

## EGR 쿨러 Type에 따른 열교환성능에 관한 실험적 연구

손정욱<sup>1)</sup> · 우승철<sup>1)</sup> · 박종욱<sup>2)</sup> · 전태수<sup>2)</sup> · 이기형<sup>\*3)</sup>

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

### An Experimental Study on the Heat Exchange Performance at Various EGR Cooler Types

Jungwook Shon<sup>1)</sup> · Seungchul Woo<sup>1)</sup> · Jongwook Park<sup>2)</sup> · Taesoo Chun<sup>2)</sup> · Kihyung Lee<sup>\*3)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 15588, Korea

<sup>2)</sup>Heat Exchanger Development Team, Hanon Systems, 95 Sinilseo-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34325, Korea

<sup>3)</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 15588, Korea

(Received 25 March 2015 / Revised 15 July 2015 / Accepted 30 July 2015)

**Abstract** : Nitrogen oxide(NOx) emission reductions are required to meet the strict emission regulations for environmental protection. Most of the Exhaust Gas Recirculation(EGR) system applied to a diesel engine can relatively decrease the NOx at a low cost, but it has a disadvantage in that the PM generation is promoted due to the hot intake air temperature. Thus, high heat exchange efficiency of the EGR cooler is required for an effective removal of NOx. In this study, heat exchange efficiency for various types of heat exchangers used in EGR cooler was measured under same conditions, and determined best heat exchange performance shape depending on type of heat exchanger.

**Key words** : EGR cooler(EGR 쿨러), Heat exchange efficiency(열교환효율), Fin-tube heat exchanger(Fin-tube 열교환기), Shell-tube heat exchanger(Shell-tube 열교환기)

#### Nomenclature

EGR : exhaust gas recirculation  
NOx : nitrogen oxides  
PM : particulate matter  
BSFC : brake specific fuel consumption

#### 1. 서론

세계 각국에서는 EURO VI 등 엄격한 배기규제에 대응하기 위하여 여러 종류의 후처리 기술들이 개발되고 있다. 배출가스 저감 기술은 크게 엔진연소 과정에서 원천적으로 적게 배출시키는 전처리기술과 연소과정에서 배출된 유해성분을 촉매나 필터를

이용하여 제거하는 후처리기술의 두 가지로 나눌 수 있다.

전처리기술 중 EGR (Exhaust Gas Recirculation) 방식은 연소실 내부에 배기가스를 일부 유입시켜 산소밀도를 낮춤과 동시에 배기가스 내의 이산화탄소와 물 등과 같은 열용량이 높은 물질을 이용하여 최대연소온도를 낮춤으로써 높은 연소온도에서 발생하는 질소산화물을 저감시키는 방법이다.

EGR 시스템의 경우 기술의 단가 대비 NOx 저감 효율이 뛰어나기 때문에 현재 대부분의 디젤엔진에 적용이 되고 있으며, 가솔린엔진에 있어서는 펌핑 로스를 저감시켜 연비향상에도 도움을 주기 때문에 향후 모든 엔진에 필수적으로 장착이 될 가능성이 높은 기술이다.

하지만, 고온의 EGR가스는 재순환시 흡입공기

\*Corresponding author, E-mail: hylee@hanyang.ac.kr

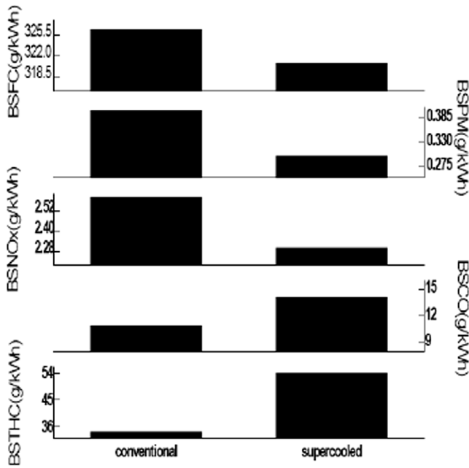


Fig. 1 Comparison of engine characteristics by EGR gas temperature reduction

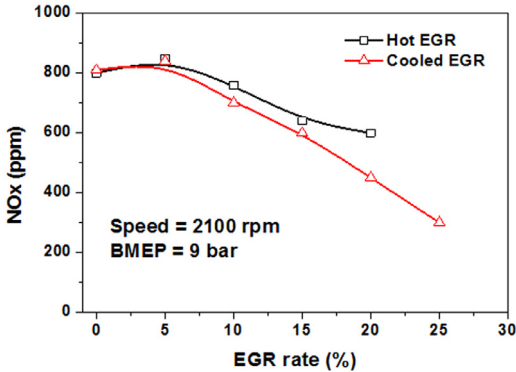


Fig. 2 Effect of cooled EGR on NOx production

전체를 가열하여 연소실 온도를 증가시키게 되고, 이는 다시 질소산화물의 생성을 촉진시킴과 동시에 흡입공기의 밀도 저하에 따라 PM이 증가하는 문제점을 가지고 있다. 가솔린엔진의 경우 연소실 온도가 상승하면 노킹의 위험으로 인하여 EGR의 장점보다 내구성 감소의 단점이 증가한다. 또한, 흡입공기의 온도상승은 공기의 밀도를 감소시켜 내부 산소량이 줄어들어 엔진의 출력이 감소된다.

EGR쿨러의 효율이 향상될 경우, EGR가스의 온도가 낮아져 Fig. 1<sup>1)</sup>과 2<sup>2)</sup>와 같이 엔진에서 발생하는 배기배출물 중 질소산화물과 PM이 저감되고, 연비도 일부 향상됨을 알 수 있다.

현재까지 대부분의 EGR 쿨러의 효율향상에 관한 연구에서는 Fin-Tube type의 경우 내부 Fin의 개수와

간격 및 형상을 변경하여 효율향상을 도모하며,<sup>3,4)</sup> Shell-Tube type의 경우 Tube의 개수 혹은 배열, 간격 및 Tube 형상을 변경하여 효율향상을 도모해왔다.<sup>5,6)</sup>

본 연구에서는 기존 연구와는 다르게 가스 측 전열 면적이 동일한 각각 다른 type의 EGR 쿨러의 열교환 성능을 비교하고, 각 type의 형상이 열교환 성능에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험대상엔진

엔진 워터펌프 및 유로 설계상 제한적인 EGR쿨러 공급 냉각수량이 EGR쿨러 내부의 저항으로 인하여 변화하는 영향과 ECU에서 제어하는 EGR가스량 조건에 따라 상용디젤엔진에서 EGR쿨러의 형상이 변경될 경우 EGR쿨러의 효율차이를 측정하기 위하여 엔진에 장착되어있는 기존 EGR 쿨러를 제거하고 다양한 종류의 EGR 쿨러를 바꿔 장착하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 엔진은 Photo. 1과 같으며, 엔진의 제원은 Table 1과 같다.

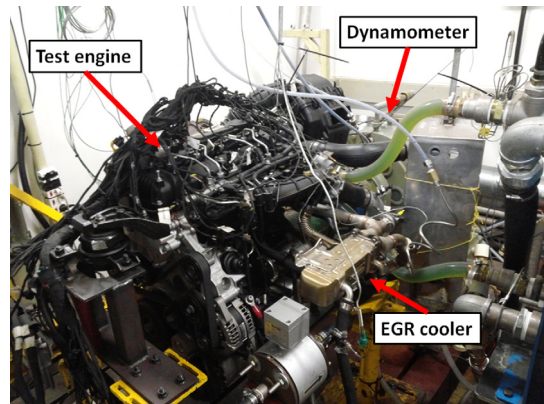


Photo. 1 Test engine




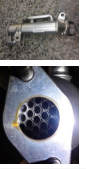
Table 1 Test engine specification

Type	Inline 4 cylinder diesel
Bore × Stroke	85.4 × 96 mm
Displacement	2199 cc
Compression ratio	16.0 : 1
HP / Torque	200 HP / 44.5 kgf·m

### 2.2 EGR 쿨러

EGR 쿨러는 Table 2와 같이 각각 U-Bend type에

Table 2 Test EGR cooler

Type	U-Bend Fin-Tube	U-Bend Shell-Tube	Straight Fin-Tube	Straight Shell-Tube
Name	Fin_U	Shell_U	Fin_S	Shell_S
Picture				
Gas inlet and outlet area (cm <sup>2</sup> )	All the same size			
Coolant inlet and outlet area (cm <sup>2</sup> )	All the same size			

서 Fin-Tube, Shell-Tube, Straight type에서 Fin-Tube, Shell-Tube 로 총 4가지 type으로 실험을 진행 하였다. 각각의 EGR 쿨러의 가스 입, 출구 직경은 모두 같으며, 냉각수 입, 출구 직경 역시 모두 동일하다. 각 EGR 쿨러의 가스 측 전열면적은 모두 동일하며, 내부의 냉각수 유로는 형상의 차이로 인하여 U-Bend type의 경우 직교류(Cross Flow)이며, Straight type의 경우 향류(Counter flow)로 구성되어있다. Fin-Tube type의 경우 가스 측 Tube 내부에는 오프셋 스트립 Fin (Offset strip fin)으로 구성되었으며, 냉각수 접촉 측에는 열전달을 촉진하기 위한 별도의 부가 Fin 등이 구성되어 있지 않다. Shell-Tube type의 경우 가스 접촉 측이 스파이럴 튜브(Spiral tube)로 구성되어있다.

### 2.3 실험방법

순정 ECU의 데이터로 작동하는 엔진시스템에 EGR쿨러만 변경하여 쿨러 전후단의 냉각수온, 냉각수량, 배기가스온도, 배기가스유량 및 압력을 측정하였다. 각각의 쿨러 type마다 Table 3과 같이 EGR 가스가 공급되는 엔진부하조건을 엔진동력계를 이용하여 구동하였고, 엔진의 세부 작동 상황은 ETAS사의 ES592를 이용하여 취득하였다.

각 조건에서 냉각수온과 배기가스온도가 안정화된 후, 1 Hz의 샘플링 속도로 3분간 데이터를 취득하여 데이터처리 후 평균값을 도출하였고, 위의 실험을 각 조건 당 10회씩 반복하였다. 이 결과를 이용하

Table 3 EGR cooler test condition

Engine speed (rpm)	BMEP (bar)
1000	2, 4
1500	2, 4, 6, 8, 10
2000	2, 4, 6, 8, 10
EGR cooling coolant temperature (°C)	90

여 각 EGR쿨러 type 별 열교환 효율을  $\epsilon$ -NTU 법을 이용하여 식 (1) ~ (3)에 대입하고 최대 가능 열전달량과 실제 열전달량의 비율로 계산하여 도출하였다.

$$\text{냉각수열용량} = m_c \times C_{p_c} \quad (1)$$

$$\text{EGR가스열용량} = m_g \times C_{p_g}$$

둘 중 작은 값을 열용량최소값  $C_{min}$ 에 대입하여,

$$\text{최대가능열전달량} = C_{min} (Th_{IN} - Tc_{IN}) \quad (2)$$

$Th_{IN}$  : EGR쿨러 입구 가스온도 (°C)

$Th_{OUT}$  : EGR쿨러 출구 가스온도 (°C)

$Tc_{IN}$  : EGR쿨러 입구 냉각수온도 (°C)

$Tc_{OUT}$  : EGR쿨러 출구 냉각수온도 (°C)

EGR쿨러의 열교환 효율

$$= \frac{\text{EGR가스실제열전달량}}{\text{EGR가스최대가능열전달량}} \times 100(\%) \quad (3)$$

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 각 조건별 쿨러 공급 EGR 가스량

각 type 별 EGR 쿨러를 통과해 공급되는 EGR 가스량은 Fig. 3과 같으며, Fig. 4는 EGR 가스량에 따라 각 type의 전, 후단에서 발생된 압력차를 나타낸 그래프이다. 각 type 마다 각각 다른 압력차가 발생함에도 불구하고 EGR 가스량은 거의 차이를 보이지 않았다. 이는 쿨러의 가스 측 Tube 내부저항으로 인하여 EGR 가스량이 감소할 경우 흡기유량을 기준으로 목표 EGR 가스량에 도달하도록 ECU에서 EGR밸브 개도량을 변경하기 때문이다. 이 때문에 쿨러를 통과하는 EGR가스의 총량은 변화가 없기에 EGR가스량 변화에 따른 효율차이는 없다고 보아도 무방하다.

Fin-Tube type보다는 Shell-Tube type이 상대적으

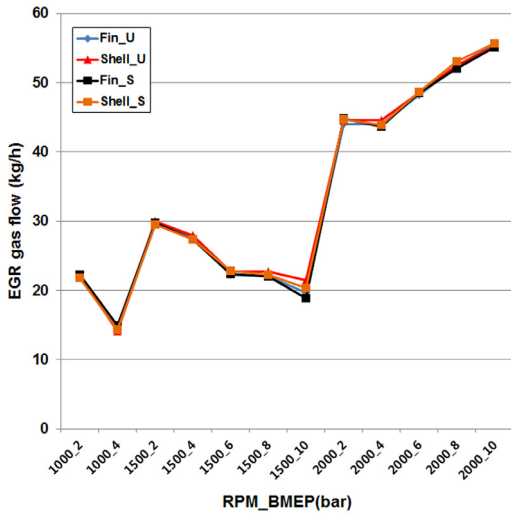


Fig. 3 EGR gas quantity at each condition

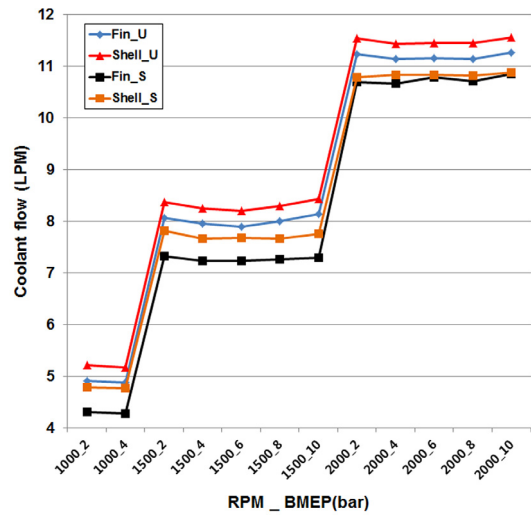


Fig. 5 Coolant flow at each condition

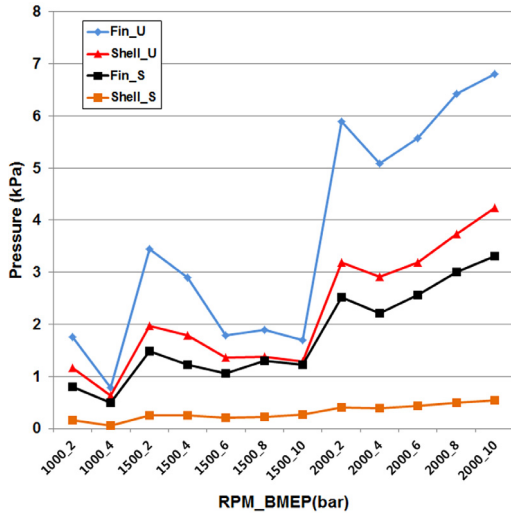


Fig. 4 EGR gas differential pressure at each condition

로 차압이 적게 발생하며, U-bend type보다는 Straight type이 차압이 적게 발생한다. 결국 전, 후단 차압은 내부의 가스가 흐르는 튜브의 저항 차이로 판단되며, 내부저항은 Shell\_S가 가장 작고, Fin\_U가 가장 크다.

### 3.2 각 조건별 냉각수 유량

열교환 효율에는 열교환기를 흐르는 유체의 속도 및 유량이 큰 영향을 미친다. 하지만 워터펌프에서 공급하는 냉각수량은 엔진 RPM에 기인하기 때문에,

EGR 쿨러로 공급되는 냉각수량은 공급관로의 직경과 RPM이 같은 경우 거의 동일해야 한다. 하지만 Fig. 5와 같이 열교환기 내부 저항으로 인하여 EGR 쿨러를 통과하는 냉각수유량이 차이를 보이며, 유량이 가장 높은 쿨러는 Shell\_U이며, Fin\_S가 가장 낮은 냉각수유량을 보였다.

위의 결과를 볼 때 실제 효율 차이는 쿨러 내부 형상에 따른 냉각수공급량과, 가스 접촉부의 형상에 영향을 받는다.

### 3.3 각 조건별 쿨러 입출구 냉각수온차

입출구의 냉각수 온도차를 나타낸 Fig. 6의 결과를 보면, EGR 쿨러 type별로 입, 출구 온도차가 상이하다. 공급되는 냉각수온도는 90°C로 동일하므로, 쿨러의 열교환 성능이 높을수록 쿨러 출구 측 냉각수온 온도차가 커진다. 상대적으로 U-Bend type이 Straight type에 비해 온도차가 크다. 이는 U-bend type의 튜브 내부 저항이 높아 가스유속이 낮아지고 좀 더 오랜 시간동안 열교환을 한 이유이다. 이를 통하여 U-Bend type이 좀 더 열교환성능이 우수할 것으로 예측되었다

### 3.4 각 조건별 쿨러 입출구 가스온도

EGR가스 입, 출구 온도차를 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. 이 결과에서 보여주는 바와 같이 EGR가

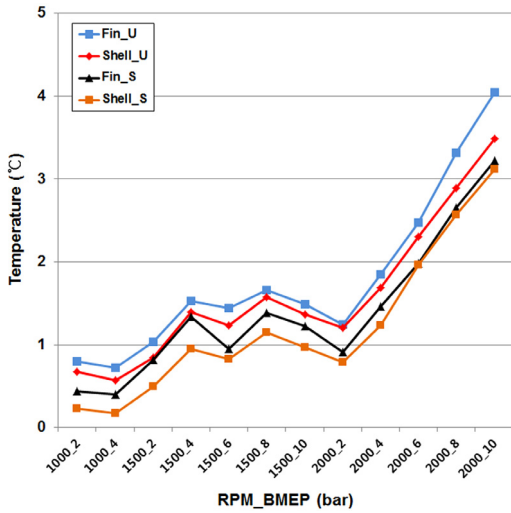


Fig. 6 Coolant inlet and outlet temperature difference at each condition

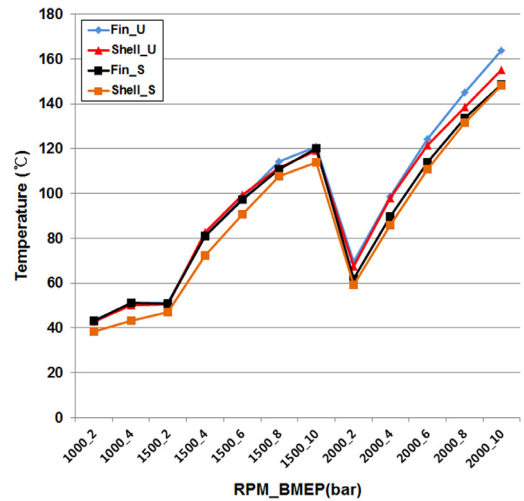


Fig. 8 EGR gas inlet and outlet temperature difference at each condition

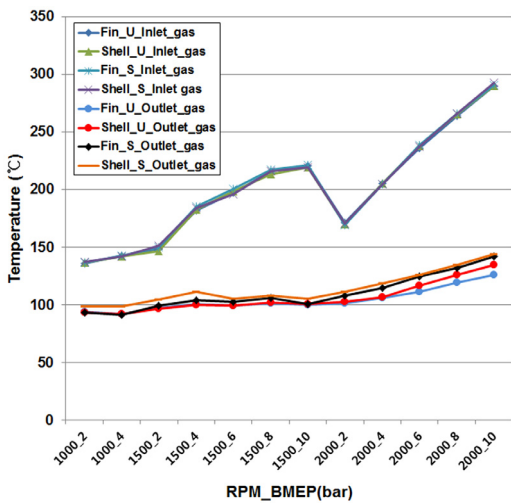


Fig. 7 EGR gas inlet and outlet temperature

스 공급온도는 각 조건별로 동일한 엔진조건에서 수행된 시험으로 유사하나, 쿨러 출구 측 가스 온도는 각 type별로 상이하다. 열교환 성능은 냉각대상의 온도차가 클수록 높기 때문에, 쿨러의 성능은 가스의 입출구 온도차로 예측이 가능하다.

엔진의 회전수와 부하가 높을수록 Fig. 7과 같이 EGR 가스의 온도는 같이 증가한다. 하지만 각 운전 조건마다 Fig. 3과 같이 EGR 가스의 유량이 다르기 때문에 쿨러출구 측 온도는 조건에 따라 상이하게 나타난다. EGR 가스 유량이 증가할수록 쿨러 출구

측 온도가 높아지지만, Fin\_U의 경우 그 증가폭이 다른 type에 비해 낮아 높은 효율을 보일 것으로 예측되었다.

Fig. 7을 기반으로 전, 후단 온도차를 계산하면, Fig. 8과 같다. EGR 가스 유량이 적은부분에서는 Shell\_S 를 제외한 다른 type들은 비슷한 온도차를 보이지만, EGR 가스 유량이 높아질수록 각 type별로 입, 출구 EGR 가스의 온도차의 차이가 두드러진다.

### 3.5 각 조건별 쿨러 열교환 효율

각 운전조건 별 type의 열교환 효율을 구해보면, Fig. 9와 같다. 위에서 언급했던 대로, Shell\_S의 경우 가장 낮은 효율을 보였으며, Fin\_U의 경우 가장 높은 효율을 보여주었다. U-Bend type과 Straight type을 각각 비교해보면, U-Bend type이 상대적으로 효율이 높게 나타난다.

Fig. 9의 각 EGR이 공급되는 부하 조건별 열교환 효율을 평균하면 Fig. 10과 같다. U-Bend로 구성된 Fin-Tube type이 가장 효율이 높으며, Straight type의 Shell-Tube type이 가장 효율이 낮았다. 이를 기준으로 Straight type보다는 U-Bend type으로, Shell-Tube type보다는 Fin-Tube type으로 열교환기를 구성하는 것이 열교환 효율 향상에 유리하다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 주로 사용되는 Straight type의 Shell-Tube EGR 쿨러가 효율이 매우 낮은 이유는, fouling

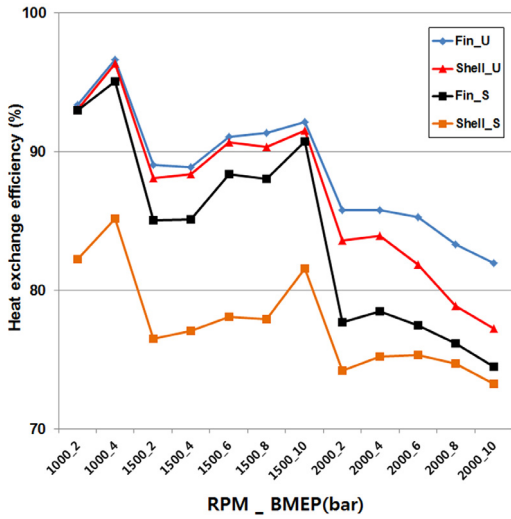


Fig. 9 Heat exchange efficiency at each load of EGR running conditions

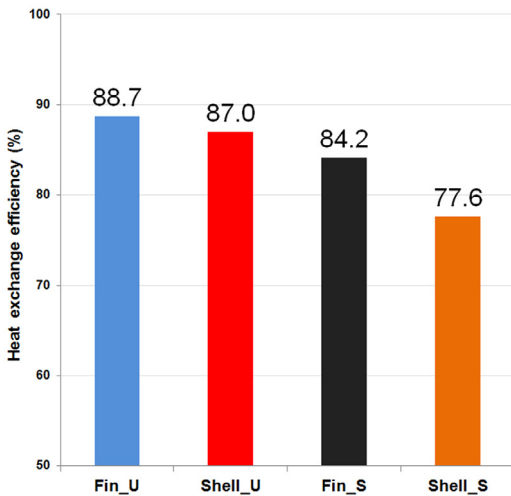


Fig. 10 Average heat exchange efficiency at each EGR cooler types on all load of EGR running conditions

으로 인한 EGR가스 공급량 저하를 막기 위하여 열 전달 효율보다 가스공급에 주력하도록 설계되어 있기 때문이다.

#### 4. 결론

1) 냉각수 유로의 내부 형상으로 인하여 EGR 쿨러로 공급되는 냉각수량은 큰 차이를 보인다. U-Bend type의 경우 직교류로 구성되고, Straight type의 경우 향류로 구성이 되었는데, EGR가스 입, 출구

측이 모두 냉각수온이 상대적으로 낮은 열교환기 입구 측과 접촉하는 직교류 type에 비해 열교환기 가스 측 출구부터 가열되면서 입구 측으로 거꾸로 흐르는 향류 type이 좀 더 냉각에 불리하다.

- 2) 냉각수 유량이 높을수록 Tube와 접촉하는 비가열 냉각수의 양이 증가되기 때문에 열교환 효율이 상승한다. Straight type에 비해 U-Bend type이 열교환기 내부의 냉각수 저항이 적어, 더 많은 냉각수유량이 공급되어 상대적으로 높은 효율을 보였다.
- 3) 동일한 U-Bend type에서는 Shell-Tube type의 스파이럴 tube가 Fin-Tube type보다 냉각수온의 온도차가 컸으나, EGR 가스 냉각효율은 가스 측 난류강도를 높일 수 있는 구조를 가진 Fin-Tube type이 높았다.
- 4) EGR 쿨러 입, 출구 차압은 열교환기 type에 따라서 그 차이를 크게 보이며, 가스 측 차압이 증가할수록 열교환 효율 역시 증가하였다. 각 type은 모두 동일한 가스 측 전열면적을 가지지만, 효율 차이를 보이는 이유는 Fin type이 Tube type에 비해 EGR 가스가 쿨러 내부에서 와류를 좀 더 적극적으로 발생시키면서 열교환 효율을 증대시키고, Straight type보다 U-bend type이 내부의 튜브 저항이 증가하여 상대적으로 긴 시간동안 가스를 냉각시켰기 때문이다.
- 5) EGR 쿨러 type 중 Fin-Tube type이 Shell-Tube type에 비하여 열교환 효율이 높으며, Straight type보다는 U-Bend type이 열교환 효율이 높다. 하지만 Fin-Tube type의 경우 높은 효율을 가짐에도 불구하고 디젤엔진에 적용 시 내부저항으로 인하여 fouling이 쉽게 퇴적되어 디젤엔진을 장기간 쿨링하는 데에는 무리가 있기 때문에 Shell-Tube로 구성하는 것이 내구성 측면에서 유리하다. 가솔린엔진에 EGR쿨러를 적용하는 경우 디젤엔진에 비하여 상대적으로 PM 배출량이 적기 때문에 Shell-Tube type보다 Fin-Tube type을 적용하는 것이 유리하며, 효율이 높아 소형, 경량화에도 이득이 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 한라비스테온공조의 산학연구(과제번호

호 20140000000304) 지원으로 수행된 연구결과로서, 관계자 여러분에게 감사드립니다.

### References

- 1) K. W. Choi, B. H. Moon, K. B. Kim and K. H. Lee, "A Study on the Combustion Characteristics by EGR Gas Temperature in Diesel Engine," The 41th KOSCO Symposium, pp.355-359, 2010.
- 2) K. P. Patel, Study of NO<sub>x</sub> and Loading of a Soot Filter versus EGR for a 2.4L Diesel engine, M. S. Thesis, University of Tennessee, Knoxville, 2001.
- 3) J. Lee, J. I. Moon and Y. H. Kim, "A Study on Heat Exchange Efficiency of EGR Cooler for Diesel Hybrid," Transactions of KSAE, Vol.17, No.2, pp.159-164, 2009.
- 4) S. J. Hwang, M. C. Kim, S. H. Jang and H. M. Kim, "Effects of Pitch Length of Stack-type EGR Cooler on Heat Exchange Characteristics in a Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.18, No.2, pp.135-140, 2010.
- 5) Y. H. Seo, S. H. Heo, T. W. Ku, W. J. Song, J. Kim and B. S. Kang, "Study on Heat Exchanger Efficiency of EGR Cooler with Dimpled Rectangular Tube Shape for Application of Diesel Vehicles," Transactions of KSME-B, Vol.32, No.10, pp.769-775, 2008.
- 6) H. S. Huh and Y. K. Suh, "Study on the Heat Transfer Characteristics for Some EGR-cooler Designs," Annual Spring Conferences of KSME, pp.1306-1310, 2002.