지진관측자료의 효과적인 활용에 관한 고찰
Best Use of the Measured Earthquake Data

연관희* 박동희* 김성주* 최원학* 장천중*
Yun, Kwan-Hee Park, Dong-Hee Kim, Sung-Zu Choi, Weon-Hack Chang, Chun-Jung

ABSTRACT

In Korea, we are absolutely short of earthquake data in good quality from moderate and large earthquakes, which are needed for the study of strong ground motion characteristics. This means that the best use of the available data is needed for the time being. In this respect, several methods are suggested in this paper, which can be applied in the process of data selection and analysis. First, it is shown that the calibration status of seismic stations can be easily checked by comparing the spectra from accelerometer and velocity sensor both of which are located at the same location. Secondly, it is recommended that S/N ratio in the frequency domain should be checked before discarding the data by only look of the data in time domain. Thirdly, the saturated earthquake data caused by ground motion level exceeding the detection limit of a seismograph are considered to see if such data can be used for spectrum analysis by performing numerical simulation. The result reveals that the saturated data can still be used within the dominant frequency range according to the levels of saturation. Finally, a technique to minimize the window effect that distorts the low frequency spectrum is suggested. This technique involves detrending in displacement domain once the displacement data are obtained by integration of low frequency components of the original data in time domain. Especially, the low frequency component can be separated by using discrete wavelet transform among many alternatives. All of these methods mentioned above may increase the available earthquake data and frequency range.

1. 서론

구조물에 큰 피해를 줄 수 있는 강진은, 많은 불확실성을 포함하고 있어 논란의 여지가 있지만 이론적으로 지진의 Self-Similarity([1])에 의해 중규모 지진(M>3) 특성으로부터 예측될 수 있다. 한편, 지진의 지진원 및 지진파 전달 특성 등은 지진관측자료를 기초로 하여 평가됨으로 지진관측자료의 정확한 분석은 아무리 이야기해도 지나치지 않는다. 우리나라는 잘 알려진 바와 같이 중·저 지진활동성 지역에 위치하고 있어 강지진동 예측 연구에 필요한 중규모 이상 지진의 발생빈도가 낮아 이들 지진들에 대한 자료 또한 미약하거나 질이 좋지 않은 편이다. 따라서 중규모지진을 이용하여 강진의 특성을 파악하기 위해서는 제한된 지진관측자료로부터 최대한의 의미 있는 정보를 도출할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 측면에서 스펙트럼의 활용 가능한 주파수 대역을 극대화 할 수 있는 여러 방안에 대해 고찰해 보고자 한다.

지진 관측자료의 분석시 분석자가 고려해야할 사항으로는 1) 지진자료의 취사선택 문제, 2) 중규모 지진 진앙지로부터 근거리에 위치한 관측소 자료에서 흔히 나타나는 포화된(saturated, clipped) 계측자료의 활용 가능 여부, 3) 활용 가능한 스펙트럼의 대역 선택 문제 등이 있는데 각 사항에 대해 고찰해 보고자 한다.

* 한국전력공사 전력연구원, 정회원

2. 본론

2.1 지진관측자료의 선택

일반적으로 지진관측자료를 이용하여 지진특성을 분석하고자 할 경우 가장 먼저 부딪히는 문제는 동일 지진에 대해 여러 지진관측소에 기록된 지진관측자료 중 어떤 지진관측자료를 선택해야 할 지의 문제이며 이때 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

1) 지진관측소의 지반조건 2) 자료의 정밀도 3) 자료의 정확도 4) 자료의 S/N 비 정도

지반조건은 지진관측자료에 큰 영향을 줄 수 있는데 견고한 지반조건의 지진관측소에서 계측된 자료가 토양이나 구조물 내에 계측된 자료보다 선호된다. 관측자료의 정밀도란 지진계 및 기록계 등의 동적범위(dynamic range)와 관련된 특성으로 계측시스템의 동적범위가 클수록 보다 정밀한 지진계측이 가능하며 현재 국내 대부분의 지진관측소는 이러한 고정밀도 시스템을 구비하고 있다. 관측자료의 정확도는 지진센서의 검교정(calibration) 상태와 관련된 문제로서 지진자료의 phase 해석 이외에 스펙트럼 해석을 하기 위해서는 반드시 활용하려는 지진관측소의 검교정 상태를 점검해 볼 필요가 있다. 검교정은 지진관측소를 운영하는 기관에서 정기적으로 수행하게 되어있으나 검교정 자료의 활용이 용이치 않을 경우도 존재한다. 이런 경우 만약 지진관측소에 속도계가 가속도계가 동시에 설치되어 있다면 그림 1과 같이 특정 지진에 대한 스펙트럼을 상호비교함으로써 상대적인 검교정 상태를 확인할 수 있으며 그림 1은 비교적 검교정 상태가

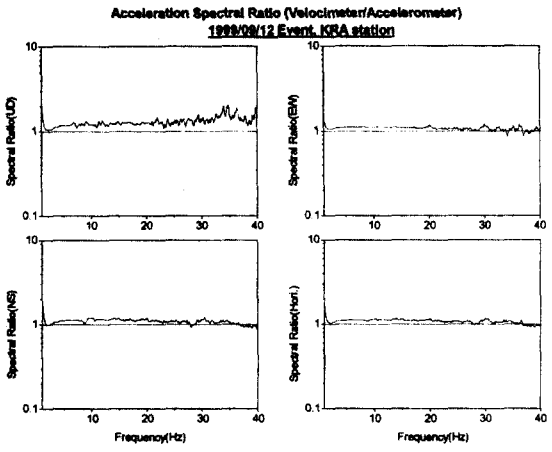

그림 1. 속도계와 가속도계가 동시에 있는 지진관측소에 대한 성분별 가속도 스펙트럼 비교

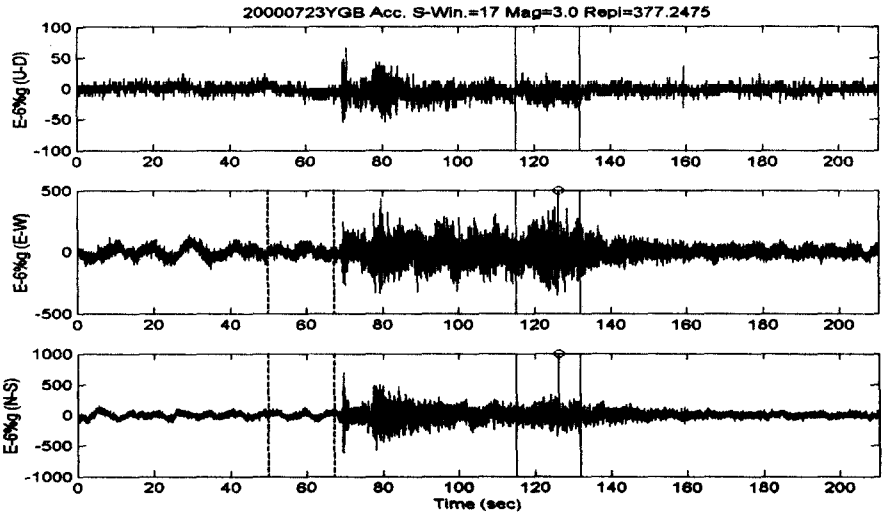

그림 2. 시간영역 상에서 S/N비가 낮은 지진관측기록의 예

양호한 지진관측소의 예이다. 국내의 주요 지진관측소에는 대부분 속도계와 가속도계가 동시에 설치되어 있기 때문에 이 방법은 검교정시 간단하면서도 매우 유용한 방법이 될 수 있다.

관측자료의 S/N비는 지진관측자료 사용여부 판단 시 정량적인 기준이 될 수 있는데 일반적인 경우 분석자가 시간이력을 시각적으로 확인하여 취사선택하는 분석자의 주관이 개입되는 부분이다. 그러나 많은 경우 시간영역에서의 S/N비가 좋지 않아 보여도 주파수대역을 선별적으로 사용할 수 있음에도 지진자료가 사장되는 경우가 있다. 그림 2는 시간영역에서 낮은 S/N비를 갖는 한 예로 비교적 작은 규모의 지진에 대해 원거리에서 기록된 것이다. 분석자의 주관적인 차이는 있을 수 있으나 이러한 자료가 버려지는 가능성을 배제할 수 없다. 그러나 이러한 자료는 스펙트럼을 선별적으로 이용함으로써 지진해석에 활용할 수 있다. 그림 3은 그림 2의 시간이력에 대한 주파수 영역에서의 S/N비를 보여준다. 그림 3에서 실선은 cosine tapering (10%)된 S파 window에 대한 수평 스펙트럼의 벡터합이며, 점선은 잡음(그림 2의 점선 구간)에 대한 스펙트럼으로 S파 window 길이와 동일한 window 시간에 대해 계산되었다. 잡음에 대한 스펙트럼은 power spectrum의 제곱근으로 추정된 스펙트럼 수준이다. 그림 3에서 알 수 있듯이 분석자가 S/N비 10이상의 스펙트럼을 사용하고자 한다면 대략 주파수 1 ~ 15Hz 사이의 스펙트럼 정보까지 활용할 수 있다. 이상에서와 같이 지진관측자료의 취사선택에 앞서 시간영역 및 주파수 영역에서 S/N 비를 확인함으로써 활용할 수 있는 계측자료의 개수와 주파수 범위를 극대화 할 수 있다.

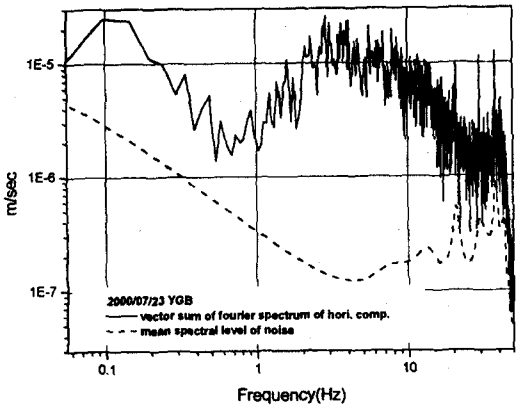

그림 3. <그림 2> 관측자료에 대한 주파수 영역에서의 S/N비

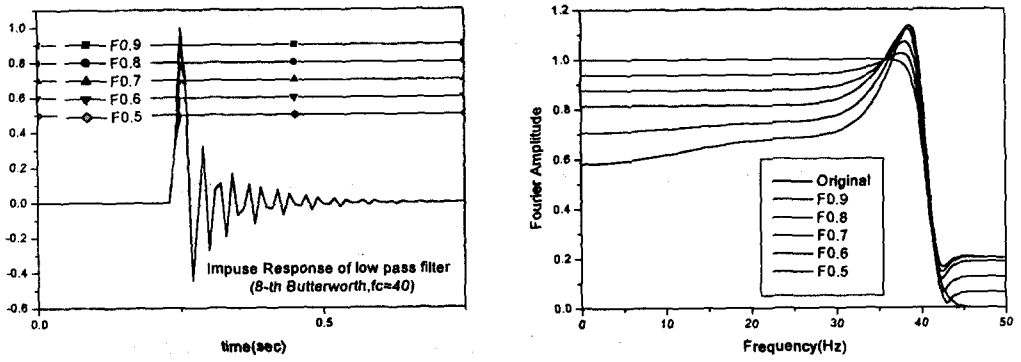

그림 4. 지진관측자료 포화정도에 따른 스펙트럼 왜곡 영향 시뮬레이션

2.2 포화된 관측자료의 활용 여부

중규모 지진발생시 근거리에서 관측된 지진자료는 자주 포화되는데 일반적으로 포화정도와 관계없이 이러한 자료는 이용되지 않고 있다. 본 절에서는 포화정도에 따른 지진관측자료의 활용성 여부를 평가하고자 하며, 이를 위해 먼저 관측자료의 포화정도가 스펙트럼에 어떤 영향을 주는 지 살펴보기 위해 가상적인 지진신호에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 최대 진폭의 90%, 80%, 70%, 60%, 50% (그림 4의 F0.9, F0.8, F0.7, F0.6, F0.5) 포화를 가정하였을 경우에 스펙트럼의 변화를 살펴보는 절차로 수행되었다. 입력신호로는 8차 Butterworth 저주파 필터가 이용되

었다.

그림 4의 시뮬레이션 결과 포화정도가 심할수록 평균적인 스펙트럼의 수준이 감소되고 있으며 이는 Parseval의 정리로부터 예상되는 결과이다. 그러나 이상의 시뮬레이션 결과는 광대역 에너지를 갖는 가상적인 입력신호에 대한 결과이며, 실제 계측자료의 경우에 대해 포화 정도에 따른 스펙트럼 영향을 살펴보기 위해 그림 5와 같이 실측자료에 대하여 그림 4와 동일한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 이용한 자료는 1997년 6월 26일, 1998년 1월 28일 발생한 지진으로 아래의 예 이외 대부분의 관측소 기록이 포화되었다. 동일 지진에 대해 여러 지진관측소에 계측된 기록의 스펙트럼 특성이 유사하다고 가정하면 포화되지 않은 지진기록에 대한 시뮬레이션 결과로부터 포화된 스펙트럼의 활용여부를 간접적으로 추정할 수 있다.

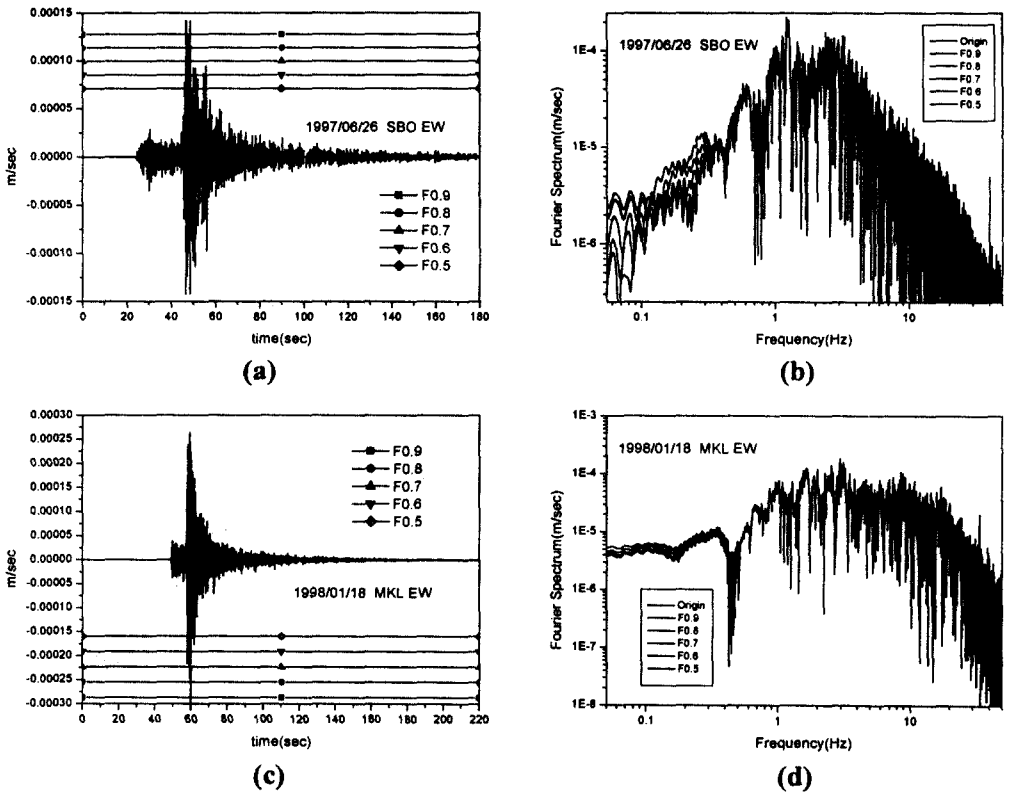

그림 5. 실제 관측기록에 대한 포화정도에 따른 스펙트럼 왜곡 영향

그림 5에서 수행된 실제 관측기록에 대한 시뮬레이션 결과, 주요 주파수대역(1~10Hz)에서는 스펙트럼의 변화가 없는 것으로 확인되었다. 따라서 동일 지진에 대해 포화되어 기록된 다른 관측소의 자료도 선별적으로 분석에 활용될 수 있다. 특히 (c), (d)의 경우처럼 포화정도에 대해 스펙트럼의 변화가 거의 없는 경우도 확인되었다. 이상의 결과로부터 지진 실측자료의 대부분은 어느 정도 포화가 되더라고 스펙트럼에는 큰 영향을 끼치지 않음을 예상할 수 있으며, 특히 주요 주파수대역에 대해서는 자료를 선별적으로 활용할 수 있다.

2.3 Window 적용에 따른 저주파 스펙트럼 왜곡 최소화

일반적으로 S파 지진원을 단일코너주파수의 ω^2 모델([2])로 가정할 수 있으며 이 이론에 따르면 가속도 스펙트럼의 저주파에서는 각주파수(angular frequency)에 비례하는 스펙트럼 수준이

예상된다. 그러나 실측자료에 대한 S파 window 구간에 대해 저주파 스펙트럼을 보면 S/N비가 충분히 큼에도 불구하고 계산된 스펙트럼의 저주파 영역에서 비물리적인 양상을 나타낼 수 있다(그림 6). 이러한 효과는 S파 window 창의 영향으로 그림 6은 본 연구에서 사용된 window 창에 대한 스펙트럼이다. S파 window 효과는 window 구간 신호에 포함된 DC 성분이 많을수록 그 효과가 커질 수 있다.

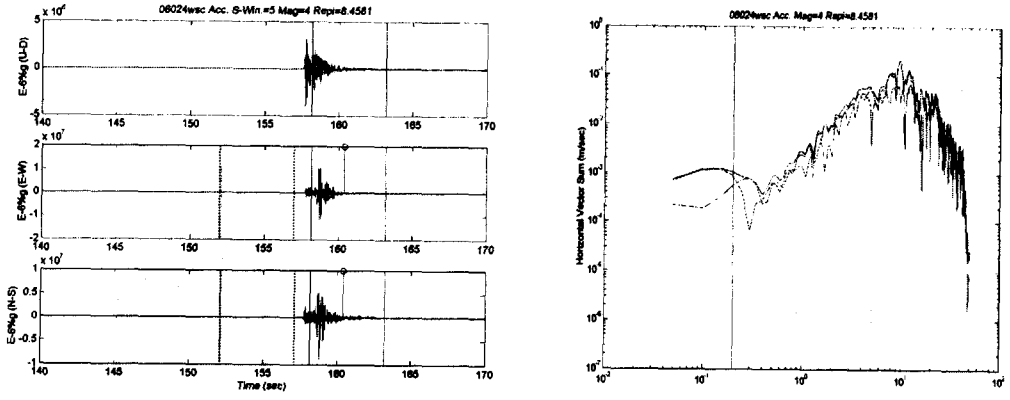

그림 6. Window 효과에 따른 저주파 스펙트럼의 왜곡 현상

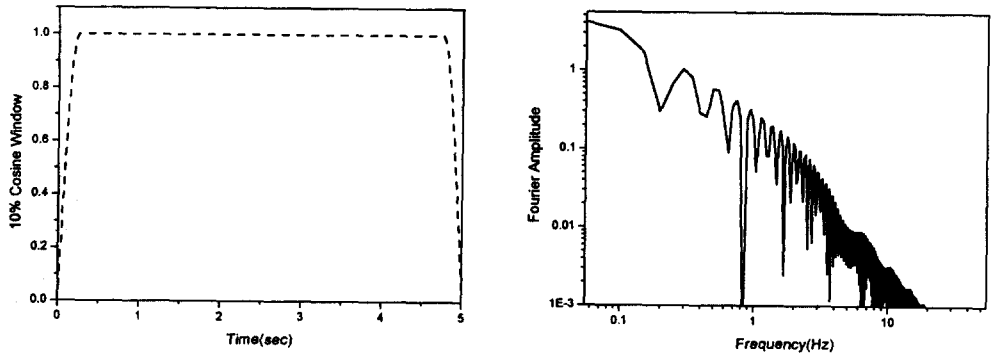

그림 7. 10% cosine window에 대한 스펙트럼

S파 window 구간 내 신호의 DC 성분을 최소화하기 위해서 일반적으로 사용하는 방법은 변위영역에서 DC 경향을 제거하는 방법이다. 가속도 자료로부터 변위 계산은 주파수 영역 혹은 시간영역에서 수행될 수 있으나 주파수 영역에서의 계산은 singularity를 포함하는 매우 불안정한 절차이므로 본 연구에서는 시간영역에서의 적분방법을 이용하였다. 또한 단주기 속도자료의 저주파 성분을 보정할 경우 보정된 속도자료의 적분을 통한 변위계산 역시 대단히 불안정한 절차로서 시간영역에서의 적분방법이 선호된다([3]).

시간적분방법으로 주로 활용되는 방법으로는 Trapezoidal 방법이 있는데 이 경우 진폭주파수응답이 그림 8처럼 왜곡될 수 있다. 이때 Trapezoidal 적분 과정에 대한 주파수 응답은 다음과 같이 계산되었다. Trapezoidal 방법에 의한 적분은 다음과 같다.

$$\int_{x_0}^{x_n} y(x)\,dx \simeq \frac{1}{2} h[y_0 + 2*y_1 + \ldots + 2y_{n-1} + y_n],\ \mathrm{h}=\Delta\mathrm{x} \qquad (1)$$

식 (1)로부터 특정 시점에서의 적분값 y(n)은 현재 입력값 x(n) 및 이전 입력값 x(n-1)와 이전 적분값 y(n-1)으로 식 (2)와 같이 반복적으로 계산될 수 있다.

$$y(n)=1/2(x(n)+x(n-1))*0.01(100\ Hz\ 샘플링인\ 경우) + y(n-1) \quad (2)$$

식 (2)를 디지털필터링 과정으로 가정하여 이에 대한 주파수 응답을 식 (3)을 이용하여 계산한 결과가 그림 8이다. 이때 a(n), b(n)은 식 (2)로부터 얻어진 a=(1 -1), b=(1/2 1/2)*0.01이 사용되었다.

$$H(e^{jw}) = \frac{B(e^{jw})}{A(e^{jw})} = \frac{b(1)+b(2)e^{-jw}+\ldots.+b(m+1)e^{-jmw}}{a(1)+a(2)e^{-jw}+\ldots.+a(n+1)e^{-jmw}} \quad (3)$$

그림 8에서 시간영역에서의 적분은 안정적이기는 하나 고주파 영역에서 진폭스펙트럼이 왜곡됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 고주파 진폭스펙트럼 왜곡을 방지하기 위해 입력 신호를 저주파 성분과 고주파 성분으로 분리하여 저주파 성분에 대해서만 Trapezoidal 적분을 통해 변위값을 얻은 후 경향(trend)을 제거하였다. 저주파 및 고주파 성분 분리는 여러 가지 방법이 있으나 여기서는 level-3 Discrete Meyer Wavelet을 이용하여 분리하였다([4]). 그림 9는 이상의 절차를 도식화한 그림이다. 이때 변위영역에서의 경향제거는 변위를 3차함수로 근사시킨후 제거시켰다.

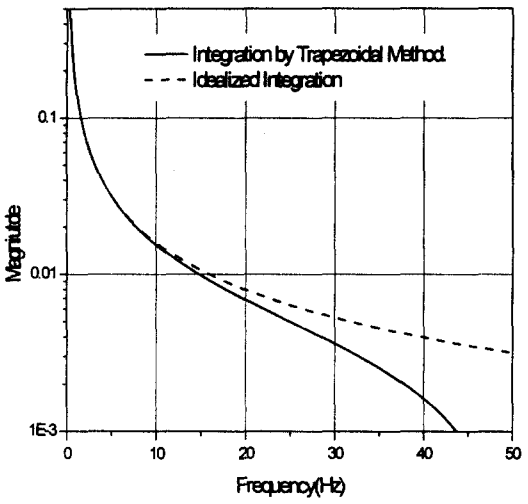

그림 8. Trapezoidal 적분 과정의 주파수 응답

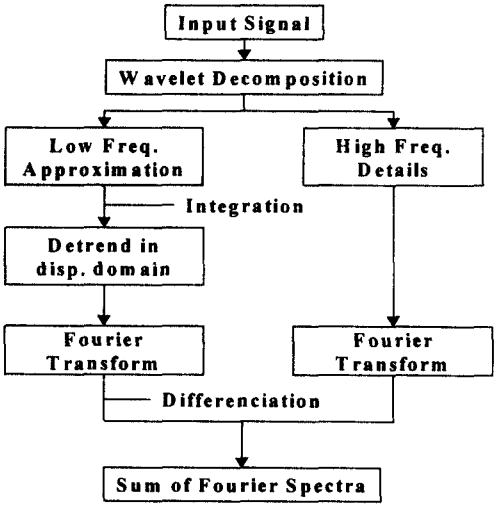

그림 9. 저주파영역에서의 window 효과를 최소화하기 위한 방법

그림 10은 이상에서 기술한 방법을 그림 6의 지진관측 자료에 적용한 결과이다. 그림 10에는 결과의 타당성 비교를 위해 이론적인 ω^2 모델을 사용할 경우 예상되는 저주파 스펙트럼을 함께 도시하였다. 또한 그림 10에는 일반적인 방법으로 선형경향 성분을 제거했을 경우의 스펙트럼 결과와 그림 9의 방법을 적용했을 경우의 결과를 비교하였다. 두 방법 적용 결과 비교에서 알 수 있는 바와 같이 그림 9의 방법을 적용했을 경우 더 낮은 주파수에서 ω^2 모델과 근접함을 알 수 있다.

일반적인 방법으로 스펙트럼을 계산한다면 대략 0.8Hz 까지 밖에 이용할 수 없으나 앞의 방법을 적용하여 S파 window 구간내의 DC 수준을 최소화한 결과 ,약 0.3~0.4Hz 까지의 낮은 주파수 성분도 활용할 수 있음을 알 수 있다. 그림 10에는 wavelet 분해된 신호에 대한 스펙트럼을 함께 대비하였는데, 저주파로서 분리된 신호(wavelet approximation)는 10Hz이하의 스펙트럼을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 한편 그림 9의 방법을 여러 신호에 적용한 결과 저주파에서 S/N 비가 충분히 클 경우(약 10이상) 사용할 수 있는 방법이며, 그렇지 않은 경우에는 고주파 성분 스펙트럼에 큰 왜곡을 가져오는 것으로 평가되어 적용에 많은 주의를 필요로 한다.

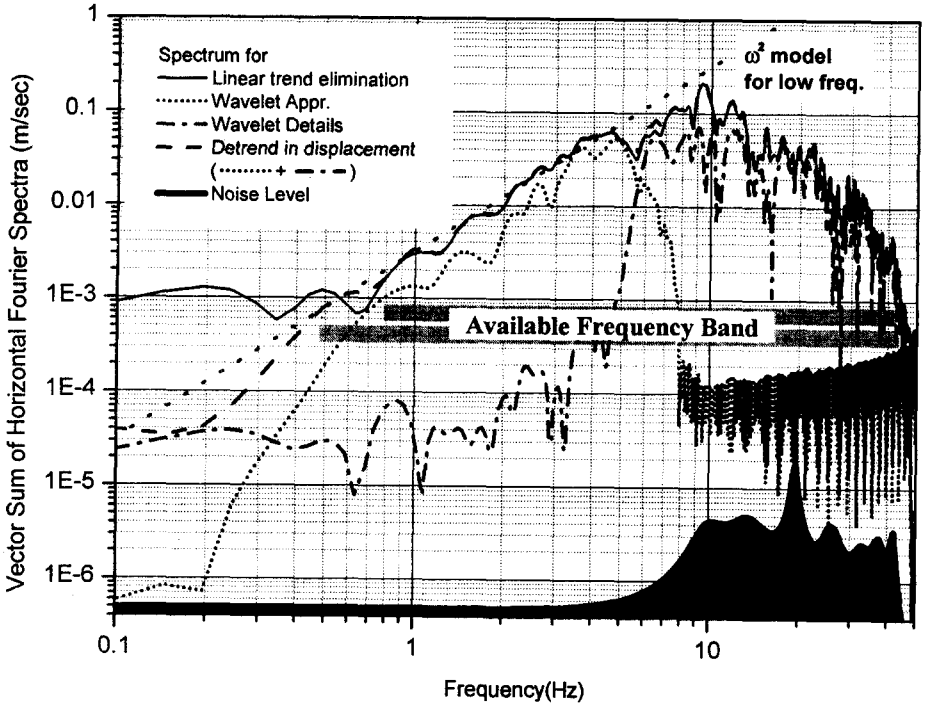

그림 10. 저주파 신호의 시간영역 적분을 통해 얻어진 변위 자료의 경향제거후 얻은 스펙트럼 계산 결과 비교·분석

3. 결 론

본 연구에서는 지진관측자료를 효과적으로 활용할 수 있는 몇 가지 방안에 대해 살펴보았다. 먼저 관측자료의 취사선택시 고려해야 할 일반적인 사항에 대해 살펴보고 이 중 대부분 지진관측소 검교정 상태는 속도계와 가속도계의 스펙트럼 비교만으로도 간단하게 평가할 수 있음을 제시하였다. 또한 시간영역에서 불량한 자료인 경우에도 주파수 영역에서는 선별적으로 스펙트럼 자료를 활용할 수 있음을 보여주었다. 포화정도에 따른 스펙트럼의 변화를 실제 자료를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 주요 주파수 대역에서는 스펙트럼의 변화가 거의 없음을 확인하였고 포화된 자료도 스펙트럼 분석에 활용될 수 있음을 보였다. 마지막으로 window 적용에 따라 저주파 스펙트럼이 왜곡됨을 확인하고 시간영역에서 적분을 통해 변위를 계산하여 변위 영역에서 경향을 제거한 후 스펙트럼을 계산하면 활용할 수 있는 저주파 영역이 더 넓어짐을 알 수 있다. 이때 시간영역에서의 적분은 고주파 스펙트럼 왜곡을 유발함으로 시간영역 적분은 wavelet 신호 분리를 통

해 얻은 저주파 신호에 대해서만 수행하였다. 향후 본 기법을 이용하여 스펙트럼 분석에 의한 지진원 및 지진파전달특성 평가 및 지진발생에 따른 응답스펙트럼 예측에 활용할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 2001년도 원자력연구개발 중장기계획사업 "원전 내진설계를 위한 기반 구축 연구" 과제로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] Thorne Lay and Terry C. Wallace, (1995), Modern Global Seismology, Academic Press

[2] Brune, J.N., (1970), "Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes", Journal of Geophysical Research, 75, 4997-5009.

[3] 연관희, 장천중, 이종림(2001), "전력연구원 지진관측망 계측지진 분석을 위한 사전자료 처리", 한국지진공학회 춘계학술발표회, 58-65.

[4] Matlab 6.0 User's Manual, The MathWorks, Inc., 2000.