

< 기술논문 >

균질혼합압축점화기관에서 프로판과 부탄연료가 기관성능에 미치는 영향

최경호* · 김지문** · 한성빈*
(2004년 7월 21일 접수, 2005년 1월 22일 심사완료)

Influence of Propane and Butane on Engine Performance in a Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI) Engine

Gyeong Ho Choi, Ji Moon Kim and Sung Bin Han

Key Words: Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI, 균질혼합압축점화), Exhaust Gas Recirculation(배기가스재순환), CO(일산화탄소), NOx(질소산화물), HC(탄화수소), Propane(프로판), Butane(부탄)

Abstract

This paper describes the engine performance of a Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI) engine according to Exhaust Gas Recirculation(EGR), cylinder-to-cylinder, fuel of propane and butane. HCCI engines are being considered as a future alternative for diesel and gasoline engines. HCCI engines have the potential for high efficiency, very low NOx emissions and very low particulate matter(PM). On experimental work, we have done an evaluation of operating conditions in a 4-cylinder compression engine. The engine has been run with propane and butane fuels at a constant speed of 1800rpm. This work is intended to investigate the HCCI operation of the engine in this configuration that has been modified from the base diesel engine. The performance and emissions of the engine are presented. In this paper, the start of combustion(SOC) is defined as the 50% point of the peak rate of heat release. SOC is delayed slightly with increasing EGR. As expected, NOx emissions were very low for all EGR range and unburned HC and CO emission levels were high. CO and HC emissions are lower with using propane than butane as fuels of HCCI engines.

1. 서 론

HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition) 엔진의 개념은 스파크 점화 기관과 압축점화기관의 결합이라고 할 수 있다. 하지만, 압축점화기관과 달리 자연발화가 가능한 가스 혼합기를 사용하며, 균일 혼합기를 연소시키기 위해서 비교적

낮은 분사방식을 이용하여 흡기관에 공급되어진다. 또한 연료에 비해 공기량이 많은 높은 공연비를 사용함으로써 높은 희박화 상태를 얻을 수 있다. HCCI 연소는 동시에 거의 균일한 상태에서 연소되므로 불안정 화염전파를 피할 수 있다.^(1,2)

HCCI의 장점은 질소산화물(NOx), 분진물(PM, particulate matter) 배출이 적다는 점과 부분부하에서 효율이 높다는 점을 들 수 있다. 하지만 HCCI는 한정된 범위 내에서 운전이 가능하고, 미연탄화수소(HC), CO의 배출이 상대적으로 크다는 점의 단점을 가지고 있다.^(3,4) 또 다른 HCCI 단점은 출력의 제약을 받고 있다는 것이다. 일반적으로

† 책임저자, 회원, 인덕대학 컴퓨터응용기계계열

E-mail : sungbinhan@induk.ac.kr

TEL : (02)950-7545 FAX : (02)950-7559

* 회원, 계명대학교 기계·자동차공학부

** 회원, 명지전문대학 산업시스템 설계과

희박 공연비 또는 대량의 EGR을 사용한 경우 안정적인 HCCI 연소를 구현할 수 있다. 하지만 공연비가 이론 당량비에 근접할수록 EGR 없이 연소안정성의 감소, 열발생율의 증가나 노크와 같은 연소압 진동이 발생할 뿐만 아니라 배기특성의 장점이 감소한다. 저부하에서는 HCCI 연소를 이용하여 연비 및 배출물 저감효과를 얻고 고부하에서는 스파크점화 또는 전통적인 디젤연소를 이용하여 출력문제를 해결하는 방법이 고려되고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

HCCI이 문제점을 극복하기 위해서는, HCCI 전용엔진의 개발이 가장 바람직하지만, 현재로는 디젤기관을 개조하여 실험적 연구를 통하여 HCCI연소가 가능하다. 또한 HCCI엔진은 가스연료를 사용하므로, LPG 차량 연구에도 많은 기여를 할 것으로 생각이 든다.^(8,9)

본 연구의 목표는 EGR를 변화, 실린더 간 (cylinder-to-cylinder) 변동 등이 프로판과 부탄 연료를 사용한 HCCI엔진 연소에 어떠한 영향을 미치는가를 실험을 통하여 면밀히 파악하는데 있다.

2. 실험장치 및 실험 방법

실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타냈고, Fig. 2는 실험엔진 주위의 사진촬영이다. 실험기관의 대략적인 제원을 Table 1에 제시했다.

실험에 사용된 기관은 4-실린더 디젤기관을 실험 운전조건에 맞게 개조를 하였고, 원활한 균질한 흡기를 얻기 위하여 18kW의 예열장치를 이용하였다. 예열에 필요한 에너지는 효율계산에 포함시키지 않았다. 기관에 가해지는 부하의 조절과 측정을 위해 30kW 동력계를 사용하였으며, 흡기관, 배기관, 냉각수, 엔진 오일 등 각 부분의 온도를 측정하기 위해 열전대를 삽입하였다. 압력 측정을 위하여 연료 인젝터를 소거하고 그 위치에 각 실린더 마다 압력센서를 삽입하였다.

실린더 내의 압력은 압력센서를 이용하여 각 실린더의 압력채취를 했으며, 압력값은 0.1도 단위로 채취를 했으며, 160 사이클을 평균 계산하였다. 채취된 압력값을 이용하여 연소율, 열발생

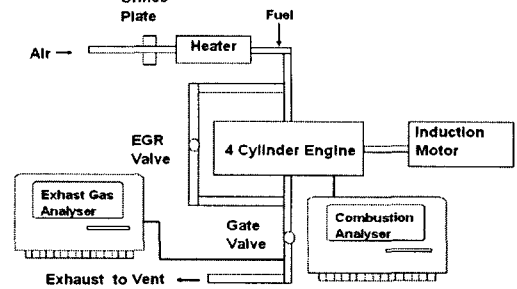


Fig. 1 Schematic diagram of experimental engine

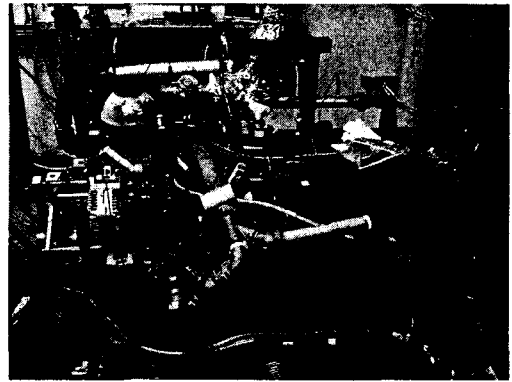


Fig. 2 Photo of experimental setup

Table 1 Engine specification

Items	Specifications
Displacement	1.896 L
Bore × Stroke	79.5 × 95.5 mm
Connecting Rod Length	144.0 mm
Compression Ratio	18.8 : 1
Piston Geometry	Bowl
Firing Order	1-3-4-2
Intake Valve Open	16 CAD ATDC
Intake Valve Close	25 CAD ABDC
Exhaust Valve Open	28 CAD BBDC
Exhaust Valve Close	19 CAD BTDC

IMEP(Indicated Mean Effective Pressure), PMEP(Pumping Mean Effective Pressure) 등을 계산하였다. 흡입공기유량은 나이프에지오리피스판(knife-edge orifice plate)를 이용한 유량계를 이용하였고,

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

연료유량은 질량유량조절기로 측정을 하였다. 또한 CO, HC, NO_x의 배기가스를 측정하였다.

EGR 장치는 기관의 배출가스의 일부분을 흡기관으로 재순환시킴으로 NO_x 배출물을 저감시키기 위한 장치이다. 재 순환량은 배기관과 흡기관 사이에 설치된 니들밸브를 통하여 재순환량을 조절할 수 있다. EGR률은 체적에 대해서 0~40%로 변화를 시켰다. 배기가스로부터 배출된 잔류가스는 통상의 EGR 라인을 통해서 흡입이 이루어진다.

연료는 LPG 연료의 대부분을 차지하고 있는 부탄과 프로판(Table 2 참조)을 대상으로 하였고, 흡입온도는 115℃로 일정하게 했으며, 연료량은 12 SLPM(Standard Liters Per Minute)으로 고정 시켰다. 기관회전수는 1800rpm에서 수행했다.

3. 실험결과 및 고찰

통상적으로 국내의 LPG 연료로서 동절기에는 100%의 부탄을 사용하고, 하절기에는 70%의 부탄과 30%의 프로판을 혼합하여 사용한다. 하지만, 북미와 유럽에서는 LPG 연료는 통상적으로 100%의 프로판을 의미한다. 하지만 본 연구에서는 동절기와 하절기에 따라 성분이 달라지는 LPG연료를 사용하지 않았고, 연료의 특성에 따라 기관에 미치는 영향 등을 고려하여 100% 프로판과 100% 부탄을 연료 대상으로 삼았다.

Fig. 3은 흡입온도를 115℃로 일정 하에서, EGR 변화에 대하여 프로판(Propane, C₃H₈)과 부탄(Butane, C₄H₁₀)을 연료로 한 경우의 기관출력

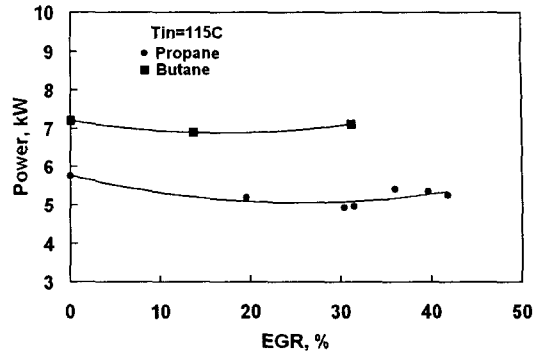


Fig. 3 Power versus EGR rate for propane and butane at intake temperature of 115℃

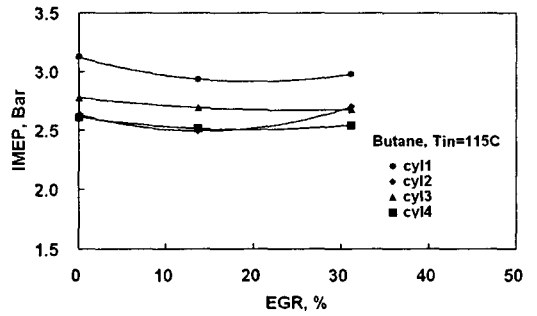
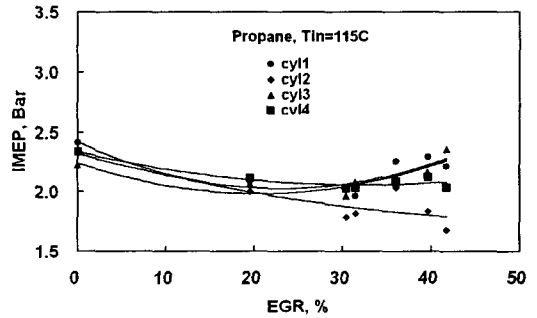


Fig. 4 IMEP versus EGR rate for different cylinders and fuels at 115℃

을 비교한 실험 결과이다. 부탄은 프로판에 비해 발열량이 크므로, 그림에서 EGR 증가에 대해서 출력이 약 25% 증가의 값을 유지하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 일정 흡입온도 하에서 EGR

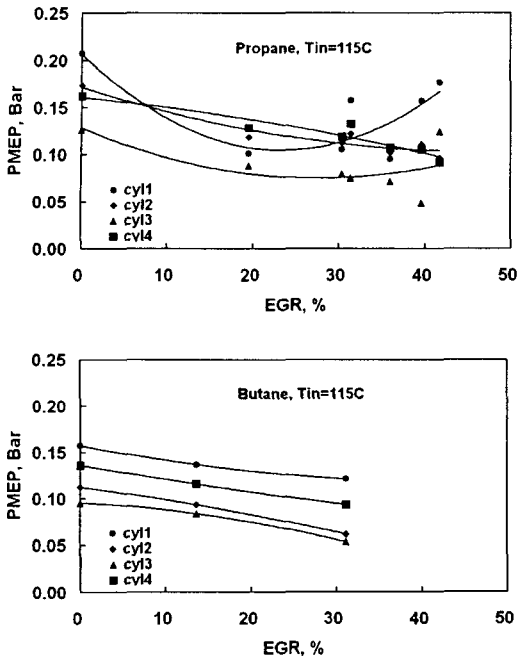


Fig. 5 PMEP versus EGR rate for different cylinders and fuel at 115°C

을에 대한 Indicated Mean Effective Pressure (IMEP)와 Pumping Mean Effective Pressure (PMEP)를 프로판과 부탄에 대해서, 실린더간 (cylinder-to-cylinder)에 대해서 나타낸 실험 결과이다. 프로판을 사용한 경우, 1번 실린더의 IMEP가 다른 실린더에 비해 EGR 0%에서 3~8%의 큰 값을 보이고 있다. 하지만 부탄을 사용한 경우의 IMEP는 실린더 간에 차이가 심함을 알 수 있다. 예를 들어 EGR 0%에서 1번 실린더의 IMEP가 3번 실린더에 비해 약 12%, 2번과 4번 실린더에 비해 18% 큰 값을 나타내고 있다. 이것은 HCCI 엔진은 실린더 간에 대해서도 민감하게 작용됨을 알 수 있다. 앞으로의 HCCI 엔진 연구에 대해서는 power balance 테스트를 수행할 필요가 있다고 생각된다. Fig. 4와 Fig. 5에서 PMEP와 IMEP는 유사한 경향을 나타내고 있고, PMEP의 증가는 바로 IMEP의 저감으로 나타난다는 것을 알 수 있다. IMEP의 결과와 마찬가지로 PMEP는 EGR 률에 대해서 영향이 크지 않은 것으로 판단된다. 하지만 전반적으로 PMEP의 값은 스파크 플러그

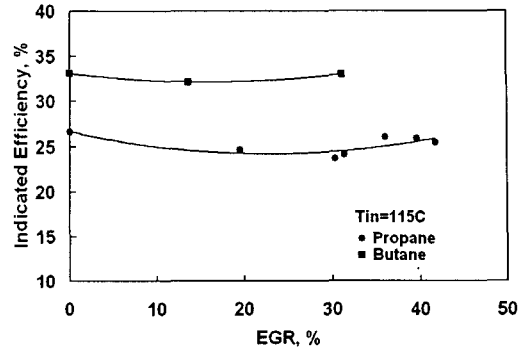


Fig. 6 Indicated efficiency versus EGR rate for fuels at intake temperature of 115°C

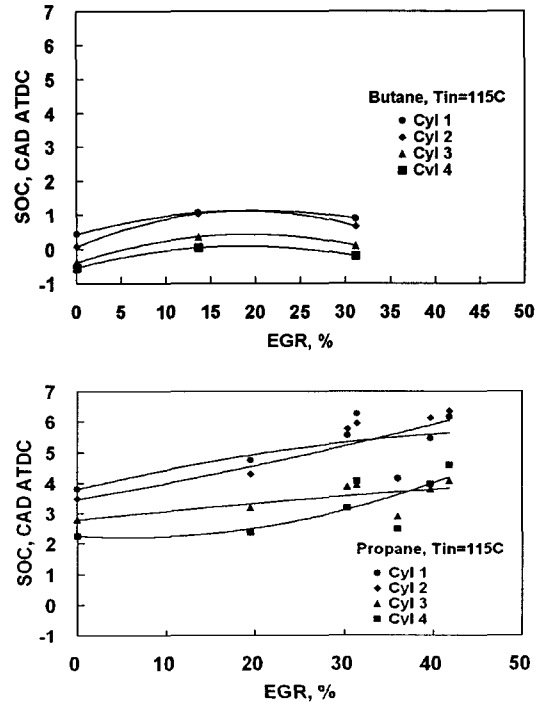


Fig. 7 Start of combustion versus EGR rate for different cylinders and fuels at 115°C

가 있는 스파크 점화기관에 비해서 상대적으로 적은 것으로 판단된다.

Fig. 6은 일정한 온도 115°C 하에서, 프로판과 부탄을 이용한 경우, EGR 률 증가에 대한 지시효율을 나타낸 선도이다. 지시효율은 출력의 향으로 표현되므로 Fig. 3의 선도와 같은 경향을 나타내

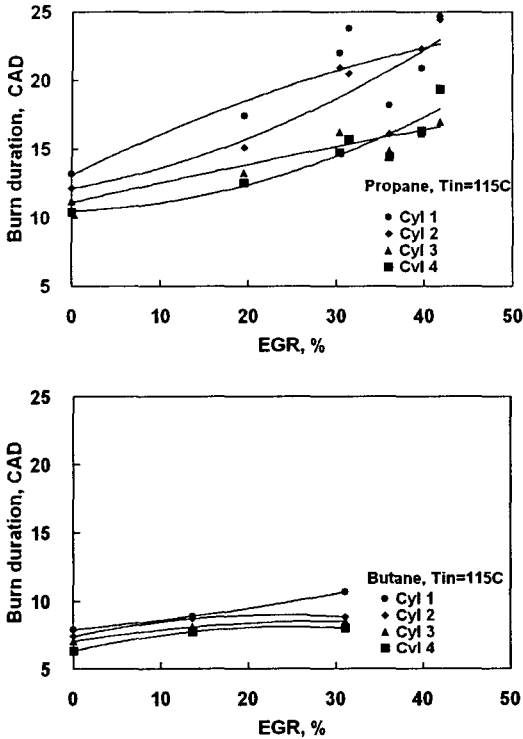


Fig. 8 Burn duration versus EGR rate for different cylinders and fuel at 115°C

고 있다.

Fig. 7은 실린더간과 연료에 대해서, EGR를 약 0~40%로 변화시켰을 경우의 연소시작점(SOC, Start of Combustion)을 크랭크 각으로 나타낸 실험 결과이다. 여기서 SOC는 최고 열발생을 50%에 해당하는 크랭크 각을 의미한다. 흡입온도를 115°C로 일정하게 했을 때, SOC는 EGR를 증가에 대해 점차적으로 늦은 연소를 보이고 있다. EGR률이 증가 됨에 따라 SOC가 늦게 나타난다는 것은 연소구간이 증가된다는 것을 의미하게 될 것이다. 또한 프로판의 경우가 부탄 보다 SOC가 일찍 나타남을 알 수 있고, 이는 바로 IMEP와 출력으로 나타남을 알 수 있다.

Fig. 8은 연소구간을 나타낸 선도로써, 여기서 연소구간은 열발생을 10~90% 동안의 크랭크 각을 의미하는 크랭크각의 누적된 값을 의미한다. 일반적으로 연소구간이 길면 느린연소(slow burn)를 말하고, 연소구간이 짧으면 급속연소(fast burn)

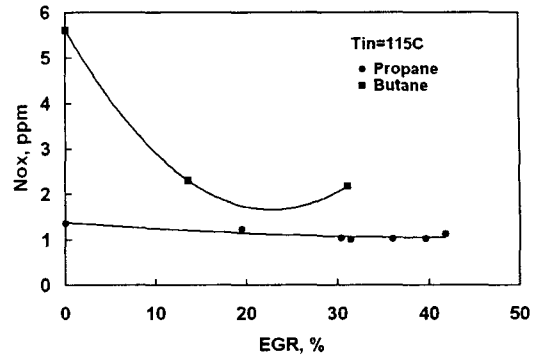


Fig. 9 NOx emissions versus EGR rate for propane and butane at inlet temperature of 115°C

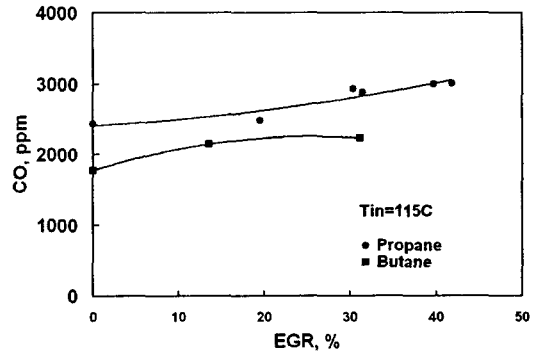


Fig. 10 CO emissions versus EGR rate for propane and butane at inlet temperature of 115°C

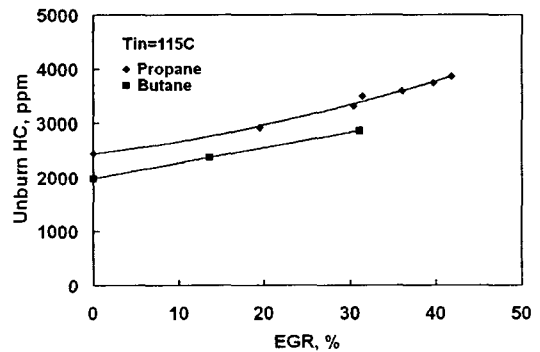


Fig. 11 HC emissions versus EGR rate for propane and butane at inlet temperature of 115°C

를 의미한다. 그림에서 EGR를 증가에 대해서 연소구간이 길어지는 느린연소를 보이는 결과를 보

이고 있으며, 부탄인 경우가 연소구간이 짧은 급속연소를 보이고 있다.

Fig. 9은 HCCI 엔진에서 부탄과 프로판을 연료로 사용한 경우 EGR 증가에 대한 NOx 배출량을 흡기온도 115℃, 엔진회전수 1800rpm에서 나타낸 선도이다. HCCI 엔진의 NOx 배출량은 가솔린을 사용하는 스파크 점화기관의 배출량에 비해서 획기적인 저감이 있는 것을 볼 수 있다. LPG 연료인 프로판과 부탄인 경우 EGR 0%에서 NOx는 1~6ppm의 아주 미량 배출되고 있으며, EGR 증가에 따라 NOx는 더욱 저감되는 이중 효과가 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 부탄과 프로판을 사용한 경우, EGR 변화에 대한 CO와 HC를 각각 나타낸 선도이다. 그림에서 CO와 HC의 배출량은 흡기온도 115℃에서는 통상의 가솔린을 사용하는 스파크 점화기관의 CO, HC 배출량에 비해 상대적으로 높은 값을 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 EGR 증가에 대해서 CO, HC 배출량은 더욱 증가하고 있다. 그러므로 배기가스 저감 측면에서는 EGR을 사용한 HCCI 엔진은 Fig. 9와 같이 NOx의 저감 효과만을 기대할 수 있고, Fig. 10과 Fig. 11 같이 CO와 HC는 HCCI 엔진을 사용함으로써 오히려 기존의 스파크 점화기관에 비해서 단점으로 작용된다. 또한 HCCI 엔진의 연료로써 프로판을 사용하는 것 보다 부탄을 사용한 것이 CO와 HC를 줄일 수 있는 효과가 있다. 예를 들어 ERG 0%에서 CO배출량은 프로판이 부탄에 비해 약 38% 많이 배출되고, EGR 30% 근방에서 CO 배출량은 프로판이 부탄에 비해 약 29% 배출량이 많다. 또한 EGR 0%에서 HC배출량은 프로판이 부탄에 비해 약 23% 많이 배출되고, EGR 30% 근방에서 HC 배출량은 프로판이 부탄에 비해 약 22% 배출량이 많다.

4. 결 론

4-실린더 압축점화 기관을 HCCI 엔진으로 개조를 하였고, 연료는 프로판과 부탄을 사용하여, EGR률과 실린더간의 효과에 대한 실험 결과는

다음과 같다.

(1) HCCI엔진은 실린더간에 대해서 IMEP가 다르게 나타난다. 하지만, 이것은 HCCI엔진 만의 특징인지, 실험상의 문제인지는 아직 확실치 않다. 또한 PMP는 EGR률에 대해서 영향이 크지 않다.

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

(3) 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. LPG 연료인 프로판과 부탄인 경우 EGR 0%에서 NOx는 1~6 ppm의 아주 미량 배출되고 있으며, EGR 증가에 따라 NOx는 더욱 저감되는 이중 효과가 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

(4) ERG 0%에서 CO배출량은 프로판이 부탄에 비해 약 38% 많이 배출되고, EGR 30% 근방에서 CO 배출량은 프로판이 부탄에 비해 약 29% 배출량이 많다. 또한 EGR 0%에서 HC배출량은 프로판이 부탄에 비해 약 23% 많이 배출되고, EGR 30% 근방에서 HC 배출량은 프로판이 부탄에 비해 약 22% 배출량이 많다. HCCI엔진의 연료로써 프로판을 사용하는 것 보다 부탄을 사용한 것이 CO와 HC를 줄일 수 있는 효과가 있다.

후 기

본 연구는 인덕대학의 연구비 지원에 의하여 이루어졌다. 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

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) Kim, H. and Sung, N., 2001, "Multidimensional Engine Modeling: NO and Soot Emissions in a Diesel Engine with Exhaust Gas Recirculation," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 8, pp. 1196~1204.
- (7) Christensen, M., Johansson, B., Amnes, P. and Mauss, F., 1998, "Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition," SAE paper, 98787.
- (8) Cha, J., Kwon, J., Cho, Y. and Park, S., 2001, "The Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Combustion Stability, Engine Performance and Exhaust Emissions in a Gasoline Engine," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 10, pp. 1442~1450.
- (9) Morimoto, S., Kawabata, Y., Sakurai, T. and Amano, T., 2001, "Operating Characteristics of a Natural Gas-fired HCCI Engine," SAE paper, 2001-01-1034.