

좁은 분사각을 갖는 인젝터를 이용한 예혼합 압축착화 엔진의 분사조건에 따른 분무 및 연소특성에 관한 연구

김형민* · 김영진* · 류재덕** · 이기형†

A Study on the Spray and Combustion Characteristics of a HCCI Engine according to Injection Conditions using a Narrow Angle Injector

Hyungmin Kim, Yungjin Kim, Jeaduk Ryu and Kihyung Lee

Key Words: Homogeneous Charge Compression Ignition engine (예혼합 압축 착화 엔진), Emission(배기가스), IMEP(도시평균유효압력), Injection angle(분사각), Injection timing(분사시기)

Abstract

As the exhaustion of petroleum resources and air pollution problems are getting serious recently, there are growing interests in premixed diesel engines which have the potential of achieving a more homogeneous mixture near TDC compared to conventional diesel engines. Early studies have shown that the fuel injection frequency and spray angle affected the mixture formation and combustion in a HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) engine. Therefore, the purpose of this study is to investigate the relationship between combustion and mixture formations by injection timing and frequency using a narrow angle injector, NADI (Narrow Angle Direct Injection). In this study, we found that the fuel injection timing and injection frequency affect the mixture formations and then affect combustion in the HCCI engine.

1. 서 론

한정된 석유자원의 고갈이 임박해가고 날로 심각해져가는 환경오염이 세계적인 문제로 대두되면서 에너지 효율이 보다 좋은 자동차의 개발과 차량의 배출가스 저감에 대한 요구가 점점 증대되고 있다. 이와 같은 맥락에서 열효율이 높은 디젤엔진은 큰 매력을 가지고 있으나, 연소과정 중 극부적인 고온 반응 구간에서의 NOx와 확산연소구간에서의 입자상 물질(particulate matter) 등의 배출 증가가 문제점으로 대두되고 있다. 따라서 내

연기관 연구자들은 이와 같은 단점을 극복하고 점점 강화되는 배기 규제를 만족시킬 수 있는 저공해 엔진 기술 개발을 위해 많은 노력을 하고 있으며, 이러한 요구를 충족시키기 위한 한가지 방법으로 연료와 공기가 충분히 혼합할 수 있는 예혼합 연료 분사 시스템을 이용하여 연소실내 희박 균일한 예혼합기를 동시에 착화시키는 HCCI(Homogeneous Charge Combustion Ignition) 연소가 주목을 받고 있다⁽¹⁻³⁾. 그러나 이와 같은 HCCI 연소의 경우 디젤엔진에 상응하는 열효율을 가지며, NOx와 스모크를 동시에 저감할 수 있는 장점이 있는 반면, 기존의 디젤엔진과 달리 연소실내의 분위기 압력 및 온도가 낮은 분사시기에서의 연료 분사를 통해 혼합기의 균일 분포를 유도하기 때문에 연료의 벽면충돌로 인한 벽류의 형성 및 좁은 운전영역 등과 같은 문제점을 가지고 있다.

그러므로, 본 연구에서는 벽류 형성을 줄이기 위해 좁

(2006년 8월 30일 접수 ~ 2006년 9월 24일 심사완료)

*한양대학교 대학원

**두산인프라코어

†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : hylee@hanyang.ac.kr

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

은 분사각을 갖는 고압 인젝터를 사용하여 분사시기와 분사횟수에 따른 분무와 혼합기 형성 및 배기 특성을 파악하였고, HCCI 연소에서 벽류 형성을 줄이고 엔진의 운전영역을 확대할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 실험 장치 및 연구 내용

2.1 실험 장치

Figure 1은 실험에 사용한 커먼레일 분사 방식의 단기통 HCCI 엔진의 개략도를 나타낸 것으로, 그림에서 보듯 분사와 같이 본 연구를 위해 노즐 지름이 0.168 mm인 5공 인젝터를 사용하여 직접 분사방식의 단기통 엔진을 구성하였다. 또한, 냉각수를 일정온도로 유지하기 위해 별도의 외부 냉각시스템과 3 kW의 히터를 설치하였고, 외부 오일 공급장치 및 30 kW AC 동력계를 사용하여 엔진을 일정 회전수로 제어하였다. 엔진의 연소해석 및 연료 공급 제어를 위하여 엔진 크랭크 축에 1800 pulse 엔코더와 캠축에 TDC 센서를 부착하였으며, 분사 압력을 제어 하기 위하여 커먼레일의 P.C.V.를 사용하였다. 엔진의 분사시기 및 분사량은 NI사의 counter board를 사용하여 제어하였으며, HCCI 연소 현상을 파악하기

위하여 연소실에 압력센서를 설치하여 연소 압력을 측정하였고, 배기 성능을 평가하기 위하여 NOx는 Horiba사의 배기 가스분석계, 매연의 농도는 AVL사의 스모크 측정기를 통하여 측정하였다.

2.2 분무수치해석

본 연구에서는 Ricardo사의 상용 프로그램인 VECTIS 3.7을 사용하여 분사각 및 분사시기가 연소실내의 혼합기 형성에 미치는 영향을 추가적으로 파악하기 위해 3차원 분무 수치해석을 수행하였다⁽⁴⁾. 계산영역은 실험에 사용한 실제 엔진의 연소실을 모델링 하고, BTDC 220° 부터 연소가 시작되는 TDC까지를 계산시간으로 하여 흡배기 밸브가 닫힌 상태에서 분사를 실행하였으며, 엔진 속도 및 스웰비는 연소 실험용 엔진과 동일 조건하에 해석을 실행하였다. 또한, 초기값으로 사용한 분사 속도 및 유량 계수는 분사율 실험 결과를 사용하였고⁽⁵⁾, 초기 S.M.D.는 노즐 지름으로 가정하였다. 분사된 연료의 분열 모델은 Kelvin-Helmholtz 이론을 사용하였으며, 식 (1), (2)에 파동 분열의 wave length 및 frequency를 나타내었다^(6, 7).

$$\Lambda_{KH} = \frac{9.02r_d(1+0.45Z^{0.5})(1+0.4T^{0.7})}{(1+0.865We^{1.67})^{0.6}} \quad (1)$$

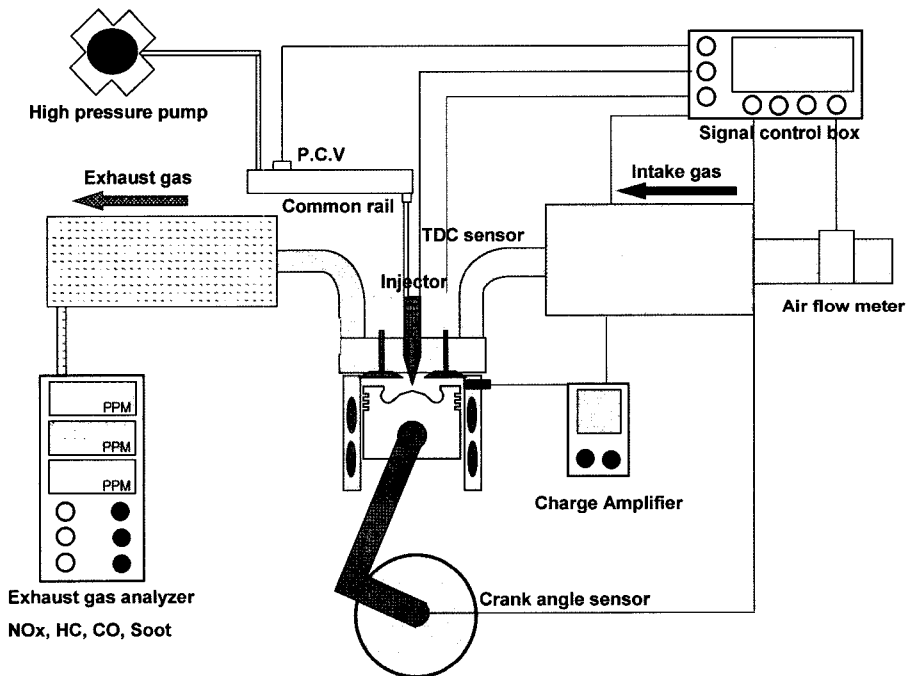


Fig. 1 Schematic of common rail injection type HCCI single cylinder engine

$$\Omega_{KH} = \frac{(0.34 + 0.385 We^{1.5}) \sqrt{\sigma}}{(1+Z)(1+1.4T^{0.6}) \sqrt{\rho_d r_d^3}} \quad (2)$$

생성되는 액적의 크기는 식 (3), (4)와 같이 Kelvin-Helmholtz의 wave length에 비례하는 것으로 가정하였다.

$$r_{d,stable} = B_0 \Lambda_{KH} \quad (\Lambda_{KH} \leq r_d) \quad (3)$$

$$r_{d,stable} = \left[\left(\frac{2\pi r_d^2 U_r}{2\Omega_{KH}} \right)^{1/3}, \left(\frac{3r_d^2 \Lambda_{KH}}{4} \right)^{1/3} \right] \quad (4)$$

($\Lambda_{KH} > r_{d,once}$)

액적의 주기는 아래의 식 (5)에 의하여 구하였다.

$$\tau_b = \frac{3.78 B_1 r_d}{\Omega_{KH} \Lambda_{KH}} \quad (5)$$

상수 B_0 는 분무에서 안정된 입자크기의 경우와 동등한 값으로 주어진 0.6이고, B_1 은 Reitz, R.D. 에 의해 제안된 값으로 엔진에서의 분무모델링 연구에 사용된 값 10을 적용하였다⁽⁷⁾.

또한 연료의 증발 특성을 고려하기 위하여 열전달 및 온도 계산을 추가하였으며, 식 (6), (7)은 액적의 질량 및 온도의 계산식을 나타낸 식이다⁽⁸⁾.

$$\frac{dm_d}{dt} = -A_d Sh \frac{D_{AB}}{D_d} \rho_v \ln \left(\frac{p - p_{v,\infty}}{p - p_{v,s}} \right) \quad (6)$$

$$m_d \frac{dC_{p,d}T}{dt} = -A_d Nu (T_d - T) k_m T_x + h_{hg} \frac{dm_d}{dt} \quad (7)$$

연소실 벽면에서의 계산은 Gosman 등이 제안한 분무 충돌 모델을 사용하였고, We_m, T_{Leid} 에 따라서 분무가 연소실 벽면 충돌 후 흡착, 튀김, 산포, 깨짐의 조건으로 계산을 수행하였다. 연소실 벽면의 조도는 없는 것으로 가정하였다^(6, 8).

2.3. 연구 내용 및 방법

본 연구에서는 고압 직접분사식 예혼합 압축착화 엔진을 이용한 분사시기 및 분사형태에 따른 분무 수치 해석을 수행하여 피스톤 형상과 연료의 충돌위치가 혼합기 형성⁽⁸⁾에 미치는 영향을 평가하였으며, 가시화 엔진을 통하여 화염특성을 파악하였고 그에 따른 엔진의 성능 및 배기 실험을 실시하였다. 또한, 실험 조건은 Table 1에 나타난 것과 같이 엔진 회전수 및 분사압력은 1400 rpm과 100 MPa로 고정하였고, 분사방법은 연료의 충분한 예혼합을 위하여 조기 다단분사방식을 선택하여 실험을 수행하였다. 인젝터는 연소실의 벽면 충돌을 줄이기 위하여 분사각 100°인 협각 인젝터⁽⁹⁾를 사용하여

Table 1 Experimental condition

Engine speed	1400 rpm
Injection pressure	100 MPa
Injection quantity	7.5 mm ³ ~26 mm ³
Injection timing	BTDC 180°~TDC
Injection angle	100°
Injection method	Early single, multiple
Intake condition	Natural Aspiration

연소 및 배기성능 특성을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 협각 인젝터의 분무 특성

Figure 2는 협각인젝터와 상용디젤엔진에 사용되는 인젝터의 분사각을 비교한 그림이다.

3.1.1 분위기 압력에 따른 분무 특성

Figure 3은 고압 챔버내에서 연소실의 압력을 모사하여 분무도달거리를 정량적으로 나타낸 결과이다. 주로 분위기 압력이 분무도달거리에 미치는 영향을 보기 위한 실험이므로 온도는 편의상 BTDC 65° 기준의 520 K으로 고정하였다. 결과를 볼 때 분위기 압력이 증가할수록 분무도달거리는 짧아지는 것을 알 수 있으며 엔진의 보어(91 mm)를 기준으로 할 때 분사 시기를 TDC에 가까이할수록 연료의 벽면 충돌량이 감소하게 된다. 또한, 예혼합 연소를 실현하기 위한 분사시기인 BTDC 70~50°에서의 분위기 압력은 5~10 bar 정도이므로 엔진 내부의 온도와 스웰유동장을 고려한다면 연료의 라이너

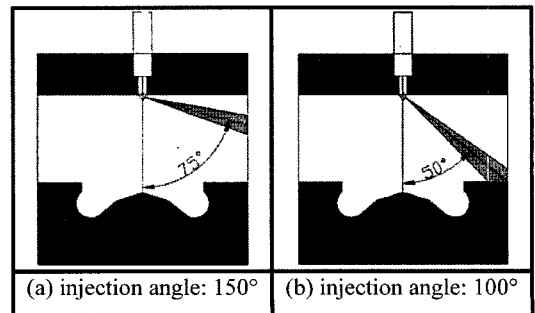


Fig. 2 Characteristic of penetration according to various ambient pressures

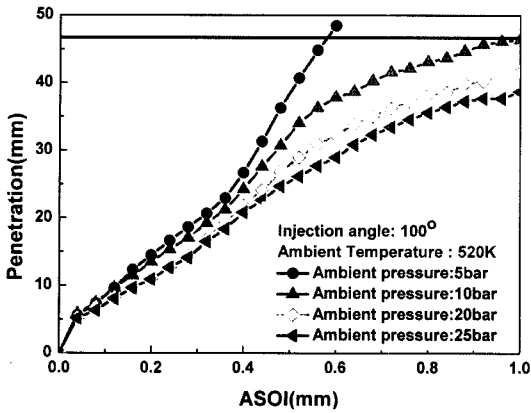


Fig. 3 Characteristic of penetration according to various ambient pressures

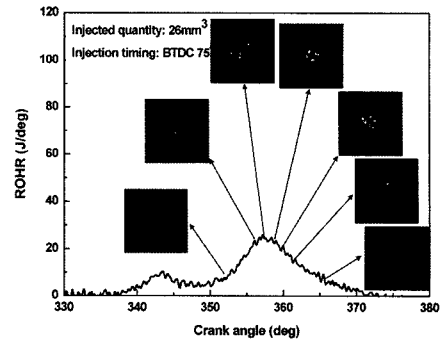
벽면 충돌을 피할 수 있을 것으로 예상되며, 취득한 데이터는 분무 시뮬레이션의 기준으로 사용되었다.

3.1.2 분사시기 변화에 따른 혼합기 분포 특성

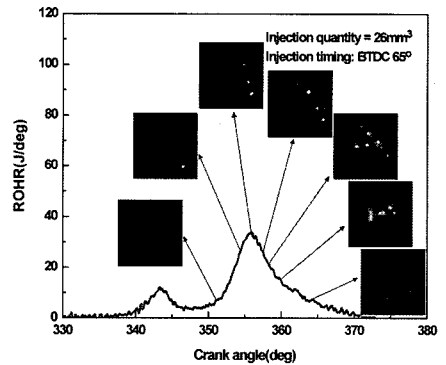
Figure 4는 분사각 100°인 인젝터의 분사시기에 따른 분무 충돌위치와 착화시점인 BTDC 10°에서 혼합기 분포 특성을 보여주는 결과이다. 분사시기가 BTDC 70° 이전인 경우는 피스톤 상부에 연료가 직접 충돌하여 연소실 라이너 벽면과 피스톤 크레비스 영역에 농후한 혼합기가 형성되고 연소실 중심 부분과 피스톤 보울 영역에는 희박한 혼합기가 형성되는 것을 알 수 있다.

또한, 분사시기가 약 BTDC 80° 이전으로 진각되지 않는 이상 분사된 연료는 실린더 라이너에 직접 충돌하지 않는다.

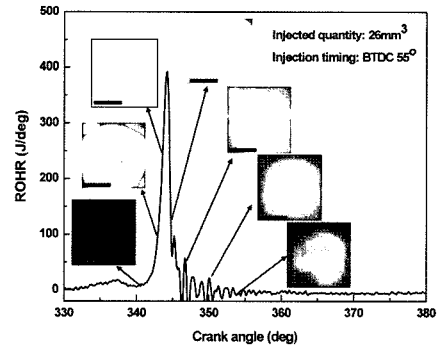
분사시기가 BTDC 65°인 경우를 볼 때 분무 충돌 위치는 피스톤 보울 영역과 피스톤상부 면의 경계인 모서리 부근으로 착화시점인 BTDC 10°에서 연소실 전체에 대체적으로 균일한 혼합기가 분포되는 특성을 보이고 있다. 또한, 분사시기가 BTDC 60° 보다 지각될 경우 분무



(a) Injection timing: BTDC 75°



(b) Injection timing: BTDC 65°



(c) Injection timing: BTDC 55°

Fig. 5 Visualization of flame in premixed charge combustion

Timing	BTDC 80°	BTDC 70°	BTDC 65°	BTDC 60°	BTDC 40°
ASOI 20°					
BTDC 10°					

Fig. 4 Mixture formation according to various injection timing (Injection angle: 100°)

충돌위치는 주로 피스톤 보울 영역이 되고 혼합기 분포도 마찬가지로 보울 영역에서 농후하게 됨을 보이고 있다. 이와 같은 결과로부터 분사시기에 따른 분무충돌위치와 분무충돌위치에 따른 혼합기 분포 특성을 확인할 수 있었다.

3.2 분사시기 및 분사횟수에 따른 연소 특성

3.2.1 분사시기 변화에 따른 화염 특성

Figure 5는 예혼합 압축착화 엔진의 조기분사시기변화에 따른 화염의 특성을 나타낸 그림이다.

분사시기가 BTDC 65° 이전으로 빨라지면 열발생률이 낮고 청색을 띤 화염을 희미하게 볼 수 있으며, 분사시기 BTDC 65°에서 피스톤 상부와 보울영역 사이 모서리부분의 분무충돌로 인한 균일한 혼합기 특성으로 보다 밝은 청색 화염이 연소실 전체에 분포하는 것을 볼 수 있다. 그러나 분사시기가 TDC에 가까워지면서 급격한 열발생과 함께 노킹이 발생하고 연소실에서는 백색화염 발생 후 황색화염으로 변화되는 것을 볼 수 있으며, 이때 스모크의 양이 급격히 증가될 것으로 생각된다.

3.2.2 분사시기 변화에 따른 스모크 및 IMEP 특성

Figure 6는 분사시기 변화에 따른 예혼합 연소의 스모크 및 IMEP 특성을 나타낸 그림이다. 분무가 엔진 라이너 벽면에 충돌하는 분사시기에는 증가된 벽류로 인한 착화 불량으로 낮은IMEP특성을 보인다.

또한, 분무가 피스톤 상부와 볼 영역 경계에 충돌할 경우 보다 좋은 증발특성과 함께 연소실 전체에 혼합기가 균일하게 분포하게 되므로 약간의 IMEP의 증가

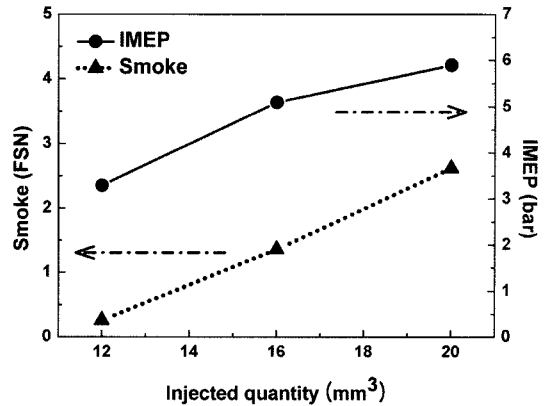


Fig. 7 Characteristics of IMEP and smoke according to injected quantity of early double injection

를 보인다. 반면에 연료가 피스톤 볼 영역에 직접 충돌할 경우에는 볼 영역 내의 농후한 연료분포로 인하여 노킹현상과 함께 IMEP는 증가됨을 보인다. 스모크 또한 분사시기가 TDC에 가까워짐에 따라 IMEP와 비슷한 경향성을 보이나 분사시기 BTDC 65°의 경우 IMEP가 약간 상승함에도 불구하고 스모크는 거의 발생되지 않았다.

3.2.3 분사 횟수에 따른 스모크 및 IMEP 특성

Figure 7은 조기 2단 분사의 분사량에 따른 스모크 및 IMEP 특성을 나타낸 그림이다. 수치해석의 결과로부터 연소실내 연료와 공기의 혼합기가 가장 균일하게 분포하는 BTDC 65°의 최적 분사시기를 기준으로 2단 분사의 분사시기는 BTDC 60°와 70°로 고정하였다. 그 결과 그림에 나타난 바와 같이 분사량이 증가하면

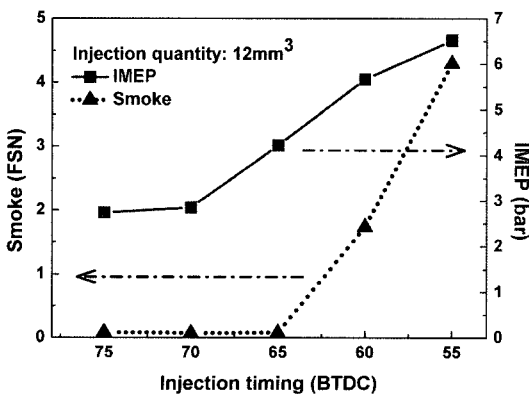


Fig. 6 Characteristics of IMEP and smoke according to injection timing of premixed charge combustion

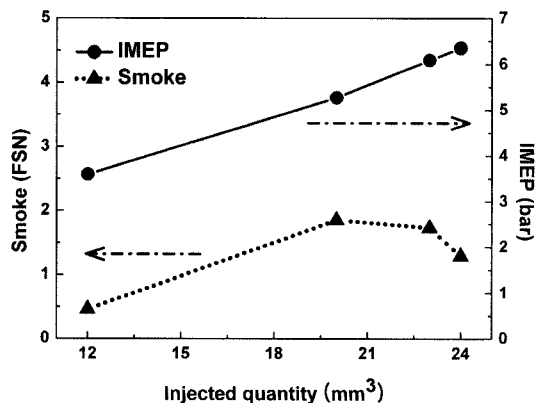


Fig. 8 Characteristics of IMEP and smoke according to injected quantity of early triple injection

IMEP와 스모크는 동시에 증가하며, IMEP가 6 bar 이상이 되면 스모크는 FSN으로 2이상 됨을 볼 수 있다. 또한, 같은 결과로부터 스모크를 FSN 2이하로 유지하기 위한 IMEP는 5 bar 정도에서 한계를 보인다는 것을 알 수 있었다.

Figure 8은 조기 3단 분사시의 분사량에 따른 IMEP 및 스모크 특성을 나타낸 그림이다. 분사시기는 2단 분사와 같은 이유에서, 균일한 혼합기 형성을 위한 최적 분사시기인 BTDC 65°가 기준이 되고, BTDC 75°, 65°, 55°의 3번에 걸쳐 분사가 되게 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 스모크와 IMEP는 연료량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이며, 스모크가 FSN 2이하에서 IMEP가 6 bar 이상으로 증가되는 구간을 볼 수 있다. 이로부터 3단 분사의 경우가 2단분사의 경우보다 증가된 IMEP 특성을 보인다는 것을 알 수 있었다. 또한, 연료량 26 mm³에서 스모크 양이 약간 감소하나, 이 지점에서의 급격한 NOx 증가로 더 이상 연료량을 증가시킬 수 없었다. 따라서, 조기의 3단분사의 경우에도 예혼합 연소의 영역은 IMEP 6 bar 정도로 제한됨을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 좁은 분사각을 갖는 커먼레일형고압인젝터의 분사 시스템을 이용하여 예혼합 압축착화 엔진에서의 분사시기 및 분사횟수 변화에 따른 분무 및 연소 특성을 연구하였으며, 그 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 분사된 연료가 실린더 라이너 벽면에 직접 충돌되거나 그 근처에 충돌되는 BTDC 65° 이전의 조기 분사의 경우, 분사시기가 TDC에 가까워짐에 따라 농후한 혼합기가 연소실 라이너 벽면에 형성되고 희박한 혼합기는 연소실 중심 부분과 피스톤 볼 영역에 형성되는 것을 알 수 있다.

2) 분사각도가 100°인 인젝터는 분사시기 BTDC 65°에서 분사된 연료가 피스톤 상부와 피스톤 보울영역 사이의 모서리에 충돌하며 이 때의 연료와 공기의 혼합기는 연소실 전체 영역에 전반적으로 균일하게 분포된다.

3) 단일 분사인 경우 분사시기 BTDC 65°까지는 스모크의 발생이 적고, IMEP가 약 3.5 bar 이다. 이는 분무가 실린더의 라이너와 직접 충돌하지 않아 벽류 현상이 적고, 전체적으로 균일하게 분포된 혼합기가 연소에도

영향을 주어 생긴 결과로 생각된다.

4) 단일 분사시의 최적 분사시기 BTDC 65°를 기준으로 보다 균일한 혼합기를 형성하기 위하여 다단 분사를 실시하였으며, 그 결과 2단 조기 분사시에는 IMEP가 약 5 bar 이며, 3단 분사시에는 약 6 bar까지 예혼합 연소 특성을 보인다.

5) 결국 예혼합 압축착화를 위한 조기분사의 경우 분사시기 및 분사횟수가 벽류의 발생과 분무 충돌 위치를 결정하는 큰 요소가 되고, 혼합기 분포 및 연료의 증발 특성을 좌우하며, 다시 이를 통해 연소실내에 분포된 혼합기가 연소 및 배기특성에 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 자동차부품연구원에서 지원하는 “예 혼합 압축 착화 엔진용 연료분사 조건의 최적화” 과제의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- (1) M. Noguchi, Y. Tanaka, T. Tanaka, Y. Takeuchi, “A Study on Gasoline Engine Combustion by Observation of Intermediate Reactive Products During Combustion,” SAE, 790840, 1979.
- (2) S. Onishi, S. H. Jo, K. Shoda, P.D. Jo, S. Katao, “Active Thermo-atmosphere Combustion (ATAC)-A New Combustion Process for Internal Combustion Engines,” SAE 790501, 1979.
- (3) P. M. Najt, D. E. Foster, “Compression-ignited Homogeneous Charge Combustion,” SAE 830264, 1983.
- (4) Ricardo Co., “Vectis Theory Manual,” 2003.
- (5) J. D. Ryu, H. M. Kim, K. H. Lee, H. M. Cho, “A study on the spray structure and evaporation characteristic of common rail type high pressure injector in homogeneous charge compression ignition engine,” The 9th Annual Conference ILASS-Asia
- (6) A. B. Liu, D. Mather and R. D. Reitz, “Modeling the effects of fuel spray characteristics on diesel engine combustion and emission,” SAE 930072, 1993.
- (7) C. Bai, A. D. Gosman, “Development of methodology for spray impingement simulation,” 950283, 1995.
- (8) K. P. Nandha, J. Abraham, “Dependence of Fuel-Air

Mixing Characteristics on Injection Timing in an Early-Injection Diesel Engine,” SAE 2002-01-0944, 2002.

(9) B. Walter, B. Gatellier “Development of the High Power

NADI™ Concept Using Dual Mode Diesel Combustion to Achieve Zero NOx and Particulate Emissions,” SAE 2002-01-1744, 2002.