

디젤엔진의 출력 및 배기가스에 미치는 EGR의 영향

송규근[†]

(Received August 6, 2015 ; Revised November 9, 2015 ; Accepted November 18, 2015)

Effect of EGR on power and exhaust emissions in diesel engine

Kyu-keun Song[†]

요약: 디젤 엔진은 출력 및 연료소비율이 우수하여 많이 사용되고 있다. 그러나 디젤엔진은 가솔린엔진에 비하여 배출 가스 저감 기술 등에서 아직 해결해야 할 문제점들이 많고, 대기오염의 주범이다. 디젤엔진에 있어 배기가스 재순환(EGR; Exhaust Gas Recirculation) 기술은 여러 촉매 기술에 비해 질소산화물(NOx) 배출 저감을 위한 가장 효과적인 기술이며 또한 경제성, 적용 가능성 측면에서도 많은 장점을 갖고 있다. 본 연구에서는 EGR 시스템을 장착한 디젤 엔진을 대상으로 EGR이 디젤기관의 출력 성능 및 배기특성에 미치는 영향을 고찰하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다. EGR율이 증가함에 따라 IHP 및 BHP는 감소하며, 순수EGR에 의한 영향은 엔진회전수에 따라 차이는 있지만, 순수 EGR에 의한 BHP는 저속 운전에서는 약 9%, 고속운전에서는 3.5% 정도 감소하였다. 그리고 NOx는 EGR율이 증가함에 따라 감소하고, 엔진회전수 증가할수록 증가한다. 또한 매연(smoke)은 EGR율이 증가함에 따라서 증가하고, 엔진회전수가 증가할수록 감소한다. EGR율에 따라 NOx와 매연 배출을 동시에 최소화 할 수 있는 최적의 운전 상태가 존재하며, EGR율이 증가할 수록 NOx 및 매연을 위한 최적운전 속도는 증가한다.

주제어: 디젤엔진, 배기가스재순환, 출력 성능, 배기 특성, 질소산화물, 매연

Abstract: Diesel engines are widely used due to superior power and fuel consumption, however there are many challenges in exhaust gas management. Exhaust gas recirculation (EGR) is the most effective technique for reducing mono-nitrogen oxide (NOx) emissions in a diesel engine, in comparison with other catalytic technologies. In addition, the technology has a number of advantages in terms of economic efficiency and implementation. In this study, the effects on the power and exhaust characteristics of diesel engines equipped with EGR systems were investigated. It was found that as the EGR rate increased, horsepower expressed as IHP and BHP decreased. The net effect of the application of EGR was measured at various engine speeds. EGR technology caused decreases in BHP of around 9% during low engine speed and 3.5% during high engine speed. Additionally, NOx emissions reduced as the EGR rate increased, and increased as engine speed increased. However, smoke emissions increased as the EGR rate increased, and decreased as engine speed increased. The optimum operating conditions and EGR rate to simultaneously achieve minimum NOx and smoke emissions were investigated. It was found that as the EGR rate increased, optimal operating speed for minimal NOx and smoke also increased.

Keywords: Diesel engine, Exhaust gas recirculation, Power performance, Emission characteristics, NOx, Smoke

1. 서론

최근 산업의 급속한 성장 및 자동차의 급속한 증가로 열기관에서 발생하는 배기가스로 인한 환경문제가 심각하게 대두되고 있다[1].

디젤엔진은 가솔린엔진에 비하여 연료 소비율과 내구성 등이 우수하여 전세계적으로 많이 사용되고 있다. 그러나 디젤엔진은 가솔린엔진에 비하여 배출가스 저감 기술 등에서 아직 해결해야 할 문제점들이 많아 질소산화물(NOx)이나 입자상물질(PM) 등이 대도시의 대기오염 주범

으로 인식되고 있다[2][3].

특히 자동차 중에서 디젤차는 약 30~40%를 차지하고 있지만, NOx, PM의 배출에서는 약 70%를 차지하고 있다.

디젤엔진에서 배기가스 재순환(EGR; Exhaust Gas Recirculation) 기술은 연소용 신공기에 배기가스의 일부를 대체하므로 연소용 공기의 산소 농도를 감소시키는 역할을 하며, 이로 인해 연소온도가 낮아져 NOx가 감소한다[4].

이 EGR 기술은 여러 촉매 기술에 비해 NOx 배출 저감을 위한 가장 효과적인 기술이며, 또한 경제성, 적용 가능성 측

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1970-6057>): Department of Mechanical System Engineering, Chonbuk National University, Deokjin-gu, Jeonju 561-756, Korea, E-mail: songkk@jbnu.ac.kr, Tel.: 063-270-2376

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

면에서도 많은 장점을 갖고 있다고 할 수 있으며, 향후 배기 규제에 대응하기 위해서도 많은 연구가 필요하다[5]-[7].

본 연구에서는 EGR 시스템을 장착한 디젤 엔진을 대상으로 EGR이 디젤기관의 출력 성능 및 배기특성에 미치는 영향을 고찰하고, EGR 적용을 위한 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

연구에서는 엔진의 출력 성능 및 배기 특성 연구를 위해 다음과 같은 실험 장치를 구성하여 실험하였다. 실험 장치는 크게 엔진동력계부, 배기가스 측정부, 연소해석 시스템부 및 EGR 장치 부분으로 구성하였다.

Figure 1에 본 실험에 사용한 실험장치 구성도를 보이다 엔진동력시스템부는 디젤엔진, 엔진동력계로 구성되었으며, 본 실험에 사용된 엔진은 직접 수분식 IDI(Indirect Injection) 디젤엔진으로 자세한 엔진 제원은 Table 1에 보인다. 또한 엔진 동력을 측정할 동력계는 E-75W를 사용하였다.

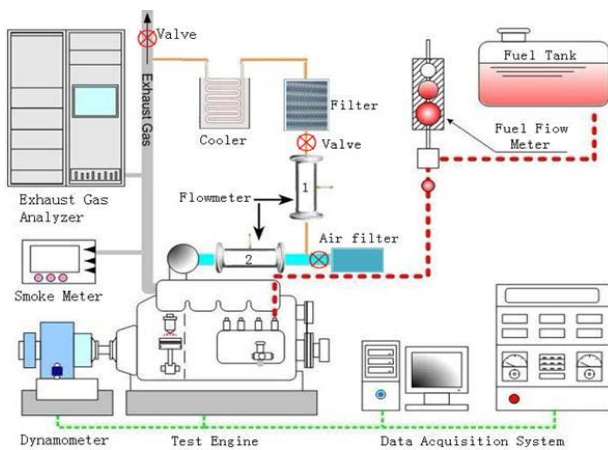


Figure 1: Schematic diagram of experimental apparatus

배기가스 측정을 위해서 MRU(독) 및 광투과식 매연 측정기를 사용하여 각종 배기가스를 측정, 분석하였다.

EGR시스템은 배기관에 조절 밸브를 장착하여 EGR율을 조절할 수 있도록 재순환 시스템을 설계하였다.

또한 연소해석은 상용 연소해석 프로그램을 사용하여 컴퓨터를 이용하여 시험 분석하였다.

Table 1: The specifications of the engine

Type	Water cooled 4 stroke
Cylinder	3
Bore*Stroke (mm)	75×70 (mm)
Displacement (cc)	927 (cc)
Maximum Power (ps/rpm)	18/2800
Combustion chamber	Swirl chamber
Engine size	493 × 450 × 697 (mm)
Weight (kg)	98 (kg)

2.2 실험 방법

본 실험에 있어 주요 변수로는 EGR율, 엔진회전수 및 엔진 부하이다. EGR율은 0~15%, 기관 회전수는 1200~2400rpm 또한 부하는 25~100%로 변화시켜가면서 엔진의 출력 성능 및 배기특성을 측정, 분석하였다. Table 2에 실험 조건을 보이다.

Table 2: Test conditions

Operation condition	Variation
EGR rate (%)	0, 5, 10, 15
Load (%)	25, 50, 75, 100
Engine speed (rpm)	1200, 1500, 1800, 2100, 2400

기관의 성능을 측정하기 위하여 엔진 실린더에 압력센서를 설치하였고, A/D board를 통해 얻어진 데이터를 컴퓨터 프로그램을 이용하여 실린더 내부압력 측정하였고, 엔진의 출력 성능을 측정, 분석하였다.

또한, MRU(Vario Plus)의 배기가스 샘플링 프로브를 배기 매니폴드로부터 약 30cm 하부에 삽입하여 일정량의 배기가스를 흡입하여 배기가스를 측정하였으며, 측정 조건이 변경될 때마다 프로브 청소와 내부 필터를 교환하고 0 점 조정을 한 후 새롭게 실험을 수행하였다.

EGR율은 배기관의 밸브 개도를 조절하면서 조절하였으며, EGR 적용 시, EGR율은 식 (1)으로 구하였다.

$$EGRRate(\%) = \frac{EGR \text{ 량}}{\text{흡입 신기량} + EGR \text{ 량}} \times 100 \quad (1)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 엔진 출력 특성 IHP, BHP

각 운전 변수 즉 EGR율, 엔진부하, 엔진회전수가 엔진 출력에 미치는 영향을 밝히기 위하여 전부하에서 EGR율(0%, 5%, 10%, 15%) 및 엔진회전수(1200rpm~2400rpm)로 운전 조건을 변화 시켜가면서 엔진 출력(IHP, BHP)를 측정, 분석하였다. 그 결과를 Figure 2 ~ Figure 4에 보이다.

Figure 2는 도시출력(IHP)에 미치는 엔진 회전수(rpm)의 영향을 실험 분석한 그림으로 도시출력은 엔진회전 속도가 증가함에 따라서 증가하고 있다. 이는 엔진회전속도가 증가함에 따라 연소 연료량이 증가하기 때문으로 생각된다.

또한 Figure 3는 배기가스 재순환량(EGR)이 IHP에 미치는 영향을 검토한 결과이다. EGR율이 증가함에 따라 각 엔진회전수에서 IHP는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 EGR율이 증가함에 따라 흡입공기가 감소하고, 이로서 연소용 산소가 부족한 상태에서 연소가 진행되기 때문이다. 발생 열량이 적어져 출력이 저하하는 것이다.

또한 Figure 4는 BHP에 미치는 EGR율의 영향을 측정, 분석한 그림이다. EGR율이 증가함에 따라 BHP는 약간씩 감소하는 경향을 보인다. 이는 Figure 3 IHP 결과와 비슷하며, EGR율에 따른 기계효율의 변화는 거의 없었다.

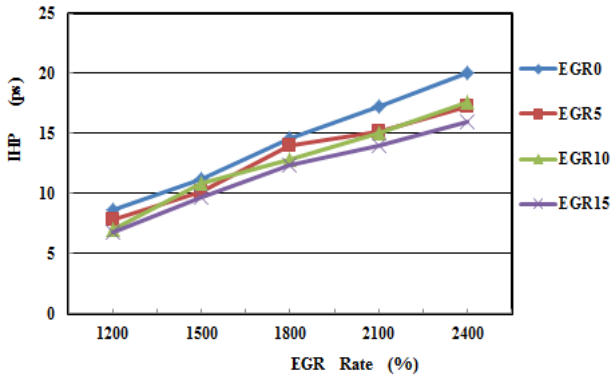


Figure 2: Effect of the rpm on engine power (IHP) at the load 100%

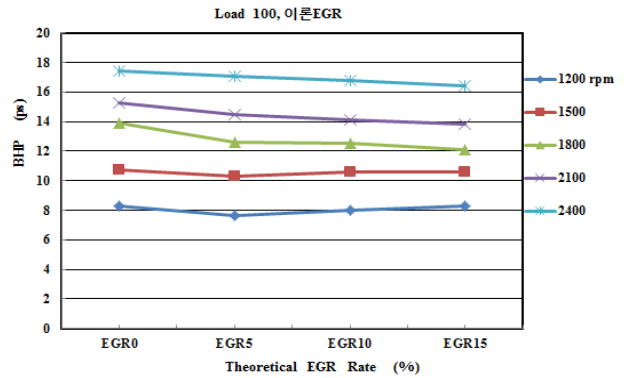


Figure 5: Effect of the EGR rate on exhaust pressure at the load 100%

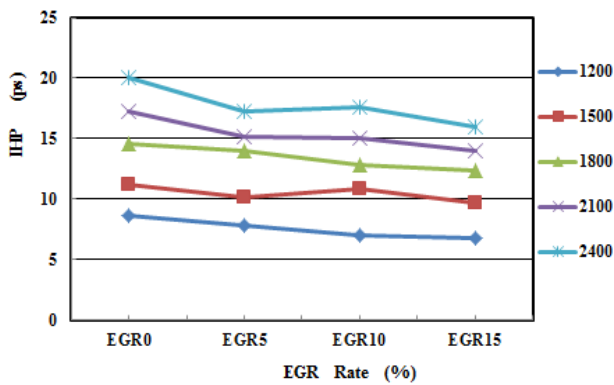


Figure 3: Effect of the EGR rate on engine power (IHP) at the load 100%

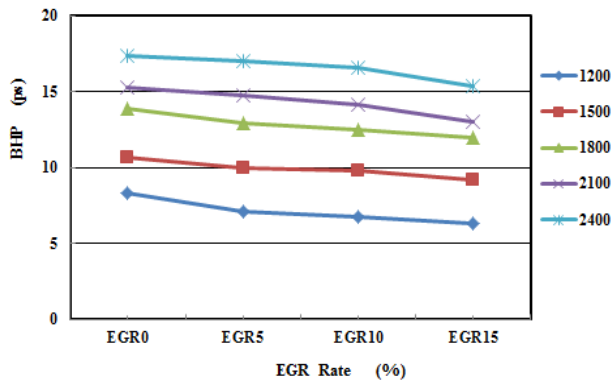


Figure 4: Effect of the EGR rate on engine power (BHP) at the load 100%

다음은 EGR을 할 때 엔진 출력에 영향을 미치는 인자로 순수 EGR에 의한 영향과 EGR을 위한 배기관 밸브를 조절할 때 배압의 차이에 의한 영향으로 생각하고, 순수 EGR이 출력에 미치는 영향을 분석하기 위하여 배기가스 재순환을 시키지 않으면서, 배압을 실제 EGR을 시켰을 때와 같게 하고서(이를 이론 EGR이라 칭했음) 출력을 측정 분석하였다.

Figure 5는 실제 EGR을 시키면서 실험을 할 때의 배압을 측정된 결과이다. EGR율이 증가함에 따라 배기관 내 압력은 약간 증가하는 경향을 보이고 있다.

또한 실제 EGR은 시키지 않으면서 Figure 5에서 측정된 배기압과 같게 배압만을 조절하면서(이론EGR) 엔진 출력(BHP)를 측정된 결과를 Figure 6에 보인다.

Figure 6는 이론EGR율에 따라 즉 배압이 엔진 출력(BHP)에 미치는 결과로 미소하지만 약간 감소하는 경향을 보인다.

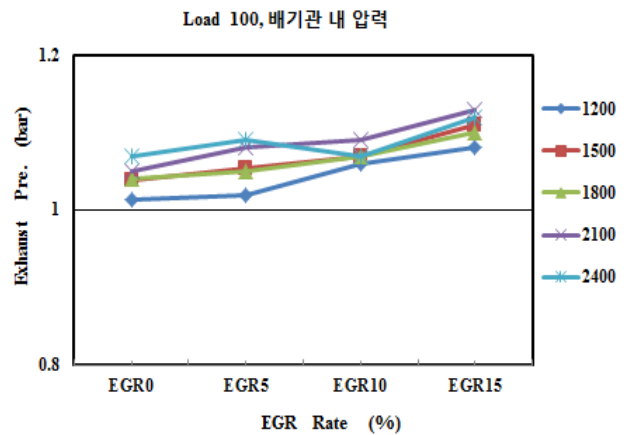


Figure 6: BHP to the theoretical EGR at the load 100%

또한 Figure 7은 Figure 4와 Figure 6의 결과의 차를(Δ BHP) 나타낸 결과이다. 즉 순수 EGR이 출력에 미치는 영향을 나타낸다.

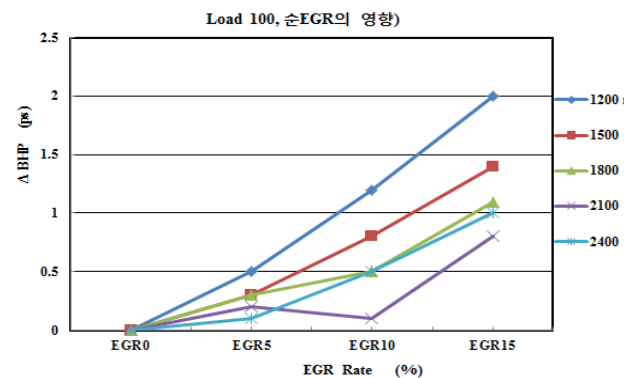


Figure 7: Effect of the EGR rate on Δ BHP at the load 100%

EGR율이 증가함에 따라 엔진 출력이 감소하며, 엔진회전수가 저속일 때 그 영향이 크게 나타났다. 저속인

1200rpm에서는 약 9%, 고속인 2400rpm에서는 약 3.5% 정도 차이를 보였다.

이는 EGR로 인한 연소용 공기가 부족하여 연소 상태가 출력에 크게 영향을 미치기 때문이며, 저속에서는 상대적으로 연소용공기 중 EGR량 비율이 커지기 때문이라 판단된다.

3.2 배기가스 온도

Figure 8은 배기가스온도에 미치는 EGR율의 영향을 측정, 분석한 그림이다. EGR율이 증가함에 따라 배기가스 온도는 감소하며, 엔진 회전수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다.

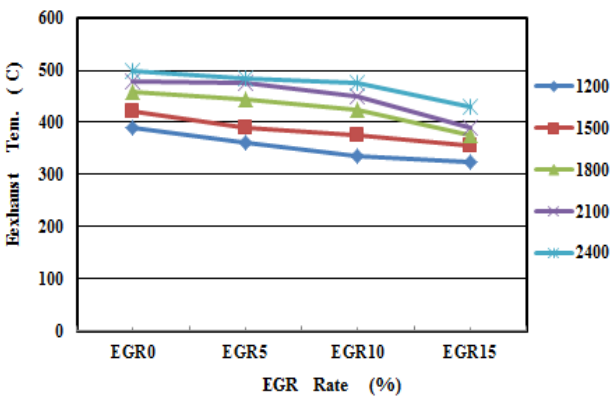


Figure 8: Effect of the EGR rate on exhaust temperature at the load 100%

이는 EGR율이 증가함에 따라 연소용 공기량이 적어져 연소에 좋지 않은 영향을 미치기 때문이며, 엔진회전수 증가에 따라서는 많은 연료가 연소하기 때문에 연소가스 온도는 상승하는 것이라 판단된다.

3.3 배기가스 특성 (NOx 및 Smoke)

본 실험에서는 배기가스 특성을 밝히고자 EGR율 (0%, 5%, 10%, 15%) 및 엔진회전수 (1200rpm~2400rpm) 등, 운전 조건을 변화 시켜가면서 배기가스를 측정, 분석하였다. NOx에 대한 결과를 Figure 9 ~ Figure 11에 보인다. 그리고 smoke에 대한 결과를 Figure 12 ~ Figure 13에 보인다.

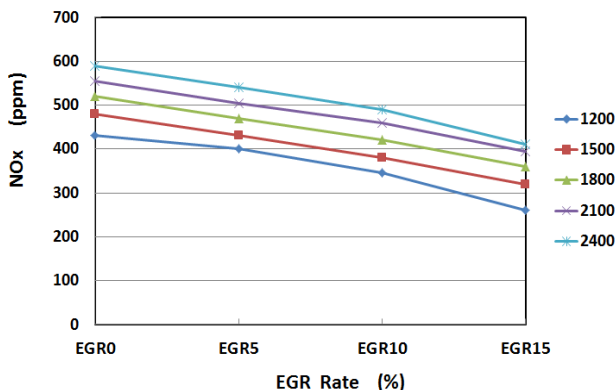


Figure 9: Effect of the EGR rate on NOx at the load 100%

Figure 9는 Load100% 운전 조건에서 NOx 배출 생성에 미치는 EGR율의 영향을 보인다. NOx 배출량은 EGR율이 증가할 수록 감소하는 결과를 보인다.

이는 EGR율이 증가함에 따라 연소용 공기의 부족으로 연소가 충분치 못해 실린더내부 온도 및 압력이 저하하고, 또한 EGR에 따른 연소가스 열용량이 새로운 흡입 공기보다 커서 배기가스 온도가 낮아져 열생성NOx가 감소하여, 전체적으로 질소산화물(NOx)의 배출량이 감소하는 것으로 판단된다.

Figure 10 및 11은 각각 엔진회전수(rpm) 및 엔진부하(Load)가 NOx 배출량에 미치는 영향을 보인다.

엔진회전수 및 엔진부하가 증가할수록 NOx 배출량은 증가하는 경향을 보인다. 이는 엔진회전수 및 엔진부하가 증가할수록 많은 연료의 연소가 일어나 연소실내의 온도, 압력이 상승하여 NOx가 증가하는 것이라 판단된다.

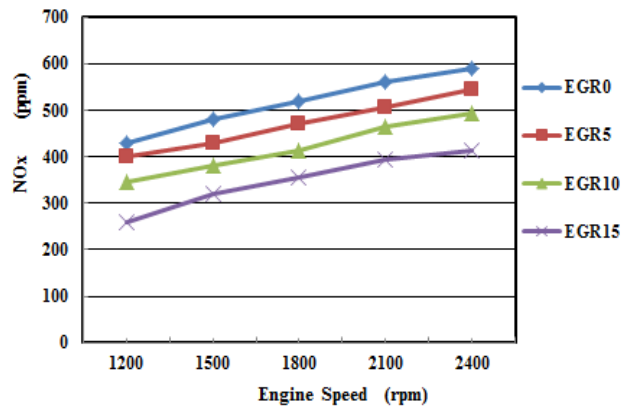


Figure 10: Effect of the RPM on NOx at the load 100%

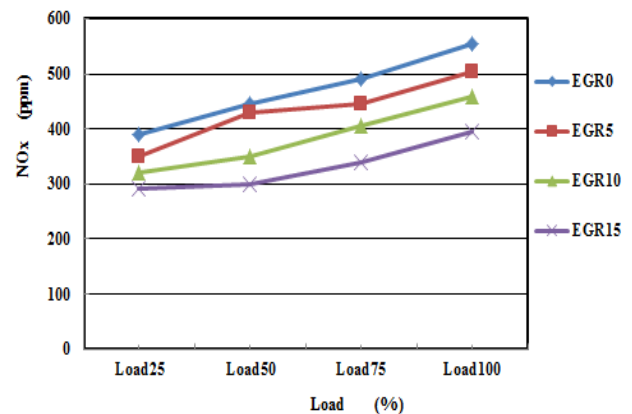


Figure 11: Effect of the engine load on NOx at the 2100rpm

Figure 12는 Load100% 운전 조건에서 매연 배출 특성에 미치는 EGR율의 영향을 보인다. 매연 배출량은 EGR율이 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. 또한 Figure 13은 엔진회전수에 의한 영향을 분석한 결과로 엔진회전수가 증가할수록 감소하는 결과를 보이고 있다. 이는 앞에서의 NOx 배출 특성과 상반되는 결과로, EGR율이 증가함에 따

라 연소용 공기의 부족으로 연소가 충분치 못해 매연 발생이 증가하는 반면, 회전수가 증가할 수록 연소량이 증가하면서 연소실내의 온도, 압력이 높아지면서 연소성이 좋아지기 때문이라 판단된다.

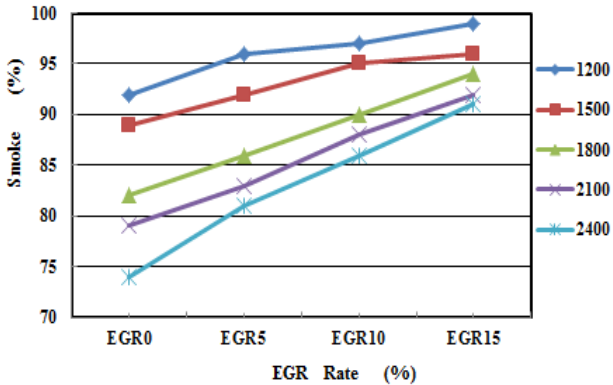


Figure 12: Effect of the EGR rate on smoke at the load 100%

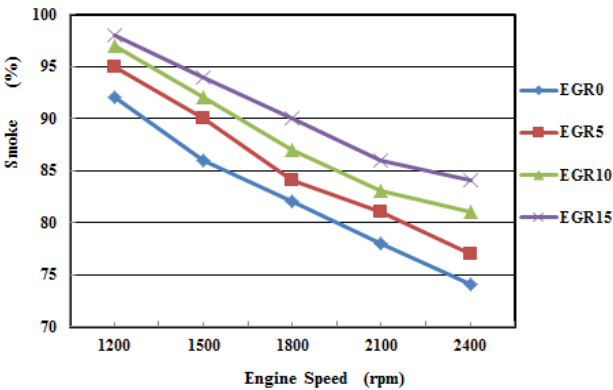


Figure 13: Effect of the RPM on smoke at the load 100%

Figure 14은 전부하 상태에서 회전 속도 및 EGR율을 적용한 운전했을 때, NOx와 매연 배출특성 측정 결과를 한 그림에 나타낸 것이다.

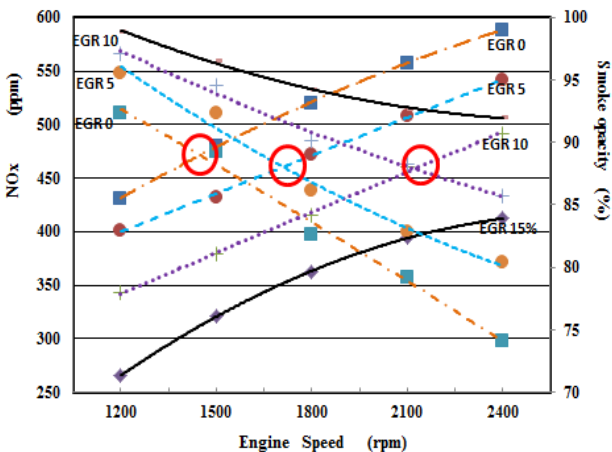


Figure 14: Effect of the EGR on NOx and smoke at the load 100%

그림에서 알 수 있는 바와 같이, 회전 속도가 증가함에 따라서 매연은 감소하고 NOx는 증가한다. 또한 EGR율이 증가함에 따라서 매연은 증가하며, NOx는 저감하고 있다. 그림에서 NOx와 매연과의 교차점 A, B, C점은 NOx와 매연을 동시에 적은 값을 갖는 최적의 운전 상태라고 할 수 있다. 즉 EGR이 없는 운전 상태에서는 저속인 약 1500rpm에서 운전할 때 NOx와 매연을 동시에 저감할 수 있는 최적 운전 조건이고, EGR율5일 때는 B점, EGR율10일 때는 c점으로 각각 1800rpm, 2200rpm 상태로 운전하는 것이 NOx와 매연을 동시에 저감하기가 좋다.

결론적으로 EGR이 증가할수록 NOx와 매연을 동시에 저감할 수 있는 최적의 운전 조건은 저속, 중속, 고속으로 운전 조건을 변경하므로써 가능하리라 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 EGR 디젤엔진을 사용하여, EGR이 엔진의 출력 특성(IHP,BHP) 및 배기가스 특성(NOx, 매연)에 미치는 영향을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) EGR율이 증가함에 따라 IHP 및 BHP는 감소하며, 순수EGR에 의한 영향은 엔진회전수에 따라 차이는 있지만, 저속 운전에서는 약 9%, 고속운전에서는 3.5% 정도 감소한다.
- 2) EGR율이 증가함에 따라 배기가스 온도는 감소한다.
- 3) NOx는 EGR율이 증가함에 따라 감소하고, 엔진회전수가 증가할수록 증가한다.
- 4) 매연은 EGR율이 증가함에 따라서 증가하고, 엔진회전수가 증가할수록 감소한다.
- 5) EGR율에 따라 NOx와 매연 배출을 동시에 감소시킬 수 있는 최적 운전 상태가 존재하며, EGR율이 증가할수록 NOx 및 매연 저감을 위한 최적운전 속도는 증가한다.

References

- [1] J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, 1988.
- [2] F. J. Liotta and D. M. Montalvo, "The Effect of Oxygenated Fuels on Emissions from a Modern Heavy-Duty Diesel Engine," SAE 932734, 1993.
- [3] J. Y. Heo, J. P. Cha, S. H. Yoon, and C. S. Lee, "Effect of multiple injection on combustion and emission character direct injection diesel engine," Proceedings of the Korea Society of Automotive Engineers Spring Conference, pp. 37-42, 2010.
- [4] G. H. Lim, J. H. Park, Y. Choi, S. Y. Lee, and Y. M. Kim, "Comparison of combustion characteristics on the basis of the dilution ratio in diesel engines with LPL EGR," Transactions of the Korean Society of

Mechanical Engineers B, vol. 35, no. 5, pp. 525-531, 2011.

- [5] K. Sihling and G. Woschni, "Experimental investigation of the instantaneous heat transfer in cylinder of a high speed diesel engine," SAE Paper No. 790833, 1979.
- [6] Wilson, Pelliccilli, "Emission Study of a Single-Cylinder Diesel Engine," SAE740213, 1974.
- [7] J. K. Lim and S. C. Cho, "Effect of fuel injection on exhaust emissions of biodiesel blend oil in diesel engine," Korean Society of Mechanical Engineers, vol. 36, no. 5, pp. 603-608, 2012.