

토석류 이동의 레올로지적 특성

Rheological Characteristics of Debris Flows

김 상 규*¹

Kim, Sang-Kyu

서 흥 석*²

Seo, Heung-Seok

Abstract

It is observed that debris mixed with a wide range of soil particles and water moves downwards like viscous fluid soon after a landslide has triggered. An Assumption can be made from the field observation that the debris flow behaves as a kind of non(non-Newtonian) Newtonian fluid which has non linear viscosity. In this study, a series of viscosity tests are carried out to measure rheological properties of debris by using a viscometer with samples taken from a landslide site. It is proved that debris flows behave as Bingham plastic model of non-Newtonian fluid. This model can be used to predict the movement of debris flows.

요 지

토석류는 다양한 크기의 흙 입자와 물이 고루 섞여 점성을 가진 유체처럼 하방향으로 이동한다는 사실이 관찰되었다. 이 관찰로부터 토석류를 비선형적인 점도를 가진 비뉴톤 유체처럼 거동하는 것으로 간주할 수 있다. 이 논문에서는 토석류의 레올로지적 특성을 규명하기 위해 산사태 현장에서 채취한 시료를 가지고 점도계를 사용하여 일련의 점도시험을 수행하였다. 그 결과, 토석류는 비뉴톤 유체 중 빙함 소성 모델로 거동한다는 사실이 밝혀졌다. 이 모델을 이용하면 토석류의 이동을 예측할 수 있다.

Keywords : landslide, debris flows, Non-newtonian fluid, Non linear viscosity, Bingham plastic model

1. 서 론

우리나라의 자연사면에서 발생하는 산사태는 하절기의 집중강우시 얇은 깊이의 풍화토층을 따라 발생하는 것이 일반적이며 활동된 흩덩이는 과도한 수분을 포함하면서 토석류

(debris flow)로 전환되는 특징을 보인다(김, 1994). 토석류는 점토질의 입자로부터 커다란 바위에 이르기까지 다양한 크기의 입자로 이루어져 있으며 많은 경우 대단한 침식력을 갖고서 주위 지형이나 지반을 침식한다. 이는 지형의 경사, 임상 등의 영향에 따라 이동속도가

*¹ 정희원, 동국대학교 공과대학 토목공학과 교수

*² 정희원, 영동전문대학 토목과 전임강사

달라지나 보편적으로 빠른 속도로 하방향으로 이동하며 평탄한 사면에 도달하면 퇴적되면서 경우에 따라서는 막대한 인명과 재산상의 피해를 야기시키게 된다.

토석류로 인한 피해를 막기 위해서는 이의 발생원인을 제거하거나 사면활동의 저항력을 증가시키는 방법이 있으나 실제로 현장여건에 따라서는 대부분 이 두가지 방법 모두 그 효과 뿐만 아니라 경제성 측면에서 어려움이 있는게 사실이다. 따라서 토석류에 대한 대책은 그 피해를 최소화하는 관점에서 고려되어 토석류가 예상되는 지역에서의 구조물 건설을 피하거나 그 지역의 사용을 제한하도록 하는 것이 비중 있게 검토되어야 할 것이다. 이를 위해서는 토석류의 이동범위를 합리적인 판단에 근거하여 정확히 예측하는 것이 우선 필요하게 된다.

본 논문에서는 토석류로 인한 피해범위를 파악하기 위하여 토석류의 이동에 관한 현상을 연구하였다. 토석류는 흙 입자와 물이 섞여 하나의 점성체로 이동한다는 사실이 관측되었다. 그러므로 토석류의 이동은 점성을 갖는 유체의 이동으로 간주할 수 있으며 유체의 레올로지(rheology) 성질을 적절히 규명하면 이에 근거하여 토석류의 이동을 해석할 수 있다. 많은 연구결과에 의하면 토석류는 고분자와 같이 비선형적인 점도를 보이는 비뉴턴(non-Newtonian) 유체로 거동한다. 비뉴턴 유체의 흐름을 해석할 때 이에 가장 영향을 미치는 요소는 점도특성이다. 따라서 본 논문에서는 점도시험기를 이용하여 산사태가 발생된 지역의 토질에 대하여 점도특성을 규명하였다. 그리고 이에 근거하여 토석류의 이동에 관한 매커니즘을 연구하였다.

2. 문헌고찰

세계 도처에서 다양한 매커니즘에 의해 발생하는 토석류를 해석하고자 하는 시도가 오랜 기간동안 계속되어 왔다. 이에 따라 각 지역의 환경에 적절한 해석모델들이 개발되었다. 지금까지 연구되어온 사면활동에 관한 동적모델은

연속체 역학에 근거한 모델과 한 위치에서 활동에 대한 거동을 이상화시키는 럼프트 매스 모델(lumped mass model)로 구분된다.

연속체 역학모델은 유체의 성질을 표현할 수 있는 레올로지 수식과 연관되어 있으며 중력을 받은 유체의 흐름을 계산하는데 이용된다. 즉 실험결과에 의하여 토석류의 성질을 어떠한 수식으로 표현하느냐에 따라 그림 1과 같이 여러 레올로지 모델들이 개발되었다. 이는 토석류가 발생된 지역의 토질에 대한 입도분포와 함수조건에 따라 달라진다.

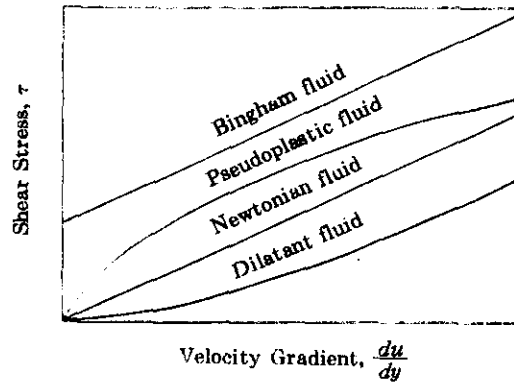


그림 1. 레올로지 모델

토석류를 초기에 연구한 사람들은(Sharpe and Nobles, 1953) 토석류를 속도구배-전단응력의 관계가 원점을 통과하며 직선적인 관계를 보이는 식 1의 뉴턴유체로 간주하여 해석하였다.

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

여기서, τ : 전단응력

μ : 점성계수

$\frac{\partial u}{\partial y}$: 속도구배

Chen(1983)은 토석류의 항복규준과 팽창성을 기술하기 위하여 식 2와 같은 빙함 소성(Bingham plastic) 모델을 제안하였다. 이 모델은 진흙흐름이나 고농도흐름에서 실제와 부

합하는 결과를 보이는 것으로 보고되고 있다 (O'Brien and Julien, 1985).

$$\tau = \tau_v + \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

여기서, τ : 전단응력

τ_v : 항복응력

μ : 점성계수

$\frac{\partial u}{\partial y}$: 속도구배

이 이외에도 슈도플라스틱(pseudo-plastic) 유체모델에서는 전단응력이 속도구배의 지수 형태로 표시되며 Yano and Daido(1965)는 이 모델을 이용하여 진흙 흐름의 거동을 해석하였다. O'Brien and Julien(1985)은 유체의 항복응력, 유체와 입자의 점성적 상호작용 그리고 난류성 응력과 분산응력을 고려하는 레올로지 모델을 제안하였다. 또한 고농도 혼합물은 Mohr-Coulomb의 기준을 따르는 경향이 있으며 이는 항복강도, 마찰저항 그리고 점성저항으로 결합되어 표시될 수 있다. Johnson(1970)은 이를 Coulomb 점성모델로 불렀다.

어느 모델이 흐름을 가장 잘 묘사할 수 있는지의 여부는 시행착오를 하여 결정할 수 있다. Rickermann(1991)은 만약 점성이 적절히 평가된다면 뉴턴유체 모델도 가파른 수로에서의 토석류에 적용가능하다고 제안하였다. 그러나 이 중 토석류를 취급하는데 가장 잘 개발된 모델들은 빙함 소성 모델에 근거를 둔 것이다 (Mainali and Rajaratnam, 1991).

펄프 매스 모델(Perla et al., 1980)에서는 산사태의 움직임을 계산하기 위해 고체 동역학을 이용하며 마찰과 속도에 의존하는 항에 의해 저항력이 산정된다. 그러나 내부 변형을 고려할 수 없는 한계가 있다. 이 방법이 비록 활동 토괴의 움직임을 합리적인 방법으로 제시할 수는 있지만 이동거리를 분석하는데 가장 중요한 흐름 전면의 거동을 묘사할 수 없다는 단점이 있다(Evans et al., 1994).

3. 토석류 이동에 대한 구성방정식

본 논문에서는 토석류를 점도를 갖는 유체의

흐름으로 간주하였다. 이 때 점도는 실험을 통하여 구명될 수 있으며 이에 근거하여 점도를 갖는 유체흐름은 다음의 식들로 표현된다.

비압축성 유체에 대한 질량보존법칙으로부터 연속방정식은 식 3과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

여기서, \mathbf{v} : 속도벡터

또한 ρ 를 유체의 밀도, \mathbf{f} 를 단위질량 당 물체력이라 할 때 운동방정식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{f} = \frac{D\mathbf{v}}{Dt} \quad (4)$$

식 4에서 Cauchy의 응력텐서 $\boldsymbol{\sigma}$ 는 임의의 등방텐서에 대해 다음과 같이 정의된다.

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \mathbf{T} \quad (5)$$

여기서, $\boldsymbol{\sigma}$: 응력텐서

p : 압력

\mathbf{I} : 단위텐서

\mathbf{T} : 추가응력텐서

일반화된 뉴턴유체에 대하여 식 5의 추가응력텐서 \mathbf{T} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{T} = 2\eta(\dot{\gamma}, T)\mathbf{D} \quad (6)$$

여기서, \mathbf{T} : 추가응력텐서

η : 속도구배 $\dot{\gamma}$, 온도 T 에 따라 변하는 점도

$$\mathbf{D} : \text{변형텐서율} (\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \mathbf{v}^T))$$

이 때 $\eta(\dot{\gamma}, T)$ 는 속도구배와 온도에 의존하는 성분으로 식 7과 같이 구분된다. 즉 $F(\dot{\gamma})$ 는 속도구배에 대한 점도를 표시하는 모델로서 토석류의 비뉴턴적인 점성의 영향은 이 항으로 표현된다. 그리고 $H(T)$ 는 온도에 의존하는 성분으로 산사태 발생시 다른 요소보다 온도는 그리 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되어 본 해석에서는 이의 영향을 무시하였다.

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = F(\dot{\gamma})H(T) \quad (7)$$

4. 점도시험 및 결과분석

4.1 점도시험을 위한 시료의 선택

기본적으로 토석류는 다양한 크기의 입자들

과 물이 섞여 구성되며 때로는 커다란 돌과 나무 등이 포함되기도 한다. 이 중 커다란 입자들은 경사면을 따라 중력, 마찰 그리고 회전에 의해 이동된다. 그러나 이러한 입자들은 세립자와 함께 움직이는 것이 관측된다. 이는 많은 연구자(Johnson, 1970; Rodine and Johnson, 1976)들에 의해 확인된 것으로 그들은 이를 부력현상 등으로 설명하였다. 그러므로 물과 섞인 세립질의 성질이 토석류의 이동을 지배하는 것으로 간주할 수 있다.

본 논문에서는 1991년 7월 21일 안성군 미리내 성지지역에서 발생한 토석류의 퇴적물을 점도시험의 시료로 선정하였다. 채취된 시료에 대하여 입도분석 실험을 수행한 결과, 그림 2에서와 같이 통일분류법 상 GP, SP로 분류되었다.

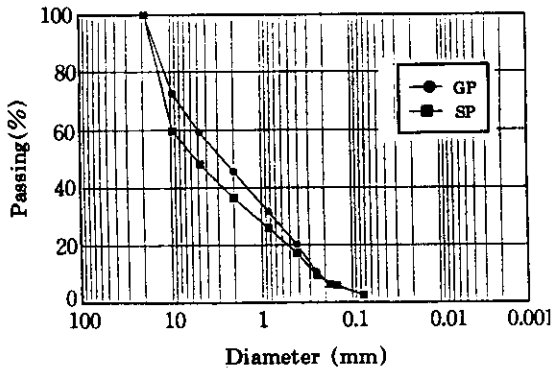


그림 2. 점도시험시 사용한 시료의 입도분포곡선

토석류가 점성체로 거동하는데는 주로 세립자의 영향이 크다. 그러므로 기존에 토석류에 대한 점도실험은 대부분 세립토에 대해 수행되었다. O'Brien and Julien(1988)은 점도시험을 수행할 때 점도계 양 실린더 간격의 1/10배 이하의 입경을 갖는 시료를 사용할 것을 권고하였다. 그러므로 본 논문에서는 토석류 퇴적물 시료 중 직경 0.1mm 이하의 시료를 시험시료로 선정하였다. 이 시료는 전체 채취된 시료의 약 4%의 비율이다.

점도는 함수조건에 따라 변하게 된다. 점도

시험을 수행할 때 함수조건은 주로 농도로 표시된다. 그러나 지반공학적으로 보다 이해를 돕기 위하여 본 논문에서는 농도를 함수비로 환산하여 표시하였다. 즉 일정량의 흙에 물을 점차적으로 증가시키는 방식으로 함수비가 43, 67, 100, 150%로 변하게 될 때 각각에 대한 일련의 점도시험을 수행하였다. 이들 함수비 값은 무게비 농도 0.4~0.7에 대응하는 값이다.

4.2 점도시험

토석류의 물리적 성질을 측정하는 것은 뉴턴 유체의 점도를 측정하는 것 보다 훨씬 복잡하다. 비뉴턴유체의 점도를 측정하는데는 3종류의 시험기구 즉 (1) 모세관 점도계, (2) 회전점도계 그리고 (3) 콘-평판 점도계가 있다.

본 논문에서는 그림 3과 같은 콘-평판 점도계의 일종인 Rheometrics Mechanical Spec-

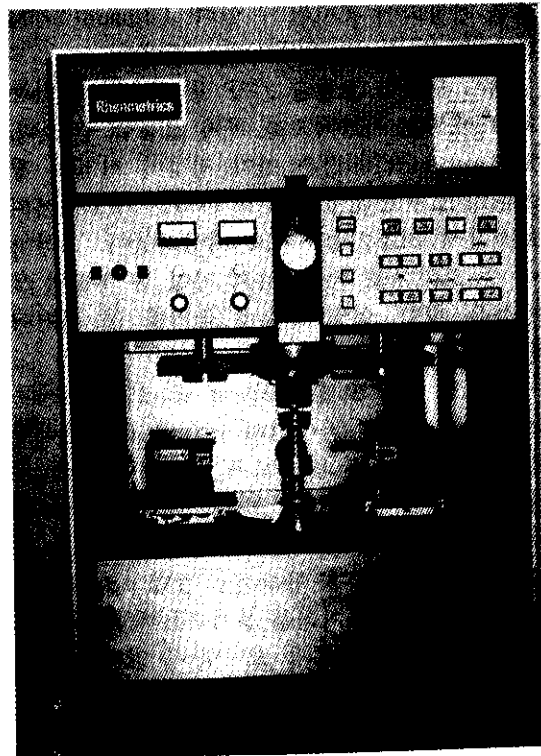


그림 3. RMS-800 점도시험기

trometer(RMS-800) 시험기를 이용하였다. 본 시험기는 시험시료의 점탄성 성질을 파악하기 위한 역학시험에 주로 이용되며 동적, 정적 시험을 수행할 수 있다. 동적 시험은 시료의 동역학적 특성을 파악하는데 이용된다. 정적 시험에서는 시료에 연속적인 회전을 가하여 일정한 속도구배에 도달될 때의 정적인 반응이 측정된다. 이러한 원리를 이용하여 속도구배가 점차적으로 증가할 때 각 단계에서 시료의 반응이 연속적으로 측정된다.

본 연구에서는 정적인 점도시험을 수행하였다. 그림 4에서와 같이 두 평판사이의 간격을 0.5~2mm로 유지하여 그 사이에 시료를 채우는 것이 권고되므로 본 시험에서는 시료의 두께를 1mm로 하여 정적시험을 실시하였다. 이때 외부실린더에 연결된 actuator를 통하여 주

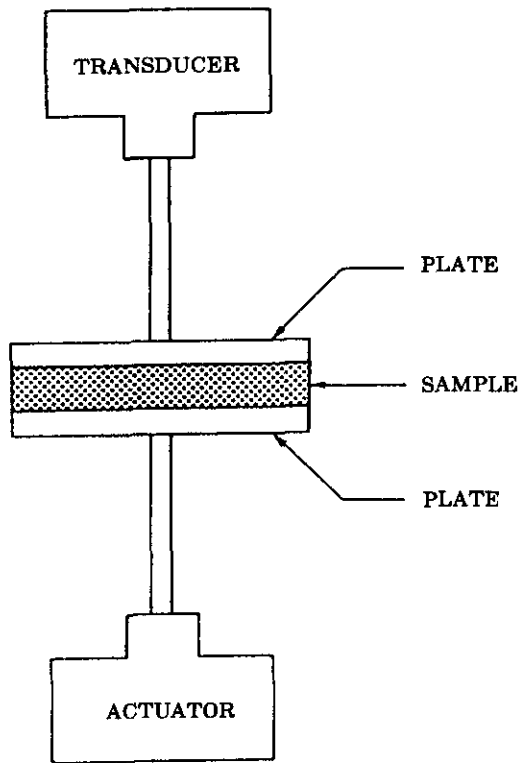


그림 4. 점도시험의 원리

어진 속도구배로의 회전이 가해지면 내부실린더에 연결된 트랜스듀서로부터 시료의 반응이 전달된다. 즉 이로부터 전단응력이 측정된다. 측정된 전단응력과 속도구배의 비로부터 각각의 속도구배에 대한 점도가 결정된다.

점도시험을 수행할 때 속도구배의 범위는 50sec^{-1} 이하로 선택하였다. 이는 현장에서 측정된 속도구배가 대부분 이 범위의 값을 보이며 이보다 큰 속도구배에서는 항복응력 값은 커지고 점도는 낮게 측정되기 때문이다(Maa, 1990).

4.3 점도시험결과 분석

그림 5는 점도시험 결과 중 속도구배에 대한 전단응력의 관계로서 어느 한계까지는 가파르게 증가되지만 이 이후로 거의 일정한 비율로 완만하게 증가하는 경향을 보인다. 또한 함수비에 따라 다른 양상을 보인다. 이들 곡선들은 그림 1의 여러 모델에서 빙함 소성(Bingham plastic) 모델과 가장 유사한 형태를 보인다. 그러므로 본 해석지역의 토질에 대한 레올로지 특성은 빙함 소성 모델로 이상화시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

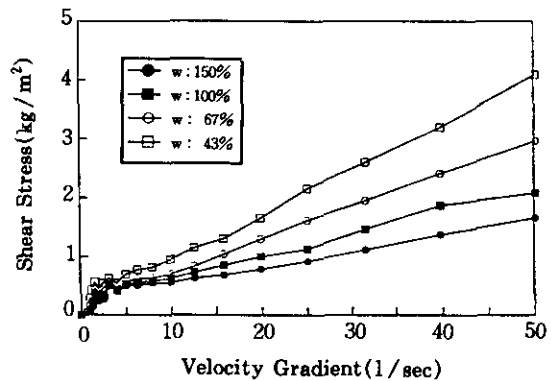


그림 5. 점도시험결과(속도구배-전단응력)

그림 6은 속도구배에 대한 점도의 관계이다. 점도는 낮은 속도구배에서 최대치를 보이며 그 이후로는 갑작스럽게 감소하다가 거의 일정한

값을 보인다. 또한 이 그림으로부터 토석류의 점도는 함수비에 따라 변한다는 것을 알 수 있다. 이들 실험곡선으로부터 토석류의 이동해석에 필요한 변수들은 식 8의 빙함 소성 모델의 표현식에 근거하여 결정될 수 있다.

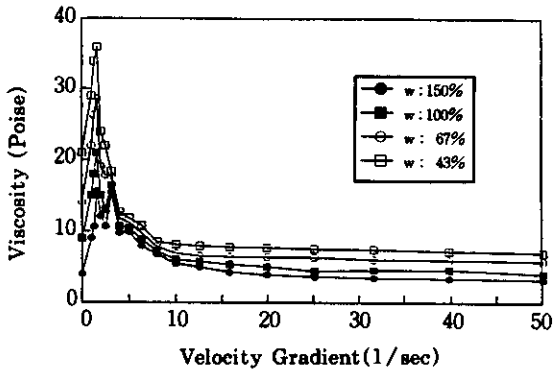


그림 6. 점도시험결과(속도구배-점도)

$$\eta = \eta_0 + \tau_s / \dot{\gamma} \quad \dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_c \quad (8)$$

$$\eta = \eta_0 + \tau_s \left(2 - \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right) / \dot{\gamma}_c \quad \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c$$

여기서, η_0 : 속도구배가 0일 때의 점도

$\dot{\gamma}_c$: 한계속도구배

τ_s : 항복응력

여기서 $\dot{\gamma}_c$, τ_s 는 속도구배-전단응력 관계곡선에서 곡선의 기울기가 급격히 변화되는 지점에서의 한계속도구배, 항복응력 값이다. 그리고 η_0 는 속도구배-점도의 관계곡선에서 속도구배가 0일 때의 점도이므로 종축과 만나는 점의 값이 된다. 이들 값을 각각의 함수비에 대해 결정한 결과가 표 1에 제시되었다.

표 1. 빙함 소성 모델의 매개변수

| w(%) | η_0 (P) | $\dot{\gamma}_c$ (1/sec) | τ_s (kg/m ²) |
|------|--------------|--------------------------|-------------------------------|
| 150 | 4.0 | 2 | 0.32 |
| 100 | 9.0 | 2 | 0.37 |
| 67 | 14.0 | 2 | 0.41 |
| 43 | 21.0 | 2 | 0.45 |

이로부터 토석류를 점성체로 간주할 때 이는 비선형적 점도를 갖는 비뉴턴유체인 것이 실험으로 판명되었다. 그 중에서도 빙함 소성 모델의 전형적인 거동을 보이게 된다. 그러므로 점도실험으로부터 규명된 이러한 레올로지 특성과 비뉴턴 유체의 흐름을 적절히 표현할 수 있는 구성방정식을 이용하면 토석류의 거동을 합리적으로 묘사할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 토석류로 인한 피해를 감소시키기 위하여 토석류의 이동에 대한 레올로지 특성을 연구하고자 하였다. 이를 위해 산사태 발생지역의 시료에 대한 점도실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 토석류는 넓은 범위의 입도분포를 보이는 흙과 물이 섞여서 구성되어 점도를 갖는 유체처럼 거동한다는 사실이 현장관찰로부터 밝혀졌다. 이 때 토석류에 포함된 커다란 입자들은 세립자와 물의 혼합물에서 부력 등에 의해 이동된다. 그러므로 토석류를 점성체로 간주하여 이동해석을 할 때 이에 주로 영향을 미치는 것은 세립질의 성질일 것으로 판단된다.
- 2) 토석류의 이동특성을 알기 위해서는 세립질의 성질을 파악하여야 한다. 이를 위해 산사태 발생지역의 토석류 퇴적물에서 적절한 입경의 시료를 선정하여 점도계를 이용하여 점도시험을 수행하였다. 실험결과, 이 지역 토질의 성질은 비뉴턴(non-Newtonian) 유체인 빙함 소성(Bingham plastic) 모델로 표현될 수 있음을 알 수 있었다.
- 3) 점도실험으로부터 얻어진 결과치와 이에 근거하여 선정된 비뉴턴 유체 모델, 그리고 유체의 흐름을 표현할 수 있는 구성방정식을 이용하면 토석류의 이동을 예측할

수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 1992년 한국과학재단의 목적기초 연구비지원에 의해 수행되었음을 밝히며 실험에 도움을 주신 서울대 화공과 안명진군께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김상규(1994), "한국에서 발생하는 지반활동", *Proceedings, East-Asian Symposium on Landslides and Debris Flows*, Seoul, pp. 75-99.
2. Chen, C. L.(1983), "On frontier between rheology and mudflow mechanics", *Proceedings of the 1983 Hydraulic Division Specialty Conference on Frontiers in Hydraulic Engineering*, ASCE, MIT, Cambridge, MA, pp. 113-118.
3. Evans, S. G., Hungr, O., and Enegren, E. G. (1994), "The Avalanche Lake rock avalanche, Mackenzie Mountains, Northwest Territories, Canada: description, dating, and dynamics", *Canadian Geotechnical Journal*, 31, pp. 749-768.
4. Johnson, A. M.(1970), *Physical processes in geology*, Freeman, Cooper and Company, pp. 431-571.
5. Johnson, A. M. and Rodine, J. R.(1984), "Debris flow", chapter 8 in Brunnsden, D. and Prior, D. B., Eds., *Slope Instability*, John Wiley and Sons, New York, pp. 257-361.
6. Maa, P. Y.(1990), "Discussion of laboratory analysis of mudflow properties", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 116, pp. 299-301.
7. Mainali, A. and Rajaratnam, N.(1991), "Hydraulics of debris flows, A review", *Water Resources Engineering Report(WRE 91-2)*, University of Alberta.
8. O'Brien, J. S. and Julien, P. Y.(1985), "Physical Properties and mechanics of hyper-concentrated sediment flows", *Proceedings of the Specialty Conference on Delineation of Landslide, Flash Flood and Debris Flow Hazard in Utah*, Utah State University, Utah, pp. 260-279.
9. O'Brien, J. S. and Julien, P. Y.(1988), "Laboratory analysis of mudflow properties", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol. 114, No. 8, pp. 877-887.
10. Perla, R., Cheng, T. T., and McClung, D. M.(1980), "A two-parameter model of snow avalanche motion", *Journal of Glaciology*, 26, pp. 197-207.
11. Richermann, D.(1991), "Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 11, pp. 1419-1439.
12. Sharpe, R. P. and Nobles, L. H.(1953), "Mudflow of 1941 at Wrightwood, Southern California," *Bulletin of Geological Society of America*, Vol. 64, pp. 547-560.
13. Yano, K. and Daido, A.(1965), "Fundamental study on mudflow", Kyoto, Japan, Kyoto University, *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*, Vol. 14, pp. 69-83.

(접수일자 1997. 7. 15)