

## HCCI 엔진에서 엔진성능 및 배출에 미치는 EGR의 영향

한성빈<sup>†</sup> · 장용훈<sup>\*</sup>

(2003년 5월 27일 접수, 2003년 8월 18일 심사완료)

### A Study on the Effects of EGR on Engine Performance and Emissions of a HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) Engine

Sung Bin Han and Yong Hoon Chang

**Key Words:** 당량비(Equivalence Ratio), 배기가스재순환(Exhaust Gas Recirculation), 연소시작점(SOC, Start of Combustion), 연소효율(Combustion Efficiency), 열발생률(Rate of Heat Release), 질소산화물(NOx), HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition), IMEP(Indicated Mean Effective Pressure)

#### Abstract

Automobile companies and research institutions in leading automobile-manufacturing nations have recently been very active with research regarding the HCCI engine for use in future vehicles. Because HCCI engines take advantage of high compression ratio and heat release rate, they exhibit high efficiency found in compression ignition engines. HCCI engines also utilize a lean air/fuel ratio resulting in low emissions of NOx and PM (particulate matter). The objective of this research is to determine the effects of EGR rate on the combustion processes of HCCI. For this purpose, a 4-cylinder, compression ignition engine was converted into a HCCI engine, and a heating device was installed to raise the temperature of the intake air and also to make it more consistent. In addition, a pressure sensor was inserted into each of the cylinders to investigate the differences in characteristics among the cylinders. The experimental study of the effects of EGR rate on various gas emissions, engine performance, etc. should prove to be a valuable source of information for the development of the HCCI engine.

#### 1. 서론

HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) 엔진은 압축점화기관과 스파크 점화기관이 결합된 엔진 연소를 하는 것으로 알려져 있

다. HCCI 엔진은 고압축비와 높은 열발생률로 작동되기 때문에 압축점화기관에 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.<sup>(1,2)</sup>

HCCI에 관한 논문을 미국자동차공학회(SAE, Society of Automotive Engineers)에 처음으로

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 인덕대학 컴퓨터응용기계계열

E-mail : sungbinhan@induk.ac.kr

TEL : (02)901-7635 FAX : (02)901-6875

<sup>\*</sup> 회원, 인덕대학 컴퓨터응용기계계열

발표한 Najt 등<sup>(3)</sup>은 CFR(Cooperative Fuel Research) 엔진을 대상으로 예측모델을 제시했다. 일반적으로 HCCI 연소는 높은 열발생률로 발생하게 되는데, 이로 인하여 엔진 사이클과 적절한 타이밍이 이루어졌을 경우 이상적인 오토 사이클에 근접할 수 있다. 혼합이 잘된 저온 반응은 엔진으로 빼앗기는 열량을 감소시키고 결국 HCCI 연소는 그 자체로서 열역학적 사이클 효율이 커진다.<sup>(4)</sup>

Aoyama 등<sup>(5)</sup>은 HCCI의 가시화에 따른 연구를 수행하였는데, HCCI 연소는 연소실의 여러 위치에서 동시 다발적 시작되며, 거기에는 화염전파로 뚜렷이 판단되지 않는다고 했다 이것은 화염면의 결핍에도 불구하고, HCCI 열발생률은 단지 화학적 반응율에 의해서 조절되는 것이 아니다.

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 EGR 없이 연소안정성의 감소, 열발생물의 증가나 노크와 같은 연소압 진동이 발생할 뿐만 아니라 배기특성의 장점이 감소한다.<sup>(6)</sup>

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.<sup>(7)</sup>

또 다른, 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.<sup>(8)</sup>

Christensen 등<sup>(9)</sup>은 연구에서, HCCI 엔진의 연소시기는 다음 항목의 영향을 받는 것으로 조사되어졌다. 즉, 연료의 자발화 특성, 연료농도, 잔류가스 비율, 그리고 잔류가스의 반응도, 혼합기의 균일성, 압축비, 흡기온도, 연료의 증발잠열, 그리고 엔진의 온도, 엔진으로의 열전달, 이외의 엔진관련 변수를 고려하였다. HCCI이 문제점을

극복하기 위해서는, HCCI 전용엔진의 개발이 가장 바람직하지만, 현재로는 수치적 또는 실험적 연구를 통하여 HCCI 연소가 가능성이 제시되고 있다.

HCCI 엔진은 스파크 점화 엔진 대비 NOx 저감효과가 미미하다고 부정적인 견해를 제시한 연구가도 있다. 향후 HCCI 전용 연료의 개발 및 연소시기 제어기술의 발전을 통하여 디젤과 같은 공연비 및 출력증대가 기대된다. 하지만 가까운 장래에 자동차에 적용될 수 있는 HCCI 연소는 2-모드 엔진이 될 수 있다고 했다. 즉, 저부하에서는 HCCI 연소를 이용하여 연비 및 배출물 저감효과를 얻고 고부하에서는 스파크점화 또는 전통적인 디젤연소를 이용하여 출력문제를 해결하는 방법이 고려되고 있다. 저부하 그리고 부분부하에서 주로 작동되는 엔진의 경우 HCCI 연소는 매우 유용한 수단이 될 것이다.<sup>(10)</sup>

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 있다. 한편, 혼합기가 너무 희박한 경우 불완전 연소 또는 실화가 생긴다. SI 엔진의 경우 스파크 플러그 주위의 혼합기의 불균일성, 그리고 유동조건의 변동으로 인하여 화염의 초기발달은 상당히 변화하기 때문에 사이클 간 변화(cycle-to-cycle variation)가 크다.<sup>(11-13)</sup>

Ryan 등<sup>(14)</sup>은 부분부하에서 잔류가스의 농도가 높아야 할 뿐만 아니라 4-행정 기관의 경우 일반적으로 잔류가스의 양이 많지 않기 때문에 초희박 혼합기 또는 대량의 EGR을 적용해야 한다고 했다. HCCI 연소는 공기, 연료, 그리고 재순환 배기가스의 혼합기의 자연발화 전에 압축시킴으로써 얻을 수 있다. 일반적으로 HCCI 연소는 분포가 잘 되어 있으며 상대적으로 급속히 진행되는 저온연소로 그 특징을 설명할 수 있다.

앞의 많은 연구자들이 필요성을 언급했듯이, EGR과 HCCI의 관계에 따른 깊이 있는 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 EGR율이 HCCI 연소과정에 얼마나 많은 영향을 미치는 가에 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 실험 방법

### 2.1 실험장치

실험에 사용된 기관은 4 실린더 Volkswagen Turbo Direct Injection 디젤기관을 실험 운전조건에 맞게 개조를 하였다. 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험기관의 대략적인 제원을 Table 1에 제시하였다. TC(Turbo Charged) 기관을 NA(Naturally Aspirated)기관으로 개조를 하였고, 원활한 흡기를 얻기 위하여 18 kW의 예열장치를 이용하였다. 예열에 필요한 에너지는 효율계산에 포함시키지 않았다. 기관에 가해지는 부하의 조절과 측정을 위해 30 kW 동력계를 사용하였으며, 흡기관, 배기관, 냉각수, 엔진 오일 등 각 부분의 온도를 측정하기 위해 열전도를 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 했으며, 압력값은 0.1도 단위로 채취를 했으며, 160 사이클을 평균 계산하였다. 채취된 압력값을 이용하여 연소율, 열발생률, IMEP 등을 계산하였다. 흡입공기유량은 knife-edge orifice plate를 이용한 유량계를 이용하였고, 연료유량은 mass flow controller로 측정을 하였다. 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%의 계산은 다음의 식을 이용하여 구한다.

$$\text{EGR (\%)} = [ ( V_1 - V_2 ) / V_1 ] \times 100$$

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
Intake Valve Open	16 CAD ATDC
Intake Valve Close	25 CAD ABDC
Exhaust Valve Open	28 CAD BBDC
Exhaust Valve Close	19 CAD BTDC

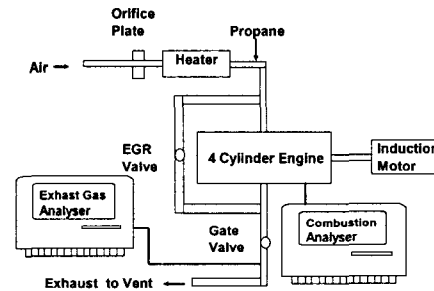


Fig. 1 Schematic diagram of experimental engine

여기서,  $V_1$ 은 배기재순환 가스가 없을 때의 흡입 공기량이고,  $V_2$ 는 EGR 밸브를 통하여 배기가스를 재순환 시킬 때의 흡입공기량이다.

본 연구에서 사용한 연료는 프로판올을 대상으로 하였다. 흡입온도는 115°C와 145°C이며 연료량은 12 SLPM (Standard Liquid Per Minute)으로 고정 시켰다. HCCI 기관은 혼합기의 온도 변화에 민감하다. HCCI 기관은 낮은 부하 또는 낮은 흡입온도에서 실화가 발생할 수 있고, 높은 부하 또는 높은 온도에서는 노킹이 일어날 수 있다. 본 연구에서 EGR율은 체적에 대해서 0~55%로 변화를 시켰다. 배기가스로부터 배출된 잔류가스는 통상의 EGR 라인을 통해서 흡입이 이루어진다. EGR은 흡기온도를 증가시킨다. 그러므로 흡입온도를 일정하게 유지하기 위해서는, EGR율을

증가시킬 때에는 흡기가열은 감소시켰다. 흡입온도는 EGR 율에 상관없이 일정한 온도로 유지시켰다.

기관회전수는 1800 rpm에서 수행했다. 실험기관을 통하여 기관 성능, 연소과정, 배기가스 등에 대한 해석을 제시한다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Morimoto 등<sup>(15)</sup>은 일반적으로 HCCI의 연소시기는 흡기온도, 흡입매니폴도 압력, 연료의 종류, 압축비, 당량비, EGR을 그리고 기관회전속도, 엔진 부하에 따라 변화한다고 했다.

Fig. 2 은 흡입온도를 115°C로 했을 때, 실린더간에 (cylinder-to-cylinder) 대하여, EGR을 약 0~43%로 변화시켰을 경우에 대한 연소시작점(SOC, Start of Combustion)을 크랭크 각으로 나타낸 실험 결과이다.

Fig. 3은 흡입온도를 145°C로 했을 때, 실린더간에 대하여 EGR율을 약 0~55%로 변화시켰을 경우에 대한 연소시작점을 나타낸 선도이다.

Fig. 2와 Fig. 3에서 보듯이, SOC의 경향이 흡기온도, ERG율, 실린더간에 따라서 민감하게 반응함을 알 수 있다. 특히 실린더간의 변화는 흡입온도가 낮은 경우가 변화의 폭이 더 크다는 것을 알 수 있고, 흡입온도가 클수록 더욱 일찍 SOC가 나타남을 알 수 있다. 흡입온도가 115°C인 경우는 EGR이 43%가 한계이고, 흡입온도가 145°C인 경우는 EGR 한계가 55%이다. HCCI를 자연발화가 일어나게 하기 위해서는 흡입공기를 가열시킬 필요가 있다.

스파크 점화기관과 디젤기관의 경우 SOC(Start of Combustion)는 각각 점화시기(ignition timing)와 분사시기로 결정되어 진다. 하지만 HCCI의 경우 점화는 균일 혼합기의 자발화에 의존하기 때문에 직접적인 SOC 제어수단이 없다. Fig. 4는 일정한 흡입온도 145°C에서 실린더간에 따라서, 최대 열발생 시기를 EGR 율에 대해서 나타낸 선도이다. 일반적으로 최대 열발생물의 시기는 EGR이 증가됨에 따라 약간 늦게 발생함을 알 수 있는데, 이것은 앞에서 제시한 SOC의

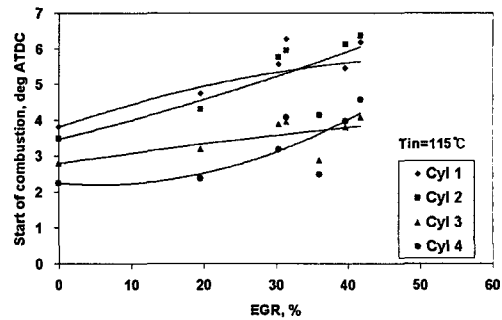


Fig. 2 Start of combustion vs. EGR rate for different cylinders at intake temperature of 115°C

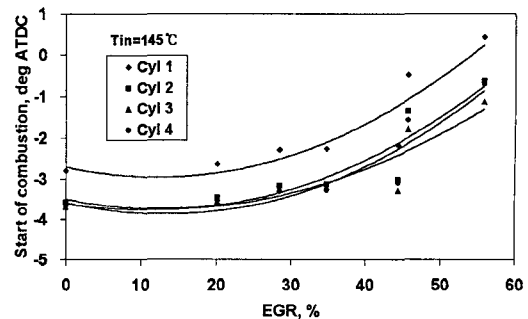


Fig. 3 Start of combustion vs. EGR rate with cylinder-to-cylinder at intake temperature 145°C

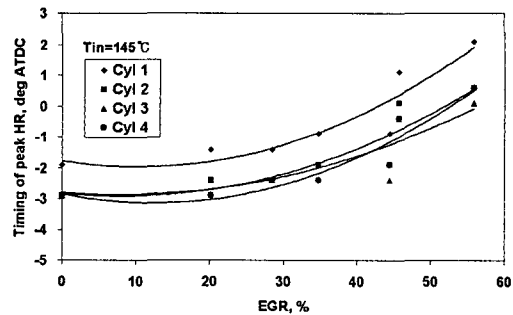


Fig. 4 Timing of peak heat release vs. EGR rate with cylinder-to-cylinder at intake temperature 145°C

경향과도 비슷하다. 그러므로 Fig. 2 ~Fig. 4에서 SOC는 대체로 EGR에 의존하는 경향이 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 흡입온도 115°C에서, Fig. 6은 흡입온도 145°C에서 EGR율에 대한 연소구간을 cylinder-to-cylinder을 변수로 나타낸 실험 결과이다. 본 연구에서 연소구간이란, 열발생률 10~90% 동안의 크랭크 각으로 정의한다. 연소구간은 연소의 속도를 결정하는 기본 자료로 사용이 될 수 있다. 일반적으로 연소구간이 길면 느린 연소를 말하고, 연소구간이 짧으면 빠른 연소를 말한다. Fig. 5와 Fig. 6에서 EGR을 증가시키에 따라 연소구간이 증가되는 이유는, EGR 율의 증가로 화학반응이 지연되기 때문으로 판단된다. 또한 흡입온도가 145°C인 Fig. 6이 연소구간이 비교적 짧다. HCCI 엔진에서 프로판을 이용한 경우에 빠른연소를 위해서 높은 흡기온도가 필요함을 알 수 있다.

Fig. 7은 EGR율에 대한 Gross IMEP를 나타낸 실험 결과이며, gross IMEP는 평균적으로 약 2.25bar를 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 8은 EGR율에 대한 연소효율을 나타낸 실험 결과이다. 145°C에서의 연소효율은 평균 95%를 나타내고 있고, 115°C에서는 평균 85%를 나타내고 있다. 연소효율의 안정성을 고려 할 때에 흡기온도 145°C에서는 EGR을 45% 이후, 흡기온도 115°C에서는 EGR을 35% 이후는 연소효율이 감소하므로 불안정된 상태를 예측할 수 있다.

Fig. 9은 HCCI 엔진에서 EGR을 사용한 경우의 NOx 배출량을 흡입온도에 대해서 나타낸 선도이다. 일반적으로 EGR을 사용할 경우에 NOx 배출물이 감소하는 이유는 열용량의 증가로 인하여 연소온도의 저하를 생각해 볼 수 있다. 또는 EGR을 사용함으로써 급기 중에 산소농도가 감소하기 때문에 NOx가 감소하는 것으로 생각할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 HCCI 기관에 따른 효과와 EGR에 따른 효과가 동시에 복합적으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 흡기온도 115°C가 145°C에 비해 더욱 낮은 NOx 배출물을 발생하고 있다. EGR을 쓰지 않고 HCCI 엔진만으로도 NOx의 정량적 값은 1.3~5.8 ppm으로 상상을 초월할 정도의 낮은 값을 나타내고 있는 획기적인 차세대 엔진임에 틀림이 없다.

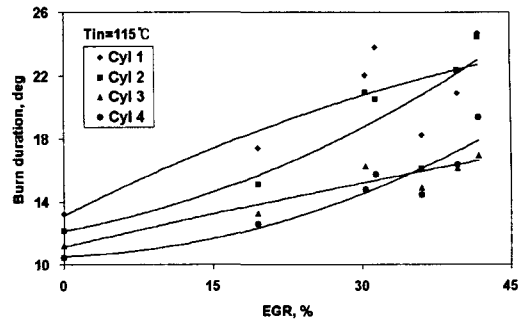


Fig. 5 Burn duration vs. EGR rate with cylinder-to-cylinder at intake temperature 115°C

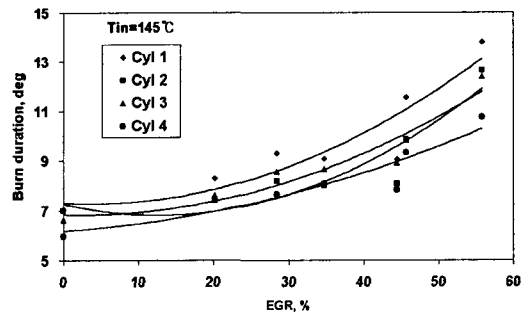


Fig. 6 Burn duration vs. EGR rate with cylinder-to-cylinder at intake temperature 145°C

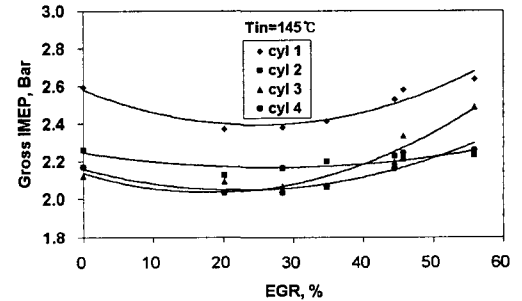


Fig. 7 Gross IMEP vs. EGR rate with cylinder-to-cylinder at intake temperature 145 °C

Fig. 10은 EGR 변화에 대한 미연의 HC을 나타낸 선도이다. 일반적으로 HC는 연료의 불안전 연소로 인하여 배출되는데 산소와 반응하여 매연의 핵으로 성장할 수 있다. HCCI 엔진의 가장 큰 단점 중의 하나가 HC의 배출량이 기존의 스

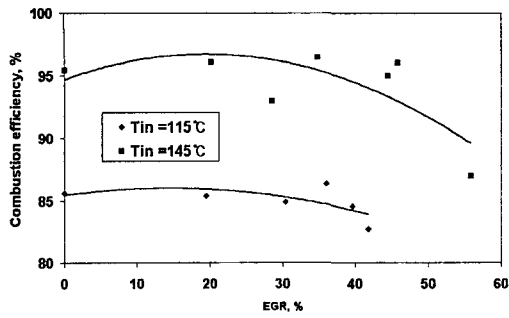


Fig. 8 Combustion efficiency vs. EGR rate with cylinder-to-cylinder at intake temperature 115°C and 145°C

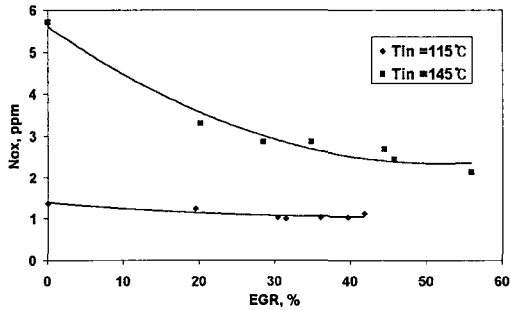


Fig. 9 NOx emissions vs. EGR rate with cylinder-to-cylinder at intake temperature 115°C and 145°C

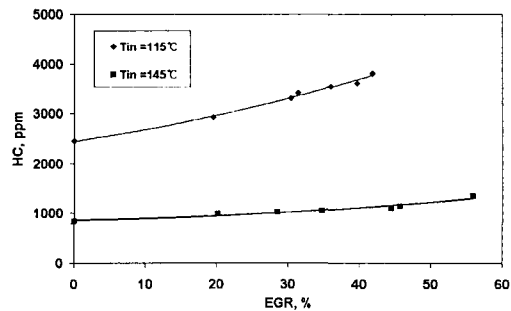


Fig. 10 Unburned HC emissions vs. EGR rate at intake temperature 115°C and 145°C

파크 점화기관에 비하여 큰 것으로 알려져 있다. 하지만, HCCI 엔진을 사용함으로써 균질한 급기를 취할 수 있기 때문에 HC의 감소를 기대해 볼 수

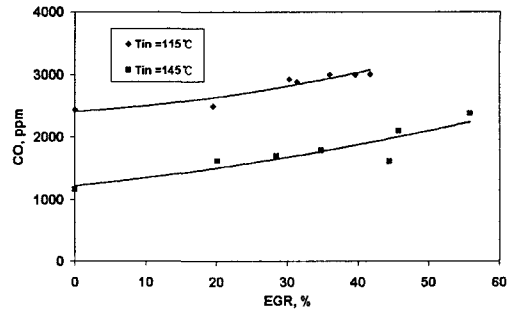


Fig. 11 CO emissions vs. EGR rate at intake temperature 115°C and 145°C

있는 긍정적인 측면이 있고, 다른 한편으로 EGR을 취함으로써 산소량의 감소로 인하여 HC가 증가하게 되는 부정적인 측면이 있다.

Fig. 11은 EGR 변화에 대한 CO를 나타낸 선도이다. 실험결과 HC와 비슷한 경향을 보이고 있다. 본 실험에서 CO의 배출량은 흡기온도 145°C에서는 통상의 가솔린 기관과 비슷한 경향을 보이고 있고, 흡기온도가 낮은 115°C에서는 비교적 양적으로 높은 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

4 실린더 압축점화 기관을 HCCI 엔진으로 개조를 하였고, 연료는 프로판을 사용하였으며, EGR을 장착하였다. 본 연구로부터 얻을 수 있었던 결론은 다음과 같다.

(1) SOC의 경향이 흡기온도, EGR율, 실린더간에 따라서 민감하게 반응함을 알 수 있다. 특히 실린더에 대한 실린더의 변화는 흡입온도가 낮은 경우가 변화의 폭이 더 크다는 것을 알 수 있고, 흡입온도가 클수록 더욱 일찍 SOC가 나타남을 알 수 있다. 흡입온도가 115°C인 경우는 EGR이 43%가 한계이고, 흡입온도가 145°C인 경우는 EGR 한계가 55%이다.

(2) HCCI 기관에서 EGR을 사용함으로써 연소온도의 저하로 말미암아 NOx가 더욱 많은 감소를 확인할 수 있었다. HCCI 기관에 따른 균질혼합기의 효과와 EGR에 따른 연소온도 저감의 효과가 동시에 복합적으로 나타남으로 NOx는 획기적

으로 저감됨을 알 수 있었다. 흡기온도 115℃가 145℃에 비해 더욱 낮은 NOx 배출물을 발생하고 있다. EGR을 쓰지 않고 HCCI 기관 만으로도 NOx의 값은 획기적으로 저감 시킬 수 있었다.

(3) 하지만 HC와 CO 배출량은 흡기온도를 높여 줄 때가 HC와 CO의 량을 저감시킬 수 있는 가능성이 있다.

## 후 기

본 연구는 인덕대학의 지원에 의하여 이루어 졌다. 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Stanglmaier, R. H. and Roberts, C. E., 1999, "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Applications," SAE Paper 1999-01-3682.
- (2) 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.
- (3) Najt, P. M. and Foster, D. E., 1983, "Compression-Ignited Homogeneous Charge Combustion," SAE paper 830264.
- (4) 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.
- (5) Aoyama, T., Hattori, Y., Mizuta, J. and Sato, Y., 1996, "An Experimental Study on Premixed-charge Compression Ignition Gasoline Engine," SAE papder 960081.
- (6) Christensen, M. and Johansson, B., 1999, "Homogeneous Charge Compression Ignition with Water Injection," SAE Paper 1999-01-0182.
- (7) Flowers, D., Aceves, S., Smith, R., Torres, J., Girard, J., Dibble, R., "HCCI In a CFREngine: Experiments and Detailed Kinetic Modeling," SAE Paper 2000-01-0328.
- (8) Odaka, M., Suzuki, H., Koike, N. and Ishii, H., 1999, "Search for Optimizing Control Method of Homogeneous Charge Diesel Combustion," SAE Paper 1999-01-0184.
- (9) Christensen, M. and Johansson, B., 1998, "Influence of Mixture Quality on Homogeneous Charge Compression Ignition," SAE paper 982454.
- (10) Christensen, M., Johansson, B., Amnes, P. and Mauss, F., 1998, "Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition," SAE paper 98787
- (11) Canakci, M. and Reitz, R. D., 2003, "Experimental Optimization of a Direct Injection Homogeneous Charge Compression Ignition Gasoline Engine Using Split Injections with Fully Automated Microgenetic Algorithms," *International Journal Engine Research*, Vol. 4, No. 1, pp.47~60.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) Ryan, T. W. and Callahan, T. J., 1996, "Homogeneous Charge Compression Ignition of Diesel Fuel," SAE Paper 961160.
- (15) Morimoto, S., Kawabata, Y. Sakurai, T. and Amano, T., 2001, "Operating Characteristics of a Natural Gas-fired HCCI Engine," SAE paper 2001-01-1034.