

드럼 세탁기 탈수시 가속도 피드백 제어

이진원[†] 스즈키 세이치로^{*} 선희복^{*}

Direct acceleration feedback control of a washing machine during spinning process

Chinwon Lee, Suzuki Seichiro and Hee Bok Sun

Key Words : Vibration control(진동 제어), Washing machine(세탁기), MEMS accelerometer(멤스 가속도계)

Abstract

The market of the horizontal axis washing machine (drum washing machine) has been growing drastically in Korea by about 80% annually since 2000. As market grows fast, the customer's demands concerning quality becomes more strict and various. Imbalance sensing is a key technology to reduce the NVH problem in a washing machine, because the laundry is time-variant and uncontrollable source of imbalance, which can cause more than 200kgf exciting force. In this paper, imbalance-sensing methods are briefly reviewed, new acceleration sensing circuits are examined, and finally the control algorithm of spinning process is proposed and validated.

기호설명

m_u 불평형 질량 (kg)
 ω 드럼의 회전속도 (rad/sec)
 g 중력가속도 (9.81m/s²)
 R 드럼의 유효회전반경 (m)
 T 회전 토크 (Nm)
 a 체감 가속도 (m/s²)

1. 서론

1.1 드럼세탁기 소개

국내에서 전통적으로 많이 사용되는 수직형 세탁기는 물의 흐름에 의한 충격력으로 세탁을 하는데 반하여, 드럼세탁기는 세탁물의 낙차를 이용하여 세탁을 하므로 물과 세제를 적게 사용하여,

물과 에너지 비용이 비싸고 환경에 민감한 유럽 시장에서 주로 사용되어져 왔다. 하지만 국내에서도 환경 보존에 대한 관심이 높아짐에 따라 드럼 세탁기의 비중이 급격히 증가하고 있는 추세이다. 연간 수요가 약 130 만대(1 조원)에 이르는 국내 세탁기 시장에서 드럼 세탁기의 비중은 드럼 세탁기 시장은 2000 년 약 2.6 만대, 2001 년 4 만대, 2002 년 15 만대에 이르며 급성장 하고 있으며 2004 년 이후에는 전체 세탁기 제품의 절반 가량을 드럼 세탁기가 차지할 것으로 업계는 예측하고 있다.

드럼 세탁기는 세탁, 행굼 그리고 건조시에는 40~100 rpm 으로 회전하며 세탁물을 회전 시키며, 탈수(Spin dry)시에는 세탁기의 종류에 따라 800rpm 에서 2000rpm 까지 고속으로 회전시키는 과정을 반복한다. 탈수 때 세탁통의 회전수는 세탁물의 탈수도에 직접적으로 영향을 주며, 탈수 후 수행되는 건조과정에서 소비되는 에너지에 큰 영향을 주고, 최고 탈수 회전수가 판매 및 차별화 사양으로 이용됨에 따라 점점 고속화 되는 추세에 있다. 하지만 탈수 회전이 고속화 됨에 따라 세탁조 내부의 세탁물이 회전체에 불평형 질량으

[†] 삼성전자 리빙사업부

E-mail : chinwon@bawi.org
 TEL : (031)200-6287 FAX : (031)200-6986

^{*} 상동

로 작용하여 전체 세탁 시스템의 진동 및 소음을 유발 시키는 문제가 과거보다 더욱 중요한 문제로 대두되고 있다. 고속 탈수를 위해서는 회전체의 밸런스 제어 뿐만이 아니라 서스펜션 시스템 및 구조 설계가 동반 되어야 하며, 잘못된 설계는 세탁기의 보행과 같은 진동/소음 문제를 발생 시킬 수 있다. 하지만 이러한 진동 소음 문제에 가장 큰 영향을 미치는 인자를 ANOVA 분석, 혹은 파레토 차트 등을 이용해 분석해 보면, 세탁물에 의해 형성된 불평형이 가장 중요한 영향을 미치는 것으로 분석되고 있다. 따라서 세탁기의 진동/소음 문제를 해결하는 첫 번째 단계는 드럼 내부에서 생성된 불평형을 측정하는 것이며, 전통적으로 불평형(혹은 세탁기 진동)의 측정은 직접 측정법과 간접 측정법 두 가지로 나누어 볼 수 있다.^[Lemaire]

1.2 세탁물에 의한 불평형 감지

1.2.1 간접 진동 측정법

(1) 회전수 변화를 이용한 추정법

드럼 내부에서 세탁물에 의한 불평형이 형성되면, 중력에 의해 회전 속도에 리플이 생기게 되며 회전속도의 리플을 측정하면 드럼 내부의 불평형을 식(1)로부터 계산 할 수 있다. 즉, 모터의 토크를 여러 가지 마찰 토크 성분과 일치하도록 고정 시키면 세탁기는 일정한 속도에서 중력에 의해서 구동(저항)되는 운동을 한다. 세탁기는 모터를 제어하기 위하여 이미 홀 센서 등을 이용하여 회전 속도를 측정하고 있으므로 이 방법은 추가적인 센서를 부착 할 필요가 없는 장점을 가지고 있다. 하지만 세탁물의 중량(회전 관성)이 증가 하거나, 측정 하는 속도가 크면 그 정확도가 떨어지게 되는 단점을 가지고 있다.

$$(m_u + M)R^2 \dot{\omega} = T_M - T_{fric} + m_u g R \cos(\omega t) \quad (1)$$

(2) 모터 토크를 이용한 추정법

모터에서 인가한 파워는 드럼의 회전 운동으로 저장되고 나머지는 공기저항 등을 비롯한 마찰로 소산된다. 하지만 세탁조의 진동이 커지게 되면 동일한 드럼의 회전 운동을 만들어 내기 위한 모터 파워(토크)가 추가적으로 필요하므로 모터 파워와 관련된 물리량을 측정하여 세탁조의 진동을 식 (2)를 이용하여 간접적으로 계산할 수 있다. 이 방법의 단점은 거품등에 의해 드럼의 회전에 저항이 걸리는 경우는 사용할 수 없으며, 사용되는 모터의 종류에 따라 모터의 전류를 역산하는 방법이 다양하다는 점이다.

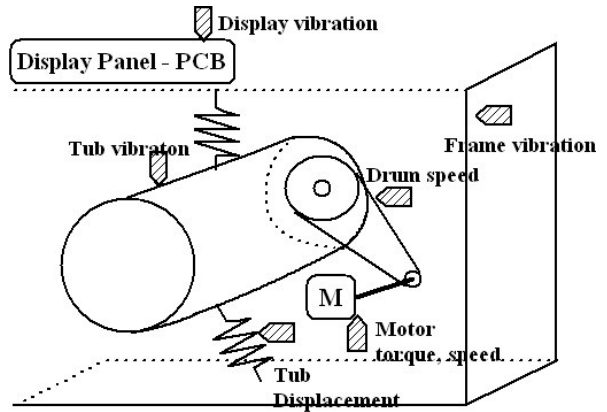


Fig. 1 Sensor position in a washing machine

Table 1 Comparison of vibration measurement

Direct method	Indirect method
Displacement (LVDT, cable, mechanical switch)	Basket rotation speed (Rotatry encoder, Odometer)
Acceleration (Piezo film, capacitor, MEMS accelerometer)	Driving torque (Current, control input)

PWM 제어를 하는 BLDC 모터의 경우, 제어 듀티 값이나, 홀 센서의 전기적 위상각을 이용하여 모터 토크를 추정하며, 삼상 교류모터 등은 전압 등을 이용해 토크를 추정할 수 있다.

$$\frac{1}{2} M \left(\int a(t) dt \right)^2 + \frac{1}{2} MR^2 \omega^2 = T_M \omega + P_{LOSS} \quad (2)$$

1.2.2 직접 진동 측정법

(1) 변위 측정법

전통적이고 가장 많이 사용되고 있는 방법은 기계적인 스위치를 이용하는 방법이다. 세탁조의 물리적인 변위가 기준 값보다 커지면 스위치가 작동하여 세탁기의 모터 구동을 정지시키는 방식이다. 이러한 방식보다 진일보한 방식은 LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 등의 센서를 이용하여 변위를 측정하는 방법이 있다. LVDT 혹은 LVDT 처럼 코일에서 유도되는 기전력을 이용하여 직접 변위를 측정하는 방식은 세탁조의 움직임을 변위로서 직접 측정하여 세탁조가 프레임 을 치는 현상을 직접 인식 할 수 있다. 또한 세탁 물이 드럼에 탑재 됨에 따라 생기는 변위를 직접 인식하므로 세탁물의 중량을 정확히 감지할 수

도 있다. 하지만 비교적 고가이며 LVDT 의 경우, excitation, demodulation 등의 부가 회로가 필요한 단점이 있다.

(2) 가속도 측정법

진동 측정의 가장 일반적인 방식이며, 피에조 필름, 정전용량 축전기, 빔-스트레인 등을 이용하여 가속도를 전기신호로 변환하는 많은 종류의 MEMS 센서가 있다. 전자제품 및 자동차 제품에 활용도가 높아지면서 점점 저가의 응용제품이 출시되고 있는 추세에 있다.

일반적으로 간접 측정법은 모터제어와 관련한 인자들을 이용해 진동을 측정하므로 추가적인 비용이 없다는 장점이 있다. 하지만 세탁물의 상태에 따라 정확한 결과를 얻을 수 없고, 또한 설계 상태에 따라 세탁조의 진동과 소비자가 느끼는 외부 프레임의 진동을 분리하여 고려할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 소비자가 느끼는 진동을 정밀하게 제어하기 위하여 가속도 센서를 사용한 제어 방식을 선택하였다.

2. 가속도 신호검출 및 검증

2.1 센서선정 및 하드웨어 구성

세탁기의 진동은 주로 회전속도의 첫 번째(1st order)성분에 의해 가진 되며 탈수통의 회전 속도는 800~1800 rpm (13~30 hz)의 낮은 주파수이므로 이에 맞는 센서의 선정이 중요하다. 시중에서 양산 판매 되고 있는 반도체 가속도 센서 몇 가지를 Table 2 에 정리하였다. 이들은 최근에 급속히 발달하고 있는 맴스 (MEMS:Micro Electro-Mechanical System) 기술을 이용해 제조되어 가격이 \$1~\$20 정도로 \$50 이상의 기존 계측기에 비해 매우 저렴하면서도 우수한 성능을 가진 제품이 많다. 세탁기의 경우, 삶음 및 건조 기능을 채용한 제품이 많아지면서 사용하는 온도 조건은 섭씨 10~50 도에 이르고, 습도가 매우 높은 환경에서 운전된다. 따라서 사용 센서는 온도 및 습도에 따라 측정 값의 변화가 적어야 한다. 본 연구에서는 부가적으로 필요한 수동 소자들의 수가 적고, 온도보상 회로가 내장된 미쯔비시 전기의 가속도센서를 사용하였으며 전체적인 회로의 구성은 Fig. 2 와 같으며, 기본 구동 회로는 데이터 서식에 제공된 것을 사용하였다.

Table 2 Comparison of MEMS accelerometers available in the market

Sensor	MAS0000	ADXL000	00MX
Supplier	Mitsubishi	Analog Device	MemsIC
Sensing Principle	Capacitance	Strain	Heat transfer
Advantage	Temperature compensation	High resolution	Low price

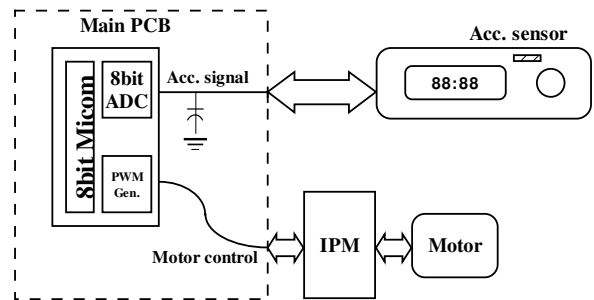


Fig. 2 Hardware configuration

가속도 선정과 관련하여 고려해야 할 또다른 사항은 가속도 센서의 부착위치로, 센서의 부착위치에 따라 출력 신호의 패턴이 전혀 다른 양상을 보이게 된다. 진동이 가장 크게 일어나는 세탁조에 부착할 경우 민감도가 좋은 장점이 있으나 사용자의 체감 진동과의 상관 관계가 떨어지는 단점이 있으므로 사용자가 계속적으로 주시하게 되는 화면 표시 판넬의 좌우 방향의 가속도를 측정할 수 있도록 화면 표시용 PCB 에 좌우 방향을 감지할 수 있도록 부착하였다.

신호처리는 대부분 마이크로 프로세서에서 소프트웨어적으로 처리하였다. 신호의 피크-홀더 회로를 추가적으로 구성할 경우 신호처리는 단순해질 수 있으나, 추가적인 부품 사용에 의한 원가 상승 요인이 되므로 식 (3)와 같이 필터링, 진폭 계산 등을 처리하였다.

측정주기: $\Delta t = 20ms$

$$\text{순간가속도: } a_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_{\text{sample}}(t - k\Delta t)$$

가속도크기:

$$a(t) = \frac{1}{2} (\max(a_i(t)) - \min(a_i(t))) \tag{3}$$

where $i = -2\text{int}(\frac{2\pi}{\omega}) .. 2\text{int}(\frac{2\pi}{\omega})$

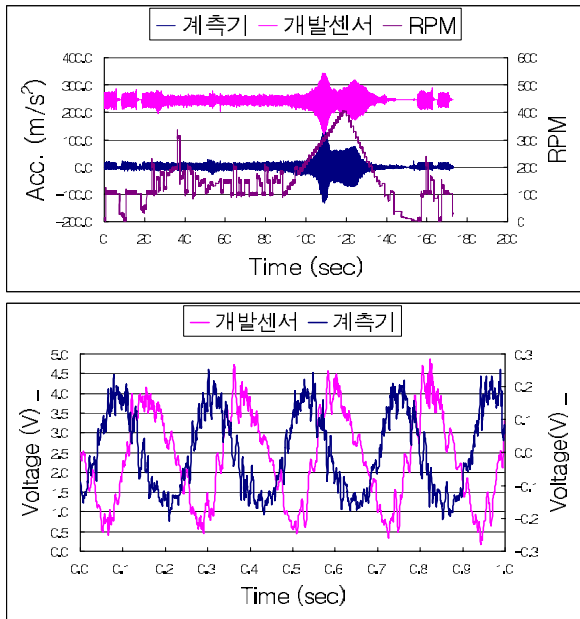


Fig. 3 Comparison of sensor signal with commercial instrument: Spin dry profile (up) and detail view (down)

2.2 센서 검증시험

제작된 센서 회로의 신호를 확인하기 위해 기존의 계측기와 비교 시험을 하였다. 실제 부하를 넣고 세탁기의 탈수를 진행시키며 동일 위치에 비교 대상으로는 B&K 4383 가속도계를 부착한 뒤 시험하였다. 제시된 Fig. 3(up)은 탈수를 진행할 때 각각의 센서에서 재현되는 신호를 측정한 결과이다. 드럼의 회전속도에 따라 디스플레이 표시부가 떨리는 큰 형상의 변화가 동일함을 알 수 있다. 초기 60 초 동안은 탈수를 위해 먼저 세탁조 내부의 배수펌프가 작동 되는 구간으로 간헐적인 가속도는 배수 펌프의 동작 상태를 나타내고 있는 것이다. 그 후 110 초 정도에서 가속도가 크게 커지는 현상은 세탁조의 공진점이 이 대역(250rpm)에 존재 하기 때문이다.

Fig.3(down)은 200~300rpm 으로 회전할 때 1 초 동안 센서와 계측기에서 나오는 신호를 비교한 그림으로 개발된 센서의 2.5Volt 의 바이어스 전압을 가지고 있다. 이 경우 계측기와 장착한 가속도계의 경우 동일한 가속도 프로파일을 보여주고 있으나, 위상이 서로 어긋나 있다. 이러한 위상차는 계측기의 경우 디지털 처리 과정에서, 계측기의 경우 Charge 앰프의 필터 통과 과정에서 발생할 수 있기 때문에 추정된다. 이상의 결과로부터 가속도 센서는 세탁기의 진동을 판단하는데 충분하다고 판단하였다.

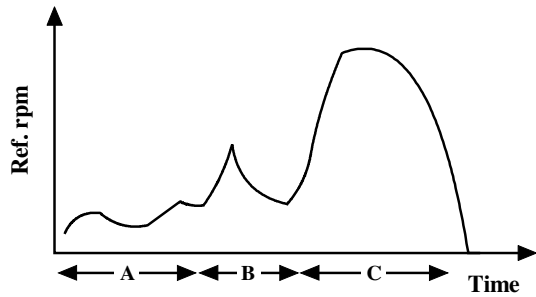


Fig. 4 Spin dry stages

3. 가속도 센서를 이용한 탈수 제어

3.1 탈수제어 알고리즘

기존 드럼 세탁기의 탈수 과정을 기능적으로 분리해서 고찰하면 Fig. 4에서 보는 바와 같이 저속탈수구간(구간 A), 중간탈수(구간 B), 고속탈수(구간 C)의 과정으로 이루어 진다. 저속 탈수구간에서는 세탁물의 중량을 감지하거나, 세탁물에 의해 발생한 불평형 질량을 감지하는 부분으로 구성되어 있으며, 중간 탈수 구간은 1 차적으로 세탁물에 포함된 물을 짜내 고속 탈수시 부하를 줄여주는 작용을 한다. 또한 이 구간은 세탁조의 1 차 공진점이 존재하므로 구조 공진을 회피하기 위한 프로파일이 필요하다. 고속 탈수 구간은 탈수 회전수 및 탈수 시간에 비례하여 세탁물의 탈수도를 결정하는 부분이다.

본 논문에서는 가속도계를 이용한 탈수 제어 알고리즘은 Table 3에 요약한 바와 같이 구간별로 다르게 사용하였다. 저속 탈수 구간에서는 탈수에 필요한 RPM 프로파일을 추종하면서 특정 시점에는 모터 제어 신호를 고정된 뒤 드럼의 회전 속도 변화를 파악 한 뒤 식 (1)로부터 세탁물로부터 발생하는 불평형 질량을 추정하여 중간 탈수 구간으로의 진행여부를 판단한다. 이 구간에서는 진동이 거의 발생하지 않는 구간이므로 가속도 신호를 사용이 필요하지 않게 된다.

중간 탈수 영역도 기본적으로 RPM 프로파일을 추종한다. 이 때 가속도 센서의 신호가 급격히 커지며 세탁기의 공진점 통과시 이상 과도 진동이 예측 될 때는 RPM 추종을 중지하는 스위치로 동작 한다.

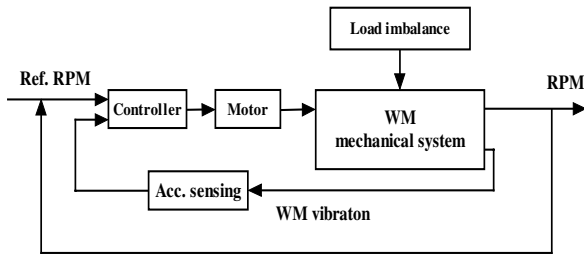


Fig. 5 Block diagram of spin dry control

Table 3 Spin strategies

Stage A (Low rpm)	RPM tracking (Reduce load unbalance)
Stage B (Mid spin)	RPM tracking Acceleration thread-hold
Stage C (High spin)	Acceleration feedback control (Time compensation)

고속 탈수 영역부터는 RPM 추종 제어가 아니라 Fig. 5의 다이어그램에서 보는 바와 같이 가속도 피드백 제어로 작동한다. 세탁기의 진동이 작을 경우 최고 모터출력이 계속 상승하여 설정된 최고 회전수에서 작동하게 된다. 하지만 세탁기의 진동이 설정된 값 이상이 될 경우 모터 출력이 줄어들며 회전수가 떨어지게 된다. 기존의 세탁물의 불평형 감지는 탈수 초기 단계에서 감지한 불평형 정보만으로 최고 회전수까지 상승하는 방법을 사용하였다. 이 경우는 세탁물의 종류에 따라 함수율이 다르므로 회전속도의 상승에 따라 초기와 다른 불평형 상태가 구성되며 발생하는 진동을 알 수 없는 단점이 있다.

가속도 피드백 제어는 다음과 같이, 설정된 가속도와 실측 가속도의 차이를 이용하여 비례적분 제어를 사용하였다.

$$\Delta rpm = (K_p + \frac{K_i}{s})(a_{set} - a) \quad (3)$$

제시한 알고리즘을 요약하면 탈수 초반에는 부하에 의한 불평형을 감지하며 저감시키도록 구성하였다. 중반에는 이상진동을 감지하도록 구성하였다. 마지막 고속 탈수 구간에서는 진동상태를 감지하며 최고 회전수를 조절 하는 방식을 사용하였다.

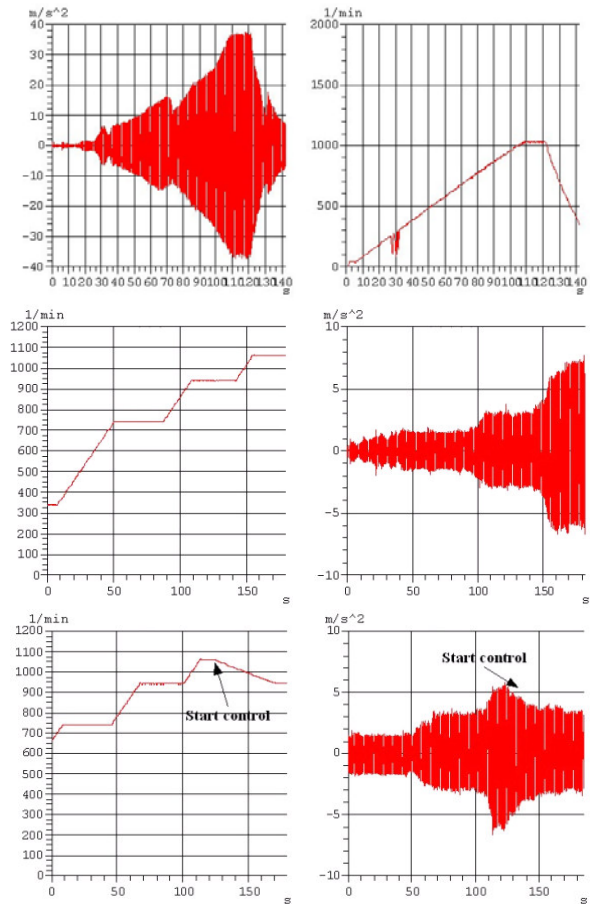


Fig. 6 (1) Tub acceleration characteristics according to rotational speed, (2) Frame vibration without control (3) Frame vibration with control

3.2 시험결과

세탁물의 경우 형성되는 불평형이 탈수시 마다 불규칙하므로 동일한 더미 부하를 드럼 내부에 장착하여 비교 실험을 진행 하였다. 진동에너지가 가장 많이 저장되는 세탁조의 상하 운동과 소비자가 진동을 느끼는 프레임의 횡방향 진동을 측정하였다.

Fig. 6(1)은 회전수를 0에서 1000rpm 까지 상승시키며 세탁조의 상하 진동을 측정한 결과를 나타낸 것이다. 회전수의 상승과 함께 300rpm 대역과 700rpm 대역에 공진점이 존재 함을 알 수 있다. 정상상태 변위는 $x = \frac{1}{\omega^2} a$ 로 표현되므로 이중 저속 영역(250rpm) 때의 변위가 약 15mm 가량 움직이며 최대 변위를 나타냄을 알 수 있다.

Fig.6 (2)~(3)은 고속 탈수가 진행될 때 센서를 작동 시키지 않은 경우와 작동 시킨 경우 가속도의 차이를 비교한 것이다. 제어기를 작동하지 않은 경우는 체감진동과 상관없이 회전수와 상관없이 체감 진동은 7 m/s^2 까지 커지고, 이 상태가 유지되고 있다. 하지만 제어기를 작동 시킨 경우 모터 출력을 감소시키며 회전수는 하강하고, 진동도 4 m/s^2 까지 감소 함을 볼 수 있다. 이 경우 회전수가 약 100rpm 정도 감소하며 탈수도의 경우 낮아지는 문제점이 발생할 수 있으므로 제어기가 동작하여 최고회전수가 낮아지는 경우 탈수 시간을 증가시켜 탈수도를 보상해 주도록 하였다.

세탁기가 대용량화 되어감에 따라, 포의 불균형 상태가 다양하게 만들어 질 수 있다. 대표적인 예가 두 개의 불평형이 각각 다른 평면에서 마주보고 있는 경우로 이 때는 회전 속도 성분으로 추정된 불평형은 없는 것으로 측정된다. 하지만 축 방향으로 회전성분으로 가진하게 되므로 실제적인 진동은 피칭모드가 크게 나타나는 경우가 된다. 가속도 피드백 제어를 이용하면 이 경우의 진동도 감지하여 효과적으로 대응할 수 있는 장점이 있다.

4. 결 론

본 연구는 국내에서 급속히 팽창하고 있는 드럼 세탁기의 진동소음 저감을 위해 저가형 가속도 센서를 사용해 탈수를 진행하는 방법에 대해 진행하였다.

세탁기 진동의 간접 센싱 방식은 빨래의 종류에 따라, 세탁기의 구조에 따라, 탈수 회전수에 따라 그 센싱 값의 정확도가 달라지는 문제점을 가지고 있으나, 가속도를 직접 부착하면 탈수 중 계속 정확한 세탁기의 상태를 모니터링 하면서 진행 할 수 장점을 가지고 있다.

탈수 과정에서 가속도 센서는 여러가지 용도로 사용될 수 있다. 본 논문에서는 1) 정해진 기준 값 이상이 되면 빨래에 의한 불평형이 심하다고 판단하여 세탁조 내의 불평형을 해소하는 시도를 하는데 사용 하였다. 2) 또한 고속 탈수 구간에서는 미리 정해진 탈수 프로화일을 따르지 않고 이미 형성된 불평형을 감당할 수 있는 범위에서 회전수가 조정될 수 있도록 가속도 피드백 제어에 사용하였다.

이와 같은 알고리즘을 10kg 드럼 세탁기에 적용한 결과 고속 탈수구간에서 소비자가 느끼는 진동을 40% 정도 저감할 수 있었다.

후 기

본 논문은 삼성전자 리빙 사업부의 세탁기 진동소음 저감 프로젝트의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Christophe Lemaire, 1999, Direct and Indirect Out-of-Balance Detection for Future Generation Washing MachinesM1999 Appliance Manufacturer Conference, Nashville
- (2) D.C.Conrad and W.Soedel, 1995, On the Problem of Oscillatory Walk of Automatic Washing Machines , Journal of Sound and Vibration, Vol.188, No.3, pp.301~314
- (3) Evangelos Papadopoulos and Iakovos Papadimitriou, 2001, Proceedings of 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics System, pp.899~904
- (4) O.S.Turkay, I.T.Sumer, A.K.Tugcu, B.Kiray, 1998, Modeling anc Experimental Assessment of Suspension Dynamics of a Horizontal-Axis Washing MachineMJJournal of Vibraton and Acoustics, Vol. 120, pp.534~543
- (5) 박정수, 김형균, 1997, , 드럼식 세탁기의 진동/소음 저감 대책', 한국소음진동공학회지, 제 7 권, 제 6 호, pp.881
- (6) B.Kiray, A.K.Tugcu, and I.T.Sumer, 1995, Formulation and Implementation of Parametric Optimization of a Washing Machine Suspension SystemS, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.9, No.4, pp.359~377