

## 솔레노이드의 고속 동작을 위한 모델링 및 제어

유승열<sup>†</sup> · 신동훈

<sup>†</sup>한국기술교육대학교 기계정보공학부

### Modeling and control of a solenoid for high-speed actuation

Seungryeol Yoo<sup>†</sup> and Dong-Hun Shin

<sup>†</sup>School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology Education

#### ABSTRACT

Electronics in modern life have become more miniaturized and precise and new technology of electronic components has made these trends possible. The explosive demand of electronic components needs more high-speed and accurate performance of manufacturing processes. For high-speed actuation, solenoids, voice coil motors and piezo motors have been used. A solenoid actuator characterized by low price, available small size, and convenience is one of the main components of production equipments requiring compact and high-speed actuators. Since these actuators show millisecond order responsiveness, the improvement of 1~2msec is very important in industrial applications. In this paper, the mathematical model of the solenoid is formulated and simulated using SIMULINK<sup>®</sup>. To verify the model, the responses for step input with open-loop control is obtained and compared with the simulation result. In order to improve the responsiveness, Hold voltage method is introduced and optimal value between spring constant and hold voltage is suggested.

**Key Words** : Solenoid, Actuator, Modeling, Simulation

### 1. 서 론

MLCC(Multi layered Ceramic Capacitor)를 포함한 전자부품은 우리 일상생활에서 사용하는 각종 전자제품 휴대폰, 컴퓨터, TV, 오디오, 냉장고, 전자레인지, 전기밥솥, 에어컨 등 모든 제품에 사용되고 있다. 또한 우주-항공산업 분야 및 하이브리드 자동차, 각종 측정장비 및 전기 제어장치 등의 모든 곳에도 사용되고 있다. 전자부품의 신기술은 휴대폰이나, 컴퓨터 DSC, DVC와 같은 전자 장비들의 지속적인 소형화 추세를 가능하게 하고, 성능이 향상됨에 따라 고용량화 되어가고 있다. 예를 들어 MLCC의 경우, 수요는 현재 폭발적으로 증가하고 있으며, 일반적으로 휴대용 전화기한 대당 약250개, PDA에 약350개, 디지털 TV에는 약700개 정도 사용되며, MLCC가 2006년을 기준으로 전체

콘덴서 시장에서 50%대에 육박하고 있다[1,2].

이러한 폭발적인 전자부품의 수요를 만족시키기 위하여 제품생산과 더불어 장비산업이 뒷받침되어야 하며 결국 장비에 의하여 생산성이 결정된다고 볼 수 있다. 결국 전자부품 생산장비의 생산공정, 검사공정, 포장공정까지 모든 공정에 고생산성, 고품질성이 포함된 포괄적인 장비 기술이 필요하다. 예를 들어 MLCC 검사 및 테이핑(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 직선 왕복운동이 가능한 액츄에이터가 필요하다. MLCC 검사 및 테이핑 장비의 경우는  $0.6 \times 0.3 \times 0.3$  mm크기의 MLCC를 3600(ea/min)의 속도로 회전테이블에 적재, 용량검사, 외관검사, 포장까지 각각 10ms이내로 공정이 완료되어야 한다. 따라서, 각

<sup>†</sup>E-mail : yoos@kut.ac.kr

공정에 사용되는 액추에이터는 생산량 이상의 고속 및 고정밀의 응답성이 가능하여야 한다.

이를 구현하기 위해 사용되는 일반적인 액추에이터는 솔레노이드(Solenoid), 보이스 코일 모터(Voice coil motor), 피에조모터(Piezo motor) 등이다. 그 중에서 솔레노이드는 가격이 저렴하며 소형이며 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있으며, 장비에 쉽게 활용할 수 있으므로 차량용과 산업용에 많이 쓰이고 있다. 일반적으로 솔레노이드는 코일에 전류를 인가시켜 자기에너지를 변환시킨 다음 기계적인 에너지의 형태로 사용할 수 있는 장치를 말한다. 초고속 솔레노이드는 전류가 인가되었을 때부터 코어가 케이스에 닿았을 때까지의 응답시간이 3 ms 이하인 솔레노이드로 정의되며, 솔레노이드는 활용도에 비해 실제 솔레노이드에 적용할 수 있는 모델식들이 부족하다.

따라서 본 연구에서는 솔레노이드의 모델식을 제안하고 모델식을 이용한 Simulation 결과와 실제 고속 솔레노이드 응답 특성을 실험하여 두 가지의 결과를 비교함으로써 최적화된 모델식을 제시하고, 그 모델식을 바탕으로 입력전압에 따른 솔레노이드 응답특성을 연구하여 산업현장에 적용할 수 있도록 한다.

## 2. 솔레노이드 모델링

일반적으로 솔레노이드는 도선을 지름보다 길이가 긴 형태의 원통형에 균일하게 감고, 원통형 안에 이동철심(core)을 추가하여 도선에 흐르는 전류에 따라 이동철심이 직선 운동하는 장치이다. 또한 코일에 전류를 인가시켜 자기에너지를 변환시킨 다음 기계적인 에너지의 형태로 사용할 수 있는 장치를 말한다. 솔레노이드는 일정한 방향의 흡인력만 작용하기 때문에 복귀를 위해 스프링을 사용하며, 전류 차단과 동시에 스프링의 반발력으로 복귀응답이 결정된다. 고속 솔레노이드는 전류가 인가되었을 때부터 코어가 케이스에 상승운동 시간과 전류 차단되었을 때 복귀 운동시간을 포함한 총 응답시간이 10 msec 이하인 솔레노이드를 말한다. 솔레노이드 내부는 Fig. 1과 같이 코어, 케이스, 코일로 구성되며 복귀를 위하여 사용되는 스프링으로 구성된다.

솔레노이드에 키르히호프 법칙을 적용하면 솔레노이드에 발생하는 역기전력( $e$ )과 입력전압( $V$ )의 관계는 아래와 같다.

$$v = Ri + e \quad (1)$$

$$e = \frac{d}{dt}(Li) = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

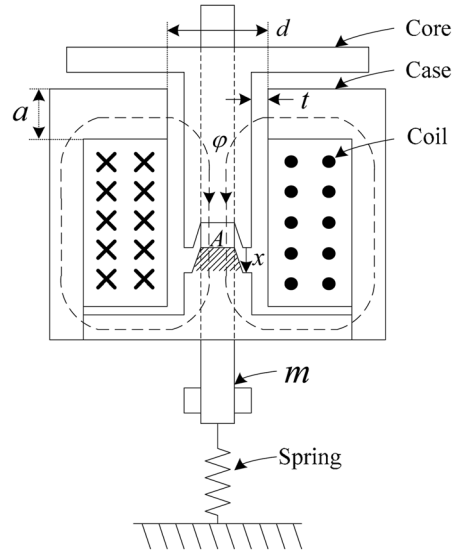


Fig. 1. Inner structure of a solenoid.

여기서  $v$ 는 입력전압(V),  $i$ 는 전류(A),  $\phi$ 는 자속선(Magnet flux line)이다. 솔레노이드는 Air gap에서 발생하는 Virtual force를 사용하기 때문에 Fig.1과 같은 Flux line( $\phi$ )에서 Air gap에 대한 자기저항(Reluctance)을 가  $\phi$ 지고 있다. Air gap의 크기와 솔레노이드 자기흡인력( $F_m$ )은 반비례하는 특성을 가지고 있으며 각각의 자기저항은 에어갭(Air gap)은 코어의 끝부분과 케이스의 에어갭( $R_1$ ) 코어의 둘레와 케이스의 에어갭( $R_2$ )의 두 부분으로 나누어지며 두 부분의 합이 전체 자기저항이 된다[3,4,5].

$$R_1 = \frac{x_f - x}{\mu_0 A}; R_2 = \frac{t}{\mu_0 \pi a d} \quad (3)$$

여기서  $x_f$ 는 풀스트로크(Full stroke)이며,  $x$ 는 코어의 변위이며, 자속에 의해 영향 받는 면적은  $A$ 이다.  $\mu_0$ 는 자유공간의 투자율이다. 인덕턴스(Inductance,  $L$ )는 권선수와 전체자기저항의 비로 식(4)로 표시되며 거리에 대한 변화량은 식 (5)로 표현되며 최종적으로 솔레노이드의 자기흡인력은 식 (6)으로 거리에 대한 인덕턴스의 변화량과 전류로 표시할 수 있다.

$$L = \frac{N^2}{R_1 + R_2} = \frac{\mu_0 N^2 A \pi a d}{(x_f - x) \pi a d + A t} \quad (4)$$

$$F_m = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} = \frac{i^2}{2} \frac{\mu_0 N^2}{((x_f - x) \pi a d + A t)^2} \quad (5)$$

여기서  $N$ 은 권선수이다. 뉴턴의 법칙(Newton's Law)에 의해 코어의 운동방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + k(x + \delta) = F_m \quad (6)$$

여기서  $\delta$ 는 스프링 초기 변위(mm),  $b$ 는 댐핑계수(damping coefficient),  $k$ 는 스프링 상수(N/mm),  $m$ (Kg)는 코어의 질량이다.

### 3. 실험장치 구성

본 논문에서 실험에 사용할 솔레노이드 제어시스템은 실시간 측정치 수집을 위한 MATLAB/Simulink XPC-Target 기반 실시간 운영시스템, NI사의 데이터 수집 보드인 PXI-6251, 솔레노이드의 고속 운동을 측정하는 와전류센서(Eddy Current sensor), 파워소스로 전류와 전압모드가 가능한 Power amp driver (H2W)로 Fig. 2와 같이 구성된다.

Fig. 2에서 호스트 PC의 MATLAB/Simulink를 이용하여 제어를 설계하고 RS-232를 통하여 Target PC에 다운로드 한다. Target PC의 XPC를 실행하여 실시간으로 제어 및 측정을 한다. Fig. 3은 실험에 사용할 솔레노이드(Model : M-140C-6V)이며, Fig. 4는 솔레노이드의 실험 장치 사진이며  $x$ 의 변위는 최대 0.5 mm로 제한하였다. 실험에서 사용된 각 파라미터의 계수는 다음과 같다.

- 솔레노이드 무빙 코어의 질량(m) : 3.5 g
- 스프링 상수 (k) : 0.3 N/mm
- 솔레노이드 코일의 저항(R) : 30.5  $\Omega$
- 솔레노이드 코일의 권선수(N) : 700
- 풀스트로크 (Full stroke) : = 0.5 mm
- 에어갭의 투자율( $\mu_0$ ): =  $4 \times \pi \times 10^{-7}$
- 코어의 A의 면적( $m^2$ ):  $30.84 \times 10^{-6}$  ( $m^2$ )

### 4. 시뮬레이션 및 실험결과 비교

2장에서 구성한 모델을 확인하고자 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 실제 구동한 결과를 비교하였다. 실험 조건으로 풀스트로크(Full stroke)를 0.5 mm, 스프링 초기변위를 0 mm으로 설정하였다. 입력전압의 최대값 19V일 때 측정된 위치변화와 시뮬레이션의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 실선은 측정된 실험결과이며, 점선은 시뮬레이션의 결과이다. 낮은 전압뿐만 아니라 높은

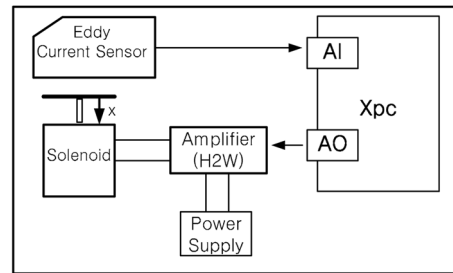


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup.

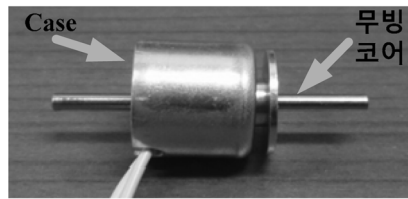


Fig. 3. Real picture of a solenoid.

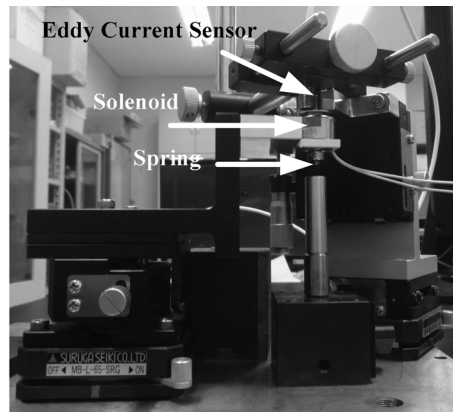


Fig. 4. Photograph of experimental setup.

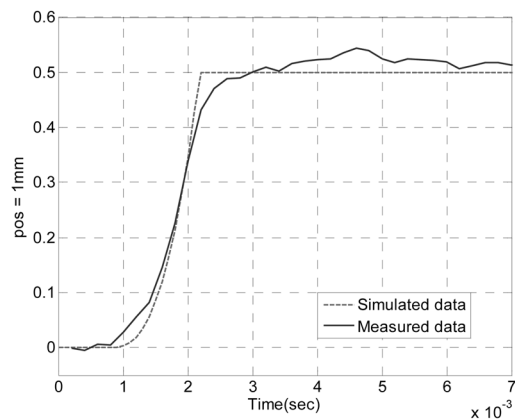


Fig. 5. Comparison of measured and simulated positions for 19 (V) input.

전압에서도 솔레노이드 모델링과 실험값은 근사하게 나왔다. 폴 스트로크인 0.5 mm에 도달하는 시간은 실험결과와 시뮬레이션 결과에서 각각 2.5 ms 및 2.2 ms의 고속응답을 보인다. 솔레노이드의 제어의 경우 일정 구간을 고속으로 왕복운동을 필요로 하기 때문에 피드백제어가 아닌 on/off 방식으로 제어하고 있다.

### 5. 홀드전압(Hold Voltage)을 이용한 응답성 개선

솔레노이드의 고속운동성 향상을 위해서는 상승뿐만 아니라 복귀 응답시간까지 개선 해야 한다. 상승운동은 최고인가 전압입력으로 충분한 응답시간을 얻을 수 있다. 복귀운동의 경우 응답성을 향상시키기 위해서는 전류로 제어하거나, 고 장력의 스프링을 쓰는 두 가지 방법이 있다. 두 가지 방법을 Table 1과 같이 비교하였다. 전류로 제어하는 방법은 구현 장비의 비용이 높고, 실제 산업현장에서 쓰이지 않는다. 그에 비해 고 장력의 스프링의 방법은 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 고 장력의 스프링 사용은 솔레노이드의 응답을 지연시키는 단점이 있다. 즉 스프링의 사용으로 복귀력은 향상되지만, 상승시간이 스프링의 반발력으로 인해 응답이 지연되는 것이다.

본 논문에서는 스프링 방법의 단점을 해결하기 위해 솔레노이드 지령 입력을 하기 전에 작은 홀드전압을 흐르게 하여 실험을 하였다. 작은 홀드전압에 따른 자속이 솔레노이드 코일에 발생하고, 자속에 따른 자기흡인력이 발생된다. 이 작은 흡인력으로 솔레노이드의 복귀에 영향 없이 상승에 대한 응답지연을 줄일 수 있다. 작은 홀드전압만으로도 스프링의 장력에 의한 솔레노이드 응답지연의 저하를 해소할 수 있다.

홀드전압의 유효성을 확인하기 위하여 솔레노이드에 구동 입력전원이 인가되기 전인 대기상태에 작은 홀드전압을 적용하고, 구동 입력전원이 인가된 후에 솔레노이드의 응답이 향상되는지 실험을 통하여 확인하였다. 스프링 초기위치(d)가 0 mm일 때 작은 홀드전압이 있는 경우와 홀드전압이 없는 경우의 실험조건으로 실험한 결과가 Fig. 6이다. 실선은 홀드전압 없이 단위 스

텨 입력 실험 결과이며 점선은 대기상태에서 작은 홀드전압을 적용한 결과이다. 두 응답결과를 비교하면 홀드 전압을 적용한 경우가 홀드전압이 없는 경우보다 응답이 빠른 것을 확인할 수 있다. 이것은 스프링의 초기 장력을 작은 홀드전압이 상쇄시켜 솔레노이드의 상승운동을 개선한다는 것을 확인할 수 있다.

실험결과에서 확인하였듯이 스프링의 반발력을 통한 솔레노이드의 복귀운동을 사용한다면, 솔레노이드에 홀드전압을 적용하여 향상된 응답을 보일 수 있다. 실제 산업현장에서는 스프링 선택과 홀드전압의 선정은 시행착오를 통하여 결정하고 있다. 따라서, 선정된 스프링의 초기위치 (d)에 따른 장력을 넘지 않는 정지상태의 최대 홀드전압을 모델에서 도출할 수 있다면 매우 유용할 것이다. 즉, 식 (1), (5), (6)을 이용하여 홀드전압을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$v = R \sqrt{\frac{2k\delta(x, \pi ad + At)^2}{\mu_0 A (N\pi ad)^2}} \quad (7)$$

솔레노이드의 파라미터와 제시된 수식모델을 이용하

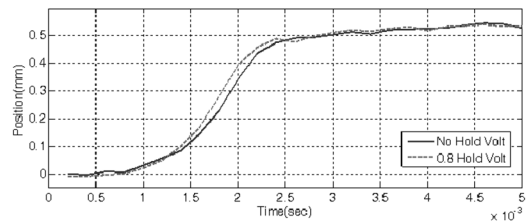


Fig. 6. Comparison of measured positions with and without hold voltage.

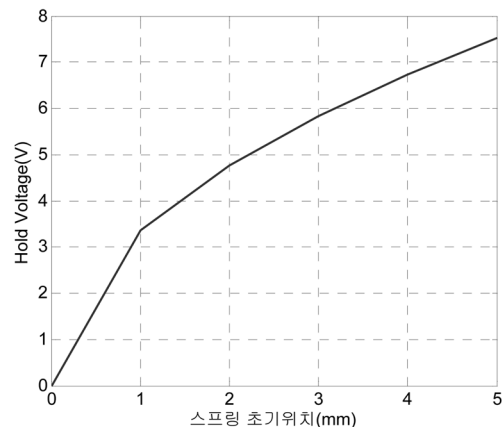


Fig. 7. Relationship between initial position of spring and hold voltage for  $k=0.3(N/mm)$ .

Table 1. Comparison of returning methods

복귀방법	전류제어	제어기구성	비용
고장력 스프링	적용불가	간단	낮음
전류제어	적용가능	복잡	높음

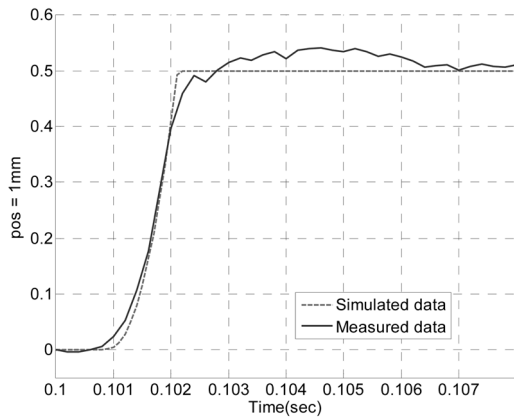


Fig. 8. Comparison of measured and simulated positions for hold voltage input(4 V).

면 스프링의 초기위치와 장력에 따른 홀드전압을 Fig. 7 과 같이 도출할 수 있다.

최적의 홀드전압을 적용하고, 솔레노이드에 최고 입력전원을 인가한 경우 솔레노이드의 최고의 응답시간을 알아보고자 스프링 초기변위가 2 mm이고 스프링상수(k)는 0.3 N/m일 때 최적화된 홀드전압(4V)을 적용하여 실험한 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 스프링 초기 장력이 작용하여도 실험결과와 시뮬레이션 결과는 각각 2.4 msec, 2.1 msec의 향상된 고속응답을 보인다. 스프링의 초기위치가 0 mm일 때의 응답시간이 2.5 msec 보다 0.1 msec 향상된 응답을 보이고, 스프링의 초기위치가 2 mm일 때의 응답시간이 2.9 msec보다 0.5msec 향상된 응답을 보인다.

최적의 홀드전압은 식 (7)과 같이 솔레노이드 코일에 전류가 흘러 발생한 자속이 영향을 받는 면적, 스프링 상수와 초기위치를 정확히 알면 손쉽게 구할 수 있다. 실제 산업현장에서 솔레노이드의 복귀운동을 신속하게 하기 위해서 스프링의 반발력을 높인다면, 손쉽게 구해진 최적의 홀드전압의 적용으로 향상된 응답개선이 가능하다.

## 6. 결 론

본 연구는 초소형 전자부품의 제조장비에서 요구되는 고속 응답의 구동기중 많이 사용되는 고속 솔레노이드에 대하여 모델을 구성하고 응답특성을 개선하고

Table 2. Comparison of responses depending on control methods

Actuator	Control method	Response time (msec) for 0.5 mm stroke
solenoid	simple on/off	2.9
	hold volt	2.4

자 하였다.

고속 솔레노이드의 특성을 파악하기 위하여 시스템 모델을 구성하고 다양한 실험을 하였다. 그 결과 실험결과와 시뮬레이션 결과가 비교적 잘 일치하였다.

솔레노이드 응답은 스프링 초기변위에 따른 장력에 따라 영향을 받는데 제시된 홀드전압 모델식에 따른 적절한 홀드전압 입력으로 솔레노이드 응답이 Table 2 와 같이 0.5msec 개선되었음을 보였다.

## 감사의 글

본 논문은 2010년도 한국기술교육대학교 교육연구진흥비 지원과 지식경제부 지역혁신센터(RIC) 사업의 2011년도 연구비로 수행되었음.

## 참고문헌

1. 위성권, “MLCC 제품개발 동향”, 세라미스트, Vol. 14-1, pp. 41-45, 2011.
2. 한국전자공업협동조합, “이동통신 단말기 시장의 최근 현황과 MLCC 및 SAW 필터 관련 부품산업”, 전자공업 통권 88호 pp. 12-16, 2003.
3. 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.
4. 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.
5. A. Fitzgerald and et al, Electric Machinery (fourth edition), McGraw-Hill Series in Electrical Engineering.

접수일: 2011년 8월 29일, 1차심사일: 2011년 9월 27일, 2차심사일: 2011년 11월 4일, 게재확정일: 2011년 11월 30일