

균질혼합압축점화기관의 배출가스특성에 관한 연구

한성빈* · 최경호*

(2003년 9월 2일 접수, 2004년 2월 6일 심사완료)

A Study on the Emissions of Homogeneous Charge Compression Ignition Engine

Sung Bin Han and Gyeong Ho Choi

Key Words: Equivalence Ratio(당량비), Intake Temperature(흡입온도), HCCI, Homogeneous Charge Compression Ignition Engine(균질혼합압축점화기관), NO_x, Nitrogen Oxides(질소산화물), HC, Hydrocarbon(탄화수소), CO, Carbon Monoxide(일산화탄소)

Abstract

As a new concept in engines and a power source for future automotive applications, the HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) engine has been introduced. Essentially a combination of spark ignition and compression ignition engines, the HCCI engine exhibits low NO_x and PM emissions as well as high efficiency under part load. In this research, a 4 cylinder diesel engine was converted into a HCCI engine, and propane was used as the fuel. The main parameters for this research are fuel flow rate and the temperature of the intake manifold, and the effects of such on a HCCI engine's performance and exhaust was investigated.

1. 서론

최근에 새로운 엔진의 개념으로 Homogeneous Charge Compression Ignition Engine(HCCI)이 각광을 받고 있다. SAE에서는 미래의 자동차용 엔진 분야에 수소, 전기, 태양 등과 같이 HCCI 엔진을 내연기관 연소의 새로운 방법으로 채택을 하고 있다.

HCCI 연소의 기본적인 개념은 스파크 점화 및 압축점화 엔진의 결합이라고 할 수 있다. 하지만, 압축점화기관과 달리 자연발화가 가능한 균질한

공기/연료의 혼합기를 사용한다.^(1,2) 압축점화기관과는 균일 혼합기를 연소시키기 위해서 비교적 낮은 분사방식을 이용하여 흡기관에 공급되어 진다. 또한 연료에 비해 공기량이 많은 높은 공연비를 사용함으로써 높은 희박화 상태를 얻을 수 있다. HCCI 연소의 경우 연소는 동시에 여러 곳에서 시작되기 때문에 연소의 사이클간 변화가 매우 작다. 또한 혼합기는 동시에 거의 균일한 상태에서 연소된다. 이러한 방법으로 불안정 화염전파를 피할 수 있다.^(3,4)

HCCI의 가장 큰 장점은 질소산화물(NO_x), 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.⁽⁵⁾

HCCI 연소의 가장 큰 매력 중의 하나는 NO_x의 저감인데, 이러한 NO_x 저감은 연소실 내에 고온

* 책임저자, 회원, 인덕대학 컴퓨터응용기계계열
E-mail : sungbinhan@induk.ac.kr
TEL : (02)901-7635 FAX : (02)901-6875
* 회원, 계명대학교 기계·자동차공학부

영역이 존재하지 않기 때문이다. HCCI 연소는 전체적으로 잘 혼합된 공연비에서 일어난다. 일부 연구자들은 수치 시뮬레이션을 통하여 이러한 효과를 발표하였다.^(6,7)

Flowers 등⁽⁸⁾은 당량비와 EGR의 조합에 관한 연구를 수행하였고, 또한 고부하에서는 전통적인 SI로 작동을 하고 저부하에서는 HCCI 작동을 하는 흥미로운 연구를 수행하였다.

Au 등⁽⁹⁾은 양산엔진을 이용한 HCCI 시험을 수행하였다. 그들이 사용한 엔진은 1.9 리터 VW 엔진으로서 흡입공기 예열 방법을 적용한 HCCI 연소를 적용하였다.

향후 디젤 배기 규제가 매우 엄격히 강화되기 때문에 HCCI 연소는 디젤엔진 응용 분야에서 높은 관심을 받고 있다. 한편, HCCI 연소는 스파크 점화 엔진의 저부하 운전에서도 NOx 저감효과가 높은 것으로 알려져 있다. 하지만, HCCI 전용 연료 또는 첨가제의 개발이 필요하다.^(10~11)

본 연구의 주요 관심은 연료유동율과 흡입매니폴드의 온도가 HCCI 엔진의 성능 및 배기가스에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 것이다.

2. 실험장치 및 실험 방법

HCCI 엔진 실험을 위해서 배기량이 1,896 cc인 4기통 디젤기관(Volkswagen Turbo Direct Injection)을 사용하였다. Fig.1은 실험장치의 사진촬영이고, Fig.2는 실험장치의 개략도이다. Table 1에 실험에 사용된 엔진의 제원을 나타냈다. 실험을 수행하기 위해서, TC (turbo charged)엔진을 NA (naturally aspirated)으로 개조를 했다. 흡입공기량은 오리피스를 설치하여 공기량을 측정하였다. 연료유량은 전자식연료유량측정장치를 이용하였다. 또한 흡입 혼합기의 예열을 위하여 18 kW 전기히터를 사용하였고, 예열에 필요한 에너지는 효율계산에 포함시키지 않았다. 기관에 가해지는 부하의 조절과 측정을 위해 동력계를 사용하였다. 흡기관, 배기관, 냉각수, 엔진 오일 등 각 부분의 온도를 측정하기 위해 열전도를 삽입하였다. 실험에서는 흡기온도 변화에 대한 각종 엔진 성능을 평가하였다.

실험 엔진의 엔진 회전수는 1800 RPM에서 수행했다. 예열의 정도는 압축비, 매니폴드 압력, 연료의 조성, 공기연료비에 따라 달라진다.

Table 1 Engine specifications

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

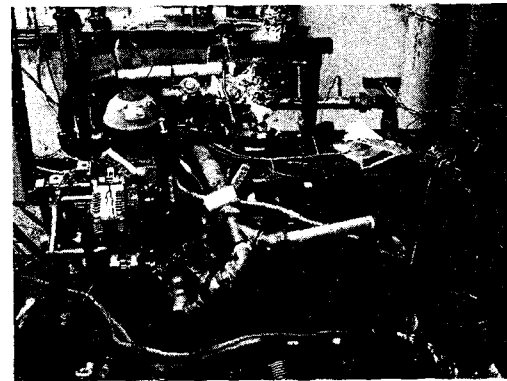


Fig.1 Photo of experimental setup

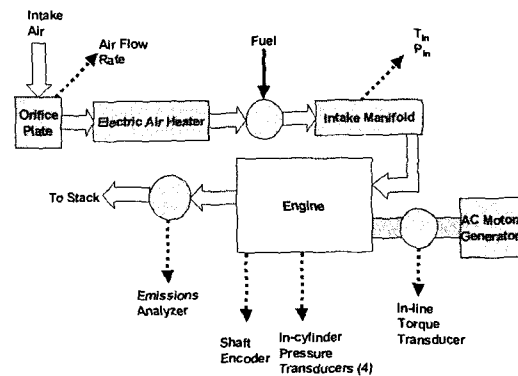


Fig. 2 Schematic diagram of experimental engine

또한 배기가스 측정 장치를 이용하여 NO_x, HC, CO 등을 측정하였다. 사용한 연료는 프로판을 대상으로 하였다. 본 연구에서 흡입온도와 연료-공기 당량비(fuel-air equivalence ratio)를 변수로 하여 연료-공기 당량비는 0.3, 0.33, 0.36, 0.39에서 각각 실시되었고, 흡입온도는 범위는 약 102 °C에서 140 °C까지의 범위에서 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3는 흡입온도의 변화에 대하여 토크를 나타낸 것이다. 일반적으로 엔진 실험에서 흡입온도의 감소는 엔진출력의 증가로 이어진다. 이것은 흡입온도의 감소로 말미암아 공기의 밀도가 증가하게 되어 토크가 증가하게 된다. 흡입온도 감소에 따른 토크의 증가는 압축점화기관과 스파크 점화기관 모두 해당되는 일반적인 경향이다. 특히 본 연구와 같이 HCCI 엔진에서도 흡입온도 감소에 따른 토크 증가를 볼 수 있다.

이 그림에서, 연료-공기 당량비의 증가에 따라 토크가 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 연료-공기 당량비의 증가는 상대적으로 공기에 비해 연료의 증가를 의미하기 때문에 토크의 증가로 이어진다.

Fig. 4는 연료-공기 당량비에 따른 흡입온도 변화에 대한 토크/연료유량(fuel flow rate)을 나타낸 실험 결과이다. 흡입온도의 범위는 약 102~140 °C 이고, 연료-공기 당량비는 약 0.3~0.4에서 각각 실시되었다. 흡입온도 변화에 대한 토크/연료유량의 결과는 흡입온도 변화에 대한 토크의 경향과 유사하다. 하지만, 이러한 실험 결과를 통하여 토크의 증가는 연료유량에 따라 크게 좌우된다는 것을 더욱 확실히 알 수 있게 되었다.

Fig. 5는 온도 변화에 따른 연료-공기 당량비에 대한 토크를 나타낸 선도이다. 연료-공기 당량비는 약 0.28~0.42에서 이루어 졌고, 흡입온도는 102, 108, 126, 139 °C에서 실험이 이루어 졌다. 일반적으로 HCCI 엔진은 혼합기의 온도 변화에 민감하기 때문에, 흡입혼합기의 조그마한 온도 변화에 대해서도 결정적인 실화의 요인으로도 작용할 수 있다. 그러나 그림에서 연료-공기 당량비가 희박해 짐에 따라 연소의 불안정⁽¹²⁾으로

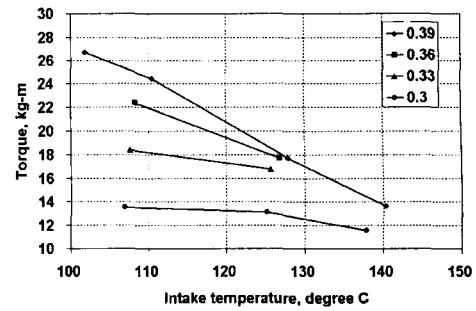


Fig. 3 Torque vs. intake temperature for varying fuel-air equivalence ratios

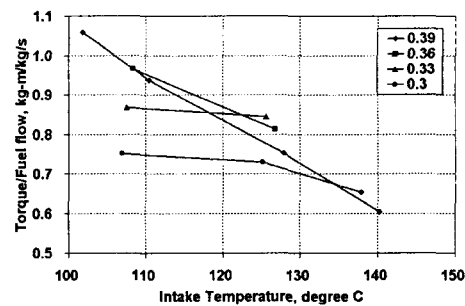


Fig. 4 Torque/fuel flow rate vs. intake temperature for varying fuel-air equivalence ratios

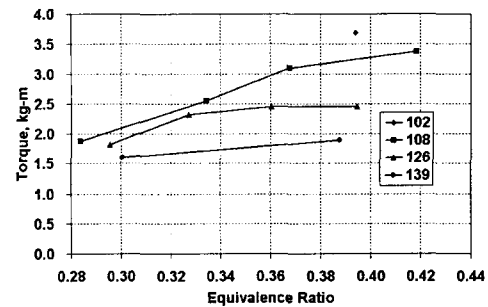


Fig. 5 Torque vs. fuel-air equivalence ratio for varying intake temperatures

토크는 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 6은 흡입온도에 따른 연료-공기 당량비 변화에 대한 토크/연료유량을 나타낸 실험 결과

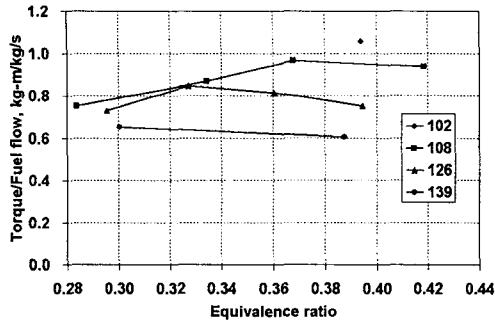


Fig. 6 Torque/fuel flow rate vs. fuel-air equivalence ratio for varying intake temperatures

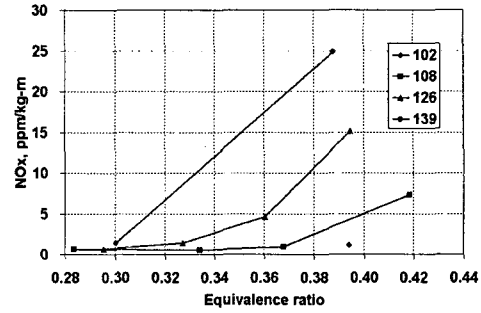


Fig. 8 NOx vs. fuel-air equivalence ratio for varying intake temperatures

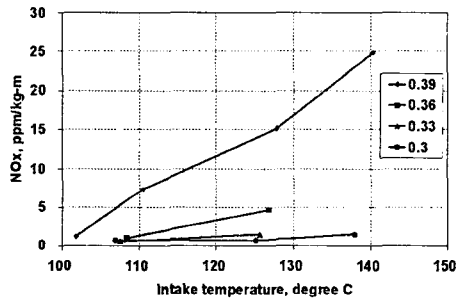


Fig. 7 NOx vs. intake temperature for varying fuel-air equivalence ratios

이다. 이 경우도 전체적으로 흡입온도의 감소가 연료유량당의 토크의 값의 증가를 초래한다. 하지만, 연료-공기 당량비가 작아짐에 따라, 즉, 희박연소가 됨에 따라, 연소의 불안정으로 토크/연료 유량의 값은 기대값 보다 약간 작아지는 것을 알 수 있다. 일반적으로 엔진 연소에서 혼합기가 너무 희박한 경우 불완전 연소로 말미암아 실화가 발생한다. HCCI 연소의 경우 연소가 연소실 내에서 여러 곳에서 시작되기 때문에 연소의 사이클간 변화가 비교적 작을 것으로 생각이 든다. 또한 혼합기는 동시에 거의 균일한 상태에서 연소되기 때문에 불안정한 화염전파를 어느 정도 피할 수 있어서 그림에서 보듯이 희박연소 영역에서 약간의 토크/연료유량의 감소가 있는 것으로 생각되어 진다.

Fig.7은 연료-공기 당량비를 변수로 하여, 흡입 온도 변화에 대한 NOx 배출물을 나타낸 실험 결

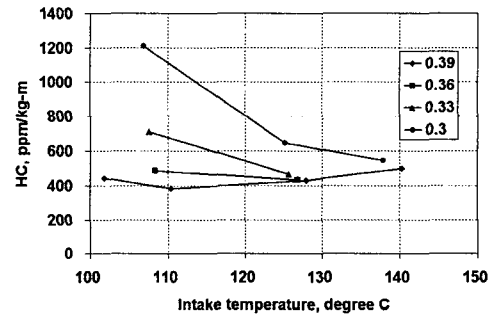


Fig. 9 HC vs. intake temperature for varying fuel-air equivalence ratios

과이며, Fig.8은 흡입온도에 따른, 연료-공기 당량비 변화에 대한 NOx 배출물을 나타낸 선도이다. 실험 결과에서, 연료-공기 당량비 0.39를 제외하고 모든 실험 조건 하에서 NOx는 매우 낮은 값을 나타내고 있다. HCCI의 가장 큰 매력 중의 하나가 NOx의 저감이다. 예상했던 대로, 희박한 영역인 당량비 0.3 또는 0.33에서는 NOx 배출물은 거의 영을 나타내고 있다. Fig. 8와 같이 일정한 온도에서 당량비 변화에 대한 NOx 배출물 선도에서도 역시 NOx는 희박 혼합기에서 더욱 낮은 것을 알 수 있다. 이러한 NOx 저감은 HCCI 연소실 내에 고온영역이 존재하지 않고, 또한 HCCI 연소는 전체적으로 잘 혼합된 공연비를 유지하고 있기 때문 일 것으로 생각이 든다. 이러한 낮은 혼합기 공급에 대한 연구는 추후 EGR과 같은 장치를 이용한다면, 더욱 명확해 질 것으로 생각된다.

Fig. 9는 연료-공기 당량비를 변수로 하여, 흡

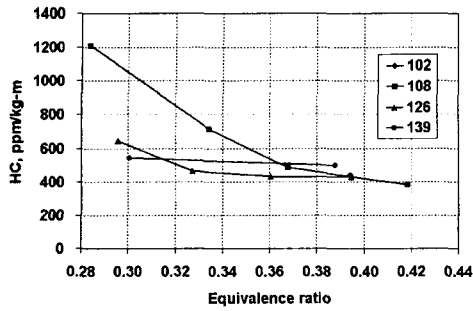


Fig. 10 HC vs. fuel-air equivalence ratio for varying intake temperatures

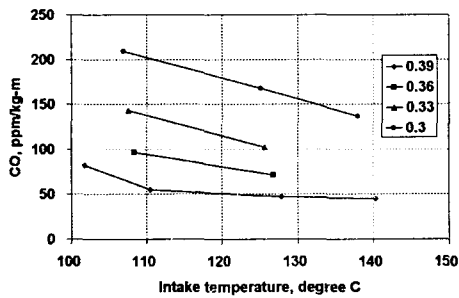


Fig. 11 CO vs. intake temperature for varying fuel-air equivalence ratios

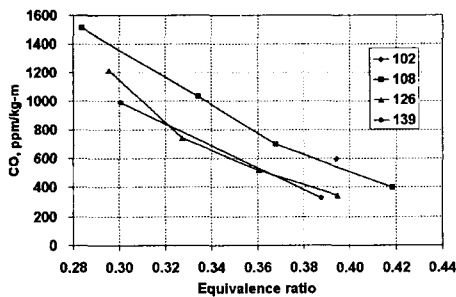


Fig. 12 CO vs. equivalence ratio for varying intake temperatures

흡입온도 변화에 대한 HC 배출물을 나타낸 실험 결과이며, Fig.10은 흡입온도에 따른, 연료-공기 당량비 변화에 대한 HC 배출물을 나타낸 선도이다. 실험에서 일정한 당량비에서 흡입온도의 증가에 따라서 HC의 양은 약간 감소하는 경향이 있고, 일정한 당량비에 대해서는 흡입온도 증가

에 따라서 적어짐을 알 수 있다. 희박한 연소 구간에서 HC의 발생이 증가되는 것으로 보아 연소의 상태가 약간은 불안정한 것으로 판단된다. 하지만 HCCI 엔진이 균질한 연소를 하고 있기 때문에 HC는 그다지 높지 않음을 알 수 있다.

Fig.11은 연료-공기 당량비를 변수로 하여, 흡입온도 변화에 대한 CO 배출물을 나타낸 실험 결과이며, Fig.12는 흡입온도에 따른, 연료-공기 당량비 변화에 대한 CO 배출물을 나타낸 선도이다. 실험에서 일정한 당량비에서 흡입온도의 증가에 따라서 CO의 양은 약간 감소하는 경향이며, 일정한 당량비에 대해서는 흡입온도 증가에 따라서 CO는 적어짐을 알 수 있다. HCCI 엔진에서의 가장 큰 단점은 HC와 CO의 배출량이 증가한다.

이러한 HC 및 CO 배출의 원인은 HCCI 운전시에 실린더 내의 온도가 낮기 때문이다. 일반적으로 연소가스의 온도가 감소하면 실린더 내의 후연소 산화율 (post-combustion oxidation rate)⁽¹³⁾이 감소할 뿐만 아니라 배기가스 중의 HC와 CO 이 증가한다.

4. 결론

4-실린더 디젤기관을 HCCI 엔진으로 개조를 하였고, 공급되는 연료는 프로판을 대상으로 하였다. 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 연료-공기 당량비의 증가에 따라 토크가 증가하고, 흡입온도가 낮아짐에 따라 토크도 증가한다. 흡입온도 변화에 대한 토크/연료유량의 결과는 흡입온도 변화에 대한 토크의 경향과 유사하다. HCCI 엔진은 혼합기의 온도 변화에 민감하다는 것을 알 수 있다.

(2) NOx는 낮은 흡입온도에서 더욱 적게 배출되는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 HCCI 연소실 내에 고온영역이 존재하지 않고, 또한 HCCI 연소는 균질된 혼합기를 유지하고 있기 때문 일 것으로 생각이 든다.

(3) HC, CO 배출물은 흡입온도의 증가에 따라서 HC, CO의 양은 약간 감소하는 경향이 있고, 이러한 HC 및 CO 배출의 원인은 HCCI 운전시에 실린더 내의 온도가 낮기 때문이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정
계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 지
원에 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) Akagawa, H., Miyamoto, T., Harada, A., Sasaki, S., Shimazame, N. and Tsujimura, K., 1999, "Approaches to Solve Problems of the Premixed Lean Combustion," *SAE Paper* 1999-01-0183.
- (3) Christensen, M. and Johansson, B., 1999, "Homogeneous Charge Compression Ignition with Water Injection," *SAE Paper* 1999-01-0182.
- (4) Iwabuchi, Y., Kawai, K., Shoji, T. and Takeda, Y., 1999, "Trial of New Concept Diesel Combustion System - Premixed Compression - Ignited Combustion," *SAE Paper* 1999-01-0185.
- (5) 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.
- (6) Shimazaki, N., Akagawa, H. and Tsujimura, K., 1999, "An Experimental Study of Premixed Lean Diesel Combustion Process," *SAE Paper* 1999-01-0181.
- (7) Stanglmaier, R. H., Li, J. and Mattews, R. D., 1999, "The Effect of In-Cylinder Wall Wetting Location on the HC Emissions from SI Engines," *SAE Paper* 1999-01-0502.
- (8) Flowers, D., Aceves, S. M., Frias, J. M., Smith, J. R., Au, M., Girard J. and Dibble R., 2001, "Operation of a Four-Cylinder 1.9L Propane Fueled Homogeneous Charge Compression Ignition Engine: Basic Operating Characteristics and Cylinder-to-Cylinder Effects," *SAE Paper* 2001-01-1895.
- (9) Au, M., Girard J. W., Dibble R., Flowers, D., Aceves, S. M., Frias, J. M., Smith, J. R., Seibel C. and Maas U., 2001, "1.9-Liter Four-Cylinder HCCI Engine Operation with Exhaust Gas Recirculation," *SAE Paper* 2001-01-1894.
- (10) Aoyama, T., Hattori, Y., Mizuta, J. and Sato, Y., 1996, "An experimental study on premixed-charge compression ignition gasoline engine," *SAE paper* 960081.
- (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.