

반능동형 오리피스 유체댐퍼를 이용한 구조물 진동제어에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Structural Vibration Control Using Semi-Active Orificed Fluid Dampers

문 석 준^{*} 김 병 현^{**} 정 종 안^{***}
Moon, Seok Jun Kim, Byung Hyun Jeong, Jong Ahn

국문요약

최근 구조물 진동제어 연구분야에서는 반능동형 진동제어(제진)장치에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 반능동형 제진장치는 수동형의 장점인 신뢰성과 경제성 및 능동형의 장점인 적응성(순응성)을 얻을 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 반능동형 제진장치의 일종으로 2톤급 반능동형 오리피스 유체댐퍼를 설계·제작하여 구조물의 적용을 통해 성능을 검증하였다. 수동형 오리피스 유체댐퍼에 2단 솔레노이드 밸브를 설치하여 반능동형을 구현하였다. 단독 성능시험을 통해 동특성을 파악하고, 시험용 철골구조물 적용시험을 통해 외부하중을 받는 구조물의 진동제어용 장치로서의 가능성을 확인하였다.

주요어 : 오리피스 유체댐퍼, 반능동형 제진장치, 구조물 진동제어

ABSTRACT

In general, control performance of the active control system is superior to that of the passive control devices. However, the active system require a large amount of external energy to operate the actuators. Semi-active control systems maintain the reliability of the passive control systems while taking advantage of the adjustability of the active control system.

In this research, a semi-active orificed fluid damper having the capacity of about 2 tons was designed and fabricated. It is a two-stage damper with normally open solenoid valve. A series of tests was performed to grasp its performance characteristics. It was also applied to a 6-story steel structure subjected to random and seismic excitations for the confirmation of its validity on structural vibration absorption.

Key words : orificed fluid damper, semi-active control, structural control

1. 서 론

오리피스를 이용한 유체댐퍼(Orificed Fluid Damper: OFD)는 피스톤, 실린더 및 오리피스 등으로 구성되어 있으며, 실린더 내의 유체가 오리피스를 통과할 때 발생하는 저항력을 이용하여 감쇠력을 얻는다. OFD는 다른 형태의 댐퍼와 비교해 볼 때 제작비용이 저렴하고, 감쇠력이 크며 설치가 용이한 장점을 가지고 있다.⁽¹⁾ 따라서 큰 감쇠력을 필요로 하는 건축구조물과 교량의 방진, 내풍 및 내진용으로 적용된 사례가 증가하고 있다. 대표적인 회사로는 미국 Taylor Devices사를 꼽을 수 있다. 이 회사의 홈페이지⁽²⁾를 살펴보면, 소형 구조물 및 장비뿐만 아니라 건축구조물과 대형교량의 진동제어를 위해 OFD가 활발하게 적용되고 있을 확인할 수 있다. 국내에서는 몇몇 대형 교량을 중심으로 설치되고 있으나 대부분의 경우 수입제품을 사용하는 것으로 알려져 있다. 이와 관련된 연구로서 최대 제어력이 약 2톤인 OFD를 설계·제작하고, 일련의 실험을 수행한 연구사례가 발표되었다.^{(3),(4)} 하지만 관련된 연구결과가 발표된 사례는 많지 않다.

최근 10년동안 반능동형 제진장치에 대한 관심과 연구가

증가하고 있다.^{(5),(6)} 반능동형 제진장치는 신뢰성이 우수한 수동형과 적응성이 우수한 능동형의 장점 결합을 목적으로 연구되고 있다. 이런 장치로서는 MR/ER 댐퍼, 반능동형 동조질량 댐퍼, 반능동형 마찰제진장치, 반능동형 유체댐퍼 등이 알려져 있다. 여러 반능동형 제진장치중 유지·보수가 용이하고 큰 제어력을 가진 반능동형 유체댐퍼에 관한 연구가 미국 및 일본을 중심으로 활발하게 진행되고 있다. 특히 일본의 Kajima사에서는 대형 지진으로부터 건축구조물을 보호하기 위해 체계적인 연구를 수행하여 100톤급 반능동형 유체댐퍼(continuously variable semi-active hydraulic damper)를 개발하였다.⁽⁷⁾ 개발된 댐퍼는 5층 규모의 실제 건축구조물에 설치되었다.

본 연구에서는 최대 제어력이 약 2톤인 반능동형 OFD를 설계·제작하였다. 수동형 OFD에 솔레노이드 밸브(solenoid valve)와 직경이 다른 2개의 오리피스를 설치하여 2단(two-stage) OFD를 구현하였다. 반능동형 OFD의 기본적인 특성 파악을 위하여 만능시험기를 이용하여 단독 성능시험을 수행하였다. 시험 결과를 바탕으로 각 단계에서의 감쇠력 특성을 조사하고, 수학적 모델을 설정하였으며, 시험결과와 비교하여 보았다. 또한 제작한 OFD를 6층 철골 시험구조물에 설치한 후 주파수 특성이 상이한 3가지 지진파형에 대해 진동대 실험을 수행하여 진동제어 효과를 실험적으로 확인하였다. 반능동형 OFD의 제어를 위한 제어 로직은 clipped-optimal algorithm⁽⁸⁾을 사용하여 설계하였다.

* 정회원 · 한국기계연구원 구조연구부, 선임연구원(대표저자 : sjmoon@kimm.re.kr)
** 정회원 · 한국기계연구원 구조연구부, 책임연구원
*** 한국기계연구원 구조연구부 선임기술원
본 논문에 대한 토의를 2004년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 2. 12 / 심사종료일 : 2004. 3. 4)

2. 반능동형 OFD 설계 및 제작

반능동형 OFD의 기본구조는 수동형 OFD⁽⁴⁾와 동일하다. 피스톤, 실린더 및 오리피스 등으로 구성되어 있으며, 실린더 내의 유체가 오리피스를 통하여 움직일 때 발생하는 저항력을 이용하여 감쇠력을 얻는다. 제작된 반능동형 OFD의 유압회로는 Fig. 1과 같다. 유압회로는 실린더 양단의 압력차에 의한 유체(오일)의 흐름을 한쪽 방향으로 유지하기 위한 체크 밸브(check valve), 유압회로의 내압이 임의 설정치(12MPa)에 도달하면 밸브가 열려 오일을 by-pass시켜 회로 압력을 일정하게 유지하여 보다 넓은 속도범위에서 사용 가능하게 하는 릴리프 밸브(relief valve), 실린더 내의 최대 압력(14MPa)을 설계치 이하로 유지하기 위한 안전밸브(safety valve)와 실린더 피스톤 운동이나 온도변화에 따른 유체체적의 변동을 보상하기 위한 축압기(accumulator) 등으로 구성되어 있다. 또한 솔레노이드 밸브는 입력된 전압크기에 따라 오일 흐름을 1mm ($\phi 1$) 오리피스 또는 2mm ($\phi 2$) 오리피스 쪽으로 바꾸어 주는 역할을 한다. 축압기는 0.5MPa로 충전되어 있으며, 실린더 오일 충전압력은 1MPa이다. 솔레노이드 밸브 On(이하 Passive-On)상태에서는 약 1.8톤 (18kN)급 댐퍼, Off 상태(이하 Passive-Off)에서는 약 0.4톤 (4kN)급 댐퍼로 설계되었다. 제작된 반능동형 OFD의 사양을 Table 1에 정리하였다.

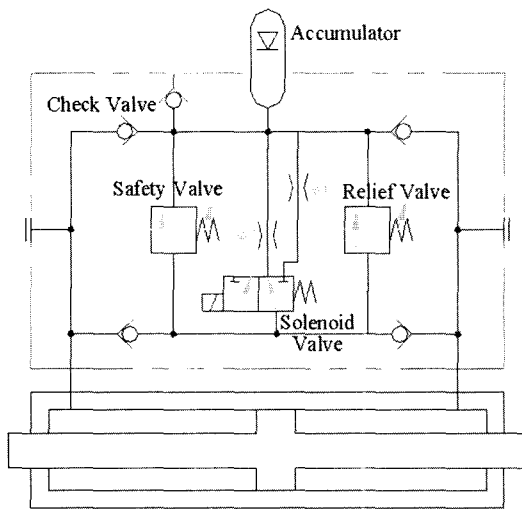


Fig. 1 Hydraulic circuit of the semi-active OFD

Table 1 Specifications of the semi-active OFD

Item	Specification
Piston Rod Diameter	35mm
Piston Head Diameter	55mm
Effective Piston Area	14.14cm ²
Maximum Stroke	±50mm
Orifice Diameter	1mm, 2mm
Solenoid Valve (response time)	Energized 22msec De-Energized 12msec
Oil	DTE-24

3. 동특성 파악

3.1 단독 성능시험

제작한 반능동형 OFD의 특성을 조사하기 위해 Fig. 2에서 보는 바와 같이 OFD를 만능시험기(UTM)에 장착하였다. 동특성 파악 실험은 동작 주파수와 변위의 크기를 바꾸어 가며 정현파의 파형을 입력하여 이때의 감쇠력을 측정하는 방법으로 수행하였다. 감쇠력은 시험기의 상단에 load cell을 설치하여 측정하였다. 제작된 반능동형 OFD는 솔레노이드 밸브에 입력되는 전압의 크기에 따라 오일의 흐름경로를 변경할 수 있다. 정상시에는 솔레노이드 밸브에 0V 직류전압(또는 무전압)이 입력되며, 이때는 직경이 2mm인 오리피스 쪽으로 오일의 흐름경로가 열려 있다. 밸브에 24V 전압이 입력되면 오일의 흐름경로는 1mm인 오리피스 쪽으로 변경된다. 따라서 0V 전압인 경우(Passive-Off)와 24V 전압인 경우(Passive-On)에 대해 실험을 각각 수행하였다. 단, 대부분의 컴퓨터용 AD/DA 보드에서는 ±10V 사이의 전압만 출력할 수 있으므로, 전압강화장치(transformer)를 만들어 5V 전압으로 솔레노이드 밸브를 조정할 수 있도록 구성하였다.

먼저 속도변화에 따른 감쇠력의 영향을 살펴보았다. Fig. 3은 동작 주파수 1Hz에서 속도-감쇠력 곡선을 보여주고 있다. Passive-On 및 Passive-Off 제어상태에서 최대 약 18kN 및 4kN의 감쇠력이 각각 발생함을 알 수 있다. 오리피스의 직경이 클수록 감쇠력은 감소하고, 속도가 증가할수록 감쇠력도 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 주파수에 따른 속도-감쇠력 곡선을 보여주고 있는데, Passive-On 제어에서는 일정한 속도에서 주파수가 높아질수록 감쇠력이 작아짐을 확인하였다. 반면 Passive-Off 제어에서는 일정한 속도에서 주파수에 따른 변화가 미미하였다. 따라서 높은 진동수에서도 동일한 감쇠효과를 낼 수 있음을 확인할 수 있다.

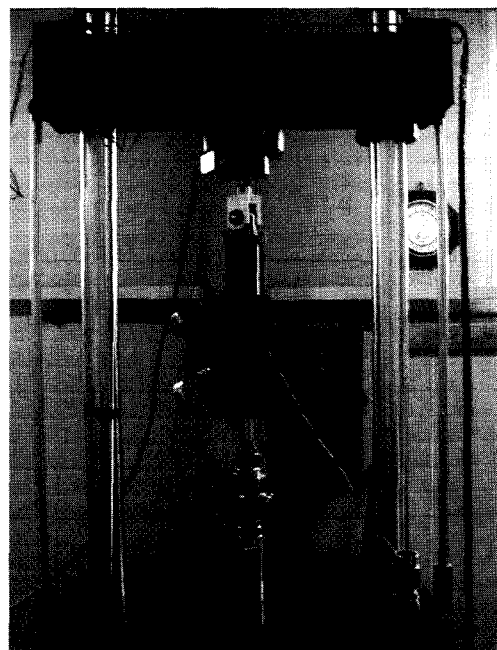


Fig. 2 Semi-active OFD installed on the UTM

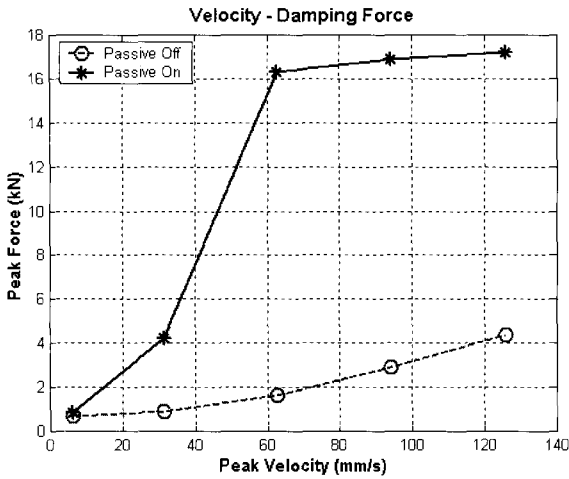
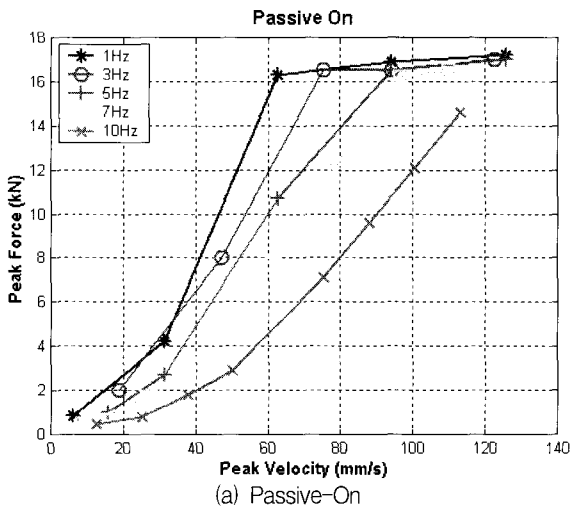
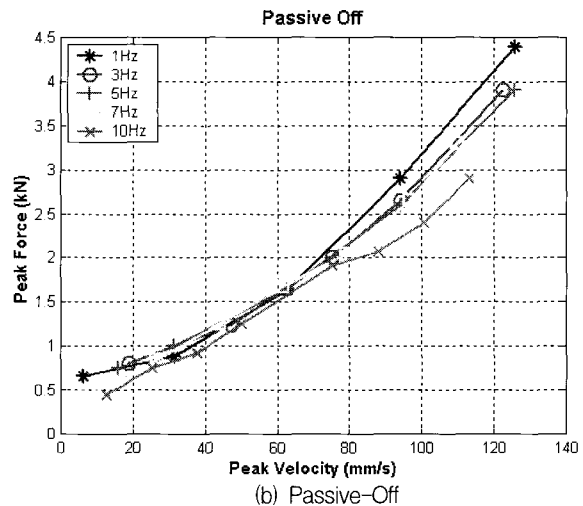


Fig. 3 Velocity-damping force curve at 1Hz

Fig. 5는 주파수에 따른 변위-감쇠력 곡선(hysteretic curve)을 보여주고 있다. 일정한 동작변위에서 주파수가 높아질수록 감쇠력과 강성효과가 증가함을 알 수 있다. 그 경향은 Passive-On 제어에서 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다. 또한 일

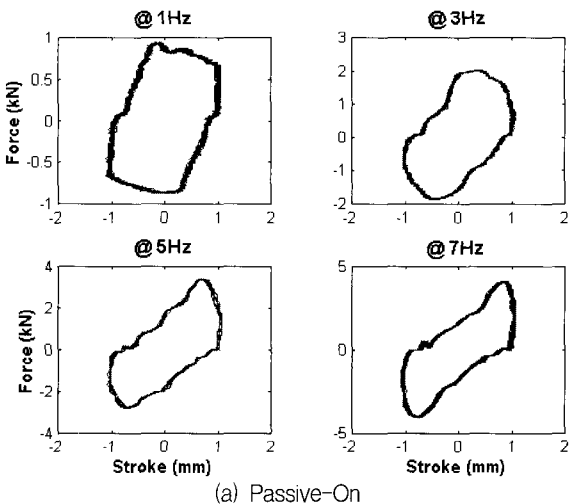


(a) Passive-On

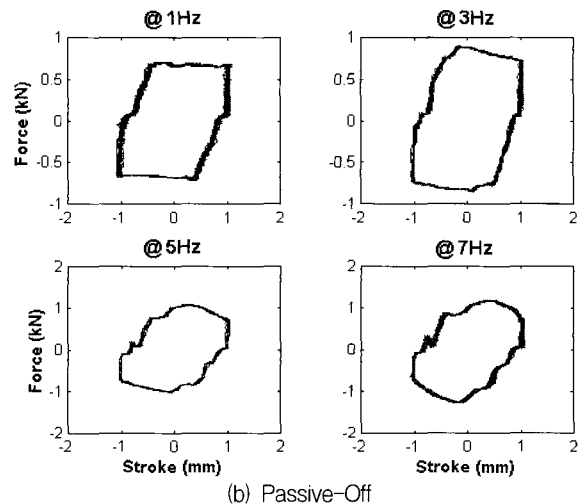


(b) Passive-Off

Fig. 4 Velocity-damping force curves



(a) Passive-On



(b) Passive-Off

Fig. 5 Displacement-damping force curves at ± 1 mm stroke

정한 속도에서의 변위-감쇠력 곡선을 Fig. 6에 보였다. 동작 주파수가 높아질수록 감쇠력은 감소함을 알 수 있으며, 곡선 모양의 변화를 통해 Passive-On 제어에서는 주파수 의존성이 매우 큰 반면 Passive-Off 제어에서는 주파수 의존성이 상대적으로 적은 편이다. 이는 Fig. 4의 결과와 동일함을 알 수 있다. 마지막으로 각 동작주파수에서 슬레노이드 밸브를 열고(Off) 닫으면서(On) 특성의 변화를 조사하였다. 밸브는 5초동안 열고 이어서 5초 동안 닫는 방식으로 수행되었다. 대표적인 응답특성 결과로서 동작주파수가 5Hz일 때의 결과를 Fig. 7에 도시하였다.

3.2 수학적 모델링

반능동형 OFD의 제어를 설계하기 위해서는 OFD의 특성을 수학적으로 표현해야 한다. 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 0.5~2로 알려져 있다.⁽¹⁾

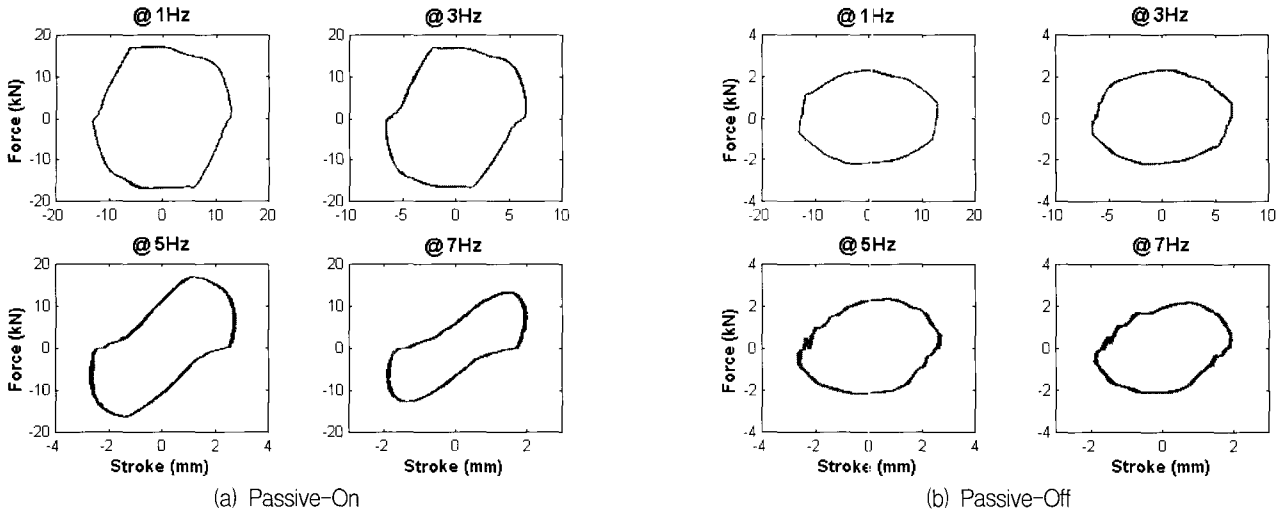


Fig. 6 Displacement-damping force curves at 81mm/s velocity

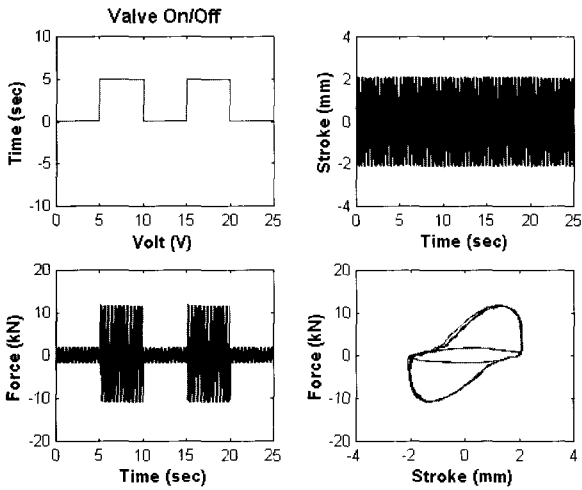


Fig. 7 Response curves with valve on/off

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

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

$$W_d = \oint F_d du = 2^{a+2} \frac{\Gamma^2(1+a/2)}{\Gamma(2+a)} u_0^{1+a} \omega^a C_d \tag{3}$$

여기서 Γ 는 gamma 함수이다.

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

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

이때 OFD의 강성효과를 같이 고려하면, OFD의 감쇠력을

식 (5)와 같이 선형 근사화할 수 있다.

$$F(t) = Ku(t) + Cu(t) \tag{5}$$

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.⁽⁹⁾

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

여기서 $F(t)$ 는 감쇠력, C_0 는 0Hz에서의 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.

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

여기서 i 는 허수 단위이다.

식 (7)을 이용하여 OFD의 동특성 실험 결과를 커브피팅한 결과 Passive-On인 경우 $\lambda = 23 \text{ msec}$, $C_0 = 210 \text{ Ns/mm}$, Passive-Off인 경우 $\lambda = 10 \text{ msec}$, $C_0 = 28 \text{ Ns/mm}$ 를 얻었다. Fig. 8은 맥스웰 모델과 실험 결과에 대한 주파수별 힘-변위 곡선을 비교하여 보여주고 있다. Passive-Off인 경우는 결과가 매우 유사한 반면 Passive-On인 경우는 결과에 약간의 차이를 보이고 있다. 이는 Passive-On 제어에서는 주파수에 따른 감쇠력 변화가 크기 때문이다. 즉 Passive-On인 경우 Passive-Off인 경우보다 비선형성이 강하며, 이로 인해 맥스웰 모델과 약간의 차이가 나타나고 있다.

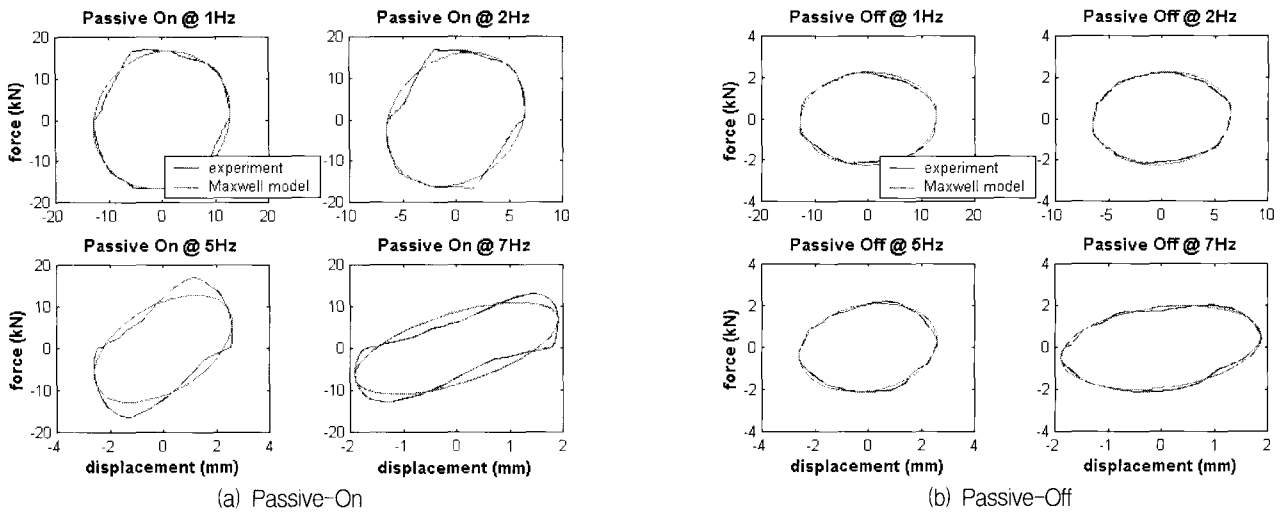


Fig. 8 Comparison of damping force-displacement curves

4. 구조물 진동제어 성능 시험

반능동형 OFD를 철골 시험구조물에 설치하여 구조물 진동제어성능을 조사하였다. 6층 시험구조물은 각층의 후판이 4개의 기둥으로 지지되고 있으며, 총 중량은 약 8톤이다. 가로×세로×높이가 2,100mm×1,200mm×3,500mm이다. 층간 변위가 가장 큰 1층 사이에 Fig. 9 및 10에 보이는 바와 같이 약 16° 기울어진 대각형으로 OFD를 설치하여 성능시험을 수행하였다. 진동대에 시험구조물을 고정시킨 후 진동대에 랜덤 및 지진파형을 입력하여 수평 단일방향으로 가진 시키면서 시험을 수행하였다. 시험구조물의 1층에 변위계(LVDT)를 설치하여 상대변위를 계측하였고, 각 층에 가속도계를 부착하여 OFD의 설치 전·후의 가속도 응답을 계측하였다. 또한 OFD의 감쇠력을 계측하기 위하여 load cell을 OFD의 한 끝단에 설치하였다. 본 논문에서는 Fig. 9에서 보는 시험구조물의 수평 좌우방향에 대한 응답만을 고려하였다. 시험구조물의 특성치는 시험을 통해 확인하였으며⁽⁴⁾, 구조물의 1차 고유진동수와 감쇠비는 각각 약 2.4Hz와 0.5%이다. 반능동형 OFD의 제어를 위한 제어 알고리즘은 clipped-optimal algorithm을 사용하여 설계하였으며, 제어신호를 계

산하기 위해서는 대상 구조물의 상태량(가속도, 속도 또는 변위)과 반능동형 제진장치의 상태량이 필요하다. 본 연구에서는 각 층에서의 가속도 응답과 OFD의 감쇠력 응답을 입력 시켰다.

4.1 랜덤파형 가진시의 제어성능 검증시험

랜덤 파형 가진에 대한 OFD 설치 전·후의 응답변화를 관찰하기 위해 먼저 OFD 설치 전의 응답을 계측하고, 이어서 설치 후의 응답을 계측하여 응답의 변화를 살펴보았다. 랜덤 파형의 RMS 가속도 레벨은 0.03g이며, 최대 주파수는 33Hz이다. 지반가속도에 대한 최상층 6층에서의 가속도 응답의 전달함수를 Fig. 11에 보여주고 있다. OFD의 설치로 인해 시험구조물의 1차 진동형에 대해 10dB 이상의 가속도 레벨을 줄이는 효과가 있음을 알 수 있으며, 고차 진동형도 동시에 크게 제어하는 효과를 확인할 수 있다. 기진력이 작기 때문에 Passive-Off, Passive-On 및 반능동 제어 경우 모두 비슷한 성능을 보이고 있으나, Passive-On 제어와 반능동 제어인 경우가 다소 향상된 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 자세히 살펴보면 시험구조물의 고차 고유진동수가 약간



Fig. 9 Experimental set-up of the test structure

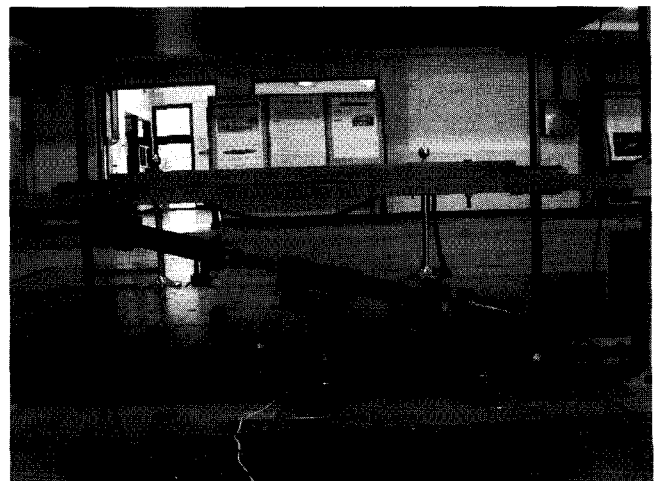


Fig. 10 Installation of the semi-active OFD

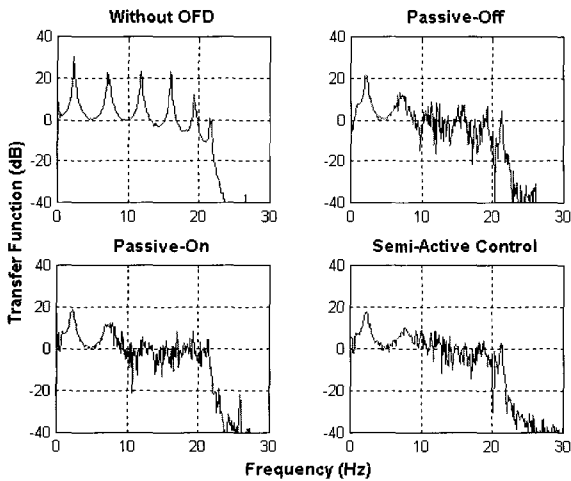


Fig. 11 Transfer function under random excitation

높아지는 현상을 확인할 수 있는데, 이는 3장에서 언급한 OFD의 강성효과로 인하여 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 12 및 Fig. 13은 각각 1층에서 계측된 상대변위 응답 및 load cell로 계측한 OFD의 감쇠력을 시간영역에서 보여주고 있다. 또한 계측된 자료를 분석하여 6층에서의 가속도 응답, 1층에서의 상대변위 응답 및 OFD의 감쇠력에 대해 최대

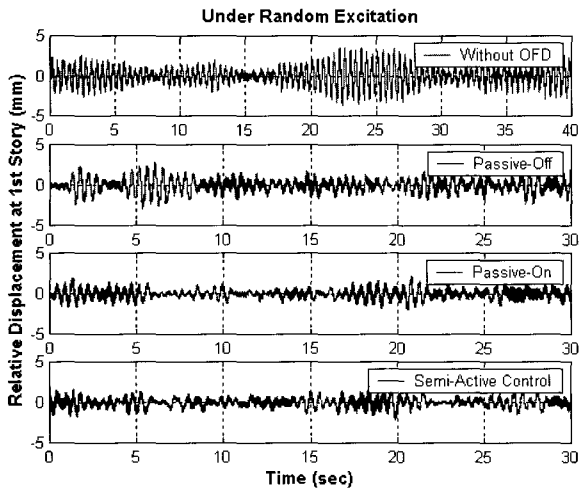


Fig. 12 Relative displacement at 1st story

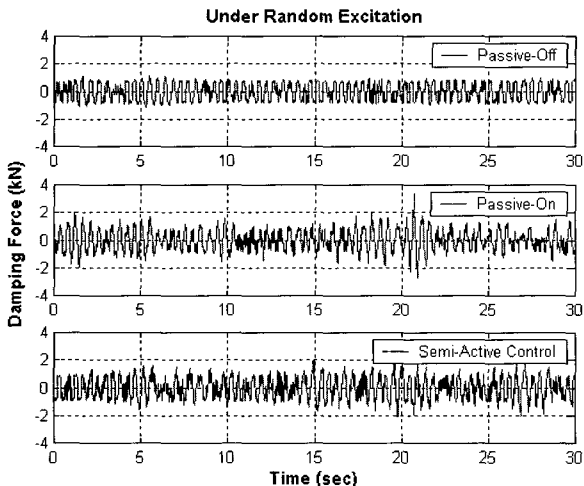


Fig. 13 Damping force of the semi-active OFD

크기 및 RMS 크기를 Table 2에 정리하였다. 반능동형 OFD를 설치함으로써 가속도 응답은 60%이상, 상대변위 응답은 30%이상 줄일 수 있음을 알 수 있다. Table 2를 보면, 상대변위 응답측면에서는 Passive-On 제어가, 가속도 응답측면에서는 반능동형 제어방법이 약간 향상된 제어성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 본 시험에 사용된 랜덤하중의 크기를 더 증가시킬 경우 시험구조물에 피로파괴 현상이 발생하였으며, 시험하중 조건에서는 OFD에서 작용되는 감쇠력이 최대 용량의 약 15% 정도이었다. 따라서 OFD의 비선형성에 의해 다른 시험조건에서는 다른 결과가 생성될 수도 있을 것으로 판단되나, 전체적인 경향은 일치할 것으로 예상된다.

Table 2 Response results under random excitation

Response		Type	Without OFD	Passive -Off	Passive -On	SA Control
		Accel. at 6-Story(m/sec ²)	Max. Peak	4.23	2.04	1.58
	RMS	1.30	0.58	0.43	0.42	
Interstory Displ. at 1-Story(mm)	Max. Peak	3.07	2.97	2.21	2.26	
	RMS	1.14	0.81	0.56	0.56	
Damping Force(kN)	Max. Peak	-	1.15	3.39	2.14	
	RMS	-	0.59	0.74	0.78	

4.2 지진파형 가진시의 제어성능 검증시험

랜덤파형 가진시험 후 3가지 지진파형에 대한 시험을 수행하였다. 사용된 지진파형은 미국 El Centro(1940년) 지진, Mexico(1985년) 지진, 터키 Gebze(1999년) 지진이다. 시험구조물의 고유진동수 및 안전성 등을 고려하여 지진파형을 1:2.6으로 시간 스케일하고, 최대 가속도 크기를 0.1g 또는 0.2g가 되도록 수정하였다. 사용된 3개의 지진파형(최대 가속도 0.1g)은 Fig. 14에 보이는 바와 같으며, 서로 다른 주파수 특성을 가지고 있다. 제어방법은 랜덤파형 가진시의 제어성능 검증시험때와 같이 Passive-Off, Passive-On 및 반능동 제어를 고려하였다. 각 지진파형에 대한 시험구조물 6층에서의 가속도, 1층에서의 상대변위 응답 및 감쇠력을 Table 3에

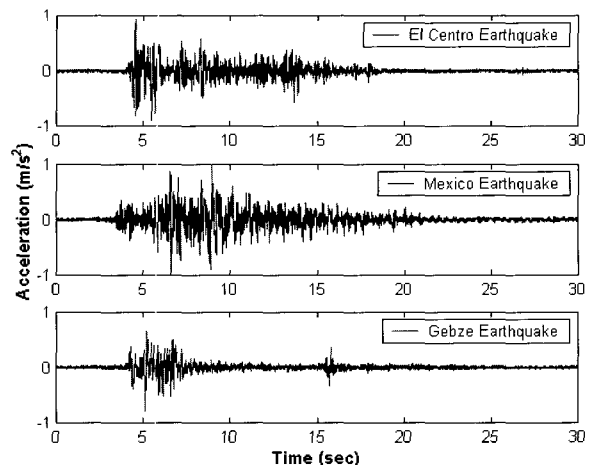


Fig. 14 Base excitation: 3 different earthquakes

Table 3 Response results under different earthquakes

Response		Acceleration at 6-story (m/sec ²)		Interstory Displacement at 1-story(mm)		Damping Force (kN)	
Earthquake	Type	Peak	RMS	Peak	RMS	Peak	RMS
El Centro (0.1g)	Without OFD	3.87	0.77	2.61	0.73	-	-
	Passive-Off	2.12	0.36	2.82	0.49	1.89	0.45
	Passive-On	2.20	0.30	1.92	0.30	2.68	0.60
	Semi-Active	1.99	0.31	2.11	0.34	2.83	0.56
Mexico (0.1g)	Without OFD	6.00	1.20	4.76	1.21	-	-
	Passive-Off	2.98	0.48	3.35	0.69	2.14	0.54
	Passive-On	2.51	0.41	2.47	0.46	4.78	0.82
	Semi-Active	2.86	0.41	2.58	0.50	4.13	0.76
Gebze (0.1g)	Without OFD	1.83	0.42	1.25	0.36	-	-
	Passive-Off	1.94	0.24	1.06	0.13	1.69	0.36
	Passive-On	1.83	0.23	0.94	0.12	1.86	0.39
	Semi-Active	1.83	0.23	0.87	0.11	1.91	0.38
El Centro (0.2g)	Passive-Off	5.96	0.95	4.32	0.92	2.37	0.58
	Passive-On	4.46	0.65	2.73	0.54	6.10	0.98
	Semi-Active	3.88	0.59	3.72	0.67	6.56	0.98
Mexico (0.2g)	Passive-Off	7.55	1.22	7.36	1.29	3.64	0.70
	Passive-On	5.19	1.03	4.10	0.89	11.49	1.76
	Semi-Active	6.83	0.86	4.83	1.03	10.71	1.55
Gebze (0.2g)	Passive-Off	2.68	0.37	1.50	0.27	1.83	0.42
	Passive-On	2.40	0.32	1.28	0.22	2.31	0.48
	Semi-Active	3.27	0.45	1.69	0.28	2.44	0.52

정리하였다. 모든 지진파형에 대해 OFD의 설치로 인하여 시험구조물의 진동이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 예상한 바와 같이 전체적으로 Passive-On 제어와 반능동 제어인 경우 제어성능이 더 좋은 것을 살펴볼 수 있다.

Passive-On 제어와 반능동 제어인 경우를 비교해 보면 어떤 제어방법이 더 우수하다고 단정할 수 없으며, 지진파형과 관심 구조응답에 따라 차이가 있음을 알 수 있다. 예를 들면, 1층에서의 층간변위응답의 경우 Passive-On 제어가 대부분은 우수한 제어성능을 보이는 것으로 나타났다. 반면 El Centro (0.2g)에 대한 가속도 응답에서는 반능동형 제어방법이 효과적이었다. 이와 같이 각 경우에 따라 제어성능 정도가 다른 것은 OFD가 가지고 있는 강한 비선형성 때문인 것으로 판단된다. Table 3의 감쇠력을 살펴보면, 당연한 사실이지만 작용하는 감쇠력이 클수록 구조물 응답은 감소하고 있음을 알 수 있다. 대표적인 시험결과로서 Mexico 지진(0.2g)에 대한 응답을 Fig. 15 및 16에 보여주고 있다. Fig. 15를 자세히 살펴보면 전체적으로는 Passive-On 제어가 성능이 우수한 것을 알 수 있으나, 약 10초 구역에서는 Passive-Off 제어가 Passive-On 제어보다 성능이 좋은 경우가 있음을 확인하였다. 이는 반능동형을 적용한다면 더 좋은 성능을 얻을 수도 있음을 보여주고 있다. Fig. 16은 반능동 제어일 경우의 결과를 보여 주고 있으며, Fig. 15의 결과와 비교해 보면 완벽하지는 않지만 반능동 제어를 통해 향상된 결과를 보여주고

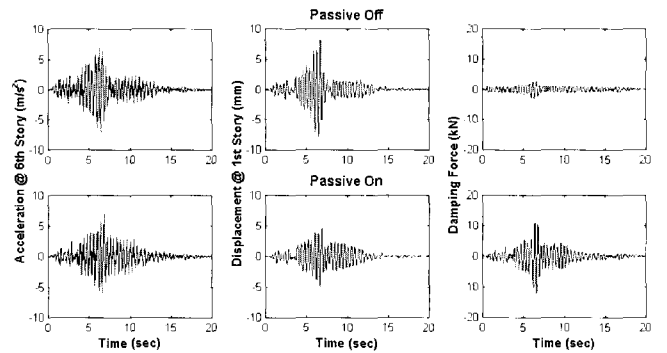


Fig. 15 Responses under Mexico Earthquake(0.2g Peak)

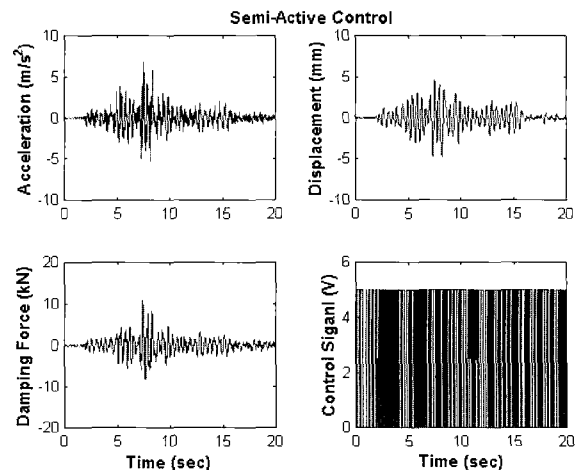


Fig. 16 Responses under Mexico Earthquake(0.2g Peak)

있음을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 15로부터 예상한 수준의 결과는 확인하지 못하였으며, 제어로직에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 최대 감쇠력 2톤 규모의 반능동형 오리피스 유체댐퍼를 개발하였다. 수동형 오리피스 유체댐퍼에 솔레노이드 밸브(solenoid valve)와 직경이 다른 2개의 오리피스를 설치하여 2단(two-stage) 반능동형 OFD를 구현하였다.

반능동형 OFD의 기본적인 특성파악을 위하여 만능시험기를 이용하여 단독 성능시험 수행하였으며, 각 단계(Passive-On 및 Passive-Off)에서의 특성을 파악하였다. 시험 결과를 바탕으로 선형 등가 맥스웰 모델로 수학적으로 모델링하고, 이를 이용한 수치실험결과와 시험결과를 비교한 결과 두 결과가 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

반능동형 OFD를 6층 철골 시험구조물에 설치한 후 랜덤파형 및 주파수 특성이 상이한 3가지 지진파형에 대해 진동대 실험을 수행하여 진동제어 효과를 실험적으로 확인하였다. 대부분의 경우 Passive-On 제어와 반능동 제어에서의 결과가 Passive-Off 제어에서의 결과보다 우수한 것으로 나타났으나, 일부 시험구간에서 Passive-Off 제어의 결과가 Passive-On 제어보다 우수한 경우도 발견되었다. Passive-On 제어와 반능동 제어의 비교에서는 어떤 제어방법이 더 우수하다고 단정할 수 없었으며, 지진파형과 관심구조응답에 따라 차이가 있음을 알 수 있었다. 따라서 설치될 구조물의 특성 및 설계하중(지진) 특성을 고려하여 제어방식을 결정해야 함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 반능동형 OFD의 제어로직으로서 clipped-optimal algorithm를 사용했으며, 현재 다수의 제어로직들이 발표되고 있다.^{(10),(11)} 따라서 여러 제어로직의 실험적 비교 연구를 통해 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업 중 “제진장치를 활용한 제진설계 기술개발”, 과제에 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Soong, T. T. and Dargush, G. F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John & Sons, 1997.
2. <http://www.taylordevices.com/3seismic.htm>, 2004.
3. 정태영, 임채욱, 김병현, “Orificed Fluid Damper를 이용한 구조물 진동제어의 실험적 연구”, 한국지진공학회 추계학술대회, 2001, pp. 364-372.
4. 정태영, 임채욱, 김병현, 문석준, “오리피스 유체댐퍼를 이용한 건축구조물 진동제어의 실험적 연구”, 한국소음진동공학회, 제12권, 제6호, 2002, pp. 469-477.
5. Syman, M. D. and Constantinou, M. C., “Development and Experimental Study of Semi-Active Fluid Damping Devices for Seismic Protection of Structures,” *Technical Report NCEER 95-0011*, National Center for Earthquake Engineering Research, SUNY at Buffalo, 1995.
6. Mori, F., Sugiyama, T., Suma, M., Kurino, H., and Fukushima, I., “Application of Semi-Active Switching Oil Damper to an Actual 11-Story Building,” *Proceedings of the 3rd World Conference on Structural Control*, Vol. 2, 2002, pp. 143-148.
7. Kurata, N., “Actual Seismic Response Control Building with Semi-active Damper System,” *Proceedings of the Structural Congress & Exposition*, Washington, D.C., 2001.
8. Dyke, S. J., Spencer, B. F., Sain, M. K., and Carlson, J. D., “Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction,” *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, 1996, pp. 565-575.
9. Soong, T. T. and Constantinou, M. C., *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*, Springer-Verlag Wien-New York, 1994.
10. Jansen, L. M. and Dyke, S. J., “Semi-Active Control Strategies for MR dampers: A Comparative Study,” *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 8, 2000, pp. 795-803.
11. Occhiuzzi, A. and Serino, G., “Control Strategies for Semi-Active Structural Control Devices,” *Proceedings of the 3rd World Conference on Structural Control*, Vol. 2, 2002, pp. 641-647.