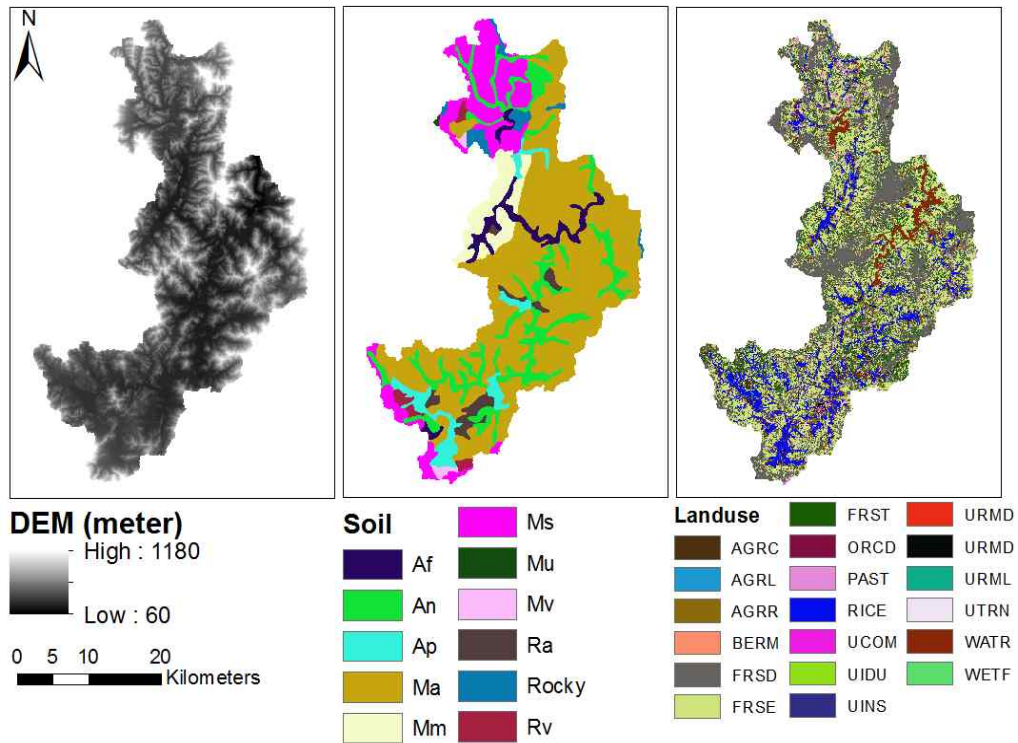
토양침식성인자의 산정을 위해서는 SWAT 모형에 개략토양도를 사용하였다. 토양침식성인자의 산정에 유기물함량을 고려하도록 하였는데, 유기물함량은 기상의 조건에 따라 달라질 수 있으며, 이는 지역적인 차이가 발생할 수 있다는 것을 의미하기 때문에 지표피복인자와 동일하게 4개 유역에 대해서 분석하였다<Table 2-10>.



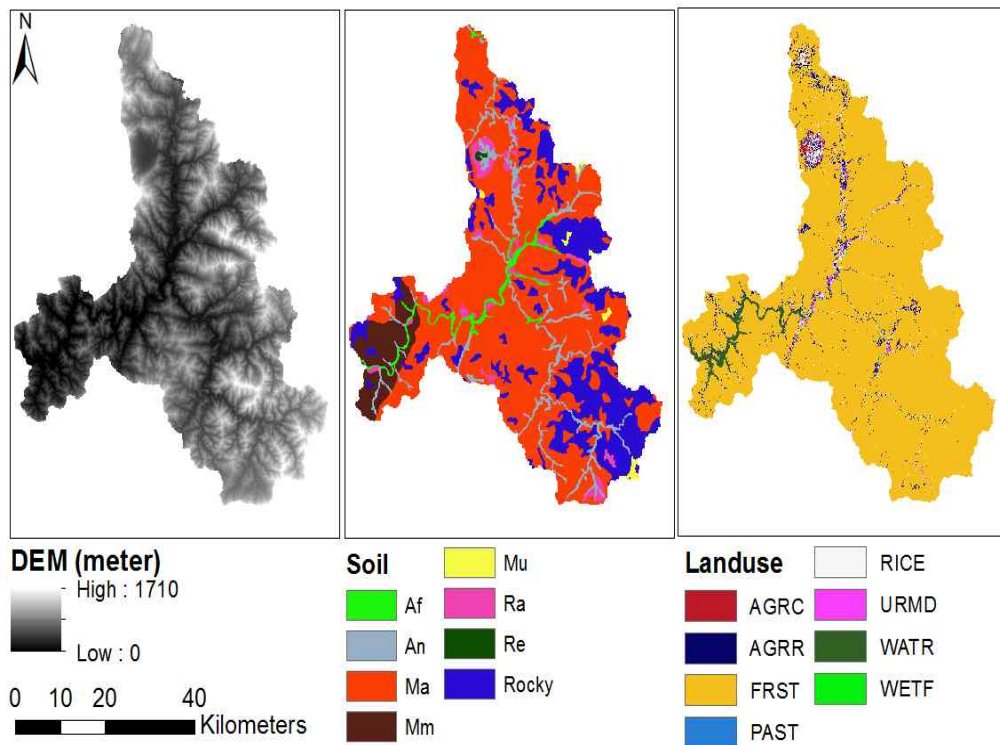
<Fig. 2-20> 대청댐유역에 대한 SWAT 모형의 입력자료



<Fig. 2-21> 임하댐유역에 대한 SWAT 모형의 입력자료



<Fig. 2-22> 주암댐유역에 대한 SWAT 모형의 입력자료



<Fig. 2-23> 소양강댐유역에 대한 SWAT 모형의 입력자료

<Table 2-6> 금강 유역에 대해 적용된 작물 재배 일정

작물명	작형	과종	수확
오이	억제재배	8상~9중	9상~10중
밀		10중~10하	6상~8상
딸기	촉성재배	3하~9상	9중~9하
딸기	초촉성재배	3하~8하	8하
호밀		중부 9하~10상	4하~5상
봄보리		중부 10상	6상~6중
땅콩		4하~5상	9하~10중
옥수수	노지재배	4상~5상	9중~하
감자	봄재배	3상~중	6하~7중
감자	여름재배	4하~5중	8중~9중
배추	봄재배	3중~4하	4상~5중
배추	가을재배	8상~8하	8하~9상
브로콜리	여름재배	4~5월	7~8월
브로콜리	가을재배	6~7월	9~11월
상추	여름재배	5상~5중	6상~6중
상추	가을재배	7하~8상	8중~하
상추	겨울재배	10중~하	11하~12상
고구마	노지재배	3중~하	10상~중
양배추	봄재배	3~4월	4~5월
양배추	가을재배	7월	8월
양배추	월 동 재 배	9월	10월
토마토	촉성재배	9상~10상	10하~11하
당근	봄재배	4월~5월	7월~8월
당근	가을재배	7월	11월
사탕수수		5상~5중	8상~8하
콩		5상~6하	10상~11상
녹두		봄녹두 4중~4하	8중~10중
녹두		그루녹두 6하~7상	8중~11중
완두		10중~11중	4상~6하
담배		3상	8상~9하
사탕무		8중~9상	11중~12상
해바라기		4상~5하	8상~9하
셀러리		3하~4상	6하~7하
가지		4하~5상	7상~10상

<Table 2-7> 낙동강 유역에 대해 적용된 작물 재배 일정

작물명	작형	과종	수확
감자	가을재배	7중~8상	10하~12상
밀		10하~11상	6상~9상
시금치	봄재배	2상~5하	3중~7상
시금치	여름재배	6상~8하	7상~10상
시금치	가을재배	9중~11하	10상~3하
양파		8하~9상	5하~6중
딸기	축성재배	3하~9상	9중~9하
딸기	초축성재배	3하~8하	8하
호밀		남부 10중	4하~6상
봄보리		남부 10하	6상~7중
알팔파		3상~4하	7상~8하
땅콩		4하~5상	9하~10중
옥수수	노지재배	4상~5상	9중~하
감자	봄재배	3상~중	6하~7중
감자	여름재배	4하~5중	8중~9중
배추	봄재배	3중~4하	4상~5중
배추	가을재배	8상~8하	8하~9상
브로콜리	여름재배	4~5월	7~8월
브로콜리	가을재배	6~7월	9~11월
상추	여름재배	5상~5중	6상~6중
상추	가을재배	7하~8상	8중~하
상추	겨울재배	10중~하	11하~12상
고구마	노지재배	3중~하	10상~중
양배추	봄재배	3~4월	4~5월
양배추	가을재배	7월	8월
양배추	월 동 재 배	9월	10월
토마토	축성재배	9상~10상	10하~11하
당근	봄재배	4월~5월	7월~8월
당근	가을재배	7월	11월
사탕수수		5상~5중	8상~8하
콩		5상~6하	10상~11상
녹두		봄녹두 4중~4하	8중~10중
녹두		그루녹두 6하~7상	8중~11중
완두		10중~11중	4상~6하
담배		3상	8상~9하
사탕무		8중~9상	11중~12상
해바라기		4상~5하	8상~9하
셀러리		3하~4상	6하~7하
가지		4하~5상	7상~10상

<Table 2-8> 섬진 영산강 유역에 대해 적용된 작물 재배 일정

작물명	작형	과종	수확
감자	가을재배	7중~8상	10하~12상
가지		4하~5상	7상~10상
수박	억제재배	7하~8상	8하~9상
완두꽃콩	노지재배	4중~하	7중~8상
밀		10하~11상	6상~9상
시금치	봄재배	2상~5하	3중~7상
시금치	가을재배	9중~11하	10상~3하
양파		8하~9상	5하~6중
딸기	촉성재배	3하~9상	9중~9하
딸기	초촉성재배	3하~8하	8하
토마토	노지역제재배	4상~4하	5중~5하
호밀		남부 10중	4하~6상
봄보리		남부 10하	6상~7중
땅콩		4하~5상	9하~10중
옥수수	노지재배	4상~5상	9중~하
감자	봄재배	3상~중	6하~7중
감자	여름재배	4하~5중	8중~9중
배추	봄재배	3중~4하	4상~5중
배추	가을재배	8상~8하	8하~9상
브로콜리	여름재배	4~5월	7~8월
브로콜리	가을재배	6~7월	9~11월
상추	여름재배	5상~5중	6상~6중
상추	가을재배	7하~8상	8중~하
상추	겨울재배	10중~하	11하~12상
고구마	노지재배	3중~하	10상~중
양배추	봄재배	3~4월	4~5월
양배추	가을재배	7월	8월
양배추	월 동 재 배	9월	10월
토마토	촉성재배	9상~10상	10하~11하
당근	봄재배	4월~5월	7월~8월
당근	가을재배	7월	11월
사탕수수		5상~5중	8상~8하
콩		5상~6하	10상~11상
녹두		봄녹두 4중~4하	8중~10중
녹두		그루녹두 6하~7상	8중~11중
완두		10중~11중	4상~6하
담배		3상	8상~9하
사탕무		8중~9상	11중~12상
해바라기		4상~5하	8상~9하
셀러리		3하~4상	6하~7하

〈Table 2-9〉 한강 유역에 대해 적용된 작물 재배 일정

작물명	작형	파종	수확
봄보리		중부 10상	6상~6중
브로콜리	봄재배	1~3월	4~6월
브로콜리	여름재배	4~5월	7~8월
브로콜리	가을재배	6~7월	9~11월
배추	봄재배	3중~4하	4상~5중
배추	가을재배	8상~8하	8하~9상
상추	고랭지재배	4상~4하	5중~5하
상추	여름재배	5상~5중	6상~6중
상추	가을재배	7하~8상	8중~하
상추	겨울재배	10중~하	11하~12상
셀러리		3하~4상	6하~7하
옥수수	노지재배	4상~5상	9중~하
당근	봄재배	4월~5월	7월~8월
당근	여름재배	5월	8월~9월
당근	가을재배	7월	11월
오이	조숙재배	2상~3중	3상~4중
오이	억제재배	8상~9중	9상~10중
가지		4하~5상	7상~10상
수수		5상~5중	9중~10하
양배추	봄재배	3~4월	4~5월
양배추	가을재배	7월	8월
양배추	월 동 재 배	9월	10월
양배추	여름재배	5~6월	6~7월
녹두		봄녹두 4중~4하	8중~10중
녹두		그루녹두 6하~7상	8중~11중
양파	고랭지춘파	3월상중	8~9월
완두		10중~11중	4상~6하
감자	봄재배	3상~중	6하~7중
감자	여름재배	4하~5중	8중~9중
호밀		중부 9하~10상	4하~5상
사탕무		8중~9상	11중~12상
콩		5상~6하	10상~11상
고구마	노지재배	3중~하	10상~중
사탕수수		5상~5중	8상~8하
해바라기		4상~5하	8상~9하
담배		3상	8상~9하
토마토	축성재배	9상~10상	10하~11하
밀		10중~10하	6상~8상

<Table 2-10> 개략토양도의 토양 성분 함량 및 토양침식성인자 ($\text{Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{cm}$)

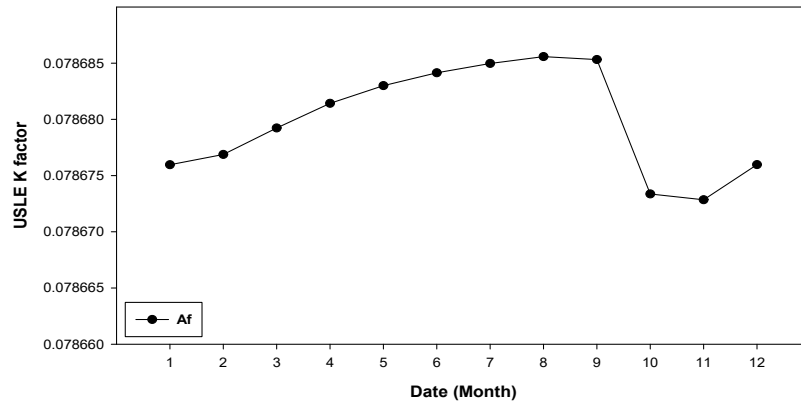
	함량(%)			USLE K
	Clay	Silt	Sand	
Af	3.7	17.50	78.80	0.130
An	21.0	52.74	26.26	0.144
Ap	22.5	67.96	9.54	0.233
Ma	7.8	29.20	63.00	0.160
Mm	12.0	55.82	32.18	0.150
Ms	19.0	54.07	26.93	0.170
Mv	16.0	54.32	29.68	0.170
Ra	7.8	29.20	63.00	0.170
Re	7.8	29.20	63.00	0.170
Rocky	-	-	-	-
Rs	30.0	30.00	40.00	0.160

(가) 대청댐유역에 대한 토양침식성인자의 산정

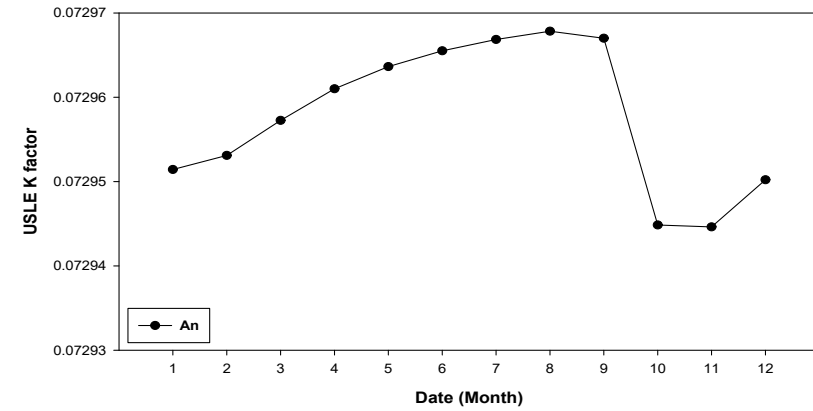
대청댐 유역은 Af, An, Ap, Ma, Mm, Ms, Mu, Mv, Ra, Re, Rs, Rv의 12개의 토양종류를 가지고 있었으며, 대부분 여름철에 높은 토양침식성인자($\text{Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{cm}$)를 보였다<Fig. 2-24 ~ 2-35>. <Table 2-11>에서 보이는 바와 같이, Af는 연중 0.07867에서 0.07869의 변화폭을 보이면서 평균 0.07868을 보였으며, An은 연중 0.07294에서 0.07296의 변화폭을 보이면서 평균 0.07296을 보였다. Ap와 Ma는 연중 각각 0.40383에서 0.40399, 0.14646에서 0.14619의 변화폭을 보이면서 각각 0.40393과 0.14618의 평균을 보였다. Mm, Ms, Mv는 차례로 각각 0.30622에서 0.30635, 0.30725에서 0.30742, 0.36909에서 0.36928의 변화폭을 보이면서 0.30630, 0.30735, 0.36920의 평균을 보였다. Ra, Re, Rs는 차례로 각각 0.14616에서 0.14620, 0.14616에서 0.14620, 0.19282에서 0.19282의 변화폭을 보이면서, 0.14618, 0.14618, 0.19282의 평균을 보였다. Rv는 연중 0.31960에서 0.31974의 변화폭과 0.31968의 평균을 보였다. 본 과업에서 산정된 토양침식성인자의 평균을 볼 때, Af, An, Ma, Ra, Re의 경우, 기존의 개략토양도의 토양침식성인자보다 작은 값을 보였으며, Ap, Mm, Ms, Mu, Mv, Rs는 다소 큰 값을 보였다.

<Table 2-11> 대청댐유역에서의 월별 토양침식성인자(Mg · hr/MJ · cm)

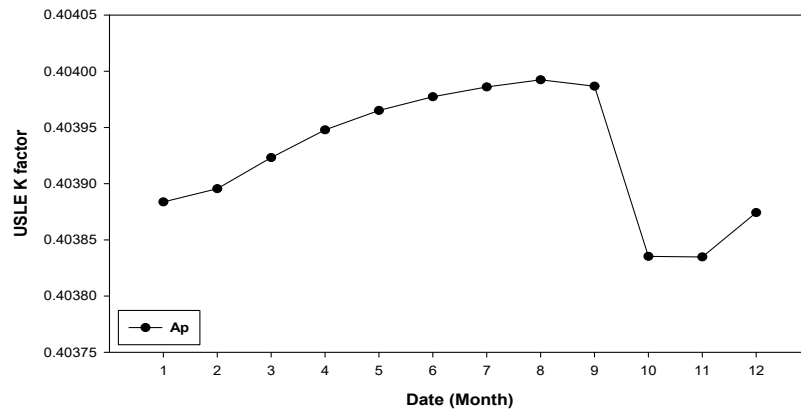
	토양도 기호											
	Af	An	Ap	Ma	Mm	Ms	Mu	Mv	Ra	Re	Rs	Rv
1월	0.07868	0.07295	0.40388	0.14617	0.30626	0.30731	0.36916	0.30602	0.14617	0.14617	0.19282	0.31965
2월	0.07868	0.07295	0.40390	0.14617	0.30627	0.30732	0.36918	0.30603	0.14618	0.14617	0.19282	0.31966
3월	0.07868	0.07296	0.40392	0.14618	0.30629	0.30735	0.36921	0.30605	0.14618	0.14618	0.19282	0.31968
4월	0.07868	0.07296	0.40395	0.14618	0.30631	0.30737	0.36923	0.30606	0.14619	0.14618	0.19282	0.31970
5월	0.07868	0.07296	0.40397	0.14619	0.30633	0.30739	0.36925	0.30607	0.14619	0.14619	0.19282	0.31972
6월	0.07868	0.07297	0.40398	0.14619	0.30634	0.30740	0.36926	0.30608	0.14619	0.14619	0.19282	0.31973
7월	0.07868	0.07297	0.40399	0.14619	0.30635	0.30741	0.36927	0.30609	0.14619	0.14619	0.19282	0.31973
8월	0.07869	0.07297	0.40399	0.14619	0.30635	0.30742	0.36928	0.30609	0.14620	0.14620	0.19282	0.31974
9월	0.07869	0.07297	0.40399	0.14619	0.30635	0.30741	0.36927	0.30609	0.14619	0.14619	0.19282	0.31973
10월	0.07867	0.07294	0.40384	0.14616	0.30622	0.30725	0.36909	0.30599	0.14617	0.14616	0.19282	0.31960
11월	0.07867	0.07294	0.40383	0.14616	0.30622	0.30725	0.36909	0.30599	0.14616	0.14616	0.19282	0.31961
12월	0.07868	0.07295	0.40387	0.14617	0.30625	0.30730	0.36914	0.30601	0.14617	0.14617	0.19282	0.31964
min.	0.07867	0.07294	0.40383	0.14616	0.30622	0.30725	0.36909	0.30599	0.14616	0.14616	0.19282	0.31960
max.	0.07869	0.07297	0.40399	0.14619	0.30635	0.30742	0.36928	0.30609	0.14620	0.14620	0.19282	0.31974
avg.	0.07868	0.07296	0.40393	0.14618	0.30630	0.30735	0.36920	0.30605	0.14618	0.14618	0.19282	0.31968



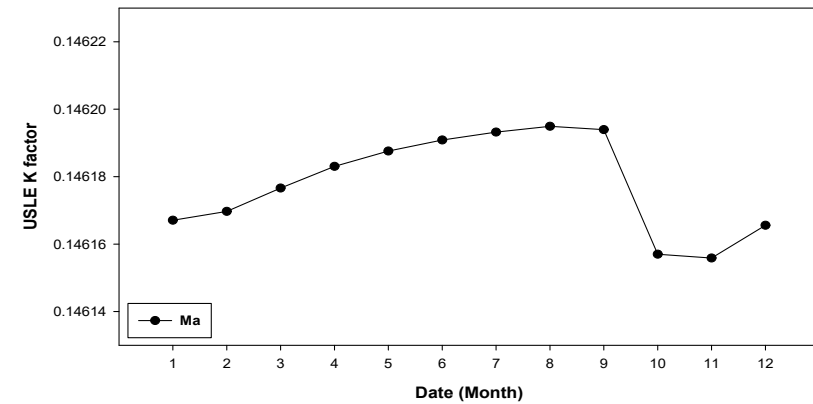
〈Fig. 2-24〉 대청댐유역에서의 토양 Af에 대한 월별 토양침식성인자



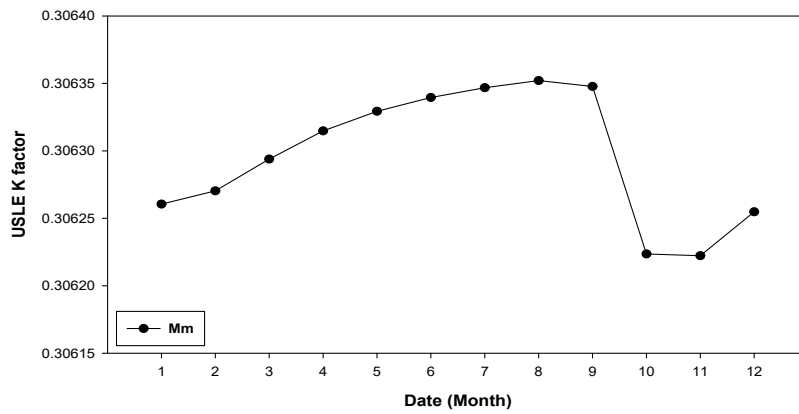
〈Fig. 2-25〉 대청댐유역에서의 토양 An에 대한 월별 토양침식성인자



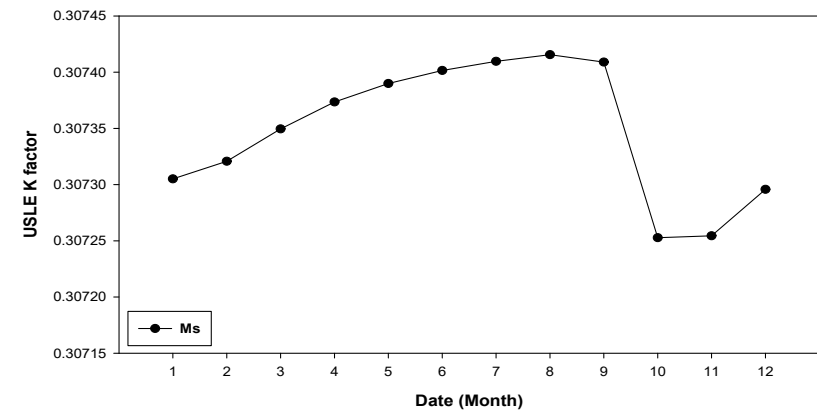
〈Fig. 2-26〉 대청댐유역에서의 토양 Ap에 대한 월별 토양침식성인자



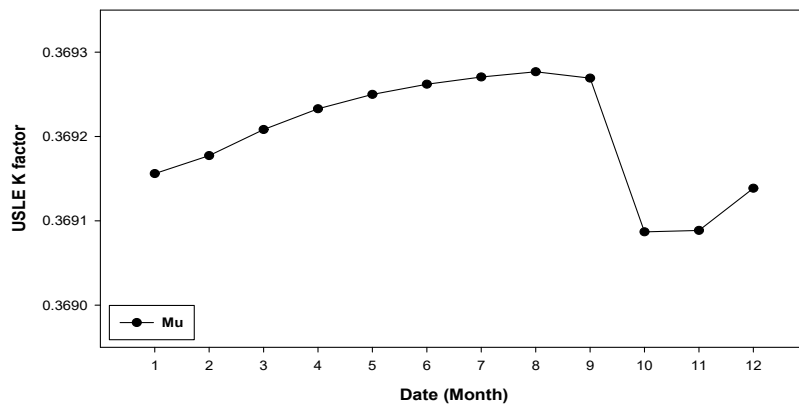
〈Fig. 2-27〉 대청댐유역에서의 토양 Ma에 대한 월별 토양침식성인자



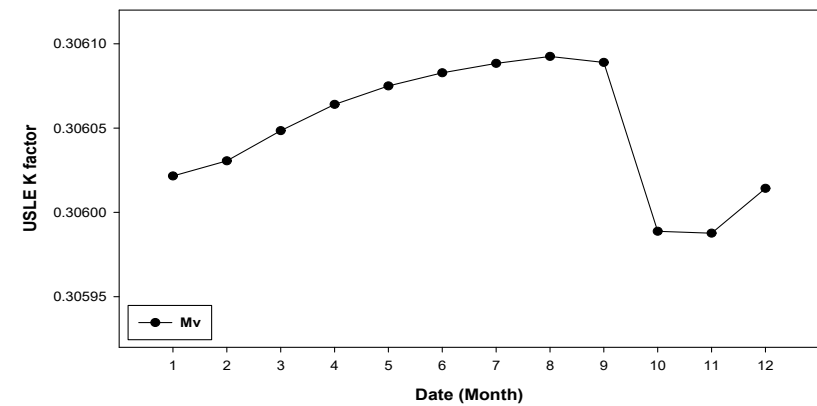
〈Fig. 2-28〉 대청댐유역에서의 토양 Mm에 대한 월별 토양침식성인자



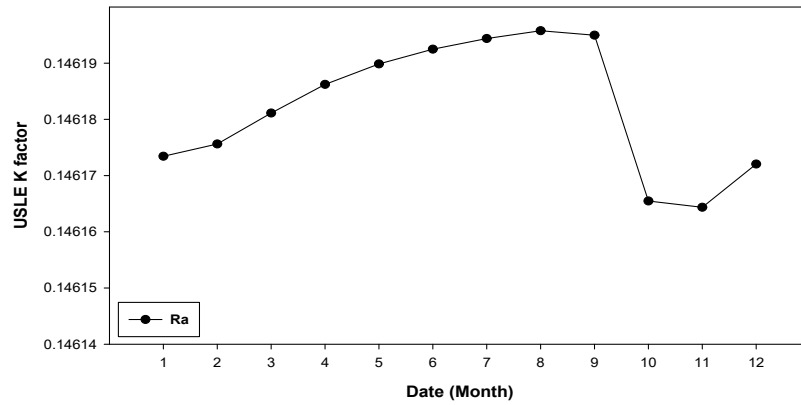
〈Fig. 2-29〉 대청댐유역에서의 토양 Ms에 대한 월별 토양침식성인자



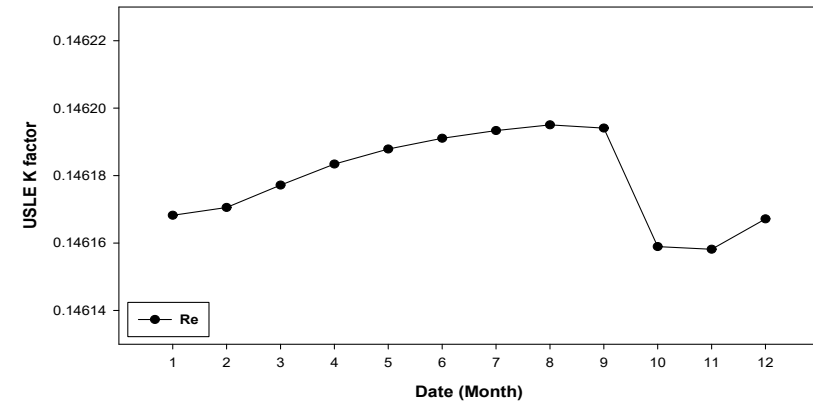
〈Fig. 2-30〉 대청댐유역에서의 토양 Mu에 대한 월별 토양침식성인자



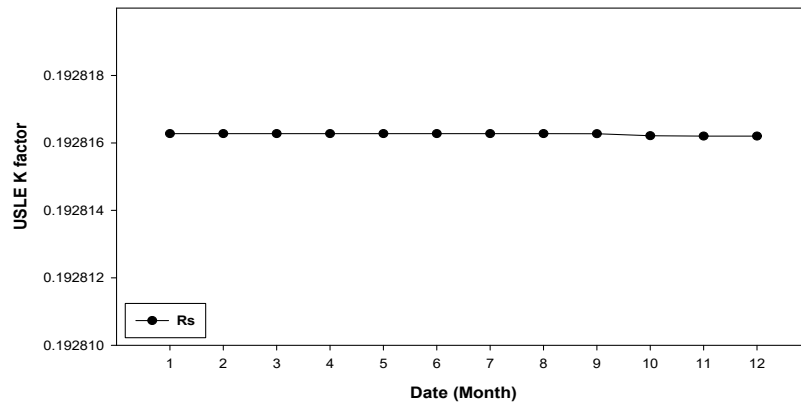
〈Fig. 2-31〉 대청댐유역에서의 토양 Mv에 대한 월별 토양침식성인자



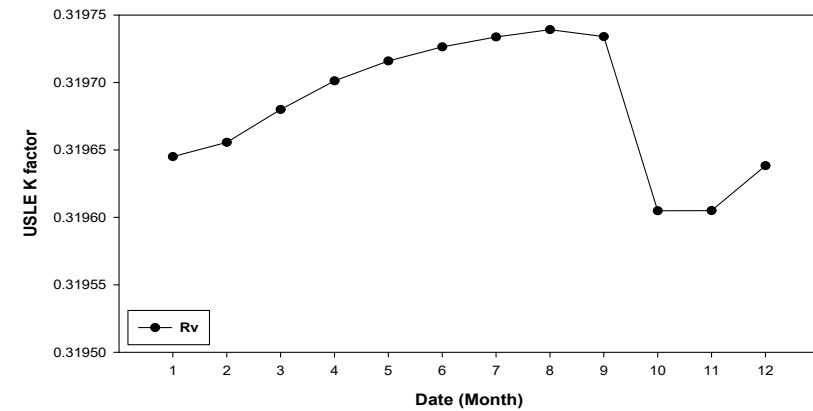
〈Fig. 2-32〉 대청댐유역에서의 토양 Ra에 대한 월별 토양침식성인자



〈Fig. 2-33〉 대청댐유역에서의 토양 Re에 대한 월별 토양침식성인자



〈Fig. 2-34〉 대청댐유역에서의 토양 Rs에 대한 월별 토양침식성인자



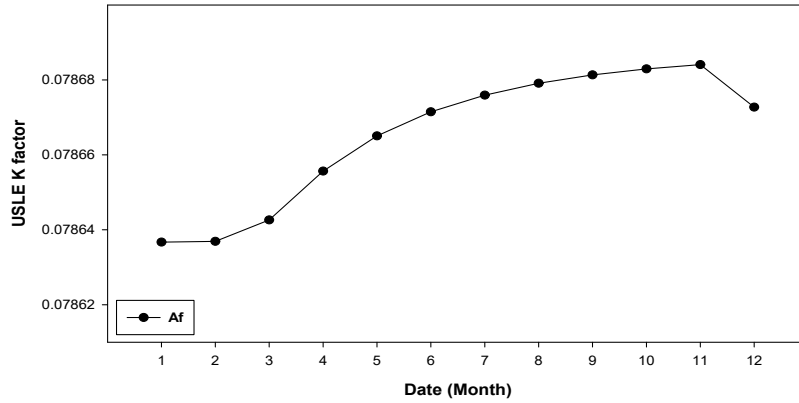
〈Fig. 2-35〉 대청댐유역에서의 토양 Rv에 대한 월별 토양침식성인자

(나) 임하댐유역에 대한 토양침식성인자의 산정

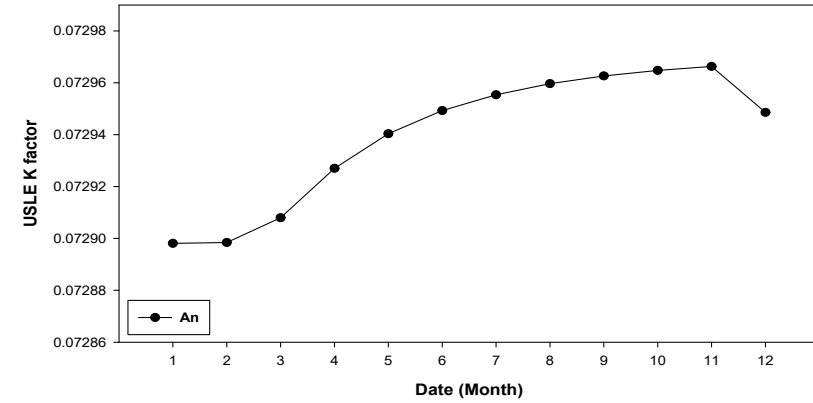
임하댐 유역은 Af, An, Ap, Ma, Mm, Ms, Mu, Mv, Ra, Rs의 10개의 토양종류를 가지고 있었으며, 대부분 여름철에 높은 토양침식성인자($\text{Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{cm}$)를 보였다<Fig. 2-36 ~ 2-45>. <Table 2-12>에서 보이는 바와 같이, Af는 연중 0.07864에서 0.07868의 변화폭을 보이면서 평균 0.07867을 보였으며, An은 연중 0.07290에서 0.07297의 변화폭을 보이면서 평균 0.07294를 보였다. Ap와 Ma는 연중 각각 0.40349에서 0.40398, 0.14605에서 0.14619의 변화폭을 보이면서 각각 0.40380과 0.14614의 평균을 보였다. Mm, Ms, Mv는 차례로 각각 0.30592에서 0.30634, 0.30690에서 0.30741, 0.36869에서 0.36927의 변화폭을 보이면서 0.30618, 0.30722, 0.36906의 평균을 보였다. Ra, Rs는 각각 0.14609에서 0.14619, 0.19282에서 0.19282의 변화폭을 보이면서, 0.14615, 0.19282의 평균을 보였다. 본 과업에서 산정된 토양침식성인자의 평균을 볼 때, Af, An, Ma, Ra의 경우, 기존의 개략토양도의 토양침식성인자보다 작은 값을 보였으며, Ap, Mm, Ms, Mu, Rs는 다소 큰 값을 보였다.

〈Table 2-12〉 임하댐유역에서의 월별 토양침식성인자(Mg · hr/MJ · cm)

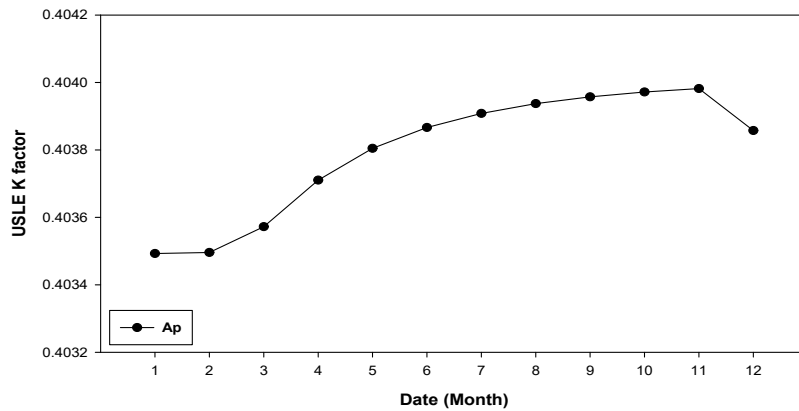
	토양도 기호									
	Af	An	Ap	Ma	Mm	Ms	Mu	Mv	Ra	Rs
1월	0.07864	0.07290	0.40349	0.14605	0.30592	0.30690	0.36869	0.30576	0.14609	0.19282
2월	0.07864	0.07290	0.40350	0.14605	0.30593	0.30690	0.36871	0.30576	0.14609	0.19282
3월	0.07864	0.07291	0.40357	0.14607	0.30599	0.30700	0.36883	0.30582	0.14610	0.19282
4월	0.07866	0.07293	0.40371	0.14611	0.30611	0.30714	0.36899	0.30591	0.14613	0.19282
5월	0.07867	0.07294	0.40380	0.14614	0.30619	0.30724	0.36908	0.30597	0.14615	0.19282
6월	0.07867	0.07295	0.40387	0.14616	0.30625	0.30730	0.36915	0.30601	0.14617	0.19282
7월	0.07868	0.07296	0.40391	0.14617	0.30628	0.30734	0.36919	0.30604	0.14617	0.19282
8월	0.07868	0.07296	0.40394	0.14618	0.30631	0.30736	0.36922	0.30606	0.14618	0.19282
9월	0.07868	0.07296	0.40396	0.14618	0.30632	0.30738	0.36924	0.30607	0.14619	0.19282
10월	0.07868	0.07296	0.40397	0.14619	0.30633	0.30740	0.36926	0.30608	0.14619	0.19282
11월	0.07868	0.07297	0.40398	0.14619	0.30634	0.30741	0.36927	0.30609	0.14619	0.19282
12월	0.07867	0.07295	0.40386	0.14616	0.30624	0.30728	0.36912	0.30600	0.14617	0.19282
min.	0.07864	0.07290	0.40349	0.14605	0.30592	0.30690	0.36869	0.30576	0.14609	0.19282
max.	0.07868	0.07297	0.40398	0.14619	0.30634	0.30741	0.36927	0.30609	0.14619	0.19282
avg.	0.07867	0.07294	0.40380	0.14614	0.30618	0.30722	0.36906	0.30596	0.14615	0.19282



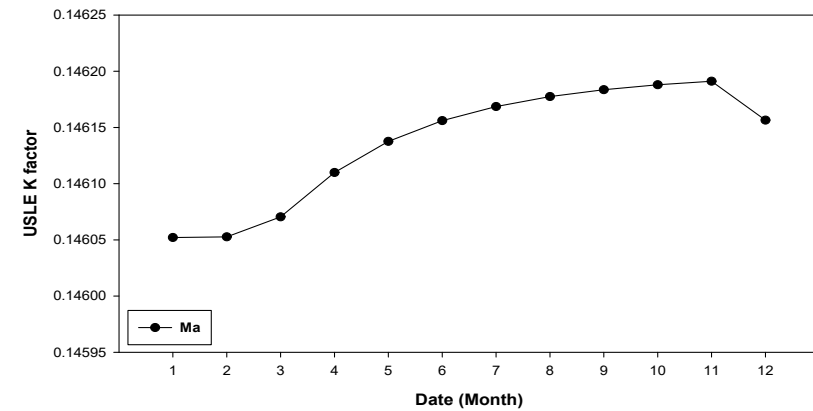
〈Fig. 2-36〉 임하댐유역에서의 토양 Af에 대한 월별 토양침식성인자



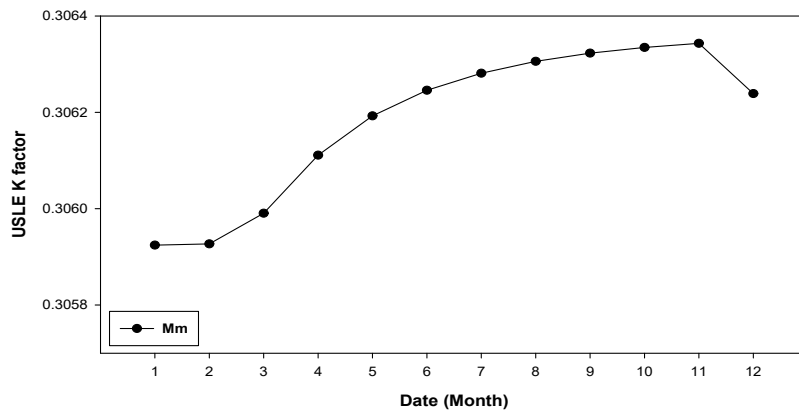
〈Fig. 2-37〉 임하댐유역에서의 토양 An에 대한 월별 토양침식성인자



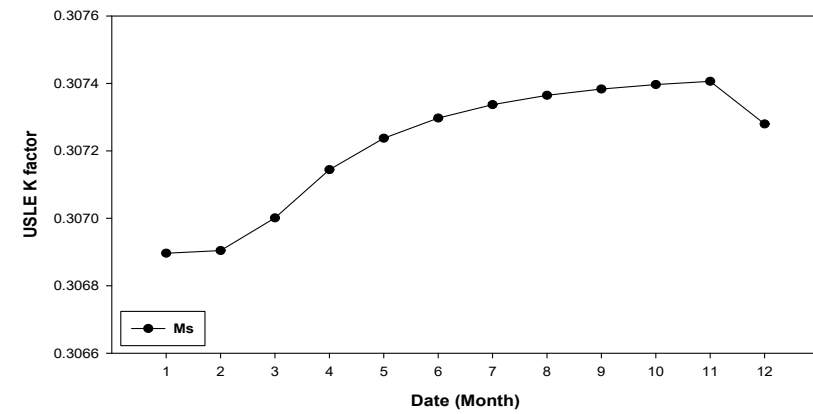
〈Fig. 2-38〉 임하댐유역에서의 토양 Ap에 대한 월별 토양침식성인자



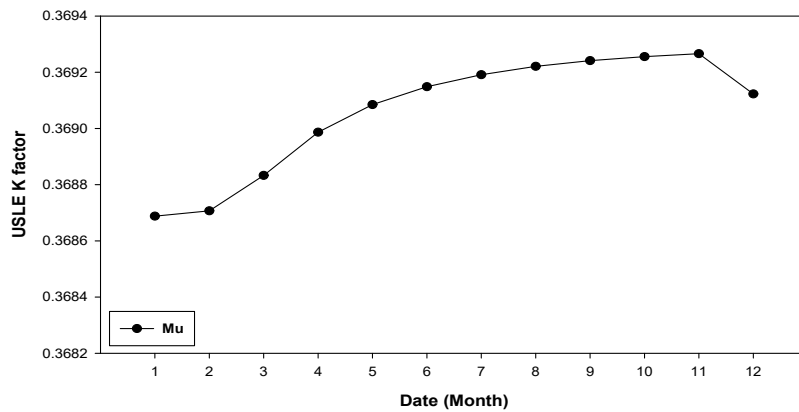
〈Fig. 2-39〉 임하댐유역에서의 토양 Ma에 대한 월별 토양침식성인자



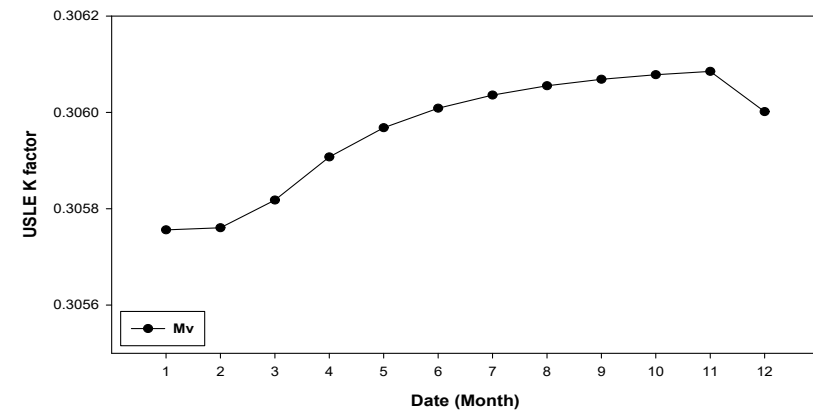
〈Fig. 2-40〉 임하댐유역에서의 토양 Mm에 대한 월별 토양침식성인자



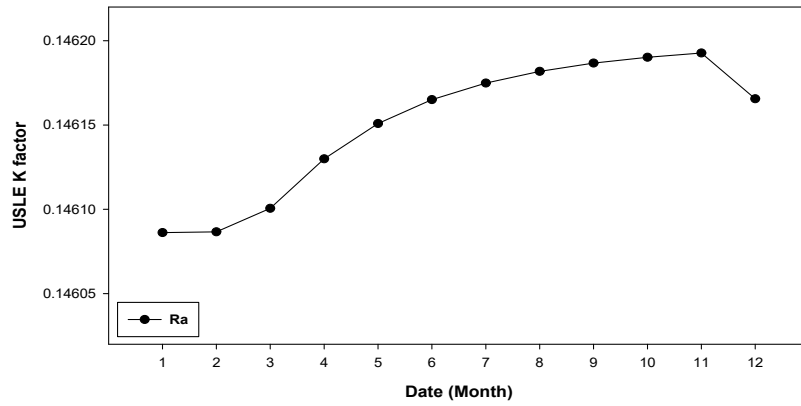
〈Fig. 2-41〉 임하댐유역에서의 토양 Ms에 대한 월별 토양침식성인자



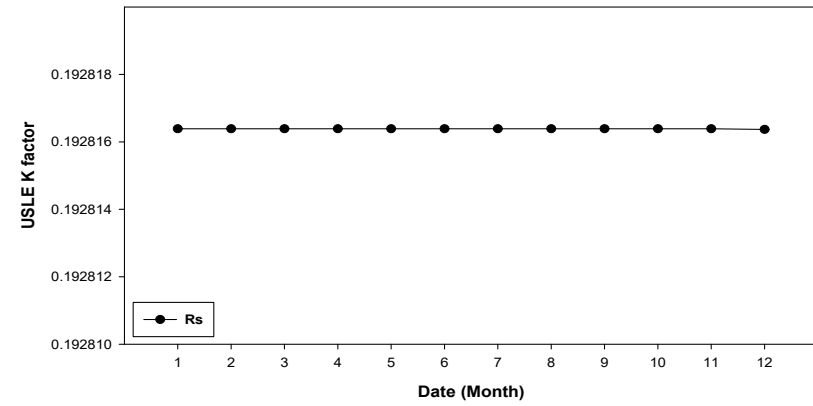
〈Fig. 2-42〉 임하댐유역에서의 토양 Mu에 대한 월별 토양침식성인자



〈Fig. 2-43〉 임하댐유역에서의 토양 Mv에 대한 월별 토양침식성인자



〈Fig. 2-44〉 임하댐유역에서의 토양 Ra에 대한 월별 토양침식성인자



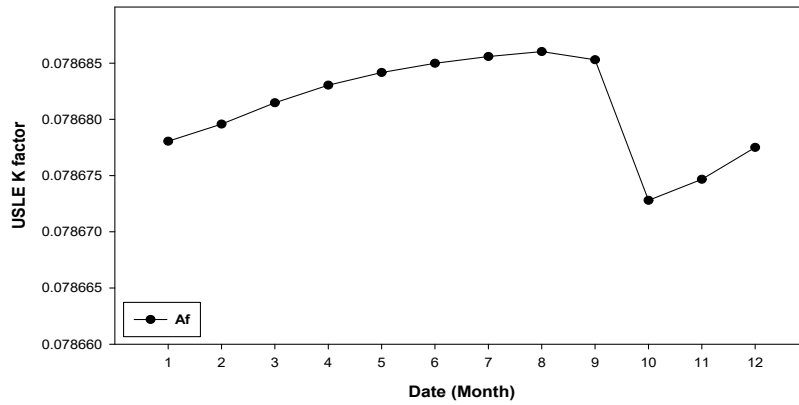
〈Fig. 2-45〉 임하댐유역에서의 토양 Rs에 대한 월별 토양침식성인자

(다) 주암댐유역에 대한 토양침식성인자의 산정

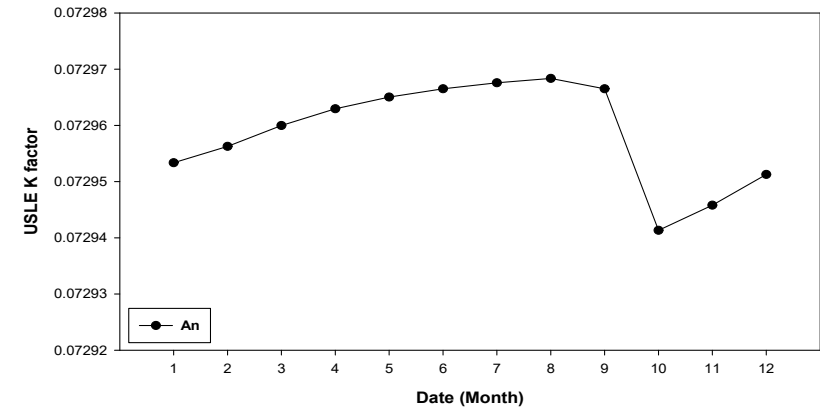
주암댐 유역은 Af, An, Ap, Ma, Mm, Ms, Mu, Mv, Ra, Rv의 10개의 토양종류를 가지고 있었으며, 대부분 여름철에 높은 토양침식성인자($\text{Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{cm}$)를 보였다<Fig. 2-46 ~ 2-55>. <Table 2-13>에서 보이는 바와 같이, Af는 연중 0.07867에서 0.07869의 변화폭을 보이면서 평균 0.07868을 보였으며, An은 연중 0.07294에서 0.07297의 변화폭을 보이면서 평균 0.07296을 보였다. Ap와 Ma는 연중 각각 0.40382에서 0.40400, 0.14615에서 0.14620의 변화폭을 보이면서 각각 0.40394와 0.14618의 평균을 보였다. Mm는 연중 0.14615에서 0.14620의 변화폭을 보이면서 평균 0.14618을 보였다. Ms, Mu, Mv는 차례로 각각 0.30723에서 0.30735, 0.36907에서 0.36921, 0.30598에서 0.30610의 변화폭을 보이면서 0.30735, 0.36921, 0.30606의 평균을 보였다. Ra, Rv는 각각 0.14616에서 0.14620, 0.31958에서 0.31974의 변화폭을 보이면서, 0.14618, 0.31969의 평균을 보였다. 본 과업에서 산정된 토양침식성인자의 평균을 볼 때, Af, An, Ma, Mm, Ra의 경우, 기존의 개략토양도의 토양침식성인자보다 작은 값을 보였으며, Ap, Ms, Mu, Mv는 다소 큰 값을 보였다.

〈Table 2-13〉 주암댐유역에서의 월별 토양침식성인자(Mg · hr/MJ · cm)

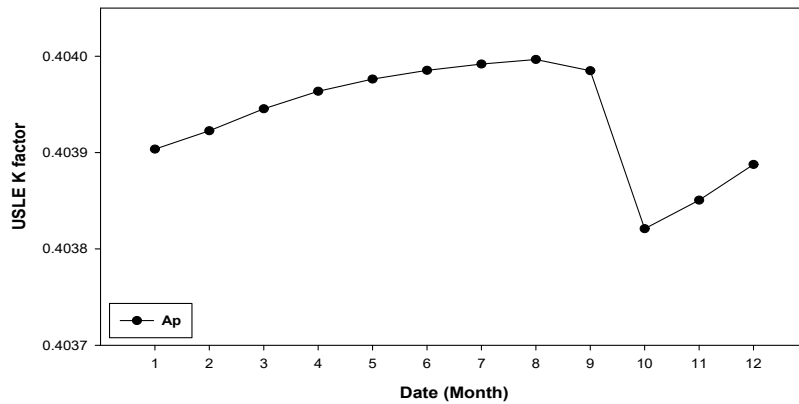
	토양도 기호									
	Af	An	Ap	Ma	Mm	Ms	Mu	Mv	Ra	Rv
1월	0.07868	0.07295	0.40390	0.14617	0.14617	0.30732	0.36918	0.30604	0.14618	0.31966
2월	0.07868	0.07296	0.40392	0.14618	0.14618	0.30734	0.36921	0.30605	0.14618	0.31967
3월	0.07868	0.07296	0.40395	0.14618	0.14618	0.30737	0.36923	0.30606	0.14619	0.31970
4월	0.07868	0.07296	0.40396	0.14619	0.14619	0.30739	0.36925	0.30607	0.14619	0.31971
5월	0.07868	0.07297	0.40398	0.14619	0.14619	0.30740	0.36926	0.30608	0.14619	0.31972
6월	0.07868	0.07297	0.40399	0.14619	0.14619	0.30741	0.36927	0.30609	0.14619	0.31973
7월	0.07869	0.07297	0.40399	0.14619	0.14619	0.30741	0.36928	0.30609	0.14620	0.31974
8월	0.07869	0.07297	0.40400	0.14620	0.14620	0.30742	0.36928	0.30610	0.14620	0.31974
9월	0.07869	0.07297	0.40398	0.14619	0.14619	0.30741	0.36927	0.30609	0.14619	0.31973
10월	0.07867	0.07294	0.40382	0.14615	0.14615	0.30723	0.36907	0.30598	0.14616	0.31958
11월	0.07867	0.07295	0.40385	0.14616	0.14616	0.30726	0.36911	0.30600	0.14617	0.31961
12월	0.07868	0.07295	0.40389	0.14617	0.14617	0.30730	0.36915	0.30602	0.14618	0.31964
min.	0.07867	0.07294	0.40382	0.14615	0.14615	0.30723	0.36907	0.30598	0.14616	0.31958
max.	0.07869	0.07297	0.40400	0.14620	0.14620	0.30742	0.36928	0.30610	0.14620	0.31974
avg.	0.07868	0.07296	0.40394	0.14618	0.14618	0.30735	0.36921	0.30606	0.14618	0.31969



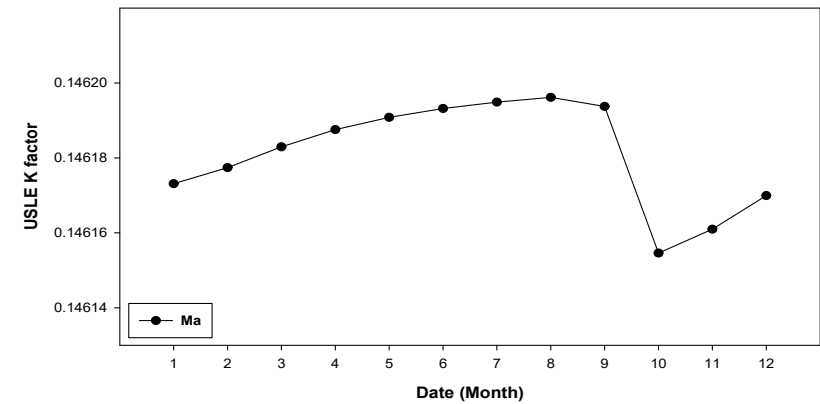
〈Fig. 2-46〉 주암댐유역에서의 토양 Af에 대한 월별 토양침식성인자



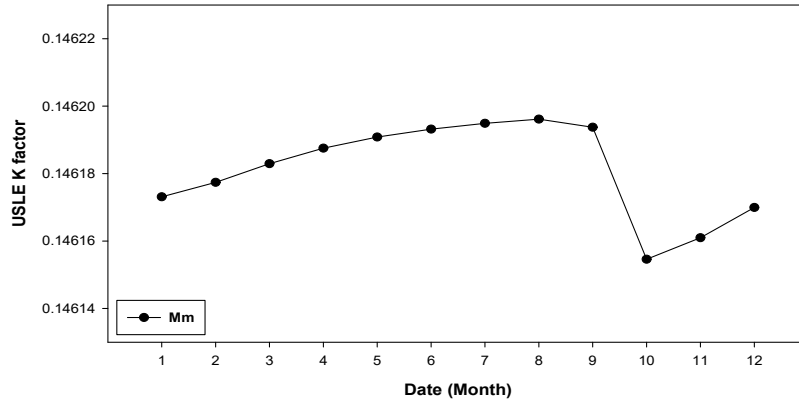
〈Fig. 2-47〉 주암댐유역에서의 토양 An에 대한 월별 토양침식성인자



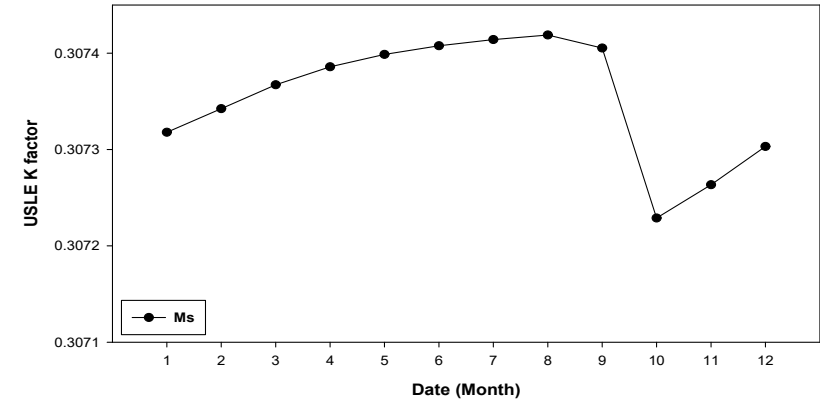
〈Fig. 2-48〉 주암댐유역에서의 토양 Ap에 대한 월별 토양침식성인자



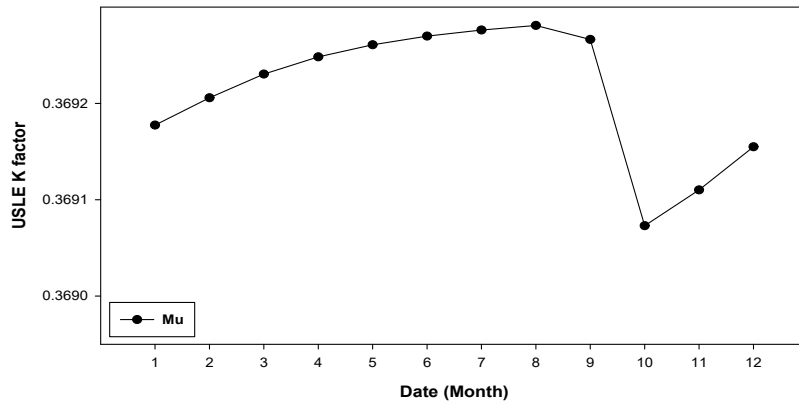
〈Fig. 2-49〉 주암댐유역에서의 토양 Ma에 대한 월별 토양침식성인자



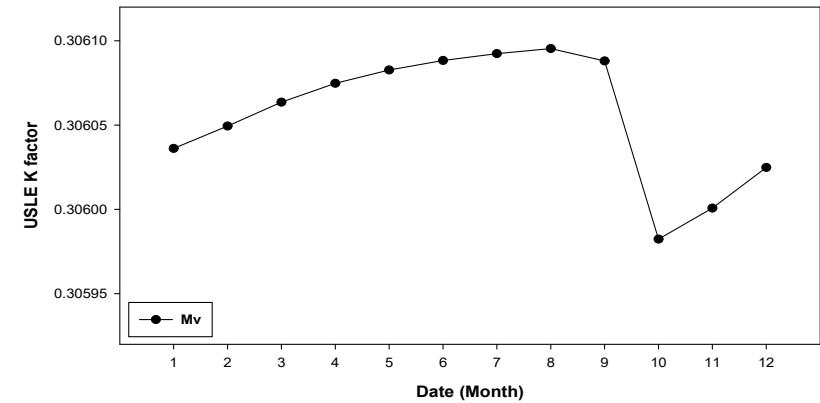
〈Fig. 2-50〉 주암담 유역에서의 토양 Mm에 대한 월별 토양침식성인자



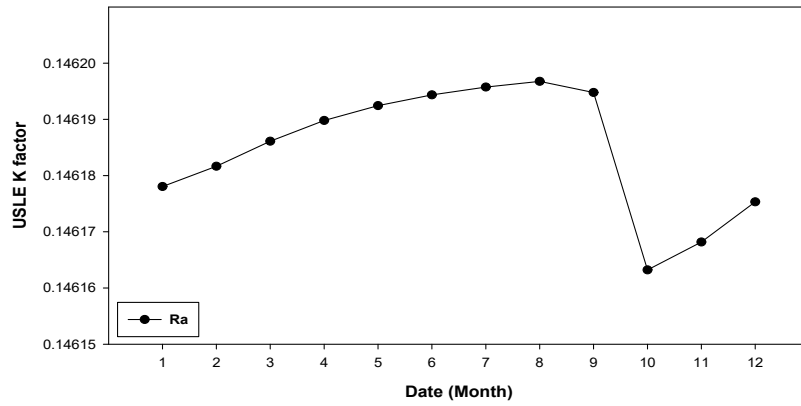
〈Fig. 2-51〉 주암담유역에서의 토양 Ms에 대한 월별 토양침식성인자



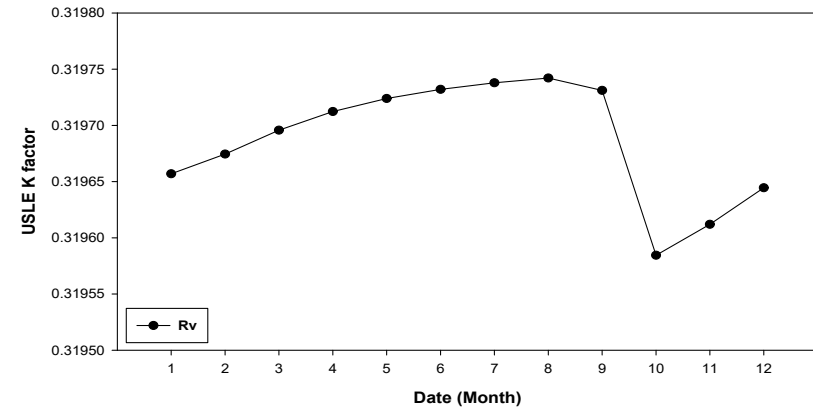
〈Fig. 2-52〉 주암담유역에서의 토양 Mu에 대한 월별 토양침식성인자



〈Fig. 2-53〉 주암담유역에서의 토양 Ms에 대한 월별 토양침식성인자



〈Fig. 2-54〉 주암댐유역에서의 토양 Ra에 대한 월별 토양침식성인자



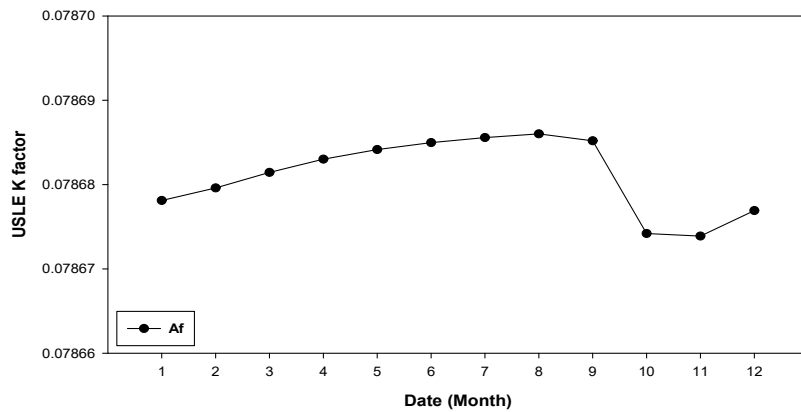
〈Fig. 2-55〉 주암댐유역에서의 토양 Rv에 대한 월별 토양침식성인자

(라) 소양강댐유역에 대한 토양침식성인자의 산정

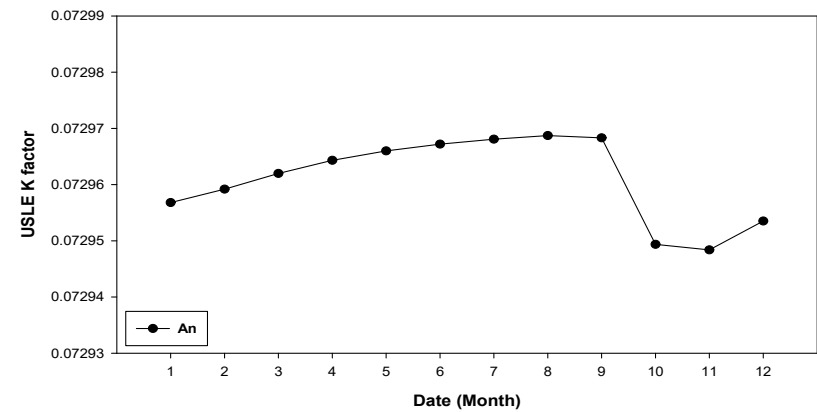
소양강댐 유역은 Af, An, Ma, Mm, Mu, Ra, Re의 7개의 토양종류를 가지고 있었으며, 대부분 여름철에 높은 토양침식성인자($\text{Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{cm}$)를 보였다<Fig. 2-56 ~ 2-62>. <Table 2-14>에서 보이는 바와 같이, Af는 연중 0.07867에서 0.07869의 변화폭을 보이면서 평균 0.07868을 보였으며, An은 연중 0.07295에서 0.07297의 변화폭을 보이면서 평균 0.07296을 보였다. Ma는 연중 0.14646에서 0.14620의 변화폭을 보이면서 0.14618의 평균을 보였다. Mm은 0.30625에서 0.30636의 변화폭을 보이면서 0.30631의 평균을 보였다. Ra, Re는 각각 0.14617에서 0.14620, 0.14617에서 0.14620의 변화폭을 보이면서, 0.14619와 0.14618의 평균을 보였다. 본 과업에서 산정된 토양침식성인자의 평균을 볼 때, Af, An, Ma, Ra, Re의 경우, 기존의 개략토양도의 토양침식성인자보다 작은 값을 보였으며, Mm, Mu, Mv는 다소 큰 값을 보였다.

〈Table 2-14〉 소양강댐유역에서의 월별 토양침식성인자($\text{Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{cm}$)

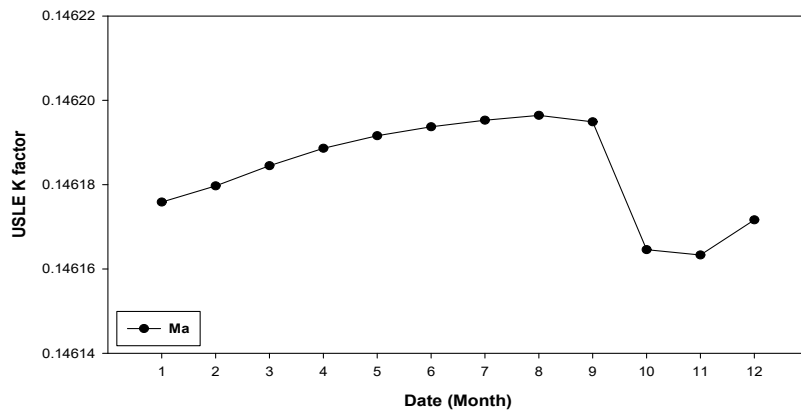
	토양도 기호						
	Af	An	Ma	Mm	Mu	Ra	Re
1월	0.07868	0.07296	0.14618	0.30629	0.36920	0.14618	0.14618
2월	0.07868	0.07296	0.14618	0.30631	0.36922	0.14618	0.14618
3월	0.07868	0.07296	0.14618	0.30632	0.36924	0.14619	0.14619
4월	0.07868	0.07296	0.14619	0.30633	0.36925	0.14619	0.14619
5월	0.07868	0.07297	0.14619	0.30634	0.36927	0.14619	0.14619
6월	0.07868	0.07297	0.14619	0.30635	0.36927	0.14619	0.14619
7월	0.07869	0.07297	0.14620	0.30635	0.36928	0.14620	0.14620
8월	0.07869	0.07297	0.14620	0.30636	0.36928	0.14620	0.14620
9월	0.07869	0.07297	0.14619	0.30635	0.36928	0.14620	0.14620
10월	0.07867	0.07295	0.14616	0.30625	0.36913	0.14617	0.14617
11월	0.07867	0.07295	0.14616	0.30625	0.36913	0.14617	0.14617
12월	0.07868	0.07295	0.14617	0.30627	0.36917	0.14618	0.14617
min.	0.07867	0.07295	0.14616	0.30625	0.36913	0.14617	0.14617
max.	0.07869	0.07297	0.14620	0.30636	0.36928	0.14620	0.14620
avg.	0.07868	0.07296	0.14618	0.30631	0.36923	0.14619	0.14618



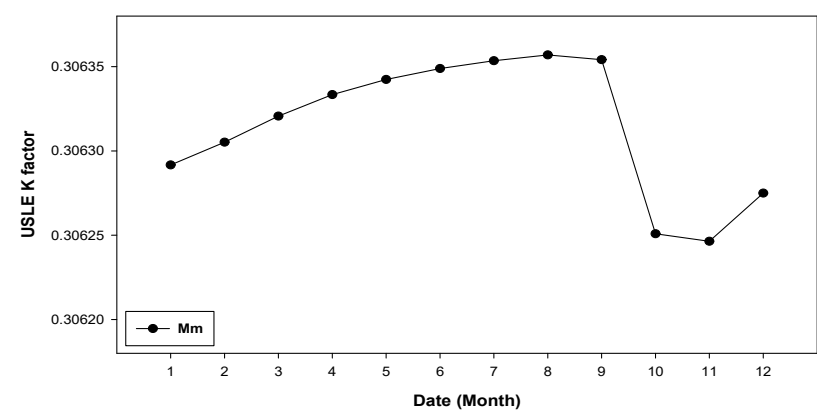
〈Fig. 2-56〉 소양강댐유역에서의 토양 Af에 대한 월별 토양침식성인자



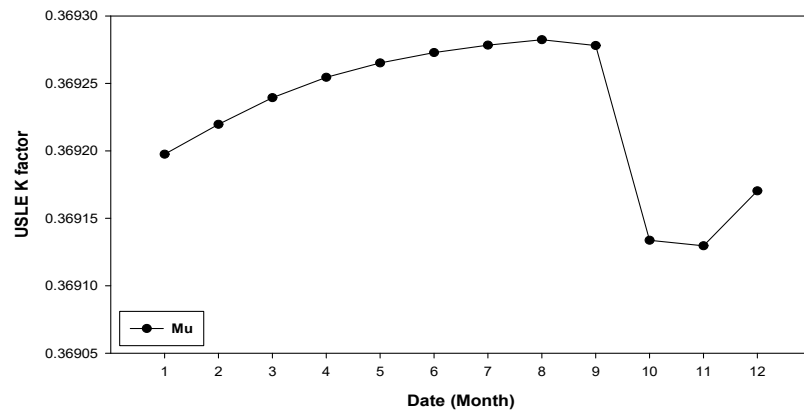
〈Fig. 2-57〉 소양강댐 유역에서의 토양 An에 대한 월별 토양침식성인자



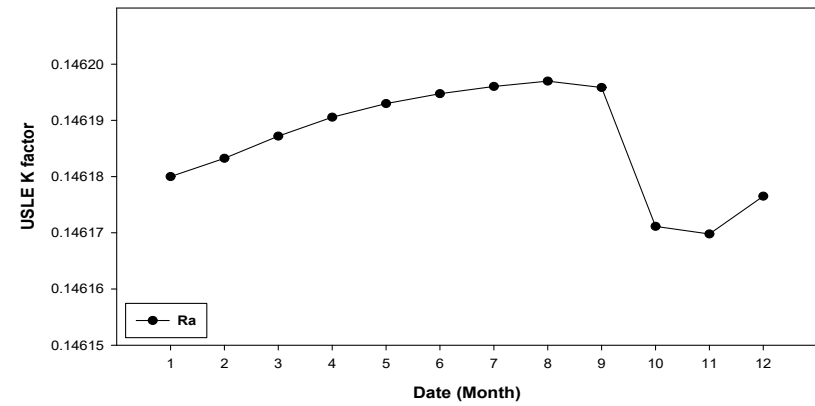
〈Fig. 2-58〉 소양강댐 유역에서의 토양 Ma에 대한 월별 토양침식성인자



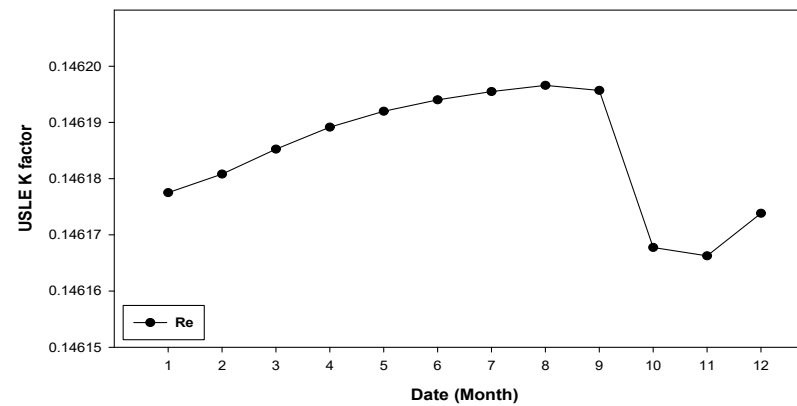
〈Fig. 2-59〉 소양강댐 유역에서의 토양 Mm에 대한 월별 토양침식성인자



〈Fig. 2-60〉 소양강댐유역에서의 토양 Mu에 대한 월별 토양침식성인자



〈Fig. 2-61〉 소양강댐유역에서의 토양 Ra에 대한 월별 토양침식성인자



〈Fig. 2-62〉 소양강댐유역에서의 토양 Re에 대한 월별 토양침식성인자

(마) 기상자료와 토양침식성인자의 관계 분석

본 과업에서는 토양침식성인자의 산정에 계절적인 영향으로 변화할 수 있는 유기물함량을 고려하였다. 다시 말해, 유역의 강우나 온도와 같은 기상 조건에 따라 토양침식성인자가 영향을 받기 때문에 이에 대한 상관 분석을 수행하였다. 각 유역의 2010년에서 2014년까지의 월평균 기온과 평균 강수량에 의해 토양침식성인자를 추정할 수 있는 회귀식을 유도하기 위해서, 회귀분석 프로그램인 CurveExpert(Hyams, 2014)를 이용하였다. 월평균 기온(T_{month})과 월평균 강수량(P_{month})과 5개의 계수(a, b, c, d, e)를 가지는 회귀식으로 각 유역에서 토양침식성인자를 산정할 수 있는 회귀식을 유도하였다<Table 2-15 ~ 2-18>.

$$\langle \text{식-19} \rangle \quad K = \frac{a + b \times T_{month} + c \times P_{month}}{1 + d \times T_{month} + e \times P_{month}}$$

각 유역에 대한 회귀식을 검정하기 위해서, SWAT 모형에 의해 결정된 월별 토양침식성인자와 회귀식에 의해 산정된 토양침식성인자와의 결정계수(R^2)를 이용하였다. <Table 2-19>에서 보이는 바와 같이, 대청댐 유역의 Rs와 임하댐 유역의 Ma와 Rs에 대한 결정계수를 제외하고 회귀식에 의한 토양침식성인자가 SWAT 모형에 의해 산정된 토양침식성인자에 대해 0.7이상의 값을 보였다. 따라서 월평균 온도와 강수량에 의해 토양침식성인자를 산정할 수 있는 회귀식의 사용이 가능할 것으로 판단된다.

<Table 2-15> 대청댐 유역에 대한 회귀식 계수

토양부호	Parameters				
	a	b	c	d	e
Af	-1.96E-02	-1.08E+01	1.96E+01	-1.38E+02	2.49E+02
An	-2.13E+00	-2.13E+02	2.52E+02	-2.92E+03	3.46E+03
Ap	4.04E-01	-5.33E-03	-3.19E-02	-1.32E-02	-7.89E-02
Ma	-2.73E+00	-2.53E+02	3.72E+02	-1.73E+03	2.55E+03
Mm	-2.73E+00	-2.53E+02	3.72E+02	-1.73E+03	2.55E+03
Ms	-1.26E+01	-9.36E+02	9.27E+02	-3.04E+03	3.02E+03
Mu	-1.69E-01	-4.11E+01	4.05E+01	-1.11E+02	1.10E+02
Mv	5.80E-02	-2.27E+01	2.66E+01	-7.40E+01	8.68E+01
Ra	-4.47E-01	-6.39E+01	9.58E+01	-4.37E+02	6.55E+02
Re	-3.77E+00	-3.69E+02	5.34E+02	-2.52E+03	3.65E+03
Rs	1.93E-01	-1.56E+00	7.94E+00	-8.07E+00	4.12E+01
Rv	-1.00E+01	-8.35E+02	9.07E+02	-2.61E+03	2.84E+03

〈Table 2-16〉 소양강댐 유역에 대한 회귀식 계수

토양부호	Parameters				
	a	b	c	d	e
Af	-8.46E+00	-2.67E+03	1.07E+03	-2.84E+04	1.14E+04
An	-2.83E+00	-7.32E+02	2.99E+02	-8.23E+03	3.36E+03
Ma	-1.79E+01	-6.08E+03	2.54E+03	-3.87E+04	1.62E+04
Mm	3.05E-01	-4.92E-02	1.13E-02	-1.61E-01	3.70E-02
Mu	5.64E-02	-8.63E+01	3.81E+01	-2.37E+02	1.05E+02
Ra	-8.53E-04	-5.92E+01	2.46E+01	-3.78E+02	1.57E+02
Re	-2.29E+00	-8.53E+02	3.57E+02	-5.44E+03	2.28E+03

〈Table 2-17〉 임하댐 유역에 대한 회귀식 계수

토양부호	Parameters				
	a	b	c	d	e
Af	7.87E-02	1.10E-02	-2.22E-03	1.40E-01	-2.82E-02
An	7.29E-02	1.07E-02	-1.75E-03	1.46E-01	-2.39E-02
Ap	4.04E-01	4.65E-02	-8.05E-03	1.15E-01	-1.99E-02
Ma	1.46E-01	2.65E-02	-3.41E-03	1.81E-01	-2.33E-02
Mm	3.06E-01	4.27E-02	-8.60E-03	1.39E-01	-2.81E-02
Ms	3.07E-01	4.31E-02	-8.63E-03	1.40E-01	-2.81E-02
Mu	3.69E-01	5.24E-02	-1.04E-02	1.42E-01	-2.82E-02
Mv	3.06E-01	4.29E-02	-8.60E-03	1.40E-01	-2.81E-02
Ra	1.46E-01	2.04E-02	-4.11E-03	1.39E-01	-2.81E-02
Rs	1.93E-01	2.47E-01	2.20E-01	1.28E+00	1.14E+00

〈Table 2-18〉 주암댐 유역에 대한 회귀식 계수

토양부호	Parameters				
	a	b	c	d	e
Af	7.86E-02	-1.28E-02	9.93E-03	-1.63E-01	1.26E-01
An	7.29E-02	-1.52E-02	1.09E-02	-2.08E-01	1.50E-01
Ap	-1.28E-01	-4.75E+01	5.19E+01	-1.18E+02	1.28E+02
Ma	1.46E-01	-2.85E-02	2.25E-02	-1.95E-01	1.54E-01
Mm	1.46E-01	-2.85E-02	2.25E-02	-1.95E-01	1.54E-01
Ms	9.08E-04	-2.10E+01	2.14E+01	-6.82E+01	6.97E+01
Mu	-4.89E-01	-6.20E+01	6.69E+01	-1.68E+02	1.81E+02
Mv	2.54E-01	-5.19E+00	5.87E+00	-1.70E+01	1.92E+01
Ra	1.19E-01	-3.85E+00	4.69E+00	-2.63E+01	3.21E+01
Rv	-9.49E-01	-1.04E+02	1.09E+02	-3.25E+02	3.42E+02

〈Table 2-19〉 유역별 회귀식에 의한 토양침식성인자 평가

토양부호	결정계수			
	대청댐	소양강댐	임하댐	주암댐
Af	0.90	0.76	0.83	0.84
An	0.92	0.76	0.73	0.88
Ap	0.92	-	0.75	0.87
Ma	0.91	0.77	0.67	0.86
Mm	0.91	0.77	0.86	0.86
Ms	0.91	-	0.87	0.87
Mu	0.89	0.74	0.88	0.85
Mv	0.90	-	0.86	0.86
Ra	0.91	0.77	0.84	0.86
Re	0.91	0.77	-	-
Rs	0.47	-	0.38	-
Rv	0.92	-	-	0.88

(바) 대청댐 유역에 대한 지표피복인자의 산정

대청댐 유역에 대해서 25개 종류의 작물을 조사하였으며, 이 중 딸기가 축성재배와 초축성재배, 감자가 봄재배와 여름재배, 배추가 봄재배와 가을재배, 브로콜리가 여름재배와 가을재배, 상추가 여름재배와 가을재배와 겨울재배, 양배추가 봄재배와 가을재배와 겨울재배, 당근이 봄재배와 가을재배, 녹두가 봄녹두와 그루녹두로 구분되면서, 총 35개 작물에 대한 데이터베이스를 구축하였다. SWAT 모형에 의해서 일별 지표피복인자를 산정한 후, 이를 모의기간 동안 같은 날짜에 대해서 평균을 구한 뒤에 다시 각 월에 대한 평균을 구하였다. 다시 말해, 1월 1일부터 1월 31일까지의 평균을 구한 뒤, 2000년부터 2014년까지 1월에 대한 평균이 1월에 대한 해당 작물에 대한 지표피복인자로 정의되었다. 그리고 2월 1일부터 2월 28일(윤년의 경우 29일)까지의 평균을 구한 뒤, 2000년부터 2014년까지 2월에 대한 평균이 2월에 대한 해당 작물에 대한 지표피복인자로 정의되었다.

각 작물에 대해서 월별 평균 지표피복인자로 볼 때, 배추(봄재배)가 0.7943으로 가장 큰 값을 보였고, 사탕수수가 0.1581로 가장 작은 값을 보였다(부록 1. 표1).

(사) 임하댐 유역에 대한 지표피복인자의 산정

임하댐 유역에 대해서 27개 종류의 작물을 조사하였으며, 이 중에서 시금치가 봄재배와 여름재배와 가을재배로, 딸기가 축성재배와 초축성재배로, 감자가 봄재배와 여름재배로, 배추가 봄재배와 가을재배로, 양배추가 봄재배와 가을재배와 겨울재배로, 당근이 봄재배와 가을재배로, 녹두가 봄녹두와 그루녹두로 구분되면서, 총 40개 작물에 대한 데이터베이스를 구축하였다. 대청댐 유역과 동일하게 SWAT 모형에 의해서 일별 지표피복인자가 산정이 되면, 이를 모의 기간 동안 같은 날짜에 대해서 평균을 구한 뒤에 다시 각 월에 대한 평균을 구하였다.

각 작물에 대해서 월별 평균 지표피복인자로 볼 때, 배추(봄재배)가 0.7993으로 가장 큰 값을 보였고, 사탕수수가 0.1517로 가장 작은 값을 보였다(부록 1. 표2).

(아) 주암댐 유역에 대한 지표피복인자의 산정

주암댐 유역은 29개 종류의 작물을 조사하였으며, 이 중에서 시금치가 봄재배와 가을재배로, 딸기가 축성재배와 초축성재배로, 감자가 봄재배와 여름재배로, 브로콜리가 여름재배와 겨울재배로, 양배추가 봄재배와 가을재배와 겨울재배로, 당근이 봄재배와 가을재배로, 녹두가 봄녹두와 그루녹두로 구분되면서, 총 41개 작물에 대한 데이터베이스를 구축하였다. SWAT 모형에 의한 일별 및 월별 지표피복인자는 대청댐 유역과 임하댐 유역 산정방법과 동일하게 산정하였다.

각 작물에 대해서 월별 평균 지표피복인자로 볼 때, 시금치(봄재배)가 0.7992으로 가장 큰 값을 보였고, 사탕수수가 0.1999로 가장 작은 값을 보였다(부록1. 표3).

(자) 소양강댐 유역에 대한 지표피복인자의 산정

소양강댐 유역도 앞의 3개 유역과 동일한 방법으로 지표피복인자를 산정하였으며, 28개 종류의 작물에 대하여 조사하였다. 작물 중 오이가 조숙재배와 익제재배로, 감자가 봄재배와 여름재배로, 배추가 봄재배와 가을재배로, 브로콜리가 여름재배와 가을재배로, 상추가 여름재배와 가을재배와 겨울재배로, 양배추가 봄재배와 가을재배와 겨울재배로, 당근이 봄재배와 가을재배로, 녹두가 봄녹두와 그루녹두로 구분되면서, 총 39개 작물에 대한 데이터베이스를 구축하였다. 각 작물에 대해서 월별 평균 지표피복인자로 볼 때, 오이(조숙재배)가 0.7998로 가장 큰 값을 보였고, 사탕수수가 0.2476으로 가장 작은 값을 보였다(부록1. 표4).

(3) 경사장·경사도인자(LS)의 산정

환경부 “표토의 침식현황 조사에 관한 고시”에 따르면 토양유실량 산정방법으로 GIS를 활용한 USLE모형을 사용하도록 명시되어 있다. GIS를 활용하는 것에 있어 모의 결과에 정확성은 모형 입력자료가 유역 내의 현황을 얼마나 잘 표현하느냐에 따라 차이가 나타난다(Chaplot, 2005). 특히 경사장·경사도 인자(LS)는 DEM(Digital Elevation Model)의 해상도에 따라 큰 영향을 받으므로, 경사장·경사도 인자 산정 시 DEM의 해상도에 따른 불확실성이 발생하게 된다. 하지만 적용되는 DEM의 해상도가 일정하지 않아 공간자료 해상도가 토양유실량에 미치는 영향을 파악하지 못하는 경우가 발생하게 되는 문제점이 발생하므로 사용되는 DEM의 해상도에 대한 정량화가 필요하다.

Kang and Kim(2011)의 연구에 따르면 지형자료를 사용한 지반 분류 시 DEM 해상도 선택에 따라 지형의 굴곡과 연약지반의 구분이 차이가 있다고 한다. 따라서 DEM 자료는 해상도에 따라 민감하게 작용한다는 사실을 알 수 있다. 하지만 국내에서 진행된 연구들을 확인하면 사용되는 DEM의 해상도는 10m, 30m 등 각기 다른 해상도의 DEM을 적용하는 것으로 확인되었다. 특히 ‘표토침식조사 및 보전 종합대책연구’에서는 고화질의 해상도를 사용하도록 권장하는 환경부의 예비조사지침에 따라 DEM 해상도 10m를 사용하여 경사장·경사도 인자를 산정하였지만, 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서는 30m 해상도의 DEM을 제공하여 관련기관에서 제공해주는 자료에 대한 불확실성이 발생한다.

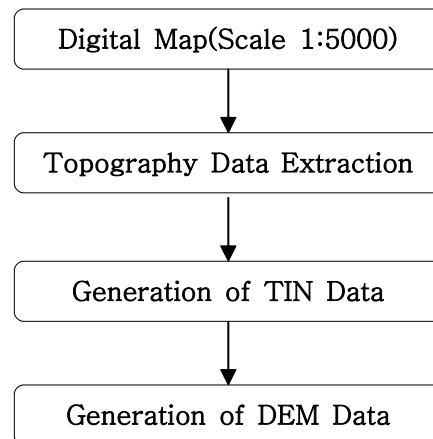
이에 본 연구에서는 보다 정확한 토양유실량 산정을 위해 해상도 5m의 고화질 해상도 DEM을 기준으로 산정한 전국단위 경사장·경사도 인자와 10m, 30m, 50m, 100m 등 각기 다른 해상도를 가지는 DEM을 사용하여 추출한 경사장·경사도 인자의 비교분석을 통해 USLE모형의 경사장·경사도 인자 산정 시 필요한 최소한의 DEM의 해상도를 제시함으로써 한국형 토양유실 공식의 경사장·경사도 인자 적용방안을 수립하려 한다.

(가) DEM(Digital Elevation Map)

① DEM의 생성

Park et al.(2007)은 DEM의 생성을 위한 과정을 <Fig. 2-63>과 같이 제시하였다. 이에 따라 본 연구에서는 국토지리정보원(National Geographic Information Institute, NGII)에서 제공하는 축적 1:5,000의 수치지형도와 수치지도활용소프트웨어를 사용하여 GIS에 적용 가능한 데이터를 추출하였다. 그리고 추출한 지형 데이터를 활용하여 TIN data를 생성한 후 이를 해상도 5m DEM으로 변환하였다. 또한 변환된 해상도 5m DEM을 기반으로 Arc GIS의

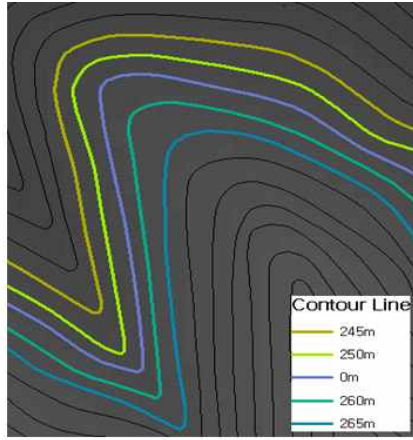
Resample 기능을 사용하여 10m, 20m, 30m, 50m, 70m, 100m 등의 해상도를 가지는 DEM을 생성하였다. DEM의 Resample 과정에서 사용된 방법은 Bilinear interpolation을 사용하였다 (Lim et al., 2010).



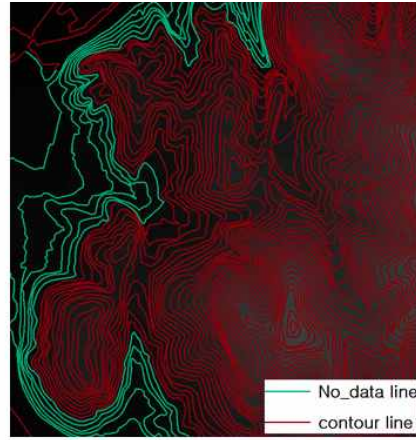
<Fig. 2-63> DEM 생성 구조

② 생성된 DEM의 검수

본 연구에서 해상도 별 DEM을 제작하기 위해 사용한 1:5,000 수치지형도(국토지리정보원)의 지형 데이터에서는 다음과 같은 오류가 발견되었다. 1)우선적으로 지형 데이터에서 등고선의 수치가 입력되지 않은 자료들이 있었으며<Fig. 2-64>, 2)등고선의 수치가 연속적이지 않은 오류가 있었다<Fig. 2-65>. 등고선의 수치가 입력되지 않은 오류를 해결하기 위해 등고선의 값을 수동으로 입력하였다. 또한 궁고선의 수치가 불연속적인 값을 가지고 있는 오류의 경우 우선적으로 DEM을 생성한 뒤 오류가 발생한 도엽을 육안으로 식별하여 해당 도엽 번호의 등고선 자료를 수정하였다.

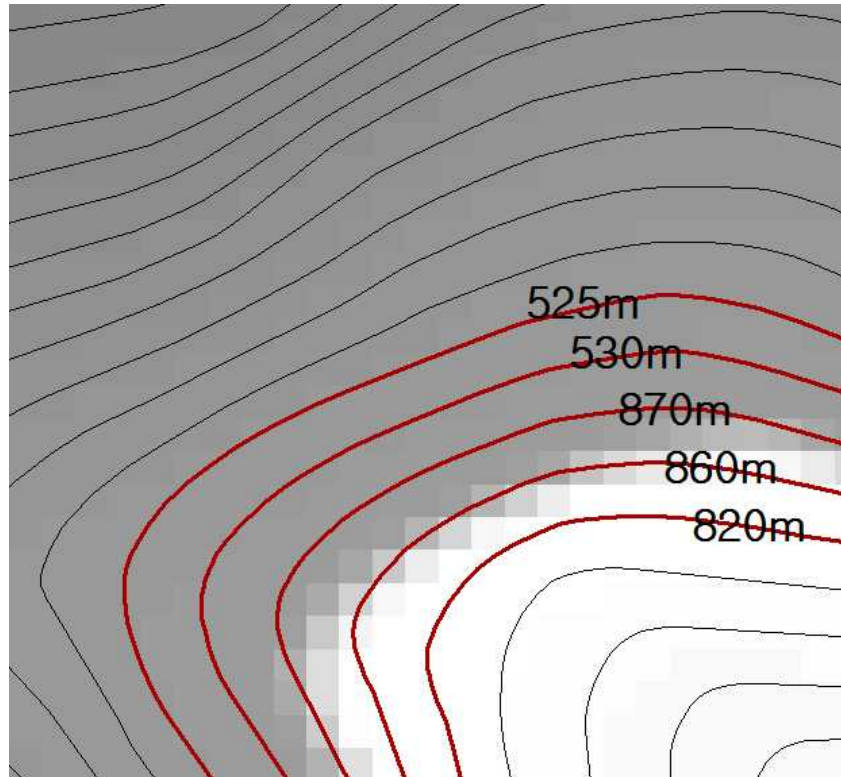


(a) No data in Contour - Index No. 36711064(NGII)



(b) No data in multiple contour - Index No. 36710012 (NGII)

〈Fig. 2-64〉 입력되지 않은 등고선 수치의 오류



〈Fig. 2-65〉 연속적이지 않은 등고선 수치의 오류
(Index No. 378XXXXX, NGII)

③ 토양유실량 산정

토양유실량을 산정하는데 있어 사용된 방법은 USLE 모형을 사용하였다. 모형을 구성하는 다섯인자 중 경사장·경사도 인자를 제외한 나머지 인자들(R, K, C, P factor)의 관측 값은 DEM의 해상도와 상관없이 동일한 값을 적용하여 토양유실량을 산정하였다. USLE 모형의 인자 중 강우인자(R), 토양침식성인자(K), 작물피복인자(C), 보전관리인자(P)의 경우 Jang et

al.(2011)이 10m 해상도의 DEM을 사용하여 산정한 결과를 사용하였으며, 경사장·경사도 인자의 경우 <식 20>을 GIS 내에서 사용하기 위해 Parveen and Kumar(2012)가 제안한 <식 21> 활용하여 산정하였다.

$$\text{<식-20> } LS = \left(\frac{A}{22.13}\right)^{0.6} \times \left(\frac{\sin\theta}{0.0896}\right)^{1.3}$$

여기서, A : 면적(m^2)

$$\theta : \text{경사각}(\circ), = \arctan\left(\frac{\text{고차}}{\text{평거리}}\right)$$

$$\text{<식-21> } LS = Pow[(Flowaccumulation) \times Resolution / 22.13, 0.6] \\ \times Pow[\sin(Slope of DEM) \times 0.01745 / 0.0896, 1.3]$$

여기서, $Pow(x, y)$: x의 값에 y의 값을 지수로 취함

Flowaccumulation : 한 Cell에 다른 Cell로부터 물이 모이는 양

Resolution : 셀 사이즈

Slope of DEM : DEM의 경사도($^\circ$)

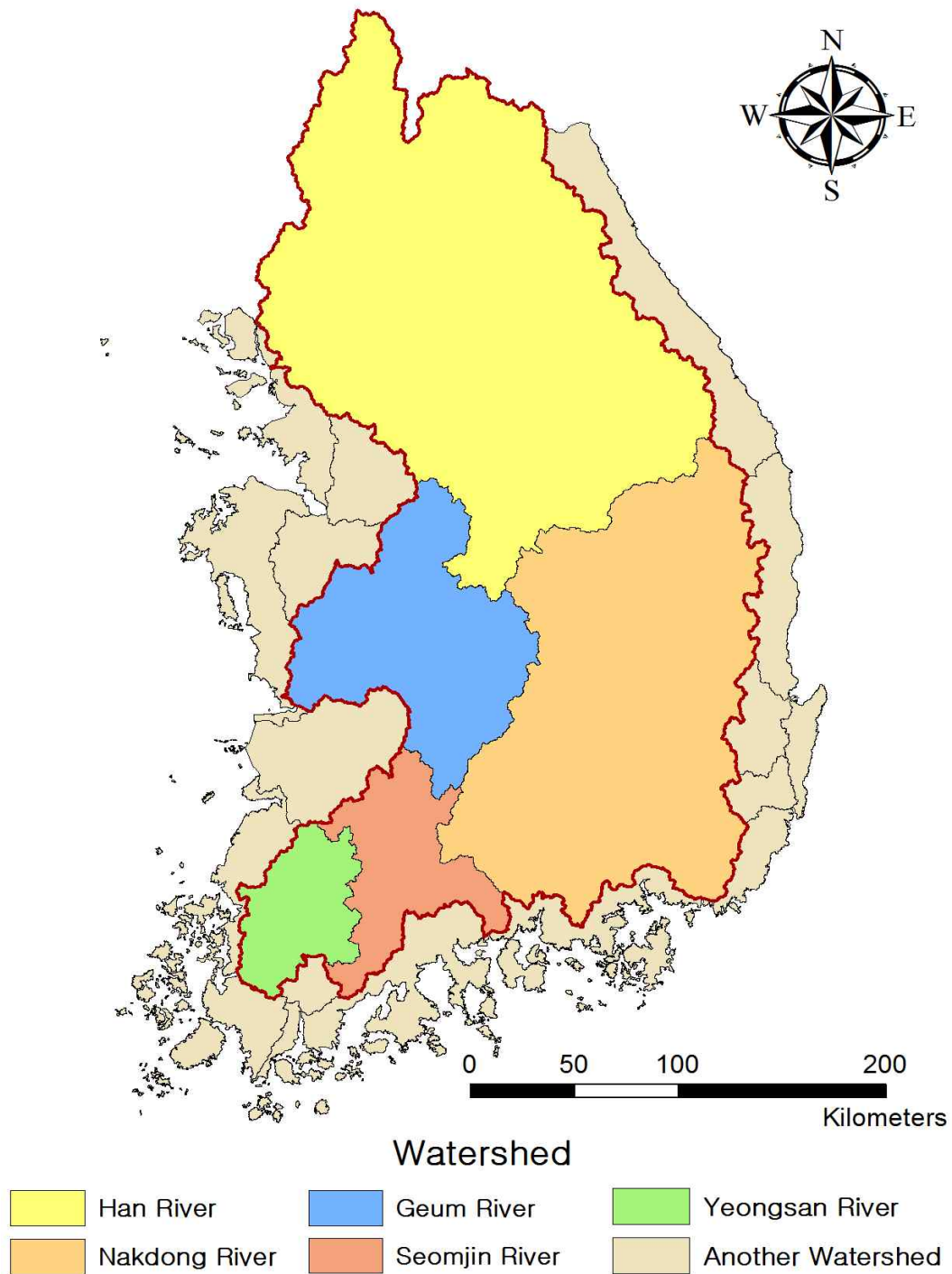
(나) 분석방법

모든 GIS를 활용한 모형에서 입력자료가 유역 내 환경을 얼마나 잘 표현하는 것에 따라 모의 결과의 정확성이 달라진다. 즉, 고해상도의 DEM을 사용하여 경사장·경사도 인자를 산정할수록 보다 정확한 토양유실량을 산정할 수 있다. 이에 본 연구에서는 주요 대권역 수계(한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강)<Fig. 2-66>에 대해 5m, 10m, 20m, 30m, 50m, 70m, 100m 해상도의 DEM을 사용하여 경사장·경사도 인자를 산정하여 비교해 보았다. 또한 각 해상도 별 산정된 경사장·경사도 인자를 사용하여 토양유실량을 산정 시 정확한 경사장·경사도 인자를 산정하는데 필요한 최적의 해상도를 제시하였다.

본 연구에서는 한국형 토양유실 공식의 경사장·경사도 인자 적용방안을 수립하기 위해 전국 주요 수계에 가용할 수 있는 최대해상도인 5m DEM을 사용하여 산정한 경사장·경사도 인자와 다양한 해상도의 DEM을 통해 산정된 경사장·경사도 인자의 최대값(MAX), 평균값(Mean), 그리고 표준편차(Standard deviation, STD)를 이용하여 경사장·경사도 인자의 차이를 분석하였다. 이를 통해 각 해상도 별 DEM을 통해 산정된 경사장·경사도 인자와 토양유실 정확성간의 접점을 찾아서 토양유실량 평가 및 다양한 정책자료 도출시 필요한 자료

의 공간 정밀도의 기준을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 경사장·경사도 인자의 평균값과 최대값을 사용하는 동시에 표준편차를 활용하였다. 표준편차는 산출된 값의 산포의 정도를 나타내는 것으로써, 기준 대상의 평균값과 표준편차가 비교하고자 하는 대상의 평균값과 표준편차에서 각각 유사하다면 이는 비교대상끼리 내포하는 값이 유사하다는 것을 의미한다. 또한 5m 해상도의 DEM으로 산정된 경사장·경사도 인자의 표준편차 차이가 크다는 것은 DEM의 해상도가 달라지면서 내포하고 있던 경사장·경사도 인자의 산정값이 다른 경향으로 바뀐 것을 의미한다. 즉 경사장·경사도 인자의 산정값에서 표준편차의 차이는 DEM 해상도에 따른 경사장·경사도 인자의 불확실성을 나타내는 지표가 될 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 주요 수계 내 경사장·경사도 인자의 최대값, 평균값, 그리고 표준편차를 산정 및 비교분석하여 한국형 토양유실 공식의 경사장·경사도 인자 산출시 필요한 최소한의 DEM 해상도를 제시하고자 하였으며, 이에 대한 타당성을 판단하기 위해 각 수계에 대한 토양유실량을 산정하여 DEM 해상도에 따른 경사장·경사도 인자의 변화가 미치는 영향을 분석하였다.

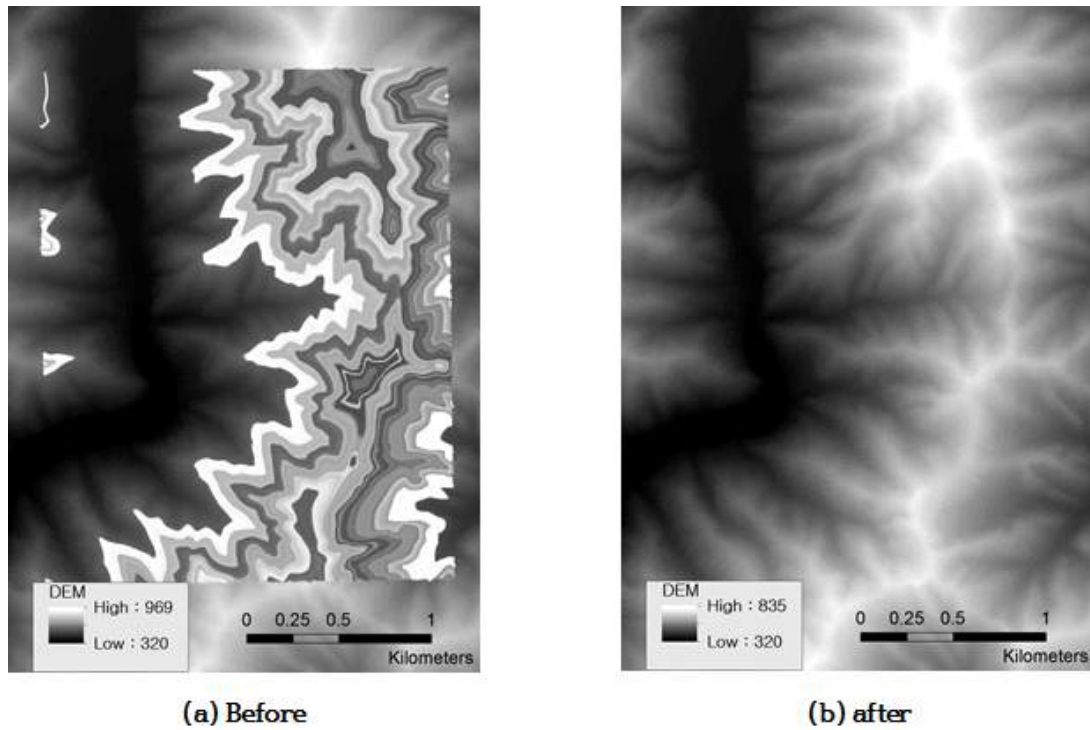


<Fig. 2-66> 대권역 분류

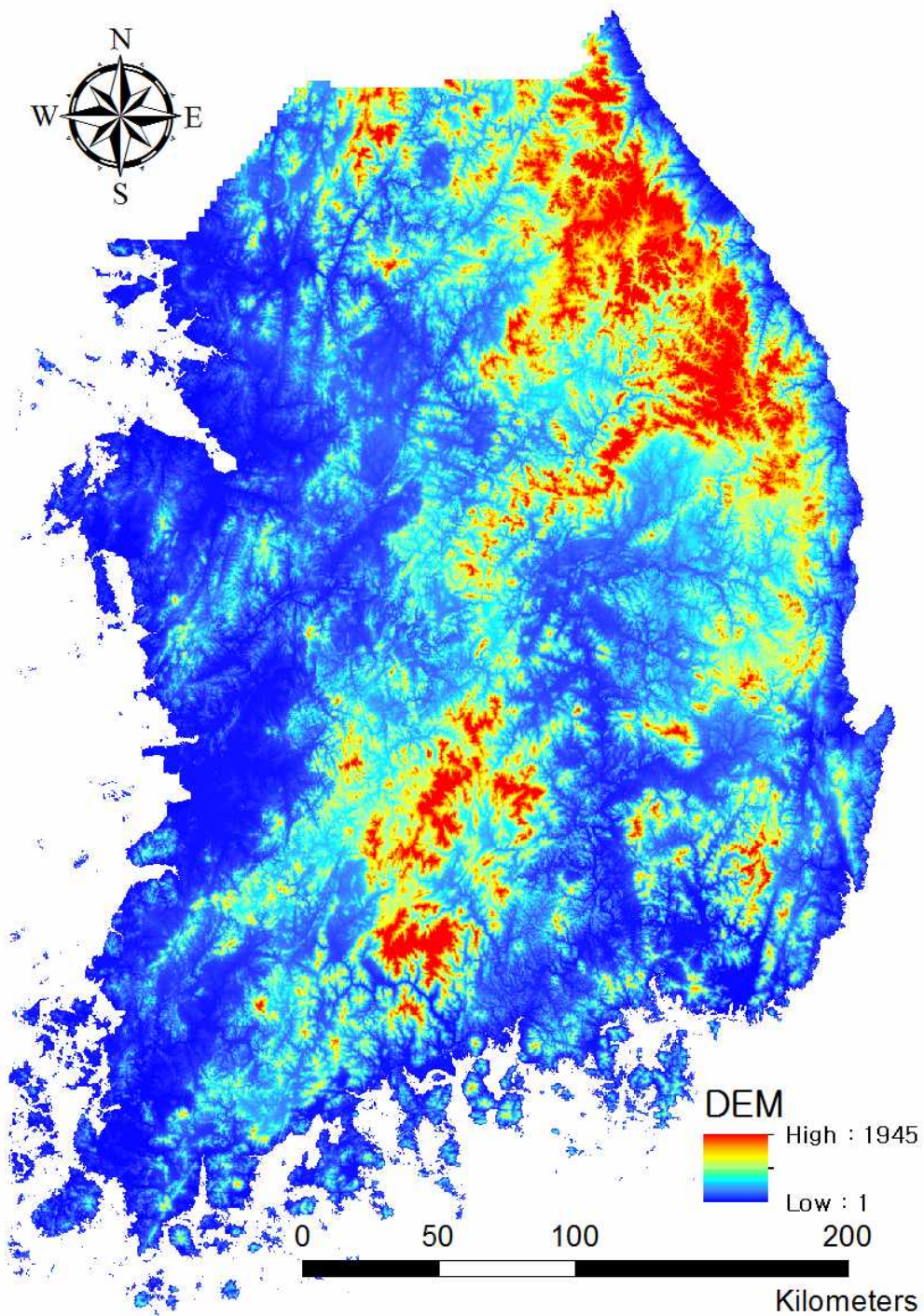
(다) 생성된 DEM의 검수 결과

본 연구에서는 “표토의 침식현황조사에 따른 고시” 내용에 따라서 예비조사 시 사용되는 국토지리정보원의 1:5,000 수치지도를 통해 DEM을 생성하였다. 수치지도를 이용하여 생성된 DEM의 정확성을 파악하기 위해서는 생성된 자료의 검수과정이 필요하다. 생성된 DEM

을 검수해본 결과, 등고선의 값이 입력되지 않은 오류와 등고선의 수치가 불연속적으로 구성되어 있는 오류가 발생하여 생성된 DEM을 보완 및 수정할 필요가 있었다. 검수 전의 <Fig. 2-67(a)>와 같은 오류들을 수정한 결과 <Fig. 2-67(b)>와 같은 결과를 얻게 되었다. 이러한 수정과정을 통해 해상도 5m의 DEM은 <Fig. 2-68>과 같다.



<Fig. 2-67> 수정된 DEM(Index No. 37810062, NGII)



〈Fig. 2-68〉 최종 생성된 5m × 5m DEM

(라) 해상도별 지형인자 비교 분석결과

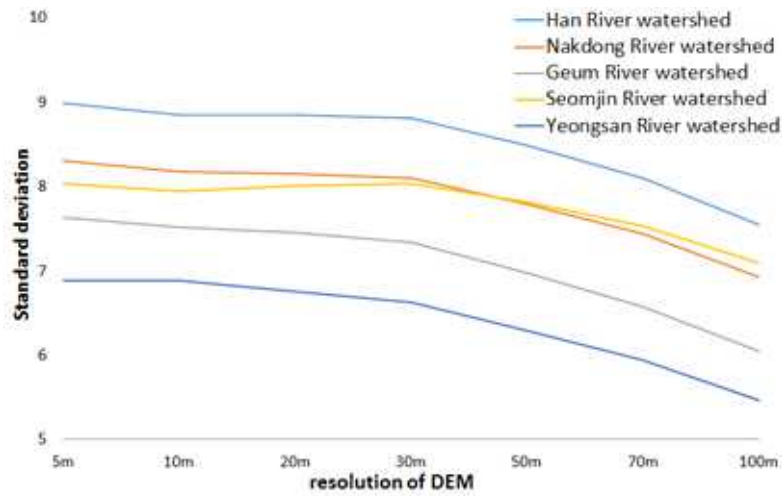
본 연구를 통해 각 해상도 별 생성된 DEM을 통해 경사장·경사도 인자를 산정한 결과, 경사장·경사도 인자의 평균값과 최대값, 표준편차에서 해상도가 낮아짐에 따라 〈Fig. 2-69〉와 같이 점차 감소하는 경향을 보였다〈Table 2-20 ~ 2-21〉.

경사인자의 최대값은 급경사 지역에 대한 정밀한 산정이 가능하게 되어 해상도가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 보였다. 하지만 경사장·경사도 인자의 평균값에서는 <Fig. 2-69>과 같이 전체적으로 해상도가 낮아짐에 따라 완만한 지역에 대한 정밀한 산정이 불가능한 곳이 많기 때문에 해상도 10m DEM의 산정 값이 증가한 것으로 판단된다.

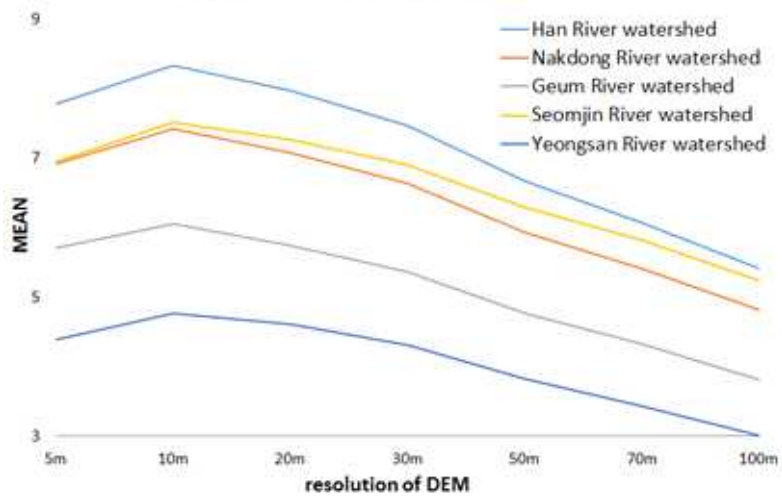
결정적으로, 산포의 정도를 나타내는 표준편차에서 해상도가 낮아짐에 따라 점차 해상도 5m DEM의 산정 값과 차이를 보이는 것은 경사장·경사도 인자의 불확실성이 커지는 것으로 판단된다.

각 해상도 별 DEM으로 산정한 경사장·경사도 인자의 표준편차는 5m-10m, 5m-20m, 5m-30m의 순서대로 한강은 1.52%, 1.53%, 1.98%의 오차율을 보였으며, 낙동강은 1.52%, 1.85%, 2.49%의 오차율을 보였다. 또한 금강은 1.52%, 2.49%, 3.93% 섬진강은 1.21%, 0.40%, 0.13%, 영산강은 0.14%, 2.01%, 3.82%의 오차율을 보였다. 5m-30m DEM에서의 최대 오차율은 3.93%, 평균 오차율은 2.47%을 보인 반면, 5m-50m DEM에서는 평균 오차율이 6%를 넘는 등 상대적으로 큰 차이를 보였다<Table 2-22>.

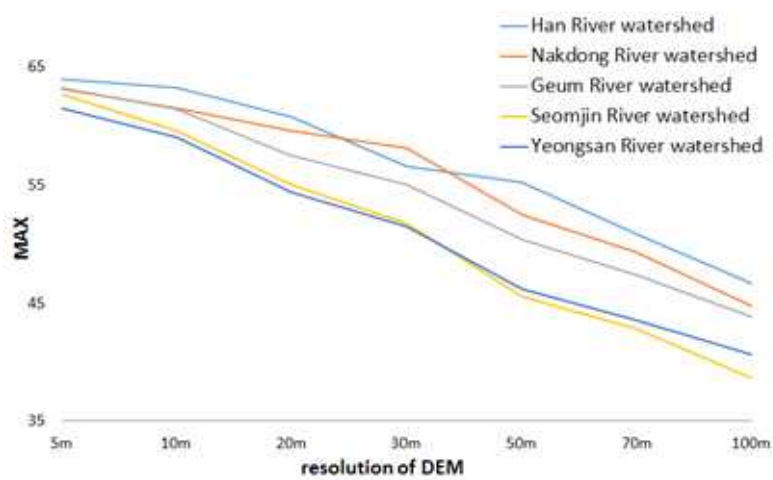
이에 따라 DEM 해상도에 따른 경사장·경사도 인자의 불확실성을 나타낸다고 볼 수 있는 표준편차에서 약 4%의 차이를 나타내는 것으로 미루어 볼 때, 5m DEM은 10m, 20m, 그리고 30m DEM으로 대체하여 사용가능할 것으로 판단된다.



(a) Maximum value of LS factor



(b) Mean value of LS factor



(c) Standard Deviation of LS factor

<Fig. 2-69> 해상도에 따른 유역의 LS factor비율 통계



(a) 5m DEM



(b) 10m DEM

〈Fig. 2-70〉 해상도에 따른 경사장 · 경사도인자의 비교
(Index No. 37810062, NGII)

〈Table 2-20〉 해상도에 따른 유역의 경사장 · 경사도 인자의 최대값

Cell Size of DEM	5m	10m	20m	30m	50m	70m	100m
Han River watershed	64.00	63.24	60.77	56.59	55.22	50.89	46.65
Nakdong River watershed	63.18	61.53	59.61	58.20	52.54	49.32	44.71
Geum River watershed	63.23	61.43	57.48	55.08	50.08	47.32	43.81
Seomjin River watershed	62.68	59.60	55.02	51.73	51.73	42.83	38.58
Yeongsan River watershed	61.57	59.11	54.45	51.52	51.52	43.56	40.59

■ : Standard

<Table 2-21> 평균값과 해상도에 따른 유역의 경사장·경사도 인자의 최대값

Cell Size of DEM		5m	10m	20m	30m	50m	70m	100m
Han River watershed	MEAN	7.79	8.34	7.97	7.47	6.67	6.08	5.41
	STD	8.99	8.85	8.85	8.81	8.49	8.10	7.54
Nakdong River watershed	MEAN	6.92	7.42	7.08	6.64	5.93	5.42	4.82
	STD	8.31	8.18	8.15	8.10	7.79	7.44	6.93
Geum River watershed	MEAN	5.71	6.05	5.74	5.37	4.77	4.33	3.81
	STD	7.64	7.52	7.45	7.34	6.97	6.58	6.05
Seomjin River watershed	MEAN	6.95	7.51	7.27	6.91	6.30	5.82	5.24
	STD	8.04	7.95	8.01	8.03	7.82	7.53	7.09
Yeongsan River watershed	MEAN	4.39	4.77	4.61	4.32	3.82	3.44	3.01
	STD	6.89	6.88	6.75	6.63	6.29	5.94	5.46

■ : Standard

<Table 2-22> 해상도에 따른 유역의 경사장·경사도인자의 표준편차 산정 결과

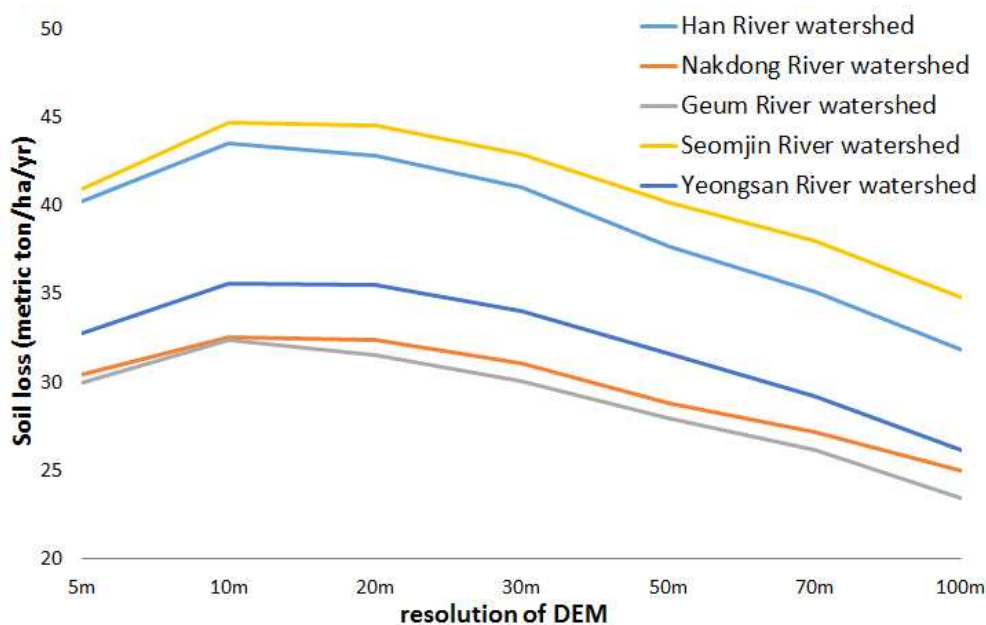
Comparison with 5m	5m-10m	5m-20m	5m-30m	5m-50m	5m-70m	5m-100m
Han River	1.52	1.53	1.98	5.57	9.87	16.14
Nackdong River	1.52	1.85	2.49	6.18	10.48	16.56
Geum River	1.52	2.49	3.93	8.78	13.86	20.81
Seomjin River	1.21	0.40	0.13	2.75	6.38	11.82
Yeongsan River	0.14	2.01	3.82	8.73	13.76	20.77
Average	1.18	1.66	2.47	6.40	10.87	17.22

■ : Standard

(마) 해상도별 지형인자를 적용한 토양유실량 산정 결과

본 연구에서는 각 해상도별 DEM을 통해 산정된 경사장·경사도 인자를 적용하여 토양유실량을 산정 시 발생하는 차이를 분석하였다. 산정된 경사장·경사도 인자와 더불어 USLE 모형을 구성하고 있는 다른 R, K, C, P인자는 Jang et al.(2015)이 산정한 값을 사용하여 연구대상유역의 토양유실량을 산정하였다.

DEM 해상도 별 토양유실량을 산정해본 결과 <Fig. 2-71, Table 2-23>와 같은 결과를 산정하였다. 5m 해상도의 DEM으로 산정된 토양유실량과 각 해상도 별 DEM으로 산정된 토양유실량에 대해 각 수계에서의 오차는 평균적으로 10m DEM에서 8.22%, 20m DEM에서 7.04%, 30m DEM에서 2.66%, 50m DEM에서 4.79%, 70m DEM에서 10.85%, 100m DEM에서 19.09%의 차이를 보였다<Table 2-24> 5m DEM 다음으로 정확한 값을 산출해내는 10m DEM의 오차율을 한계 오차율로 선정하여, 이보다 높은 오차율을 나타내어 토양유실량을 산정하는 것에 있어 불확실성을 증가시킬 수 있는 DEM 해상도는 5m DEM의 해상도를 대체할 수 있는 대상에서 제외시켰다. 그 결과 5m DEM은 10m, 20m, 30m, 50m DEM으로 대체하여 사용하도록 무방할 것으로 판단된다.



<Fig. 2-71> 해상도에 따른 유역의 토양유실산정 결과

<Table 2-23> 해상도에 따른 토양유실량 산정 결과(metric ton/ha/yr)

Cell Size of DEM	5m	10m	20m	30m	50m	70m	100m
Han River watershed	40.23	43.55	42.82	41.03	37.66	35.13	31.87
Nakdong River watershed	30.42	32.58	32.42	31.11	28.82	27.18	25.00
Geum River watershed	30.01	32.37	31.51	30.06	27.93	26.14	23.44
Seomjin River watershed	40.92	44.70	44.50	42.94	40.18	37.98	34.82
Yeongsan River watershed	32.77	35.61	33.54	34.07	31.62	29.22	26.20

□ : Standard

<Table 2-24> 해상도에 따른 경사장 · 경사도인자의 표준편차 산정 결과

Comparison with 5m	5m-10m	5m-20m	5m-30m	5m-50m	5m-70m	5m-100m
Han River	8.23	6.43	1.99	6.40	12.70	20.80
Nakdong River	7.86	5.00	0.15	6.94	12.89	21.88
Geum River	7.11	6.60	2.27	5.26	10.64	17.80
Seomjin River	9.24	8.75	4.93	1.82	7.19	14.90
Yeongsan River	8.67	8.44	3.94	3.52	10.85	20.05
Average	8.22	7.04	2.66	4.79	10.85	19.09

□ : Standard

(바) 한국형 토양유실공식의 지형인자 적용방법

본 연구에서는 USLE 모형의 인자 중 DEM 해상도에 따라 값이 결정되는 경사장 · 경사도 인자의 정량화를 위해 각기 다른 해상도를 가지는 DEM을 생성 한 후 5m 해상도 DEM을 기준으로 비교분석을 하였다.

분석 결과 해상도가 낮아짐에 따라 최대값과 표준편차는 감소하는 경향을 보였다. 하지만 평균값의 경우 10m DEM에서는 증가하나, 그 이상의 해상도 DEM에서는 감소하는 경향을 보였다. 특히 국가 기관에서 제공하는 해상도인 30m DEM과 그보다 높은 해상도의 DEM으

로 산정한 지형인가의 경우, 5m DEM과 비교하였을 때 표준편차에서 평균 2.47%의 비교적 적은 차이를 보였다. 또한 토양유실량에서는 가장 정확한 값을 산출할 수 있는 5m DEM과 다음으로 정확한 값을 산출하는 10m DEM을 이용하여 산정된 두 토양유실량 산정 값의 사이 값을 산정해내는 해상도는 20m DEM과 30m DEM으로 나타났다.

이에 따라, 한국형 토양유실 공식의 경사장·경사도 인자를 산정함에 있어 5m의 고해상도 DEM을 사용하는 것이 가장 바람직하나 5m DEM의 사용이 제한되는 경우, 10m, 20m, 30m 해상도의 DEM을 사용하여도 불확실성이 적게 발생할 것으로 판단된다. 따라서 경사장·경사도 인자 산정 시 최소한의 DEM 해상도는 30m DEM을 사용해도 무방할 것으로 판단된다. 또한 본 연구를 통해 한국형 토양유실 공식의 경사장·경사도 인자 적용 시 정량화된 해상도의 DEM을 사용함으로써 자료에 대한 신뢰성이 높아질 것으로 판단되며, 향후 관련 연구에 기여할 것으로 기대된다.

(4) 경작방법인자(P)의 산정

토양유실량을 산정하기 위해 사용되는 범용토양유실공식(USLE)은 전 세계적으로 수요가 높은 토양유실량 산정모형이다. USLE모형을 구성하는 다섯 인자 중 보전관리방법인자(이하 경작방법인자)는 계산이 아닌 경작지의 환경조건 및 관리방법에 따라 그 값이 결정되도록 구성이 되어있다. 1978년에 발간된 ‘Predicting rainfall erosion losses. A Guide to Conservation Planning’에 따르면 경작지에 적용되는 관리방법인 등고선방법과 등고선 대상재배, 계단재배 등으로 분류하여 각 관리방법에 맞는 경작방법인자를 제안하였다. 현재 사용되고 있는 USLE모형은 1978년에 제안된 방법을 사용하고 있다. 국내에서는 유실된 토양의 가치를 인정하고 보호하기 위해 2012년 7월에 토양환경보전법 제6조의 2 및 동법 시행규칙 제5조의 2의 규정에 따라 “표토의 침식 현황 조사에 관한 고시”를 제정하였다. 해당 고시는 토양의 침식현황조사 시 USLE모형에 기반한 예비조사방법과 현장조사방법을 제시하고 있다. 이에 따라 모든 토양유실관련 연구에서는 USLE모형을 사용하여 토양유실량을 산정하고 있는 상황이다.

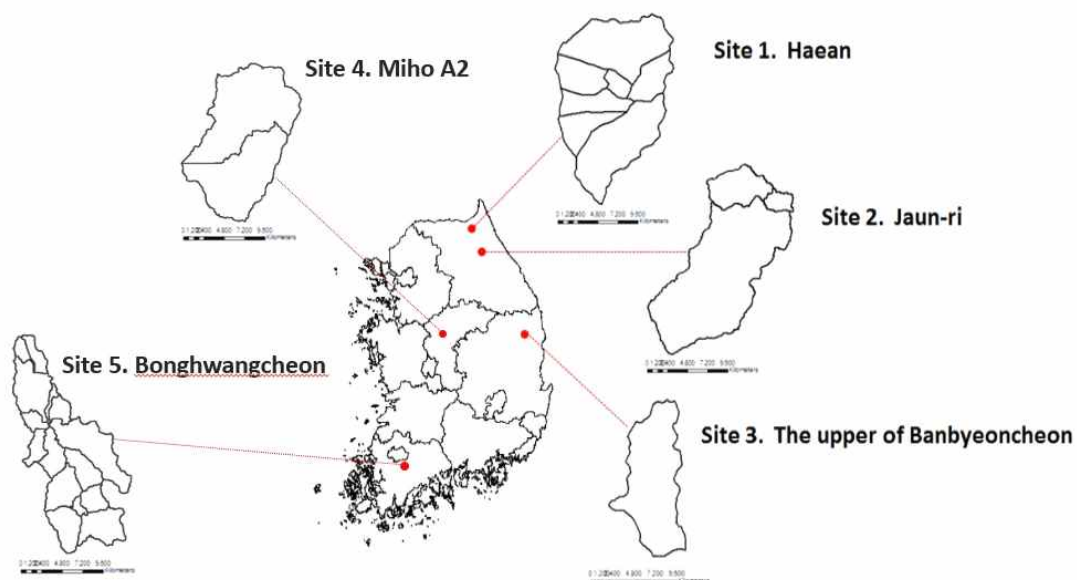
하지만 현재 토양유실관련 연구자들은 USLE모형을 사용할 시 사용하는 경작방법인자는 오직 경사도만을 고려한 값을 선정하여 사용하고 있다. 또한 실제 경사도가 아닌 수치지도 를 통해 얻어낸 경사도를 사용하여 해당 경작지의 경작방법인자를 선정하고 있다. 이러한 점은 USLE모형에서 제시된 조건을 고려하지 않은 방법을 사용하여 정확한 유실량을 평가하기에는 한계점이 존재하게 된다. 또한 실제 경작지는 작물의 생산량과 함께 상품성을 높이

기 위한 복합적인 관리방법을 적용하고 있으므로 현재 사용되는 경작방법인자를 사용하기에는 문제가 있다. 따라서 이러한 문제점들을 고려하여 경작지의 경사도와 관리방안을 복합적으로 고려한 경작방법인자 선정 체계가 필요한 시점이다.

이에 본 연구에서는 USLE모형에서 제공해주는 경작방법인자와 현재 사용되는 경작방법인자의 차이를 분석해보고, 실제 경작지조사를 통해 경작지 별 관리방안과 경사도를 고려한 한국형 경작방법인자를 제안하고자 한다. 본 연구를 통해 제안된 경작방법인자는 기존 사용되는 경사도만을 고려한 경작방법인자의 대안으로 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

(가) 연구대상지역

경작방법인자는 실제 경작지에 적용된 영농관리방법과 경사도, 경사장 자료를 이용하기 때문에 자료의 정확성을 높이기 위해서 해당 경작지의 현장조사가 필요하다. 따라서 금강유역과 영산강 유역을 대상으로 농경지(밭)가 문제가 되거나 집중되어 있는 유역을 조사하고자 하였다. 2차년도에는 강원도 양구군 해안면, 강원도 홍천군 내면 자운리, 경북 안동시 임동면 대곡리의 반변천 상류유역을 대상으로 실시하였으며, 3차년도에는 금강(미호A2) 유역과 영산강중류(봉황천) 유역을 대상으로 조사하였다. 금강유역은 00 연구소에 자문을 받아 우심지역을 대상으로 선정하였으며, 영산강 유역은 김지혜(2016)의 ‘영산강수계 토지이용형태와 수질 간 상관성 분석’ 연구를 토대로 대상지점을 선정하였다.



<Fig. 2-72> 경작방법인자 조사를 위한 대상유역 모식도

(나) 대상구역의 경작지 조사

① 구역 내 경작지 데이터 구축 및 현장조사

현장조사 및 데이터 구축을 위해 1차 작업으로 수치지도를 이용하여 대상구역의 농경지를 추출하였으며, 2차 작업으로 경작지에 대한 디지털라이징 작업을 실시하였다. 디지털라이징 작업은 위성사진 및 항공사진을 이용하여 대상구역에 위치하는 경작지의 경계를 추출하기 위한 작업으로, 현장조사 시 필요한 정보 및 위치를 제공해 주기 위해 실시하였다. 각 필지별로 수치지도와 위성사진을 비교하여 농경지를 구분하였으며, 현장조사를 통해 수치지도와 위성사진의 농경지를 재 확인하였다.

디지털라이징 작업을 위해 사용된 도구는 GNU General Public License하에서 제공되는 사용자 친화적 오픈소스인 QGIS(Quantum GIS)를 사용하였다. QGIS를 이용하여 구역 내 경작지 데이터를 구축하기 위해 사용된 항공사진은 Google에서 제공해주는 항공사진을 이용하였다. 해당 항공사진은 2015년 3월에 측정된 사진으로서 구역 내 위치한 경작지의 현황을 확인할 수 있다. 디지털라이징 작업은 구역 내 위치한 경작지의 경계를 Polygon형태로 생성한 뒤 각 경작지 별 이름을 부여한 뒤 DB구축을 위한 기본자료를 생성하였다.



<Fig. 2-73> 수치지도를 이용한 농경지 추출

디지털라이징 작업이 완료된 후 현장조사 양식에 따라 각 구역별 현장 조사를 실시하였다. 경작지에서 발생하는 토양유실에 영향을 미치는 요인은 경작지의 경사도다. 하지만 실제 경작지에서 시행되는 관리방법에 따라 토양유실량은 영향을 받기도 한다. 동일한 경사를 가지

고 있는 경작지에 대해 서로 다른 관리방법을 적용하게 되면 발생하는 토양유실량의 차이가 나타나게 된다.

국립농업과학원(2010)의 연구에 따르면 경작지의 멀칭 유무에 따라 발생하는 토양유실량이 다르며, 작물의 수확량 증대를 위해 경운방법을 달리함에 따라 발생하는 토양유실량은 차이가 큰 것으로 연구되었다.

실제 구역에서 이뤄지고 있는 경작현황에 대한 정보를 구축하기 위해 구역 내 위치하고 있는 경작지를 방문하여 작물과 관리방법에 대한 조사를 진행하였다. 경작지에서 경작되고 있는 작물에 대해서 작물의 종류, 영농관리방법(비닐/벗짚 멀칭 유무, 등고선 및 상하경 적용 여부)을 조사하였다. 조사는 구역에 따라 작물이 재배되고 있는 6월말에 실시하였다.

번호	작물	등고선 방향	심토경운	contour	vertical	contour 벗짚피복	vertical 벗짚피복	Contour Vinyl	Vertical Vinyl

<Fig. 2-74> P값 조사를 위한 현장조사 양식

② 실제 경사도 측정

환경부의 표토관련고시에 따르면 조사대상지역의 토지이용 및 경사도에 따라 경작방법인자를 선정하도록 명시되어 있다. 또한 Wischmeier and Smith(1978)가 제안한 경작방법인자는 경작지의 경사도와 보전관리방법에 의해 선정할 수 있도록 구성되어 있다. 따라서 본 연구에서는 대상 구역 내 위치한 경작지의 실제 경사도를 측정한 결과를 토대로 선정한 경작방법인자와 1:5,000 수치지도를 활용하여 선정한 P factor를 비교 분석함으로써 차이점을 확인하였다.

2차년도 연구와 같이 구역내 필지별 경사도를 모두 측정하기에는 한계가 있기 때문에 Google Earth를 이용하여 해당 구역 내 경작지의 경사도를 측정하였다. Google Earth를 이용한 경사도의 오차한계는 2차년도 연구결과에서 제시하였으며, 2차년도 연구결과에 따라 Google Earth를 이용하여 경사도를 산정하는 방법에는 큰 문제가 없는 것으로 판단하였다.

(다) 경작현황 및 경사도를 고려한 경작방법 인자

경작방법인자는 대상 유역에서 농민들이 실제 재배하는 작물과 영농방법, 경사도를 고려하여 산정된 값이다. 따라서, 동일한 경사도에 다른 영농관리방법으로 작물을 재배할 경우 경작방법인자는 변하게 된다. 이러한 점을 보완하기 위해 본 연구에서는 현장조사와 농경지 필지별 면적을 고려하여 대상유역의 경작방법인자를 산정하였다.

경작현황과 경사도를 고려한 경작방법인자를 제안하기 위해서는 우선적으로 동일한 조건을 가지는 경작지를 대상으로 구분해야 한다. 각 유역 별 동일한 범위의 경사도를 가지는 경작지별로 구분하였으며, 다시 동일한 작물, 동일한 관리방법을 적용한 경작지별로 구분하였다. 또한 각 분류 별 대표 경작방법인자를 산정하기 위해 경작지의 면적을 이용하여 면적가중치를 적용한 경작방법인자를 산정하였다. 경작지의 면적가중치를 적용하기 위해 사용된 식은 <식 22>와 같다.

$$\text{<식-22> } P_{factor} = \frac{(Extent\ of\ same\ field \times P_{factor}) + (Extent\ of\ another\ same\ field \times P_{factor})}{Total\ extent\ of\ field}$$

분류된 경작지에 경작방법인자를 부여하기 위해 사용된 값은 Jung(2004)이 제안한 경작방법인자를 사용하였다<Table 2-25>. 각 경작지에 경운, 벧짚 등의 멀칭, 비닐멀칭 등의 부여된 경작방법인자와 면적을 이용하여 상위 분류의 P factor를 산정하였다. 산정된 경작방법인자에 동일한 조건을 가진 경작지의 총 면적 가중치를 주고, 면적이 더 넓은 경작지의 경작방법인자의 가중치를 높게 부여하여 경사도로 분류된 경작방법인자 값을 산정하였다.

〈Table 2-25〉 한국의 관리방법 별 경작방법인자

Conservation practice			P factor
Contour	Normal		0.54
	High ridge		0.25
	Subsoiling		0.32
Mulching of furrow	Contour	Rice straw	0.14
		Stump	0.21
	Vertical	Rice straw	0.32
Vinyl mulching of ridge	Contour		0.29
	Vertical		0.85
Contour terrace			0.08
Terrace channel			0.10
Gravel band			0.15
Grass Band			0.16

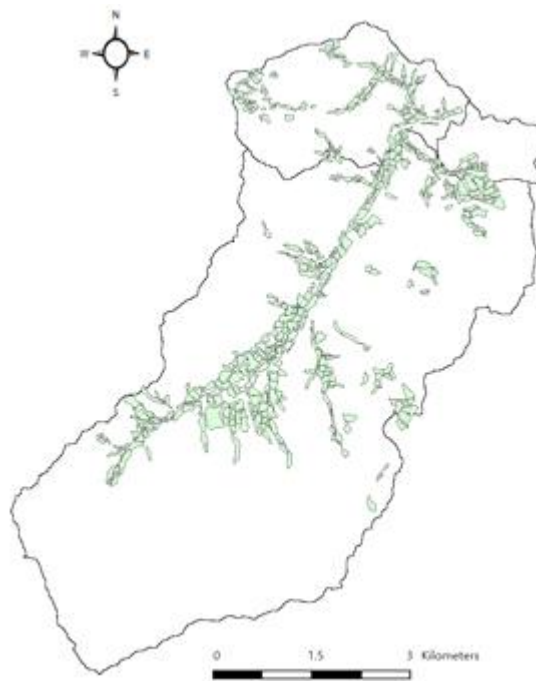
(라) 대상유역의 경작지 조사 결과

① 유역 내 경작지 데이터 구축

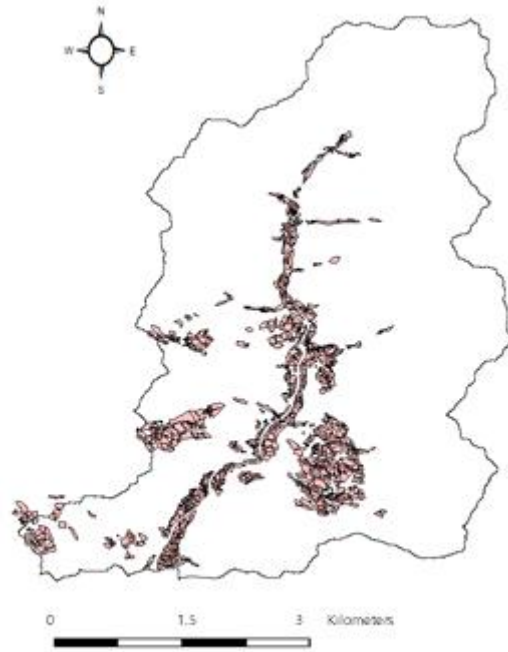
대상 유역 내 필지별 수행되어진 영농활동(작물과 영농방법, 경사도, 경사방향 등)에 대한 정보를 구축하였다. 유역 내 경작지 데이터를 구축한 결과 2차년도는 해안면 4,192개, 자운리 617개, 반변천 상류 1,147개의 필지가 유역 내 위치하고 있었으며, 대부분의 농경지가 용수와 배수 등의 원활한 영농활동을 위해 하천주변을 따라 위치하고 있었다. 3차년도의 구축된 데이터는 금강(미호A2) 유역 1,321개, 영산강중류(봉황천) 유역 487개의 필지 데이터를 구축하였다.



〈Fig. 2-75〉 해안면의 경작지 현황



〈Fig. 2-76〉 자운리의 경작지 현황



〈Fig. 2-77〉 반변천 상류의 경작지 현황



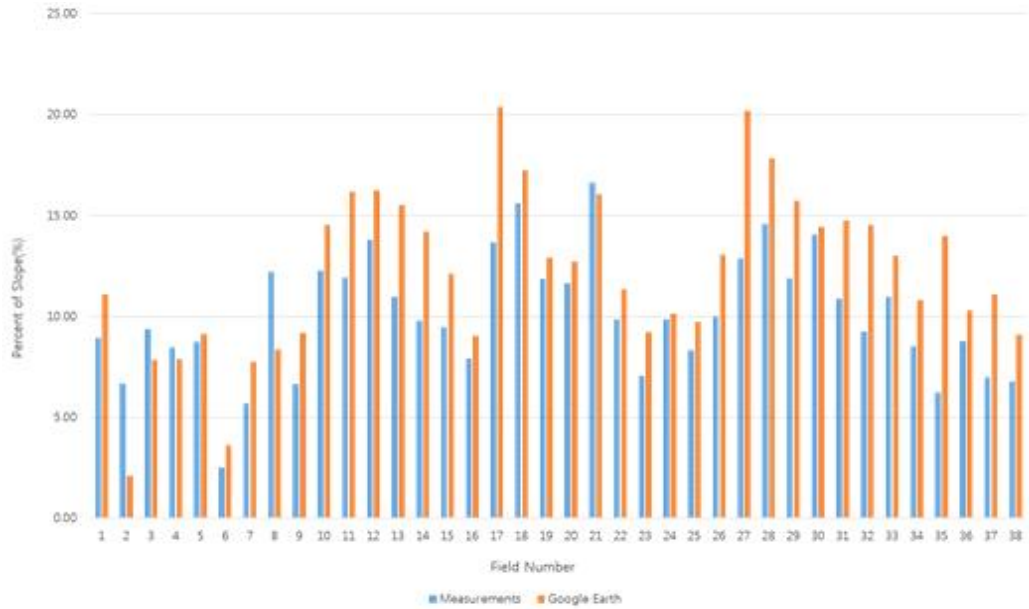
〈Fig. 2-78〉 금강(미호A2)의 경작지 현황



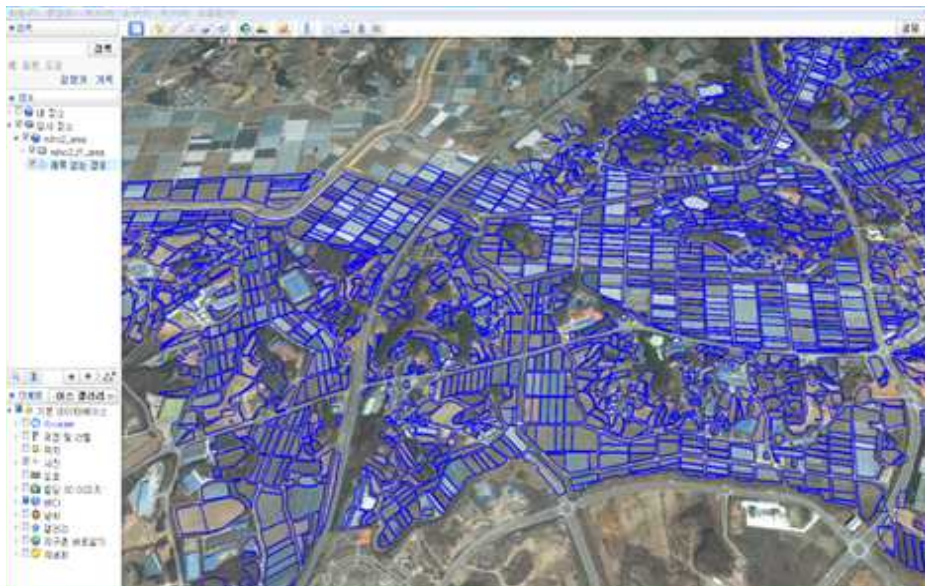
<Fig. 2-79> 영산강중류(봉황천)의 경작지 현황

② Google Earth를 이용한 경사도 측정 결과

환경부 “표토의 침식현황 조사에 관한 고시”에 따르면 1:5,000 수치지도를 활용하여 대상 구역의 P factor를 선정하라고 명시되어 있다. 그러나 실제 경사도가 아닌 수치지도를 활용한 P factor에는 영농방법과 성토 및 절토행위에 따른 경사도 변화를 반영하지 못하는 한계점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 2차년도에서 검증된 Google Earth를 활용하는 방법을 통해 각 필지별 경사도를 산정하였다. 2차년도 연구결과에 따르면, 실측한 결과와 Google Earth를 통해 측정한 결과를 비교 분석한 결과, 오차범위 2% 내의 경사도를 가지는 경작지가 각 구역 별 80% 이상의 경작지가 일치함을 보여주고 있다. 따라서, 3차년도에서 수치지도와 Google Earth를 이용하여 대상구역의 각 필지별 경사도를 산정하였다.



〈Fig. 2-80〉 해안면의 경작지 경사도 비교 결과



〈Fig. 2-81〉 Google Earth를 이용한 필지별 경사도 산정

③ 대상 구역의 경작현황 조사 결과

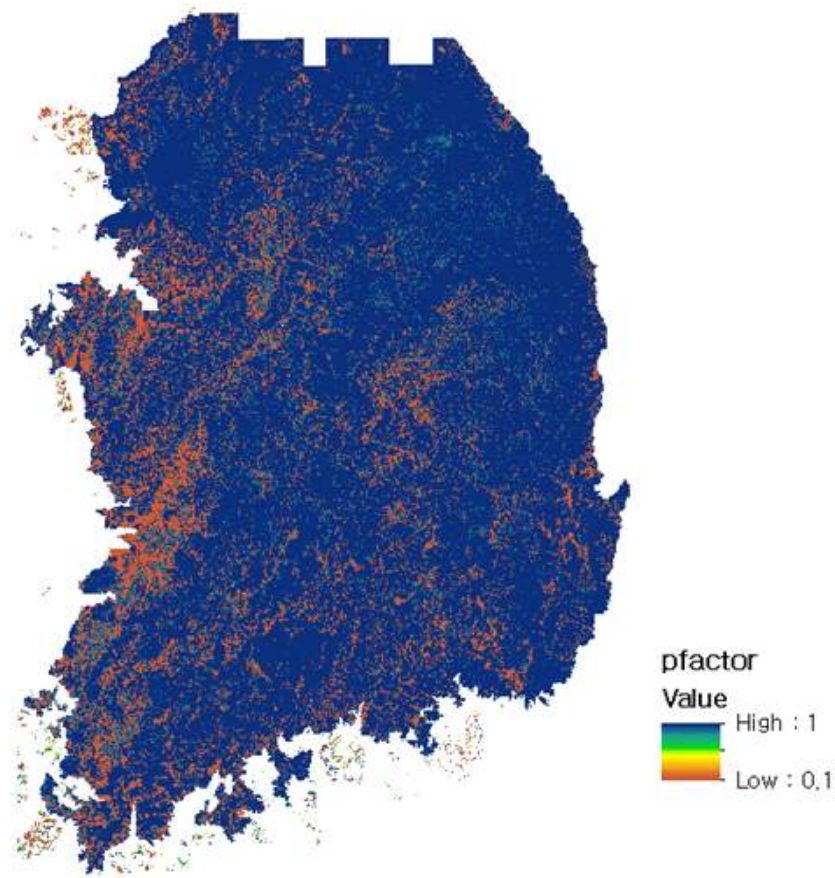
현장조사를 통해 해당 구역에 위치한 필지별 경작지의 작물 및 영농방법을 조사하여 경작지에 대한 DB를 구축하였다. 2차년도 연구결과에 따르면 해안면의 경우 전체 경작지의 85%가 고랭지 작물인 감자 등의 뿌리채소를 경작하고 있으며, 경작지의 69%가 등고선방법을 사용하여 경작지를 운영하고 있다. 영농방법은 전체 54%가 비닐멀칭을 적용하여 작물을 경작하고 있는 것으로 나타났다. 자운리의 경우는 무 등의 뿌리채소가 전체 경작지의 78%

에서 경작되고, 전체 경작지의 99%가 비닐멀칭을 적용하여 작물을 경작하고 있었다. 자운리 유역의 특성상 경사장이 길고 좁은 형태의 경작지가 많아 상하경을 적용한 경작지가 23%를 차지하고 있었으며, 이외의 경작지는 등고선 방법을 적용하여 작물을 경작하고 있었다. 반변천 상류의 경우 경작하는 작물은 주로 고추와 깨, 콩 등을 경작하고 있었으며, 98%가 엽경채류에 해당 하는 것으로 나타났다. 전체 경작지 중 90%가 등고선 방법을 적용하여 경작하고, 94%의 경작지에서 비닐멀칭을 적용하여 작물을 경작하고 있었다. 해안면과 자운리는 기후조건이 비슷하여 감자와 무가 많이 재배되고 있으나, 경사도의 차이가 커서 경운방법이 다르게 적용되고 있는 것으로 나타났다.

미호A2 유역의 경우 등고선 방법과 상하경 방법이 59%와 41%로 나타났으며, 뿌리채소와 엽경채류가 49%와 51%로 고추나 깨, 인삼, 콩 등 다양한 작물이 재배되고 있는 것으로 나타났다. 그러나 60%의 농경지에서 비닐멀칭을 하고 재배 하는 것으로 나타났다. 봉황천 유역은 등고선 방법과 상하경 방법의 면적비율이 동일하였으며, 엽경채류의 작물이 85%를 차지하는 것으로 나타났다. 이와같이 지역별로 경작방법이나 재배작물 등의 차이가 큰 것으로 나타났으며, 작물에 따라 비닐멀칭 등을 이용하여 피복함으로써 경작방법인자의 값이 줄어든 것으로 나타났다(부록3. 표1 ~ 6).

(마) 실제 경사도와 고시에 따른 경작방법인자 비교결과

앞에서 Google Earth를 이용하여 산정한 경작방법인자 결과와 “표토침식 현황조사에 관한 고시”에 제시되어 있는 결과를 비교하였다. 고시된 결과는 환경부 표토관련고시에서 제시한 1:5,000 수치지도를 이용하여 산정하였으며, 해상도 10 m의 DEM을 기반으로 각 셀 당 평균 경사도를 산정한 뒤 경사도별 경작방안인자를 입력하였다. 실제 현장조사를 진행하여 구축한 경사도는 DB를 활용하여 경작방법인자를 선정해본 결과 환경부 “표토침식 현황조사에 관한 고시”에서 제시한 방법으로 선정한 경작방안인자와 차이를 보이고 있는 것을 확인할 수 있었다. 환경부 “표토침식 현황조사에 관한 고시”에서 제시한 방법으로 선정한 경작방안인자는 대부분 경사도가 높게 산정되어 높은 값의 경작방법인자를 선정한 바와 달리 실제 경사도를 이용하여 선정한 경작방법인자는 각 유역의 경사도 별 필지에 따라 비슷한 수준으로 분포하는 것을 확인하였다(부록3. 표7 ~ 11).



〈Fig. 2-82〉 환경부 “표토침식 현황조사에 관한 고시”에 의해 선정된 경작방법인자

(바) 경사도별 영농방법에 따른 경작방법인자 산정 결과

경작방법인자는 기존에 제시되었던 경사도만을 고려한 경작방법인자와는 차이가 있다. 토양유실 발생 요인 중 중요한 인자는 경사도 등의 지형인자이다. 그러나, 실제 경작지에서는 경사도 외에 작물 및 영농방법에 의해 유실되는 토양의 양은 차이를 보이게 된다. 따라서, 본 연구에서는 기존에 사용되는 경사도만을 고려한 경작방법인자가 아니라 경사도별로 작물과 영농방법을 고려한 경작방법인자를 제안하였다.

작물 및 영농방법에 따른 경작방법인자를 산정하기 위해 대상유역 내 각 필지를 경사도별로 구분하였다. 경사도는 0~2도, 3~8도, 9~12도, 13~16도, 17~20도 그리고 21도 이상으로

구분하였다. 경사도별로 구분된 경작방법인자는 Jung et al.(2004)에 제시된 문헌값을 이용하여 작물(뿌리채소와 입경채소)과 멀칭유무(비닐멀칭, 벚짚멀칭, 나지상태 등)를 구분한 경작방법인자를 다시 산정하였다. 이때 비닐멀칭과 벚짚멀칭 그리고 나지상태의 필지별 면적비를 고려하였다. 산정된 결과는 다시 경운방법(상하경과 평행경)에 따라 구분하였다. 2차년도에 제시된 경사도별 경작방법인자는 나지상태의 조건을 고려하지 않은 결과값으로 당해연도에 작물과 멀칭유무, 경운방법을 모두 고려하여 재 산정한 결과값을 제시하였다(부록2. 표 5 ~ 9).

(사) 경작지의 형태(경운방법)를 고려한 경작방법인자

경작지에서 수행되고 있는 영농방법은 토양유실이나 오염물질 유출을 줄이기 위한 매뉴얼이나 법령으로 정해지지 않은 상황이다. 경작을 시행하는 농민의 입장에서는 경작지에서 발생하는 토양유실을 고려하지 않고, 농민의 작업여건만을 고려하여 영농방법을 결정하기에 국내 표토관련고시에 의한 경사도만을 고려한 경작방법인자의 선정은 한계가 있다고 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 농민의 작업여건에 큰 영향을 미치는 경운방법의 형태를 고려한 경작방법인자를 제안하고자 하였다.

경운방법(상하경과 평행경)의 형태를 분류하기 위해서는 실제 경작지의 현황과 형태 이에 따른 영농방법에 대한 정보가 필요하다. 그러나 전국단위 모든 현장을 조사하기에는 많은 시간과 노동력 등 이외에 많은 변수가 있다. 따라서, 현장조사를 통해 구축한 영농방법 정보와 수치지도를 이용하여 디지털작업을 통해 분석한 정보를 이용하여 서로의 상관성을 분석하였다. 2차년도 분석결과 경작지의 장단비 조건에 따라 세 유역 내의 위치한 경작지를 분류할 수 있었다. 또한 장단비 조건이 1:2.7 이상 되는 조건에 대해 적용되는 관리방법을 분류할 수 있는 경작지가 전체 경작지의 78% 이상 증명이 가능하여 해당 경작방법인자를 선정할 수 있는 것으로 판단하였다. 경작지의 형태에 따른 장단비로 분류한 경작지에는 상하경과 등고선 방법에 의한 경작방법인자를 적용하였다. 국내의 농업 여건상 대부분의 경작지에 대해 계단전 적용이 어렵기 때문에 계단전의 경작방법인자적용은 USLE Manual에 의해 선정된 값을 사용하였다<Table 2-27>.

〈Table 2-26〉 국내 경작지 형태에 따른 경작방법인자

Landuse	Support practice	Conservation Practice factor
Paddy	-	0.05
Field	Contour	0.30
	Up and down Tillage	0.85

〈Table 2-27〉 계단전에 적용되는 경작방법인자

Land slope percent	Farm planning		Computing sediment yield		
	Contour Factor2	Strip-crop factor		Graded channels Sod outlets	Steep back-slope underground outlet
1 to 2	0.60	0.30		0.12	0.05
3 to 8	0.50	0.25		0.10	0.05
9 to 12	0.60	0.30		0.12	0.05
13 to 16	0.70	0.35		0.14	0.05
17 to 20	0.80	0.40		0.16	0.06
21 to 25	0.90	0.45		0.18	0.06

(아) 한국형 토양유실 공식의 경작방법인자 적용방법 제안

작물과 영농방법 등의 2차년도와 3차년도 현장조사 결과를 통해 산정한 4대강 유역별 경작방법인자 산정을 통해 국내의 경작현황을 고려할 수 있는 한국형 경작방법인자를 제안하고자 하였다. 2년간에 걸쳐 양구군 해안면 유역, 홍천군 자운리 유역, 안동시 임동면 반변천 상류 유역, 음성군 미호A2 유역, 나주시 봉황면 봉황천 유역 등 총 5지점에 대한 작물과 영농방법 등의 현장조사를 실시하였으며, 현장조사 결과를 바탕으로 유역별 경작방법인자를 산정하였다.

연구결과 “표토침식 현황조사에 관한 고시”와 같이 경사도만을 고려하여 경작지에서 발생하는 토양유실을 평가하기에는 한계가 있는 것으로 나타났으며, 유역과 경작지별로 영농활동방법이 다양하기 때문에 이러한 점을 고려한 경작방법인자 산정이 필요한 것으로 나타났다.

경작지의 지리적 특성으로 인해 경작되는 작물의 종류가 달라짐에 따라 경작방법인자의 차이가 발생하므로 전국단위 조사를 통해 구축된 정보를 기반으로 경작방법인자의 재산정이 필요한 것으로 보여진다. 또한, 본 연구를 통해 산정된 경작방법인자는 작물과 영농방법 등의 현장조사를 통해 산정된 값이므로 유역 내 위치하고 있는 경작지의 토양유실량을 산정하는데 기초데이터로 활용될 것으로 판단된다.

다. ArcSATEEC의 개발 및 적용(한국형 토양유실 공식)

High Impact Targeting(HIT; <http://www.iwr.msu.edu/hit2/home.htm>)은 웹기반의 모형으로 미국 미시간 주립 대학교에서 개정범용토양유실공식(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)과 Sediment Delivery Model(SEDMOD; Fraser, 1999)를 기반으로 하여, 그레이트 레이크 (Great Lakes) 유역에 대한 연간 토양유실량과 부유사 부하량 산정을 위해 개발되었다. 초기에는 토양유실량 산정이 주된 목적이었으나, 최근에는 최적관리기법에 의한 토양유실저감량을 함께 고려할 수 있도록 개선되었다. Water Erosion Prediction Project(WEPP; Flanagan and Livingston, 1995)는 범용토양유실공식을 기반으로 하고 있으나, 분단위 강우자료나 단일 강우사상에 대한 유출 및 토양유실량 모의가 가능한 모형이다. 초기에는 텍스트 형식의 파일을 입력자료로 하여 텍스트 형식의 결과를 출력하는 포트란 기반의 모형이었으나, C++ 언어에 의한 모형으로 개선된 후, GIS 기반의 모형인 GeoWEPP(Renschler, 2002)가 개발되었다. 그리고 웹 기반의 WEPP 모형인 WEPP Watershed Online GIS 2011 (Frankenberger et al., 2011; <http://milford.nserl.purdue.edu/wepp/>)이 개발되어 현재 2013 버전까지 업데이트 되어왔다.

이 모형들과 유사하고 데스크탑의 GIS 소프트웨어를 기반으로 하는 Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC; Lim et al., 2003)이 개발되어 이용되어 왔다. 이 SATEEC 모형은 수치표고모형, 토지이용도, 토양도와 같은 GIS 기반의 자료를 범용토양유실공식의 인자들로 변환에서 토양유실량 산정에까지 사용자에게 편의를 제공하고 있다. 그러나, 이 SATEEC 모형은 장기간에 걸친 토양유실량을 예측하기 때문에 우리나라의 여름에 집중되는 강우 특성을 반영하는 데에 한계가 있다. 더욱이 현재 사용이 제한되는 GIS 기반의 소프트웨어인 ArcGIS 10에 의해 구동되는 것이 아니라 ArcView 기반으로 되어 있기 때문에 모형의 사용이 제한이 된다. 따라서, 본 연구에서는 SATEEC 모형이 사용되고 있는 ArcGIS 기반의 소프트웨어에 의해 구동될 수 있도록 재개발하는 것이며, 또한 한국의 계절 특성을 반영한 토양유실량 예측이 가능하도록 개선하여 4대강 유역별 토양유실량을 예측하

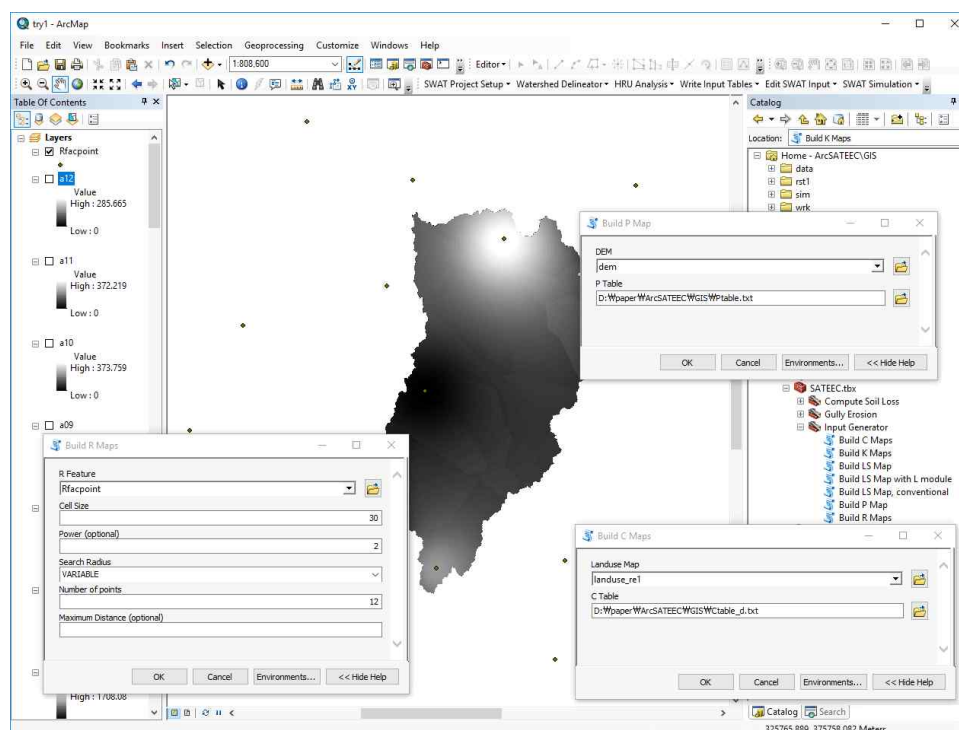
고자 하였다.

ArcSATEEC 모형의 적용을 위해서 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강 등에 대한 30 m 격자를 가지는 공간자료를 구축하였다. 수치표고모형은 국립지리원에서 제공하는 수치지도 (1:5,000)를 이용하였고, 토양도는 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공하는 개략토양도 (1:50,000)를 이용하였으며, 토지이용도는 환경부 환경공간정보서비스에서 제공하는 2005년 대분류 토지피복도(1:25,000)를 이용하였다.

(1) ArcGIS 10을 기반으로 하는 ArcSATEEC의 개발

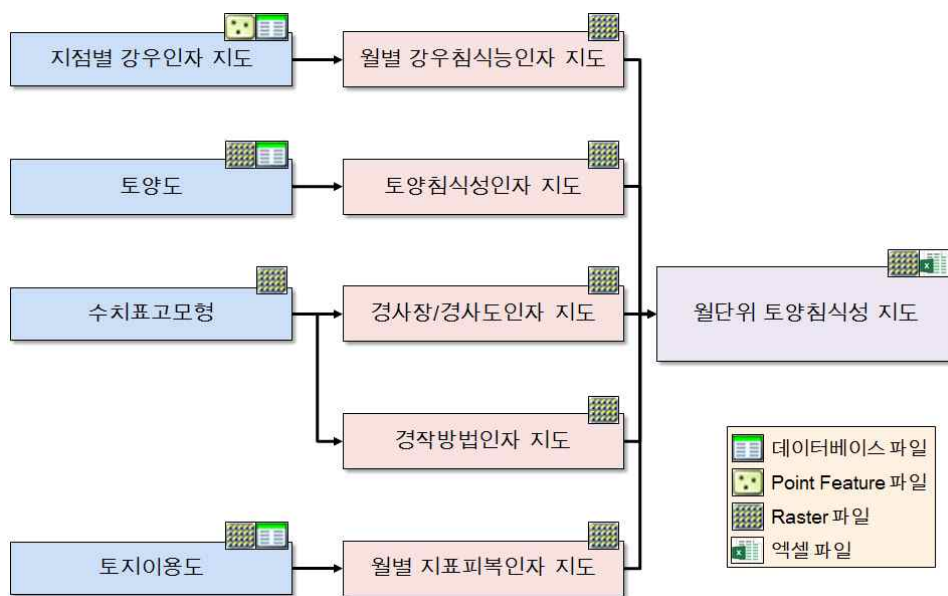
(가) ArcSATEEC 모형의 개발

기존의 SATEEC 모형이 토양유실과 관련하여 많은 기능을 제공하나, ArcView를 기반으로 하기 때문에 현재 사용하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구를 통해 현재 사용되고 있는 ArcGIS 10 소프트웨어에서 사용이 가능하도록 SATEEC 모형을 재개발되었다. 현재 ArcGIS 소프트웨어는 ArcPy 프로그래밍 언어에 의한 코딩과 인터페이스 개발 체제를 지원하고 있다. 이에 기존의 사용자에 의한 입력 자료를 범용토양유실공식의 각 인자로 변환하는 과정과 토양유실을 추정하기 위한 과정이 ArcPy로 코딩되었으며, ArcGIS에서의 툴박스 형식의 인터페이스를 가지도록 하였다<Fig. 2-83>.



<Fig. 2-83> ArcSATEEC의 인터페이스

기존 SATEEC 모형은 연평균 연간 토양유실량을 추정하는 데에 사용이 가능하였으나, ArcSATEEC은 우리나라의 계절성을 반영하여 토양유실량을 추정할 수 있도록 강우침식능인자와 지표피복인자를 월별로 산정할 수 있도록 개선하였다<Fig. 2-84>. ArcSATEEC 모형은 사용자의 GIS 자료를 범용토양유실공식의 각 인자 자료로 변환하는데, 월별 강우침식능인자 지도 생성을 위해서는 Point Feature 형식의 자료를 필요로 한다. 이 자료는 대상 유역 안에 혹은 인근에 위치한 강우 자료의 측정 위치를 나타내기 위한 것이며, 각 지점에 대해서 월별 강우침식능인자 값들을 가지고 있어야 한다. 토양침식성인자는 토양도에 의해 구축될 수 있도록 하였는데, 기존 SATEEC 모형은 사용자에게 의해서 래스터 형식의 자료로 각 격자가 인자값을 가지도록 구축한 뒤 사용이 가능했었던 반면에, ArcSATEEC에서는 래스터 형식의 토양도 자료를 그대로 사용하면서 각 토양 속성에 대한 인자값을 텍스트파일로 저장하면, 모형 내에서 인자값이 정의될 수 있도록 하였다.



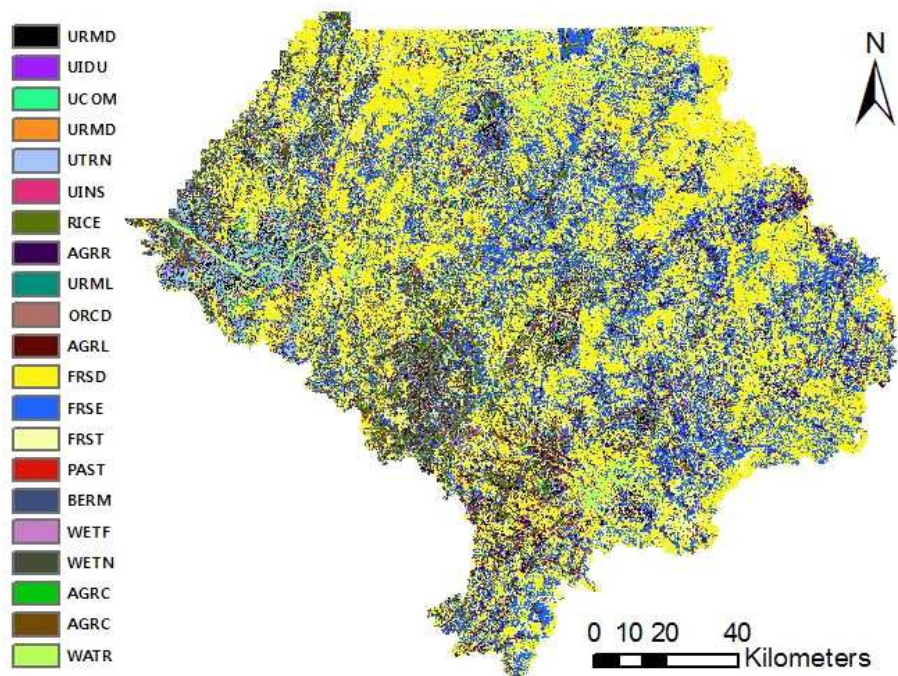
<Fig. 2-84> 월별 토양유실량 추정을 위한 ArcSATEEC 모형의 흐름도

(나) ArcSATEEC 적용을 위한 대상유역

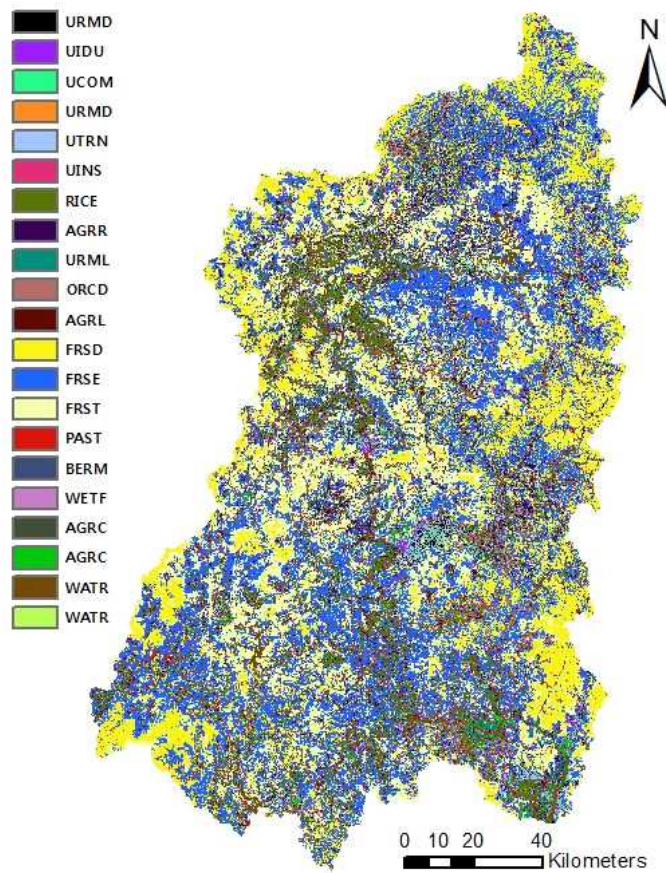
<Fig. 2-85 ~ 2-89>와 같이 4대강 유역별 23개의 세분류 분류항목으로 토지이용도를 분석하였다. 토지이용을 분석한 결과 낙동강 유역은 23,690 km²으로 가장 큰 면적인 것으로 나타났다. 산림지역이 67.4%, 농업지역이 16.9%를 차지하는 것으로 나타났다. 한강의 유역면적은 22,298 km²으로 나타났으며, 이중 산림이 71%, 농업지역이 12.8%를 차지하는 것으로 나타났다. 다음으로 금강과 섬진강 그리고 영산강 순으로 면적이 큰 것으로 나타났으며, 영산강 유역이 농업지역이 차지하는 면적이 35.7%로 가장 큰 것으로 나타났다<Table 2-28>.

<Table 2-28> 대상유역별 토지이용현황

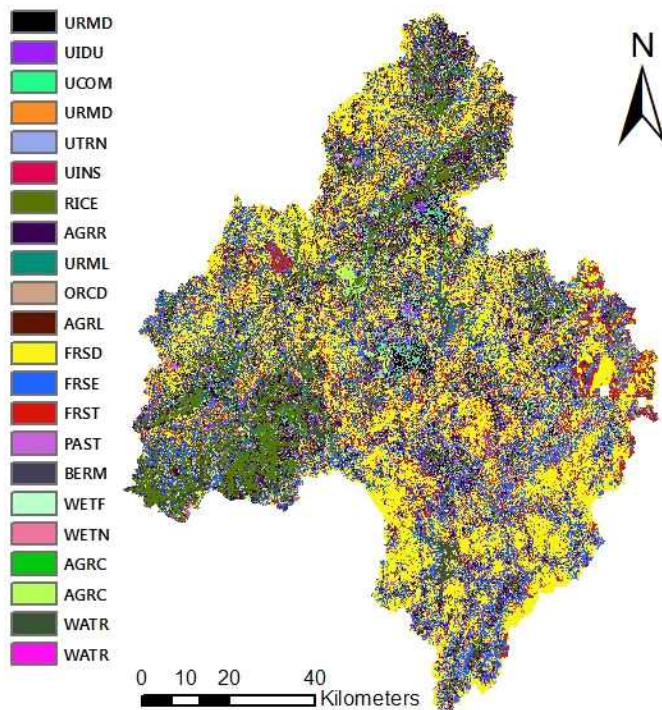
유역 분류	금강	한강	낙동강	섬진강	영산강
총면적 (km ²)	9,903	22,298	23,690	4,903	3,473
시가화건조지역 (%)	4.9	5.8	4.6	2.6	7.4
농업지역 (%)	25.5	12.8	16.9	19.5	35.7
(논)	(12.9)	(4.0)	(7.5)	(10.5)	(21.3)
(밭)	(10.1)	(7.5)	(5.4)	(7.3)	(10.9)
산림지역 (%)	57.9	71.0	67.4	68.1	45.4
초지 (%)	6.0	5.1	5.8	5.1	5.0
습지 (%)	1.5	0.8	1.3	1.3	1.4
나지 (%)	1.9	2.2	2.2	1.2	1.8
수역 (%)	2.3	2.3	1.8	2.2	3.3



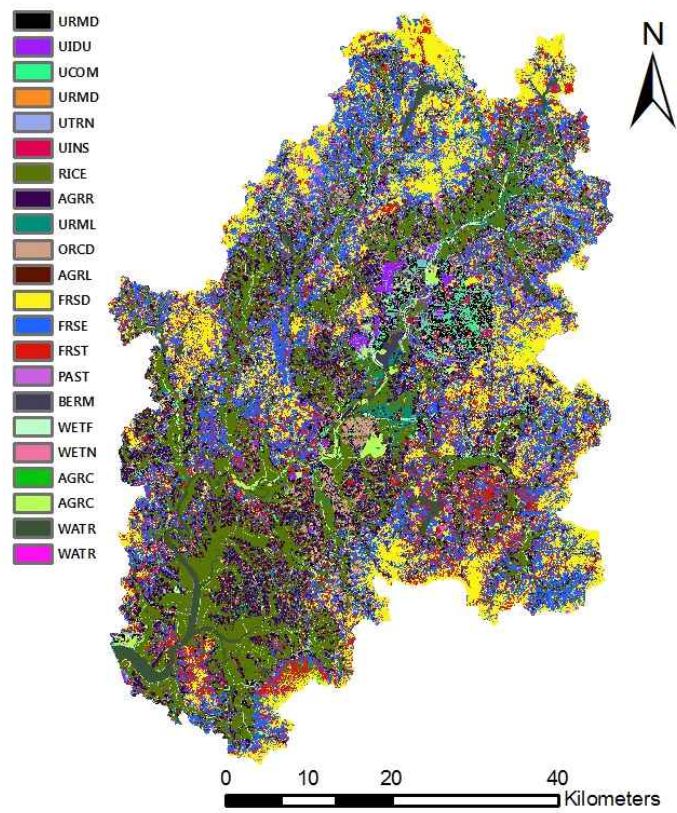
<Fig. 2-85> ArcSATEEC 적용을 위한 한강유역 토지이용도



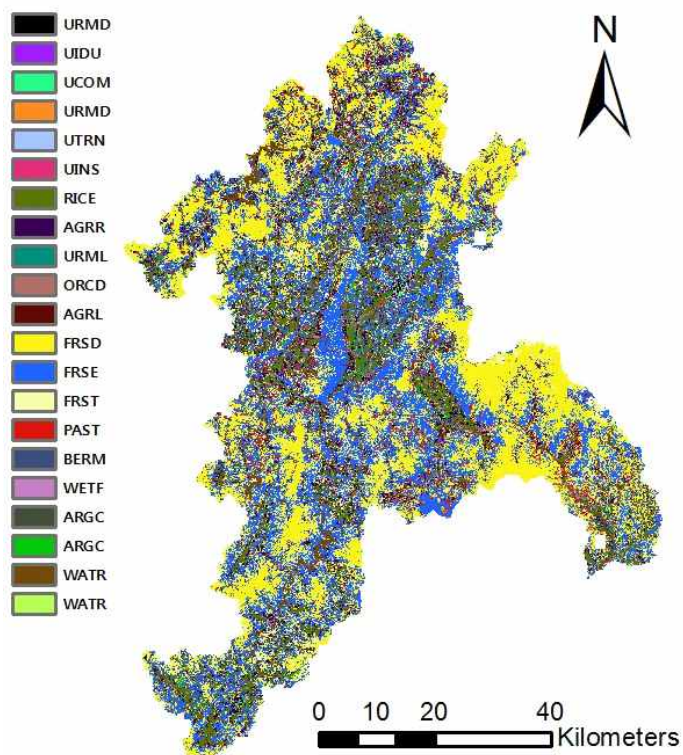
<Fig. 2-86> ArcSATEEC 적용을 위한 낙동강유역 토지이용도



<Fig. 2-87> ArcSATEEC 적용을 위한 금강유역 토지이용도



<Fig. 2-88> ArcSATEEC 적용을 위한 영산강유역 토지이용도

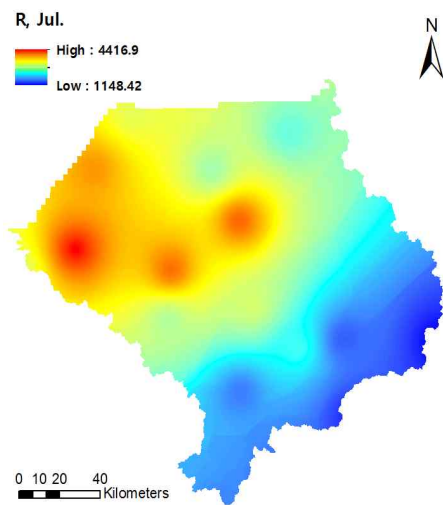


<Fig. 2-89> SATEEC 적용을 위한 섬진강유역 토지이용도

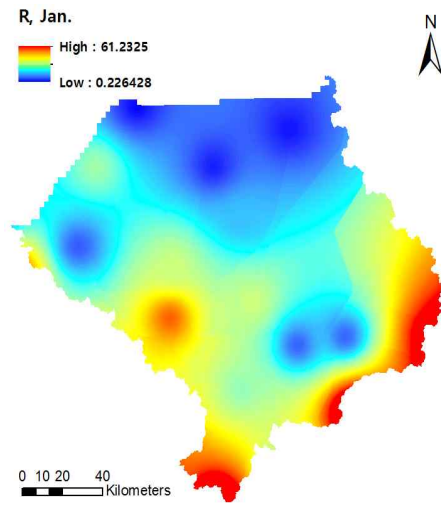
(2) 한강유역에 대한 적용

한강유역에서의 토양유실량을 추정하기 위해서 각 인자 구축에 필요한 입력자료가 사용되었다. 강우침식능인자는 2차년도에 구축된 지점별/월별 강우침식능인자 데이터베이스를 이용하였으며, ArcSATEEC 모형에 의해서 래스터 형식의 월별 강우침식능인자로 변환되었다. 토양침식성인자는 정밀토양도에 의해 구축되었으며, 수치표고모형과 ArcSATEEC 모형을 이용하여 경사장/경사도인자 지도로 작성되었다. 지표피복인자 지도는 2차년도와 3차년도의 데이터베이스와 토지이용도에 의해서 래스터 형식의 월별 지도로 작성되었다. 그리고 경작방법인자는 2차년도와 3차년도의 데이터베이스와 수치표고모형에 의해 래스터 형식의 지도로 작성되었다.

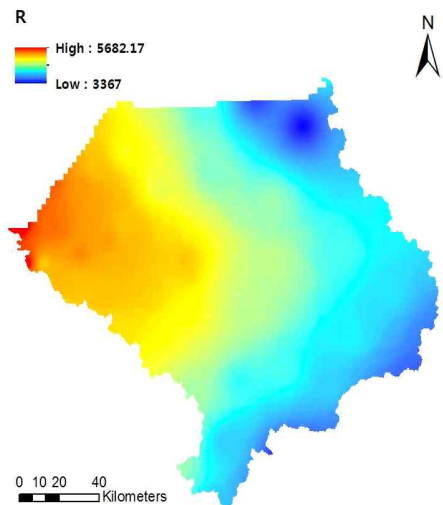
강우침식능인자의 월 최댓값은 지역별로 1,148.42~4,416.9 MJ·mm/ha·hr의 범위로 구축하였으며, 월 최솟값은 지역별로 0.23~61.23 MJ·mm/ha·hr의 범위로 구축되었다. 분석결과와 같이 월 최댓값일 때에는 서쪽 지역(서울과 홍천, 양평지점)에서 큰 값을 보였으며, 월 최솟값일 때에는 유역의 남동쪽 지역(보은과 영주, 태백지점)에서 비교적 큰 강우를 보였다. 기존의 ‘표토의 침식현황에 관한 고시’에 의한 강우침식능인자는 연간 3,367~5,682.17 MJ·mm/ha·hr의 범위로 나타났으며, 서쪽 지역(서울과 홍천)에서 큰 값을 보였다. 토양침식성인자는 0~0.1000 Mg·hr/MJ·cm 범위, 경사도·경사장인자는 0.001~56.589의 범위로 각각 구축되었다. 지표피복인자의 월 최댓값은 지역별로 0~0.560의 범위로 구축되었으며, 월 최솟값은 지역별로 0~0.204의 범위로 구축되었다. 경사도별 경작방법인자는 0~0.402의 범위로 구축되었다<Fig. 2-90>.



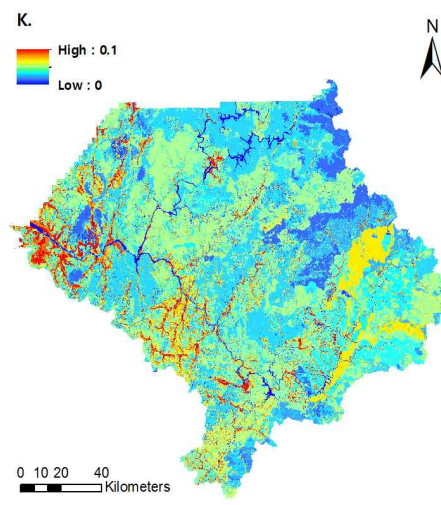
(a) R 인자 최댓값



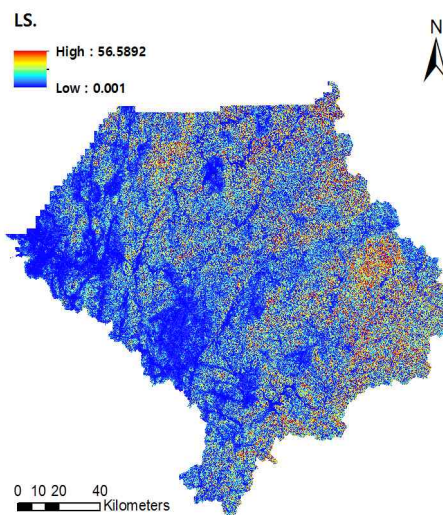
(b) R 인자 최솟값



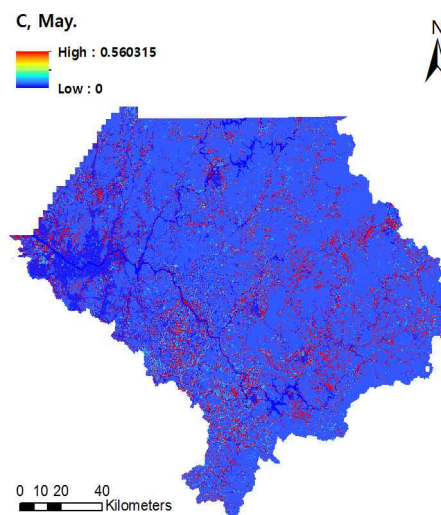
(c) R 인자 고시값



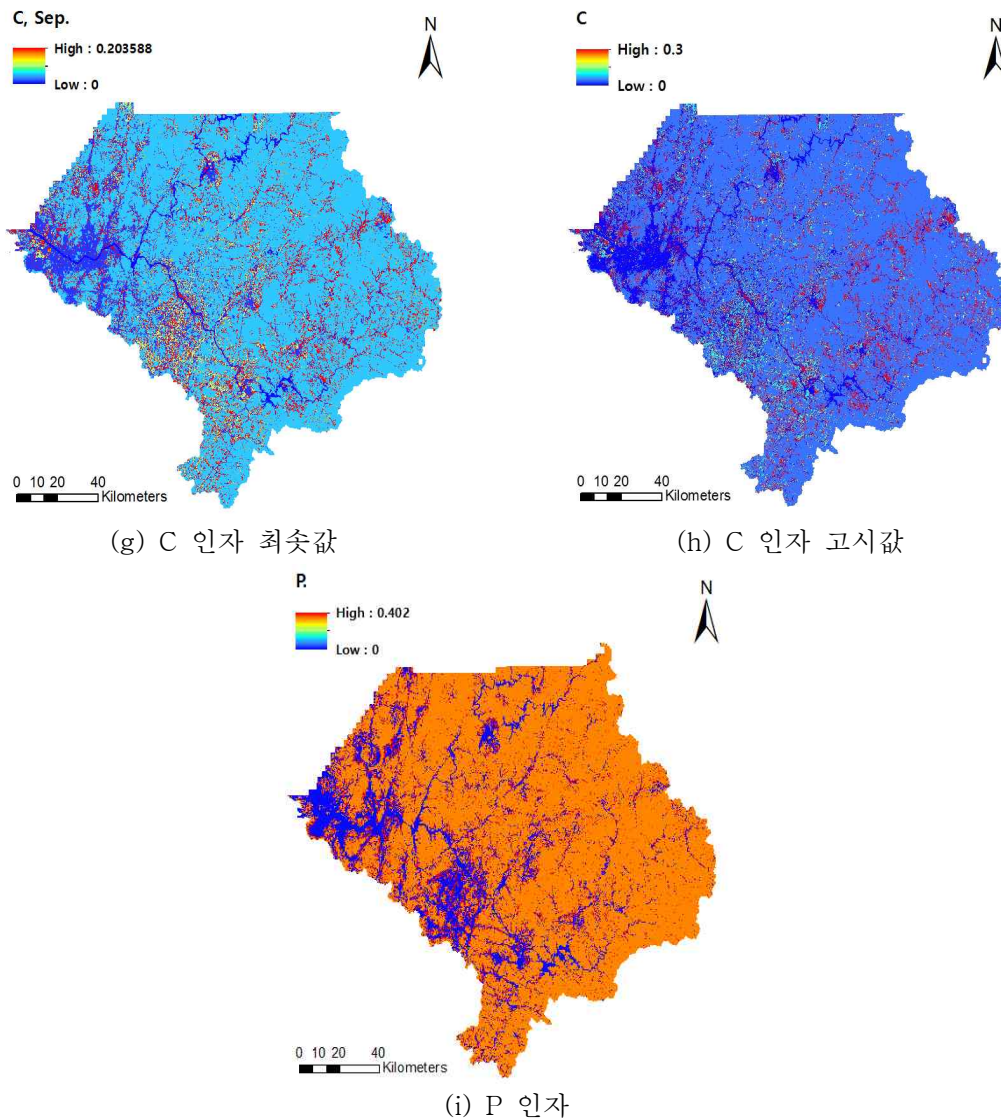
(d) K 인자



(e) LS 인자



(f) C 인자 최댓값

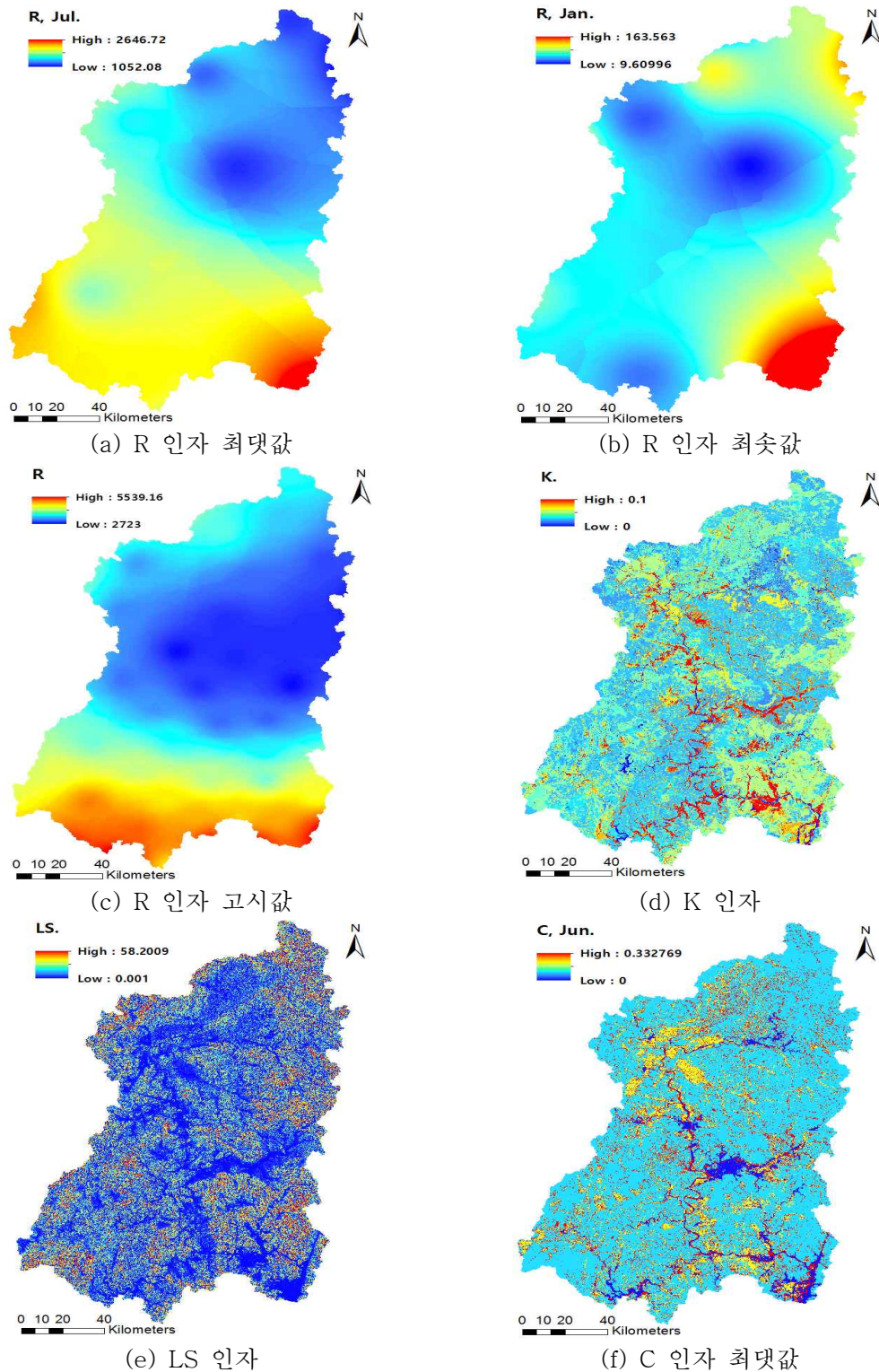


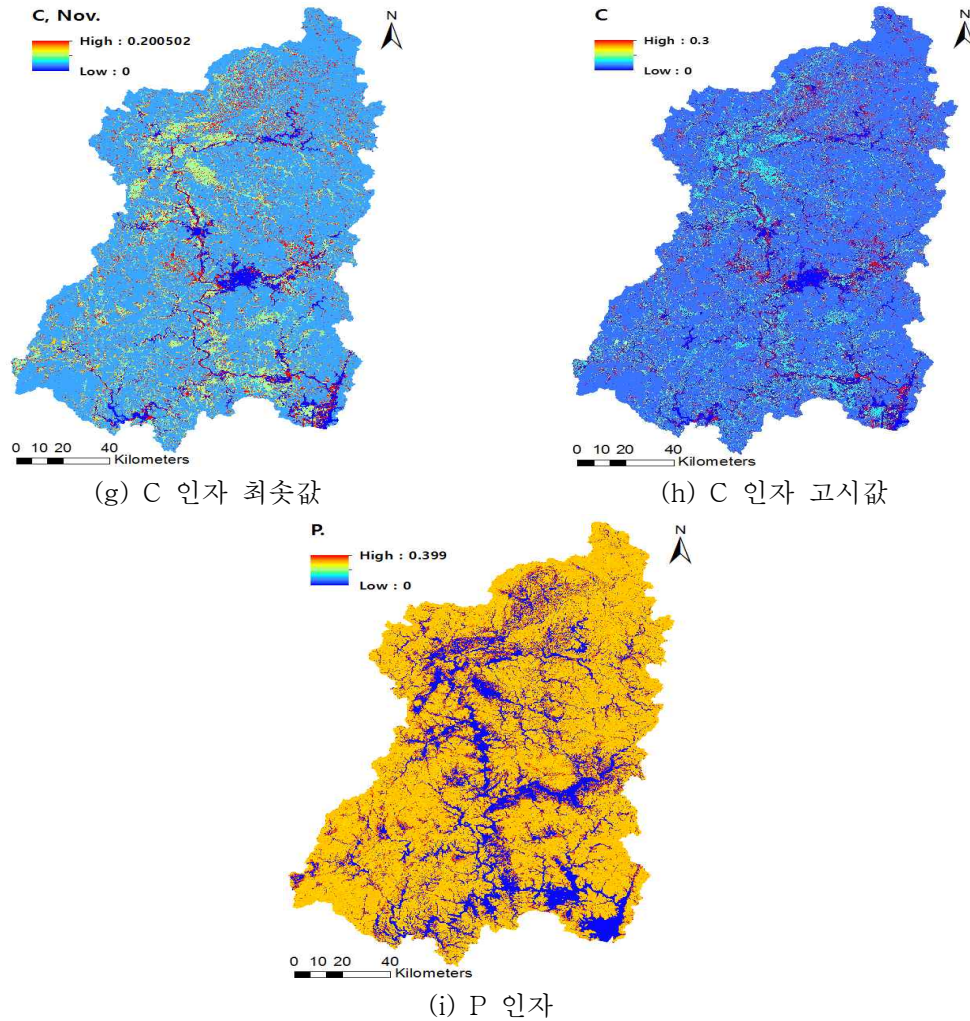
<Fig. 2-90> 한강유역의 SATEEC 입력자료 구축

(3) 낙동강유역에 대한 적용

낙동강유역도 한강유역과 동일한 입력 자료와 방법이 ArcSATEEC 모형에 적용되었다. 낙동강유역의 강우침식능인자를 구축한 결과 월 최댓값은 지역별로 1,052.08~2,646.72 MJ · mm/ha · hr의 범위이며, 월 최솟값은 지역별로 9.61~163.56 MJ · mm/ha · hr의 범위로 나타났다. 결과와 같이 남동쪽유역인 부산지점에서 월 최댓값일 때와 월 최솟값이 비교적 큰 값을 보였다. 기존의 ‘표토의 침식현황에 관한 고시’에 의한 강우침식능인자는 2,723~5,539.16 · hr의 범위로 유역의 남쪽 부분에서 전반적으로 높은 값을 보이면서, 본 연구에서 구축한 결과와 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 토양침식성인자는 0~0.1000 Mg · hr/MJ · cm 범위, 경사도·경사장인자는 0.001~58.201의 범위로 각각 구축되었다. 지표피

북인자의 월 최댓값은 지역별로 0~0.333의 범위로 구축하였으며, 월 최솟값은 지역별로 0~0.201의 범위로 구축되었다. 경사도별 경작방법인자는 0~0.399의 범위로 구축되었다<Fig. 2-91>.

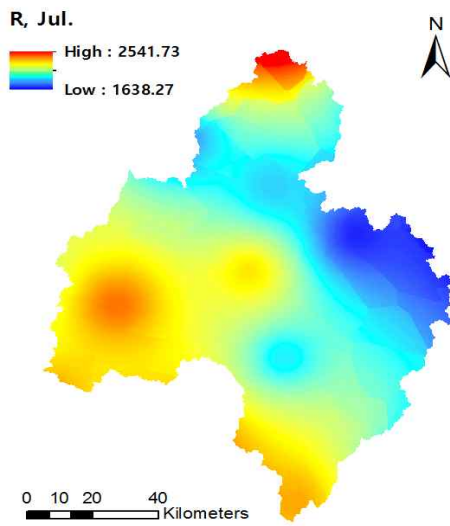




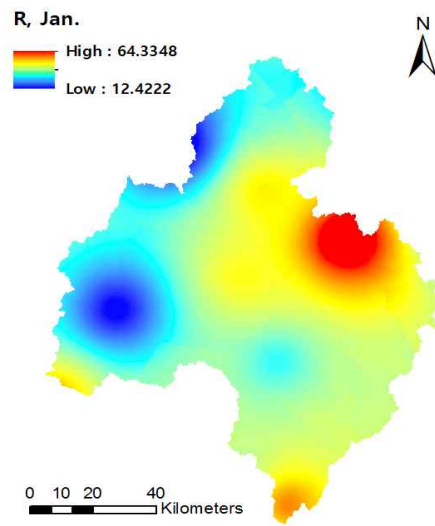
<Fig. 2-91> 낙동강유역의 SATEEC 입력자료 구축

(4) 금강유역에 대한 적용

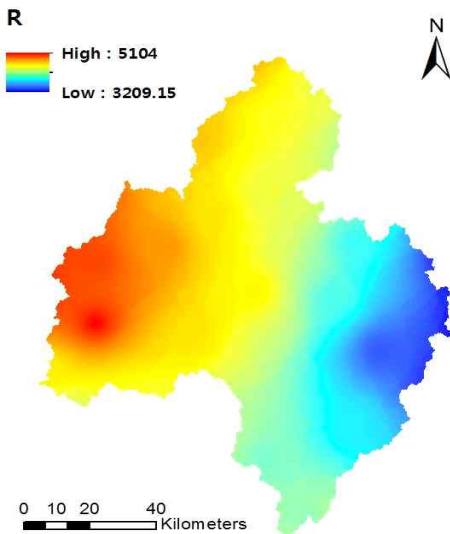
금강유역의 강우침식능인자를 구축한 결과 월 최댓값은 지역별로 1,638.27~2,541.73 MJ · mm/ha · hr의 범위, 월 최솟값은 12.42~64.33 MJ · mm/ha · hr의 범위로 나타났다. 월 최댓값일 때에는 유역의 북쪽 지역인 이천지점에서 비교적 큰 값을 보였으며, 월 최솟값일 때에는 동쪽 지역(보은지점)에서 비교적 큰 값을 보였다. 기존 ‘표토의 침식현황에 관한 고시’에 의한 강우침식능인자는 3,209.15~5,104 MJ · mm/ha · hr의 범위로 서쪽지역에서 크게 나타나 본 연구에서 구축한 결과와 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 토양침식성인자는 한강유역과 동일하게 0~0.0765 Mg · hr/MJ · cm 범위, 경사도·경사장인자는 0.001~55.077의 범위로 각각 구축되었다. 지표피복인자의 월 최댓값은 지역별로 0~0.559의 범위로 구축하였으며, 월 최솟값은 지역별로 0~0.204의 범위로 구축되었다. 경사도별 경작방법인자는 0~0.823의 범위로 구축하였으며, 4대강 유역 중 최댓값이 가장 큰 것으로 나타났다<Fig. 2-92>.



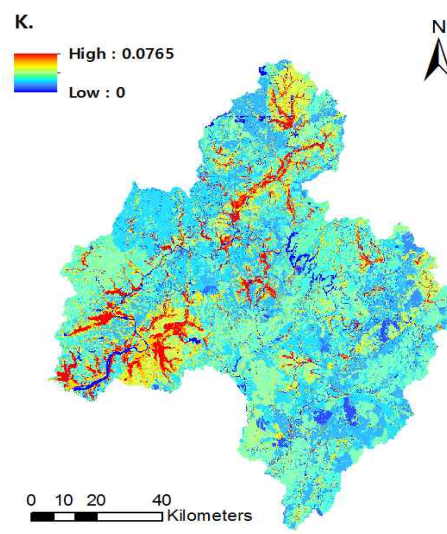
(a) R 인자 최댓값



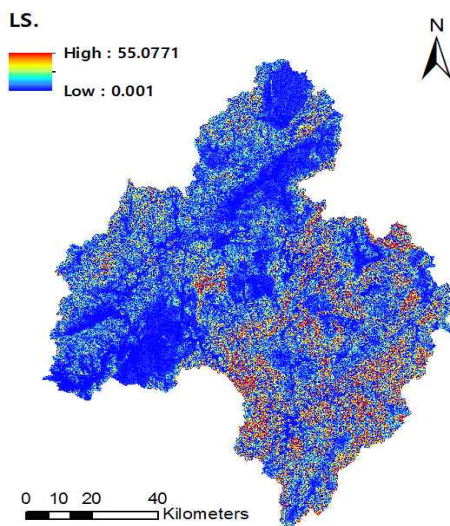
(b) R 인자 최솟값



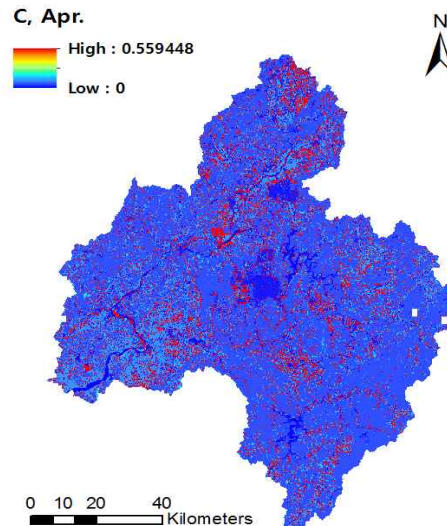
(c) R 인자 교시값



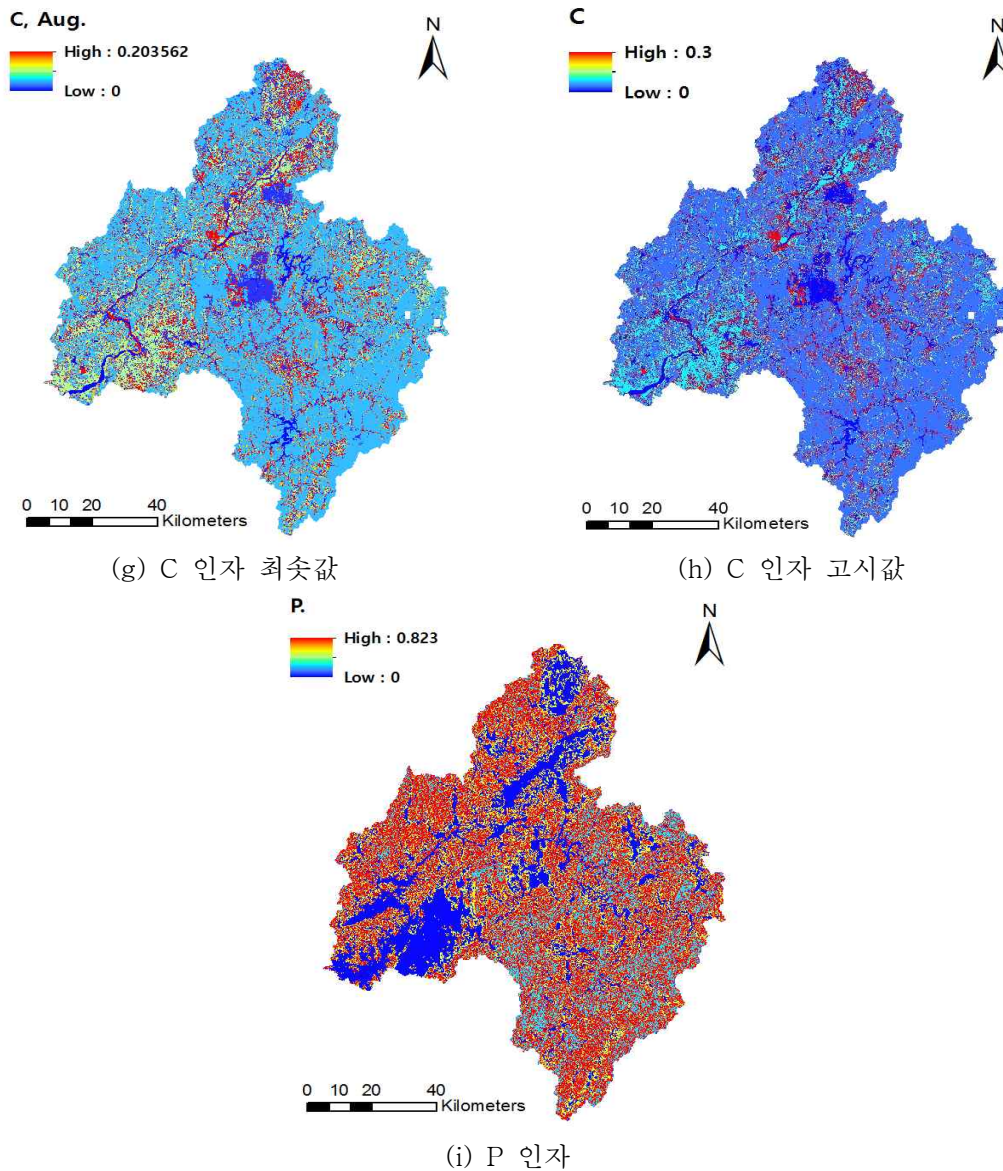
(d) K 인자



(e) LS 인자



(f) C 인자 최댓값

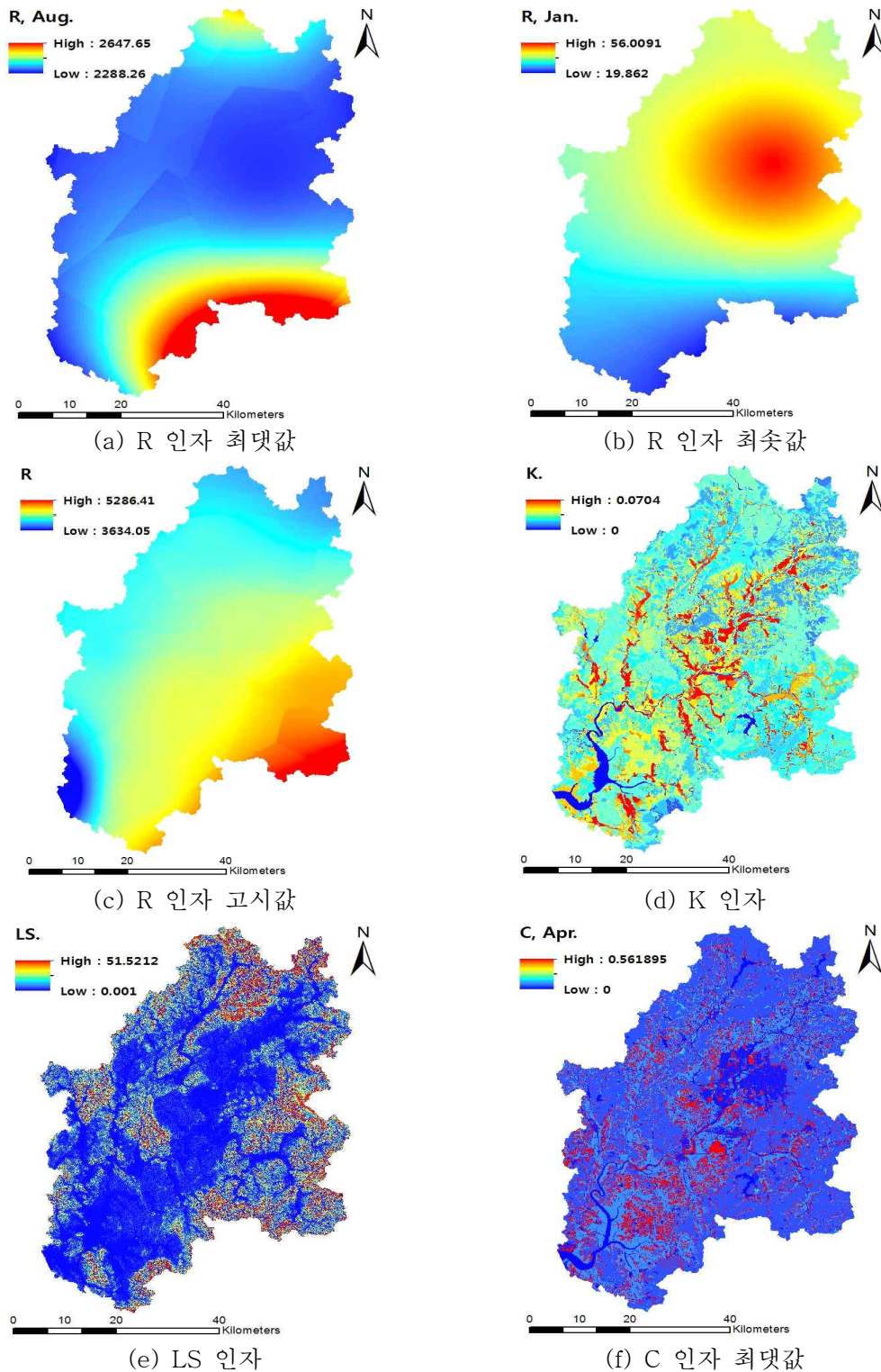


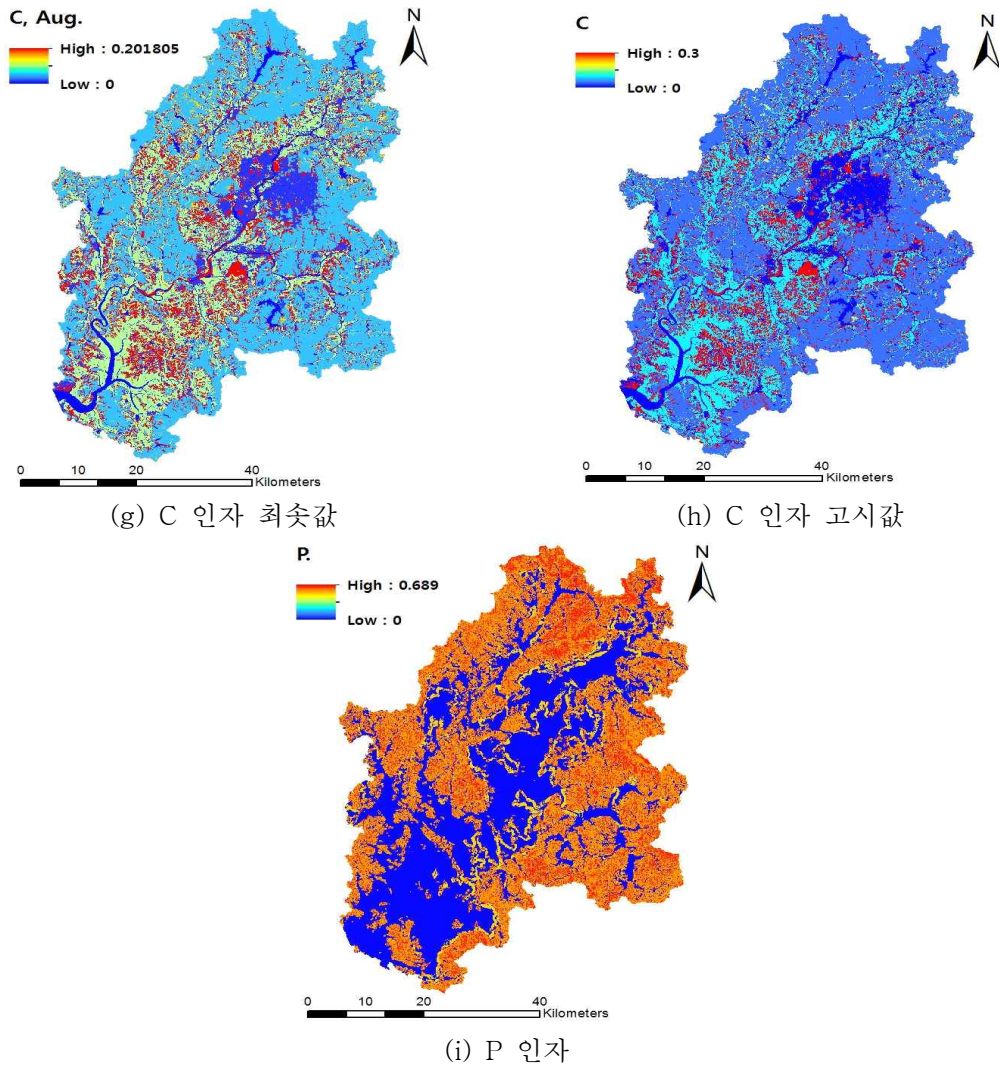
<Fig. 2-92> 금강유역의 SATEEC 입력자료 구축

(5) 영산강유역에 대한 적용

영산강유역의 강우침식능인자를 구축한 결과 월 최댓값은 지역별로 2,288.26~2,647.65 MJ · mm/ha · hr의 범위, 월 최솟값은 지역별로 19.86~56.01 MJ · mm/ha · hr의 범위로 나타났다. 월 최댓값일 때에는 유역의 남쪽 지역인 장흥지점에서 비교적 큰 값을 보였으며, 월 최솟값일 때에는 유역의 동쪽 지역인 광주지점에서 비교적 큰 값을 보였다. 과거 ‘표토의 침식현황에 관한 고시’에 의한 강우침식능인자는 3,634.05~5,286.41 MJ · mm/ha · hr의 범위로 구축하였으며, 남동쪽 지역에서 큰 값을 보여 월 최댓값일 때와 유사한 것으로 나타났다. 토양침식성인자는 0~0.0704 Mg · hr/MJ · cm 범위, 경사도·경사장인자는 0.001~51.521의

범위로 각각 구축되었다. 지표피복인자의 월 최댓값은 지역별로 0~0.562의 범위로 구축하였으며, 월 최솟값은 지역별로 0~0.202의 범위로 구축되었다. 경사도별 경작방법인자는 0~0.689의 범위로 구축되었다<Fig. 2-93>.



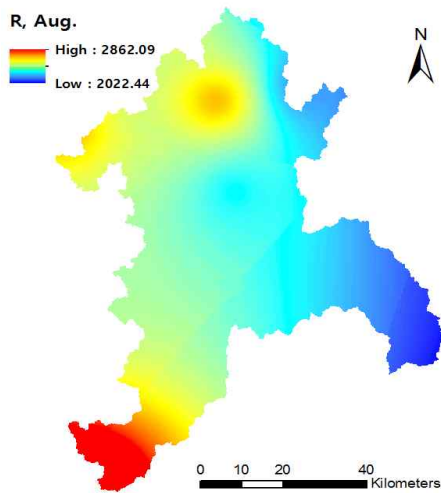


<Fig. 2-93> 영산강유역의 SATEEC 입력자료 구축

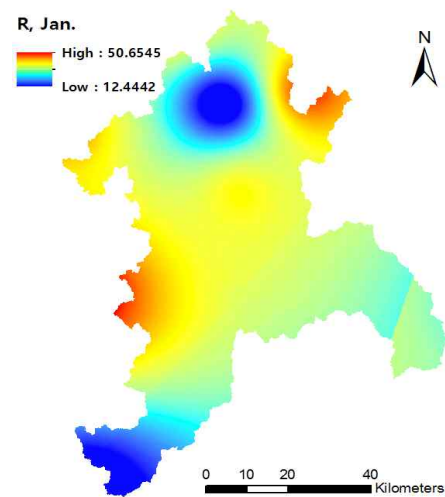
(6) 섬진강유역에 대한 적용

섬진강유역의 강우침식능인자를 구축한 결과 월 최댓값은 지역별로 2,022.44~2,862.09 MJ · mm/ha · hr의 범위, 월 최솟값은 12.44~50.65 MJ · mm/ha · hr의 범위로 나타났다. 월 최댓값일 때에는 유역의 남서쪽 지역인 장흥지점에서 큰 값을 보였으며, 월 최솟값일 때에는 유역의 서쪽 지역인 광주지점에서 비교적 큰 값을 보였다. 과거 ‘표토의 침식현황에 관한 고시’에 의한 강우침식능인자는 3,861~5,590.06 MJ · mm/ha · hr의 범위로 남동쪽지역이 가장 큰 것으로 나타나 본 연구에서 산정한 결과와 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 영산강유역과 섬진강유역은 강우침식능인자와 경사도·경사장인자 그리고 지표피복인자는 다른 적용범위의 값을 사용하지만, 토양침식성인자와 경작방법인자는 동일한 적용범위의 값을 적용하였다. 그러나 경사도·경사장인자는 동일한 범위의 값으로 나타났다. 토양침식성인자는

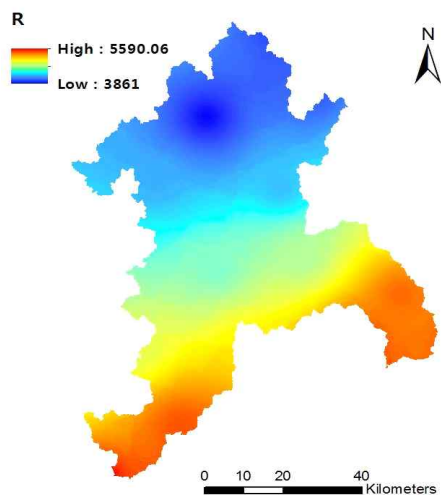
0~0.0704 Mg · hr/MJ · cm 범위, 경사도·경사장인자 인자는 0.001~51.521의 범위로 각각 구축되었다. 지표피복인자의 월 최댓값은 지역별로 0~0.562의 범위로 구축하였으며, 월 최솟값은 지역별로 0~0.202의 범위로 구축되었다. 경사도별 경작방법인자는 0~0.689의 범위로 구축되었다<Fig. 2-94>.



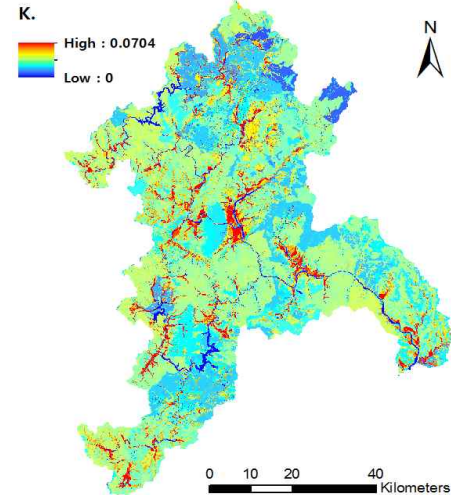
(a) R 인자 최댓값



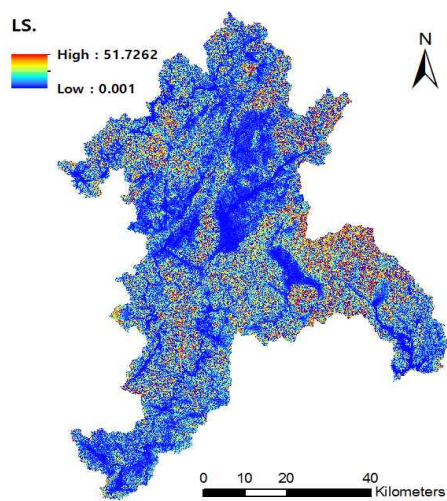
(b) R 인자 최솟값



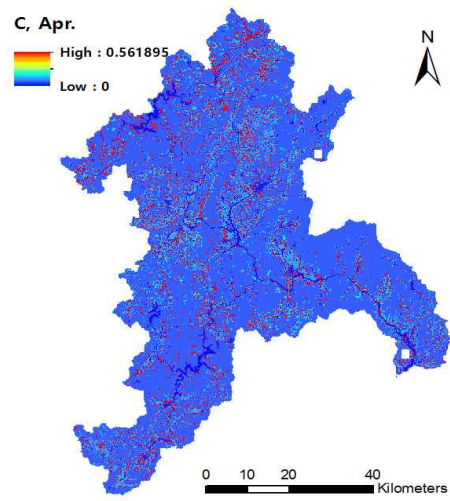
(c) R 인자 고시값



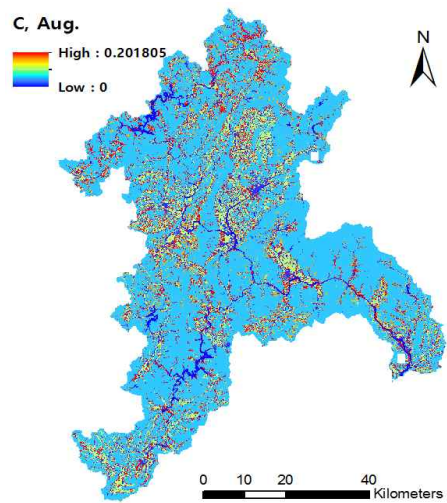
(d) K 인자



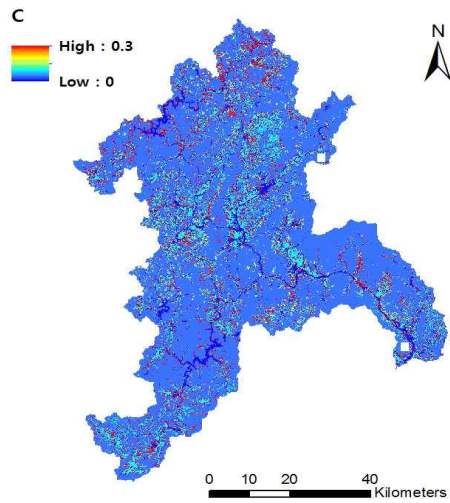
(e) LS 인자



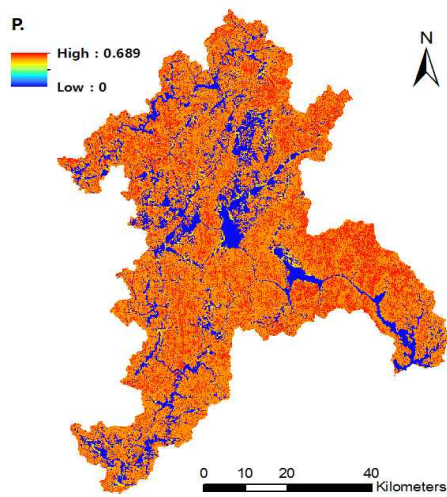
(f) C 인자 최댓값



(g) C 인자 최솟값



(h) C 인자 고시값



(i) P 인자

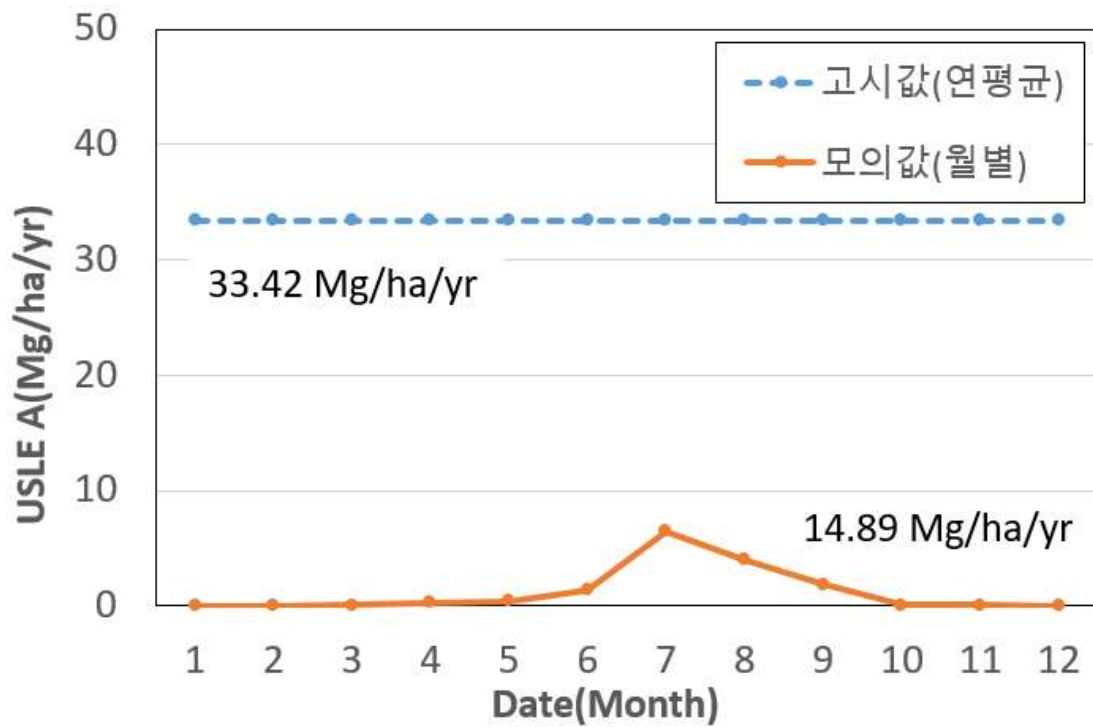
<Fig. 2-94> 섬진강유역의 SATEEC 입력자료 구축

(7) ArcSATEEC을 이용한 4대강의 토양유실가능성 추정치

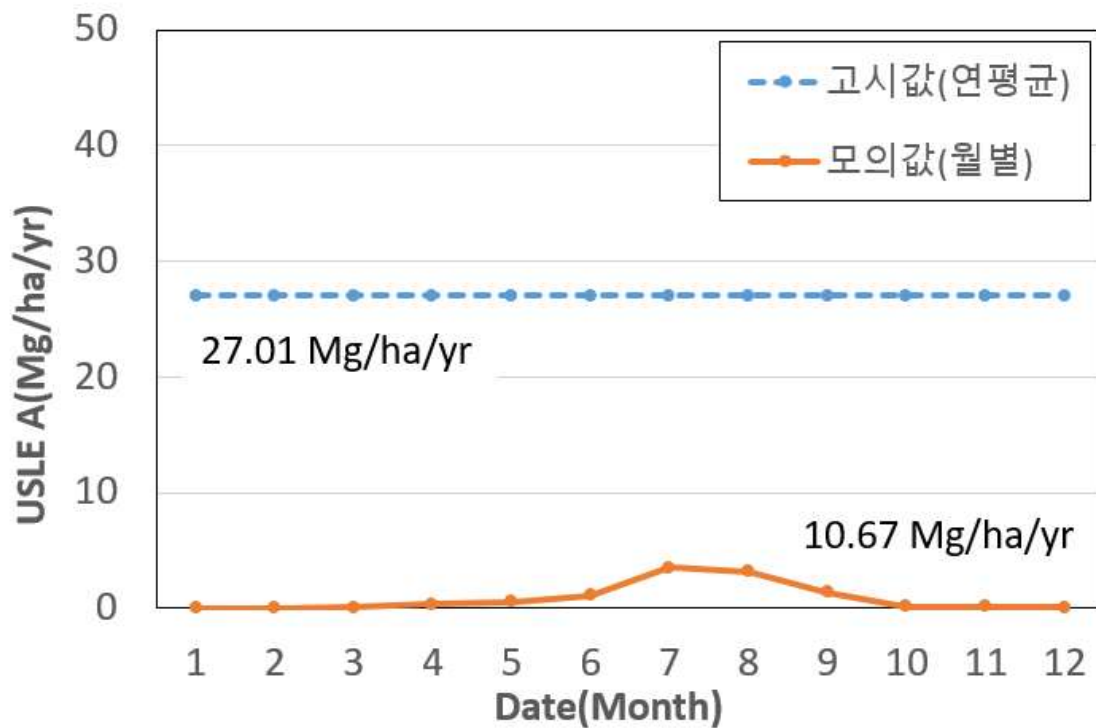
4대강 유역의 토양유실가능성 추정치를 월별로 산정한 결과 기존 환경부 고시 값보다 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 금강과 섬진강 그리고 영산강 유역은 고시값의 약 85%정도 인 것으로 산출되었으나, 한강과 낙동강은 약 44.6%와 39.5% 인 것으로 나타났다. 기존 고시값과 ArcSATEEC을 이용한 토양유실가능성 추정치는 모두 섬진강 유역이 40.15 Mg/ha/Year와 34.45 Mg/ha/Year로 가장 많은 것으로 나타났다. 본 연구에서 산정한 토양유실가능성 추정치를 월별로 분석해 보면 4대강 유역모두 7월과 8월에 집중되어 토양유실이 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 우리나라 장마철 발생하는 강우를 반영하여 나타난 결과로 보여진다. 한강유역의 경우 7월에 6.51 Mg/ha/Month로 가장 많은 토양유실이 발생하는 것으로 나타났으며, 1월과 2월에 0.01 Mg/ha/Month의 토양유실이 발생하는 것으로 나타났다. 낙동강유역의 경우는 7월과 8월에 각각 3.51 Mg/ha/Month와 3.18 Mg/ha/Month로 연간 총 발생하는 토양유실량의 62.7%가 집중되어 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같이 월별 토양토양유실가능치를 분석한 결과 강우에 의한 영향이 높기 때문에 연간 토양유실량을 이용하여 동일한 값을 적용하는 데에는 문제가 있다. 따라서, 계절성을 고려할 수 있는 월별 토양유실량을 산정하여 유역별 토양유실량을 산정해야 할 것으로 판단된다.

<Table 2-29> 4대강 유역별 월단위 토양유실가능성 추정치 (Unit: Mg/ha/Month)

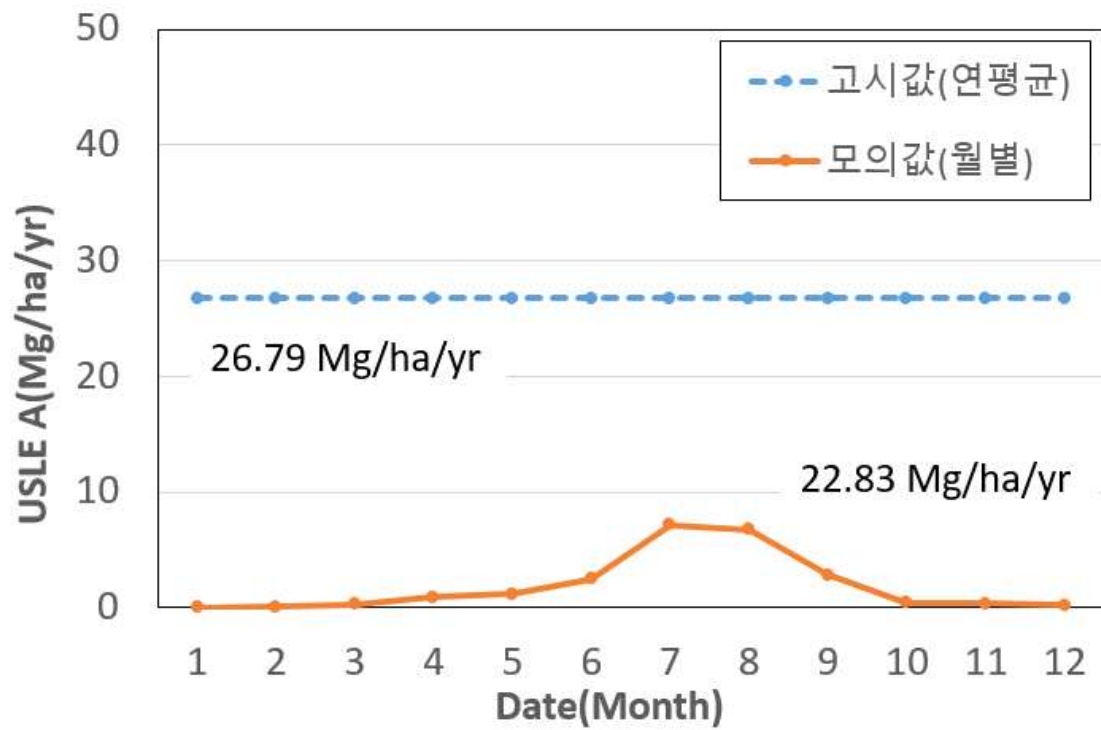
	한강	낙동강	금강	영산강	섬진강
1월	0.01	0.01	0.04	0.04	0.04
2월	0.01	0.03	0.12	0.19	0.22
3월	0.07	0.09	0.33	0.39	0.51
4월	0.33	0.36	0.91	0.98	1.33
5월	0.48	0.56	1.19	1.35	1.88
6월	1.39	1.11	2.5	2.09	3.01
7월	6.51	3.51	7.15	6.59	10.41
8월	4.01	3.18	6.74	7.56	11.05
9월	1.86	1.41	2.84	2.76	4.02
10월	0.12	0.19	0.43	0.59	0.68
11월	0.08	0.14	0.37	0.76	0.8
12월	0.02	0.07	0.22	0.63	0.5
합(모의값) Mg/ha/Year	14.89	10.67	22.83	23.93	34.45
고시값 Mg/ha/Year	33.42	27.01	26.79	28.14	40.15



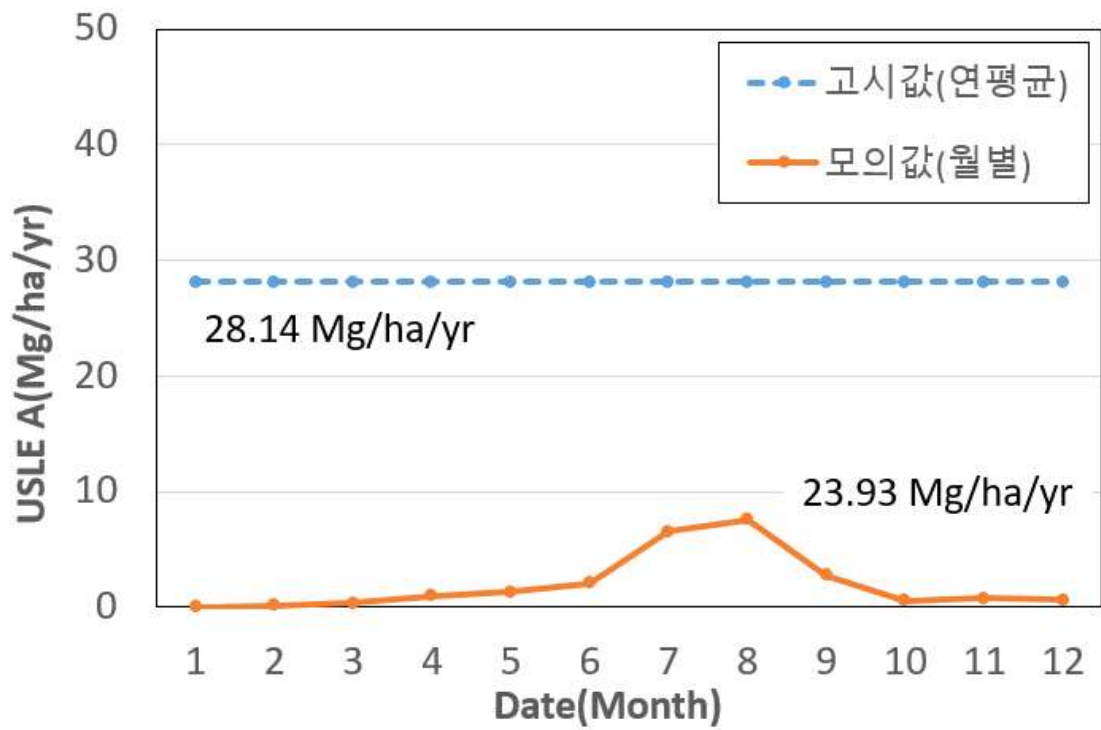
<Fig. 2-95> 한강유역의 토양유실량 월별 변화 및 고시값 비교



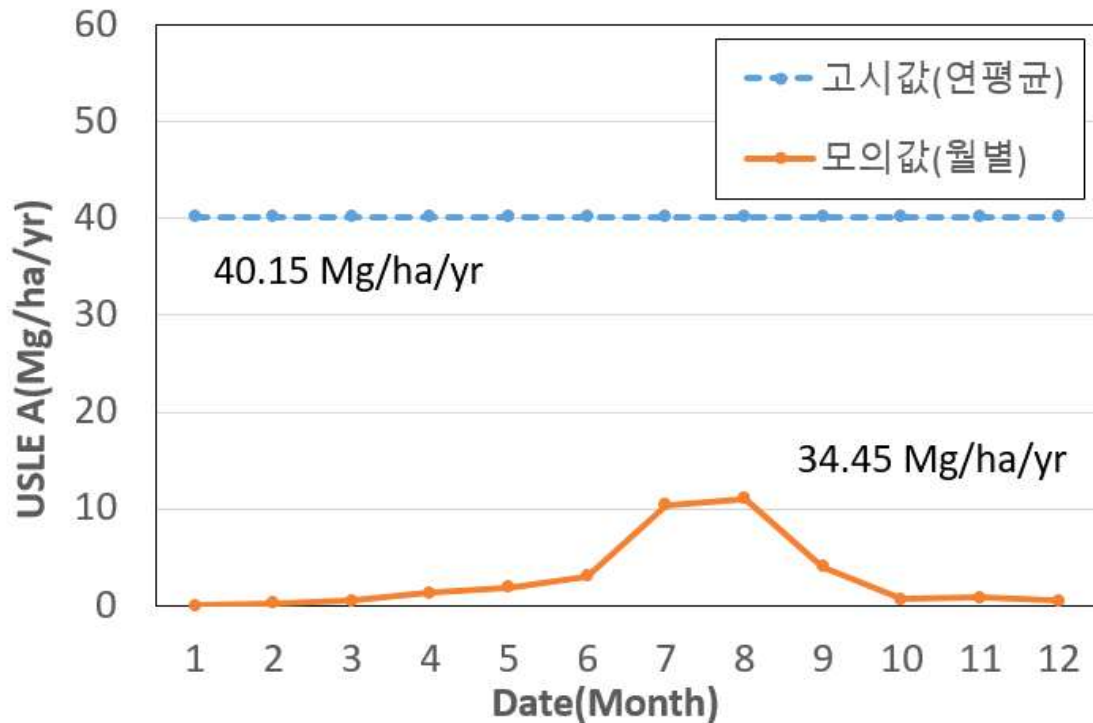
<Fig. 2-96> 낙동강유역의 토양유실량 월별 변화 및 고시값 비교



<Fig. 2-97> 금강유역의 토양유실량 월별 변화 및 고시값 비교



<Fig. 2-98> 영산강유역의 토양유실량 월별 변화 및 고시값 비교



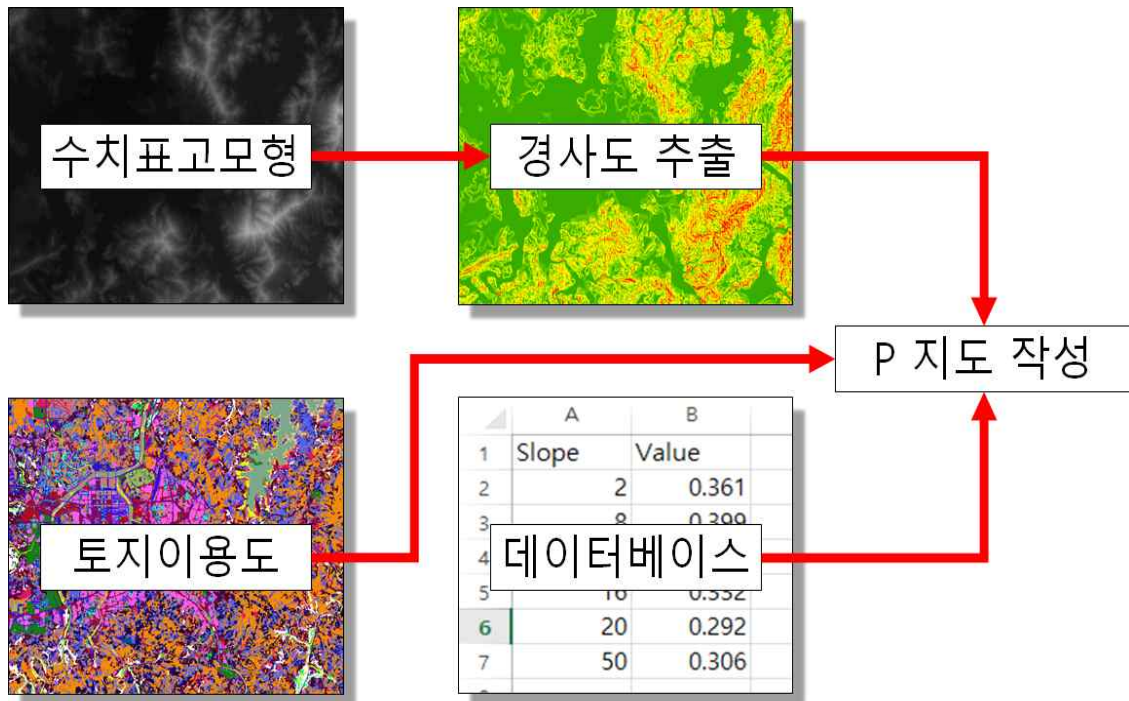
<Fig. 2-99> 섬진강유역의 토양유실량 월별 변화 및 고시값 비교

라. 한국형 토양유실 공식의 개선

(1) 보전관리인자 지도 산정 모듈 개선

2차년도와 3차년도에서 현장조사를 통해 4대강 유역(금강, 낙동강, 섬진강, 영산강, 한강)에 대한 경사도별 보전관리인자를 산정할 수 있도록 작물정보와 영농방법에 대한 DB를 구축하였다. 3차년도에서 월단위 토양유실량을 예측하기 위해서 GIS 기반의 모형을 개발하고, 일반적으로 사용되고 있는 GIS 자료를 이용하여 각 인자를 자동으로 산정할 수 있는 모듈을 개발하였다. 보전관리인자 지도의 경우, 수치표고모형을 이용하여 경사도를 추출하고 이 경사도를 이용하여 보전관리인자 값을 부여하도록 되어 있었는데, 이 경우 농경지가 아닌 산지나 도시 지역에 대해서도 경사도에 의한 보전관리인자 값이 부여되도록 되어 있었다. 따라서 농경지를 제외한 지역에 대해서는 모두 1.0의 값을 부여하고, 농경지에 대해서는 유역별 및 경사도별로 구축된 DB에 의해 값이 부여할 수 있도록 개선할 필요가 있다.

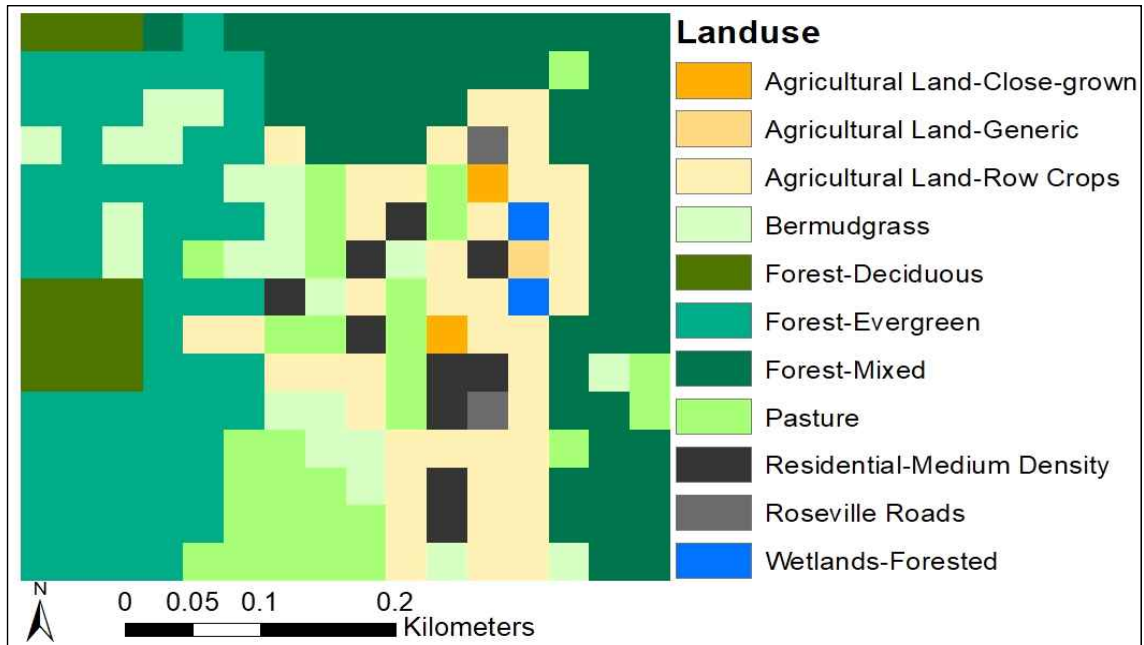
따라서 토지이용현황 정보 없이 지점의 경사도에 의해 일괄적으로 값을 정의하지 않고, 지점의 토지이용현황 정보에 의해 선택적으로 보전관리인자 값을 정의할 수 있는 모듈을 추가하였다<Fig. 2-100>.



<Fig. 2-100> 토지이용별 보전관리인자 산정 흐름도

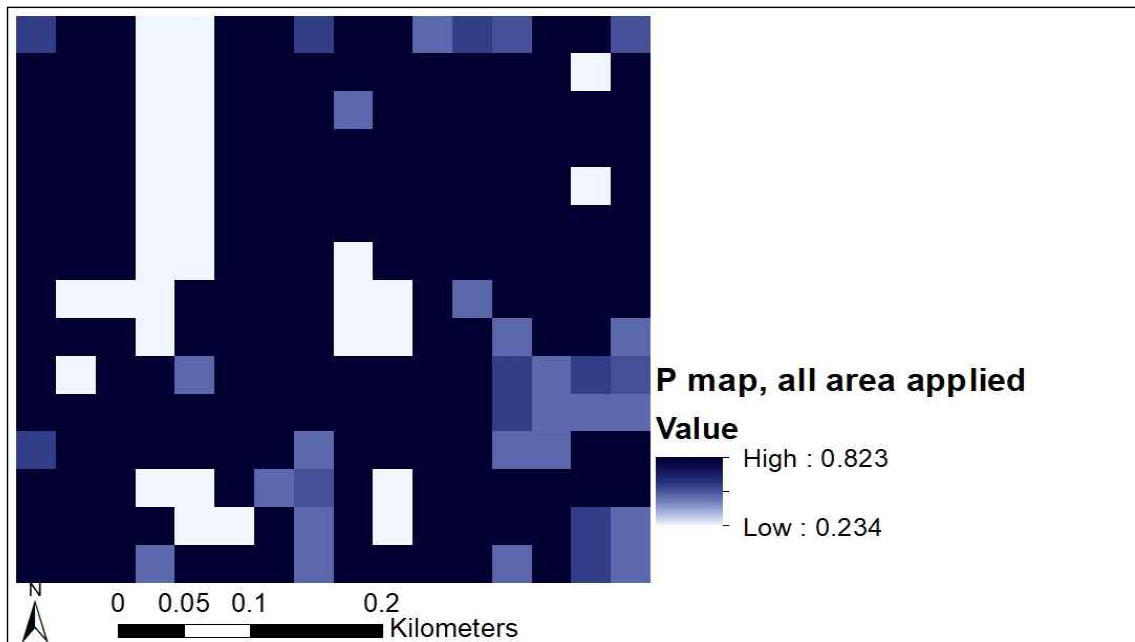
이 모듈은 보전관리인자 지도 작성을 위해 수치표고모형만을 요구하던 기존의 모듈과 달리, 토지이용도와 토지이용도에서 농경지 지역에 대한 격자 코드(Grid Code)를 요구한다. 즉, 기존의 모듈은 수치표고모형을 이용하여 경사도 지도를 작성한 뒤, 유역별/경사도별 보전관리인자 데이터베이스에 의해서 보전관리인자 지도를 작성하였다. 하지만 개선된 모듈은 전체 지점에 대한 경사도 지도를 작성한 뒤에, 토지이용도로부터 농경지 지점 정보를 불러온 후 이 지점들에 대해서만 경사도 정보를 추출하고, 유역별/경사도별 보전관리인자 데이터베이스에 의해서 농경지에 대한 보전관리인자 값을 부여하고, 농경지가 아닌 지역에 대해서는 1.0을 값을 부여한 다음, 이들을 합쳐서 최종적인 보전관리인자 지도를 작성한다.

산정된 보전관리인자 산정 모듈의 적용 예를 들기 위해 금강 유역 내에 작은 지역에 대해 이 모듈을 적용하였다. <Fig. 2-101>에서 보이는 것처럼, 농경지 등 총 11개의 토지이용 현황이 존재하는데, 이 중에서 농경지에 해당하는 지역은 3지역(‘Agricultural Land-Close-grown’, ‘Agricultural Land-Generic’, ‘Agricultural Land-Row Crops’)이다.

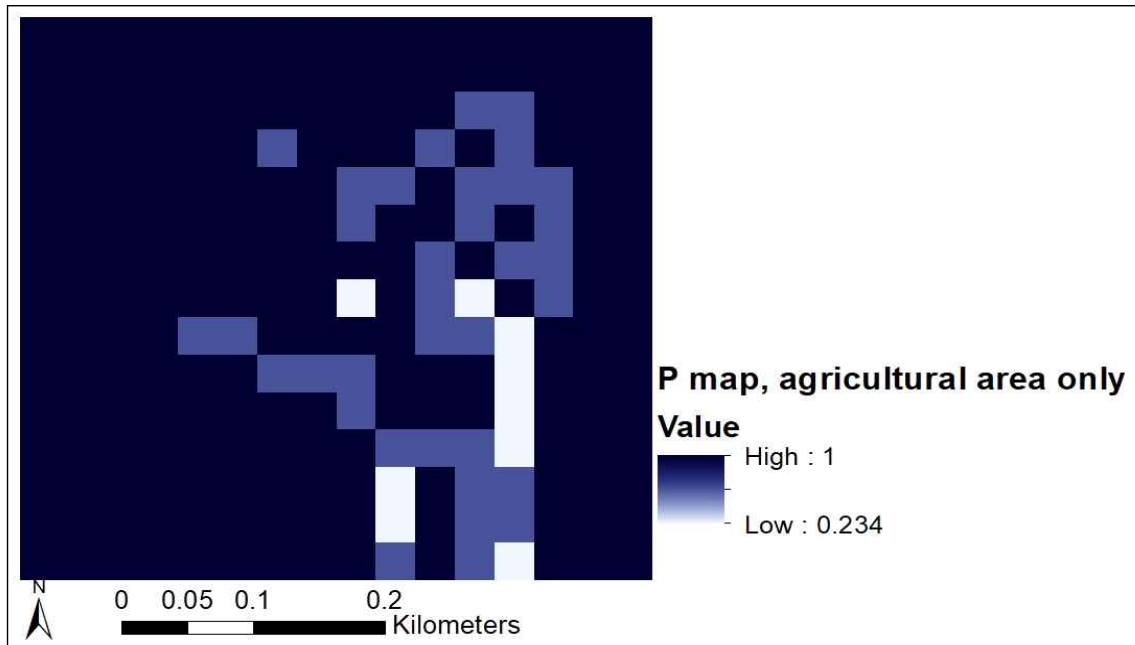


〈Fig. 2-101〉 개선된 보전관리인자 지도 생성 모듈 예시를 위한 토지이용도

〈Fig. 2-102〉는 농경지 지점에 대한 구분 없이 모든 지역에 대해서 경사도에 의해 보전관리인자 값을 부여하는 기존의 모듈에 의한 결과이며, 〈Fig. 2-103〉는 농경지 지점들에 대해서만 선택적으로 보전관리인자 값을 선택적으로 부여하고, 농경지 지역이 아닌 지역에 대해서는 경사도와 상관없이 1.0을 부여하는 개선된 모듈에 의한 결과이다.



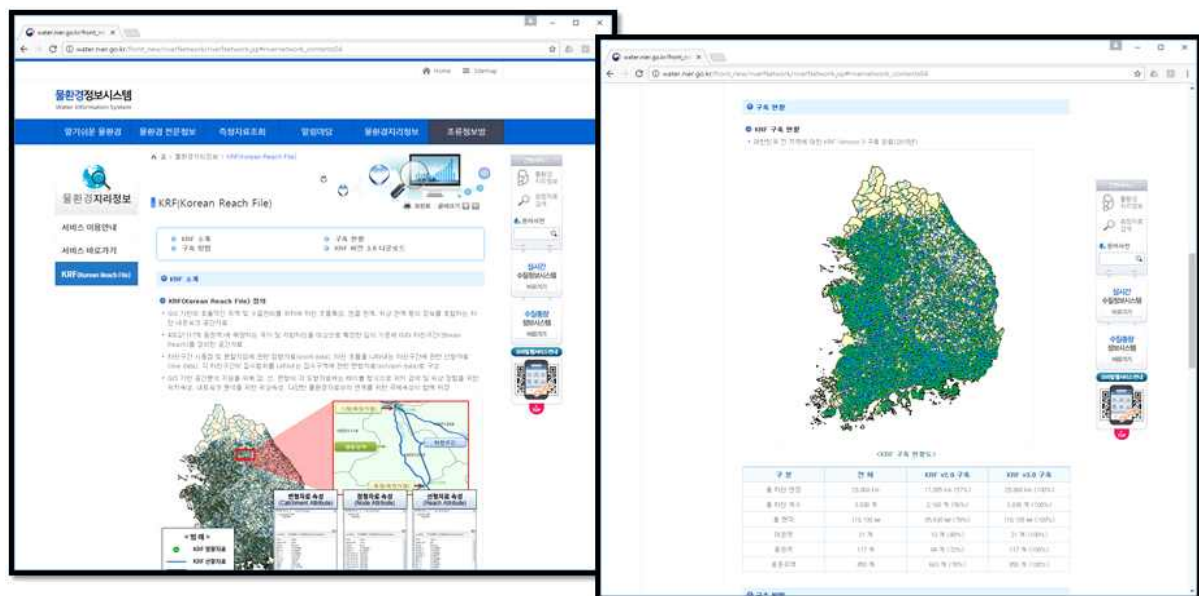
〈Fig. 2-102〉 전 지역에 대한 보전관리인자 정의 예시



〈Fig. 2-103〉 농경지 지역에 대한 선택적 보전관리인자 정의 예시

마. 표토침식 우려지역 선정

기존 연구에서는 표토침식 우려지역을 선정할 때 4대강 유역별 북쪽 또는 남쪽으로 구분하여 대략적인 위치 분석을 하였으나, 본 연구에서는 토양유실량 등급화를 통해 보다 정확한 표토침식 우려지역을 구분하고자 하였다. 등급화를 위한 유역 구분은 물환경정보시스템의 표준유역도(KRF)를 기준으로 구분하였다.



〈Fig. 2-104〉 물환경정보시스템 표준유역도(KRF)

(1) 표토침식 우려지역 선정을 위한 대상구역

표토침식 우려 지역 선정을 위해 4대강 유역을 대상으로 토양유실량을 등급화하였다. 등급화를 위해 ArcSATEEC 모형을 이용하였으며, 모형의 입력자료인 수치표고모형, 토양도, 토지이용도를 구축하였다. 수치표고모형은 국립지리원에서 제공하는 1:5,000의 수치지도를 사용하여 30 m의 해상도를 가지는 격자 래스터 파일로 변환하여 구축하였으며, 토지이용도는 환경부 환경공간정보서비스에서 제공하는 2005년 대분류 토지피복도(1:25,000)를 이용하였다. 토양도는 농촌진흥청 국립농업과학원에서 제공하는 정밀토양도(1:25,000)를 이용하였다 <Table 2-30, Fig. 2-105>.

토양유실의 월별 특성을 반영하기 위해 2016년도 연구결과와 같이 ArcSATEEC 모형과 함께 제공되는 2000년부터 2014년까지의 월평균 강우량 자료에 대한 월별 강우침식능인자 Point feature 데이터베이스를 사용하여도 무방하나, 최근 각 연별 그리고 월별 강우침식능인자의 변화를 고려하기 위해 월평균 강우량 자료가 아닌 기상청의 2003년 1월 1일부터 2016년 12월 31일까지의 일 단위 강우량 자료를 수집하여 이를 각 지점에 대해서 월별 강우량 자료로 변환한 뒤, Kongju National University(2015)에 의해 제안된 월별 강우침식능인자를 산정하였다. 즉, 기존 연구에서는 12개의 월별 강우침식능인자가 산출되나, 본 연구에서는 168개(14년)의 강우침식능인자 Point feature 데이터베이스를 구축하였다.

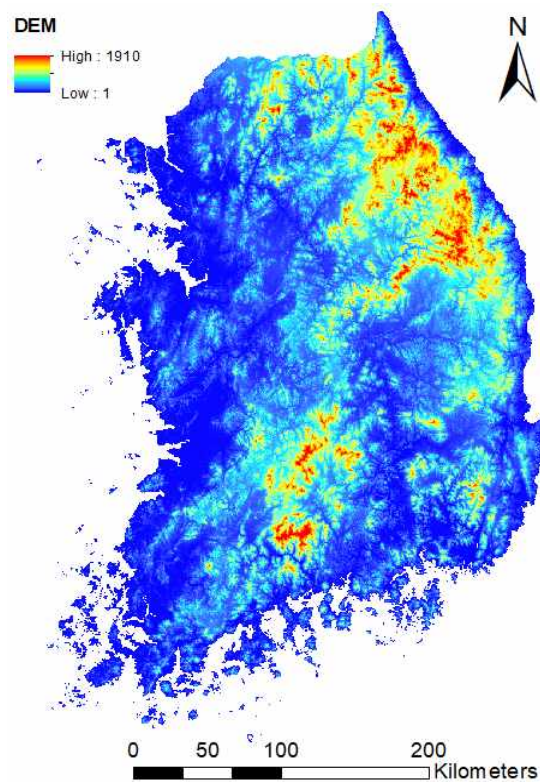
4대강 유역의 23개의 세분류 분류항목으로 토지이용을 분석한 결과 낙동강 유역은 23,690 km²으로 가장 큰 면적인 것으로 나타났으며, 산림지역이 67.4%, 농업지역이 16.9%를 차지하는 것으로 나타났다. 한강의 유역면적은 22,298 km²으로 나타났으며, 이중 산림이 71%, 농업지역이 12.8%를 차지하는 것으로 나타났다. 다음으로 금강과 섬진강 그리고 영산강 순으로 면적이 큰 것으로 나타났으며, 영산강 유역이 농업지역이 차지하는 면적이 35.7%로 가장 큰 것으로 나타났다<Table 2-31>.

<Table 2-30> Description of input data source

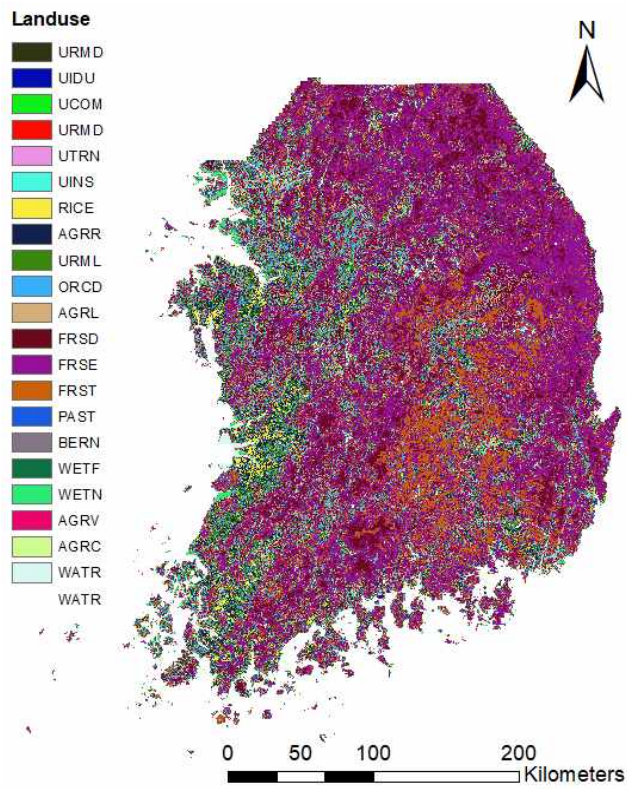
Data	Description	Source
Digital elevation model	Scale 1:5,000	National Geographic Information Institute, Ministry of Land, Infrastructure and Transport
Soil map	Scale 1:25,000	National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration
Landuse	Scale 1:25,000	Environmental Geographic Information Service, Ministry of Environment
Rainfall data	Daily precipitation (2003. 1. 1. - 2016. 12. 31.)	Korea Meteorological Administration

<Table 2-31> 대상유역별 토지이용현황

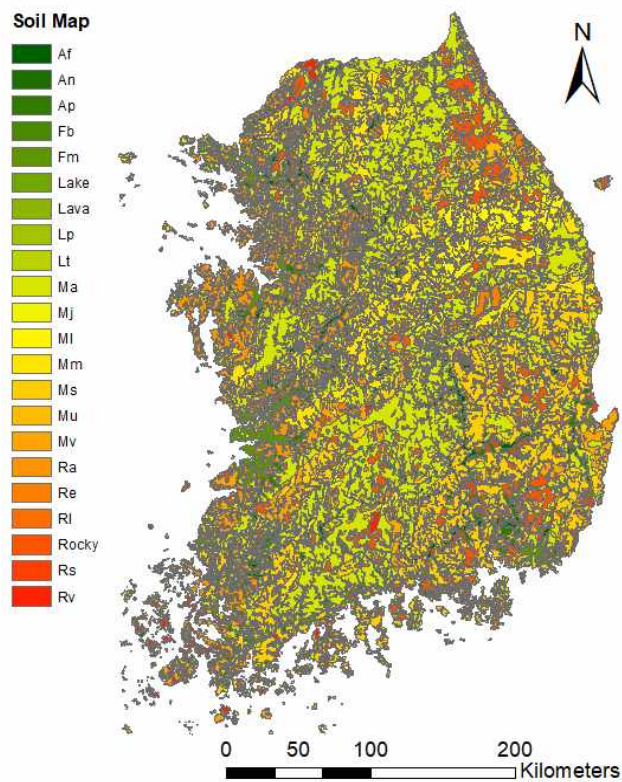
유역 분류	금강	한강	낙동강	섬진강	영산강
총면적 (km ²)	9,903	22,298	23,690	4,903	3,473
시가화건조지역 (%)	4.9	5.8	4.6	2.6	7.4
농업지역 (%)	25.5	12.8	16.9	19.5	35.7
(논)	(12.9)	(4.0)	(7.5)	(10.5)	(21.3)
(밭)	(10.1)	(7.5)	(5.4)	(7.3)	(10.9)
산림지역 (%)	57.9	71.0	67.4	68.1	45.4
초지 (%)	6.0	5.1	5.8	5.1	5.0
습지 (%)	1.5	0.8	1.3	1.3	1.4
나지 (%)	1.9	2.2	2.2	1.2	1.8
수역 (%)	2.3	2.3	1.8	2.2	3.3



(a) 수치표고모형



(b) 토지이용도



(c) 토양도

<Fig. 2-105> 4대강 유역의 입력자료

(2) 한강유역의 토양유실량 등급화

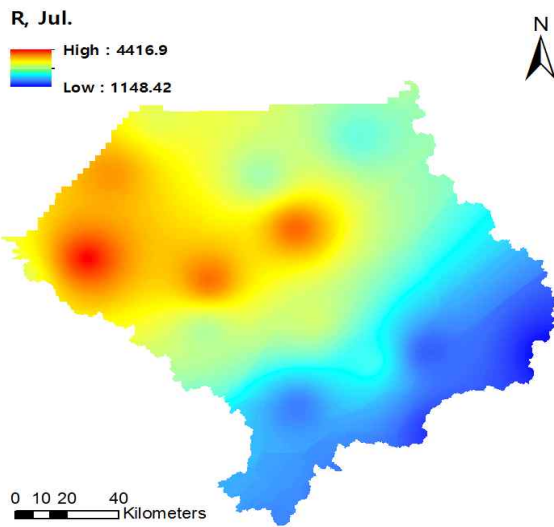
(가) 월별 토양유실량 예측

한강유역의 토양유실량을 등급화하기 위해 ArcSATEEC 모형을 이용하여 2003년부터 2016년까지 월별 강우침식능인자 지도를 생성하였으며, 토양침식성인자 지도는 래스터 형식의 토양도 자료를 그대로 사용하여 각 토양 속성에 대한 인자값으로 정의하였으며, 지형인자 지도와 보전관리인자 지도는 수치표고모형을 입력 자료로 하여 모형에서 생성되도록 하였다. 또한, 지표피복인자는 토지이용도를 입력 자료로 하여 모형의 데이터베이스에 의해 각 월에 해당하는 12개의 지표피복인자 지도가 생성되도록 하였다.

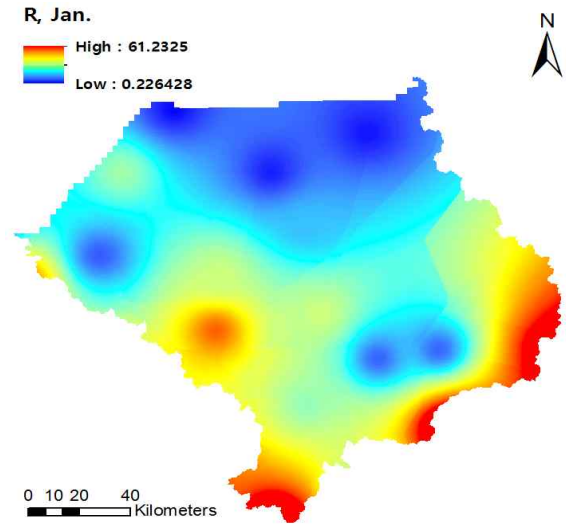
전체 모의 기간인 14년에 대한 168개의 월별 토양유실량을 분석한 결과 <Table 2-32>과 같이 강우침식능인자는 2006년 7월에 $2,191.010 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr} \sim 19,318.400 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$ 로 가장 큰 것으로 나타났으며, 2012년 2월에 $00.000 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr} \sim 30.403 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$ 로 가장 작은 것으로 나타났다. 토양침식성인자(K)는 모의 기간 동안 변하지 않는 값으로 $0.000 \text{ Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{mm} - 0.100 \text{ Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{mm}$ 의 범위로 나타났으며, 지형인자(LS)는 유역의 경사에 따라 0.069에서 76.723의 범위로 큰 변화폭을 보였다. 지표피복인자(C)는 작물의 생장이 고려되어, 유역 내 위치한 강이나 습지와 같은 수역이 0.000의 값으로 적용되었으며, 수역을 제외한 토지이용(논, 밭, 산림, 도시 등)의 최댓값은 5월에 가장 큰 0.560 최솟값은 9월에 0.204로 적용이 되었다.

<Table 2-32> Ranges of factors in 2003~2016

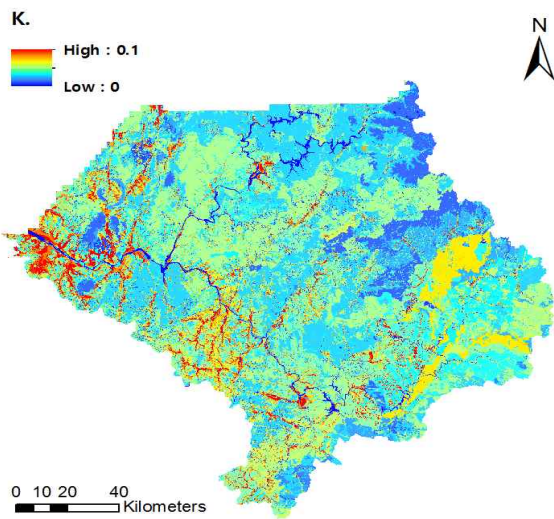
	R ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$)	K ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$)	LS (-)	C (-)	P (-)
Min.	0.000~30.403 / ($4.665 \cdot 10^{-7}$)	0.000	0.069	0.000~0.204	0.000
Max.	2,191.010~19,318.400	0.100	76.723	0.000~0.560	1.000



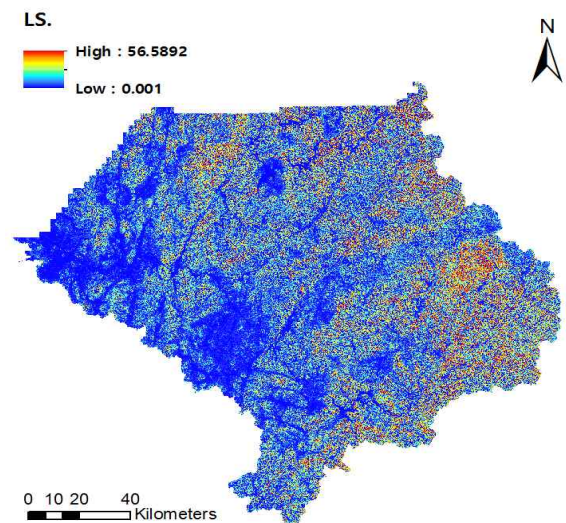
(a) R 인자 최댓값



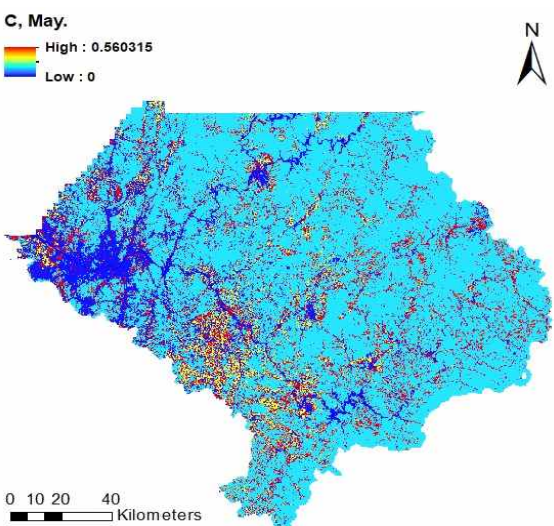
(b) R 인자 최솟값



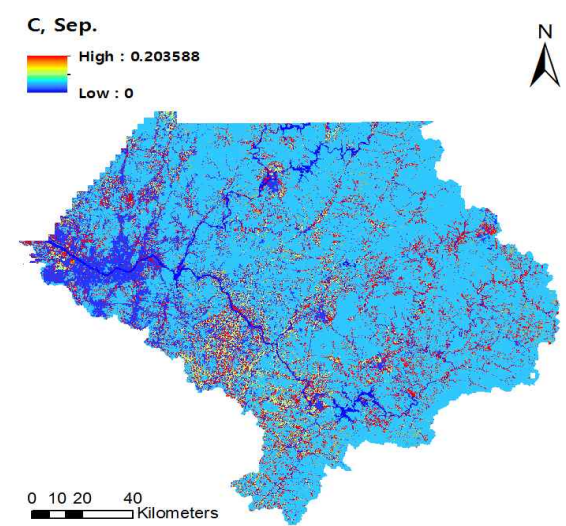
(c) K 인자



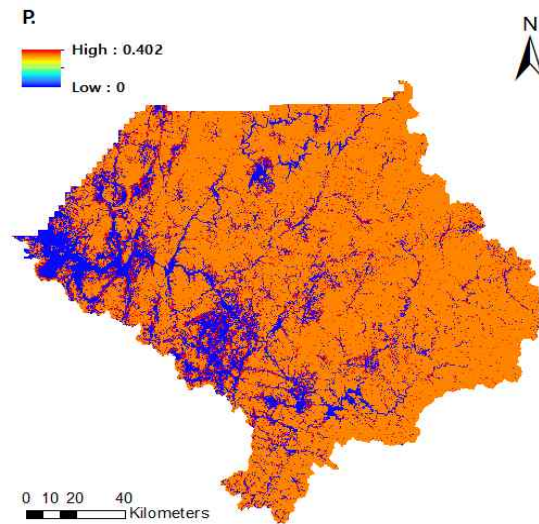
(d) LS 인자



(e) C 인자 최댓값



(f) C 인자 최솟값



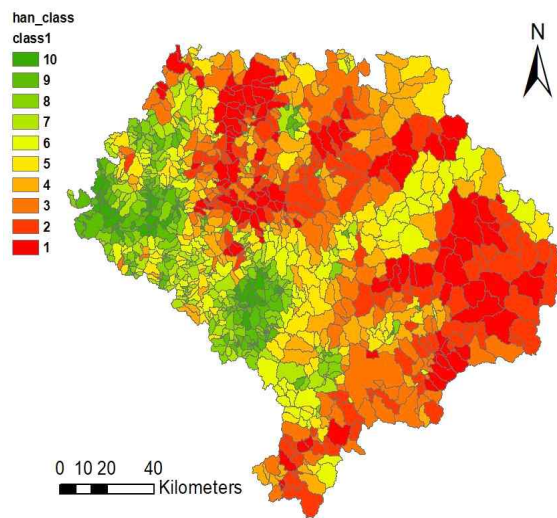
(g) P 인자

<Fig. 2-106> 한강유역의 ArcSATEEC 구축자료 및 결과

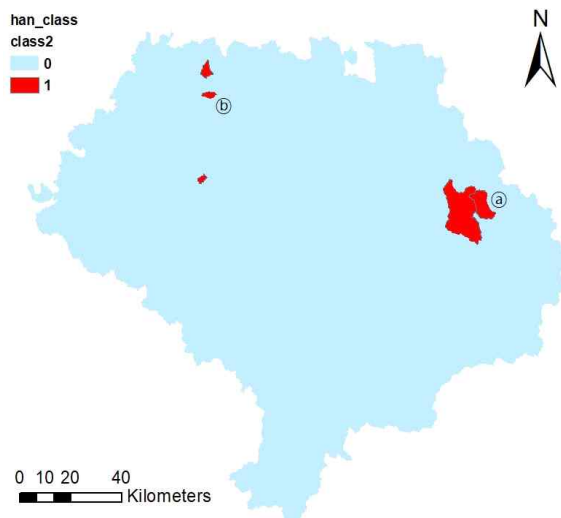
(나) 토양유실량 우려지역의 선정

표준유역도를 기준으로 한강유역은 총 1,181개의 소유역으로 구분되어지며, 각 소유역별 연간 토양유실량과 단위면적당 발생할 수 있는 토양유실량을 예측하였다<Fig. 2-107>. 분석 결과 토양유실량이 가장 크게 예측된 유역의 경우 연간 발생할 수 있는 토양유실량이 175.33 Mh/ha/yr로 나타났으며, 1,181개의 소유역 중에 57개의 소유역은 최근 14년 동안의 기상 조건에 대해 발생할 수 있는 토양유실량이 1.00 Mg/ha/yr 이하로 아주 낮게 예측되었다.

이와 반대로, 한강 유역 내 토양유실 가능성이 가장 큰 5개의 구역을 정의하였는데 <Fig. 2-108>에서 보이는 바와 같이 3개의 구역은 유역의 서쪽 부분에 위치하고 있으며, 2개의 유역은 유역의 동쪽 지역에 위치하고 있다. 유역의 동쪽에 위치한 ㉠구역은 평창군 봉산리, 정성군 유천리, 구절리로 이루어져 있으며 연간 토양유실 가능성이 175.33 Mg/ha/yr로 가장 큰 값으로 예측되었으며, 서쪽에 위치한 ㉡구역은 가평군 도대리, 적목리로 이루어져 있으며 158.24 Mg/ha/yr로 연간 토양유실 가능성이 두 번째로 큰 것으로 예측되었다.



〈Fig. 2-107〉 한강유역 소유역 등급화 결과



〈Fig. 2-108〉 한강유역 주요 토양유실 우려지역

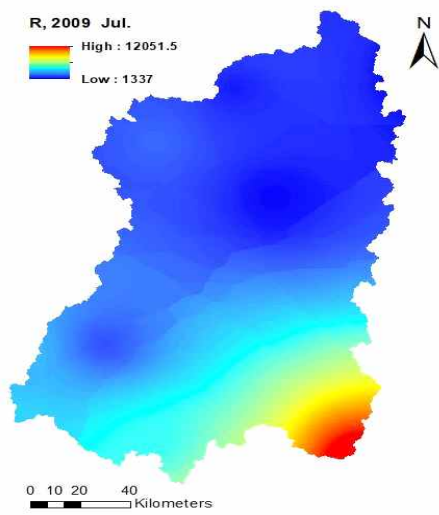
(3) 낙동강유역의 토양유실량 등급화

(가) 월별 토양유실량 예측

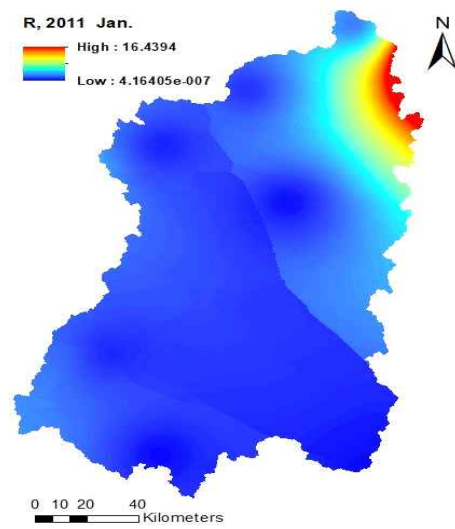
낙동강유역도 한강유역과 동일한 입력 자료와 방법이 ArcSATEEC 모형에 적용되었다. 전체 모의 기간인 14년에 대한 168개의 월별 토양유실량을 분석한 결과 〈Table 2-33〉와 같이 강우침식능인자는 2009년 7월에 $1,337.000 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr} \sim 12,051.500 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$ 로 가장 큰 것으로 나타났으며, 2011년 1월에 $0.000 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr} \sim 16.439 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$ 로 가장 작은 것으로 나타났다. 토양침식성인자(K)는 모의 기간 동안 변하지 않는 값으로 $0.000 \text{ Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{mm} \sim 0.100 \text{ Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{mm}$ 의 범위로 나타났으며, 지형인자(LS)는 유역의 경사에 따라 0.069에서 78.534의 범위로 큰 변화폭을 보였다. 지표피복인자(C)는 작물의 생장이 고려되어, 유역 내 위치한 강이나 습지와 같은 수역이 0.000의 값으로 적용되었으며, 수역을 제외한 토지이용(논, 밭, 산림, 도시 등)의 최댓값은 6월에 가장 큰 0.333 최솟값은 11월에 0.201로 적용이 되었다.

〈Table 2-33〉 Ranges of factors in 2003~2016

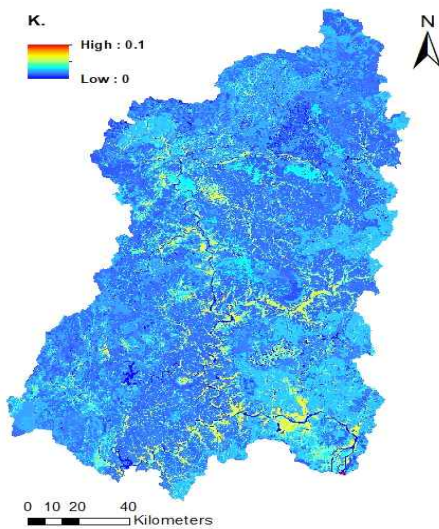
	R ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$)	K ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$)	LS (-)	C (-)	P (-)
Min.	0.000~16.439 / ($4.164 \cdot 10^{-7}$)	0.000	0.069	0.000~0.201	0.000
Max.	1,337.000~12,051.500	0.100	78.534	0.000~0.333	1.000



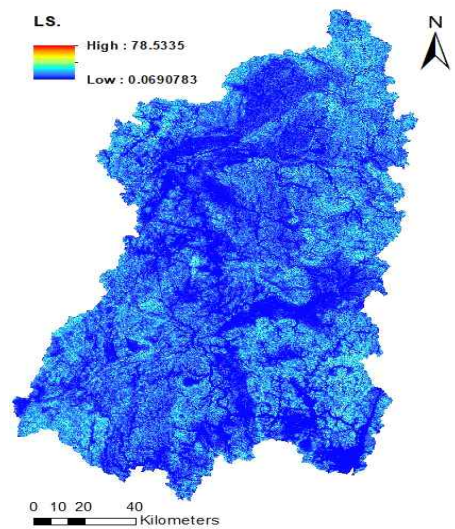
(a) R 인자 최댓값



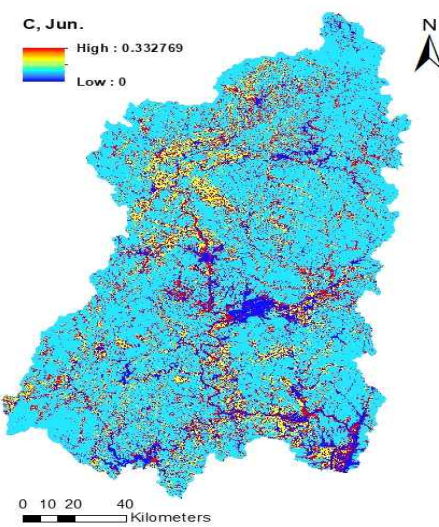
(b) R 인자 최솟값



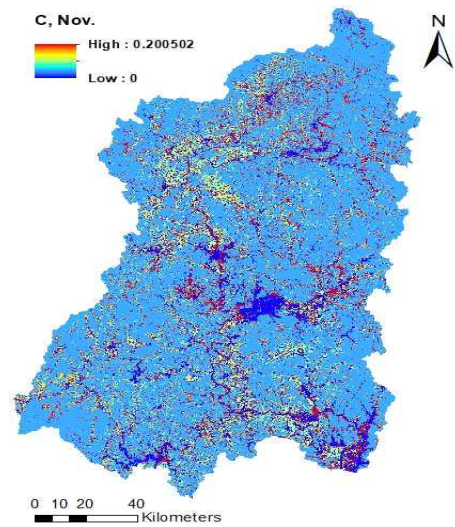
(c) K 인자



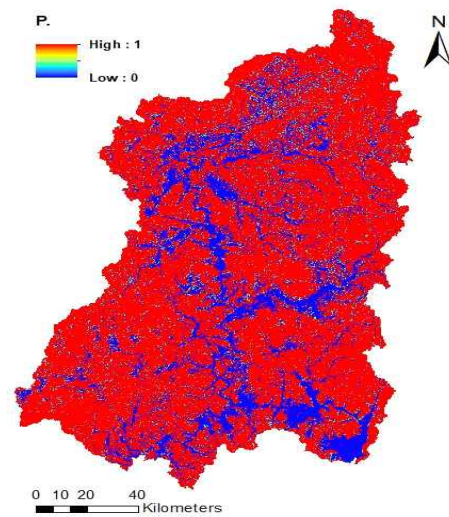
(d) LS 인자



(e) C 인자 최댓값



(f) C 인자 최솟값



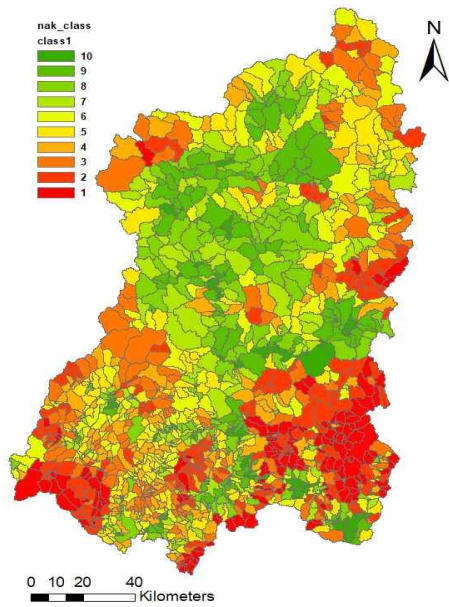
(g) P 인자

<Fig. 2-109> 낙동강유역의 ArcSATEEC 구축자료 및 결과

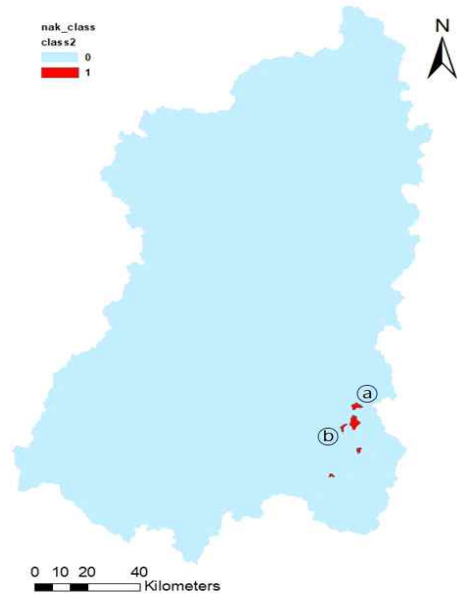
(나) 토양유실량 우려지역의 선정

표준유역도를 기준으로 낙동강유역은 총 1,570개의 소유역으로 구분되어지며, 각 소유역 별 연간 토양유실량과 단위면적당 발생할 수 있는 토양유실량을 예측하였다<Fig. 2-110>. 분석결과 토양유실량이 가장 크게 예측된 유역의 경우 연간 발생할 수 있는 토양유실량이 182.08 Mh/ha/yr로 나타났으며, 1,570개의 소유역 중에 81개의 소유역은 최근 14년 동안의 기상 조건에 대해 발생할 수 있는 토양유실량이 1.00 Mg/ha/yr 이하로 아주 낮게 예측되었다.

이와 반대로, 낙동강 유역 내 토양유실 가능성이 가장 큰 5개의 구역을 정의하였는데 <Fig. 2-111>에서 보이는 바와 같이 5개의 구역은 유역의 남쪽 지역에 위치하고 있다. 5개 구역중 ㉠구역은 밀양시 원서리로 연간 토양유실 가능성이 182.08 Mg/ha/yr로 가장 큰 값으로 예측되었으며, ㉡구역은 밀양시 사연리로 연간 토양유실 가능성이 166.49 Mg/ha/yr로 두 번째로 큰 것으로 예측되었다.



〈Fig. 2-110〉 낙동강유역 소유역 등급화 결과



〈Fig. 2-111〉 낙동강 유역 주요 토양유실 우려지역

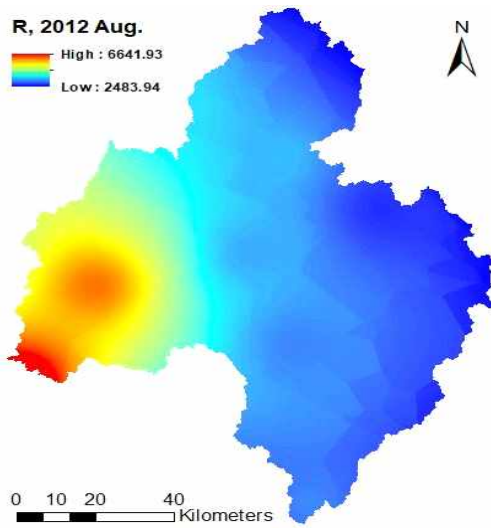
(4) 금강유역의 토양유실량 등급화

(가) 월별 토양유실량 예측

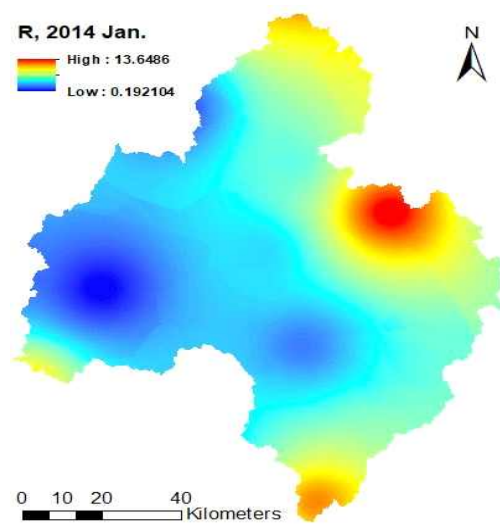
금강유역의 전체 모의 기간인 14년에 대한 168개의 월별 토양유실량을 분석한 결과 〈Table 2-34〉과 같이 강우침식능인자는 2012년 8월에 $2,483.940 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr} \sim 6,641.930 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$ 로 가장 큰 것으로 나타났으며, 2014년 1월에 $0.192 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr} \sim 13.649 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$ 로 가장 작은 것으로 나타났다. 토양침식성인자(K)는 모의 기간 동안 변하지 않는 값으로 $0.000 \text{ Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{mm} \sim 0.077 \text{ Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{mm}$ 의 범위로 나타났으며, 지형인자(LS)는 유역의 경사에 따라 0.069에서 80.863의 범위로 큰 변화폭을 보였다. 지표피복인자(C)는 작물의 생장이 고려되어, 유역 내 위치한 강이나 습지와 같은 수역이 0.000의 값으로 적용되었으며, 수역을 제외한 토지이용(논, 밭, 산림, 도시 등)의 최댓값은 4월에 가장 큰 0.559 최솟값은 8월에 0.204로 적용이 되었다.

〈Table 2-34〉 Ranges of factors in 2003~2016

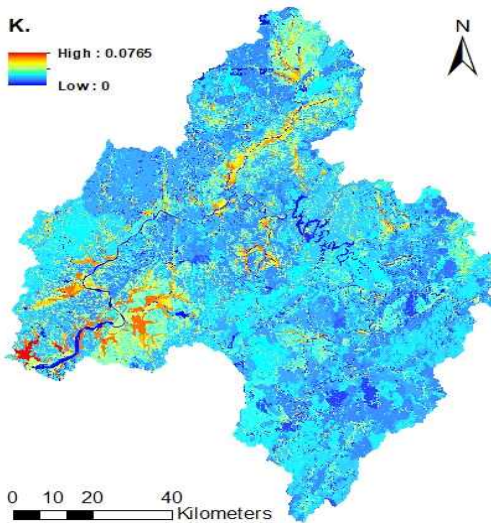
	R ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$)	K ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$)	LS (-)	C (-)	P (-)
Min.	0.192~13.649	0.000	0.069	0.000~0.204	0.000
Max.	2,483.940~6,641.930	0.077	80.863	0.000~0.559	1.000



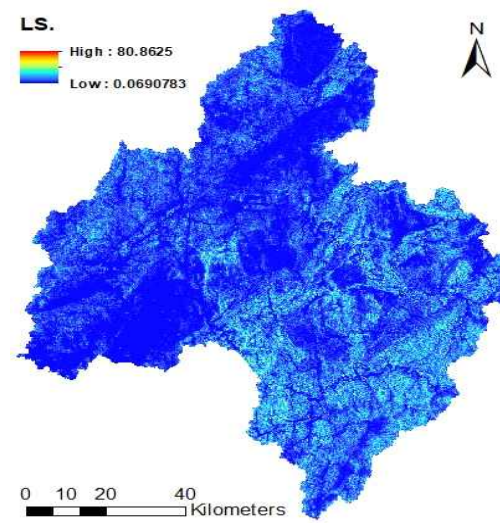
(a) R 인자 최댓값



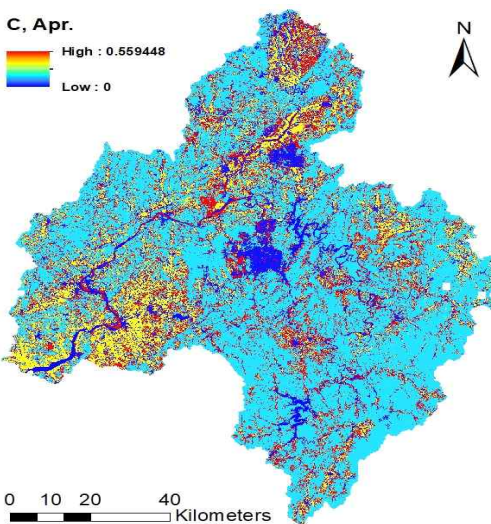
(b) R 인자 최솟값



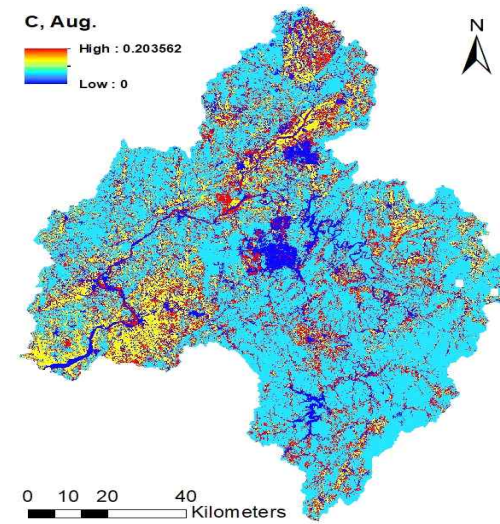
(c) K 인자



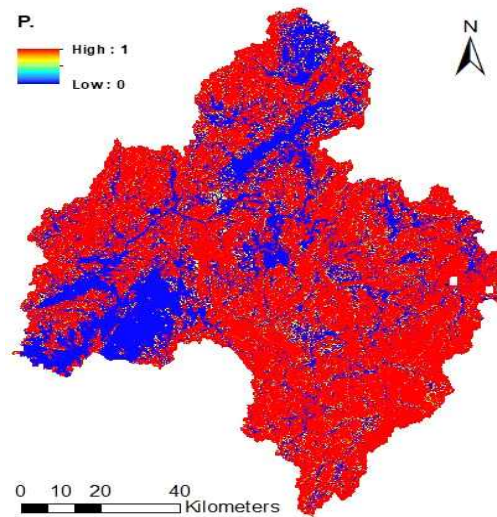
(d) LS 인자



(e) C 인자 최댓값



(f) C 인자 최솟값



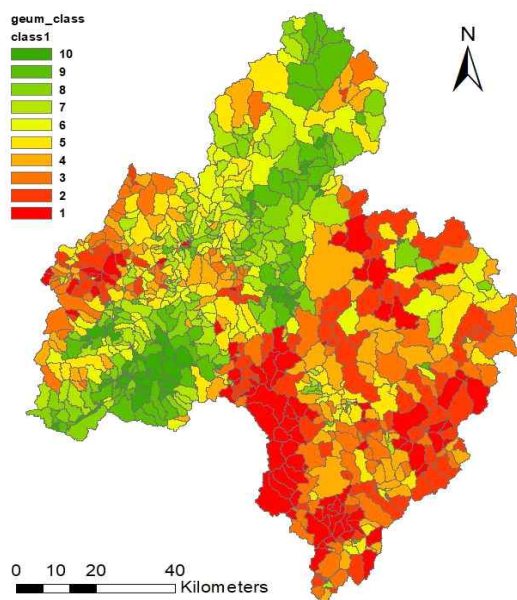
(g) P 인자

<Fig. 2-112> 금강유역의 ArcSATEEC 구축자료 및 결과

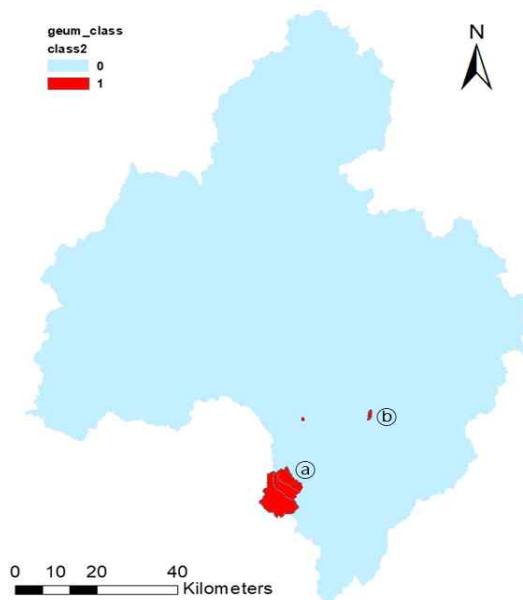
(나) 토양유실량 우려지역의 선정

표준유역도를 기준으로 금강유역은 총 900개의 소유역으로 구분되어지며, 각 소유역별 연간 토양유실량과 단위면적당 발생할 수 있는 토양유실량을 예측하였다<Fig. 2-113>. 분석결과 토양유실량이 가장 크게 예측된 유역의 경우 연간 발생할 수 있는 토양유실량이 154.60 Mh/ha/yr로 나타났으며, 900개의 소유역 중에 56개의 소유역은 최근 14년 동안의 기상 조건에 대해 발생할 수 있는 토양유실량이 1.00 Mg/ha/yr 이하로 아주 낮게 예측되었다.

이와 반대로, 금강 유역 내 토양유실 가능성이 가장 큰 5개의 구역을 정의하였는데 <Fig. 2-114>에서 보이는 바와 같이 5개의 구역은 모두 유역의 남쪽 지역에 위치하고 있다. 5개 구역 중 ㉠구역은 진안면 봉학리로 연간 토양유실 가능성이 154.60 Mg/ha/yr로 가장 큰 값으로 예측되었으며, ㉡구역은 금산군 방우리로 연간 토양유실 가능성이 123.91 Mg/ha/yr로 두 번째로 큰 것으로 예측되었다.



〈Fig. 2-113〉 금강유역 소유역 등급화 결과



〈Fig. 2-114〉 금강 유역 주요 토양유실 우려지역

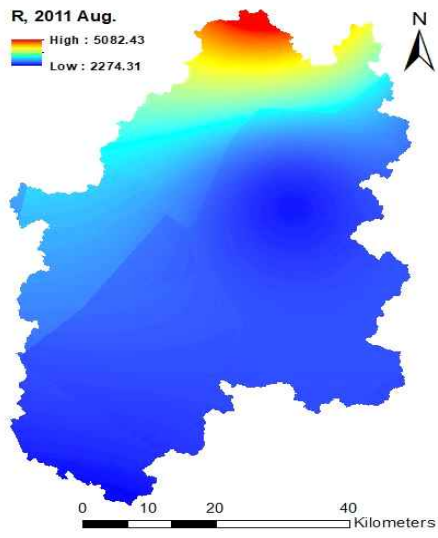
(5) 영산강유역의 토양유실량 등급화

(가) 월별 토양유실량 예측

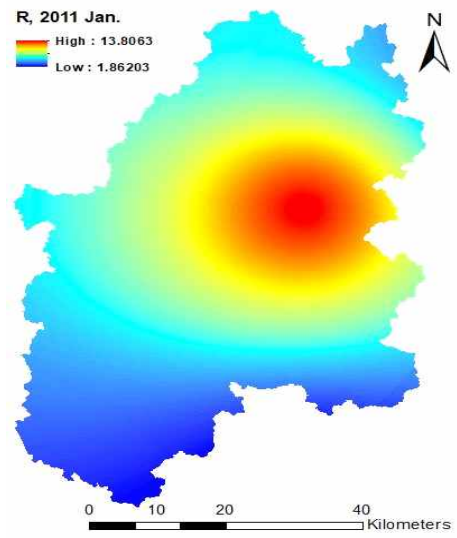
영산강유역의 전체 모의 기간인 14년에 대한 168개의 월별 토양유실량을 분석한 결과 〈Table 2-35〉과 같이 강우침식능인자는 2011년 8월에 $1,330.800 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr} \sim 5,915.910 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$ 로 가장 큰 것으로 나타났으며, 2011년 1월에 $1.862 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr} \sim 13.806 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$ 로 가장 작은 것으로 나타났다. 토양침식성인자(K)는 모의 기간 동안 변하지 않는 값으로 $0.000 \text{ Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{mm} \sim 0.070 \text{ Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{mm}$ 의 범위로 나타났으며, 지형인자(LS)는 유역의 경사에 따라 0.069에서 72.111의 범위로 큰 변화폭을 보였다. 지표피복인자(C)는 작물의 생장이 고려되어, 유역 내 위치한 강이나 습지와 같은 수역이 0.000의 값으로 적용되었으며, 수역을 제외한 토지이용(논, 밭, 산림, 도시 등)의 최댓값은 4월에 가장 큰 0.562 최솟값은 8월에 0.202로 적용이 되었다.

〈Table 2-35〉 Ranges of factors in 2003~2016

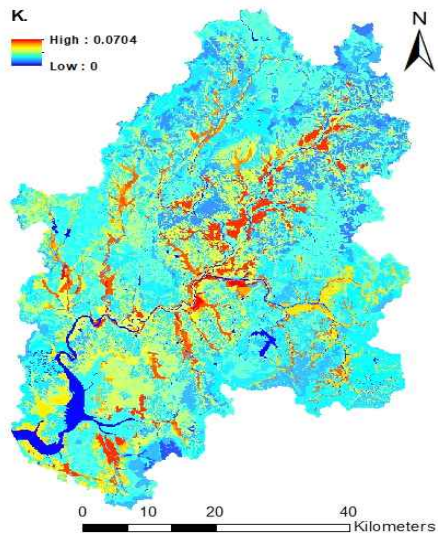
	R ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$)	K ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$)	LS (-)	C (-)	P (-)
Min.	1.862~13.806	0.000	0.069	0.000~0.202	0.000
Max.	2,274.310~5,082.430	0.070	72.111	0.000~0.562	1.000



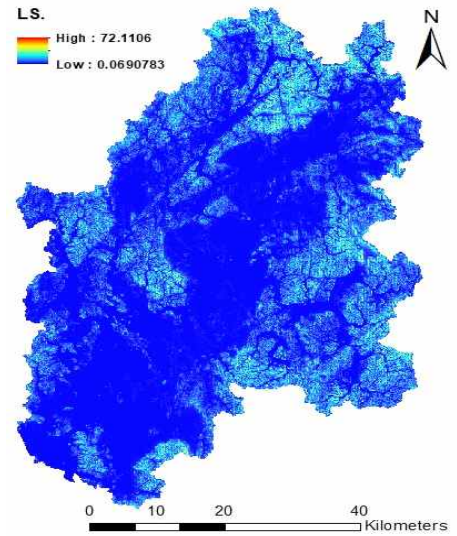
(a) R 인자 최댓값



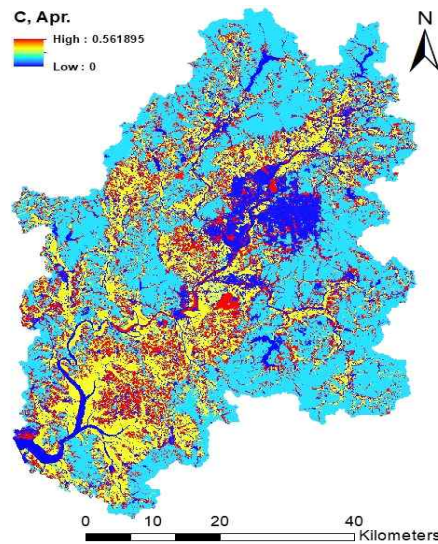
(b) R 인자 최솟값



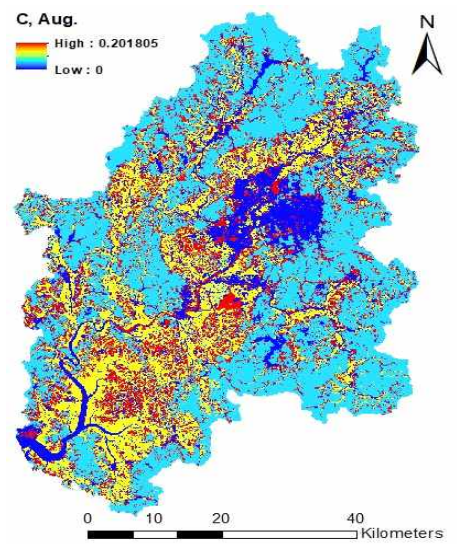
(c) K 인자



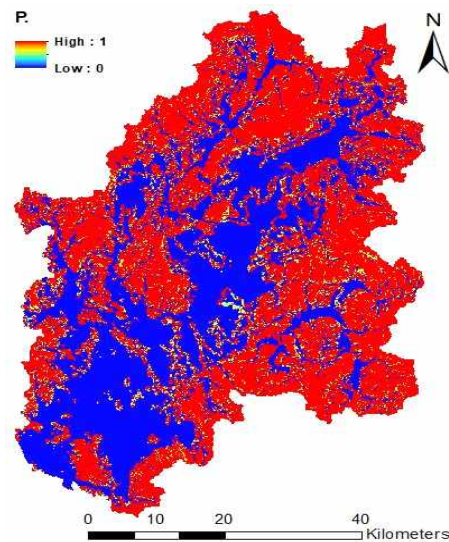
(d) LS 인자



(e) C 인자 최댓값



(f) C 인자 최솟값



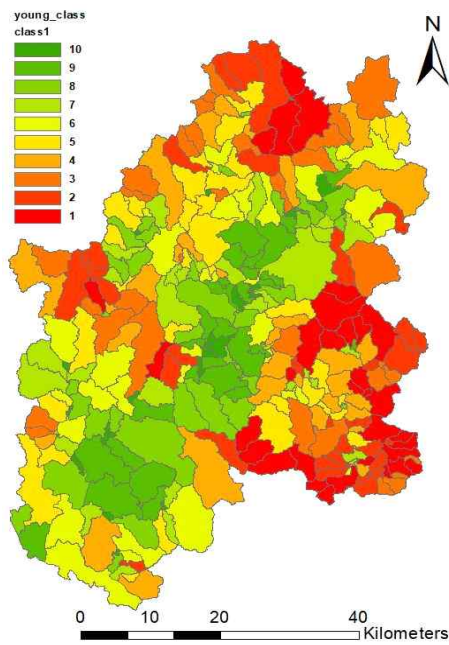
(g) P 인자

<Fig. 2-115> 영산강유역의 ArcSATEEC 구축자료 및 결과

(나) 토양유실량 우려지역의 선정

표준유역도를 기준으로 영산강유역은 총 329개의 소유역으로 구분되어지며, 각 소유역별 연간 토양유실량과 단위면적당 발생할 수 있는 토양유실량을 예측하였다<Fig. 2-116>. 분석 결과 토양유실량이 가장 크게 예측된 유역의 경우 연간 발생할 수 있는 토양유실량이 163.82 Mh/ha/yr로 나타났으며, 329개의 소유역 중에 34개의 소유역은 최근 14년 동안의 기상 조건에 대해 발생할 수 있는 토양유실량이 1.00 Mg/ha/yr 이하로 아주 낮게 예측되었다.

이와 반대로, 영산강 유역 내 토양유실 가능성이 가장 큰 5개의 구역을 정의하였는데 <Fig. 2-117>에서 보이는 바와 같이 5개의 구역은 유역의 동쪽 지역에 위치하고 있다. 5개 구역 중 ㉠구역은 화순군 장치리로 연간 토양유실 가능성이 163.82 Mg/ha/yr로 가장 큰 값으로 예측되었으며, 가장 북쪽에 위치한 ㉢구역은 화순군 도웅리, 계소리, 벽라리로 이루어져 있으며 146.84 Mg/ha/yr로 연간 토양유실 가능성이 두 번째로 큰 것으로 예측되었다.



〈Fig. 2-116〉 영산강유역 소유역 등급화 결과



〈Fig. 2-117〉 영산강 유역 주요 토양유실 우려지역

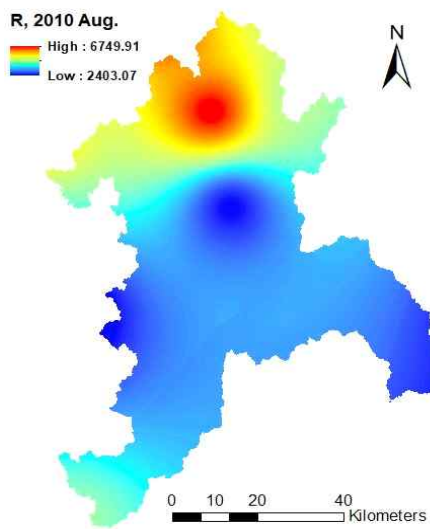
(6) 섬진강유역의 토양유실량 등급화

(가) 월별 토양유실량 예측

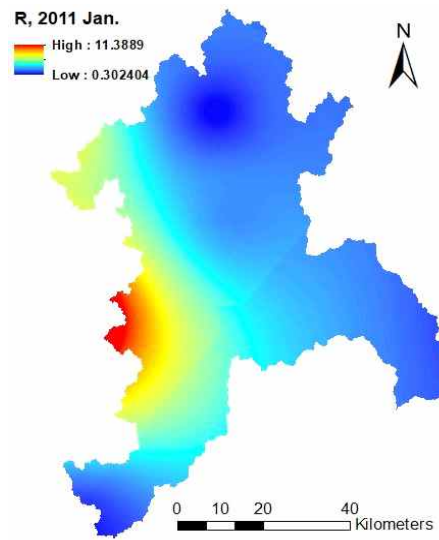
섬진강유역의 전체 모의 기간인 14년에 대한 168개의 월별 토양유실량을 분석한 결과 〈Table 2-36〉와 같이 강우침식능인자는 2010년 8월에 $2,403.070 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$ ~ $6,749.910 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$ 로 가장 큰 것으로 나타났으며, 2011년 1월에 $0.302 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$ ~ $11.389 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$ 로 가장 작은 것으로 나타났다. 토양침식성 인자(K)는 모의 기간 동안 변하지 않는 값으로 $0.000 \text{ Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{mm}$ ~ $0.070 \text{ Mg} \cdot \text{hr}/\text{MJ} \cdot \text{mm}$ 의 범위로 나타났으며, 지형인자(LS)는 유역의 경사에 따라 0.069에서 73.394의 범위로 큰 변화폭을 보였다. 지표피복인자(C)는 작물의 생장이 고려되어, 유역 내 위치한 강이나 습지와 같은 수역이 0.000의 값으로 적용되었으며, 수역을 제외한 토지이용(논, 밭, 산림, 도시 등)의 최댓값은 4월에 가장 큰 0.562 최솟값은 8월에 0.202로 적용이 되었다.

〈Table 2-36〉 Ranges of factors in 2003~2016

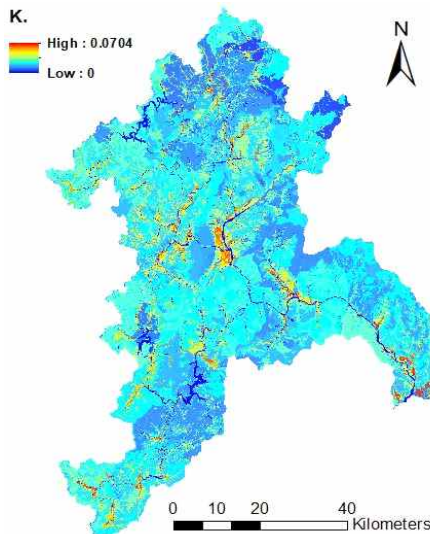
	R ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$)	K ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$)	LS (-)	C (-)	P (-)
Min.	0.302~11.389	0.000	0.069	0.000~0.202	0.000
Max.	2,403.070~6,749.910	0.070	73.394	0.000~0.562	1.000



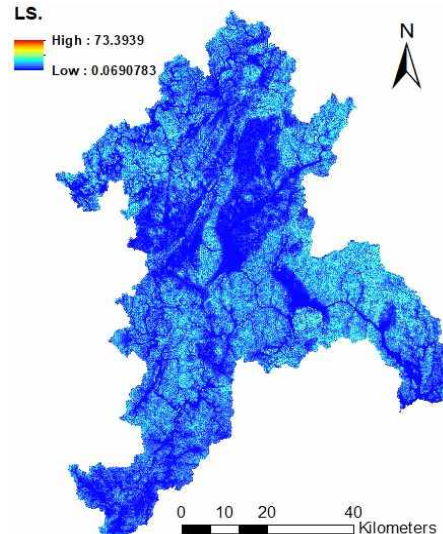
(a) R 인자 최댓값



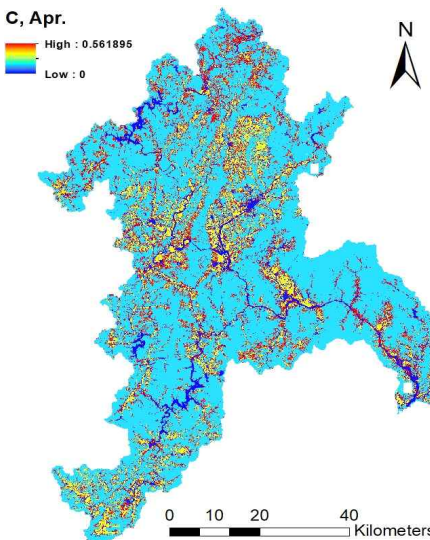
(b) R 인자 최솟값



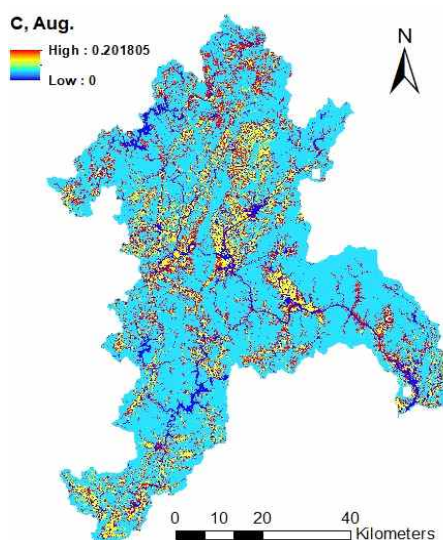
(c) K 인자



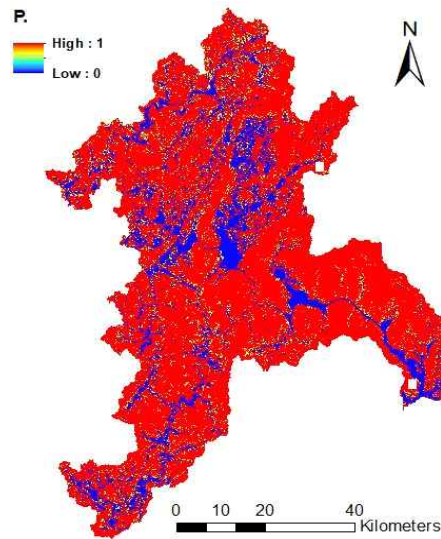
(d) LS 인자



(e) C 인자 최댓값



(f) C 인자 최솟값



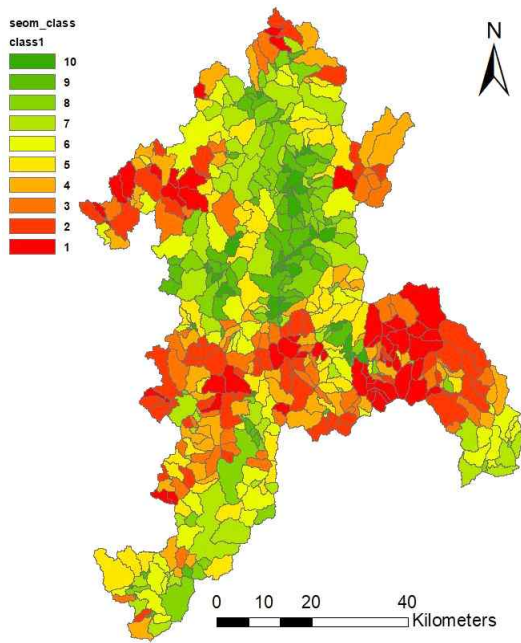
(g) P 인자

<Fig. 2-118> 섬진강유역의 ArcSATEEC 구축자료 및 결과

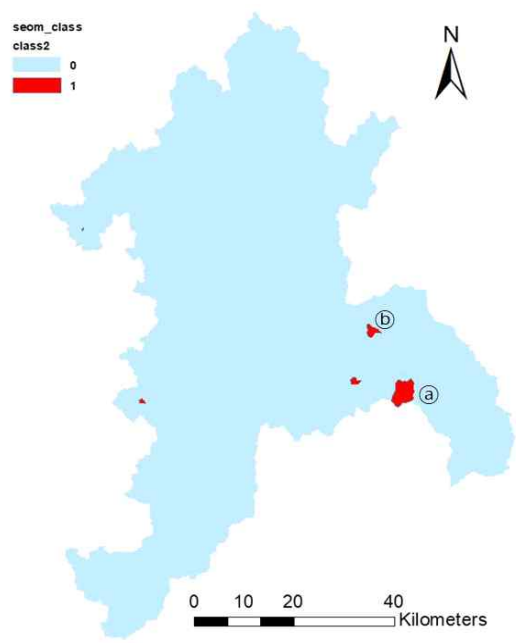
(나) 토양유실량 우려지역의 선정

표준유역도를 기준으로 섬진강유역은 총 549개의 소유역으로 구분되어지며, 각 소유역별 연간 토양유실량과 단위면적당 발생할 수 있는 토양유실량을 예측하였다<Fig. 2-119>. 분석 결과 토양유실량이 가장 크게 예측된 유역의 경우 연간 발생할 수 있는 토양유실량이 166.05 Mh/ha/yr로 나타났으며, 549개의 소유역 중에 17개의 소유역은 최근 14년 동안의 기상 조건에 대해 발생할 수 있는 토양유실량이 1.00 Mg/ha/yr 이하로 아주 낮게 예측되었다.

이와 반대로, 섬진강 유역 내 토양유실 가능성이 가장 큰 5개의 구역을 정의하였는데 <Fig. 2-120>에서 보이는 바와 같이 2개의 구역은 유역의 서쪽 부분에 위치하고 있으며, 3개의 구역은 유역의 동쪽 지역에 위치하고 있다. 5개 구역 중 동쪽에 위치한 ㉠구역은 광양시 금천리로 연간 토양유실 가능성이 166.05 Mg/ha/yr로 가장 큰 값으로 예측되었으며, ㉡구역은 구례군 내서리로 연간 토양유실량 가능성이 156.34 Mg/ha/yr로 두 번째로 큰 것으로 예측되었다.



〈Fig. 2-119〉 섬진강유역 소유역 등급화 결과



〈Fig. 2-120〉 섬진강 유역 주요 토양유실 우려지역

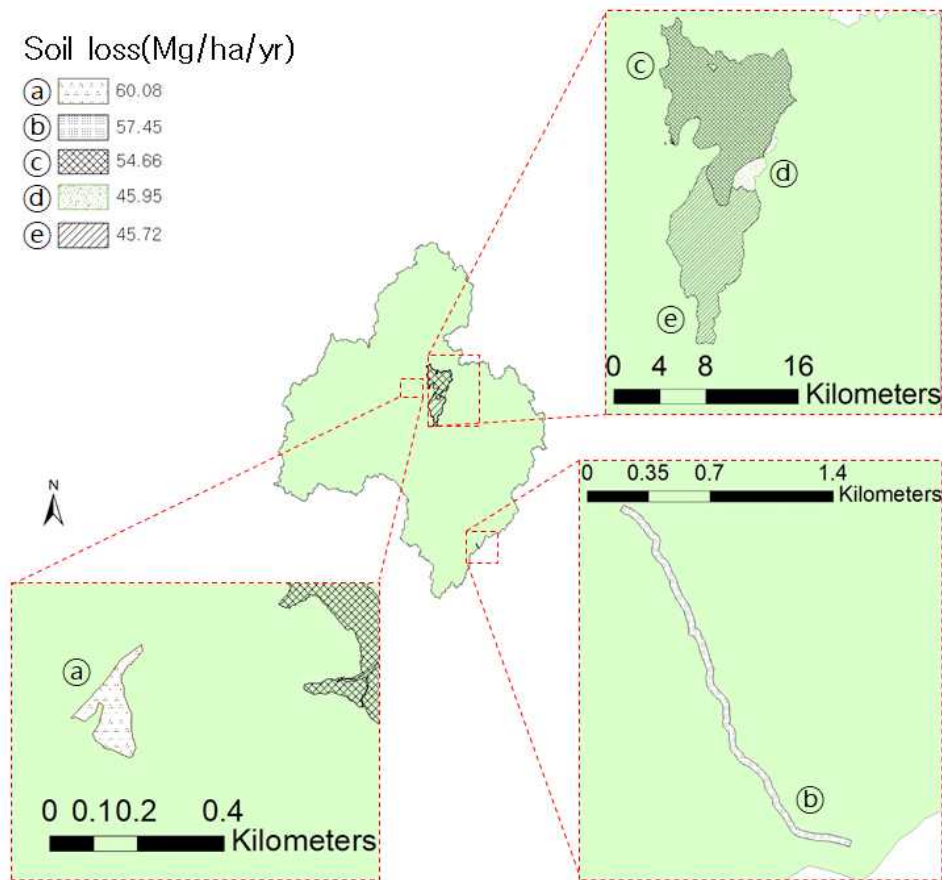
(7) 표토침식 우려지역 확대 적용 예시

표토침식 우려지역 선정의 적용 예시를 위해 금강 유역에 있는 상수원보호구역을 대상으로 하였다. 상수원보호구역 자료는 국가수자원관리종합정보시스템의 자료를 사용하였으며, 금강 유역 내에는 총 38개의 상수원보호구역이 있는 것으로 나타났다. 토양유실량이 가장 크게 예측된 구역의 경우 연간 발생할 수 있는 토양유실량이 60.08 Mh/ha/yr로 나타났으며, 38개의 상수원보호구역 중에 22개의 상수원보호구역은 최근 14년 동안의 기상 조건에 대해 발생할 수 있는 토양유실량이 1.00 Mg/ha/yr 이하로 아주 낮게 예측되었다. 이 구역들은 지표피복상태가 산림지역 혹은 시가화 지역을 포함하거나, 경사가 급하지 않아 지형인자가 낮게 산정된 지역들로 나타났다. 더욱이 금강 유역에서 토양 유실을 일으키는 강우침식능인자는 유역의 북쪽과 서쪽에서 높게 예측된 반면에, 상수원보호구역은 대부분 유역의 동부 및 중부 지역에 위치하고 있기 때문에 토양유실 가능성이 비교적 낮은 것으로 예측되었다. 다시 말해 토양유실 가능성이 낮은 지역은 5개의 인자 중에 특정 인자에 지배적인 영향을 받은 것이 아니라, 각 인자값의 크기가 모두 작은 경향을 보일 때 토양유실 가능성이 낮은 것으로 예측되었다.

38개의 상수원보호구역 중에 10개 구역은 1.10 Mg/ha/yr에서 25.62 Mg/ha/yr의 범위를 보였는데 이는 금강 유역 내 상수원보호구역에서 토양유실 가능성이 가장 큰 구역에 비해 1.83%에서 42.64%에 해당하는 것으로, 이 구역들의 토양유실 가능성은 유역 내 토양유실 가

능성이 가장 큰 상수원보호구역과 비교했을 때 절반 미만인 것으로 예측되었다. 즉, 금강 유역 내 상수원보호구역의 58%는 토양유실에 대한 취약성이 거의 없는 것으로 예측되었으며, 38개의 상수원보호구역 중에서 32개(84%)는 토양유실 가능성이 가장 큰 구역에 비해 50% 미만의 토양유실 가능성을 가지고 있는 것으로 예측되었다.

이와 반대로, 금강 유역 내 상수원보호구역 중에서 토양유실 가능성이 가장 큰 5개의 구역을 정의하였는데 <Fig. 2-121>에서 보이는 바와 같이 4개의 구역은 유역의 중앙 부분에 위치하고 있으며, 1개의 유역은 유역의 동남부 지역에 위치하고 있다. 유역의 중앙 부분에 위치한 4개의 구역 중에서 가장 서쪽에 위치한 ㉠구역이 연간 토양유실 가능성이 60.08 Mg/ha/yr로 가장 큰 값으로 예측되었으며 ㉢구역이 57.45 Mg/ha/yr로 연간 토양유실 가능성이 두 번째로 큰 것으로 예측되었다. 5개의 구역 중에 이들 두 구역은 상대적으로 작은 면적을 차지하는 구역이다. ㉠구역의 경우 토양유실 가능성이 크게 예측된 이유는 농경지를 포함하고 있으며, 경사도 및 경사장에 의해 산정되는 지형인자가 최소 0.71에서 최대 7.24의 값으로 토양유실 가능성이 비교적 낮았던 32개 구역에 비해서 상대적으로 큰 경향을 보였다. ㉢구역은 지표피복인자의 값이 큰 농경지를 포함하고 있지 않고 산림 지역만을 포함하고 있다. 하지만, 지형인자의 범위가 최소는 0.07로 비교적 크지 않았으나 최대값은 26.89로 상대적으로 큰 경향을 보였다. 즉, 토양유실 가능성이 가장 큰 두 구역에 대해 분석하였을 때, 농경지를 포함하면서 지형이 토양유실에 취약한 조건을 가지고 있는 것으로 나타났다. 즉, 토양유실에 영향을 주는 인자의 조합 혹은 특정인자가 매우 큰 경향을 보인 구역들이 토양유실 가능성이 매우 큰 것으로 나타났다.



〈Fig. 2-121〉 표토침식 우려지역 예시

바. 유달률 산정방법 검토

유실된 토양이 유역의 유출구까지 얼마나 도달하는지를 고려할 수 있는 방법은 유역의 유달률(Sediment delivery ratio; SDR)을 산정하여 적용하는 것이다. 즉, 유달률은 유역의 유출구 혹은 임의 지점에서의 유사량을 유역의 총 토양유실량으로 나눈 비율로 정의된다. 이 유달률은 유역의 크기, 형상, 강우 유형, 직접 유출량, 침투 유량, 토지이용 현황, 작물, 경사, 토양 속성 등과 같은 유역의 물리적인 인자의 영향을 받으나, 이러한 모든 자연적인 요소를 반영하여 유달률을 표현한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 유달률을 유역의 면적이거나 경사에 의해서 산정할 수 있는 방법들이 제안된 바 있다(Boyce, 1975<식 23>; USDA, 1972 <식 24>; Vononi, 1975 <식 25>; Williams et al., 1977 <식 26>; Williams and Berndt, 1977 <식 27>).

$$\text{〈식-23〉 } SDR = 0.5656 \times AREA^{-0.11}$$

$$\text{〈식-24〉 } SDR = 0.3750 \times AREA^{-0.2382}$$

$$\langle \text{식-25} \rangle \quad SDR = 0.472 \times AREA^{-0.125}$$

$$\langle \text{식-26} \rangle \quad SDR = 0.627 \times SLOPE^{0.403}$$

$$\langle \text{식-27} \rangle \quad SDR = 1.366 \times 10^{-11} \times AREA^{-0.098} \times RATIO_{relief}^{0.3629} \times CN^{5.444}$$

여기서, SDR은 유달률, AREA는 유역 면적(km²), SLOPE은 유역의 평균경사(%), RATIOrelief는 기복비(m/km), CN은 Curve Number이다.

최근에는 래스터 형식의 자료의 각각 격자에서의 유달률 산정 방식이 제안되기도 하였다. 이 식은 유역에 대해서 평균 지표피복인자($\bar{C}$), 평균 경사($\bar{S}$, m/m), 유역 면적(A, m²), 유로 연장(d), 각 격자에서의 지표피복인자(C_i)와 경사도(S_i), 이론적인 최대 유달률(SDRmax)을 이용하여 유달률을 정의한다. IC와 k는 유달률 산정공식(식 29)의 보정계수로 이용할 수 있다 (De Rosa et al., 2016).

$$\langle \text{식-28} \rangle \quad IC = \log_{10} \left(\frac{\bar{C}\bar{S}\sqrt{A}}{\sum_i \frac{d_i}{C_i S_i}} \right)$$

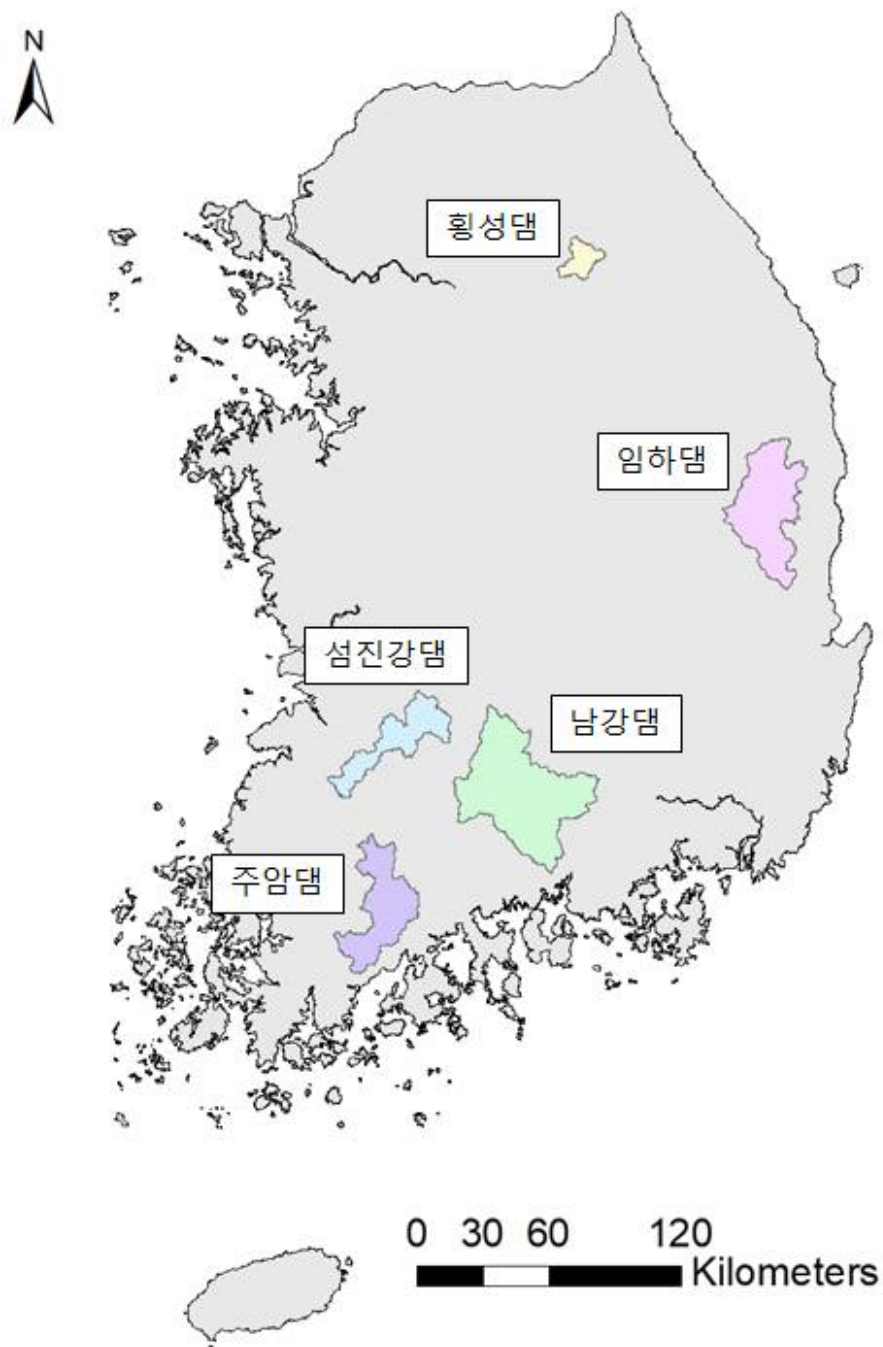
$$\langle \text{식-29} \rangle \quad SDR_i = \frac{SDR_{\max}}{1 + e^{\left(\frac{IC_0 - IC_i}{k} \right)}}$$

범용토양유실공식 기반인 한국형 토양유실공식에 의해 산정된 토양유실량에 유달률을 적용하기 위해서, 1) 한국형 토양유실공식에 의해서 월별 토양유실량(Mg/month)을 예측한 뒤, 2) 한국수자원공사의 월평균 부유물질농도(Suspended Solid)와 일별 유입수량(m3/s)을 이용하여 월별 부유물질 총량(Mg/month)을 계산하고, 3) 2003년 1월부터 2009년 12월(84개월)에 대한 예측 및 실측 부유물질량을 유달률 산정식의 매개변수 보정 자료로 활용하였으며, 4) 2010년 1월부터 2016년 12월(60개월)에 대한 예측 및 실측 부유물질량을 유달률 산정식에 대한 검정 자료로 활용하였다.

(1) 대상 유역의 선정 및 월별 부유사량 산정

한국수자원공사의 MyWater(<http://www.water.or.kr/index.do>)에서 제공하는 각 댐에 대한 일별 유입량(m3/s)을 월 유입량(m3)으로 변환한 뒤, 월평균 부유물질농도(Suspended Solid;

SS)(mg/L)를 이용하여 월별 부유물질 총량(Mg)을 계산하였다. 대상 유역은 횡성댐, 섬진강댐, 주암댐, 임하댐, 남강댐의 총 5개 유역이었으며<Fig. 2-122>, 유역 면적은 최소 207.3 km²(횡성댐)에서부터 최대 2,280.6 km²(남강댐)로 다양하도록 하였다. 5개의 유역 모두 산림이 차지하는 면적이 약 70%이상을 차지하고 있으며 논과 밭의 면적 비율이 두 번째로 넓은 면적 비율을 차지하고 있으며, 최소 면적 비율을 차지하는 토지이용현황은 다양하였다<Table 2-37>.



<Fig. 2-122> 월별 부유물질량 수집 대상 유역

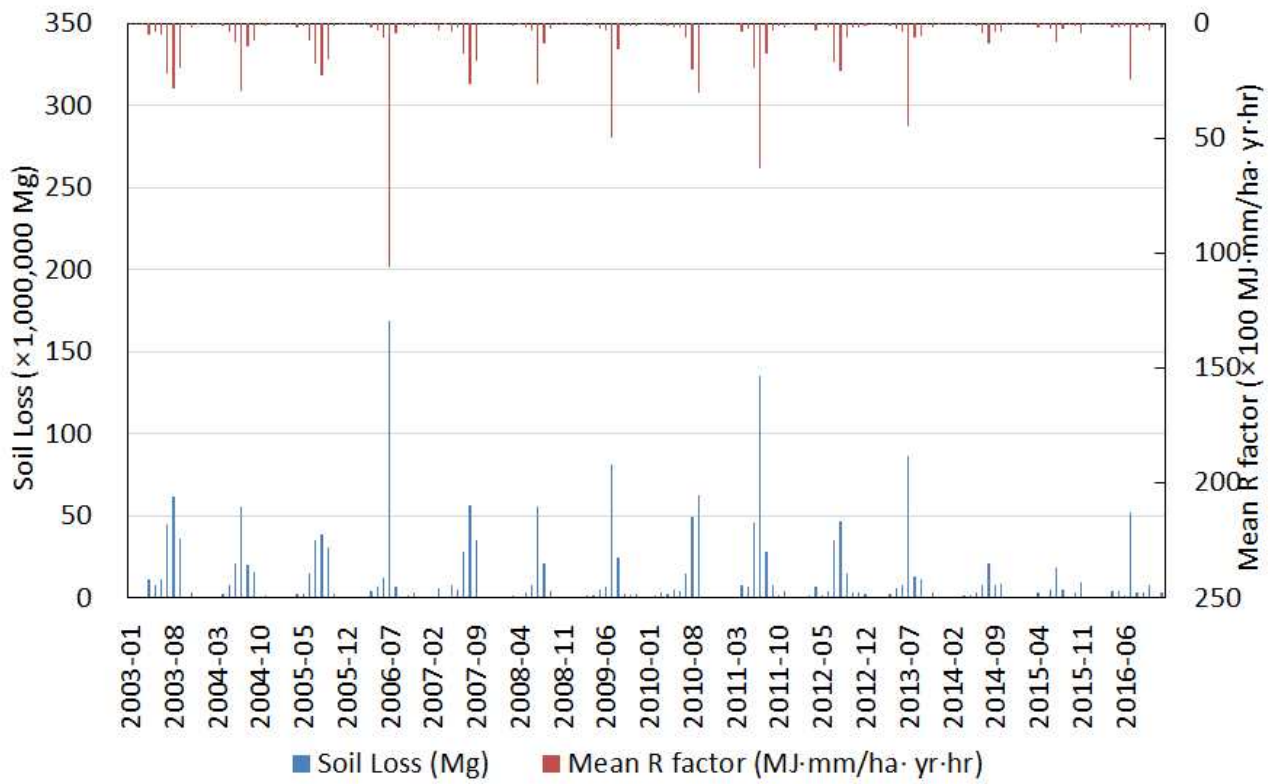
<Table 2-37> 유역별 면적, 평균경사, 토지이용현황 비율

유역	면적 (km ²)	평균경사 (%)	토지이용현황 비율(%)						
			도시	논	밭	과수원	산림	초지	수역
홍성담	207.3	48.7	1.6	2.6	10.4	0.1	81.6	0.3	3.3
섬진강담	762.9	37.3	3.2	6.4	11.8	0.4	68.8	4.8	4.6
주암담	1,028.6	36.8	2.9	10.7	8.2	0.3	71.7	2.1	4.2
임하담	1,367.7	46.8	2.1	1.6	6.6	1.9	81.6	3.5	2.7
남강담	2,280.6	40.1	4.7	7.2	5.5	1.6	73.0	5.0	3.0

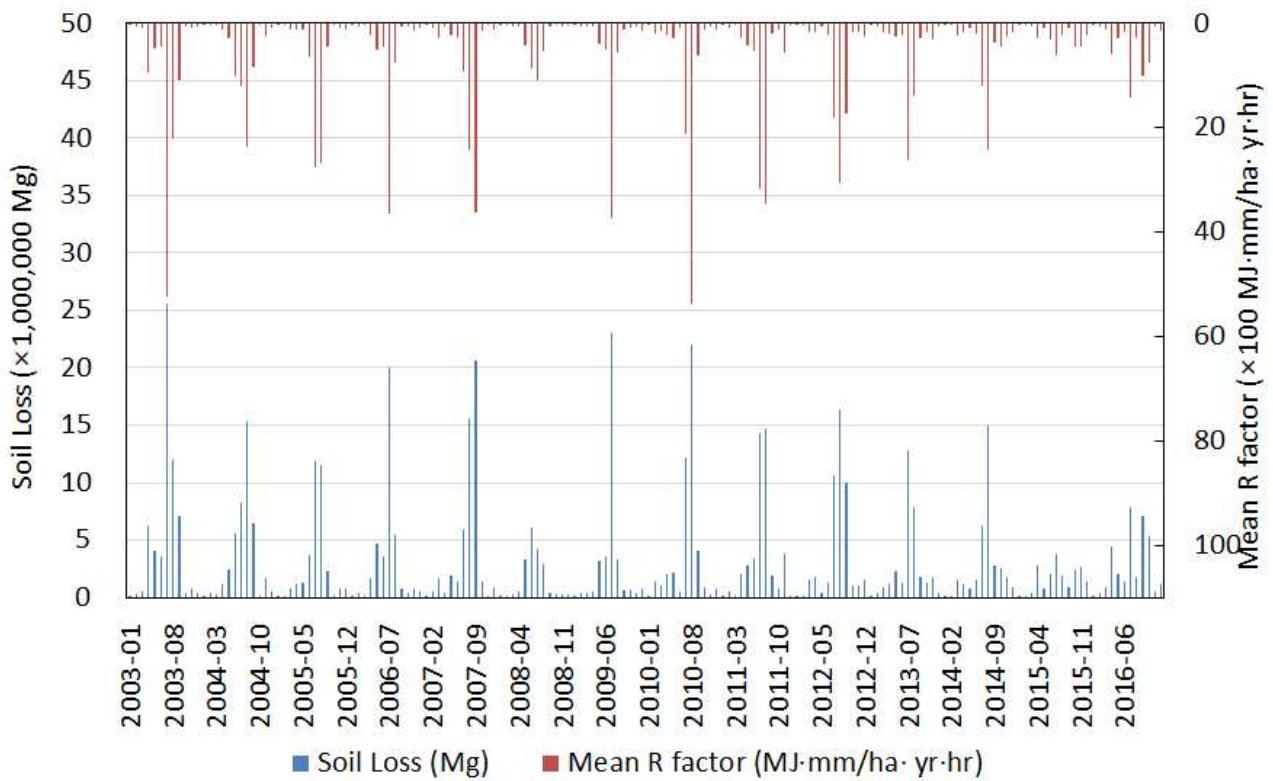
(2) 한국형 토양유실공식에 의한 월별 토양유실량 예측

5개의 유역에 대한 월별 토양유실량 예측에 사용된 강우량, 수치표고모형, 토지이용도, 토양도는 2-1. 연구내용의 마. ‘표토침식 우려 지역 선정’에서 사용된 자료와 동일하다. 한국형 토양유실공식의 강우침식능인자, 토양침식성인자, 지형인자, 지표피복인자, 보전관리인자의 다섯 개의 인자 중에서 토양침식성인자, 지형인자, 보전관리인자는 월별 및 연별로 동일하게 적용이 되며, 지표피복인자는 월별로는 변화하지만 매년 동일한 월에 적용되는 값은 동일하다. 그러나 강우침식능인자의 경우 월별 강우량에 의해 지점별로 계산이 되기 때문에 월별 및 연별로 모두 다른 값이 산정이 되어 적용이 된다. 이에 각 유역에서 적용된 강우침식능인자 래스터 파일에 대한 평균값을 산정하여 모의 기간 동안 월별 토양유실량 예측값과 함께 변동량을 제시하였다<Fig. 2-123 ~ 2-127>. 월별 강우량은 164개월 동안 다르기 때문에 모든 유역에 대해서 월별로 강우침식능인자는 다르게 산정되었으며, 이로 인해 토양유실량 예측값도 모의 기간 동안 변동하였으며, 강우침식능인자와 토양유실량 예측값의 변화경향은 거의 일치하였다.

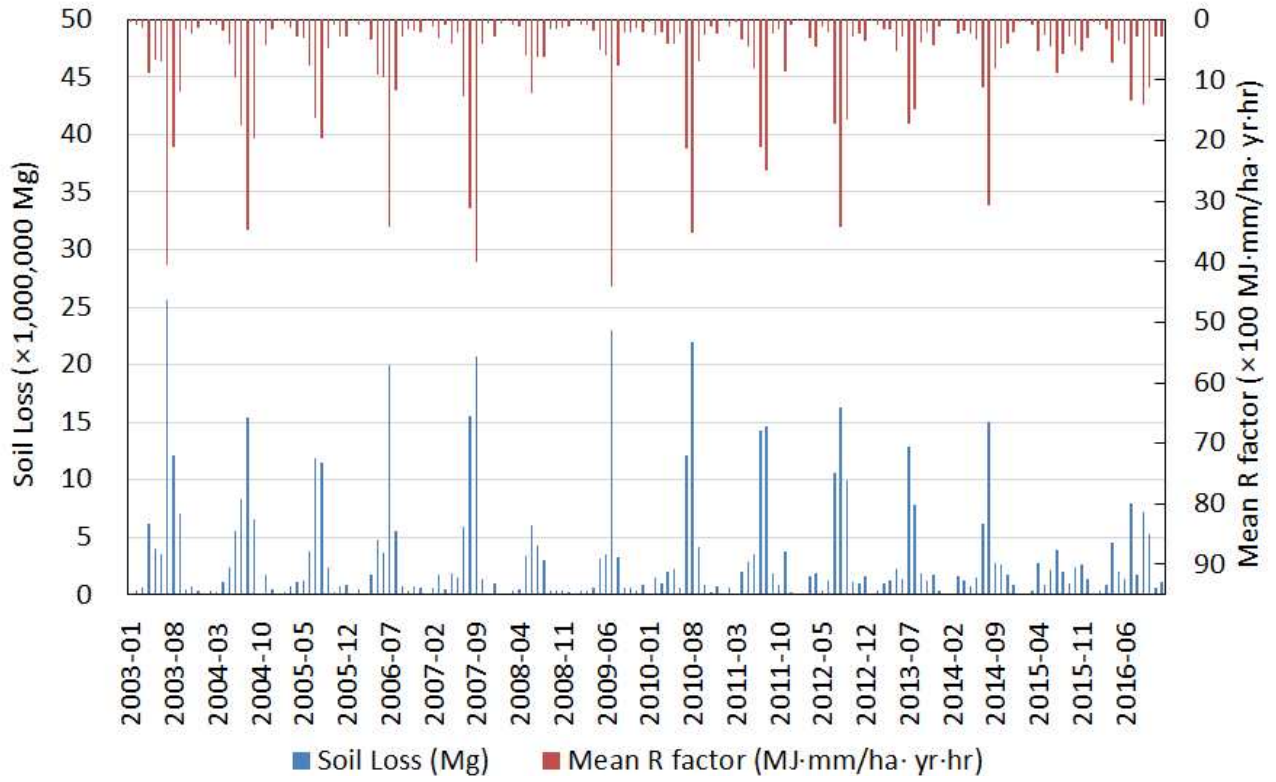
본 과업에서 토양유실량 예측에는 범용토양유실공식과 유사한 한국형 토양유실공식에 의해 예측된 값이 이용되었으며, 각 유역에서 유량 및 토양유실량에 영향을 주는 인위적인 조건(저수지 등)을 반영하는 데에는 한계가 있다. 이러한 점이 유달룰 산정 결과에 영향을 준 것으로 보인다



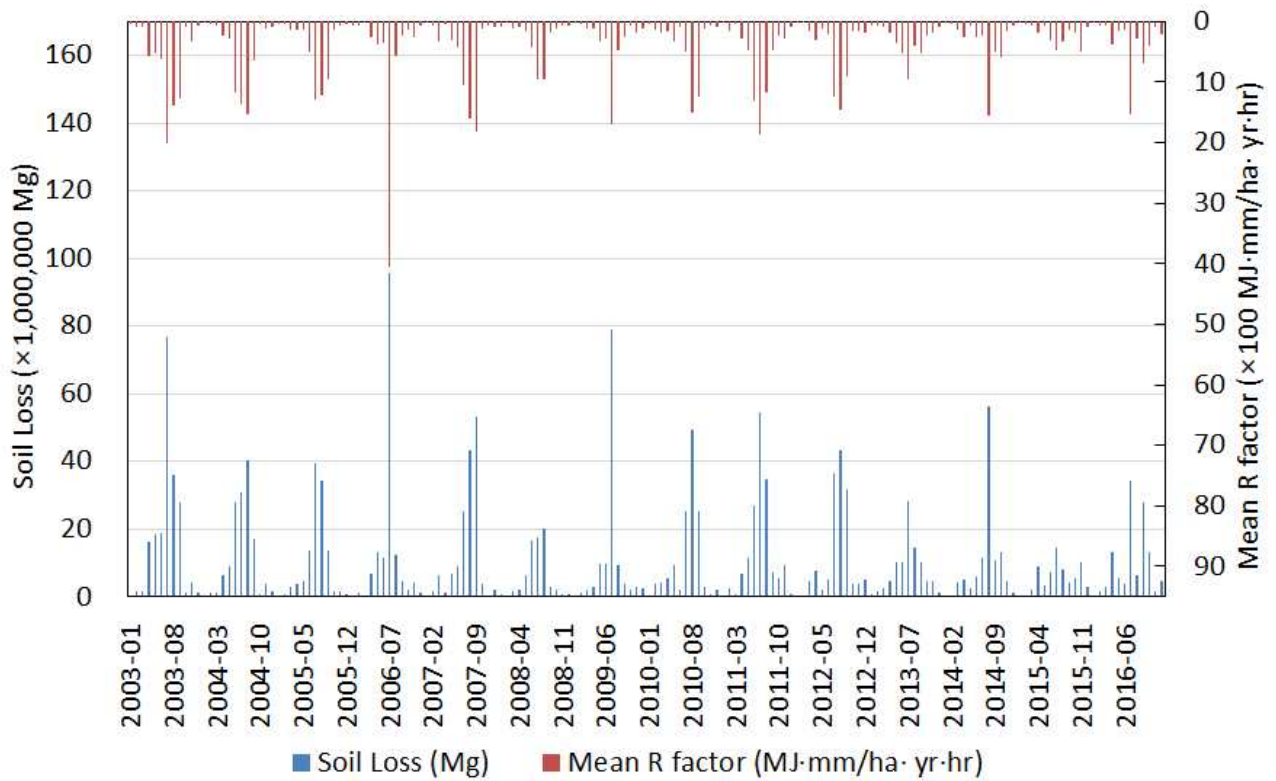
<Fig. 2-123> 황성담 유역에 대한 월별 토양유실량 예측



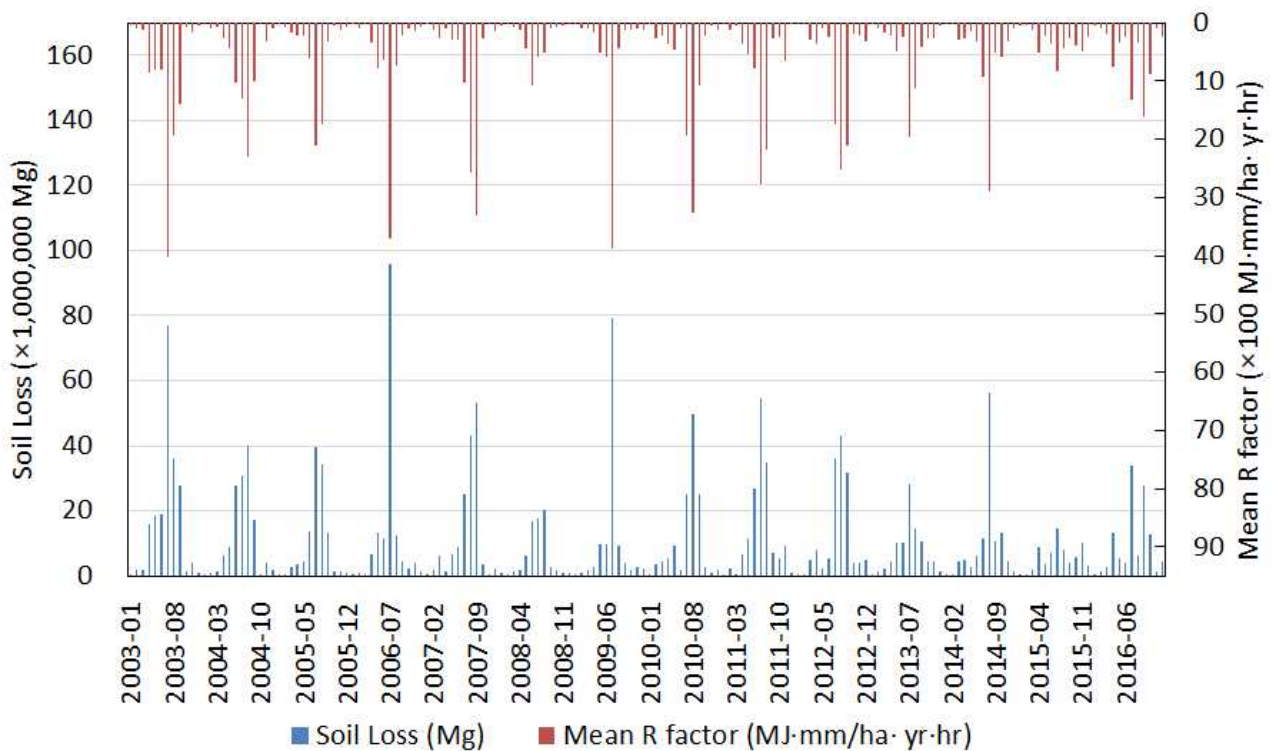
<Fig. 2-124> 섬진강담 유역에 대한 월별 토양유실량 예측



<Fig. 2-125> 주암댐 유역에 대한 월별 토양유실량 예측



<Fig. 2-126> 임하댐 유역에 대한 월별 토양유실량 예측



<Fig. 2-127> 남강댐 유역에 대한 월별 토양유실량 예측

(3) 유달률을 적용한 부유사량 예측

유달률 산정식을 정의하기 위해서는 유달률에 영향을 미치는 유역의 조건이 무엇인지에 대한 검토와 이 조건들이 얼마나 영향을 미치는가에 대한 검토가 필요하다. 그리고 이를 근거로 하는 기본식 정의와 함께 매개변수의 결정이 이루어질 필요가 있다. 본 과업에서는 유달률에 영향을 미치는 유역이 가지고 있는 조건의 검토와 함께 그 영향의 정도 및 기본식 결정을 동시에 수행하였다. 이를 위해 2차년도에서 강우침식능인자 회귀식을 개발하기 위해 사용되었던 60여개의 회귀식을 제공하는 사용프로그램인 CurveExpert Profesional(v.2.2.0)을 이용하여, 유역의 면적(km²), 유역의 평균 경사(%), 산림이나 농경지의 면적 비율(%)을 회귀식 인자로 하여 검토하였다. 유역에 대한 월별 강우량(mm)이나 강우침식능인자는 토양유실량 산정 시 사용이 되는 조건이므로 배제하였다.

주어진 인자들과 예측 및 실측 부유물질량에 대해서 CurveExpert Profesional(v.2.2.0) 소프트웨어에서 제공되는 회귀식들에 대해 검토한 결과, 강우침식능인자 예측 과정과 유사하게 각 월(<식 30>에서 Month)과 토양유실량 예측값(<식 30>에서 Soil Loss)이 부유물질량 예측에 가장 적합한 것으로 나타났다. <식 30>은 월별부유물질 예측을 위한 식으로 한국형 토양유실공식에 의해 예측된 월별 토양유실량(Soil Loss)과 각 월에 따라 1에서 12의 범위를 가지

는 인자(Month)를 이용한다.

실측값과 비교할 때, 수문 모형에 의한 예측값의 만족 여부를 판단하는 경우 Nash-Stucliff Efficiency와 결정계수(Coefficient of Determination; R^2)를 사용할 수 있다. 만족 여부에 대한 기준은 Ramanarayanan et al.(1997)은 NSE가 0.4이상이고 R^2 가 0.5, Donigian(2000)은 NSE가 0.6이상, Engel et al.(2007)은 NSE가 0.5이상이고 R^2 가 0.6이상이며 상대오차가 15%보다 작은 경우로 제안하였다. 본 과업에서는 NSE가 0.4 이상이고 결정계수가 0.5인 경우, 예측값과 실측값을 도식화하고 p-value에 의해서 예측값에 대한 만족 여부를 결정하였다. p-value의 경우, 유의확률 95%(유의수준 $\alpha = 0.05$)에 대해 검토하여 p-value가 유의수준보다 클 경우(검정통계량이 임계값의 범위 이내인 경우) 예측값을 받아들일 수 있는 것으로 정의하였다.

<Table 2-38>는 각 유역별 <식 30>의 보정과정에서 결정된 매개변수 a, b, c를 보여주는 것이며, <Table 2-39>와 <Fig. 2-128 ~ 2-132>는 매개변수를 결정하기 위한 보정과정 및 유달률 회귀식의 검정과정에 대한 NSE, 결정계수, p-value를 나타낸 것이다. 보정과정에서는 NSE와 결정계수가 모두 0.5보다 크고 p-value가 유의수준보다 크게 나타났기 때문에 유달률 산정식의 보정이 잘 이루어진 것으로 판단된다. 검정과정에서는 횡성댐, 섬진강댐, 임하댐, 남강댐에서는 NSE가 0.4보다 크고 결정계수가 0.5이상이며 p-value가 유의수준보다 크게 나타났기 때문에 이 유역들에 대해서는 유달률 산정식이 유효한 것으로 판단되나, 주암댐의 경우 NSE가 0.4보다 크고 p-value는 유의수준보다 크지만 결정계수가 0.5보다 작게 나타났다.

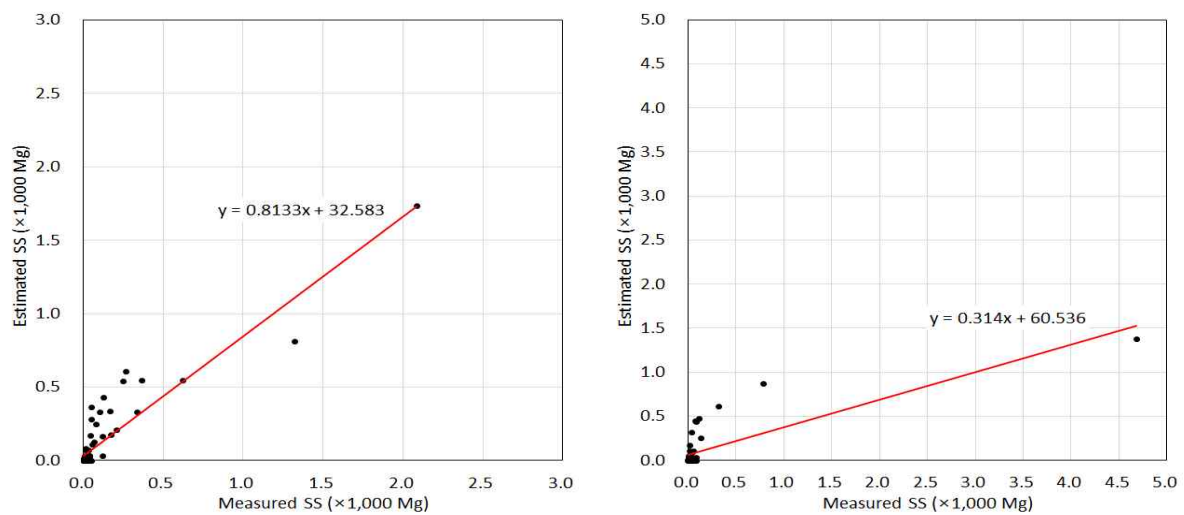
$$\begin{aligned} \text{<식-30> } Suspended\ Soil\ Load(Mg/month) = \\ a + b \times Soil\ Loss(Mg/month) + c \times Month \end{aligned}$$

<Table 2-38> 각 유역별 유달률 산정식의 매개변수

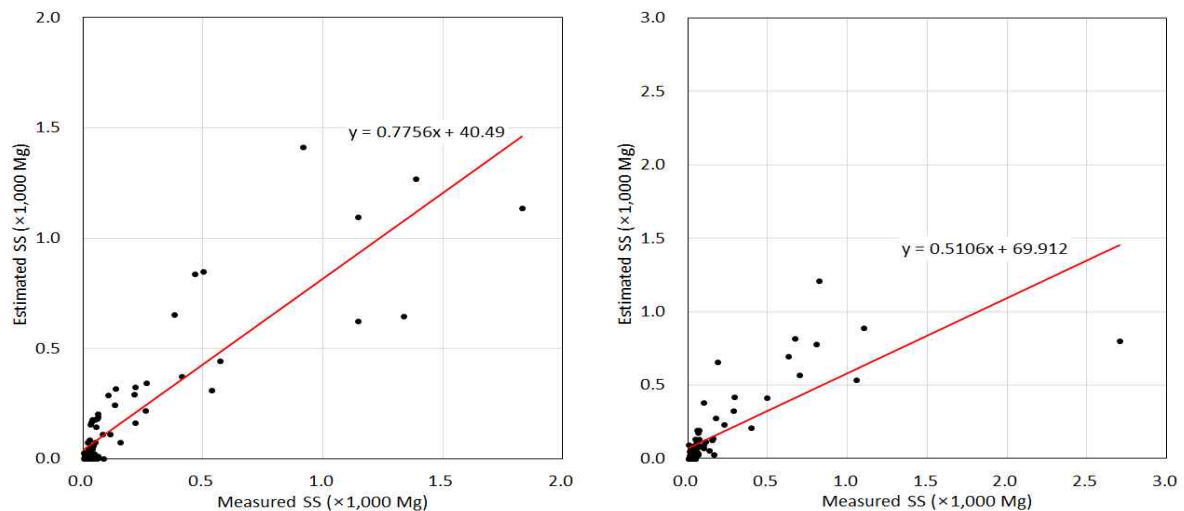
유역	매개변수		
	a	b	c
횡성댐	-4.63×10 ¹	1.06×10 ⁻⁵	3.25×10 ⁻⁴
섬진강댐	-1.94×10 ¹	5.59×10 ⁻⁵	-3.16×10 ⁻⁶
주암댐	4.61×10 ¹	7.27×10 ⁻⁵	-4.98×10 ⁻⁴
임하댐	-6.31×10 ¹	2.84×10 ⁻⁵	1.11×10 ⁻⁴
남강댐	-5.06×10 ²	1.46×10 ⁻⁴	2.74×10 ⁻³

<Table 2-39> 각 유역별 보정 및 검정 결과

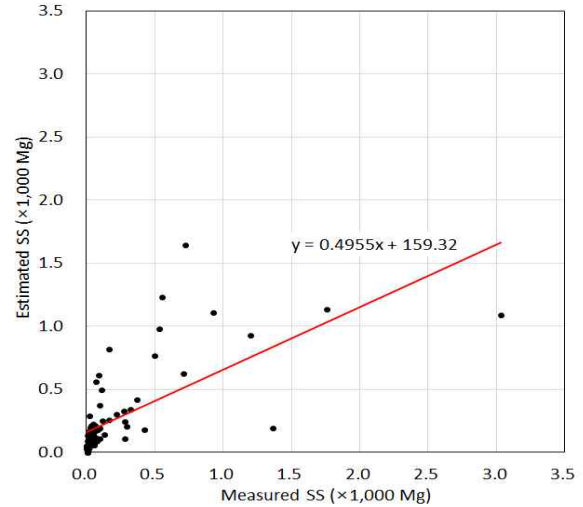
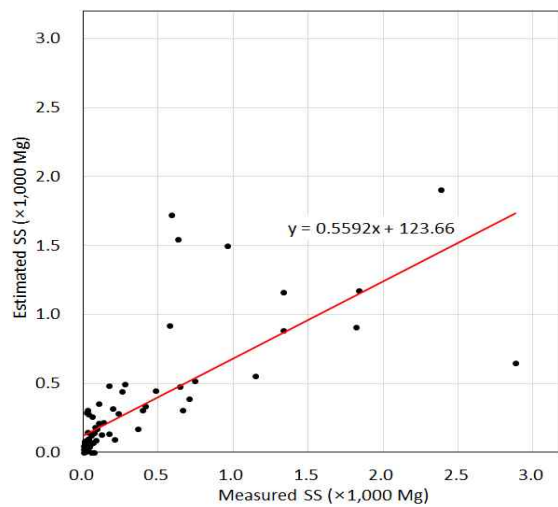
유역	보정 (2003. 01. ~2009. 12.)			검정 (2010. 01. ~2016. 12.)		
	NSE	R ²	p-value	NSE	R ²	p-value
횡성댐	0.8399	0.8446	0.6863	0.4734	0.6419	0.8294
섬진강댐	0.7797	0.7798	0.9571	0.5765	0.5873	0.8341
주암댐	0.5588	0.5588	0.9950	0.4362	0.4579	0.3170
임하댐	0.6177	0.6536	0.6080	0.5004	0.7310	0.1492
남강댐	0.5299	0.5315	0.8079	0.6565	0.6591	0.7509



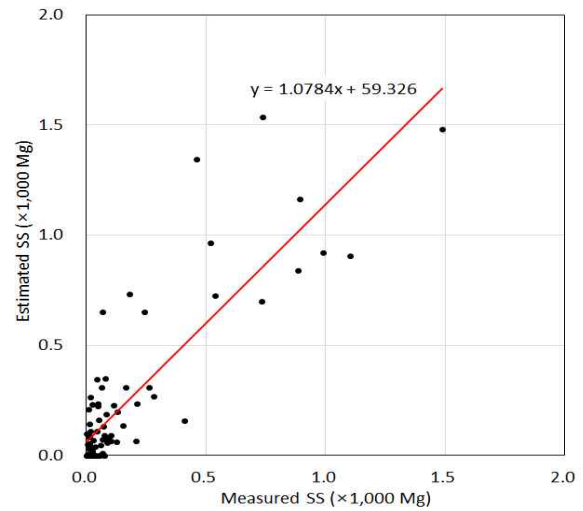
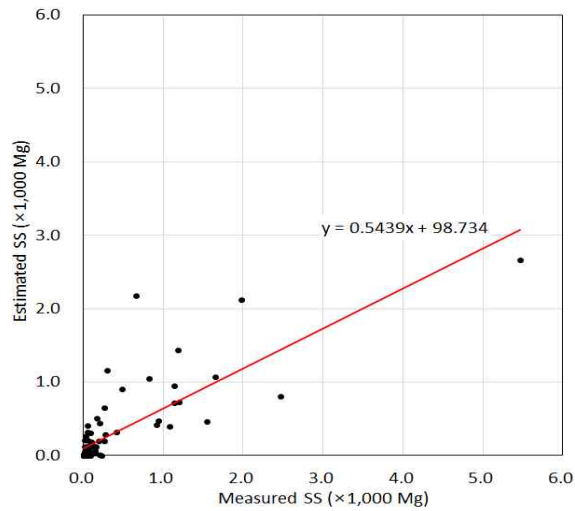
<Fig. 2-128> 횡성댐 유역의 부유사량 예측 보정(좌) 및 검정(우) 결과



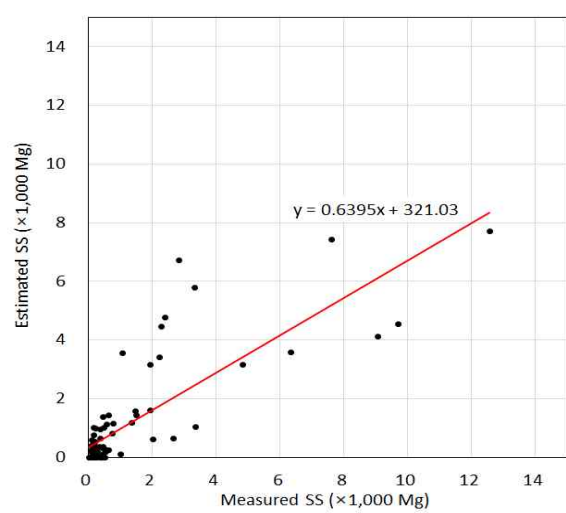
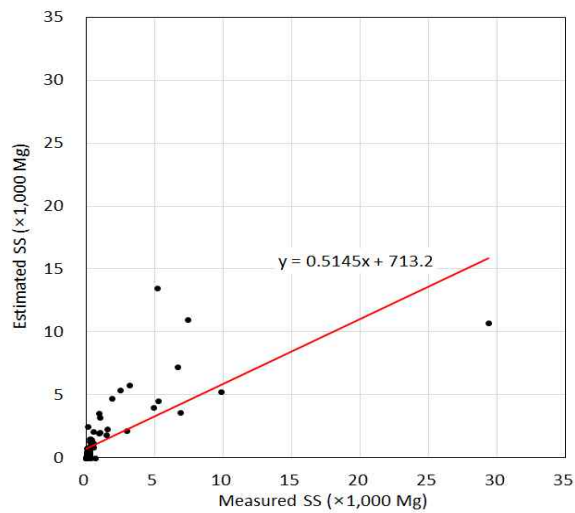
<Fig. 2-129> 섬진강댐 유역의 부유사량 예측 보정(좌) 및 검정(우) 결과



<Fig. 2-130> 주암댐 유역의 부유사량 예측 보정(좌) 및 검정(우) 결과



<Fig. 2-131> 임하댐 유역의 부유사량 예측 보정(좌) 및 검정(우) 결과



<Fig. 2-132> 남강댐 유역의 부유사량 예측 보정(좌) 및 검정(우) 결과

2-2. 연구 개발 성과

가. 논문게재

게재 연월일	논문명	저자			학술지 명	Vol (No.)	국내외 구분
		주저자	교신 저자	공동 저자			
2015.9.1.	A web-based tool to estimate pollutant loading using LOADEST	Youn Shik Park	Youn Shik Park	Bernie Engel, Jane Frankenberger, Hasun Hwang	Water	7	SCI(E)
2015.10.1.	Analysis for regression model behavior by sampling strategy for annual pollutant load estimation	Youn Shik Park	Youn Shik Park	Bernie Engel	Journal of Environmental Quality	44(6)	SCI
2016.1.1.	모델링 기법을 이용한 밭의 벼짚 지표피복의 부유사량 저감효과 평가방법	박윤식	김기성	금동혁, 이동준, 최중대, 임경재	한국물환경학회	32(1)	국내
2016.8.26.	Identifying the correlation between water quality data and LOADEST model behavior in annual sediment load estimations	Youn Shik Park	Bernie Engel	-	Water	8	SCI(E)
2016.11.30.	월단위 토양유실가능추정치를 위한 지표피복인자의 산정 방안 연구	성윤수	박윤식	정영훈, 임경재, 김종건, 김기성, 박승기, 신민환, 금동혁	한국농공학회	58(6)	국내
2017.9.30.	월단위 토양유실가능성 추정을 위해 개발된 ArcGIS 기반의 모형 적용	유나영	박윤식	신민환, 김종건	한국농공학회	59(5)	국내
2017.11.30.	MODIS 이미지를 이용한 지표특성에 따른 토양수분의 시공간적 분포 특성	김상우	신용철	이태화, 이상호, 최경숙, 박윤식, 임경재, 김종건	한국농공학회	59(6)	국내
2017.12.31.	한국형 토양유실공식의 GIS 기반 모형에 의한 금강 유역에 대한 토양유실 우심지역 선정에 관한 연구	김종건	박윤식	양재의, 임경재, 김성철, 이기하, 황상일, 유나영	한국토양지하수환경학회	22(6)	국내
2018.1.31.	원격탐사자료 기반 유효토양특성 산정을 위한 토양수문동화기법 개발	이태화	신용철	김상우, 이상호, 최경숙, 임경재, 박윤식	한국농공학회	60(1)	국내

게재 연월일	논문명	저자			학술지 명	Vol (No.)	국내외 구분
		주저자	교신 저자	공동 저자			
2018.3.31.	현장조사를 통한 4대강 유역의 보전관리인자 산정 연구	유나영	김종건	신민환, 서지연, 박윤식	한국농 공학회	60(2)	국내

나. 특허

등록/출원연 월일	출원/등록구분	특허명	출원/ 등록인	출원/ 등록국	출원/ 등록번호

다. 사업화성과

년월일	공사/제품판매명	금액(원)	발주/판매처

라. 기타성과

년월일	성과구분	내용	비고

2-3. 연구 결과

3년간(2차~4차)의 표토침식 예측모델 구축과 평가를 통해 USLE에 필요한 5개 인자(강우침식
능인자, 토양침식성인자, 경사도.경사장 인자 지표피복인자, 경작방법인자)에 대한 인자를 구축
하였다. 또한 ArcGIS 프로그램을 이용하여 토양유실량을 예측할 수 있는 툴을 개발하였으며,
이를 통해 월별 토양유실량 예측과 임의 유역에 대한 토양유실량 등급화가 가능하도록 하였음.
이를 통해 ‘표토의 침식 현황 조사에 관한 고시’의 예비조사 개정안을 마련하였음

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3-1. 목표

최종 목표는 국내에 적합한 한국형 표토침식 예측모델 개발 및 표토침식 방지를 위한 방지 대책 수립이며, 이를 위해 “표토침식 조사 및 보전 종합대책 마련 연구”에서 제안된 표토침식 예측모델의 인자를 국내에 적합한 인자로 수정·보완하는 것과 표토침식 현황 조사 모델링을 위한 기법 개발로 구분할 수 있다

- (1) 한국형 표토침식 예측모델 확립을 위한 인자 개선
- (2) 표토침식 취약지역 취약 지역 설정 및 침식 방지 대책 수립
- (3) 표토침식 모델링 기법 개발

3-2. 목표 달성여부

목 표	연구개발 수행내용	달성도(%)
한국형 표토침식 예측모델 확립	기존 Lysimeter Data 검토 및 운영 개선사항 제안	100
	전국강우자료를 이용한 한국형 강우침식능인자 확립	100
	기상을 고려한 토양침식성인자 확립	100
	지표피복인자 산정	100
	경작방법인자의 적용 방안 수립	100
	경사장·경사도인자 적용 방안 수립	100
한국형 표토침식 예측모델의 비교평가	시범적용을 통한 기존 모델과의 비교/분석	100

목 표	연구개발 수행내용	달성도(%)
한국형 표토침식 예측모델을 위한 표토침식 DB구축	지표피복인자의 적용 작물 및 토양침식성인자 DB 확대	100
한국형 표토침식 예측모델의 입력자료 확대	경작방법인자 및 토양침식성인자 현장 조사	100
표토침식 취약지역 침식 방지 대책 I	GIS 기반의 모형 개발	100
	표토침식 취약지역 설정 시범적용	100

목 표	연구개발 수행내용	달성도(%)
한국형 표토침식 예측모델의 검토	3차년도 연구내용 결과 보완 및 4차년도 연구연계	100
	2차년도 및 3차년도에 개발된 한국형 표토침식 예측모델 개선	100
유달률 산정 방법 검토	유달률 산정 방법 검토	100
표토침식 취약지역 침식 방지대책 II	표토침식 취약지역 설정 시범적용 II	100

3-3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

- 해당사항 없음

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

현행 환경부 고시에서는 USLE모델을 기준으로 표토침식량을 산정하고 있으며, USLE의 일부 인자값들은 외국의 데이터를 기반으로 구축되어 있어 국내 환경여건을 정확히 반영하지 못하므로 제한점을 갖음

- 그러므로 본 연구를 통해 개선 및 보완될 USLE 인자 값들은 향후 한국을 대상으로 한 표토침식량 산정 연구에 기반이 되는 데이터로 활용이 가능하며, 국내 표토침식 우심지역 선정에 기초자료로 활용될 수 있음
- 그리고 한국형 표토침식 모델의 검증 및 평가를 통한 데이터베이스 구축은 현재 국내에서 연구가 미비함으로 본 과업에서 제시하게 될 데이터베이스는 국내 표토침식산정 연구에 초석이 될 수 있음
- 또한 본 연구에서 수행할 표토 침식현황 파악 결과 Map은 국가단위의 표토침식 취약지역 파악을 용이하게 하며, 이 Map은 효율적 표토침식 관리지역 설정 방안 제시에 활용될 수 있음
- 따라서 국가정책 수립 시 국내 실정을 반영한 표토침식평가가 가능함에 따라 기존의 정책보다 정확하고 효율적인 정책 수립에 기여할 수 있을 것이라 판단되며, 표토침식 취약지역 관리방안은 자원으로써의 표토보전 및 침식방지에 활용될 수 있음

붙임. 참고문헌

- Arnold, J.G., Srinivasan, R., 1994, Integration of a BASIN-scale water quality model with GIS, Journal of the American Water Resources Association, 30(3), pp.453-462.
- Bieger K., G. Hörmann, N. Fohrer (2015) Detailed spatial analysis of SWAT-simulated surface runoff and sediment yield in a mountainous watershed in China, Hydrological Sciences Journal, 60:5, 784-800, DOI: 10.1080/02626667.2014.965172.
- Box. Jr. J. E. (1981). The effect of surface slaty fragment on soil erosion by water. Soil Sci. Soc. Am. J. 43:111-116.
- Boyce, R. C., 1975. Sediment Routing with Sediment Delivery Ratios. In:Present and Prospective Technology for ARS, USDA, Washington, DC.
- Brown, L. R., 1984. Conserving soils, State of the World. Norton, New York, pp.53-75.
- Chaplot, V., 2005, Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment and NO₃-N loads predictions, Journal of Hydrology, 312(1), pp.207-222.
- De Rosa P, Cencetti C, and Fredduzzi A., 2016. A GRASS tool for the Sediment Delivery Ratio mapping. PeerJ Preprints 4:e2227v2 (<https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.2227v2>).
- Di Stefano, C., V. Ferro, M. Burguet, E. V. Taguas, (2016) Testing the long term applicability of USLE-M equation at a olive orchard microcatchment in Spain, CATENA 147 (2016) 71-79.
- Erickson, A.J., (1997), “A disforestimating soil erodibility - K value class and soil loss tolerance.” U.S. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Salt Lake City, Utah.
- Flanagan D.C., Livingston S. J. WEPP user summary: USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP) USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory; 1995. NSERL Report No. 11.
- Fraser, R. SEDMOD: A GIS-based Delivery Model for Diffuse Source Pollutants (doctoral dissertation. Yale University. May 1999.
- Hyams, D.G., 2014, CurveExpert professional Documentation, User’ s manual.
- J. Lieskovský and P. Kenderessy, (2014). Modeling the effect of vegetation cover and different tillage practices on soil erosion in VINEYARDS: a case study in VRÁBLE (Slovakia) using WATEM/SEDEM. Land Degradation & Development, 25(3), pp.288-296.

- Jang, C.H., Shin, Y.C., Kum, D.H., Kim, R.G., Yang, J.E., Kim, S.C., Hwang, S.I., Lim, K.J., Yoon, J.K., Park, Y.S., Jung, Y.H., 2015, Assessment of soil loss in South Korea based on land-cover type, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29(8), pp.2127-2141.
- Jung, K.H., Kim, W.T., Hur, S.O., Ha, S.K., Jung, P.K., Jung, Y.S., 2004, USLE/RUSLE factors for national scale soil loss estimation based on the digital detailed soil map, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 37(4), pp.199-206.
- Kang, S. Y., Kim, K. H., 2011, Effects of DEM Resolutions in Site Classification, *Journal of Korean Society for Geospatial Information System*, 19(1), pp.21-28.
- Khaleghpanaha, N, M. Shorafaa, H. Asadia, M. Gorjia, M. Davarib, (2016), Modeling soil loss at plot scale with EUROSEM and RUSLE2 at stony soils of Khamesan watershed, Iran, *CATENA*, 147 (2016) 773-788.
- Kongju National Unoversity, 2015, Development of topsoil erosion medel for Korea. Yesan-gun:Republic of Korea
- Kongju National Unoversity, 2016, Development of topsoil erosion medel for Korea. Yesan-gun:Republic of Korea
- Lim, K.J., Choi, J.D., Kim, K.S., Sagong, M., Engel, B., 2003. Development of Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC) in Small Scale Watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 45(5), pp.85-96.
- Magesh, N. S., N. Chandrasekar (2016), Assessment of soil erosion and sediment yield in the Tamiraparani sub-basin, South India, using an automated RUSLE-SY model, *Environ Earth Sci* (2016) 75:1208, DOI 10.1007/s12665-016-6010-x.
- Mancino, G, A. Nolèa, L. Salvatib, A. Ferraraa, (2016) In-between forest expansion and cropland decline: A revised USLE model for soil erosion risk under land-use change in a Mediterranean region, *Ecological Indicators*, Volume 71, December 2016, Pages 544-550.
- Mhangara, P., V. Kakembo, K. J. Lim, (2012), Soil erosion risk assessment of the Keiskamma catchment, South Africa using GIS and remote sensing, *Earth Sci* (2012) 65: 2087. doi:10.1007/s12665-011-1190-x.
- Moore, I. & Burch, G., (1986). Physical Basis of the Length-Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation, *Soil Science Society of America Journal*, 50, 1294-1298
- Muñoz-Carpena, R., J. E. Parsons, 2005, Vegetative Filter Strips Hydrology and Sediment

Transport Modeling System, Model Document & User's Manual.

- Nicks, A.D.; Lane, L.J. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile Model Documentation; USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory: West Lafayette, IN, USA, 1989.
- Park, C.S., Lee, S.K., Suh, Y.C., 2007, Development of an Automatic Generation methodology for Digital Elevation Models using Two-Dimensional Digital Map, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 10(3), pp.113-122.
- Park, Y.S., Kim, J., Kim, N.W., Kim, S.J., Jeon, J.H., Engel, B.A., Jang, W., and Lim, K.J., 2010, Development of new R, C and SDR modules for the SATEEC GIS system, Comp. Geo., 36, 726-734.
- Park, Y. S., Engel, B. A., Harbor, J., 2014. A web-based model to estimate the impact of best management practices. WATER 6, pp.455-471.
- Parveen, R., Kumar, U., 2012, Integrated Approach of Universal Soil Loss Equation(USLE) and Geographical Information System(GIS) for Soil Loss Risk Assessment in Upper South Koel Basin, Jharkhand, Journal of Geographic Information System, 4(6), pp.588-596.
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, D.C. Yoder., 1997, Prediction soil erosion and water: A guide to conservation planning with the revised USLE, US. Dep. Agric., Agric, Handbook No.703.
- Renschler, C.S. "Designing geo-spatial interfaces to scale process models: The GeoWEPP approach" , Hydrol. Process, 17(5), pp.1005-1017, 2003.
- Risal, A., Bhattarai, R., Kum, D.H., Park, Y.S., Yang, J.E., Lim, K.J., 2016. Application of Web EROsivity Module (WERM) for estimation of annual and monthly R factor in Korea, KATENA 147 (2016) 225-237.
- Sharpley, A.N., Williams, J.R., 1990, EPIC-erosion productivity impact calculator: 1. Model documentation. Technical Bulletin (United States. Department of Agriculture) No.1768.
- Tetra Tech, Inc. User's Guide Spreadsheet Tool for the Estimation of Pollutant Load (STEPL) Version 4.1; Tetra Tech, Inc.: Fairfax, VA, USA, 2011.
- USDA, 1972. Sediment Source, Yields, and Delivery Ratios, National Engineering Handbook, Section 3 Sediment.
- Vanoni, V.A., 1975. Sedimentation Engineering, Manual and Report No. 54, American Society of Civil Engineers, New York, N.Y.

- William R.T. and G. Bahram (2015), Event-based soil loss models for construction sites, Journal of Hydrology 524 (2015) 780-788.
- Williams, J.R. and Berndt, H. D., 1977. Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology, Trans. of the ASAE, 20, 1100-1104
- Williams, J.R., 1977. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources, USDA-ARS-S-40, U.S Department of Agriculture, Washington, DC.
- Wischmeier, W.H., D.D. Smith., 1965, Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: A guide for selection of practices for soil and water conservation, US. Dep. Agric., Agric. Handbook No.282.
- Wischmeier, W. H., John, C. B., and Cross, B. V., (1971), A Soil erodibility monograph for farm land and conservation sites. Journal of Soil and Water Conservation, vol.26.
- Wischmeier, W.H., D.D. Smith., 1978, Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning, US. Dep. Agric., Agric. Handbook No.537.
- 건설부 (1992). 댐 설계를 위한 유역단위 비유수량 조사 연구.
- 국립농업과학원, 2010, 농업환경변동조사, 10년(1999~2008) 사업완결 보고서, 농촌진흥청, pp 247~268.
- 김민정, 허승오, 권순익, 정구복, 손연규, 하상진, 이덕배, 2010, 우리나라 강우량 변화 시나리오에 따른 밭토양의 토양 유실량 변화 예측, 한국토양비료학회지, 한국토양비료학회, 제 43권 제6호, pp.789-792.
- 김민석, 김진관, 양동윤, 2007, 소유역에서의 토양유출 산정을 위한 GeoWEPP model 과 USLE의 비교,적용 연구 - 이천시단월동 유역을 사례로, 자원환경지질학회지, 자원환경지질학회 제40권, pp.103-113.
- 김민희, 박민석, 한준호, 정명숙, 현승, 2011, 한강 상류지역 토양유실에 의한 염류부하지수와 수질의 상관관계, 한국물환경학회 대한상수도학회 공동 논문집, 한국물환경학회 pp. 54.
- 김소래, 유찬, 이상환, 지원현, 장민원, 2017, USLExls를 이용한 복토법에 따른 필지 단위 토양유실량 분석, 한국농공학회지, 제59권 제6호, pp.109-125.
- 김지혜, 2016, 영산강수계 토지이용형태와 수질간 상관성 분석, 공학석사학위논문, 전남대학교.
- 박재현, 김동주, 김민규, 장춘화, 강현우, 금동혁, 임경재, 2014, 기후변화에 따른 R-Factor 값을 고려한 토양유실량 평가, 한국관개배수, 제21권 제1호, pp.64-77.

- 박찬원, 손연규, 현병근, 송관철, 전현정, 문용희, 윤순강, 2011, 토양유실량 예측을 위한 강우침식인자 재산정, 한국토양비료학회지, 제44권 제6호, pp.977-982.
- 박찬원, 손연규, 현병근, 송관철, 전현정, 조현준, 문용희, 2016, 토양 특성 및 토지이용에 따른 낙동강 상류지역 토양침식위험성 평가, 한국토양비료학회지, 한국토양비료학회, 제45권 제6호, pp.890-896.
- 신민환, 원철희, 최용훈, 서지연, 이재운, 임경재, 최중대(209). 인공강우기에 의한 시험포장 토양유실량의 - 강우강도, 비표면 및 경사조건 변화 -, 수질보전 한국물환경학회지, 제25권 제5호, pp.785-791.
- 신상훈, 김원, 이승엽, 백경록, 2015, 강우 공간분포가 토사유출에 미치는 영향의 실험적 고찰, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제45권, pp.111-117.
- 신승숙, 박상덕, 이종철, 이규송 (2013), 대규모 산지유역 토양침식 평가를 위한 SEMMA 개선, 한국수자원학회논문집, 제46권 제9호, pp.885-896.
- 예령, 정세웅, 오동근, 윤성완, 2009, 기후변화에 따른 대청호 유역의 물순환 및 토양유실량 영향, 수질보전 한국물환경학회지, 제25권 제6호, pp.821-831.
- 유나영, 이동준, 한정호, 임경재, 김종건, 김기형, 김소연, 김은석, 박윤식, 2017, 월단위 토양유실가능성 추정을 위한 ArcGIS기반의 모형 개발, 한국농공학회지, 제51권 제1호, pp.21-30.
- 이근상, 장영률, 조기성 (2003). 토양침식량 산정에서 토양도 축척에 따른 적정 해상도 분석에 관한 연구. 한국지리정보학회지, 제6권 제3호, pp.1-10.
- 이기하, 김연수, 안현욱, 오성렬 (2015), 파티클 필터를 이용한 토양침식모형의 불확실성 분석, 한국방재학회 학술발표대회논문집, 제14권 제14호, pp.283-283.
- 이동준, 이지민, 금동혁, 박윤식, 정영훈, 신용철, 정교철, 이병철, 임경재, 2014, 최적관리기법에 따른 토양유실 저감 효과 유역단위 분석, 한국물환경학회지, 한국물환경학회, 제30권 제6호, pp.638-646.
- 이진영, 양동윤, 임현수, 정공수, 김주용, 2003, 남한강 유역의 범용토양유실공식(USLE)의 적용에 관한 연구, 대한자원환경지질학회지, 대한자원환경지질학회, pp.157-160.
- 장원석, 박윤식, 최중대, 김종건, 신민환, 류지철, 강현우, 임경재, 2010, SWAT모형을 이용한 벚꽃매트의 토양유실 저감효과 분석, 한국농공학회지, 제52권 제3호, pp.97-104.
- 장춘화, 류지철, 강현우, 금동혁, 김영석, 박화용, 김기성, 임경재. 2011. 일강우를 고려한 SATEEC R 모듈 개발. 한국토양비료학회지 제44권 제6호, pp.983-990.
- 전지홍, 최동혁, 김태동 (2014), SATEEC을 이용한 우회수로 토양유실 저감효과 모의: 임하

호 유역을 대상으로, 한국도시환경학회지 제14권 제3호, pp.213-221.

- 정강호, 김원태, 허승오, 하상건, 정필균, 정영상 (2004). 수치 정밀토양도에 기초한 전국 토양유실량의 평가를 위한 USLE/RUSLE 인자의 산정. 한국토양비료학회지, 제37권 제4호, pp.199-206.
- 정영상, 권영기, 임형식, 하상건, 양재의, 1999, 강원도 경사지 토양유실예측용 신 USLE의 적용을 위한 강수 인자와 토양 침식성인자의 검토, 한국토양비료학회지, 제32권 제1호, pp.31-38.
- 정필균, 고문환, 임정남, 엄기태, 최대웅, 1983, 토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석, 한국토양비료학회지, 제16권 제2호, pp.112-118.
- 최진규, 구자웅, 손재권 (1998). 토양유실량 예측공식 USLE 적용과 단위변환. 한국토양비료학회지, 제31권 제3호, pp.301-308.
- 최철현, 유주한, 정성관 (2013), RUSLE 모형을 이용한 경주국립공원의 토양침식 위험지역 추정, 한국환경생태학회지 제27권 제5호, pp.614-624.
- 환경부, 2012, 표토의 침식 현황 조사에 관한 고시.

주 의

1. 이 보고서는 환경부에서 시행한 환경기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 환경부에서 시행한 환경기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.