

# 전력연구원 지진관측망 계측지진 분석을 위한 사전자료 처리

## Data Processing of earthquake data from KEPRI seismic monitoring system

연관희\*                      장천중\*\*                      이종림\*\*\*  
Yun, Kwan-Hee              Chang, Chun-Jung              Lee, Jong-Rim

---

### ABSTRACT

It is essential to know exactly what the response of the seismograph is inclusive of characteristic of the seismic sensors before using it for detailed seismic study. This is because the recorded earthquake data can be more or less affected by the overall system and need to be corrected properly to the analysis's best to obtain the right results. In this respect, two basic earthquake data processing techniques are introduced and applied, for validation purpose, to real data from KEPRI seismic monitoring system which were established for determining the site-specific characteristics of the earthquakes around the Nuclear Power Plants. One is conventional instrumental correction technique for velocity data and the other is for removing acausal ringing originated from using linear phase FIR filter. These techniques are all implemented in the time domain using digital filtering process and shows the desired results when applied to real earthquake data.

---

### 1. 서론

4개 원전부지 인근 8개 지진관측소에 설치된 전력연구원 지진관측망은 '99년 5월부터 원전 인 근지역에 발생하는 미소지진 뿐만 아니라 강지진을 계측하기 위해 운영되고 있으며, 실시간으로 원전부지의 지진동을 감시하여 원전 구조물 내의 지진감시시스템과 더불어 원전의 내진안전성 확보에 크게 기여하고 있다.

본 연구에서는 전력연구원 지진관측망을 구성하는 기기의 주파수특성에 대해 검토하고 이러한 특성이 계측기록에 어떠한 영향을 주는지 평가하고 실질적인 지진자료 분석이전에 고려해야 할 사항과 일반적인 자료처리 기법 및 적용사례에 대해 소개코자 하며 향후 전력연구원 지진관측망 자료를 사용코자 하는 관련 분야 종사자들의 이해를 증진시키고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 전력연구원 지진관측자료 처리시스템 개요

전력연구원 지진관측망의 특징은 공학적인 목적과 지진학적인 목적을 효율적으로 달성하기 위해, 지진감지기는 속도계와 가속도계로 이중화하고 지진기록계는 high dynamic range의 24 bits A/D

---

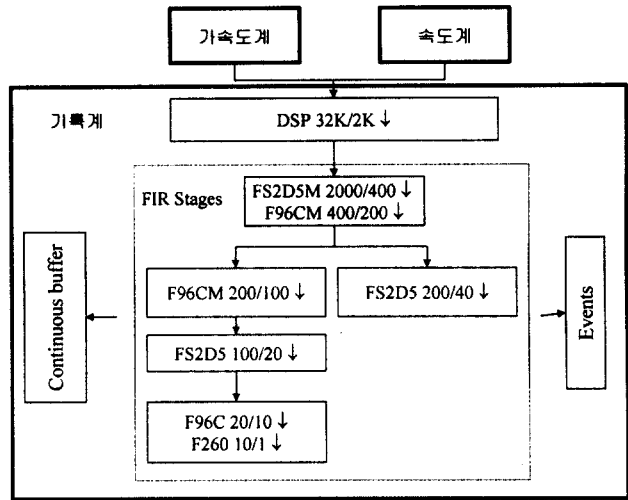
\* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원

\*\* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원

\*\*\* 한국전력공사 전력연구원 수석연구원, 정회원

보드를 장착하고 있으며 지진자료의 보관은 가속도 100Hz, 속도 20Hz에 대해 이루어지고 있다. 그림 1은 전력연구원 지진관측망의 자료처리 흐름을 나타내는 모식도이며 도표 1은 구성 기기의 중요한 특성을 정리한 표이다.

그림 1에서 FS2D5M, F96CM, FS2D5, F96C, F260 등은 기록계 내부에서 downsampling하기 위해 사용되는 FIR(finite impulse response) 디지털 필터의 이름이다([1]). 이 FIR 필터중 F96CM, FS2D5은 각각 100Hz, 20Hz 기록에 영향을 주는 필터의 이름이다(빗금친 영역). 그림 2는 F96CM과 FS2D5의 주파수 응답 및 impulse response를 나타내는 그림이다. 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 F96CM은 minimum phase인 casual 필터이며 FS2D5는 linear phase를 갖는 acausal 필터임을 알 수 있다. 일반적으로 높은 sampling rate을 갖는 기록은 초동을 분석하기 위한 용도로 사용되며 이를 위해 minimum phase FIR 필터를 사용하며 낮은 sampling rate을 갖는 기록은 시간영역에서 신호의 왜곡을 방지하기 위해 linear phase 필터를 사용한다([2]).

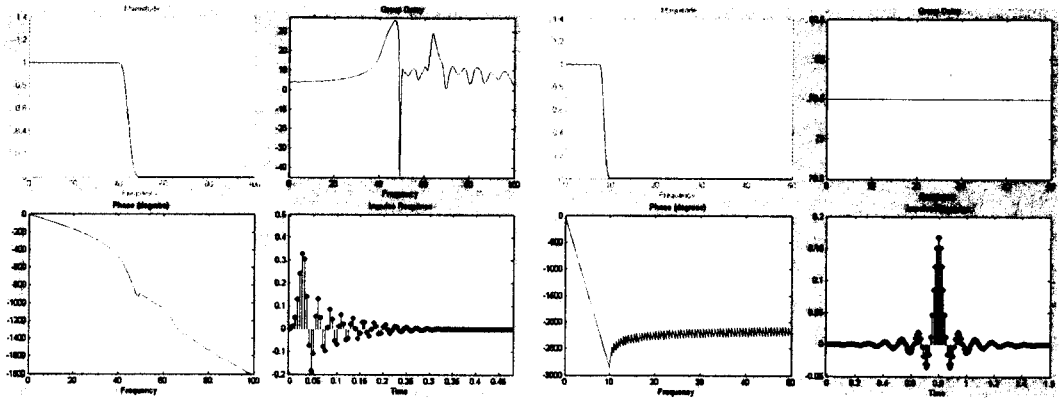


DSP: Digital Signal Processor ↓: down-sampling  
그림 1 전력연구원 지진관측망 지진자료처리 흐름도

도표 1 전력연구원 지진관측망 기기 사양

구성 기기	모 델	제 원
속도계	JC-V100-3D-CC (Markland)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type : moving coil</li> <li>• Component : Three components in one unit</li> <li>• Natural frequency: 1Hz</li> <li>• Damping                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- coil resistance: 4.8 k<math>\Omega</math></li> <li>- air damping ratio: 0.01</li> </ul> </li> </ul>
가속도계	FBA Episensor(ES-T) (Kinematic)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DC ~ 200Hz</li> <li>• 20V differential</li> </ul>
기록계	Q4128GS-10/E16 (Quanterra)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8 channel</li> <li>• Sampling Rate: 32,000Hz</li> <li>• LSB=2.34 <math>\mu</math>V, 최대 148dB</li> <li>• Timing: UTC에 대해 1 <math>\mu</math>sec</li> <li>• <math>\pm</math>20V differential 입력</li> </ul>

그림 3은 전력연구원 지진관측망 구성기기중 속도계에 대한 주파수 응답으로 대부분의 관측소는 critical damping 70%, 고유주파수 1Hz를 갖고 있으며([3]) 기록계의 입력단에서 8배 증폭되며 센서의 감도범위는 3.5 ~ 3.9 V/kine이다. 그림 3에서 알 수 있듯이 1Hz 부근 이하에서 주파수크기 왜곡이 있으며 위상은 전 주파수대역에서 비선형성을 갖고 있다([4]).



(a) F96CM

(b) FS2D5

그림 2 FIR 필터의 주파수응답 및 impulse response

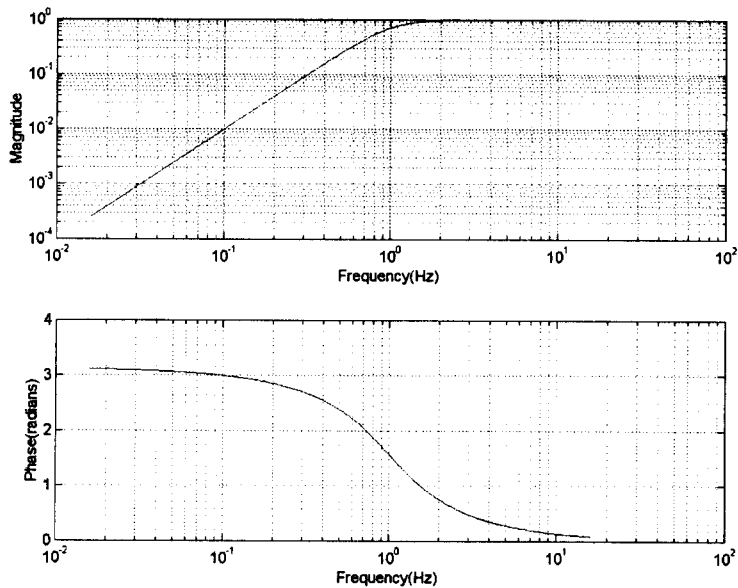


그림 3 속도계(JC-V100) 주파수응답 특성

가속도 센서로 사용되고 있는 EpiSensor-T의 진폭 스펙트럼은 0~50Hz 주파수 구간에서 상수에 가까우며 위상 스펙트럼은 선형으로서 미약한 시간지연을 갖고 있다([5]). 이하의 토론에서는 주파수 왜곡특성을 갖는 속도 센서에 대해서만 그 영향을 평가하기로 한다.

그림 4는 이상에서 언급한 센서와 기록계의 주파수 특성에 의해 계측되는 파형이 어떠한 영향을 받는지를 종합적으로 시뮬레이션한 결과이다. 지진파 입력 신호로는 6차 30Hz Butterworth 저주파통과 필터의 impulse response를 가정하였다. 그림 4의 (a), (b)로부터 속도계(JC-V100) 및 F96CM 필터에 의해 약간의 파형왜곡이 관찰되며 그림 4(b), (d)로부터 F96CM 및 FS2D5 필터에 의해 시간지연 현상을 확인할 수 있다. F96CM 필터의 시간지연은 0.0422sec(=4.22/100)로 기록되어 있으며

FS2D5의 시간지연은 0.795sec이며 이때 F96CM 필터의 시간지연의 의미는 nyquist 주파수 70%에서의 group delay time을 의미한다.([6]) 이러한 시간지연은 관측기록시 자동으로 보정됨으로 사후 분석시 별도의 보정이 필요없다. 한편 그림 4(d)에는 linear phase 필터인 FS2D5에 의해 도착시간 이전에 생성되는 acausal ringing 현상이 확인되고 있으며 이후에 이에 대한 문제점에 대해 토론코자 한다.

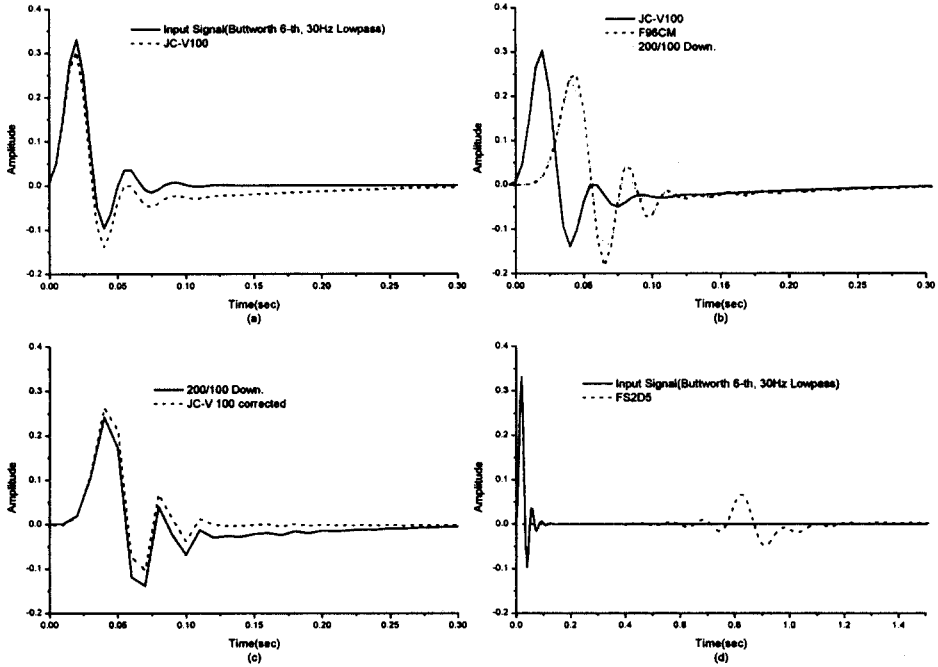


그림 4 전력연구원 관측시스템의 시간영역응답 시뮬레이션

## 2.2 속도계 계기보정

앞서 살펴 본 바와 같이 전력연구원 지진관측망에서 사용하는 JC-V100 속도계는 1Hz 미만에서 주파수응답이 왜곡됨으로 이 이하의 주파수를 지진분석에 활용하기 위해서는 계기보정이 필수적이다. 계기보정에 대한 여러 방법은 정립되어 있으나 본 연구에서는 시간영역에서의 디지털 필터 방법을 적용하여 계기보정을 수행하였다. 시간영역에서의 필터링을 위해서는 먼저 속도계의 아나로그 응답을 s-plane 영역에서 수치 모델화하고 이를 bilinear transform하여 이산영역인 z-plane 영역에서의 필터계수를 구하는 과정이 필요하며 다음과 같은 변환 관계식을 이용한다.

$$z = \frac{1 + (T/2)s}{1 - (T/2)s}, \quad \text{where } T = \text{sampling interval} \quad (1)$$

한편 s-plane 영역에서 JC-V100 속도계의 아나로그 응답은 다음과 같이 표시된다([7]).

$$T(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2h\omega_0 s + \omega_0^2}, \quad \omega_0 = 2\pi f_0 \quad (2)$$

여기서  $h$ 는 critical damping 값이며  $f_0$ 는 속도계의 고유진동수이다. 따라서 속도응답에 의한 왜곡을 제거하기 위해서는 아날로그 응답  $T(s)^{-1}$ 에 대한 이산영역에서의 필터계수를 계산해야 하며 이는 식(1), (2)을 이용하여 계산될 수 있다. 계산 결과는 식 (3)과 같이 표시되며 sampling rate에 따른 분모, 분자의 필터 계수  $b(n)$ ,  $a(n)$ 는 도표 2와 같다.

$$T(z) = \frac{b(1) + b(2) \cdot z^{-1} + b(3) \cdot z^{-2}}{a(1) + a(2) \cdot z^{-1} + a(3) \cdot z^{-2}} \quad (3)$$

도표 2에서 기록이 20Hz, 100Hz인 경우 이를 40Hz, 200Hz로 interpolation해서 속도보정을 실시하였는데, 이는 s-plane 위상응답과 z-plane 위상응답을 서로 최대한 일치시키기 위해서이다.

도표 2 Sampling rate에 따른 시간영역 속도계 보정 계수

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

그림 5는 아날로그 영역과 이산영역에서의 주파수응답을 비교한 그림으로 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

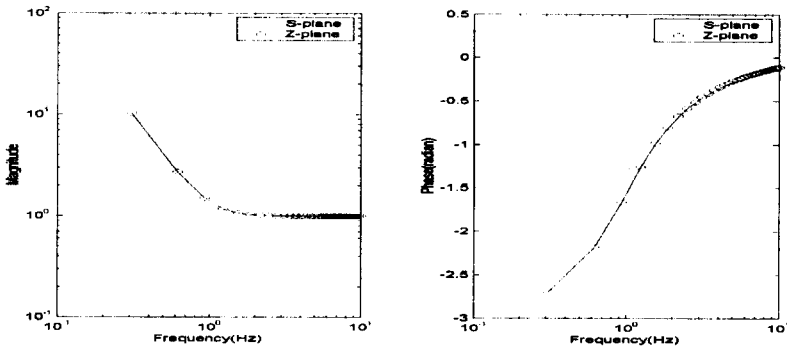


그림 5 속도계기보정을 위한 아날로그 주파수응답과 이산영역 주파수응답 비교

이상에서 도출된 디지털 필터 계수  $b(n)$ ,  $a(n)$ 을 이용한 속도계기보정은 식(4)에 의해 이루어질 수 있다(8).

$$a(1)y(n) = b(1)x(n) + b(2)x(n-1) + \dots + b(nb+1)x(n-nb) - a(2)y(n-1) - \dots - a(na+1)y(n-na) \quad (4)$$

도출된 속도계기보정 디지털 필터 계수  $b(n)$ ,  $a(n)$ 을 검증하기 위해 센서 검정이 잘 되었고 비교적 큰 규모의 지진(경주지진, WSB NS, 1999년 6월 2일)에 대해 기록된 속도자료와 가속도자료를 이용하여, 1Hz 미만이 계기보정된 속도자료와 가속도자료를 그림 6과 같이 비교하여 보았다. 이때 속도계 계기보정된 기록의 저주파는 0.2Hz 6차 buttworth 고주파 통과필터를 입력신호에 대해 순방향 그리고 역방향으로 적용하여 제거시켜 입력 신호의 위상에 변화가 없도록 하였다. 비교 결

과 그림 6에서와 같이 계기보정 결과가 왜곡이 없는 가속도 응답과 같 일치함을 확인할 수 있다.

일반적으로 지진기록에 대한 스펙트럼 분석은 기록의 일부분을 windowing하여 수행되는데 시간영역에서의 계기보정을 실시함으로써 window 구간 계측기록에 대한 1Hz 미만의 스펙트럼 정보를 최대한 활용할 수 있는 장점이 있다. 예로서 그림 7은 지진기록 중 S파의 스펙트럼을 계산하기 위한 window 영역을 나타내고 있다. 그림 8에는 window 영역에 대한 푸리에 진폭스펙트럼이 나타나 있으며(실선) 이를 식(2)를 이용해 진폭보정만을 수행한 경우(짧은 점선)와 시간영역에서 계기보정을 통해 위상까지 보정한 후 window 영역에 대해 다시 스펙트럼을 계산한 결과(긴 점선)를 보여 주고 있다. 푸리에 진폭스펙트럼 계산은 양끝 cosine tapering 5%를 실시한 후 수행되었다. 그림 8에서 알 수 있듯이 1Hz 이하의 저주파수에서는 진폭만을 보정한 결과와 시간영역에서 위상까지 보정한 결과가 큰 차이가 없으나 1Hz에서 멀어질수록 큰 차이를 나타내며, 진폭만 보정한 결과는 저주파로 갈수록 진폭의 크기가 발산함을 알 수 있다. 따라서 지진기록의 window 영역에 대한 스펙트럼 분석시, 1Hz 이하의 저주파에 대한 푸리에진폭을 안정적으로 계산하기 위해서는 시간영역에서의 필터링이 필요하다.

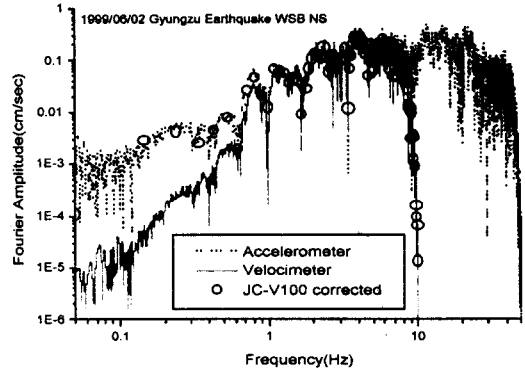


그림 6 실측자료를 이용한 시간영역 속도계기보정 검증

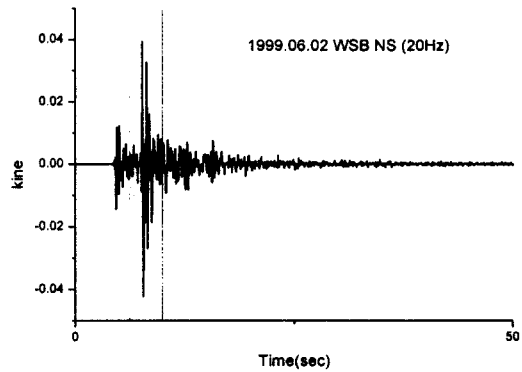


그림 7 시간영역에서의 계기보정의 타당성 검증에 이용된 지진기록 예제 및 S파 window 영역

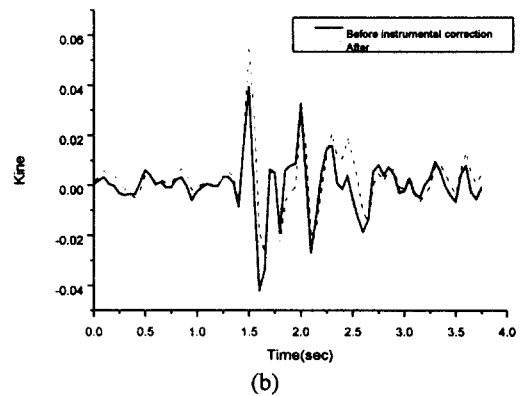
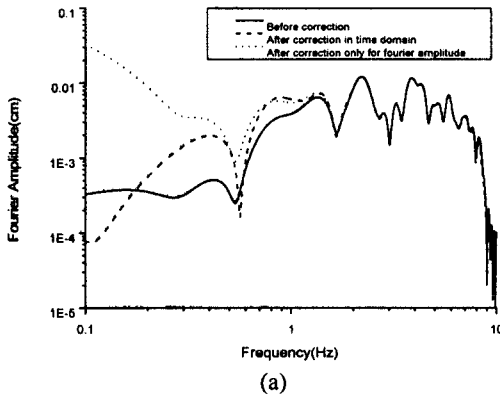


그림 8 그림 7의 window에 대한 스펙트럼 분석 결과비교 및 시간영역 속도계 계기보정 결과

## 2.2 Acausal ringing에 의한 파형왜곡 보정

그림 4(d)에서 문제점으로 언급한 바와 같이 기록계 FS2D5에 의해 acausal ringing 현상이 발생

하는데 이로 인해 지진파의 도착시간과 초동 방향을 결정할 수 없다. 이러한 현상은 그림 9에 나타난 바와 같이 FS2D5에 포함된 maximum phase 성분에 기인한다. 그림 9는 FS2D5 필터의 zero phase, minimum phase, maximum phase 성분을 나타내는 그림으로 각 성분 분해는 polynomial rooting 방법에 의해 수행되었다([9]). 이때 maximum phase인 경우는 z plane 영역에서 unit circle 외부에 있는 해를 조합한 신호이며 minimum phase, zero phase는 각각 unit circle 내부, unit circle 상에 존재하는 해에 대한 신호이다([8]).

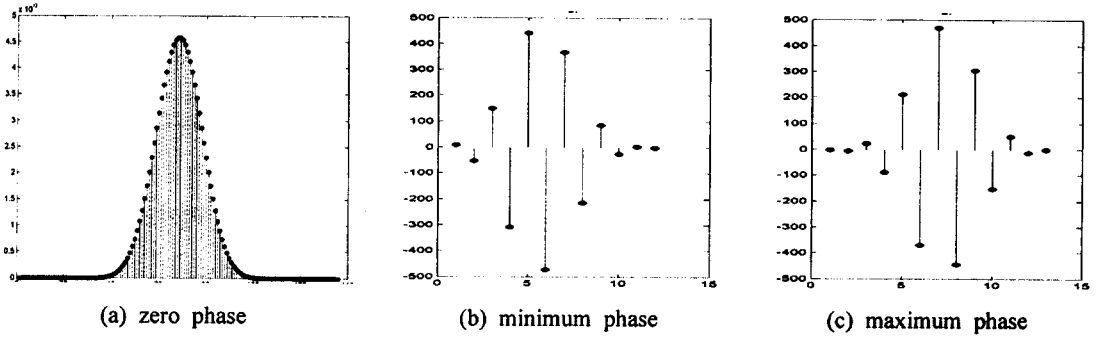


그림 9 Decomposition of the FS2D5 FIR filter

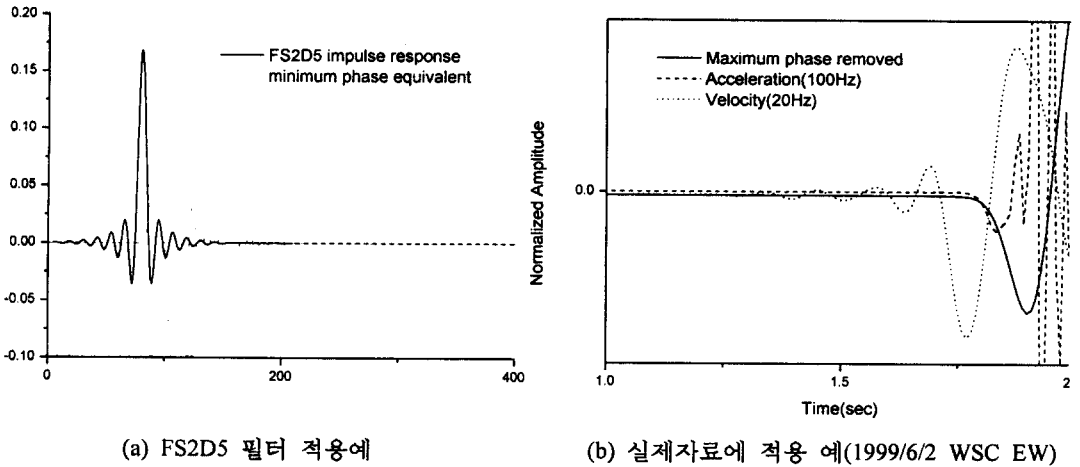


그림 10 Acausal ringing 현상을 제거하기 위한 필터링 결과

acausal ringing 현상을 제거하기 위해서는 maximum phase 성분을 동일한 푸리에 진폭스펙트럼을 갖는 minimum phase 성분으로 환산해야 하는데 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 Schebaum([9])이 사용한 방법을 적용해 보기로 한다. [9]에 의하면 maximum phase 성분을 포함한 filter에 의해 acausal ringing의 왜곡된 신호를 갖는 기록은 다음과 같은 식에 의해 보정될 수 있다.

$$y'[i] = \sum_{k=1}^{mx} a(k) \cdot y[i-k] + \sum_{l=0}^{mx} b[l] \cdot x[i-l] \quad (5)$$

여기서  $a[k] = \frac{f_{\max}[mx-k]}{f_{\max}[mx]}$  for  $k = 1$  to  $mx$ ,  $b[l] = \frac{f_{\max}[l]}{f_{\max}[mx]}$  for  $l = 0$  to  $mx$ 이다. 또한

$y[\cdot]$ ,  $x[\cdot]$ 은 각각 출력, 입력시계열의 역방향 시계열(time reversed sequence)을 의미하며  $f_{\max}[\cdot]$ 는 non-causal 필터의 maximum phase 성분을 의미한다. 식(5)로부터 필터의 maximum phase 성분인  $f_{\max}[\cdot]$ 을 계산할 수 있으면 시계열  $a[\cdot]$ ,  $b[\cdot]$ 를 계산할 수 있고 입력신호의 역방향 시계열에 대해 식(5)를 적용하고 그 결과의 역을 다시 취하면 acausal ringing 현상이 제거된 신호를 얻을 수 있다. 그림 10은 이상에서 계산된 필터계수  $a[\cdot]$ ,  $b[\cdot]$ 를 FS2D5와 실측 자료에 적용한 후 필터의 균지연값인 79(0.79초) 이동한 적용 결과를 보여주고 있다. 그림 10(b)의 경우 acausal ringing 현상에 의해 전혀 확인되지 않았던 초동의 방향과 도착시간이 식(5)의 필터링에 의해 확연히 나타나고 가속도와 동일한 경향을 갖고 있음을 알 수 있다. 그림 10(b)에서 20Hz 속도기록을 필터링하기 위해 FS2D5의 sampling rate인 100Hz로 interpolation 하였다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 전력연구원에서 운영하고 있는 지진관측망의 관측시스템에 대한 주파수특성을 살펴보고 계측기록에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 시뮬레이션 결과 속도계에 의해 1Hz 미만에서 주파수응답 왜곡현상이 나타났으며 20Hz 속도기록 downsampling시 사용되는 FIR 필터인 100Hz FS2D5에 의한 acausal ringing이 확인되었다. 속도계에 의한 왜곡을 보정하기 위해 시간영역에서 디지털 필터에 의한 속도계 계기보정(JC-V100)을 실제자료에 적용하고 결과의 타당성을 검증하였다. 특히 지진파의 window 기록에 대해 안정적인 저주파 스펙트럼을 계산하기 위해서는 시간영역에서의 계기보정이 필요한 것으로 사료된다. 20Hz 속도 자료를 이용한 도착시간 및 초동 방향 파악을 어렵게 하는 acausal ringing 현상을 제거하기 위해 FIR 필터의 maximum phase를 minimum phase로 대체하는 신호처리기법 소개하고 계측된 지진자료에 적용하여 타당성을 검증하였다. 향후 본 기법을 이용하여 스펙트럼 분석에 의한 지진원 및 지진파전달특성 평가 및 지진발생에 따른 응답스펙트럼 예측에 활용할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 2000년도 원자력연구개발 중장기계획사업 "원전 내진설계를 위한 기반 구축 연구"과제로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사 드립니다.

### 참고문헌

- [1] Quanterra Inc.(1998), ULTRA SHEAR (Software Configuration Guide, Rev. B)
- [2] Quanterra Inc.(1992), Quanterra Technical Note, Linear and Minimum-phase filters
- [3] MARK RAND CO. (1998), JC-V100-2D-CC (Operational Manual)
- [4] 전명순, 지현철, 전정수, 신인철(1994), 지진연구(KR-94(C)1-16), 한국자원연구소
- [5] Kinemetrics Inc. (1998), EpiSensor(User Guide), Document 301900
- [6] Personal communication with Robert Bob Busby with Quanterra, Inc.
- [7] 지현철 외 11인(2000), 지진연구망 구축 및 운영(KR-00-(T)-07), 한국자원연구소
- [8] Alan V. Oppenheim and Ronald W. Schaffer (1989), Discrete-Time signal processing, Prentice Hall Signal Processing Series
- [9] Frank Scherbaum (1996), Of Poles and Zeros - Fundamentals of Digital Seismology, Kluwer Academic Publ.