

캠축에서의 피로파괴해석

조재웅*, 한문식#

Analysis on Fatigue Fracture at Cam Shaft

Jae-Ung Cho*, Moon-Sik Han#

ABSTRACT

This study investigates the fatigue life and the damage possibility of cam shaft by the fatigue tool of Ansys. Among nonconstant fatigue loads, the case of 'SAE Bracket History' which is severest at the variation of load tends to be most unstable. The maximum relative damage in case of 'SAE Bracket History' is occurred near the average stress '0' and this case can be shown to have the possibility to take more damage than other cases. The case of 'Sample History' which becomes a little slow at the variation of load tends to be most stable. But there is most damaged possibility of 5% as 7 times at the range of mean stress from 0Pa to -104MPa and amplitude stress from 0MPa to 104MPa than the case of 'SAE Bracket History' or 'SAE Transmission'.

Key Words : Available life(사용 가능수명), Relative damage(상대적인 손상), Rainflow matrix (레인플로우 매트릭스), Damage matrix(손상 매트릭스)

1. 서 론

자동차의 엔진에는 캠축이 들어가는데, 캠축은 엔진의 흡기밸브와 배기밸브를 적절한 타이밍에 개폐해주는 장치로서 엔진의 출력과 엔진의 컨디션에 매우 직접적인 역할을 하고 있다^[1,2]. 요즘은 출력의 향상을 위해 캠의 각도를 조절하여 애프터 마켓용으로 출시되는 캠들도 있는데 각도에 따라 세미캠, 혹은 하이캠으로 구분된다. 승용차용 기관의 고성능화에 따라, 그 최고회전수를 높이고 연소실의 구형화를 시도한 결과 흡·배기 밸브의 설치나 구동방법이 달라졌다. 즉, 종래의 밸브기구에는 OHV(overhead valve)라고

해서 단순히 흡·배기 밸브만이 실린더 헤드(연소실 상부)에 설치되어 있으며, 캠축은 크랭크축으로부터 기어에 의해서 동력을 전달받는 관계상 실린더의 측면에 놓여 있었다. 그런데 이 구조로는 캠축에서 밸브까지의 거리가 너무 멀어서 운동 부분의 관성중량이 커지므로 기관의 회전수를 높일 수 없는 난점이 있다. 개량방법으로서 캠축의 위치를 실린더의 상부로 옮긴 하이캠축 방식을 채택하여 그 목적을 이루게 되었다. 그리고 기계공학 기술의 발달에 따라, 종래에는 경주용 자동차나 항공용 기관 외에는 사용하지 않던 OHC(overhead camshaft)방식을 승용차에도 사용하기 시작하였다. 이것은 캠축에서 직접 흡·배기 밸브를 개폐하는 방법이며, 운동부분이 극히 가벼워지므로 기관의 고속회전이 가능해져, 성능의 향상을 도모할 수가 있다. 그러나 캠축이 기관의 상부에 붙는 관계로 크랭크축으로부터 회전력을 얻을 때 기어식

* 공주대학교 기계자동차공학부

교신저자 : 계명대학교 기계자동차공학부

E-mail : sheffhan@kmu.ac.kr

으로는 기구가 복잡해지므로 체인을 사용하지만, 내구성이나 소음문제에 설계상의 고충이 있었다. 따라서 자동차나 구조물에 있어서 이러한 피로나 파괴를 규명하기 위한 여러 가지 연구가 광범위하게 이루어져 왔으며 이들에 대하여는 피로 파괴에 대한 연구가 주류를 이루고 있다^[3-5]. 그 중에서 대부분의 피로 파괴는 불규칙적으로 일어나고 있어 이론 해석에 의하지 않고서는 그 예측이 불가능한 실정이다. 본 연구에서는 피로수명, 파손 및 그 내구성의 해석 결과들에 대한 수렴성이 좋고 효율적인 해석 결과를 얻을 수 있는 피로 설계 전용 Ansys 프로그램을 사용하였다^[6,7]. 본 논문에서는 CATIA를 이용한 캠축의 설계와 모델링을 해보고 엔진구동시에 캠이 받는 피로도를 ANSYS를 통하여 해석하였다. 그 연구 내용으로는 피로를 받는 캠축의 모든 부분에 대하여 그 수명과 손상들을 예측할 수 있었고 파손 및 사용 가능한 수명들을 모든 하중의 변화들로서 비교할 수 있었다. 이러한 본 연구의 결과를 종합하여 불규칙 하중을 받는 자동차 부품에 응용한다면 그 파손 방지 및 내구성을 검토, 예측하는데 활용이 클 것으로 사료된다.

2. 본 연구에서의 모델 및 해석절차

본 연구에서의 해석모델로서 캠축의 유한요소분할 모양과 치수(단위:mm)는 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다. Solid 187의 요소로, 절점들과 요소들의 개수는 각각 10456 및 5921 이다. 시험편의 재료로는 구조용 강으로서 그 특성은 Table 1 에 나타나 있다. Fig. 3과 같이 캠축의 한 쪽면 A를 구속하고 그 반대편 면 B에 모멘트로서 30Nm가 가해지고 있다. 본 논문의 해석에 있어서는 피로 곡선에 대한 실험 데이터로서 구조용 강의 자료를 사용하였다. Fig. 4는 피로 해석 모델에 대한 데이터를 보여 주는 그림으로서 x축상에서는 사이클 수이고 y축상에서는 진폭응력 값을 나타낸 그림들이다. 또한 피로 Tool로서 평균 응력과 여러 가지 하중의 형태들을 정의하여 그 하중 조건들을 설명할 수 있다^[6]. 피로 Tool로서는 시간에 따라 임의의 한 부분에 대하여 하중을 변화시킬 수 있는데, Fig. 5와 같이 수행하는 실제 차량이 받을 수 있는 불

규칙 진폭하중들인 'SAE Bracket History', 'SAE Transmission', 'Sample History'와 같이 진폭하중에 대한 배열들의 목록을 나타내고 있다. 본 해석은 하나의 축방향 응력에 대하여 정적 응력의 안전성을 구하는 Tool들과는 달리, 어떤 한 점에서 응력이 시간에 따라 변하는 경우에 대하여 한 것이다. 또한 본 연구에 있어서는 불규칙 진폭하중의 방법을 채택하고 기본 하중에 대하여는 배열을 적용할 수 있다. 진폭 응력이 S-N 곡선의 범위를 벗어난다면 무한 수명 값이 사용되어지는데, 본 연구에 있어서는 설계 수명인 무한 수명으로서 10^9 사이클로 정하고 있다.

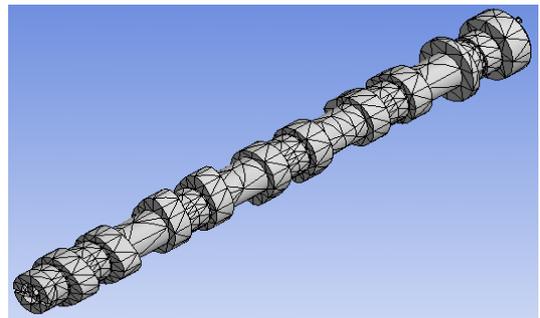


Fig. 1 Mesh of Specimen

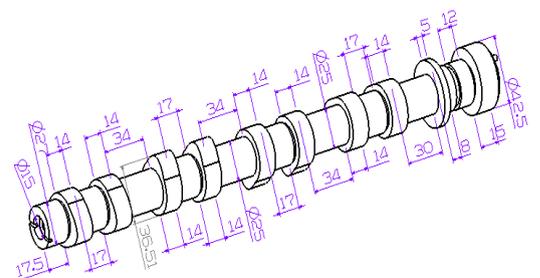


Fig. 2 Dimensions of Specimen (Unit :mm)

Table 1 Material Properties

Structural Properties	
Young's Modulus	2×10^5 MPa
Poisson's Ratio	0.3
Mass Density	7.85×10^{-6} kg/mm ³
Stress Limits	
Yield Strength	250MPa
Ultimate Strength	460MPa

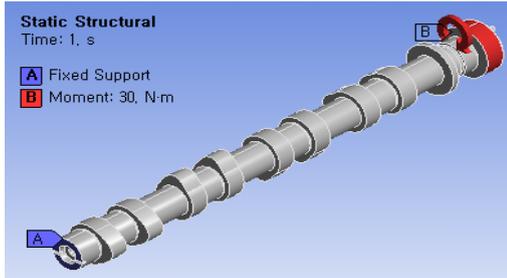


Fig. 3 Constraints of Specimen

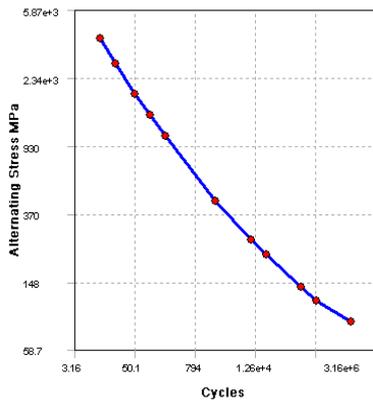
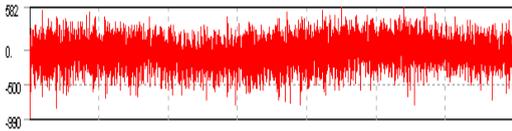
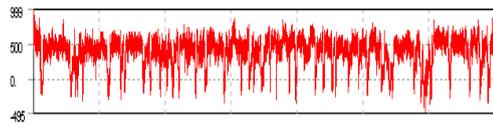


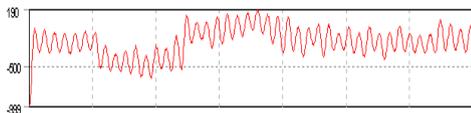
Fig. 4 S-N Curves in Fatigue



(a) SAE Bracket History



(b) SAE Transmission

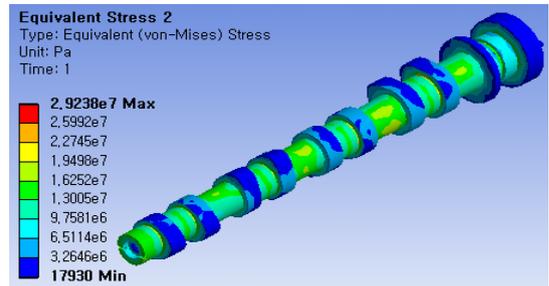


(c) Sample History

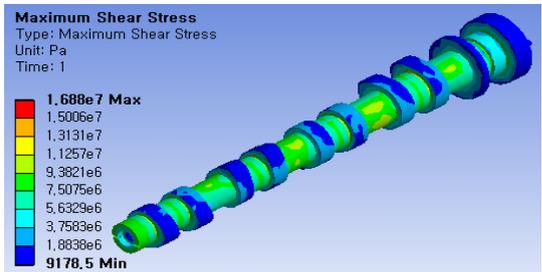
Fig. 5 Loading history

3. 해석 결과

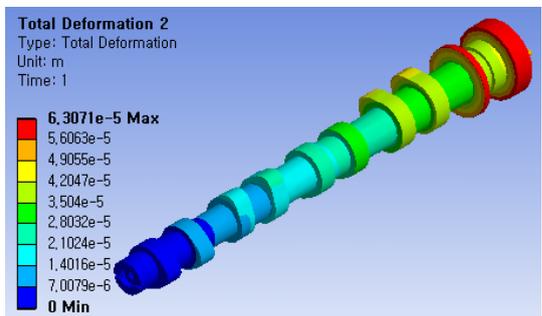
평균 하중에 대한 Von-mises 응력, 최대 전단 응력 및 전변형량에 대한 등고선들을 Fig. 6과 같이 보여 주고 있는데, von Mises 등가 응력과 최대 전단 응력은 캠의 중심축 부분에서 29MPa와 17MPa로서 각각 크게 나타났다. 또한 전변형량은 캠축의 오른쪽 끝단 부에서 0.06mm로 크게 나타나고 있다.



(a)

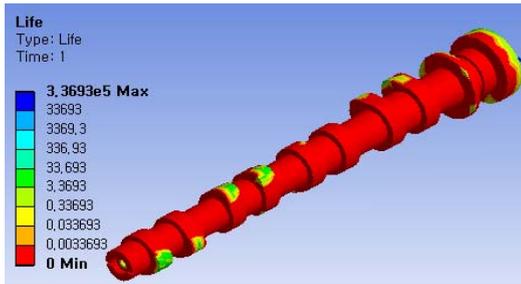


(b)

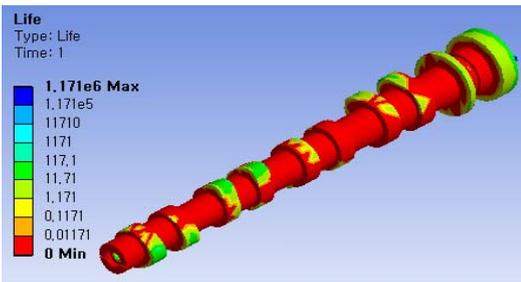


(c)

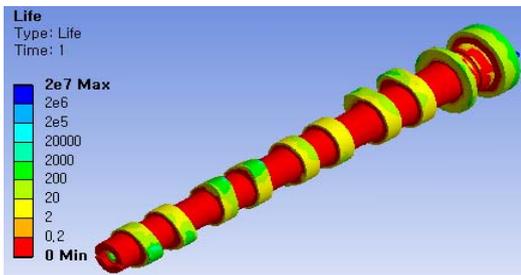
Fig. 6 Von-Mises Equivalent Stress(a), Maximum Shear Stress(b) and Total Deformation (c) of Model



(a) SAE Bracket History



(b) SAE Transmission

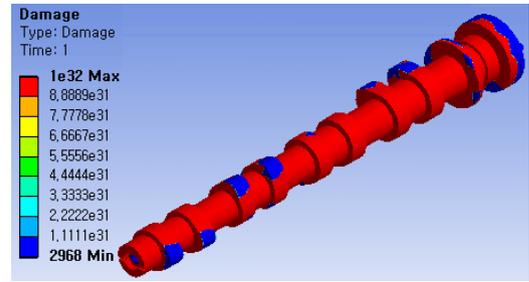


(c) Sample History

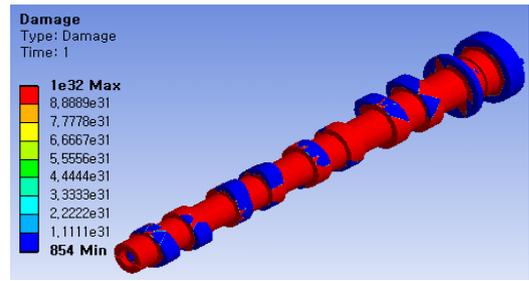
Fig. 7 Contour Plots of Available Lives

피로에 대한 해석 결과의 출력들은 피로 수명, 파손, Rainflow 매트릭스 및 Damage 매트릭스들을 포함하고 있다. 각각의 출력들은 불규칙 진폭하중들인 'SAE Bracket History', 'SAE Transmission', 'Sample History'들의 하중들로서 서로 비교 될 수 있다. 본 연구의 모델에 대하여 사용 가능 수명에 대한 등고선 그림들이 Fig. 7에 나타나 있다. 이 결과는 모델 전체에 걸쳐서 계산 될 수 있는데 불규칙 진폭 하중으로 본 모델에 작용됨으로써 이 결과의 등고선 그림들은 주어진 피로 분석에 대하여 사용 가능한 수명을 보여

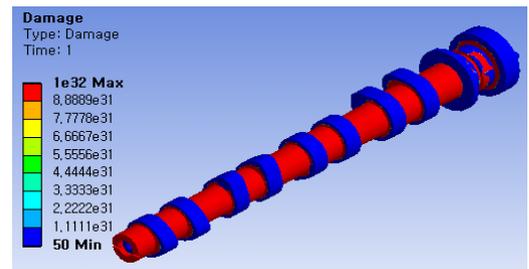
주고 있다. Fig. 7에서 보면 (a)의 경우의 하중의 변화가 극심한 'SAE Bracket'의 경우가 사용 가능 수명이 3.37×10^5 Cycle 정도로 가장 짧은 것을 볼 수가 있고 하중의 변화가 완만한 'Sample History'의 경우가 그 수명이 2×10^7 Cycle 정도로 가장 긴 것을 알 수 있었다.



(a) SAE Bracket History



(b) SAE Transmission



(c) Sample History

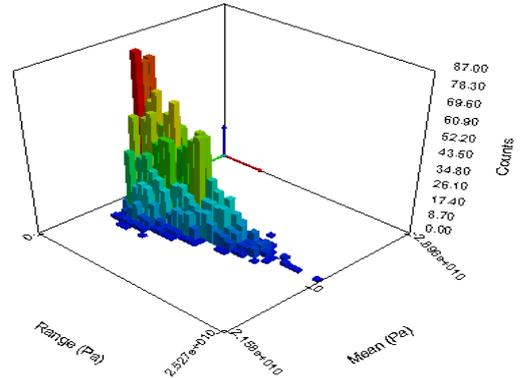
Fig. 8 Contour Plots of Fatigue Damages

Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 등고선으로 된 피로 손상은 설계 수명을 사용 가능 수명으로 나누는 것으로 정의된다. 피로 손상이 아주 적은 부분으로 서

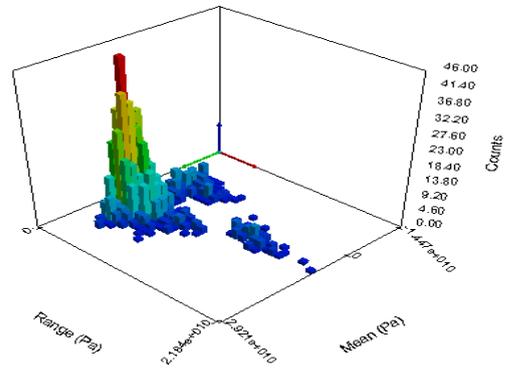
3가지 경우들을 공히 비교할 수 있다. Fig. 8에서 보면 (a)의 경우인 하중의 변화가 극심한 'SAE Bracket'의 경우가 손상이 2968로 가장 많은 것을 볼 수가 있고 하중의 변화가 완만한 'Sample History'의 경우가 그 손상이 50 정도로 가장 적은 것을 알 수 있었다. 따라서 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 'SAE Bracket History'의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 완만한 'Sample History'의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다.

Fig. 9는 임계 위치에 대한 Rainflow 매트릭스들에 대한 그림들로서 'SAE Bracket History', 'SAE Transmission', 'Sample History'들의 3가지 불규칙 진폭하중에 대해서만 적용된다. 그리고 Fig. 8은 본 해석에 가해지는 하중 내역의 구성으로서 진폭 응력 과 평균 응력에 대한 그 빈도수들로서 그려지는데, z축은 주어진 진폭 응력과 평균 응력에 대한 빈도수에 해당된다. Fig. 9에서 보면 'SAE Bracket History'의 경우가 상대적인 손상은 평균응력이 0 부근의 상태에서 최대의 빈도수가 80 정도로서 상대적인 손상을 많이 일으켜 어떤 다른 경우들보다는 더 파손의 가능성이 더 일어남을 알 수 있었다. 또한 'Sample History'의 경우는 이 상태에서 최대의 빈도수가 5정도로서 손상을 가장 적게 일으켜 그 파손의 가능성이 가장 작음을 알 수 있었다.

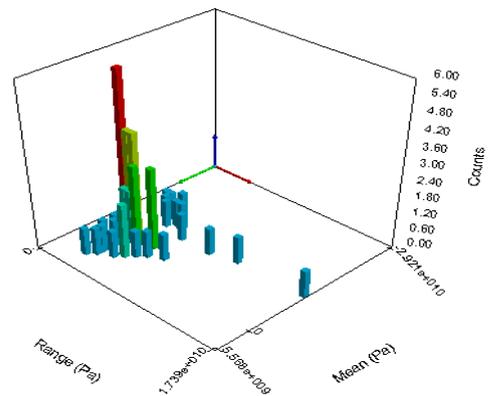
Fig. 10은 본 연구 모델에서 파손에 대한 임계 위치에서의 Damage 매트릭스들에 대한 그림들로서 불규칙 진폭하중에 대해서만 적용되는데 10^9 사이클의 무한 수명에 대한 상대적 손상 가능성을 나타내고 있다. Fig. 10에서 보면 'Sample History'의 경우가 다소 안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이 0Pa부터 -10^4 MPa이고 응력 진폭 0MPa부터 10^4 MPa에 있어서 최대 5%의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 파손의 가능성이 많다고 예측 할 수 있었다. 그리고 'Sample History'의 경우가 최대 0.7% 정도의 파손가능성을 보이는 'SAE Bracket History'나 'SAE Transmission' 경우보다 7배의 파손의 가능성이 큼을 알 수 있었다.



(a) SAE Bracket History



(b) SAE Transmission



(c) Sample History

Fig. 9 Plots of Rainflow Matrices

4. 결 론

불규칙한 피로 하중을 받는 캠축에서의 피로 수명과 그 손상의 가능성을 Simulation 해석 할 수 있었는데, 본 연구를 통하여 얻은 주요한 결론은 다음과 같다.

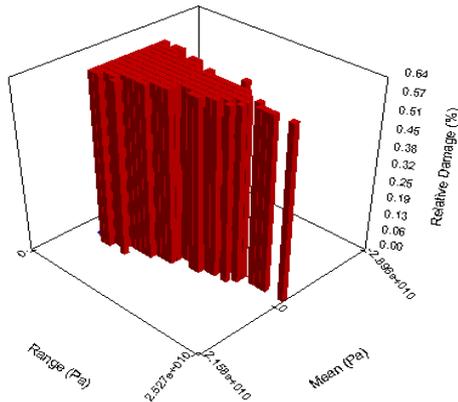
1. 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 'SAE Bracket History'의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 완만한 'Sample History'의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다.

2. 'SAE Bracket History'의 경우가 상대적인 손상은 평균응력이 0 부근의 상태에서 최대의 상대적인 손상을 일으켜 어떤 다른 경우들보다는 더 파손의 가능성이 더 일어남을 알 수 있었다.

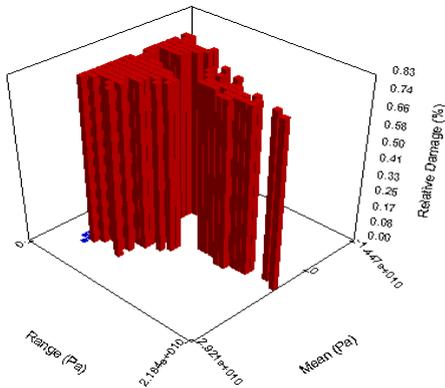
3. 'Sample History'의 경우가 안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이 0Pa부터 -10^4 MPa이고 응력 진폭 0MPa부터 10^4 MPa에 있어서 최대 5%의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 'SAE Bracket History'와 'SAE Transmission'경우보다 7배의 파손의 가능성이 많다고 예측 할 수 있었다.

참고문헌

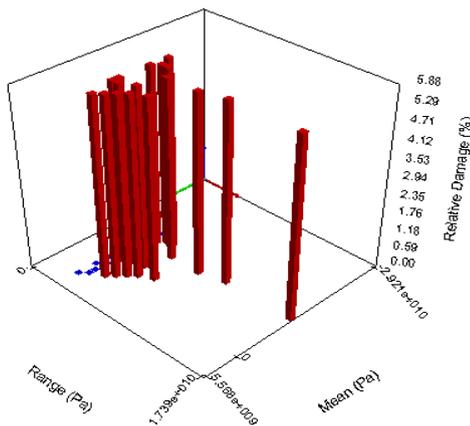
1. 여창기, 이인환, 김현수 “접촉점의 마찰을 고려한 OHC 형 캠-밸브기구의 본드그래프 모델과 캠축 토크해석”, 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp. 153-159, 1991.
2. 장낙영, “내연기관의 윤활계통설계의 기초(III),” 오토저널(자동차공학회지), 제9권, 제1호, pp. 15-22, 1987.
3. Park, Y. C. and Lee, D. W., “Shape Optimization of the Lower Control Arm using the Characteristic Function and the Fatigue Analysis,” Transactions of KSAE, Vol. 13, No. 1, pp. 119-125, 2005.
4. Han, B. K., Cho, S. S., Chang, H. and Kim, B. K., “Fatigue Fracture of NBR-coated SUS301 Thin Plate for MLS Gasket,” Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 4, pp. 207-212, 2004.
5. Goo, B. C. and Seo, J. W., “Probabilistic Fatigue



(a) SAE Bracket History



(b) SAE Transmission



(c) Sample History

Fig. 10 Plots of Damage Matrices

Life Evaluation of Rolling Stock Structures,”
Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 5, pp. 89-94,
2003.

6. Swanson, John., “Design Space”, Ansys Workbench,
Ansys. Inc., 2003.
7. Hancq, D. A., Walters, A. J. and Beuth, J. L.,
“Development of an Object Oriented Fatigue Tool,”
Engineering with Computers, Vol. 16, pp. 131-144,
2000.