

솔레노이드의 고속응답 개선에 관한 연구

A Study on Improvement of High-Speed Response of the Solenoid

유승열, *#조용덕

S. Yoo, *#Y. Jo(neverd@kut.ac.kr)

한국기술교육대학교 기계정보공학부

Key words : Solenoid, Actuator, Modeling, Simulation

1. 서론

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 3ms 이하인 솔레노이드를 말한다.

본 연구에서는 최적화된 솔레노이드 모델이 적용된 Simulation 결과와 실제 고속 솔레노이드를 실험하여 두 가지의 결과를 비교함으로써 최적화된 모델식을 제시하고, 그 모델식을 바탕으로 입력전압에 따른 솔레노이드 응답특성을 연구하여 산업현장에 적용할 수 있도록 한다.

2. 솔레노이드 모델링

본 실험에서 사용된 솔레노이드는 Fig. 1 과 같다. 상부 지지대에 의해 코어의 변위를 제한하며, 하부 스프링의 장력에 의해 코어는 복귀운동을 한다. 원형형태의 코어와 케이스로 구성된 고속 솔레노이드(M-140C-6V)이다.

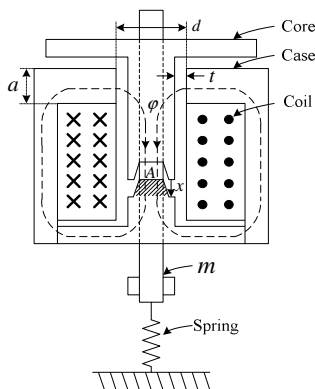


Fig. 1 Solenoid magnet

솔레노이드에 키르히호프 법칙을 적용하면 아래와 같다.

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

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

여기서 v 는 입력전압(V), i 는 전류(A), e 는 역기전력이다. ϕ 은 Flux line 이다. Fig. 1 과 같은 Flux line 에서 gap 에 대한 자기저항(reluctance)은 아래와 같다. [1][2]

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

여기서 x_f 는 Full Stroke 이며, x 는 코어의 변위이며, Flux 에 의해 영향 받는 면적은 A 이다. μ_0 는 자유공간의 투자율이다. 인덕턴스(inductance)는 L 이며, 솔레노이드의 자기흡인력 F_m 은 아래와 같다.

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

$$F_m = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} = \frac{i^2}{2} \frac{\mu_0 N^2 A (\pi ad)^2}{((x_f - x) \pi ad + At)^2} (F_m, \text{단위 } N) \quad (5)$$

여기서 N 은 권선수이다. 뉴턴의 법칙에 의해 운동방정식은 아래와 같이 표현된다.

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

여기서 δ 는 스프링 초기 변위(mm), b 는 마찰계수, k 는 스프링 상수(N/mm)이다.

3. 실험장치 구성

솔레노이드 특성파악을 위하여 Fig. 2 와 같이 실험장치를 구성하였다. 솔레노이드 제어는 Power Amp Driver(H2W)를 통해 전압 및 전류로 제어가 가능하다. 솔레노이드 변위는 솔레노이드 코어에 부하를 줄이기 위해서 비접촉식 측정방법인 Eddy Current Sensor(DT3010-S1)를 사용하여 측정하였다.

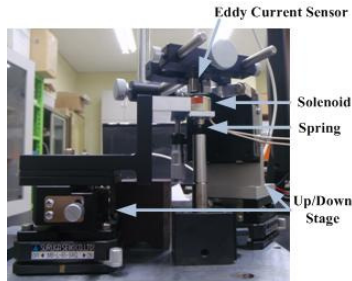


Fig. 2 Photograph of experimental setup

4. Simulation 결과 비교

실험조건으로 Full Stroke 를 0.5mm, 스프링 초기변위를 0 으로 설정하였다. 입력전압이 19V 일 때 결과를 Fig. 3 에 나타내었다. 실선은 측정된 실험결과이며, 점선은 Simulation 결과이다. 낮은 전압뿐만 아니라 높은 전압에서도 솔레노이드 모델링과 실험값은 근사하게 나왔으며 오차율은 5% 미만이다. 19V 의 입력 전압으로 나타난 실험결과와 simulation 결과는 각각 2.5ms, 2.2ms 의 고속응답을 보인다.

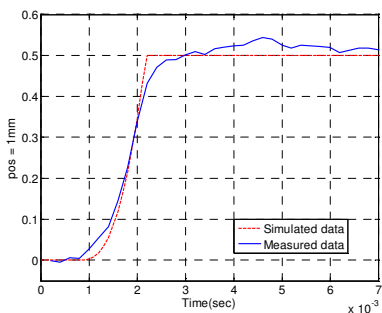


Fig. 3 Comparison of measured and simulated positions for 19 volt input.

5. Hold 전압입력 결과 비교

솔레노이드의 고속응답에서는 스프링의 초기변위에 따라 솔레노이드의 응답에 영향을 준다. 즉, 솔레노이드 스프링 초기변위가 증가함에 따라 스프링 장력에 의해 응답은 늦어지고, 이때 적절한 Hold 입력전압을 통해 일관된 응답을 얻을 수 있다. 평형상태에서 식(1), 식(5), 식(6)을 이용하여 Hold 전압에 대한 모델식을 아래와 같이 제시하였다.

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

Fig. 4 는 스프링 초기변위가 0.2mm 일때 4 Hold 전압과 19V 입력전압의 step 입력으로 주어진 실험 결과이다. 스프링 초기장력이 작용하여도 실험결과와 Simulation 결과는 각각 2.4ms, 2.1ms 의 향상된 고속응답을 보인다.

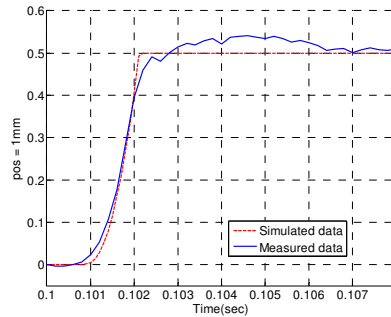


Fig. 4 Comparison of measured and simulated positions for 4 hold volt input.

6. 결론

본 연구는 초고속 솔레노이드의 특성을 파악하기 위하여 다양한 실험을 하였으며 이와 동시에 모델링을 세워 비교하여 특성을 파악하였다. 그 결과 실험결과와 simulation 결과가 비교적 잘 일치하였다.

솔레노이드 응답은 스프링 초기변위에 따른 장력에 따라 영향을 받는데 제시된 Hold 모델식에 따른 적절한 Hold 입력전압으로 솔레노이드 응답이 개선되었음을 보였다.

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. 황재원, 길한주, 박재근, 채재우, "고속용 솔레노이드 설계를 위한 수치해석적 연구," *한국자동차공학회논문집*, 제 7 권, 제 3 호, pp. 94-102, 2003.