

## 강우를 고려한 사면내 요부(凹部)에서의 안정성 해석

### Stability Analysis of the Concave Zone in a Slope Considering Rainfall

사 공 명<sup>1</sup> Sagong, Myung

임 경 재<sup>2</sup> Lim, Kyoung-Jae

#### Abstract

Since slope sliding and loss of railway triggered by a rainfall produce instability in the operation of trains, a proper method to estimate the slope stability considering rainfall is required. From the field study, sliding induced by rainfall depends on the engineering properties of soils, three dimensional aspect of the slope, rainfall intensity and geological conditions of the soil layers. In this study, among various types of sliding, slope instability caused by the surface runoff water at the concave zones in a slope is investigated. The depth of runoff water is calculated by using the Rational method and Manning equation. The occurrence of runoff water is evaluated by a comparison between the calculated infiltration rate and rainfall intensity. Pressure heads which can be calculated from the modified Iverson model are used to calculate the factor of safety along the vertical depth of the slope. The modified Iverson model considers the depth of runoff water, thus the maximum hydraulic gradient along the depth of slope is greater than one.

#### 요 지

집중강우로 인한 철도연변 사면의 활동 및 선로의 유실은 철도 운행에 있어 불안정성을 유발하는 요인으로서 이에 대한 적절한 평가방법이 요구된다. 현장조사 결과 강우로 인한 사면의 활동은 사면내 흙의 특성, 강우강도, 사면의 3차원상 형상과 지층의 지질학적 조건과 상관이 있는 것으로 관측되었다. 본 연구에서는 사면의 활동패턴 중 사면내 요부(凹部)에서 주변 수계로부터 흘러들어온 표면유출수로 인하여 발생하는 사면의 활동을 대상으로 하고 있다. 표면 유출수의 발생은 Philip 공식에서 계산된 침투율과 강우강도의 비교를 통해서 판정되었다. 표면유출수의 심도를 계산하기 위하여 합리식과 Manning 공식을 적용하였으며, 심도별 사면의 안전율을 구하기 위하여 Iverson 모델을 수정하여 적용하였다. 수정된 Iverson 모델의 적용에 있어 표면 유출수의 심도를 고려하므로 최대 동수경사가 1 이상의 경우를 고려하였다.

**Keywords :** Iverson model, Manning equation, Rainfall, Slope, Watershed

#### 1. 서 론

최근 들어 지구온난화 현상으로 인한 이상기후의 발생은 전 지구적인 현상으로 인식되고 있다. 특히 국내

에서는 이러한 이상기후의 영향으로 단기간에 고강도의 집중강우가 발생하여 토목구조물에 큰 영향을 미치는 경우가 관측되었다. 2002년과 2003년에 발생한 태풍 루사 및 매미는 토목기술자에게 토목구조물의 설계

1 정회원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute, rockcore@krii.re.kr)

2 강원대학교 환경연구소 연구원 (Researcher, Environmental Research Center, Kangwon National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

에 있어 강우의 영향을 필수적으로 고려해야 할 사항임을 강조하는 결과를 낳았으며 향후 태풍의 강도 및 강우의 영향은 증대 될 것으로 예측되는바 고강도의 강우를 고려한 구조물의 설계는 반드시 수반되어야 할 사항으로 판단된다.

폭우로 인한 철도구조물에 대한 영향은 선로유실, 옹벽파괴, 교대배면의 파괴, 철도 연변사면의 활동 등으로 나타나며, 선로유실과 철도연변 사면의 활동은 발생 원인에 있어 상호 상관성이 있는 것으로 판단된다. 선로유실은 철도노반 어깨부에서의 활동 혹은 인접 계곡부에서 집수된 지표수가 노선을 가로질러 월류하는 경우에 관측되는 것으로 사면의 활동 양상과 일부 유사한 현상을 보인다.

특히, 현장조사를 통하여 관측된 철도연변 사면의 활동패턴은 그림 1에서와 같이 크게 4가지로 구분할 수 있었다(사공 등, 2005). 각각의 활동 패턴에 대하여 간략히 설명하면 다음과 같다. 활동패턴 I의 경우에는 판상으로 발생하는 토석류의 발생으로서 천층파괴의 형태를 보인다. 이 경우 강우로 인한 상부 토층의 포화, 그로 인한 자중의 증가 및 전단강도의 감소 등에 의해 활동이

발생하는 것으로 판단된다. 활동패턴 II의 경우에는 중간층의 활동으로서 활동패턴 I과 유사한 원인에 의해 활동이 발생할 것으로 판단된다. 다만, 활동양상의 차이는 사면의 형태 및 강우량의 차이, 지속시간 등과 상관있을 것으로 판단된다. 활동패턴 III의 경우에는 집수부에서 관측되는 활동양상으로서 활동패턴 I에 비해서 활동심도가 상대적으로 깊으며 주변수계로부터 사면내 요부(凹部)를 향하여 표면유출수가 집중되는 지형조건을 가지고 있다. 따라서 토석류의 발생이 관측된다면 활동패턴 I의 경우보다 더 큰 소류력 및 흙의 전단강도 저하가 예측되는 상황이다. 이때 관측된 활동심도는 전석층에 미칠 정도로서 활동패턴 III이 관측된 곳에서는 활동 후 사면내 일부 활동되지 않은 전석이 잔존해 있는 것을 확인할 수 있었다. 활동패턴 IV의 경우에는 하부 기반암과 상부 토층사이에서 활동이 관측되는 타입이다. 이처럼 강우로 인한 사면의 활동은 흙의 공학적 특성뿐만 아니라 사면의 형태 및 지질 상태와도 밀접한 관련이 있다.

기존에 제안된 강우를 고려한 사면의 안정해석의 접근은 이론적 모델 혹은 수치해석방법으로 구분할 수 있

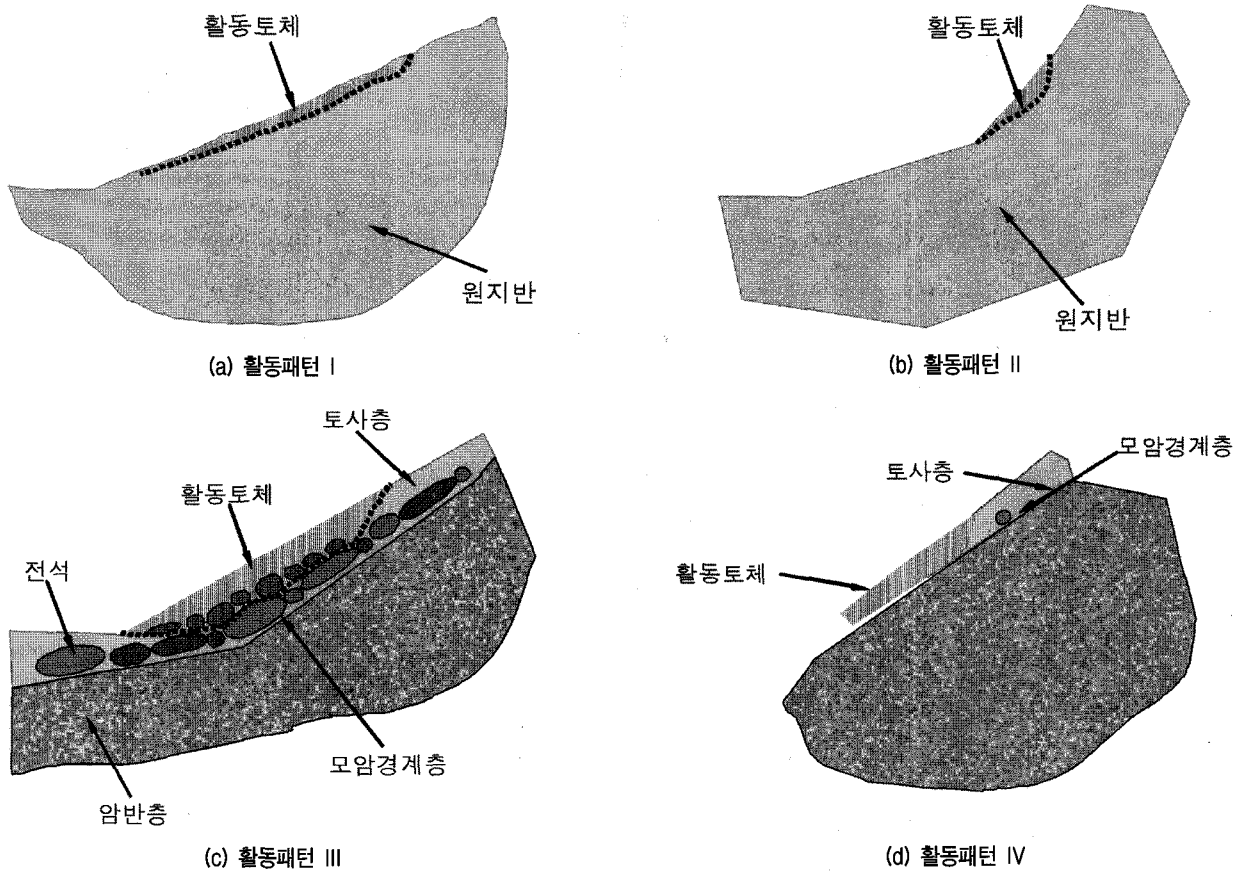


그림 1. 현장에서 관측된 강우로 인한 활동패턴

으며 크게 사면의 거동을 비뉴톤 유체(Johnson, 1984, Takahashi, 1991, Chen과 Lee, 2002)의 거동으로 가정하는 방법과 강체의 거동(Iverson, 2000, 조와 이, 2000, Cho와 Lee, 2002)으로 가정하는 방법으로 구분할 수 있다. 이상에서 제안된 해석기법은 현장조사를 통한 결과 중 패턴 I(관상의 활동)에 적용 가능할 것으로 판단된다. 다만, 이상에서 제안된 모델은 현장에서 관측된 활동 패턴 III과 같이 표면유출수의 발생으로 인한 사면표면에서의 활동에 대한 현상을 고려하지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존에 제안된 모델중 Iverson 모델을 이용하여 사면내 요부에서 표면유출수가 일정한 심도를 가지는 경우에 대하여 사면의 안정해석 기법을 제안하고자 한다.

## 2. 기존의 강우를 고려한 사면해석 모델

본 단락에서는 사면의 활동을 강체의 거동으로 가정하는 Iverson(2000)과 Cho와 Lee(2002)의 모델에 대하여 간략히 소개하고자 한다.

### 2.1 Iverson 모델

Iverson 모델은 부정류 조건시 불포화상태의 다공성 매질에서 발생하는 흐름을 대상으로 구성되었으며 모델은 Richard 공식에서 유도되었다. 사면내에서의 흐름에 적용하기 위하여 수정한 Richard 공식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} \frac{\partial \theta}{\partial \Psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_L(\Psi) \left( \frac{\partial \Psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_L(\Psi) \left( \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z(\Psi) \left( \frac{\partial \Psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right] \quad (1)$$

여기서,  $\Psi$ 는 지하수의 압력수두,  $x$  방향은 사면의 경사 방향이며  $y$  방향은 사면에 접하는 등고선 방향을 나타내며  $z$  방향은 사면에 수직인 방향을 나타낸다. 또한  $\theta$ 는 체적함수량이며  $t$ 는 시간,  $\alpha$ 는 사면의 경사를 나타낸다. 그리고  $K_L$ ,  $K_z$ 는 측면방향( $x$ ,  $y$ )과  $z$  방향으로의 투수계수를 나타낸다. 식 (1)에 적용된 국부좌표계는 그림 2에 도시되었다. 그림상에서의  $z$ 와  $Z$ 는 수직방향과 연직방향을 의미한다.

식 (1)을 바탕으로 Iverson(2000)은 단기 강우에 대한 사면내 간극수압의 분포를 나타내는 식을 다음과 같은 형태로 도출하였다.

$$\frac{\Psi}{Z} (Z, t \leq T) = \beta \left( 1 - \frac{d}{Z} \right) + \frac{I_Z}{K_Z} [R(t^*)] \quad (2)$$

$$\frac{\Psi}{Z} (Z, t > T) = \beta \left( 1 - \frac{d}{Z} \right) + \frac{I_Z}{K_Z} [R(t^*) - R(t^* - T^*)] \quad (3)$$

$$t^* = \frac{t}{\frac{Z^2}{4D_0 \cos^2 \alpha}} \quad (4)$$

$$T^* = \frac{T}{\frac{Z^2}{4D_0 \cos^2 \alpha}} \quad (5)$$

$$R(t^*) = \sqrt{t^*/\pi} \exp(-1/t^*) - \operatorname{erfc}(1/\sqrt{t^*}) \quad (6)$$

여기서  $Z$  사면의 표면에서부터 연직방향 심도,  $d$  사면 표면에서 직각방향으로의 지하수 심도,  $\beta = \cos^2 \alpha$ ,  $\alpha$  사면 경사각,  $I_Z$  장기간 연직방향 침투율,  $K_Z$  연직방향 투수율,  $T$  강우지속시간,  $D_0 = \frac{K_{sat}}{C_0}$ ,  $C_0$  체적함수곡선에서의 최소기울기 값,  $\operatorname{erfc}$  여오차 함수  $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ 이다. 식 (4)와 (5)는 정규화된 시간을 나타내며 식 (6)은 정규화된 시간에 의존적인 수두응답함수이다. 결국 식 (2)와 (3)을 이용하여 사면내 압력수두의 계산이 가능한데, 이때 요구되는 변수로서는 수두응답함수  $R(t^*)$ , 초기압력수두분포, 정규화된 강우강도  $\frac{I_Z}{K_Z}$ , 그리고 정규화된 강우지속시간  $T^*$ 이 필요하다. Iverson 모델에서  $\frac{I_Z}{K_Z}$ 의 최대적용 가능 값은 “1”로 한정하고 있는데 이 원인은 강우의 표면유출이 발생하더라도 저류가 되지 않는 것으로 가정하기 때문이다. 이러한 점은 앞서 언급한 바와 같이 표면유출수의 심도를 고려하지 않는 조건을 대상으로 하고 있으므로 사면내 요부가 있어 타입 III과 같은 활동이 발생하는 지형조건에 대해서는 적절

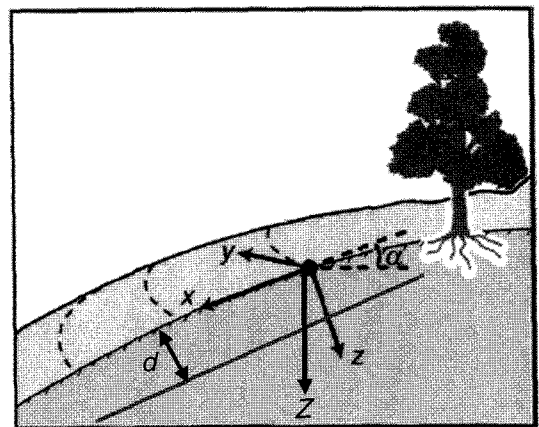


그림 2. 식 (1)에 적용된 국부좌표계의 정의

한 압력수두의 변화를 나타내지 못한다.

Iverson 모델을 이용하여 표 1의 조건에 대한 깊이별 압력수두를 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3을 살펴보면 사면 상부에서 초기( $t=0$ ) 조건에서는 압력수두의 변화가 없으나 침투로 인하여 부의 간극수압이 점차 증가하여 양의 간극수압 방향으로 진행되는 것을 알 수 있다. 이러한 압력수두의 변화는 점진적으로 진행되며 강우가 지속됨에 따라 사면내 수압은 정수압 상태로 진행된다. 그림 3에서는 정수압 상태를 나타내는 선을 beta line으로 나타내었다.

이렇게 구한 깊이별 압력수두의 함수, 사면의 제원 및 흙의 강도정수를 다음의 식에 적용하면 무한사면 조건에서 강우로 인한 사면의 안정성을 평가할 수 있다.

$$FS = F_f + F_w + F_c \quad (7)$$

$$F_f = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \quad (8)$$

$$F_w = \frac{-\Psi(Z,t)\gamma_w \tan \phi}{\gamma_s Z \sin \alpha \cos \alpha} \quad (9)$$

$$F_c = \frac{C}{\gamma_s Z \sin \alpha \cos \alpha} \quad (10)$$

표 1. Iverson 모델 적용을 위한 사면의 제원과 흙의 공학적 특성

사면 및 흙의 제원	
사면의 경사( $^\circ$ )	15
연직방향 활동 깊이( $Z$ ), m	6
지표면에서의 지하수 깊이( $d_z$ ), m	2
포화투수계수( $K_{sat}$ ), m/hr	0.00018
간극수압 확산계산( $D_o$ ), $m^2/hr$	0.0036
강우강도( $I_z$ ), m/hr	0.00018
강우지속시간( $T$ ), h	240(10 일)

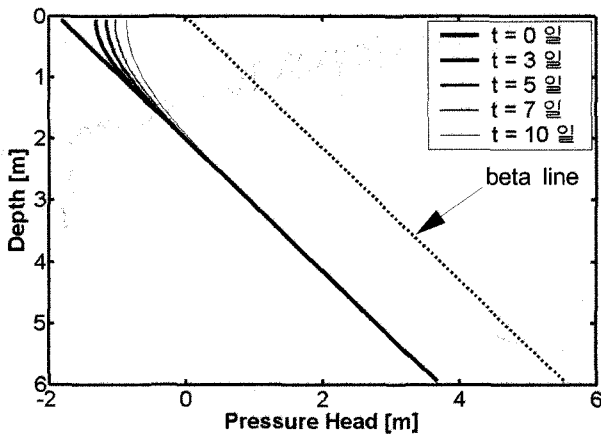


그림 3. 표 1의 조건에 따른 사면내 연직방향( $Z$ )과 시간에 따른 압력수두의 변화

여기서  $F_f$ ,  $F_w$ ,  $F_c$ 는 내부마찰각, 간극수압, 점착력에 대한 안전율을 나타낸다. 또한  $\gamma_w$ 와  $\gamma_s$ 는 지하수와 흙의 포화단위중량을 의미하며  $C$ 는 점착력을 나타낸다.

식 (7)에서 식 (8)과 (10)의 항목은 일반적으로 무한사면 조건에서 사용하는 식이며 시간별, 깊이별 압력수두의 변화는 Iverson의 모델을 이용하여 식 (9)에서 계산된 압력수두 항에서 반영이 된다. 따라서 일반적으로 무한사면 조건에서 건조 혹은 완전히 포화된 경우로 가정하여 해석하는 것에 비해 각 위치별 압력수두를 직접적으로 사용하므로 Iverson이 제안하는 방법이 보다 더 실질적이다.

## 2.2 Cho와 Lee 모델

Cho와 Lee(2002)는 Green-Ampt의 일차원 침투이론과 Mein과 Larson(1973)의 이 단계 침투모델을 이용하여 강우시 사면 내 침투심도를 계산하였다. 침투발생 단계는 흙의 침투능과 강우강도 그리고 투수계수에 따라 구분된다. 첫 번째로 강우강도( $I$ )가 포화투수계수( $K_{sat}$ )보다 적은 경우에는 강우의 지표면 유출은 거의 발생하지 않으며 전체 강우는 흙 속으로 침투한다. 이 경우는 그림 4의 선 A에 해당하는 경우이다. 두 번째로 투수계수( $K_{sat}$ )가 강우강도( $I$ )보다 적으며 강우강도가 침투능( $f_p$ )보다 큰 경우( $K_{sat} < f_p < I$ )에는 강우가 어느 정도 흙 속으로 침투하나 일정시간이 지난 후 흙은 점차 포화가 되며 침투능은 감소하게 되므로 지표면 유출이 발생한다. 이 경우는 그림 4의 선 B와 C에 해당하는 경우이다. 세 번째로는 투수계수가 강우강도보다 적으며 강우강도가 침투능보다 적은 경우( $K_{sat} < I < f_p$ )의 경우에는 침투능이 강우강도 이상이므로 강우시작과 더불어 흙내부로 침투가 발생하는 경우로서 그림 4의 선 D에 해당하는 경우이다.

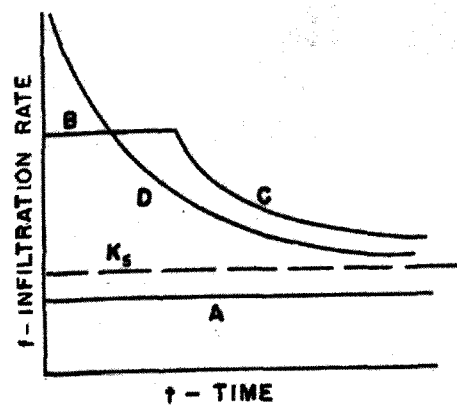


그림 4. 강우지속시간에 따른 침투율의 변화(Mein과 Larson(1973))

일정한 강우강도의 조건시 침투능과 강우강도가 같은 경우 지표면에서의 저류(ponding)가 시작할 조건이 되며  $f=I$  조건을 대입하여 포화선단의 연직깊이( $Z_p$ ) 및 누적침투량( $F_p$ )에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$Z_p = \frac{K_s \Psi}{(I - K_s)} \quad (11)$$

$$F_p = Z_p \Delta \theta_i = \frac{K_s \Delta \theta_i \Psi}{(I - K_s)} \quad (12)$$

여기서  $\Delta \theta_i$ 는 함수결손량,  $K_s$ 는 포화투수계수를 나타낸다. 또한 강우강도가 침투능보다 클 경우 누적 침투량과 포화선단의 연직깊이( $Z$ )까지의 누적침투량( $F$ )은 다음과 같다.

$$F = F_p + K_s (T - T_p) + \Psi \Delta \theta_i \ln \left( \frac{F + \Psi \Delta \theta_i}{F_p + \Psi \Delta \theta_i} \right) \quad (13)$$

결국 포화선단의 연직깊이( $Z$ )는 다음과 같이 표현된다.

$$Z = \frac{F}{\Delta \theta_i} \quad (14)$$

최종적으로 계산된 포화선단의 연직 침투깊이를 무한사면 조건에서의 안전을 계산을 위하여 아래의 식(15)에 대입하면 포화선단에서 강우로 인한 사면의 안정성은 다음의 식을 통하여 평가될 수 있다.

$$F_s = \frac{c + (\gamma_t Z \cos^2 \alpha - u_w) \tan \phi}{\gamma_t Z \sin \alpha \cos \alpha} \quad (15)$$

여기서,  $\gamma_t$ ,  $u_w$ 는 습윤단위중량과 간극수압이다. 이상과 같이 Iverson 모델과 Cho와 Lee의 모델은 무한사면조건에서 사면내 흙의 거동을 한계평형해석을 통하여 안전율을 평가하고 있다. 이 두 모델은 주어진 사면의 제원과 흙의 공학적 특성을 이용하여 사면내에서 관측되는 활동을 대상으로 하며 집수유역 발생과 관련한 사면형상의 불규칙성에 대한 고려는 없음을 알 수 있다. 따라서 이러한 모델은 현장에서 관측된 활동 중 패턴 I에 적용 가능할 것으로 판단된다.

### 3. 집수지형에서의 강우를 고려한 사면해석 모델

#### 3.1 안정성 해석 모델의 도출

그림 5는 활동패턴 III이 관측된 개소의 현장사진을

보이고 있다. 활동패턴 III의 경우에는 그림 6과 같은 지층구조에서 B층과 C층 이상, 즉 전석층 이상의 위치에서 활동이 발생한 경우로 판단된다. 이러한 활동패턴의 발생은 그림 5에서 확인되는 바와 같이 주로 물이 집수되어 흘러내릴 수 있는 요부에서 발생함을 알 수 있다.



(a) 경전선, 북천-횡천129k878



(b) 태백선, 추전-태백 93k9(상부에서 패턴 III이 예측되는 경우)

그림 5. 현장에서 관측된 사면활동 양상(패턴 III)

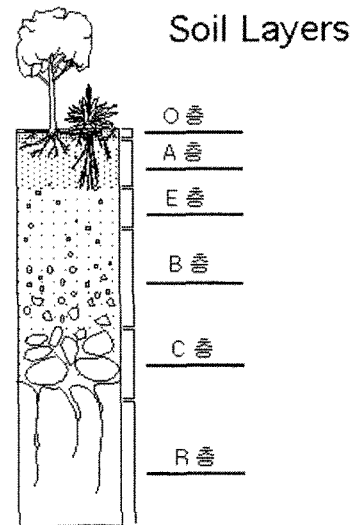


그림 6. 흙의 지층구성

그림 5(a)를 살펴보면 계곡부의 바닥과 주변부에서 전석이 토체내에 박혀있는 것을 알 수 있다. 이에 반해 그림 5(b)의 경우에는 전석이 드러나 있으며 흙더미와 더불어 이동된 것으로 보아 그림 5(b)에서 관측된 전석은 계곡부 상부에서 이동된 것을 알 수 있다. 따라서 토석류의 발생 시 특히 요부에서는 물이 집수되어 일정한 표면유출수를 생성할 경우 상당한 소류력이 발생하여 토체를 이송시킴을 알 수 있다. Iverson 모델이 가정하는 것처럼 표면 유출수의 심도가 "0" 인 경우에는 활동 패턴 III과 같은 유형의 사면활동을 발생시키기에는 한계가 있을 것이다. 결국, 이러한 관측 결과 사면의 안정 해석은 사면의 3차원 제원을 고려한 해석이 수행되어야 함을 알 수 있다. 따라서 본 절에서는 표면유출수가 계곡부에서 집수되어 일정한 수심을 유지하는 조건에 따라 사면의 안정성을 평가하고자 한다. 결국, 그림 7과 같이 일정한 수계영역에서 사면 내 요부로 집수되는 강우량은 합리식을 이용하여 구할 수 있을 것이다. 사면의 경우 대부분 해당 수계의 유역면적이 소규모인 경우이므로 합리식의 적용이 가능하다.

$$Q_p = mIA_v \quad (16)$$

여기서  $Q_p$  : 침투 홍수량( $m^3/sec$ )

$m$  : 유출계수

밀집시가지 0.9, 일반시가지 0.8, 산지 0.7, 밭, 임야 0.6, 논 0.7

$I$  : 시간당 강우강도( $m/sec$ )

$A_v$  : 유역면적( $m^2$ )

집수부로 유입되는 유량을 식 (16)을 통해서 계산한 후 Manning 공식을 이용하여 요부에서 예상되는 표면

유출수의 심도를 계산할 수 있을 것이다. 단 이때 통수 단면적은 바닥과 하폭의 평균값에 심도를 곱한 값으로 한다. 따라서

$$Q = VA = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} A = \frac{1}{n} \left( \frac{A}{P} \right)^{2/3} S^{1/2} A$$

$$= \frac{1}{n} \left( \frac{b_{ave} \times h_w}{b_{ave} + 2h_w} \right)^{2/3} (S)^{1/2} (h_w \times b_{ave}) \quad (17)$$

여기서  $n$  : 조도계수

(비피복 인공수로 중 하상이 돌로 된 상태가 나쁜 흙수로 0.025~0.04 적용)

$R$  : 경심(면적/윤변)( $m$ )

$S$  : 경사( $m/m$ )

$A$  : 요부의 면적( $m^2$ )

$P$  : 요부의 윤변( $m$ )

$b_{ave}$  :요부의 평균 폭( $m$ ) ( $b_{ave} = (b_1 + b_2) / 2$ )

$Q_p = Q$ 를 적용하면

$$mIA_v = \frac{1}{n} \left( \frac{b_{ave} \times h_w}{b_{ave} + 2h_w} \right)^{2/3} (S)^{1/2} (h_w \times b_{ave}) \quad (18)$$

식 (18)을 이용하여 반복계산을 통하여  $h_w$ 를 구한다. 이렇게 구한  $h_w$ 는 어떤 의미에서 보면 보수적인 결과를 도출하는 표면유출수의 심도이다. 왜냐하면 식 (18)을 통해서 계산되는 표면유출수의 심도는 유역면적의 출구에서 계산되므로 유역면적내의 유출량 전체를 이용하여 해당 지점에서의 심도를 계산한 것이다. 따라서 유역면적이 긴 경우 이러한 오류를 방지하기 위하여 유로연장 선상에서 일정한 간격으로 표면유출수를 구하는 것이 경우에 따라서는 합리적인 결과를 제시할 수도 있다.

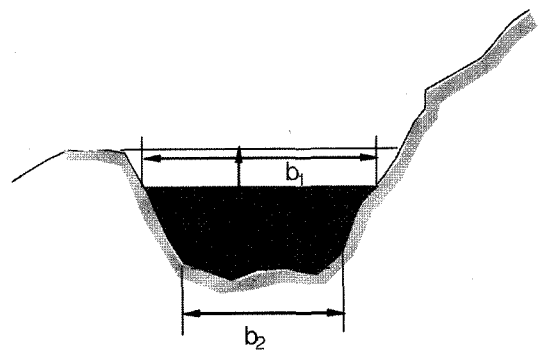
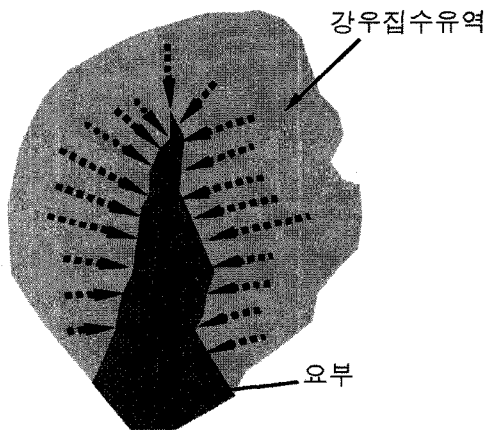


그림 7. 강우 집수유역 및 사면내 요부에서의 집수유량의 심도

이렇게 구한  $h_w$ 를 이용하여 사면의 형상을 단순화 시키면 그림 8과 같다. 여기서 심도  $h_w$ 는 사면의 표면에 수직된 방향으로서 해당지점에서의 수두는  $h_p (= h_w \times \cos \alpha)$ 로 나타낼 수 있으며 결국에는 압력수두의 경사는 1 이상이 된다.

이는 결국 식 (2)와 (3)에서 적용하는 경계조건 중에서  $I_z/K_z$ 의 비가 1 이상이 됨을 의미한다. 왜냐하면 Darcy의 법칙에서  $v = K(\frac{dh}{dz})$ 이므로 여기서 유속  $v$ 를 강우강도로 두면  $I = K(\frac{dh}{dz})$ 가 된다. 결국  $I_z/K_z$ 의 비는 사면내 연직방향으로의 압력수두의 구배가 된다. 따라서 표면저류가 발생하는 조건에서의  $I_z/K_z$ 는  $\frac{I_z}{K_z} = \frac{h_p + Z}{Z}$ 으로 대체될 수 있다. 표면유출수를 고려한 압력수두의 적용은 고강도의 강우 발생 혹은 지속적인 강우로 인하여 표면유출수가 발생하는 조건에서 적용이 가능하다. 만일 강우강도가 낮아서 표면유출수가 발생하지 않는 조건에서는 기존의  $I_z/K_z$ 의 비를 적용하여야 하며 이때  $I_z/K_z$ 의 비는 1과 같거나 적을 것이다. 결국, 강우강도가 흙의 침투능보다 큰 경우에 대한 간극수압의 확산은 식 (2)와 (3)을 변형하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Psi}{Z}(Z, t \leq T) = \beta(1 - \frac{d}{Z}) + \frac{h_p + Z}{Z} [R(t^*)] \quad (19)$$

$$\frac{\Psi}{Z}(Z, t > T) = \beta(1 - \frac{d}{Z}) + \frac{h_p + Z}{Z} [R(t^*) - R(t^* - T^*)] \quad (20)$$

단, 식 (19)와 (20)에서 계산된 간극수압의 분포가  $h_p + Z \cos \alpha^2$  이상인 경우에는 간극수압의 분포는  $h_p + Z \cos \alpha^2$ 를 따르는 것으로 가정한다. 여기서  $h_p + Z \cos \alpha^2$ 는 정수압조건을 나타낸다. 이러한 정수압 조건으로 형성된 라인 또한 beta line이라 칭하기로 한다.

또한, 표면유출수의 발생은 시간당 강우강도가 침투율보다 큰 경우에 발생하므로 Philip 공식(Carbeneau, 2000)을 통하여 계산된 침투율과 강우강도를 비교하여

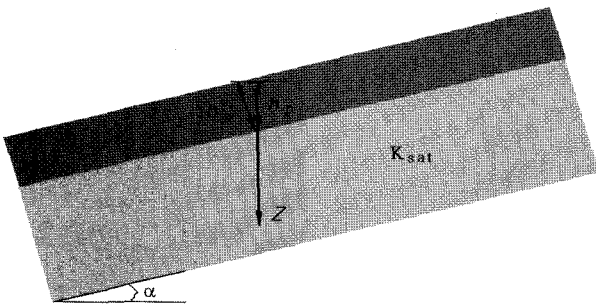


그림 8. 표면 유출이 발생한 사면의 개략도

강우강도가 침투율보다 큰 경우( $I > f$ )에 식 (19)와 (20)을 적용하여야 할 것이다. 적용할 Philip 공식은 다음과 같다.

$$f(t) = St^{(1/2)} + At \quad (21)$$

여기서 S는 수착도(Sorptivity), A는 투수계수에 영향을 받는 상수이다. 식 (21)을 적용하여 시간에 따라 계산된 침투능이 강우강도 보다 적은 경우에 대하여 표면유출수 심도를 계산한다.

표면유출이 발생하는 사면에 대하여 작용하는 전단응력을 살펴보면 유출수로 인한 사면 표면에 작용하는 전단응력은 다음의 식으로 표현될 수 있을 것이다. 표면유출과 중력으로 인한 전단응력은

$$\tau_D = (\gamma_s Z + \gamma_w h_z) \cos \alpha \sin \alpha \quad (22)$$

여기서  $h_z = \frac{h_w}{\cos \alpha}$ 이다. 또한 무한사면조건에서 중력에 저항하는 전단강도는

$$\begin{aligned} \tau_R &= c + \sigma' \tan \phi = c + (\sigma - u) \tan \phi \\ &= c + ((\gamma_s Z + \gamma_w h_z) \cos \alpha^2 - \Psi(Z, t) \gamma_w) \tan \phi \end{aligned} \quad (23)$$

따라서 안전율은 계산 식 (22)과 식 (23)을 사용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$FS = \frac{c + ((\gamma_s Z + \gamma_w h_z) \cos \alpha^2 - \Psi(Z, t) \gamma_w) \tan \phi}{(\gamma_s Z + \gamma_w h_z) \cos \alpha \sin \alpha} \quad (24)$$

결국 식 (24)는 간극수압의 확산 및 유역면적에서 표면유출수의 집수를 고려한 안전율 계산식이 된다.

### 3.2 모델의 적용

본 연구에서 제안하는 모델의 적용을 위하여 표 2의 조건에 대하여 적용하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. 표 2는 모래질 흙으로 구성되어 있는 사면에 대한 사례이다. 사면의 경사각은 20°이며 사면의 심도는 1m이다. 또한 지하수위는 사면의 표면에서 1m 아래에 위치해 있는 경우로 가정한다. 사면주변의 유역면적은 600m<sup>2</sup>이며 시간당 40mm의 강우가 4 시간동안 지속하는 경우로 가정한다. 이때 요부의 평균 폭은 50cm인 조건을 고려하였다. 적용한 강우강도와 지속시간동안 해당 지역에 강우가 발생하였을 때 계산되는 표면유출수의 심도는

약 12cm로 계산되었다. 단, 표면유출수의 심도 계산에 있어 표면유출수의 발생여부를 확인하기 위하여 Philip 공식을 적용하여 침투율을 계산하였으나, 표면유출수의 심도 계산에 있어서는 침투율을 감안하지 않았다. 침투율에 의한 표면유출수 심도의 변화는 일부 예상되는 바이나 전체적으로 사면의 안전을 계산에 있어 그 영향은 미미할 것으로 판단되었다. Philip 공식에 적용된 계수들은 Carbeneau(2000)에서 적용한 값을 차용하였으며 사면의 안전을 위하여 적용된 사면내 모래의 내부마찰각과 점착력은 30°와 3kPa이다.

그림 9, 11, 12, 13은 표 2의 조건에 대하여 Iverson 모델을 적용한 결과와 본 연구에서 제안하는 방법을 통한 요부에서의 표면유출수를 고려한 계산 결과이다. 즉, 재언하면 사면의 표면이 판상의 조건인 경우와 요부가 형성되어 표면유출수가 집수되는 경우에 대한 계산 결과의 비교이다. 그림 9를 살펴보면 사면 내 흩이 모래질 이므로 Iverson 모델을 통한 계산결과 2시간 동안의 강우만으로도 사면의 표면에서는 일부 정수두 형태의 압력수두분포를 보이고 있으며, 약 4시간의 강우로 인해 사면 깊이의 약 50% 정도가 정수두 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 그림 9에서 나타내고 있는 beta line은 물리적으로 압력수두가 발생할 수 있는 상한값이므로 계산된 압력수두의 값이 beta line 이상이 될 경우에는 beta

표 2. 수정된 Iverson 모델의 적용을 위한 사면의 제원과 흩의 공학적 특성

사면 및 흩의 제원	
사면내 흩의 종류	모래
사면의 경사(°)	20
연직방향 활동 깊이( $Z$ ), m	1.0
지표면에서의 지하수 깊이( $d_z$ ), m	1.0
포화투수계수( $K_{sat}$ ), m/hr	0.036
간극수압 확산계산( $D_v$ ), $m^2/hr$	0.36
강우강도( $I_z$ ), m/hr	0.04
강우지속시간( $T$ ), h	4
수침도( $S$ ), $m\sqrt{hr}$	0.09
Philip 상수( $A$ ), m/hr	0.11
유출계수( $m$ )	0.6
유역면적( $A_v$ ), $m^2$	600
요부 평균 폭( $b_{ave}$ ), m	0.5
조도계수( $n$ )	0.03
표면유출수의 심도( $h_m$ ), m	0.13
내부마찰각(°)	30
점착력( $c$ ), kPa	3
흩의 단위중량( $\gamma_s$ ) $kN/m^3$	22
물의 단위중량( $\gamma_w$ ) $kN/m^3$	9.8

line의 값을 적용하였다.

그림 10은 표 2의 조건을 이용하여 나타낸 시간에 따른 침투도이다. 시간에 따른 침투도가 강우강도보다 작으므로 표면유출수가 발생하는 것으로 판단되었다. 그림 9에서 계산된 압력수두를 이용하여 식 (24)에 적용하면(이때  $h_z=0$ ) 그림 11과 같이 각 위치별 시간에 따른 사면의 안전을 도출할 수 있다. 그림 11을 살펴보

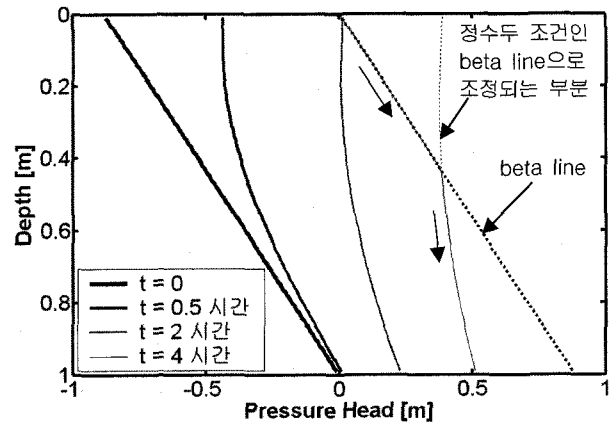


그림 9. 표 2의 조건에서 Iverson 모델을 고려한 경우 압력수두의 변화

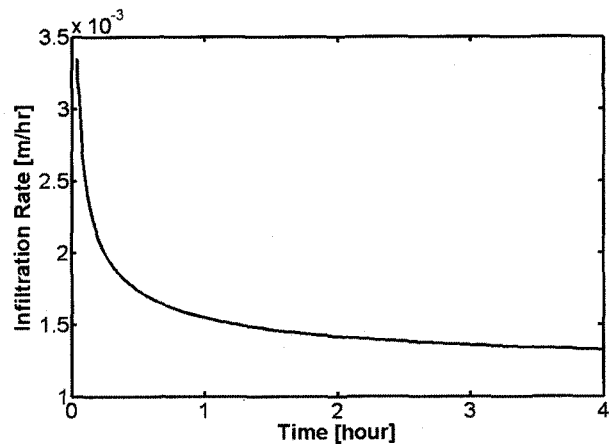


그림 10. Philip 공식에 의한 시간에 따른 침투도

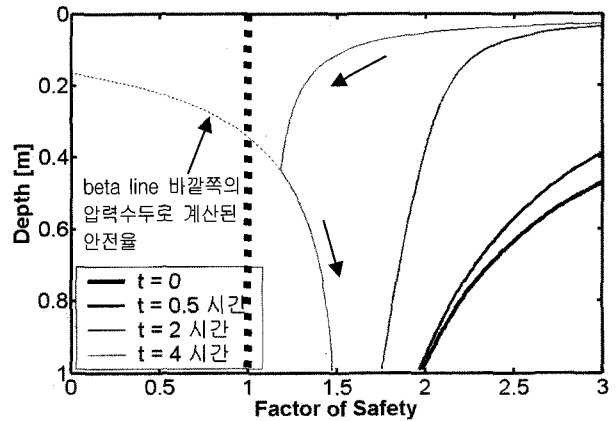


그림 11. 표 2의 조건에서 Iverson 모델을 고려한 경우 안전율의 변화



면 전체적으로 사면은 안전율이 1 이상임을 알 수 있다. 비록 4시간 동안의 강우에 의한 사면의 안전율은 1 이상이나 사면내 심도와 시간에 따른 안전율의 변화는 뚜렷이 관측되었다. 그림 11 내에서 점선으로 나타난 부분은 그림 9에서 압력수두 값이 beta line 이상인 경우를 나타낸다.

동일한 강우조건과 사면내 흙의 공학적 특성을 이용하여 집수가 발생하는 경우에 대한 안정성 분석 결과는 그림 12와 13에 나타내었다. 초기 t=0인 조건에서의 압력수두의 분포는 그림 9와 동일하게 나타났으며 전체적으로 표면유출을 고려한 경우의 압력수두의 분포가 Iverson 모델의 결과에 비해 양의 방향으로 이동한 것을 알 수 있다. 본 예제의 경우 표면유출수의 심도에 의한 압력수두는 약 12cm이며 그림 12에서 사면의 표면에 나타낸 압력수두가 이에 해당함을 알 수 있다. 그림 13에서는

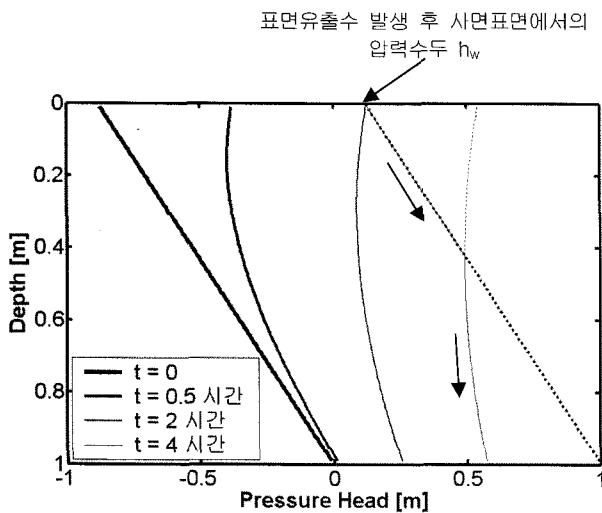


그림 12. 표 2의 조건에서 표면유출수를 고려한 경우 압력수두의 변화

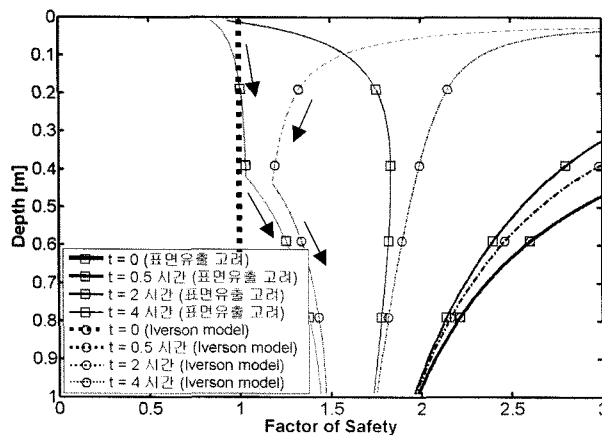


그림 13. 표 2의 조건에서 표면유출수를 고려한 경우와 Iverson model을 적용한 경우 안전율의 변화

Iverson의 방법과 본 연구에서 제안하는 방법을 통하여 구한 안전율의 비교를 나타내고 있는데, 그림 12에서 구한 간극수압의 분포를 바탕으로 계산한 안전율의 경우 강우가 4시간 이상 지속될 경우 사면 상부에서 안전율이 1 이하가 됨을 알 수 있다.

#### 4. 결론

현장에서 관측된 사면의 활동 양상은 판상의 사면 표면에서 흙에서의 활동, 흙과 기반암 접촉면에서의 활동, 사면내 집수부에서의 활동으로 크게 구분할 수 있다. 본 연구는 이중 사면내 집수부에서의 활동에 대한 내용을 조사하였다.

본 연구에서는 사면내 요부로 집수되는 강우량의 산정을 위하여 합리식을 적용하였으며 집수되는 강우로 인한 표면유출수의 발생여부 및 심도 계산을 위하여 Manning 공식과 Philip 공식을 적용하였다. 만일 표면유출수의 발생이 예측될시 동수경사가 “1” 이상인 조건의 발생을 가정하여 최종적으로 수정한 Iverson 모델을 이용하여 사면의 안정성 평가 기법이 제시되었다.

표면유출수의 발생으로 인하여 동수경사가 “1” 이상인 조건에서는 표면유출수를 고려하지 않는 경우보다 사면내 간극수압의 상태가 정수압의 상태로 더욱 빨리 전이될 수 있으며 그로 인하여 사면의 안전율을 또한 Iverson 모델의 경우보다 더욱 적은 값을 나타낼 수 있다. 특히 사질토 및 투수성이 뛰어난 화강 풍화토의 경우 이러한 현상이 더욱 두드러질 것으로 판단된다.

강우로 인한 사면의 거동은 사면의 3차원상의 형상, 사면 상부 집수구역의 크기, 사면의 경사, 사면내 흙의 공학적 특성, 강우량 등 여러 가지 요인에 의존적일 것이다. 본 연구에서는 이상과 같이 다양한 요소를 고려한 사면의 안정성 평가 기법이 제시되고 있으며 본 연구에서의 제안은 다양한 케이스를 통한 검증 및 보완이 추가로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 참고 문헌

1. 사공명, 황선근, 이수형, 김현기, 김민석 (2005), 강우로 인한 철도 연면 사면의 활동특성 분석 : 현장사례 중심, *한국지반공학회 논문집*, 제 21권, 5호, pp.7-13.
2. 조성은, 이승래 (2000), 강우특성을 고려한 사면의 표면과피에 대

- 한 안정성 평가, *한국지반공학회 논문집*, 제 16권, 5호, pp.107-116.
3. Carboneau, R. J. (2000), *Groundwater hydraulics and pollutant transport*, Prentice Hall, pp.206-211.
  4. Chen H., and Lee, C. F. (2002), Runout analysis of slurry flows with Bingham model, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.12, pp.1032-1042.
  5. Cho, S. E. and Lee, S. R. (2002), Evaluation of Surficial Stability for Homogeneous Slopes Considering Rainfall Characteristics, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.9, pp.756-763.
  6. Iverson, R. M. (2000), *Landslide triggering by rain infiltration*, *Water Resources Research*, Vol.36, No.7, pp.1897-1910.
  7. Johnson, A. M. (1970), *Physical processes in geology*, San Francisco, Freeman, Cooper.
  8. Mein, R. G., and Larson, C. L. (1973), *Modeling infiltration during a steady rain*, *Water Resources Research*, Vol.9, No.2, pp.384-394.
  9. Takahashi T. (1991), *Debris Flow*, Rotterdam, Balkema.

(접수일자 2005. 6. 13, 심사완료일 2005. 11. 9)