

솔레노이드의 고속응답특성에 관한 연구

조용덕 · 유승열[†]

[†]한국기술교육대학교 기계정보공학부

A Study on High-Speed Response Characteristics of a Solenoid

Young Dok Jo and Seungryeol Yoo[†]

[†]Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

A solenoid actuator characterized by low price, available small size, and convenience is one of the main components of production equipments requiring compact, high-speed actuators. When the response needs to be under few milli-seconds, sensing the position of the actuator is much harder because of the inherent low inertia. Improvement of the required performance of these actuators can be obtained by the simulation using a mathematical model. In this study, the mathematical model is presented and proved by comparing the responses of the actual solenoid and of the simulation. The position of the actual solenoid was measured by the eddy current sensor. The simulation was executed using SIMULINK[®].

Key Words : Solenoid, Actuator, Modeling, Simulation

1. 서 론

최근 생활에서 사용하고 있는 휴대폰, 컴퓨터, TV, 오디오, 냉장고, 전자레인지, PMP, MP3 등 전자제품에 들어가는 부품은 점점 경량화하고 소형화되고 있다. 또한 우주-항공산업 분야 및 자동차 산업 현장에서 측정 장비 및 전기 제어장치가 사용되는 모든 곳에는 초소형 전자 부품이 사용된다.

제품이 소형화 되고 고성능화 됨에 따라 그에 맞는 부품의 수요는 필수적이며, 장비산업이 뒷받침되어야 한다. 현재 부품산업의 발전에 따라 부품의 수요도 급속히 늘어나고 있으며, 부품의 생산은 정확도와 더불어 생산성도 만족시켜야 한다. 결국 전자부품 생산장비의 생산공정, 검사공정, 포장공정까지 모든 공정에 고생산성, 고품질성이 포함된 포괄적인 장비 기술이 요구되고 있다. 예를 들어 MLCC 검사 및 Taping 장비 분야에서 최대3500(ea/min)의 생산량을 보이는 수입장비의 성능과는 달리 현재 국산 장비의 성능으로는 생산성과 품질을 기대하기 어려운 실정이다.

부품의 생산성 향상과 동시에 품질보장을 하기 위해서는 생산장비의 핵심 부품중의 하나로써 초소형/초고속 액츄에이터가 중요하다. 모든 공정에서 사용하는 액츄에이터는 생산량 이상의 고속 및 고정밀의 응답성을 필요로 한다. 이를 구현하기 위해 고려한 세가지 액츄에이터는 솔레노이드(Solenoid), 보이스코일모터(Voice Coil Motor), 피에조모터(Piezo Motor)이다. 그 중에서 솔레노이드는 가격이 저렴하며 소형이며 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있으며, 장비에 쉽게 활용할 수 있으므로 차량용과 산업용에 많이 쓰이고 있다. 솔레노이드는 활용도에 비해 그 이론적인 부분에 있어서 일반화된 수식이나 실제 솔레노이드에 적용할 수 있는 모델식들이 부족한 실정에 있다. 본 연구에서는 최적화된 솔레노이드 모델이 적용된 Simulation 결과와 실제 솔레노이드를 실험하여 두 가지의 결과를 비교함으로써 최적화된 모델식을 제시하고, 산업현장에 사용될 수 있도록 하고자 한다.

2. 솔레노이드 모델링

일반적으로 솔레노이드는 코일에 전류를 인가시켜 자기에너지를 변환시킨 다음 기계적인 에너지의 형태

[†]E-mail : yoos@kut.ac.kr

로 사용할 수 있는 장치를 말한다. 초고속 솔레노이드는 응답시간이 3 ms 이하인 솔레노이드를 말하며 응답시간은 크게 전류가 인가되었을 때부터 Fig. 1(b)에서 코어가 케이스에 도달할 때까지의 시간을 말한다. 솔레노이드 구성은 Fig. 1과 같다.

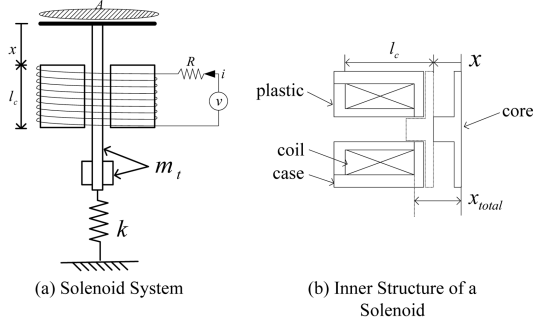


Fig. 1. System and inner structure of a solenoid.

솔레노이드에 키르히호프 법칙을 적용하면 아래와 같다.

$$v = Ri + \frac{d}{dt}Li \quad (1)$$

여기서 v 는 입력전압(V), i 는 전류(A)이다.

실험에서 사용된 솔레노이드의 코어는 강자성체이며, 전류가 인가되었을 때 코일의 자계에 의하여 코어는 자화가 된다. 자기이력 히스테리시스 곡선에서 외부자계에 의해서 코어의 자화는 증가하게 된다. 그러나 코어와 코일 사이의 길이가 제한된 솔레노이드는 코어가 코일에 근접할수록 코어의 비투자율 μ_r 은 지수함수적으로 증가하게 된다. μ_r 은 아래와 같이 표현된다.

$$\mu_r = e^{-\left(\frac{x}{x_{total}}\right)^2}, \mu_c = \mu_0\mu_r \quad (2)$$

여기서 x_{total} 은 코일과 코어 사이의 거리, x 는 코어의 변위이다. μ_c 와 μ_0 는 각각 코어와 자유공간의 투자율이며 μ_r 은 투자율의 비이다. 인덕턴스(inductance)는 L 이며, 솔레노이드의 자기흡인력 F_m 은 아래와 같다 [1,2].

$$L = \frac{N^2 A \mu_c}{l} = \frac{N^2 A \mu_0}{l_c} \times e^{-\left(\frac{x}{x_{total}}\right)^2} \quad (3)$$

$$F_m = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial l} = \frac{\phi^2}{2\mu_0 A} = \frac{L^2 i^2}{2N^2 A \mu_0} \quad (4)$$

여기서 A 는 자속에 의해 영향 받는 총면적, l 은 흐르

는 전류의 총 길이, l_c 는 코일의 길이, \mathcal{E} 은 에너지, ϕ 는 자속, N 은 권선수이다. 뉴턴의 법칙에 의해 코어의 운동방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$m_i \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + k(x + \delta) = F_m \quad (5)$$

여기서 δ 는 스프링 초기 변위, b 는 마찰계수, k 는 스프링 상수(N/m)이다. 운동방정식 식(5)에 솔레노이드 자기흡인력 식(4)를 넣어 정리하면, 솔레노이드 코어와 코어에 흐르는 전류에 대한 수식 모델식은 아래와 같다.

$$m_i \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + k(x + \delta) = \frac{L^2 i^2}{2N^2 A \mu_0} \quad (6)$$

3. 실험장치 구성

솔레노이드의 특성 실험을 위하여 Fig. 2와 Fig. 3 같이 실험장치를 구성하였다. 솔레노이드 제어는

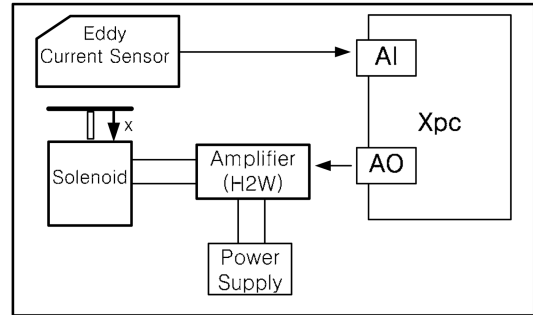


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup.

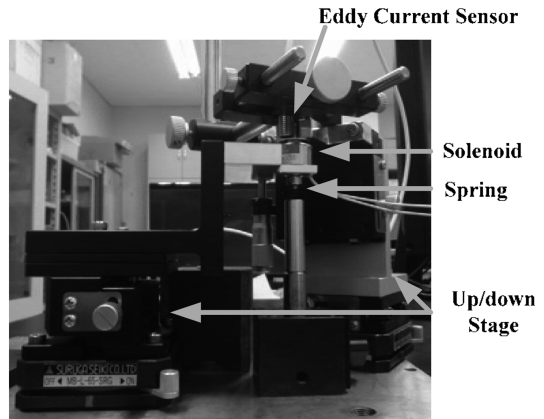


Fig. 3. Photograph of experimental setup.

Power Amp. Driver를 통해 전압 및 전류로 제어가 가능하다. 솔레노이드의 변위는 Eddy Current Sensor를 사용하여 측정하였으며 이것은 솔레노이드 코어에 부하를 줄이기 위해서 비접촉식 측정방법을 선택한 것이다. 상위 제어기로서 실시간 제어가 가능한 XPC를 통해 데이터 수집 및 제어를 하였다. x 의 변위는 최대 0.5 mm로 제한하였다. 본 실험에서 사용한 솔레노이드 모델명은 M-140C-6V 이다.

4. 실험방법 및 조건

본 실험에서 사용된 Driver는 전압 및 전류 소스로 사용이 가능하여 솔레노이드 입력에 두가지를 모드를 사용하여 실험하였다. 스프링 상수 $k=0.3 \text{ N/mm}$ 이며, 스프링 초기 변위량은 0이다. 제어신호는 1V ~ 2V의 범위를 가지는 펄스형태이고 펄스폭의 시간은 0.1s이다. 위치 측정의 샘플링 주기는 0.2 ms 이다. 사용된 위치 측정센서(Eddy Current Sensor)의 분해능은 50 nm이며 측정범위는 1 mm 이다.

5. 결과 및 토의

본 실험결과는 같은 실험방법과 조건에 준하여 Voltage Mode, Current Mode, Simulation 의 결과를 차례대로 나열하였다.

5.1. Voltage Mode

Fig. 4는 Voltage Mode로 실험한 결과이다. 제어입력의 범위 1~1.3V에서 x 의 변위가 상승할 때 스프링 장력과 솔레노이드의 자기 흡인력에 의해 평형상태를 이루는 위치에서 x 의 변위가 일정하게 유지한 다음 복귀한다. 일정하게 입력전압이 증가할수록 x 의 변위는 일정하게 증가하기 보다는 지수함수적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 코어가 코일에 근접할수록 자화에 의해 자기흡인력이 증가한다는 것을 의미하는 것이다.

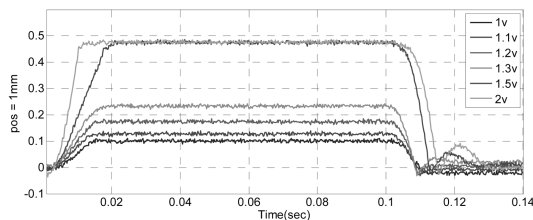


Fig. 4. Measured positions of a solenoid when input is voltage mode.

제어입력의 범위 1.4 ~ 2V에서 솔레노이드 코어는 케이스에 닿아 더 이상 상승하지 않으며, 입력전압이 증가할수록 제한거리 0.5 mm 도달시간은 더욱 빨라진다.

5.2. Current Mode

Fig. 5는 Current Mode로 실험한 결과이다. Voltage Mode에 의한 실험결과와 비슷한 양상을 보이고 있으나, 0.1s 에서 제어입력이 복귀에 해당되는 전압(1V)으로 바뀌면서 솔레노이드 코어는 스프링에 의해서 복귀하게 되는데 Voltage Mode와달리 복귀가 일시에 이루어진 것을 알 수 있다. 이것은 Voltage Mode보다 Current Mode가 솔레노이드의 제어에 효과적이라는 것을 알 수 있다.

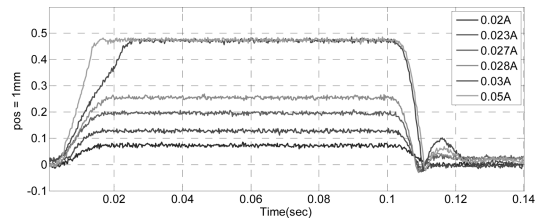


Fig. 5. Measured positions of a solenoid when input is voltage mode.

5.3. SIMULINK® Simulation

상기에 언급한 솔레노이드 모델링을 적용하여 Matlab SIMULINK®를 통해 Voltage Mode와 같은 실험조건으로 Simulation 을 한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 실제 실험결과와 매우 근사함을 알 수 있다. Fig. 7은 제작된 SIMULINK® Model 이다.

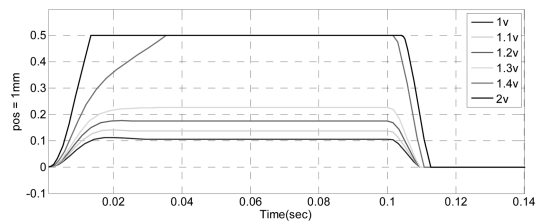


Fig. 6. Simulated positions of a solenoid when input is voltage input.

Fig. 8에서는 Fig. 4와 Fig. 6을 0~0.025s 구간에 대하여 비교한 것이다. Fig. 9에서는 Fig. 4와 Fig. 6을 0~0.005s 구간에 대하여 비교한 것이다. Noise가 포함된 것은 eddy current sensor로 측정한 실험결과이며, 실선은 Simulation 결과이다. 낮은 전압뿐만 아니라 높은 전압에서도 솔레노이드 모델링과 실험값은 근사하게 나왔으며 위치오차는 5% 미만이다. 9V의 전압입력

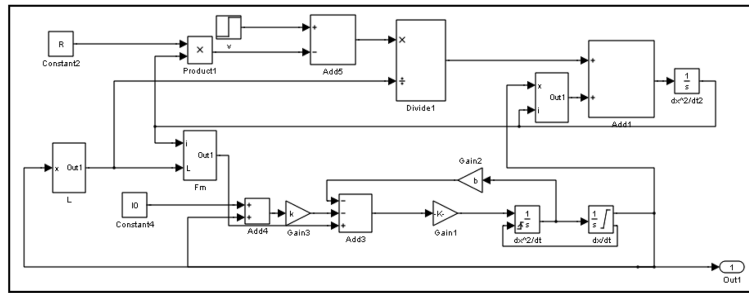


Fig. 7. SIMULINK® model for the solenoid simulations.

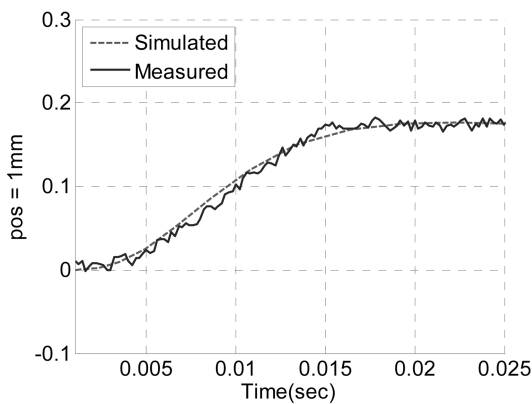


Fig. 8. Comparison of measured and simulated positions for 1.2 Volt input.

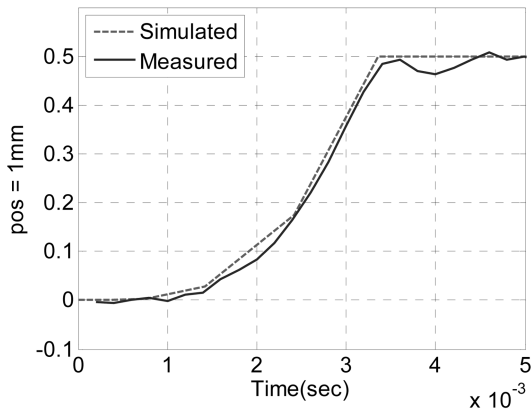


Fig. 9. Comparison of measured and simulated positions for 9 Volt input.

인 경우는 3.5 ms의 고속응답을 보인다.

6. 결 론

본 연구는 초고속 솔레노이드의 특성을 파악하기 위

하여 다양한 실험을 하였으며 이와 동시에 모델링을 세워 비교하여 특성을 파악하였다. Power Source의 전류제어는 전압제어 보다 솔레노이드 복귀를 앞당겼으며, 강자성체인 코어는 입력 값에 의해 솔레노이드 자기흡인력이 지속적으로 증가함을 알 수 있었다. 실험결과와 도출된 수식모델의 simulation결과가 비교적 잘 일치 하였다.

초고속 솔레노이드에서 Hold 전압 및 전류에 따라 응답시간이 달라지는 특성에 대한 연구는 향후 수행할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 한국기술교육대학교 교육연구 진흥비 프로그램과 지식경제부 지역혁신센터(RIC) 사업의 2009년도 연구비로 수행되었음.

참고문헌

1. M. Taghizadeh., A. Ghaffari., F. Najafi., “Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications,” *Comptes Rendus Mecanique*, Vol.337, pp.131-140, 2009.
2. B.L. Shields., K.B. Fite., M. Goldfarb., “Design, control, and energetic characterization of a solenoid-injected monopropellant-powered actuator,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol.11, pp. 477-487, 2006.
3. R.B. Van Varseveld., G.M. Bone., “Accurate position control of a pneumatic actuator using on/off solenoid valves,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics* Vol.2, pp. 195-204,1997.
4. T. Nguyen., J. Leavitt., F. Jabbari., J.E. Bobrow., “Accurate sliding-mode control of pneumatic systems using low-cost solenoid valves,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol.12, pp. 216-219, 2007.

5. Z. Janusz, "Simulation of a Solenoid Actuator for a Device for Investigating Dynamic Air Permeability Through Flat Textile Products," FIBRES & TEXTILES, Vol.11, pp.41-44, 2003.
6. 황재원, 길한주, 박재근, 채재우, "고속용 솔레노이드

설계를 위한 수치해석적 연구," 한국자동차공학회논문집, 제7권, 제3호, pp. 94-102, 2003.

접수일: 2010년 5월 19일, 1차 심사일: 2010년 5월 28일,
2차 심사일: 2010년 6월 7일, 게재확정일: 2010년 6월 15일