〈 논문 〉

Dimethyl Ether 예혼합 압축 착화 엔진에서 흡기중 CO_2 농도와 흡기온도 변화가 연소에 미치는 영향

배충식† · 장진영* · 염기태*

(2007년 1월 2일 접수, 2007년 4월 25일 심사완료)

Effect of Inlet Temperature and CO_2 Concentration in the Fresh Charge on Combustion in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine Fuelled with Dimethyl Ether

Choongsik Bae, Jinyoung Jang and Kitae Yeom

Key Words: CO_2(Carbon Dioxides: 이산화탄소), DME(Dimethyl ether), EGR(Exhaust Gas Recirculation: 배기 가스 재순환), HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition: 예혼합 압축 착화), T_{in}(Inlet Temperature: 흡기온도)

Abstract

This study focused on the effects of the CO_2 gas concentration in fresh charge and induction air temperature on the combustion characteristics of homogeneous charge compression ignition with dimethyl ether (DME) fuel, which was injected at the intake port. Because of adding CO_2 in fresh charge, start of auto-ignition was retarded and burn duration became longer. Indicated combustion efficiency and exhaust gas emission were found to be worse due to the incomplete combustion. Partial burn was observed at the high concentration of CO_2 in fresh charge with low temperature of induction air. However, indicated thermal efficiency was improved due to increased expansion work by late ignition and prolonged burn duration. Start of auto-ignition timing was advanced with negligible change of burn duration, as induction air temperature increased. Burn duration was mainly affected by oxygen mole concentration in induction mixture. Burn duration was increased, as oxygen mole concentration was decreased.

기호설명

a : 자발점화 시작점
b : 연소종료점
T_{in} : 흡기온도
η_{ic} : 도시 연소효율
η_{ith} : 도시 열효율

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : csbae@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3044 FAX : (042)869-5023
* 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

엔진 연소 방법은 스파크 점화, 압축 착화 방식으로 크게 나뉘어 있었으나, 최근에 와서는 예혼합 압축 착화(HCCI; homogeneous charge compression ignition) 방식이 저공해 미래형 엔진 연소방식으로 제안되어 그에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

예혼합 압축착화는 예혼합된 연료/공기 혼합기를 압축시켜 자발점화 시키는 연소 방법이다. 예혼합 압축착화 엔진은 희박한 혼합기를 연소시킬 수 있어 연료경제성이 뛰어 나고 연소온도가 낮

아 질소산화물(NOx; nitrogen oxides)의 발생량이 낮으며, 예혼합된 연료/공기 혼합기를 사용하기 때문에 국부적으로 농후한 영역이 감소하여 입자상물질(PM; particulate matter)의 배출량을 저감할 수 있다.[1,2] 그러나 자발점화 시기와 연소 기간을 제어하기 힘들다는 단점이 있고, 부하를 늘리기 위해 연료공급량을 증가시키게 되면 노킹이 발생하여 큰 소음이 발생하고, 짧은 순간 동안 발생하는 큰 압력에 의해 엔진이 손상될 가능성이 있다. 또한 낮은 연소온도로 인하여 압축행정 동안에 실린더 내부에 존재하는 틈새체적(crevice volume)에 들어갔던 연료들이 팽창행정 중 산화반응의 부족으로 인하여 불완전 연소하여 탄화수소(HC; hydrocarbon)와 일산화탄소(CO; carbon mono-oxide)의 배출량을 증가시키는 단점이 있다.[3]

기화와 자발점화 특성이 우수한 DME(dimethyl ether)는 디젤을 대체할 수 있는 연료로 이를 기존의 고속직접분사식(HSDI; high speed direct injection) 엔진과 예혼합 압축 착화방식의 엔진에 적용하고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.[4,5] 그러나 DME를 예혼합 압축 착화 엔진에 사용하게 되면 우수한 기화와 자발점화 특성 때문에 조기착화의 문제가 크게 나타난다. 따라서 많은 연구자들이 DME 점화시기와 연소기간을 제어하기 위하여 배기가스 재순환 (EGR; exhaust gas recirculation) 방법을 이용한 연구를 진행 중이다.[6~9]

EGR 가스는 배기가스이므로 그 온도가 높아 흡기의 온도를 높이지만, 이산화탄소(CO_2; carbon dioxides)와 같은 희석가스에 의해 연소온도가 낮아지고 그에 따라 점화지연 및 연소방해가 일어나게 된다.[10]

따라서 본 연구에서는 CO_2 농도 및 흡기온도 변화 각각이 예혼합 압축착화에 미치는 영향을 분석해 보고자 한다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 실험장치

실험 장치는 Fig. 1에서 나타내었다. 본 연구에 사용된 엔진은 4행정, 단기통, DOHC(double over head camshaft) VVT 엔진이다. 엔진의 제원은 Table 1에 나타내었다. 엔진의 부하와 회전수는 AC(alternating current) 다이나모미터(82 kW, Unico Co.)를 사용하여 제어하였다. DME 연료의 분사위치는 공기와의 혼합을 충분히 하기 위하여 흡기밸브로부터 약 30 cm 떨어진 곳으로 하였다. 짧은 순간동안에 충분한 연료를 분사하기 위하여 질소(N_2; nitrogen)를 사용하여 5 MPa로 DME 연료를 가압하여 액상을 유지할 수 있도록 하였다. 또한 DME의 낮은 점도에 의한 연료 공급 장치의 손상을 방지하기 위해 DME에 윤활 향상제(Infineum, R655)를 500 ppm 첨가하였다. EGR 조건을 모사하기 위해 99% 이상의 순도를 가지는 CO_2 가스를 흡기관 입구에서 공급하였고, 흡기온도의 가열을 위해 온도 가열 장치를 설치하였다. 흡입되는 혼합기 중 CO_2의 농도와 배기가스중 탄화수소와 일산화탄소 배출물등은 배기가스 분석기(Horiba, Mexa 1500d)를 이용하여 측정하였다.

Table 1 Engine specifications

Bore (mm)		82
Stroke (mm)		93.5
Compression ratio		13
Displacement (cc)		494
Intake / Exhaust valve open duration		228 / 228
Intake / Exhaust valve lift		8.5 / 8.4
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

Table 2 Experimental conditions

Engine speed (rpm)	1000
DME fuel amount (mg)	18.2
CO_2 concentration (%)	0 ~19.4
Inlet temperature (°C)	25 ~ 80

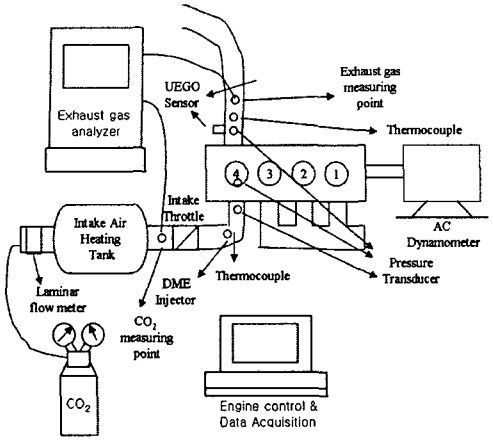


Fig. 1 Experimental setup

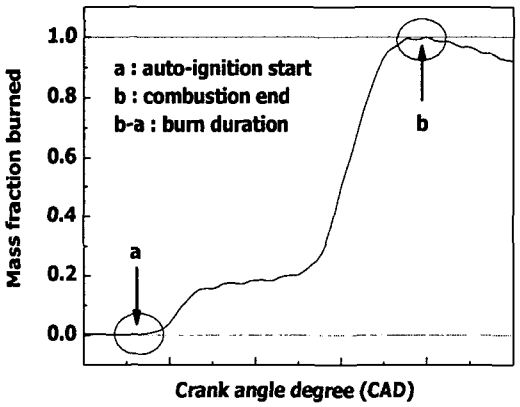


Fig. 2 Definition of start of auto-ignition, end of combustion and burn duration

압력 데이터의 경우 1 회전에 2048개의 신호를 취득하였다. 온도와 배기가스 분석 데이터는 1초에 100개의 데이터를 10초 동안 취득한 후 평균한 값을 사용하였다. 실험데이터의 취득은 데이터 수집 장치(Io Tech, Wavebook 512H)를 이용 수집 저장하였다.

자발 점화 시작점과 연소기간의 정의는 Fig. 2에서 정의 한 것 처럼 질량 연소율(mass fraction burned)이 0보다 커질 때를 자발점화 시작점 (a)으로 하였고, 1이 될 때를 연소종료점 (b) 으로 하였다. 또한 연소기간은 자발점화 시작점부터 연소종료점까지로 하였다.

2.2 실험방법

1000 rpm의 회전수로 운전을 하는 엔진에서 DME 연료량을 18.2 mg/stroke 으로 고정하였고, 이때 흡입되는 신기중의 CO_2 농도와 흡기 온도 변화에 따른 연소와 배기가스 배출에 대한 영향을 실험하였다. 흡기스로틀을 이용하여 공기흡입량을 일정하게 제어하였고, 흡기관 입구에서 CO_2 가스를 공급하여 흡입되는 신기중의 CO_2 농도를 증가시켰으며, 흡기온도 조절 장치를 이용하여 온도를 제어하였다.

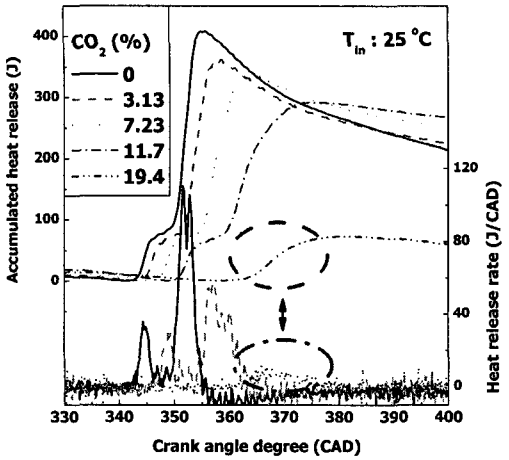
3. 실험결과

3.1 자발점화 시작 및 연소기간

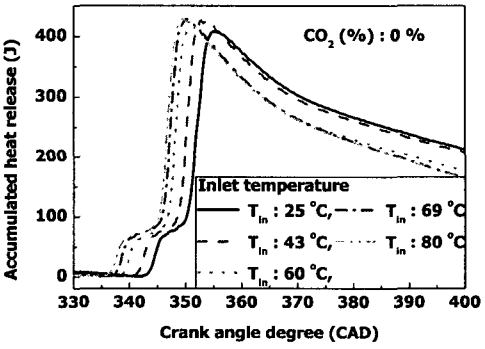
흡기 온도를 일정하게 유지한 상태에서 흡기 행정중 CO_2 공급량 증가에 따른 자발점화시기 변화와 연소기간 변화의 영향을 실험하였다.

Figure 3(a)는 흡기온도가 25°C인 조건에서 CO_2 공급량이 증가하였을 때의 열방출 곡선을 나타내고 있다. CO_2 공급량 증가에 따라 열방출이 시작되는 즉 자발점화가 시작되는 위치가 늦게 나타나며 열방출 최고값이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 CO_2 공급량이 증가하는 동시에 공기흡입량이 감소하게 되고, 혼합기의 열용량이 증가하게 되어 연소온도 저감 및 연소방해가 심해져서 나타나는 현상이다. 또한 CO_2 공급량 0~11.7%까지는 열방출량 곡선 중간에 변곡점이 나타나는 것을 통하여 저온산화반응과 고온산화반응이 함께 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 Fig. 3(a)에서 알 수 있듯이 CO_2 공급량이 19.54%인 조건에서는 CO_2에 의한 연소방해가 심각해져 저온산화반응이 상사점 이후에 나타나고, 고온산화반응은 나타나지 않고 있음을 알 수 있다.

저온 산화반응은 보통 600~900 K의 온도 조건에서 발생하고, 고온산화반응은 보통 900 K 이상의 조건에서 발생하게 된다.[11,12] 하지만 CO_2 공급에 따른 실린더내 최고 연소온도를 이상기체 가정으로 계산한 결과를 보여주는 Fig. 4에 따르면 CO_2 공급량이 증가할수록 연소온도가 낮아지고, CO_2 분률이 12%를 넘어서게 되었을 경우에는 최고온도가 800 K 이하를 나타내면서 900 K 이상에서 발생하는 고온산화반응을 제대로 촉발하지 못해 부분연소를 만들고 있음을 알 수 있다.



(a) CO_2 % in the fresh charge



(b) T_{in}

Fig. 3 Effect of CO_2 % in the fresh charge and T_{in} on accumulated heat release; (a) CO_2 % in the fresh charge, (b) T_{in}

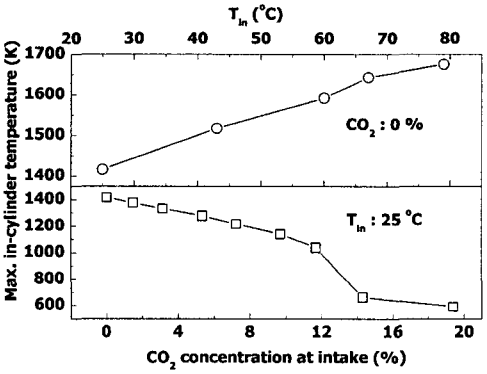


Fig. 4 The change of maximum in-cylinder temperature as a function of CO_2 % in the fresh charge and T_{in}

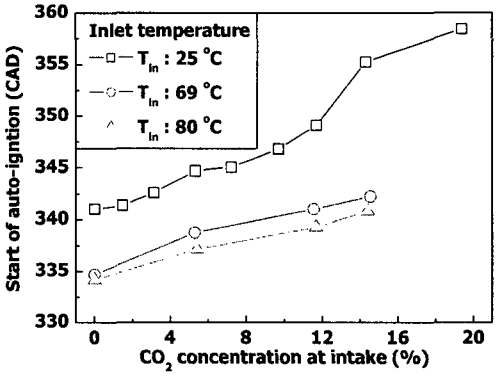


Fig. 5 Effect of CO_2 % in the fresh charge and T_{in} on start of auto-ignition

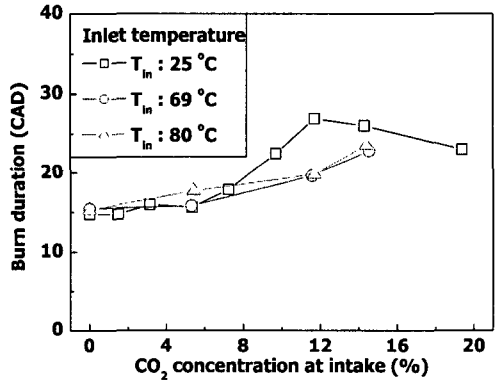


Fig. 6 Effect of CO_2 % in the fresh charge and T_{in} on burn duration

반면 CO_2를 공급하지 않고 흡기온도를 증가시킨 경우에는 Fig. 3(b)와 Fig. 4에서 알 수 있듯이 연소 최고온도가 모두 1000 K 이상으로 나타나는 것을 통해 저온 산화반응과 고온산화반응 모두 나타나고 있음을 알 수 있다.

Figure 5는 흡입되는 CO_2 농도변화와 흡기 온도 변화에 따른 자발점화시기 변화를 나타내고 있다. CO_2의 공급이 증가할수록 Fig. 3(a)의 결과에서 확인했듯이 자발점화시기가 지각되고 있음을 알 수 있다. 앞서 설명하였듯이 CO_2를 공급함에 따라 열용량이 증가하고 산소흡입량이 감소하여 자발점화시기가 지각되는 특성을 나타낸다. 흡기온도를 높인 상태에서 CO_2를 공급한 경우에는 자발점화시기가 진각 하여 평행이동된 것 같은 모습을 보이고 있다. 이를 통해 CO_2 공급과 흡기온도 변화가 상호연관 없이 자발점화시기에

각각 독립적으로 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Figure 6은 흡입되는 CO_2 농도변화와 흡기 온도 변화에 따른 연소기간 변화를 나타내고 있다. CO_2 농도가 증가할수록 연소기간이 증가하고 있다. 그러나 흡기온도가 25°C인 조건에서는 CO_2 농도가 12~13% 이상인 지점부터 연소기간이 감소하는 모습을 보이게 된다. 이는 앞서 Fig. 3(a)와 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 과다한 CO_2 공급량으로 인해 고온산화 반응이 나타나지 못하고 부분연소가 일어났기 때문이다. 그러나 흡기 온도를 높이게 되면 혼합기의 초기 온도가 높아지게 되어 CO_2에 의한 연소온도 감소 및 방해를 극복하게 된다. 그로 인해 흡기온도가 낮을 때 촉발되지 못했던 고온산화반응이 발생하는 것이다.[3] 또한 연소기간이 CO_2 공급량에 비례하여 증가하게 된다. 그러나 흡기온도 증가에 따른 연소기간 변화는 거의 나타나지 않음을 통해 연소기간은 CO_2 공급량에 주로 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

3.2 효율에 미치는 영향

앞서 살펴보았듯이 CO_2 공급과 흡기 온도 변화에 의하여 자발점화 시작과 연소기간이 변화하게 된다. 이러한 변화는 연소 효율 및 열효율 변화와 함께 나타나므로 이를 분석하고자 공급되는 열량 대비 발열되는 열량(식 (1), η_{ic} : 도시 연소효율)과 공급되는 열량중에 일로 바뀌는 량(식 (2), η_{ith} : 도시 열효율)에 대해 아래와 같이 정의하고 분석을 하였다.

$$\eta_{ic} = \frac{\text{heat release}}{m_{fuel} Q_{LHV}} \times 100 \qquad (1)$$

$$\eta_{ith} = \frac{\text{Work}}{m_{fuel} Q_{LHV}} \times 100 \qquad (2)$$

Figure 7은 흡입되는 CO_2 농도변화와 흡기 온도 변화에 따른 η_{ic} 변화를 나타내고 있다. η_{ic}는 식 (1)에서 정의한 것과 같이 공급된 열량 중에서 어느 정도의 열량이 실린더 내부의 온도 및 압력 증가에 기여했는가를 나타낸다. CO_2 공급량이 증가할수록 η_{ic}가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 CO_2 공급량 증가로 인해 연소 방해와 CO_2에 의한 열흡수가 증가하기 때문이다. 또한 흡기 온도가 낮을 때는 CO_2 공급량이 12~13% 이상에서 부분연소에 의해 η_{ic}가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 흡기 온도가 높아진 경우에는 η_{ic} 가 증가하기는 하지만 일정수준에서 제한되고 있음을 확인 할 수 있다.

Figure 8은 흡입되는 CO_2 농도변화와 흡기 온도 변화에 따른 η_{ith} 변화를 나타내고 있다. η_{ith}은 식 (2)에서 정의한 것과 같이 엔진으로 공급된 열량중에 일로 변환된 비율을 나타내는 것이다. 외부로 표출된 일은 압축행정 동안의 음의 일과 팽창행정동안의 양의 일이 더해진 결과이다.

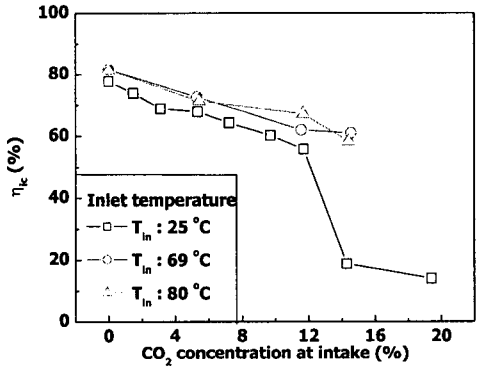


Fig. 7 Effect of CO_2% in the fresh charge and T_{in} on indicated combustion efficiency

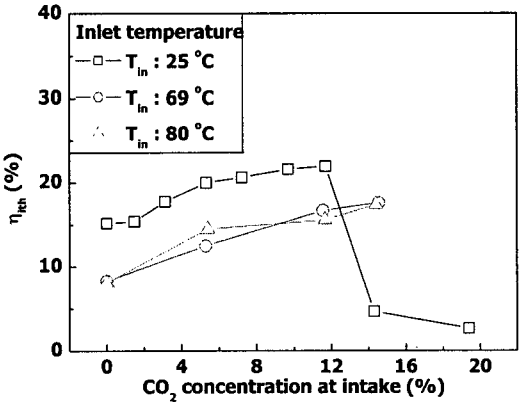


Fig. 8 Effect of CO_2% in the fresh charge and change of T_{in} on indicated thermal efficiency

따라서 연소기간이 팽창행정에 많이 위치할수록 η_{ith}는 커지게 된다. η_{ic}가 CO_2 공급량증가에 따라 감소하는 모습을 보였지만 η_{ith}의 경우 반대로 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 CO_2 공급량 증가에 의한 연소방해에 의해 실린더 내부 온도 및 압력 증가에 기여된 열량이 줄어들었지만 자발점화 시기 지각 및 연소기간 증가가 나타났고, 자발점화시기가 늦어지고 연소기간이 길어지게 되면서 압축행정보다 팽창행정에서의 일이 증가하게 되어 전체일이 증가하고 그에 의해 도시 열효율이 증가한 것이다. η_{ith} 역시 낮은 온도의 높은 CO_2 공급 조건에서 급격히 감소하는 것을 통해 이 부근의 실험조건에서 부분연소가 일어나고 있음을 재확인 할 수 있다. 흡기 온도 증가 되었을 경우에는 자발점화시기 진각으로 인하여 압축행정동안에 행해지는 일이 증가하게 되어 전체 일의 감소가 일어나 η_{ith}가 감소하고 있다.

3.3 탄화수소와 일산화탄소 배출특성

예혼합 압축착화의 경우 적은 연료를 예혼합시켜 압축착화 시키므로 연소온도가 낮아 탄화수소와 일산화탄소의 산화반응이 활발하지 못해 그 배출량이 기존의 스파크점화 기관과 압축착화기관에 비해 증가할 수 있다.[3,11] 이때 CO_2 공급량을 증가시키고, 흡기온도를 증가시켜가며 탄화수소와 일산화탄소 배출물 변화를 살펴보았다.

연소 온도가 높은 경우 발생하는 질소산화물(NOx: nitrogen oxides)의 경우 희박한 조건에서 연소를 하고 있기 때문에 발생하지 않았다. 또한 예혼합된 혼합기를 이용하고 있으며, 함산소 연료인 DME를 사용하고 있으므로 국부적으로 농후한 영역에서 산소의 부족으로 인해 발생하게 되는 입자상물질(PM: particulate matter)이 발생하지 않았다.[3]

Figure 9는 흡입되는 CO_2 농도변화와 흡기 온도 변화에 따른 탄화수소 배출 변화를 나타내고 있다. 탄화수소 배출이 CO_2 공급량 증가에 따라 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 흡기 온도가 낮은 실험조건에서는 탄화수소 배출량 증가가 조금 더 크고, 앞서 설명한 것과 같이 CO_2 공급량이 12~13% 이상인 실험조건에서는 부분연소에 의해 그 배출량이 급격히 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

일산화탄소 배출에 대해서는 Fig. 10과 같이 흡입되는 CO_2 농도변화와 흡기 온도 변화에 따라 도시하였다. 탄화수소 배출과 마찬가지로 CO_2 공급량이 증가함에 따라 일산화탄소가 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 흡기온도가 낮고 CO_2 공급량이 많은 조건에서 부분연소에 의해 배출량이 급격히 증가하고 있다.

Figure 9와 10의 탄화수소와 일산화탄소 배출 결과를 통해 배출가스의 급격한 증가는 흡기 온도 상승에 의한 부분연소 문제 해결을 통해서 줄일 수 있음을 알 수 있다.

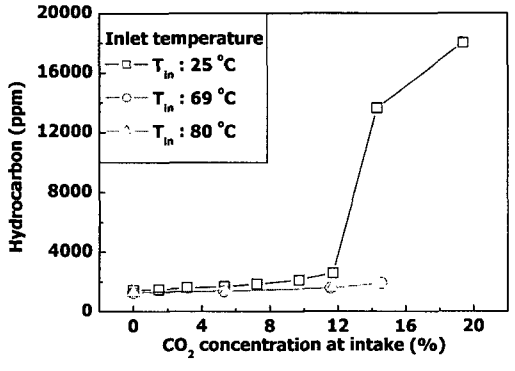


Fig. 9 Effect of CO_2% in the fresh charge and T_{in} on hydrocarbon emission

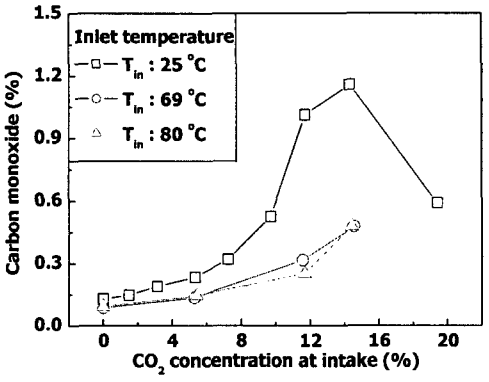


Fig. 10 Effect of CO_2% in the fresh charge and T_{in} on carbon monoxide emission

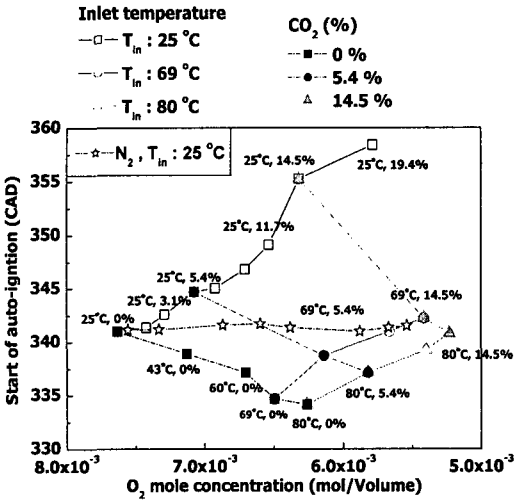


Fig. 11 Effect of CO_2% in the fresh charge and T_{in} on start of auto-ignition

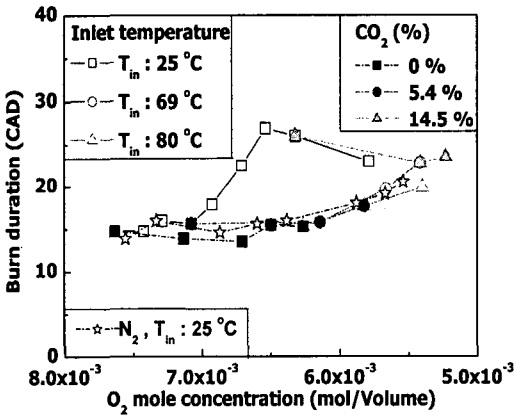


Fig. 12 Effect of CO_2% in the fresh charge and T_{in} on burn duration

3.4 혼합기 중 CO_2와 흡기온도 변화에 의한 영향 비교

흡입 신기에 CO_2를 공급하거나 흡기온도를 증가시키게 되었을 때 공통적으로 나타나는 현상은 바로 흡입 공기량 감소에 의한 행정체적대비 실린더 내부에 분포하는 산소의 절대몰수 감소이다. 따라서 CO_2 공급과 흡기온도 변화에 따른 영향을 비교도시하기 위해 Fig. 11, 12와 같이 행정체적에 대한 흡기 산소 몰농도를 기준으로 자발점화 시기와 연소기간을 도시하였다.

Figure 11을 통해 자발점화 시기는 CO_2 공급량과 흡기온도와 각각 선형적인 관계를 가지면서 독립적으로 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 CO_2 공급량이 증가한 경우에도 흡기 온도 증가에 의해 자발점화시기가 진각 될 수 있음을 예측 할 수 있다. 산소몰수 감소에 의한 자발점화시기 영향을 파악하기 위해 흡기 온도를 25°C 로 유지하고 CO_2 대신 N_2를 공급하여 산소몰수를 감소시켜 보았다. 그에 대한 결과는 Fig. 11에서 별모양으로 표시되었다. 그림에서 나타나듯이 산소 몰 농도 감소는 자발점화시기 변화와 거의 무관함을 알 수 있다.

연소기간을 나타내는 Fig. 12를 통해 부분연소와 같은 이상연소가 나타나지 않을 경우 CO_2 공급량 증가와 온도 증가에 의한 산소 몰 농도 감소에 의해 연소기간이 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 연소기간은 CO_2 공급량 증가에 의한 열용량 증가와 흡기 온도 증가로 인한 점화시기 진각에 영향을 받는 것 보다 산소의 몰수 감소에 주로 영향을 받는다고 결론지을 수 있다. 이를 뒷받침하기 위해 CO_2 대신 N_2를 공급하여 산소몰 농도를 감소시킨 결과와 비교를 해보았다. 연소기간이 다른 결과들과 겹쳐지는 것을 확인 할 수 있으며 이를 통해 연소기간은 산소의 몰농도에 주로 영향을 받는다는 것을 재확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 DME를 예혼합 압축 착화하는 엔진에서 흡입되는 CO_2 공급량 변화와 흡기 온도 변화에 따른 영향을 살펴보았다.

(1) 흡입되는 CO_2 공급량을 증가시키게 되면 자발점화시기가 지각된다. 하지만 흡기 온도 증가시 자발점화시기는 진각된다.

(2) 흡입되는 CO_2 공급량과 흡기 온도는 각각에 대하여 독립적으로 자발점화 시기에 영향을 주고 있다.

(3) 도시 연소효율의 경우 흡입되는 CO_2 공급량 증가에 따라 연소온도 감소와 연소방해에 의하여 감소한다. 하지만 흡기 온도가 증가하게 되면 개선되는 것을 확인 할 수 있다.

(4) 도시 열효율의 경우 흡입되는 CO_2 공급량이 증가하게 되면서 자발점화 시기 지각과 연소기간 증가가 나타나게 되어 팽창일 증가로 인해 증가하게 된다. 하지만 흡기 온도가 증가하게 되면 자발점화시기 진각으로 인하여 압축과정에서

의 일이 증가하게 되어 도시 열효율이 감소하게 된다.

(5) 탄화수소와 일산화탄소 배출은 흡입되는 CO_2 공급량 증가에 의한 연소온도 감소와 연소 방해로 인해 증가하는 경향을 보이고 있다.

(6) 낮은 흡기 온도조건에서 CO_2 공급량을 증가시킬 경우 나타나게 되는 부분연소가 흡기온도를 증가 시켰을 경우 사라지는 것을 확인 할 수 있었다.

(7) 흡입 신기 중 산소 몰수 감소로 살펴본 CO_2 공급량과 흡기 온도 변화 영향에서 자발점화시기는 두 가지 실험인자에 독립적이라는 것을 알 수 있다. 또한 이때 연소기간 변화의 경우 산소 몰수에 주로 영향을 받는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 우수 연구 센터 (ERC) 의 지원 아래 연소 기술 연구 센터의 과제로써 수행되었으며, 이에 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

(1) Kook, S., Park C., Choi, W., Bae, C., 2004, "Effects of Two-Stage Injection on Combustion and Exhaust Emission Characteristics in a HCCI Engine," *Trans. of the KSAE*, Vo.12, No.5, pp32-39.

(2) Epping, K., Aceves, S., Bechtold, R., Dec, J., 2002, "The Potential of HCCI Combustion for High Efficiency and Low Emissions," SAE paper No. 2002-01-1923.

(3) Zhao, F., Asmus, T., Assanis, D., Dec, J., Eng, J., Najt, P., 2003, *Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine : Key Research and Development Issues,* Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa.

(4) Golovitchev, V. I., Nordin, N. and Chomiak, J., 1998, "Neat Dimethyl Ether: Is It Really Diesel Fuel of Promise?," SAE paper No. 982537.

(5) Pyo, Y., Lee, Y., Kim, G., Kim, M., 2003, "Engine Performance and Exhaust Emissions Characteristics of DI Diesel Engine Operated with Neat Dimethyl Ether," *Trans. of the KSME(B)*, Vo.27, No.5, pp. 589~595.

(6) Dec, J. E., 2002, "A Computational Study of the Effects of Low Fuel Loading and EGR on Heat Release Rates and Combustion Limits in HCCI Engines," SAE paper No. 2002-01-1309.

(7) Yeom, K., Woo, Y., Jang, J., Park, Y., Bae, C., 2003, "Performance nd Emission Charateristics of Liquid-Phase LPG Injection Engine with Different EGR Rate," *Trans. of the KSAE*, Vol.11, No.5, pp7-14.

(8) Ladommatos, N., Abdelhallm, S. M., Zhao, H., and Hu, Z., 1996, "The Dilution, Chemical, and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Emissions - Part 1: Effect of Reducing Inlet Charge Oxygen," SAE paper No. 961165.

(9) Ladommatos, N., Abdelhallm, S. M., Zhao, H., and Hu, Z., 1996, "The Dilution, Chemical, and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Emissions - Part 2: Effect of Carbon Dioxide," SAE paper No. 961167.

(10) Sahashi, W., Azetsu, A. and Oikawa, C., 2005, "Effects on N_2 and CO_2 mixing on ignition and combustion in a homogeneous charge compression ignition engine operated on dimethyl ether," *IJER* vol. 6 PP. 423-431.

(11) Milovanovic, N. and Chen, R., 2001, "A Review of Experimental and Simulation Studies on Controlled Auto-Ignition Combustion," SAE paper No. 2001-01-1890.

(12) Yamda, H., Sakanashi, H., Choi N. and Tezaki A., 2003, "Simplified Oxidation Mechanism of DME Applicable for Compression Ignition," SAE paper No. 2003-01-1819.