

딴플 튜브형 EGR Cooler 의 개발 및 구조 건전성 평가

Development and Structural Integrity Evaluation of Dimpled Tube EGR Cooler

*서영호¹, 허성찬¹, 이현민¹, 구태완¹, 김정¹, #강범수¹

*Y. H. Seo¹, S. C. Heo¹, H. M. Lee¹, T. W. Ku¹, J. Kim¹, #B. S. Kang(bskang@pusan.ac.kr)¹

¹ 부산대학교 항공우주공학과

Key words : Exhaust Gas Recirculation Cooler, Dimpled Rectangular Tube, Thermal-Structural Coupled Field Analysis, Modal Analysis

1. 서론

디젤 엔진은 우수한 연비와 증량당 출력지수가 우수하고 내구성 및 신뢰성, 경제성이 우수하여 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. 특히 연소 특성상 질소산화물과 입자상 물질의 배출이 많은 단점이 있는데, 이 물질은 상호 트레이드 오프(trade-off) 관계이기 때문에 동시에 배출량을 줄이는 일은 쉽지 않다[1,2]. 그러나 북미 및 유럽의 선진국에서는 이에 대한 엄격한 규제를 실시할 예정이므로, 이에 대한 기술개발이 시급한 실정에 있다. 따라서 최근에는 냉각식 배기재순환장치(Cooled Exhaust Gas Recirculation: CEGR)의 도입을 기본으로 하여 모든 차세대 첨단 저공해 디젤엔진 개발에 적용하고 있다[3]. 현재까지 개발된 EGR Cooler 는 대체적으로 열교환 효율이 낮고, 체적 대비 전열면적인 집적도가 낮아 전체적으로 체적이 커지고, 설치 공간의 이용 효율이 낮아 실물 적용에 한계가 있었다. 이러한 문제점들에 대한 해결 방안을 제시하고자 본 연구에서는 딴플(dimple) 형상으로 성형된 딴플 사각 튜브를 고안하였으며, 딴플 사각 튜브 구조를 포함하는 EGR Cooler 에 대한 열 및 진동 등의 영향에 대한 구조 건전성을 평가하였다.

2. 딴플 튜브형 EGR Cooler

기존 EGR Cooler 의 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 새로운 개념의 딴플 형상을 가진 사각 튜브가 내장된 EGR Cooler 를 Fig. 1 과 같이 설계하였으며, 이는 딴플 형상을 가진 10 개의 딴플 사각 튜브(dimpled oval core rectangular tube)와 이 딴플 튜브들을 고정시키기 위한 두 개의 고정판(fix-plate), 딴플 튜브들을 감싸는 셸(shell body), 냉각수가 유입·배출되는 배관(coolant pipe) 그리고 배기 가스가 시스템 내로 유입 및 배출되는 두 개의 양단 플랜지(flange)로 구성되었다. 또한 딴플 튜브는 SUS 304L 박판 소재의 Core Tube 상에 특수하게 설계 배치된 Dimple 형상을 박판 성형용의 고정도 금형을 이용하여 고난이도 성형 가공기술로서 개발하였다. 딴플 튜브형 EGR Cooler 는 튜브길이가 150mm, 200mm 인 2 가지 모델로 개발되었으며, Fig. 2 에 개발된 딴플 튜브형 EGR Cooler 를 나타내었다.

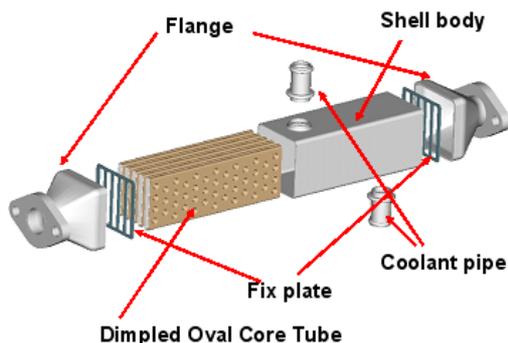


Fig. 1 Conceptual design of EGR Cooler



Fig. 2 Dimpled tube and EGR Cooler

3. 유한요소 해석

EGR Cooler 에 대한 3 차원 형상 구현은 CATIA V5 R16 를 사용하여 Fig. 3 과 같이 구성하였으며, 해당 모델에 대한 유한요소 해석은 ANSYS V10.0 을 이용하였다. 또한, 해석 시간의 절약과 해석 용이성을 위해 전체 대상 모델의 1/4 부분 모델을 사용하였다. Fig. 4 에는 Fig. 3 의 모델에 대해 유한요소 이산화를 통한 모델링을 수행한 후 1/2 모델로 수정하여 나타내었다. 본 연구에서 개발한 EGR Cooler 에는 스테인레스-스틸 계열(SUS 304L)의 소재가 사용되었으며, 일반적으로 소재의 열팽창 계수는 온도에 대한 함수로 나타나는데 본 연구에서는 배기 가스의 유입온도인 500℃ 에 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.

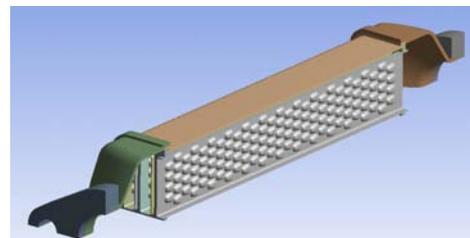


Fig. 3 A quarter configuration of assembled EGR Cooler

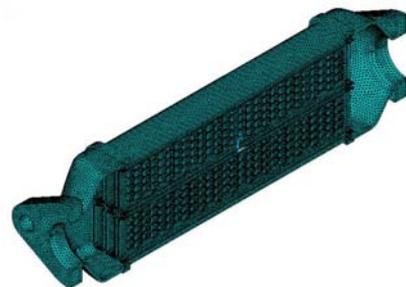


Fig. 4 Finite element model of EGR Cooler

EGR Cooler 의 열응력 해석에 앞서 온도 분포를 도출하기 위해 열전달 해석을 수행하였으며, 덤플 튜브 입구에서부터 출구까지 선형적으로 온도가 감소한다고 가정하였다. 또한, 고온의 가스와 외부의 열전달 계수를 동일하다고 가정하였고, 각각의 경계면에 대하여 가스측은 $13.085 \text{ W/m}^2\text{C}$, 냉각수 측은 $150.85 \text{ W/m}^2\text{C}$ 와 같은 대류 열전달 계수를 이용하였다. 이러한 조건에서의 유한요소법을 이용한 열전달 해석 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. EGR Cooler 의 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. 6 에 해석 모델에 대한 열응력 해석 결과를 나타내었다. 전체적으로 볼 때, 최대 응력은 약 131 MPa 로 고정판과 덤플 사각 튜브의 연결부에서 국소적으로 발생하며, 이외의 경우에는 작은 크기의 응력이 발생함을 확인 할 수 있었고, 그 변형량은 최대 0.3mm 이하로 나타났다. 이와 같은 열응력과 변형량 수준은 본 EGR Cooler 에 사용된 소재의 항복응력인 215 MPa 에 비해 낮으므로 구조적으로 안전하다고 할 수 있다.

EGR Cooler 는 엔진의 연소실로부터 시스템으로 유입된 배기 가스와 냉각수의 유동에 의한 압력차가 발생하는 조건에서 작동된다. 이러한 압력의 차이는 덤플 사각 튜브의 외벽에 하중으로 작용하여 사각 튜브 및 덤플의 구조적 안전성에 영향을 미칠 수 있으므로, 본 연구에서는 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 EGR Cooler 의 안전성에 압력에 의한 영향은 없는 것으로 파악되었다.

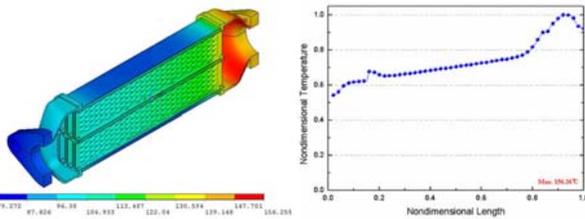


Fig. 5 Distribution and non-dimensional trend of temperature for EGR Cooler

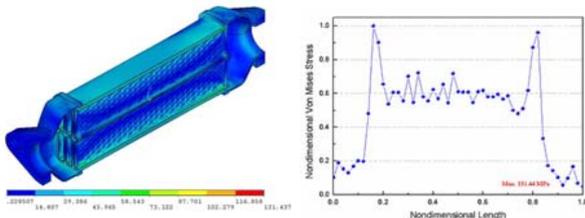


Fig. 6 Distribution and non-dimensional trend of stress for EGR Cooler

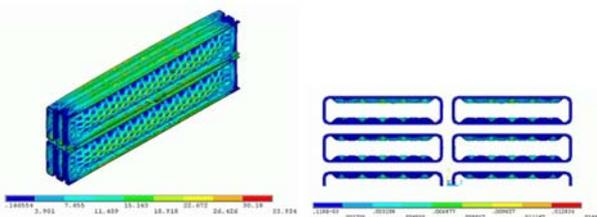


Fig. 7 Stress and displacement distribution of dimpled rectangular tube of EGR Cooler

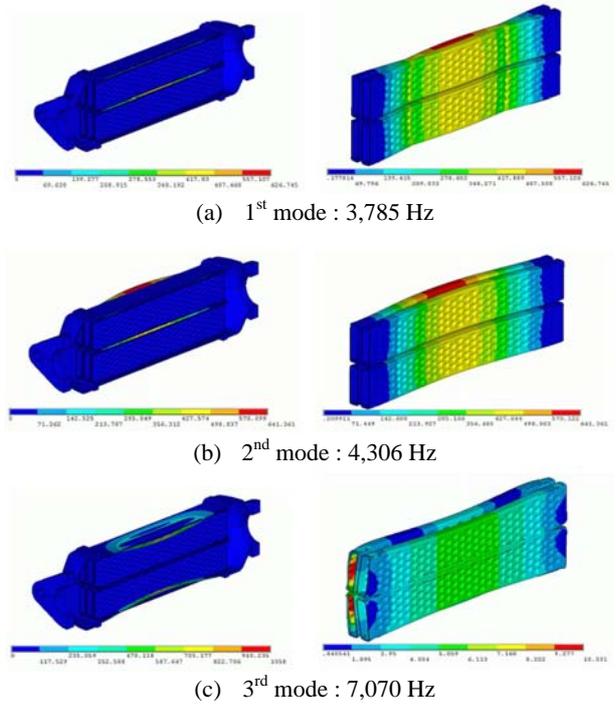


Fig. 8 Mode shape of EGR Cooler

엔진의 가진 주파수에 의한 공진에 대한 안전성을 검토하기 위해 진동 모드 해석을 추가적으로 수행하였다. Fig. 8 에서의 결과와 같이 본 시스템의 1 차 고유 진동수는 약 $3,785 \text{ Hz}$ 로 나타났는데 자동차의 엔진 가진 주파수는 약 523 Hz ($5,000\text{RPM}$)이므로 본 해석 결과를 바탕으로 해당 시스템의 공진 발생의 가능성은 미미하다고 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차용 EGR Cooler 의 개발에 있어서, 온도 변화에 따른 열응력 해석, 배기 가스 유동에 의한 압력 해석 및 진동 모드 해석을 통하여 덤플 사각 튜브형 EGR Cooler 의 정상 작동 조건하에서의 구조 건전성을 검토하였다. 열응력 해석 결과 최대 응력 131MPa , 압력 해석 결과 최대 응력이 33.93MPa 로 구조 재료인 SUS 304L 의 항복응력인 215 MPa 보다 낮게 나타났다. 또한, 자동차 엔진의 가진에 의한 EGR Cooler 의 공진 발생 가능성을 검토하기 위해서 진동 모드 해석을 수행하였으며, 그 결과 1 차 진동 모드가 약 $3,785\text{Hz}$ 로 나타났고 이는 엔진의 최대 가진 주파수인 523Hz 와는 상당한 차이를 보이므로 공진 발생의 가능성은 낮다고 판단할 수 있었다.

후기

본 연구는 2 단계 BK21 사업, 과학기술부 및 한국과학재단의 국가핵심연구센터사업(R15-2006-022-02002-0)의 지원과 2007 년도 국제과학기술협력재단의 지원(No. M60601010004-06E0101-00400)을 받아 수행된 연구 결과입니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. 손창현, "튜브형상에 따른 배기가스 재순환 냉각 장치 열전달 성능 평가," 자동차공학회지, **15**, 112-117, 2007.
2. 이준, 한창석, "Euro-5 대응 디젤엔진용 EGR 쿨러의 열교환 효율 연구," 자동차공학회지, **15**, 183-188, 2007.
3. 정진은, 진영욱, 강우, 정재호, 강정호, "디젤엔진의 EGR 유량 예측 모델에 관한 연구," 자동차공학회논문집, 504-508, 2006.