

예혼합 압축착화 디젤엔진의 분사시기 변화에 따른 혼합기 형성 과정 및 연소 특성에 관한 연구

조병호*·한용택*·이기형†·이창식**

(2002년 3월 12일 접수, 2002년 9월 27일 심사완료)

A Study on the Mixture Formation Process and Combustion Characteristics According to Injection Timing in Premixed Charge Compression Ignition

Byung ho Cho, Yong tak Han, Ki hyung Lee and Chang sik Lee

Key Words: PCCI(예혼합 압축착화), GTT(generalized tank and tube), Mixture(혼합기), Exhaust Gas(배기가스)

Abstract

A diesel engine has various merits such as high thermal-efficiency, superior fuel consumption and durability. Therefore the number of diesel engine in the world is increasing. As the seriousness of environmental pollution increases in the world, the method to reduce the noxious materials of CO₂, NO_x and P.M. is very important subject to correspond to exhaust gas regulations. A new concept, so called premixed charge diesel combustion(PCCI), is focused among the various corresponding manners. In this study, we investigated the mixture formation within the cylinder with injection timing using GTT simulation code and also compared combustion characteristics of PCCI engine with that of commercial diesel engine. From this experiments, it could be found that homogeneous mixture formation was observed according to advance of injection timing and simultaneous reduction of NO_x and Soot in injection timing of BTDC 60°

1. 서론

연비, 내구성, 열효율 면에서 우수한 장점을 가지고 있는 디젤엔진의 사용은 차량 및 산업 분야에서 광범위하게 이용되고 있다. 그러나 최근 보편화되고 있는 직접 분사식의 경우 실린더 내로 연료가 직접 분사되므로 분사된 연료 분무 주위에는 공간적으로 불균일한 공연비 분포가 발생되어 농후영역에서는 입자상 물질(particulate material

: P.M.)이 생성되며, 이온 공연비 영역에서는 질소산화물(NO_x)의 배출이 증가하는 현상이 큰 문제점으로 대두되고 있다. 따라서 전 세계적으로 자동차 배출가스에 의한 환경문제가 심각하게 대두됨에 따라 이에 대한 규제가 강화되고 있는 실정이며, 이러한 배출가스 저감기술로서 다양한 방안들이 제시되고 있는 가운데 NO_x와 P.M. 배출물의 동시 저감을 이루기 위한 새로운 방안으로 다양한 연료를 이용하여 예혼합 압축착화를 시도하는 연구가 여러 기관에서 수행되고 있다.^(1~8)

본 연구에서는 예혼합 압축착화 연소방식을 이용하기 위하여 혼합기 형성 과정을 시뮬레이션 코드를 이용하여 파악함으로써 균일한 예혼합기 형성에 최적의 연료분사 조건을 예측하였다. 또한 이러한 결과를 바탕으로 예혼합 압축착화 실험을 수행하여 기존의 직분식 디젤엔진과의 연소 및 배기 특성을 비교하여 분사시기 변화에 따른 NO_x와 Soot의 동시저감의 가능성을 파악하였다.

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과

E-mail : hylee@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5251 FAX : (031)406-5550

2. 실험 장치 및 해석 방법

2.1 예혼합 압축착화 엔진 시스템

본 실험에서는 Table 1과 같은 제원을 가진 상용 단기통 디젤엔진을 기본으로 Fig. 1과 같은 예혼합 압축착화 엔진 시스템을 제작하였다. Fig. 1과 같이 연소실 내에 분사시기를 변경시켜 경유를 분사함으로써 예혼합 압축착화를 실현시키기 위해 직접 분사식 가솔린 엔진에 사용되는 고압 인젝터를 설치하였고, 공급연료의 미립화를 촉진시키기 위하여 흡기밸브와 서지 탱크 사이에 가열기를 설치하였다.

한편 경유를 공급하기 위해서 독립적으로 분사압력 조절이 가능한 고압펌프를 사용하였으며, 실린더헤드 중앙부에는 Kistler사의 피에조 형식의 압력센서를 부착하여 연소실내 압력을 획득하였다. 캠축과 크랭크축에 엔코더를 설치하여 회전수를 조정하였고, 여러 가지 배기가스 측정장치를 이용하여 배기밸브에서 방출되는 배기가스 성분(Soot, NOx)을 측정하였다. 엔진 제어장치는 크게 엔진동력계, 엔진제어부, 연료 분사 제어부로 구성되어 있다. 엔진동력계는 Dauem사의 75 kW출력의 DC 동력계로서 엔진제어 및 데이터 획득이 수행되며, 엔진의 부하는 동력계 제어 프로그램으로 조절된다.

Table 1 Engine specification

Engine class	ND130DI
Engine type	4stroke single diesel (direct injection)
Bore × Stroke	95mm × 95mm
Displacement volume	673cc
Compression ratio	19
Inlet valve open/close	BTDC 20° / 130°
Exhaust valve open/close	ATDC 132° / 20°

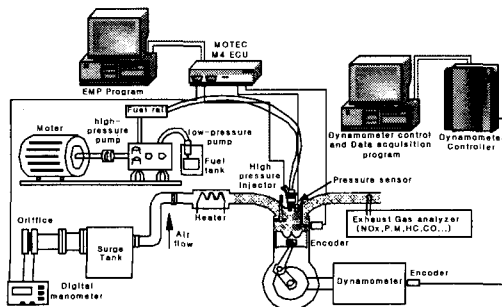


Fig. 1 Schematic diagram of direct injection type PCCI system

또한 연료분사를 제어하기 위하여 Motec사의 M4 ECU를 사용하여 공급 연료의 분사시기 및 분사량을 조절하였다.

2.2 실험방법

분사시기 변화에 따른 예혼합 압축착화 연소실 내의 혼합기 형성 과정을 파악하기 위해서 사용 연료는 시중에서 판매되는 일반경유를 사용하였으며, 연료분사압력은 5MPa, 분사시간은 1.5ms로 고정하여 분사시기 변화에 따라 혼합기 형성 과정과 속도 분포를 파악하였다. 한편, 예혼합 압축착화 엔진 실험을 수행하기 위하여 예혼합 압축착화 엔진의 가장 큰 단점이라고 할 수 있는 운전영역의 한계를 고려하여 저속·저부하 영역에서 실험을 수행하였고, 냉각수 온도는 $80 \pm 1^\circ\text{C}$ 를 유지하였으며, 연료분사조건에 따른 연소 및 착화특성을 파악하기 위하여 흡입공기 온도와 연료 분사압력을 변화시켜 각각의 경우에 분사시기 변화에 따른 연소 특성을 파악하였다.

2.3 혼합기 분포 및 증발과정 시뮬레이션

일반적으로 연소실 내의 연소현상에 의한 부산물로서 얻어지는 NOx 와 Soot 의 발생은 연소실 내의 혼합기 분포의 균일성에 밀접한 관계를 가지고 있으므로 본 연구에서는 시뮬레이션을 이용하여 예혼합 압축착화 연소실 내에서의 혼합기 형성과정과 공급 연료의 분무 및 증발과정을 파악함으로써 본 실험에서 적용하고자 하는 예혼합 압축착화 연소방식의 가능성을 검토하였다.

직접 분사식 예혼합 압축착화 연소실 내의 분무 거동을 파악하기 위한 시뮬레이션 코드로서는 KIVA II를 기초로한 GTT (generalized tank and tube)코드^(9,10)를 사용하였으며, 직접 분사식 예혼합 압축착화 연소실 내에서의 분사시기, 초기에

Table 2 Experiment conditions

Spray simulation	
Fuels	diesel
Injection pressure	5 MPa
Injection duration	1.5 ms
Injection timing	BTDC 30°, 60°, 120°
Direct injection engine performance test	
Engine speed	1200 rpm
Load	unload, 1/4load
Air temperature	80°C, 120°C
Injection pressure	3, 7 (MPa)
Injection timing	BTDC 30°, 60°, 120°

공급되는 연료의 액적크기, 분사압력, 분무각, 고압인젝터의 제원, 분사위치 및 분사방향 등을 시뮬레이션을 위한 최적의 상태에서 연소를 고려하지 않고 각각의 분사시기와 연료 분사압력에 대한 연소실 내의 혼합기 분포를 예측하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 단기통 디젤엔진의 실린더 및 피스톤 형상을 나타낸 그림이며, Fig. 3은 본 시뮬레이션 코드에 적용된 42×42×17의 격자로 이루어진 직접 분사식 예혼합 압축착화 엔진의 grid 형상을 나타낸 그림이다.

한편 이러한 GTT 코드를 이용하여 일정 분사시기에 연소실 내에 연료를 분사한 경우에 대하여 Fig. 4와 같이 전체적인 분무형상 및 분무도달거리와 분무각을 분무 가시화 실험결과와 비교함으로써 본 연구에서 사용한 GTT 코드의 신뢰성을 확인하였다.

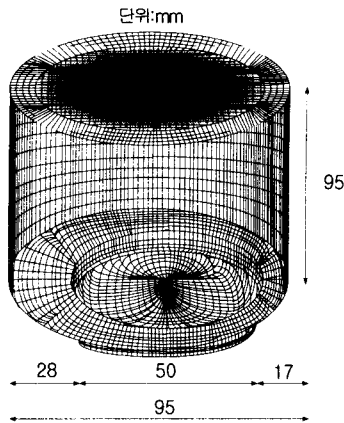


Fig. 2 Cylinder and piston cavity of PCCI

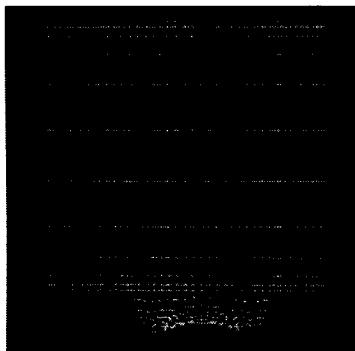


Fig. 3 Computational grid of PCCI

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 혼합기 형성 과정 시뮬레이션

분사시기 변화에 대한 혼합기 형성과정을 살펴보기 위하여 각각의 연료 분사시기에 대하여 연료분포와 속도분포를 크랭크 각도별로 나타내었다. Fig. 5와 Fig. 6은 분사시기가 BTDC120°인 경우의 크랭크 각도에 따른 연료분포와 속도 분포를 나타낸 그림이다. 두 그림에서 알 수 있듯이 분사된 연료는 시간이 경과함에 따라서 피스톤 캐비티 쪽으로 이동함과 동시에 주위 공기와의 혼합에 의하여 분무각이 확대되어 연소실 전체로 분포하는 경향을 보이고 있으며, 분무가 발달하



(a) Result of simulation (b) Result of spray visualization

Fig. 4 Validation of GTT code

CA	BTDC 118°	BTDC 116°	BTDC 113°	BTDC 106°
Fuel vapor mass fraction				
3D velocity contour				
CA	BTDC 100°	BTDC 75°	BTDC 50°	BTDC 20°
Fuel vapor mass fraction				
3D velocity contour				

Fig. 5 Fuel distribution and Velocity in BTDC120°

는 기간 동안 연소실 벽과 피스톤에 충돌되지 않고 성장해가고 있음을 알 수 있다. 이러한 압축 초기에 분사된 연료는 시간이 지남에 따라 전체적으로 균일화되어 연소실 전체에 혼합기의 형성이 이루어지는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 7은 BTDC⁶⁰에 분사하였을 경우의 연료 분포와 속도분포를 크랭크 각도별로 표시한 그림이다. 분사후 혼합기의 형성이 이루어지기 전에 분무가 피스톤의 캐비티 안으로 빨려들어감을 볼 수 있고, 혼합기가 캐비티의 벽면을 따라 퍼지는 모습을 볼 수 있다. 즉 균일화되기 전에 연료가 피스톤에 충돌하는 모습을 볼 수 있다. 또한 충돌에 의한 운동량 상승에 따라서 캐비티 내의 속도분포가 비교적 높게 나타나는 경향을 볼 수 있다.

Fig. 8은 BTDC 30°에 분사한 경우의 연소실 내의 연료 분포와 속도분포를 계산하여 크랭크 각도별로 표시한 그림이다. 연료 분포의 그림과 같이 연료가 분사됨과 동시에 피스톤의 벽면에 연료가 충돌되기 때문에 균일한 혼합기 분포가 생성되기 어렵다는 사실을 시뮬레이션 결과로서 알 수 있다. 또한 속도분포에서도 분사시기를 BTDC 120°, BTDC 60°, BTDC 30°로 변화시켰을 경우 압축초기에 분사된 혼합기는 크랭크각도가 진행함에 따라 혼합기의 균일화가 이루어지

는 결과를 볼 수 있었고, 또한 분사시기를 지각함에 따라 혼합기의 분포가 균일화되지 못하고 캐비티의 벽면에 혼합기의 형성이 이루어지는 것을 알 수 있었다.

3.2 예혼합 압축착화 디젤엔진의 연소특성

Fig. 1과 같은 예혼합 압축착화 실험 장치를 이용하여 저속, 저부하 영역에서 분사시기 및 분사량 그리고 압축행정 말기에 분사된 연료의 착화에 영향을 미칠 수 있는 흡입공기 온도와 연료 분사압력의 변화에 따른 연소 및 배기특성을 분석하였다. 먼저 흡입공기 온도가 80℃이고, 연료 분사압력이 3MPa일 때의 연소특성을 살펴보았다. Fig. 9는 무부하에서, Fig. 10은 1/4부하에서의 연소압력과 열발생율을 나타낸 그래프이다. 무부하에서는 분사시기가 변화함에 따라서 연소 최고압력과 발생시기 그리고 착화시기는 거의 변화가 없음을 알 수 있으며, 부하가 증가한 경우에는 분사시기를 진각 시킴에 따라서 연소 최고압력은 점차 상승되며 최고압력 발생시기는 거의 일정하고, 착화시기는 분사시기를 진각시킴에 따라서 조금씩 진각됨을 알 수 있다. 이는 분사시기를 BTDC 60°와 BTDC 120°로 진각시킴에 따라서 분사된 연료와 공기와의 혼합시간은 연료분사시기가 BTDC 30°일 때보다 1200rpm일 때 약 4.1ms와 13.3ms 증가하지만 전체적으로 실린더 내부의 분위기 온도와 압력이 낮은 상태에서 분사할 뿐만 아니라 온도와 압력의 변화정도는 피스톤이 상사점에 이르렀을 때에 비하여 크지 않고 또한 연료분사압력이 3MPa로서 점성과 비중이 높은 디젤연료가 제대로 무화되지 않고 액적이 큰 상태로 분사가 되기 때문에 일정 분사압력으로 분사된 연료가 착화점에 도달하기까지의 증발시간은 분사시기를 진각시킴에 따라서 증가했기 때문으로 생각된다. 한편 각각의 부하에서 열발생율을 살펴보면 무부하에서는 분사시기 변화에 따라서 큰 차이가 없으며, 반면 1/4부하에서는 전체적으로 공급 연료량의 증가로 인하여 연소가 활발해지며, 분사시기가 진각됨에 따라서 큰 차이는 나타나지 않지만 BTDC120°인 경우에 예혼합 열발생이 더 많이 일어남을 관찰할 수 있다. 이는 연료 입자들의 균일도 향상에 의한 증발속진 때문인 것으로 생각되며 부하가 증가함에 따라서 그 효과가 잘 나타나는 것으로 생각된다.

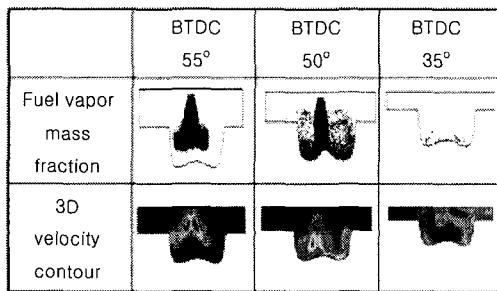


Fig. 6 Fuel distribution and Velocity in BTDC60°

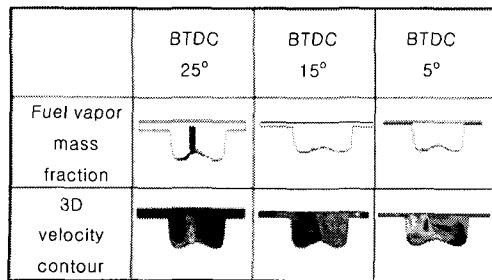


Fig. 7 Fuel distribution and Velocity in BTDC30°

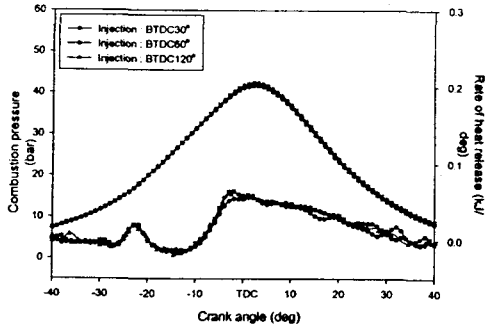


Fig. 8 Combustion pressure and ROHR at unload by injection timing

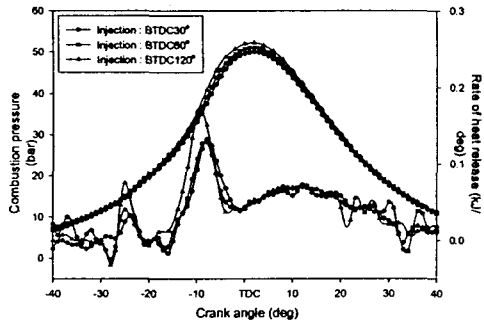


Fig. 9 Combustion pressure and ROHR at 1/4 load by injection timing

한편 무부하와 1/4부하에서 모두 BTDC22° 부근에서 소위 냉염(cool flame)현상이 일어남을 관찰할 수 있었다. 이러한 화염 한계 영역에 대하여 명확한 규명을 한다면 예혼합 압축착화 엔진의 분사시기 조절에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 생각된다.

한편 흡입공기 온도와 연료 분사압력에 대한 연소특성을 살펴보기 위하여 분사시기가 BTDC 30° 와 120° 인 경우에 대하여 검토를 하였다. Fig. 11은 1/4부하에서 분사시기가 BTDC30° 인 경우 흡입공기 온도와 연료 분사압력에 대한 연소압력과 열발생율을 나타낸 그래프이고, Fig. 12는 분사시기가 BTDC120° 인 경우의 그래프이다. 흡입공기 온도가 80℃인 경우보다 120℃인 경우에 전체적으로 연소 최고압력 발생시기와 착화시기는 진각됨을 알 수 있으며, 연소 최고압력은 약 0.5MPa 정도 증가함을 알 수 있다. 이는 흡입공기 온도의 증가로 인하여 연료입자의 증발이 촉진됨으로써 착화시기와 연소최고압력 발생시기가 진각된 것으로 생각되며, 연소도 더 활발히

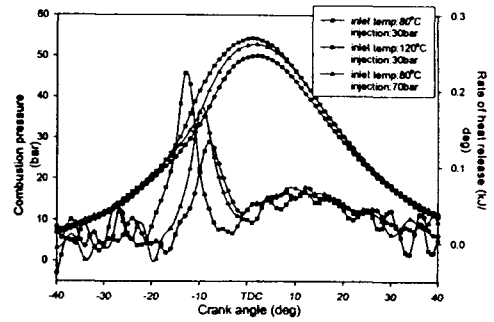


Fig. 10 Combustion pressure and ROHR at BTDC30° by inlet temp and injection pressure

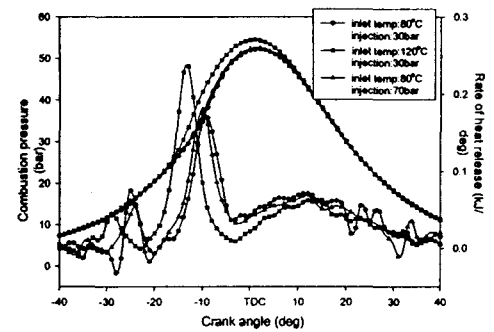


Fig. 11 Combustion pressure and ROHR at BTDC120° by inlet temp and injection pressure

일어난 것으로 생각된다. 한편 흡입공기 온도가 120℃인 경우에는 분사시기에 따라 큰 변화가 없는 반면, 80℃인 경우에는 분사시기가 BTDC120° 인 경우가 BTDC30° 인 경우보다 더 높은 연소압력을 나타내고 있다. 즉 흡입공기 온도가 높은 경우에는 분사시기의 영향이 적고, 흡입공기 온도가 상대적으로 낮은 경우에는 분사시기의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 한편, 흡입공기 온도가 120℃인 경우에는 분사시기에 따라서 큰 차이를 나타내고 있지 않지만, 흡입공기 온도가 80℃인 경우에는 분사시기가 BTDC 120° 인 경우가 BTDC 30° 인 경우보다 예혼합 열발생이 더 크게 발생되고 있음을 알 수 있다. 이는 흡입공기 온도가 상대적으로 낮은 경우에 분사시기 진각에 따른 연료 입자들의 균일도 향상 때문으로 생각된다.

한편, 연료 분사압력에 대한 영향을 살펴보면 두 그래프에서 알 수 있듯이 분사압력이 높은

7MPa인 경우에는 분사시기에 상관없이 최고 연소압력과 발생시기, 착화시기는 거의 비슷한 경향을 나타내고 있는 반면, 분사압력이 3MPa로 낮은 경우에는 분사시기가 BTDC120° 인 경우가 BTDC30° 인 경우보다 최고 연소압력이 약 0.2~0.3MPa 정도 상승하여 연료 분사압력이 7MPa인 경우와 거의 비슷한 값을 나타내고 있다. 이는 분사시기가 BTDC30° 인 경우에는 비록 낮은 분사압력 범위이지만 연료 분사압력 증가에 따른 연료 입자들의 미립화 효과에 따른 증발 촉진 때문인 것으로 생각되며, 분사시기가 BTDC 120° 인 경우에는 분사시기 진각에 의해 연료 입자들과 공기와의 혼합시간이 증가함에 따른 균일한 혼합기 형성에 의한 효과가 연료 분사압력 증가에 따른 미립화 효과보다 더 큰 것으로 생각된다. 분사시기가 BTDC30° 인 경우에는 연료 분사압력의 증가에 대한 연료 액적들의 증발 촉진으로 인해서 예혼합 연소구간에서의 열발생이 더 빨리 발생됨을 알 수 있으며, 분사시기가 BTDC 120° 인 경우에는 큰 차이가 나타나지 않고 있다. 한편 전체적으로 연료분사압력 보다는 흡입 공기 온도에 대한 영향이 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 연료 분사압력이 낮은 범위이므로 연료 입자들의 미립화의 효과에 의한 증발 촉진효과가 흡입공기 온도증가에 의한 효과보다 미비하기 때문으로 생각된다.

3.3 예혼합 압축착화 디젤엔진의 배기특성

직접 분사식 예혼합 압축착화 디젤엔진의 배기 특성을 살펴보기 위하여 1/4부하에서 흡입공기 온도와 연료 분사압력 그리고 연료 분사시기에 대하여 NOx와 Soot 배출량을 측정하였다. 먼저 Fig. 13은 연료 분사압력이 3MPa인 경우 흡입공기 온도와 연료 분사시기에 따라서 NOx와 Soot의 배출량을 나타낸 그래프이고, Fig. 14는 연료 분사압력이 7MPa일 때 NOx와 Soot의 배출량을 나타낸 것이다. Fig. 13에서 보는바와 같이 NOx 배출량은 전체적으로 50ppm 이하의 배출량을 나타내고 있으며, 이는 기존의 압축행정 말기에 200bar의 연료 분사압력으로 연료를 분사했을 경우와 비교했을 때 약 1/5이하의 수준으로 감소한 수치이다. 그러나 Soot의 발생량을 살펴보면 흡입공기 온도가 120℃인 경우 약35%, 80℃인 경우 약40% 가깝게 높은 수치를 나타내고 있다. 이는 기존의 직분식 디젤엔진의 1/4부하에서의 배출량

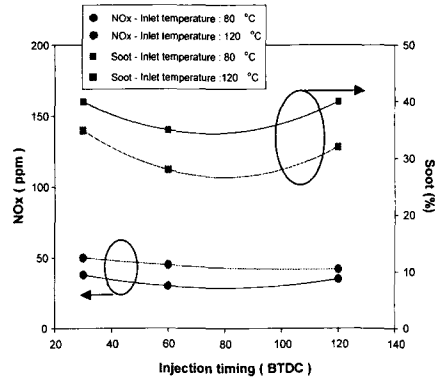


Fig. 12 NOx and Soot at injection pressure 3MPa

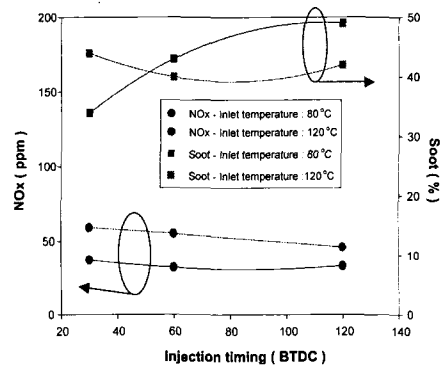


Fig. 13 NOx and Soot at injection pressure 7MPa

인 25%와 비교해 볼 때 약1.5배 이상 증가한 수치이다. 이러한 NOx와 Soot의 배출량은 연료분사 압력이 7MPa인 경우에도 유사한 값을 나타내고 있으며, 흡입공기 온도가 증가하는 경우에는 NOx 발생량이 약간 증가하고 soot 발생량은 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이러한 원인으로는 분사시기를 진각시킨 예혼합 압축착화의 경우에는 좀 더 균일한 혼합기 생성에 의해서 NOx 발생량이 저감된 것으로 생각되며, 분사시기가 BTDC30° 인 경우에는 급격한 열발생이 일어날 수 있을 만큼 충분히 연료 입자들의 기화가 되지 않음으로 인한 불완전 연소 때문에 NOx 발생량이 저감된 것으로 생각된다. 이러한 경향으로 살펴보면 직접 분사식 예혼합 압축착화를 시도한 본 실험방법에서의 연료공급 방식은 연료 분사압력이 전체적으로 낮은 분사압력의 범위이기 때문에 연료 입자들의 충분한 미립화를 도모할 수 없으므로 전체적으로 과도한 Soot 발생을 초래한 것으로 생각된다. 또한 흡입공기 온도를 증가시킨 경우에는 기화 촉진으로 인하여 연소가 촉진됨으

로써 NOx 발생량은 증가하고, Soot 발생량은 감소하는 것으로 생각된다.

4. 결론

(1) 분사시기를 변경시켜 연소실내의 혼합기 분포를 비교한 결과, 압축초기에 분사된 혼합기는 크랭크각도가 진행함에 따라 혼합기의 균일화가 이루어지는 결과를 볼 수 있었고, 분사시기의 지각에 따라 혼합기의 분포가 균일화되지 못하고 캐비티의 벽면 부근에 혼합기의 형성이 이루어지는 것을 알 수 있었다.

(2) 조기 분사일 경우 혼합과 증발에 여유가 있으므로 예혼합 연소가 원활하게 발생하였으며, 분사시기가 늦을 경우는 분사 압력과 흡기 온도의 영향을 강하게 받고 있으며, 원활한 예혼합 착화연소를 시키기 위하여는 이와 같은 연료와 공기의 혼합을 촉진시킬 수 있는 방안이 필요함을 알 수 있었다. 또한 전체적으로 연료 분사압력에 대한 영향보다는 흡입공기 온도에 대한 영향이 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

(3) 직분식 예혼합 압축착화 엔진의 경우 NOx와 Soot를 동시에 저감시킬 수 있는 분사시기가 존재함을 확인하였으며, 본 실험 조건에서는 분사압력이 3MPa인 경우 BTDC 60° 분사의 경우가 NOx와 Soot의 동시 저감에 효과적이었다.

후 기

본 연구는 청정 생산 기술 사업 및 BK21 지원에 의하여 수행된 연구결과로서, 관계기관에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Keiichi Nakagome, Naoki Shimazaki, Keiichi Niimura and Shinji Kobayashi, 1997, "Combustion and Emission Characteristics of Premixed Lean Diesel Combustion Engine," SAE Paper 970898.
- (2) Rie Takatsuto, Tetsuya Igarashi and Norimasa Iida, 1998, "Auto Ignition and Combustion of DME and n-Butane / Air Mixtures in Homogeneous Charge Compression Ignition Engine," *The Fourth International Symposium*

COMODIA 98, pp. 185~190.

- (3) Magnus Christensen and Bengt Johansson, 1998, "Influence of Mixture Quality on Homogeneous Charge Compression Ignition," SAE Paper 982454.
- (4) M. P. Poonia and A. Ramesh and R. R. Gaur, 1998, "Effect of Intake Air Temperature and Pilot Fuel Quantity on the Combustion Characteristics of a LPG Diesel Dual Fuel Engine," SAE Paper 982455.
- (5) Yoshinaka Takeda, Nakagome Keiichi and Niimura Keiichi, 1996, "Emission Characteristics of Premixed Lean Diesel Combustion with Extremely Early Staged Fuel Injection," SAE Paper 961163.
- (6) Yasuhiro Daisho, Kou Takahashi, Yuki Iwashiro, Shigeki Nakayama, Ryoji Kihara, and Takeshi Saito, 1995, "Controlling Combustion and Exhaust Emissions in a Direct-Injection Diesel Engine Dual-Fueled with Natural Gas," SAE Paper 952436.
- (7) Magnus Christensen, Anders Hultqvist and Bengt Johansson, 1999, "Demonstrating the Multi Fuel Capability of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Variable Compression Ratio," SAE Paper 1999-01-3679.
- (8) Makoto Kaneko, Koji Morikawa, Jin Itoh, Youhei Saishu, 2001, "Study on Homogeneous Charge Compression Ignition Gasoline Engine," *The Fifth International Symposium COMODIA 2001*, pp. 441~446.
- (9) Je-hyung Lee, Shinichi Goto, Tadashi Tsurushima, Takeshi Miyamoto and Tomoyuki Wakisaka, 2000, "Effects of Injection Conditions on Mixtures Formation Process in a Premixed Compression Ignition Engine," SAE Paper 2000-01-1831.
- (10) Tadashi Tsurushima, Takeshi Miyamoto, Hisashi Akagawa, Yuzo Aoyagi, Je-Hyung Lee, Daeyup Lee, Shinichi Goto, Tomoyuki Wakisaka, Takuji Ishiyama and Hiroshi Kawanabe, 2000, "Effects of Initial In-Cylinder Flow Field on Mixture Formation in a Premixed Compression Ignition Engine," SAE Paper 2000-01-0331.