

가솔린 직접분사식 HCCI 엔진의 혼합기 제어에 의한 연소 및 배기 특성에 관한 실험적 연구

김형민¹⁾ · 류재덕¹⁾ · 이기형²⁾

한양대학교 기계공학과 대학원¹⁾ · 한양대학교 기계공학과²⁾

An Experimental Study on the Characteristics of Combustion and Emission in a Gasoline Direct Injection Type HCCI Engine by Controlling Mixture Formation

Hyungmin Kim¹⁾ · Jeaduk Ryu¹⁾ · Kihyung Lee^{*2)}

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

²⁾Graduate School, Hanyang University, Gyeonggi-do 425-791, Korea

(Received 31 October 2003 / Accepted 4 May 2004)

Abstract : As the environmental pollution becomes serious global problem, the regulation of emission exhausted from automobiles is strengthened. Therefore, it is very important to know how to reduce the NOx and PM simultaneously in diesel engines, which has lot of merits such as high thermal efficiency, low fuel consumption and durability. By this reason, the new concept called as Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI) engines are spotlighted because this concept reduced NOx and P.M. simultaneously. However, there is trade off between output and NOx in a HCCI engine.

In this study, output and emission characteristics for a gasoline direct injection type HCCI engine were investigated to clarify the effects of intake air temperature, injection time and mixture formation. From these experiments, we found that the smoke was not produced when the fuel was injected earlier than BTDC 90°. In addition, the output was increased because of delay of ignition time and NOx emission was decreased because of homogeneous charge of first injection in case of split injection.

Key words : HCCI(예혼합 압축착화), Cool flame(냉염), Split injection(2단분사), Two-stage ignition(2단연소), Stratification charge(성층혼합기), Homogeneous charge(균일혼합기), ROHR(열발생률)

1. 서론

환경문제와 석유자원의 고갈이 세계적인 문제로 대두되면서 자동차의 배출가스 저감과 열효율의 증가에 대한 요구가 증대되고 있다. 이러한 관점에서 열효율이 우수한 디젤엔진이 주목을 받고 있지만,

디젤엔진의 연소 특성인 국부적인 고온 반응 구간에서의 NOx 생성과 확산연소시의 입자상물질 PM (particulate matter)의 배출 증가와 같은 문제점을 가지고 있는 실정이다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 연료와 공기가 충분히 혼합할 수 있도록 예혼합 연료 분사 시스템을 이용하여 흡입행정 및 압축행정 초기에 연료를 분사함으로써 연소실내에 희박 균일한 예혼합기

*To whom correspondence should be addressed.
hylee@hanyang.ac.kr

를 형성시킨 후, 순간적으로 동시에 자기착화를 시키는 새로운 연소 시스템인 HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition)가 새로운 연구대상이 되고 있다.

HCCI 엔진의 개념은 Noguchi 등과 Onishi 등이 ATAC(Active thermo-atmosphere combustion)란 이름으로 2행정 기관에 최초로 적용하였고^{1,2)}, HCCI 연소의 중요한 특성인 저온연소 및 고온연소의 화학 반응에 대하여 많은 연구가 진행되고 있으며³⁾, 최근에는 많은 연구기관 및 대학 등에서 HCCI 엔진의 운전범위의 확대와 배출물의 저감을 위해 노력하고 있다.

그러나 현재 디젤 엔진에서 사용되고 있는 연료와 분사시스템을 이용하여 균일 혼합기를 형성하는데에는 어려움이 따르고 있으며, 또한 엔진의 최대출력을 증대시키기 위해서는 착화시점이 TDC 근처에서 이루어져야 하지만, 흡기관 분사나 조기분사 시스템의 HCCI 연소는 압축에 의한 자기착화 연소이기 때문에 착화시점이 TDC 이전에 발생하는 단점을 가지고 있다.⁴⁾

그러므로 본 연구에서는 혼합기 형성과 착화시기 제어⁵⁾를 통한 열효율 증대효과를 파악하기 위하여 가솔린 직접 분사식 HCCI 시스템을 구축하였다. 이 시스템에서 분사시기 조절 및 2단 분사에 의하여 균일혼합기와 성층혼합기를 형성한 후, 두 혼합기 분포의 장단점을 파악하였으며, 이러한 직접분사 시스템의 혼합기 분포를 제어함으로써 출력의 증가 및 배기가스 저감에 적합한 연료 분사 방식을 제시하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서는 상용 단기통 디젤엔진을 기본으로 새로운 연료공급장치를 부착하여 예혼합 압축착화 시스템을 구축하였다. Fig. 1에 직접 분사식 예혼합 압축착화 엔진의 개략도를 나타내었고, Table 1에 엔진 제원을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 직접분사식 예혼합 압축착화를 실현시키기 위하여 기존에 장착되어 있던 캠-플런저의 노즐을 제거하고, 저압 커먼 레일 타입 인젝터를 엔진 헤드 중심부에

Table 1 Specifications of test engine

Engine type	4 stroke single cyl.
Bore×Stroke	95 mm × 95 mm
Displacement volume	673 cc
Compression ratio	19
IVO/IVC	BTDC 20°/ ABDC 44°
EVO/EVC	BBDC 44°/ ATDC 44°

Table 2 Specifications of fuel injection system

Injector type	Mitsubishi GDI injector
Injection pressure	5MPa
Spray geometry	Hollow cone
Nozzle type	Swirl type
Spray angle	60°

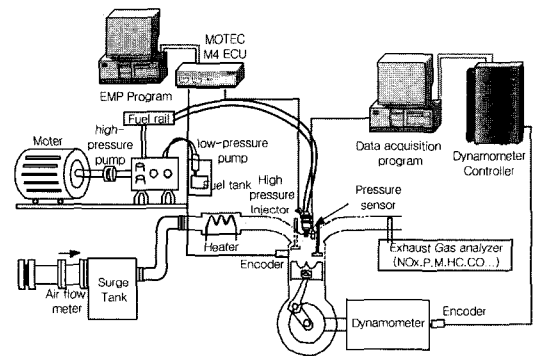


Fig. 1 Schematic diagram of D.I. type HCCI engine system

장착하여 분사시기 및 분사량을 제어할 수 있는 시스템을 구성하였다. 이러한 연료공급장치는 일정 분사압력을 유지시켜주기 위한 연료 레일과 저압 펌프 및 고압 펌프로 구성되어 있고, 연료 분사압력은 최고 10MPa까지 제어가 가능하다.

기존의 디젤 고압 인젝터를 사용할 경우에는 분사된 연료가 연소실 표면에 부착되어 연소 성능이 저하될 것으로 판단되므로, 본 실험에서는 미립화 특성이 우수하면서도 분무도달거리가 짧은 직접 분사식 가솔린 엔진에서 사용하는 중공형 스월 인젝터를 사용하였다.^{5,6)} 또한 압축행정 초기에 분사된 연료의 벽면 충돌에 의한 퇴적의 감소를 위하여 디젤엔진보다 낮은 분사압력인 5MPa를 사용하였다.

공급연료의 미립화 촉진 및 흡기 온도 변화에 따른 성능 실험을 수행하기 위하여 흡기관에 전기 히터를 장착하여 흡기온도를 대기온도부터 140℃까

지 조절하였고, 연료는 디젤연료보다 휘발성이 좋아서 예혼합기 형성에 유리하다고 판단되는 가솔린 연료를 사용하여 실험을 수행하였다.

2.3 실험조건 및 절차

본 연구의 실험조건은 Table 3과 같다. 성능 실험에서는 냉각수 온도를 $80 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지하였고, 흡기 온도의 영향에 대한 실험은 흡기온도 80°C 를 기준으로 공연비를 맞춘 후, 연료량을 일정하게 유지한 상태에서 흡기온도를 변화시켰다.

HCCI 성능실험 후 연소압력을 사용하여 연소해석을 수행하면, Fig. 2와 같은 연소압력 및 열발생을 그래프를 얻을 수 있다. 이를 이용하여 착화시기, 착화지연기간, 최고압력, 최대 열발생 위치 및 연소기간 등의 주요 인자들을 산출하여 연소특성을 파악하였다. 또한 동력계 및 배기가스 분석계에 의해 토크 및 NOx, CO, HC, Smoke 등을 측정하였다.

Table 3 Engine test conditions

Engine Performance Test	
Engine speed	800 ~ 1800 rpm
A/F	74
Intake air temp.	$80^\circ\text{C} \sim 140^\circ\text{C}$
Injection type	single, split(5:5)
Injection timing	BTDC $30^\circ \sim 320^\circ$
Fuel	Gasoline

3. 실험결과 및 고찰

3.1 디젤연료와 가솔린연료의 예혼합 압축착화 연소 특성

Fig. 2는 디젤 연료와 가솔린 연료의 예혼합 연소 특성을 비교한 그림이다. 그림에서 나타나 있는 바와 같이 디젤연료의 예혼합 연소특징은 주연소 이전에 냉염이 발생하는 2단연소(two-stage ignition) 형태를 갖는다. 이때 생성되는 냉염은 메탄과 에탄을 제외한 알킨(파라핀)계열 연료의 연소에 의하여 발생되며, 주 연소 이전에 저온연소 반응을 일으키는 것으로 알려져 있다.⁷⁾ 반면 가솔린 연료의 연소 시에는 냉염이 발생되지 않으며, 가솔린과 비슷한 성분인 iso-octane의 경우 초기 온도가 330K 이상이 되면 1단연소 형태를 보인다는 연구 결과⁷⁾와 일치

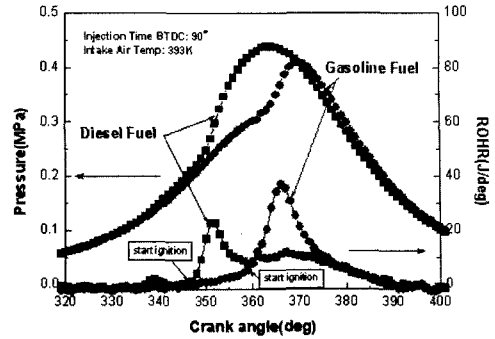


Fig. 2 Comparison of combustion characteristics between diesel and gasoline fuel

하고 있다. 또한 디젤연료의 경우, 착화시기가 가솔린연료의 연소에 비해 빨리 발생되는 특성을 가지고 있으며, TDC이전의 착화로 인하여 엔진의 성능면에서 불리할 것으로 예상되는데, 이는 디젤연료가 가솔린연료보다 자기착화 온도가 낮기 때문이다. 그리고 디젤연소의 경우 예혼합 압축을 하였음에도 불구하고 예혼합 연소 후에 확산화염 형태의 연소특성이 나타나고 있다. 이는 디젤연료가 가솔린 연료 보다 미립화 및 증발특성이 좋지 않아 미처 증발되지 못한 연료에 의하여 확산연소의 형태로 나타나는 것으로 판단된다. 그러나 가솔린 연료는 확산연소가 발생되지 않음을 알 수 있으며, 이러한 특성들로 인하여 가솔린 연료가 예혼합 연료로서의 장점을 가지고 있다고 사료된다.

3.2 예혼합 연소의 출력 및 배기 특성

3.2.1 분사시기 및 흡기온도에 따른 출력특성

Fig. 3은 분사시기 및 흡기온도에 따른 엔진의 최대출력 조건을 찾기 위한 실험의 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 분사시기가 TDC에 가까워질수록 출력이 증가하는 경향을 보이다가 어느 시점을 지나면 다시 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 분사시기를 너무 진각 시키면 착화불량으로 인해 엔진 운전이 불가능해짐을 알 수 있으며, 이는 연료의 착화조건에 영향을 주는 흡기온도에 따라 달라지는 경향을 나타내고 있다. 즉, 흡기온도의 증가는 분사시기에 따른 운전 가능기간을 증가시키지만 최대출력은 감소시킨다. 이상의 결과로부터 흡기온도에

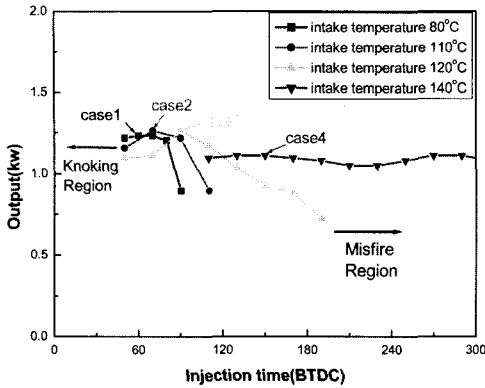


Fig. 3 Performance characteristics according to injection time and intake air temperature

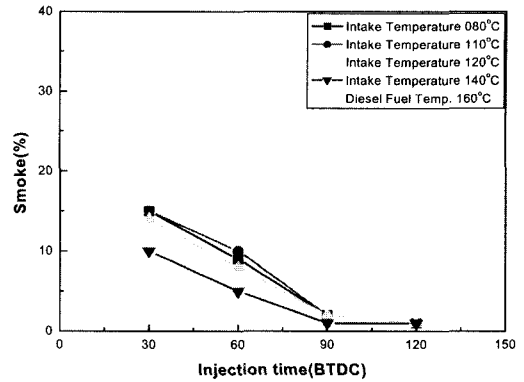


Fig. 5 Smoke characteristics according to injection time and intake air temperature(1500RPM)

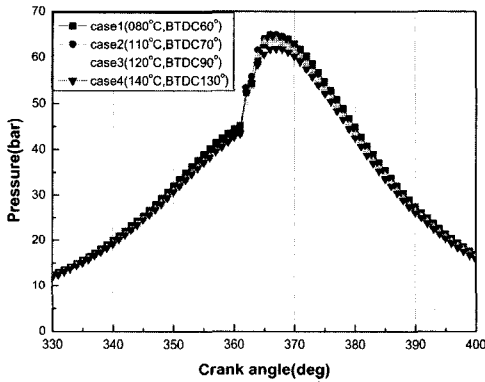


Fig. 4 Pressure characteristics at maximum power position

따라 최대 출력이 나타나는 분사시기가 다르게 나타나는 것을 알게 되었고 그 지점을 그림 중에 Case1~4로 표시하였다.

Fig. 4는 흡기온도 및 분사시기에 따라 최대 출력 발생 지점에서의 압력 선도를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 세 경우 모두 흡기온도나 분사 시기에 관계없이 TDC 후 2~3도 지점에서 급격한 압력상승을 보이고 있다. 이 결과로부터 최대 출력을 나타내는 착화 시기는 분사시기에 관계없이 동일함을 알 수 있었다.

3.2.2 분사시기 및 흡기온도에 따른 배기특성

Fig. 5는 가솔린 연료의 분사시기 및 흡기온도에 따른 Smoke 농도를 디젤연료의 예혼합 연소와 비교한 것이다. 가솔린연료는 디젤연료보다 미립화 및 증발특성이 좋기 때문에 확산연소 과정이 없으므로 디젤연료의 예혼합 연소 시의 Smoke 배출량보다 월

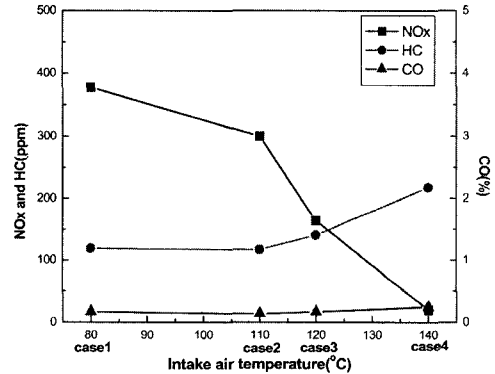


Fig. 6 Emissions characteristics according to intake air temperature at maximum power

등히 감소한다. 또한 흡기온도가 증가함에 따라 Smoke 배출량도 감소함을 알 수 있었으나, 가솔린 연료의 증발시간이 충분한 BTDC 90° 이전에 분사하였을 경우에는 흡기온도에 관계없이 거의 Smoke가 발생되지 않았음을 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 흡기온도 별 최대 출력지점에서 배기가스 특징을 나타낸 그림이다. NOx의 배출량은 흡기온도의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으며, 또한 HC와 CO의 배출량은 흡기온도 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 흡기온도가 증가 되면 최대 출력이 발생하는 분사시기가 진각되어 나타나기 때문에 균일 혼합기를 형성할 시간이 충분하므로 NOx의 양은 감소하지만, 이른 분사에 따른 가솔린 연료의 기화 불량에 기인하여 HC나 CO의 배출량은 증가되는 것으로 사료된다.

3.2.3 혼합기 형성 상태에 따른 출력 및 배기특성

실제 엔진에서는 흡기온도를 엔진의 운전조건에 따라 변화시키기는 어려운 일이다. 따라서 본 연구의 분사 시스템에서는 출력 및 배기 특성의 관점에서 흡기온도 120°C가 가장 효과적이라고 사료된다. Fig.7은 흡기온도를 120°C로 유지한 상태에서의 출력 및 배기 특성을 나타낸 그림이다. 출력특성은 분사시기 BTDC 90도를 최고로 하여 지각했을 경우는 착화시기의 진각에 의한 노킹현상이 발생하며, 진각할 경우에는 미연소에 의한 착화성의 불량으로 인해 출력이 감소하고 있는 경향을 보이고 있다. NOx 배출량은 분사시기가 진각 될 수록 감소하는 경향을 나타내고 있으며, BTDC 130도 이전에 분사할 경우에는 거의 발생하지 않았다. 따라서 가솔린 연료는 증발특성이 좋아서 BTDC 130도 이전에 연료를 분사시키면 균일 혼합기를 형성할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 HC의 경우에는 NOx와 반대의 경향을 나타내었다.

Fig. 8은 흡기온도가 120°C일 때 분사시기에 따른 압력 및 열발생 특성을 나타낸 그림이다. 분사시기가 BTDC90도 보다 지각하여 분사할 경우, 착화시기는 TDC이전에 나타나므로 압축행정에 착화되어 출력 면에서 손실을 초래한다. 또한 연료의 미립화 및 증발할 시간의 부족으로 인하여 디젤연료의 연소 때와 같은 확산화염이 발생하여 Smoke의 증가를 야기시킨다. 또한 분사시기가 진각 될 수록 최대 압력 및 열발생률이 감소함을 알 수 있다.

Fig. 9는 흡기온도가 120°C일 때 최대출력인 분사

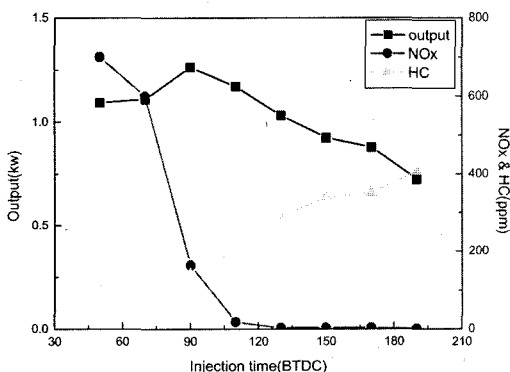


Fig. 7 Power and emissions according to injection time (intake air temp=120°C)

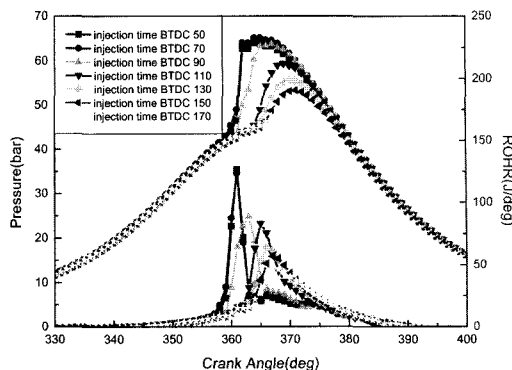


Fig. 8 Pressure and ROHR according to injection time (intake air temp=120°C)

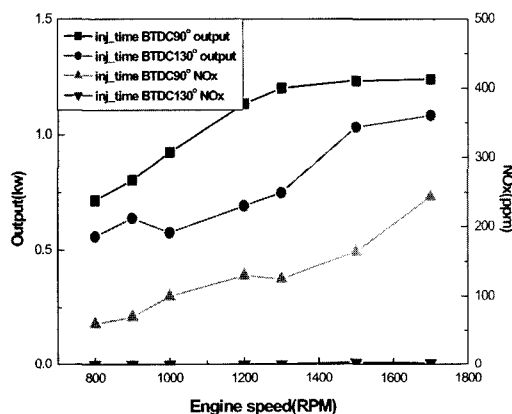


Fig. 9 Power and NOx according to stratification charge (intake air temp=120°C)

시기와 NOx가 발생하지 않는 분사시기를 엔진회전 속도에 따라 비교한 것이다. 분사시기 BTDC90도에서의 출력은 전 운전영역에서 분사시기 BTDC130도보다 높았고, NOx의 양은 엔진회전수가 증가할 수록 증가하였다. 분사시기가 BTDC130도에서의 출력은 분사시기 BTDC90도 보다 작으나 전 운전영역에서 NOx는 배출되지 않음을 보이고 있다. 이러한 특성으로부터 성층혼합기는 출력을 증가시키지만 NOx의 배출을 증가시키는 반면, 균일혼합기는 NOx는 저감되나 출력 면에서 불리한 단점을 가지고 있다는 사실을 알게 되었다.

3.2.4 Split 분사에 의한 혼합기 형성 특성

Fig. 10,11은 2단 분사의 분사시기에 따른 출력 및 NOx 특성을 나타낸 그림이다. 단일 분사와 마찬가지로 출력과 NOx는 Trade-off 관계에 있음을 확인

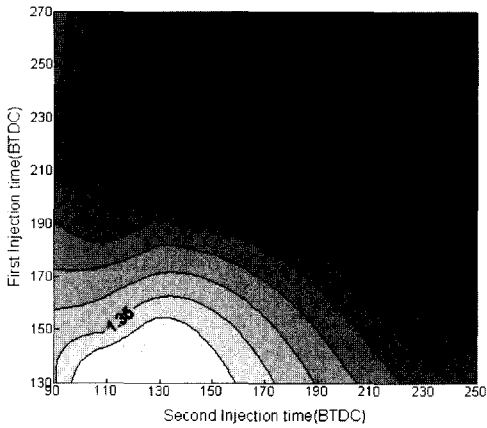


Fig. 10 Power characteristic according to first and second injection time(intake air temp.:120°C, unit:kw)

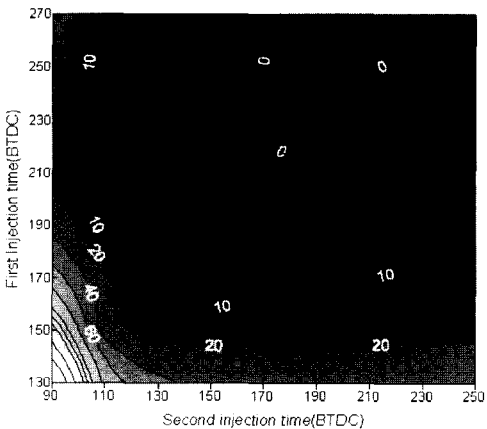


Fig. 11 NOx emission characteristic according to first and second injection time(intake air temp.:120°C, unit: ppm)

할 수 있었다. 그러나 단일 분사인 Fig. 3에서 보다 운전 범위가 넓어졌음을 알 수 있으며, 이는 연료의 성층화로 인해 착화범위를 증가시킨 결과로 사료된다.

Fig. 12는 분사량의 비율을 5:5로 하여 출력이 최대인 분사시기를 단일 분사 때와 비교한 것이다. 출력이 최대인 분사시기는 단일 분사 때보다 진각되고 있으며, 흡기온도에 따른 경향은 단일분사와 비슷한 경향을 나타내었다. 그리고 Fig. 13은 흡기온도에 따른 최대 출력 및 효율을 단일분사와 2단 분사에 대하여 비교한 그림이다. 모든 흡기온도에서 2단 분사일 때가 단일분사보다 출력이 증가되고, 흡기온도에 대한 영향이 단일 분사시보다 크지 않으며,

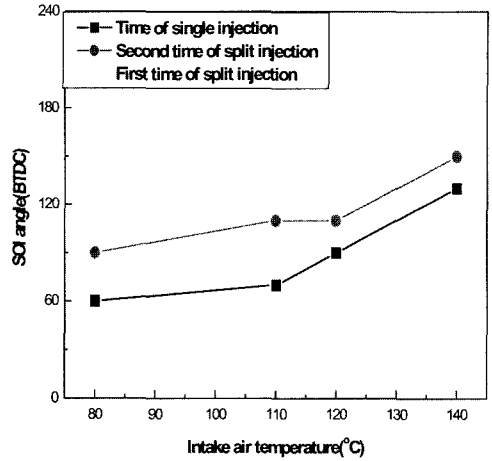


Fig. 12 Comparison of injection strategy at maximum output

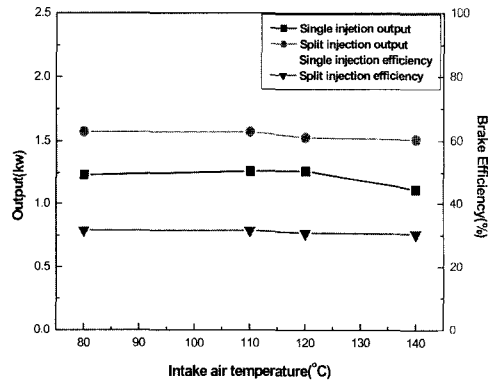


Fig. 13 Output and brake efficiency according to intake air temperature at maximum performance

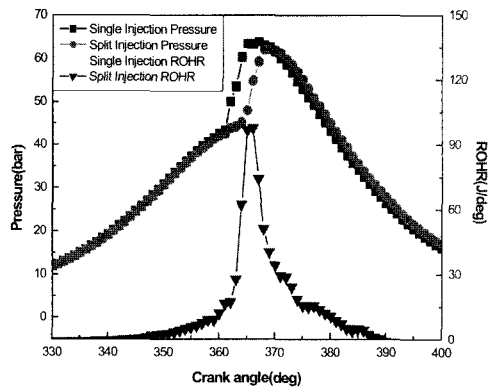


Fig. 14 Pressure and rate of heat release characteristics of single and split injection(intake air temperature:120°C)

효율은 2단 분사 시 약 30%정도를 유지하고 있다. 이는 Fig. 14에서도 볼 수 있듯이 착화시기가 단일분

사시보다 지각되어 나타나고, 팽창행정까지 압력이 전달되기 때문이라고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 가솔린 연료를 사용하여 예혼합 압축착화 엔진의 혼합기 분포에 따른 출력 및 배기 특성을 확인한 후, Split 분사를 통해 출력 및 배기 성능을 향상할 수 있는 방법을 연구한 결과 얻어진 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 가솔린 연료의 예혼합 연소는 디젤 연료와는 다르게 1단연소(single-stage ignition) 형태의 특징을 보이며, 디젤연료 보다 미립화 및 증발특성이 좋고 자착화 온도가 높아 예혼합연소에 더 적합한 연료라고 사료된다.
- 2) 단일분사 시에 분사시기를 BTDC90도 이상 진각시키면 Smoke는 발생되지 않았고 분사시기의 지각은 성층혼합기에 의해 출력향상이 향상되었으며 분사시기의 진각은 균일 혼합기에 의해 NOx 배기가스의 저감을 가져왔다.
- 3) 2단 분사는 착화시기의 지연에 의해 단일 분사조건보다 출력의 향상을 가져왔으며, 첫 번째 분사의 균일 혼합기의 형성에 의해 NOx의 감소를 초래하였다.

후 기

본 연구는 한양대학교에서 지원하는 2002년도 특성화 연구과제의 일환으로 수행되었으며, 관계자에게 감사를 드립니다.

References

- 1) M. Noguchi, Y. Tanaka, T. Tanaka, Y. Takeuchi, "A Study on Gasoline Engine Combustion by Observation of Intermediate Reactive Products During Combustion," SAE 790840, 1979.
- 2) S. Onishi, S. H. Jo, K. Shoda, P.D.Jo, S. Katao, "Active Thermo-atmosphere Combustion(ATAC) - A New Combustion Process for Internal Combustion Engines," SAE 790501, 1979.
- 3) P. M. Najt, D. E. Foster, "Compression-ignited Homogeneous Charge Combustion," SAE 830264, 1983.
- 4) H Roy, Y Hiromichi, "HCCI Combustion in DI Diesel Engine" SAE 2003-01-0745, 2003.
- 5) C. D. Marriott, R D. Reitz, "Experimental Investigation of Direct Injection-Gasoline for Premixed Compression Ignited Combustion Phasing Control," SAE 2002-01-0148, 2002.
- 6) B. H. Cho, K. H Lee, C. S Lee, "Combustion Characteristics of Premixed Charge Compression Ignition Diesel Engine using Mixed Fuels," Transactions KSAE, Vol.10, No.5, 2002.
- 7) S. Tanaka, F. Ayala, J. C. Keck, J. B. Heywood, "Two-stage Ignition in HCCI Combustion and HCCI Control by Fuels and Additives," Combustion and Flame, Vol.132, pp.219-239, 2003.