

## 사면의 안전율과 임계변위에 의한 지진 재해 위험지도의 비교

### Seismic Landslide Hazard Maps Based on Factor of Safety and Critical Displacements of Slope

정의송<sup>1)</sup>, Eui Song Chung, 조성원<sup>2)</sup>, Sung Won Cho, 김명모<sup>3)</sup>, Myoung Mo Kim

<sup>1)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정, Graduate Student, School. of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

<sup>2)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정, Graduate Student, School. of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

<sup>3)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, Professor, School. of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

**SYNOPSIS** : As the first step for the application of seismic landslide hazard maps to domestic cases, two types of hazard maps on Ul-joo from pseudostatic analysis and Newmark sliding block analysis are constructed and compared.

ArcView, the GIS program and the 1:5,000 digital maps of the test-site are used for the construction of hazard maps and the parameters for the analyses are determined by seismic survey and laboratory tests.

The results from the pseudostatic analysis have more conservative values of lower critical slope angles, although the results from the two different analyses have similar tendencies. In detail, with increasing the peak ground acceleration, the difference between the two analyses in the critical slope angle increases, while the difference decreases with increasing the maximum soil depth.

**Key words** : hazard map, factor of safety, critical displacement, pseudostatic analysis, Newmark sliding block analysis, GIS technique

## 1. 서론

지진으로 인하여 발생하는 여러 유형의 피해 가운데, 사면의 파괴로 인한 피해가 전체 피해의 상당 부분을 차지하는 것으로 보고되고 있다. 사면의 파괴는 인명 및 구조물에 직접적인 피해를 줄뿐만 아니라 도로, 라이프 라인 등의 기능을 상실하게 하여 사회시스템을 마비시켜 큰 피해를 유발하게 된다. 이러한 이유로 지진에 대한 사면의 재해위험을 평가하는 것은 매우 중요한 일로 인식되고 있으며 평가된 재해위험 정도를 지도상에 나타내는 작업들이 진행되고 있다.

우리나라도 최근 들어 발생하고 있는 크고 작은 지진으로 인해 더 이상 지진에 대한 안전지대가 아니라는 인식이 지배적으로, 사면에 대한 재해위험평가가 이루어져야할 시점이라 생각된다. 현재 진행되고 있는 재해위험지도 작성을 위한 방법으로 크게 두 가지 방법이 사용되고 있다. 그 하나는 대상지역의 안전율을 계산하여 지도상에 안전율을 표시하는 방법으로 국제 지반공학회의 제 4 기술위원회(ISSMGE TC4)를 중심으로 이루어지고 있는 방법이다. 또 다른 방법은 대상 사면의 변위를 예측하여 그 결과를 지도상에 나타냄으로써 위험정도를 나타내는 방법으로 미국을 중심으로 이루어지고 있다.

본 연구에서는 사면에 대한 재해위험지도 작성의 국내 적용을 위하여 위에서 언급한 두 가지 방법으

로 재해위험지도를 작성하여 그 결과를 비교해봄으로써 국내 활용을 위한 기초자료로 이용하고 궁극적으로는 국내 여건에 알맞는 재해위험 평가방법을 정립하는 기틀을 마련하고자 하였다. 재해위험지도의 작성을 위하여 지진발생의 가능성이 높은 지역으로 생각되는 양산단층 주변지역인 울산광역시 울주군 지역을 대상지역으로 선정하고 재해위험지도를 작성하였다. 지도작성을 위해서는 GIS기법을 활용하였으며, 안전율 평가방법으로는 유사정적해석을 수행하였고, 변위예측을 위해서는 Newmark의 강성블록해석(sliding block analysis)을 수행하여 그 결과를 이용한 재해위험지도를 완성하였다.

## 2. 이론적 배경

사면의 재해위험평가를 위해 사용되는 방법으로는 사면의 안전율을 이용하는 방법과 사면의 변위를 예측하는 방법 등 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 안전율 산정을 위해 유사정적해석을 수행하였고, 변위 예측을 위해서는 Newmark의 강성블록해석(sliding block analysis)을 적용하였다. 두 가지 경우 모두에 대하여 대상지역의 사면은 모두 무한사면으로 가정하였다. 각각의 내용은 다음과 같다.

### 2.1 유사정적해석

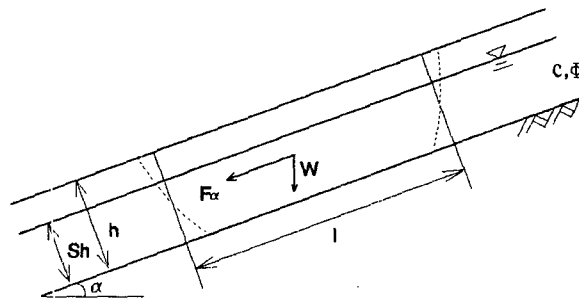


그림 1. 무한사면의 안전율

무한사면이 지표면과 평행한 평면 활동면을 따라 활동을 일으키는 경우, 유사정적해석방법은 일반적인 정적사면해석방법에 지진에 의한 영향을 지진계수를 지표면에 평행한 방향에 적용시켜 해석한다(그림 1). 이때, 지진계수  $k_a$ 는 지진가속도를 중력가속도로 나눈 값으로, 지진에 의한 작용력은 지진계수에 토체의 자중  $W$ 를 곱한 값으로 가정한다.

따라서, 사면 파괴에 대한 안전율은 다음의 식 (1)과 같다.

$$FS = \frac{\text{저항력}}{\text{작용력}} = \frac{cl + (W \cos \alpha) \tan \phi}{W \sin \alpha + F_a} = \frac{cl + (\gamma_t - S\gamma_w)hl \cos \alpha \tan \phi}{\gamma_t h l \sin \alpha + k_a \gamma_t h l} \quad (1)$$

여기서,  $FS$ 는 사면 안전율,  $c$ 는 점착력,  $l$ 은 파괴토체의 길이,  $W$ 는 토체의 자중,  $\alpha$ 는 사면 경사각,  $\phi$ 는 내부마찰각,  $\gamma_t$ 는 토체의 전체단위중량,  $\gamma_w$ 는 물의 단위중량,  $S$ 는 포화도,  $h$ 는 표층의 두께,  $F_a$ 는 지진으로 인한 관성력,  $k_a$ 는 지진계수를 나타낸다.

### 2.2 Newmark 강성블록해석(Sliding Block Analysis)

Newmark는 파괴토체를 강체로 가정하여 지진시 작용가속도( $a(t)$ )가 임계가속도( $a_c$ )보다 큰 경우에 토체가 움직이기 시작한다고 가정하여 파괴토체의 변위를 구하였다. 즉, 임계가속도보다 큰 작용가속도에 대하여 임계가속도와와의 차( $a(t) - a_c$ )를 두 번 적분하여 파괴토체의 변위를 구하는데(그림 2), 임계가

속도란, 토체에 작용하는 하중이 토체의 저항력보다 커지는 순간의 작용가속도를 의미한다.

Newmark 변위 결정 방법은 위에 언급된 것처럼, 가속도의 차( $a(t) - a_c$ )를 직접 2번 적분하여 구하는 것이 원칙이나 적분의 번거로움을 덜기 위하여 과거 지진기록들을 근거로 하여 통계적인 방법에 의해 제안된 간단한 경험식을 사용하는 방법이 일반적이다. 본 연구에서는 여러 가지 경험식 중 Ambraseys and Menu (1988) 등이 제안한 식 (2)를 사용하여 변위를 예측하였다.

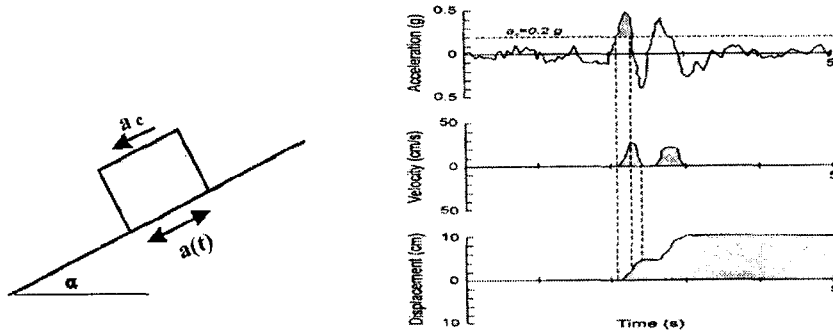


그림 2. Newmark의 강성블록해석 개념과 변위를 구하는 방법

$$\log D_n = 0.9 + \log [(1 - a_c/a_{\max})^{2.53} (a_c/a_{\max})^{-1.09}] \quad (2)$$

여기서,  $D_n$ 은 변위(cm),  $a_c$ 는 임계가속도( $m/s^2$ ),  $a_{\max}$ 는 최대지반가속도( $m/s^2$ )를 나타낸다.

식 (2)에서 임계가속도  $a_c$ 는 사면의 정적 안전율을 이용하여 다음의 식 (3)과 같이 구할 수 있다 (Newmark, 1965).

$$a_c = [(F_s - 1) \sin \alpha] g \quad (3)$$

여기서,  $F_s$ 는 사면의 정적안전율,  $\alpha$ 는 사면 경사각,  $g$ 는 중력 가속도를 나타낸다.

위의 식 (3)에 적용되는 사면의 정적 안전율  $F_s$ 는 식 (4)에 의해 구해지며, 포화도 적용에 있어서 완전 포화된 사면에서의 지하수위면은 지표면과 일치하는 것으로 가정한다.

$$F_s = \frac{c}{\gamma_t h \sin \alpha} + (1 - \frac{S \gamma_w}{\gamma_t}) \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \quad (4)$$

여기서,  $c$ 는 점착력,  $\gamma_t$ 는 토체의 전체단위중량,  $\gamma_w$ 는 물의 단위중량,  $h$ 는 표층의 두께,  $S$ 는 포화도,  $\phi$ 는 내부마찰각,  $\alpha$ 는 사면 경사각을 나타낸다.

### 3. 해석을 위한 변수의 결정

사면에 대한 유사정적해석 및 Newmark의 강성블록해석을 수행하기 위해서는 해석에 사용되는 변수 값의 결정이 이루어져야 한다. 해석을 위하여 결정되어야 할 변수값들은 최대지반가속도, 지반의 강도정수, 표층의 두께 등이 있으며, 각 내용은 다음과 같다.

최대지반가속도의 결정에 있어서, 본 연구에서는 건설교통부에서 제안한 설계지진 가속도를 적용하였다. 건설교통부(1997)는 한반도의 설계지진 가속도를 제안한 바 있는데, 이때 설계지진 가속도  $A_{\max}$ 는 내진성능목표에 따라 재현주기(50, 100, 200, 500, 1000, 2400년)에 의한 위험도계수 I, 대상지역의 지진구역(I, II)에 따른 구역계수 Z, 그리고 지반조건에 따른 부지특성계수 G가 결정되면 다음의 식 (5)로부터

산정된다.

$$A_{\max} = Z \cdot I \cdot G \cdot g \quad (5)$$

여기서, Z는 재현주기에 따른 위험도계수, I는 지진구역에 따른 구역계수, G는 지반조건에 따른 부지특성계수, g는 중력가속도를 나타낸다.

본 연구에서는 위험도 계수의 적용을 위해 재현주기 500년, 1000년, 2400년에 해당하는 위험도 계수를 선택하였고, 구역계수는 1구역에 해당하는 0.11을 적용하였으며, 대상지역인 울주군 지역의 지반조건을 고려하여 부지특성계수는 1.18을 적용하였다. 그 결과를 재현주기 500년, 1000년, 2400년에 대해 각각 0.13g, 0.18g, 0.26g의 최대지반가속도 값을 적용하여 해석에 활용하였다.

정확한 사면안정해석을 위해서는 지반의 강도정수값의 결정이 매우 중요한데, 특히 표층에서부터 수십m 깊이까지의 지반공학 및 지질학적 데이터가 필요하다. 본 연구에서는 탄성과 탐사를 수행하여 개략적인 지층의 구성상태와 강도정수를 유추하였다. 탄성과 탐사 결과( $v_s=360\sim760$  m/s)로부터 건교부가 제시한 지반의 분류표에 의하면, 이 지역의 표층 30m 이내의 대표적인 지반은 “매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반 ( $S_c$ )”에 해당된다.

대상 사면의 강도정수는 현장에서 채취된 시료를 재성형하여 실시한 삼축시험 결과와 국내 풍화 잔적토 지반의 경험값에 근거하여  $c=10\text{kN/m}^2$ ,  $\phi=38^\circ$  로 결정하여 해석에 적용하였다.

일반적으로 표층의 두께는 사면의 기울기, 지질조건, 표층 생성방법 등에 의해 결정되어진다. 해석의 편의를 위해 본 연구에서는 대상지역에 대해 실시한 탄성과 탐사의 결과를 이용하여 사면 경사를 단일 변수로 하는 경험식을 도출하였으며, 그 결과를 해석에 적용하였다. 표층의 두께 산정식은 식 (6)과 같다. 주어진 식에서, 기울기가  $70^\circ$  를 넘으면 표층은 존재하지 않는 것으로 가정하였고, 표층의 최대두께는 2.5m로 가정하였다.

$$D_{\text{soil}} = 2.5 - 1.5 \frac{\tan \alpha}{\tan 60^\circ} \quad (\text{if } \alpha < 70^\circ) \quad (6)$$

여기서,  $D_{\text{soil}}$ 은 표층의 두께(m),  $\alpha$ 는 사면 경사각을 나타낸다.

## 4. 재해위험지도 작성 및 해석결과 분석

### 4.1 재해위험지도 작성

재해위험지도는 GIS 기법을 이용하여 작성되었는데, 이 방법은 실제 지도상에 구체적인 값을 표시함으로써 이해하기 쉬운 결과를 제공한다. 지도작성을 자동화하기 위해 GIS 프로그램인 ArcView의 매크로 언어(Avenue)를 이용하여 기존의 사용자 환경(GUI)에 새로운 기능을 추가하는 확장프로그램을 개발했다. 더 나은 사면안정해석을 위해서는 지형(geometry)에 대한 정확한 자료를 얻는 것이 필수조건이다. 본 연구에서는 국립지리원이 1987년에 작성한 1:5,000 수치지도를 사용하였는데, 수치지도가 충분한 정밀도를 가지고 있어서 실제와 거의 유사한 지형을 구축할 수 있는 것으로 판단된다. 사용된 울주의 수치지도 크기는  $9.1\text{km} \times 5.6\text{km}$ 인데, 수치지도로부터 격자(cell) 크기가  $10\text{m} \times 10\text{m}$ 인 높이를 나타내는 지도를 생성하여 확장 프로그램의 입력지도로 활용하였다.

먼저 유사정적해석을 이용하여 구한 안전율 지도는 이미 결정된 지진계수, 지반의 강도정수와 주어진 각 cell에서의 경사로부터 얻어지는 표층두께 및 경사각 등의 자료로부터 앞의 식 (1)을 이용하여 계산된 안전율을 수치지도상에 표시함으로써 얻어지게 된다.

Newmark의 강성블록해석을 통해 얻어진 변위도 마찬가지로 방법에 의해 각 cell별로 계산되어지며 수치지도상에 나타내어질 수 있다. 그러나 변위 자체로는 위험정도를 나타내는데 적절치 못하다고 판단되

어 새로이 임계변위에 의한 변위율을 정의하여 위험정도를 나타내는 척도로 삼았으며, 지도상에 변위율을 나타냄으로써 재해위험지도를 작성하였다.

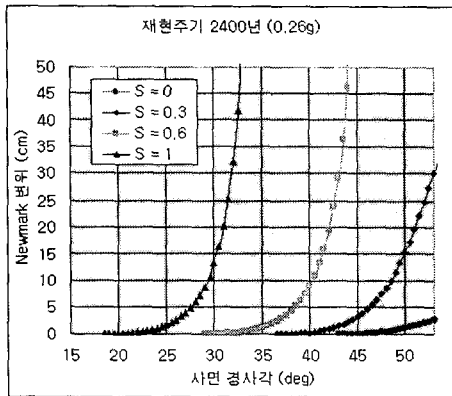


그림 3. 0.26g에 대한 Newmark 변위

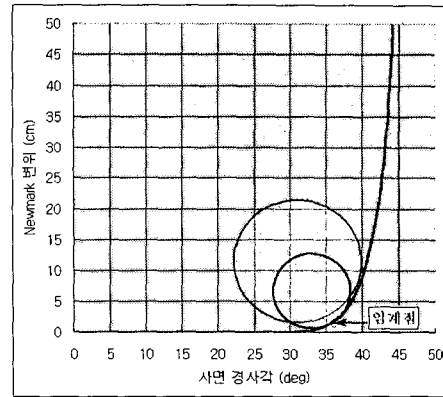


그림 4. 임계점을 구하는 개념

변위율 정의를 위해서는 임계변위 정의가 우선되어야 한다. 변위결정에 사용된 식 (2)로부터 경사각-변위 곡선 예를 도시하면 그림 3과 같다. 그림 3을 살펴보면, 모든 경우에 대해 변위는 경사가 증가함에 따라 서서히 증가하다가 어느 지점에 이르러 급격히 증가하는 양상을 보이고 있다. 이 점을 임계점이라 정의하고 파괴의 시작점으로 가정하여 이때의 변위를 임계변위, 경사각을 임계경사각이라 정의하였다. 이러한 임계변위 개념은 여러 연구자들(Franklin, 1977 ; Wiczorek, 1985 ; Keefer & Wilson, 1989 ; Jibson & Keefer, 1993)에 의해 제시된 바 있으며 사면의 안정관리에 활용되고 있다. 임계점은 그림 4에 나타난 바와 같이, 주어진 곡선의 최소 곡률반경을 갖는 점으로 결정되어지며, 곡선의 식을 이용하여 수학적 방법에 의해 얻어지게 된다. 이 임계점은 주어진 조건에 따라 매년 달라지게 되며, 따라서 주어진 조건에 대해서만 유효한 값이 된다. 이러한 방법으로부터 얻은 임계변위로부터 다음 식(7)과 같이 변위율을 정의하였다.

$$FS (\text{변위율}) = \frac{\text{임계 변위}}{\text{각 cell의 Newmark 변위}} \quad (7)$$

변위율은 유사정적해석의 안전율과 비슷한 개념으로 1보다 작을수록 위험한 영역을 나타낸다. 이와 같이 작성된 재해위험지도(재현주기 1000년, 0.18g)는 다음과 같다.

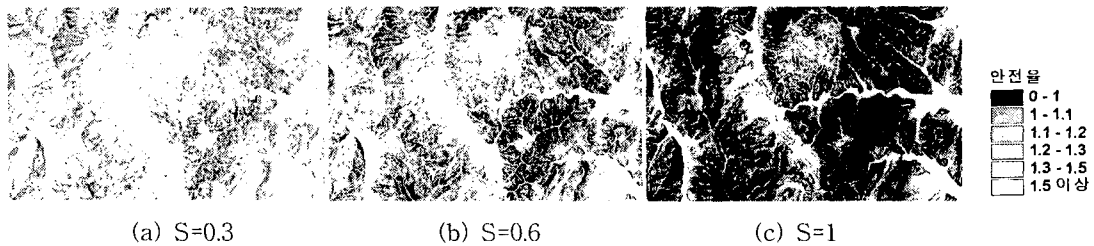


그림 5A. 유사정적해석에 의한 안전율 (재현주기 1000년, 0.18g)

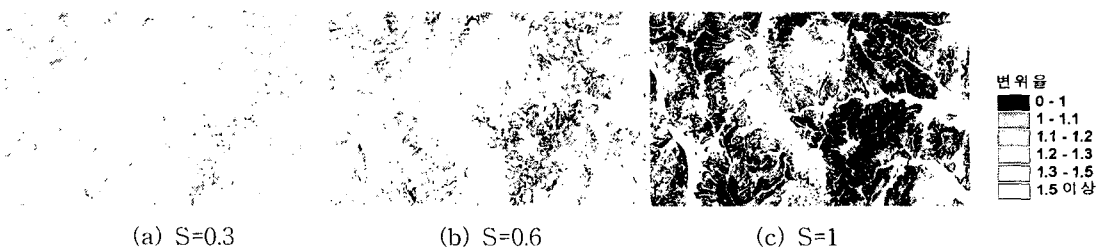


그림 5B. 임계변위에 의한 변위율 (재현주기 1000년, 0.18g)

그림 5의 결과로부터 포화도는 매우 민감한 변수임을 알 수 있어 향후 포화도의 적용에 있어서는 신중한 선택이 이루어져야 한다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 유사정적해석에 의한 안전율 결과와 변위해석에 의한 변위를 결과보다 더 많은 위험영역을 나타내고 있다. 이러한 결과는 두 가지 방법의 전혀 다른 접근 방법에서 기인된 것으로 생각되어지며, 보다 정확한 분석을 위해서는 심화된 매개변수 연구가 이루어져야 한다. 또한 이 결과는 주어진 대상지역에서만 한정적일 수 있는 결과이므로 좀 더 많은 적용을 통한 비교 검토가 필요하다고 하겠다.

## 4.2 해석결과 분석 및 토의

두 가지 방법에 의한 해석에 있어서 최대지반가속도와 지반의 강도정수가 결정되면 안전율과 변위를 사면경사의 함수로 나타낼 수 있다. 각 방법에 의한 해석결과를 비교하기 위하여 재현주기 1000년 (0.18g)인 지진에 대한 경사각-안전율(변위율) 그래프를 그림 6에 나타내었다.

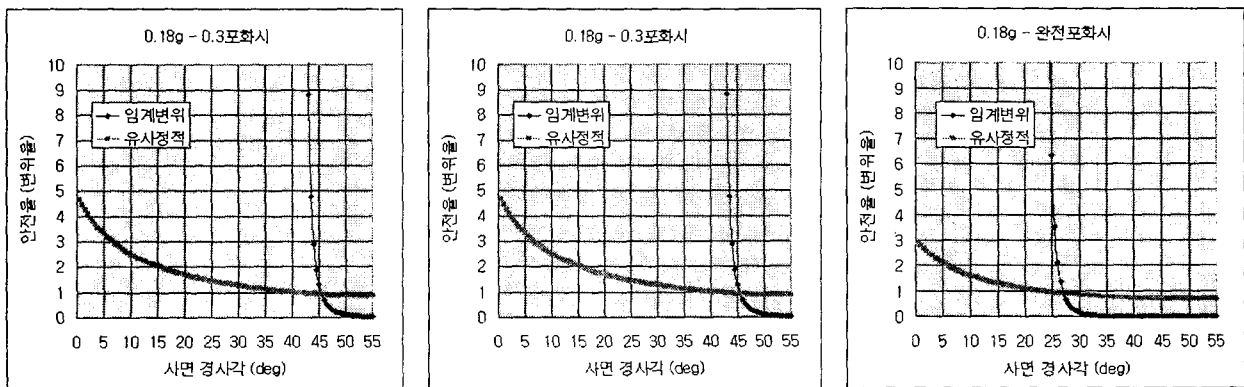


그림 6. 최대지반가속도 0.18g인 지진에 대한 안전율과 변위율

그림 6에서 볼 수 있듯이 유사정적해석을 통해 계산된 안전율은 경사가 커짐에 따라 점차적으로 감소하는 경향을 나타내는데 비해 Newmark의 강성블록해석을 통해 계산된 변위율은 앞서 정의한 임계점을 중심으로 급격한 변화를 보이고 있다. 이러한 결과는 앞서 재해위험지도의 비교에서 밝힌 바와 같이, 두 가지 해석의 접근방식 차이에서 기인한 것으로 보인다. 따라서, 두 결과에 대한 직접적인 비교에는 다소 무리가 있으나 유사정적해석의 결과가 1이 되는 점을 변위율이 1이 되는 임계점과 비교하여 보았다.

표 1. 포화도와 최대지반가속도 변화에 대한 해석결과 (최대표층두께 2.5m)

포화도	해석 방법	0		0.3		0.6		1	
		안전율	변위율	안전율	변위율	안전율	변위율	안전율	변위율
재현주기500년 (0.13g)	임계경사각(deg)	53.5	변위 없음	44.7	47.7	37.1	39.7	26.1	28.7
	임계변위(cm)				0.5		0.5		0.5
	위험면적(%)	0	0	0.4	0.1	6.5	2.9	41.5	31.8
재현주기1000년 (0.18g)	임계경사각(deg)	48.3	변위 없음	41.1	45.4	33.7	37.7	22.9	26.9
	임계변위(cm)				0.8		0.8		0.8
	위험면적(%)	0.1	0	1.8	0.3	14.3	5.5	52.8	38.6
재현주기2400년 (0.26g)	임계경사각(deg)	42.4	48.4	36.1	42.6	28.7	35.2	18.0	24.5
	임계변위(cm)		0.6		1.2		1.2		1.3
	위험면적(%)	1.1	0.1	8.4	1.0	31.8	10.4	67.8	47.3

표 1에 포화도와 최대지반가속도 변화에 대한 해석결과를 나타내었다. 표에서 안전율에 대한 임계경사각은 안전율이 1이 되는 점에서의 경사를 의미하며, 위험면적은 재해지도상에서 각각 안전율과 변위율이 1이하로 나타나는 면적의 전체 면적에 대한 비율이다. 표에서 나타난 결과를 보면 완전 건조상태

에서는 최대지반가속도에 관계없이 거의 변위가 발생하지 않는 것으로 나타났으며 위험 면적비도 아주 작은 값으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 반면에 완전 포화상태에서는 작은 경사에서 임계경사각이 결정되며 위험면적도 상당히 크게 나타남을 볼 수 있다. 그러나 완전 건조상태나 완전포화상태는 실제 자연상태에서 거의 나타나지 않는 상황이므로 이 두 결과는 기준값으로써의 역할을 할 뿐이며 향후 해석 시에는 포화도의 결정에 신중을 기해야 한다.

임계경사각의 경우, 안전율의 결과가 변위율의 결과보다 전체적으로 작은 경사에서 결정되었는데, 포화도에 따라서는 그 차이가 크게 다르지 않으나 최대지반가속도가 커짐에 따라 차이가 커지고 있음을 알 수 있다. 이에 따른 결과로 위험면적의 비도 최대지반가속도가 커짐에 따라 차이가 커지고 있음을 알 수 있다. 즉, 최대지반가속도가 0.13g에서 0.26g로 증가함에 따라 안전율과 변위율에 의한 임계경사각 간의 차이는 2.6~3.0° 에서 6.0~6.5° 로 증가하여, 최대지반가속도가 증가할수록 변위율 해석에 비해 안전율의 결과가 훨씬 더 보수적임을 나타냈다. 또한, 두 해석 모두 최대지반가속도가 증가할수록 임계경사각이 감소하며, 포화도가 커질수록 그 감소 폭이 줄어드는 경향을 나타냈다. 즉, 최대지반가속도가 0.13g에서 0.26g로 증가함에 따라, 안전율의 임계경사각은 8.1~11.1° 감소하였고, 변위율의 임계경사각은 4.2~5.1° 감소하였다. 표에 나타난 임계변위값을 비교해 보면, 같은 최대지반가속도에 대하여는 포화도의 차이에도 불구하고 거의 같은 변위를 나타내고, 최대지반가속도가 증가할수록 임계변위값은 증가함을 알 수 있다. 즉, 최대지반가속도가 0.13g에서 0.18g, 0.26g로 증가함에 따라 임계변위값은 각각 0.5cm에서 0.8cm, 1.2~1.3cm로 증가하였다. 그러나 같은 최대지반가속도에 대하여는 포화도의 차이에도 불구하고 거의 같은 변위를 나타내고 있어 주어진 경우에 대한 허용 변위로서의 사용 가능성을 보여주고 있다. 연구 결과로 나타난 임계변위(0.5~1.3cm)는 외국에서 제시된 결과들에 비해 대체로 작은 값을 나타내고 있다. 미국의 경우 5~10cm의 범위에서 임계변위를 설정하고 있으며, Franklin(1977)이 노천 광산에서 사면 계측시 피해 경고 수준으로 제시한 값은 10mm이다.

사면의 표층두께가 해석 결과에 미치는 영향을 알아보기 위하여 재현주기 2400년에 해당하는 최대지반가속도 0.26g에 대하여 최대표층두께를 변화시키며 해석을 수행하였다. 표층두께를 구하는 식은 식(6)을 그대로 사용하였으며 앞의 상수만 2.5, 3.0, 3.5로 변화시켜 해석하였고 그 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2. 최대 표층두께의 변화에 따른 해석결과 (재현주기 2400년, 0.26g)

최대 표층두께(m)		2.5		3		3.5	
해석 방법		안전율	변위율	안전율	변위율	안전율	변위율
포화도 0.6	임계경사각 (deg)	28.7	35.2	25.3	30.9	23.3	28.4
	임계변위 (cm)		1.2		1.1		1.0
완전포화	임계경사각 (deg)	18.0	24.5	15.0	20.9	13.0	18.7
	임계변위 (cm)		1.3		1.2		1.1

임계경사각의 경우, 표층두께가 커짐에 따라 안전율과 변위율에 의한 임계경사각의 차이는 감소하며, 포화도가 커짐에 따라 그 폭은 줄어드는 경향을 나타냈다. 즉, 최대표층두께가 2.5m에서 3.5m로 증가함에 따라 임계경사각의 차이는 포화도 0.6의 경우 6.5° 에서 5.1° 로, 완전포화시 6.5° 에서 5.7° 로 감소하였다. 임계변위의 경우, 표층두께가 커짐에 따라 임계변위는 감소하는 경향을 보인다. 즉, 최대표층두께가 2.5m에서 3.5m로 증가함에 따라 임계변위는 포화도 0.6의 경우 1.2cm에서 1.0cm로 완전포화시엔 1.3cm에서 1.1cm로 감소하였으나 큰 차이는 보이지 않았으며, 이번에도 역시 포화도의 변화에 대해서는 거의 일정한 값을 나타내는 것으로 나타나서 임계변위는 최대지반가속도에 의존하고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과들을 종합적으로 고찰해 볼 때, 두 가지 해석방법에 의한 결과는 정량적으로는 다소 차이를 보이고 있으나 정성적으로 유사한 경향을 보이고 있어 재해위험평가를 위한 지침으로의 활용 가능성을 확인하였다. 따라서 국내 여건에 맞는 일반적인 재해위험 평가방법의 정립을 위해서는 좀 더 심도있는 매개변수 연구와 실제 적용이 이루어져야 할 것이다. 또한, 본 논문에 제시된 결과는 대상지역에 대해 제한적일 수 있는 결과이므로 일반화를 위해서도 많은 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 5. 결론

사면에 대한 지진 재해위험 평가방법의 국내 적용을 위해 울산광역시 울주군 지역을 대상으로 유사정적해석과 Newmark의 강성블록해석을 이용하여 각각 재해위험지도를 작성하고 그 결과를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 사면의 파괴가 시작될 때의 변위로 정의되는 임계변위는 최대지반가속도가 일정한 경우 포화도에 관계없이 거의 일정하며 최대지반가속도가 커짐에 따라 그 값이 커지는 경향을 보였는데, 최대지반가속도가 0.13g인 경우 0.5cm, 0.18g인 경우 0.8cm, 0.26g인 경우 1.2~1.3cm의 임계변위값을 나타내었다.
- 2) 최대지반가속도가 증가함에 따라 두 방법에서 모두 임계경사각은 감소하였는데, 유사정적 해석에 의한 결과가 강성블록해석에 의한 결과보다 더 작은 값을 보였으며, 최대지반가속도가 0.13g에서 0.26g로 변하는 동안 두 방법에 의해 얻어진 임계경사각의 차이는 2.6~3.0° 에서 6.0~6.5° 로 증가하여 최대지반가속도가 증가함에 따라 두 해석 결과의 차이는 증가하는 경향을 보였다.
- 3) 최대표층두께를 변화시켰을 때 임계변위는 큰 변화를 보이지 않았는데, 최대표층두께가 2.5m에서 3.5m로 증가함에 따라 1.0cm에서 1.3cm로 증가하였다.
- 4) 임계경사각은 최대표층두께가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였는데, 최대표층두께가 2.5m에서 3.5m로 증가했을 때 두 방법에 의해 얻어진 임계경사각의 차이는 6.5° 에서 5.1~5.7° 로 감소하여 최대표층두께가 증가함에 따라 두 해석 결과의 차이는 줄어드는 경향을 보였다.
- 5) 두 가지 해석방법에 의한 해석결과는 이상에서 비교한 바와 같이 수치적으로는 다소 차이가 있으나 대체로 유사한 경향을 보이고 있어 두 방법 모두 재해위험 평가방법으로 사용 가능하다고 판단된다. 다만, 국내 여건에 알맞는 재해위험 평가방법의 정립을 위하여는 국내 지반특성 및 지진특성 등을 고려한 추가적인 연구가 요구되어진다.

## 참고문헌

1. 건설교통부(1997), "내진설계기준연구 I, II"
2. Ambraseys, N. N. and Menu, J. M.(1988), "Earthquake-Induced Ground Displacements", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 16, pp. 985-1006.
3. Franklin, J. A.(1977), "Some practical considerations in the planning of field instrumentation", Proc. of Int'l symposium on field measurements in Rock Mechanics, Zurich, Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 3-13.
4. Jibson, R. W.(1993), "Predicting Earthquake-Induced Landslide Displacements Using Newmark's Sliding Block Analysis", Transportation Research Record 1411.
5. Jibson, R. W., and D. K. Keefer(1993), "Analysis of the Seismic Origin of Landslides: Examples from the New Madrid Seismic Zone", Geological Society of America Bulletin, Vol. 105, No. 4, pp. 521-536
6. Jibson, Randall W., Harp, Edwin L. and Michael, John A.(1998), "A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps: An Example from the Los Angeles, California, Area", USGS, Open-File Report, pp. 98-113.
7. Keefer, D. K., and R. C. Wilson(1989), "Predicting Earthquake-Induced Landslides, With Emphasis on Arid and Semi-Arid Environments", In Landslides in a Semi-Arid Environment, Inland Geological Society, Riverside, Calif., Vol. 2, 1989, pp. 118-149.
8. Newmark, N. M.(1965), "Effects of earthquakes on dams and embankments", Geotechnique, Vol. 15, No. 2, pp. 139-160.
9. Wiczorek, G. F., R. C. Wilson, and E. L. Harp(1985), "Map Showing Slope Stability During Earthquakes in San Mateo County, California", Miscellaneous Investigations Map I-1257-E. U.S. Geological Survey.