

딴플 사각 튜브형 배기 가스 재순환 시스템의 열 및 진동 특성에 관한 연구

서영호*, 허성찬*, 권영석**, 구태완***, 김 정***, 강범수#

A Study on Thermal and Modal Characteristics for EGR System with Dimpled Rectangular Tube

Young-Ho Seo*, Sung-Chan Heo*, Young-Seok Kwon**, Tae-Wan Ku***, Jeong Kim***
and Beom-Soo Kang#

ABSTRACT

Recently, Exhaust Gas Recirculation (EGR) system which re-flow a cooled exhaust gas from vehicles burning diesel as fuel to a combustion chamber of engine has been used to solve the serious air pollution. For the design and mass production of EGR system, it is essential to ensure structural integrity evaluation. The EGR system consisted of ten dimpled oval core rectangular tubes, two fix-plates, two coolant pipes, shell body and two flanges in this study. To confirm the safety of the designed system, finite element modeling about each component such as the dimpled oval core tube with the dimpled shape and others was carried out. The reliability of EGR system against exhaust gas flow with high temperature was investigated by flow and pressure analysis in the system. Also, thermal and strength analysis were verified the safety of EGR system against temperature change in the shell and tubes. Furthermore, modal analysis using ANSYS was also performed. From the results of FE analysis, there were confirmed that EGR system was safe against the flow of exhaust gas, temperature change in EGR system and vibration on operation condition, respectively.

Key Words : Exhaust Gas Recirculation System (배기 가스 재순환 시스템), Dimpled Rectangular Tube (딴플형 사각 튜브), Thermal-Structural Coupled Field Analysis (열-구조 연성 해석), Modal Analysis (모드 해석), Finite Element Method (유한요소법)

1. 서론

현재 자동차에 널리 사용되고 있는 디젤 엔진은 연비와 중량당 출력지수, 내구성, 신뢰성 및 경

제성이 우수하지만 스모그(smog)와 호흡 장애를 유발하는 질소산화물(NO_x) 및 독성을 지닌 CO, HC 등을 방출하며, 입자상의 매연과 분진을 배출하는 심각한 문제점들을 지니고 있다. 이들 중 질

접수일: 2007년 11월 1일; 게재승인일: 2007년 12월 27일

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원

** 나라엠엔디㈜

*** 부산대학교 항공우주공학과

교신저자: 부산대학교 항공우주공학과

E-mail bskang@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2310

소산화물은 혼합 공기가 연소될 때 고온에 의해서 공기중의 질소와 산소가 결합하여 생성되는 것으로 질소산화물의 발생은 심각한 문제이면서 해결하기 가장 힘든 문제이다. 따라서 북미 및 유럽의 여러 선진국에서는 이에 대한 엄격한 규제를 실시할 예정으로, 이에 배출가스 완화를 위한 기술개발을 서두르고 있는 실정이다.

현재 선진국에서 승용 디젤 자동차에 대한 배기 공해 규제 추이 및 일정은 Fig. 1에서와 같으며, 심각한 문제가 되는 질소산화물의 배출 규제 수준은 1990년 기준으로 2010년에 60% 이상을 줄여야 하는 정도로 엄격한 수준의 규제가 예정되어 있다.¹ 또한, 현재까지 생산된 디젤 자동차의 질소산화물 배출 수준은 Fig. 2에서와 같은 배출 기준을 충족시키지 못하고 있고 청정환경 보전에 심각한 영향을 미치고 있다. 이에 따라 2008년까지 EURO-5 수준인 HC+NO_x 배출량이 0.15 g/km 이하가 되어야 한다.²

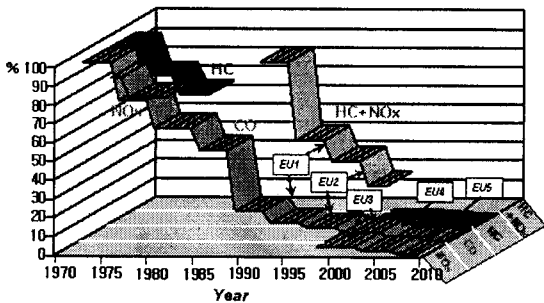


Fig. 1 Trend of emission standard for NO_x of diesel engine¹

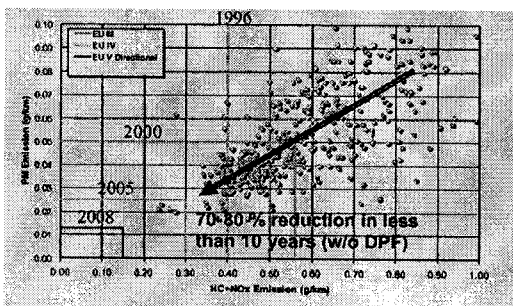


Fig. 2 Guideline for reduction of NO_x emission of diesel engine²

국내에서도 승용 디젤 엔진의 질소산화물 배출에 대해서 선진국 수준의 규제를 목표로 하고 있다. 따라서 질소산화물의 배출 수준을 기술적으로 만족시키기 위한 냉각식 배기 가스 재순환 시스템(Cooled Exhaust Gas Recirculation : CEGR)의 개발이 필수적이다. 여기서 배기 가스 재순환 시스템(이하 EGR 시스템)은 유해 배출 가스를 저감할 수 있는 후처리 기술 중의 하나로 배기 가스 중 일부를 배기관에서 흡기관으로 재순환시키는 장치를 말한다. 이 과정 중 재순환 가스는 냉각기(Cooler)를 통해 냉각되어지고 흡입된 공기와 혼합하여 연소 온도를 낮추게 됨으로써 질소산화물을 저감하게 된다.³

현재까지 개발된 EGR 시스템은 단순한 셸-튜브(shell and tube) 또는 튜브-튜브(tube and tube) 구조가 일반적인데, 국내의 경우 EURO-3 디젤 배기 기준을 적용하기 위해 2003년에 평면관 다관식 셸-튜브 구조에 대한 실증 연구 및 2004년에 스파이럴 다관식 셸-튜브 구조에 대한 실용화 연구를 추진한 예가 있다. 또한, 국외의 개발현황으로써 북미 및 유럽 등지에서는 단순한 평면 원통관 다관식 셸-튜브 구조의 EGR 시스템을 개발하여 2004년까지 보급하여 왔으나 구조적 한계로 인해 온도 효율이 약 50% 수준이었다. 그리고, 독일 Modine 사의 경우 온도 효율과 집적도를 높이기 위해 적층 구조의 10kW 급 EGR 시스템을 개발한 예가 있으나, 이 경우의 온도 효율은 약 59%로 기존 시스템과 비교해서 약 2% 정도 성능을 개선하였으나, 정격냉각능력이 설계 사양인 10kW 보다 낮은 약 9.3kW 수준인 것으로 보고되었다.^{4,5}

현재까지 개발된 EGR 시스템은 대체적으로 열교환 효율이 낮고 체적 대비 전열면적인 집적도가 낮아 전체적으로 체적이 커지고, 설치 공간의 이용 효율이 낮아 설계 결과의 실물 적용에 한계가 있었다. 이러한 문제점들에 대한 해결 방안을 제시하고자 본 연구에서는 딩플(dimple) 형상으로 성형된 딩플 사각 튜브를 고안하였으며, 딩플 사각 튜브 구조를 포함하는 EGR 시스템에 대한 열 및 진동 등의 영향에 대한 구조 건전성을 평가하고자 하였다. 즉, 승용 디젤 엔진의 정상 운전 상태에서의 배기 가스 유동에 의한 압력 해석, 온도 변화에 따른 열응력 해석과 엔진의 가진 주파수에 따른 EGR 시스템의 모드 해석(Modal Analysis)을 수행하였고, 그 결과로 본 연구에서의 딩플 사각

튜브 구조의 EGR 시스템은 배기 가스, 시스템내의 온도 변화 및 진동 특성에 대해서 구조적으로 열 및 진동의 영향에 대해 건전하다는 결론에 도달할 수 있었다.

2. 배기 가스 재순환 시스템

2.1 배기 가스 재순환 시스템(EGR 시스템)

현재까지 개발된 단순한 구조의 EGR 시스템들은 효율이 낮고 집적도(전열면적/체적)가 낮은 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 새로운 개념의 딴플 형상을 가진 딴플 사각 튜브가 내장된 EGR 시스템을 Fig. 3 에서와 같이 설계하였다. 본 연구에서의 EGR 시스템은 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.

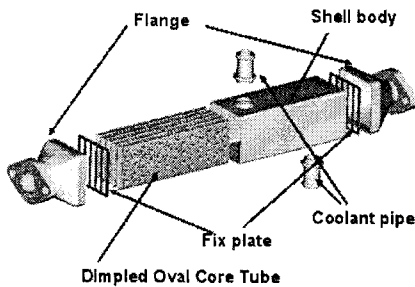
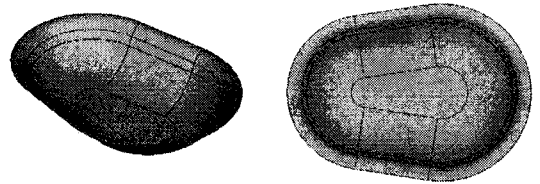


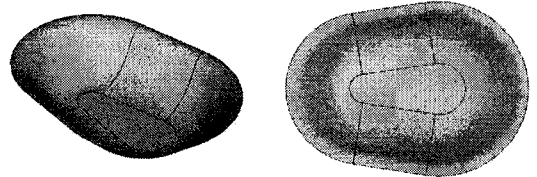
Fig. 3 Conceptual design of EGR system

2.2.3 차원 형상 모델링

본 연구에서 제시하고자 하는 딴플 형상을 가지는 딴플 사각 튜브는 개당 약 242 개의 유선형 비대칭 딴플을 포함하고 있으며, Fig. 4 에서와 같이 하나의 딴플은 약 13 개의 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 13 개의 객체를 5 개의 객체로 줄이기 위한 Boolean 연산 기법을 사용하였으며, 이를 통해 하나의 딴플 사각 튜브의 유한요소 모델링을 간소화하였다.



(a) Dimple modeling with 13 area entities



(b) Dimple modeling with 5 area entities

Fig. 4 Three-dimensional dimple modeling

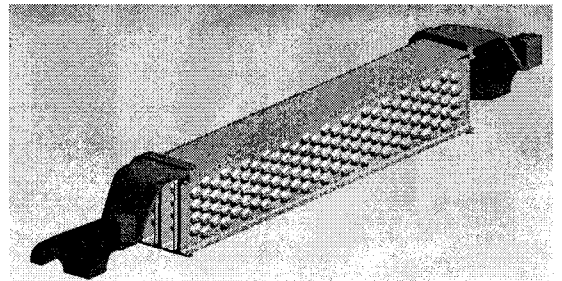


Fig. 5 A quarter configuration of assembled EGR System

EGR 시스템에 대한 3 차원 형상 구현은 CATIA V5 R16 를 사용하여 Fig. 5 와 같이 구성하였으며, 해당 모델에 대한 유한요소 해석은 ANSYS V10.0 을 이용하였다. 또한, 본 해석 시간의 절약과 해석 용이성 등을 위해 전체 대상 모델의 1/4 인 부분 모델을 사용하였다

3. 유한요소 해석

3.1 해석 조건 및 방법

본 연구에서의 EGR 시스템에는 스테인레스-스틸 계열(SUS304)의 소재가 사용되었으며, Table 1 에 주된 재료 특성치를 나타내었다. 일반적으로 소재의 열팽창 계수는 온도에 대한 함수로 나타나므로, 본 연구에서는 Fig. 6 에서와 같이 특정 온도(시스템 내부로의 배기 가스의 유입 온도 : 약 500℃)에 대한 열팽창 계수를 기준 조건으로 하여 보간법을 이용한 열팽창 계수를 사용하였다.⁶

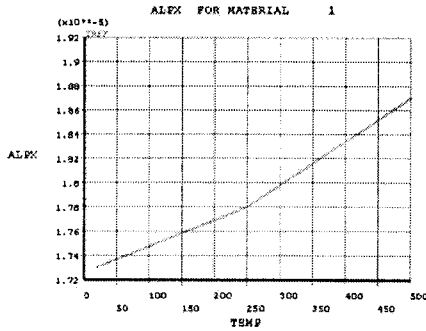


Fig. 6 Relationship of thermal expansion coefficient according to temperature

Table 1 Material properties of SUS 304

Young's Modulus	200 GPa
Yield Strength	215 MPa
Thermal Expansion Rate	17.3 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ at Temp. 20 $^\circ\text{C}$ 17.8 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ at Temp. 250 $^\circ\text{C}$ 18.7 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ at Temp. 500 $^\circ\text{C}$
Thermal Conductivity	16.2 W/m $^\circ\text{C}$

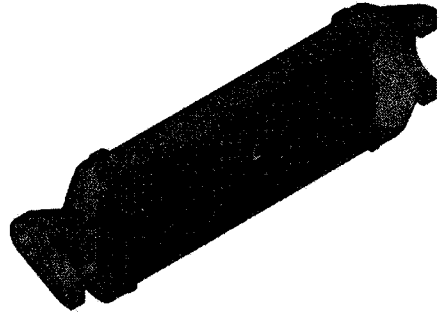


Fig. 9 Finite element model of EGR system

해석 결과 분석 및 검토의 편의를 위해 길이 방향(X-방향), 폭 방향(Y-방향) 그리고 높이 방향(Z-방향)을 Fig. 7 에서와 같이 정의하였다. 또한, 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. 또한, 배기 가스 재순환 시스템내의 배기 가스 유입구와 배출구측의 고정판에서 발생하는 응력의 경향을 분석하기 위해서 결과 도사용 국소 좌표계를 정의하였으며, 여기서 정의된 좌표계에 따라 길이 방향 및 고정판에서의 각 방향에 대한 응력 분포 및 이의 경향을 분석하였다. 또한, EGR 시스템의 정상 작동 조건에서의 온도 경계 조건(Fig. 8)을 이용하여 열전달 해석을 우선 수행한 후, 열전달 해석 결과로 얻어진 각 절점에서의 온도 분포를 하중으로 부여하여 응력 해석을 수행하였다.

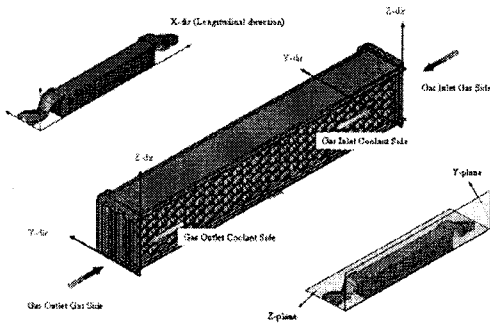


Fig. 7 Local coordinate system of FE analysis

3.2 열전달 해석

EGR 시스템에 대한 열전달 해석을 위해 사용된 해석 모델의 전체 조립된 형상을 알 수 있는 Fig. 8 로부터 Fig. 5 와 같이 1/4 로 분할하여 유한요소 열전달 해석에 사용하였다. Fig. 9 는 Fig. 5 의 모델에 대해 유한요소 이산화를 통한 모델링을 수행한 후 1/2 모델로 수정하여 나타낸 것이다. 실제적으로 본 시스템의 유한요소 모델링에 있어서 1/4 모델에 사용된 요소는 사면체(tetrahedral) 이자 열전달 해석용 요소인 Solid 70 요소이며, 약 296,000 개의 요소로 해석 모델을 구성하였다.

본 절에서의 EGR 시스템의 열전달 해석은 열

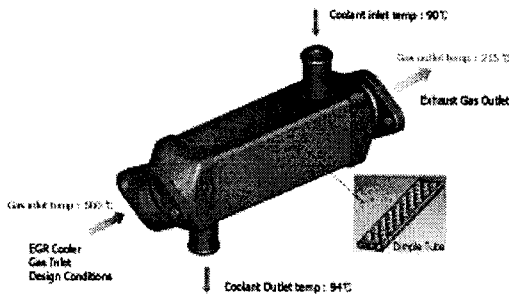


Fig. 8 Thermal boundary condition of EGR system

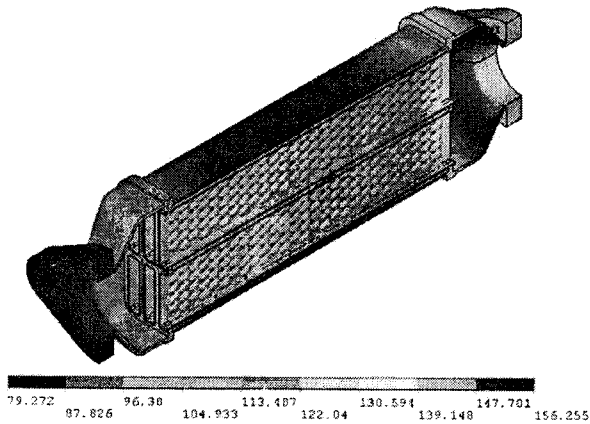
응력 해석에 앞서 해당 시스템 내의 온도 분포를 도출하기 위해 수행하였으며, 온도 조건은 덤플 튜브 입구에서부터 출구까지 선형적으로 온도가 감소한다고 가정하였다. 또한, 고온의 가스와 외부의 열전달 계수를 동일하다고 가정하였고, 각각의 경계면에 대하여 가스측은 $13.085 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, 냉각수 측은 $150.85 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ 와 같은 대류 열전달 계수를 이용하였다.

이러한 조건에서의 유한요소법을 이용한 열전달 해석 결과를 Fig. 10 에 나타내었다.⁷ Fig. 10(a)에서 EGR 시스템의 입구측 온도 분포는 $156.3 \text{ }^\circ\text{C}$, 출구측에서는 $79.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 분포를 보이고 있다.

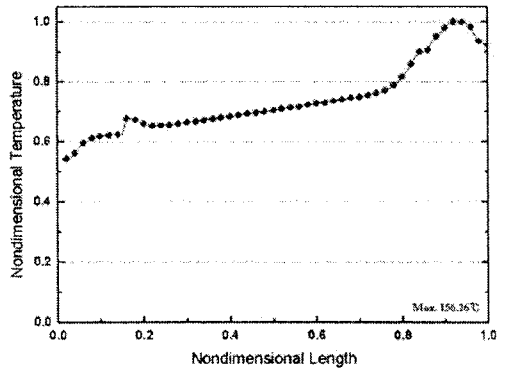
또한, 길이 방향에 대한 최대 온도의 분포는 Fig. 10(b)에서처럼 전체적으로 온도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 온도 분포는 Fig. 11에서와 같이 EGR 시스템 내부의 덤플 튜브에서도 유사한 경향을 나타내고 있다. 특히, Fig. 11에서는 고온의 가스가 유입되는 입구에서 최고 온도인 $140.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 를 나타내고 있으며, 냉각수와의 온도 교환이 일어나는 구간에서는 선형적으로 온도가 감소함을 알 수 있었다.

3.3 열응력 해석

앞서의 열전달 해석을 통하여 얻어진 각 절점

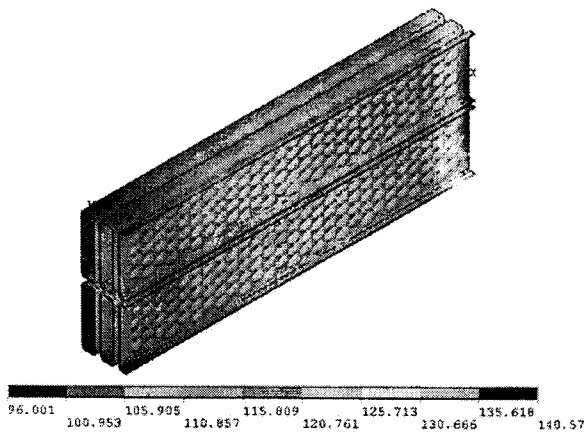


(a) Temperature distribution [unit: $^\circ\text{C}$]

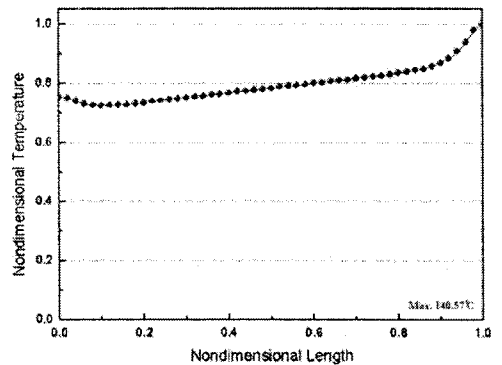


(b) Trend of non-dimensional temperature

Fig. 10 Distribution and non-dimensional trend of temperature for EGR system



(a) Temperature distribution [unit: $^\circ\text{C}$]



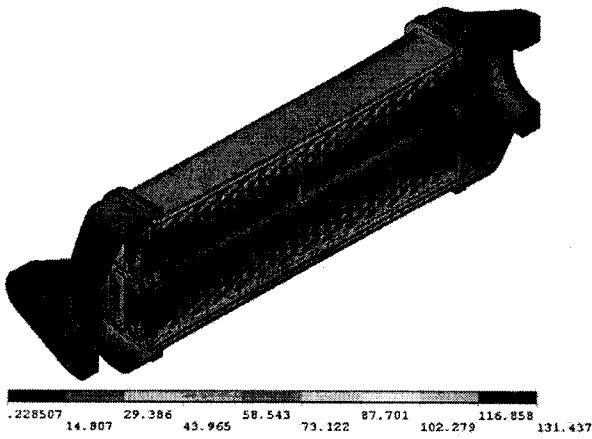
(b) Trend of non-dimensional temperature

Fig. 11 Distribution and non-dimensional trend of temperature for dimpled tube in EGR system

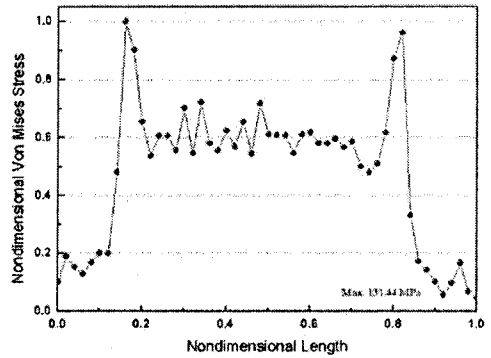
에서의 온도를 이용하여 열팽창에 의한 열응력 해석을 수행하였다. Fig. 12 에서는 해석 모델에 대한 열응력 해석 결과를 보여주고 있다. 전체적으로 볼 때, 최대 응력은 약 131 MPa 로 고정판과 댐플 사각 튜브의 연결부에서 국소적으로 발생하며, 이외의 경우에는 작은 크기의 응력이 발생함을 확인할 수 있었고, 그 변형량은 최대 0.3mm 이하로 나타났다. 이와 같은 열응력과 변형량 수준은 본 EGR 시스템에 사용된 소재의 항복응력인 215 MPa 에 비해 낮으므로 구조적으로 안전하다고 할 수 있다.

또한, EGR 시스템 내의 댐플 사각 튜브에 있어서의 열응력 분포를 Fig. 13 에 나타내었다. 위의 결과와 마찬가지로 고정판과의 연결부에서 국부적인 응력 집중 현상이 나타나는 것을 알 수 있었다. 그리고 길이 방향에 대한 응력 분포를 살펴보면 댐플 형상에 의해서 응력 분포가 변하지만 그 정도가 심하지 않아 구조적 안전성에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 14 에는 열응력 해석에 있어서 EGR 시스템의 셀과 고정판부의 응력 분포를 나타내고 있다. 그리고, Fig. 15 와 Fig. 16 에서는 배기 가스의 입구

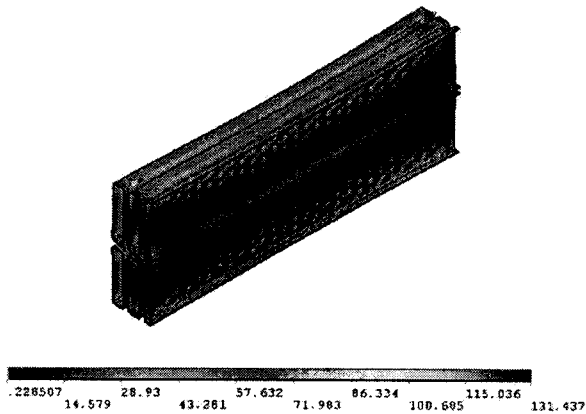


(a) Stress distribution [unit: MPa]

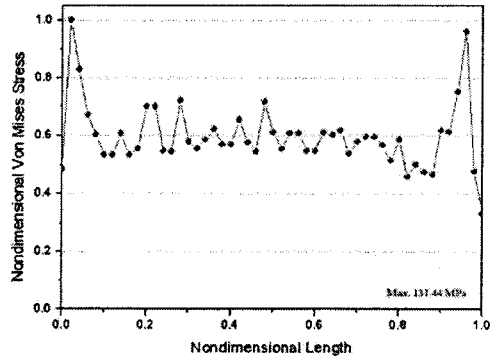


(b) Trend of non-dimensional stress

Fig. 12 Distribution and non-dimensional trend of stress for EGR system



(a) Stress distribution [unit: MPa]



(b) Trend of non-dimensional stress

Fig. 13 Distribution and non-dimensional trend of stress for dimpled tube in EGR system

측과 출구측에 대한 고정판에서의 응력 분포를 나타내었으며, 또한 길이와 응력 분포에 대한 무차원화된 관계를 각각 도시하였다. 배기 가스 유입에 의해 시스템의 출구측보다 입구측에서 상대적으로 온도가 높기 때문에 응력의 크기도 입구측(67.4MPa)이 출구측(61.8MPa) 보다 약간 높게 발생하였다.

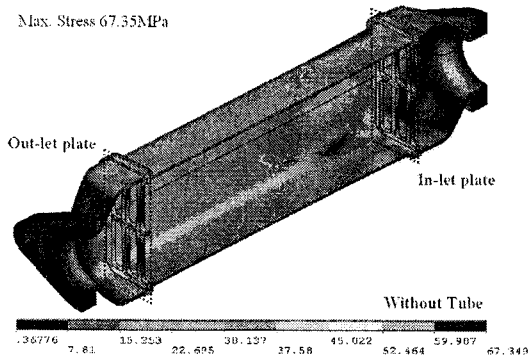
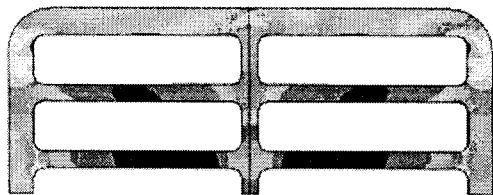


Fig. 14 Stress distribution for shell body and flange parts of EGR system without dimpled tube

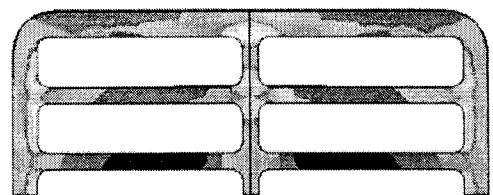
결과적으로 고정판에서는 입구측과 출구측 모두 낮은 응력이 발생하므로 구조적으로 안전함을 예측할 수 있었다. 열응력의 분포 경향을 살펴보면, Y-방향에 대해서는 덤플 사각 튜브가 세로로 정렬되어 순차적으로 용접이 되어있기 때문에 이러한 배열에 따라 응력이 분포하면서 덤플 사각 튜브의 바깥쪽으로 갈수록 응력이 높게 나타났다. 또한, Z-방향에서의 응력 분포를 살펴보면 외각 부근에서 다소 높은 응력이 발생함을 알 수 있었다.

3.4 압력 해석

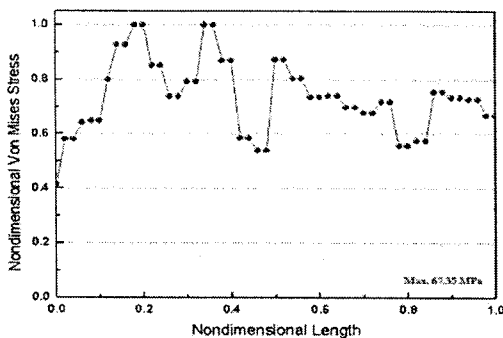
EGR 시스템은 엔진의 연소실로부터 시스템으로 유입된 배기 가스와 냉각수의 유동에 의한 압력차가 발생하는 조건에서 작동 되어진다. 이러한 압력의 차이는 덤플 사각 튜브의 외벽에 하중으로 작용하여 덤플 사각 튜브 및 덤플의 구조적 안전성에 영향을 미칠 수 있으므로, 본 연구에서는 EGR 시스템 내부를 통과하는 배기 가스(약 2 bar)와 냉각수(약 1 bar)의 유동 압력 하중에 의한 영향을 살펴보기 위해 구조 해석을 수행하였다.



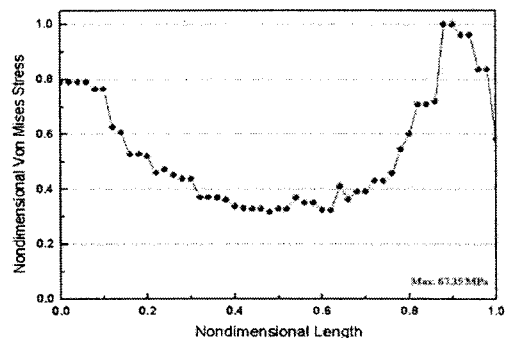
(a) Stress distribution of gas side [unit : MPa]



(b) Stress distribution of coolant side [unit : MPa]



(c) Trend of non-dimensional stress in Y-direction



(d) Trend of non-dimensional stress in Z-direction

Fig. 15 Distribution and non-dimensional trend of stress for gas in-let plate in EGR system

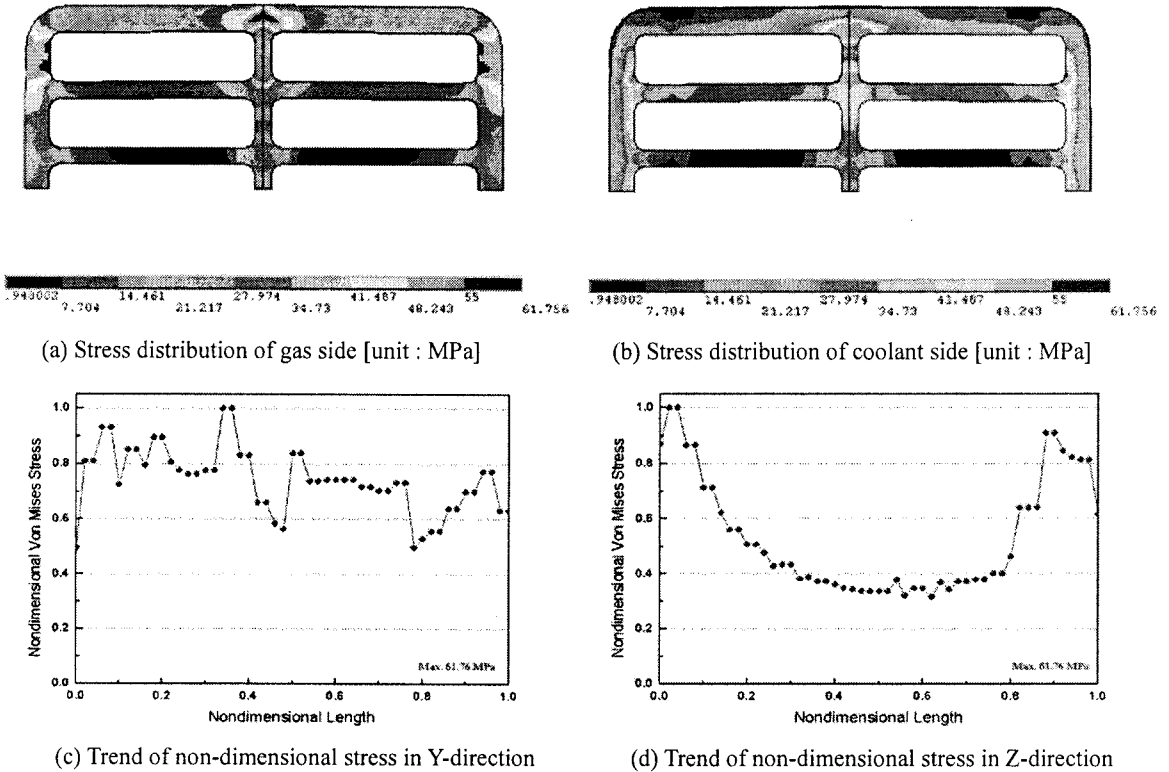


Fig. 16 Distribution and non-dimensional trend of stress for gas out-let plate in EGR system

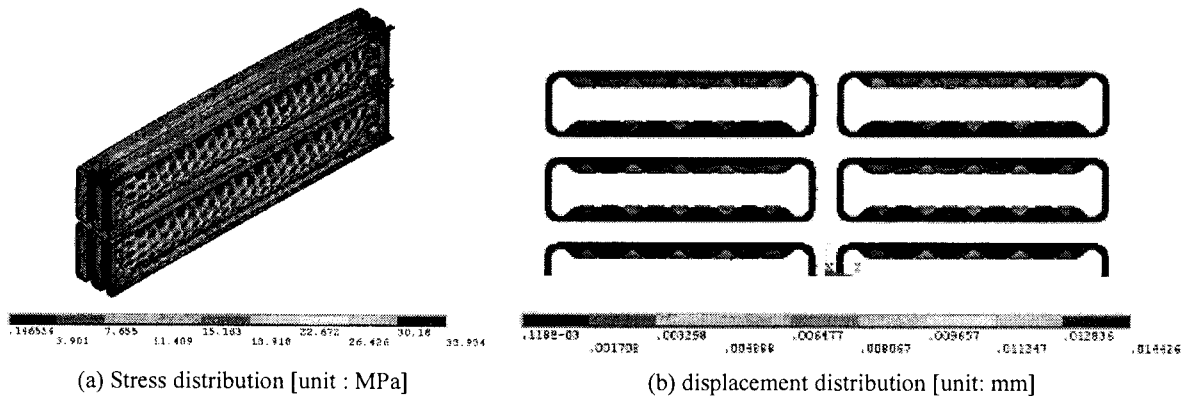


Fig. 17 Stress and displacement distribution of dimpled rectangular tube of EGR system

해석에 사용된 모델은 열응력 해석 모델과 동일하며, 단지 유한요소 모델 구성에 있어서 Solid 70 요소 대신 구조 해석용 요소로 적합한 Solid 45 요소를 사용하였다. 이와 같은 하중 조건에서 수행한 구조 해석 결과를 Fig. 17에 나타내었다. Fig. 17에서 알 수 있듯이 응력이 전체적으로 고르게 분

포함을 알 수 있었고, 최대응력은 33.93MPa로 소재의 항복응력(215MPa)에 비해 크게 낮은 것을 파악할 수 있었다. 또한 뎀플 사각 튜브에서의 최대 변위는 약 0.0144mm로 시스템, 뎀플 사각 튜브 및 뎀플의 안전성에 압력에 의한 영향은 거의 없는 것으로 파악되었다.

3.5 진동 모드 해석

엔진의 가진 주파수에 의한 공진에 대한 안전성을 검토하기 위해 EGR 시스템의 압력 하중에 의한 구조 해석에서 사용된 유한요소 모델을 이용하여 진동 모드 해석을 추가적으로 수행하였다. 본 해석에 있어서의 경계 조건으로는 배기 가스 재순환 시스템의 플랜지 양단에 구속 조건을 부가하였다.

ANSYS의 Lanczos Method를 사용하여 고유 진동 모드 해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 18에 1차 모드, 2차 모드 및 3차 모드 순으로 도시하였다.

Fig. 18에서의 결과와 같이 본 시스템의 1차 고유 진동수는 약 3,785.8 Hz, 2차 고유 진동수는 약 4,306.2 Hz, 3차 고유 진동수는 약 7,070.7 Hz로 나타났다. 더군다나 Fig. 18에서와 같이 진동 영향

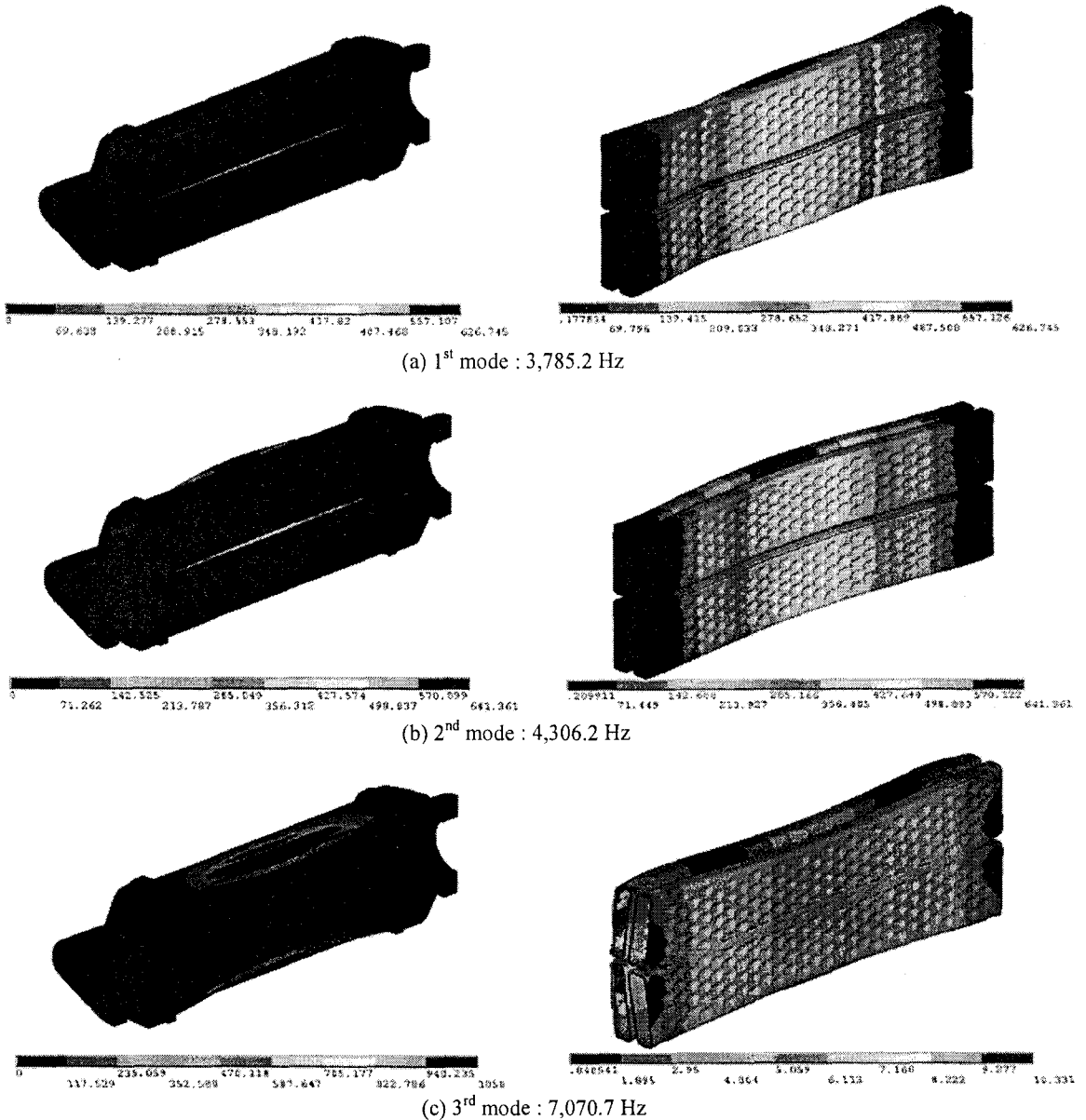


Fig. 18 Mode shape for EGR system

에 의해 덤플형 사각 튜브 및 셀 구조물에 비틀림 및 1 2 차 벤딩의 변형이 발생하고 있음을 알 수 있었다. 본 절에서의 진동 모드 해석 결과를 종합해보면, 자동차의 엔진 가진 주파수는 약 523.6 Hz(5,000RPM)이므로, 본 해석 결과를 바탕으로 해당 시스템의 공진 발생의 가능성은 미미하다고 판단되었다.

3.6 결과 비교

본 연구에서의 사각 덤플 튜브 구조를 가진 EGR 시스템에 대한 시제품을 제작하여 열효율 특성에 관한 실험을 수행하였다. 본 연구에서 제안한 EGR 시스템의 열효율에 대한 실험은 배기 가스의 유입 온도와 출구 온도의 차이를 비교함에 의해 수행되었으며, 이를 수치적 접근으로 얻어진 열효율과 비교하여 Table 2 와 Table 3 에 나타내었다. EGR 시스템의 기본 설계 사양으로는 배기 가스의 유입 온도 500℃, 유입 유량 120Kg/H 그리고 냉각수 유량 25L/min 이었다. 그리고, 사각 덤플 튜브의 길이가 150mm 일 때의 열효율 비교 결과를 Table 2 에 나타내었으며, 사각 덤플 튜브의 길이가 200mm 일 경우의 열효율 비교 결과를 Table 3 에 나타내었다.

일반적으로 EGR 시스템에 있어서 가장 좋은 열효율을 가지는 것은 독일의 Modine 社가 개발한 적층형 EGR 시스템이며, 이의 열효율은 약 59% 인 것으로 알려져 있다. 그러나, 본 연구에서의 결과인 Table 2 와 Table 3 에서와 같이 덤플형 사각 튜브 구조를 가지는 EGR 시스템의 평균 열효율은

Table 2 Comparison with thermal efficiency for dimpled tube length of 150mm

Test Condition		Out-let Temperature	Thermal Efficiency
Gas In-let Temperature*	400℃	213℃	60.2
	450℃	231℃	60.5
	500℃	257℃	59.3
Gas In-let Temperature**	400℃	214℃	60.0
	450℃	235℃	59.7
	500℃	257℃	59.4

* Experimental result at coolant flow rate 25L/min, gas flow rate 120Kg/H

** Calculated result at coolant flow rate 25L/min, gas flow rate 120Kg/H

Table 3 Comparison with thermal efficiency for dimpled tube length of 200mm

Test Condition		Out-let Temperature	Thermal Efficiency
Gas In-let Temperature*	400℃	198℃	64.9
	450℃	214℃	65.3
	500℃	231℃	65.3
Gas In-let Temperature**	400℃	197℃	65.3
	450℃	215℃	65.2
	500℃	232℃	65.1

* Experimental result at coolant flow rate 25L/min, gas flow rate 120Kg/H

** Calculated result at coolant flow rate 25L/min, gas flow rate 120Kg/H

튜브의 길이가 150mm 일 때 약 60%, 사각 튜브의 길이가 200mm 일 경우에 약 65%로 측정되었다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차용 EGR 시스템의 개발에 있어서, 시스템 내부의 온도 변화에 따른 열응력 해석, 배기 가스의 시스템 내부에서의 유동에 의한 압력 해석 및 진동 모드 해석을 통하여 덤플 사각 튜브형 EGR 시스템의 정상 작동 조건하에서의 구조 건전성을 검토하고자 하였다.

열응력에 의한 구조물의 안전성을 검토하기 위해 우선적으로 열전달 해석을 수행하였으며, 이 열전달 해석 결과를 바탕으로 열응력 해석을 수행한 결과, 최대 응력은 131MPa 로 본 시스템의 구조 재료인 SUS304 의 항복응력인 215 MPa 보다 낮다는 것을 도출할 수 있었다. 또한, 전체 모델, 덤플 튜브, 배기 가스 유입측과 배출측에서의 최대 응력 분포 경향을 확인 할 수 있었다.

그리고, 배기 가스의 본 시스템 내로의 유입과 냉각수와의 유동에 의한 압력 해석 결과로 최대 응력이 33.93MPa 로 나타났으며, 이 결과는 사용된 소재의 항복응력에 비해 현저하게 낮음을 확인 할 수 있었다. 또한, 자동차 엔진의 가진에 의한 EGR 시스템의 공진 발생 가능성을 검토하기 위해서 진동 모드 해석을 수행하였으며, 그 결과 1 차 진동 모드가 약 3,785.8Hz 로 나타났으며 이는 엔진의 최대 가진 주파수인 523.6Hz 와는 상당한 차

이를 보이므로 공진 발생의 가능성은 낮다고 판단할 수 있었다.

마지막으로 본 연구에서 제시한 덤플 구조를 가지는 사각 튜브 EGR 시스템의 열효율이 사각 튜브의 길이가 150mm, 200mm 일 경우에 약 60%, 약 65%로 각각 나타났으며, 이는 현재까지 개발된 EGR 시스템의 열효율(최대 약 59%)보다 개선되었음을 알 수 있었다. 이러한 연구 결과로부터 최근에 관심이 고조되고 있는 디젤 승용자동차 및 디젤 SUV 차량 등에 본 EGR 시스템을 장착한다면 배기 가스 배출 기준을 충분히 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

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

6. Automation Creations Inc., <http://www.matweb.com>
7. Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer 5th Edition," John Wiley & Sons, 2005.
1. Dubreuil, A. and Foucher, F., "HCCI Combustion: Effect of NO in EGR," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, Issue 2, pp. 2879 - 2886, 2007.
2. Idcheria, C. A. and Pickett, L. M., "Effect of EGR on Diesel Premixed-Burn Equivalence Ratio," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, Issue 2, pp. 2931 - 2938, 2007.
3. Heo, H. S., Won, J. P. and Park, K. S., "Evaluation of Thermal Fluid Characteristics for EGR Cooler with Spiral Type," Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 6, pp.44-50, 2003.
4. Banzhaf, M. and Lutz, R., "Heat Exchanger for Cooled Exhaust Gas Recirculation," SAE Paper No. 971822, 1997.
5. Ladommatos, N., Abdelhalim, S. M., Zhao, H. and Hu, Z., "The dilution, Chemical, and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Emission, Part I: Effect of Reducing Inlet Charge Oxygen," SAE Paper No. 961165, 1996.