

< 논문 >

CAI 연소 방법을 이용한 성층 연소를 통한 운전 영역 확대, 연소 및 배기 특성에 관한 실험적 연구

이창희[†] · 정해영^{*} · 이기형^{**}

(2005년 12월 13일 접수, 2006년 3월 29일 심사완료)

An Experimental Study on the Extend of the Operating Region and Emission Characteristics Through the Stratified Combustion Using Controlled Auto-Ignition Method

Changhee Lee, Haeyoung Jeoung and Kihyung Lee

Key Words : CAI(Controlled Auto-Ignition: 자기착화 조절), Residual EGR(잔류 배기가스), Early Injection(조기분사), Late Injection(후기분사), Stratified Combustion(성층연소)

Abstract

Controlled auto-ignition(CAI) combustion, offers the potential to improve fuel economy and reduce emission simultaneously. In this study, CAI-combustion was achieved in a single cylinder gasoline DI engine with modified camshafts in order to restrict the gas exchange process. We investigated the effects of air-fuel ratio, residual EGR rate and injection timing such as early injection and late injection on the attainable CAI combustion region. The effect of injection timings on combustion characteristic such as start of combustion, combustion duration and heat release rate was also investigated. From the result early injection causes the mixture to ignite earlier and burn more quickly due to the exothermic reaction during the recompression and gives rise to good mixing of the fuel/air. On the other hand, late injection extended the operation region more than early injection but the emissions of HC and NOx were more or less increased than early injection.

1. 서 론

현재 ULEV(Ultra Low Emission Vehicle)와 CAFÉ(Corporate Average Fuel Economy) 및 교토 의정서등과 같이 전세계적으로 강화되고 있는 배기 규제에 대응하기 위하여 자동차 생산업체들은 연료 경제성이 뛰어나고 오염 물질의 배출이 적은 차량에 대한 많은 연구를 진행하고 있다. 이러한 배기 규제를 만족시킬 수 있는 저공해 엔진 기술 개발을 위해 많은 노력을 하고 있는 실정이다. 가솔린 연소의 신개념인 자기착화 조절

(controlled auto ignition) 개념을 이용한 SCCI (Stratified Charge Compression Ignition) 연소는 국부적으로 농후한 혼합기를 형성하여 자기 착화를 쉽게 하기 위한 방법이며, 이러한 방법을 이용하면 희박 성층 연소가 가능하다. 즉, SCCI 의 연소 개념은 엄밀히 보면 HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) 연소 개념 안에 속하는 연소 시스템이다.^(1-3,8)

가솔린의 예혼합 압축착화 엔진의 연소 조절을 위한 방법으로 내부 EGR 조절, VVT 및 흡기 온도 조절을 통해 자기 착화 시기를 조절하는 연구가 진행되었으며,⁽⁴⁾ 가솔린 연료를 이용하여 HCCI 연소를 위한 방법으로 압축비 변화, 흡기 온도 및 NVO(Negative Valve Overlap)을 조절하여 내부 EGR의 변화를 통하여 연소 특성을 파악하는 연구도 수행되었다.^(5,6)

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과
E-mail : leemech@encod.hanyang.ac.kr
TEL : (031)418-9293 FAX : (031)406-5550

^{*} 한양대학교 대학원 기계공학과

^{**} 회원, 한양대학교 기계공학과

CAI 연소는 연소실내 혼합기 분포, 압력, 온도 및 연료의 화학적 구성 등을 제어함으로써 구현될 수 있다. CAI 연소는 높은 EGR 율과 희박연소에 따른 저온 연소 특성으로 인하여 NOx 를 크게 줄일 수 있고, 가솔린 연료의 기화특성으로 인한 입자상 물질(particulate material)의 양을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나, CAI 연소의 단점으로는 운전영역이 협소한 특징을 갖고 있다. 지금까지 안정적인 CAI 연소를 구현하기 위해서 많은 연구가 진행되고 있으며,⁽⁹⁻¹³⁾ 그 방법과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 흡기 포트 가열식,
- (2) 압축비(compression ratio)의 변화,
- (3) 연료의 특성(cetan or octane 조절),
- (4) 외부 EGR 및 내부 EGR

이와 같이 많은 방법이 있지만, CAI 연소를 구현할 수 있는 가장 현실적인 방법은 EGR 의 사용이다. EGR 을 사용함으로써 얻을 수 있는 2 가지 효과는 첫째, 압축 행정 동안 연료의 자착화 온도까지 쉽게 도달할 수 있으며, 둘째, Knocking 과 착화 시기를 지연 시킬 수 있는 효과가 있다.⁽¹²⁾

본 연구에서는 직접 분사식 가솔린 인젝터와 NVO(negative valve overlap)을 이용하여 내부 EGR 을 증대 및 후기 분사방법을 이용하여 운전 영역 확대를 구현하였다. 이 외에도, NVO 를 이용한 내부 EGR 량과 초기 및 후기 분사시기에 따른 운전 영역과 배기특성을 분석 및 비교하였다. 또한 CAI 연소의 협소한 운전영역 확대를 위한 방법으로 국부적으로 농후한 성층 혼합기를 형성함으로써 운전 영역 확대를 위한 방법을 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서는 단기통 직분식 가솔린 엔진을 기본으로 새로운 연료 시스템을 구성하였으며, 균일 혼합 및 성층 혼합 엔진 시스템을 구축하였다. Fig. 1 에 가솔린 직접 분사식 CAI 엔진의 개략도를 나타내었으며, Table 1, Table 2 와 Table 3 에 엔진 제원과 인젝터 제원 및 실험조건을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 직접분사식 성층 압축착화 연소를 실현시키기 위하여 기존에 장착되어 있던 캠-플러저의 기계식 노즐을 제거하고, 저압 커먼 레일(common-rail)

타입 인젝터를 엔진 헤드 중심부에 장착하여 분사시기 및 분사량을 제어할 수 있는 시스템을 구성하였다. 본 연구에서 사용된 저압 커먼레일 인젝터는 중공형 이며, 압축행정 초기에 분사된 연료의 벽면 충돌에 의한 퇴적을 감소시키기 위하여 분사압력은 디젤 엔진보다 낮은 5MPa 로 선정하였다. 연료 특성상 디젤과 비교하여 가솔린의 자기착화(auto ignition) 온도가 높기 때문에 이러한 문제점을 보완하기 위하여 자기 착화 온도까지 온도를 높여주기 위하여 NVO 방법을 이용하여 연소실내 온도를 증가시켰다.

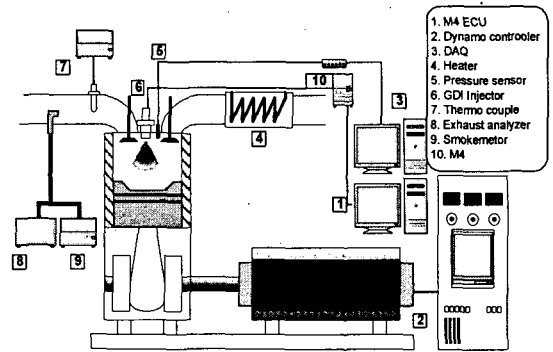


Fig. 1 Schematic diagram of direct injection type CAI engine system

Table 1 Engine specifications

Engine type	4Stroke, Single Cyl.
Bore × Stroke	95mm×95mm
CR	11
IVO	ATDC 40°

Table 2 Specifications of fuel injection system

Injection Pressure	5MPa
Spray Geometry	Hollow cone / Swirl type
Spray Angle	60°

Table 3 Engine test conditions

Engine speed	1000, 1200 rpm
A/F	40 ~ 80
Injection timing	BTDC 360°, 270°, 90°
EVC	BTDC 50°, 70°, 90°

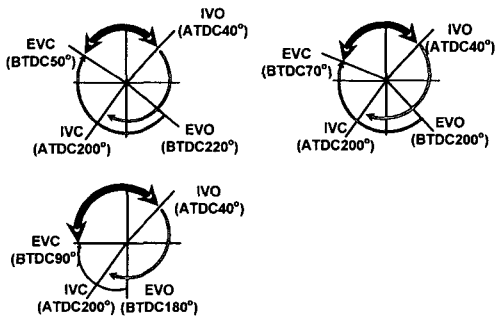


Fig. 2 Diagram of modified valve timing

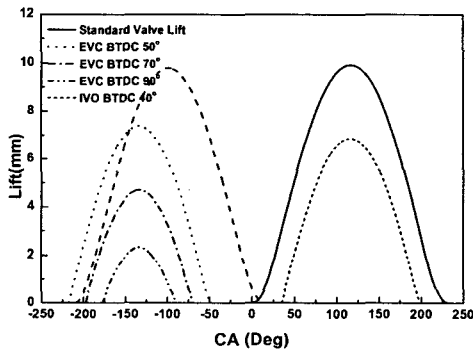


Fig. 3 Cam-profile of modified valve timing and valve lift

엔진 내 연료량과 분사시기를 제어하기 위하여 Motec 사의 M4 ECU 를 사용하였으며, CAI 연소의 배기 특성을 분석하기 위해 스모크 메타와 배기 분석계를 사용하였다. 연소특성을 분석하기 위하여 실린더 헤드에 피에조 형식의 압력센서를 부착 후, 연소실의 압력을 A/D 보드를 통하여 획득하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서 사용된 실험조건은 Table 3 과 같이 요약하였다. 내부 EGR 을 이용하기 위한 밸브 시스템 개략도를 Fig. 2 에 나타내었다. Fig. 3 은 Fig. 2 에서 제안한 개략도를 이용하여 NVO 를 적용한 밸브 타이밍과 리프트의 개폐시기를 나타낸 결과이다.

배기 밸브 닫힘 시기에 따른 재압축의 영향으로 인하여 흡기포트 유동의 역류(back flow)로 인한 열손실 현상과 흡입 공기량 확보를 위해 흡기 밸브의 열림 시기를 (ATDC 40°) 지각시켰다. 각각의 밸브 닫힘 시기에 따른 내부 EGR 의 정량적인 값을 구하기 위해서 다음과 같은 이상기체 방정식을 사용하였다.

$$PV=m_rRT, m_r = \frac{PV}{RT} \quad (1)$$

위의 이상기체 방정식에서 P 는 압력센서로부터 실린더 내의 압력을 측정함으로써 얻을 수 있고, V 는 배기 밸브가 닫히는 시점에서의 형상학적 값으로 구할 수 있다. 또한 연소실내의 연소 온도를 측정하기 힘들기 때문에 배기 포트 앞 부분에 온도 센서를 설치하여 배기가스 온도(T)를 측정하였으며, 온도센서로부터 얻은 온도는 실린더내의 배기가스의 온도와 같다고 가정하였다.⁽⁹⁾ 기체상수 R 의 값은 실린더 내로 유입되는 미연 혼합기의 당량비와 연소실 온도에 상응하는 온도를 고려하여 수정 R 의 값을 넣었다.

CAI 연소의 초기 활성화를 위하여 냉각수 온도를 80℃로 유지하였다. 조기 분사(early injection)에 의한 분사량 및 EGR 율에 따른 운전영역과 배기 특성실험을 하였고, 운전영역 확대를 위해 후기 분사(late Injection) 실험을 수행하였다. 조기 분사 시기는 흡입 공기량에 영향을 줄 수 있는 압축 TDC 기준 BTDC 360°와 270°는 흡입행정 중에 분사를 하였고, 후기 성층화를 위한 분사 시기는 BTDC 90°에서 분사하였다.

3. 결과 및 고찰

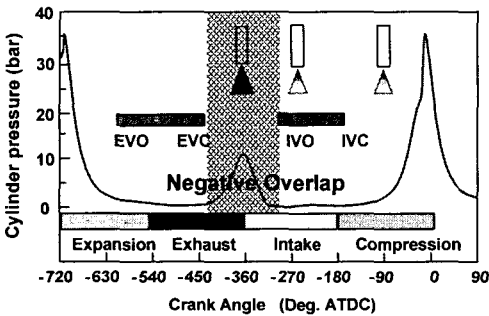
본 연구는 NVO 시기 및 분사량 변화에 따라 EGR 량의 차이를 보정하기 위하여 식 (1)을 이용하여 정량적으로 내부 EGR 량을 얻을 수 있었다. 또한 조기 분사 및 후기 분사 방식에 따른 협소한 운전 영역의 확대방안, 연소 와 배기 특성을 분석하였다.

3.1 내부 EGR 율을 이용한 CAI 압력 특성 및 EGR 변화 특성

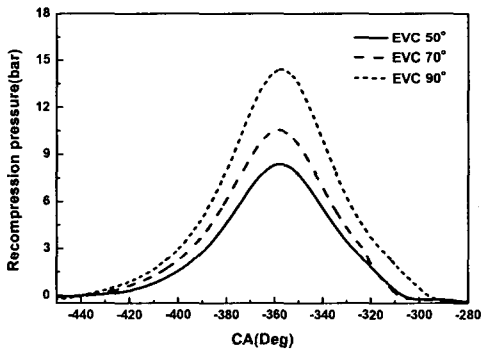
Fig. 4 는 내부 EGR 을 이용한 CAI 연소의 일반적인 압력곡선과 재압축시 내부 EGR 량에 따른 압력 변화를 나타낸 결과이다. 배기밸브 닫힘 시기를 빠르게 설정함으로써, 실린더 내부에 남아 있는 잔류 배기가스가 배기 TDC에서 재압축되는 현상을 보이고 있다. 재압축 압력은 밸브의 닫힘 시기가 빠를수록 높아지며, 이것은 곧 EGR 량의 증가를 의미한다. 그림에서 볼 수 있듯이, 배기밸브 닫힘 시기가 빠를수록 잔류 배기가스로 인해 압력이 증가하는 것을 알 수 있다. 직접분사식 엔진에서 재압축 기간 내 연료를 분사할 경우, 가솔

린의 기화특성이 흡입공기에 미치는 영향을 고려하여 분사시기를 BTDC 360°와 270°를 선택하였으며, 연료 성층화에 따른 연소특성을 고려하기 위해서 BTDC 90°를 분사시기로 선정하였다.

내부 EGR 량에 따른 배기밸브 앞부분에서 온도 특성을 나타낸 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 결과로부터 내부 EGR 량의 증가에 따라 연소실의 온도는 가솔린의 자착화 온도까지 도달하는 것을 확인할 수 있었다. 단지 내부 EGR 량이 작은 영역에서는 다소 자착화 온도까지 도달하지 않고 있음을 확인할 수 있었다.



(a) Compression diagram of CAI combustion



(b) Recompression diagram according to the internal EGR

Fig. 4 Diagram of CAI combustion and recompression

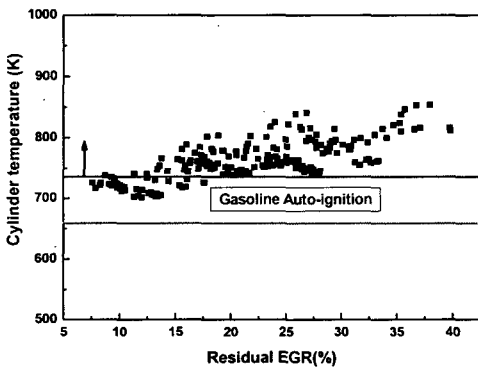


Fig. 5 Effect of cylinder temperature according to residual EGR

3.2 내부 EGR 량 및 분사시기 변화에 따른 연소와 열발생을 특성

Fig. 6은 내부 EGR 량의 변화 및 분사시기 변화에 따른 연소 특성과 열발생 특성을 나타낸 결과이다. 내부 EGR 량이 증가함에 따라(Fig. 3의 배기 밸브 개폐시기 변화) 연소 압력이 증가하는 특성을 볼 수 있었다. 이는 EGR 량의 증가로 인하여 연소실의 온도가 증가하였기 때문에 분사된 연료의 기화 촉진으로 인하여 자착화 온도까지 상승하여 연소가 촉진된 것으로 생각된다. 내부 EGR 율이 18%인 경우, 실린더내의 온도가 낮기 때문에 재압축 시점에 분사하는 경우가 연소 특성이 우수함을 알 수 있었으며, 분사시기가 지각됨에 따라 열발생 시점도 지각되는 특성을 볼 수 있었다. 내부 EGR 율이 30%이며, 분사시기가 BTDC 270°와 BTDC 360° 일 때 연소 압력 및 열발생 특성은 비슷한 결과를 보인 반면, 분사시기가 후기 분사에 해당하는 BTDC 90°인 경우, 조기 분사의 경우보다 열발생 시점은 TDC 부근으로 지각(retard)되는 특성을 볼 수 있었다. 따라서, 내부 EGR 량의 변화는 연소 특성 및 착화시기를 결정할 수 있는 중요한 인자라고 생각된다.

3.3 내부 EGR 량 변화에 따른 배기 특성

Fig. 7은 분사시기가 BTDC 270° 일 때 공연비 및 내부 EGR 량 변화에 따른 배기 특성을 나타낸 결과이다. 내부 EGR 량이 증가함에 따라 HC는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 내부 EGR 량이 증가함에 따라 연소실내 온도의 증가로 인하여 분사된 연료가 빠르게 기화되었기 때문으로 사료된다. 또한 내부 EGR 량의 증가에 따라 NOx의 배출량은 거의 발생하지 않는 특성을 보였다. 그러나, 공연비가 농후한 영역에서는 많은 NOx가

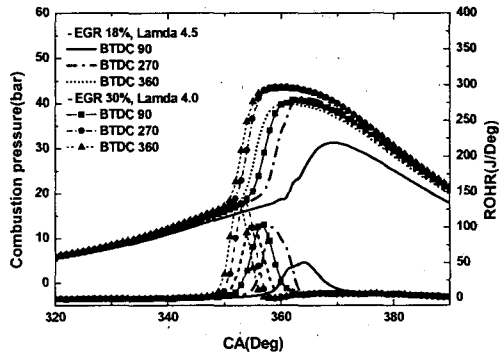


Fig. 6 Combustion pressure and heat release rate according to variation on the residual EGR rate and the injection timing

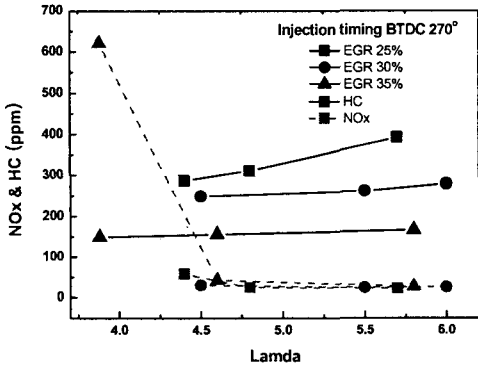


Fig. 7 Emission characteristics according to the residual EGR rate

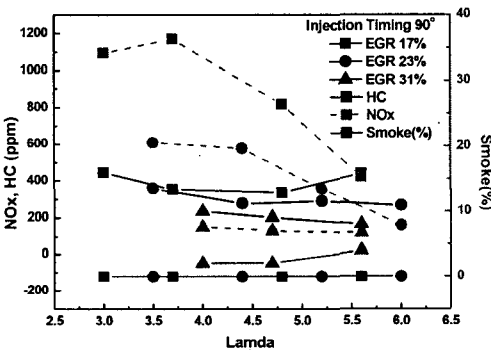


Fig. 8 Emission characteristics according to the residual EGR

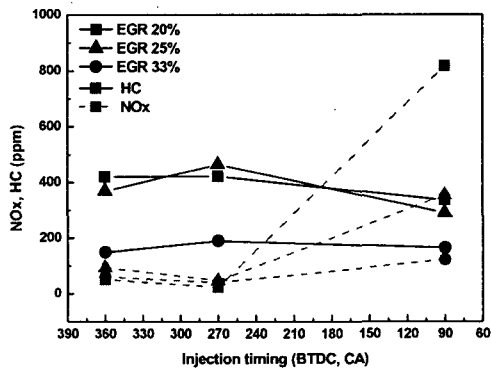


Fig. 9 Emission characteristics according to variation on the injection timing at the engine speed 1200rpm

배출되었는데, 이는 Fig. 10 에서 결과를 통해 CAI의 단점인 협소한 운전영역에 해당하는 부분이며, 이 영역은 노킹이 발생하는 영역으로 생각된다.

Fig. 8 은 분사시기가 BTDC 90° 일 때 공연비 및 EGR 량의 변화에 따른 배기 특성을 나타낸 결과이다. 내부 EGR 량이 증가함에 따라 HC 는 Fig. 7 과 같이 감소하는 경향을 보이고 있으나, NOx 는

Fig. 7 과는 많은 배출량의 차이를 보이고 있다. 그러나, 내부 EGR 량의 증가로 인하여 급격하게 감소하는 특성을 보이고 있다. 조기 분사와는 다르게 많은 양의 NOx 가 발생하는 이유는 국부적으로 농후한 혼합기가 형성하기 때문이며, 공연비가 희박해짐에 따라 NOx 가 감소하는 특성을 통하여 이러한 이유를 보이는 근거라고 생각된다. 조기 분사일 경우는 smoke 가 발생하지 않았지만, 후기 분사일 경우 소량의 smoke 가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 다량의 EGR 량의 증가로 인하여 공기의 부족으로 농후한 혼합기가 형성되어 소량의 smoke 가 발생한 것으로 생각된다.

Fig. 9 는 엔진 회전수 1200rpm 일 때 분사시기 및 내부 EGR 량의 변화에 따른 배기 특성을 나타낸 결과이다. 분사시기에 관계없이 내부 EGR 량이 증가함에 따라 HC 는 급격히 감소하는 특성을 보이고 있다. 이는 연소실내 온도가 자착화 온도까지 상승하여 연료의 기화가 촉진되었기 때문이다. 조기 분사에 해당하는 BTDC 270° 와 BTDC 360° 인 경우, 내부 EGR 량에 상관없이 NOx 는 발생하지 않았지만 후기 분사에 해당하는 BTDC 90° 인 경우, 내부 EGR 량이 증가함에 따라 NOx 는 현저히 감소하는 경향을 볼 수 있었다.

3.4 조기 및 후기 분사시 운전 영역 특성

Fig. 10 은 엔진 회전수 1000rpm 과 1200rpm 일 때, 분사시기와 내부 EGR 량 및 공연비변화에 따른 CAI 연소의 운전 영역 특성을 나타낸 결과이다. 본 실험에서는 모든 조건에 대하여 연소압력을 분석하여 노킹이 발생하지 않는 영역을 구분하였다. 특히, 조기 분사의 경우(분사시기 BTDC 270° 와 360°) 협소한 운전 영역으로 인하여 노킹 영역과 실화(misfire)의 영역이 넓게 분포하는 특성을 볼 수 있었다. 그러나 노킹영역과 실화영역을 줄이기 위한 방법으로 후기 분사를 이용하면 노킹영역과 실화영역을 줄어든 것으로 사료되며, 조기 분사와 후기분사를 통하여 공연비와 내부 EGR 량을 조절한다면 넓은 운전 영역을 확보할 것으로 판단된다.

Fig. 11 은 후기 및 조기 분사를 통하여 내부 EGR 량을 변화시켰을 경우의 IMEP 특성을 나타낸 결과이다. 조기 분사의 경우 IMEP 와 내부 EGR 량은 한계는 각각 2~5bar 및 20~30%이다. 반면 후기 분사를 통하여 내부 EGR 량의 한계뿐만 아니라 IMEP 값도 증가하는 특성을 보였다. Fig.

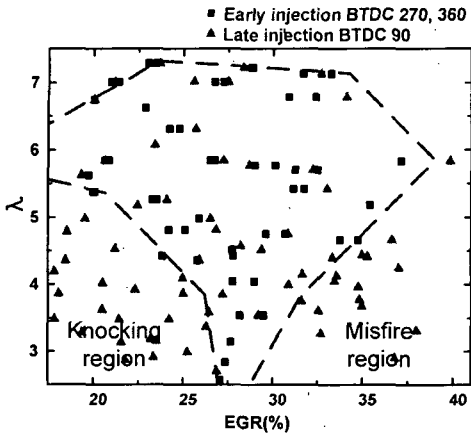


Fig. 10 Operation region according to variation on the residual EGR rate in case of early and late injection

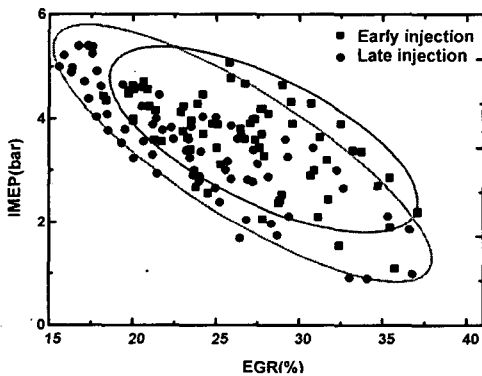


Fig. 11 IMEP effect according to the residual EGR rate in case of early and late injection

10의 결과와 비교하여 후기 분사를 통하여 넓은 운전 영역 확보뿐만 아니라 IMEP 및 내부 EGR 량의 증가를 실현할 수 있음을 확인하였다.

3.5 연소 안정성

Fig. 12는 엔진 회전수 1000rpm과 1200rpm일 때 내부 EGR 량 및 분사 시기 변화에 따른 연소 안정성을 나타낸 결과이다. 내부 EGR을 영역은 18~36 정도에서 1000rpm과 1200rpm의 경우 안정된 연소 특성을 보였으며, 전체적으로 내부 EGR 량 변화 및 희박한 공연비내에서도 안정된 연소 특성을 확인할 수 있었다. 이러한 특성은 Fig. 10과 Fig. 11의 결과에 대한 연소 특성이 안정함을 보여주는 근거라 사료된다.

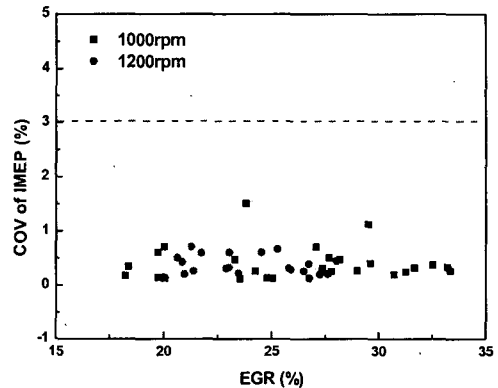


Fig. 12 Combustion stability according to the residual EGR and engine rpm

4. 결론

본 연구에서 NVO와 가솔린 직분식 인젝터를 사용하여 CAI 연소를 구현하였다. 후기분사를 통하여 얻은 운전영역과 배기특성 및 압력 특성의 상관관계를 다음과 같이 정리하였다.

(1) 내부 EGR 량에 따른 연소실의 온도는 가솔린의 자착화 온도까지 도달하는 것을 확인할 수 있었다. 단지 내부 EGR 량이 작은 영역에서는 다소 자착화 온도까지 도달하지 않고 있음을 확인할 수 있었다.

(2) 실린더내의 온도의 영향, 즉 내부 EGR 량의 변화는 연소 특성 및 착화시기를 결정할 수 있는 중요한 인자라고 생각된다.

(3) 내부 EGR 량이 증가함에 따라 HC는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 내부 EGR 량이 증가함에 따라 연소실내 온도 증가로 인하여 분사된 연료가 빠르게 기화되었기 때문으로 사료된다.

(4) 조기 분사일 경우는 smoke가 발생하지 않았지만, 후기 분사일 경우 소량의 smoke가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 다량의 EGR 량의 증가로 인하여 공기의 부족으로 농후한 혼합기가 형성되어 소량의 smoke가 발생한 것으로 생각된다.

(5) 후기 분사는 노킹영역과 실화영역을 보상할 수 있는 조건으로 사료되며, 조기분사와 후기분사를 통하여 공연비와 내부 EGR 량을 조절하면 넓은 운전 영역을 확보할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 CERC(연소기술연구센터) 사업의 연구비에 의해 수행된 연구 결과로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Aoyama, T. and Hattori, Y., 1996, "An Experimental Study on Premixed - Charge Compression Ignition Gasoline Engine," SAE 960081.
- (2) Ishibashi, Y., et.al., 1998, "A Low Pressure Pneumatic Two-stroke Engine by Activated Radical Combustion Concepts," SAE 980757.
- (3) Jacques, L., et. al., 2000, "Innovative Ultra-low NOx Controlled Auto-ignition Combustion Process for Gasoline Engine," SAE 2000-01-1837.
- (4) Morikawa, et. al., 2001, "First Report Concerning Research on a Premixed-charge Compression Ignition Gasoline Engine," SAE Paper 2001 Spring Congress of JSAE, No. 51-01, pp. 5~8.
- (5) Tomonori Urushihara, Koji Hiraya, Akihiko Kakuhou and Teruyuki Itoh, 2003, "Expansion of HCCI Operating Region by the Combination of Direct Fuel Injection, Negative Valve Overlap and Internal Fuel Reformation," SAE 2003-01-0749.
- (6) Koji Hiraya, Kazuya Hasegawa, Tomonori Urushihara, Akihiro Iiyama and Teruyuki Itoh, 2002, "A Study on Gasoline Fueled Compression Ignition Engine - A Trial of Operation Region Expansion," SAE 2002-01-0416.
- (7) Kaneko, M. et. al., 2001, "Study on Homogeneous Charge Compression Ignition Gasoline Engine," COMODIA 2001, pp. 441~446.
- (8) Kihyung Lee, et. al, 2004, "An Experimental Study on the Two Stage Ignition of Cool Flame and Hot Flame in HCCI Engine According to Fuel Compression," *Transactions of KSAE*, Vol. 12, No. 1, pp. 17~24.
- (9) Richard Standing, Tom Ma and Hua Zhao, 2005, "Effect of Injection Timing and Valve Timings on CAI Operation in a Multi-cylinder DI Gasoline Engine," SAE 2005-01-0132.
- (10) Thirouard, B. and Knop, V., 2005, "Investigation of Mixture Quality Effect on CAI Combustion," SAE 2005-01-0141.
- (11) Aron Oakley, Hue Zhao and Nicos Lasommatos, 2001, "Experimental Study on Controlled Auto-ignition Combustion of Gasoline in a 4-stroke Engine," SAE 2001-01-1030.
- (12) Don Law and Jeff Allen, 2002, "On the Mechanism of Controlled Auto Ignition," 2002-01-0412.
- (13) Rui Chen and Nebojsa Milovanovic, 2003, "The Thermal Effect of Internal Exhaust Gas Recirculation on Controlled Auto Ignition," SAE 2003-01-0751.
- (14) Younghoon Yoon, Daesik Kim and Changsik Lee, 2005, "Effect of Premixed Fuel and EGR on the Combustion and Emission Characteristics of HCCI Diesel Engine," *Transactions of the KSME B*, Vol. 29, No. 9, pp. 1006~1012.
- (15) Kyunghwan Lee, Venkatesh Gopalakrishnan and John Abraham, 2004, "An Investigation of the Effect of Changes in Engine Operating Conditions on Ignition in an HCCI Engine," *KSME International Journal*, Vol. 18, No. 10, pp. 1809~1818.