

구조-유체 연성을 고려한 EGR 시스템의 진동 내구성 분석

Durability Analysis for Vibration Characteristics of EGR System Considering Fluid-structure Interaction

류 재 하* · 양 원 석†
Jaeha Ryu* and Wonseok Yang†

(Received August 18, 2022 ; Revised September 30, 2022 ; Accepted September 30, 2022)

Key Words : Durability(내구성), Base Excitation(기반 가진), Fluid-structure Interaction(유체 구조 연성), Finite Element Method(유한요소법), Cooling Water System(냉각 시스템)

ABSTRACT

Vibration tests have been conducted to verify the structural robustness of mounted vehicle parts experiencing road excitations during driving. Given the difficulty with installing water supply devices, a numerical methodology is required to conduct environmental tests of real vehicle parts containing cooling water. In this study, the structural vibrations of an exhaust gas recirculation (EGR) system with cooling water under base excitations were analyzed considering fluid-structure interactions. A numerical model based on the finite element method (FEM) was simulated to predict the structural responses of the EGR system and pressure fluctuations of its cooling water. To describe a dynamic environmental test, the excitation condition was modeled using experimental acceleration signals. The torsional and bending modes of the cooling water receptor were revealed as important factors in determining the fatigue life. The modal frequencies of the EGR system were lowered and their mode shapes were changed owing to the added mass and fluid coupling of the cooling water. Finally, the durability life under road excitations was predicted using time analysis and Miner's rule, and its numerical results were verified experimentally.

1. 서 론

최근 환경문제가 부각되면서 자동차의 질소산화물, 이산화탄소 등의 유해가스 배출 규제가 강화되고 있다. 특히 질소산화물은 디젤 엔진 내부의 고온, 고압에 의해 인위적으로 생성되어 대류권의 오존층을 파괴하거나 사람에게 호흡기 질환의 원인으로 작용한다⁽¹⁾.

배기가스 재순환(이하 EGR) 시스템은 질소산화물의 배출을 낮추기 위해 배기가스를 재순환하여 냉각시키는 장치로 내연기관 차량에 반드시 필요한 부품이다. EGR 시스템은 배기가스의 온도를 낮추기 위해 냉각수가 항상 수반되어 있어 구조물 설계시 유체의 부가 질량과 커플링 효과를 고려해야 한다.

EGR 시스템의 설계를 위해 다양한 수치해석 방법을 적용하여 동특성을 분석하는 연구가 진행되었다.

† Corresponding Author ; Member, Department of Automotive Engineering, Korea National University of Transportation, Professor
E-mail : wsyang@ut.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation, Student

A part of this paper was presented at the KSNVE 2021 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Heon Jun Yoon

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

EGR 구조물의 다양한 재료적 성질을 적용하여 노면 진동에 의한 응답을 유한요소모델로 계산한 사례가 있다⁽²⁾. 열효율과의 상관관계를 분석하기 위해 열과 구조물의 연성작용을 고려하여 딥플, 사각 튜브형 EGR 시스템의 모드해석과 응력분포를 예측한 연구가 존재한다^(3,4). EGR 시스템과 유사하게 유체를 수반하는 배관의 진동분석을 위해 보의 이론과 수치해석 모델을 활용한 연구가 진행되었다⁽⁵⁾. 분석 대상 범위를 넓혀서 터보 기계와 EGR 시스템을 함께 고려하여 이산계 시스템으로 모델링하고, 비틀림 진동효과에 대한 응답을 확인하였다⁽⁶⁾. 또한, 노면 진동에 대하여 EGR 시스템의 하우징 두께를 최적화하는 방법이 연구되었다⁽⁷⁾. 최근에는 전산유체 수치해석을 활용하여 EGR 시스템의 열충격 손상을 방지하기 위한 유동 경로를 분석한 연구가 진행되었으며, EGR 시스템에 대한 엔진 효율을 인공 신경망으로 예측된 바 있다⁽⁸⁾.

노면 진동과 유사하게 동적 하중을 고려한 기계적 내구수명을 예측하는 연구가 현재까지 진행되고 있다. 노면에서 발생하는 복합 하중에 의해 자동차용 휠의 내구성능을 유한요소모델로 예측한 사례가 있다⁽⁹⁾. 또한, 군용 차량의 노면 진동 및 충격에 대한 대형 레이더의 랜덤진동과 충격 반응 스펙트럼 해석을 통해 응력분포를 계산하고 수명을 예측한 연구가 진행되었다⁽¹⁰⁾. 마지막으로 헬기의 이륙부터 착륙까지 계측된 가속도 데이터로 외부 장착 구조물에 대한 피로 수명을 예측한 사례가 존재한다⁽¹¹⁾.

위 사례들을 통해 유체-구조 연성효과를 고려한 EGR 시스템의 진동해석은 수행된 바 있으나 데이터를 통해 내구수명을 예측하고 검증에 대한 연구가 제대로 수행되지 않고 있다. 이 연구에서는 EGR 시스템의 내구수명을 예측하기 위해 유체-구조 연성해석을 고려한 유한요소모델을 구축하였다. 완성된 수치해석 모델을 통해 EGR 시스템의 모드해석과 전달함수를 예측하였고, 실험을 통해 검증하였다. 검증된 모델을 통해 시간해석을 수행하여 EGR 시스템의 취약부를 찾아 누적 손상 법칙으로 내구성을 검토하였다.

2. 유체-구조 연성을 고려한 수치해석 모델링

2.1 유한요소 해석 모델

EGR 시스템은 Fig. 1과 같이 유입된 배기가스가 냉각수와 대류 열전달에 의해 냉각되는 원리를 갖는

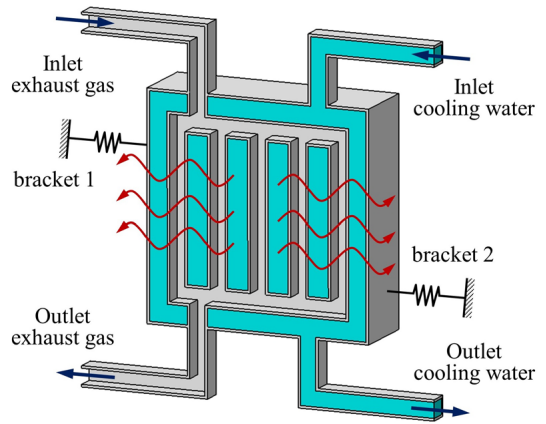


Fig. 1 Schematics of EGR cooling water system

다. 따라서, EGR 시스템의 진동을 분석하기 위해서는 구조와 유체의 연성효과를 고려해야 한다. 냉각 시스템은 차체와 연결되어 있으며, 노면 진동이 장착 구조물을 거쳐 EGR 시스템으로 전달된다. 이를 고려하기 위해서는 EGR 시스템의 장착 표면이 모델링되어야 하며, 기반 가진 조건을 주어 해당 구조물의 진동을 모사해야 한다.

EGR 시스템의 진동을 모사하기 위해서 다음과 같이 유체-구조 연성해석을 고려한 유한요소 방정식을 사용하였다⁽¹²⁾.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0} \\ \rho_f \mathbf{S} & \mathbf{M}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{d}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{d}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s - \mathbf{S}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{M}_s , \mathbf{C}_s , \mathbf{K}_s 는 구조물의 질량, 감쇠, 강성행렬을 말하며, \mathbf{M}_f , \mathbf{C}_f , \mathbf{K}_f 는 냉각수의 질량, 감쇠, 강성행렬을 의미한다. \mathbf{d} 는 구조물의 변위 벡터, \mathbf{p} 는 냉각수의 압력 벡터, \mathbf{f} 는 기반 가진에 의한 구조물의 힘 벡터를 말한다. \mathbf{S} 는 연성 행렬로 구조와 유체의 형상합수에 의해 결정된다.

기반 가진에 의한 전달함수를 분석하기 위해 변위, 압력, 가진 힘을 다음과 같이 조화함수로 가정하였다.

$$\mathbf{d} = \mathbf{D}e^{i\omega t}, \mathbf{p} = \mathbf{P}e^{i\omega t}, \mathbf{f} = \mathbf{F}e^{i\omega t} \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하여 다음과 같이 기반 가진의 주파수 응답에 따른 구조물의 변위와 냉각수의 압력을 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} -\omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0} \\ \rho_f \mathbf{S} & \mathbf{M}_f \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s - \mathbf{S}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_f \end{bmatrix} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{P} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (3)$$

식 (3)의 해를 구하기 위해서 MATLAB을 이용하여 코드를 구현하였다. 이 논문에서 사용한 유한요소 해석 코드는 유체를 수송하는 알루미늄 원형관의 진달함수 해석을 통해 정확도를 검증하였다⁽⁵⁾.

2.2 EGR 시스템의 단순모델 진동해석

실제 EGR 시스템은 Fig. 2과 같이 복잡한 구조물과 냉각수로 구성되어 있다. 구조물은 강(SUS 304), 알루미늄(6061 aluminum alloy), 플라스틱(PPA)으로 이루어져 있으며, 냉각수는 15 °C의 물로 가정하여

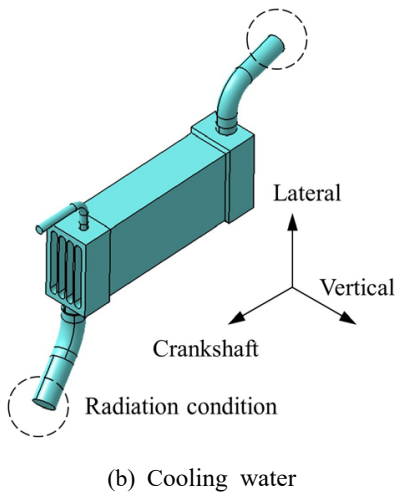
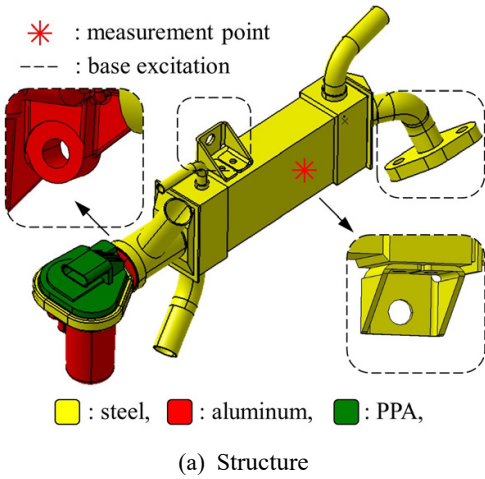


Fig. 2 Boundary condition of finite element model for vibration analysis of EGR cooling water system

Table 1과 같이 물성치를 설정하였다⁽¹³⁻¹⁵⁾. 구조물의 장착면에는 기반 가진 조건을 주었으며, 냉각수의 입출구는 자유단 조건을 입력하였다. 냉각수의 경계조건으로는 입출구 조건에 무반사 조건을 주어 구조진동에 의해 발생하는 압력 섭동이 빠져나갈 수 있도록 모델링하였다.

모드해석을 수행하기 위해서 구조물의 면에 고정단 조건을, 물의 입출구에는 자유단 조건을 주어 식 (1)의 고유치 문제를 풀었다.

EGR 시스템의 진동 특성을 파악하기 위해 Fig. 3과 같이 냉각수 용기를 단순화된 모델로 모드해석을 진행하였다.

모드해석을 수행한 결과, Fig. 4처럼 1차 모드에서 비틀림 방향의 모드형상이 나타났으며, 2차에서는 굽힘 방향으로 진동이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, 냉각수에 의한 부가질량 효과로 인해 고유진동수가 저주파수로 이동하는 현상을 보였다. 1차 고유진동수가 노면에 의한 기반 가진 대역(약 500 Hz 미만)⁽¹⁶⁾과 근접하여 EGR 시스템의 내구성에 가장 큰 영향을 줄 것으로 파악된다.

Table 1 Mechanical properties of EGR cooling water system

Solid properties	Young's modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson ratio
Steel	200	8000	0.3
Aluminum	68.9	2700	0.35
PPA	3.7	1200	0.4
Fluid properties	Wave speed (m/s)	Density (kg/m ³)	Kinematic viscosity (m ² /s)
Water	1492	1000	1.787 × 10 ⁻⁶

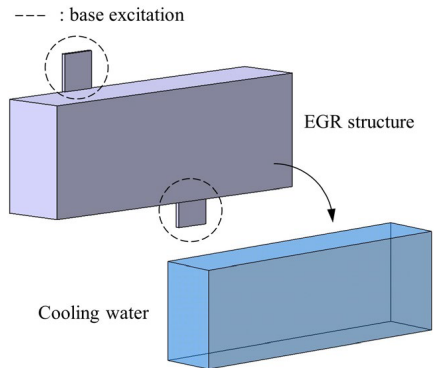


Fig. 3 Simplified model of EGR cooling water system

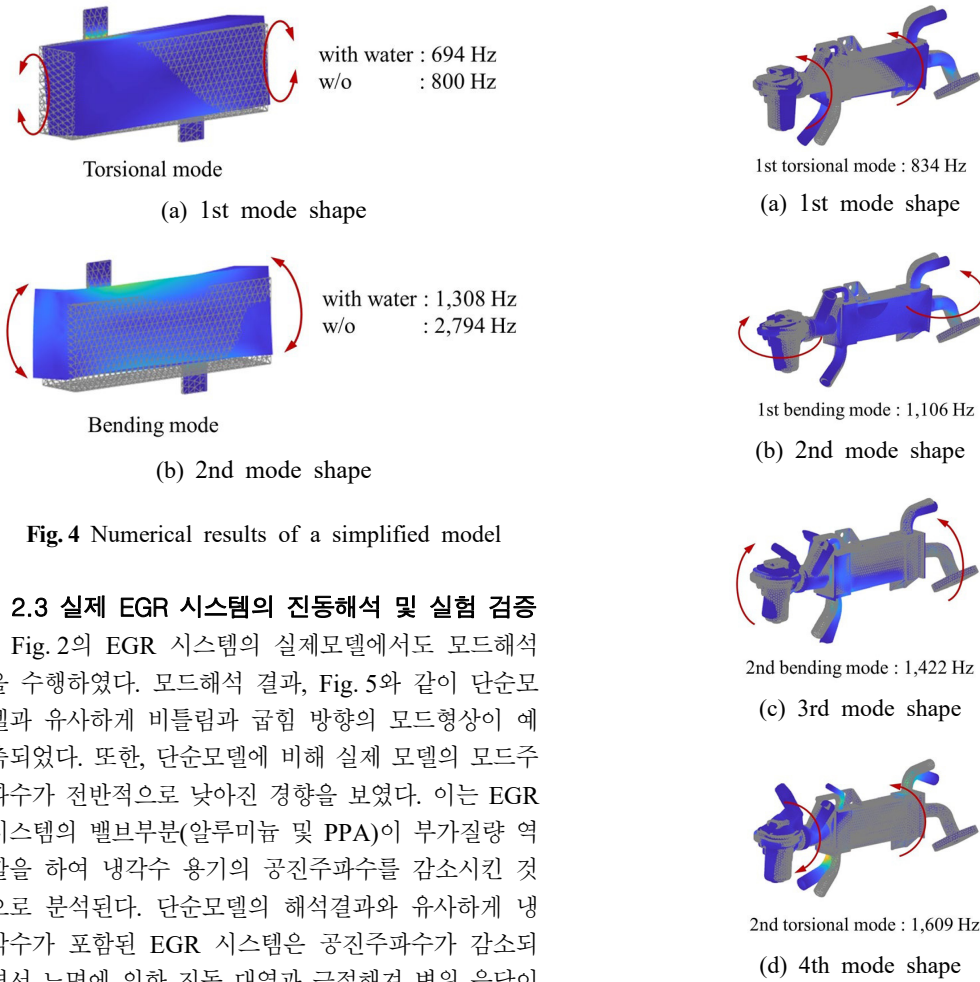


Fig. 4 Numerical results of a simplified model

2.3 실제 EGR 시스템의 진동해석 및 실험 검증

Fig. 2의 EGR 시스템의 실제모델에서도 모드해석을 수행하였다. 모드해석 결과, Fig. 5와 같이 단순모델과 유사하게 비틀림과 굽힘 방향의 모드형상이 예측되었다. 또한, 단순모델에 비해 실제 모델의 모드주파수가 전반적으로 낮아진 경향을 보였다. 이는 EGR 시스템의 밸브부분(알루미늄 및 PPA)이 부가질량 역할을 하여 냉각수 용기의 공진주파수를 감소시킨 것으로 분석된다. 단순모델의 해석결과와 유사하게 냉각수가 포함된 EGR 시스템은 공진주파수가 감소되면서 노면에 의한 진동 대역과 근접해져 변위 응답이 높게 나타날 것으로 보인다. 높아진 변위 응답은 응력 상승을 유발시켜 내구성에 영향을 줄 것으로 파악된다. Fig. 5 (a)의 경우는 크랭크(crankshaft) 방향의 비틀림 진동이 예측되었으며, 수평(lateral) 방향과 수직(vertical) 방향의 진폭에 영향을 주었다. 또한, Fig. 5(b)의 경우는 수평 방향과 수직 방향을 모두 갖는 회전축에 대한 굽힘모드가 예측되었다. 이는 EGR 시스템의 단순 모델과의 형상 차이, 밸브 및 튜브의 경계조건으로 인해 발생한 것으로 확인되었다. Fig. 5 (c)와 (d)의 2차 모드도 다른 공진주파수에 비해 노면에 의한 진동 대역에 가까워 내구성에 영향을 줄 것으로 분석된다.

식 (3)을 통해 Fig. 6과 같이 기반 가진의 변위와 EGR 시스템 변위의 전달함수를 계산하였다. 기반 가진과 EGR 시스템 변위의 측정위치는 Fig. 2와 같다. Fig. 5에서 예측된 모드주파수가 전달함수의 공진으로

Fig. 5 Numerical results of EGR cooling water system

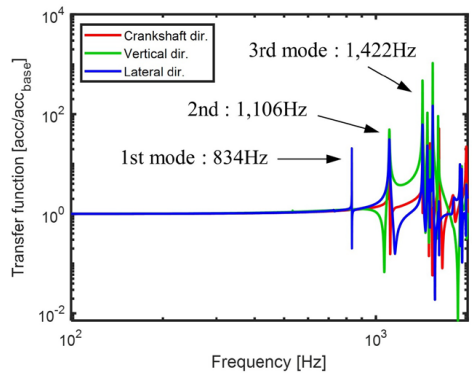
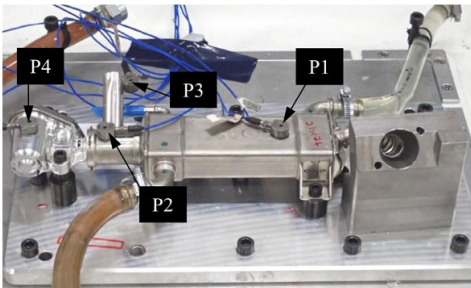


Fig. 6 Transfer functions of EGR cooling water system on the base excitation in the crankshaft, vertical, and lateral directions

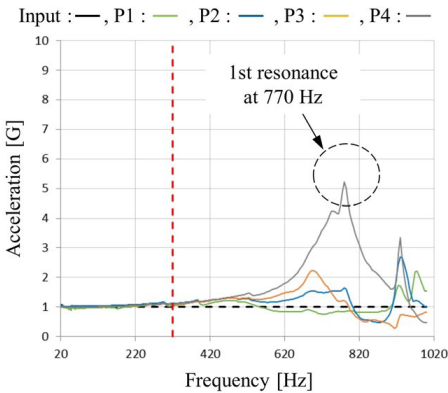
로 검출되었다. 하지만, 해당 모드형상들은 노면에 의한 진동대역 미만의 전달함수 크기에 영향을 주지 않았으며, 현재의 냉각수 용기 설계가 내구성 측면에서 안전하게 설계된 것으로 파악된다.

3. EGR 냉각 시스템의 진동실험 및 검증

유한요소 모델의 정확성을 검증하기 위해 Fig. 7(a)과 같이 실제 실험에서의 가속도 신호를 측정하였다. 공진 주파수의 일치성을 확인하기 위해 급수펌프를 이용하여 EGR 시스템에 냉각수를 공급하여 부가질량 효과를 구현하였다. Fig. 2와 동일하게 장착부와 기반 가진의 바닥과 연결시켰으며, 가진 가속도의 크기는 1G, 가진 주파수 대역을 약 1000 Hz 이하로 실험을 수행하였다. Fig. 7 (a)에서 보는 바와 같이 측정지점은 Fig. 5의 모드분석 결과를 바탕으로 총 4곳으로 1차 비틀림 모드의 측정이 잘 되는 부분(P4)과 그렇지 않은 부분(P1, P2, P3)을 나누어 가속도 신호 응답을 확인하였다.



(a) Measuring points



(b) Acceleration responses

Fig. 7 Experimental setup to measure the acceleration signal of EGR cooling water system

Fig. 7(b)은 4곳 가속도 신호와 입력 신호를 나타낸 그래프이다. 예측했던 대로 측정지점 P1 ~ P3 신호에서는 공진주파수가 나타나지 않았으며, P4 신호에서는 1차 비틀림 모드로 추정되는 성분(약 770 Hz)에서 응답이 높게 측정되었다. Fig. 5(a) 공진주파수와 비교한 결과, 재료의 물성치와 실험장치의 장착조건 모호성으로 인해 약 8%의 차이를 보였지만 1차 비틀림 모드형상과 동일한 경향을 보였다. 1차 굽힘모드와 2차 모드들은 공진주파수들이 가진주파수 대역보다 높게 나타나 1000 Hz 이하에서는 검출되지 않은 것으로 분석되었다. P3 신호의 700 Hz에서 발생하는 공진은 하단부의 냉각수 튜브에 의해 발생한 것으로 실제 차량 장착조건에서는 튜브의 길이가 길기 때문에 나타날 것으로 판단된다.

4. EGR 냉각 시스템의 내구성 평가

검증된 유한요소모델을 이용하여 EGR 냉각 시스템의 내구성을 판단하였다. 내구성 판단 지점을 설정하기 위해 노면에 의한 차체의 가속도신호를 기반 가진에 입력하여 주파수별 응력 데이터를 계산하였다. 주파수별 응력 데이터는 다음과 같이 로그합을 통해 응력분포 레벨로 계산하였다.

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \frac{\sigma_{total}^2}{\sigma_{ref}^2} \tag{4}$$

여기서 σ_{total} 은 전주파수에 대한 응력합을 말하며, σ_{ref} 은 기준응력으로 1 Pa로 설정하였다. Fig. 8과 같이 응력분포 레벨이 가장 높게 예측된 지점들을 내구성 판단 지점으로 선정하였다. 주로 냉각수 용기에서 높은 응력이 발생되었으며, 중앙과 모서리 부분에서 1차 비틀림 모드로 인한 응력 상승을 알 수 있었다.

자동차부품의 내구진동 실험에서는 일반적으로 노면에 의한 차체의 가속도신호에 1.5 ~ 3배로 진폭을 증가시켜 수행한다⁽¹⁷⁾. Fig. 9는 실제 차체의 가속도신호를 1.75배로 증폭시킨 결과를 보여준다. 내구수명을 계산하기 위해 유한요소모델에 대한 시간해석이 필요하다. 이를 위해서는 Fig. 9의 가속도신호를 시간신호로 환산하였다. 모드법을 활용하여 식 (1)을 정규화하여 시간에 대한 중앙차분법으로 응답을 계산하였다. 시간해석으로 구한 시간 응답은 레인플로 헛수방법을

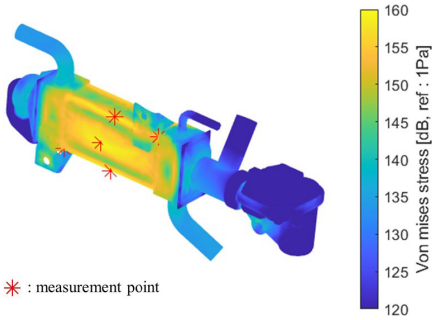


Fig. 8 Stress distribution of EGR cooling system applied on base excitation at the frequency band of Fig. 9

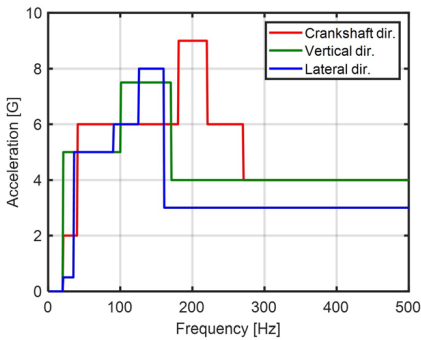
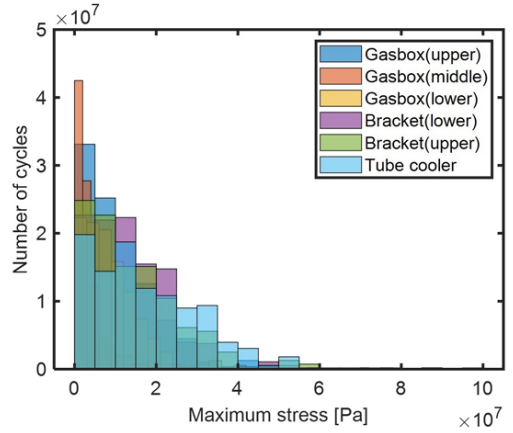


Fig. 9 Input acceleration profile of base excitation considering the vibration of vehicle

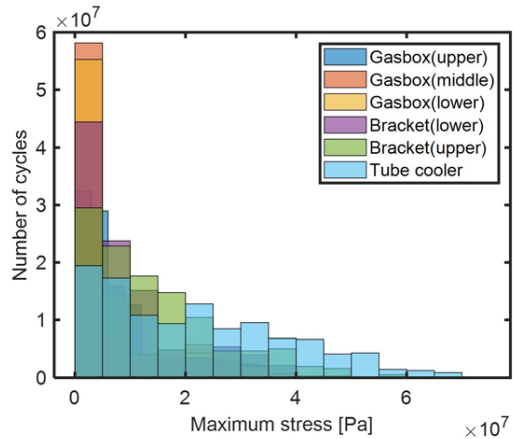
통해 교변하중의 크기 및 횟수를 계산하였다. EGR 냉각 시스템의 내구성을 검토하기 위해 참고문헌의 SUS 304 S-N 곡선과 비교하여 누적 손상법칙을 적용하였다⁽¹⁸⁾. 가진 시간은 100시간으로 설정하였으며, 해석시간을 고려하여 교변하중의 회수를 계산하였다. 내구 수명시간을 검토하기 위해서 가진 시간과 S-N 곡선과의 관계를 아래의 식을 통해 예측하였다⁽¹⁹⁾.

$$N_2 = N_1 \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^m \tag{5}$$

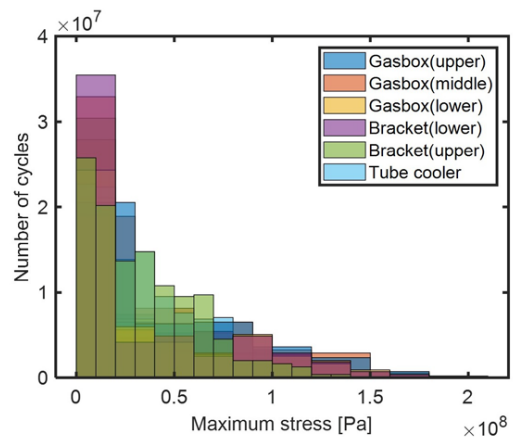
여기서 N_1 은 가진 시간, N_2 는 목표 내구 수명 시간, S_1 는 측정된 변위신호의 진폭, S_2 는 실험을 위해 증폭된 변위신호, m 은 S-N 곡선의 기울기 역수를 의미한다. SUS 304의 경우는 m 의 범위가 약 10~20정도로 알려져 있으며, 참고문헌을 통해 18.43으로 계산하였다. 앞서 실험조건에 의해 S_1 와 S_2 의 비율은 1.75이며, 이



(a) Crankshaft direction



(b) Vertical direction



(c) Lateral direction

Fig. 10 Rainflow cycle counting histogram for EGR cooling water system applied to base excitation

Table 2 Damage evaluation of EGR cooling water system using Miner’s rule

Direction of vibration	Measuring point	Miner’s rule
Crankshaft dir.	Housing	0
	Bracket	0
	Tube	0
Vertical dir.	Housing	0.02
	Bracket	0.02
	Tube	0.01
Lateral dir.	Housing	0.39
	Bracket	0.38
	Tube	0.01

를 환산하면 약 30 000시간으로 예측된다.

Table 2에서는 Fig. 10과 같이 누적 손상법칙을 적용한 결과, 크랭크 방향, 수직 방향보다 수평 방향에서 교번 하중의 크기가 가장 높게 예측되었다. 1차 비틀림 모드가 다른 모드에 비해 내구성에 지배적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 또한, 냉각수 용기와 장착 브라켓이 다른 곳에 비해 높은 응력이 발생되어 냉각수 용기의 내구성이 가장 낮다고 분석된다. 하지만, 예측된 누적손상 법칙의 수가 1보다 작기때문에 기반 가진으로 인한 손상이 없을 것으로 기대된다.

5. 결 론

이 논문에서는 유체를 수반하고 있는 EGR 시스템의 내구성을 분석하기 위해 유한요소모델을 활용하여 진동 특성을 파악하고, 실험을 통해 이를 검증하였다. EGR 시스템의 진동을 모사하기 위해 유체-구조 연성 효과가 존재하는 유한요소 방정식을 사용하였다. 진동 특성을 파악하기 위해 EGR 시스템을 단순화하여 모드분석을 수행하였다. 단순 모델의 모드형상으로는 비틀림, 굽힘방향 진동이 예측되었으며, 이는 실제 모델에서도 유사한 경향을 보였다. 실제 모델의 기반 가진 실험 결과, 가속도 신호들에 따라 모드형상으로 인한 공진주파수들이 검출되었다. 내구성을 평가하기 위해 차량의 입력 신호를 시용하여 EGR 시스템의 주파수별 응력분포를 예측하였다. 내구 수명 예측을 위해 주파수별 응력 분포의 로그합을 계산하여 주요 관측지점을 선정하였다. 검증된 EGR 시스템의 유한요소모델에 시간해석을 적용하여 기반 가진에 대한 주요 관측지점의 시간 신호를 계산하였다. 예측된 시간신호와 레인플로 횡수방법으로 교번하중의 회수와 크기를 분

별하였다. 수평 방향의 응력크기가 가장 높게 예측되었으며, 앞서 예측된 모드형상과 유사한 방향으로 진동하여 내구성이 가장 취약할 것으로 예상하였다. 마지막으로 EGR 시스템의 내구성을 검증하기 위해 누적 손상법칙으로 100시간에 대한 내구성 평가를 수행하였고, 손상이 없을 것으로 기대된다. 이 연구결과를 통해 자동차 부품 설계 분야의 모드형상 및 동강성 해석 방법 뿐만 아니라 내구 피로 수명을 예측하는 기술 개발과 냉각수의 강건 설계 등으로 활용될 수 있다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1G1A109725213).

References

- (1) Seo, Y., Lee, H., Jeon, S., Ku, T., Kang, B. and Kim, J., 2012, Homogenization of Dimpled Tube and Its Application to Structural Integrity Evaluation for a Dimple_type EGR Cooler using FEM, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 13, No. 2, pp. 183~191.
- (2) Shrestha, R., Chung Y., Han, A., Hong, S. and Kim, W., 2016, Finite Element Analysis on Thermal Performance of Exhaust Gas Recirculation by using CFD, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 11, pp. 8288~8292.
- (3) Carrera, J., Navarro, A., Paz, C., Sanchez, A. and Porteiro, J., 2015, Fatigue Life Calculation under Thermal Multiaxial Stresses in EGR Coolers, SAE International Journal of Materials and Manufacturing, Vol. 8, No. 3, pp. 632~639.
- (4) Demirkesen, C., Zeren, H. B., Guryuva, S. and Savci, I. H., 2022, Numerical and Experimental Investigation of Heavy-duty EGR Cooler Thermal Performance, Applied Thermal Engineering, Vol. 212, p. 118531.
- (5) Yang, W., 2021, Prediction of Flow Velocity from the Flexural Vibration of a Fluid-conveying Pipe using the Transfer Function Method, Applied Sciences, Vol. 11, No. 13, p. 5779.
- (6) Kim, Y. and Kim, U., 2019, Effects of Torsional

Vibration of a Propulsion Shafting System and Energy Efficiency Design Index from a System Combining Exhaust Gas Recirculation and Turbocharger Cut Out, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 33, No. 8, pp. 3629~3639.

(7) Dhummansure, V., Salunkhe, P. S., Doddamani, S. and Jamadar, N. I., 2021, Structural Analysis and Optimization of EGR Cooler for Diesel Engine, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 21, No. 1, pp. 1387~1395.

(8) Park, J., Cho, J., Choi, H. and Park, J., 2020, Prediction of Reformed Gas Composition for Diesel Engines with a Reformed EGR System Using an Artificial Neural Network, *Energies*, Vol. 13, No. 22, 5886.

(9) Jung, S., Chung, W. and Park, T., 2011, Multi-axial Stress Analysis and Experimental Validation to Estimate of the Durability Performance of the Automotive Wheel, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 21, No. 10, pp. 875~882.

(10) Shin, D., Lee, S., Lee, J., Kang, K., Jin, H. and Kim, K., 2018, Environmental Specification Establishment of Transport Dynamic Property for Large Radar and Durability Analysis, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 28, No. 5, pp. 600~607.

(11) Jeong, H., Park, J., Son, D. and Jang, J., 2019, Study on Fatigue Life Estimation of an Aircraft External Store under Dynamic Loads, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 29, No. 4, pp. 462~469.

(12) Cook, R., 2007, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.

(13) Vinh, P. V. and Tounsi, A., 2022, Free Vibration Analysis of Functionally Graded Doubly Curved Nanoshells using Nonlocal First-order Shear Deformation Theory with Variable Nonlocal Parameters, *Thin-Walled Structures*, Vol. 174, p. 109084.

(14) Aragh, B. S. and Hedayati, H., 2012, Static Response and Free Vibration of Two-dimensional Functionally Graded Metal/Ceramic Open Cylindrical Shells Under Various Boundary Conditions, *Acta Mechanica*, Vol. 223 No. 2, pp. 309~330.

(15) Ficici, F., Ayparcasi, Z. and Unal, H., 2017,

Influence of Cutting Tool and Conditions on Machinability Aspects of Polyphthalamide (PPA) Matrix Composite Materials with 30 % Glass Fiber Reinforced, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 90, pp. 3067~3073.

(16) Harrison, M., 2004, *Vehicle Refinement Controlling Noise and Vibration in Road Vehicles*, SAE International, Warrendale, PA, pp. 145~233.

(17) Choi, G., 2008, Durability Performance Evaluation of Automotive Components Using Hydraulic 6 Axis Simulation Table, *Journal of Drive and Control*, Vol. 5, No. 1, pp. 11~16.

(18) Cho, B., Jeong, E. and Koo, J., 2018, Evaluation of the Durability Characteristics of the Railway Vehicle Main Transformer Under Random Vibration, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 27, No. 6, pp. 524~532.

(19) Yasuoka, M., Wang, P., Zhang, K., Qiu, Z., Kusaka, K., Pyoun, Y. S. and Murakami, R., 2013, Improvement of the Fatigue Strength of SUS304 Austenite Stainless Steel using Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 218, No. 1, pp. 93~98.



Jaeha Ryu received his M.S. degree in Mechanical Engineering from Inje University, in Korea, in 2002. He has been working for Borgwarner since 2014. He is Ph.D. course degrees in Mechanical Engineering at Korea National University of Transportation.



Wonseok Yang received his Ph.D. in Mechanical Engineering from Hanyang University, Seoul, Korea in 2017. He worked at the Agency of Defense Development from 2017 to 2019. He is currently an assistant professor of Department of Automotive Engineering in Korea National University of Transportation. His research interests include signal processing, wave analysis, and noise control for improving damping, or fluid-structure interaction analysis including mechanical issue.