

제어자발화 가솔린기관의 배기 특성 An Emission Characteristics of a Controlled Auto-Ignition Gasoline Engine

김 홍 성
H. S. Kim

(접수일 : 2008년 11월 20일, 수정일 : 2009년 3월 9일, 채택확정 : 2009년 3월 13일)

Key Words : Controlled Auto-Ignition Gasoline Engine(제어자발화 가솔린기관), Inlet-Air Temperature(흡입공기온도), Carbon Monoxide(일산화탄소), Hydrocarbon(탄화수소), Nitrogen Oxides(질소산화물)

Abstract : This work deals with a controlled auto-ignition (CAI) single cylinder gasoline engine, focusing on the extension of operating conditions. The fuel is injected indirectly into electrically heated inlet air flow. In order to keep a homogeneous air-fuel mixing, the fuel injector is cooled by the water of a specially designed coolant passage. The engine emission characteristics were investigated under the wide range of operating conditions such as 32 to 63 in the air-fuel ratio, 1000 to 1800 rpm in the engine speed, and 150 to 180 °C in the inlet air temperature. The ultra lean-burn can be achieved by the auto-ignition of gasoline fuel due to the heated inlet air in the compression ignition gasoline engine. It is confirmed that the emission concentrations of carbon monoxide, hydrocarbons and nitrogen oxide can be significantly reduced by CAI combustion compared with the combustion of a conventional spark ignition engine.

1. 서 론

현재 세계적으로 환경오염의 심각성과 지구온난화로 인하여 배출가스 저감 및 우수한 연료경제성을 가진 초 저연료소비 자동차기관 출현에 대한 사회적인 요구가 점차 강해지고 있다. 특히 가솔린기관의 초 저연료 소비와 배기 가스 저감의 동시 실현을 위하여 제어자발화 (Controlled Auto-Ignition, 이하 CAI로 약칭) 연소 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. CAI 연소는 기존의 가솔린기관 연소나 디젤기관 연소와는 다른 새로운 개념의 연소 방식으로 연소실 전체에 균질의 연료-공기 혼합기가 압축과정 말에서 다점적으로 동시 자발화되어 연소가 이루어지는 방식이다. CAI 연소방식에 관한 연구는 1980년대부터 본격적으로 활발하게 시작되었으며 선행연구자의 연구는 다음과 같다. Koji 등은 고압축비 직접분사 디젤기관에 디젤 연료 분사의 질량유동율, 연소와 점화 특성 및 기관성능과 배기가스 배출에 대한 공기연료비의 영향에 대해 연

구하였다¹⁾. Nakamura 등은 희박연소 한계 확장을 위해 다점 스파크 점화의 연소특성을 연구하였다²⁾. Inoue 등, Onishi 등은 예 혼합 희박연소가 층상급기연소에 비해 NO_x 저감 효과가 크게 나타났다고 보고하였다^{3,4)}. Christensen 등은 이소옥탄, 에탄올, 천연가스 등 다양한 연료를 사용하여 연구를 수행하였으며 천연가스를 사용한 경우 상용 압축착화나 스파크 점화 연소에 비해 NO_x 발생이 크게 저감되었다⁵⁾. Taro 등은 Nakamura 등, Inoue 등, Onishi 등의 연구 결과 미비한 점을 보완하였지만 그들의 연구는 기관운전 조건인 기관회전수와 흡입공기온도의 범위가 제한되었으며 연료분사시기가 일정한 운전 상태에서 흡기포트에 분사하는 등 매우 한정된 운전조건에서 기관 성능과 배기 특성을 연구하였다⁶⁾. 국내에서도 가솔린 및 디젤 CAI 연소장치와 시스템을 활용하여 기관운전 조건 변화에 대한 성능 평가 연구가 수행되고 있다⁷⁾.

CAI 연소는 2행정 기관에 대해서는 "TS (Toyota-Soken Combustion)³⁾", "ATAC (Active Thermo-Atmosphere Combustion)⁴⁾", "AR(Activated Radicals) combustion⁸⁾", "IAPAC(Compressed air

김홍성(책임저자) : 경기공업대학 자동차과
E-mail : hskim@kinst.ac.kr, Tel : 031-496-4765

assisted fuel injection process)⁹⁾, 4행정 기관에 대해서는 "HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition)⁵⁾", "PCCI(Premixed Charge Compression Ignition)^{6,10)}", "CAI(Controlled Auto-Ignition) combustion¹¹⁾", "CIHC(Compression Ignited Homogeneous Charge) combustion¹²⁾", "UNIBUS (Diesel combustion under uniform higher-dispersed mixture formation)¹³⁾" 등 많은 다른 이름들로 사용되며 연구되고 있다.

본 연구는 기존의 스파크 점화방식이 아닌 CAI 연소 방식을 도입하여 별도의 스파크 점화장치 없이 상용 단기통 기관에 유입되는 흡입공기를 가열 및 제어하여 흡기포트에 분사되는 가솔린 연료의 압축 착화성을 향상시킴으로써 기관 작동을 가능케 하였고 공기연료비, 기관회전수 및 흡입 공기 가열 온도 변화에 대한 제어자발화 가솔린기관(Controlled Auto-Ignition Gasoline Engine)의 배기특성을 규명하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로서 실험기관, 흡·배기장치, 흡입 공기 가열 및 제어장치, 전기동력계, 연료공급장치, 냉각장치, 연소해석장치, 연료분사 제어장치 및 배기분석장치로 구성되며 각 부분의 압력과 온도를 실시간으로 측정할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 기관은 4사이클 수평형 단기통 수냉식 직접분사 디젤기관(대동엔진, ND-80)에 흡입 공기 가열 및 제어장치 그리고 인젝터를 설치하여 CAI 가솔린기관으로 개조한 것이며 Table 1에 실험기관의 제원을 제시하였다.

기관에 공급되는 공기량은 흡입유도관에 오리피스 유량계를 설치하여 오리피스 전후의 압력차로 측정하였으며 가솔린을 포트 분사식으로 하여 로터리 엔코더의 각도 신호를 기준으로 매 사이클마다 일정한 크랭크 각도에서 분사가 시작되도록 하였고, 흡입밸브와 바로 인접한 위치에 있는 인젝터로 0.1 ms 간격으로 프로그램화된 기간 동안에 연료가 분사되도록 하여 연료량을 조절하였다. 또한 흡기포트 가열에 따른 연료 인젝터의 과열을 방지하기 위해 구리관을 이용한 순환형 수냉식으로 인젝터를 냉각시켰다. 공기연료비는 오리피스 유량계로 측정된 공기 증량과 메스 실린더로 측정된 연료 증량비로서

산출 하였다. 흡입 공기 가열 및 제어장치는 흡입 서지탱크와 기관에 부착된 흡입 공기 관 사이에 사각형 형태의 통 안에 세라믹 보빈(bobbin)을 각각 병렬로 2개를 고정하여 1 kW 용량의 니크롬선을 각 세라믹 보빈에 감아 2개를 병렬로 설치한 다음 결선 작업을 하여 기관 제어장치에 장착시킨 2 kW용 전압조절기에 연결하여 제작하였다. 온도를 검출하는 K-type의 열전대, 가열온도를 실시간으로 표시하는 디스플레이어로 구성하였으며 제어 장치는 1℃ 단위로 제어 가능하도록 하였다.

이와 같이 구성한 흡입 공기 가열 및 제어장치의 기초실험을 수행한 결과 기관회전수에 대한 운전 가능한 흡입 공기 가열 온도 범위는 각각 상이하게 나타났다. 그 예로서 기관회전수 1800 rpm인 경우 250℃까지 상승시킬 수 있음을 확인하였으며 150℃ 이하인 경우는 기관 운전 상태가 극히 불안정하여 CAI 연소를 실현하는데 있어서 상당한 어려움이 발생하였다.

본 실험 조건에서는 기관의 안정적 연소 확보를 위해 흡입 공기 온도의 범위를 150℃부터 180℃까지 제한하여 실험을 수행하였다. 연소실 내의 압력 변동의 측정에는 압력변환기(Kistler Co. Type-601A) 및 증폭기(Kistler Co. Type-5011)를 사용하였으며 취득한 압력신호는 연소해석장치(Ono Sokki Co. Type CB-366)를 사용하여 분석하였다. 본 연구에 사용된 실험 기관 및 실험 기관 제어 장치의 사진을 Fig. 2에 나타내었다. Table 2는 배기가스 측정 및 분석에 사용된 NO/NO_x 분석계와 CO 및 HC 분석계의 주요 제원을 제시한 것이다. NO/NO_x 분석계의 측정 원리는 화학발광법(chemiluminescent method)으로 측정 범위는 0~5000 ppm이며 CO 및 HC 분석계의 측정 원리는 비분산 적외선법(Non-disperse infrared rays method, NDIR)으로서 측정 범위는 CO가 0~10 %이고, HC는 0~8000 ppm이다.

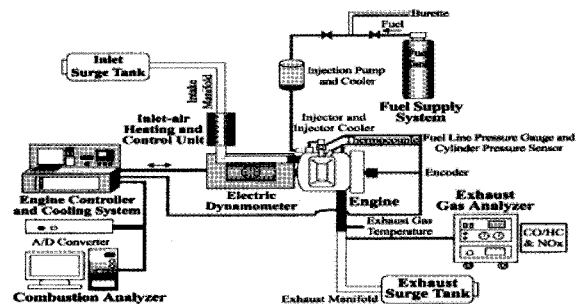


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

Table 1 Engine specifications

number of cylinder	1
bore × stroke	92 × 95 mm
displacement volume	631 cm ³
brake power	4 kW
cooling system	water cooling
combustion chamber	toroidal bowl type
compression ratio	18
injection timing	60° btdc
type of fuel	gasoline
fuel injection position	inlet port
fuel injection pressure	3 kgf/cm ²

Table 2 Specifications of exhaust gas analyzer

measuring principle and range	CO : NDIR, 0~10 % HC : NDIR, 0~8000 ppm NO/NO _x : chemiluminescence & atmospheric pressure type, 0 ~ 5000 ppm
gas sampling	direct sampling
reproducibility	2 % of full scale
response time	CO : 90 % response within 10 sec HC : 90 % response within 10 sec NO/NO _x : 90 % response within 20 sec
ambient condition	CO/HC : 0~40 °C NO/NO _x : 5~35 °C
warm-up time	CO/HC : 30 min NO/NO _x : approx. 1 hour
power supply	AC 100 V, 50/60 Hz

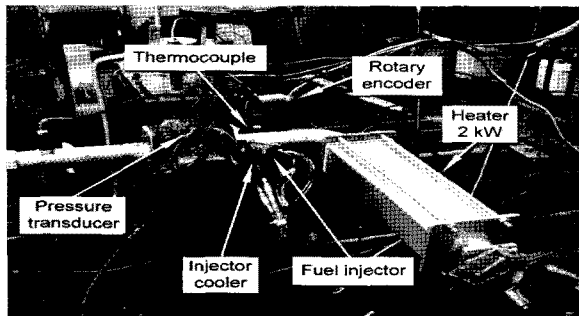


Fig. 2 Photograph of test engine

2.2 실험방법

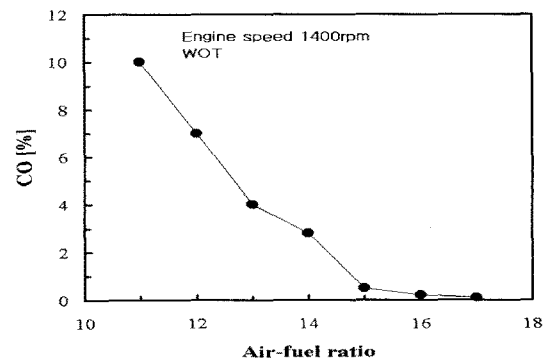
CAI 가솔린기관의 배기 배출특성을 규명하기 위한 작동조건은 기관 압축비 18, 냉각수 출구온도 75

± 5°C, Wide open throttle (이하 WOT로 약칭)로 일정하게 유지하였다. 기관회전수는 1000 rpm, 1200 rpm, 1400 rpm, 1600 rpm, 1800 rpm, 흡입공기온도는 150°C, 160°C, 170°C, 180°C, 공기연료비를 노킹 발생 전부터 운전 가능한 범위까지 변화시키면서 각 운전 조건에서의 CO, HC 및 NO_x 등 배기 배출가스의 농도를 규명하였다.

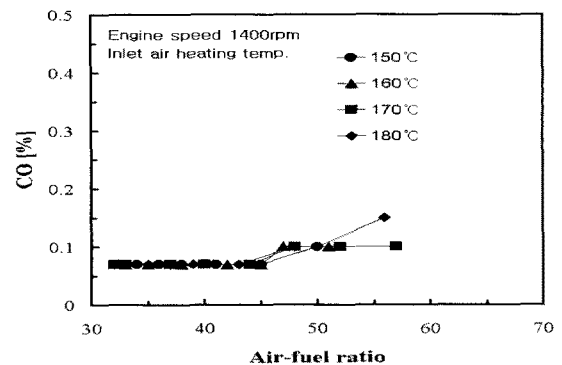
3. 실험결과 및 고찰

3.1 CO의 배기특성

Fig. 3은 대표적으로 기관회전수 1400 rpm이고 흡입공기 가열온도를 150 °C에서 180 °C까지 변화시켰을 경우 공기연료비 변화에 대한 CO의 배출농도를 흡입공기 온도가 상온일 때의 상용 스파크 점화기관과 비교한 것이다. 제어자발화 가솔린기관에서는 초 희박 (A/F 35 이상) 연소가 일어나므로 CO 배출은 거의 발생되지 않으며 상용 스파크 점화기관의 경우는 이론 공기연료비 15 이상에서는 CO의 배출이 거의 없다. 또한 흡입공기 가열온도 변화의 영향도 거의 없는 것으로 나타나고 있다.



(a) Spark ignition engine



(b) Compression ignition gasoline engine

Fig. 3 Effect of air-fuel ratio on carbon monoxide concentrations for inlet air heating temperature

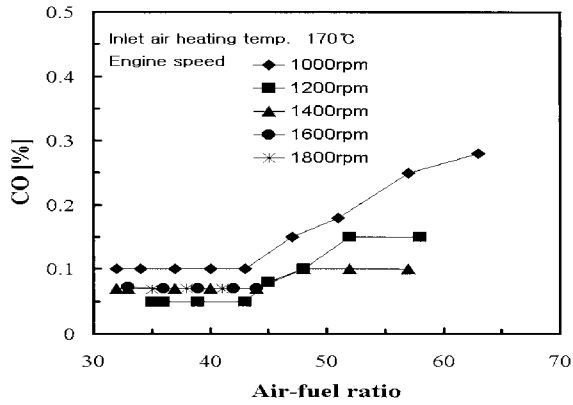


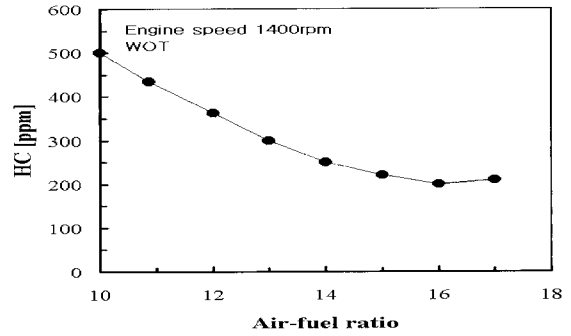
Fig. 4 Effect of air-fuel ratio on carbon monoxide concentrations for engine speed

Fig. 4는 흡입공기 가열온도가 170 °C일 때 기관회전수를 변화시켰을 경우 공기연료비 변화에 대한 CO의 배출농도를 나타 낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 CO 배출은 거의 없다. 따라서 초 희박영역에서 운전되는 제어자발화 가솔린기관의 경우는 흡입공기 가열온도나 기관회전수에 무관하게 CO 배출은 거의 없는 것으로 나타나고 있다.

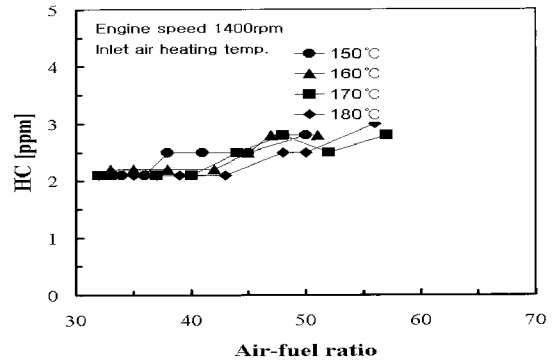
3.2 HC의 배기특성

Fig. 5는 Fig. 3의 운전조건에서 공기연료비 변화에 대한 HC의 배출농도를 흡입공기 온도가 상온일 때의 상용 스파크 점화기관과 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 5(a)의 상용 스파크 점화기관의 경우 공기연료비가 희박할수록 HC 농도는 감소하며 공기연료비 16 부근에서 최소가 되며 그 이상의 희박영역이 될수록 배출농도는 증가하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 5(b)의 제어자발화 가솔린 기관의 경우를 보면 HC의 배출농도는 공기연료비가 초 희박영역이 될수록 약간 증가하는 경향을 보이고 있지만 본 실험 범위 내에서의 HC 배출 농도는 2 ppm에서 3 ppm 정도이며 상용 스파크 점화기관과는 비교할 수 없을 정도로 적으며 흡입공기 가열온도 변화에 대한 영향도 비교적 적다.

Fig. 6은 흡입공기 가열온도가 170 °C인 경우 기관회전수 변화에 대한 HC의 배출농도를 공기연료비틀때개 변수로 하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기관회전수 전체 변화에 대하여 HC의 배출농도는 2 ppm에서 4 ppm으로 대단히 적게 배출되고 있다. 이는 제어자발화 가솔린기관의 연소 특성으로 연소실 내의 혼합기는 전체적으로 균질이며 점화는 동시 다점에서 자발화가 이루어지기 때문에 HC의 발생 요인인 소염층의 형성이나 미연가



(a) Spark ignition engine



(b) Compression ignition gasoline engine

Fig. 5 Effect of air-fuel ratio on hydrocarbon concentrations for inlet air heating temperature

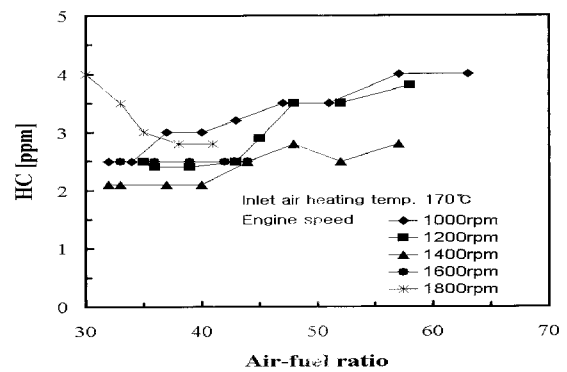
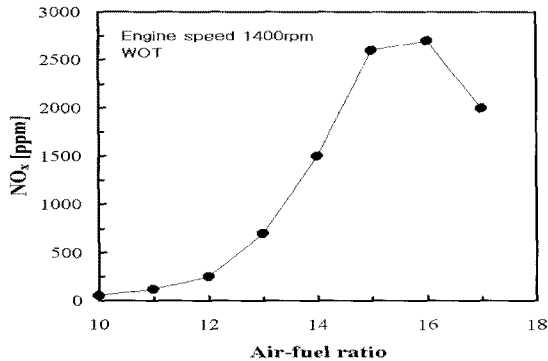


Fig. 6 Effect of air-fuel ratio on hydrocarbon concentrations for engine speed

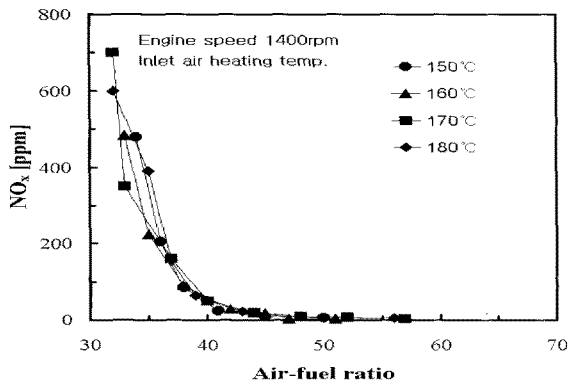
스가 실린더 내부의 틈새에 압입되어 화염이 침투하지 못하는 원인들이 제거되었기 때문일 것이다.

한편 흡입공기 가열온도가 일정할 경우 기관회전수가 증가함에 따라 운전 가능한 희박한계 공기연료비는 점차 축소되고 있음을 알 수 있고 본 실험 범위 내에서는 동일한 공기연료비에 대한 HC의 배출농도가 기관회전수 1400 rpm일 때 가장 적게 배출되고 있으며 이 보다 기관회전수가 증가하거나 감소하면 HC의 배출농도는 증가되고 있다. 이것으

로 미루어 보면 HC의 배출농도 측면에서의 최적 운전조건이 존재하고 있음을 알 수 있다.



(a) Spark ignition engine



(b) Compression ignition gasoline engine

Fig. 7 Effect of air-fuel ratio on nitrogen oxide concentrations for inlet air heating temperature

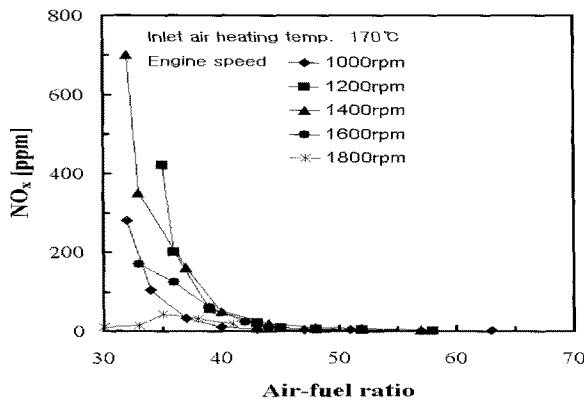


Fig. 8 Effect of air-fuel ratio on nitrogen oxide concentrations for engine speed

3.3 NO_x의 배기특성

Fig. 7은 기관회전수 1400 rpm이고 흡입공기 가열온도를 150 °C에서 180 °C까지 변화시켰을 경우 공기연료비 변화에 대한 NO_x의 배출농도를 흡입공

기 온도가 상온일 때의 상용 스파크 점화기관과 비교하여 제시한 것이다. Fig. 7(a)에 나타난 상용 스파크 점화기관의 경우는 공기연료비 16부근에서 2500 ppm 이상의 NO_x의 최대 농도를 나타내고 있으며 이 보다 희박하게 될수록 NO_x의 배출은 감소되고 있다. 한편 Fig. 7(b)에 나타난 제어자발화 가솔린기관의 경우는 공기연료비가 희박하게 될 수록 NO_x의 배출은 급격히 감소되고 있으며 특히 공기연료비 45 이상의 희박 영역에서는 흡입공기 가열온도에 관계없이 NO_x는 거의 배출되지 않고 있다.

Fig. 8은 흡입공기 가열온도가 170 °C인 경우 기관회전수 변화에 대한 NO_x의 배출 농도를 공기연료비를 매개변수로 하여 비교한 것이다. NO_x의 배출농도는 흡입공기 가열온도의 경우와 비슷한 경향을 나타내고 있으며 공기연료비 45 이상의 희박 영역에서는 기관회전수와 무관하게 NO_x의 배출은 거의 없다. 즉 NO_x의 배출은 연소가스온도에 지배되므로 초 희박영역에서의 연소는 연소가스의 온도가 아주 낮기 때문에 NO_x는 거의 배출되지 않는다.

4. 결 론

본 연구는 상용 단기통 기관에 별도의 점화장치 없이 기관에 유입되는 흡입공기를 가열 및 제어할 수 있는 시스템을 구성하고, 흡기포트에 분사되는 가솔린 연료의 착화성을 향상시켜 제어자발화 가솔린기관의 실현을 가능케 하였으며 배기 특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초희박 영역에서 운전되는 제어자발화 가솔린기관의 경우는 흡입공기 가열온도나 기관회전수에 무관하게 CO 배출은 거의 없는 것으로 나타나고 있다.

2) 공기연료비 변화에 대한 HC 배출 농도는 2~3 ppm 정도이며 상용 스파크 점화기관과는 비교할 수 없을 정도로 작다. 흡입공기 가열온도 변화에 대한 영향도 비교적 작으며, 기관회전수 전체 변화에 대하여 배출농도는 2~4 ppm으로서 그 영향이 대단히 작다.

3) NO_x의 배출은 연소가스온도에 지배되므로 초 희박영역에서의 연소는 연소가스의 온도가 아주 낮기 때문에 거의 배출되지 않는다.

따라서 CAI 가솔린기관의 실현이 초 희박 연소를 가능케 하였고, CO, HC 및 NO_x 등 배기 가스 배출 저감에 상당한 효과가 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. Y. Koji, S. Hideo and T. Hidenori, 1998, "Study on Combustion and Exhaust Gas Emission Characteristics of Lean Gasoline-Air Mixture Ignited by Diesel Fuel Direct Injection", SAE Paper, No. 982482.
2. N. Nakamura et al., 1985, "Multipoint Spark Ignition for Lean Combustion", SAE Paper, No. 852092.
3. T. Inoue et al., 1993, "Toyota Lean Combustion System-The Third Generation System", SAE Paper, No. 930873.
4. S. Onishi et al., 1990, "Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC) - A New Combustion Process for Internal Combustion Engine", SAE Paper, No. 90501.
5. Christensen, et al., 1999, "Homogeneous Charge Compression Ignition with Water Injection", SAE Paper, No. 1999-01-0182.
6. A. Taro et al., 1996, "An Experimental Study of Premixed-Charge Compression Ignition Gasoline Engine", JSAE Paper, No. 9634477.
7. H. S. Kim, 2003, "Performance and Emission Characteristics of a Controlled Auto-Ignition Gasoline Engine", Ph.D. Thesis, University of Soongsil, Seoul, Korea.
8. Y. Ishibashi, Y. Asai and K. Nishida, 1997, "An Experimental Study of Stratified Scavenging Activated Radical Combustion Engine", SAE Paper, No. 972077.
9. P. Duret and S. Venturi, 1996, "Automotive Calibration of the IAPAC Fluid Dynamically Controlled Two Stroke Combustion Engine", SAE Paper, No. 960-363.
10. T. Aoyama et al., 1996, "An Experimental Study on Premixed-Charge Compression Ignition Gasoline Engines", SAE Paper, No. 960081.
11. N. Milovanovic and R. Chen, 2001, "A Review of Experimental and Simulation Studies on Controlled Auto-Ignition Combustion", SAE Paper, No. 2001-01-1890.
12. P. M. Najt and D. E. Foster, 1983, "Compression-Ignited Homogeneous Charge Combustion", SAE Paper, No. 830264.
13. H. Yanagihara et al., 1997, "A Study of Diesel Combustion under Uniform Higher-Dispersed Mixture Formation", JSAE Paper, No. 9733675.