GIS를 이용한 토사재해 위험도 분석

이 창 현
현대엔지니어링 수자원개발부 과장
lch0329@hec.co.kr

1. 서론

2005년 7월에 자연재해대책법이 개정되면서 전국의 시 · 군 · 구를 대상으로 풍수해저감종합계획수립 제도가 도입됨에 따라 시 · 군 · 구 전체를 대상으로 풍수해 유형별 위험도 분석 및 위험지구 선정에 대한 효율적이고 적절한 방법이 필요시 되고 있다.

기존의 사전재해영향성검토는 개발로 인한 재해영향 예측 및 검토라는 측면에서 비교적 작은 범위를 대상으로 한 풍수해 유형별 위험도 분석이라고 한다면, 풍수해저감종합계획은 과업범위가 시 · 군 · 구 전체를 대상으로 하기 때문에 위험도 분석에 소요되는 시간과 비용이 크다고 하겠다. 따라서 전 구간에 대하여 우선적으로 수집된 관련 자료들을 이용하여 1차적으로 위험도 분석을 실시하고 그 결과 취약지구에 대하여 현장조사를 통해 보다 효율적인 위험도 평가가 가능 할 것이다.

풍수해 유형별로 위험도 분석방법을 고려할 때 하천재해와 내수침수재해의 경우에는 기존의 측량성과가 반영된 하천기본계획 및 관련 계획들을 이용하여 현재 시설물의 능력검토를 통해 위험도 분석이 가능하겠지만, 토사재해의 경우에는 대상범위가 광범위하여 모든 지역에 대한 측정이 불가능하기 때문에 현재는 지리정보시스템(Geographic Information System, 이하 GIS)을 이용하여 재해를 유발하는 인자들을 추출한 후 위험도를 분석하는 방법이 사용되고 있다.

본고에서는 GIS를 이용한 토사재해 위험도 분석 방법을 소개하고 이에 대한 적용 사례 및 문제점을 제시하고자 한다.

2. 토사재해 위험도 분석

최근 집중호우가 빈발하면서 토사침식으로 인해 유출

률과 유출속도가 증가하여 하류부의 유출량 증가 및 토사 퇴적으로 인한 하상고 상승으로 통수능이 저하되어 홍수 피해가 발생하며, 상류로부터 유입된 토사가 우수유입구를 차단하여 도로, 주택 등 생활시설의 침수피해가 발생하는 등 토사유출로 인한 피해가 속출하고 있다. 이에 토사재해 위험지구를 선정하고 피해가 발생하지 않도록 사전에 대책을 수립하여야 할 것이다.

토사재해 위험지구 선정을 위해서는 과거 피해발생지역, 주민 탐문조사와 같이 위험이 노출되어 있는 지역뿐만 아니라, 과업범위 전구간에 대하여 토사재해 위험도 분석을 실시한 후 위험요인이 잠재되어 있는 지역까지를 고려하여 결정하여야 한다.

보통 토사재해 위험도 분석을 위해 많이 사용하는 방법이 개정범용토양손실공식(Revised Universal Soil Loss Equation, 이하 RUSLE)을 이용하여 유역내에 토사유출량을 산정한 후 위험도를 판단하는데 최근에는 광범위한 면적에 대하여도 GIS를 이용하여 비교적 쉽고 간편하게 분석할 수 있게 되었다.

본고에서는 경기도 광주시에 대하여 GIS를 이용한 토사재해 위험도 분석을 적용한 사례를 소개하고자 한다.

2.1 RUSLE 모형의 개요

강우의 토양침식에 대한 토지이용의 영향을 예측할 목적으로 개발된 USLE(Universal Soil Loss Equation) 모형은 농업지역의 토양유실량을 산정하기 위하여 1965년에 Wischmeier와 Smith에 의해 강우에 의한 토립자의 이탈 및 운송에 의한 개념을 기초로 하여 처음 제안되었고, 1996년에 미국농무성(United States Department of Agriculture, USDA)은 개발목장이나 산림과 같은 실험지점 이외의 토양조건에 대한 토사침식량 산정을 위해 기후인자의 수정, 계절적 변화에 대한 토양의 침식성 인자의 개발, 사면의 길이 및 경사에 대한 수정과 피복식생 인자를 산정하는 새로운 계산과정의 개발 등을 추가한 RUSLE 모형을 발표하였다.

RUSLE 모형의 식은 다음과 같다.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

여기서,

A : 강우침식인자(R)의 해당기간 중 단위면적당 토양침식량(tonnes/ha)

R : 강우침식인자(10^7J/ha · ㎜/hr)

K : 토양침식인자(tonnes/ha/R)

LS : 지형인자(무차원) (L=침식경사면 길이, S=침식경사도)

C : 식생피복인자(무차원)

P : 토양보존대책인자(무차원)

〈그림 1〉 토양침식량 산정과정

2.2 GIS 기본 데이터베이스 구축

가) 입력자료 현황

RUSLE 모형에 필요한 인자를 생성하기 위하여 수치지형도와 정밀토양도, 토지이용현황도 등의 수치자료를 이용하였다. 광주시 관내 전체를 10m×10m의 격자로 나누워 각각의 셀마다 인자값을 결정하고, 결정된 인자 값들에 대한 검토를 통해 토사유출 위험도를 분석하였다. 지형인자 추출은 1:5,000 축척의 수치지형도를 사용하였고, 토양침식인자 추출은 1:25,000 축척의 정밀토양도를 사용하였으며, 식생피복인자와 토양보존대책인자 추출을 위

〔표-1〕 RUSLE 모형에 사용된 수치자료 현황

자료명	발행처	Scale	비고
수치지형도	국립지리원	1:5,000	지형인자 추출
정밀토양도	농업과학기술원	1:25,000	토양침식인자 추출
토지이용현황도	국립지리원	1:25,000	식생피복인자, 토양보존대책인자 추출

해 1:25,000 축척의 토지이용현황도를 사용하였다.(〈표 1〉참고)

GIS 기본데이터베이스 구축을 위해 Arc-View 3.2 프로그램을 사용하였다.

나) RUSLE 모형인자 생성

(1) 강우침식인자(R)

강우침식인자는 강우의 운동에너지에 의한 토양침식량의 정도를 나타내는 인자로서 연평균 강우침식인자와 단일호우 강우침식인자로 구분하여 산정한다.

연평균 강우침식인자는 연평균 강우량에 의한 토양침식량의 정도를 나타내는 인자로서 박정환 등(2000년)이 과거 24년간의 기상청 관측소의 강우자료를 이용하여 산정된 결과를 사용하였으며 〈표 2〉와 같다.

〔표-2〕 지점별 연평균 강우침식인자

[단위 : 10^7J/ha · ㎜/hr]

관측소	강우침식인자(R)	관측소	강우침식인자(R)	관측소	강우침식인자(R
속 초	383	목 포	351	남 원	411
춘 천	413	여 수	552	순 천	469
강 릉	417	진 주	523	장 흥	598
서 울	526	강 화	666	해 남	488
인 천	451	양 평	524	고 흥	640
수 원	491	이 천	483	영 주	389
서 산	498	인 제	274	문 경	282
청 주	441	홍 천	486	영 덕	258
대 전	475	제 천	436	의 성	265
추풍령	280	충 주	395	선 산	246
포 항	262	보 은	386	영 천	253
군 산	405	아 산	492	거 창	363
대 구	271	보 령	551	합 천	404
전 주	428	부 여	540	밀 양	366
울 산	450	금 산	381	산 청	542
광 주	460	부 안	396	거 제	797
부 산	608	임 실	355	남 해	803
통 영	502	정 읍	434	평 균	445

자료) 토양유실공식의 강우침식도 분포에 관한 연구(2000년, 박정환 등)

단일호우 강우침식인자는 단일호우에 의한 토양침식량의 정도를 나타내는 인자로서 다음과 같은 식을 이용하여 산출한다.

$$R = E \cdot I_{30}$$

$$E = e \cdot \triangle P$$

$$e = 0.029[1 - 0.72\exp(-0.05 \cdot I)$$

여기서,

R : 단일호우 강우침식인자(10^7J/ha · mm/hr)

I_{30} : 설계재현기간의 30분 강우강도(mm/hr)

E : 강우총에너지(10^7J/ha)

△P : 강우지속기간 구분시 간격당 강우증가량(mm)

e : 강우운동에너지(10^7J/ha/mm)

I : 강우강도(mm/hr)

본고에서는 연평균 강우침식인자를 사용하였으며, 광주시 관내에 영향을 주는 양평, 이천, 수원관측소의 강우침식인자 값을 Thiessen 면적비를 계산하여 506.6×107J/ha · ㎜/hr으로 적용하였다.

〔표-3〕 광주시 강우침식인자

관측소	강우침식인자(R)	편입면적(㎢)	티센면적비	R×티센면적비
양 평	524	236.4	0.551	288.7
이 천	483	136.6	0.319	154.1
수 원	491	55.9	0.130	63.8
합 계		428.9	1.000	506.6

(2) 토양침식성 인자(K)

토양침식은 토양 덩어리로부터 토양입자가 떨어져 나가는 이탈과정과 흐름에 의해 운반되는 이송과정으로 구성되며, 일반적으로 토양입자가 크면 쉽게 이탈되나 이송은 어렵다.

토양침식인자(K)는 토양의 침식성에 따른 토양침식량의 변화를 나타내는 인자로서 입도분포, 토양의 구조 및 유기물 함량 등에 관계된다. 산정방법에는 Wylie 방법, Ericson 방법, Wischmeier 방법 등이 있으며 그 중 가장 정확한 것으로 알려져 있는 Wischmeier 방법을 채택하였다.

본고에서는『댐 설계를 위한 유역단위 비유사량 조사 ·

연구(건설교통부/ 한국건설기술연구원, 1992)』에서 한국 전역의 토양통별로 제시된 K값을 사용하였으며, 광주시 관내에는 가천, 강서 등 총 44개의 토양통이 존재하며 각 토양통별 K값은 〈표 4〉와 같다.

(3) 지형인자(LS)

강우에 의한 토양침식은 경사지역의 길이와 경사도와 같은 지형인자에 따라 달라지므로 이에 대한 영향을 고려하고자 무차원계수 L과 S를 산정하였다. 사면길이는 지표 월류수가 발생되기 시작하는 지점에서부터 경사가 줄어 퇴적되는 지점까지의 길이 또는 유출이 뚜렷하게 나타나는 형태인 수로나 지류로 합류되는 지점까지의 수평거리를 나타낸다.

〔표-4〕 광주시 관내 토양통별 K값

번호	토양통	K값	토양부호	번호	토양통	K값	토양부호
1	가천	0.34	Gq	23	예천	0.39	YdB
2	강서	0.55	Gt	24	오산	0.20	OnC2, OnD2, OnE2, OnE3
3	고천	0.35	Gz	25	옥천	0.31	OcB
4	고평	0.32	GpB	26	외산	0.29	OsF2
5	남계	0.21	Ng	27	용지	0.35	YjB
6	남평	0.61	Np	28	월곡	0.30	WoB, WoC
7	뇌곡	0.21	NkB	29	은곡	0.31	EgB
8	덕산	0.16	DpE2, DpF2	30	중동	0.43	Jd
9	덕천	0.36	Dq	31	지곡	0.11	JoB, JoC
10	매곡	0.24	MoB	32	지산	0.31	JiB
11	백산	0.30	BjB	33	창곡	0.29	CfB
12	사촌	0.26	ScB, SfB, SfC	34	청산	0.29	CaF2, CmF2
13	삼각	0.25	SgD2, SgE2, SgF2	35	청원	0.28	Ce
14	상주	0.23	SAB, SAC, SuB, SuC	36	칠곡	0.29	CGC
15	석천	0.32	SE	37	평택	0.58	Pt
16	석토	0.24	SsC, SsD	38	풍천	0.21	PxB, PzB
17	송산	0.22	SND2, SNE2, SNF2, SRE2, SRF2	39	함창	0.54	Hh
18	송정	0.19	SoC2	40	화동	0.33	HjB
19	수암	0.25	SqC, SqD, SqE	41	황룡	0.26	Hr
20	안룡	0.45	ArB, ArC	42	회곡	0.23	HEB, HEC
21	연곡	0.41	YcB	43	저수지		W
22	예산	0.30	YaC2, YaD2	44	하천		RC, RCS, RS

본래 USLE 공식에서 사면길이 L과 사면경사 S는 각각 22.1m와 9%인 표준밭에 대한 토양손실량 결과를 나타내는 것으로 무차원값이며 산정방법은 다음과 같다.

사면길이 L은,

$$L=\left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^{m}$$

여기서, λ : 평면에 투영된 사면의 길이(m)를 말하며, 본 연구에서는 셀크기가 10m×10m를 감안하여 10m로 가정하였다.

$$m=\frac{\beta}{1+\beta}$$

$$\beta=\frac{11.16\sin\theta}{3.0(\sin\theta)^{0.8}+0.56}$$

사면경사 S는, 사면길이가 4.572m 이상인 경우에는 다음식과 같고,

$S=10.8\sin\theta+0.03, \quad \sin\theta < 0.09$

$S=16.8\sin\theta-0.5, \quad \sin\theta \geq 0.09$

사면길이가 4.572m 미만인 경우에는 다음식과 같다.

$S=3.0(\sin\theta)^{0.8}+0.56$

여기서, θ : 경사각(°)으로 Arc-view 프로그램의 경사를 계산하는 tool을 이용하였다.

(4) 식생피복인자(C)

식생피복인자는 경작의 종류와 식생의 상태 즉, 지표침식을 제어하는 요인인 지상식물의 크기, 지표면 부근의 상태, 지하의 식물 뿌리, 지표면 조도, 토양의 함수량 등에 따라서 달라지는 피복인자이다.

산정방법은 토지피복상태에 따라 과거에 제시된 경험값을 이용하여 결정하는데 본 연구에서는 Hann(1994년)이 제시한 식생피복인자와 국내에서 기존에 연구되었던 신계종(1999년), 김주훈 등(2003년), 이진영 등(2006년)

〔표-5〕 적용된 C값

구분	경작지		산림			초지	나지	물/시가지
	논	밭	고밀도	중밀도	소밀도			
C값	0.3	0.4	0.001	0.003	0.009	0.2	1.0	0.0

과 같은 문헌을 참고로 하여 〈표 5〉와 같은 값을 적용하였다.

토지이용현황도를 경작지(논, 밭)와 산림, 초지, 나지, 인공지역(도로, 건물, 시가지), 수계(하천, 저수지)로 먼저 구분하고, 산림의 경우에는 수치임상도를 활용하여 산림밀도 분포가 높은 지역과 중간 지역, 낮은 지역으로 구분하여 값을 부여하였다.

(5) 토양보존대책인자(P)

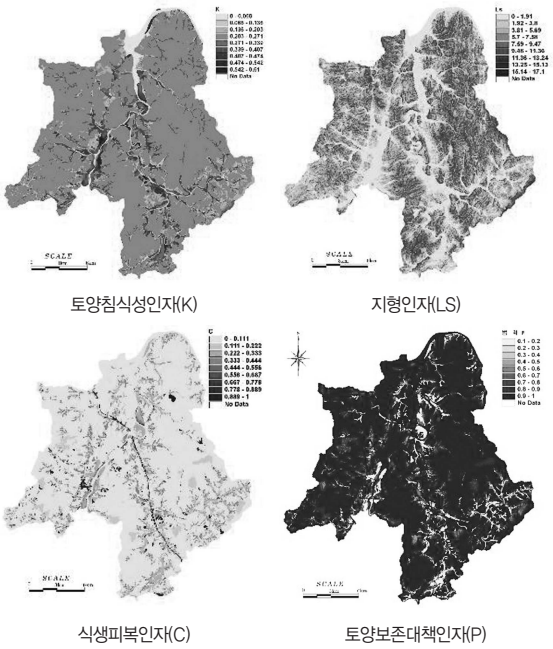
토양보존대책인자는 어떤 토양보존대책을 세운 사면의 상·하 방향 경사지로부터의 토양보존대책에 대한 토양유실의 비로 정의한다. 이것은 등고선 경작, 등고선 대상재배, 등고선 단구효과, 지표하 배수, 건조한 농경지의 조도의 효과를 평가하기 위해서 사용된다.

우리나라는 밭과 과수원은 주로 등고선을 따라 경작하므로 등고선 경작, 경지 정리된 논은 대부분 계단식의 테라스 경작, 그리고 미경지 정리된 논은 등고선 대상경작의 형태를 가진다(신계종(1999년), 박경훈(2003년)). 이러한 기준에 의해 농경지를 경작형태에 따라 분류한 후, 이를 경사분포에 따라 재분류하여 〈표 6〉과 같이 각 유형별로 토양보존대책인자(P) 값을 부여하였다.

〔표-6〕 적용된 P값

지면경사(%)	등고선 경작	등고선대상경작	테라스경작
1~3	0.6	0.30	0.12
3~9	0.5	0.25	0.10
9~13	0.6	0.30	0.12
13~17	0.7	0.35	0.14
17~21	0.8	0.40	0.16
21~25	0.9	0.45	0.18

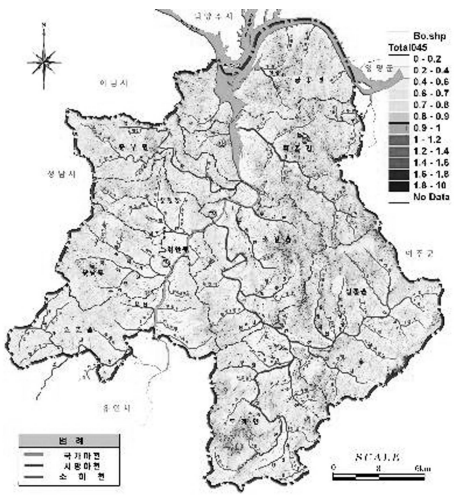
이상 토양침식량을 산정하기 위해 RUSLE 공식의 인자들을 상기와 같은 방법으로 산정한 결과 〈그림 2〉와 같다.



〈그림 2〉 토양침식량 산정을 위한 매개변수 산정결과

2.3 토양침식량 산정 결과

토양침식량은 앞서 설명한 바와 같이 강우침식인자 R, 토양침식인자 K, 지형인자 LS, 식생피복인자 C, 토양보존대책인자 P의 곱으로 산정할 수 있으며, GIS를 활용하여 각 매개변수별로 레이어를 구축하여 계산하였으며, 결과는 〈그림 3〉과 같다.



〈그림 3〉 토양침식량 분포도

가) 소유역 설정

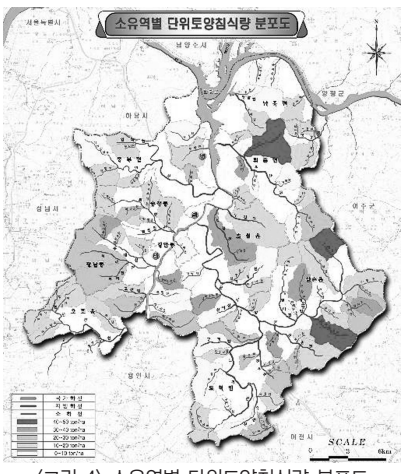
침식된 토사는 하천을 따라 하류로 유출되기 때문에 유역별로 토양침식량을 판단하여 위험지구를 선정하기 위해서 광주시 전체를 소유역으로 나누어 소유역별 토사침식량을 산정하였다.

소유역을 나누는 기준은 기본적으로 소하천을 대상으로 하였으며, 지방하천내에 소하천이 없는 단일하천의 경우도 하나의 소유역으로 설정하였다. 금회 설정된 소유역은 총 95개소이다.

나) 소유역별 토양침식량 산정결과

소유역별 하구지점에서 산정된 토양침식량 결과는 우산천 지류인 염치천에서 30,417ton으로 가장 많이 침식되며, 단위면적당 토양침식량은 곤지암천 지류인 웃개마을천이 44.7ton/ha로 침식이 제일 크며, 우산천 지류 염치천이 43.3ton/ha, 곤지암천 지류인 건업천이 41.9ton/ha 순으로 토양침식량이 큰 것으로 나타났다(<그림 4>참조).

다만, 광범위한 지역에 대하여 GIS를 이용한 토양침식도 분석은 이론만 정립된 상태이고 분석에 사용되는 매개변수 값들은 사용자에 따라 달리 적용하고 있어, 유역내에 토사유출 위험정도 분포를 판단하기에는 적합하나 산정된 결과에 신뢰성이 부족하여 설계에 사용하기에는 부적합한 실정이다.



<그림 4> 소유역별 단위토양침식량 분포도

3. 결론

최근 기후변화의 영향으로 매년 집중호우가 발생하고 있으며, 이에 동반하여 토사유출로 인한 피해가 반복적으로 발생하고 있다. 따라서, 토사유출에 의한 피해를 방지하기 위해 과거 피해지역 및 주민 탐문조사를 통하여 외부에 노출되어 있는 위험지구에 대한 대책이 1차적으로 필요하겠지만 위험성이 잠재되어 있는 지역에 대해서도 찾아내어 대책을 강구하는 것이 필요하다.

본고에서는 광범위한 대상구간에 GIS를 이용하여 비교적 간단하고 객관적이며 효율적으로 토사재해 위험도를 평가하는 방법에 대하여 소개하였으며, 이를 경기도 광주시에 적용하여 보았다. 위험도 평가방법을 간단히 요약하면, 토양침식량을 산정하는 RUSLE 공식의 인자들에 대하여 수치지도를 이용하여 모형을 구축한 뒤 각 인자들의 곱으로 계산되는 토사발생량이 현저한 지역을 위험지구로 선정하는 것이다.

다만, 광범위한 지역에 대하여 GIS를 이용한 토양침식도 분석은 이론만 정립된 상태이고 분석에 사용되는 매개변수 값들은 사용자에 따라 달리 적용하고 있으며, 토양침식에 대한 실험결과가 전무한 상태라 모형의 검증이 전혀 이루어지지 않았기 때문에 위의 결과를 활용하는 측면에서 유역내에 토사유출 위험정도 분포를 판단하기에는 적합하나 산정된 결과를 이용하여 구조물 설계에 적용하기에는 좀 더 면밀한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

또한 위의 방법을 통하여 산정된 위험지구는 반드시 현장조사를 통하여 실제 재해 가능성이 있는지에 대한 평가가 따라야 할 것이다.

참고문헌

1. 건설부 (1992), 댐 설계를 위한 유역단위 비유사량 조사 · 연구
2. 김주훈 등(2003), GIS를 이용한 토양침식 위험지역 분석, 한국지리정보학회지
3. 박경훈 (2003), GIS 및 RUSLE 기법을 활용한 금호강 유역의 토양침식위험도 평가, 한국지리정보학회지
4. 박정환 등(2000), 토양유실공식의 강우침식도 분포에 관한 연구, 한국수자원학회 논문집
5. 신계종 (1999), 지형공간정보체계를 이용한 유역의 토양유실 분석, 박사학위논문 강원대학교
6. 이진영 등(2006), 복하천 유역의 토양유실량 및 경작지의 상관 분석, 한국지리정보학회지