Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 4, pp.207-212 (2004)

Copyright © 2004 KSAE
1225-6382/2004/070-25

MLS 가스켈용 NBR 피복 SUS301 박판의 피로파손

한 병 기[*1] · 조 성 산[1] · 장 훈[2] · 김 범 근[2]

홍익대학교 기계 · 시스템디자인공학과[1] · 현대자동차[2]

Fatigue Fracture of NBR-coated SUS301 Thin Plate for MLS Gasket

Byoungkee Han[*1] · Sung-San Cho[1] · Hoon Chang[2] · Beomkeun Kim[2]

[1]*Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea*
[2]*Hyundai Motor Company, 772-1 Jangduk-dong, Whasung-si, Gyeonggi-do 445-706, Korea*
(Received 14 April 2004 / Accepted 23 June 2004)

Abstract : Full-beads of multi-layer steel engine head gaskets that are used to seal the combustion gas between the head and the block are subject to cyclic bending stresses due to the variation of the head/block gap during engine operation. The S-N curve for the fatigue durability assessment of the full-bead formed on NBR-coated SUS301 thin plate is deduced from the axial fatigue test results because of the difficulty in conducting the bending fatigue test of thin plate. The experimental verification of the deduced S-N curve is presented. It is shown that the NBR coating increases the endurance limit of the plate significantly. Mechanism of crack nucleation and propagation in the full-bead is discussed with photographs of the fatigue cracks.

Key words : MLS gasket(MLS 가스켈), Fatigue fracture(피로파괴), Stainless steel(스테인레스강), Thin sheet(박판), Bead(양각), S-N curve(S-N 선도)

1. 서 론

MLS(multi-layer steel) 실린더 헤드 가스켈은 최근 엔진의 소형화, 경량화 및 고효율화를 추구하는 현대식 엔진에서 널리 사용되고 있다. 그 이유는 높은 연소압력과 엔진의 고속화로 인한 높은 열하중에 견딜 수 있고, 또한 상대적으로 낮은 실린더 헤드 체결력을 사용함으로써 보어(bore)를 포함한 엔진 전체의 변형을 감소시켜 엔진의 출력 특성을 개선하는 효과가 있기 때문이다.[1-5]

Fig. 1은 냉간압연된 SUS301 박판에 양각(bead)을 을 성형한 후 조립하여 제작되는 MLS 가스켈의 기본 구조를 보여준다. 양각에는 연소실 기체 기밀을 담당하는 완전양각(full-bead)과 윤활유 및 냉각수 기밀을 담당하는 반양각(half-bead)이 있다. 가스켈이 실린더 헤드와 블록 사이에 체결될 때 양각(bead)은 체결력에 의해 압축되면서 단차가 거의 없는 상태로 변형된다. 그러나 엔진 작동 중에 연소실 압력에 의해 헤드와 블록 사이의 간극이 증가할 때 양각은 탄성복원력에 의해 형상을 복원하면서 헤드 및 블록과의 접촉을 유지하며, 이 때 형성되는 접촉압력에 의해 기밀기능을 수행한다. 스토퍼(stopper)는 엔진 보어 주위의 상대적으로 두꺼운 부분이며, 정적 기밀기능을 수행하면서 동시에 간극 변화를 감소시키고 양각의 수명을 향상시키는 기능을 수행한다.[3] 심(shim)은 양각과 접촉하는 별도의 박판이며, 표면기공에 의한 누설와 양각의 마멸을 감소시키는 기능을 수행한다. MLS 가스켈의 표면에는 미세 기

*To whom correspondence should be addressed.
bkhan@wow.hongik.ac.kr

밀(micro sealing)을 위한 얇은 인조 고무층이 코팅되어 있다.[2)]

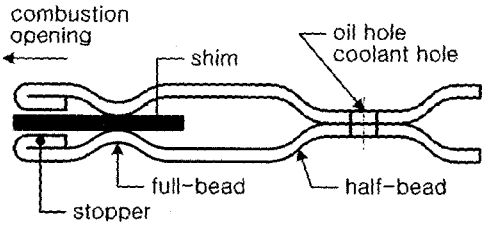

Fig. 1 Basic structure of MLS bead type gasket

실린더 헤드 가스켈은 헤드와 블록 사이의 간극이 넓어진 상태에서도 기밀성을 유지해야 하며, 이 기능을 수행하는 것이 양각이다. 그러나 엔진 작동 중에 기밀간극은 증가와 감소를 반복하므로 양각에 작용하는 압축하중도 증가와 감소를 반복한다. 따라서 양각의 피로내구성은 반드시 확보되어야 한다.

가스켈의 내구평가는 가스켈이 엔진에 조립된 상태에서 수행되어야 하므로 평가에 어려움이 많고 또한 많은 시간과 비용이 소요된다. 따라서 가스켈의 내구성을 설계단계에서 평가하기 위해서는 가스켈 단품을 대상으로 평가하는 기술이 필요하다. 가스켈 제조회사에서는 실제 엔진을 모방한 구조물 내에 가스켈을 장착하고 연소실에 상응하는 공간에 채워진 유체의 압력을 반복적으로 변화시키면서 가스켈의 피로내구성을 실험적으로 평가하고 있다. 그러나 이러한 실험적 평가를 각사의 자체 기준에 의해 수행하고 있고, 더욱이 방법의 구체적인 내용을 외부에 공개하지 않고 있기 때문에 공인된 평가방법 및 기준이 아직 확립되어 있지 않다. 한편 해석적으로 내구성을 평가하는 내용이 언급된 논문5)이 최근에 발표되었다. 그러나 가스켈용 판재의 S-N 선도와 유한요소해석으로 얻어진 응력 진폭값을 사용하면 해석적으로 평가할 수 있다는 정도의 원론적인 내용만을 언급할 뿐, 가스켈용 판재의 S-N 선도 및 피로특성에 관한 구체적인 내용은 언급하고 있지 않다. 따라서, 본 논문에서는 MLS 가스켈 양각의 피로내구성을 해석적으로 평가하는데 기초가 되는 MLS 가스켈용 NBR 피복 SUS301 박판의 피로수명 선도를 제시하고 피로파괴 특성을 고찰한다.

2. 피로시험

연소실 압력변화에 의해 실린더 헤드와 블록 사이의 간극이 변화할 때 양각은 탄성복원력에 의해 압축과 복원을 반복한다. 즉, 양각의 형상변화는 탄성영역에서 발생하므로 고주기 피로이론을 적용하여 양각의 피로수명을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 응력진폭-수명(S-N) 선도를 도출하기 위한 시험을 수행하였다.

헤드/블록 간극 변화에 따라 양각이 압축 및 복원될 때 양각 모서리부의 굽힘량이 변화한다. 피로이론에 의하면 동일한 소재라도 하중의 종류에 따라 소재의 피로강도는 차이를 나타내므로 양각용 판재의 피로시험은 굽힘하중 조건에서 수행해야 한다. 한편, MLS 가스켈용 박판의 두께는 0.2-0.25mm이기 때문에 굽힘 피로시험을 수행하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 표준시편으로 판재가 얇아 압축력을 가할 수 없으므로 응력 비(stress ratio; R) R>0 인 편진 인장조건에서의 S-N 선도를 도출한 후, 피로이론에 근거하여 편진인장피로 S-N 선도로부터 굽힘피로 S-N 선도를 도출하였다. 굽힘피로 S-N 선도의 신뢰성을 검증하기 위해 완전양각의 반복압축 피로시험을 수행하였다.

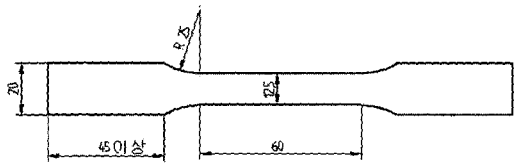

Fig. 2 Standard tensile test specimen

2.1 표준시편 편진 인장 피로시험

양각용 판재로 주로 사용되는 냉간 압연된 SUS301 판재를 대상으로 편진 인장 피로시험을 수행하였다. 시편은 KS B 0801 금속재료 인장시편 규격 13호(Fig. 2)에 준하여 제작하였다. 압연방향의 영향을 확인하기 위해 압연방향 및 압연방향과 수직인 방향으로 절취된 두가지 종류의 시편을 대상으로 시험을 수행하였다. 냉간압연된 SUS301 판재의 기본적인 기계적 특성을 확인하기 위해 인장시험을 수행하였으며, 그 결과를 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Mechanical properties of cold-rolled SUS301 plate

Elastic modulus	185GPa
Poisson's ratio	0.29
Yield strength (0.2% offset)	845MPa
Ultimate tensile strength	1.4GPa
Elongation	20%

가스켈은 미세 기밀을 위해 표면에 인조고무가 코팅되어 있다. 코팅은 강판에 비해 강성이 약하지만 피로수명은 표면조건에 따라 차이를 나타내므로 NBR(nitril butadien rubber)이 코팅된 시편에 대한 시험도 수행하였다.

가스켈이 엔진에 체결될 때 양각 부위는 심각하게 소성변형되며, 이후 헤드/블록 간극이 증가할 때 탄성복원된다. 완전양각의 체결과정에 대한 유한요소해석[6]에 의하면 체결시 양각 부위에 형성되는 주응력은 소재의 최대인장강도에 근접한다. 따라서 반복응력의 최대값이 최대인장강도 1.4GPa에 근접한 상태에서 최저응력을 변화시키는 방법으로 피로시험을 수행하여 S-N 선도를 도출하였다. 평균응력의 영향을 확인하기 위해 평균응력을 일정하게 유지하고 응력진폭을 변화시키는 방법으로도 시험을 수행하였다.

2.2 완전양각 피로시험

엔진 작동 중에 완전양각에 작용하는 반복압축하중과 유사한 조건에서 완전양각의 수명을 평가하는 시험을 수행하였다. Fig. 3은 이를 위해 제작된 지그

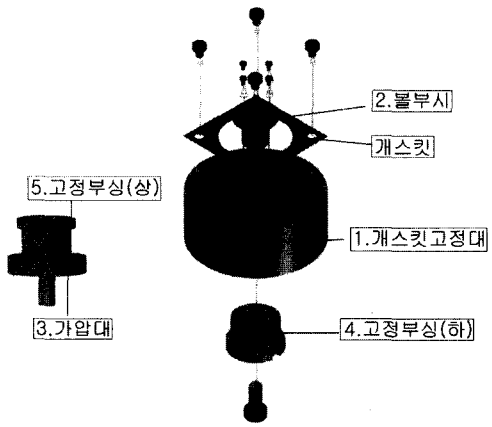

Fig. 3 Jig for the fatigue test of full bead

의 분해도를 보여준다. 양각이 성형된 판재는 실린더 헤드와 블록에 해당되는 가압대와 고정대 사이에서 반복 압축하중을 받는다.

시험 중에 완전양각의 피로파손 시점을 찾아내기가 어렵기 때문에 일정 회수의 반복압축하중을 가한 후 현미경으로 균열발생 여부를 확인하는 방법으로 시험을 수행하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 판재의 편진 인장 피로특성

Fig. 4는 표준시편을 대상으로 편진 인장 피로시험을 수행한 결과와 그 결과로부터 도출된 S-N선도를 보여준다. NBR이 코팅되지 않은 판재의 시험 결과를 보면, 인장하중의 방향이 판재 압연방향과 평행한 경우(기호 □)와 수직인 경우(기호 ○)의 결과는 미미한 차이를 나타낸다. 또한 최대응력을 일정하게 유지한 경우(기호 □)와 평균응력을 일정하게 유지한 경우(기호 △)의 결과도 미미한 차이를 나타낸다. 따라서 완전양각의 피로평가에서 압연방향과 평균응력의 영향을 무시해도 무방한 것으로 판단된다.

피로이론에 의하면 평균응력값이 증가하면 수명은 감소하는데,[7] 본 시험에서는 그 영향이 미미하다. 평균응력의 영향에 대한 기존의 이론은 평균응력값이 소재의 최대인장강도에 비해 매우 적은 경우에 적용된다. 그러나 본 시험에서는 상대적으로 매우 큰 평균응력이 작용한다. 따라서 평균응력값이 매우 큰 경우에는 평균응력의 영향이 감소하는 것으로 추정되며, 이 결과는 보다 더 많은 실험적 검증이 필요한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 NBR이 코팅된 시편의 시험결과(기호 ◆)도 보여준다. 유한수명 영역에서 코팅의 유무는 미미한 차이를 나타낸다. 그러나 무한수명을 보장하는 내구한계(endurance limit, Se)는 코팅에 의해 120MPa에서 230MPa로 크게 증가한다. 일반적으로 표면의 미세균열 및 거칠기는 내구한계를 감소시키는데,[7] 코팅에 의해 이 영향이 감소되어 내구한계가 증가한 것으로 판단된다. 따라서 가스켈용 판재의 내구수명은 코팅이 있는 상태의 수명선도를 사용해야 한다.

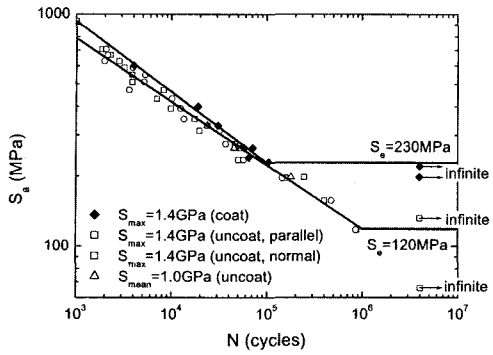

Fig. 4 S-N curves for axial loading

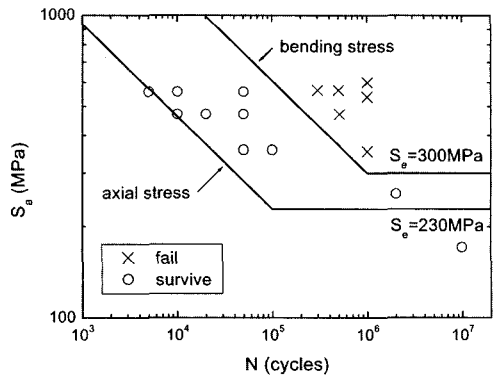

Fig. 5 S-N curve for full-bead

3.2 완전양각의 피로특성

반복 압축하중은 완전양각부에 반복굽힘응력을 발생시키므로 완전양각의 피로거동은 굽힘피로 S-N 선도를 사용해야 한다. 본 연구에서는 굽힘피로 S-N 선도를 편진 인장피로 S-N 선도와 피로이론에 근거하여 도출한다. 피로이론에 의하면 피로균열은 큰 응력이 작용하는 소재 내의 취약한 지점에서 생성된다. 시편의 크기가 증가하면 시편 내에 취약한 지점이 존재할 가능성이 증가하므로 피로균열이 쉽게 생성되고 그 결과 내구한계가 감소한다. 이를 치수효과(size effect)라고 부른다. 한편, 인장하중은 부재 내에 균일한 응력을 생성시키지만, 굽힘하중은 부재 표면에서 응력이 최대가 되는 응력 구배(gradient)를 생성시킨다. 즉, 굽힘하중은 인장하중에 비해 큰 응력이 작용하는 부분의 체적이 적으며, 그 결과 굽힘피로 내구한계는 인장피로 내구한계보다 큰 값을 갖는다. 이를 하중효과(loading effect)하고 부른다. 기존의 실험결과에 의하면 인장피로 내구한계는 굽힘피로 내구한계의 0.6-0.9배의 범위 내에 있다.[7] 일반적으로 안전한 설계에서 사용되는 비율 0.7을 사용하면, 인장피로 내구한계가 230MPa일 때 굽힘피로 내구한계는 330MPa이 된다. 그러나 보다 안전한 설계를 위해 내구한계 300MPa를 선정한다. 한편 크기 및 하중효과가 유한수명 선도의 기울기에 미치는 영향에 대한 일반화된 결론은 정립되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 철강재의 내구한계가 일반적으로 100만회 부근이라는 사실에 근거하여 인장피로 유한수명 선도를 평행이동시켜 반복하중 100만회에서 응력진폭이 내구한계 값이 되도록 굽힘피로 유한수명선도를 선정하였다. 참고적으로 가스켈은 무한수명을 보장할 수 있도록 설계하므로 유한수명 선도의 중요성은 상대적으로 낮다.

Fig. 5는 상기한 과정으로 도출된 굽힘피로 S-N 선도와 완전양각의 압축피로시험 결과를 보여준다. 완전양각의 피로시험에서 압축하중에 의해 완전양각부에 형성되는 응력진폭의 최대값은 아래와 같이 산출하였다. 즉, 완전양각 피로시험의 유한요소해석[6]을 수행하여 완전양각 전체에 대해 산출된 주응력의 진폭 S_{a1}, S_{a2} 및 S_{a3}를 사용하여 등가응력진폭 S_{qa}를 산출한 후, 이 중 최대값을 완전양각 피로시험의 굽힘응력 진폭으로 결정하여 Fig. 5에 표시하였다. Sines 이론에 근거한 등가응력진폭,[8]

$$S_{qa}=\sqrt{\frac{(S_{a1}-S_{a2})^2+(S_{a2}-S_{a3})^2+(S_{a3}-S_{a1})^2}{2}}$$

를 사용한 이유는 완전양각 피로시험을 수행할 때 압축하중은 완전양각 내에 다축응력을 발생시키기 때문이다. 굽힘피로 S-N 선도와 완전양각 피로시험의 결과가 잘 일치하므로, 편진 인장피로 수명선도로부터 굽힘피로 수명선도를 도출하는 과정 및 결과가 신뢰성이 있는 것으로 판단된다. Fig. 5에 참고적으로 제시된 코팅 시편의 편진 인장피로 수명선도는 완전양각의 피로시험결과와 큰 차이를 나타내므로, 편진 인장피로수명선도를 사용하여 완전양각의 피로수명을 평가해서는 안된다는 것을 알 수 있다.

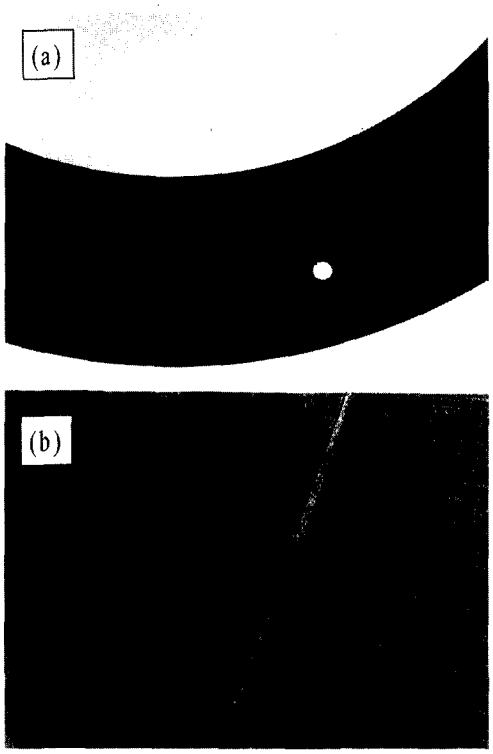

Fig. 6 Photographs of (a) through-crack (35±30kN, 10^6 cycles) and surface crack (45±35kN, 5×10^5 cycles)

Fig. 6은 완전양각에 일정 회수의 반복압축하중을 가한 후 코팅재를 제거하고 파손상태를 관찰한 대표적인 사진을 보여준다. Fig. 6(a)는 관통균열이 발생한 경우를 보여주며, Fig. 6(b)는 미관통 표면 균열이 전파되고 있는 상태를 보여준다. 이 결과는 균열이 표면에서 생성된 후 성장하여 관통균열이 된다는 것을 확인시켜 준다. 관통균열이 발생하면 누출이 발생하므로 완전양각의 수명이 다 한 것으로 판단할 수 있다. 한편 균열은 항상 완전양각의 보어쪽 걱임부(Fig. 6(a))와 바깥쪽 걱임부(Fig. 6(b)) 중 어느 한 쪽에서 관찰되었다. 그러나 원주방향의 균열발생위치는 일관성있는 결과를 나타내지 않았다. 따라서, 완전양각의 피로균열은 2개의 원형 걱임부 상에서 소재적 결함이 존재하는 위치에서 발생하는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 파단면을 보여준다. Fig. 7(a)에서 판재 표면에 근접한 부분을 보여주는 아래 쪽에서 전단파괴의 증거인 경사진 파단면이 관찰된다. Fig. 7(b)는

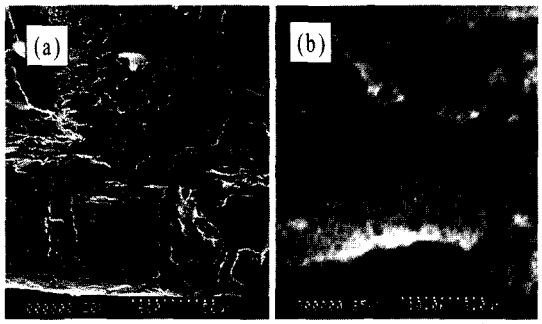

Fig. 7 Photographs of fracture surface

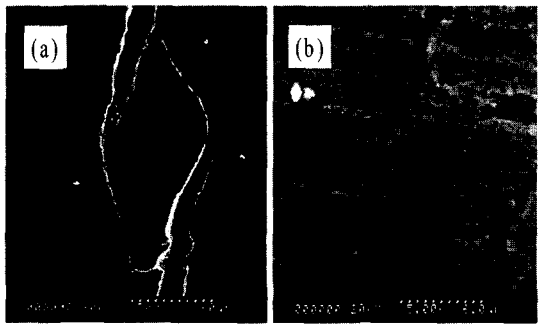

Fig. 8 Photographs of (a) merging and (b) propagation of fatigue cracks

Fig. 7(a)에서 판재 단면의 중심부에 해당되는 상단부 파단면을 고배율로 보여주며, 인장파괴의 증거인 다수의 dimple 자국이 관찰된다. 따라서 Fig. 6과 Fig. 7의 결과를 종합하면 피로균열은 전단응력에 의해 표면에서 생성된 후 인장응력에 의해 성장하여 관통균열이 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8는 균열의 전파과정을 보여준다. Fig. 8(a)는 2개의 독립적인 균열이 만나서 연결되는 과정을 보여주며, 따라서 동시 다발적으로 생성된 여러 개의 균열이 성장하면서 서로 연결되어 Fig. 6(a)에 제시된 것과 같은 큰 균열이 된다는 것을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 균열이 결정립계를 관통하면서 진전되는 모습을 보여준다. 즉, 균열의 전파방향은 결정립 계면의 방향과는 무관하게 작용응력의 방향에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

MLS 가스켈의 내구수명 평가에 필요한 NBR 피복 SUS301 박판의 피로수명선도를 제시하였다.

MLS 가스켈에서 피로에 가장 취약한 완전양각은 굽힘피로응력에 노출되어 있지만 박판의 굽힘피로 시험이 어렵기 때문에 편진 인장피로시험으로 얻어진 피로수명선도로부터 완전양각의 피로수명선도를 도출하는 방법을 사용하였으며, 그 결과 및 방법의 타당성을 실험적으로 검증하였다.

완전양각용 피로수명선도를 도출하는 과정에서 얻어진 자료를 근거로 다음의 사실을 확인하였다. 코팅은 판재의 내구한계를 증가시킨다. 피로균열은 전단응력에 의해 표면에서 생성된 후 인장응력에 의해 성장하여 관통균열이 된다. 다수의 균열이 동시 다발적으로 발생하여 서로 연결되어 큰 균열을 형성한다. 균열의 성장방향은 소재의 미세조직보다는 작용응력의 방향에 의해 결정된다.

References

1) K. Yamaguchi, A. Sato, E. Goto, R. Fujiki, Y. Kawai, N. Nakata, "Development of a New Metal Cylinder Head Gasket," SAE 980844, pp.1334-1338, 1998.
2) H. Kodaira, K. Niizuma, T. Ishii, O. Aizawa, "Some Observations Relative to the Micro Sealing Performance of Elastomeric Coated Steel Construction Cylinder Head Gasket," SAE 980577, pp.1-7, 1998.
3) C. Herbert, W. Webster, "Cylinder Head Gasket Simulation in Finite Element Analysis," SAE 980843, pp.1328-1333, 1998.
4) G. Novak, M. Sadowski, E. Widder, R. Capretta, "The Role of the Stopper in the Mechanics of Combustion Seals," SAE 980575, pp.1-6, 1998.
5) F. Popoelas, C. Chen, S. Obsemaier, "CAE Approach for Multi-Layer Steel Cylinder Head Gaskets," SAE 2000-01-1348, 2000.
6) S.-S. Cho, B. K. Han, H. Chang, B. K. Kim, "Effects of Forming Process on Sealing Performance of Full-bead of MLS Gasket - Finite Element Analysis," International Journal of Automotive Technology, Accepted.
7) J. A. Bannantine, J. J. Comer, J. L. Handrock, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, New Jersey, 1990.
8) H. O. Fuchs, R. I. Stephens, Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons, New York, 1980.
9) Korean Industrial Standards, KS B 0801, Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials.