MR 댐퍼를 사용한 드럼세탁기의 진동완화 Vibration Attenuation of a Drum-Typed Washing Machine Using Magneto-Rheological Dampers

차상태* · 백운경***†

Sang-Tae Cha* and Woon-Kyung Baek***†

(접수일 : 2012년 11월 28일, 수정일 : 2013년 01월 25일, 채택확정 : 2013년 01월 29일)

Abstract: Most washing machines are now produced as a drum-type, where a washing drum mounted on a suspension system with springs and dampers, to minimize the transmittance of the vibration from the drum to the frame. A low-cost MR damper, using magneto-rheological fluids, can produce variable damping forces by changing the current values in the magnetic coil. Experimental results show the comparison of the vibration attenuation performances between two different dampers. One test set-up uses a passive damper and another one uses a MR fluid damper. The test results showed that the vibration amplitude of the washing machine with the MR damper is much smaller than the case with the passive damper.

Key Words : Drum washing machine, MR friction damper, Magnetic Analysis, Magnetic field intensity, Damping force

1. 서 론

세탁기의 댐퍼는 세탁 시 발생하는 진동과 소음에 영향을 미치는 주요 부품이다. 최근 드럼형 세탁기의 보급이 대폭 확대됨에 따라 생산업체에서도 다양한 성능의 제품을 개발하고 있다. 기존의 수동형(passive) 댐퍼는 고정된 감쇠계수를 가지므로 운전조건에 따라 능동적으로 감쇠력을 조절하기 불가능하기 때문에, 세탁과정 중 발생하는 진동과 소음을 줄이는데 한계가 있다. 특히 탈수 과정에서 소음과 진동이 가장 큰 문제가 되고 있

으며, 이러한 문제점을 개선하기 위해 새로운 방식의 댐퍼 설계가 요구되고 있다.

미국 Lord사에서는 미크론 크기의 자화물질 입자를 오일에 부유상태로 첨가하여 자기장이 가해지면 수 밀리 초 이내에 유동특성이 변하는 기능성 유체인 MRF(Magneto-Rheological Fluid)를 개발하였다.¹⁾ MR댐퍼는 이러한 MRF를 적용하여 세탁기의 운전조건 및 환경에 따라 댐퍼에 부하되는 하중과 진동을 감지하여 적절하게 감쇠력을 제어할 수 있는 지능형 댐퍼이다. 본 연구의 목적은 MR댐퍼를 세탁기에 적용하여 진동과 소음을

***백운경(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과
E-mail : baekwk@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6164
*차상태 : 부경대학교 대학원 메카트로닉스공학과

***†Woon-Kyung Baek(corresponding author) : Department of Mechanical and Automotive Engineering, Pukyong National University.
E-mail : baekwk@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6164
*Sang-Tae Cha : Department of Mechatronics Engineering, Pukyong National University.

완화할 수 있는 저가형 MR댐퍼를 개발하고 그 성능을 확인하는데 있다.

2. MR댐퍼의 설계

2.1 마찰형 MR댐퍼

MR댐퍼는 사용목적에 따라 스퀴즈형, 전단형, 밸브형으로 나누어 구분할 수 있다. 스퀴즈형 MR댐퍼의 경우 자기장이 인가된 방향과 같은 방향의 힘인 압축력이 MR유체에 작용할 때 사용되는 타입이다. 밸브형 타입의 경우 MR유체가 원형의 밸브를 통과할 때 인가되는 자기장 세기에 따라 MR유체의 감쇠력이 달라지는 타입이다. 세 가지 타입 중에서 가장 큰 감쇠력을 얻을 수 있으며, 가장 널리 사용되는 타입이다. 하지만 밸브형의 경우 많은 양의 MR유체가 소모되는 단점이 있다. 전단형 MR댐퍼의 경우 자기장이 인가된 방향과 수직한 방향으로 힘이 작용할 때 사용되는 마찰형 MR댐퍼 타입이다.²⁾ 밸브형 댐퍼에 비해서 MR유체를 적게 사용하지만 감쇠력의 크기가 작으며, 주로 소형 클러치나 브레이크용으로 사용된다. 본 연구에서는 전단형 MR댐퍼에 대해서 연구를 수행하였으며, 전단형 MR댐퍼의 감쇠력과 관련된 개념도는 Fig. 1과 같다. 피스톤 로드와 솔레노이드 사이에 MR 유체를 밀봉시키고 세탁기의 터브가 움직일 때 순간적으로 전류를 인가하여 자기장의 세기에 따라 MR유체의 점도를 변화시켜 마찰 전단 응력에 의해 감쇠력이 발휘된다.

Fig. 1 MR fluid used in shear mode

2.2 MR 댐퍼의 감쇠력

구조적 마찰을 무시한 전단형 MR댐퍼의 감쇠력은 식(1)과 같이 자기장 인가 전후의 감쇠력 합으로 표현되어 진다.³⁾

$$F_{total} = F_{\eta} + F_{MR} \quad (1)$$

Fig. 2에서 자기장이 인가되지 않았을 때 MR유체의 감쇠력은 식(2)와 같다.

$$F_{\eta} = \eta \cdot S \cdot \frac{wL}{g} \quad (2)$$

식(2)에서 η 는 MR유체의 점성, S 는 MR유체와 2개의 판 사이의 상대속도, g 는 MR유체의 두께, w 는 MR유체를 감싸는 폭, L 은 MR유체의 길이이다.

Fig. 2 Direct shear type MR damper

자기장이 인가되었을 때 MR유체의 감쇠력은 식(3)과 같이 표현된다.

$$F_{MR} = \tau_{MR} \cdot w \cdot L \quad (3)$$

여기서 자기장 세기에 의한 MR유체의 항복강도는 식(4)와 같다.⁴⁾

$$\tau_{MR} = C \times 2.717 \times 10^5 \times \Phi^{1.5239} \times \tanh(6.33 \times 10^{-6} \times H) \quad (4)$$

식(4)에서 C 는 기저 유체(Carrier Fluid)에 따라 결정되는 상수이며, Φ 는 체적비율, H 는 자계강도이다.

2.3 기본 형상과 부품의 명칭

MR댐퍼 내에 형성되는 자기장은 코일의 감긴 횟수, 자기회로의 형상 그리고 자기회로를 이루는 부품들의 재질에 영향을 받게 된다. Fig. 3은 본 연구에서 설계한 내통형 MR 마찰댐퍼의 개략도이며, 효율적인 감쇠력을 얻기 위해 전류의 인가 방향이 다른 코일 2개를 이용하여 자기회로를 구성하였다. Table 1은 MR 마찰댐퍼 구성품의 재질을 나타낸다.

Fig. 3 Design concept of the MR damper

Table 1 Materials of components

Component	Material
Rod	S45C
Yoke	S45C
Coil	Copper (AWG31)
Bobbin	Teflon
MRF	MRF-140CG
Cylinder	S45C
Inner tube	S45C

2.4 자기장 해석

MR유체에 발생하는 자계강도를 효율적으로 증가시키기 위해 상용 프로그램인 ANSYS를 이용하여 자기장 해석을 수행하였다.⁵⁾ MR댐퍼는 로드(rod)를 중심으로 하여 축대칭이므로 해석의 편의를 위해 축을 중심으로 오른쪽 단면만을 모델링하였다. Fig. 4에 유한 요소 모델을 나타내었다. 본 모델에는 2차원 자속 요소인 plane53 요소가 사용되었다. Table 2는 해석조건을 나타내며, Table 3은 자기장 해석의 설계변수를 나타낸다. 설계변수는 자속가이드의 구성품 중 MR유체의 항복응력에 가장 큰 영향을 미치는 요크(yoke)와 로드(rod)의 단면적을 고려하여 선정하였다.⁶⁾

Fig. 4 Finite element model for magnetic analysis

Table 2 Conditions for the analysis

Parameters	Value
Type of the coil	AWG 31
Bobbin width	18 mm
Coil turns	1215 turns
Current	0.12A
MR Fluid gap	0.2 mm
Cylinder thickness	1.5mm

Table 3 Design variables of the flux guide

	Variables	1	2
A	Rod Dia.	14 mm	12 mm
B	Yoke_1, 3 length	5.5 mm	4 mm
C	Yoke_2 length	9 mm	12 mm

Table 4는 해석순서를 나타내며, 실질적으로 MR댐퍼의 감쇠력은 로드의 운동방향과 수직한 방향으로 MR유체에 작용하는 자계강도와 관련 있으므로 이와 관련된 내용을 고려하여 해석을 수행하였다. Fig. 5에서 자기장 해석을 통해 자속가이드에 형성되는 자속선을 확인 할 수 있으며, 코일에 인가된 전류로 인해 발생하는 자기장이 MR 효과가 발생하는 틈새 영역에서 수직으로 집중됨을 알 수 있다.

Table 4 Combination of design variables for the analysis

No.	A	B	C	MRF length (m)
1	A1	B1	C1	6.0x10-2
2	A1	B1	C2	6.3x10-2
3	A1	B2	C1	5.7x10-2
4	A1	B2	C2	6.0x10-2
5	A2	B1	C1	6.0x10-2
6	A2	B1	C2	6.3x10-2
7	A2	B2	C1	5.7x10-2
8	A2	B2	C2	6.0x10-2

Fig. 5 Magnetic Flux lines near the coils

Fig. 6은 Case 2의 y축 길이에 대한 x축의 자계강도를 나타내며, Table 5는 MR유체 영역에 대해서 포화강도 이상의 자계강도는 포화강도 값으로 대체하여 계산한 자계강도의 평균값과 감쇠력을 나타낸다. Case 2의 경우에 가장 큰 감쇠력이 발생하는 것을 알 수 있다. 이로 보아 높은 감쇠력을 얻기 위해서는 자속가이드를 구성하는 요크와 로드의 단면적을 증대시켜 전단력의 작용면적을 늘리는 것이 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 6 Magnetic field intensity at the MR fluid

Table 5 Analysis results

No.	MRF length (m)	Magnetic field strength (A/m)	Damping force (N)
1	6.0×10^{-2}	87396.4	110.34
2	6.3×10^{-2}	94016.7	122.85
3	5.7×10^{-2}	80484.2	97.92
4	6.0×10^{-2}	78911.4	101.38
5	6.0×10^{-2}	82853.3	90.51
6	6.3×10^{-2}	79302.9	91.62
7	5.7×10^{-2}	79511.7	83.08
8	6.0×10^{-2}	75909.3	84.09

3. 실험

3.1 MR댐퍼의 특성시험

자기장 해석을 바탕으로 시제품을 제작하였으며, MR댐퍼의 특성시험을 Fig. 7과 같은 장비를

사용하여 실시하였다. MR댐퍼의 특성 시험을 위해서 스프링과 고무부싱을 제거한 후 지그를 연결 하였으며, 시험기의 상부에 위치한 액추에이터의 운동에 의해 댐퍼가 가진된다. 이 때 발생하는 힘은 하부에 있는 로드셀을 사용해서 측정하였으며, 특성 시험조건은 Table 6과 같다.

Fig. 7 Exciting test system

Table 6 Exciting test conditions

Factors	Values
Stroke (mm)	± 8 (240rpm)
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	22 ± 1
current (mA)	0, 50, 100, 150, 200, 300, 400

Fig. 8은 전류에 대한 감쇠력을 나타낸다. 전류가 증가되면 감쇠력 또한 증가하며, 감쇠력의 변화 폭은 작아지는 것을 알 수 있다. Fig. 9와 Fig. 10은 인가 전류를 변화 시켰을 때 얻어진 힘-변위 선도와 힘-속도 선도를 나타낸다. Fig. 9에서 힘-변위의 관계는 대략 타원형이며 전류가 증가할수록 힘-변위 곡선에 둘러싸인 영역이 확장 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 전류가 증가할수록 더 많은 에너지가 소산된다는 것을 의미한다. Fig. 10에서 어느 속도 이상에서는 감쇠력의 변화가 거의 없으며, 이로 보아 마찰댐퍼의 감쇠력은 속도와는 무관함 알 수 있다. 또한 히스테리시스도 발생하는데, 이는 댐퍼의 내부 마찰로 인한 것으로 판단된다. 그리고 300 mA와 400 mA에서 감쇠력

의 차이가 다른 전류값에 비해 현저히 작아지며 제작되어진 MR댐퍼의 감쇠력 포화영역으로 판단된다.

Fig. 8 Force versus current

Fig. 9 Force versus displacement for various currents

Fig. 10 Force versus velocity for various currents

3.2 세탁기 밀판의 가속도 측정

세탁과정은 크게 세탁모드와 탈수모드로 나뉘는데, 실험은 탈수모드에서 불균형질량을 부착하여 베니어판의 가속도를 측정하도록 구성하였다. Fig. 11과 같이 홀 센서를 사용하여 드럼의 회전속도를 측정하였으며, MR댐퍼와 수동형 댐퍼를 장착한 경우의 드럼의 회전속도에 대한 가속도를 비교하였다. 가속도 센서는 Fig. 12와 같이 세탁기 정면을 기준으로 100 mm 앞에 위치하도록 부착하였다.

Fig. 11 Position of the Hall sensor and the Damper

Fig. 12 Position of the acceleration sensor

세탁기의 진동은 세탁물이 드럼 내에 고루 분포되어 있지 않고 한 곳에 집중되었을 때와 중심점에서 제일 가장자리로 벗어났을 때 심해진다. 본 연구에서는 실제 드럼세탁기의 탈수과정에서 옷감의 거동을 고려하여 Fig. 13과 같이 500 g의 불균형질량을 드럼내부 중심에 부착하여 세탁물이 한 곳에 모이는 효과를 구현하였다.

Fig. 13 Unbalancing mass in the drum

3.3 실험 결과

홀 센서에서 나오는 펄스파의 주파수를 분석하여 시간에 대한 드럼의 회전속도를 Fig. 14에 나타내었다. 최대 회전속도는 약 950 rpm이며 최고 속도에 도달하는 시간은 170초가 소요 된다. 그리고 최대 속도에 도달 할 때 까지 두 번의 가속 구간이 존재하며, 1차 가속은 50~170 rpm, 2차 가속은 170~950 rpm까지 가속 된다. 본 연구에서는 진동의 발생이 큰 1차와 2차 가속 구간에 대하여 주안점을 두었다.

Fig. 14 RPM of the drum

Fig. 15는 전원공급 장치를 사용하여 MR댐퍼에 50 mA씩 0~350 mA까지 전류를 공급하였을 때 베니어판의 가속도 측정값을 나타낸다. 약 270 rpm 이하 구간에서는 전류를 공급 시 진동이 저감 되는 것을 확인 할 수 있으며, 280 rpm 이후로는 오히려 전류를 공급하면 가속도 값이 더 커지는 것을 볼 수 있다. 이로 보아 280 rpm 이후에는 MR댐퍼의 감쇠력이 적을수록 진동을 줄이는데 효과적이라는 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로 전류제어기 설계에서 필요한 전류세기에 대한 가속도의 데이터베이스를 구축하였다.

Fig. 15 Measured accelerations for various currents

Fig. 16은 MR댐퍼를 장착한 경우와 수동형 댐퍼를 장착한 경우의 베니어판의 가속도 값을 보여준다. 저속에서는 감소비율이 낮으나 고속으로 증가 될수록 MR댐퍼의 진동 저감 효과가 수동형 댐퍼 보다 큰 것으로 나타났다.

Fig. 16 Acceleration comparisons between the cases of the passive damper and the MR damper

4. 결 론

Vibration Engineering, pp. 525-528.

본 연구에서는 드럼형 세탁기에서 발생하는 진동 및 소음의 저감을 위한 MR댐퍼를 설계하고 그 성능을 확인하였다. MR유체에 발생하는 자계 강도를 효율적으로 증가시키기 위해 자기장 해석을 통해 MR 댐퍼의 설계변수를 조정하였고, 제작된 댐퍼의 각 전류 세기에서의 감쇠력 특성을 확보하였다. 또한 제작된 MR댐퍼를 실제 세탁기 시스템에 장착하여 전류 세기에 대한 베니어판의 가속도 데이터베이스를 구축하였으며, 이를 바탕으로 전류제어 알고리즘을 구성하였다. 구성된 알고리즘을 적용하여 베니어판의 가속도를 측정한 결과 MR댐퍼를 장착한 경우가 일반적인 수동형 댐퍼를 장착한 경우에 비해 두드러진 진동저감 효과를 보였다.

참고 문헌

1. J. H. Park et al., 2009, "A Study on MR Brake for High-tension Control of Converting Machinery", Spring conference of The Korea Society for Power System Engineering, pp. 153-156.
2. N. M. Wereley et al., 2008, "Magnetorheological dampers in shear mode", Smart Materials and Structures, Vol. 17, No. 1, 015021.
3. D. W. Youn et al., 2006, "Electromagnetic Analysis and design of rotary MR brake", Autumn conference of The Korea Society for Power System Engineering, pp. 146-151.
4. J. D. Carlson, 2004, "MR Technology Workshop" Lord Corporation, Cary, NC, pp. 6/9-6/10.
5. W. H. El-Aouar, 2002, "Finite Element Analysis Based Modeling of MagnetoRheological Dampers", M. S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
6. G. S. Lee, W. H. Yoo and B. J. Ryu, 2008, "Design of damper with multi_stage core", Spring conference of The Korea Society for Noise and