

## 직분식 예혼합 압축착화 디젤엔진의 운전조건과 연료조성에 따른 연소 및 배기 특성

이 기 형<sup>1)</sup> · 류 재 덕<sup>2)</sup> · 이 창 식<sup>3)</sup>

한양대학교 기계공학과<sup>1)</sup> · 한양대학교 대학원<sup>2)</sup> · 한양대학교 기계공학과<sup>3)</sup>

### The Characteristics of Combustion and Exhaust Emission according to Operating Condition and Fuel Composition in a Direct Injection Type HCCI Diesel Engine

Kihyung Lee<sup>\*1)</sup> · Jeaduk Ryu<sup>2)</sup> · Changsik Lee<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do 425-791, Korea

<sup>2)</sup>Graduate School, Hanyang University, Gyeonggi-do 425-791, Korea

<sup>3)</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 7 June 2003 / Accepted 3 November 2003)

**Abstract** : The Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) engine has advantage for reducing the NOx and P.M. simultaneously. Therefore, HCCI engine is receiving attention as a low emission diesel engine concept.

This study was carried out to investigate the characteristics of combustion and exhaust emission for operating conditions in a direct injection type of HCCI engines such as supercharged and naturally aspirated using diesel fuel and additive. From the experimental result, we found that cool flame was always appeared and also it was difficult to control combustion characteristics by changing the injection timing in HCCI. In addition, at the lean air-fuel ratio and high speed range, it was observed that charging air pressure, additive or increasing intake air temperature is effective to increase combustion performance and reduce exhaust emission. We concluded that chemical reaction by the increasing intake air temperature or additive without physical improvement has limitation for reduction of exhaust emission.

**Key words** : HCCI(예혼합 압축착화), Charging air pressure(과급압), Additive(첨가제), Intake air temperature(흡입공기온도), Combustion(연소)

### 1. 서론

연비와 내구성 및 열효율 면에서 우수한 장점을 가지고 있는 디젤엔진은 압축행정 말기에 연료를 고온, 고압 분위기의 연소실로 직접 분사시키므로 연소실 내부에 공간적으로 불균일한 혼합기가 형성되므로 농후한 영역에서는 입자상 물질(P.M.), 이

론 공연비 영역에서는 질소산화물(NOx)이 생성된다. 그러나, P.M., NOx의 생성과정이 서로 상반관계(trade-off)이므로 동시에 저감시키는 것은 매우 어렵다. 그러므로, 점점 강화되고 있는 자동차 배출가스 규제에 대응하기 위해서, 연소실 전체에 균일 혼합기를 생성하여 배기가스를 저감하는 신연소 방식인 예혼합 시스템 연구가 주목을 받고 있다.<sup>1)</sup> 그러나, 신연소 방식인 예혼합 압축착화는 다양한 연구가 진행되어 NOx와 Soot의 저감효과를 가져왔으

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

나, 불완전 연소에 따른 HC와 CO의 배출량은 증가하는 경향을 나타내고 있다.<sup>2,3)</sup>

그러므로, 본 연구에서는 HCCI 연소방식에 따른 성능 평가를 위하여, 직분식 디젤엔진을 HCCI용으로 개조하여 사용하였다. 직분식 디젤엔진의 연료 공급 방식은 캠-플런저의 기계식 방식으로 분사시기 및 공연비 제어가 어려우므로, 본 연구에서는 저압 커먼레일 타입 중공형 스웰 인젝터를 선정하여 예혼합 시스템을 구축하였다. HCCI 엔진은 연료 분사가 압축행정 초기 또는 흡기행정에 이루어지어야 하므로, 일반 디젤 엔진 보다 낮은 분사압력을 사용하여 연소실내로 직접 분사된 연료의 벽면 충돌에 의한 벽류량을 감소시킬 수 있다. 또한, NOx와 Soot 및 불완전연소에 따른 HC와 CO를 동시 저감시키기 위하여 연료를 압축행정 초기 또는 흡기행정에 연소실 내에 직접 분사하는 예혼합 압축착화 연소방식을 적용하여, 운전조건에 따른 연소 및 배출물 특성을 확인하였고, 과급 및 첨가제의 영향도 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 예혼합 압축착화 디젤엔진 시스템

본 연구에 사용한 엔진 제원 및 실험 장치의 개략도를 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 엔진 제어는 범용 ECU를 사용하여 분사시기 및 공연비를 제어하였고, 흡기 온도 및 흡기 압력이 연소에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 흡기 매니폴드에 흡기관 히터 및 슈퍼차저를 이용하여 흡기온도 및 압력을 일정하게 유지하였다. 슈퍼차저는 AC 모터와 인버터로 회전수를 제어하여, 흡기 압력을 일정하게 유지하였다. 예혼합 압축착화 엔진의 연소특성은 실린더 헤드에 설치한 압력 센서로 연소해석을 수행하였고, 배기분석을 위하여, 엔진의 배기 밸브로부터 100cm 떨어진 배기관에 배기 분석 장치의 프로브를 설치하여 배기 가스 (NOx, Soot, HC, CO)농도를 측정하였다. 엔진 회전속도는 DC 동력계에 장착된 로터리 엔코더에서 발생하는 TDC신호와 360개의 크랭각신호를 획득하여 확인하였고 엔진의 부하는 로드셀을 이용하여 동력계에서 흡수하는 토크를 측정하였다.

Table 1 Engine specifications

Engine type	4 stroke sigle D.I. diesel engine
Bore × Stroke	95mm × 95mm
Displacement volume	673cc
Compression ratio	19

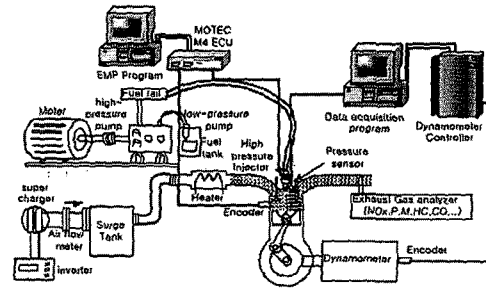


Fig. 1 Schematic diagram of direct injection type supercharged HCCI diesel engine system

### 2.2 연료 첨가제

연료 첨가제란 탄소와 수소만으로 구성된 물질을 제외한 화학물질로서 연료에 소량을 첨가하여 자동차의 성능을 향상시키거나 배출물질을 저감시키고, 첨가제와 혼합한 연료는 용해도, 인화점, 동점도, 안정성 등을 충족해야 한다. 본 실험에서는 여러 문헌을 참조하여, 적절한 온도에서 쉽게 분해하여 연료의 열분해에 의한 유리기를 기하함수적으로 증가시키고, 연쇄반응의 비를 증가시켜 연료의 착화성을 향상시키는 2-ethylhexyl nitrate (EHN)를 선정하였다.<sup>4-6)</sup> 디젤의 성분특성에 따라 다르지만 일반적으로 EHN 1000 ppm (0.1부피%) 첨가시 4~6 정도의 세탄가가 향상되는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 EHN 첨가연료의 세탄가를 직접 측정하지 않았지만 0.5% 첨가한 경우에 착화 지연 시간이 짧아지고 있는 것을 볼 때, 세탄가가 향상되고 있음을 알 수 있었다.

### 2.3 실험 조건 및 방법

본 실험에서 선정한 실험 조건은 Table 2와 같으며, 냉각수 온도를 80±2°C로 유지한 상태에서 배기 가스 측정과 동시에 100 사이클 압력을 취득한 후, 이를 평균하여 연소해석을 수행하였다. 흡기온도의 영향에 대한 실험은 흡기온도 80°C 기준으로 공연

Table 2 Engine test conditions

Engine speed(rpm)	900 ~ 1800
Intake air temperature(°C)	80 ~ 160
Injection timing(ATDC)	30 ~ 120
A/F	43 ~ 74
Charge air pressure (MPa)	0.1, 0.12, 0.14
Fuels (EHN additive)	0%, 0.5%

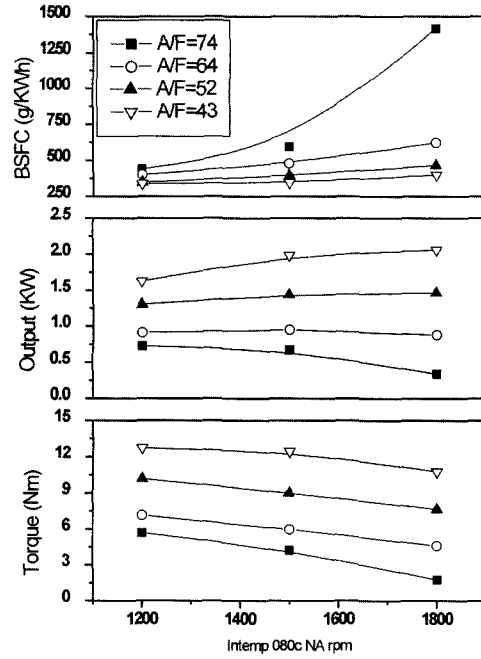
비를 맞추고 연료량을 일정하게 유지한 상태에서 흡기온도를 변화시켰다. 연료를 교환할 경우에는 앞 실험 조건의 영향을 받지 않도록 연료 공급장치의 연료를 완전히 교체하고 30분간 엔진을 운전하였다. 또 분사압을 3.0 MPa로 할 때에는 연소실 압력이 더 높아지는 경우가 발생하여 연료가 분사되지 않아 실패되는 운전영역이 존재하기 때문에 연료 분사압을 70 bar로 정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

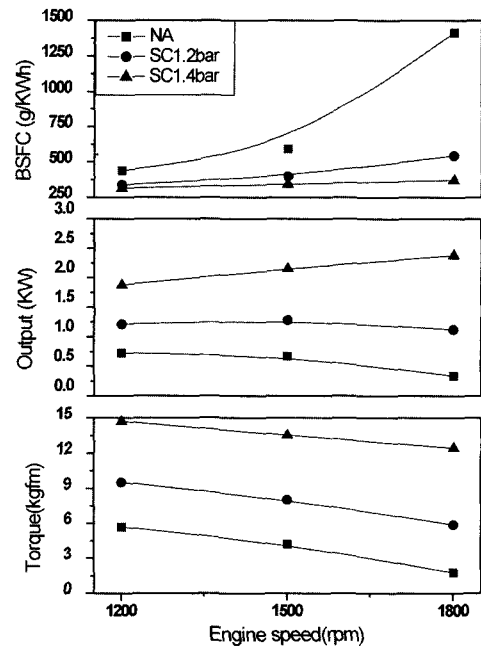
#### 3.1 출력 특성

Fig. 2는 HCCI 디젤 엔진의 무과급 (natural aspirated : NA)과 과급 (supercharged : SC) 상태에서의 성능특성을 흡기온도 80°C에서 비교한 그림이다. NA에서는 A/F = 43, 1200rpm 조건에서 최대토크가 발생되었으며, 연료 소비율은 엔진회전속도에 비례적으로 증가하고 공연비가 희박할수록 악화되어 출력이 저하되고 있다. 이는 실화로 인한 불완전 연소의 확대와 마찰손실 증가의 결과로 생각된다. 또한 과급의 효과는 흡입 공기 밀도 증가로 인하여 실린더내의 압력이 상승하기 때문에 압축비의 상승과 동일한 효과를 얻을 수 있다. 따라서 과급압이 증가함에 따라 연료 소비율이 감소하고, 토크가 상승하고 있으며, 회전수가 증가할수록 출력의 상승폭이 증가하는 것으로 보아 과급은 고회전 영역에서 엔진성능 향상에 더욱 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 3은 일반경유와 EHN 0.5%를 첨가한 경유를 대상으로 NA상태에서 흡기 온도에 따른 도시평균 유효압력(IMEP) 및 제동평균유효압력(BMEP)을 나타내었다. 흡기 온도 증가로 인한 흡입 공기 밀도 저하가 충전효율을 감소시키며, 자착화가 빨라 TDC 이전, 압축행정에서 연소율을 증가시켜 부정적 일과 마찰을 발생시킨다. 이로 인해 IMEP와 BMEP가



(a) NA



(b) Super-charging (A/F : 74)

Fig. 2 Performance characteristics of HCCI diesel engine

감소되고 있으나, 공연비가 희박한 상태에서는 오히려 BMEP가 증가하는 경향을 보였다. 이러한 현

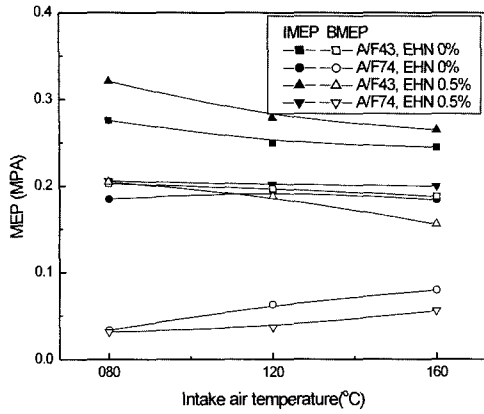
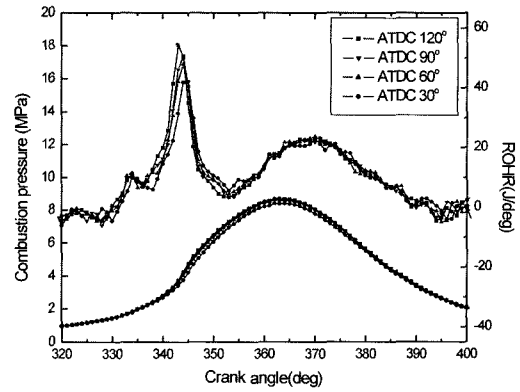


Fig. 3 Effect of EHN on MEP with intake air temperature (NA, 1800rpm)

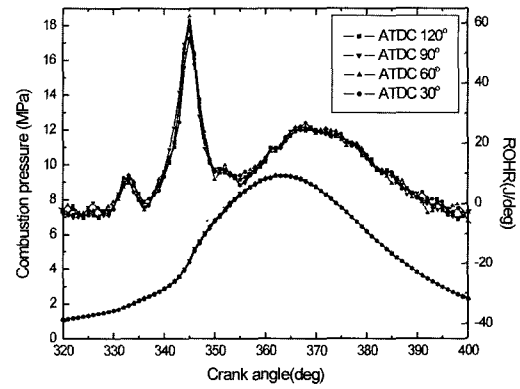
상은 희박한 공연비에서 흡기온도 증가에 의한 공기량 감소로 전열반응의 활성화 연소조건이 개선됨으로 공연비가 농후해지며, 연소축진 및 후연소를 당겨서 TDC 직후에서의 연소량이 증대되어 연소효율이 향상한 것으로 생각된다.<sup>7)</sup> 또한 첨가제가 포함된 경우가 일반 디젤연료에 비하여 급속 연소되어 IMEP가 상승되나 흡기온도가 높아짐에 따라 오히려 낮은 BMEP를 보이고 있다. 이는 연소실내 압축행정을 통해 발생하는 열에너지에 의하여 연료의 결합선이 붕괴되어 각각의 HC로 분해되는데, EHN은 이러한 현상을 촉진시켜 온도가 증가하면 열분해가 빨리 진행하여 연료가 산화되는 경향이 나타나기 때문으로 생각된다.

### 3.2 연소 특성

Fig. 4(a)는 과급압 0.14 MPa, A/F : 43, 1200rpm에서의 연소특성을 나타내는 그림으로, 분사시기가 진각되면서 착화 지연 기간동안 기화된 연료의 동시 착화에 의하여 예혼합 열발생량이 미세하게 증가하였다. 이는 과급압 증가가 크랭크 각도당 분위기 압력의 변화폭을 증가시켜 연료 공기 균일도가 향상되었기 때문으로 판단된다. 그러나 Fig. 4(b)의 1800rpm에서는 예혼합 연소특성에 대한 분사시기 영향이 거의 없는데, 이는 고속에 의한 절대시간 감소와 흡입공기의 운동 에너지 증가 때문으로 생각된다. 이러한 결과로부터, 저압 분사로 착화 이전에 연료의 분사가 완료되는 특성상 분사시기에 의한



(a) 1200rpm



(b) 1800rpm

Fig. 4 Comparison of pressure & ROHR (SC 1.4, A/F 43, intake air temperature 80°C)

영향이 적어졌음을 판단할 수 있다. 또한, 디젤은 휘발성이 나쁘고 착화온도가 낮아 이러한 경향이 크게 나타난 것으로 판단된다. 따라서, 혼합기 형성의 절대시간이 확보되고 공기유동이 적은 저속의 경우, 연료의 연소실 벽면 충돌 및 주위로 확산과정에 있어서 분무특성이 중요한 인자가 될 것으로 생각된다. 또 분사압을 높이는 것이 분사율 증가로 인하여 연소실 공간 이용율을 확대시켜 혼합기 형성에 효과적일 것으로 판단된다.

Fig. 5는 공연비 및 rpm에 따른 냉염과 열염의 관계를 보여주고 있다. 공연비가 농후해지면 냉염과 열염이 비례적으로 증가하며, 동일 공연비 조건에서는 저속영역인 900rpm에서 냉염과 열염이 상대적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이러한 경향은 공연비 증가에 따라 연료량의 증가와 더불어 작은

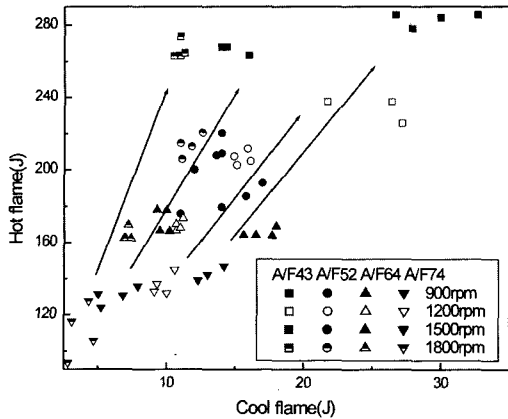


Fig. 5 Hot flame vs. Cool flame (NA, intake air temperature 80°C)

액적들의 절대 입자수가 많아져서 공기연료 혼합비가 높아지며, 저속영역에서 혼합시간이 확보되기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 고회전 영역에서 냉염과 열염의 기울기가 증가하는 것으로 보아, 회전수가 증가하면 냉염보다 열염이 민감하게 반응함을 알 수 있다.

이는 엔진 회전수가 증가함에 따라 압축말기의 온도 및 압력이 증가하여 연소 속도가 증가하므로 냉염이 발생하는 온도조건의 기간이 줄어들며, 열염의 연소 반응성 및 연소속도가 증가하는 경향이 나타나게 된다. 그러므로 열염의 증가가 상대적으로 크게 나타나므로 냉염의 비율은 감소하는 것으로 판단된다.

### 3.3 배기가스 특성

Fig. 6은 A/F 74를 유지하면서 과급압과 rpm이 변화될 때의 배기가스 결과를 나타낸 그림이다. 이 결과 그림은 모든 배기가스는 과급압 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 현상은 일정 공연비를 위해 흡기압력 및 공기량이 증가됨으로 연료 분사량이 증가되었고, 이에 따라 공기연료 혼합량의 증가와 함께 연소반응이 촉진되었으며 연료의 합착 및 벽면 충돌도 많아졌기 때문으로 판단된다.

엔진 회전수의 영향은 고속으로 갈수록 과급에 의한 NOx의 증가폭이 감소하는 경향을 나타내었다. NOx는 연소 중에 최고화염 온도영역에서 형성

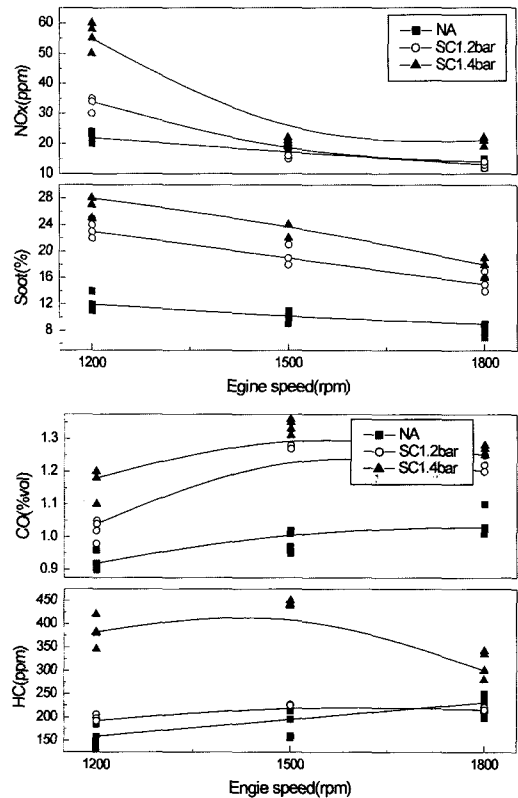


Fig. 6 Emission with charge air pressure (A/F : 74, intake air temperature : 80°C)

되며 온도와 산소에 영향을 받는데, 고속영역에서는 가스의 체류시간이 짧아 그 영향이 적어진 결과로 생각된다. Soot의 경우에는 엔진 회전수 증가에 따라 연료공기 혼합시간이 짧아지기 때문에 불균일한 혼합으로 인하여 그 배출량이 증가하나, 연소시간의 부족에 의한 불완전 연소 및 공기유동 증가의 영향으로 오히려 감소하고 있다. 또한, NA상태에서 회전수 증가에 따라 CO와 HC 배출량이 크게 증가하였는데, 이는 공연비의 희박화와 고속에 의한 실화 및 부분연소에 의한 영향으로 판단된다.<sup>8)</sup> 그러나, 과급압 0.14MPa 인 조건에서 1800 rpm으로 되면 HC 및 CO는 감소되며, 모든 배기가스가 저감되는 경향이 나타나는 것으로 보아, 고회전 영역에서 과급압 증가는 배기저감에 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 7은 NA상태에서 일반경유와 EHN 첨가 경우의 흡기온도에 따른 배기가스 변화를 비교한 그림이다. EHN을 0.5%첨가하면 NOx와 Soot는 약간 증

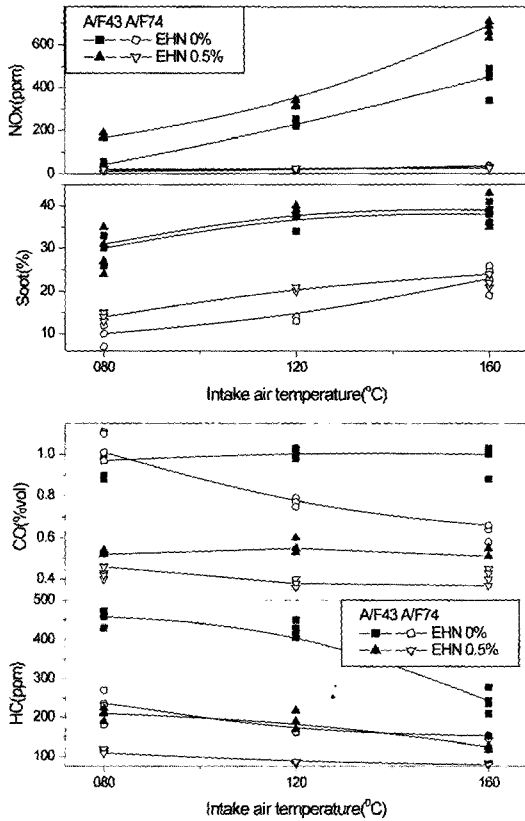


Fig. 7 Effect of EHN on emission with intake air temperature (NA, 1800rpm)

가하지만, HC와 CO는 현저하게 감소하며, 특히 공연비가 희박한 상태에서 흡기온도 증가에 따라 HC와 CO가 0에 가까워지고 있다. 이는 EHN을 첨가한 경우, 착화지연기간의 감소와 급속연소로 인하여 온도증가 및 불균일 혼합을 발생시키며 연소축진에 의해 부분산화나 잔류가스를 감소시켰기 때문으로 생각된다. 한편, 흡기온도 상승 및 공연비 농후에 따라 NOx가 증가하는 것으로 보아 온도에 크게 의존함을 확인할 수 있다. 또한, 흡기온도 상승은 충전효율을 감소시키기 때문에 국부적 농후영역의 확대와 착화의 향상에 의한 Soot도 증가된 것으로 판단된다. 즉 흡기온도의 증가는 증발 및 미립화에 의한 균일혼합 보다 자착화 선행과 공기부족에 의한 불균일 혼합분포영역의 확대에 큰 영향을 주는 것으로 생각된다.

이상의 결과에서 첨가제나 흡기온도 상승에 의해

배기가스 저감이 가능한 운전영역이 희박한 공연비 영역으로 확대될 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

직분식 HCCI 디젤 엔진에 있어서 연소 및 배기 특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) HCCI 디젤 엔진은 저압 분사로 낮은 압력과 온도조건에서 자기 착화에 의하여 연소되므로 냉염 및 열염이 각각 나타나며, 출력성능은 일반적인 디젤엔진과는 달리 분사시기 보다는 흡기 압력과 온도에 따라 제어되는 것을 알 수 있었다.
- 2) 과급에 따른 흡기압력 상승은 희박영역에서 출력과 연비를 향상시키며, 고회전 영역에서 연소효율의 향상으로 출력이 증가되며, 배기가스 저감에도 효과적인 것으로 판단된다.
- 3) 첨가제나 흡기온도 상승은 실화와 소염작용을 감소시키는 작용을 하여 희박한 공연비에서 출력을 증가시키며, 첨가제 및 흡기온도의 연소성능 향상요인으로 인하여 배기가스를 저감시키는 경향을 보이는 반면 흡기온도 상승은 착화시기에 영향을 미치므로, 불균일 혼합기가 형성되어 Soot가 증가하며, 첨가제가 NOx배출에 미치는 영향은 자착화 시점이 지각됨에 따라 화염온도가 상승하여 증가하는 것으로 하는 것으로 판단된다.
- 4) 배기가스 저감에 있어서 미립화와 증발에 의한 물리적 혼합기 분포의 축진없이 온도 및 첨가제를 통한 화학반응 작용으로는 한계가 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 자동차 부품 연구원에서 주관하는 “에혼합 압축착화 연소엔진의 기반 및 실용화 기술개발”사업의 지원으로 수행되었으며, 관계기관에 감사드립니다.

#### References

- 1) O. Y. Kwon, J. D. Ryu, K. Y. Lee, C. S. Lee, “Flame and Combustion Characteristics of D.I.

- HCCI Engine using a Visualization Engine,” Transactions of KSAE, Vol.10, No.6, 2002.
- 2) G. R. Pucher, D. P. Gardiner, M. F. Bardon, “Alternative Combustion Systems for Piston Engines Involving Homogeneous Charge Studies Using Methanol, Gasoline and Diesel Fuel,” SAE 962063, 1996.
  - 3) R. H. Stanglmaier, C. E. Roberts, “Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Applications,” SAE 1999-01-3682, 1999.
  - 4) K. S. Sim, “Trend of Automotive Fuel additives,” Journal of KSAE, Vol.23, No.2, pp.30-34, 2001.
  - 5) B. Nishikawa, “Cetane Improver,” Petrotech, Vol.24, No.7, 2001.
  - 6) B. Higgins, D. Siebers, C. Mueller “Effects of 2-Ethylhexyl Nitrate on Diesel-Spray Process,” SANDIA REPORT SAND98-8243, 1998.
  - 7) M. P. Poonia, A. Ramesh, “Experimental Investigation of the Factors Affecting the Performance of a LPG-Diesel Dual Fuel Engine,” SAE 1999-01-1123, 1999.
  - 8) D. E. Wang, H. C. Watson, “Direct Injection Compressed Natural Gas Combustion and Visualization,” SAE 2000-01-1838, 2000.