

RUSLE 모형으로 토사유실에 따른 사방댐 적정성 분석

Analysis of the Adequacy Check Dam according to Soil Loss using RUSLE

최 현¹⁾
Choi, Hyun

Abstract

Damage such as landslides has been caused by natural phenomenon like a heavy rain. As appropriate countermeasures, rather than analysing the cause of the landslide, we used methods of check dam installation and maintenance mountain basin. A check dam is a small, sometimes temporary, dam constructed across a swale, drainage ditch, or waterway to counteract erosion by reducing water flow velocity. In this study, we analysed the adequacy of check dam built to prevent further damage after landslides through GIS and examined the sediment erosion in the existing check dams for an ideal location of check dam, considering the accessibility and size. As a result of reviewing soil loss in the study watershed according to RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation), the basin I had about 2% soil loss reduction, the basin II showed less than 1 % soul loss reduction, and basin III showed the reducing effect of 5 % soil erosion.

Keywords: Landslides, Check Dam, Soil Loss, GIS, RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)

초 록

산사태와 같은 피해는 집중 호우 등의 자연현상에 원인이 있다. 적절한 대응책으로는 사방댐 설치와 계류보전 등의 방식을 사용한다. 사방댐은 산비탈 붕괴지의 골이나 이에 접속된 계류의 최상류부에 설치하는 소규모의 댐을 말한다. 본 연구에서는 산사태가 난 후에 추가피해를 방지하기 위한 사방댐이 설치된 지역의 적정성을 분석하였다. 사방댐 최적지 분석을 위한 기준에 설치된 사방댐을 중심으로 접근성과 규모 등을 고려하여 GIS로 토사유실량을 검토하였다. RUSLE 모형으로 연구대상구역의 토사유실량을 검토한 결과 유역 I에서는 약 2%정도의 토양유실 감소효과가 있었고, 유역 II에서는 1% 미만의 토양유실 감소가 있는 것으로 나타났으며, 유역 III에서는 5% 대의 토사유실감소효과가 있는 것으로 나타났다.

핵심어: 산사태, 사방댐, 토사유실량, GIS, RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)

Received 2016. 09. 23, Revised 2016. 10. 08, Accepted 2016. 10. 25

1) Member, Dept. of Civil Engineering, Kyungnam University(E-mail : hchoi@kyungnam.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

우리나라는 기상관측 이후 평균기온이 약 1.5℃ 상승하였으며(Kwon, 2007), 세계적인 기상이변현상으로 인하여 단기간 집중적으로 발생하는 게릴라성 강우특성을 보이고 있다. 최근 연평균 산사태 발생면적을 살펴보면 779ha로 1980년대보다 지속적으로 증가함을 알 수 있다(Kim *et al.*, 2012). 특히 게릴라성 호우와 같은 강우강도의 증가는 시간적 공간적으로 재해의 발생 예측을 어렵게 할 뿐만 아니라 홍수 발생 시 한계를 보여주고 있다. 유역에서 발생하는 토사량 산정에 관한 연구는 USLE(Universal Soil Loss Equation)를 보정하여 토양침식 계산에 관한 연구가 Jetten and Dejong(1988)에 의해 이루어졌으며, Ferri and Minacapilli(1995)는 USLE를 확대하여 유사이송항을 모델에 적용하여 유역으로부터 유출되는 토사유실량을 예측하고자 하였다. Kim *et al.*(2003)은 GIS를 이용한 토양침식 위험지역 분석에 관한 연구를 수행하여 유역에 대한 토양침식 위험지역을 분석하였다. Lee and Jo(2004)는 GIS 기반 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation) 모델에 의한 탁수자료를 이용한 GIS 기반의 토사유실량의 적정성을 평가하였다. 최근에는 인공위성, LiDAR영상을 활용한 토사유실에 관한 연구가 수행되었다(Kang and Kang, 2006; Yang, *et al.*, 2006). Lee, *et al.*(2007a)는 소유역의 토사유실량에 따라서 유사저류지의 규모의 적정성을 검토하기 위해서 지형정보자료를 활용하여 범용토양유실 공식을 적용한 후 소유역의 토사유실량을 분석하고 저류지 용적규모와 비교·평가하여 유사저류지 규모의 적정성을 검토하였다. Lee, *et al.*(2007b)는 사방댐유역의 토사유실량과 유사운송비를 이용하여 저감효과를 분석하여 2005년 사방댐의 토사유실 저감효과에 대한 연구를 수행하였다. Park *et al.*(2013)은 수치지도와 각종 수문지형인자를 입력매개변수로 하는 GIS를 이용하여 토사유실에 대한 영향을 분석함으로써 관개용 저수지 토사유실에 대한 예측의 신뢰도를 높일 수 있는 방안을 연구하였다. 기존의 연구를 살펴보면 강우에 따른 토사유실량에 대한 연구와 그에 따른 저류지 용량 분석 등에 대한 연구가 주류를 이루고 있으며, 토사유실량과 사방댐의 관련성에 대한 연구가 미비한 실정이다.

산사태와 같은 피해는 집중 호우 등의 예측이 어려운 자연현상에 기인하므로 원인 분석 보다는 적절한 대응책으로 사방댐 설치와 계류보전 등의 방식을 사용한다. 2011년에 발생한 폭우로 인한 우면산 산사태와 같이 사방댐 설치 및 재해 정비지역과 기타 지역을 비교하면 산사태 발생 정도에 피해 규모가 현저한 차이가 있을 정도로 효과가 입증된 공법이다. 사

방댐은 침식이 진행되는 계곡 기슭에 튼튼하게 돌을 쌓아 급격히 무너져 내리는 것을 방지하는 예방 공법이다. 사방댐의 설계 및 시공기준에는 공사피해예방과 자연경관훼손을 최소화하기 위한 제도장치가 있으나, 산림재해 예방 복구라는 명분아래 진행되는 사방댐사업으로 인해 우리나라의 숲과 계곡, 소하천의 생태계가 지속적으로 훼손되고 있다. 사방댐은 집중호우에 따른 산사태예방에 효과가 있으나, 무분별한 사방댐 설치의 자연환경을 해치고 예산낭비가 될 수 있다. 따라서 사방댐은 산사태 발생 등 재해발생 위험이 높은 지역이거나 인명 또는 재산피해가 발생할 수 있는 지역에 설치되어야 한다. 본 연구에서는 기존에 설치된 사방댐을 중심으로 강우량에 따른 토사유실량을 분석하여 설치 적절성을 분석하고자 한다.

2. 기본 이론

일반적으로 산사태발생 예측은 토사유실량으로 유추하게 된다. 토사유실량의 산정에는 저수지 퇴사나 산지하천의 침전지의 규모결정과 같은 목적에서 연평균유출량을 대상으로 하는 방법과 홍수시의 하상변동이나 토사재해의 문제를 취급하는 관점에서 홍수로 인한 유출량을 대상으로 하는 방법으로 분류된다. 본 연구에서는 사방댐설치 적지 분석을 위한 토사유실량과 댐 퇴사량을 산정하기 위해 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)모형을 적용하였다. RUSLE 모형은 과거 농업지역에서 적용되었던 USLE 모형을 일반 유역에 적용할 수 있도록 개량한 모형으로서 토사유출에 주로 응용되고 있다. 강우침식인자, 토양침식인자, 침식사면의 길이인자, 침식사면의 경사인자, 식생 피복인자, 경작인자 등 6개의 인자에 의해 Eq. (1)으로 해당 유역의 유출량을 예측할 수 있다.

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

Where, A : Average annual soil loss, R : Rainfall-runoff erosivity factor, K : Soil erodibility factor, LS : Slope length and steepness factor, C : Cover management factor, and P support practice factor.

GIS 기법을 이용하여 전체 대상지역을 소규모의 격자로 분할 한 후 각 격자에 대하여 6개의 인자를 결정 한 후 이를 토대로 소유역과 유역의 유출량을 결정한다. 그리고 결정된 유출량 값과 유사전달률을 이용하여 결과적인 퇴적량을 유역 분기점 기준으로 결정하게 된다.

강우침식인자(R)은 획득 가능한 자료를 고려하여 Toxopeus 식을 사용하였으며 Eq. (2)와 같다(Lee, et al.(2007b)).

$$R = 38.5 + 0.35 \times P \quad (2)$$

where, R : Average annual rainfall(mm/yr).

토양침식인자(K)를 구하기 위해서는 해당 지역 토양에 대한 구체적인 샘플링 자료가 필요하나 취득하기가 어려우므로 토양침식인자 산정용 도표(Wischmeier and Smith, 1978; Erickson, 1996)에서 토양통에 해당하는 입경분포, 유기물함량, 골재함량을 토양통해설서에서 결정 후 도표를 이용하였다.

침식사면의 길이인자(L)는 단위구획 경사길이인 22.1m에 대한 수평경사길이 비를 말한다. 인자값 결정은 격자형 수치고도모형을 결정한 후 이를 이용하여 경사각과 주 경사방향을 산출한 후 유역의 상류기여면적을 정한다. 그리고 등고선길이를 계산하여 Desmet and Govers(1996)의 식에 적용하여 침식사면의 길이인자를 계산한다. 수치표고모형을 이용하여 경사각을 결정한 후 Nearing(1997)이 제안한 식에 값을 대입하여 침식사면 경사인자(S)를 결정한다(Eq. 3).

$$S = -1.5 + \frac{17}{1 + \exp(2.3 - 6.1 \sin \theta)} \quad (3)$$

Where, θ : Tilt angle.

식생피복인자(C)는 농경이나 토양의 관리기법이 유출량에 미치는 영향을 반영하기 위하여 개발된 지표이다. RUSLE 모형에서는 부 요소들을 이용한 산정방법이 주로 적용된다. 이 실험에서는 KICT(2002)이 제시한 식생피복인자표를 이용하여 해당 격자 별로 토지이용현황을 분류한 후 이를 Table 1에 적용하여 각 격자별로 식생피복인자를 결정하였다.

Table 1. Deriving vegetation parameters(C)

Vegetation Parameters	Rice paddy	Field	Forest	Grass land	Urban and Basin	Grove
C factor	0.01	1.00	0.01	0.03	0.00	0.05

경작인자(P)는 지표면에서의 경작형태에 따른 토양침식비를 보여주는 지표이다. 경작형태에는 등고선경작, 등고선대상경작, 테라스경작 등이 있을 수 있으며 이와 함께 지표면의

경사 또한 경작인자의 결정에 영향을 미친다. 본 연구에서는 Shin(1999)이 제안한 Table 2를 이용하였다. 격자형태의 수치고도모형으로 부터 각 격자의 경사를 결정한 후 토지피복도를 중첩하여 각 격자별 경사에 따른 경작지 형태를 파악하고 결정표를 이용하여 최종 경작인자를 추출하였다.

Table 2. Upland cropping management factor(P)

slope (%)	contour	contour line	terrace
0.0-7.0	0.55	0.27	0.10
7.0-11.3	0.60	0.30	0.12
11.3-17.6	0.80	0.40	0.16
17.6-26.8	0.90	0.45	0.18
26.8 이상	1.00	0.50	0.20

3. 실험 및 고찰

3.1 연구대상지역

연구대상지역은 경상남도 인근의 사방댐을 중심으로 하였다. 연구대상지역을 선정하기 위해 먼저 경남지역의 사방댐 설치 현황을 살펴보았다. 경남에는 1986년부터 2011년까지 총 551개소의 사방댐이 설치되어 있다(Fig 1). 접근이 용이한 지역을 중심으로 사방댐 10개소를 우선 후보군으로 선정하였다. 위성영상, 토지이용도 그리고 수치지도 등의 기초데이터를 바탕으로 사방댐의 규모와 상태 및 주변상황 등을 파악하기 위해 현장답사를 실시하여 연구대상에 적합한 사방댐 3곳을 최종 선정하였다(Fig. 2).

선정된 사방댐은 유역 내 매개변수를 산정하여 건설 전·후 자료를 비교·분석이 가능하며, 강우량에 따른 퇴사량 변화를 평가할 수 있는 유역이라 할 수 있다.

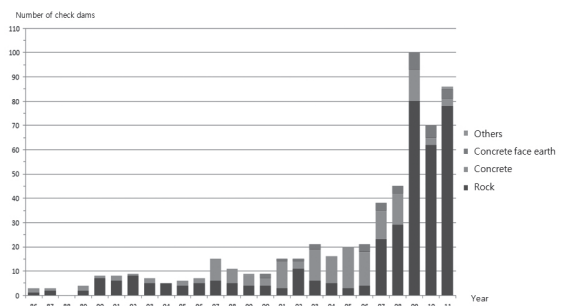


Fig. 1. Present condition of check dams in Gyeongsangnam-do province

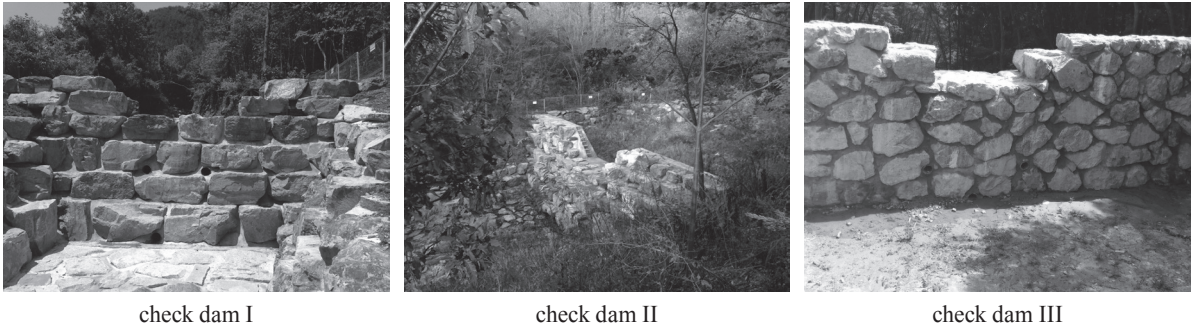


Fig. 2. Pictures of check dam at study area

3.2 우량관측소 선정

유출량의 산정은 임계지속시간을 바탕으로 산정되므로 확률통계 처리의 안정성과 신뢰성을 확보할 수 있다. 본 연구에서는 시간우량 자료의 확보가 용이한 기상청 강우관측자료를 사용하였다. 연구대상지역에서는 이용가능한 수문관측시설이 위치해 있지 않아 유역인근에 위치한 기상대의 관측기록을 사용하였다. Fig.3은 우량 관측소의 현황과 연구대상유역 내 티센망도를 나타낸 것이다.

유실모형에는 토사유실량 산정 후 실제 산사태와의 상관관계를 분석하기 위해 30년, 50년 그리고 100년 빈도별 토사유실량을 산정하였다. 각종 인자에는 강우침식인자 R, 토양침식인자 K, 지형인자 LS, 토지피복인자 C, 침식조절인자 P, 유역면적 A, 유사전달률 SDR이 있다. 이러한 6개의 인자를 바탕으로 토사유실량이 산정된다. Fig 4, 5 and 6은 연구대상지역의 유출곡선지수와 유출계수를 나타내기 위한 지형인자를 나타낸다.

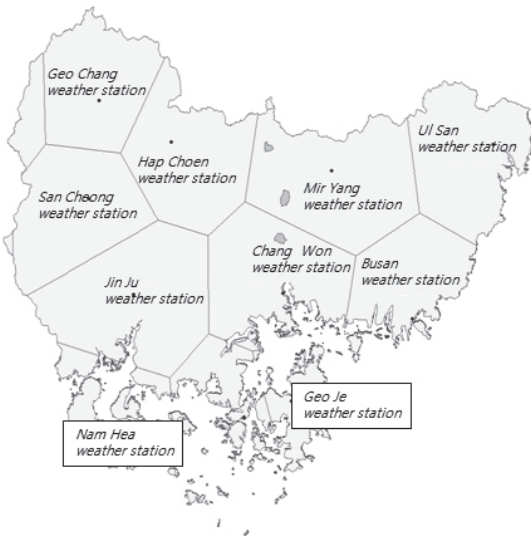


Fig. 3. Map of thiessen network

연구에서의 강우지속시간별 확률강우량의 분석을 위해 밀양기상대의 지속시간별 년 최대지 강우자료를 이용하였다. Table 3 and 4는 연구대상유역의 전대수다항식의 지역상수이며, Table 5는 단일호우 강우침식인자 산정 결과이다. 토사

Table 3. Algebra polynomial expression in Changwon

빈도	a	b	c	d	e	f	g
30	4.3630	-0.4300	-0.0216	-0.0044	-0.0013	-0.0003	0.0001
50	4.4410	-0.4270	-0.0229	-0.0042	-0.0011	-0.0004	0.0001
100	4.5380	-0.4250	-0.0237	-0.0033	-0.0010	-0.0006	0.0002

Table 4. Algebra polynomial expression in Miryang

빈도	a	b	c	d	e	f	g
30	4.2710	-0.5080	-0.0366	0.0064	0.0014	-0.0011	0.0001
50	4.3500	-0.5050	-0.3766	0.0067	0.0016	-0.0011	0.0001
100	4.4480	-0.5040	-0.3992	0.0051	0.0022	-0.0010	0.0001

Table 5. Heavy rainfall erosion of a single factor in study area

Area	Heavy rainfall erosion (10 ⁷ joule/ha.mm/hr)		
	30 year	50 year	100 year
Changwon	801.57	952.34	1173.97
Miryang	324.26	435.69	647.16

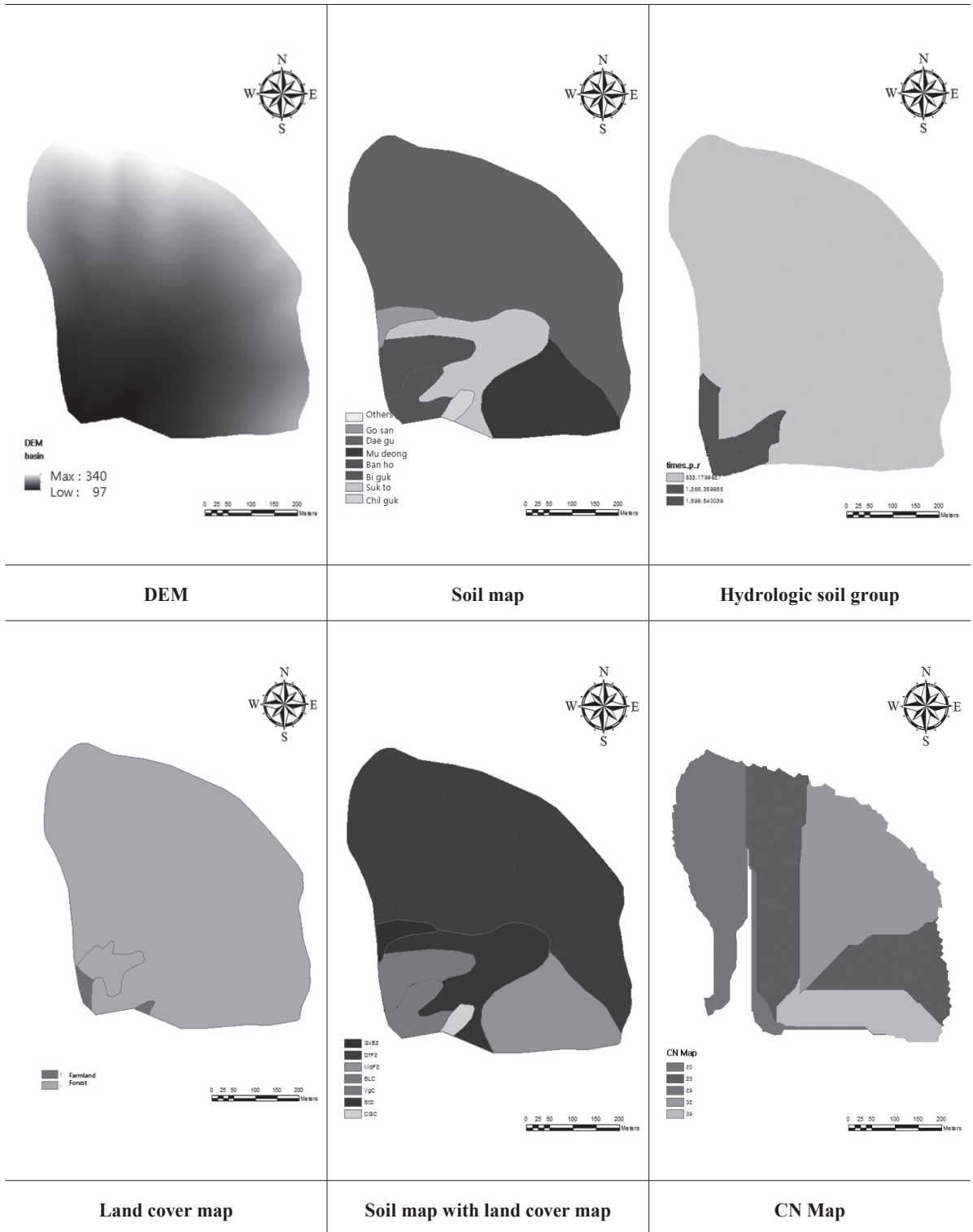


Fig. 4. Hydrological Geographic Parameters of runoff curve number and runoff coefficient at Basin I

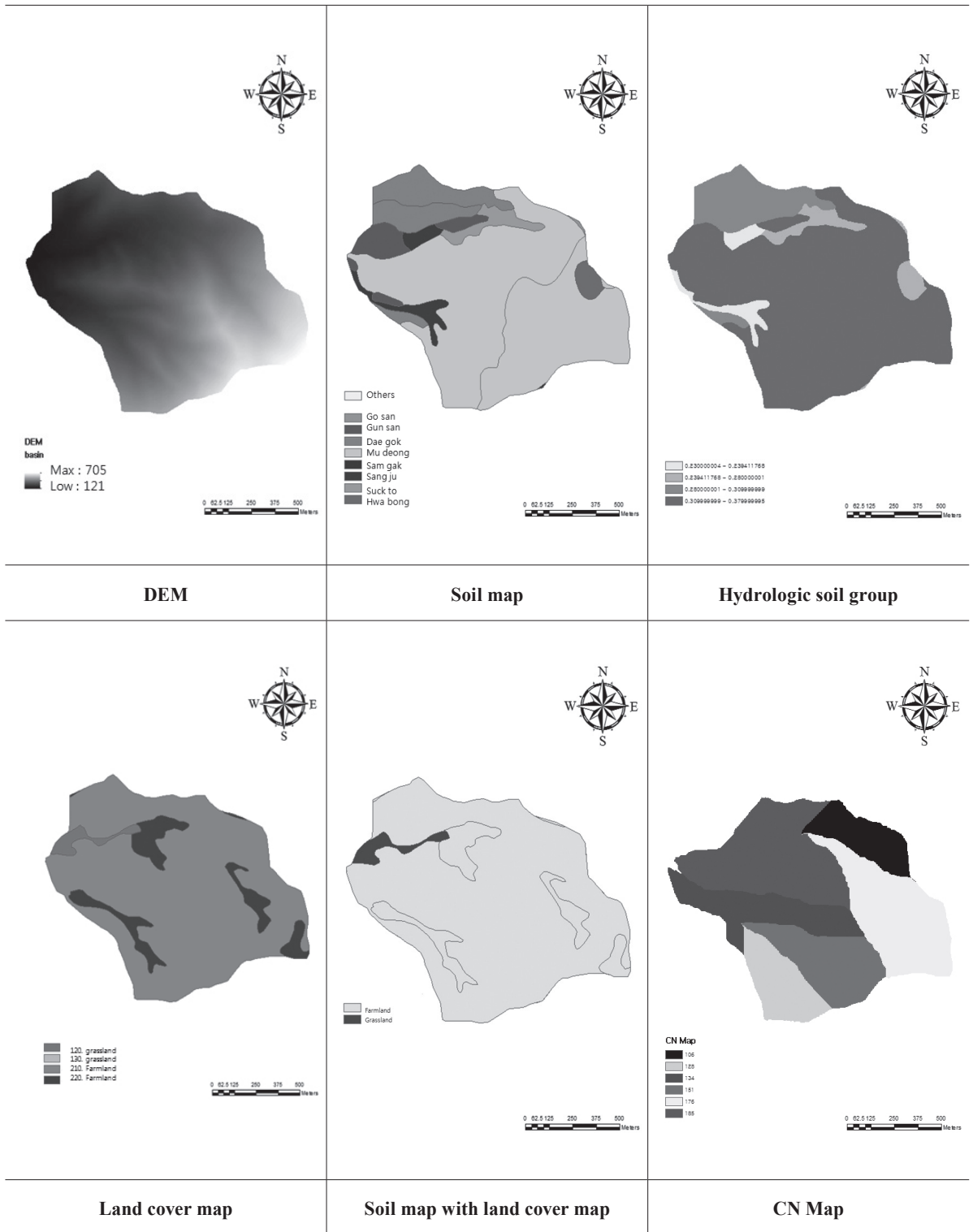


Fig. 5. Hydrological Geographic Parameters of runoff curve number and runoff coefficient at Basin II

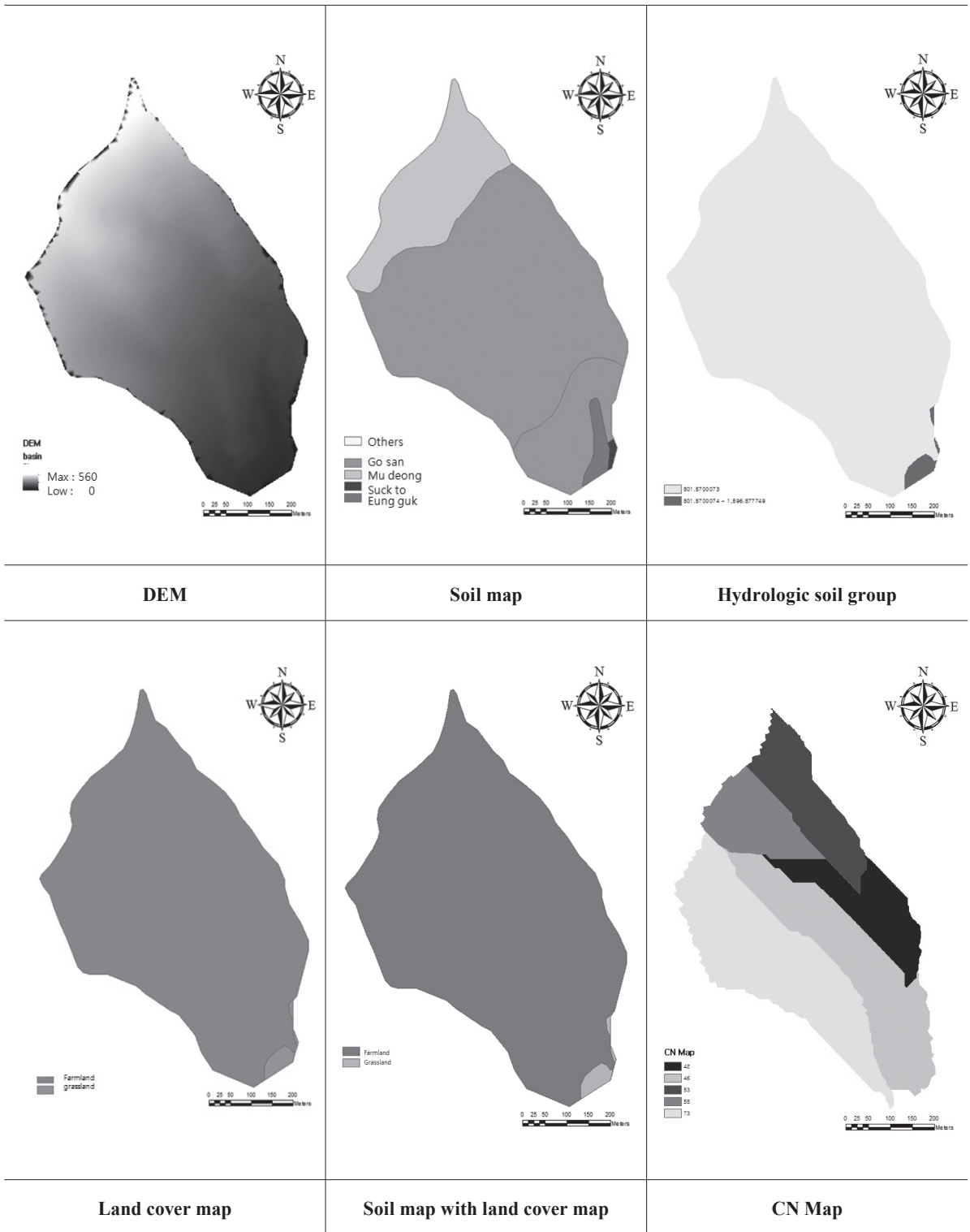


Fig. 6. Hydrological Geographic Parameters of runoff curve number and runoff coefficient at Basin III

3.3 사방댐 설치유역 유출해석 및 토사유실량 분석

본 연구는 사방댐이 설치된 유역의 특성을 분석하기 위해 2014년 설치된 사방댐유역을 대상으로 현장답사를 통하여 접근성과 규모 등을 고려하여 3개소의 사방댐 설치유역을 결정하였다. 사방댐 유역 I 중 H의 토사유실량의 산정에 앞서 영

향인자들이 우선 산정되어야하며, 6개의 인자 중 강우침식인자 R은 재현기간별(30년, 50년, 100년)로 6차 전대수다항식을 적용하여 각각 산정한 후 적용하였다. Table 6, 7 and 8은 연구대상 사방댐의 설치 전, 후 그리고 미설치시의 토사유실량을 나타낸 것이다.

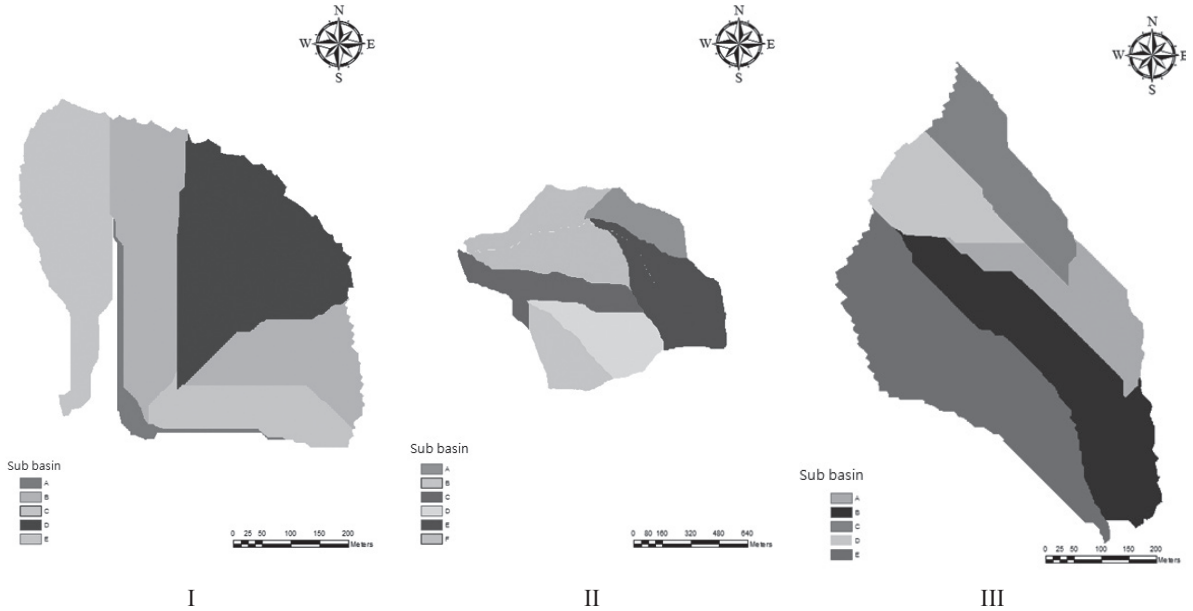


Fig. 7. Basins of study areas

Table 6. Soil loss equation of check dam I

check dam	soil loss(ton/yr)			Area(ha)
	in 30 years	in 50 years	in 100 years	
Before (Basin C)	161.03	83.29	111.05	5.55
After (Basin C)	151.35	75.68	102.70	5.41
a half check dam basin(A+B+D+E)	604.72	303.72	413.59	19.63

Table 7. Soil loss equation of check dam II

check dam	soil loss(ton/yr)			Area(ha)
	in 30 years	in 50 years	in 100 years	
Before (Basin A+E+F)	7,322.57	11,021.47	13,589.17	65.11
After (Basin A+E+F)	7,048.49	10,638.54	13,093.01	63.79
a half check dam (basinB+C+D)	4,033.77	6,080.80	7,493.22	43.81

Table 8. Soil loss equation of check dam III

check dam	soil loss(ton/yr)			Area(ha)
	in 30 years	in 50 years	in 100 years	
Before (Basin A+B+C+D)	833.36	991.94	1,226.26	17.23
After (Basin A+B+C+D)	668.23	797.56	983.38	14.47
a half check dam (basin E)	685.09	816.48	1,004.17	9.38

연구대상지역의 RUSLE 인자를 이용하여 각 구역의 토사 유실량을 검토한 결과 구역 I에서는 30년 빈도에서 9.68ton/yr, 50년 빈도 7.61ton/yr 그리고 100년 빈도에서는 8.35ton/yr로 나타났다. 사방댐 설치 후 약 2%정도의 토양유실 감소 효과가 있는 것으로 나타났다. 구역 II에서는 30년 빈도에서 274.08ton/yr, 50년 빈도 382.93ton/yr, 100년 빈도 496.16ton/yr로 나타났으며 1% 미만의 토양유실 감소가 있는 것으로 나타났다. 구역 III에서는 30년 빈도에서 165.13ton/yr, 50년 빈도 194.38ton/yr, 100년 빈도 242.88ton/yr로 나타났다. 검토 결과 구역 I, II에서는 사방댐 설치 전과 후에 2% 전후의 차이가 있으므로 설치에 따른 효과가 미미한 것으로 나타났으며, 구역 III에서는 5% 대의 토사유실감소효과가 있는 것으로 나타났다. 연구결과를 보면 설치된 사방댐 3곳 중에서 2곳은 사방댐 설치에 따른 효과가 미미함을 알 수가 있다. 우리나라는 8,000여개가 넘는 사방댐이 설치되어 있다. 본 연구에서의 토사유실량 수치해석결과 사방댐의 효과가 미미한 사방댐이 전국적으로 일부 있을 것으로 판단된다. 따라서 향후 사방댐 설치에 따른 토사유실량을 비교 검토한 후 재해발생 위험가능성을 판단하여 피해 발생이 예상되는 곳에 설치해야 할 것이다.

4. 연구결과

본 연구는 토사유실모형의 이론을 적용하여 토사유실량 산정 후 실제 산사태와의 상관관계를 분석하기 위해 30년, 50년 그리고 100년 빈도의 강우강도에 따른 토사유실량을 산정하였다. 사방댐이 설치된 구역의 특성을 분석하기 위해 적용 지역을 설정하였으며, 2014년 설치된 사방댐구역을 대상으로 현장답사를 통하여 접근성과 규모 등을 고려하여 3개소의 사방댐 설치구역을 결정하였다. 연구대상지역의 RUSLE 인자를 이용하여 각 구역의 토사유실량을 검토한 결과 구역 I에서는 약 2%정도의 토양유실 감소효과가 있었고, 구역 II에서는 1% 미만의 토양유실 감소가 있는 것으로 나타났으며, 구역 III에서는 5% 대의 토사유실감소효과가 있는 것으로 나타났다. 사

방댐의 설계 및 시공기준에는 공사피해예방과 자연경관훼손을 최소화하기 위한 제도장치가 있으나, 사방댐 개발이라는 명목으로 산림과 전답이 파괴된 결과 엄청난 량의 빗물을 저장하는 역할을 하지 못하는 한편 곳곳의 산림훼손으로 빗물이 내려오는 속도가 빨라 수재피해가 가속화 될 수 있다. 따라서 향후 사방댐 설치에 따른 토사유실량을 비교 검토한 후 재해발생 위험가능성을 판단하여 피해 발생이 예상되는 곳에 설치해야 할 것이다.

Acknowledgment

This work was supported by Kyungnam University Foundation Grant, 2015.

References

- Desmet, P. J. and Govers, G., 1996, Comparison of Routing Algorithms for Digital Elevation Models and Their Implications for Predicting Ephemeral Gullies, *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, 10(3), 311-331.
- Erickson, A. J., 1997, *Aids for Estimating Soil Erodibility-K Value Class and Soil Loss Tolerance*, U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service Salt Lake City of Utah.
- Ferri, V. and Minacapilli M.(1995), Sediment delivery processes at the basin scale, *Hydrological Science Journal*, Vol. 40, pp. 703-717.
- Jetten, V., Henkens and Dejong S. M. (1988), *The Universal Soil Loss Equation*, Version 1.0, release 1.0, distributed, Department of Physical Geography, Utrecht Univ., The Netherlands.
- Kang, Y. and Kang, J.(2006), The monitoring of sediments

- on the basin using LiDAR data, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 24, No.1, pp. 27-36.(in Korean with English abstract)
- KICT(2002), *Enhancing the Usability of NGIS in the Water Resources Parts*, KICT(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology).(in Korean)
- Kim, J., Kim, K., and Yeon, G.(2003), Analysis of soil erosion hazard zone using GIS, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 6, No. 2, pp.22-32.(in Korean with English abstract)
- Kim, K., Gyoo, G., Yoon, H., Lee, C., Won, M., Lee, B., Woo, C., Kim, S., and Lee, M. (2012), *2011 Forest Disaster White Paper*, No. 11-140037-000524-01, Korea Forest Research Institute, Seoul, 29p.(in Korean)
- Kwon, W. (2007), *Development of Regional Climate Change Scenario for the National Climate Change(Ⅲ)*, MR040-C03, National Institute of Meteorological Research, Jeju, 510p.(in Korean)
- Lee G., Lee M., Hong H., and Hwang E.(2007a), Efficiency of soil erosion to a debris barrier using GIS, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 10, No 1, 158-168.(in Korean with English abstract)
- Lee, S., Lee, B., Choi, H., and Kwak, Y.(2007b), Optimum scale evaluation of sediment basin design by soil erosion estimation at small basin, *The Korean Society for Geospatial Information System*, Vol. 15, No. 2, pp. 25-31.(in Korean with English abstract)
- Lee, K. and Jo, K.(2004), Evaluation of GIS-based soil erosion amount with turbid water data, *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, Vol.12, No. 4, pp. 75-81.(in Korean with English abstract)
- Nearing, M. A.(1997), A single continuous function for slope steepness influence on soil loss, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 61, No. 3, pp.917-919
- Park, W., Hong, S., Ahn, C., and Choi, H.(2013), Assessment of soil loss in irrigation reservoir based on GIS, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 31, No. 6-1, pp. 439-446.
- Shin, K.J.(1999), *The Soil Loss Analysis Using GIS in Watershed*, Ph. D. dissertation, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University(in Korean with English abstract)
- Wischmeier, W. and Smith, D.(1978), *Predicting Rainfall Erosion Losses*, USDA Agr, Handbook.
- Yang, I., Kim, D., and Chun, K.(2006), Analysis of accumulation/erosion in river using satellite image, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy Photogrammetry and Cartography*, Vol. 24, No. 1, pp. 37-45.(in Korean with English abstract)