

## 新 유사정적 사면안정해석 기법 개발

# Development of Novel Method of Seismic Slope Stability Analysis

윤 세 응<sup>1)</sup> · 박 두 희<sup>†</sup> · 이 승 호<sup>2)</sup> · 황 영 철<sup>3)</sup>

Yun, Seung · Park, Duhee · Lee, Seungho · Hwang, Youngchul

**ABSTRACT** : The seismic slope stability is most often evaluated by the pseudo-static limit analysis, in which the earthquake loading is simplified as static inertial loads acting in horizontal and/or vertical directions. The transient loading is represented by constant acceleration via the pseudostatic coefficients. The result of a pseudostatic analysis is governed by the selection of the value of the pseudostatic coefficient. However, selection of the value is very difficult and often done in an ad hoc manner without a sound physical reasoning. In addition, the maximum acceleration is commonly estimated from the design guideline, which cannot accurately estimate the dynamic response of a slope. There is a need to perform a 2D dynamic analysis to properly define the dynamic response characteristics. This paper develops a new hybrid pseudostatic method that links the modified one-dimensional seismic site response analysis and the pseudostatic algorithm. The modified site response analysis adjusts the density of the layers to simulate the change in mass and weight of the layers of the slope with depth. Multiple analyses were performed at various locations within the slope to estimate the change in seismic response of the slope. The calculated peak acceleration profiles with depth from the developed procedure were compared to those by the two-dimensional analyses. Comparisons show that the two methods result in remarkable match. The calculated profiles are used to perform pseudostatic analysis. The results show that use of peak or a fraction of acceleration at the surface can seriously underestimate or overestimate the factor of safety, and that the proposed procedure significantly enhances the reliability of a standard procedure.

**Keywords** : Seismic slope stability, Pseudostatic analysis, Pseudostatic coefficients, Seismic site response analysis, Peak acceleration profile

**요 지** : 지진동에 대한 사면의 안정성은 일반적으로 지진계수를 이용하여 지진하중을 유사정적 하중으로 단순화하여 한계평형법으로 평가된다. Transient 지진동은 지진계수를 이용하여 정적하중으로 대체된다. 하지만, 유사정적 해석결과에 절대적인 영향을 미치는 지진계수는 합리적인 물리적 근거 없이 산정된다. 또한 내진설계기준에 의거하여 산정되는 최대가속도는 사면의 진동특성을 반영한다고 볼 수 없으며, 이를 정확하게 예측하기 위해서는 2차원 동적해석을 수행해야 한다. 본 연구에서는 수정된 1차원 동적해석과 유사정적해석을 연결한 Hybrid 유사정적 해석법을 제안하였다. 기존의 해석기법은 깊이에 따라서 변이하는 가속도를 고려할 수 없기에 신뢰성 있는 사면의 안정성 예측이 어려운 실정이다. 수정된 1차원 지반응답해석은 깊이에 따른 사면 무게변화를 모델링하기 위하여 층의 밀도를 조정하였으며 위치별 진동가속도를 예측하기 위해서 다수의 해석을 수행하였다. 2차원 유한요소해석과 비교한 결과, 수정된 1차원 해석은 2차원 해석과 일치성이 우수한 것을 확인할 수 있었다. 해석결과를 유사정적해석에 입력하여 깊이에 따라서 변이하는 가속도 주상도를 적용하였으며 기존의 해석방법으로 계산된 안전율과 비교하였다. 비교 결과, 계산된 안전율에는 큰 차이가 발생하는 것으로 나타났으며, 기존의 해석기법으로 안전율을 예측할 경우, 매우 비현실적인 값을 계산할 수 있다. 본 연구에서 개발된 기법은 해석의 신뢰성을 현격하게 향상시키는 것으로 나타났다.

**주요어** : 사면안정해석, 유사정적해석, 설계지진계수, 지반응답해석, 최대지반가속도 주상도

## 1. 서 론

국내에서는 지진동에 의한 사면피해가 제한적인 반면 국외에서는 많은 사례가 발생하였다. 국내외 경우, 1783년 이탈리아에서 발생한 지진 이후 사면피해에 대한 과학적인 기록이 시작되었으며 1930년대 항공사진이 개발되면서부터 사면피해가 더욱 정밀하게 기록되었다. 이 중 매우 중요한 사례는 1957 캘리포니아(Daly City, 규모 = 5.3)에서

발생한 지진에 의하여 유발된 23개의 사면붕괴이며 이는 총 10km<sup>2</sup>에 걸쳐서 발생하였다. 1964년 알래스카 지진(규모 = 9.2)에서는 269,000km<sup>2</sup>에 이르는 대규모의 사면붕괴가 발생하였다. 페루에서 발생한 규모 7.9의 지진은 역사상 가장 파괴적인 사면붕괴를 유발하였다. 이로 인하여 발생한 대규모 낙석으로 인하여 18,000 이상의 사망자가 발생하였으며 30,000km<sup>2</sup>에 걸쳐서 수천개의 사면붕괴로 이어졌다. 이외에도 수많은 지진동에 의한 사면피해가 발생

1) 정회원, 한양대학교 토목공학과 석사과정

† 정회원, 한양대학교 토목공학과 전임강사(E-mail : dpark@hanyang.ac.kr)

2) 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수

3) 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수

하였으며 이를 모두 나열하는 것은 불가능하다(Keefer, 2002).

지진동에 대한 사면의 안정성을 평가하는 가장 정확한 방법은 기하학적 증폭형상과 시간별로 변이하는 안전율을 모사할 수 있는 2차원 또는 3차원 동적해석이다. 하지만 2 - 3차원 동적해석은 수행하기가 어려우며 긴 연산시간이 소요되므로 널리 수행되지 않고 있다. 이와 같은 이유로, 지진에 의한 관성력을 등가정적하중으로 치환하는 유사정적해석이 가장 널리 사용되고 있다. 유사정적해석은 수행이 간편하다는 장점을 가지고 있지만 다양한 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 기존 유사정적 해석기법의 문제점을 보완하되, 사면의 동적거동을 보다 정확하게 모사하는 수정된 1차원 지반응답해석기법을 장착하여, 동적해석의 정확성과 유사정적해석의 편리성을 동시에 만족하는 新 유사정적 해석법을 개발하였으며 이의 정확성을 평가하였다.

## 2. 유사정적 해석기법

지진이 발생하면 사면에 큰 관성력이 유발되며 토체 내 응력이 증가하게 된다. 관성력을 유발시키는 지진력을 등가정적하중으로 치환하여 Body Force로 사면 토체에 작용하여 해석하는 방법을 유사정적해석법이라 하며 이때의 등가정적하중은 다음과 같이 계산된다(Terzaghi, 1950).

$$F_h = \frac{a_h}{g} W = k_h \frac{a_{\max}}{g} W \quad (1)$$

여기서,  $a_h$ =수평가속도,  $a_{\max}$ =최대지반가속도,  $k_h$ =수평지진계수이다. 수직성분을 고려할 경우에는 식 (1)의  $h$ 항을  $v$ 로 변경하면 된다. 식 (1)은 유사정적해석의 정확성은  $a_h$  (또는  $k_h$ )에 따라서 결정됨을 보여준다. 국내의 경우에는  $a_{\max}$ 는 일반적으로 내진설계기준(II)에서 제시된 재현주기 1000년(내진성능 1등급) 또는 재현주기 500년(내진성능 2등급) 지진에 상응하는 최대지반가속도( $a_{\max}$ )가 사용된다. 일반적으로는 SB 지반이라 가정되며 이와 같은 경우  $a_{\max}$  내진성능 1과 2등급 각각 0.154g와 0.11g이다. 지반의 증폭현상을 모사할 경우, 지반분류별 증폭계수를 적용해야 한다.  $k_h$ 는 일반적으로 0.5~1.0이 적용되고 있다. 이와 같은 방법으로 수행되는 유사정적해석기법에는 다음과 같은 문제점이 있다.

1.  $a_{\max}$ 의 예측은 수평지반이라고 가정해서 예측하였으며 이는 사면에 적용하는 것은 무리가 있다. 이를 정확하게 예측하기 위해서는 2차원-3차원 동적해석을 수행해

야 하나 이는 전술한 바와 같이 사용하기 어렵다.

2. 지표면에서 계산되는 최대지반가속도를 사용하기에 깊이 따른 가속도의 변화가 고려되지 않는다. 깊이에 따른 가속도의 변화를 모사하기 위해서는 1번 항목과 마찬가지로 동적해석을 수행해야 한다.
3. 사면 내 깊이에 따른 최대지반가속도의 변화, 그리고 순간적으로 동적하중이 작용하는 점 등을 고려하여 국내 외에서  $k_h$ 는 1.0 보다 작은 값이 일반적으로 사용되고 있다. 하지만,  $k_h$ 은 경험적으로 산정된 값이며 국가별 설계기준에서  $k_h$ 은 일정하지 않다. 국내에서는 명확한 기준 없이 관례적으로 0.5~1.0이 적용되고 있다.

## 3. 新 유사정적 해석기법 개발

전절에서 기존의 유사정적 해석기법의 문제점을 지적하였다. 본 연구에서는 기존의 해석기법의 문제점을 해결하며 유사정적해석의 정확성을 향상시키기 위하여 동적해석과 유사정적을 혼합시킨 Hybrid 유사정적 해석기법을 개발하였다. 新 유사정적 해석기법의 구성요소인 동적해석 모듈과 유사정적 모듈은 다음과 같다.

### 3.1 동적해석 모듈

사면의 동적응답 특성을 정확하게 예측하기 위해서는 2차원 이상의 동적해석을 수행해야 하나, 이는 해석의 어려움과 과도한 소요연산시간 등의 이유로 실무에서 수행되는 경우는 거의 없다. 본 연구에서는 동적응답을 보다 간편하게 예측하기 위하여 수정된 1차원 지반응답해석기법을 개발하였으며 이를 신 해석기법에 모듈로서 적용하였다.

일반적인 1차원 지반응답해석은 모든 지층의 경계가 수평하며 지반의 응답은 기반암으로부터 수직방향으로 전파되는 수평전단파(SH, horizontal shear wave)에 지배받는다 는 가정을 기본으로 한다. 실제 지진파 전파는 3차원이지만 여러 사례 있어서 지표면 자유장 운동을 비교적 잘 예측하였다(Idriss 등, 1968, Hashash 등, 2001).

1차원 지반응답해석은 해석영역에 따라 주파수 영역 그리고 시간영역으로 구분되어진다. 주파수 영역 해석은 입력물성치가 적으며 계산이 빠르다는 장점을 가지고 있지만 지반 거동은 선형 탄성이라고 가정되어진다. 반면, 지진 시 지반의 비선형 거동에 의하여 지반응답은 크게 영향을 받으며 해석 시 이를 사실적으로 모사하는 것은 매우 중요하다. 주파수 영역에서 지반의 비선형 거동을 고려하기 위하여 제안된 방법이 등가선형해석기법이며 시간영역에서는 비선형해석을 통하여 모사하게 된다. 실무에서 비

선형해석이 사용되는 경우는 극히 드물며 일반적으로 등가선형해석이 적용되고 있다.

1차원 등가선형해석은 연직방향으로 전파되는 SH파에 대하여 다음과 같은 1차원 파동방정식의 해를 주파수영역에서 계산하게 된다(Kramer, 1996, Schnabel 등, 1972).

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (2)$$

여기서,  $\rho$ =비중,  $G$ =전단탄성계수,  $u$ =변위,  $z$ =지표면에서부터의 깊이,  $t$ =시간이다. 위의 파동방정식은 중복반사이론에 입각하여 반무한 반탄성체의 기반 위에 복수층지반이 놓여진 경우에 대해 적용하여 해를 구한다(Schnabel 등, 1972). 각 층은 동일 층 내에서 등방·균질하고 물리적 특성과 역학적 특성은 같다고 가정한다. 이 모델의 진동은 모델 지반을 연직 방향으로 투과 및 반사하여 전달되는 전달파에 의해 발생하고 아래와 같은 변위는 수평 방향으로만 발생한다.

위의 파동방정식을 풀면 각 층의 상단과 하단에서의 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

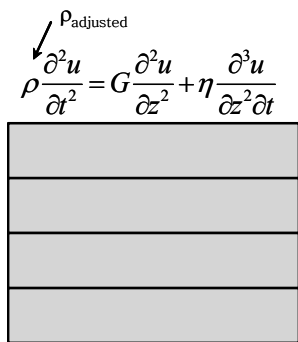
$$\begin{aligned} u(Z_m = 0, t) &= u_m = (A_m + B_m)e^{i\omega t} \\ u(Z_m = h_m, t) &= u_{m+1} = (A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m})e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $u$ =변위,  $A_m$ 과  $B_m$ =전파의 상향파와 하향파 성분,  $h_m$ =층의 두께  $k_m^* = \frac{\omega}{(\sqrt{G_m/\rho_m})(1+i\xi_m)}$ 이다.

위의 식에 boundary condition과 compatibility condition을 만족시키게 하면 다음과 같은 지층간의 상호식을 구할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} A_{m+1} &= \frac{1}{2} A_m (1 + \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 - \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \\ B_{m+1} &= \frac{1}{2} A_m (1 - \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 + \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $\alpha_{m+1}^* = \frac{\rho_m \sqrt{G_m/\rho_m} (1+i\xi_m)}{\rho_{m+1} \sqrt{G_m/\rho_m} (1+i\xi_{m+1})}$ 이다.



위의 식을 사용하여 지층 간에 다음과 같은 전달함수 (transfer function)를 유도할 수 있다.

$$F_{ij}(\omega) = \frac{|u_i|}{|u_j|} = \frac{A_i(\omega) + B_i(\omega)}{A_j(\omega) + B_j(\omega)} \quad (5)$$

전달계수는 한 층에서의 변위를 안다면 모든 층에서의 변위를 쉽게 계산할 수 있는 유용한 식이며 주파수영역 지반진동해석기법의 기본식이다. 주파수영역해석방법은 매우 계산 시간이 빠르고 간편하다는 장점을 가지고 있지만 선형인 재료모델에만 적용될 수 있다는 단점을 동시에 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 제안된 해석방법이 등가선형해석방법이며 이는 상당히 정확한 것으로 알려졌다(Kramer, 1996).

사면의 응답은 수평토층과는 상이하며 이의 기하학적 형상에 의한 증폭을 예측하는 것은 매우 중요하다. 과거 일본 마쓰자키에서 기록된 지진들은 지표면의 기하학적 형상으로 인한 증폭현상을 입증한 바 있다(Jibson, 1987). 지표면의 기하학적 형상으로 인한 증폭효과는 지진파와 지표면에서의 상호작용, 지진파의 주파수 특성, 입사각 등 다양한 요소들의 영향을 받으므로, 이를 모델링 및 정량화하는 것은 매우 어렵다.

본 연구에서는 1차원 지반응답해석 틀 안에서 사면의 기하학적 형상으로 인한 증폭현상을 간접적으로 모사하는 수정된 해석기법을 적용하였다. 일반적인 1차원 해석과 수정된 해석기법의 차이점은 심도별 무게의 변화를 모사할 수 있다는 점이다. 사면의 상부층은 그림 1과 같이 하부층에 비하여 층의 무게가 작으며, 층의 무게는 심도가 깊어질수록 증가하게 된다. 이와 같이 수직방향으로 변이하는 무게를 모델링하기 위하여 본 연구에서는 사면을 구성하는 각각의 층의 밀도( $\rho$ )를 그림 1과 같이 전체 사면 폭에 대한 각 층의 폭의 비를 이용하여  $\rho_{adjusted}$ 를 식 (6)과 같이 계산한다.

$$\rho_{adjusted} = \frac{L_i + L/3}{4L/3} \times \rho_i \quad (6)$$

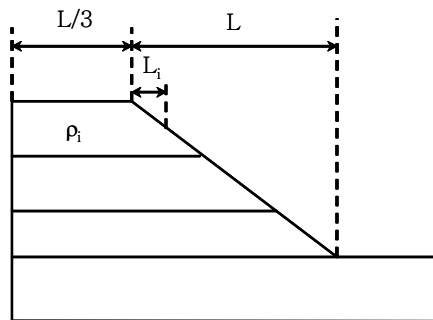


그림 1. 수정된 1차원 지반응답해석에 적용된 밀도 보정법

여기서,  $L$ =사면폭,  $L_i$ =사면정점에서부터  $i$ 번째 층 끝단까지의 수평거리,  $\rho_i$ = $i$ 번째 층의 밀도이다. 식 (6)은 사면폭을  $L$ 이 아닌  $3/4L$ 로 산정하였다. 이는 사면폭을  $L$ 로 적용하였을 경우, 최상단층의 밀도가 매우 작게 계산되어 진동이 크게 증폭될 수 있기 때문이다.  $3/4L$ 은 많은 수의 응답 해석으로부터 계산된 최적의 폭이다.

수정된 1차원 지반응답해석의 정확성을 검증하기 위하여 해석결과를 2차원 동적해석과 비교하였다. 1차원 지반응답해석과의 2차원의 동적해석에 사용된 사면은 그림 2와 같다. 사면의 종류는 총 세 가지이며 각각에 대하여 사면의 경사도는 1:2를 적용하였다. 지반에 사용된 물성치는 표 1과 같다(표 1의 점착력과 마찰각은 등가선형 지반응답 해석에는 사용되지 않았으며 사면안정해석에 사용되었음).

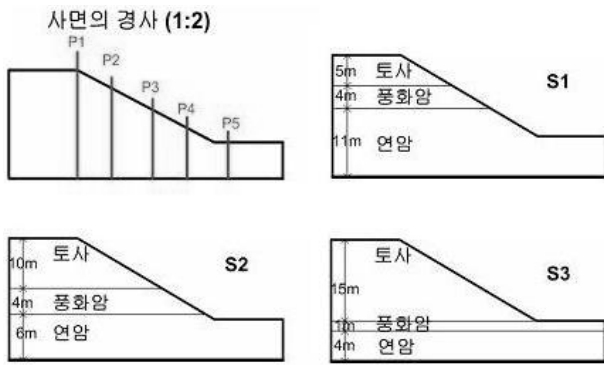


그림 2. 토층에 따른 검토단면

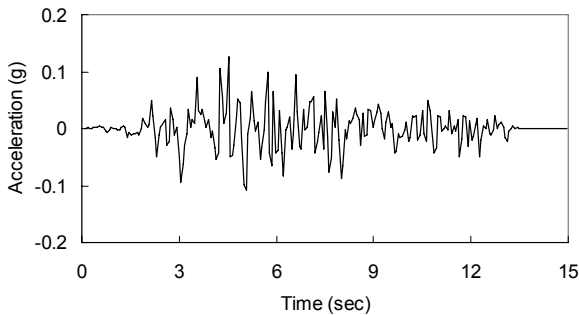


그림 3. 동적해석에 사용된 입력지진파

표 1. 해석에 적용된 지반의 물성치

구분	$V_s$ (m/s)	$\gamma$ (tf/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$c$ (tf/m <sup>2</sup> )
토사	300.0	2.0	30	1.5
풍화암	400.0	2.2	30	3
연암	1000.0	2.5	30	15

표 2. 사용된 지반의 동적 곡선

구분	전단탄성계수 감소곡선	감쇠비 곡선
토사	Seed 등(1970) Mean 곡선	Seed 등(1970) Mean 곡선
풍화암	Seed 등(1970) Upper 곡선	Seed 등(1970) Lower 곡선
연암	Schnabel 등(1972) Rock 곡선	Schnabel 등(1972) Rock 곡선

입력 지진파는 Ofunato 지진파를 재현주기 1000년 지진에 상응하도록 스케일링 하였다(그림 3). 지반의 전단탄성계수 감소 곡선과 감쇠비 곡선은 표 2와 같이 선정하였다.

수정된 1차원 응답해석이 사면의 심도에 따른 무게변화를 예측할 수 있다고 하나, 해석 1회로 사면표면에서의 응답을 구할 수 없다. 본 연구에서는 그림 2와 같이 5개 지점(P1 - P5)에서 1차원 응답을 수행되었다. 1차원 해석 소요 시간이 일반적으로 1분 미만인 것을 감안하면, 5회의 해석을 수행하여 수 시간이 소용되는 2차원 동적해석과는 비교가 되지 않을 만큼 효율적이다. 그림 4는 5회의 1차원 해석으로 계산된 사면표면에서의 최대지반가속도와 Quake/W(2004)를 사용하여 수행된 2차원 요소 동적해석으로 계산된 결과를 비교하였다. 1차원 지반응답해석은 밀도보정을 하지 않은 표준 그리고 밀도보정을 한 수정된 해석 모두 본 연구에서 새롭게 개발된 해석프로그램을 사용하였다.

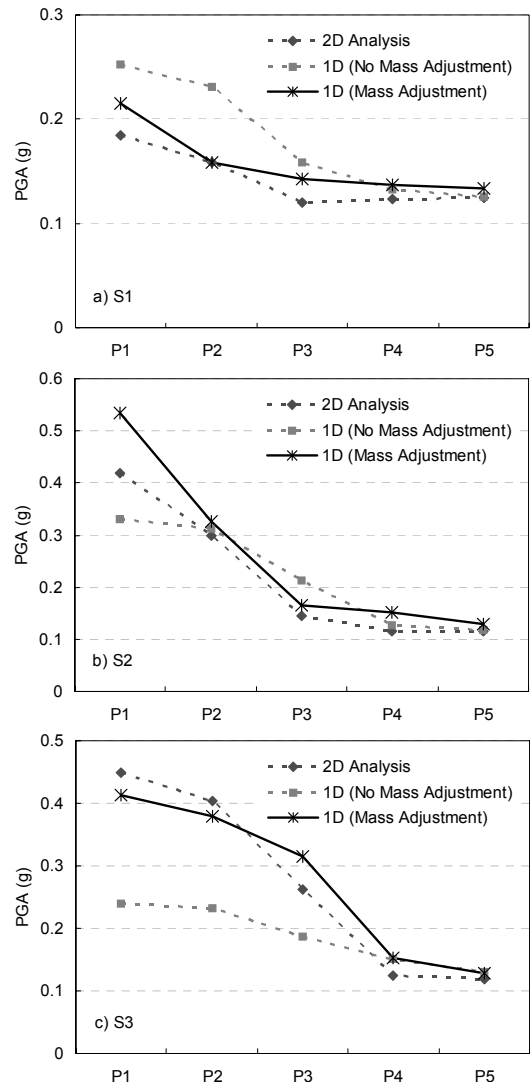


그림 4. 2차원 유한요소법과 수정된 1차원 지반응답해석으로 계산된 사면표면에서의 최대지반가속도 비교

해석결과는 그림 4와 같다. 기존의 수정된 1차원 지반응답해석은 무게가 최소인 최상층의 응답을 정확하게 예측하지 못하는 것으로 나타난 반면, 수정된 해석은 2차원 동적해석과 유사한 응답을 예측하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 사용된 세 개의 사면에서 공통적으로 나타났으며 수정된 해석기법은 효과적이며 효율적으로 2차원 동적응답을, 즉 기학적 증폭, 충분히 정확하게 모의할 수 있음을 보여주고 있다.

### 3.2 유사정적 해석 모듈

유사정적해석은 일반적인 한계평형해석에 식 (1)과 같은 등가정적 Body Force를 적용하여 안전율을 계산한다. 한계평형해석은 파괴토체를 여러 개의 수직방향으로 분리된 요소에 작용하는 힘의 평형을 고려하여 안전율을 계산하며 토체에 일정한  $k_{hi}$ 을 적용하는 경우에는 매우 효율적이지만, 전절에서 설명된 깊이별로 변화하는 최대지반가속도의 변화를 반영할 수 없다. 이를 반영하기 위해서는 토체의 요소를 수평방향으로 분리해야 하며, 각각의 요소에 깊이별로 변이하는 Body Force를 적용해야 한다. 이를 위해서는 새로운 해석프로그램을 개발하거나, 깊이별 변이하는 Body Force를 적용할 수 있는 프로그램을 사용해야 한다. 본 연구에서는 유한요소해석프로그램인 VisualFEA(2003)를 사용하여 이를 적용하였다.

## 4. 新 유사정적 해석기법 비교

新 유사정적 해석기법과 기존의 유사정적 해석기법의 차이를 평가하고자 계산된 안전율을 비교하였다. 해석은 모두 VisualFEA(2003)를 사용하여 수행하였다. 기존의 유사정적해석법은  $k_{hi}=0.5$  적용하였으며 내진설계기준(II)(건설교통부, 1997)에 따른  $a_{max}$ 를 적용하였다. 사면 S1은 내진설계기준 상 SB 지반에 속하며 S2, S3은 Sc 지반으로 분류된다. 재현주기 1000년 지진에 대한 S<sub>B</sub>와 S<sub>C</sub> 지반의  $a_{max}$ 는 각각 0.154g와 0.182g이며 이를 해석에 적용하였다. 新 유사정적 해석은 수정된 1차원 지반응답해석을 대상사면의 5개의 지점에서 계산하여(그림 2 참조) 각 지점별(깊이별) 최대지반가속도를 계산하여 이를 Body Force로 적용하였다. 또한 지반응답해석 결과에 따른 차이를 평가하기 위하여, Standard 지반응답해석으로 수행하여 계산된 지점별 최대지반가속도를 적용하여 안전율을 계산하였다. 그림 5는 기존 유사정적해석과 新 유사정적 해석법으로 계산된 안전율을 비교하고 있다. 비교 결과, 내진설계

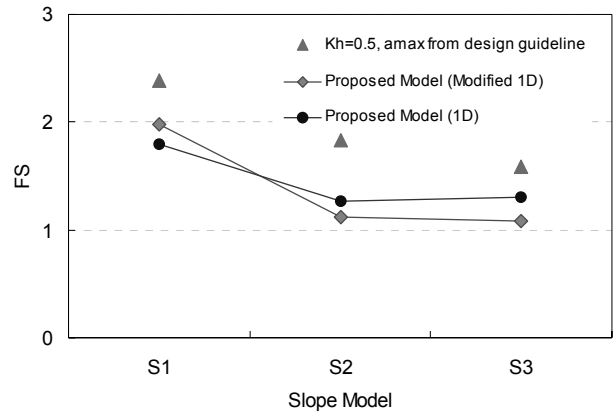


그림 5. 내진설계기준을 사용하는 기존의 기법과 본 연구에서 개발된 기법으로 계산된 안전율의 차이 비교

기준으로 예측된  $a_{max}$ 을 적용할 경우, 안전율을 크게 과대 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 지반을 단순하게 5가지(특별한 해석이 요구되는 지반 S<sub>F</sub>를 제외한다면)로 분류하는 내진설계기준 자체의 부정확성과 기본적으로 1차원 지반에만 적용되도록 제안되었기 때문이다. 깊이별 지반가속도의 변화를 모사할 수 있는 新 유사정적 해석법으로 계산된 안전율은 기존 유사정적해석법에 비하여 최대 30% 이상 작은 안전율을 예측하는 것으로 나타났다. 이는 사면설계 시, 반드시 지반응답해석을 수행하여 합리적으로 지반의 진동을 예측해야 함을 입증하고 있다. 깊이별 변이하는 최대지반가속도를 적용하는 경우에도, Standard 1차원 응답해석을 적용할 경우에는, 안전율을 10-15% 정도 다르게 예측하는 것으로 나타났으나 내진설계기준으로 구한  $a_{max}$ 을 사용할 경우에 비해서는 정확성이 현격히 향상되는 것을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 지진동에 대한 사면의 안정성을 평가하는 새로운 해석기법을 개발하였다. 해석기법은 동적해석과 유사정적의 두 개의 모듈로 구성되어있다. 동적해석모듈은 1차원 지반응답해석을 기반으로 하되, 깊이별 무게의 변화를 모사할 수 있도록 수정되었다. 수정된 1차원 응답해석의 정확성을 검증하기 위하여 해석결과를 2차원 동적해석과 비교하였다. 수정된 1차원 해석을 5개의 위치별로 수행하여 사면표면에서 최대지반가속도를 계산하였으며 이를 2차원 동적해석과 비교한 결과, 수정된 해석은 2차원 해석을 상당히 정확하게 예측하는 것을 볼 수 있다. 반면, 기존의 1차원 응답해석은 특히 최상층의 응답을 정확하게 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 新 유사정적해석기법의

유사정적해석모듈은 동적해석모듈에서 계산된 깊이별 가속도를 가속도로 인한 Body Force로 치환하여 파괴토체에 적용하며 궁극적으로 안전율을 계산한다. 동적해석과 유사정적해석을 융합한 Hybrid 해석기법은 기존의 해석기법과 비교하여 수평지진계수를 사용할 필요가 없으며 동적응답을 보다 정확하게 모사하는 진보된 방법이다. 기존의 기법과 신 해석기법으로 계산된 안전율을 세 개의 사면에 적용하여 비교한 결과, 기존의 기법은 안전율을 30%이상 과대 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업 연구과제인 “낙석 및 산사태 방지를 위한 차세대 신기술 개발(05지역특성 B02-01)”에서 지원받아 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 건설교통부 (1997), *내진설계기준연구(II)*, pp. 29~41.
2. Hashash, Y.M.A. and Park, D. (2001), Non-linear one-dimensional

- seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment, *Engineering Geology*, Vol. 62, No. 1-3, pp. 185~206.
3. Idriss, I.M., and Seed, H.B. (1968), Seismic response of horizontal soil layers, *Journal of the Soil mechanics and foundations*, Vol. 94, No. SM4, pp. 1003~1029.
4. Jibson, R.W. (1987), Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis, *Transportation Research Record Washington*, No. 1411, pp. 9~17.
5. Keefer, D.M. (2002), Investigating Landslides Caused By Earthquakes-A Historical Review, *Geophysics*, Vol. 23, pp. 473~510.
6. Kramer, S.L. (1996), *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J. pp. xviii~653.
7. QUAKE/W (2004), *User's Manual*, GEO-SLOPE International Ltd.
8. Schnabel, P.B., Lysmer, J.L., and Seed, H.B. (1972), *SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*, EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA.
9. Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970), *Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses*, Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley. Report No. EERC 70-10, p. 41.
10. Terzaghi, K. (1950), Mechanism of Landslides, *The Geological Society of America*, Berkeley November, pp. 83~123.
11. VisualFEA (2003), *User's Manual*, SYTecEnC.

(접수일: 2008. 11. 10 심사일: 2008. 11. 11 심사완료일: 2008. 12. 16)