

분사시기의 변화에 따른 제어자발화 가솔린기관의 배기특성

An Emission Characteristics of a Controlled Auto-Ignition Gasoline Engine According to Variation of the Injection Timing

김 흥 성
H. S. Kim

Key Words : Controlled Auto Ignition Gasoline Engine(제어자발화 가솔린기관), Injection Timing(분사시기), 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. In order to keep a homogeneous air-fuel mixing, the fuel injector is water-cooled by a specially designed coolant passage. Investigated are the engine emission characteristics 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 80° BTDC to 20° ATDC in the injection timing. A controlled auto-ignition gasoline engine which has the ultra lean-burn with self-ignition of gasoline fuel can be achieved by heating inlet air. It can be achieved that the emission concentrations of carbon monoxide, hydrocarbons and nitrogen oxides had been significantly reduced by CAI combustion compared with conventional spark ignition engine.

기호 설명

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

1. 서 론

전 세계적으로 환경오염의 심각성과 지구온난화로 인해 자동차 유해 배출가스 저감 및 우수한 연료 경제성을 가진 초 저연료 소비 자동차기관 출현에 대한 사회적인 필요성이 강력하게 대두되고 있다. 따라서 기관 성능 향상과 배기 배출물 저감 측면에서 새로운 점화 방식에 의한 여러 가지 시도로 배기 성능 향상을 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 가솔린기관의 초 저연료 소비와 배기 배출물 저감의 동시 실현을 위하여 제어자발화(Controlled Auto-Ignition, 이하 CAI로 약칭) 연소 방식에 대

한 연구가 활발히 진행되고 있다. CAI 연소는 기존의 가솔린기관 연소나 디젤기관 연소와는 다른 새로운 개념의 연소방식으로 연소실 전체에 균질의 연료-공기 혼합기가 압축과정 말에서 다점적으로 동시 자발화되어 연소가 이루어지는 방식이다. CAI 연소방식에 관한 연구는 1980년 대 부터 본격적으로 활발하게 시작되었으며 선행연구자의 연구는 다음과 같다. Koji 등은 고압축비 직접분사 디젤기관에 디젤연료를 분사하여 점화된 초 희박 가솔린-공기에 혼합기에 대한 연소와 점화 특성을 규명하였으며 디젤 연료 분사의 질량유동을, 연소와 점화 특성 및 기관성능과 배기가스 배출에 대한 공기연료비의 영향에 대해 연구하였다¹⁾. Nakamura 등은 희박연소 한계 확장을 위해 다점 스파크 점화의 연소 특성을 연구하였다²⁾. Inoue 등, Onishi 등은 예 혼합 희박연소가 층상급기연소에 비해 NOx 저감 효과가 크게 나타났다고 보고하였으나 압축비나 안정적 연소 범위 등이 직접분사 디젤기관에 비해서 크게 제한되었으며 NOx 저감은 단지 촉매에 의한 후처리에 크게 의존하고 있는 실정이다^{3,4)}. Christensen 등은 이소옥탄, 에탄올, 천연가스 등 다양한 연료를 사용하여 연구를 수행하였고, 천연가스를 사용한 경

접수일 : 2004년 6월 10일
 김흥성(책임저자) : 숭실대학교 기계공학과 내연기관연구실
 E-mail : 1057412@hanmail.net, Tel : 019-355-4025

우는 상용 압축착화나 스파크 점화 연소에 비해 NOx 발생이 크게 저감되었다⁵⁾. 한편 연료에 물을 첨가한 경우는 아주 한정된 부하조건에서만 점화가 지연되며 느린 연소로 인해 미연탄화수소와 일산화탄소의 배출이 증가되었다고 발표하였다. Taro 등, Nakamura 등, Inoue 등, Onishi 등의 연구 결과의 미비한 점을 보완하였으며 저 연료소비와 저 배기를 동시에 실현하는 시스템으로 흡입공기 가열을 이용한 흡기포트 분사의 압축점화 가솔린기관을 제작하여 직접분사식 디젤기관과 가솔린 직접분사기관과의 연소 및 배기 성능을 비교 평가하였다⁶⁾. 그러나 그들의 연구는 기관운전 조건인 기관회전수와 흡입공기온도의 범위가 제한되었으며 연료분사시기가 일정한 운전 상태에서 흡기포트에 분사하는 등 매우 한정된 운전조건에서 기관 성능과 배기 특성을 연구하였다. 한편 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) combustion³⁾”, “IAPAC(Compressed air assisted fuel injection process)⁹⁾”, 4행정 기관에 대해서는 “H-CCI(Homogeneous Charge Compression Ignition)⁵⁾”, “PCCI(Premixed Charge Compression Ignition)^{6,10)}”, “CAI(Controlled Auto-Ignition) combustion¹¹⁾”, “CI-HC(Compression Ignited Homogeneous Charge) combustion¹²⁾”, “UNIBUS(Diesel combustion under uniform higher-dispersed mixture formation)¹³⁾” 등 많은 다른 이름들로 사용되며 연구되고 있다. CAI 연소는 가솔린, 디젤, 메탄올, 에탄올, 디메틸에테르 및 천연가스 등 다양한 연료에 CAI 연소 적용이 가능하다. 지금까지의 CAI 연소에 관한 선행연구들은 기관운전 조건인 기관회전수, 공기연료비, 흡입공기온도의 범위가 제한되었고 연료분사시기가 일정한 상태에서 흡기포트에 분사하는 등 상당히 한정된 운전조건에서 기관 성능과 배기 성능이 연구되었다.

따라서 본 연구는 초 희박, 초 저공해 기관을 실현하기 위해 상용 스파크 점화나 압축 점화가 아닌 균질 연소인 CAI 연소 방식을 도입하였고, 별도의 점화 장치 없이 초 희박 연소의 실현과 배기성능 개선을 위하여 공기연료비가 일정한 상태에서 기관회전수, 흡입공기온도와 연료분사시기 등의 작동 조건을 변화시켰을 경우 제어자발화 가솔린기관

(Controlled Auto-Ignition Gasoline Engine)의 CO, HC 및 NOx의 배출 특성을 규명한다.

2. 실험

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구를 위해 사용된 실험장치의 전체적인 개략도를 나타낸 것으로서 실험장치를 크게 분류하면 실험기관, 흡·배기장치, 흡입공기가열 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 가열장치 및 인젝터를 설치하여 CAI 가솔린기관으로 개조하였으며 Table 1에 기관의 제원을 나타내었다. 기관에 유입되는 공기량은 흡입유도관에 오리피스 유량계를 설치하여 오리피스 전후의 압력차로 측정하였다. 가솔린을 포트 분사식으로 하여 로터리 엔코더의 각도 신호를 기준으로 매 사이클마다 일정한 크랭크 각도에서 분사가 시작되도록 하였으며 흡입밸브 바로 앞쪽에 위치한 인젝터로 분사 시작 크랭크 각도로 부터 0.1 ms 간격으로 지정된 기간 동안에 연료가 분사되도록 하여 연료량을 제어하였다. 또한 흡기포트 가열에 따른 연료 인젝터의 과열을 방지하기 위해 구리관을 이용한 순환형 수냉식으로 인젝터를 냉각시켰다. 공기연료비는 오리피스 유량계로 측정된 공기중량과 메스 실린더로 측정된 연료 중량비로서 산출 하였다. 흡입공기 가열 및 제어장치는 흡입서어지 탱크와 기관에 부착된 흡입공기 관 사이에 사각형 형태의 통 안에 세라믹 보빈(Bobbin)을 각 병렬로 2개를 고정하여 1 kW용량의 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 제어장치는 1℃ 단위로 조절 가능하도록 하였다. 이와 같이 구성된 흡입공기 가열장치의 기초실험을 수행한 결과 기관회전수에 대한 운전 가능한 흡입공기 가열온도 범위는 각각 상이하게 나타났으며, 그 예로서 본 실험장치는 기관회전수 1800 rpm인 경우 250℃까지 상승시킬 수 있음을 확인하였고, 150℃ 이하인 경우는 기관운전 상태가 극히 불안정하여 CAI 연소를 실현

하는데 상당한 어려움이 발생하였다. 실험 조건에서는 기관의 안정적 연소 확보를 위해 흡입공기온도를 150℃ 부터 180℃ 까지 한정하여 실험을 수행하였다. 연소실내의 압력 변동의 측정은 압력변환기(Kistler Co. Type-601A) 및 증폭기(Kistler Co. Type-5011)를 사용하였으며 취득한 압력신호는 연소해석장치(Ono Sokki Co. Type CB-366)를 사용하여 해석하였다. Fig. 2에 본 연구에 사용된 실험 기관 및 실험 기관 제어 장치의 사진을 나타내었고, Table 2에 배기가스 측정 및 분석에 사용된 NO/NO_x 분석계와 CO 및 HC 분석계의 주요 제원을 제시하였다. 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.

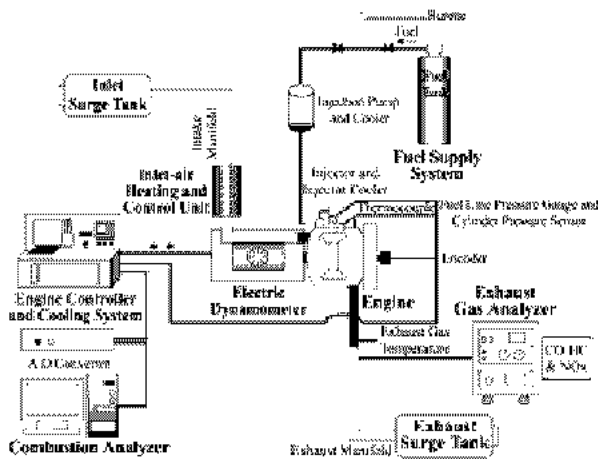


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

Table 1 Engine specifications

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	80°, 70°, 60°, 50°, 40° BTDC, 0°, 10°, 20° ATDC
Fuel	Gasoline
Fuel injection	Inlet port
Fuel pressure	3 kg/cm ²

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

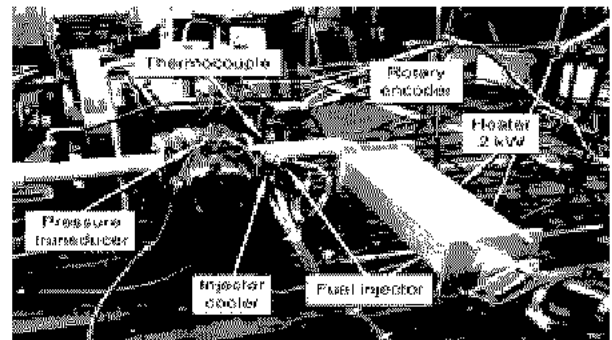


Fig. 2 Photograph of engine

2.2 실험방법

분사시기의 변화에 따른 CAI 가솔린기관의 배기 특성을 규명하기 위한 실험조건은 기관 압축비18, 냉각수 출구온도는 75 ± 5℃로 일정하게 유지하였다. 공기연료비는 40(연료분사기간 5.8 ms)을 유지하면서 기관회전수는 1000 rpm, 1200 rpm, 1400 rpm, 1600 rpm, 1800 rpm으로 단계적으로 변화시켰다. 흡입공기온도는 150℃, 160℃, 170℃, 180℃, 가솔린 연료 분사시기는 80°, 70°, 60°, 50°, 40° BTDC, 0°, 10°, 20° ATDC로 단계적으로 변화시켰고, Wide open throttle(이하 WOT로 약칭)일 때 각 운전 조건에서 실험을 실시하였다. 각 실험조건에서 분사시기의 변화에 따른 CAI 가솔린기관의 CO, HC 및 NO_x 등 배기가스 농도를 파악하였다. 또한 상용 스파크 점화 기관과의 배기 특성을 비교 평가하였고 상용 스파크 점화기관의 운전 조건은

압축비4.5, 공기연료비 14.3 및 WOT이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 CO의 배기 특성

Fig. 3은 상용 스파크 점화기관의 흡입공기온도가 상온 (20℃)이고, 기관회전수가 1400 rpm, 공기 연료비가 14.3이며 WOT일 때 점화 시기의 변화에 대한 CO 배출 농도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 점화시기가 진각 될수록 CO 배출이 약간 증가되는 경향을 나타내고 있으나 그 증가폭은 그리 크지 않으며 CO 배출농도는 본 실험 범위에서 1~2 % 정도이다.

Fig. 4는 CAI 가솔린기관의 공기연료비가 40이고 흡입공기온도를 150℃부터 180℃까지 변화시켰을 경우 분사시기의 변화에 대한 CO 배출 농도를 나타낸 것이다. CAI 가솔린기관은 초 희박(A/F 35 이상)연 소이므로 CO 배출은 분사시기 변화에 무관하게 거의 발생되지 않는다. 또한 흡입공기온도 변화의 영향도 거의 없는 것으로 나타나고 있으며 상용 스파크 점화기관에 비해 10분의 1정도로 CO 배출 농도를 나타낸다.

Fig. 5는 공기연료비가 40이고 흡입공기온도가 170℃이고 WOT일 때 기관회전수를 변화시켰을 경우 분사시기의 변화에 대한 CAI 가솔린기관의 CO 배출 농도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡입공기온도의 변화와 비슷하게 CO 배출은 거의 없다. 따라서 초 희박 영역에서 운전되는 CAI 가솔린기관은 흡입공기온도나 기관회전수에 무관하게 CO 발생은 거의 없는 것으로 나타나고 있다.

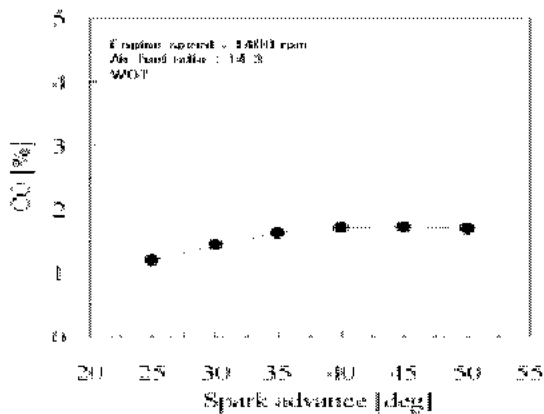


Fig. 3 Variation of the carbon monoxide concentration with respect to the spark advance of spark ignition engine

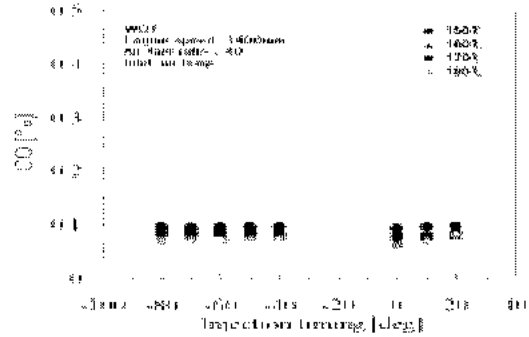


Fig. 4 Variation of the carbon monoxide concentration with respect to the injection timing for different inlet-air temperatures

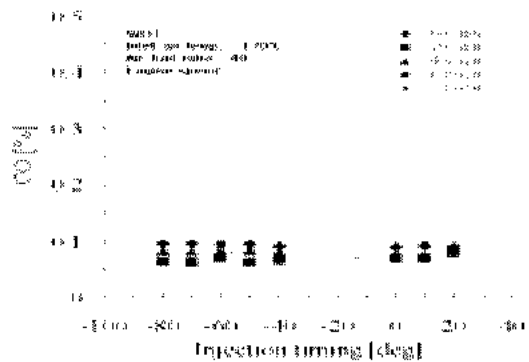


Fig. 5 Variation of the carbon monoxide concentration with respect to the injection timing for different engine speeds

3.2 HC의 배기 특성

Fig. 6은 Fig. 3의 운전조건에서 상용 스파크 점화기관의 분사시기의 변화에 대한 HC 배출농도를 점화시기 변화에 대하여 나타낸 것이다. 점화시기가 진각 될수록 HC 농도는 약간 증가하는 경향을 나타내고 있으나 그 증가폭은 그리 크지 않다.

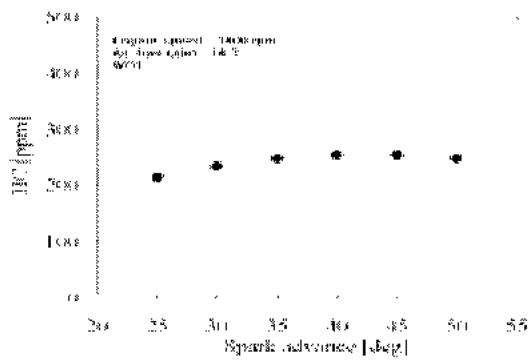


Fig. 6 Variation of the hydrocarbon concentration with respect to the spark advance of spark ignition engine

Fig. 7은 Fig. 4의 운전 조건에서 CAI 가솔린기관의 분사시기의 변화에 대한 HC 배출 농도를 나타낸 것이다. HC 배출 농도는 분사시기가 지연될수록 약간 증가하는 경향을 나타내고 있지만 본 실험 범위 내에서의 HC 배출 농도는 2 ppm에서 2.5 ppm 정도이며 상용 스파크 점화기관의 200 ppm에서 250 ppm과 비교할 수 없을 정도로 적으며 흡입공기 온도의 변화에 대한 영향도 비교적 적다.

Fig. 8은 공기연료비가 40, 흡입공기온도가 170℃이고 WOT일 때 기관회전수의 변화에 대한 HC 배출 농도를 분사시기를 매개 변수로 하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 분사시기 전체 변화에 대하여 HC 배출 농도는 2 ppm에서 4 ppm으로 대단히 적게 배출되고 있다. 이러한 경향은 CAI 가솔린기관의 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 추정된다.

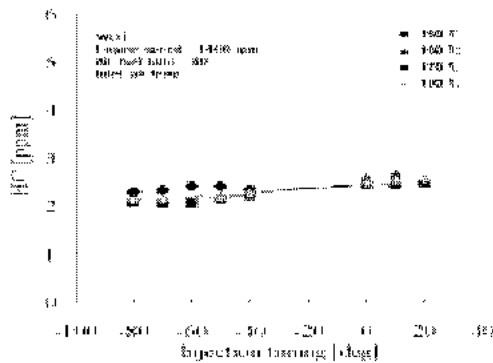


Fig. 7 Variation of the hydrocarbon concentration with respect to the injection timing for different inlet-air temperatures

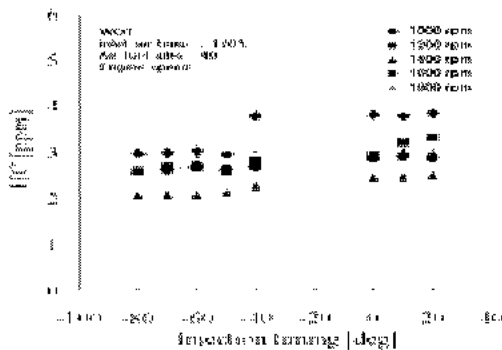


Fig. 8 Variation of the hydrocarbon concentration with respect to the injection timing for different engine speeds

3.3 NOx의 배기 특성

Fig. 9는 Fig. 3의 운전조건에서 상용 스파크 점화기관의 분사시기의 변화에 대한 NOx 배출농도를 점화시기 변화에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 점화시기가 진각될 수록 배출농도는 약간 증가하는 경향을 나타낸다.

Fig. 10은 Fig. 4의 운전 조건에서 CAI 가솔린기관의 분사시기의 변화에 대한 NOx 배출 농도를 나타낸 것이다. 선도에서 보는 바와 같이 배출농도는 분사시기의 변화에 거의 무관하게 30 ppm에서 50 ppm 정도로 매우 적게 발생되었다. 또한 흡입공기 온도 변화에 관계없이 대단히 적게 발생되었다.

Fig. 11은 공기연료비가 40이고 흡입공기온도가 170℃이고 WOT일 때 기관회전수의 변화에 대한 CAI 가솔린기관의 NOx 배출농도를 분사시기를 매개변수로 하여 나타낸 것이다. NOx 배출농도는 흡입공기온도의 경우와 유사한 경향을 나타내고 있으며 기관회전수 변화에 무관하게 아주 적게 발생되었다. 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 추정된다. 이는 Rudolf 등의 연구 결과와도 일치한다¹⁴⁾. 따라서 분사시기의 변화는 CO나 HC와 마찬가지로 NOx 배출에 거의 영향을 주지 않으며 그 발생량도 극히 적었다.

4. 결 론

본 연구는 연료분사시기를 단계적으로 변화시켰을 경우 CAI 가솔린기관의 CO, HC 및 NOx 배기 특성을 파악하였다. 분사시기의 변화에 대한 CAI 가솔린기관의 CO, HC 및 NOx 배출 농도는 상용 가솔린 기관에 비해 비교가 되지 않을 정도로 매우 적게 발생되었다. 이는 CAI 연소 방식을 채용함에 의한 균질 초 희박 연소가 실현되기 때문인 것으로 추정되며 분사시기의 변화는 배기 성능에 크게 영향을 미치지 않고 있는 것으로 간주된다. 따라서 CAI 가솔린기관의 실현이 초 희박 연소를 가능케 하였고 CO, HC 및 NOx 등 배기 가스 배출 저감에 상당한 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-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. 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. Ishibashi, Y., Asai, Y., and Nishida, K., 1997, "An Experimental Study of Stratified Scavenging Activated Radical Combustion Engine", SAE Paper, No. 972077.
9. Duret, P., and Venturi, S., 1996, "Automotive Calibration of the IAPAC Fluid Dynamically Controlled Two Stroke Combustion Engine", SAE Paper, No. 960363.
10. Aoyama, T., Hattori, Y., Mizuta, J., and Sato, Y., 1996, "An Experimental Study on Premixed-Charge Compression Ignition Gasoline Engines", SAE Paper, No. 960081.
11. Nebojsa Milovanovic and Rui Chen, 2001, "A Review of Experimental and Simulation Studies on Controlled Auto-Ignition Combustion", SAE Paper, No. 2001-01-1890.
12. Najt, P. M., and Foster, D. E., 1983, "Compression-Ignited Homogeneous Charge Combustion", SAE Paper, No. 830264.
13. Yanagihara, H., Sato, Y., and Junichi, M., 1997, "A Study of Diesel Combustion under Uniform Higher-Dispersed Mixture Formation", JSAE Paper, No. 9733675.
14. Rudolf, H., Stanglmaier, et al., 2001, "HCCI Operation of a Dual-Fuel Natural Gas Engine for Improved Fuel Efficiency and Ultra - Low NOx Emissions at Low to Moderate Engine Loads", SAE Paper, No. 2001-01-1897.