

흡입공기온도의 변화에 따른 제어자발화 가솔린기관의 성능 및 배기 특성

Performance and Emission Characteristics of a Controlled Auto-Ignition Gasoline Engine according to Variation of the Inlet-Air Temperature

김 흥 성
H. S. Kim

Key Words : Controlled Auto Ignition Gasoline Engine(제어자발화 가솔린기관), Inlet Air Temperature(흡입공기 온도), Self Ignition(자발화), Heat Release Rate(열발생율), Mass Burned Rate(질량연소율), Carbon Monoxide(일산화탄소), Hydrocarbon(탄화수소), Nitrogen Oxides(질소산화물)

Abstract : This work treats a controlled auto-ignition (CAI) single cylinder gasoline engine, focusing on the extension of operating conditions. The fuel was injected indirectly into electrically heated inlet air flow. In order to keep a homogeneous air-fuel mixing, the fuel injector was water-cooled by a specially designed coolant passage. The engine performance and emission characteristics were investigated under the wide range of operating conditions such as 40 in the air-fuel ratio, 1000 to 1800 rpm in the engine speed, 150 to 180°C in the inlet-air temperature, and 60° BTDC in the injection timing. The ultra lean-burn with self-ignition of gasoline fuel by heating inlet air was achieved in a controlled auto-ignition gasoline engine. It could be also achieved that the emission concentrations of carbon monoxide, hydrocarbons and nitrogen oxide significantly reduced by CAI combustion compared with conventional spark ignition engines.

기호 설명

A/F : 공기연료비(air-fuel ratio)
BTDC : 상사점전(before top dead center)
ATDC : 상사점후(after top dead center)

1. 서 론

기관 성능 향상과 배기가스 저감 측면에서 새로운 점화 방식에 의한 여러 가지 방법으로 배기 성능 향상을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 그 중 하나인 가솔린기관의 저 연료 소비와 배기가스 저감을 위해 제어자발화(Controlled Auto-Ignition, 이하 CAI로 약칭) 연소방식에 대한 관심이 높아지고 있다. CAI 연소는 기존의 가솔린기관 연소나 디젤기관 연소와는 다른 새로운 개념의 연소방식으로 연소실 전체에 균질의 연료-공기 혼합기가 압축과

정 말에서 다점적으로 동시 자발화되어 연소가 행해지는 방식이다.

CAI 연소방식에 관한 연구는 1980년 대 부터 본격적으로 시작되었다. Koji 등은 초 희박 가솔린-공기 예 혼합기에 대한 연소 특성을 규명하였고¹⁾, Nakamura 등은 희박연소 한계 확장을 위해 다점스파크 점화의 연소 특성을 연구하였다²⁾. Inoue 등, Onishi 등은 예 혼합 희박연소를 연구하였으며^{3,4)}, Christensen 등은 이소옥탄, 에탄올, 천연가스 등 다양한 연료를 사용하여 연구를 수행하였다⁵⁾. Taro 등은 흡입공기 가열을 이용한 흡기포트 분사의 압축점화 가솔린기관을 제작하여 직접분사식 디젤기관과 가솔린 직접분사기관과의 연소 및 배기 성능을 평가하였으나 매우 한정된 운전조건에서 출력특성과 배기 특성을 조사하였다⁶⁾. 국내에서는 가솔린 및 디젤 CAI 연소장치와 시스템을 활용하여 기관운전 조건 변화에 대한 성능 연구가 진행되고 있다⁷⁾. 지금까지의 CAI 연소에 관한 선행연구들은 기관운전 조건인 기관회전수, 공기연료비, 흡입공기 온도의 범위가 제한되었고 연료분사시기가 일정한 상태에서 흡기포트에 분사하는 등 상당히 제한된 운

접수일 : 2005년 9월 30일
김흥성(책임저자) : 경기공업대학 자동차과
E-mail : hskim@kinst.ac.kr, Tel : 031-4964-765

전조건에서 기관 성능과 배기 특성이 연구되었다.

따라서 본 연구는 상용 스파크 점화나 압축 점화가 아닌 균질 연소인 CAI 연소 방식을 도입하여 별도의 점화 장치 없이 상용 단기통 기관에 유입되는 흡입공기를 가열 및 제어하여 흡기포트에 분사되는 가솔린 연료의 압축 착화성을 향상시킴으로서 작동인자인 공기연료비, 기관회전수 및 연료분사시기가 일정한 상태에서 흡입공기온도를 변화시켰을 경우 제어자발화 가솔린기관(Controlled Auto-Ignition Gasoline Engine)의 기본 성능과 CO, HC 및 NO_x의 배기 배출 특성을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로서 실험기관, 흡·배기장치, 흡입공기 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 흡입공기 가열 및 제어장치 그리고 인젝터를 설치하여 CAI 가솔린기관으로 개조한 것이며 Table 1에 실험기관의 제원을 나타내었다. 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 파열을 방지하기 위해 구리관을 이용한 순환형 수냉식으로 인젝터를 냉각시켰다. 공기연료비는 오리피스 유량계로 측정된 공기 중량과 메스 실린더로 측정된 연료 중량비로서 산출 하였다. 흡입공기 가열 및 제어장치는 흡입 서지탱크와 기관에 부착된 흡입공기 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 실시간

으로 표시하는 디스플레이로 구성하였으며 제어 장치는 1℃ 단위로 제어 가능하도록 하였다.

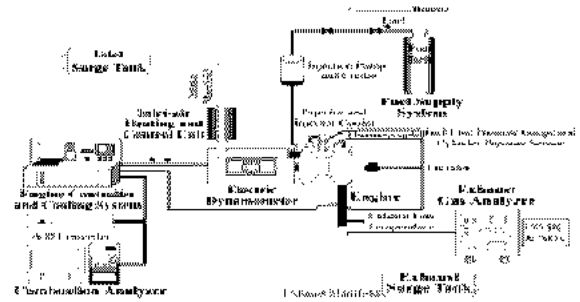


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

Table 1 Engine specifications

Items	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

이와 같이 구성한 흡입공기 가열 및 제어장치의 기초실험을 수행한 결과 기관회전수에 대한 운전 가능한 흡입공기 가열 온도 범위는 각각 상이하게 나타났으며 그 예로서 기관회전수 1800 rpm인 경우 250℃까지 상승시킬 수 있음을 확인하였으며 150℃ 이하인 경우는 기관운전 상태가 극히 불안정하여 CAI 연소를 실현하는데 있어서 상당한 어려움이 발생하였다. 본 실험 조건에서는 기관의 안정적 연소 확보를 위해 흡입공기온도의 범위를 150℃부터 180℃까지 제한하여 실험을 수행하였다. 연소실 내의 압력 변동의 측정은 압력변환기(Kistler Co. Type-601A) 및 증폭기(Kistler Co. Type-5011)를 사용 하였으며 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 분석

계와 CO 및 HC 분석계의 주요 제원을 제시한 것이다. NO/NO_x 분석계의 측정 원리는 화학발광법 (Chemiluminescent method)으로 측정 범위는 0~5000ppm이며 CO 및 HC 분석계의 측정원리는 비분산 적외선법(Non-disperse infrared rays method, NDIR)으로서 측정 범위는 CO가 0~10 %이고, HC 는 0~8000 ppm이다.

Table 2 Specifications of exhaust gas analyzer

Items	Specifications
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℃ NO/NO _x : 5~35℃
Warm up time	CO/HC : 30 min NO/NO _x : Approx. 1 hour
Power supply	AC 100 V, 50/60 Hz

2.2 실험방법

흡입공기온도의 변화에 따른 CAI 가솔린기관의 성능 및 배기 배출특성을 규명하기 위한 작동조건은 기관 압축비 18, 냉각수 출구온도는 75 ± 5℃, Wide open throttle(이하 WOT로 약칭), 가솔린 연료 분사시기는 60° BTDC,로 일정하게 유지하였다. 공기연료비는 40(연료분사시간 5.8 ms)을 유지하면서 기관회전수는 1000 rpm, 1200 rpm, 1400 rpm, 1600 rpm, 1800 rpm, 흡입공기온도는 150℃, 160℃, 170℃, 180℃로 단계적으로 변화시켰을 때 각 운전 조건에서 실험을 실시하였다. 각 운전조건에서 흡입공기온도의 변화에 따른 CAI 가솔린기관의 지압선도를 비교하였으며 최고압력, 열발생율, 질량연소율, 계동평균유효압력, 계동열효율 및 계동연료소비를 등의 기관 성과와 CO, HC 및 NO_x 등 배기 배출가스의 농도를 규명하였다.

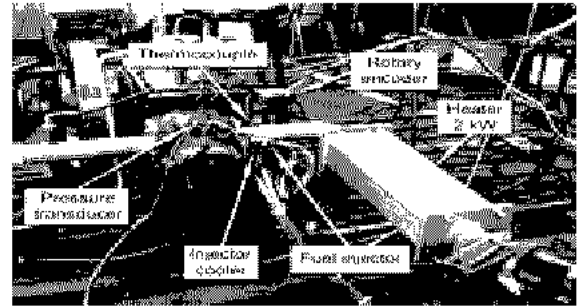


Fig. 2 Photograph of test engine

3. 실험결과 및 고찰

3.1 지압선도 비교

Fig. 3은 대표적으로 기관회전수 1200 rpm, 공기 연료비가 40 및 분사시기가 60° BTDC이고 WOT 일 경우 흡입공기온도 변화에 대한 실린더 내의 압력 경과 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 조건에 따라 약간씩 상이하지만 대체로 흡입공기온도가 상승할수록 사이클 최고압력은 증가하고 있으며 최고압력 발생시기도 조금씩 진각되고 있다. 이러한 경향은 공기연료비의 변화와 마찬가지로 혼합기 강도(mixture strength)때문인 것으로 간주되며 Taro 등의 연구 결과와도 일치하고 있다⁶⁾.

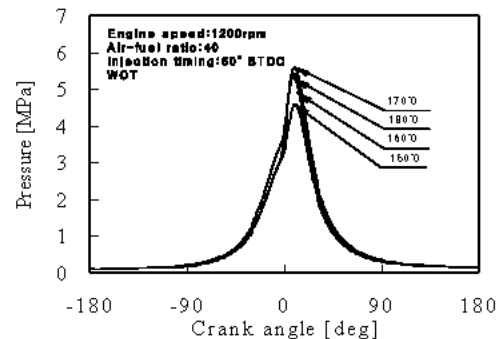


Fig. 3 Variation of the cylinder pressure with respect to the crank angle for different inlet-air temperatures

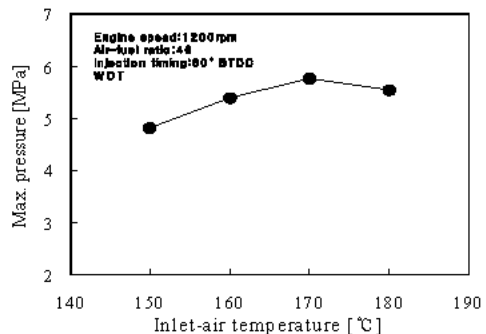


Fig. 4 Variation of the maximum cylinder pressure with respect to the inlet-air temperature

Fig. 4는 대표적으로 기관회전수 1200 rpm, 공기 연료비 40 및 분사시기가 60° BTDC이고 WOT일 때 흡입공기온도 변화에 대한 최고압력의 변화를 나타낸 것이다. 흡입공기온도가 150℃에서 180℃로 증가할수록 사이클 최고압력은 서서히 증가되고 있는데 이는 흡입공기온도가 높을수록 자발화가 활성화되고 있음을 나타내고 있는 것이다. 그러나 흡입공기온도가 150℃이하 에서는 제어자발화가 불가능 하였고, 180℃이상 에서는 기관운전 자체가 불안정 하며 최고압력은 크게 저하되는 현상을 나타내었다. 이 조건에서는 흡입공기온도가 170℃에서 사이클 최고압력이 가장 높게 나타나고 있다.

3.2 열발생을 및 질량연소를

Fig. 5는 대표적으로 기관회전수 1200 rpm, 공기 연료비 40 및 분사시기가 60° BTDC이고 WOT일 때 흡입공기온도 변화에 대한 열발생율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡입공기온도가 상승할수록 열발생율 최고 값은 증가하고 있으며 열발생율 최고 값의 발생시기도 전각되고 있음을 알 수 있다. 열발생율의 특성도 사이클 최고압력의 변화 경향과 같이 흡입공기온도가 170℃에서 최대 로 나타나고 있으며 이것은 지압선도 비교에서 전술한 바와 같이 열발생율이 혼합기 강도에 의존되기 때문일 것으로 간주된다. 이러한 경향은 Taro 등과 Rudolf 등의 연구 결과와도 일치한다^{6,8)}.

Fig. 6은 대표적으로 기관회전수 1200 rpm, 공기 연료비 40 및 분사시기가 60° BTDC이고 WOT일 때 흡입공기온도 변화에 대해 질량연소율 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 질량연소율 선도에서도 전반적으로 흡입공기온도가 상승할수록 연소기간이 단축되며 급속 연소(rapid combustion)가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

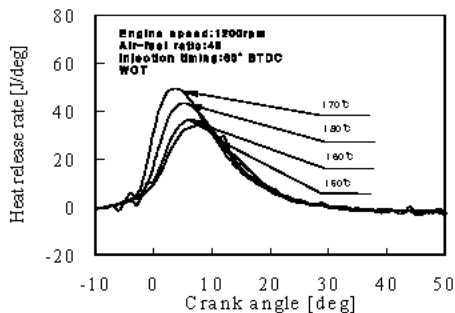


Fig. 5 Variation of the heat release rate with respect to the crank angle for different inlet-air temperatures

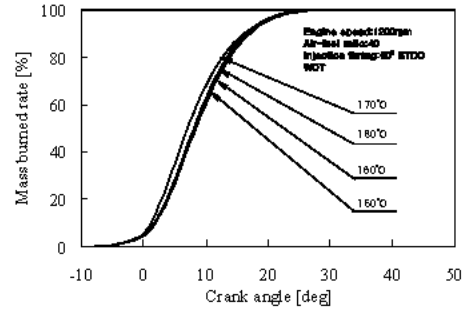


Fig. 6 Variation of the mass burned rate with respect to the crank angle for different inlet-air temperatures

3.3 제동평균유효압력, 제동연료소비율 및 제동 열효율

Fig. 7은 대표적으로 기관회전수 1200 rpm, 공기 연료비 40 및 분사시기가 60° BTDC이고 WOT일 때 흡입공기온도 변화에 대한 제동평균유효압력을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡입공기온도 변화는 제동평균유효압력 변화에 큰 영향을 미치지 않으며 그 변화폭도 작다.

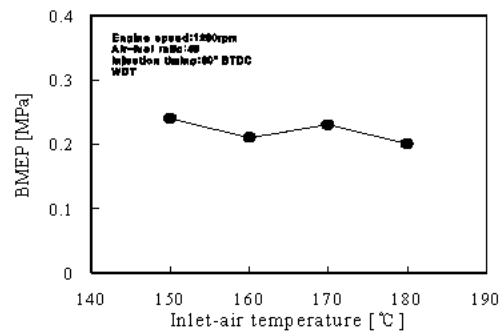


Fig. 7 Variation of the brake mean effective pressure with respect to the inlet-air temperature

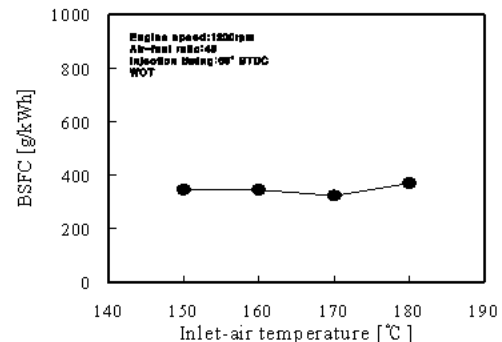


Fig. 8 Variation of the brake specific fuel consumption with respect to the inlet-air temperature

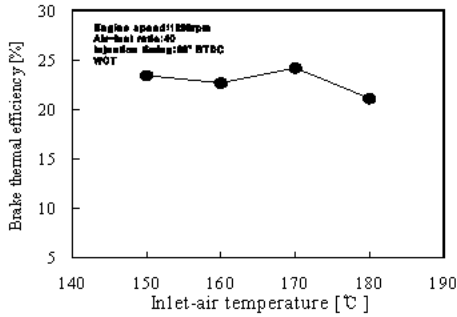


Fig. 9 Variation of the brake thermal efficiency with respect to the inlet-air temperature

Fig. 8은 대표적으로 기관회전수 1200 rpm, 공기 연료비 40 및 분사시기가 60° BTDC이고 WOT일 때 흡입공기온도 변화에 대한 제동연료소비율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡입공기온도 변화는 제동평균유효압력 변화와 마찬가지로 제동연료소비율 변화에 큰 영향을 주지 않으며 그 변화폭은 미미하다.

Fig. 9는 대표적으로 기관회전수 1200 rpm, 공기 연료비 40 및 분사시기가 60° BTDC이고 WOT일 때 흡입공기온도 변화에 대한 제동열효율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 제동열효율은 대체로 20~25 % 정도이며 흡입공기온도 변화가 제동열효율에 미치는 영향은 비교적 적게 나타났으며 이는 Rudolf 등의 연구 결과와도 일치한다³⁾.

3.4 CO의 배출 특성

Fig. 10은 대표적으로 기관회전수 1400 rpm, 공기 연료비 40 및 분사시기가 60° BTDC이고 WOT일 때 흡입공기온도의 변화에 대한 CO의 배출 농도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 CO의 배출 농도는 흡입공기온도의 변화에 거의 무관하게 아주 적게 발생되었다. 흡입공기온도의 변화는 CO의 배출 농도 변화에 거의 영향을 미치지 않는다.

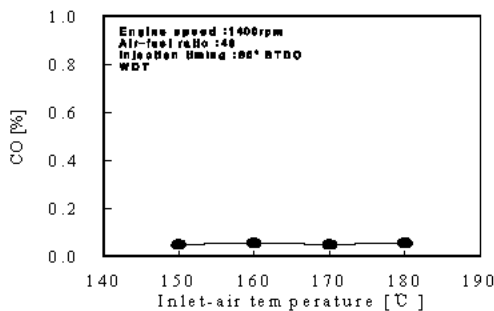


Fig. 10 Variation of the carbon monoxide concentration with respect to the inlet-air temperature

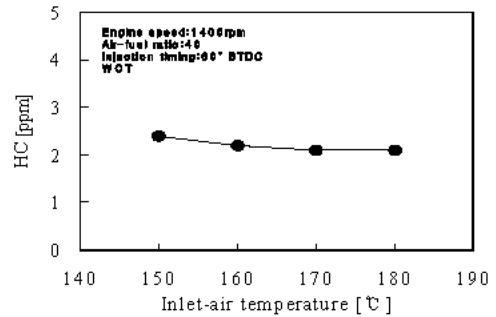


Fig. 11 Variation of the hydrocarbon concentration with respect to the inlet-air temperature

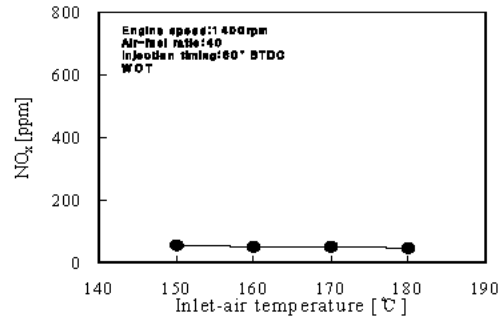


Fig. 12 Variation of the nitrogen oxides concentration with respect to the inlet-air temperature

3.5 HC의 배출 특성

Fig. 11은 대표적으로 Fig. 10의 운전 조건에서 흡입공기온도의 변화에 대한 HC의 배출 농도를 나타낸 것이다. 흡입공기온도가 상승할수록 약간 감소하는 경향을 나타내고 있으나 그 변화폭은 아주 적다. 이러한 경향은 CAI 기술런기관의 연소 특성으로 연소실 내의 혼합기는 전체적으로 균질이며 점화는 동시에 다점적으로 자발화가 이루어지기 때문에 HC 발생 요인인 소염층의 형성이나 미연가스가 실린더 내부의 틈새에 압입되어 화염이 침투하지 못하는 원인들이 제거되었기 때문인 것으로 간주된다.

3.6 NOx의 배출 특성

Fig. 12는 대표적으로 Fig. 10의 운전 조건에서 기관회전수 1400 rpm, 공기 연료비 40 및 분사시기가 60° BTDC이고 WOT일 때 흡입공기온도의 변화에 대한 NOx의 배출 농도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 NOx 배출 농도는 흡입공기온도의 변화에 거의 무관하게 아주 적게 발생되며 그 변화폭도 매우 미비하다.

즉, NOx 배출 농도는 산소 평형농도와 연소가스

온도에 지배되기 때문에 균질 연소인 CAI 연소 방식을 채용한 CAI 가솔린기관에서 초 희박영역 (A/F 35 이상)에서의 연소는 연소가스의 온도가 아주 낮으므로 대단히 적게 배출되는 것으로 간주되며 이는 Rudolf 등의 연구 결과와도 일치한다⁸⁾. 따라서 흡입공기온도의 변화는 CO, HC 및 NO_x 배출에 거의 영향을 주지 않는 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 연구는 상용 스파크 점화나 압축 착화 방식이 아닌 균질 연소의 특성인 CAI 연소 방식을 도입하였다. 상용 단기통 기관에 별도의 점화 시스템 없이 기관에 유입되는 흡입공기를 가열 및 제어하기 위한 시스템을 구성하여 흡기포트에 분사되는 가솔린 연료의 압축 착화성을 향상시켜 기관 운전을 실현 가능케 하였다. 기관 작동조건 중 흡입공기온도를 단계적으로 변화시켰을 경우 CAI 가솔린기관의 성능 특성과 CO, HC 및 NO_x 배출 특성을 파악하였다. CAI 가솔린기관의 출력 특성에 영향을 미치는 지배적 인자는 기관회전수, 공기연료비 등이며 흡입공기온도의 변화는 기관 출력 성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 간주되며 CO, HC 및 NO_x 배출 농도는 매우 적게 발생되었다. 이는 CAI 연소 방식을 채용함에 의한 균질 초 희박 연소가 실현되기 때문인 것으로 판단되며 CAI 가솔린기관의 실현이 초 희박 연소를 가능케 하였고, CO, HC 및 NO_x 등 배기 가스 배출 저감에 매우 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

1. Koji, Y., Hideo, S., and Hidenori, T., 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. Nakamura, N., et al., 1985, "Multipoint spark ignition for lean combustion," SAE Paper, No. 852092.
3. Inoue, T., et al., 1993, "Toyota lean combustion system - The third generation system," SAE Paper, No. 930873.
4. Onishi, S., et al., 1990, "Active Thermo-Atmo-

- sphere 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. Taro, A., Yoshiaki, H., Junichi, M., and Yasuo, S., 1996, "An Experimental Study of Premixed-Charge Compression Ignition Gasoline Engine," JSAE Paper, No. 9634477.
7. Kim, H., S., 2003, "Performance and Emission Characteristics of a Controlled Auto-Ignition Gasoline Engine," Ph.D. Thesis, University of Soongsil, Seoul, Korea.
8. Rudolf, H., Stanglmaier, et al., 2001, "HCCI Operation of a Dual - Fuel Natural Gas Engine for Improved Fuel Efficiency and Ultra - Low NO_x Emissions at Low to Moderate Engine Loads", SAE Paper, No. 2001-01-1897.