

하이브리드 디젤엔진용 EGR 쿨러의 열교환 효율 연구

이 준^{*1)} · 문 전 일¹⁾ · 김 연 혁²⁾

호서대학교 로봡공학과¹⁾ · 호서대학교 산학협력중심대학²⁾

A Study on Heat Exchange Efficiency of EGR Cooler for Diesel Hybrid

Joon Lee^{*1)} · Jeon-Il Moon¹⁾ · Yeon-Hee Kim²⁾

¹⁾Department of Robotic Engineering, Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea

²⁾CIACCU of Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea

(Received 25 August 2008 / Accepted 28 October 2008)

Abstract : Cooled EGR system is an effective method for the reduction of NO_x emission and PM emission from a diesel engine. Proper choice of wavy cooling fins and gas tubes is a key factor of cooled EGR system. As a part of solutions for energy crisis and environmental problems, hybrid vehicles mounted with diesel engines are under development globally. This study investigates the cooled EGR systems for hybrid diesel engine with the specifications of both optimized wavy cooling fins and improved shape of structure to verify the heat exchange efficiency, outlet temperature and gas pressure drop of cooler by means of numerical analyses and rig performance tests. The output of this study will be applied to a 2.0L hybrid diesel engine which is being developed for domestic and overseas market.

Key Words : EGR system(배기가스 재순환 장치), EGR cooler(배기가스 재순환 냉각기), Wavy-fin(파형 핀), Hybrid diesel(하이브리드 디젤), NO_x(질소산화물), Particulate matter(입자상 물질), PM deposit(입자상물질 부착 현상)

1. 서론

1896년 Rudolf Diesel에 의해 발명된 디젤엔진은 구조특성상 가솔린 엔진에 비하여 고효율, 저 연비, 저 CO₂ 배출 및 우수한 내구성 등과 같은 장점으로 자동차 및 산업계에 널리 쓰이고 있다.

최근 유럽 및 북미, 일본을 중심으로 차세대 자동차로 각광받고 있는 가솔린 하이브리드 차량에 디젤엔진을 탑재한 디젤 하이브리드 차량의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 그러나 디젤엔진의 배기에는 NO_x(Nitro Oxides: 질소산화물)와 PM(Particulate Matter: 입자상 물질)이 배출되는데 발암성 물질로 알려지게 되면서 대기오염의 주범으로 인식되고

있다. 특히 디젤엔진에서 NO_x와 PM 모두를 동시에 줄이는 일은 용이하지 않다. 이들의 관계는 상호 트레이드오프(trade-off) 관계에 있기 때문이다.^{1,2)} NO_x를 저감시키기 위해 널리 적용되고 있는 배기가스 재순환 장치(EGR System)의 성능향상을 위해서 엔진의 냉각수를 이용하여 강제 냉각시키는 수냉식 쿨러(cooler)를 장착하여³⁾ 재순환 배기가스의 온도를 낮추어 NO_x와 PM을 같이 저감시키는 cooled EGR system에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{4,5)}

CO₂와 같은 온실가스에 의한 지구온난화의 심화 및 최근 폭등하는 유가의 심각한 위협으로부터 디젤 하이브리드 자동차의 개발이 절실히 요구되어지고 있다.

*Corresponding author, E-mail: leejoon@office.hoseo.ac.kr

본 연구에서는 국내 완성차업체에서 개발되고 있는 하이브리드 디젤엔진에 적합한 EGR cooler의 제원을 제안하고 시제품 개발과 성능시험을 통해 그 우수성을 입증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 EGR cooler의 개념설계

본 연구에서는 하이브리드 엔진에 적용되는 고성능 소형 EGR cooler의 개발을 위해 아래와 같은 설계 개념을 선택하였다.

- 1) 배기가스 유입면적 극대화, 유동흐름 방해 면적 최소화
- 2) 가스 유동성 향상 및 유속 증대
- 3) 가스 및 냉각수 압력손실 저감
- 4) Anti-Fouling성 증대를 통한 내구성 확보
- 5) 전열면적 극대화
- 6) NO_x 저감으로 배기가스 규제 능동 대응 등

wavy-cooling fin이 각각 삽입된 oval형 가스튜브와 square형 가스튜브가 EGR cooler의 내부에 조립된 구조로 되어 있다.

Fig. 1은 oval형 EGR cooler 개념도이고 Fig. 2는 square형 EGR cooler의 개념도이다.

현재 양산 되고 있는 shell & tube형 EGR cooler는 내부에 다수의 원형 가스튜브를 삽입하고 튜브표면에 나선형 홈을 만들어 가스의 난류를 형성하는 구조로 되어 있다.⁵⁾

전체 열전달은 가스튜브 외벽과 나선형 홈에 의해 이루어진다.

oval 가스튜브형 EGR cooler는 기존의 shell & tube형 EGR cooler에 비해 열교환 면적을 증대시키기 위해 가스튜브 형상을 변경하고 wavy-fin을 내부에 삽입하였다.

square 가스튜브형 EGR cooler는 가장자리가 반원인 oval형 가스튜브형상을 square형으로 변경하여 oval 튜브의 양쪽 R부로 인한 불필요한 공간을 제거하여 열교환 면적을 더 증대시켰다.

열전달기구는 내부에 삽입된 wavy-fin에 의해 난류가 형성되고 이 얇은 fin에 의해 1차적인 열교환이 발생된 후에 가스튜브로 전달되어 냉각수에 의한 2차 열교환이 일어난다.⁶⁾

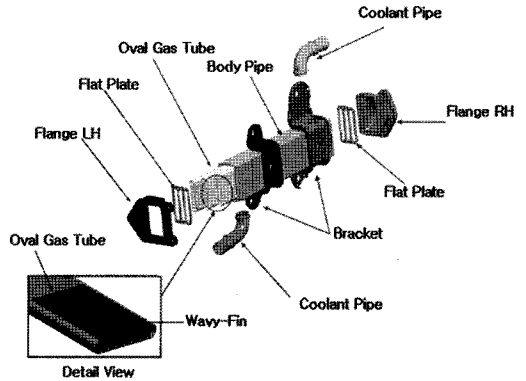


Fig. 1 Concept of oval gas tube type EGR cooler

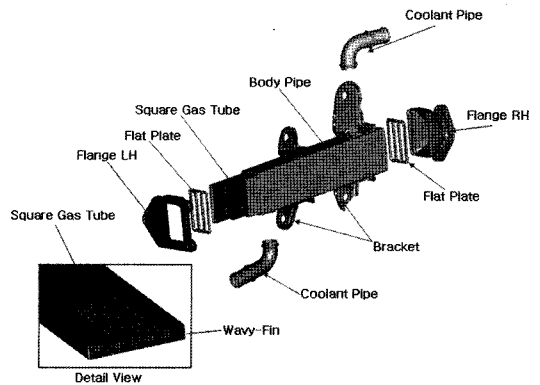


Fig. 2 Concept of square gas tube type EGR cooler

2.2 EGR cooler의 시제작

국산 2L급 하이브리드 디젤엔진에 탑재 가능한 레이아웃의 EGR cooler를 시제작 하였다. Fig. 3은 oval 및 square 가스튜브에 각각 wavy-fin을 삽입한 EGR cooler 시제품 사진이다.

Fig. 4는 oval 가스튜브형 EGR cooler 내부의 oval 가스튜브와 wavy fin이 조립된 세부 형상 사진이다.

Fig. 5는 Square 가스튜브형 EGR cooler 내부의

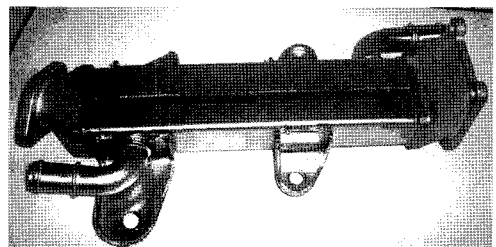


Fig. 3 Sample of EGR cooler with wavy-fins

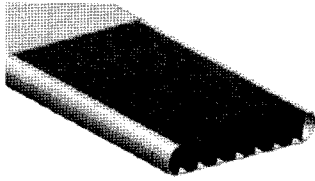


Fig. 4 Detail view of oval gas tube with wavy-fin

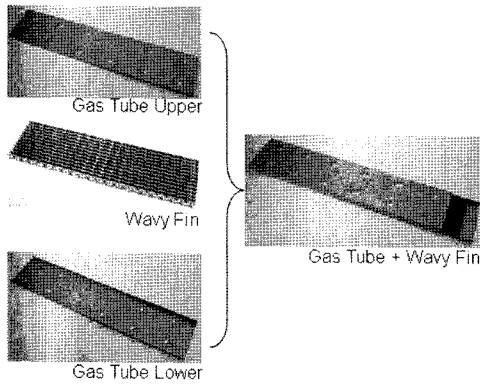


Fig. 5 Detail view of square gas tube with wavy-fin

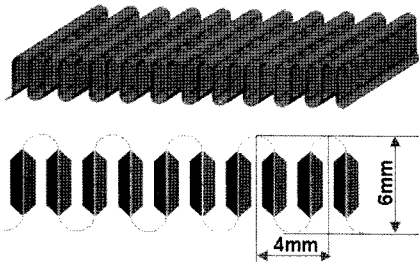


Fig. 6 Detail view of wavy-fin

Square 가스튜브와 wavy fin이 조립된 세부 형상 사진이다. 그림에서 보듯이 조립성 향상을 위해 튜브가 상부와 하부로 나누어져 있고, 그 사이에 wavy-fin을 삽입하여 브레이징 용접하는 방식으로 되어 있다.^{7,8)}

Fig. 6은 EGR cooler에 적용된 wavy-fin의 개략도이다. fin의 높이는 6mm 이고, 피치는 4mm이다.

2.3 유동해석 결과

본 연구에서는 가스튜브 형상과 wavy-fin의 종류에 따른 열전달 효율 및 압력강하를 예측하기 위해서 Table 1과 같은 2 가지 경우에 대한 열유동 해석을 실시하였다.

유동해석은 상용 Fluent 프로그램을 사용하였고

Table 1 Specification of gas tube & wavy-fin for CFD Analysis

Tube type	Tube spec.	Wavy fin
Oval	H51.1×W7.3×0.6t (3ea)	Round type(0.2t) Pitch 4, 11 fins
Square	H51.1×W7.3×0.6t (3ea)	Round type(0.2t) Pitch 4, 12 fins

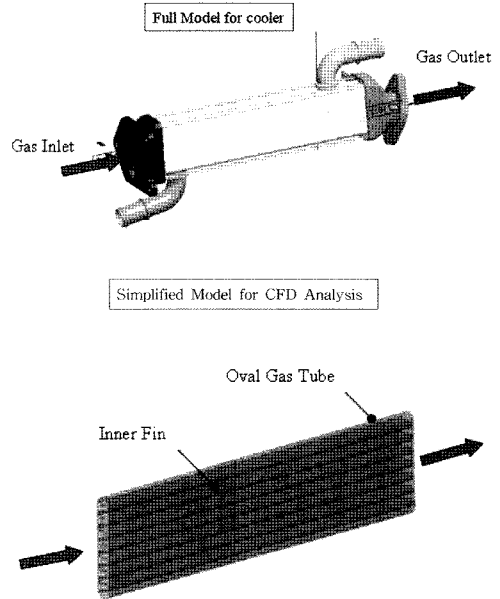


Fig. 7 Model for CFD Analysis

난류모델은 표준 K-ε모델을 적용하였다.

이산화법으로는 2차 upwind scheme을 사용하였으며 벽조건은 shell conduction 상태에서 가스튜브 재질인 stainless의 물성치를 넣었다. Fig. 7은 열유동 해석을 위한 모델을 나타낸다. 각각의 oval 가스튜브 및 square 가스튜브에 동일 유량이 유입되고 냉각수는 온도상승이 없을 정도로 충분히 공급된다는 가정 하에 해석을 수행하였다. 해석을 위한 경계조건은 완성차업체에서 제공한대로, 가스입구온도 452°C, 유량 63kg/hr, 가스튜브 벽면온도는 90°C로 적용하였다.

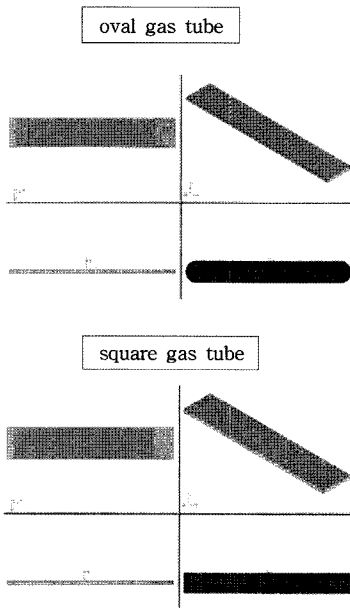


Fig. 8 Mesh shape for CFD Analysis

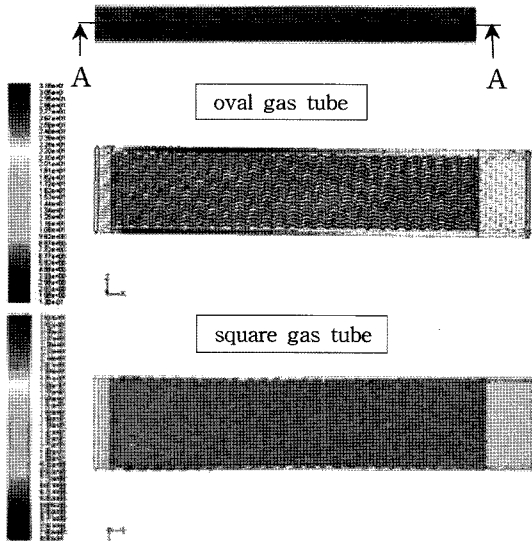


Fig. 9 Velocity vector distribution (section A-A)

Fig. 8은 해석에 사용된 oval 및 square 가스튜브의 격자 형상을 보여주고 있고 Fig. 9는 유동해석 결과 가스의 속도 벡터를 나타내고 있다.⁹⁾

Table 2에 유동해석의 결과 값을 나타내었다.

해석 결과를 보면 열전달튜브를 oval에서 square 형으로 변경 시 압력강하 폭이 증가되고 열전달효율이 증대됨을 알 수 있다. 이는 fin이 1산 더 들어감

Table 2 Result of CFD analysis

Gas inlet temp. (°C)	452	
Gas flow rate (kg/h)	63	
Coolant inlet temp. (°C)	90	
Coolant flow rate (L/h)	20	
Tube type	Oval tube	Square tube
Gas ΔT (°C)	311.1	319
Gas pressure drop. (kPa)	1.66	1.98
Gas outlet temp. (°C)	140.9	133
Efficiency (%)	85.9	88.1
Heat transfer rate (W)	5817	5964

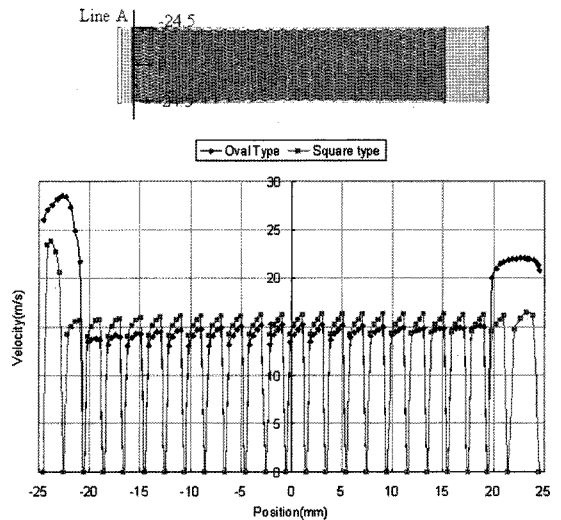


Fig. 10 Velocity profile at Line A

으로 인한 고른 속도분포 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 10은 oval tube 및 square tube에 대한 Line A에서의 유동해석 결과에 따른 속도분포를 나타낸다.

oval 및 square 튜브의 fin 없는 양쪽 가장자리를 제외하고 fin이 존재하는 위치에서의 평균속도를 보면 oval 튜브에서는 14.3m/s이고 square 튜브에서는 15.3m/s의 값을 보여주고 있다.

oval 튜브의 양쪽 가장자리에서의 급격한 속도 증가 및 band width가 감소함으로 인해 fin 존재위치에서의 평균속도가 1m/s 증가함으로서 oval 튜브 대비 square 튜브 사용 시 유동분포가 훨씬 개선됨을 알 수 있다.

2.4 성능 시험 결과

각각의 시험은 자동차 회사의 성능 시험 기준에

준하였고 엔진회전수를 달리하는 두 가지 조건에서 동일한 시험을 수행하여 그 결과를 비교 분석하였다.

Table 3은 oval형 및 square형 EGR cooler 시험조건으로 엔진회전수를 1700rpm과 2500rpm으로 Table 4와 같이 총 4가지 경우에 대하여 시험을 수행하였다.

Fig. 11은 EGR cooler 단체 rig 방열시험기와 cooler의 성능시험 사진을 보여준다.

Table 5는 Table 3의 시험조건에서 Table 4의 총 4가지 case의 성능 시험 결과를 나타낸다. 방열효율은 case 4인 Square type의 경우가 각각 92.6, 91.4%로 가장 좋은 결과를 보이고 있고, 가스측 압력강하도 허용범위 내의 결과를 보이고 있다.

Table 3의 시험조건에서 각 case별 결과를 도식화하여 Fig. 12는 각 case별 열전달효율을, Fig. 13은 가스측 출구온도를, Fig. 14는 가스측 압력강하를 각각 보여주고 있다.

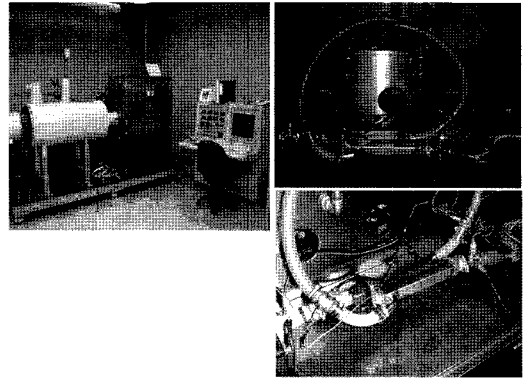


Fig. 11 Schematic diagram of heat dissipation tester and EGR cooler

Table 3 Performance test specification

Items	Engine speed	
	1700rpm	2500rpm
Coolant inlet temp. (°C)	90	90
Gas inlet temp. (°C)	280	452
Coolant flow rate (L/Min)	13	20
Gas flow rate (kg/h)	52	63
ABS.air pressure (bar)	1.6	1.6

Table 4 Conditions of performance test

Condition	Tube type
Case 1	Shell & tube
Case 2	Oval tube, fin pitch 4.0mm
Case 3	Oval tube, fin pitch 3.6mm
Case 4	Square tube, fin pitch 4.0mm

Table 5 Comparison of performance test results

Condition	Gas out temp(°C)	Gas side ΔP(kPa)	Water out temp(°C)	Water side ΔP(kPa)	Efficiency (%)
Case 1	120.8	3.9	92.3	3.1	83.7
	153.8	6.7	94.2	6.0	82.4
Case 2	110.4	2.1	92.7	3.5	89.2
	133.6	3.7	94.1	8.3	87.9
Case 3	108.5	2.5	93.1	4.3	90.4
	129.1	4.1	95.1	10.4	89.4
Case 4	104.8	2.4	93.9	5.0	92.6
	122.0	4.1	95.9	11.4	91.4

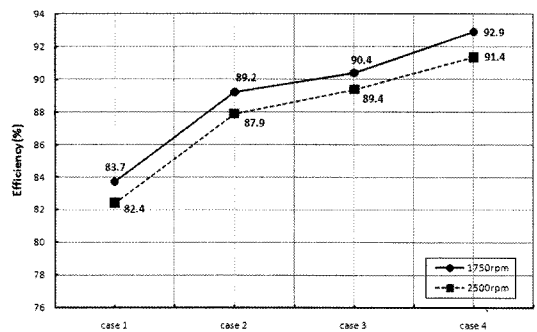


Fig. 12 Efficiency

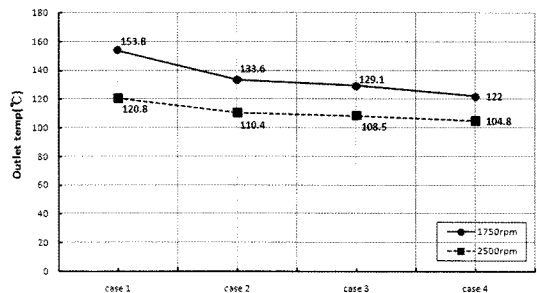


Fig. 13 Gas outlet temperature

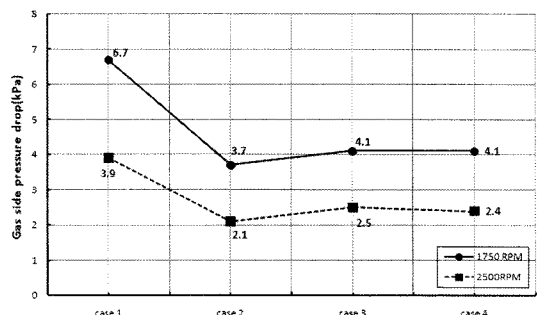


Fig. 14 Gas side ΔP

3. 결론

본 연구에서는 기존의 shell & tube 형 및 oval tube 형 EGR cooler와 새로 개발된 square tube형 EGR cooler를 해석과 성능 시험을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) oval 튜브의 경우 양쪽 가장자리의 round 부위로 인해 wavy-fin이 삽입이 되지 않아 fin 삽입부위 대비 상대적으로 단면적이 크고 유동저항이 적음으로 유동속도가 크게 증가한다.
- 2) 따라서 wavy-fin 부위의 속도가 상대적으로 작게 나타나고 있다.
- 3) square 튜브 사용 시 oval 튜브와 같은 round 부위가 없으므로 인해 양쪽 끝단까지 fin의 삽입이 가능하여 상대적으로 단면적이 커지는 부위가 존재하지 않아 fin이 있는 위치의 평균속도는 oval 튜브 대비 약 1m/s 증가함을 알 수 있었다.
- 4) 유동해석 결과 square 튜브가 oval 튜브 대비 효율이 약 2.5% 증가하며 이는 전체 속도분포가 균등하게 분포되는 것과 wavy-fin 1산이 추가되는 것에 기인하여 효율이 증대되는 것으로 판단된다.
- 5) square 튜브가 oval 튜브 대비 가스 측 압력강하 값은 다소 크게 나타나는데 이는 유동저항이 많이 걸리는 wavy-fin 존재위치의 속도증가에 의한 것으로 판단되나 허용할 수 있는 수준이다.

후 기

“이 논문은 2008년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비(과제번호: 20080205) 지원에 의해 수행된 연구입니다.”

References

- 1) D. T. Montgomery and R. D. Reitz, “Six-Mode Cycle Evaluation of the Effect of EGR and Multiple Injection on Particulate and NO_x Emission from a DI Diesel Engine,” SAE 960316, 1996.
- 2) M. P. Walsh, “Global Trends in Diesel Emissions Control,” SAE 970179, 1997.
- 3) P. Zelenka, H. Aufinger, W. Reczek and W. Cartellieri, “Cooled EGR-A Key Technology for Future Efficient HD Diesel,” SAE 980190, 1988.
- 4) J. W. Lim, B. M. Kang, J. S. Park, J. K. Yeom, S. S. Chung and J. Y. Ha, “A Study on the Effects of EGR Temperature on Emission Characteristics in a HSDI Diesel Engine using EGR Cooler,” Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.306-312, 2004.
- 5) W. Wendland, “Automobile Exhaust System Steady-state Heat Transfer,” VTMS 1, Combustion Paper 931085, 1993.
- 6) J. P. Holman, Heat Transfer, 9th Edn, McGraw-Hill, New York, 2001.
- 7) B. Ismail, R. Zjang, D. Ewing, J.-S. Chang and J. Cotton, “The Heat Transfer Characteristics of EGR Cooling Device,” Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition(IMECE). LA, USA. ASME Paper IMECE HT-34559, 2002.
- 8) M. Banzhaf and R. Lutz, “Heat Exchanger for Cooled Exhaust Gas Recirculation,” SAE 971822, 1997.
- 9) J. Nies, Use of Simulation Tools in EGR Design Process, 3, Vehicle Thermal Management Systems Conference(VTMS 5), Nashville, Tenn. 2001.