

튜브형상에 따른 배기가스 재순환 냉각 장치 열전달 성능 평가

손 창 현*

경북대학교 기계공학부

Heat Transfer Analysis of EGR Cooler with Different Tube Shape

Chang-Hyun Sohn*

Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

(Received 8 January 2007 / Accepted 23 March 2007)

Abstract : With the Euro-4 regulation coming into effect, the domestic car industry is forced to look for newer options to reduce NOx in the exhaust. EGR (Exhaust Gas Recirculation) Cooler is an effective method for the reduction of NOx from a diesel engine. High efficiency, low pressure loss and compactness are desirable features of an EGR Cooler. The cooling performance of EGR depends on the shape of tubes and the location of the entrance and exit. This paper reports the computational work conducted to estimate the performance of EGR cooler with three different cross section tubes and a triangular spiral tube. Three dimensional computation results show that the triangular tube is more effective than circular and rectangular tube. The most effective geometry is a triangular spiral tube with offset inlet and outlet locations.

Key words : EGR(배기가스 재순환), EGR cooler(EGR 냉각장치), EURO-4, Triangular spiral tube(삼각형 나선 튜브), NOx(질소산화물)

1. 서론

최근 통계를 보면 한국 자동차산업의 괄목할 만한 성장을 피부로 느낄 수 있다. 이러한 자동차 산업의 호황 기조를 지속적으로 이어나가기 위해서는 향후 자동차 산업의 환경 변화에 적응할 수 있는 준비를 해야 할 것이다. 현재 나타나고 있는 변화 중에서 가장 시급하고 현실적인 것은 환경 분야이다. 최근 선진국들을 중심으로 지구 환경 보호와 무역을 연계한 새로운 형태의 무역 규제 제도를 도입하려는 움직임이 가시화되고 있다. 특히 배기가스 규제는 현재 무역 장벽으로 작용하고 있어 주요 수출 대상국들의 환경 규제를 만족시키지 못한다면 제품의 성능이나 가격 경쟁력과 상관없이 수출이 불가능한

실정이다. 따라서 현재 자동차 산업에 있어서 환경 관련 기술 혁신이 어느 때 보다도 중요한 시기라고 판단된다.

전 세계적으로 대기 공해 개선에 대한 사회적인 요구로 인하여 디젤엔진의 배출가스 공해 규제는 한층 강화되고 있다. 이러한 배출가스 공해 규제의 강화는 대기오염방지 및 개선이라는 측면에서는 바람직하나, 수송 및 산업용의 주 동력원으로 사용되는 대형 디젤엔진 연비 악화를 수반함으로써, 지구 온난화의 주요인이 되는 이산화탄소와 질소산화물, 입자상 물질 등을 배출한다.

디젤엔진의 배기규제가 엄격해지면서 냉각 EGR의 필요성이 강조되고 있다. 연비와 입자상 물질(PM)의 증가 없이 NOx를 저감시키는 방법으로 기존의 EGR 밸브에 엔진냉각수를 이용한 열교환 장

*Corresponding author, E-mail: chsohn@knu.ac.kr

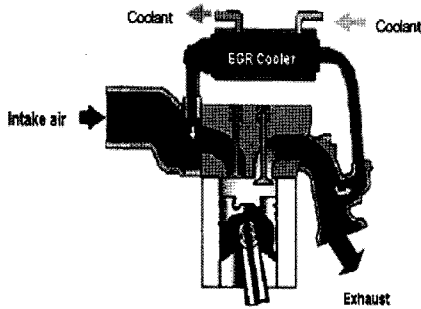


Fig. 1 Diesel engine with a EGR coolerer

치를 설치함으로써 비교적 적은 투자로서 NOx 감소에 큰 효과를 얻을 수 있는 방법이다.¹⁻⁴⁾

Fig. 1에서 EGR Cooler를 장착한 엔진의 개략도를 보여주고 있다. 배기가스 재순환 장치는 배기가스 중의 일부를 다시 흡기관으로 보내 연료와 공기를 혼합시켜 연소실로 유입되게 한다. 배기가스를 재순환시키면 새 혼합기의 충전율은 낮아지게 된다. 그리고 재공급된 배기가스는 더 이상 연소 작용을 할 수 없기 때문에 동력 행정시의 연소 온도가 낮아지게 된다. 연소온도가 낮아지면 질소산화물(NOx)의 양은 현저하게 감소한다.

배기가스를 냉각하여 연소실로 공급하는 Cooled EGR은 연소실 내의 온도를 더욱 낮출 수 있고 낮은 온도의 배기가스의 체적 감소로 인해 새 혼합기의 충전율을 높여 줌으로써 질소 산화물의 생성을 줄이는데 도움을 준다.⁵⁾

본 연구에서는 열교환기인 EGR Cooler의 냉각수 입출구의 위치와 재순환 배기가스가 통과하는 튜브의 형상을 변화시켜 열유동 해석을 통하여 열전달 성능을 평가 하였다.

2. 연구 내용 및 방법

Fig. 2는 배기가스 재순환 냉각 장치의 구조와 내부에서 배기가스와 냉각액의 흐름을 보여준다. 계산에 사용한 EGR Cooler의 길이는 228mm이고 직경은 54mm이다. 배기가스는 직경7mm의 19개의 튜브 내부를 통해서 지나가게 되고, 냉각액은 배기가스가 지나가는 튜브들 사이로 유동하면서 열교환을 한다. 열교환이 잘 이루어지도록 하기 위해서는 유동의 방해물 최소화 하면서 냉각액과 배기가스의 열

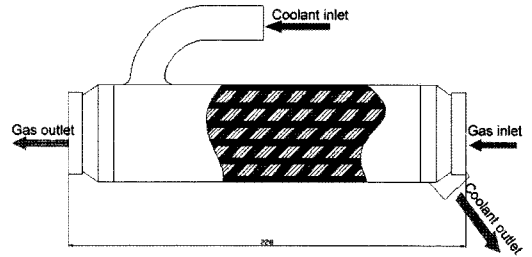


Fig. 2 Flow direction of the coolant and exhaust gas in EGR cooler

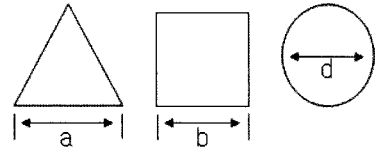


Fig. 3 The shape of tubes

Table 1 Hydraulic diameter of an each tube shape

	Triangle	Square	Circle
Hydraulic diameter (D)	$\frac{\sqrt{3}}{3}a$	b	d
Perimeter (S)	$3\sqrt{3}d$	$4d$	πd

전달 면을 증가시키는 것이 중요하다.

Fig. 3은 본 연구에서 고려한 세 가지 튜브의 형상을 보여주고 있다. 세 가지 튜브 형상 모두 동일한 수력 직경(hydraulic diameter)을 가지게 하였으며, 수력직경 식은 (1)과 같다.

$$D = \frac{4A}{S} \tag{1}$$

여기서 A는 도형의 면적이고 S는 도형의 테두리 길이이다. (1)식으로 계산된 수력직경은 Table 1과 같이 된다. 세 종류의 튜브 형상이 동일한 수력직경을 가지므로($D_T = D_S = D_C$), 수력직경 식 (1)로부터 $\sqrt{3}a/3 = b = d$ 이 된다. 따라서 원관 직경 d를 기준으로 각 형상의 길이를 나타내면 $a = \sqrt{3}d$, $b = d$ 가 되어 $S_T = 3\sqrt{3}d$, $S_S = 4d$, $S_C = \pi d$ 가 된다. 계산한 결과에서 동일한 수력직경을 가지는 세 가지의 형상 중에 삼각형 형상이 가장 긴 테두리(S)를 가지기 때문에 그만큼 열교환을 할 수 있는 표면적이 크다는 것을 의미한다. 원형단면에 비해 삼각형 단면의

표면적은 약 1.65배 정도 증가한다. 본 수치실험에서 비교한 세 가지 형상 중에 표면적이 가장 큰 삼각형 튜브와 일반적인 형태의 원형 튜브를 수치해석하여 열전달 성능을 비교하였다.

수치해석에 사용된 배기가스 재순환 냉각장치의 형상은 Fig. 2에서와 같이 19개의 튜브 내부를 통해 배기가스가 순환되며, 튜브 외부를 냉각액이 배기가스와 반대 방향으로 흐르면서 배기가스를 냉각하고 있고, 냉각액의 유입구와 유출구가 동일한 평면에 위치하고 있다.

열유동해석은 상용프로그램인 CFD-ACE를 사용하였고 2차의 정확도를 가지는 풍상차분법(Upwind Scheme)을 적용하였으며, Fig. 4에 EGR Cooler해석을 위한 격자형상을 보여주고 있다. 냉각액은 물을 사용하였으며, 배기가스와 냉각수의 입구조건은 Table 2에 나타내었다.

본 연구에서는 Table 3에서와 같이 5가지의 경우를 계산하였다. Case 1은 층류유동인 경우의 원형관에 대한 계산이며, Case 2는 원형관의 경우이면서 유동 조건은 난류유동 조건이다. 사용한 난류 모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. Case 3의 경우는 원형 단면을 가지는 튜브를 사용한 경우이면서 냉각액의 유입구와 유출구가 Fig. 5에서와 같이 70° 회전되게 계산한 경우이다. Case 4는 삼각형 튜브를 사용한 경우이며, Case 5는 삼각형 튜브를 나선형으로 꼰 튜브에 대하여 해석을 하였다.

Table 2 Inlet conditions for exhaust gas and coolant

	Temperature (°C)	Pressure (kPa)	Mass Flow Rate
Gas	500	ABS 260	0.0389 kg/sec
Coolant	90	ABS 130	5.83 m ³ /sec

Table 3 Various cases considered

Case	Shape of tube	Flow condition	Remark
1	Circle	Laminar	Aligned inlet and outlet
2	Circle	Turbulent	Aligned inlet and outlet
3	Circle	Turbulent	70° different inlet and outlet position
4	Triangle	Turbulent	Aligned inlet and outlet
5	Triangle	Turbulent	Aligned inlet and outlet, Spiral tube

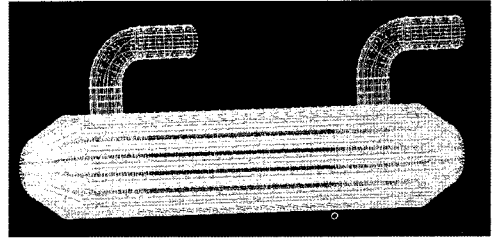
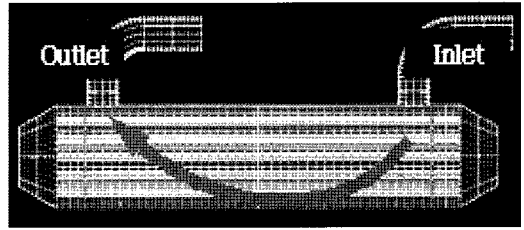
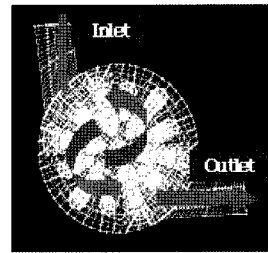


Fig. 4 Grid system of EGR cooler for circular duct



(a) Aligned inlet and outlet locations (Case 2)



(b) Rotated inlet and outlet location (Case 3)

Fig. 5 Modifying inlet and outlet locations

3. 수치해석 결과

수치해석에 있어서 계산 결과의 격자 의존성을 확인하기 위해 격자수를 변화하면서 계산을 수행하였다. Fig. 6은 격자수의 변화에 따른 배기가스의 입구와 출구 온도 차이를 나타내고 있다. 150,000이상의 격자수에 대해서는 계산 결과의 변화가 거의 없어, 본 수치해석에서 사용한 격자수는 150,000로 하였다.

Table 4는 각각의 형상과 조건에 대한 수치해석의 결과인 냉각액과 배기가스의 유입구와 유출구의 온도와 온도차 그리고 열전달 향상 효과를 Case 1의 배기가스 온도 차이를 기준으로 상대적 변화율 ($Effect = (\Delta T - \Delta T_{case1})_{gas} / \Delta T_{case1}$) 을 나타내었다. 유입구와 유출구의 온도차가 많을수록 열교환이 잘 이루어졌음을 나타낸다.

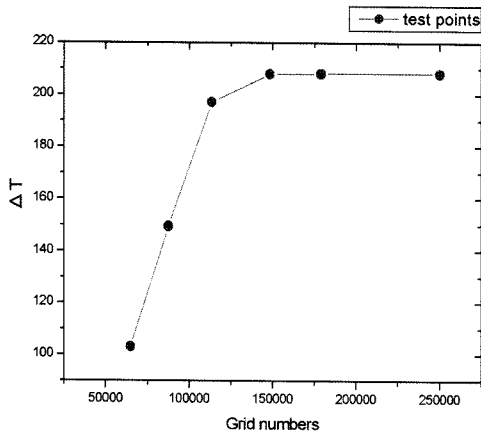


Fig. 6 Test results of grid number dependency

Table 4 Computational results for considered cases

Case	Water(K)			Gas(K)			Effect (%)
	T_{in}	T_{out}	ΔT	T_{in}	T_{out}	ΔT	
1	363	366	3	773	599.8	173.2	-
2	363	366.6	3.6	773	565.1	207.9	20.03
3	363	366.7	3.7	773	559.3	213.7	23.38
4	363	367.1	4.1	773	541.4	231.6	33.72
5	363	368	5.1	773	478.4	294.6	70.09

Table 4에서 Case 1의 층류유동 결과는 냉각수와 배기가스의 입구와 출구의 온도 변화는 각각 3K와 173.2K으로 계산되었다. Case 2인 난류유동일 경우에는 각각 3.6K와 207.9K으로 계산되어 난류유동이 층류유동보다 열전달 성능이 향상됨을 알 수 있다. 열전달 향상 효과는 Case 1에 비해 배기가스 온도 차이를 기준으로 약 20% 배기가스 냉각효과가 증가되었음을 알 수 있다.

Fig. 7은 Case 2의 온도 분포를 나타내고 있다. 같은 평면에 냉각액의 유입구와 유출구가 있는 경우에 Fig. 5(a)의 개략적으로 화살표로 표시한 것 같은 방향으로 주 냉각액이 흐르고, 냉각액과 배기가스의 열교환은 EGR Cooler의 상부에 비해 하부에서 많이 일어나서 냉각액의 온도가 하부에서 증가하고 있음을 알 수 있다.

Case 3은 유입구와 유출구의 위치를 70°정도 회전하여 어긋나게 위치를 변경함으로써 유동이 냉각장치 내부를 선회하도록 유도하였다. Table 4에 표시한 Case 3의 결과와 같이 냉각수와 배기가스의 온도

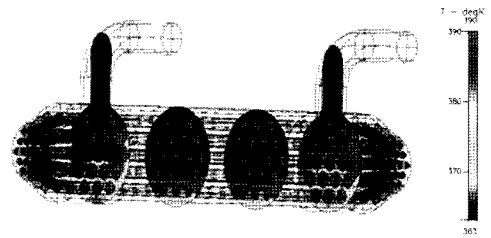


Fig. 7 The circle shape tube (Case 2)

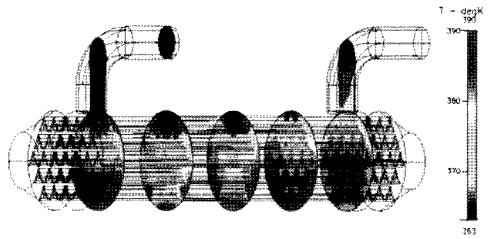
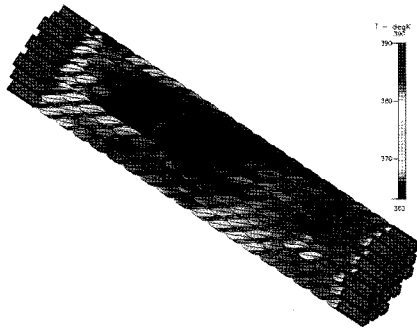


Fig. 8 The triangle shape tube (Case 4)

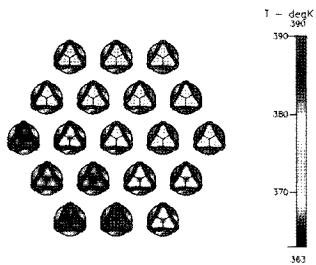
변화는 3.7K와 213.7K로써 냉각수의 유입구와 유출구를 조정하면서 열교환이 보다 많이 이루어져 Case 2에 비해 배기가스의 냉각 효과는 증가하였다.

Fig. 8은 Case 4의 경우로 난류유동과 삼각형 단면의 튜브를 사용하였고 냉각액의 유입구와 유출구는 같은 평면에 있는 경우이다. 형상의 특성 때문에 부분적으로 비정렬 격자를 사용하였고 정렬 격자수는 98,768개와 비정렬 격자수는 156,324개를 사용하였다. 원형 단면 형상인 Fig. 7과 삼각형 단면 형상의 Fig. 8을 비교해 보면 삼각형 형상의 튜브일 때 냉각수가 보다 높은 온도를 가지는 것을 확인할 수 있다. 참고로 Fig. 7과 Fig. 8의 온도 변화 스케일은 363K에서부터 최고 390K로 같으며, 다른 온도변화 그림도 동일한 스케일을 사용하여 온도변화를 비교하였다. 냉각수의 온도가 높은 만큼 열교환이 많이 이루어져서 배기가스의 냉각에 더 효율적임을 알 수 있다. Table 4의 해석 결과를 살펴보면 Case 1에 비해 배기가스의 냉각효과는 33.7% 증가하였음을 알 수 있으며 이는 원형 형상의 튜브에 비해 증가한 표면적과 삼각형 형상으로 인한 난류유동의 혼합이 증가하였기 때문이라 판단된다.

Fig. 9에서와 같이 열교환기의 성능을 극대화를 위해 파배기와 같이 끈 형상의 튜브를 고안하였다.^{6,7)} Fig. 9는 Fig. 8와 동일한 조건에서 끈 튜브 형상을 수치 해석한 결과로 튜브를 통과하는 배기가



(a) triangular spiral tube (Case 5)



(b) temperature distribution at cross section

Fig. 9 The temperature distribution of exhaust gas in the triangular spiral tube

스의 온도분포이다. Table 4의 배기가스 온도차이로 구한 냉각효과를 보면 약 70%의 배기가스 냉각 효과가 증대하였음을 알 수 있다. 이는 삼각형의 나선 튜브(Triangular spiral tube)는 삼각형 단면의 형상이 꼬여져서 유동에 대한 장애는 크지 않으면서 튜브 주위로 선회유동을 유발시키고, 냉각수와 접하는 면적이 증가하여 보다 많은 열교환을 이룰 수 있기 때문으로 판단된다. 같은 삼각형 튜브의 형상이지만 열전달 향상효과가 Case 4의 33.7%의 증대효과에 비교하여 2배 이상의 70.1%의 냉각 효과 증대는 나선 튜브에 의한 튜브 주위로의 선회유동과 이로 인한 난류 혼합에 의한 열전달 효과가 상대적으로 중요하다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 10과 Fig. 11의 결과는 냉각액의 경우와 배기가스 경우의 온도차를 나타낸 것으로 냉각수와 배기가스의 온도 변화를 뚜렷하게 알 수 있다. 그리고 냉각액의 유입구에서 유출구로의 온도증가는 에너지 보존에 의해 배기가스의 유입구에서 유출구로의 냉각된 온도 차와 같음을 두 그림의 비교를 통해 알 수 있다. Fig. 12에서는 각각의 경우에 대한 배기가

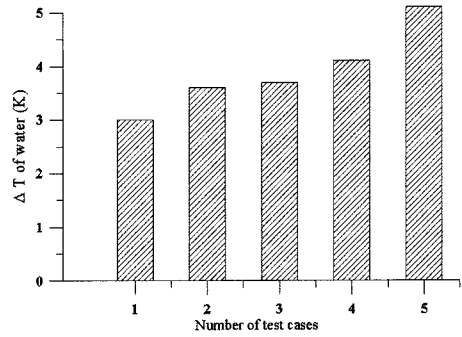


Fig. 10 ΔT of water with different cases

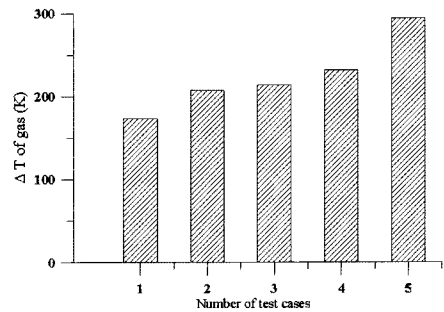


Fig. 11 The ΔT of gas with different cases

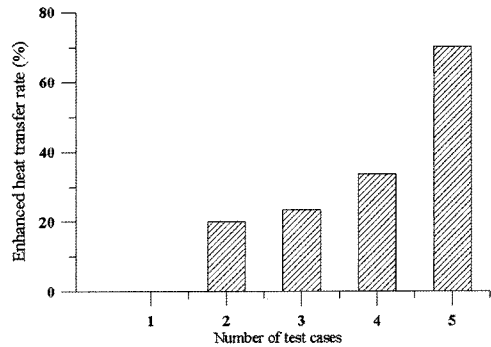


Fig. 12 Enhanced heat transfer rate compared with first case

스의 냉각효과 증대를 그래프로 나타내었으며, 삼각형의 나선 튜브를 사용한 경우가 열교환이 가장 많이 이루어졌음을 알 수 있다. 그러나 삼각형 튜브의 곧 형상의 제작은 원형관에 비해 제작의 어려움과 제작 단가의 증가가 예상된다.

4. 결론

본 연구는 디젤엔진의 NOx 저감을 위해 장착하는 EGR Cooler의 열교환 성능을 증가시키기 위해

튜브 형상을 변화시키면서 배기가스 냉각 성능을 수치 해석적으로 평가하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수력직경이 동일할 때, 원형과 사각형 단면의 튜브보다 삼각형 단면을 가질 경우에 튜브의 표면적 증가로 열교환 효율이 증가한다.
- 2) 동일한 위상에 있는 냉각수 유입구와 유출구의 위치를 70° 회전되게 조정하여 냉각장치 내부의 냉각수 유동을 선회하도록 유도함으로써 열교환이 증대한다.
- 3) 수치해석한 결과들 중에서 삼각형의 나선 튜브를 적용한 결과가 배기가스 냉각 효과가 가장 높다. 이는 유동의 흐름을 방해하지 않으면서 표면적의 증가와 튜브 형상을 따라 유동의 선회를 유발하여 난류 열전달이 증가하였기 때문이다.

후 기

본 연구는 일부 교육부 BK21 사업의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) A. Tsolakis, A. Megaritis and M. L. Wyszynski, "Effects of Reformed EGR on the Diesel

Engine Smoke-NOx Emissions Trade-off," Proceedings of the Ninth Postgraduate Research Symposium, pp.30-34.

- 2) W. Marshall, G. L. Schumacher and S. Howell, "Engine Exhaust Emissions Evaluation of a Cummins L10E when Fueled with a Biodiesel Blend," SAE 952363, 1995.
- 3) N. Ladommatos, R. Balian, R. Horrocks and L. Cooper, "The Effect of Exhaust Gas Recirculation on Combustion and NOx Emissions in a High-speed Direct-injection Diesel Engine," SAE 960840, 1996.
- 4) H. S. Heo, J. P. Won and K. S. Park, "Evaluation of Thermal Fluid Characteristics for EGR Cooler with Spiral Type," Transactions of KSAE, Vol.11, No.6, pp.44-50, 2003.
- 5) K. M. Chun "EGR Technology," Auto Journal, KSAE, Vol.28, No.6, pp.46-51, 2006.
- 6) L. Charnay, L. Anderson, B. Palm and L. Ostling, "CFD Optimization of an EGR Cooler for Heavy-Duty Diesel Engines," SAE 2001-01-1755, 2001.
- 7) M. H. Mehta and M. Raja, Heat Transfer and Tubes for Horizontal Condensers, Advanced in Enhanced Heat Transfer, San Diego, 1979.