

엔진 배기매니폴드의 열피로 수명 예측

최복록*

원주대학 자동차·기계과

Thermal Fatigue Life Prediction of Engine Exhaust Manifold

Boklok Choi*

Department of Automotive and Mechanical Engineering, Wonju College, Gangwon 220-711, Korea

(Received 8 June 2006 / Accepted 7 July 2006)

Abstract : This paper presents the low cycle thermal fatigue of the engine exhaust manifold subject to thermo-mechanical cyclic loadings. The analysis includes the FE model of the exhaust system, temperature dependent material properties, and thermal loadings. The result shows that at an elevated temperature, large compressive plastic deformations are generated, and at a cold condition, tensile stresses are remained in several critical zones of the exhaust manifold. From the repetitions of thermal shock cycles, plastic strain ranges could be estimated by the stabilized stress-strain hysteresis loops. The method was applied to assess the low cycle thermal fatigue for the engine exhaust manifold. It shows a good agreement between numerical and experimental results.

Key words : Exhaust manifold(배기매니폴드), Thermal shock test(열충격 시험), FEM(유한요소법), Plastic strain amplitude(소성변형률 진폭), Thermal fatigue life(열피로 수명)

Nomenclature

- $\Delta \epsilon$: strain range
- \dot{m} : mass flow rate, g/min
- BSFC : brake specific fuel consumption, g/PS h

Subscript

- P : plastic

1. 서론

배기매니폴드에서 발생하는 대부분의 열피로 균열은 실린더 헤드 및 플랜지와 러너(runner) 사이의 큰 온도 구배(temperature gradient)에 의한 열팽창 차

이가 주요 원인이 된다. 즉, 고온의 배기가스가 지나가는 러너들의 열팽창이 실린더 헤드에 체결된 러너에 의해 구속됨으로써 합류부와 같은 구조적으로 취약한 부위에서 쉽게 균열이 발생할 수 있다. 이 같은 현상을 구조 역학적인 관점에서 살펴보면 엔진의 열사이클로 이루어지는 가열과정 동안에는 균열 발생 예상부에서 대개 큰 압축 소성변형이 발생하고, 이후 냉각과정을 통해 팽창함으로써 인장의 잔류응력이 존재하게 된다.^{1,2)} 따라서, 이같은 인장과 압축의 반복과정에 의해 표면에서 초기 균열이 발생한 후 점차 진전됨으로써 관통 크랙을 형성하고 최종적으로 파단 과정에 이르게 된다.^{3,4)}

한편, 배기매니폴드는 열팽창에 의한 상대적 강성 차이로부터 플랜지와 실린더 헤드사이 틈이 크게 발생할 수 있으며, 이것이 가스켓 비드의 복원량

*Corresponding author, E-mail: topmount@wonju.ac.kr

보다 많을 경우 배기가스의 누설 문제를 수반할 수가 있으므로 엔진의 성능을 충분히 유지하기 위해서는 열변형 거동도 매우 중요한 요소이다.

2. 본론

2.1 해석 과정

배기매니폴드의 열응력과 열변형, 그리고 열피로 내구 수명을 예측하기 위해서는 열사이클 과정에 대응하는 온도 분포 해석이 선행되어야 한다. 다음으로 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 구속 조건과 재질 특성을 이용해서 비선형 열응력 해석을 수행하게 된다. 마지막으로 유한 요소 해석 결과와 재질의 피로 특성을 이용해서 열피로 수명을 예측하는 과정으로 이루어져 있다.

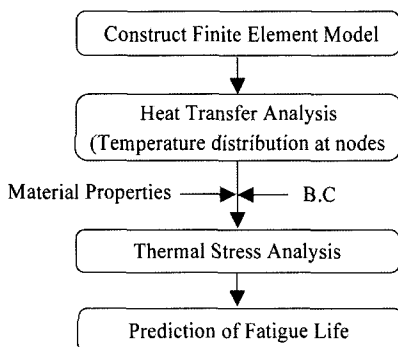


Fig. 1 Analysis process for the thermal fatigue life

2.2 유한요소 모델

Fig. 2는 배기계의 유한요소 모델을 나타낸 것이다. 엔진의 실린더 헤드에서 배기 밸브를 통해 나온 배기가스는 배기매니폴드와 촉매를 지나서 배기 파이프를 통해 대기중으로 배출된다. 본 연구에서는 비교적 고온의 배기가스에 의해 많은 열피로 문제를 일으키는 배기매니폴드를 대상으로 해석과정 및 적용과 실험적 평가에 대해서 기술하였다.

먼저, 배기매니폴드의 열응력 및 열적 피로 특성을 해석적으로 예측하기 위해서는 실린더 헤드부의 열팽창으로 인한 구속 효과를 고려해야 한다.

그러나, 실린더 헤드의 강성을 해석모델에서 제대로 표현하기 위해서는 모델의 자유도가 매우 커진다는 단점이 있다. 따라서 본 고에서는 실린더 헤

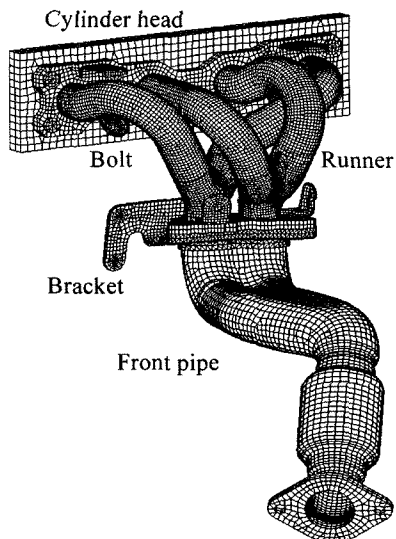


Fig. 2 Finite element model of the engine exhaust system

드를 등가의 단순화된 모델로 나타내었으며, 배기계와의 체결력을 고려하기 위해서 볼트 모델을 구성하였다. 또한, 배기계는 고온 환경 하에 있으므로 온도에 따른 재료의 기계적 성질이 매우 크게 변화한다. 따라서, 재료의 비선형적 열적 거동을 표현할 수 있도록 구조해석 상용 프로그램인 ABAQUS를 이용한 비선형 유한요소 해석을 수행하였다.

2.2.1 하중 조건

배기매니폴드에 작용하는 하중 사이클은 다음과 같다. 먼저, 상온 상태에서 볼트의 초기 체결력을 작용하였으며, 다음으로 열사이클 현상을 상상하기 위해서 유동해석을 통해 구한 최고 속도에서의 온도와 이후 상온으로의 냉각 과정이 한 주기로 이루어져 있다. Fig. 3은 하나의 열사이클 하중을 고려하기 위한 해석 단계를 도식적으로 나타낸 것이다.

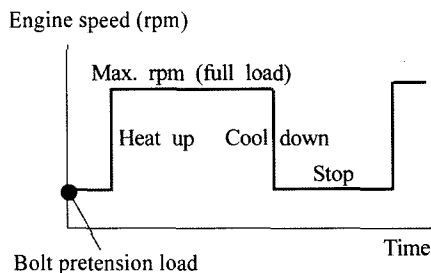


Fig. 3 Thermal cyclic load

2.2.2 구속 조건

배기매니폴드에서 발생하는 응력 및 변형은 온도 분포에 의한 열팽창 차이와 기하학적인 구속에 의해 발생한다. 따라서, 열응력 및 열변형을 정확히 예측하기 위해서는 실제 구조물의 구속 현상을 해석 모델에서 적절히 표현하는 것이 매우 중요하다.

Fig. 4는 배기매니폴드에서 초기 체결력과 실린더 헤드와의 접촉 및 구속 조건을 설명한 것이다.

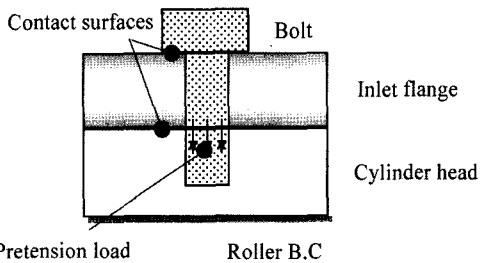


Fig. 4 Constraint conditions around fastener

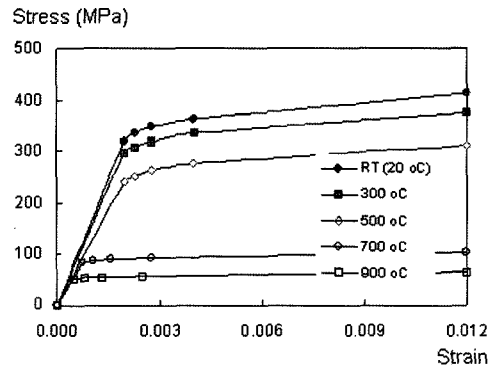
2.2.3 재질 특성

주기적인 기계적 또는 열적 하중을 받고 있는 부품의 저주기 피로 특성을 예측하기 위해서는 주기 하중 하의 재료 특성들을 해석모델에서 고려해야 한다. Table 1은 배기계를 구성하는 각 부품의 상온에서의 기계적 성질들을 나타낸 것이다. 한편, 재료의 기계적 성질은 온도에 따라 크게 변화하는 성질을 가지고 있으므로, 이 같은 온도 의존성의 비선형 특성들도 포함하여야 한다. Fig. 5의 (a)는 배기매니폴드에서 많이 사용하는 재질(FCD50)의 온도 변화에 따른 응력-변형률 선도를 나타낸 것이며, (b)는 탄성 계수와 항복 강도에 대해서 온도 증가에 따른 크기의 변화를 한 예로서 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 상온에서 약 400°C 부근까지는 재료의 강도가 완급하게 저하하지만 그 이상의 온도에서는 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다.

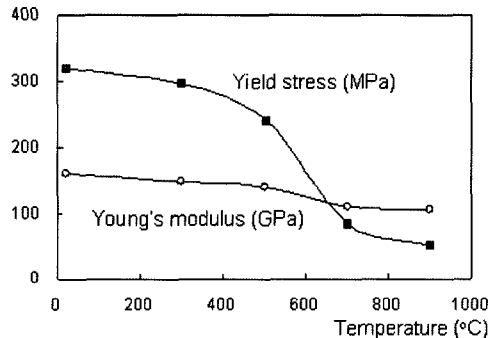
Table 1 Material properties at room temperature

Part	FCD-50	Steel	Aluminum
E (GPa)	160	205	69
ν	0.29	0.30	0.33
CTE ($\mu\text{m}/\text{mK}$)	12.2	11.5	21.4

CTE : Coefficient of Thermal Expansion



(a) Stress-strain relationship



(b) Yield stress and elastic modulus

Fig. 5 Temperature dependent material properties

3. 해석 결과

3.1 열사이클 내구 시험

열충격 대상 내구시험은 대개 아래와 같은 조건에서 일정시간 반복함으로써 수행하게 된다.

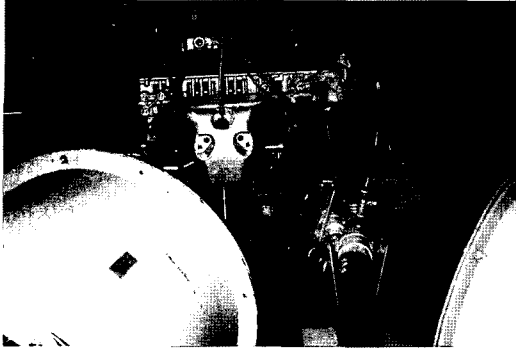
(a) 시험 조건(blow fan on)

- Rated rpm, WOT (Wide Open Throttle ; 전부하)
- Engine stop

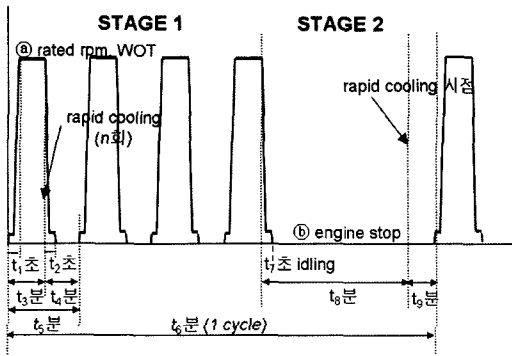
(b) 운전 조건

- W/T (Water Temperature) : $95 \pm 3^\circ\text{C}$
- O/T (Oil Temperature) : 145°C 이하

Fig. 6은 열충격 시험 장치 및 한 사이클에 대한 시험 조건을 한 예로서 나타낸 것이다. 내구성을 만족하기 위해서는 이 같은 시험 및 운전 조건 하에서, 일정 횟수의 사이클이 반복될 때까지 배기매니폴드에서는 열피로에 의한 크랙 및 배기가스의 누설 등이 발생하지 않아야 한다.



(a) Test apparatus of thermal shock



(b) Thermal shock cycles

Fig. 6 Thermal shock rig test

3.2 온도 분포 해석

열용력과 열피로 특성을 예측하기 위해서는 3.1 절과 같은 엔진의 운전조건 하에서 정확한 온도 분포의 계산이 매우 중요하다. 본 연구에서는 엔진의 정격 회전 속도와 정상상태 조건 하에서 각 절점에서의 온도분포를 다음과 같이 구하였다.

3.2.1 CHT 해석 방법

온도 분포를 구하기 위해서 내부의 배기가스 유동장(fluid part)과 배기매니폴드(solid part)의 온도 분포를 동시에 계산하는 Conjugate Heat Transfer (CHT) 해석을 수행하였다.

유동장은 정상, 비압축성, 난류 점성 유동장으로 가정하였으며, 상용 CFD 소프트웨어인 STAR-CD를 이용해서 수치해석을 하였다. STAR-CD는 유한 체적법(FVM)을 이용하여 지배 방정식을 차분화하며, 해석 알고리즘은 단순 알고리즘을 채택하였고, 난류 유동장은 벽함수(wall function)를 사용하는 표준 k-ε 난류 모델을 이용하여 계산하였다.

3.2.2 배기가스 및 재료 물성치

실제 배기매니폴드의 내부에서 유동하는 배기가스는 상당히 복잡한 혼합물로 구성되어 있으므로 내부 가스의 물성치를 정확하게 구하기는 매우 어려우나, 많은 경우 배기가스를 공기라 가정해도 비교적 잘 일치한다. Table 2는 비압축성 공기로 가정된 배기가스와 배기매니폴드의 재질 특성들을 나타낸 것이다.

Table 2 Convection type boundary condition

Location		T (°C)	R (m ² T/W)	h (W/m ² T)
Inlet	Head side	85(coolant)	0.004	250
	Air side	139.5(ambient)	0.004	250
Runner		139.5(ambient)	0.070	15
Outlet	Air side	139.5(ambient)	0.050	20
	CCC side	Insulated		

$$R(\text{thermal resistance})=1/h(\text{heat transfer coefficient})$$

3.2.3 경계 조건

(1) 입구 경계 조건

배기가스의 온도는 시험에 의해 측정되며, 유량은 BSFC와 Power 및 A/F를 이용하여 다음의 식에 의해 구할 수 있다.

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

$$\dot{m}_{fuel} = BSFC \times P / 60 \tag{2}$$

$$\dot{m}_{air} = \dot{m}_{fuel} \times A / F \tag{3}$$

(2) 출구 경계 조건

유동장의 출구에서는 Neumann type 또는 압력 경계 조건을 사용하였다.

(3) 벽면 조건: 대류형 열 경계 조건

배기매니폴드의 CHT 해석에서 가장 중요한 것 중 하나는 러너 및 각 플랜지의 외벽면에 부과되는 열 경계 조건이다. CHT 해석에서는 배기가스와 고체 부분이 동시에 해석되므로 Table 2는 시험에 의해 측정된 배기매니폴드 주위의 온도와 외벽면의 네 영역에 대하여 열전달 계수 h를 부여하는 대류형 열 경계 조건을 나타낸 것이다.

3.2.4 온도 분포 해석 결과

열충격 조건 하에서 내구 시험을 수행하면 배기 매니폴드 각 절점에서 시간에 따른 온도 분포는 일반적으로 Fig. 7과 같은 경로를 나타낸다. 본 고에서는 시작점(O)을 상온으로 가정하였으며 가열 과정을 통해서 최고 온도(A)에 도달한 후, 냉각 과정을 통해서 다시 상온(B)으로 되돌아오는 하나의 사이클을 대상으로 하였다.

Fig. 8은 엔진의 정격 회전 속도에서 구한 배기 매니폴드의 온도 분포를 나타낸 것이다. 입구측 플랜지에서는 실린더 헤드와의 접촉 냉각에 의해 약 200~400°C의 낮은 온도 분포를 가지며, 러너의 합류부로 향할수록 약 500~760°C의 높은 온도 분포를 나타내고, 마지막 러너가 합류하는 곳에서 최대이다. 한편, 출구측 플랜지에서는 약 600~700°C의 온도 분포를 나타내고 있다.

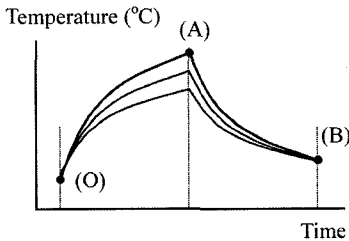


Fig. 7 Temperature profile during thermal shock

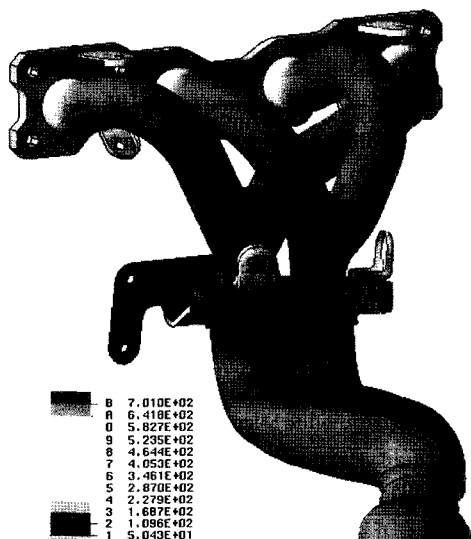


Fig. 8 Temperature field at full load

3.3 열응력 해석

본 절에서는 앞의 유동 해석을 통해서 구한 배기계의 온도 분포와 재료의 비선형적 특성, 그리고 구속 및 접촉 조건 등을 모두 적용해서 비선형 유한요소 해석을 수행한 결과이다.

Fig. 9는 볼트의 초기 장력과 반복 열사이클 하중에 의해 발생하는 배기매니폴드에서의 소성 변형률 크기와 분포를 나타낸 것이다. 최대 크기를 나타내는 합류부 전면에서는 상대적으로 열팽창 강성이 큰 입구측 플랜지와 실린더 헤드에 의해 구속되므로 고온 조건에서 압축 상태에 놓이게 된다.

Fig. 10은 온도 변화에 따른 응력 및 변형률의 이력을 나타낸 것이다. 초기 가열 과정에서 점 (가)까지는 선형 탄성거동을 한다. 그러나, 점 (가)에서 항복이 일어난 후에는 온도가 점점 증가함에도 불구하고 응력의 크기는 급격히 줄어든다. 점 (A)는 최고 온도에서의 응력의 크기이다. 다음으로 냉각 과정을 통해서 온도가 감소함에 따라 응력은 압축에서 인장 상태로 변하게 되며, 온도가 초기 상태로 냉각된 후에도 일정량의 잔류 응력이 존재하게 된다.

Fig. 11은 동일 위치에서의 응력과 변형률의 히스테리시스 곡선을 나타낸 것이다. 초기 가열 과정에서는 큰 소성 변형을 수반하며, 안정화된 후부터는 거의 일정한 양의 소성 변형 진폭을 나타낸다.

3.4 열피로 수명 예측

저주기 열피로 현상은 대개 열 또는 기계적 하중에 의해 많은 소성 변형을 수반하므로, 배기매니폴드의 경우 열피로 특성을 판단하기 위해서는 Fig. 11

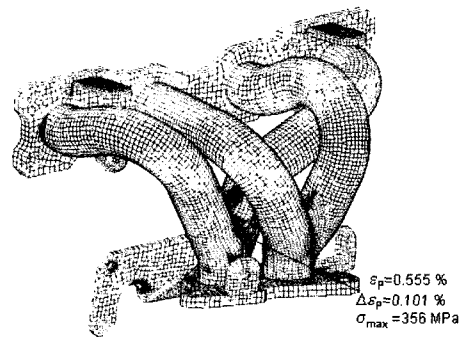


Fig. 9 Plastic strain of the exhaust manifold during thermal cycle mode

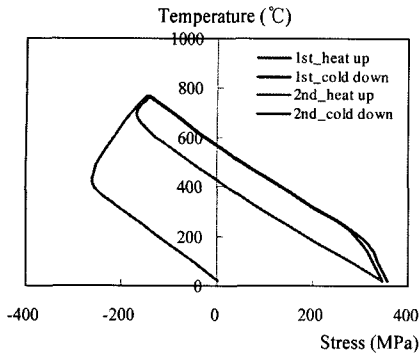


Fig. 10 Stress history during thermal cyclic load

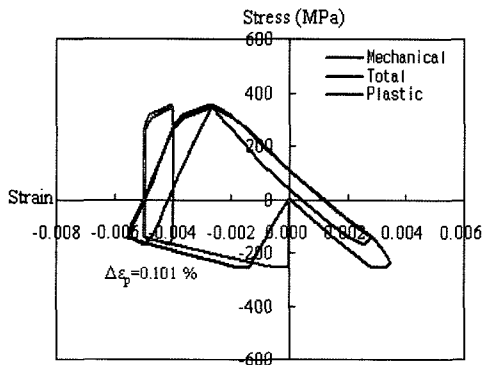


Fig. 11 Stress-strain hysteresis loop of a critical point

에서 나타낸 응력과 변형률의 히스테리시스 루프로 부터 계산되어지는 소성 변형률 진폭이 필요하다.

소성 변형률 진폭과 수명과의 관계는 로그 좌표 계에서 선형 관계를 나타내며 다음 식과 같다.⁵⁾

$$\Delta \epsilon_p = M(2N_f)^z \quad (4)$$

여기서, M과 z는 재료 상수이다.

따라서, 식 (4)에 의해 유한요소 해석을 통해서 계산된 소성 변형률 진폭의 크기를 알고 있으면 주어진 재질 특성에 대해서 배기매니폴드의 저주기 열 사이클 수명을 비교적 정확히 예측할 수 있다.

Fig. 12는 본 고에서 대상으로 한 배기매니폴드의 대상 내구 시험시 발생한 크랙의 위치를 보여 주고 있다. Fig. 9의 해석을 통해 얻어진 최대 소성변형이 발생한 위치와 실제 내구시험을 통해 발생한 크랙 발생 위치가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

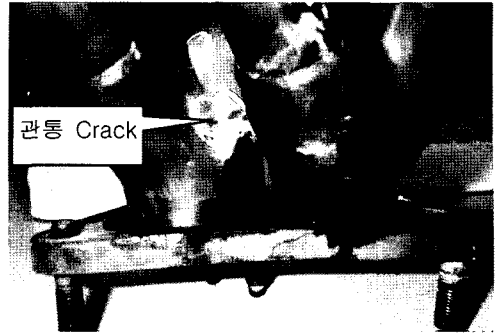


Fig. 12 Crack occurred at runner junction

본 연구에서는 열적·기계적 하중을 받고 있는 엔진의 배기매니폴드를 대상으로, 열피로 수명 예측에 관한 해석 방법의 개발 및 적용에 대해서 나타내었으며, 요약하면 다음과 같다.

- 1) 배기가스 온도와 정격 운전속도에서 배기매니폴드에 발생하는 온도를 유동해석을 통해서 계산하였으며, 최고 온도는 약 760°C 정도로서 합류부에서 발생하며, 플랜지면에서는 실린더 헤드에 열을 빼앗김으로 상대적으로 낮은 값을 나타낸다.
- 2) 열사이클 하중에 의해 발생하는 역학적 거동을 해석적으로 예측하기 위해서는 유동해석에 의한 온도분포와 온도 의존성의 재료 특성을 포함하는 비선형 유한요소 해석이 필요하며, 이를 통해서 배기계의 저주기 열피로 수명을 예측할 수 있다.
- 3) 열응력 해석을 수행한 결과, 최대 소성변형이 나타내는 곳에서 실제 내구 시험시 균열이 발생하였으며, 여러 엔진에 적용한 결과 실험 결과와 매우 잘 일치하였다.
- 4) 본 고에서 제시한 바와 같은 실험적으로 검증된 해석 기법을 설계 초기 적용함으로써, 설계 기간의 단축 뿐만 아니라 형상 최적화도 가능하다.

References

- 1) B. L. Choi, H. Chang and K. H. Park, "Low Cycle Thermal Fatigue of Engine Exhaust Manifold," Int. J. Automotive Technology, Vol.5, No.4, pp.297-302, 2004.
- 2) H. Kawano, S. Inoue, M. Iwata, T. Yamaguchi,

- H. Yanagisawa and E. Fukumori, "Improvement in the Thermal Elasto-Plastic FEM Model Applied to Exhaust Manifold," SAE 911771, 1991.
- 3) Y. Watanabe, K. Shiratani, S. Iwanaga and K. Nishino, "Thermal Fatigue Life Prediction for Stainless Steel Exhaust Manifold," SAE 980841, 1998.
- 4) G. Lederer, E. Charkaluk, L. Verger and A. Constantinescu, "Numerical Lifetime Assessment of Engine Parts Submitted to Thermomechanical Fatigue, Application to Exhaust Manifold Design," SAE 2000-01-0789, 2000.
- 5) S. S. Manson, Thermal Stress and Low-Cycle Fatigue, McGraw-Hill, New York, pp.245-274, 1966.