

## 피로 하중을 받는 열간 압연 연강판재의 기계적 성질과 모우드 변화에 관한 연구

김 학 윤 · 이 성 호\*

수원전문대학 열처리과

\*김천전문대학 건축설비과

A Study on the Variation of the Mechanical Properties and Mode of the  
Hot-Rolled Mild Steel Plate under Fatigue Loading

**Hak-Yoon Kim, Seong-Ho Lee\***

Dept. of Heat-treatment, Suwon College, Suwon 445-742

\*Dept. of Architectural Equipment, Kimchon College, Kimchon 740-200

### ABSTRACT

Using natural frequency measurement method, which is one of NDT method, natural frequency of the hot-rolled mild steel plate(specimen) under fatigue loading was measured. Between the degradation of the specimen under fatigue loading and the variation of the natural frequency of the specimen was investigated. As a result, the degradation of the specimen was described and monitored as variation of natural frequency of specimen. The natural frequency of specimen decreased gradually under fatigue loading. This means the variation of material properties of specimen. Especially, It means the variation of Young's modulus of specimen.

### 1. 서 론

공학에서 사용되는 재료의 기계적 성질은 재료의 시편에 하중을 가하여 이에 대한 재료의 거동을 분석하는 시험을 통하여 결정하는 경우가 많이 있다. 이러한 시험의 대표적인 방법으로는 재료에 정하중을

가하는 인장·압축 시험과 동하중을 가하는 피로 시험 등이 있다. 그러나 이러한 시험 방식들은 재료를 영구 변형시키거나 파괴시키기 때문에 작용 응력에 대한 재료의 연속적인 기계적 성질 변화를 측정하는 방법으로는 적합하지가 못하다. 즉, 재료의 경년변화나 열처리 전후의 기계적 성질을 알고자 하는 데는 한계

가 있게 된다. 따라서 재료에 영구 변형을 일으키지 않고 재료의 기계적 성질을 연속적으로 측정할 수 있는 방법이 필요하다. 이러한 방법으로 재료의 고유 진동수를 측정하는 방법이 있으며, 본 연구에서는 이를 이용하여 피로 하중을 받고 있는 열간압연 연강판재의 기계적 성질 변화를 알아보고자 한다.

## 2. Modal 해석 및 동특성 측정 방법

### 2.1 공진 시험법

결함이나 성분 조성의 변동이 있는 시편의 진동 특성은 정상적인 시편과 다르게 나타난다. 따라서 여러 가지의 손상과 재질 조성의 불균일은 비파괴적인 모우드 해석과 동특성 측정에 의하여 확인될 수 있다. 이러한 NDT(Nondestructive Testing)에는 공진과 감쇄기법이 있다<sup>1)</sup>. 진동 시험을 통한 동특성 방법은 크기에 있어서 미서적인 규열에서부터 거시적인 구멍과 같은 조건을 포함하여, 화학적 불순물, 빈 공간, 분리면, 그리고 이와 비슷한 기계적 결함이나 손상을 발견하는 데 사용될 수 있다. 경화, 노화, 화학적 구성, 그리고 응력 부식과 같은 물질의 조성과 특성의 변동 등을 이와 같은 방법을 이용하여 검출할 수 있다. 고유 진동수는 형상, 단면적, 길이 물질의 특성 그리고 그 외의 요인들과의 관계로 나타난다. 따라서 고유 진동수는 식 (1)과 같은 함수로 표현할 수 있다.

$$\text{고유 진동수(Hz)} = f(\text{모양, 물리적 상수, 구속 조건}) \quad (1)$$

이 식에서 고려되는 모양은 물체의 기하학적 형상을 나타내며, 시편의 경우는 길이, 폭, 두께 등을 의미한다. 물리적 상수는 시험 금속의 탄성계수, 밀도, 그리고 포아송비 등을 포함한다. 또한 구속 조건은 용접, 힌지, 또는 자유단과 같은 결합 방식에 대한 것이다. 구속 조건은 진동 주파수에 큰 영향을 미치나 기하학적 형상과 구속 조건이 동일하다면 고유 진동수는 물리 상수에 의해 결정된다. 일반적인 고유 진동수의 측정 방법으로는 실험적인 방법과 수치 해석적인 방법이 있다. 이 두 방법은 서로 상호 보완적

로 사용되고 있다. 수치 해석적인 방법을 이용하면 실험적인 방법으로 고유 진동수를 측정하기 어려운 작은 물체나 특수조건에서의 고유 진동수를 구할 수 있고, 진동형이나 각 부분의 상대적 변위를 쉽게 알 수 있다. 반면에 물체의 형상을 단순화시키는 과정을 거치므로 입력 변수의 값이 정확하지 않거나 구속 조건이 불분명한 경우 실제 측정치와 전혀 다른 값을 얻을 수도 있다. 반면에 실험적인 방법에서는 실제의 물체에 가속도계를 부착하여 직접 측정을 하므로 보다 실질적인 고유 진동수를 얻어낼 수 있다.

### 2.2 횡 진동 모우드

물체의 진동 방식은 진동 모우드로 알려져 있다. 전형적인 진동 모우드의 형태는 횡, 길이, 회전, 직경, 반경, 둘레 방향으로 표현된다. 모우드의 형태는 기본 모우드와 고차 모우드가 존재한다. 횡 모우드의 예로서, 지지되지 않은 사각보의 진동을 보면, 이 모우드의 특성으로서 사각보가 상하방향의 일정한 거리를 움직이는 것을 알 수 있다(Fig. 1). 그 결과는 한 쪽 면에 휨 형상이 나타나며 번갈아 인장과 압축이 일어나고, 반대편 면에서는 반대 위상의 작용이 일어난다. 이러한 모우드에서 위치 변화가 전혀 없는 점이, 이 경우의 진동 노드 또는 진동 면이 된다. 길이  $l$  인 보에서 기본적인 횡 모우드에서의 노드는 양끝으로부터 대략적으로 0.22 $l$  되는 지점에 위치한다. 최대 변위 부분은 중앙과 보의 양끝이 된다. 단일보는 휨 또는 다른 모우드에서 하나 이상의 고차의 모드에 대한 여러 개의 고유 진동수를 가지고 있다. 하

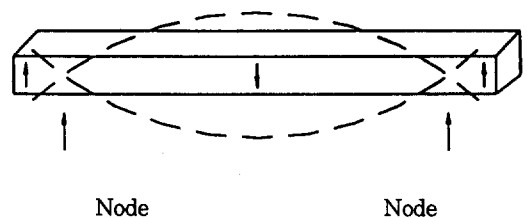


Fig. 1 Basic Vibration Mode of the Unsupported Rectangular Beam

지만 기본 모우드는 보가 가지고 있는 무한개의 고차 진동수 중 가장 낮은 진동수이다. 이러한 고차 진동수는 higher harmonic 또는 overtones라고 부르며, 주파수 척도에서 규칙적인 간격을 두고 발생한다. 전형적인 harmonic을 생성시키거나 유지시키기는 어렵다. 그럼에도 불구하고 구조물의 진동을 일으키는 주요 원인으로, 진동 원인에 대한 조사에 있어서 중요하게 취급되고 있다. 고차 모우드의 예로서, 지지되지 않은 사각보의 횡진동 모우드의 첫번째 overtone을 Fig. 2에 나타냈다. 이 three-nodal 횡 모우드의 진동수는 Fig. 1의 two-nodal 횡 모우드의 대략 2.7배에 있다. 모든 기본 모우드는 연속적으로 고차 overtone을 가지면서 상대적으로 노드와 반노드(antinode)의 수가 증가한다. 노드에서는 미소의 진동도 없기 때문에 자체의 고유 진동수나 감쇄 특성의 영향을 받지 않으므로 몸체의 지지점이나 고정점이 될 수 있다. 그러나 고유 진동수의 측정 위치를 결정하는 데 있어서는 노드가 되는 위치를 피해야 하며, 특정 모우드의 노드가 되는 위치에 가속도계를 부착하게 되면 특정 고유 진동수를 측정할 수 없게 된다. 따라서 실험을 위한 지지점과 측정점의 위치 선정에 신중한 고려가 필요하다.

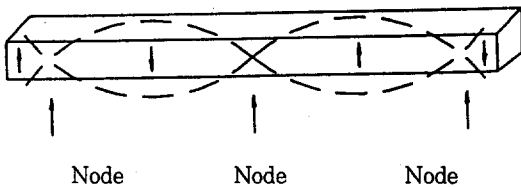


Fig. 2 3 Node Vibration of the Unsupported Rectangular Beam

2.3 횡 모우드의 진동수 식

균일한 보의 횡진동은 비행기의 기체, 공간 구조물, 빌딩 또는 돌출단 같은 구조물에서 발생하는 일반적인 진동 모우드 중의 하나이다. 실험에 앞서 단순 균

일보에 대하여 알아보았다. 명료하게 하기 위하여, 비구속 또는 자유단임을 가정한다.

$$f = \frac{K^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E I g}{A \rho}} \tag{2}$$

여기서,  $f$ : 진동수

$K$ : 횡 진동 모우드의  $kl$  상수

$l$ : 길이

$E$ : 탄성 계수

$I$ : 관성 모멘트 ( $bh^3/12$ )

$b$ : 폭

$h$ : 높이

$g$ : 중력 가속도

$\rho$ : 밀도

$A$ : 단면적

이다.

사각보 진동의 기본 모우드에서  $b=h$ ,  $K=4.73(=(2n-1)\pi/2, n=2)$ 로 선택하고, 상수항을 입력하면 식 (3)의 자유단 진동 주파수 식은 다음과 같이 주어진다<sup>2)</sup>.

$$f = \frac{20h}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{3}$$

사각보의 탄성계수를 계산하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$E = \frac{0.00245f^2 l^4 \rho}{h^2} \tag{4}$$

위의 식에서 알 수 있듯이 탄성계수는 고유 진동수의 자승에 비례한다. 이는, 고유 진동수의 변화가 곧 탄성계수의 변화를 의미하는 것이 된다.

3. 실험 방법

3.1 측정물의 지지

재료 시험을 위한 지지 방식은 매우 중요하게 고려되어야 한다. 시험할 시편은 진동 모우드를 좀더 좋게 하기 위하여 모우드와 overtone에 따라 발생하는 진동 노드에 지지점이 위치되어야 한다.

그 예로, 길이가  $l$ 인 보의 기본 횡진동 모우드를 측정하기 위해서는 보의 양끝으로부터  $0.22l$  되는 지점에 지지점이 있어야 한다. 최적의 지지는 고정하는 것보다 실로 매다는 것이다. 고정 부위가 크게 되면 노드점(nodal point)에 강성을 추가시켜서 진동 특성에 영향을 주게 된다. 따라서 한 물체의 진동 특성을 정확하게 구할 수 있는 방법은 자유진동의 조건이 된다. 그러나 현실적으로 이러한 형태로 지지되는 경우는 불가능하다. 대부분의 경우는 일정한 지지상태에서 고유 진동을 측정하는 것이 대부분이다. 본 실험에서는 지지 조건이 일정한 경우, 고유 진동수 변화의 측정을 목적으로 하기 때문에 실에 의한 지지를 택하였으며, 지지점을 선택하기 위하여 I-DEAS를 이용하여 시편에 대한 모우드 해석을 하였다<sup>3)</sup>. 그 결과 다음의 4가지 모우드의 노드가 시편의 목 부분에서 노드를 가지는 것으로 해석되었다. 따라서 고정점을 목 부분으로 정하고 전체 진동 모우드에 대한 가속도계의 영향을 줄이기 위하여 고정점에서 약간 벗어난 부분에 가속도계를 설치하였다. 이 해석에 의한 첫번째 모우드의 고유 진동 주파수는 540Hz이고 두번째 모우드는 1569Hz, 세번째 모우드는 3152Hz, 네번째 모우드는 5285Hz에서 나타났다.(Fig. 3)

### 3.2 열간 압연 강판재

실험에 사용되는 SHPI은 KS D 3501의 일반용 및 드로잉용의 열간 압연 연강판에 대하여 규정되어 있으며, 이 재료는 자동차용 차체에 주로 사용되며, 내피로성, 용접성이 좋다.

Table 1~3은 SHPI의 화학성분, 기계적 성질 및 물성치를 보여 주고 있다.

**Table 1.** Chemical component of the SHPI

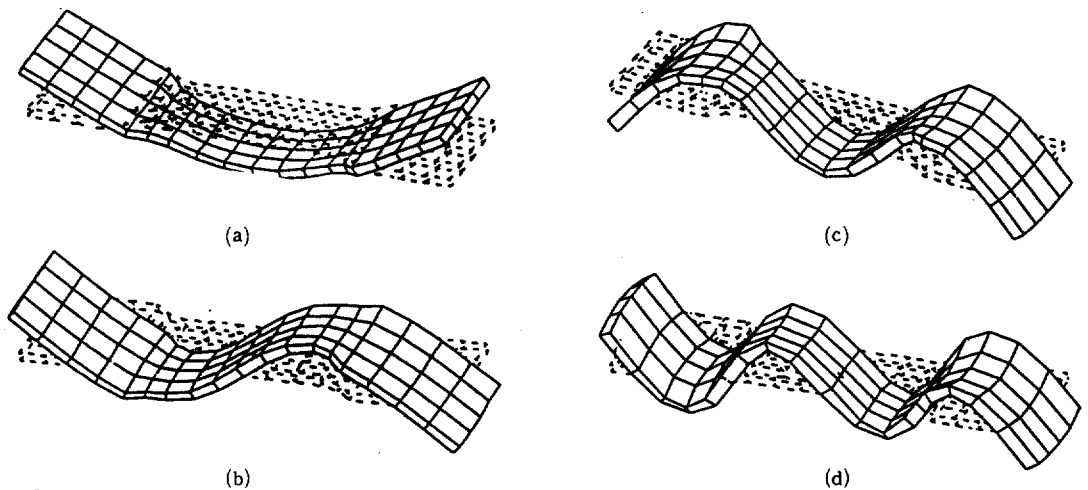
종류	P	S	C
SPHC	0.050% 이하	0.050% 이하	0.15% 이하

**Table 2.** Mechanical Properties of the SHPI

종류	인장강도(N)	연신율 (%)		인장시험편
		두께 2.5~3.0mm	두께 3.2~4.0mm	
SPHC	270 이상	29 이상	31 이상	KS B 0801 5호

**Table 3.** Physical Properties of the SHPI

밀도( $kg/m^3$ )	탄성계수(GPa)
7661.5	169



**Fig. 3**

- (a) 1st Mode of the Specimen using I-DEAS (540Hz)
- (b) 2nd Mode of the Specimen using I-DEAS (1569Hz)

- (c) 3rd Mode of the Specimen using I-DEAS (3152Hz)
- (d) 4th Mode of the Specimen using I-DEAS (5285Hz)

3.3 시험편 준비

시험편은 자동차용 차체로 가공된 판재의 세 부분에서 65° 방향으로 시험편을 절단하였다. 절단 방법으로 레이저 절단기를 사용하였고, 가공면은 그라인더 가공을 하여 매끄럽게 하였다.(Fig. 4)

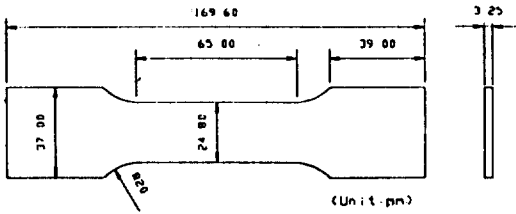


Fig. 4 Specimen of the SHP1

3.4 피로 시험

피로 시험은 주파수 20Hz, 정현파, 용력이 0.1로 4가지의 하중 조건하에서 시험을 하였다. (Table 4, Fig. 5)

3.5 진동시험

고유 진동의 변화를 측정하기 위하여 Fig. 6과 같이 실험장치를 구성하였다<sup>4),5)</sup>. 자유 진동을 측정하기 위하여 실을 이용하여 시험편을 고정하였으며, 가속도

Table 4. Fatigue Loading condition of the SHP1 (100%=5000kgf)

Type	Max.	Min	Mean
A	20	2	11
B	30	3	16.5
C	40	4	22
D	50	5	27.5

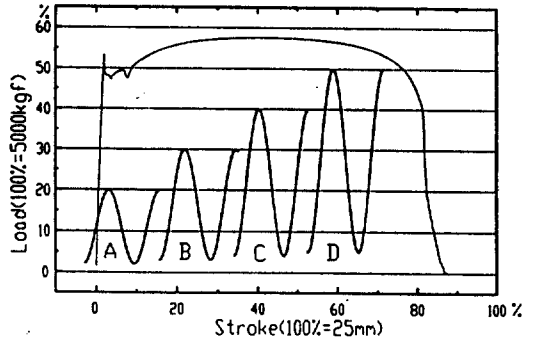


Fig. 5 Loading Condition and Load-Stroke Curve of the SHP1

계의 부착방법으로는 양면 접착테이프를 사용하였다. 양면 접착 테이프에 의한 가속도계의 부착 방법은 보편화되지 않은 방법이나 예비 실험결과 반복 측정에서 재연성이 좋은 특성을 보이고 있어서 이 방법을 사용하였다.

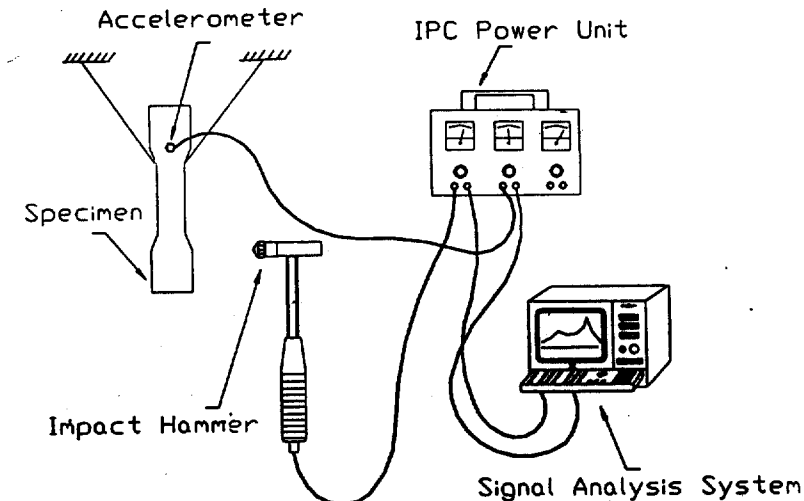


Fig. 6 Vibration Measurement System

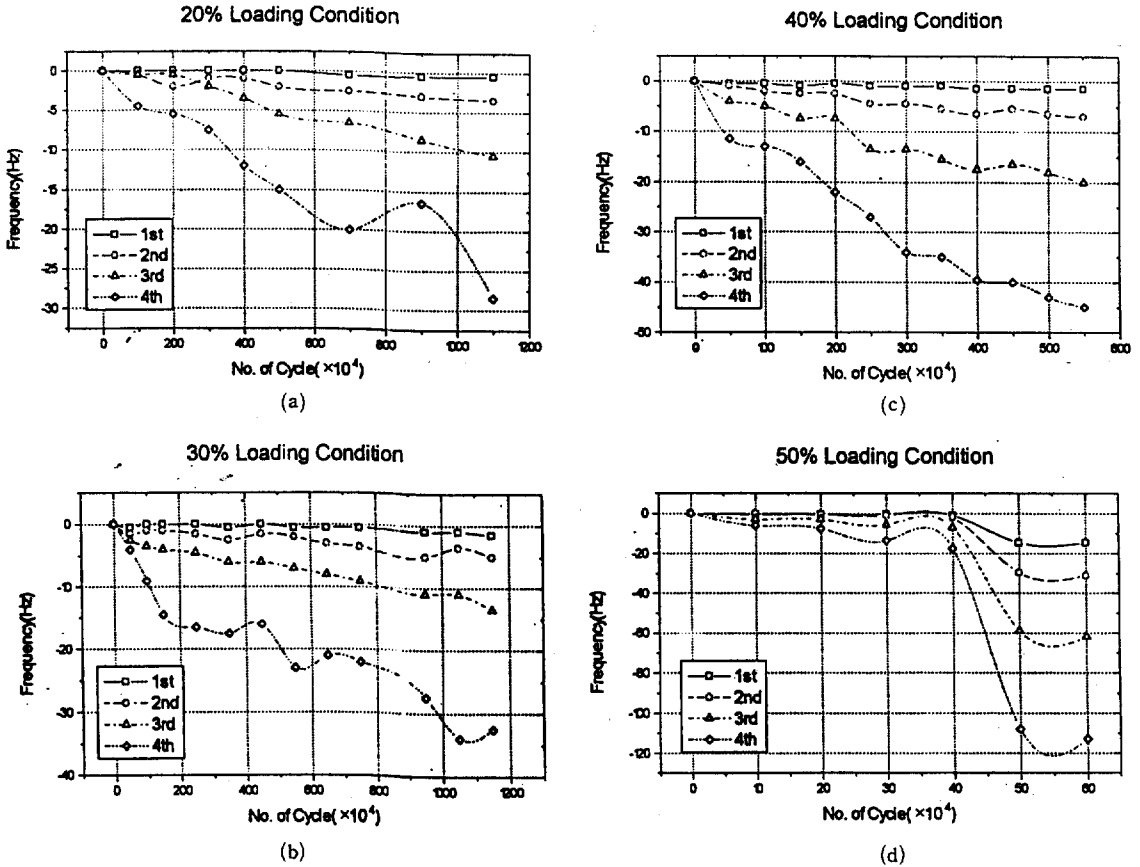


Fig. 7 Variation of the Natural Frequency in the each Mode

(a) Max. 20% Loading Condition  
 (b) Max. 30% Loading Condition

(c) Max. 40% Loading Condition  
 (d) Max. 50% Loading Condition

#### 4. 실험결과 및 고찰

먼저 Table 1은 SHP1 시편의 화학성분과 조성을 나타내며, Table 2와 Table 3은 SHP1 시편의 기계적 성질을 나타낸다. Table 4의 A, B, C 및 D의 피로하중 조건으로 Load Control하여 피로시험을 행하였으며, 이 때 사용한 4가지의 응력사이클은 Fig. 5에서 주어진 것으로 시험을 행하였다. 이 중에서 Fig. 5의 (D)번에 해당하는 하중으로 항복강도보다 다소 높은 상태에서 피로시험을 한 것을 나타내며, 즉 초기에 소성변화를 주었다. Fig. 5의 A, B, C 및 D에

서 보는 바와 같이 각각의 하중 조건에 대한 고유 진동수의 변화량을 그래프로 나타내면 Fig. 7(a)~(d)와 같이 나타나게 된다. Fig. 7의 (a), (b), (c) 및 (d)의 경우 모두 피로가 진행됨에 따라 지속적인 고유 진동수의 감소하고 있음을 보여 주고 있으며, 이러한 감소의 경향은 부과되는 하중 조건이 커짐에 따라 급격히 변화하고 있음을 나타낸다. 또 피로 사이클이 진행함에 따라 불규칙적이지만 점진적인 고유 진동수의 감소를 볼 수 있었으며, 특히 Fig. 7의 4번째 모드에 대한 고유 진동수는 1번째, 2번째 및 3번째의 모드에 비하여 그 변화가 뚜렷하다는 것을 알 수 있다.

하중조건(100%=5000kgf)이 20%, 30% 및 40%일 경우의 피로수명대 고유 진동수 변화의 그래프 Fig. 7((a)~(c)는 각 모드 별로 유사한 모양을 나타내고 있지만, 50%인 경우, 즉 하중 조건이 시편의 항복강도보다 큰 경우는 고유진동수의 변화가  $40 \times 10^4$  사이클까지는 각 모드 별로 두드러짐이 없다가 그 후로 급격히 변화하는 것이 관찰되었다.

Fig. 7(d)의 경우 주어진 하중 조건이 하항복점을 약간 넘긴 것으로 다른 하중 조건에서의 고유진동수 변화와 구별되는 경향을 보여 주고 있다. 이에 대한 이유로 초기의 탄성역을 넘은 하중에서 시편의 길이 방향으로의 신장 변화를 초래하므로 고유진동수 변화에 큰 영향을 미쳤기 때문으로 사료된다.

## 5. 결론

피로하중을 받는 시편의 고유 진동수 변화를 측정하는 방법으로, 그 재료의 피로에 의한 열화과정을 가시화할 수 있었으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 피로가 진행함에 따라 재료의 고유 진동수는 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 재료의 기계적 변화를 의미하며, 구체적으로 탄성계수의 변화라고 할 수 있다.

- 2) 모우드의 변화는 약간의 기록을 보였으며, 4번째 모우드 변화의 기울기가 상대적으로 급하게 진행되었다. 이는 재료가 피로하중을 받으며 열화되어 가는 과정이 불규칙하다는 증거이다.
- 3) 50%의 하중조건에서는  $40 \times 10^4$  사이클까지는 각 모드별 변화가 둔하였고, 그 이후로 각 모드별 변화는 매우 급한 기울기를 보였다.

## 참고문헌

- 1) Tracy R. Robinson : Nondestructive Testing Techniques, wiley, 1992
- 2) C. Harris, C. Crede : Shock and Vibration Handbook, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1988
- 3) I-DEAS System Dynamics User's Guide, SDRC, 1990
- 4) D.J. Ewins : Modal Testing - Theory and Practics, Bruel & Kjaer, 1986
- 5) Jens Trampe Broch : Mechanical Vibration and Shock Measurement, Bruel & Kjaer, 1984