

# 세탁기용 자동진동저감장치(Auto-Leg™)의 최적 설계 Optimal Design of an Auto-Leg System for Washing Machines

서현석† · 이태희\* · 전시문\*

H.S. Seo, T.H. Lee and S.M. Jeon

**Key Words** : 3 차원 동역학 모델링(3-D Dynamic Modeling), 접촉 해석(Contact Analysis), 세탁기(Washing Machine)

## ABSTRACT

Automatic washing machines have been improved and popularized steadily since the first electric washing machine was produced in the early 1900's. Appliance industry has tried to obtain the performance of washing machine with large capacity, high energy efficiency, low vibration and low noise levels. As the installation place of a washer becomes closer to the living space, vibration and noise problems become more important challenges. In general, a washing machine has four legs to support its body. Four legs of the washing machine should be attached on a floor. If not so, it may cause severe vibration or walking in the spin-drying process. Unfortunately, the floor of an ordinary house is bumpy in general, and the consumers will not accept bolting washing machines to a foundation; moreover, sometimes they move the location of their washing machines to utility rooms or bath rooms or kitchens and don't care for leveling the legs exactly. In this study, we devise an auto-leg system that prevents the occurrence of abnormal vibration and walking of washing machines. It is simply composed of a spring and a friction damper. Some experiments are implemented to show the dynamic characteristics of the three-dimensional auto-legged washing machine model that is located on the even or uneven ground. A spring parameter is optimized to adjust the length of the auto-leg system automatically up to 10 mm irregularity, and the friction damper is designed to decrease a resonance induced by the spring of the auto-leg system. Some numerical results show that placing the proposed auto-leg system in a washing machine makes good performance with low vibration, as well as low noise, regardless of the unevenness of the floor.

## 1. 서 론

다양한 가사 노동 중에서도 세탁은 많은 힘과 시간을 요하는 가장 어려운 일 중의 하나이므로 이를 기계의 힘을 이용하여 해결하고자 하는 시도가 일찍부터 있어왔다. 최초의 세탁기의 발명에 대한 명확한 자료는 없으나, 1766년 Schaefer가 고안한 세탁장치 등 18세기 후반부터 활발한 발명 활동이 이루어져 온 것으로 알려지고 있다. 전기를 이용한 세탁기는 1908년 미국 시카고의 Hurlley Machine社에 의하여 개발되었고, 그 후 가정용 전기가 보편적으로 공급되면서 가정용 세탁기의 기술은 각 지역의 생활 패턴과 자원 여건에 맞는 세탁 방식으로 분화하여 급속도로 진전되어 왔다. 국내에서도 LG전자(당시 금성사)가 1969년 최초로 2조식 세탁기를 개발/생산한 것을 시작으로 1980년대 이후 보급률이 급속히 증가하여 현재에는 거의 모든 가정에서 사용하고 있을 정도이다.

현재 세계에서 사용되는 세탁기는 세탁 방식에 따라 유럽지역에서 주로 사용되는 드럼식(drum type)과 미주지역의 교반식(agitator type), 한국과 일본 등 동아시아 지역에서 사용되는 와권식(pulsator type)의 세 가지로 크게 분류되고, 진동계 관점에서 구분을 하면 세탁기의 회전축에 따라서 수평축 방식(horizontal-axis type)과 수직축 방식(vertical-axis type)으로 나뉘어진다. 여기에서 드럼식은 수평축 방식이며, 교반식과 와권식은 수직축 방식에 해당된다. 최근에는 세탁물의 손상이 적고 물 사용량이 매우 작으며 에너지 절약에 강점을 가지고 있는 드럼 세탁기가 대용량화되고 세탁 성능이 개선되면서 전세계적으로 점유율이 증가하고 있는 추세이다.

세탁기 개발의 주된 관심은 에너지 고효율화, 저진동/저소음, 대용량화, 사용 편리성 증대 등에 집중되어 왔는데, 특히 용량이 커지는데 반해 재료비 절감 등의 이유로 세탁기의 무게가 점차 가벼워지고 탈수 속도가 높아지면서 진동 문제는 점차 심각해지고 있다. 세탁기의 진동이 과도하게 클 경우에 발생하는 현상인 워킹(walking)은 세탁기의 위치가 이동하므로 점차 심한 진동을 유발할 수 있고, 다른 물체와 충돌하거나 전복될 위험까지 있으므로 반드시 방지하여야 한다.

워킹은 과도 진동 시 외조(outer tub)와 캐비닛의

† 책임저자; LG전자 DA연구소 워싱시스템그룹  
E-mail : tetriser@lge.com  
Tel : (02) 818-3634, Fax : (02) 837-0298

\* LG전자 DA연구소 워싱시스템그룹

충돌에 의한 “striking”과 정상 진동에서 탈수 속도의 증가에 따라 불균형 질량(unbalance mass)에 의한 원심력이 증가하면서 미끄러지는 “slip”으로 나누어진다. 세탁기의 워킹을 방지하기 위하여 구동부의 무게 중심이 대칭이 되도록 설계하고 과도 및 정상 상태에서 적절한 댐핑력을 갖도록 댐퍼를 개발 또는 제어하며 바닥과의 접촉력이 좋은 레그(leg) 재질을 선택하여야 한다. 그러나, “slip” 현상의 경우에는 실제 사용 환경에 더욱 심각하게 영향을 받고 있는데, 이는 세탁기가 설치된 바닥의 탄성, 마찰 계수 등의 기계적 성질뿐만 아니라 경사도, 평면도 등의 기하학적 상태가 매우 다양하기 때문이다. 일반적으로 세탁기를 지지하고 있는 4 개의 레그에 질량이 고르게 분포되어야 워킹 현상을 방지할 수 있다. 그러나, 사용 환경인 다용도실, 욕실, 주방, 거실 등의 바닥이 울퉁불퉁한 경우가 많고, 초기에 설치기사가 적절히 설치하였다 하여도 사용자가 이주나 다른 필요에 의하여 세탁기의 위치를 이동하는 일이 빈번하다. 이때 대부분의 경우 수평 조절이 제대로 이루어지지 않으므로, 워킹 현상은 매우 쉽게 일어날 수 있으며 이는 제품에 대한 심각한 불만으로 나타나게 된다.

세탁기와 같은 가전 산업 분야는 개발 기간이 오래되었음에도 기업들 간의 경쟁이 치열하여 문헌으로 보고되는 일이 드문 편이다. 세탁기의 워킹 현상에 관한 연구로는 Conrad 와 Soedel<sup>(1)</sup>이 수직축 방식과 수평축 방식 세탁기에 대하여 각각 간단한 2 차원 모델링을 하고 워킹이 일어나는 임계 회전 속도를 구하여 비교하고 설계 방향을 제시하였으며, Papadopoulos 와 Papadimitriou<sup>(2)</sup>는 소형 드럼 세탁기를 대상으로 간단한 3 차원 모델링을 통하여 워킹 현상을 해석하였다. 기존의 연구들은 간단한 수학적 모델링을 통하여 워킹 현상을 분석적으로 파악할 수 있는 장점이 있으나 실제 복잡한 거동을 예측하기에는 한계가 있다.

본 연구에서는 앞서 언급한 드럼 세탁기의 워킹 현상에 능동적으로 대처하기 위하여 자동으로 수평 조절을 할 수 있는 장치를 설계한다. 이를 위하여 워킹 현상을 고려한 수치해석 모델링과 실험 데이터를 통한 검증, 동적 특성에 대한 해석을 수행하였다. 본 연구에서 제안한 자동진동저감장치(Auto-Leg™)는 스프링에 의하여 바닥 면의 평면도와 관계없이(실제적으로 일어날 수 있는 범위 내에서) 세탁기의 4 점 지지에 고르게 힘을 전달함으로써 워킹을 억제하고 이와 병렬로 적절한 마찰 댐퍼를 추가하여 부가적인 진동을 줄인다.

## 2. 세탁기의 동역학 모델링

세탁기의 진동은 본질적으로 세탁 시보다 탈수 시에 심하며 세탁물을 넣은 드럼이 고속으로 회전할 때 세탁물이 한쪽으로 모아서 발생하는 불균형 질량이 가진원이 된다. 본 연구에서는 캐비닛의 워킹에 관심이 있으므로 간단한 수학적 모델링을 통하여 전달 경로를 살펴보고, 실제 거동 해석은 상용 소프트웨어인 DADS 를 사용하여 3 차원으로 모델링 하였다.

### 2.1 단순화된 수학적 모델링

드럼 세탁기의 동적 거동을 2 차원으로 표현하면 Fig. 1 과 같다. 세탁물에 의한 불균형 질량이 회전하면서 발생하는 원심력이 스프링과 댐퍼를 통하여 캐비닛에 전달되어 바닥 면에서의 수직항력 및 마찰력과 평형을 이루게 된다.

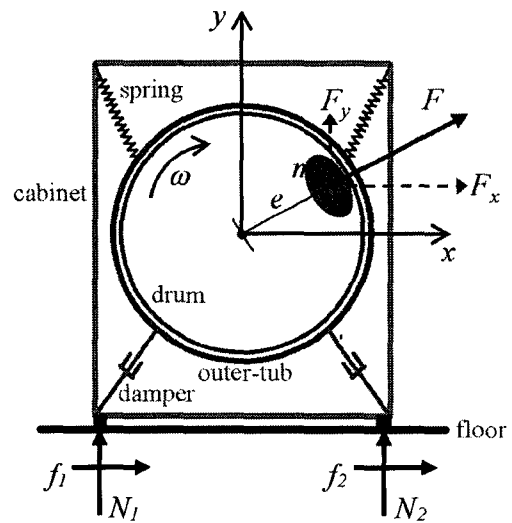


Fig. 1 Two-dimensional free body diagram

Conrad 와 Soedel<sup>(1)</sup>이 전개한 바와 같이 평평한 바닥에 레그가 강체이고 쿨롱 마찰임을 가정하면 다음과 같은 관계가 얻어진다.

$$(M + m)\ddot{x} = F_x - (f_1 + f_2) \quad (1)$$

$$(M + m)\ddot{y} = F_y - (M + m)g + N_1 + N_2 \quad (2)$$

$$f_1 + f_2 = \mu(N_1 + N_2) \quad (3)$$

여기에서  $M$  은 불평형 질량  $m$  을 제외한 시스템의 질량이고  $\mu$  은 마찰계수이다.

정상상태에서의 회전운동 시 원심력의 각 성분은 식 (4)와 (5)로 나타낼 수 있고 “slip”이 일어나기 전까지는 캐비닛이 바닥에 고정되어 있으므로  $\ddot{x}=\ddot{y}=0$ 임을 이용하면 식 (1)~(5)를 정리하여 식 (6)과 같이 된다.

$$F_x = me\omega^2 \cos \alpha t \quad (4)$$

$$F_y = me\omega^2 \sin \alpha t \quad (5)$$

$$me\omega^2 (\cos \alpha t + \mu \sin \alpha t) = \mu(M+m)g \quad (6)$$

이와 같은 관계로부터 “slip”이 일어나는 임계속도  $\omega_{slip}$  을 구하면 식 (7)과 같다.

$$\omega_{slip} = \sqrt{\frac{\mu(M+m)g}{me\sqrt{1+\mu^2}}} \quad (7)$$

위의 결과를 이용하면,  $M=70kg$ ,  $m=1kg$ ,  $e=0.25m$ ,  $\mu=0.6$  인 경우  $\omega_{slip}$  는 361.5rpm 이 된다. 이는 바닥 면과 접촉하고 있는 세탁기의 레그가 강체로 가정됨으로써 실제 현상보다 “slip”이 발생하는 탈수 속도가 매우 낮게 평가됨을 알 수 있다.

이상과 같이 드럼 세탁기의 워킹에 관한 메커니즘을 매우 단순화하여 살펴보았는데, 실제로 고무 또는 플라스틱으로 제작된 레그의 탄성을 고려한 접촉 문제는 매우 복잡하다.

## 2.2 3차원 모델링

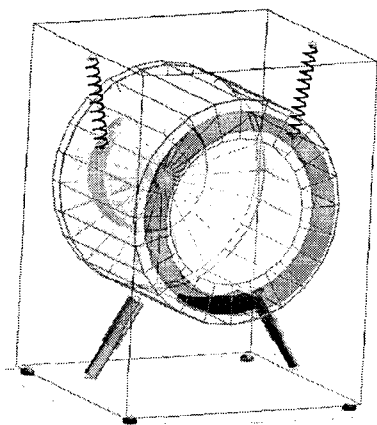


Fig. 2 DADS Model for Drum-type Washer

본 연구에서 사용된 드럼 세탁기는 Fig. 2 와 같이 각각 두 개의 스프링과 댐퍼로 외조가 지지되어 있고, 드럼은 직접 구동 방식(direct-drive) 모터로 구동된다. 4 개의 레그와 바닥 사이의 접촉은 Fig. 3 과 같은 구조로 모델링 된다. 여기에서 부싱 요소(bushing element)는 레그 재질의 탄성 및 댐핑을 반영하도록 하고 DADS 에서 접촉 요소(contact element)로 법선 방향의 마찰력을 표현하는데 제한이 있으므로 자유도를 맞추어 마찰 요소(friction element)를 추가하였다.

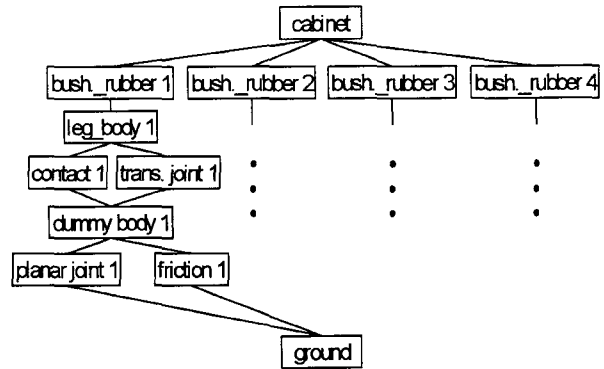


Fig. 3 Topology Map for Contacting Part

해석에 있어서 적절한 물성치의 사용이 중요하므로 레그의 탄성을 측정하기 위하여 몇 가지 고무 재질에 대하여 압축 실험을 시행하였다(Fig. 4). 고무의 경우 압축량에 따라 탄성이 다르고 동적 거동에 영향을 받으나, 세탁기의 자중을 고려하여 압축시의 탄성계수를 구하고 비선형적인 부분을 실험 데이터를 이용하여 선형 근사하였다.

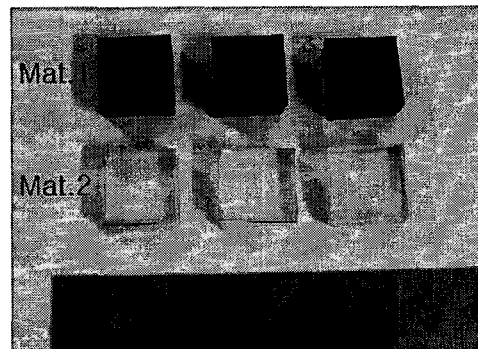


Fig. 4 Specimens of Leg for Compression Test

### 3. 해석 모델 검증 및 파라미터 연구

세탁기와 바닥 사이의 접촉 현상을 실제와 같이 해석하기 위하여 Fig. 5 와 같이 드럼의 전방에 불균형 질량이 존재하고, 'leg 2'가 다른 레그에 비하여 5mm 짧은 조건에서 실험을 하여 각 레그의 수직 방향 변위를 측정하였다. 세탁기의 투입구의 개폐 장치 등으로 인하여 무게 중심이 전방에 위치하고 있으므로 초기 상태에서 세탁기는 앞으로 기울어져 있다.

Fig. 6 에서는 실험 결과와 이를 이용하여 바닥의 탄성계수와 댐핑, 레그와의 반발 계수 등을 추정하여 얻은 해석 결과를 비교한 것으로서, 3 차원 동역학 해석 모델이 세탁기의 워킹 현상을 예측하는데 적합하게 사용될 수 있음을 보여주고 있다. 드럼의 회전 속도가 증가하면서 불균형 질량에 의한 과도 진동이 발생하여 세탁기가 심하게 덜컹거리다가 정상 상태로 진입하면서 3 점지지 상태를 유지함을 알 수 있다.

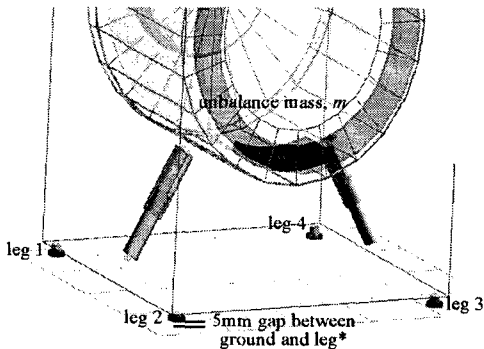


Fig. 5 Test 1: One Leg is 5mm Shorter

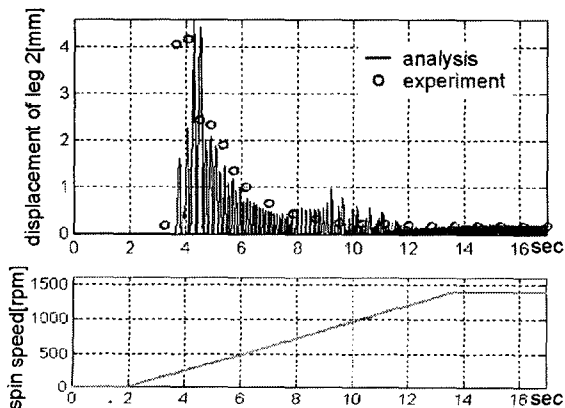


Fig. 6 Experimental and Numerical Results of Test 1

자동진동저감장치를 장착하였을 때의 거동을 예측하기 위하여 한쪽 레그(leg 1)에 보조 스프링을 장착한 후, 레그의 수직 변위를 측정하고 같은 조건에서 동역학 해석을 수행하였다. 이 경우에 약 700 ~ 800rpm 구간에서 캐비닛의 진동이 심해지는 것을 볼 수 있는데, 이는 레그와 바닥 사이의 탄성에 의한 공진으로 상대적으로 변형이 쉬운 스프링이 대각 방향의 레그와 반대의 위상을 가지고 진동하는 모드이다. 해석 모델은 전체적으로 변위와 공진 영역을 잘 모사하고 있으며, 고속 회전 영역에서의 변위 크기에 다소 차이가 나는 것은 부싱의 비선형 댐핑 특성에 기인한 것으로 판단된다.

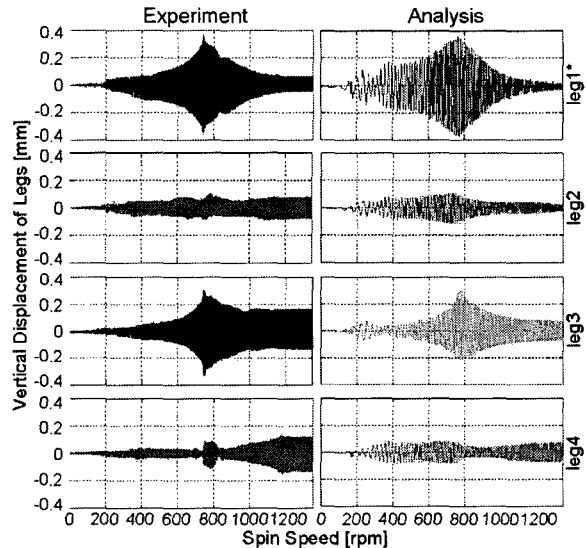


Fig. 7 Test 2: with Self-Adjustable Spring Installed at Leg1

위의 결과로부터 자동진동저감장치의 스프링에 의한 공진이 감지되었으므로, 공진 주파수를 이동시키거나 댐핑을 추가하여 감쇠할 필요가 있다. 자동진동저감장치의 스프링의 역할은 바닥의 요철에 의한 불균형에 대처하기 위한 것으로서 가능한 일정한 수직항력을 유지하여야 하므로, 스프링 상수가 작을수록 요철에 의한 길이 변화에 둔감하게 작동한다.

Fig. 8 은 스프링 상수를 달리하고 바닥의 요철의 유무에 따른 진동을 해석한 결과로서 스프링 상수가 작은 경우의 레그의 수직항력의 변화  $k_2\delta$  가 스프링 상수가 큰 경우의 수직항력의 변화  $k_1\delta$  보다 작음을 알 수 있다. 또한, 공진 영역에서 'leg3'의 수직항력이 0 이 되면서 바닥을 살짝 찰

는 현상이 나타나는데, 스프링 상수  $k_1$  인 경우에는 716 ~ 889rpm 영역의 'stamping' 구간이 652 ~ 1,003rpm 으로 증가하지만  $k_2$  인 경우에는 706 ~ 880rpm 에서 706 ~ 881rpm 으로 거의 같다. 여기에서 공진점은 스프링 상수의 크기에 거의 영향을 받지 않으므로 부가적인 진동 저감을 위해서는 댐핑의 추가가 필요함을 알 수 있다.

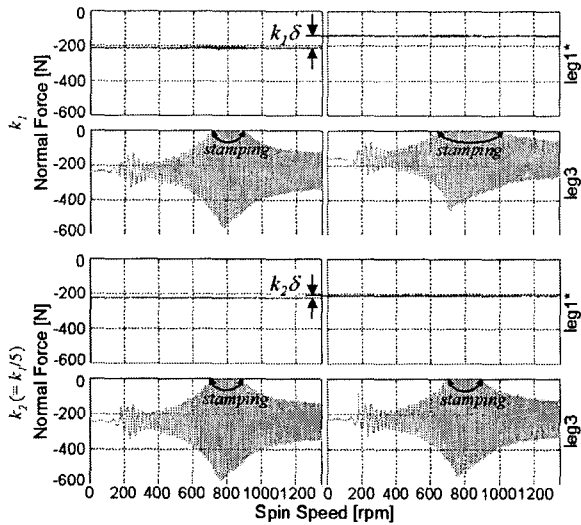


Fig. 8 Effect of Self-Adjustable Spring,  $k$

#### 4. 자동진동저감장치 설계

앞에서 검토한 바와 같이 자동진동저감장치를 구성하기 위해서는 가능한 작은 스프링 상수를 갖는 스프링과 바닥 진동을 적절히 감쇠하기 위한 댐퍼가 필요하다. Fig. 9 는 자동진동저감장치의 설계 예를 보여주고 있다.

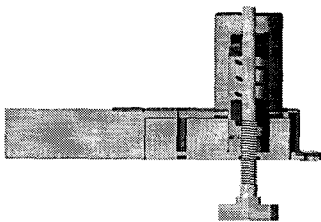


Fig. 9 Design Example of Auto-Leg System

자동진동저감장치의 설계를 위하여 다음과 같이 최적화 문제를 정식화 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} && \text{Vibration of Cabinet}(k, c, l; \omega, m) \\
 & \text{such that} && N_i < 0 \text{ for } \pm 5\text{mm unevenness} \\
 & && (i = 1, 2, 3 \text{ and } 4) \\
 & && l \leq \text{allowable maximum free length} \\
 & && 0 \leq \omega \leq \text{maximum spin speed} \\
 & && 0 \leq m \leq \text{unbalance capacity}
 \end{aligned}$$

여기에서 설계변수  $k, c, l$  은 각각 스프링 상수, 댐핑 상수, 스프링 자유장의 길이를 나타내며,  $N_i$  는 각 레그에서의 수직항력으로서 음의 영역에서 바닥과 접촉하고 있음을 의미한다.

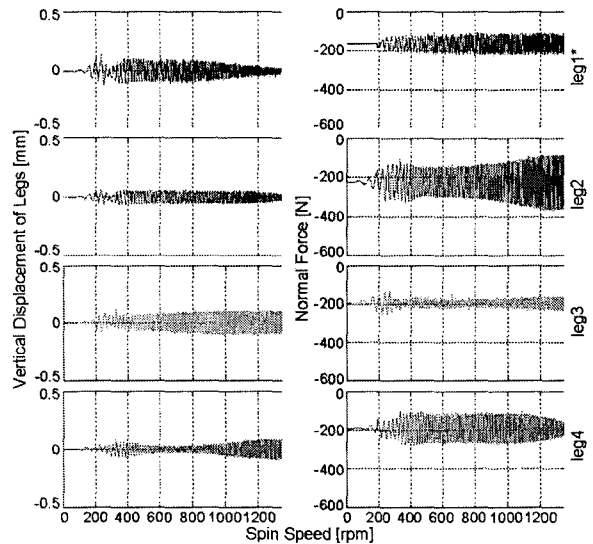


Fig. 10 Leg Vibration of Washing Machine with Auto-Leg System

본 연구에서 설계한 자동진동저감장치는 Fig. 10 의 해석 결과에서 보여주고 있는 바와 같이 적절한 4 점 지지를 가능하게 함으로써 캐비닛의 진동을 줄이고 워킹을 방지하여 세탁기의 진동과 소음 저감에 기여할 수 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 드럼 세탁기의 워킹 현상에 능동적으로 대처하기 위하여 스프링과 마찰 댐퍼로 구성된 자동진동저감장치를 개발하고 실험과 수치

해석을 통하여 세탁기의 레그 부분 진동에 관한 연구를 수행하였다. 드럼 세탁기의 3 차원 동역학 모델링을 완성하고 레그와 바닥의 동접촉과 관련된 물성치를 몇 가지 실험을 통하여 결정함으로써 해석의 정확성을 높일 수 있었다.

자동진동저감장치를 설계함에 있어서 스프링은 작동 범위 내에서 일정한 힘을 유지하는 것이 바람직하므로 공간이 허락하는 한 작은 값의 스프링 상수를 선정하여야 하고, 댐퍼는 스프링과 병렬 구조로 연결되어 있는 것이 효과적이며 레그의 길이가 유연하게 복원될 수 있도록 댐핑력의 선정에 주의하여야 한다.

본 연구에서 개발된 자동진동저감장치는 세탁기의 초기 설치가 잘못 되었거나 사용자의 설치이동으로 인한 4 점 지지의 불균형을 최소화하여 실제 사용 중에 발생할 수 있는 세탁기의 이상 진동과 소음을 억제한다.

#### 참고문헌

- (1) Conrad, D. C., and Soedel, W., 1995, "On the Problem of Oscillatory Walk of Automatic Washing Machines," *Journal of Sound and Vibration*, 188(3), pp. 301-314
- (2) Papadopoulos, E., and Papadimitriou, I., 2001, "Modeling, Design and Control of a Portable Washing Machine during the Spinning Cycle," *Proceedings of the 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Systems*, pp. 899-904