

고속 솔레노이드의 응답특성에 관한 연구

조규학

(부경대학교 대학원)

1. 서론

최근 환경에 대한 인식이 증가함에 따라 세계 각국은 선박과 자동차의 주된 동력원인 내연기관의 배기가스규제를 강화하고 있다. 또한, 지구온난화를 방지하기 위하여 유해 배출가스 뿐만 아니라 이산화탄소의 총량적 규제도 진행되고 있다. 따라서 배기 배출물 중 이산화탄소의 총량적 규제를 고려하면 열효율이 가장 높은 직분식 디젤기관이 가장 적합하다. 그러나 디젤기관의 경우 NOx나 Soot등의 배기가스를 저감시켜야 하는 기술적 과제가 남아있다. 디젤기관의 열효율은 더욱 향상시키고 유해 배기배출물을 저감시키기 위해서는 흡·배기계와 분사계의 전자제어(intelligent engine)가 필요하다. 전자제어로 가장 많은 연구가 진행되고 있는 시스템은 커먼 레일 시스템(common rail system)¹⁾이다. 그런데 이의 핵심요소는 전기적 신호에 의해 작동하는 솔레노이드이다. 특히 고속기관의 경우 응답성이 뛰어난 고속 솔레노이드가 필요하다.

솔레노이드에 관한 연구는 솔레노이드의 구조적 연구와 전원인가방법에 대한 연구로 대별된다. 솔레노이드의 구조적 연구로서 Seilly A. H²⁾, Michael M Schechter³⁾, Takeo Kushida⁴⁾등에 의한 콜레노이드(COLENOID), 멀티-폴 솔레노이드(Multi-pole Solenoid), 디솔레(DISOLE)등으로 명명되어진 솔레노이드에 관한 연구가 있고, 전원인가 방법에 대한 연구로서 Takashi Kajima⁵⁾, Mingao Yang⁶⁾등에 의한 E-core 솔레노이드의 전원인가방법에 대한 연구가 있다. 그러나 상기의 연구들은 고속디젤기관에 적용할 만한(0.5ms이내)응답성을 갖지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 고속디젤엔진의 전자제어 분사계에 적용할 목적으로 앞에서 언급한 멀티-폴 솔레노이드와 최근의 전원인가방법인 PWM전원인가 회로를 설계·제작하여 제작 솔레노이드의 전원인가 특성과 응답성능에 특성을 분석한다.

II. 실험장치 및 실험방법

1. 실험장치

가. 솔레노이드

솔레노이드의 스테이터(stator)와 아마추어(armature)의 재료는 일반적인 연강(Mild steel)을 사용하였고 스펀들(spindle)은 자장의 영향을 받지 않는 스테인레스강(stainless steel)을 사용하였다. 스테이터의 래그(lag)는 7개이며 그 중에서 3개에 코일을 감았다. 코일의 굵기는 0.6mm이며 각 래그에 40회씩을 감았다. 스펀들과 아마추어의 질량은 총 50g이고, 아마추어의 양정은 0.3mm, 초기의 스프링력은 4kg으로, 솔레노이드의 공급전원은 직류전압 48V로 하였다.

나. 전원인가장치

솔레노이드에 전원을 인가하는 방법은 고전류인가 후 유지전류인가 방법, 초핑에 의한 방법(chopping method), Pre-energizing method⁷⁾ 등으로 대별된다. 동일한 솔레노이드의 경우 Pre-energizing method와 초핑에 의한 방법의 응답성능이 0.74ms와 0.96ms로 차이가 있다는 보고가 있으나, 이 경우 양정의 10%점을 작동시작점으로 보고 있다. 그러나 실제 영점(zero point)을 작동시작점으로 본다면 응답성의 차이는 미미하다. 따라서 본 실험에서는 제작이 용이한 초핑에 의한 방법을 사용한 전원인가 장치를 제작하여 사용하였다.

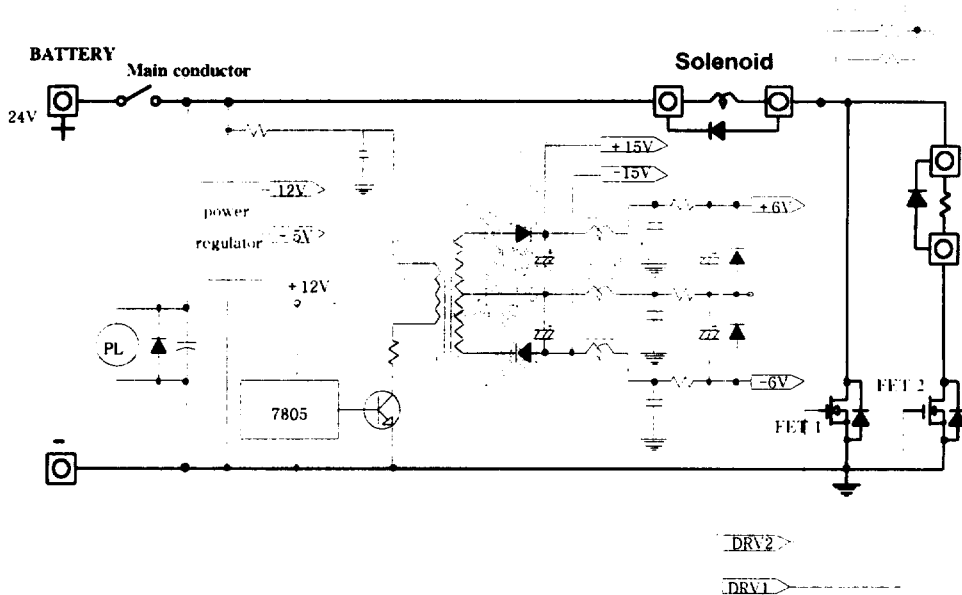


Fig. 1. Main circuit of power supplier for solenoid.

전원인가 장치는 주회로와 보조회로로 구성되어있으며, Fig.1은 전원인가 장치의 주회로이다. 이 전원인가장치는 외부 명령신호(command signal)가 보조회로에 가해지면 FET제어 시그널이 FET1, FET2에 인가되어 솔레노이드의 입력전류를 제어한다.

이때 보조회로에서 발생하는 FET1과 FET2의 제어 시그널은 솔레노이드에 흐르는 초기여자시간과 제어여자시간을 각각 $80\mu\text{s}$ 에서 $590\mu\text{s}$ 까지 9단계로 조정할 수 있다. 또한, PWM은 10kHz의 사이클을 가지며, 듀티율은 30%에서 100%까지 변화시킬 수 있다.

Fig.2는 실험장치도를 나타낸다. 시그널 발생기(command signal generator)는 한 시그널의 기간을 0.5ms에서 8ms까지 조절할 수 있도록 제작하였다.

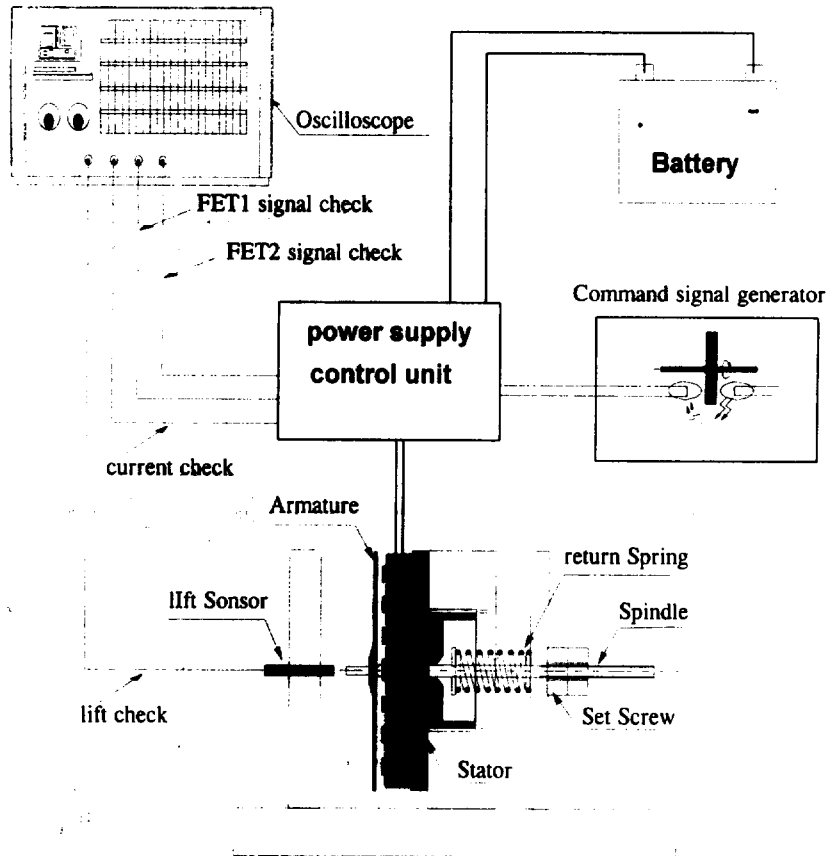


Fig. 2. Schematic diagram of experimental device set up apparatus.

2. 실험방법

Table.1은 실험조건을 나타낸다. 실험은 시그널발생기에 의해 발생하는 신호를 전원인가 장치에 보내고, 전원인가 장치에서 초기여자시간과 제어여자시간 및 제어여자시간의 듀티율을 조정하여 솔레노이드의 전원을 인가한다. 이때 전원인가장치의 FET1, FET2의 제어신호를 오실로스코프로 받아 듀티율과 조정기간을 확인하였다. 솔레노이드

에 흐르는 전류는 전원입력 장치에서 측정하였고, 아마추어(armature)의 양정변화는 $0.5\mu\text{m}$ 까지 측정이 가능한 비접촉식 변위센서로 측정하였다.

Fig. 3은 솔레노이드 작동실험의 한 예이다. 그림에서 T1은 초기여자기간(first stage exiting duration), T2는 제어여자기간(control stage exiting duration)으로 정의를 하였으며, Max i 는 솔레노이드의 최대인가전류이며, t1은 지연기간(waiting time), t2는 rising time, t3은 유지기간(holding time), t4는 off time 그리고, t1+t2를 on time으로 정의하였다.

Table 1. Test conditions

First stage exiting duration	Control exciting duration	Duty rate of control exciting duration
0.08ms	0.17ms	
0.17ms	0.22ms	30%
0.22ms	0.3 ms	50%
0.3 ms	0.38ms	75%
0.38ms	0.45ms	100%
0.45ms	0.52ms	
0.52ms		

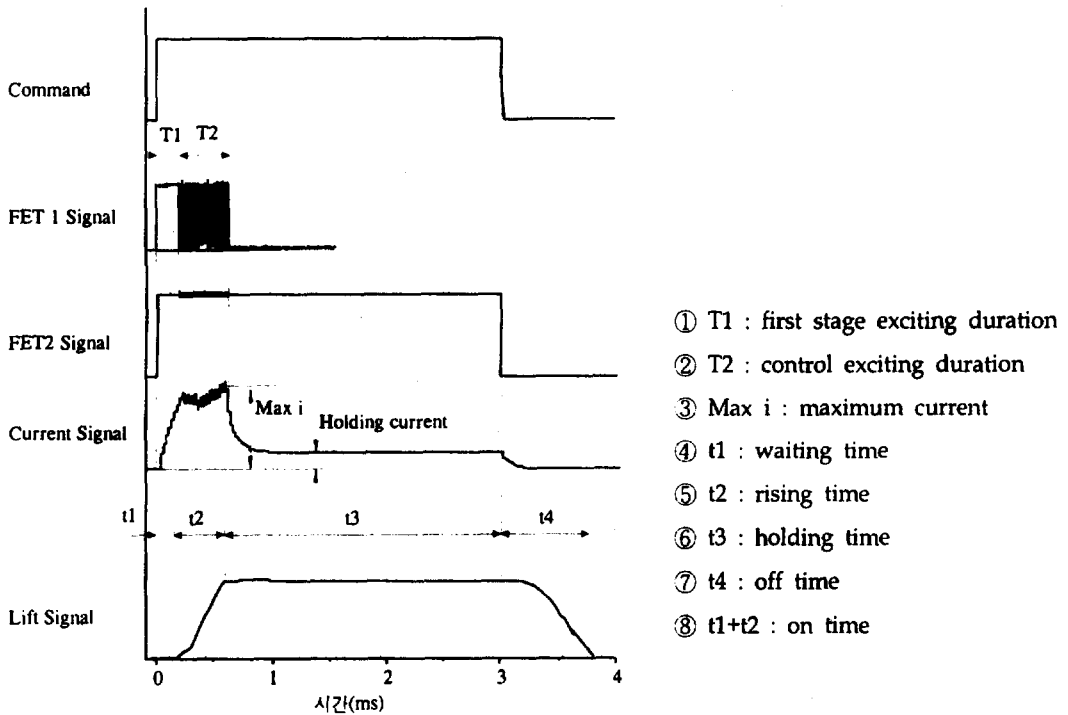


Fig. 3. Example of signals for armature according to time.

III. 실험결과 및 고찰

Fig.4의 (a)와 (b)는 제어여자기간 0.22ms에서 초기여자기간 0.08ms와 0.38ms의 듀티율(duty rate)변화에 따른 여자전류의 특성을 보여주는 그래프로 초기여자기간 0.08ms는 듀티율(duty rate) 50%에서, 초기여자기간 0.38ms는 듀티율(duty rate) 75%에서 초기여자기간의 최대전류와 비슷한 전류의 흐름을 유지할 수 있었다.

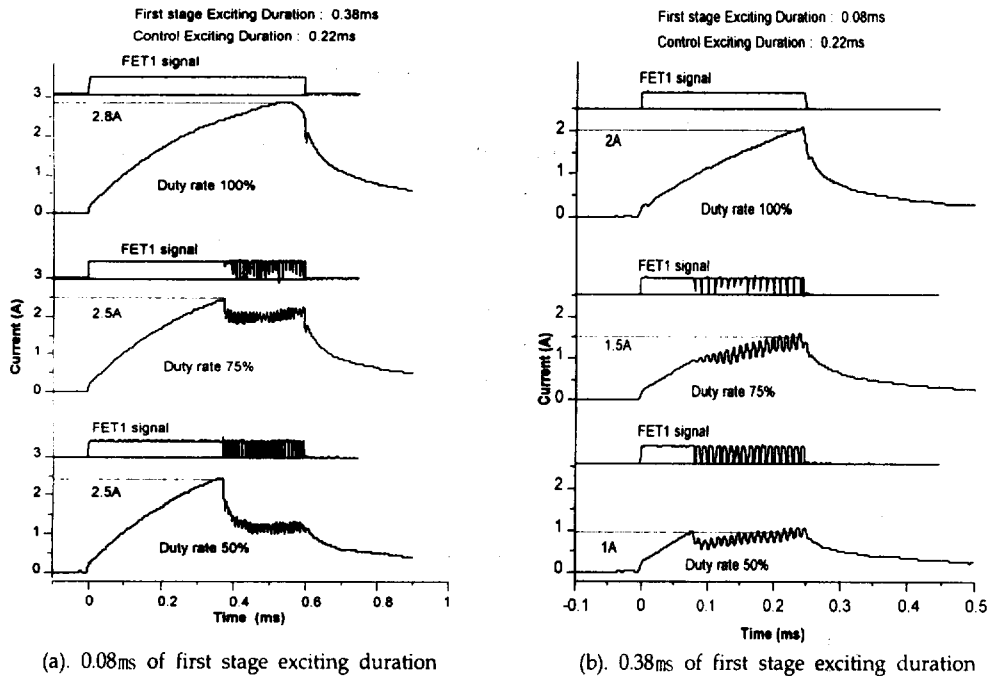


Fig. 4. Exiting current for solenoid according to first stage exciting duration and duty rate on control exciting duration 0.22ms.

최대전류를 유지하기 위한 듀티율(duty rate)이 차이가 나는 것은 전류량의 차이가 자속의 차이로 나타나고, 자속의 차이는 인덕턴스의 차이를 가져와 전체 저항의 변화가 생김으로서 PWM에 의해 제어되는 전류의 상승곡선과 하강곡선이 변화하기 때문으로 생각된다. 따라서 최대전류를 변화시키고자 할 때 최대전류를 유지하기 위한 듀티율(duty rate)을 알아야만 인가되는 최대전류의 제한과 동시에 충분한 입력에너지의 공급이 가능하다. 한편, 초기여자기간의 증가(0.08ms에서 0.38ms로)에 따라 최대전류도 상승(1.5A에서 2.5A로)하고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 최대전류를 제한할 때 충분한 입력에너지의 공급은 초기여자기간(T1)의 제어와 최대 전류값에 따른 듀티율을 조절함으로써 가능할 것으로 생각된다.

Fig.5는 초기여자기간 0.38ms, 제어여자기간 0.22ms, 듀티율(duty rate) 75%에서

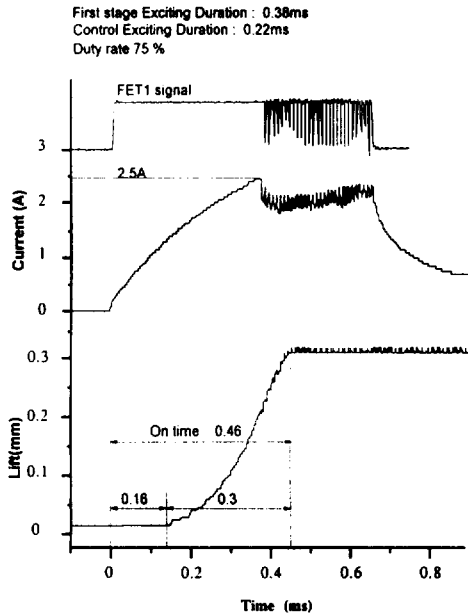


Fig. 5. Solenoid lift and current at the first stage exciting duration, 0.38ms and control exciting duration, 0.22ms on 75% duty rate.

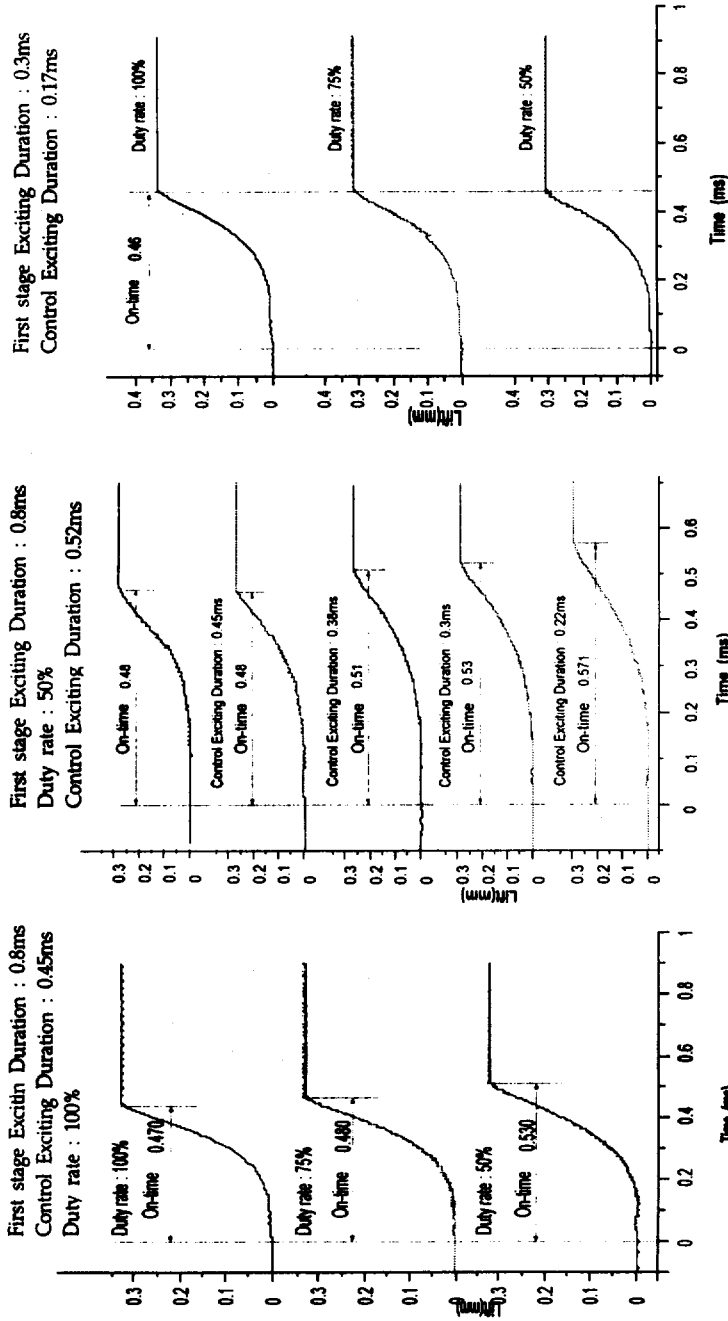
못함을 알 수 있다. 이는 초기여자시간과 제어여자시간의 합이 응답시간보다 길 경우 두 시간의 증가는 응답성에 영향을 미치지 못하는 것으로 생각된다.

Fig.6의 (c)는 초기여자시간(0.3ms)과 제어여자시간(0.17ms)을 일정하게 하고 듀티율을 변화시킬 때 on time의 변화를 나타낸 것으로 듀티율과 상관없이 일정한 on time을 갖는다. 이는 초기여자시간이 길어 초기여자시간의 전류값이 높아 제어여자시간의 듀티율이 낮아도 공급되는 에너지가 많기 때문으로 생각된다. (a),(b),(c)의 경우를 통하여 초기여자시간으로 최대전류를 제한하고, 적절한 제어여자시간과 듀티율을 가하면 솔레노이드의 응답성능의 제어가 가능할 것으로 생각된다.

솔레노이드의 인가전류와 리프트 시그널 (lift signal)을 보여준다. 솔레노이드의 응답성능은 t_1 이 0.16ms, t_2 가 0.3ms로 on time이 0.46ms로 기존의 보고 (0.65ms)⁸⁾에 비하여 향상된 성능을 보여주고 있다.

Fig.6은 on time 특성을 나타낸 것으로 (a)는 초기여자시간(0.08ms)과 제어 여자시간(0.45ms)을 일정하게 하고 듀티율을 변화시킬 때 on time의 변화를 나타낸 것으로 듀티율이 증가하면 on time은 짧아지나 듀티율 100%의 경우는 초기여자시간과 동일한 상태가 되므로 의미가 없다. 따라서 최대전류를 고려한 듀티율을 결정하여야 한다.

Fig.6의 (b)는 초기여자시간(0.08ms)과 듀티율(50%)을 일정하게 하고 제어 여자시간을 변화시킬 때 on time의 변화를 나타낸 것으로 제어여자시간이 증가하면 on time이 짧아지나 일정기간 이상 증가하면 on time에 영향을 주지



(a). On time characteristics according to duty rate with constant first stage exciting duration and control exciting duration
 (b). On time characteristics according to control exciting duration with constant first stage exciting duration and duty rate
 (c). On time characteristics according to duty rate with constant first stage exciting duration and control exciting duration

Fig. 6. On time characteristics of solenoid.

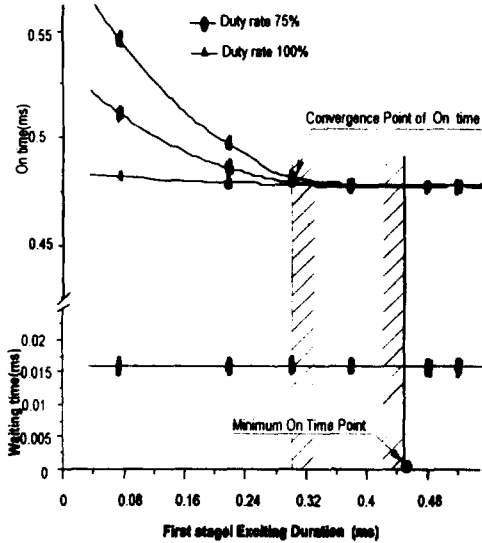


Fig. 7. On time and waiting time characteristics according to first stage exciting duration and duty rate.

Fig.7은 초기여자기간과 듀티율(duty rate)의 변화에 따른 솔레노이드의 응답특성을 나타낸 것이다. 그림에서 지연시간(waiting time)의 경우 모든 조건에서 0.015~0.018ms로 비슷하고, on time의 경우 듀티율(duty rate)이 증가할수록 변화가 작아지며, 초기여자기간 0.3ms 이상에서는 0.46ms로 일정한 on time의 값을 가졌다. 이로서 최소응답시간(on time)을 갖는 초기여자기간의 범위가 0.3ms 이상이므로 최적 초기여자기간은 그 중 가장 짧은 기간인 0.3ms이다. 따라서 본 실험장치에서 제어여자기간은 최소응답시간(0.46ms)까지인 0.16ms로 하며 이 때의 듀티율(duty rate)은 초기여자기간의 최대전류를 일정하게 유지하는 75% 이하로 하여 제어하면 될 것으로 생각된다.

IV. 결 론

멀티-폴 솔레노이드(multi-pole solenoid)를 설계·제작한 후 전원입력조건에 따른 응답실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초기여자기간 0.08ms와 0.17ms에서 듀티율 50%와 75%를 사용하여 최대전류와 동일한 전류를 유지할 수 있었으며, 초기여자기간을 조절하여 최대전류를 제한할 수 있었다.
2. 초기여자기간 0.38ms, 제어여자기간 0.3ms, 듀티율 75%에서 솔레노이드의 on time 응답성능이 0.46ms로 기존의 보고에 비하여 향상된 응답성을 보였다.
3. 솔레노이드의 초기여자기간의 변화에 따른 응답시간은 지연시간의 경우 0.015~0.018ms로 거의 전 영역에서 일정하였고, on time의 경우 0.3ms 이후에는 듀티율과 상관없이 약 0.46ms로 일정하게 나타났다. 따라서 최소응답시간을 갖는 전원인 가조건은 초기여자기간 0.3ms, 제어여자기간 0.16ms, 듀티율(duty rate) 75%로 하는 것이 좋을 것을 알았다.

참고문헌

- 1) Ganser, M.A, Common rail Injector with Injection Rate Control, SAE 981927
- 2) Seilly, A.H, COLENOID Actuators - Further Developments in Extremely Fast Acting Solenoids, SAE 810462.
- 3) Michael M. Schechter, Fast Response Multipole Solenoids, SAE 820203.
- 4) Takeo Kushida, High Speed Powerful and Simple Solenoid Actuator 'DIESOLE' and its Dynamic Analysis Results, SAE 850373.
- 5) Takashi Kajima, & Yoshihisa Kawamura, Development of a High Speed Solenoid Valve - Investigation of Solenoids, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 42, No.1, February 1995.
- 6) Minggao Yang, S.C Sorenson, Modeling of the Dynamic Processes in an Electronic Diesel Fuel Injection System, SAE 920240.
- 7) Takashi Kajima, Development of a High Speed Solenoid Valve-Investigation of the Energizing Circuits, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 40, No.4, August 1993.
- 8) Pierre Lauvin et. al., Electrically controlled High Pressure Unit Injector System for Diesel Engines, SAE 911819.

A Study on the Response Characteristics of a High Speed Solenoid

Kyu-Hak CHO

(Graduate School, Pukyong National University)

Abstract

The studies on the electronic control fuel injection system for a DI diesel engine have done for reducing the exhaust emission and improving fuel consumption. The electronic control fuel injection system is classified into a common rail system, a unit injector system and a high pressure injection system. The characteristics of these systems are largely depends on the operating characteristics of its solenoid that have high speed on-off operation. In order to improve these characteristics of fuel injection system, it is necessary to design the optimal shape of solenoid and select the input method of its power source.

It was proposed HELENOID, COLENOID, DISOLE, and Multipole Solenoid in the studies of design for the optimal shape of solenoid. The studies on the energizing method, input method for power of solenoid were dealt with the conventional energizing method, the chopping method and the pre-energizing method. In order to find out the high response characteristics of solenoid, it is necessary to test the performance of optimally designed solenoid with a new energizing method.

In this paper, the solenoid of multi-pole type with plat armature and its power control unit to control input current by the chopping method designed, and its response tests were performed according to its energizing conditions. As a result, the maximum input current for solenoid was controlled by the period of first stage exciting current and chopping duty ratio of control stage exciting current, and the fastest "on" time was able to get 0.46ms. The conditions of fastest "on" time was 0.3ms for first stage exciting current, 0.16ms for control exciting current and 75% for chopping duty ratio.

Key Words : Common rail system(커먼레일 시스템), Energizing method(전원인가방법), Multi-pole solenoid(멀티-폴 솔레노이드), Exciting current(여자전류), Response time(응답시간)