

디젤차량 배기 브레이크용 솔레노이드 밸브의 개발 Development of Solenoid Valve for the Exhaust Brake of Diesel Engines

윤소남 · 함영복 · 조정대 · 류병순

S. N. Yun, Y. B. Ham, J. D. Jo and B. S. Ryu

Key Words : Exhaust Brake(배기 브레이크), Brake Valve (브레이크 밸브), DC Solenoid(직류 솔레노이드), Plunger(가동자), Magnetomotive Force(기자력), Attraction Force(흡인력)

Abstract : Exhaust brake system for Diesel engines is composed of gate valve, pneumatic cylinder and exhaust brake valve with on-off solenoid. Exhaust brake valve which is core component of exhaust brake system should have characteristics such as high reliability and long life. In this paper, exhaust brake valve with on-off solenoid which is used for vehicle brake system was studied. For the performance evaluation of on-off solenoid, electromagnetic characteristics and dynamic characteristics are analyzed. As a basic study for the performance improvement of exhaust brake system, pneumatic circuit and pneumatic valve with on-off solenoid were suggested and the performance of the pneumatic valve was evaluated through tests.

기호 설명

- A_p : cross sectional area of cylinder
- b_p : friction coefficient of cylinder
- C : capacitor, E : electromotive force
- J_a : 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_1 : resistance of solenoid coil
- S : coil sectional area
- S_e : effective area of exhaust brake valve
- T : absolute temperature, W : air mass
- x_0 : initial displacement of spring
- x_p : cylinder displacement
- μ : magnetic permeability

1. 서 론

솔레노이드 액츄에이터는 작은 면위에 대해 직접 운동을 가능하게 할 뿐만 아니라 구조가 간단하여 신뢰성과 지속성을 보유하고 있고 경제적이어서 스위치, 릴레이, 밸브 및 사무자동화, 공장자동화 분야에 폭넓게 이용되고 있다¹⁾.

본 연구에서 대상으로 하는 직류 솔레노이드 방식 배기브레이크 밸브는 디젤엔진차량의 배기브레이크에 사용되는 공압용 온오프밸브로, 이 밸브가 장착된 차량은 기존의 기계식 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 있다²⁾. 때문에 배기브레이크용 솔레노이드는 배기브레이크 시스템 장착차량의 장거리 운행 및 굴곡이 있는 도로주행 여건들을 고려하여 설계되어야 하며, 고신뢰성 및 장수명화가 요구되고 있다³⁾.

본 연구에서는 배기브레이크용 솔레노이드의 성능 향상 및 최적설계 알고리즘 개발을 위한 기초 연구로서 배기브레이크 시스템 해석 이론을 제안하고, 대상 솔레노이드 밸브의 과도상태를 해석하여 성능향상을

접수일 : 2003년 8월 10일
윤소남책임지사 : 한국기계연구원 첨단기술산업연구부
E-mail : ysn688@kimu.re.kr, Tel : 042-868-7155
함영복, 조정대, 류병순 : 한국기계연구원 첨단기술산업연구부

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 솔레노이드 밸브의 내부구조도를 보이는 것으로 실린더 구동용 압축유의 방향을 제어하는 체크 밸브(불형식)와 가동자, 고정자, 코일 등으로 이루어져 매우 간단한 구조를 가진다.

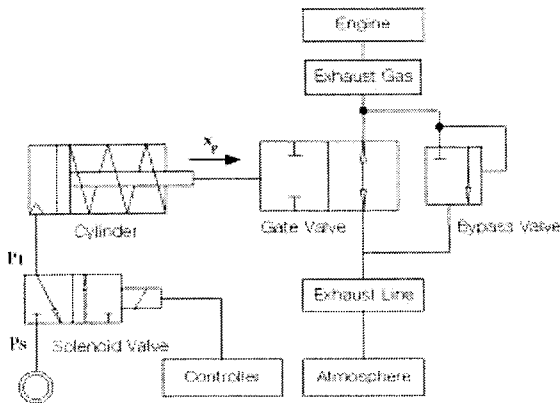


Fig. 1 Pneumatic circuit of exhaust brake system

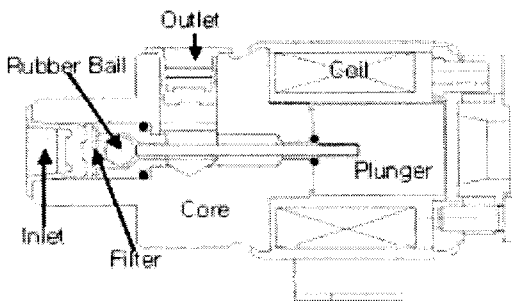


Fig. 2 Exhaust brake valve model

2.1 유한요소 이론해석

솔레노이드 밸브 내부에 발생하는 와전류 및 자속을 고려하여 시변계 자기방정식으로 표현하면 다음과 같다^[1-3)].

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

식(1)에서 \mathcal{J}_e 는 와전류밀도를 의미하며, 와전류 밀

도는 다음과 같이 정의된다.

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

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

$$\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_e}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{A_e}{r} + \frac{\partial A_e}{\partial r} \right) \right] = \sigma \frac{dA_e}{dt} - J_{os} \quad (3)$$

식(3)을 각 요소 e 에 대하여 갤러킨 법으로 정식화하면 삼각형 요소의 요소 행렬 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다^[7)].

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

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

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

여기서, R_{ext} 는 외부 회로저항을 나타낸다.

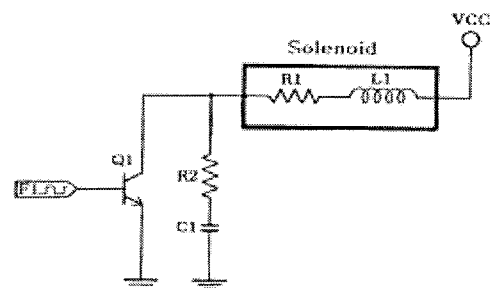


Fig. 3 Electric driving circuit for the exhaust brake valve

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

$$E^{(e)} = \frac{2\pi N}{S} \frac{d}{dt} \int_{s,e} r_e A^{(e)} ds = [G]^{(e)} \frac{d}{dt} \{A\}^{(e)} \quad (6)$$

여기에서, r_e 는 요소(e)의 중심의 반경이다. 식(5)의 회로방정식에서 누설 인덕턴스 항을 무시하고, 식(6)을 대입하면 식(7)의 관계가 얻어진다.

$$[G] \frac{d}{dt} \{A\}^{(e)} + R J_{(e)} = V \quad (7)$$

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

2.1 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.

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

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

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

식(8)과 식(9)로부터 오리피스를 통과하는 공기의 유속이 음속 이하인 경우에는 실린더 내부 압력(P_1)과 밸브 유효단면적(S_s)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 등온과정에서 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.

$$F = (P_1 - P_7)A_s = m_s \frac{d^2 x_s}{dt^2} + b_s \frac{dx_s}{dt} + k_s(x_s + x_p) \quad (12)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소법에 의한 과도상태 해석

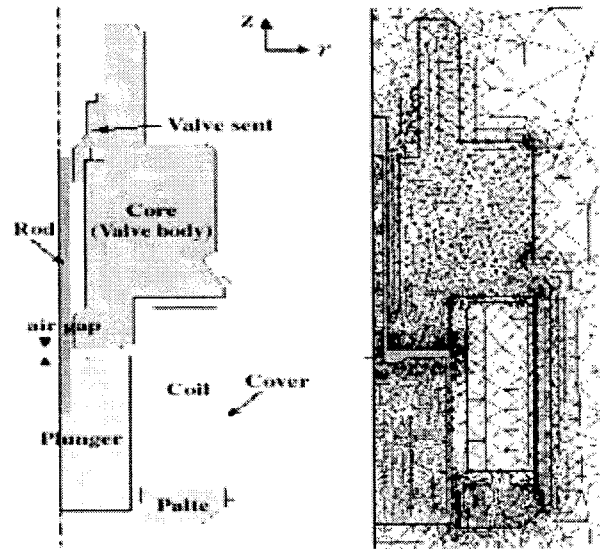
본 연구에서는 Table 1에 보이는 바와 같은 네가지 경우의 밸브를 대상으로 해석을 수행하였다.

Fig. 4 (a)는 유한요소 해석대상 모델을 보이고 있는 것으로, 솔레노이드 밸브는 구조상 축대칭으로 해석할 수 있으므로, 단면의 1/2만을 해석영역으로 선택하였다⁸⁾. Fig. 4 (b)는 해석영역에서의 요소 분할도

를 보이고 있는 것으로, 유한요소 해석에서는 공극 (air gap) 부분의 해석이 매우 중요하므로 다른 부분 보다 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.

Table 1 Coil specifications for analysis

Input Voltage [V]	Coil Dia. [mm]	Coil Turns [Turns]	Resistance [Ω]
12.0	0.41	1195	17.50
10.2	0.44	1035	15.18
9.0	0.47	926	13.58
8.0	0.50	832	12.20



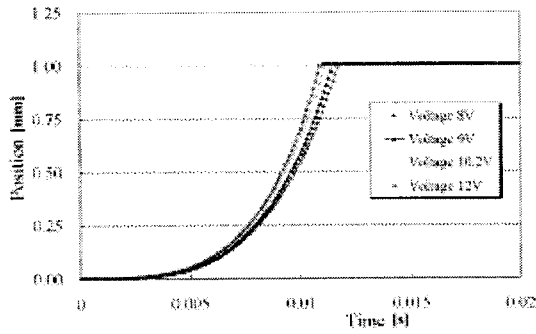
(a) analysis model (b) finite element mesh

Fig. 4 Schematic of a model and finite element mesh for analysis region

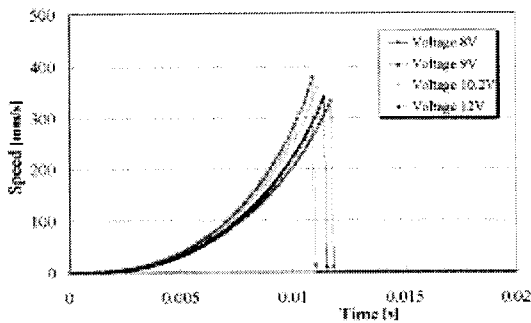
본 연구에서는 Fig. 2에 제안된 온오프 솔레노이드 밸브에 전압을 DC 8, 9, 10.2, 12[V]로 입력했을 때의 변위, 힘, 전류, 속도변화의 과도상태 특성을 해석하였다.

Fig. 5는 연구 대상 솔레노이드의 과도특성 해석 결과를 보이는 것으로, Fig. 5 (a)로부터 플런저의 변위는 초기에는 거의 변화가 없으나, 10 [msec] 부근에서 급격하게 이동하며, 이 때 플런저의 이동 속도

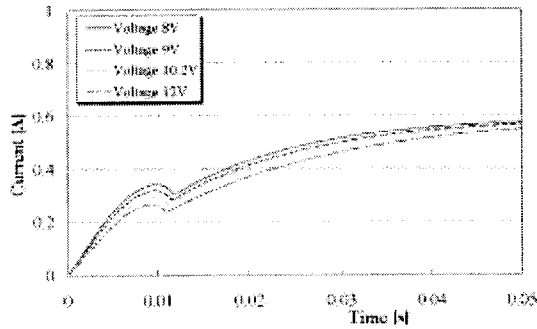
가 최대가 됨은 Fig. 5 (b)로부터 알 수 있다. 플런저가 이동을 완료하는 시간은 약 11~12[ms]이다. Fig.



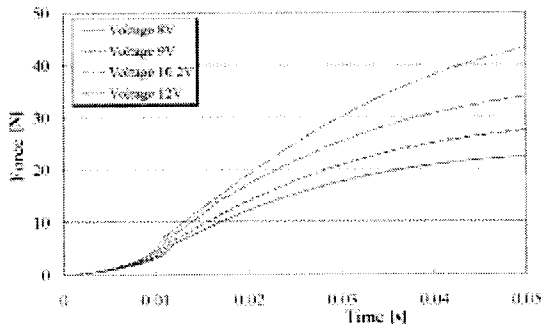
(a) Displacements of plungers



(b) Speeds of plungers



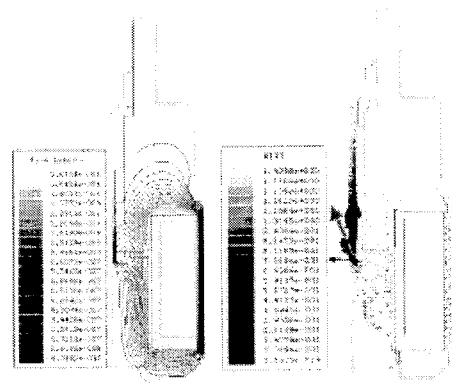
(c) Winding current



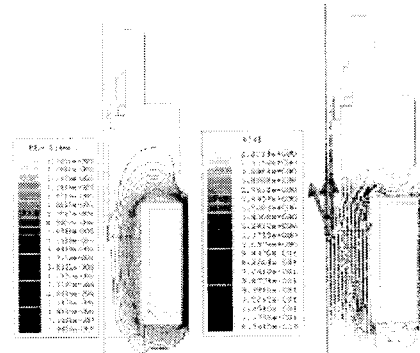
(d) Force

Fig. 5 Transient characteristics of solenoid valve

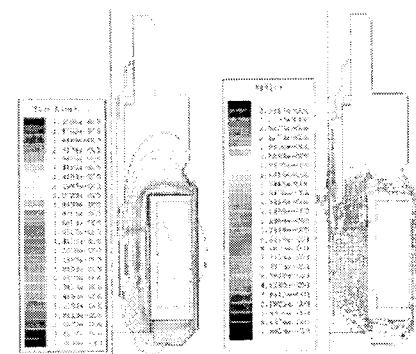
5 (c)와 5 (d)는 시간에 따라서 코일에 흐르는 전류와 이 때 발생하는 힘의 변화를 보이는 것으로, Fig. 5 (c)에는 코일에 흐르는 전류가 입력전압이 12[V]인 경우보다 8[V]인 경우가 더 크게 나타나지만, Fig. 5 (d)에서는 12[V]인 경우에 플런저에 작용하는 힘이 더 크게 나타난다. 이것은 플런저에 작용하는 힘이 단순히 전류에 비례하는 것이 아니라, 코일에 흐르는 전류와 전체 코일 권회수의 곱으로 표현되는 기자력의 크기에 비례하기 때문이다.



(a) t=1[ms]



(b) t=11[ms]



(c) t=50[ms]

Fig. 6 Distributions of magnetic flux and magnetic flux density

Fig. 6은 유한요소 해석 결과로써, 자속의 흐름과 자속밀도의 크기를 보이는 것으로, 구동 초기인 $t=1[\text{ms}]$ 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 $t=11[\text{ms}]$ 까지는 로드 부분과 플런저 부분의 자속 밀도가 같이 증가하지만, 플런저가 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 없기때문에 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 다음과 같다.

$P_s: 10[\text{bar}]$, $R: 287[\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}]$, $A_p: 7.1[\text{cm}^2]$, $m_p: 0.5[\text{kg}]$, $b_p: 1[\text{Ns}/\text{cm}]$, $k_p: 10[\text{N}/\text{cm}]$, $x_s: 0.1[\text{cm}]$

Fig. 7은 배기 브레이크 시스템의 시뮬레이션 결과를 보이는 것으로 10[Hz]의 특성을 갖는 밸브의 입력 특성에 따라 비교적 쉽게 시스템 성능에측이 가능함이 확인되었다.

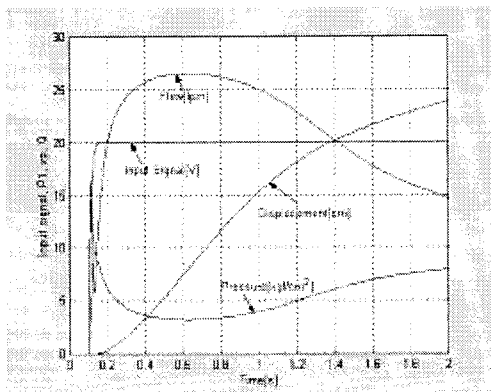


Fig. 7 Exhaust brake system characteristics

3.3 성능시험 결과

Fig. 8은 본 연구에서 제안된 배기 브레이크용 솔레노이드 밸브의 특성을 시험하기 위한 장치의 개략도를 보이는 것이며, Fig. 9는 연구대상 밸브의 계단 응답 시험 결과를 보이는 것으로, 이 시험은 밸브 입구 압력을 5[bar]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.

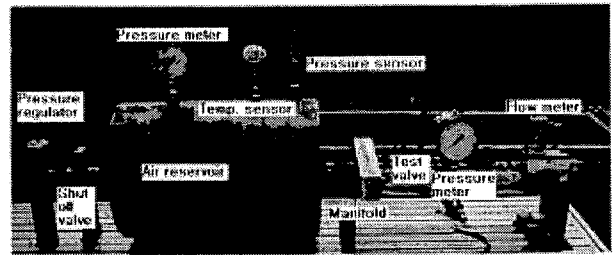


Fig. 8 Experimental apparatus

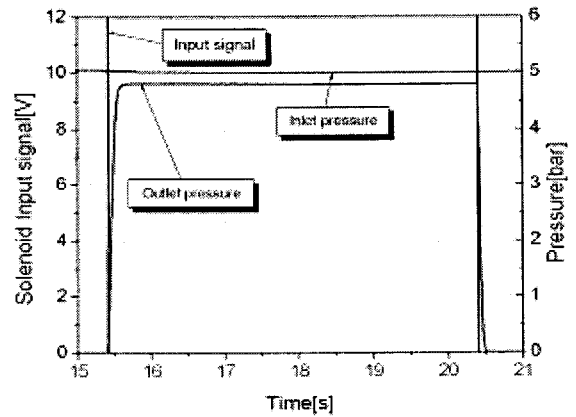
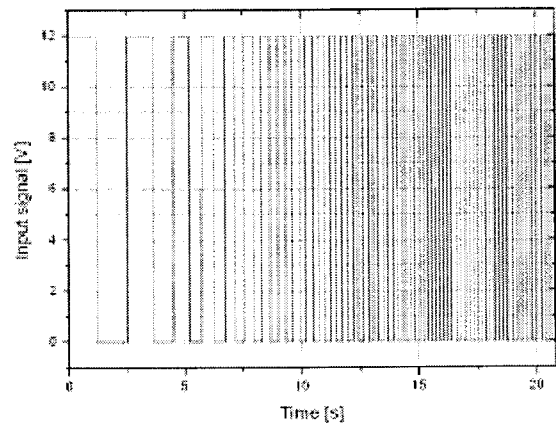
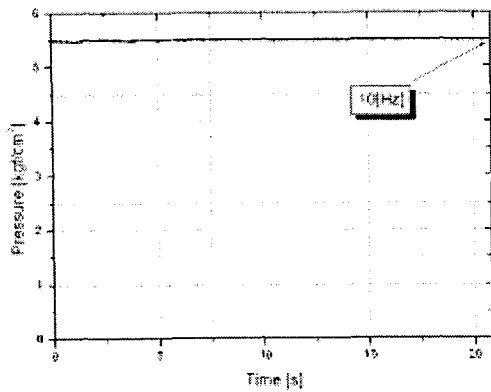


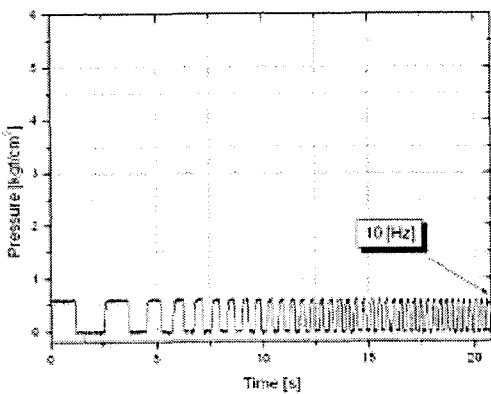
Fig. 9 Step response characteristics



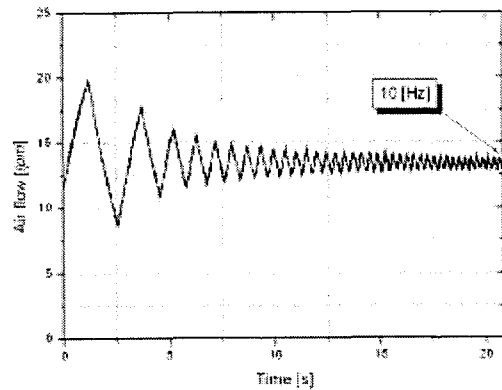
(a) Input signal variation



(b) Inlet pressure characteristics



(c) Outlet pressure characteristics



(d) Output flow characteristics

Fig. 10 Frequency characteristics test results

4. 결 론

본 연구에서는 배기브레이크 밸브의 성능향상 및 최적설계 알고리즘 개발을 위한 기초 연구로서, 유한요소해석을 통하여 대상 솔레노이드의 과도특성을 분석하였으며, 공압 온오프밸브 및 공압 온오프밸브 액

튜에이터로 사용되는 직류 솔레노이드를 제안하였다. 또한, 제안된 밸브는 성능시험장치를 통하여 그 특성이 평가되었다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 연구대상 솔레노이드의 플런지에 작용하는 힘은 기저력 특성에 비례하고, 20[N] 이상의 흡인력 특성 및 12[ms] 이내의 응답특성이 얻어짐이 유한요소해석을 통하여 확인되었으며, 실험을 통하여 연구대상 배기 브레이크밸브는 시정수가 80[ms]임이 확인되었다.
2. 본 연구에서 제안된 설계수법은 온-오프 솔레노이드밸브의 초기 치수를 결정하는데 매우 중요한 역할을 하며, 설계방향을 결정하는데 타당성이 있음이 실험을 통하여 확인되었다.
3. 본 연구에서 제안된 성능시험장치는 연구대상 밸브의 정적성능 및 동적성능시험이 모두 가능하며, 타당성 있게 설계되었음이 실험을 통하여 확인되었다.
4. 본 연구의 결과는 국내 중대형 디젤차량 배기브레이크 시스템 설계에 매우 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. I. Jang, J. Hur, S. Yoon, D. Hyun, "A Study on the Shape Optimization of Solenoid Actuator", 1998, KIEE, Vol. 47, No. 9, pp. 1325~1330.
2. S. Yun, B. Sung, 2001, "Exhaust Brake Techniques of Diesel Engine Vehicle", KSAE, Vol. 23, No. 3, pp. 38~42.
3. Riker, 2001, "Exhaust Brakes", Catalogue.
4. G. Kweon, 2000, "Dynamic Analysis of Fast Acting Solenoid Valves Using Finite Element Method", Master's thesis.
5. H. C. Roters, 1970, "Electromagnetic Device", John Wiley & Sons, Inc.
6. H. Tanaka, 1984, "A Study on High Speed Electromagnetic Valve", JSME, Vol. 50, No. 457, pp. 1504~1601.
7. I.-H. Choi, C.-S. Koh, T.-K. Chung, S.-Y. Hahn, 1991, "Finite Element Analysis for Electromagnetic System of Solenoid Actuator", Trans KIEE, Vol. 40, No. 11, pp. 1105~1113.
8. Ahn soft, 2002, "Maxwell 2D".