지진에 대한 사면의 재해위험지도 작성
-울산시 울주군 지역을 중심으로-

Seismic Landslide Hazard Maps in Ul-ju, Ul-san, Korea

조성원* 정의송** 김명모***
Cho, Sung-Won Chung, Eui-Song Kim, Myoung-Mo

Abstract

Landslide damage comprise most part of the damages from the earthquake, and it only causes the damage to lives and structures directly, but also cease the operation of social system by road or lifeline failure. For these reasons, hazard assesment on the landslides has been recognized very important. And hazard maps have been used to visualize the hazard of the landslide. In this study, as the first step for application of hazard map to domestic cases, hazard maps are made for the Ul-joo, Ul-san, Korea, where the Yang-san faults are located. For building hazard maps, the degree of hazard are evaluated based on Newmark displacement, and the resulting maps are constructed by GIS technique. In hazard assesment, maximum ground acceleration obtained from attenuation equation of wave propagation, and design earthquake acceleration suggested by Ministry of construction, are used for acceleration term. Hazard maps are made by GIS programs, Arc/Info and Arc/View, based on the digital maps and data from lab tests and elastic wave surveys. The maps show the possible landslide regions significantly, and the displacements of slide are proportional to the slope angles.

1. 서론

지진은 인간이 만든 구조물과 사회의 각종 시설에 큰 피해를 초래할 뿐 아니라, 나아가 인간의 생명을 앗아갈 수 있는 자연재해이다. 과거에는 지진의 위험은 피할 수 없는 숙명으로 인식되었다. 그러나 현대로 오면서 지진의 원인이 과학적으로 밝혀지고, 그에 따른 공학적 대처기술이 발달하여 지진으로 인한 피해를 어느 정도까지 제한하는 것이 가능하게 되었다. 일반적으로 지진이 발생하면 여러 형태의 피해가 발생하는데, 강진이 발생하는 경우 사면의 파괴로 인한 피해는 지진으로 인한 전체 피해 중 상당부분을 차지한다. 사면의 파괴는 인명 및 구조물에 직접적인 피해를 유발할 뿐 아니라 도로, 라이프 라인 등의 기능을 상실하게 하여 사회시스템을 마비시킨다. 이로 인한 간접적인 인적, 물적 피해 규모가 직접적인 피해보다 더 큰 사례도 많이 보고되고 있다. 이러한 이유로 지진에 대한 사면의 재해 위험을 평가하여 위험에 대한 대비책을 수립하는 것은 매우 중요한 일이며, 사면의 재해위험도를 가시적으로 나타내는 방법으로 재해위험지도의 작성이 있다.

본 연구에서는 사면에 대한 재해위험지도 작성의 국내 적용을 위한 시작단계로 한반도 남동부

* 서울대학교 지구환경시스템 공학부 박사과정, 학생회원
** 서울대학교 지구환경시스템 공학부 석사과정
*** 서울대학교 지구환경시스템 공학부 교수, 정회원

의 주요 단층의 하나인 양산단층 주변 지역을 대상으로 하여 재해위험지도를 작성하였다. 이 지역은 울산광역시 울주군의 일부이다.

2. 재해위험지도 작성 기법

국제지반공학회의 제 4 기술위원회인 "Earthquake Geotechnical Engineering"은 일본 지반공학회의 재정 지원하에 지진으로 인하여 발생할 수 있는 재해에 대한 위험지도 작성의 지침과 방법론을 포함하는 편람을 발간해오고 있다. 가장 최근(1999. 3)의 편람에는 지반 운동(ground motion), 사면의 불안정성(slope instability), 그리고 액상화(soil liquefaction)에 대한 재해지도 작성에 관한 내용이 서술되어 있다. 각 사항에 대한 위험지도에 대하여 그 정밀도에 따라 3등급으로 분류하였는데, 등급이 높아질수록 지도 작성에 필요한 자료가 많아지고 축척은 작아져 더욱 정밀한 위험도의 평가를 가능하게 한다. 이 편람에는 이상의 세가지 등급에 대하여 여러 가지 방법의 위험지도 작성기법을 소개하고 있는데, 최고의 정밀도를 가지는 3등급 방법들에서는 항복가속도와 사면 경사각의 관계, 사면 경사각과 지진가속도를 고려한 안전율 등을 기준으로 재해위험을 평가한다. 이 편람과는 별도로 미국에서는 사면의 변위를 기준으로 사면의 재해위험을 평가하고 그 결과를 GIS 기법을 이용하여 작성하는 방법이 사용되고 있다. 이 방법은 사면에 대한 재해위험 평가를 Newmark 변위에 의해 수행하는 방법으로, GIS 기법을 이용하여 실제 수치지도상에 구체적인 변위 값을 나타냄으로써 이해하기 쉬운 결과를 제공한다.

본 연구에서는 위에서 언급한 방법 중 후자에 해당하는 방법을 사용하여 재해위험지도를 작성하였다. Newmark 변위를 구하기 위하여는 지진시 발생 가능한 최대 지반가속도, 항복가속도, 사면의 정적안전율, 지반의 강도정수, 토층의 두께, 그리고 사면 경사 등의 자료가 필요하다. 먼저 최대 지반가속도를 선정하기 위하여 두 가지 방법을 선정하였다. 하나는 주어진 지진규모와 진원거리에 대해 지진파 전달 감쇠식을 이용하여 최대 지반가속도를 구하는 방법이고, 다른 하나는 건설교통부에서 제안한 설계 지진가속도를 직접 사용하는 방법이다. 항복가속도와 정적안전율은 Newmark가 제안한 방법을 사용하여 얻을 수 있다. 지반의 강도 정수와 토층두께는 각각 현장에서 채취한 시료에 대한 실내실험과 현장에서의 탄성파 탐사 결과를 이용하여 결정하였다. 위험지도 작성에 사용된 수치지도는 기본셀이 10m×10m 로서 해석에 필요한 충분한 정밀도를 가지고 있으며 사면 경사에 대한 데이터를 기본적으로 제공한다. 여러 가지 자료로부터 변위가 결정되면 그 결과를 GIS 프로그램인 Arc/Info와 Arc/View를 이용하여 수치지도상에 나타내었다.

3. 지진시 지반운동의 평가

지진시 지반운동에 대한 평가는 지진파 전달 감쇠식을 이용하는 방법과 건설교통부가 마련한 설계기준가속도 이용 방법 등 두가지 방법으로 이루어졌다.

3.1 지진파 전달 감쇠식

진원에서 발생한 지진파는 주변으로 전파되면서 감쇠현상이 일어난다. 감쇠현상을 정확히 이해하기 위해서는 강진동에 대한 충분한 데이터가 필요하다. 그러나 한반도에서는 강한 지진활동의 빈도가 작아 강진동 기록 데이터가 축적되어 있지 않기 때문에 지진학자들은 한반도에서 최근에 발생한 지진의 진동데이타로부터 추계학적 모사법을 이용하여 한반도에서 발생 가능한 강진동의 지진 감쇠 데이터를 유추해 내었다. 본 연구에서는 추계학적 모사법을 사용한 한반도 지진파 전달 감쇠식 중에서 박창업(Park et al., 1999)이 제시한 감쇠식을 사용하였다. 이 감쇠식은 한반도의 지진 발생 메카니즘이 미국 동부의 지진 발생 메카니즘과 비슷하다고 판단하여 미국 동부의 지진파 감쇠 모델에 기초 하고 있으며 여기에 국내지진의 진원과 매질의 특성을 고려하여 다음 식(식 1)과 같은 강진동 감쇠식을 제안하였다.

$$\ln a_{max} = c_0 + c_1 R - \ln R \qquad \text{(식 1)}$$

$$c_k = \xi_o^k + \xi_1^k (M-6) + \xi_2^k (M-6)^2 + \xi_3^k (M-6)^3$$

a_{max} : 최대 지반가속도(m/s^2)

R : 진원 거리(km)

M : 지진 규모

위 식에서 R은 진원과 대상지역 사이의 거리이며, M은 지진 규모를 나타낸다. 본 연구에서는 진원이 대상지역 바로 밑 깊이 10km에 존재한다고 가정하였고, 지진 규모는 6.0, 6.5, 7.0 세 가지를 적용하였다. 여기서 사용된 진원깊이 10km는 진원이 위치할 수 있는 최소거리이며, 지진 규모 6.0은 감쇠식에 적용할 수 있는 최소값이다. 표 1은 위 식에 적용되는 계수값을 나타낸 것이다.

표 1. 감쇠식에 사용되는 계수값(조남대, 박창업, 1999)

ξ_0^0	ξ_1^0	ξ_2^0	ξ_3^0
8.459603	0.7562072	-0.05399793	0.01330123
ξ_0^1	ξ_1^1	ξ_2^1	ξ_3^1
-0.01427469	0.002962086	-0.0004335541	-0.0001049906

3.2 건설교통부 기준 설계지진 가속도

건설교통부(1997)는 한반도의 설계지진 가속도를 제안한 바 있는데, 이 때 설계지진 가속도는 내진성능목표에 따라 재현주기(50, 100, 200, 500, 1000, 2400년)에 의한 위험도계수 I(표 2), 대상지역의 지진구역(I, II)에 따른 구역계수 Z(표 3), 그리고 지반조건(표 4)에 따른 부지특성계수 G(표 5)가 결정되면 다음 식(식 2)으로부터 산정된다.

$$A_{max} = Z \cdot I \cdot G \cdot g \qquad \text{(식 2)}$$

Z : 재현주기에 따른 위험도계수

I : 지진구역에 따른 구역계수

G : 지반조건에 따른 부지특성계수

g : 중력가속도

대상지역인 울산광역시 울주군의 지반조건은 표 4에 따른 분류에 의하면 S_c에 해당하며, 이를 고려하여 내진 1등급, 재현주기가 500년, 1000년, 2400년인 설계기준가속도를 결정하면 각각 0.13g, 0.182g, 0.26g가 된다.

표 2 위험도 계수

재현주기(년)	50	100	200	500	1000	2400
위험도 계수, I	0.40	0.57	0.73	1	1.4	2.0

표 3. 구역계수

지진구역	I	II
구역계수, Z(g값)	0.11	0.07

표 4. 지반의 분류

지반종류	지반종류의 호칭	상부 30m에 대한 평균 지반특성		
		전단파속도(m/s)	표준관입시험 $\overline{N}(\overline{N_{CH}})$(blow/foot)	비배수전단강도(kPa), $\overline{s_u}$
S_A	경암지반	1500초과	-	-
S_B	보통암지반	760～1500		
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360～760	> 50	> 100
S_D	단단한 토사지반	180～360	15～50	50～100
S_E	연약한 토사지반	180미만	< 15	< 50
S_F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

표 5. 부지특성계수

Soil Type	S_A	S_B	S_C	S_D	S_E	S_F
Site Coefficient	0.82	1.0	1.18	1.45	2.0	-

4. Newmark 변위의 계산

Newmark 방법은 파괴토체를 강체로 가정하여 지진시 작용가속도(a(t))가 항복가속도(a_c)보다 큰 경우에 토체가 움직이기 시작한다고 가정하여 파괴토체의 변위를 구한다. 즉, 항복가속도보다 큰 가속도에 대하여 항복가속도와의 차(a(t)-a_c))를 두 번 적분하여 파괴토체의 변위를 구하는데 (그림 1), 항복가속도란 토체에 작용하는 하중이 토체의 저항력보다 커지는 순간의 작용가속도이다. Newmark의 방법은 파괴토체를 강체로 가정하여 토체내에서 지진파의 감쇠효과를 고려하지 못하고, 지진하중 하에서 그리고 파괴 도중 흙의 강도변화를 고려하지 못하는 제약조건에도 불구하고 지진시 산사태의 변위를 비교적 잘 예측할 수 있는 것으로 알려져 있다(Makdishi, F. I. & Seed H. B., 1978).

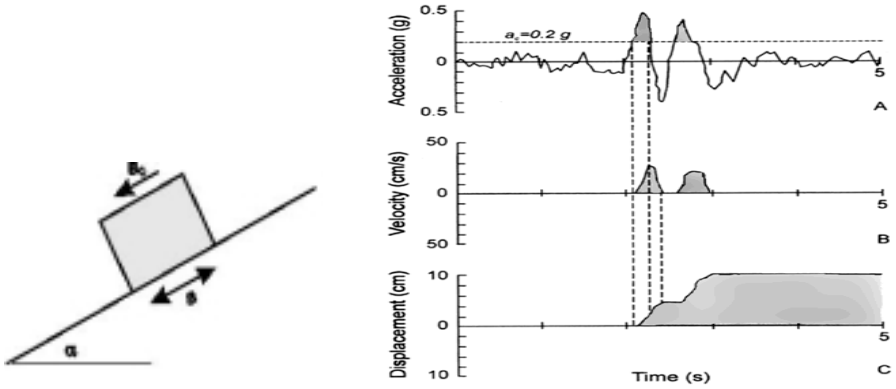

그림 1. Newmark의 강성블록해석 개념과 변위를 구하는 방법

Newmark 변위 결정 방법은 앞에서 설명한 대로 가속도의 차(a(t)-a_c))를 직접 2번 적분하는 방법과 적분의 번거로움을 덜기 위하여 통계적인 방법에 의해 제안된 간단한 경험식을 사용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 후자의 방법 중 하나인 다중변수 회귀방정식을 이용하여 Ambraseys and Menu (1998) 등이 제안한 식(식 3)을 사용하였다.

$$\log D_n = 0.9 + \log[(1-a_c/a_{max})^{2.53}(a_c/a_{max})^{-1.09}] \quad (식\ 3)$$

D_n : 변위(cm)　　a_c : 항복가속도(m/s^2)

a_{max} : 최대 지반가속도(m/s^2)

Newmark 변위를 구하기 위해 필요한 항복가속도 a_c는 유사정적해석에서 안전율이 1이 될 때 사면에 작용하는 가속도이며, 사면의 정적안전율(F_s)을 이용하여 다음 식(식 4)과 같이 구할 수 있다(Newmark(1965)).

$$a_c = [(F_s - 1)\sin\alpha]g \quad (식\ 4)$$

a_c : 항복가속도　　F_s : 정적 상태에서의 안전율

α : 사면 경사각　　g : 중력 가속도

위의 식에 적용되는 정적인 상태에서 사면의 안전율은 모든 사면을 무한사면으로 가정하여 계산하는데, 이 논문에서는 편의상 사면을 건조한 사면과 포화된 사면 두가지로 나누어 안전율을 계산하였다. 포화된 사면에서 지하수위면은 지표면과 일치하는 것으로 가정하였다. 정적 사면안전율은 다음의 식들(식 5, 6)로부터 산정된다.

건조 상태 : $$F_s = \frac{c}{\gamma h \sin\alpha} + \frac{\tan\phi}{\tan\alpha} \quad (식\ 5)$$

포화 상태 : $$F_s = \frac{c}{\gamma_{sat} h \sin\alpha} + (1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_{sat}})\frac{\tan\phi}{\tan\alpha} \quad (식\ 6)$$

F_s : 정적 사면안전율　　c : 점착력

γ : 단위중량　　γ_{sat} : 포화단위중량

γ_w : 물의 단위중량　　h : 토층의 두께

ϕ : 내부마찰각　　α : 사면의 경사각

사면의 안정성을 평가하기 위해서는 지반의 강도정수가 결정되어야 하는데, 특히 표층에서부터 수십m 깊이까지의 지반공학 및 지질학적 데이터가 필요하다. 본 연구에서는 탄성파 탐사를 수행하여 개략적인 지층의 구성상태와 강도정수를 유추하였다. 탄성파 탐사 결과(v_s=360~760m/s)로부터 이 지역의 표층 30m 이내의 대표적인 지반을 표 4에 따라 분류하면 S_c이다.

대상 사면의 강도정수는 현장에서 채취된 시료를 재성형하여 실시한 삼축시험 결과와 국내 풍화잔적토 지반의 경험 값에 근거하여 c=10kN/m^3, ϕ=38° 로 결정하였다.

무한사면의 안전율을 구하는 식(식 5, 6)의 입력 변수 중 하나인 토층의 두께는 사면의 기울기, 지질조건, 토층 생성방법 등에 의해 결정되지만, 해석의 편의를 위하여 가장 중요한 요인으로 판단되는 사면의 기울기를 단일변수로 하여 탐사 결과를 이용하여 경험식을 도출하였다. 토층의 두께 산정식은 다음 식(식 7)과 같다. 단, 기울기가 70° 를 넘으면 토층은 존재하지 않는다고 가정하였으며 토층의 최대 두께는 2.5m로 가정하였다. 이전의 연구에서는 토층 최대 두께를 3m로 가정하기도 하였다(Wiezcorek et al., 1985).

$$D_{soil} = 2.5 - 1.5\frac{\tan\alpha}{\tan 60^\circ} \quad (\text{if } \alpha < 70^\circ) \quad (식\ 7)$$

D_{soil} : 토층 두께(m)　　α : 사면의 경사각

5. 재해위험지도 작성

지진에 대한 사면의 재해위험지도의 작성에 이용된 수치지도는 국립지리원이 1987년에 작성한 것으로 10×10m의 기본셀로 구성되어 있다. 본 연구에서 지도작성을 위하여 사용한 기본셀의 크기는 20×20m로 수치지도로부터 사면의 기울기를 정확하게 구할 수 있었다. 사면의 재해위험지도 작성을 위하여 GIS 프로그램인 Arc/Info, Arc/View를 사용하였으며 재해위험지도의 작성을 위해 지반운동의 평가방법은 앞서 설명한 두가지 방법을 적용하였고, 안전율 산정시에는 건조사면과 포화사면을 모두 고려하였다. 관련된 자료를 모두 각각의 셀에 대해 입력하여 변위를 계산하였으며 그 결과를 GIS 프로그램에 입력함으로써 최종적인 위험지도를 얻었다.

건조사면의 경우에는 지진에 의한 사면의 변위가 거의 나타나지 않았다. 따라서 다음의 결과들은 모두 포화사면에 대한 위험지도이다. 건설교통부에서 제안한 재현주기 500년, 1000년, 2400년에 대한 설계 지진가속도를 적용한 위험지도는 그림 2- 4와 같으며, 진원거리 10km에 대하여 지진규모 M=6.0, 6.5, 7.0를 적용한 감쇠식으로부터 얻은 최대 지반가속도에 대한 위험지도는 그림 5- 7과 같다.

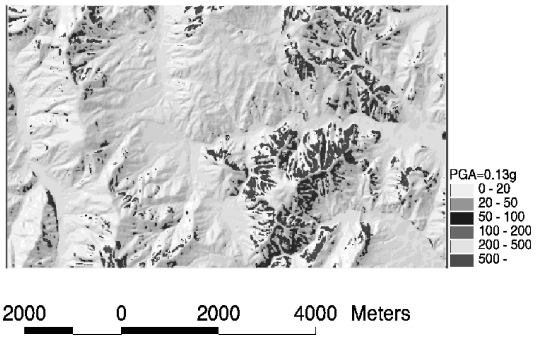

그림 2. 재현주기 500년($a_{max}=0.13g$)

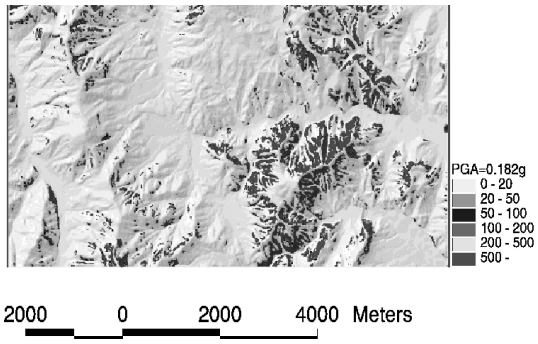

그림 3. 재현주기 1000년 ($a_{max}=0.182g$)

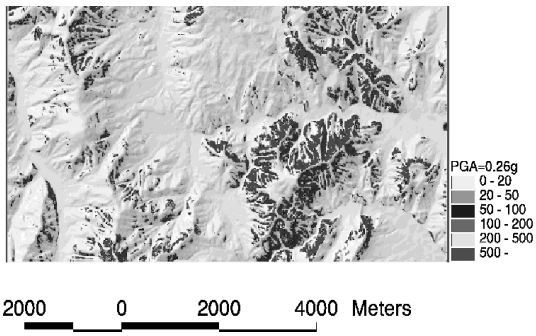

그림 4. 재현주기 2400년 ($a_{max}=0.26g$)

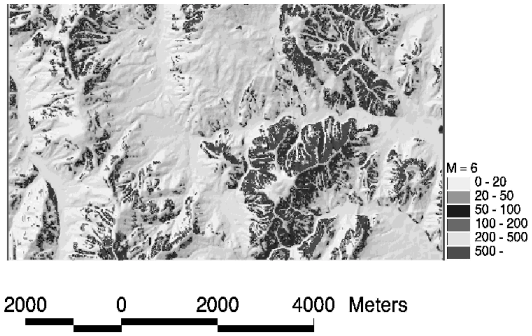

그림 5. 지진규모 M6.0, 진원거리 R=10km

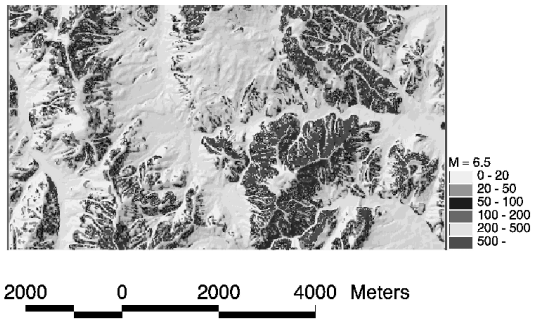

그림 6. 지진규모 M6.5, 진원거리 R=10km

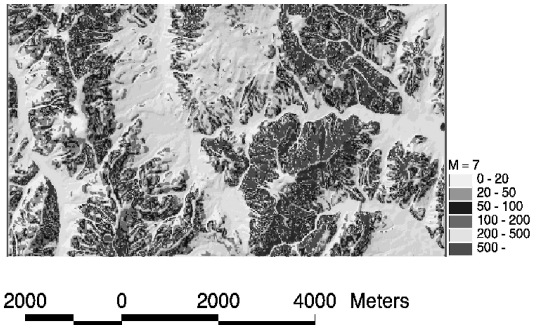

그림 7. 지진규모 M7.0, 진원거리 R=10km

위의 위험지도상에 나타난 공통적인 특징은 변위가 일단 발생한 지점은 매우 큰 변위가 발생하였고 그렇지 않은 곳은 변위가 거의 발생하지 않아 사면 파괴 구역과 그렇지 않은구역을 확연하게 구분할 수가 있다는 것이다.

재해위험지도에 나타난 변위를 사면의 경사와 최대 지반가속도를 변수로 하여 도표로 작성하였다(그림 8). 그림 8에 나타난 바와 같이 사면의 변위는 당연히 지반가속도가 클수록 커지며, 사면의 경사가 커질수록 크게 나타나고 있음을 알 수 있는데 그림 8에 나타난 결과를 보면 지반가속도의 크기에 상관없이 변위가 50cm 부근에 이르러서는 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 그림 9에는 50cm 변위가 발생하는 사면 경사각과 지반가속도의 관계를 나타내었다. 그림 9에서 보면 임계변위(50cm)가 발생하는 경사각과 지반가속도는 선형적인 관계가 있음을 알 수 있는데, 이러한 결과는 향후 재해위험 평가시에 주어진 지반가속도에 대한 임계 경사각 결정에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

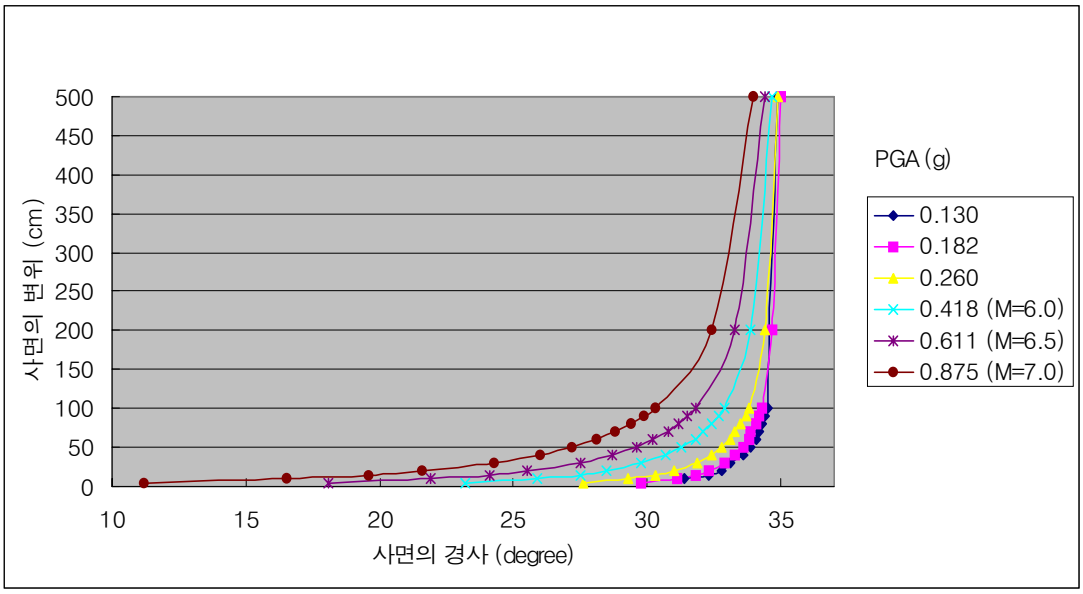

그림 8. 사면의 경사 및 최대 지반가속도와 변위와의 관계

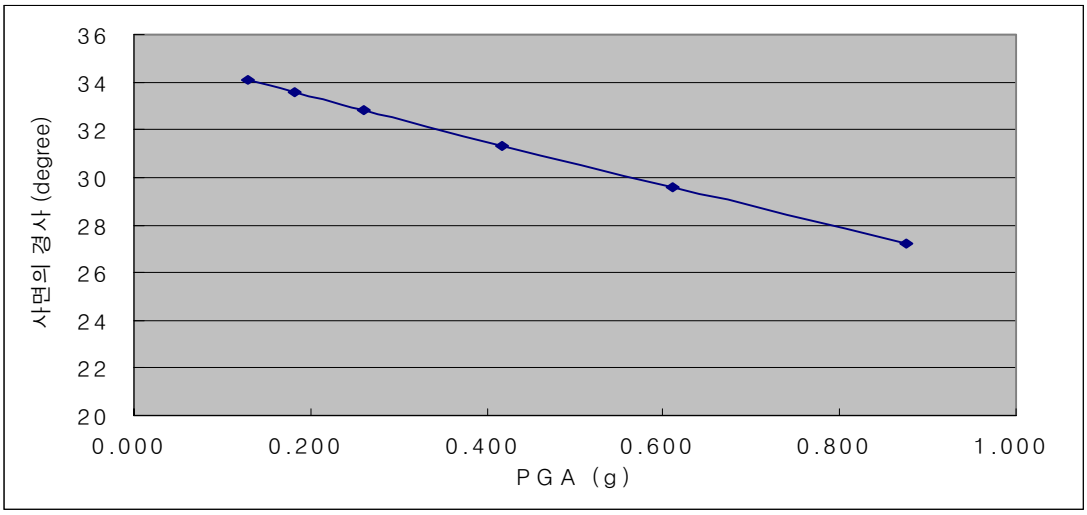

그림 9. 사면 변위 50cm에 대한 최대 지반가속도와 사면 경사각과의 관계

6. 결론

울산시 울주지역을 대상으로 Newmark 변위를 기준으로 하여 위험도를 평가하고 GIS 기법을 적용한 재해위험지도를 작성하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 지진시 사면의 변위는 최대 지반가속도가 클수록 그리고 사면의 경사각이 클수록 크게 발생하는데, 본 연구 대상 지역의 경우, 사면경사각이나 지반가속도의 크기에 상관없이 변위량이 50cm 이상이 되면 급격한 변위 증가를 보임으로서, 변위량 50cm는 임계 변위의 의미를 갖는다고 볼 수 있다.

2) 임계 변위량(50cm)이 발생하는 사면의 경사각은 최대 지반가속도와 선형적인 관계를 갖는 것으로 나타났다.

3) 재해위험지도는 그 결과로부터 대상 지역에서의 사면 파괴 위험 지역에 대한 구분을 확실히 할 수 있게 함으로써 도로 노선선정이나 주변의 부지 활용을 위한 기초자료를 제공하는 등 지진 발생시 피해에 대비한 유용한 예비자료의 가치가 있다.

참고문헌

1. 조남대, 박창업(1999), “추계학적 모사법을 사용한 감쇠공식”, 서울시 지진발생 특성별 및 단계별 대응모델 개발, 부록1.
2. 건설교통부(1997), “내진설계기준연구 I, II”
3. Atkinson, G. and D. Boore(1998), "Evaluation of models for earthquake source spectra in eastern North America", Bull. Seism. Soc. Am. 88
4. Ambraseys, N.N. and Menu, J.M.(1988), "Earthquake-Induced Ground Displacements", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 16, pp. 985 -1006.
5. Jibson, R.W.(1993). “Predicting Earthquake-Induced Landslide Displacements Using Newmark's Sliding Block Analysis“, Transportation Research Record 1411.
6. Jibson, Randall W., Harp, Edwin L. and Michael, John A.(1998), "A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps: An Example form the Los Angeles, California, Area", USGS, Open-File Report 98-113.
7. Keefer, D.K.(1984), “Landslides caused by earthquakes”, Geological Society of America Bulletin, v. 95, p. 406-421.
8. Makdishi, F. I. and Seed, H. B.(1978), "Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake induced deformations", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.104, No. GT7, pp.849-867