

DME/천연가스 HCCI 기관의 연소특성 (기통 간 불균형과 EGR의 영향)

Combustion Characteristics of HCCI Engine Fueled DME and Natural Gas(Unbalance of Cylinder-to-Cylinder and Effect of EGR)

정 석 호

S. H. Jung

(접수일 : 2010년 1월 13일, 수정일 : 2010년 4월 21일, 채택확정 : 2010년 5월 7일)

Key Words : Natural Gas(천연가스), DME(디메틸에테르), HCCI(균일예혼합압축착화), Unbalance of Cylinder to Cylinder(기통간 불균형), EGR(배기가스 재순환)

Abstract : HCCI engines fueled DME and natural gas have been studied on single-cylinder engine due to availability of reducing on NOx and PM simultaneously without deteriorating into high thermal efficiency, and thus it is clarified that higher maximum engine load is achieved as DME equivalence is smaller. In this study, combustion tests were accomplished on multi-cylinder engine for practical use of it. When minimum DME equivalence achieved maximum engine load on single-cylinder engine was applied to 4-cylinders engine, there was in unstable running condition that engine revolution fluctuated greatly and cyclically. It is the reason what misfire occurred intermittently with one the same as minimum DME equivalence on single-cylinder due to increase in energy for ignition at No. 1 cylinder with lower cylinder liner temperature. Maximum engine load was achieved by adopting EGR, though it decreased because of knocking at smaller engine load than single-cylinder due to increase in minimum DME equivalence.

1. 서 론

내연기관의 배기 배출물 중 NOx와 PM에 관한 규제가 강화되어 가고 있다. 미국에서는 TierIV, 유럽에서는 EUROV가 2010년부터 시작된다. 또 가까운 일본에서는 2009년 10월부터 포스트 신장기규제가 시작되었다. 이러한 배기가스규제의 강화는 자동차업계뿐만 아니라 선박업계에서도 마찬가지다. 2011년부터 IMO의 TierII가 시작되고, 2016년에는 TierIII로 엔진자체만으로는 해결할 수 없을 정도로 규제가 강화될 예정이다. 또한 지구온난화에 따른 이상 기후 현상에 의한 재해가 매년 증가함에 따라 국제적으로 지구온난화의 주범인 이산화탄소의 발생을 저감시키는 방법에 대한 관심이 집중되고 있다. 2009년 12월 제15차 유엔 기후변화협약(UNFCCC)이 열려 이산화탄소 감소에 대한 협약체결에 지대한 관심이 쏟아졌으나, 선진국과 개발도상

국 간의 이견을 좁히지 못한 채 막을 내렸다. 그러나 이산화탄소의 저감에 대한 전 세계적인 관심이 표출된 장으로 의미가 깊다. 이러한 상황에 맞추어 디젤 기관의 경우는 NOx와 PM을 동시에 저감할 수 있다는 장점 때문에, 가솔린 기관의 경우는 열효율이 높다는 장점 때문에 예혼합 압축착화(HCCI : Homogeneous Charge Compression Ignition) 방식을 적용한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 그 중에서도 석유자원의 대체 연료로 DME, 천연가스 또는 둘을 동시에 사용한 성능시험^{1~5)}뿐만 아니라 CHEMKIN 등을 이용한 연소해석^{6~7)}에 대한 연구들이 세계적으로 널리 발표되고 있다.

그러나, 이러한 연구들은 단기통 기관에서의 실험이 대부분이다. 소형 모터보트나 예초기 등에 사용되는 것을 제외한 대부분의 상용기관은 다기통 기관으로, HCCI 기관이 상용기관으로써 사용되기 위해서는 다기통 기관에서의 성능시험이 필요불가결하다. 본 연구에서는 선행연구인 단기통 DME/천연가스 HCCI 기관⁵⁾을 4기통 기관에 적용하여 최고부하

정석호(교신저자) : 다이하츠디젤(주) 연구부
E-mail : sukho1001@hotmail.com, Tel :+81-70-5502-2315

한계와 이에 미치는 EGR의 영향에 대해서 조사하였다. 또, 단기통 기관에서 최고부하를 얻었던 최소 DME 당량비(min. ϕ_{DME})를 4기통 기관에 적용하였을 때, 기관회전수가 크게 변동하며 불안정한 운전상태가 발생하여 그 원인에 대하여 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험에 사용한 기관은 4기통 고속 직접분사식 디젤기관으로, ISUZU(주) 제작의 4JB1-2이다. Table 1에 자세한 기관사양에 대해서 나타내었다. Table 2에는 실험에 사용된 연료의 특성에 대해 나타내었다. DME는 순도가 99.9%의 압축액체로 세탄가는 55~60이다. 그리고 천연가스는 일본의 도시가스 13A를 이용하였다. 도시가스 13A는 87.65%의 CH_4 와 7.22%의 C_2H_6 , 1.65%의 C_3H_8 , 3.30%의 C_4H_{10} , 0.05%의 C_5H_{12} 외에 0.13%의 기타 가스성분으로 구성되어 있다.

Table 1 Engine specifications

Description	Specification
Model	ISUZU 4JB1-2
Engine type	Water-cooled 4 stroke diesel engine
Number of cylinders	4
Piston displacement	2771 cc
Bore × Stroke	93 mm × 102 mm
Maximum power	64.7/3400 kW/rpm
Compression ratio	18.2

Table 2 Properties of tested fuels⁵⁾

Properties	Kinds		
	DME	Natural gas	
Chemical structure	CH_3OCH_3	CH_4 (88%) +Others	
Lower heating value (MJ/kg)	28.9	49.1	
Cetane number	55~60	0	
Ignition point (K)	505	920	
Stoichiometric A/F ratio	8.98	17.10	
Carbon (%wt.)	52.2	79.4	
Hydrogen (%wt.)	13.0	20.6	
Oxygen (%wt.)	34.8	0.0	

Fig. 1에 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 먼저 연료의 도입방법에 대해서 설명하면, 천연가스는 도시가스 라인에 압축기를 설치하여 0.1 MPaG(게이지

압)로 가압시키고, 압축 액체 DME는 가스통에서 0.12 MPaG로 감압시켜 예혼합기가 형성되기 쉽도록 가스 상태로 흡기 매니폴드로부터 1500 mm에 위치한 믹싱 챔버에 도입하였다.

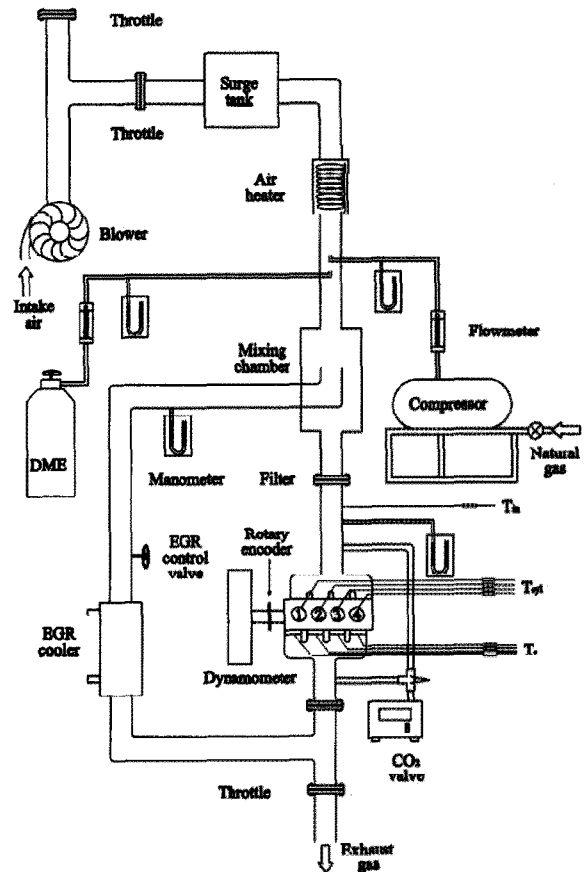


Fig. 1 Schematic diagram of system for experiment

2.2 실험방법

4기통 기관에 있어서 최고부하한계를 얻을 수 있는 조건을 조사하기 위해, 흡기온도(T_{in}) 30, 40 및 60°C에 있어서 최고부하한계를 얻을 수 있는 ϕ_{DME} 를 바꿔가며 균일한 예혼합기를 연소실 내에 도입하는 연소실험을 행하였다. 또, EGR률(X_{EGR})이 최고부하한계에 미치는 영향을 조사하기 위해 EGR을 도입하였으며, X_{EGR} 은 Fig.1과 같이 흡배기의 이산화탄소 농도를 측정, 식 (1)을 이용하여 산정하였다.

$$X_{EGR} = \frac{CO_{2in}}{CO_{2ex}} \times 100(\%) \quad (1)$$

게다가 서론에서 설명한 불안정한 운전상태 원인을 규명하기 위해 각 기통의 실린더 라이너(상사점에서 피스톤 톱 링의 위치)와 배기공에 열전대를 설치하여 실린더 라이너 온도(T_{cyl})와 배기온도(T_e)를

10분 간 측정하여 평균값을 나타내었다. 모든 실험에 걸쳐 기관회전수는 1,700±5 rpm으로 일정하게 유지하였다. 그리고 흡기공에서의 혼합기압은 Fig. 1에 나타난 것처럼 블로워와 2개의 조절판을 이용하여 표준대기압으로 일정하게 유지하였다. 1번 실린더에 압력센서(Kistler 6125B)를 설치하였고, 연소실 내 압력 데이터는 연소 분석기(Ono sokki CB-467)를 이용하여 한 사이클 당 크랭크 각 0.25°씩, 총 350 사이클의 데이터를 수집, 평균값을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

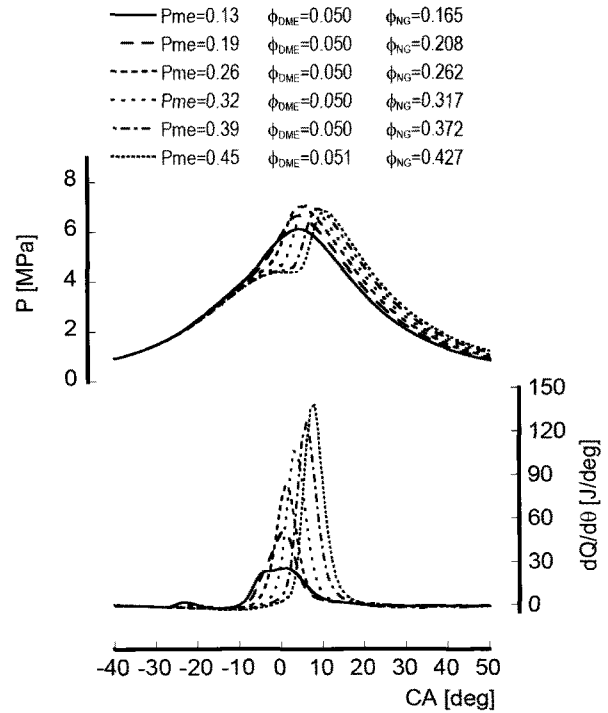
3.1 단기통 HCCI 기관의 연소특성⁵⁾

Fig. 2에 4기통 기관에서 최고부하를 얻을 수 있는 조건인 $T_{in}=60^{\circ}C$ 에 있어서 $\phi_{DME}=0.05$ 로 일정하게 유지하였을 때 운전부하에 따른 단기통 기관의 연소특성을 나타내었다. 그래프 종축의 P 및 $dQ/d\theta$ 는 각각 실린더 내 압력과 열발생률을 나타내고, 횡축의 CA는 크랭크 각도를 나타낸다. 그리고 범례의 Pme는 정미평균유효압력을, ϕ_{NG} 는 천연가스의 당량비를 나타낸다. DME/천연가스 HCCI 기관은 저부하에서도 노크를 발생시키는 DME의 저온산화반응을 억제해야 하기 때문에 최소 DME 당량비(min. ϕ_{DME})에서 최고부하가 얻어지며, 단기통의 min. ϕ_{DME} 는 Fig. 2 (a)의 범례에 나타난 것처럼 0.05이다. Fig. 2 (b)에는 최고 $X_{EGR}=50\%$ 를 도입한 경우의 연소특성을 나타내고 있다. EGR 도입에 의해 연소실 내 혼합기 중 비열비가 큰 CO_2 와 H_2O 의 비율이 증가하기 때문에 더 많은 착화 에너지가 요구되어 DME의 저온산화반응으로 분위기 온도를 상승시키기 위해 ϕ_{DME} 가 0.09로 증가하였다. 최고부하 이후에는 착화 지연이 커짐에 따라 실화가 일어난다. 단기통 기관의 최고부하한계는 EGR의 도입에 관계없이 Pme=0.45 MPa로 일정하였다.

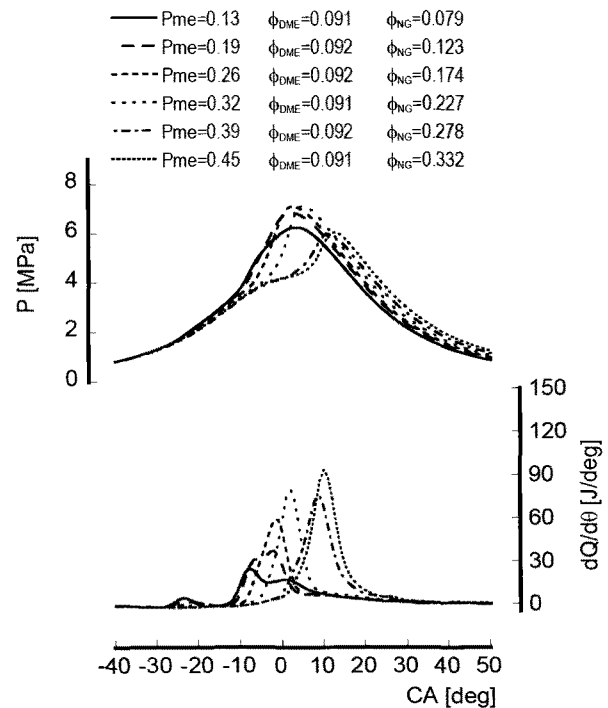
3.2 4기통 HCCI 기관의 연소특성

Fig. 3 (b)에 $T_{in}=60^{\circ}C$, $\phi_{DME}=0.056$ 로 일정하게 유지하였을 때 운전부하에 따른 4기통 HCCI 기관의 연소특성을 나타내었다. 4기통의 min. ϕ_{DME} 가 0.056로 단기통에 비해 증가되었는데, 이는 실린더 간 라이너 온도의 불균형에 의한 것으로 다음 절에서 설명하도록 하겠다. min. ϕ_{DME} 의 증가로 Pme=0.40 MPa 이후에서는 노크로 인해 최고부하한계가 단기통에 비해 감소하였다. Fig. 3 (b)에는 $X_{EGR}=40\%$ 에 있어서의 연소특성을 나타내었다. EGR 도입에 의해

노크 또는 실화로 인해 단기통과 같이 ϕ_{DME} 를 일정하게 유지할 수 없었지만, 적절한 ϕ_{DME} 에 의해 최고부하한계가 단기통과 같은 Pme=0.45 MPa로 증가하였다. 즉, 4기통 DME/천연가스 HCCI 기관에서는



(a) $X_{EGR}=0\%$



(b) $X_{EGR}=50\%$

Fig. 2 Change in combustion history due to engine load in single-cylinder HCCI engine ($T_{in}=60^{\circ}C$)

단기통 기관에 비해 $\min.\phi_{DME}$ 가 증가함에 따라 노크의 발생으로 최고부하한계가 $P_{me}=0.40$ MPa로 낮았으나, EGR의 도입으로 인해 HCCI 기관의 문제점 중의 하나인 급격한 연소의 제어가 가능하게 되어 단기통 기관과 같은 최고부하한계를 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구에 사용된 DME/천연가스 HCCI 기관의 최고부하한계는 실린더 수에 관계없이 $P_{me}=0.45$ MPa로 추정된다.

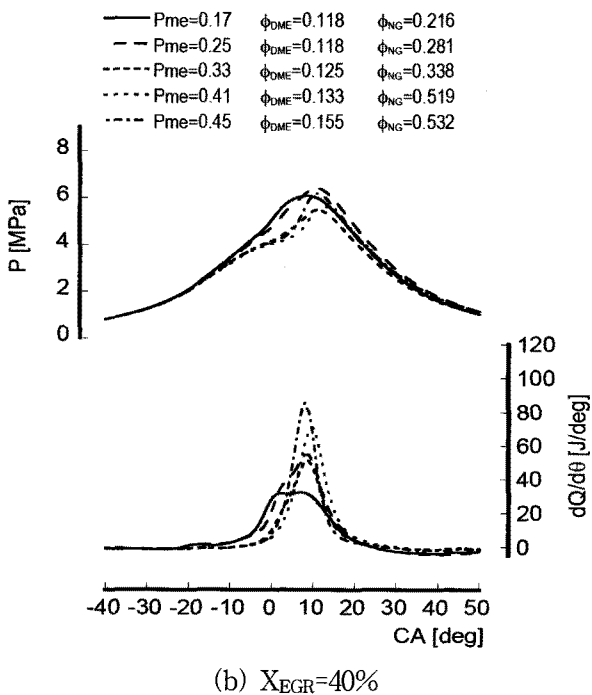
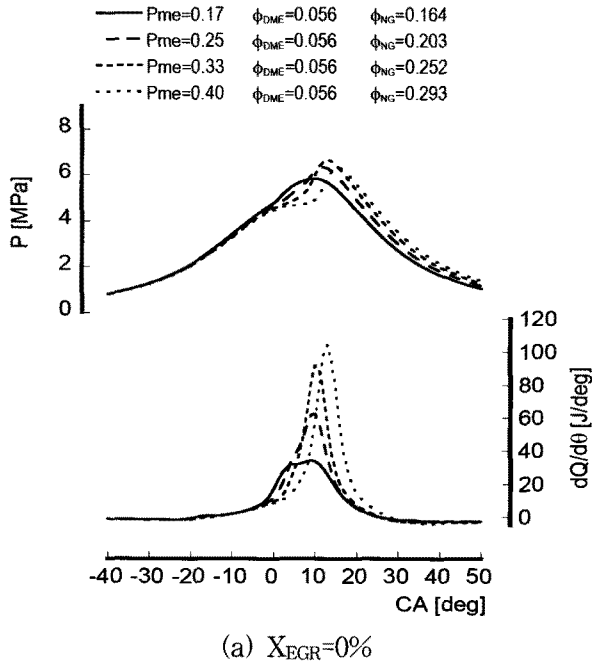


Fig. 3 Change in combustion history due to engine load source in 4-cylinders HCCI engine ($T_{in}=60^{\circ}C$)

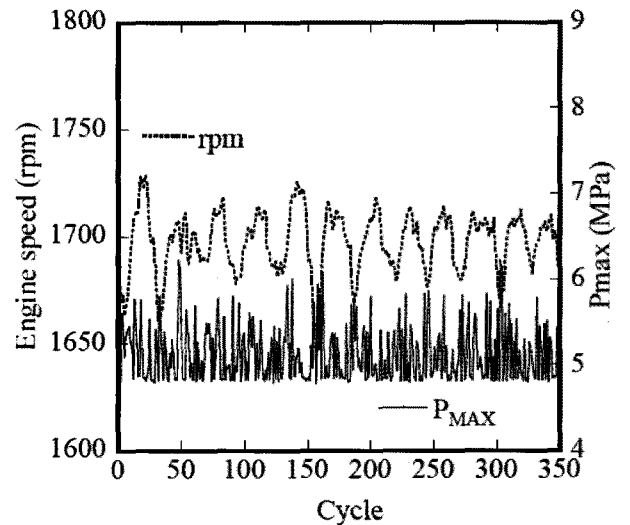
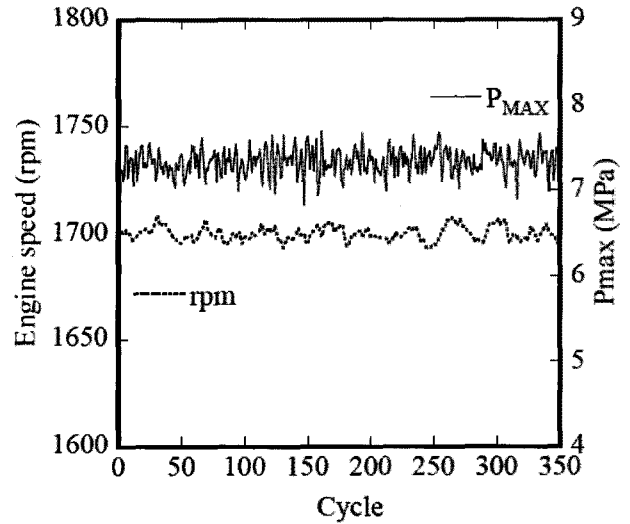


Fig. 4 Variations of engine speed and maximum in-cylinder pressure during 350 cycles ($T_{in}=40^{\circ}C$)

3.3 기통 간 불균형

본 장에서는 4기통 기관의 $\min.\phi_{DME}$ 가 증가하게 된 원인에 대해서 규명하고자 한다. Fig. 4에 불안정한 운전이 일어나는 예로 $T_{in}=40^{\circ}C$ 에 있어서 350사이클에 걸친 기관 회전수(실선)와 실린더 내 최고압력(점선)의 변동을 나타낸다. Fig. 4 (a)에 안정된 운전조건($COV_{imep}=1.55$), Fig. 4 (b)에는 불안정한 운전조건($COV_{imep}=9.34$)을 나타낸다. 여기서 COV_{imep} 는 지시평균유효압력의 변동계수를 나타내며 본 연구에서는 실화발생 확률의 지표로 채택하였고 식 (2)로 정의한다.

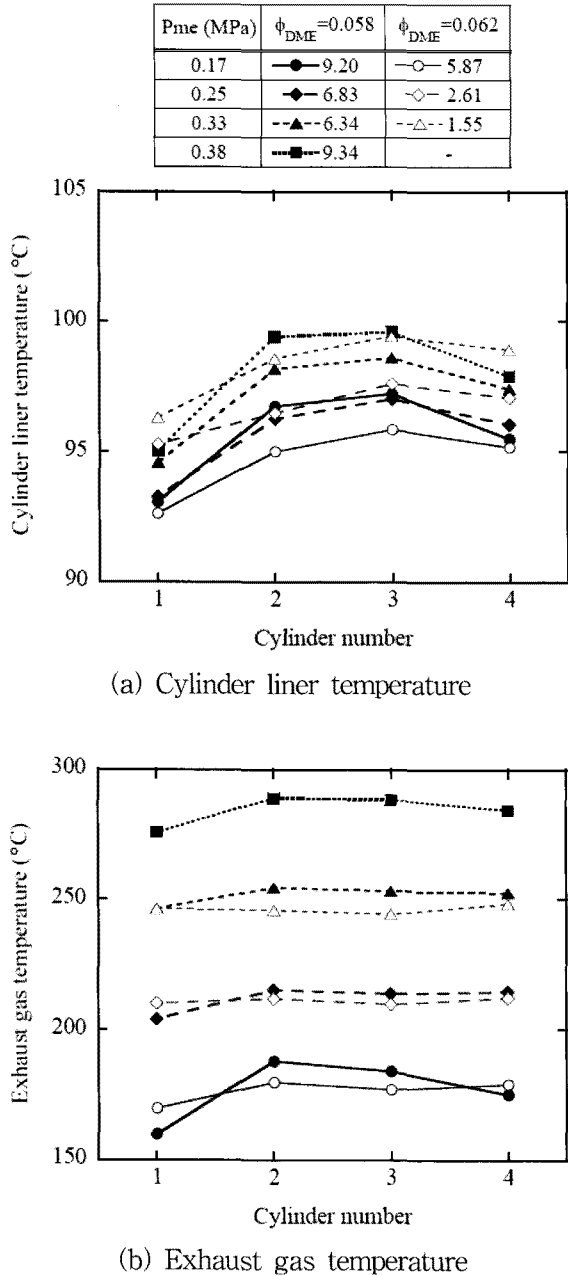


Fig. 5 Cylinder-to-cylinder variations of cylinder liner and exhaust gas temperature under stable and unstable running conditions ($T_{in}=40^{\circ}C$)

$$COV_{imep} = \frac{\sigma_{imep}}{imep} \times 100(\%) \quad (2)$$

Fig. 4 (a)의 경우 COV_{imep} 가 1.55로, 기관 회전수가 설정 회전수 1700 rpm에 ± 5 이내로 안정되어 있고, 실린더 내 최고압력의 변동도 크지 않은 것으로부터 실화가 일어나지 않는 안정된 운전 상태로 판단된다. 한편, Fig.4 (b)의 경우는 COV_{imep} 가 9.34로, 실린더 내 최고 압력이 큰 폭으로 변동하며, 최저치가 상사점에 있어서의 압축압력인 약 4.8 MPa로 받

복되므로 간헐적인 실화상태로 추정된다. 또, 기관 회전수도 1700 ± 30 rpm의 큰 변동 폭을 나타내며, 거의 주기적으로 변동하기 때문에 타 기통은 안정한 연소가 일어나고 있는 것으로 판단된다. 이는 Ohtsubo 등⁸⁾이 4기통 천연가스 PCCI 기관에 있어서 전 실린더의 연소압력 계측 결과 1번 실린더가 타 실린더보다 압력이 낮은 것과 일치하며, 이는 Fig. 5로 설명이 가능하다.

Fig. 5는 $T_{in}=40^{\circ}C$ 에 있어서 불안정한 운전조건인 $\phi_{DME}=0.058$ 및 안정된 운전조건인 $\phi_{DME}=0.062$ 에 있어서 실측한 각 기통의 실린더 라이너의 온도와 배기가스 온도를 각각 Fig. 5 (a)와 Fig. 5 (b)에 나타내었다. 범례의 심별 뒤 숫자는 COV_{imep} 를 나타낸다. Fig.5 (a)에서 전 부하에 걸쳐 불안정한 운전조건인 경우, 1번 실린더 라이너의 온도가 안정된 운전조건과 비교해 2, 3번 실린더와의 차가 크게 된다. 실린더 라이너의 온도가 낮을수록 연소실 내의 분위기 온도가 저하하기 때문에 안정된 착화를 위한 $\min.\phi_{DME}$ 는 증가하는 결과를 초래하는 것으로 판단된다. 또 Fig. 5 (b)의 배기가스 온도를 살펴보면, 안정된 운전조건에 비해 불안정한 운전조건의 경우 실린더 라이너 온도와 마찬가지로 1번 실린더가 낮다. 한편, 1번 실린더의 배기가스 온도가 타 실린더의 배기가스 온도보다 낮은 이유는 Fig. 4 (b)에 나타낸 것처럼 1번 실린더에서 일어나는 간헐적인 실화에 의한 것으로 사료된다. 이상의 결과로부터 불안정한 운전상태가 일어나는 원인은 냉각 시스템에 따른 1번 실린더 라이너 온도의 저하에 따른 것으로 추정되며, 안정된 운전을 위한 COV_{imep} 는 9%로 정의한다.

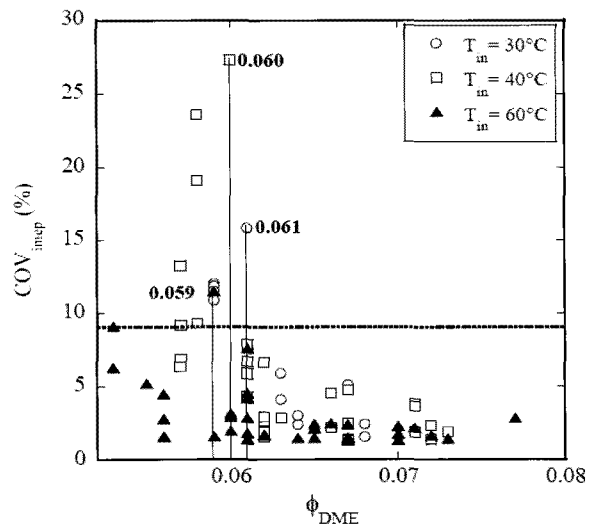


Fig. 6 Change in COV_{imep} due to DME and intake temperature in 4-cylinders DME/NG HCCI engine

Fig. 6은 각 흡기온도에 있어서 ϕ_{DME} 에 따른 COV_{imep} 의 변화를 나타낸다. COV_{imep} 가 9%를 넘지 않는 $min.\phi_{DME}$ 는 흡기온도 30°C의 경우 0.061, 40°C는 0.060, 60°C는 0.059로 흡기온도에 의존하는 것을 알 수 있다. 환언하면, 흡기온도가 낮을수록 실화한계의 $min.\phi_{DME}$ 이 커진다.

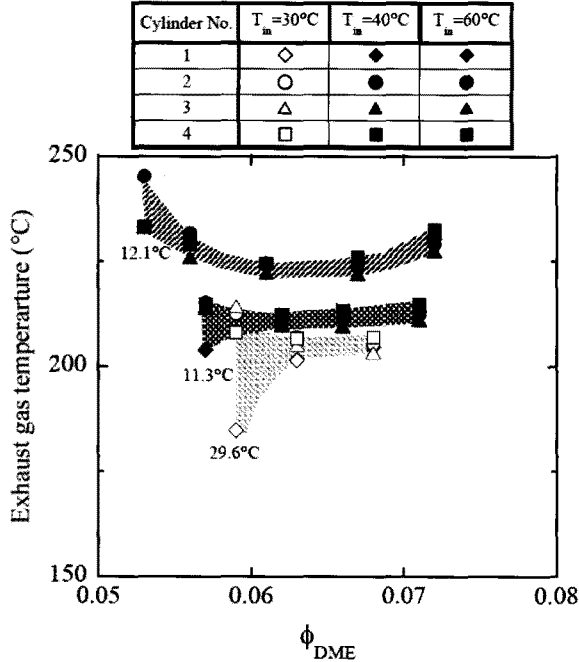


Fig. 7 Cylinder-to-cylinder variations of exhaust gas temperature due to DME equivalence ratio ($P_{me}=0.25$ MPa)

Fig. 7은 $P_{me}=0.25$ MPa에서 ϕ_{DME} 와 각 실린더 배기가스 온도의 분산 관계를 나타낸다. 흡기온도가 낮을수록 안정된 착화를 위한 $min.\phi_{DME}$ 가 커지고 있다. 또 어떤 흡기온도에 있어서도 ϕ_{DME} 가 실화한계의 $min.\phi_{DME}$ 보다 작아지면 실린더 간의 배기가스 온도차가 커지고 불안정한 운전상태가 된다.

4. 결 론

1) 4기통 기관에 있어서 최고부하한계는 최소 DME 당량비가 증가함에 따라 단기통 기관보다 낮았으나, EGR의 도입으로 단기통 기관과 같은 $P_{me}=0.45$ MPa를 달성하였고, 본 연구에서의 최고부하한계는 기통 수에 관계없이 $P_{me}=0.45$ MPa이다.

2) 불안정한 운전상태가 일어나는 원인은 실린더 라이너 온도가 타 실린더보다 낮은 1번 실린더에서 간헐적 실화가 일어나기 때문이다.

3) 불안정한 운전 상태는 COV_{imep} 가 9%를 넘는 경우에 나타났다.

4) 흡기온도가 높을수록 안정된 운전을 위한 최소 DME 당량비가 감소한다.

참고 문헌

1. Sato S. et al., 2005, "Basic Research on the Suitable Fuel for HCCI Engine from the Viewpoint of Chemical Reaction", SAE 2005-01-0149.
2. Shudo T., Ono Y. and Takahashi, T., 2002, "Influence of Hydrogen and Carbon Monoxide on HCCI Combustion of Dimethyl Ether", SAE 2002-01-2828.
3. Bae C. S. et al., 2007, "The Effects of Hydrogen on DME HCCI Combustion", Trans. of the KSAE, Vol. 15, No. 2, pp. 15~21.
4. Konno M., and Chen Z., 2005, "Ignition Mechanisms of HCCI Combustion Process Fuelled with Methane/DME Composite Fuel", SAE 2005-01-0182.
5. Jung S. H. et al., 2005, "Ignition and Combustion Characteristics of DME Premixed with Natural Gas in a HCCI Engine", 18th ICE International Symposium, Paper No. 20056086.
6. Yamada H., Yoshii M. and Tezaki A., 2005, "Chemical Mechanistic Analysis of Additive Effects in Homogeneous Charge Compression Ignition of Dimethyl Ether", Proc. of the Combustion Institute, Vol. 30, pp. 2773~2780.
7. Maroteaux F. and Noel N., 2006, "Development of a Reduced N-heptane Oxidation Mechanism for HCCI Combustion Modeling", Combustion and Flame, Vol. 146, pp. 246~267.
8. Ohtsubo H. et al., 2007, "Influence of Compression Ratio on Performance and Variations in Each Cylinder of Multi-Cylinder Natural Gas Engine with PCCI Combustion", SAE 2007-01-1877.