

ER 클러치 및 브레이크 시스템을 이용한 세탁기 운동 제어 Motion Control of Washing Machine Using ER Clutch & Brake Systems

김 준 호 (인하대 대학원)*, 최 승 복 (인하대), 정 재 천 (인하대)
J. H. Kim (Inna Univ. Graduate School)*, S. B. Choi (Inha Univ.), C. C. Cheong (Inha Univ.)

ABSTRACT

This paper presents a motion control of washing machine using ER clutch and brake actuators. After analyzing field-dependent torque of the actuators on the basis of Bingham model of the ER fluid, two sets of cylindrical ER clutch and brake are manufactured. The governing equation of motion for washing and dehydrating are derived by considering actuators' dynamics. Subsequently, PID controllers are designed to achieve desired rotational motions and tracking control results are provided to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key Words : ER Fluid(ER 유체), ER Clutch and Brake System(ER 클러치 및 브레이크 작동기), Washing Motion(세탁운동), Dehydrating Motion(탈수운동)

1. 서론

인류 문명 발달사와 더불어 세탁은 주부 가사노동에서 큰 부분을 차지해왔으나, 근래에는 전기세탁기의 보급으로 인하여 세탁에 소요되는 시간과 노력이 현저하게 줄어들게 되었다. 전기세탁기는 1900년에 수력을 이용한 세탁기가 나온 것이 최초이고, 5년 후에 회전방식의 전동식 세탁기가 소개되었으며, 세계 제 1차 세계대전 이후 교반식 및 드럼식 세탁기가 나왔다. 이 세탁기들은 현재 우리가 사용하고 있는 세탁기와는 다르게 원심탈수기가 부착되어 있지는 않았다. 1960년대에 이르러 원심탈수기가 부착된 세탁기가 개발되면서 오늘날과 같은 세탁기의 면모를 갖추게 되었다. 세탁기의 세탁방식은 크게 드럼식(cylinder type), 교반식(agitator type), 와권식(pulsator type)으로 구분된다. 드럼식은 드럼 내에 세탁물을 넣고 드럼을 회전시켜 낙차에 따른 충격과 세제의 세정효과를 이용한 세탁방식이다. 교반식은 세탁조 중앙의 날개가 붙어있는 교반기(agitator)가 규칙적으로 회전하면서 수류를 형성하여 세탁운동이 이루어진다. 또한 한국을 비롯한 아시아등지에서 많이 사용하는 세탁 방식은 와권식으로 세탁조의 하부에 있는 회전날개(pulsator)가 회전할 때 생기는 수류가 세탁물에 충격을 주어 세탁한다.

상술한 세탁기중 특히 국내에 가장 많이 보급된 와권식 세탁기의 작동기를 살펴보면, 그 작동기가 기어박스안에 유성기어와 항성기어가 조립된 복잡한 상태로 이루어져 있다. 그리고 이 세탁기의 경우 그 세탁과 탈수 운동 제어가 용이하지 않아 세탁과

탈수 시 세탁물의 엉킴이 생기는 정도가 심하다는 단점을 갖고있다.

본 연구에서는 최근 산업화 추세에 부응하여 간단한 구조, 능동적인 제어, 유연한 작동성 및 빠른 응답특성 등의 장점을 갖는 전기 유동 유체(ERF)를 이용한 새로운 일체형 클러치 및 브레이크 작동기를 설계 및 제작하였으며, 이 새로운 작동기에 대한 동특성 및 성능 실험을 수행하였다. 그리고 이 작동기의 적용을 용이하게 하기 위하여 수학적 모델을 유도하였다. 또한 작동기의 적용성을 검증하기 위하여 새로운 작동기를 장착한 소형 세탁기 시스템을 모델링하고, 모의 실험을 수행하였다. 마지막으로 모의 실험의 타당성을 입증하기 위하여 소형 세탁기 실험 장치를 설계 및 제작하였다. 소형 세탁기 시스템은 와권식 세탁기를 기초로 하여 설계되었고, 또한 와권식 세탁기의 세탁과 탈수운동에 준하여 동일한 운동을 구현 및 제어할 수 있도록 제작되었다.

2. ERF 의 빙햄특성

전기 유동 유체(Electro-Rheological Fluid, 이하 'ERF'라 칭함)는 비전도성 용매에 전도성 입자를 분산시킨 콜로이드 용액으로 가해지는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭한다. ERF는 전기장 무부하시에는 비전도성 용매에 분산된 입자가 자유로이 운동을 하는 뉴토니안 유체(newtonian fluid)와 같은 거동 나타내지만 전기장 부하시에는 항복응력을 갖는 빙햄 거동(Bingham

behavior)을 나타내게 된다. 1880년대 Koenig, Duff, Quinke 등이 전기 유동 현상을 발견한 이래 1949년 Winslow⁽¹⁾에 의하여 실리카계 입자를 분산시킨 유체에 전기장을 인가하면 전기장의 강도에 따라 유체의 점성이 변화되는 현상이 학계에 처음으로 공표되면서 ERF는 널리 알려지게 되었다.

ERF의 역학적 거동은 다음과 같은 빙햄모델을 이용하여 수식적으로 표현할 수 있다.

$$\tau = \tau_y(E) + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

$$\tau_y(E) = \alpha E^\beta \quad (2)$$

여기서 τ 는 전단응력, $\tau_y(E)$ 는 항복전단응력, η 는 ERF의 점성, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비를 나타낸다. 이 때 항복전단응력은 전기장의 지수함수의 형태로 표현되어지며, α 와 β 는 ERF의 고유상수로서 빙햄실험을 통하여 얻는다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 20cs 점도를 가지는 실리콘오일에 특수 전분을 25%의 입자중량비로 혼합한 ERF의 빙햄특성을 도시한 그림이다.

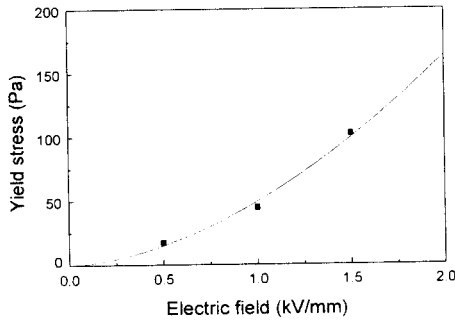


Fig. 1 Bingham property of the ERF

3. 작동기 모델링

본 연구에서는 기존 세탁기의 작동기가 복잡한 기어박스 형태로 제작되어졌던 것과는 다르게 용량이 다른 두 쌍의 일체형 ER 클러치 및 브레이크(ER Clutch & Brake, 이하 'ER-C/B'라 칭함)작동기를 사용한다. ER-C/B는 Fig. 2에 그 전체적인 구조를 도시했듯이 실린더형으로 제작되어졌으며, 세개의 실린더 사이에는 ERF가 채워지고, 실린더 간극은 1mm로 유지된다. 실린더는 클러치 역할을 하는 내부-중간 실린더와 브레이크 역할을 하는 중간-외부실린더로 나뉘어 진다.

동력 전달 및 단속요소인 ER 클러치와 동력 제동요소인 ER 브레이크에서 발생하는 토크는 ERF에

전기장을 인가시 발생되는 항복전단응력에 의한 항복 ERF의 점성에 의한 점성항으로 분해할 수 있다. 항복전단응력에 의해 전달되는 토크는 전기장(E)에 의해 제어가 가능하며, 그 크기는 단위면적당 발생하는 ERF의 항복전단응력을 전체면적에 대하여 적분하므로 얻을 수 있다. 이것을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T(E) &= \int_0^{l_1} \tau_y(E) r dA \\ &= \int_0^{l_1} 2\pi \alpha E^\beta r_1^2 dl \\ &= 2\pi r_1^2 \alpha E^\beta l_1 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 r_1 는 내부 실린더의 반지름이고, l_1 은 내부 실린더의 길이이다. 또한 각속도에 비례하여 크기가 증가하는 점성토크는 전체 시스템의 운동방정식에서 점성항으로 작용하며 그 크기는 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T(\omega) &= \int_0^{l_1} \eta \dot{\gamma} r_1 dA \\ &= \int_0^{l_1} 2\pi \eta \frac{v}{h} r_1^2 dl \\ &= \int_0^{l_1} 2\pi \eta \frac{r_1 \omega}{h} r_1^2 dl \\ &= 2\pi r_1^2 \eta \frac{r_1 \omega}{h} l_1 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 η 는 ERF의 점성, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비, $\omega = \theta$ 는 각속도를 나타낸다.⁽²⁾

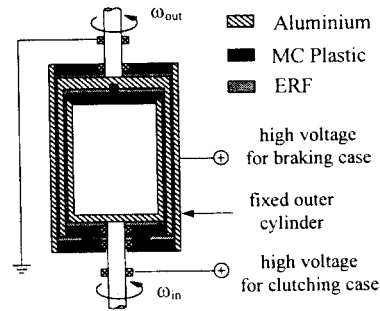


Fig. 2 The proposed ER-C/B Actuator

ER-C/B의 성능평가와 동특성을 살펴보기 위하여 직류모터와 절연커패시터, 토크트랜스듀서, ER-C/B로 이루어진 실험장치를 제작하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 실험은 ER-C/B를 일정한 각속도로 회전시키면서 전기장을 인가하여 발생한 토크를 토크트랜스듀서를 이용하여 측정하였다. 또한 ER-C/B의 동특성을 파악하기 위하여 계단입력에 대한 과도응답실험을 수행하였다. 그 결과를 살펴보면 ER-C/B₁의 경우 약 34 msec, ER-C/B₂의 경우 약

40 msec 의 시상수를 갖는 전형적인 1 차 시스템의 거동을 보인다. 따라서 ER-C/B 의 모델을 수학적으로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$T = 2\pi r_1^2 l_1 \left[\alpha E^x + \eta \frac{r_1 \omega}{h} \right] \left(1 - \exp^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (5)$$

여기서 τ 는 시상수를 나타낸다.

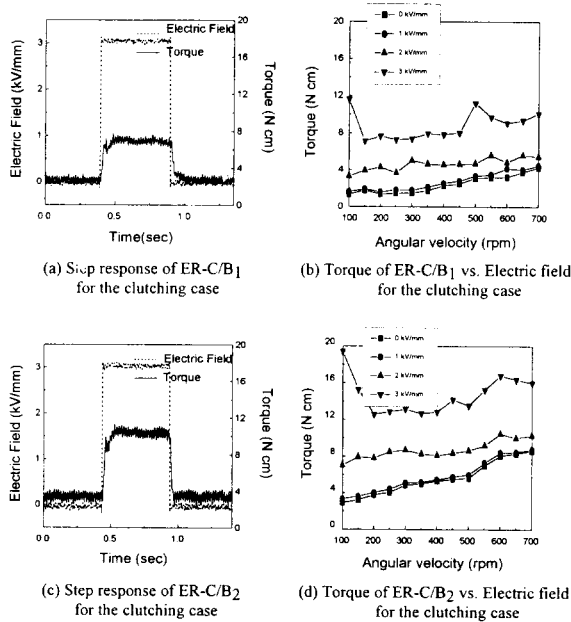


Fig. 3 The performance of ER-C/B

4. 세탁기의 운동

Fig. 4 는 모델링에 입각하여 구성된 소형 세탁기 개략도이다. 세탁기의 운동을 살펴보면 크게 세탁과 탈수운동으로 구분할 수 있다. 세탁과 탈수운동에 대한 모델링은 다음과 같다. 세탁운동은 수류를 발생시키는 회전날개(pulsator)의 정·역회전에 의하여 이루어지며, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$J_1 \ddot{\theta} + C_1 \dot{\theta} = T_{c1} - T_{b1} \quad (6)$$

여기서 J_1 는 회전날개 및, ER-C/B₁에서 중간실린더의 관성 모우멘트(moment of inertia)를 합한 것이며, C_1 은 세탁시 점성항에 의해 발생하는 점성계수이다. T_{c1} 과 T_{b1} 은 각각 ER-C/B₁을 통해 전달된 클러치 및 브레이크의 토크를 나타낸다.

한편, 탈수운동은 회전날개와 세탁통(spin-basket)이 동일한 회전수로 회전하므로 이루어진다. 이 때 회전날개와 세탁통은 다음과 같이 독립적으로 운동

하게 된다.

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\theta} + C_1 \dot{\theta} &= T_{c1} - T_{b1} \\ J_2 \ddot{\theta} + C_2 \dot{\theta} &= T_{c2} - T_{b2} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 J_2 는 세탁통, 벨트풀리, ER-C/B₂에서 중간실린더의 관성 모우멘트를 합한 것이며, C_2 는 탈수시 점성항에 의해 발생하는 점성계수이다. T_{c2} 과 T_{b2} 는 각각 ER-C/B₂을 통해 전달된 클러치 및 브레이크의 토크를 나타낸다.

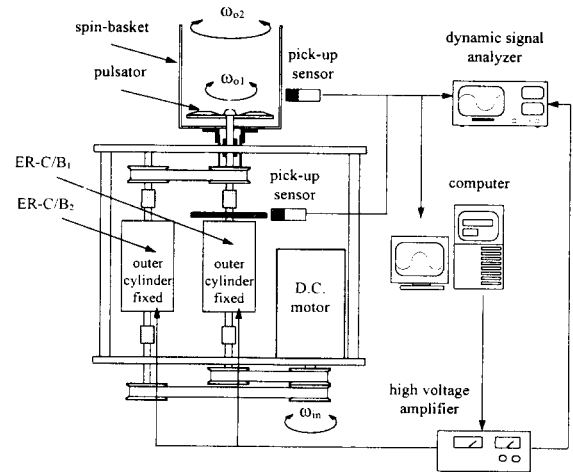


Fig. 4 Schematic diagram of the proposed system

5. 제어기 설계

세탁기의 경우 세탁 시에 발생하는 수류와 세탁물의 엉킴 등에 의해 많은 불확실성이 존재한다. 또 탈수시에는 세탁물의 편심으로 인한 진동이 매우 심한 편이다. 이러한 불확실성과 진동 등에 강건하게 대체할 수 있는 제어 이론에는 여러가지가 있겠으나, 본 연구에서는 수류와 세탁물을 배제한 모델을 유도하였으며, 순수 세탁과 탈수운동 구현을 위하여 산업현장에서 가장 많이 사용되어 지고 있는 PID 제어기를 이용하여 제어를 수행하였다. 본 연구에서 사용된 제어기는 다음과 같으며, Fig. 5 에는 제안된 제어 시스템의 블럭선도를 도시하였다.

$$E(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

여기서 $E(t)$ 는 제어입력으로 단위 간극 당 전기장으로 표현되어지며 차원은 [kV/mm]이다. $e(t) = \omega_d - \omega$ 는 제어를 위하여 설정된 오차로 요구되는 각속도와 제어에 의해 귀환되어지는 실제 각속도와 의 차로 표현되어진다.

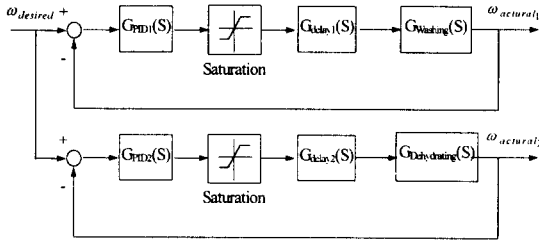


Fig. 5 Block diagram of the PID controller

Fig. 6 과 Fig. 7 은 각각 PID 제어를 사용하여 세탁과 탈수 운동에 대한 모의실험을 수행한 결과이다. Fig. 6 을 살펴보면 기존 세탁기와 유사한 세탁 운동을 구현하기 위하여 주기적인 계단파형을 생성하는 함수를 만들었는데, 그 결과 매우 우수한 제어 성능을 발휘함을 확인할 수 있었다. 이 그림에서 클러치 제어 입력 전압이 음(-)의 부호값을 갖는 것은 모터에 의한 역회전을 표현하는 것이다. Fig. 7 에서는 순차적으로 계단입력이 증가하는 함수를 사용하였는데, 이것은 탈수운동이 다단계로 증속되어지는 것을 나타낸 것이다. 그리고 탈수운동의 추적제어시 회전날개보다 세탁통의 지연시간이 더 긴 이유는 관성 모우멘트값이 3 배이상 차이가 나기 때문이다.

6. 결론

본 연구에서는 새로운 작동기로서 일체형 ER 클러치 및 브레이크 시스템을 제안하였으며, 제어의 용이성을 부여하기 위하여 동특성 및 성능실험을 수행하였다. 또한 이 작동기의 적용성을 검증하기 위하여 소형 세탁기 시스템을 모델링하고 세탁과 탈수 운동에 대한 모의실험을 수행하였다. 결과적으로 세탁과 탈수 운동 구현이 용이하며, 현재 제작된 소형 세탁기 실험장치에 대한 실험을 수행중이다. 향후 기존 세탁기 시스템에 적용한다면, 현재 세탁기 시스템이 안고 있는 세탁물의 엉킴문제와 가격면에서 탁월한 성능을 발휘할 수 있으리라 기대된다.

7. 참고 문헌

1. W. H. Winslow. "Induced Fibrillation Suspensions", Journal of Applied Physics, Vol 20, pp. 1137~1140, 1949
2. S. B. Choi, C. C. Cheong and G. W. Kim, "Feedback

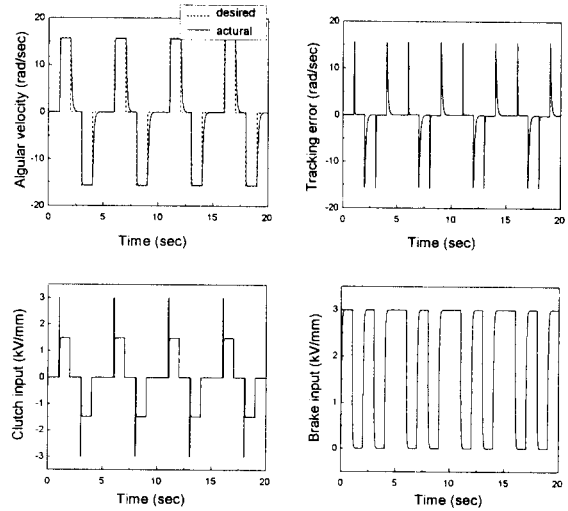
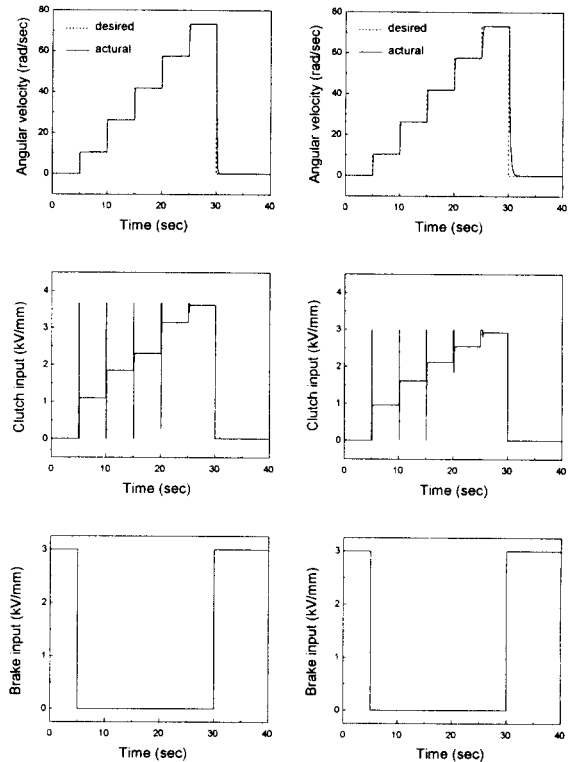


Fig. 6 Washing motion control using PID



(a) Pulsator motion control

(b) Spin-basket motion control

Fig. 7 Dehydrating motion control using PID