

# Orificed Fluid Damper를 이용한 구조물 진동제어의 실험적 연구

## An Experimental Study on the Structural Vibration Control Using Orificed Fluid Dampers

정태영\*  
Chung, Tae-Young

임채욱\*\*  
Lim, Chae-Wook

김병현\*  
Kim, Byung-Hyun

---

### ABSTRACT

An orificed fluid damper(OFD) having the capacity of about 2 tons was designed and fabricated and applied to a 6-story steel structure under random excitation and seismic excitation for the confirmation of its validity on structural vibration absorption. The experimental results demonstrated that the addition of an OFD to the test structure is very effective in reduction of vibration level of the higher modes as well as the fundamental mode. Maxwell model was adopted to describe the frequency-dependent characteristics of the fabricated OFD and the numerical simulation was carried for the test structure. It was confirmed that the experimental and numerically simulated results agree well.

---

### 1. 서론

오리피스를 이용한 유체댐퍼(Orificed Fluid Damper ; OFD)는 기본구조로서 피스톤, 실린더 및 오리피스로서 구성되어 있으며, 실린더 내의 유체가 오리피스를 통하여 움직일 때 발생하는 저항력을 이용하여 감쇠력을 얻는다. 1925년 미국 Buffalo의 Ralph Peo가 자동차에 사용하기 위하여 OFD를 발명한 후에 많은 제작용체가 이를 만들어 오고 있으나, 제일 유명한 제작용체로서는 Taylor Devices사를 들 수 있다. 이 회사는 1955년 회사가 설립된 이후에 200만개가 넘는 제품을 각종 주요 구조물과 기기의 진동 및 충격 완충장치로 판매해 온 것으로 알려져 있고, 이 회사에서 제작된 OFD는 내진 및 내풍 용으로 1990년에서부터 현재까지 49개의 건물과 16개의 교량의 진동제어에 적용된 사례가 있다[1,2]. University of New York at Buffalo의 Constantinou교수 팀은 Taylor Devices사와 함께 OFD와 관련한 연구를 활발히 수행하여 수동 제어 시스템에 대한 연구를 해오고 있는 것으로 알려져 있다[3,4]. OFD는 다른 형태의 댐퍼와 비교해 볼 때 제작 비용이 저렴하고 감쇠력이 큰 장점을 가지고 있으며, 실제 건물과 교량에 설치하기가 용이한 장점을

---

\* 정회원 · 한국기계연구원 구조시스템 연구부

\*\* 한국기계연구원 구조시스템 연구부

가지고 있으나, 국내에서는 아직 OFD가 적용된 사례와 관련된 연구결과가 발표된 사례를 찾아보기 어렵다.

본 연구팀은 최대 감쇠력 2톤 규모의 OFD를 제작하여, OFD의 감쇠력을 결정하는 주요 파라미터인 오리피스 직경 및 동작 주파수, 변위 크기에 따른 감쇠력 특성 실험을 수행한 바 있다[5]. 본 연구에서는 OFD를 철골 시험구조물에 적용하여 랜덤 파형과 지진 파형에 대한 진동대 실험을 통하여 시험구조물의 진동제어 효과를 확인하였다. 또한, OFD의 특성 실험 결과를 토대로 OFD의 수학적 모델 설정 및 이를 사용한 진동제어 효과를 위한 수치모사를 수행하여 실험 결과와 비교하였다.

## 2. OFD의 설계 및 제작

OFD의 기본구조는 피스톤, 실린더 및 오리피스로서 구성되어 있으며, 실린더 내의 유체가 오리피스를 통하여 움직일 때 발생하는 저항력을 이용하여 감쇠력을 얻는데, 최대 감쇠력이 약 2톤 규모인 OFD를 설계 및 제작하였다. 제작된 OFD는 Fig. 1과 같고 이의 사양은 Table 1과 같다. 사용된 오일의 점성은 CST32(ISO규격 VG32)로 가연성을 제외하고는 Taylor Devices사의 유체댐퍼에서 사용하는 silicone 오일과 거의 같은 물성치를 가진다. 제작된 OFD의 유압회로는 Fig. 2와 같다. 유압회로는 실린더 양단의 압력차에 의한 유체의 흐름을 한 쪽 방향으로 유지하기 위한 체크 밸브(check valve), 유압회로의 내압이 임의 설정치에 달하면 밸브가 열려 기름을 by-pass시켜 회로 압력을 일정하게 유지하여 보다 넓은 속도 범위에서 사용 가능하게 하는 릴리프 밸브(relief valve), 실린더 내의 최대 압력을 설계치 이하로 유지하기 위한 안전 밸브(safety valve)와 실린더 피스톤 운동이나 온도 변화에 따른 유체 체적의 변동을 보상하기 위한 축압기(accumulator)등이 설치되었다.



Fig. 1 Photograph of the Fabricated Orificed Fluid Damper

Table 1 Specifications of the Orificed Fluid Damper

Number	Specifications
1	Piston Rod Diameter : 35mm
2	Piston Head Diameter : 55mm
3	Effective Piston Area : 14.14cm <sup>2</sup>
4	Maximum Stroke : ±50mm
5	Maximum Damping Force : 2000kgf
6	Used Oil : Compressible DTE24

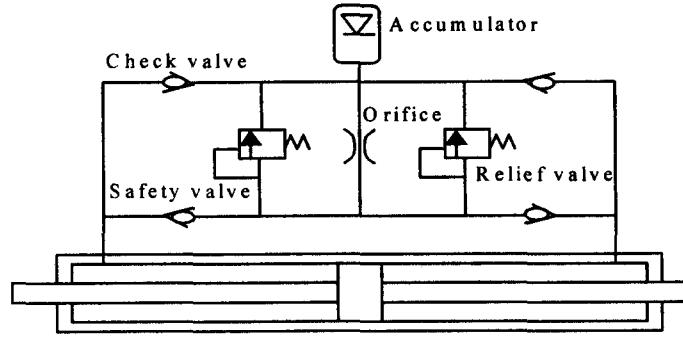


Fig. 2 Hydraulic Circuit of the Orificed Fluid Damper

### 3. OFD의 진동제어 성능실험

본 연구의 선행 연구로 수행된 OFD의 특성 실험에서는 제작된 OFD를 만능시험기에 장착하고 동작 주파수와 변위의 크기를 바꾸어 가며 정현파의 변위를 가하여 이때의 감쇠력을 측정하였다. 이로부터 오리피스의 직경이 커질수록 감쇠력은 감소하며, 오리피스 직경이 1mm보다 큰 경우(피스톤의 유효 단면적에 대한 오리피스 단면적 비가 1:1800보다 큰 경우)에서는 얻을 수 있는 감쇠력이 크게 약화됨을 확인하였다[5]. 따라서 본 연구에서는 오리피스 직경이 1mm인 OFD를 사용하여 진동제어 성능실험을 수행하였다.

OFD의 제어성능을 검증하기 위하여 제작된 6층 철골 시험구조물은 각각의 후판이 4개의 기둥으로 지지되고 있는데, 총 중량은 약 8톤이며, 가로×세로×높이가 2,100mm×1,200mm×3,500mm이다.

비제어 시의 시험구조물의 층간 변위는 1층이 가장 크므로, Fig. 3과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 OFD를 지반과 시험구조물의 1층 사이에 약 16°로 기울어진 대각형으로 설치하여 OFD의 제어성능 실험을 수행하였다. 진동대에 시험구조물을 고정시킨 후 진동대에 랜덤 파형 및 지진 파형의 입력을 주어 수평 방향(X축)으로 가진시키면서 수행하였다. 시험구조물의 1층에 변위계를, 또한 각 층에 가속도계를 부착하여 OFD의 설치 전·후의 시험구조물의 응답을 계속하였고, OFD의 감쇠력을 계속하기 위하여 Load Cell을 OFD의 한 끝단에 설치하였다.

#### 3.1 랜덤 파형 가진 실험

랜덤 파형 가진에 대한 OFD의 설치 전·후의 응답 변화를 관찰하기 위해 먼저 OFD의 설치 전의 응답을 계속하고, 이어서 설치 후의 응답을 계속하여 이의 분석을 통해 응답의 변화를 고찰하였다. 랜덤 파형 가진의 최대 가속도는 0.1g이며, 각각 140초 동안 시험을 수행하였다.

Fig. 5는 OFD의 설치 전·후의 지반 가속도 입력에 대한 1층 및 6층에서의 가속도 응답의 전달함수와 1층에서의 변위 응답의 시간이력을 보여주고 있다. OFD의 설치로 인해 시험구조물의 1차 모드에 대하여 약 15dB정도의 가속도 레벨을 줄이는 효과와 1차 모드 뿐만 아니라 시험구조물의 모든 모드를 동시에 크게 제어하는 효과를 확인할 수 있으며, 또한 OFD의 강성효과로 인하여 시험구조물의 고차모드의 고유진동수가 높아지는 현상을 확인할 수 있다.

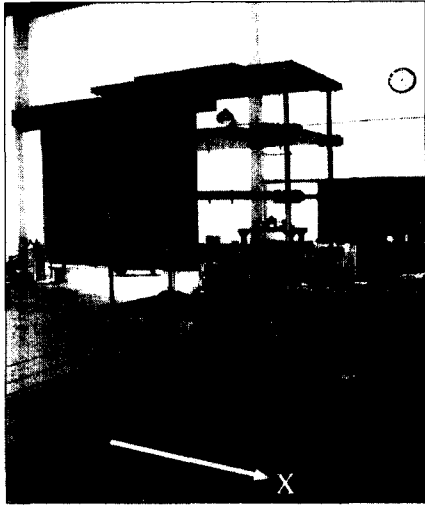


Fig. 3 Experimental Set-up of the 6-story Test Structure

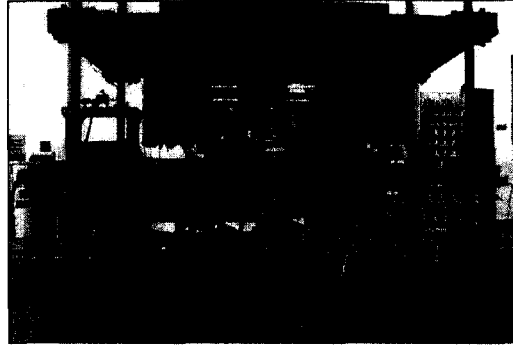


Fig. 4 Installation of the Designed OFD

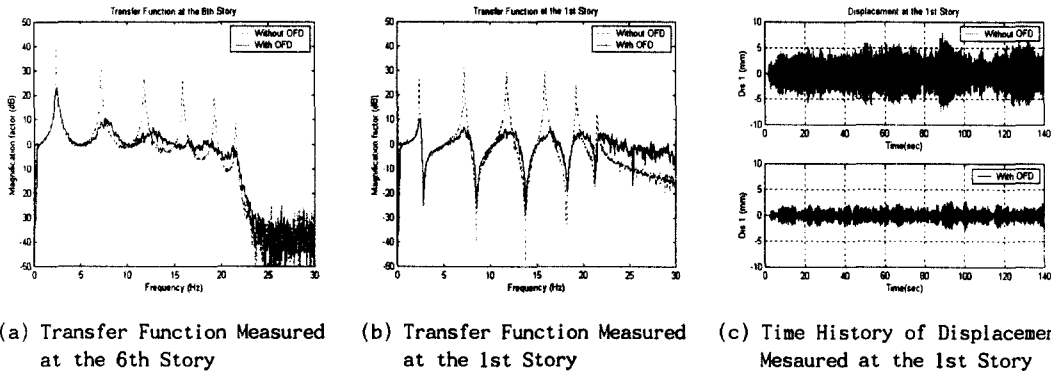


Fig. 5 Control Performances of the OFD under Random Excitation

### 3.2 지진 파형 가진 실험

다음으로 지진 파형으로 가진 실험을 수행하였다. 입력 지진 파형은 1940년에 발생한 E1 Centro 지진의 남북방향의 가속도 신호를 1:2.6로 시간 스케일하여 최대 가속도 크기가 0.1g인 파형으로 실험을 수행하여 제어 성능을 확인하였다. Fig. 6은 OFD의 설치 전·후의 지진 파형 가진에 대한 1층 및 6층에서의 절대 가속도 응답과 1층에서의 변위 응답의 시간 이력을 보여주고 있는데, 이로부터 OFD의 설치하는 지진을 받는 시험구조물의 가속도 및 변위를 줄임에 매우 효과적임을 재확인할 수 있다.

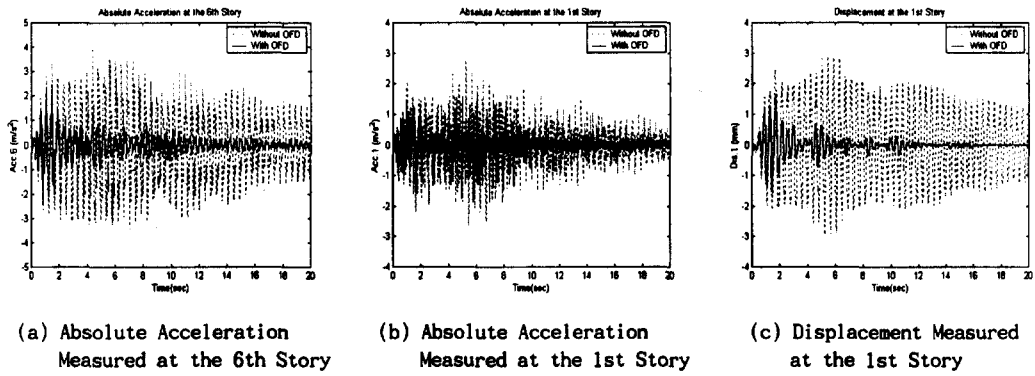


Fig. 6 Control Performances of the OFD under 1:2.6 Time-scaled El Centro Earthquake (PGA=0.1g)

#### 4. 수치모사

##### 4.1 OFD의 수학적 모델

OFD의 변위를 식 (1)과 같이 정현파로 줄 때, OFD의 감쇠력을 식 (2)와 같이 속도의 지수함수로 가정할 경우, 한 주기당 OFD에서 소산되는 에너지는 식 (3)과 같다. 일반적으로 OFD에서 사용되는 지수  $\alpha$ 의 값은 0.5 ~ 2이다.

$$u(t) = u_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$F_d(t) = C_d |\dot{u}(t)|^\alpha \cdot \text{sgn}(\dot{u}(t)) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} W_d &= \oint F_d du \\ &= 2^{\alpha+2} \frac{\Gamma^2(1+\alpha/2)}{\Gamma(2+\alpha)} u_0^{1+\alpha} \omega^\alpha C_d \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\Gamma$ 는 gamma 함수이다.

OFD의 동특성 실험 결과로부터 소산 에너지  $W_d$ 를 계산하여 식 (3)을 적용한 결과 지수  $\alpha$ 의 값은 약 1.2로 판정되었다. 이 때의 감쇠계수  $C_d$ 는 동작 주파수의 함수로서 동작 주파수가 높아질수록 작아짐을 확인할 수 있었으며, 또한 같은 동작 주파수에서도 변위가 커질수록 감쇠계수가 커짐을 확인할 수 있었다[5].

제작된 OFD를 등가 선형 감쇠계수  $C$ 를 갖는 선형 댐퍼로 근사화하여 모델링하였다. 등가 선형 댐퍼의 한 주기당 소산되는 에너지를 구하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 W_d &= \oint C \dot{u} du \\
 &= \pi \omega u_0^2 C
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

이때 OFD의 강성효과를 같이 고려하면, OFD의 감쇠력을 식(5)와 같이 선형 근사화할 수 있다.

$$F(t) = Ku(t) + C\dot{u}(t) \tag{5}$$

여기서  $K$ 는 저장강성(storage stiffness)을 나타내고,  $C = \frac{W_d}{\pi \omega u_0^2}$ 이다.

실제 동작 주파수가 높아질수록  $K$ 는 커지며  $C$ 는 작아지므로,  $K$ 와  $C$ 는 주파수에 대한 함수이다. 이런 OFD의 동적 특성을 수학적으로 모델링하기 위하여 다음의 맥스웰 모델(Maxwell model)을 사용하였다.

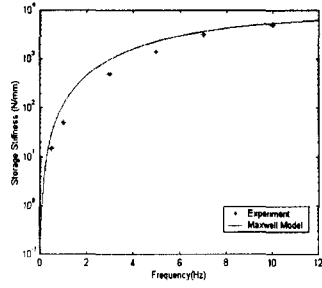
$$F(t) + \lambda \dot{F}(t) = C_0 \dot{u}(t) \tag{6}$$

여기서  $F(t)$ 는 감쇠력,  $C_0$ 는 0Hz에서의 감쇠계수,  $\lambda$ 는 완화시간(relaxation time)을 나타낸다.  $C_0$ 와  $\lambda$ 는 OFD의 주파수에 따른 동적 특성으로부터 얻어진  $K$ 와  $C$ 의 값들로부터 커브피팅하여 결정하게 된다. 식 (6)을 푸리에 변환(Fourier transform)하여 식 (5)와 비교하면  $K$ 와  $C$ 는 다음과 같이 주파수의 함수로 표현된다.

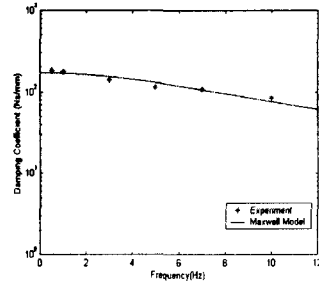
$$\begin{aligned}
 F(\omega) &= [K_1(\omega) + iC\omega]u(\omega) \\
 K(\omega) &= \frac{C_0 \lambda \omega^2}{1 + \omega^2 \lambda^2} \\
 C(\omega) &= \frac{C_0}{1 + \omega^2 \lambda^2}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

여기서  $i$ 는 허수 단위(imaginary unit)이다.

식 (7)을 이용하여 OFD의 동특성 실험 결과를 커브피팅한 결과  $\lambda = 17.77 \text{ msec}$ ,  $C_0 = 171.7 \text{ N/mm}$ 를 얻었다. Fig. 7은 저장강성  $K$ , 선형 감쇠계수  $C$ 에 대하여 커브피팅한 결과를 보여주고 있다. 또한 Fig. 8은 맥스웰 모델과 실험 결과에 대한 주파수별 힘-변위 곡선을 비교하여 보여주고 있다.

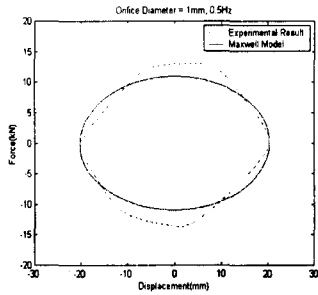


(a) Storage Stiffness

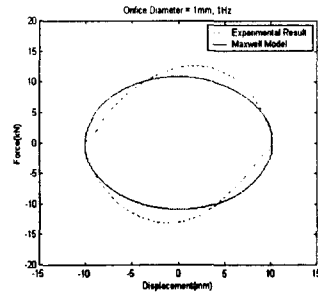


(b) Damping Coefficient

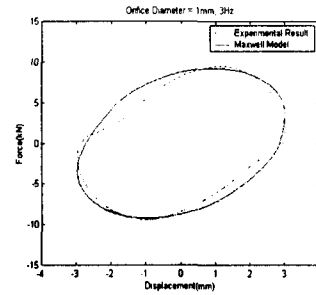
Fig. 7 Comparison of Experimental Results and Maxwell Model



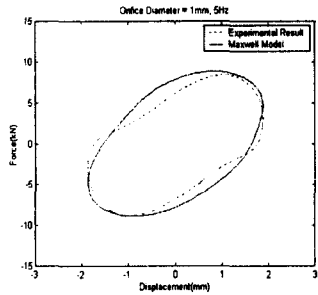
(a) 0.5Hz



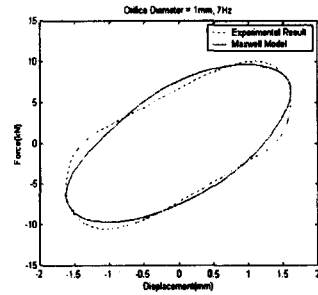
(b) 1Hz



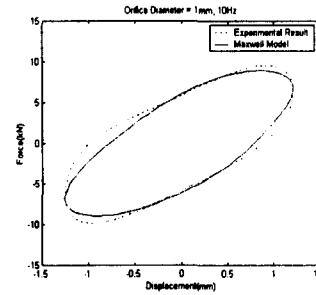
(c) 3Hz



(d) 5Hz



(e) 7Hz



(f) 10Hz

Fig. 8 Comparison of Force-Displacement Loops of the Designed OFD

#### 4.2 시험구조물의 수학적 모델

제작한 시험구조물의 동특성 실험은 진동대에 시험구조물을 고정시킨 후 진동대를 랜덤 파형을 이용하여 수평 방향으로 가진시키면서 수행하였다. 시험구조물의 각 층에 가속도계를 부착하여 지반 가진에 의한 각 층에서의 가속도 응답을 계속하였다. 계속된 가속도 응답으로부터 각 층에서의 전달 함수를 구하여 고유 진동수, 감쇠비, 모드 형상 등을 추정하였다. 추정된 시험구조물

의 고유진동수 및 감쇠비는 Table 2에 정리하였다.

시험구조물을 전단 집중질량 모델로 모델링하고, 동특성 실험을 통하여 추정된 고유진동수, 감쇠비, 모드 형상과 질량행렬(  $M$  ) 등을 이용하여 식 (9)로 주어진 운동 방정식의 감쇠행렬(  $C$  ), 강성행렬(  $K$  ) 등을 추정하였다.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M l\ddot{x}_0(t) \quad (9)$$

여기서  $x(t)=[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T$  로 지반에 대한 각층의 상대 변위를,  $\ddot{x}_0(t)$ 는 지반가속도를 나타내고,  $l=[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ 이다.

Table 2 Natural Frequencies and Damping Ratios of the Test Structure

Mode		1	2	3	4	5	6
		Direction					
Longitudinal (X)	Natural Frequencies(Hz)	2.39	7.22	11.79	15.92	19.26	21.52
	Damping Ratios(%)	0.5	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2

### 4.3. 수치모사 결과

OFD의 진동제어 성능의 실험 결과를 OFD의 동특성을 선형 등가 맥스웰 모델로 수학적으로 모델링한 수치모사 결과와 비교하였다. Fig. 9는 지진 파형 가진에 대한 실험 결과 중 6층에서의 절대 가속도 응답, 1층에서의 변위 응답, 그리고 OFD의 감쇠력을 수치모사 결과와 비교하여 보여주고 있는데, 대체적으로 잘 일치함을 확인할 수 있다. 시험구조물의 초기 응답의 피크치 부근에서는 실제 OFD의 고주파수에서의 강성효과로 인해 응답이 약간 커진 것으로 사료되며(OFD의 수학적 인 모델은 10Hz까지만의 동특성을 고려하였음), OFD의 수학적 모델은 실제 OFD의 감쇠력보다 약간 작은 감쇠력을 가짐을 확인할 수 있다.

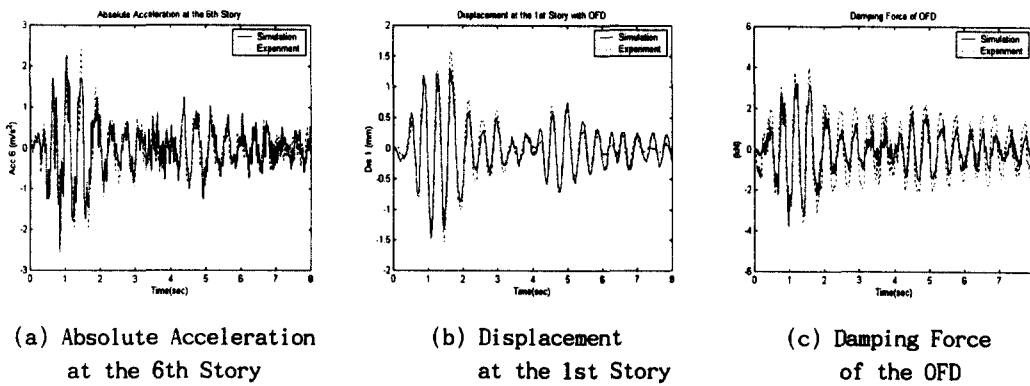


Fig. 9 Comparison of the Simulation and Experimental Results under 1:2.6 Time-scaled El Centro Earthquake (PGA=0.1g)



## 5. 결론

본 연구에서는 최대 감쇠력 2톤 규모의 오리피스를 이용한 유체댐퍼(Orificed Fluid Damper: OFD)를 제작하고, 이를 철골 시험구조물에 적용하여 진동제어 성능을 실험적으로 확인하였다. 랜덤 파형 및 지진 파형 가진 실험을 통해 OFD가 시험구조물의 1차 모드는 물론 고차 모드 모두를 동시에 제어함에 매우 효과적임을 확인하였다.

또한, OFD를 선형 등가 맥스웰 모델로 수학적으로 모델링하고, 이를 이용한 수치모사 결과와 실험 결과를 비교한 결과, 두 결과가 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업 중 “제진장치를 활용한 제진설계 기술개발” 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. T.T. Soong and M.C. Constantinou (1994), “Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering”, Springer-Verlag Wien-New York
2. <http://www.taylordevices.com>, 2001
3. T.T. Soong and G.F. Dargush (1997), “Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering”, John Willey & Sons
4. M.C. Constantinou and M.D. Symans (1993), “Experimental Study of Seismic Response of Buildings with Supplemental fluid Dampers”, The Structural Design of Tall Buildings, Vol. 2, pp. 93-132
5. 정태영, 임채욱, 김병현, (2001) “오리피스를 이용한 유체댐퍼의 성능실험”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 1141-1145