

# 진동대를 이용한 구조물의 내진실험시 잡음의 영향에 관한 고찰

## Noise Effects on Shaking Table Test of Structures

최 인 길\*                      서 정 문\*\*  
Choi, In-Kil                      Seo, Jeong-Moon

---

### ABSTRACTS

The effect of noise on the input motion for the seismic test of structures using shaking table was studied. Table motions usually contain high frequency contents which influence the PGA of input motions. It was shown that the noise influenced PGA much with minor changes in high frequency contents. The Butterworth bandpass filter can be effectively used. The adequacy of the table motion should be judged based on both the frequency contents and the PGA.

---

#### 1. 서론

근래에 와서 토목 및 건축구조물이 대형화되고 있으며, 우리나라에서의 지진발생회수가 증가되고 있는 점을 감안하여 구조물의 내진안전성에 대한 관심이 고조되고 있다. 이에 따라 토목 및 건축구조물의 내진해석 및 설계에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 특히 열악한 실험환경에서도 구조물의 내진성능 평가를 위한 진동대 실험이 활발히 수행되고 있다<sup>(1)~(3)</sup>. 진동대 실험시 진동대 상의 진동이 요구되는 진동에 비해 고진동수 성분을 많이 내포하게 되는데 이는 유압가력기의 파형왜곡이나 진동대, 고정장치 및 실험체간의 이완, 그리고 실험체 자체의 이완 등에 의해 주로 발생된다. 그 외에 실험장비의 성능한계 또는 주위의 환경에 의해 진동대 운동에 잡음이 섞이게 된다. 이러한 잡음은 입력 및 응답의 첨두(Peak) 진폭 및 진동수특성(Frequency Content)에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 구조물 및 기기의 내진성능 평가를 위하여 많이 활용되고 있는 진동대를 이용한 실험에서 진동대 및 Background의 잡음으로 인해 지진동의 입력성분에서 나타나는 잡음의 영향을 제거하여 정확한 거동예측을 위해 필수적인 잡음에 의한 영향을 분석해 보고자 한다. 먼저 본 연구에서는 우리나라의 역사지진 재평가를 위해 수행된 일련의 진동대 실험에 사용된 입력지진동과 계측결과를 사용하여 입력지진 및 계측기록에 포함된 잡음을 분석하고 Butterworth 필터<sup>(4)(5)</sup>를 이용하여 이를 제거하여 원래의 기록과 비교함으로써 진동대실험에 있어서의 잡음의 영향을 분석하였다.

---

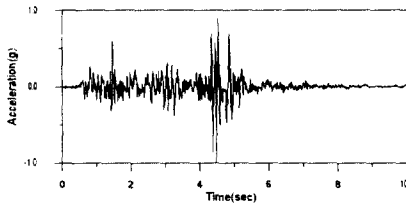
\* 한국원자력연구소 선임연구원, 정회원

\*\* 한국원자력연구소 책임연구원, 정회원

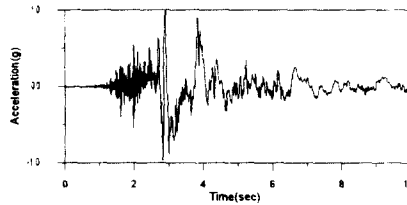
## 2. 진동대실험의 개요

본 연구에서는 본 연구진에 의해 수행된 진동대실험의 결과를 이용하였다. 본 연구진에서 수행한 진동대 실험<sup>(6)~(8)</sup>은 우리나라의 지진재해도 분석에 있어서 불확실성 제거의 일환으로 우리나라의 역사지진 기록을 실험을 통하여 재현함으로써 당시의 기록상에 나타난 지진의 진도를 역으로 추정하기 위하여 수행되었다. 본 실험이 진행되는 동안 진동대 옆의 반력벽에서는 몇가지 피로실험이 동시에 진행되고 있었다.

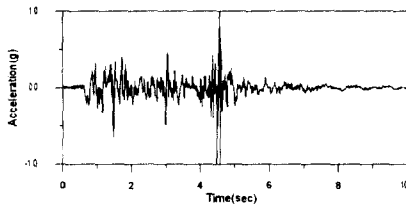
이 실험에 사용된 모델은 고대 우리나라의 전통적인 평민의 주거양식으로 초가삼간을 선정하고, 초가삼간에 대한 1/4 모델을 제작하여 암반지반과 연약지반에 대한 거동 및 파괴특성 평가를 위한 실험을 수행하였다. 입력지진으로 1985년 12월 북미 동부에서 발생한 Nahanni 지진기록 및 미국 서부의 Imperial Valley에서 1979년에 발생한 지진중 Array No. 5에서 측정된 지진기록을 사용하였다. 실험시 사용된 입력지진은 실제 지진기록중 강진구간 20초의 기록에 상사법칙을 적용하여 사용하였으며, 각각의 최대 가속도를 1g로 정규화한 가속도-시간이력은 그림 1 및 그림 2와 같다.



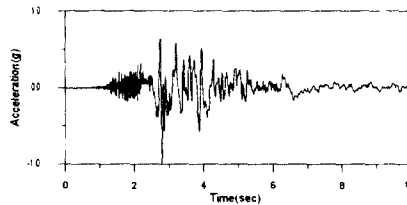
(a) 수평방향(x)



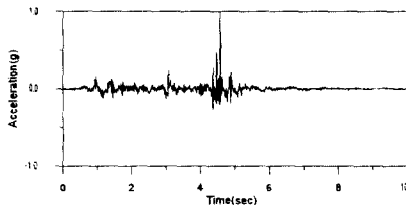
(a) 수평방향(x)



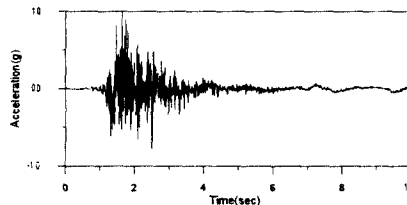
(b) 수평방향(y)



(b) 수평방향(y)



(c) 연직방향



(c) 연직방향

그림 1 Nahanni 지진의 가속도-시간 이력 (PGA=1g, 상사율적용)

그림 2 Imperial Valley 지진의 가속도-시간 이력(PGA=1g, 상사율적용)

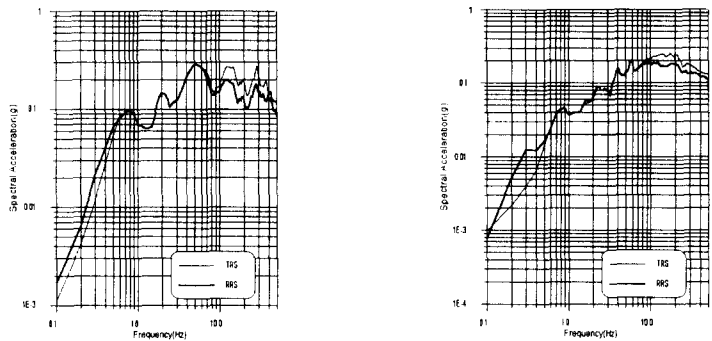
### 3. 지진동 계측 및 비교

실험에 사용한 진동대는 한국 기계연구원이 보유하고 있는 MTS진동대로서 최대적재하중은 30t이며 최대 가속도는 수평의 경우 1.5g, 수직은 1.0g 이며, 최대 가진주파수는 50Hz이다. 또한 동시계측능력은 56 Channel로서 본 실험에서는 9개의 가속도계(B&K4370)와 ±25mm 용량의 LVDT(Tokyo Sokki) 6개를 사용하여 축소모델의 가속도와 변위를 측정하였다. 이와는 별도로 진동대에 설치된 가속도계를 이용하여 진동대의 가속도-시간 이력을 측정하여 진동대의 성능과 정확한 입력지진동으로의 가진 여부를 분석하였다.

진동대상의 가진성능 평가를 위하여 수행한 실험에서 획득한 진동대상의 가속도-시간이력을 보면 많은 고진동수 성분의 잡음이 내포되어 있음을 알 수 있었다(그림 6 (a), 7 (a) 참조). 따라서 본 연구에서는 진동대상에서 획득한 가속도-시간이력의 성분을 분석하였다. Imperial Valley 지진기록을 이용한 실험(PGA=0.08g)에서 요구 지진동의 응답스펙트럼(Required Response Spectrum; RRS) 및 진동대 상에서 계측된 지진동의 응답스펙트럼(Test Response Spectrum; TRS) 및 각각의 Fourier 스펙트럼을 그림 3과 4에 비교하여 나타내었다. 이때 응답스펙트럼의 감쇠비는 5%이다. 그림에서 보는 바와 같이 약 10 Hz 이상의 고진동수 성분에서 TRS가 크게 나타났으며 반면에 0.8Hz 이하의 저진동수 성분에서는 대체적으로 작게 나타났다. 즉, 진동대의 성능곡선에서 변위로 제어되는 0.8Hz 이하에서는 TRS가 RRS에 비해 작게 나타났다. 그림 5에는 Nahanni 지진기록을 이용한 실험(PGA=6.0g)에서의 응답스펙트럼을 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 수평(x)방향 입력의 경우 Imperial Valley 지진실험과 동일한 양상을 나타내고 있으나 수평(y) 방향의 경우 10Hz를 전후하여 이보다 큰 진동수 영역에서는 TRS가 크게 나타났으며 이보다 작은 진동수영역에서는 전반적으로 작게 나타났다. 또한 연직방향의 경우 전체적으로 TRS가 크게 나타났다.

축소모델의 실험에서 구한 추가삼간 모델의 고유진동수는 탄성한계내에서 x 및 y 방향에서 각각 3.3Hz, 3.5~4.3Hz로 나타났으며 추가삼간의 큰 비선형성으로 인한 대변형 상태에서의 고유진동수는 각각 1.3Hz, 2.0~2.5Hz로 나타났다. 이러한 구조물의 고유진동수를 고려할 경우 본 실험에서의 진동대상의 가진은 주요 진동수대에서는 적절히 입력되었음을 알 수 있다.

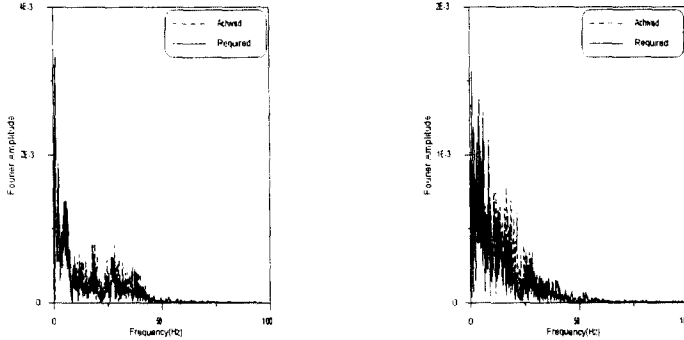
이상의 결과로 볼 때 두 지진기록을 이용한 실험에서 주요진동수대의 입력은 적절히 이루어졌으나 진동대상에 나타난 최대가속도값은 크게 입력되었음을 알 수 있다.



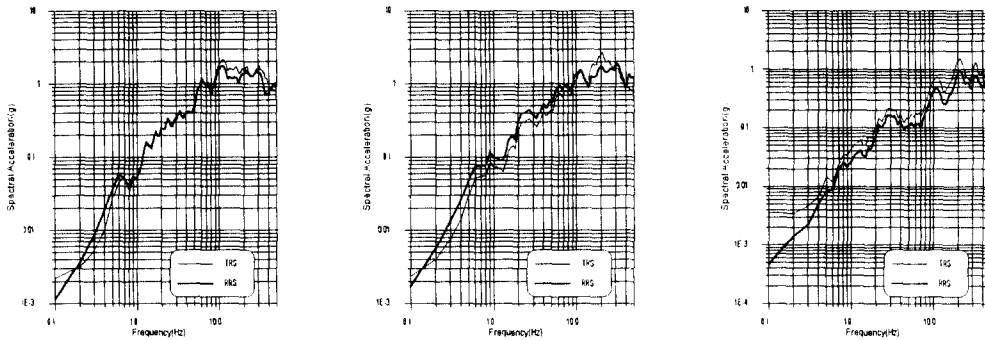
(a) 수평(x) 방향

(b) 수평(y) 방향

그림 3 Imperial Valley 지진 실험시 입력운동의 응답스펙트럼 비교



(a) 수평(x) 방향 (b) 수평(y) 방향  
 그림 4 Imperial Valley 지진 실험시 입력운동의 Fourier 스펙트럼 비교



(a) 수평(x) 방향 (b) 수평(y) 방향 (c) 연직 방향  
 그림 5 Nahanni 지진 실험시 입력운동의 응답스펙트럼 비교

#### 4. 잡음제거 방법

일반적으로 진동대 실험에 의해 구조물 내진성능을 평가할 경우 저진동수 특성을 갖는 구조물의 경우 변위응답을 이용하여 평가하는 것이 바람직하며, 반대로 고진동수 특성을 갖는 구조물의 경우 가속도 응답 또는 가속도응답 스펙트럼의 비교에 의한 평가가 바람직하다<sup>(9)</sup>.

진동대 실험에서는 여러 가지 원인에 의해 가진기록 및 응답기록의 계측에 많은 잡음이 내포되어 있다. 이러한 잡음은 주로 고진동수 영역에서 나타나게 되며<sup>(9)</sup> 이는 ZPA의 증가는 물론 입력 및 응답기록상에 오차를 가져오게 된다. 특히 모드응답 실험을 통하여 구조물의 고유진동수를 구하고자 할 경우 이러한 잡음은 고유진동수의 측정에 혼선을 가져오게 된다<sup>(10)</sup>. 이러한 계측기록상의 잡음을 제거하기 위하여 본 연구에서는 비교적 활용도가 높은 Butterworth 필터를 이용하였다. 잡음제거를 위하여 먼저 계측기록을 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하여 주파수영역으로 변환하고 그 결과 얻은 복소 Fourier 계수에 Butterworth Band Pass 필터를 적용하고, 이를 다시 FFT에 의해 시간영역으로 변환하는 방법을 사용하였다.

Lowpass Butterworth 필터는 기본적으로 저역필터(Low Pass Filter)로서 다음과 같은 주파수 응답함수(1 rad/sec Cutoff Frequency)로 나타낼 수 있다<sup>(4)(5)</sup>

$$|H(\bar{\Omega})|^2 = \frac{1}{1 + (\bar{\Omega}^2)^N} \quad (1)$$

여기서,  $N$ 은 필터의 차수를 나타낸다.  $\bar{\Omega} = \frac{\omega}{\omega_L}$  로  $\omega_L$ 은 Low Cutoff Frequency를 나타낸다.

고역필터(High Pass Filter) 및 대역필터(Band Pass Filter)는 저역필터의 적절한 진동수변환으로 쉽게 규정할 수 있다.

## 5. 잡음영향 분석

실험에서 요구하는 입력지진동의 정확한 모사를 평가하기 위하여 진동대상에서 가속도계를 이용하여 입력운동을 측정하고 필터를 이용하여 고진동수 성분을 제거한 후 그 결과를 비교하였다. 고진동수 성분을 제거하기 위해 Butterworth Bandpass Filter를 사용하였으며 이때 고역 차단진동수(Cutoff Frequency)는 50Hz로 하였으며 이때 필터의 차수(Number of Pole)는 5로 하였다. 저진동수 영역에서의 필터링은 수행하지 않았다. 앞서 기술한 바와 같이 실험에서 사용한 기계연구원에서 보유하고 있는 진동대의 가진진동수는 50Hz 이나 그림 4의 진동대상에서 측정된 입력지진동의 Fourier Spectrum을 보면 50Hz 이상의 성분이 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 또한 입력지진동이 진동대상에서 가진될 때 10Hz 이상의 고진동수 영역에서 상당히 증폭되어 가진되었음을 알 수 있다. 따라서 진동대의 가진한계인 50Hz 이상의 잡음만을 제거하고 이러한 잡음에 의한 최대가속도 값의 변화에 대하여 고찰하였다.

Imperial Valley 지진시의 진동대 상에서 측정된 입력지진과 잡음이 제거된 Fourier Spectrum을 FFT를 이용하여 시간영역으로 역변환한 가속도-시간 이력을 그림 6에 비교하여 나타내었다. 또한 Nahanni 지진기록을 이용하여 실험한 경우의 진동대상에서 측정된 입력지진동과 잡음제거 후의 가속도-시간이력을 각 성분별로 그림 7에 나타내었다. 이때 사용한 필터는 Imperial Valley 지진 처리에 사용한 것과 동일하다. 그림 6과 7에서 보는 바와 같이 50Hz 이상의 잡음을 제거함으로써 가속도-시간 이력상에서 잡음이 제거된 것을 잘 알 수 있으며, 또한 그림 4의 Fourier Spectrum상에서 볼 때 50Hz 이상에서의 진동수성분의 크기가 매우 미미하나, 이러한 미세한 부분만을 제거하였음에도 불구하고 가속도-시간이력의 최대값에 많은 차이가 발생함을 알 수 있다.

각 실험조건에서의 입력요구지진동, 진동대상의 실제 입력지진동 및 잡음을 제거한 지진동의 최대값을 표 1에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 Imperial Valley 지진을 이용한 실험에서는 의도한 최대지진동값은 0.08g 이었으나 실제 진동대상에서 계측된 값으로 보면 0.097g 와 0.120g로 최대가속도가 20~50% 크게 나타났다. 그러나 이들 입력지진동에서 잡음을 제거한 후의 최대가속도값은 각각 0.081g 및 0.109g로 나타났다. 또한 Nahanni 지진을 이용한 실험의 경우 진동대상에서 측정된 최대가속도가 5~20% 크게 측정되었으나, 이들 기록에서 잡음을 제거할 경우 입력요구지진동의 최대가속도에 비해 5~15% 정도 작게 나타났다.

Imperial Valley 지진실험의 진동대상에서 계측된 가속도-시간이력을 필터링한 후, 필터링된 가속도-시간이력의 응답스펙트럼(Filtered TRS)을 TRS와 비교하였다. 또한 필터링 전후의 Fourier 스펙트럼을 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 고진동수 영역의 잡음을 제거함으로

인해 응답스펙트럼의 고진동수의 영역에서 TRS에 비해 낮은 응답수준을 보여주고 있으며, Fourier 스펙트럼을 비교해 보면 50Hz 이상의 고진동수 성분이 거의 제거된 것을 알 수 있다.

표 1 입력지진의 최대가속도비

Input Motion	Component	Required(g) (A)	Achieved(g) (B)	Filtered(g) (C)	B/A	C/A
Imperial Valley Eq.	x	0.080	0.097	0.089	1.21	1.01
	y	0.080	0.120	0.111	1.5	1.39
Nahanni Eq.	x	0.600	0.627	0.515	1.05	0.86
	y	0.600	0.630	0.507	1.05	0.85
	z	0.400	0.479	0.374	1.20	0.94

이상의 결과로 볼 때 실험시 요구되는 가속도 수준에 비하여 진동대상에서 측정된 입력 지진동의 최대가속도값이 대체적으로 크게 나타나고 있다. 이는 고진동수 특성을 갖는 잡음에 의한 것으로서, 진동대의 가진범위를 넘는 고진동수 영역에 대한 필터링을 통하여 실제 구조물에 영향을 미치는 진동수 범위내에서의 최대 가속도값을 얻을 수 있다. 또한 표 1에서 보는 바와 같이 비교적 고진동수 특성이 우세한 입력지진을 사용할 경우 진동대상에서 측정된 가속도 수준이 요구수준에 근접되어 있을 경우, 가진 진동수 범위내의 지진동으로 필터링 할 경우 요구수준보다 작은 값으로 가진 되었음을 알 수 있다.

진동대실험을 통하여 일정한 가속도 수준의 지진동에 대한 구조물의 응답을 평가할 경우 가진 범위내에서의 필터링을 통하여 정확한 입력지진동 수준의 평가가 요구되며, 필요에 따라서는 측정된 구조물 응답 역시 필터링을 통하여 응답가속도 수준을 평가하여야 한다.

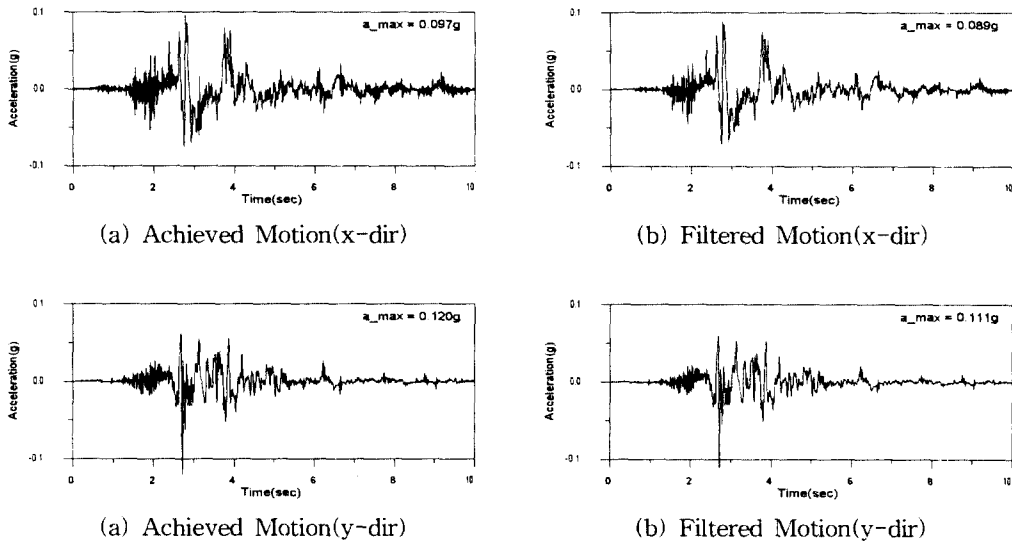
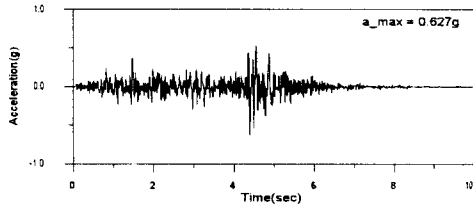
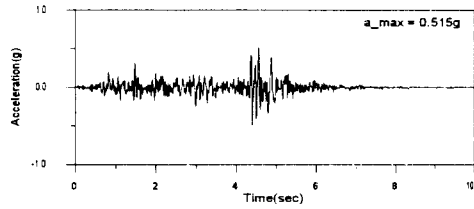


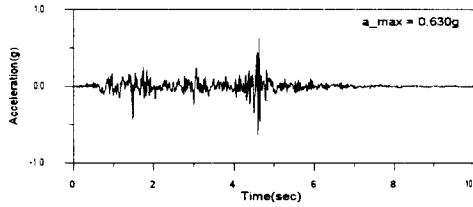
그림 6 입력지진동 비교(Imperial Valley Earthquake)



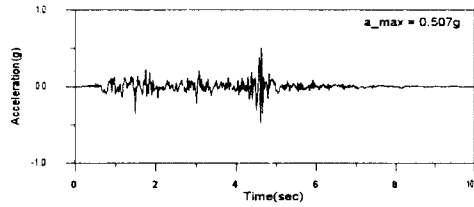
(a) Achieved Motion(x-dir)



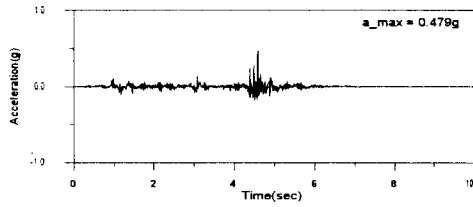
(b) Filtered Motion(x-dir)



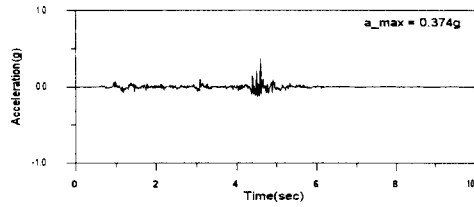
(a) Achieved Motion(y-dir)



(b) Filtered Motion(y-dir)



(a) Achieved Motion(z-dir)



(b) Filtered Motion(z-dir)

그림 7 입력지진동 비교(Nahanni Earthquake)

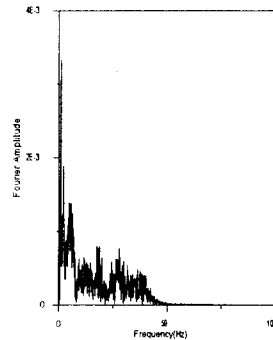
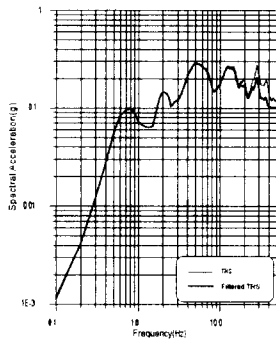


그림 8 Imperial 지진실험 가진기록의 필터링효과(x-dir)

## 5. 결론

진동대실험에서 실험에서 의도한 입력지진동의 정확한 모사의 평가와 여러 원인에 의한 입력 지진동의 잡음의 영향을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 진동대 실험시 정확한 입력 및 응답의 평가를 위해서는 먼저 입력지진동의 모사에 대한 정확성 여부를 판단하기 위하여 진동대상에서 실제 가진 기록의 계측이 요구되며 계측된 지진 동기기록의 분석을 통하여 가진 기록의 특성을 확인하고 보정을 통하여 요구지진동의 정확한 모사가 요구된다.
- 요구되는 입력운동에 비해 실제 진동대상에서 가진된 입력지진이 고진동수 영역에서 매우 크게 증폭되어 가진됨으로 인하여 입력 지진동 수준에 대한 응답이 과도하게 평가될 수 있으며, 특히 10Hz 이상의 고유진동수를 갖는 구조물의 경우 그 응답이 실제보다 과대평가 될 수 있다. 따라서 구조물 응답의 평가시 최대가속도값을 적절한 비교변수로 사용하기 위해서는 많은 주의가 필요하다.
- 또한 진동대의 성능한계에 의해 발생하는 저진동수 영역에서의 과소한 가진으로 인하여 저진동수 특성을 갖는 구조물의 응답이 과소평가 될 수 있다.
- 의도하는 실험의 목적 및 용도에 따라 TRS 및 RRS의 비교/평가 및 구조물의 응답 시간이력에 대한 필터링을 수행하여야 구조물의 지진시 응답에 대한 정확한 평가가 가능할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 이한선, 우성우, 김병현, "4m x 4m 진동대를 이용한 구조모델의 동적실험", 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제1호, 1997.
2. 송영훈, 김진구, "1/4 철골구조물을 이용한 건물 기초분리장치의 진동대실험", 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제2호, 1997.
3. 박형기, 조양희, 이종립, 김성택, "ASME III 글로브밸브의 내진검증을 위한 진동대시험", 1998년도 춘계 한국지진공학회 학술발표회 논문집, Vol. 2, No. 1, 1998.
4. Lawrence R. Rabiner and Bernard Gold, *Theory and Application of Digital Signal Processing*, Prentice-Hall, 1975.
5. John G. Proakis and Dimitris G. Manolakis, *Digital Signal Processing ; Principles, Algorithms, and Applications*, 3rd ed., Prentice-Hall, 1996.
6. 서경문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, 허택영, "전통 초가삼간 가옥의 지진응답 특성실험", 1997년도 추계 한국지진공학회 학술발표회 논문집, Vol. 1, No. 2, 1997.
7. 서경문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, "전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가실험(I) : 암반 지반 조건, 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제4호, 1997.
8. 서경문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, "전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가실험(II) : 연약 지반 조건, 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제4호, 1997.
9. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., *IEEE Recommended Practices for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations*, ANSI/IEEE 344-1987, 1987.
10. M. D. Tucker, *An Adaptive Filtering Technique for Removing Periodic Noise from Modal Response Data*, SAND-87-1332C, 1987.