

디젤엔진 분사기용 솔레노이드의 형상에 따른 솔레노이드의 특성

조 규 학[†] · 라 진 홍* · 안 수 길**

(원고접수일 : 2003년 3월 3일, 심사완료일 : 2003년 4월 2일)

Characteristics of Solenoid on the Shape for Electric Control Injector in Diesel Engine

Kyu-Hak Cho[†] · Jin-Hong Rha* · Soo-Kil Ahn**

Key words : Injector(인젝터), Response Characteristics(응답특성), Solenoid(솔레노이드), Magnetic Force(기자력), Solenoid Shape(솔레노이드 형상)

Abstract

An electric control fuel injector of a diesel engine injection systems is very important apparatus for fuel economy and emission control. It's performance was influenced by hydraulic control valve and solenoid, especially the solenoid was important factor for operation and control of injector.

In this paper, we made solenoids of 4 type, which changed the shape of armature and core, and measured magnetic force according to input current, and analyzed characteristics of solenoid on the shape through the test results.

Nomenclature

E : voltage, V
 R : wire resistance, Ω
 μ_g : permeability, H/m
 x : clearance of armature and leg, m
 L : inductance, Ω
 N : number of turn,
 F_{mag} : magnetic force, N
 K : spring coefficient,

i : current, A
 Φ_s : flux of armature, kmax
 m : mass of armature, kg
 F_s : friction force, N

1. 서 론

디젤기관의 전자제어 인젝터는 유해배기가스의 제어와 연료소비율의 향상을 위한 중요한 장치로, 기관상황에 따라 분사시기, 분사량 및 분사율 등을

[†] 책임저자(부경대학교 대학원) E-mail:ch02104@netion.com, T : 019-624-5749

* 부경대학교 탐양호(E-mail:rajh@pknu.ac.kr)

** 부경대학교 기계공학부(E-mail:skahn@pknu.ac.kr)

제어한다. 전자제어 인젝터는 유압 제어밸브와 솔레노이드에 의해 작동한다. 솔레노이드는 전기 에너지를 자기 에너지로, 자기 에너지를 기계적인 에너지로 바꾸는 장치로서, 인젝터용 솔레노이드는 고압연료의 이동을 단속하는 유압 제어밸브를 제어하기 때문에 큰 힘이 필요하다. 또한, 고속에서는 짧은 분사기간 중에 제어가 이루어지기 때문에 응답시간이 짧아야 한다. 솔레노이드의 성능에 관계된 요소로는 입력전원⁽¹⁾, 자성재료, 솔레노이드 형상과 치수^{(2),(3),(4),(5)} 등을 들 수 있다. 특히, 솔레노이드의 형상이나 치수는 인가된 전기에너지가 자기에너지로 변환되는 과정에서 유효자속(기계적 에너지로 바뀌는 자속)의 형성에 큰 영향을 미친다. 따라서 솔레노이드의 형상과 치수는 솔레노이드의 성능에 큰 영향을 끼치는 중요한 요소이다. 솔레노이드에 관한 국내의 연구로는 황 등의 연구⁽⁶⁾와 최 등의 연구⁽⁷⁾가 있으나, 이들의 연구는 일정한 형상에 대한 것으로 형상에 대한 고려를 하지 않았다.

본 논문에서는 솔레노이드의 아마츄어와 코어의 형상을 변화시킨 4개의 솔레노이드를 설계·제작하여 솔레노이드의 형상이 흡인력과 응답특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 이론적 배경

솔레노이드의 작동은 전기적 과정, 자기적 과정, 기계적 과정으로 나누어 볼 수 있다.

전기적 과정은 입력전압과 입력전류에 의해 결정되는 과정으로 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$E = L \frac{di}{dt} + iR = N \frac{d\phi}{dt} + iR \quad (1)$$

입력전류는 시간에 따라 변하고, 입력전류의 변화에 따라 자속의 변화도 이루어진다. 이때 형성되는 자속은 자성재료의 B-H 곡선에 따라 비선형적으로 변화를 한다. 형성된 자속은 자성체인 코어와 코어 래그 및 아마츄어를 통하여 자로를 형성하여 아마츄어를 당기는 힘으로 작용하게 된다. 그러나, Fig. 1에서 보는 바와 같은 래그(leg)와 래그사이에 또는 래그와 아마츄어 사이의 누설자속

(leakage flux), fringing flux 등 유효자속이 되지 못하는 자속의 흐름이 생긴다. 이러한 누설자속과 fringing flux는 아마츄어의 치수와 형상에 따라 그 크기가 변한다. 따라서 고성능 솔레노이드의 제작을 위해서는 누설자속과 fringing flux를 최소화하는 솔레노이드의 형상과 치수의 결정이 요구된다.

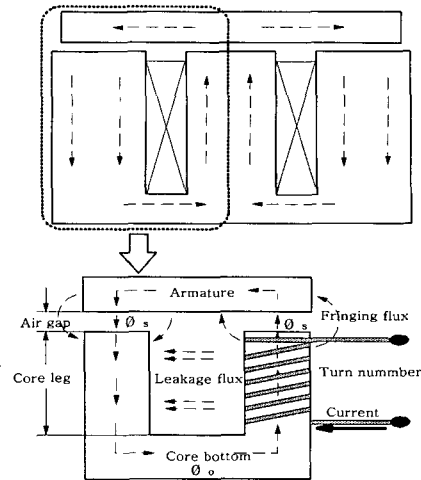


Fig. 1 Magnetic sub-model.

자기적 과정에서 유효자속(ϕ_s)을 구하게 되면 아마츄어에 작용하는 힘(기자력)을 구할 수 있다. 이를 수식화 하면 다음과 같다.

$$F_{mag} = \frac{1}{2} \phi_s^2 \frac{1}{\mu_g A_g} \quad (2)$$

여기서 ϕ_s 는 아마츄어를 통과 하는 자속, μ_g 는 공극에서의 투자도, A_g 는 래그와 아마츄어가 마주보는 면적이다.

기계적 과정은 아마츄어에 작용하는 기자력이 아마츄어를 움직일 때 아마츄어에 작용하는 힘들의 평형을 고려한 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{mag} = m \frac{d^2x}{dt^2} + Kx + F_s \quad (3)$$

여기서 m 은 아마츄어의 질량, x 는 아마츄어와 래그사이의 갭, K 는 스프링상수, F_s 는 초기 스프링력이다.

3. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 솔레노이드 실험장치도를 Fig.2에 나타내었다. 솔레노이드의 아마추어와 래그사이의 갭(gap)은 조정핸들을 통하여 0.1mm에서 0.5mm까지 0.1mm단위로 조정하여 고정볼트로 고정하였으며, 다이얼 게이지로 이를 측정하였다. 전원공급장치는 30V까지 조정되는 최대출력전류 6A의 장치로서 솔레노이드의 인가전압은 24V, 입력전류는 0.5A에서 4A까지 0.5A 단위로 인가하였다. 아마추어에서 작용하는 힘(traction force, magnetic force)을 로드셀(load cell)로 측정하고, 앰프와 오실로스코프를 통하여 컴퓨터에 저장하였다. 측정을 위하여 사용한 로드셀은 88.9N의 용량을 가진 Sensotec model 34 type이다.

실험에 사용한 솔레노이드는 Fig 3에 나타난 것과 같이 일반적인 형태인 A type, 아마추어를 변형한 B type, 코어 래그를 변형한 C type, 아마추어와 코어 래그의 변형을 조합한 D type의 4가지 형상으로 하였으며, B type과 D type에서 래그사이의 간극(leg clearance)을 0.25mm, 0.5mm, 0.75mm, 1mm, 1.25mm로 하였다. 아마추어의 질량은 A type과 D type은 12.5g이고, B type과 D type은 7.5g이며, 감은 코일의 굵기와 권수는 형상에 상관없이 0.3mm, 300회로 하였다. 솔레노이드의 제작에 사용한 자성재료는 Permalloy 78을 사용하였다.

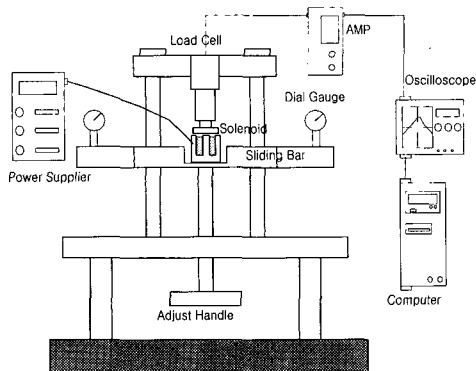


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1 Test Mode.

Shape	Input Voltage	Input Current	Air Gap	Leg Clearance (B&D type)
A	24V	0.5A	0.1mm 0.2mm 0.3mm 0.4mm 0.5mm	0.25mm 0.5mm 0.75mm 1mm 1.25mm
B		1A		
B		1.5A		
B		2A		
C		2.5A		
C		3A		
C		3.5A		
D		4A		

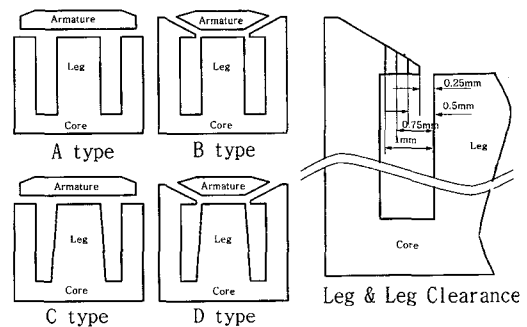


Fig. 3 Shape of Solenoids.

4. 결과 및 고찰

4.1 래그사이의 간극에 따른 비교

B type과 D type 솔레노이드는 코어 래그 끝단이 변형된 형태로 되어있다. 이 부분의 간극이 짧게 되면 아마추어를 통하지 않고 코어 래그 끝단으로 누설되는 자속의 양이 많아지게 되어 유효자속의 감소를 가져온다. 따라서 B와 D의 형상에서 코어 래그 끝단의 간극을 결정하는 것이 중요하다.

Fig. 4의 (a)와 (b)는 B type에서 아마추어의 양정이 0.1mm와 0.3mm에서 코어 래그의 간극에 따른 흡인력의 경향을 나타내었다. (a)에서는 동일한 입력전류의 크기에서 코어 래그의 간격이 0.75mm까지는 흡인력의 상승을 보이며 코어 래그의 간극이 더 커질 경우 조금 낮아지는 경향을 보인다. 코어 래그 끝단의 간격이 0.75mm이하에서는 간극의 증가에 따라 누설되는 자속이 감소함으로 동일한 입력전류에서도 아마추어에 작용하는 자속이 증가한 것으로 추측된다. 반면, 0.75mm이상에서는

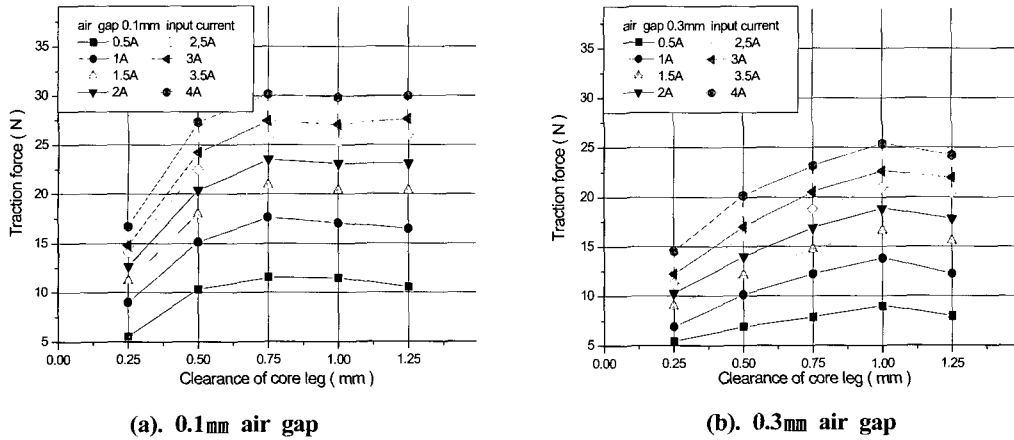


Fig. 4 Traction force of solenoid according to core leg clearance for B type.

누설자속의 증가는 없어 동일한 자속이 형성되거나 아마추어의 접촉면적이 감소하여 흡인력이 감소한 것으로 생각된다. (b)에서는 코어 래그의 간격이 1mm까지 흡인력이 증가하는 현상을 보이고 이후엔 감소하는 경향을 보인다. 이것은 (a)에서 설명한 바와 같은 이유에서 일어나는 현상으로 생각된다. 아마추어의 양정이 0.2mm까지는 (a), 0.3mm 이후에서는 (b)와 같은 경향을 나타내었다. 이는 솔레노이드의 양정이 증가함에 따라 코어 래그 끝단으로 누설되는 자속의 양과 아마추어로 넘어가는 자속의 비가 변함을 의미한다. 따라서 B type의 경우 래그사이의 간격은 0.75mm와 1mm일 경우에 대하여 고찰하고자 한다.

Fig. 5는 D type에서 래그사이의 간극에 따른 흡인력의 비교이다. B type은 양정에 따라 래그 간극이 0.75mm와 1mm에서 가장 큰 흡인력을 나타내었으나, D type은 아마추어의 양정에 상관없이 래그사이의 간극이 1mm일 경우가 가장 큰 흡인력을 나타내었다. 래그사이의 간극이 1mm전 후에서 흡인력의 감소는 B type의 이유와 동일하나, 아마추어의 양정에 상관없이 래그사이의 간극이 1mm에서 최대 흡인력을 나타내는 이유는 코어의 변형에 따른 자속의 증가로 판단된다. 따라서 D type의 경우 래그사이의 간극은 1mm일 경우에 대하여 고찰하고자 한다.

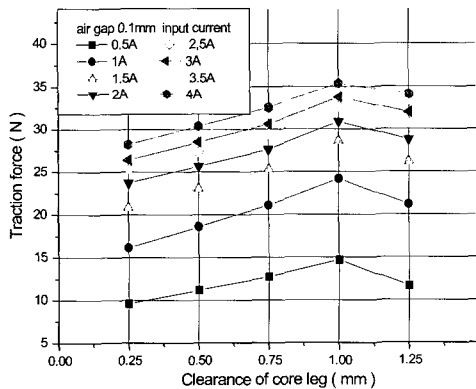


Fig. 5 Traction force of solenoid according to core leg clearance for D type.

Fig. 4와 5의 결과로 코어 래그 끝단의 간극은 양정에 따른 코어 래그 끝단의 누설자속과 아마추어의 접촉면적을 고려하여 결정하여야 함을 알 수 있다.

4.2 아마추어 형상에 따른 비교

Fig. 6은 앞에서 결정된 코어 래그의 간격인 0.75mm와 1mm에서 A type과 B type의 흡인력을 비교한 그림이다. (a)와 (b) 모두 A type에 비하여 B type의 흡인력이 낮은 것으로 나타났다. 그러나, 그 차이가 크지 않으므로 아마추어의 무게를 고려한다면 응답성은 역전된 결과를 가져올 것으로 생각된다. 앞에서 언급한 식(3)에서 초기 스프

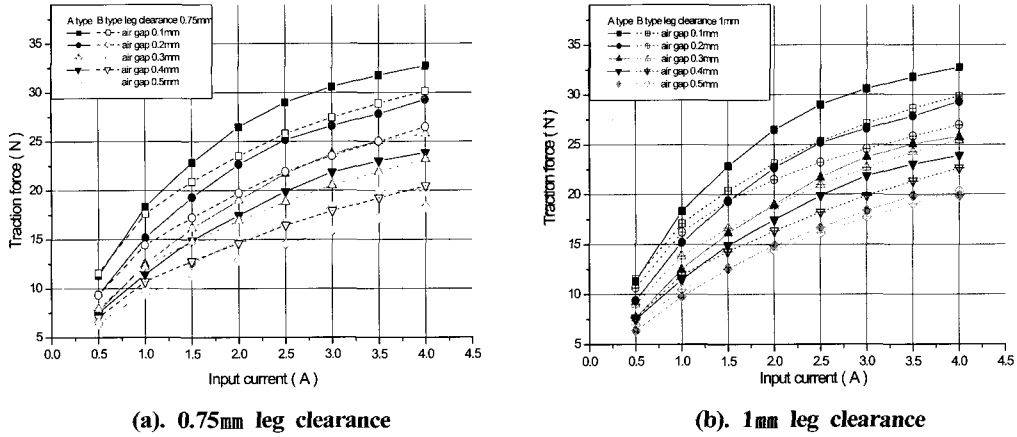


Fig. 6 Traction force of solenoid according to shape of armature.

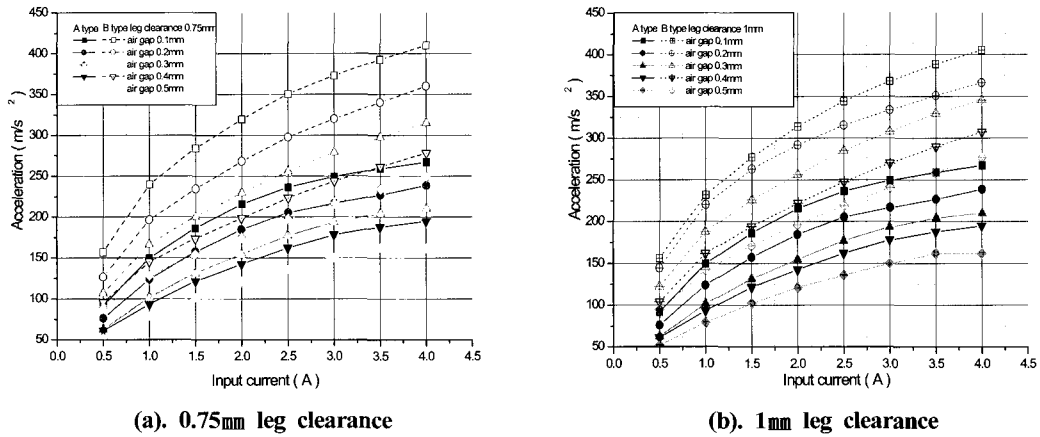


Fig. 7 Calculation of acceleration according to armature weight.

링력과 스프링에 의한 반발력을 무시하고 무게에 따른 가속도를 이론적인 계산($F = m \times a$)으로 비교한 결과를 Fig.7에 나타내었다. 가속도의 비교에서는 A type에 비하여 B type의 가속도가 1.7 배 정도였다.

4.3 코어 래그의 형상에 따른 비교

Fig. 8은 코어 래그를 변형한 C type과 A type의 흡인력을 비교한 그래프이다. 입력전류가 낮은 경우 형상에 상관없이 비슷한 흡인력을 가지나, 입력전류가 증가할수록 래그의 형상을 변형한

C type의 흡인력이 더 커짐을 알 수 있다. 이는 낮은 입력전류의 경우 솔레노이드 코어에 형성되는 자속이 포화되지 않기 때문에 코어의 크기에 영향을 받지 않으나, 입력전류의 증가에 따라 코어 래그에 형성되는 자속이 포화가 되기 때문으로 생각된다. 즉, 코어 래그의 하단부에 형성된 자속은 코어를 지나면서 누설되어 하단부가 포화자속이 형성되어도 코어 래그의 끝단(아마추어 방향)은 포화에 이르지 못한다. 따라서 아마추어에 작용하는 자속인 코어 래그의 끝단에 형성된 자속이 코어 래그 하단부의 면적에 의해 제한을 받게 되는 것이다.

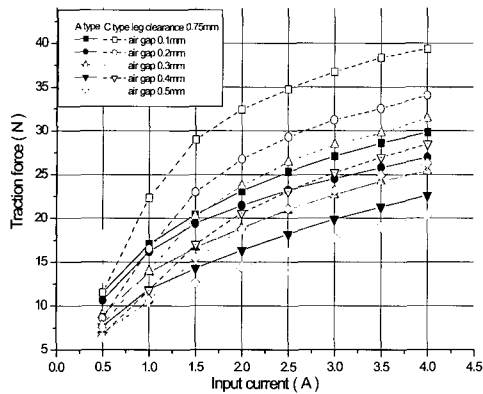


Fig. 8 Traction force of solenoid according to shape of core leg.

4.4 아마추어와 래그의 형상을 조합한 결과

4.2와 4.3절에서 기본형인 A type보다 B type 나 C type이 솔레노이드의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되는 결과를 얻었다. 따라서 이를 조합한 형태인 D type의 흡인력을 비교할 필요가 있다.

Fig. 9는 A type과 D type의 흡인력을 비교한 것으로 아마추어의 무게가 작은 D type이 더 큰 흡인력을 나타낸다. 이는 B type과 달리 코어의 형상을 변화시켰기 때문에 향상된 것으로 생각된다.

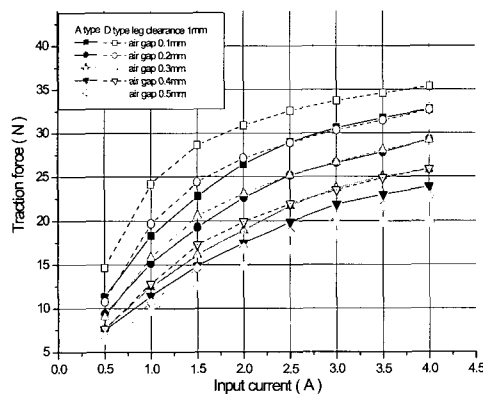


Fig. 9 Traction force of solenoid compared A type with D type solenoid.

5. 결 론

이상의 실험결과와 분석을 통하여 다음과 같은

결론을 얻었다.

1) B type과 D type에서 코어 래그 끝단의 간극은 아마추어의 양정에 따라 솔레노이드의 흡인력에 큰 영향을 미치는 것을 알았다.

2) 아마추어 형상을 변형시킨 B type은 A type에 비하여 흡인력이 감소하였으나, 아마추어 질량의 감소로 인한 응답성의 향상을 확인하였다.

3) C type은 A type에 비하여 낮은 입력전류에서는 흡인력이 비슷하지만, 입력전류가 증가할수록 흡인력이 증가하였다.

4) 아마추어와 코어 래그를 동시에 변화시킨 D type에서 흡인력과 응답성의 향상을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2002년도 두뇌 한국 21사업의 지원을 받아 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] Takashi Kajima, "Development of a High-Speed Solenoid Valve-Investigation of the Energizing Circuits", IEEE Transaction on Industrial Electronics Vol. 40, No.4, pp428~435, 1993.
- [2] Michael M. Schechter, "Fast Response Multipole solenoids", SAE 820203, 1982
- [3] Takeo Kushinda, "High Speed Powerful and Simple solenoid Actuator 'DISOLE' and its Dynamic Analysis Results", SAE 850373, 1985.
- [4] Takashi Kajima, Yoshihisa Kawamura, "Development of a High - Speed Solenoid Valve - Investigation of Solenoids", IEEE Transaction on Industrial Electronics Vol. 42, NO.1, pp1~7, 1995.
- [5] M. A. Ganser, "Common Rail Injectors for 2000 bar and Beyond", SAE 2000-01-0706, 2000.
- [6] 황재원 외3명, "고속용 솔레노이드 설계를 위

한 수치해석적 연구”, 한국 자동차공학회논문
집 제7권 3호, pp94~102, 1999.

- [7] 최영하 외2명, “스플벨브를 이용한 축압식 연
료분사계의 작동특성에 관한 연구”, 한국액체
미립화학회지, 제6권 1호, pp1~8, 2001.



라진홍 (羅鎭洪)

1957년 11월 23일생. 1983년 8월 부
산수산대학교 기관학과 졸업. 1989년
2월 동대학원 기관공학과 졸업(석사).
1996년 2월 동대학원 기관공학과 졸
업(박사). 현재 부경대학교 탐양호 기
관장.

저 자 소 개



조규학 (曹圭學)

1969년 1월 27일생. 1991년 2월 부산
수산대학 기관공학과 졸업. 2001년 2
월 부경대학교 대학원 제어기계공학
과 졸업(석사). 현재 동대학원 박사
과정.



안수길 (安秀喆)

1943년 5월 27일생. 1967년 2월 한국
해양대학교 기관공학과 졸업. 1979년
2월 동경공업대학교 이공학대학원 기
계공학과 졸업(석사). 1982년 2월 동
대학원 기계공학과 졸업(공학박사).
현재 부경대학교 기계공학부 정교수.