

엔진 배기매니폴드의 배기가스 누설 해석

최복록*

국립강릉대학교 기계자동차공학부

Leakage Analysis of the Exhaust Gas for the Engine Exhaust Manifold

Boklok Choi*

School of Mechanical & Automotive Engineering, Kangnung National University, Gangwon 220-711, Korea

(Received 20 October 2006 / Accepted 19 November 2006)

Abstract : Exhaust manifold is generally subjected to thermal cycle loadings ; at hot condition, large compressive plastic deformations are generated, and at cold condition, tensile stresses are remained in highly deformed critical zones. These phenomena originate from that thermal expansions of the runners are restricted by inlet flange connected to the cylinder head, because the former is less stiff than the latter and, the temperature of the inlet flange is lower than that of the runners. Therefore, due to the repetitions of thermal deformation, leakage problems could be occur between inlet flange and cylinder head. In this study, we obtained pressure distributions along gasket bead lines from the finite element analysis and compared to the test results. It shows a good agreement between numerical and experimental results.

Key words : Exhaust manifold(배기매니폴드), Inlet flange(입구측 플랜지), Cylinder head(실린더헤드), Leakage(누설), Gasket bead line(가스켓 비드선), Thermal deformation(열변형)

Nomenclature

\dot{m} : mass flow rate, g/min

BSFC : brake specific fuel consumption, g/PS h

1. 서론

배기매니폴드는 자동차의 엔진 실린더 헤드에 장착되며, 실린더 내에서 연소 과정에 의해 발생한 고온의 배기가스를 모아서 촉매 변환기로 보내주는 역할을 한다. 따라서, 배기계는 엔진성능에 많은 영향을 미칠 뿐만 아니라 차량의 주행 시 고온의 배기가스로 인한 열 사이클 하중과 장시간 주행 시 오랫동안 고온에 노출되는 부품이므로, 열적인 하중에

의한 피로파손과 열변형으로 인한 배기가스의 누설 등에 관해서 많은 연구가 필요한 분야이다.

배기매니폴드에 관한 연구는 그 동안 엔진의 성능과 관련해서 많은 연구가 이루어져 왔으나, 최근 엔진의 경량화 및 고출력화에 따른 배기가스의 온도 상승으로 인해서 열피로와 더불어 열변형 문제에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 특히, 엔진시험실에서의 누설 및 가속 내구에 의한 방법과 유한 요소법 등을 이용한 해석적 방법들이 많이 활용되고 있다.¹⁻⁴⁾

Shimizu 등⁵⁾은 유한요소 해석에 필요한 배기계의 온도분포를 얻기 위해서 엔진 사이클 시뮬레이션과 유동 및 열전달 해석을 수행하였으며, 계산한 온도 분포를 이용하여 탄소성 해석을 수행함으로써 배기매니폴드의 열적 변형거동을 분석하였다.

*Corresponding author, E-mail: blchoi@kangnung.ac.kr

Kazuo 등⁶⁾은 온도 변화에 따른 실린더 헤드부의 변형과 배기매니폴드의 변형량의 차이로부터 구속률(restraint ratio)이라는 인자를 활용함으로써 배기계의 열변형에 대한 각 설계변수들의 영향에 관해서 연구하였다.

본 연구에서는 열충격 하중에 의해 발생하는 배기매니폴드의 열변형으로 인한 누설 가능성을 해석적으로 예측하기 위해서 비선형 유한요소 해석을 수행하였으며, 그 결과 입구측 플랜지의 실린더 헤드면에 대한 수직 변형량과 볼트의 축력변화, 그리고 가스켓 비드면에서의 면압분포를 계산하였다. 한편, 해석결과의 신뢰성을 검증하기 위해서 실험을 통해 측정된 가스켓에서의 면압분포와 비교하였으며, 이를 통해서 배기가스의 누설 메카니즘과 배기가스의 누설을 해석적으로 예측할 수 있는 해석적 접근방법을 제시하였다.

2. 유한요소 모델

2.1 유한요소 해석 모델

엔진 작동시 배기계를 통과하는 배기가스의 기밀성을 평가하기 위해서는 배기계의 온도분포와 구속 조건에 따른 비선형 유한요소 해석이 필요하다.

Fig. 1은 배기계를 구성하는 유한요소 모델의 범위를 나타낸 것이다. 열충격 또는 전부하 하중에 대해서 배기계의 열적인 거동에 의한 열변형 크기를 계산하기 위해서는 배기계 뿐만 아니라 등가의 실린더헤드와 가스켓 모델을 모두 포함하여야 한다.

한편, 볼트의 초기 체결력에 따라서 가스켓에서의 면압이 차이를 나타낼 수 있으므로 체결력을 부여하기 위한 볼트 요소들도 모두 구성하였다.

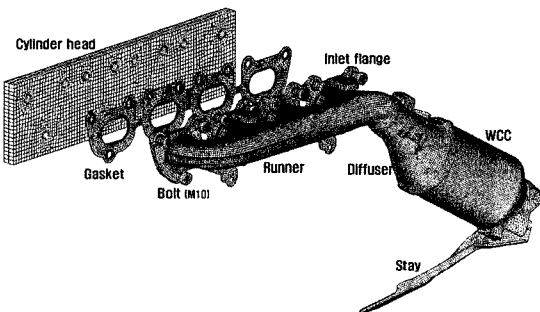


Fig. 1 Finite element model of the exhaust system

2.2 가스켓 모델

엔진 사이클동안 배기과정을 통해서 나오는 배기가스는 배기매니폴드뿐만 아니라 입·출구측 플랜지 등에서도 누설이 없어야 한다.

Fig. 2는 일반적인 배기계에서 많이 적용하고 있는 철재 가스켓(steel gasket)의 형상을 나타낸 것이다. 가스켓의 구조는 크게 바디(body)부와 실링성을 확보하기 위한 비드(bead)부로 이루어져 있으며 실린더헤드와 배기매니폴드 사이에서 볼트 체결력에 의해 압착되어진다.

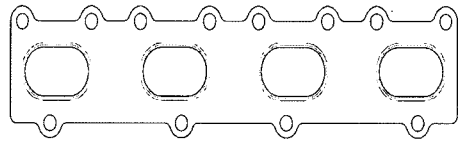


Fig. 2 Gasket geometry

Fig. 3은 유한요소 해석모델에서 가스켓의 변형 특성을 고려하기 위해 실험을 통해 측정된 하중-변위 선도이다. 실제 엔진 작동시의 변형특성을 얻기 위해서 초기 비드의 변형특성을 고려하지 않고 변형선도의 형상이 안정화되도록 5회 정도 반복하중을 작용한 후에 측정된 그래프이다.

Fig. 4는 Fig. 3에서 하중-변위 관계를 측정된 가스켓의 비드부 형상을 나타낸 것이다. 일반적으로 배

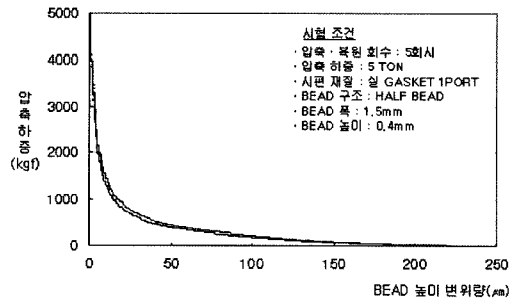


Fig. 3 Gasket property (force-displacement)

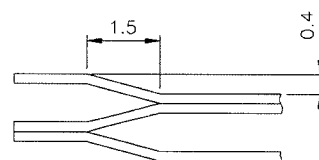


Fig. 4 Gasket bead

기가스의 실링성을 확보하기 위해서는 여러 장의 가스켓을 겹쳐서 사용하며, 본 고에서 대상으로 한 엔진의 배기매니폴드는 하프 비드 (half bead) 3매가 겹쳐져서 구성된 가스켓임을 알 수 있다. 따라서, 엔진 작동시 이 같은 전체 비드들의 복원량이 배기매니폴드 플랜지에서 열변형에 의해 발생하는 실린더 헤드 면에 대한 수직방향의 변위크기보다 작을 경우 누설이 발생할 수 있을 것이다.

2.3 온도분포 해석

열응력과 열변형 특성을 예측하기 위해서는 엔진 운전 상태에서의 정확한 온도분포 계산이 필요하다. 본 연구에서는 엔진의 정격 회전 속도 및 정상상태 조건 하에서의 각 절점 온도와 상온으로의 냉각 조건을 고려하고자 한다.

2.3.1 CHT 해석 방법

배기계의 온도분포를 구하기 위해서 내부의 배기 가스 유동장(fluid part)과 배기매니폴드(solid part)의 온도분포를 동시에 계산하는 Conjugate Heat Transfer(CHT) 해석을 수행하였다.

유동장은 정상, 비압축성, 난류 점성 유동장으로 가정하였으며 상용 CFD 소프트웨어인 STAR-CD를 이용하여 수치 계산을 수행하였다. STAR-CD는 유한 체적법(FVM)을 이용하여 지배 방정식을 차분화 하며, 해석 알고리즘으로써 단순 알고리즘을 채택하였다. 난류 유동장은 벽함수(wall function)를 사용하는 표준 k-ε 난류 모델을 이용하여 계산하였다.

2.3.2 배기가스 및 재료 물성치

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

2.3.3 경계 조건

1) 입구 경계 조건

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

Table 2 Convection type boundary condition

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

R(thermal resistance)=1/h(heat transfer coefficient)

$$\dot{m} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{fuel} = BSFC \times P / 60 \quad (2)$$

$$\dot{m}_{air} = \dot{m}_{fuel} \times A / F \quad (3)$$

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. Table 2는 CHT 해석에서는 배기 가스와 고체 부분이 동시에 해석되므로 시험에 의해 측정된 배기매니폴드 주위의 온도와 외벽면의 네 영역에 대하여 열전달 계수 h를 부여하는 대류형 열 경계 조건을 나타낸 것이다.

3. 해석 결과

3.1 온도분포 해석 결과

단순한 열충격 조건(가열-냉각) 하에서 시험을 통해 온도 이력을 측정하면 배기매니폴드의 각 절점에서 시간에 따른 온도변화는 일반적으로 Fig. 7과 같은 경로를 나타낼 것이며, 그림에서는 한 예로서 나타낸 것이다. 본 연구에서는 시작점(O)을 상온으로 가정하였으며 가열 과정을 통해서 최고 온도(A)에 도달한 후, 냉각 과정을 거쳐서 다시 상온(B)으로 냉각되는 것을 하나의 사이클로 고려하였다.

Fig. 8은 엔진의 정격 회전속도에서 구한 배기매니폴드의 온도분포를 나타낸 것이다. 입구측 플랜지에서는 실린더 헤드와의 접촉 냉각에 의해 약 200~400°C의 비교적 낮은 온도분포를 가지며, 러너의 합류부로 향할수록 약 500~800°C의 높은 온도분

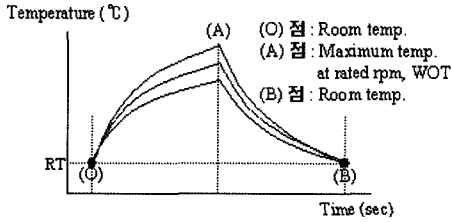


Fig. 7 Temperature profile during thermal shock

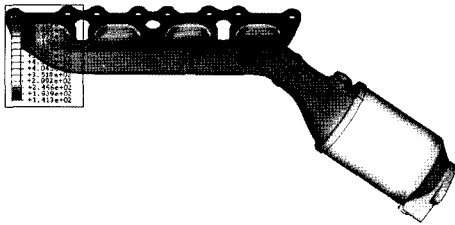


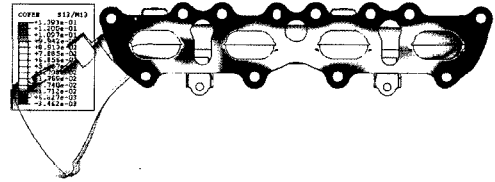
Fig. 8 Temperature distribution of the exhaust system

포를 나타내고, 마지막 리너가 합류하는 곳에서 최대이다. 한편, 출구측 플랜지에서는 600~700°C의 온도를 나타내고 있다.

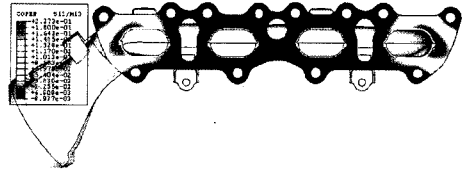
3.2 열변형 해석

볼트 체결 등에 의한 구속이 없을 경우 열사이클 하중에 대한 배기매니폴드 입구측 플랜지에서의 일반적인 열변형은 다음과 같다. 즉, 고온에서는 플랜지의 중앙 면이 실린더헤드와의 접촉면으로부터 멀어지는 변형(concave 형)을 하며, 상온으로의 냉각시는 그와 반대의 열변형(convex 형)을 나타낸다.

Fig. 9는 볼트의 초기장력(bolt pretension load) 상태에서 배기가스의 최고온도에 대응하는 열적하중을 작용하였을 경우의 변형을 나타낸 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 플랜지의 중앙부로 갈수록 수직방향 변위가 증가하며 중앙부에서의 변형은 볼트 체결 때문에 다소 줄어들고 있다. 한편, 배기가스의 온도가 고온에서 상온으로의 냉각시는 플랜지 바깥쪽에서의 수직변형이 상대적으로 뚜렷하게 나타나고, 내측의 포트들은 거의 평면을 유지한다. 따라서, 연속내구 시험과 같이 엔진이 고온으로 장시간 지속될 경우에는 배기포트의 내측에서 누설이 일어날 가능성이 높으며, 열사이클 하중과 같이 고온과 냉각의 사이클 하중을 받는 경우는 냉각이 완료된 후 재가열 전까지의 시점에서 배기가스의 누설이 발생



(a) Hot condition



(b) Cold condition

Fig. 9 Flange normal displacement

할 가능성이 높다는 것을 알 수 있다. 그리고, 고온에서 길이방향으로 신장된 플랜지는 냉각과정을 통해서 초기 길이에 비해 다소 줄어드는 현상을 나타내고 있으며, 이것은 리너들의 국부적인 소성변형에 의한 것으로 사료된다.

3.3 볼트의 축력변화

열사이클 하중시의 플랜지 거동과 축력변화와의 상관성을 파악하기 위해서 초기 조립하중과 고온 및 냉각과정시의 축력의 변화를 검토하였다.

Fig. 10은 일반적으로 엔진 작동시 많은 누설문제를 수반하는 바깥부위 4개의 볼트들에 대한 축력의 변화를 다른 볼트들의 축력변화와 비교한 것이다.

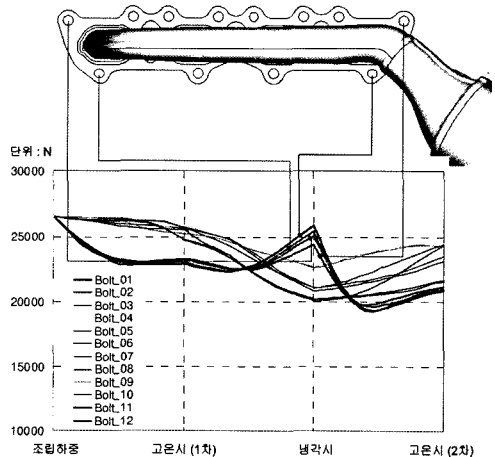


Fig. 10 Bolt load variations due to the thermal cyclic load

그림에서 보면 고온-냉각 과정에 따라 플랜지 외측 볼트들(Bolt_01, 02, 11, 12)에서의 축력변화율이 비교적 크게 나타나며, 특히 냉각시에는 반대로 증가한다. 그 이유는 외측 플랜지에서 실린더 헤드면 대해 멀어질려는 변형을 억제하기 위한 힘 때문이다. 따라서, 플랜지에서의 열변형과 축력변화는 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

3.4 가스켓 면압 해석

3.4.1 가스켓에서의 면압분포

엔진시험을 통해서 실제로 배기가스의 누설이 발생한 엔진을 대상으로 실험 및 해석을 통해서 가스켓에서의 면압분포를 비교, 분석하였다.

Fig. 11의 (a)는 내구시험 후 면압지를 이용해서 측정된 가스켓에서의 면압분포이다. 실제 시험시 배기가스는 외측 비드부의 상하방향으로 누설되었으며 면압 측정결과 배기가스가 누설한 위치에서는 면압이 거의 형성되지 않고 있음을 알 수 있다.

한편, (b)는 유한요소 해석을 통해서 얻어진 가스켓에서의 면압분포이다. 그림에서 보는 바와 같이 가스켓 비드부의 최소 면압은 양 끝단 포트의 외측 화살표 부위에서 발생하며, 시험결과와 면압분포가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

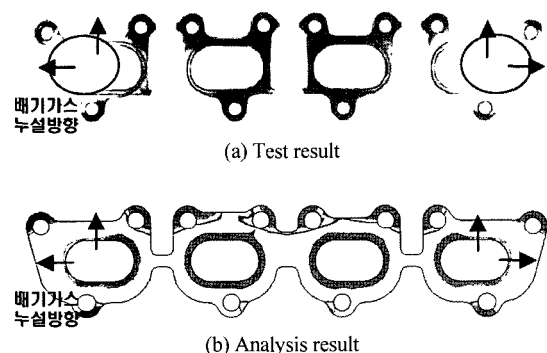


Fig. 11 Gasket pressure distribution (cold condition)

3.4.2 비드부 면압 크기

유한요소 해석을 통해서 얻어진 가스켓 비드부에서의 면압의 크기를 각 하중 조건에 대해서 비교하였다.

Fig. 12는 각 배기포트에 대해서 초기 조립하중과

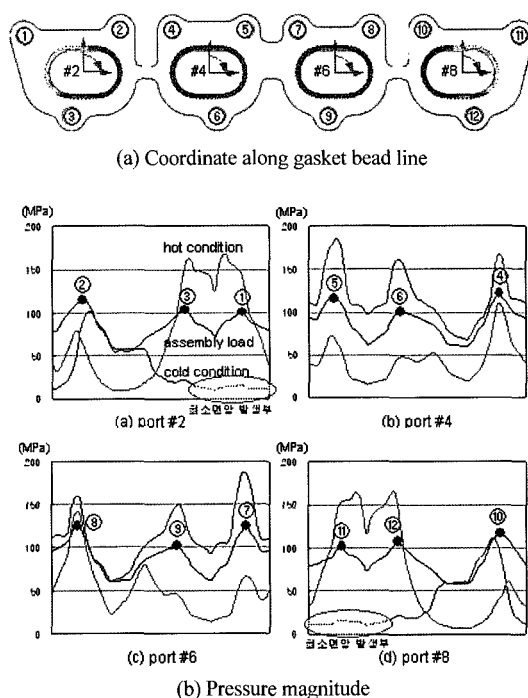


Fig. 12 Pressure distribution along gasket bead lines

고온으로의 가열 및 상온으로의 냉각으로 구성된 각각의 하중에 대해서 가스켓 비드선을 따라서 계산한 면압의 크기를 비교한 것으로서, 가로축은 (a)에서 정의한 좌표계에 대해서 가스켓 비드선 상의 위치이고 세로축은 면압의 크기를 나타낸 것이다. 조립하중시에 그림에서 나타낸 바와 같이 대응하는 각 볼트 체결위치에서 모두 100 MPa 이상의 면압이 형성되고 있으며 또한 체결부 사이의 구간에서도 최소 60 MPa 이상의 면압을 형성하고 있다. 그리고, 내부 포트들(#4, #6)에서는 각 하중에 따른 압력의 분포 및 크기가 매우 뚜렷이 구별되며 냉각시에는 비드부 면압의 형성이 매우 좋으나(blue line) 고온으로의 가열시에는 크게 저하하는 것을 볼 수 있다(red line). 이것은 전부하 연속내구와 같은 고온조건에서는 배기포트의 내부에서 배기가스의 누설이 발생할 가능성이 높다는 사실과 일치한다. 그러나, 상온으로의 냉각시에는 바깥쪽 배기포트들(#2, #8)에서 면압의 크기가 크게 떨어지며 최소 면압부에서의 면압의 크기는 10.1~11.1 MPa 정도이다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 고온 조건에서는 플랜지의 중앙 면이 그리고, 냉각시에는 반대로 플랜지의

양 끝단이 실린더헤드와의 접촉면으로부터 멀어질려는 변형을 한다는 사실과 잘 일치한다. 한편, 이 같은 최소면압 발생 위치는 실험을 통해서 측정된 최소 면압 부위와도 정확히 일치하고 있음을 알 수 있다.

따라서, 열적하중에 의한 배기계에서의 배기가스 누설 가능성은 가스켓 비드부에서의 면압의 분포 및 크기를 유한요소 해석 등을 통해 얻음으로써 판단할 수 있을 것이며, 앞으로 여러 엔진과 가스켓 형상을 대상으로 데이터베이스화 함으로써 설계초기 보다 정량적으로 예측할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 열적하중을 주로 받고 있는 배기매니폴드를 대상으로, 배기가스의 누설에 대한 정량적 판단기준을 마련하기 위해서 비선형 유한요소 해석을 수행하였으며, 요약하면 다음과 같다.

- 1) 열사이클 하중에 의해 발생하는 열변형 거동은 고온조건에서는 플랜지의 중앙 면이 실린더헤드와의 접촉면으로부터 멀어지는 변형을 하며, 상온으로의 냉각시는 그와 반대의 열변형을 한다. 그러나 실제 배기계에서는 볼트 체결력에 의한 구속으로 중앙부에서는 거의 변형이 일어나지 않는다.
- 2) 고온-냉각 과정에 따른 축력의 변화는 플랜지의 외측 볼트들에서 크게 발생하며, 특히 냉각시에는 축력의 크기가 내측 볼트들과 반대로 증가한다. 그 이유는 냉각시 외측 플랜지의 수직방향 변형을 억제하기 위한 힘 때문이므로 플랜지의 변형과 축력의 변화는 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.
- 3) 시험과 해석을 통해서 가스켓에서의 면압분포를 비교하였으며, 그 결과 매우 잘 일치하였으며 실제 엔진 작동시의 배기가스 누설방향과도 잘 일치한다.

따라서, 가스켓 비드부의 면압분포 및 크기를 유한요소 해석과 같은 해석적 방법을 통해 얻음으로써 초기 설계시 또는 설계 변경에 따른 면압의 크기를 통해 배기가스의 누설 문제를 보다 정량적으로 예측할 수 있을 것이다. 나아가, 배기계에서 주어진 열적 조건에 대해 배기가스의 누설이 발생하지 않도록 설계하기 위해서는 플랜지의 형상과 볼트의 체결위치, 그리고 가스켓의 형상을 최적화해야 하므로 각 설계 파라메타와 배기가스 누설과의 관계를 설정할 예정이다.

References

- 1) H. Indig and T. R. Williams, "Exhaust System Accelerated Durability Testing," SAE840503, 1984.
- 2) T. Noguchi, T. Yasuki, T. Nakakubo and T. Atsumi, "Thermal Stress and Deformation Analysis of Exhaust Manifold of Internal-Combustion Engine," pp.34-39, JSAE Review, 1985.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) T. Shimizu, T. Takahashi, M. Ohtani and T. Satake, "Exhaust Manifold Heat Analysis," pp. 181-186, JSAE 9531200, 1995.
- 6) K. Ishii, M. Nakada, S. Takahashi, M. Enomoto and Y. Konishi, "Evaluation of Thermal Fatigue Life on the Exhaust Manifold by Analyzing Restraint Ratio," FISITA Congress, Seoul, Korea, pp.1-8, 2000.