

## 균질혼합압축점화기관에서 n-부탄 연료의 특성에 관한 연구

한성빈<sup>1†</sup> · 박준영<sup>2</sup> · 정연중<sup>3</sup>

<sup>1</sup>인덕대학교 기계자동차학과, <sup>2</sup>신안산대학교 기계설계과, <sup>3</sup>동국대학교 경주캠퍼스 기계부품시스템공학과

### A Study on the Characteristics of n-Butane for a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine

SUNG BIN HAN<sup>1†</sup>, JUN YOUNG PARK<sup>2</sup>, YON JONG CHUNG<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Induk University, Department of Mechanical & Automotive Engineering, 12 Choansan-ro, Nowon-gu, Seoul, 01878, Korea

<sup>2</sup>Shin Ansan University, Department of Machine Design, 135 Sinansandaehak-ro, Danwon-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 15435, Korea

<sup>3</sup>Dongguk University Gyeongju Campus, Department of Mechanical Parts System Engineering, 123 Dongdae-ro, Gyeongju-si, Gyeongsangbuk-do, 38066, Korea

**Abstract** >> This paper describes the characteristics of n-Butane fuel for 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. From the experimental observations, the effect of n-Butane fuel in HCCI engine on CO, HC and NOx are analysed. The objective of this paper is to clear the effects of equivalence ratio and inlet temperature with n-Butane on the HCCI. For this purpose, a 4-cylinder, compression ignition engine was converted into a HCCI engine. This work has been run with n-butane fuel at a constant speed.

**Key words** : Homogeneous Charge Compression Ignition(균질혼합압축점화), n-Butane(n-부탄), equivalence ratio(당량비), inlet temperature(흡입온도), engine speed(기관속도), CO(일산화탄소), HC(탄화수소), NOx(질소산화물)

### 1. 서론

날이 갈수록 점점 더 자동차 배기가스 규제가 더욱 심해지고 있다. Euro-6 또는 Tier-3 등의 엄격한 배기가스 규제에 의하여 과연 자동차의 배기가스는 어느 것이 적당한 규제의 마지노선인지도 모호한 상태이다. 폭스바겐의 배기가스 조작 파문으로 인하여

자동차 선진국에서는 디젤자동차는 더 이상 생산을 하지 않는 것도 하나의 방법이라는 조심스러운 진단을 하여 본다. 이러한 시점에서 무엇이 가장 최선의 방법인가를 생각해 본다.

미국자동차공학회 SAE(Society of Automotive Engineer)에서 미래의 자동차용 엔진 분야에서 하이브리드 자동차, 전기 자동차 등과 같이 균질 혼합 압축점화기관(HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition)을 채택하고 있다. 이 HCCI 엔진의 개념은 스파크점화기관의 장점과 압축점화기관의 장점을 이

<sup>†</sup>Corresponding author : sungbinhan@induk.ac.kr

Received: 2016.7.7 in revised form: 2016.7.23 Accepted: 2016.10.30

Copyright © 2016 KHNES

용한 엔진이다<sup>1,2)</sup>.

HCCI기관 연소의 기본적인 이해는 스파크 점화 및 압축점화 엔진의 장점의 결합이라고 할 수 있다. 하지만 압축점화기관과 달리 자연발화가 가능한 균질한 공기-연료의 혼합기를 공급해주어야만 사용이 가능하게 된다. 기존의 고압 압축점화기관의 분사 방식이 아닌 저압의 균일 혼합기 흡기관에 공급되는 방식이다.

기존의 스파크점화기관이 디젤연료를 채택하고 있는 압축점화기관 보다 열효율이 낮은 이유는 엔진의 압축비가 낮기 때문이다. 하지만 HCCI 엔진은 압축비를 디젤 압축 점화기관의 수준으로 높여 설계가 가능하기 때문에 연소가 원활히 이루어진다면 디젤 압축 점화기관 이상의 열효율을 기대할 수 있다<sup>3,4)</sup>.

또한 공기와 연료의 혼합비인 당량비 (Equivalence ratio)는 스파크점화기관에서 현실적으로 이루기 힘든 이론 공기연료비 보다 높은 초희박 공기연료비(ULEV: Ultra Lean Burn Emission Vehicle) 채택이 가능함으로써 배기가스 저감과 열효율에 따른 연료소비율의 경제성도 기대할 수 있다.

더우기 HCCI 기관은 스파크 플러그가 없고, 압축 착화점화기관 같이 연소가 동시에 여러 곳에서 시작되기 때문에 연소의 사이클 간 변동이 매우 적은 동시에 균일한 상태에서 연소가 진행되게 된다. 그러므로 스파크점화기관에서 자주 일어나는 불안정 화염 전파를 피할 수 있는 장점이 있다.

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

디젤자동차의 배기가스 저감을 위해서 EGR (Exhaust Gas Recirculation)을 사용하게 되면 출력 저감과 연료소비의 증가로 자동차 배기가스 조작의 문제도 대

두되고 있다. 하지만 HCCI의 가장 큰 장점은 질소산화물(NOx), 미세먼지인 분진물(PM, particulate matters) 배출이 적다는 점과 부분부하에서 효율이 높다는 점을 들 수 있다. HCCI 연구로는 UC Berkeley 가 선도적인 역할을 수행하였다. 그들은 당량비와 EGR의 조합에 관한 연구를 수행하였다<sup>5-7)</sup>.

통상적으로 NOx는 연소가스 온도가 낮으면 적게 배출된다. 이러한 NOx 저감은 연소실 내에 고온영역이 존재하지 않기 때문이다. HCCI 엔진은 고압축비로 작동되기 때문에 압축 점화기관에 해당되는 높은 효율을 가질 수 있고, 희박한 공기연료비를 달성할 수 있기 때문에 배기가스 후처리 장치 없이도 매우 낮은 질소산화물(NOx), 분진물(미세먼지) (PM, particulate matter)을 배출하게 된다.

HCCI 연소반응이 스파크 플러그가 장착된 기관 같이 스파크 플러그에서 시작되어 지는 것이 아니기 때문에, 화염면의 물리적 현상에 의하여 제한되는 것이 아니기 때문에 편중된 고온 영역이나 화염면이 없다. 하지만 HCCI는 운전 범위가 한정된 범위 내에서 가능하며, HC, CO의 배출이 상대적으로 크다는 단점을 가지고 있다.

HCCI 연소의 단점은 출력의 제약을 받고 있다는 것이다. 일반적으로 희박 공연비 또는 대량의 EGR을 사용한 경우 안정적인 HCCI 연소를 구현할 수 있다. 하지만 공연비가 이론 당량비에 근접할수록 연소 안정성의 감소, 열발생율의 증가나 노크와 같은 연소 압 진동이 발생할 뿐만 아니라 배기특성의 장점이 감소한다. 하지만, 이것은 최적의 운전범위를 ECU (Electronic Control Unit)에서 조절해 줄 수 있고, 촉매장치에서 HC, CO 조절이 가능하다고 생각된다<sup>8-10)</sup>.

본 연구에서 사용되는 연료로는 LPG의 대표적이라 할 수 있는 n-부탄을 사용하였으며, 향후 EGR을 하였을 경우에 흡입온도의 저하와 당량비를 염두에 두고 실험을 수행한다. 본연구의 목적은 흡입온도와 당량비가 HCCI 엔진 성능에 어떠한 영향을 미칠 것



Fig. 1 Photo of experimental setup

인가에 대한 각종 성능 특성을 면밀히 파악하고자 한다. 이러한 데이터는 HCCI 엔진 개발의 귀중한 자료로 사용될 것으로 생각이 든다.

## 2. 실험장치 및 사용연료

### 2.1 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 기관은 4 실린더 직접분사식 디젤 기관을 HCCI 실험 조건에 맞게 엔진을 개조 하였다.

Fig. 1은 실험장치를 보여주며, 제원은 Table 1에 제시하였다. 원활한 균질혼합기를 얻기 위하여 예열 장치를 이용하였다. 기관에 가해지는 부하의 조절과 측정을 위해 동력계를 사용하였으며, 흡기관, 배기관, 냉각수, 엔진오일 등 각 부분의 온도를 측정하기 위해 열전대를 삽입하였다. 압력값을 위하여 연료 인젝터 위치에 각 실린더 마다 압력센서를 삽입하였다.

데이터 측정을 위하여, 크랭크 각은 크랭크 각 엔코더를 이용하여 측정했으며, 실린더 내의 압력은 압력센서를 이용하여 각 실린더의 압력을 채취하여 평균값으로 계산하였다.

흡입온도는 102, 108, 126, 139°C에서 단계적으로 변화를 주었고, 당량비는 0.30, 0.33, 0.36, 0.39까지 단계적으로 변화를 시켰다. 압축비는 기존의 디젤기관과 같은 19.5로 채택하였으며, 기관회전수는 1800 rpm에서 고정을 시켜 실험을 수행하였다.

Table 1 Engine specifications

Items	Specifications
Type	Water-Cooled
Displacement	1.896 L
Bore × Stoke	79.5 × 95.5 mm
Connecting Rod Length	144.0 mm
Compression Ratio	19.5
Piston Geometry	Bowl
Firing Order	1-3-4-2

흡입압력은 실험이 쉽지는 않았지만, 표준대기압 101.3 kPa을 유지하도록 하였다.

EGR은 사용하면 흡기온도의 영향이 크고 이로 인한 정확한 인자에 대한 규명이 힘들 것으로 판단되므로 EGR율은 0%에서 실험을 수행하였다.

### 2.2 사용연료

LPG는 온실가스 감축을 위한 매우 매력적인 대안이라는 평가가 나오고 있다. 특히 LPG는 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, 정제 과정에서 생산되는 기체상의 탄화수소를 액화시킨 혼합물로서, 프로판 제품과 부탄제품으로 구분하여 사용된다.

프로판 제품은 프로판( $C_3H_8$ )이 주성분이며, 소량의 메탄, 에탄, 부탄 등이 혼합되어 있다. 부탄제품은

**Table 2** Fuel specifications

Items	n-Butane
Formula	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
Boiling point, K	274
Octane Number, RON	94
Lower heat value, MJ/kg	45.6
Spontaneous ignition temperature, K	638
Density, kg/m <sup>3</sup>	2.7
Stoichiometric Air/Fuel ratio	15.4

노말부탄(n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), 이소부탄(i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) 등 부탄성분이 대부분을 차지한다.

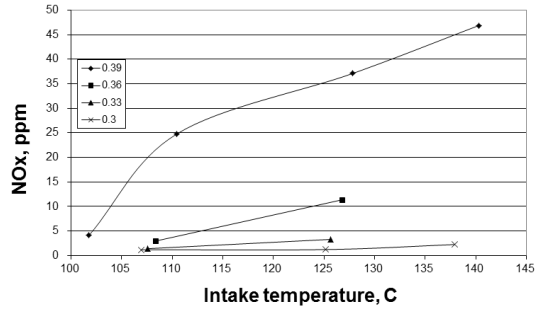
Table 2는 부탄의 특성을 나타낸 도표이다. 국내의 LPG 연료로서는 하절기에는 100%의 부탄을 사용하고, 동절기에는 지역에 따라 약간의 차이가 있지만, 70%의 부탄과 30%의 프로판을 혼합하여 사용한다. 하지만, 북미와 유럽에서는 LPG 연료는 일반적으로 100%의 부탄을 사용한다. 본 연구에서는 100% n-부탄을 연료 대상으로 삼았다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 흡기온도를 102, 108, 126, 139°C로 변화시켰을 때 NOx(질소산화물)을 나타낸 실험결과이다. 이때에 변수는 당량비를 0.30, 0.33, 0.36, 0.39로 하였다. 연소공학에서 NOx는 연소온도가 낮으면 NOx발생은 저감되고, 연소온도가 높으면 NOx 발생이 많게 된다. 또한 질소산화물은 이론혼합비 부근에

**Table 3** Test Conditions

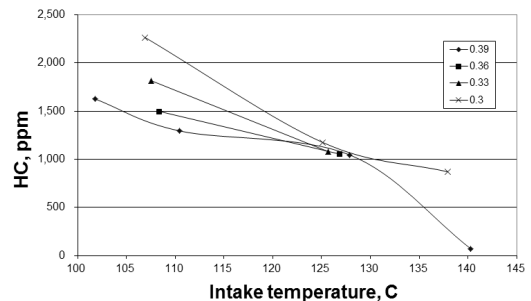
Items	n-Butane
Inlet temperature, °C	102, 108, 126, 139
Equivalence ratio	0.30 - 0.39
Inlet pressure, kPa	101.3
EGR, %	0
Engine speed, rpm	1800



**Fig. 2** NOx vs. intake temperature for equivalence ratios

서 최대값을 나타내며, 이론혼합비 보다 농후하거나 희박한 경우에 질소산화물의 발생률은 낮아진다. 하지만, 본 연구는 연소온도가 아닌 흡기 온도의 변화에 대한 실험 결과임에도 불구하고, 연소 온도의 영향을 미칠 것으로 판단된다. 특히 EGR장치를 사용하면 연소온도를 낮추는 효과가 있기 때문에 질소산화물을 저감시킬 수 있다. 본 연구에서는 EGR을 사용하지 않았지만, 흡기온도를 낮추게 되면 연소온도에도 영향을 주어서, 결국 NOx를 낮추는 효과가 있음을 알 수 있다. 또한 당량비가 0.39에서 이론 당량비로 향하는 0.30로 실험 조건을 바꿈에 따라서 NOx도 통상의 가솔린 엔진과 같이 NOx가 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 그 정량적인 값은 기존의 가솔린 기관에서 배출되는 NOx 량 보다 월등히 낮은 값을 나타내고 있다.

Fig. 3은 n-부탄을 사용한 경우, 흡기온도 변화에 대한 HC 배출물의 변화를 나타낸 실험결과이다. 변



**Fig. 3** HC vs. intake temperature for equivalence ratios

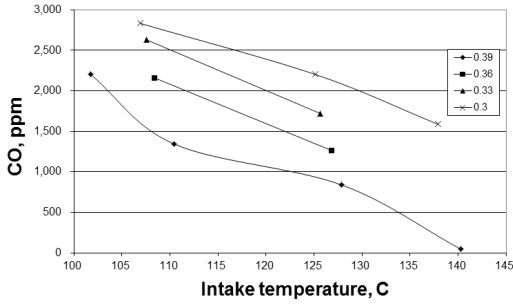


Fig. 4 CO vs. intake temperature for equivalence ratios

수로는 당량비를 0.30, 0.33, 0.36, 0.39로 하였다. 자동차용 기관에서 통상의 가솔린 기관의 HC발생은 이론혼합비 보다 희박한 상태의 불안정한 영역에서도 미연의 HC를 발생시킬 수 있다. 통상의 스파크 플러그가 장착된 스파크 점화기관에 비해서 정량적으로 비슷한 수준의 HC 배출량을 나타내고 있다. 특히 실험조건이 당량비가 농후한 조건에서는 기존의 스파크 점화기관과 마찬가지로 HC의 발생이 높은 값을 보이고 있는데, 이는 기관의 불안정성 때문인 것으로 판단된다.

또한 온도변화에서도 흡기온도가 낮은 영역에서 HC 발생이 높게 나오고 있는 경향은 기존의 스파크 점화기관과 같은 경향을 나타내고 있다.

Fig. 4는 HCCI엔진에서 n-부탄을 사용한 경우, 흡기온도 변화에 대해서, 당량비를 변수로 했을 때에 CO 배출물의 변화를 나타낸 실험결과이다. 자동차용 기관에서 통상의 가솔린 기관의 CO의 발생은 산소공급의 부족으로 발생한다. 특히 이론혼합비 보다 농후한 영역은 산소공급이 부족한 영역이므로 연소의 불안정으로 CO발생은 증가 하게 된다. 실험결과에서 n-부탄을 사용한 경우는 통상의 스파크 플러그가 장착된 스파크 점화기관에 비해서 정량적으로 비슷한 수준의 CO 배출량을 나타내고 있다.

특히 실험조건이 당량비가 농후한 조건에서는 기존의 스파크 점화기관과 마찬가지로 HC의 발생이 높은 값을 보이고 있는데, 이는 산소공급의 부족으로

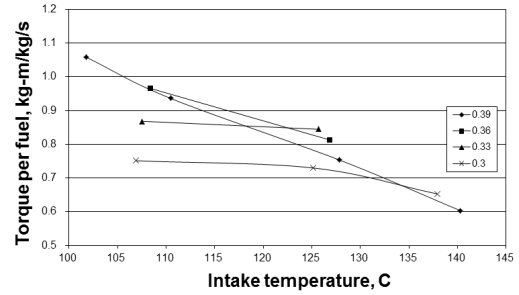


Fig. 5 Torque per fuel vs. intake temperature for equivalence ratios

인한 불안정 연소로 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 HCCI엔진에서 n-부탄을 사용한 경우, 흡기온도 변화에 대한 당량비를 변수로 했을 때의 n-부탄이 공급했을 때의 토크변화를 실험결과이다. 또한 Fig. 6은 흡기온도 변화에 대한 토크 변화를 나타낸 실험결과이다. Fig. 5와 Fig. 6은 비슷한 결과를 나타내고 있다.

토크의 변화의 결과에서 알 수 있는 것은 흡기온도의 저감은 공기의 밀도를 크게 함으로써 토크 향상의 증가로 나타내고 있다. 또한 농후한 혼합비에는 오히려 토크가 저감되고 있다는 것을 알 수 있다. 본 실험에서 사용된 당량비는 부분부하 영역으로 지나치게 농후한 당량비 이므로 오히려 당량비가 큰 쪽으로 향하게 되면 토크가 크게 뚱을 알 수 있었다. HCCI 기관이 아직까지는 부분 부하에서 사용이 가능하다는 것이다.

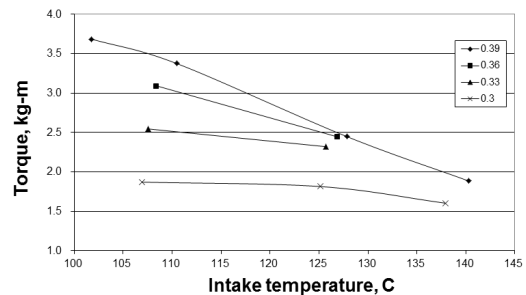


Fig. 6 Torque vs. intake temperature for equivalence ratios

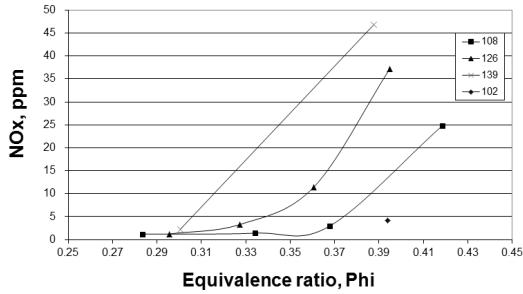


Fig. 7 NOx vs. equivalence ratio for inlet temperatures

Fig. 7은 당량비를 0.30, 0.33, 0.36, 0.39로 변화시키고 변수를 흡기온도를 102, 108, 126, 139°C로 변화시켰을 때 NOx를 나타낸 실험결과이다. Fig. 2의 결과와 마찬가지로 질소산화물은 이론혼합비보다 농후하거나 희박한 경우에 질소산화물의 발생률은 낮아진다. 하지만, 본 연구는 연소온도가 아닌 흡기 온도의 변화에 대한 실험 결과임에도 불구하고, 연소 온도의 영향을 미칠 것으로 판단된다.

Fig. 8은 당량비 변화에 대한 HC의 배출량을 흡기 온도 변수로 실험한 결과를 나타낸 선도이다. Fig. 3과 마찬가지로의 경향을 보이고 있는데, 당량비가 증가됨에 따라서 흡기온도가 낮은 영역에서 HC 발생이 높게 배출 되고 있다. 이러한 경향은 기존의 스파크 점화기관과 같은 경향을 나타내고 있다.

Fig. 9는 당량비 변화에 대한 CO배출량을 흡기 온도 변수로 나타낸 실험 결과이다. 실험결과와 Fig. 3과 유사한 결과를 나타내고 있다. 통상의 가솔린 기

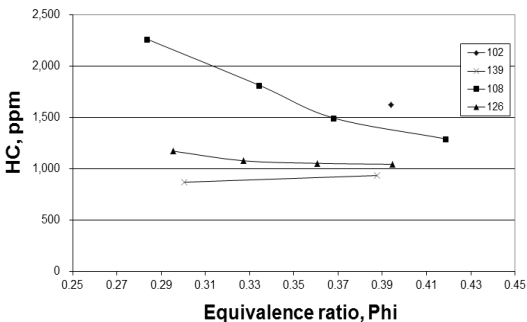


Fig. 8 HC vs. equivalence ratio for inlet temperatures

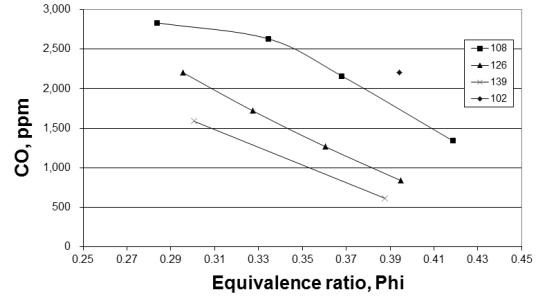


Fig. 9 CO vs. equivalence ratio for inlet temperature

관의 CO의 발생은 산소공급의 부족으로 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한 이론혼합비보다 농후한 영역은 산소공급이 부족한 영역이므로 연소의 불안정으로 CO발생은 증가 하게 되는 것도 같은 결과이다.

Fig. 10, Fig. 11은 n-부탄을 HCCI엔진 연료로 사용한 경우, 당량비 변화에 대한 공급연료에 대한 토크변화와 당량비 변화에 대한 토크 변화를 흡기 온도를 변수로 각각 나타낸 실험 결과이다. Fig. 5와 Fig. 6에서와 마찬가지로의 결과가 나타났다.

일반적으로 자동차용 기관에서 흡기온도의 저감은 공기의 밀도를 크게 함으로써 토크 및 출력 향상의 증가로 나타내고 있다. 또한 지나치게 농후한 혼합비에는 오히려 토크가 저감되고 있다는 것을 알 수 있다. 아직도 미비한 연구가 HCCI 기관이 부분 부하에서 사용이 가능하기 때문에 개선되어야 할 연구가 많은 것이 사실이다.

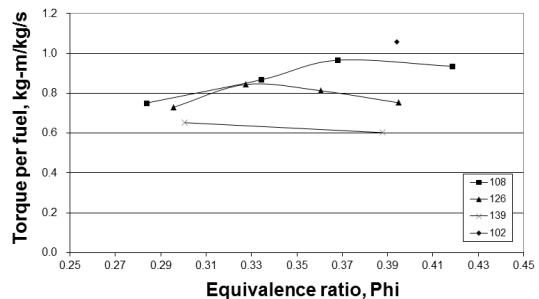


Fig. 10 Torque per fuel vs. equivalence ratio for inlet temperature

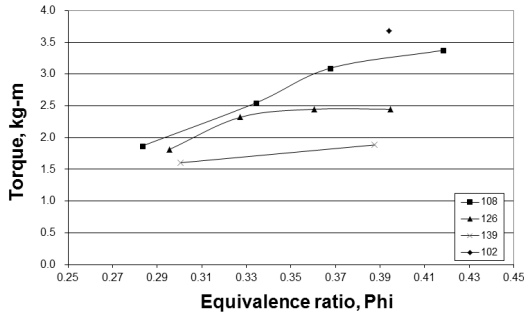


Fig. 11 Torque vs equivalence ratio for inlet temperature

#### 4. 결 론

기존의 디젤용 압축점화 기관을 HCCI 엔진으로 개조를 하였고, 연료는 n-부탄을 사용하였다. 실험연구 결과는 다음과 같다.

- 1) NOx 발생은 흡기온도를 낮추게 되면 연소온도에도 영향을 주어서, 결국 NOx를 낮추는 효과가 있음을 알 수 있다. 기존의 스파크 점화기관의 NOx 배출량 정량적인 값이 HCCI 기관에서 현저히 낮음을 알 수 있었다.
- 2) HC와 CO배출은 이론혼합비 보다 농후한 당량비에서와 흡기온도가 낮은 경우에 산소공급의 부족으로 인하여 연소가 불안정하게 되어서 HC와 CO 발생이 증가되고 있다. 하지만, 균질혼합압축의 공급으로 인하여 오히려 스파크 플러그가 장착된 스파크 점화기관에 비해서 정량적으로 비슷한 수준의 HC, CO 배출량을 나타내고 있다.
- 3) 흡기온도의 저감은 공기의 밀도를 크게 함으로써 토크 향상의 증가로 나타내고 있다. 또한 농후한 혼합비에는 오히려 토크가 저감되고 있다는 것을 알 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 미국 University of California at Berkeley

의 Professor Robert W. Dibble의 Combustion Laboratory의 데이터를 이용한 결과입니다. Dibble교수와 실험실 관계자에게 감사를 드립니다.

#### References

1. Seibel, C., "Pressure and emissions data analysis for an HCCI engine using n-butane and propane", Thesis, University of California at Berkeley, 2000.
2. Aoyama, T., Hattori, Y., Mizuta, J. and Sato, Y., "An experimental study on premixed-charge compression ignition gasoline engine", SAE Paper No. 960081, 1996.
3. Au, M. Y., Girard, J. W., Dibble, R., Flowers, D., Aceves, S. M., Frias, J. M., Smith, R., Seibel, C. and Maas, U., "1.9-Liter four-cylinder HCCI engine operation with exhaust gas recirculation". SAE Paper No. 2001-01-1894, 2001.
4. Flowers, D., Aceves, S., Smith, R., Torres, J., Girard, J., Dibble, R., "HCCI In a CFR engine: experiments and detailed kinetic modeling", SAE Paper No. 2000-01-0328, 2000.
5. Saxena, S, Chen, C. and Robert Dibble, R., "Maximizing power output in an automotive scale multi-cylinder homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine", SAE Paper No. 2011-01-0907, 2011.
6. Vuilleumier, D., Selim, H., Dibble, R., and Sarathy, M., "Exploration of Heat Release in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Primary Reference Fuels", SAE Paper No. 2013-01-2622, 2013.
7. DeFilippo, A., Saxena, S., Rapp, V., Dibble, R., Chen, J., Nishiyama, A. and Ikeda, Y., "Extending the lean Stability limits of gasoline using a microwave-assisted spark plug", SAE Paper No. 2011-01-0663, 2011.
8. Ryan, T. W. and Callahan, T. J., "Homogeneous

- charge compression ignition of diesel fuel”, SAE Paper No. 961160, 1996.
9. Stanglmaier, R. H. and Roberts, C. E., Homogeneous charge compression ignition (HCCI): benefits, compromises, and future engine applications. SAE Paper No. 1999-01-3682, 1999.
10. Bogin Jr., G. E., Mack, H. and Dibble, R. W., “Homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine”, SAE Paper No. 2009-01-1805, 2009.