2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

월성원자력 발전소 지진관측 자료의 최대지반가속도 값에 대한 비교

Comparison of PGA Values Recorded at Freefield Stations in Wolsung NPP Sites

박동희, 연관희, 장천중
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

권오재
한국수력원자력(주)
서울특별시 강남구 삼성동 167

요 약

자유장의 지반운동의 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)값은 원전의 운영과 관련된 규제의 측면에서 매우 중요한 값이다. 이번 연구에서는 월성 원전 부지 내의 위치를 달리하는 자유장 지진관측 자료에 대하여 PGA값을 비교하고 인접한 관측소 자료의 PGA값에 차이가 생기는 원인이 천부부지 증폭효과와 고주파감쇠효과임을 입증하였으며 부지증폭효과를 제거하는 기법을 이용하여 PGA값을 보정하는 방법을 소개하였다.

ABSTRACT

For the purpose of rapid earthquake reaction, PGA (Peak Ground Acceleration) values recorded at freefiled play a basic role. In this study, PGA values recorded in WSA (KEPRI) and WSN (KINS) stations located adjacently each other are compared. The difference in PGA values are found to be attributed to site amplification effect and high frequency attenuation effect. And the correction of amplified PGA values was conducted by removing site amplification effect.

1. 서 론

원자력 발전소와 같은 중요한 산업 및 공공 시설물은 지진이 발생하였을 때 신속히 피해여부를 조사하여 이에 대한 대응조치를 취하는 것이 매우 중요하다. 현행 원전 운영기준에 따르면 지진에 의해 자유장의 최대지반가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)값이 0.1g를 초과할 경우 운전을 정지하도록 규제하고 있다. 이에 대한 선행조치로서 운전정지 기준인 PGA값의 1/10에 해당하

는 0.01g를 자동기록수준(trigger level)으로 설정하고 있다.

한전 전력연구원(KEPRI, Korea Electric Power Research Institute)에서는 원전부지내의 자유장에 지진관측소를 설치하여 실시간으로 지진동을 관측하고 있으며, 지진감시센터 서버에 전송되는 자료는 한국수력원자력(주) 본사 및 각 원전의 주제어실(MCR, Main Control Room)로 실시간으로 송신하며 자동기록수준의 초과여부를 감시하고 지진발생시 각 관측소에서 기록된 PGA값 및 진앙지, 규모 등을 분석하여 통보하고 있다.

각 원전에는 전력연구원에서 운영중인 지진관측소 이외에 한국원자력안전기술원(KINS, Korea Institute of Nuclear Safety)에서 가속도계와 속도계를 설치하여 지진발생여부를 감시하고 있으며, 원전부지 내 격납건물 주변의 자유장에도 별도의 지진계측기가 설치되어 지진동을 실시간으로 감지하고 있다.

본 논문에서는 원전내의 인접한 곳에서 기록된 지진자료를 비교하는 과정에서 특히 월성 원전내에서 기록된 최대지반가속도 값이 큰 차이를 보이는 현상을 지적하고, 그 원인과 보정방법에 관하여 논의하였다.

2. 본문

2.1. 문제제기 - WSA, WSN 관측소에 기록된 PGA값의 비교

한전 전력연구원은 원전부지 인근의 지진활동을 감시하기 위하여 1999년 5월부터 4개 원전부지의 자유장 및 인근부지에 지진관측소를 설치하여 가속도 및 속도자료를 실시간으로 관측하고 있으며, 한국원자력 안전기술원(KINS) 또한 1999년부터 4개 원전부지에 지진관측소를 운영하고 있다. 이들 두 기관에서 원전부지에 운영중인 지진관측소는 서로 인접한 곳에 위치하고 있어 지진응답의 상호비교를 통하여 보다 정밀한 지진의 특성을 규명할 수 있다.

본 연구에서는 두 기관이 1999년 지진관측을 시작한 이래 월성, 고리, 영광, 울진 원전부지 내의 관측소에서 기록된 PGA값을 비교하는 과정에서 고리, 영광, 울진 발전소에서 기록된 PGA값의 수준은 유사한데 비하여 월성원전 내의 자유장 관측소인 WSA(KEPRI)와 WSN(KINS)에서 기록된 PGA값이 큰 차이를 보이는 현상을 감지하였다.

WSA, WSN 관측소의 위치는 표 1과 같으며, 관측소간의 거리는 약 950 m 정도이다.

표 1. WSA 및 WSN 관측소의 위치 및 기반암의 특성

	위도	경도	지질	풍화도	위치
WSA (KEPRI)	35 °42 ′76 ″	129 °28 ′64 ″	안산암	신선	건식 저장고 옆
WSN (KINS)	35 °42 ′40 ″	129 °28 ′19 ″	안산암	신선	3, 4 호기 정수장 진입로 입구

표 2는 WSA와 WSN에서 동시에 기록된 주요지진의 PGA값을 비교한 것으로 진앙거리가 약 50 km 이내의 근거리 지진의 경우 WSA에서 기록된 값이 WSN에서 기록된 경우보다 수배정도 크다. 예를 들면 1999년 6월 2일 발생한 경주지진(M=3.4)의 경우 WSA의 PGA값은 34.95gal

(=0.035g)을 기록하여 1/10 OBE 수준을 초과한 반면 WSN에서는 6.35gal(=0.006g)에 불과하였다. 진앙거리가 100 km 이상인 원거리 지진의 경우에는 WSA와 WSN의 PGA값은 비교적 유사한 수준이지만 WSA의 계측값이 WSN의 기록보다 크다. WSA와 WSN은 불과 1 km 이내의 인접한 관측소임을 고려하면 동일한 지진에 대하여 비슷한 수준의 PGA값이 기록될 것으로 추정되지만, 실제 지진자료를 비교하는 과정에서 PGA값의 차이가 생기는 현상을 발견하고 그 원인과 보정방법에 대하여 논의하였다.

표 2. WSA 관측소와 WSN 관측소의 PGA값 비교

YY/MM/DD	Station	Epi. Dist.	PGA-EW (gal)	PGA-NS (gal)
99/06/02	WSA	23	34.94	13.75
	WSN		4.19	6.35
02/07/12	WSA	35	0.45	0.47
	WSN		0.20	0.21
03/01/13	WSA	10	12.29	8.07
	WSN		2.75	2.01
03/03/01	WSA	17.9	12.44	5.78
	WSN		1.73	1.76
99/04/07	WSA	186	0.12	0.15
	WSN		0.09	0.09
02/10/23	WSA	133	0.11	0.10
	WSN		0.10	0.10
02/11/06	WSA	176	0.05	0.05
	WSN		0.03	0.03
03/03/10	WSA	105	0.06	0.05
	WSN		0.04	0.05

2.2. 계기검증

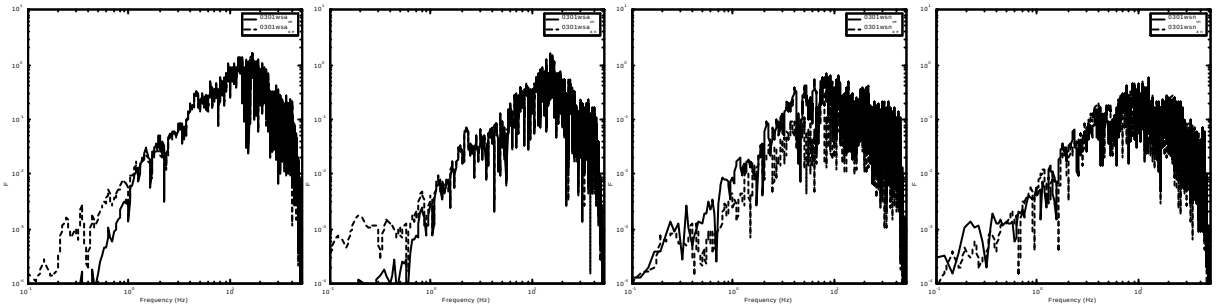
먼저, WSA와 WSN 관측소의 PGA값의 차이가 생기는 원인을 지진계 및 기록계의 응답의 오류에 의한 것인지를 확인하기 위하여 지진계의 검교정 상태를 확인하였다.

표 3과 같이 WSA와 WSN에는 속도계와 가속도계가 동시에 위치하고 있다. 이와 같이 속도계와 가속도계가 함께 위치하는 경우에는 계기 특성에 의한 왜곡이 없다면 지진계에 기록되는 최종 응답은 같아야 하므로 속도, 가속도의 스펙트럼 비를 이용하면 지진파의 응답에 대한 검교정 상태를 확인하기 용이하다(연관희 외)[1].

표 3. WSA 관측소와 WSN 관측소의 지진계 및 기록계의 구성

	속도계	가속도계	기록계
WSA (KEPRI)	JC-V100 (단주기)	EpiSensor	Q4128
WSN (KINS)	STS-2 (광대역)	EpiSensor	Q4128

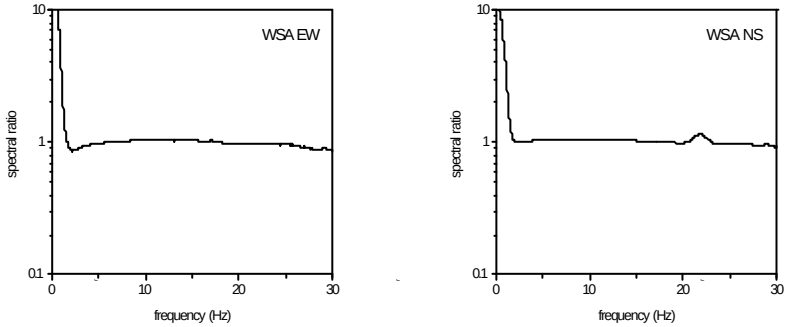
그림 1은 WSA 및 WSN에서 기록된 가속도 파형의 스펙트럼과 속도파형의 미분을 통하여 획득한 가속도 스펙트럼을 비교, 도시한 것이다. 일반적으로 속도계 기록과 가속도 기록을 비교하여야 할 경우에는 속도계 자료의 미분에 따른 고주파 영역에서의 잡음증가를 고려하여야 하나, 이번 센서 검증에 이용된 자료는 S/N비(Signal to Noise ratio)가 충분한 파형을 선정한 결과이므로 잡음에 의한 영향을 무시할 수 있다.



(a) (b) (c) (d)

그림 1. 센서 검교정 확인을 위한 가속도파형의 스펙트럼과 속도파형의 미분을 통하여 획득한 가속도 스펙트럼의 비교(03/03/01 지진). (a) WSA-EW 성분 (b) WSA-NS 성분 (c) WSN-EW 성분 (d) WSN-NS 성분

그림 1(a), (b)의 WSA 가속도 스펙트럼은 속도의 미분을 통한 가속도 스펙트럼과 전 주파수 대역에서 거의 일치함을 알 수 있다. 즉 이들 스펙트럼의 비는 그림 2에 도시한 바와 같이 1로서 가속도 및 속도센서의 검교정 상태가 매우 양호하므로 계측 센서의 계기에 의한 왜곡은 없다고 간주할 수 있다. 그림 1(c), (d)의 WSN의 경우에는 EW성분의 가속도 자료와 속도로 구한 스펙트럼의 약간의 불일치성이 보이나 비교적 검교정 상태는 양호하다.



(a) (b)

그림 2. WSA 관측소의 센서 검교정 확인을 위한 가속도파형의 스펙트럼과 속도파형의 미분을 통하여 획득한 가속도 스펙트럼의 비의 예(03/03/01). (a) EW성분 (b) NS 성분

그러나 표 2에서도 지적하였지만 계기에 의한 왜곡이 없음에도 불구하고 WSA와 WSN에서 기록된 PGA값은 상당한 차이가 있으며, 전체 시간영역의 파형을 도시하면 PGA값 이외에도 전체적인 가속도 파형의 진폭값에도 차이가 있다는 것을 확인할 수 있다. 그림 3과 4는 2003년 3월 11일(M=2.8)에 발생한 지진의 속도, 가속도 기록으로 WSA, WSN의 관측값을 비교하여 도시하였다. 속도파형의 경우 두 관측소에서의 진폭수준이 유사한데 비하여 가속도 파형의 경우 WSA의 진폭값이 WSN보다 수배 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 점으로 미루어보아 가속도 자료에는 속도자료에서 작게 나타나는 어떠한 원인의 영향을 받고 있음을 유추할 수 있고 이는 고주파수 부지특성으로 다음절에서 상세하게 설명하였다.

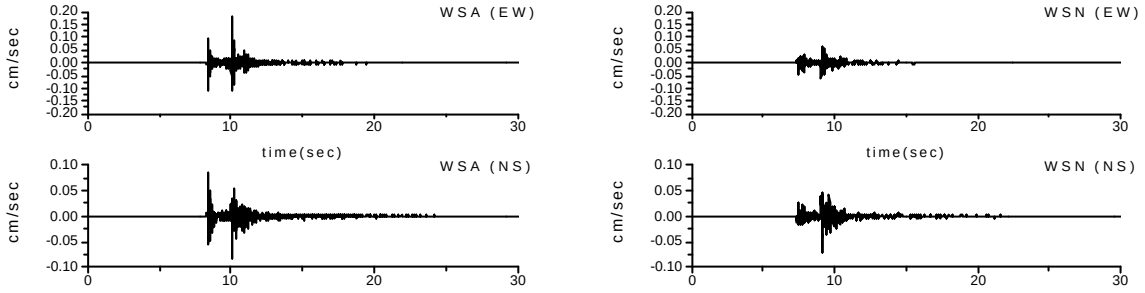


그림 3. WSA, WSN 속도 관측 자료의 동서성분, 남북성분 파형의 예(03/03/11)

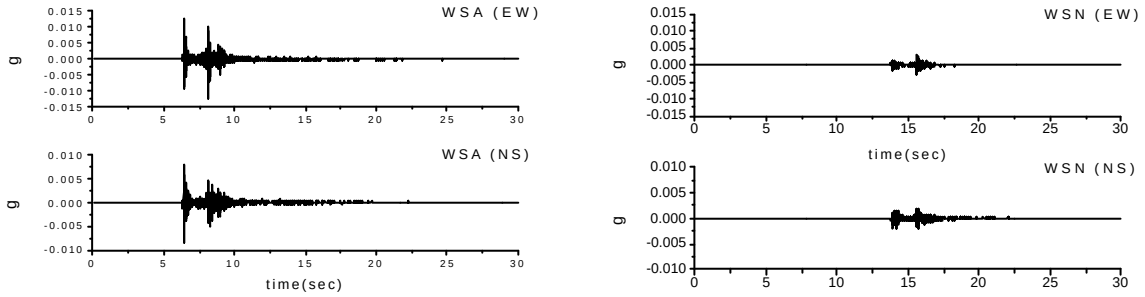


그림 4. WSA, WSN 가속도 관측 자료의 동서성분, 남북성분 파형의 예(03/03/11)

2.3. 부지효과

일반적으로 관측된 지진기록의 스펙트럼에 대한 진폭값은 다음과 같이 지진원함수($\mathrm{E(f)}$),수진지역까지의 전달함수($\mathrm{D(R,f)}$), 부지특성($\mathrm{S(f)}$)의 중첩된 결과이다.

$$\mathrm{A(f) = E(f) \square D(R,f) \square S(f)} \quad (1)$$

여기서, f는 주파수(Hz), R은 진원거리(km)를 의미한다.

WSA와 WSN에 동시에 기록된 지진동은 $\mathrm{E(f)}$가 동일하고, 두 관측소의 거리가 1 km 이내의

근거리에 위치하므로 지진파의 전파경로도 거의 유사하여 $D(R,f)$도 동일하다고 가정할 수 있다. 그러나 천부부지의 밀도와 속도에 의해 좌우되는 $S(f)$는 각각의 부지에 따라 특정 주파수에 증폭을 일으키는 등의 차이를 보인다. 따라서 WSA와 WSN의 PGA값이 차이가 나는 주된 원인으로 $S(f)$ 즉, 부지효과의 영향임을 추정할 수 있다.

그림 5는 박동희 외(2003)[2)]의 방법을 이용하여 구한 WSA, WSN 관측소의 부지효과를 도시한 것이다. 그림에서 WSA의 경우 10 Hz에서 20 Hz 주파수 대역에서 증폭이 보이며, WSN 관측소에는 전 주파수 대역에서 비교적 1에 가까운 특별한 주파수에 따른 증폭효과는 보이지 않는다.

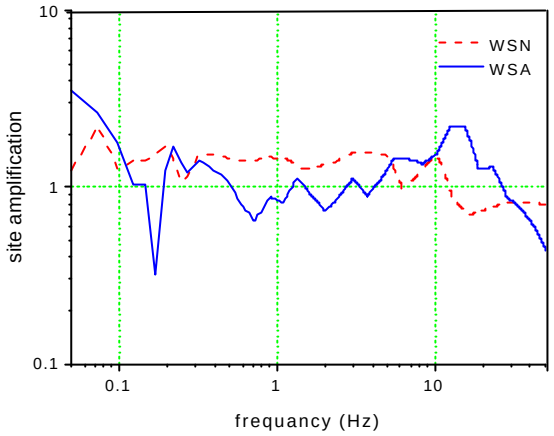


그림 5. Weak motion 방법으로 구한 WSA, WSN의 부지효과(박동희 외, 2003)

그림 6은 WSA와 WSN의 가속도 스펙트럼을 비교하여 도시한 것으로 약 10 Hz 이하의 주파수 대역에서는 진폭값이 비교적 잘 일치하고 있지만 10~20 Hz사이에서 WSA의 진폭값이 더 높다는 것을 알 수 있다. 이는 그림 5에서 설명한 WSA 관측소에서 나타나는 10~20 Hz사이의 증폭효과에 의한 것으로 생각된다.

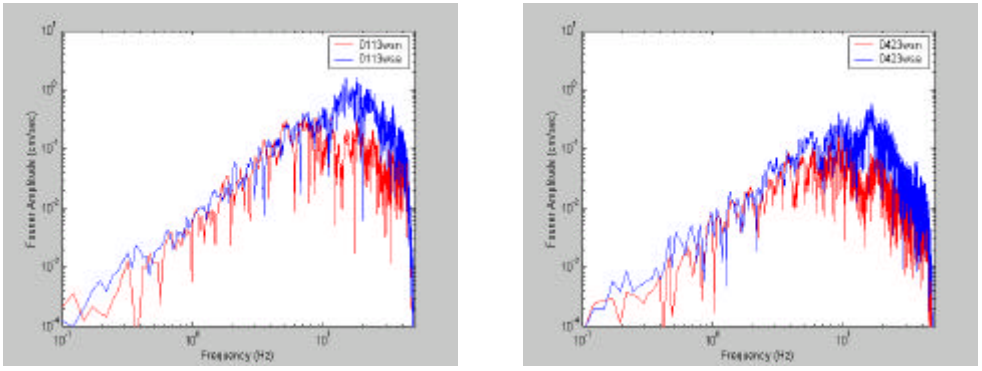


그림 6. WSA 및 WSN 가속도 스펙트럼의 비교. WSA 관측소에는 10~20 Hz 주파수 대역에 부지증폭효과가 보임

2.4. 고주파수 증폭효과 모사

WSA관측소에서는 부지효과로 인한 10~20 Hz 대역의 고주파수에 증폭효과가 있음을 알 수 있었다. 이와 같이 고주파수의 증폭효과가 지반가속도에 미치는 영향을 합성 지진동 모사를 이용하여 검토하였다.

합성 지진동 모사에 사용한 입력요소는 표 3과 같으며 미국지질조사소의 David Boore (2002)[3]에 의한 SMSIM(Strong Motion SIMulation) V2.16 프로그램을 이용하였다.

표 3. 지진동 모사에 이용된 주요 입력요소

stress drop, $\triangle\sigma$	30 bars
quality factor, $Q_0 f^{\eta}$	Q_0=348, η=0.52
shear wave velocity	3.5
high frequency attenuation, κ	0.012

일반적으로 지진에너지의 우세 주파수 구간(f_c)은 지진의 규모와 관련이 있는 함수로서, 지진의 규모가 증가할수록 저주파수로 이동한다(Watanabe, 1971)[4].

$$\log f_c = 1.5 - 0.20 M_L \qquad (2)$$

식 (2)에 의하면 M_L=3.0일 때 f_c는 7.94 Hz 이며, M_L=6.0일 때 f_c는 1.99 Hz 이다. 국내에서 발생하는 대부분의 지진은 규모 3.0 내외의 미소지진으로 상대적으로 고주파수 에너지가 크다.

국내에서 자주 발생하는 고주파수 에너지가 큰 미소지진이 발생할 경우와, 원전 등의 구조물에 보다 큰 영향을 미칠 수 있는 상대적으로 저주파수 에너지가 큰 중규모지진의 진앙거리에 따른 고주파수 증폭효과를 고려하기 위하여 모멘트 규모(M_w) 3.0, 6.0일 때 진앙거리, 30 km, 200 km에 대하여 모사하였다. 모사된 가속도 파형은 그림 7의 (a), (b), (c), (d)의 우측에 도시하였다.

시간영역의 가속도 파형은 푸리에 변환을 실시하였으며 이 스펙트럼과 WSA의 부지효과를 곱한 스펙트럼을 그림 8에 함께 도시하였다. 그림 8의 (a), (b)와 같이 M_w=3.0의 경우 고주파수가 우세하므로 거듭 고주파수 증폭효과가 더해지면 고주파수 에너지가 상대적으로 더욱 커지게 되어 그림 7(a), (b)의 좌측파형에 도시한 바와 같이 가속도 진폭값이 더욱 커지게 된다. 그러나 그림 7(c), (d)의 경우와 같이 규모가 커질수록, 또 진앙거리가 커질수록 지진이 주된 에너지는 저주파수로 이동하기 때문에 고주파수 증폭의 효과는 가속도 진폭값에는 큰 변화를 일으키지 않는다.

따라서, WSA의 경우 미소지진, 근거리 지진일수록 고주파수 증폭의 효과로 인하여 지반가속도 및 PGA값이 증폭되어 나타날 수 있으나 이는 부지효과를 제거시켜줌으로써 보정할 수 있다. 또한 지진규모가 커질수록 고주파수 증폭효과는 상대적으로 지진에너지가 집중되어 있는 저주파수 에너지 준위보다 낮아 PGA값에 미치는 영향은 미소하므로, 실제로 운전정지와 관련이 있는 큰 규모의 지진이 발생하더라도 고주파수 부지증폭에 의한 영향은 무시할 수 있을 것이다. 실제로 2003년 3월 23일에 전라남도 홍도 북서쪽 약 50 km 해역에서 발생한 규모 4.9의 중규모 지진의 경우 WSA, WSN의 진앙거리는 450 km정도이다. 이때에 WSA의 EW, NS성분의 PGA값은 0.13

gal, 0.18gal 이고, WSN는 각 각 0.15gal, 0.27gal로서 거의 유사한 값을 보이고 있다.

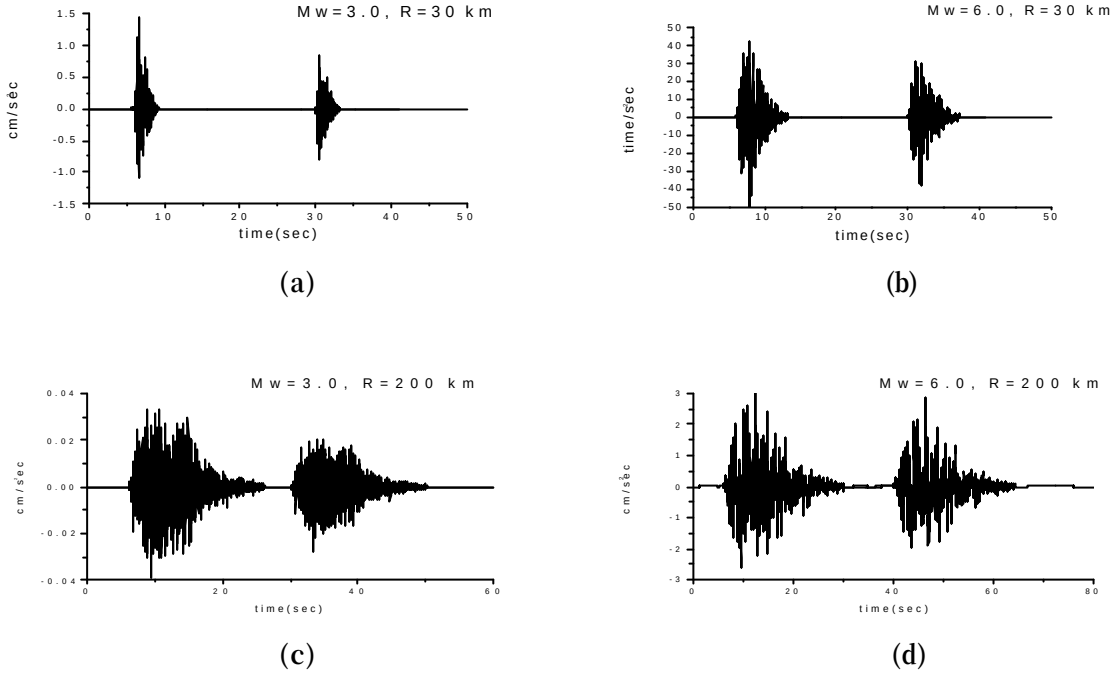
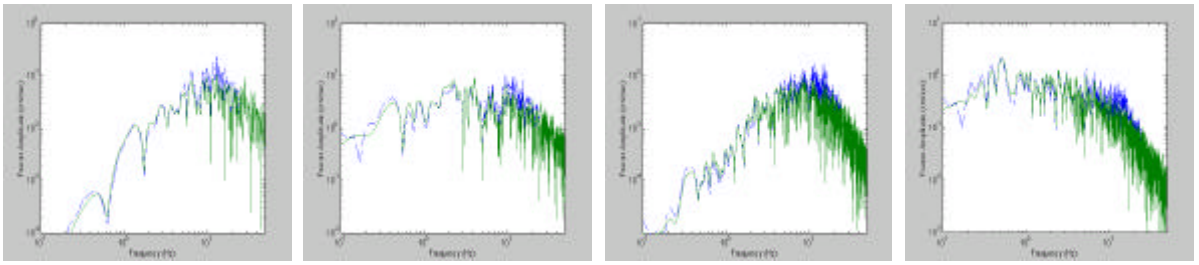


그림 7. 지진동 모사 결과. 우측에 도시된 파형은 표 3의 입력요소를 이용하여 모사한 결과이며, 좌측 그림은 고주파수 부지효과를 고려하여 구한 결과. (a) Mw=3.0, R=30 km (b) Mw=6.0, R=30 km (c) Mw=3.0, R=200km (d) Mw=6.0, R=200 km



(a) Mw=3.0, R=30km (b) Mw=6.0, R=30km (c) Mw=3.0, R=200km (d) Mw=6.0, R=200km

그림 8. 고주파수 증폭효과 고려전(실선), 후(점선)의 스펙트럼 비교

2.5. 부지효과 보정

앞서 설명한 바와 같이 WSA관측소는 10~20 Hz에 부지증폭효과를 가진다. 이번 절에서는 부지효과를 보정하는 기법에 대하여 기술하였다.

부지효과를 배제하기 위하여서는 식(1)의 지진동 스펙트럼 $A(f)$를 부지효과 함수 $S(f)$로 나

누어주면 간단히 구할 수 있다. 한편, 그림 5의 WSA, WSN의 부지효과는 식(3)과 같이 EW성분의 부지효과(S_{EW})와 NS성분의 부지효과(S_{NS})가 중첩된 것이다.

$$S_{effect}(f) = \sqrt{S_{EW}(f)^2 + S_{NS}(f)^2} \tag{3}$$

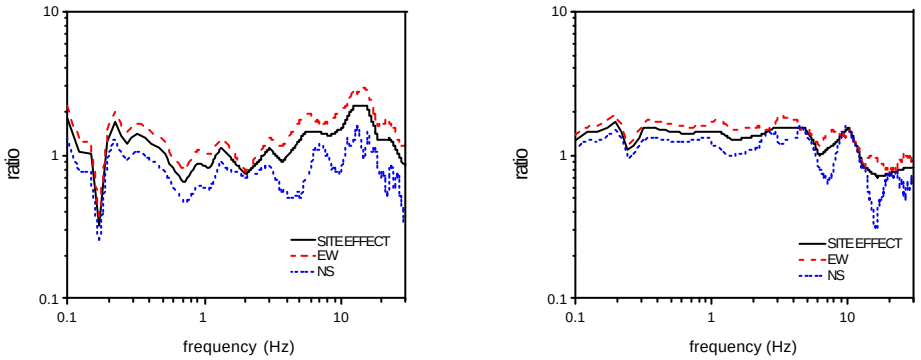
지진파형의 푸리에변환을 통하여 획득한 EW, NS스펙트럼의 비를 이용하면 EW, NS 성분별 독립적인 부지효과를 분리할 수 있다. EW(f)와 NS(f)의 비를 $ratio(f)$라 하면 NS 성분에 대한 부지효과, S_{NS}는 식 (4)와 같다.

$$S_{NS}(f) = \sqrt{\frac{S_{effect}(f)}{1 + ratio(f)}} \tag{4}$$

WSA, WSN의 $ratio(f)$는 표4의 지진자료의 EW성분, NS성분의 스펙트럼 비를 평균한 값이다. 식 (4)에서 구한 S_{NS}를 다시 식 (3)에 대입시키면 S_{EW}를 구할 수 있으며 WSA, WSN의 S_{EW}와 S_{NS}을 그림 9에 도시하였다.

표 4. 스펙트럼의 동서성분 대 남북성분비, $ratio(f)$를 구하는데 이용된 지진목록

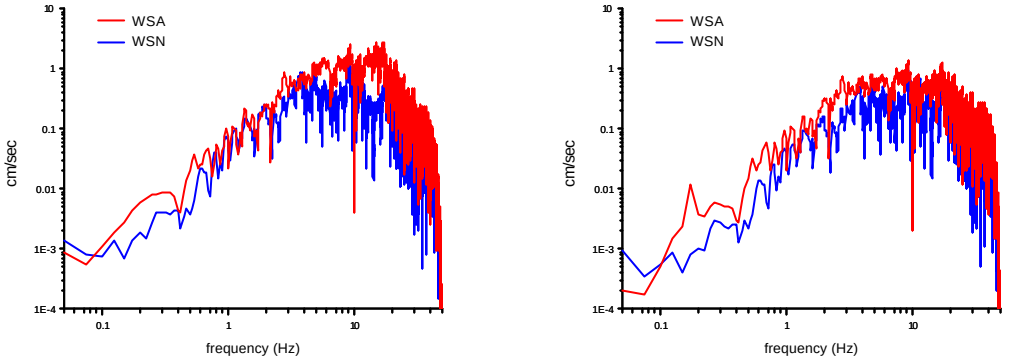
YY/MM/DD	규모	YY/MM/DD	규모	YY/MM/DD	규모	YY/MM/DD	규모
99/04/23	3.2	01/05/27	2.5	02/05/01	2.0	03/01/10	2.7
99/06/02	3.4	01/06/23	2.8	02/06/11	1.8	03/01/13	2.8
99/09/11	3.4	0101/13	2.1	02/07/11	2.1	03/03/01	3.0
01/03/11	2.1	02/04/15	2.2	02/10/23	2.8	03/03/10	3.1



(a) WSA (b) WSB

그림 9. 스펙트럼의 EW/N비를 이용하여 분리한 EW, NS 성분별 부지효과

그림 10은 그림 9에서 구한 S_{EW}, S_{NS}를 보정하기 전(a) 후(b)의 스펙트럼의 예(03/01/ 13일 지진)를 도시한 것으로 보정 후에는 WSA의 고주파수 성분이 다소 감쇠된 것을 알 수 있다.



(a) (b)

그림 10. (a) 부지효과를 보정하기 전(a), 후(b)의 WSA, WSN의 스펙트럼(03/01/13)

부지효과를 보정한 스펙트럼을 역푸리에 변환을 이용하여 시간영역으로 변환시킨 파형의 예를 그림 11에 도시하였다. 그림 3에서 WSA의 경우 WSN에 비하여 가속도값이 높게 평가되는 결과가 부지효과 보정을 통하여 다소 개선되었음을 알 수 있으며, 따라서, WSA에서 가속도 파형과 PGA값이 크게 나타나는 이유로 고주파수 증폭효과의 영향을 받았음을 알 수 있다.

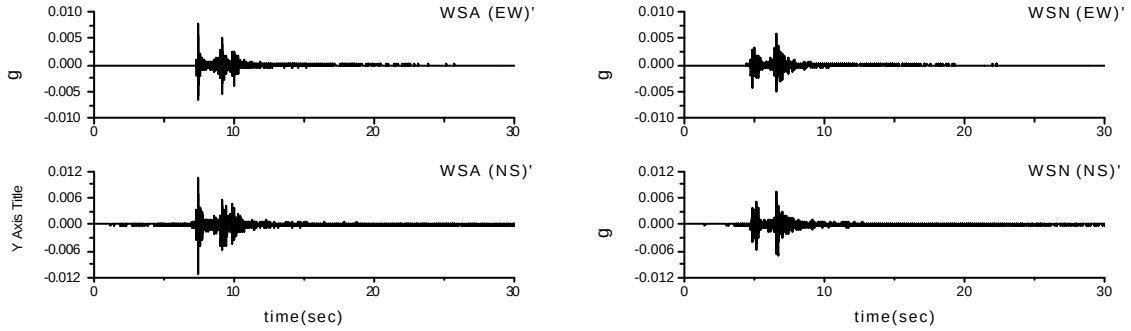


그림 11. 부지효과를 보정한 후 역푸리에 변환을 통하여 구한 가속도 파형 (a) WSA (b) WSN (03/01/13)

표 5는 표2의 지진기록에서 부지효과를 보정한 후의 WSA, WSN의 PGA값을 나타낸 것이다. 그러나, 부지효과를 보정하였음에도 불구하고 여전히, WSA와 WSN의 파형의 진폭에는 어느 정도의 차이가 발생하고 있으며 이는 그림 10의 스펙트럼에서 살펴본 바와 같이 부지효과를 보정하였더라도 WSN의 스펙트럼값의 준위가 WSA보다 작고, 특히 고주파수 대역에서 심하게 줄어드는 현상에 기인한 것으로 추정된다. 이에 대한 논의는 다음에서 계속 하였다.

표 5. WSA 관측소와 WSN 관측소의 PGA값 비교

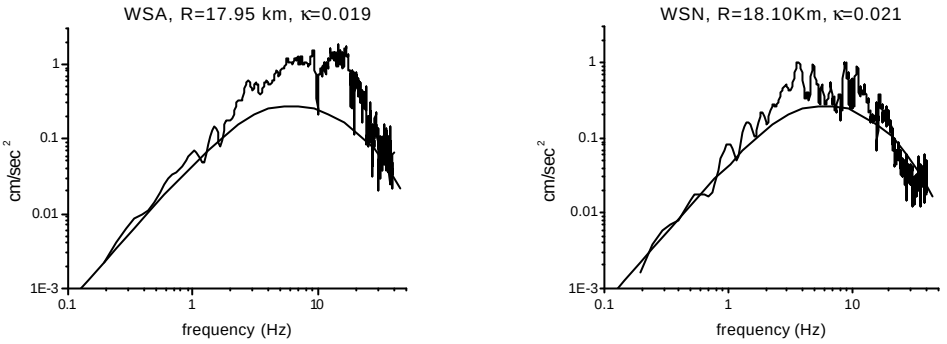
YY/MM/DD	Station	Epi. D.	PGA-EW (gal)	PGA-EW` (gal)	PGA-NS (gal)	PGA-NS' (gal)
99/06/02	WSA	23	34.96	16.94	13.75	15.06
	WSN		4.19	4.27	6.35	5.82
02/07/12	WSA	35	0.45	0.22	0.47	0.44
	WSN		0.20	0.18	0.21	0.24
03/01/13	WSA	10	12.29	0.73	8.07	10.96
	WSN		2.75	2.63	2.01	2.76
03/03/01	WSA	17.9	12.44	5.41	5.78	5.89
	WSN		1.73	1.74	1.76	2.39
99/04/07	WSA	186	0.12	0.10	0.15	0.14
	WSN		0.09	0.06	0.09	0.09
02/10/23	WSA	133	0.11	0.06	0.10	0.13
	WSN		0.10	0.07	0.10	0.09
03/03/10	WSA	105	0.06	0.04	0.05	0.06
	WSN		0.04	0.03	0.05	0.46

3. 토의 및 결론

본 연구결과 WSA 관측소에서는 10~20 Hz 대역의 부지증폭 효과에 기인하여 지반가속도 및 PGA값이 증폭되는 현상을 보이고, 부지효과를 보정하는 방법을 제시하였다. 그러나, 부지효과를 보정하여 얻은 PGA값의 신뢰성 여부를 검증을 하기 위하여 다음의 절차를 수행하였다.

월성원전 내에는 WSA, WSN 지진관측소 이외에 WSA 관측소와 인접한 월성원전 2호기내의 자유장에 설치되어 있는 가속도계측기(WOL)가 있어 0.01g 이상의 지반가속도가 관측이 되면 자동으로 지진자료가 기록된다. WOL에 기록된 자료로는 1999년 6월 2일(M=3.6)에 발생한 지진의 PGA값이 0.13g로 감지되어 자동으로 저장되어 있다. 따라서 1999년 6월 2일에 발생한 지진의 WSA, WSN, WOL 자료를 비교 검증하였다.

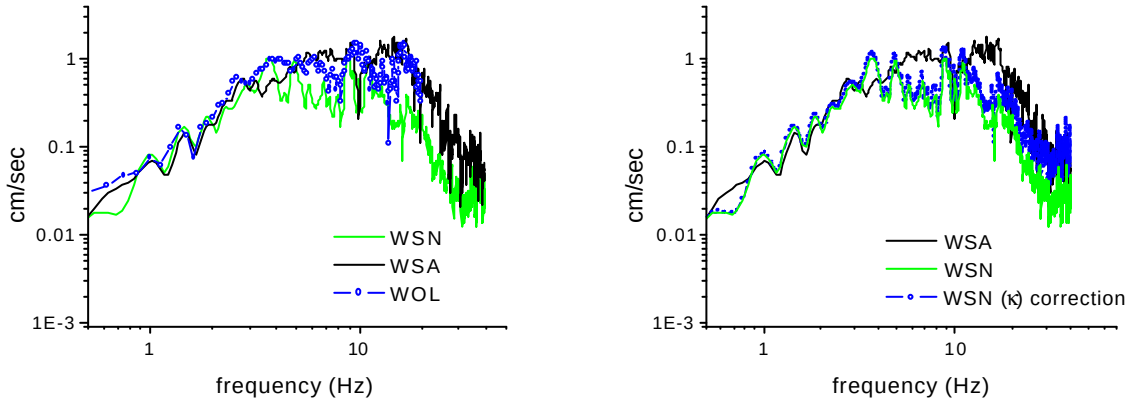
먼저, WSA 및 WSN의 기록된 가속도파형의 스펙트럼을 실측자료와 모델의 역산을 통하여 추정된 스펙트럼과 비교하여 그림 12에 도시하였다. 스펙트럼 역산은 연관희 외(2002)[5]의 입력요소를 이용하였으며 지각증폭효과가 함께 고려된 것이다. 역산결과 고주파수 감쇠효과를 나타내는 κ_0는 WSA, WSN의 경우 각 각 0.019, 0.021로 추정되었다. WSA의 경우 앞서 설명한 천부부지 증폭효과에 의하여 실측 스펙트럼 값이 추정된 스펙트럼보다 고주파수 대역에서 크게 나타나며(그림 12(a)), WSN의 경우 그림 10에서도 설명한 바와 같이 고주파수로 갈수록 실측자료와 추정자료의 수준차이가 커져서 대략 20 Hz 이하에서는 보다 큰 차이를 보인다(그림 12(b)). 이로부터 WSN에서 기록된 실측자료의 고주파수 감쇠가 추정 결과보다 더 크다는 것을 알 수 있다.



(a) (b)

그림 12. 1999/06/02(M=3.6) 지진에 대한 WSA와 WSN의 스펙트럼과 모사를 통한 추정 스펙트럼의 비교

그림 13은 1999년 6월 2일 지진의 WSA, WSN, WOL 관측소에서 기록된 가속도자료의 스펙트럼을 비교한 것이다. 그림 13(a)에 도시한 바와 같이 인접한 두 관측소 WSA와 WOL 스펙트럼은 거의 전 주파수 대역에서 일치하고 있으나 10~20 Hz 주파수 대역에 WSA 증폭효과만큼의 차이가 있다. 이는 WSA의 증폭효과를 보정하면 WOL의 준위와 유사해질 것으로 생각된다. 반면에 WSN의 경우 스펙트럼의 준위가 상대적으로 낮다. 특히 이 효과는 그림 12(b)에서 설명한 바와 같이 고주파수에서 더 크게 나타나는데 고주파 감쇠를 나타내는 κ를 보정시켜주면 그림 13(b)와 같이 고주파수 대역이 보정됨을 알 수 있다. 즉 WSN의 경우 고주파수 감쇠에 의해 전체적인 지진에너지가 감쇠되어 나타나므로WSA나 WOL 경우보다 스펙트럼 준위가 낮게 나타나며 이러한 효과는 앞서 그림 3의 가속도 파형의 준위가 낮은 원인이기도 한다.



(a) (b)

그림 13. 1999/06/02 지진에 대한 스펙트럼의 비교 (a) WSA, WSN, WOL 푸리에 스펙트럼 (b) 고주파 감쇠효과를 보정하기 전, 후의 WSN의 스펙트럼

표 6은 WSA의 부지효과 보정하기 전, 후의 PGA값과 WOL의 PGA값을 비교한 것이다.

표 6. 월성원전 부지내 자유장 지진계의 기록값(1999/06/02 지진)

	PGA (EW)	PGA (NS)
WSA (g)	0.0356	0.0140
WSA' (g)	0.0173	0.0153
WOL (g)	0.0132	0.0068
KINS (g)	0.0042	0.0064

1999년 6월 2일 지진에 대하여 WSA에 기록된 EW의 PGA값은 0.0356g로 부지효과를 보정하면 0.0173g가 되고, NS의 PGA값은 0.0173g으로 보정 후에는 0.0153g이다. 이는 WOL의 EW, NS PGA값인 0.0132g, 0.068g와 비슷한 수준이지만, 부지효과를 보정함에도 불구하고 여전히 WSA의 경우가 더 큰 값을 가진다. 그 이유로는 WSA의 가속도 센서와 기록계는 40 Hz까지 응답영역이 가능한 것에 비하여 WOL의 가속도 센서는 응답대역이 25 Hz 이하에서는 감쇠를 시작하는 계기특성에 의하여 과소반응하기 때문이다. 즉, WOL의 경우 그림 14와 같이 30 Hz이상의 대역의 지진에너지를 충분히 반영할 수 없기 때문에 WSA보다 PGA값이 작게 기록되는 것으로 생각된다.

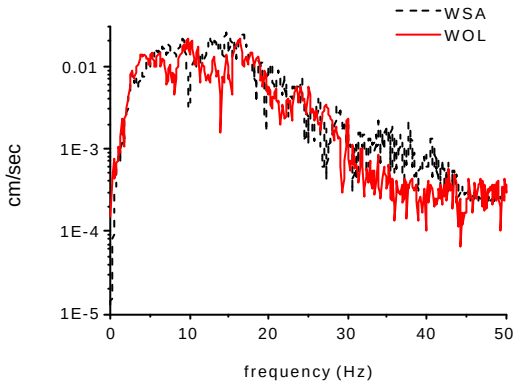


그림 14. 1999년 6월 26일 지진에 대한
WSA, WOL의 스펙트럼 비교

비록, WSA와 상호비교 가능한 WOL의 자료가 충분히 축적되어 있지 않아 절대적인 비교는 어려웠으나 두 관측소의 파형과 스펙트럼의 비교, 검증을 통하여 부지효과를 보정한 WSA의 PGA값은 비교적 신뢰성이 있다는 것을 입증할 수 있었다. WSA에 기록된 자료들의 부지효과를 보정하여 PGA값을 구한 결과를 표 7에 도시하였다. 그 결과 규모 3.0 내외의 가속도 기록의 PGA값은 동서성분의 경우 약 1.2~2.1정도 과대평가되고, 남북성분의 경우 약 0.8~0.9 정도 과소평가되었음을 알 수 있다.

본 연구에서 논의한 WSA 관측소에서 기록된 파형의 증폭은 10~20 Hz의 부지효과에 의한 것이라는 것을 알 수 있었다. PGA값의 증폭정도는 지진동모사 결과로부터 강지진, 원거리 지진일수록 부지효과의 영향을 거의 받지않아 최소화되고 근거리에서 기록된 미소지진 때에 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한 부지효과를 보정한 WSA의 PGA값이 WOL의 관측값보다 크게 나타나는 것은 WSA 관측계기의 응답 주파수 대역이 40 Hz 이상까지이므로 지진에너지를 충분히 반영한

결과임을 보였다. 따라서 WSA의 증폭정도는 충분히 보수적인 값으로 원전의 안전성에는 영향을 미치지 않는다. 한편, 월성 원전 인근에서 발생한 근거리 지진의 신속한 평가를 위하여 실시간으로 전송되는 지반가속도 값을 동서성분은 약 1.2~2.1, 남북성분은 0.8~0.9의 계수를 나누어 주는 방법으로 PGA값의 증폭현상을 보정할 수 있으며, 차후 WSA, WSN, WOL의 관측자료가 축적되면 더욱 신뢰성 높은 상수를 제시할 수 있을 것이다.

표 7. WSA 관측소의 부지효과 보정을 위한 EW, NS성분의 PGA 보정상수

YY/MM/DD	규 모	진앙거리	보정 상수 (EW)	보정 상수 (NS)
99/06/02	3.4 (KMA)	18	2.06	0.89
99/09/11	3.4 (KMA)	30	2.22	1.04
01/01/13	2.1 (KIGAM)	108	1.33	0.64
01/03/11	2.1 (KIGAM)	5.8	1.98	0.72
01/05/27	2.5 (KMA)	22	1.69	0.82
01/06/23	2.8 (KIGAM)	21	1.80	0.68
02/04/15	2.2 (KIGAM)	23	1.16	1.15
02/05/01	2.0 (KIGAM)	38	1.92	0.80
02/06/11	1.8 (KIGAM)	13.6	1.10	0.85
02/07/11	2.1 (KMA)	35	2.09	1.07
03/01/10	2.7 (KMA)	31	1.96	0.99
03/01/13	2.8 (KMA)	10	1.68	0.73
03/03/01	3.0 (KMA)	18	2.29	0.98
03/03/10	3.1 (KMA)	105	1.58	0.81

4. 사사

본 연구는 과학기술부 2003년도 원자력연구개발 중장기 계획사업 “원전부지 최대지진력 평가 연구 ”과제로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

[1] 박동희, 연관희, 장천중, “지진관측 자료를 이용한 국내 지진관측소의 지반특성 분류 ”, 한국지진공학회 추계학술발표회 논문집, 7권 1호, pp. 61-68, 2003.

[2] 연관희, 박동희, 최원학, 장천중, “전력연구원 지진관측자료의 사전자료처리 기법 및 효과적인 활용에 과한 고찰 ”, 한국지진공학회 논문집, 6권 2호, pp. 39-50, 2002.

[3] D. M., Boore, "SMSIM-Fortran program for simulation ground motions from earthquake", Version 2.16, U.S. Geol. Surv. Open-file Report 00-509, pp. 1-55, 2002.

[4] H., Watanabe, "Determination of earthquake magnitude at regional distance in and near Japan", *Zisin* (in Japanese), Vol. 24, pp. 189-197, 1971.

[5] 연관희, W., Silva, 박동희, 장천중, "수정된 Levenberg-Marquardt 역산방법에 의한 한반도 남부의 추계학적 지진요소 평가", 한국지진공학회 춘계학술발표 논문집, 6권 1호, pp. 20-28, 2002.