

# 가속도 피이드백 제어기를 이용한 세탁기의 능동진동제어 Active Vibration Control of Washing Machine by Acceleration Feedback Controller

김승기\* · 곽문규† · 양동호\*  
Seung-Ki Kim, Moon K. Kwak and Dong-Ho Yang

**Key Words :** Washing Machine Vibration(세탁기 진동), Active Vibration Control(능동진동제어), Acceleration Feedback Controller(가속도 피이드백 제어기)

## ABSTRACT

This paper is concerned with the active vibration control of washing machine. To this end, a new control algorithm utilizing an acceleration signal as a sensor signal is newly developed based on the principle of a dynamic absorber. The resulting control algorithm was implemented digitally on the DSP board. The accelerometer and the active linear actuator were used as sensor and actuator for the active vibration control of washing machine. Experimental results show that the proposed control algorithm can be effectively used for a controller which uses an accelerometer.

## 1. 서 론

산업 기술이 발달하고 인간의 삶의 질이 향상되면서 현대인들을 위한 가전 제품들은 소비자의 편리성이 강조되며 발달되어 왔다. 따라서 기업체에서도 소비자의 욕구를 충족시키기 위한 수많은 연구가 진행되고 있다. 다양한 가전 제품 중에서도 세탁기는 인간의 노동을 직접적으로 대체할 수 있는 유일한 수단이었다.

최근에는 현대인의 생활 패턴이 변화하면서 맞벌이 가정들의 수가 급증하고, 바쁜 일상으로 인해 세탁을 불가피하게 늦은 시간에 해야 하는 경우가 적지 않게 발생한다. 또한 최근에 이슈화 되고 있는 층간 소음 문제에 이러한 상황들도 영향을 미치면서 사람들끼리 서로 얼굴을 붉히는 사례들이 종종 일어난다. 세탁 과정에서는 특히 탈수 행정에서의 소음과 진동이 가장 심한데 이를 저감시키기 위한 연구가 국내·외적으로 다양하게 이루어져 왔다. 진동제어 방법은 크게 수동형 진동제어 방법과 능동

형 진동제어 방법으로 나눌 수 있다. 세탁기에 적용될 수 있는 수동형 진동 제어 방법으로는 기존에 상용되고 있는 오일 댐퍼(Oil Damper)나 마찰 댐퍼(Friction Damper) 등이 있지만 이는 진동을 저감시키는데 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 능동형 제어 방법들이 활발하게 연구되고 있다. 세탁기의 능동형 진동 제어방법으로는 전자 제어식 MR Damper를 이용한 방법이 연구 중에 있다.

현실에 성공적으로 적용된 제어 알고리즘으로는 PID 제어기, PPF 제어기<sup>(1)</sup>,  $H_{\infty}$  제어기, LQG/LQR 제어기<sup>(2)</sup> 등을 예로 들 수 있다. 그러나 능동진동 제어를 위해 주로 사용되는 센서는 가속도계이기 때문에 가속도 신호를 센서 신호로 사용하는 제어 알고리즘이 보다 효과적일 수 있다. 그러나 이런 형태의 제어 알고리즘은 아직 개발되어 사용되지 않았다. 본 연구에서는 가속도 신호를 사용하는 능동진동제어 알고리즘을 동흡진기 원리를 이용해 개발하였다. 본 연구에서 개발한 가속도 피이드백 제어기는 가속도 신호를 그대로 사용하기 때문에 제어기를 적용하는데 있어 일반적으로 사용하는 가속도계를 사용할 수 있다.

세탁기 능동진동제어 실험 결과는 본 연구에서 제안한 가속도 피이드백 제어기가 효과적임을 보여준

† 교신저자; 동국대학교 기계로봇에너지공학과

E-mail : kwakm@dgu.edu

Tel : 02) 2260-3705

\* 동국대학교 대학원 기계공학과

다.

## 2. 가속도 피이드백 제어기

본 연구에서는 가속도 신호를 센서 신호로 사용하며 외부 교란에 대해 보다 효과적인 능동진동제어 알고리즘을 개발하기 위해 동흡진기의 원리를 이용하고자 한다. 다음과 같이 동흡진기가 부착된 진동 모델을 먼저 고려해보자. 동흡진기의 원리는 잘 알려진 바와 같이 주구조물에 부가적인 스프링-질량-댐퍼 시스템을 부착하고 부구조물의 고유진동수를 주구조물에 작용하는 외부 조화가진력의 가진 진동수와 맞출 경우 주구조물의 진동이 감소된다는 것이다.

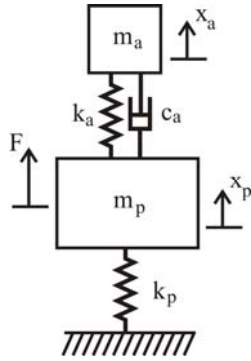


Fig. 1 Dynamic absorber

Fig. 1의 시스템에 대한 운동방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$m_p \ddot{x}_p + c_a \dot{x}_p - c_a \dot{x}_a + (k_p + k_a)x_p - k_a x_a = F \quad (1)$$

$$m_a \ddot{x}_a - c_a \dot{x}_p + c_a \dot{x}_a - k_a x_p + k_a x_a = 0 \quad (2)$$

여기서  $m_p, k_p$ 는 주구조물의 질량과 스프링,  $m_a, c_a, k_a$ 는 동흡진기의 질량, 감쇠, 스프링을 나타낸다. 동흡진기는 잘 알려진 바와 같이 주구조물에 외력,  $F$ 가 작용하여 발생하는 힘을 동흡진기가 흡수하여 주구조물의 진동을 최소화하는데 있다. 자유물체도로부터 동흡진기로부터 주 구조물에 전달되는 힘은 다음과 같이 유도되는데 일종의 제어력이라고 말할 수 있다.

$$F_a = c_a (\dot{x}_a - \dot{x}_p) + k_a (x_a - x_p) \quad (3)$$

라플라스 변환을 식 (2)에 적용하면 다음 식이 유도된다.

$$\mathbf{X}_a = \frac{c_a s + k_a}{m_a s^2 + c_a s + k_a} \mathbf{X}_p \quad (4)$$

그리고 식 (3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{F}_a = (c_a s + k_a)(\mathbf{X}_a - \mathbf{X}_p) \quad (5)$$

식 (4)를 식 (5)에 대입하면 다음식이 유도된다.

$$\frac{\mathbf{F}_a}{s^2 \mathbf{X}_p} = -m_a \frac{2\zeta_a \omega_a s + \omega_a^2}{s^2 + 2\zeta_a \omega_a s + \omega_a^2} \quad (6)$$

여기서  $\omega_a = \sqrt{k_a/m_a}$ ,  $\zeta_a = c_a/2m_a\omega_a$ 이다.

$s^2 \mathbf{X}_p = \mathbf{A}_p$ , 즉, 주구조물의 가속도임을 고려하면 동흡진기 성질을 갖는 새로운 가속도 피이드백 능동제어 알고리즘을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\mathbf{F}_a}{\mathbf{A}_p} = -m_a \frac{2\zeta_a \omega_a s + \omega_a^2}{s^2 + 2\zeta_a \omega_a s + \omega_a^2} \quad (7)$$

식 (7)로 주어지는 제어알고리즘에서  $m_a$ 는 제어이득의 역할을 담당함을 알 수 있다. 제어가 효과적이기 위해서는  $\omega_a$ 가 주구조물에 작용하는 외부 조화가진력의 가진진동수와 맞추어져야 한다. 또한,  $\zeta_a$ 가 작을수록 제어 효과는 커지지만 제어할 수 있는 진동수 대역이 좁아져 너무 작은  $\zeta_a$ 값은 오히려 제어에 효과적이지 않을 수 있다. 본 연구에서는 식 (7)과 같은 새로운 개념의 제어 알고리즘을 세탁기 능동진동제어에 적용하였다. 식(7)을 줄더 살펴보면 PPF 제어 알고리즘과 SRF 제어 알고리즘이 결합된 형태를 보여준다. 단, 기존의 제어 알고리즘이 변위를 피이드백하는 형태인 반면에 식 (7)로 주어진 새로운 가속도 피이드백 제어 알고리즘은 가속도 신호를 이용한다.

식 (7)로 주어지는 제어 알고리즘의 장점은 다음과 같다. 동흡진기의 원리를 이용하기 때문에 이론상  $m_a$ 가 크기 않으면 주구조물을 불안정하게 만들지 않는다. 형태가 단순해 제어 알고리즘을 OP 앰프나 디지털 컨트롤러로 쉽게 구현할 수 있다.

## 3. 세탁기 능동 진동 제어

Fig. 2는 드럼세탁기의 외부에 능동선형액츄에이터(ALA)와 가속도계(ACC)가 부착되어 있는 것을 보여준다. 본 연구에서는 세탁물 회전시 발생하는 불평형력에 의해 발생하는 외판의 진동을 능동적으로 제어하는 실험을 수행하였다. 세탁기의 진동 신호는 ENDEVCO사의 500mv/g 가속도계를 이용하여 계측하였고, ALA를 구동하는 파워 앰프는 Eliezer사의 EA120AR2 Power Amplifier를 사용하였다.

Fig. 3는 ALA와 가속도계, 그리고 제어 알고리즘을 탑재한 dSpace사의 DS1104 보드, 제어 출력 신호

를 증폭하는 파워 앰프가 연결되어 피이드백 루프를 구성하는 것을 보여준다. 이와 같이 ALA는 작동기로서, 가속도계는 감지기로서 사용되었다. 실험에 적용한 제어 알고리즘은 앞에서 개발한 가속도 피이드백 제어기이다. 본 연구의 목표는 세탁기 드럼의 회전에 의해 발생하는 진동을 억제하는 것이기 때문에 제어 대상 진동수는 쉽게 그 값을 알 수 있다



Fig. 2 Experimental setup

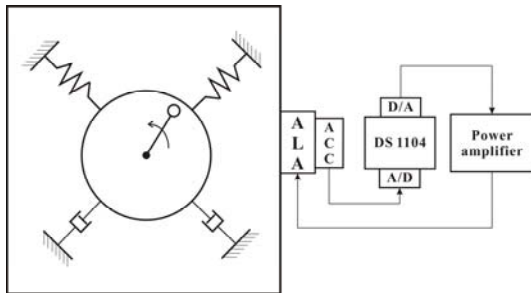


Fig 3. Feedback loop for active vibration control

#### 4. 능동진동제어 실험 결과

Fig. 4는 드럼 세탁기의 탈수 행정에서 능동진동제어기를 구동하기 전후의 가속도계 신호를 보여준다. Fig. 4의 그림에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 개발한 가속도계 피이드백 제어기가 효과적임을 알 수 있다. 시간 응답상에서는 가속도 수준이 제어하지 않았을 경우에 비해 약 75% 정도의 저감을 보여주었다. 이를 주파수 성분 별로 분석한 결과가 Fig. 5이다. 점선은 제어 전, 실선은 제어 후의 결과를 나타낸다. Fig. 5에 보이는 바와 같이 1차 진동수인 13.2Hz에서 제어 알고리즘이 구동되었을 때에 약 80% 가량 저감된다.

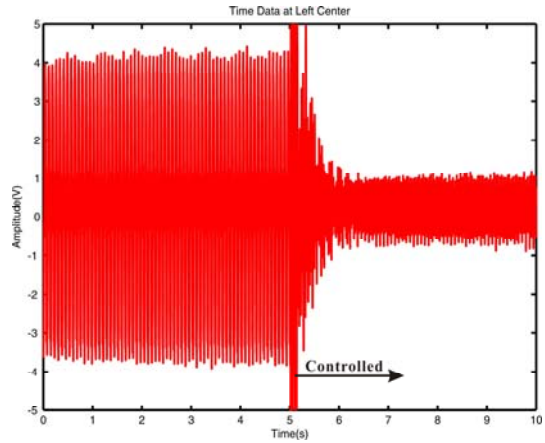


Fig. 4 Accelerometer signal

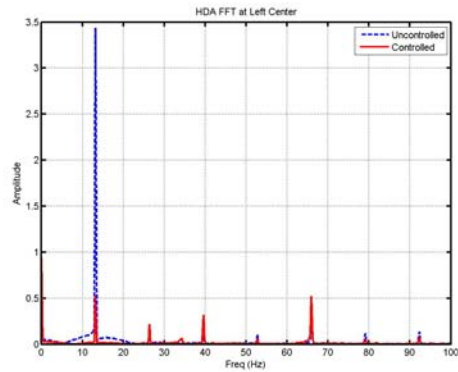


Fig. 5 Uncontrolled and controlled power spectral density curves

#### 5. 결 론

본 연구에서 가속도 신호를 사용하는 새로운 형태의 능동진동제어 알고리즘을 개발하였다. 새로 개발된 가속도 피이드백 제어기는 동흡진기의 원리를 이용하는데 피이드백 신호로 주구조물의 가속도 신호를 입력 신호로 사용한다. 기계적인 수동 형태의 동흡진기가 주구조물을 불안정하게 만들지 않는다는 원리는 새로 개발된 가속도 피이드백 제어기의 안정성을 보장한다고 말할 수 있다. 본 연구에서 개발한 제어 알고리즘을 세탁기 능동진동제어에 적용한 결과 제어 알고리즘이 효과적임을 확인하였다. 실험 결과는 진동이 시간 응답상에서는 약 75%, 주 주파수성분은 약 80%의 저감 효과가 있음을 보여준다. 차후에는 개발된 제어 알고리즘의 안정성과 적용상의 문제점에 대한 연

구를 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 한국 연구재단의 “유연 다물체 지능 구조물의 동적모델링 및 능동진동 제어” 과제 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Ra, W.-K., Kwak, M. K. and Yoon, K.-J., 1997, Vibration Suppression of Smart Structures Using PPF and SRF Control Techniques, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 400~406.
- (2) Kwak, M. K., 1998, Comparison of Multiple PPF Control and the Modified LQG Control for the Active Vibration Suppression of Intelligent Structures, Transaction of the KSNVE, Vol. 8, No. 6, pp. 1121~1129.