

연료조성에 따른 HCCI 엔진의 냉염 및 열염의 2단연소 특성에 관한 실험적 연구

이 기 형^{*1)} · 김 형 민²⁾ · 류 재 덕²⁾ · 이 창 식³⁾

한양대학교 기계공학과¹⁾ · 한양대학교 기계공학과 대학원²⁾ · 한양대학교 기계공학과³⁾

An Experimental Study on the Two Stage Ignition of Cool Flame and Hot Flame in HCCI Engine According to Fuel Composition

Kihyung Lee^{*1)} · Hyungmin Kim²⁾ · Jeaduk Ryu²⁾ · Changsik Lee³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do 425-791, Korea

²⁾Graduate School, Hanyang University, Gyeonggi-do 425-791, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 10 June 2003 / Accepted 3 November 2003)

Abstract : As the environmental pollution becomes serious global problem, the regulation of emission exhausted from automobiles is strengthened. Therefore, it is very important to know how to reduce the NOx and PM simultaneously in diesel engines, which has lot of merits such as high thermal efficiency, low fuel consumption and durability. By this reason, the new concept called as Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI) engines are spotlighted because this concept reduced NOx and P.M. simultaneously. However, it is well known that HCCI engines increased HC and CO. Thus, the investigation of combustion characteristics which consists cool and hot flames for HCCI engines were needed to obtain the optimal combustion condition.

In this study, combustion characteristics for direct injection type HCCI engine such as quantity of cool flame and hot flame, ignition timing and ignition delay were investigated to clarify the effects of these parameters on performance.

The results revealed that diesel combustion showed the two-stage ignition of cool flame and hot flame, the rate of cool flame increase and hot flame decrease with increasing intake air temperature. On the other hand, the gasoline combustion is the single-stage ignition and ignition timing is near the TDC. In addition mixed fuel combustion showed different phenomenon, which depends on the ratio of gasoline component. Ignition timing of mixed fuel is retarded near the TDC and the ignition delay is increased according to ratio of gasoline.

Key words : HCCI(예혼합 압축착화), Cool flame(냉염), Hot flame(열염), Start of ignition(착화시기), Ignition delay(착화지연), Two-stage ignition(2단연소), Single-stage ignition(1단연소)

1. 서론

전 세계적으로 자동차의 배출가스 저감과 열효율의 증가에 대한 요구가 증대되고 있으며, 이러한 관

점에서 열효율이 높은 디젤엔진은 큰 매력을 가지고 있으나, 디젤엔진의 연소 특성인 국부적인 고온 반응 구간의 NOx와 확산연소시의 입자상물질PM(particulate matter)등의 배출가스 증가가 문제점으로 대두되고 있다. 따라서 내연기관 연구자들은 강화된 배기 규제를 만족시킬 수 있는 청정 연소의 저

*To whom correspondence should be addressed.
hylee@hanyang.ac.kr

공해 엔진 기술 개발을 위해 많은 노력을 하고 있는 실정이다.

흡기 포트와 연소실 형상의 최적 설계를 통하여 연료와 공기의 혼합을 촉진시켜 디젤 연소를 개선하는 방법과, EGR과 분사 시기 및 다단 분사등의 연료 분사계를 제어하는 방법, 그리고 산화 촉매 및 희박 NOx 촉매 등을 이용하여 배출가스를 억제하는 후처리 방법 등으로 대별할 수 있다. 이 외에도 초고압 분사(common rail injection)와 대체연료를 사용하는 방법 등이 있으나, 아직까지는 강화되고 있는 배출가스 규제기준을 만족시키지 못하고 있는 실정이다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 연료와 공기가 충분히 혼합할 수 있도록 예혼합 연료 분사 시스템을 이용하여 흡입행정 및 압축행정 초기에 연료를 분사함으로써 연소실내 희박 균일한 예혼합기를 형성시켜 동시에 착화를 시키는 새로운 연소 시스템인 HCCI(homogeneous charge compression ignition)가 주목을 받고 있다.

HCCI 엔진의 개념은 Noguchi 등과 Onishi 등이 ATAC(Active thermo-atmosphere combustion) 이므로 2행정 기관에 최초로 적용하였고^{1,2)}, Najt 등은 CFR 4행정 기관에서 HCCI 연소를 적용하였으며, HCCI 연소의 중요한 특성인 저온연소 및 고온연소의 화학반응을 연구하였다.³⁾ Thring 등은 가솔린 연료를 사용하여 SI 방식으로 저부하시에 HCCI 연소를 구현하였다.⁴⁾ 그러나 흡기관분사나 조기분사 시스템의 HCCI 연소는 압축착화의 자기착화 연소이기 때문에 착화시기를 운전자 나름대로 제어할 수 없는 단점을 가지고 있다.

그러므로 본 연구에서는 디젤과 가솔린연료 및 혼합연료를 압축행정 초기에 연소실로 직접 분사하는 방법을 사용하여 실제 엔진에서 HCCI 연소를 구현함으로써, 연료조성과 흡기온도 및 분사시기에 따른 냉염 및 열염 특성을 파악하여 HCCI 연소에서 가장 중요한 핵심 기술인 착화시기 제어에 필요한 인자를 제시하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서는 상용 단기통 디젤엔진을 기본으로 새로운 연료공급장치를 부착하여 예혼합 압축착화 시스템을 구축하였다. Fig. 1에 직접 분사식 예혼합 압축착화 엔진의 개략도를 나타내었고, Table 1에 엔진 제원을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 직접분사식 예혼합 압축착화를 실현시키기 위하여 기존에 장착되어 있던 캠-플런저의 노즐을 제거하고, 저압 커먼 레일 타입 인젝터를 엔진 헤드 중심부에 장착하여 분사시기 및 분사량을 제어할 수 있는 시스템을 구성하였다. 이러한 연료공급장치는 일정 분사압력을 유지시켜주기 위한 연료 레일과 저압 펌프 및 고압 펌프로 구성되어 있고, 연료 분사압력은 최고 10MPa까지 제어가 가능하다.

기존의 디젤 고압 인젝터를 사용할 경우에는 분사된 연료의 연소실 표면 부착으로 인해 연소 성능에 악영향을 미칠 것으로 판단되므로, 미립화 특성이 우수하면서도 분무도달거리가 짧은 GDI 엔진에서 사용하는 중공형 스월 인젝터를 사용하였다.⁵⁾ 또한 압축행정 초기에 분사된 연료의 벽면 충돌에 의한 퇴적의 감소를 위하여 디젤엔진보다 낮은 분사압력인 5MPa를 사용하였다.

공급연료의 미립화 촉진 및 흡기 온도 변화에 따

Table 1 Specifications of test engine

Engine type	4 stroke single cyl.
Bore×Stroke	95 mm × 95 mm
Displacement volume	673 cc
Compression ratio	18
I/O/IVC	BTDC 20°/ ABDC 44°
EVO/EVC	BBDC 44°/ ATDC 44°

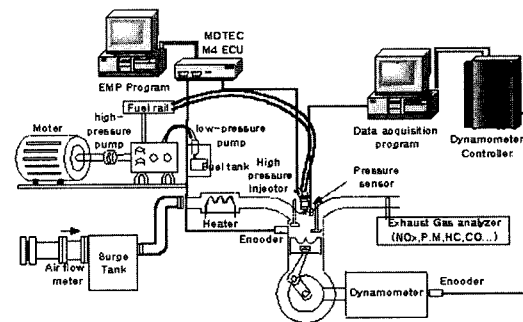


Fig. 1 Schematic diagram of D.I. type HCCI engine system

른 성능 실험을 수행하기 위하여 흡기관에 전기 히터를 장착하여 흡기온도를 대기온도부터 160°C까지 조절하였고, 연료 조성에 의한 연소특성을 연구하기 위하여 디젤과 가솔린 및 혼합연료를 사용하여 실험을 수행하였다.

2.2 시험연료

디젤 연료는 낮은 자기착화 온도라는 장점을 가지고 있는 반면에 연료의 점도 및 표면장력이 가솔린 연료보다 크기 때문에 미립화 및 증발하는데 어려움을 가지고 있다. 이에 비하여 가솔린 연료는 높은 휘발성과 낮은 점성 등으로 예혼합기 형성에 유리하지만 자기착화 온도가 높고 노킹이 쉽게 일어난다는 단점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 두 연료의 장점을 이용하기 위하여 옥탄가가 다른 혼합연료^(6,9)를 사용하여 디젤 및 가솔린연료를 사용한 경우와 연소 특징을 비교하였다. 이와 같은 시스템의 원리는 휘발성이 좋은 가솔린 연료가 희박 예혼합기를 형성한 후, 디젤 연료의 자기착화 특성을 이용하여 압축착화를 실시함으로써 균일 희박연소에 의한 NOx의 생성 억제와 균일 예혼합 연소에 의한 입자상 물질의 동시저감을 목표로 한 것이다.⁽¹⁰⁾

2.3 실험조건 및 절차

실험조건을 Table 2와 같이 요약하였다. 성능 실험에서는 냉각수 온도를 80±2°C로 유지하였고, 흡기온도의 영향에 대한 실험은 흡기온도 80°C를 기준으로 공연비를 맞춘 후, 연료량을 일정하게 유지한 상태에서 흡기온도를 변화시켰다.

HCCI 성능실험 후 연소압력을 사용하여 연소해석을 수행하면, Fig. 3과 같은 연소압력 및 열발생을

Table 2 Engine test conditions

Engine performance test	
Engine speed	900 ~ 1800 rpm
A/F	43, 52, 64, 74
Intake air temp.	353, 393, 433K
Injection press.	5MPa
Injection timing	BTDC 30° ~ 120°
Fuels	diesel gasoline mixed fuel

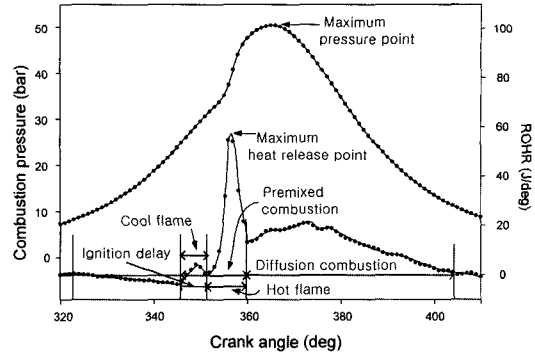


Fig. 2 Definition of combustion parameters

그래프를 얻을 수 있다. 이를 이용하여 착화시기, 착화지연기간, 최고압력, 최대 열발생 위치 및 연소기간 등의 주요 인자들을 산출하여 연소특성을 파악하였으며, 착화시작은 열염의 시작을 기준으로 판단하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 디젤연료와 가솔린연료의 예혼합 압축착화 연소 차이점

Fig. 3은 디젤 연료와 가솔린 연료의 예혼합 연소 특성을 비교한 그림이다. 그림에서 나타나 있는 바와 같이 디젤연료의 예혼합 연소특징은 주연소 이전에 냉염이 발생하는 2단연소(two-stage ignition) 형태를 갖는다. 이때 생성되는 냉염은 메탄과 에탄을 제외한 알킨(파라핀)계열 연료의 연소에서 주연소 이전에 저온연소 반응을 일으키며 생성되는 것이다.⁽¹¹⁾ 반면 가솔린 연료의 연소시에는 냉염이 발생

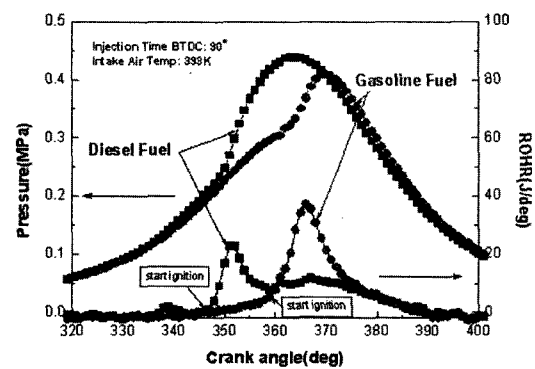


Fig. 3 Comparison of combustion characteristics between diesel and gasoline fuel

되지 않는다. 그 이유는 iso-octane의 경우 초기 온도가 330K 이상인 경우 1단연소(single-stage ignition) 형태를 보이기 때문이다.¹¹⁾ 또한, 디젤연료의 착화 시기가 가솔린연료의 연소에 비해 빨리 발생되는 특성을 가지고 있다. 이는 디젤연료가 가솔린연료보다 자기착화 온도가 낮기 때문이다. 그리고 디젤연소의 경우 예혼합 연소 후에 확산화염의 형태의 연소특성을 보이는데, 이는 디젤연료가 가솔린보다 미립화 및 증발특성이 좋지 않아 미처 증발되지 못한 연료에 의하여 확산연소의 형태로 나타나는 것으로 판단된다.

3.2 디젤연료의 예혼합 연소특성

3.2.1 분사시기 및 흡기온도에 따른 연소특성

Fig. 4, 5는 디젤연료의 예혼합 연소특성을 알아보기 위하여 분사시기 및 흡기온도 별로 열발생률을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 디젤연료는 분사시기에 관계없이 냉염과 열염의 2단연소(two-stage ignition) 형태를 보이고 있으며, 그 발생시점은 거의 같은 지점에서 발생하였다. 또한 예혼합 연소가 TDC 이전에 대부분 진행되었기 때문에 엔진의 성능면에서 불리한 결과를 초래할 것으로 예상되며, 이는 디젤연료의 착화 온도가 낮아 TDC 이전에 자기착화 온도에 도달하였기 때문으로 사료된다. 또한 분사시기가 진각 됨에 따라 열염의 최고값 및 기울기는 감소한다. 이는 분사시기가 진각되면 미립화 및 증발 할 수 있는 시간의 증가로 인하여 급격한 예혼합 연소가 발생되지 않았을 것으로 사료된다. Fig. 5는 디젤연료의 예혼합 연소특성을 흡기온도에 따른 열발생률로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 흡기온도가 증가할수록 냉염과 열염의 발생시기 및 최대값 발생시점도 진각된다. 이는 흡기온도가 높으면 디젤이 자기착화 온도에 도달하는 시간이 빨라져서 착화시점이 앞당겨진 것으로 사료된다. 이러한 결과로부터 디젤연료의 착화는 미립화 및 증발특성보다는 흡기온도에 큰 영향을 받는 것으로 생각된다.

Fig. 6, 7은 디젤연료 예혼합 연소시 발생하는 냉염 및 열염의 비율을 분사시기 및 흡기온도에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 냉염의 비

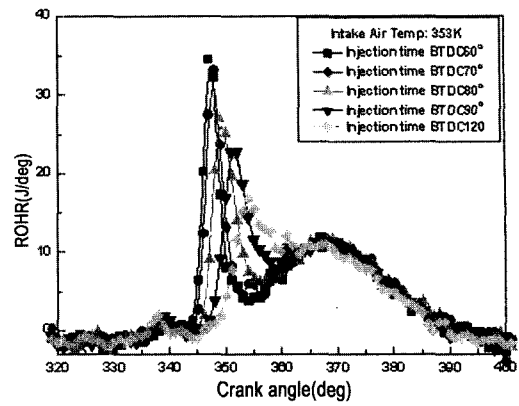


Fig. 4 Rate of heat release according to injection time (diesel, A/F=43)

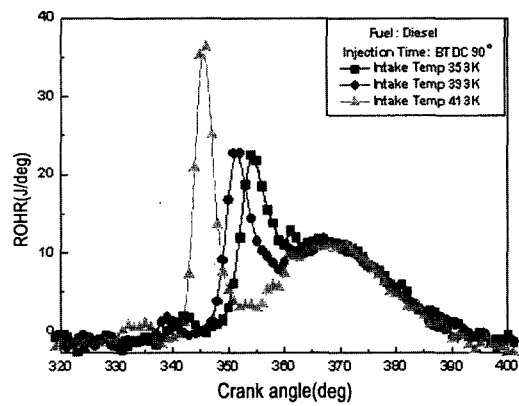


Fig. 5 Rate of heat release according to intake air temp. (diesel, A/F=43)

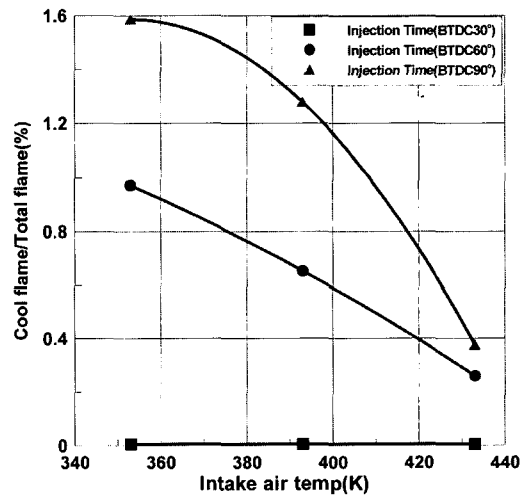


Fig. 6 Cool flame according to intake air temperature & injection time(diesel, A/F=43)

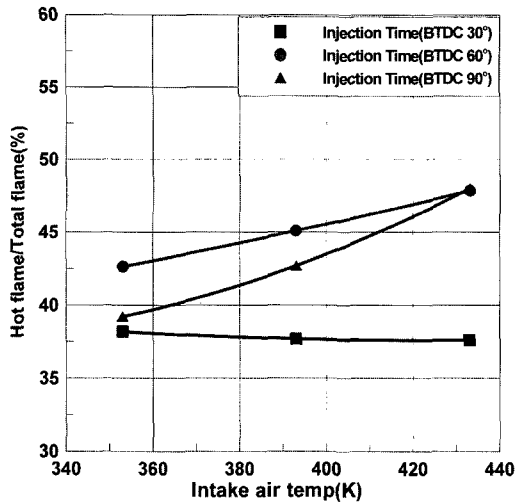


Fig. 7 Hot flame according to intake air temp. & injection time(diesel, A/F=43)

율은 흡기온도가 증가함에 따라 감소하는 반면에 열염은 증가하는 경향을 보이며, 분사시기가 진각됨에 따라 흡기온도에 영향이 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 분사시기가 진각됨에 따라 냉염은 증가하나 열염은 BTDC60°에서 가장 큰 값을 가진다. 그러므로 본 시스템에서 디젤연료를 사용하여 예혼합 연소를 실현하기 위해서는 흡기온도를 높여 연료의 증발을 촉진시키고 BTDC60°이전에서 분사시켜 공기와의 혼합을 증가시켜야 할 것으로 사료된다. 그러나 착화시기를 TDC근처에 맞추기 위해서는 흡기온도와 분사시기 이외의 다른 조건이 필요함을 알 수 있었다.

3.2.2 공연비 및 엔진 회전수에 따른 열염 및 냉염 특성

Fig. 8은 공연비 및 엔진 회전수에 따른 냉염과 열염의 관계를 나타낸 것이다. 같은 공연비 조건에서는 회전속도가 느린 900RPM에서 냉염과 열염이 대체적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 저속영역에서는 공기와의 혼합 및 증발 시간이 길어져서 충분한 혼합기 형성이 가능하기 때문이다. 한편 고회전 영역에서 냉염과 열염의 기울기가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 피스톤 운동 및 유동장 강화에 의한 연료 액적의 증발 및 공기와의 혼합속도가 상승하여 열염의 양이 증가하기 때문으로 판단된다.

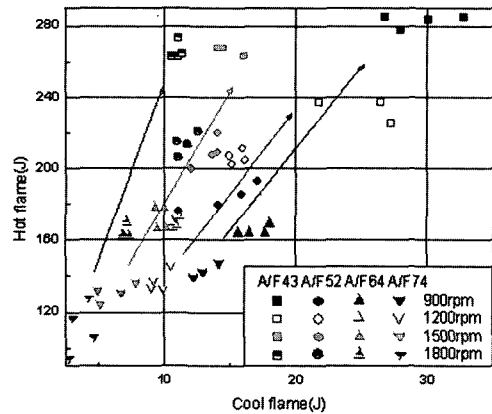


Fig. 8 Hot and Cool flame according to A/F and RPM (Ti=353K)

3.3 가솔린 연료의 예혼합 연소특성

Fig. 9,10은 가솔린 연료의 예혼합 연소특성을 분사시기 및 흡기온도에 따라 열발생률 그래프로 비교한 그림이다. 연소특징은 1단연소(single-stage ignition) 형태로 나타나며 착화는 분사시기를 지각시키거나 흡기온도를 감소함에 따라 TDC근처로 이동되었다. 또한 분사시기를 BTDC60°이상 지각하였을 경우 디젤연소와 같은 확산화염 형태가 형성되는 것을 알 수 있다. 이는 TDC에 가까울수록 연료가 미립화 및 증발할 시간이 부족하여 나타난 결과로 사료된다. 그러나 확산화염의 양은 디젤연료보다는 적은 것으로 나타났다.

Fig. 11은 가솔린 연료의 예혼합 연소특징을 분사시기 및 흡기온도에 따라 열염의 발생량으로 나타

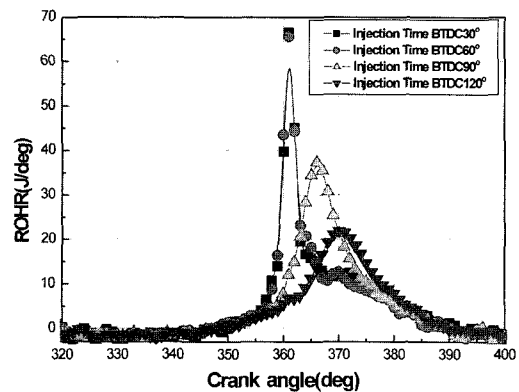


Fig. 9 Rate of heat release according to injection time (Gasoline, A/F=74)

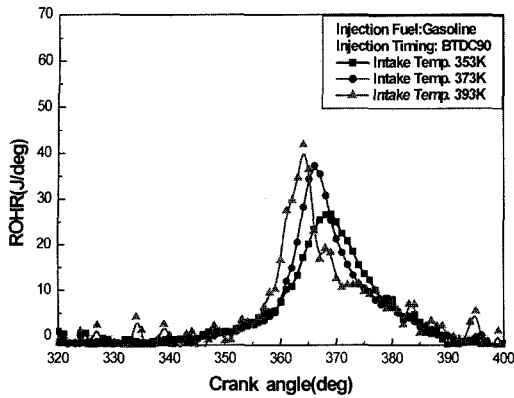


Fig. 10 Rate of heat release according to intake air temp. (Gasoline, A/F=74)

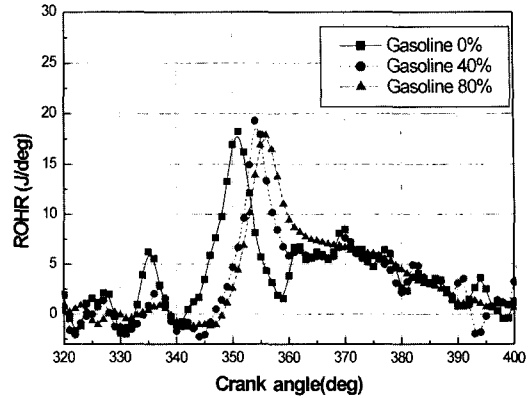


Fig. 12 Rate of heat release according to gasoline percent (Ti=353K, A/F=74)

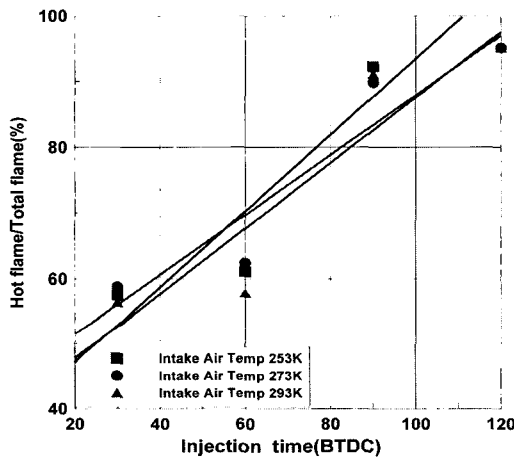


Fig. 11 Hot flame according to intake air temp. & injection time (Gasoline, A/F=74)

내었다. 그림에서 보는 바와 같이 분사시기가 진각됨에 따라 열염의 비율이 급격히 증가한다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 TDC 근처에서 분사할 경우 미립화 및 증발시간의 부족으로 가솔린 연료도 확산화염의 형태를 보이기 때문이다. 그러나 흡기 온도에 따라서는 비슷한 경향을 나타내는 것으로 보아 가솔린 연료의 예혼합 연소특성은 온도보다는 분사시기의 영향이 큰 것으로 사료된다.

3.4 디젤 · 가솔린 혼합연료의 연소특성

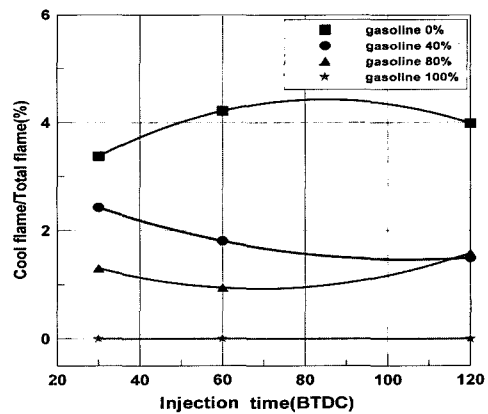
3.4.1 연료혼합비에 따른 열발생률 특성

Fig. 12는 디젤 · 가솔린 연료의 혼합비에 따른 예혼합연소 특성을 열발생률로 나타낸 것이다. 가솔

린의 혼합비가 증가할수록 냉염 및 열염의 발생시기는 지각됨을 알 수 있다. 이는 착화온도가 높은 가솔린 연료가 증가할수록 착화시기가 지각되어 나타난 결과로 생각된다. 또한 냉염과 확산연소의 양이 줄어드는 경향을 가진다.

3.4.2 연료혼합비 및 분사시기에 따른 냉염 및 열염 특성

Fig. 13은 디젤 · 가솔린 연료의 혼합비 및 분사시기에 따른 연소특성을 냉염 및 열염 발생 비율로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 가솔린 혼합비율이 증가할수록 냉염은 감소하나 열염은 증가하는 경향을 갖는다. 이는 냉염은 디젤 연료의 영향이 크며, 열염은 가솔린 연료에 의해 확산연소가 감소하여 열염의 증가로 나타난 결과로 사료된다. 또한 냉염 및 열염의 비율은 분사시기보다는 가솔린 혼합비율에 더욱 민감한 것으로 판단된다.



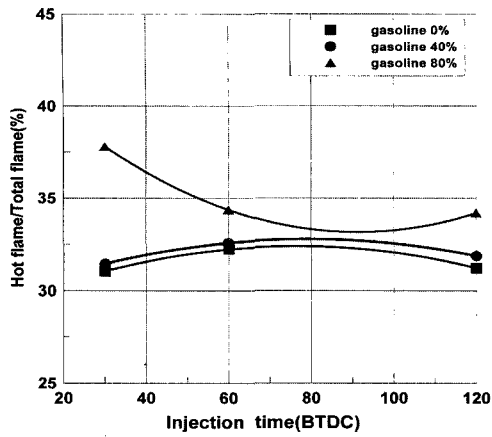


Fig. 13 Cool and Hot flame according to gasoline percent (Ti=353K, A/F=74)

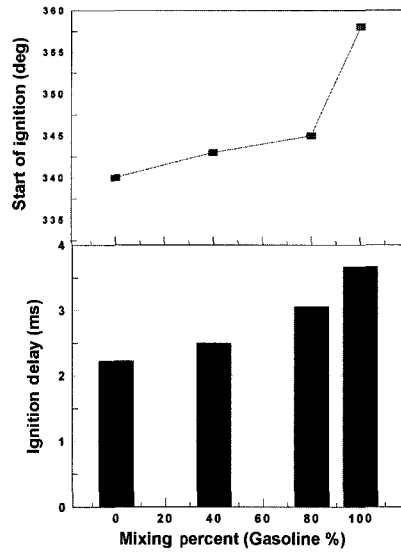
3.4.3 연료혼합비 및 흡기온도에 따른 착화시기 및 착화지연기간

Fig. 14는 디젤·가솔린연료의 혼합비 및 흡기온도에 따라 착화시기 및 착화지연기간을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 가솔린의 혼합비율이 증가할수록 착화시기는 TDC 근처로 이동하고 착화지연기간도 증가함을 볼 수 있다. 또한 가솔린 100%일 때 착화시기의 증가 기울기가 큰 것으로 보아 적은 양의 디젤연료도 착화원으로 작용하였음을 판단할 수 있었다. 또한 흡기온도가 증가하면 착화시기는 빨라지고 착화지연기간은 감소함을 알 수 있었다.

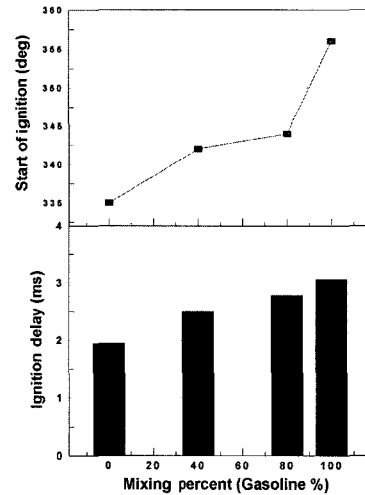
4. 결론

본 연구에서는 디젤 및 가솔린 연료를 사용한 예혼합 압축착화 엔진의 연소특성을 확인한 후, 두 개의 혼합비를 조절하여 연소특성을 연구한 결과 얻어진 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 디젤연료의 예혼합 연소는 냉염과 열염의 2단연소(two-stage ignition) 형태의 특징을 가지며, 흡기온도가 상승할수록 냉염은 감소하지만 열염은 증가하고, 분사시기가 진각되면 냉염은 증가하고 열염은 BTDC60°에서 최대값을 갖는다. 또한 착화시기는 분사시기보다 흡기온도에 더 큰 영향을 받는다.
- 2) 가솔린 연료는 열염만의 1단연소(single-stage



(a) Ti = 353K



(b) Ti = 393K

Fig. 14 Start and delay of ignition according to gasoline percent and intake air temp.(A/F=74)

ignition) 형태의 연소를 보이고 착화는 디젤연료보다 지각된 시점인 TDC 근처에서 일어나며, 분사시기가 BTDC60° 이상 지각되면 디젤 연소와 같은 확산연소가 생성되는 열발생률을 가진다. 또한 흡기온도가 열염에 미치는 영향은 디젤연료보다 적고 착화는 분사시기를 지각시키거나 흡기온도를 증가함에 따라 진각된다.

- 3) 혼합연료의 예혼합 연소특성은 가솔린 혼합비

가 증가함에 따라 냉염의 비율은 줄어드나 열염의 비율은 증가한다. 이는 냉염은 디젤연료의 영향이 크며, 열염은 가솔린 연료에 의해 확산연소가 감소하여 열염의 비율이 증가되었기 때문이라고 사료된다.

- 4) 착화시기는 가솔린 혼합비가 증가함에 따라 TDC 근처로 지각되고 착화지연기간은 증가함을 보이고 있다. 이는 가솔린 비율이 증가함에 따라 세탄가가 감소하기 때문이라고 사료된다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단에서 지원하는 2002년도 협동연구지원 사업의 “균일 예혼합 압축 착화 엔진의 분무 및 혼합기 최적화 기술에 관한 연구(KRF-2002-042-D00025)” 과제의 일환으로 수행되었다.

References

- 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) R. H. Thring, “Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine,” SAE 892068, 1989.
- 5) C. D. Marriott, R. D. Reitz, “Experimental Investigation of Direct Injection-Gasoline for Premixed Compression Ignited Combustion Phasing Control,” SAE 2002-01-0148, 2002.
- 6) M. Christensen, A. Hultqvist, B. Johansson, “Demonstrating the Multi Fuel Capability of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Variable Compression Ratio,” SAE 1999-01-3679, 1999.
- 7) M. Furutani, Y. Ohta, M. Kono, M. Hasegawa, “An Ultra-lean Premixed Compression-ignition Engine Concept and its Characteristics,” The Forth International Symposium COMODIA 98, 1998.
- 8) B. H. Cho, K. H. Lee, C. S. Lee, “Combustion Characteristics of Premixed Charge Compression Ignition Diesel Engine using Mixed Fuels,” Transactions of KSAE, Vol.10, No.5, 2002.
- 9) T. Aroonsrisopon, V. Sohm, P. Werner, D. E. Foster, T. Morikawa, M. Iida, “An Investigation into the Effect of Fuel Composition on HCCI Combustion Characteristics,” SAE 2002-01-2830, 2002.
- 10) R. H. Stanglmaier, C. E. Roberts, “Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Applications,” SAE 1999-01-3682, 1999.
- 11) S. Tanaka, F. Ayala, J. C. Keck, J. B. Heywood, “Two-stage Ignition in HCCI Combustion and HCCI Control by Fuels and Additives,” Combustion and Flame, Vol.132, pp.219-239, 2003.