

엘리베이터 권상기 브레이크 시스템의 소음 및 진동 감소를 위한 솔레노이드 구동 제어기법 개발

Development of a Solenoid Control Technique for the Suppression of Noise and Vibrations of the Brake System of Elevator Traction Machine

양 동 호* · 김 기 영** · 허 석* · 곽 문 규† · 이 재 하*

Dong-Ho Yang, Ki-Young Kim, Seok Heo, Moon K. Kwak and Jae-Ha Lee

(2012년 3월 14일 접수 ; 2012년 4월 24일 심사완료)

Key Words : Solenoid Control(솔레노이드 제어), Brake(브레이크), Elevator Traction Machine(엘리베이터 권상기)

ABSTRACT

This paper is concerned with the suppression of noise and vibrations of the brake system of elevator traction machine by means of a solenoid control technique. The solenoid is used to hold the brake shoe, which is then released by turning the solenoid off. Since the brake shoe hits the brake disk, vibrations and noise occur. We developed the solenoid control technique based on the dynamic behavior of the solenoid. The theoretical model for the solenoid is modeled by using linear magnetic principles. The solenoid model was then combined with the vibration model to simulate the vibrations of brake system. The simulation results show that the additional pulse input to the solenoid can decrease the vibrations. The timing of the applied pulse is determined by observing the current. The experimental results show that both the vibrations and noise can be substantially decreased, which validates the approach developed in this paper.

1. 서 론

최근에 엘리베이터의 권상기를 승강로내에 배치해 기계실이 없는 엘리베이터를 구현하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 이 경우 엘리베이터 객실이 권상기에 근접하는 상황이 벌어질 수 있기 때문에 권상기 자체의 소음을 저감시킬 수 있는 기술이 필요하다. 권상기에 가장 큰 소음을 유발하는 소음원

으로는 권상기에 사용되는 브레이크인데, 브레이크는 솔레노이드로 구동된다. Watanabe et al.⁽¹⁾은 솔레노이드 구동, 즉 솔레노이드와 연결된 브레이크 암이 브레이크 판에 부딪히면서 발생하는 소음을 감소시키기 위해 솔레노이드의 전원 off 후의 회로내 전류를 피드백하고 PWM(pulse width modulation) 신호를 이용하는 방법을 제안하고 실험을 통해 소음 및 진동 저감이 가능함을 입증하였다.

국내에서도 엘리베이터의 권상기 브레이크 소음 및 진동 저감을 위한 노력이 현장에서 이루어지고 있지만, 아직 만족할 만한 성과를 얻지 못하고 있으며, 오직 브레이크의 스켈 소음 저감에 대한 연구⁽²⁾ 정도만 보고되고 있다. 이 연구에서는 권상기 브레이크 시스템에 사용되는 솔레노이드를 모델링하는 방법을 제안하고 수치해석을 통해 그 거동을 조사

† 교신저자; 정회원, 동국대학교 기계로봇에너지공학과

E-mail : kwakm@dgu.edu

Tel : (02)2260-3705

* 정회원, 동국대학교 기계공학과

** 정회원, 현대 엘리베이터

이 논문의 일부는 2012년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

하였다. 그리고 Watanabe et al.이 제안한 방법보다 간단한 방법으로 솔레노이드 특성을 고려한 펄스 신호 적용 방법을 개발하였다. 그리고 이 연구에서 개발한 방법을 간단한 솔레노이드 브레이크 실험 장치에 적용해 그 타당성을 입증하였다.

솔레노이드는 전기에너지를 기계에너지로 변환하는 액추에이터 중 가장 간단한 장치인데, 다양한 형태의 솔레노이드가 자동차, 밸브, ATM⁽³⁾, 휴대폰⁽⁴⁾, 전자식 브레이크 등에 적용되고 있다. 실제 산업 현장에서 가장 많이 사용하는 액추에이터는 회전 운동 또는 직선 운동을 할 수 있는 모터와 공압 또는 유압 액추에이터 등이다. 이들 중 DC 모터, 스테핑 모터, 서보 모터에 기반한 통상적인 액추에이터들은 고정밀의 위치 제어를 위해 사용되는 액추에이터이다. 따라서 이들 액추에이터는 솔레노이드에 비해 구조가 복잡하고 감지 기능을 가지고 있어 생산 단가가 높고 유지 보수 비용도 많이 필요하다. 일반적으로 로봇 시스템, 공작기계의 위치 제어에 이런 액추에이터들이 사용된다. 반면에 솔레노이드는 단순한 on/off 액추에이터라고 말할 수 있는데 구조가 복잡하지 않고 구동을 위한 부가 장치가 필요하지 않기 때문에 생산 단가가 낮다. 솔레노이드는 단순한 운동을 요구하는 밸브 개폐 장치나 개폐를 최종 목적으로 하는 선형 또는 회전 장치에 사용되고 있다. 엘리베이터 권상기 브레이크 시스템에서는 솔레노이드를 이용해 엘리베이터가 지정한 위치에서 정지하도록 만들고 있다.

솔레노이드는 단순한 on/off 제어만 수행하는 스위칭 솔레노이드와 제어 신호에 비례하는 힘이나 변위를 구현하는 비례 솔레노이드 등으로 구분된다. 하지만 후자는 제어 시스템이 부가적으로 구성될 뿐이며 솔레노이드의 기본적인 구조는 거의 유사

하다. Fig. 1은 일반적인 솔레노이드의 구조를 보여주고 있다.

Fig. 1에서 알 수 있듯이 솔레노이드는 기계적인 왕복 운동을 하는 플런저, 전자력을 생성하는 코일, 프레임, 복원력을 제공하는 스프링 등 크게 4개의 부품으로 구성되어 있다. 코일에 구동 전압을 인가하면 코일을 둘러싸고 있는 프레임과 플런저를 따라 흐르는 자기회로가 형성된다. 이 자기 회로를 통해 자속이 흐르면서 플런저에 자기력이 발생하여 플런저가 움직이게 된다. 운동 구간이 제한된 솔레노이드의 플런저는 구동 전압이 차단된 후에 스프링으로 인하여 원위치로 복귀한다. 이때 플런저의 운동은 구조물에 의해 저지되며 이 순간 충격음과 진동이 동시에 발생한다. 이러한 문제는 솔레노이드 타입의 브레이크 시스템에서 많이 발생한다. 특히 엘리베이터에 사용되는 전자식 브레이크에서 발생하는 충격음은 세대 내로 전달되어 소음 문제를 유발하기도 한다. 솔레노이드를 이용하는 브레이크 시스템을 연구하기 위해서는 솔레노이드 자체에 대한 모델링이 우선적으로 필요하다.

솔레노이드에 대한 대표적인 연구 결과들을 살펴보면 다음과 같다. Cheung et al.^(5,6)과 Rhman et al.^(7,8)은 솔레노이드의 모델링 방법을 연구하고, 수치 해석 및 실험을 통해 솔레노이드의 자기 특성 및 성능을 분석하였다. Chladny et al.⁽⁹⁾은 자동차 엔진의 효율을 향상시키기 위한 솔레노이드 밸브의 새로운 유한요소 해석 모델을 연구를 통해 제시하였다. 그리고 실험을 통해 제시한 모델의 타당성을 검증하였다. Taghizadeh et al.⁽¹⁰⁾은 PWM 제어 방식의 솔레노이드 밸브에 관한 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 유체와 연성된 시스템을 고려하여 솔레노이드의 거동에 대한 모델링을 연구했으며 실제 시스템과 비교하였다. Vaughan et al.⁽¹¹⁾은 고속으로 구동하는 비례 솔레노이드 밸브의 모델을 질량-스프링-댐퍼 시스템으로 단순화하는 방법을 제시하였다.

이와 같이 솔레노이드 모델링 방법에 대한 연구가 수행되어 왔지만, 솔레노이드를 제어해 솔레노이드 구동으로 인해 발생하는 소음과 진동을 감소시키는 것에 대한 연구는 Watanabe et al.⁽¹⁾의 연구가 유일하다. 그러나 Watanabe et al.⁽¹⁾의 연구는 솔레노이드 모델에 근거한 제어기 설계가 아니라 실험

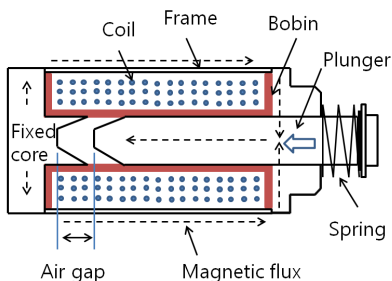


Fig. 1 Schematic diagram of a solenoid

관찰을 토대로 제어 알고리즘을 제시하는 연구이어서 진동 감소에 대한 이론적인 분석을 제시하지 못하였다. 따라서 이 연구에서는 솔레노이드의 거동과 관련된 이론 모델을 유도하고 그 거동으로 인해 발생하는 진동 모델을 동시에 고려해 제어 알고리즘을 개발하였다. 또한 솔레노이드의 모델을 통해 동적 특성과 전기적 특성을 분석하고 수치 해석을 통해 충격 진동을 줄이기 위한 방법을 제시하였다. 그리고 솔레노이드 실험 장치를 구성하여 그 타당성을 검증하였다. 이론 및 실험 결과는 제안한 방법이 효과적임을 보여준다.

2. 솔레노이드 동적 모델링

Fig. 1과 같은 솔레노이드가 브레이크 구동기로 동작하는 경우에 솔레노이드의 플런저가 브레이크 디스크에 부딪히게 된다. 이를 간단한 수학적 모델로 표현하면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

그림에서 x 는 플런저의 변위, x_b 는 디스크의 변위를 나타낸다. 구동 전압이 인가될 경우, 솔레노이드에 자력으로 인한 흡입력이 발생하여 플런저는 축을 따라 왼쪽 방향으로 움직인다. 이런 움직임을 표현하기 위해 x 축의 양의 방향을 왼쪽 방향으로 선택하였다. 만일 구동 전압이 차단되면 플런저는 다시 스프링의 복원력으로 인하여 외벽에 충돌하게 된다. m , c , k 는 플런저의 질량, 플런저와 연결된 감쇠계수 및 스프링 상수이다. m_b , c_b , k_b 는 브레이크 디스크를 일자유도로 표현한 경우의 질량, 감쇠계수와 스프링 상수이다. l_i 은 코일의 길이, l_d 는 축으로부터 코일의 중심부까지의 거리를 나타낸다.

일자유도 스프링-질량계로 나타낸 플런저의 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \quad (1)$$

여기서, $F = F(x, i)$ 는 솔레노이드가 플런저를 당기는 힘, 즉 코일의 전자기력에 의한 힘을 나타낸다. 이 힘은 자력 흐름에 의해 결정되기 때문에 플런저의 위치와 코일의 전류 크기에 따라 바뀌게 된다. 이 힘을 결정하기 위해서는 코일에 가해지는 전압과 전류, 그리고 자력에 대한 분석이 필요한데 솔레노이드의 흡인력은 coenergy 변위를 편미분해 얻어진다⁽¹²⁾.

$$F = \frac{\partial W_{co}}{\partial x} \quad (2)$$

여기서, 전류와 자기로 인한 coenergy는 다음과 같다⁽¹²⁾.

$$W_{co} = \frac{1}{2}Li^2 \quad (3)$$

따라서 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 전자기력이 다음과 같이 표현된다.

$$F = \frac{i^2}{2} \frac{\partial L}{\partial x} \quad (4)$$

식 (4)를 식 (1)에 대입하면 플런저의 운동방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = \frac{i^2}{2} \frac{\partial L}{\partial x} \quad (5)$$

솔레노이드의 코일에 인가된 전압과 코일에 흐르는 전류 사이의 방정식은 다음과 같이 표현된다⁽¹²⁾.

$$V = Ri + \frac{d}{dt}(Li) = Ri + \frac{dL}{dt}i + L \frac{di}{dt} \quad (6)$$

여기서, V 는 코일에 인가된 전압, R 은 코일의 내부 저항, i 는 코일에 흐르는 전류, $L=L(x)$ 은 플런저의 위치에 의해 결정되는 인덕턴스를 의미한다. 식 (6)를 chain rule을 이용해 전류에 대한 미분방정식으로 다시 정리하면 다음과 같다.

$$i = \frac{1}{L} \left[V - \left(R + \frac{\partial L}{\partial x} \dot{x} \right) i \right] \quad (7)$$

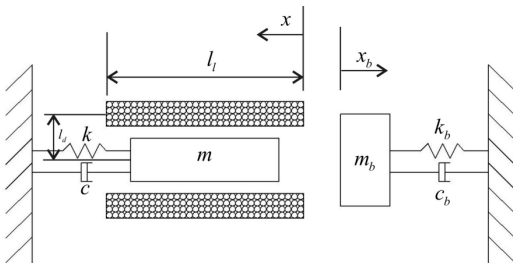


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

식 (5)와 (7)은 코일에 가해진 전압으로 인해 발생하는 코일의 전류와 플런저의 운동에 대한 연립 미분 방정식을 나타낸다. 이 연립 미분방정식으로부터 플런저의 변위와 코일에 흐르는 전류가 서로 연성되어 있음을 알 수 있다. 이 연립 미분방정식을 풀기 위해서는 전자기력, L 에 대한 표현식이 필요한데, 이를 유도하기 위해서 솔레노이드의 자기 회로를 고려하였다. 솔레노이드의 자기 회로 식은 다음과 같이 표현된다⁽¹²⁾.

$$Ni = H_c l_c + H_g l_g \tag{8}$$

여기서, N 은 코일의 감긴 횟수, H_c , H_g 는 각각 코어와 공극의 자기장의 세기이고, l_c , l_g 는 각각 코어와 공극의 내부 자기회로의 길이를 나타낸다. 코어의 내부 자기 회로의 길이는 Fig. 2로부터 $l_c = 2l_d + 2l_i$ 이 된다. 그리고 l_g 는 Fig. 1에 보이는 air gap의 길이를 나타낸다. 각 자기장의 세기는 다시 다음의 식으로 표현된다⁽¹²⁾.

$$H_c = \frac{\phi}{\mu_c A_p}, \quad H_g = \frac{\phi}{\mu_0 A_p} \tag{9a,b}$$

여기서 ϕ 는 자속(flux), A_p 는 코어의 단면적, 즉 플런저의 단면적을 나타낸다. 그리고 μ_c, μ_0 는 각각 코어와 공극의 투자율(permeability)을 나타낸다. 여기서 코일에 생성된 자속은 자기 회로에서만 이동하며 자속이 이동하는 코어의 면적은 동일하다고 가정한다. 식 (9)를 식 (8)에 대입하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$Ni = \frac{1}{\mu_0 A_p} \left(\frac{l_c}{\mu_r} + l_g \right) \phi \tag{10}$$

여기서 $\mu_r = \mu_c / \mu_0$ 는 공기에 대한 코어의 상대 투자율비를 나타낸다. 또한 인덕턴스는 자속과 다음의 관계식을 가진다⁽¹²⁾.

$$Li = N\phi \tag{11}$$

식 (10)의 결과를 식 (11)에 대입하면 인덕턴스에 대해 다음과 같은 결과가 유도된다.

$$L = \frac{N^2 \mu_c A_p}{l_c + \mu_r l_g} \tag{12}$$

만일 솔레노이드에 전압이 인가되지 않은 상태를 좌표의 원점으로 하고 스프링의 초기 압축 변위를 δ_0 로 가정한다면 공극, l_g 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$l_g = \delta_0 - x \tag{13}$$

식 (13)을 식 (12)에 대입하면 플런저의 위치에 따른 인덕턴스와 위치에 대한 인덕턴스의 편미분을 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$L = \frac{N^2 \mu_c A_p}{l_c + \mu_r (\delta_0 - x)} \tag{14a}$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \frac{N^2 \mu_c A_p}{\{l_c + \mu_r (\delta_0 - x)\}^2} \tag{14b}$$

식 (14)를 식 (5)와 식 (7)에 대입하면 솔레노이드의 플런저의 변위와 코일에 흐르는 전류에 대한 비선형 연립 미분방정식이 완성된다. 여기서 외력은 코일에 인가된 전압이 된다.

일자유도 진동계로 가정한 디스크의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$m_b \ddot{x}_b + c_b \dot{x}_b + k_b x_b = 0 \tag{15}$$

충돌 후 진동을 묘사하기 위해 충돌 직후 디스크 시스템이 다음과 같은 초기 속도를 가지는 것으로 가정하였다.

$$\dot{x}_{b0} = (1+e)/(1+m_b/m) \dot{x} \tag{16}$$

여기서 e 는 반발계수를 나타낸다.

3. 수치 해석 및 제어 알고리즘 개발

앞에서 설명한 바와 같이 엘리베이터 권상기 브레이크는 솔레노이드와 원판 디스크로 구성되어 있다. 솔레노이드에 전압이 인가된 상태에서는 플런저가 안으로 들어가 있게 된다. 브레이크를 걸기 위해서 전압을 차단하면 스프링 복원력에 의해 플런저가 튀어나와 디스크에 부딪히게 된다. 이 연구는 솔레노이드가 디스크에 주는 충격력을 줄여 유발되는 진동을 저감하는 것을 목적으로 하고 있다. Watanabe et al.⁽¹⁾의 연구는 솔레노이

드의 전압을 해제한 후 전류가 감소하다가 부딪히기 직전에 유도 전류로 인해 코일 전류가 상승하는 것을 관찰하고 이 시점에 PWM 전압을 인가하여 충격을 완화하는 것을 제안하였다. 그러나 짧은 시간 동안 전류를 감지하고 이를 피드백하여 PWM 전압을 이용하는 방법은 실제 적용하기 용이하지 않다. 이 연구에서는 유도 전류로 인해 코일 전류가 증가하는 시점에 펄스 전압을 인가하는 것을 제안한다. 이 방법의 장점은 PWM 신호보다 제어하기가 쉽고 피드백 회로를 구성할 필요가 없다는 것이다.

실험을 위해 사용된 솔레노이드의 파라미터를 수치해석에 사용했는데 다음과 같다. 스프링의 초기 공극 $\delta_0 = 0.024\text{m}$, 플런저의 단면적 $A_p = 2.0106 \times 10^{-4}\text{m}^2$, 코일의 턴 수 $N = 3000$, 코일의 내부저항 $R = 15.4\Omega$, 공기 투자율 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, 투자율 비 $\mu_r = 25$, 코어의 내부 자기회로의 길이 $l_c = 0.114\text{m}$, 플런저의 질량 $m = 0.08519\text{kg}$, 스프링 상수 $k = 981\text{N/m}$, 감쇠계수 $\zeta = 0.01$ 을 사용하였다. 또한 부딪히는 구조물에 대해서는 $m_b = 0.08579\text{kg}$, $k_b = 10^6\text{N/m}$, $\zeta_b = 0.04$ 를 사용하였다. 탄성 반발 계수 $e = 0.8$ 을 사용하였다. 플런저의 초기 변위 $x_0 = 0.023\text{m}$, 초기 전압 $V_0 = 14.67\text{V}$ 을 수치 모사에서 사용했다. 이 경우에 초기 전류가 약 0.95A 에서 시작하는데 이 전류가 감소하다가 증가되기 시작한 시간을 수치모사에서 관찰하고 다음과 같은 펄스 전압을 수치계산에 적용하였다.

$$V = 24\text{V}, 0.0065 \leq t \leq 0.0125 \quad (17)$$

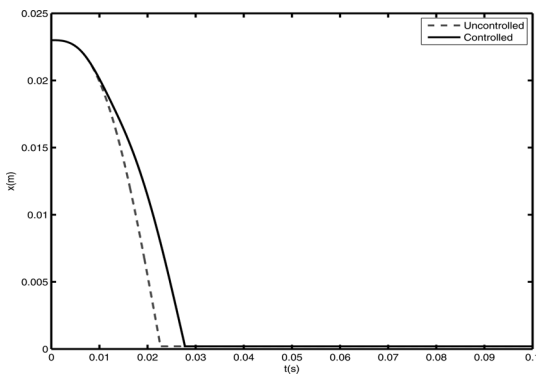


Fig. 3 Time history of plunger displacement

초기 코일의 인덕턴스 값을 실험을 통해 $L_0 = 0.3945\text{H}$ 을 측정하였는데 이 값을 수치계산에 사용하였다. Fig. 3부터 Fig. 6은 수치계산 결과를 보여

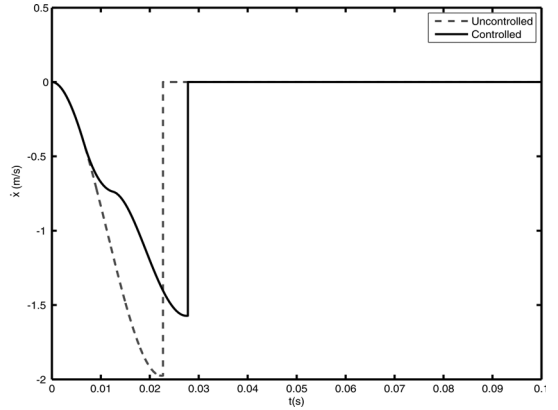


Fig. 4 Time history of plunger velocity

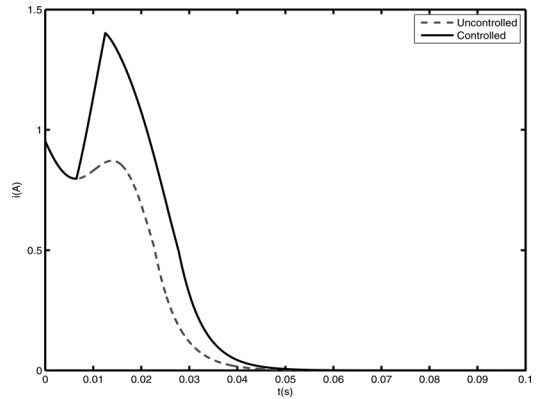


Fig. 5 Time history of coil current

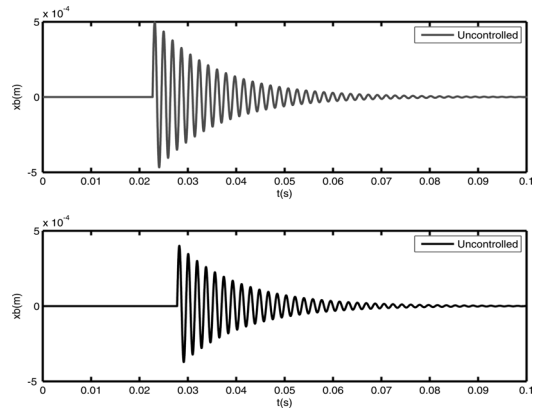


Fig. 6 Time history of disk displacement

주는데 펄스 전압을 사용하지 않은 경우와 사용한 경우를 보여주고 있다. Fig. 5의 전류 계산 결과에서 전압 펄스를 사용하지 않은 경우를 살펴보면 초기 전류값에서 감소하다가 유도 전류로 인해 코일 전류가 일시적으로 상승하는 것을 보여준다. 식 (18)의 펄스 전압 제어는 이 결과에 관찰을 두고 있다. 펄스 전압을 인가할 경우 당연히 전류가 증가하게 된다. 이와 같은 전압 증가로 인해 운동 반대 방향으로 자력이 작용하게 되어 Fig. 4에 보이는 바와 같이 충돌시의 속도가 줄어들게 되며 따라서 Fig. 6처럼 유발 진동도 감소되게 된다.

3. 실험

수치해석을 통해 코일 전류가 상승하는 시점에 전압펄스를 인가해 충격을 줄일 수 있음을 확인하였다. 이를 실험으로 입증하기 위해 Fig. 7과 같이 솔레노이드와 충격벽, 그리고 충격벽에 부착된 가속도계로 구성된 실험 장치를 구성하였다. Fig. 8은 실험 장치에 대한 제어 흐름도를 보여준다. 솔레노이드의 on/off 신호는 dSpace사⁽¹³⁾의 ds1104보드에서 제어하며 솔레노이드에 인가되는 전류는 셉트 저항을 사용하여 측정 하였다. 가속도계는 ENDEVCO사⁽¹⁴⁾의 7751-500 가속도계를 사용하였다.

Fig. 9는 중간에 펄스 전압을 인가하지 않은 경우 충격벽의 가속도와 코일 내부의 전류를 보여준다. 전류에 대한 계측 결과는 수치계산 결과와 유사한 경향을 보여준다. Fig. 10은 펄스 전압을 인가하여 측정 한 결과이다. 전류값은 순간적으로 올라가는 경향을 확인 할 수 있으며, 펄스 전압을 인가하지 않은 경우에 비해 가속도가 약 70%가 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 이로 인하여 플런저가 충돌할 때

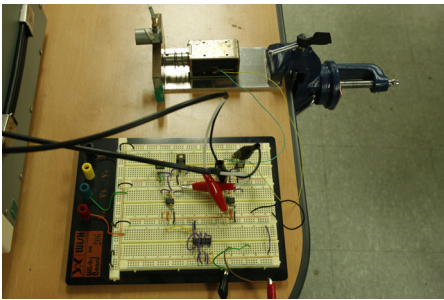


Fig. 7 Experimental setup for solenoid

발생하는 소음이 줄어드는 효과도 동시에 얻을 수 있었다.

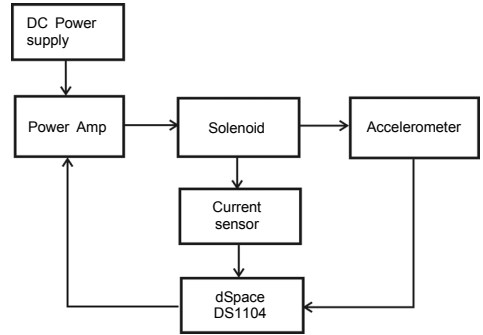


Fig. 8 Control flow for solenoid experiment

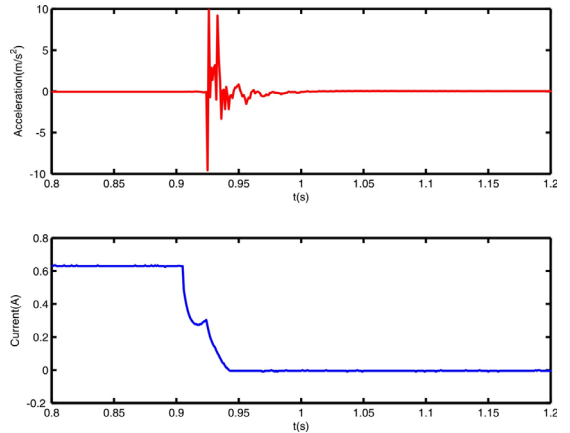


Fig. 9 Accelerometer and current sensor outputs(uncontrolled case)

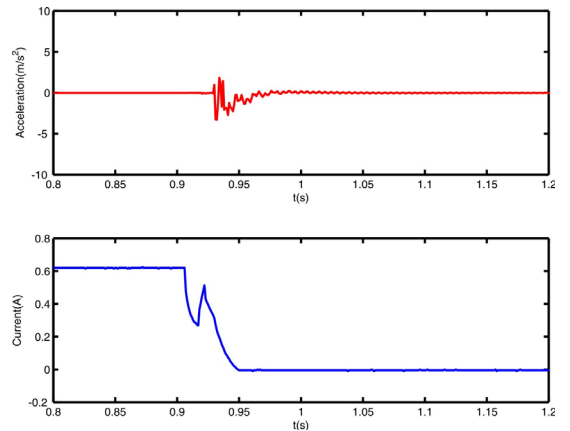


Fig. 10 Accelerometer and current sensor outputs(controlled case)

4. 결 론

이 연구에서는 엘리베이터 권상기 브레이크에 사용되는 솔레노이드 브레이크의 충격 소음 및 진동 저감에 대한 기초 연구를 수행하였다. 솔레노이드의 플런저가 충돌하여 생기는 진동을 분석하기 위하여 솔레노이드의 동적 모델을 유도하였다. 동적 모델은 플런저의 변위와 코일 내부의 전류가 연성된 비선형 연립 미분방정식으로 표현된다. 이 방정식을 이용해 수치 해석을 수행하여 솔레노이드의 전기 및 동적 특성을 분석하였다. 수치모사를 통해 유도전류로 인해 전류가 감소하다 일시적으로 증가하는 시점이 발생함을 알 수 있었는데 이는 실험에서도 관찰되었다. 이 연구에서는 플런저의 충돌로 인해 발생하는 진동 및 소음 저감을 위해 이 시점에 펄스 전압을 인가하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 수치 모사와 실험에서 그 타당함이 입증되었다. 이론에 근거한 수치 계산과 솔레노이드로 구성된 브레이크 장치 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이 연구에서 유도한 솔레노이드 플런저의 변위와 코일내 전류에 대한 연성 비선형 미분방정식이 실제 시스템의 거동을 효과적으로 묘사한다.

(2) 유도 전류가 발생하는 시점에 펄스 전압을 인가함으로써 충격 진동을 억제할 수 있다. 실험으로부터 충돌 시 가속도 레벨이 약 70% 감소하는 것을 확인하였고 충격 소음 또한 감소함을 확인하였다.

(3) 이 연구에서 제안한 펄스 전압 인가 방법을 이용해 엘리베이터 권상기 브레이크와 같이 솔레노이드를 브레이크 시스템으로 사용하는 브레이크 장치의 진동 및 소음 문제를 해결할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

이 연구는 한국연구재단의 “유연 다물체 지능구조물의 동적모델링 및 능동진동제어”과제의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Watanabe, S., Yumura, T., Kariya, Y. and

Hoshino, T., 2003, The Brake Noise Reduction Method for the Elevator Traction Machine, The Transportation and Logistics Conference, JSME, pp. 133~134.

(2) Kim, T. J., Koo, J. H., Jeong, W. B., Kim, Y. H. and Joo, W. H., 2010, Experimental Study for the Reduction of Wet-brake Squeal Noise in a Forklift, Transactions of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 12, pp. 1147~1152.

(3) Suh, J. H., Choi, Y. S., Jeong, J. K., Baek, Y. K. and Yoon, J. H., 2005, Dynamic Analysis of ATM gate Module, Proceeding of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 232~235.

(4) Lee, C. M., Lee, H. J., Bang, K. C., Hwang, G. Y. and Hwang, S. M., 2008, Novel Design of Solenoid Type Actuator Using in Cell-phone, Proceeding of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 230~235.

(5) Cheung, N. C., Lim, K. W. and Rahman, M. F., 1993, Modeling a Linear and Limited Travel Solenoid, Proceedings of the IECON'93, Vol. 3, pp. 1567~1572.

(6) Cheung, N. C., Rahman, M. F. and Lim, K. W., 1993, Simulation and Experimental Studies Towards The Development of A Proportional Solenoid, Proceedings of the AUPEC'93, Vol. 2, pp. 582~587.

(7) Rahman, M. F., Cheung, N. C. and Lim, K. W., 1996, Modeling of A Nonlinear Solenoid Towards the Development of A Proportional Actuator, Proceedings of the 5th International Conference on Modeling and Simulation of Electrical Machines Convertors and Systems., ELECTRIMACS'96, Vol. 1, pp. 121~128.

(8) Rahman, M. F., Cheung, N. C. and Lim, K. W., 1995, Converting a Switching Solenoid to a Proportional Actuator, IEEJ Proceedings on International Power Electronics Conference, IPEC'95, pp. 1628~1633.

(9) Chladmy, R. R., Koch, C. R. and Lynch, A. F., 2005, Modeling Automotive Gas-exchange

Solenoid Valve Actuators, Transactions of IEEE On Magnetics, Vol. 41, No. 3, pp. 1155~1162.

(10) Taghizadeh, M., Ghaffari, A. and Najafi, F., 2009, Modeling and Identification of a Solenoid Valve for PWM Control Applications, Transaction of Comptes Rendus Mecanique, Vol. 337, Issue. 3, pp. 131~140.

(11) Vaughan, N. D. and Gamble, J. B., 1996, The Modeling and Simulation of a Proportional

Solenoid Valve, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Transactions of the American Society of Mechanical Engineering, Vol. 118, pp. 120~125.

(12) Fitzgerald, A. E., Kingsley, Charles, Umans, Stephen D., 2009, Electric Machinery 6/E, McGraw-Hill, Inc.

(13) <http://www.dspaceinc.com>

(14) <http://www.endevco.com/>