

## 다양한 하중을 받는 커넥팅 로드 의 피로 파손 해석

조재웅\* · 최두석 · 김기선

공주대학교 기계 · 자동차공학부

### The Analysis of Fatigue Damage of Connecting Rod under Various Load

Jaeung Cho\* · Dooseuk Choi · Keysun Kim

Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University, Chungnam 330-717, Korea

(Received 7 June 2005 / Accepted 20 July 2005)

**Abstract** : This study investigates the fatigue life and the damage possibility of connecting rod by the fatigue tool of Ansys workbench. The case of constant fatigue loading variation ‘Sine’ becomes more stable than that of nonconstant loading but the magnitude of constant load becomes larger than that of nonconstant load. Among nonconstant fatigue loads, the case of ‘SAE Bracket History’ which is severest at the variation of load tends to be most unstable. The case of ‘Sample History2’ which becomes a little slow at the variation of load tends to be most stable. 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 another case.

**Key words** : Fatigue loading variation(피로 하중 변화), Relative damage(상대적인 손상), Fatigue sensitivity(피로 민감도), Rainflow matrix (레인플로우 매트릭스)

### 1. 서론

자동차나 구조물에 있어서는 피로나 파괴를 규명하기 위해서 피로 균열, 압축 잔류응력, 또한 최적화 설계 등의 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1,4)</sup> 강도상에 있어서는 충분한 여유를 가지고 설계된 기계 내지 구조물이라고 해도 파손이 일어나는 경우가 많으며 의외로 항복응력보다 훨씬 낮은 저응력하에서도 파괴가 잘 일어난다. 따라서 이를 규명하기 위하여 여러 가지 연구가 광범위하게 이루어져 왔으며 이들에 대하여는 피로 파괴에 대한 연구가 주류를 이루고 있다.<sup>1)</sup> 그 중에서 대부분의 피로 파괴는 불규칙적으로 일어나고 있어 이론 해석에 의하지 않고

서는 그 예측이 불가능한 실정이다. 본 연구에서는 피로수명, 파손 및 그 내구성의 해석 결과들에 대한 수렴성이 좋고 효율적인 해석 결과를 얻어 낼 수 있는 피로 설계 전용 Ansys workbench 프로그램을 사용하였다.<sup>5,6)</sup>

본 논문에서는 동력행정시에 발생하는 가스의 폭발 압력을 받아, 이를 크랭크 축에 전달하여 크랭크 축이 회전 운동을 할 수 있도록 하는 커넥팅로드를 대상으로 연구하였다. 또한 커넥팅 로드 는 운전 중 압축력, 인장력, 휨 등의 피로 하중을 반복하여 받기 때문에 이것을 충분히 견딜 수 있는 강도와 강성이 필요하다. 따라서 자동차 주행시에서의 규칙 및 불규칙 피로하중을 받는 자동차 엔진의 커넥팅 로드를 시뮬레이션을 하였고 그 진동의 안전성과 내구성 및 수명 관계를 해석하였다. 또한 기초적으로 해

\*To whom correspondence should be addressed.  
jucho@kongju.ac.kr

석의 간편화를 위하여 불규칙적인 피로하중이 작용되는 간편한 모델을 사용하였다. 그 연구 내용으로는 피로를 받는 커넥팅 로드의 모든 부분에 대하여 그 수명과 손상들을 예측할 수 있었고 파손 및 사용 가능한 수명들을 모든 하중의 변화들로서 비교할 수 있었다. 그리고 시간에 대한 하중 변화 곡선들을 피로에 있어서는 설정된 내역 데이터로부터 하중의 형태를 정함으로서 불규칙 진폭 하중을 지정할 수 있어 다양한 하중형식들을 택하여 보았다. 또한 어떠한 작은 응력의 피로 사이클들일지라도 Rainflow와 Damage 매트릭스들에 의하여 재료에 대한 영향을 알아 낼 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

### 2.1 유한요소모델

본 연구에서의 해석모델로서 커넥팅 로드와 유한요소분할 모양과 치수(단위:mm)는 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다. 절점들과 요소들의 개수는 각각 11137 및 6125이다. 이 모델에 대한 해석값의 수렴오차는 3.5% 이내가 되어 해석 결과의 상호 비교에는 지장이 없다고 사료된다. 시험편의 재료로는 주조용 강으로서 그 특성은 Table 1에 나타나 있다. 그 구속 조건은 소단부의 아래쪽 부싱의 내면에 구속되어 있고 위쪽 대단부에 베어링 하중으로서 30000 N에 의해서 가해지고 있다. 본 논문의 해석에 있어서는 S-N 곡선으로서 피로에 대한 재료 특성들을 정확하

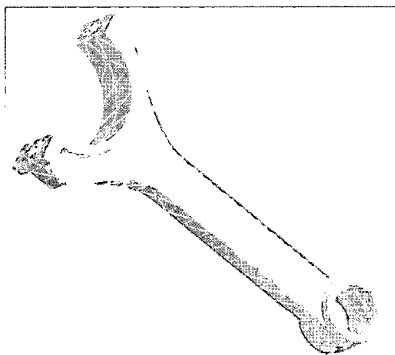


Fig. 1 The mesh of specimen

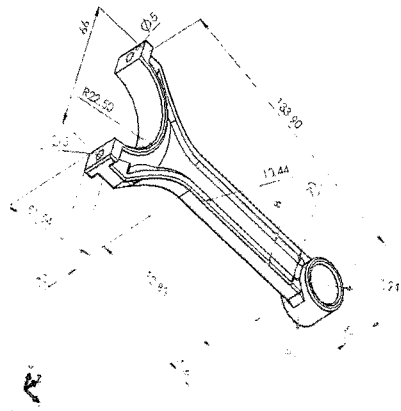


Fig. 2 The dimensions of specimen (unit : mm)

게 입력할 수 있다. 더 많은 정확한 분석<sup>7-9)</sup>에 대하여는 고유한 재료 특성으로서 각 진폭 응력에 대한 수명들을 입력할 수 있도록 되어 있으나 본 재료에는 피로 곡선에 대한 실험 데이터로서 주조용 강의 자료를 사용하였다.

### 2.2 해석모델의 하중조건

Fig. 3은 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.

피로 Tool로서는 시간에 따라 임의의 한 부분에 대하여 하중을 변화시킬 수 있는데, 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 규칙 및 불규칙 진폭하중의 방법을 채택하고 기본 하중에 대하여는 배율을 적용할 수 있다.

Table 1 Material properties

Structural properties	
Young's modulus	$1.1 \times 10^5$ MPa
Poisson's ratio	0.28
Mass density	$7.2 \times 10^{-6}$ kg/mm <sup>3</sup>
Stress limits	
Tensile ultimate	240 MPa
Compressive ultimate	820 MPa

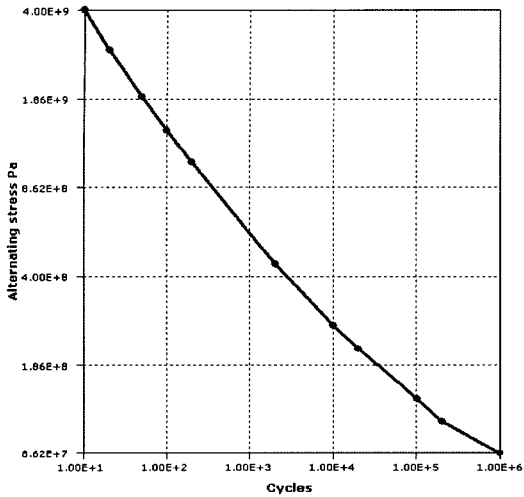
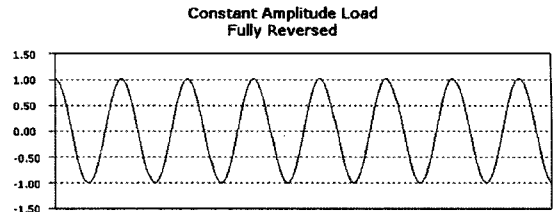


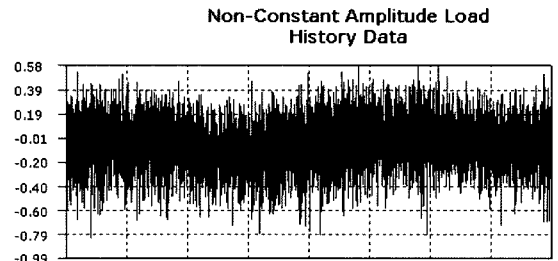
Fig. 3 S-N curves in fatigue

규칙 진폭 하중에 대하여는 그 배율이 1이고 불규칙 진폭 하중에 대하여는 0.003이다. 진폭 응력과 평균 응력을 계산하기 위해서는 하나의 하중 배율을 사용하는 것뿐만 아니라 하중 배율이 시간에 따라 변하게 한다. 따라서 이렇게 설정된 내역 데이터로부터 하중의 형태를 정함으로서 규칙 또는 불규칙 진폭 하중을 지정할 수 있다. Fig. 4와 같이 주행하는 실제 차량이 받을 수 있는 규칙 진폭 하중인 ‘Sine’ 이나 불규칙 진폭 하중들인 ‘SAE Bracket History’, ‘SAE Transmission’, ‘Sample History2’와 같이 진폭하중에 대한 배율들의 목록을 나타내고 있다. 또한 본 연구에서는 피로 수명의 사이클 계산과 예측되는 파손의 가능성을 계산한다. 그리고 Rainflow 및 Damage 매트릭스 계산법이 사용되어 지는데, 진폭 응력과 평균 응력들은 그림의 결과들에 나타낼 빈도들 및 상대적 손상으로 나타낼 수 있다.

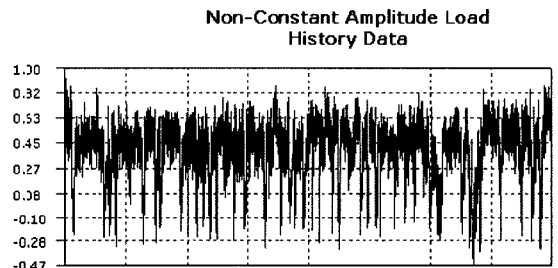
진폭 응력이 S-N 곡선의 범위를 벗어난다면 무한 수명 값이 사용되어 지는데, 본 연구에 있어서는 무한 수명으로서는  $10^9$  사이클로 정하고 있다. 그리고 피로에서 진폭 응력을 수정 계수로 나눈다는 것은 피로 강도를 피로강도계수(K)로 곱하는 것과 같다. 또한 이 계수는 진폭 응력에만 적용되고 평균 응력에는 영향을 끼치지 않으며 0.8로 정한다.



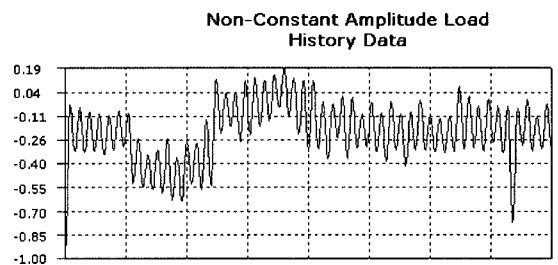
(a) Sine



(b) SAE bracket history



(c) SAE transmission



(d) Sample history 2

Fig. 4 Loading history

### 3. 해석 결과

피로에 대한 해석 결과의 출력들은 피로 수명, 파손, 피로 수명의 민감성, Rainflow 매트릭스 및 Damage 매트릭스들을 포함하고 있다. 각각의 출력들은 규칙 진폭 하중인 ‘Sine’ 이나 불규칙 진폭 하중들인 ‘SAE Bracket History’, ‘SAE Transmission’,

‘Sample History2’들의 하중들로서 서로 비교 될 수 있다. 또한 불규칙 진폭 하중으로 본 모델에 작용됨으로써 어떤 한 부분이 파괴될 때까지의 하중의 기간에 대한서의 블록 수들로 나타내 준다. 따라서 주어진 하중의 내역이 한 달 간의 하중을 표현하고 그 수명이 120으로 된다면, 예측되는 모델의 수명은 120개월이 된다. 본 연구의 모델에 대하여 사용 가능 수명에 대한 등고선 그림들이 Fig. 5에 나타나 있다. 이 결과는 모델 전체에 걸쳐서 계산 될 수 있는데 규칙 및 불규칙 진폭 하중으로 본 모델에 작용됨으로써 이 결과의 등고선 그림들은 주어진 피로 분석에 대하여 사용 가능한 수명을 보여 주고 있다.

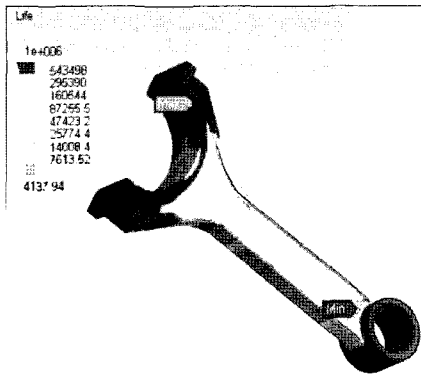
또한 Table 2에서는 각각 4가지 하중들에 대한 최대가 되는 위쪽 대단부, 아래쪽 소단부 부상 및 최소가 되는 아래쪽 소단부 부상 바로 위 생크부분부위에서의 사용 가능한 수명들을 보여 주고 있다. 따라

Table 2 Maximum and minimum available lives for 4 loading types

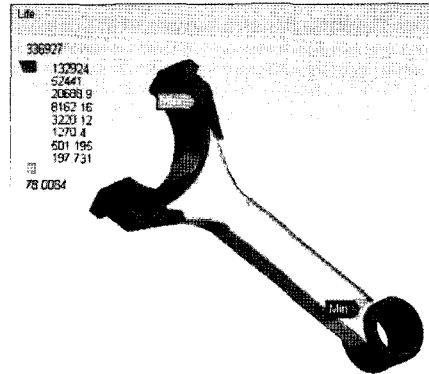
Part Loading type	Upper large part, Lower small part bushing	Shank just above lower small part bushing
(a) Constant amplitude load	$1 \times 10^6$	4138
(b) SAE bracket history	336927	78
(c) Transmission	$1.17 \times 10^6$	635
(d) Sample history 2	$2 \times 10^7$	18091

서 (d)의 경우가 가장 안정된 경향을 보이고 있고, 그 다음으로 (a)의 경우가 안정되어 있으나 (b)의 경우는 극히 불안정되어 있다.

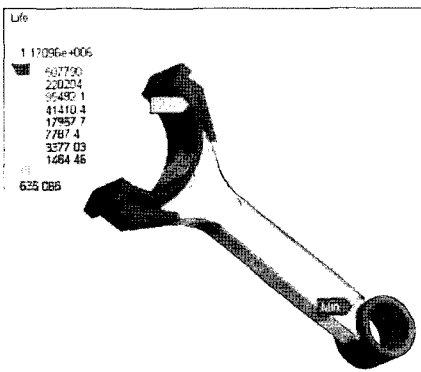
Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 등고선으로 된 피



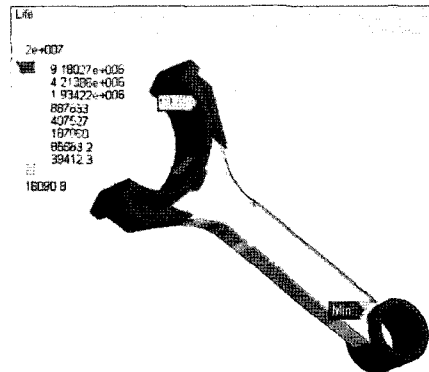
(a) Sine



(b) SAE bracket history



(c) SAE transmission



(d) Sample history 2

Fig. 5 Contour plots of available lives

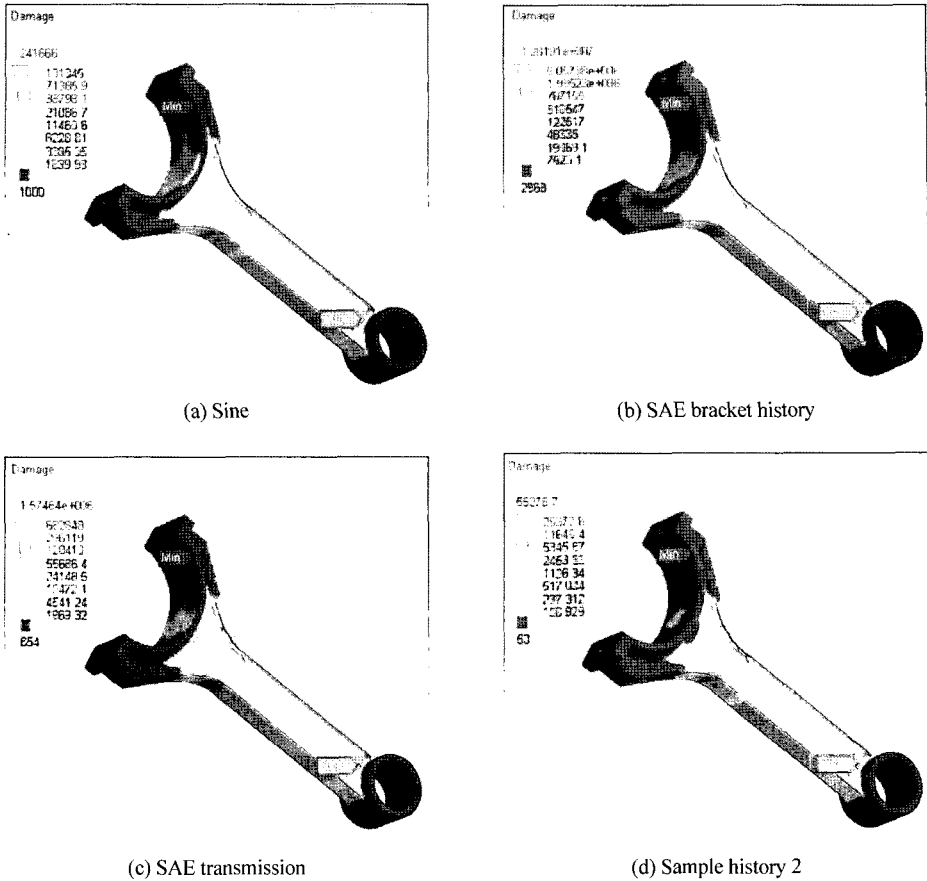


Fig. 6 Contour plots of the fatigue damages

로 손상은 사용 가능 수명으로 나누어진 설계 수명으로 정의되어지고 그 설계 수명은 본 해석 프로그램의 제어판에서 정할 수 있다. 4가지 경우들을 비교할 수 있는데 Table 3에서는 각각 4가지 하중들에 대한 최대가 되는 위쪽 대단부, 아래쪽 소단부 부싱 및 최소가 되는 아래쪽 소단부 부싱 바로 위 생크 부위에서의 피로 손상들을 보여 주고 있다. 역시 (d)의 경우가 가장 안정된 경향을 보이고 있고, 그 다음으로 (a)의 경우가 안정되어서 있으나 (b)의 경우는 극히 불안정되어 있다.

Fig. 7은 피로 수명의 민감도의 그림들을 나타내고 있다. 역시 4가지 경우들에 대한 하중 변화들에 따라서 사용 가능한 수명들을 비교할 수 있는데, (a), (b), (c), (d)의 각 이론에 대한 하중의 변화에 대하여 유용 가능한 수명을 나타낸 것이다. 하중의 변화는 하중의 진폭을 평균 하중으로 나눈 값이다. 피로 민

Table 3 Maximum and minimum fatigue damages for 4 loading types

Loading type \ Part	Upper large part, Lower small part bushing	Shank just above lower small part bushing
(a) Constant amplitude load	1000	241666
(b) SAE bracket history	2968	$1.28 \times 10^7$
(c) Transmission	854	$1.57 \times 10^6$
(d) Sample history 2	50	55277

감도는 손상에 대한 사용 가능한 수명에 대하여 보여 준다. 예를 들면, 현재 하중의 200%를 부과했다면 현재 하중의 50%를 초과한다는 것을 모델의 수명 민감도로서 볼 수 있다. 이 그림상에서 1의 x 축

다양한 하중을 받는 커넥팅 로드들의 피로 파손 해석

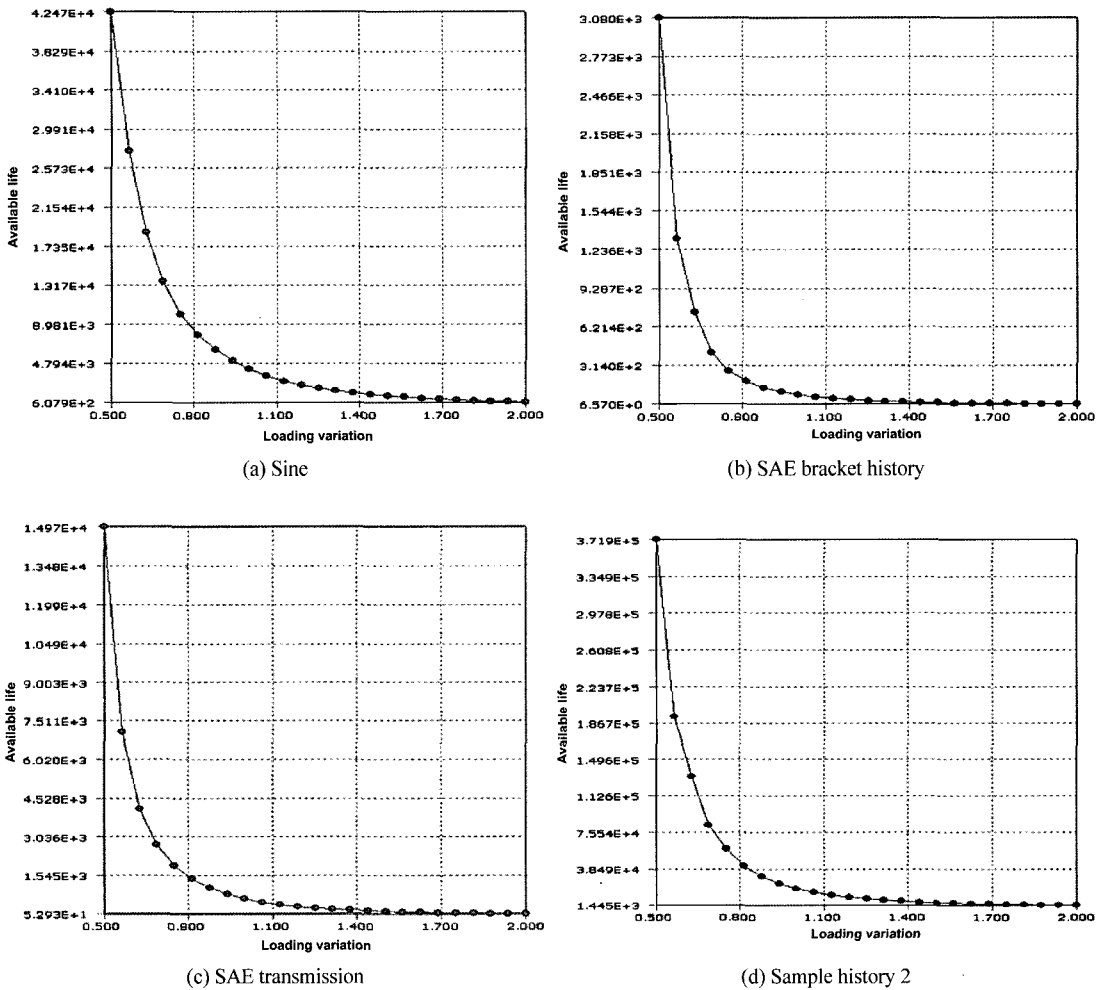


Fig. 7 Fatigue sensitivity plots

값은 모델의 현재 하중에서의 수명에 해당한다. 만약 해석상의 하중들이 현재 하중들보다 50% 보다 크다면 1.5의 x 축값은 임계 피로 수명에 해당되는데 선형 -X, Log-Y 스케일을 택하였다. Table 4에서는 각각 4가지 하중들에 대하여 하중의 변화가 0.5와 2.0일 때의 피로 민감도들에 대하여 값으로 나타내고 있다. 따라서 하중의 변화에 대해서는 (d)의 경우가 그 수명이 가장 안정스럽게 변화되고 있다. 그 다음으로 (a)이나 (d)의 경우가 대체로 안정을 보이고 있다. (b)의 경우는 극히 불안정이 되고, (c)의 경우는 다소 안정이 되어 있음을 알 수 있다. 따라서 (b)의 경우가 하중의 변화에 대하여 파단의 위험이 가장 높음을 보이고 있다.

Table 4 Fatigue sensitivities according to loading variations for 4 loading types

Loading type \ Loading variation	Loading variation	
	0.5	2.0
(a) Constant amplitude load	$4.247 \cdot 10^4$	$6.079 \cdot 10^2$
(b) SAE bracket history	$3.080 \cdot 10^3$	6.57
(c) Transmission	$1.497 \cdot 10^4$	52.93
(d) Sample history 2	$3.719 \cdot 10^5$	$1.445 \cdot 10^3$

Fig. 5부터 Fig. 7까지의 경우를 보면 규칙적인 하중인 Sine형태의 (a) 경우가 그 하중의 배율이 1 이어

서 불규칙적인 하중의 경우인 (b),(c),(d) (하중의 비율:0.003)의 경우 보다 그 크기가 상당히 크다. 그러나 불규칙적인 하중의 경우인 (b),(c),(d)보다 그 하중이 클지라도 더 안정된 경향을 보이고 있다.

Fig. 8은 임계 위치에 대한 Rainflow 매트릭스들에 대한 그림들로서 ‘SAE Bracket History’, ‘SAE Transmission’, ‘Sample History2’들의 3가지 불규칙 진폭하중에 대해서만 적용된다. 그리고 Fig. 8은 본 해석에 가해지는 하중 내역의 구성으로서 진폭 응력과 평균 응력에 대한 그 빈도수들로서 그려지는데, z 축은 주어진 진폭 응력과 평균 응력에 대한 빈도수에 해당된다. (a), (b) 및 (c)의 불규칙 진폭하중의 경우를 비교하였는데, (a)의 경우는 진폭 응력의 범위는 0부터  $2.41 \times 10^8$  Pa이고 평균응력의 범위는  $-2.762 \times 10^8$  Pa부터  $2.058 \times 10^8$  Pa로서 평균 응력이 0 부근이며 진폭응력이  $0.5 \times 10^8$  Pa 부근에서 그 빈도수가 87로 가장 많이 나타나고 있다. 또한 (b)의 진폭 응력의 범위는 0 부터  $2.083 \times 10^8$  Pa이고 평균응력의 범위는  $-1.38 \times 10^8$  Pa부터  $2.786 \times 10^8$  Pa로서 평균 응력이  $1.5 \times 10^8$  Pa 부근이며 진폭응력이  $0.4 \times 10^8$  Pa 부근에서 그 빈도수가 46으로 많이 나타나고 있다. (c)의 진폭 응력의 범위는 0부터  $1.658 \times 10^8$  Pa 이고 평균응력의 범위는  $-2.786 \times 10^8$  Pa부터  $5.31 \times 10^7$  Pa로서 평균 응력이  $-5 \times 10^7$  Pa 부근이며 진폭응력이  $0.3 \times 10^8$  Pa 부근에서 그 빈도수가 6으로 나타나고 있다. 그리고 대부분의 작은 진폭 응력들은 더 큰 진폭 응력들보다 높은 평균응력들을 가지고 있다

는 것을 알 수 있다. (a), (b), (c) 3가지의 경우가 거의 같은 경향을 보이고 있으며 대체적으로 낮은 진폭 응력에서 그 빈도수가 많이 일어남을 알 수 있다. 또한 (a)의 경우가 평균응력이 가장 낮은 범위에서 그 응력의 빈도수가 제일 많이 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 9는 본 연구 모델에서 파손에 대한 임계 위치에서의 Damage 매트릭스들에 대한 그림들로서 불규칙 진폭하중에 대해서만 적용되는데 109사이클의 무한 수명에 대한 상대적 손상 가능성을 나타내고 있다. 이 결과의 원인이 되는 각각의 빈도수는 z 축상에서 나타내는 상대적인 손상의 빈도수를 제외하고는 Fig. 8의 Rainflow 매트릭스들에 대한 그림들과 유사하다. Fig. 9 (a), (b), (c)의 경우, 공히 손상의 가능 범위로서의 진폭응력은 Fig. 8 (a), (b), (c)의 경우와 같다. (a)의 경우의 상대적인 손상은 평균응력이 0 이고 진폭응력이  $1.2 \times 10^8$  Pa의 경우로서 최대의 상대적인 손상의 범위가 약 3.58%를 보이고 있다. (b)의 경우는 평균응력이  $0.5 \times 10^8$  Pa 이고 진폭응력은  $1.2 \times 10^8$  Pa로서 최대 7.58%의 손상 가능성을 보이고, 진폭응력이 0부터  $1 \times 10^8$  Pa의 범위에서는 거의 0%의 손상 가능성을 보이고 있다. (c)의 경우는 평균응력이  $-1 \times 10^8$  Pa 이고 진폭응력이  $1.6 \times 10^8$  Pa에 있어서 최대 76%의 손상 가능성을 보이고 있어 이러한 응력 상태에서 손상 가능성이 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한 평균응력이  $-1 \times 10^8$  Pa 부근을 제외하고는 거의 0%의 손상 가능성을 보이고 있다. 따라서 (a)의 경우에서의 상대적인 손상은 평균

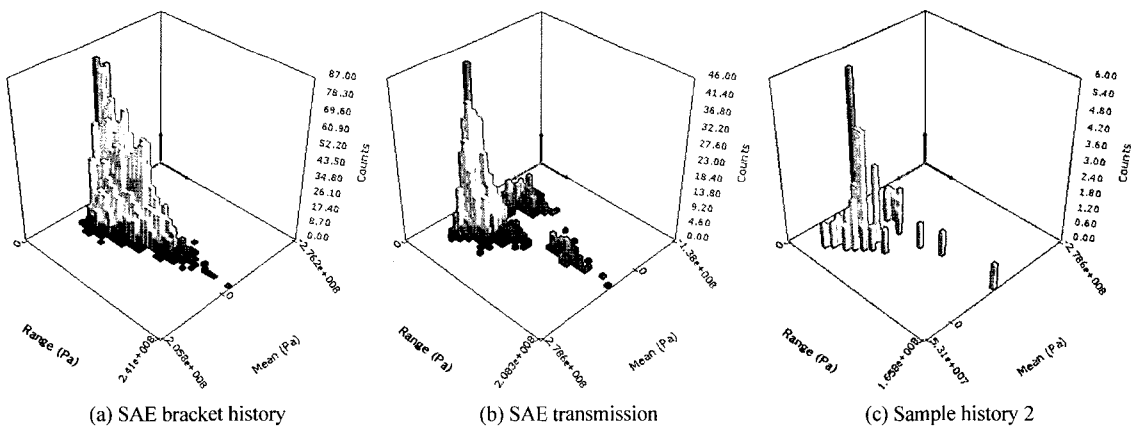


Fig. 8 The plots of rainflow matrices

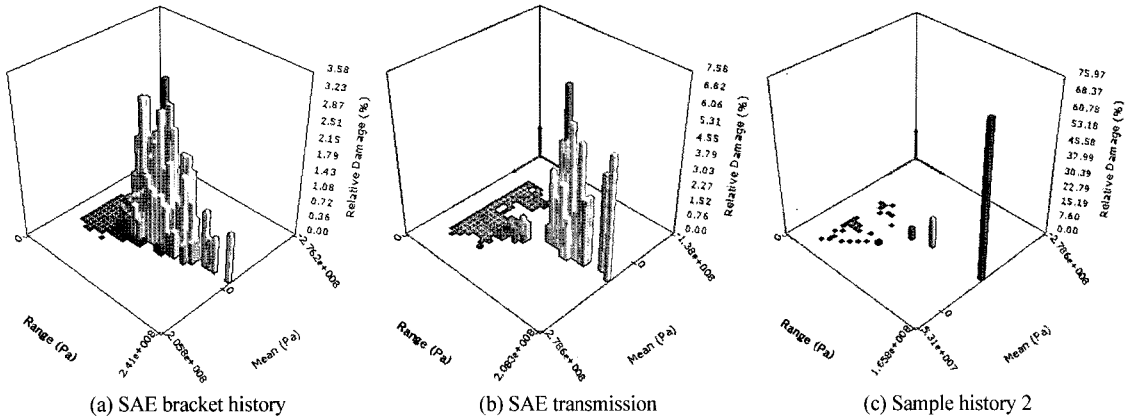


Fig. 9 The plots of damage matrix

응력이 0 부근의 상태에서 최대의 상대적인 손상을 일으켜 어떤 다른 경우들보다는 더 파손의 가능성이 더 일어남을 알 수 있었다. 그러나 (a)의 경우 보다 좀 더 높은 평균응력에서 (b)와 (c)의 경우가 더 파손의 가능성이 있었고, 낮은 평균 응력 상태에 있을지라도, 손상은 더 낮은 응력 진폭들에서도 일어남을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

Ansys workbench의 피로 Tool들에 의하여 커넥팅로드의 피로 수명과 그 손상의 가능성을 예측할 수 있었는데, 본 연구를 통하여 얻은 주요한 결론은 다음과 같다.

- 1) 하중의 변화가 규칙적인 피로 하중 형식인 'Sine' 파형의 경우가 불규칙적인 하중의 변화보다 그 하중이 클지라도 더 안정된 경향을 보이고 있다.
- 2) 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 'SAE Bracket History'의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 완만한 'Sample History2'의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다.
- 3) 'SAE Bracket History'의 경우가 상대적 손상은 평균응력이 0 부근의 상태에서 최대의 상대적 손상을 일으켜 어떤 다른 경우들보다는 더 파손의 가능성이 더 일어남을 알 수 있었다.
- 4) 'Sample History2'의 경우가 안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이  $-1 \times 10^8$  Pa이고 응력 진폭

$1.6 \times 10^8$  Pa에 있어서 최대 76%의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 파손의 가능성이 많다고 예측 할 수 있었다.

#### References

- 1) S. Tanaka, M. Ichikawa and S. Akita, "A Probabilistic Investigation of Fatigue Life and Cumulative Cycle Ratio," Eng. Frac. Mech., Vol.20, pp.501-513, 1984.
- 2) Y. C. Park and D. W. Lee, "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.
- 3) B. K. Han, S. S. Cho, H. Chang and B. K. Kim, "Fatigue Fracture of NBR-coated SUS301 Thin Plate for MLS Gasket," Transactions of KSAE, Vol.12, No.4, pp.207-212, 2004.
- 4) B. C. Goo and J. W. Seo, "Probabilistic Fatigue Life Evaluation of Rolling Stock Structures," Transactions of KSAE, Vol.11, No.5, pp.89-94, 2003.
- 5) John Swanson, Design Space, Ansys Workbench, Ansys. Inc., 2003.
- 6) D. A. Hancq, A. J. Walters and J. L. Beuth, "Development of an Object Oriented Fatigue Tool," Engineering with Computers, Vol.16, pp.131-144, 2000.
- 7) H. O. Fuchs and R. I. Stephens, Metal Fatigue



- in Engineering, A Wiley-Interscience Publication, 1980.
- 8) Lampman, S. R. Editor, "Fatigue and Fracture," ASM Handbook, ASM International, Vol.19, 1996.
- 9) U.S. Dept. of Defense, "Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures," MIL-HDBK-5H, 1988.