

딴플 튜브형 EGR Cooler 구조건전성 및 열효율 평가

서영호[†] · 이현민* · 박중원* · 구태완** · 김 정** · 강범수**

Evaluation of Structural Integrity and Heat Exchange Efficiency for Dimpled Tube Type EGR Cooler

Young-Ho Seo, Hyun-Min Lee, Jung-Won Park, Tae-Wan Ku
Jeong Kim and Beom-Soo Kang

Key Words : Exhaust Gas Recirculation Cooler(EGR 쿨러), Dimpled Tube(딴플형 튜브), Thermal-Structural Coupled Field Analysis(열-구조 연성해석), Heat Exchange Efficiency(열교환 효율)

Abstract

Most of vehicle manufacturers have applied exhaust gas recirculation (EGR) system to the development of diesel engines in order to obtain the high thermal efficiency without NO_x and Particulate Matter (PM) emitted from the engine. EGR system, which reflow a cooled exhaust gas from vehicles burning diesel as fuel to a combustion chamber of engine, has been used to solve this problem. In order to confirm the safety of the EGR system, finite element analysis was carried out. The safety of EGR system against temperature variation in the shell and tubes was evaluated through the thermal and structural analysis, and the modal analysis using ANSYS was also performed. Finally, the performance of EGR system was verified through the experiment and numerical simulation using effectiveness-NTU method. Program for the estimation of the heat exchange efficiency of the EGR system with regard to the dimpled tube shape was developed.

1. 서 론

디젤 엔진은 열교환 효율이 높아⁽¹⁾ 자동차는 물론 산업용의 모든 원동기에 적용되고 있지만 스모그(smog)와 호흡 장애를 유발하는 질소산화물(NO_x), 독성을 지닌 CO, HC 및 입자상의 매연과 분진을 배출하는 심각한 문제점을 지니고 있다⁽²⁾. 특히 연소 특성상 질소산화물과 입자상 물질의 배출이 많은 단점이 있는데, 이 물질은 상호 트레이드오프(trade-off) 관계이기 때문에 동시에 배출량을 줄이는 일은 쉽지 않다^(3,4). 따라서, 디젤 엔진에 대한 유해 배기가스 저감에 대한 노력은 질소

산화물과 입자상 물질에 집중되어 있다. 이에 대한 해결책으로 냉각식 배기재순환 장치(cooled exhaust gas recirculation: CEGR)의 도입을 기본으로 하여 모든 차세대 첨단 저공해 디젤엔진 개발에 적용하고 있다. 재순환 가스는 냉각기(cooler)를 통해 냉각되고 흡입된 공기와 혼합되어 연소 온도를 낮춤으로써 질소산화물을 저감하게 된다⁽⁵⁾. 또한, Cooled EGR 율을 조정함으로써 입자상 물질을 저감할 수 있게 된다.

현재까지 개발된 EGR Cooler 는 Fig. 1 과 같이 원형 튜브를 가지는 단순한 셸-튜브(shell and tube) 또는 튜브-튜브(tube and tube) 구조가 일반적이는데, 이는 열교환 효율이 낮고 체적 대비 전열면적인 집적도가 낮아 체적과 중량이 커지고 공간 이용 효율이 낮아 적용에 한계가 있었다. 이러한 문제점들에 대한 해결 방안을 제시하고자 본 연구에서는 딴플 형상으로 성형된 사각 튜브를 고안하였으며 딴플 사각 튜브 구조를 포함하는 EGR Cooler

[†] 서영호, 부산대학교 항공우주공학과 대학원

E-mail : pzpzp@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-1531 FAX : (051)512-4491

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원

** 부산대학교 항공우주공학과

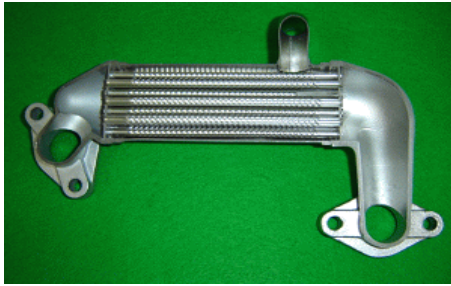


Fig. 1 Spiral multi tube type shell and tube EGR Cooler

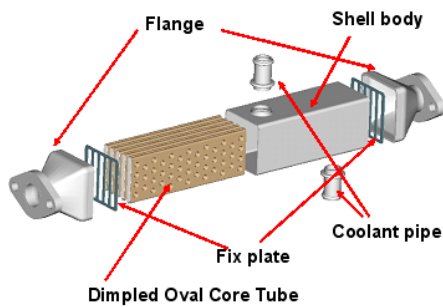


Fig. 2 Conceptual design of EGR Cooler

에 대한 열 및 진동 등의 영향에 대한 구조 건전성을 평가하였다. 또한 열교환 효율 실험을 통하여 EGR Cooler 열교환 효율을 측정하고 열전달 기초 이론을 토대로 한 열교환 효율 예측 모델과 비교하여 타당성을 검증하였다. 마지막으로 EGR Cooler의 성능을 확인하기 위하여 제안된 열교환 효율 예측 모델을 이용하여 EGR Cooler 열교환 효율 예측 프로그램을 개발하였다.

2. 딴플 튜브형 EGR Cooler

기존 EGR Cooler의 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 새로운 개념의 딴플 형상을 가진 사각 튜브가 내장된 EGR Cooler를 Fig. 2와 같이 설계하였으며, 이는 딴플 형상을 가진 10개의 딴플 사각 튜브와 딴플 튜브들을 고정시키기 위한 두 개의 고정판, 딴플 튜브들을 감싸는 셸, 냉각수가 유입·배출되는 배관 그리고 배기 가스가 시스템 내로 유입 및 배출되는 두 개의 양단 플랜지로 구성되었다. 또한 딴플 튜브는 박판 소재의 튜브에 특수하게 설계 배치된 딴플 형상을 박판 성형용의 고정도 금형을 이용하여 고난이도 성형 가공기술로서 개발하였다. 딴플 튜브형 EGR Cooler는 튜브 길이가 150mm, 200mm인 2가지 모델로 개발되었으며, Fig. 3에 개발된 딴플 튜브형 EGR Cooler를 나타내었다.



Fig. 3 Dimpled tube and EGR Cooler

3. 유한요소 해석

3.1 해석 모델 및 방법

EGR Cooler에 대한 3차원 형상 구현은 CATIA V5 R16를 사용하여 Fig. 4와 같이 구성하였으며, 해당 모델에 대한 유한요소 해석은 ANSYS V10.0을 이용하였다. 본 연구에서 제시하고자 하는 딴플 형상을 가지는 딴플 사각 튜브는 개당 약 242개의 유선형 비대칭 딴플을 포함하고 있으며, Fig. 5에서와 같이 하나의 딴플은 약 13개의 객체(area entity) 요소로 구성되어 있어 대상 모델을 유한요소화 및 해석하기에는 계산 시간이 많이 소요될 가능성을 지니고 있다. 이 부분에 대한 개선책으로 하나의 딴플 형상을 구성하는 13개의 객체를 5개의 객체로 줄이기 위한 Boolean 연산 기법을 사용하였으며, 이를 통해 하나의 딴플 사각 튜브의 유한요소 모델링을 간소화하였다. 또한, 해석의 용이함을 위해 전체 모델의 1/4 부분 모델을 사용하였다. Fig. 6에는 Fig. 4의 모델에 대해 유한요소 이산화를 통한 모델링을 수행한 후 1/2 모델로 수정하여 나타내었다. 본 연구에서 개발한 EGR Cooler에는 스테인레스-스틸 계열(SUS 304L)의 소재가 사용되었으며, 일반적으로 소재의 열팽창 계수는 온도에 대한 함수로 나타나는데 본 연구에서는 배기 가스의 유입온도인 500°C에 대한 열팽창 계수를 기준으로 보간법을 이용한 열팽창 계수를 사용하였다. 길이 방향으로의 온도 및 응력분포를 확인하기 위해 무차원 온도를 길이 방향에서의 임의의 위치에서 존재하는 온도와 최대 온도의 비로 정의하였고(분포 온도/최대 온도), 무차원 응력은 길이 방향에서의 임의의 위치에서 나타나는 응력과 최대 응력의 비(응력/최대응력)로 각각 정의하였다.

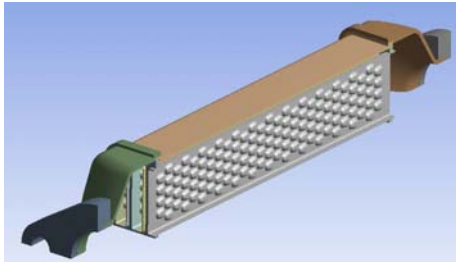
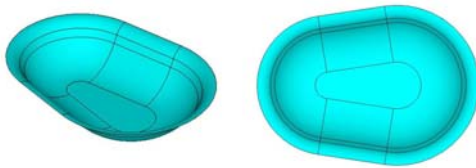
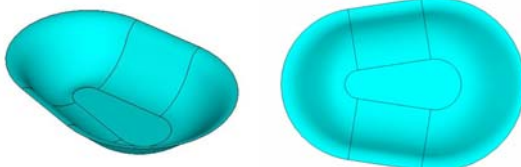


Fig. 4 A quarter configuration of EGR Cooler



(a) Dimple modeling with 13 area entities



(b) Dimple modeling with 5 area entities

Fig. 5 Three-dimensional dimple modeling



Fig. 6 Finite element model of EGR Cooler

3.2 열전달 및 열응력 해석

EGR Cooler의 열응력 해석에 앞서 온도 분포를 도출하기 위해 열전달 해석을 수행하였으며, 디플 튜브 입구에서부터 출구까지 선형적으로 온도가 감소한다고 가정하였다. 또한, 고온의 가스와 외부의 열전달 계수를 동일하다고 가정하였고, 각각의 경계면에 대하여 가스측은 $13.085 \text{ W/m}^2\text{C}$, 냉각수측은 $150.85 \text{ W/m}^2\text{C}$ 와 같은 대류 열전달 계수를 이용하였다. 이러한 조건에서의 유한요소법을 이용한 열전달 해석 결과를 Fig. 7에 나타내었다. EGR Cooler의 입구측 온도는 156.3 C , 출구측은 79.3 C 의 분포를 보이고 있다. 또한, 길이 방향에 대한 최대 온도의 분포는 전체적으로 온도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 열전달 해석 결과를 이용하여 열팽창에 의한 열응력 해석을 수행하였다. Fig. 8에 해석 모델에 대한 열응력 해석 결과를 나타내었다. 최대 응력은 약 131MPa 로 고정판과

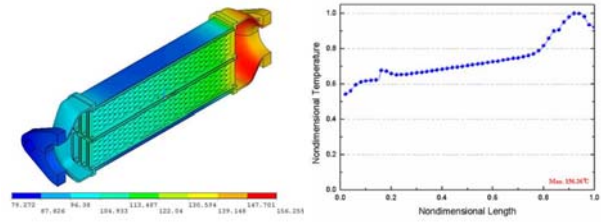


Fig. 7 Distribution and non-dimensional trend of temperature for EGR Cooler

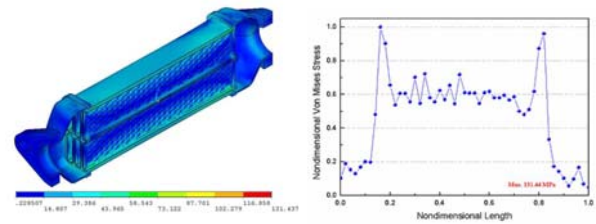


Fig. 8 Distribution and non-dimensional trend of stress for EGR Cooler

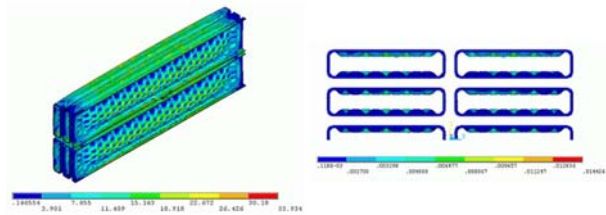


Fig. 9 Stress and displacement distribution of dimpled rectangular tube of EGR Cooler

디플 사각 튜브의 연결부에서 국소적으로 발생하며, 이외의 경우에는 작은 크기의 응력이 발생함을 확인할 수 있었고, 그 변형량은 최대 0.3mm 이하로 나타났다. 이와 같은 열응력과 변형량 수준은 본 EGR Cooler에 사용된 소재의 항복응력인 215 MPa 에 비해 낮으므로 구조적으로 안전하다고 할 수 있다.

3.3 압력분포 및 진동 해석

EGR Cooler는 엔진의 연소실로부터 유입된 배기 가스와 냉각수의 유동에 의한 압력차가 발생하는 조건에서 작동된다. 이러한 압력의 차이는 디플 사각 튜브의 외벽에 하중으로 작용하여 사각 튜브 및 디플의 구조적 안전성에 영향을 미칠 수 있으므로, EGR Cooler 내부를 통과하는 배기 가스(약 2 bar)와 냉각수(약 1 bar)의 유동 압력 하중에 의한 영향을 살펴보기 위해 구조 해석을 수행하였다. 그 결과, 최대응력은 33.93MPa 로 소재의 항복응력(215MPa)에 비해 크게 낮고, 사각 튜브에서의 최대 변위는 약 0.0144mm 로 압력에 의한 영향은 없는 것으로 파악되었다.

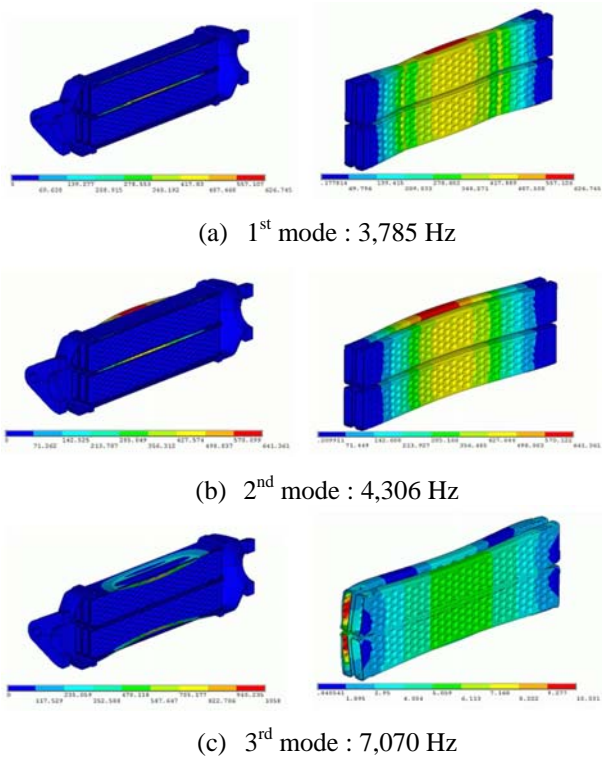


Fig. 10 Mode shape of EGR Cooler

엔진의 가진 주파수에 의한 공진에 대한 안전성을 검토하기 위해 진동 모드 해석을 추가적으로 수행하였다. Fig. 10에서의 결과와 같이 본 시스템의 1차 고유 진동수는 약 3,785 Hz로 나타났는데 자동차의 엔진 가진 주파수는 약 523 Hz (5,000RPM)이므로 본 해석 결과를 바탕으로 해당 시스템의 공진 발생의 가능성은 미미하다고 판단할 수 있다.

4. 열교환 효율

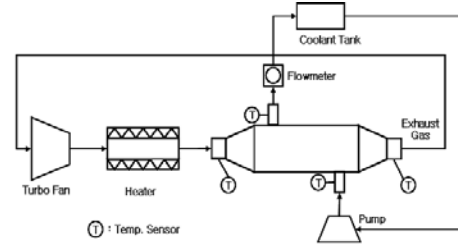
4.1 실험장치의 구성

앞서 개발된 모델에 대하여 Table 1과 같이 가스의 유량 및 입구온도, 냉각수의 유량을 변화시키면서 열교환 효율 실험을 진행하였다. 실험장치는 Fig. 11과 같이 구성하였다. 배기가스 온도 측정 센서는 EGR Cooler의 입·출구 플랜지에 장착하였고, 냉각수의 온도 측정 센서는 냉각수 입·출구 파이프에 장착하였다. 각각의 실험 조건에 따른 결과로서 실험장치에 내장된 Function에 의해 계산되어진 열교환 효율과 온도 측정 센서에 의한 출구온도를 Table 2,3에 나타내었다. 본 연구에서 제안한 EGR Cooler의 평균 열교환 효율은 튜브 길이가 150mm일 때 약 60%, 200mm일 경우 약 65%로 측정되었다.

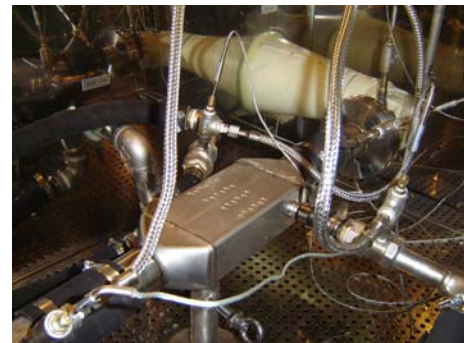
Table 1 Experiment conditions

| | | |
|---------|-------------------|---------------------------|
| Gas | Inlet Temperature | 400/450/500* [°C] |
| | Flow Rate | 0.022/0.028/0.033* [kg/s] |
| | Inlet Pressure | 196 [kPa] |
| Coolant | Inlet Temperature | 90 [°C] |
| | Flow Rate | 25*/40/60 [L/min] |
| | Inlet Pressure | 98 [kPa] |

* : basic experiment condition



(a) Schematic diagram of experiment apparatus



(a) Experiment apparatus

Fig. 11 Experiment equipment

4.2 열교환 효율 수치모사 모델

본 연구에서 개발한 EGR Cooler 열교환 효율 예측 프로그램의 흐름도를 Fig. 12에 나타내었으며, 쉘-튜브 구조의 열교환기에 일반적으로 사용되는 (effectiveness-NTU)법을 사용하였다. 이 흐름도를 살펴보면 Cooler의 기하학적 제원 및 입구에서의 EGR 가스 및 냉각수의 온도와 유량 등을 초기 조건으로 하여 가스 및 냉각수측 입출구 평균온도에서 가스와 냉각수의 열역학적 물성값, 튜브와 Cooler의 수력직경(hydraulic diameter)등을 계산한다. 또한, 이를 바탕으로 일련의 계산과정을 거쳐서 열전달 계수 등을 도출하고 마지막으로 열이동 단위 및 열교환 효율을 계산하여 출구온도와 열전달율을 예측, 초기에 가정한 열전달율과 비교하여 2%내의 오차를 가지도록 알고리즘을 구성하였다. 결과는 Table 2,3에 나타내었다.

Table 2 Analysis result of 150mm model

| Test Condition | | Outlet Temp. [°C] | | | Efficiency [%] | | |
|---------------------------|--------|-------------------|----------|-----------|----------------|----------|-----------|
| | | Experiment | Analysis | Error [%] | Experiment | Analysis | Error [%] |
| Gas Inlet Temp. [°C] | 400 | 213 | 214 | 0.47 | 60.2 | 60 | 0.33 |
| | 450 | 231.8 | 235 | 1.38 | 60.5 | 59.7 | 1.32 |
| | 500* | 257.5 | 256.6 | 0.35 | 59.3 | 59.4 | 0.17 |
| Gas Flow Rate [kg/s] | 0.022 | 229 | 229.3 | 0.13 | 65.7 | 66.1 | 0.61 |
| | 0.028 | 244 | 246 | 0.81 | 62.4 | 61.9 | 0.80 |
| | 0.033* | 257.5 | 256.6 | 0.35 | 59.3 | 59.4 | 0.17 |
| Coolant Flow Rate [L/min] | 25* | 257.5 | 256.6 | 0.35 | 59.3 | 59.4 | 0.17 |
| | 40 | 254 | 251 | 1.18 | 60 | 60.7 | 1.16 |
| | 60 | 251.5 | 249 | 0.99 | 60.4 | 61.2 | 1.32 |

* : basic experiment condition

Table 3 Analysis result of 200mm model

| Test Condition | | Outlet Temp. [°C] | | | Efficiency [%] | | |
|---------------------------|--------|-------------------|----------|-----------|----------------|----------|-----------|
| | | Experiment | Analysis | Error [%] | Experiment | Analysis | Error [%] |
| Gas Inlet Temp. [°C] | 400 | 198 | 198 | 0 | 64.9 | 65.3 | 0.62 |
| | 450 | 214 | 214.8 | 0.37 | 65.3 | 65.2 | 0.15 |
| | 500* | 231 | 231.5 | 0.35 | 65.4 | 65.1 | 0.35 |
| Gas Flow Rate [kg/s] | 0.022 | 209 | 205 | 1.91 | 71.3 | 72.7 | 1.96 |
| | 0.028 | 218 | 217.8 | 0.09 | 68.4 | 68.9 | 0.73 |
| | 0.033* | 231 | 231.5 | 0.35 | 65.4 | 65.1 | 0.35 |
| Coolant Flow Rate [L/min] | 25* | 231 | 231.5 | 0.35 | 65.4 | 65.1 | 0.35 |
| | 40 | 228 | 227.8 | 0.09 | 65.6 | 66 | 0.61 |
| | 60 | 225 | 224 | 0.44 | 66.2 | 66.7 | 0.76 |

* : basic experiment condition

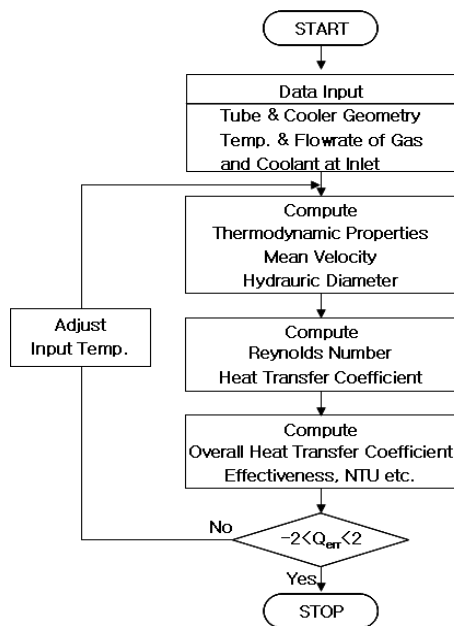
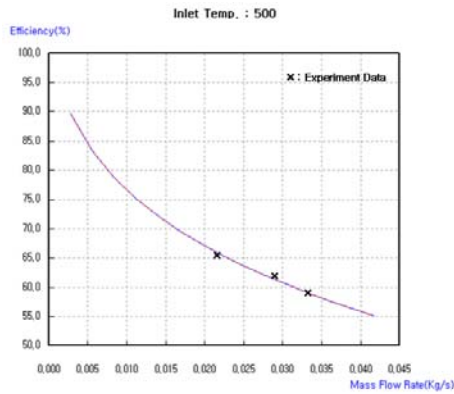


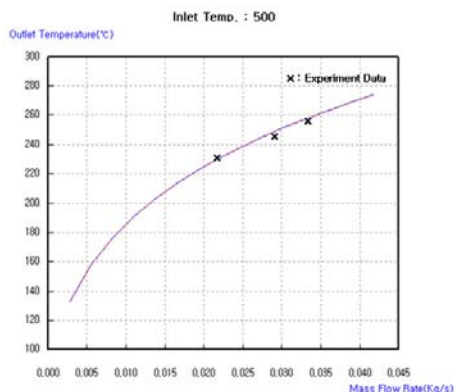
Fig. 12 Flow chart of the program

4.3 결과 및 검토

실험결과를 종합하면, EGR Cooler의 평균 열교환 효율은 튜브 길이가 150mm 일 때 약 60%, 200mm 일 경우에 약 65%로 측정되어 튜브의 길이가 길어지면 전열면적이 증가하여 열교환 효율이 증가하는 것을 확인 할 수 있으며 기존 EGR cooler의 효율보다 증가한 것을 알 수 있다. 또한, 실험 및 수치계산 결과를 비교해보면 열교환 효율과 출구온도 모두 입구온도, 가스유량, 냉각수 유량의 변화에 대하여 오차 범위 2%내의 정확도를 가지고 있음을 확인하였다. 앞서 수행된 수치모사를 활용하여 EGR Cooler 열교환 효율 예측 프로그램을 개발하였다. 열교환 효율 예측을 수행하기 위한 입력 조건은 유입되는 가스의 온도(gas inlet temperature), 가스 유량(gas flow rate), 냉각수 유량(coolant flow rate)이며, 설계인자를 조건으로 하여 열교환기 전열성능에 대한 결과가 출력된다. 이는 열교환 효율 및 출구가스 온도와 같이 EGR Cooler의 주요 성능평가 기준에 대한 값들이며 아울러 가스의 유량에 따른 열교환기 성능의 경향을 파악하기 위하여 Fig. 13 과 같이 그래프를 도시하였다.



(a) Efficiency estimation



(b) Outlet temperature estimation

Fig. 13 Evaluation program of thermal performance

5. 결론

본 연구에서는 자동차용 덤플형 EGR Cooler 를 개발하였고, 온도 변화에 따른 열응력 해석, 배기 가스 유동에 의한 압력 해석 및 진동 모드 해석을 통한 덤플 사각 튜브형 EGR Cooler 의 정상 작동 조건하에서의 구조 건전성을 검토하였다. 또한 실험을 통하여 열교환 효율을 측정하고, EGR Cooler 에 적용 가능한 열교환 효율 예측 모델링 기법을 개발하여, 수치해석을 통한 결과값과 비교해 보았다. 그 결과 덤플형 EGR Cooler 는 구조적 안정성이 검증되었으며, 열교환 효율은 150mm 모델이 평균 60%, 200mm 모델은 65%로서 열교환 효율이 기존의 그것과 비교하였을 때 우수함을 확인하였다. 또한 EGR Cooler 에 적용 가능한 열교환 효율 예측 모델링 기법을 개발하였으며, 수치해석을 통한 결과값이 실험결과와 비교해 보았을 때 오차범위가 2% 이내임을 알 수 있었다. 이러한 연구 결과로부터 최근 관심이 고조되고 있는 디젤 승용자동차 및 디젤 SUV 차량 등에 집적도가 높은 EGR cooler 를 장착한다면 공간의 효율성을 높이고 유해 배기 가스를 획기적으로 줄일 수 있을 것으로

판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(R15 -2006-022-02002-0) 및 2008 년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R0A-2008-000-20017-0).

참고문헌

- (1) Kim, C. H., Lee, J. H., Chun, K. M., Lee, K. S., 2000, "Prediction of Nitric Oxide Formation Using a Two Zone Model in a DI Diesel Engine," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 24, No. 3, pp. 390~401.
- (2) Bae, M. H., Ha, J. H., 2000, "A Study on the Effect of Recirculated Exhaust Gas with Scrubber EGR System upon Exhaust Emissions in Diesel Engine," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 24, No. 9, pp. 1247~1254.
- (3) Sohn, C. H., 2007, "Heat Transfer Analysis of EGR Cooler with Different Tube Shape," *Trans. of the KSAE (B)*, Vol. 15, No. 5, pp. 112~117.
- (4) Lee, J. and Han, C. S., 2007, "A Study on Heat Exchange Efficiency of EGR Cooler for Diesel Engine to Meet Euro-5 Emission Regulation," *Trans. of the KSAE (B)*, Vol. 15, No. 3, pp. 183~188.
- (5) Heo, H. S., Won, J. P. and Park, K. S., 2003, "Evaluation of Thermal Fluid Characteristics for EGR Cooler with Spiral Type," *Trans. of the KSAE (B)*, Vol. 11, No. 6, pp. 44~50.