

한반도 동남부의 강진동 모사와 감쇠식

Stochastic Prediction of Strong Ground Motions and Attenuation Equations in the Southeastern Korean Peninsular

이정모* 박동희** 박창엽**
Lee, Jung Mo Park, Dong-Hee Baag, Chang-Eob

ABSTRACT

In order to reduce seismic hazard, the characteristics of strong earthquakes are required. In the region where strong earthquakes do not happen frequently, the stochastic simulation of strong motion is an alternative way to predict strong motions. This simulation requires input parameters such as the quality factor, the corner frequency, the moment magnitude, the stress drop, and so on, which can be obtained from analyses of records of small and intermediate earthquakes.

Using those parameters obtained in the previous work, the strong ground motions are predicted employing the stochastic method. The results are compared to the two observed earthquakes-the Ulsan Offshore Earthquake and the Kyungju Earthquake. Although some deviations are found, the predictions are similar to the observed data. Finally we computed attenuation equations for PGA, PGV and ground accelerations for some frequencies using the results of predictions. These results can be used for earthquake engineering, and more reliable results will come out as earthquake observations continue.

1. 서론

지진공학적인 목적에 있어 강진동의 특성은 매우 중요한 자료이다. 한반도 동남부와 같이 충분한 강진동 기록자료가 축적되지 않은 경우에는 앞으로 발생 가능한 지반진동과, 지반진동의 주파수에 따른 특성을 추계학적인 모사법(stochastic simulation method)을 통해 간접적으로 유추할 수 있다. 추계학적 강진동 모사법이란 어떤 지역의 지진활동 분석을 토대로 하여 그 지역의 발생 가능한 지진을 예측하기 위한 확률론적 방법으로, 지진동의 최대지반속도(peak ground velocity; PGV), 최대지반가속도(peak ground acceleration; PGA), 및 주파수에 따른 속도와 가속도 등의 특성을 구명할 수 있다.

Hanks와 McGuire(1981)는 강진동을 예측하는데 있어 ω^2 스펙트럼(Brune, 1970, 1971)을 가지는 확률과정용 도입한 추계론적 모델(stochastic source model)을 제안하였다. 이후 Boore(1983)는 Hanks와 McGuire의 모델을 이용하여 미국 서남부의 규모 5.0~7.0사이의 강진동 자료의 회

* 경북대학교 교수, 정회원

** 경북대학교 석사과정

*** 서울대학교 교수, 정회원

귀분석의 결과와 모델을 통한 예측값이 잘 일치함을 보였으며 최대가속도 예측을 위한 모델은 규모 3.0 이하의 지진과도 잘 일치됨을 보였다. 이 외에도 Hanks와 McGuire의 이론을 이용하여 강진동을 모사하는 연구가 다수 수행되었고 강진동 특성평가에 많은 성과를 거두었다. 국내에서는 노명현, 이기화(1995)와, 조남대(1998)가 추계학적 분석법을 통하여 강진동을 평가한 예가 있으나, 아직 시작단계에 있는 실정이다.

강진동 모사에서 입력자료는 지각밀도(ρ), 전단파 속도(β), 스펙트럼의 모서리 주파수(corner frequency; f_c), 응력강하량(stress drop; $\Delta\sigma$)등과 같은 지진원의 요소와 지진파 전파과정에서 감쇠현상을 정량화 하는 Q (quality factor) 등이다. 본 연구에서는 '한반도 동남부의 지진원 요소 및 지진파 감쇠(박동희 외, 2000)'의 결과를 사용하여 추계학적 모사법(stochastic simulation method)을 이용하여 이 지역에 발생 가능한 강진동을 예측하고, 예측결과를 이용하여 지반가속도의 거리에 따른 감쇠식을 도출하였다.

2. 이론적 배경

2.1 추계학적 분석(Stochastic process)

추계론적 분석이란 시간과 함께 변하는 양의 분석을 확률론적으로 나타내고자 하는 것으로, 시점 t 의 값을 확률변수 $X(t)$ 로 생각하고, 모든 t 에 대해서 이와 같이 생각한 확률변수의 계열을 말한다. 단층에서 얼마만큼 떨어진 곳의 지진동은 임의의 시간동안 지속기간이 짧은 무작위 펄스(short random pulse)가 겹쳐 나타나게 된다. 이 때문에 진동(oscillation)이 격심하게 계속될 때 가속도기록은 거의 일정 크기의(constant intensity)의 진폭을 가지게 되고, 이 진폭은 일정 지속기간(duration time)동안 백색잡음(white noise)으로 모델링(modeling) 할 수 있다(Joyner, 1984). 위의 이론을 기본으로 하는 추계학적 모사법은 시간영역에서 평균 0인 무작위 가우시안 잡음(Gaussian noise)과 부합되는 가속도의 윈도우(windowing)로부터 시작되며, 윈도우의 크기는 규모와 진앙거리의 함수로 특성화된다. 위의 방법을 적용하여 획득한 스펙트럼에 모델 진폭스펙트럼을 곱한 후 다시 시간영역으로 역변환 시키면 최종적으로 시간영역에서의 파형을 얻을 수 있다.

2.2. 모델의 푸리에 진폭 스펙트럼(Fourier Amplitude Spectrum of the Model)

강진동 모사(strong ground motion simulation)를 위해서 푸리에 진폭 스펙트럼(Fourier amplitude spectrum)을 이용한다. 모델의 푸리에 진폭 스펙트럼은 지진모멘트(seismic moment; M_0), 진앙거리(hypocentral distance; R), 주파수(frequency; f)의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$A(M_0, R, f) = C \cdot E(M_0, f) \cdot D(R, f) \cdot I(f). \quad (1)$$

여기에서, C 는 모델 진폭 스펙트럼의 척도요소(scaling factor), $E(M_0, f)$ 는 진원 스펙트럼(earthquake source spectrum), $D(R, f)$ 는 스펙트럼의 기하학적, 및 비탄성 감쇠를 나타내는 감쇠함수(diminution function), $I(f)$ 는 어떤 특정 지진동의 스펙트럼의 모양을 좌우하는 스펙트럼 모양 필터(spectrum shaping filter)이다.

2.2.1. 척도 요소(Scaling factor)

척도 요소(scaling factor) C 는 다음의 식으로 주어지는 상수이다.

$$C = \frac{R_{\theta\phi} \cdot FS \cdot PT}{4\pi\rho\beta^3}. \quad (2)$$

여기에서, $R_{\theta\phi}$ 는 진원에서의 방위각(azimuth)과 사출각(take-off angle)에 의하여 결정되는 횡파의 발산양상(radiation pattern), FS 는 자유경계면(free surface)에서의 횡파의 증폭계수

(amplification factor), PT 는 횡파의 수평성분률(horizontal partition factor)이다. 일반적으로 평균적인 $R_{\theta\phi}$ 는 0.63(Boore and Boatwright, 1984), PT 는 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ($\cong 0.707$), FS 는 2가 사용되고 있다. 지각밀도 ρ 와 횡파속도 β 는 김성균(1995)을 참조하여 각각 2.7 g/cm^3 , 3.68 km/s 을 채택하였다.

2.2.2. 지진원 스펙트럼(Earthquake source spectrum)

Brune(1970; 1971)의 지진원모델(source model)에서 진원함수 $E(M_0, f)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$E(M_0, f) = \frac{M_0}{1 + (f/f_c)^2} \quad (3)$$

이때, M_0 는 지진모멘트(seismic moment), f_c 는 모서리 주파수 (corner frequency)이다.

2.2.3. 감쇠함수(Diminution function)

거리에 따른 스펙트럼의 감쇠효과, $D(R, f)$ 는 다음과 같다.

$$D(R, f) = D_x(R, f) \cdot G(R) \quad (5)$$

여기서, $D_x(R, f)$ 는 Anderson과 Hough(1984)가 제안한 카파필터(kappa filter)이고 박동희 외(2000)가 구한 결과를 이용하였다. $G(R)$ 은 기하학적 확산(geometric spreading)을 나타내는데, 기하학적 감쇠에 의한 스펙트럼의 감쇠는 주파수에는 무관하나 진원거리에 따라 다른값을 가진다. S파보다 표면파가 우세하게 나타나는 거리에서는 표면파가 대부분의 에너지를 전달하게 되며, 이 전이거리는 지역에 따라 다르나, 일반적으로 약 100 km지점을 기점으로(Herrmann and Kijko, 1983)하여 표면파가 우세하게 나타난다. 따라서 진원거리(R)가 100 km인 지점을 기점으로 하여 기하학적 감쇠를 차등 적용시켰다. 즉, 100 km이내의 진원거리가 짧은 지역에서는 기하학적 감쇠를 $1/R$ 로 설정하였으며 이보다 진원거리가 긴 지역에 대해서는 표면파 우세를 고려하여 기하학적 감쇠를 $1/\sqrt{R}$ 로 설정하였다.

2.2.4. 형태 필터(Shaping filler)

필터 $I(f)$ 는 예측하고자 하는 지진동에 대응하는 스펙트럼 모양을 만드는데 이용된다. 지진동 속도나 지진동 가속도를 고려하여

$$I(f) = (2\pi f)^p \quad (6)$$

로 나타내고, 이 때 P 값은 속도와 가속도에 대해 각각 1과 2이다.

2.3 시간영역에서의 가속도파형(Accelerogram in time domain)

강진동을 모사하는데 필요한 입력요소는 상기 외에 지속시간(duration model)과 형태 윈도우(shaping window)가 있다.

2.3.1 지속시간 모델(Duration model)

지진동의 지속시간은 지진기록에서 초동이 시작된 시작부터 끝날 때까지의 시간차로 정의되며, 일반적으로 다음과 같은 두 개의 요소를 갖는다.

$$T = T_d + bR \quad (7)$$

T_d 는 진원 지속시간(source duration) 이고, bR 은 거리에 의존하는 요소로 산란(scattering)과 분산(dispersion)을 고려한 것이다.

진원 근처에서의 지진동의 모사 시 진원 지속시간은 최대진폭의 생성 또는 단층 지속시간

(faulting duration)의 응답(response)과 관계가 있으며, 거리에 의존하는 양인 bR 은 지역에 따라 각기 다른값으로 특성화되는데 한반도에서 누적된 지진자료의 부족으로 이 값을 구하는데 어려움이 있었다. 따라서 Herrmann(1985)에 의한 이론식으로 임의의 진원거리에서의 지속시간을 계산하였다.

$$T = \frac{1}{f_c} + 0.05R. \quad (8)$$

이번 연구에서 경주 지진과 울산 앞바다 지진의 스펙트럼 분석으로부터 구해진 T_d 값은 각각 0.237, 0.34로 평균값은 0.263이다.

2.3.2. 형태 윈도우(Shaping window)

시간영역에서 가속도 파형을 얻기 위해 사용되는 윈도우는 박스(box)모양 또는 지수함수모양이 흔히 이용된다. 일반적으로 박스모양의 윈도우는 규모 4.0 이하의($M < 4.0$) 미소지진의 모사에 이용되며, 지수함수 모양의 윈도우는 규모 4.0 이상($M > 4.0$)의 지진동 모사에 이용된다.

본 연구는 규모 4.0이상의 지진동을 모사하는데 목적이 있으므로 지수함수 형태의 윈도우를 이용하였다.

3. 강진동 모사

앞에서 언급한 바와 같이 추계학적 모사법은 어떤 지역의 지진활동 분석을 토대로 하여 그 지역에서 발생 가능한 강도의 특성을 예측하기 위한 확률론적인 방법으로, 모멘트 규모(M_w)와 진원거리(R)에 따른 강진동의 최대지반가속도와 가속도 스펙트럼(spectral acceleration; SA)의 특성을 구명할 수 있는 방법이다. 추계학적 모사법을 이용한 강진동 모사는 유한한 지속시간을 가지는 유한대역 백색 가우시안 잡음(bandlimited white Gaussian noise)의 생성으로부터 시작된다. 다음으로 정규화된 형태 윈도우(shaping window)를 적용시킨 후 푸리에 변환(Fourier Transform)을 이용하여 주파수 영역으로 변환시킨 스펙트럼에 모델 스펙트럼(model spectrum)을 곱한다. 이를 다시 역 푸리에 변환을 시켜 시간영역의 가속도 또는 속도 파형을 얻는다. 이런 방법으로 획득되는 파형은 지역적으로 각기 다른 특성을 가지는 입력요소에 의해 특성화 된다. 본 연구에서는 가속도 파형 모사를 위한 입력요소를 Table. 1에 나타내었다.

Table. 1. parameters of model spectra.

$\Delta\sigma$	105 bar
Q	1977
x	$0.00131+0.0001374R$
β	3.68 km/sec
ρ	2.7g/cm^3
$R_{\theta\phi}$	0.63
F	2
V	0.707

강진동 모사에 사용한 프로그램은 미국지질조사소(U. S. Geological Survey), David M. Boore (1996)에 의한 SMSIM(strong motion simulation)프로그램이다.

본 연구에서는 위에서 기술한 방법을 이용하여 한반도 동남부에서 발생가능한 지진동의 최대

지반 속도와 최대지반 가속도 및 지진동 가속도를 계산하였으며, 이를 다양한 진원거리. 모멘트 규모, 고유주파수를 적용시켜 모사하고, 관측된 자료(경주 지진, 울산 앞바다 지진)와 비교, 검토하였다.

3.1. 강진동 모사결과(Results of strong motion simulation)

앞에서 기술한 입력자료를 이용하여 얻어진 스펙트럼을 Fig. 1에 나타내었다.

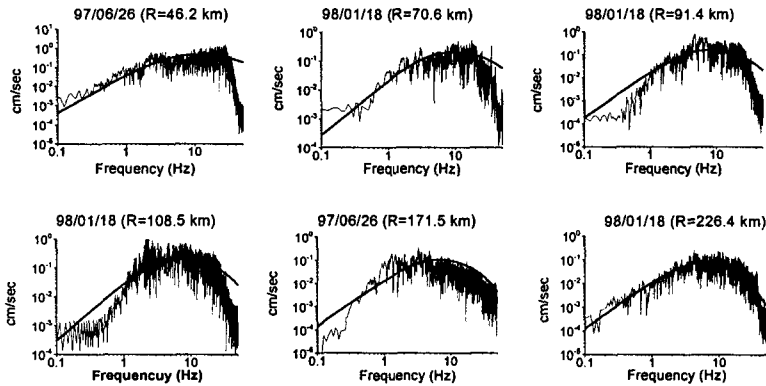


Fig. 1. Comparison of observed amplitude spectra (jagged curves) with model amplitude spectra (smooth curves) for different distances.

가는선(피크)으로 나타나는 스펙트럼은 1997년 6월 26일 경주 지진과 1998년 1월 18일 울산 앞바다 지진의 관측자료로부터 구한 가속도 스펙트럼으로, 이를 모사결과 얻어진 모델의 스펙트럼(곡선)과 비교하였다. 이들 두 스펙트럼은 저주파수 영역에서는 유사하나 고주파수 영역에서는 모델의 감쇠현상이 실제보다 적음을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 관측된 지진자료는 25 Hz 이상의 고주파수 영역에 반 알리아싱 필터가 적용되어 있기 때문에 고주파수 영역에서 급격한 감쇠를 보이는 것이다.

모사파형과 실제파형의 시간영역에서의 파형을 비교하기 위하여 백색 가우시안잡음(white gaussian noise)으로 부터 모사된 합성 강진동과 실제 관측된 지진동 속도를 미분하여 얻은 가속도 파형을 Fig. 2에 나타내었다.

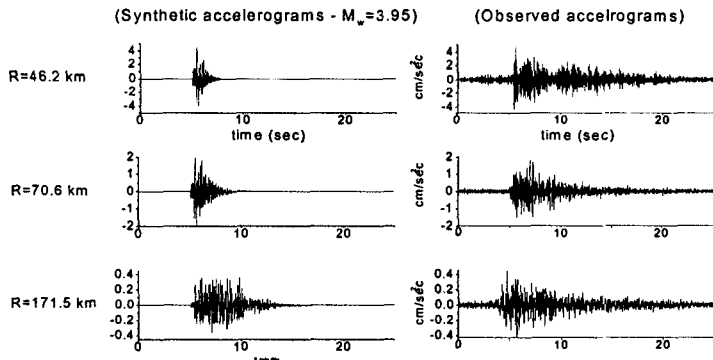


Fig. 2. Comparison of observed (left) and synthetic (right) accelerogram of S-waves.

가속도 파형은 실제로 획득한 경주 지진(96/06/26)과 울산 앞바다지진(98/01/18) 자료의 속도 파형을 미분함으로써 얻어진 것이나 신호대 잡음의 비가 높은 파형만을 분석에 이용하였으므로 미분에 의한 오차는 최소인 것으로 가정한다. 모사파형은 앞서 구해진 모멘트 규모 3.95를 대입한 것으로 S파의 파형을 보여주고 있으며, 실제 파형보다 지속기간은 짧게 나타나는데 이는 지진파의 산란과 분산에 의한 효과로 사료된다. 진원거리가 증가할수록 가속도의 최대 진폭의 값은 감소하며, 모사결과와 실제관측결과의 최대진폭값은 대부분의 경우 유사한 결과를 가진다. 따라서 모사 결과로부터 한반도에서 발생 가능한 지진동의 파형을 예측하는데 큰 무리가 없는 것으로 사료된다.

4. 감쇠식(Attenuation equations)

지반운동과 에너지 감쇠특성은 지역마다 그 지역의 지진과 지반의 특성에 따라 상이하기 때문에 각 지역에 적합한 방정식을 만들어서 적용하는 것이 이상적이다. 따라서 본 연구에서는 모사를 통해 얻어진 결과를 이용하여 최대가속도와 최대 속도의 값 및 고유주파수별 지진동의 진원거리에 따른 감쇠식을 도출하였다.

먼저, 모멘트규모 4.0, 5.0, 6.0, 7.0에 대한 합성지진의 PGA와 PGV의 결과를 진원거리에 따라 구하였다. 진원거리는 10 km에서 350 km 사이를 로그 거리값의 등 간격으로 나누어 총 17개의 거리에 대해 최대진폭 값을 구하여 Fig. 3에 도시하였다. 또한 실제 관측된 경주 지진과 울산 앞

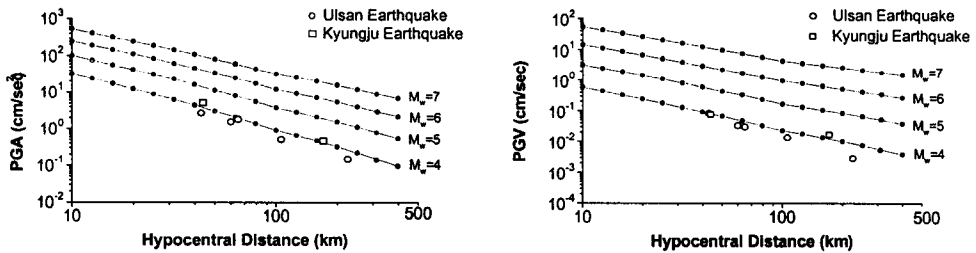


Fig. 3. Predictions of the hypocentral Distance (R) dependence of PGA and PGV for moment magnitude 4, 5, 6, and 7. The solid circles represent PGA and PGV from the predicted ground motion. The open circles and squares are observed PGA and PGV of Kyungju earthquake (97/06/26) and Ulsan Front Sea earthquake (98/01/18) data, respectively.

바다 지진자료의 속도의 최대값과 이를 미분하여 얻은 가속도의 최대값을 함께 도시하여 비교하였다. Fig. 3에서 100 km를 기준으로 기울기가 달라져 있음을 알 수 있는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 진원거리 100 km를 기준으로 기하학적 감쇠를 차등 적용시켰기 때문이다. 또한 224.7 km 거리에서 관측된 울산 앞바다 지진 자료 외에는 대체적으로 유사함을 일컬어 볼 수 있다. 이는 강진동 모사에 있어 적용된 지진파의 전파양상, 감쇠효과, 응력강하량등에 포함된 오차들의 단독 또는 복합적인 결과로 사료된다.

실제로 강진동 모사에 의한 피해지역은 100 km이내이고, 이 지역까지 모사결과가 실제자료와 매우 유사하므로, 모사결과를 이용하여 진원거리 100 km이내에 대하여서만 감쇠식을 유도하였다. 내진공학에 있어서는 지반의 거동 뿐 아니라 지반에 세워진 구조물의 거동또한 중요하다. 또한 구조물은 고유주파수(natural frequency)가 있어, 이 고유주파수에 대한 진동은 증폭이 되므로 주파수별 지반의 가속도가 요구된다. 따라서 모멘트규모 4.0, 5.0, 6.0, 7.0일 때 5% 댐핑을 준 유사응답 가속도의 응답스펙트럼(response spectrum)을 지진동 모사를 이용하여 구하였다. 모사에 적용시킨

주파수는 0.5 Hz 에서 50 Hz까지로 이를 등간격으로 나눈 9개의 고유주파수(natural frequency)-0.5 Hz, 1.0 Hz, 2.0 Hz, 5.0 Hz, 10.0 Hz, 16.0 Hz, 20.0 Hz, 25.0 Hz, 50.0 Hz-이다.

이 결과와 앞서 구한 PGA, PGV에 대하여 Boore(1987)의 감쇠식

$$\log y = c_0 + c_1 r - \log r \quad (9)$$

을 이용하여 감쇠상수를 구하였다. 여기서, y 는 고유주파수에 대응하는 응답 가속도를 의미하며 cm/sec^2 이다. 상수 c_0, c_1 은 지진과 지반의 성질에 따라 다르며 여러 지진자료의 회귀분석(regression analysis)을 통해 결정되어지는 값으로 c_0 는 진원 강도(source strength), $c_1 r$ 은 비탄성 감쇠(anelastic attenuation), $\log r$ 은 기하학적 감쇠(geometrical spreading)을 나타낸다. 강진동의 감쇠식은 규모에 관계없이 동일한 계수로 표현되어야 하므로 우변의 상수와 진원거리 R 의 계수는 다음과 같이 규모에 대한 다항식으로 나타낼 수 있다.

$$c_i = \xi_0^i + \xi_1^i (M_w - 6) + \xi_2^i (M_w - 6)^2 + \xi_3^i (M_w - 6)^3 \quad i=0 \text{ or } 1. \quad (10)$$

그러나 고차항(high order term)에서 기인하는 오차를 줄이기 위해 규모 그 자체를 대입시키기 보다는 강진동의 기준이 되는 $M_w - 6$ 을 대입시킨다. 위 식 (9), (10)에 행렬 역산(matrix inversion)을 이용하여 PGA, PGV, 및 각 주파수에 따른 지진동 가속도의 감쇠식을 계산하였다. 그 결과 구하여진 감쇠상수를 적용하면, 내진설계 시 가장 우선으로 고려해야하는 지반운동값을 특정 모멘트 규모와 진원거리에 관하여 도출할 수 있다. PGA와 PGV의 감쇠상수와 각 고유주파수에 해당하는 지진동 가속도의 감쇠상수는 Table. 2에 나타내었다.

Table. 2. Coefficients of attenuation equation

M_w		C_0	C_1	C_2	C_3
PGA	C_0	3.391E+00	3.601E-01	-3.621E-02	-6.385E-03
	C_1	-3.660E-03	1.267E-03	-9.000E-05	-2.667E-05
PGV	C_0	2.158E+00	5.974E-01	-3.084E-02	7.930E-03
	C_1	-1.931E-03	1.1104E-03	-1.489E-04	-2.299E-05
0.5	C_0	2.691E+00	9.412E-01	-2.140E-01	-5.826E-02
	C_1	-9.451E-05	1.044E+00	-5.224E-01	-5.219E-01
1.0	C_0	3.425E+00	3.525E-01	-3.345E-02	6.657E-03
	C_1	-3.570E-03	1.181E-03	-1.200E-04	-3.000E-05
2.0	C_0	3.684E+00	5.845E-01	-3.474E-01	-8.873E-02
	C_1	-1.380E-03	1.667E-04	1.551E-04	5.833E-05
5.0	C_0	3.684E+00	3.754E-01	-4.289E-02	2.015E-02
	C_1	-2.321E-03	6.466E-04	5.500E-05	-3.167E-05
10.0	C_0	3.789E+00	2.564E-01	-3.221E-02	7.792E-03
	C_1	-3.301E-03	8.800E-04	-5.000E-06	5.500E-05
16.0	C_0	3.850E+00	3.733E-01	-7.972E-02	-2.081E-02
	C_1	-4.271E-03	1.003E-03	3.000E-04	5.333E-05
20.0	C_0	3.780E+00	3.444E-01	-2.766E-02	4.095E-03
	C_1	-4.710E-03	1.072E-03	-7.000E-05	6.167E-05
25.0	C_0	3.743E_00	3.429E-01	-2.768E-02	3.232E-03
	C_1	-5.090E-03	1.135E-03	-8.500E-05	5.000E-04
50.0	C_0	3.535E+00	3.757E-01	-4.538E-02	1.107E-02
	C_1	-4.531E-03	1.267E-04	4.100E-04	5.433E-04

5. 결론 및 토의

앞선 연구에서 얻은 지진원요소($\Delta\sigma$, f_c , M_0) 및 감쇠상수(Q , κ)의 결과를 입력요소로 하여 한반도 동남부에서의 강진동을 모사하였으며, 이 결과를 경주 지진, 울산 앞바다 지진자료와 비교하였다. 스펙트럼 분석과 시간영역 파형 분석 결과, 모사한 지진동과 실제지진자료의 주파수 특성과, 지진동의 파형은 유사하였다. 따라서 이들 강진동 모사의 입력자료들을 타당한 것으로 사료된다. 또한 추계학적 모사법으로 최대지반 속도, 최대지반 가속도의 진원거리에 따른 변화와 지진동 가속도의 고유주파수 및 진원거리에 따른 변화를 추정하였으며, 획득된 결과를 회귀분석하여 진원거리에 따른 감쇠식을 도출하였다.

본 연구의 결과는 이 지역에 위치한 구조물 설계의 기본자료로 이용될 수 있으며, 향후 지진 관측소가 증가하고 양질의 자료가 누적되면 더욱 신뢰도 높은 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

사사

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업의 일환으로 수행된 것으로 일부 교육부의 두뇌한국21의 보조를 받았다.

참고 문헌

1. 김성균(1995), "한반도의 지각구조에 관한 연구," *지질학회지*, 제31권, pp.393-403.
2. 박동희, 이정모, 김성균(2000), "한반도 동남부의 지진파 감쇠, 지진원 요소," *지구물리(발표예정)*.
3. 조남대(1998), "추계학적 모사법을 이용한 한반도 동남부에서의 강진동 연구," 석사학위논문, 울산대학교
4. Boore, D.(1983), "Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.73, pp.1865-1894.
5. Boore, D.(1996), "SMSIM-Fortran program for simulating ground motions from earthquakes, Version 1.0," *U. S. Geol. Surv. Open-file Report*, pp.54.
6. Brune, J. N.(1970), "Tectonic stress and the spectra of seismic shear wave from earthquake," *J. Geophys. Res.*, Vol.75, pp.4997-5009.
7. Brune, J. N.(1971), Correction, *J. Geophys. Res.*, Vol.76, pp.5002.
8. Hank, T. and McGuire, R.(1981), "The character of high frequency strong ground motion," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.71, pp.2071-2095.
9. Hanks, T. and Kanamori, H.(1979), "A moment magnitude scale," *J. Geophys. Res.*, Vol.84, pp.2348-2350.
10. Jorner, W.(1984), "A scaling law for the spectra of large earthquake," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.74, pp.1167-1188.
11. Noh, M. and Lee, K.(1995), "Estimation of peak ground motions in the southeastern part of the Korean Peninsula (II) : development of predictive equations," *Jour, Geol Soc. Korea*, Vol.31, pp.175-187.