

산림소유역 토사유출량에 의한 사방댐 시공적지 예측기법 개발

이성재¹ · 김선정² · 이은재³ · 마호섭^{4*}

¹서울대학교 학술림, ²경상남도산림환경연구원,

³국립산림과학원 산림기술경영연구소, ⁴경상대학교 환경산림과학부(농업생명과학연구원)

Prediction of the Suitable Area on Erosion Control Dam by Sediment Discharge in Small Forest Catchments

Sung-Jae Lee¹, Seon-Jeong Kim², Eun-Jai Lee³ and Ho-Seop Ma^{4*}

¹Seoul National University Forest, Seoul 08826, Korea

²Gyeongsangnamdo Forest Environment Research Institute, Jinju 52616, Korea

³Forest Technology and Management Research Center, National Institute of Forest Science, Pocheon 11186, Korea

⁴Department of Forest Environmental Resources, Gyeongsang National University (Institute of Agriculture and Life Science), Jinju 52828, Korea

요약: 본 연구는 산림소유역에 시공되어 있는 사방댐내의 토사유출량에 영향을 미치는 산림환경 인자를 분석하고 수량 화이론(I)를 이용하여 예방적인 측면에서 사방댐 시공적지를 선정하고 예측하였다. 각 산림환경 인자의 범위를 추정된 결과, 준설경과년수(0.7495)가 가장 높게 나타나 산림소유역 토사유출량에 큰 영향을 미치는 것으로 추정되었으며, 다음으로 는 경급(0.6000), 소밀도(0.5318), 유역면적(0.3416), 사면경사(0.3207), 강수량(0.3160), 고도(0.2990), 토양형(0.2192)순으로 나타났다. 각 인자의 범주별 상대점수를 74개 사방댐의 각종 인자에 반응시켜 사방댐의 시공적지를 예측할 수 있는 판정표를 개발하였고, 판정표를 이용하여 시공적지를 I 급지(Very suitable site) 2.2496 이상, II 급지(Suitable site) 1.1248 ~ 2.2495, III 급지(Poor suitable site) 1.1247 이하로 구분하였다.

Abstract: The characteristics of forest environmental factors were analyzed using the quantification theory (I) for prediction of the suitable area of erosion control dams. The results indicated that sediment discharge in small forest catchments was significantly correlated with dredging passage (0.7495) and age class (0.6000). In contrast, area (0.3416), slope gradient (0.3207), rainfall (0.3160), altitude (0.2990) and soil type (0.2192) were poorly correlated. Following quantification theory (I), we developed a selection decision table for erosion control dams based on sediment discharge rate as class I (highly suitable site, greater than 2.2496), class II (suitable site, 1.1248 ~ 2.2495), and class III (poorly suited site, lower than 1.1247).

Key words: suitable site, development of prediction technique, erosion control dam, forest environment factors

서론

우리나라의 산지토사재해는 매년 6~8월경 이상강우로 국지성 집중호우가 산발적으로 발생하며, 이는 자연적인 환경파괴를 가속화시켜 산림생태계의 질서를 파괴할 뿐

만 국민의 생명 및 재산 피해와 국토를 훼손하는 큰 원인 중의 하나이다(Lee, 2014; Kwon et al., 2015).

우리나라는 산지토사재해로 인하여 2006년부터 2015년 까지 피해면적 395 ha, 인명피해 218명, 재산 피해 5조 4천 억원에 달하는 천문학적 인명 및 재산피해가 발생한 것으로 조사되었다(Lee et al., 2019). 이러한 피해를 방지하기 위하여 사방댐은 폭 30~50 m, 높이 4~5 m의 규모로 시공되고 있으며, 이는 계곡 또는 소하천의 경사를 완화시켜 침식을 방지하고 상류에서 내려오는 토석 및 나무 등을

* Corresponding author
E-mail: mhs@gnu.ac.kr

ORCID

Ho-Seop Ma  https://orcid.org/0000-0002-2698-0639

차단하는 역할을 한다. 특히 사방댐은 1개소당 2,550 m³, 계류보전 1 km당 1,770 m³의 토석 및 유목차단 효과가 입증됨에 따라 사방사업의 중요성에 대한 사회적 관심과 그 수요가 지속적으로 증가되고 있다(Korea Forest Service, 2012).

산지유역에 설치된 사방댐은 2011년말 기준 5,018개소이며 연간 1,000개소 이상을 설치하여 2030년까지 총 24,600개소를 확충할 계획에 있다(Korea Forest Service, 2012). 이러한 사방댐의 적절한 관리와 기능의 극대화를 위해서는 사방댐 내로 유입되는 토사의 공간적 분포 및 구조물의 안정과 퇴사로 인한 홍수위 상승 등 일정기간 경과한 사방댐 내의 토사유출량을 측정하여 토사유출량에 영향을 미치는 인자를 구명하는 것이 무엇보다도 중요하다(Jeong and Ma, 2007), 따라서 사방댐 토사유출량 및 사방댐 시공적지에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 저수지 퇴사량과 유역인자와의 상관(Ahn and Lee, 1984), GIS를 이용한 사방댐의 토사유실 저감효과 분석(Lee et al., 2007), 기상 및 하천형태학적 인자가 사방댐의 퇴사량에 미치는 영향(Jeong and Ma, 2008), 전라북도 산지소유역에 있어서 토사유출량의 산정과 이에 미치는 영향인자 분석(Park et al., 2011), 변형 RUSLE 모델을 이용한 산림유역의 토사생산량 추정(Oh and Park, 2014), 산림유역의 만사 사방댐에 의한 토사유출 조절 효과 추정(Seo et al., 2014), 사방댐 준설퇴적물 관리시스템 개발 및 관리기준 제안(Song et al., 2018) 등 연구되고 있다. 하지만, 산림소유역 토사유출량은 여러 유발 인자들이 복잡하게 조합되어 다양한 형태로 발생되고 있는데 비해 토사유출량 원인 규명에 대한 연구는 미흡한 상태이며, 현장조사 자료도 부족한 실정이다(Varnes, 1987; Hutchinson, 1988; EPOCG, 1993; Lee and Ma, 2019; Lee et al., 2019).

사방댐은 유역내의 토사생산량을 기준으로 그 규모를 결정하여야 하며, 계상물매의 안정을 해치지 않는 범위에서 준설시기를 예측하여 주기적인 준설계획을 수립하고 실행할 필요가 있다. 그러나 산림유역에서 발생하는 토사생산량은 강우, 지질 토질, 임상 등에 따라 다르기 때문에 이를 산정하는 데에 어려움이 따른다(Oh and Park, 2014; Lee, 2014; Ma et al., 2014).

본 연구에서는 1986년부터 2007년까지 경상남도에 시공된 사방댐을 대상으로 토사유출량 및 주변 산림환경 인자를 현장조사 하여, 사방댐을 적지적소에 배치 할 수 있도록 판정표를 개발하는 것을 목적으로 하였다. 이를 통하여 산지사면에서 발생한 각종 재해에 대한 피해를 최소화할 수 있는 산림소유역 관리에 대한 기술적 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

재료 및 방법

1 조사 방법

본 연구는 경상남도에서 1986년부터 2007년까지 시공된 경상남도(거제시, 김해시, 밀양시, 양산시, 진주시, 창원시, 거창군, 고성군, 남해군, 산청군, 의령군, 창녕군, 하동군, 함안군, 함양군, 합천군 등) 16개 시·군 사방댐 시행지 256개소 중 사방댐관리사업(준설)을 시행한 74개소의 사방댐을 연구대상으로 현장조사를 실시하였다(Figure 1). 산림유역 사방댐의 토사유출에 미치는 주요 영향인자 중 총 12개의 인자를 선정하고 각 인자를 Table 1과 같이 구분하였다. 특히, 기존의 자연사면, 임도 및 암반사면 붕괴 등 토사유출량과 관련된 선행연구를 참고하여 산림유역 사방댐의 토사유출 취약성에 영향을 미치는 요인을 도출하였다(Choi, 1986; Ma, 1994; Ma and Jeong, 2007; Jung, 2010; Park et al., 2010; Ma and Lee, 2018; Lee and Ma, 2018; Lee and Ma, 2019; Lee et al., 2020).

1) 사방댐 토사유출량 측정(m³)

사방댐 설계 도서를 참고하여 시공당시 사방댐의 내용적과 실측에 의한 현재의 내용적을 조사비교하여 그 차이를 토사유출량으로 하는 내용적 면전감소법(Jeong, 2001; Ma and Jeong, 2007)을 이용하였고, 측정방법은 Figure 2와 같다.

$$V(m^3) = \frac{w_1+w_2}{2} \times h - h' \tag{1}$$

여기서,

$V(m^3)$: 토사유출량, h : 사방댐 유효고, h' : 사방댐 평균여유고,

l : 저사거리, w_1 : 사방댐 주변 계상폭, w_2 : 사방댐 상류 계상폭

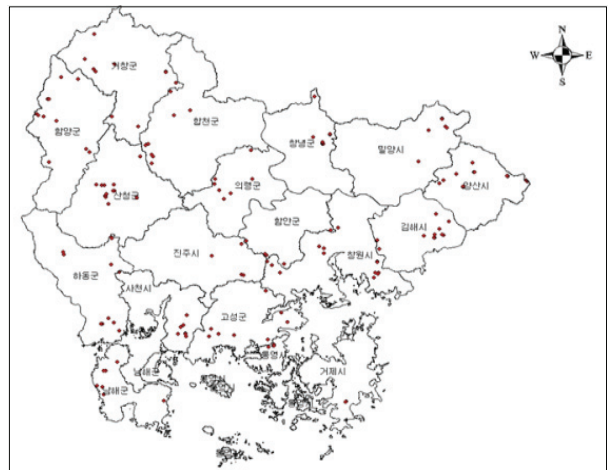
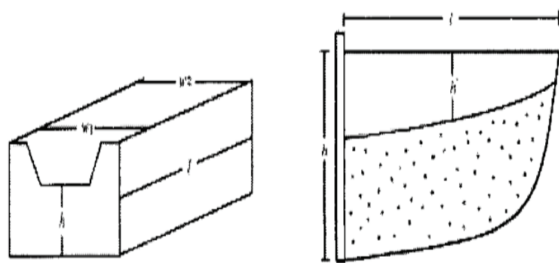


Figure 1. Map of the study sites.

Table 1. Classification and reactionary number of each factor by category.

Factors	Category					Total
	1	2	3	4	5	
Area	<100 ha	101~200 ha	201~300 ha	301~400 ha	401 ha<	
React. no.	26	20	9	11	8	74
Altitude	<100 m	101~300 m	301~500 m	500 m<		
React. no.	5	44	18	7		74
Slope gradient	<10°	11~20°	21~30°	31~40°	41°<	
React. no.	6	25	21	14	8	74
Aspect	NE	NW	SE	SW		
React. no.	17	25	14	18		74
Forest type	Coniferous	Deciduous	Mixed			
React. no.	32	8	34			74
Diameter of breast height	6~16cm	17~30cm	30cm<			
React. no.	6	63	5			74
Age class	III	IV	V	VI		
React. no.	6	36	28	4		74
Crown density	≤50%	51~70%	71%<			
React. no.	1	34	39			74
Soil type	B1	B2	B3	B4	Rb2	
React. no.	8	31	31	2	2	74
Parent rock	Metamorphic	Sedimentary	Igneous			
React. no.	3	19	52			74
Dredging passage	0~2 (year)	2 (year)<				
React. no.	59	15				74
Rainfall	<1,300 mm	1,301~1,500 mm	1,501~1,700 mm	1,701 mm<		
React. no.	12	40	7	15		74

**Figure 2. The survey method of sedimentation in erosion control dam.**

2) 사방댐 설치지 주변 산림환경 인자

유역면적은 사방댐 시공된 지점을 중심으로 유역면적을 측정하였으며, 100 ha 미만, 101~200 ha, 201~300 ha, 301~400 ha, 401 ha 이상으로 구분하였다. 고도는 사방댐이 위치한 유역의 최고점의 고도를 측정하였으며, 100 m 미만, 101~300 m, 301~500 m, 501 m 이상으로 구분하여 조사하였으며, 계상물매는 산림청 산림공간정보시스템(FGIS: Forest Geospatial Information System, www.forest.go.kr)을 활용하

여 사방 주변의 계상물매를 수집하여 10°미만, 11~15°, 15~20°, 21~25°, 25°이상으로 구분하였다. 방위는 NE, NW, SE, SW로 구분하여 조사하였으며, 임상은 산림입지도(1:5000)를 이용하여, 침엽수림, 활엽수림, 혼효림으로 구분하였다. 흉고직경은 임상도(1:25000)를 활용하여 소경목, 중경목, 대경목으로 구분하였으며, 영급은 임상도(1:25000)를 활용하여 III, IV, V, VI급으로 구분하였다. 소밀도는 임상도(1:25000)를 활용하여 소, 중 밀로 구분하였으며, 토양형은 산림입지도(1:5000)를 활용하여 B1, B2, B3, B4, Rb2로 구분하였으며, 모암은 한국지질연구원의 지질도(1:50000)를 활용하여 퇴적암, 화성암, 변성암으로 구분하였다. 준설경과년수는 사방댐관리대상에서 수집하여 0~1년, 2년 이상으로 구분하였으며, 강수량은 기상청 홈페이지의 지역별 자동기상관측소(AWS)에서 제공하는 강우자료를 4년 평균(2010~2013년)하여 1,300 mm 미만, 1,301~1,500 mm, 1,501~1,700 mm, 1,700 mm 이상으로 구분하였다.

2. 분석방법

산림소유역 사방댐 토사유출량에 관여하는 인자로는 유역면적, 계상물매, 방위, 고도, 임상, 홍고직경, 영급, 소밀도, 토양형, 모암, 준설 경과년수, 강수량 총 12개 인자와 76개 설명변수로 구분할 수 있다. 종속변수(Y: 토사유출량 (m³))가 p- 1개의 독립변수(Xn: 산림환경 인자)에 의하여 변화함을 가정할 후, 단계별 회귀분석(stepwise regression analysis)을 실시하였다(Lee, 2014; Lee and Ma, 2018). 사방댐 토사유출량은 많은 인자가 복합적으로 영향을 미치고 있으므로, 이들 산림환경 인자가 어느 정도의 영향을 미치고 있는가를 추정하기 위하여, 종속변수(토사유출량 (m³))가 독립변수(산림환경 인자)에 의하여 변화함을 가정하여 토사유출량별 범주는 Table 1에 표시한 것과 같이 요인의 특성을 명확하게 구분하여 나타내었다. 분류한 범주는 가급적 균일하게 배치되도록 하였으며, 결과 해석자료의 객관적 근거를 고려하여 각 산림환경 인자와 토사유출량과 상관 및 단계별회귀분석을 통하여 높은 상위인자 선별작업으로 범주를 재분류하여 최종적으로 사방댐 적지 판정 기준표를 개발하였다. 본 연구에서는 통계프로그램 package SPSS 21.0을 이용하여 통계분석을 실시하였다. 이상과 같은 과정을 거쳐 상대점수를 기준으로 토사유출량을 이용하여 사방댐의 시공적지 판정 기준표를 개발하고, 판정 기준표를 이용하여 I 등급(Very suitable site), II 등급(Suitable site), III등급(Poor suitable site)으로 평가하였다. 또한 예측점수를 실제 사방댐 시공지에 직접 대입하여 적절성을 평가하였다.

결과 및 고찰

1. 산림소유역 토사유출량에 대한 영향인자 분석

산림소유역에서 발생하는 토양침식은 각종 인자의 상호 복합적인 작용에 의해 발생하게 된다. 사방댐이 설치된 유

역의 토사유출량과 산림환경 인자와의 관계를 위해 단계별 회귀분석을 실시하였으며, 이를 분석한 결과는 Table 2와 같다. 토사유출량에 영향을 미치는 요인 중 가장 상관성이 높은 변수는 2년 이상(준설경과년수)이며, 다음으로 11~20°(사면경사), 1,701 mm 이상(강수량), 101~300 m(고도), 401ha(유역면적), B3/갈색적운산림토양(토양형), VI(영급), 71%<(소밀도)순으로 모두 8개의 인자가 도입되었다.

산림소유역에서 발생한 토사유출량(m³)에 대한 추정식은 Y= 1661.889 - 824.468(준설경과년수 2년<) +605.432(사면경사 11~20°) + 513.218(강수량 1,701mm<) - 429.855(고도 101~300 m) + 640.091(유역면적 401 ha<) + 274.925(토양형 B3/갈색적운산림토양) - 2225.088(영급 VI) + 1622.437(소밀도 71%<)로 개발되었다. 추정된 회귀모형식을 이용하여 적합도에 대한 F 통계량은 30.315분석되었으며, R²값은 0.626으로 나타났다. Jeong and Ma(2006)은 수량화이론(I)을 사용하여 산림유역 붕괴위험지역 인자는 모암, 임상, 석력함량, 주 하천길이, 총 하천차수 등 13가지 산림 환경인자가 붕괴위험발생에 영향을 준다고 보고하였다. Choi(1986)는 수량화(I)이론에 의한 토사량에 영향을 주는 산림환경 인자는 횡단면형, 경사길이, 모암, 사면위치, 사면경사, 석력함량, 경급, 지형, 토석류 깊이, 임상, 횡단면형 순으로 나타났다고 하였다. Ma et al.(2012)은 산지소유역에서 토사유출에 미치는 인자는 피복율, 누적강우량, 임상 등 순으로 보고하였다.

위의 결과는 산림소유역 토사유출량은 강우에 의한 물의 유출에 의해 일어났으며, 동일한 지역이라도 기후, 산림환경 인자, 산림유역면적 등의 상호작용에 따라 다르다. 따라서 계속되는 기후변화와 산림의 개발 및 이용으로 인한 토양침식이 토사유출로 가중시켜 산사태 및 토석류 등 산지재해가 발생하므로, 산림소유역 상류구간은 사방사업을 통하여 재해로 인한 인명 및 재산피해를 줄일 수 있도록 많은 노력이 필요한 것으로 사료된다.

Table 2. Stepwise regression analysis to estimate the soil sediment discharge.

Variables	Regression coefficient	Standard error	Model R ²	F	Prob>F
Constrant	1661.889	235.797			
0~2year (Dredging passage)	-824.468	189.370	0.296	30.315	0.000
11~20° (Slope gradient)	605.432	155.356	0.360	19.957	0.000
1,701 mm < (Rainfall)	513.218	181.253	0.434	17.872	0.000
101~300 m (Altitude)	-429.855	142.483	0.496	17.008	0.000
401 ha < (Area)	640.091	232.122	0.533	15.551	0.000
B3 (Soil type)	274.925	141.114	0.560	14.241	0.000
VI (Age class)	-2225.088	673.620	0.586	13.373	0.000
71% < (Crown density)	1622.437	619.854	0.626	13.595	0.000

2. 토사유출량에 대한 주요 산림환경 인자의 상대점수 분석

산림소유역 토사유출량에 대한 주요 영향인자(준설 경과년수, 사면경사, 강수량, 고도, 유역면적, 토양형, 영급, 소밀도)를 중심으로 범주별 상대점수를 분석한 결과 Table 3과 같다. 상대점수의 범주별 점수는 부(-)의 값을 나타내는 범주는 안정하다는 측에 작용하는 요인이며, 반대로 정(+)의 값을 가지는 범주는 불안하다는 측에 작용하여 산림소유역 토사유출량에 기여를 많이 하는 것을 의미한다. 준설 경과년수의 경우 2년 이상이 토사유출량에 가장 큰 것으로 나타났으며, 영급은 VI영급에서 토사유출량

에 안정 측에 기여하는 것으로 분석되었다. 사면경사 범위가 11~20°에서 토사유출량에 가장 큰 것으로 나타났으며, 유역면적은 401 ha 이상에서 가장 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 붕괴지역에서 생산된 토사가 계류에 퇴적과 침식 및 하류로 이동을 반복하는 과정에서 유역면적이 큰 수록 사방댐 토사유출량이 많이 발생하기 때문인 것으로 나타나 유역면적과 토사유출량 사이에는 비례의 관계가 성립하는 것으로 사료되었다.

범위는 토사유출량에 대한 각 인자의 상대점수의 변동폭을 나타내는 척도로서 각 산림환경 인자의 category별 상대점수의 최대치 및 최소치의 상대점수 차로 나타낸다. 각 인자의 범위를 산정한 결과, 준설경과년수(0.7495)이 가장 높게 나타나 산림소유역 토사유출량 발생에 큰 영향을 미치는 것으로 추정되었으며, 다음으로는 경급(0.6000), 소밀도(0.5318), 유역면적(0.3416), 사면경사(0.3207), 강수량(0.3160), 고도(0.2990), 토양형(0.2192)순으로 나타났다.

Table 3. Normalized score of each category and range.

Factors	Category	Mean score	Normalized score	Range
Dredging passage	0~2year	0.3704	-0.3704	0.7495
	2year<		0.3791	
Slope gradient	< 10°	0.1001	0.0926	0.3207
	11~20°		0.3207	
	21~30°		0.0763	
	31~40°		0.0987	
	41°<		-0.1001	
Rainfall	< 1,300 mm	0.0841	-0.0841	0.3160
	1,301~1,500 mm		0.1513	
	1,501~1,700 mm		-0.0732	
	1,701 mm<		0.2319	
Altitude	<100 m	0.2361	-0.0025	0.2990
	101~300 m		-0.2361	
	301~500 m		-0.0632	
	500 m<		0.0629	
Area	<100 ha	0.1195	-0.1195	0.3416
	101~200 ha		-0.0082	
	201~300 ha		0.0987	
	301~400 ha		0.0746	
	401 ha<		0.2221	
Soil type	B1	0.0665	0.0925	0.2192
	B2		0.0014	
	B3		0.1527	
	B4		0.1049	
	RB2		-0.0665	
Age class	III	0.5625	-0.0765	0.6000
	IV		0.0092	
	V		0.0375	
	VI		-0.5625	
Crown density	< 50%	0.0765	-0.0765	0.5318
	51~70%		0.0996	
	71% <		0.4553	
Total				3.3778

3. 사방댐의 시공적지 예측 및 판정표 작성

상대점수는 정(+) 및 부(-)의 값으로 표시되어 있기 때문에 사용에 불편한 점이 있다. 따라서 이를 개선하기 위하여 각 범주별 점수 중에서 최소값(0점)으로 하고, 최소값의 절대치를 증가하여 정의 값으로 변화시켜 토사유출량 발생 위험도 예측 점수표를 제시하면 Table 4와 같다. Table 4에서 5개 인자의 범주별 점수를 보면 준설 경과년수는 0점에서 0.7495 범위에 있으며, 사면경사는 0점에서 0.3207 범위, 강수량은 0점에서 0.3160 범위, 고도는 0점에서 0.2990 범위, 유역면적은 0점에서 0.3416 범위, 토양형은 0점에서 0.2192 범위, 경급은 0점에서 0.6000 범위 소밀도는 0점에서 0.5318 범위로 계산되었다.

산림소유역 토사유출량을 이용한 사방댐 시공적지 예측은 Table 4와 같이 토사유출량 상대점수를 이용하여 사방댐 시공적지 예측 판정표를 작성하게 된다. Table 5에서 보면 경급, 소밀도, 유역면적, 사면경사, 강수량, 고도, 토양형 점수를 각 조사현장에 적용하여 분석한 범위는 0점에서 3.3778점 사이에 분포하고 있으며, 중앙값은 1.6889 점이었다. 사방댐 시공적지 등급의 구분은 8개 인자의 범주별 점수를 통합하여 나타낼 수 있는 최고점수와 최저점수를 이용하여 33.3%의 범위로 3개 등급으로 구분하였다. 이 등급의 기준 값을 이용하여 산림소유역 토사유출량 예측기준을 Table 5와 같이 작성하였다. 산림소유역 토사유출량에 의한 사방댐 시공적지 판정표에서 I 등급(Very suitable site)은 2.2496 이상, II등급(Suitable site) 1.1248~2.2495, III등급(Poor suitable site) 1.1247 이하로 나타났다. 또한, Table 6의 사방댐 시공적지 판정표를 이용하여 산림소유역 토사유출량 발생지에 대입 예 $Y = 0.7495$ (준설경과

Table 4. Score table for suitable site of erosion control dam.

Factors	Caregory				
	1	2	3	4	5
Dredging passage	0~2(year) 0	2(year)< 0.7495			
Slope gradient	<10° 0.1927	11~20° 0.3207	21~30° 0.0763	31~40° 0.0987	41°< 0
Rainfall	<1,300 mm 0	1,301~1,500 mm 0.2354	1,501~1,700 mm 0.0109	1,701 mm< 0.316	
Altitude	<100 m 0.2336	101~300 m 0	301~500 m 0.1729	500 m< 0.2990	
Area	<100 ha 0	101~200 ha 0.1113	201~300 ha 0.2182	301~400 ha 0.1941	401 ha< 0.3416
Soil type	B1 0.1590	B2 0.0679	B3 0.2192	B4 0.1714	Rb2 0
Age class	III 0.4860	IV 0.5717	V 0.6000	VI 0	
Crown density	≤50% 0	51~70% 0.1761	71%< 0.5318		

Table 5. Prediction score for suitable site for erosion control dam by normalized score.

Class of suitable site	Prediction score	Remarks
Very suitable site(I)	2.2496<	33.3
Suitable site(II)	1.1248~2.2495	66.6
Poor suitable site(III)	<1.1247	100

Table 6. The number of soil sediment occurred by hazard class.

Class of soil sediment hazard	Number of soil sediment	Occurred percentage(%)
I	45	60.8
II	28	37.8
III	1	1.4
Total	74	100

년수 2년<) + 0.0763(사면경사 21~30°) + 0.3160(강수량 1,701 mm<) + 0.2990(고도 500 m<) + 0.3416(유역면적 401ha<) + 0.2192(토양형 B3/갈색적운산림토양) + 0.4860(영급 III) + 0.5318(소밀도 71%<) = 3.0194점(산림소유역 토사유출 위험 등급 I) 분석한 결과 토사유출량 발생개소는 Table 6과 같다. Table 6에서 보면 I 등급(Very suitable site)은 45개소로 전체의 60.8%, II등급(Suitable site)은 28개소로 37.8%, III등급(Poor suitable site)은 1개소 1.4%로 나타났다. I 등급, II등급에서 73개소가 발생되어 예측 비

율이 98.6%로서 매우 높게 분석되었으며, 경상남도 산림소유역 토사유출량의 사방댐 시공적지를 분석하는데 유용하게 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

결론

경상남도 지역에서 시공된 사방댐 지역을 중심으로 토사유출량에 영향을 미치는 인자를 단계별 회귀분석을 실시한 결과 가장 상관성이 높은 변수는 2년 이상(준설경과년수)이며, 다음으로 11~20°(사면경사), 1,701 mm 이상(강수량), 101~300 m(고도), 401 ha(유역면적), B3/갈색적운산림토양(토양형), VI(영급), 71%<(소밀도)등이었다. 상관성이 높은 산림환경 인자를 이용하여 산림소유역에서 발생한 토사유출량(m³)에 대한 추정식은 Y= 1661.889 - 824.468(준설경과년수 2년<) + 605.432(사면경사 11~20°) + 513.218(강수량 1,701mm<) - 429.855(고도 101~300m) + 640.091(유역면적 401ha<) + 274.925(토양형 B3/갈색적운산림토양) - 2225.088(영급 VI) + 1622.437(소밀도 71%<)로 개발되었다.

각 인자의 범위를 분석한 결과, 준설경과년수(0.7495)가 가장 높게 나타나 산림소유역 토사유출량 발생에 큰 영향을 미치는 것으로 추정되었으며, 다음으로는 영급(0.6000), 소밀도(0.5318), 유역면적(0.3416), 사면경사(0.3207), 강수량(0.3160), 고도(0.2990), 토양형(0.2192)순으로 나타났다.

상대점수 방법의 단점을 보완하기 위하여 사방댐 시공적 지 판정표를 기준으로 8개의 산림환경 인자의 범주별 점수를 계산한 점수범위는 0점에서 3.3778점 사이에 분포하고 있다. 산림소유역 토사유출량에 의한 사방댐 시공적지 판정표에서 I 등급(Very suitable site)은 2.2496 이상, II등급(Suitable site) 1.1248~2.2495, III등급(Poor suitable site) 1.1247 이하로 나타났다. 이를 이용하여 산림소유역 토사유출지에 실제 대입한 결과 I 등급, II등급에서 73개소가 발생되어 예측 비율이 98.6%로서 매우 높게 예측하였다.

특히, 산림소유역 토사유출지역에 실제 조사된 토사유출량에 영향을 많이 미치는 12개의 인자들만을 이용하여 수량화이론(I)에 의하여 얻어진 사방댐 시공적지 판정표를 각종 산지재해로부터 예방적인 차원의 사방사업인 사방댐을 건설하고자 할 때 객관적인 지표로 이용하여 시공에 따른 타당성과 시공적지를 예측함으로써 사방댐 자체의 기능을 극대화 시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 앞으로 사방사업은 복구차원이 아닌 예방적 측면에서 재해의 위험성을 예지하고 효과적인 사방댐의 적지선정 기준을 마련하여 사방댐 자체의 목적과 그 기능을 극대화시킬 수 있는 기술개발이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 농업생명과학대학 학술림 지원과 산림청(과제번호:2020162C10-2022-AD01)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다. 심사단계에서 논문의 완성도를 높일 수 있도록 좋은 의견을 주신 심사위원 여러분께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

References

- Ahn, S.J. and Lee, J.H. 1984. A Correlation of reservoir sedimentation and watershed factors. *Korea Water Resources Association* 17(2): 107-112.
- Choi, K. 1986. Landslides occurrence and its prediction in Korea. Doctor of Philosophy Dissertation kangwon National University. Korea. pp. 45.
- EPOCH (European Community Program). 1993. Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European community, Contract No. 900025.
- Hutchinson, J.N. 1988. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology. In *Landslides Proc. on Landslide 1*: 3-35.
- Jeong, W.O. 2001. Studies on the selection of suitable site for erosion control dam by the characteristics of forest watershed. Doctor of Philosophy Dissertation Gyeongsang National University. Korea. pp. 14-35.
- Jeong, W.O. and Ma, H.S. 2006. Evaluation and prediction of failure hazard area by the characteristics of forest watershed. *Korea Journal of Environment and Ecology* 20(4): 415-424.
- Jeong, W.O. and Ma, H.S. 2007. Influences of environmental factors on the sedimentation of soil erosion control dams in forest watershed. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 41(1): 7-12.
- Jeong, W.O. and Ma, H.S. 2008. Influences of meteorological and river morphological factors on the sedimentation of debris control dams in forest watershed. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 42(3): 17-22.
- Jung, K.W. 2010. Studies on the causal characteristics of landslide and the development of hazard prediction map for landslide in Gyeongsangbuk-Do Province, Korea Doctor of Philosophy Dissertation Kyungpook National University. Korea. pp. 1-4.
- Korea Forest Service. 2012. Sound erosion control works. pp. 44.
- Kwon, H.J., Lee, C.W., Woo, C.S., Kim, D.Y., Youn, H.J. and Park, S.J. 2015. A status of landslide damage in mountainous national park of Korea using temporal spatial images. *Journal of the Korea Society of Hazard Mitigation* 15(5): 97-102.
- Lee, G.S., Lee, M.J., Hong, H.J. and Hwang, E.H. 2007. Efficiency of soil erosion to a debris barrier using GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 10(1): 158-168.
- Lee, S.J. 2014. Development of prediction technique of landslide using forest environmental factors. Doctor of Philosophy Dissertation Gyeongsang National University. Korea. pp. 1-11.
- Lee, S.J. and Ma, H.S. 2018. Development of prediction technique of landslide using forest environmental factors. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 52(4): 63-72.
- Lee, S.J. and Ma, H.S. 2019. Analysis of Landslide characteristics of the central regions in Korea. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 53(1): 61-72.
- Lee, S.J. and Ma, H.S. 2019. Development of prediction technique of landslide hazard of central regions in Korea. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 53(3): 7-16.
- Lee, S.J., Kang, W.S., Lee, E.J. and Ma, H.S. 2020. Development of prediction technique of debris flow hazard areas at rugged mountain range of the Jeollabuk-do, Korea. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 54(5): 73-79.
- Lee, S.J., Lee, E.J. and Ma, H.S. 2019. Analysis of characteristics of landslide susceptibility in rugged mountain range in the Korean national park. *Journal of Korean*

- Forestry Society 108(4): 552-561.
- Ma, H.S. 1994. Studies on development of prediction model of landslide hazard and its utilization. *Journal of Korean Forestry Society* 83: 175-190.
- Ma, H.S. and Jeong, W.O. 2007. Suitable Site prediction of erosion control dam by sediment. *Journal of Korean Forestry Society* 96(3): 300-306.
- Ma, H.S., Kang, W.S. and Kang, E.M. 2012. Effect of forest land use on soil runoff in small watershed. *Journal of Korean Forestry Society* 101(2): 220-225.
- Ma, H.S., Kang, W.S. and Lee, S.J. 2014. Prediction and evaluation of landslide hazard based on regional forest environment. *Journal of Korean Forestry Society* 103: 233-239.
- Ma, H.S. and Lee, S.J. 2018. Analysis of debris flow characteristics in bongwha area Gyeongsangbuk-do, Korea. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 52(1): 1-11.
- Oh, G.W. and Prak, S.M. 2014. Estimation of sediment yield from forest catchment using modified RUSLE Model. *Journal of Korean Forestry Society* 2014: 260.
- Park, C.M., Ma, H.S., Kang, W.S., Oh, K.Y., Park, S.H. and Lee, S.J. 2010. Analysis of landslide characteristics in Jeonlabuk-do, Korea. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 44(4): 9-21.
- Park, J.M., Kim, S.Y., Oh, G.W. and Prak, S.H. 2011. Factors affecting sediment yield variability in small mountain catchments in jeonbuk region. *Journal of Korean Forestry Society* 2011: 754-755.
- Park, J.S., Lee, J.W., Choi, Y.H., Kim, M.J., Kweon, H.K. and Jeon, Y.J. 2010. A study on location condition for erosion control dam(Focus on Chungcheong region and Kyeongsangbuk da). *Journal of Agricultural Science* 37(2): 223-229.
- Park, J.H., Lee, C.W., Kang, M.J. and Kim, K.D. 2015. Analysis of characteristics of forest environmental factors on land creeping occurrence. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 49(5): 133-144.
- Seo, J.L., Chun, K.W. and Song, D.G. 2016. Estimation of sediment discharge controlled by sediment-filled check-dam in a forested catchment. *Journal of Korean Forestry Society* 105(3): 321-329.
- Song, Y.S., Yun, J.M. and Jung, I.K. 2018. Development of the dredged sediments management system and its managing criteria of debris barrie. *Journal of Korean Geosynthetics Society* 17(4): 267-275.
- Varnes, D.J. 1987. Slope movement types and processes, In landslides analysis and control, TRB special Report, 176, National Academy of Science, pp. 11-33.

Manuscript Received : July 7, 2020
 First Revision : September 18, 2020
 Second Revision : October 23, 2020
 Accepted : November 4, 2020