

분사시기 및 분사각 변화에 따른 HCCI 엔진의 혼합기 분포 및 연소특성에 관한 연구

김형민¹⁾ · 류재덕¹⁾ · 이기형^{*2)}

한양대학교 기계공학과 대학원¹⁾ · 한양대학교 기계공학과²⁾

A Study on the Characteristics of Mixture Formation and Combustion in HCCI Engine according to the Various Injection Angles and Timings

Hyungmin Kim¹⁾ · Jeaduk Ryu¹⁾ · Kihyung Lee^{*2)}

¹⁾Graduate School, Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea

(Received 25 August 2005 / Accepted 8 December 2006)

Abstract : Recently, there has been an interest in premixed diesel engines as it has the potential of achieving a more homogeneous and leaner mixture close to TDC compared to conventional diesel engines. Early studies are shown that in a HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition) engine, the fuel injection timing and injection angle affects the mixture formations. Thus the purpose of this study was to investigate relationship of combustion and mixture formations according to injection timing and injection angle in a common rail direct injection type HCCI engine using a early injection method called the PCCI(Premixed Charge Compression Ignition). From this study, we found that the fuel injection timing and injection angle affect the mixture formations and in turn affects combustion in the PCCI engine.

Key words : Homogeneous charge compression ignition engine(예혼합 압축착화 엔진), Emission(배기가스), IMEP(도시평균유효압력), Injection angle(분사각), Injection timing(분사시기)

1. 서론

전 세계적으로 자동차의 배출가스 저감과 열효율의 증가에 대한 요구가 증대되고 있으며, 이러한 관점에서 열효율이 높은 디젤엔진은 큰 매력을 가지고 있으나, 디젤엔진의 연소특성인 국부적인 고온 반응 구간의 NO_x와 확산연소시의 입자상 물질(particulate matter)등의 배출가스 증가가 문제점으로 대두되고 있다. 따라서 내연기관 연구자들은 강화된 배기 규제를 만족시킬 수 있는 청정 연소의 저공해 엔진 기술 개발을 위해 많은 노력을 하고 있는

실정이다. 이러한 요구를 충족시키기 위하여 연료와 공기가 충분히 혼합할 수 있는 예혼합 연료 분사 시스템을 이용하여 연소실내 희박 균일한 예혼합기를 동시에 착화시키는 연소 방식인 HCCI(Homogeneous Charge Combustion Ignition) 연소가 주목을 받고 있다.¹⁻³⁾ 이와 같은 HCCI 연소는 디젤엔진의 효율 및 저배기를 만족시킬 수 있는 연소방식으로 많은 연구가 진행되고 있으나, 종래의 디젤 엔진 분사기로는 분무의 벽면 충돌로 인해 기대만큼의 배기 배출물을 감소 시키지 못하고 있다.

본 연구에서는 다양한 분사각을 갖는 고압 디젤 인젝터를 사용하여 분사각 및 분사시기에 따른 연

*Corresponding author, E-mail: hylee@hanyang.ac.kr

소 및 배기 특성을 파악하였고, HCCI 연소에 적절한 분사각 및 분사시기를 제시하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 연구 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 커먼레일 분사 방식의 HCCI 용 단기통 엔진의 개략도를 나타낸 것이다. 그림에 보여준 것과 같이 본 연구에서는 직접 분사방식인 노즐 지름이 0.168mm인 5공 인젝터를 사용하여 단기통 엔진을 구성하였고, 별도의 냉각수와 엔진 오일 공급장치 및 온도 유지를 시키기 위한 3kW의 히터를 설치하였으며, 30kW AC 동력계를 사용하여 엔진을 일정 회전수로 제어하였다. 엔진의 연소해석 및 연료 공급을 제어하기 위하여 엔진 크랭크 축에 1800 pulse 엔코더 및 캠축에 TDC 센서를 부착하였으며, 분사 압력을 제어하기 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 Horiba사의 배기가스분석계로 NOx를 측정하였고, AVL사의 스모크 측정기를 사용하여 매연의 농도를 측정하였다.

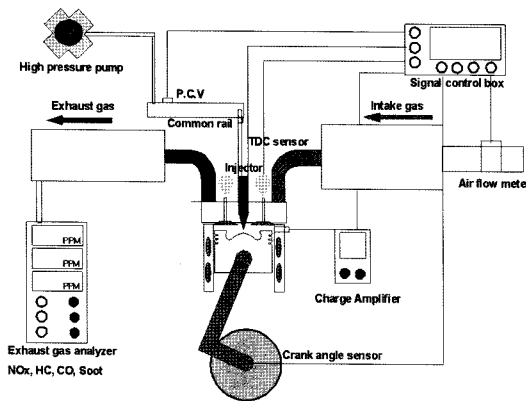


Fig. 1 Schematic of common rail injection type HCCI single cylinder engine

2.2 분무 수치 해석

본 연구에서는 분사각 및 분사시기가 연소실내의 혼합기 형성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 3차

원 분무 수치해석을 수행하였다. 분무 수치 해석은 Ricardo사의 상용 프로그램인 VECTIS 3.7을 사용하여 계산을 수행하였고⁴⁾ 계산영역은 연소실험에 사용한 연소실을 모델링하였으며, 계산은 흡·배기 밸브가 모두 닫히는 BTDC 220°부터 연소시작 시기인 TDC까지로 하고 엔진 속도 및 스웰비는 연소 실험용 엔진에 맞추어 해석을 실행하였다. 또한, 초기 값으로 사용한 분사 속도 및 유량계수는 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)}

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

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

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

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

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

액적의 Life time은 아래의 식 (5)에 의하여 구하였다.

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

상수 B₀ 및 B₁은 0.6과 10을 사용하였다.⁷⁾

또한 분무 액적의 증발과정은 열전달과 물질 전달이 동시에 일어나는 현상이므로 액적의 증발열은 주위 공기로부터 전도 및 대류에 의하여 액적 표면으로 전달되며, 기상의 연료는 주위의 공기로 확산되어 진다. 따라서 연료의 증발 특성을 고려하기 위하여 열전달 및 온도 계산을 추가하였으며, 식 (6), (7)은 액적의 질량 및 온도의 계산식을 나타낸 식이다.⁸⁾

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

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

연소실 벽면에서의 계산은 Gosman 등이 제안한 분무 충돌 모델을 사용하였고, W_{ein} , 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 방법

본 연구에서는 분사각 및 분사시기에 따른 분무 수치 해석을 수행하여 피스톤의 형상과 연료의 충돌위치가 혼합기 형성⁸⁾에 미치는 영향을 평가하였으며, 가시화 엔진을 통하여 화염특성을 파악하였고 그에 따른 엔진의 성능 및 배기 실험을 실시하였다. 또한 실험 조건은 Table 1에 나타낸 것과 같이 엔진 회전수 및 분사압력은 1400rpm, 100MPa로 고정하고, Fig. 2와 같이 150°의 분사각을 가지는 상용 디젤 인젝터와 연소실의 벽면 충돌을 줄이기 위한 좁은각 인젝터⁹⁾의 연소 및 배기성능 특성 분석하였다.

Table 1 Experimental condition

Engine speed	1400RPM
Injection pressure	100 MPa
Injection quantity	7.5mm ³ ~ 26mm ³
Injection timing	BTDC 180° ~ TDC
Injection angle	70°, 100°, 130°, 150°
Intake condition	N.A

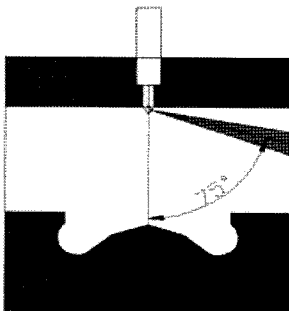


Fig. 2 The definition of injection angle for test injectors

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분사각 및 분사시기 변화에 따른 분무 특성

3.1.1 분사각 변화에 따른 분무 특성

Fig. 3은 연소실을 모사한 고압챔버 내에서 분사각에 따른 분무 형상을 인젝터 아래 방향에서 촬영한 것이고, Fig. 4는 분위기 밀도를 분사시기 BTDC 70~50°로 모사하고 엔진의 보어(91mm)를 기준으로 분무의 길이를 정량적으로 나타낸 결과이다. 분무각이 작을수록 분무도달거리는 짧아지며, 밀도 13.53kg/m³일 때는 분사각 100°에서도 연소실 벽면과 충돌하지 않으며, 실제 연소실에서 분위기 온도와 유동장이 고려된 상태에선 더욱 짧아질 것이라 생각되며, 이 데이터는 분무 시뮬레이션의 기준으로 제공되었다.

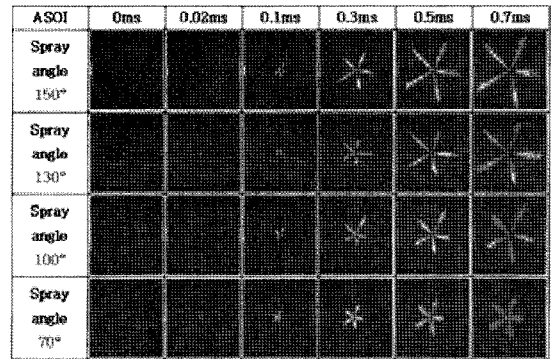


Fig. 3 Characteristic of spray according to the various injection angles (=13.53kg/m³)

3.1.2 분사각 및 분사시기 변화에 따른 혼합기 분포 특성

Fig. 5는 각각의 분사 각도를 가지는 인젝터에서 분사시기에 따른 분무의 충돌위치와 착화시기 (BTDC 10°)에서 혼합기 분포 특성을 비교한 결과이다. 분무가 벽면에 직접 충돌되는 조기 분사의 경우는 연소실 라이너 벽면에 농후한 혼합기가 형성되고 연소실 중심 부분과 피스톤 볼 영역에는 희박한 혼합기가 형성되는 것을 알 수 있다. 또한 분사각이 70°인 경우는 분사시기가 BTDC 80°, 분사각이 100°인 경우는 분사시기가 BTDC 60°에서와 같이 분무 충돌위치가 피스톤 상부와 피스톤 볼 영역의 경계 부인 경우는 연소실 전체 영역에서 전반적으로 균

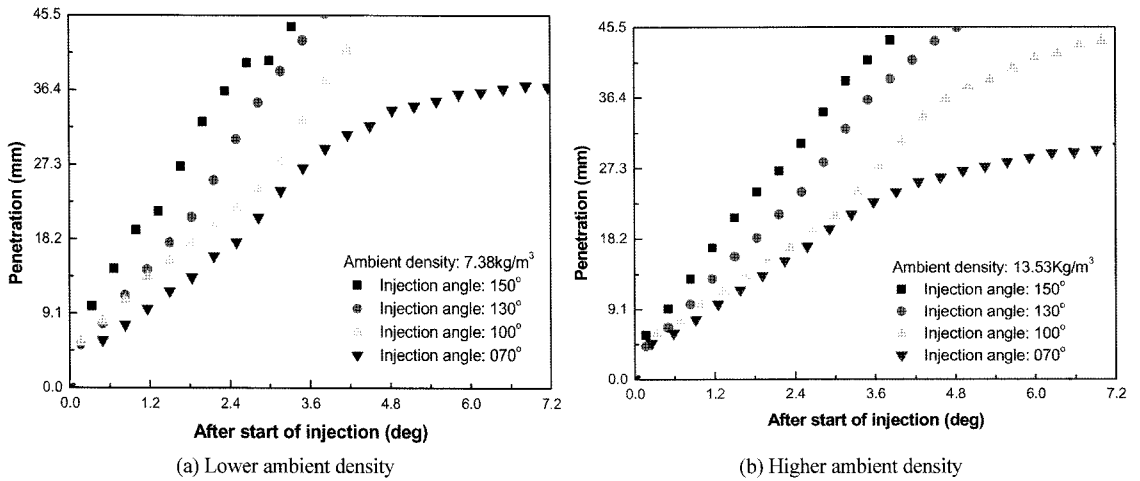


Fig. 4 Comparison of penetration according to the various injection angles

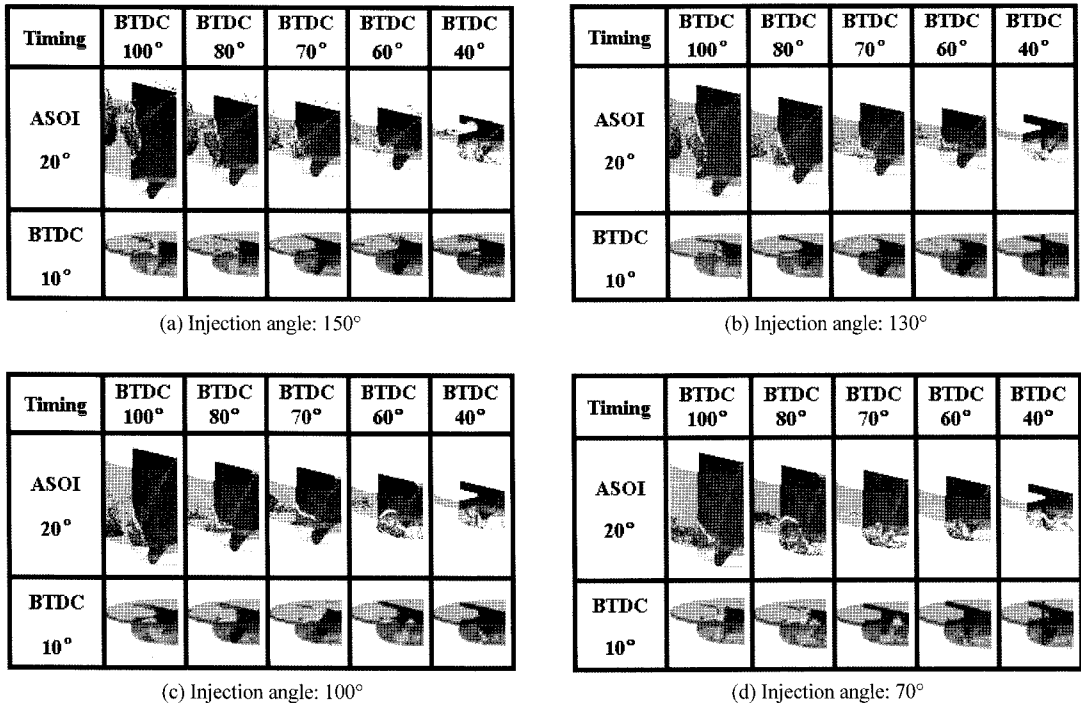


Fig. 5 Air fuel distribution according to various injection angles and injection timings

일한 혼합기 분포 특성을 보이고 있다. 이와 같은 결과로부터 분무충돌위치가 혼합기 분포에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

3.2 분사각 및 분사시기 변화에 따른 연소 특성

3.2.1 분사각 및 분사시기 변화에 따른 화염 특성

Fig. 6은 조기분사시에 분사각에 따른 예혼합 화염의 특성을 나타낸 그림이다. 150°의 분사각을 가진 경우에는 연소실 모서리와 피스톤 상면에 연료가 농후하게 존재하여 불 영역 주변으로 밝은 화염을 보이며, 100°의 분사각에서는 분무가 피스톤의 불 영역 모서리에 충돌하고 비교적 균일한 혼합기를 형성하여 연소실 전체적으로 청색

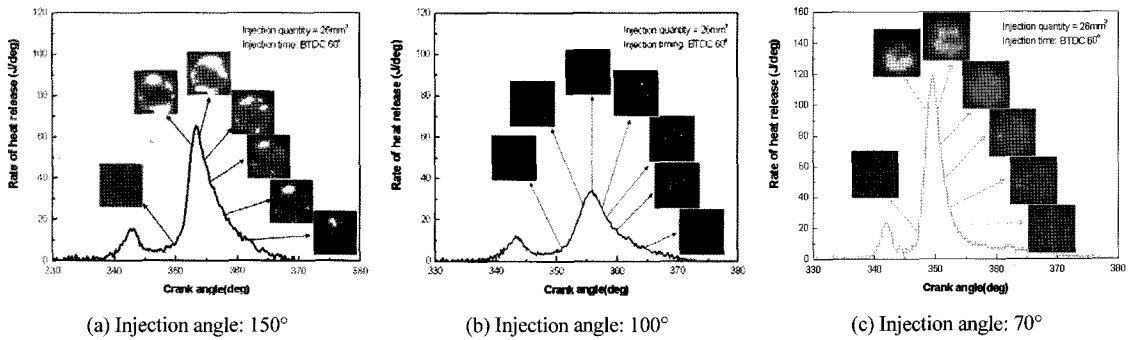


Fig. 6 Visualization of flame in premixed charge combustion (Injection timing: BTDC 60°, Injection quantity: 20mm³)

의 화염을 보이고 있으나, 분사각이 70°일 때는 불 영역에 연료가 분포하여 황색화염을 보이고 있다. 이와 같은 화염의 강도는 스모크 특성과 관계될 것이라고 생각된다.

3.2.2 분사각 및 분사시기 변화에 따른 성능 특성

Fig. 7은 분사각 변화에 따른 예혼합 연소의 IMEP 특성을 나타낸 그림이다. 분무가 실린더 라이너에 충돌하는 분사시기에는 벽류의 증가로 인한 착화의 불량으로 IMEP가 감소되며, 피스톤 상부와 불 영역 경계에 충돌할 경우에는 혼합기가 연소실 전체에 균일하게 분포하여 IMEP가 상승하며, 연료가 피스톤 불 영역에 직접 충돌할 경우 불 영역에 연료가 농후하게 분포하여 IMEP는 최대값을 보이나 착화시기가 빨라짐에 따라 노킹현상을 동반하게 된다.

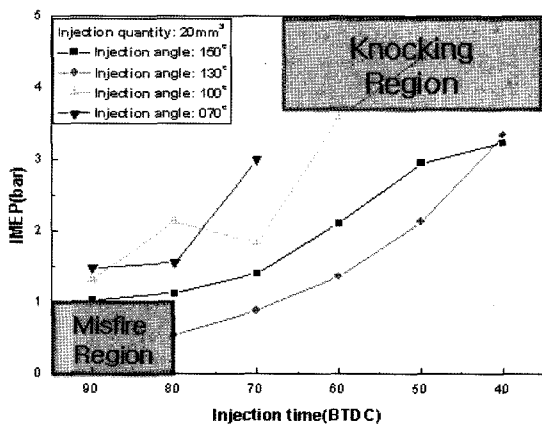


Fig. 7 Characteristic of IMEP according to various injection angles of premixed charge combustion

3.2.3 분사각 및 분사시기 변화에 따른 배기 특성

Fig. 8은 분사각 및 분사시기 변화에 따른 스모크 특성을 나타낸 그림이다. 스모크의 발생특성은 IMEP의 특성과 거의 일치하는데, 이는 연료의 충돌 위치와 혼합기 형성과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문일 것으로 사료된다. 즉, 실린더 라이너에 연료가 충돌하는 경우와 연소실에 연료와 공기의 혼합기가 균일하게 형성될 때에는 스모크는 적게 발생하나, 연료가 피스톤 불 영역에 직접 충돌할 경우에는 농후한 혼합기가 형성되어 스모크의 발생이 급격히 증가함을 보이고 있다.

Fig. 9는 IMEP에 대한 스모크 특성을 나타낸 그림이다. 대체적으로 IMEP가 증가하면 스모크도 증가하는 경향을 보이며 이는 농후한 혼합기가 엔진의 성능 면에서는 유리하나, 스모크 발생이 증가되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 분사각도가 100°일 때는

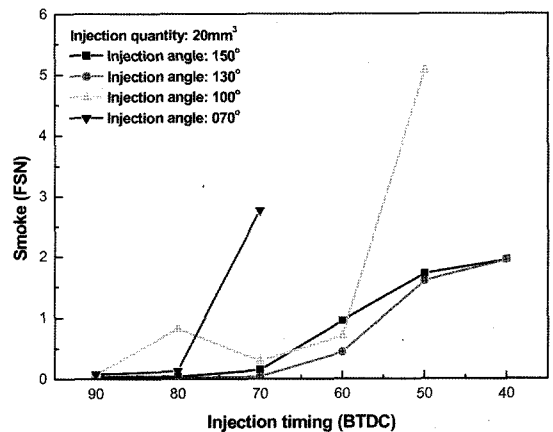


Fig. 8 Characteristics of smoke according to various injection angles

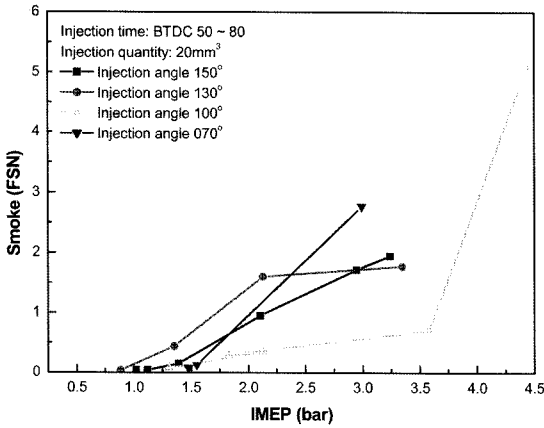


Fig. 9 Characteristics of smoke according to IMEP

IMEP 3.5 이상에서도 스모크가 FSN1 이하임을 볼 수 있으므로 조기 분사시스템을 이용하여 HCCI 연소를 구현할 경우에는 분사각은 100°, 분사시기는 BTDC 60°에서 가장 유리할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 조기 직접 분사 시스템을 이용하여 분사각 및 분사시기에 따른 HCCI 엔진의 혼합기 분포 및 연소 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 상용의 디젤 엔진의 인젝터로 조기분사 예혼합 연소에 적용할 경우 벽류의 형성으로 인하여 낮은 IMEP와 혼합기 불균형을 초래한다.
- 2) 분사각도에 관계없이 분무가 벽면에 직접 충돌되는 조기 분사의 경우는 연소실 라이너 벽면에 농후한 혼합기가 형성되고 연소실 중심 부분과 피스톤 볼 영역에는 희박한 혼합기가 형성되는 것을 알 수 있다.
- 3) 분사각이 70°인 경우는 분사시기가 BTDC 80°, 분사각이 100°인 경우는 분사시기가 BTDC 60°에서 피스톤 상부와 피스톤 볼 영역의 경계부에 분무가 충돌되며, 이 시점에서 혼합기 분포가 연소실 전체 영역에 전반적으로 균일한 특성을 보이고 있다.
- 4) IMEP와 스모크는 비례하는 경향을 보이나, 분사각이 100°일 경우는 IMEP 3.5 이상에서 스모크가 FSN1 이하를 보이고 있다.

후 기

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

References

- 1) M. Noguchi, Y. Tanaka, T. Tanaka and Y. Takeuchi, “A Study on Gasoline Engine Combustion by Observation of Intermediate Reactive Products During Combustion,” SAE790840, 1979.
- 2) S. Onishi, S. H. Jo, K. Shoda, P. D. Jo and S. Katao, “Active Thermo-atmosphere Combustion (ATAC) - A New Combustion Process for Internal Combustion Engines,” SAE 790501, 1979.
- 3) P. M. Najt and 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 and 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, 2004.
- 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 and A. D. Gosman, “Development of Methodology for Spray Impingement Simulation,” SAE 950283, 1995.
- 8) K. P. Nandha and 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 and B. Gatellier, “Development of the High Power NADITM Concept Using Dual Mode Diesel Combustion to Achieve Zero NOx and Particulate Emissions,” SAE 2002-01-1744, 2002.
- 10) J. W. Chung, J. H. Kang, B. S. Kim, W. Kang and H. C. Kim, “A Study on the Diesel DI-HCCI Combustion Characteristics using 2-stage Injection Method,” Transactions of KSAE, Vol.12, No.6, pp.66-73, 2004.