

직접 분사식 가솔린 엔진을 이용한 성층 연소 특성에 관한 실험적 연구

이 창 희^{*1)} · 이 기 형¹⁾ · 임 경 빈²⁾ · 김 봉 규³⁾

한양대학교 기계공학과¹⁾ · 한양대학교 기계공학과¹⁾ · 한밭대학교 기계설계공학과²⁾ · 한국가스공사³⁾

An Experimental Study on the Stratified Combustion Characteristics in a Direction Injection Gasoline Engine

Changhee Lee^{*1)} · Kihyung Lee¹⁾ · Kyoungbin Lim²⁾ · Bonggyu Kim³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

²⁾Department of Mechanical design Engineering, National Hanbat University, Daejeon 305-719, Korea

³⁾R&D Division, KOGAS, Sal-dong, Sangrok-gu, Gyeonggi 425-791, Korea

(Received 5 August 2005 / Accepted 17 November 2005)

Abstract : A gasoline-fueled stratified charge compression ignition (SCCI) engine with both direct fuel injection and intake temperature and compression ratio was examined. The fuel was injected directly by using the high temperature resulting from heating intake port. With this injection strategy, the SCCI combustion region was expanded dramatically without any increase in NOx emissions which were seen in the case of compression stroke injection. Injection timing during the intake temperature was found to be an important parameter that affects the SCCI region width. The effect of mixture stratification and the effect of fuel reformation can be utilized to reduce the required intake temperature for suitable SCCI combustion under each set of engine speed and compression ratio conditions.

Key words : Stratified charged combustion ignition(SCCI 성층 압축 착화), GDI(직접분사식 가솔린 엔진), Mixture distribution(혼합기 분포), Stratified combustion(성층 연소)

1. 서 론

현재 ULEV(Ultra Low Emission Vehicle)와 CAFE(Corporate Average Fuel Economy) 및 교토 의정서등과 같은 전세계적으로 강화되고 있는 배기 규제에 대응하기 위하여 자동차 생산업체는 연료 경제성이 뛰어나고 오염 물질의 배출이 적은 차량에 대한 요구가 증대되고 있다. 이러한 배기 규제를 만족시킬 수 있는 저공해 엔진 기술 개발을 위해 많은 노력을 하고 있는 실정이다. 가솔린 연소의 신개념인 자기 착화 조절(controlled auto ignition) 개념을 이용한 SCCI(Stratified Charged Compression Ignition) 연소

는 성층 연소를 통한 국부적으로 농후한 혼합기를 형성하여 자기 착화를 쉽게 하기 위한 방법이며, 이러한 방법을 이용하면 가연 희박 성층 연소가 가능하다. 즉, SCCI의 연소 개념은 엄밀히 보면 HCCI(Homogeneous Charged Compression Ignition) 연소 개념 안에 속하는 연소 시스템이다. 단지 차이점이 라면 HCCI의 연소 특징은 균일한 혼합기를 조성하여 다점 점화하는 방식으로 세탄가가 높은 연료를 사용하여 압축 착화하는 방식이다. 마찬가지로 SCCI 연소 개념은 성층 혼합 압축 착화하는 방식이며, 가솔린과 같은 비교적 세탄가가 낮은 연료를 사용하여 국부적으로 농후한 혼합기를 형성하여 압축 착화하는 방식이다.

*Corresponding author. E-mail: leemech@ihanyang.ac.kr

흡기 온도 및 당량비 조절은 SCCI 연소에 중요한 인자이다.^{1-3,8)}

가솔린의 예혼합 압축착화 엔진의 연소 조절을 위한 개념으로 내부 EGR 조절, VVT 조절 및 흡기 온도 조절을 통해 자기 착화 시기를 조절하는 연구가 진행되었으며,⁴⁾ 가솔린 연료를 이용하여 HCCI 연소를 위한 방법으로 압축비 변화, 흡기 온도 및 negative 밸브 오버랩을 조절하여 내부 EGR의 변화를 통하여 연소 특성을 파악하는 연구도 수행되었다.^{5,6)}

본 연구에서는 흡기 온도를 높여 자기 착화 온도까지 높이는 방법을 이용하였으며, 분사시기와 흡기 온도 및 압축비를 변화시키면서 연소 및 배기 특성을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서는 상용 단기통 디젤엔진을 기본으로 새로운 연료 공급장치를 부착하여 성층 압축착화 엔진 시스템을 구축하였다. Table 1과 Table 2에 엔진 및 인젝터 제원을 나타내었으며, Fig. 1에 가솔린 직접 분사식 성층 압축 착화 엔진의 개략도 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 직접분사식 성층 압축착화 연소를 실현시키기 위하여 기존에 장착되어 있던 캠-플런저의 기계식 노즐을 제거하고, 저압 커먼 레일(common-rail) 타입 인젝터를 엔진 헤드 중심부에 장착하여 분사시기 및 분사량을 제어할 수 있는 시스템을 구성하였다. 본 연구에서 사용된 저압 커먼레일 인젝터는 중공형 인젝터를 사용하였으며, 압축행정 초기에 분사된 연료의 벽면 충돌에 의한 퇴적을 감소시키기 위하여 분사압력은 디젤 엔진보다 낮은 분사압력인 5MPa를 선정하였다. 연료 특성상 디젤과 비교하여 가솔린의 자기착화(auto ignition) 온도가 높기 때문에 이러한 문제점을 보완하기 위하여 자기 착화 온도까지 온도를 높여주기 위하여 흡기포트 앞에 온도 조절장치를 설치하였다.

2.2 실험조건 및 방법

본 연구에서 사용된 실험조건은 Table 3과 같이

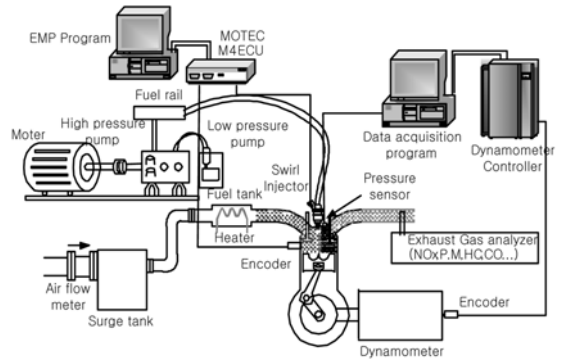


Fig. 1 Schematic diagram of direct injection type SCCI engine system

Table 1 Engine specifications

Engine class	ND 130DI
Engine type	4Stroke, Single Cyl.
Bore×Stroke	95mm×95mm
Volume	673cc
CR	18
IVO/IVC	BTDC 20°/ ABDC 50°
EVO/EVC	BBDC 44°/ ATDC 44°

Table 2 Specifications of fuel injection system

Injector type	Mitsubishi SIDI injector
Injection pressure	5MPa
Spray geometry	Hollowcone / Swirl type
Spray angle	60°

Table 3 Engine test conditions

Engine performance test	
Engine speed	1200 rpm
Compression ratio	18, 16.2, 14.2
A/F	40, 50, 60, 70
Intake air temperature	353K, 393K, 433K
Injection pressure	5MPa
Injection timing	Late injection
Charge air pressure	NA
Fuels	Gasoline

요약하였다. 성능 실험에서는 냉각수 온도를 80±2°C를 유지하였으며, 흡기 온도 변화, 압축비 변화, 분사시기 변화 및 공연비 변화에 따른 엔진 성능 및 배기 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 검토

직접 분사식 엔진을 이용한 연소 개념은 성층 혼합 압축 착화 (SCCI, Stratified Charged Compression Ignition) 방식을 구성하여 세탄가가 낮은 연료를 사용하여 국부적으로 농후한 혼합기를 형성하여 압축 착화하는 방식을 구현하였다. 자기 착화 온도를 높이기 위한 방법으로 흡기 온도를 높였으며, 분사시기와 흡기 온도 및 압축비를 변화시키면서 연소 및 배기 특성을 분석하였다.

3.1 운전 조건변화에 따른 연소 특성

Fig. 2는 압축비와 공연비가 16.2와 60일 때 연소 압력 및 열발생을 특성을 나타낸 결과이다. 분사시기가 지각됨에 따라 연소압력이 증가하는 특성을 보이고 있으며, 착화 시기는 진각되는 특징을 보이고 있다. 이는 정적 연소기내에서 성층연소인 경우 연소압력이 급격히 증가하는 특성으로 미루어보아 분사시기가 지각됨에 따라 혼합기의 성층화가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.⁹⁾

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 조건하에서 흡기온도 변화에 따른 연소압력 및 열발생을 특성을 나타낸 결과이다. 흡기 온도가 353K이고, 분사시기가 BTDC 20°일 경우는 성층을 이룰 수 있는 조건이기는 하지만 온도가 낮아서 분사된 연료가 충분히 기화되지 않았기 때문에 연소 특성이 나쁘게 나타나는 것으로 판단된다. 반면, 흡기 온도를 증가시키면 분사된 연료가 충분히 기화할 수 있는 조건이 충족되었기

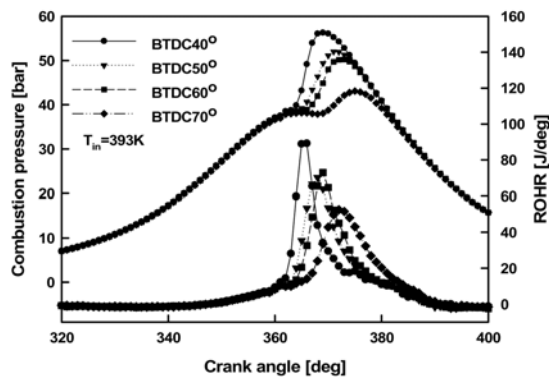


Fig. 2 Effect of injection timing on the compression pressure and ROHR at compression ratio 16.2 and A/F 60

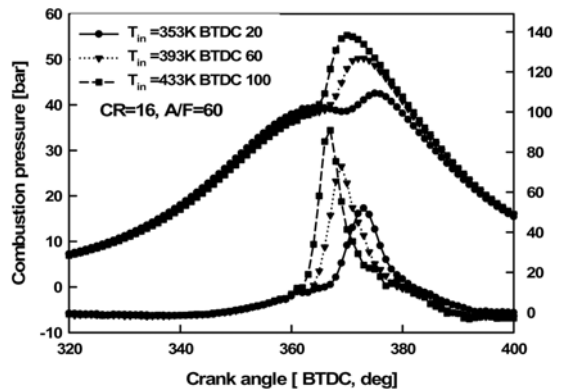
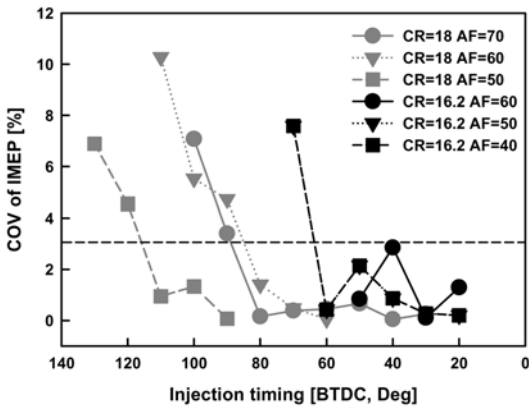


Fig. 3 Effect of intake temperature on the compression pressure and ROHR at compression ratio 16.2 and A/F 60

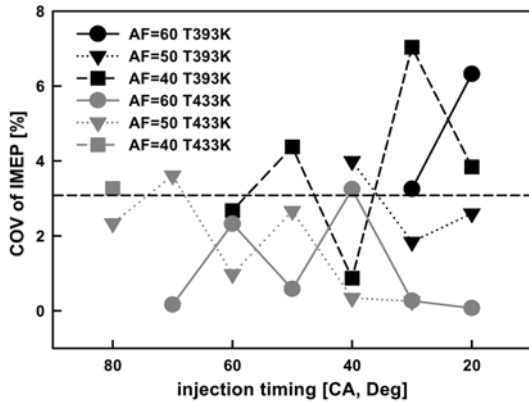
때문에 연소가 활발히 이루어지고 있음을 알 수 있었으며, 분사시기는 TDC 부근으로 지각되는 특성을 보이고 있다. 이는 성층연소가 활발히 진행됨을 알 수 있다.

3.2 연소 안정성

Fig. 4는 압축비, 분사시기 및 흡기 온도 변화에 따른 연소의 안정성을 나타낸 결과이다. Fig. 4(a)의 경우는 흡기 온도가 353K이며, 공연비 변화에 따른 연소 안정성을 나타낸 결과로서, 분사시기가 진각될수록 연소 안정성이 불안정함을 알 수 있다. 이는 분사시기가 진각될수록 분사된 연료가 연소실 내에서 존재하기 보다는 실린더 벽면 및 연소실 이외에 혼합기가 분포하기 때문에 자기 착화하기가 어렵기 때문으로 판단된다. 분사시기가 TDC 부근으로 지각될수록 연료가 연소실 내에 국부적으로 성층화되기 쉬우므로 연소의 안정성이 향상됨을 알 수 있었으며, 압축비의 변화에 따른 연소 안정성의 특성은 분사시기가 TDC 부근으로 지각됨에 따라 연소의 안정함을 보인 반면, 분사시기가 지각됨에 따라 연소의 안정성은 악화되는 경향을 보였다. 이는 분사시기가 진각시킬 경우 연료가 실린더 내 넓게 분포하기 때문에 연료의 성층이 어렵고 착화시기가 일정하지 않기 때문이라 사료된다. 또한, Fig. 4(b)의 경우는 압축비가 14.2이고, 흡기 온도에 따른 연소 안정성을 나타낸 결과로서, 압축비가 낮기 때문에 연소실내의 온도가 낮아지므로 실화할 가능성이 높



(a) In case of intake temperature $T_a=353K$



(b) In case of compression ratio=14.2

Fig. 4 Combustion stability according to effect of compression ratio and injection timing

아서 393K인 경우가 433K인 경우에 비하여 연소가 안정되지 못하고 있음을 확인할 수 있었다. 흡입 공기를 433K로 설정할 경우는 연료의 기화가 촉진되어 연소 성능 또한 높게 나왔으며, 연소의 안정성 측면에서 볼 때 어느 정도 안정적인 연소특성을 보이고 있다고 사료된다.

3.3 배기와 성층연소와의 상관관계

Fig. 5는 압축비가 18일 때 공연비 변화에 따른 IMEP와 연료 소비율에 대한 연료의 성층 특성을 나타낸 결과이다. 공연비의 변화와 무관하게 분사시기가 지각됨에 따라 연료 소비율이 감소함을 알 수 있었으며, NO_x의 배출량이 급격하게 증가하는 경향으로 보아 국부적으로 성층화 된 혼합기가 이루

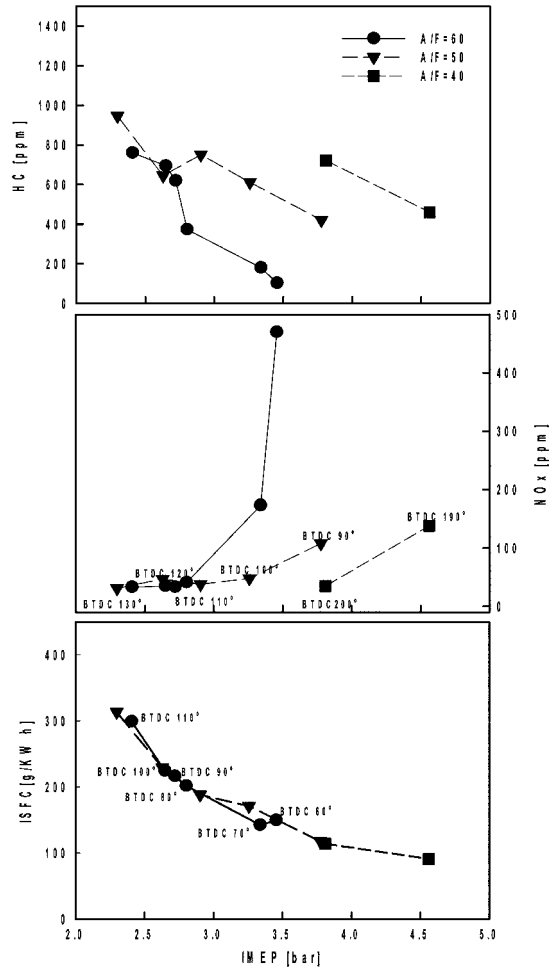


Fig. 5 Effect of fuel consumption rate and emission characteristics according to injection timing

고 있음을 예상할 수 있다. 또한 분사시기가 지각됨에 따라 많은 HC를 배출하는 특성은 분사된 연료가 국부적인 성층을 이루기보다는 피스톤 주변에 넓게 희박한 혼합기를 이루고 있기 때문에 실화의 가능성이 높아지기 때문으로 사료된다.

흡기 온도 변화에 따른 IMEP에 대한 연소의 성층 특성을 Fig. 6에 나타내었다. 분사시기가 지각됨에 따라 IMEP와 NO_x가 증가하는 특성을 보이고 있다. 이는 분사된 연료가 피스톤 볼 영역에 농후한 혼합기를 이루어 급격히 연소가 발생하기 때문이며, 온도가 낮은 경우(353K)는 착화온도 까지 상승하지 않았기 때문에 HC는 급격히 증가하는 반면 NO_x는

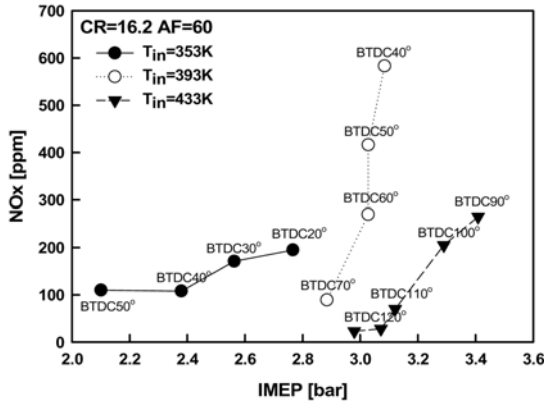


Fig. 6 Effect of mixture stratification on NOx and IMEP (CR=16.2)

감소하는 특성을 보였다. 이는 연소실내에서의 연소특성이 불량함을 알 수 있다. 따라서 일정 압축비 하에서는 흡기온도의 변화 및 분사시기를 조절하여 성층 연소를 실현가능하다고 생각된다.

압축비 변화에 따른 IMEP에 대한 성층 연소 특성을 Fig. 7에 나타내었다. 압축비의 증가는 분사된 시기에 따라 주변 온도 및 압력이 변하기 때문에 압축비에 따라 분사시기가 다르게 나타나고 있다. 압축비가 증가함에 따라 분사시기는 진각되는 경향을 보이고 있으며 주변 온도 및 압력 영향에 의하여 연소가 활발히 일어나고 있음을 알 수 있었다. 따라서 압축비가 증가함에 따라 분사 시기는 진각되는 특성을 보이고 있으며, IMEP 값도 증가하는 경향을 보이고 있다.

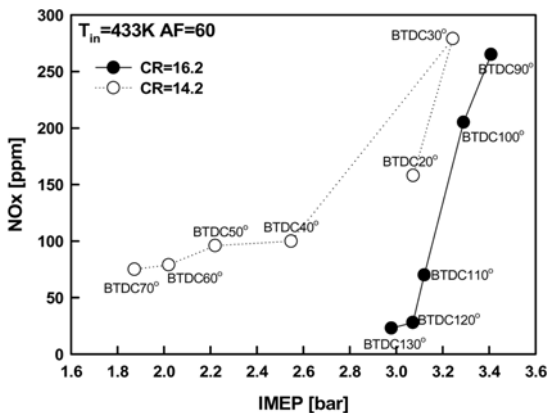


Fig. 7 Effect of mixture stratification on NOx and IMEP (Tin =433K)

3.4 성층연소의 운전 영역 특성

Fig. 6과 Fig. 7의 결과를 통하여 얻은 압축비와 흡기 온도에 따른 운전 영역 특성을 Fig. 8에 나타내었다. Kaneko⁷⁾는 균일 혼합기를 이루는 운전 영역이 대략 AF 35~40임을 보였다. 본 실험 결과를 통하여 성층 혼합기를 이룰 경우의 공연비는 균일 혼합기의 운전 영역에 비하여 넓은 영역에서의 운전 특성을 보였다. 균일 혼합기를 이루는 운전영역과 비교하여 희박한 공연비에서도 성층화된 혼합기를 이룰 경우 연소가 활발히 이루어짐을 알 수 있었다. 흡기 온도의 변화에 따른 운전 영역도 비록 압축비가 높은 경우에 비하여 연료 소비율면에서는 다소 불리함을 보이고 있지만 넓은 영역의 운전 영역에서 성층연소 특성을 잘 보여주고 있다.

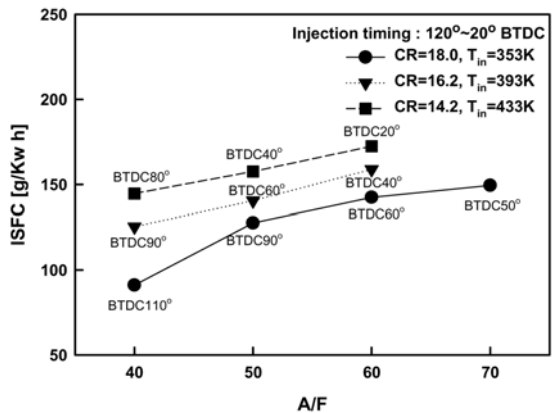


Fig. 8 Operation range by mixture stratified mixture formation according to compression ratio and intake temperature

4. 결론

본 연구는 연소의 신 개념인 자기 착화 제어 방법을 이용하여 흡기 온도, 압축비, 분사시기에 따른 연소 특성 및 안정성 및 배기 특성을 분석하였다. 이에 따른 결과는 다음과 같다.

- 1) 분사시기 변화에 따른 연소 특성 결과, 분사시기를 진각시킴에 따라 착화 시기는 지연되는 경향을 보이며, 연소 압력 또한 감소한다. 압축비가 감소함에 따라 분사 시기는 진각되는 경향을 나타내었으며, 흡입공기 온도가 상승함에 따라 착화 시기는 진각된다.

- 2) 압축비 변화에 따른 연소 및 배기 특성 결과, 압축비가 증가함에 따라 분사 시기는 진각되며, IMEP 값은 증가하는 특성을 보였다. 공연비가 농후해짐에 따라 역시 IMEP 값은 증가하였으며, HC는 감소한 반면 NOx 는 증가하는 특성을 보였다.
- 3) 흡기 온도, 압축비 및 분사시기 변화에 의한 성층 혼합기를 이룰 경우의 공연비(AF40~70)는 균일 혼합기의 운전 영역에 비하여 넓은 운전 영역에서 성층 연소 특성을 잘 보여 주고 있다.

후 기

본 연구는 CERC(연소기술연구센터) 사업의 연구비에 의해 수행된 연구 결과로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 포함합니다.

References

- 1) T. Aoyama and Y. Hattori, "An Experimental Study on Premixed - Charge Compression Ignition Gasoline Engine," SAE 960081, 1996.
- 2) Y. Ishibashi and A. Masahiko, "A Low Pressure Pneumatic Two-stroke Engine by Activated Radical Combustion Concepts," SAE 980757, 1998.
- 3) L. Jacques, C. D. Jean and P. Duret, "Innovative Ultra-low NOx Controlled Auto-ignition Combustion Process for Gasoline Engine," SAE 2000-01-1837, 2000.
- 4) H. Morikawa and H. Teruyuki, "First Report Concerning Research on a Premixed-charge Compression Ignition Gasoline Engine," SAE Paper 2001 Spring Congress of JSAE, No.51-01, pp.5-8, 2001.
- 5) U. Tomonori, H. Kaji and K. Akihiko, "Expansion of HCCI Operating Region by the Combination of Direct Fuel Injection, Negative Valve Overlap and Internal Fuel Reformation," SAE 2003-01-0749, 2003.
- 6) H. Kaji, H. Kasuya and U. Tomonri, "A Study on Gasoline Fueled Compression Ignition Engine - A Trial of Operation Region Expansion," SAE 2002-01-0416, 2002.
- 7) M. Kaneko, "Study on Homogeneous Charge Compression Ignition Gasoline Engine," COMODIA 2001, pp.441-446, 2001.
- 8) K. H. Lee, H. M. Kim and J. D. Ryu, "An Experimental Study on the Two Stage Ignition of Cool Flame and Hot Flame in HCCI Engine According to Fuel Compression," Transactions of KASE, Vol.12, No.1, pp.17-24, 2004.
- 9) C. H. Lee and K. H. Lee, "A Study on the Effect of Stratified Mixture Formation on Combustion Characteristics on a Constant Volume Combustion Chamber," JAME International Journal Series B, Vol.48, No.2, pp.265-272, 2005.