

< 논문 >

SCCI 방법을 이용한 직분식 가솔린 엔진내의 압축비 및 흡기 온도 변화에 따른 연소 및 배기 특성에 관한 실험적 연구

이창희[†] · 이기형* · 임경빈**

(2005년 12월 22일 접수, 2006년 4월 4일 심사완료)

An Experimental Study on the Combustion and Emission Characteristics According to the Variation of Compression Ratio and Intake Temperature Using Stratified Charge Compression Ignition in a Gasoline Direct Injection Engine

Changhee Lee, Kihyung Lee and Kyoungbin Lim

Key Words : SCCI(성층혼합연소), Intake Temperature Heating(흡기온도가열), Gasoline Direct Injection Engine(직분식엔진), Compression Ratio(압축비)

Abstract

Stratified charge compression ignition (SCCI) combustion, also known as HCCI(homogeneous charge compression ignition), offers the potential to improve fuel economy and reduce emission. In this study, SCCI combustion was studied in a single cylinder gasoline DI engine, with a direct injection system. We investigated the effects of air-fuel ratio, intake temperature and injection timing such as early injection and late injection on the attainable SCCI combustion region. Injection timing during the intake process was found to be an important parameter that affects the SCCI region width. We also find it. The effects of mixture stratification and 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.

1. 서론

현재 ULEV(Ultra Low Emission Vehicle)와 CAFÉ(Corporate Average Fuel Economy) 및 교토 의정서 등과 같은 전세계적으로 강화되고 있는 배기 규제에 대응하기 위하여 자동차 산업업체는 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 자기착화 조절(controlled auto ignition) 개념을 이용한 SCCI(Stratified Charge Compression Ignition) 연소는

성층 연소를 통한 국부적으로 농후한 혼합기를 형성하여 자기 착화를 쉽게 하기 위한 방법이며, 이러한 방법을 이용하면 가연 회색 성층 연소가 가능하다. 즉, SCCI의 연소 개념은 엄밀히 보면 HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition) 연소 개념 안에 속하는 연소 시스템이다.

예혼합 압축 착화 방식의 하나인 SCCI 연소는 압축착화 방식과 스파크 프러그 점화 방식의 장점을 갖춘 잠재력 있는 연소기술로써 최근 SCCI 연소에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이다.^(1,2,3,8) 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 NVO(Negative Valve Overlap)을 조절하여 내부 EGR의 변화를 통하여 연소 특성을 파악하는 연구도 수행되

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과
E-mail : leemech@encod.hanyang.ac.kr
TEL : (031)418-9293 FAX : (031)406-5550

* 회원, 한양대학교 기계공학과

** 회원, 한밭대학교 기계공학과

었다.^(5,6)

일반적으로 가솔린 연료를 이용한 자착화에 관한 연구는 진행되지 않고 있으며, 이론 공연비에서 연소를 하는 특성보다는 희박한 공연비에서 연소 특성을 파악하기 위하여 국부적으로 농후한 혼합기를 만들어 자착화시키기 위한 노력이 대두되고 있다. 본 연구에서는 직접 분사식 가솔린 인젝터와 흡기온도 및 압축비 변화를 이용하여 SCCI 엔진 기술을 확립하였으며, 이러한 SCCI 엔진의 연소 및 배기 특성을 분석하였다. 또한, 분사시기, 압축비 및 흡기 온도 변화에 따른 노킹 영역과 실화 영역을 구분하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서는 상용 단기통 디젤엔진을 기본으로 새로운 연료 공급장치를 부착하여 성층 압축착화 엔진 시스템을 구축하였다. Table 1 과 Table 2 에 엔진 및 인젝터 제원을 나타내었으며, Fig. 1 에 가솔린 직접 분사식 성층 압축 착화 엔진의 개략도를 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 5MPa 를 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.

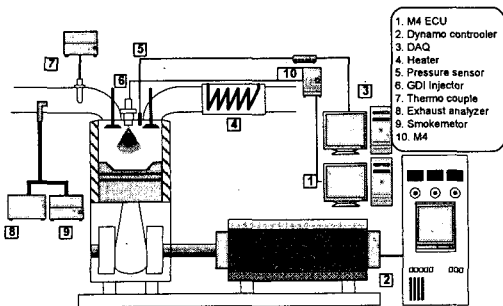


Fig. 1 Schematic diagram of direct injection engine system

2.2 실험 방법 및 조건

본 연구에서 사용된 실험조건을 Table 3 과 같이 요약하였다. 성능 실험에서는 냉각수 온도를 80±2℃ 를 유지하였으며, 흡기 온도 변화, 압축비 변화, 분사시기 변화 및 공연비 변화에 따른 엔진 성능 및 배기 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분사 시기변화에 따른 연소특성

Fig. 2 와 Fig. 3 은 흡기 온도가 353K, 압축비가 각각 18, 16.2 일 때 연소 압력 및 열 발생율(heat release) 특성을 나타낸 결과이다.

분사시기가 지각(retard)됨에 따라 착화시기는 진각(advance)되는 특성을 보이고 있으며, 연소압력은 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 가솔린 연료의 특성상 자기 착화(auto-ignition) 온도의 증가로 인함과 동시에 분사시기가 지각됨에 따라 주변 분위기 압력이 증가되어 균일한 혼합기를 이루기 보다는 성층화된 혼합기를 이루었기 때문이라고 생각된다. 분사시기가 지각됨에 따라 실린더내의 압력과 온도가 높아지게 되며, 이때 연료를 분사할 경우 빠르게 연소가 이루어짐을 알 수 있다.

이러한 이유로 분사시기를 진각시킴에 따라 분사된 연료가 상대적으로 낮은 실린더 압력에서 분사되기 때문에 혼합기 분포가 넓게 분포할 가능성

Table 1 Engine specifications

Engine type	4Stroke, Single Cyl.
Bore × Stroke	95mm×95mm
volume	673cc
I/VO/IVC	BTDC 20°/ABDC 50°
EVC/EVC	BBDC 44°/ATDC44°

Table 2 Specifications of fuel injection system

Maker (Injection Pressure)	Mitsubishi (5MPa)
Spray Geometry	Hollow cone / Swirl type
Spray Angle	60°

Table 3 Engine test conditions

Engine speed	1200 rpm
A/F	40, 50, 60, 80
Injection timing	Late injection(BTDC 20~120°)
Intake temperature	353K, 393K, 433K
Compression ratio	18, 16.2, 14.2

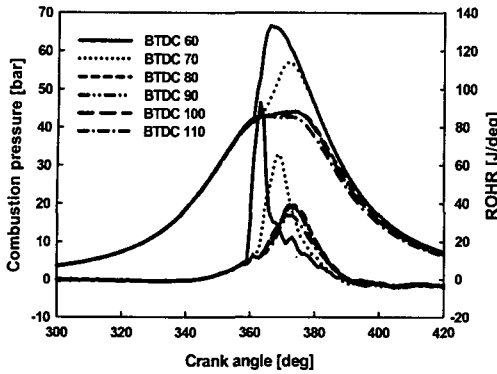


Fig. 2 Pressure and ROHR to injection timing at intake temperature 353K, CR 18 and A/F 60

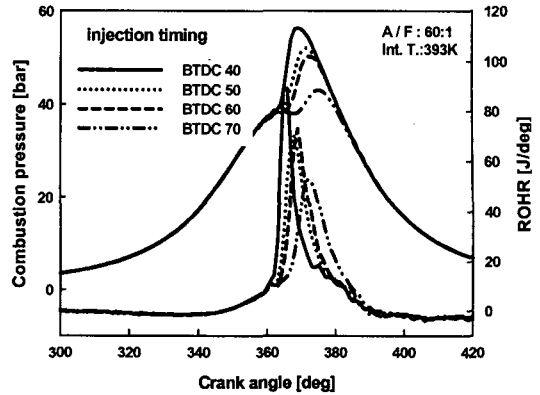


Fig. 4 Pressure and ROHR to injection timing at intake temperature 393K, CR 16.2 and A/F 60

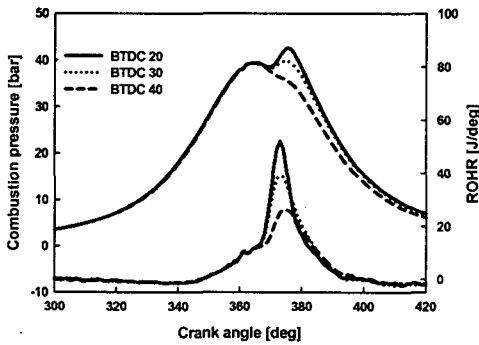


Fig. 3 Pressure and ROHR to injection timing at intake temperature 353K, CR 16.2 and A/F 60

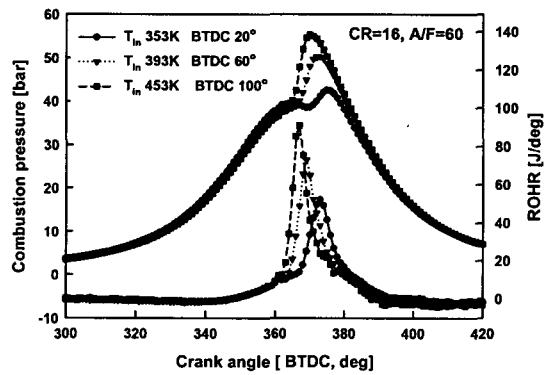


Fig. 5 Pressure and ROHR with intake temperature at CR 16.2 and A/F 60

이 높아지게 되어 전체적으로 희박한 혼합기를 이루기 때문에 연소 특성이 불안정함을 알 수 있었다. 따라서 분사시기를 진각시킬 경우, 착화시기가 지연되며, 분사시기를 TDC 부근으로 지각시키면 노킹이 발생하는 경향을 보이고 있다. 압축비가 16.2 이고 흡기 온도가 353K 인 경우의 결과를 통하여 Fig. 2 와 같은 분사시기의 경우는 압축 착화가 일어 나지 않고 있음을 볼 수 있다. 분사시기를 TDC 부근으로 지각시킬 경우 분사된 연료가 피스톤 보울 영역에 농후한 혼합기 분포를 형성하기 때문에 연소 특성이 좋아 지고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 압축비를 낮추게 됨에 따라 실린더 내의 연소 압력 및 온도가 다르기 때문에 가솔린 연료의 기화 특성 및 자기 착화 특성이 다르게 나타나고 있음을 예측할 수 있다.

이러한 이유를 설명하기 위해 흡기 온도를 393K 로 설정하여 같은 압축비에 대해 실험한 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 그 결과 흡기 온도의 상승으로 인하여 Fig. 3 의 실화 영역에서 연소 특성이 활발해 지는 경향을 볼 수 있다.

Fig. 2 와 Fig. 3 및 Fig. 4 의 결과로부터 압축비가 낮아지게 되면 착화시기는 지각되며, 흡기 온도의 변화에 따라서는 착화시기가 진각되는 특성을 보이고 있다.

3.2 흡기온도 변화에 따른 연소 특성

Fig. 5 는 공연비와 압축비가 각각 60 과 16.2 일 때 흡기 온도 변화에 따른 연소 압력 및 열 발생률 특성에 대한 결과이다.

흡기 온도가 증가함에 따라 연소 가능 영역이 증가하는 특성을 보이고 있으며, 분사시기는 진각(advance)되는 특성을 보이고 있다. 이러한 특성으로 보아, 흡기 온도의 증가로 인하여 가솔린이 빠르게 기화가 촉진되며, 착화 온도까지 도달하는 시간이 짧아 지는 특성을 보이고 있다. 즉 흡기 온도가 증가할수록 가솔린의 착화 온도까지 도달하는 시점이 빨라지므로 착화시점이 앞당겨지는 것으로 사료된다. 노킹현상으로 인한 운전 영역의 한계가 발생하는 원인으로서는 흡기 온도가 증가함에 따라서 공기와의 혼합효율이 떨어질 뿐만 아니라 이로 인하여 착화지연기간이 길어지기 때문에 급격한 압력 상승이 발생하는 것으로 생각된다.

3.3 분사시기 및 압축비에 따른 성능 특성

Fig. 6 은 분사시기와 공연비 및 압축비 변화에 따른 성능 혼합 연소의 IMEP 특성을 나타낸 결과이다.

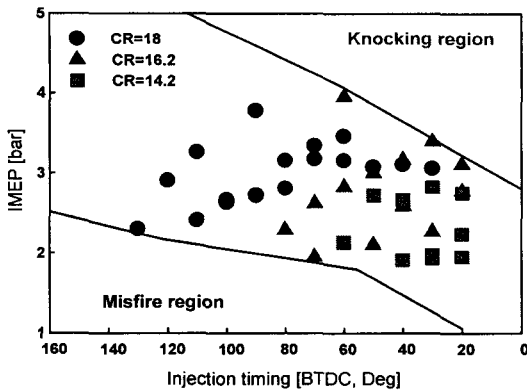


Fig. 6 IMEP value according to variable compression ratio

압축비 변화에 따른 연소특성 결과, 압축비가 증가함에 따라 분사시기는 진각되는 특성을 보이고 있으며, IMEP 값도 증가하는 경향을 보이고 있다. 공연비 변화에 따른 연소특성 결과, 공연비의 증가에 따라 IMEP 값이 증가하는 특성을 보이고 있다. Kaneko⁽⁷⁾을 통하여 그 특성을 확인 할 수 있었다. 분사된 연료가 연소실 벽면에 충돌하는 분사시기에는 벽류의 증가로 인하여 착화가 불량하여 IMEP가 감소된다. 이때 압축비가 감소함에 따라서는 분사시기는 TDC 근처로 지각되어 분사가 이루어지게 되는데 연소실내에 성층 혼합기를 이루지 못하기 때문에 연소 성능이 나빠지게 된다. 이러한 연료의 성층을 위해서는 압축비 및 흡기 온도가 낮을 경우는 분사시기가 TDC 근처로 지각되는 특성을 보이고 있다. 또한 연료가 피스톤의 불 영역에 직접 충돌할 경우 불 영역에 연료가 농후하게 분포하여 노킹과 함께 IMEP도 최대값을 보이고 있다.

본 실험에서 얻은 연소압력을 분석하여 노킹에 해당하는 부분은 제외하고 나타난 결과를 토대로 분사시기 및 압축비 변화에 따른 성능 특성 결과, 공연비가 증가함에 따라서는 분사시기를 지각할수록 노킹영역에 포함되며, 압축비가 감소함에 따라서는 분사시기가 진각될수록 실화 영역(misfire region)에 포함되는데 이러한 영역을 좁히기 위해서는 분사시기를 지각함으로써 노킹 영역(knocking region)을 좁힐 수 있다.

3.4 분사시기와 압축비 및 흡기 온도에 따른 배기 특성

압축비와 공연비가 각각 18 과 70 일 때, 분사시기 변화에 따른 배기특성을 나타낸 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

분사시기가 TDC 근처로 지각됨에 따라 NOx가 증가함과 동시에 HC는 감소됨을 알 수 있었다. 이러한 이유는 분사시기가 지각됨에 따라 분사된

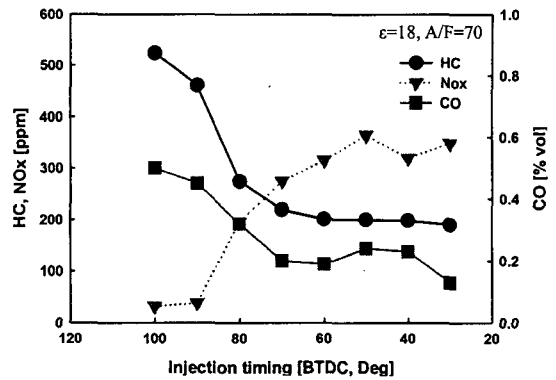


Fig. 7 HC, CO and NOx emission with injection timing

연료가 피스톤 불 영역에 농후하게 분포되어 노킹과 함께 연소 특성을 활발하게 이루어지고 있음을 예측할 수 있었으며, 분사시기가 진각됨에 따라 분사된 연료가 피스톤 벽면에 부착되어 착화가 불안정하기 때문에 HC가 과다하게 배출됨을 알 수 있었다. 이와 같은 조건의 경우, 출력과 배기 특성을 고려해보면 분사시기를 BTDC 80~70°에 분사하는 것이 좋은 조건이라고 생각되며, CO의 배출량은 거의 발생하지 않고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8은 공연비와 압축비 및 흡기 온도의 변화에 따른 배기 특성을 나타내었다. 압축비가 증가함에 따라 가솔린의 자착화 온도는 압축비 증가로 인하여 연소실 온도가 증가하기 때문에 연소가 원활히 이루어짐을 알 수 있다.

Fig. 8(a)는 압축비 18이며, 흡기 온도가 353K 일때의 공연비에 따른 HC와 NOx의 특성을 나타낸 결과이다. HC는 분사시기를 TDC 부근으로 지각함에 따라 감소하는 반면에 NOx는 공연비가 농후해짐에 따라 급격하게 증가하는 특성을 보이고 있다. Fig. 6의 분사 시기에 따른 IMEP 특성과 비교하여 보면 NOx가 과다하게 발생하는 영역은 노킹발생 영역에 해당된다. 공연비가 농후해질수록 노킹 발생 영역은 증가하는 특성을 보였다.

Fig. 8(b)는 압축비가 16.2 일 때 공연비와 분사시기 변화에 따른 배기 특성을 나타낸 결과이다. 분사시기를 TDC 부근으로 지각시켜도 NOx 배출이 Fig. 8(a)의 경우보다 작게 나타났다. 이러한 이유는 흡기 온도와 압축비의 영향으로 인하여 노킹 발생 영역이 좁아졌음을 알 수 있다. 이 결과에서도 마찬가지로 공연비가 농후(rich)해짐에 따라 노킹 발생 영역의 증가와 더불어 많은 HC가 배출되고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8(c)와 Fig. 8(d)는 압축비가 14.2 일 때 흡기 온도 변화에 따른 배기 특성을 나타낸 결과이다. Fig. 8(c)의 경우는 Fig. 6의 출력 성능결과를 통하여 분사시기 및 공연비와 상관없이 많은 HC를 배출하고 있는데, 이는 잦은 실화로 인하여 HC의

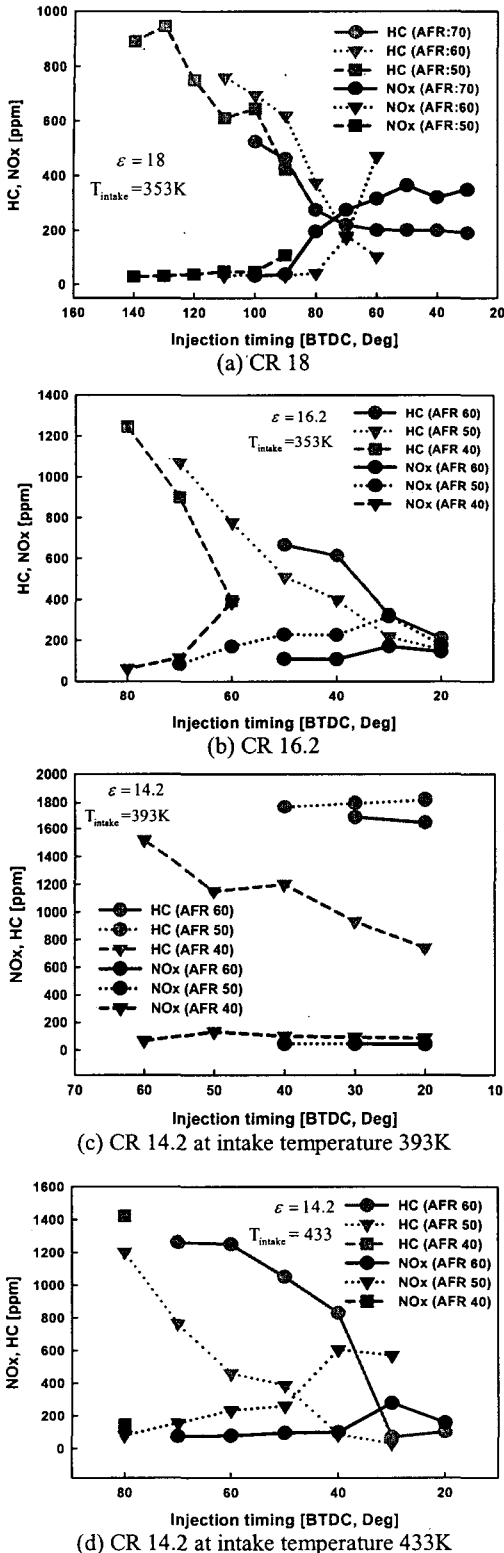


Fig. 8 Emission characteristics of HC and NOx according to compression ratio

배출량이 다른 조건에 비해 많이 배출되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8(d)의 경우는 흡기 온도를 434K 로 높였을 때의 배기특성을 나타낸 결과이다. Fig. 8(c)의 경우와는 다르게 흡기 온도의 상승으로 인하여 실화 영역이 감소됨을 알 수 있었다. Fig. 8(a)와 비슷한 경향을 보이고 있으며, Fig. 6의 성능 특성을 고려했을 경우, 성능은 비록 떨어지나 배기 측면에서는 50% 이상의 배기 성능 측면에서 유리하다고 판단된다.

Fig. 9는 압축비, 흡기 온도 및 분사시기 변화에 따른 NOx와 수트(Soot) 특성을 나타낸 결과이다. 수트(soot)의 발생 특성은 Fig. 6의 IMEP 특성과 거의 일치하는 경향을 보이고 있다. 연소실 부근에 농후한 혼합기의 형성으로 인하여 수트의 발생이 증가하고, 불영역에 성층 혼합기가 형성되어 충분히 자기착화할 수 있는 조건이 갖추어질 경우에는 수트가 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 9(a)는 압축비와 흡기 온도가 각각 18과 353K 일 때 NOx와 수트의 배기 특성을 나타낸 결과이다. NOx 배출량이 증가함에 따라 수트도 증가하는 경향을 보이고 있으며, 공연비가 농후해짐에 따라 NOx와 수트가 증가함을 보이고 있다.

Fig. 9(b)는 압축비 16.2 일 때의 배기 특성을 나타낸 결과이다. Fig. 9(a)와 비교 결과, 공연비가 희박한 경우는 비슷한 값을 보였지만 공연비가 농후해짐에 따라 급격하게 수트가 다량으로 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 연소 압력 및 열발생율의 결과에서 언급했듯이 열발생이 TDC 이후에서 시작된 것으로 미루어보아 후기연소에서 발생된 수트로 생각된다.

Fig. 9(c)의 결과를 통하여 보면 Fig. 9(b)에서 일어난 현상에 대하여 뒷받침하는 결과로 여겨진다. 흡기 온도를 증가함에 따라 급격하게 NOx의 배출량이 증가하고 수트의 배출량은 감소하는 특성을 보이고 있다.

Fig. 9(d)와 (e)는 압축비가 14.2이며, 흡기 온도가 각각 393K, 433K 일 때 배기 특성을 나타낸 결과이다. 흡기 온도가 높은 경우가 NOx 및 수트배출량이 증가하는 특성을 보이고 있다. Fig. 9(d) 결과를 통하여 압축비 변화에 따른 수트의 생성은 압축비가 감소함에 따라 발생 정도가 감소되는 경향을 보이고 있으며, 동일 압축비의 경우, 공연비가 농후해 질수록 수트의 배출 정도는 증가하는 특성을 보인다.

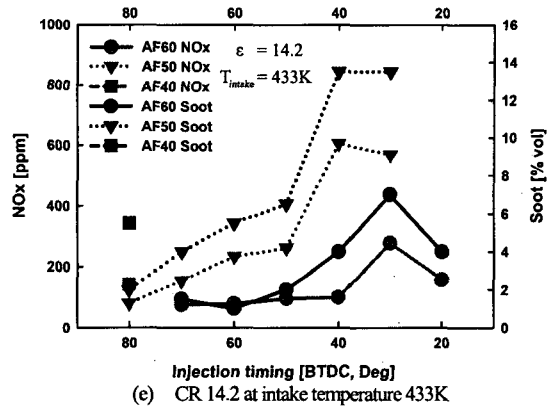
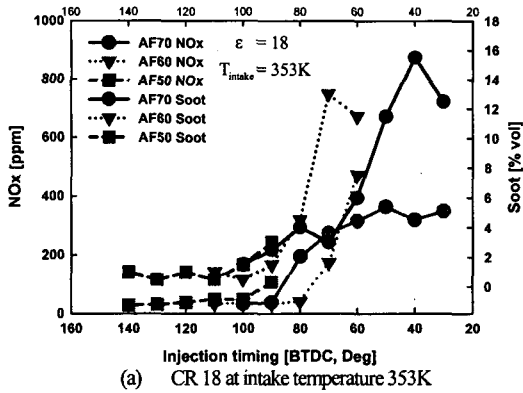
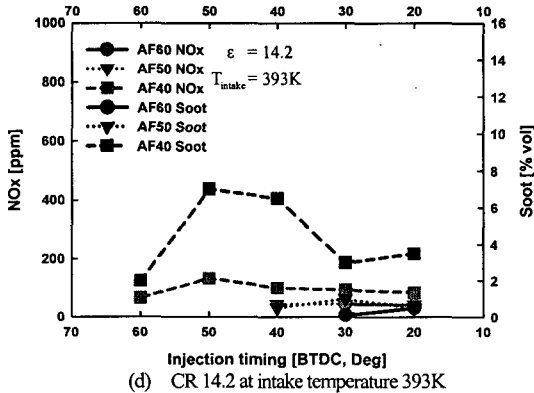
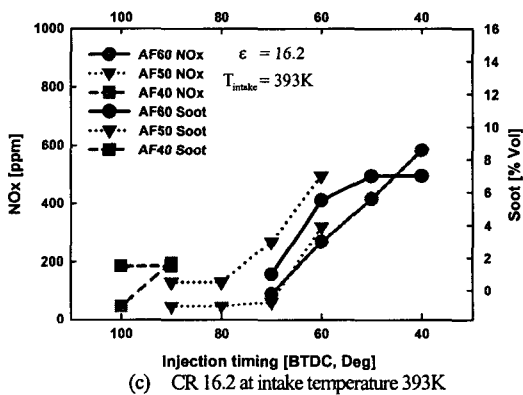
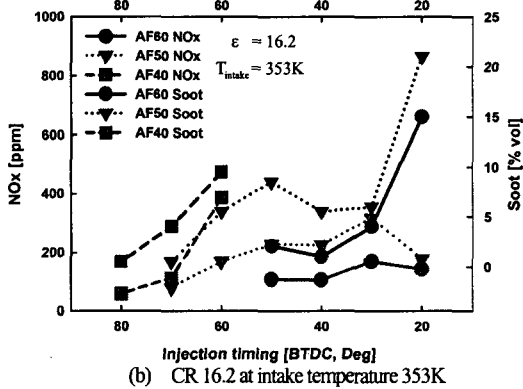


Fig. 9 Characteristics of soot according to compression ratio and intake temperature



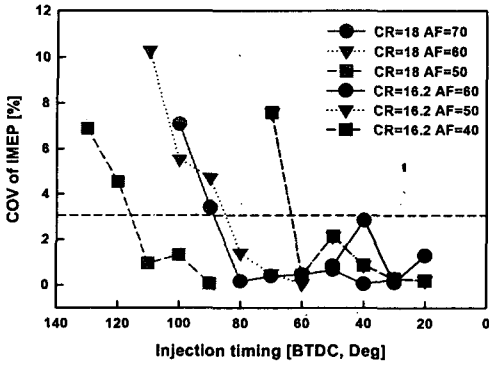
3.5 연소 안정성

압축비, 분사시기 및 흡기 온도 변화에 따른 연소 안정성 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

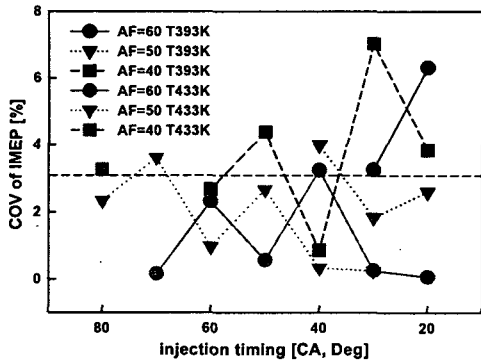
Fig. 10(a)의 경우는 흡기 온도가 353K 이며, 공연비 변화에 따른 연소 안정성을 나타낸 결과로서, 분사시기가 진각될수록 연소 안정성이 불안정함을 알 수 있다. 분사시기가 진각될수록 분사된 연료가 연소실 내에서 존재하기 보다는 실린더 벽면 및 연소실 이외에 혼합기가 분포하기 때문에 자기 착화할 수 있는 충분한 상태를 이루지 못하고 있다고 생각된다. 분사시기가 TDC 부근으로 지각될수록 연소의 안정성이 향상됨을 알 수 있었다. 또한 압축비가 낮은 경우가 높은 경우보다 더욱 연소의 안정성을 보이고 있다. 공연비가 농후해 질수록 연소가 안정한 영역은 분사시기 영향에 따라 진각되는 경향을 보이고 있다.

Fig. 10(b)의 경우는 압축비가 14.2 이고, 흡기 온도에 따른 연소 안정성을 나타낸 결과이다. 압축비가 낮기 때문에 압축비가 높은 경우와 비교하여 연소실내의 온도는 낮으며 실화할 가능성이 높다. 흡입공기를 393K 와 433K 로 설정하여 실험한 결과, 393K 인 경우 연소가 안정되지 못하고 있음을 확인할 수 있었다.

이러한 이유는 Fig. 6 에서 언급했듯이 연소 성능 곡선과 일치하는 경향을 보이고 있다. 흡입 공기를 433K 로 설정할 경우는 연소 성능 또한 높게 나왔으며, 연소의 안정성 측면에서 보면, 어느 정도 안정적인 연소특성을 보이고 있다고 사료된다.



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



(b) In case of CR 14.2

Fig. 10 Combustion stability according to effect of compression ratio, injection timing and intake temperature

Fig. 8 과 Fig. 9 의 결과를 통하여 얻은 압축비와 흡기 온도에 따른 운전 영역 특성을 Fig. 11 에 나타내었다.

Kaneko⁽⁷⁾는 균일 혼합기를 이루는 운전 영역이 대략 AF=35~40 임을 보였다. 본 실험 결과를 통하여 성층 혼합기를 이루는 경우의 공연비는 균일 혼합기의 운전 영역에 비하여 넓은 영역에서의 운전 특성을 보였다. 균일 혼합기를 이루는 운전영역과 비교하여 희박한 공연비에서도 성층화된 혼합기를 이루는 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 성층 연소 특성을 잘 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 SCCI 연소 방법을 이용하여 흡기 온도(353K, 393K, 433K)와 압축비(CR=18, 16.2,

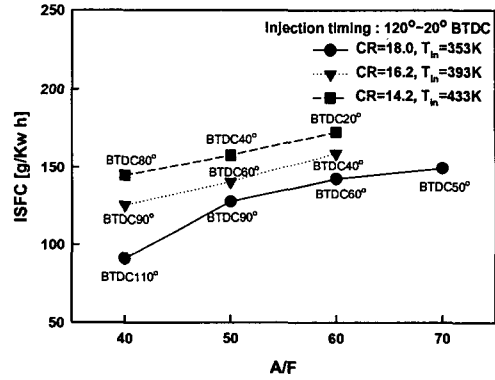


Fig. 11 Operation range by mixture stratified mixture formation according to compression ratio and intake temperature

14.2) 변화에 따른 연소 특성 및 안정성을 분석하였다. 연소 압력 및 배기 특성과 운전영역의 상관 관계를 다음과 같이 정리하였다.

(1) 분사시기 변화에 따른 연소 특성의 영향은 분사시기를 진각시킴에 따라 착화시기는 지연되는 경향을 보이며, 연소 압력 또한 감소하였으며, 흡기 온도가 증가할수록 연소 가능 영역이 증가하는 경향을 보이는 결과를 얻었다. 이때 분사시기는 진각되는 경향을 보였으며, 분사시기를 지각할 경우 노킹 영역으로 인한 운전 한계가 발생하였다.

(2) 압축비 변화에 따른 연소 특성의 영향은 압축비가 증가함에 따라 분사시기는 진각되며, IMEP 값은 증가하는 특성을 보였다. 공연비가 농후해짐에 따라 역시 IMEP 값은 증가하였다. 또한, 분사시기, 압축비 및 흡입 온도 변화에 따른 영향은 동일 압축비일 때 분사시기가 지각됨에 따라 NOx 와 수트는 증가하는 반면 HC 감소하였다. 흡기 온도의 변화에 따라 실화 영역의 감소로 인하여 HC 는 감소되고, NOx 와 수트는 증가하는 성향을 보였다.

(3) 압축비 감소와 흡입 온도 상승을 할 경우(압축비 14.2, 흡입 공기 온도 433K), 압축비 18 인 경우보다 IMEP 면에서는 다소 손실을 보지만 배기 측면에서 보면 약 50%의 배기 점감을 가져왔다.

(4) 압축비, 분사시기, 흡기 온도에 따른 SCCI 연소의 안정성의 영향은 압축비 변화에 따라 대부분이 분사시기가 TDC 부근으로 지각됨에 따라 연소의 안정성은 떨어졌지만, 낮은 압축비에 흡기 온도 변화에 따라 배기 및 안정성 측면에서 안정적인 연소특성을 보였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Aoyama, T., Hattori, Y., 1996, "An Experimental Study on Premixed - Charge Compression Ignition Gasoline Engine," SAE 960081.
- (2) Ishibashi, Y., et.al., 1998, "A Low Pressure Pneumatic Two-stroke Engine by Activated Radical Combustion Concepts," SAE 980757.
- (3) Jacques, L., et. al., 2000, "Innovative Ultra-low NOx Controlled Auto-ignition Combustion Process for Gasoline Engine," SAE 2000-01-1837.
- (4) Morikawa, et. al., 2001, "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.
- (5) Tomonori Urushihara, Koji Hiraya, Akihiko Kakuhou and Teruyuki Itoh, 2003, "Expansion of HCCI Operating Region by the Combination of Direct Fuel Injection, Negative Valve Overlap and Internal Fuel Reformation," SAE 2003-01-0749.
- (6) Koji Hiraya, Kazuya Hasegawa, Tomonori Urushihara, Akihiro Iiyama and Teruyuki Itoh, 2002, "A Study on Gasoline Fueled Compression Ignition Engine - A Trial of Operation Region Expansion," SAE 2002-01-0416.
- (7) Kaneko, M. et. al., 2001, "Study on Homogeneous Charge Compression Ignition Gasoline Engine," *COMODIA 2001*, pp. 441~446.
- (8) Kihyung Lee et. al, 2004, "An Experimental Study on the Two Stage Ignition of Cool Flame and Hot Flame in HCCI Engine According to Fuel Compression," *Transactions of KSAE*, Vol. 12, No. 1, pp. 17~24.
- (9) Richard Standing, Tom Ma and Hua Zhao, 2005, "Effect of Injection Timing and Valve Timings on CAI Operation in a Multi-cylinder DI Gasoline Engine," SAE 2005-01-0132.
- (10) Thirouard, B. and Knop, V., 2005, "Investigation of Mixture Quality Effect on CAI Combustion," SAE 2005-01-0141.
- (11) Aron Oakley, Hue Zhao and Nicos Lasommatos, 2001, "Experimental Study on Controlled Auto-ignition Combustion of Gasoline in a 4-stroke Engine," SAE 2001-01-1030.
- (12) Don Law and Jeff Allen, 2002, "On the Mechanism of Controlled Auto Ignition," 2002-01-0412.
- (13) Rui Chen and Nebojsa Milovanovic, 2003, "The Thermal Effect of Internal Exhaust Gas Recirculation on Controlled Auto Ignition," SAE 2003-01-0751.
- (14) Younghoon Yoon, Daesik Kim and Changsik Lee, 2005, "Effect of Premixed Fuel and EGR on the Combustion and Emission Characteristics of HCCI Diesel Engine," *Transaction of the KSME B*, Vol. 29, No. 9, pp. 1006~1012.
- (15) Kyunghwan Lee, Venkatesh Gopalakrishnan and John Abraham, 2004, "An Investigation of the Effect of Changes in Engine Operating Conditions on Ignition in an HCCI Engine," *KSME International Journal*, Vol. 18, No. 10, pp. 1809~1818.