

배기 브레이크용 솔레노이드 밸브의 특성 해석

윤 소 남* · 함 영 복

한국기계연구원 첨단산업기술연구부

Characteristics Analysis of the Solenoid Valve for Exhaust Brake

Sonam Yun* · Youngbog Ham

Department of Advanced Industrial Technology, Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yusong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 21 July 2003 / Accepted 18 November 2003)

Abstract : An exhaust brake system is composed of a gate valve, a pneumatic cylinder and an on-off solenoid valve. An on-off solenoid valve which is a key component of the exhaust brake system ought to have characteristics such as high reliability and long life for reducing the foot brake and tires damage, and for driver's fatigue relief of middle/large size vehicles running a long distance.

In this paper, an on-off solenoid valve which is used for vehicle brake system was studied. For the performance evaluation of the on-off solenoid, electromagnetic characteristics and dynamic characteristics are analyzed. On the basic study for the performance improvement of exhaust brake system, pneumatic circuit and pneumatic valve of on-off solenoid type were suggested and the performance of pneumatic valve through the test procedure was evaluated.

Key words : Air gap(공극), DC solenoid(직류 솔레노이드), Plunger(가동자), Stationary core(고정자), Magnetomotive force(기자력), Attraction force(흡인력)

Nomenclature

A_p : cross sectional area of cylinder
 \hat{A} : magnetic vector potential
 b_p : friction coefficient of cylinder, C : capacitor
 E : electromotive force, J_o : input current density
 J_e : eddy current density
 k_p : spring constant of cylinder load part
 L_s : leakage inductance, N : coil turn number
 P_s : supply pressure, P_1 : pressure in cylinder
 R : gas constant, R_s : resistance of solenoid coil

S : coil sectional area, S_e : effective area of valve
 T : absolute temperature, W : air mass
 x_o : initial displacement of spring
 x_p : cylinder displacement
 μ : magnetic permeability, σ : electric conductivity

1. 서론

솔레노이드는 교류 또는 직류의 여자 코일에 통전하여 가동철심을 움직이므로써 전자(電磁)에너지를 기계적 운동으로 변환하는 플런저형 전자석이다.¹⁾ 본 연구의 대상으로 하는 직류 솔레노이드 밸브는 디젤엔진차량의 배기브레이크에 사용되는 공압용 온오프밸브로, 이 밸브가 장착된 차량은 기

*To whom correspondence should be addressed.
ysn688@kimm.re.kr

제식 마찰 브레이크가 담당하던 역할을 배분하기 때문에 브레이크 및 브레이크 패드의 파손이나 타이어의 소손을 줄여 차량의 정비 보수 및 운행 중지로 인한 시간적, 경제적 손실을 막는 효과가 있으며, 운전자의 피로를 가중시키는 문제를 해소하는 역할을 하는 것으로 보고 되고 있다.²⁾ 때문에 배기브레이크용 솔레노이드는 배기브레이크 시스템 장착차량의 장거리 운행 및 굴곡이 있는 도로주행 여건들을 고려하여 설계되어야 하며, 고신뢰성 및 장수명화가 요구되고 있다.³⁾

본 연구에서는 배기브레이크용 솔레노이드의 성능향상 및 최적설계 알고리즘 개발을 위한 기초 연구로서 배기브레이크 시스템 해석 이론을 제안하고, 대상 솔레노이드 밸브의 과도상태를 해석하여 성능향상을 위한 물리인자들을 도출하기로 하며, 실험장치를 통하여 제안된 솔레노이드 밸브의 특성을 평가하기로 한다.

2. 이론해석

일반적으로 중대형 디젤차량의 배기 브레이크 시스템은 Fig. 1에 보이는 바와 같은 구조로 이루어져 있으며, Fig. 2는 본 연구의 대상으로 하는 브레이크용 온오프 솔레노이드밸브의 내부구조도를 보이는 것으로 실린더 구동용 압축유의 방향을 제어하는 체크밸브(볼형식)와 가동자, 고정자, 코일 등으로 이루어져 매우 간단한 구조를 가진다.

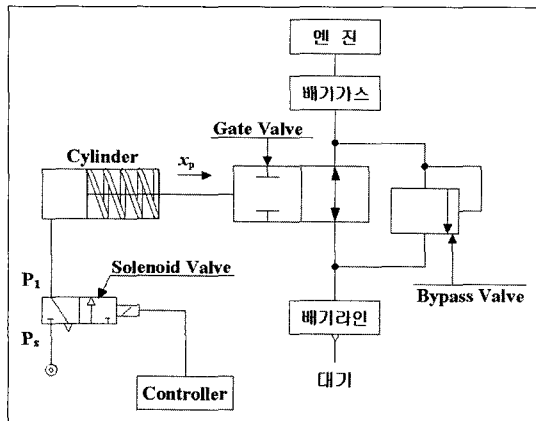


Fig. 1 Pneumatic circuit of exhaust brake system

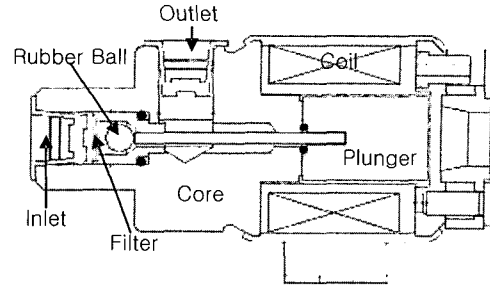


Fig. 2 On-off solenoid valve model

2.1 유한요소 이론해석

솔레노이드밸브 내부에 발생하는 와전류 및 자속을 고려하여 시변계 자기방정식으로 표현하면 다음과 같다.^{4,7)}

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_o + \vec{J}_e \quad (1)$$

식 (1)에서 J_e 는 와전류밀도를 의미하며, 와전류 밀도는 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{J}_e = -\alpha \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (2)$$

식 (2)에서 전위항을 무시하고, 식 (1)에 대입하여 축대칭 3차원 문제를 고려하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{A_\theta}{r} + \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right) \right] = \sigma \frac{dA_\theta}{dt} - J_{o\theta} \quad (3)$$

식 (3)을 각 요소 e 에 대하여 갤러킨 법으로 정식화하면 삼각형 요소의 요소 행렬 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[S_e]^{(e)} \{A\}^{(e)} + [P]^{(e)} \frac{d}{dt} \{A\}^{(e)} - \{Q\}^{(e)} I^{(e)} = 0 \quad (4)$$

Fig. 3은 연구대상밸브의 구동회로 모델을 보이는 것으로, 트랜지스터 Q_1 이 접속되어 전류가 흐르면 회로방정식은 다음과 같다.

$$V = (R_1 + R_{ext}) I_{(t)} + E + L_{ext} \frac{dI_{(t)}}{dt} \quad (5)$$

여기서, R_{ext} 와 L_{ext} 은 회로저항과 회로 인덕턴스를 나타낸다.

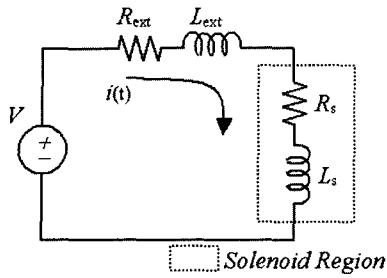


Fig. 3 Electric circuit for the on-off solenoid valve

과도상태를 해석하는 경우에는 솔레노이드 밸브 코일에 흐르는 전류가 변화하여 쇄교자속이 변화하기 때문에 코일에 유도기전력이 발생하는데, 이 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.⁸⁾

$$E^{(e)} = \frac{2\pi N}{S} \frac{d}{dt} \int_{s^{(e)}} r_o A^{(e)} ds \quad (6)$$

$$= [G]^{(e)} \frac{d}{dt} \{A\}^{(e)}$$

여기에서, r_o 는 요소(e)의 중심의 반경이다. 식 (5)의 회로방정식에 식 (6)을 대입하면 식 (7)의 관계가 얻어진다.

$$[G]^{(e)} \frac{d}{dt} \{A\}^{(e)} + (R_{ext} + R_s) I(t) - L_{ext} \frac{dI(t)}{dt} = V \quad (7)$$

결국, 식 (7)과 식 (4)는 미지수가 자기백터 포텐셜과 전류로 표현되므로 전기와 자기가 결합된 유한요소해석이 가능하게 된다.

2.2 배기브레이크시스템 이론해석

Fig. 1의 모델로부터 공급유량의 변화는 공급압력(P_s)과 실린더 압력(P_1)의 비로 다음과 같이 표시할 수 있다. 즉, 비음속 유동($P_1/P_s \geq 0.528$)인 경우의 유량변화는 식 (8)과 같이 표현 가능하다.⁹⁾

$$Q = 22.2 \times S_d \sqrt{P_1 \cdot (P_s - P_1)} \sqrt{\frac{273}{T}} \quad (8)$$

위 식을 시간당 질량유량 변화식으로 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$G = Q \times 2.15 \times 10^{-5} \quad (9)$$

식 (3)과 식 (4)로부터 오리피스를 통과하는 공기의 유속이 음속 이하인 경우에는 실린더 내부 압

력(P_1)과 밸브 유효단면적(S_e)에 의하여 유량이 결정됨을 알 수 있다.

실린더 내부의 압력과 밸브(오리피스)를 통과하는 유량간의 관계식은

$$V \frac{dP_1}{dt} + P_1 \frac{dV}{dt} = GRT + WR \frac{dT}{dt} \quad (10)$$

와 같다. 식 (10)에서 실린더 시스템 운동이 등온 과정에서 이루어진다고 가정하면,

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{1}{V} \{GRT - P_1 \frac{dV}{dt}\} \quad (11)$$

과 같이 표현 가능하며, 실린더의 운동방정식은 식 (12)와 같이 쓸 수 있다.

$$F = (P_1 - P_T) A_p = m_p \frac{d^2 x_p}{dt^2} + b_p \frac{dx_p}{dt} + k_p (x_o + x_p) \quad (12)$$

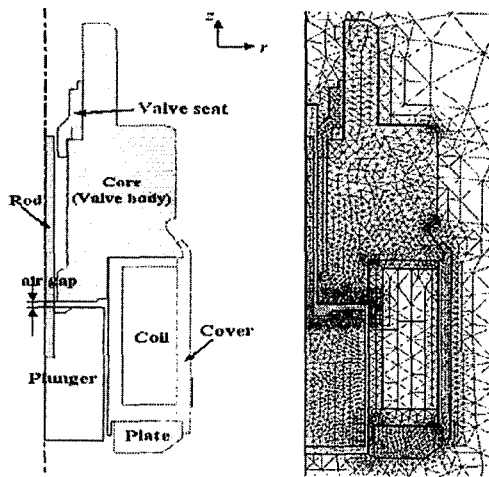
3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소법에 의한 과도상태 해석

Fig. 4(a)는 유한요소 해석대상 모델을 보이고 있는 것으로, 솔레노이드 밸브는 원통형 구조로 되어 있어 축대칭문제로 해석할 수 있으므로, 단면의 1/2만을 해석영역으로 선택하였다. Fig. 4(b)는 해석영역에서의 요소 분할도를 보이고 있는 것으로, 유한요소 해석에서는 공극(air gap) 부분의 해석이 매우 중요하므로 다른 부분보다 세밀하게 요소분할을 하였으며, 해석의 정밀도를 향상시키기 위해서 자성체의 비선형을 고려하였다. 또한, 공극의 길이는 잔류자기의 영향을 줄이기 위한 잔류자기 방지공극 0.3[mm]를 포함하여 1.3[mm]로 하였으며, 이 중에서 플런저가 실제로 이동하는 거리는 1.0[mm]로 하였다.

본 연구에서는 Fig. 2에 제안된 온오프 솔레노이드 밸브에 전압을 DC 8, 9, 10.2, 12[V]로 입력했을 때의 변위, 힘, 전류, 속도변화의 과도상태 특성을 해석하였다.

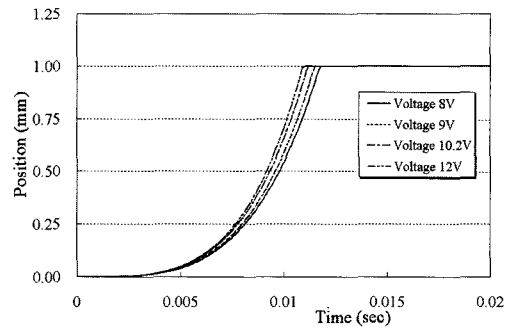
Fig. 5는 연구 대상 솔레노이드의 과도특성 해석 결과를 보이는 것으로, Fig. 5(a)로부터 플런저의 변위는 초기에는 거의 변화가 없으나, 10 [msec] 부



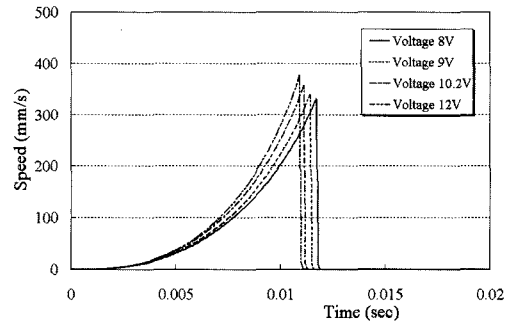
(a) Analysis model (b) Finite element mesh
 Fig. 4 Schematic of a model and finite element mesh for analysis region

근에서 급격하게 이동하며, 이 때 플런저의 이동 속도가 최대가 됨은 Fig. 5(b)로부터 알 수 있다. 플런저가 이동을 완료하는 시간은 약 11~12[ms]이다. Fig. 5(c)와 5(d)는 시간에 따라서 코일에 흐르는 전류와 이 때 발생하는 힘의 변화를 보이는 것으로, 플런저 변위가 종료되고 난 뒤의 흡인력은 모두 20[N] 이상이 됨을 확인할 수 있다. Fig. 5(c)에는 코일에 흐르는 전류가 입력전압이 12[V]인 경우보다 8[V]인 경우가 더 크게 나타나지만, Fig. 5(d)에서는 12[V]인 경우에 플런저에 작용하는 힘이 더 크게 나타난다. 이것은 플런저에 작용하는 힘이 단순히 전류에 비례하는 것이 아니라, 코일에 흐르는 전류와 전체 코일 권회수의 곱으로 표현되는 기자력의 크기에 비례하기 때문이다.

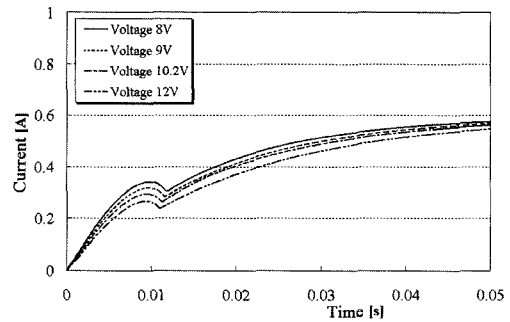
Fig. 6은 유한요소 해석 결과로써, 자속의 흐름과 자속밀도의 크기를 보이는 것으로, 구동 초기인 $t=1[ms]$ 일 경우에는 코어와 플런저 사이의 공극이 커서 많은 양의 자속이 로드(rod) 부분을 통해서 흐르지만, 플런저가 이동하여 플런저와 코어 사이의 공극이 감소하면 이 공극을 통해서 흐르는 자속이 증가한다. 이것은 화살표로 표시된 자속밀도의 분포를 보면 보다 잘 알 수 있다. 플런저가 이동을 완료하는 시점인 $t=11[ms]$ 까지는 로드 부분과 플런저 부분의 자속밀도가 같이 증가하지만, 플런저가



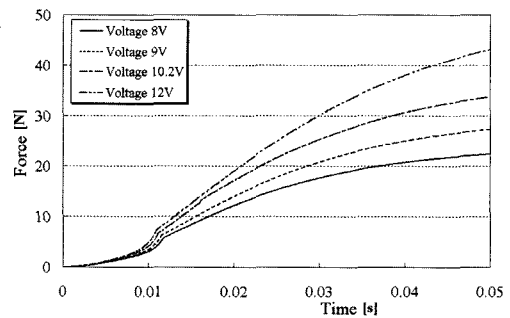
(a) Displacements of plungers



(b) Speeds of plungers



(c) Winding current



(d) Force

Fig. 5 Transient characteristics of solenoid valve

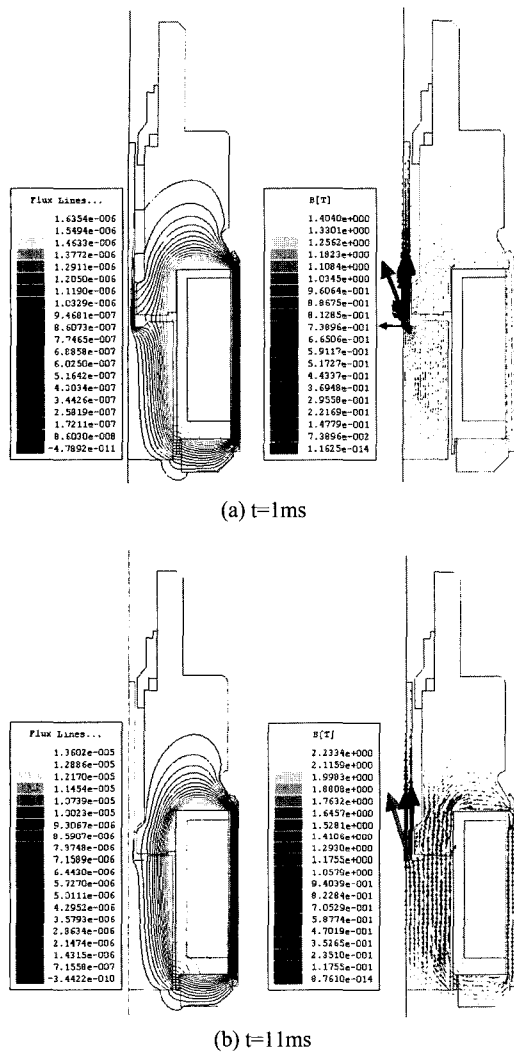


Fig. 6 Distributions of magnetic flux and magnetic flux density

이동을 완료한 후에는 공극의 길이가 충분히 작아졌기 때문에 자속밀도는 플런저 부분에서만 증가한다. 플런저의 이동에 미치는 힘은 공극에서의 자속밀도에 의해서 영향을 받지만, 로드와 코어 사이의 공극에서는 자속밀도가 대부분 반경방향 성분만 가지고 있기 때문에 z 방향으로 이동하는 플런저에 미치는 영향은 거의 없다. 플런저가 이동을 완료한 후에는 공극 길이의 변화가 없기 때문에 공극의 자속밀도는 전류에 비례해서 증가한다. 이것은 플런저에 작용하는 힘의 크기가 전류에 비례해서 변화하는 것으로 나타난다.

3.2 배기브레이크 시스템 해석

배기브레이크 시스템 해석에 있어서는 식 (8), (9), (10), (11)을 이용하였으며, 시뮬링크를 이용하여 4차 Runge-Kutta법으로 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 물리인자들은 Table 1과 같다.

Table 1 Simulation parameters

P_s	R	A_p	m_p
1.0[MPa]	287[J/kg.K]	0.5[kg]	7.1[cm]
b_p	k_p	x_o	
0.98[N.s/cm]	1[N/cm]	0.1[cm]	

Fig. 7은 배기 브레이크 시스템의 시뮬레이션 결과를 보이는 것으로 10[Hz]의 특성을 갖는 밸브의 입력특성에 따라 비교적 안정적으로 응답하고 있음이 확인되었다.

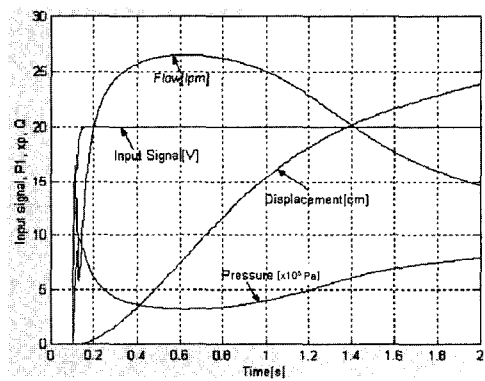


Fig. 7 Exhaust brake system characteristics

3.3 성능시험 결과

Fig. 8은 본 연구에서 제안된 배기 브레이크용 솔레노이드 밸브의 특성을 시험하기 위한 장치의 개략도를 보이는 것이며, Fig. 9는 연구대상 밸브의

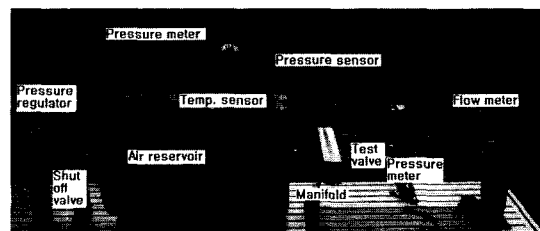


Fig. 8 Experimental apparatus

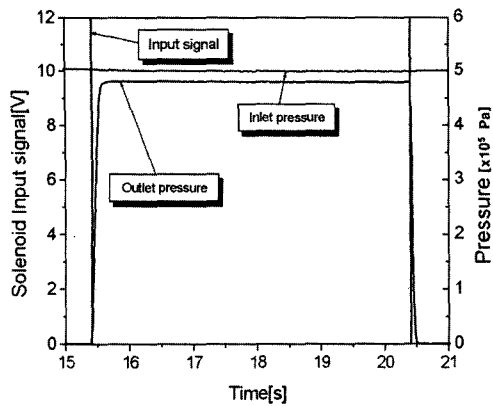


Fig. 9 Step response characteristics of solenoid valve

계단응답 시험 결과를 보이는 것으로, 이 시험은 밸브 입구 압력을 0.5[MPa]로 유지한 상태에서 계단입력을 밸브에 인가한 후, 압력검출장치를 통하여 응답을 검출하는 것이다. Fig. 9로부터 밸브는 과도응답없이 매우 안정된 형태를 보이고 있으며, 밸브의 시정수는 80[ms]임이 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 배기브레이크용 솔레노이드의 성능향상 및 최적설계 알고리즘 개발을 위한 기초 연구로서, 공압 온오프밸브 및 공압 온오프밸브 액츄에이터로 사용되는 직류 솔레노이드를 제안하였으며, 유한요소해석을 통하여 대상 솔레노이드의 과도특성을 분석하였다. 분석결과로서, 연구대상 솔레노이드는 설계목표로 하는 20[N] 이상의

흡인력을 얻을 수 있었으며, 플런저에 작용하는 힘은 기차력 특성에 비례하고, 응답특성은 12[ms] 이내임이 확인되었다. 본 연구의 결과는 국내 중대형 디젤차량 배기브레이크 시스템 설계에 매우 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단한다.

References

- 1) KS, KS C 4530, 1991.
- 2) S. N. Yun, B. J. Sung, "Exhaust Brake Techniques of Diesel Engine Vehicle," Journal of KSAE, Vol.23, No.3, pp.38-42, 2001.
- 3) Riker, Exhaust Brakes, Catalogue, 2001.
- 4) G. T. Kweon, "Dynamic Analysis of Fast Acting Solenoid Valves using Finite Element Method," Master's These of Kookmin Univ., 2000.
- 5) H. C. Roters, Electromagnetic Device, John Wiley & Sons, Inc., 1970.
- 6) H. Tanaka, "A Study on High Speed Electromagnetic Valve," JSME, Vol.50, No.457, pp.1594-1601, 1984.
- 7) S. N. Yun, J. S. Ryu, "A Study on Characteristics Improvement of On-off Solenoid for Pneumatic," 2003 KSAE Spring Conference Proceeding, pp.1152-1157, 2003.
- 8) I. H. Choi, C. S. Koh, T. K. Chung, S. Y. Hahn, "Finite Element Analysis for Electromagnetic System of Solenoid Actuator," KIEE, Vol.40, No.11, pp.1105-1113, 1991.
- 9) (社)日本油空壓, "油空壓便覽", p.428, 1989.