

## 도로인근 유역의 토석류 위험평가 및 등급화 방안

### Debris Flow Risk Evaluation and Ranking Method for Drainage Basin adjacent to Road

김경석<sup>1)</sup>, Kyung-Suk Kim, 장현익<sup>2)</sup>, Hyun-Ick Jang

<sup>1)</sup> 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원, Researcher, Korea Expressway Corporation

<sup>2)</sup> 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원, Chief Researcher, Korea Expressway Corporation

**SYNOPSIS** : Technical countermeasures against debris flow should be established upon the risk level of the target location. Risk of debris flow should consider the hazard imposed by debris flow and vulnerability of the facilities to debris flow. In this research, we have defined the target location for risk evaluation and suggested scoring method of hazard of debris flow and vulnerability of road to debris flow. By defining risk rank into 6 categories in terms of possibility of damage during rainfall and using the risk scores of 46 debris flow cases, we have suggested risk ranking matrix. The method can be used in ranking the drainage basin adjacent to road by simply determining the hazard with vulnerability score and can be used for planning the debris flow countermeasures.

**Keywords** : debris flow, countermeasures, risk, hazard, rating and ranking

## 1. 서론

토석류는 전 세계적으로 발생하는 자연재해로서 집중호우에 의한 주로 발생하며 이동경로에 위치한 시설물이나 가옥에 큰 피해를 야기한다. 국내에서도 토석류에 의한 가옥, 도로, 시설물 등의 피해 사례가 있었으며 지구온난화로 인한 기후변화에 의해 발생과 피해가 앞으로도 증가할 것으로 예상되고 있다. 토석류 피해를 예방하기 위한 다양한 대책들이 적용되고 있지만 아직 국내에서는 토석류 발생가능 지역을 선별하고 위험정도를 정량적 또는 정성적으로 결정하는 방법론이 제시되어 있지 않은 상황으로서 기존 토석류 피해 발생 지역의 복구에만 치중하거나 기술자의 주관적 판단에 의해 예방적 대책적용 위치를 선정하고 있는 실정이다.

토석류 또는 산사태 위험 구간을 선정하기 위한 방법들 중에는 재해 정도를 정량화 방법론과 지리정보시스템(GIS)을 연계하여 공간적으로 산재하여 분포하는 재해가능지점을 재해지도(hazard map)형태로 있는데, 산사태 재해지도는 토석류 가능구간 평가에 적용하기에는 한계가 있는데 이는 (1) 재해지도는 특정 지형조건과 지질조건에서 발생한 산사태 또는 토석류 자료에 근거하여 제시된 경우가 많으므로 지역적인 특성 차이가 있는 경우에는 결과 차이가 불가피하게 발생, (2) 재해지도는 주로 산사태지점이나 토석류 시작지점의 위험정도를 예측하는데 중점을 두고 있으며, 토석류와 같이 시작-이동-퇴적 과정에서 시설물에 피해를 유발하는 형태의 재해에 적용하기 어려움, (3) 재해지도의 작성에 사용되는 평가인자의 실용적 획득이 어려워 보편적으로 사용할 수 없다는 점이다.

이 연구는 고속도로에 피해를 유발한 토석류 구간에 대한 조사와 분석결과를 토대로 토석류 발생과 도로의 피해가 가능한 구간을 선정하는 방법론을 제시하고자 하였다. 토석류가 공간적으로 한정된 유역 내에서 발생하는 점을 고려하여 도로에 영향을 줄 수 있는 유역을 평가 대상으로 토석류 발생, 이동 그

리고 도로의 취약정도를 정량적인 값으로 산정할 수 있도록 하였으며, 기존에 토석류를 유발시킨 경우 특성과 토석류 발생지점 정량적 평가값의 관계로부터 평가구역의 위험등급을 결정하는 방법을 제시하였다.

## 2. 위험평가 방법론

위험평가(risk assessment)는 위험관리의 중간과정으로서 토석류 재해에 의한 위험을 정량적 또는 정성적으로 평가하는 중요한 과정이다. 위험관리(risk management)는 재해분석(hazard analysis)과 피해분석(consequence analysis)을 통해 재해위험을 정량적 또는 정성적으로 산정(risk evaluation)하고 위험평가(risk assessment)를 통해 사회적, 경제적으로 감내할 수 있는 수준의 위험인지를 평가한 후 필요에 따라 위험을 완화시키거나 제어(risk mitigation or control)하기 위한 다양한 대책들을 수립하는 과정을 포함한다.

위험평가를 위한 가장 기본적인 단계는 위험평가를 위한 대상과 범위를 명확히 정의하는 것이며 여기에는 공간적 평가범위, 피해가능범위, 지질 및 지반공학적 조사범위, 평가방법론 등의 내용을 포함한다. 평가대상과 범위가 결정되면 대상범위내에서 재해가능성과 재현빈도를 평가하게 되며 이를 위해서는 재해의 현상적 특성에 대한 이해가 필요하다. 기본적으로 재해를 유발하는 인자와 메커니즘을 규명하는 것이 필요하고 이러한 재해가능성을 조사를 통하여 해석적 또는 다른 방법론을 통하여 정량적으로 산정할 수 있어야 한다. 국내외적으로 개발되고 있는 다양한 형태의 재해지도는 이 단계에 포함된다고 할 수 있다. 다음 단계는 피해분석단계로서 재해발생시 피해가 발생 가능한 시설들에 대하여 어느 정도의 피해가 발생가능한지를 평가한다. 대상시설물은 매우 다양할 수 있으며 재해의 형태와 규모에 따라라도 달라지게 되는데 피해분석을 위해서는 재해가 시설물까지 도달할 수 있는지의 여부, 재해의 크기와 시설물의 상대적인 규모, 재해가 시설물에 도달했을 때의 충격이나 파손가능성 정도를 평가하는 것이 필요하다.

정량적인 위험도 산정은 각 평가단계의 확률과 피해대상 구조물의 손상가능정도를 확률론적으로 고려하여 평가하게 되며 연간 피해가능량(금액), 재해빈도-피해규모의 형태로 제시된다. 정성적인 위험도는 등급이나 설명으로 제시되는 재해의 가능성(likelihood)과 피해의 가능성(consequence)을 이용하여 표형태로 제시하게 된다.

## 3. 위험 평가와 등급화 방법 제안

### 3.1 위험 평가 대상 구간 정의와 평가인자 선정

기존의 산사태재해지도에서는 한 지점에서의 안전율이나 파괴확률, 통계적 평가값으로 재해가능여부를 판단하지만 토석류는 한 지점에서 발생하는 산사태 현상과 달리 시작-이동-퇴적의 과정에서 피해를 유발하므로 공간적 평가대상은 이러한 현상이 발생하는 구간 전체를 대상으로 설정할 필요가 있다. 도로에서의 토석류 위험평가를 위해서는 토석류가 발생 가능한 인근 유역을 대상으로 시작-이동-퇴적가능성을 평가해야 하며, 토석류가 특정지점까지 이동-퇴적이 가능할지라도 대상 도로구간까지 토석류가 이동하지 않거나 이동하더라도 도로하부로 통과하는 형태라면 피해가 발생할 가능성이 없다면 토석류에 의한 위험은 없으므로 위험의 평가에서는 평가대상 도로지점의 토석류에 대한 취약정도(vulnerability)도 고려할 필요가 있다. 이를 고려할 때 토석류 위험도는 도로의 특정지점을 기준으로 ① 상부 배수 유역 내에서 토석류 시작 가능성 ② 시설물 위치까지 토석류 이동 또는 퇴적가능성 ③ 이동한 토석류에 의한 시설물 피해 가능성의 세가지 항목으로 평가할 수 있다.

이 연구에서는 과거 토석류 발생 구간에 대한 조사와 분석결과를 토대로 토석류 시작과 이동에 관계되는 주요 지형인자를 토석류 시작과 이동을 평가하는 항목으로 선정하고 도로위치의 형태와 배수시설 규격으로 도로의 취약정도를 평가하는 항목으로 선정하였으며, 구체적인 평가항목별 선정기준은 표 3.1

에 나타내었다.

표 3.1 토석류 위험도 평가대상 요소의 정의와 선정기준

구분	기준항목	평가항목	선정기준
재협 정도	유역내 토석류 시작 가능성	유역평균 지형경사(°)	o 유역평균경사는 강우시 계곡부 유량의 증가속도에 직접적으로 연관됨. 토석류 시작과 이동에 직·간접적으로 영향을 미침
		35°이상 지형 면적비율(%)	o 유역내 35°이상 지형경사에서는 강우시 자연사면파괴가능성이 높아지며 토석류 시작과 직접적으로 연관됨
	토석류의 도로 이동가능 여부	계곡 평균경사(°)	o 계곡 평균 경사는 계곡내에서 토석류 이동거리와 직접적으로 연관되며, 토석류 규모의 증가에 직·간접적으로 영향을 미침
		계곡전체길이 중 경사 15°이상의 비율	o 계곡길이 중 15°이상 경사를 갖는 구간은 계곡바닥 및 측벽 침식·세굴로 인한 토석류 규모 증가와 직접적으로 연관되며, 토석류가 퇴적되지 않고 지속적인 이동이 가능한 구간임
취약 정도	토석류 퇴적가능 여부	배수 시설 전면의 퇴적 공간 규모	o 배수시설 전면의 퇴적공간 규모는 토석류가 도로까지 이동했을 때 도로노면까지 침범할지의 여부와 직접적으로 연관됨
	토석류 통과가능 여부	배수시설의 규격 (처리용량)	o 토석류에 의해 배수시설의 기능이 마비되는지의 여부를 평가하기 위함. 배수시설 단면크기가 클수록 완전차단가능성은 낮아짐

평가대상 요소는 명확한 정의가 필요하며 구체적인 수치로 산정할 수 있어야 한다. 토석류의 시작과 이동가능성은 1:5,000축척의 수치지형도로부터 구체적으로 산정할 수 있고 도로의 취약정도는 배수시설 전면의 퇴적공간과 배수시설규격을 결정한 후 과거 토석류 피해구간 조사 결과를 토대로 제시되는 평가 점수를 이용하여 결정할 수 있다. 평가요소별 값의 산정방법은 표 3.2에 나타내었다.

표 3.2 평가대상 요소의 산정방법

구분	기준항목	평가요소	산정방법
위험 정도	유역내 토석류 시작 가능성	유역평균 지형경사(°)	영향유역의 평균지형경사로서, 유역을 5m×5m 또는 10m×10m 크기의 격자 로 분리한 후 각 격자별 경사를 이용하여 계산. -평균경사 = $\sum n_i \theta_i / \sum n_i$ ( $\theta_i$ : 격자경사, $n_i$ : $\theta_i$ 의 경사를 갖는 격자 개수)
		35°이상 지형 면적비율(%)	경사가 35°이상인 격자들의 면적합과 유역 면적의 비율 -면적비율 = $\sum A_i(\theta_i \geq 35^\circ) / A$ ( $A_i$ : $\theta_i \geq 35^\circ$ 인 격자들의 면적, $A$ : 영향유역전체면적)
	토석류의 도로 이동가능 여부	계곡 평균경사(°)	도로지점부터 유역내 최고지점까지 계곡을 따른 이동경로( $L_{path}$ )로 계곡단 면도를 도시하고, 고저차와 이동경로거리를 이용하여 계산 - 계곡의 평균경사 = $\tan^{-1}(\Delta H / L_{path})$ ( $\Delta H$ : 고저차, $L_{path}$ : 계곡을 따른 이동 거리)
		계곡전체길이 중 경사 15°이상의 비율	계곡단면도에서 각 위치별 계곡경사를 구하고, 15°이상 되는 계곡 구간길이 와 계곡 전체 길이의 비율로 계산 - 계곡길이비율 = $\sum L_i(\theta_i \geq 15^\circ) / L_{path}$ ( $L_i$ : $\theta_i \geq 15^\circ$ 인 계곡부의 길이)
취약 정도	토석류 퇴적가능 여부	배수 시설 전면의 퇴적 공간 규모	도로노면을 영향유역 쪽으로 수평 연장시켰을 때 지형적으로 만들어지는 공 간의 부피로 정의
	토석류 통과가능 여부	배수시설의 규격 (처리용량)	도로에 설치되어 있는 배수시설규격 또는 교량하부의 배수 용량

### 3.2 평가항목별 가중치와 배점 결정

평가항목별 상대적인 가중치는 과거 토석류 발생구간에 대한 자료를 토대로 로지스틱 회귀분석을 통해 결정하고 과거 토석류 발생구간에 대한 각 평가요소의 최대값과 최소값의 범위를 5구간으로 등분하여 배점을 부여한 후 각 항목별 배점값을 합산하여 재해정도와 취약정도를 정량화하는 방법을 이용하였다. 과거 토석류 발생한 46개 구간에 대하여 표 3.2의 산정방법에 따라 위험평가항목별 값을 구하여 표 3.3에 나타내었다.

표 3.3 과거 토석류 발생 구간에 대한 위험구간 평가항목별 값

구분	위치	유역크기 (㎡)	유역평균 경사(°)	35° 이상 면적비(%)	계곡평균 경사(°)	15° 이상 계곡비(%)	퇴적공간 유무	배수시설규격
영동선	186.60	76,260	27.14	24.02	15.41	36	없음	시설없음(절토부)
	186.70	160,805	24.81	17.43	10.93	15	부족	횡배수, B2.8x2.5
	186.97	549,144	26.91	24.70	10.33	17	보통	횡배수, B4x4
	187.05	19,406	28.24	24.56	22.68	94	없음	절토부, 집수정D1000
	187.20	23,149	24.98	11.26	22.29	78	없음	절토부 계곡
	187.24	53,555	31.53	37.82	21.76	64	없음	절토부 계곡
	187.45	54,126	32.11	39.44	22.47	67	없음	절토부, V형 측구
	187.70	21,100	31.18	37.22	22.44	73	없음	절토부, V형 측구
	187.90	41,264	35.97	53.71	25.23	93	부족	집수정, D1000
	188.20	274,094	29.65	31.22	16.08	35	보통	소하천, B2x2
	188.83	213,041	30.73	35.96	16.20	44	부족	횡배수, B2x2
	189.03	59,632	32.61	41.00	21.12	57	보통	절토부 계곡
	189.30	93,375	31.24	36.42	18.86	44	보통	횡배수, B2x2
	189.40	48,363	31.47	38.36	18.31	47	없음	절토부, 집수정D1000
	189.64	634,835	25.88	20.31	11.71	18	보통	횡배수, B2x2
	190.80	30,772	30.93	33.43	21.22	63	없음	절토부, 집수정D1000
	197.56	300,767	19.03	6.52	10.29	22	부족	횡배수, B2x2
	202.40	253,584	26.58	22.12	13.80	21	부족	횡배수, B2x2
	206.30	125,677	25.51	11.45	17.45	37	보통	횡배수관, D1000
	217.20	129,476	32.42	39.78	25.97	84	보통	횡배수, B2x2
230.90	140,136	17.31	4.25	7.87	9	부족	절토부, U형배수로	
231.70	17,399	23.93	8.58	21.00	75	보통	횡배수, D800/D2000	
231.80	71,327	23.28	10.49	15.90	38	보통	횡배수, D2000	
233.00	91,523	19.50	3.39	12.72	28	충분	횡배수, D2000	
233.10	17,574	19.25	2.37	15.98	48	여유	절토부, D800	
동해선	49.90	31,092	21.63	6.39	14.46	46	없음	절토부, 집수정D600
구마선	5.40	48,440	26.17	13.04	25.02	93	없음	절토부, 집수정D1000
	7.00	108,283	27.25	18.43	20.83	63	없음	절토부, B2x2
	8.00	74,979	27.43	22.36	23.59	78	없음	절토부, 집수정D800
88선	106.69	206,497	30.50	35.53	18.53	49	보통	횡배수, B2x1.5
	107.20	87,801	31.59	37.90	21.92	65	부족	횡배수, B2x2
	107.22	198,123	32.18	39.92	18.00	45	여유	횡배수, B1.5x2
	107.28	141,652	30.08	33.76	18.02	43	보통	횡배수, B1.5x1.5
	107.50	38,366	30.77	36.80	19.00	70	보통	횡배수, B1x1
	107.64	11,853	31.94	39.28	26.88	84	여유	횡배수관, D1000
	107.94	209,453	28.41	28.50	16.93	49	부족	횡배수, B2x2
	108.27	287,515	21.66	9.49	12.72	30	부족	횡배수, B2.5x2
	108.61	141,921	22.40	11.05	13.56	35	여유	횡배수, B1.5x1.5
	대전-진주	139.40	16,559	21.88	1.15	20.78	81	부족
145.60		72,347	26.62	18.85	17.21	54	충분	절토부, 집수정D1000
145.90		36,919	25.72	18.87	21.32	68	부족	횡배수, B2x2
146.00		67,418	26.26	22.39	19.43	54	부족	부채도로, U형배수로
146.05		193,624	27.44	23.18	16.90	50	부족	부채도로, U형배수로

	147.00(1)	236,431	26.91	22.98	15.13	35	보통	횡배수, B2x2
	147.00(2)	234,315	23.90	16.23	15.68	39	보통	횡배수, B2x2
	147.20	248,702	26.28	23.16	16.54	40	부족	횡배수, B2x2
	154.90	14,859	27.86	25.14	23.14	90	부족	사면형토석류(산사태)

평가항목별 상대적 가중치를 구하는 방법은 크게 (1)주관적 방법, (2) 계측분석법(AHP), (3) 로지스틱 회귀분석 등이 있지만 주관적인 요소를 최대한 배제하기 위하여 이 연구에서는 로지스틱 회귀분석을 통해 앞서 선정된 평가항목별 상대적인 가중치를 구하였다. 토석류 발생과 이동에 영향을 주는 인자들을 독립변수(X), 토석류 발생여부를 종속변수(Y)로 둘 때 로지스틱 회귀분석 모형은 다음과 같이 표현된다.

- 독립변수: 토석류 발생, 이동에 영향을 주는 인자 (X)
- 종속변수: 토석류의 발생여부 (Y) 토석류 발생시 1, 토석류 발생하지 않는 경우 0
- 로지스틱 회귀분석 모형

$$Y = P(X) = E(Y|X) = \frac{\exp(a_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 \dots)}{1 + \exp(a_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 \dots)}$$

여기서,  $E(Y|X)$  : 각 독립변수에 대한 기대치 (0~1사이의 확률)

$a_0, b_i$  : 회귀분석 모형의 계수,  $X_i$  : 독립변수

로지스틱 회귀분석에서 각 인자가 확률에 미치는 영향은 모형계수를 구함으로서 할 수 있는데, 다음과 같이 기대치를 로짓(logit)으로 정리하고 log변환을 하는 경우 선형회귀분석으로 변환되며 이로부터 모형계수  $a_0, b_i$ 를 구할 수 있다.

$$\text{logit} = \frac{P}{1-P}, \quad \ln(\text{logit}) = a_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots$$

로지스틱 회귀분석에서 각 인자가 확률에 미치는 영향(가중치)을 평가하는 방법으로는 로짓을 이용하는 방법, 확률을 이용하는 방법, 승산비를 이용하는 방법이 있다. 로짓을 이용하는 방법은 독립변수(X)의 변화에 따른 로짓값(logit=P/1-P)의 변화로 평가하는 방법으로서 로짓값의 변화의 의미가 명확하지 않은 문제점이 있다. 확률을 이용하는 방법은 독립변수(X)의 변화에 따른 확률값(P)의 변화로 평가하는 방법으로서 로지스틱 함수를 편미분하여 구할수 있지만 독립변수와 확률이 비선형관계를 나타내므로 독립변수값에 따른 확률의 변화량이 달라지는 문제가 있다. 승산비를 이용하는 방법은 독립변수(X)가 1변화할 때 로짓값의 증가비율(=승산비)로 평가하는 방법이며, 독립변수  $X_i$ 에 대한 승산비는  $\exp(b_i)$ 로 계산된다. 승산비가 1보다 크면 독립변수 값이 1 증가할 때 확률이 증가(positive)함을 의미하고 0이면 확률변화가 없는 상태, 1보다 작으면 확률이 감소(negative)함을 의미한다. 승산비의 크기가 확률(P)과 직접적으로 관계되지 않지만 승산비가 클수록 독립변수가 커질수록 확률의 변화량이 증가하게 된다.

이 연구에서는 각 평가인자의 가중치를 평가하기 위해 승산비를 적용하였으며, 각 독립변수의 변화에 따른 승산비를 구하고 각 인자의 승산비로부터 상대적인 가중치를 결정하였다. 변수  $X_i$ 에 대한 승산비를  $\exp(b_i)$ 라고 하면 각 변수에 대한 상대적인 가중치는  $\exp(b_i) / \sum \exp(b_i)$ 로 구할 수 있다.

토석류 발생구간의 자료를 토대로 로지스틱 회귀분석을 하기 위해서는 토석류가 발생한 구간뿐만 아니라 발생하지 않은 구간에 대한 자료도 필요한데, 타 지역에서 조사한 자료를 활용하여 분석에 이용하였다. 평가인자로 선정된 4개의 변수에 대한 각 변수별 가중치를 구하기 위해 통계 프로그램인 SPSS를 이용하여 이항 로지스틱 회귀분석을 실시하였으며 각 평가인자별 분석결과를 표 3.4에 나타내었다. 모형 계수( $b_i$ )는 모두 양의 값을 나타내며 이는 각 변수가 증가함에 따라 토석류의 발생확률이 높아짐을 의미한다. 변수별 토석류 발생확률에 기여하는 정도인 승산비( $\exp(b_i)$ )는 1.029~1.175로 나타난다. 계산된 승산비를 이용하여 토석류 발생에 영향을 평가인자별 상대적인 가중치는 4개의 승산비에 대한 비율로서

구할 수 있으며 결과는 표 3.5에 나타내었다.

각 변수별 가중치는 큰 차이가 없는 것으로 나타나며, 토석류 현상의 복잡한 가변성을 고려할 때 실용적인 범위에서 거의 동일한 것으로 간주할 수 있다. 실제 토석류 위험평가 적용시에는 계산상의 편의와 실용적인 측면을 고려하여 변수별 가중치가 동일한 것으로 설정하였다.

표 3.4 로지스틱 회귀분석 결과

구분	모형계수 ( $b_i$ )	표준편차 S.E	Wald	DF	유의수준 (Sig.)	승산비 $\exp(b_i)$
유역평균경사	.161	.059	7.409	1	.006	1.175
Constant	-3.915	1.580	6.141	1	.013	.020
35이상면적비율	.049	.020	5.879	1	.015	1.050
Constant	-.696	.480	2.104	1	.147	.499
계곡평균경사	.157	.062	6.496	1	.011	1.170
Constant	-2.458	1.113	4.873	1	.027	.086
15이상길이비율	.028	.012	5.337	1	.021	1.029
Constant	-1.129	.669	2.846	1	.092	.323

표 3.5 토석류 위험지 평가 변수의 가중치

평가인자	승산비( $\exp(b_i)$ )	비율(%)	변수별 가중치( $w_i$ )
유역평균경사	1.175	26.56	0.27
35이상면적비율	1.050	23.73	0.24
계곡평균경사	1.170	26.45	0.26
15이상 계곡길이비율	1.029	23.26	0.23
소계	4.424	100%	1.0

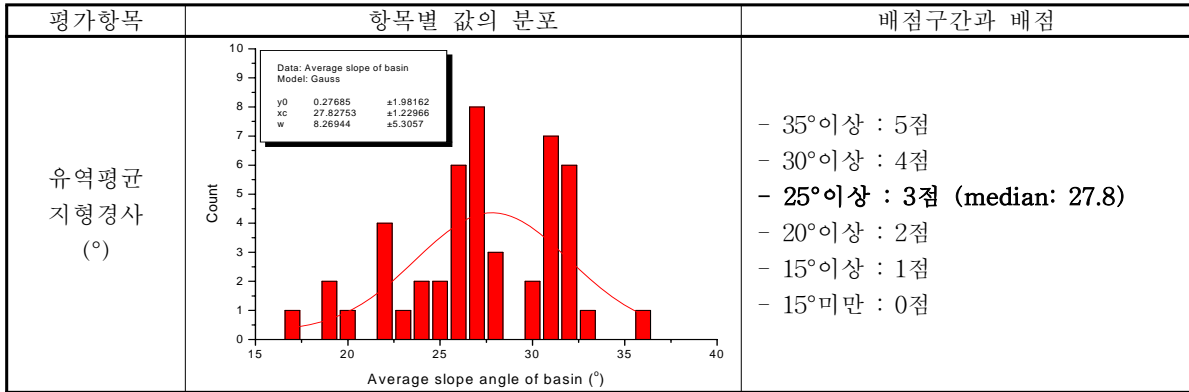
토석류 재해 평가항목별 배점구간과 배점부여는 기존 토석류 발생구간 46개소에 대하여 평가항목별 값의 분포로부터 최대, 최소, 중간값을 구하고 중간값이 포함된 구간을 포함하여 총 5개의 배점구간으로 나누는 후 중간값이 포함된 배점구간에 대하여 3점을 부여하고 순차적으로 0~5점을 부여하는 것으로 하였다. 각 평가항목별 최소값 이하구간에 대해서는 0점을 부여하고, 최대값이 포함되는 구간은 5점을 부여하였다. 표 3.6에는 각 평가항목별 값의 최대, 최소, 및 중간값을 나타내었다.

표 3.4 과거 토석류 구간에 대한 위험구간 평가항목별 값의 범위

평가항목	값의 범위		
	최대값 (max. value)	중간값 (median value)	최소값 (min. value)
유역 평균 지형 경사(°)	35.79	27.14	17.31
유역내 35°이상 지형 비율(%)	53.71	23.16	1.15
계곡의 평균 경사도(°)	26.88	18.02	7.87
15°이상 계곡 경사비율(%)	94	49	9
배수시설 전면 퇴적공간	충분	보통	없음 (절토부)
배수시설의 규격	B4.5x4.5	-	절토부

유역의 평균지형경사를 예로 들면, 최대값과 최소값의 차이가 약 18.48(=35.79 - 17.31)정도가 나오는데, 이 값을 5등분하면 약 3.7이 되며 배점구간의 구분값이 된다. 배점구간의 구분을 실용적으로 하기 위해서 최소값과 최대값이 속한 범위를 조절하여 배점구간을 구분하는 숫자가 정수로 되도록 하였으며, 이렇게 조절된 최소값 미만에 대해서는 0을 부여하고, 최대값 이상에 대해서는 5점을, 그리고 두 값의 사이를 5개 등급으로 나누어 순차적으로 배점값이 증가하도록 설정하였다 (표 3.5참조)

표 3.5 평가항목별 값의 분포와 배점구간의 결정예



도로의 취약정도 평가는 배수시설전면의 퇴적공간과 배수시설 규격으로 평가할 수 있도록 설정하였으며, 퇴적공간의 경우 퇴적공간의 크기에 따라 6구간으로 설정하여 0점에서 6점을 순차적으로 배점하고, 배수시설 규격의 경우 배수시설의 크기에 따라 6구간으로 구분하여 각각 0~6점을 부여하는 것으로 하였다. 표 3.6에는 도로취약정도 평가를 위한 배점구간과 배점값을 나타내었다.

표 3.6 도로의 취약정도 평가항목별 배점구간과 배점

평가항목	값의 분포범위	배점구간 및 구간별 배점
배수시설전면 퇴적공간	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 퇴적공간 없음: <math>V=0 \text{ m}^3</math> (예, 절토부)</li> <li>- 퇴적공간 부족: <math>V=0\sim 100\text{m}^3</math>미만 (예, 저성토부)</li> <li>- 퇴적공간 보통: <math>V=100\sim 1,000\text{m}^3</math>미만 (예, 증가규모 성토부)</li> <li>- 퇴적공간 여유: <math>V=1,000\sim 5,000\text{m}^3</math>미만</li> <li>- 퇴적공간 충분: <math>V=5,000\text{m}^3</math>이상</li> <li>- 퇴적공간 초과: 토석류가 도로로 침범하지 않는 것이 확실 (※ 절토부 사이계곡이라 하더라도 퇴적공간이 있는 경우에는 해당크기의 퇴적공간이 있는 것으로 간주)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 퇴적공간 없음: 5점</li> <li>- 퇴적공간 부족: 4점</li> <li>- 퇴적공간 보통: 3점</li> <li>- 퇴적공간 여유: 2점</li> <li>- 퇴적공간 충분: 1점</li> <li>- 퇴적공간 초과: 0점</li> </ul>
배수시설 규격	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 절토부 도수로</li> <li>- 횡배수관: D800, D1,000, D1,200</li> <li>- 횡배수관: D2,000, D2,500 (파형강관)</li> <li>- 수로박스: B1.0x1.0, B1.5x1.2, B1.5x1.5 B1.5x2.0, B2.0x2.0, B2.0x2.5 B3.0x3.0, B4.0x4.0 (2련수로, 3련수로 박스)</li> <li>- 아치형수로: B2.0xD2.0, B3.0xD3.0 (콘크리트하부+상부강관)</li> <li>- 소교량 : 교량하부 통과단면적 <math>8\text{m}\times 4.5\text{m}</math>이상 (※ 배수시설이 통수로 겸용이거나 또는 배수시설 인접하여 통로가 있는 경우는 상황을 감안하여 1단계 아래의 점수 부여)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 절토부도수로 : 5점</li> <li>- 횡배수관 D1,200이하 : 4점</li> <li>- 수로박스 B2.0x2.0이하: 3점</li> <li>- 수로박스 B4.0x4.0이하: 2점</li> <li>- 수로박스 B4.0x4.0초과 ~ 통수단면 <math>30\text{m}^2</math> : 1점</li> <li>- 소교량 : 0점</li> </ul>

### 3.3 토석류 위험 평가표

토석류 가능구간에 대한 위험평가는 평가대상 구간에 대한 토석류 발생가능성(재해점수)과 도로의 피해가능성(취약점수)로 구분하여 평가하는 것으로 제안하였다. 재해점수와 취약점수는 표 3.7의 토석류 위험구간 평가표에 제시된 항목별 배점방법과 다음식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\text{재해점수} = \sum \text{토석류 발생가능성} + \sum \text{토석류 이동가능성}$$

$$\text{취약점수} = \text{토석류의 퇴적가능여부} + \text{토석류 통과가능여부}$$

재해점수는 도로에 인접한 배수구역에서 토석류가 시작하여 도로지점까지 이동할 가능성을 정량적으로 나타내고, 취약점수는 토석류 발생시 도로의 피해가 발생할 가능성을 정량적으로 나타낸다고 볼 수 있으며, 각 평가항목별 배점표로부터 산정되는 재해점수의 범위는 0~20, 취약점수의 범위는 0~10점이 된다.

표 3.7 토석류 위험구간 평가표

항목구분			배점기준	
			배점구간	구간별 배점
재해 점수 (20점)	토석류 발생가능여부 (10점)	① 유역평균 지형경사 (단위: °)	- 35°이상	5
			- 30°이상~35°미만	4
			- 25°이상~30°미만	3
			- 20°이상~25°미만	2
			- 15°이상~20°미만	1
			- 15°미만	0
	② 35°이상 지형면적비율 (단위: %)	- 40%이상	5	
		- 30%이상~40%미만	4	
		- 20%이상~30%미만	3	
		- 10%이상~20%미만	2	
		- 1%이상 ~10%미만	1	
		- 1%미만	0	
	토석류 이동여부 (10점)	③ 계곡의 평균경사 (단위: °)	- 25°이상	5
			- 20°이상~25°미만	4
			- 15°이상~20°미만	3
			- 10°이상~15°미만	2
- 5°미만~10°미만			1	
④ 15°이상 계곡길이비율 (단위: %)		- 5°미만	0	
		- 90%이상	5	
		- 70%이상~90%미만	4	
		- 50%이상~70%미만	3	
		- 30%이상~50%미만	2	
취약 점수 (10점)	토석류 퇴적가능여부	⑤ 퇴적공간	- 10%이상~30%미만	1
			- 10%미만	0
			- 퇴적공간 없음	5
			- 퇴적공간 부족	4
			- 퇴적공간 보통	3
			- 퇴적공간 여유	2
	토석류 통과가능여부	⑥ 배수시설물	- 퇴적공간 충분	1
			- 퇴적공간 초과	0
			- 절토부도수로	5
			- 횡배수관 D1,200이하	4
			- 수로박스 B2.0x2.0이하	3
			- 수로박스 B4.0x4.0이하	2
			- 수로박스 B4.0x4.0초과 ~ 통수단면 30m <sup>2</sup> 미만	1
			- 소교량	0

### 3.4 위험의 등급화

위험평가표를 이용하여 산정된 점수는 각 평가대상구간의 재해가능성과 취약정도를 평가하는데 이용할 수 있지만 각 평가대상 위치에서 실제적으로 어느 정도의 위험도를 가지는지 알 수 없다. 또한 토석류의 주된 유발요인이 되는 강우에 대한 고려가 없는 상황으로서 어느 정도의 강우에 의해 토석류 발생이나 위험이 있는지를 판단할 수 없는 단점이 있다.



평가표를 이용한 값은 단순히 토석류 가능성과 피해 가능성을 의미하며 강우시에 어느 정도 위험도를 가진 유역에서 토석류 발생으로 인한 도로의 피해가 발생할지 알 수 없다. 평가값의 실제적인 의미는 과거 토석류를 유발시킨 강우특성과 실제 토석류가 발생한 구간의 평가값을 연관시킴으로서 결정할 수 있다.

특정 강우에 의해 한 지역에서 동시다발적으로 토석류가 발생하여 도로에 피해를 유발한 경우, 각 피해 지점별로 재해점수와 취약점수를 구하고 유발강우의 특성을 정량적으로 평가하여 상관성을 알 수 있다면 특정 강우 발생 시 어떠한 재해점수와 취약점수를 갖는 구간에서 피해가 발생하는지를 알 수 있을 것이다. 예를 들어, 동일한 지역에서 재현주기가 긴 강우(강우강도 큼)와 재현주기가 짧은 강우(강우강도 작음)가 발생한다고 가정해보면 재현주기가 긴 강우에 의해서는 재해점수와 취약점수가 낮은 구간에서도 토석류 발생에 의한 피해가 가능하고 재현주기가 짧은 강우에서는 위험점수와 취약점수가 높은 구간에서만 토석류에 의한 피해가 가능할 것이다. 이러한 상관성을 모식도로 나타내면 그림 3.1과 같다.

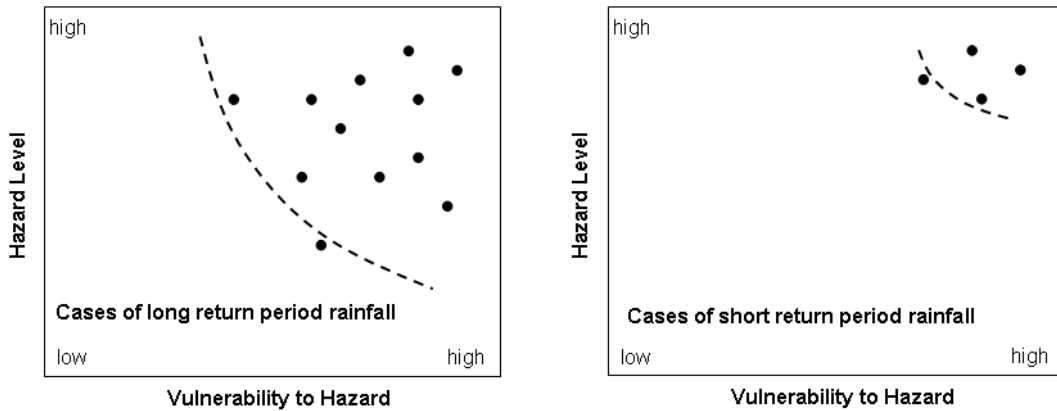


그림 3.1. 강우특성과 위험도의 관계

강우특성과 위험도의 관계를 구하기 위해 과거 고속도로에 46개의 토석류 피해를 유발시킨 8회의 강우에 대하여 재현주기와 강우 당시 피해가 발생한 위치별 위험점수와 취약점수를 구하여 그림 3.2에 나타내었다. 이를 보면 높은 재현주기를 갖는 강우시에 위험도와 취약정도가 낮은 구간에서도 토석류 발생이 가능함을 알 수 있고 토석류 발생빈도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 2006년 7.18일 발생한 토석류의 경우 재현주기가 약 2~5년의 작은 강우에도 불구하고 비교적 넓은 범위에서 토석류가 발생한 사례도 있어 보다 정확한 구분기준을 위해서는 앞으로도 지속적인 자료축적을 통한 분석이 필요할 것으로 보인다.

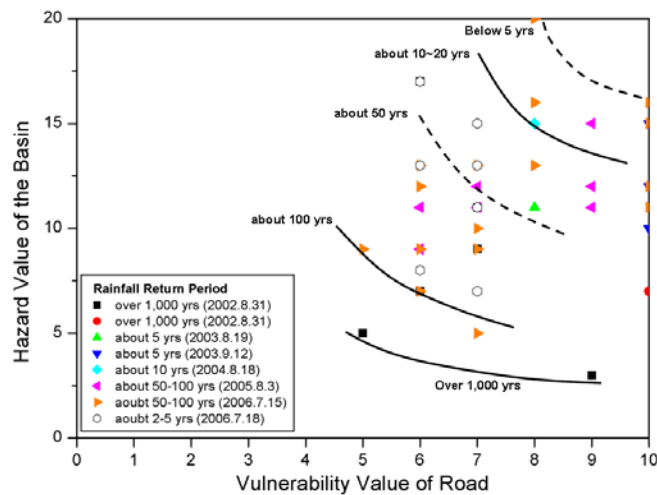


그림 3.2. 과거 토석류 유발강우와 피해발생지점의 위험도 관계

제한된 자료에도 불구하고 토석류 유발강우의 강우재현주기별 피해발생지점의 위험도(재해점수와 취약점수)관계를 이용하면 특정 강우에 의해 어느 정도의 위험도를 가진 구간에서 토석류가 발생하여 피해를 유발할지 가늠할 수 있으며, 이로부터 강우재현주기별 토석류 발생가능성에 대한 위험정도를 정의하고 정량적인 값과 관련시켜 위험을 등급화 할 수 있다. 이 연구에서는 표 3.9와 같이 토석류 가능성과 도로의 피해가능성 그리고 강우재현주기에 따른 위험등급을 정의하고 이러한 등급을 그림 3.2의 과거 토석류 유발강우와 피해발생지점의 위험도 관계를 참고하여 재해점수 및 취약점수와 연관시켰으며 표 3.10과 같은 위험등급표(risk ranking matrix)를 제시하였다.

표 3.9 위험등급별 위험정도

위험등급	위험 정도
S	- 토석류 발생 가능성 및 도로 피해 가능성 매우 높음 - 재현주기 약 2~5년 강우에 의해서도 피해 발생 가능
A	- 토석류 발생 가능성 및 도로 피해 가능성 높음 - 재현주기 약 5~20년 강우에 의해서 피해 발생 가능
B	- 토석류 발생 가능성 및 도로 피해가능성 있음 - 재현주기 약 20~50년 강우에 의해 피해 발생 가능
C	- 토석류 발생 가능성 있음 - 재현주기 약 50~100년 강우에 의해 피해 발생 가능
D	- 토석류 발생 가능성 및 도로 피해가능성 낮음 - 재현주기 약 1,000년의 이상의 강우에 의해 피해 가능
E	- 토석류 발생가능성이 매우 낮거나 도로 피해가능성 매우 낮음

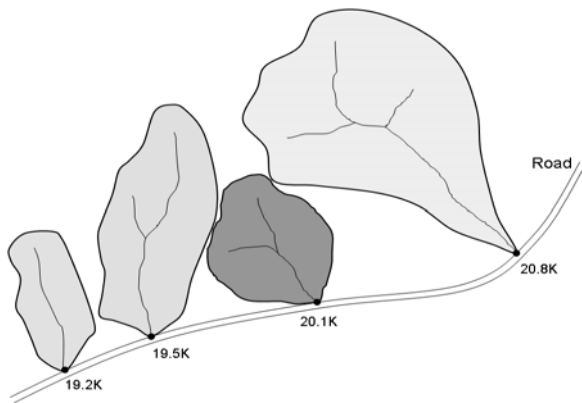
표 3.10 위험점수와 취약점수에 따른 위험등급표

20	E (20)	D (21)	D(22)	C (23)	B (24)	B (25)	B (26)	A (27)	S (28)	S (29)	S (30)
19	E (19)	D (20)	D (21)	C (22)	B (23)	B (24)	B (25)	A (26)	S (27)	S (28)	S (29)
18	E (18)	D (19)	D (20)	C (21)	C (22)	B (23)	B (24)	A (25)	A (26)	S (27)	S (28)
17	E (17)	D (18)	D (19)	C (20)	C (21)	B (22)	B (23)	A (24)	A (25)	S (26)	S (27)
16	E (16)	D (17)	D (18)	C (19)	C (20)	B (21)	B (22)	B (23)	A (24)	A (25)	S (26)
15	E (15)	E (16)	D (17)	D (18)	C (19)	C (20)	B (21)	B (22)	A (23)	A (24)	A (25)
14	E (14)	E (15)	D (16)	D (17)	C (18)	C (19)	B (20)	B (21)	B (22)	A (23)	A (24)
13	E (13)	E (14)	D (15)	D (16)	C (17)	C (18)	C (19)	B (20)	B (21)	B (22)	A (23)
12	E (12)	E (13)	D (14)	D (15)	C (16)	C (17)	C (18)	B (19)	B (20)	B (21)	B (22)
11	E (11)	E (12)	D (13)	D (14)	C (15)	C (16)	C (17)	C (18)	B (19)	B (20)	B (21)
10	E (10)	E (11)	E (12)	D (13)	D (14)	C (15)	C (16)	C (17)	C (18)	B (19)	B (20)
9	E (9)	E (10)	E (11)	D (12)	D (13)	C (14)	C (15)	C (16)	C (17)	C (18)	B (19)
8	E (8)	E (9)	E (10)	D (11)	D (12)	D (13)	C (14)	C (15)	C (16)	C (17)	C (18)
7	E (7)	E (8)	E (9)	E (10)	D (11)	D (12)	D (13)	C (14)	C (15)	C (16)	C (17)
6	E (6)	E (7)	E (8)	E (9)	D (10)	D (11)	D (12)	D (13)	C (14)	C (15)	C (16)
5	E (5)	E (6)	E (7)	E (8)	E (9)	D (10)	D (11)	D (12)	D (13)	D (14)	D (15)
4	E (4)	E (5)	E (6)	E (7)	E (8)	E (9)	E (10)	D (11)	D (12)	D (13)	D (14)
3	E (3)	E (4)	E (5)	E (6)	E (7)	E (8)	E (9)	E (10)	E (11)	D (12)	D (13)
2	E (2)	E (3)	E (4)	E (5)	E (6)	E (7)	E (8)	E (9)	E (10)	E (11)	E (12)
1	E (1)	E (2)	E (3)	E (4)	E (5)	E (6)	E (7)	E (8)	E (9)	E (10)	E (11)
0	E (0)	E (1)	E (2)	E (3)	E (4)	E (5)	E (6)	E (7)	E (8)	E (9)	E (10)
재해점수 취약점수	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

#### 4. 평가방법 및 위험등급의 활용방안

제안된 토석류 가능구간 위험평가와 등급화 방안은 도로 선형 계획이나 설계뿐만 아니라 기존 도로구간에 대한 토석류 대책수립을 계획할 때 유용하게 적용할 수 있다. 우선적으로 도로유지관리 또는 설계 단계에서 토석류 방재목표를 설정할 필요가 있는데, 예를 들어 방재목표를 『재현주기 50년의 강우에 토석류 피해가 발생하지 않도록 한다』라고 할 경우 앞에서 제안한 위험등급표에 따르면 『위험등급 B』에 해당하는 도로인근의 배수 구역에 대해서는 토석류 피해방지를 위한 대책을 수립할 필요가 있다. 방재목표의 설정 후에는 도로 인근 배수구역에 대한 조사와 분석을 통해 위험도 평가항목별 값을 산정하여 재해점수와 취약점수를 구하고 등급구분표를 이용하여 각 배수구역별 위험등급을 결정할 수 있다.

예를 들어, 공용중인 도로에 대하여 토석류 예방대책을 계획하는 경우에는 그림 3.3a와 같이 사전에 검토대상 지역에 대하여 배수유역을 결정하고 위험평가와 등급을 부여한 후 방재목표에 따라 위험성이 있는 구간에 대해서는 대책을 수립할 수 있고, 도로의 계획·설계 단계에서는 그림 3.3b와 같이 몇 가지 대안 노선에 대하여 각 노선별 배수유역을 결정하고 위험평가를 수행함으로써 노선별 토석류 위험도를 평가할 수 있고, 토석류 대책수립이나 노선의 선정에 활용할 수 있다.

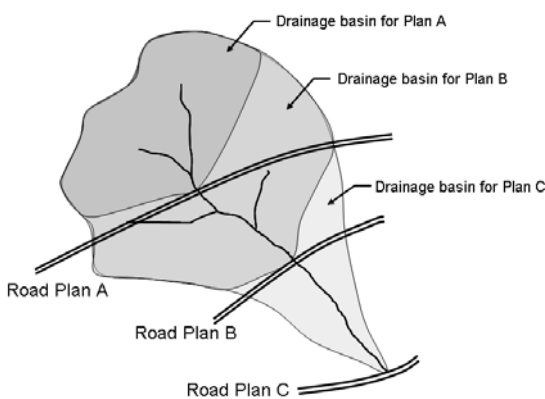


OO도로(18~21K구간) 토석류 위험등급

위치	재해점수	취약점수	위험등급
19.2K	15	6	B
19.5K	14	7	B
20.1K	17	9	S
20.8K	9	4	D

- \* S, A, B : 대책수립 필요
- \* C, : 관찰요망
- \* D, E : 대책수립 필요 없음

(a) 공용도로에서의 토석류 위험평가 적용사례



[노선계획에 따른 유역의 토석류 위험등급]

노선계획	재해점수	취약점수	위험등급
Plan A	18	8	A
Plan B	19	6	B
Plan C	12	4	D

- \* Plan A: 배수시설 규격을 확대하는 경우 B등급까지 등급감소 가능
- \* Plan B: 배수시설 규격을 확대하는 경우 C등급까지 등급감소 가능

(b) 도로 계획·설계 단계에서의 토석류 위험평가 적용사례

그림 3.3 도로에서의 토석류 위험등급의 활용

## 5. 결 론

이 연구는 고속도로에 피해를 유발한 토석류 구간에 대한 조사와 분석결과를 토대로 토석류 위험가능 구간을 선정하여 평가하는 방법론을 제시하고자 하였다. 기존의 산사태 위험지도는 특정 지점의 재해발생가능성만을 평가하며 토석류와 같이 시작-이동-퇴적과정에서 피해를 유발하는 형태의 재해에는 적용하기에는 한계가 있다. 이 연구에서는 토석류 위험평가를 위해 도로의 특정지점에 영향을 주는 배수유역을 평가단위로 정의하고 배수유역 내에서 토석류 시작과 이동가능성 그리고 도로의 취약정도를 평가하기 위한 항목을 선정한 후 과거 토석류 자료를 바탕으로 정량적인 평가체계를 제안하였다. 또한 정량적인 위험도 평가값과 강우재현주기를 바탕으로 위험등급 결정방법을 제시하였으며 이러한 평가방법론을 도로관리 및 설계에 활용하는 방안을 제안하였다. 이러한 방법론은 도로인근 유역에 대한 토석류 대책계획을 수립하는데 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- (1) 이천용, 최경, 이종학, 이창우 (2002) GIS를 이용한 산사태 위험지도 작성기법 개발, *산림과학논문집*, 65, pp.1~10.
- (2) 채병곤, 김원영, 조용찬, 김경수, 이춘오, 최영섭 (2004) 토석류 산사태 예측을 위한 로지스틱 회귀모형 개발, *Jnl. of Engineering Geology*, Vol.14, No.2, pp.211-222
- (3) 홍세희, *이항 및 다항 로지스틱 회귀분석*, 2005, 교육과학사, 경기도 파주시
- (3) Iverson,R.M. Vallance,J.W. (2001) New Views of Granular Mass Flows, *Geology*, Vol.29, No.2, *Geological Society of America*, pp.115-118(33)
- (4) Okuda,S., et al, (1977) Synthetic Observation on Debris Flow, Part4. Observation at valley Kamikamihorizawa of Mt. Yakedake in 1977, *Annuals, DPRI, 21B-1*, pp.277-296
- (5) Savage, S.B. (1984), *Advances in Applied Mechanics: The Mechanics of Rapid Granular Flow*, Academic Press Inc. Orlando, Florida.
- (6) Satty,T.L. (1980) *The Analytical Hierarchy Process*, RWS Publication