

오리피스 유체 댐퍼를 이용한 건축 구조물 진동제어의 실험적 연구

An Experimental Study on the Building Vibration Control Using Orificed Fluid Dampers

정 태 영* · 임 채 욱* · 김 병 현* · 문 석 준†

Tae-Young Chung, Chae-Wook Lim, Byung-Hyun Kim and Seok-Jun Moon

(2002년 3월 19일 접수 : 2002년 4월 28일 심사완료)

Key Words : Orificed Fluid Damper(오리피스 유체 댐퍼), Maxwell Model(맥스웰 모델), Vibration Control(진동제어)

ABSTRACT

An orificed fluid damper(OFD) having the capacity of about 2 tons was designed and fabricated, and series of tests were performed to grasp the fundamental performance characteristics of it. Several important findings were observed and introduced in this paper. It was 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 experimentally and numerically simulated results agree well.

1. 서 론

오리피스를 이용한 유체댐퍼(orificed fluid damper : OFD)는 피스톤, 실린더 및 오리피스로서 구성되어 있으며, 실린더 내의 유체가 오리피스를 통과할 때 발생하는 저항력을 이용하여 감쇠력을 얻는다. 1925년 미국 Ralph Peo가 자동차에 사용하기 위하여 OFD를 발명한 후에 많은 업체가 이를 만들어 오고 있으며, 대표적인 회사로는 Taylor Devices 사를 들 수 있다. 이 회사는 1955년 설립된 이후에 200만개가 넘는 제품을 각종 주요 구조물과 기기의 진동 및 충격 원충장치로 판매해 온 것으로 알려져 있다. 이 회사에서 제작된 OFD는 내진 및 내풍 용으로 1990년 에서부터 현재까지 49개의 건물과 16개의 교량의 진

동제어에 적용된 사례가 있다.^(1,2) University of Buffalo의 Constantinou교수 팀은 Taylor Devices사와 함께 OFD와 관련한 연구를 활발히 수행하여 수동 제어 시스템에 대한 연구를 수행하고 있다.^(3,4) OFD는 다른 형태의 댐퍼와 비교해 볼 때 제작 비용이 저렴하고 감쇠력이 큰 장점을 가지고 있으며, 실제 건물과 교량에 설치하기가 용이한 장점을 가지고 있다. 그러나 국내에서는 아직 건축구조물에 OFD가 적용된 사례와 관련된 연구결과가 발표된 사례를 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 OFD의 기본적인 특성파악을 위하여 최대 감쇠력이 약 2톤인 OFD를 설계·제작하고 일련의 실험을 수행하였다. OFD는 실린더 단면적의 크기, 사용 오일의 종류 및 온도, 오리피스의 형상 및 크기에 따라 다른 특성을 가진다. 따라서 본 연구에서는 오리피스의 직경, 동작 주파수 및 변위 크기에 따른 감쇠력 특성을 실험을 통해 조사하였다. OFD의 특성 실험 결과를 근거로 OFD의 수학적 모델을 설정하고, 진동제어 효과를 수치실험을 통해 살펴보았다. 또한

† 책임저자, 정희원, 한국기계연구원 구조연구부

E-mail : sjmoon@kimm.re.kr

Tel : (042) 868-7428, Fax : (042) 868-7418

* 정희원, 한국기계연구원 구조연구부

제작한 OFD를 철골 시험구조물에 설치한 후 진동대 실험을 수행하여 진동제어 효과를 확인하였다.

2. OFD의 설계 및 제작

OFD는 유압서보시스템 제작전문업체인 동양시스템(주)에서 제작되었다. 제작된 OFD는 Fig. 1과 같고, 사양은 Table 1과 같다. 사용된 오일의 점성은 CST32(ISO규격 VG32)로 Taylor Devices사의 유체 탬퍼에서 사용하는 실리콘 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, 유압회로의 내압이 임의 설정치에 달하면 밸브가 열려 기름을 by-pass시켜 회로 압력을 일정하게 유지하여 보



Fig. 1 Photograph of the orificed fluid damper

Table 1 Specifications of the orificed fluid damper

Number	Specifications
1	Piston rod diameter : 35 mm
2	Piston head diameter : 55 mm
3	Effective piston area : 14.14 cm ²
4	Maximum stroke : ±50 mm
5	Maximum damping Force : 2000 kgf
6	Used Oil : compressible DTE24

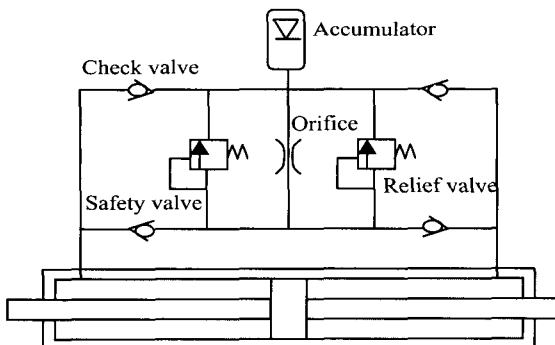


Fig. 2 Hydraulic circuit of the orificed fluid damper

다 넓은 속도 범위에서 사용 가능하게 하는 릴리프 밸브, 실린더 내의 최대 압력을 설계치 이하로 유지하기 위한 안전 밸브 및 실린더 피스톤 운동이나 온도 변화에 따른 유체 체적의 변동을 보상하기 위한 축압기 등으로 구성되어 있다.

3. OFD의 동특성 실험

제작된 OFD의 특성을 규명하기 위해 Fig. 3에서 보는 바와 같이 만능시험기를 이용하여 실험을 수행하였다. 정현파의 변위로 움직이면서 동작주파수와 변위의 크기를 바꾸어 가며 감쇠력을 측정하였다. 감쇠력은 시험기의 윗 부분에 load cell을 설치하여 측정하였다. 설계된 최대 감쇠력이 20 kN이므로 안전 밸브의 압력은 14 MPa, 릴리프 밸브의 압력은 12 MPa로 설정하였다.

먼저 오리피스의 직경에 따른 OFD의 특성변화를 살펴보았다. 오리피스의 직경이 커질수록 동일 동작주파수와 동일 속도에서 OFD의 감쇠력은 감소함을 알 수 있었는데, Fig. 4는 주파수가 1 Hz인 경우에 대하여 오리피스의 직경에 따른 속도-감쇠력의 곡선을 보여주고 있다. 최대 감쇠력은 설정된 릴리프 밸브의 압력에 의해서 제한되었는데 약 17.5 kN 이다. 이로부터 오리피스의 직경이 1 mm보다 큰 경우(피스톤의 유효 단면적에 대한 오리피스 단면적 비가 1:1800보



Fig. 3 Experimental set-up for the identification of dynamic characteristics of the OFD

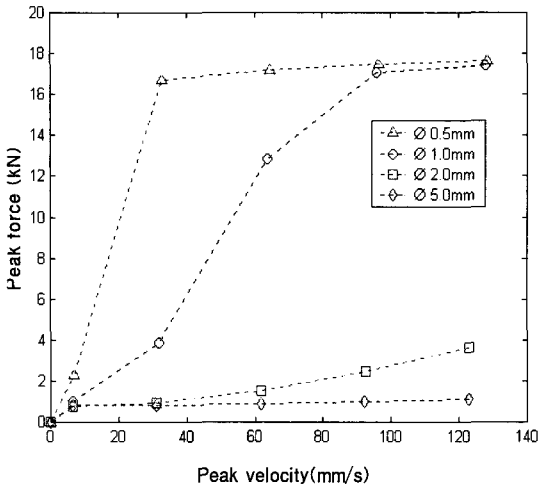


Fig. 4 Velocity-damping force curves (operating frequency = 1 Hz)

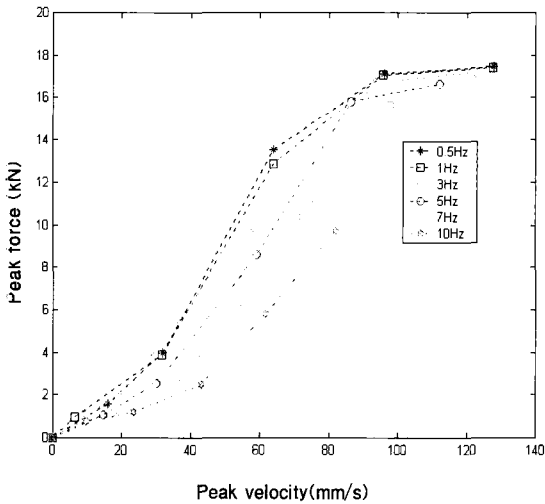


Fig. 5 Velocity-damping force responses (orifice diameter = 1 mm)

다 큰 경우)에서는 얻을 수 있는 감쇠력이 크게 감소함을 알 수 있다.

다음으로 주파수에 따른 OFD의 특성을 살펴보았다. Fig. 5는 오리피스의 직경이 1mm인 경우 주파수에 따른 속도-감쇠력 곡선을 보여주고 있는데, 주파수가 높아질수록 감쇠력은 작아짐을 확인할 수 있다. Fig. 6은 오리피스 직경이 1mm인 경우에 대하여 주파수에 따른 감쇠력 및 강성효과의 변화추이를 보여주고 있다. Fig. 6의 변위-감쇠력 곡선으로부터 주파수가 높아질수록 강성효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, Fig. 7은 주파수에 따른 변위-감쇠력의

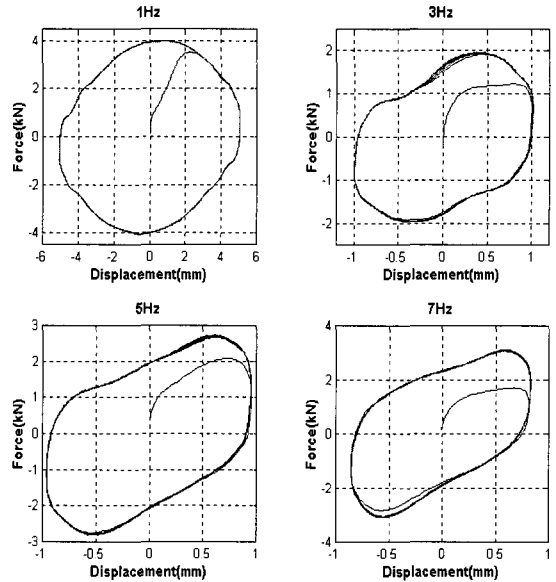


Fig. 6 Displacement-damping force responses (orifice diameter = 1 mm)

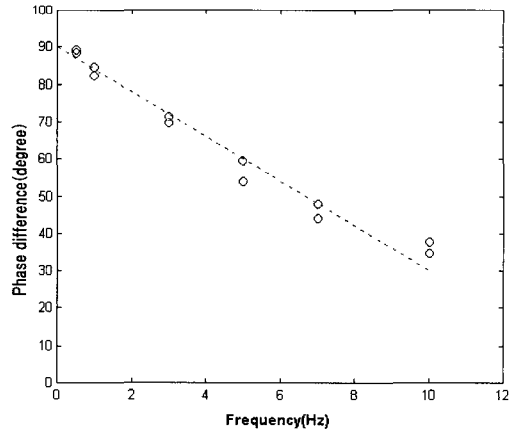


Fig. 7 Phase of the displacement-damping force responses (orifice diameter = 1 mm)

위상차를 보여주고 있는데, 1 Hz 이하의 저주파 대역에서는 위상차가 거의 90°로서 강성의 효과가 거의 없고, 주파수가 높아질수록 위상차가 작아짐으로 이로부터 강성의 효과가 크게 나타남을 확인할 수 있다.

다음으로 OFD의 강성효과가 실험 파라미터의 변화에 따라 어떻게 변화하는가를 살펴보았는데, 여러 차례의 실험 결과 오리피스의 직경이 작아질수록 또한 변위가 커질수록 강성효과가 커짐을 확인할 수 있었다. Fig. 8은 그 중 동작주파수가 7Hz인 경우에 오리피스의 직경에 따른 강성효과의 차이를 보여주고 있다.

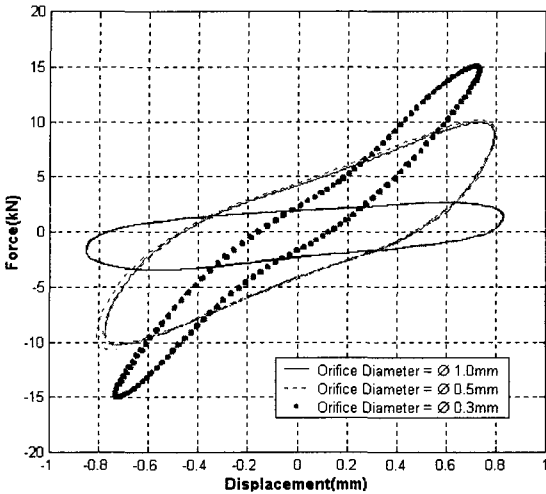


Fig. 8 Stiffness effect depending on orifice diameters (Operating Frequency = 7 Hz)

4. 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 α 의 값은 0.5 ~ 2.0으로 알려져 있다.⁽³⁾

$$u(t) = u_0 \sin(\omega t) \tag{1}$$

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

$$W_d = \oint F_d du \tag{3}$$

$$= 2^{\alpha+2} \frac{\Gamma^2(1+\alpha/2)}{\Gamma(2+\alpha)} u_0^{1+\alpha} \omega^\alpha C_d$$

여기서 Γ 는 gamma 함수이다.

제작한 OFD의 동특성 실험 결과로부터 소산 에너지 W_d 를 계산하여 식 (3)을 적용한 결과 지수 α 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.

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

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

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

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

여기서 K 는 저장강성(storage stiffness)을 나타내고, $C = W_d / \pi \omega u_0^2$ 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 맥스웰 모델(Maxwell model)을 사용하였다.⁽¹⁾

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

여기서 $F(t)$ 는 감쇠력, C_0 는 0 Hz에서의 감쇠계수, λ 는 완화시간(relaxation time)을 나타낸다. C_0 와 λ 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.

$$F(\omega) = [K_1(\omega) + iC(\omega)\omega]u(\omega)$$

$$K(\omega) = \frac{C_0 \lambda \omega^2}{1 + \omega^2 \lambda^2} \tag{7}$$

$$C(\omega) = \frac{C_0}{1 + \omega^2 \lambda^2}$$

여기서 i 는 허수 단위이다.

식 (7)을 이용하여 OFD의 동특성 실험 결과를 커브피팅한 결과 $\lambda = 17.77$ msec, $C_0 = 171.7$ Ns/mm를 얻었다. Fig. 9는 저장강성 K , 선형 감쇠계수 C 에 대하여 커브피팅한 결과를 보여주고 있다. 또한 Fig. 10은 맥스웰 모델과 실험 결과에 대한 주파수별 힘-변위 곡선을 비교하여 보여주고 있다.

5. OFD의 진동제어 성능실험

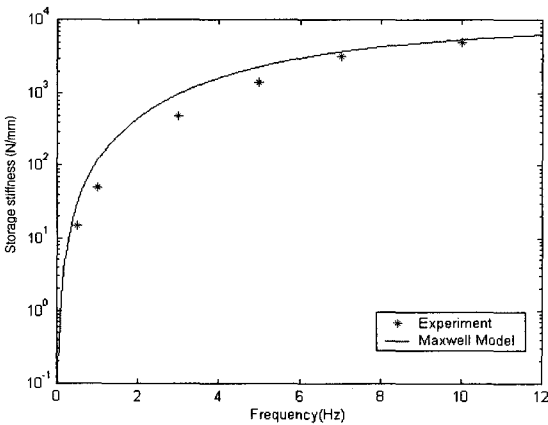
5.1 시험구조물의 동특성 파악 실험

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

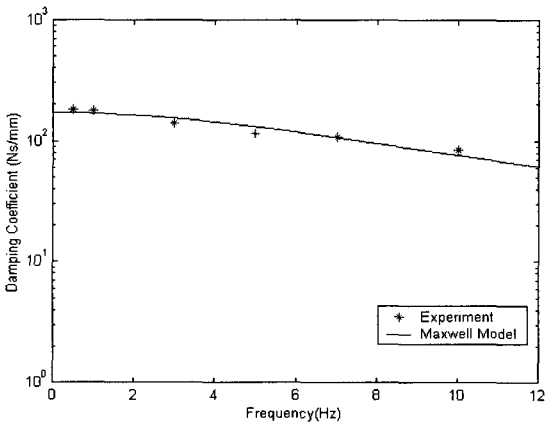
비제어 시의 시험구조물의 층간 변위는 1층이 가장 크므로, Fig. 11과 Fig. 12에서 보는 바와 같이 OFD를 지반과 시험구조물의 1층 사이에 약 16°로 기울어진 대각형으로 설치하여 OFD의 제어성능 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 오리피스 직경이 1mm인 OFD를 사용하였다.

진동대에 시험구조물을 고정시킨 후 진동대에 랜덤파형 및 지진파형의 입력을 주어 수평 방향(X축)으로 가진시키면서 실험을 수행하였다. 시험구조물의 1층에 변위계를, 또한 각 층에 가속도계를 부착하여 OFD의 설치 전·후의 시험구조물의 응답을 측정하였고, OFD의 감쇠력을 측정하기 위하여 load cell을 OFD의 한 끝단에 설치하였다.

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



(a) Storage stiffness



(b) Damping coefficient

Fig. 9 Comparison of experimental results and Maxwell model

Table 2 Natural frequencies and damping ratios of the test structure

Mode		Direction					
		1	2	3	4	5	6
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

진동대를 랜덤파형으로 가진시켜 측정된 가속도 응답으로부터 각 층에서의 전달 함수를 구하여 고유진동수, 감쇠비, 모드 형상 등을 추정하였는데, 추정된 시험구조물의 고유진동수 및 감쇠비는 Table 2와 같다.

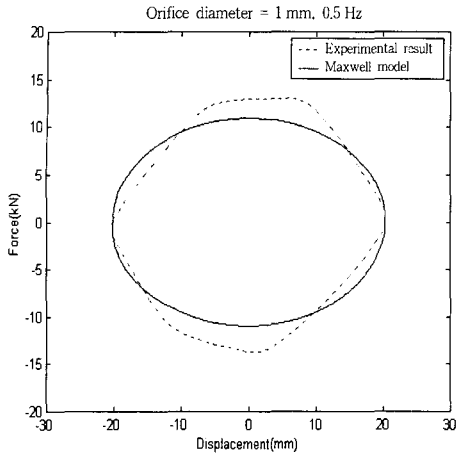
시험구조물을 전단 집중질량 모델로 모델링하고, 동특성 실험을 통하여 추정된 고유진동수, 감쇠비, 모드 형상과 질량행렬(M) 등을 이용하여 식 (9)로 주어진 운동 방정식의 감쇠행렬(C), 강성행렬(K) 등을 추정하였다.

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

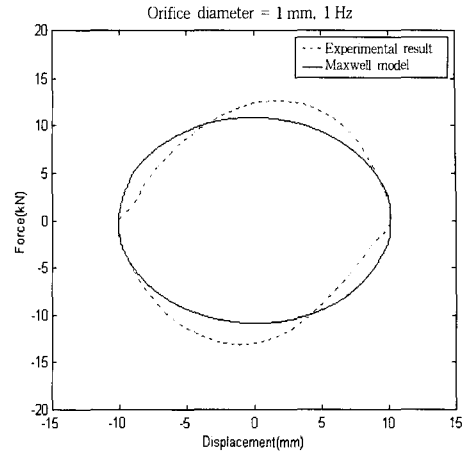
5.2 랜덤파형 가진시의 제어성능 확인 실험

랜덤파형 가진에 대한 OFD의 설치 전·후의 응답 변화를 관찰하기 위해 먼저 OFD의 설치 전의 응답을 측정하고, 이어서 설치 후의 응답을 측정하여 이의 분석을 통해 응답의 변화를 고찰하였다. 랜덤파형 가진의 최대 가속도는 0.1g이며, 각각 140초 동안 실험을 수행하였다.

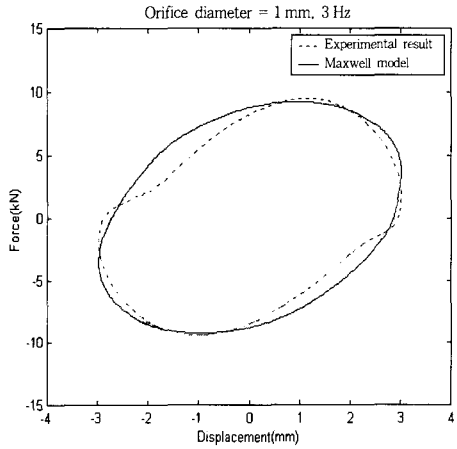
Fig. 13은 OFD 설치 전·후의 지반 가속도 입력에 대한 6층에서의 가속도 응답의 전달함수와 1층에서의 변위 응답의 시간이력을 보여주고 있다. OFD의 설치로 인해 시험구조물의 1차 모드에 대하여 약 15dB 정도의 가속도 레벨을 줄이는 효과와 1차 모드뿐만 아니라 시험구조물의 모든 모드를 동시에 크게 제어하는 효과를 확인할 수 있으며, 또한 OFD의 강성효과로 인하여 시험구조물의 고차모드의 고유진동수가 높아지는 현상을 확인할 수 있다.



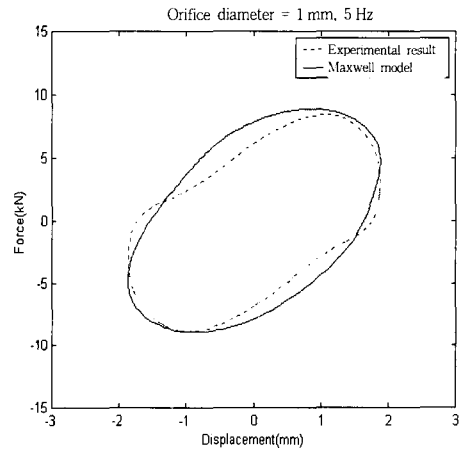
(a) 0.5 Hz



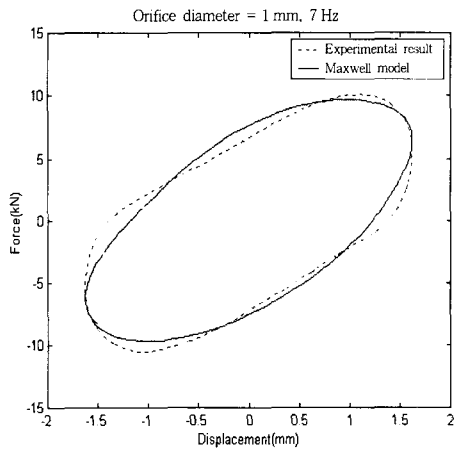
(b) 1 Hz



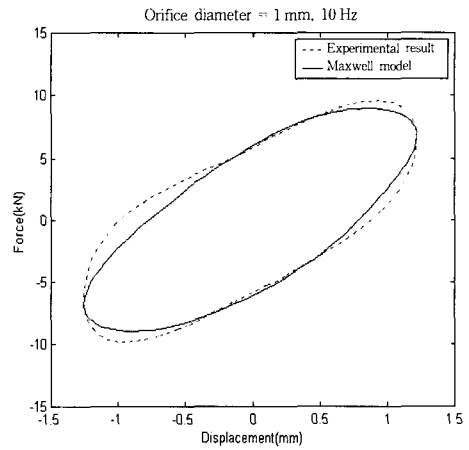
(c) 3 Hz



(d) 5 Hz



(e) 7 Hz



(f) 10 Hz

Fig. 10 Comparison of force-displacement loops of the designed OFD

5.3 지진파형 가진시의 제어성능 확인 실험

다음으로 지진파형으로 가진 실험을 수행하였다. 입력 지진파형은 1940년에 발생한 El Centro 지진의 남북방향의 가속도 신호를 1:2.6으로 시간 스케일하여 최대 가속도 크기가 0.1 g인 파형으로 실험을 수행하여 제어 성능을 확인하였다. Fig. 14는 OFD의 설치 전·후의 지진파형 가진에 대한 1층 및 6층에서의 절대 가속도 응답과 1층에서의 변위 응답의 시간 이

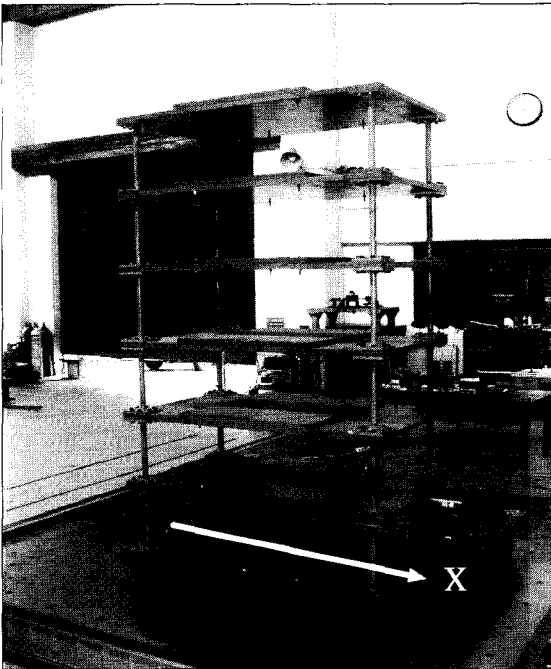


Fig. 11 Experimental set-up of the test structure with OFD

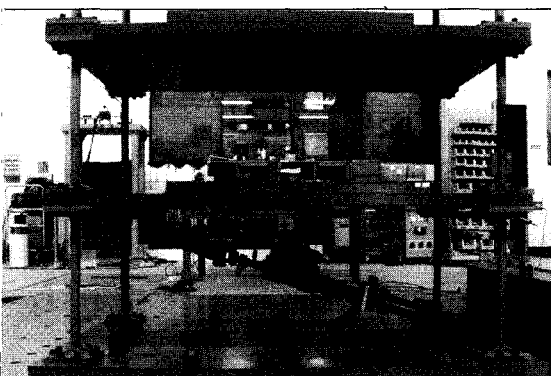
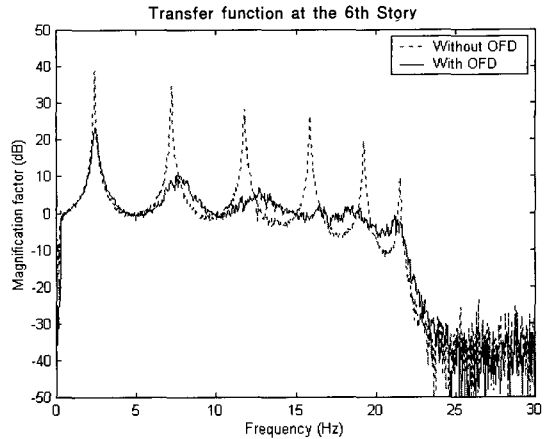
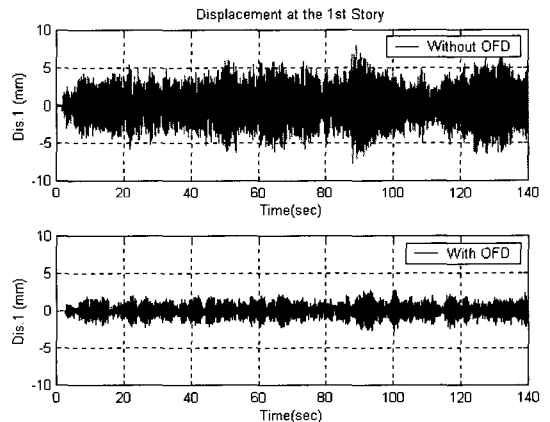


Fig. 12 Installation of the OFD

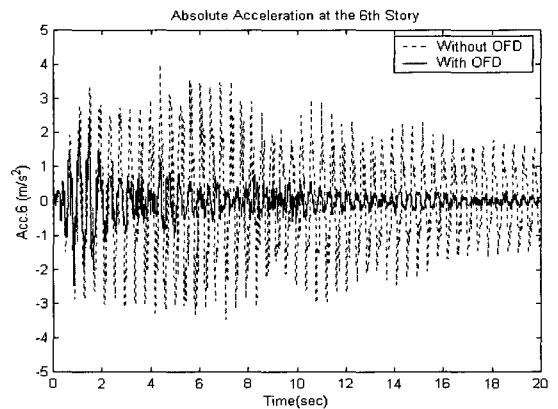


(a) Transfer function measured at the 6th story

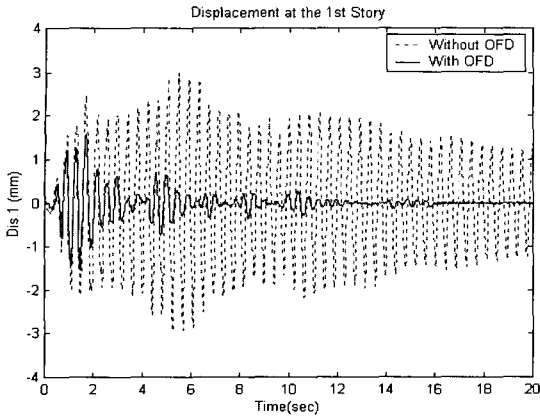


(b) Time history of displacements measured at the 1st story

Fig. 13 Control performances of the OFD under random excitation

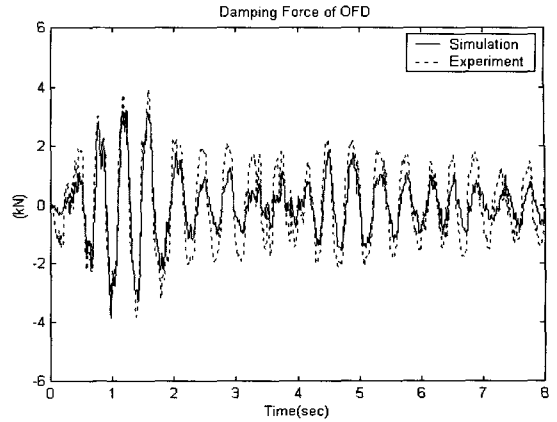


(a) Absolute acceleration measured at the 6th story



(b) Displacement measured at the 1st story

Fig. 14 Control performances of the OFD under 1:2.6 time-scaled El centro earthquake



(c) Damping force of the OFD

Fig. 15 Comparison of the simulation and experimental results under 1:2.6 time-scaled El centro earthquake

력을 보여주고 있는데, 이로부터 OFD의 설치는 지진을 받는 시험구조물의 가속도 및 변위를 줄임에 매우 효과적임을 재확인할 수 있다.

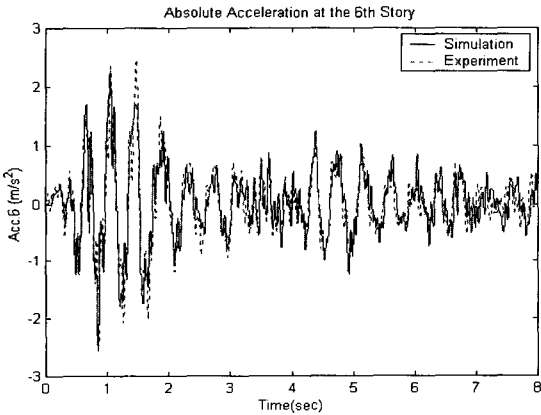
5.4 수치모사 결과와의 비교

OFD의 진동제어 성능의 실험 결과를 OFD의 동특성을 선형 등가 맥스웰 모델로 수학적으로 모델링한 수치모사 결과와 비교하였다. Fig. 15는 지진파형 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. 다만, 실험결과가 수치모사 결과에 비해 20% 정도 크게 나타나고 있으며, OFD의 수학적 모델은 실제보다 약간 작은 감쇠력을 가짐을 확인할 수 있다. 이에 대한 원인은 아직 규명되지는 않았으나, 비선형성을 가지고 있는 OFD의 선형화 모델링 과정에서의 오차 등에 기인한 것으로 판단된다. 추가적인 시험을 통해 원인을 규명할 예정이다.

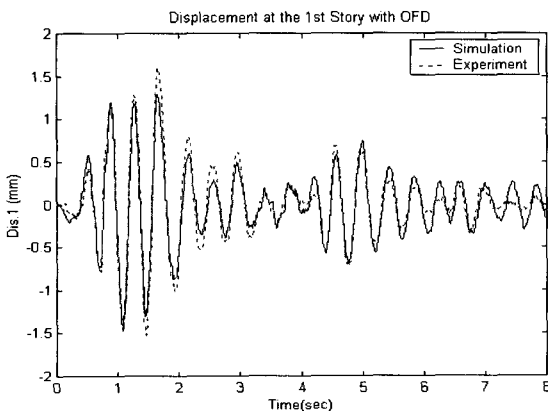
6. 결 론

본 연구에서는 최대 감쇠력 2톤 규모의 오리피스를 이용한 유체댐퍼(orificed fluid damper; OFD)를 설계 및 제작하여, 이의 기본적인 특성파악 실험을 수행하여 다음과 같은 OFD의 특성을 확인하였다.

(1) 일반적으로 오리피스의 직경이 커질수록 얻을 수 있는 감쇠력은 감소하는데, 제작된 OFD의 경우



(a) Absolute acceleration at the 6th story



(b) Displacement at the 1st story

오리피스의 직경이 1mm보다 큰 경우(피스톤의 유효 단면적에 대한 오리피스 단면적 비가 1:1800보다 큰 경우) 감쇠효과가 크게 커진다.

(2) 감쇠효과는 동작주파수가 높아질수록 떨어지고, 강성효과는 오리피스의 직경이 작아질수록, 변위나 동작주파수가 커질수록 커진다.

다음으로 제작한 OFD를 철골 시험구조물에 적용하여 진동제어 성능을 실험적으로 확인하였다. 랜덤파형 및 지진파형 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.

후 기

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

참 고 문 헌

(1) Soong, T. T. and Constantinou, M. C., 1994,

“Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering”, Springer-Verlag Wien-New York.

(2) <http://www.taylordevices.com>, 2001.

(3) Soong, T. T. and Dargush, G. F., 1997, “Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering”, John Willey & Sons.

(4) Constantinou, M. C. and Symans, M. D., 1993, “Experimental Study of Seismic Response of Buildings with Supplemental Fluid Dampers”, The Structural Design of Tall Buildings, Vol. 2, pp. 93 ~132.

(5) 장서일, 양성일, 김상주, 2000, “비선형 히스테리시스 댐퍼를 갖는 진동계의 해석”, 한국소음진동공학회지, 제 10 권, 제 3 호, pp. 531~535.

(6) 모창기, 이재수, 2001, “구조물 진동 저감을 위한 반응동 제어”, 한국소음진동공학회지, 제 11 권 제 1 호, pp. 96~103.

(7) 조기대, 김도형, 정용현, 이인, Oshima, N., Fukuda, T., 2001, “ER 유체를 이용한 반응동 완충 장치의 동적 특성”, 한국소음진동공학회지, 제 11 권 제 4 호, pp. 13~21.