

스풀밸브를 이용한 축압식 연료분사계의 작동특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Accumulator Type Fuel Injection System with Spool Valve

최영하*, 이장희**, 윤석주***

Y. H. Choi, J. H. Lee, S. J. Yoon

ABSTRACT

Fuel injection system is very important in diesel combustion. Recently electronic control of fuel injection system and common rail systems are introduced to reduce the emission and to increase the energy efficiency from diesel engine by control of the injection timing and duration. In this study, evaluation possibility of the system for electronic control by spool valve, one of the accumulator type injection systems with spool valve using solenoid was composed and the operating characteristics were investigated to evaluate the effects of spring coefficient, initial spring force, solenoid driving time, fuel supply pressure on the injection timing and duration.

We could confirm the capability that diesel injection was electronically controlled by spool valve.

주요기술용어 : Diesel Engine(디젤기관), Spool Valve(스풀밸브), Accumulator Type Fuel Injection System(축압식 연료분사계), Spring Coefficient(스프링상수), Spring Initial Force(스프링초기장력), Solenoid Driving Time(솔레노이드 구동시간)

기호 설명

P_S : 펌프측 압력

F_s : 스프링 장력

T_0 : 솔레노이드 구동시간

Spring#1: 스프링 상수 64.7N/mm의 스프링

Spring#2: 스프링 상수 103N/mm의 스프링

T_1 : 60V의 직류 전압 구동 시간

T_2 : 30V의 직류 전압 구동 시간

1. 서론

디젤 기관의 연소는 착화 지연기간, 예혼합 연소기간, 확산 연소기간으로 구분할 수 있다. 착화 지연 기간은 연료가 분사된 후 압축되어 착화될 때까지의 기간이며, 예혼합 연소기간은 착화 지연기간 동안 증발되고 혼합된 연료가 누적되어 급격한 연소가 이루어지는 과정으로서 착화 지연기간 중의 연료 분사량이 많으면 질소산화물의 생성에 영향을 미치는 기간이다. 그리고 확산 연소 기간은 증발, 혼합, 연소가 동시에 일어나는 과정으로서 연소는 증발된 연료가 공기와 혼합되는 량에 의해 제어되는데, 부분적으로 공연비가 농후한 곳의 연료 중 수소 성분은 증발되어 산화되고 탄소 성분은 응축

* 전북대학교 기계공학과 대학원

** 한국기계연구원

*** 전북대학교 기계공학부

되면서 입자상물질(soot)이 형성된다.¹⁾

디젤기관의 연료분사계로서 필수적인 요구 조건에는 속도와 부하에 따라 연료 분사시기와 연료 분사량의 조절이 가능할 것, 초기 연료 분사율이 작을 것, 후연소 부분이 적을 것 등이다. 그런데 디젤엔진의 일반적인 연료분사계는 P-L-N (Pump, Line, Nozzle)구조로 되어 있어 캠형상에 따라 연료 분사시기가 결정되고 랙(Rack)에 의해 분사량이 제어되므로 부하와 회전수에 따라 연료 분사시기와 연료분사량을 조절하는데 많은 어려움이 있다. 또한 분사말기에 2차분사나 액낭에 고여있던 연료의 드리블링에 의한 후연소기간동안의 입자상물질의 생성이 문제가 되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 디젤엔진의 연료 분사 제어방식에 대한 연구가 기계적 방식에서 전자 제어방식으로 변화하고 있다.

현재 활발한 연구가 진행되고 있는 전자 제어 방식으로는 기존의 연료분사계에 컨트롤솔리브를 도입한 TICS²⁾³⁾(Timing and Injection rate Control System), 3방향밸브에 의해 분사량이 조절되고 파일럿, 부츠, 델타형태의 분사가 가능한 커먼레일(common rail)분사방식의 연료 분사펌프 대신 고압 발생장치와 축압기를 이용한 ECD-UZ⁴⁾(Electronically Controlled Fuel Injection System), 그리고 기존의 P-L-N 연료분사계의 단점을 보완하기 위하여 P-L-N을 일체화한 유닛 인젝터⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾ 등이 있다

본 연구에서는 이와 같은 여러 타입의 전자 제어식 연료분사계중에서 축압식 연료분사계에 의한 전자제어 연료분사장치를 개발하기 위한 기초연구로써 비교적 소형 디젤기관에 많이 쓰이는 기존의 간접 분사식 연료분사계를 증압식 고압 펌프와 축압기를 이용하여 일정한 압력으로 유지시키고, 솔레노이드와 스풀밸브, 스프링을 이용하여 분사시기와 분사량을 제어할 수 있도록 전자제어가 가능한 축압식 연료분사계로 변경하였다. 그리고 솔레노이드 구동 시간, 분사 제어 장치에 공급되는 압력, 스프링의 장력 변화에 대한 축압식 연료분사계의 분사 특성을 규명하였다.

또한 제어장치를 사용하여 연료 차단 후 니들의 관성에 의해 분사 말기에 발생하는 급격한 압력강하로 인하여 입자상 물질의 발생 원인이 되는 2차분사에 대한 문제를 검토하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구를 수행하기 위하여 제작된 축압식 연료 분사 실험 장치를 Fig.1에 도시하였다. 축압식 연료분사계는 Fig.2에 보인 바와 같이 스풀밸브의 축압기로 연결되는 연료 유입구와 인젝터가 연결되는 연료 유출구를 어긋나게 설계하고 스풀밸브에 형성된 그루브를 통해서 스풀밸브의 이동에 따라 연료 유입구에서 들어온 연료가 연료 유출구로 공급되거나 차단되는 구조로 되어 있다. 이때 스풀밸브는 솔레노이드와 스프링에 의해 구동되도록 되어 있다.

- | | |
|-------------------------|----------------------------|
| A: AIR COMPRESSOR | J: SPRING CONTROLLER |
| B: FUEL TANK | K: SPOOL VALVE LIFT SENSOR |
| C: HASKEL PUMP | L: PRESSURE SENSOR |
| D: ACCUMULATOR | M: NEEDLE LIFT SENSOR |
| E: STOP VALVE | N: INJECTOR |
| F: INJECTION CONTROLLER | O: SPRAY CHAMBER |
| G: SOLENOID | P: PERSONAL COMPUTER |
| H: SPOOL VALVE | Q: A/D CONVERTER |
| I: SPRING | |

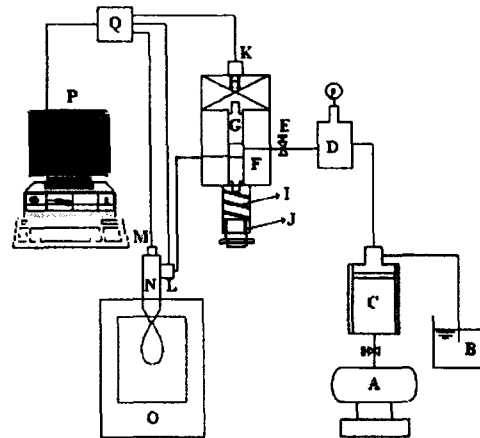


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

정압 발생 장치의 가압펌프는 압축공기에 의해 구동되는 증압식 교축펌프로써 최대 100MPa까지 정압으로 가압할 수 있으며 가압된 연료는 축압기에 저장되었다가 연료분사 제어장치에 의해 분사되도록 되어 있다. 축압기

에는 압력 조절기를 부착하여 일정 압력으로 조절이 가능하도록 하였다.

측압식 연료분사계의 작동 특성을 파악하기 위하여 스펴밸브 양정, 니들 양정, 그리고 분사 압력을 동시 계측이 가능하도록 A/D 변환기를 사용하여 퍼스널 컴퓨터로 데이터를 처리하였으며, 데이터의 측정은 솔레노이드 신호를 사용한 동기회로에 의해 이루어졌다.

스플밸브 양정 측정은 밸브 양정 센서(AVL424)를 사용하였고, 니들 양정 측정은 니들 양정 센서(AVL425)를 사용하였다. 분사압력 측정은 잔류압력 최대 100MPa까지 측정 가능한 피에조 타입의 압력센서를 사용하였다.

연료 분사량은 100회 분사한 양을 포집하여 마이크로 저울로 측정하여 환산하였으며, 니들 양정 측정에 의하여 분사기간을 알 수 있었다.

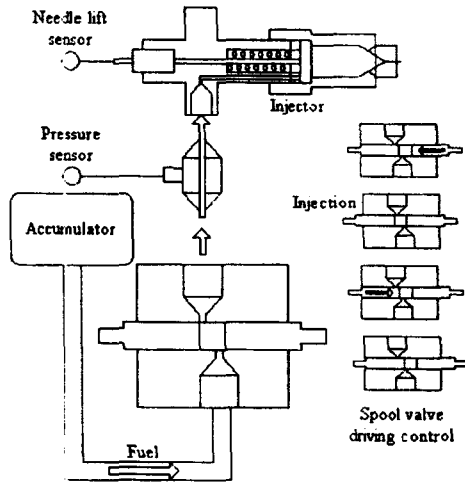


Fig. 2 Schematic diagram of injection control unit

솔레노이드 구동을 위하여 솔레노이드 구동장치를 제작하였고 솔레노이드 구동펄스는 Fig.3과 같이 2단 전원 공급방식을 사용하여

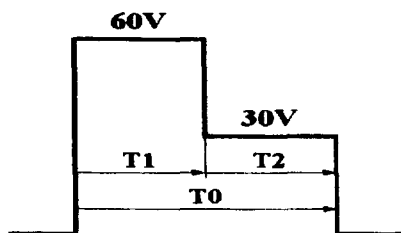


Fig. 3 Solenoid driving pulse

솔레노이드가 소손되지 않는 범위내에서 고속으로 작동되도록 하였으며, 솔레노이드 구동시간 T_0 는 T_1 과 T_2 의 설정에 따라 조정되는데 본 연구에서는 T_1 을 3.6ms로 고정하고 T_2 를 변화시켜 솔레노이드 구동시간을 조절하였다.

Table 1 Experimental parameters

solenoid driving time(ms)		$T_0=5.0,5.5,6.0,6.5,7.0$	
spring type	# 1(k=64.7N/mm)	Initial	$F_s=24.5,32.3N$
	# 2(k=103N/mm)	force	$F_s=24.5N$
pump pressure(MPa)		$P_s=15,18,21,24$	

사용된 노즐은 개변압력 13MPa인 간접분사식 노즐이며 Table 1에서 보인 바와 같이 솔레노이드 구동시간, 연료공급압력, 스프링과 스프링초기장력을 변화시켰으며 분사기간과 분사량 변화 및 연료분사 제어장치의 특성을 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 분사계 특성

Fig. 4는 본 연구에서 사용한 분사계의 구동 특성으로 솔레노이드 작동 후 분사압력, 니들 양정 그리고 스펴밸브 양정을 동시 계측하여 나타낸 것이다. 스펴밸브는 솔레노이드 구동 신호 후 2ms정도 후에 작동하고, 그로 인해 연료가 인젝터로 유입되며 스펴밸브 이동 후 2.5ms정도 후에 니들밸브가 열리면서 분사가 시작됨을 알 수 있다.

그림에 나타난 바와 같이 스펴밸브가 이동함에 따라 연료가 노즐쪽으로 유입되면서 압력이 상승하고 압력이 상승함에 따라 약 14MPa 부근에서 연료가 분사되기 시작하고 연료 분사 직후 순간적으로 압력강하가 일어나고 있으며 순간적인 압력강하에도 불구하고 관성에 의하여 니들은 계속 상승하고 있음을 알 수 있다. 노즐의 개변압력이 13MPa로 설정되었으나 기계적인 관성력에 의하여 분사 개시 압력은 약간 증가하고 있음을 알 수 있으며, 특히 일반적인 P-L-N분사계에서는 분사 종료 후에 낮은 압력으로 인해 2차분사가 나타나는데 본 연구에서 사용한 분사계에서는 분사 종료 후의

잔류압력이 약 9.5MPa로 높게 유지되고, 분사 말기에 스프링밸브가 연료를 차단하기 때문에 압력파가 차단되어 이러한 2차분사가 나타나지 않음을 알 수 있다.

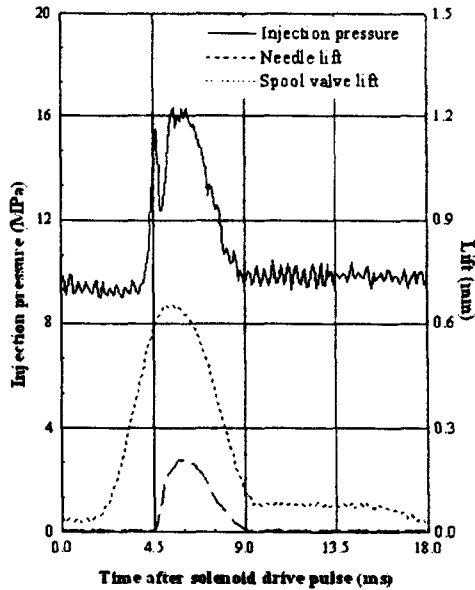


Fig. 4 Characteristics of injection pressure, needle and spool valve lift

따라서 분사말기의 분무상태(2차분사)가 매우 양호할 것으로 사료되며 이에 따라 입자상 물질의 배출량이 저감될 것이라고 생각된다.

3.2 스프링 변화에 의한 영향

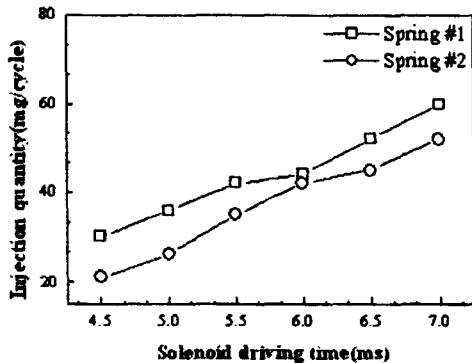


Fig. 5 Influence of spring coefficient on injection quantity

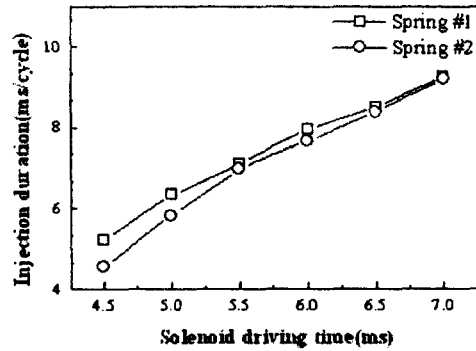


Fig. 6 Influence of spring coefficient on injection duration

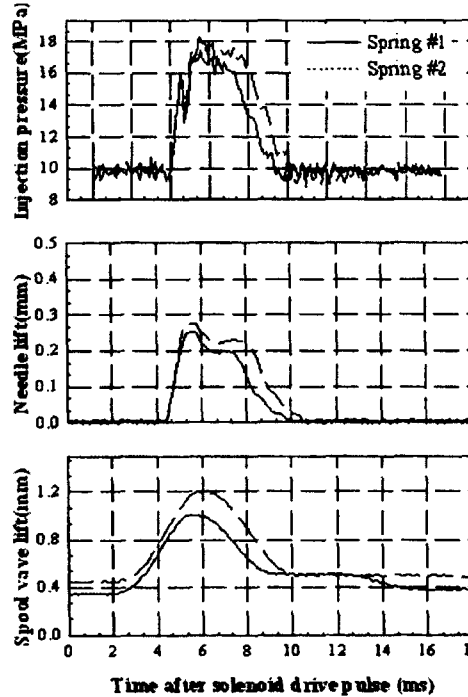


Fig. 7 Influence of spring coefficient on injection characteristics

3.2.1 스프링 상수변화에 의한 영향

Fig.5와 Fig.6은 스프링 상수 k 가 각각 64.7N/mm, 103.4N/mm인 스프링#1과 스프링 #2에 대해서 연료의 공급압력을 18MPa, 스프링 초기장력을 24.5N으로 동일하게 유지하고 솔레노이드 구동시간을 변화시키면서 측정된 분사량과 분사기간을 도시한 것이다. 스프링 상수가 증가하면 분사기간과 분사량은 감소한다는 것을 알 수 있다.

이것은 Fig.7에서 보는 바와 같이 스프링 상수가 증가하면 스톱밸브의 이동거리가 짧아지고 따라서 분사기간이 짧아지기 때문이라고 생각된다.

또한 스톱밸브의 이동거리가 짧아짐에 따라 연료통과면적이 작아져서 분사 제어장치 내의 분사압력은 낮아지고 분사량이 감소하게 됨을 알 수 있다.

3.2.2 스프링 초기 장력변화에 의한 영향

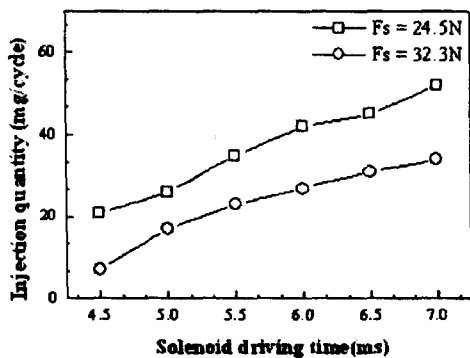


Fig. 8 Influence of spring force on injection quantity

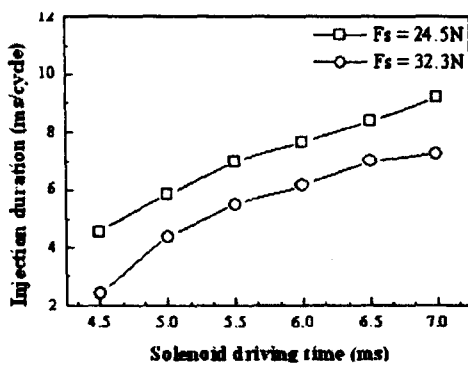


Fig. 9 Influence of spring force on injection duration

Fig.8과 Fig.9는 연료의 공급압력을 18MPa, 스프링#2의 초기장력을 24.5N, 32.3N으로 각각 변화시켰을때 솔레노이드 구동시간 변화에 대한 분사량과 분사기간을 나타낸 것이다.

스프링의 초기 장력이 증가함에 따라 분사량과 분사기간은 감소하는데 이는 스프링 작용력의 증가에 의해 스톱밸브양정이 감소하게 되어 분사기간은 짧아지고 분사압력은 낮아져 분사

량이 감소하는 것이다. 따라서 초기 장력을 변화시킴으로서 분사계의 분사기간을 조절할 수 있을 것이라고 생각한다.

3.3 솔레노이드 작동 시간에 의한 영향

Fig.10은 스프링#2를 사용하여 초기장력 $F_s=24.5N$, 연료 공급압력이 18MPa일 때의 솔레노이드 구동시간 변화에 대한 분사압력, 니들 양정 그리고 스톱밸브 양정의 변화를 나타낸 것이다. 구동시간이 증가하더라도 분사압력과 최대 니들 양정 그리고 최대 스톱밸브 양정은 일정하며 스톱밸브 양정이 최대인 위치에서 스프링의 작용력과 솔레노이드의 작용력은 서로 평형을 이루어 정지되어 있기 때문에 곡선의 변화는 분사초기와 말기에서 유사하다. 또한 구분류에서의 분사압력은 항상 일정하고 솔레노이드 구동시간의 증가량만큼 증가하여 분사기간과 분사량이 늘어나는 것을 알 수 있다.

3.4 연료 공급압력에 의한 영향

Fig.11은 연료 공급압력을 변화시키면서 측정된 스톱밸브 양정, 니들 양정 그리고 분사압력의 변화를 도시한 것이다. 연료 공급압력의 증가에 따라 스톱밸브의 작동지연이 발생하며 최대 양정은 감소하고 있다. 또한 감소율은 점차 작아져 스톱밸브의 동작이 둔화되고 있음을 알 수 있다. 따라서 연료통과면적은 작아지게 되고 분사제어 장치내의 분사압력은 감소하게 된다. 분사압력은 연료공급압력 P_s 가 15MPa일 때 14MPa, P_s 가 24MPa일때 20MPa로 낮아지고 있다. 그러나 연료 공급압력의 증가에 따라 분사압력은 상대적으로 증가하여 니들 양정은 증가하게 된다. 본 연구에서 사용한 솔레노이드의 응답속도는 연료공급압력 증가에 따라 지연기간이 약간 증가하지만 전 실험범위에서 5ms이내의 분사지연이 발생하고 있음을 알 수 있다.

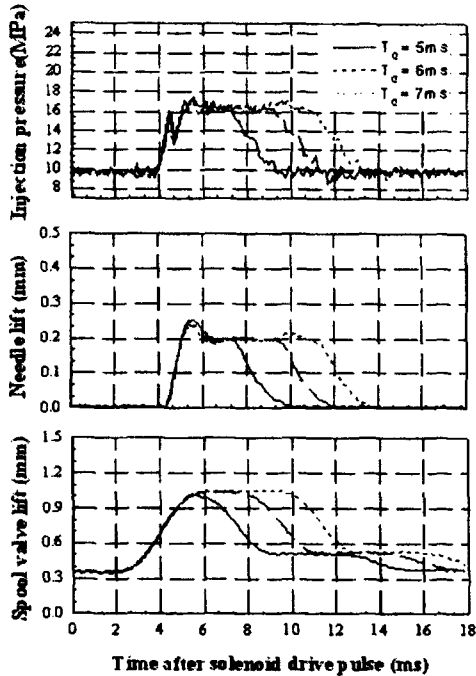


Fig. 10 Influence of solenoid driving time on injection characteristics (Spring#2, $F_s=24.5\text{N}$, $P_s=18\text{MPa}$, $T_0=5\text{ms}$)

3.4 연료 공급압력에 의한 영향

Fig.11은 연료 공급압력을 변화시키면서 측정한 스톱밸브 양정, 니들 양정 그리고 분사압력의 변화를 도시한 것이다. 연료 공급압력의 증가에 따라 스톱밸브의 작동지연이 발생하며 최대 양정은 감소하고 있다. 또한 감소율은 점차 작아져 스톱밸브의 동작이 둔화되고 있음을 알 수 있다. 따라서 연료통과면적은 작아지게 되고 분사제어 장치내의 분사압력은 감소하게 된다. 분사압력은 연료공급압력 P_s 가 15MPa일 때 14MPa, P_s 가 24MPa일 때 20MPa로 낮아지고 있다. 그러나 연료 공급압력의 증가에 따라 분사압력은 상대적으로 증가하여 니들 양정은 증가하게 된다. 본 연구에서 사용한 솔레노이드의 응답속도는 연료공급압력 증가에 따라 지연시간이 약간 증가하지만 전 실험범위에서 5ms이내의 분사지연이 발생하고 있음을 알 수 있다.

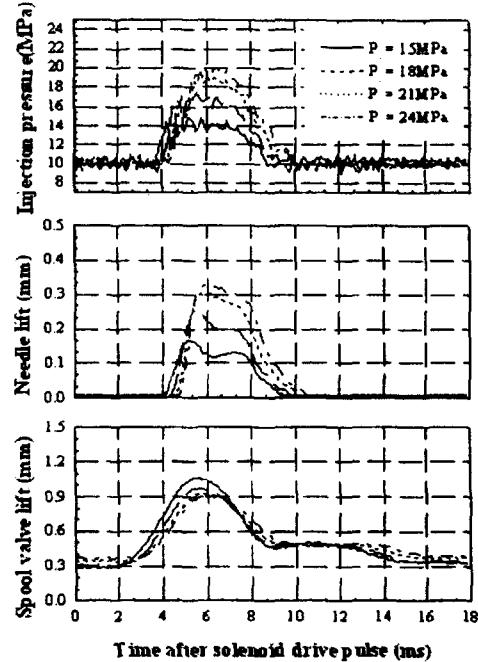


Fig. 11 Influence of fuel supply pressure on injection characteristics (Spring#2, $F_s=24.5\text{N}$, $T_0=5\text{ms}$)

Fig.12는 연료 공급압력 변화에 대한 분사량의 변화를 나타낸 것이다. 분사량은 솔레노이드 구동시간의 증가에 대하여 선형적으로 증가하며, 니들 양정이 증가하면 역시 증가한다.

연료 공급 압력의 증가에 따라 나타나는 스톱밸브 움직임의 둔화 현상은 연료공급압력과 인젝터에 잔류하는 잔류압력의 차가 스톱밸브에 상하 방향으로 작용하고 동시에 마찰저항을 받게 되기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 분사 종료시에 스톱밸브의 움직임이 급격히 둔화되고 있으며 이는 압력파에 의해 인젝터로 유입되던 연료가 급격히 차단되면서 나타나는 현상으로 사료되며 스톱밸브의 작은 이동량에 비추어볼 때 분사시간이 줄어들어야 하지만 분사 말기에 연료가 급격히 차단되지 못하고 분사 말기의 기간이 늘어남으로써 분사시간이 길어지는 경향을 보인다.

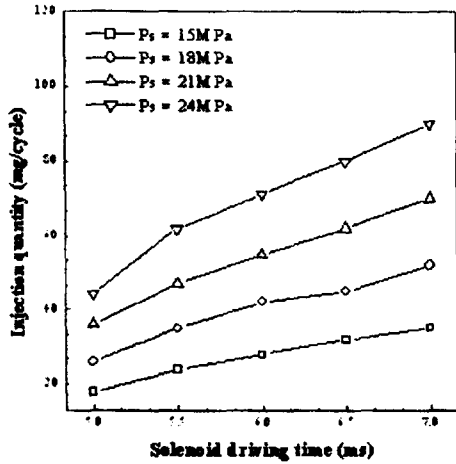


Fig. 12 Influence of fuel supply pressure on injection quantity (Spring#2, $F_s=24.5\text{N}$, $T_0=5\text{ms}$)

3.5 재현성

본 연구에서 사용한 전자제어 연료분사시스템의 구동회로 안정성을 평가하기 위하여 스프링#2를 사용하여 연속 5회 구동시켰을때의 니들양정변화를 Fig.13에 도시하였다.

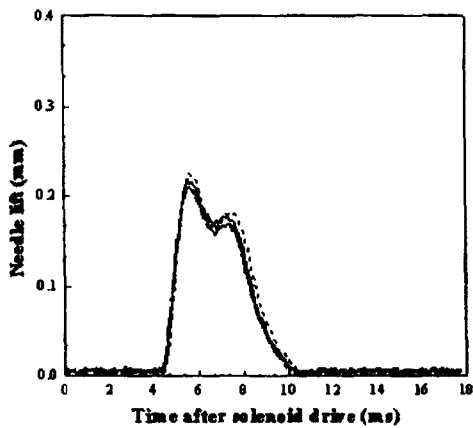


Fig. 13 Display of 5 continuous injections overlap

(Spring#2, $F_s=24.5\text{N}$, $P_s=18\text{MPa}$, $T_0=5\text{ms}$)

이때 스프링 초기장력은 24.5N, 솔레노이드 구동시간은 5ms이었으며, 2000rpm의 엔진 속도를 기준으로 16.7Hz의 솔레노이드 구동신호에 의해 분사시켰다. 최대 양정의 편차가 5%미만으로 재현성은 양호하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서 시험 제작한 스프링밸브를 이용한 연료 분사제어장치를 사용하여 스프링과 솔레노이드 작동시간, 연료공급압력변화에 대한 분사계 작동특성 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 스프링 상수와 초기장력이 증가함에 따라 분사량과 분사기간은 감소하였다.
- 2) 연료공급압력의 증가에 의해 스프링밸브의 운동은 둔화되고 있으나 분사압력의 증가에 의해 분사량은 증가하는 것으로 나타났다
- 3) 분사계 작동시 분사종료후의 압력은 9.5MPa 정도로 높게 유지되고 있는데 이는 분사 말기에 스프링밸브에 의해 압력파가 차단되어 2차분사가 나타나지 않으므로 인해서 분무 개선효과가 있을 것으로 기대된다
- 4) 시스템의 재현성은 최대편차가 5%미만으로 양호하였다.

참고 문헌

1. J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-hill, pp.503-506, 1988.
2. K. Nishizawa, H. Ishiwata, and S. Yamaguchi, "A New Concept of Diesel Fuel Injection-Timing and Injection Rate Control System", SAE Paper No. 870434, 1987.
3. H. Ishiwata, T. Ohishi, K. Ryuzaki, K. Unoki, and N. Kitahara, "A Feasibility Study of Pilot Injection in TICS(Timing and Injection Rate Control System)", SAE Paper No. 940195, 1994.
4. M. Miyaki, H. Mesude, and Y.

- Yamamoto, "Development of New Electronically Controlled Fuel Injection System ECD-U2 for Diesel Engines", SAE Paper No. 912052, 1991.
5. G. Frankl, B. G. Barker C. T. Timms, "Electronics Unit Injectors for Direct Injection Engines", SAE Paper No. 894791, 1989.
6. P. Lauvin, A. Loffler, A. Schmitt, W. Zimmermann, and W. Fuchs, "Electronically Controlled High Pressure Unit Injector System for Diesel Engines", SAE Paper No. 911819, 1991.
7. S. V. Yudanov, "Development of Hydraulically Actuated Electronically Controlled Unit Injector for Diesel Engines", SAE Paper No. 952057, 1995.
8. H. Erlash, F. Chmela, W. Cartellieri, and P. Herzog, "Pressure Modulated Injection and Its Effect on Combustion and Emissions of a HD Diesel Engine", SAE Paper No. 952059, 1995.
9. 김현지, 하종철외, "정압 연료 분사 장치의 분사량 제어에 관한 연구", 한국액체미립화학회 1995 추계학술대회 초록집, ILASS-KOREA, pp.79-85, 1995.
10. 최영하, 윤석주, 이장희, 김영민, "스플밸브를 이용한 축압식 연료분사계의 작동 특성에 관한 연구", 한국자동차공학회 1996 춘계학술대회논문집, KSAE, pp.45-51, 1996.