

엔진 배기계의 배기가스 누설 메카니즘과 설계인자들의 영향에 관한 연구

A Study on the Effects of the Design Parameters and Sealing Mechanism of the Exhaust Gas in Engine Exhaust System

최 복 록

B. L. Choi

(접수일 : 2010년 2월 26일, 수정일 : 2010년 5월 14일, 채택확정 : 2010년 6월 8일)

Key Words : Exhaust Manifold(배기매니폴드), FEM(유한요소법), Gasket Bead(가스켓 비드), Contact Pressure (접촉 면압), Inlet Flange(입구측 플랜지)

Abstract : This paper deals with the sealing mechanism of the gasket component and the effects of design parameters for the exhaust manifold. The finite element model includes hot-end exhaust system and a simplified gasket model supplied by ABAQUS software. The mechanical behaviors of bead and body of a gasket are measured after several times of cyclic loads by gasket supplier. From the finite element analysis due to the cyclic thermal loads, the flange of exhaust manifold shows thermal expansion and contraction in longitudinal direction as well as convex and concave deformations with respect to the engine cylinder head. And, the contact pressures of the gasket beads suddenly changes by normal deformation of inlet flanges. Therefore, the magnitudes of contact pressures could be used to determine the sealing characteristics of the exhaust gas in the exhaust system. The distributions of contact pressures in gasket bead lines shows a good agreement with the engine test results.

1. 서 론

자동차 엔진이나 산업용 펌프 등과 같이 일반 기계 부품에는 실링성을 확보하기 위해서 작동 온도와 압력, 내구성, 기능성, 제품 원가 등을 고려해서 여러 가지 형상 및 재질로 구성된 실(seal) 구조물들이 사용되고 있다. 그 중에서도 엔진 배기매니폴드에서 사용하고 있는 가스켓(gasket)의 경우는 특히 고온 환경 하에 있으므로 내구성과 안정성 등을 고려해서 미소 두께로 코팅된 얇은 스틸 재질로 구성되어 있으며, 엔진 작동에 따른 실링 압력을 국부적으로 향상시키기 위해서 배기 포트 둘레를 따라 엠보싱(embossment)된 얇은 판재 구조를 여러 겹으로 해서 사용한다. 이 같은 가스켓 비드 구조의 역학적 특성은 하중에 대해서 변형 거동이 탄소성 성질을 나타냄으로 배기가스의 기밀성을 유지하기 위해서는 플랜지의 변형 추종성과 실링 압력을 충

분히 확보하고 있어야 하며, 설계자는 가스켓 비드의 두께와 폭, 그리고 높이 등을 형상 변수로 해서 설계하고 있다. 즉, 가스켓에서의 실링성은 가스켓 비드부의 형상 및 재질에 따른 탄소성 거동과 코팅 두께, 접촉부의 강성, 그리고 열팽창으로 인한 볼트 축력의 변화 등과 같은 여러 가지 요소들에 의해 좌우된다고 할 수 있다.^{1),2)}

그러나 현재 배기가스의 기밀성 관련해서는 자동차 회사 및 가스켓 업체에서는 실제 엔진의 작동에 의한 누설 여부 판단 또는 초기 체결시와 시험 전후의 면압 특성을 면압지에 의해 측정된 후 그 크기 및 분포를 통한 분석에 대부분 의존하고 있는 실정이며, 해석적인 평가는 최근 일부 시도는 하고 있으나^{3,4)} 거의 문헌에서 찾아볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 이 같은 배기매니폴드의 실링성을 해석적으로 평가하기 위해서 엔진 작동 조건에 따른 가스켓 비드부의 면압 특성과 배기가스 누설 현상을 해석과 시험 결과를 비교·검토하였으며, 또한 볼트의 체결 축력 변화에 따른 면압

최복록(교신저자) : 강릉원주대학교 기계자동차공학부
E-mail : blchoi@gwnu.ac.kr, Tel : 033-760-8765

분포와 플랜지의 열변형 거동을 분석함으로써 배기가스의 누설에 관한 정성적 및 정량적인 평가 기준을 향후 설정하는데 그 목적이 있다.

2. 수치 해석 모델

2.1 배기계의 구성 요소

엔진 배기계에서 배기가스의 기밀성을 유한요소 해석을 통해서 예측하기 위한 해석 모델을 Fig. 1에 나타내었다. 실린더헤드부와 맞닿는 배기매니폴드의 입구측 플랜지 사이에 가스켓이 삽입되어지며 스택드 볼트에 의해 실린더헤드에 체결되는 구조로 되어 있다. 한편, 해석 모델의 범위는 배기매니폴드의 플랜지 변형에 영향을 줄 수 있는 배기계의 고온부(hot end)를 모두 포함해서 구성하였다.

Fig. 2는 해석에 사용된 가스켓의 유한요소 모델을 나타낸 것이다. 배기매니폴드의 가스켓 구조는 크게 비드부와 바디부로 구성되어 있으며, 배기포트 주위를 감싸고 있는 비드부의 특성이 실링성의 확보를 위해서 매우 중요하다. 따라서 이 같은 가스켓 모델을 이용해서 열충격 사이클 하중에 따른 가스켓 비드부에서의 접촉 면압을 계산한 후, 가스켓의 주요 역할 중 하나인 배기가스의 실링성을 해석적으로 평가하기 위함이다.

본 연구에서 대상으로 한 엔진의 가스켓 재질은 SUS 재질이며, 가스켓 비드부는 Half bead로 되어 있다. 가스켓의 유한요소 해석 모델은 실제와 동일한 여러겹의 구조로 모델링 할 경우, 해석 모델의 자유도가 지나치게 커지며 해석 시간 또한 많이 소요되므로 구조해석 상용프로그램인 ABAQUS/

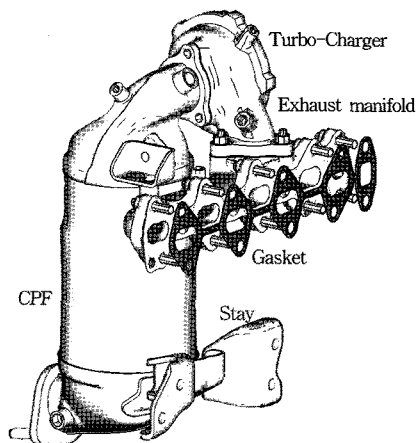


Fig. 1 Finite element model of the exhaust system

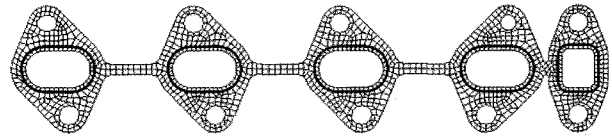
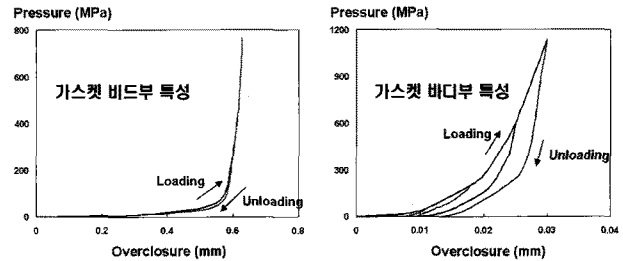


Fig. 2 Gasket model



a) gasket bead (b) gasket body

Fig. 3 Pressure-overclosure curves for exhaust manifold gasket

Standard에서 제공하고 있는 가스켓의 비선형 거동 특성을 유지하면서 모델을 단순화해서 한겹으로 구성할 수 있는 가스켓 요소(gasket element)를 사용하였다. 이와 같이 모델링함으로써 여러겹의 복잡한 적층 구조를 Fig. 2와 같이 단층으로 간단히 모델링할 수 있다는 큰 장점이 있다.⁵⁾

Fig. 3은 가스켓의 역학적 거동 특성으로서, 비드부와 바디부 각각에 대해서 입력 데이터로 사용하기 위한 면압과 밀착량(pressure-overclosure)과의 관계이다. 그림의 (a)는 비드부의 특성을 하중 작용/loading)시와 제하(unloading)시 각각에 대해서 5회 반복 후의 거동을 나타낸 것이며, 그림 (b)는 바디부에 대한 특성을 각 단계별 5회까지의 곡선들을 모두 나타낸 것으로서, 이것들은 가스켓 공급 업체에서 실험적으로 측정된 것들을 제공받은 것이다. 그림에서 보여준 바와 같이 실링 성능에 매우 중요한 비드부의 특성은 하중 작용시와 제하시의 경로가 거의 일치한다. 그러나 바디부는 하중이 반복됨에 따라 경로차가 많이 나고 있음을 알 수 있다.

2.2 하중 조건

비선형 유한요소 해석에 사용된 열적-기계적 하중 사이클은 다음과 같다. 먼저, 상온 상태에서 초기 체결 조건인 볼트의 축력을 작용하였으며, 다음으로 열사이클 현상을 상사화하기 위해서 유동 해

석을 통해 구한 최고 속도에서의 온도와 이후 상온으로의 냉각 과정이 한 주기로 이루어져 있다. Fig. 4는 하나의 열사이클 하중을 고려하기 위한 해석 단계를 간단히 도식적으로 나타낸 것이며, 실제 엔진의 열충격 내구시험에서 적용하고 있는 시험모드와 매우 유사한 과정이다.

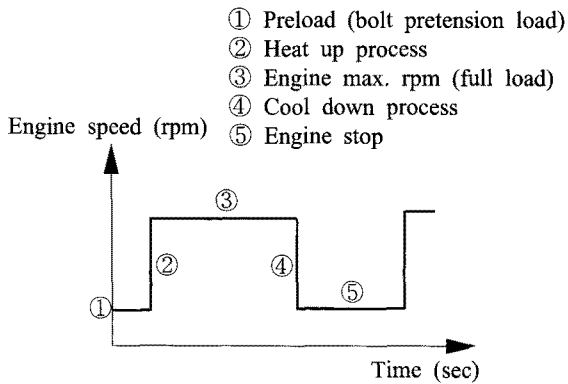


Fig. 4 Simplified thermal cyclic load

3. 해석결과 및 고찰

3.1 가스켓 비드면에서의 면압 분포

엔진 작동 조건을 대상으로 실린더 헤드와 배기매니폴드 사이에서 발생할 수 있는 배기가스 누설 문제를 해석적으로 예측하기 위해서 앞에서 구성한 유한요소 모델을 이용해서 해석을 수행하였다.

Fig. 5는 가스켓에서 실린더 헤드면과 접하는 부위에서의 면압 분포를 각 하중 조건에 대해서 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 가스켓에서 면압은 바디부에서는 거의 발생하지 않고 대부분 비

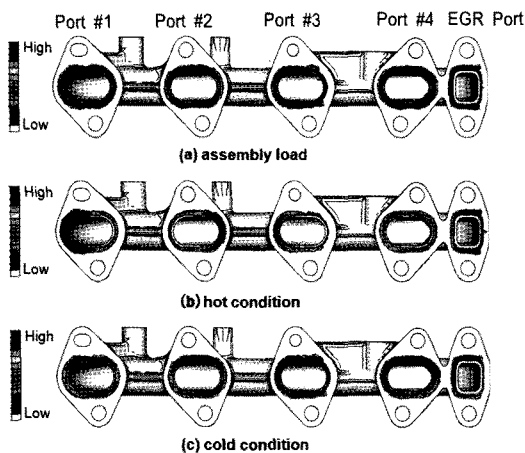


Fig. 5 Contact pressure at gasket bead due to the thermal cyclic load

드부에서 나타나고 있으며 가스켓을 기준으로 배기매니폴드와 접촉하는 플랜지에서의 면압과 실린더 헤드와 접촉하는 면압 분포는 거의 동일하게 나타난다. 한편, 가스켓 비드부에서의 면압의 크기를 각 하중 조건에 대해서 살펴보면 다음과 같다.

초기 조립 조건에서는 모든 포트들에 대해서 비드선을 따라 면압이 비교적 크게 발생한다. 그러나, 온도가 상승함으로써 고온 상태에 이르면 포트 #1과 #2 사이, #3과 #4 사이, 그리고 #4와 EGR 포트 사이에서 면압이 크게 저하됨을 알 수 있다. 즉, 온도가 상승함에 따라 플랜지의 거동이 중앙부가 실린더 헤드면으로부터 멀어지려는 변형에 기인한 것이며, 볼트 체결력 및 체결 위치에 의해 포트와 포트 사이에서 비드부의 면압 저하가 발생한 것이다. 이것은 전부하 연속 내구와 같은 고온 조건에서는 중앙부 배기 포트에서 배기가스의 누설이 발생할 가능성이 높다는 사실과 일치한다. 다음으로 냉각 조건에서는 배기매니폴드에서의 소성 변형에 의해 초기 상태로 복원되지 않고 소성 변형을 수반하게 된다. 따라서 플랜지의 거동은 고온 조건에서와는 반대의 면에 수직 방향 변위를 나타내므로 그림에서와 같이 양 끝단 배기 포트 주위에서 면압의 크기가 크게 저하됨을 알 수 있다. 이와 같은 면압 분포는 열충격 내구 시험에서 배기가스 누설 문제가 발생할 경우의 누설 메카니즘과 대개 일치하는 현상이다.

Fig. 6은 각 배기 포트의 둘레에 대응하는 가스켓 비드선을 따라서 계산한 면압의 크기를 각도의 함수로 나타낸 것이며, 가로축은 그림에서 정의한 좌표계에 대해서 가스켓 비드선 상의 위치이고 세로축은 면압의 크기를 나타낸 것이다. 먼저, 조립 하중시에는 그림에서 나타낸 바와 같이 각 볼트 체결 방향(● : 그림의 x 좌표에서 10도와 190도 부근)에서는 매우 큰 면압이 형성되고 있으며, 체결부 사이의 구간에서도 또한 충분한 면압 크기를 나타내고 있다. 다음으로 냉각 상태에서의 비드부 면압 크기(점선)를 살펴보면 Fig. 6의 (b)와 (f)에서 보는 바와 같이 양 끝단의 #1 포트와 EGR 포트에서는 비드부의 면압 크기가 포트 둘레를 따라서 모두 크게 감소함을 알 수 있다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 냉각상태에서는 배기매니폴드의 소성 변형에 의해 양 끝단이 실린더헤드면으로부터 멀어지려는 거동과 일치한다.

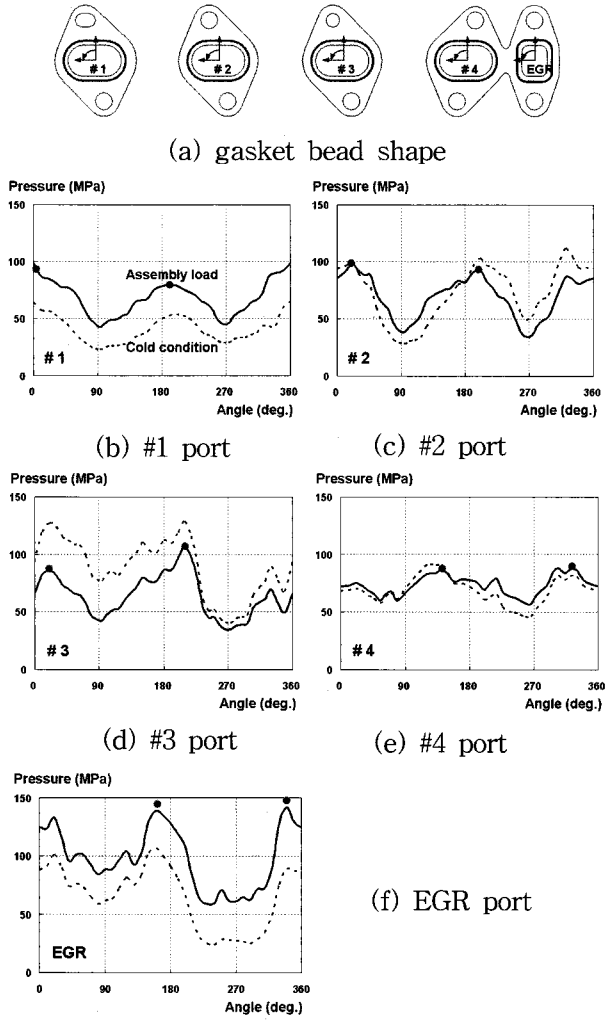


Fig. 6 Contact pressure distributions along gasket bead lines

따라서 본 연구에서 대상으로 한 배기계의 경우 면압 분포는 일반적인 거동을 잘 나타내고 있으며 냉각시 최소 면압의 크기는 약 25 MPa 정도이다. 그리고 어셈블리 상태와 냉각 후의 각 포트별 면압 분포를 비교하면 양쪽 끝단 부위 포트들에서는 가스켓 비드선을 따라서 면압이 수평적으로 감소하고 있으나, 중앙 #3 포트에서는 반대로 냉각시 면압의 크기가 비드선을 따라서 모두 높은 값을 나타내고 있다. 그리고, #2와 #4 포트에서는 면압의 변화 폭이 적으며 값의 크기도 일정 방향에서 서로 역전되는 현상을 나타낸다

따라서 이 같은 열사이클 하중에 대해서 가스켓 비드부를 따른 최소 면압의 크기 및 방향을 유한요소 해석을 통해서 계산함으로써 엔진 배기계의 배기가스 누설 여부를 판단할 수 있을 것이며, 향후 여러 엔진의 가스켓 형상을 대상으로 해석과 시험 결과를 비교함으로써 정량적인 누설 평가 기준을

마련할 수 있을 것이다.

3.2 볼트 체결력의 영향

볼트의 체결력 변화에 따른 면압의 크기를 분석하였다. Fig. 7은 볼트 체결력의 크기를 초기 모델 대비 두 배로 증대(Bolt Load = 17,150 N → 34,300 N)한 경우의 면압 크기를 나타낸 것이다. 가스켓 비드선에 따른 면압 분포는 Fig. 6의 초기 축력에 대한 결과와 매우 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 체결 축력이 증가함에 따라 볼트 체결 방향에서는 어셈블리와 냉각 상태 모두 그 크기가 2배 이상으로 크게 증가한다. 한편, 최소 면압 크기는 초기 어셈블리 상태에서는 축력이 2배로 증대함에 따라 약 1.7~1.8 배 정도의 개선 효과를 나타내고 있다. 그러나, 냉각시의 면압은 중앙 부위의 포트(#2, #3, #4)들은 뚜렷이 증가하고 있으나, 양쪽 외측 포트(#1, EGR)에서는 배기가스의 누설 가능성이 높은 90도와 180도 부위에서 최소 면압의 크기 변화가 거의 나타나지 않는다. 즉, 배기가스의 기밀성을 향상시키기 위해서 쉽게 생각할 수 있는 축력의 일방적인 증가는 체결 안정성 측면에서는 유리하나 실

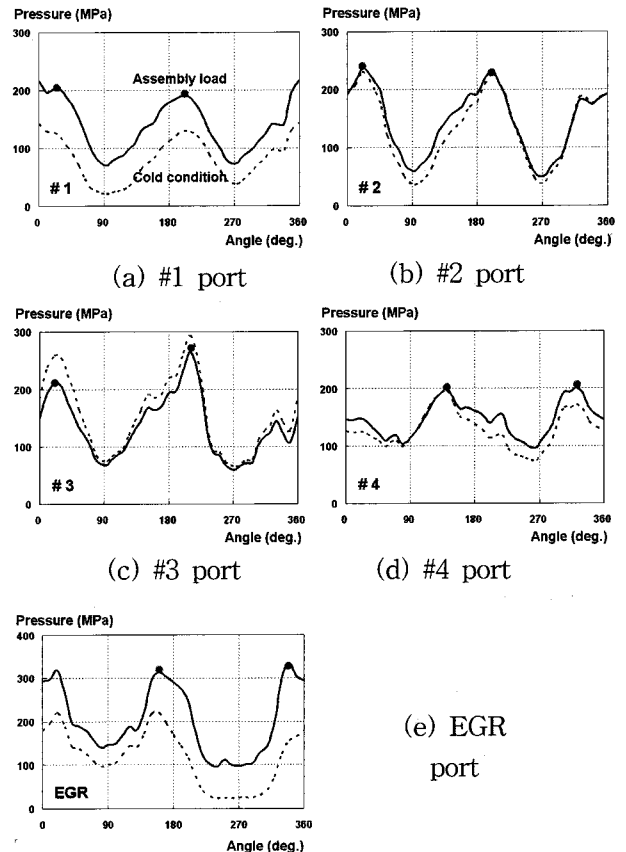


Fig. 7 Magnitude of contact pressure along the gasket bead line for the $\times 2$ bolt load

링성에는 큰 효과가 없을 수 있다는 것을 의미한다. 한편, #4 포트에서의 냉각시 면압의 크기를 살펴보면 전체적으로 면압 크기가 크게 향상됨을 알 수 있다. 이것은 이웃하는 EGR 포트의 체결부 영향으로 사료되므로, 실링성을 향상하기 위해서는 볼트 체결 수 뿐만 아니라 체결 위치가 매우 중요함을 시사하는 것이라 할 수 있다.

3.3 배기매니폴드 플랜지의 거동

배기매니폴드의 국부적인 소성 거동에 의한 플랜지의 변형과 플랜지 자체의 굽힘 강성도 배기가스의 누설에 많은 영향을 미친다. 즉, 플랜지의 굽힘 강성이 적을수록 열변형에 의해 실린더 헤드면으로부터의 변형이 과대하게 되며 결국은 가스켓에서의 면압 저하를 초래할 수 있다.

Fig. 8은 실린더 헤드면에 대한 배기매니폴드 플랜지 면에서의 수직 방향 변위의 크기를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 조립 하중 상태에서는 배기 포트 주위로의 변위 크기가 균일한 분포를 나타내고 있으므로 가스켓에서의 면압 분포도 비교적 양호할 것으로 사료된다. 그러나, 온도가 상승함에 따라 배기매니폴드의 중앙부가 실린더 헤드면으로부터 멀어지려는 변형을 하므로 중앙 부위에서의 변위가 가장 크게 나타난다. 그러나, 볼트 축력에 의한 구속으로 실제 거동은 배기 포트 #1과 #2 사이, #3과 #4 사이, 그리고 #4와 EGR 포트 사이에서 국부적인 굽힘 변형 형상을 나타내고 있으며 이것은 앞에서 언급한 가스켓에서의 접촉 면압 분포와 거의 동일하다. 그리고, 그림 (c)는 열사이클 하중에서 완전히 냉각된 상온 상태에서의 잔류 변형의 크기를 나타낸 것이다. 고온에서 발생한 배기

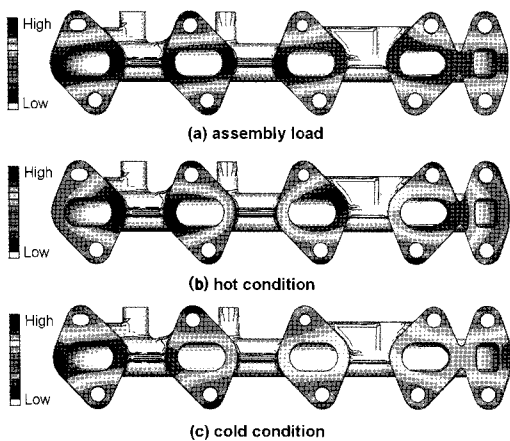


Fig. 8 Normal displacement at inlet flange of the exhaust manifold

매니폴드에서의 소성 변형에 의해 냉각 후에도 완전히 초기 위치로 복원되지 않으므로 열충격 사이클 하중과 같은 주기 하중이 반복될 경우 냉각 후의 잔류 변형에 의한 가스켓에서의 면압 저하로 누설이 발생하게 된다. 본 연구에서 대상으로 한 엔진의 경우 잔류 수직 방향 변형은 포트 #1의 수평 방향으로 가장 크게 발생하고 있으므로 배기가스가 누설될 경우의 누설 예상 부위로 판단된다.

3.2.2 면압측정 결과와 해석결과의 비교

앞에서 나타난 가스켓 면압 결과를 검증하기 위해서 해석 결과를 시험 결과와 비교하였다. Fig. 9는 전부하 연속내구(F/F test mode)와 열충격 내구 시험(T/S test mode) 완료 후의 가스켓 면압 분포를 플랜지 면과 실린더 헤드면 각각에 대해서 납탄 분석을 통해 측정된 결과이다. 이상 두가지 시험을 각각 완료한 후의 면압 분포는 거의 유사한 경향을 나타내고 있으며 또한 실린더 헤드면과 플랜지면의 분포가 서로 대칭을 이루고 있음을 알 수 있다. 그리고, 유한요소 해석을 통해서 얻은 열사이클 완료 후의 냉각시 면압 분포의 특성을 시험 결과와 비교해 보면 포트 #1의 우측 중앙부 근처에서 면압이 최소로 발생하고 있으며 모든 배기계 포트에서 경향이 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

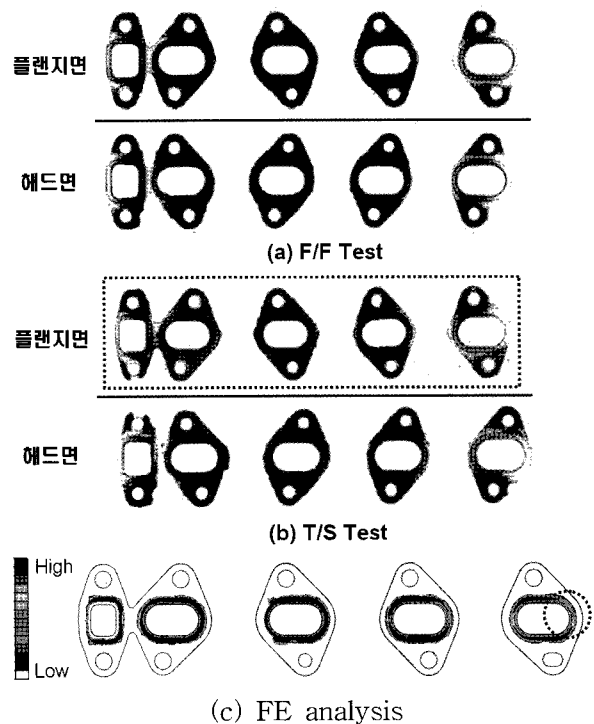


Fig. 9 Comparison of gasket contact pressures between analysis and test results

4. 결 론

본 연구에서는 열적 하중을 주로 받고 있는 배기계를 대상으로, 배기가스의 누설 여부에 대한 정량적 판단 기준을 마련하기 위해서 비선형 유한요소 해석을 수행하였으며, 요약하면 다음과 같다.

1) 열사이클 완료 후 가스켓에서의 면압 크기를 초기 조립상태에서 면압 크기와 비교하면 양쪽 끝단 포트에서는 모두 감소하나 중앙 포트(#3)에서는 반대로 냉각시 면압의 크기가 높은 값을 나타낸다. 이것은 배기매니폴드 플랜지에서의 사이클 하중에 대한 열적 거동과 잘 일치하고 있다.

2) 어셈블리 상태에서 볼트의 축력이 2배로 증가했을 때의 면압 크기를 계산한 결과, 볼트 체결방향에서의 면압은 2배 정도로 나타나지만 최소 면압의 크기는 약 1.7~1.8배 높아진다. 그러나 열사이클 완료 후의 최소 면압의 크기는 개선 효과가 거의 없으므로 단순한 축력의 증가는 체결 안정성 측면에서는 유리하나 실링성에는 많은 효과가 없음을 알 수 있다.

3) 유한요소 해석을 통해서 계산한 가스켓에서의 최소 면압의 크기는 약 25MPa이다. 그리고 면압 분포는 포트 #1의 우측 중앙부 근처에서 최소로 발생하고 있으며 면압 측정 시험결과도 동일한 경향을 나타내고 있다.

참고 문헌

1. S. S. Cho et al., 2006, "Finite Element Modeling and Parameter Study of Half-Bead of MLS Cylinder Head Gasket", Int. J. of Automotive Technology, Vol. 7, No. 1, pp. 109~114.
2. T. Noguchi et al., 1985, "Thermal Stress and Deformation Analysis of Exhaust Manifold of Internal-Combustion Engine", JSAE Review, pp. 34~39.
3. B. L. Choi, 2007, "Leakage Analysis of Exhaust Gas for the Engine Exhaust Manifold", Trans. of KSAE, Vol. 15, No. 3, pp. 160~165.
4. Kim, B. K., Lee, E. H. and Choi, B. L., 2007, "Thermal Deformation Analysis of Exhaust Manifold for Turbo Diesel Engine in Considering of Flange Design", Trans. of

KSAE, Vol. 31, No. 3, pp. 338~343.

5. ABAQUS Analysis User's Manual, Vol IV : Elements, Dassault Systemes.