

# EGR 적용 비도로 엔진의 쿨러 열화에 따른 질소산화물 배출특성 NOx Emission Characteristic according to Aging of EGR Cooler in Non-Road Diesel Engine

이경복\* · 오광철\*\*  
Kyoung-Bok Lee\* and Kwang-Chul Oh\*\*

(Received 15 June 2016, Revision received 16 August 2016, Accepted 17 August 2016)

**Abstract:** Exhaust gas recirculation has the advantage of being low-cost and easy to control of NOx emission. Therefore, it is most generally used to reduce NOx emission according to strengthen regulation. In the case of a non-road engine, such as the agricultural engine, since it mainly operate a middle or high-load state, NOx emission is decreased in accordance with the mapping range of the EGR rate, but results in an increase in the particulate matter which is caused to deposit and fouling problem of the EGR system. This problem has become an important issue for maintaining the performance of the engine, as well as emission performance. This study had examined the effects of cooler aging on the performance of heat transfer efficiency and NOx emission in non-road diesel engine. As a result of the EGR cooler aging during 200 hours engine operation, the cooling performance decreased about 25% compared with that of fresh cooler and the NOx emission increased about 14.6% on NRSC(non-road steady cycle) and 20% on NRTC(non-road transient cycle) compared with that of fresh cooler respectively.

**Key Words :** EGR cooler, Particulate Matter, NOx(Nitrogen Oxides), Heat transfer efficiency, Pressure drop, aging, Non-road engine

## 1. 서 론

화석 연료를 사용하는 내연 기관을 이용하는 자동차의 유해가스 저감 및 연비 향상은 경제적인 이유뿐만 아니라 지구의 환경적인 측면에서도 매우 중요한 의미를 갖는다. 이에 따라 세계 각국은 강화된 배기규제<sup>1)</sup>를 점진적으로 시행하기 시작하였으며, 자동차 배출오염물질에 대한 규제강화에 대응하기 위한 후처리 장치 및 디젤 엔진의

연소 개선 등과 같은 배기저감 기술개발에 많은 노력들이 이루어지고 있다.

이러한 배출가스 규제는 자동차(On-road) 엔진에 국한되지 않고 비도로(Non-road) 엔진에까지 강화<sup>1)</sup>되고 있으며 미국의 경우, 비도로 엔진에 대하여 1996년 Tier 1 규제를 시행하였으며, 2008년부터 2015년까지 배출가스 기준이 대폭 강화된 Tier 4를 단계적으로 시행하고 있다. Tier 4 final 규제를 만족하기 위해서는 엔진 출력에 따라 다

\* 오광철(교신저자) : 자동차부품연구원 차세대엔진시스템연구센터 센터장

E-mail : kcoh@katech.re.kr, Tel : 041-559-3089

\*이경복 : 자동차부품연구원 차세대엔진시스템연구센터

\*\* Kwang-Chul Oh(corresponding author) : Advanced Engine System R&D center, Korea Automotive Technology Institute. E-mail : kcoh@katech.re.kr, Tel : 041-559-3089

\*Kyoung-Bok Lee : Advanced Engine System R&D center, Korea Automotive Technology Institute.

르지만 NOx(Nitrogen Oxides)의 배출량을 Tier 3 대비 약 90% 이상 저감시켜야 하기 때문에 엔진 기술만으로 Tier 4 배기규제를 대응하기에는 한계가 있어 EGR 사용 및 연소개선의 전처리 기술 적용 및 입자상물질 제거를 위한 입자상물질필터(Diesel Particulate Filter, 이하 DPF) 및 질소산화물 제거를 위한 후처리 기술 적용이 요구되고 있는 실정이다.

디젤 엔진은 확산화염 형태의 연소 방식의 한계로 인하여 연소실 내에서 국부적 연료 과농 지점과 고온 화염지역이 공존하여 질소 산화물(NOx)과 입자상 물질(Particulate Matters, 이하 PM)의 배출이 주요한 문제가 되어 왔다. 그러나 배기가스 후처리 기술의 발전으로 인하여 PM과 같은 입자상 물질은 DPF, DOC(Diesel Oxidation Catalyst) 등과 같은 후처리 장치를 이용하여 획기적인 저감을 이루었다. 또한 질소 산화물은 배기가스 재순환(Exhaust Gas Recirculation, EGR) 시스템<sup>2-4)</sup>을 이용하여 엔진 연소 단계에서 저감하는 기술이 일반화 되었고, 근래에는 EGR 쿨러를 이용하여 배기가스의 온도를 낮추어 재순환시키는 cooled EGR 시스템 기술<sup>2,3,5-9)</sup>이 보편화 되어지고 있다.

kWm	(hp)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
0 - 18	(0 - 24)	{7.5}/6.6/0.40						
19 - 36	(25 - 48)	{7.5}/5.5/0.30		{4.7}/5.0/0.03				
37 - 55	(49 - 74)	{4.7}/5.0/0.40		{4.7}/5.0/0.03				
56 - 74	(75 - 99)	{4.7}/5.0/0.40	3.4/0.19/5.0/0.02			0.40/0.19/5.0/0.02		
75 - 129	(100 - 173)	{4.0}/5.0/0.30	3.4/0.19/5.0/0.02			0.40/0.19/5.0/0.02		
130 - 560	(174 - 751)	2.0/0.19/3.5/0.02			0.40/0.19/3.5/0.02			
>560	(> 751)	0.67/0.40/3.5/0.10				0.67/0.19/3.5/0.03		
		Tier 3		Tier 4 Interim		Tier 4 Final		

NOx/HC/CO/PM (g/kW-hr)      Engine of this study

Fig. 1 Non-road emissions requirements for diesel engines by tiers

배기규제의 강화에 따라 높은 EGR율을 이용한 연소 방식으로 인하여 탄화수소(HC, Hydro Carbon)/유기성 용해 물질(SOF, Soluble Organic Fraction), 입자상물질 등의 증가와 냉각에 따른 수분 및 탄화수소 등의 응결, 입자상 물질 등의 표면 퇴적에 따른 파울링(fouling), 열교환 효율 저하

및 유동 저항의 증가 등을 해결해야 할 문제점으로 안고 있다. 이를 해결하기 위하여 열교환 효율 및 유동 저항을 줄이기 위하여 유동 해석을 통한 최적화<sup>10,11)</sup>와 높은 EGR을 이용한 연소 방식으로 인한 EGR 밸브와 EGR 쿨러에 매연 퇴적(deposit)에 따른 장치의 내구성 및 파울링에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다.<sup>2,3,5-9,12)</sup>

쿨러 파울링이란 디젤 엔진의 운전 조건에 따라 발생하는 PM, SOF, SO<sub>4</sub> 등과 같은 물질이 EGR 쿨러 내부에 부착되어 열교환 효율 저하 및 부식시키는 현상을 말한다. EGR 쿨러의 파울링이 생기는 원인은 쿨러 형상에 따른 쿨러의 디자인, 작동 상태에 따른 운전 모드, 입출구 가스 온도, 배기 유량 및 냉각수 온도에 따른 주위 조건, 유기성 용해 물질 및 산 등에 의한 부식, 매연 입자 등과 같은 성분에 의해 나타난다고 알려져 있다.<sup>7,8,12)</sup>

근래에 들어 비도로 엔진의 경우도 강화된 배기규제대응을 위해 엔진 출력에 따라 대응 방법이 상의하게 적용되는 경향을 보이고, 본 논문의 대상인 54 kW급 엔진의 경우는 Tier 4 배기규제를 맞추기 위해 EGR 시스템과 DPF 시스템이 적용되었다. EGR의 경우는 잘 알려진 NOx 저감 기술의 하나로 EGR 율에 따른 연소실내의 온도 저감 효과로 NOx를 효과적으로 저감한다. 그러나 EGR이 증가하면 PM이 증가하고 PM의 성질<sup>(13-15)</sup>도 변하여 EGR 시스템의 열화<sup>(12)</sup>에 대한 영향이 고려되어야 한다.

본 논문은 EGR 시스템과 DPF가 장착된 비도로 엔진을 이용하여 Tier 4 규제 만족을 위한 EGR 율을 결정하고, 정상상태 모드(NRSC mode) 및 비정상상태 모드(NRTC mode)에서 사용된 EGR 시스템의 열화에 의한 배기가스 배출특성의 영향을 분석하였다.

## 2. 실험 방법 및 실험 장치 구성

### 2.1 실험 방법

본 연구는 Tier 4 배기규제 대응을 위해 고압 컨먼레일 연료 분사장치가 장착된 2.4리터 비도로 엔진이 사용되었다.

Table 1 Engine specification

Engine	Non-road Turbo charged Diesel Engine
Displacement volume(cc)	2,400
Injection	Common rail
NO. of Cylinder	4
Max. Power(kW)	52
Max. Torque(N-m)	240
Exhaust treatment system	CCRT (DOC+CDPF), EGR

배출가스 및 연비 최적화를 위한 고압 분사장치가 적용되어 운전영역에 따른 분사시기 최적화가 이루어 졌고, EGR 시스템 적용을 통해 상승한 질소산화물이 저감되었다. 그리고 PM 배출 저감을 위해 촉매가 코팅된 DPF 시스템이 사용되었다.

EGR 시스템의 열화에 따른 질소산화물 배출특성의 변화를 확인하기 위하여 1) 사용된 엔진의 주요 운전점에서 적정 EGR 율을 설정하고 2) 초기 장착된 EGR 쿨러의 성능(열교환 효율, 압력손실)을 확인하였다. 그리고 난후 3) NRSC 및 NRTC 모드에서의 초기 배출 특성을 확인하고, 4) 정상상태 모드, 변형된 NRSC로 50시간, 100시간, 200시간 열화를 수행하고, 각 시간에서 EGR 쿨러의 성능 변화를 확인하였다. 5) 변형된 NRSC 200시간 열화 후, NRSC 및 NRTC 모드에서의 배출가스 변화를 확인을 통하여 쿨러의 열화에 따른 영향이 분석되었다.

## 2.2 실험 장치 구성

엔진 동력계를 이용하여 EGR 쿨러의 열화 수행 및 엔진의 배기성능의 변화를 확인하였고, EGR 쿨러 단품 성능은 배기가스 모사 시험 장치를 이용하여 확인하였다.

### 2.2.1 엔진 시험을 위한 구성 및 방법

본 연구에서는 EGR 쿨러 열화 및 EGR 쿨러 열화 전/후의 인증모드(NRSC/NRTC) 배기성능 변화를 확인하기 위해서 53 kW급 비도로(Non-road) 디젤엔진을 사용하였으며, 엔진의 구동을 위해서 AC 과도 동력계(350kW)를 이용하였다. 그림 2는

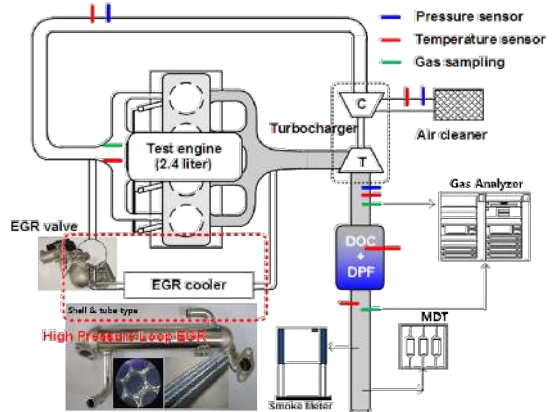


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup: engine, EGR cooler and sampling port

AC 엔진 다이내모에 Non-road 엔진을 장착한 모습과 구성을 간략히 보여준다. 배기가스의 변화를 확인하기 위해 배기분석계(HORIBA社 MEXA 7100 DEGR)를 설치하였고. PM의 발생량 변화를 확인하기 위해 스토크미터(AVL-415S)와 MDT 장비(MDT-3000, horiba)를 사용하였다.

EGR 시스템은 셸 앤 튜브(Shell and Tube) 형태의 쿨러와 엔진 블록 내부의 EGR 유로를 거치고 전자식 EGR 밸브가 장착되어 흡기 매니폴드 전단으로 연결되어 있다. EGR 시스템의 엔진 내 성능 확인을 위해 EGR 쿨러 입구와 출구 가스온도와 냉각수 온도가 측정되었다. 그리고 EGR 유량은 흡배기 CO<sub>2</sub> 농도 측정 방법이 짧은 혼합구간 흡기의 경우에 오차가 컸기 때문에 흡기유량의 변화로 측정되었다.

$$EGR \text{ 율} = 1 - \frac{Q_{\text{measured}}}{Q_{\text{w/o EGR}}} : \text{흡입공기량 측정} \quad (1)$$

Q<sub>measured</sub>: 흡기유량 (w/ EGR), kg/h

Q<sub>w/o EGR</sub>: EGR을 적용하지 않은 경우 흡기유량, kg/h

#### 1) EGR 시스템 열화(aging)

본 연구에서 사용된 EGR 쿨러는 셸 앤 튜브타입으로 기본적인 원형관에 웨이브(wave)가 있는 구조이며, 냉각수와 배기가스의 열교환을 잘 이루

어지도록하기 위하여 면적을 증가시키기 위한 형태이다. EGR 쿨러의 열화(aging)는 비도로 디젤엔진에 정상상태 모드(변형된 NRSC)를 반복하여 열화를 수행하였다. 열화 수행 시간은 50시간, 100시간, 200시간을 기준으로 수행하였으며, 각 수행시간별 EGR 쿨러의 냉각성능 변화를 확인하기 위하여 EGR 쿨러 단품을 배기모사 시험 장치에 장착한 후 냉각성능 실험을 통해 확인하고 이를 비교하였다.

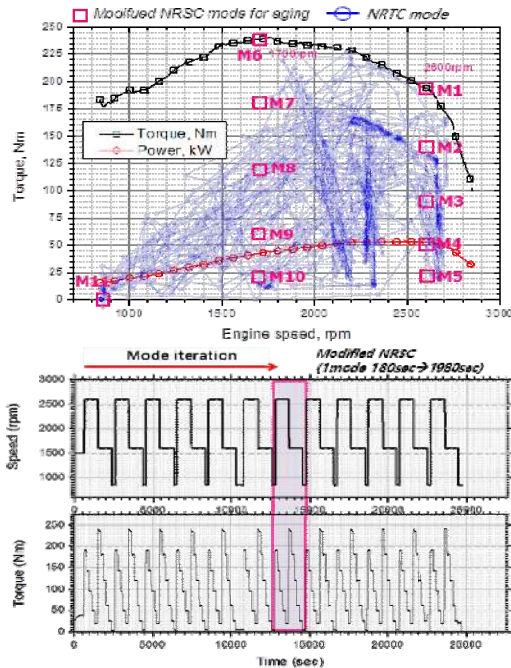


Fig. 3 Emission test mode in non-road engine: engine operating points of modified NRSC mode and NRSC mode

2) 엔진 배기 성능 측정 및 EGR 설정

엔진의 배기성능 개선을 위해 NRSC 모드 운전점에서 적정 EGR 율을 결정하였다.

질소산화물 배기규제 만족을 위하여 cooled EGR 적용을 통하여 현재 EGR 수준(EGR 율 10% 수준)에서 20% 정도를 감소시켜야 하고 이를 위해서 NRSC C1 모드의 1, 2, 3, 4, 6, 7 대표 운전점에서 EGR 율 변화에 대한 NOx 저감 특성을 살펴보고 EGR 밸브의 개도를 결정하였다. 각 운전점에서 배

기 변화의 특징을 살펴보면, EGR 밸브 개도량 증가에 따라 EGR 유량이 증가하고 그에 따라 배기가스 중 NOx 농도가 감소한다. 현재 엔진의 NOx 저감 목표치 내에서는 THC 증가 및 연비 손실이 거의 없었고, 대부분의 운전점에서 DPF 장착 고려(DPF 장착시 배압 증가로 EGR 율이 증가하는 경향이 있음)하여 EGR 율이 20% 범위로 결정되었다.

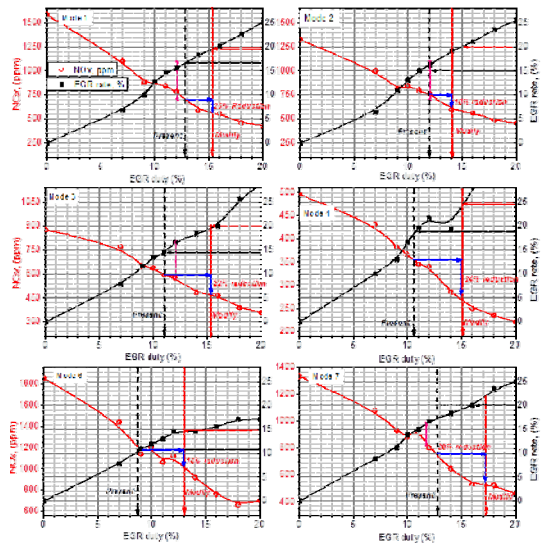


Fig. 4 EGR rate calibration in representative engine operating points

2.2.2 배기모사 시험장치 구성 및 방법

EGR 쿨러의 단품 성능평가를 위해 배기모사장치를 구성하였다. 배기모사장치는 정상상태에서 실험변수를 독립적으로 제어하고 안정하게 유지하는데 엔진보다 많은 이점이 있다. EGR 쿨러의 단품 성능을 확인하기 위해 Fig. 5와 같이 실험장치를 구성하였다.

배기모사장치는 고온의 배기가스 생성을 위한 덤프 연소기 부분, 연료의 유량 및 공기 유량을 제어하기 위한 질량유량계(Mass Flow Controller) 부분, 냉각수 온도 조절 장치 부분, EGR 가스유량을 확인하기 위한 유량계 부분, EGR 가스 및 냉각수 차압을 측정할 수 있는 차압계, 주요 부분의 온도를 측정하기 위한 온도센서, 데이터 수집을 위한 부분으로 구성되어 있다.<sup>12)</sup>

### 3. 실험결과

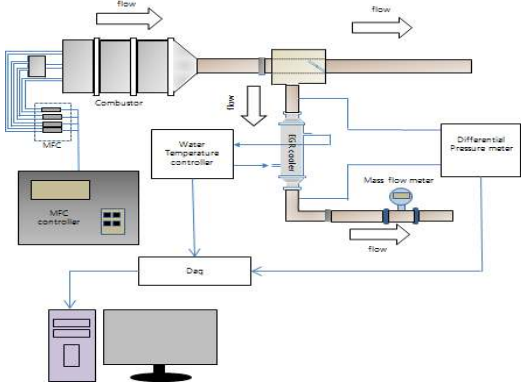


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup for the evaluation of EGR cooler performance

EGR 쿨러의 냉각성능을 확인하기 위해 다음과 같은 조건에서 실험을 진행하였다. EGR 쿨러 유입되는 가스 온도는  $340\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  범위로 설정하였으며, 유량은 최대 50 kg/h까지 변화하면서 실험을 수행하였다. 냉각수의 유량은  $14\text{ l/min}$ 으로 유지하였으며, 냉각수 온도는  $90\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  범위로 설정하였다. EGR 쿨러의 효율을 확인하기 위하여 EGR 쿨러 전단의 배기가스 온도와 후단의 배기가스 온도를 K-type 열전대를 사용하여 측정하였고, 냉각수 온도 제어 및 측정을 위해 EGR 쿨러로 들어가는 냉각수 온도와 출구의 냉각수 온도는 T-type 열전대를 통해 측정하였다. 또한, 배기가스 유로의 압력손실을 확인하기 위해 차압계를 통해 EGR 쿨러 전단과 후단의 차압을 확인하였다.

냉각효율 다음 식(2)를 사용하여 쿨러 효율을 비교·분석하였다.<sup>8,12)</sup>

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{Q}{Q_{\max}} \times 100 \\ &= \frac{(T_{\text{gas inlet}} - T_{\text{gas outlet}})}{(T_{\text{gas inlet}} - T_{\text{coolant inlet}})} \times 100 \end{aligned} \quad (2)$$

- $\epsilon$ : 열교환 성능, %       $Q$ : 실제 열교환 열량, kcal
- $Q_{\max}$ : 최대(이상적) 열교환 열량, kcal
- $T_{\text{gas inlet}}$ : EGR 가스 입구온도, K
- $T_{\text{gas outlet}}$ : EGR 가스 출구온도, K
- $T_{\text{coolant inlet}}$ : EGR 냉각수 입구온도, K

EGR 시스템의 열화에 따른 질소산화물 배출특성의 변화를 확인하기 위하여 적정 EGR이 결정된 엔진을 대상으로 배기모사장치에서 초기 성능이 측정된 EGR 쿨러의 성능(열교환 효율, 압력손실)을 NRSC 및 NRTC 모드에서 배출 특성을 확인하였다. 그리고 난 후 정상상태 모드, 즉 변형된 NRSC로 50시간, 100시간, 200시간 열화를 수행하고, 각 시간에서 배기모사장치를 이용하여 EGR 쿨러의 성능 변화를 확인하였다. 그리고 NRSC 200시간 열화 후에는 대상엔진에서 인증모드(NRSC/NRTC 모드) 상의 배출가스 변화 확인을 통하여 쿨러의 열화에 따른 배기 특성에 대한 영향이 분석되었다.

#### 3.1 열화 시간에 따른 EGR 쿨러 성능 특성 변화

배기모사장치를 통하여 EGR 쿨러 단품에 대한 실험을 수행하였다. 초기 및 열화에 따른 냉각효율을 확인하기 위해서 초기상태의 EGR 쿨러와 50시간, 100시간, 200시간 열화를 진행한 상태의 EGR 쿨러에 대해서 성능평가를 수행하고 이를 비교하였다.

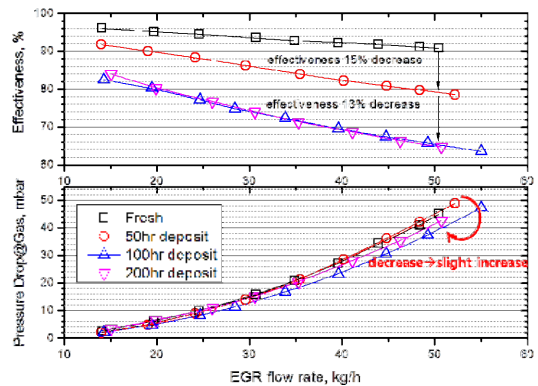


Fig. 6 Effectiveness and gas side pressure drop of EGR cooler

Fig. 6 EGR 쿨러의 Effectiveness 및 배기 가스 측의 압력손실을 비교하여 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 100시간 열화까지는 계속적으로 냉각

효율이 감소했으며, 200시간 aging시 냉각효율은 100시간 열화 시 결과와 유사하였다. 압력 손실은 100시간 열화 시 감소하였다가, 200시간 열화 시 다소 증가하는 모습을 보였다.

Fig. 7은 EGR 유량이 50 kg/h일 때 열화 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 냉각효율은 열화 초기 급격한 감소를 보이다 100시간 이후부터는 거의 변화가 없음을 확인 할 수 있다. 이는 EGR 쿨러 내부에 PM이 포화되어 더 이상 쌓이지 않기 때문으로 판단된다. NRSC 모드 상의 EGR 유량은 최대 50 kg/h 정도이고 11개 모드의 반복으로 이루어져 있어서 매 모드마다 EGR 유량이 변화한다. 이에 따라 쿨러에 PM이 쌓이는 양이 유량에 따라 변동하고, 작은 유량에서 쌓인 PM은 큰 유량일 때 blow-off 되어 연소실로 유입되어 열교환 효율이 복원되기도 한다. 이는 유량변동이 있는 엔진에서는 일정유량으로 EGR을 공급하였을 때 보다 늦게 포화가 일어나는 이유이기도 하다. 게다가 PM의 농도 및 성질에 따라 쌓이는 두께가 변화하고, PM이 Wet한 경우(EGR이 크거나, SOF 함량이 큰 경우), 그 양이 증가함을 유추할 수 있다.

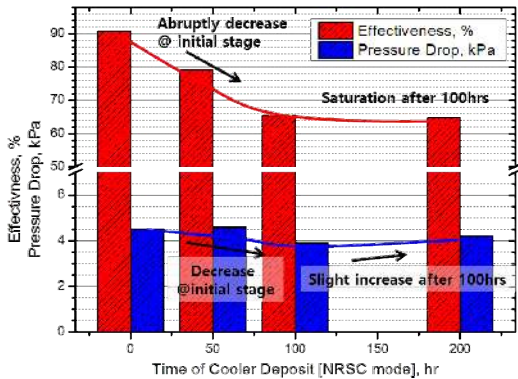


Fig. 7 Effectiveness and gas side pressure drop of EGR cooler according to aging period (EGR gas flow rate=50kg/h)

Fig. 8은 Dry하고 Wet한 PM 조건에서 EGR양을 50 kg/h로 고정하고 PM을 증가시킨 조건에 노출했을 때, 냉각효율이 감소하다가 변화하지 않는 상태의 쿨러를 초기 성능과 비교한 결과를 보여 준다. 그림에서 알 수 있듯이 부하가 낮고, EGR이 큰 조건에서는 PM에 SOF 및 미연 연료를 다량

포함(C/H 비가 낮음)되어 있어 포화되었을 때 쿨러에 퇴적(deposit)이 증가하고 이에 따라 쿨러의 열교환 효율이 고부하의 조건(dry PM)에 비해 크게 감소함을 알 수 있다. 본 엔진의 EGR 유량 (~20%)의 경우, 비교적 dry한 PM의 경우이며 그림 8의 결과와 비교하였을 때 dry PM에 가까운 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

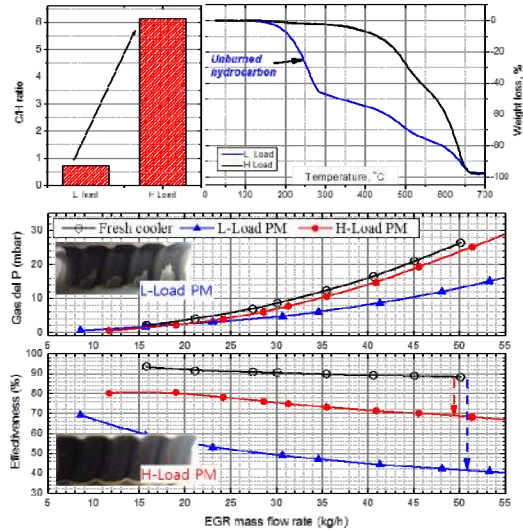


Fig. 8 Effectiveness and gas side pressure drop according to PM properties

이와 같이 열교환 효율 및 차압이 감소 원인은 Shell & tube 형상의 특성에 기인한 것으로 초기의 경우, 골과 골 사이에 PM이 쌓이게 되어 골을 평탄화 시켜 난류유동을 억제시켜 열교환 효율 및 차압이 감소한 것으로 판단<sup>(12)</sup>되며 200시간의 경우는 PM이 포화되면서 쿨러 내부에 부착된 PM이 진동에 의해 떨어져 나가게 되면서 차압이 다소 증가한 것으로 판단된다.

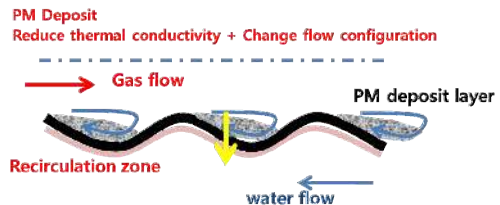
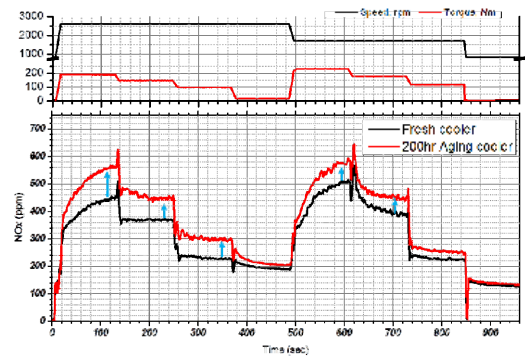


Fig. 9 Illustration of deposit pattern on inner tube shape (12)

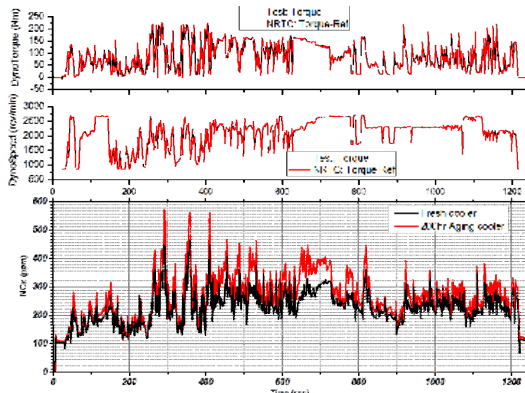
### 3.2 EGR 쿨러 열화 전·후 배기성능 비교

EGR 쿨러의 열화에 의한 냉각효율 감소가 엔진의 배기성능에 미치는 영향을 살펴보기 위해 초기상태의 EGR 쿨러와 200시간 이상 열화를 진행한 EGR 쿨러를 DPF(Diesel Particulate Filter)가 장착된 동일한 Non-Road 디젤엔진에 EGR 쿨러만 교체하여 NRTC 모드 및 NRSC 모드 실험을 수행하여 배기가스 결과를 비교하였다.

Fig. 10은 NRSC 모드와 NRTC 모드 운전시 NOx 배출량을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 열화되지 않은 초기상태의 EGR 쿨러에 비해 200시간 이상 열화가 진행된 EGR 쿨러를 장착한 엔진의 경우, NOx의 배출량이 높음을 확인 하였다. 특히 고부하 조건이 유지되는 조건에서 NOx 배출량 증가가 커짐을 알 수 있고, 이는 그림 6의 단품 성능의 결과에서 보는 것처럼 EGR 쿨러의 냉각효율 감소가 EGR 유량이 큰 조건에서 커지는 결과에 기인한다.



(a) NRSC Mode



(b) NRTC mode

Fig. 10 NOx emission in NRSC and NRTC mode

Fig. 11은 배기가스 배출량(특히 NOx 배출량) 및 연비를 모드에 따른 결과로 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 PM 및 THC는 큰 변화를 보이지 않은 반면 NOx 배출량은 변화가 큼을 알 수 있다. NRSC 모드에서 열화된 쿨러의 경우, 약 3.2 g/kWh의 배출특성으로 Fresh 쿨러의 약 2.8 g/kWh의 배출 특성에 비해 16% 높아진 결과를 보였다. 그리고 NRTC 모드에서는 열화된 쿨러는 2.7 g/kWh 배출특성을 보였으며, Fresh 쿨러에 비해 15.7%의 증가를 보였다. 그리고 또한 열화된 EGR 쿨러는 NRSC, NRTC 모드에서 각각 1.3%, 0.3%의 연비 악화되었음을 확인할 수 있다. 이는 열교환 성능의 감소에 따라 EGR 온도가 상승하여 흡입공기량의 감소에 의한 영향으로 유추된다.

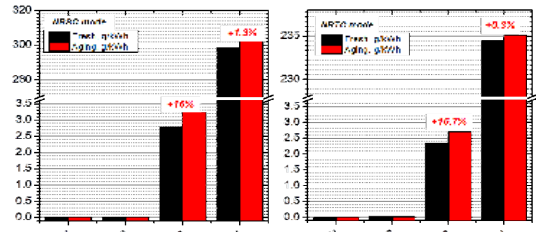


Fig. 11 Emission of NRSC and NRTC

Fig. 12는 최대 출력점에서 100시간 열화시킨 쿨러의 질소산화물 배출특성을 위의 두 결과와 비교하여 나타내었다. 초기 상태의 Fresh 쿨러에 비해 NRSC 모드에서는 14.6% NOx발생량이 증가하였으며, NRTC 모드에서는 20.1% 증가한 결과를 보여주었다.

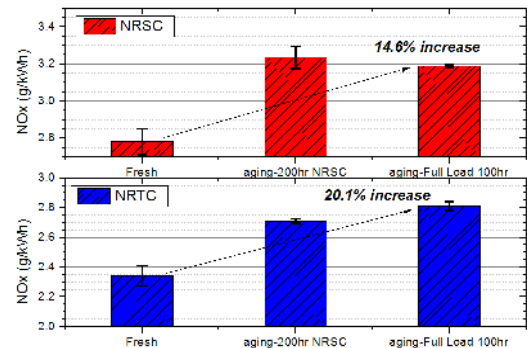


Fig. 12 Comparison of NOx emission according to cooler aging

## 4. 결 론

EGR 쿨러 열화가 냉각성능에 미치는 영향을 확인하기 위하여 배기모사 리그를 사용하여 초기 상태, 50시간, 100시간 열화시킨 쿨러의 냉각성능을 확인하였다. 또한 EGR 쿨러 열화가 엔진 배기 가스에 미치는 영향을 확인하기 위해 200시간 이상 열화한 EGR 쿨러와 초기상태 EGR 쿨러를 교환해가며 NRTC 모드와 NRSC 모드 평가를 수행하고, 배기 분석계를 통해 배기가스 결과를 비교하였다.

1) 쿨러 열화에 따른 냉각성능을 비교한 결과 50 kg/h 유량조건에서 200시간 이상 열화한 EGR 쿨러의 경우 초기상태의 쿨러 대비 약 25% 성능이 저하되었다. 냉각성능의 저하는 EGR 쿨러 내부에 상대적으로 열전달 계수가 낮은 PM이 퇴적(deposit)되면서 열전도 계수의 변화 및 열교환 면적의 감소에 기인한다.

2) 열화에 따른 배기가스의 압력손실을 확인한 결과, 초기부터 100시간까지는 감소하는 경향을 보이다가 200시간 열화한 쿨러는 근소한 상승을 보인다. 이는 Shell & Tube 방식의 EGR 쿨러의 형상 특성에 기인한 것으로 100시간 정도까지는 골과 골 사이에 PM이 퇴적되면서 웨이브(Wave) 채널을 평탄화 시켜 표면적을 감소하여 차압이 감소하다가 이후에는 쌓이고 떨어짐을 반복하는 특성의 결과이다.

3) 열화된 쿨러를 장착하여 배출가스 모드를 평가한 결과, NRSC로 200시간 열화 샘플의 경우, 정상상태 모드인 경우 15%, 비정상상태(transient) 모드는 17% 상승하는 결과를 보였고, 100시간 전 부하(full load)로 열화시킨 결과와 유사한 특성을 보임을 알 수 있었다.

## References

1. Dieselnet, "Emission standards", www.diesel.net
2. A. Stoltz, K. Fleischer, W. Knecht, J. Nies and R. Strahle, 2001, "Development of EGR Coolers for Truck and Passenger Car Application", SAE 2001-01-1748.
3. S. Andersson, C. Akerlund and M. Blomquist, 2002, "Low Pressure EGR Calibration Strategies for Reliable Diesel Particulate Filter Regeneration on HDD Engines", SAE2002-01-2780.
4. S. K. Singh, A. K. Agarwal and M. Sharma, 2006, "Experimental Investigations of Heavy Metal Addition in Lubricating Oil and Soot Deposition in an EGR Operated Engine", Applied Thermal Engineering, 26, pp. 259 - 266.
5. J. Hoard, M. Abarham, D. Styles, J. M. Giuliano, C. S. Sluder and John M. E. Storey, 2008, "Diesel EGR Cooler Fouling", SAE 2008-01-2475.
6. R. Zhan, S. T. Eakle, J. W. Miller and J.W. Ant hony, 2008, "EGR System Fouling Control", 2008-01-0066.
7. C. S. Sluder, J. Storey, S. Lewis, D. Styles, J. Giuliano and J. Hoard, 2008, "Hydrocarbons and Particulate Matter in EGR Cooler Deposits: Effects of Gas Flow Rate, Coolant Temperature, and Oxidation Catalyst", SAE 2008-01-2467.
8. R. Zhang, F. Charles, D. Ewing, J. S. Chang and J. S. Cotton, 2004, "Effect of Diesel Soot Deposition on the Performance of Exhaust Gas Recirculation Cooling Devices", SAE 2004 -01-0122.
9. M. J. Lance, C. S. Sluder, H. Wang and J. M. E. Storey, "Direct Measurement of EGR Cooler Deposit Thermal Properties for Improved", SAE 2009-01-1461, 2009.
10. C. H. Sohn, 2007, "Heat Transfer Analysis of EGR Cooler with Different Tube Shape", Transactions of KSAE, Vol. 1, No. 5, pp. 112-117.
11. H. S. Heo, J. P. Won and K. S. Park, 2003, "Evaluation of Thermal Fluid Characteristics for EGR Cooler with Shell & Tube Type", Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 6, pp. 44-50.



12. Y. W. Nam, K. C. Oh, C. H. Lee, C. B. Lee and W. N. Lee, 2011, "The Effect of Cooling Efficiency on Fouling by EGR Cooler Internal Shape", Transactions of KSAE, Vol. 19, No. 1, pp. 101-108.
13. Kwang Chul Oh, Uen Do Lee, Eui Ju Lee and Hyun Dong Shin, 2005, "The evolution of incipient soot particles in ethane inverse diffusion flame", Combustion and Flame, Vol. 140, pp. 249-254.
14. Y. J. Jung and C. S. Bae, 2015, "Immaturity of soot particles in exhaust gas for low temperature diesel combustion in a direct injection compression ignition engine", Fuel 161, pp. 312-322.
15. S. H. Cho, K. C. Oh and C. B. Lee, 2009, "Characteristics of Low Temperature Combustion in Single Cylinder Engine by High EGR Rate", Transactions of KSAE, Vol. 17, No. 4, pp. 79-85.