1999년 6월 2일 경주 지진의 스펙트럼 특성

Spectral Characteristics of the June 2, 1999 Kyeongju Earthquake

신 진 수* 이 종 림** 장 천 중*
Shin, Jin Soo Lee, Jong-Rim Chang, Chun-Joong

ABSTRACT

Spectral characteristic of Kyeongju earthquake occurred on the June 2, 1999 with magnitude 3.4 is analyzed. It is guessed that the stress energy release of source within relatively short period caused the ground near the epicenter to vibrate with large amplitude for the magnitude and predominantly high frequency. The cumulative absolute velocity and average spectrum acceleration are 0.034 gsec and 0.118 g , respectively, lower than threshold values of potential earthquake damage, which is consistent with the investigation of damage in field. The analysis of the acceleration records of Kyeongju earthquake shows the need to develop the ration criterion for the determining the operating basis earthquake of nuclear power plant.

1. 서 론

원자력발전소와 같은 중요한 산업 및 공공 시설물은 지진이 발생하였을 때 신속히 피해여부를 조사하여 이에 대한 대응 조치를 취하는 것이 매우 중요하다. 그러나 발생하는 모든 지진에 대하여 이러한 조치를 취하는 것은 거의 불가능하고 경제적으로도 큰 손실을 초래하기 때문에 어떠한 기준이 필요하게 된다. 과거에는 최대지반가속도(PGA: Peak Ground Acceleration)를 잠재적인 지진 손상도를 판단하는 기준으로 사용하였으나 최근 연구에서는 결과 실제 지진피해가 이 값보다는 강지반운동(Strong Ground Motion)의 지속시간, 스펙트럴 가속도 특성 등에 보다 더 밀접한 연관성을 보이는 것으로 밝혀졌다[1]. 이는 지진 발생시 최대 지반가속만이이 아니라 지진기록 전체에 대한 정확한 파형분석을 수행하여 지진피해 가능성 여부를 판단해야 한다는 것을 의미한다.

1999년 6월 2일 경주에서 발생한 지진에서는 규모에 비하여 큰 최대지반가속도 값이 관측되었다. 이번 경주 지진은 지반 가속도 크기만으로 비교할 때 1978년 홍성지진 과 1997년 영월지진과 유사한 크기이나[2][3]. 이들 지진과는 달리 진앙부근에서 어떠한 지진피해도 유발시키지 못하였다. 이는 국내에서도 잠재적인 지진 손상도 판단에 단순히 지반가속도의 크기만을 적용할 수 없음을 시사해 주고 있다.

여기에서는 경주지진의 가속도 기록의 특징을 기술하고 그 원인을 추정하였다. 또한 누적절대속도와 평균응답스펙트럼을 계산하여 잠재적인 지진손상도 평가 기준으로 이들을 국내 원전의 안전기준지진 초과 기준으로 적용하는 것에 타당성이 있는가를 살펴보았다. 본 연구의 결과는 향후 원전과 같은 주요 구조물에 적용될 관련 기준 제정에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

* 한전 전력연구원 선임연구원
** 한전 전력연구원 수석연구원

2. 경주 지진 기록

1999년 6월 2일 발생한 경주 지진은 규모 3.4의 소규모 지진이다. 이 지진의 진앙은 북위 35.9도, 동경 129.3도로 경주시 서북쪽 외곽의 양산단층 선상에 위치한다. 이 지진으로 인하여 진앙부근에서 0.1g를 초과하는 최대지반운동 가속도가 관측되었는데(Table 1) 이는 규모에 비하여 큰 것으로 최대지반가속도 관계식[4]에 의하면 규모 4.5 내지 5.0 정도에서 예측되는 값이다. 이 지진의 또 다른 특징은 가속도 지반운동의 우세 주파수(Dominant frequency) 영역이 약 10 hz 부근의 고주파수 대역이다(Figure . 2)

경주 지진의 지반운동 기록이 이러한 특징을 보이는 것은 발진기구(Focal Mechanism)의 시간이력 특성에 기인한 것 예상된다. 지반 운동의 우세 주파수 f_p는 Ben-Menahem and Singh[5]에 의하면 다음과 같은 비례 관계를 보인다.

$$f_p \propto \frac{H}{\beta_s T}\ \frac{1}{\Delta} \qquad (1)$$

여기서 H는 진원깊이, β_s는 진원에서 전단파 속도, T 는 단층이동 시간, Δ는 진앙거리를 의미한다. 지각내에 특별한 저속도 층이 존재하지 않는 한 진원깊이 H가 증가할수록 β_s가 커지기 때문에 이 두 파라미터가 f_p에 주는 영향은 서로 상쇄 시키는 것으로 생각할 수 있다. 또한 진앙거리 Δ는 지진파의 감쇠 현상에 관계되는 것으로 주파수에 따라서 감쇠가 다르게 이루어지는 효과를 반영하고 있다. 결국 진원효과 중 f_p에 가장 큰 영향을 주는 것은 단층이동 시간 T이다. 지진을 발생시킨 단층의 운동이 빠른 시간 내에 이루어질수록 고주파수 영역의 지반운동이 우세하게 된다. 경주지진과 같이 작은 규모의 지진에서 고주파수 운동이 우세한 것은 작은 에너지가 빠른 시간 내에 방출된 것으로 해석될 수 있다. 이는 상대적으로 큰 지반가속도 운동을 보이는 것에 대한 원인으로도 해석된다.

지반 가속도 크기의 대수함수 값은 속도나 변위 값보다 지진 규모와의 선형 관계도가 낮다. 이는 같은 규모의 지진에서도 진원특징에 따라서 가속도 크기의 변화 폭이 크기 때문이다. 경주지진은 작은 규모에서도 큰 지반가속도가 관측될 수 있다는 것을 보여주는 좋은 사례이다.

Table 1. Peak ground accelerations of June 2, 1999 Kyeongju earthquake.

Station ID	Distance (km)	Peak Ground Acceleration (g)		
		E-W	N-S	U-D
KRA	63.3	0.0029	0.0021	0.0015
KRB	74.4	0.0008	0.0005	0.0005
WSA	25.3	0.0356	0.0140	0.0100
WSB	25.7	0.0052	0.0058	0.0053
WSC	8.4	0.1153	0.0900	0.0403

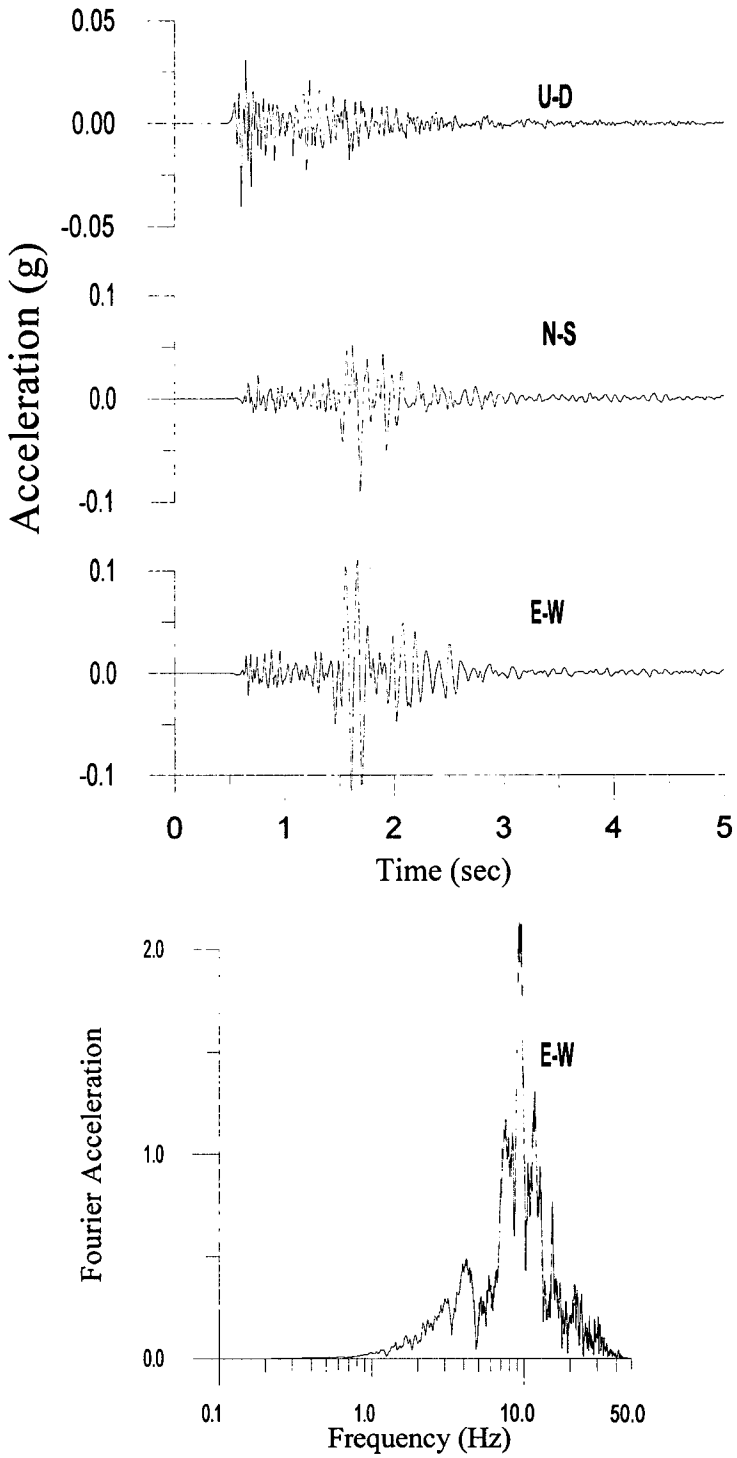

Figure 2. Acceleration seismograms and Fourier spectrums of Kyeongju earthquake at WSC station

3. 누적절대속도 (CAV: Cumulative Absolute Velocity)

지진으로 인한 손상도를 정의하기 위하여 가장 널리 사용되는 파라미터는 진도 등급과 최대 지반가속도가 있는데 이들은 공학적으로 직접사용하기에는 다소 객관성에 문제가 있다. 미국 전력연구소(EPRI)에서는 39개의 규모 4.0 이상 지진의 피해기록을 분석하여 최대지반가속도는 지진 손상도를 결정에 좋지 않은 파라미터임을 보였다[1]. 그래서 지진의 잠재적인 손상도 평가에 적용할 수 있는 요소로서 누적절대속도를 제안하였다. 누적절대속도 CAV 는 가속도 파형 절대값의 면적으로 정의된다.

$$CAV = \int_0^{t_d} |a(t)|\, dt \qquad (2)$$

여기서 $a(t)$ 가속도 지반운동 기록을, t_d 는 지속시간을 나타낸다. 식 (2)과 같이 가속도 파형이 주어지면 CAV 는 손쉽게 구할수 있다. 그러나 CAV 계산이 지반운동이 있은 전시간 동안에 이루어진다면 강진 이후에 기록되는 작은 크기의 파형들의 효과가 계속적으로 추가되어 그 값이 지속적으로 커지게 된다. 일반적으로 강지반운동은(Strong Ground Motion)은 10초 이내에 끝나고 이후에 도달하는 것을 파동의 산란에 의한 것들이다. 종결파(Coda Wave)로 불리워지는 이 파형은 지반의 수평적인 불균질성 때문에 생성된다[6][7].

McGuire and Barnhard[8] 또는 Trifunac등[9]이 제안한 강지반운동 지속시간 정의를 사용하여 t_d 를 결정하면 이 문제를 해결하면 되지만 이 보다 더 효율적인 방법은 최소 가속도를 정하여 이 보다 큰 운동구간에서만 식 (3)과 같이 누적절대속도를 계산하는 것이다.

$$\begin{aligned} CAV &= \sum_i C_i \\ C_i &= \int_{t_i}^{t_{i+1}} |a(t)|dt, \qquad \mathrm{Max}\,[|a(t)|, t_i < t < t_{i+1}] > a_{\min} \\ &= 0 \qquad\qquad\qquad\quad \mathrm{Max}\,[|a(t)|, t_i < t < t_{i+1}] < a_{\min} \end{aligned} \qquad (3)$$

CAV 계산의 민감도를 분석한 결과[10] 최소 지반가속도는 0.025g, 시간 간격 $t_i - t_{i+1}$은 1초가 각각 가장 합리적인 것으로 알려졌다.

경주지진의 누적절대속도 계산에 사용된 자료는 WSC 관측소의 동서방향 지진기록(Figure 2.)이다. 누적절대속도는 0.0g에서 0.03g 범위의 최소가속도 변화에 따라 0.05 gsec에서 0.035 gsec 정도의 범위를 지닌다(Figure 3). 누적절대속도 계산의 민감도 분석은 최소가속도가 0.005g 미만에서는 계산 값이 급격히 변화하고 그 이상의 값에서는 비교적 수렴된 결과를 보인다. 최소가속도를 제한한지 않은 경우에는 시간 창(Time window)이 증가하면서 종결파 또는 배후잡음진동의 영향으로 누적절대속도 값도 계속 증가한다. 반면 최소가속도를 0.01g 이상으로 제한한 경우에는 약 3초 이후에는 CAV 가 한 값으로 수렴한다. 이 결과에서 경주지진이 배후잡음 이상의 진동이 약 3초 이내 동안 지속되었다고 해석 할 수 있고 실제 강지반운동은 이보다 훨씬 작았을 것이다.

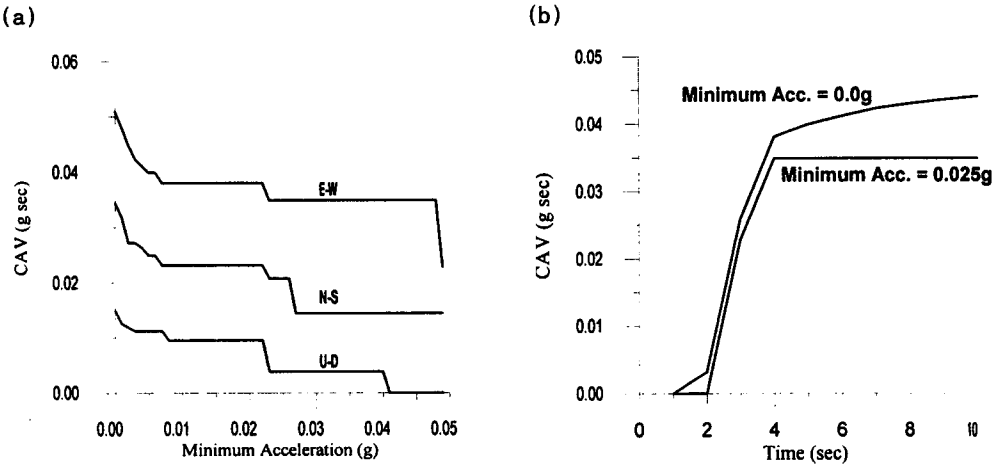

Figure 3. Plot of cumulative absolute velocity for WSC record(figure 2) with variation of minimum acceleration.(at) and duration of ground motion.(b).

4. 운전기준지진 초과 기준

상위 개념 내진설계 기준이 적용되는 원자력발전소는 건설과 운영에 안전정지지진(SSE: Safe Shutdown Earthquake)와 운전기준지진(OBE: Operating Basis Earthquake)이 적용된다. 안전정지지진이란 원전의 구조물, 계통, 기기들이 정상적인 성능을 유지할 수 있는 지반진동의 최대값의 의미하고 결정론적, 또는 확률론적으로 예측되는 최대지반운동 보다 높게 결정된다. 안전정지지진은 단순히 지반의 최대가속도값(PGA)으로 규정되는 것이 아니라 지반응답스펙트럼으로 그 특징이 기술된다[11].

안전정지지진이 정의와는 달리 운전기준지진은 정확한 의미가 규정되어 있지는 않다. 미국 원자력위원회 지침[12]에는 정상적으로 가동중인 원자력발전소가 운전기준지진에 해당하는 지반운동 영향을 받았을 때 안전에 문제가 없이 가동이 계속 될 수 있어야한다라고 기술되어 있고 원전 기준지진은 최소한 안전정지지진의 1/2 이상으로 할 것을 권고하고 있다. 또한 안전기준지진을 초과하는 지반진동이 발생하였을 때는 원전에 잠재적인 손상도 요인이 있기 때문에 운전을 중지하고 이에 대한 검사를 수행하도록 규정하고 있다.

안전기준지진 초과와 관련한 기본 관심사는 더 이상 안전운전을 계속할 수 없게 하는 잠재적인 손상도이다. 따라서 지진 발생시 지반진동이 잠재적인 손상을 초래할 안전기준지진 이상의 것인지를 합리적으로 판단하는 것이 중요한 사항이다. 그러나 우리나라에서는 안전기준지진 초과 판단 기준이 아직까지 명문화되어 있지 않고 단순히 최대지반가속도 초과여부로만 인식되어지고 있다.

공학적으로 최대 지반가속도의 크기는 구조물의 피해와 직접적인 연관성이 작은 것으로 받아들여지고 있다. 실제로 북미에서 규모 4.0 이상의 지진의 피해를 조사해본 결과[1] 최대 지반가속도가 지진의 잠재적인 손상도를 나타내는 지표로는 가장 부적절한 것으로 드러났다. 이 조사에서는 지반 진동이 0.06g 이상 있었던 지역의 철근-콘크리트 구조물, 시설물 내의 배관이나 주요 기기들의 조사해본 결과 지진 손상도를 표시하기 위한 지표로 지반응답스펙트럼과 누적절대속도의 사용을 제안하였다.

이 제안에 따르면 운전기준지진 초과 여부는 다음과 같은 절차에 의해서 판단된다. 첫번째 단계는 2 hz 와 10 hz 사이의 지반응답스펙트럼과 운전기준지진의 설계스펙트럼과의 비교이다. 고주파수 영역을 10 hz로 제한한 것은 그 이상 주파수 대역의 지반운동은 운동 변위가 매우

작기 때문에 구조물 또는 기기의 안전성에 영향을 주지 못한다[13]. 고주파수 영역이 우세한 발파 진동 분석 결과에서도 10 hz 이상의 지반진동이 1.0g를 초과하는 경우에도 진동 피해가 없음이 밝혀졌다[1]. 응답스펙트럼 비교에서 관측된 지반응답스펙트럼이 설계응답스펙트럼을 초과하였을 경우에는 운전기준지진을 초과하였을 가능성이 있는 것으로 판단 할 수 있다. 또한 설계응답스펙트럼을 초과하지 못한 경우에도 응답가속도의 평균값이 0.2 g 이상인 경우에도 잠재적인 손상 판단을 계속하여야 한다. 이 기준은 원전이 아닌 일반 구조물의 피해조사에서 제시된 값이다.

응답스펙트럼 비교에서 운전기준지진을 초과한 것으로 판단된 경우에는 최종적으로 누적절대속도 분석을 실시한다. 북미의 지진피해 조사 결과 누적절대속도가 0.318 gsec 이상일 때 피해가 발생한 것으로 나타나 미국 전력연구소에서는 0.3 gsec를 원전의 운전기준지진 초과 기준으로 제시하였고 원자력위원회에서는 0.165 gsec를 이 기준으로 할 것을 추천하였다.

1999년 6월 2일 발생한 경주 지진의 경우 이 지진이 원전 인근 10 km 이내에서 발생하였다고 가정하면 최대지반가속도 기준으로는 운전기준지진을 초과하였다고 판단할 수 있다. 또한 응답스펙트럼비교에서도 6 hz에서 10 hz 사이에서 운전기준지진 설계응답스펙트럼을 초과하고 있다 (figure 4). 그러나 기록 분석결과 이러한 특성을 가진 지반운동은 지진피해를 유발시킬 수 없는 것으로 예측되고 실제 현장조사에서도 아무런 피해가 발견되지 않았다. 따라서 최대 지반가속도와 단순한 응답스펙트럼 비교는 운전기준지진 초과 기준으로 적절하지 못하다는 것을 증명하고 있는 것이다. 경주 지진의 평균 응답가속도는 5% 감쇠비에서 계산하였을 때 0.118 g 이고 누적절대속도는 0.034 gsec 이다. 이는 미국 원자력위원회에서 운전기준지진 초과 기준으로 추천한 0.165 gsec를 보다 훨씬 낮은 값이다.

우리나라의 지진활동 발생 특성을 보면 규모 3.0에서 4.0 사이의 지진은 특별한 지표 활성단층 존재여부와 상관없이 원전 인근을 비롯한 어떤 장소에서나 발생할 가능성이 있다. 경주지진에서 보듯이 진원 특성에 따라 이런 소규모의 지진들에서도 최대지반가속도가 0.1g 이상이 될 수도 있다. 이런 지진들이 원전의 안전운영에 영향을 미치는 손상을 발생하였다면 심각한 문제가 되지만 그 반대의 경우로 어떠한 잠재적인 손상을 발생하지 않았는데 단순히 최대지반가속도 기준을 적용하여 원전 가동을 중단하는 것 역시 경제적인 손실을 초래한다.

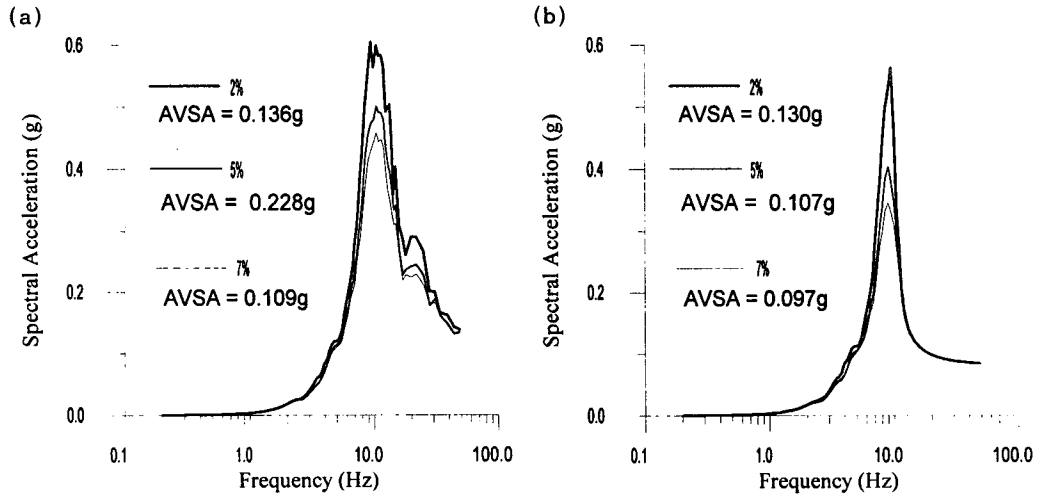

Figure 8. Pseudo acceleration response spectra for non-filtered(a) and filtered(b) WSC record

5. 결론

지진 발생시 지반운동 크기가 원전 설계에 고려된 값을 초과했는지 여부를 정확히 판단해야만 이에 따른 적절한 후속조치가 가능하게 된다. 이는 원전의 내진안전성 유지에 필수적인 사항이다. 합리적이고 객관적인 초과여부 판단 기준이 수립되어 있지 않다면 신속한 대응조치를 취하지 못하거나 또는 과도한 조치로 불필요한 운전 중지를 초래 할 수 있다. 그렇지만 아직까지 국내에서는 지진관측소의 미비로 원전 운전기준 지진을 초과하는 지진의 강지반진동의 기록이 없어 이에 관련한 충분한 연구가 미흡한 실정이고 외국의 사례를 검토하는 수준이다. 1999년 6월 2일 발생한 경주지진은 소규모 지진이라고 진앙부근에서는 운전기준지진을 초과하는 지반운동을 수반할 수 있다는 것을 보여주고 있어 이에 대한 연구가 절실히 요구된다 할 수 있다.

본 연구에서는 경주지진 기록을 지진파형을 분석하고 누적절대속도 및 평균 응답스펙트럼을 계산하여 미국 원자력연구소에서 제시한 운전기준지진 초과 기준과 비교하였다. 경주 지진은 다른 지진과는 달리 10 hz 이상의 고주파수 대역 지진 파형이 우세하고 규모에 비하여 큰 지반가속도 운동을 일으킨 특징을 가지고 있다. 이는 주로 작은 에너지지만 단시간 내에 작은 에너지를 방출한 진원효과로 추정된다. 경주지진 누적절대 속도와 5% 감쇠비의 평균응답가속도는 0.034 gsec와 0.118 g로 계산되었다. 이는 각각 초과 기준인 0.3 gsec와 0.2g 보다 작은 값으로 운전기준지진을 초과하지 않은 값이다. 비록 제시된 기준에는 국내의 지진 피해특성이 반영되어 있지는 않지만 여러 지역의 지진피해를 종합하여 얻어진 결론이기 때문에 이러한 판단 기준으로 사용하는데 미흡하지는 않다. 그러나 향후에는 국내의 지진기록을 근거 지진피해를 예측할 수 있는 관련 연구를 수행하여할 필요가 있다.

참고문헌

1. Reed, J. W., Anderson, N., Chokshi, N. C., Kennedy, R. P., Metevia, W. J., Ostrom, D. K., and Stevenson, J. D., "A criterion for determining exceedence of the operating basis earthquake", *EPRI NP-5930,* Electric Power Research Institute, California, 1988, 82pp.
2. 서정희, " 홍성지진 조사보고" 대한광상학회지 제6권, 1979, pp158-165
3. 조봉곤, 김성균, 김우한, 김준경, 박창업, "1996년 12월 13일 영월지진의 진도 평가와 지진에너지 감쇠특성", *한국지진공학회 춘계 학술발표 논문집 제 1권 1호,* 1997, pp 21-27.
4. 신진수, 이종림, 박창업, "한반도 남부의 지진파 감쇠특성", *한국지진공학회 춘계 학술발표 논문집 제 2권 1호,* 1998, pp 44-51.
5. Ben-Menahem, A. and Singh, A. J., *Seismic waves and sources, Springer-Verlag,* New York, 1981, 1108pp.
6. Aki, K and Chouet, B., "Origin of coda waves: source, attenuation , and scattering effects", *J. Geophy. Res.* Vol. 80, 1975, pp3322-3342.
7. Aki, K and Richards, P. G., *Quantitive seismology theory and method,* W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1979, 913pp.
8. McGuire R. K. and Barnhard, T. P. " Four definition of strong ground motion duration: Their predictability and utility for seismic hazard analysis", *United States Geological Survey, Open-File Report 79-1515,* 1979.
9. Trifunac, M. D., "A study on the duration of strong ground earthquake ground motion", *Bull. Seism. Soc. Amer.*, Vol. 67 No. 3, 1975, pp917-927.
10. O'Hara, T. F. and Jacobson, J. P., "Standardization of the cumulative absolute velocity", *EPRI TR-100082,* Electric Power Research Institute, California, 1991, 13pp
11. U. S. Nuclear Regulatory Commission, "Identification and characterization of seismic sources and

determination of safe shutdown earthquake ground motion", *NRC Regulatory Guide 1.165*, U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 1997, 45pp

12. U. S. Nuclear Regulatory Commission, "Seismic and geological siting criteria for nuclear power plants", *10 CFR Part 100 Appendix A.* Federal Register, Vol. 38, No. 31282, 1973.
13. Reed, J. W., Kennedy, R. P. and Lashkari, B., "Analysis of high frequency seismic effects", *EPRI TR-102470*, Electric Power Research Institute, California, 1993, 170pp