

가시화 엔진을 이용한 직분식 예혼합 압축착화 디젤엔진의 화염 및 연소특성

Flame and Combustion Characteristics of D.I. HCCI Diesel Engine using a Visualization Engine

권 오 영*, 류 재 덕*, 이 기 형**, 이 창 식**
Ohyoung Kwon, Jaduk Ryu, Kihyung Lee, Chang Sik Lee

ABSTRACT

Combustion characteristics of diesel engine depends on mixture formation process during ignition delay and premixed flame region. Fuel and air mixture formation has a great influence on the exhaust emission. Therefore, the present study focused on the combustion mechanism of Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) engine.

This study was carried out to investigate the combustion characteristics of direct injection type HCCI engine using a visualization engine. To investigate the combustion characteristics, we measured cylinder pressure and calculated heat release rate. In addition, we investigated the flame development process by using visualization engine system.

From the experimental result of HCCI engine, we observed that cool flame was always appeared in HCCI combustion and magnitude of cool flame was proportional to magnitude of hot flame. And we also found that fuel injection timing is more effective to increase lean homogeneous combustion performance than intake air temperature. Since increasing the intake air temperature improved fuel vaporization before the fuel atomizes, we concluded that increasing the temperature has disadvantage for homogeneous premixed combustion.

주요기술용어 : HCCI(예혼합 압축착화), Visualization engine(가시화 엔진), Ignition point(착화점), Cool flame(냉염), Hot flame(열염)

1. 서 론

디젤 엔진은 높은 열효율과 연비성능 및 내구성 등의 장점을 가지고 있으므로 차량 및 산업용으로 널리 사용되고 있다. 최근 보편화되고 있는

직접 분사식 엔진의 경우는 압축행정 말기에 연료를 고온, 고압 분위기의 연소실로 직접 분사시켜 열전달로 인한 액적 온도의 상승, 증발 및 혼합기 생성의 물리적 과정과 연료의 열분해 및 산화에 의한 화학적 과정을 거친 후, 착화에 의한 연소과정이 진행된다. 따라서, 공간적으로 불균일한 혼합기 영역이 존재하므로 농후한 영역에

* 회원, 한양대학교 대학원

** 회원, 한양대학교 기계공학부

서는 입자상 물질(Particulate matter : P.M.)이 생성되고, 이론 공연비 영역에서는 NOx 배출이 증가되는 현상이 나타나게 된다. 그러나 NOx와 P.M.은 생성과정이 서로 상반관계를 가지므로, 두가지를 동시에 절감시키는 것은 상당히 어려운 과제이다.

이와 같은 배출가스 문제를 해결하기 위해 초고압 분사 및 혼합 연료, 대체 연료 등의 방향으로 연구가 진행중에 있으나, 디젤엔진의 특성상 혼합기 분포가 불균일하여 연소과정이 예혼합 및 확산 연소로 나타나고, 연료공급 방식을 바꾸어야 하는 어려운 점이 남아있다.¹⁾

따라서 압축행정 초기에 연료를 분사함으로써 연소실 전체에 균일 혼합기가 생성되도록 하는 예혼합 시스템 연구가 활발하게 진행 중이며 현재 다양한 방법으로 그 가능성을 확인하고 있다.^{2,3)}

종래의 연료 공급 방식은 캠-플런저의 기계식 방식으로 분사시기 및 공연비 제어가 어려우므로, 본 연구에서는 가시화 엔진에 저압 커먼 레일 타입 인젝터를 사용하여 연료 분사시기 및 공연비를 제어할 수 있는 시스템을 구축하였다. 이러한 인젝터는 일반적 디젤 엔진 보다는 낮은 분사압력을 사용하며, 분사된 연료의 벽면 충돌에 의한 퇴적을 막고, 분사시기와 공연비를 제어하여 예혼합 착화 연소를 구현시켰다. 이와 같은 예혼합 압축착화 엔진 시스템을 이용하여 화염가시화 및 연소 해석을 수행함으로써 예혼합 압축착화 엔진의 착화특성 및 연소 현상을 규명하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 가시화 엔진 시스템

본 실험에서 사용한 엔진은 배기량 673cc인 직분식 디젤 엔진을 예혼합 압축착화 가시화 엔진으로 개조하여 사용하였고, DC 모터를 사용하여 엔진 회전수를 일정하게 제어하였다. 엔진 제어 및 개략도를 Table 1과 Fig.1에 나타내었다.

Table 1 Engine specifications

Engine type	D.I. diesel engine
Bore × Stroke	95mm × 95mm
Swept volume	673cc
Compression ratio	19

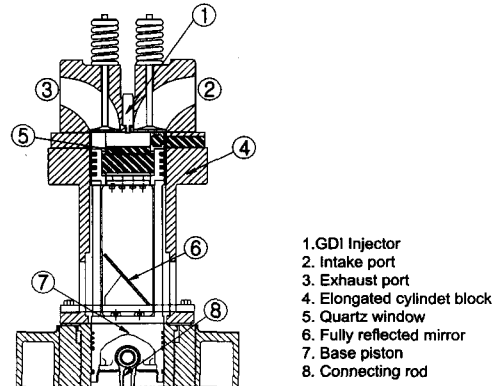


Fig. 1 Schematic diagram of visualization HCCI engine

엔진 제어는 범용 ECU를 사용하여 분사시기 및 공연비를 제어하였고, 흡기 온도 변화에 따른 영향을 조사하기 위해 흡기매니폴드 둘레에 흡기관 히터를 이용하여 가열공기를 일정하게 공급하였으며, AC 모터와 인버터를 사용하여 수퍼차저회전수를 제어하여 흡기압력 변화의 효과를 파악하였다. 연료 공급은 연료펌프 및 저압 커먼 레일 타입 인젝터를 사용하여 30bar로 연소실 내로 직접 분사하였다. 공연비 및 분사시기에 따른 예혼합 압축착화 연소 및 화염 특성을 분석하기 위해 실린더 헤드에 압력센서를 설치하여 연소해석을 수행하였고, 고속 카메라를 사용하여 연소실의 화염 가시화를 수행하였다. Fig. 2에는 실험장치 개략도를 나타내었다.

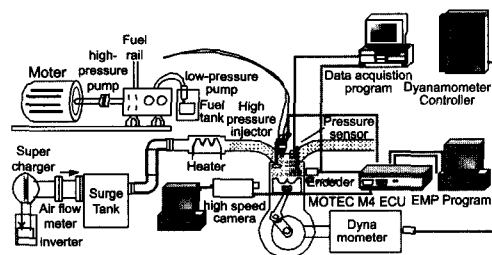


Fig. 2 Schematic diagram of direct injection type HCCI visualization system

2.2 실험 방법

본 실험에서는 가시화 엔진을 실제 엔진 조건을 모사하기 위하여 실린더 헤드에 가열판을 장착하여 온도를 80℃로 유지하였고, 엔진 회전수는 DC 모터를 사용하여 400rpm으로 일정하게 제어하였다. 실험 변수로는 공연비, 분사시기, 흡입공기 온도 및 흡기압력이 초기 연소에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Table 2에 나타낸 바와 같은 실험조건에서 실험을 수행하였다. 연소 압력은 100 사이클 압력을 취득한 후, 이를 평균하여 연소해석을 수행하였고 화염 가시화는 연료 분사 후부터 5 deg 간격으로 화상을 취득하였다.

Table 2 Engine test conditions

Engine speed	400 rpm
Intake air temperature	80, 120, 200℃
Injection timing	BTDC 30, 60, 90, 120
A/F	84, 65, 50, 40
Charge air pressure	1, 1.2 bar

3. 실험 결과

앞 절의 시험조건에 나타냈듯이 디젤연소에 중요한 영향을 미치는 분사시기 및 공연비에 따른 연소특성을 분석하였고, 예혼합 압축착화에 영향을 미칠 것으로 판단되는 흡기 온도 및 흡기 압력의 영향을 평가하였다.

3.1 분사시기에 따른 연소 및 화염특성

분사시기 변화에 따른 연소실 내의 연소특성을 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 나타내었다. Fig. 3과 4를 비교해 보면 흡기온도가 증가하여 200℃가 되면 분사시기에 관계없이 연소압력과 열발생율이 일정하게 수렴되는 경향을 나타내는데, 이와 같은 현상으로 보아 흡기 온도가 높아짐에 따라 분사시기에 관계없이 초기 액적 기화율의 임계점이 존재하는 것으로 판단된다.

Fig. 5(a), (b)는 일정 흡기온도 및 일정 공연비 조건에서 분사시기가 BTDC 30deg와 120deg인 경우의 화염 가시화 결과를 나타낸 것이다. 화염

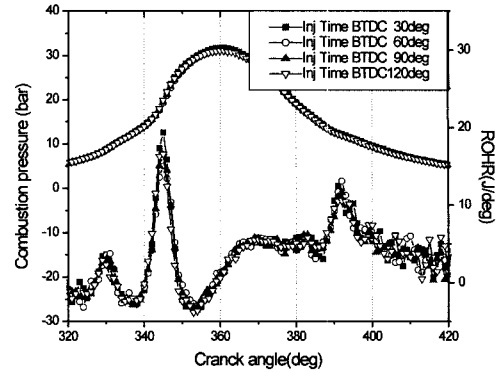


Fig. 3 Combustion pressure and ROHR (Intake air Temp.200℃ A/F=50)

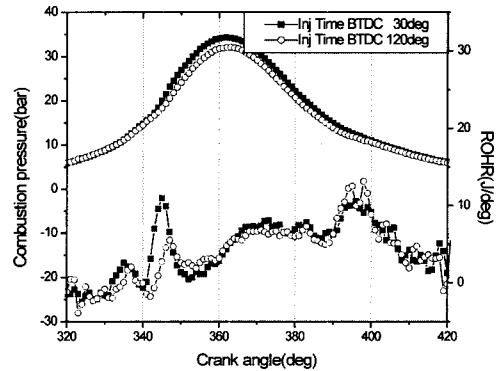


Fig. 4 Combustion pressure and ROHR (Intake air Temp.120℃ A/F=40)

가시화 결과에 나타낸 바와 같이 분사시기가 빨라짐에 따라, 예혼합 화염의 관측시기는 큰 차이를 보이지 않았으나, 후연소의 화염성장은 빨라짐을 보이고 있다. 또한 연료 분사시기가 빨라짐에 따라 착화지연기간이 길어져서 열발생율이 급격하게 증가되어야 하지만 저하되는 것은 분사시기가 빨라질수록 분위기압력이 감소하여 증발온도가 낮아지고, 분사압력과 분위기 압력의 차이가 증가하여 연료의 미립화가 향상되므로 나타난 것으로 판단된다. 그리고 기화될 수 있는 시간이 충분하므로 연료 액적의 분포와 증발율의 향상에 의한 분위기 온도 저하와 희박한 공연비 영역에서 자착화가 이루어졌기 때문에 냉염과 열염이 감소한 것으로 판단된다.

반면, 분사시기가 늦게되면 착화지연이 짧고 피스톤 상승운동에 의한 압축효과로 분위기압

이 증가되며, 공기와의 항력을 증가시켜 운동에너지를 소진된다. 이로 인해 분무성장이 둔화되고 공기 이용율이 저하되어, 직접 분사된 연료는 흡입공기와 충분히 혼합되지 않은 상태에서 연소가 이루어진다. 이러한 현상으로 분사시기가 늦은 Fig. 5(b)의 경우에 초기화염, 즉 예혼합 화염의 화염강도는 크게 나타나는 것으로 판단된다.

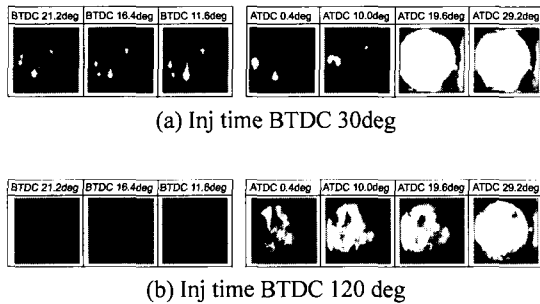


Fig. 5 Flame visualization result
(Intake air Temp. 120 °C, A/F=40)

Fig. 6은 총열발생량에 대한 예혼합 열발생량의 열발생량비로 분사시기에 따른 흡기온도 영향을 나타낸다. Fig. 6에 의하면 200°C에서는 분사시기에 관계없이 예혼합 열량비가 비교적 일정하며, 흡기온도 80°C, 120°C에서는 분사시기가 BTDC 90deg 까지 예혼합 열량비가 증가하다가 이후 감소하는 경향을 보인다. 이를 통해 고온인 200°C가 되면 연소실 내의 온도가 대단히 높아 미립화 특성보다 증발에 의한 상변화가 지배

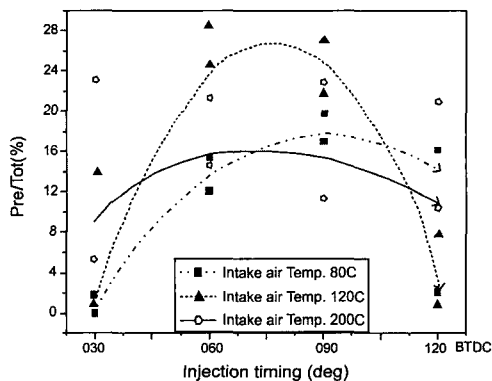


Fig. 6 Pre/Tot(%) at each injection timing

적이며 이에 따라 분사시기가 무시됨을 알 수 있다. 또 분사시기 변화에 따른 분사압과 분위기압력 차에 의한 미립화와 흡기온도에 의한 증발량의 변화 영향으로 인하여 연소특성이 달라지는 상관관계가 있음을 예측할 수 있다.

3.2 공연비에 따른 연소 및 화염 특성

Fig. 7, 8, 9는 분사시기가 일정하고 흡기온도가 80°C 및 120°C일 때의 공연비 변화에 대한 연소압력과 열발생을 및 화염 성장과정을 나타낸다. 공연비가 희박해짐에 따라 열발생 및 연소압력이 저하되고 있으며, 화염의 강도가 약해지는 현상을 보아 연소온도가 상대적으로 낮아지는 것으로 판단된다. 흡입공기 온도가 낮은 경우는 공연비가 농후함에 따라 압력 및 열발생율의 상승폭이 작지만, 흡입공기 온도가 높은 경우에는 공연비에 따른 영향이 크게 나타나고 있으며, 특히 공연비가 농후한 영역에서는 예혼합 화염이 크게 나타나고 있다. 이는 연료량이 증가함에 따라 상대적으로 작은 입경의 절대 입자수의 증가와 연료액적의 기화에 의한 혼합기량의 증가로, Fig. 8의 화염 가시화에서처럼 예혼합 비율을 증가시켜 예혼합 화염영역이 확대된 것으로 생각된다. 또한 분사량의 증가로 인하여 피스톤에 충돌하는 액적들이 많아져서 후연소 확산과정에서도 화염이 많이 발생되며 이에 따라 열발생율도 증가했음을 알 수 있다.

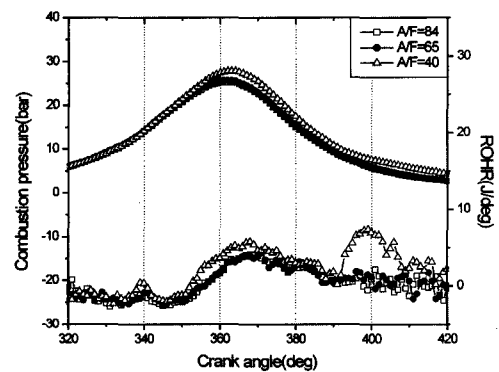


Fig. 7 Combustion pressure and ROHR(Intake air Temp. 80°C Inj time BTDC 30deg)

Fig. 10은 흡기온도를 상승시킨 경우, 공연비에 따른 열발생량의 비율을 나타낸다. 예혼합 열발생량은 전반적으로 공연비의 감소와 흡기온도의 증가에 따라 증가하고, 공연비가 낮아질수록 예혼합 열량의 증가폭은 감소됨을 알 수 있다.

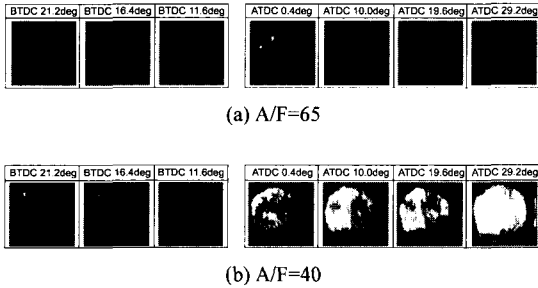


Fig. 8 Flame visualization result(Intake air Temp.80°C Inj time BTDC 30deg)

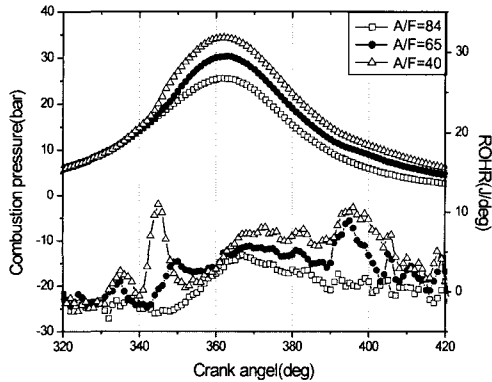


Fig. 9 Combustion pressure and ROHR(Intake air Temp.120°C Inj time BTDC 30deg)

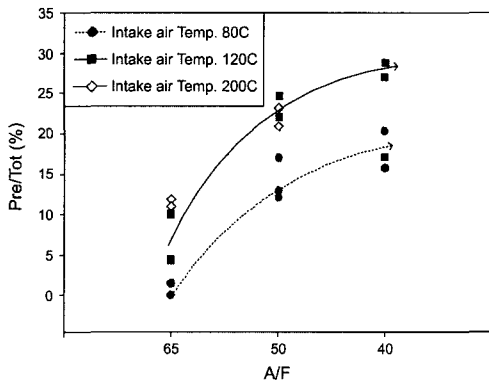


Fig. 10 Pre/Tot(%) at each A/F

이는 흡기온도에 따라 화염생성 분위기를 촉진하는 연료미립화 및 증발특성의 영향과 압축과정에서 압력상승에 의한 압축효과가 증가되기 때문이다. 이 외에도 연료량 증가에 따라 작은 입경의 절대 입자수 증가로 인하여 예혼합 열발생량이 증가하는 반면 팽창행정시에는 누적된 연료의 증가에 의한 확산화염 열량의 증가율이 감소하였기 때문으로 판단된다.

3.3 흡기온도에 따른 연소 및 화염특성

흡기온도 변화에 따른 압력과 열발생 및 화염 특성을 Fig. 11, 12, 13에 나타내었다. 흡입 공기 온도가 증가할수록 착화 시기가 빨라지고 연소실 최고압력이 상승하며, 예혼합 화염발생이 빨리 나타났다. 또 후연소 확산화염에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그러나, 전체 연소기간은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. Fig. 13(a), (b)는 흡입공기 온도에 따른 화염 가시화 결과로서 초기 화염은 흡기온도 120°C의 경우가 80°C의 경우보다 작고 강하게 관측된다. 흡입공기 온도의 증가로 인하여 연료 액적에 공급되는 열이 증발 잠열에 소비되어 연료 증발은 촉진되나, 연료와 공기가 혼합될 수 있는 기간이 부족하므로 연료 분포가 농후한 분무 주변에서만 연소가 발생되고 있음을 알 수 있다. 이는 혼합기 생성보다 열분해가 먼저 된 액적들로 인한 자착화가 선행되어 불균일한 연소의 발생 가능성이 증가하기 때문이다. 즉, 증발보다는 화학반응이 주위온도에 더 민감하기 때문에 나타나는 현상으로 해석된다. 한편, 온도가 낮은 경우는 열흡수 시간이 많이 소비되며 그 동안 증발팽창이 증가하고 가연 혼합기의 화염영역이 확대되어 화염강도가 상대적으로 약할 뿐만 아니라 연소실 전체 영역에서 관찰된다. 이와 같이 분위기 온도가 낮은 경우가 공기 이용율이 높은 것은 착화지연이 상대적으로 길어 혼합기 형성량이 많아지고 점성의 감소로 유동저항이 감소하여 연료공기 혼합율이 높아졌기 때문으로 판단된다.

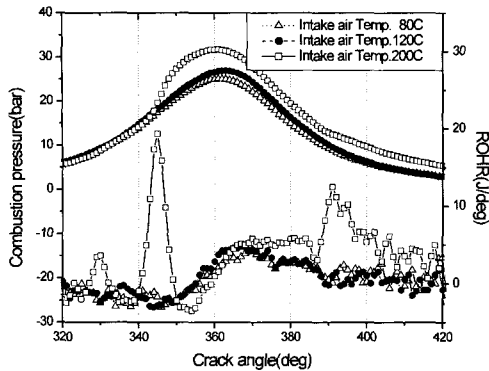


Fig. 11 Combustion pressure and ROHR (Inj time BTDC 30deg A/F=50)

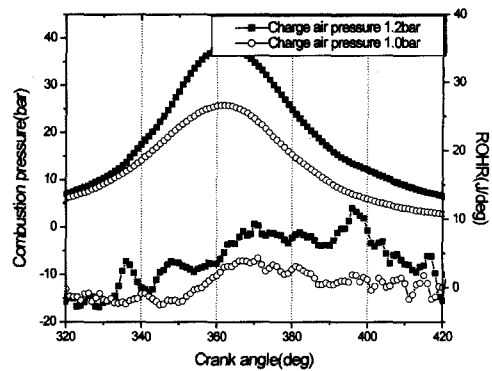


Fig. 14 Combustion pressure and ROHR(Intake air Temp.80 °C Inj time BTDC 30deg A/F=65)

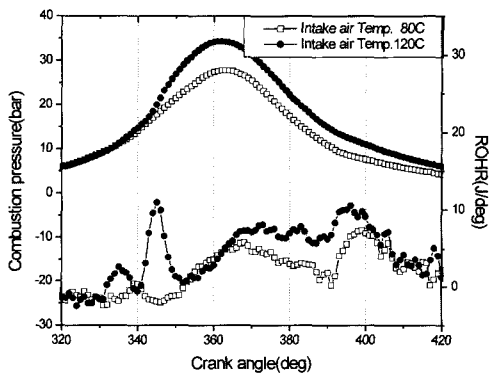


Fig. 12 Combustion pressure and ROHR (Inj time BTDC 30deg A/F=40)

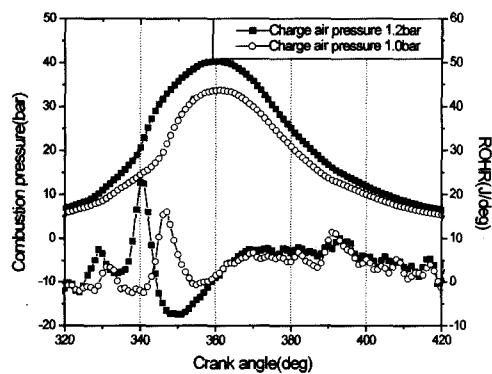


Fig. 15 Combustion pressure and ROHR(Intake air Temp.120 °C Inj time BTDC 120deg A/F=65)

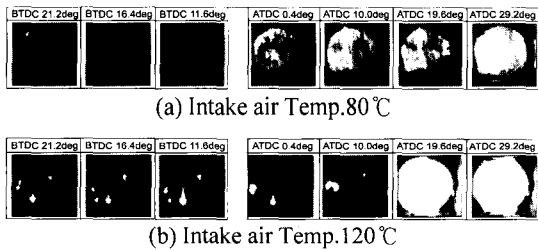


Fig. 13 Flame visualization result (Inj Time BTDC 30deg A/F=40)

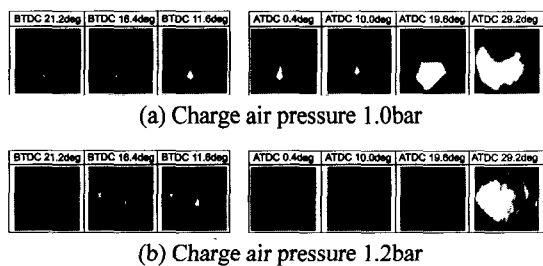


Fig. 16 Flame visualization result(Intake air Temp.120 °C Inj time BTDC 120deg, A/F=65)

3.4 흡기압력에 따른 연소 및 화염특성

동일한 조건에서 높은 흡기압력(1.2bar)과 대기압을 비교하여 연소 및 화염특성을 Fig. 14, 15, 16에 나타내었다. 흡기압력이 높은 경우 연소실 최고압력은 크게 증가되며, 초기 화염형성 과정에서 연료 액적 주위의 공기농도가 증가하고 연료량도 증가하여 연소실내의 온도가 전반적으

로 상승한다. 이에 따라 Fig. 16(b)의 결과에 나타난 바와 같이, Fig. 16(a)에 비하여 착화전에 연료 증발량의 증가와 농후한 혼합기를 형성하므로 착화 지연 시간이 짧아지고 예혼합 화염은 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 동일한 분사시기에서 흡기압력이 증가하면 연료량이 증가하고, 연소실 벽면에 부착되는 연료량도 증가하여, 후연소 확

산화염의 시작이 늦어지고 화염이 강해짐을 열발생 및 화염형상으로부터 관찰할 수 있었다.

흡기압력이 대기압이고, 분사시기가 BTDC 120deg인 초기 예혼합 화염형상을 관측하면 화염이 존재하는데, 이는 부분적으로 불균일한 과농연료 혼합 또는 미중발 액적들에 의해 나타나는 현상이며 화염 주위 발광강도가 낮은 예혼합 화염은 촬영되지 않았기 때문으로 생각된다.

3.5 냉염과 열염 특성

본 가시화 실험 결과, 분사시기가 빨라짐에 따라 분사종료부터 착화까지 연료의 증발이 높아 연료 주위의 가연 혼합기층의 생성이 확대된다는 사실을 알 수 있었다. 착화 지연 기간 동안 발화 온도까지 가열된 가연 혼합기의 일시적인 폭발 현상이 나타나는 예혼합기 시기에서는 화염의 발광강도가 낮았으며, 화염의 형상은 일정하지 않고, 착화의 위치는 다점으로 발생하였다. 이때의 열발생율은 짧은 시간에 급격하게 상승하는 경향을 나타내었다. 본 실험에 사용된 가시화 엔진 특성상 실제 엔진에 비하여 상대적으로 낮은 벽면 온도를 나타내고 있다. 또, 연료 분사압력이 낮아 분무 액적들이 분무축을 중심으로 밀도 높게 분포되므로 분산되지 않고 합착하여 벽면에 부착된 연료는 기화성이 저하되어 충돌부위에 넓게 유막을 형성한 상태에서 서서히 증발하여 연소가 진행된다.^{4,5)} 이로 인하여 연소후기 (약 ATDC 30°) 충돌면상에서 갑자기 등글게 발광하는 증발확산 화염이 관찰되고 있으며, 이는 열발생율의 기울기에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 열발생율 구조에서 알 수 있는 바와 같이 냉염, 열염의 예혼합 화염과 후연소 확산화염으로 나누어지고, 착화시 냉염은 저온 상태에서의 화학종 반응이므로 화염이 나타나지 않고, 후속 증발의 열염에 대한 화염만 미소하게 촬영되었다.

분사시기가 당겨지면 산소가 충분한 전체적 공간에서 존재하는 분해 성분은 저온 반응인 냉염을 발생시키며,^{6,8)} Fig. 17에 나타난 바와 같이

냉염이 증가함에 따라 열염도 증가하는 경향으로 보아 냉염은 열염을 일으키는 고온반응을 활성화시키고 연소 압력에도 영향을 주고 있음을 짐작 할 수 있다. 이를 통해 예혼합 압축착화 디젤엔진에서 냉염의 제어는 연소 압력과 열발생율에 중요한 인자임을 알 수 있다.

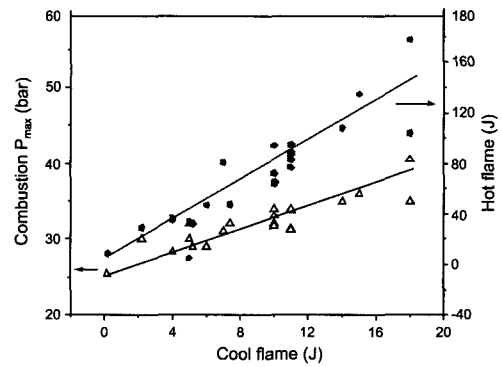


Fig. 17 Comparison of cool flame and hot flame

4. 결론

HCCI 엔진의 연소 및 화염 특성을 연구하기 위하여 가시화 단기동 엔진을 제작하여 실험적인 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) HCCI 엔진의 경우 연소실 내부의 압력과 온도가 낮은 상태이므로 예혼합은 냉염을 발생시키며, 냉염은 열염 생성에도 영향을 미치는 것으로 나타났다.

2) 흡기온도의 증가는 자발화를 선행시켜 공기의 이용율을 감소시키고, 온도가 증가함에 따라 연소 및 화염특성 변화에 대한 분사시기의 영향이 감소하였다.

3) 연료의 분사시기가 빨라짐에 따라 착화 지연기간이 증가하여 연료와 공기의 혼합 및 균일 예혼합을 촉진시키는 것으로 나타났다.

4) 희박한 공연비가 균일 예혼합 생성에 유리한 것으로 판단되며, 공연비가 농후해짐에 따라 벽면에 충돌하는 연료가 많아지므로 연소기간 후반에 확산화염이 급격히 증가되는 결과를 나타내었다.

후 기

본 연구는 자동차 부품 연구원의 미래형자동차 기술개발 사업 지원에 의하여 수행된 연구결과로서, 관계기관에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Y. Sato, Y. Goto, "Research Trends in Power Systems using Alternative Fuels," IWPS2000, pp.47-57, 2000.
- 2) Y. Aoyagi, Y. Asumi, E. Kunishima, A. Harada, A. Morita, T. Seko, "Visualized Analysis of a Pre-Mixed Diesel Combustion Under the High Boosting Engine Condition" COMODIA 2001, pp.434-440, 2001.
- 3) G. R. Pucher, D. P. Gardiner, M. F. Bardon, V. Battista, "Alternative Combustion Systems for Piston Engines Involving Homogenous Charge Studies Using Methanol, Gasoline and Diesel Fuel," SAE 962063, 1996.
- 4) 박권하, "디젤분무의 벽면충돌모델," 한국액체미립화학회지, 제5권 제4호, 2001.
- 5) Y. Ohta, M. Furutani, "Identification of Cool and Blue Flames in Compression Ignition," Polish Academy of Science, Vol.11, No.1-2, pp.43-52, 1991.
- 6) H. Yanagihara, Y. Sato, J. Mizuta, "A Study of DI Diesel Combustion under Uniform Higher-Dispersed Mixture Formation," JSAE Review 18, pp.361-367, 1997.
- 7) S. Schnaubelt, M. Tanabe, C. Eigenbrod, H. J. Rath, "Verification of detailed Simulations for Two-Stage Ignition of Single Droplets by Ignition Radius," ZARM Space Forum, pp. 299-306, 2000.
- 8) H. Yanagihara, Y. Sato, J. Mizuta, "A Study of DI Diesel Combustion under Uniform Higher-Dispersed Mixture Formation," JSAE Review 18, pp.247-254, 1997.