

혼합연료를 이용한 예혼합 압축착화 디젤엔진의 연소특성

Combustion Characteristics of Premixed Charge Compression Ignition Diesel Engine using Mixed Fuels

조 병 호*, 이 기 형**, 이 창 식**
Byungho Cho, Kihyung Lee, Changsik Lee

ABSTRACT

A diesel engine has various merits such as high thermal-efficiency, superior fuel consumption and durability. Therefore the number of diesel engine in the world is increasing. As the seriousness of environmental pollution increases in the world, the method to reduce the noxious materials of CO₂, NO_x and P.M. is very important subject to correspond to exhaust gas regulations. A new concept, so called premixed charge compression ignition(PCCI), is focused among the various corresponding manners. In this study, we investigated the combustion characteristics of PCCI engine using a mixed fuels with that of commercial diesel engine. Finally we grasped a emission characteristics of PCCI engine. From this experiment, it could be found that NO_x reduction is caused by the lower maximum temperature and soot reduction is caused by rapid combustion under diffusion combustion part. Also, it was found that 1st-combustion(cool flame) and 2nd-combustion(hot flame) is appeared in heat release curve, exhaust gas temperature is diminished and combustion variation is increased according to increasing of gasoline ratio.

주요기술용어 : PCCI(예혼합 압축착화), Mixed fuel(혼합연료), Cool flame(냉염), Hot flame(열염)

1. 서 론

디젤엔진은 높은 열효율과 우수한 연비 성능 및 내구성 등의 장점을 가지고 있으므로 차량 및 산업 분야에서 광범위하게 이용되고 있다. 그러나 최근 보편화되고 있는 직접 분사식의 경우 실린더 내로 연료가 직접 분사되므로 분사된 연료 분무 주위에는 공간적으로 불균일한 공연비 분포가 발생되어 농후영역에서는 입자상 물질

(particulate material : P.M.)이 생성되며, 이론 공연비 영역에서는 질소산화물(NO_x)의 배출이 증가하는 현상이 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 따라서 점차 강화되고 있는 배기가스 규제에 대응하기 위하여 이러한 NO_x와 P.M. 배출물의 동시 저감을 이루기 위한 방안으로 다양한 연료를 사용해서 예혼합 압축착화를 시도하는 연구가 여러 기관에서 수행되고 있다.¹⁻⁴⁾

본 연구에서는 예혼합 압축착화를 구현하기 위하여 세탄가가 다른 혼합연료를 사용하여 예혼합 압축착화 시스템을 구축하여 기존의 직분

* 회원, 한양대학교 대학원

** 회원, 한양대학교 기계공학부

식 디젤엔진과의 연소특성 및 배기특성을 파악하였다. 이와 같은 시스템은 희박 예혼합기를 형성한 후 압축착화를 실시함으로써 희박 연소에 의한 NOx 생성 억제와 예혼합 연소에 의한 입자상 물질의 동시저감을 목표로 하고 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 예혼합 압축착화 엔진 시스템

본 실험에서는 Table 1과 같은 제원을 가진 상용 단기통 디젤엔진을 기본으로 Fig. 1과 같은 엔진 시스템을 제작하였다. Fig. 1과 같이 흡기관 내에 혼합연료를 분사하여 예혼합 압축착화를 실현시키기 위해 고압 인젝터를 설치하였고, 혼합연료의 미립화를 촉진시키기 위하여 흡기밸브와 고압 인젝터 사이에 가열기를 설치하였다. 한편 혼합연료를 공급하기 위해서 독립적으로 분사압력 조절이 가능한 고압펌프를 사용하였으며, 실린더헤드 중앙부에는 Kistler社의 압력 센서를 부착하여 연소실내 압력을 획득하였

으며, 캠축과 크랭크축에 엔코더를 설치하여 회전수와 분사시기를 조정하였고, 배기밸브에서 방출되는 배기가스 성분을 측정하였다.

엔진동력계는 Dauem社의 75kW출력의 DC 동력계로서 엔진제어 및 데이터 획득이 수행되며, 엔진의 부하는 동력계 제어 프로그램으로 조절된다. 또한 Motec社의 M4 ECU를 사용하여 혼합연료의 분사시기 및 분사량을 조절하였다.

2.2 실험 방법

본 실험에서는 시중에서 시판되고 있는 가솔린(비중 0.70~0.75)과 경유(비중 0.82~0.88)를 일정 비율로 혼합하기 위해서 1mg의 분해능을 가지고 있는 전자저울(TP200S, OHAUS)을 사용하여 혼합연료를 제조하였으며, 혼합비율은 가솔린과 경유 각각의 저위발열량(가솔린:45.3J/mg, 경유:43.6J/mg)을 기준으로 가솔린 100%에서부터 20%간격으로 경유를 혼합하여 제조하였다. 이러한 혼합연료를 사용하여 Table 2와 같이 예혼합 압축착화 엔진의 가장 큰 단점이라고 할 수 있는 운전영역의 한계를 고려하여 저속·저부하 영역에서 실험을 수행하였고, 냉각수 온도는 $80 \pm 1^\circ\text{C}$ 를 유지하였으며, 흡입공기온도는 80°C 로 고정하였다. 이러한 조건하에서 각각의 혼합연료를 100% 포트 분사하여 예혼합 압축착화 시킴으로써 연소특성 및 배기 특성을 분석하였다.

Table 1 Engine specifications

Engine class	ND130DI
Engine type	4stroke single diesel (direct injection)
Bore × Stroke	95mm × 95mm
Displacement volume	673cc
Compression ratio	19
Inlet valve open/close	BTDC 20° / 130°
Exhaust valve open/close	ATDC 132° / 20°

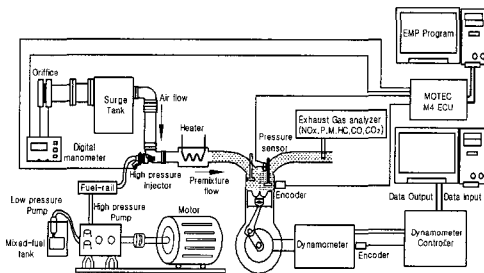


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

3. 실험 결과

3.1 예혼합 압축착화 엔진의 연소특성

무부하와 1/4부하 조건에서 가솔린 혼합비율

Table 2 Engine performance test conditions

Engine speed	1200 rpm
Air temperature	80°C
Load	Unload, 1/4 load
Mixed fuels	Gasoline: (0, 20, 40, 60, 80, 100) %

에 따른 압력과 열발생율을 나타낸 결과를 Fig. 2 와 Fig. 3에 나타내었다. 가솔린 혼합비율이 50% 보다 적은 경우에는 직접분사식 디젤엔진 보다 Pmax값은 높게 나타나며, 발생시기는 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 혼합비율이 50%를 넘는 경우에는 Pmax값이 직분식 디젤엔진보다 작은 값을 나타내고 있으며, 발생시기는 지각됨을 알 수 있다. 한편, 1/4부하조건인 경우에 가솔린 함유량이 60%보다 적은 경우에는 연소압력은 직접분사식 디젤엔진에 비해 증가하며, 가솔린 함유량이 많아질수록 연소압력은 점차 낮아지며 Pmax발생시기는 지각됨을 알 수 있다.

이러한 현상의 원인으로서는 혼합연료 분무특성의 결과에서 알 수 있듯이 비점이 높은 100% 디젤연료보다 가솔린이 혼합된 연료가 기화가 촉진되며, 분무각 또한 가솔린 비율이 증가할수록 작아지므로 연소에 유리한 예혼합기 형성이 원활하게 이루어진 결과라고 여겨진다. 한편, 가솔린 함유량이 많아질수록 공기와의 혼합율이

더 좋아질 것이라고 생각되지만, 50% 이상이 되면 분사되는 연료량이 많음에도 불구하고 점화원으로서의 역할을 하는 디젤연료의 함유량이 적어짐에 따라 착화지연기간이 길어져서 최고 압력 발생시기도 늦어지고 최고 연소압력도 저하된다. 1/4부하에서는 착화원 역할을 하는 디젤 연료의 양이 상대적으로 증가하므로, 가솔린 혼합비율이 조금 더 높은 영역까지 양호한 예혼합 연소를 얻을 수가 있음을 알 수 있다.

한편 열발생율을 살펴보면, 먼저 가솔린 100%를 제외한 나머지 경우에서 각각 1st 연소반응과, 2nd 연소반응으로 나누어 열발생이 이루어짐을 알 수 있다. 가솔린 함유율이 50% 미만인 경우에는 1st 연소반응 발생시기가 BTDC 20°로 거의 일정함을 알 수 있으며, 60% 이상인 경우에는 BTDC 16° 정도에서 발생됨을 알 수 있다. 이러한 1st 연소반응 에너지는 가솔린 함유량이 적어질수록 커짐을 알 수 있다. 한편 2nd 연소반응은 혼합연료중 가솔린 함유량이 많아질수록 지각됨과 동시에 디젤연소의 특징인, 급속연소와 확산연소의 경계가 점차 사라지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상의 원인으로서는 착화시기를 결정하는 디젤 연료량이 점진적으로 감소함에 따라서 착화 지연기간이 증가하여 결국 가솔린의 연소형태로 변화되는 것으로 판단된다. 1/4부하에서도 이와 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

한편, 이러한 연소현상을 좀더 명확히 규명하기 위해서 본 연구에서는 실린더직경, 행정, 압축비 등과 같은 제원을 갖는 가시화 엔진에서 400 pm, A/F=50인 경우에 화염 가시화를 수행하여 기존의 직접 분사식 디젤연소방식과 예혼합 압축착화 연소방식인 경우의 전체적인 연소패턴을 파악하여 비교하였다. Fig. 4의 화염가시화 결과에서 알 수 있듯이 직접분사식 디젤의 경우에는 각각의 분공에서 나오는 미립화된 연료입자들이 공기와 혼합되면서 이론공연비 영역에 해당하는 부분에서 밝은 화염이 발생되는 것을 볼 수 있다. 반면 예혼합 압축착화인 경우에는 전체적으로 희박연소를 수행하므로 고온의 밝은 영역이 적어짐

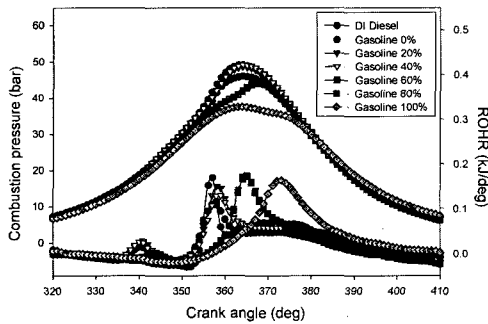


Fig. 2 Combustion pressure and ROHR at unload

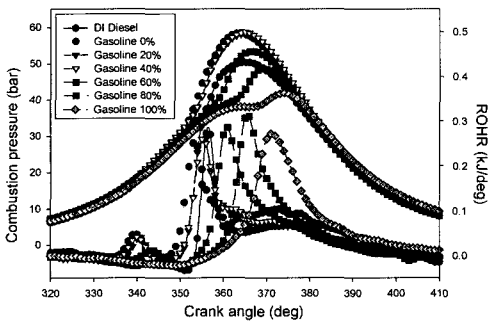


Fig. 3 Combustion pressure and ROHR at 1/4 load

DI						
	1.6°	2.67°	4.27°	8°	13.3°	24°
G 0%						
	7.2°	10.8°	14.4°	18°	21.6°	25.2°
G 20%						
	3.6°	7.2°	10.8°	14.4°	18°	21.7°
G 40%						
	3.6°	6°	8.4°	11°	13.4°	15.8°
G 60%						
	9.4°	11.6°	13.8°	16°	18.2°	20.4°
G 80%						
	11.6°	13.6°	15.6°	17.6°	19.6°	21.6°
G 100%						
	15°	16.8°	18.6°	20.4°	22.2°	24°

Fig. 4 Flame visualization of intake port injection type HCCI

을 알 수 있으며, 또한 가솔린 비율이 증가할수록 연소기간이 짧아지는 것을 알 수 있다.

한편 예혼합 압축착화 디젤엔진에서 공급된 연료의 착화특성을 알아보기 위해서 대표적으로 가솔린 혼합비율 20%인 혼합연료에 대하여 1200rpm 무부하와 1/4부하에서 흡입공기온도가 80℃와 130℃인 경우, 연료분사압력이 30bar와 70bar인 경우에 대해서 공급된 연료의 착화특성을 살펴보았다. Fig. 5는 무부하와 1/4부하에서 흡입공기온도와 연료분사압력 변화에 따른 압력곡선을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 흡입공기온도가 80℃인 경우 연료분사압력을 30bar에서 70bar로 증가시킨 경우 무부하에서 약 1~2°, 1/4부하에서는 약 2~3° 착화시기가 진각됨을 알 수 있으며, 흡입공기온도가 130℃로 높은 경우에는 분사압력 증가에 따른 착화시기는 변동이 거의 없이 일정함을 알 수 있다. 한편 동일 연료분사압력에서의 흡입공기온도에 대한 영향을 살펴보면 무부하인 경우 연료분사압력이 30bar일 때 흡입공기온도를 80℃에

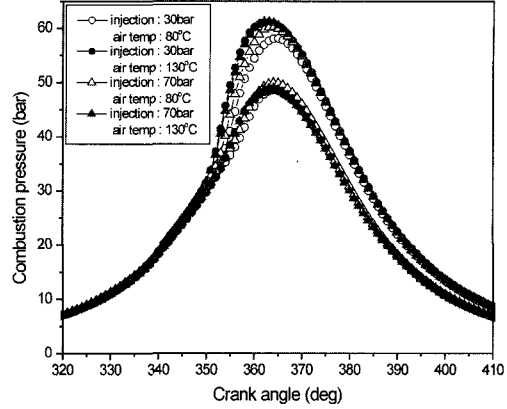
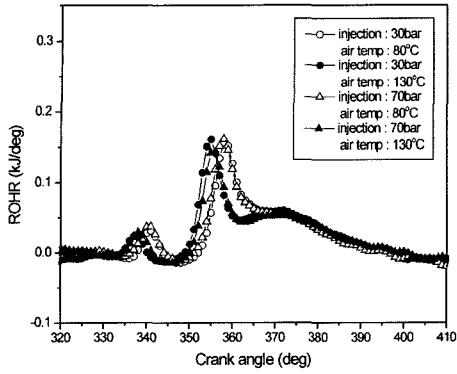
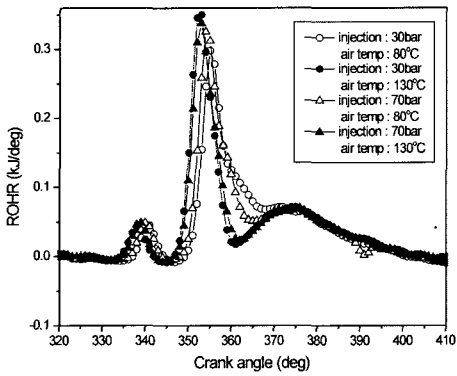


Fig. 5 Combustion pressure of gasoline 20% mixed fuel at unload and 1/4load

서 130℃로 증가시킨 경우 착화시기는 약 2~3° 진각되며, 1/4부하에서는 약 4~5° 진각됨을 알 수 있다. 반면, 연료분사압력이 70bar일 때 흡입공기온도를 80℃에서 130℃로 증가시킨 경우 무부하에서는 약 1~2° 진각되며, 1/4부하에서는 약 2~3° 진각됨을 알 수 있다. 이러한 착화 특성으로 살펴보면 흡입공기온도가 낮은 경우에는 낮은 분사압력의 범위에서 분사압력 증가의 영향을 받지만, 흡입공기온도가 높은 경우에는 분사압력의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 이러한 원인으로서는 착화원으로서의 역할은 혼합연료중의 디젤연료가 담당하므로 낮은 분사압력 범위 내에서 분사압력을 증가시키면(30→70bar) 혼합연료내의 디젤 연료의 점도가 높아서 충분히 미립화가 안되지만 연료액적의 크기는 작아질 것으로 생각된다. 따라서 흡입공기온도가 80℃인 경우에는 분사압력의 증가에 의해서 액적의 입경 감소에 의한 효과에 의해 착화시기가 약 1~2° 진각된 것으로 생각되며, 반면 흡입공기온도가 130℃로 높은 경우에는 연료액적의 증발속도가 80℃일 때보다 더 빨라져서 입경 감소에 의한 효과가 무시되는 것으로 생각된다. 한편 Fig. 6에 각각의 부하에서 열발생을 그래프를 나타내었다. 흡입공기 온도가 증가함에 따라서 1st연소와 2nd연소의 열발생 시기가 동시에 약 2~3° 정도 진각됨을 알 수 있으나, 반면 확산화염의 종료시



(a) 무부하



(b) 1/4부하

Fig. 6 ROHR in unloading and 1/4load

기는 거의 일정함을 알 수 있다. 이러한 원인으로 낮은 분사압력의 범위 내에서는 흡입공기온도의 증가에 따라서 압축말기에 연료입자의 증발 촉진에 의해 입자 주위의 가연 혼합기층의 생성시기가 빨라짐에 따라서 착화시기는 빨라지지만 연료분사압력은 상대적으로 낮기 때문에 연료 분무의 미립화 효과가 저감되었기 때문에 생각된다.

3.4 예혼합 압축착화 엔진의 배기특성

Fig. 7에서 볼 수 있듯이 예혼합 압축착화 엔진의 배기가스 분석 실험을 수행한 결과 NOx 발생량은 95% 이상 저감됨을 알 수 있으며, 혼합연료 중의 가솔린 혼합비율 40% 이상에서는 비슷한 NOx 배출 특성을 보이고 있다. 이러한 NOx 저감요인은 혼합연료를 공기와 예혼합 시켜 연소실 내 특정 부위에서 순간적인 고온의 열발생 대신

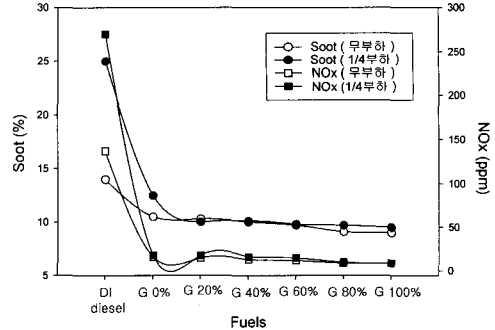


Fig. 7 Soot and NOx at each mixed fuels

연소실 벽면을 제외한 전체적으로 균일한 열발생으로 인한 낮은 연소온도의 유지 때문으로 생각된다. 이와 함께 Soot 발생량은 직분식 디젤엔진에 비하여 1/3 수준으로 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 열발생율과 화염가시화 결과에서 알 수 있듯이 가솔린 비율이 증가할수록 연소기간이 단축되기 때문으로 생각된다.

한편, Fig. 8에서 알 수 있듯이 CO와 HC 발생량은 각각의 부하조건에서 가솔린 혼합비율이 증가함에 따라서 전체적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 앞서 분무 가시화 결과에서 알 수 있듯이 전체적으로 큰 분무각으로 인하여 벽류량 생성이 증대되기 때문으로 생각되며, 또한 동일한 연소실내의 분위기 온도와 압력에 대해서 가솔린 함유량이 많아질수록 압축착화가 쉽게 이루어지지 않으므로, 연소반응에 참여하지 않거나 완전한 연소가 이루어지지 않은 연료비율이 증가함에 따른 것으로 생각된다. CO의 경우는 부하가 증가되면 배출이 억제되는 경향을

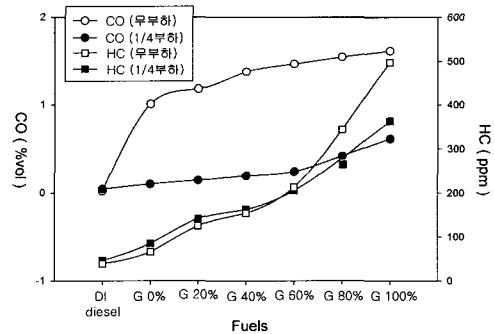


Fig. 8 CO and HC at each mixed fuels

보이고 있는데 이는 착화원으로 작동하는 디젤 연료의 양이 상대적으로 증가되어 연소를 촉진 시킨 결과라고 생각된다.

3.4 예혼합 압축착화 엔진의 성능특성

혼합연료를 사용한 예혼합 압축착화 엔진의 성능을 평가하기 위해서 혼합연료의 혼합비율 및 부하변동에 따른 배기온도 특성을 고찰하였다. Fig. 9는 배기가스 온도를 나타낸 그림이다. 무부하인 경우에는 직분식 디젤엔진보다 전체적으로 낮은 배기온도를 나타내고 있으며, 가솔린 혼합비율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 볼 수 있으며, 1/4부하인 경우에도 유사한 경향을 나타내고 있으며, 감소율이 무부하보다 크게 나타나고 있다. 이는 혼합연료중 가솔린 비율이 많아질수록 자발화 시기는 늦어지지만 비점이 낮은 가솔린 연료의 특성상 공기와의 혼합효율이 증가됨으로 인하여 연소실 전체에 균일한 혼합기 상태를 생성하기 때문에 연소온도가 낮아지기 때문으로 생각된다.

한편 직접 분사식 디젤엔진과 비교하여 예혼합 압축착화 디젤엔진의 연소변동에 대한 특성을 살펴보았다. 본 실험에서는 각각의 실험조건에서의 사이클당 연소최고압력을 이용하여 COV_{Pmax} 값을 구하여 살펴보았다. Fig. 10은 무부하와 1/4부하 조건에서의 혼합연료의 혼합비율 변화에 따른 COV_{Pmax} 를 나타낸 것이다. Fig. 10에

서 볼 수 있듯이 부하증가와 혼합연료의 혼합비율이 증가함에 따라서 P_{max} 연소변동이 증가함을 알 수 있다. 이러한 연소변동은 부하 또는 가솔린 혼합비율이 증가함에 따라 착화원으로서의 역할을 하는 디젤 연료량이 줄어들어 따라 연소 불안정성이 증가하기 때문으로 생각되며 이와 동시에 운전영역의 제한은 부하가 증가함에 따라서 공급되는 연료량이 상대적으로 증가하므로 공기와의 혼합효율이 저하되어 착화지연기간이 길어지기 때문으로 생각된다.

한편 흡기관 분사식 예혼합 압축착화 엔진의 연비특성을 살펴보기 위하여 A/F와 발열량 그리고 연료소비율을 측정하여 저부하(1/4부하) 영역에서의 측정결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 좌측은 각각의 연료에 해당하는 공연비를 나타낸 것이고, 우측은 분사되는 1회 연료량에 각각의 혼합연료에 해당하는 발열량을 구하여 계산한 값과 이러한 데이터를 기준으로 연료소비율을 나타낸 결과이다. 가솔린 혼합비율이 증가할수록 전체적으로 직접분사식 디젤엔진의 경우보다 연비가 악화되는 현상을 볼 수 있고, 적게는 약 1.2배 크게는 약 1.5배 이상 연비가 악화되는 경향을 볼 수 있다. 이러한 원인은 앞서 화염가시화 결과와 CO와 HC의 발생량에서도 예측할 수 있듯이 가솔린 혼합비율의 증가에 따라서 착화성 저하, 실화증가로 인하여 혼합연료를 이용하는 경우 동일한 토크를 발

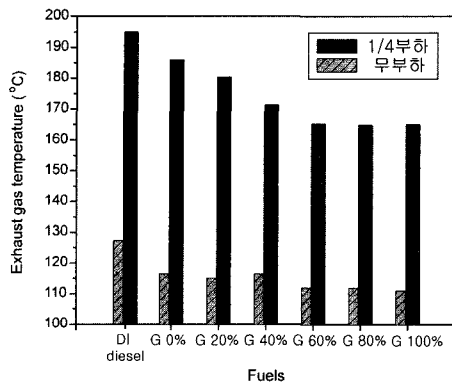


Fig. 9 Exhaust gas temperature at each mixed fuels

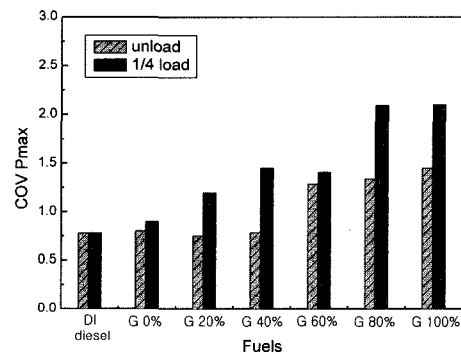


Fig. 10 COV_{Pmax} of DI Diesel and HCCI used mixed fuels at each loads

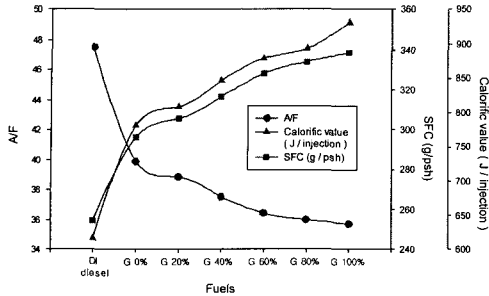


Fig. 11 A/F and SFC and Calorific value of DI Diesel and HCCI used mixed fuels at 1/4load

생시킴을 위하여 더 많은 양의 연료를 필요로 함을 알 수 있다.

4. 결론

1) 무부하에서는 가솔린 혼합비율이 50% 이하에서 P_{max} 가 직분식 디젤엔진보다 우수하였으며, 1/4부하에서는 60% 이하에서 P_{max} 가 증가하였으며, 가솔린 비율이 증가함에 따라 P_{max} 의 저하와 발생시기가 지연됨을 알 수 있다.

2) 열발생을 곡선에서 1st, 2nd 연소반응을 관측하였다. 무부하에서 가솔린 비율이 증가함에 따라 1st 연소반응은 적어지며, 발생시기는 가솔린 혼합비율 50% 이상에서 4° 정도 지각되었으며, 1/4부하에서는 거의 일정하였다. 한편, 2nd 연소반응은 가솔린 비율이 증가함에 따라 가솔린 엔진의 열발생을 형태로 변경되었다.

3) 흡입공기온도가 80°C로 낮은 경우에는 낮은 분사압력의 범위에서(30~70bar) 분사압력 증가의 영향을 받지만, 흡입공기온도가 130°C로 높은 경우에는 분사압력의 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

4) 혼합연료를 예혼합 압축착화 시킴으로써 NOx와 Soot는 동시저감 되었으며, 가솔린 혼합비율에 따른 NOx 배출특성은 거의 일정하였다. 가솔린 혼합비율이 증가함에 따라서 HC와 CO는 증가하였다.

5) 가솔린 혼합비율이 증가할수록 배기온도는 저감되고 연소변동은 증가하였으며, 저부하 영역에서의 연료소비율은 직분식 디젤엔진에 비해 가솔린 비율이 증가할수록 증가하였다.

후 기

본 연구는 청정 생산 기술 사업 및 BK21 지원에 의하여 수행된 연구결과로서, 관계기관에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) M. Christensen, A. Hultqvist, B. Johansson "Demonstrating the Multi Fuel Capability of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Variable Compression Ratio," SAE 1999-01-3679, 1999.
- 2) T. Kaimai, H. Tsunemoto, H. Ishitani, "Effects of Hybrid Fuel System with Diesel and Premixed DME /Methane Charge on Exhaust Emissions in a Small DI Diesel Engine," SAE 1999-01-1509, 1999.
- 3) 조진호, "균일 예혼합 압축착화 방식에 의한 디젤엔진의 연소와 배기," 자동차공학회지, 제20권 제5호, 1998.
- 4) 조진호, "Study about the Combustion of Premixed Lean Mixture with Compression Ignition," 자동차공학회지, 제20권 제6호, 1998.