국내 지진센서의 저주파 응답의 신뢰성에 관한 고찰
Review on the reliability of low frequency responses of locally operating sensors

박동희* 연관희* 장천중*
Park, Dong-Hee Yun, Kwan-Hee Chang, Chun-Joong

ABSTRACT

Frequency responses for most of the local seismic sensors in Korea have been roughly checked by mutual comparison of Fourier spectra of seismic records from accelerometer and seismometer, both of which are installed at the same location. Especially, because the frequency content of the seismic energy is usually above 1 Hz for local earthquakes, the reliability of low frequency response could have not been evaluated. Fortunately a recent large earthquake, Ms=7.2 on 02/06/29 containing dominant low frequency energy makes it possible to check the low frequency response of the seismic sensors, especially EpiSensor and JC-V100. Considering two types of sensor pairs, (STS-2 and EpiSensor, JC-V100 and EpiSensor), the low frequency response of EpiSensor is confirmed first by comparison with STS-2 which has proved low frequency response. Second, reliable low frequency limit of instrumentally corrected seismic data from JC-V100 data is estimated to be about 0.03 Hz by comparison with EpiSensor data.

1. 서론

전력연구원은 '99년 5월부터 4개 원전부지 인근 8개의 지진관측소에 단주기 속도계(JC-V100) 및 가속도계(EpiSensor)를 설치하여 원전부지 인근의 지진활동을 감시하고 있으며 기상청, 한국지질자원연구원, 한국원자력안전기술원 등에서도 각 각 지진활동을 관측하고 있다.

지진계에 기록되는 수진지역의 지진동의 크기는 지진원 시간함수(source time function), 수진지역까지의 전달함수(transfer function), 수진지역의 응답함수(receiver function)에 의하여 결정된다. 지진동의 크기는 지진의 규모와 주파수에 의존하는 함수로 지진의 규모에 따라 지진의 에너지의 주파수 특성이 다르다. 즉, 지진의 에너지가 작은 미소지진부터 대규모 지진을 관측 또는 분석하기 위해서는 넓은 주파수 대역의 응답이 유용하다.

* 정회원, 한국전력공사 전력연구원

국내의 지진은 규모 3 내외의 미소지진이 주를 이루고 있는데 미소지진의 에너지가 집중되는 1 Hz 이상의 대역에 대한 지진계의 고주파수 응답 검교정(Calibration)상태는 속도, 가속도의 스펙트럼 비를 비교함으로서 대략 확인되어 있지만[1] 단주기 속도계와 가속도계의 저주파 응답은 확인되지 않았다. 따라서, 이번 연구에서는 비교적 근거리에서 발생한 02/06/29의 규모 7.2 지진의 관측자료를 이용하여 국내 지진계의 응답대역 중 저주파 응답의 신뢰성에 관하여 고찰하여 보고자 한다.

2. 국내 지진계의 특성

2.1. 국내 지진관측소의 구성

국내에서 계기지진관측은 1905년 인천관측소에서 시작되었으며 1978년 이후 기상청에서 본격적으로 관측하게 되었다. 1994년경부터는 한국지질자원연구원[2] 및 기상청[3]을 중심으로 디지털 관측장비를 갖춘 지진관측소를 추가로 구축되었고, 현재 한전 전력연구원이 보유한 원전 주변 8개 관측소를 포함하여 전국의 속도, 가속도 지진관측소는 표 1과 같은 기기로 구성되어 있다. 표 1과 같이 국내에서 이용되는 대부분의 지진계는 단주기 속도계로 JC-V100, SS-1 모델, 광대역 속도계로 STS-2모델, 가속도계로 EpiSensor 모델이 설치, 운영되고 있으며, JC-V100과 EpiSensor, STS-2와 EpiSensor 모델이 동일한 장소에 놓여있는 경우가 많아 속도, 가속도 센서의 스펙트럼 비를 이용하면 지진파의 응답에 대한 검교정 상태를 확인하기 용이하다.

표 1. 국내 지진관측소 운영 기관별 지진계 모델 현황 (2002년 5월 현재)

		전력연구원 (KEPRI)	기상청 (KMA)	한국원자력안전기술원 (KINS)	한국지질자원연구원 (KIGAM) 및 대학
속도계 개수 (모델명)	초광대역	-	1 (STS-1)	-	-
	광대역	-	12 (STS-2)	4 (STS-2)	8 (STS-2)
	단주기	8 (JC-V100)	17 (SS-1)	-	13 (JC-V100) 6 (WR-1), 4 (CMG3T-B)
가속도계 개수 (모델명)		8 (EpiSensor)	70 (EpiSensor)	4 (EpiSensor)	10 (EpiSensor) 2 (JA101)
기록계 개수 (모델명)		8 (Q4128)	19 (Q4128) 51 (Q730)	4 (Q4128)	15 (Q4128), 4(K2) 1 (16SUP), 10 (16ACT)

2.2. 속도계

국내 지진관측기관에서 운영하고 있는 광대역 속도 지진계는 STS-1, STS-2 모델이다. 이들 속도계의 주파수 응답대역이 각 각 0.003 Hz~10 Hz, 0.02 Hz~50 Hz 영역으로 거의 왜곡없이 기록된다.

한전 전력연구원의 지진계를 비롯한 국내 단주기 센서의 대부분은 JC-V100 모델이다. JC-V100

은 고유주파수(natural frequency)가 1 Hz로 그 이하에서는 주파수 응답이 왜곡되므로 이 이하의 주파수를 지진분석에 활용하기 위해서는 계기보정이 필수적이다[4]. 시간영역의 디지털 필터 방법을 이용하여 구한 속도계 보정계수는 표 2와 같으며 필터계수 a(n), b(n)과 식 (1)을 이용하여 1 Hz 이하의 저주파수 대역이 왜곡된 입력신호 $x(n)$을 보정한다[1].

$$a(1)y(n)=b(1)x(n)+b(2)x(n-1)+\cdots+b(nb+1)x(n-nb)-a(2)y(n-1)-\cdots \\ -a(na+1)y(n-na) \tag{1}$$

표 2. Sampling rate에 따른 시간영역 속도계 보정계수

Sampling rate	b(n)			a(n)		
40 Hz (20 Hz 기록에 적용)	(1.1161e+000	-1.9877e+000	8.9621e-001)	(1	-2	1)
200 Hz (100 Hz 기록에 적용)	(1.0222e+000	-1.9995e+000	9.7826e-001)	(1	-2	1)

2.3. 가속도계

지진가속도자료는 약 90여개의 관측소에서 EpiSensor로 관측한다. EpiSensor는 Force Balance 형 3축 가속도계로 DC~200 Hz 까지 Flat 한 영역을 가진다(그림 1)[5].

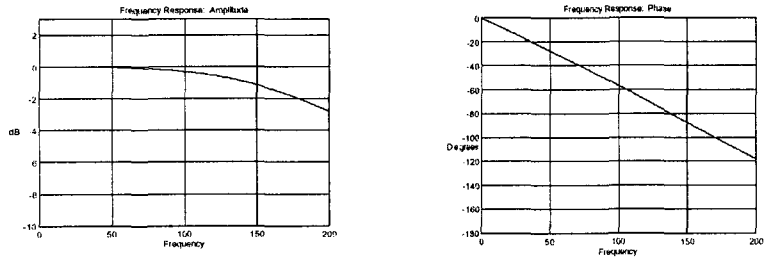


그림 1. EpiSensor(가속도계)의 응답

이론적으로는 가속도계는 응답대역이 DC 영역까지 Flat하여 저주파수에서 파형이 왜곡없이 기록되지만 분석하고자 하는 지진파 신호의 낮은 S/N비 또는 스펙트럼 해석 시 윈도우 효과 등에 의해서 왜곡이 생기기도 한다. 그림 2는 시간영역에서 S/N비가 나쁜 지진파에 대한 스펙트럼의 예로 1Hz 이상의 주파수 대역에는 S/N비가 좋지만 1 Hz 이하의 저주파 구간은 noise효과가 크다. 따라서 넓은 대역의 주파수를 해석하고자 하는 경우에는 스펙트럼의 저주파수 영역까지 S/N비

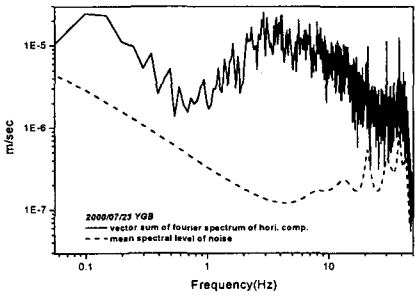
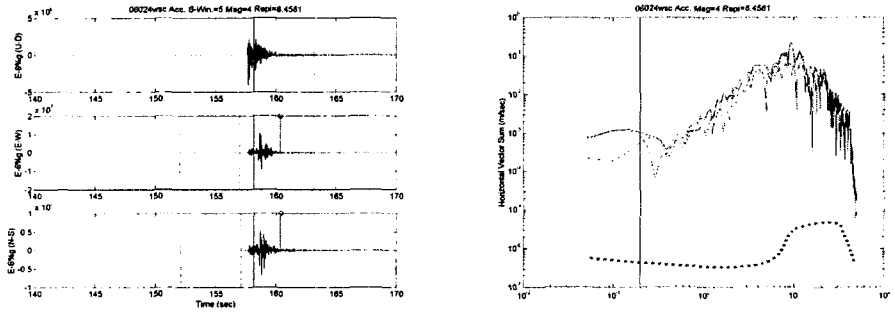


그림 2. 주파수 영역에서의 S/N비 (00/07/23 YGB 가속도 기록)

가 충분히 좋은 지진자료를 이용하여야 한다. 두 번째로 넓은 주파수 대역에서 S/N비가 충분히 큼에도 불구하고 window 구간의 신호에 포함된 DC성분에 의하여 왜곡이 발생하는 경우가 있다. 그림 3(a)은 국내에서 발생한 규모 4 지진의 기록의 예로 그 스펙트럼을 도시한 것이 3(b)이다. 3(b)에서 보는바와 같이 주 에너지 대역은 10 Hz 부근의 고주파수 영역이며 window 효과로 인하여 대략 0.3~0.4 Hz 이하의 주파수 대역에서는 스펙트럼 준위가 커지는 비물리적인 양상이 확인되므로 자료해석에 이용하기 어렵다.



(a) (b)

그림 3. window 효과에 따른 저주파 스펙트럼의 왜곡현상

3. 저주파수 응답특성

전술한 2절의 단주기 속도계와 가속도계의 저주파수 응답을 보정하는 방법에 의하여 왜곡된 지진자료를 보정하여 S/N비가 큰 경우 0.3~0.4 Hz 범위의 자료를 지진파 해석에 이용할 수 있음을 알 수 있었으나, 이는 저주파 에너지가 크지 않은 국내의 미소지진을 이용하여 보정한 결과이다. 만약, 저주파수 대역에 에너지가 충분하게 분포하는 규모가 큰 지진의 스펙트럼을 분석한다면 확인되지 않은 0.3 Hz 이하의 저주파수 대한 응답을 확인할 수 있다.

2002년 6월 29일 중국에서 발생한 지진은 규모(Ms)가 7.2로 우리나라 인근에서 이 정도로 큰 지진이 발생한 것은 이례적인 일이다(표 3).

표 3. 2002/06/29 지진의 발생정보

발생시각 (GMT)		진앙위치		진원깊이	규모(Ms)
년 / 월 / 일	시 각	위 도	경 도	566 km	7.2 (USGS)
02 / 06 /29	02 : 19 : 30	43.8°N	130.65°E		

일반적으로 지진의 주에너지 대역은 코너 주파수(corner frequency) 부근에서 최대 에너지를 가지는데 규모(Ms)가 5.0일 때 코너주파수는 1 Hz부근이고, 규모(Ms)가 7.0이면 대략 0.1 Hz 부근이다[6]. 즉 이 지진의 에너지가 주로 분포하는 대역은 0.1 Hz 부근이어서 저주파수 에너지를 충분

히 포함하고 있음을 알 수 있다. 또한, 이 지진의 진앙거리는 국내 대부분 관측소로부터 700~1,000 km 내외로 비교적 가깝고, 진원깊이가 깊어 직접파(direct wave)의 phase picking이 용이하며 S/N비도 좋아서 저주파수 응답에 대한 지진 센서의 Calibration 고찰에 좋은 자료가 된다. 이와 같은 이유로, 6월 29일 지진이 기록된 국내 관측자료들의 응답을 비교, 검토하여 지진센서의 저주파수 응답특성을 알아보았다. 시간영역에서의 윈도우는 저주파수 대역까지 충분한 응답을 고려하기 위하여 80초로 하였다(그림 4).

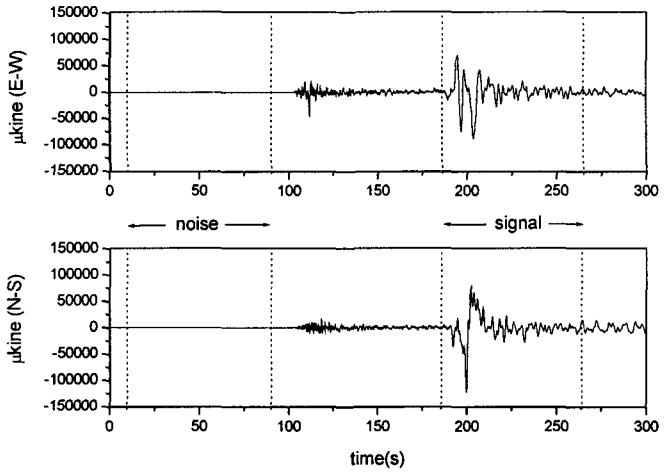


그림 4. 분석에 이용한 지진자료의 window의 예 (02/06/29 UCN)

지진관측소에 속도계와 가속도계가 동시에 설치되어 있다면 특정 지진에 대한 스펙트럼을 상호 비교하여 지진계의 검교정 상태를 확인할 수 있어 이 방법은 매우 간단하고 유용하다.

먼저, EpiSensor 가속도계와 STS-2 속도계가 동시에 설치되어있는 관측소에서 EpiSensor의 저주파 응답 특성을 알아보기 위하여 저주파수 자료가 왜곡 없이 기록되는 STS-2 광대역 센서에 기록된 속도자료의 스펙트럼을 비교하였다. STS-2와 EpiSensor는 동일한 지역에 위치하고 있어 계기 특성에 의한 왜곡이 없다면 지진계에 기록되는 최종응답은 같아야 한다. 그림 5는 EpiSensor에 기록된 가속도 파형의 스펙트럼과 STS-2에 기록된 속도자료 스펙트럼에 $2\pi f$를 곱하여 얻은 가속도 파형을 비교, 도시한 것이다. 두 스펙트럼은 약 0.03 Hz 저주파 대역까지 잘 일치하고 있음을 알 수 있어 센서들의 검교정 상태가 양호하며, 특히, Episensor 가속도 센서의 저주파 응답 대역이 상당히 신뢰할 수 있음을 알 수 있다.

다음으로 저주파수 응답의 신뢰성이 확인된 EpiSensor와 JC-V100 단주기 속도계의 응답을 비교하여 그림 6에 도시하였다. 그림 6에서 점선은 JC-V100의 기록자료를 미분하여 만든 가속도 스펙트럼 값이며, 실선은 전술한 2절의 JC-V100센서 응답 보정방법에 의하여 저주파수 응답을 보정한 가속도 스펙트럼 값이다. STS-2와 EpiSensor의 기록을 비교함으로써 EpiSensor의 저주파 응답이 신뢰도가 있음을 알 수 있었는데, 보정한 JC-V100의 응답이 EpiSensor의 값과 잘 일치하고 있는 것으로 보아 단주기 속도계에 기록된 저주파수 대역의 스펙트럼 값도 신뢰할 수 있음을 알 수 있다. 이들의 신뢰구간은 약 0.03 Hz 이상이다.

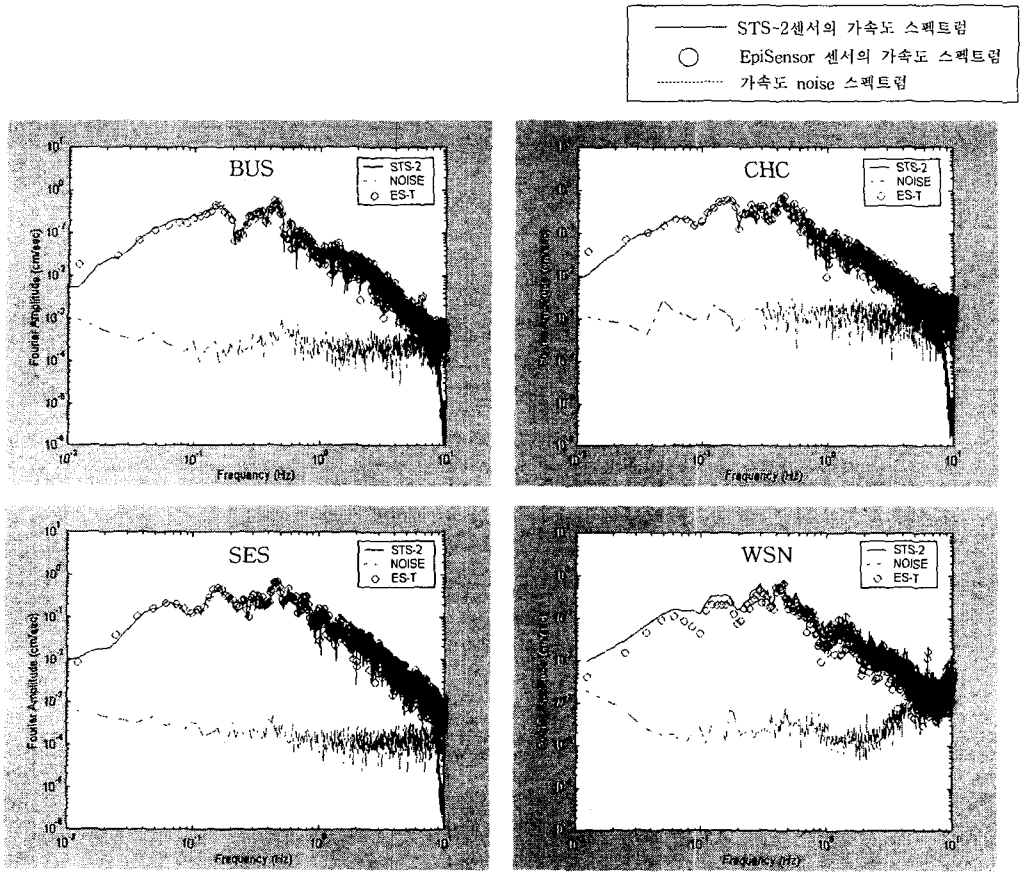


그림 5. STS-2 센서와 EpiSensor 기록의 스펙트럼 비교

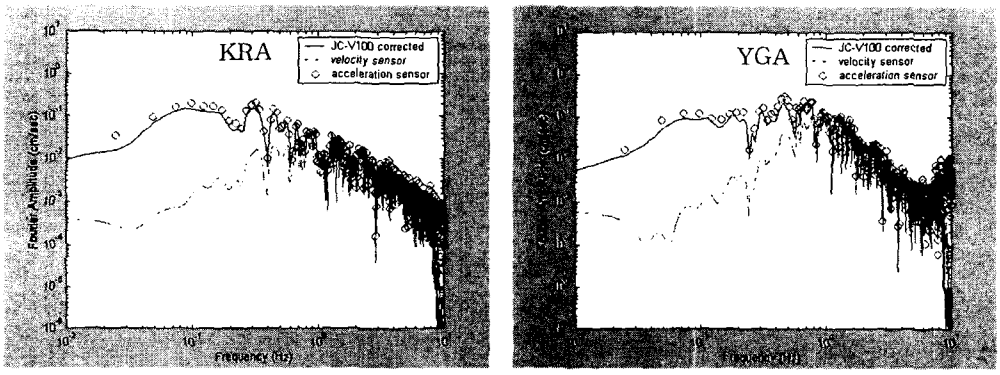


그림 6. EpiSensor와 JC-V100 기록의 스펙트럼 비교

4. 국내 지진자료의 활용

3절의 결과로부터 S/N비가 충분할 경우 가속도 스펙트럼의 저주파수 대역과 저주파수 응답에 대하여 보정한 단주기 속도계의 자료는 대략 0.03 Hz 이상의 주파수 구간에서 신뢰성 있는 응답

을 보여준다는 것을 알 수 있었다. 스펙트럼 분석에서 저주파의 응답이 유용한 이유는 0.1~1 Hz 구간이 인간활동 또는 조석 등에 의한 noise 구간이지만, 0.1 Hz 이하의 응답은 배경잡음의 효과와 부지효과 등을 거의 포함하지 않기 때문이다.

다음으로 스펙트럼의 응답을 지진파 분석에 활용하는 예로써 비선형 역산방법을 이용하여 2002년 6월 29일에 발생한 지진에 대하여 추계학적 점지진원 모델의 지진원 매개변수를 산정하였다. 지진자료는 전술한 2절, 3절의 방법으로 저주파수 응답을 보정하였으며 그림 7과 같이 실측 스펙트럼과 역산에 의한 모델 스펙트럼을 비교하여 최적해를 구한다[7]. 02/06/29 지진은 진원깊이가 566 km로 지진원 특성이 점지진원을 가정한 위의 모델과 차이가 있고, 감쇠경로 또한 지각 상부에서 일어난 지진과 다른 양상이므로 추계학적 지진원 모델을 적용시키기에는 한계가 있다. 그러나, 역산 시 점지진원 특성 및 지각상부의 감쇠경로로 근사시켜도 모델 스펙트럼이 실측스펙트럼에 잘 대비됨을 알 수 있었으며(그림 7), 역산 결과 구한 모멘트 규모는 7.1로 USGS에서 발표한 Ms 2.2와 Harvard Seismology Center에서 발표한 모멘트 규모 7.2와도 유사하였다.

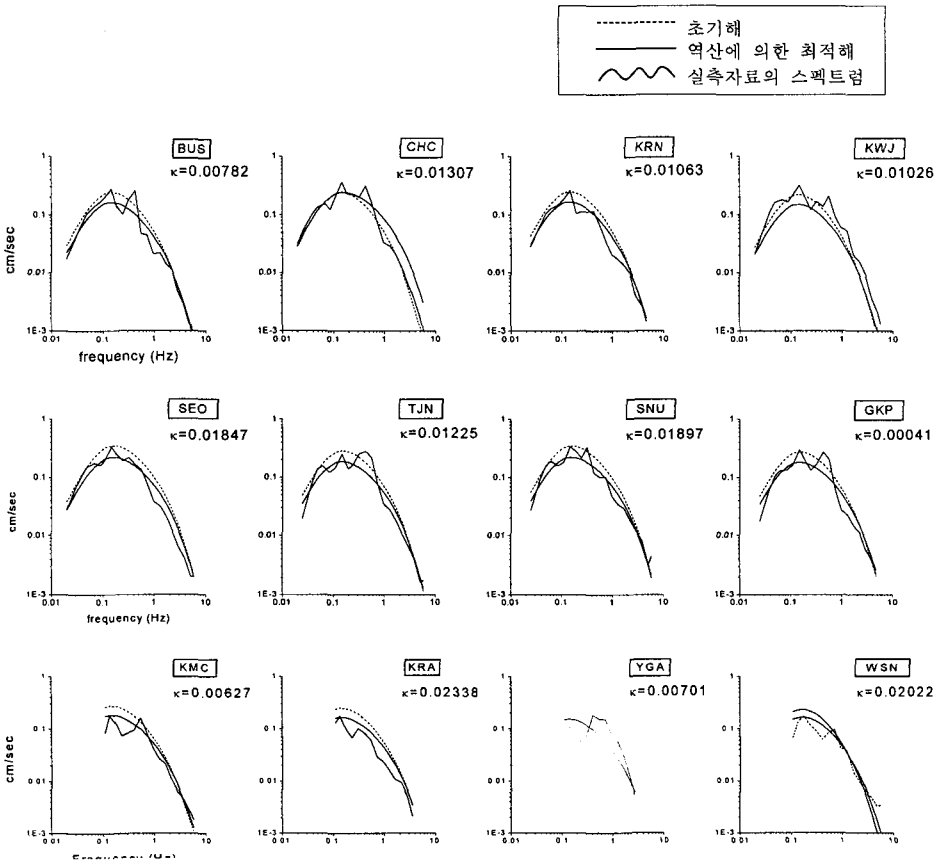


그림 7. 속도파형을 이용한 지진역산 결과

국내의 지진관측소 중 일부는 EpiSensor로 가속도만 관측하는 곳이 있으며, 경상분지의 일부 관측소는 JC-V100 속도계만 운영되고 있는 관측소도 있다. 그림 7의 결과로부터 기하학적 특성 및

부지특성 등을 확인할 수 있으면 속도 또는 가속도의 상호 검교정 상태비교가 어려운 지역에서 상대적인 스펙트럼의 준위를 유추할 수 있다. 또한, 그림 7의 KRA, KRN 관측소, SEO, SNU 관측소는 인접해 있는 관측소로 스펙트럼의 준위가 유사함을 알 수 있다. 이와 같이 속도계 또는 가속도계로만 지진을 관측하고 있는 관측소의 기록을 주변의 또는 진앙거리가 유사한 속도계, 가속도계가 함께 놓여 있어 검교정 상태가 확인된 관측자료의 스펙트럼 준위와 비교해보면 검교정 상태를 간접적으로 확인할 수 있다.

5. 토의 및 결론

이번 연구에서 지진계의 저주파응답의 신뢰성을 고찰한 결과는 다음과 같다.

EpiSensor 가속도계의 응답은 S/N비가 충분하다면 0.1 Hz 이하의 저주파수까지 신뢰할 수 있으며 JC-V100 속도 기록계의 응답도 계기보정을 하면 0.1 Hz 이하의 스펙트럼 대역까지 신뢰할 수 있다. 이번 02/06/29 지진을 이용한 결과, EpiSensor와 JC-V100의 자료는 대략 0.03 Hz 저주파수까지 신뢰할 수 있었다. 또한, 단주기 속도센서 혹은 가속도센서만 운영되고 있는 관측소라 하더라도 감쇠특성과 부지특성값을 알고 있으면 상대적인 스펙트럼 준위를 유추하여 확인할 수 있으며, 주변의 검교정이 확인된 관측소의 스펙트럼 준위와 비교하면 간접적으로 검교정 상태를 확인할 수 있었다.

이상의 결과는 국내 지진자료를 사용하는 관련분야 종사자들의 이해를 증진시킬 수 있으며, 차후 이 방법을 이용하여 스펙트럼 분석을 수행하고자 할 때 보다 안정적인 값을 얻을 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 2002년도 원자력연구개발 중장기 계획사업 "원전 내진설계를 위한 기반구축연구"과제로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 연관희, 박동희, 최원학 장천중, "전력연구원 지진관측자료의 사전 자료처리 기법 및 효과적인 활용에 관한 고찰", 한국지진공학회, 제6권, 제2호, 2002, pp. 39-50.
2. 지헌철, 이희일, 전정수, 신인철, 김동균, 박정호, 김근영, "지진공학연구", 한국지질자원연구원 연구보고서, KR-98(C)-06, 1998.
3. "2001 지진연보", 기상청, 2002.
4. Markrand Co., *"JC-V100-2D-CC(Operational Manual)"*, Japan, 1998.
5. Kinemeterics Inc., *"EpiSensor(User Guide)*, Document 301900", 1998.
6. "Modern Global Seismology", Academic Press, 1995.
7. 연관희, Walter Silver, 박동희, 장천중, "수정된 Levenberg-Marquardt 역산방법에 의한 한반도 남부의추계학적 지진요소 평가", 한국지진공학회 춘계 학술발표회 논문집, 제6권, 제1호, 2002, pp. 22-27.