

다물체 동역학 모델을 이용한 세탁기의 동적 해석

Dynamic Analysis of a Washing Machine Using a Multi-body Dynamic Model

김 태 진*. 김 병 진*. 김 승 오**. 민 제 흥**. 정 진 태†

Taejin Kim, Byungjin Kim, Seungoh Kim, Jehong Min and Jintai Chung

(2011년 11월 22일 접수 ; 2011년 12월 9일 심사완료)

Key Words : Washing Machine(세탁기), Dynamic Behavior(동적거동), Multi-body Dynamic Model(다물체 동역학 모델)

ABSTRACT

In this study, a multi-body dynamic model is developed for a washing machine and the dynamic behaviors of the machine are investigated. The mechanical properties such as spring constants and damping factors are measured from vibrational experiments. With these experimentally obtained mechanical properties, a computer simulation model for the washing machine is established by using a commercial multi-body dynamics software DAFUL. In order to verify the developed simulation model, the dynamic responses computed from simulation are compared to the responses measured from vibration experiments. In addition, the effects of the stiffness and damping factors on the dynamic responses are also analyzed.

1. 서 론

생활수준이 향상되고 가전제품이 고급화되는 추세에 따라 세탁기와 같은 가전제품도 이러한 경향에 맞춰 성능이 다양해지고 제품의 질이 날로 발전하고 있다. 쾌적한 생활환경에 대한 요구가 높아져 정숙성이 제품 선택의 큰 기준 중에 하나가 되었기 때문에 최근에 개발되어 출시되는 세탁기는 뛰어난 세탁성능 뿐만 아니라 저진동 저소음의 성능이 확보되어야만 한다. 세탁기는 작동원리와 구조상 진동을 억제하기에 매우 어려운 가전제품이다. 질량 불균형을 갖는 바스켓(basket)과 모터가 회전하면서 전체적인 세탁기 시스템의 진동을 유발하기 때문에

이를 억제하기는 쉽지 않다. 진동저감을 통한 저진동 저소음 세탁기를 구현하기 위해서는 우선적으로 세탁기의 구조를 파악하고 거동에 미치는 영향 인자에 대한 이해가 필요하다.

세탁기의 거동에 대한 연구는 여러 가지 방법으로 진행되어 왔다. Conrad와 Soedel⁽¹⁾은 세탁기의 수평방향 및 수직방향의 진동에 대한 연구를 수행했는데 수평축이 불안정 할 때 수직축의 거동에 대해 설명했고 Turkey 등⁽²⁾은 그리드와 순차 2차계획법을 사용하여 현가장치(suspension system)의 최적화 설계 공법을 제시하였다. Chung 등⁽³⁾은 현가장치의 진동원인을 시뮬레이션을 통해 규명하고 이를 통해 설계 개선책 및 진동 저감 방안을 제시하였다. Oh와 Lee⁽⁴⁾는 현가장치의 탄성운동을 고려한 모델링을 제안하여 동역학 모델을 유도하였다. Spelta 등⁽⁵⁾은 MR(magnetorheological) 댐퍼의 제어를 통한 세탁기의 진동감쇠 방안을 제안하였고 Chen과 Zhang⁽⁶⁾은 현가장치의 접선방향 감쇠를 고려한 수학

† 교신저자; 정회원, 한양대학교 기계공학과
E-mail : jchung@hanyang.ac.kr
Tel : (031)400-4735, Fax : (031)406-6964

* 한양대학교 일반대학원 기계공학과
** 삼성전자주식회사 생활가전사업부

적 모델링을 설립하고 안정성 연구를 수행했다. 세탁기의 거동에 관한 많은 연구가 있었으나 현가장치가 터브(tub) 및 세탁기 프레임(washing machine frame)을 지지하는 접촉면에서 세탁기 구동 시 생기는 마찰감쇠 효과에 대해서는 고려하지 않아 마찰감쇠가 세탁기 거동에 미치는 영향에 대한 평가를 수행할 수 없었다. 따라서 현가장치 접촉면에서의 마찰감쇠 효과를 적용하는 방안에 대한 연구가 필요하다.

이 논문에서는 상용 다물체 동역학 프로그램 DAFUL을 이용해 현가장치의 마찰감쇠효과를 고려한 세탁기 시스템을 구현하였으며 밸런서의 밸런싱 효과는 제거하였다. 각 부분은 고정, 회전, 병진 조인트(fixed, revolute, translation joint)를 적용하여 모델링을 진행하였고 현가장치의 스프링-댐퍼는 스프링 요소로, 현가장치와 터브 및 세탁기 프레임간의 접촉 부분은 6자유도를 갖는 힘 요소인 부싱(bushing)을 이용하여 모델링하였다. 현가장치 접촉 부분의 마찰감쇠효과를 구현하기 위해 1자유도 비틀림 감쇠진자를 제안하였고 실험 결과를 모델링에 적용하였다. 이외의 부분들에 대해서도 실측과 캐드(CAD) 프로그램, 그리고 실험을 통해 물성치를 획득하고 모델링에 적용하였다. 완성된 시뮬레이션 모델과 세탁기의 시간응답을 비교하여 모델의 신뢰성을 검증하였고 거동에 영향을 미치는 영향인자들을 선정 후 시뮬레이션 모델을 이용하여 영향도를 분석하였다.

2. 세탁기 시스템

이 논문에서 다루는 세탁기 시스템은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 크게 터브, 바스켓, 구동장치(driving module), 현가장치로 이루어져 있다. 각 부분의 세부 구성 요소는 Fig. 2의 단순화한 모델을 통해 확인할 수 있다. 터브는 터브 몸체(tub body)와 터브 캡(tub cap)으로 구성되어 있으며 현가장치에 지지되어 있다. 바스켓은 세탁물이 들어가게 되는 세탁조(basket wrapper), 바스켓 바울(basket bowl), 펄세이터(pulsator), 플랜지(flange)의 결합체로 구동장치를 통해 동력을 전달받아 세탁물의 세탁과 탈수를 수행한다. 구동장치는 모터(motor)와 모터 다이(motor dai), 그리고 클러치(clutch)로 이루어져 모터가 구동되면 벨트를 통해 클러치로 동력이

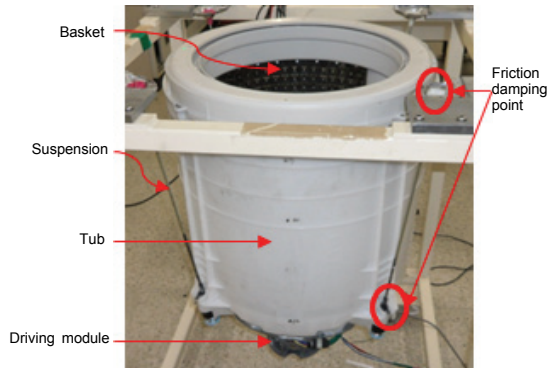


Fig. 1 Washing machine system with a tub, basket, driving module and suspension

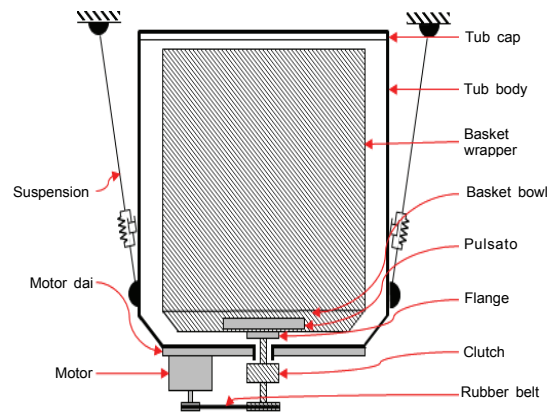


Fig. 2 Simplified model of a washing machine

전달되고 클러치는 바스켓과 연결되어 바스켓을 구동시킨다. 이때 모터와 바스켓에 의한 진동이 모터 다이와 연결된 터브에 전달되며 터브를 지지하고 있는 현가장치를 통해 세탁기 외부 프레임에도 진동이 전달된다.

3. 해석모델 수립

세탁기 시스템의 시뮬레이션 모델링은 DAFUL을 이용하여 강체로 모델링을 진행하였고 터브, 바스켓, 그리고 구동장치를 결합한 세탁기 몸체와 현가장치로 나누어 진행하였다. 세탁기 몸체의 클러치는 모터로부터 동력을 전달받아 바스켓을 구동시키는 역할을 하므로 회전 조인트를 사용하여 구속하였다. 이외의 세탁기 몸체의 각 부분들은 고정 조인트를 사용하여 한 몸체처럼 움직일 수 있도록 모델링을 수행

하였다. 동역학 모델을 위한 물성치는 실측을 통해 질량 정보를 얻었고 캐드 프로그램을 이용하여 질량 관성모멘트를 획득하였다. 구동속도 프로파일은 회전 속도계(tachometer)로 측정하여 적용하였다.

현가장치는 세탁기 프레임에 지지되어 있고 터브를 지지하고 있다. Fig. 3은 현가장치를 모델링 한 것이다. 스프링-댐퍼는 스프링 요소로 모델링 하였고 실험을 통해 스프링-댐퍼의 강성과 감쇠계수를 획득하여 모델링에 적용하였다. 스프링-댐퍼와 같이 움직이는 부분은 병진 조인트를 적용하여 현가장치 위에서만 움직이도록 구속하였고 마찰감쇠가 일어나는 부분은 병진방향과 회전방향을 스프링 요소로 구속할 수 있는 부싱을 이용하여 모델링 하였다. 현가장치가 터브나 세탁기 프레임을 이탈하지 않도록 병진방향으로 높은 강성을 적용하였고 회전방향의 감쇠항에 비틀림 감쇠계수를 적용하는 것으로 마찰 감쇠효과를 대체할 수 있다고 가정하였다. 이를 위해 Fig. 4의 비틀림 감쇠계수를 가지는 1자유도 감쇠진자를 제안하였다. Fig. 5는 비틀림 감쇠계수를 획득하기 위한 실험장치도이다. 충격해머(impact hammer)로 가진하여 가속도계로 응답을 측정하였고 주파수 분석기를 통해 주파수응답함수(frequency response function)를 얻었다. Fig. 6은 실험을 통해 구한 주파수응답함수이다. 주파수응답함수로부터

고유진동수와 대역폭(band width), Q-factor(quality factor)를 획득한 후 이를 통해 감쇠비를 얻어 비틀림 감쇠계수를 구하였다.

4. 진동실험을 통한 해석모델 검증

이 논문에서는 시뮬레이션 모델과 실제 세탁기 시스템의 시간응답을 비교하여 해석모델의 타당성을 입증하였다. Fig. 7은 완성된 시뮬레이션 모델이다. 시뮬레이션과 실제 세탁기의 비교를 위해 동일한 위치에서 응답을 측정하였으며 시간응답은 터브의 정면상단, 정면하단, 측면상단 세 부분에 가속도계를 부착하여 측정하였다. 실험은 불평형질량 300 g, 500 g을 세탁조 하단에 부착하여 진행했고 구동속도는 탈수 최고속도인 730 rpm으로 설정하였다. 세탁기가 멈춰있는 정지상태부터 측정하기 시작하여 730 rpm으로 구동중인 정상상태까지 측정하였다. Fig. 8은 불평형질량 500 g을 세탁조 하단에 부착하고 구동한 실제 세탁기 시스템의 시간응답을

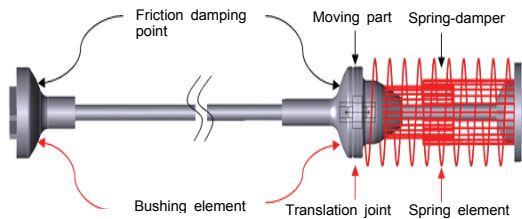


Fig. 3 Suspension system of the washing machine

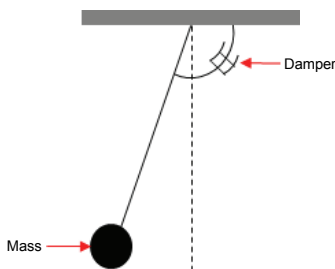


Fig. 4 Single-degree-of-freedom model of a damped pendulum

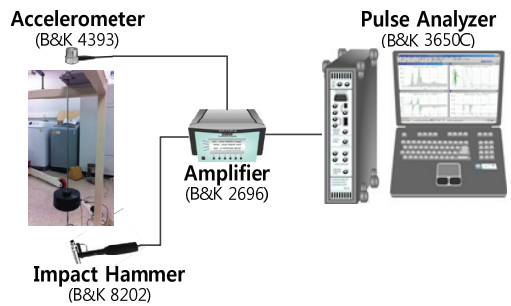


Fig. 5 Experimental setup for measurements of torsional damping coefficient

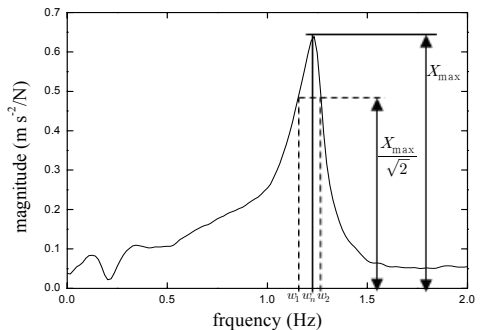


Fig. 6 Frequency response function of the suspension system

가속도계와 주파수 분석기를 이용하여 측정된 것이다. 초기 구동 시 피크(peak)가 생기는 구간을 과도 구간으로 설정하였고 일정한 진폭을 갖는 후반부의 구간을 정상구간으로 설정하였다. 과도응답과 정상응답의 실험값과 시뮬레이션의 비교결과는 Table 1에 나타내었다. 실험값과 시뮬레이션의 오차는 10% 내외를 만족하여 시뮬레이션 모델의 신뢰성을 검증하였고 마찰감쇠 효과를 구현하기 위해 제한한 비틀림 감쇠진자 모델에 대해서도 타당성을 입증하였다.

5. 해석모델 거동 영향 평가

세탁기 시스템의 거동에 영향을 미치는 요인은 다양하다. 질량이나 형상이 변할 경우 전체 시스템의 질량중심이나 질량관성모멘트가 변해 거동이 달라지며 현가장치와 터브 및 세탁기 프레임과의 결합위치의 변화에 따라서도 거동이 변하게 된다. 거동이 변한다는 것은 단순히 변위의 크기만 변한다는 것이 아니라 전체적인 시스템의 거동 특성이 변해 시스템 자체가 변하는 것을 의미한다. 기존 시스템에선 상단변위가 하단변위보다 컸더라도 거동 특성이 변한 시스템에선 상단변위가 하단변위보다 작을 수도 있다. 이 논문에서는 세탁기 시스템 자체의 거동 특성을 변경하지 않는 범위에서 영향인자들이 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 변경 가능한 인자들인 스프링 강성, 감쇠계수, 비틀림 감쇠계수를 영향인자로 설정하였고 DAFUL을 이용하여 수립한 해석모델을 통해 영향인자가 거동에 미치는 영향을 분석하였다. Figs. 9~14는 스프링 강성, 감쇠계수, 비틀림 감쇠계수의 변화에 따른 세탁기 정면상단부의 과도상태 응답과 정상상태 응답을 비교하여 나타내었다.

Figs. 9, 12를 통해 강성이 증가함에 따라 정상상태 응답은 커지며 과도상태 응답은 작아지는 것을 확인할 수 있다. 강성이 증가하면 세탁기 초기 구동시 스프링의 움직임이 작아 과도한 거동이 줄어드는 효과가 있다. 따라서 강성이 증가하면 과도응답은 줄어든다. 하지만 이와는 반대로 정상상태 응답은 커지게 되는데 강성 증가로 인해 스프링의 거동이 어려워져 진동저감 효과가 적어진 것으로 판단된다. 감쇠계수의 경향은 이와는 반대로 값이 커질수록 정상상태 응답은 감소하고 과도상태 응답은

커지는 것을 Figs. 10, 13을 통해 알 수 있다. 일반적으로 감쇠계수가 커지면 감쇠력도 비례하여 커지므로 응답을 감소시키는 효과가 있다. 일정한 변위로 움직이고 있는 정상상태 구간에선 감쇠계수가 커질

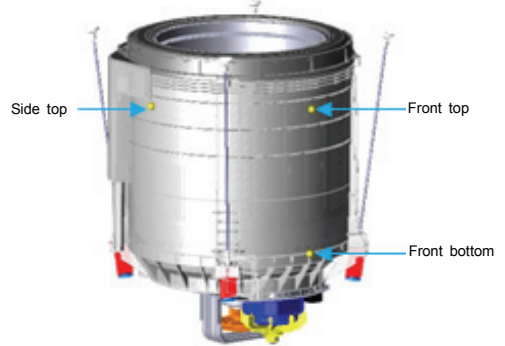


Fig. 7 Simulation model of the washing machine using DAFUL

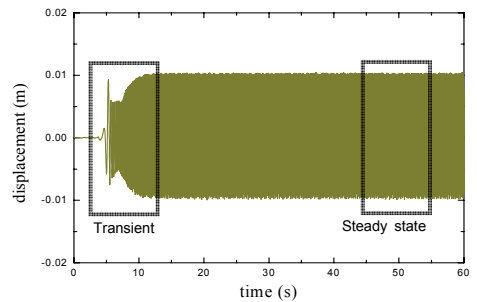


Fig. 8 Time response of the front top for the washing machine tub

Table 1 Comparison of the displacements obtained by experiment and simulation

	Unbalance mass	Measure point	Error (%)
Transient response	300 g	Front top	-6.09
		Front bottom	5.59
		Side top	0.00
	500 g	Front top	-0.59
		Front bottom	10.61
		Side top	3.93
Steady state response	300 g	Front top	-8.60
		Front bottom	2.20
		Side top	-6.71
	500 g	Front top	0.69
		Front bottom	0.93
		Side top	-9.41

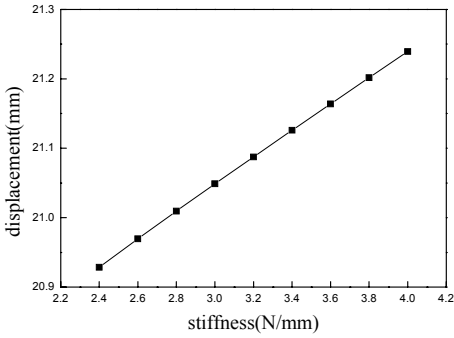


Fig. 9 Variation of the vibration magnitude for the change of the stiffness in the steady-state region

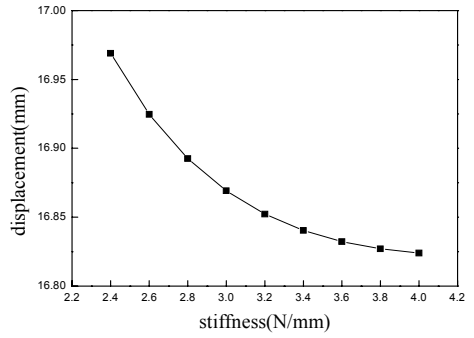


Fig. 12 Variation of the vibration magnitude for the change of the stiffness in the transient region

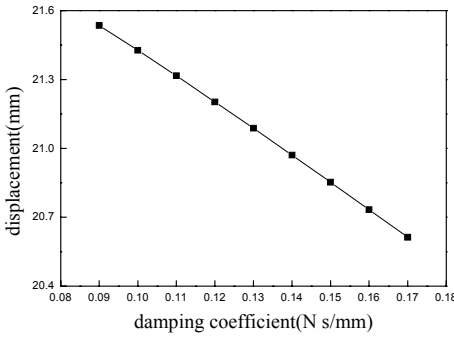


Fig. 10 Variation of the vibration magnitude for the change of the damping coefficient in the steady-state region

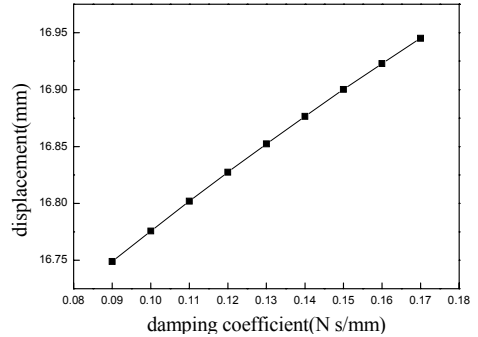


Fig. 13 Variation of the vibration magnitude for the change of the damping coefficient in the transient region

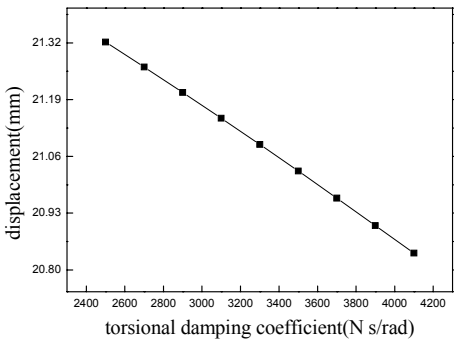


Fig. 11 Variation of the vibration magnitude for the change of the torsional damping coefficient in the steady-state region

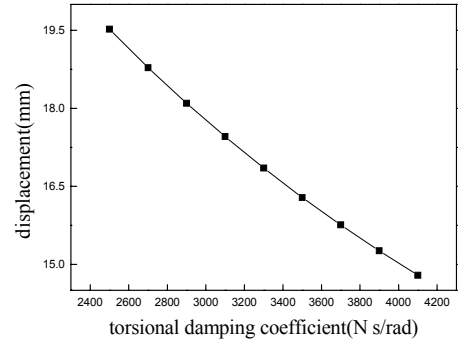


Fig. 14 Variation of the vibration magnitude for the change of the torsional damping coefficient in the transient region

수록 감쇠력도 크게 작용하여 응답이 작아지는데 반해 과도상태구간에선 응답이 증가하는 경향을 보였다. 이를 통해 감쇠력이 커질수록 과도응답이

증가하는 현가장치 스프링-댐퍼의 특성을 확인할 수 있었다. Figs. 11,14에 나타낸 비틀림 감쇠계수의 변화에 따른 정상 및 과도상태의 응답은 감쇠계수가

커질수록 감쇠력이 크게 작용하여 정상 및 과도상태 응답 모두 작아졌고 정상상태 응답에 비해 과도상태 응답이 큰 비율로 감소하였다.

스프링 강성, 감쇠계수, 비틀림 감쇠계수가 응답에 미치는 영향을 비교해 보았을 때 비틀림 감쇠계수의 변화가 세탁기의 초기 거동에 가장 큰 영향을 끼쳤고 스프링 강성과 감쇠계수는 상대적으로 미치는 영향이 적었다. 이는 현가장치의 스프링-댐퍼의 영향보다 터브 및 세탁기 프레임과의 마찰효과가 크다는 것을 의미한다. 따라서 마찰효과에 영향을 주는 그리스의 양 및 점도의 조절이 거동 개선에 큰 도움이 될 것으로 판단된다. 현가장치의 스프링-댐퍼는 감쇠력이 커질수록 과도응답이 증가하는 특성을 보이므로 설계 시, 이 특성을 고려하여 감쇠계수를 선정하는 것이 중요하다고 사료된다.

6. 결 론

이 연구에서는 세탁기 시스템의 영향인자가 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해 다물체 동역학 해석모델을 수립하였고 실험을 통해 얻은 물성치를 적용한 해석모델과 실제 측정값을 비교하여 해석모델의 신뢰성을 검증하였다. 이 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 마찰감쇠효과를 구현하기 위해 1자유도 감쇠진자를 제안하였고 실험을 통해 얻은 비틀림 감쇠계수를 DAFUL로 모델링 한 부싱의 회전 감쇠항에 적용하여 실제 시스템의 마찰감쇠효과를 구현하였다. 시뮬레이션 모델과 실험값과의 오차가 10% 내외를 만족하여 제안한 내용이 타당함을 입증하였다.

(2) 현가장치의 스프링 강성, 감쇠계수, 그리고 감쇠진자의 비틀림 감쇠계수를 거동에 영향을 미치는 영향인자로 설정하고 각각의 값을 변경하며 거동을 평가했을 때 비틀림 감쇠계수가 거동에 가장

큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 또한 스프링-댐퍼의 감쇠계수가 증가하면 과도응답이 커지는 특성을 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) Conrad, D. C. and Soedel, W., 1995, On the Problem of Oscillatory Walk of Automatic Washing Machine, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 188, No. 4, pp. 301~314.

(2) Turkay, O. S., Kiray, B., Tugcu, A. K. and Sumer, I. T., 1995, Formulation and Implementation of Parametric Optimisation of a Washing Machine Suspension System, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 9, No. 4, pp. 359~377.

(3) Chung, K. R., Lee, J. B., Im, M. S. and Yun, J. M., 1993, Computer Simulation for Dynamic Analysis of Rigid body Suspension System for Washing machine, *Transaction of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 65~75.

(4) Oh, H. J. and Lee, U. S., 2004, Dynamic Modeling and Analysis of the Washing Machine System with an Automatic Balancer, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineering*, Vol. 28, No. 8, pp. 1212~1220.

(5) Spelta, C., Previdi, F., Savaresi, S. M., Fraternali, G. and Gaudio, N., 2009, Control of Magnetorheological Dampers for Vibration Reduction in a Washing Machine, *Mechatronics*, Vol. 19, pp. 410~421.

(6) Chen, H. W. and Zhang, Q. J., 2010, Stability Analyses of a Vertical Axis Automatic Washing Machine Without Balancer, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 11, pp. 2177~2192.