

제어자발화 가솔린기관의 성능 특성

김 홍 성[#]

Performance Characteristics of a Controlled Auto-Ignition Gasoline Engine

Hong-Sung Kim[#]

ABSTRACT

In this study, A controlled auto-ignition (CAI) single cylinder gasoline engine is considered, focusing on the extension of operating conditions. The fuel is injected indirectly into electrically heated inlet air flow. Investigated are the engine performance characteristics 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. A controlled auto-ignition gasoline engine which has the super ultra lean-burn with self-ignition of gasoline fuel can be achieved by heating inlet air.

Key Words : Controlled Auto-Ignition Gasoline Engine(제어자발화 가솔린기관), Inlet-Air Temperature(흡입공기온도), Self-Ignition(자발화), Heat Release Rate(열발생율), Mass Burned Rate(질량연소율)

1. 서 론

현재 세계적으로 자동차의 배출가스로 인한 환경 오염의 심각성과 지구온난화로 인하여 유해 배출가스 저감 및 훌륭한 연료경제성을 가진 초저연료 소비 자동차기관 출현에 대한 사회적인 요구가 점차 강해지고 있다. 따라서 기관 개발 및 설계자들은 기관 성능 향상을 위하여 고출력, 우수한 연료경제성 및 저 공해를 동시에 실현시킬 수 있는 고압축비 희박연소 기관 개발에 많은 연구를 집중하고 있다. 특히 가솔린기관의 초 저연료 소비의 실현과 배기 배출물 저감을 위하여 제어자발화(Controlled Auto-Ignition, 이

하 CAI로 약칭) 연소방식에 대하여 주목하고 있다. CAI 연소는 기존의 가솔린기관 연소나 디젤기관 연소와는 다른 새로운 개념의 연소방식으로 연소실 전체에 균일한 연료-공기 혼합기가 압축과정 말에서 다 점적으로 동시 자발화되어 연소가 이루어지는 방식이다.

CAI 연소방식의 연구는 1980년대 부터 본격적으로 활발하게 시작되었는데 선행연구자들의 연구를 살펴 보면 다음과 같다. Koji 등^[1]은 고압축비 직접분사 디젤기관(19.9 : 1)에 착화 보조원으로 디젤연료를 분사하여 점화시킨 초 희박 가솔린-공기 예 혼합기에 대한 연소와 점화특성을 규명하였으며 디젤 연료 분사의 질량유동율, 연소와 점화 특성 및 기관성능과 배기가스 배출에 대한 공기연료비 영향을 연구하였다. Nakamura 등^[2]은 희박연소 한계 확장을 위해 다점 스

[#] 교신저자 : 경기공업대학 자동차부품기술트레이닝센터
E-mail: hskim@kinst.ac.kr

파크 점화의 연소특성을 연구하였다. 스파크 플러그를 여러 개 배치하여 화염 전파 거리를 단축시킴으로써 희박한계를 확장시켰으며 또한 노킹 발생의 억제도 동시에 가능하게 하였다. Inoue 등^[3]은 예 혼합 희박연소는 층상급기연소에 비해 NO_x 저감 효과가 크게 나타나고 있다고 보고하였다. 그러나 그들의 연구는 압축비나 안정적 연소 범위 등이 직접분사 디젤기관에 비해서 크게 제한되었다. Onishi 등^[4], Noguchi 등^[5], Thring 등^[6]의 연구는 저속과 저부하 작동조건에서 다점 자발화에 의해서만 안정적 작동을 얻을 수 있다고 하였다. Taro 등^[7]은 저 연료소비와 저 배기를 동시에 실현시키는 시스템으로서 흡입공기 가열을 이용한 흡기포트 분사의 압축점화 가솔린기관을 제작하여 직접분사식 디젤기관과 가솔린 직접분사기관의 연소 및 배기 성능을 비교 평가하였다. 그러나 Taro 등^[7]의 연구는 기관운전 조건인 기관회전수와 흡입공기온도를 제한하여 실험을 수행하였다. 국내에서도 가솔린 및 디젤 CAI 연소장치와 시스템을 활용하여 기관운전 조건 변화에 대한 성능 평가 연구^[8-9]를 수행하고 있다.

CAI 연소는 2행정 기관에 대해서는 "TS^[3](Toyota-Soken Combustion)", "ATAC^[4](Active Thermo-Atmosphere Combustion)", "AR^[10](Activated Radicals) combustion", "IAPAC^[11](Compressed air assisted fuel injection process)", 4행정 기관에 대해서는 "HCCI^[6](Homogeneous Charge Compression Ignition)", "PCCI^[7-12](Premixed Charge Compression Ignition)", "CAI^[13](Controlled Auto-Ignition)combustion", "CIHC^[14](Compression Ignited Homogeneous Charge)combustion", "UNIBUS^[15](Diesel combustion under uniform higher-dispersed mixture formation)" 등 다양한 이름들로 지칭되며 연구되고 있다. 가솔린, 디젤, 메탄올, 에탄올, 디메틸에테르 및 천연가스 등의 연료는 CAI 연소 적용이 가능하며 따라서 초 저연료 소비 및 저배기를 함께 실현할 수 있는 차세대 기관의 유력한 후보로 각광받고 있다. 지금까지의 CAI 연소에 관한 선행연구들은 기관운전 조건인 기관회전수, 공기연료비, 흡입공기온도가 한정되었고 연료분사시기가 일정한 상태에서 흡기포트에 분사하는 등 상당히 제한된 운전 조건에서 기관 및 배기 특성을 연구하였다.

따라서 본 연구는 초 희박, 초 저공해 기관을 실현

하기 위해 상용 스파크 점화나 압축 점화가 아닌 균질 연소인 CAI 연소 방식을 도입하였다. 별도의 스파크 점화장치 없이 상용 단기통 기관에 유입되는 흡입공기를 가열 및 제어하여 흡기포트에 분사되는 가솔린 연료의 압축 착화성을 향상시킴으로써 기관 작동을 가능케 하였고 기관회전수, 공기연료비 및 흡입공기온도 변화에 대한 제어자발화 가솔린기관(Controlled Auto-Ignition Gasoline Engine)의 성능특성을 규명하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구를 위해 사용된 실험장치의 전체적인 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치를 크게 분류하면 실험기관, 흡·배기장치, 흡입공기가열 및 제어장치, 전기동력계, 연료공급장치, 냉각장치, 연소해석장치, 연료분사 제어장치 및 배기분석장치로 구성되며 각 부분의 압력과 온도를 측정할 수 있도록 하였다. 본 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 공급되는 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 하였고, 흡입밸브 바로 뒤쪽에 위치한 인젝터로 분사 시작 크랭크 각도로부터 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 측정한 공기중량과 메스실린더로 측정된 연료 중량비로 산출 하였다. 흡입공기 가열 및 제어장치는 흡입 서어지 탱크와 기관에 부착된 흡입공기 관 사이에 사각형 형태의 통 안에 세라믹 보빈(Bobbin)을 각각 병렬로 2개를 고정하고, 1 kW 용량의 니크롬선을 각 세라믹 보빈에 감아

2개를 병렬로 설치한 다음 결선 작업을 하여 기관 제어장치에 장착시킨 2 kW 용 전압조절기에 연결하여 제작하였다. 그리고 온도를 검출하는 열전대(K-type), 가열온도를 실시간으로 표시하는 디스플레이어로 구성하였으며 장치는 1℃ 단위로 조절 가능하도록 하였다. 이와 같이 구성한 흡입공기 가열장치의 기초실험을 수행한 결과 기관회전수에 대한 운전 가능한 흡입공기 가열온도 범위는 각각 다르게 나타나고 있다.

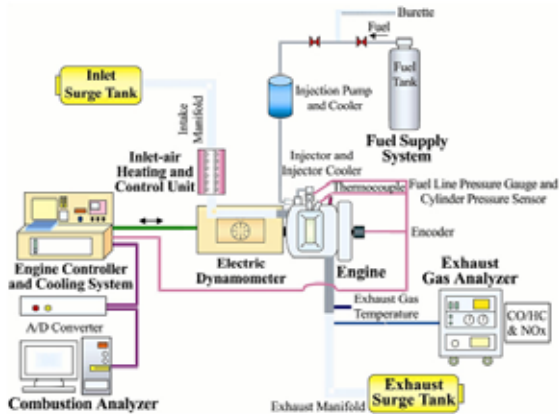


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

Table 1 Engine Specifications

| Items | Type |
|---------------------|-----------------------|
| 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 |
| Fuel | Gasoline |
| Fuel injection | Inlet port |
| Fuel pressure | 3 kg /cm ² |

예로서 본 실험장치는 기관회전수 1800 rpm인 경우 250℃ 까지 상승시킬 수 있음을 확인 하였고, 150℃ 이하인 경우는 기관운전 상태가 극히 불안정 하여 CAI 연소를 실현하는데 어려움이 발생하였다. 그러므로 본 실험 여건에서는 안정적 연소 확보를 위하여 흡입공기온도를 150℃ 부터 180℃ 까지 제한하여 실험을 수행하였다. 연소실내의 압력 변동의 측정은 압력변환기(Kistler Co. Type-601A) 및 증폭기(Kistler Co. Type-5011)를 사용하였으며 이렇게 얻은 압력신호는 연소해석장치(Ono Sokki Co. Type CB-366)를 사용하여 해석하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용한 실험 기관 및 실험 기관 제어 장치의 사진을 나타낸 것이다.

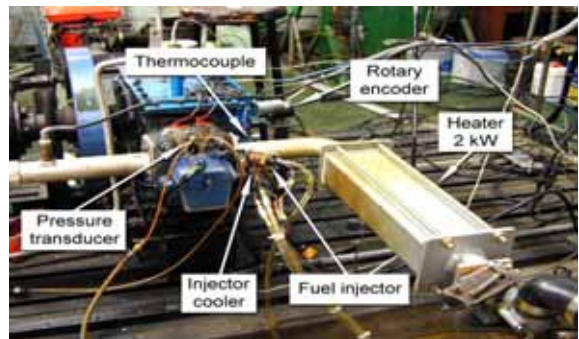


Fig. 2 Photograph of engine

2.2 실험방법

본 실험 기관의 압축비는 18, 가솔린 연료 분사시기는 60° BTDC에서 연료를 분사하였으며 WOT이고 냉각수 출구온도는 75± 5℃로 일정하게 실험 조건을 유지하였다. 기관회전수는 1000 rpm, 1200 rpm, 1400 rpm, 1600 rpm, 1800 rpm, 흡입공기온도는 150℃, 160℃, 170℃, 180℃로 변화시켰다. 공기연료비는 노킹 발생 전부터 운전 가능한 범위(A/F : 30 ~ 63)까지 변화시켰다. 각 운전 조건에서 실험을 수행하여 지압선도를 평가하였으며 또한 최고압력, 열발생을 및 질량연소율, 제동평균유효압력, 제동열효율 및 제동연료소비율 등 작동조건 변화에 따른 출력 특성을 규명하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 지압선도 비교

기관회전수 1200 rpm, 흡입공기온도 170℃ 및 분사시기 60° BTDC이고 WOT일 때 공기연료비 변화에 대한 압력 경과 곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 이 경우 공기연료비가 35보다 농후한 영역에서는 노킹의 발생으로 공기연료비는 35까지로 한정되었고, 58 이상의 희박영역에서는 기관운전이 점화불량으로 인하여 운전영역이 제한되었다. 그림에서 보는바와 같이 공기연료비가 농후할수록 사이클 최고압력은 증가하고 있으며 최고압력 발생시기는 조금씩 진각 되고 있다. 일반적으로 상용 스파크 점화기관에서는 이론 공기연료비보다 약간 농후한 영역에서 사이클 최고압력이 나타나고 있으며 이것보다 희박한 영역이 될 수록 최고압력이 저하되며 최고압력이 나타나는 시기도 지연되는 경향을 나타내고 있는데 이는 혼합기 강도 (mixture strength)때문인 것으로 간주된다. 따라서 본 연구는 초 희박영역에서 농후한 영역으로 운전되는 경우이므로 공기연료비가 농후해 질수록 사이클 최고압력이 상승되고 최고압력 발생시기도 진각 된다. 이러한 경향은 Taro 등^[7]과 Rudolf 등^[6]의 결과와도 일치하고 있다.

Fig. 4는 기관회전수 1200 rpm, 분사시기 60° BTDC이고 WOT일 때 흡입공기온도를 150℃에서 180℃까지 변화시켰을 경우 공기연료비 변화에 대한 최고압력의 변화를 나타낸 것이다.

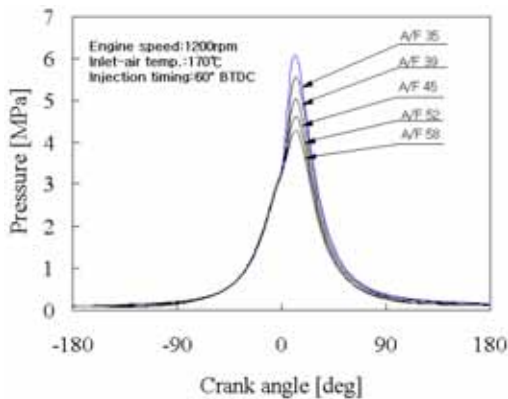


Fig. 3 Variation of the pressure with respect to the crank angle for different air-fuel ratios

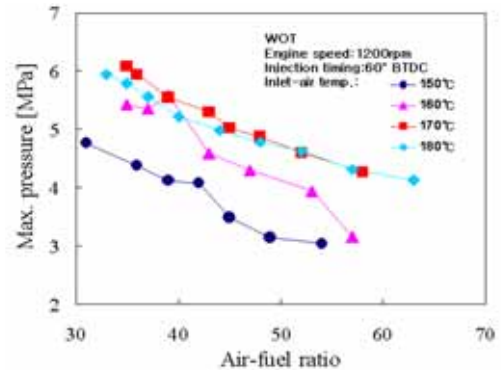


Fig. 4 Variation of the maximum pressure with respect to the air-fuel ratio for different inlet-air temperatures

그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 흡입공기 가열온도에 따라 약간씩 차이는 있지만 최대로 운전 가능한 공기연료비 영역은 흡입공기온도 180℃에서 63 정도의 초 희박 연소가 가능하였다. 한편 흡입공기 가열온도가 150℃에서 180℃로 증가할수록 사이클 최고압력은 증가되고 있는데 이는 흡입공기 가열온도가 높을수록 자발화가 활성화되고 있음을 나타내고 있는 것이다. 그러나 흡입공기 가열온도가 150℃ 이하에서는 압축점화가 불가능하였고, 180℃ 이상에서는 기관운전 자체가 불안정하며 최고압력은 크게 저하되는 현상을 나타내었다. 이것으로 보면 본 실험 장치에서 이 온도 범위가 기관회전수 1200 rpm에서의 CAI 연소가 가능한 한계 온도 범위인 것으로 간주된다. 즉 각 회전수마다 운전 가능한 흡입공기온도 한계 범위가 존재하는 것으로 보여 진다.

3.2 기관출력 성능

Fig. 5는 기관회전수 1200 rpm, 분사시기 60° BTDC이고 WOT일 때 흡입공기온도를 150℃에서 180℃까지 변화시켰을 경우 공기연료비 변화에 대한 제동평균유효압력을 나타낸 것이다. 제동평균유효압력은 공기연료비가 희박할수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 공기연료비가 농후한 쪽에서는 흡입공기 가열온도가 낮을수록, 희박영역 쪽에서는 흡입공기 가열온도가 높을수록 제동평균유효압력이 크게 나타내는 경향을 보여주고 있다. 이는 각 각의 공기

연료비에서 제어자발화가 가능한 최적의 흡입공기온도가 존재하기 때문인 것으로 간주된다.

Fig. 6은 기관회전수 1200 rpm, 분사시기 60° BTDC이고 WOT일 때 흡입공기온도를 150℃에서 180℃까지 변화시켰을 경우 공기연료비 변화에 대한 제동연료소비율을 나타낸 것이다. 제동연료소비율은 공기연료비가 희박할수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히 공기연료비 45 이상에서는 흡입공기온도가 낮을수록 제동연료소비율은 크게 증가되고 있다. 이는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 공기연료비가 45이상에서 흡입공기온도가 낮을수록 제동평균유효압력의 감소 폭이 크게 나타나고 있기 때문인 것으로 간주된다.

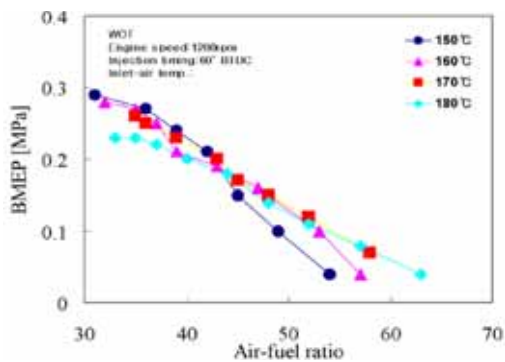


Fig. 5 Variation of the brake mean effective pressure with respect to the air-fuel ratio for different inlet-air temperatures

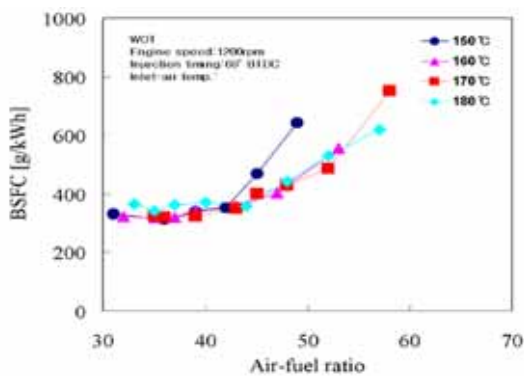


Fig. 6 Variation of the brake specific fuel consumption with respect to the air-fuel ratio for inlet-air temperatures

3.3 제동열효율

Fig. 7은 기관회전수 1200 rpm, 분사시기 60° BTDC이고 WOT일 때 흡입공기온도를 150℃에서 180℃까지 변화시켰을 경우 공기연료비 변화에 대한 제동열효율을 나타낸 것이다. 제동열효율은 공기연료비가 35정도 까지는 다소 증가하다가 그 이후 희박영역이 될수록 급격히 감소하고 있다. 농후한 쪽에서는 흡입공기 가열온도가 낮을수록, 희박영역 쪽에서는 흡입가열온도가 높을수록 제동열효율이 높게 나타나고 있다. 이는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 제동평균유효압력이 이와 같은 경향이 나타나기 때문일 것이며, 특히 공기연료비 45이상에서 흡입공기 가열온도 변화에 대한 제동열효율의 변동 폭이 크게 나타나고 있는데 이것 또한 Fig. 6에 나타난 제동연료소비율의 영향 때문인 것으로 추정된다.

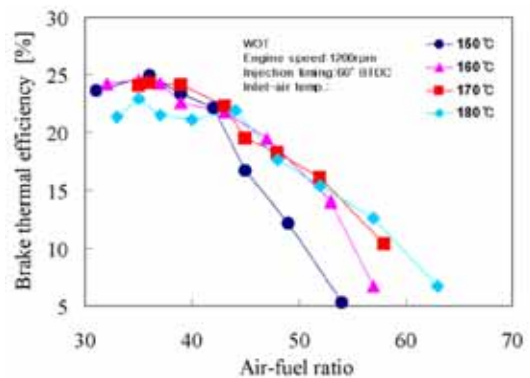


Fig. 7 Variation of the brake thermal efficiency with respect to the air-fuel ratio for different inlet-air temperatures

3.4 열발생율과 질량연소율

Fig. 8은 열발생율과 질량연소율 선도를 대표적으로 기관회전수 1200 rpm, 분사시기 60° BTDC이고 WOT이고 흡입공기온도 170℃인 경우 공기연료비 변화에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 공기연료비가 농후해질수록 열발생율 최고 값은 증가하고 있으며 열발생율 최고 값의 발생시기도 진각 되고 있음을 보여주고 있다. 이는 지압선도 비교에서 전술한 바와 같이 열발생율이 혼합기 강도에 의존되기 때문일 것이다. 따라서 질량연소율 선도에서도 공기

연료비가 농후할수록 연소기간이 단축되며 급속 연소 (rapid combustion)가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 초 희박, 초 저공해 기관 실현을 위해 상용 스파크 점화나 압축 착화가 아닌 균질 연소의 특성인 CAI 연소 방식을 도입하였다. 기관은 별도의 점화 장치 없이 작동조건인 기관회전수, 공기연료비 및 흡입공기온도 등을 변화시켰을 경우 CAI 가솔린 기관의 출력 특성을 규명하였다. 흡입공기를 가열시켜 가솔린연료를 CAI연소시킴으로서 초 희박 연소의 실현이 가능하였

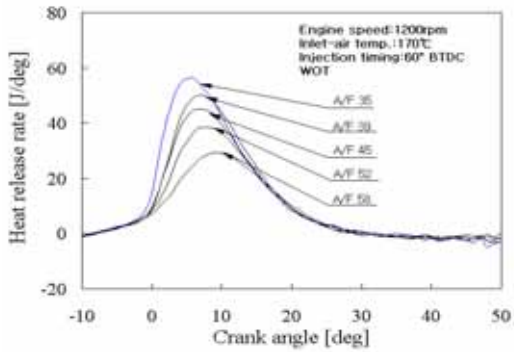
으며 예로서 기관회전수 1000 rpm, 흡입공기온도 170 ℃인 경우 운전 가능한 희박 한계 공기연료비는 63 부근까지 확장되었다. 운전조건에 따라서 CAI 연소가 가능한 흡입공기온도가 존재하며 기관회전수 1200 rpm인 경우는 150℃에서 180℃사이이고 이 범위를 벗어나면 운전의 불안정 및 노킹이 발생하였다. 제동평균유효압력, 제동연료소비율 및 제동열효율 등의 기관성능은 공기연료비가 농후한 영역이 될 수록 개선되고, 열발생율의 최대 값도 증가하며 또 그 발생시기가 진각되어 연소기간의 단축과 빠른 연소가 이루어진다.

후 기

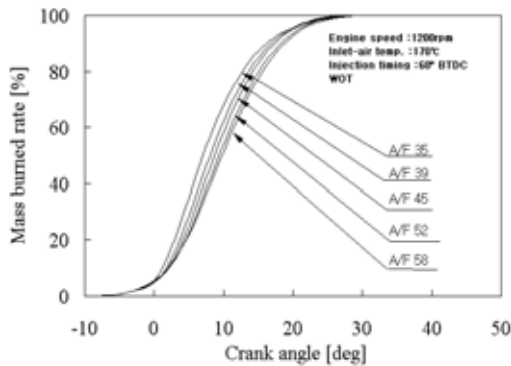
본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Koji, Y., Hideo, S., and Hidenori, T., "Study on Combustion and Exhaust Gas Emission Characteristics of Lean Gasoline-Air Mixture Ignited by Diesel Fuel Direct Injection," SAE Paper, No. 982482, 1998.
2. Nakamura, N., and Saima, k., "Multipoint spark ignition for lean combustion," SAE Paper, No. 852092, 1985.
3. Inoue, T., and Ogawa, M., "Toyota lean combustion system - The third generation system," SAE Paper, No. 930873, 1993.
4. Onishi, S., Jo, S. H., Shoda, K., Jo, P. D., and Kato, S., "Active Thermo -Atmosphere Combustion (ATAC) - A new combustion process for internal combustion engine," SAE Paper, No. 790501, 1979.
5. Noguchi, M., Tanaka, Y., Tanaka, T., and Takeuchi, Y., "A study on gasoline engine combustion by observation of intermediate reactive products during combustion," SAE Paper, No. 790840, 1979.
6. Thring, R. H., "Homogeneous Charge Compression



(a) Heat release rate



(b) Mass burned rate

Fig. 8 Variation of the heat release rate and the mass burned rate with respect to the crank angle for different air-fuel ratios

- Ignition (HCCI) Engines,” SAE Paper, No. 892068, 1989.
7. Taro, A., Yoshiaki, H., Junichi, M., and Yasuo, S., “An Experimental Study of Premixed-Charge Compression Ignition Gasoline Engine,” JSAE Paper, No. 9634477, 1996.
 8. Kim, H., S., “Performance and Emission Characteristics of a Controlled Auto-Ignition Gasoline Engine,” Ph.D. Thesis, University of Soongsil, Seoul, Korea, 2003.
 9. Cho, B. H., Han, Y. T., Lee, K. H. and Lee, C. S., “A Study on the Mixture Formation Process and Combustion Characteristics According to Injection Timing in Premixed Charge Compression Ignition,” KSME, Vol.26, No.12, pp. 1692 ~ 1698, 2002.
 10. Ishibashi, Y., Asai, Y., and Nishida, K., “An Experimental Study of Stratified Scavenging Activated Radical Combustion Engine,” SAE Paper, No. 972077, 1997.
 11. Duret, P., and Venturi, S., “Automotive Calibration of the IAPAC Fluid Dynamically Controlled Two Stroke Combustion Engine,” SAE Paper, No. 960363, 1996.
 12. Aoyama, T., Hattori, Y., Mizuta, J., and Sato, Y., “An Experimental Study on Premixed-Charge Compression Ignition Gasoline Engines,” SAE Paper, No. 960081, 1996.
 13. Nebojsa, Milovanovic and Rui, Chen, “A Review of Experimental and Simulation Studies on Controlled Auto-Ignition Combustion,” SAE Paper No. 2001-01-1890, 2001.
 14. Najt, P. M., and Foster, D. E., “Compression-Ignited Homogeneous Charge Combustion,” SAE Paper, No. 830264. 1983.
 15. Yanagihara, H., Sato, Y., and Junichi, M., “A Study of Diesel Combustion under Uniform Higher-Dispersed Mixture Formation,” JSAE Paper, No. 9733675, 1997.
 16. Rudolf, H., Stanglmaier, Thomas, W., Ryan III and Jason, S., Souder, “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, 2001.