

남한 지진의 지속시간과 H/V 비율 The Duration and H/V ratio of the Ground Motion in Southern Korea

최 호 선* 박 창 업** 조남대*
Choi, Hoseon Baag, Chang-Eob Jo, Nam-Dae

ABSTRACT

The duration and H/V ratio(the amplitude ratio of the horizontal to vertical components) of ground motions caused by earthquakes in southern Korea are analyzed. Total 329 seismograms of horizontal component recorded at hypocentral distances of 10 to 350 km from 27 earthquakes with local magnitude 2 to 4 are used for the analysis. Simplified relation between the duration of ground motion(T_d) and the ratio(x) of Arias intensity(I_A) and squared maximum acceleration(a_{max}^2) is determined to be $T_d = 3.423x^2 + 8.200x + 0.029$, which is useful for the estimation of the duration in southern Korea. There are three distinct distance ranges with different linear variations of the duration in hypocentral distance. They are distance intervals of 10~80km, 80~140km, and the distance greater than 140km. The duration in southern Korea shows clear proportionality to the local magnitude at magnitudes greater than 3.1. The value 1.37 of the H/V ratio obtained in southern Korea is similar to the value 1.4 of ENA(Eastern North America). The H/V ratio in southern Korea increases in the frequency range from 0.3 to 10Hz. The duration and H/V ratio of ground motions derived in this study could be used in the stochastic simulation of strong ground motion.

1. 서론

지반운동을 표현하기 위해서 사용되는 중요한 인자 중 지속시간과 H/V 비율(수평성분과 수직성분의 진폭 비율)이 있다. 이 연구에서는 남한 지역의 (1) 진원거리와 지역규모에 따른 지속시간 변화의 경향과 (2) 시간영역과 주파수영역의 H/V 비율을 알아보고자 한다.

2. 자료

기상청(KMA), 한국원자력안전기술원(KINS), 한국전력연구원(KEPRI), 한국지질자원연구원(KIGAM) 그리고 각 대학교 지진관측소의 지진자료를 획득하여 지속시간과 H/V 비율 연구에 사용하였다. 그림 1은 최근까지 기록된 실측자료 중 이 연구에서 사용된 지진들의 진앙과 관측소의 위치를 나타내고 있다. 열린 원과 닫힌 삼각형은 각각 진앙과 관측소의 위치를 나타낸다. 각 자료는 계기응답(instrumental response)을 디컨벌루션(deconvolution)해서

* 서울대학교 대학원 지구환경과학부 박사과정

** 서울대학교 지구환경과학부 교수, 정회원

3. 2. rms 지속시간

rms 지속시간을 유도하기 위해, Vanmarcke and Lai(1980)은 I_A (Arias Intensity, 1970)를 시간영역과 푸리에(Fourier)영역에서 식 (2)와 같이 표현하였다.

$$I_A = \int_0^{t_0} a^2(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} a^2(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} A^2(f)df = 2 \int_0^{\infty} A^2(f)df \quad (2)$$

t_0 는 지진이 기록된 전체시간이며, f 는 주파수이다. $A(f)$ 는 지반가속도의 푸리에진폭스펙트럼(Fourier amplitude spectrum)을 나타낸다. rms 지반가속도(σ)는

$$\sigma^2 \left(= \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} a^2(t)dt \right) \approx \frac{2}{T_d} \int_0^{\infty} A^2(f)df = \frac{I_A}{T_d} \quad (3)$$

로 표현할 수 있으므로, Arias Intensity와 rms 지반가속도, 지진파 지속시간은 식 (4)와 같은 관계를 갖는다.

$$I_A \approx T_d \sigma^2 \quad (4)$$

만약, 지속시간이 전체 기록시간(t_0)과 같다면, 지속시간은 $T_d = t_0$ 이 되며, rms 지반가속도가 최대 지반가속도(a_{\max})와 같다면 지속시간은 $T_d = I_A / a_{\max}^2$ 로 표현할 수 있다. 전자의 경우가 지속시간이 가장 길고, 후자의 경우가 지속시간이 가장 짧다. 그러나, 앞의 두 가지는 모두 극단적인 경우이며, 비현실적이기 때문에 최대 지반가속도와 rms 지반가속도 사이의 적절한 관계를 찾아야 한다. Vanmarcke and Lai(1980)는 최대 지반가속도와 rms 지반가속도의 비율 r (최대치인자)를 식 (5)와 같이 유도하였다.

$$r = \frac{a_{\max}}{\sigma} = \begin{cases} \sqrt{2 \ln(2T_d/T_p)} & T_d \geq 1.36 T_p \\ \sqrt{2} & T_d \leq 1.36 T_p \end{cases} \quad (5)$$

여기서 T_p 는 우세주기(predominant period)이며, 오른쪽의 조건은 가우시안 파가 단순한 사인곡선일 때 얻어지며, 가장 작은 r 을 갖는다. 식 (5)를 식 (4)에 대입하면, 식 (6)과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$T_d \approx r^2 \frac{I_A}{a_{\max}^2} = \begin{cases} 2 \ln(2T_d/T_p) \cdot (I_A/a_{\max}^2) & T_d \geq 1.36 T_p \\ 2I_A/a_{\max}^2 & T_d \leq 1.36 T_p \end{cases} \quad (6)$$

I_A/a_{\max}^2 은 실제 지반가속도의 기록에서 구하고, T_p 은 가장 진폭이 큰 전단파의 전후로 적절한 크기의 창(window)에서 영점교차법(zero crossing)으로 구함으로써, 식 (6)을 간접적으로 풀어낼 수 있다.

전체자료에 사용해서 얻어진 rms 지속시간 결과가 그림 3인데, 진원거리에 대한 누적에너지 지속시간의 변화 경향과 유사하다는 것을 알 수 있다. (a)에서 계산된 지속시간들이 진원거리에 대하여 도시되어 있다. 구해진 지속시간들은 지진의 규모가 서로 다르기 때문에, 식 (1)을 감안한다면 진원에 의한 효과 때문에 같은 진원거리에 대해서도 지속시간이 다르다. 하지만, 지역규모가 작아서 진원에 의한 지속시간이 0.5초보다 작기 때문에, 진원에 의한 지속시간을 상수로 보아도 무방하다(Atkinson, 1993)³⁾. (b)에서 닫힌 원은 각 진원거리에서 지속시간의 평균값을 나타내며, 세로 실선은 90% 신뢰구간을 나타낸다. 실선은 회귀분석에 의해 얻어진 결과이다. 지속시간의 변화 경향은 진원거리에 따라 누적에너지 지속시간의 변화 경향처럼 세 구간으로 나눌 수 있는데, 0~80km은 직접파에 의한 영향을 많이 받는 구간, 80~140km은 모호면 반사파의 영향을 받아 진원거리에 따른 지속시간의 변화가 크지

않은 구간, 140km 이상은 표면과의 우세에 의해 지속시간의 증가가 완만한 구간이다. 식 (7)은 그림 3의 (b)에서 실선으로 나타낸 회귀분석 결과이다.

$$\begin{aligned}
 T_d &= 0.1536 + 0.0941R & 10\text{ km} \leq R \leq 80\text{ km} \\
 T_d &= 8.0729 - 0.0049R & 80\text{ km} \leq R \leq 140\text{ km} \\
 T_d &= 4.1113 + 0.0233R & R \geq 140\text{ km}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

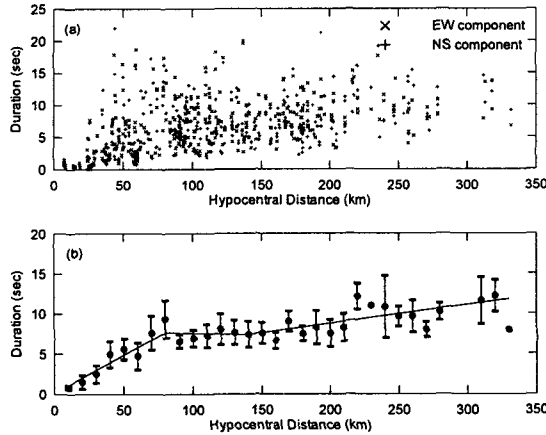


그림 3. rms 지속시간 계산 결과 (a) 계산된 rms 지속시간 (b) 닫힌 원은 계산된 rms 지속시간의 평균값, 세로 실선은 90% 신뢰구간, 실선은 회귀분석 결과를 나타낸다.

T_d 은 지속시간, R 은 진원거리를 나타낸다. 식 (7)의 첫 번째 식을 진원거리 0km까지 확장 후, 식 (1)의 $1/f_c$ 과 비교하면, $f_c = 1/0.1536 \approx 6.5\text{ Hz}$ 이다. 연구에 사용된 지진의 모서리주파수는 대부분 2~7Hz 사이에 분포하고 있으며, 지속시간에 의해 구해진 모서리주파수는 이 구간 내에 있다. 식 (7)은 남한 지진의 진원거리에 따른 평균적인 지속시간을 나타내며, 큰 지진이 일어난다면 모서리주파수의 값이 작아지기 때문에 지속시간이 길어지는 쪽으로 수평이동 할 것이다.

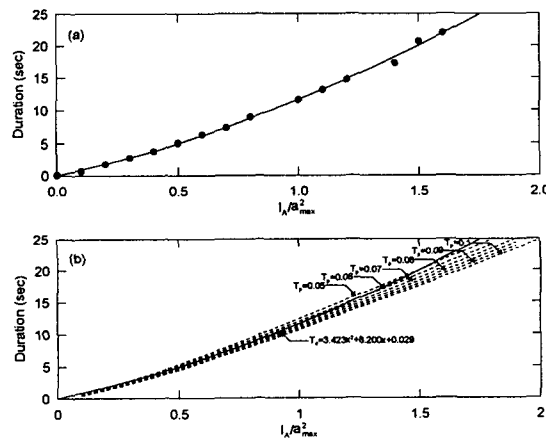


그림 4. (a) I_A/a_{max}^2 과 rms 지속시간의 관계 (닫힌 원은 지속시간 평균값이며, 실선은 회귀분석 결과이다.) (b) 우세주기에 따른 rms 지속시간의 변화

식 (6)에서 지속시간과 I_A/a_{\max}^2 는 최대치인자와 일정한 관계를 맺고 있음을 알 수 있다. 그림 4의 (a)는 가로축을 I_A/a_{\max}^2 , 세로축을 지속시간이라고 할 때, 이차곡선 회귀분석 결과이다. (b)는 우세주기에 대한 지속시간의 변화에 대한 것으로, 지속시간은 우세주기의 변화에 민감하지 않으며, 이차곡선 회귀분석 결과가 이 범위에 안에 있는 것을 볼 수 있다. 이차곡선 회귀분석에 의한 결과는 $x=I_A/a_{\max}^2$ 라고 하였을 때 식 (8)과 같다.

$$T_d = 3.423x^2 + 8.200x + 0.029 \quad (8)$$

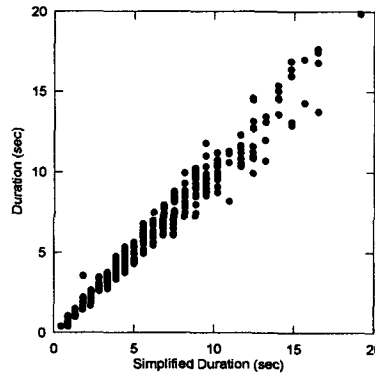


그림 5. 근사적 계산식에 의한 rms 지속시간과 실제 rms 지속시간의 비교

그림 5는 실제 계산한 지속시간과 근사적 계산식을 이용한 지속시간을 비교한 것이다. 이들은 비례관계를 보이지만, 진원거리가 멀어질수록, 즉 지속시간이 커질수록 분산이 커진다. I_A/a_{\max}^2 의 값은 지반가속도 기록에서 쉽게 구할 수 있으므로, 식 (8)은 근사적인 지속시간을 구하고자 할 때 사용하면 유용할 것이다.

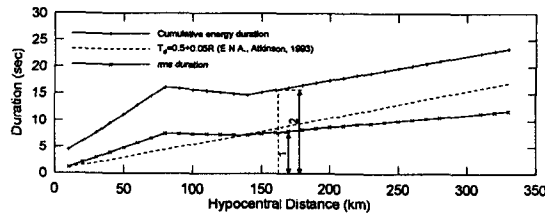


그림 6. 누적에너지 지속시간, rms 지속시간, 북미 동부지역 지속시간 관계식간의 비교

그림 6은 연구에서 얻은 누적에너지 지속시간, rms 지속시간과 식 (1)에서 $1/f_c=0.5$, $a=0.05$ 로 했을 경우 ENA(eastern North America)의 지속시간(Atkinson, 1993)과의 관계를 나타낸다. 누적에너지 지속시간과 rms 지속시간은 같은 진원거리에서 약 2배 차이가 난다. rms 지속시간과 ENA의 지속시간을 비교해보면, 진원거리가 가까운 곳은 rms 지속시간의 증가율이 더 크다. 이는 비교적 단순한 지각구조를 가지고 있는 ENA에 비해, 남한은 다중파가 산란되거나 반사되어 다중파가 생길 수 있는 지각구조를 가지고 있어서, 가까운 거리에서는 진원거리가 멀어질수록 지속시간의 길이가 급격하게 늘어날 수 있기 때문이다. 진원거리가 먼 곳은 오히려 rms 지속시간의 증가율이 더 작아지는데, ENA는 지진파의 감쇠율이 남한보다 작아서 작은 규모의 지진도 먼 곳까지 전파될 수 있음에 반해, 지진파의 감

쇠율이 ENA보다 큰 남한은 진원거리가 멀어질수록 지속시간의 길이에 영향을 주는 지진파의 감쇠가 커서 지속시간은 증가하지만, 증가율은 작다.

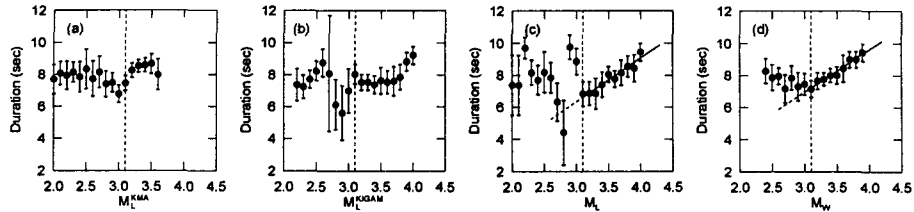


그림 7. 지진규모와 지속시간의 관계 (a) 기상청 지역규모(M_L^{KMA}) (b) 한국지질자원연구원 지역규모(M_L^{KIGAM}) (c) 재계산된 지역규모(M_L) (d) 모멘트규모(M_w) (단한 원은 지속시간의 평균값, 세로 실선은 90% 신뢰구간, 실선은 각 규모가 3.1이상일 때 회귀분석 결과이며, 진원거리는 100km이다.)

그림 7은 지진의 규모와 지속시간의 관계를 도시한 것이다. (a)는 기상청 지역규모(M_L^{KMA}), (b)는 한국자원지질연구원 지역규모(M_L^{KIGAM}), (c)는 이 연구를 위해서 재계산된 지역규모(M_L) 그리고 (d)는 모멘트규모(M_w)와 지속시간의 관계를 각각 나타내고 있다. 진원거리에 대한 의존도를 없애기 위해서 모든 지속시간을 식 (10)을 이용해서 진원거리를 100km로 고정하였다. 모든 규모에 대해 3.1 이하에서는 뚜렷한 상관관계를 찾을 수 없다. 이는 지진의 규모가 작기 때문에 잡음에 의한 영향이 지속시간 계산이나, 규모 계산에 영향을 주어서 제대로 된 결과가 나오지 않은 것이다. 모든 규모 3.1 이상에서 기상청 지역규모, 한국자원지질연구원 지역규모는 지속시간과 뚜렷한 상관관계를 보이지 않지만, 재계산된 지역규모와 모멘트규모는 이 범위에서 지속시간과 뚜렷한 상관관계를 보인다.

4. H/V 비율

이전의 지진기록계는 모든 성분을 기록한 것이 아니고 수직성분만을 기록한 것이 많았기 때문에 수평성분에 대한 정보가 없었다. 하지만, 지진공학적인 면에서는 수직성분보다 수평성분이 관심영역이기 때문에 H/V 비율 분석이 중요하게 여겨져 왔다. 강진동을 모사할 때 보통 수평성분만을 고려하여 모사하기 때문에 모사된 강진동의 수직성분에 대한 정보를 얻기 위해서는 H/V 비율에 대한 분석이 필요하다.

우선 시간영역의 H/V 비율을 구하기 위해 관심이 있는 시간영역에서 수평성분과 수직성분의 최대진폭을 구하며, 식 (9)와 같이 사용된다.

$$H/V = \frac{\sqrt{(EW^2 + NS^2)_{\max}/2}}{|UP|_{\max}} \quad (9)$$

여기서 EW , NS , UP 은 각각 동서, 남북, 수직성분을 의미한다.

주파수영역의 H/V를 구하기 위해 모든 자료를 푸리에변환(Fourier transform)을 한다. 갑작스러운 펄스의 영향을 막기 위해 이동창에 의한 평활화(moving average)를 실시하고, 각 주파수 별로 식 (10)를 이용하여 주파수영역에서의 H/V를 계산한다.

$$H/V = \frac{\sqrt{(EW^2 + NS^2)/2}}{|UP|} \quad (10)$$

시간영역에서 구한 H/V 비율은 그림 8과 같다. 시간영역에서 평균적인 H/V 비율은 1.37로 계산되었으며, Boore and Atkinson(1987)⁴⁾의 1.4와 거의 비슷한 값을 가지며, 지진공학적

으로 많이 쓰이는 H/V 비율(1.5)보다 작지만 비슷한 값을 갖는다. 진원거리가 가까운 곳에서는 진원의 효과에 의해 거리가 먼 곳보다 큰 H/V 비율을 갖는다.

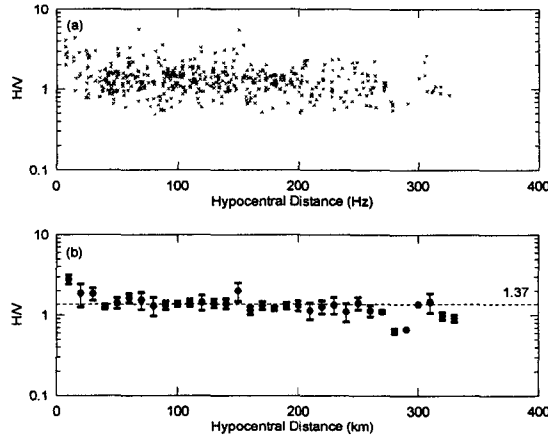


그림 8. 시간영역의 H/V 비율 (a) 계산된 H/V 비율 (b) 닫힌 원은 H/V 비율의 평균값, 세로 실선은 90% 신뢰구간이며, 전체 평균값은 1.37이다.

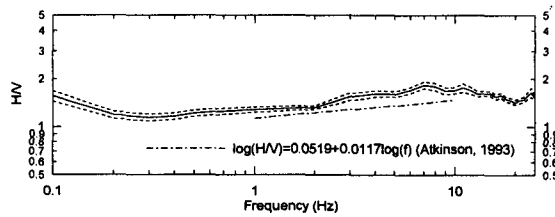


그림 9. 전체 자료를 이용해서 얻어진 주파수영역의 H/V 비율(실선은 평균값, 점선은 90% 신뢰구간을 나타낸다.)

각 주파수를 고정시킨 후 H/V 비율을 구해보면 편차는 존재하지만 평균적인 값은 진원거리와 상관없이 거의 일정하였으며, 그림 9는 전체 자료를 한꺼번에 계산하여 주파수별 H/V 비율을 계산한 것이다. 점선은 Atkinson(1993)이 ENA에서 주파수별로 H/V 비율을 구한 것이다. 이 연구에서 얻어진 값이 약간 크게 계산되었지만, Atkinson(1993)의 결과와 비슷하게 0.3Hz에서 10Hz까지 점차 증가하는 경향을 보인다. 이 결과는 남한 지역의 평균적인 H/V 비율이기 때문에, 실제 관측소의 평균적인 부지의 특성은 같다는 가정이 포함되어 있다. 구조물이나 건축물에 영향을 많이 주는 주파수의 대역이 이 범위 안에 들어간다면, 이 범위 내에서는 주파수가 증가할수록 수평성분에 의한 영향이 수직성분에 의한 영향보다 더 클 수 있다는 것을 의미한다.

5. 결론 및 토의

지진의 지속시간, 특히 진폭과 에너지가 큰 전단파의 경우 지속시간은 대부분의 건물피해에 영향을 준다. 즉, 보통 규모이지만 긴 지속시간을 갖는 지진이 큰 규모이지만 짧은 지속시간을 갖는 지진보다 건축물에 더 큰 피해를 입힐 수도 있다. 또한, 지속시간은 강지진동 모사에 필수적인 입력값이 된다. Hanks and McGuire(1981)⁵⁾는 지반가속도 기록을 특정한 시간 길이를 갖고, 특정한 주파수대역(band limited)을 갖는 가우시안 파로 모사할 수 있다

고 하였는데, 특정한 시간적 길이가 바로 지속시간이다.

남한 지진에 대해 누적에너지 지속시간과 rms 지속시간을 각각 계산하였다. 누적에너지 지속시간이 rms 지속시간보다 약 2배 정도 큰 값을 갖는데, 이는 실제적인 강지진동 모사를 사용되는 형태창(shape window)을 구성하기 위한 지속시간 사이의 관계와 유사하다. 두 지속시간의 변화는 진원거리에 따라 크게 세 구간으로 나눌 수 있다. 진원거리가 가까운(~80km) 구간에서는 진원거리가 커질수록 지속시간이 가파르게 증가하는데, 이는 진원거리에 따른 직접파의 효과에 의한 것이다. 진원거리가 80~140km 구간에서는 진원거리에 따라 지속시간의 변화가 거의 없는데, 이는 모호면 반사파에 의한 것이며, 진원거리가 140km 이상의 구간에서는 표면파가 우세하므로 진원거리에 따라 지속시간은 완만하게 증가한다. 지속시간은 지진의 규모와도 상관이 있다. 보통 규모가 커지면 지속시간이 커지는데, 이 연구에서는 지진의 규모가 작은 것(지역규모 3.1 이하)은 규모와 지속시간의 상관관계를 얻어낼 수 없었다. 이는 지진의 규모가 작아서 잡음에 의한 문제, 지속시간 계산에 의한 문제, 지역규모 계산에 의한 문제가 서로 연관되어서, 각각의 효과를 따로 분리해서 적용하기 어렵기 때문이다. 하지만, 지진의 규모가 클 경우(지역규모 3.1 이상)는 규모와 지속시간의 상관관계를 뚜렷하게 볼 수 있다. 특히, 재계산한 지역규모와 모멘트규모는 지속시간과 뚜렷한 비례관계를 보여주었다.

일반적으로 강지진동의 모사에는 보통 수평성분을 모사하고, 수직성분은 수평성분에 일정 비율을 곱해서 사용한다. 그러므로 수평과 수직성분의 비율인 H/V 비율의 정보가 필요하다. 시간영역에서 계산한 H/V 비율은 기존에 일반적으로 사용하고 있던 값과 큰 차이가 없었다. 각 주파수별로 H/V 비율을 보면 편차는 있지만 진원거리와 상관없이 일정한 값을 갖는다. 그리고, 한반도의 평균적인 H/V 비율은 0.3Hz부터 10Hz사이에서 점차 증가하는 경향을 보인다.

참고문헌

1. Trifunac, M. D., Brady A. G. (1975), A study on the duration of strong earthquake ground motion, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 65, 581-626.
2. Vanmarcke, E. H., Lai, S. P. (1980), Strong-motion duration and rms amplitude of earthquake records, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 70, 1293-1307.
3. Atkinson, G. M. (1993), Notes on ground motion parameters for eastern North America : duration and H/V ratio, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 83, 587-596.
4. Boore, D. M., Atkinson, G. M. (1987), Stochastic prediction of ground motion and spectral response parameters at hard-rock sites in eastern North America, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 75, 1447-1453.
5. Toro, G. R., McGuire, R. K. (1987), An investigation into earthquake ground motion characteristics in eastern North America, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 77, 468-489.