레올로지 모델을 이용한 토석류 이동해석

An Analysis of Debris Flow Movements Using Rheological Model

김 상 규*1
Kim, Sang-Kyu
서 흥 석*2
Seo, Heung-Seok

Abstract

It was proved from the viscosity test for deposits of debris flows(Kim and Seo, 1997) that the property of debris flows could be represented as Bingham plastic model. Based on this bahavior, numerical analysis for the movement of debris flows is carried out by using a computer program, Polyflow which has been developed for the analysis of the behavior of non-Newtonian fluid. The numerical results obtained from two sites agree well with the movement predicted by an empirical formula. It can be concluded, therefore, that this scheme can be used for the analysis of the movement of debris flow.

요 지

기존에 발생된 토석류 퇴적물에 대한 점도실험으로부터 세립질의 성질이 빙함 소성(Bingham plastic) 모델로 표현될 수 있다는 사실이 판명되었다. 이러한 사실과 비뉴톤유체의 흐름을 해석할 수 있도록 개발된 수치해석 프로그램 Polyflow를 이용하여 토석류의 이동을 해석하였다. 그 결과 실제와 유사한 이동결과가 얻어졌으므로 토석류의 이동은 이와 같은 기법으로 해석할 수 있다는 것을 알게 되었다.

Keywords : Bingham plastic model, movement, debris flows, non-Newtonian fluid,

1. 서 론

우리나라에서 발생되는 산사태는 주로 평행활동으로 파괴되어 대부분 토석류(debris flows)로 전환되는 특징을 갖고 있다. 토석류는 갑작스럽게 그리고 빠른 속도로 발생되기 때문에 이의 이동과 침식지역에서는 상당한 피해를 입게 된다.

토석류에 대한 대책은 그 피해를 최소화하는 관점에서 고려되어 토석류가 예상되는 지역에서의 구조물 건설을 피하거나 그 지역의 사용을 제한하도록 하여야 한다. 이를 위해 토석류 발생시 이의 이동범위를 합리적인 판단에 근거하여 정확히 예측하는 것이 우선 필요

*1 정회원, 동국대학교 공과대학 토목공학과 교수
*2 정회원, 영동전문대학 토목과 전임강사

하게 된다.

본 논문에서는 현장관측에 근거하여 토석류의 이동을 점성을 갖는 유체의 이동으로 간주하였다. 이와 같은 개념에 근거하여 토석류의 이동을 해석하기 위해서는 우선 토석류의 성질을 실험을 통하여 규명하여야 한다. 실험결과 토석류의 성질은 빙함 소성 모델(Bingham plastic model)로 판명되었으므로(김, 서, 1997) 이에 근거하여 토석류의 이동을 해석하였다. 이 해석에 있어서는 비뉴톤적인 성질의 흐름까지 해석할 수 있도록 화학공학 분야에서 개발된 유한요소 프로그램 Polyflow(Place de l'Universite, 1992)가 이용되었다. 해석대상지역으로 1991년 7월 토석류가 발생한 용인군 남사면 창리와 안성군 이동면 묘봉리지역을 선정하였다.

2. 연속체역학 모델

토석류를 해석하는데는 연속체역학 모델과 럼프트 매스 모델(lumped mass model)로 대별할 수 있으나 본 논문에서는 연속체역학에 근거하여 토석류의 이동을 해석하고자 하므로 이에 대해 고찰하기로 한다.

연속체역학 모델에서는 토석류가 발생된 지역의 토질에 대해 점도시험을 수행하여 점도특성을 규명한다. 이는 각 지역 토질의 입도분포 상태, 함수조건 등 여러 요인에 의하여 다른 특성을 보이게 된다. 실험결과에 의하면 뉴톤모델, 빙함 소성 모델, 슈도플라스틱 모델, Coulomb 점성모델 등 여러 모델들이 제안되었다. 이 중 뉴톤모델을 제외하면 나머지 모델들은 속도구배-전단응력의 관계가 비선형적인 관계를 보이므로 이는 비뉴톤유체라 부른다.

제안된 여러 모델 중 토사흐름을 취급하는데 가장 잘 개발된 모델은 빙함 소성 모델에 근거한 모델이다. Jeyapalan(1981)은 갑작스럽게 발생하는 댐파괴와 같은 비정상류 흐름에 관심을 집중하였으며 선형점성(뉴톤) 층류흐름과 점소성(빙함 소성) 흐름에 관한 해를 유도하였다. Fread(1988)는 지수법칙을 이용하여 유사한 해를 제시하였다. Dent(1982)는 빙함 소성 모델과 유사한 쌍일차 레올로지 모델을 이용하여 뉴톤 비정상흐름 프로그램을 수정하였다. Sousa and Voight(1991)는 여러 암사태 사례에서와 같이 흐르는 물질의 레올로지 거동을 모델화하기 위해 Dent(1982)의 프로그램(BVSMAC)을 이용하였다.

토석류 모델링에서 가장 어려운 점은 모델선택의 문제이다. 지금까지 개발된 모델들은 단순한 점소성(빙함 소성) 모델로부터 급속한 속도로 움직이는 입상흐름을 연구하기 위한 매우 이론적인 모델에 이르기까지 다양하다(McTigue, 1978). 이론적인 모델은 실용적이지 못한 반면 단순한 모델은 제한된 범위에서만 만족스런 경향이 있다. 대부분의 연구는 단순한 모델을 이용하여 수행되었다. 어느 모델이 토석류를 정확히 묘사할 수 있는지의 여부는 결정하기 어렵지만 많은 시행착오를 통하여 결정될 수 있으며 본 연구대상지역에 대해서는 빙함 소성 모델이 적절할 것으로 판단된다.

3. 수치해석 기법 및 입력자료

3.1 수치해석 프로그램

화학, 식품공학 분야에서는 폴리머와 고무제조과정, 식품레올로지와 같은 흐름과정을 유체흐름으로 간주하여 해석한다. 이러한 흐름은 순수한 물의 흐름과는 달리 점도가 일정치 않은 비뉴톤(non-Newtonian) 유체로 거동하게 된다. 한편 산사태로 인하여 발생된 파괴된 토괴는 수분을 흡수하여 점성을 갖은 유체와 같이 하방향으로 이동되어 토석류로 전환된다. 그래서 본 논문에서는 토석류를 비선형적인 점성특징을 보이는 비뉴톤 유체흐름으로 묘사하였다.

본 논문에서는 비뉴톤유체의 거동을 해석할 수 있도록 개발된 유한요소 프로그램 Polyflow(Place de l'Universite, 1992)를 이용하

여 토석류의 이동을 해석하고자 한다. 이 프로그램은 주로 화학공학 분야에서 이용되는 것으로 유체의 레올로지 거동을 해석하기 위해 연속체역학 원리에 근거를 두고 있다. 이는 뉴톤 유체 뿐만 아니라 비선형적인 점성현상과 점탄성 효과에 의해 지배되는 흐름과정 까지도 분석할 수 있다. 또한 등온, 비등온, 2, 3차원, 정상류, 비정상류해석이 모두 가능하다.

3.2 해석대상지역

본 논문에서 선택된 수치해석모델을 검증하기 위하여 안성군 이동면 묘봉리와 용인군 남사면 창리지역을 해석대상으로 선정하였다. 이들 지역에서는 1991년 7월 21일 시간당 최고 64.5mm의 강우로 인하여 산사태가 발생되었다.

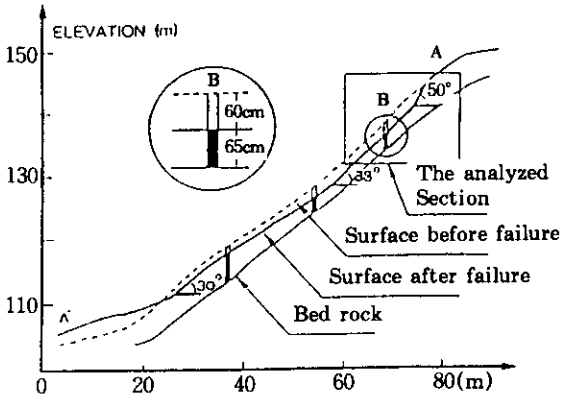


그림 1. 묘봉리 산사태지역의 대표단면

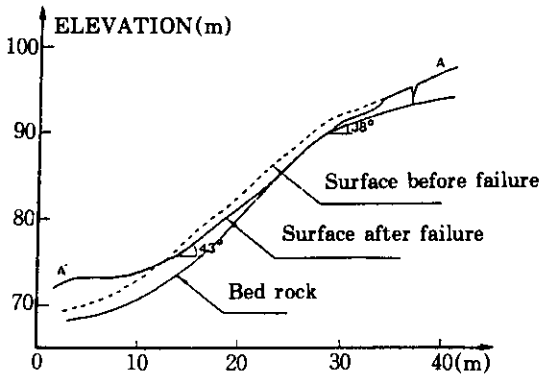


그림 2. 창리 산사태지역의 대표단면

그림 1은 묘봉리지역의 중리저수지 부근 계곡에서 발생된 산사태 중 가장 규모가 큰 산사태지역의 단면도이다. 그림 2는 창리지역에서 발생된 산사태 중 하나로 길이 40m, 폭 20m 정도의 소규모이다.

3.3 해석단면

묘봉리, 창리지역에서 발생한 토석류를 해석하기 위하여 그림 1, 2의 실측된 단면에 근거하

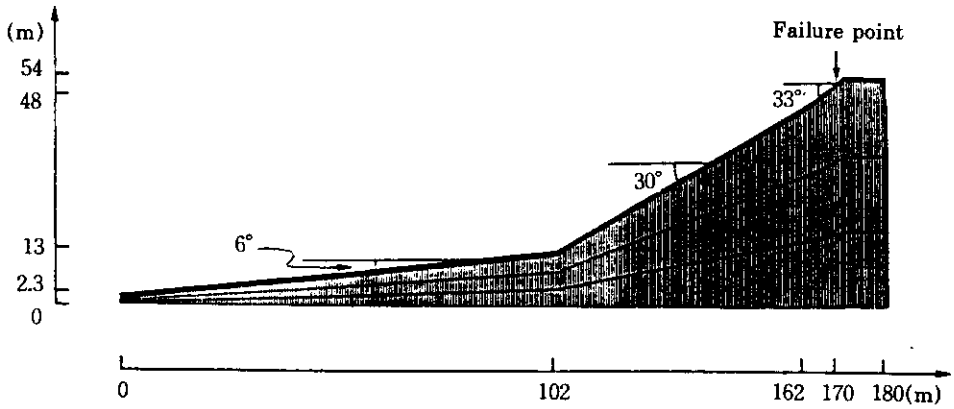


그림 3. 묘봉리 해석단면의 유한요소망

여 유한요소망을 구성하였다.

그림 3은 묘봉리지역에 대한 유한요소망으로 사면은 30~33° 경사지며 기반암 위의 토층은 사면파괴 발생 측면부의 시추시험 결과에 의하여 1.2m의 균일한 두께로 구성된다. 이동된 토괴의 퇴적이 발생하는 하부경사는 실측경사인 6°로 설정하였다.

창리지역은 그림 4와 같이 사면이 38~43°로 경사진다. 상부토층은 시추시험 결과에 의해 0.45m 두께로 설정하였으며 하부지역은 경작지로서 1m의 두께로 분포하는 것으로 가정하였다. 또한 퇴적이 발생하는 하부경사는 실측경사인 2°로 설정하였다.

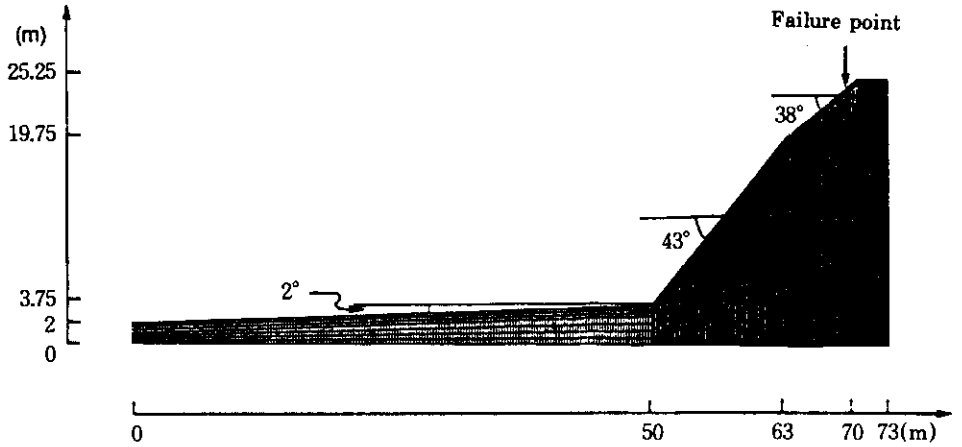


그림 4. 창리 해석단면의 유한요소망

3.4 경계조건

뉴톤, 비뉴톤유체의 흐름은 유체의 흐름을 표현하는 연속방정식과 Navier-Stocks의 운동방정식을 이용하여 묘사할 수 있다. 이 때 뉴톤, 비뉴톤 유체로 구분되는 점도의 영향은 운동방정식에서 추가응력텐서에 의해 반영된다(김, 서, 1997). 여기서는 수치해석시 적용되는 경계조건에 대해 서술하고자 한다.

3.4.1 초기 및 경계 조건

흐름영역 $\partial\Omega$의 경계에서 속도성분이나 표면인장성분은 다음과 같이 명시 되어야 한다.

$$\mathbf{v}=\overline{\mathbf{v}}\ (\mathbf{x},\ t) \qquad \mathbf{x}\in\partial\Omega_v \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{\sigma}\cdot\mathbf{n}=\overline{\mathbf{t}}\ (\mathbf{x},\ t) \qquad \mathbf{x}\in\partial\Omega_t$$

$\mathbf{v}$: 속도벡터

$\boldsymbol{\sigma}$: 응력텐서

$\mathbf{n}$: 외향법선벡터

$\overline{\mathbf{v}}$, $\overline{\mathbf{t}}$: 속도, 견인력에 관한 함수

$\partial\Omega=\partial\Omega_v\cup\partial\Omega_t$

묘봉리, 창리지역에 대한 경계조건으로 단면의 양측단과 하단 그리고 상부단면의 파괴 시작점 위는 접선방향과 수직방향의 속도를 0으로 즉 $v_s=v_n=0$으로 설정하였다. 상부단면의 파괴 시작점 아래는 자유면으로서 기반암 위의 토층은 점도를 갖는 유체로 간주되어 중력에 의해 흐르게 된다. 이 때 파괴가 시작되는 위치는 실제 파괴시작 위치를 직접 측정하여 설정하였다.

토층과 기반암 사이의 경계조건은 식 2의 Navier법칙을 적용하여 설정할 수 있다. 이 식에서 경계면의 속도는 기반암이 고정되어 있는 것으로 간주할 수 있으므로 0으로 설정하였으며 계수 F_{slip}, Ex_{slip}은 사면 각 부분의 경사면 방

향에 대해 계산된 전단력에 대응하는 값으로 산정하였다.

$$f_s = F_{slip}(v_{wall} - v_s)\frac{|v_{wall} - v_s|^{Exslip}}{|v_{wall} - v_s|} \quad (2)$$

f_s : 벽면의 접선방향 전단력

F_{slip}, Ex_{slip} : 재료상수

v_{wall} : 벽면의 접선방향 속도

v_s : 유체의 접선방향 속도

3.4.2 자유면

자유면 문제는 경계의 위치를 알 수 없는 즉 경계의 위치가 해로서 해결될 때 발생한다. 이 때는 고정된 경계를 갖는 흐름문제와는 대조적으로 새로운 식이 도입되며 자유면에 대한 정의는 수직력, 수직방향의 속도와 더불어 접선 표면력으로 명시된다. 정상류(steady-state), 시간 의존적(transient) 해석에서는 적절한 동적, 운동학적 조건이 적용된다.

3.5 해석시 입력자료

해석대상지역의 토질에 대한 기본특성을 파악하기 위하여 시추시험과 들밀도 시험을 수행하여 표 1과 같은 결과를 얻었다.

표 1. 시추시험과 들밀도시험 결과

지역	위치	깊이 (m)	비중	함수비 (%)	간극율	γ_t (t/m^3)	γ_{sat} (t/m^3)
묘봉리	측면부	0.2	2.44	15.7	0.46	1.52	1.78
창 리	측면부	0.2	2.65	14.7	0.53	1.42	1.78
		0.4	2.67	12.9	0.53	1.42	1.79

수치해석 프로그램 Polyflow를 이용하여 토석류 이동을 해석하기 위해서는 우선 농도가 결정되어야 한다. 산사태는 집중강우시 발생되므로 강우로 인하여 토층이 완전히 포화되었다고 가정했을 때의 농도는 토질역학적으로 함수비의 함수로 표시될 수 있다$\left(C_w = \frac{W_s}{W}, W_s : 흙입자\ 무게, W : 흙전체무게\right)$. 계산결과 포화시 흙의 상태는 대략 농도 0.7에 해당하므로 이 농도값에 대한 점도실험치를 입력변수로 선택하였다.

각 해석지역에서의 단위중량은 강우로 인하여 지반이 완전히 포화되었다는 조건하에서 포화단위중량을 사용하였으며 해석시 필요한 매개변수를 표 2와 같이 결정하였다.

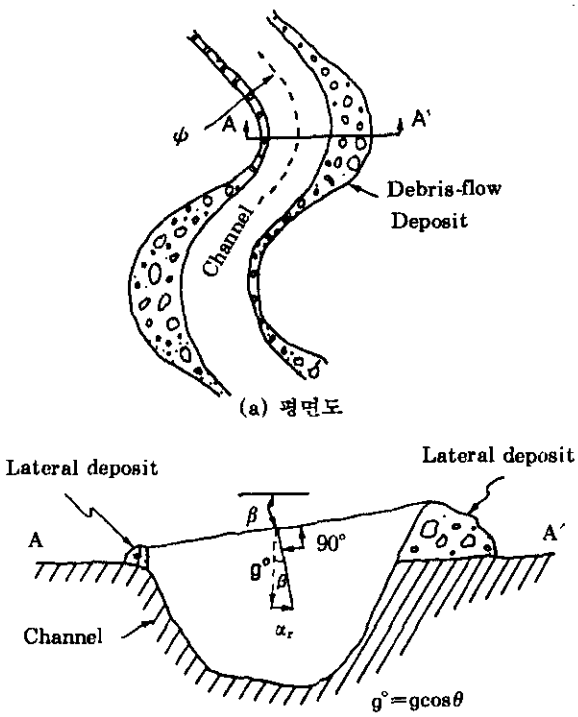
표 2. 해석시 입력자료

해석지역	단위중량 (kg/m^3)	점도			중력가속도 (m/sec^2)
		η_0 (Poise)	$\dot{\gamma}_c$ (1/sec)	τ_y (kg/m^2)	
묘봉리	1780	21.0	2	0.45	9.8
창 리	1780	21.0	2	0.45	9.8

4. 수치해석결과 및 분석

4.1 현장에서의 이동속도 추정

Troxell and Peterson(1937) 등은 토석류가 흘러 수로의 만곡부를 만나게 될 때 일반적으



(b) 수로에서 토석류의 단면

그림 5. 수로의 가파른 만곡부에 인접한 이상화된 토석류 퇴적물 (Johnson and Rodine, 1984)

로 만곡부의 외측에 둑을 쌓게 되어 만곡부 외측의 퇴적물이 내측보다 높다는 것을 관측하였다. 토석류의 이러한 특징으로부터 그림 5에서와 같이 과거에 발생한 토석류의 속도를 평가할 수 있는 방법이 제안되었다(Johnson and Rodine, 1984). 즉 흐름의 곡률반경, 수로의 사면경사 그리고 수로 양벽에서의 침식깊이 차로부터 흐름표면경사 등을 측정하여 식 3으로부터 토석류의 이동속도를 산정할 수 있다.

$$v=[g\psi\cos\theta\tan\beta]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

g : 중력가속도

ψ : 곡률반경

θ : 사면경사

β : 흐름표면경사

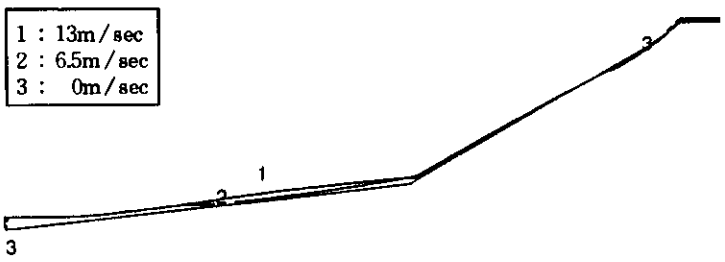
식 3을 이용하여 수치해석 지역과 근접하면서 속도추정이 용이한 곡률반경이 작은 위치에서 토석류의 이동속도를 추정한 결과, 묘봉리, 창리지역에서 각각 5.40, 3.38m/sec가 얻어졌다.

4.2 수치해석결과

각 지역에 대해 실험으로부터 결정된 입력자료와 관측된 파괴위치 등의 경계조건을 입력시켜 해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

묘봉리지역에서는 시간이 경과함에 따라 기반암 위의 토괴가 하부로 이동되어 그림 6과 같은 양상으로 퇴적된다. 그림 6(a)는 흐름양상을 속도벡터도에 보인 것이다. 한편 토석류의 주 흐름방향이 x방향이기 때문에 그림 6(b)와 같이 x방향 등속도선도를 표시하였다. 이때 속도분포는 0~13m/sec로 계산되며 해석지역에서 유추한 속도 5.4m/sec는 이 범위내에 있다.

(a) 속도벡터도

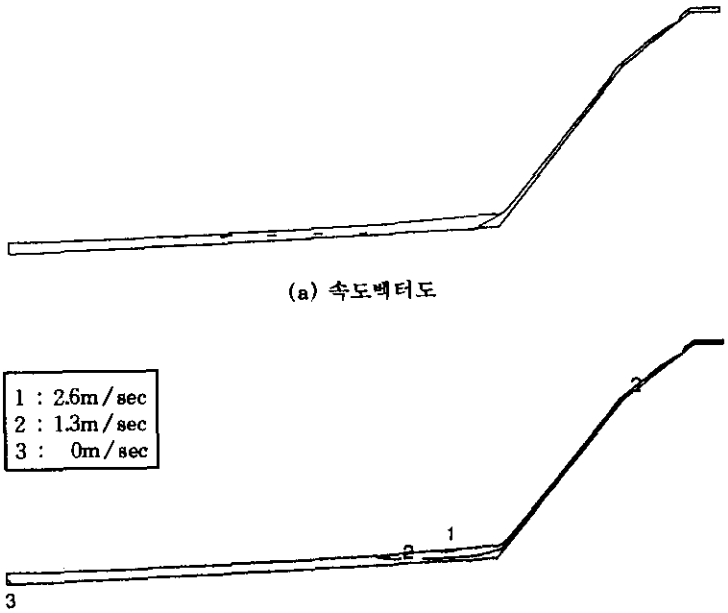


(b) x방향 등속도선도

그림 6. 묘봉리지역의 해석결과

창리지역의 토층 두께는 0.45m로서 묘봉리지역의 1.2m와는 많은 차이가 있다. 또한 단면규모가 작으므로 이동거리를 분석할 때 이동토괴량이 작은 관계로 그림 7에서와 같이 퇴적된 토괴량의 가시적인 확인이 명백하지가 않다. 그러나 묘봉리지역에서와 마찬가지로 토괴의

움직이는 경향은 인지될 수 있다. 해석결과 토괴는 21. 5m를 이동하여 퇴적되었으며 최대속도는 가파른 사면부분에서 2.6m/sec로 얻어졌다. 그러나 창리지역에서 유추된 속도는 3.38m/sec로서 해석결과는 이보다 다소 낮게 산정되었다.



(a) 속도벡터도

(b) x방향 등속도선도

그림 7. 창리지역의 해석결과

4.3 수치해석결과와 현장 유추속도와의 비교

표 3은 각 해석지역에 대한 해석결과 중 이동토괴 부분에 해당하는 유한요소망의 절점들에서 평균속도를 산정한 값과 현장 유추속도를 비교한 것이다. 수치해석 결과 묘봉리지역에서는 수치해석과 현장 유추속도가 거의 비슷하게 계산되었다. 그러나 창리지역에서는 현장 유추속도 보다 수치해석의 결과가 다소 작게 산정되었다. 이러한 차이는 아마 현장속도 추정시의 오차 등으로 인하여 발생된 것으로 추측된다.

표 3. 수치해석결과와 현장 유추속도의 비교

해석지역	수치해석시 평균속도 (m/sec)	현장 유추속도 (m/sec)
묘봉리	5.53	5.40
창 리	2.40	3.38

표 4는 각 해석지역에 대해 토석류 이동거리에 대한 결과를 요약한 것이다.

표 4. 토석류 이동거리에 대한 해석결과

해석지역	최종 이동거리(m)	경과시간(sec)
묘봉리	59.2	7.7
창 리	21.5	11.7

그림 8은 묘봉리, 창리지역에서 수치해석결과를 경과시간에 대한 이동거리의 관계로 나타낸 것이다. 초기에는 느린 속도로 이동되며 어느 정도 시간이 경과되면 빠른 속도로 이동되다가 퇴적이 시작되면서 다시 느린 속도로 변하는 양상을 보인다.

수치해석 결과, 주목할 만한 점은 창리지역의 경사(38~43°)가 묘봉리지역(30~33°)의 경사 보다 가파르지만 흐르는 도중의 상태에 대

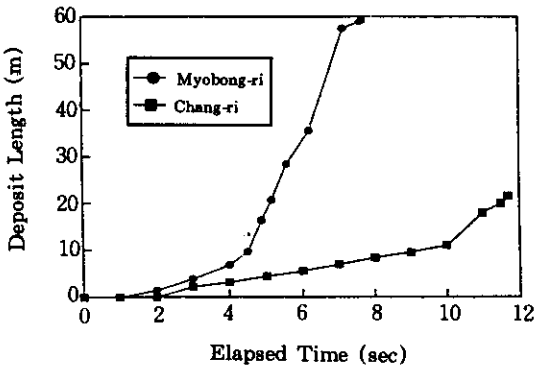


그림 8. 경과시간-이동거리

해 계산된 이동속도는 창리지역이 최대 2.6m/sec로서 묘봉리지역의 13m/sec 보다 훨씬 작다는 것이다. 현장 유추속도에서도 역시 같은 경향을 보인다. 이에 대한 원인으로는 첫째, 묘봉리 해석단면에서 이동된 토괴는 창리지역 보다 약 6.8배가 더 많다. 그러므로 단위폭 당 이동토괴량의 증가는 결국 속도의 증가로 나타나게 된다. 둘째는 경사진 사면의 凹凸효과로서 묘봉리지역은 오목한 형상의 사면에 해당되어 창리지역의 볼록한 사면 보다 이동속도가 빠르게 산정될 수 있다. 그리고 셋째는 묘봉리지역의 하부경사가 창리지역 보다 더 가파르다는 것이다. 그러므로 이상과 같은 세가지 지형적인 원인에 의하여 묘봉리지역의 토석류가 더 빠른 이동속도를 보이는 것으로 짐작된다.

농도 즉 함수조건은 토석류의 이동에 큰 영향을 미치게 된다. 이에 따라 본 논문에서는 농도가 토석류의 이동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 민감도 분석을 수행하였다. 해석대상지역은 묘봉리, 창리지역으로 해석의 편의상 하부경사가 수평인 경우로 한정하였다. 이 때 표 2의 실험결과에서와 같이 점도가 0.4로부터 0.7까지 변할 때 이에 대한 각각의 빙햄 소성 모델 계수들을 입력변수로 하였으며 나머지 변수들은 일정하게 설정하였다.

민감도 분석결과는 그림 9에서와 같이 실제 농도값인 0. 7로부터 농도가 감소됨에 따라 이동거리는 증가되는 것으로 나타났다. 즉 묘봉리지역에서는 농도변화에 대한 이동거리 변화가 70.1m/(단위농도), 창리지역은 42.3m/(단위농도)의 변화경향을 보인다. 이로부터 그 지반의 정확한 농도상태를 측정하는 것이 토석류의 이동거리를 분석하는데 중요하다는 것을 알 수 있다.

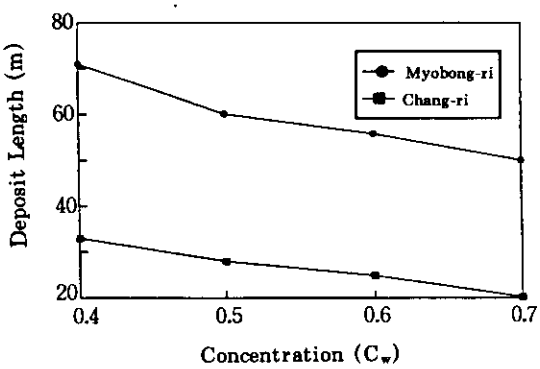


그림 9. 민감도분석

한편 묘봉리와 창리지역에 대한 현장답사를 통하여 각 해석지역에서 이동되는 토괴량을 산정하였고 이를 하부지역의 침식깊이에 근거하여 퇴적분포도를 작성하였다. 그 결과 그림 10, 11에서와 같이 묘봉리, 창리지역에서는 수치해석에서 얻어진 결과와 약 10% 내의 오차를 보였다. 퇴적분포도를 작성할 때 비록 미세한 지형적인 변화까지 고려할 수는 없지만 이로부터 수치해석으로 토석류의 이동을 묘사하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 토석류로 인한 피해를 감소시키기 위하여 토석류의 이동범위에 대해 연구하였다. 이 때 토석류의 흐름은 비뉴톤적인 점도를 갖는 유체로 간주하였으며 유한요소 프로그램 Polyflow(Place de l'Universite, 1992)를 이용하여 이를 해석하였다. 해석대상지역은 1991년 7월 토석류가 발생한 용인군 창리, 안

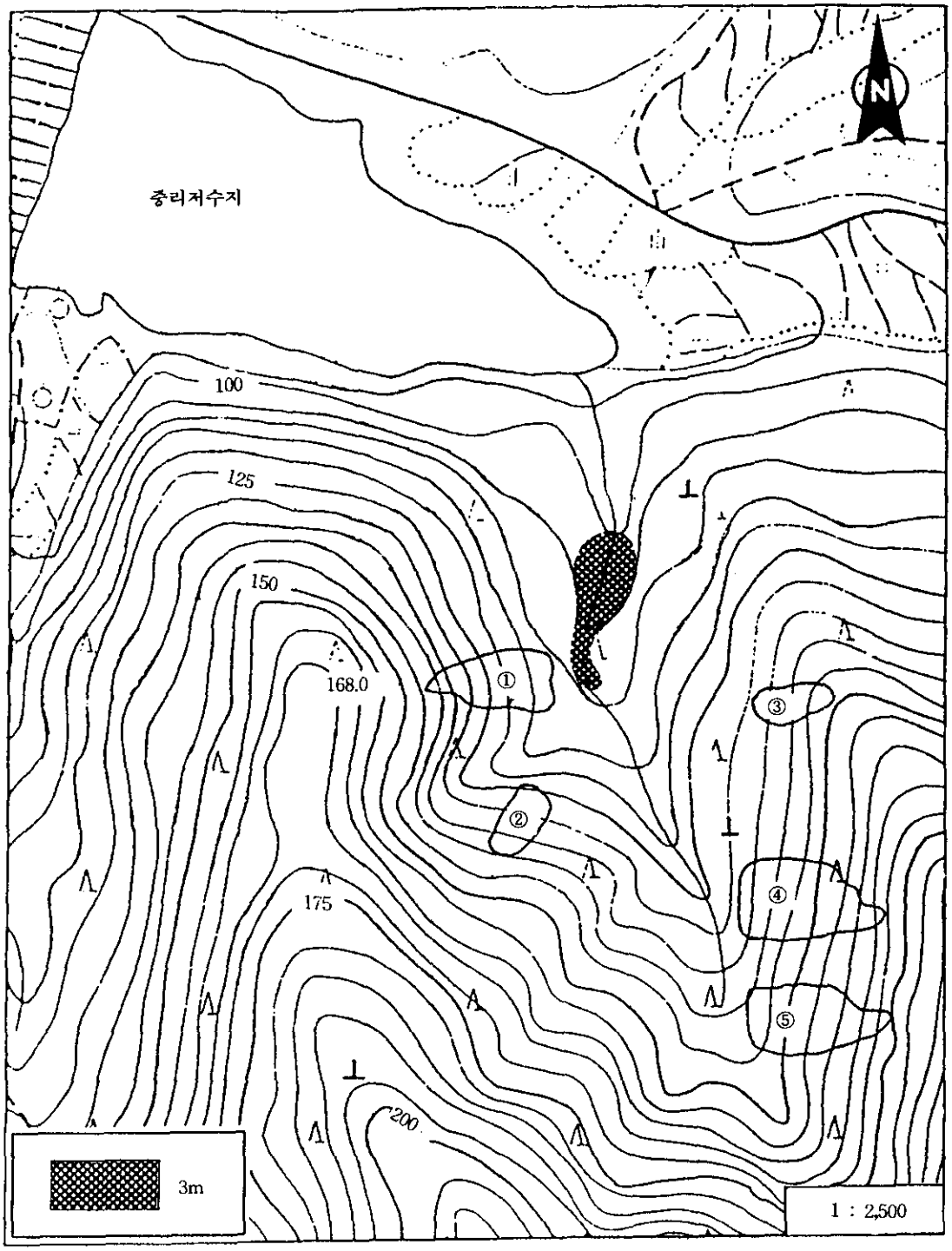


그림 10. 수치해석영역의 토괴가 흘러내린 모습(묘봉리지역)

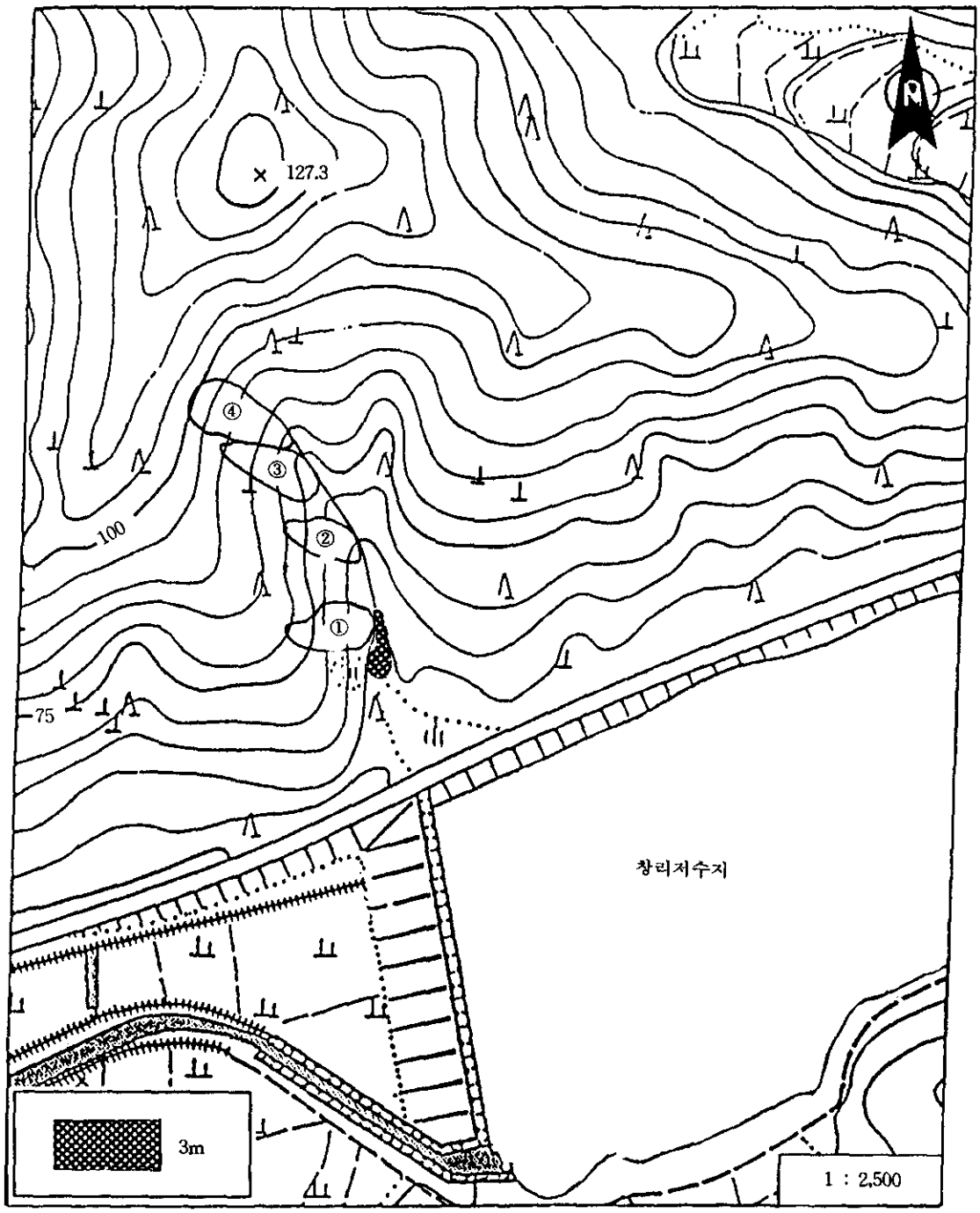


그림 11. 수치해석영역의 토피가 흘러내린 모습(창리지역)

성군 묘봉리지역을 선정하였으며 분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 점도시험으로부터 얻은 결과를 입력하여 토석류의 이동을 해석하였다. 수치해석으로부터 계산된 속도와 현장 유추속도를 비교한 결과, 창리지역에서는 다소 차이가 발생하였지만 묘봉리지역에서는 실제와 근사한 결과치가 얻어졌다. 이로부터 토석류는 비선형적 점도를 갖는 유체흐름으로 간주될 수 있고 비뉴톤 유체흐름을 해석할 수 있는 수치해석기법을 이용하면 실제와 부합하는 토석류 이동을 예측할 수 있다는 것을 알게 되었다.

2) 이동거리 분석 중 묘봉리지역의 경사가 약 30°로 창리지역의 40°보다 완만하지만 현장속도나 수치해석 상의 속도가 더 빠른 것으로 나타났다. 이는 보다 많은 이동토괴량과 해석단면의 凹凸효과 그리고 가파른 하부경사에 의해 설명 될 수 있다.

3) 토석류 해석시 농도의 영향을 파악하고자 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과 농도변화에 대해 이동거리는 창리지역에서 42.3m/(단위농도)로부터 묘봉리지역의 70.1m/(단위농도)까지 변화를 보였다. 이로부터 토석류를 정확히 해석하기 위해서는 정확한 농도 즉 함수조건의 규명이 필요하다는 것을 알게 되었다.

참 고 문 헌

1. 김상규, 서홍석(1997), "토석류 이동의 레올로지적 특성", 한국지반공학회, 13권, 5호, pp. 125-131
2. 서홍석(1996), 토석류의 이동과 퇴적에 관한 연구, 동국대학교, 공학박사학위 논문.
3. Dent, J. D. (1982), *A biviscous modified Bingham model of snow avalanche motion*, Ph D Thesis, Montana State University, Bozeman.
4. Fread, D. L. (1988), *The NWS DAMBRK model: theoretical background and user documentation*, National Weather Service, Silver Spring, Md, Hydrologic Research Laboratory.
5. Fukoka, M. , Yoshida, Y. and Masuda, T. (1977), "Kinetic Friction in Landslides", *Proceedings of Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, pp. 71-74, Tokyo, Japan.
6. Heim, A. (1932), Bergsturz und Menschenleben, Zurich: Fretz and Wasmuch.
7. Hungr, O. and Morgenstern, N. (1984), "High velocity ring shear tests on sand", *Geotechnique*, Vol. 34, No. 3, pp. 415-421.
8. Hutchinson, J. N. (1986), "A sliding consolidation model for flow slides", *Canadian Geotechnical Journal*, 23, pp. 115-126.
9. Jeyapalan, K. (1981), *Analysis of flow failures of mine tailings impoundments*, Ph D Thesis, University of California, Berkeley.
10. Johnson, A. M. and Rodine, J. R. (1984), "Debris flow", Chapter 8 in Brunsden, D. and Prior, D. B. , Eds. , *Slope Instability*, John Wiley and Sons, New York, pp. 257-361.
11. McTigue, D. F. (1978), "A model for stresses in shear flow of granular materials", *Proceedings of the U.S. Japan Seminar on Continuum Mechanical and Statical Approaches in the Mechanics of Granular Materials*, Cowin, S. C. and Satake, M., Eds., Gakujutsu Bunken Fukyukai, Tokyo, Japan, pp. 266-271.
12. Moriwaki, H. (1987), "Geomorphological prediction of the travel distance of a debris", *Proceedings of China-Japan Field Workshop on Landslides*, Xian-Lanzhou, published by the Japan Landslide Society, pp. 97-102.
13. Polyflow(1992), User's Manual, Place de l'Universite, Polyflow s. a.
14. Sassa, K. (1988), "Geotechnical model for the motion of landslides", Special lecture, 5th International Symposium on Landslides, *Landslides*, Vol. 1, pp. 37-55.
15. Sousa, J. and Voight, B. (1991), "Continuum simulation of flow failures", *Geotechnique*, Vol. 41, No. 4, pp. 515-538.
16. Troxell, H. C. and Peterson, J. Q. (1937), "Flood in La Canada Valley", *US Geological Survey Water Supply Paper 757C*, pp. 53-98.

(접수일자 1997. 7. 15)