

## EGR(배기재순환)에 따른 HCCI(균질혼합압축착화)기관의 엔진성능특성에 관한 연구

최경호\*·한성빈†·Robert W. Dibble\*\*

(2004년 2월 20일 접수, 2004년 5월 24일 심사완료)

### A Study on Engine Performance Characteristics of a Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI) Engine According to Exhaust Gas Recirculation(EGR)

Gyeong Ho Choi, Sung Bin Han and Robert W. Dibble

**Key Words:** Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI, 균질혼합압축착화), Exhaust Gas Recirculation(배기가스재순환), Start of Combustion(SOC, 연소시작점), CO(일산화탄소), NOx(질소산화물)

#### Abstract

HCCI engines take advantage of high compression ratio and heat release rate, they exhibit high efficiency in compression ignition engines. HCCI engines also utilize a lean air/fuel ratio resulting in low emissions of NOx and particulate matter(PM). 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.

#### 1. 서 론

HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition)엔진은 압축착화점화기관의 고압축비를 그대로 유지하면서 스파크 플러그 없이 자발화에 의하여 연소를 수행하는 기관이며, 사용 연료는 가스

연료를 사용한다. HCCI기관은 고압축비와 높은 열발생율로 작동되기 때문에 압축점화기관에 해당되는 높은 효율을 가질 수 있고, 희박한 공기 연료비를 달성할 수 있기 때문에 후처리 장치 없이도 매우 낮은 질소산화물(NOx), 분진물(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>

HCCI 연소의 단점은 출력의 제약을 받고 있다는 것이다. 일반적으로 희박 공연비 또는 대량의

† 책임저자, 회원, 인덕대학 컴퓨터응용기계계열

E-mail : sungbinhan@induk.ac.kr

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

\* 회원, 계명대학교 기계·자동차공학부

\*\* University of California at Berkeley

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.<sup>(3)</sup> 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>(4,5)</sup>

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>(6,7)</sup> HCCI 엔진의 연소시기는 다음 항목의 영향을 받는 것으로 조사되어졌다. 즉, 연료의 자발화 특성, 연료농도, 잔류가스 비율, 잔류가스의 반응도, EGR률, 혼합기의 균일성, 압축비, 흡기온도, 연료의 증발잠열, 그리고 엔진의 온도, 엔진으로의 열전달, 이외의 엔진관련 변수를 고려하였다. HCCI의 문제점을 극복하기 위해서는, HCCI 전용엔진의 개발이 가장 바람직하지만, 현재로는 수치적 또는 실험적 연구를 통하여 HCCI 연소가 가능함이 제시되고 있다.<sup>(8~10)</sup>

HCCI 연소는 공기, 연료, 그리고 재순환 배기가스의 혼합기를 자연발화 전에 압축시킴으로써 얻을 수 있다. 일반적으로 HCCI 연소는 분포가 잘 되어 있으며 상대적으로 급속히 진행되는 저온연소로 그 특징을 설명할 수 있다. HCCI기관은 가스연료를 사용하므로, LPG 차량 연구에도 많은 기여를 할 것으로 생각이 든다.

앞의 많은 연구자들이 필요성을 언급했듯이, EGR률과 HCCI의 관계에 따른 깊이 있는 연구가 필요하다. 본 연구의 목적은 EGR률이 HCCI 엔진 연소에 어떠한 영향을 미치는가에 있다. 또한 EGR률에 따라 배기가스 저감의 효과와 고효율의 향상과 각종 성능 특성을 면밀히 파악하고자 한다.

## 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 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 열전도를 삽입하였다. 압력값을 위하여 연료 인젝터 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, 열발생율, IMEP(Indicated Mean Effective Pressure) 등을 계산하였다. 흡입공기유량은 나이프에지 오리피스판(knife-edge orifice plate)를 이용한 유량계를 이용하였고, 연료유량은 질량유량조절기(mass flow controller)로 측정을 하였다. 또한 배기가스를 측정하였다.

일반적으로 EGR 장치는 기관의 배출가스의 일부분을 흡기관으로 재순환시킴으로써 NOx 배출물을 저감시키기 위한 장치이다. 재순환량은 배기관과 흡기관 사이에 설치된 니들밸브를 통하여 재순환량을 조절할 수 있다. EGR %의 계산은 다음의 식을 이용하여 구한다.

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

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

연료는 부탄을 사용하였다. 흡입온도는 115°C와 130°C이며, 연료량은 12 SLPM (Standard Liter Per Minute)으로 고정 시켰다. HCCI기관은 혼합기의 온도 변화에 민감하다. HCCI기관은

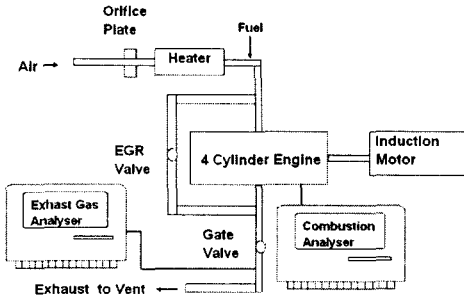


Fig. 1 Schematic diagram of experimental engine

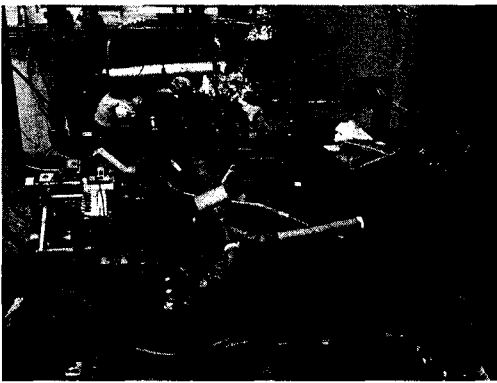


Fig. 2 Photo of experimental setup

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
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

낮은 부하 또는 낮은 흡입온도에서 실화가 발생할 수 있고, 높은 부하 또는 높은 온도에서는 노킹이 일어날 수 있다. 본 연구에서 EGR률은 체적에 대해서 0~50 %로 변화를 시켰다. 배기가스

로부터 배출된 잔류가스는 통상의 EGR 라인을 통해서 흡입이 이루어진다. EGR은 흡기온도를 증가시킨다. 그러므로 흡입온도를 일정하게 유지하기 위해서는, EGR률을 증가시킬 때에는 흡기가열은 감소시켰다. 흡입온도는 EGR률에 상관없이 일정한 온도로 유지시켰다. 기관회전수는 1800rpm에서 수행했다.

### 3. 실험결과 및 고찰

HCCI엔진은 스파크 플러그 없이 압축점화기관의 고 압축비를 그대로 유지하면서 고압자연발화가 일어나게 하기 위해서 흡입공기를 가열시킬 필요가 있다. Fig. 3 은 흡입온도를 115°C로 했을 때, 실린더간(cylinder-to-cylinder)에 대하여, EGR을 약 0~30%로 변화시켰을 경우에 대한 연소시작점(SOC, Start of Combustion)을 크랭크 각으로 나타낸 실험 결과이다. 여기서 SOC는 최고 열발생을 50%에 해당하는 크랭크 각을 의미한다.

Fig. 4는 흡입온도를 130°C로 했을 때, 실린더간에 대하여 EGR률을 약 0~50%로 변화시켰을 경우에 대한 연소시작점을 나타낸 선도이다. 스파크 점화기관과 디젤기관의 경우 SOC는 각각 점화시기(ignition timing)와 분사시기로 결정되어진다. 하지만 HCCI의 경우 점화는 균일 혼합기의 자발화에 의존하기 때문에 직접적인 SOC 제어수단이 없고, Fig. 3과 Fig. 4에서 보듯이, SOC의 경향이 흡기온도, EGR율, 실린더간에 따라서 민감하게 반응함을 알 수 있다. 특히 실린더간의 변화는 흡입온도가 낮은 Fig. 3의 경우가 SOC의 변화의 폭이 더 크고, 흡입온도가 클수록 더욱 일찍 SOC가 나타남을 알 수 있다.

Fig. 5는 일정한 흡입온도 130°C에서 실린더간에 따라서, 최대 열발생 시기를 EGR률에 대해서 나타낸 선도이다. 그림에서 최대 열발생 시기는 EGR이 증가됨에 따라 늦게 발생됨을 알 수 있다. 그러므로 Fig. 3~5에서 최고 열발생 시기와 SOC는 대체로 EGR률에 의존하는 경향이 있음을 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 흡입온도 115°C, 130°C에서

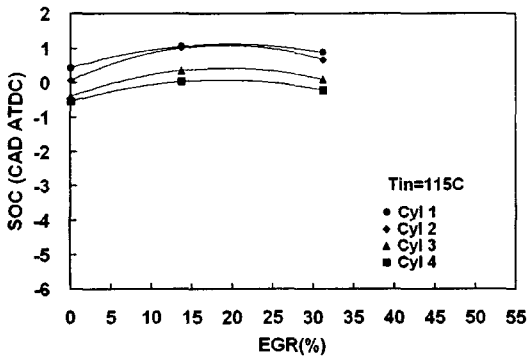


Fig. 3 Start of combustion vs EGR rate for different cylinders at intake temperature of 115°C

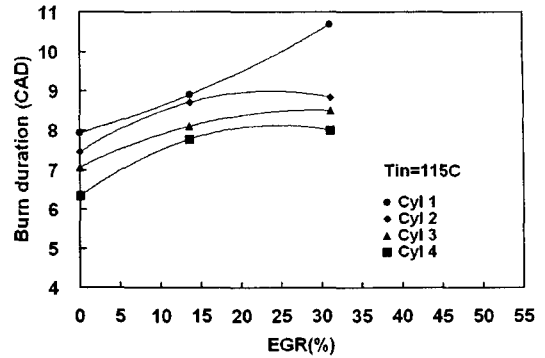


Fig. 6 Burn duration vs EGR rate for different cylinders at intake temperature of 115°C

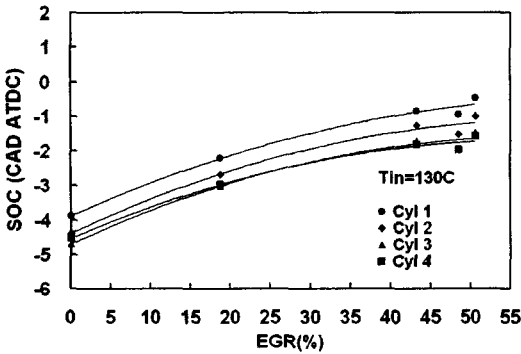


Fig. 4 Start of combustion vs EGR rate for different cylinders at intake temperature of 130°C

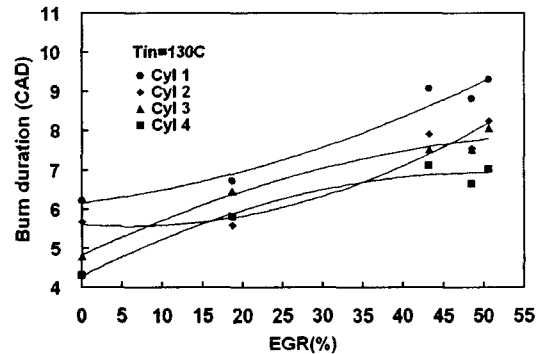


Fig. 7 Burn duration vs EGR rate for different cylinders at intake temperature of 130°C

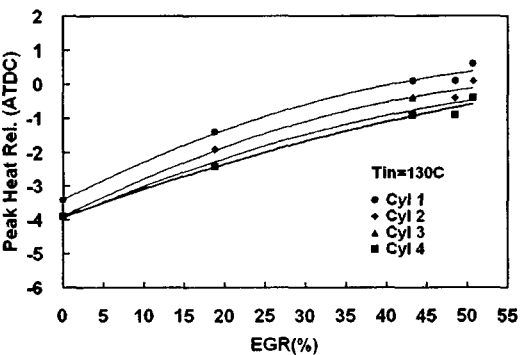


Fig. 5 Timing of heat release vs EGR rate at intake temperature of 130°C

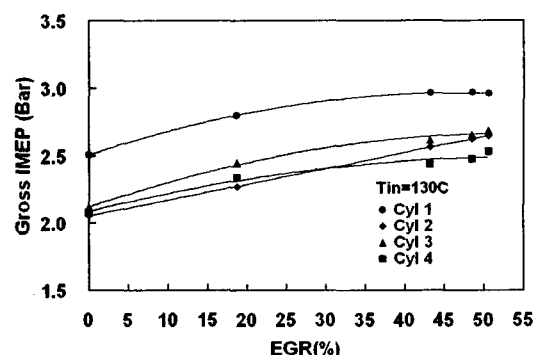


Fig. 8 Gross IMEP vs EGR rate for different cylinders at intake temperature of 130°C

EGR에 대한 연소구간을 나타낸 선도이다. 여기서 연소구간은 열발생 10~90% 동안의 크랭크 각을 의미한다. 일반적으로 연소구간이 길면

느린 연소를 말하고, 연소구간이 짧으면 빠른 연소를 말한다. Fig. 6과 Fig. 7에서 EGR률이 증가함에 따라 연소구간이 증가되는 이유는, EGR

물의 증가로 화학반응이 지연되기 때문으로 판단된다. 또한 흡입온도가 130°C인 Fig. 7이 연소구간이 비교적 짧다. HCCI 엔진에서 부탄을 이용한 경우에 급속연소를 위해서 높은 흡기온도가 필요함을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 EGR률에 대한 Gross IMEP와 Pumping Mean Effective Pressure (PMEP)를 각각 나타낸 실험 결과이다. Gross IMEP는 2~3bar로 안정된 운전을 하고 있으며, PMEP도 0.04~0.14bar로 통상의 가솔린 기관에 비해 작은 값을 유지하고 있는 것으로 판단되며, PMEP는 EGR률에 영향을 크게 받지 않는다.

Fig. 10은 부탄연료를 사용하여, 흡입온도를 변수로 하여 1800rpm에서 EGR 변화에 대한 CO를 나타낸 선도이다. 그림에서 CO의 배출량은 흡기온도 130°C에서는 통상의 가솔린 기관과 비슷한 경향을 보이고 있고, 흡기온도가 낮은 115°C에서는 비교적 양적으로 높은 값을 보이고 있음을 알 수 있다. HCCI엔진의 단점 중의 하나가 CO의 배출량이 기존의 스파크 점화기관에 비하여 큰 것으로 알려져 있다. 하지만, HCCI엔진을 사용함으로써 균질한 혼합기를 취할 수 있기 때문에 낮은 CO량을 기대해 볼 수 있는 긍정적인 측면이 있지만, 다른 한편으로 EGR을 취함으로써 산소량의 감소로 인하여 CO가 증가하게 되는 부정적인 측면이 있다.

Fig. 11은 HCCI엔진에서 흡입온도를 변수로 하여 EGR을 변화시켰을 때 NO<sub>x</sub> 배출량을 나타낸 선도이다. 일반적으로 EGR을 장착한 엔진은 NO<sub>x</sub> 배출물이 감소하는 것으로 알려져 있다. NO<sub>x</sub> 감소의 원인은 열용량의 증가로 인하여 연소온도가 저하되며, 이로 인하여 급기 중에 산소농도가 감소하기 때문에 NO<sub>x</sub>가 감소하는 것으로 생각할 수 있다. Fig. 11에서 흡기온도 115°C에서 NO<sub>x</sub>는 대략 2~5 ppm가 발생하며, 130°C에서는 3~12 ppm의 NO<sub>x</sub>를 배출하고 있다. 또한 EGR 0인 경우인 HCCI엔진 만 장착한 경우에 대해서도 115°C와 130°C인 경우 각각 5 ppm, 12 ppm 정도의 NO<sub>x</sub>를 배출하고 있다. 이렇게 절대적 값에서도 NO<sub>x</sub>량이 적은 것은 HCCI 기관의 균질한 혼합기 공급 효과와 EGR 부착에 따른 연소온도의 저하로 인한 원인이 동시에 복합적으로 나타

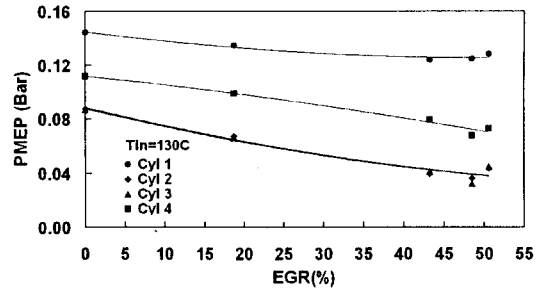


Fig. 9 PMEP vs EGR rate for different cylinders at intake temperature of 130°C

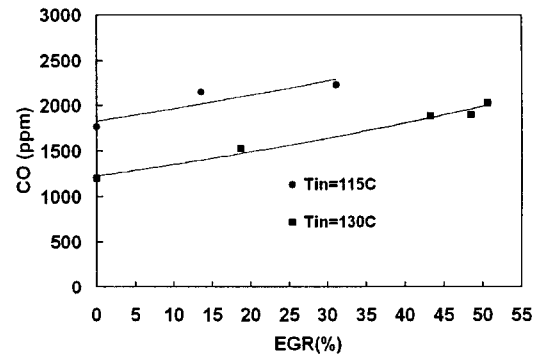


Fig. 10 CO emissions vs EGR rate at intake temperature of 115°C and 130°C

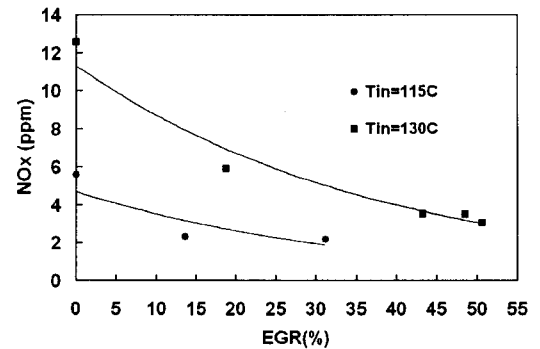


Fig. 11 NO<sub>x</sub> emissions vs EGR rate at intake temperature of 115°C and 130°C

나고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

4-실린더 압축점화 기관을 HCCI 엔진으로 개

조를 하였고, 연료는 부탄을 사용하며, EGR률에 대한 실험 결과는 다음과 같다.

(1) SOC의 경향은 흡기온도, ERG률, 실린더간에 따라서 민감하게 반응한다. 특히 실린더간의 변화는 흡입온도가 낮은 경우가 SOC의 변화의 폭이 더 크고, 흡입온도가 클수록 더욱 일찍 SOC가 나타난다.

(2) 최대 열발생 시기는 EGR이 증가 됨에 따라 늦게 발생된다. 최고 열발생 시기와 SOC는 대체로 EGR률에 의존하는 경향이 있다. 또한 EGR이 증가함에 따라 연소구간이 증가된다.

(3) HCCI엔진을 사용함으로써 균질한 혼합기를 취할 수 있기 때문에 낮은 CO량을 기대해 볼 수 있지만, EGR을 취함으로써 산소량의 감소로 인하여 CO가 증가하게 되는 부정적인 측면이 있다.

(4) NOx량이 적은 것은 HCCI 기관의 균질한 혼합기 공급 효과와 EGR 부착에 따른 연소온도의 저하로 인한 원인이 동시에 복합적으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것입니다.

## 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) Christensen, M. and Johansson, B., 1999, "Homogeneous Charge Compression Ignition with Water Injection," *SAE Paper* 1999-01-0182.
- (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) Flowers, D., Aceves, S., Smith, R., Torres, J., Girard, J. and Dibble, R., 2000, "HCCI In a CFR Engine: Experiments and Detailed Kinetic Modeling," *SAE Paper* 2000-01-0328.
- (6) Christensen, M., Johansson, B., Amnes, P. and Mauss, F., 1998, "Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition," *SAE paper* 98787.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Han, S. and Chang, Y., 2003, "A Study on the Effects of EGR on Engine Performance and Emissions of a HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) Engine," *Transactions of KSME(B)*, Vol. 27, No. 11, pp. 1630~1636.
- (10) Morimoto, S., Kawabata, Y., Sakurai, T. and Amano, T., 2001, "Operating Characteristics of a Natural Gas-Fired HCCI Engine," *SAE paper* 2001-01-1034.