

DME 예혼합 압축 착화 엔진에서 밸브 양정과 개폐시기가 내부 배기가스 재순환과 연소에 미치는 영향

장진영·배충식*

한국과학기술원

Effect of Valve Lift and Timing on Internal Exhaust Gas Recirculation and Combustion in DME Homogeneous Charge Compression Ignition Engine

Jinyoung Jang · Choongsik Bae*

Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

(Received 24 November 2008 / Accepted 23 January 2009)

Abstract : Intake/exhaust valve timing and exhaust cam lift were changed to control the internal exhaust gas recirculation (IEGR) and combustion phase of homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine. To measure the IEGR rate, in-cylinder gas was sampled during from intake valve close to before ignition start. The lower exhaust cam made shorter valve event than higher exhaust cam and made IEGR increase because of trapping the exhaust gas. IEGR rate was more affected by exhaust valve timing than intake valve timing and increased as exhaust valve timing advanced. In-cylinder pressure was increased near top dead center due to early close of exhaust valve. Ignition timing was more affected by intake valve timing than exhaust valve timing in case of exhaust valve lift 8.4 mm, while ignition timing was affected by both intake and exhaust valve timing in case of exhaust valve 2.5 mm. Burn duration with exhaust valve lift 2.5 mm was longer than other case due to higher IEGR rate. The fuel conversion efficiency with higher exhaust valve lift was higher than that with lower exhaust valve lift. The late exhaust and intake maximum open point (MOP) made the fuel conversion efficiency improve.

Key words : DME(dimethyl ether), HCCI(homogeneous charge compression ignition; 예혼합 압축 착화), IEGR (internal EGR; 내부 배기가스 재순환), Residual Gas(잔류가스), VVA(variable valve timing; 가변 밸브 타이밍)

1. 서론

엔진 연소 방법은 크게 스파크 점화와 압축 착화 방식으로 나누어 볼 수 있는데, 최근에 와서는 예혼합 압축 착화(HCCI; homogeneous charge compression ignition) 방식이 추가되어 그에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

예혼합 압축 착화는 예혼합된 연료/공기 혼합기를 압축시켜 자발점화 시키는 연소 방법이다. 예혼

합 압축 착화 엔진은 아주 희박한 혼합기를 연소시킬 수 있어 연료 경제성이 뛰어나고 연소 온도가 높지 않아 질소산화물(NOx; nitrogen oxides)의 발생량이 낮으며, 예혼합된 연료/공기 혼합기를 사용하기 때문에 국부적으로 농후한 영역이 감소하여 입자상 물질(PM; particulate matter)의 배출량을 저감할 수 있다.¹⁾ 하지만 자발 점화 시기와 연소 기간을 제어하기 힘들다는 단점이 있고, 부하를 늘리기 위해 연료 공급량을 증가시키게 되면 노킹이 발생하여 큰 소음이 발생하고, 짧은 순간 동안 발생하는 큰 압력

*Corresponding author, E-mail: csbae@kaist.ac.kr

에 의해 엔진이 손상될 가능성이 있다. 또한 압축 행정 동안에 실린더 내부에 존재하는 틈새 체적(crevice volume)에 들어갔던 연료들이 낮은 연소온도로 인하여 팽창 행정 중 산화 반응의 부족으로 인하여 불완전 연소하여 탄화수소(HC; hydro carbon)와 일산화탄소(CO; carbon mono-oxide)의 배출량을 증가시키는 단점이 있다.²⁾

기화와 자발점화 특성이 우수한 dimethyl ether(DME)는 디젤을 대체할 수 있는 연료로 생각되어 이를 기존의 고속직접분사식(HSDI; high speed direct injection)엔진과 예혼합 압축 착화방식의 엔진에 적용하고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.³⁾ DME의 예혼합 압축 착화 엔진 적용시 DME 가가지는 우수한 기화 특성 때문에 기존 디젤 HCCI 에서 문제시 되었던 벽면 적심 현상 및 국부적으로 농후한 영역에 의해 발생하는 soot 생성이 줄어드는 장점을 가진다. 그러나 DME를 예혼합 압축 착화 엔진에 사용하게 되면 우수한 기화와 자발 점화 특성 때문에 조기 착화의 문제가 크게 나타난다. 따라서 많은 연구자들이 DME 점화시기와 연소 기간을 제어하기 위한 연구를 진행 중이다.

점화 시기와 연소 기간을 제어하기 위하여 배기 가스 재순환(EGR; exhaust gas recirculation) 방법을 사용하는 연구자들이 많다. 배기 가스 재순환 방식은 외부 EGR(EEGR; external EGR)과 내부 EGR(IEGR; internal EGR)로 나뉠 수 있다. EEGR과 IEGR의 공통적인 효과는 둘 모두 열용량이 크고, 가연 혼합기의 사이에 위치하여 연소를 방해하는 역할을 하여 연소 온도를 낮춰주며 연소기간을 늘려주는 것이다.⁴⁾ 둘의 차이점은 IEGR의 경우 그 온도가 높아 전체 혼합기의 온도를 상승시켜 자발점화시기의 진각을 가져 올 수 있다는 점이다.⁵⁾ IEGR 양을 변화시키기 위해 가변 밸브 기구와 낮은 밸브 양정을 가지는 캠샤프트를 사용한다.

이에 본 연구에서는 DME 예혼합 압축 착화엔진에서 밸브 개폐시기와 배기밸브 양정변화에 따른 IEGR 을 변화와 예혼합 압축 착화 특성변화에 대해 알아볼 것이다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 엔진은 Fig. 1에서 나타난 것처럼 4행정 단기통 엔진으로써 예혼합 압축 착화 엔진 실험을 위하여 압축비를 13:1로 하였다. 자세한 엔진의 제원은 Table 1에 나타내었다. 엔진의 부하와 회전수는 교류 동력계(alternating current dynamometer, 82 kW, Unico Co.)를 사용하여 제어하였다. DME 연료는 공기와의 충분한 혼합을 위하여 흡기 밸브로부터 30 cm 떨어진 곳에서 분사하였다. 짧은 순간동안에 충분한량의 DME 연료를 분사하기 위하여 질소를 사용하여 5 MPa로 DME를 가압하였고, 이에 따라 DME가 액상 상태로 분사되었다.

또한 연료 공급 장치의 손상을 방지하기 위해 DME에 윤활 향상제(Infineum, R655)를 500 ppm 첨가하였다.

Fig. 2는 흡/배기 밸브 캠의 열림 기간을 각도에 따라 나타내었으며, 배기밸브 양정이 2.5, 4.0, 8.4 mm인 배기 캠샤프트를 사용하였다. 각각의 배기

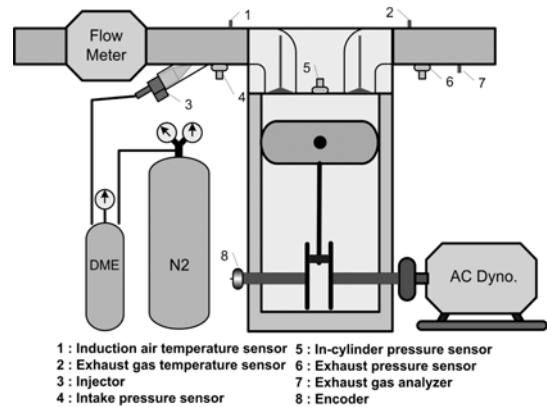


Fig. 1 Experimental setup

Table 1 Engine specifications

| | | |
|------------------------------|----------------------------|----|
| Bore (mm) | 82 | |
| Stroke (mm) | 93.5 | |
| Compression ratio | 13 | |
| Displacement (cc) | 494 | |
| Valve timing (CAD) | Intake valve open (BTDC) | 1 |
| | Intake valve close (ABDC) | 49 |
| | Exhaust valve open (BBDC) | 42 |
| | Exhaust valve close (ATDC) | 6 |
| DME injection pressure (MPa) | 5 | |

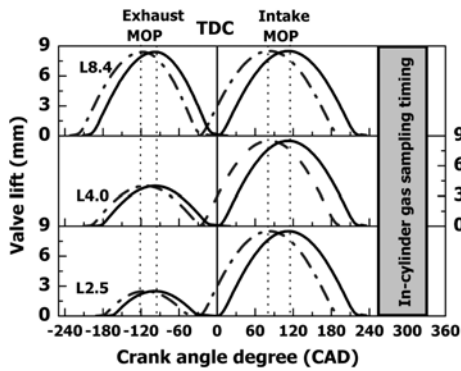


Fig. 2 Valve profile

밸브 열림 기간은 140, 180, 228 crank angle degree (CAD)이다.

연소 해석을 위해 연소실에 압력 센서(Kistler, 6052B)를 장착하였으며, 흡기와 배기 매니폴드의 압력을 계측하기 위해 압력 센서(Kistler, 4045A5)를 장착하였다. 혼합기의 온도와 배기 가스의 온도를 측정하기 위해 흡기 매니폴드와 배기 매니폴드에 각각 K-type 열전대(thermocouple)를 장착하였다. 배기가스 배출물은 배기가스 분석기(Horiba, Mexa 1500d)를 이용하여 탄화수소, 질소 산화물, 이산화탄소, 일산화탄소를 측정하였으며 데이터 수집 장치(Io Tech, Wavebook 512H)를 이용하여 수집 저장하였다.

2.2 IEGR을 측정 장치

IEGR 율을 측정하기 위하여 실린더 내부에서 가스를 채취하는 직접 채집 방법을 사용하였다.⁶⁾ IEGR 율 측정을 위한 시스템은 진공펌프, 고속 솔레노이드 밸브, 샘플링 챔버 및 제어장치로 구성된다. 실린더 내부로부터 직접 연료 공기 혼합가스를 취득하기 위하여 실린더에 샘플링을 위한 홀을 가공하였고, 그 홀에 샘플링 라인과 솔레노이드 밸브 등을 연결하였다. 고속으로 회전하는 엔진에서 짧은 순간 동안 작동하는 솔레노이드 밸브가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 고속 솔레노이드 밸브(Parker, General Valve Series 9)를 사용하였다. 이 솔레노이드 밸브는 최대 응답속도가 2 ms이고 진공에서부터 약 8 MPa까지의 압력 범위에서 사용 가능하다. 채집시기는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 흡기밸브가

닫힌 후부터 점화가 일어나기 전까지로 하였다. 즉, 실린더 내부 가스 샘플링은 흡기 밸브가 닫히는 시점에서부터 자발 점화가 일어나기 전까지, 약 80 CAD 정도의 기간동안 가능하다. 하지만 솔레노이드 밸브의 응답성을 고려하여 크랭크 각도 60 CAD 동안의 초기 압축행정에서 진행되도록 하였다. 채집된 가스는 가스 크로마토그래피(GC; gas chromatography)를 이용하여 이산화탄소(CO₂)의 농도측정에 이용하였다. IEGR 율은 식 (1)과 같이 채집된 가스와 배기 가스 중의 CO₂ 농도의 비로 계산되었다.

$$IEGR\ rate(\%) = \frac{(CO_2)_{in-cylinder}}{(CO_2)_{exhaust}} \times 100 \quad (1)$$

자발 점화 시작점과 연소 기간은 각각 전체 열 방출의 5%에 해당하는 위치와 전체 열방출의 95%에 해당하는 위치로 정의하였다. 또한 연소 기간은 자발 점화 시작 점부터 연소 종료 점까지로 하였다.

2.3 실험 조건

밸브 개폐시기와 양정에 따른 IEGR 율 변화와 예혼합 압축 착화 특성 변화에 대하여 알아보기 위하여 Table 2에 나타낸 것과 같은 실험조건에 대하여 실험하였다. 배기 밸브 양정은 Fig. 2와 같이 각각 2.5 mm, 4.0 mm, 8.4 mm에 대하여 실험을 하였으며, 흡기와 배기 밸브 개폐시기는 각각 최대 40 CAD와 15 CAD를 변화시켰다. IEGR 율과 예혼합 압축 착화 특성이 엔진회전수와 연료 분사량에 영향을 받으므로 각각을 1,000 rpm, 21.5 mg/stroke로 고정하여 실험하였다. 이때 연료분사는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 포트에서 하였으며, 분사 압력은 5 MPa로 하였다.

3. 실험결과

3.1 실린더 압력 변화

Fig. 3과 4는 밸브 개폐시기와 밸브 양정 변화에 대한 연소압력을 크랭크각도에 대하여 나타내었다. Fig. 3(a)와 3(b)는 흡기 밸브 최대 열림 지점(MOP; maximum open point) 변화에 대한 압력 변화를 나타내고 있다. 배기 밸브 양정이 8.4 mm(L8.4) 인 경우 (Fig. 3(a))에는 큰 차이를 보이지 않으나, 흡기 MOP가 지각되면서 발생하는 네거티브 밸브 오버랩

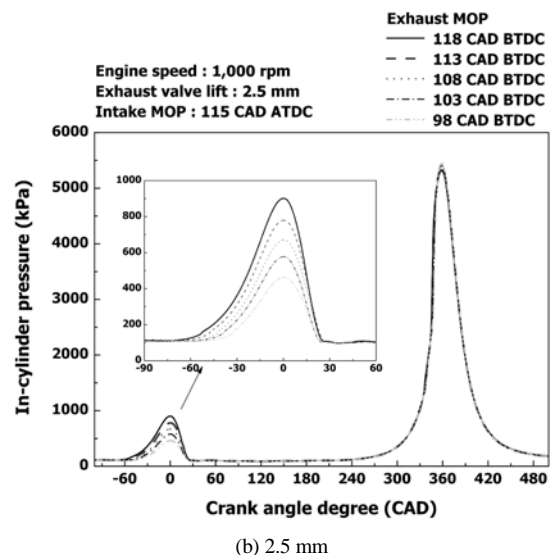
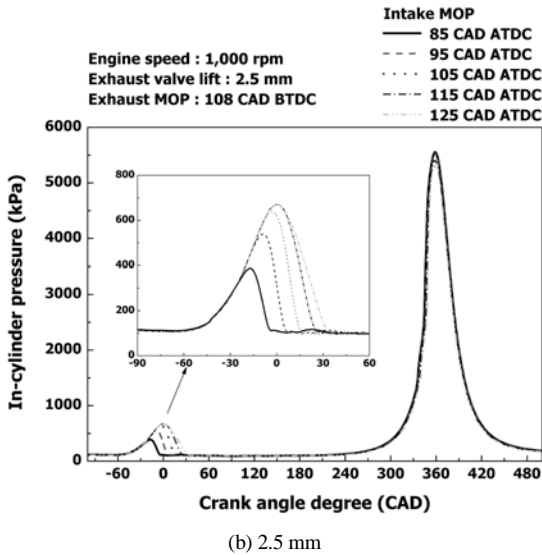
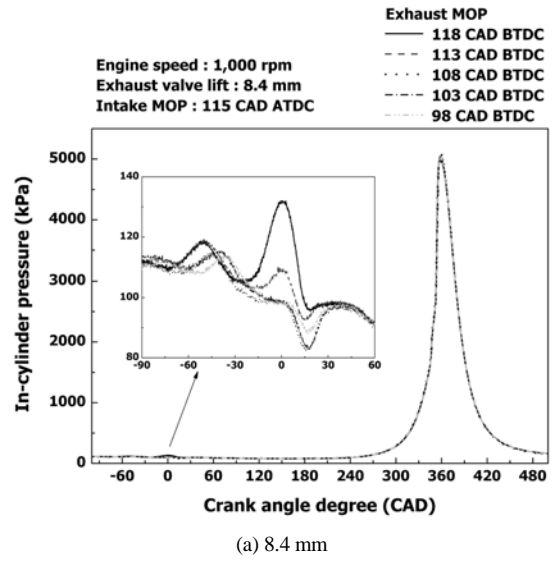
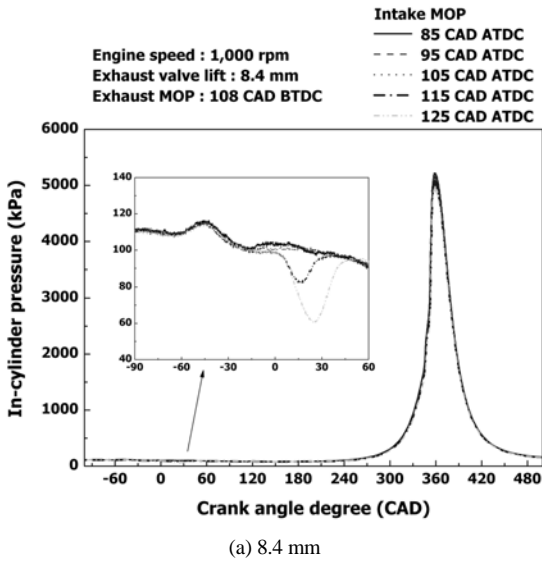


Fig. 3 Variation of cylinder pressure as a function of intake MOP; exhaust cam lift (a) 8.4 mm, (b) 2.5 mm

Fig. 4 Variation of cylinder pressure as a function of exhaust MOP; exhaust cam lift (a) 8.4 mm, (b) 2.5 mm

(NVO; negative valve overlap)에 의해 30 CAD 부근에서 실린더 압력이 감소하였다가 다시 증가하는 것을 확인할 수 있다. 배기 밸브 양정이 2.5 mm (L2.5)인 경우(Fig. 3(b))에 흡기 MOP 지각에 따라 0 CAD 부근에서의 실린더 압력이 점점 증가하여 약 600 kPa 까지 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 NVO 증가에 의해 짧은 배기 밸브 열림 기간에 의한 배기 행정 말기의 재압축 기간 증가 때문에 나타나는 현상이다.

Fig. 4(a)와 4(b)는 배기 MOP 변화에 대한 압력 변화를 나타내고 있다. L8.4인 경우(Fig. 4(a))에 배기 MOP가 진각되면서 발생하는 NVO에 의해 배기 행정 말기에 재압축 과정이 발생하게 되어 0 CAD 부근에서 실린더 압력이 약 30 kPa 정도 증가한 것을 확인할 수 있다. L2.5인 경우(Fig. 4(b))에 배기 MOP 진각에 따라 0 CAD 부근에서의 실린더 압력이 점점 증가하여 약 800 kPa까지 증가한 것을 볼 수 있다.

이 역시 NVO 증가에 의해 짧은 배기 밸브 열림 기간에 의한 배기 행정 말기의 재압축 기간 증가 때문에 나타나는 현상이다. Fig. 3과 4의 결과에서 알 수 있듯이 배기 밸브 양정이 낮은 경우에 NVO를 크게 하여 배기 행정 중에 재압축 과정을 만들어 주게 되고, 재압축 과정은 흡기 MOP 지각에 보다는 배기 MOP 지각에 더 큰 영향을 받고 있다.

3.2 내부 배기가스 재순환(IEGR) 율

Fig. 5는 흡기 MOP와 배기 MOP 변화에 대한 IEGR 율 값을 나타내었다. IEGR 율은 밸브 열림 최대 지점이 빨라질수록, 흡기 밸브 열림 최대 지점이 늦어질수록 증가하고 있다. 흡기와 배기 캠샤프트는 밸브 개폐시기와 상관없이 일정한 밸브 열림 기

간을 가지고 있다. 따라서 밸브 열림 최대 지점이 진각 되면, 밸브 개폐시기와 함께 진각 된다. 마찬가지로 밸브 열림 최대 지점이 지각 되면, 밸브 개폐시기는 함께 지각 된다(Fig. 2). Fig. 2에서 알 수 있듯이 배기 밸브 열림 최대 지점이 진각 된 경우 배기 밸브가 일찍 닫히게 되어 네거티브 밸브 오버랩이 증가하게 된다. 이 때문에 배기 과정 중 실린더로부터 배기관으로 빠져나가는 배기 가스의 양이 감소하게 되어 IEGR 율이 증가하게 된다.

흡기 밸브 열림 최대 지점이 늦어지게 되면 배기 밸브 열림 최대 지점이 빨라질 때와 마찬가지로 Fig. 2와 같이 네거티브 밸브 오버랩 기간이 증가하게 되어 IEGR 율이 증가한다. 배기 밸브 개폐시기가 같은 상태이므로 배기 과정 동안 빠져나가지 못한 배기 가스량이 동일 한 상태에서 흡기 밸브 열림 시기가 지각될수록 Fig. 3과 같이 실린더 내부 가스의 재압축이 커지게 되어 실린더 내부 압력이 증가하게 되고, 이로 인하여 흡기구를 통해 실린더 내부로 들어오는 가스의 유동을 방해하게 되어 IEGR 율이 증가하는 것이다.

여기서 배기 밸브 열림 최대 지점 변화 때 보다 IEGR 율 증가량이 크지 않은 결과를 통해, 배기 밸브 개폐시기 변화가 흡기 밸브 개폐시기 변화보다 IEGR 율에 더 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

3.3 연소상 변화

Fig. 6은 배기 밸브 양정과 밸브 열림 최대 지점 변화에 따른 연소상 변화를 보여주고 있다. 연소상은 자발 점화 시기와 전체 열방생의 50%가 나타나는 지점, 그리고 연소 종료점으로 구분하여 나타내었다.

흡기와 배기 밸브 열림 최대 지점이 빨라수록, 그리고 배기 밸브 양정이 낮을수록 연소상이 앞당겨지고 있음을 확인할 수 있다. 이때 L8.4인 배기 캠샤프트를 사용하는 경우에는 배기 밸브 열림 최대 지점 변화에 따른 연소상 변화가 명확하게 나타나고 있지 않다. 배기 밸브 열림 최대 지점이 빨라수록, 그리고 배기 밸브 양정이 낮을수록 IEGR 율이 증가하고 있음을 Fig. 6(a)를 통해 알 수 있다. Yap와 Megaritis(2005)의 연구에 의하면 연소실 내부에 잔류되는 가스의 양이 증가 할수록 다음 사이클로 전

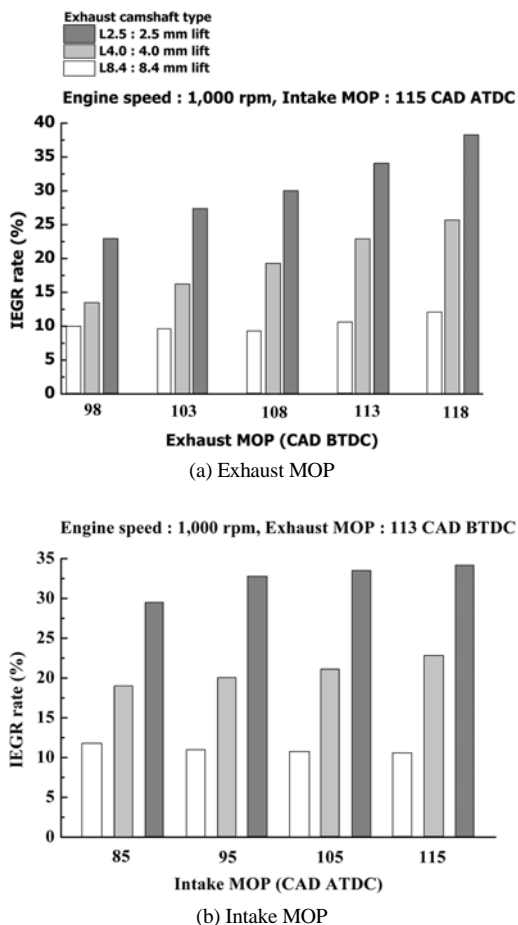


Fig. 5 Variation of IEGR rate as a function of (a) Exhaust MOP and (b) Intake MOP

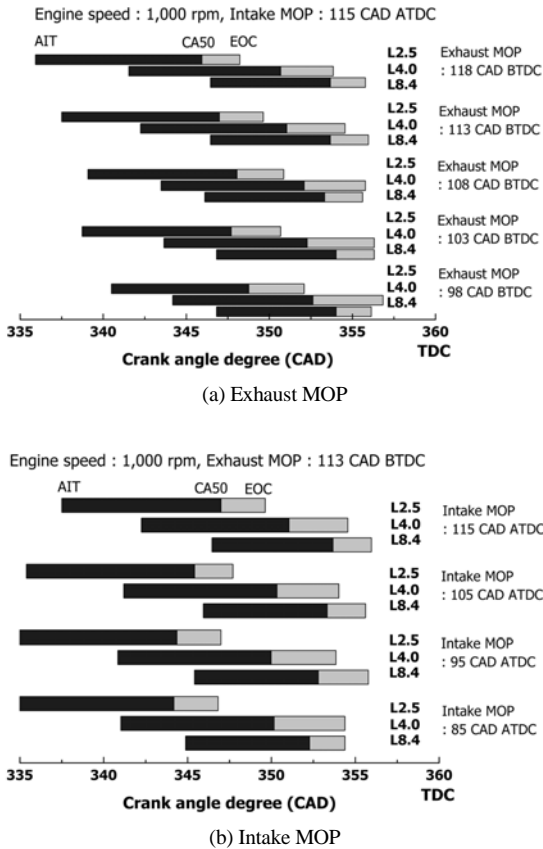


Fig. 6 Variation of combustion characteristics as a function of (a) Exhaust MOP and (b) Intake MOP

달되는 열량이 증가하게 되고, 이로 인하여 압축 행정 초기의 실린더 내부 온도가 높아져 연소상이 진각 된다.⁷⁾

반면 흡기 밸브 열림 최대 지점이 진각 되는 경우에는 IEGR 율이 낮지만 연소상이 진각 되고 있다. 이는 배기 가스 재순환을 감소에 의한 압축 행정 초기의 실린더 내부 온도 감소 영향 보다는 흡기 밸브 열림 시기의 진각에 의한 유효 압축비(effective compression ratio)의 증가로 인한 실린더 내부 온도 상승에 의한 영향이 상대적으로 크게 나타났기 때문이다. 유효 압축비는 흡기 밸브 열림 최대점이 진각되면서 10.8:1에서 12.7:1로 변하게 된다.

자발 점화 시기부터 연소 종료 점까지로 본 연소 기간의 경우, 밸브 개폐시기 변화에 대해서는 거의 비슷한 값을 보이고 있으나 배기 밸브 양정 변화에 대해서는 차이를 보이고 있다. 연소 기간은 IEGR 율

이 가장 높은 L2.5에서 가장 길게 나타났다. L2.5인 경우 IEGR 율 증가로 인하여 압축 행정 초기의 온도가 높아져 연소상은 진각 되지만, 연소과정에서는 재순환된 배기 가스에 의한 희석 효과(dilution effect)와 열적 효과(thermal effect)로 인하여 연소 기간이 길어진다.

3.4 효율 변화

Fig. 7은 연료 변환 효율(FCE)과 연소 효율을 실린더 내부 최고 온도에 대하여 나타내고 있다. 연료 변환 효율의 경우 실린더 내부 최고 온도가 낮은 경우에는 배기 밸브 양정에 관계 없이 비슷한 값을 보이고 있으나, 실린더 내부 최고 온도가 높은 경우에는 배기 밸브 양정이 가장 작은 L2.5에서 가장 낮게 나타났다. 이것은 Fig. 5를 통해 알 수 있듯이 배기 밸브 양정이 낮을수록 IEGR 율이 증가하여 압축 행정 초기 온도가 상승하게 되어 자발 점화 시기가 진각되어 압축 행정 동안 발생하는 일의 양이 증가하여 연료 변환 효율이 감소된 것이다. 하지만 실린더 내부 최고 온도가 낮은 경우에는 높은 열량을 가지고 있는 배기 가스를 많이 포함하고 있어 연소가 잘 일어날 수 있었기 때문이다. 이는 연소 효율 결과를 통해서 확인 할 수 있다. 연소 효율 그래프에서 확인

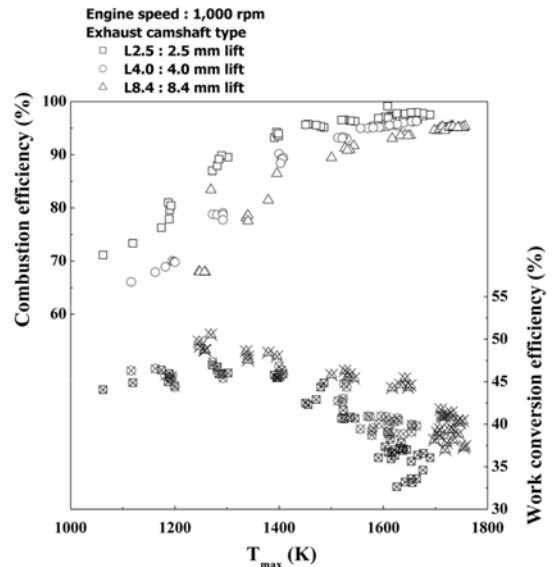


Fig. 7 Fuel conversion efficiency and combustion efficiency with regard to exhaust valve lift and T_{max}

하여 보았을 때 실린더 내부 최고 온도가 낮은 부분에서의 연소효율이 L2.5인 경우가 나머진 경우에 비해 높음을 알 수 있다. 또한 Oakley et al. (2001)이 정한 연소 효율의 허용 가능한 최소값 정의인 85%에서 90%의 연소 효율이⁸⁾ L2.5의 경우가 다른 경우에 비해 더 낮은 실린더 내부 최고 온도에서도 유효함을 알 수 있다.

효율 결과를 통해서 보았을 때, 연료 변환 효율은 모든 경우에 대하여 연소 효율 85% ~ 90%, 실린더 내부 최고 온도 약 1,400 K이 되는 지점까지 증가한 후, 그 이후에 다시 감소하고 있다. 이는 DME와 같이 세탄가(cetane number)가 높은 연료를 이용하여 HCCI 연소를 하였을 때, 연료량이 증가할수록 자발 점화 시기가 TDC 이전으로 빨라지고, 연소 기간이 감소하게 되어 압축 행정 동안에 발생하는 음의 일이 증가하게 되어 결국 연료 변환 효율이 감소하게 된다. 하지만 연료량 증가로 인하여 연소 온도, 즉 실린더 내부 최고 온도가 증가하게 되어 연소 효율은 증가하게 된다.

따라서 본 연구에서 사용된 엔진의 경우 DME HCCI 엔진 연소에서 낮은 밸브 양정을 가지는 배기 캄샤프트를 사용할 경우 IEGR 율 증가로 인해 저 부하 운전 시 연료 변환 효율을 유지하면서 연소 효율을 증가시킴으로써 운전 영역을 확장시킬 수 있음을 확인 할 수 있다.

4. 결론

DME를 사용한 예혼합 압축 착화(HCCI; homogeneous charge compression ignition) 엔진에서 밸브 개폐시기와 밸브 양정을 변화시켜 실험을 수행하였으며, 이를 통해 알아낸 사실은 다음과 같다.

- 1) 배기 밸브 양정이 2.5 mm인 경우 배기 밸브 열림 시간이 짧아 네거티브 밸브 오버랩(NVO: negative valve overlap)이 크며, 배기 행정 중에 재압축이 크게 나타난다. 이때 재압축은 흡기 밸브 개폐 시기 보다 배기 밸브 개폐시기에 더 크게 영향을 받는다.
- 2) HCCI 엔진의 경우 스로틀링이 거의 없기 때문에 배기 밸브 양정이 높고 열림 시간이 긴 경우 내부 배기 가스 재순환(IEGR; internal exhaust gas re-

circulation)이 잘 되지 않아 IEGR 율이 낮지만, 배기 밸브 양정이 낮고 열림 시간이 짧은 경우에는 배기 밸브가 일찍 닫히게 되어 트랩되는 배기 가스의 양이 증가하게 되어 IEGR 율이 증가하게 된다.

- 3) 배기 밸브 양정이 8.4 mm인 경우에는 흡기 밸브 개폐시기 지각에 따른 유효 압축비 감소에 의해 자발 점화 시기가 지각되며, 배기 밸브 개폐시기에 따른 자발 점화 시기 영향은 무시할 만하다. 하지만 배기 밸브 양정이 2.4 mm인 경우에는 유효 압축비 변화 영향과 함께 배기 밸브 개폐시기 변화 영향이 자발 점화 시기에 함께 미치게 되어 흡/배기 밸브 개폐시기가 빠를수록 자발 점화 시기가 빨라지고, 느릴수록 자발 점화 시기가 느려지고 있다.
- 4) 연소 효율은 배기 밸브 양정이 낮은 경우 재압축과 내부 배기 가스 재순환에 의해 공급되는 추가적인 열량에 의해 증가한다. 이에 의해 배기 밸브 양정이 높은 경우에 만족하지 못했던 연소 효율의 허용 가능한 최소값을 배기 밸브 양정이 낮은 경우에는 만족하고 있다. 즉, 부하가 낮은 운전 조건에서는 배기 밸브 양정이 낮은 경우가 더 유리한 것이다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 지원 아래 “중소형 LPG승용차 개발사업”의 과제으로써 수행되었으며, 이에 관계 기관에 감사의 뜻을 포함합니다.

References

- 1) S. Kook, C. Park, W. Choi and C. Bae, “Effects of Two-Stage Injection on Combustion and Exhaust Emission Characteristics in a HCCI Engine,” Transactions of KASE, Vo.12, No.5, pp.32-39, 2004.
- 2) J. E. Dec, “A Computational Study of the Effects of Low Fuel Loading and EGR on Heat Release Rates and Combustion Limits in HCCI Engines,” SAE 2002-01-1309, 2002.
- 3) V. I. Golovitchev, N. Nordin and J. Chomiak,

- “Neat Dimethyl Ether: Is It Really Diesel Fuel of Promise?,” SAE 982537, 1998.
- 4) H. Teng, J. C. McCandless and J. B. Schneyer, “Thermochemical Characteristics of Dimethyl Ether-An Alternative Fuel for Compression-Ignition Engines,” SAE 2001-01-0154, 2001.
 - 5) P. Wolters, W. Salber, J. Geiger, M. Duesmann and J. Dilthey, “Controlled Auto Ignition Combustion Process with an Electromechanical Valve Train,” SAE 2003-01-0032, 2003.
 - 6) J. Jang, K. Yeom and C. Bae, “Effect of Various Intake Valve Timing Conditions and Exhaust Throttle on the Residual Gas Fraction and Exhaust Emission in an SI Engine,” Spring Conference Proceedings, Vol.1, KSAE, pp.65-70, 2004.
 - 7) D. Yap and A. Megaritis, “Applying Forced Induction to Bioethanol HCCI Operation with Residual Gas Trapping,” Energy and Fuel, Vol.19, pp.1812-1821, 2005.
 - 8) A. Oakley, H. Zhao, N. Ladommatos and T. Ma, “Experimental Studies on Controlled Auto-Ignition (CAI) Combustion of Gasoline in a 4-Stroke Engine,” SAE 2001-01-3606, 2001.