

추계학적 선진원 모델과 층상반무한체에서의 탄성파 전파 해석법에 의한 지진 지반운동 합성

Synthesis of Earthquake Ground Motion by Combining Stochastic Line Source Model with Elastic Wave Propagation Analysis Method in a Layered Half Space

김 재 관¹⁾ · 권 기 준²⁾
By *KIM, Jae Kwan and KWON, Ki Jun*

ABSTRACT : A Stochastic line source model is developed to simulate the seismic wave field generated during the rupture propagation process along a fault plane of which length is much larger than its width. The fault plane is assumed to consist of randomly distributed slip zones and barriers and each slip zone is modeled as a point source. By combining the newly developed source model with wave propagation analysis method in a layered 3-D visco-elastic half space, synthetic seismograms are obtained. The calculated accelerograms due to vertical dip slip and strike slip line sources are presented.

1. 서 론

지상구조물이나 지하구조물의 내진설계를 위한 설계지반운동은 강도, 주파수 내용 그리고 지속 시간의 세가지 측면에서 그 특성이 잘 정의되어야 한다. 지진에 의해서 발생하는 지반운동의 특성은 지진원기구 특성, 전파 경로의 영향 및 부지 조건의 영향의 3가지 인자에 의하여 그 대강이 결정된다. 이들 3대 인자가 지반운동의 특성에 미치

는 영향은 어느 정도 잘 규명되어 있는 상태이다. 그러나 확인된 단층에 의해서 특정 위치에 있는 부지에 발생할 수 있는 지반운동을 수학적 모델을 사용하여 결정론적으로 예측한다는 것은 지진파 발생기구와 지층을 통한 지진파 전파과정에 있어서의 불확실성 및 수학적 모델링의 어려움으로 인해서 가까운 장래에도 가능하지 않을 것으로 예상된다. 그러므로 설계지반운동은 일반적으로 계측된 지진기록으로부터 통계적인 처리 방법에 의해

1) 정희원, 서울대학교 토목공학과 조교수
2) 정희원, 서울대학교 토목공학과 박사과정

서 결정되어왔다. 장기간에 걸쳐서 관측된 지진기록이 충분히 축적되어 있는 경우에는 상기 방법은 신뢰성이 높은 타당한 결정법이 될 것이다. 우리나라와 같이 계측된 지진기록이 극히 빈약한 경우에는 우리나라와 유사한 지진환경을 가진 곳에서 적용하고 있는 설계지반운동을 원용할 수 있으나 이렇게 하면 우리나라 고유의 진원기구 특성과 지진파 전파 특성이 제대로 반영될 수 없는 단점이 있다.

초고층 건물 또는 먼진 구조물과 같이 고유진동수가 낮은 구조물의 지진응답은 지반운동의 저주파수 영역 성분에 민감하게 응답하며, 지진운동의 저주파수 영역 성분은, 특히, 진원기구 특성 및 전파경로상 지층구조의 영향에 의해서 크게 영향을 받는다. 따라서 계측지진기록이 빈약한 곳에서도 진원기구 특성과 전파경로 특성 나아가 부지의 특성까지 고려할 수 있는 설계지반운동 결정방법이 요구되고 있다. 이를 위해서 수학적 모델을 사용하여 지진파 또는 지반운동을 이론적으로 합성하는 방법에 관한 연구가 지속적으로 진행되고 있다 (Aki, 1983). 이러한 지반운동 합성법 중의 한 접근법으로는 추계학적 진원 모델과 층상구조체에서의 지진파 전파 해석기법을 결합하여 진원기구와 지층구조 특성을 반영한 지반운동을 생성하는 방법이 있으며, 활성단층을 그 중심선을 따라 random하게 분포된 asperity로 이상화하는 Zhang et al.(1992)의 추계학적 선진원 모델이 그 예에 속한다.

이 논문에서는 길이 대 폭의 비가 큰 단층면을 따라서 단층 전단파괴가 전파하면서 지진파가 생성되는 과정을 모사할 수 있는 새로운 추계학적 지진원 모델을 제안하였다. 이 모델은 지진이 발생하는 활성 단층면에서 slip은 균일하게 발생하지 않고, 단층면에 분포되어있는 barrier사이에서만 slip이 일어나는 것으로 보는 이론, 즉, 지진원 기구에 대한 barrier 이론에 근거하였다(Das and Aki, 1977 ; Aki, 1983). 단층면을 slip 구간과 barrier 구간이 교대로 분포하고 있는 단층선으로

이상화하고 이 slip 구간과 barrier의 길이는 Rayleigh 분포 특성을 갖는 random 변수로 가정되었다. 단층 파괴는 단층선을 따라서 일정 속도로 전파한다고 전제하였고, 각 slip 구간은 단층 파괴 전면이 그 구간의 중심에 도달할 때 slip을 개시하는 점진원으로 모델링 되었으며, 각 점진원의 지진 모멘트는 slip 구간의 길이에 비례한다고 가정하였다. slip 구간과 barrier의 확률분포 특성이 주어진다면 여기서 제안하는 선진원 모델은 random process로 정의 될 수 있으며, 이 process의 특정 표본은 random walk에 의해서 쉽게 얻어질 수 있다(Clough and Penzien 1993).

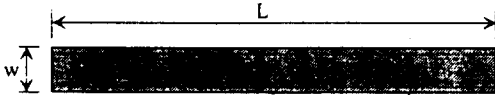
각 점진원에서 생성된 지진파의 지층을 통한 파괴 전파 과정은 propagator 행렬법(Haskell, 1953 ; Dunkin, 1965 ; Aki and Richards, 1981)에 의해서 해석되었다. 이 해석법은 reflectivity 방법(Kennet, 1983)과 함께 층상구조체에서 탄성과 전파 해석에 널리 사용되는 두 가지 대표적인 방법에 속한다. 제안한 추계학적 지진원 모델과 층상지반에서의 탄성과 전파 해석기법을 사용하여 층상지반 아래 반무한체에 있는 길이 10km의 연직 dip-slip단층과 길이 20km의 연직 strike slip 단층에 의한 지표 및 지하에서의 지반운동을 계산하였다.

2. 추계학적 선진원 모델

그림 1에 주어진 예와 같이 단층면의 길이 대 폭의 비가 크다면, 즉, $W \ll L$ 이면, 전단을 일으키는 단층면은 그림 2에서와 같이 단층선으로 이상화될 수 있을 것이다.

지진을 일으키는 단층면에서는 작은 규모의 비균질성이 존재하기 때문에 단층 전단파괴 전파 과정은 매끄럽게 진행되지 않는다(Aki, 1983). 현재 이러한 비균질성을 고려한 단층 전단파괴 과정에 대해서는 두 가지 이론이 제안되어 있다. 한 이론은 Kanamori와 Stewart(1978)가 제안한 asperity 모델이고 다른 이론은 Das와 Aki(1977)가

제안한 barrier 모델이다. 이 논문에서 발전시키고자 하는 추계학적 진원모델은 두 번째 이론, 즉, barrier 모델에 근거하였다.



$$w \ll L$$

그림 1. 단층면

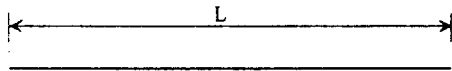
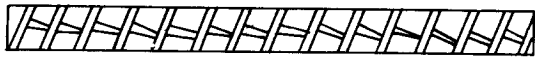


그림 2. 선진원 모델

Barrier 이론에 따라서 선으로 모델링된 단층면은 slip 구간과 barrier가 그림 3에서와 같이 random하게 혼재되어 있는 것으로 가정되었다. 만약 slip이 발생한 면적과 그렇지 아니하는 barrier의 면적의 비가 주어져 있다면 선진원 모델에서는 slip 구간의 전체 길이와 동일한 비를 갖는다고 볼 수 있고, 따라서 단층의 총길이 L은 slip 구간의 총길이, L_S 와 barrier의 총길이, L_B 의 합으로 다음과 같이 나타내진다.

$$L = L_S + L_B = \sum_j l_{jS} + \sum_j l_{jB}$$

여기서 l_{jS} 는 j번째 slip 구간의 길이, l_{jB} 는 j번째 barrier 길이를 각각 의미한다.

만약 각 slip 구간의 길이와 barrier의 길이가 미리 주어진 확률분포에 의해 특정 지워지는

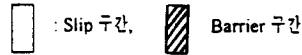
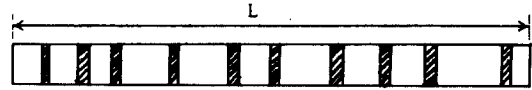


그림 3. Barrier와 slip 구간으로 구성된 선진원 모델

random variable로 정의된다면 선진원은 random process로 모델링 될 수 있다. 이 연구에서는 각 slip 구간 길이와 barrier의 길이를 Rayleigh분포를 갖는 상호 독립적인 random 변수로 가정하였으며, 인접한 slip 구간은 하나의 barrier에 의해서 경계지워진다고 가정하였다. 그러므로 이 모델에서는 slip 구간과 barrier가 단층선을 따라서 교대로 분포하게 된다. 단층선 위에 random하게 분포된 slip 구간은 각 구간의 중심에 위치한 점진원으로 모델링 하였으며 각 점진원의 지진모멘트는 해당하는 slip 구간의 길이에 비례한다고 보았다. 단층선의 한 점에서 시작된 단층의 전단은 점진원을 따라서 속도 v_r 로 전파하게 된다. 물론 전단파와 전파속도, v_r 또한 random variable로 취급될 수 있지만 이 논문에서는 일정한 것으로 가정하였다. 각 slip 구간의 중심에서 정의된 점진원은 이 전단파 전면이 그 점에 도달하는 시점에 slip을 개시하게 된다. 그림 4에 예시한 바와 같이 추계학적 선진원 모델의 표본은 random walk 방법(Clough and Penzien, 1993)을 이용하여 쉽게 구현될 수

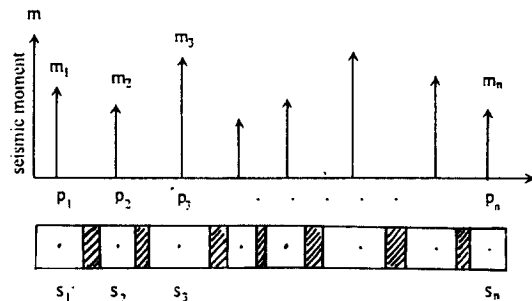


그림 4. 추계학적 선진원 모델의 표본

있다. 이 그림에서 s_1, s_2, \dots, s_n 은 slip 구간을 의미하고 p_1, p_2, \dots, p_n 은 각 slip 구간의 중심 즉, 점진원의 위치, 그리고 m_1, m_2, \dots, m_n 은 각 점진원의 지진 모멘트를 나타낸다.

균질 등방성 선형탄성 매질로 이루어진 공간의 한 점, $\xi=(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 에 위치한 점진원에서의 전단 파괴로 인하여 다른 한 점, (x_1, x_2, x_3) 에서 발생하는 변위성분 u_n 은 convolution 적분의 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다(Aki and Richards, 1980) :

$$u_n(x, t) = M_{pq} \bar{u}(t) * \frac{\partial}{\partial \xi_q} G_{np}(x, t; \xi) \quad (1)$$

여기서 M_{pq} 는 지진 모멘트와 단층면의 방위와 slip 방향의 함수인 지진 모멘트 텐서이고; $\bar{u}(t)$ 는 정규화 된 slip 함수; G_{np} 는 Green 텐서를 의미하며; * 기호는 convolution을 나타낸다. 이 논문에서는 그림 5에 예시되어 있는 상승시간, t_r 을 갖는 경사계단함수가 정규화 된 slip 함수로서 사용되었다.

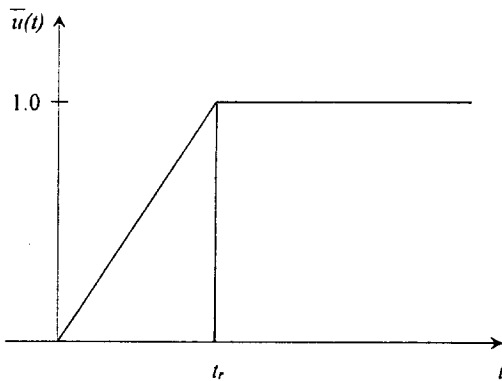


그림 5. 경사계단 형상의 정규화된 slip 함수

3. 층상구조지반에서의 탄성과 전파해석

층상구조 지반모델에서의 지진파 전파 과정은 propagator 행렬법(Haskell, 1953 ; Dunkin, 1965 ; Aki and Richards, 1980)에 의해서 수행되었다. Propagator 행렬법은 앞서 서론에서도 잠시 언급했듯이, reflectivity 방법(Kennet, 1983)과 더불어서 층상구조체에서의 탄성과 전파 해석에 널리 사용되고 있다. 이 해석법은 선형매질에서의 동탄성상태 지배방정식에 Fourier-Hankel 변환을 적용하여서 편미분방정식을 연립상미분방정식으로 단순화한 후 행렬해석법을 사용하여 층상구조체에서의 해를 편리하게 구할 수 있는 방법이다. Propagator 행렬법은 문헌(Haskell, 1953 ; Dunkin, 1965 ; Aki and Richards, 1980 ; 고현무 등, 1994)에 잘 소개되어 있으므로 이 논문에서는 상세한 설명을 생략하였다.

4. 적용예

층상 지반 아래 반무한체에 있는 연직 dip-slip 단층과 strike-slip 단층을 추계학적 선진원으로 모델링하고, 이에 의한 지반운동을 propagator 행렬법에 의하여 해석하였다. 지반은 표1에 주어진 바와 같이 심도가 깊어짐에 따라서 강성이 증가하는 층상지반으로 모델링 되었으며 반무한체 위에 놓인 4개의 지층으로 구성되어 있다.

표 1. 모델의 물성치

층번호	두께 (km)	밀도 (g/cm ³)	β^* (km/s)	α^{**} (km/s)	Q^{***}
1	0.1	1.8	0.8	1.5	50
2	0.2	2.0	1.2	2.0	80
3	0.3	2.4	2.0	3.6	80
4	0.4	2.6	2.8	5.0	100
5	∞	2.8	3.4	6.0	160

* S - 파속도, ** P - 파속도, *** Quality factor

Dip-slip 단층과 strike-slip 단층에 있어서 단층의 길이 및 위치, 단층 전단파괴 전파방향 및 관측

점의 위치는 각각 그림 6과 7에 주어져 있으며, 단층면의 방위와 slip 방향은 그림 8과 9에 각각 묘사되어 있다.

그림 6의 dip-slip 단층의 추계학적 모델링 시에 slip 구간과 barrier 길이의 최확치는 각각 1.0km와 0.1km로 주어졌고, 그림 7의 strike-slip 단층의 경우에는 각각 2km와 0.1km로 주어졌고, 그림 7의 strike-slip 단층의 경우에는 각각 2km와 0.

1km로 가정되었다. 두 모델에 있어서 모두 단층 파괴 전파속도는 2.8km/sec로 취하였으며, 정규화된 slip 함수 $\bar{u}(t)$ 로는 그림 5에 주어진 정규화된 경사계단함수가 사용되었고, 이때 상승시간 t_r 는 0.4sec로 주어졌다. 또한 지진모멘트 M_0 는 5.0×10^{24} dyne-cm로 가정하였는데 이 값은 모멘트 규모, $M_w=5.8$ 에 해당한다.

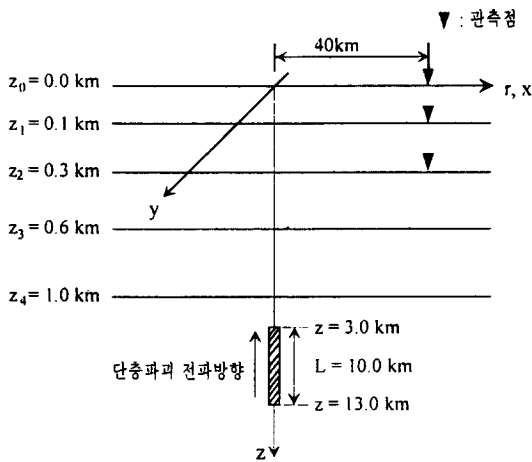


그림 6. 추계학적 선진원으로 모델링된 dip-slip 단층

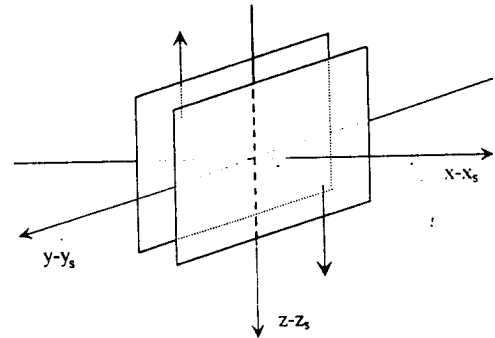


그림 8. 연직 dip-slip 단층방위와 slip 방향

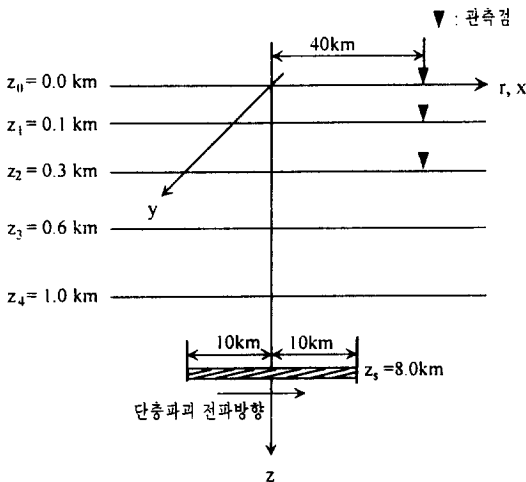


그림 7. 추계학적 선진원으로 모델링된 strike-slip 단층

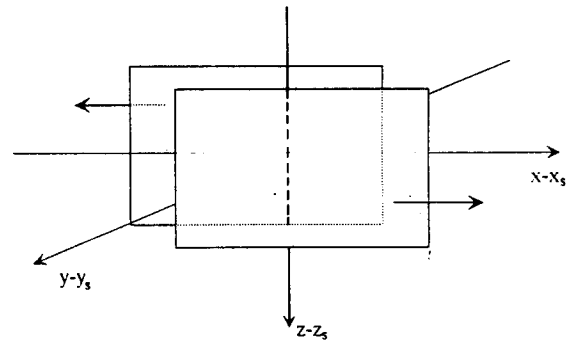


그림 9. 연직 strike-slip 단층방위와 slip 방향

그림 10과 11에는 그림 6에 주어진 dip-slip 단층에 의해서 발생하는 관측점에서의 반경방향 및 연직방향 가속도가 각각 주어져 있다. 깊이가 증가함에 따라서 수평가속도의 크기는 현저하게 감소함을 그림 10에서 확인할 수 있다. 이와같은 현상은 그림 11에 주어진 연직가속도 시간이력에서도 확인되고 있다. 그러나 연직가속도는 수평가속도

에 비하여 감소 정도가 뚜렷하지 아니함을 알 수 있다. 이러한 현상은 고현무등(1994)이 점진원 모델을 사용하여 해석한 결과에서 관찰한 내용과 극히 유사하다. 또한 그림 10과 11에서 지표면 가속도를 비교하여 보면 연직가속도의 침두값은 수평가속도의 침두값의 약 1/3에 해당하는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 특성은 실제 지진관측 기록에서 확인할 수 있는 현상과 정성적으로 일치하고 있다(Komada and Hayashi, 1990). Dip-slip 단층의 추계학적 모델에 의한 관측점에서 계산된 반경방향 수평변위와 연직방향 변위의 시간이력이 그림 12와 13에 각각 주어져 있다. 깊이가 깊어짐에 따라서 변위의 크기도 전반적으로 감소하는 경향

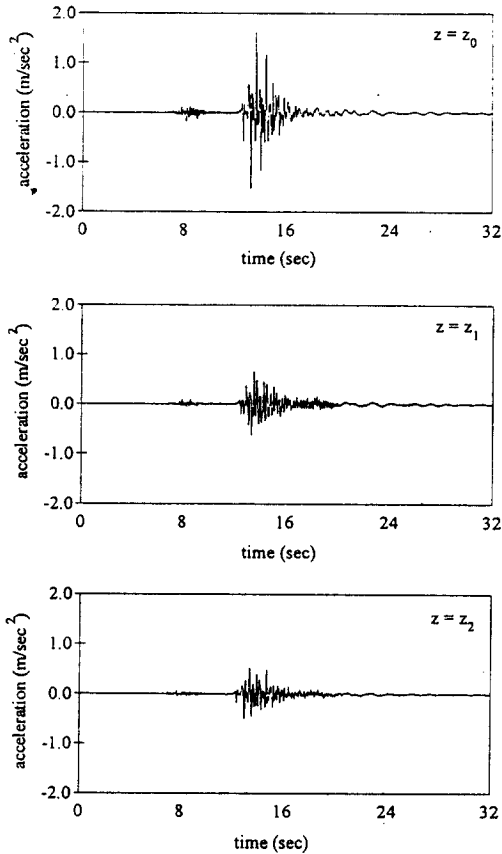


그림 10. 추계학적 dip-slip 단층 선진원 모델에 의한 반경방향 수평가속도 시간이력.

이 두 그림에서 확인되고 있다. 그러나 그 감소의 정도는 가속도에서와 같이 두드러지지 않는다. 특히 수직변위의 크기는 깊이가 증가하여도 크게 차이를 보이지 않고 있다. 이러한 특성은 고현무등(1994)이 보고한 내용과도 전반적으로 일치하고 있다.

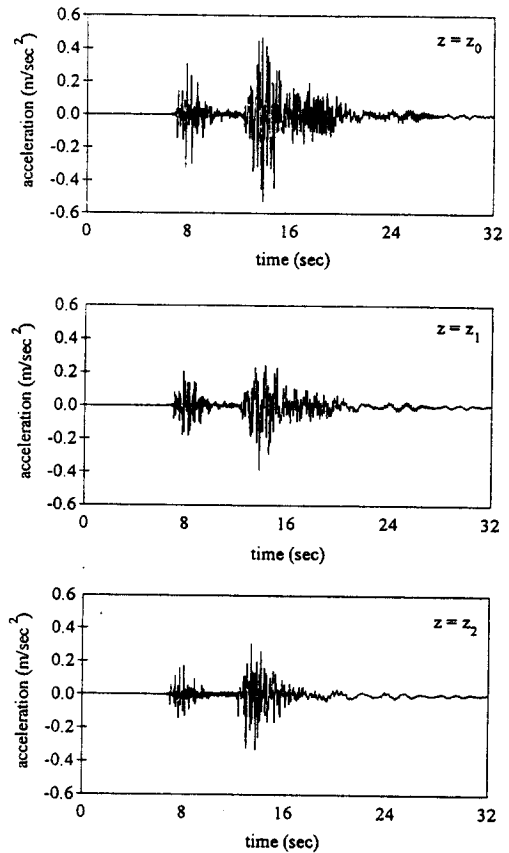


그림 11. 추계학적 dip-slip 단층 선진원 모델에 의한 수직가속도 시간이력.

그림 7의 strike-slip 단층의 추계학적 모델을 사용하여 계산된 관측점에서의 접선방향 수평가속도 시간이력이 그림 14에 주어져 있다. 이 결과도 그림 10에 주어진 dip-slip 단층에 의한 수평가속도와 같이 심도가 깊어짐에 따라서 가속도의 크기가 현저하게 감소함을 알 수 있고 그 경향은 고현

무등(1994)이 제시한 점진원에 의한 결과에 대체

로 일치하고 있다.

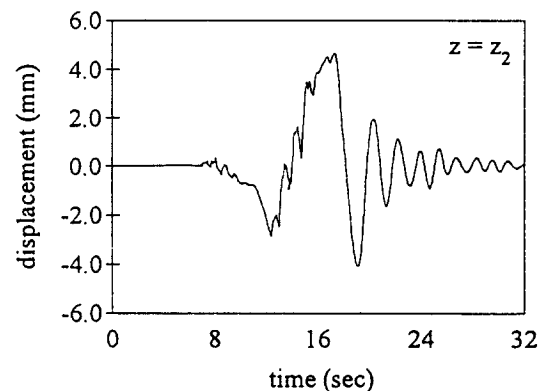
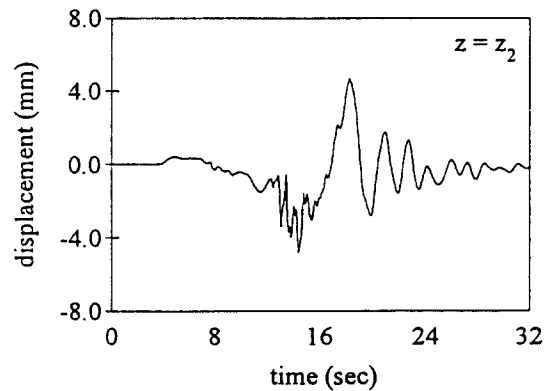
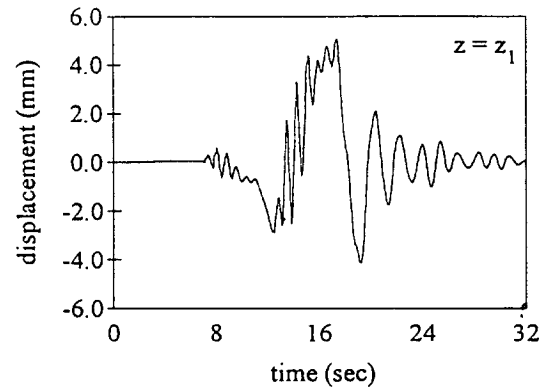
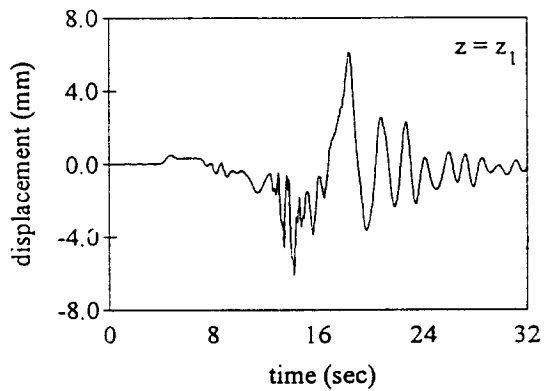
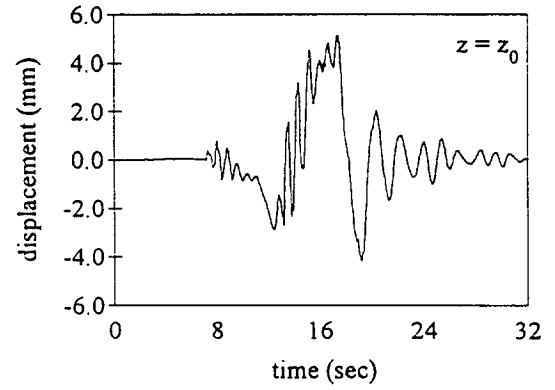
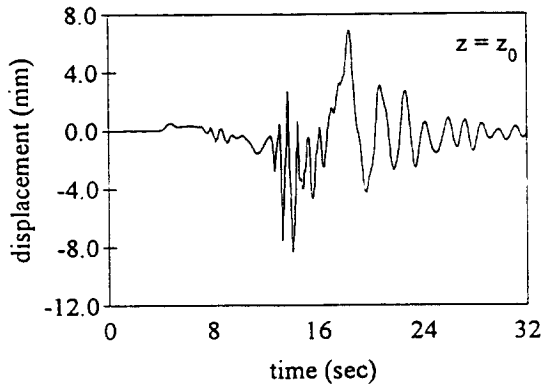


그림 12. 추계학적 dip-slip 단층 선진원 모델에 의한
반경방향 수평변위 시간이력

그림 13. 추계학적 dip-slip 단층 선진원 모델에
의한 수직변위 시간이력

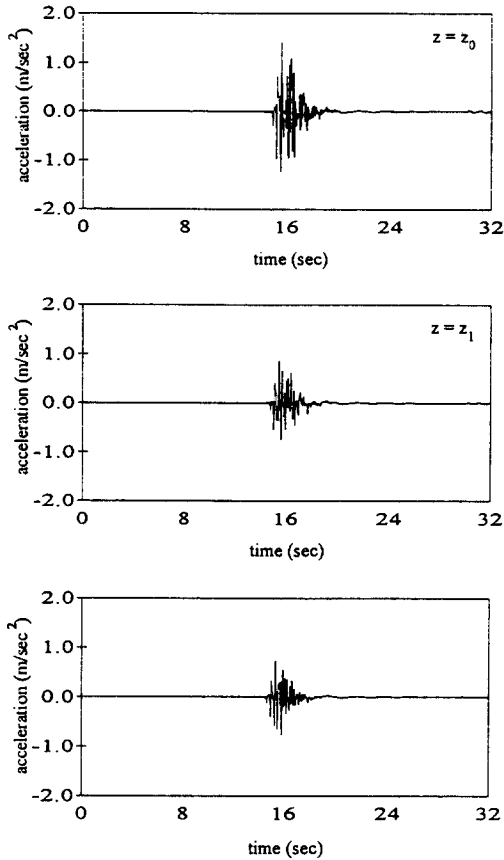


그림 14. 추계학적 strike-slip 단층 선진원 모델에 의한 접선방향 수평가속도 시간이력

5. 결 론

단층면에 존재하는 작은 규모의 비균질성을 고려한 단층 전단파괴 이론인 barrier 이론을 도입하여 길이가 폭에 비해 상당히 큰 값을 갖는 단층에 적용 될 수 있는 추계학적 선진원 모델을 제안하였다. 또한 이 모델을 단층과 전파 해석기법인 propagator 행렬법과 결합하여 층상구조 지반에서 추계학적 진원에 의해서 발생하는 지반운동을 계산하는 기법을 개발하였다. 층상지반 아래 반무한체에 있는 연직 dip-slip 단층과 연직 strike-slip 단층을 추계학적 선진원으로 모델링하여 이들 지진원에 의한 지반운동을 해석하였다.

반무한체에 있는 연직 dip-slip 단층에 의한 그 위에 놓인 층상 지반의 응답해석 결과 깊이가 깊어짐에 따라서 지반운동의 강도가 감소함을 알 수 있었고 수평방향 성분의 감소 정도가 수직 방향 성분보다 더 현저함을 알 수 있었다. 변위 응답의 경우 깊이에 따른 특성 변화는 가속도 응답에 비하여 민감하지 않았다. 연직 strike-slip 단층 모델에 대한 응답 해석 결과도 dip-slip 단층에 대한 해석 결과와 유사한 경향을 보여주었다.

이 연구에서 시도한 지반운동의 이론적 모사 방법은 실제 지진 기록과의 비교 검증과정을 거친 후 지상 시설뿐만 아니라 지하시설의 내진설계시 설계 지반운동결정 또는 지진위험도 해석에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 좀더 실제에 가까운 모델이 되기 위해서는 각 slip 구간에서 단층파괴 전과 과정 및 비균등 slip 과정이 더욱 세밀하게 모델링 될 수 있어야 할 것이며, slip 구간의 길이, 즉, barrier 간격 등 추계학적 모델링에 필요한 매개변수들을 실제 지진기록으로부터 결정할 수 있어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 1994년도 서울대학교 발전기금 일반 학술연구비 지원과제인 “추계학적 진원모델과 층상반무한체에서의 지진파전파에 의한 지반운동합성에 관한 연구”과제 수행 중 얻어진 성과에 근거하였다. 저자들은 서울대학교의 연구비 지원에 감사를 표한다.

참 고 문 헌

1. 고현무, 김재관, 권기준(1994), “점진원모델을 사용한 층상지반에서의 깊이에 따른 지반운동 특성 변화연구”, 대한토목학회 논문집, Vol. 14, No. 4, pp.453-462.
2. 김재관(1994), 추계학적 진원모델과 층상반무한체에서의 지진파 전파에 의한 지반운동 합성에

- 관한 연구, 연구보고서, 연구관리번호 94-15-1110, 서울대학교.
3. Aki, K. (1983), "Strong-motion seismology," Earthquakes : Observation, Theory and Interpretation, LXXX Corso Soc. Italiana di Fisica-Bologna-Italy.
 4. Aki, K. and Richards, P.G.(1980), Quantitative seismology, theory and methods, W.H. Freeman and Co., New York.
 5. Clogh, R.W. and Penzien, J.(1993), Dynamics of structures, second Ed., McGraw-Hill, New York.
 6. Das, S. and Aki, K.(1977), "A numerical study of two dimensional spontaneous rupture propagation," Geophysics, J., Vol. 50, pp. 643-668
 7. Dunkin, J. W.(1965), "Comparison of modal solutions in layered dlastic media at high requecies," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 55, pp. 335-358.
 8. Haskell, N. A., (1953), "The dispersion of surface waves on multilayered media," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 43, pp. 17-34
 9. Kanamori, H. and Stewart, G. S. (1978), "Seismological aspects of the Guatemala earthquakes," J. of Geophysics, Res., Vol. 83, pp. 3427-3434.
 10. Kennet, B. L. N. (1983), Seismic wave propagation in stratified media, Cambridge University Press.
 11. Kodama, H. and Hayashi, M..(1990), CRIEPI Report E379003.
 12. Zhang, R., Young, Y. and Lin, Y. K.(1992), "Earthquake ground motion modeling II : stochastic line source," Journal of Engineering Mechanics, ASCE Vol. 117, pp. 2133-2148.