

# 특집

## 대형 구조물의 준능동제어기술

# 구조물 제진을 위한 자기유변유체 댐퍼의 준최적 설계 및 제작

문석준\*, 허영철\*\*, 최강민\*\*\*, 정형조\*\*\*\*

(\*,\*\*한국기계연구원 e-Engineering 센터, \*\*\*한국과학기술원 건설 및 환경공학과, \*\*\*\*세종대학교 토목환경공학과)

### 1. 머리말

최근 20여 년 동안 수동형 및 능동형 진동제어장치의 장점을 결합한 반능동형 제진장치에 대한 관심과 연구가 증가하고 있다. 반능동형 제진장치는 신뢰성이 우수한 수동형과 적응성이 우수한 능동형의 장점 결합을 목적으로 연구되고 있다. 즉 반능동형 제진장치는 장치의 특성(제어력 크기, 동조 주파수 등)을 실시간적으로 변경 가능한 반면, 구동을 위해 소규모 에너지만을 요구하므로 지진 등 외부 하중에 의해 외부 전원이 차단될 경우에도 축전지 등을 이용하여 장치가 원하는 기능을 유지할 수 있다. 이러한 구조물 진동제어용 반능동형 장치로서는 가변 오리피스 댐퍼(variable orifice damper), 가변 마찰 댐퍼(variable friction damper), 조절형 동조 유체 댐퍼(adjustable tuned liquid damper) 및 특수한 유체를 이용한 전기/자기유변 유체 댐퍼(electrorheological/magnetorheological fluid damper) 등이 알려져 있다. 특히 자기유변 유체 댐퍼는 자기유변 유체가 큰 항복 강도(yield strength)를 가지고 있으며, 비교적 낮은 전압에서도 작동이 가능한 장점을 가지고 있어 많은 분야에서 활발하게 연구가 진행되고 있다. 또한 넓은 운용 온도 범위를 가지고 있어 적용범위가 확대되고 있다.

Gavin et al (2001)<sup>1)</sup>은 자기유변 유체 장치 설계를 위한 두 가지 요소에 대해서 설명하였다. 첫째, 댐퍼는 전력을 적게 소모해야 하며, 둘째, 댐퍼의 제어력은 전기적 신호에 대해 가능한 빠르게 응답하여야 한다. 이를 위해 2002년 Gavin et al<sup>2)</sup>은 댐퍼에 필요한 전력을 최소화

하도록 최적화 기법을 이용한 자기유변 유체 댐퍼 설계에 대해 연구하였다. 국내에서도 활발한 연구가 진행되고 있으며, 한국기계연구원의 문석준 등<sup>3,4)</sup>이 약 1톤급 자기유변 유체 댐퍼를 설계·제작하여 소형 구조물 모델에 적용하여 성능을 검증한 바 있다.

이 글에서는 최적화 기법을 이용한 자기유변 유체 댐퍼 설계 방법에 대한 연구결과를 수록하고 있다. 몇 개의 제한조건을 갖는 상황에서 자기유변 유체 댐퍼의 동적 영역을 최대화 하도록 설정하였다. 자기장 회로와 피스톤 크기를 설계하기 위해 자기장 해석 기법을 적용하였다. 결과적으로 제어력이 약 7,000 N을 갖는 자기유변 유체 댐퍼를 제작하여 이를 실험을 통해 검증하였다.

### 2. 자기유변 유체 댐퍼 설계

구조물 진동제어용 자기유변 유체 댐퍼가 구조물에 작용할 수 있는 힘은 크게 제어할 수 없는 힘(이하 제어력,  $F_c$ )과 제어할 수 있는 힘으로 나눌 수 있다(그림 1 참조). 제어할 수 없는 힘은 다시 소성의 점성에 의한 힘(plastic viscous force,  $F_p$ )과 마찰에 의한 힘(friction force,  $F_f$ )으로 나눌 수 있다. 일반적으로 마찰에 의한 힘은 댐퍼의 속도와 무관하게 일정한 반면 소성의 점성에 의한 힘은 속도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 제어력은 제어입력 전압(또는 전류)의 크기 등으로 조절할 수 있고, 이 제어할 수 없는 힘은 제어입력 전압(또는 전류)의 양으로 조절할 수 없으며, 댐퍼의 기하학적 형상 및 사용하는 자기유변 유체의 특성 등에 의해 결정된다.

\* E-mail : sjmoon@kimm.re.kr / Tel : (042) 868-7428

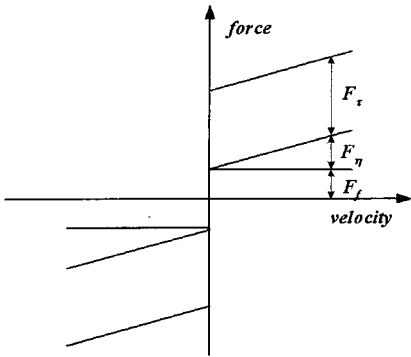


그림 1 자기유변 유체 댐퍼의 힘 분해<sup>(5)</sup>

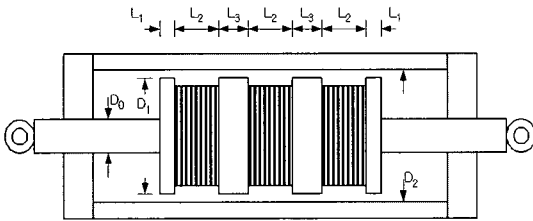


그림 2 자기유변 유체 댐퍼 설계를 위한 개념도

따라서 성능이 우수한 자기유변 유체 댐퍼를 설계하기 위해서는 제어할 수 없는 힘에 대한 제어력의 비인 동적범위(dynamic range,  $D$ )를 가능한 크게 설정해야 한다. 동적범위는 여러 가지 형태로 정의될 수 있는데, 이 글에서는 아래와 같이 정의하였다. 이 연구에서는 밸브 모드형 자기유변 유체 댐퍼가 일반적으로 그림 2와 같이 기하학적으로 개념 설계할 수 있다고 가정하였다. 이런 경우 제어력 및 소성의 점성에 의한 힘은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$D = \frac{F_{uc}}{F_f} = \frac{F_{\tau}}{F_{\eta} + F_f} \quad (1)$$

$$F_{\tau} = c \frac{\tau_0 LA_p}{h} = \left( 2.07 + \frac{12Q\eta}{12Q\eta + 0.4wh^2\tau_0} \right) \frac{\tau_0 LA_p}{h} \quad (2)$$

$$F_{\eta} = \left( 1 + \frac{whu_0}{2Q} \right) \frac{12\eta QLA_p}{wh^3} \quad (3)$$

여기서, 사용된 각 변수는 아래와 같다.

- $h$  : 간격 크기 (gap size (=  $(D_2 - D_1)/2$ ))
- $w$  : 댐퍼의 환상류 경로의 평균값(mean circumference of the damper's annular flow path)

- $\tau_0$  : 유체의 항복응력(fluid yield stress)
- $\eta$  : 소성 점성도(plastic viscosity)
- $A_p$  : 피스톤 헤드의 단면적  
(cross section area of the piston head)
- $v_0$  : 피스톤 헤드의 속도(piston head velocity)
- $Q$  : 체적 순간유량(volume flow rate (=  $A_p \times v_0$ ))
- $L$  : 유효 축 방향 pole 길이  
(effective axial pole length (=  $\sum L_i, i=1,3$ ))

식 (2)와 식 (3)으로부터 기하학적 제한조건을 식 (4)와 같이 유도할 수 있다.

$$wh^2 = \frac{12k}{c} \left( \frac{\eta}{\tau_0} \right) \left( \frac{F_{\tau}}{F_{\eta}} \right) Q \quad (4)$$

여기서,  $k = 1 + (whu_0)/(2Q)$ .

이 연구에서 사용된 자기유변 유체는 Lord Corporation (Lord Corp., 2006)<sup>(6)</sup>사에서 제작된 MR fluid MRF 140CG로 선정하였다. 이 유체는  $0.280 (\pm 0.070)$  Pa · s의 점성도(viscosity)를 가진다. 또한 항복응력은 자기유변 유체에 작용하는 자기장의 세기에 따라 결정되는 유체 고유 특성으로 본 연구에서 사용된 MRF 140CG의 설계 항복응력은 약 50 kPa@150 kAmp/m이다.

### 2.1 | 단계 최적 설계

성능이 우수한 자기유변 유체 댐퍼를 설계하기 위해서는 식 (1)의 동적 범위가 크면서, 식 (2)의 기하학적 제한조건을 만족하는 설계변수들을 찾아야 한다. 이 글에서는 설계 속도 60 mm/s를 갖는 약 7,000 N의 제어력을 갖는 자기유변 유체 댐퍼를 예제로 하여 설계 방법을 정립하고자 한다. 따라서 최적설계 식은 아래와 같이 정의할 수 있다.

목적함수(object function) : Max.  $D (> 10)$  (5)

제한조건(constraint condition)

- 제어할 수 있는 힘(controllable force)

$$F_{\tau} \approx 7,000 \text{ N @ } 60 \text{ mm/s}$$

- 기하학적 제한조건(geometric constraint) Eq. (4)

설계 변수(design variables)

-  $D_1$  : 피스톤 헤드의 지름(diameter of the piston head)

-  $D_0$  : 피스톤 로드 지름(diameter of the piston rod)

표 1 자기장 해석 결과

Stage 수(No. of stage)	3	3	4
유속밀도(flux density in steel)	< 1.5 T	> 1.5 T	< 1.5 T
자기유도 세기 (magnetic induction at gap)	< 150 kAmp/m	> 150 kAmp/m	> 150 kAmp/m
코일 감은 횟수(coil turns)	20 AWG/200 turns	20 AWG/230 turns	21 AWG/230 turns
전류(coil current)	3 A	3 A	3 A

표 2 4-stage 댐퍼의 민감도 해석 결과

$t_p$ (mm)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	기준(criterion)
$H$ [kAmp/m]	165	161	161	160	157	> 150
$B_{outer}$ (T)	0.67	1.41	1.41	1.41	1.42	< 1.5
$B_{piston}$ (T)	1.32	1.28	1.27	1.26	1.26	< 1.5
$t_r$ (mm)	3	4	5	6	7	기준(criterion)
$H$ [kAmp/m]	128	152	161	160	161	> 150
$B_{outer}$ (T)	1.78	1.63	1.41	1.18	1.00	< 1.5
$B_{piston}$ (T)	1.03	1.20	1.27	1.29	1.29	< 1.5
$t_c$ (mm)	14	16	18	20	22	기준(criterion)
$H$ [kAmp/m]	139	156	161	160	163	> 150
$B_{outer}$ (T)	1.19	1.32	1.41	1.44	1.57	< 1.5
$B_{piston}$ (T)	1.69	1.50	1.27	1.04	0.89	< 1.5

-  $L$ : 유효 축 방향 pole 길이

(effective axial pole length ( $=\sum L_i, i=1,3$ ))

-  $h$ : 간격 크기(gap size ( $= (D_2 - D_1)/2$ ))

설계 변수의 범위(bound of the design variables)

- $10 \text{ mm} < D_1 < 50 \text{ mm}$
- $10 \text{ mm} < D_0 < 30 \text{ mm}$
- $3 \text{ mm} < L < 100 \text{ mm}$
- $0.5 \text{ mm} < h < 2 \text{ mm}$

식 (5)의 최적설계 식을 풀기 위해 MATLAB® Optimization Toolbox<sup>7)</sup>에서 제공하고 있는 fmincon 함수를 사용하였으며, 이때 사용된 설계변수의 초기조건은 다음과 같다.

## 2.2 2단계 최적 설계

1단계 최적설계에서는 댐퍼의 실린더 및 피스톤의 크기, 자기장이 형성되는 pole 및 gap의 크기가 결정된다. 2단계는 1단계에서 결정된 최적값을 이용하여 세부적인 피스톤 헤드의 형상을 결정하는 단계로서 자기 회로의 설계 및 해석을 통해 피스톤 헤드의 주요 설계변수를 결정한다. 단, 이 때 주의할 점은 1단계에서 가정한

유체의 항복응력이 발생할 수 있는 자기유도가 형성되어야만 1단계 결과가 유효할 수 있다. 또한 자기포화를 고려하기 위해 자기밀도는 1.5 T이하로 설계되어야 한다. 2단계에서 정의된 설계변수는 다음과 같다.

- $t_r$  : 바깥 링의 두께(thickness of outer ring)
- $t_p$  : 마찰 재료의 두께  
(thickness of the frictional material (plastic))
- $t_c$  : 피스톤 중심의 두께  
(thickness of the piston core)
- $L_{1,3}$ : 유효 축 방향 pole 길이  
(effective axial pole length)
- $L_2$  : 길이(length)
- $N$  : 코일 감은 횟수(coil turns)

이 설계 변수들은 finite element method magnetics (version 2.4) (Meeker, 2004<sup>8)</sup>) 프로그램을 사용하여 수치적인 자기장 해석을 위해 사용되었다. 결과는 위의 표 1에 정리하였다. 4-stage 댐퍼의 경우 자기밀도 1.5 T 이하의 조건이 만족되었고, 또한 자기유변 유체의 유도 세기도 150 kA/m 만족하였다. 그리고 설계 민감도 해석을



#### 4. 고찰 및 맺음말

이 연구에서 자기장 해석을 통해 최적화된 자기유변 유체 댐퍼를 설계하였으며, 그 특성을 실험을 통해 확인하였다. 첫 번째 설계 단계로 댐퍼의 주요 치수들은 비선형 최적화 기법을 통해 결정되었으며, 두 번째 단계에서 자기장 해석과 설계 민감도 해석을 통해 세부적인 피스톤 헤드의 형상을 결정하였다. 최종적으로 4-stage 자기유변 유체 댐퍼를 설계하였으며, 이를 바탕으로 실제 자기유변 유체 댐퍼를 제작하여 이를 검증하였다. □

#### 감사의 글

이 연구는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업 중 “내진 및 내풍 대책으로 적합한 신개념 스마트 제진 장치의 실용화” 과제 (Grant No. C105A100021-06A0300-01910)의 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사드립니다.

#### 참고문헌

(1) Gavin, H.P., Hoagg, J. and Dobossy, M., 2001, “Optimal Design of MR Dampers”, Proceedings of U.S.-Japan Workshop on Smart Structures for Improved Seismic Performance in Urban Regions, pp. 225~236.  
 (2) Gavin, H.P., Phule, P.P. and Jones, A.J., 2002, “Design Optimization of MR Devices and Materials”, Proceedings of 3th World Conference on Structural

#### Control.

(3) 문석준, 김병현, 정종안, 2004, “반능동형 오리피스 유체댐퍼를 이용한 구조물 진동제어에 관한 실험적 연구”, 한국지진공학회논문집, 제 8 권, 제 2 호.  
 (4) 문석준, 김병현, 정종안, 2004, “지반기진력을 받는 구조물의 진동제어를 위한 자기유변 감쇠기의 실험적 연구”, 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권, 제 8 호, pp. 767~773.  
 (5) Yang, G., 2001, Large-scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control, Ph.D Dissertation, Univ. of Notre Dame, IN, USA.  
 (6) Lord Corporation, 2006, Hydrocarbon-Based MR Fluid MRF-140CG Product Bulletin, <http://www.mrfluid.com>.  
 (7) Mathworks, Inc., 2006, Optimization Toolbox for Use with MATLAB, User s Guide, <http://www.mathworks.com>.  
 (8) D. Meeker, 2004, User s Manual for Finite Element Method Magnetics Version 3.4, <http://femm.berlios.de>.  
 (9) 문석준, 허영철, 정형조, 2006, “구조물 진동제어용 밸브 모드형 자기유변 댐퍼의 최적설계 방법”, 2006년도 한국지진공학회 학술발표회.  
 (10) Moon, S. J., Huh, Y. C., Jung, H. J. and Choi, K. M., 2006, “A Study on Substructural Design Procedure of Magnetorheological Fluid Damper for Structural Control”, Proceedings of International Symposium Commemorating the 10th Anniversary of Earthquake Engineering Society of Korea, pp. 111~117.