〈연구논문〉 한국동력기계공학회지 제5권 제3호 pp. 11~16 2001년 8월

디젤기관의 분사밸브를 위한 고속 솔레노이드의 성능에 관한 연구

A Study of Performance Test of High Speed Solenoid for Fuel Injector in Diesel Engine

조규학 · 라진홍 · 안수길

K. H. Cho, J. H. Rha and S. K. Ahn

Key Words : Multi-pole solenoid(멀티-폴 솔레노이드), Common rail injection system(코먼레일 분사 시스템), Response characteristic(응답특성), repetition(재현성)

Abstract : In the DI diesel engine of passenger cars, common rail injection system have been used to improve the engine performance and reduce the exhaust emission by controlling injection timing, injection pattern, and injection duration. In case that common rail injection system is applied to high speed DI diesel engine, it is necessary to have high response and good repetition characteristics. These characteristics of injector depend on the characteristics of solenoid. Thus, to apply the common rail injection system in the high speed diesel engine, we had designed and made a multi-pole solenoid, and carried out repetition, response test to compare the multi-pole solenoid with the gasoline injector solenoid. The result shows that repetition and response characteristics of multi-pole solenoid have better characteristics than the gasoline injector solenoid.

1. 서 론

최근 세계 각국은 지구온난화, 오존층의 파괴 등 지구환경의 변화를 가져오는 공해물질의 저감을 위한 규제를 강화하고 있다. 한편, 내연기관의 배기가스규제는 환경규제와 자국산업의 보호라는 측면에서 그 규제의 정도를 조절하고 있다. 자동차의 생산과 선박의 건조가 주요산업인 우리나라의 경우 선진국의 각종 규제를 충족시키기 위한 기술개발이 당면과제로 대두되고 있다. 미국과 일본 및 유럽의 경우 Auto/Oil program을 통하여 열효율의 향상과 배기배출물의 저감을 위한 기술개발을 국가적 과제로 진행하고 있다.[1)]

열기관중에서 열효율이 가장 좋은 것은 직분식 디젤기관이다. 그러나 직분식 디젤기관의 경우 질소산화물(NOx)과 입자상물질(soot)의 배출이 많은 것이 결점으로 지적되고있다. 직분식 디젤기관의 열효율과 공해 배출물인 질소산화물(NOx) 및 입자상물질(soot)은 서로 상반관계(trade off)에 있기 때문에 이들을 동시에 만족시키기 위해서는 분사계의 최적제어가 필요하다. 그러나 기존의 PLN 분사계에서는 분사시기와 분사량이 캠의 형상과 랙의 위치에 의해 결정되므로 제어성의 한계를 가지고 있다. 그래서 디젤기관의 분사계에 대한 연구는 전자제어에 주력하고 있으며, 현재 주목받고 있는 분사 시스템은 코먼 레일 시스템(common rail system)[2,3)]이다. 코먼 레일 시스템은 인젝터내에 장착된 솔레노이드의 성능에 의하여 그 제어성능이 좌우된다. 그러므로 뛰어난 응답성과 재현성을 가진 솔레노이드의 개발이 중요한 과제이다. 이러한 관점에서 국외에서는 솔레노이드에 관한 많은 연구[4,5)]가 진행되고 있다. 그러나 국내의 경우 이에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 논문에서는 디젤기관의 전자제어 인젝터용 솔레노이드에 관한 기초적 연구로서 기존의 가솔린 인젝터용 솔레노이드와 제작한 멀티-폴 솔레노이드에 PWM 전원인가방법을 적용한 실험을 행하였다. 이를 통하여 두 솔레노이드의 응답성, 재현성, 선형성 등을 비교 검토함으로서 제작한 솔레노이드를 디젤엔진에 적용할 수 있는가를 확인하고자 한다.

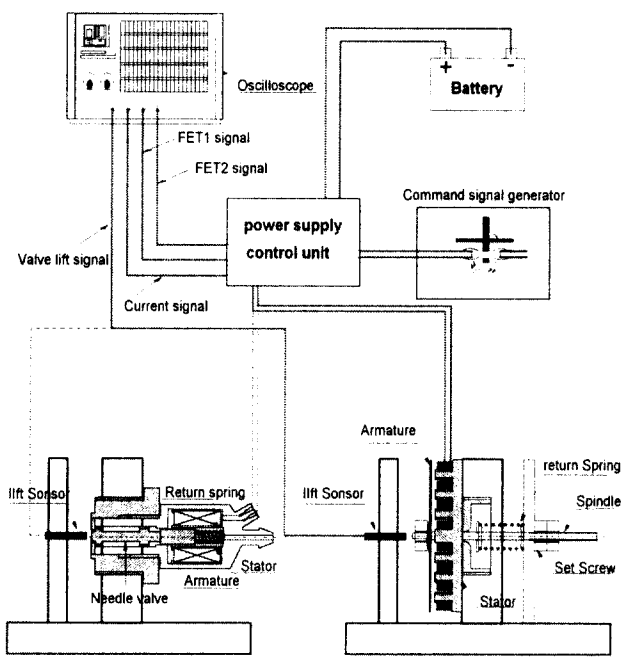
접수일 : 2001년 4월 27일
조규학 : 부경대학교 대학원
라진홍 : 부경대학교 탐양호
안수길 : 부경대학교

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치도이다. Fig. 1의 (a)는 가솔린 인젝터용 솔레노이드(현대자동차, 13~16Ω)를, (b)는 멀티폴 솔레노이드(3.5Ω)를 실험대에 장착한 것이다.

솔레노이드 작동의 주 전원으로는 자동차용 밧데리 2개를 직렬로 연결하여 사용하였다. 솔레노이드의 전원인가방법은 초핑에 의한 방법(chopping method)[6]을 사용하였다. 제작한 전원인가장치는 PWM신호의 듀티율(duty rate)로 솔레노이드의 입력전류를 제어할 수 있으며, PWM신호의 주파수는 10 ㎒이고, 듀티율(duty rate)은 30 %에서 100 %까지 변화시킬 수 있도록 하였다. 전원인가장치에서 솔레노이드에 입력되는 전원의 제어를 위하여 명령신호 발생기(command signal generator)를 제작하여 사용하였다. 제작한 명령신호 발생기는 솔레노이드에 전원입력기간을 0.5 ㎳에서 10 ㎳까지 변화시킬 수 있도록 하였다. 제작한 멀티-폴 솔레노이드의 아마추어(armature)와 가솔린 인젝터의 니들밸브(needle valve; 아마추어와 일체임)의 양정변화를 측정하기 위한 센서는 0.5 ㎛까지 측정이 가능한 비접촉식 변위센서이다.



(a) Gasoline injector solenoid (d) Multi-pole solenoid

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

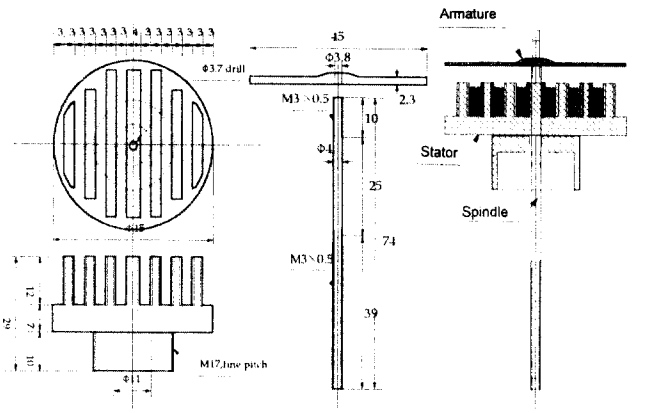
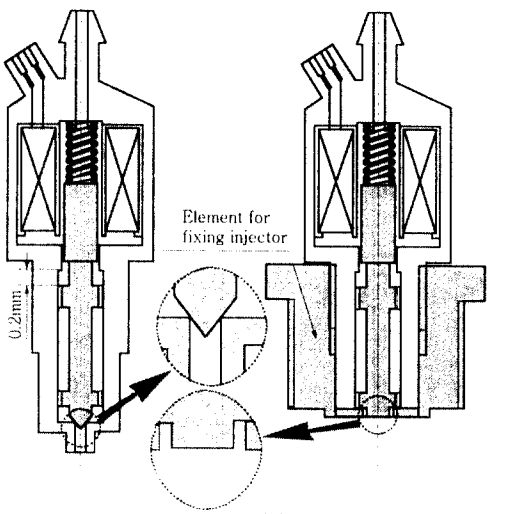


Fig. 2 Design diagram and assembly drawing of multi-pole solenoid



(a) Before modification (b) After modification

Fig. 3 Modification of gasoline injector solenoid for testing

Fig. 2는 제작한 멀티-폴 솔레노이드의 설계도와 조립도로서 스테이터의 래그(lag)는 7개이며 그 중 3개의 래그에 코일을 감았다. 코일의 굵기는 0.6 ㎜이며, 각 래그에 40회씩을 감았다. 움직이는 부분인 스핀들과 아마추어의 질량은 총 50 g이고, 초기의 스프링력은 39N으로 하였다. 멀티폴 솔레노이드의 재료로 스테이터(stator)와 아마추어(armature)에는 일반 연강(mild steel)을, 움직이는 부분인 스핀에는 자장의 영향을 받지 않는 스테인레스강(stainless steel)을 사용하였다.

가솔린 인젝터용 솔레노이드는 양정을 측정하기 위해 Fig. 3과 같이 변형하였다. 즉, 실험장치에 고정하기 위한 고정구를 장착하였으며, 아마추어의 양정변화를 측정하기 위하여 아마추어와 일체인 니들

밸브(needle valve)의 앞부분 일부를 평면 가공하였다. 장착한 고정구의 재료로는 자속의 영향을 받지 않는 황동(bronze)을 사용하였다.

제작한 멀티폴 솔레노이드의 아마추어 양정은 0.4 ㎜이고, 가솔린 인젝터용 솔레노이드의 아마추어 양정은 0.2 ㎜이다.

2.2 실험방법

솔레노이드의 재현성과 선형성 및 응답성능을 비교하기 위하여 Table 1에 나타낸 것과 같이 재현성 시험과 선형성 시험을 교대로 행하였다. 실험은 명령신호 발생기(command signal generator)의 시그널을 입력신호로 하여 전원인가장치에서 솔레노이드에 전원을 공급하며, 명령신호 발생기의 시그널 기간을 조절하여 솔레노이드에 전원이 공급되는 기간을 제어하였다. 재현성 시험은 입력신호기간을 3 ㎳로 하여 15회 반복실험을 행하였고, 선형성 시험은 입력신호기간을 0.5 ㎳에서 8 ㎳까지 변화시키며 3회 반복실험을 행하였다. 전원인가장치에서 솔레노이드에 전원을 인가하는 기간은 오실로스코프로 확인하였다.

Table 1 Test conditions

repetition test	command signal duration	3 ㎳
	number of repetition	15
linear test	command signal duration	0.5~8 ㎳
	number of repetition	3
power input method		chopping method
current		under 10A
input voltage		24V

3. 결과 및 고찰

3.1 선형성

Fig. 4는 선형성 시험의 한 예로서 전원입력기간 3 ㎳에서 멀티폴 솔레노이드와 가솔린 인젝터용 솔레노이드의 아마추어 양정변화를 나타낸 것이다. 그림에서 10 % on-off time이란 아마추어가 상승하기 시작하여 전 양정의 10 % 높이에 도달한 시점(A점)부터 아마추어가 하강하여 전 양정의 10 % 높이에 도달한 시점(A′)까지의 소요시간으로 정의하였다. 또, 80 % on-off time이란 아마추어가 상승하기 시작하여 전 양정의 80 % 높이에 도달한 시점(B점)부터 아마추어가 하강하여 전 양정의 80 % 높이에 도달한 시점(B′)까지의 소요시간으로 정의하였다.

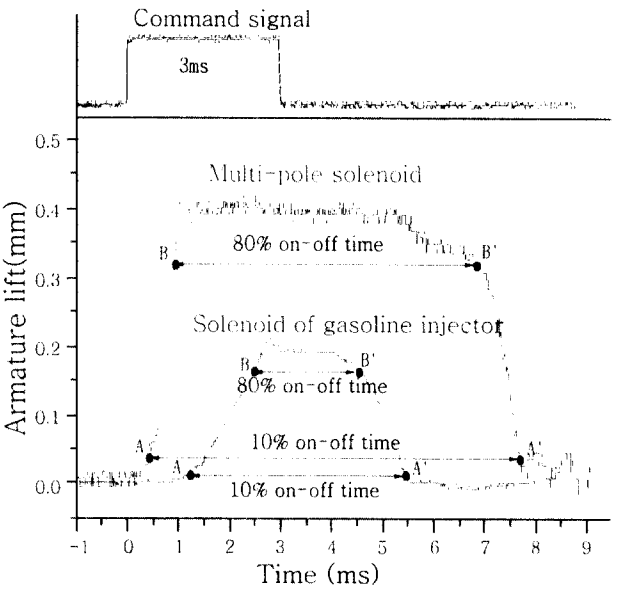


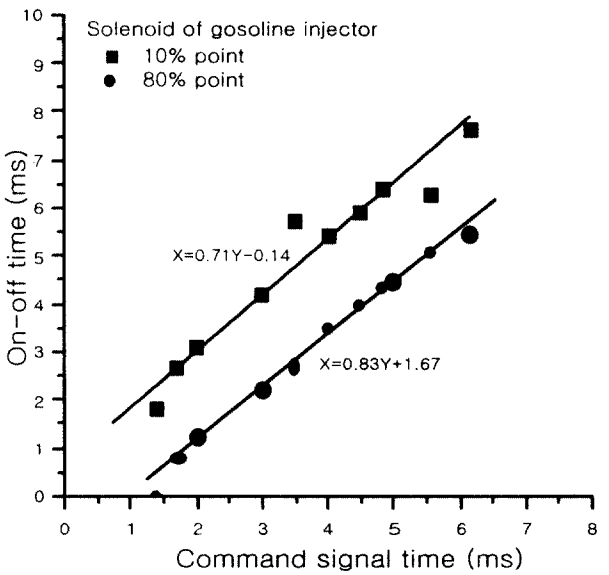
Fig. 4 Command and armature lift signal

Fig. 5는 선형성 시험의 결과를 나타낸 것으로 솔레노이드에 전원인가기간에 따른 아마추어의 on-off time을 나타낸 것이다. Fig. 5 (a)는 가솔린 인젝터용 솔레노이드에 관한 것으로 80 % on-off time과 10 % on-off time에서 선형성을 가진다고 볼 수 있다.반면, Fig. 5 (b)는 멀티-폴 솔레노이드에 관한 것으로 80 % on-off time 및 10 % on-off time에서 비 선형적인 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 솔레노이드 재료로서 보자력이 큰 일반 연강(mild steel)을 사용하였기 때문으로 생각된다. 즉, 자장의 형성에 의한 재료내부의 맴돌이 전류와 자속에 의해 생성된 자장이 전원의 입력이 차단된 이후에도 많은 자속을 유지(보자력)하고 있기 때문으로 생각된다. 따라서 솔레노이드 재료의 선정에서 보자력이 적은 재료를 사용하고 맴돌이 전류를 줄일 수 있도록 적층하면 멀티폴 솔레노이드의 선형성도 확보될 것으로 생각된다.

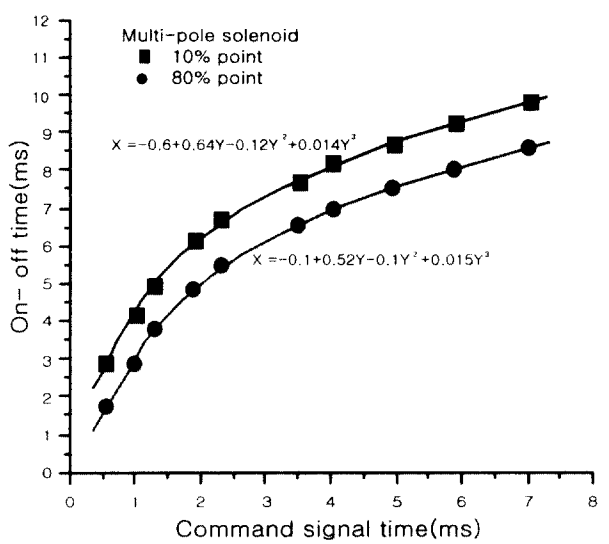
가솔린 인젝터용 솔레노이드와 멀티폴 솔레노이드의 선형성 시험의 결과값을 최소자승법으로 관계식을 구한 결과, 그림에 나타나 있는 것과 같은 관계식을 구할 수 있었다. 따라서 비 선형적인 멀티폴 솔레노이드의 관계식이 그림에 나타나 있는 것과 같이 거의 일치하고 있다. 따라서 이 관계식을 이용하면 멀티폴 솔레노이드의 제어도 가능할 것으로 생각된다.

3.2 재현성

Fig. 6은 재현성시험의 결과 그래프로서 전원인가 기간 3 ms에서 15회 반복실험을 행한 결과를 나타낸 것이다. 0 % on-off time을 아마츄어가 움직이기 시작하는 점에서 완전히 닫힌 점 사이의 시간으로, 10 % on-off time을 아마츄어 전 양정의 10 % 상승한 점에서 다시 10 %점을 통과하는 점 사이의 시간으로, 80 % on-off time을 아마츄어 전 양정의 80 %상승한 점에서 다시 80 %점을 통과하는 점 사이의 시간으로, 90 % on-off time을 아마츄어 전 양정의 90 %상승한 점에서 다시 90 %점을 통과하는

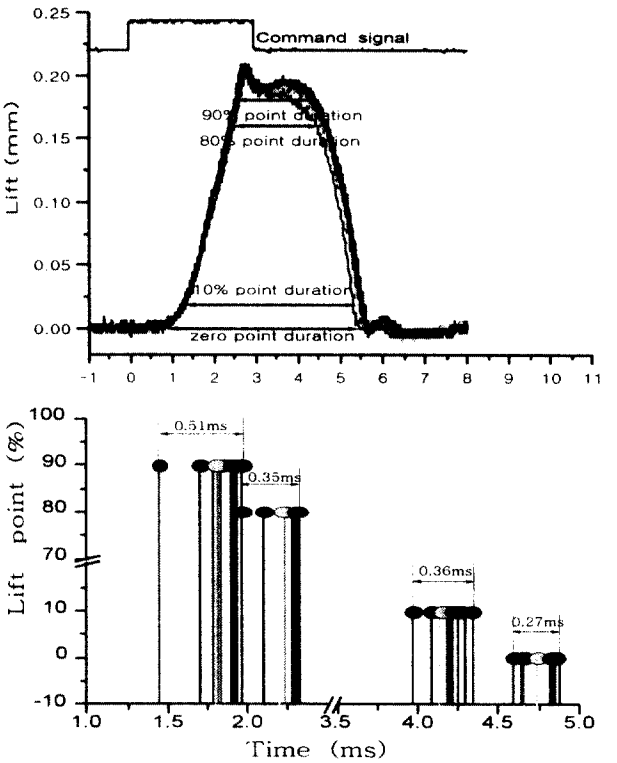


(a) Gasoline injector solenoid

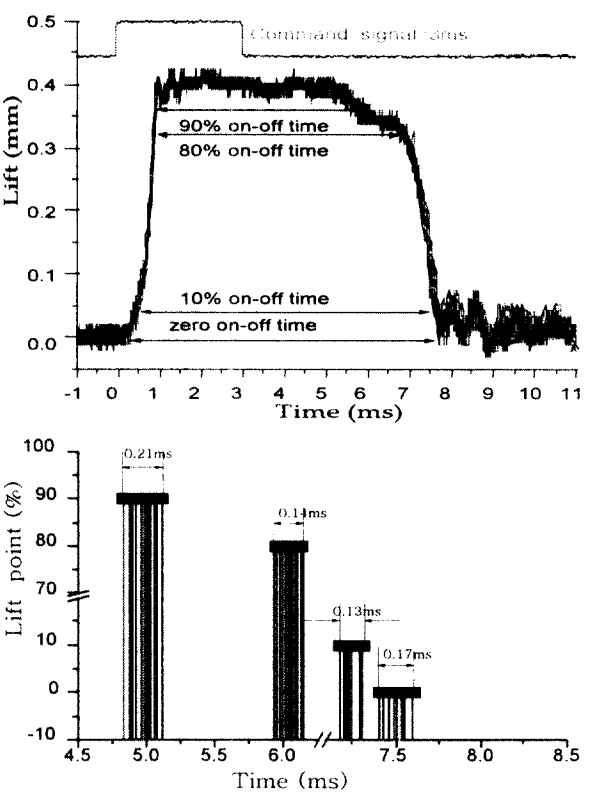


(b) Multi-pole solenoid

Fig. 5 Relationship between command signal duration and on-off time



(a) Gasoline injector solenoid



(b) Multi-pole solenoid

Fig. 6 Deviation of on-off time according to lifting rate for multi-pole solenoid and gasoline injector solenoid

점 사이의 시간으로 그림과 같이 정의하여 각 on-off time에서의 재현성을 고찰하였다. Fig. 6의 (a)는 가솔린 인젝터용 솔레노이드를 대상으로 한 시험의 결과를 나타낸 것으로 0 %, 10 %, 80 %, 90 % on-off time의 편차가 각각 0.27 ms, 0.36 ms, 0.35 ms, 0.51 ms이었고, Fig. 6의 (b)는 멀티폴 솔레노이드에 대한 시험 결과를 나타낸 것으로 0 %, 10 %, 80 %, 90 % on-off time의 편차가 각각 0.17 ms, 0.13 ms, 0.14 ms, 0.21 ms이었다. 이 결과로서 재현성의 면에서 멀티폴 솔레노이드가 가솔린 인젝터용 솔레노이드보다 약 2배정도 향상된 성능을 가짐을 알 수 있다.

3.3 응답시간

Fig. 7은 가솔린 인젝터의 솔레노이드와 멀티-폴 솔레노이드의 응답시간을 나타낸 예이다. 그림에서 보는바와 같이 지연시간(delay time)은 전원인가장치에서 전원이 인가된 후 아마추어가 움직일 때까지의 시간, 상승시간(rising-time)은 지연시간에서 아마추어 양정의 80 %까지 상승하는데 소요되는 시간으로, 폐쇄시간(closing time)은 아마추어 양정의 80 %에서 완전히 닫히는 점까지의 시간으로 정의하였다.

Fig. 8은 재현성 시험의 결과를 Fig. 7에서 정의한 지연시간, 상승시간, 폐쇄시간으로 고찰한 결과이다. 그림에서 가솔린 인젝터용 솔레노이드의 지연

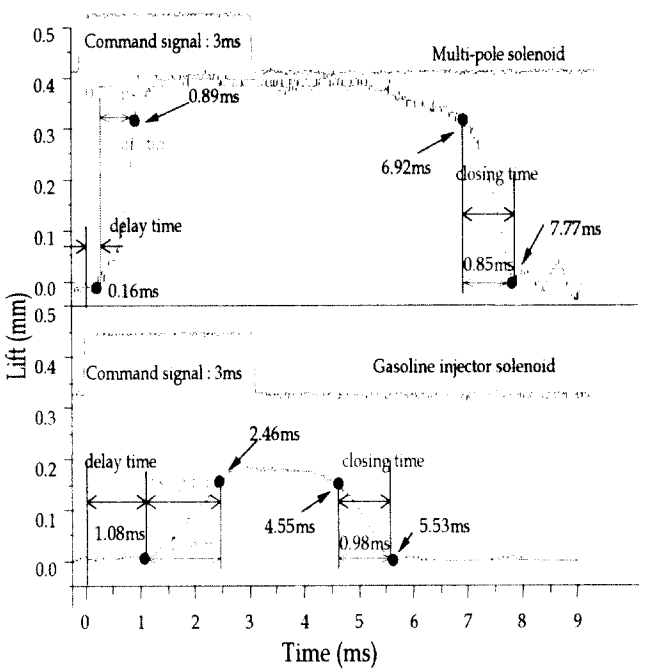
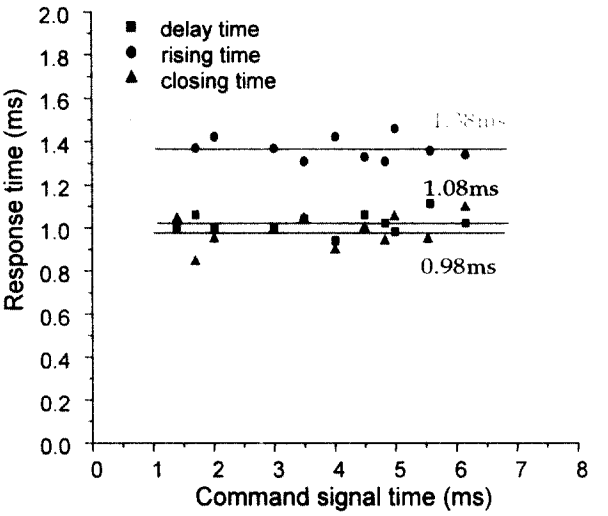
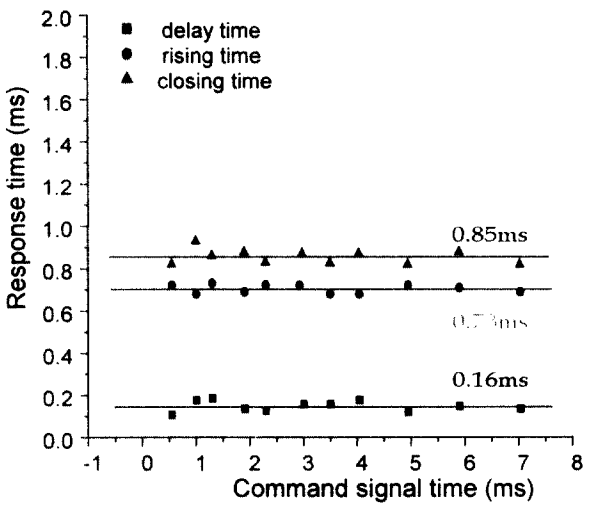


Fig. 7 Response time for multi-pole solenoid and gasoline injector solenoid at command signal duration time, 3ms



(a) Gasoline injector solenoid



(b) Multi-pole Solenoid

Fig. 8 Response time for multi-pole solenoid and gasoline injector solenoid according to command signal duration time

시간, 상승시간, 폐쇄시간의 평균은 각각 1.08 ms, 2.46 ms, 0.98 ms이며, 제작한 멀티폴 솔레노이드의 지연시간, 상승시간, 폐쇄시간의 평균은 각각 0.16 ms, 0.89 ms, 0.85 ms이다.

가솔린 인젝터용 솔레노이드와 멀티-폴 솔레노이드의 응답시간의 비교에서 멀티폴 솔레노이드의 지연시간이 약 1/6, 상승시간이 약 1/3로 단축된 결과를 나타내었으며, 폐쇄시간의 경우는 비슷한 결과를 보였다. 이는 솔레노이드의 형상이나 성능면에서 멀티폴 솔레노이드가 가솔린 인젝터용 솔레노이드보다 향상되었음을 나타내는 것으로 생각된다. 그러나 폐쇄시간에서 비슷한 결과를 나타낸 것은 제작한 멀티폴 솔레노이드의 재료로서 일반 연강을 사용함

에 따른 코어내의 맴돌이 전류와 재료의 보자력에 기인한 응답성능의 저하로 보여진다. 만약, 제작한 멀티-폴 솔레노이드의 아마추어 양정(lift)을 가솔린 인젝터용 솔레노이드의 양정과 동일하게 하여 사용한다면 더 나은 응답성능을 가질 것으로 생각되며, 자성재료의 선택에서 보자력이 적고, 포화 자속밀도가 큰 재료를 선택한다면 전체적으로 향상된 성능을 나타낼 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서 설계 제작한 멀티-폴 솔레노이드와 변형한 기존의 가솔린 인젝터용 솔레노이드를 PWM 전원인가방법으로 실험을 행하여 비교 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 제작한 멀티-폴 솔레노이드의 입력신호에 따른 on-off time은 비 선형적으로 나타났으나, 제어를 위한 관계식은 찾을 수 있었다.
2) 가솔린 인젝터용 솔레노이드와 멀티폴 솔레노이드의 재현성 비교에서 제작한 멀티폴 솔레노이드가 약 2배정도 더 향상된 결과를 보였다.
3) 가솔린 인젝터용 솔레노이드와 제작한 솔레노이드의 응답시간 비교에서 제작한 멀티폴 솔레노이드가 지연시간은 약 1/6, rising time은 약 1/3로 향상되었으며, closing time은 비슷한 2000결과를 보였다.

후 기

본 연구는 2000년도 두뇌한국21사업의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

1. 정용일, "자동차와 환경", www.autoenv.org, pp. 168~173, pp. 217~292, 2000
2. T. Kato et al., "Common Rail Fuel Injection System for Improvement of Engine Performance on Heavy Duty Diesel Engine", SAE TP 980806, 1998
3. W. Boehner, "Common Rail Injection System for Commercial Diesel Vehicles", SAE TP 970345, 1997
4. M. M. Schechter, "Fast Response Multipole Solenoids", SAE 820203, 1982
5. T. Kushida, "High Speed Powerful and Simple Solenoid Actuator 'DIESOLE' and its Dynamic Analysis Results", SAE 850373, 1985
6. T. Kajima, "Development of a High Speed Solenoid Valve-Investigation of the Energizing Circuits", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 40, No.4, August 1993
7. H. C. Roters, "Electromagnetic Devices", CHAMPMAN & HALL, Limited, 1941
8. 조규학, "고속 솔레노이드의 응답특성에 관한 연구", 수산해양교육학회 제12권 2호 pp. 142~151, 2000