

Magic Formula 모델을 이용한 드럼세탁기용 마찰댐퍼의 동역학적 모델링과 해석

Dynamic Modeling and Analysis of a Friction Damper in Drum-type Washing Machine with a Magic Formula Model

박진홍*. 이정환**. 유완석†. 노경훈***. 정보선***

Jin-Hong Park, Jeong-Han Lee, Wan-Suk Yoo, Gyung-hun Nho and Bo-Sun Chung

(2009년 7월 9일 접수 ; 2009년 9월 21일 심사완료)

Key Words : Damping Force(댐핑력), Dynamic Model(동역학 모델), Hysteresis(히스테리시스), Magic Formula Model(매직포뮬라 모델), Nonlinear(비선형)

ABSTRACT

In this paper, the magic formula model was applied for a friction damper in a drum-type washing machine. To describe characteristics of the hysteretic damping force, Physical tests were first carried out to get experimental results using an MTS machine. Then, parameters for the magic formula model were determined from the experimental curves. The ADAMS and MATLAB programs were used for the multibody modeling of the damper and process for parameter identification. The model of drum-type washing machine was applied for a dynamic model of friction damper, in which the accuracy of the proposed damper model was verified.

1. 서론

우리가 일상생활에서 사용하는 드럼세탁기는 세탁 및 탈수 시 많은 진동 및 소음을 야기 시킨다. 이를 줄이기 위해 가격대비 성능이 우수한 마찰댐퍼가 널리 사용되어 지는데, 종류별로 성능이 개선되면서 다양한 제품이 출시되고 있다. 특히 댐퍼와 관련된 연구도 활발히 진행되고 있으며, CAE기법을 활용한 댐퍼모델의 해석은 설계 시 일어날 수 있는 많은 시행착오를 줄일 수 있고, 정량적인 해석 기법 도입으로 신제품 개발속도를 향상시킬 수 있는 장점을 가

지고 있다.

일반적으로 마찰댐퍼는 플라스틱 재질의 외관과 스틸 재질의 내관으로 구성되어 있으며, 외관에 부착된 스펀지에 의해 댐핑력(damping force)이 발생한다. 스펀지의 점탄성 재질 특성 때문에 마찰댐퍼는 진폭과 주파수에 대해서 히스테리시스(hysteresis)⁽¹⁾을 갖고, 주기적인 가진에 대해서도 이력반응을 나타낸다.

기존의 마찰댐퍼 모델은 쿨롱(Coulomb)⁽²⁾마찰력을 적용한 모델부터 스펀지의 변형과 이동을 고려한 MSTV(modified-stick-transition-velocity)⁽³⁾모델까지 다양한 해석기법이 이루어지고 있다. 하지만 기존의 모델로는 굴곡이 심한 히스테리시스를 갖는 마찰댐퍼의 비선형성(nonlinear)을 표현하는데 한계가 있다. 따라서 댐퍼의 동역학 해석을 위한 새로운 댐퍼모델이 요구된다.

Magic formula모델은 타이어에 작용하는 수평력(lateral force) 및 수직력(longitudinal force)등 비선형

† 교신저자; 정회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : wsyoo@pusan.ac.kr

Tel : (051)510-2328, Fax : (051)512-9835

* 정회원, 부산대학교 대학원 기계공학부

** 부산대학교 대학원 기계공학부

*** LG전자 세탁기 사업부

성이 강한 타이어의 특성을 표현하는데 널리 사용되고 있으며, 차량동역학에서 많이 활용되고 있다. 이 모델은 Pacejka⁽⁴⁾에 의해 제안되었으며, 모델의 수식은 사인함수와 아크탄젠트함수로 구성되어 파라미터의 적절한 선택으로 다양한 비선형성 및 이력특성을 표현할 수 있다. 하지만 수식에는 특별한 물리적 의미를 갖고 있지 않다.

이 논문에서는 마찰 댐퍼의 비선형성과 히스테리시스를 구현하기 위해 magic formula 수식과 선형감쇠 및 강성값의 조합으로 새로운 댐퍼모델을 제안하였다. 제안된 모델에서 magic formula 수식은 4개의 파라미터로 구성되어 있으며, 댐퍼실험을 통해 얻은 댐핑력과 가진속도에 대한 F-V선도(force-velocity)를 커브피팅하여 파라미터를 결정하였다. 모델링 및 동역학 해석을 위해 다물체 동역학 해석 프로그램인 ADAMS⁽⁵⁾를 이용하였고, 파라미터 규명은 MATLAB⁽⁶⁾를 활용하였다. 2장에서는 마찰댐퍼의 특성시험을 나타내었고, 3장에서는 magic formula 모델을 마찰댐퍼의 모델링에 적용하는 과정, 4장에서는 시뮬레이션 결과 및 비교를 나타내었으며, 5장에서는 드럼세탁기의 동역학모델에 적용하여 6장에 결론을 나타내었다.

2. 마찰댐퍼의 특성시험

2.1 마찰댐퍼의 구조 및 시험

Fig. 1은 전체적인 마찰댐퍼의 구조를 나타낸다. 구조는 외관, 내관, 스펀지로 구성되어 있으며, 가진될 시 외관이 상하운동을 함에 따라 외관에 부착된 스펀지에 발생하는 마찰력으로 진동에너지가 소산되며, 이 특성은 댐퍼의 거동 속도와 연관이 된다. 그리고 드럼세탁기에 부착될 시 마모방지 및 제품오차를 고려하여 고무부싱이 양 끝단에 부착된다.

드럼세탁기에 부착된 마찰댐퍼의 순수한 비선형적인 특성을 파악하기 위해 고무부싱을 제거한 다음 Fig. 2와 같이 MTS 가진 시험기에 부착하여 조화가진 시험을 시행하였다. 입력값으로 식 (1)의 정현파를 이용하였고, δ_0 는 가진변위, f 는 가진주파수를 나타내며, 주파수 및 변위에 따라 Table 1의 시험조건을 적용하여 40초간 측정하였다.

$$\delta(t) = \delta_0 \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (1)$$

Table 1 Conditions of test

Frequency f [Hz]	Amplitude δ_0 [mm]
1.00	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0
3.00	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0
6.67	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0
10.00	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0

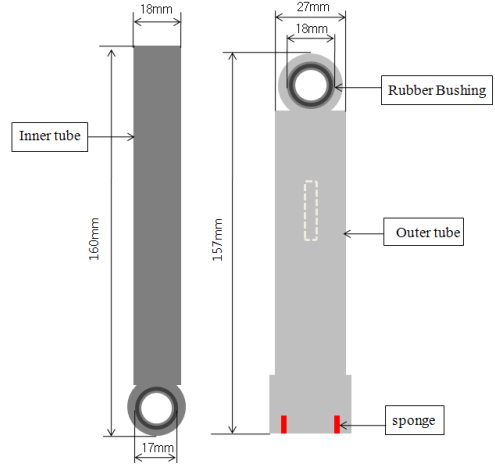


Fig. 1 Components in a friction damper



Fig. 2 Damper with a jig in testing machine

2.2 시험 결과

Fig. 3과 Fig. 4는 세탁기 시스템이 탈수모드에서 작동할 때를 고려하여 다양한 가진 주파수와 변위를 입력하여, MTS장비의 내부 프로그램에 의해 댐핑력을 측정하고, Fig. 5에서 나타난 가진변위 $Y(t)$ 를 미분한 속도값으로 F-V(force-velocity)선도를 아래와 같이 각각 나타내었다. 이를 통해 가진 주파수 및 변위가 증가함에 따라 F-V선도의 기울기가 감소

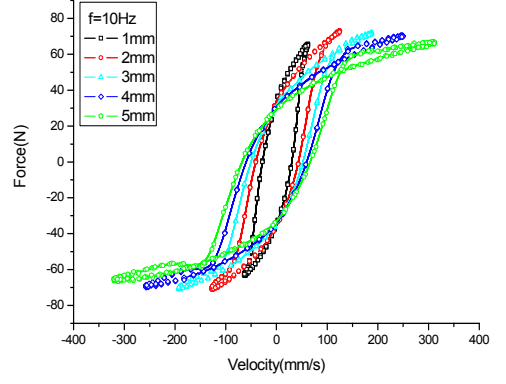
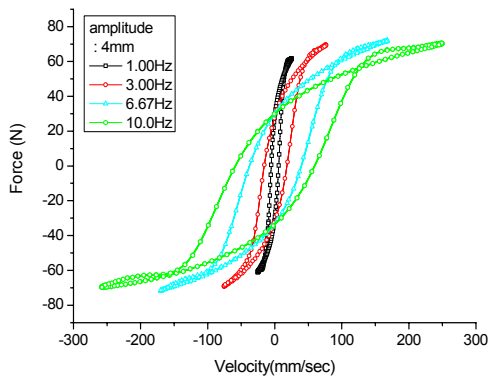
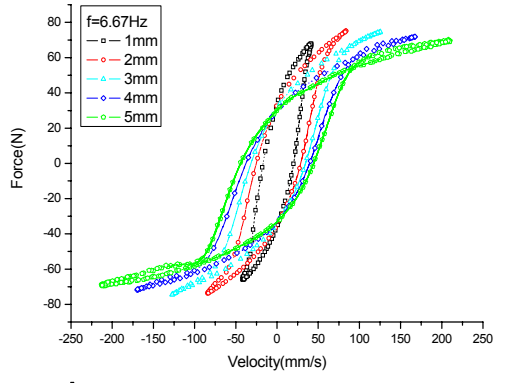
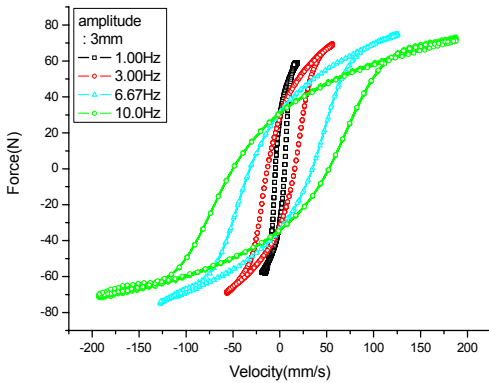
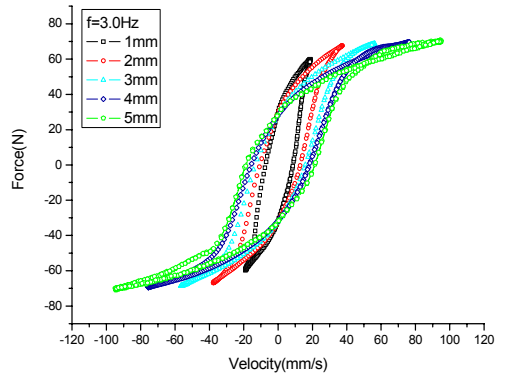
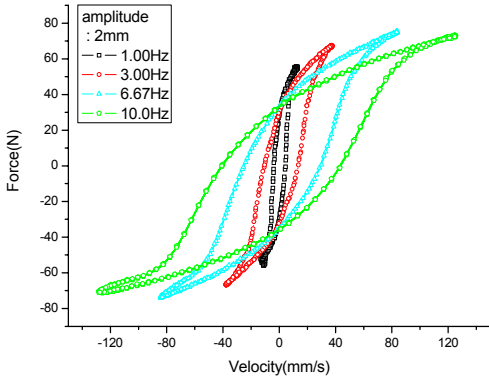


Fig. 3 F-V Curve versus various frequency

Fig. 4 F-V Curve versus various amplitude

하며, 굴곡이 심한 히스테리시스 특성이 나타나는 것을 알 수 있고, Table 1에서 나타낸 모든 주파수 및 변위에서도 동일한 히스테리시스 특성이 나타난다.

3. Magic formula 모델을 이용한 마찰 댐퍼의 모델링

다물체동역학 해석에 사용되어진 여러 가지 댐퍼 모델들은 참고문헌에 잘 나타나 있다⁽⁷⁾. 한 개의 스프링 및 댐퍼가 포함된 모델로는 히스테리시스를

구현할 수 없다. 이 점을 보완하기 위해 고안된 맥스웰 모델(Maxwell model)과 켈빈-보이트 모델(Kelvin-Voigt model) 등 다양한 모델이 고안되었다. 이 연구에서는 히스테리시스 특성을 잘 표현하는 magic formula 모델을 세탁기용 마찰댐퍼에 적용하고, 그 결과를 실험값과 비교하였다.

3.1 Magic Formula

초창기 magic formula는 타이어에 작용하는 힘을 나타내는데 활용되는 모델인데 이 논문에서는

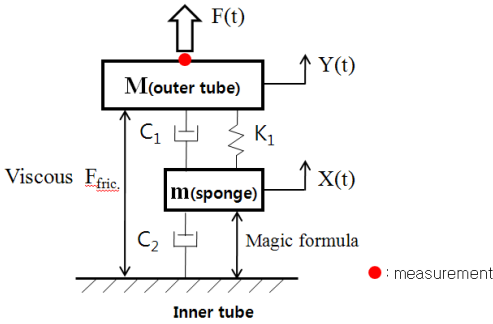


Fig. 5 Free body diagram of a friction damper

마찰댐퍼에서 나타나는 비선형적인 히스테리시스 특성을 구현하는데 적용하였다. 기본적인 수식은 아래 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, D 는 힘의 크기를 조절하는 상수이고, C, B, E 는 형상을 결정하는 상수가 된다. 그리고 S_v 는 수직이동을 S_h 는 수평이동을 V 는 스펀지의 변위 $X(t)$ 에 대한 미분값 즉 스펀지의 속도 $V(t)$ 를 나타낸다.

$$F_{magic} = D \sin(C \tan^{-1}(B\Phi)) + S_v$$

$$\Phi = (1 - E)(V + S_h) + (E/B) \tan^{-1}(B(V + S_h)) \quad (2)$$

여기서 B, C, D, E 의 4개의 파라미터에 의해 F-V 선도에서 히스테리시스 형상이 결정이 된다.

이 논문에서는 드럼세탁기용 마찰댐퍼의 구성품인 스펀지의 점탄성 마찰에 의해 발생하는 히스테리시스 특성을 magic formula 모델로 모델링 하였다. 세탁기용 마찰댐퍼의 자유물체도를 나타낸 Fig. 5에서 $Y(t)$ 는 가진변위, $X(t)$ 는 스펀지의 변위를 나타내며, M, m 은 각각 외관과 스펀지의 질량이다.

스펀지의 변형력을 K_1, C_1 으로 가정하였고, 비선형적인 히스테리시스 특성이 나타나도록 스펀지와 내관사이에서 작용하는 마찰력을 선형감쇠계수 C_2 와 magic formula 수식으로 나타내었다. 식 (3)은 전체 댐퍼모델의 운동방정식을 나타낸 것이다.

$$M\ddot{Y} + C_1(\dot{Y} - \dot{X}) + K_1(Y - X) = F(t)$$

$$m\ddot{X} + C_2\dot{X} + F_{magic} = C_1(\dot{Y} - \dot{X}) + K_1(Y - X) \quad (3)$$

3.2 Magic Formula 모델의 파라미터 규명

Magic formula 모델이 적용된 댐퍼모델의 파라미터를 선정하기 위한 모델링은 ADAMS와 MATLAB를

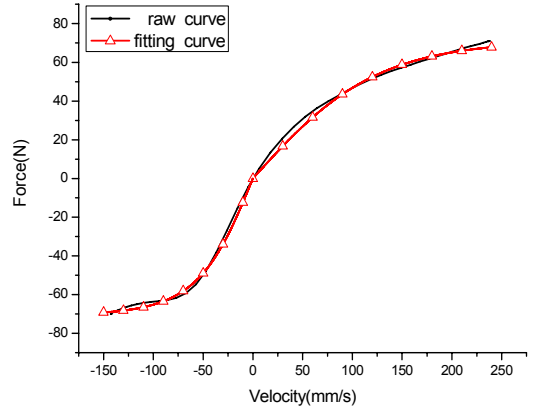


Fig. 6 Curve fitting F-V curve

이용하였으며, 각주파수와 변위의 입력조건에 따라 공통된 파라미터를 적용하기 위해 다음과 같은 과정을 실시하였다.

댐퍼모델은 식 (2)와 식 (3)에서 알 수 있듯이 magic formula 수식의 4개의 파라미터와 3개의 선형강성(1개) 및 감쇠계수(2개)로 총 7개의 파라미터로 구성되어 있다. Magic formula 수식에 있는 4개의 파라미터는 Fig. 6에서 나타낸 실험에서 측정된 F-V 선도에서 원점에 대한 대칭성을 활용하여, 인장방향에서 나타나는 스펀지의 특성을 MATLAB을 이용하여 커브피팅 하면 4개의 상수가 결정이 되고, 선형강성 및 댐핑계수는 ADAMS의 parameter study를 이용하여 최적값을 결정하게 된다. 이러한 과정을 Table 1의 가진조건에 대해서 실시하고, 공통된 파라미터를 선정한다. 그래서 댐퍼를 구성하는 파라미터를 ADAMS 모델에 입력하게 되면, 가진 주파수 및 가진 변위 $Y(t)$ 의 입력값에 따라서 스펀지의 변위 $X(t)$ 및 속도 $V(t)$ 가 발생하며, 전체적으로 식 (3)의 운동방정식을 ADAMS 모델에서 풀게 된다. 이렇게 시뮬레이션에서 구한 힘 $F(t)$ 에 대한 가진 속도 $V(t)$ 의 F-V 선도를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 선형강성(K_1)과 감쇠(C_2)의 파라미터 값이 비선형적인 히스테리시스 특성에 얼마만큼 영향을 미치는지 보여주고 있다.

주요인자로 선형강성 K_1 은 Fig. 7에 나타낸 F-V 선도에서 값이 증가함에 따라 히스테리시스 형상의 폭을 결정하며, Fig. 8에서 C_2 는 히스테리시스 형상의 최소값과 최대값을 결정하게 된다. 이러한 각 파라미터의 민감도 분석에 따라 실험값과 해석값 사이의

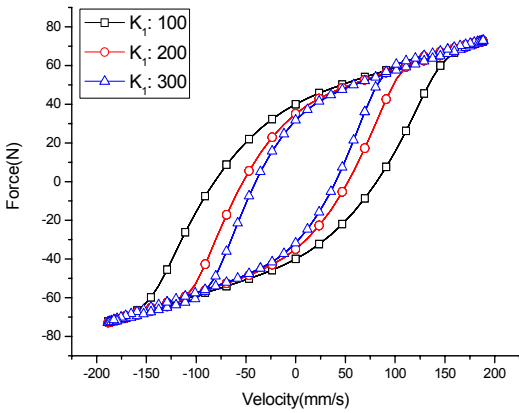


Fig. 7 F-V curve versus various K_1

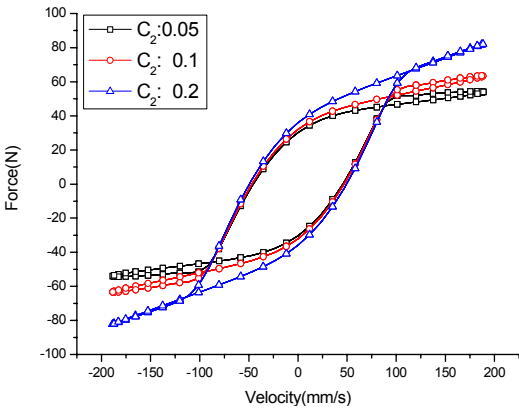


Fig. 8 F-V curve versus various C_2

차가 최소가 되는 최적값을 선정하여 Table 2, 3에 표기 하였다.

Table 2, 3에서 D , C_2 값을 제외한 5개의 파라미터는 공통된 값을 가지게 되고, D 값은 가진 주파수가 증가함에 따라 선형적으로 감소하게 되고, C_2 도 가진변위가 증가함에 따라 감소하게 된다. 이는 댐퍼가 실제 세탁기에 부착되는 것을 고려하면, 가진 주파수는 세탁기의 모터 회전수를 의미한다. Fig. 9는 모터가 600 rpm(10 Hz)로 회전할 때, 세탁기에 장착된 댐퍼의 실제 변위를 나타내며, Fig. 10은 FFT(fast Fourier transform)를 했을 때, 10 Hz에서 진폭이 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉 모터가 600 rpm(10 Hz)로 회전하면, 댐퍼도 10 Hz로 가진운동을 하게 된다. 이는 모든 RPM구간에서 동일하게 나타나며, 이러한 상관성을 가지고 모터의 회전수와 D 값의 관계식을 식(4)처럼 구성하였다.

Table 2 Identified parameters (1)

Parameters	Optimum values		
	3 Hz	6.67 Hz	10 Hz
K_1	200		
C_1	0.001		
C_2	0.16		
B	0.028		
C	1.5		
D	62	52	42
E	1		

[Amplitude : 3 mm]

Table 3 Identified parameters (2)

Parameters	Optimum values			
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm
K_1	200			
C_1	0.001			
C_2	0.36	0.26	0.16	0.12
B	0.028			
C	1.5			
D	42			
E	1			

[Frequency : 10 Hz]

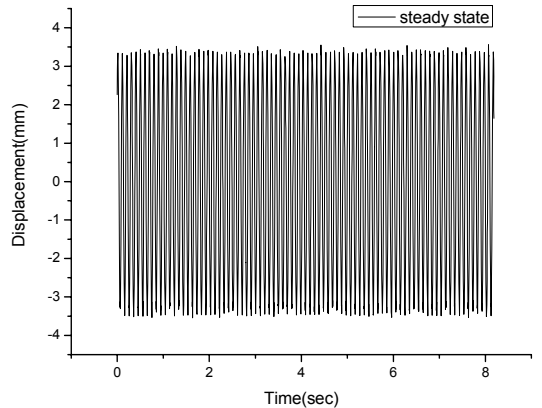


Fig. 9 Displacement in a steady state region

그리고 세탁기에 부착된 댐퍼의 가진변위에 따라서도 C_2 값이 변화도록 식(5)를 구성하였다.

$$D = -2.91 * Force\ Frequency + 71.06 \quad (4)$$

$$C_2 = -0.082 * Force\ Amplitude + 0.43 \quad (5)$$

식(4)에서 가진 주파수는 모터의 회전수를 나타내며, 실제 댐퍼가 세탁기에 장착되었을 때 입력값

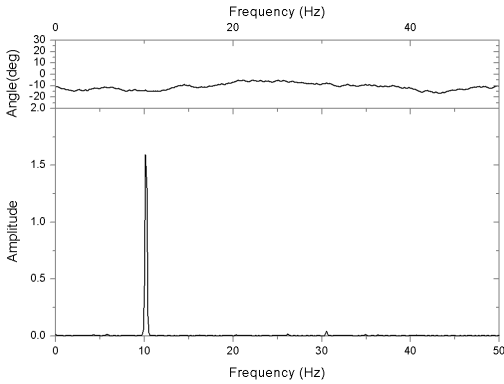


Fig. 10 FFT of the displacement

이 된다. 그리고 식 (5)는 ADAMS프로그램 내에서 1차함수로 구성하여, 댐퍼의 변위가 자동적으로 입력 값이 된다. 즉 모터가 회전함에 따라 회전수가 식 (4)의 가진 주파수로 입력되어, D 값이 결정되고 가진변위에 의해 C_2 값이 결정됨에 따라 전체적으로 댐핑력이 모터의 회전수에 따라 변화하게 된다.

4. Magic formula모델의 결과 분석

다양한 가진 주파수 및 변위의 입력조건에 따라 댐퍼의 실험치와 해석치를 비교한 F-V선도를 Fig. 11부터 Fig. 14에 나타내었다.

그림에서 볼 수 있듯이 magic formula모델을 적용한 해석값이 실험값에 근사적으로 추종하는 것이 확인된다. 이러한 이유는 F-V선도에서 스펀지가 변형에서 이동으로 상태변화 하는 지점이 곡선구간으로 나타나는데, 이를 magic formula모델이 비선형적인 사인 및 아크탄젠트함수로 표현 하고 있다.

오차분석은 RMS(root mean square)를 활용하여 각 주파수 및 변위에 대해서 상대오차값을 구하였다. Table 3에서 나타낸 바와 같이 magic formula를 적용한 모델의 해석값과 실험값의 오차가 최대 7.2% 이므로, 실험과 시뮬레이션이 92% 이상 일치하고 있다.

5. Magic formula모델을 적용한 댐퍼를 드럼세탁기 모델에 적용

드럼세탁기는 크게 회전부인 드럼과 고정부인 터브와 무게중심추, 그리고 회전부와 고정부를 연결하

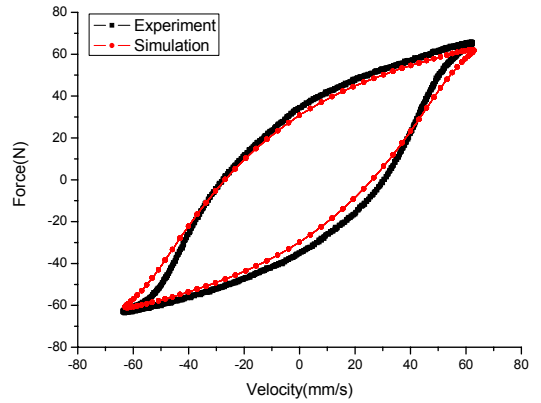


Fig. 11 Comparison experiment vs simulation F-V curve(10 Hz, 1 mm)

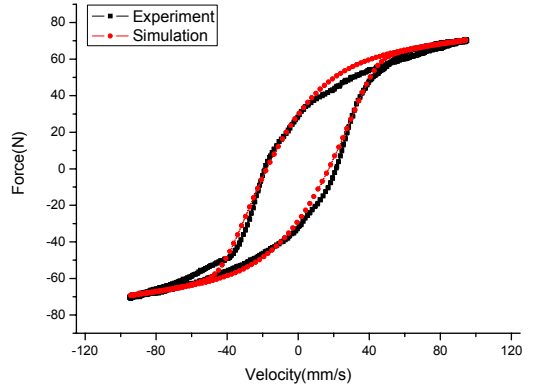


Fig. 12 Comparison experiment vs simulation F-V curve(3 Hz, 5 mm)

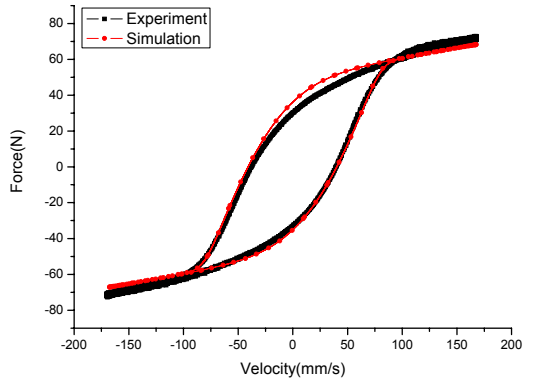


Fig. 13 Comparison experiment vs simulation F-V curve(6.67 Hz, 4 mm)

는 회전조인트, 케이스와 연결되는 스프링과 댐퍼로 구성된다. Magic formula모델을 적용한 댐퍼를

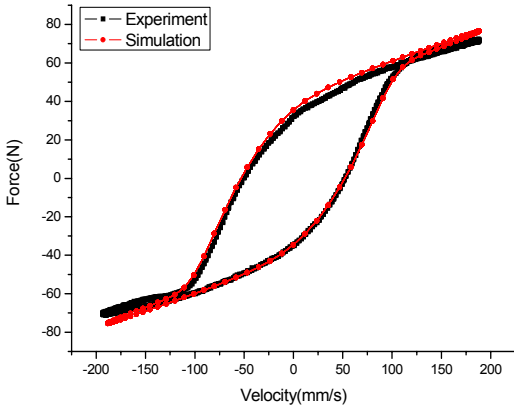


Fig. 14 Comparison experiment vs simulation F-V curve(10 Hz, 3 mm)

Table 4 Error in magic formula model

	RMS(F_{exp})	RMS(F_{MF})	Error
(10 Hz, 1 mm)	50.04 N	46.4 N	7.2 %
(3 Hz, 5 mm)	58.8 N	54.8 N	3.1 %
(6.67 Hz, 4 mm)	59.5 N	57.9 N	2.6 %
(10 Hz, 3 mm)	58.2 N	61.1 N	4.9 %

Table 5 Specificatin of drum-type of washing machine

Part	Diameter	Length
Drum	565 mm	440 mm
Drum rotor	302 mm	70 mm
Tub	595 mm	520 mm

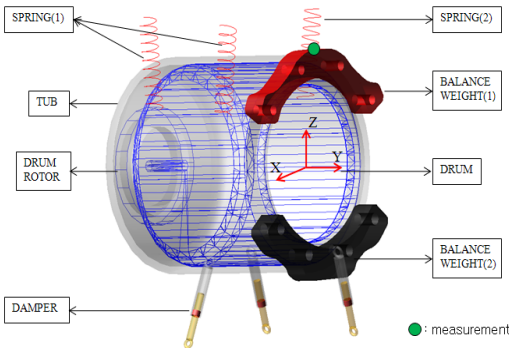


Fig. 15 Dynamic model of drum-type washing

드럼세탁기 모델에 장착하여 전체적인 형상에 대해 각부 명칭과 LG(주)로부터 얻은 제원을 Fig. 15와

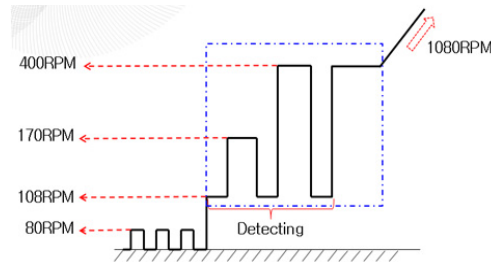


Fig. 16 Simulink block diagram of motor

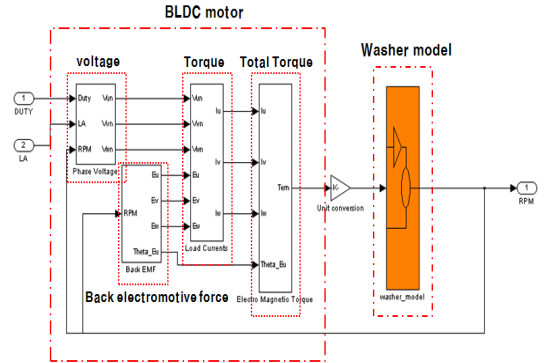


Fig. 17 Change of RPM in a dehydration

Table 5에 나타내었다. 드럼세탁기 모델은 터브와 드럼사이의 회전조인트(1개)와 터브 6방향의 운동으로 구성된 7자유도 모델이며, X축 방향은 터브의 좌우운동을 나타내며, Y방향은 앞뒤운동을, Z축 방향은 상하운동을 나타낸다.

실험과 동일하게 탈수모드에서 실제 세탁물을 고려한 균일질량(11.7 kg)과 드럼의 앞쪽에 불균형 질량(393 g)을 부착하여 시뮬레이션을 수행하였고, Fig. 14에 나타낸 측정지점에서 실험과 동일하게 3축 가속도 크기를 측정하였다. Fig. 16은 탈수모드에서 세탁기 시스템의 RPM변화를 나타낸 것으로 80 rpm에서 세탁물을 흘트리고, 108 rpm에서 불균형 질량을 감지하여, 400 rpm까지 과도구간을 지나 1080 rpm으로 고속탈수과정을 하게 된다. 이를 구현하기 위해 실험에서 모터의 토크를 발생시키는 duty와 lead angle값을 실험 data로 획득하여, LG(주)로부터 얻은 simulink으로 구성된 모터 블록 다이어그램과 ADAMS로 구성된 세탁기모델을 연동하였다. 이를 Fig. 17에 나타내었고, 실제 탈수시간 270초 동안 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 18부터 Fig. 20은 1080 rpm에 도달하기 전까지 전 구간

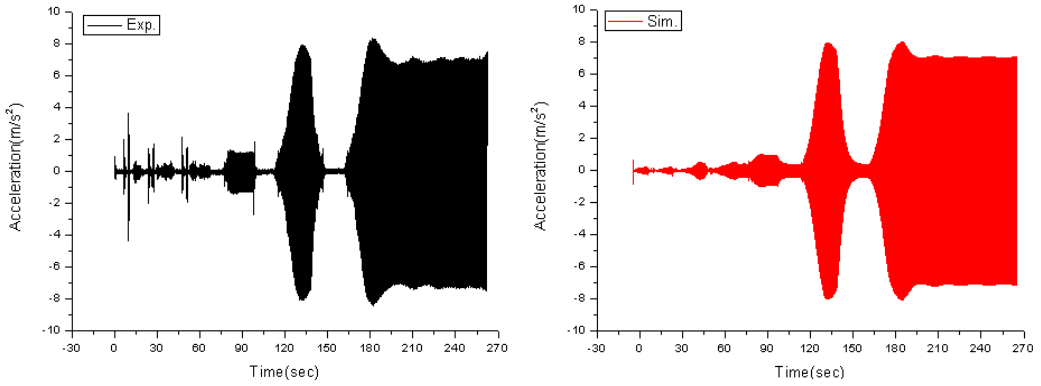


Fig. 18 Comparison experiment vs simulation acceleration of X axis direction

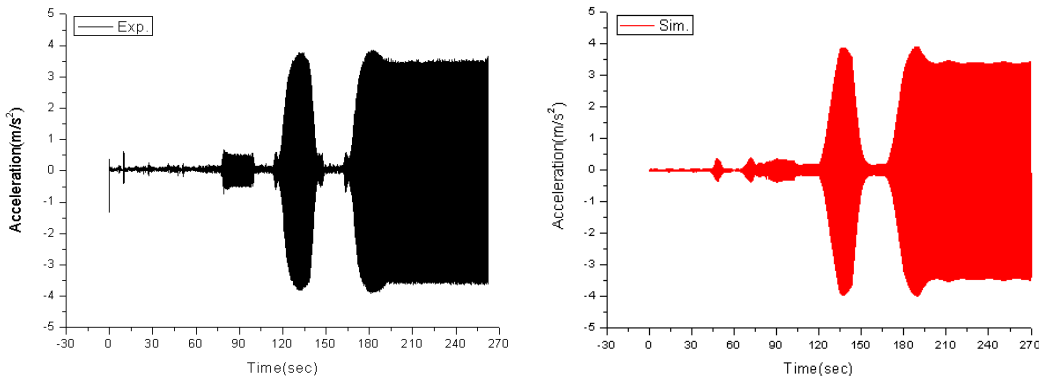


Fig. 19 Comparison experiment vs simulation acceleration of Y axis direction

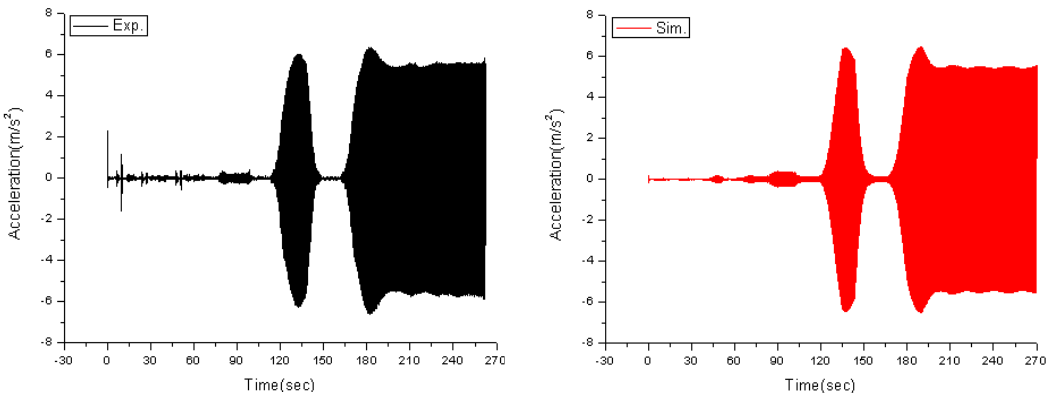


Fig. 20 Comparison experiment vs simulation acceleration of Z axis direction

서 측정된 3축 가속도 크기에 대해서 실험값과 해석값을 비교하였다. 처음 400 rpm에 도달하여, 108 rpm에서 편심을 감지하고 다시 400 rpm에서 일정(정상상태)해지는 구간이 실험과 시뮬레이션이 잘 일치 하고 있다. 하지만 실험에서 측정된 가속도 크

기를 보면 80 rpm부근에서 noise신호가 나타나는데, 이는 세탁물을 흔들리는 과정에서 드럼의 회전방향이 바뀌게 되고, 이때 역토크가 발생하여 나타난 결과라고 판단된다.

결론적으로 진동이 가장심한 탈수구간에서 magic

formula 모델을 적용한 댐퍼의 댐핑력이 실제 댐퍼가 세탁기에 부착되었을 때 나타나는 댐핑력을 잘 표현하고 있으며, 실험에서 사용한 세탁기 시스템의 공진주파수가 200~350 rpm(3~6 Hz) 사이에 있는 것을 감안할 때, 세탁기 시스템의 과도응답특성이 잘 구현되었다.

6. 결 론

이 논문에서는 세탁기 하부를 지지하는 마찰댐퍼에 대해서 새로운 댐퍼 모델을 개발하였다. 댐퍼 모델은 차량동역학 해석에서 활용되고 있는 magic formula 모델을 적용하여 히스테리시스 특성을 구현하였으며, 모델의 정확성을 검증하기 위해 다양한 가진주파수 및 변위를 입력하고, 댐핑력과 가진속도에 대한 F-V 선도를 실험값과 해석값을 비교하였다. 그 결과 최대오차가 7.2%로 실험과 시뮬레이션이 92% 이상 일치했다. 그리고 드럼세탁기의 동역학 모델에 적용했을 때, 진동이 심한 탈수구간에서도 실험에서 얻은 터브의 가속도 측정값이 실험치와 해석치가 전체적으로 잘 일치하고 있는데, 이는 실제 세탁기에 부착이 되었을 때 나타나는 댐핑력을 magic formula를 적용한 댐퍼 모델이 잘 표현하고 있음을 의미한다. 앞으로 이러한 댐퍼의 모델링 과정이 다양한 특성을 지닌 드럼세탁기용 댐퍼를 모델링하는데 있어서 유용하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 LG전자(주)의 지원으로 이루어졌으므로, 지원기관에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Bouc, R., 1967, "Forced Vibration of Mechanical Systems with Hysteresis," Proceedings of the 4th international Conference on Nonlinear Oscillations, Prague, Czechoslovakia.
 (2) Liang, J. W., Feeny, B. F., 1998, "Identifying Coulomb and Viscous Friction from Free-vibration

Decrement," Nonlinear Dynamics, Vol. 16, pp. 337~347.

(3) Yoo, W.-S., Ryu, J.-C., Nho, G.-H., Chung, B.-S., Lee, J. H. and Jung, S.-W., 2008, "Suggestion of MSTV(modified stick transition velocity) Model for Hysteretic Damping Mechanism," J. Mechanical Science and Technology, Vol. 22, pp. 1~8.

(4) Egbert, B., LARS, N., Hans, B. P., 1987, "Tyre Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies," SAE, The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space, No. 870421, pp. 23~27.

(5) ADAMS User's Guide, MSC Software Corporation 2005.

(6) MATLAB7.1 User's guide, The MathWorks Software Corporation.

(7) Ok, J.-K., Yoo, W.-S. and Sohn, J.-H., 2006 "Sensitivity Analysis and Parameter Identification of Uni-axial Bushing Model Using the Bouc-Wen Hysteretic Model," Transactions of KSME, Vol. 14, No. 6, pp. 143~150,

(8) Nikraves, P. E., 1988, "Computer-aided Analysis of Mechanical System," Prentice-Hall.

(9) Yao, G. Z., Chen, F., Li, W. H. and Yeo, S. K., 2002, "MR Damper and Its Application for Semi-active Control of Vehicle Suspension System," MECHATRONICS, Vol. 12, pp. 963~967.

(10) Yoo, W.-S., 2008, "Damping Models for Multibody Dynamics Simulations," Proceedings of the EuroMech 495.

(11) Lai, C. Y. and Liao, W. H., 2002, "Vibration Control of a Suspension System Via a Magneto-rheologica l Damper," Journal of Vibration and Control, Vol. 8, pp. 527~547.

(12) Seong, M. S., Sung, K. G., Han, Y. M., Choi, S. B. and Lee, H. G., 2008, "Vibration Control of MR Suspension System Considering Damping Force Hysteresis," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 3 pp. 315~322.