Sino-Korea Craton에서 최대수평가속도의 감쇠
Attenuation of Peak Horizontal Acceleration in the Sino-Korea Craton

이기화*[1)] 조광현**[2)]
Lee, Kiehwa Cho, Kwang Hyun

ABSTRACT

The strong ground motion data recorded in the Sino-Korea Craton are analysed to obtain attenuation relations valid for 5 < M < 8, r < 400 km applicable to the Korean Peninsula. The result is

$$\log A = -1.83 + 0.386M - \log r - 0.0015r$$

where A is peak horizontal acceleration in g, M is surface-wave magnitude, and r is hypocentral distance in km.

Our result is compared with the existing attenuation relations of Western North America and Eastern North America and the prior predictive equations for the Southern part of Korean Peninsula. Our result compares better with those of North America than those of the Southern part of the Korean Peninsula. More theoretical and empirical studies are required for better attenuation relations appropriate for the Korean Peninsula.

주요어 : **strong ground motion, Sino-Korea Craton, peak horizontal acceleration, attenuation, surface-wave magnitude**

* 정회원 · 서울대학교 지구환경과학부, 교수

** 학생회원 · 서울대학교 지구환경과학부, 박사과정

1. 서론

강지진동(strong ground motion)에 대한 합리적 평가는 지진위험도와 밀접하게 연관하여 국민의 생명과 재산의 안전뿐만 아니라 병원, 원자력 발전소, 학교, 컴퓨터 센터, 공장과 정부 관공서 같은 중요한 시설물의 내진설계를 위해 매우 중요하다.

20세기에 한반도의 지진활동은 매우 낮았다. 그러나 매우 활발한 지진활동이 15-18세기에 한반도에서 발생하였다. 과거 한반도에서 발생한 MMI VIII 이상의 역사지진과 계기지진의 대부분은 한반도의 주요 단층과 연관되어 있다. 특히 활성단층으로 밝혀진 양산단층 일대의 지진활동은 매우 높고 단층 주위에 원자력발전소가 위치하고 있어서 그 지진위험도는 매우 심각하다. 지진위험도는 지반운동 감쇠식의 불확실성에 매우 민감한 것으로 밝혀졌다(노명현 · 김연중, 1996). 이러한 맥락에서 한반도에서의 강지진동 감쇠식의 평가는 매우 중요하다.

국내에서 강지진동에 대한 이전의 연구들은 이론적인 예측공식의 추정에 관한 것이었다. 이들 연구는 지반운동의 기초로서 유용하지만, source spectral function에 대하여 한반도에서 발생한 소규모의 지진자료에서 추출된 parameter를 self similarity를 이용하여 큰 지진으로 외삽한 데에 문제점이 있다.

실제 강진자료로부터 지진동 감쇠공식을 구하기 위해서는 필요한 규모와 거리를 포괄하는 많은 강진 자료가 요구된다. 한반도에서는 최근까지 지진관측장비가 충분히 갖추어지지 않았고 지진활동이 낮았기 때문에 감쇠공식을 유도하는데 필요한 규모 5.0 이상의 지진기록은 전무한 상태이다. 일반적으로 다른 지역의 예측공식이 직접적으로 한반도에 적용될 수는 없지만 지리적으로 인접하고 지질학적 구조와 지진환경이 한반도와 유사한 중국-한국 육괴의 일부인 중국 북동부의 많은 강진자료를 사용할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 중국-한국 육괴에서 발생한 강진자료를 이용하여 한반도 지역에 적용할 수 있는 지진운동 감쇠양상에 관한 일반적인 관계식을 구하였다.

2. 본론

2. 1. 이론

한반도에서는 축적된 강진자료가 거의 없으므로 한반도의 강지진동에 대한 이전의 연구들은 Boore(1983)에 의해서 제시된 추계학적 모사법을 이용하여 한반도의 미소지진으로부터 계산에 사용되는 입력자료를 추정하여 강진의 감쇠양상을 계산하였다(Noh and Lee, 1995; Park et. al., 1999; 조남대 · 박창업, 2001).

본 연구에서는 실제 최대수평가속도 자료를 이용하여 지진운동에 대한 감쇠공식을 회귀분석을 이용하여 유도하였다. 많은 지진자료, 가능한 많은 변수, 변수들 사이의 비선형 관계로

인해 지진운동과 관련하여 회귀분석 문제는 매우 복잡하다. Campbell(1985)은 지반운동 감쇠공식을 다음과 같이 규모와 거리의 기본적인 함수로 표현하였다.

$$Y = b_1 f_1(M) f_2(R) f_3(M, R) f_4(P_i) f_5(F) \varepsilon \quad (1)$$

식 (1)에서 Y 는 strong motion parameter, b_1은 상수, f_1(M)은 독립변수 M의 함수, f_2(R)은 독립변수 R의 함수, f_3(M, R)은 M과 R의 가능한 joint 함수, $f_4(P_i)$는 관측지역의 영향을 표현하는 함수, f_5(F)는 지진원의 단층형태의 영향을 표현하는 함수, ε 은 오차이다. M과 R의 joint 함수 f_3(M, R)은 규모와 거리의 변화가 서로 연관되어 규모와 거리에 따른 지반운동의 상대적 변화가 서로 독립적이지 않다는 것을 의미한다. f_3(M, R)의 실제성은 아직 논란이 되고 있다(Joyner and Boore, 1981). 그러므로, 본 연구에서는 이 항을 제외한 더 적은 변수를 갖는 공식을 채택한다. 또한, 관측지역의 영향에 대한 함수, $f_4(P_i)$는 관측지역의 암상에 대한 자료가 부족할 때 고려할 수 없다. 암상자료를 이용한 이전의 연구들은 통계적으로 관측지역의 암상이 최대 가속도에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 보여준다(Boore et al., 1980). 또한 단층형태와 연관된 함수, f_5(F)는 지진자료의 focal mechanism이 잘 정의되지 않을 때 고려할 수 없다.

2. 2. 자료분석

가속도자료는 속도자료나 변위자료에 비해 쉽게 측정되어지고 가장 많은 자료를 공급하기 때문에 지반운동의 감쇠양상은 보통 최대지반가속도자료로 표현된다. 또한, 본 연구에서는 지진공학적인 관점에서 볼 때 더 중요한 수평성분 중 더 큰 성분을 사용한다.

본 연구에 사용된 중국-한국 육괴의 지진들은 1975년 2월 15일 해청에서 발생한 규모 5.4, 깊이 33 km의 본진과 그 aftershock 그리고 1976년 7월 27일 당산에서 발생한 규모 7.8, 깊이 23 km의 본진과 그 aftershock들이다. 진원으로부터 반경 400 km 이내의 관측소에서 얻어진 326 개의 당산지진의 최대가속도자료와 70 개의 해청지진의 최대가속도자료가 사용된다. 모든 지진의 규모는 Surface-wave magnitude이다. 이 중 1976년에 발생한 당산지진은 인류역사상 가장 큰 인명피해를 가져온 강진의 하나로 공식적으로 25만 5천명이 사망하였으며, 실종자를 포함하여 최고 65만 5천명으로 추정되는 사망자를 낳았다.

그림 1 은 당산지진과 해청지진의 본진의 진앙위치를 보여준다. 건물에서 기록된 가속도자료는 건물의 영향을 받을 수 있기 때문에(Boore et al., 1980) 건물과 댐에서 얻어진 기록은 제외되었다. 그림 2와 그림 3은 회귀분석에 사용된 최대가속도 자료의 거리에 대한 규모의 분포와 거리에 대한 각 규모의 최대수평가속도의 분포를 보여준다. 그림 3에서 각 규모의 거리에 따른 최대수평가속도의 감쇠양상을 확인할 수 있다.

다음 공식을 사용하여 다중회귀분석(Draper and Smith, 1966; Weisberg, 1980)에 의해 최대가속도자료를 fitting 시킨다.

$$\log y = a - \log r + br \tag{2}$$

식 (2)에서 $a = \sum_{i=1}^{N} a_i E_i$ ($E_i = 1$ for earthquake i, $E_i = 0$ otherwise), y 는 최대 수평가속도, r 은 진원거리이다. a , b 는 주어진 r 값에 대해 선형회귀분석에 의해 결정된다. a_i 값은 식 (3)와 같이 규모의 함수로 표현될 수 있다.

$$a_i = \alpha + \beta M_i + \gamma M_i^{\,2} \tag{3}$$

식 (3)에서 2차식의 계수는 90% 신뢰도로 무시될 수 있다. 그러므로, 식 (4)과 같은 최대수평가속도의 감쇠예측공식을 얻는다.

$$\log A = -1.83 + 0.386M - \log r - 0.0015r \tag{4}$$

그림 4는 본 연구에서 중국-한국 육괴의 실제강진자료를 통해서 얻어진 최대수평가속도 감쇠곡선과 북아메리카의 서부 캘리포니아 지역(Joyner and Boore, 1981)과 동부 지역(Boore and Atkinson, 1987)의 감쇠곡선을 보여준다. 중국-한국 육괴의 최대수평가속도 감쇠곡선은 규모 8에서는 북아메리카 동부지역과 규모 5 와 규모 6에서는 북아메리카 서부 지역의 감쇠곡선과 유사하다. 또한 세 감쇠곡선의 기울기는 진원거리 100 km 까지 아주 유사함을 알 수 있다. 규모가 한 단위 감소할 때 중국-한국 육괴에서의 최대가속도의 감소 폭은 북아메리카 동서부지역보다 더 크다. 북아메리카의 동서부의 감쇠곡선이 중국-한국육괴에 직접적으로 적용될 수 없다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 한반도 남부의 강지진동 감쇠공식에 대한 이전의 연구에서 추계학적 모사법으로 얻어진 감쇠곡선(Noh and Lee, 1995; 조남대 · 박창업, 2001)과 본 연구에서 실제 최대가속도자료를 이용하여 얻어진 감쇠곡선을 보여준다. Noh and Lee의 감쇠곡선의 기울기는 본 연구의 결과와 유사하다. 그러나 추계학적 모사법으로 얻어진 두 감쇠곡선은 실제 가속도자료로부터 얻어진 본 연구의 결과와 다소 차이가 있음을 알 수 있다.

세계 각지에서 얻어진 감쇠공식의 불확실성은 통계적으로 볼 때 지역에 따라 큰 차이가 없다(Douglas and Smit, 2001). 더 많은 자료와 변수가 더 많은 복잡한 분석 방법을 사용해도 이 불확실성은 줄어들지 않는다. Douglas and Smit(2001)에 의하면 이러한 불확실성은 분석방법에 의해서가 아니라 자료의 편차에 기인한다. 본 연구에서 사용된 자료는 그림 3에서 볼 수 있듯이 거의 편차가 없는 양질의 자료이기 때문에 감쇠공식을 구할 때 일어날 수 있는 불확실성의 표준편차 내에 속한다고 볼 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 한반도 지진운동의 감쇠양상을 결정하기 위하여 중국-한국 육괴에서 발생한 강진자료를 이용하여 한반도 지역에 맞는 최대지반가속도 감쇠공식을 구하였다.

$$\log A = -1.83 + 0.386M - \log r - 0.0015r$$

미국 동서부 지역의 최대지반가속도 감쇠곡선과 비교적 유사하지만 어느 것도 한반도에 직접적으로 적용될 수 없음을 알 수 있다. 또한 한반도 남부 지역에 대한 이전의 이론적인 감쇠곡선과 비교하여 볼 때 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 한반도 지역의 합리적인 지진위험도 평가를 위하여 관측지역의 지질학적 특성과 focal mechanism 등을 고려한 지반운동 감쇠공식에 대한 좀 더 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 지진공학 연구센터의 지원으로 이루어졌다. 또한, 본 연구의 가속도 자료는 중국 지진국의 Yanxiang Yu 박사가 제공하였다.

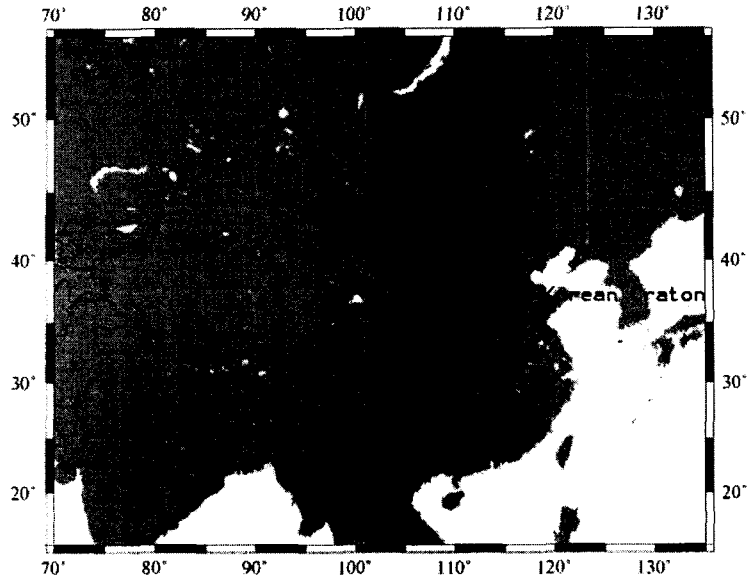

그림 1 . 본 연구에서 사용된 중국-한국 육괴의 당산지진(A)과 해청지진(B)의 진앙위치.

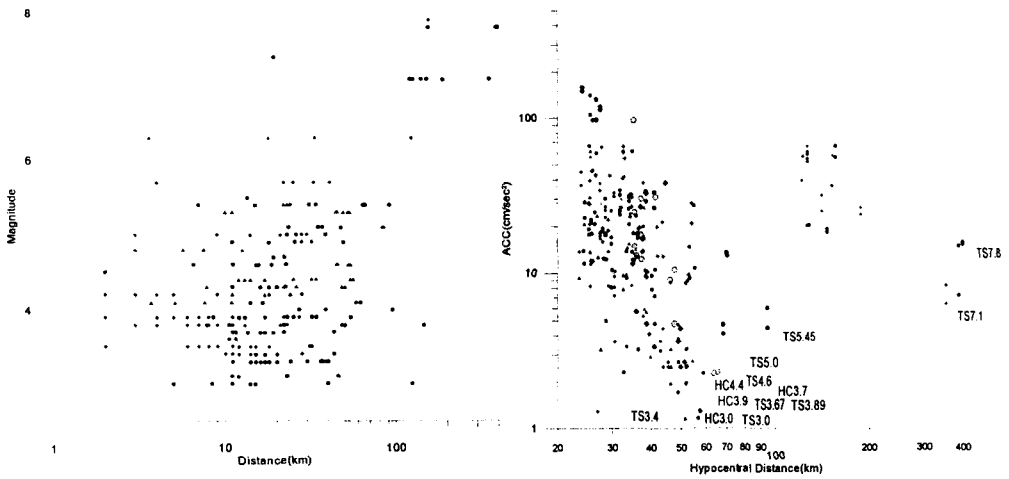

그림 2 . 최대수평가속도 자료의 규모와 진앙거리에 대한 분포도

그림 3 . 회귀분석에 사용된 최대가속도자료

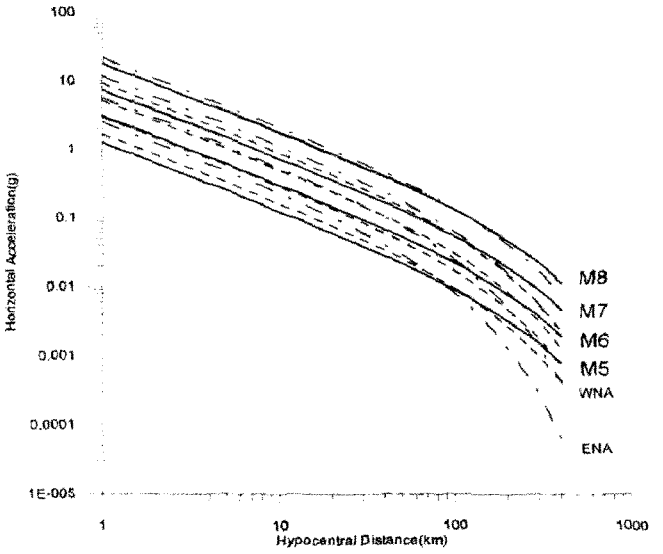

그림 4 . 본 연구에서 얻어진 최대수평가속도 감쇠곡선(실선)과
미국 서부 캘리포니아 지역(WNA)(Joyner and Boore, 1981)과
미국 동부 지역(ENA)(Boore and Atkinson, 1987)의
최대수평가속도 감쇠곡선(점선)의 비교

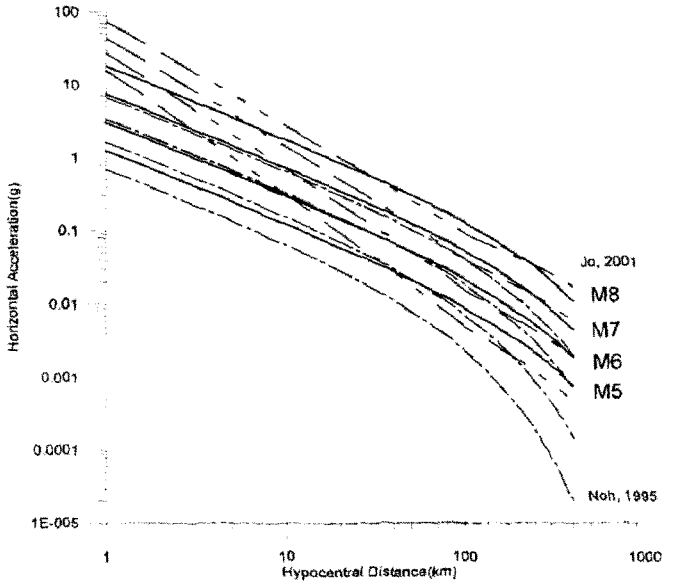

그림 5 . 본 연구에서 얻어진 최대수평가속도 감쇠곡선(실선)과
추계학적 모사법으로 얻어진 최대수평가속도
감쇠곡선(조남대 · 박창업, 2001; 노명현 · 이기화, 1995)의 비교

참고문헌

1. 노명현, 김연중, 한국의 지진재해도곡선의 민감도 분석, 한국지질학회지, 제3권 제3호, 1996, p. 199-207.

2. 조남대, 박창업, 추계학적 모사법을 이용한 한반도 남부에서의 강지진동 연구, 한국지진공학회 논문집, 제5권 제4호, 2001, p. 17-26.

3. Boore, D. M., Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 73, 1983, p. 1865-1894.

4. Boore, D. M., W. B. Joyner, A. A. Oliver III, and R. A. Page, Peak acceleration, velocity, and displacement from strong-motion records, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 70, 1980, p. 305-321.

5. Boore, D. M. and G. M. Atkinson, Stochastic prediction of ground motion and spectral response parameters at hard-rock sites in eastern North America., Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 77, 1987, p. 440-467.

6. Campbell, K. W., Strong motion attenuation relations: a ten year perspective, Earthquake Spectra, Vol. 1, 1985, p. 759-804.

7. Douglas, J. and P. M. Smit, How Accurate Can Strong Ground Motion Attenuation Relations Be?, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 91, 2001, p. 1917-1923.

8. Draper, N. R. and H. Smith, Applied Regression Analysis, Wiley, New York, 1966.

9. Joyner, W. B. and D. M. Boore, Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 71, 1981, p. 2011-2038.

10. Noh, M. H. and K. Lee, Estimation of Peak Ground Motions in the Southeastern Part of the Korean Peninsula(II): Development of Predictive Equations, Jour. Geol. Soc. Korea., Vol. 31, No. 3, 1995, p. 175-187.

11. Park, J. U., M. H. Noh, and K. Lee, Development of attenuation equations of ground motions in the southern part of the Korean Peninsula, Jour. Geol. Soc. Korea., Vol. 3, No. 1, 1999, p. 21-27.

12. Weisberg, S., Applied Linear Regression, Wiley, New York, 1980.