

〈 논문 〉

# CAI 연소 방법을 이용한 직분식 가솔린 엔진내의 조기 분사시 연소 및 배기 특성에 관한 실험적 연구

이창희<sup>†</sup> · 최영종\* · 이기형\*\*

(2005년 12월 13일 접수, 2006년 4월 4일 심사완료)

## An Experimental Study on the Combustion and Emission Characteristics of the Early Injection in a Gasoline Direct Injection Engine Using Controlled Auto Ignition Combustion Method

Changhee Lee, Youngjong Choi and Kihyung Lee

**Key Words :** CAI(Controlled Auto Ignition, 자기착화 조절), Residual EGR(잔류배기가스), NVO (Negative Valve Overlap, 네거티브 밸브 오버랩), Early Injection(조기분사)

### Abstract

Controlled auto ignition (CAI) combustion, also known as HCCI (homogeneous charge compression ignition), offers the potential to simultaneously improve fuel economy and reduce emission. CAI-combustion was achieved in a single cylinder gasoline DI engine, with a cylinder running in a CAI mode. Standard components were used the camshafts which had been modified in order to restrict the gas exchange process. 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 were investigated. The effect that injection timings on factor such as start of combustion, combustion duration and heat release rate was also investigated. From results early injection caused the mixture to ignite earlier and burn more quickly due to the exothermic reaction during the recompression and gave rise to good mixing of the fuel-air.

### 1. 서 론

현재 ULEV(Ultra Low Emission Vehicle)와 CAFÉ (Corporate Average Fuel Economy) 및 교토 의정서등과 같은 전세계적으로 강화되고 있는 배기 규제에 대응하기 위하여 자동차 생산업체는 연료 경제성이 뛰어나고 오염 물질의 배출이 적은 차량에 대한 요구가 증대되고 있다. 이러한 배기 규제를 만족시킬 수 있는 저공해 엔진 기술 개발을 위해 많

은 노력을 하고 있는 실정이다. 가솔린 연소의 신 개념인 자기착화 조절(controlled auto ignition) 개념을 이용한 SCCI 연소는 성층 연소를 통한 국부적으로 농후한 혼합기를 형성하여 자기 착화를 쉽게 하기 위한 방법이며, 이러한 방법을 이용하면 가연 회박 성층 연소가 가능하다. 즉, SCCI의 연소 개념은 엄밀히 보면 HCCI 연소 개념 안에 속하는 연소 시스템이다.

예혼합 압축 착화 방식의 하나인 CAI 연소는 압축착화 방식과 스파크 프러그 점화 방식의 장점을 갖춘 잠재력 있는 연소기술로써 최근 CAI 연소에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이다.<sup>(1-3,8)</sup> 가솔린의 예혼합 압축착화 엔진의 연소 조절을 위한 개념으로 내부 EGR 조절, VVT 조절 및 흡기 온도 조절을 통해 자기 착화 시기를 조절하는 연구가

<sup>†</sup> 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

진행되었으며,<sup>(4)</sup> 가솔린 연료를 이용하여 HCCI 연소를 위한 방법으로 압축비 변화, 흡기 온도 및 NVO 을 조절하여 내부 EGR 의 변화를 통하여 연소 특성을 파악하는 연구도 수행되었다.<sup>(5,6)</sup>

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 NO<sub>x</sub> 를 크게 줄일 수 있고, 가솔린 연료의 기화특성으로 인한 입자상 물질(particulate material)의 양을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

또한 CI 엔진의 장점인 높은 열효율을 이용하여 CAI 연소의 자착화 시기는 SI 와 CI 엔진에서 연소시기를 결정하는 점화플러그나 연료 인젝터의 사용이 없다는 점에서 기본적으로 큰 어려움이 따른다. 그로 인해 운전영역이 협소하여 저부하와 중부하 영역에서 CAI 연소를 구현하는 SI 연소와 CAI 연소의 부분부하 방식을 기본 개념으로 하고 있다. 안정적인 CAI 연소를 구현하기 위해서 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>(9-13)</sup>

그 방법은 다음과 같이 정리할 수 있다. 흡기 포트 가열식, 압축비(compression ratio)의 변화, 연료의 특성 및 내부 EGR 과 같은 많은 방법이 있지만, CAI 연소를 구현할 수 있는 가장 현실적인 방법은 내부 EGR 방법이다. 내부 EGR 을 사용함으로써 얻을 수 있는 2 가지 효과는 첫째, 압축 행정 동안 연료의 자착화 온도까지 쉽게 도달할 수 있으며, 둘째, 노킹과 착화 시기를 지연시킬 수 있는 효과가 있다.<sup>(12,14,15)</sup>

본 연구에서는 직접 분사식 가솔린 인젝터와 NVO(negative valve overlap)을 이용하여 내부 EGR 사용을 구현하였다. 또한, NVO 를 이용한 내부 EGR 량과 분사시기에 따른 운전영역과 배기특성을 분석하였다. 분사시기 변화 및 NVO 시기 변화에 따른 조기 분사 시 연소 특성을 분석하였으며, 이에 관한 다른 배기 특성을 분석하였다.

## 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. Table 1 과 Table 2 에 엔진 및 인젝터 제원을 나타내었으며, Fig. 1 에 가솔린 직접 분사식 CAI 엔진

의 개략도를 나타내었다. 본 연구에서 사용된 저압 커먼레일 인젝터는 중공형 인젝터를 사용하였으며, 압축행정 초기에 분사된 연료의 벽면 충돌에 의한 퇴적을 감소시키기 위하여 분사압력은 디젤 엔진보다 낮은 분사압력인 5MPa 를 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. CAI 연소의 배기 특성을 분석하기 위해 스모크 메타와 배기 분석계를 사용하였다.

### 2.2 실험방법

본 연구에서 사용된 실험조건은 Table 3 과 같이 요약하였다. 내부 EGR 을 이용하기 위한 시스템 개략도를 Fig. 2 에 나타내었다. Fig. 3 은 Fig. 2 에서 제안한 개략도를 이용하여 NVO 를 적용한 밸브 타이밍과 리프트의 개폐시기를 나타낸 결과이다. 내부 EGR 에 의한 재압축의 영향으로 흡기포트 방향의 역류로 인한 열손실 현상과 흡입 공기량 확보를 위해 흡기 밸브의 열림 시기를(ATDC 40°) 늦추었다. 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 실험 장치에서도 볼 수 있듯이 T 의 값은 배기포트에 설치되어 있는 배기 가스의 온도를 온도센서로부터 얻어 실린더내의 배기가스의 온도와 같다고 가정하였다. 기체상수 R 의 값은 실린더 내로 유입되는 혼합기의 당량비를 고려하여 그에 맞게 수정한 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 하였다. 조기 분사 시기는 흡입 공기량에 영향을 줄 수 있는 압축 TDC 기준 BTDC 360°, 270°와 흡입행정 중에 분사를 하였다.

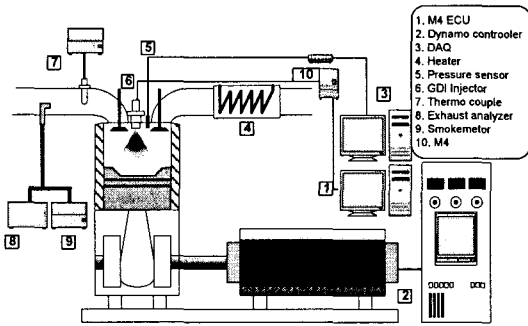


Fig. 1 Schematic diagram of direct injection type CAI engine system

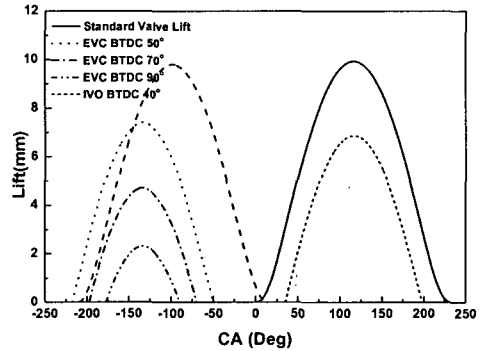


Fig. 3 Modified valve timing and valve lift

Table 1 Engine specifications

Engine type	4Stroke, Single Cyl.
Bore × Stroke	95mm×95mm
volume	673cc
CR	11
IVO	ATDC 40°
EVC	BTDC 50°, 70°, 90°

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°

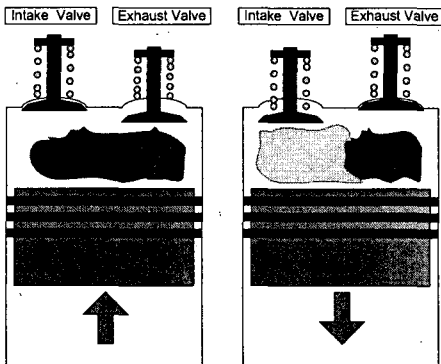


Fig. 2 Concept of negative valve overlap

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 내부 EGR 을 이용한 CAI 압력 특성

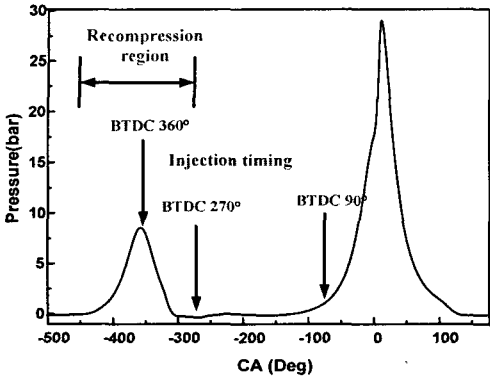
Fig. 4 는 내부 EGR 을 사용한 CAI 연소의 일반적인 압력곡선과 재압축시 내부 EGR 량에 따른 압력변화를 나타낸 결과이다.

배기밸브 닫힘 시기를 빠르게 설정함으로써, 실린더 내부에 남아 있는 잔류 배기가스가 배기 TDC 에서 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. 직분사식 엔진에서 재압축 기간 내 연료 분사 시, 가솔린의 기화특성이 흡입공기에 미치는 영향을 고려하여 분사시기를 BTDC 360°와 270°를 선택하였으며, 연료 성층화에 따른 연소특성을 고려하기 위해서 BTDC 90°를 분사시기로 선정하였다.

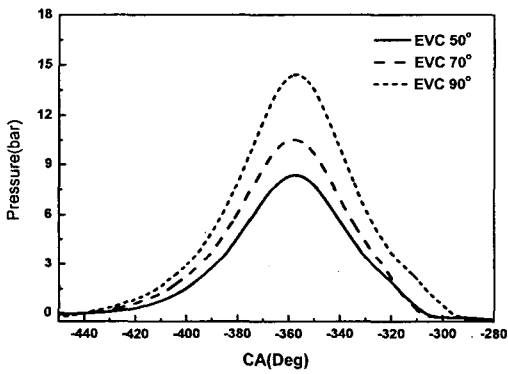
rpm 과 밸브 닫힘 시기에 따른 흡입 공기량을 Fig. 5 에 나타내었다. 본 연구에 사용된 엔진의 특성에 따라 1200rpm 에서 최대 공기 흡입량을 보였으며, 밸브 닫힘 시기가 빨라질수록, 즉 EGR 량이 많아 질수록 흡입 공기량이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 rpm 이 빨라질수록 2 밸브 특성에 따라 실린더 내에 남아 있는 잔류배기가스의 유동이 방해 를 받아 많은 양의 EGR 로 인해 흡입 공기량이 줄어드는 현상임을 알 수 있었다.

#### 3.2 조기 분사시 연소 압력 특성

Fig. 6 과 Fig. 7 은 공연비와 EGR 율에 따른 연소 압력 및 열발생율을 나타낸 결과이다. 본 결과에서 알 수 있듯이 CAI 연소는 급격한 연소 과정을 특징으로 한다.



(a) Compression diagram of CAI combustion



(b) Recompression diagram

Fig. 4 General compression diagram of CAI combustion and recompression diagram of changing EGR

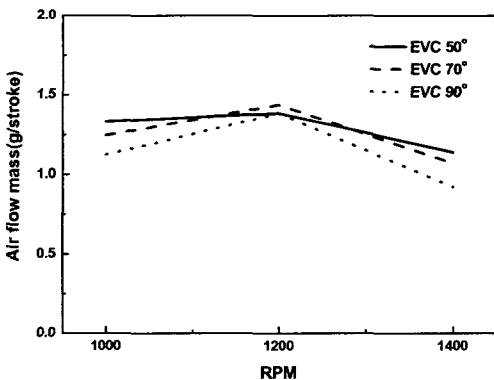


Fig. 5 The variation of intake air flow rate according to changing NVO timing

Fig. 6은 엔진 회전수가 1000rpm 이며, EGR 량이 30%인 경우, 공연비 변화에 따른 연소 압력 및 열 발생을 곡선을 나타낸 결과이다. 이때의 분사 시기는 BTDC 360°이다. 공연비가 감소함에 따라 연소 최고 압력은 TDC 부분으로 지각되는 특성을 볼 수 있었다. 착화시기는 진각되는 특성을 볼 수 있었으며, 연소기간은 다소 증가하는 특성을 보였다. 따라서, EGR 율이 증가되면, 내부 잔류배기 가스에 의해 연소 특성에 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 동일 공연비와 RPM 조건에서 EGR 량에 변화에 따른 연소특성을 나타낸 결과이다. 내부 배기 가스가 가솔린 자착화 온도를 돕는 영향 이외에 순수 EGR 효과의 영향을 받는 것이다. 착화시기를 지연함으로써, 최대 압력 발생구간을 TDC 이후로 가져갈 수 있었고, 연소 구간을 길게 설정함으로써 급격한 열발생으로 인한 NOx 배출을 저감 효과를 가져올 것으로 사료된다.

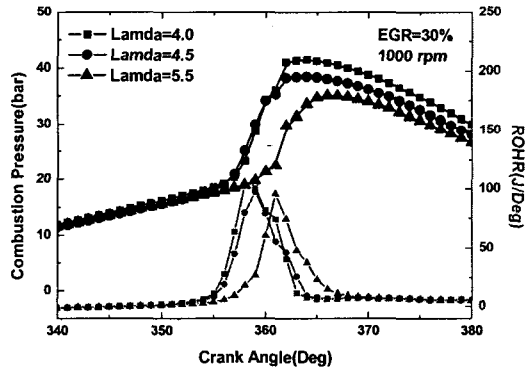


Fig. 6 Combustion pressure and heat release according to changing air-fuel ratio

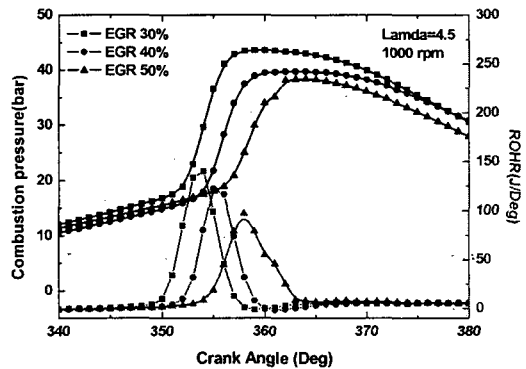


Fig. 7 Combustion pressure and heat release according to changing EGR

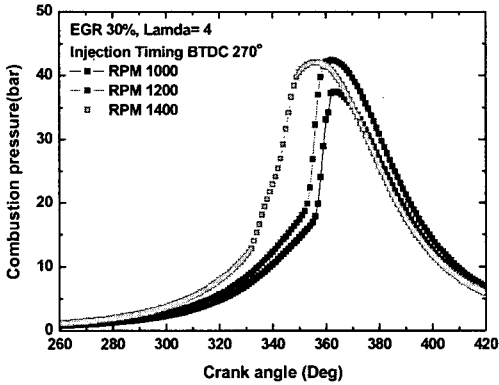


Fig. 8 Characteristics of combustion pressure according to changing rpm

Fig. 8 은 동일 공연비와 EGR 량 조건에서 엔진 회전수 변화에 따른 연소 압력 특성을 나타낸 결과이다. 엔진 회전수가 증가할수록 최고 압력 발생시기와 점화 시기는 진각되고 있으며, 최고 압력은 회전수가 증가함에 따라 증가하지만 1200 과 1400rpm 에서 비슷한 값을 가진다. 이것은 엔진 회전수에 관련된 흡입 공기량 차이로 인하여 다소 차이가 나는 것으로 판단된다. 1400rpm 에서는 공기 흡입량이 가장 적기 때문에 실질적인 공연비는 증가하게 되며, 착화시기와 최고 압력 발생 지점이 진각된 것이라 생각된다.

본 연구에서는 조기 분사시 분사 시기에 따른 압력특성을 나타내기 위하여 각각 분사시기 BTDC 360°, 270°를 선정하였다. 360°에 분사의 이유는 실린더 내에 잔류하고 있는 배기가스가 재압축 될 때 연료를 분사하면 가솔린 연료의 기화로 인해 흡입 공기량의 차이가 커질 것이라고 생각되며, 조기 분사의 한가지 방식으로 270°에 분사시기를 선정하였다.

Fig. 9 는 분사시기에 따른 압력 특성을 나타낸 결과이다. 그림에서와 같이 분사시기에 따라 흡입 공기량의 차이는 있을 가능성이 있지만, 그 변화의 차가 크지 않았기 때문에 실제 연소에서는 크게 영향을 미치지 않는다고 생각된다. 조기 분사 CAI 연소는 운전영역이 협소하기 때문에 연료량의 증감에 따른 Knocking 현상과 실화(Misfiring) 현상이 수반된다. 내부 EGR 로 인한 착화 시기의 지연현상과, 연소 시간의 지연은 차후 소개될 연료성층화와 연결되어 운전영역의 확대에 큰 영향을 줄 것이라 생각된다.

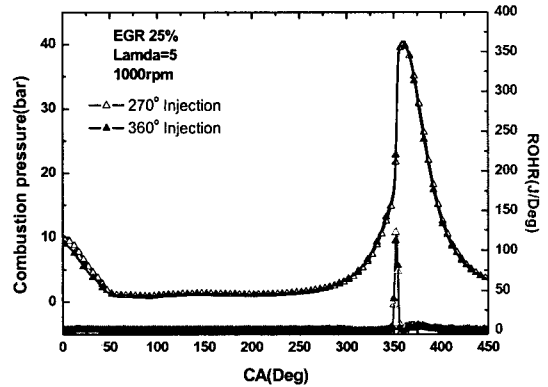


Fig. 9 Combustion pressure and heat release according to changing injection timings

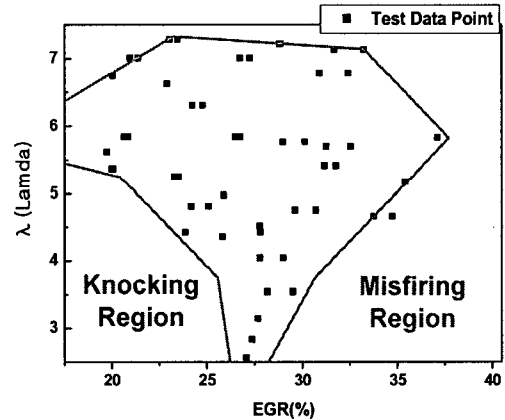


Fig. 10 Operation region of CAI combustion

### 3.3 조기 분사시 운전 영역 특성

Fig. 10 은 조기 단일 분사 시 EGR 율과  $\lambda$  값에 대한 CAI 연소의 운전영역을 나타낸 결과이다. EGR 량 변화에 따른 운전영역 특성 측정 결과, EGR 량이 증가함에 따라 운전영역이 증가하는 특성을 보이고 있다. 이러한 이유는 낮은 압축비와 높은 EGR 량의 영향으로 착화시기를 지연 시킴으로써 노킹(knocking)이 발생하지 않음을 알 수 있었으며,  $\lambda=1$  근처까지 운전이 가능함을 알 수 있었다. 배기 밸브 닫힘 시기를 BTDC 50°, 70°, 90°로 설정했음에도 EGR 율이 고른 분포를 가지는 이유는 일정한 연료량에 따른 흡입 공기량을 측정하여 공연비를 산출하였기 때문이다.

### 3.4 내부 EGR 과 공연비 변화에 따른 IMEP 및 배기 특성

엔진 회전수와 분사시기가 각각 1200rpm 과

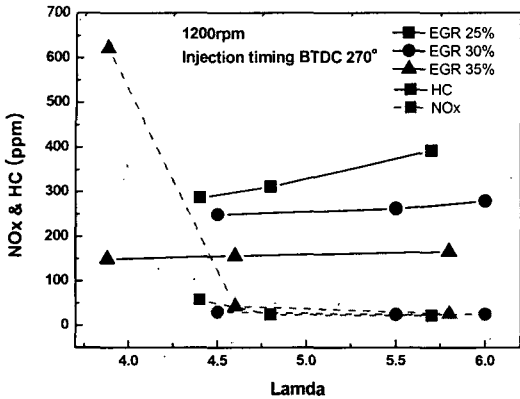
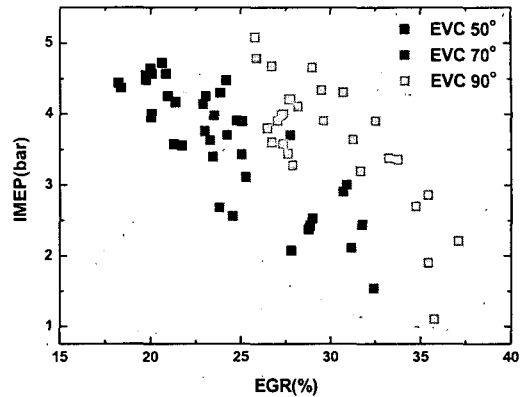


Fig. 11 Emission characteristics according to EGR and air-fuel ratio

270° 일 때 EGR 을 및 공연비 변화에 따른 NOx 와 HC 의 특성을 Fig. 11 에 나타내었다. EGR 율이 증가 및 공연비가 감소함에 따라 NOx 와 HC 는 감소하는 특성을 보이고 있다. 이는 내부 EGR 의 증가로 인하여 자착화할 수 있는 온도까지 도달하였기 때문에 HC 가 감소되었다고 사료된다.

EGR 율 및 공연비 변화에 따른 IMEP 특성을 Fig. 12 에 나타내었다. Fig. 10 에서 나타낸 바와 같이, CAI 연소의 운전영역은 EGR 율이 적은 영역에서 연소 불가능 영역인 Misfiring 구역과 조기 분사에 의한 예혼합 연소로 인한 노킹 현상 때문에 운전가능 영역은 매우 협소한 것을 확인할 수 있었다. EGR 율이 증가함에 따라 운전가능 영역이 증가하였고, 내부 EGR 에 의한 착화 지연과 가솔린 자착화 안정화로 인하여 IMEP 값도 높아 짐을 알 수 있다. 내부 EGR 에 의한 예혼합에 의한 급속연소로 인하여 IMEP 특성은 좋지만, IMEP 값이 일정 영역에 한정됨을 알 수 있었다.

EGR 율이 증가함에 따라 EGR 25~30% 영역에서는 운전영역이 충분히 넓지만, 그 이상 증가함에 따라 IMEP 값은 감소 하는 특성을 보였다. 그림에서 색으로 구분하여 밸브 닫힘 시기를 기준으로 IMEP 를 표시한 것은 각각 EGR 율이 나타내는 IMEP 영역에 차이가 컸기 때문이다. EVO 50°인 경우에 노킹과 실화 현상으로 인하여 일정 IMEP 영역에서만 특성을 나타내었으나, EVC 90°인 경우에는 전반적인 IMEP 영역의 특성을 보이고 있다. 본 연구를 통하여 EGR 량을 더욱 증가 시킬 수 있으며, 그에 따른 IMEP 증가효과도 볼 수 있을 것으로 생각된다.



(a) Negative valve overlap

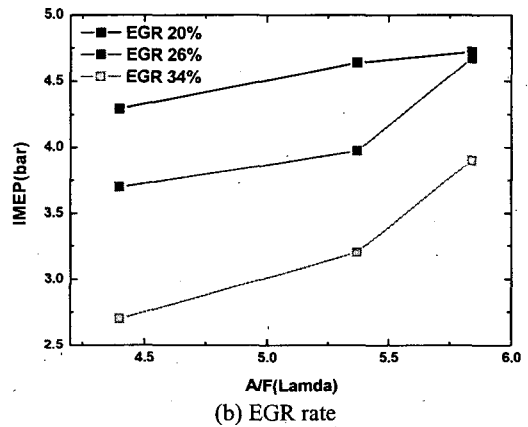


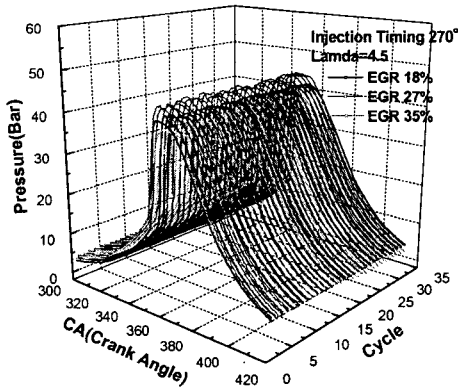
Fig. 12 IMEP characteristics according to NVO timing and EGR rate

3.5 연소 안정성

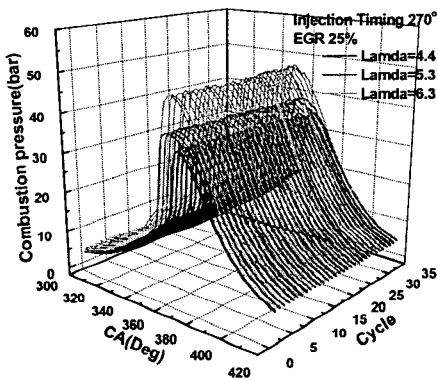
Fig. 13 은 분사시기가 BTDC 270°이며, 엔진 회전수가 1200rpm 인 경우, EGR 변화 및 공연비 변화에 따른 싸이클에 대한 연소의 안정성을 나타낸 결과이다. Fig. 13(a)와 (b)의 결과를 통하여 각 조건에 대한 연소의 안정성이 평균적으로 1% 미만의 연소 안정성을 판단할 수 있다.

Fig. 14 는 rpm 변화에 따른 연소 안정성을 판별한 결과이다. EGR 율 영역은 18~36 정도에서 1000rpm 과 1200rpm 안정된 연소 특성을 보였다. 전체적으로 EGR 량 변화 및 희박한 공연비내에서도 안정된 연소 특성을 확인할 수 있었다.

Fig. 13 과 14 의 결과를 통하여, 자착화 할 수 있는 최소한 온도를 유지시켜 줄만한 EGR 량이 확보된다면 조기 분사시 연소의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Residual EGR rate



(b) Air-fuel ratio

Fig. 13 Diagram of combustion stability according to EGR and air-fuel ratio

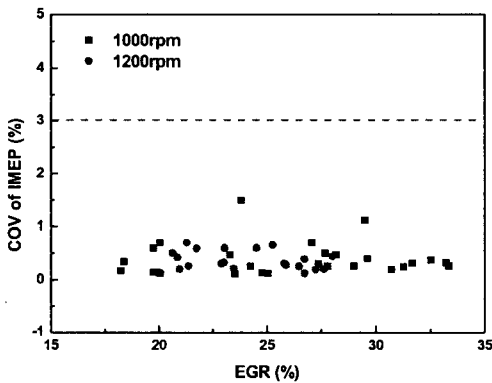


Fig. 14 Combustion stability according to EGR and rpm

#### 4. 결론

본 연구에서 NVO 와 가솔린 직분식 인젝터를 사용하여 CAI 연소를 구현하였다. EGR 율과 공연

비를 기준으로 운전영역과 배기특성 및 압력 특성의 상관관계를 다음과 같이 정리하였다.

(1) 조기 분사방식의 CAI 연소의 운전영역은 내부 EGR 율이 증가함에 따라 확대되었으며, 저 EGR 율에서는 Knocking 으로 인해 협소한 운전영역을 나타내었다.

(2) CAI 연소의 특징은 후연소 구간이 없는 예혼합 급속연소를 특성을 갖고 있으며, 내부 EGR 율의 증가에 따라 착화 시기는 지각되고, 공연비가 증가함에 따라 착화시기가 빨라지는 특성을 보였다.

(3) 예혼합 연소로 인한 급속연소에 의하여 전체적인 NOx 수치는 높게 나타났으나, EGR 율이 증가 함에 따라 NOx 의 수치는 감소함을 알 수 있었다. HC 는 EGR 율이 높을 수록 약간의 상승 경향을 보이는데, 이것은 잔류배기 가스가 연소에 부정적인 영향을 끼침으로써 나타나는 현상으로 판단된다.

(4) EGR 율, 공연비 및 엔진 회전수 변화에 따른 연소 안정성 특성 결과, EGR 율은 18~36% 영역과 희박한 공연비에서도 안정적인 연소 특성을 보였다. 이는 연료가 자착화할 수 있는 최소한의 EGR 율이 확보된다면 안정적인 연소 특성을 보일 것으로 사료된다.

#### 후 기

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 Kakuho 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," *Transaction 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.