

## 등가선형해석을 이용한 지반증폭 영향 요소 연구

### A Parametric Study on Site Amplification using Equivalent Linear Analysis

김동수 \*                      윤종구 \*\*                      박덕근 \*\*\*  
Kim, Dong-Soo              Yoon, Jong-Ku              Park, Dug-Keun

---

#### ABSTRACT

Free-field ground motion during earthquake is significantly affected by the local site conditions and it is essential for the seismic design to perform the ground response analysis. In this study, ground response analyses based on the equivalent linear method were carried out to evaluate the effects of various ground conditions on the site amplification. Four major factors including the depth of the site(very soft and dense soil), the impedance ratio between soil layer and bed rock, linear analysis versus equivalent linear analysis, and the location of soft soil layer were deeply discussed. Based on the analysis results, the importance of various local site conditions on the site amplification was emphasized.

---

#### 1. 서 론

1920년대 이래로 지반공학자들은 강진에 대한 국지적인 지반조건의 영향정도를 정량화하기 위한 연구를 수행해 왔다. 연약점토질 퇴적층 위에 형성된 멕시코시티의 경우 지반증폭에 의해 엄청난 피해를 입었으며, 1988년 발생한 아르메니아 지진의 경우 진원으로부터 멀리 떨어진 깊은 퇴적층 위에 세워진 도시는 진원 근처에 위치한 도시보다 많은 피해를 입었다. Loma Prieta 지진 및 고베지진의 경우 매립지 위에 세워진 구조물들이 많은 피해를 입는 등 부지증폭현상이 지진피해의 주요 원인이 되었다. 또한, 최근에는 강진 계측기록을 바탕으로 국지적 지반특성에 따른 지반증폭현상을 정량적으로 측정할 수 있게되었다. 따라서, 각국의 지진관련 시방서에서 지반증폭관련 기준이 강화되고 있다. 1997년 개정된 NEHRP 기준에서는 상부지층 30m의 전단파 속도를 바탕으로 지반의 종류를 6종으로 구분하고 장주기 영역은 물론 단주기 영역에도 지반증폭계수를 강화하여 도입하였고, 국내 내진시방서도 이를 참고하여 제정되었다.

캘리포니아 주립대학의 Seed교수와 Idriss교수가 1차원 등가선형해석기법을 이용한 SHAKE프

---

\* 한국과학기술원 토목공학과 부교수, 정회원

\*\* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

\*\*\* 행정자치부 국립방재연구소 연구관

로그래를 개발·배포한 후 지반의 지진응답에 대한 본격적인 예측 및 해석이 시작되었으며, 이후 더욱 정확한 해석 및 액상화현상 예측을 위한 동적비선형모델(Cyclic Nonlinear Model)과 구성모델(Constitutive Model)을 이용한 비선형 지진해석 프로그램이 개발되고 있다.

현재 사용중인 여러 지반응답특성 평가기법 중 현업에서 가장 널리 사용되어지는 방법은 1차원 등가선형해석을 이용한 지반응답특성 평가방법이다. 이 기법은 지반을 구성하고 있는 모든 지층이 반무한-수평으로 이루어져 있고, 지반의 응답이 주로 기반압으로부터 연직 방향으로 전파되는 SH파에 의해 이루어진다고 가정하고 해석하는 방법이다. 1차원 지반응답특성 평가는 암반노두의 계층치를 이용하여 기반압에서의 지진 거동을 예측한 후, 이를 이용하여 지표면에서의 지진거동을 예측하고 이를 암반노두 인근 지역에서 계층되어진 지표면 실제 계층치와 비교하는 방법으로 타당성이 검증되어져 왔다. 대표적인 1차원 지반응답특성 평가 프로그램으로는 SHAKE91이 있고, 이 프로그램에서는 지반의 비선형 거동을 등가선형으로 모델링하여 해석을 수행한다.

본 연구에서는 자유장에서 1차원 등가선형해석을 이용하여 지반의 증폭에 영향을 주는 요소에 대하여 심도 있게 다루고자 한다. 본 연구에서 적용한 요소로는 지반의 전단파 속도, 지반과 암반의 강성도 차이, 토층 두께, 지진의 세기, 연약 지반층의 존재여부 등이다.

## 2. 등가선형(Equivalent Linear) 이론

지진시 지반이 비선형 거동을 하는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 비선형 용력-변형을 이력 거동을 하는 지반을 할선 전단탄성계수  $G_{sec}$ 와 이력곡선(hysteresis loop) 내부 한 싸이클에서 발생하는 동일한 에너지 손실을 가지는 등가선형감쇠비  $\xi$ 로 표현할 수 있다.

선형해석시 사용되는 전단탄성계수( $G$ )와 감쇠비( $\xi$ )는 지반의 한 층에서 일정한 값을 갖도록 사용되므로, 이에 상응하는 각층의 변형률 값을 산정하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서, 실내시험 중 지반이 경험하게 되는 변형에너지는 일시 진동인 지진시 겪게되는 지반의 변형에너지에 비하여 훨씬 크며, 일반적으로 이를 보정하기 위하여 지진시 변형률의 크기는 최대 전단변형률의 50-70%의 범위내에서 유효변형률을 산정하여 사용한다. SHAKE91에서는 최대 전단변형률( $R_r$ )의 크기를 지진 규모( $M$ )의 함수로 식 (1)과 같이 정의하여 사용한다.

$$R_r = \frac{\epsilon_{equiv}}{\epsilon_{max}} = \frac{(M-1)}{10} \quad (1)$$

지진응답 산정시 계산되어진 변형률의 크기는 전달함수를 구성하는 등가 선형전단탄성계수 및 감쇠비의 값에 영향을 미치므로 지반 모든 층에 대한 반복 계산을 통하여 최적값을 찾아야 한다. 이를 위하여 지반을 수평층상 구조로 모델링한 후 각 층에 대한 초기 가정치  $G$ 와  $\xi$ 를 산정한다. 초기 가정치  $G$ 와  $\xi$ 로부터 지반응답 및 각층의 변형률 이력곡선을 산정하고, 산정된 변형률 이력곡선으로부터 얻어진 최대 변형률로부터 각층의 유효 변형률을 계산한다. 그리고, 산정된 유효 전단응력으로부터 상응하는 등가 선형 감쇠비 및 전단탄성계수를 사용하여 지반응답 및 각층의 변형률 이력곡선을 산정한다. 등가선형해석은 이러한 과정을 반복하여 각층에서 계산된 전단탄성계

수 및 감쇠비가 사용되어진 전단탄성계수 및 감쇠비의 허용오차내에 존재할때까지 반복 연산을 수행한다. 이와 같은 일련의 등가선형해석기법은 지반의 지진 거동시 각 시간대에 따른 전단 탄성계수 및 감쇠비의 변형율에 따른 변화를 고려하지 못하나, 비교적 신뢰할 수 있는 결과를 제공한다.

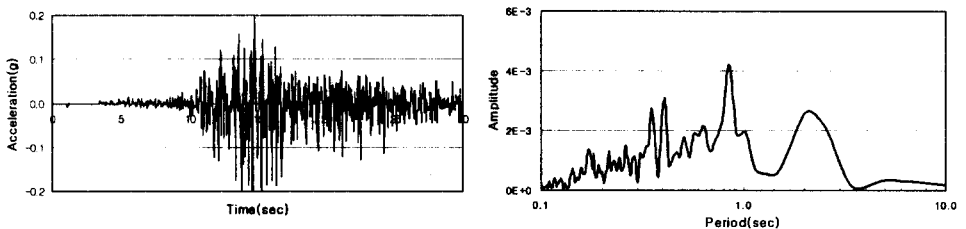
### 3. 등가선형해석의 입력변수

지진시 지반의 증폭 정도에 영향을 주는 요소는 지반의 전단파 속도, 지반과 암반의 강성도 차이, 토층 두께, 입력지진의 세기, 연약 지반층의 존재여부, 지반과 암반의 밀도, 지진의 주파수 대역, 지반의 비선형 변형특성 등 여러 가지가 있다. 따라서, 지반증폭에 영향을 주는 요소에 대한 연구를 효과적으로 수행하기 위해서는, 다양한 영향 요소의 조합을 효율적으로 설정하여 다른 요소에 의한 영향을 최소화 해야한다.

건설교통부의 내진설계 성능기준에는 행정구역의 구분에 따른 결정방법과 설계지반운동 결정을 위한 지진 재해도에 의한 방법을 제안하고 있다. 본 연구에서는 건설교통부에서 제정한 내진설계기준연구를 근간으로 보통암 지반의 설계지반운동수준을 산정하여, 표 1에 나타난바와 같이 지진세기가 작은 지진부터 큰 지진까지 여러 가지 지반운동 수준을 설정하고 지반운동의 크기가 지반의 비선형 거동과 지반증폭에 미치는 영향을 연구하였다.

국내 지반의 지진시 지반증폭에 대한 연구를 위해서는 국내 지반 또는 암반에서 계측된 지진기록을 사용하는 것이 이상적이나, 국내 계기지진의 경우 진도와 규모가 소규모이고 국내 내진설계 기준에 부합되지 않아 지진응답해석에 사용하기엔 부적절하다. 본 연구에서는 이러한 사정을 고려하여 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research) 센터의 입력지진 선택 권고안을 바탕으로 입력 지진운동을 결정하였다. PEER 센터에서는 지진기록을 지반계측과 암반계측을 구분할 것과, 근거리 단층지대(near fault)에서 발생한 지진과 원거리 지역(long duration)에서 발생한 지진기록을 구분하여 사용하도록 권고하고 있다.

본 연구에서는 국내 내진설계기준에 따라 암반에서 계측되고, 국내에서 지진이 발생할 경우 원거리지진이 발생할 확률이 높아 원거리지진을 사용하기로 결정했다. 따라서, PEER 센터에서 추천한 여러 가지 지진기록 중에서 지진응답해석에 널리 쓰이고, 지진기록의 주파수 대역이 비교적 넓은 지진기록인 일본 Miyagi-ken-oki현의 Ofunato항 지진기록(1978)을 이용하기로 결정하였다. Ofunato항 실지진의 시간영역에서 가속도의 이력곡선과 주파수영역 성분을 그림 1에 나타내었다.



(a) 시간영역

(b) 주파수 영역

그림 1 Ofunato항 지진기록

해석단면은 지반과 암반의 강성도 변화에 의한 영향, 토층 두께에 의한 영향, 지진세기에 의한 영향, 연약지반층의 위치가 미치는 영향 등을 조사하기 위하여 다양하게 구성하였다.

지진시 지반운동은 지반의 특성에 따라 달라지므로 지반의 특성을 반영할 수 있도록 하기 위하여 지반을 분류한다. 건설교통부의 내진설계기준연구에 의하면 지반분류는 지반의 전단파 속도를 기준으로 지반을  $S_A \sim S_F$ 의 6종으로 분류한다. 본 연구에서는 지반의 강성도에 대한 영향을 알아보기 위하여 지반을 매우 연약한 지반( $S_E$ ), 단단한 토사지반( $S_D$ )으로 구분하여 해석을 수행하였다. 또, 암반의 강성도에 대한 영향을 조사하기 위하여 암반을 전단파 속도를 기준으로 연암, 보통암, 경암, 매우 단단한 암반 등으로 구분하여 해석을 수행하였다. 또, 토층 두께에 의한 영향을 알아보기 위하여 지반을 얇은 지반, 보통 지반, 깊은 지반으로 구분하여 해석모델을 설정하였다 (표 1).

표 1. 해석단면 및 입력변수의 결정

입력변수	구분	입력값
지진세기	작은 지진	0.02g, 0.05g
	큰 지진	0.10g, 0.20g, 0.40g
지반의 강성	매우 연약한 지반( $S_E$ )	$V_{soil}=100m/sec$
	단단한 토사지반( $S_D$ )	$V_{soil}=300m/sec$
암반의 강성	연암	$V_{rock}=760m/sec$
	보통암	$V_{rock}=1000m/sec$
	경암	$V_{rock}=1500m/sec$
	매우 단단한 암반	$V_{rock}=2000m/sec$
토층 두께	얇은 지반	10m
	보통 지반	30m
	깊은 지반	50m

등가선형해석에서는 지반의 비선형 거동을 평가하기 위하여 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수의 변화 곡선 및 감쇠비 곡선을 필요로 한다. 이를 위하여 지반의 경우 공진주 시험으로 획득한 국내 준설 매립토의 정규화 전단탄성계수 감소 곡선을 이용하였고, 암반의 경우 SHAKE91에서 제공되는 대표곡선을 이용하였다. 해석에 사용된 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 감소 곡선 및 감쇠비 곡선은 그림 2에 나타내었다.

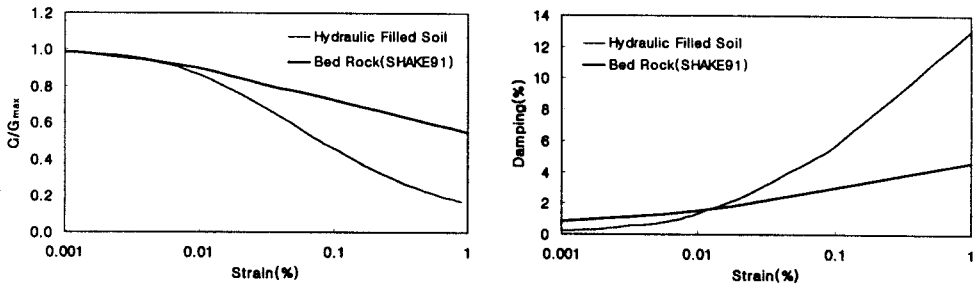
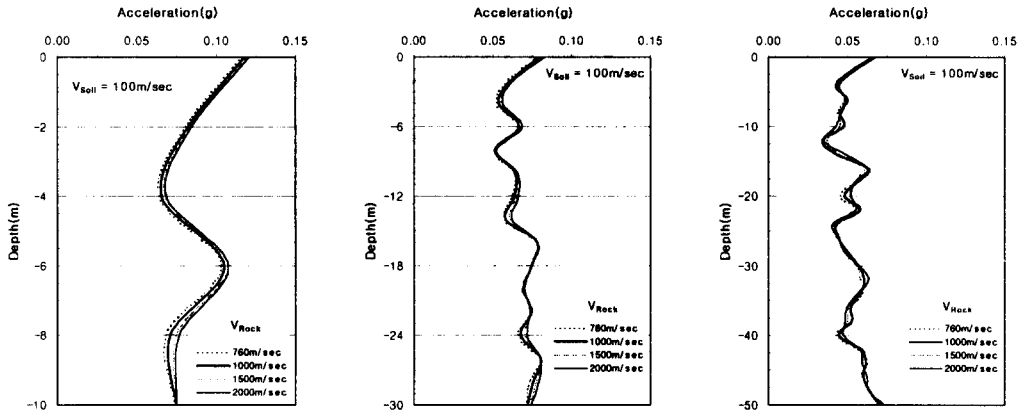


그림 2 국내 준설 매립토와 연암의 대표곡선

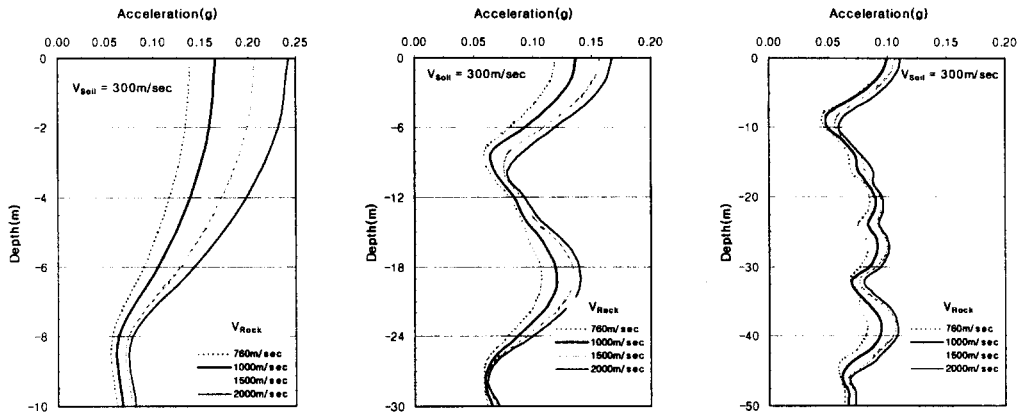
#### 4. 해석결과

##### 4.1 토층 깊이 및 암반 강성도의 영향

본 절에서는 토층 깊이에 따른 지반의 전단파 속도와 지반과 암반 사이의 강성도의 차이에 대한 영향을 조사하였다. 본 절의 해석에서 암반노두의 지진가속도는 재현주기 500년에 해당하는 0.11g를 입력하였다. 토층 깊이가 10m, 30m, 50m일 때의 해석결과는 그림 3에 나타나 있다. 그림 3-(a)의 매우 연약한 지반에서의 해석결과를 살펴보면, 토층 깊이가 깊어질수록 지표면의 가속도는 감소하나, 암반의 강성이 증가하여도 지반증폭 정도에는 별다른 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나, 그림 3-(b)의 단단한 토사지반의 경우 토층 깊이가 깊어짐에 따라 지표면 가속도는 소폭 감소하지만, 암반 강성도에 따라 지반증폭 정도는 상당한 변화가 있음을 알 수 있다. 지표면에서 토사지반과 암반노두에서의 가속도 비를 비교한 그림 4의 결과에서도, 매우 연약한 지반에서는 감쇠현상이 일어나고 단단한 토사지반에서는 토층 깊이가 40m 이하에서 증폭현상이 일어남을 알 수 있다.

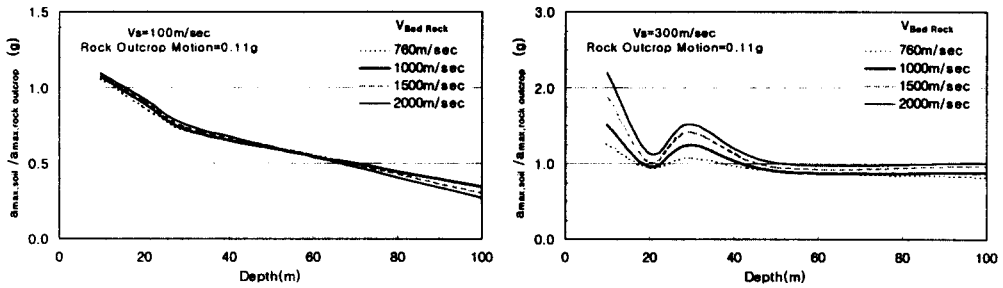


(a) 매우 연약한 지반에서 토층 두께 및 암반 강성도에 의한 지반증폭



(b) 단단한 토사 지반에서 토층 두께 및 암반 강성도에 의한 지반증폭

그림 3 토층 두께 및 암반 강성도에 의한 지반증폭



(a) 매우 연약한 지반

(b) 단단한 토사 지반

그림 4 지표면에서 지반증폭 비

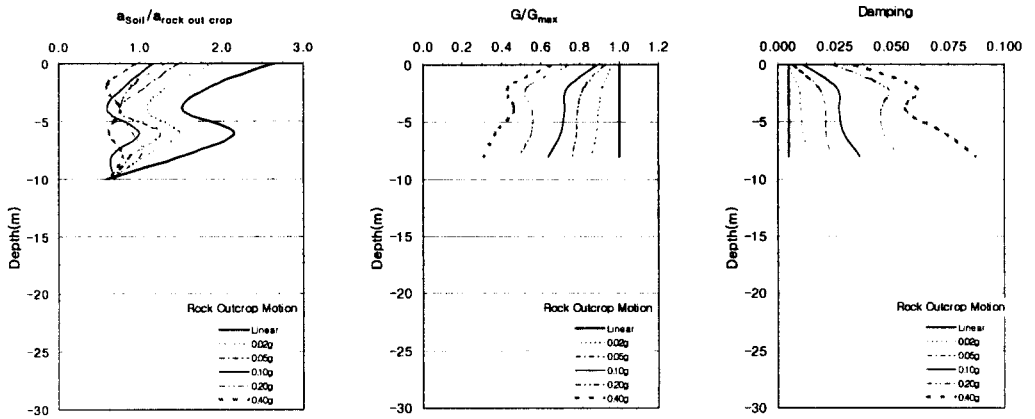
이러한 결과는, 연약하고 토층 두께가 깊은 지반일수록 지반증폭이 많이 일어나는 것으로 알려져 있는 일반적인 사항과는 상반되는 결과이다. 이와 같이 연약한 지반에서 감쇠현상이 일어난 이유는 입력 지진의 세기와 지반의 변형특성과 관련이 있는 것으로 판단된다. 즉, 지진시 발생한 지반의 변형이 선형영역을 벗어난 비선형 영역에서 일어나고, 이로 인하여 지반의 강성은 감소하고 감쇠비가 급격히 증가하여 지반증폭현상을 억제하였다. 반면, 단단한 토사지반의 경우 같은 세기의 지진에서도 지반의 변형이 주로 선형영역에서 발생하여 지반증폭이 상대적으로 많이 일어난 것으로 판단된다. 지진세기가 클 때 지반이 경험하는 비선형 거동은 4.2절에 자세하게 설명되어져 있다.

#### 4.2 지진세기에 따른 선형-등가선형 해석결과의 비교

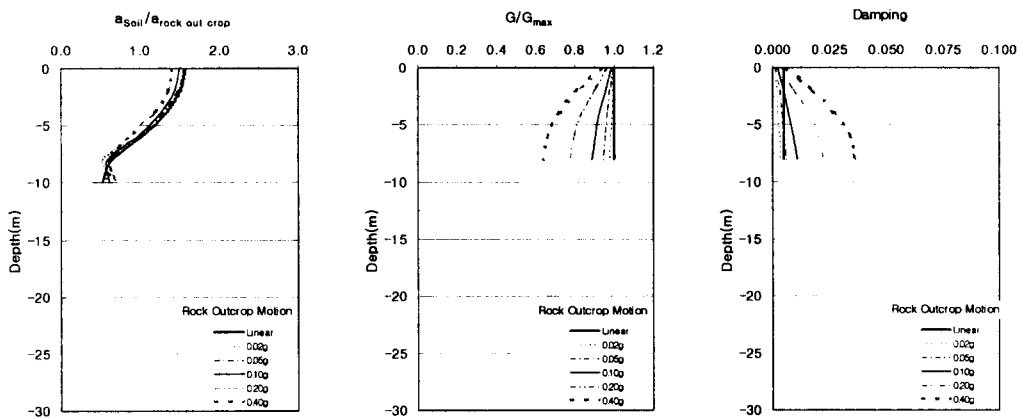
본 절에서는 지진세기에 따른 선형해석과 등가선형 해석결과를 비교하여 분석하였고, 입력지진의 세기는 표 1에 나타나있다. 매우 연약한 지반과 단단한 토사지반에서 지진세기가 증가함에 따라 선형해석과 등가선형해석의 결과는 그림 5에 나타내었다. 그림 5-(a)의 토층 두께가 10m인 연약지반에서의 해석결과를 살펴보면, 지진세기가 작은 지진(0.05g 이하)의 경우 지반증폭 정도에는 큰 차이가 있지만 깊이별 가속도 분포가 선형거동과 등가선형거동의 형태가 유사함을 볼 수 있다. 그러나, 지진세기가 큰 지진(0.10g 이상)의 경우 선형거동과 등가선형거동이 전혀 다른 특성을 보이고 있고, 지반의 증폭 정도는 현저히 감소한 경향이 뚜렷하다. 그림 5-(b)의 토층 두께가 10m인 단단한 토사지반의 결과에서는 연약지반의 지반거동과 현격한 차이가 있음을 알 수 있다. 이 경우 지진세기가 커져도 비선형 거동보다는 선형거동이 지배적이어서 선형거동과 매우 유사한 형태를 보이고 있다. 토층 깊이가 30m인 예제의 해석결과도 토층 깊이가 10m인 해석결과와 마찬가지로 연약층의 경우 지진세기가 작을 경우 선형거동과 비슷하고, 클 경우 선형거동과는 많은 차이가 있음을 볼 수 있다.

이러한 결과는 그림 5의 전단탄성계수 감소곡선( $G/G_{max}$  curve)과 감쇠비 곡선(damping curve)의 변화로 설명이 가능하다. 그림 6-(a)의 연약지반에서 지진세기가 0.10g 이상일 경우 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선이 선형해석 결과에 비하여 현격한 변화가 있음을 알 수 있다. 따라서, 지반전체 깊이에서 비선형 거동이 증가하여 지반의 동적특성( $G/G_{max}$ ,  $D$ )이 급격히 변화하며 증폭보다는 감쇠현상이 발생한 것으로 판단된다. 그러나, 단단한 토사지반에서는 지진세기가 큰 지진에서도 지반의 동적특성에 급격한 변화가 없다. 따라서, 선형거동과 비슷한 지반거동이 발생

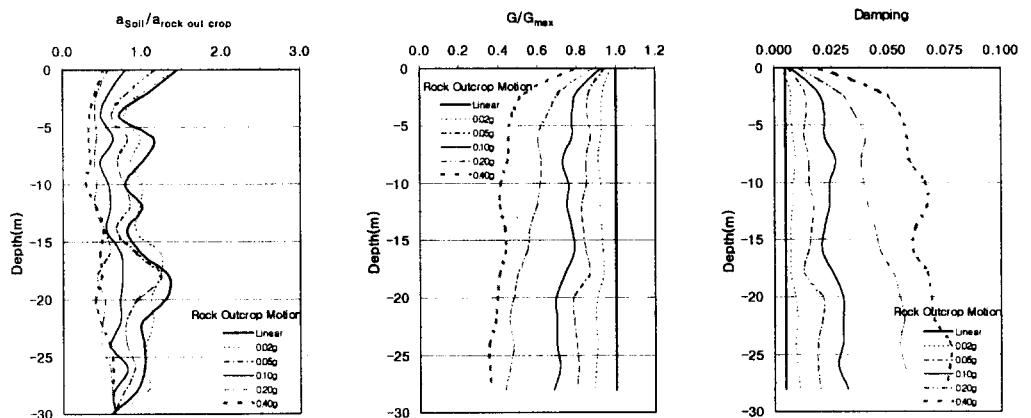
한 것으로 판단된다. 4.1절의 경우 해석에 사용된 입력지진의 세기는 0.11g이었으므로 연약층에서 증폭이 일어나지 않는 현상은 본 절의 해석결과로 설명할 수 있다.



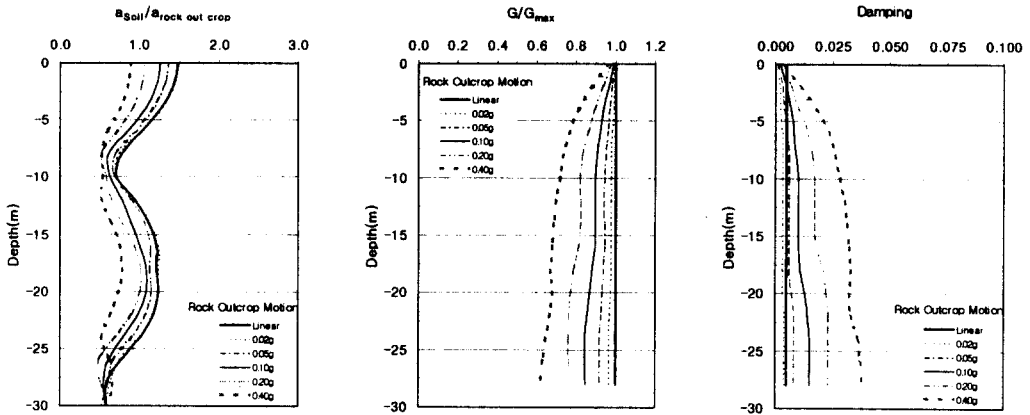
(a) 토층 깊이가 10m인 매우 연약한 지반에서 지진세기에 의한 지반증폭



(b) 토층 깊이가 10m인 단단한 토사 지반에서 지진세기에 의한 지반증폭



(c) 토층 깊이가 30m인 매우 연약한 지반에서 지진세기에 의한 지반증폭



(d) 토층 깊이가 30m인 단단한 토사 지반에서 지진세기에 의한 지반증폭  
 그림 5 선형-등가선형해석결과의 비교

### 4.3 연약 지반층의 위치에 대한 영향

본 절에서는 연약한 지반층이 지반증폭에 미치는 영향에 대한 해석을 수행하였다. 이를 위하여 10m 깊이의 연약층의 위치가 그림 6과 같이 지표면에 위치한 경우(top), 보통지반과 단단한 토사 지반 사이에 위치한 경우(sandwiched), 암반 바로 위에 위치한 경우(bottom)로 나누어 모델을 설정하였다. 또, 지진의 세기에 대한 영향을 조사하기 위하여 암반노두의 가속도를 0.05g, 0.10g, 0.20g, 0.40g 등으로 정하여 해석을 수행하였다. 각 해석결과로부터 연약지반의 위치 및 지진세기에 대한 영향은 그림 7에 나타나 있다.

해석결과 연약 지반층이 암반 바로 위에 위치해 있을 경우, 연약층이 존재하는 곳에서 지반가속도가 급격히 증가하여 최대가 된 후 감소하여 상부층으로 올라갈수록 더 이상의 증폭은 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이 경우 지진세기에 상관없이 지반감쇠 현상이 발생한 것이 특이하다. 연약층이 보통지반과 단단한 토사 지반 사이에 위치해 있을 경우에도 연약층이 있는 곳에서 지반가속도가 증가한 후 감소하는 경향을 볼 수 있고, 지진세기가 변화해도 지표면에서의 지반증폭은 거의 일어나지 않는 것을 알 수 있다. 그러나, 연약층이 상부층에 위치해 있을 경우 지반증폭은 연약층이 위치한 상부층에서 많이 발생한 점이 다르다.

위 결과와 같이 연약층이 존재하는 곳에서 지반가속도가 최대가 된 후 감소하는 현상은 연약층에서 지반의 변형이 많이 이루어져 지진 에너지가 대부분 흡수되기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 연약층이 지표면이 아닌 중간 부분이나 하부층에 있을 경우 지반감쇠 현상이 발생하거나 지반증폭의 정도가 미미하게 나타난 것이다.

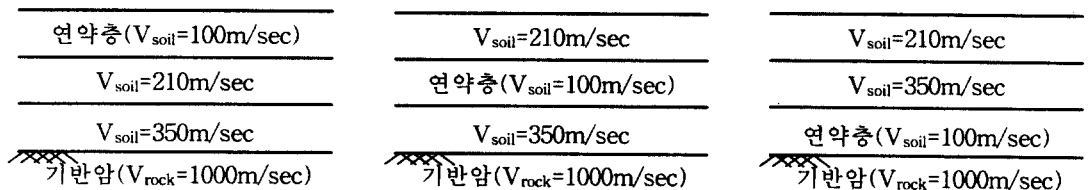


그림 6 연약지반층의 위치



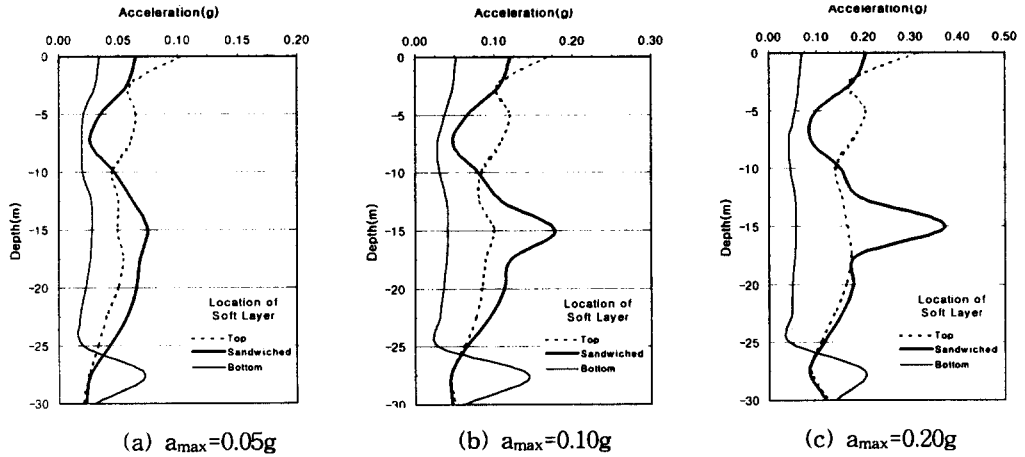


그림 7 연약 지반층의 위치 및 지진세기에 대한 영향

연약지반 위치 및 지진세기에 대한 응답스펙트럼의 변화는 그림 8에 나타내었다. 그림 8의 결과를 살펴보면, 연약층의 위치에 따라 지표면에서 응답스펙트럼의 특성이 매우 다름을 발견할 수 있다. 연약 지반이 상부층에 있을 경우 장주기에서 지반증폭이 크게 일어나 지표면에서 많은 변형이 발생할 확률이 높다. 이는 구조물에 치명적인 영향을 미칠 수 있음을 뜻한다. 연약층이 암반 바로 위에 있을 경우에는, 지표면의 응답스펙트럼은 기반암의 응답스펙트럼과 비슷한 모양을 유지하고 지반 증폭이 가장 작게 일어나는 것으로 나타났다. 그리고, 연약층이 가운데에 있을 경우 단주기 거동은 상부층의 경우와 비슷하고 장주기 거동이 전체적으로 작아지는 것이 특이하다.

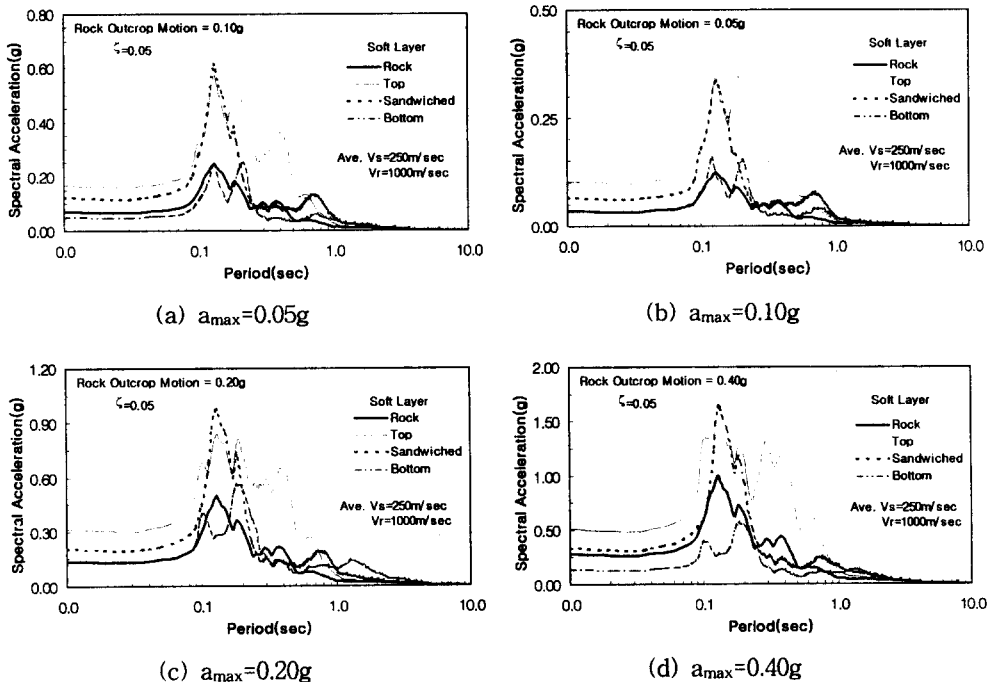


그림 8 연약지반 위치 및 지진세기에 대한 응답스펙트럼 비교

## 5. 결론

본 논문은 등가선형해석을 이용하여 지반증폭에 영향을 주는 요소에 대한 연구를 수행하였다. 지반증폭에 영향을 주는 여러 가지 요소에 대한 해석결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

매우 연약한 지반에서는 지반이 비선형 거동으로 인한 동적물성의 변화로 토층 깊이가 깊어질수록 지반증폭이 감소하거나 감쇠현상이 일어나는 것으로 나타났고, 암반의 강성도에 의한 영향은 미미한 것으로 나타났다. 그러나, 단단한 토사 지반에서 지반의 거동은 선형 거동과 비슷하고 토층이 깊어짐에 따른 지표면 가속도의 영향은 미미했으나, 암반의 강성도에 의한 영향은 큰 것으로 나타났다. 연약 지반에서 지진세기가 작은 지진(0.05g 이하)에서는 선형해석과 등가선형해석에서 큰 차이를 보이지 않았으나, 지진세기가 큰 지진(0.10g 이상)에서는 두 해석결과의 차이가 매우 큰 것으로 나타났다. 이 경우, 단단한 토사지반에서 지진세기에 의한 영향이 연약지반에 비하여 상대적으로 작았다. 한편, 연약한 지반의 위치에 따라 지반가속도의 변화는 매우 다르게 나타났으며, 연약층이 지표면 가까운 곳에 위치할수록 지진시 위험도는 높아지는 것으로 나타났다. 또, 연약층이 지표면 근처에 위치할수록 지진시 구조물이 위험에 노출될 확률이 높은 것으로 나타났다.

## 6. 감사의 글

본 연구는 행정자치부 국립방재연구소의 “지진재해에 대비한 지반특성 파악에 관한 연구”의 지원에 의한 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 7. 참고문헌

1. 건설교통부, “내진설계기준연구(II)”, 1997
2. 해양수산부, “항만 및 어항시설의 내진설계 표준서”, 1999
3. Idriss, I. M. and Sun, J. I. (1992), “SHAKE91: A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits,” User’s Guide, University of California, Davis, pp. 13.
4. Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B.(1972), “SHAKE: a computer program for earthquakeresponse analysis of horizontally layered sites,” Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.