

< 논문 >

터보 디젤 엔진용 배기매니폴드의 열변형 해석

김범근[†] · 이은현* · 최복록**
(2006년 9월 4일 접수, 2007년 2월 14일 심사완료)

Thermal Deformation Analysis of Exhaust Manifold for Turbo Diesel Engine in Consideration of Flange Design

Beomkeun Kim, Eunhyun Lee and Boklok Choi

Key Words: Turbo Diesel Engine(터보 디젤 엔진), Exhaust Manifold(배기 매니폴드), Fea(유한 요소 해석), Plastic Strain(소성 변형률), Thermal Deformation(열 변형)

Abstract

Thermal deformation of cast iron exhaust manifold for turbo diesel engine is investigated by finite element analysis (FEA). The FE model included the temperature dependent material properties as well as the interactions between exhaust manifold, cylinder head and fasteners. It also considers the sliding behavior of the flanges of exhaust manifold on cylinder head when either expansion or contraction of the exhaust manifold exceeds the fastener pretension. The result of analysis revealed that remarkable thermal deformation along the longitudinal direction. Compressive plastic deformation at high temperature remained tensile stress in manifold and resulted in longitudinal contraction at ambient temperature. The amount of contraction at each fastener position was predicted and compared with experimental results. Analysis results revealed that the model predicted deformation qualitatively, but more elaborated cyclic hardening behavior would be necessary to predict the deformation quantitatively.

기호설명

- AF : 공연비
- BSFC : 비연료소모율(g/PS·h)
- h : Heat transfer coefficient (W/m²K)
- P : 출력(PS)
- T : 온도(°C)
- \dot{m} : Mass flow rate (g/h)
- \dot{m}_{air} : Mass flow rate of air (g/h)
- \dot{m}_{fuel} : Mass flow rate of fuel (g/h)

1. 서론

배기 매니폴드는 실린더 헤드와 배기 파이프 사이에 위치하여 엔진에서 발생하는 배기가스를 배출시키는 역할을 한다. 이러한 배기 매니폴드는, 엔진의 시동을 걸었을 때 발생하는 고온의 온도 조건과 엔진이 정지되었을 때 냉각되어 형성되는 저온의 온도 조건이 주기적으로 반복되면서, 열 변형 현상이 발생되고, 이러한 변형은 열 피로 균열 현상을 발생시킨다.¹⁾³⁾ 최근에는 엔진의 출력 증대, 연료비 효율 및 환경 문제 등의 요구 조건을 충족시키기 위하여, 배기가스 온도가 더욱 높아지는 추세이므로, 배기 매니폴드의 과도한 열 변형에 의한 열 피로 가능성이 더욱 높아지는 추세이다. 이러한 파손 문제를 줄이기 위해서는 배기 매니폴드에서 발생하는 열변형 현

† 책임저자, 회원, 인제대학교 기계자동차공학부
E-mail : mechkbk@inje.ac.kr
TEL : (055)320-3439 FAX : (055)320-3439

* 현대기아 연구개발본부 승용디젤엔진시험팀

** 회원, 원주대학 자동차기계과

상에 대한 정확한 이해가 필요하다.

지금까지, 유한요소법을 이용하여 배기 매니폴드에서 발생하는 열응력을 파악하고 열 피로 내구 수명을 예측하고자 하는 시도가 많이 이루어져 왔다. Mamiya 등은 비선형 유한요소해석을 통하여 파악된 소성 변형량과 매니폴드 재질의 열 피로 강도 사이의 관계를 이용하여, 열 피로 내구 성능을 예측하였다.⁽¹⁾ 윤 등은 온도에 의존하는 반복 소성 모델(Temperature dependent cyclic plasticity model)을 제안하고, 이 모델을 이용하여 배기매니폴드의 내구 수명을 예측하였다.⁽³⁾ 최 등은 가솔린 엔진에 사용되는 배기매니폴드의 수명을 예측하였다.⁽⁴⁾ 이러한 연구 결과들은 내구 수명 예측에는 성공하였으나, 배기 매니폴드에서의 정확한 열변형 특성에 대한 시험적 검증 없이 수행되었다.

최근에 개발되고 있는 터보 디젤 엔진용 배기 매니폴드는 엔진의 출력 증대로 인하여 기존의 디젤 엔진용 배기매니폴드에 비하여 온도가 더욱 높아졌으며, 엔진의 성능을 높이기 위하여 배기 가스 순환 시스템(Exhaust gas recirculation system)과 함께 장착되기도 한다. 또한, 좁은 엔진룸에 위치하기 때문에 런너(Runner)의 길이가 짧아 열 피로 측면에서도 불리하다. Delprete와 Rosso는 터보 디젤 엔진용 배기 매니폴드에 대한 실험 및 유한 요소 해석을 실시하여, 배기 매니폴드의 플랜지면이 실린더 헤드면을 따라 미끄러지는 양이 크다는 것을 제시하였으며, 실린더 헤드 크랙의 발생 위치를 예측하였다.⁽⁵⁾ 최근 자동차 업체에서는 배기매니폴드 플랜지면의 볼트 홀을 볼트 유효경보다 크게 하여, 배기 매니폴드의 과도한 변형에 의한 크랙현상을 줄이고 있다. 본 연구에서는 터보 디젤 엔진용 배기 매니폴드에서 발생하는 플랜지면의 미끄러짐 현상을 해석적으로 재현하고 시험 결과와 비교하여, 시험적으로 검증된 해석 모델을 제시하고자 한다.

2. 유한 요소 해석

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 터보 디젤 엔진용 배기매니폴드의 형상을 나타낸다. 엔진에서 연소된 가스는 배기 매니폴드의 입구 측 플랜지를 통하여 유입되어 짧은 런너를 통하여 합쳐진 후, 배기가스 순화 시스템으로 유입되거나 터보

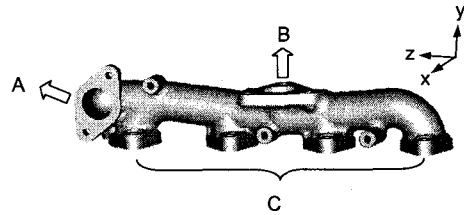


Fig. 1 Exhaust manifold of turbo diesel engine; A: Outlet to EGR system, B: Outlet to Turbo charger, C: inlet from cylinder head

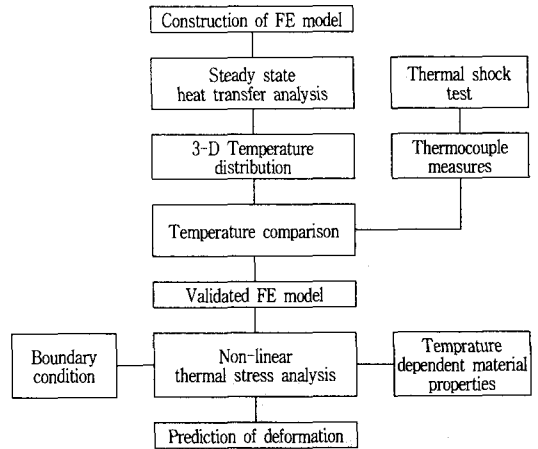


Fig. 2 The procedure of thermal analysis

차저(Turbo charger)로 흘러가게 된다. 이러한 배기 매니폴드의 열변형을 해석적으로 예측하기 위하여 Fig. 2의 절차로 비선형 해석을 수행하였다. 우선 해석 모델을 구성한 후, Heat transfer analysis를 수행하여 온도분포를 파악하였다. 파악된 온도분포는 측정된 온도와 비교 검증한 후, 엔진 작동 중 배기 매니폴드의 온도 조건으로 입력하였다. 온도에 따른 비선형 물성치를 고려하여 구조해석을 실시한 후, 내구시험 조건에서의 배기매니폴드의 변형을 예측하였다.

2.1 유한 요소 해석 모델

배기 매니폴드의 열 변형을 예측하기 위하여, CAD 형상을 바탕으로 유한 요소 모델을 생성하였다. 가스켓, 볼트 및 실린더 헤드까지 해석 모델에 모두 포함시켜 배기 매니폴드 해석을 실시하는 경우, 실제 구속 조건을 모두 표현시킬 수는 있지만, 해석 모델의 크기가 과대해져 많은 계산 시간이 소

요된다. 본 연구에서는 실제의 구속 조건을 표현하는 경계조건이 부여된 단순화된 해석 모델을 구성하여 해석을 실시하였다.⁽⁵⁾ Fig. 3은 본 연구에서 사용된 유한 요소 해석 모델을 나타낸다. 배기 매니폴드는 사면체 2차 요소(Parabolic tetra element)를 이용하여 구성하였으며, 실린더 헤드는 배기 매니폴드와의 접촉면을 포함한 판재의 형상으로 단순화시켰다. 배기 매니폴드를 조립할 때 체결되는 볼트의 초기 장력은 변위로 환산하여 플랜지의 볼트 접촉면에 적용시키고 볼트는 유한 요소 해석 모델에서 제외시켰다.

Table 1은 해석 모델에 사용된 부품의 상온에서의 재료 특성을 나타낸다. 배기 매니폴드 모델에는, Fig. 4에 나타난 바와 같이, 온도에 따른 배기 매니폴드 재질의 비선형 특성을 입력하였으며, 온도에 따른 열팽창 계수 값도 입력하였다. 실린더 헤드의 재질에 대해서는 상온의 특성을 해석에 이용하였다.

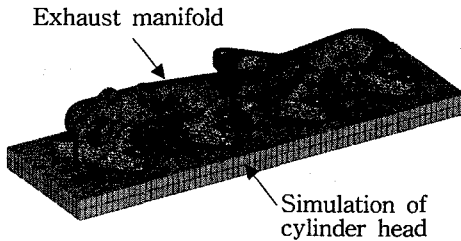


Fig. 3 FE model of exhaust manifold

Table 1 Mechanical properties at room temperature

Part	Material	E(GPa)	ν	$\alpha(10^{-6}/K)$
Exhaust manifold	FCD-50HS	160	0.29	12.2
Cylinder head	Aluminum	69	0.33	21.4

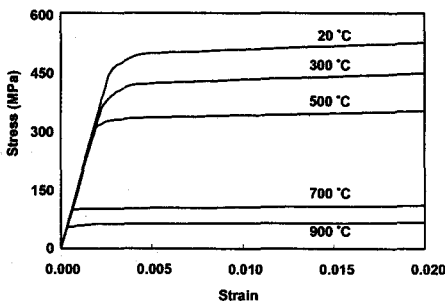


Fig. 4 Stress strain curve of exhaust manifold

2.2 온도 분포 해석

엔진이 작동할 때 배기 매니폴드에 형성되는 온도 분포를 파악하기 위하여, 최 등의 연구 방법을 따라 배기 가스 유동장과 배기 매니폴드의 온도 분포를 동시에 계산하는 Conjugate Heat Transfer(CHT) 해석을 수행하였다.⁽⁶⁾ 배기 매니폴드에서 유동하는 배기가스는 비압축성 공기로 가정하였으며, 상용 프로그램인 STAR-CD를 이용하여 계산하였다. 시험에서 측정된 배기가스의 온도와 다음의 식에서 계산된 유량을 입구 경계 조건으로 지정하였다.

$$\dot{m} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel} \tag{1}$$

$$\dot{m}_{fuel} = BSFC \times P \tag{2}$$

$$\dot{m}_{air} = \dot{m}_{fuel} \times AF \tag{3}$$

본 연구에서 사용된 배기매니폴드의 입구 경계 조건 입력 데이터는 다음과 같다.

- BSFC : 237 (g/kwh)
- Power : 110.7 (kW)
- AF ratio : (20.4:1)
- Exhaust gas temperature : 810 °C

유동장의 출구에는 압력 경계 조건을 사용하였으며, 실험에서 측정된 압력을 입력하였다. 런너 및 플랜지의 외벽 면에는 영역별로 구분하여, 대류형 열 경계 조건인, 시험에 의하여 측정된 배기 매니폴드 주위의 온도와 열전달 계수를 부여하였다(Table 2). 온도 분포 파악을 위한 해석 모델에는 포함되어 있지 않은 실린더 헤드로의 열전도를 고려하기 위하여 입구 플랜지 벽면의 열전달 계수를 높게 설정하였다.

Table 2 Convection type boundary condition

Location	T(°C)	H(W/m ² K)
Inlet flange head side	85	250
Inlet flange air side	139.5	250
Runners	139.5	15
Outlet flange air side	139.5	20

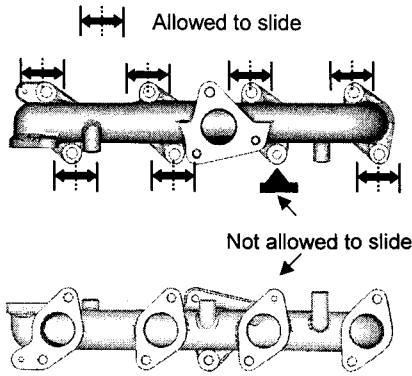


Fig. 5 Different tolerance given to bolt holes to allow sliding of flanges

2.3 경계 조건 및 하중 조건

온도에 따른 비선형 물성치가 고려된 구조해석을 위해서는 상용 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 배기 매니폴드와 실린더 헤드 사이의 경계면에는 접촉 조건을 주어, 열팽창률이 다른 두개의 금속이 서로 미끄러질 수 있도록 하였으며, 실린더 헤드는 변위를 고정시켰다. 본 연구에 사용된 배기 매니폴드는 축 방향 변형 구속을 풀어주기 위하여, Fig. 5와 같이 플랜지면의 볼트 홀중, 하나의 볼트 홀을 제외한 나머지를 모두 볼트 유효경보다 크게 하였다.

유한 요소 해석 모델에서는 배기 매니폴드의 볼트 홀 중심과 실린더 헤드 볼트 체결 면 중심 사이를 커넥터 요소 (Connector element)로 연결하여, 배기 매니폴드 플랜지의 볼트 홀 부위가 볼트 홀과 볼트 유효경의 공차 범위 내에서 움직일 수 있도록 하였다. 또한 커넥터 요소에는 볼트의 장력에 의한 마찰력에 상응하는 탄성계수를 부여하여, 배기 매니폴드의 변형이 볼트의 장력을 초과할 때에만 미끄러질 수 있도록 하였다.

하중 조건은 열 사이클 내구 시험을 따랐다.⁽⁴⁾ 상온 상태에서 볼트의 초기 장력을 입력한 배기 매니폴드의 조립 상태를 첫 번째 하중 조건으로, 엔진의 작동 중 발생하는 온도 분포를 각 절점에 입력한 고온의 온도 상태를 두 번째 하중 조건으로 입력하였다. 다음으로 각 절점에 상온의 온도 분포를 입력하여 열 사이클 내구 시험에서 상온으로 냉각되는 과정을 구현하였다. 마지막 두 하중 조건을 반복함으로써, 사이클 수 증가에 따른

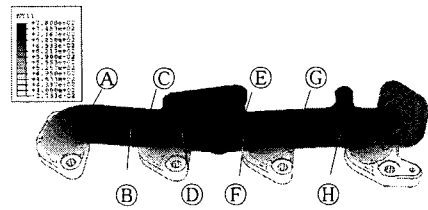


Fig. 6 Calculated temperature distribution of exhaust manifold

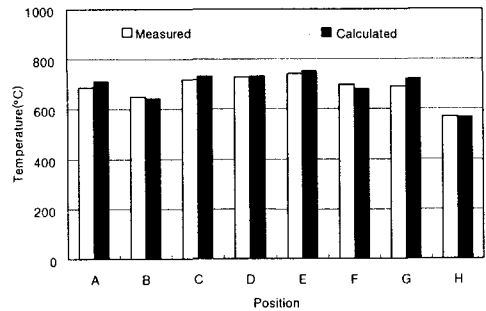


Fig. 7 Comparison of calculated and measured surface temperature

배기 매니폴드의 변형을 파악하였다.

3. 결 과

3.1 온도 분포

해석을 통하여 파악된 각 절점에서의 온도 분포는 Fig.6과 같이 나타났다. 엔진 작동 시 배기 매니폴드에서 가장 온도가 높을 것으로 파악된 부위는 터보 차저 플랜지 부위로서 764°C에 이를 것으로 예측되었다. 가장 높은 것으로 파악되었으며, 해석에서 파악된 온도 분포와 비슷한 경향을 나타내었다. Fig. 7은 배기 매니폴드의 주요 위치에서 열전대를 사용하여 파악한 표면 온도와 해석을 통하여 예측된 온도를 비교하여 나타낸다.

3.2 변형 형상

해석을 실시한 결과, 본 연구에서 사용된 배기 매니폴드와 같이 런너의 길이가 짧고 연소 가스가 함유되는 부위가 긴 배기 매니폴드는, 고온

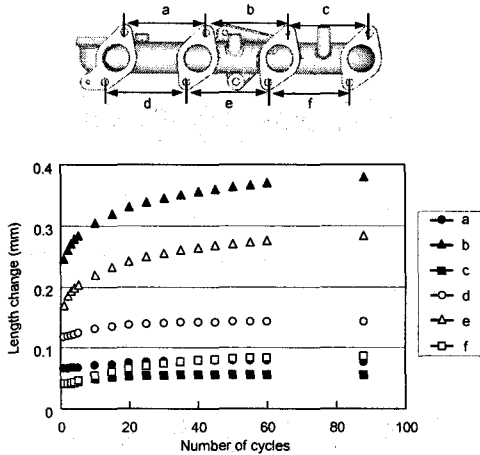


Fig. 8 Change in distance between fastener holes at each thermal cycle

상태에서 플랜지의 축 방향(Z-axis in Fig. 1) 변형이 크게 나타나는 것으로 파악되었다. 재질의 열팽창에 의한 축 방향 변형으로 인하여, 공차가 부여된 볼트 홀에 접한 플랜지 면들은 실린더 헤드 면을 따라 미끄러짐 현상을 일으켰다.

열팽창 되었던 배기 매니폴드는 상온으로 냉각되면서 수축을 일으켰으며, 매 주기를 반복함에 따라 냉각된 상태에서 파악된 플랜지 볼트 홀 간의 거리(Fig. 8)는 줄어드는 것으로 예측되었다. 이러한 현상은, 엔진 작동 시 터보 차저 장착 플랜지 부위에서 발생한 압축 소성 변형이, 냉각된 후 인장 잔류 응력으로 형성되어, 배기매니폴드의 영구적인 변형을 일으켰기 때문인 것으로 파악된다. 열 사이클 해석을 88회 실시한 후 파악된 변형 형상은 터보 차저 장착 부위에서의 수축 현상이 가장 두드러진 것으로 파악되었다. 1800 회의 열 사이클 실험을 실시한 후 측정된 플랜지 볼트 홀 간의 거리도 해석에서 예측된 바와 같이 줄어드는 것으로 파악되었으며, 터보 차저 장착 부위인 b와 e에서 가장 수축이 큰 것으로 나타났다.

열 사이클을 반복함에 따라 줄어드는 플랜지 볼트 홀 간의 거리 측정 결과를 해석 결과와 비교하기 위하여, 1800 사이클의 내구 시험후의 거리 측정 결과와 88 사이클의 해석 결과를 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 해석 결과의 경우, 사이클 수가 88회로서 1800 사이클인 시험 결과와 큰

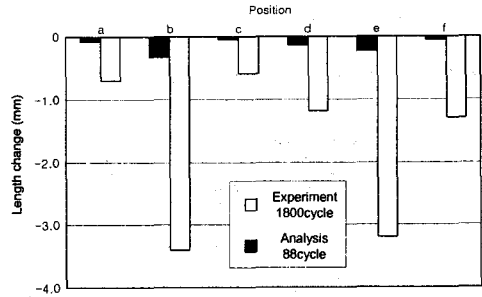


Fig. 9 Comparison of change in distance between calculated data at 88 cycles and measured data at 1800 cycles

차이를 나타내었으나, 볼트 홀간의 거리가 b에서 가장 클 것으로 예측되고, 다음으로는 e, d, f 순으로 클 것으로 예측되어, b에서 가장 큰 수축을 보이고, 다음으로 e, f, d 순이었던 내구 시험 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석 및 실험을 통하여 터보 디젤 엔진용 배기 매니폴드의 열 변형 형상을 파악하였다. 런너가 짧은 터보 디젤 엔진에서는 길이 방향의 변형이 가장 두드러졌으며, 반복된 열 사이클 하중은 엔진 작동 중 고온으로 상승되는 터보 차저 장착 부위에서 거대한 수축 현상을 나타내었다. 본 연구에 사용된 배기 매니폴드와 같이 플랜지면의 볼트 홀을 볼트 유효경보다 크게 하는 새로운 디자인은 배기 매니폴드가 공차 범위 내에서 움직일 수 있도록 하여, 배기 매니폴드 내의 열응력을 감소시킬 수 있을 것으로 파악된다.

해석을 통하여 예측된 열변형 현상은 시험 결과와 유사한 경향을 나타내는 것으로 파악되었다. 배기 매니폴드의 변형량을 좀 더 정확하게 예측하기 위해서는 좀 더 복합적인 응력-변형률 거동을 나타내는 해석 모델의 구성이 필요할 것으로 파악된다.

후 기

본 논문은 2005년도 인제대학교 학술연구조성비 보조에 의한 것이다.

참고문헌

- (1) Mamiya, N., Masuda, T. and Noda, Y., 2002, "Thermal Fatigue Life of Exhaust Manifolds Predicted by Simulation," *SAE Technical Paper*, #2002-01-0854.
- (2) Hoeschler, K., Bischof, J. and Koschel, W., 2002, "Thermo-Mechanical Analysis of an Automotive Diesel Engine Exhaust Manifold," *Temperature-Fatigue Interaction SF2M*, pp. 299~307.
- (3) Yoon, S., Lee, K. O., Lee, S. B. and Park, K. H., 2004, "Thermal Stress and Fatigue Analysis of Exhaust Manifold," *Key engineering materials*, Vol. 261/263, No. 2, pp. 1203~1208.
- (4) Choi, B. L., Chang, H. and Park, K. H., 2004, "Low Cycle Thermal Fatigue of the Engine Exhaust Manifold," *Internationals Journal of Automotive Technology*, Vol. 5, No. 4, pp. 297~302.
- (5) Delprete, C. and Rosso, C., 2005, "Exhaust Manifold Thermo-Structural Simulation Methodology," *SAE Technical Paper*, #2005-01-1076.