

## 산사태 위험지도에서 안전등급지역인 오륜터널 일대의 토사유실 원인분석

### Causal Analysis on Soil Loss of Safety Class Oryun Tunnel Area in Landslide Hazard Map

김태우\* · 강인준\*\* · 최 현\*\*\* · 이병걸\*\*\*\*

Kim, Tae Woo · Kang, In Joon · Choi, Hyun · Lee, Byung Gul

#### 요 旨

현재 우리나라는 기후변화로 인해 여름철 집중호우와 국지성 호우가 증가하고 있다. 이에 토사유실 예방에 관한 연구들이 활발하게 이루어지고 있고 산림청에서는 산사태 위험지도를 제공하고 있다. 산사태 위험지도는 9가지의 요소들로 가중치를 주어 5등급화 하여 위험도를 나타낸다. 2014년 8월 25일 부산시 금정구 오륜터널 일대에서 국지성 호우로 인한 토사유실이 발생했으며 산사태위험지도와 비교해 본 결과 실제 토사유실이 발생한 지역은 위험지도상의 안전지대였다. 토사유실이 발생한 오륜터널 일대를 강우량, 토양도, 지질도, 임상도, 경사도, 하계망, 분수령, 유역형상, 유출량을 분석하였다. 분석한 결과 산사태가 발생한 지점의 토양, 임상, 다량의 유출량과 침투유량, 수계망의 차수, 유역의 형상이 토사유실의 원인요소라고 판단된다. 이 요소 중 산사태 위험지도에서는 고려하지 않은 집중 강우량에 의한 유출량과 침투유량, 수계망의 차수, 유역의 형상이 산사태의 가장 큰 원인이라고 분석되었다. 기록적인 국지성 호우로 인해 많은 재산피해가 있었던 발생지점 중 하나인 오륜터널 일대의 토사유실원인분석 연구를 통하여 강수량에 의한 유출량, 침투유량, 유역의 형상이 중요하다고 판단된다. 이 요소들을 산사태 위험지역 판정 시 고려하여 집중호우 시 토사유실에 대비하여야 한다.

핵심용어 : 산사태, 토사유실, GIS, 오륜터널

#### Abstract

At present, summer cloudburst and local torrential rainfalls have increased in this country, because of climatic change. Therefore, studies on prevention of soil loss have been actively proceeded, and Korea Forest Service has offered landslide hazard map. Landslide hazard map divides risks into 5 classes, by giving weight with 9 kinds of elements. In August 25 2014, soil loss occurred in the whole Oryun Tunnel, Geumjeong-gu, Busan, because of local torrential heavy rain. As a result of comparing with landslide hazard map, the area where soil loss occurred in reality is a safety zone on hazard map. Rainfall, soil map, geological map, forest type map, gradient, drainage network, watershed, basin shape, and efflux of the whole Oryun Tunnel where soil loss occurred were analyzed. As a result of an analysis, it is judged that soil, forest type, much efflux and peak discharge, degree of water network and basin shape of a place where landslide occurred are causes of soil loss. It is judged that efflux, peak discharge, and basin shape by the localized rainfall that is not considered in landslide hazard map of them are the biggest causes of soil loss. It is judged that efflux, peak discharge, degree of water network and basin shape by the rainfall are important through a study on a causal analysis on soil loss in the whole Oryun Tunnel where is one of occurrence area where a lot of property were lost by the record local torrential rainfalls. A localized torrential downpour should be prepared by considering these elements on judgement of a landslide hazard area.

Keywords : Landslide, Soil Loss, GIS, Oryun Tunnel

Received: 2015.12.09, revised: 2016.01.21, accepted: 2016.02.15

\* 정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정(Member, Dept. of Civil Eng., Pusan National University, twkim0329@pusan.ac.kr)

\*\* 교신저자 · 정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학과 교수(Corresponding Author, Member, Dept. of Civil Eng., Pusan National University, ij kang@pusan.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 경남대학교 토목공학과 부교수(Member, Dept. of Civil Eng., Kyungnam University, hchoi@kyungnam.ac.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 제주대학교 토목공학과 교수(Member, Dept. of Civil Eng., Jeju National University, leebg@jeju.ac.kr)

## 1. 연구의 배경 및 목적

전 국토의 70퍼센트 정도가 산지로 이루어진 우리나라는 여름철 집중호우와 국지성 호우로 인한 토사유실의 위험도가 증가하고 있다. 우면산 토사유실 등 최근 많은 토사유실 피해지역이 나타나는 가운데 산림청에서는 산사태 정보시스템의 산사태 위험지도를 제공하고 있으며 기후변화에 따른 토사유실의 증가에 따라 대응책 마련과 관련 연구가 증가하고 있다. Park(2014)은 토사유실 및 비탈면 재해 예방에 대해서 홍콩의 선진관리체계를 살펴보고, 배수시설을 벤치마킹하고 배수시설의 개선방안을 제시하였고, Ko(2014)의 연구에서는 우면산 토사유실 발생부의 경사방향, 고도의 빈도 분석을 실시하고 능선과 요선에 대한 등급별 분류를 검토하고 표면곡률을 분석하였다. Oh(2013)는 GIS를 이용하여 토사유실에 대한 특성을 이해하고 토사유실발생지역을 미리 예측하기 위해 산지재해 위험성 평가방법에 대해 연구하였다. 또한 Chu et al.(2014)는 수치지형도, 수치임상도, 수치입지도, 수치지질도를 활용하여 토사유실 위험지역을 추출하였다.

2014년 8월 25일 부산에 내린 시간당 최고 110~130mm의 기록적인 국지성 폭우로 인한 오륙터널 일대에서 발생한 토사유실은 최하위 차수에서 강우유출이 집중되어 발생한 것으로 나타났다. 발생한 토사유실로 인해 도시고속도로인 변영로의 오륙터널에서 회동나들목 구간이 전면 통제 되었다. 비슷한 지형 형상을 가진 부산~울산 고속도로 장안IC 근처에서도 하위차수의 강우유출에 의한 토사유실이 일어났으며 토사유실과 침수 등의 피해로 도로 20여 곳의 교통이 통제됐다. 기존 연구를 살펴보면 토사유실 취약지점, 발생지점을 통계하여 취약지도, 위험지도를 작성하고 등급화한 연구는 다수 존재하나 강수량을 고려하여 소유역의 유역형상, 물이 집중되는 하위차수의 배수구의 유출량에 따른 토사유실영향을 분석한 연구가 부족하다. 따라서 본 연구에서는 토사유실이 발생한 지역의 소유역을 분석하여 국지성 집중호우에 따른 소유역의 물이 집중되는 하위차수에서 토사유실원인을 분석하고자 한다.

## 2. 기본이론

### 2.1 토사유실의 발생 요인

토사유실은 사면을 구성하는 물질이 경사면에서 일부가 중력의 작용에 의해 급속히 붕괴되는 상태로 태풍의 영향으로 인한 호우, 강력한 소나기, 장마철의 지속적인 비, 지진, 국지성 폭우 등에 의해 산지의 급경사면

등에 일어난다.

토사유실의 종류에는 Slump, Slide, Flow, Fall, Topple, Torrent가 있다. Slump는 하부의 침식이나 집중호우로 인해 토사가 꺼지는 현상으로 우리 주변에서도 흔히 볼 수 있고, 대규모의 현상도 빈번히 발생한다. Slide는 포화되지 않았거나 압밀되지 않은 토사 또는 암석이 오랫동안 풍화작용을 받아서 급속도로 연약면과 평행한 방향으로 미끄러지면서 흘러내리는 현상이다. Flow는 점성이 높은, 포화된 물질이 흘러내리는 현상으로 일반적으로 Slump는 보다 빠른 속도로 발생한다. 진흙처럼 점성이 크기 때문에 암석덩어리나 나무 혹은 큰 물체를 움직일 수도 있다. Fall는 압밀되지 않은 덩어리 형태의 물질 또는 암석이 사면으로부터 떨어져, 튀어 오르거나 자유 낙하하는 현상이다. Topple는 경사면의 끝에서부터 암석이 부서져 내리는 현상이다. 다른 산사태는 미끄러지거나 흘러내리는 것에 비하여 이 현상은 암석이 넘어지는 것이 특징이다. Torrent는 암석파편이나 식물 구성성분을 포함하고 있는 토석류가 계곡이나 배수로를 따라 급속한 속도로 흘러 내려오는 현상이며 주로 집중호우가 원인이다.

### 2.2 유효우량 산정을 위한 SCS-CN

SCS-CN(Soil Conservation Service Curve Number) 방법(SCS, 1972)은 미국 토양 보존청에서 개발한 유효우량 산정방법이다. 유역의 토양 피복 상태와 토양특성만으로 강우로부터 유효우량을 산정할 수 있기 때문에 미계측 유역의 유효우량 산정에 널리 사용되는 방법으로 총강우량과 유효우량을 관계를 이용하여 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다(Yun, 2009).

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S_p} \quad (1)$$

여기서 Q는 유효우량으로 사상별 총 강우량 P와 유역의 최대잠재보유수량  $S_p$ 의 함수로 표현된다.  $I_a$ 는 강우의 초기손실로 최대잠재보유수량  $S_p$ 의 크기에 비례한다고 가정하여 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{F}{S_p} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (2)$$

F는 토양의 침투량으로 총 강우량에서 유효우량을 뺀 것을 의미하므로 다음과 같이 나타낼 수 있고 Eq. (3)을 Eq. (2)에 대입하여 초기손실을 고려하면 Eq. (1)

과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$F = P - Q \quad (3)$$

여기서 초기손실  $I_a$ 는 지면의 차단, 저류, 침투 등으로 유출의 시작 전에 발생하는 요소이기 때문에 SCS  $I_a$ 를 소거하기 위해 다수의 유역에 대해서 각 사상별 강우량과 유출량 자료를 분석하여 Eq. (4)를 제안 하였다. Eq. (4)를 Eq. (1)에 대입하면 Eq. (5)와 같은 총 강우량-유효우량 관계를 얻을 수 있다.

$$I_a = 0.2S_p \quad (4)$$

$$Q = \frac{(P - 0.2S_p)^2}{P + 0.8S_p} \quad (5)$$

SCS는 총강우량 유효우량관계를 표준화하여 토양의 종류 토지이용 및 토지피복 등의 수문학적 성질이 반영된 유출곡선지수(run off curve number, CN)를 개발하였다 이 유출곡선지수는 최대잠재보유수량  $S_p$ 와 Eq. (6)과 같은 관계를 가진다.

$$S_p = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6)$$

여기서 CN은 무차원 변수로 0~100의 값을 가지며 불투수면에서는 CN=100이다 CN값은 선행강우조건에 따라 각각 다른 값을 갖기 때문에 선행강우조건을 고려하여 적용하여야 한다. 5일 선행강우량을 지표로 하여 정의된3가지 선행토양함수 조건을 고려한다. AMC-II인 경우에는 평균적인 CN(II) 값을 가지며 AMC-I과AMC-III조건에서는 CN값이 각각 AMC-II보다 작거나 크게 나타난다.

AMC-II의 조건하에서 구해진 CN값을 다음의 관계식을 통해 선행강우에 따른 AMC-I과 AMC-III의 조건에서 Eq. (7) and (8)의 CN값으로 환산할 수 있다.

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (7)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.130CN(II)} \quad (8)$$

### 2.3 토사유실 산정을 위한 MUSLE모형

단일 호우 시 유출량과 침투유량을 고려하는 Williams

(1975, 1978)의 MUSLE모형을 이용한다. MUSLE는 단일 호우에 대한 유출특성을 반영하여 강우에 대한 민감도를 높여 정확한 토사유실량(ton/ha) Eq. (9)를 구할 수 있다.

$$A = 11.8 \times (Q_p)^{0.56} \times K \times LS \times C \times P \quad (9)$$

여기서, A는 토사유실량(tonnes), Q는 총 유출량( $m^3$ ),  $Q_p$ 는 침투유량( $m^3/sec$ ), K는 토양침식성인자, L, S는 지형인자, C는 토양피복인자, P는 토양침식제어대책인자이다. 총 유출량(Q)은 SCS-CN법, 침투유량은 합리식( $q_p$ )을 이용하여 산출하며 토양침식성인자(K)는 Eq. (10)과 같다.

$$K = \frac{2.1 \times 10^{-4} (12 - OM) M^{1.4} + 3.25 (S_1 - 2) + 2.5 (P_1 - 3)}{100} \quad (10)$$

여기서, OM은 유기물 백분율, Eq. (11)의 M은 임경에 있어서 주종을 이루는 토립자와 토사 전체 비율에 대한 함수,  $S_1$ 은 토양구조지수,  $P_1$ 은 투수지수이다.

$$M = (MS + VFS) \cdot (100 - CL) \quad (11)$$

여기서, MS는 실트 백분율(%), VFS는 극세사 백분율(%), CL은 점토 백분율(%)이다.

사면길이, 사면경사 인자(L, S)는 Eq. (12) and (13)과 같다.

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.1} \right)^m \quad (12)$$

여기서,  $m$ 은  $\frac{\beta}{1 + \beta}$  이고  $\beta$ 는  $\frac{11.16 \sin \theta}{3.0 (\sin \theta)^{0.8} + 0.56}$  이다.

$$S = 16.8 \times \sin \theta - 0.50 \quad (13)$$

Eq. (12)에서  $\lambda$ 는 평면에 투영한 사면길이(m),  $m$ 은 사면경사길이의 멱지수,  $\beta$ 는 세류, 세류간 침식비,  $\theta$ 는 사면경사각이다.

식생 및 피복상태 등 경작종류와 형태에 따른 무차원 인자인 C는 Eq. (14)와 같다

$$C = C_i \times R_b \quad (14)$$

여기서,  $R_b$ 는  $\frac{\text{퇴적기간동안강우량}}{\text{년강우량}} \times 100$ 이다. C는 무차원인자,  $C_i$ 는 식생 및 피복 상태에 따른 상수이고 토양보전 대책을 나타내는 무차원 인자인 P는 산림지역의 매개변수인 1을 사용한다.

### 3. 토사유실분석

#### 3.1 모델지역 및 기본인자 분석

Fig. 1은 연구대상지역인 부산광역시 금정구 오륜동 오륜터널 일대로 2014년 8월 25일 부산에 내린 시간당 최고 110~130mm의 기록적인 국지성 호우로 인해 사면이 붕괴된 지역이다.

토사유실을 유발시키는 요인 중 가장 큰 외적 요인으로는 강우를 들 수 있다. 우리나라 연강수량 측정 결과 중부지방이 1,200mm~1,500mm, 남부지방이 1,000~1,800mm로 연평균 강우량은 대략 1,100~1,400mm로 이 중 대부분이 6월에서 9월 사이 우기인 여름에 연강수량의 50~60%가 집중적으로 내리고 있다. 이 시기에 매년 많은 산사태가 발생하고 있으며 최근에는 이상기후 현상으로 인해 더 많은 양의 비가 여름철에 집중적으로 내리고 있는 것으로 추정되고 있다.

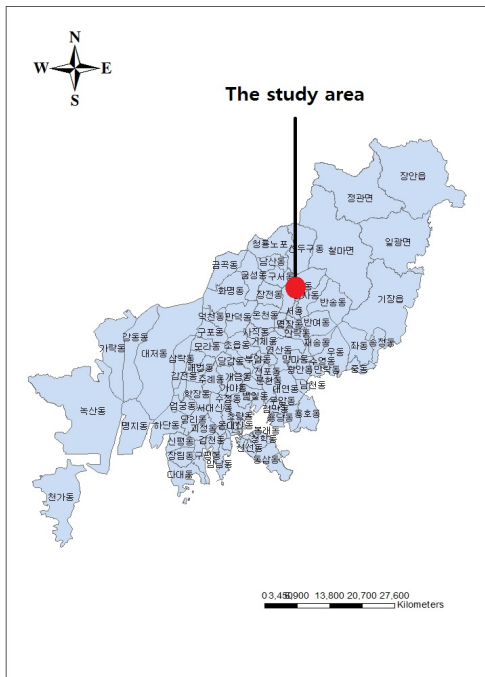


Figure 1. The study area

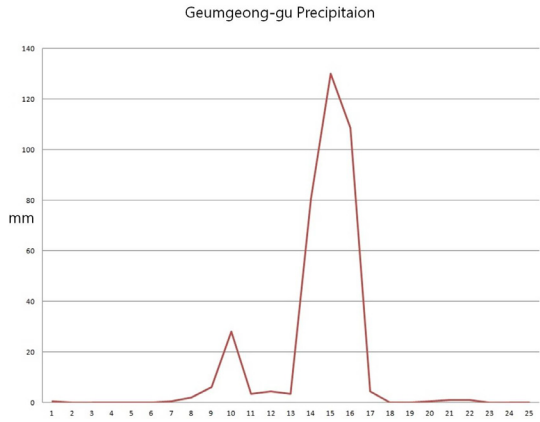


Figure 2. Hourly precipitation

산사태가 일어난 8월 24일에서 8월 25일의 금정구 시간당 강수량은 Fig. 2와 같다.

토사유실을 일으키는 영향 인자인 강우를 고려할 때 강우지표로서는 연속강수량, 일강수량, 시강수량이 사용된다. 산림청에서 과거의 산사태와 당시의 강우 조건을 토대로 산사태 예보 기준을 제시하고 있으며 그 값은 Table 1과 같다. 연속강수량 100mm~200mm, 시강수량 20mm~30mm, 일강수량 80mm~150mm는 산사태 주의보, 연속 강수량 200mm이상, 시강수량 30mm 이상, 일강수량 150mm이상은 산사태 경보로 지정해 3가지 인자 중 2가지 이상을 충족하게 될 경우 산사태 예보 및 경보를 발령하도록 권장하고 있다. Table 1은 산림청과 건설부의 산사태 예보 및 경보의 기준이다.

연구지역의 강수량과 산사태 주의보, 경보를 비교한 결과 8월 25일 연속강수량 244.5mm, 일강수량 245mm, 최대시강수량 130mm(13:34 ~ 14:34)로 산사태 경보, 주의보 표를 통해 분석한 결과 산사태경보 이상의 강수량 형태를 보였으므로 산사태 경보를 발령할 수 있다.

연구대상지역의 토양도 분석결과 배수등급은 양호, 약간 양호로 이루어져 있으며, 지질분포는 미문상화강암, 안산암질암류, 이천리층으로 이루어져 있다.

산림의 구성은 곰솔, 기타 참나무, 침활혼효림으로 구성되어 있었으며, 곰솔의 구성이 가장 많아 침엽수림이 가장 많은 부분을 차지하고 활엽수와 혼효림으로 존재하였다. 침엽수의 경우 활엽수보다 뿌리가 얇게 자라고 강우 시 빗물이 지표수로 흐르기 쉽기 때문에 산사태의 위험이 높다. 경급은 소경목, 중경목으로 구성된다. 소경목은 흉고직경 6~16cm의 입목 수관점유 비율이 50%이상인 인분이며 중경목은 흉고직경 18~28cm

Table 1. Landslide watch and landslide warning

Institution	Classification	Landslide watch	Landslide warning
Korea forest service	Continuous rainfall	100~200	200 and over
	Daily amount of precipitation	80~150	150 and over
	Precipitation for one hour	20~30	30 and over
The ministry of work (daily amount of precipitation)	I area	90	105
	II area	75	90
	III area	55	75

의 입목 수관점유비율이 50%이상인 임분이다. 소경목의 경우 산사태의 위험이 높다고 볼 수 있다. 영급은 4영급으로 이루어져 있다. 4영급은 수령 31~40년생 입목의 수관점유 비율이 50%이상인 임분으로 산사태에 강하다고 볼 수 있고 임상들은 밀하게 구성되어 있다.

3.2 GIS분석

본 연구에서는 ESRI사의 ArcGIS를 이용하여 분석하였다. 수치지도의 layer를 추출하여 불규칙삼각망을 생성하고 불규칙삼각망을 이용하여 레스터 자료인 DEM으로 변환하며 DEM을 이용하여 경사도와 경사방향을 분석한다. DEM을 생성하고 DEM을 이용하여 흐름의 방향을 분석하여 물이 어느 방향으로 흐르는지 분석한다. 물의 흐름과 흐름의 방향에 따른 누적 흐름도를 추출하기 위한 단계를 거친 후 최종적으로 유역과 하계망을 추출한다.

Fig. 3은 Arc GIS를 이용하여 경사도와 경사방향을 분석하였다. 일반적으로 산사태는 15~40도 사이에 가장 많이 발생한다. 경사도가 높은 경우 견고한 암석으로 이루어지고 경사도가 낮은 경우 사면안정도가 높아 산사태의 위험도가 낮다.

본 산사태 발생지역은 5~35도 사이의 경사도로 산사태 위험지역이라고 볼 수 있다. 경사방향의 경우 분수령을 경계로 유역 내에서 물들이 집중되는 형태의 수로가 만나는 분기점인 것을 알 수 있었다.

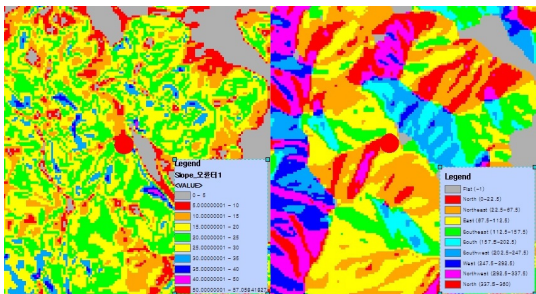


Figure 3. Slope and aspect

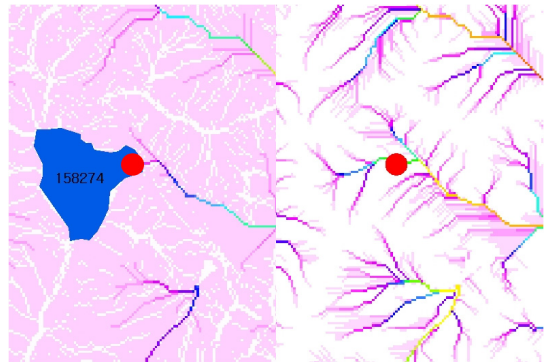


Figure 4. Watershed and drainage pattern analysis

Fig. 4는 하계망과 분수령을 분석하여 최종 유역(watershed)의 경계와 수계를 추출하였다.

하계망은 하천의 차수를 가진 네트워크이며 하천의 분기점과 유역의 경계에 의하여 하천의 차수를 구분할 수 있다. 흐름의 방향을 분석한 후 침몰지역이 나타나는 주위 셀의 표고 값으로 할당하는 채우기를 통하여 수정하였다. 침몰된 부분이 채워지면 누적흐름도를 분석을 통하여 흐름의 방향을 찾아 수로의 윤곽을 표현할 수 있다. 누적 흐름도를 통하여 하계망을 추출할 수 있었다.

지표에 내린 강수가 다른 유역으로 갈라져서 흘러들어가는 경계를 분수령이라고 한다. 분수령을 분석하기 위해 하계망의 차수들이 만나는 지점을 인식하여 유역분지를 분석하였다.

하계망은 지표면에서 흐르는 하천의 유출량은 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동한다. 각 소유역에서 수계망은 하천의 차수를 가진 네트워크로 구축되며 분기점과 유역경계에 의하여 하천의 차수를 구분하게 된다.

수계망의 차수는 Strahler법(1952)과 Shreve법(1966)이 있다. Strahler법은 2개의 1차수가 만나면 2차수가 되고 두 개의 2차수가 만나면 3차수가 된다. 다른 두 개의 다른 차수의 하천이 만나면 차수는 증가하지 않는다. Shreve법은 2개의 1차수 하천이 만나면 2차수가 되

며 1차수와 2차수가 만나면 3차수, 2차수와 3차수가 만나면 5차수가 되는 방법이다.

분석결과 본 산사태 발생지역은 Fig. 4와 같이 물이 집중되는 최하위차수이며 국지성호우에 유역내의 물이 집중되는 토사유실의 주된 원인이라고 볼 수 있다. 분수령 분석에 의한 유역면적은  $158274m^2$ 이다.

### 3.3 유출 및 유역 분석결과

토사유실이 발생한 지역을 SCS법으로 분석하였다. 유효우량에 직접적으로 영향을 미치는 강우가 있기 이전의 유역의 선행토양함수조건과 유역을 형성하고 있는 토양의 종류와 토지이용상태 및 식생피복의 처리상태, 토양의 수문학적 조건 등을 고려하여 이들 인자들이 직접유출량에 미치는 복합적인 영향을 양적으로 표시하는 것이다. 산사태가 일어난 것은 8월이므로 성수기로 분류된다. 토사유실이 일어난 8월25일 이전 5일의 누적우량은 63mm으로 AMCⅢ으로 분류된다. AMCⅢ는 선행 5일 동안의 강우량이 많아 유역의 토양이 거의 포화상태이다. 침투율이 작아서 유출률이 큰 상태이다.

84.67을  $Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S)$ 에 대입한다. (P는 강우시점부터 산사태 발생 시각까지의 총 우량 = 244.5mm) 계산결과 산정한 유출우량은 165.86mm이다.  $158274m^2$ 에 유출량이 165.86mm이므로 총  $26251.3m^3$ 의 물이 유출되었다. 평균 유출량은  $0.81023m^3/sec$ 이다

강우강도와 유역면적을 이용하여 첨두유량을 구한다. I(강우강도)는 130.0mm/hr이고 A(유역면적)은  $158274m^2$ 이다.

첨두유량은  $2.858m^3/sec$ 로 유역면적에 비해 강우유출량이 비대함을 알 수 있다. 본 연구모델지역 소유역

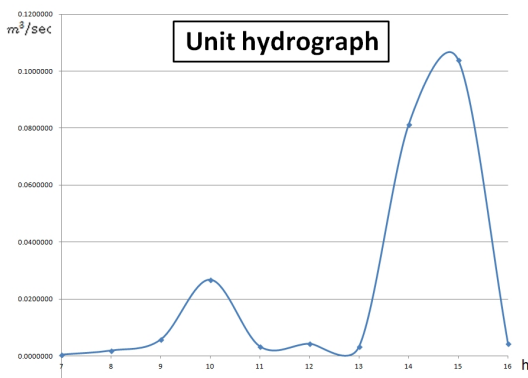


Figure 5. Unit hydrograph

의 형상은 역삼각형으로 모든 방향으로부터 유역출구까지 한꺼번에 유출이 집중되므로 빠른 시간 내에 첨두유량에 도달하게 된다. 모양계수는 36.09로 값이 작아서 유역의 지체시간이 짧고 첨두 홍수량이 커지기 때문에 산사태위험지도상 안전지역임에도 불구하고 토사유실이 발생하였다고 판단된다.

Fig. 5은 본 연구지역의 단위유량도이다. 단위유량도는 단위시간동안 균일한 강도로 유역전반에 균등하고 내리는 단위유효우량으로 인해 발생하는 직접유출 수문곡선이다(Yun, 2009).

단위중거는 5.1cm이다. 직접유출량에 단위유출량을 나누면 단위유량이 산출된다.

### 3.4 토사유실 분석결과

국지성 호우로 인한 토사유실량을 산정하기 위하여 MUSLE모형을 이용하였다. 총 유출량 Q는  $26251.3m^3$ , 첨두유량  $Q_p$ 는  $2.858m^3/sec$ 이며 토양침식성인자 K는 0.39, 지형인자 LS는 47.258, 토양피복인자 C는 0.07, 토양침식제어대책인자 P는 1.00이다.

MUSLE모형에 모델지역의 인자들을 적용하여 817.285ton/ha의 토사유실량을 산정하였다. 유역면적  $158274m^2$ 로 총 토사유실량은 12943.410ton으로 다량의 토사가 유실되었음을 알 수 있었다.

### 3.5 비교고찰

Fig. 6은 산사태 위험지도(산림청)로서 토사유실에 대한 위험정도를 나타낸다. 표시된 원은 연구모델지역이다. 토사유실이 발생한 연구모델지역은 산림청에서 제공하는 산사태지도에서의 위험등급은 3, 4, 5등급으로 안전한 것으로 나타났으나, 일정량이 넘는 첨두유량 발생 시 토사유실이 발생하였다. 지도상의 3등급 지는 산사태 위험 낮음, 4등급 지는 산사태위험 매우 낮음, 5등급 지는 산사태위험 없음이다. 산사태 위험지도는 안전도를 등급화 하기 위하여 사면경사, 사면방위, 사면길이, 사면곡률, 지형습윤지수, 임상, 경급, 토심, 모암을 고려하였다. 본 연구에서 다루었던 강우량에 대한 고려를 하지 않고 있어 실제 산사태가 발생한 지역과 산사태 위험지도 상의 위험지는 차이가 있었다. 물이 집중적으로 모이는 하위차수에서 산사태의 위험이 높다고 판단되므로 총 유출량, 첨두유량, 유역의 형상 등을 고려하여야 더 정확한 산사태 위험지도가 될 수 있다고 판단된다. 토사유실발생 지역은 총 강우량이 244.5mm 최대 시간당 강우량이 130mm로 SCS법에 의한 유효우량은 165.9mm이며 총 유출량은  $26251.3m^3$ 이고 평균유출량은  $0.81023m^3/sec$ 이다. 합리식에

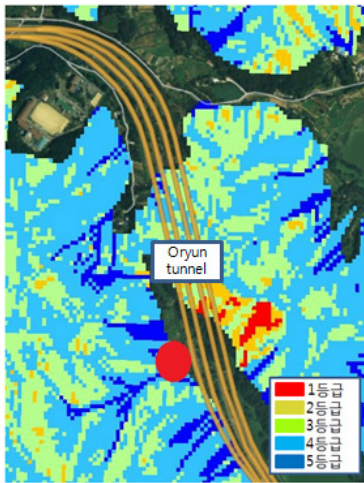


Figure 6. Landslide hazard maps

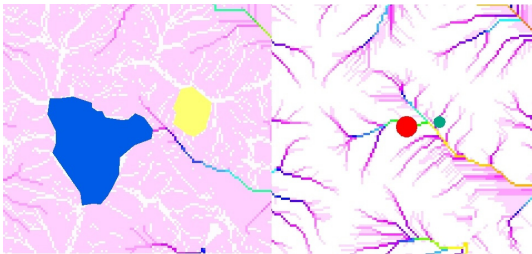


Figure 7. Basin area and low lank degree

의한 침투유량은  $2.858m^3/sec$ 이며 다량의 유출이 단시간에 하위차수로 집중된 것이 산사태의 직접적인 원인이라 판단된다.

Fig. 7은 산사태 위험지도상 3, 4, 5등급지인 모델지역과 위험 1등급지의 유역면적과 수계망의 차수를 비교하여 보았다.

모델지역의 유역면적은  $158274m^2$ 이고 산사태 위험 1,2등급지역은  $33339m^2$ 이다. 유역면적이 크면 침투유량이 크게 때문에 최하위차수에서 토사유실이 발생할 가능성이 높다.

Shreve법에 의해 모델지역의 경우에는 8차수이고 비교지역은 2차수이다. 실제 산사태 1등급지에서는 토사유실이 발생하지 않았으며 하위차수에 집중된 유출이 산사태의 원인이라 판단된다.

#### 4. 결론

GIS를 이용한 토사유실 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 강우량과 SCS-CN법, 합리식을 이용하여 유출량을 분석하였으며 연속 강우량, 일 강우량, 시 강우량은 산사태 경보수준이다. 특히 시 강우량은 산사태 경보수준의 4배가량이다. SCS유출 분석결과 총 유출량은  $26251.3m^3$ , 평균 유출은  $0.81023m^3/sec$ 이고 합리식 결과 배수구의 침투유량은  $2.858m^3/sec$ 로 초당  $2.858m^3$ 의 많은 물이 유출되었고 MUSLE모형에 의한 총 토사유실량은  $12943.410m^3$ 이다. 역삼각형의 집중형 유역형상으로 빠른 시간 내에 침투유량에 도달하였고 하류부의 유출면적이 지배적이었다. Shreve법에 의한 수계망의 차수는 8차수로 하위차수에서 토사유실이 발생했다.

둘째, 토양도, 지질도, 임상도, 경사도를 분석한 결과 오룬터널 일대 지역은 화강암으로 이루어져 풍화도가 크고 식생의 뿌리가 자라기 어렵다. 또한 침엽수림이 많은 부분을 차지해 뿌리가 얇고 강우 시 빗물이 지표수로 유출이 잘 일어난다. 소경목의 비율이 높아 나무의 직경이 좁고 경사도가 약 5~35도의 경사로 이루어져있어 토사유실에 영향을 미쳤다고 판단된다.

이러한 요인들을 토사유실위험 지역판정에 이용한다면 위험지역 예측에 도움이 될 것이라 판단된다. 앞으로 최근의 기후변화로 인한 집중호우, 국지성호우로 인한 산사태에 대한 강우량, 유출량, 소유역별 유역형상, 침투유량, 수계망의 차수에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 보여진다.

#### 감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

#### References

1. Park, Y. E., 2014, Improvement of drainage facility for the prevention of landslide and slope disaster, Master's thesis, Hanyang university.
2. Ko, S. M., 2014, Topographic analysis of landslides in Woomyunsan, Master's thesis, Gangneung-wonju national university.
3. Oh, C. Y., 2013, Study on risk assessment techniques of mountainous disasters using GIS, Doctoral thesis, Kangwon national university.
4. Chu, T. H., Yoon, H. C., Bae, C. H. and Son, H. S., 2014, Study on decision for landslide hazard areas by Using GIS, Journal of the Korea academia

- industrial, Vol. 15, No. 8, pp. 5310-5317
5. Williams J. R., 1975, Sediment routing for agricultural watershed, Journal of the American water resources association, Volume. 11, No. 5, pp. 965-974.
  6. Williams J. R., 1978, A sediment graph model based on an instantaneous unit sediment graph, An American geophysical union journal, Vol. 14, No. 4, pp. 659-664.
  7. Yun, Y. N., 2009, Hydrology, Cheong moon gak, pp. 3-693.
  8. SCS., 1972, Hydrology, Sect. 4, Soil conversion service national engineering handbook, U.S. Dept. of agriculture Washington, DC.
  9. Strahler, A. N., 1952, Hypsometric analysis of erosional topography, Bulletin of the geological society of America, Vol. 63, pp. 1117-1142.
  10. Shreve, R. L., 1966, Statistical law of stream number, Journal of geology, Vol. 74, pp. 17-37
  11. Korea forest service, 2015, Landslide information system, <http://fgig.forest.go.kr/>