

균일 예혼합 압축 착화 디젤 엔진의 성능 및 배출물 특성에 미치는 Cooled-EGR 효과

이 창 식¹⁾ · 윤 영 훈²⁾ · 김 명 윤²⁾

한양대학교 기계공학부¹⁾ · 한양대학교 대학원²⁾

Effect of Cooled-EGR on the Characteristics of Performance and Exhaust in a HCCI Diesel Engine

Chang Sik Lee^{*1)} · Young Hoon Yoon²⁾ · Myung Yoon Kim²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 1 February 2005 / Accepted 11 July 2005)

Abstract : The effects of cooled-EGR on the characteristics of combustion and exhaust emissions were investigated in a single cylinder HCCI diesel engine. The premixed charge (gasoline or diesel) was obtained with premixing chamber and high-pressure (5.5MPa) injection system. Exhaust pressure control and cooled EGR system were used in order to reduce pressure fluctuation and to mix the exhaust gas well with the fresh intake air. The experimental results show that NO_x emissions from conventional diesel engine are steeply decreased by HCCI diesel combustion with cooled-EGR in both case of gasoline and diesel premixing. But soot emissions are rapidly increased with the increase of EGR rate. The recycled exhaust gas increased the ignition delay of mixture and decreased maximum combustion pressure. HC and CO emissions of HCCI combustion are increased with EGR rate.

Key words : EGR(Exhaust gas recirculation, 배기 재순환), HCCI(Homogeneous charge compression ignition, 균일 예혼합 압축 착화), Diesel engine(디젤엔진), Exhaust emissions(배기 가스), Combustion characteristics(연소 특성)

1. 서론

디젤 엔진에서 배출되는 NO_x와 P.M.은 도시의 대기를 오염시키는 주된 요인으로 되고 있어 향후 이에 대한 배출규제는 더욱 강화될 것으로 예상되고 있다. SI엔진에서는 3원 촉매장치를 통하여 배기가스 중의 NO_x와 HC, CO를 각각 환원과 산화시키는 방법으로 비교적 손쉽게 정화할 수 있다. 그러나 디젤 엔진은 공연비 조절을 하지 않고 연료 분사량에 의하여 공연비가 결정되는 운전특성으로 인하여 배

기가스가 산소과잉의 분위기이기 때문에 기존의 삼원 촉매장치로는 NO_x의 변환효율이 크게 떨어지게 된다. 또한 연소실 내에서 연료 분무가 공기와 혼합되면서 연소 되는 연소특성으로 인해 연소실 내에 국부적으로 농후한 혼합기가 형성되어 P.M.이 생성되는 문제점이 있다.

따라서 이러한 공해물질을 저감시키는 대책으로는 후처리 장치를 이용하는 방법과 배기가스의 발생을 원천적으로 저감시키는 방법으로 나누어지고 있다. 배기가스의 발생을 원천적으로 저감시키는 방법 중 균일 예혼합 압축 착화(homogeneous charge compression ignition, HCCI)엔진은 균일한 희박 예

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

혼합기를 압축착화 시키기 때문에 연소온도가 낮아 NO_x의 발생이 거의 없으며 농후한 공연비 분포가 없기 때문에 P.M.의 발생 또한 적은 장점을 가지고 있어 많은 연구가 진행되고 있다.¹⁾

그 중, 균일 예혼합 압축착화 디젤 엔진은 예혼합기를 공급한 후, 직접 분사되는 디젤 연료의 연소로 예혼합기의 연소를 촉진시키는 방법으로 기존 디젤 엔진의 연소 특성인 불균일한 공연비 분포와 극부적인 고온 연소등의 문제점을 해결하여 P.M.과 NO_x의 발생을 줄일 수 있는 방법이다.²⁻⁵⁾

EGR은 배기가스의 일부를 흡기로 재순환하여 흡기중의 산소 농도를 저감시키고 연소 온도를 낮추어 주기 때문에 NO_x저감에 매우 효과적인 방법이다. 그 중 Cooled-EGR은 재순환되는 배기가스를 EGR 쿨러를 통해 냉각시켜 유입시키는 방법으로 기존의 EGR시스템의 문제로 지적되는 흡기온도의 상승에 의한 체적효율의 감소와 유해 배출물의 증가를 줄일 수 있다.^{6,7)}

HCCI 엔진은 혼합기의 압축착화에 의존하므로 직접적인 착화제어 인자가 없지만 흡기온도, 밸브 타이밍, 연료 분사시기, 연료 조성 등을 이용하여 예혼합기의 착화를 제어하려는 시도가 많이 이루어지고 있다. 그 중에서도 EGR의 적용은 예혼합기의 착화를 지연시킬 수 있는 것으로 알려져 있어 HCCI 엔진에 EGR을 적용하고자 하는 많은 연구가 이루어지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 예혼합 압축 착화 디젤 엔진에서 EGR과 예혼합 특성이 연소 및 배기 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 예혼합 연료의 종류와, 예혼합율, EGR을 등을 변화시켜 이들의 영향을 규명하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험에 적용한 엔진은 배기량이 673cc인 4 사이클 직접 분사식 디젤 엔진으로서, Table 1은 사용된 엔진의 주요 제원을 나타낸 것으로서 압축비는 18:1이다.

본 연구에 적용한 엔진 시스템은 Fig. 1과 같이 직접분사식 디젤 엔진, 예혼합기 공급 시스템, EGR 시

Table 1 Specification of test engine

Items	Specifications
Type	DI diesel engine
Combustion chamber shape	Toroidal
Number of injector holes	4
Displacement(cc)	673
Number of cylinder	1
Bore×Stroke(mm)	95×95
Compression ratio	18:1

스템으로 구성된다. HCCI 연소는 예혼합기의 균일도에 의하여 많은 영향을 받는다고 알려져 있다.⁸⁾ 따라서 본 연구에서는 예혼합기의 불균일성에 의한 영향을 최소화하기 위하여 0.009 m³ 체적의 예혼합 챔버를 제작하고 5.5MPa의 압력으로 연료를 분사하여 균일한 예혼합기를 형성한 후 연소실에 공급되도록 하였으며 배압을 일정하게 유지시키기 위해 0.028 m³의 안정화 챔버와 압력 조절 밸브를 설치하였다. 또한 EGR 쿨러와 EGR 조절 밸브를 통하여 배기가스가 냉각된 후 유입 될 수 있도록 하였다.

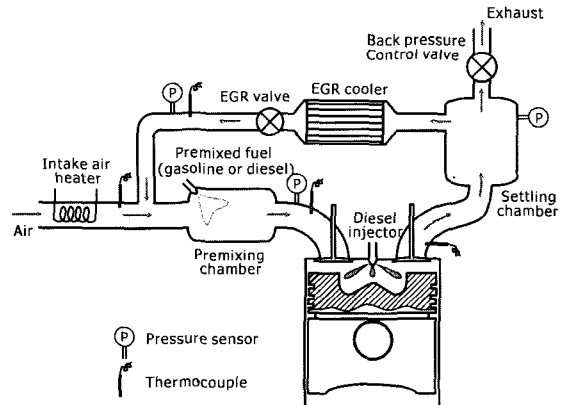


Fig. 1 Schematic diagram of intake and exhaust system

실험 장치 구성은 디젤 엔진과 동력계 시스템, 예혼합기 공급 및 EGR 제어 장치, 흡기 온도 제어 장치, 연소 및 배기 분석 장치로 구성하였다. 예혼합 연료는 유니버설 ECU를 통하여 제어하도록 하였다. 또한, 흡기의 가열과 조절을 위한 흡기가열 및 제어장치와 유량 측정을 위한 열선식 유량계를 설치하였다.

동력계는 최대 흡수 마력이 75kW인 와전류식 동

력계를 사용하였으며, 엔진으로부터 배출되는 배기가스의 분석을 위하여 NO_x 분석기 (Yanaco, BCL-511)와 매연 측정기(DBC-1000), 그리고 HC·CO 분석기 등을 사용하였다.

또 연소 압력 및 열발생율의 측정을 위하여 압전식 압력센서(6052B1, Kistler)를 연소실에 설치하였고, 데이터 취득 보드(National instrument, PCI-MIO-16E-1, 1.25M/sec)를 이용하여 데이터를 취득하였다.

2.2 예혼합을 및 EGR율

예혼합 연료와 직접 분사되는 연료의 비율을 나타내기 위하여 연소실 내로 공급되는 연료의 총열량에 대한 예혼합되는 연료의 열량의 비를 예혼합율(r_p)로 정의하고, 다음 식으로 나타내었다.

$$r_p = \frac{Q_{pre}}{Q_{pre} + Q_{DI}} = \frac{m_{pre}H_{i,pre}}{m_{pre}H_{i,pre} + m_{DI}H_{i,DI}} \quad (1)$$

여기서 m_{pre} 은 예혼합 연료의 분사량, m_{DI} 는 직분되는 연료의 분사량을 의미하며, $H_{i,pre}$ 은 예혼합 연료의 저위발열량, $H_{i,DI}$ 는 직분되는 연료의 저위발열량을 의미한다.

또한 EGR율의 정의는 EGR을 하지 않은 상태에서의 흡기 유량에 대한 EGR시의 흡기 유량의 감소율로 정의하였다.

$$EGR \text{ rate} = \frac{V_o - V_{EGR}}{V_o} \quad (2)$$

여기서 V_o 는 EGR을 하지 않았을 때의 흡기유량이고, V_{EGR} 은 EGR을 하였을 때의 흡기유량이다.

일반적으로 EGR을 수행하는 경우에는 고온의 배기가스를 흡기로 유입하게 되어 흡기온도가 상승하는 문제점이 있으나, 본 연구에서는 고온의 배기가스를 EGR 쿨러를 통해 냉각시켜 EGR을 수행한 경우에도 흡기온도의 상승을 10°C 이내로 유지하도록 하였다.

2.3 실험 조건 및 방법

Table 2는 본 연구의 실험 조건을 나타낸 것이다. EGR율은 0~40%까지 적용하였고 배기가스의 흡기 유입을 위하여 엔진 배압을 배압 조절용 밸브를 이용하여 50kPa로 일정하게 유지하였다. 기화성이 우

수한 가솔린을 예혼합하는 경우는 흡기온도(Tin)을 상온인 20°C로 유지하였다. 상대적으로 기화성이 나쁜 디젤 연료를 예혼합한 경우는 흡기온도를 80°C로 가열하였으며, 이 경우 예혼합한 디젤 연료가 벽류없이 연소실에 공급됨을 확인하였다.

Table 2 Experimental conditions

Items		Test conditions
Engine speed(rpm)		1200
Load condition(Nm)		20
Back pressure(kPa)		50
EGR ratio(%)		0~40
Fuel	Premixed	Gasoline, diesel
	DI	diesel
Intake temperature (T _{in})	Gasoline premixed	20
	Diesel fuel premixed	80
Injection timing (deg ATDC)	Premixed	0(TDC)
	DI	-20
Injection pressure (MPa)	Premixed	5.5
	DI	22

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 HCCI 디젤 연소 배출물에 미치는 Cooled-EGR 효과

EGR은 기존의 엔진 시스템에 간단한 장치의 부착만으로도 손쉽게 적용할 수 있고 NO_x 저감에 효과적이기 때문에 최근 널리 사용되고 있는 반면에 soot의 발생량이 증가하고 과도한 EGR율에서는 연료 소비율이 악화되는 단점을 가지고 있다.

Fig. 2는 직분식 디젤 엔진에 Cooled-EGR을 적용한 경우의 NO_x와 soot배출량의 상관 관계를 나타낸 것이다. Cooled-EGR의 경우에는 EGR율의 증가에 비례하여 NO_x의 발생량은 감소하지만 soot의 발생량은 증가하는 전형적인 상반 관계를 보여주고 있다. 특히 EGR율이 30% → 40%로 증가하는 경우에는 soot의 배출량이 65%정도 증가하고 있어 NO_x의 배출을 줄이기 위하여 높은 EGR율만을 적용할 수 없음을 알 수 있다.

3.2 예혼합 연료에 따른 HCCI 디젤 연소

3.2.1 가솔린 예혼합

Fig. 3은 EGR이 예혼합 압축 착화 엔진의 연소 특

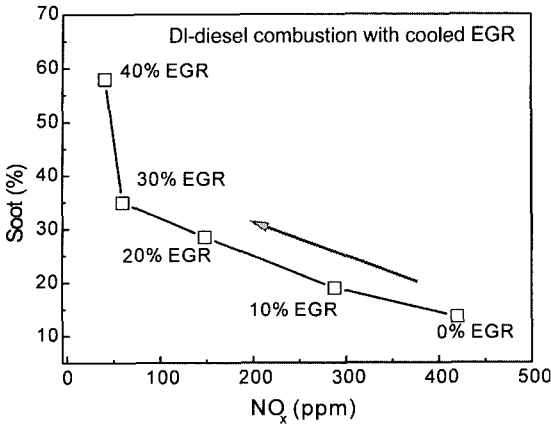


Fig. 2 Effect of cooled EGR on NO_x and soot emissions (1,200rpm, load=20Nm)

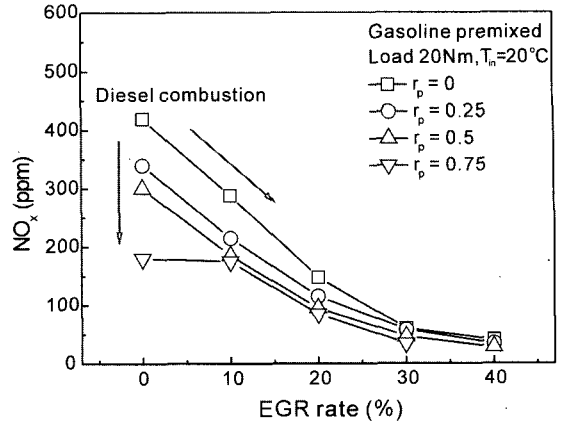


Fig. 4 Effect of EGR rate on NO_x emission (gasoline pre-mixed, 1,200rpm)

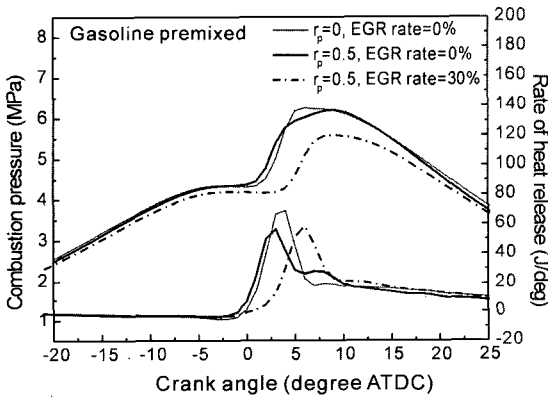


Fig. 3 Effect of cooled-EGR on combustion characteristics of HCCI combustion

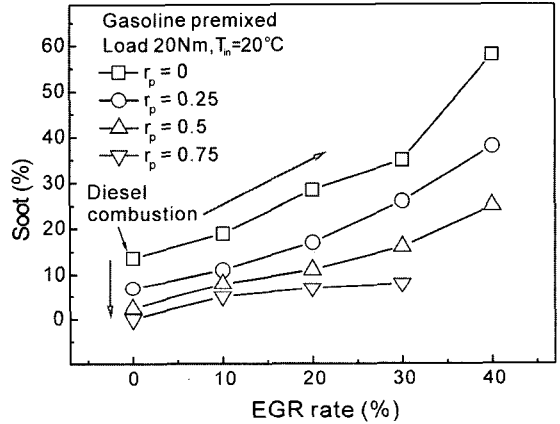


Fig. 5 Effect of EGR rate on soot emission (gasoline pre-mixed, 1,200rpm)

성에 미치는 영향을 나타낸 것이며 예혼합 연료로 가솔린을 사용한 경우이다. 예혼합을 하지 않은 경우($r_p=0$, EGR rate=0%)는 디젤 엔진의 연소특성을 나타내고 있으며, 예혼합을 하게 되면 ($r_p=0.5$, EGR rate=0%) 예혼합 연료로 인하여 연소 시작 시점이 미소하게 앞당겨 지고 디젤 연소의 급격한 예혼합 연소는 감소되고 있다. 동일한 예혼합율($r_p=0.5$)에서 30%의 EGR을 수행하게 되면 최고연소압력은 6.2MPa에서 5.6MPa로 낮아지고, 최고 열발생위치는 ATDC 3°→6°로 지각되는 경향을 보이고 있다.

Fig. 4는 흡기 온도 20°C, 엔진 부하 20Nm에서의 NO_x 배출 특성을 나타낸 것이다. $r_p=0$ 인 경우는 디젤 연소에 해당하며 EGR 율이 증가함에 따라 NO_x의

발생량은 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 예혼합을 수행한 경우, 예혼합율의 증가에 따라 NO_x의 배출량은 급격히 감소하고 있다. 그러나 높은 EGR 율에서는 EGR에 의한 NO_x의 저감효과는 크게 나타났으나, 예혼합 연소에 의한 효과는 줄어드는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 soot의 배출특성을 나타내고 있으며 예혼합율이 증가하면 soot의 발생량은 급격히 감소하지만 EGR 율의 증가와 함께 soot 배출량은 급격히 증가하고 있다.

Fig. 6은 EGR의 변화가 균일 예혼합 압축착화 디젤 엔진의 연비 및 배기 온도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. BSFC(brake specific fuel consumption)는

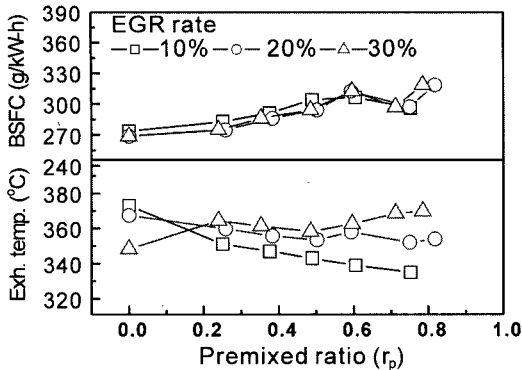


Fig. 6 Effect of premixed ratio on exhaust gas temperature and fuel consumption rate

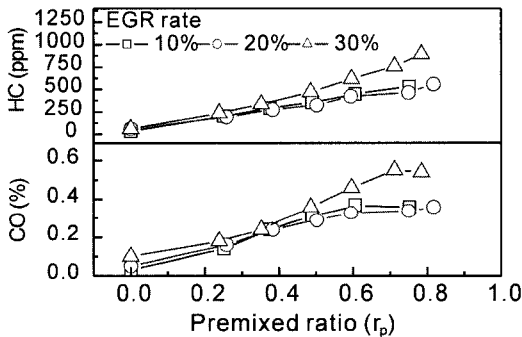


Fig. 7 Effect of premixed ratio and EGR rate on exhaust emissions

예혼합율이 증가할수록 증가하는 경향을 보이고 있으나 EGR율에는 그다지 영향을 받지 않고 있다.

$r_p=0$ 인 경우 EGR율이 10%일때 배기가스의 온도는 373°C이나 EGR율이 30%가 되면 배기가스의 온도가 348°C까지 내려가고 있다. 또한 EGR율이 10%인 경우는 예혼합율이 증가하게 되면 배기가스의 온도가 내려가는 경향을 보이지만 EGR율이 30%까지 올라가게 되면 예혼합율이 증가하여도 배기가스의 온도는 오히려 상승하는 결과를 보이고 있다. 이러한 배기온도 상승의 원인은 Fig. 3의 연소특성에서 알 수 있는 바와 같이 EGR율이 증가하게 되면 TDC 이후로 연소가 지각되고 연소속도가 느려져 후연기간이 길어졌기 때문인 것으로 판단된다.

미연소 가스인 HC와 CO의 발생량은 디젤 연소 ($r_p=0$)인 경우에는 디젤 엔진의 연소 특성상 그 발생량이 매우 적으나, EGR율이 높아질수록 CO의 배

출량은 다소 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 예혼합율이 증가할수록 HC와 CO의 발생량은 증가하는 경향을 보이고 있으며, EGR율이 높아질수록 그 발생량이 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 미연 가스 배출의 원인은 예혼합된 가솔린 연료의 일부가 연소실의 크레비스 체적으로 유입되어 연소되지 못하고 배출되는 것과 연소 온도가 낮은 HCCI 연소의 특성으로 인하여 연소실 벽면에서 소염된 미연가스가 배출되는 것으로 볼 수 있다.

3.2.2 Diesel 예혼합

Fig. 8은 EGR이 예혼합 압축 착화 엔진의 연소특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 예혼합연료로 디젤을 사용한 경우이며 예혼합되는 디젤 연료의 기화를 촉진하기 위하여 흡기온도를 80°C로 가열하였다. EGR율을 10%→30%로 증가시키면 연소 속도의 지연으로 인하여 최고연소압력은 7MPa→6.3MPa로 0.7MPa이 낮아졌다. 또한 HCCI 연소의 특징인 냉염과 열염의 발생시기도 각각 지각되는 경향을 보였다.

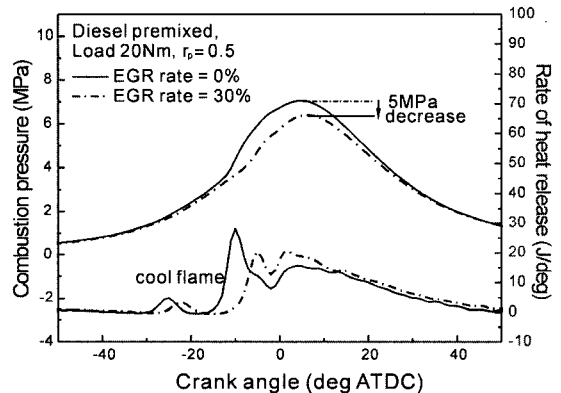


Fig. 8 Effect of EGR rate on combustion characteristics (diesel premixed, 1,200rpm, $T_{in}=80^{\circ}\text{C}$)

Fig. 9는 흡기 온도 80°C, 엔진 부하 20Nm에서의 NO_x 배출 특성을 나타낸 것이다. 예혼합율과 EGR율이 증가할수록 NO_x 의 배출량은 감소하였으며, EGR 30%와 $r_p=0.75$ 에서의 NO_x 의 배출량은 EGR을 적용하지 않은 직분식 디젤 엔진의 배출량에 비해 1/10 수준으로 감소하였다.

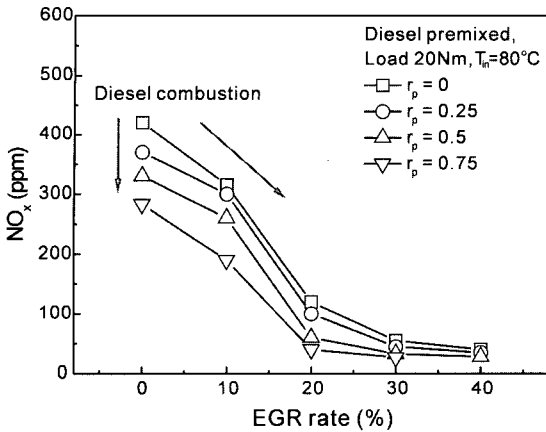


Fig. 9 Effect of EGR rate on NO_x emissions(diesel premixed, 1,200rpm, T_{in}=80°C)

Fig. 10은 EGR율이 soot배출에 미치는 영향을 나타낸 것이다. soot의 배출량은 예혼합율의 증가에 따라 오히려 다소 증가하는 경향을 보이고 있으며, EGR의 증가는 soot의 배출을 급격히 증가시켰다. 특히 EGR율 30~40% 구간에서의 soot 증가폭이 가장 큰 것으로 나타났다.

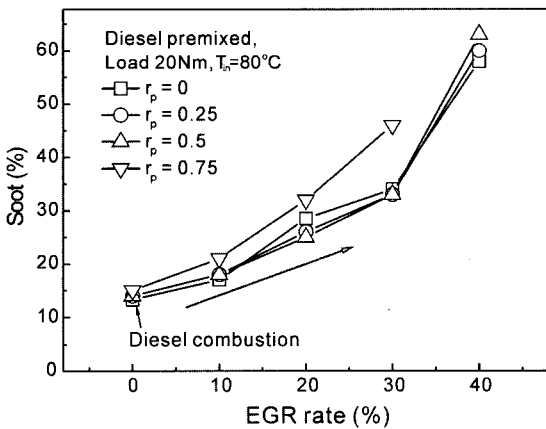


Fig. 10 Effect of EGR rate on soot emissions(diesel premixed, 1,200rpm)

4. 결론

균일 예혼합 압축 착화 디젤 엔진에 Cooled-EGR 시스템을 적용하여 예혼합 연료와 EGR율의 변화에 따른 연소 및 배기 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가솔린을 예혼합한 연료로 사용한 경우, 디젤 엔진에서 발생하는 NO_x의 배출량을 현저하게 감소시킬 수 있었으며, soot 발생량의 대부분을 저감시킬 수 있었다.
- 2) Cooled EGR을 적용하면 디젤 엔진에서 발생하는 NO_x의 배출량을 90% 이상 감소(EGR rate=40%)시켰으나, soot의 배출량은 현저하게 증가하였다.
- 3) EGR의 적용은 예혼합 디젤 엔진의 연료소비율에는 그다지 영향을 미치지 않았으나, HC와 CO의 발생량은 증가시키는 것으로 나타났다.
- 4) EGR은 예혼합 연소의 냉염과 열염의 발생위치를 지각시키는 것으로 나타났다. 또한 연소지연으로 최고연소압력은 감소하였다.
- 5) 디젤을 예혼합의 경우, NO_x의 저감에는 효과적이었으나 soot 저감효과는 거의 나타나지 않았다. 반면에 EGR의 적용은 NO_x의 저감율은 90% 이상이었으나, soot 배출량은 급격히 증가시키는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR project (무-저공해 자동차사업단)와 교육인적자원부의 BK21 program의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) R. H. Stanglmaier and C. E. Roberts, "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) : Benefits, Compromises, and Future Engine Applications," SAE 1999-01-3682, 1999.
- 2) D. S. Kim, M. Y. Kim and C. S. Lee, "Combustion and Emission Characteristics of Partial Homogeneous Charge Compression Ignition Engine," Combustion Science and Technology, Vol.177, pp.107-125, 2005.
- 3) S. Simescu, S. B. Fiveland and L. G. Dodge, "An Experimental Investigation of PCCI-DI Combustion and Emissions in a Heavy-Duty Diesel Engine," SAE 2003-01-0345, 2003.
- 4) C. S. Lee, M. Y. Kim, S. J. Hwang and D. S. Kim, "Effect of Operation Condition on the

- Characteristics of Combustion and Exhaust Emissions in a Gasoline Fueled HCCI Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.12, No.1, pp.48-54, 2004.
- 5) C. S. Lee, K. H. Lee and D. S. Kim, "Experimental and Numerical Study on the Combustion Characteristics of Partially Pre-mixed Charge Compression Ignition Engine with Dual Fuel," Fuel, Vol.82, No.5, pp.553-560, 2003.
 - 6) D. Tomazic and A. Pfeifer, "Cooled EGR A Must of an Option for 2002/2004," SAE 2002-01-0962, 2002.
 - 7) P. Zelenka, H. Aufinger, W. Reczek and W. Cartellieri, "Cooled EGR A Key Technology for Future Efficient HD Diesels," SAE 980190, 1998.
 - 8) M. Christensen and B. Johansson, "Influence of Mixture Quality on Homogeneous Charge Compression Ignition," SAE 982454, 1998.