

〈논 문〉 SAE NO. 98370005

유닛인젝터용 고속응답 솔레노이드 설계 및 응용에 관한 연구

A Study on Design and Application of High Response Solenoid for Unit Injector

황재원*, 양이진*, 정영식***, 이상만**, 채재우*
J. W. Hwang, I. J. Yang, Y. S. Jeong, S. M. Lee, J. O. Chae

ABSTRACT

Most of fuel-injection system operated with mechanical methods are difficult to control the injection quantity and injection timing as well as injection rate exactly. Moreover high pressure injection scheme is never be realized with conventional one. On the other hand, serious air pollution can be lessened with injection system equipped with those functions. Therefore, electronically controlled Unit Injector(UI) appeared to satisfy above mentioned desires. However, it is still difficult that the most important part, especially solenoid valve, is analyzed precisely, because of the existence of complex combination of electromagnetics, electrics and dynamic problems.

In this study, experimental and theoretical analysis are accomplished for understanding of solenoid valve characteristics and further its design. As the result, the follows are obtained 1) As the increase of wire diameter, the response time became shorter and optimal inductance existed in relative with the response time and wire diameter. 2) According to increasing input voltage, the traction force increased, otherwise the response time was shortened. 3) As the increase of armature stroke, the traction force decreased and the response time became longer.

주요기술용어 : Unit Injector(유닛인젝터), Electromagnetic(전자기), Response Time(작동 시간), Traction Force(흡인력)

기 호 설 명

A : Projected area

B : Magnetic inductance

F_{mech} : Armature counterforce

F_m : Traction force

H : Magnetic field strength

I : Current

L_0 : Initial inductance

* 정회원, 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 기계공학과

*** 서울대학교 터보동력기계연구센터

R	: Wire resistance
t_1	: Waiting time
t_2	: Rising time
U	: Voltage
w	: Number of turn
Θ	: Magnetomotive force
Φ	: Magnetic flux
δ	: Stroke
μ_0	: Permeability of vacuum($4\pi \times 10^{-7} \text{Vs/Am}$)

1. 서 론

디젤기관은 고효율, 고출력이라는 장점 때문에 차량용, 선박용 및 발전용 등의 동력원으로서 각광을 받고 있으나 고유한 확산연소방식으로 인해 매연배출, 진동과 소음 발생 등이 해결되어야 할 문제로 남아 있다. 이러한 디젤기관은 연료분사 펌프에 의해 분사되는 기계적 시스템이 주로 이용되고 있으며 분사량, 분사형태, 분사시기 및 분사율의 조절에 한계가 있다. 따라서 최근들어서는 분사계의 전자화와 더불어 연료의 고압화를 피함으로써 앞서 언급한 한계를 극복 및 성능개선과 배기가스 청정화를 위한 연구가 다수 수행되고 있다.^{1)~4)} 분사펌프와 분사노즐을 1개의 단체로한 유닛인젝터에 대한 연구가 그 중에 하나이며 배기가스 규제가 엄격해짐에 따라 고속·고압의 솔레노이드 밸브를 ON/OFF시켜 분사량을 제어하는 고압(150Mpa 이상)유닛인젝터에 대한 개발에 초점이 맞추어 지고 있다. 이와같은 용도로 사용되는 고용량 고속응답용 솔레노이드는 이미 자동차용 및 산업용의 전자밸브로 서로 다른 용도에 쓰이고 있다.^{5)~8)} 이러한 솔레노이드가 유닛인젝터에 사용되는 경우에는 기존의 분사장치 혹은 솔레노이드와 상이하야 그의 전자기적 특성 뿐만 아니라 연료의 유체특성이 함께 고려되어야 한다.⁹⁾ 현재 독일 및 일본에서는 유닛인젝터용 솔레노이드 개발 및 유닛인젝터 개발이 이루어져 디젤기관에 장착 실용화 단계에 이르고 있으나 국내에서의 연구는 전무한 상태이며, 특

히 유닛인젝터의 핵심이라 할수 있는 솔레노이드 해석 또한 전혀 이루어져 있지 않은 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 유닛인젝터를 구동하는 솔레노이드에 동역학적인 개념을 도입하여 그 성능을 예측할수 있는 프로그램 뿐만 아니라 이론적 해석의 결과를 바탕으로 직접 솔레노이드를 제작함으로써 성능예측의 가능성을 파악하고 솔레노이드의 최적의 작동조건을 찾아내는 것을 목적으로 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 솔레노이드 설계

솔레노이드 구동시 코어와 아마추어간에 서로 작용하는 힘은 가장 중요한 요소이며, 솔레노이드의 작동흡인력은 다음과 같이 주어진다.^{10)~11)}

$$F_m = \frac{AB^2}{2\mu_0} \quad (1)$$

만일 쇄교자속(Leakage Flux)이 없고, 자기유도가 각 단면적에서 균일하다면, 자속밀도(Magnetic Flux)는

$$\phi_m = B_i A_i = \text{const.} \quad (2)$$

로 표현이 된다. 이 자기장 주위의 전압은 기자력(Magnetomotive) Θ 와 같으며, 이것은 코일의 전 전류(Total Current)로 정의된다.

$$\Theta = I_w \quad (3)$$

그러나 이 값은 쇄교자속등을 고려하지 않았으므로 단지 근사값을 가질 뿐이다. 기자력이 일단 결정이 되면, 자기장의 코일은 계산이 되고 식은 맥스웰방정식(Maxwell Equation)을 따른다. 만일 이 솔레노이드를 액추에이터(Actuator)로 사용한다면, 자기력과 행정그래프가 필요로 한다. 만일 평면형 아마추어(Armature)와 베이스를 가지고 있다면, 암페어(Ampere)의 법칙으로부터,

$$\Theta = H\delta\delta = \frac{B\delta\delta}{\mu_0} \quad (4)$$

$$F_m = \frac{\Theta^2 \mu_0 A_1}{2\delta^2} \quad (5)$$

$$t_1 = \frac{L_0}{R} \ln \frac{1}{1 - \frac{R}{U} \left(2F_{mech} \frac{\delta_0}{L_0} \right)^{1/2}} \quad (6)$$

$$t_2 = \left(\frac{3\delta_0 m}{U \left(\frac{F_{mech}}{2\delta_0 L_0} \right)^{1/2} - R \frac{F_{mech}}{L_0}} \right)^{1/3} \quad (7)$$

여기서 t_1 과 t_2 는 고속용이나 ON/OFF 형태의 솔레노이드 설계시 꼭 필요한 변수로서 일단 정역학적인 힘이 구하여 졌을 경우, 다음과 같은 절차를 따른다.

$$F_m(t) = F_{m0}(1 - e^{-t/\tau})^2 : \text{힘의 형성시} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{\mu_0 l_f a b}{\pi^2 \rho \delta (a/b + b/a)} : \text{사각인 경우} \quad (9)$$

주어진 전압에서 작은 코일 저항은 반응시간을 줄여주지만 다음과 같은 파워의 손실, 또는 열로써 방출된다.

$$P_v = U^2/R \quad (10)$$

2.2 솔레노이드 서지 (Surge)

솔레노이드에 전기를 통전하면 코일에 의해 전기에너지가 자기에너지로 변환되며, 코일에 변환된 자기에너지가 축적된다. 이때 전기를 차단하면 축적된 자기에너지는 역으로 전기에너지로 변환되어 코일을 파손시킨다. 서지전압은 사용전압의 10~30배로 자동차 솔레노이드의 구동전압이 12V인 것을 고려하면 120~360V 정도의 크기로 발생될 수 있다. 또한 역기전압은 서지전압의 전류가 도선을 따라 권선된 코일에 흘러 연결한 코일에 전류가 유발되며 유발된 전류를 입력신호로

인식한 부품은 오동작을 하여 정확한 제어가 불가능하며 소음이 발생하기도 한다. 따라서 기기의 오동작과 기능저하를 방지하기 위해 서지보호 회로를 만든다. 서지보호 회로는 발생된 서지를 흡수할 수 있는 반도체 소자를 이용하여 만들며 본 연구에서는 솔레노이드에 병렬로 부착하여 서지를 회로내부의 각 소자의 작용에 의해 흡수하여 다른 회로에 영향을 미치지 않게 하였다.

3. 실험 장치 및 방법

Fig.1은 솔레노이드의 전류의 인가에 대한 동적 특성을 파악하기 위한 솔레노이드 실험장치를 나타낸 것이다. 솔레노이드는 베드(Bed)위에 단단히 고정되어 있으며 그 위에 크기가 28mm, 두께 0.35mm, 코어의 길이 17mm인 규소강판을 투영면적 8mm×20mm로 적층하였고, 보빈은 고온에서의 원활한 동작을 위하여 테프론을 사용하여 제작하였다. 스프링이 아마추어를 지탱하고 있으며 이 스프링은 원하는 Set Force로 볼트에 의해 조정될 수 있게 하였다. 아마추어 끝 부분에는 아마추어의 위치를 확인하기 위해 Lift Sensor와 영구자석을 설치하였다. 또한 Lift Sensor로 부터의 신호는 오실로스코프의 화면에서 확인할 뿐 아니라, PC에 파일로 저장이 가능하게 하였다. 솔레노이드 지지대와 센서의 지지대는 자화가 되지 않는 Stainless steel(SUS304)을 사용하였고, 아마추어는 적층이 곤란한 문제로 순철을 사용하였다. 그리고, 행정거리는 틈새 게이지를 사용하여 조절하였다. 본 연구에서 사용되어 지는 스프링은 Falling time(전류의 Cut-Off 시간 후 아마추어가 완전히 코어로부터 떨어지는 시간)의 측면에서 코일재질의 보자력과 함께 중요한 요소이다. 특히, 스프링의 스프링상수가 높은 경우 솔레노이드의 빠른 응답성을 기대할 수 있게 된다.

본 실험에는 스프링 상수는 2.5kg/mm 및 3.5kg/mm인 스프링을 사용하여 솔레노이드 아마추어 끝 부분에 고정하였다. 또한, 솔레노이드 제어를 위해 전류의 형태를 제어하는 방식인 PWM(Pulse Width Modulation)방식을 사용하였다.

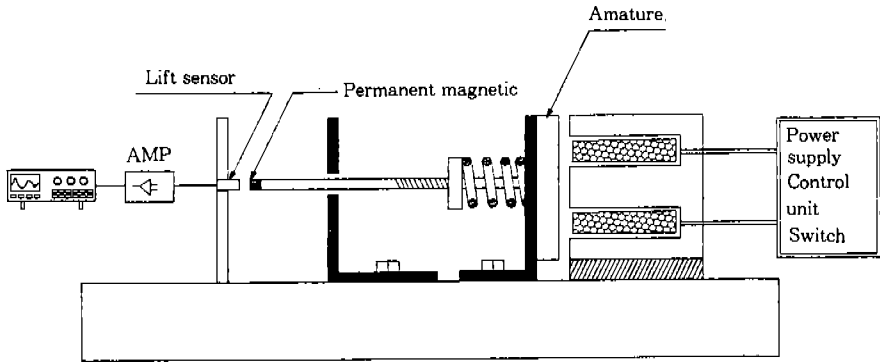


Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Device

전원은 차량용 배터리를 High Pass Filter 두 개와 연결하여 안정된 12V 및 24V를 사용하였다. 그리고, 솔레노이드의 서지를 방지하기 위하여 솔레노이드의 순전압 방향으로 다이오드를 연결하였으며, 이를 통해 서지전압을 약 40% 정도 줄였다. 솔레노이드의 전류를 인가하면서 스위치 역할을 하는 FET(Field Effect Transistor, IRFP 250)는 허용전류가 약 25A, 전압이 24V를 사용할 경우에는 2개를 병렬로 연결하였다. 여기에서 PWM방식을 주기 위한 펄스를 만드는 것은 4개의 Timer인데 여기에서 나오는 펄스를 Booster (7667)에서 증폭하여 FET에 인가된다. Fig.2는 실제로 오실로스코프로부터 얻은 전류와 아마추어 리프트와의 관계를 나타낸 것이며 이 결과로부터 Waiting time(전류가 인가되어서 아마추어가 움직이기 전까지 걸리는 시간)과 Rising time(실제로 아마추어가 움직이기 시작하여 코어에 닿을 때까지의 시간)을 각각 결정하였다.

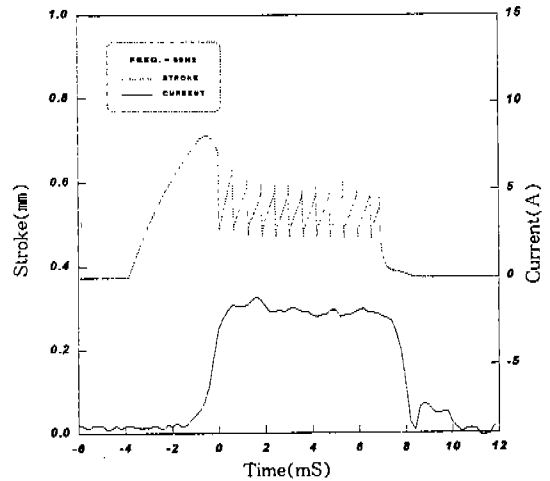


Fig.2 Current and Armature Moving Diagram

이다. 그림에서 입력전압에 따라 작동시간은 크게 줄어드는 것을 알 수가 있으며, 직경 0.9mm의 경우가 0.6mm와 0.4mm보다 응답속도가 빠르다는 것을 알 수 있다.

4. 실험결과

4.1 입력전압의 변화에 따른 작동시간의 영향

Fig.3은 솔레노이드 작동주파수가 50Hz, 아마추어의 질량이 40g이며, 상온(20℃)에서 코일 직경과 감은횟수가 각각 0.4mm×190, 0.6mm×106, 0.9mm×72회인 경우에 입력전압 변화에 따른 Waiting time 및 Rising time을 나타낸 것

4.2 코일의 인덕턴스와 작동시간

Fig.4는 동일조건에서 코일의 인덕턴스의 변화에 따른 Waiting time 및 Rising time에 대한 그래프이고, Fig.5과 Fig.6는 최적의 인덕턴스의 값을 각 코일의 직경에 따라 나타낸 그래프이다. 그림에서 코일의 인덕턴스의 변화에 따라 작동시간은 일반적으로 인덕턴스가 증가할수록

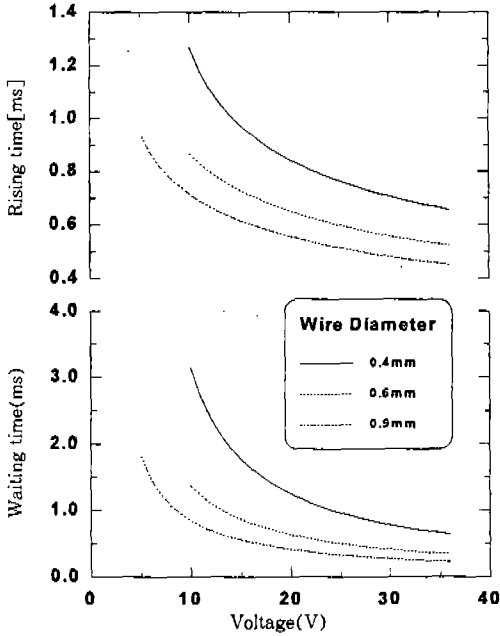


Fig.3 Variation of Response Time on Input Voltage and Wire Diameter (Experimental Data)

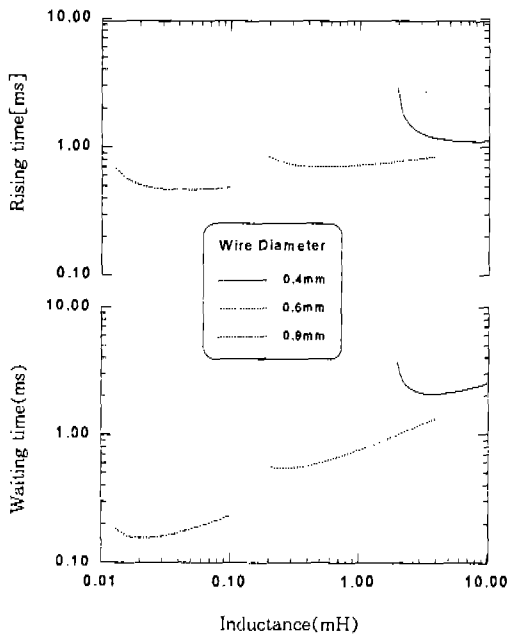


Fig.4 Variation of Response Time on Inductance

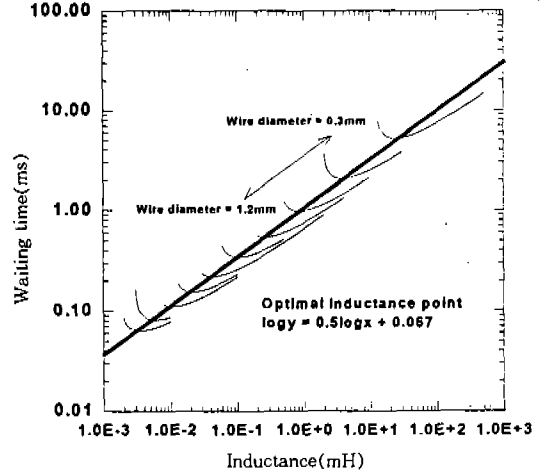


Fig.5 Variation of Optimal Waiting Time on Inductance and Wire Diameter (Theoretical Result)

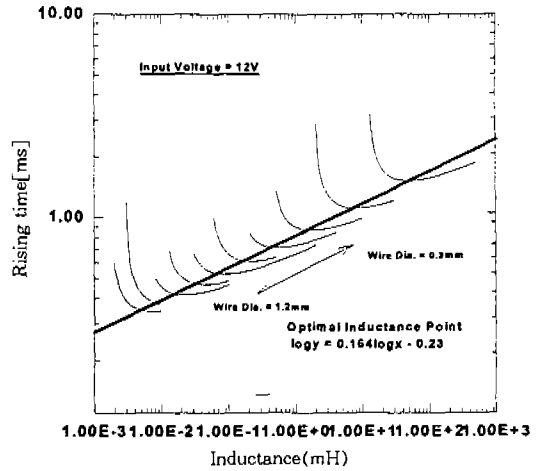


Fig.6 Variation of Optimal Rising Time on Inductance and Wire Diameter (Theoretical Result)

작동시간은 길어지며 지나치게 작은 인덕턴스도 작동시간을 느리게 한다. 또한 각각 최적의 인덕턴스 값이 존재한다는 것을 볼 수가 있으며 그 최적점 역시 어떠한 함수의 형태로 나타내어지는 것을 알 수가 있다. 전체적으로 볼 경우 직경 0.9mm의 경우가 0.6mm와 0.4mm보다 응답속도가 빠르다는 것을 보여주며, 이는 코일의 직경이 크

면 볼수록 코일의 감는 횟수가 작아지고 이로 인해 인덕턴스가 작아졌기 때문이다.

4.3 아마추어 질량과 작동시간

Fig.7는 동일조건에서 아마추어의 질량의 변화에 따른 Waiting time 및 Rising time을 나타낸 것이다. 그림에서 볼수 있듯이 코어의 질량 변화에 따라 Waiting time은 거의 일정하며 이는 Waiting time시에는 동역학적인 것보다는 전자기력의 영향이 크다는 것을 보여준다. 한편, Rising time은 아마추어 질량의 증가에 따라 증가하며, 이는 Rising time시에는 전자기력과 동역학적인 효과가 함께 영향을 미치는 것으로 보인다. 직경 0.9mm를 사용할 경우가 0.6mm와 0.4mm보다 응답속도가 빠르다는 것을 알수 있으며, 코일의 직경이 크면 볼수록 코일의 내부저항이 작아 인가된 전류의 상승이 있었기 때문이다.

4.4 코일의 저항과 작동시간

Fig.8은 코일의 저항의 변화에 따른 Waiting time 및 Rising time에 대한 그래프이다. 여기

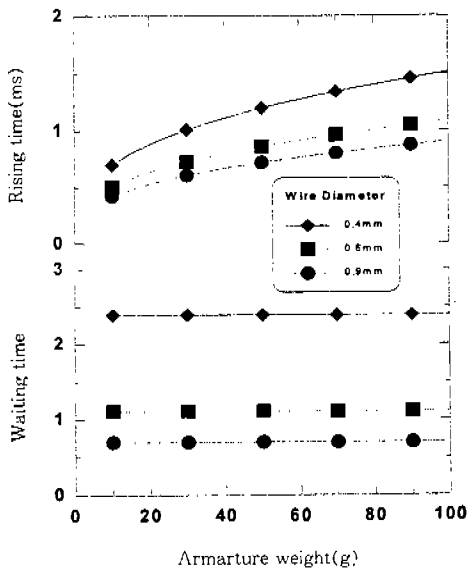


Fig.7 Variation of Response Time on Armature Weight and Wire Diameter (Experimental Data)

에서 코일저항의 조절은 코일 외부에 저항을 직접 달아서 사용하였다. 일반적으로 코일저항의 감소에 따라 작동시간은 줄어드는 것을 볼 수가 있으며, 직경 0.9mm의 경우 0.4mm와 0.6mm보다 응답속도가 빠르다는 것을 보여준다. 이는 0.9mm의 경우는 전류의 상승으로 응답속도가 빨라진 것을 보여준다.

4.5 행정거리와 작동시간

Fig.9은 행정거리의 변화에 따른 Waiting time 및 Rising time에 대한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 행정거리의 감소에 따라 작동시간은 줄어드는 것을 볼 수가 있으며, 직경 0.9mm를 사용할 경우 0.6mm와 0.4mm보다 응답속도가 빠르다는 것을 알 수 있다. 이는 코일의 직경이 클수록 코일의 내부저항이 작아지므로 인가된 전류가 상승하기 때문이다. 그러나 행정거리가 짧아지는 경우 흡인력은 강해지지만 아마추어와 코일이 맞닿을 때 기계적인 반발력 또

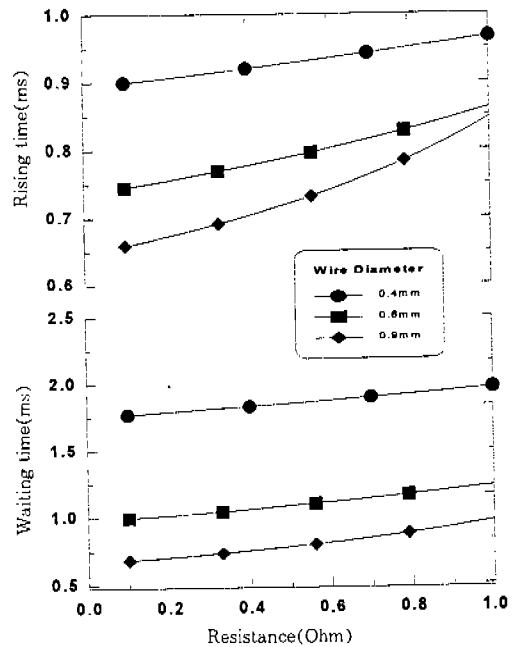


Fig.8 Variation of Response Time on Resistance and Wire Diameter (Experimental Data)

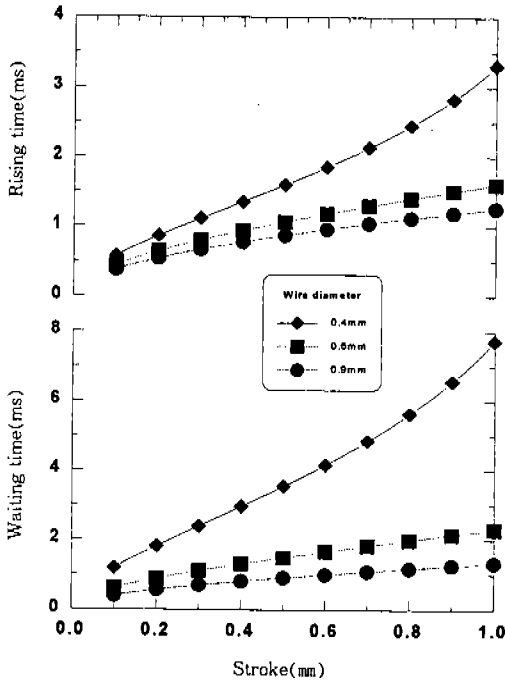


Fig.9 Variation of Response Time on Stroke and Wire Diameter (Experimental Data)

한 증가하여 코어의 수명을 단축시키게 된다. 결국 솔레노이드 구동에는 전자기적 영향 뿐만 아니라, 동역학적인 영향도 직접적으로 미친다는 것을 알 수 있다.

4.6 입력전압과 흡인력

Fig.10은 입력전압과 흡인력의 관계를 이론적 해석을 통해 나타낸 것이다. 이론적 해석을 통해 계산된 솔레노이드의 흡인력은 인가되는 전류가 함수의 형태로 나타난다는 점, 솔레노이드 작동 시 행정거리는 시간에 따라 비선형적으로 변하고 아마추어의 정지시 마찰력의 증가로 인하여 실제 값보다는 크게 나타난다. 일반적으로 전압의 상승은 흡인력을 상승시키나 코일직경의 증가에 따라 흡인력의 증가의 폭이 점차 줄어든다. 이러한 경향은 첫째로 흡인력이 인가되는 전류의 제곱에 비례하는데 반해 코일의 증가에 따라 내부저항은 제곱에 반비례하지 않기 때문이며, 둘째로 흡인력은 감은 횟수 제곱에 비례하지만 감은 횟수는 코일의 직경에 따라 제곱에 반비례하지 않기 때

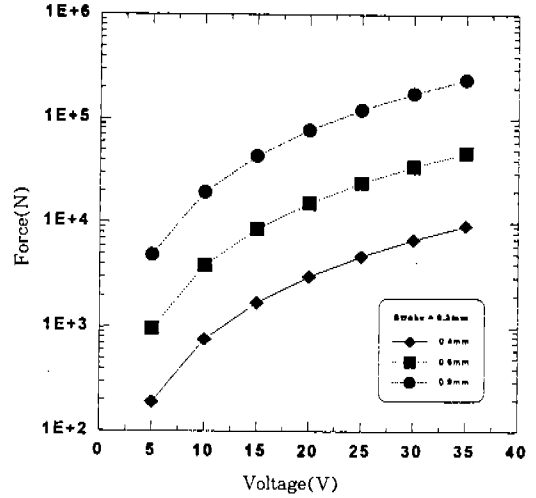


Fig.10 Relationship between Traction force and Voltage According to Coil Diameter

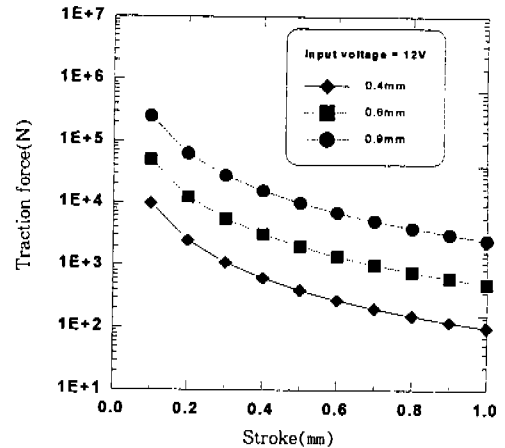


Fig.11 Relationship between Traction force and Stroke According to the Wire Diameter

문이다.

4.7 행정거리와 흡인력

Fig.11는 입력전압이 12V인 경우 행정거리와 흡인력의 관계를 코일의 직경변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 행정거리가 길어질수록 흡인력은 작아지며 코일의 직경이 클수록 흡인력이 커짐을 알 수 있다.

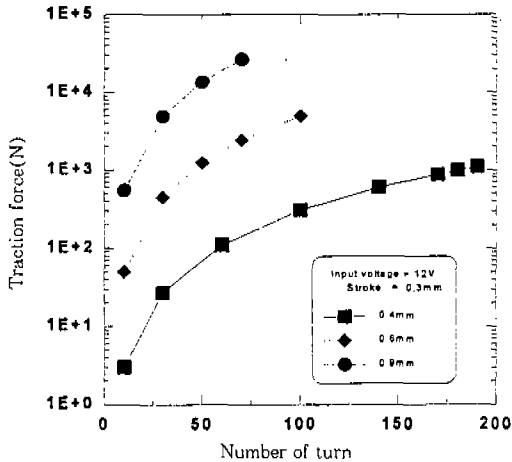


Fig.12 Relationship between Traction force and Number of Turn According to the Wire Diameter

4.8 감은 횟수와 흡인력

Fig.12에서 보면 코일의 감은 횟수와 흡인력의 관계를 코일직경의 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림으로부터 일반적으로 감은 횟수에 따라 흡인력은 증가함을 알 수 있다. 그림에서는 내부의 저항을 고정한 상태이며 만일 감는 횟수에 따른 저항의 변화를 고려할때는 이 역시 최적의 흡인력을 가지는 감는 횟수가 나오게 된다.

5. 결 론

본 연구는 디젤엔진에서 연료분사 계통을 전자화 하기 위한 유닛인젝터의 핵심 부분인 솔레노이드의 설계를 그 목적으로 하며 실험 및 수치해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 코일의 감긴횟수와 솔레노이드 형상의 함수 관계에 있는 인덕턴스에 따른 동작시간은 각 조건에 따라 최적의 응답특성을 내는 인덕턴스가 존재하였고 그들은 Log의 함수관계를 나타내었다. 즉, 이는 단순히 코일의 감는횟수를 흡인력만 고려하여 많이감으면 내부저항의 증가로 인한 전류의 감소로 오히려 작동시간을 느리게 만들었다.

- 2) 입력전압에 따른 작동시간은 전압의 증가에 따라 짧아졌으며 코일직경이 작을수록 그 경향은 현저하였다.
- 3) 외부저항의 증가에 따라 작동시간은 늘어났으며, 변화의 폭은 다른 변수에 비해 작았다. 이를 이용하여 코일의 저항 값이 작은 솔레노이드의 설계시 외부저항의 증가로 다소 작동시간과 흡인력의 감소는 있으나 전류의 감소로 인하여 작동온도를 크게 줄일 수 있음을 알 수 있었다.
- 4) 행정거리의 증가에 따라 작동시간의 변화는 증가하였으며 이는 다른 변수에 비해 그 영향이 큼을 알 수 있었다. 솔레노이드 설계시 행정거리의 중요한 변수임을 나타낸다.
- 5) 솔레노이드에 전류가 인가될 경우 전류의 파형은 일정한 함수의 형태로 나타났으나, 코어가 포화(Saturation)되었을 경우 전류의 파형은 또다른 함수의 형태로 나옴을 실험을 통하여 알 수 있었다. 이 현상은 히스테리시스 곡선과 식 (8),(9)를 살펴보면 일단 코어가 포화되면 투자율이 0에 가까워진다. 이는 시정계수를 0에 가깝게 만들며 이 현상으로 인해 이론적으로 전류를 무한대의 값을 가지기 때문이다.
- 6) 상용중인 BOSCH형 유닛인젝터의 응답시간은 약 0.65ms인데 반하여 본 연구에서 실험 및 이론적인 고찰을 통하여 BOSCH에서 쓰이고 있는 동일 직경의 코일을 사용하면서 최적의 인덕턴스 값을 갖는 솔레노이드일 경우 응답속도는 약 0.4ms 까지 됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Hiroyuki Kano, "Contribution of Optimum Design for Nozzle Configuration to Spray Formation", SAE 900824, 1990.
2. T. Kato, "Spray Characteristics and Combustion Improvement of DI Diesel Engine

- with High Pressure Fuel Injection”, SAE 890265, 1989.
3. S.Shundoh, “The Effect of Injection Parameters and Swirl on Diesel Combustion with High Pressure Fuel Injection”, SAE 910489, 1989.
 4. S.Shundoh, “NO_x Reduction for Diesel Combustion Using Pilot Injection with High Pressure Injection”, SAE 920461, 1992.
 5. S.Shundoh, “Reduction Particulate and NO_x Emissions by Using Multiple Injection in a Heavy Duty D.I. Diesel Engine”, SAE 940897, 1994.
 6. S.Shundoh, “Prediction-A Measure to Influence Exhaust Quality and Noise in Diesel Engine”, Proceedings ASME, 1989.
 7. Gerhard Stumpp, “Fuel Injection Equipment for Heavy Duty Diesel Engine for U. S. 1991/1994 Emission Limit”, SAE 890851, 1989.
 8. William G.Wolber, “An Overview of Automotive Control Actuator”, SAE 840306, 1984.
 9. 김영권, “전자기학” 회중당, pp. 307~379, 1994.
 10. Pierre Lauvin, “Electronically Controlled High Pressure unit Injector System for Diesel Engine”, SAE 911819, 1991.
 11. Ronald Jurgen, “Automotive Electronics Handbook”, Chap.10 McGraw-Hill, 1994.