

4기통 디젤기관에 적용한 천연가스 예혼합 압축착화 기관의 연소특성 Combustion Characteristics of Pre-mixed Charge Compression Ignition Engines with Natural Gas Applied to 4-Cylinders Diesel Engine

정 석 호
S. H. Jung

(접수일 : 2009년 1월 17일, 수정일 : 2009년 3월 23일, 채택확정 : 2009년 4월 18일)

Key Words : Natural Gas(천연가스), DME(디메틸에테르), PCCI(예혼합압축착화), HCCI(균일예혼합압축착화), Ignition Timing Control(착화시기 제어)

Abstract : In recently, studies concerned to the diesel engine uses a natural gas as a fuel oil whose infra has been built already was approached to PCCI or HCCI with keeping a high thermal efficiency and reducing NOx and PM have been researching actively in normally single cylinder. An ignition source is required to burn the natural gas by a spark plug in gasoline engines, due to a higher auto-ignition temperature of natural gas. Then gas oil and DME were introduced as the ignition source. In this study as basic data for practical use of natural gas PCCI and HCCI engines, combustion characteristics and emission characteristics on 4-cylinders natural gas PCCI and HCCI engines with gas oil and DME as ignition sources were analyzed and the engine load range that is main object for practical use of PCCI and HCCI engines was made clearly by empirical experiment.

1. 서 론

지구온난화에 따른 이상 기후 현상에 의한 재해가 매년 증가함에 따라 국제적으로 지구온난화의 주범인 이산화탄소의 발생을 저감시키는 방법에 대한 관심이 집중되고 있다. 특히 내연기관의 세계에서는 이산화탄소의 저감은 곧 연비개선과 연관되어 있어, 가솔린기관보다는 열효율이 높은 디젤기관을 주목하고 있다. 그러나 디젤기관은 유해 물질인 질소산화물(NOx)과 입자상 물질(PM)의 배출량이 가솔린기관에 비해 많은 것이 문제점으로 지적되고 있고, 유럽, 미국, 일본에서는 빠르게는 2009년부터 각각 NOx와 PM의 규제치를 대폭 감소시켜 시행할 예정이다.

한편, 최근에는 원유가 급상승에 이어, 금융위기에 의한 경제침체에 따라 원유가가 급격히 하강하는 등, 석유연료에 대한 의존도가 높은 현실에 불안감이 고조되어가고 있어 대체 연료에 대한 요구가 증가하고 있다. 현재로써는 디젤기관의 대체 연료로

바이오디젤유와 DME 등이 시험운행 또는 시판되고 있다. 가솔린 기관의 대체 연료로 아직 매장량이 풍부하다고 알려진 천연가스가 주로 이용되고 있지만, 아직 그 활용도는 미비한 상태이다.

이러한 문제점들을 해결할 방책으로 디젤기관의 고효율을 저하시키지 않으면서 NOx와 PM을 동시에 저감시킬 수 있으며, 가스 상태의 대체연료도 이용이 용이한 예혼합압축착화 기관이 주목받고 있다. 예혼합압축착화 기관의 유래로는 1983년 Najt와 Foster¹⁾에 의해 예혼합압축착화에 대한 연구가 시작되었고, 그 뒤 1989년에 처음으로 균일 예혼합압축착화(HCCI:Homogeneous Charge Compression Ignition)라는 용어를 사용한 Thring²⁾에 의해서 알려졌지만, 아무도 그 가치에 대해서 크게 받아들이지 않았다. 그러나 2000년대에 들어서면서 미국 자동차공학회지(SAE)에만 매년 수백편의 HCCI기관에 관한 연구 논문³⁾이 발표되고 있을 정도로 세계 각지에서 활발하게 연구되고 있다.

HCCI기관으로의 적용방법에는 가솔린기관과 디젤기관에서 적용하는 방법이 고안되어 있다. 가솔린기관에서 HCCI기관으로의 적용방법에 대한 연구에는 천연가스가 많이 이용되고 있다. 천연가스는 인

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

프라 구축이 완성되어 있고 경제적인 면에서도 우수하다. 따라서 천연가스를 디젤기관의 대체연료로 이용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 그러나 천연가스는 주성분인 메탄(CH₄)을 비롯해 타 성분의 세탄가가 거의 0에 가까워 압축착화방식인 디젤기관에 어떤 장치를 이용하지 않고 사용하는 것은 무리다. 또한, 경유와 세탄가가 비슷한 DME를 디젤기관에서의 예혼합압축착화 기관으로 적용하는 연구가 발표⁴⁾되었으나 조기착화에 의한 급격한 연소가 노크를 발생시켜 저부하에서의 운전이 그치고 있다. 한편, 이러한 연구의 대부분은 단기통 기관에서 이루어지고 있으며, 상용되고 있는 대부분의 기관은 다기통 기관이다. 따라서, 본 연구에서는 예혼합압축착화 기관이 상용기관으로 이용되기 위한 기초 연구로 4기통 디젤기관에 적용하였다. 디젤기관에 예혼합압축착화 기관의 적용방법으로는 천연가스의 착화점이 높은 특성 때문에 천연가스 단독보다는 착화원으로써 소량의 경유를 분사시키는 방법과 경유와 특성이 비슷한 DME를 예혼합시키는 방법을 이용하였다. 여기서, 전자의 경우는 천연가스 균일 예혼합기를 연소실에 공급하지만, 착화 전 경유의 분사로 인해 균일 예혼합기 상태가 아니므로 천연가스 PCCI(Pre-mixed Charge Compression Ignition) 기관이라고 명명하고, 후자의 경우는 착화 전 단계에서도 균일한 예혼합기를 구성하고 있기 때문에 천연가스 HCCI기관이라고 명명한다. 본 연구에서는 두 기관의 경유와 DME의 비율, 흡기온도 등에 따른 연소특성을 분석하는 한편, 실용기관으로써의 중요한 요소인 운전부하영역을 디젤기관의 운전부하영역과 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1에 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 실험에 사용한 기관은 4기통 고속 직분식 디젤기관으로, ISUZU(주) 제작의 4JB1-2이다. Table 1에 기관사양에 대해서 나타내었다. 실린더 직경과 행정거리가 각각 93mm 와 102mm로 배기량은 2771cc, 최고출력은 3400rpm에서 64.7kW이다. 연료분사시기는 분사펌프에서 크랭크 각 0.1° 단위로 임의조정이 가능하며, 압축비는 18.2이다.

Table 2에는 실험에 사용된 연료의 특성에 대해 나타내었다. 경유는 세탄가 57인 일본에서 시판되는

JIS 2호를 사용하였고, DME는 순도가 99.9%로 세탄가는 55~60이다. 그리고 천연가스는 일본의 도시가스 13A를 이용하였다. 도시가스 13A는 87.65%의 CH₄와 7.22%의 C₂H₆, 1.65%의 C₃H₈, 3.30%의 C₄H₁₀, 0.05%의 C₅H₁₂ 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	93mm × 102mm
Max. power	64.7/3400 kW/rpm
Compression ratio	18.2

Table 2 Properties of tested fuels

	Gas oil	DME	Natural gas
Chemical structure	-	CH ₃ OCH ₃	CH ₄ (88%) +Others
Lower heating value MJ/kg	42.9	28.9	49.1
Cetane number	57	55~60	0
Ignition point K	520	505	920
Stoichiometric A/F ratio	14.50	8.98	17.10
%wt. Carbon	86.5	52.2	79.4
%wt. Hydrogen	13.5	13.0	20.6
%wt. Oxygen	0.0	34.8	0.0

2.2 실험방법

천연가스는 도시가스 라인에 압축기를 설치하여 0.1MPa로 가압시키고, 압축 액체 DME는 가스통에서 0.12 MPa로 감압시켜 예혼합기가 형성되기 쉽도록 가스상태로 흡기 매니폴드로부터 1500mm에 위치한 믹싱챔버에 도입하였다.

천연가스 PCCI기관에서는 흡기온도 60, 80, 100 및 120±0.5°C에 있어서 천연가스 예혼합기를 연소실 내에 도입한 후, 착화에 필요한 경유 분사량과 분사시기를 바꿔가며 연소실험을 행하였다. 천연가스 HCCI기관에서는 흡기온도 30, 40 및 60±0.5°C에 있어서 DME의 도입량을 바꿔가며 균일 예혼합기를 연소실 내에 도입하는 연소실험을 행하였다.

모든 실험에 걸쳐 기관회전수는 $1,700 \pm 5$ rpm으로, 흡기매니폴드에서의 흡기압은 표준대기압으로 일정하게 유지하였다. 연소실 내 압력과 니들리프트는 한 사이클 당 크랭크 각 0.25° 씩, 총 350 사이클의 데이터를 수집한 평균치를 나타내었다. NO_x는 감압형 화학발광법에 의한 NO_x 자동계측기(야마모토 제작소 ECL -77형)를, THC(총미연탄화수소)는 수소화염 이온화 검출법에 의한 THC 자동계측기(야마모토 제작소 EHF-710H형)를 이용하여 10분간 계측한 데이터의 평균치를 취득하였다. PM을 대신하는 스모크는 보쉬 스모크미터를 이용하여 취득한 후 질량 농도로 환산하였다.

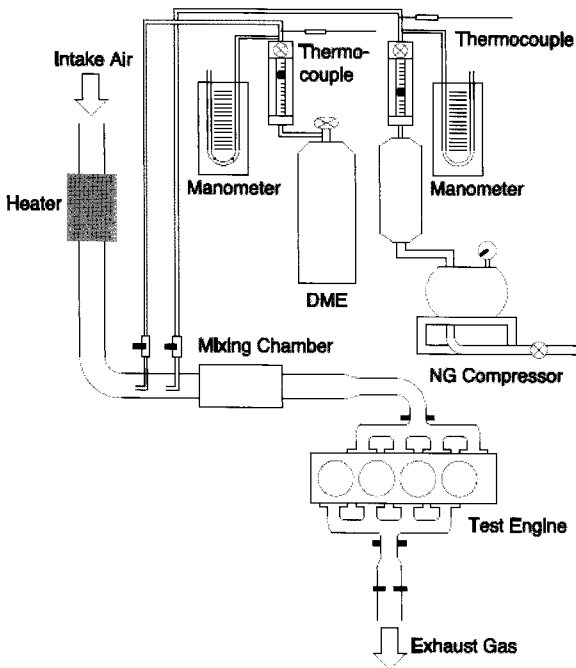


Fig. 1 Schematic diagram of system for experiment

3. 결과 및 고찰

3.1 천연가스 PCCI 기관의 연소특성

Fig. 2는 운전부하 0.66MPa , 분사시기 TDC, 흡기 온도 60°C 에 있어서 경유 분사량에 따른 천연가스 PCCI기관의 연소특성을 나타내고 있다. 횡축의 CA는 크랭크 각도를, 종축의 P, $dQ/d\theta$, Lift는 각각 실린더 내 연소압력, 열발생율, 니들리프트를 나타내고 있다. 부하 0.66MPa 에서 천연가스를 연소시키기 위한 착화원인 경유 분사량을 감소시킴에 따라 착화 에너지가 감소하게 되어 1.5mg/st . 미만이 되면 실화에 이르게 된다. 즉, 이 조건에서 안정적인 연소를 얻기 위한 최소 경유 분사량은 1.5mg/st .이다.

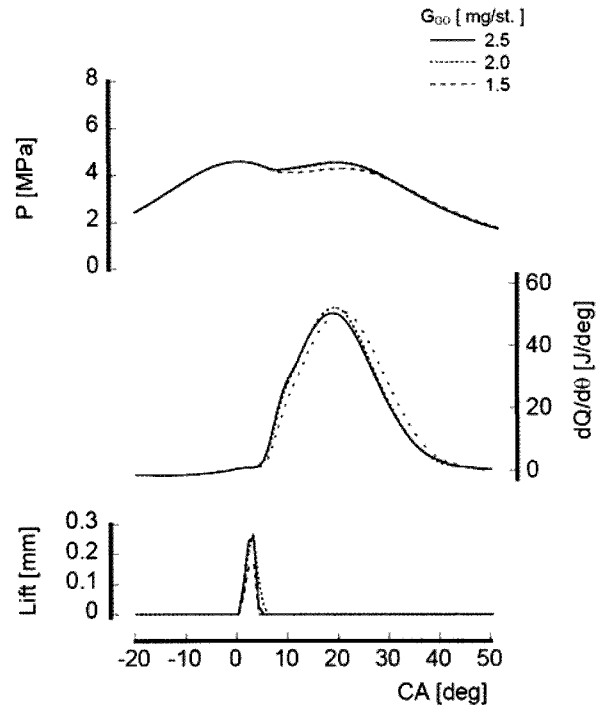


Fig. 2 Change in combustion history due to amount of gas oil as ignition source in PCCI engine ($P_{me}=0.66\text{MPa}$, $T_{in}=60^\circ\text{C}$, $\theta_{inj}=\text{TDC}$)

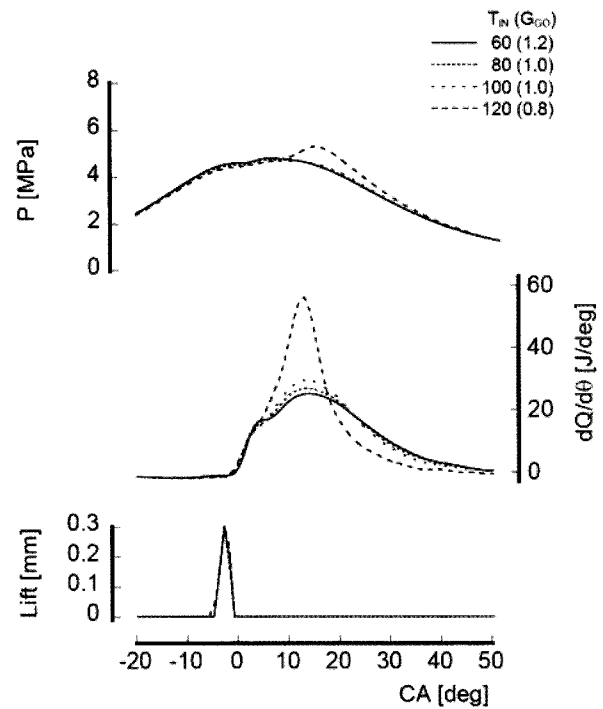


Fig. 3 Change in combustion history due to intake temperature and amount of gas oil in PCCI engine ($P_{me}=0.33\text{MPa}$, $\theta_{inj}=5^\circ\text{BTDC}$)

Fig. 3은 운전부하 0.33MPa 에서 흡기온도에 따른

천연가스 PCCI기관의 최소 경유 분사량과 연소특성의 변화를 나타내고 있다. 흡기온도가 증가함에 따라 착화 에너지가 증가하게 되므로 경유 분사량이 감소되고 있다. 이는 흡기온도가 160°C 이상이 되면 디젤기관에 있어서 천연가스만으로도 자발착화가 가능하다⁴⁾는 내용과 일치한다. 그러나, 흡기온도 120°C의 결과를 볼 때, 흡기온도가 증가하면 천연가스가 급격한 연소를 하게 되며 이는 노크를 일으킬 가능성이 높아져 운전부하영역이 축소됨을 예상할 수 있다.

Fig. 4는 경유 분사량 1.5mg/st., 흡기온도 60°C에 있어서 부하에 따른 천연가스 PCCI기관의 연소특성을 나타내고 있다. 부하의 증가에 따라 경유의 착화 후 뒤따르는 천연가스의 연소가 급격해짐에 따라 0.69MPa 보다 높은 부하에서는 노크가 발생, 운전이 불가능하였다.

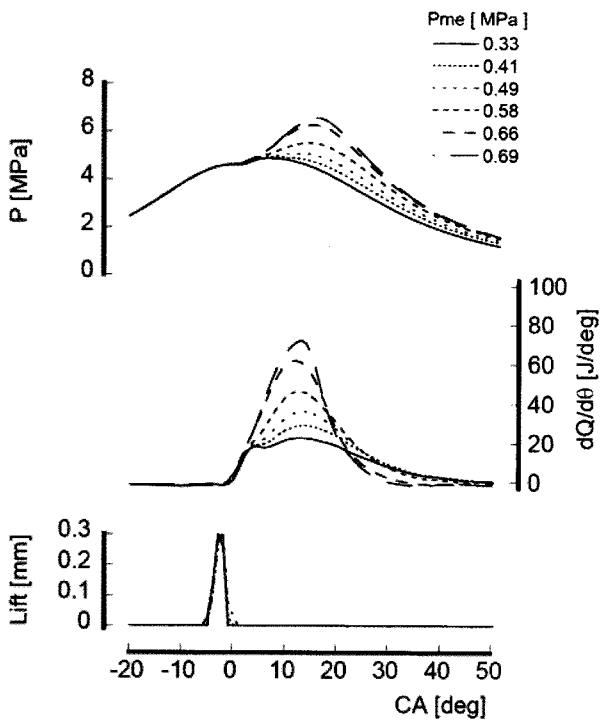


Fig. 4 Change in combustion history due to engine load in PCCI engine ($G_{GO}=1.5\text{mg/st.}$, $T_{IN}=60^\circ\text{C}$, $\Theta_{inj}=5^\circ\text{BTDC}$)

3.2 천연가스 HCCI 기관의 연소특성

DME가 착화원인 천연가스 HCCI가 경유를 착화원으로 하는 천연가스 PCCI와 가장 큰 차이점은 착화전 연소실 내의 혼합기가 균일한 것이다. 경유를 착화원으로 하는 천연가스 PCCI는 경유의 분사시기에 의해 착화시기 제어가 가능하지만, DME가 착화

원인 천연가스 HCCI에는 착화시기를 제어할 장치가 없어서 착화시기 제어가 쉽지 않다.

Fig. 5는 운전부하 0.13MPa에 있어서 DME 도입량에 따른 천연가스 HCCI기관의 연소특성을 나타내고 있다. DME는 냉염(또는 청염)을 발생하는 저온산화반응(Low Temperature Reaction)과 열염을 발생하는 고온산화반응(High Temperature Reaction)을 일으키는데⁵⁾, 저온산화반응이 전체 열발생율에서 차지하는 양이 적은 이유로 전체 열발생율의 10%인 크랭크각도를 CA10 정의하고 착화시기로 보는 경우⁶⁾도 있다. 그러나, 본 연구에서는 저온산화반응의 시작점을 착화시기로 정의하고 저온산화반응의 시작점은 열발생률 그래프에서 저온산화반응의 접점과 횡축과의 접점으로 정의하였다. DME의 도입량 (G_{DME})이 4.7mg/st.에서 10.2mg/st. 증가함에 따라 착화시기는 22°BTDC에서 30°BTDC까지 전각하고, G_{DME} 가 이 보다 증가하면, 저부하임에도 불구하고 노크현상이 일어나 안정적인 운전을 얻을 수 없었다.

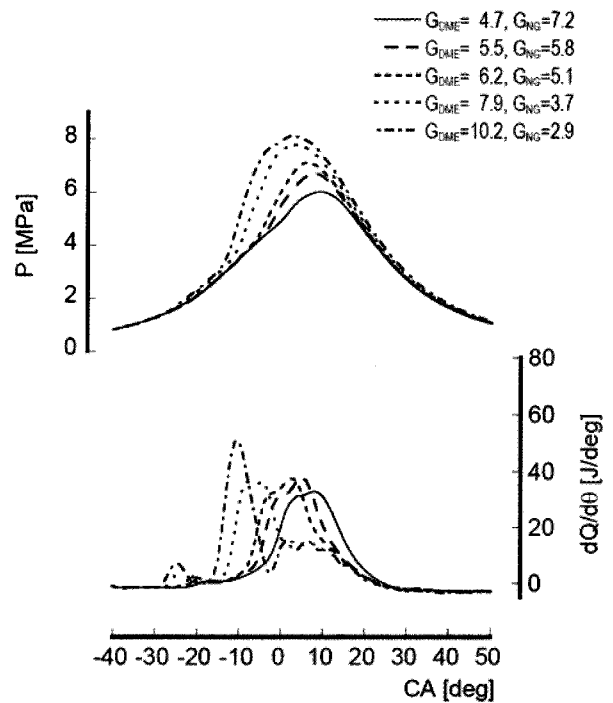
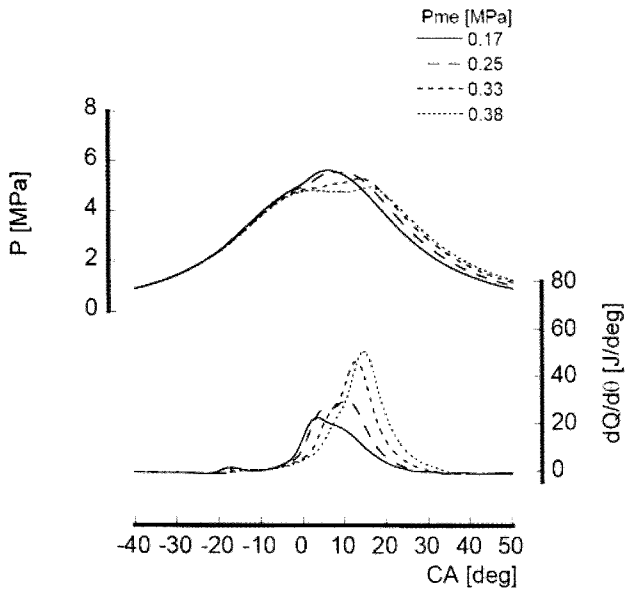


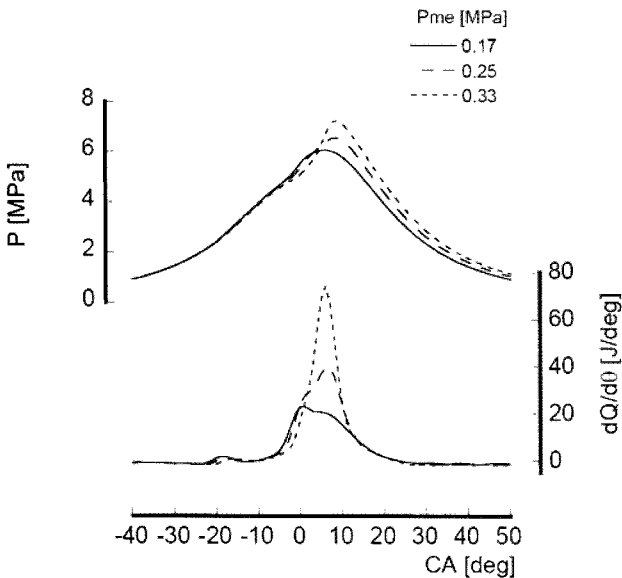
Fig. 5 Change in combustion history due to amount of DME as ignition source in HCCI engine ($P_{me}=0.13\text{MPa}$, $T_{IN}=60^\circ\text{C}$)

Fig. 6에는 흡기온도 40°C에 있어서 부하에 따른 천연가스 HCCI기관의 연소특성을 나타낸다. (a)에는 G_{DME} 가 4.6mg/st.인 경우에 대해서 (b)에는 G_{DME} 가 5.0mg/st.인 경우에 대해서 나타내고 있다.

앞서 설명한 것처럼 HCCI기관의 경우에는 착화시기를 제어할 마땅한 장치가 없어서 G_{DME} 가 불과 0.4mg/st.의 차이로 인해 연소특성에 큰 영향이 미친다. 특히, 고부하로 갈수록 이 근소한 차이로 인해 실화가 될지 노크가 될지가 가려진다. 이는 HCCI기관이 실용기관으로써 사용되기 위해서 해결되어야 할 크나큰 과제이다.



(a) $G_{DME}=4.6\text{mg/st.}$



(b) $G_{DME}=5.0\text{mg/st.}$

Fig. 6 Change in combustion history due to engine load in HCCI engine ($T_{IN}=40^{\circ}\text{C}$)

Fig. 2에서 6까지 살펴본 연소특성 결과로부터 착

화시기에 대해 정리해 보면, 천연가스 PCCI기관의 경우는 경유분사시기가 일정하면 경유의 분사량, 흡기온도 및 운전부하에 거의 상관없이 착화시기의 차가 크랭크 각 1° 이내로 일정한 반면, 천연가스 HCCI기관의 경우는 DME의 도입량에 따라 착화시기의 차가 크랭크 각 10° 정도로 변화한다.

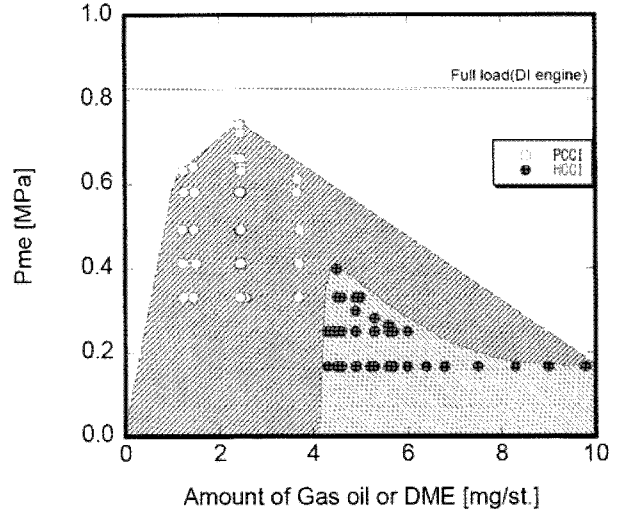


Fig. 7 Engine load range on natural gas PCCI and HCCI engines

3.3 운전부하영역

Fig. 7에 두 기관에 있어서의 경유의 분사량 또는 DME 도입량에 따른 운전부하영역을 나타내었다. 천연가스 PCCI기관의 경우, 운전부하영역이 착화시기의 제어가 가능한 장점을 지니고 있어 디젤기관의 전부하 0.82MPa에 가까운 0.74MPa, 다시 말해, 디젤기관의 운전부하영역의 약 90%에 이르는것에 비해, 천연가스 HCCI기관의 경우는 0.40MPa로 약 50%밖에 이르지 못한다. 따라서, 천연가스 PCCI기관은 즉시 실용기관으로써 사용이 가능하다고 사료되지만, 천연가스 HCCI기관이 실용기관으로써 이용되기 위해서는 운전부하영역을 확대시키는 연구가 필요하다고 여겨진다.

3.4 배기특성

Fig. 8은 Fig. 7에서 최고부하에 도달했을 때의 경유 또는 DME의 도입량에 있어서 부하별 배기특성과 연료소비율을 나타낸다. 배기가스성분 중에서 규제가 엄격해지고 있는 NO_x 에 있어서, 부하 $P_{me}=0.5\text{MPa}$ 이상인 PCCI기관의 경우를 제외하고는 EURO V의 3.5톤 이상 트럭의 규제치인 $\text{NO}_x \leq$

2.0g/kWh를 만족하고 있다. 매연의 발생량은 0.05g/kWh 미만으로 충분히 적은 양이다. 다시 말해, 천연가스 PCCI와 HCCI기관은 후처리 장치 없이도 2009년부터 규제가 될 EURO V를 만족시킬 수 있다. NO_x의 경우는 연소온도의 저하, 매연의 경우는 가스 상태의 연료를 사용하기 때문에 배출량이 줄어드는 것으로 사료된다. 또, 연료(또는 에너지) 소비율(be)에 있어서도 종래의 디젤기관(그래프 내에 ◇로 표시되어 있음)에 비해 비교적 낮은 것을 알 수 있다.

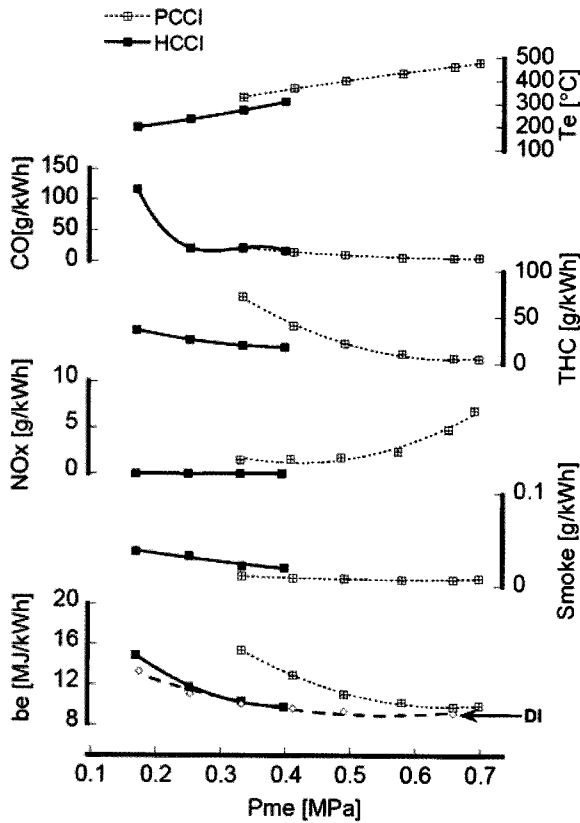


Fig. 8 Characteristics of exhaust emissions and fuel consumption of PCCI and HCCI engine ($T_{IN}=60^{\circ}C$)

4. 결 론

본 연구에서 행한 천연가스 PCCI와 HCCI기관의 실험결과는 다음과 같다.

(1) 천연가스 PCCI기관에 있어서 흡기온도가 높아질수록 필요한 착화에너지가 작아져 최소 경유 분사량이 감소하였다.

(2) 천연가스 PCCI기관에 있어서, 착화시기는 경유의 분사시기가 같으면 경유 분사량, 흡기온도 및

운전부하에 관계없이 일정한 반면, 천연가스 HCCI기관에 있어서는 DME 도입량의 증가에 따라 착화시기가 진각하였다.

(3) 천연가스 PCCI기관의 운전부하영역은 디젤기관에 있어서 운전부하영역의 약 90%에 이르는 반면, 천연가스 HCCI기관의 경우는 약 50%에 이르렀다.

(4) 천연가스 PCCI기관과 HCCI기관 모두 연료소비율을 크게 저하시키지 않으면서 NO_x는 EURO V를 거의 만족시켰고 매연의 배출량도 0.05g/kWh 미만이었다.

후처리 장치 없이도 EURO V를 만족시키는 천연가스 PCCI기관과 HCCI기관이 실용화되기 위해서는 안정된 연소를 얻을 수 있는 방안과 운전부하영역을 넓힐 수 있는 방법을 모색하지 않으면 안 된다. 당장에는 운전부하영역이 넓혀지지 않더라도 발전된 제어기술을 접목하여 중저부하에서는 THC와 NO_x배출량이 적고 연료소비율도 좋은 HCCI기관을 사용하고, 고부하에서는 PCCI기관을 사용하는 것도 좋은 방법이라고 생각된다.

참고 문헌

1. P. M. Najt and D. E. Foster, 1983, "Compression-Ignited Homogeneous Charge Combustion", SAE 830264.
2. R. H. Thring, 1989, "Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI) Engines", SAE 892068.
3. K. Hatamura, 2005, "Potential and Challenges of HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) Gasoline Engine", JSAE, Vol. 36, No. 2, pp.13~18.
4. Z. Chen et al., 2000, "Experimental Study of CI Natural Gas/DME Homogeneous Charge Engine", SAE Paper No. 2000-01-0329.
5. H. YAMADA, 2007, "A Study of Autoignition Mechanism in Homogeneous Charge Compression Ignition Engine", ENGINE TECHNOLOGY, Vol. 9, No. 2, pp. 56~63.
6. M. Sjöberg, J. E. Dec and N. P. Cernansky, 2005, "Potential of Thermal Stratification and Combustion Retard for Reducing Pressure-Rise Rates in HCCI Engines Based on Multi-Zone Modeling and Experiments", SAE 2005-01-0138.