

균질혼합압축점화기관의 배기가스재순환 특성에 관한 연구

한성빈[†], 김성모*

인덕대학, 현대자동차

(2009년 6월 30일 접수, 2009년 10월 1일 수정, 2009년 10월 1일 채택)

A Study on Exhaust Gas Recirculation of Homogeneous Charge Compression Ignition Engine

Sung Bin Han[†] and Sung Mo Kim*

[†]Department of Mechanical & Automotive Engineering, Induk University, Seoul, Korea

*Service Quality Information Team, Hyundai Motor Company, Seoul, Korea

(Received 30 June 2009, Revised 1 October 2009, Accepted 1 October 2009)

요 약

이 논문은 새로운 개념의 엔진으로 균질혼합압축점화기관(HCCI)에 대해서 이야기 하고 있다. HCCI 엔진은 디젤기관과 가솔린기관의 미래대체엔진으로 고려되고 있다. HCCI엔진은 부분부하에서 높은 지시열효율과 매우 낮은 질소산화물을 배출하는 잠재력 있는 엔진이다. 이 논문의 목적은 HCCI 엔진에서 의 배기가스재순환(EGR)의 효과를 분명히 하는데 있다. 이러한 연구목적을 위해서 4실린더 압축점화기관이 HCCI 기관으로 개조가 되었다. 이 작업은 일정한 회전속도에서 프로판과 부탄의 연료를 사용하였다.

주요어 : 균질혼합압축점화, 배기가스재순환, 프로판, 부탄

Abstract— This paper describes the homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine for a new concept. HCCI engines are being considered as a future alternative for diesel and gasoline engines. HCCI engines have the potential for high indicated thermal efficiency under part load and very low NOx emissions. The objective of this paper is to clear the effects of exhaust gas recirculation (EGR) rate on the HCCI. For this purpose, a 4-cylinder, compression ignition engine was converted into a HCCI engine. This work has been run with propane and butane fuels at a constant speed.

Key words : Homogeneous charge compression ignition (HCCI), Exhaust gas recirculation (EGR), Propane, Butane

1. 서 론

균질혼합압축점화기관 (HCCI : Homogeneous Charge Compression Ignition)의 개념은 스파크 점화기관의 장

점과 압축점화기관의 장점을 이용한 엔진이다.^[1]

미래의 자동차용 엔진 분야에 하이브리드전기자동차 등과 같이 HCCI 엔진을 내연기관 연소의 새로운 방법으로 채택을 하고 있다. HCCI 연소의 기본적인 개념은 스파크점화 및 압축점화 엔진의 결합이라고 할 수 있지만, 압축점화기관과 달리 자연발화가 가능한 균질한 공기-연료의 혼합기를 사용한다. 통상의 고압 압축점화기관의 분사 방식이 아닌 저압의 균일 혼합기를 연소시키는 분사방식을 이용하여 흡기관에 공급되는 방식이다.^[2,3]

또한 전통적인 가솔린 스파크 점화기관이 디젤 압축점화기관 보다 열효율이 낮은 이유는 압축비가 낮기 때문이다. HCCI 엔진은 압축비를 디젤 압축점화기관의 수준

[†]To whom correspondence should be addressed
Department of Mechanical & Automotive Engineering,
Induk University, San 76 Wolgye-dong, Nowon-gu,
Seoul 139-749, Korea.
Tel: +82-2-950-7545
E-mail: sungbinhan@induk.ac.kr

으로 높여 설계를 한다.^[4]

또한 공기와 연료의 혼합비는 가솔린기관에서 현실적으로 이루기 힘든 이론 공기연료비 보다 높은 초희박공기연료비를 채택이 가능함으로 배기가스 저감과 연료소비율이 경제적이다.^[5]

또한 HCCI 연소는 스파크플러그가 없고, 연소가 동시에 여러 곳에서 시작되기 때문에 연소의 사이클간 변동이 매우 적은 동시에 균일한 상태에서 연소가 진행된다. 그러므로 불안정 화염전파를 피할 수 있다.^[6]

HCCI의 장점은 질소산화물(NOx), 분진물(PM, particulate matters) 배출이 적다는 점과 부분부하에서 효율이 높다는 점을 들 수 있다. 이러한 NOx 저감은 연소실 내에 고온영역이 존재하지 않기 때문이다. HCCI 엔진은 고압축비와 높은 열발생율로 작동되기 때문에 압축점 화기관에 해당되는 높은 효율을 가질 수 있고, 희박한 공기연료비를 달성할 수 있기 때문에 후처리 장치 없이도 매우 낮은 질소산화물(NOx), 분진물(PM, particulate matter)을 배출한다. HCCI 연소반응이 하나의 스파크에 의해서 시작되어 지는 것이 아니기 때문에, 전통적인 화염면의 물리적 현상에 의하여 제한되는 것이 아니며, 일반적으로 HCCI 연소는 편중된 고온 영역이나 화염면이 없다.^[7,8]

하지만 HCCI는 한정된 범위 내에서 운전이 가능하며, HC, CO의 배출이 상대적으로 크다는 점의 단점을 가지고 있다.

HCCI 연구로는 UC Berkeley 가 선도적인 역할을 수행하였다. 그들은 당량비와 EGR의 조합에 관한 연구를 수행하였다.

향후 디젤 배기 규제가 매우 엄격히 강화되기 때문에 HCCI 연소는 디젤엔진 응용 분야에서 높은 관심을 받고 있다. 한편, HCCI 연소는 스파크점화 엔진의 저부하 운전에서도 NOx 저감효과가 높은 것으로 알려져 있다. 하지만, HCCI 전용 연료 또는 첨가제의 개발이 필요하다.

HCCI 연소의 단점은 출력의 제약을 받고 있다는 것이다. 일반적으로 희박 공연비 또는 대량의 EGR(Exhaust Gas Recirculation)을 사용한 경우 안정적인 HCCI 연소를 구현할 수 있다. 하지만 공연비가 이론 당량비에 근접할수록 연소안정성의 감소, 열발생율의 증가나 노크와 같은 연소압 진동이 발생할 뿐만 아니라 배기특성의 장점이 감소한다.

HCCI 기관의 다른 큰 단점은 HC와 CO의 배출량이 증가한다. HC 및 CO 배출의 한 원인은 HCCI 운전을 위하여 필요한 EGR율을 증가시켜 실린더 내의 온도가 낮아지기 때문이다. 한편, 연소가스의 온도가 감소하면 실린더 내의 후연소산화율이 감소할 뿐만 아니라 배기가스 중의 HC와 CO가 증가한다는 사실은 잘 알려져

있다.^[9]

또한 HCCI 연소의 주요 과제 중의 하나는 연소시기 조절이다. 스파크점화 또는 디젤엔진의 경우와 달리 연소시작시기를 조절하는 직접적 방법은 현재 이용가능하지 않다. 대신, 연소시작 시기는 공기연료 혼합기의 자발화를 이용하여 정립할 수 있다.

본 연구의 목적은 EGR율이 HCCI 연소과정에 얼마나 많은 영향을 미치는가에 있다. 또한 EGR율에 따라 배기가스 저감의 효과와 고효율의 향상과 각종 성능 특성을 면밀히 파악하고자 한다. 이러한 데이터는 HCCI 엔진 개발의 귀중한 자료로 사용될 것으로 생각이 든다.

2. 실험장치 및 실험방법

2-1. 실험장치

실험에 사용된 기관은 4 실린더 직접분사식 디젤기관을 실험 운전조건에 맞게 개조를 하였다. 실험장치의 개략도와 사진촬영을 Fig 1과 Fig 2에 나타내었다. 실험기관의 제원을 Table 1에 제시하였다. 원활한 균질혼합기를 얻기 위하여 예열장치를 이용하였다. 기관에 가해지는 부하의 조절과 측정을 위해 동력계를 사용하였으며, 흡기관, 배기관, 냉각수, 엔진오일 등 각 부분의 온도를 측정하기 위해 열전대를 삽입하였다. 압력값을 위하여 연료인젝터 위치에 각 실린더 마다 압력센서를 삽입하였다.

2-2. 실험방법

데이터 측정을 위하여, 크랭크 각은 크랭크 각 엔코더를 이용하여 측정했으며, 실린더 내의 압력은 압력센서를 이용하여 각 실린더의 압력채취를 하여 사이클을 평균 계산하였다. 채취된 압력값을 이용하여 연소율, 열발생율, 평균유�효압력 등을 계산하였다. 또한 흡입공기유

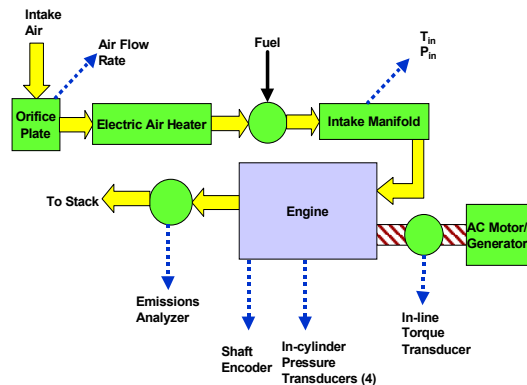


Fig. 1. Schematic diagram of experimental engine.

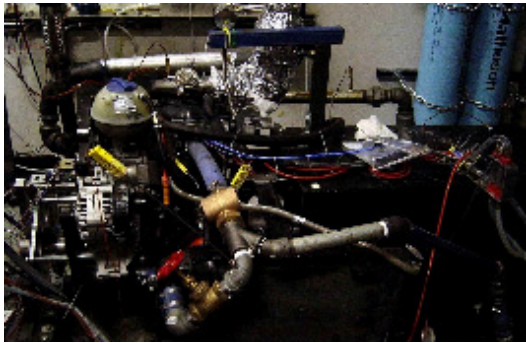


Fig. 2. Photo of experimental setup.

Table 1. Engine specification

Items	Specifications
Type	4 Cylinder Water-Cooled
Displacement	1.896 L
Bore × Stoke	79.5 × 95.5 mm
Connecting Rod Length	144.0 mm
Compression Ratio	18.8 : 1
Piston Geometry	Bowl
Engine Speed	1800 rpm
Firing Order	1-3-4-2

Table 2. Combustion properties of selected fuels

Items	Butane	Propane
Formula	C ₄ H ₁₀	C ₃ H ₈
Boiling point, K	93	231
Lower heat value, MJ/kg	45.84	46.40
Spontaneous ignition temperature, K	704	831
Adiabatic flame temperature, K	2256	2250
Specific gravity	0.58	0.51

량과 연료유량을 측정을 하였고, 또한 배기가스 측정장치를 이용하여 미연의 HC, CO, NOx 등을 측정하였다.

일반적으로 EGR 장치는 기관의 배출가스의 일부분을 흡기관으로 재순환시킴으로 NOx 배출물을 저감시키기 위한 장치이다. 재순환량은 배기관과흡기관 사이에 설치된 니들밸브를 통하여 재순환량을 조절할 수 있다.

EGR 장치는 기관의 배출가스의 일부분을 흡기관으로 재순환시킴으로 연소가스의 온도를 낮춤으로 NOx 배출물을 저감시킬 수 있는 장치이다. 재 순환량은 배기관과

Table 3. Monthly component ratio of methane and butane in Korea

Month	component ratio, %		Month	component ratio, %	
	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀		C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
1	30	70	7	0	100
2	30	70	8	0	100
3	20	80	9	20	80
4	10	90	10	20	80
5	0	100	11	25	75
6	0	100	12	30	70

흡기관 사이에 설치된 니들밸브를 통하여 재순환량을 조절할 수 있다. EGR율은 체제에 대해서 0~40%로 변화를 시켰다. 흡입온도는 115℃로 일정하게 했으며, 기관 회전수는 1800 rpm에서 수행했다.

2-3. 사용연료

저탄소 녹색성장이 화두로 떠오르고 있는 가운데 LPG (Liquefied Petroleum Gas)는 온실가스 감축을 위한 매우 매력적인 대안이라는 평가가 나오고 있다. 특히 LPG는 현재 전 세계적으로 확보돼 있는 인프라를 이용할 경우, 즉시 기후변화에 대응할 수 있는 효율적인 에너지로 평가되고 있다. 더구나 LPG의 경쟁 연료인 휘발유, 경유 등에 비해 이산화탄소 등에 대한 최근 분석 결과에서는 온실가스 배출량이 가장 적은 에너지로 나타나 한국이 추진하고 있는 저탄소 녹색성장에 부합하는 효율적인 청정에너지원으로 꼽히고 있다.

LPG는 생산부터 소비자에게까지 이르는 전 유통 단계에서 발생하는 총 이산화탄소 배출량이 경유의 82%, 휘발유의 84%에 불과한 것으로 확인됐다. 또한 자동차 연료 등 수송 부문 에너지원에서도 LPG의 온실가스 배출량이 경유와 휘발유보다 각각 16%와 12%씩 적은 것으로 나타났다.

LPG는 원유의 채굴, 정제과정에서 생산되는 기체상의 탄화수소를 액화시킨 혼합물로써, 프로판(Propane)제품과 부탄(Butane)제품으로 구분하여 사용된다. 프로판 제품은 프로판(C₃H₈)이 주성분이며, 소량의 메탄, 에탄, 부탄 등이 혼합되어 있다. 부탄제품은 노말부탄(n-C₄H₁₀), 이소부탄(i-C₄H₁₀) 등 부탄성분이 대부분을 차지한다.^[10]

Table 2는 부탄과 프로판의 특성을 나타낸 도표이고, Table 3은 한국에서 사용하고 있는 LPG 연료 조성비율을 달별로 나타낸 것이다. 일반적으로 국내의 LPG 연료로써 하절기에는 100%의 부탄을 사용하고, 동절기에는 지역에 따라 약간의 차이가 있지만, 70%의 부탄과 30%

의 프로판을 혼합하여 사용한다. 하지만, 북미와 유럽에서는 LPG 연료는 일반적으로 100%의 프로판을 의미한다. 본 연구에서는 동절기와 하절기에 따라 구분하지 않고, 100% 프로판과 100% 부탄을 연료 대상으로 삼았다. 또한 공급되는 연료량은 1분당 12리터로 고정 시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig 3은 흡입온도를 115°C로 일정 하에서, EGR율에 대하여 프로판과 부탄을 연료로 한 경우의 기관출력을 비교한 실험 결과이다. 그림에서 EGR 증가에 대해서 부탄 연료의 출력이 약20% 증가의 값을 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 비록 저위발열량은 부탄이 작지만 비중이 크기 때문에 동일량(실험에서 1분당 12L의 부탄과 프로판이 공급된다)의 체적으로 부탄과 프로판을 공급한 경우, 부탄이 더 많은 질량의 연료가 공급한 결과가 되기 때문이다. 즉, 질량으로 환산하면 부탄이 6.96 kg, 프로판이 6.12 kg 공급하게 된다

Fig 4은 지시연료소비율(ISFC: Indicated Specific Fuel Consumption)을 EGR변화에 대해서 각 연료와 흡입온도 변화로 나타낸 실험 결과이다. 통상적으로 ISFC는 출력 곡선과 반비례의 경향을 나타낸다. 여기서도 출력곡선과 지시연료소비율과의 관계는 EGR 증가에 대해서 출력과 반비례관계를 나타내고 있다. EGR율을 높임에 따라 최고연소온도를 감소시킴에 따라 약간의 출력의 증가를 가져왔고, 이러한 출력증가는 ISFC의 감소로 이어지는 효과를 보이고 있다.

Fig 5는 지시효율(indicated efficiency)을 나타낸 실험 결과이다. 일반적으로 지시효율은 지시연료소비율과 저위발열량에 반비례의 관계가 있다. 전반적인 모든 연료와 흡입온도와 EGR 변화에 대해서 지시효율은 25~35%를 나타내고 있으며, 특히 비중량이 큰 부탄이 흡기온도 115°C와 130°C모두에서 프로판 보다 지시효율이 큰 것으로 나타났다. HCCI엔진은 잔류가스의 양이 많지 않기 때문에 희박 혼합기 또는 대량의 EGR을 적용해도 지시효율은 감소되지 않고 있다. HCCI 연소는 공기, 연료, 그리고 재순환 배기가스의 혼합기의 자연발화 전에 압축 시킴으로써 얻을 수 있다. 일반적으로 HCCI 연소는 분포가 잘 되어 있으며 상대적으로 급속히 진행되는 저온 연소의 효과도 볼 수 있었다.

Fig 6과 Fig 7은 실린더간과 프로판과 부탄연료에 대해서, EGR율 0~40%로 변화시켰을 경우의 연소시작점(SOC: Start of Combustion)을 크랭크 각으로 나타낸 실험 결과이다. 여기서 SOC는 최고 열발생율 50%에 해당하는 크랭크 각을 의미한다. 흡입온도를 115°C로 일정하게 했을 때, SOC는 EGR율 증가에 대해 점차적으로 늦은 연

소를 보이고 있다. EGR율이 증가됨에 따라 SOC가 늦게 나타난다는 것은 연소구간이 증가된다는 것을 의미하게

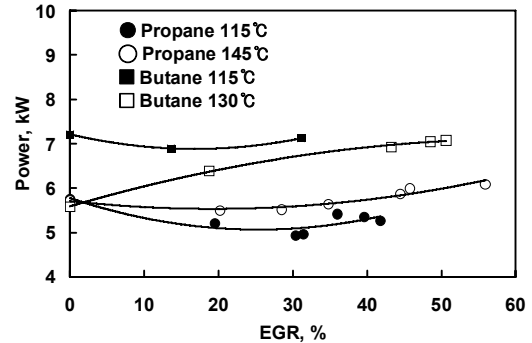


Fig. 3. Engine power vs. EGR rate for different fuels and inlet temperatures.

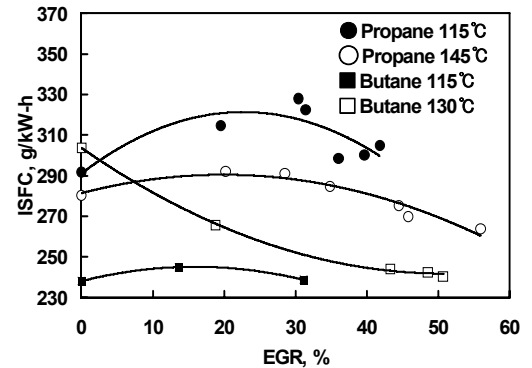


Fig. 4. Indicated specific fuel consumption vs.. EGR rate for different fuels and inlet temperatures.

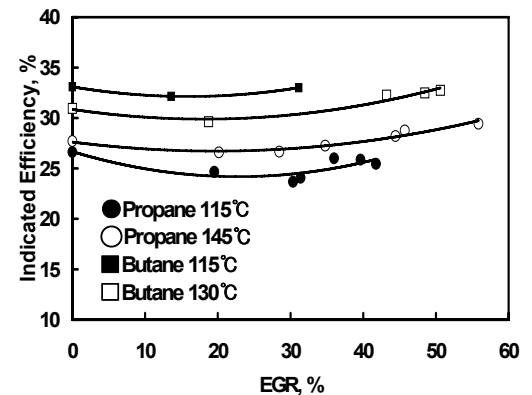


Fig. 5. Indicated efficiency vs.. EGR rate for different fuels and inlet temperatures.

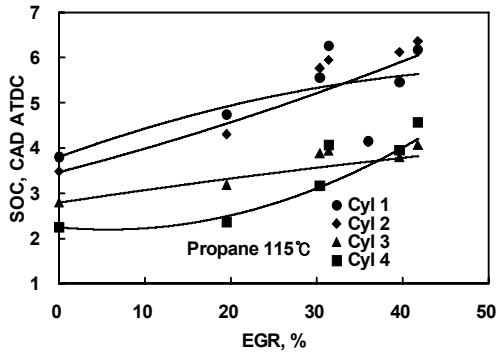


Fig. 6. Start of combustion vs. EGR rate for different cylinder at inlet temperature of 115°C.

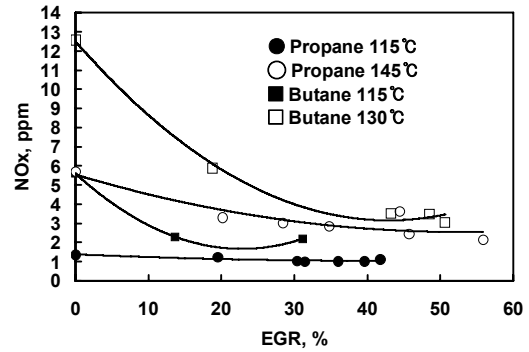


Fig. 8. Nitric oxide emissions vs. EGR rate for different fuels.

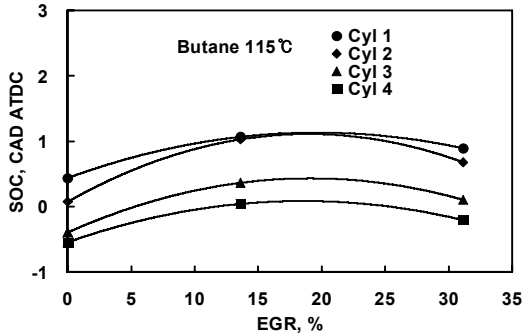


Fig. 7. Start of combustion vs. EGR rate for different cylinder at inlet temperature of 115°C.

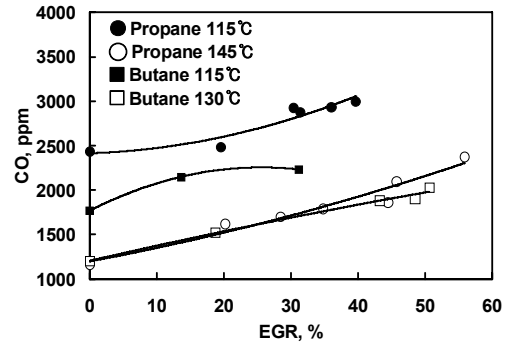


Fig. 9. CO emissions vs. EGR rate for different fuels.

될 것이다. 또한 프로판의 경우가 부탄 보다 SOC가 일찍 나타남을 알 수 있고, 이는 바로 출력증가와 지시연료소비율감소와 지시효율 증가로 나타남을 알 수 있다.

Fig 8은 HCCI엔진에서 부탄과 프로판을 연료로 사용한 경우 EGR 증가에 대한 NOx 배출량을 흡기온도 115°C, 130°C, 145°C에서 나타낸 선도이다. 질소는 잘 산화되지 않지만, 고온 고압 및 스파크 점화기관 등에서 특히 산화하여 질소산화물을 발생시킨다. 특히 연소온도가 높은 경우 질소산화물이 많이 발생한다. 또한 질소산화물은 이론혼합비 부근에서 최대값을 나타내며, 이론혼합비 보다 농후하거나 희박한 경우에 질소산화물의 발생률은 낮아진다. 특히 EGR장치를 사용하면 연소온도를 낮추는 효과가 있기 때문에 질소산화물을 저감시킬 수 있다. HCCI엔진은 스파크 플러그 없이 압축에 의한 자발화 연소를 하는 기관이므로 NOx 배출량은 가솔린을 사용하는 스파크 점화기관의 배출량에 비해서 획기적인 저감이 있는 것을 볼 수 있다. LPG 연료인 프로판과 부탄인 경우 EGR 0%에서 NOx는 1~6 ppm의 아주 미량 배출되고 있으며, EGR 증가에 따라 NOx는 더욱 저감되는

효과가 나타나고 있는 것을 알 수 있다. HCCI 엔진은 스파크 점화 엔진 대비 NOx 저감효과가 미미하다고 부정적인 견해도 생각해 볼 수 있다.

Fig 9는 부탄과 프로판을 사용한 경우, EGR 변화에 대한 CO를 각각 나타낸 선도이다. 그림에서 CO 배출량은 흡기온도가 높은 경우에 CO배출량이 감소가 확실하고, EGR율이 높은 경우 연소온도의 저감효과가 있기 때문에 CO의 발생량은 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 CO배출량은 공기량이 충분한 경우 낮고, 공기량이 부족한 진한 공기연료비에서 CO배출량이 많은 것과도 일치하는 결과이다. 또한 CO는 저온일 때 농후한 혼합비를 공급하므로 CO는 증가한다. 또한 흡기온도 115°C에서 EGR 0%에서 CO배출량은 프로판이 부탄에 비해 약 35% 많이 배출되고, 흡기온도 115°C EGR 30% 근방에서 CO 배출량은 프로판이 부탄에 비해 약 30% 배출량이 많다.

Fig 10은 부탄과 프로판을 사용한 경우, EGR 변화에 대한 HC를 나타낸 선도이다. HC는 이론혼합비 보다 희박한 경우에 연소의 불안정으로 증가한다. HC는 미연의 HC를 발생시킬 수 있는 불안정 연소가 되면 많이 발

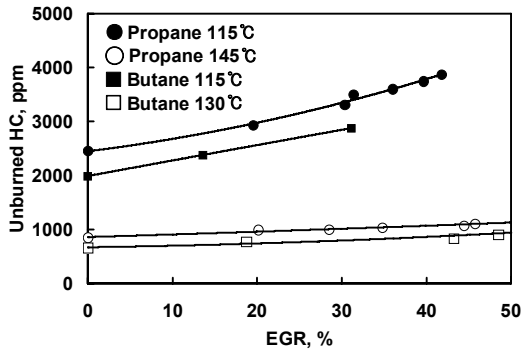


Fig. 10. Unburned HC emissions vs. EGR rate for different fuels.

생한다. 통상의 가솔린을 사용하는 스파크 점화기관의 HC 배출량에 비해 상대적으로 높은 값을 보이고 있다는 것은 불안정성 때문인 것으로 알려져 있다. 또한 EGR 증가에 대해서 HC 배출량은 더욱 증가하고 있다. 그러므로 배기가스 저감 측면에서는 EGR을 사용한 HCCI엔진은 NOx의 저감의 효과는 극대화시킬 수 있지만, CO와 HC는 오히려 기존의 스파크 점화기관에 비하여 증가하는 단점을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 HCCI엔진의 연료로 프로판을 사용하는 것 보다 부탄을 사용한 것이 비교적 CO와 HC를 줄일 수 있는 효과가 있다. 또한 흡기온도 115°C에서 EGR 0%에서 HC배출량은 프로판이 부탄에 비해 약 20% 많이 배출되고, 115°C에서 EGR 30% 근방에서 HC 배출량은 프로판이 부탄에 비해 약 20% 배출량이 많다.

4. 결 론

압축점화 기관을 HCCI 엔진으로 개조를 하였고, 연료는 프로판과 부탄을 사용하여, EGR율의 효과에 대한 실험연구 결과는 다음과 같다.

- (1) HCCI 기관은 높은 공연비를 얻을 수 있고, 또한 EGR을 사용함으로써 높은 희박화 상태를 얻을 수 있다. 하지만, 만일 혼합기가 매우 농후한 경우 연소율이 지나치게 빨라져서 노킹과 같은 문제가 발생할 수 있을 것으로 생각된다.
- (2) HCCI 전용 연료의 개발 및 연소시기 제어기술의 발전을 통하여 디젤과 같은 공연비 및 출력증대가 기대된다. 하지만 저부하에서는 HCCI 연소를 이용하여 연비 및 배출물 저감효과를 얻고 고부하에서는 스파크점화 또는 전통적인 디젤연소를 이용하여 출력문제를 해결하는 방법이 좋을 듯하다.

(3) SOC는 EGR를 증가에 대해 점차적으로 낮은 연소를 보이고 있다. 또한 프로판의 경우가 부탄 보다 SOC가 일찍 나타남을 알 수 있고, 이는 바로 IMEP와 출력으로 나타난다.

(4) HCCI엔진은 NOx 배출량 저감에 탁월한 효과가 있다. 하지만 CO와 HC 배출량에 있어서는 기존의 스파크 점화기관 보다 HCCI엔진이 배출량이 많은 단점을 가지고 있다. 또한 EGR 증가에 대해서 CO, HC 배출량은 더욱 증가하고 있다.

참고문헌

1. Au, M. Y., Girard, J. W., Dibble, R., Flowers, D., Aceves, S. M., Frias, J. M., Smith, R., Seibel, C. and Maas, U., 2001, "1.9-Liter Four-Cylinder HCCI Engine Operation with Exhaust Gas Recirculation," SAE paper 2001-01-1894.
2. Flowers, D., Aceves, S., Smith, R., Torres, J., Girard, J. and Dibble, R., "HCCI In a CFR Engine: Experiments and Detailed Kinetic Modeling," SAE Paper 2000-01-0328.
3. Stanglmaier, R. H. and Roberts, C. E., 1999, "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Applications," SAE Paper 1999-01-3682.
4. Christensen, M. and Johansson, B., 1999, "Homogeneous Charge Compression Ignition with Water Injection," SAE Paper 1999-01-0182.
5. Campbell, S., Lin, S., Jansons, M. and Rhee, K. T., 1999, "In-cylinder Liquid Fuel Layers, Cause of Unburned Hydrocarbon and Deposit Formation in SI Engines?," SAE paper 1999 -01-3579.
6. Christensen, M., Johansson, B., Amnes, P. and Mauss, F., 1998, "Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition," SAE paper 98787.
7. Brown, A. G., Stone, C. R. and Beckwith P., 1996, "Cycle-by-Cycle Variation in Spark Ignition Engine Combustion - Part I: Flame Speed and Combustion Measurements and a Simplified Turbulent Combustion Model," SAE Paper 960612.
8. Morimoto, S., Kawabata, Y., Sakurai, T. and Amano, T., 2001, "Operating Characteristics of a Natural Gas-fired HCCI Engine," SAE paper 2001-01-1034.
9. Kerns, J. M. and Surnilla, G., 2006, "Fuel Assisted Idle Speed Control for Lean Burn Gasoline Engines", SAE Paper 2006-32-0009.
10. Korea LPG association : <http://www.klpg.or.kr/>