

<논문> SAE NO. 2000-03-0028

전자제어식 직접분사 디젤 엔진 연소실내의 분무연소 특성에 관한 연구

A study on the spray combustion characteristics in a cylinder of a D.I.diesel engine with the electronically controlled injector

정재우*, 김성중*, 이기형**, 선우명호***
Jaewoo Jeong, Seongjoong Kim, Kihyung Lee, Myuongho Sunwoo

ABSTRACT

It is well known that the combustion phenomenon of diesel engine is an unsteady turbulent diffusion combustion. Therefore, the combustion performance of diesel engine is related to a complex phenomenon which involves the various factors of combustion, such as a injection pressure , injection timing, injection rate, and operating conditions of engine.

In this study, the spray and the flame development processes in a single cylinder D.I. diesel visualization engine which uses the electronically controlled injection system were visualized to interpret the complicated combustion phenomenon by using high speed CCD camera. In addition, the cylinder pressure and heat release rate were also obtained in order to analyze the diesel combustion characteristics under several engine conditions.

주요기술용어 : Diffusion flame (확산화염), D.I.diesel engine (직접분사식 디젤 엔진), Heat release rate (열발생율), Electronically controlled diesel pump (전자제어식 디젤 펌프)

1. 서 론

최근 지구 온난화 현상의 억제 대책으로 CO₂ 규제가 강화됨에 따라 연비성능에서 상대적 우위

에 있는 디젤엔진의 비중이 증가되고 있는 추세이다. 그러나 디젤 엔진 연소의 기본인 분무 확산화염은 질소산화물과 매연 입자의 발생을 초래하므로 이러한 유해 배기 물질을 저감시킬 수 있는 기술 개발이 요구되고 있다. 이와 같은 저감 기술의 하나로써 직분식 디젤 엔진의 고압 분사와 전자제어를 통한 성능 향상을 도모하고자 하는 연구가 활발히 수행되고 있으며, 국내에서도 고압 분사 기술과 분사 시기 및 분사율 등과 같은 디젤 엔진의 전자 제어 기술에 많은 관심을 기울이

* 회원, 한양대학교 대학원

** 회원, 한양대학교 기계공학과

*** 회원, 한양대학교 자동차공학과

고 있다.^{1,2)} 그러나 이들 연구 중에서 전자 제어를 이용하여 분사시기와 분사량을 정밀 제어할 수 있는 고압 직접분사에 의한 분무 특성과 실제 엔진 내부의 분무연소 현상에 대한 기초 연구는 상당히 부족한 실정이다.³⁻⁷⁾

따라서, 본 연구에서는 전자 제어식 직접분사 디젤 엔진의 연소 특성 해석을 위한 기초 단계로서 연소실 내의 복잡한 연소 현상을 직접 가시화할 수 있도록 직분식 디젤 가시화 엔진을 제작하였다. 이 가시화 엔진에 분사시기를 전자 제어할 수 있는 연료 공급 장치를 장착하여, 분사시기를 제어함과 동시에 분사량 변화시의 직분식 디젤 엔진의 연소특성 및 화염의 발달 과정에 대한 기초적인 연구를 수행하였다. 이러한 연구 결과로부터 전자 제어식 직분식 디젤 엔진에 있어서 운전 조건에 따른 연소실 내의 분무 확산 연소 현상과 직분식 디젤 연소에 대한 분사 조건의 영향을 파악하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 직분식 디젤 가시화 엔진 시스템

본 연구에서는 전자제어장치를 이용한 운전 조건에 따른 연소해석을 수행하기 위하여 엔진 내부의 동적 연소 현상을 직접 관찰할 수 있도록 단기통형의 디젤 가시화 엔진을 제작하였으며, 최근 관심이 증대되고 있는 전자 제어식 직분식 연료 분사 시스템을 장착하였다.

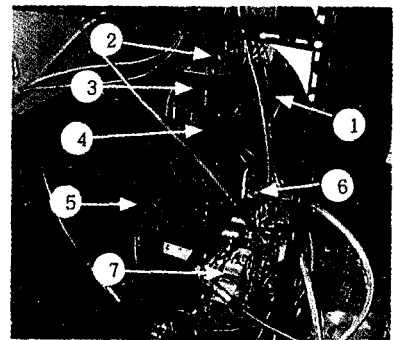
본 실험에서 사용된 가시화엔진 시스템은 크게 관측부, 신장 피스톤부, 실린더 헤드부, 구동 시스템부등으로 구성된 엔진부와 전자 제어식 연료 펌프 시스템과 연료분사 노즐로 이루어진 연료 공급부로 구성되어 있다. 본 연구에서 이용한 가시화 엔진의 주요 제원은 Table 1과 같으며, 전체 가시화 엔진의 실제 사진을 Fig. 1에 나타내었다

2.1.1 엔진부

연소실에 상응하는 관측창은 직분식 연소실 내

Table 1 Specifications of the optical-access engine

Engine type	4cycle diesel engine
Combustion system	Direct injection
Number of cylinder	1
Bore × Stroke	95 × 95[mm]
Displacement volume	673[cc]
Compression ratio	19.0



1.DC Motor 2.Cylinder Head 3.Elongated Cylinder
4.Fully Reflected Mirror 5.Encoder 6.solenoid Valve 7. Electronically Controlled Pump

Fig. 1 The picture of visualized engine

의 분무 및 확산 연소 현상을 관측하기 위해 디젤 압축 연소 환경에 견딜 수 있는 석영유리(quartz)로 제작하였다. 신장 피스톤부는 피스톤을 신장시킨 부분으로 내부에 연소실내를 관측하기 위한 45° 각도의 전반사 미러가 장착되어 있다. 실린더 블록은 진동과 좌굴 방지 및 제작의 편의성을 위하여 S45C 재질의 실린더 라이너가 포함되어 있는 일체형 블록을 사용하였다.

운할 방식은 관측창과 반사 거울의 청결성과 투명도를 확보하기 위하여 무운할 방식을 이용하였으며, 이를 위하여 내열성과 내마멸성이 우수한 테플론 링을 가공하여 피스톤링 부에 장착하였으며, 적절한 장력을 제공하기 위하여 내열 고무를 이용한 압축링을 테플론링 안쪽에 장착하였다.

구동 시스템부는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 정출력 방식의 DC 모터(22Kw, 주성전기)를 이

용하였으며, 엔진 작동시의 축토크를 억제하여 일정한 회전수를 유지할 수 있도록 4상한(회생제동)제어 방식을 채택하였다.

2.1.2 연료 공급부

본 연구에서 사용된 연료펌프는 COPEC (Computed PE Pump Control) 시스템에 이용하는 열형(in-line) 펌프이며, 리니어 모터를 이용한 랙 조절로서 분사량을 조절하였고, 엔진오일과 슬레노이드 밸브를 이용하여 작동각을 변화시켜 분사시기 조절을 수행하였다. 이러한 COPEC시스템의 전체 구성도는 Fig.2와 같으며, 연료펌프의 제원은 Table 2에 나타내었다. 연료펌프의 구동은 엔진의 동력을 이용하였으며, 캠축의 타이밍 기어에 1:1의 풀리를 설치하여 타이밍 벨트로 구동하였다.

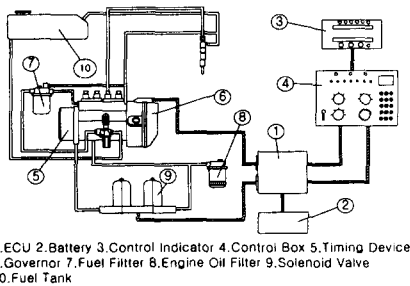


Fig. 2 The schematic diagram of COPEC system

Table 2 Specifications of the fuel injection system

Injection pump	In-line type PE pump (ZEXEL,970599-5171)
Nozzle type	D.I. (ZEXEL)
Number of holes	5
Injection pressure	250 bar
Angle of fuel-jet axis (from horizontal)	22.5°

이러한 제원을 가진 인젝터는 실린더 헤드에 수직 방향으로 16° 경사지게 장착되었다.

다음의 Fig.3에는 디젤 노즐팁 내부의 상세를

나타내었으며, 실험에 사용된 노즐은 상대적으로 큰 sac volume을 가지는 상용 인젝터이다.

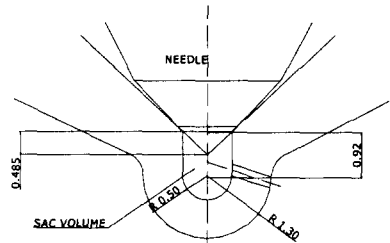


Fig. 3 Geometry of inner construction in diesel nozzle tip

2.2.1 압력 측정 및 고속 화상 취득 시스템

연소 해석을 위한 연소 압력의 측정시, 크랭크 각도에 따른 압력 측정은 실린더 헤드에 설치된 피에조(piezo)식 압력 변환기(Kistler, 6052A)와 캠축에 장착한 엔코더(encoder)의 신호를 취득하여 수행하였다.

실험시 15사이클 이상의 압력 데이터를 취득하여 위상 평균하였으며, 이를 이용하여 열발생율을 구하였다.

압력 측정시의 실험 조건은 엔진 회전수 400rpm, 600rpm과 분무 시기 BTDC 7°, 15°, 23° 그리고 각 경우에 대하여 연료량 7cc/100st(A/F=21.03), 4cc/100st(A/F=36.80), 2cc/100 st(A/F=73.61)의 총 18가지 조건에 대하여 수행하였다. 또한 연소 해석과 함께 가시화를 통한 화염 특성을 조사하기 위하여 다음의 Fig.3과 같은 가시화 실험장치를 구축하였으며, Fig.4에 연소실내의 측정 영역을 나타내었다.

확산 화염의 촬영시는 광원을 조사하지 않았으며, 화상의 취득은 컬러 고속 CCD 카메라(Kodak, max.10000f/s)를 이용하였으며, 촬영시의 크랭크 각도의 취득은 데이터링크(Kodak, EKTAPRO multi channel data link)를 이용하여 화상에 TDC신호가 전압으로 표시되도록 하

여 구하였다. 가시화 실험시의 카메라 촬영속도는 3000fps로 선정하여 수행하였다.

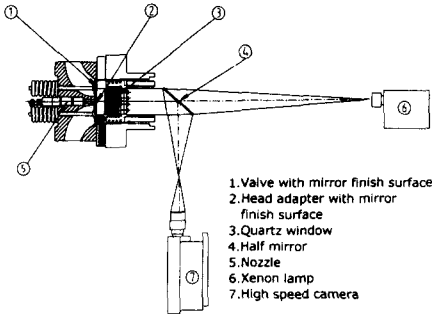


Fig. 4 Experimental apparatus for visualization

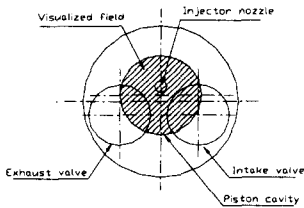


Fig. 5 Visualization region in combustion chamber

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 직분식 디젤 엔진의 확산 화염 성장 특성

본 연구에서 구축한 실험장치를 이용하여 측정 한 화염가시화 결과와 열발생을 패턴으로부터 직분식 디젤 엔진의 확산 연소 현상을 파악하였다. Fig.6은 이러한 직분식 디젤 엔진의 열발생 패턴과 화염 발달 과정과의 관계를 600rpm의 전부하 상태에서 비교한 결과이다. 그림에서와 같이 분사 시작부터 연소 시작까지(A-B)의 점화 지연 시간을 거치면서 연소실 내에 발화 온도 가까이 가열된 가연 혼합기의 일시적인 폭발 현상이 나타나는 예혼합 연소기(B-C)를 거친다. 이 시기에서의 화염의 밝기는 매우 낮고, 투명하기 때문에 화염이 잘 관측되지 않았으며, 이때의 열

발생율은 짧은 시간에 급격하게 상승하는 경향을 나타내었다. 일단 예혼합 연소기를 거치면서 압력과 온도는 크게 높아지며 점화 지연은 짧아지기 때문에 노즐로부터 분사되는 연료가 바로 연소되면서 매우 밝은 화염이 나타나는 제어 연소기(C-E)에 도달한다. 마지막으로 분사 종료(D) 후 실린더 내에 남아 있는 연료에 비하여 산소가 극히 희박한 후연소기(E-F)에 이르면서 연소 반응이 종료하는 모습을 나타내고 있다.

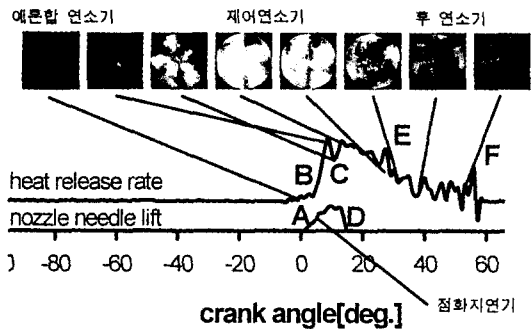


Fig. 6 Characteristics of diesel flame

3.2 운전 조건 변화에 따른 분무 연소 특성 비교

디젤 엔진의 운전조건 중 본 실험에서는 부하와 회전수 변화에 따른 분무 연소 과정을 비교하였다. 우선 부하 변화에 따른 연소 특성을 파악하기 위하여 엔진 속도 400rpm에서 아이들링 상태와 전부하 상태에서의 열발생율과 화염을 측정하여 그 결과를 Fig.7에 나타내었다.

두 부하 상태에서의 최고 열발생율의 관측 시기는 각각 ATDC 8° 와 9° 에서 나타났으며, 이 결과로부터 연료량에 무관하게 최고 열발생율의 발생시기는 거의 일정함을 알 수 있었다. 전체적인 열발생율은 전부하시가 아이들링 상태보다 2배이상의 큰 값을 보이고 있다. 또한 열발생율과 화염의 성장 과정을 두 부하 조건에 대하여 비교해 보면 전부하의 경우 확산화염의 발생시기

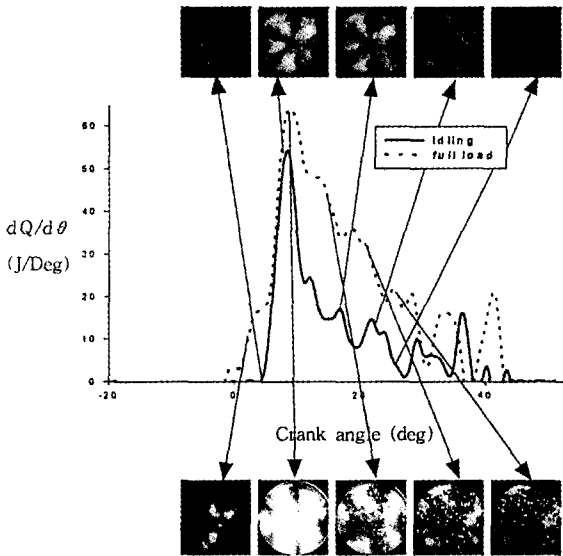


Fig. 7 Characteristics of heat release rate and flame between idling and full load at 400rpm

가 빠른 것으로 보아 착화 지연 기간이 단축되고 있음을 알 수 있으며, 착화 지연 기간 후의 화염 성장속도 또한 급격하게 빨라짐과 동시에 후 연소 기간까지 지속적으로 연소가 진행되고 있는 경향을 보이고 있다. 이러한 확산화염의 관측결과로부터 아이들링시는 착화지연 후 급격하게 열발생율이 증가한 후 급속히 저하하는 반면, 전부하시 열발생시기가 빠르며 열발생율의 저하 또한 완만한 형태를 보이는 열발생율 패턴의 이유를 정성적으로 고찰할 수 있었다.

다음은 엔진의 회전 속도 변화에 따른 확산 연소 특성을 비교하기 위하여 엔진 회전 속도 400, 500, 600rpm의 세 경우에 대하여 전부하 상태에서의 확산 화염 가시화 결과를 Fig.8에 나타내었다. 그림에서와 같이 회전수 증가에 따라 확산 화염이 일찍 관찰되고 있으며, 화염의 발달 속도가 촉진되고 있음을 확인할 수 있다. 즉 회전수의 증가에 따라 착화 지연 기간과 연소기간이 단축되는 화염특성을 보여주고 있는데, 이는 피스톤의 평균속도 증가에 따라 연소실내의 공기 유속이

rpm \ ATDC	1°	4.5°	7°	10°	15°	22°	32°
	400rpm	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]
500rpm	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]
600rpm	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]

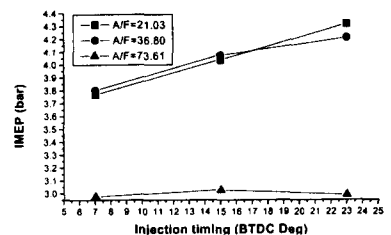
Fig. 8 Comparison of flame characteristics between three engine speed

강화되어 혼합특성이 개선되었기 때문으로 판단된다. 이외에도 600rpm의 경우가 동일 시기에서의 확산 화염의 발생면적이 가장 크게 나타나고 있다.

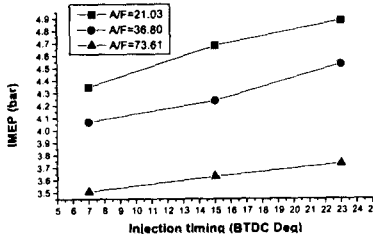
3.3 분사 조건에 따른 분무 연소 특성 비교

본 실험에서는 분사 시기와 공연비 변화에 따른 분무 연소 특성을 살펴보았다. Fig. 9는 분사 시기에 관해 회전수별로 도시평균 유효압력을 측정된 결과이다.

이 결과 그림으로부터 분사시기가 빨라질수록 도시 평균 유효 압력이 증가됨을 알 수 있으며, 이러한 현상은 엔진 회전 속도가 빠를 경우 더욱 현저하다. 이와 같은 현상의 원인으로는 분사 시기가 빠른 경우 착화 지연기간이 길어져서 연료와 공기의 충분한 예혼합이 진행된 후 열발생율



(a) 400rpm



(b) 600rpm

Fig. 9 Effects of the injection timing on IMEP at 400 and 600rpm

이 급격하게 증가하기 때문으로 생각된다. 또한 엔진 회전 속도가 클 경우에는 유동장 증가에 따라 예혼합 기간동안의 연료와 공기의 혼합이 더욱 촉진되어 분사시기의 영향이 크게 나타나고 있다. 이와 같은 분사시기에 따른 연소특성을 보다 명백하게 파악하기 위하여 극단적인 두 분사시기 (BTDC 7° 와 23°) 에 대한 확산화염 가시화 결과를 Fig.10에 나타내었다.

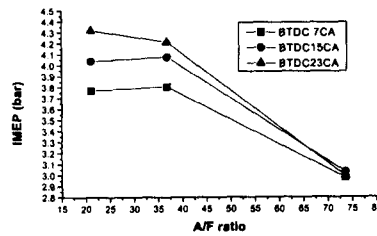
CA	9.6°	12°	14.4°	16.8°	19.2°	21.6°	24°	26.4°
Inj. Timing								
BTDC 7°								
CA	-7.2°	-4.8°	-2.4°	0°	2.4°	4.8°	7.2°	9.6°
Inj. Timing								
BTDC 23°								

Fig. 10 Visualization result with the injection timing (400rpm, A/F ratio = 21.03)

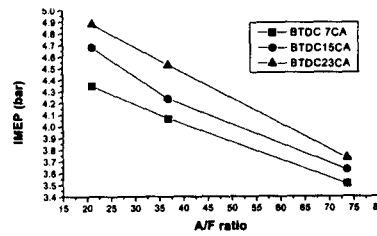
분사 후 처음 화염이 관측되는 시기는 BTDC 23° 의 경우가 조금 빠르지만 큰 차이는 보이지 않는 반면, 그 이후의 화염 성장 속도가 급격히 빨라지고 있으며 화염의 존재 시간도 더욱 길어지고 있으므로 열발생율이 증가되어 도시 평균 유효 압력도 증대되고 있음을 알 수 있다.

다음은 공연비 변화에 따른 각 분사 시기별 도시 평균 유효 압력의 측정 결과를 Fig.11에 나타

내었다.



(a) 400rpm



(b) 600rpm

Fig. 11 Effects of the A/F ratio on IMEP at 400 and 600rpm

600rpm의 경우 모든 분사시기에 대하여 공연비가 희박해 질수록 도시 평균 유효 압력이 감소하는 경향을 보이고 있으나, 400rpm의 경우 특정 분사 시기에 있어서는 A/F=36.8에서의 도시 평균 유효 압력이 A/F=21일때보다 도시 평균 유효 압력이 증가하는 영역이 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상을 정성적으로 규명하기 위하여 400rpm에서의 두 당량비(A/F=21과 36.8)에 대한 확산화염 가시화 결과를 Fig.12에 나타내었다.

ATDC	0°	4.8°	9.6°	19.2°	33.6°	43.2°	57.6°	67.2°
A/F								
21.0								
36.8								

Fig. 12 Visualization result with the amount of fuel (400rpm, Injection timing BTDC 7°)

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 $A/F=36.8$ 의 경우 초기 화염의 성장 속도가 급격히 빨라지고 있으나, 연료량의 부족으로 인하여 연소기간은 $A/F=21$ 의 경우보다 단축되고 있다. 따라서 초기 연소 속도의 증가는 상대적으로 정적 연소에 가까운 연소 상태를 구현할 수 있으므로 평균 유효 압력의 증가를 초래할 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

운전조건과 분사조건 변화에 따른 화염 가시화와 연소 특성 해석을 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 부하가 클 경우 동일한 크랭크 각도에서 확산 화염 발생 면적이 크게 나타났으며, 높은 열 발생율과 지속적인 확산연소가 발생됨을 알 수 있었다. 그러나 최고 열발생율의 발생시기는 부하 상태에 무관하게 비슷한 시기에서 관측되었다.
- 2) 엔진의 회전수가 증가할수록 화염의 성장 속도가 빨라짐을 알 수 있으며, 이는 유동장 강화에 따른 공기와 연료의 혼합이 개선되었기 때문으로 판단된다.
- 3) 본 실험 범위내에서는 분사 시기가 빠를수록 도시 평균 유효 압력이 증가하고, 확산화염의 성장속도가 촉진되는 경향을 보였으며, 이러한 현상은 빠른 회전수 영역에서 더욱 현저하게 나타났다.
- 4) 공연비가 희박할수록 도시 평균 유효 압력은 감소되지만, 저속 영역의 경우 $A/F=36.8$ 의 경우가 $A/F=21.03$ 보다 도시 평균 유효 압력이 증가되는 경향을 나타내었으며, 이러한 현상의 원인을 화염 가시화 결과로부터 확인하였다.

구 결과의 일부로서, 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- 1) 김명곤, 장기원, 김창수, "직분식 디젤 엔진용 고압 인젝터 구조에 관한 연구", 한국자동차공학회, 1997. 6.
- 2) 김창수, 김용환, "디젤연료분사장치에 대한 기술개발 동향", 한국액체미립화학회지, vol. 1, No. 3, 1996.
- 3) 장석채, 갈한주, 정영식, "솔레노이드 밸브를 이용한 디젤 기관의 분사율 변화 및 배기특성에 관한 연구", 한국 자동차 공학회, 1997. 6.
- 4) Imperial College of Science, Technology and Medicine, "Spray Characterization in Direct-Injection Diesel Engines", International Symposium on Advanced Spray Combustion, July 6-8, Hiroshima, Japan, 1994.
- 5) Yoshiaki Asou, Hajime Fujimoto, Jiro Senda, Kazushi Tsurutani, Masahiro Nagae, "Combustion in a small DI Diesel Engine at Starting", SAE paper 920697.
- 6) Takeyuki Kamimoto, Haruyuki Yokota, and Haruki Kobayashi, "Effect of High Pressure Injection on Soot Formation Processes in a Rapid Compression Machine to Simulate Diesel Flames.", SAE paper 871610.
- 7) John Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals.", McGraw-Hill Inc., 1988.

후 기

본 논문은 학술진흥재단 기계공학 연구과제 (1998-018-E00123)의 연구비에 의해 수행된 연