

## 동조액체감쇠기의 진동제어 성능연구

# A Study on Control Performance of Tuned Liquid Damper

우 성 식\*  
Woo, Sung-Sik

우 운 택\*\*  
Woo, Woon-Taek

정 란\*\*\*  
Chung, Lan

### Abstract

This paper presents the results of experimental investigations on the response control performance of tuned liquid damper(TLD). Steel frame building model is used for the experiments. Shaking table is controled by velocity consol. Experimental variables are mass ratios( $\mu$ =mass of TLD/mass of structure), shape ratio(depth of water/ length of TLD), number of nets( $N$ ) and tuned frequency ratio( $f_l/f_s$ ).

Results show that the greater the mass ratio is, the better the control performance is. So, it can be concluded that TLD is able to be used as a device of vibration control in the remodeling of existing buildings that are not designed to resist earthquake

**Keywords:** Apartment, Remodeling, Vibration Control, Tuned Liquid Damper

## 1. 서론

### 1.1 연구의 목적

1988년 제정된 내진규정 적용 이전에 설계된 공동주택의 경우 내진설계가 되어 있지 않기 때문에 리모델링 시 리모델링 공사비 중 내진 보강을 위한 공사비가 많은 부분을 차지하고 있다. 때문에 본 연구에서는 이미 건축물에 설치되어 있는 물탱크를 이용하여 기존 보강법보다 경제적인 진동제어장치를 개발하는 것이 목적이다. 이러한 액체를 이용한 진동제어장치로는 동조액체감쇠기(TLD: Tuned Liquid Damper)<sup>1)</sup>, 동조액체기둥감쇠기(TLCD: Tuned Liquid Column Dapmer)<sup>3)</sup>등이 있다. 이와 같은 진동제어장치의 경우 경제성 및 유지관리 면에서 다른 진동제어기술보다 우수하여 이미 미국, 일본에서 활발한 연구, 개발이 이루어져 있다. 실제로 미국 뉴욕의 Random House의 경우 TLCD를 진동제어장치로 사용하여 부가감쇠장치 없이 골조에만 의존하여 횡력에 저항하는 구조 시스템에 비해 약 7~8백만 불(약 100억 원, 총 공사비대비 약 5%)의 절감 효과가 있는 것으로 조사되었으며, 일본의 경우 Shin Yokohama 프린스 호텔에 TLCD를 적용한 사례가 있다. 하지만 기존의 연구는 신축되는 건축물에 적용되고 있기 때문에 본 연구에서 목표로 하는 기존 공동주택에 적용을 위한 연구는 수행되어 있지 않다. 때문에 우리나라의 벽식 구조물의 특성에 맞는 동조액체진동제어장치 개발이 필요하며, 이러한 연구를 수행하기 위한 사전연구로서 동조액체감쇠기의 진동제어 특성에 관한 소형 모델실험을 실시하였다.

## 2. 실험 장치의 구성

실험은 소형진동대로 실시되었으며, 그림 2에서 나타낸 바와 같이 높이 500mm, 두께 3mm의 기둥 프레임과 600×600×20, 400×600×20 바닥판을 각각 3장씩 사용하였고, 1축방향의 동적신호를

\* 학생회원 · 단국대학교 건축공학과, 석사과정  
\*\* 정회원 · 단국대학교 건축대학 건축공학과, 초빙교수  
\*\*\* 정회원 · 단국대학교 건축대학 건축공학과, 교수

측정할 수 있도록 기둥의 약축 방향으로 가진하였다. 질량과 강성은 각각 바닥판, 프레임에 모두 집중된 것으로 가정하였다. 진동대는 Labview 프로그램에 의해 제어되며, 진동대는 AC 서보모터를 사용하였고 내셔널 인스트루먼트사의(NI) BNC-2110 D/A 보드로 제어하였다. 가속도 및 동적 변위는 각각  $\pm 1G$  가속도계와  $\pm 100mm$  용량의 동적변위계(LVDT)로 측정하였다.

### 3. 실험내용

#### 3.1 자유진동실험

모델구조물의 고유진동수 및 감쇠비, 프레임의 강성등을 검토하기 위하여 모델구조물에 백색잡음을 가진하여 그림 1(a)와 같이 가진이 종료된 시점부터 진동이 완전히 종료된 시점까지의 가속도 데이터를 사용하였다. 실험결과 모델구조물의 고유진동수( $f_i$ )는 1.26Hz(그림 1(b))를 나타냈고, 강성( $k_s$ )은 9.74kgf/cm, 감쇠율( $c_s$ )은 1.1%로 나타났다.

#### 3.2 실험변수

##### 1. 동조 진동수비( $f_i/f_s$ )

본 실험에서 모델구조물의 자유진동 실험을 통해 얻은 고유진동수( $f_s$ ) 1.26Hz와 식 (1)<sup>1)</sup>을 이용한 TLD의 고유진동수( $f_i$ )가 일치하도록 TLD 형상을 결정하였다.

표. 1 실험체 변수산정

질량비 ( $m_l/m_s$ )	형상비 ( $h/L$ )	감쇠네트의 수 (N)	동조진동수비 ( $f_i/f_s$ )
0.01, 0.02	0.22	0, 1, 3	1

주)  $m_l$ : 물의 질량,  $m_s$ : 모델구조물 질량,  $L$ : 실험체 길이,  $h$ : 수심

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{L} \tanh(\pi \Delta)} \quad \text{식 (1)}$$

여기서,  $f_i$ 은 TLD의 고유진동수(Hz)이고  $g$ 는 중력가속도( $9.8m/s^2$ )이며,  $\Delta$ 는 형상비( $h/L$ )이다.

##### 2. 형상비( $\Delta$ )<sup>1),5)</sup>

형상비는 TLD의 길이(L)에 대한 수심(h)의 비로 TLD의 고유진동수가 자유진동실험 결과를 통해 확인한 모델구조물의 고유진동수와 일치하게 제작하기 위해서 320mm의 길이(L)와 70mm의 수심(h)으로 형상비를 0.22로 결정하였다.

##### 3. 질량비( $m_l/m_s$ )<sup>3)</sup>

모델 구조물과 물질량의 비로 물질량의 증가에 따른 TLD의 제어성능을 확인하기 위하여 모델 구조물의 질량 150kg에 대해 1, 2%의 질량비를 적용하여 물의 질량이 각각 1.5kg, 3kg인 TLD를 사용하였다. 이때, TLD의 진동수에 영향을 주는 TLD 모델의 형상비를 변화시키지 않기 위해 그림 3(b)와 같이 폭을 달리하였다.

##### 4. 감쇠네트(N)<sup>5)</sup>

TLD 자체의 부족한 제어력을 보충하기 위해 설치하는 추가 제어장치로서, 본 실험에서는 개구율 70%의 철망을 사용 TLD 중앙부에 1, 3개 설치하였을 때 제어성능을 확인 하였다.

#### 3.3 실험체 개요

실험체는 그림 2와 같이 진동대 위에 모델구조물을 설치하고 그 위에 감쇠기모델을 설치한 형태이고, TLD는 실험 시 고려된 변수들 중 고유진동수비와 형상비, 질량비를 고려하여 그림 3 (a)와 같이 320×220으로 제작하였으며, 그림 3(b)와 같이 70mm, 140mm 두 가지 형태로 제작하였다.

### 3.4 입력 하중

본 실험에서는 표 2와 같이 백색잡음, 조화하중을 사용하여, 각각 30초간 가진 하였다. 백색잡음 실험에서 하중의 세기가 TLD의 제어성능에 미치는 영향을 검토하였다. 조화하중은 모델구조물의 고유진동수와 일치하는 주파수 1개와 일치하지 않는 주파수 2개를 가진 하였고, 강도에 따른 영향 분석과 주파수간의 동조 시와 비동조 시, 가진된 주파수의 크기에 의한 TLD 성능을 확인하였다.

표 2. 입력하중 비교

종 류	강 도	시간간격(초)	지속시간(초)	비 고	
백색잡음	0.05G	0.01	30	강도영향 검토	
	0.1G				
	0.3G				
조화하중	0.01G	0.01	30	강도 및 주파수 영향 검토	
					1.0Hz
					1.26Hz
	0.02G				1.4Hz
					1.0Hz
					1.26Hz
	1.4Hz				

## 4. 실험 결과

### 4.1 백색잡음

TLD의 설치에 따른 진동제어성능효과를 검토하기 위해서 질량비, 감쇠네트 입력하중의 세기를 달리 하여 TLD의 제어성능을 확인하였다. 감쇠기 설치 전 모델구조물의 고유진동수는 1.26Hz이었으나 TLD 설치 후 감쇠네트의 수에 따라 고유진동수가 1.21Hz~1.23Hz로 변화를 나타냈다. 가속도응답파워는 그림 4(a)에 나타나듯, TLD 설치전과 비교하여 질량비 1%의 TLD를 설치하였을 때, 87% 감소하였고, 그림 4(b)에 나타나듯 물질량을 2%로 증가시킨 경우 97% 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 감쇠네트를 1, 3개 설치하였을 때, 감쇠네트를 설치하지 않은 경우보다 가속도응답파워가 증가하여 제어성능을 감소시키는 것으로 나타났다.

변위시간이력(그림 5)을 비교해 보면, TLD를 설치하지 않은 모델구조물의 가진 시 최대 변위는 1.84cm이었으나, 질량비 1%의 감쇠네트가 없는 TLD의 경우 0.81cm로 56%의 제어성능을 발휘하고 있고, 감쇠네트의 개수에 따라 각각 1.03cm, 1.29cm의 최대변위를 나타내고 있다. 이러한 현상은 감쇠네트의 설치에 따른 물의 출렁임의 크기가 작아지면서 제어력이 감소하는 것으로 판단된다(그림 6(a)). 하지만 가진 종료 후 자유진동 시 그림 6(b)에 나타나듯 감쇠네트를 설치하지 않은 경우 약 35초의 진동지속시간과 0.42cm의 진동진폭을 을 갖고 있으나, 감쇠네트를 설치한 후 진동지속시간이 약 10초 감소하고, 진동진폭 또한 감쇠네트의 개수별로 0.21cm, 0.11cm로 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

입력하중의 세기를 0.1G, 0.3G로 증가시키면서 실험을 진행하여 입력하중의 세기에 따른 진동제어성능의 변화를 확인하였다(표 3). 그 결과 0.1G의 하중에서는 54%, 0.3G의 하중에서는 33%의 진동제어성능을 나타내고 있었다. 이러한 결과는 입력하중의 세기가 커지면서 TLD의 출렁임 현상이 파괴되어 제어력이 감소되는 것으로 판단되며, 출렁임 현상에 영향을 미치지 않기 위한 형상비에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

표 3. 백색잡음 가진 시 최대변위 응답비교

		비 제어시	TLD 제어시(감쇠네트 0)			TLD 제어시(감쇠네트 1)		TLD 제어시(감쇠네트 3)	
입력세기	질량비(%)	최대변위(cm) ①	최대변위(cm)②	②/①	최대변위(cm) ③	③/①	최대변위(cm) ④	④/①	
0.05G	1	1.84	0.82	0.45	1.03	0.56	1.29	0.70	
	2	1.84	0.85	0.46	0.74	0.40	0.87	0.47	
0.1G	1	3.38	1.97	0.58	2.16	0.64	2.13	0.63	
	2	3.38	1.67	0.49	1.65	0.49	1.80	0.53	
0.3G	1	4.81	3.95	0.82	3.91	0.81	3.62	0.75	
	2	4.81	3.59	0.75	4.18	0.87	3.37	0.70	

## 4.2 조화하중

조화하중의 경우 모델구조물의 진동수와 동조 또는 비동조 시의 응답의 차이를 확인 하는데 필요한 실험으로 자유진동실험을 통해 파악된 모델구조물의 고유진동수와 일치하는 진동수로 가진 을 하고, 그 외에 동조되지 않는 진동수를 가진함으로써 입력하중의 진동수와 동조시의 성능에 대한 검토를 위해 실시하였다. 입력하중의 종류는 표 2와 같이 입력하중의 세기를 두 가지로 나눈 후, 각각의 세기마다 고유진동수와 일치하는 진동수 1.26Hz 외에 일치하지 않는 진동수 1.0Hz, 1.4Hz를 가진 하여 입력 진동수가 모델구조물의 고유진동수와 일치하는 경우의 제어성능과 모델 구조물의 고유진동수보다 낮거나 높은 경우의 제어성능의 변화를 확인 하였다.

먼저 입력하중의 진동수를 1.0Hz로 가진 한 경우, 그림 7(a), 8(a)의 주파수 분석에서 나타나듯 가속도응답과위는 모델구조물의 진동수는 물론 TLD의 고유진동수와 일치 하지 않기 때문에 TLD의 제어성능이 발휘되고 있지 못할 뿐만 아니라 오히려 TLD의 물이 추가 질량으로 작용을 하여 가속도응답과위를 증폭시키고 있으며 이러한 현상은 TLD의 물의 질량비를 2%로 증가시켰을 때, 더 크게 나타나고 있다. 또한 감쇠네트를 설치한 경우 개수에 관계없이 감쇠네트가 없는 경우보다 높은 가속도응답과위를 나타내고 있다. 이러한 결과는 그림 9(a)에 나타나듯 비제어시 모델구조 물의 최대 변위는 0.78cm이었으나, TLD로 제어 시 오히려 0.85cm로 증가하였고 감쇠네트를 추가 적으로 설치하였을 때, 0.86, 0.88cm로 변위응답이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 가진 종료 후 자유진동 시(그림 9(b))에는 감쇠네트를 설치하지 않은 TLD에서 진동진폭은 물론 진동지속시간 또한 비제어시보다 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 TLD 질량의 증가와 입력하중의 세기가 커지면서 더욱 크게 나타나고 있다. 때문에 TLD 설치 시 구조물의 진동수 성분뿐만 아니라, 예상 되는 하중의 특성이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

두 번째로 모델구조물의 고유진동수와 일치하는 1.26Hz로 가진하였을 때, 그림 7(b), 8(b)에 나 타난 주파수 분석결과 감쇠네트를 갖지 않는 TLD를 설치하였을 때, 가장 큰 제어성능을 나타내 고 있는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 모델구조물에 가진된 진동수와 TLD의 진동수가 동조되어 최대의 성능을 발휘한 것으로 판단된다. 이러한 결과에서 나타나듯 TLD 제어성능을 결정하는데 입력하중의 진동수 특성이 큰 영향을 끼치는 것을 확인 할 수 있다. 또한 감쇠네트의 의한 제어성 능의 향상은 나타나지 않았고, 네트 설치에 따른 진동수의 변화가 나타났다. 그림 10(a)에서와 같이 변위시간이력을 통해 확인된 모델구조물의 최대 변위는 3.42cm로 1.0Hz로 가진된 경우의 최대변 위보다 5배 이상의 변위폭을 나타내고 있다. 하지만 1% 질량비의 감쇠네트를 갖지 않는 TLD로 제어하였을 때, 최대변위응답이 2.39cm로 30%의 제어성능을 나타내고 있으며, 질량비를 2%로 증 가시킨 경우 2.02cm로 약 50%의 제어성능을 나타내고 있다. 이것은 TLD가 모델구조물의 진동수 와 동조되었을 때, 질량의 증가는 제어성능에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 TLD의 제어성능은 구조물에 크게 영향을 줄 수 있는 진동수에서 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, 진동 수 동조 후에 액체의 질량을 증가시키는 것이 제어성능 향상에 효과적일 것으로 판단된다. 때문에 TLD 설계시 모델구조물의 진동수와 예상되는 하중의 진동수 성분을 고려한 설계가 이루어 져야 할 것으로 판단된다. 하지만 그림 11에서와 같이 감쇠네트를 설치하였을 때, 제어성능이 저하되고 가진 종료 후 자유진동 시에도 큰 제어성능을 발휘하고 있지 못하다. 본 실험에서의 감쇠네트는 고유진동수에 크게 간섭하여 설치 시 고유진동수의 변화를 가져왔으며 그에 따른 제어성능의 저 하로 나타났다. 따라서 감쇠네트를 설치하여도 TLD의 고유진동수가 변하지 않는 경우에는 더 큰 제어력을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

마지막으로 1.4Hz의 진동수로 가진하였을 때, 1.0Hz로 가진 한 경우와 마찬가지로 가속도응답과 위가 모델구조물보다 크게 나타났다(그림 7(c), 8(c)). 하지만 그림 12(a), (b)와 같이 변위시간이력 결과를 비교하여 보면, 비제어 시 1.19cm였으나, 감쇠네트가 없는 TLD로 제어 시 0.89 cm로 제어 성능을 발휘하고 있고, 가진 종료 후 자유진동에서도 제어성능이 발휘되고 있다. 하지만 비제어시 의 변위응답보다 크게 나타나는 부분이 있어, 최대 변위제어성능은 발휘되었으나 가진 시 전체 변 위응답에 대한 제어는 이루어지지 않아 가속도 파워값이 비제어시보다 크게 나타나는 것으로 판

단된다. 또한 질량비를 증가시켰을 때, 가진 시와 자유진동 시 모두에서 비제어시의 변위응답 보다 크게 나타나고 있으며, 감쇠네트에 의한 제어성능 저하가 나타났다. 따라서 입력하중이 조화하중과 같은 정현파로 가진될 경우, 감쇠네트는 제어성능을 감소시키고 사용성을 크게 떨어트리는 요인이 될 것으로 판단된다. 또한 조화하중의 입력세기를 0.01G에서 0.02G로 증가시켰을 때 표 4와 같이 입력 진동수가 1.0, 1.4Hz일 때는 변위응답의 증가가 크게 나타나고 있지 않지만, 1.26Hz로 가진한 경우에는 제어성능이 저하되고 있는 것을 확인 할 수 있고 질량비가 증가하였을 때, 더 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 하중의 세기가 강해지면서 TLD의 제어성능에 영향을 미친 것으로 판단되며, 그에 따라 질량의 증가는 제어력보다 추가 질량으로 작용한 것으로 판단된다. 따라서 입력하중의 세기가 증가하여도 TLD의 출렁임 현상에 영향이 없을 정도의 길이를 산정하여야 할 것으로 판단된다.

표 4. 조화하중 최대변위응답 비교

입력하중			without TLD	감쇠네트(Net) 0		감쇠네트(Net) 1		감쇠네트(Net) 3	
세기	진동수	질량비(%)	최대변위(cm)①	최대변위(cm)②	①/②	최대변위(cm) ③	①/③	최대변위(cm) ④	①/④
0.01G	1.0Hz	1%	0.78	0.85	1.09	0.86	1.10	0.88	1.13
		2%	0.78	1.37	1.76	0.93	1.19	0.91	1.17
	1.26Hz	1%	3.42	2.39	0.70	2.77	0.81	2.92	0.85
		2%	3.42	2.02	0.59	2.18	0.64	2.35	0.69
	1.4Hz	1%	1.19	0.89	0.75	1.30	1.09	1.10	0.92
		2%	1.19	1.21	1.02	1.14	0.96	1.16	0.97
0.02G	1.0Hz	1%	1.67	1.85	1.11	1.98	1.19	2.17	1.30
		2%	1.67	1.85	1.11	2.01	1.20	1.98	1.19
	1.26Hz	1%	4.31	3.51	0.81	3.94	0.91	3.92	0.91
		2%	4.31	3.43	0.80	3.49	0.81	3.54	0.82
	1.4Hz	1%	2.22	1.74	0.78	2.50	1.13	2.38	1.07
		2%	2.22	2.29	1.03	2.11	0.95	2.15	0.97

## 5. 결론

본 실험에서 TLD의 진동제어성능을 입력하중별로 세기, 질량비, 감쇠네트의 개수 등을 달리하여 진동대 실험을 실시한 결과를 분석하였다.

1. 입력하중의 세기 : 백색잡음과 조화하중의 입력하중의 세기가 약한 경우에 큰 제어성능을 발휘하는 것으로 나타났다. 하지만 TLD 실험체의 크기가 작은 것에 비해 하중의 세기가 큰 것을 고려할 때, 실제구조물에 설치 시 입력하중의 세기를 고려한 TLD의 설계가 필요할 것으로 판단된다.

2. 질량비 : 백색잡음과 조화하중에서 모델구조물과 감쇠기가 동조될 때 물질을 증가시킬 때 제어성능의 향상되었다.

3. 감쇠네트 : 백색잡음, 조화하중실험 모두에서 가진 시에 감쇠네트는 제어성능을 감소시키고 있으나, 자유진동 시에는 진동진폭과 진동지속시간을 감소시키는 것으로 나타났다. 따라서 본 실험에서는 감쇠네트가 가진 시 고유진동수에 크게 간섭을 일으키는 것으로 판단된다. 따라서 감쇠네트 설치 시 고유진동수를 구조물과 일치시킬 경우 큰 제어성능을 발휘할 것으로 판단되며, 사용성 측면에서도 감쇠네트를 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 동조 진동수비 : 모델구조물과 TLD의 고유진동수 동조에 의한 제어성능은 입력하중의 진동수에 따라 크게 변하는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 현상은 입력하중의 진동수가 구조물의 진동수와 일치하지 않는 경우 TLD의 제어성능이 발휘되지 못하고, 오히려 추가질량으로 작용하고 있다. 그러나 입력하중의 진동수와 모델구조물의 진동수 동조에 따른 최대 변위, 가속도는 TLD의 제어력에 의해 30%이상 제어되는 것을 확인 할 수 있다.

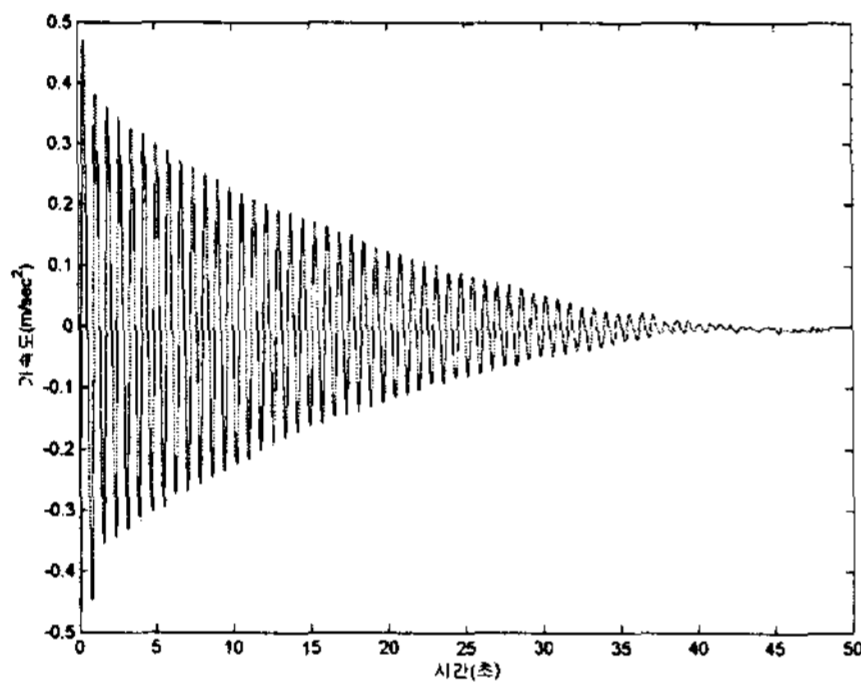
5. 형상비 : 본 실험에서 형상비 변화에 따른 제어성능은 검토하지 못하였지만 입력하중의 세기를 고려하여 물의 출렁임에 영향을 받지 않도록 형상비를 고려 설계하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

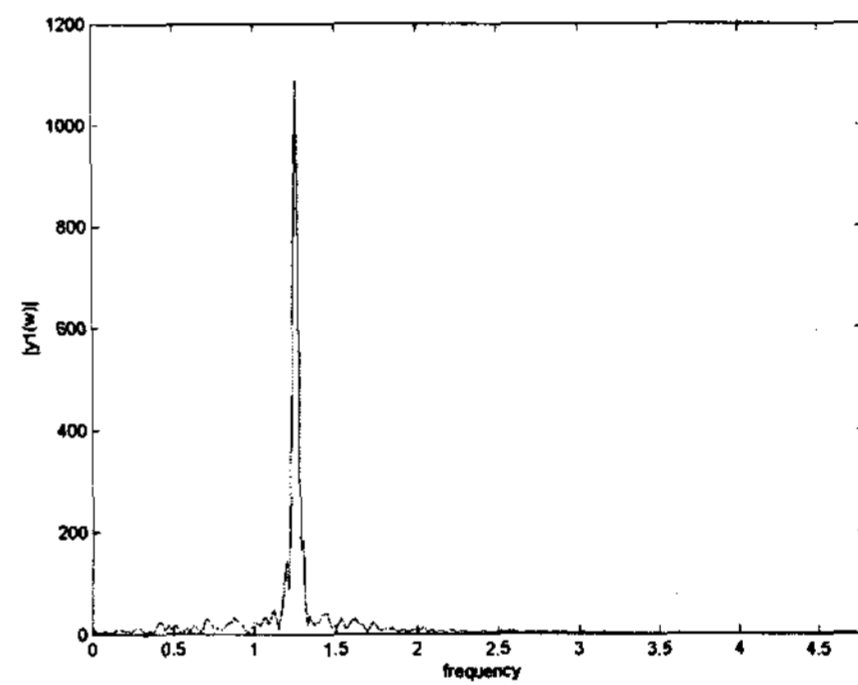
이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 03 산학연 A07-03)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Jin-Kyu Yu, Toshihiro Wakahara and Dorothy A. Reed, "A Non-Linear Numerical Model of The Tuned Liquid Damper", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999, Dyn. 28, pp.671-686.
2. Pradipta Banerji, Mohan Mirudi, Arvind H. Shah and Neil Popplewell, "Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2000, Dyn. 29, pp.587-602.
3. Yalla, S.K., Kareem, A., and Kantor J. C. "Semi-Active Tuned Liquid Column Dampers for Vibration Control of Structures", Engineering Structure, 2001, Vol. 23, pp. 1469- 1479.
4. Pei-Ming Chang, Jack Y. K. Lou and Loren D. Lutes, "Model identification and Control of a Tuned Liquid Damper", Engineering Structure, 1998, Vol.20, No.3, pp.155-163.
5. 주영규, "지진하중을 받는 벽면 요철형 동조액체댐퍼의 제진 특성에 관한 실험적 평가", 대한건축학회 논문집 구조계, 19권 2호, 2003. 2, pp.9-16.



(a) 가속도 시간이력



(b) 주파수 분석

그림 1. 자유진동 실험결과

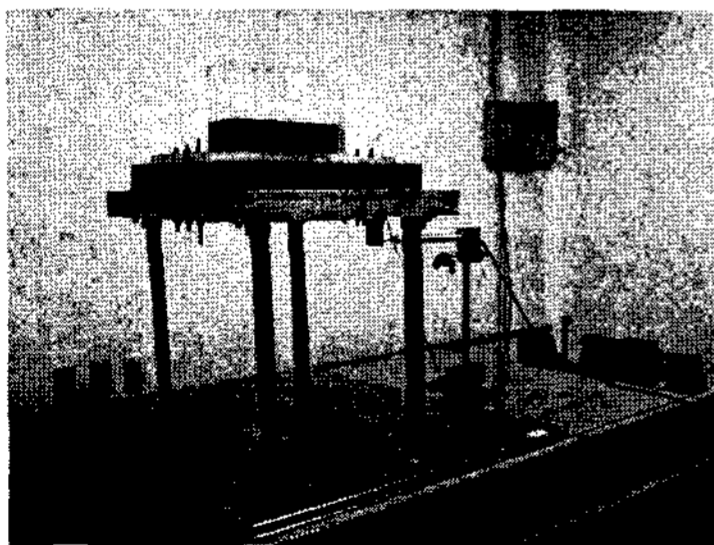
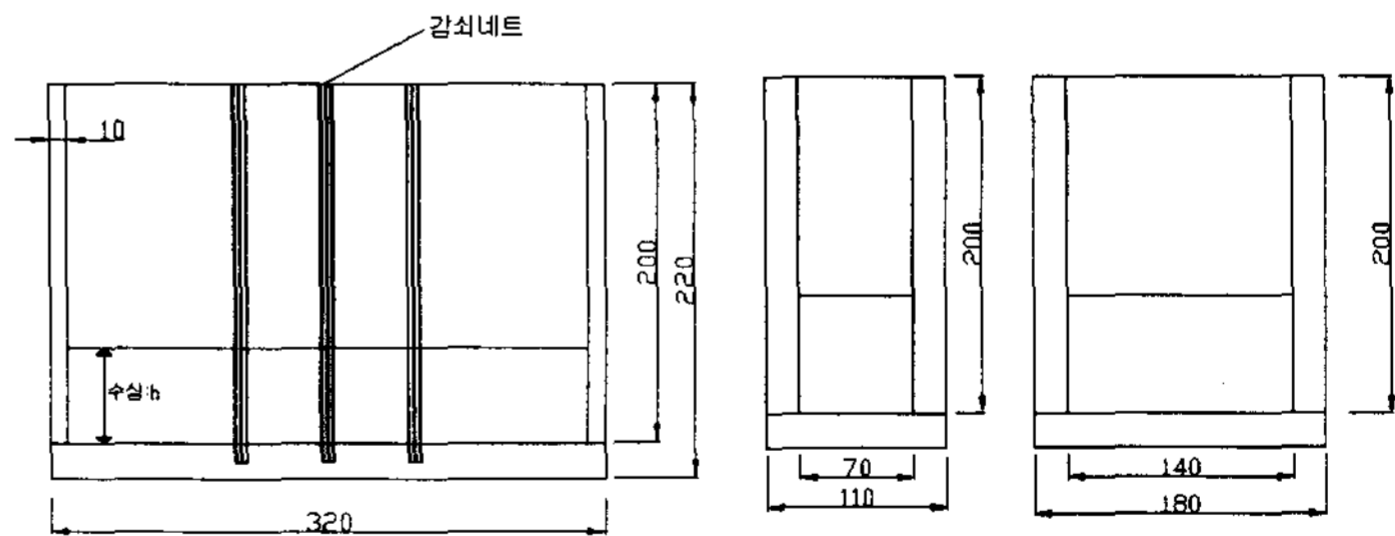


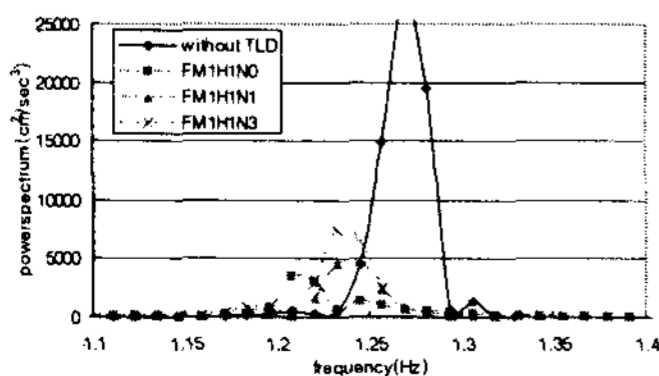
그림 2. TLD를 설치한 모델구조물



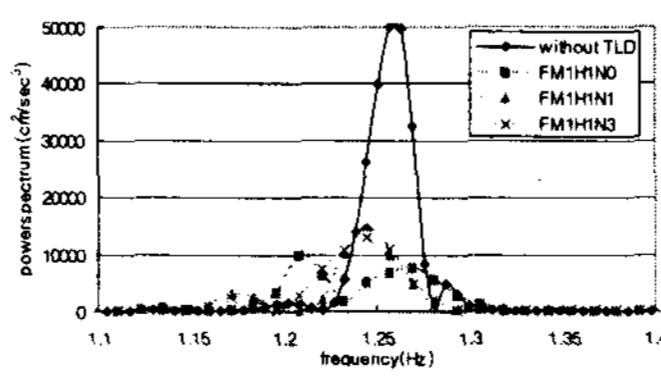
(a) 실험체 단면

(b) 실험체 배면

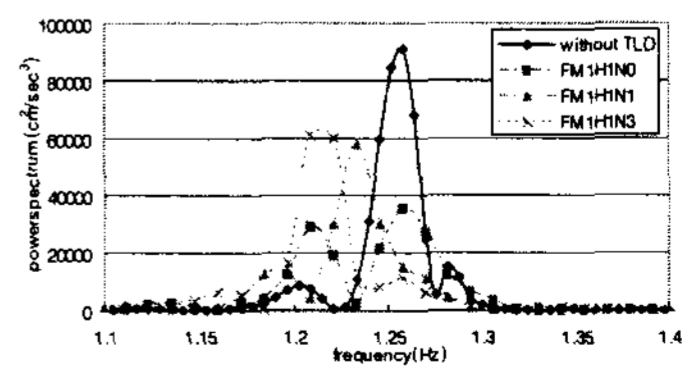
그림 3. TLD 실험체 형상



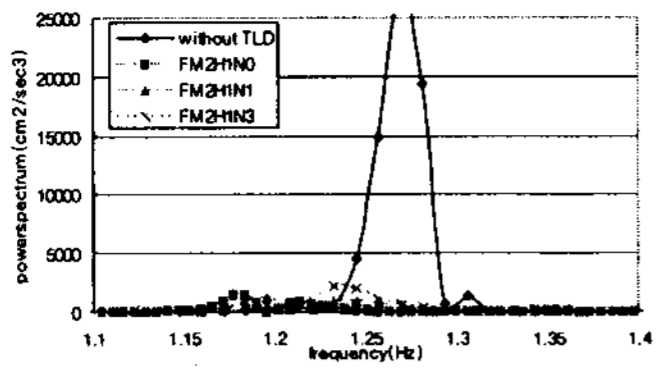
(a) 입력세기 0.05G, 질량비 1%



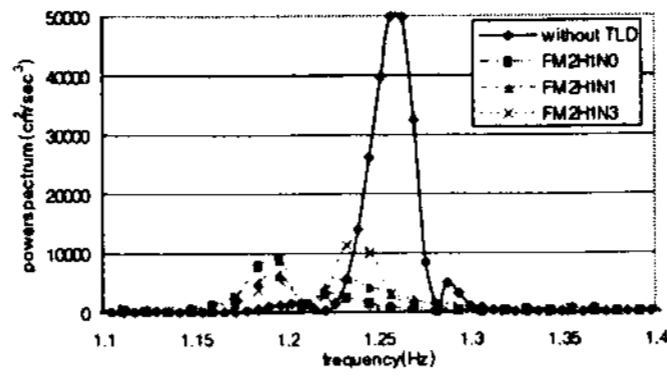
(b) 입력세기 0.1G, 질량비 1%



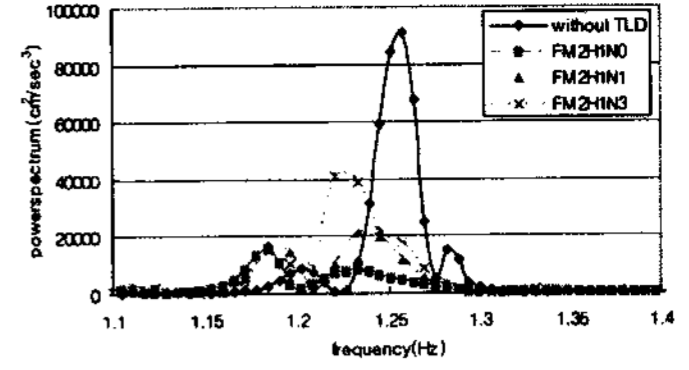
(c) 입력세기 0.3G, 질량비 1%



(d) 입력세기 0.05G, 질량비 2%



(e) 입력세기 0.1G, 질량비 2%



(f) 입력세기 0.3G, 질량비

그림 4. 백색잡음 주파수 분석

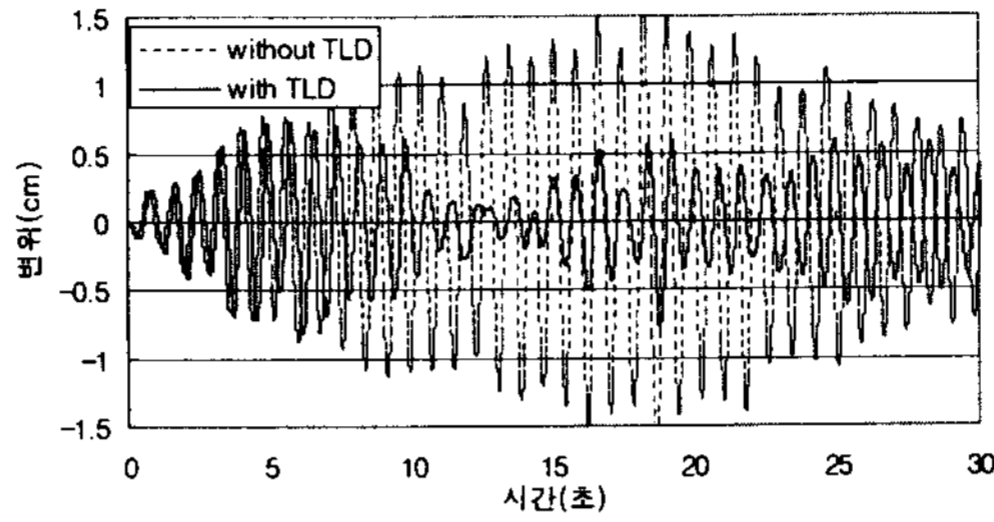
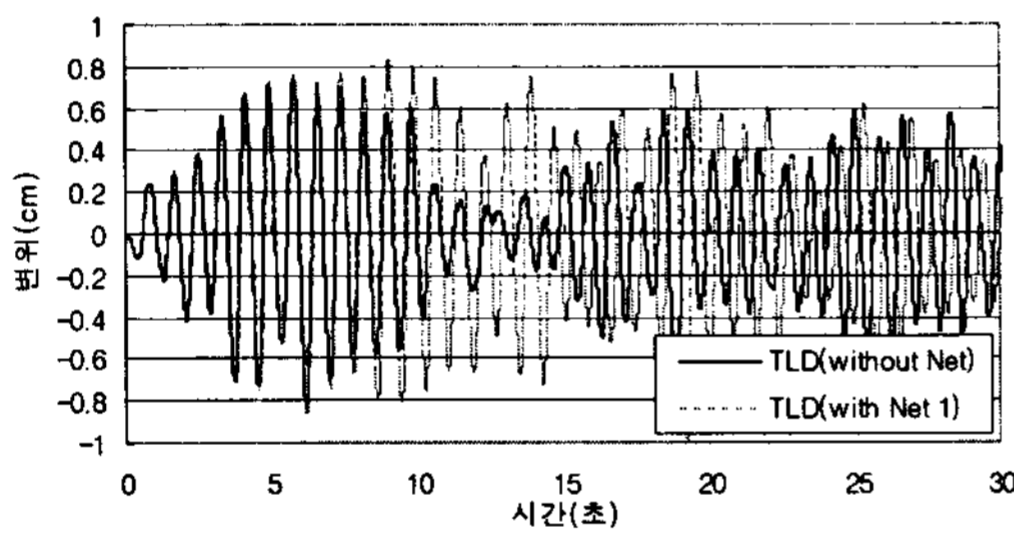
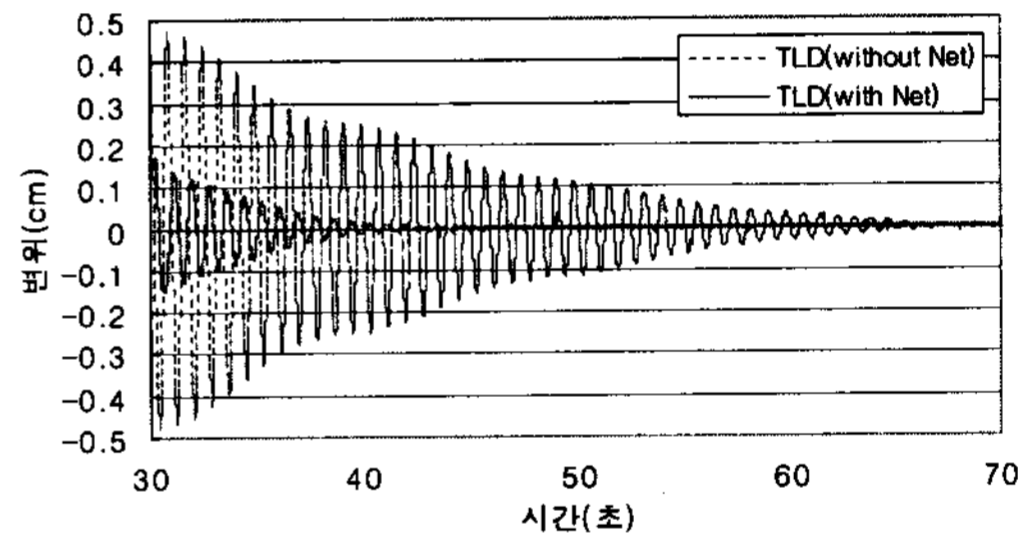


그림 5. 변위시간이력(TLD 설치시)

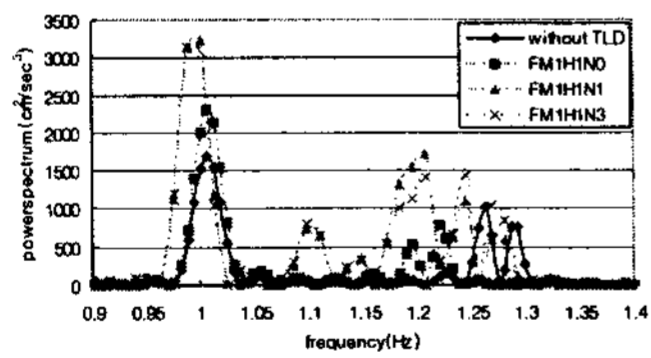


(a) 가진시

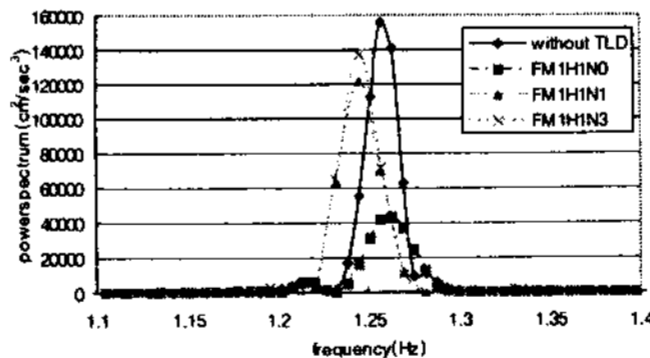


(b) 자유진동시

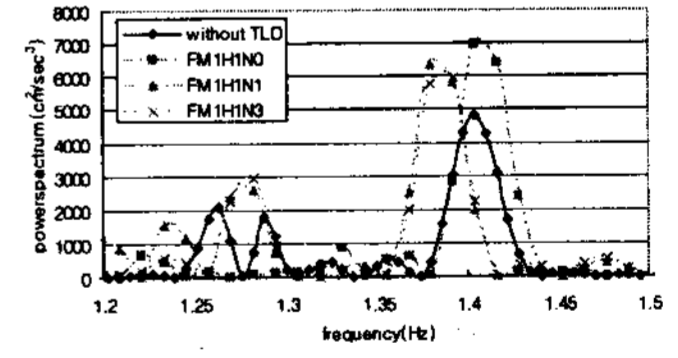
그림 6. 감쇠네트 유무에 따른 변위응답



(a) 1.0Hz

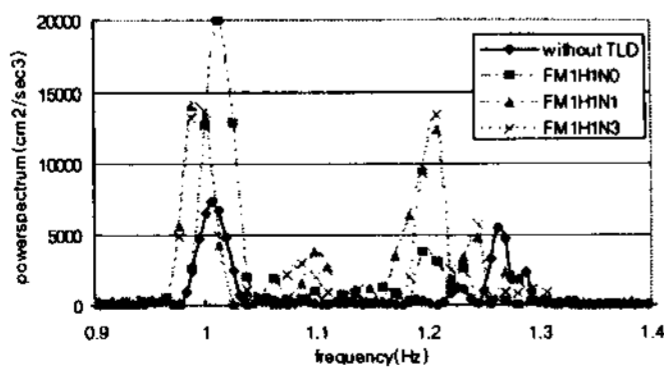


(b) 1.26Hz

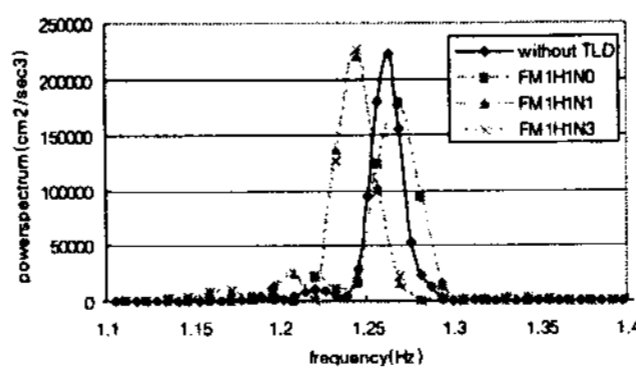


(c) 1.4Hz

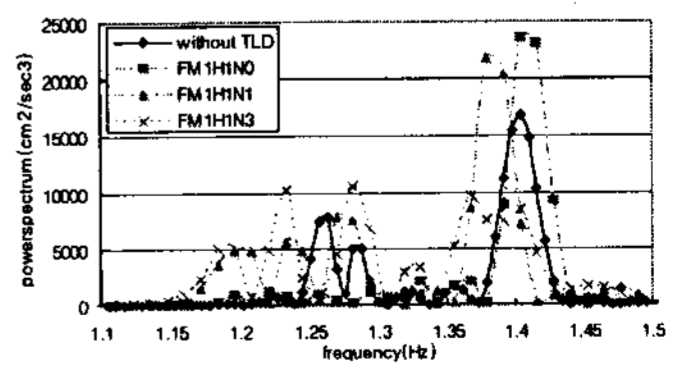
그림 7. 주파수 분석(입력하중 세기: 0.01G, 질량비 : 1%)



(a) 1.0Hz

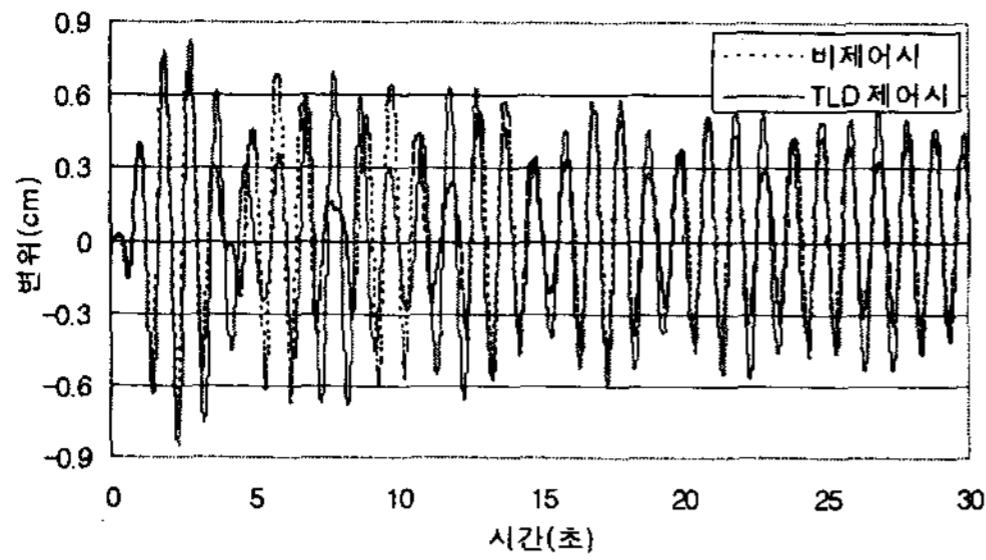


(b) 1.26Hz

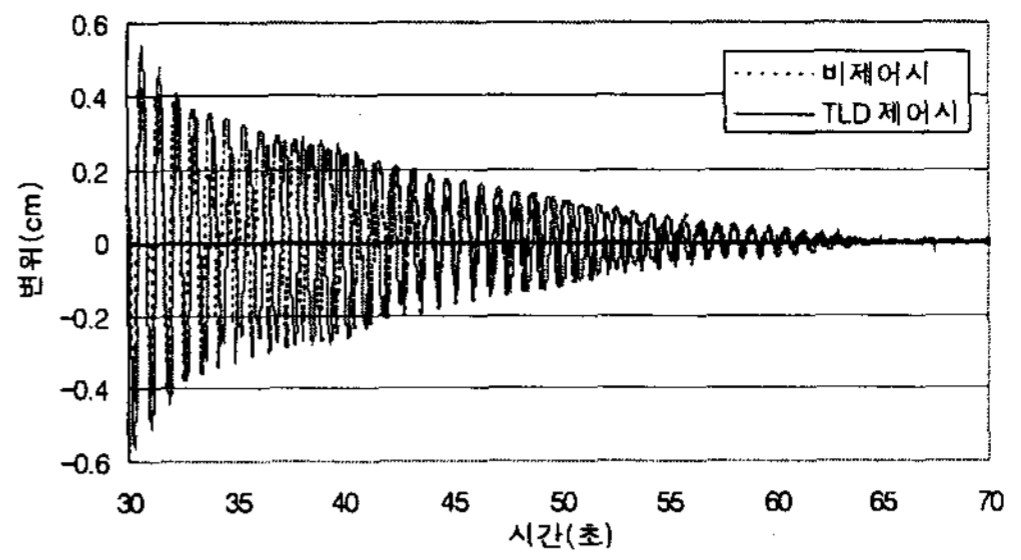


(c) 1.4Hz

그림 8. 주파수 분석(입력하중 세기: 0.01G, 질량비 : 2%)

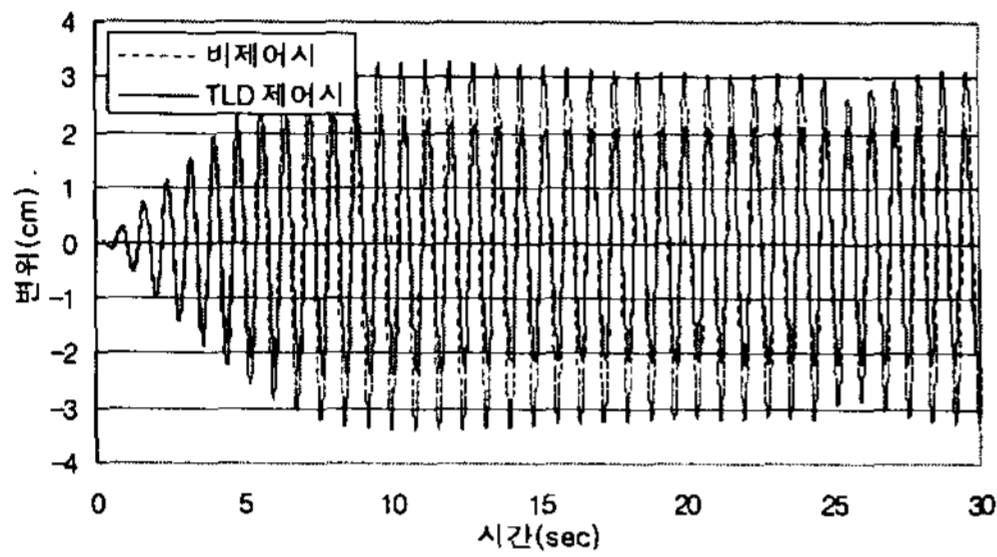


(a) 가진시

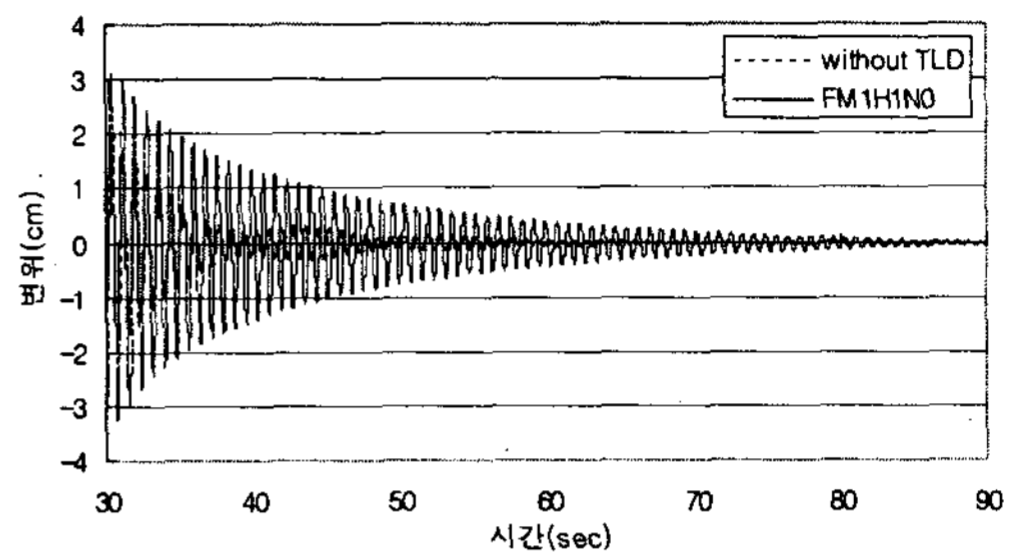


(b) 가진 종료 후 자유진동

그림 9. 변위시간이력(하중세기 : 0.01G, 입력진동수 : 1.0Hz)



(a) 가진시



(b) 가진 종료 후 자유진동

그림 10. 변위시간이력(입력세기 : 0.01G, 입력 진동수: 1.26Hz)

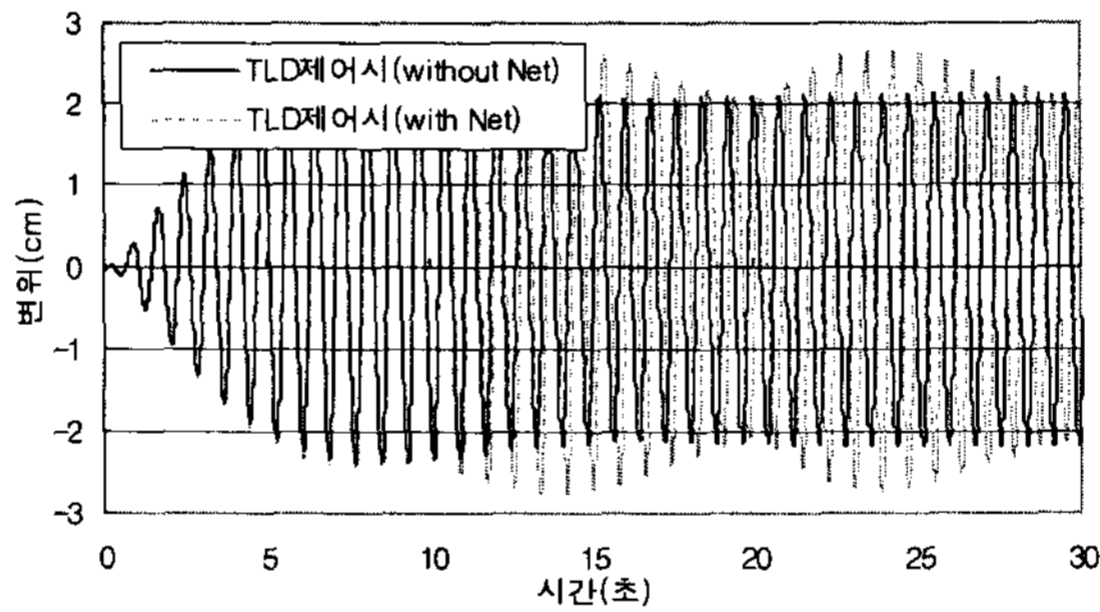
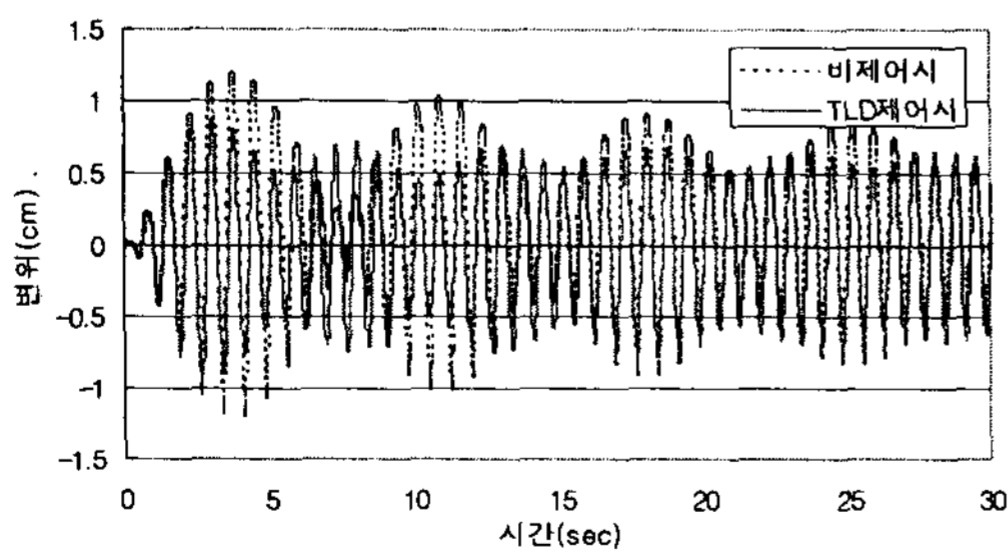
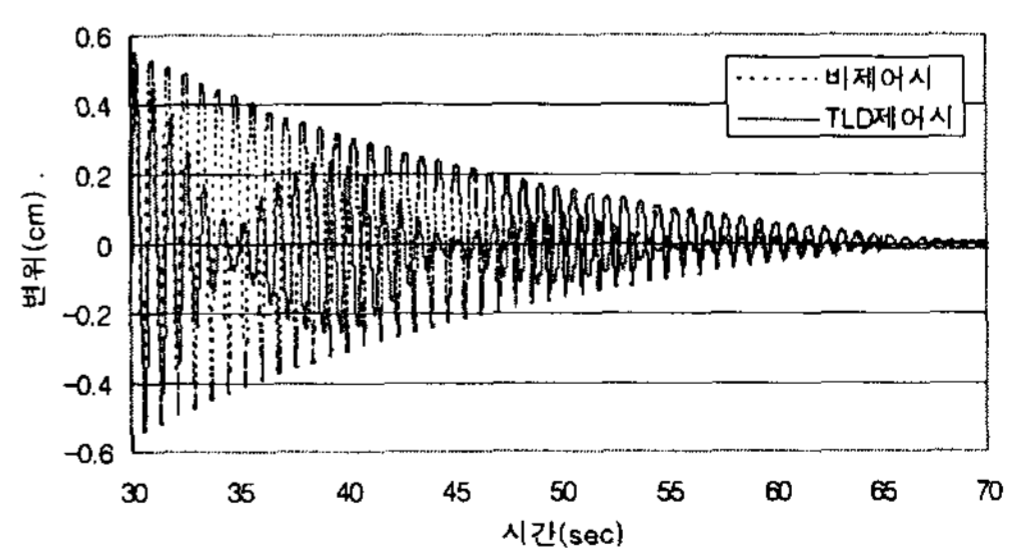


그림 11. 감쇠네트 유무에 따른 변위응답



(a) 가진 시



(b) 가진종료 후 자유진동

그림 12. 변위시간이력(입력세기: 0.01G, 입력 진동수: 1.4Hz)