

〈논 문〉 SAE NO. 97370002

직접분사식 디젤엔진에서의 공해저감을 위한 전자분사 시스템에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Electronic Injection System for Pollutant Reduction in a DI Diesel Engine

채 재 우*, 정 영 식**, 양 준 석*, 황 재 원*, Alexander A. Martychenko***
J. O. Chae, Y. S. Jung, J. S. Yang, J. W. Hwang

ABSTRACT

The pump—pipe—injector system is that most commonly used type of injection equipment for diesel engines. In this study, a new electromagnetic fuel injection system was designed and carried out the experiment of single cylinder direct injection(DI) diesel engine. This system do not need the cam shaft for fuel injection. The effects of the injection timing on the combustion process and and emission were investigated. The results are that 1) atomization was improved, 2) combustion pressure was increased and ignition delay became shorter than before, 3) Low smoke level guarantee with more advanced injection timing without abnormal combustion but NO_x concentration was increased as the injection time advanced.

주요기술용어 : Atomization(미립화), self ignition(자기착화), PM(배기 미립자), Electromagnetic fuel pump(전자제어식 분사펌프)

1. 서 론

직접분사식 디젤기관은 예연소식 디젤엔진에 비해 열효율과 신뢰성이 높을 뿐만 아니라 연

료소비율이 비교적 적기 때문에 고출력 디젤엔진 및 기타산업분야에서 널리 사용되고 있다. 디젤 기관은 가솔린 기관에 비해 착화 및 연료공급방식에 있어서 큰 차이를 보인다. 가솔린 기관은 공기-연료 혼합기를 압축후 점화 플러그에 의해 착화하는 것에 비하여 디젤기관은 공기만을 흡입 고압축비(15~22:1)로 압축을 하고, 공기의 온도가 500°C 이상이 되게 한 후 연료를 분사시킨 후 연료의 증발에 의해 자기 착화(self ignition)를 시키는 점이 다르다.¹⁾ 일반적으로

* 정희원, 인하대학교 기계공학과

** 정희원, 서울대학교 터보동력 기계연구 센터

*** Belarus State Univ. of Radio Electronics and Computer Science, Dept. of Advanced Electronics Technologies

분사압력이 높으면 연소기간은 짧아지고 공연비가 감소할수록 연소기간이 증가하며, 분무체적이 증가하여 연료의 공기 이용율이 향상됨에 따른 양호한 연소조건을 반영한다. 또, 분사압력이 증가할수록 증발율이 촉진되어 착화 지연기간이 짧아지기 때문에 질소산화물 저감의 대책수단이 될 수 있다. 그런 관점에서, 단일 연소실로 되어 있는 직접분사식 엔진은 NO_x 와 배기 미립자(PM)의 배출을 저감 시키면서 출력을 개선시키는 방법으로 초고압 분사가 활발히 연구중이다. 현재, 자동차 배기에 의한 대기오염이 심각해짐에 따라 자동차 배기규제가 점차 엄격해지고 있다. 미국 캘리포니아주의 승용차 배기규제 강화조치가 1990년 9월 통과 되었고 이에 따라 1994년 승용차 Model부터 미국 시장(캘리포니아)에 수출되는 자동차에 단계적으로 보다 엄격해진 배기가스 규제를 적용받게 되었다. 이러한 요구에 부응하기 위해 최근 디젤기관에서는 고성능, 저소음 및 전자제어에 의한 연료분사 등의 연구가 이루어지고 있다. 특히, 전자제어에 의한 연료분사 방법으로 유해 배기가스를 저감시키고자 현재 연구가 활발히 진행 되고 있다.²⁾ 이는 환경문제 해결방안의 일환으로도 관심이 부각되고 있는 추세이며 디젤유의 성질 및 엔진의 연소특성 및 엔진과 운전조건간의 조화 등의 연구가 이루어지고 있다.^{3,4)} 이에따라 연료분사 시기를 전자적으로 제어함으로써 엔진의 성능 및 배기가스에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. Pierre Lauvin⁵⁾ 등은 전자적으로 제어가 되는 디젤엔진에 있어서의 고압 연료분사 시스템에 관하여 연구하여 NO_x 와 입자상 분진의 배출을 적게 하기위한 방안으로 디젤엔진에 있어서의 전자제어식 분사시스템을 해결방안으로 제시하였으며, J. R. Needham, M. P. May과 Ricardo consulting engineer⁶⁾ 등은 분사시기와 분사율의 제어가 배기물질을 줄이는데 효과적이라는 연구를 수행하였다. C. L. Wong⁷⁾ 등은 단기통, 직접분사 디젤엔진으로 착화지연에 관한 디젤유의 성질과 엔진 운전조건에 영향을 관한 일련의 연구를 수행하였다. Robert cC. Yu와 Syed M. Shahed⁸⁾는 직접분사식 디젤엔진으로부터 배기가스 배출에 대한 배기가스 재

순환과 분사시기 지연의 효과에 대한 체계적인 결과를 제시하였다. 그들은 엔진의 속도, 연료량, 분사시기, 분사압, 흡입산소 농도등을 연구의 인자로 삼았다. 이 연구로 부터 배기가스 재순환과 분사시기의 지연은 둘다 스모크와 NO_x 의 배출을 줄이는데 효과적이라는 것을 제시하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험 장치는 직접분사식 단기통 디젤기관, 연료 및 흡기량 측정장치, 흡기에 열장치, 동력계(dynamometer), 동력계 조절장치(dynamometer controller), 전자분사 펌프, 비교모듈, 신호증폭기 등으로 구성되어 있다. 또한 측정장치로는 온도 측정장치, 배기가스 분석장치, 실린더 및 연료관압 측정장치, 상사점 및 크랭크 각도 측정장치(Gray code encoder), 그레이(Gray)코드, 이진(Binary)코드 변환기, 연료의 분사시기를 측정하기 위한 노즐 리프트센서(nozzle lift sensor), 솔레노이드 펌프의 작동거리를 측정할 수 있는 변위센서(펌프속도 측정기), 각 시그널을 취득할 수 있는 취득장치 및 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 본 연구에 사용된 디젤기관은 직접분사식 4사이클 기관으로 그 제원은 Table에 나타내었다. 본 연구를 위하여 솔레노이드 펌프를 제작하였으며, 솔레노이드 펌프

Table 1 Specification of the test engine

Description	Specification
형식	4행정 수냉식 직접분사식
실린더수	1
배기량	$0.638 \times 10^{-3} \text{m}^3$
보어×행정	95×95[mm]
압축비	18
정격 출력	7.35/2200[KW/rpm]
최대 마력	9.56/2400[KW/rpm]
분사시기	23°BTDC
연료분사압력	23 MPa
노즐 형식	핀틀형[4- ϕ 0.28mm]

는 열발생률을 고려하여 크기 및 재질을 선택하였으며 내부에서의 와전류의 영향을 없애기 위하여 내부보빈을 수직으로 절단하였다. 사용된 코일은 $\phi 1.4$ 의 에나멜 동선을 사용하여 210회 감았다. 코일에서 발생된 자속을 효과적으로 사용하기 위하여 틈체 및 슬레노이드 코어는 연강을 사용하였고 구동부의 원활한 동작을 위하여 자화가 되지않는 스테인레스 봉을 가공하여 부착하였다. 슬레노이드 펌프에 백동전압을 없애기 위하여 3상의 220V 전원을 사용하였다. 대용량의 전류를 공급하기 위하여 SCR(Silicon Controlled Rectifier)를 사용하였다. 전자분사 펌프의 장치도는 Fig.1에 나타내었고, Controller는 Fig.2와 같다.

3. 실험결과

3.1 연료분사 시기가 연소압력 및 착화지연에 미치는 영향

Fig.3은 회전수 1500rpm, 토크 24.5N·m, 연료의 분사시기를 IT(Injection timing)=11°, 15°, 19°, 27°, 35° BTDC(Before top dead center)로 각각 변화를 시키며 그에 따른 연소실내의 압력을 측정하는 것이다. 이 그래프에서는 IT=11° BTDC에서 연소압이 가장 낮게 나타나며

착화지연부분이 두드러지게 나타난다. 또한 IT=11°, 15°, 19° BTDC까지는 착화지연 기간의 구분이 쉬우나 캠구동 펌핑방식에서의 분사시기인 23° BTDC를 넘어선 IT=27°, 35° BTDC에서는 착화지연기간이 상당히 짧아졌음을 알 수 있다. Fig.3을 보면 분사시기가 진각이 되고 회전수가 증가할수록 착화지연 기간이 감소하는 것을 알 수 있다. 연소압력의 경우 분사시기의 진각에 따라 동일 회전수에서 증가를 보였으며 캠축구동분사장치의 경우보다도 연소압력이 크게 나타났다.

Fig.4는 각 회전수에서 분사시기의 진각에 따른 연소실내의 압력을 나타낸 것이며 분사시기의 진각에 따라 저속에서의 연소압이 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig.5는 1500rpm, 토크 24.5N·m, IT=27° BTDC에서 연소과정을 나타내고 있으며 노즐리프트 센서의 신호 및 연료라인에서의 연료압력 곡선을 살펴보면 연료가 분사가 된 후 재분사가 이루어 짐을 볼 수 있다.

3.2 연소배출물에 미치는 분사시기의 영향

분사시기가 진각됨에 따라 Soot의 배출량은 점차로 감소하는 경향을 보였으나 NO_x의 경우는 이와는 반대로 증가하는 경향을 보였다. 이것은 분사시기 전각의 경우 실린더 내부에서 미리 분사되어진 연료가 일시에 연소하면서 연소가스 온

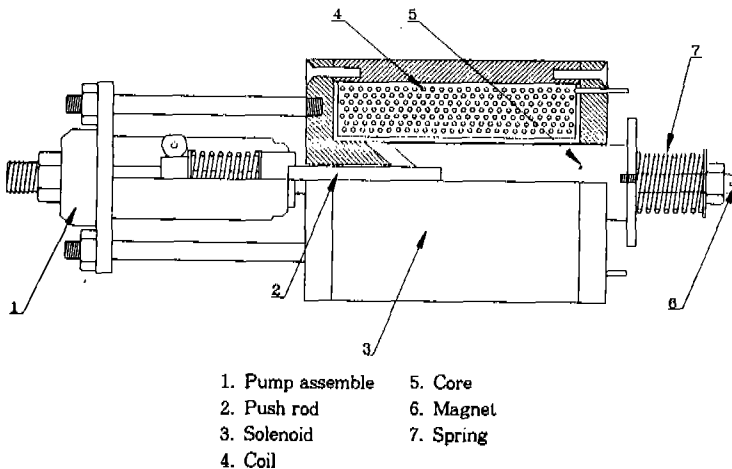


Fig.1 Schematic diagram of solenoid pump

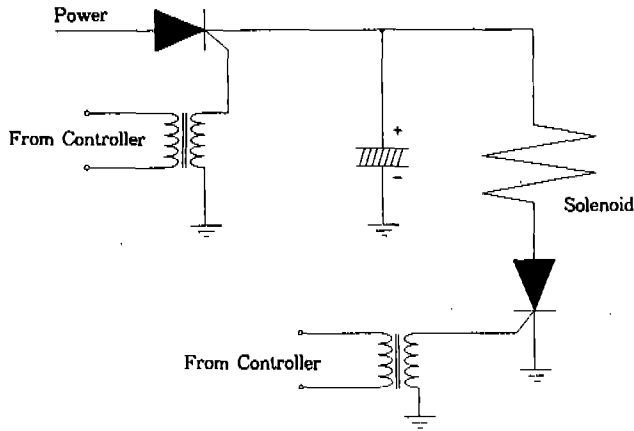


Fig.2 Circuit of the solenoid controller

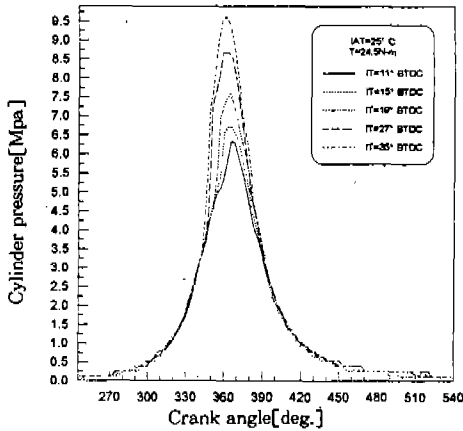


Fig.3 Variation of cylinder pressure with injection timing at 1500rpm

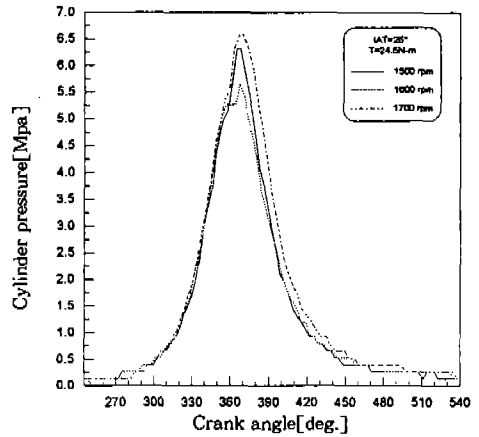


Fig.4 Cylinder pressure versus crank angle for variation of rpm at 111° BTDC

도를 높였기 때문이다. CO의 경우 NO_x의 증가와는 반대로 감소의 경향을 보이고 있다. Fig.6에서는 분사시기 진각에 따른 NO_x와 Soot 곡선이 교차하고 있음을 알 수 있다. 또한, 1600rpm의 경우에는 IT=34° BTDC에서 균형점을 이루고 있으며, 1700rpm의 경우, IT=40° BTDC에서 동일한 경향을 나타낸다. 이 그래프로부터 rpm의 증가에 따라 이와 같은 경향이 보다 진각된 분사시기에서 나타난다는 것을 알 수 있다.

3.3 실린더 체적과 압력과의 관계

Fig.7은 1500rpm에서의 P-V선도를 나타낸 것이다. 이 곡선에서 연소최고압력은 분사시기가 진각 됨에 따라 급격한 상승을 보이는데 이는 분사시기가 진각이 된 위치에서는 예혼합연소의 조건이 잘 형성되기 때문이다. 또한 이 그래프에서도 연소압력이 캠축구동 분사방식을 채택한 기계식의 경우, 연소압력보다 더욱 높으며 이것은 펌핑압력의 급상승으로 인한 미립화 촉진의 결과라

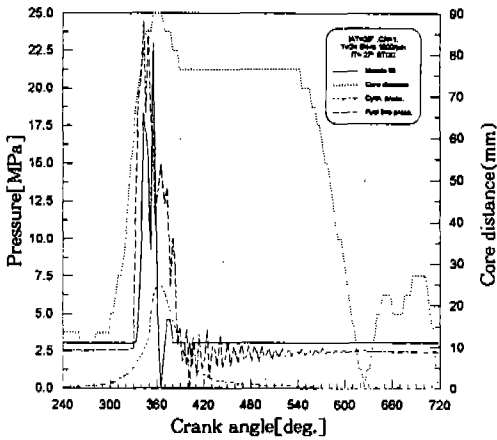


Fig.5 Signal of combustion pressure fuel line pressure, nozzle lift and core distance

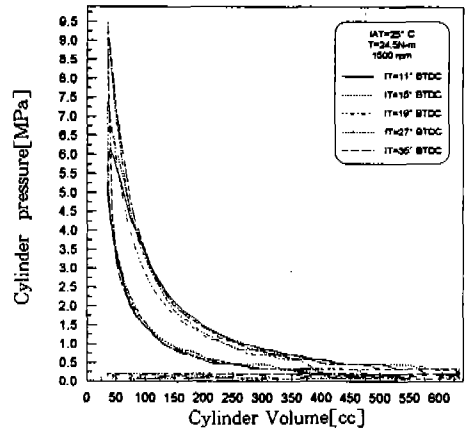


Fig.7 Variation of pressure-volume diagram with injection timing

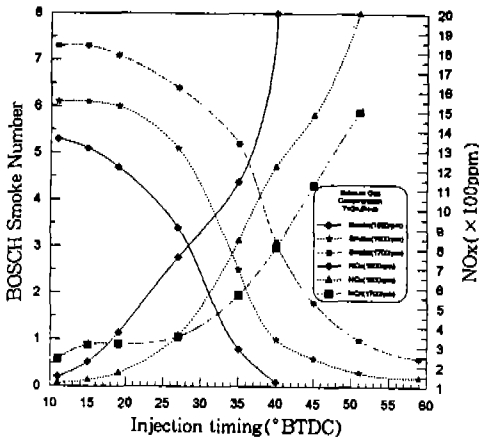


Fig.6 Variation of NO_x and smoke number with injection timing

고 할 수 있다. Fig.7에서 볼 수 있듯이 분사시기가 진각 될수록, 회전수가 증가 할수록 실린더 내의 연소압력이 증가함을 확인 할 수 있었다.

3.4 솔레노이드 펌프의 영향

Fig.5의 그래프중 크랭크 각도에 대한 코어변위에 관한 곡선을 살펴보면 초기에는 아주 급격한 상승을 보이며 최고점에 이르면 일정하게 유지되며, 다시 하강하는 것을 볼 수가 있다. 이 곡선에서 곡선의 기울기는 단위각도에 대한 거리를 의미하므로 펌핑 속도를 의미한다. 솔레노이

드의 빠른 펌핑속도는 연료의 펌핑압력을 급상승시키며 이로 인하여 노즐열림이 커지며 기계식에 비하여 고압의 연료를 연소실 내로 분사 시킨다.

따라서 분사장치에서 분사되는 연료의 미립화가 향상되고 이로인해 예혼합 연소를 촉진하여 급격한 연소를 이루게 된다. 본 연구에서 사용한 솔레노이드 펌프의 경우 약 708W 정도의 에너지를 소모한다. 그러나, Fig.5에서 보듯이 대부분의 에너지가 불필요하게 펌프를 일정위치에 정제하는데 쓰이고 있다. 이는 에너지의 저감 가능성을 보여주며 재질의 선택에 있어서도 규소장판을 이용하여 펌프를 제작할 경우 자기장의 변화가 펌프를 가열하는 경우를 더욱더 줄일 수 있으므로 에너지 소비율을 감소시킬 수 있다.

3.5 솔레노이드에 대한 고회전수의 영향

본 연구에서 사용하는 솔레노이드 펌프의 경우, 고 엔진 회전수에서 펌핑시 코어의 행정거리가 변화하는 특성이 있었다. 이는 솔레노이드에서 발생한 자력선이 솔레노이드 펌프의 재질 때문에 쉽게 변화하지 못하고 와전류를 형성하기 때문이다. 이러한 현상이 전류는 케이스 내부를 흐르며 솔레노이드를 가열하게 된다. 또한 이러한 성질 때문에 솔레노이드 펌프의 외부 온도는 내부의 온도와는 상관없이 상승하게 되며 이것은 즉 에너지의 손실로 이어진다. 따라서 솔레노이

드 펌프의 재질의 개선으로 자화 현상(μ : magnetic permeability) 방지함으로써 에너지의 절감 및 고 회전수에서의 동작을 가능하게 할 수 있으며 솔레노이드 내부에서의 와전류의 영향을 없애기 위한 방법으로 얇은 판상재료의 제작이 요구된다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 직접분사식 단기통 디젤엔진을 대상으로 기존의 캠 방식이 아닌 새로운 전자제어 분사방식을 채택하였다. 새로운 분사방식을 통하여 연료의 분사시기를 제어하는 것이 디젤연소에 끼치는 영향을 파악하고자 연구를 수행하였으며 그 결과는

- 1) 전자식 분사펌프는 엔진 작동 상태에 따라서 분사시기를 여러가지 형태로 조정이 가능하다.
- 2) 전자식 펌핑방식으로 인하여 분사율이 증가하여 연료의 미립화가 향상되고 착화지연기간이 기존의 캠구동방식의 분사장치에 의한 것보다 짧아졌다.
- 3) 분사시기가 진각될수록 연소압력은 높아지며 착화지연기간은 점차적으로 짧아진다.
- 4) 분사시기의 진각에 따라 NO_x 의 배출농도는 점차적으로 증가하며 Soot와 CO의 경우 분사시기의 진각에 따라 감소한다.
- 5) 솔레노이드 펌프의 위치를 확인함으로써 현 펌프의 실제 에너지 소비와 펌핑에 소비되는 에너지의 저감가능을 확인 할 수 있었다. 소모되는 에너지중의 약 2/3정도는 필요없이 낭비되고 있음을 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 채재우 외 3명, "대학 내연기관", 원창출판사, pp.105~153, 1994
2. M. Yang and S. C. Sorenson, "Direct Digital Control of the Diesel Fuel Injection Process", SAE Paper 920626, 1992
3. M. L. McMillan and R. Halsall, "Fuel Effects on Combustion and Emissions in a Direct Injection Diesel Engine", General Motors Research Lab., SAE Paper 881650, 1988
4. G. R. French and W. M. Scott, "Giving the IDI Diesel a Fresh Start", Ricardo Consulting Engineers PLC, SAE Paper 850452, 1985
5. Pierre Lauvin, Alf Löffler, Alfred schmitt, Werner Zimmermann, and Walter Fuchs, "Electronically Controlled High Pressure Unit Injector System for Diesel Engines", Robert Bosch GmbH, SAE Paper 911819, 1991
6. J. R. Needham, M. P. May, D. M. Doyle and S. A. Faulkner, H. Ishiwata, "Injection Timing and Rate Control—A Solution for Low Emissions", Ricardo Consulting Engineers Ltd. & Diesel Kiki Co. Ltd., SAE Paper 900854, 1990
7. C. L. Wang, D. E. Steere, "The Effects of Diesel Fuel Properties and Engine Operating Conditions on Ignition Delay", SAE Paper 821231, 1982
8. Robert C. Yu and Syed M. Shahed, "Effects of Injection Timing and Exhaust Gas Recirculation on Emissions from a D. I. Diesel Engine", Cummins Engine Co., Inc., SAE Paper, 1982
9. "FICHT High pressure injection system DSE—PDS", FICHT GmbH, 1995

1. 채재우 외 3명, "대학 내연기관", 원창출판