

직접분사식 가솔린 엔진을 이용한 CAI 연소특성 및 운전영역 확대를 위한 성층 연소 특성에 관한 연구

이 창 희^{*1)} · 최 영 종¹⁾ · 임 경 빈²⁾ · 이 기 형³⁾

한양대학교 대학원¹⁾ · 한밭대학교²⁾ · 한양대학교 기계공학과³⁾

A Study on the CAI Combustion Characteristics and Stratified Combustion to Extend the Operating Region Using Direct Injection Gasoline Engine

Changhee Lee^{*1)} · Youngjong Choi¹⁾ · Kyoungbin Lim²⁾ · Kihyung Lee³⁾

¹⁾Graduate School of HanYang University, Gyeonggi 426-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Design Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

³⁾Department of mechanical Engineering, HanYang University, Gyeonggi 426-791, Korea

(Received 18 November 2005 / Accepted 3 January 2006)

Abstract : Controlled Auto Ignition(CAI) combustion has great potential in achieving significant increase in engine efficiency, while simultaneously reducing exhaust emissions. The process itself involves the auto ignition and subsequent simultaneous combustion of a premixed charge.

In this study, NVO (Negative Valve Overlap) system was applied to a CAI engine in order to use residual gas. The fuel was injected directly to the cylinder under the high temperature condition resulting from heating the intake port to initiate CAI combustion. This paper introduced the valve timing strategy and experimental set-up. From this study, the effect of engine speed and valve timing on CAI combustion and exhaust emissions was clarified. In addition, stratified charge method was used to extend CAI operating region.

Key words : CAI(Controlled Auto ignition, 가솔린 자착화), HCCI(Homogeneous charge Compression Ignition, 예혼합 압축 착화) NVO(Negative Valve Overlap) EVC(Exhaust Valve Close, 배기밸브 닫힘) IVC(Intake Valve Close, 흡기 밸브 닫힘) EGR(Exhaust Gas Recirculation, 배기가스재순환)

1. 서 론

예혼합 압축 착화(HCCI) 방식의 하나인 CAI (Controlled Auto Ignition) 연소는 압축착화(Compression ignition) 방식과 스파크 점화(Spark ignition) 방식의 장점을 갖춘 잠재력 있는 연소기술로써 최근 CAI 연소에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이다. 이와 같은 CAI 연소는 연소실내 혼합기특성과 압력 및 온도 그리고 연료의 화학적 구성 등을 제어함으

로써 구현될 수 있다.¹⁾ CAI 연소는 높은 배기가스 재순환(EGR)율과 희박연소에 따른 저온연소 특성으로 인하여 NOx를 크게 줄일 수 있고, 가솔린 연료의 기화특성으로 인한 입자상 물질(PM : Particle material)의 양을 감소시키며,²⁾ 또한 CI엔진의 장점인 높은 열효율을 특징으로 한다. 그러나 CAI 연소의 자착화 시기는 점화플러그 점화(SI)와 압축착화(CI) 엔진에서 연소시기를 결정하는 점화플러그나 연료 인젝터의 사용이 없다는 점에서 기본적으로 큰 어려움이 따른다. 그로인해 운전영역이 협소하

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

여 저부하와 중부하 영역에서 CAI연소를 구현하는 SI연소와 CAI연소의 부분부하 방식을 기본 개념으로 하고 있다.³⁾

안정적인 CAI 연소를 구현하기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 방법이 요구된다. 1) 흡기 가열식, 2) 높은 압축비, 3) 연료의 특성, 4) EGR의 사용등과 같은 방법이 있지만, CAI 연소를 구현할 수 있는 가장 현실적인 방법은 NVO 방법을 이용한 내부 EGR⁴⁾의 사용이다. EGR을 사용함으로써 얻을 수 있는 2가지 효과는 첫째, 압축행정동안 연료의 자착화 온도까지 쉽게 도달할 수 있으며, 둘째, 노킹과 착화시기를 지연 시킬 수 있는 효과가 있다.

본 연구에서는 직분식 가솔린 인젝터와 NVO를 사용하여⁵⁾ 내부 EGR사용을 구현하였으며 EGR 량과 분사시기에 따른 운전영역과 배기특성을 분석하였다. 또한 CAI연소의 협소한 운전영역 확대를 위한 방법으로 국부적으로 농후한 성층 혼합기를 형성하여 연소 및 배기 특성을 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 CAI 연소를 구현하기 위한 CAI엔진과 동력계 및 실험 장치를 나타내고 있다. 엔진 내 연료량과 분사시기를 제어하기 위하여 Motec사의 M4 ECU를 사용하였으며, 인젝터는 분사압력이 50bar인 중공형 스웰 인젝터를 사용하였다. 엔진 동력계는 최대 출력 75KW인 Daum사의 DC동력계로서 냉각장치는 솔레노이드 밸브로 작동되는 개방형 순환 수냉식이며, 공기량 센서, 흡입공기 온도 센서, 배기 온도 센서, 냉각수 온도 센서 등이 동력계와 엔진에 부착되어 있다. 또한 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.

Table 1은 실험에 사용된 단기통 엔진의 제원을 나타내고 있으며, SI연소와 CAI 연소의 부분부하 운전을 고려하여 압축비를 11로 낮추었으며, CAI연소의 구현을 위하여 배기 밸브의 닫힘 시기를 조절 할

수 있게 하였다.

rpm과 밸브 닫힘 시기에 따른 흡입 공기량을 Fig. 2에 나타내었다. 상용디젤 엔진의 특성에 따라 1200rpm에서 최대 공기 흡입량을 일반적으로 나타낸다, 밸브 닫힘 시기가 빨라질수록, 즉 EGR 량이 많아 질수록 흡입 공기량이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 회전수가 빨라질수록 2밸브 특성에 따라 실린더 내에 남아 있는 잔류배기가스의 유동이 방해 를 받아 많은 양의 EGR로 인해 흡입 공기량이 줄어드는 현상임을 알 수 있었다.

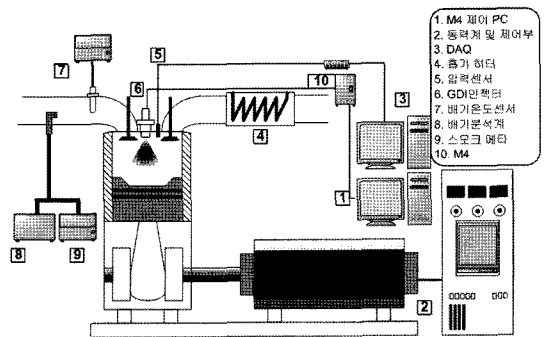


Fig. 1 Experimental setup

Table 1 Specification of measurement system

Engine type	4 Stroke Single Cyl. 2 Valve per Cyl.	Compression Ratio	11
Bore×Stroke	95 mm×95 mm	IVO	ATDC 40°
Displacement Volume	673cc	EVC	BTDC 50°, 70°, 90°

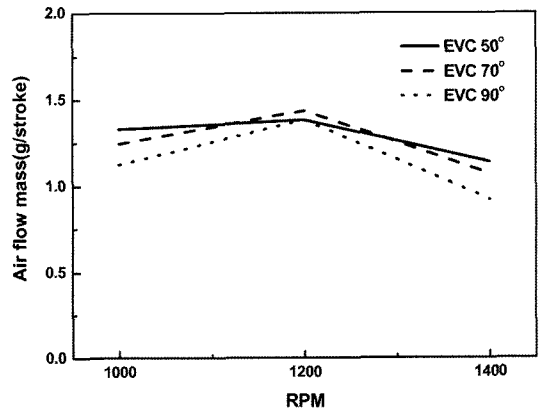


Fig. 2 The characteristics of intake air mass flow

2.2 실험방법 및 조건

본 연구에서는 내부 EGR을 사용함에 따른 CAI 연소 특성을 분석하였다. 내부 EGR을 이용하기 위해 배기 밸브의 닫힘시기를 조절하였다. 이러한 방법을 이용하기 위해서는 배기 밸브의 캠을 회전시켜 배기 밸브가 닫히는 시기 즉 BTDC 50°, 70°, 90°에 맞추어 캠을 제작하여 NVO 방식을 적용하였다. Fig. 3은 NVO를 적용한 밸브 타이밍과 리프트의 개폐시기를 나타낸 결과이다. 내부 EGR에 의한 재압축의 영향으로 흡기포트 방향의 역류(Back-Flow)로 인한 열손실 현상과 흡입 공기량 확보를 위해 흡기 밸브의 열림 시기를(ATDC 40°) 늦추었다.

각각의 밸브 닫힘 시기에 따른 내부 EGR의 정량적인 값을 구하기 위해서 다음과 같은 이상기체 방정식을 사용하였다.

$$PV = m_r RT \quad m_r = \frac{PV}{RT}$$

$P =$ Cylinder Pressure $V =$ Geometrical Volume
 $T =$ Exhaust Tem. $R =$ Gas Constant According

위의 이상기체 방정식에서 P는 압력센서로부터 실린더 내의 압력을 측정함으로써 얻을 수 있고, V는 배기 밸브가 닫히는 시점에서의 형상학적 값으로 구할 수 있다. 또한 실험 장치에서도 볼 수 있듯이 T의 값은 배기포트에 설치되어 있는 배기가스의 온도를 온도센서로부터 얻어 실린더내의 배기가스의 온도와 같다고 가정하였다. 기체상수 R의 값은 실린더 내로 유입되는 혼합기의 당량비를 고려하여 그에 맞게 수정한 값을 넣었다.

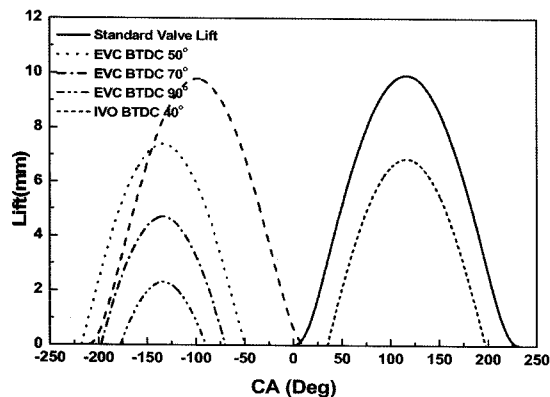


Fig. 3 Modified valve timing

CAI 연소의 초기 활성화를 위하여 냉각수 온도를 80°C로 유지하였으며, 흡기포트에 히터(4Kw)를 장착하여 흡기 온도를 200°C로 유지하였다. 배기가스의 온도가 충분히 올라간 상태에서 연소가 안정이 되면 흡기가열을 멈추고 실험을 하였으며, 조기 분사에 의한 분사량, EGR율에 따른 운전영역과 배기 특성실험을 하였고, 운전영역 확대를 위해 후기분사(Late Injection)로 인한 스웰 인젝터의 성층화 효과에 따른 실험을 병행하였다. 엔진 회전수는 1000, 1200, 1400rpm에서 실험하였으며, 조기 분사 시기는 흡입 공기량에 영향을 줄 수 있는 압축 TDC기준 BTDC 360°와 흡입행정 중에 분사를 하였고, 후기 성층화를 위한 분사 시기는 BTDC 90°에서 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 예혼합 CAI연소의 운전영역

Fig. 4는 조기 분사(early injection) 시 EGR율과 λ 값에 대한 CAI 연소의 운전영역을 나타낸 결과이다. EGR량 변화에 따른 운전영역 특성 측정 결과, EGR량이 증가함에 따라 운전영역이 증가하는 특성을 보이고 있다. 이러한 이유는 낮은 압축비와 높은 EGR량의 영향으로 착화시기를 지연시킴으로서 노킹이 발생하지 않음을 알 수 있었으며, $\lambda=2$ 근처까지 운전이 가능함을 알 수 있었다. 배기 밸브 닫힘시기를 BTDC 50°, 70°, 90°로 설정했음에도 EGR율이 고른 분포를 가지는 이유는 일정한 연료량에 따른 흡입 공기량을 측정하여 공연비를 산출하였기 때문이다.

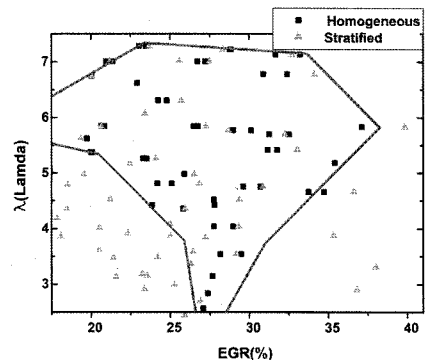
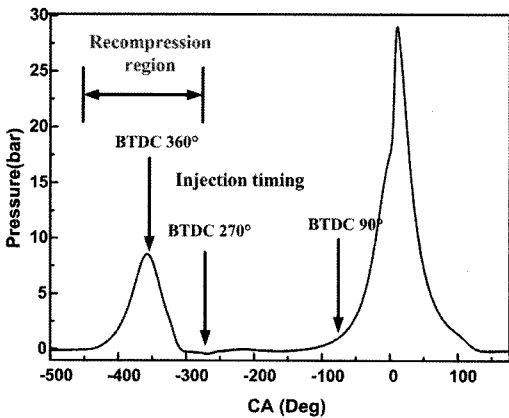


Fig. 4 CAI operation region

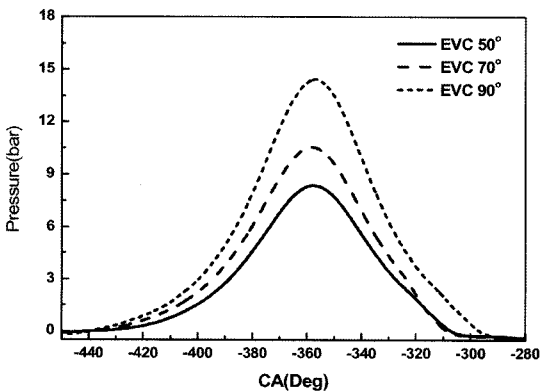
실험에 사용된 엔진은 저회전 엔진이었기 때문에 흡입 공기량은 1200rpm에서 최고를 보이며, 2벨브로 인한 흡, 배기의 유동에 많은 영향을 미쳤다. 그로 인해, 고른 분포를 가진 EGR율을 가지게 되었으리라 생각한다.

3.2 연소 특성

Fig. 4는 내부 EGR을 사용한 CAI 연소의 일반적인 압력곡선을 나타낸 그림이다. 배기밸브 닫힘 시기를 빠르게 설정함으로써, 실린더 내부에 남아 있는 배기가스가 배기 TDC에서 재압축 되는 현상을 보이고 있다. 재압축 압력은 밸브의 닫힘 시기가 빠를수록 높아지며, 이것은 곧 EGR 량의 증가를 의미한다.



(a) Injection timing



(b) Recompression diagram

Fig. 5 Injection timing and recompression diagram

3.2.1 압력 특성

Fig. 6과 Fig. 7은 EGR율과 rpm에 따른 연소압력 및 열발생율을 나타낸 결과이다. Fig. 6의 결과에서 알 수 있듯이 CAI연소는 급격한 연소 과정을 특징으로 한다. EGR율이 증가되면, 내부 잔류배기 가스에 의해 연소가 영향을 받는 것을 알 수 있다. 내부 배기 가스가 가솔린 자착화 온도를 돕는 영향 이외에 순수 EGR 효과의 영향을 받는 것이다. EGR 량을 증가함에 따라 착화시기를 지연함으로써, 최대 압력 발생구간을 TDC 이후로 가져갈 수 있었고, 연소 구간을 길게 설정함으로써 급격한 열발생율로 인한 NOx 배출을 저감시킬 수 있었다.

엔진의 회전수 변화에 따라서는 동일 공연비 조건에서 엔진 회전수가 증가할수록 최고 압력 발생

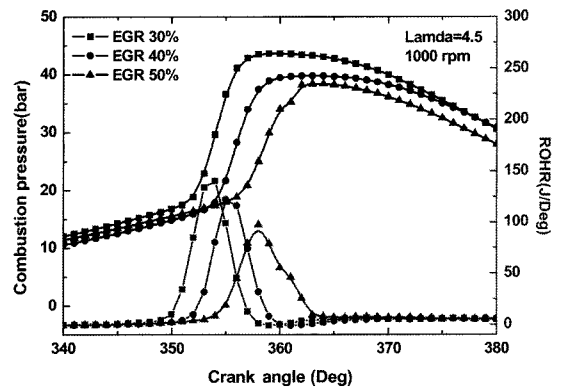


Fig. 6 Heat release rate and combustion pressure as a function of EGR rate

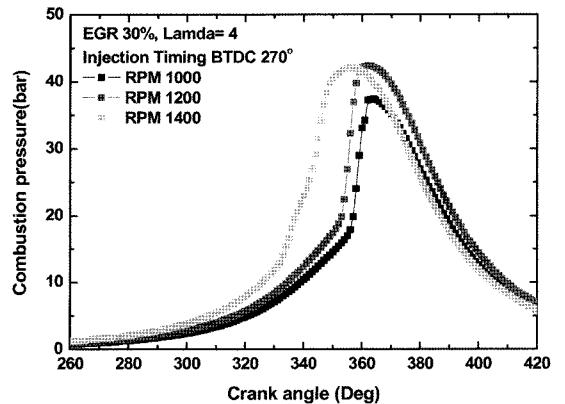


Fig. 7 Characteristics of combustion pressure as a function of RPM

시기와 점화 시기는 진작되고 있으며, 최고 압력은 회전수가 증가함에 따라 증가하지만 1200과 1400 rpm에서 비슷한 값을 가진다. 이것은 엔진 회전수에 관련된 흡입 공기량 차이인 엔진 제원상의 이유인 것으로 사료된다. 1400rpm에서는 공기 흡입량이 가장 적기 때문에 실질적인 공연비는 증가하게 된다. 그러므로 착화시기와 최고 압력 발생 지점이 진작된 것이라 생각된다.

3.2.2 IMEP 및 배기특성

EGR율에 따른 도시평균유효 압력(indicated mean effective pressure : IMEP) 영역과 배기특성을 Fig. 8에 나타내었다. 앞서 CAI연소의 운전영역을 표시한 것과 마찬가지로 EGR율이 적은 영역에서 운전영역이 협소한 것을 확인할 수 있었고, 예혼합에 의한 급속연소로 인하여 IMEP특성은 좋지만, IMEP 값의

영역에 한정됨을 알 수 있었다. EGR율이 증가함에 따라 EGR 25~30%영역에서는 운전영역이 충분히 넓지만, 그 이상 증가함에 따라 IMEP 값은 감소하는 특성을 보였다. 이는 고EGR율이 됨에 따라 잔류 배기가스에 의해 착화가 방해 받는 것으로 사료되며, 이는 배기가스 특성에서 볼 수 있듯이, EGR율이 증가함에 따라 HC가 증가하는 현상을 통해 그러한 이유를 알 수 있었다.

본 연구에서 조기분사에 의한 CAI연소는 운전영역이 협소하기 때문에 동일 조건하의 데이터를 얻기 힘들었다. EGR 량이 적은 조건하에서 급속한 연소로 인하여 NOx 량이 증가하였으나, 내부 EGR 효과로 인하여 점차 줄어드는 모습을 볼 수 있다. 본 연구에서 EGR율이 증가 및 공연비가 감소함에 따라 NOx와 HC는 감소하는 특성을 보이고 있다. 이는 내부 EGR의 증가로 인하여 자차화할 수 있는 온도까지 도달하였기 때문에 HC가 감소되었다고 사료된다.

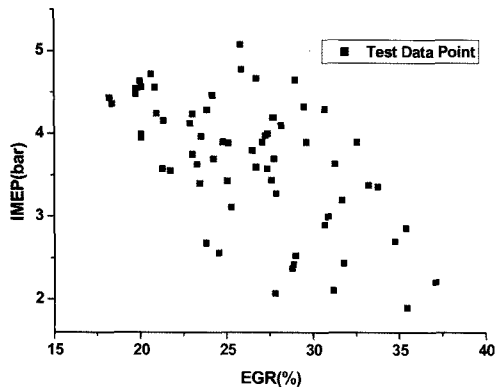
3.3 성층화에 따른 CAI 연소특성

연료 성층화에 따른 CAI 연소의 특성 파악을 위해 GDI 인젝터를 사용하여 후기 분사를 적용하였다. 후기 분사는 BTDC 90°에서 실시하였으며, 동일 EGR 조건에서 실험을 수행하였다.

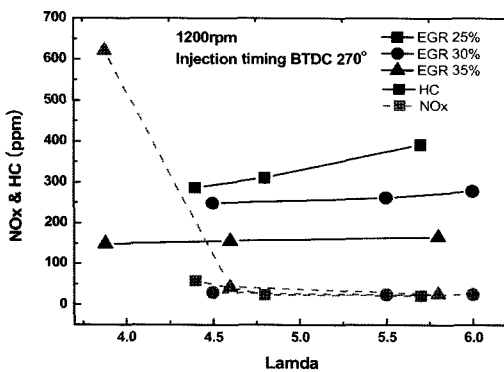
연소특성 및 배기특성

CAI 연소의 운전영역을 Fig. 4에서 소개하였다. 이를 바탕으로 연료 성층화로 인한 CAI 연소 운전 가능 영역과 배기특성을 Fig. 9(a),(b),(c)에 나타내었다. Fig. 9(a)의 결과를 통해 알 수 있듯이 조기 분사 CAI연소에 비해 EGR율이 낮으며 전체적인 혼합기가 농후한 영역에서도 운전이 가능했으며, Fig. 9(c)의 운전영역 특성을 통하여 조기 분사의 경우 노킹 영역에 해당하는 운전영역의 확대 및 IMEP의 개선 효과를 얻을 수 있었다.

Fig. 9(b)의 배기 특성 그래프에서 NOx 량은 EGR율이 증가 할수록 줄어드는 경향을 보이며, HC 역시 조기 분사와 비슷하게 증가하는 경향을 보인다. 그러나 HC 량은 조기 분사보다 많은 양을 가지는데, 이는 낮은 압축비와 후기 분사로 인해 피스톤 상부에 연료의 벽류현상으로 인한 배기 특성이라고 생각된

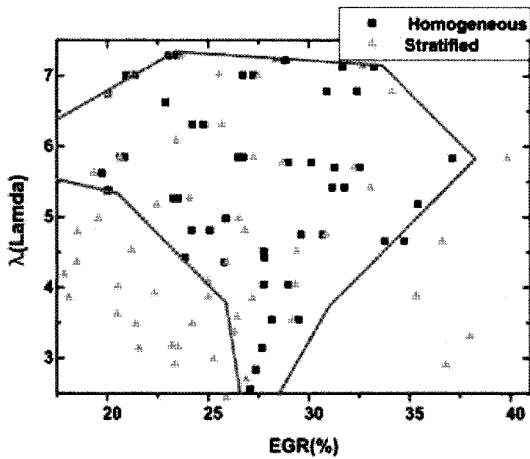


(a) IMEP

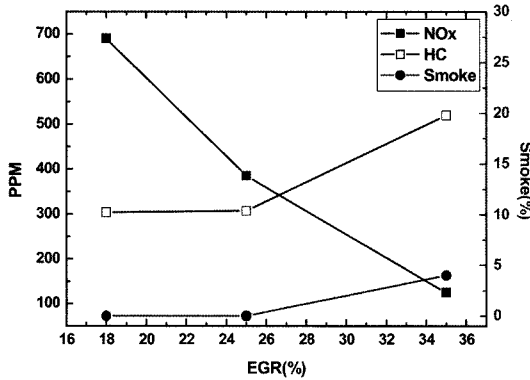


(b) Emission

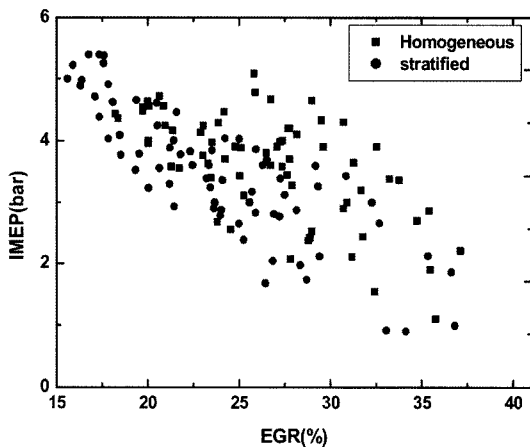
Fig. 8 Characteristics of exhaust emission and IMEP as a function of EGR



(a) Operation region



(b) Emission



(c) IMEP

Fig. 9 Characteristics of exhaust emission and IMEP according to stratified charge mixture

다. Smoke 특성에서는 후기 분사로 인해 연료의 미립화 및 증발 시간의 부족으로 고EGR을 일 경우 Smoke가 조기 분사의 경우보다 증가하는 특성을 보였다.

4. 결론

본 연구는 NVO와 직분식 가솔린 인젝터를 이용하여 CAI 연소를 구현하였으며, EGR율과 공연비에 따른 운전영역과 배기특성 및 압력 특성, 성층연소를 통한 운전영역의 상관관계를 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 배기 밸브 닫힘 시기를 앞당김으로서 내부 EGR을 이용한 CAI연소를 구현하였다, 잔류가스의 재압축으로 인한 흡입 공기량의 확보를 위해 흡기 밸브 열림 시기는 지각시켰다.
- 2) 조기 분사방식의 CAI 연소의 운전영역은 내부 EGR율이 증가함에 따라 확대되었으며, 저 EGR율에서는 Knocking으로 인해 협소한 운전영역을 나타내었다.
- 3) CAI 연소의 특징은 후연소 구간이 없는 예혼합 급속연소를 특징으로 하며 EGR율의 증가에 따라 착화 시기는 지각되고 연소속도는 늦어지는 현상이 발생한다. 또한 공연비에 따른 착화 시기의 변화가 있었다. 공연비가 높을수록 착화시기가 빨라졌으며, 낮으면 착화시기가 지연됨을 알 수 있었다.
- 4) 예혼합 연소로 인한 급속연소에 의하여 전체적인 NOx 수치는 높게 나타났으나, EGR율이 증가함에 따라 NOx의 수치는 감소함을 알 수 있었다. HC는 EGR율이 높을수록 약간의 상승 경향을 보였다.
- 5) CAI 연소의 운전영역 확대를 위해 GDI 인젝터를 이용한 연료 성층화를 이용하였으며, 이에 따라 저 EGR율에서의 운전영역이 넓어졌으며, IMEP의 개선효과를 볼 수 있었다.
- 6) 성층 CAI연소에서의 배기 특성은 전체적으로 조기 분사 방식과 비슷했지만, 후기 분사에 의한 가솔린 기화 시기가 짧아짐에 따라 조기분사의 경우보다 Smoke가 증가하는 특성을 보였다.

후 기

본 연구는 연소기술센터(ERC)의 후원을 받아 수행되었으며, 관계기관에 진심으로 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) P. L. Kelly-Zion and J. E. Dec, "A Computational Study of the Effect of Fuel-Type on Ignition Time in HCCI Engines," The 2000 Symposium International on Combustion, Edinbergh Scotland, 2000.
- 2) R. H. Stanglmaier and C. E. Roberts, "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Application," SAE 1999-01-3682, 1999.
- 3) B. Leach, H. Zhao, Y. Li and T. Ma, "Control of CAI Combustion Through Injection Timing in a GDI Engine with an Air-Assisted Injector," SAE 2005-01-0134, 2005.
- 4) J. Allen and D. Law, "Advanced Combustion Using a Lotus Active Valve Train: Internal Exhaust Gas Recirculation Promoted Auto-Ignition," Proceedings of the IFP International Congress 2001, pp.85-100, 2001.
- 5) T. Urushihara, K. Hiraya, A. Kakuhou and T. Itoh, "Expansion of HCCI Operation Region by the Combustion of Direct Fuel Injection, Negative Valve Overlap and Internal Fuel Reformation," SAE 2003-01-0749, 2003.
- 6) Y. W. Woo, C. H. Lee, K. H. Lee and C. S. Lee, "A Study on the Spray Characteristics for a Gasoline Direct Injector by Using Entropy Analysis and PIV Method," KSME B, Vol.26, No.7, pp.1042-1054, 2002.
- 7) Y. H. Yoon, M. Y. Kim and C. S. Lee, "Effect of Cooled-EGR on the Characteristics of Performance and Exhaust in a HCCI Diesel Engine," Transaction of KSAE, Vol.13, No.5, pp.35-41, 2005.
- 8) K. H. Lee, V. Gopalakrishnan and J. Abraham, "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, 2004.
- 9) Z. Gao and W. Schreiber, "The Effect of EGR and Split Fuel Injection on Diesel Engine Exhaust," Int. J. Automotive Technology, Vol.2, No.4, pp.123-133, 2001.