

碩士學位論文

RANDOM 振動荷重을 받는 構造物用 材料의
疲勞破壞에 대한 基礎的 研究

濟州大學校 大學院

機 關 工 學 科



趙 成 培

1991年 12月

RANDOM 振動荷重을 받는 構造物用 材料의
疲勞破壞에 대한 基礎的 研究

指導教授 金 貴 植

趙 成 培

이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함.

1991年 12月

趙 成 培 의 工學碩士學位論文을 認准함.



審査委員長 印

委 員 印

委 員 印

濟州大學校 大學院

1991年 12月

Fundamental Study of Fatigue Fracture
of Structural Materials under Random
Vibration Loading.

Seong-Bae Cho

(Supervised by professor Kui-Sik Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ENGINE TECHNOLOGY
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1991. 12.

목 차

Abstract	1
I. 서 론	3
1. 연구배경 및 연구목적	3
II. 해석방법	7
1. 시뮬레이션 랜덤진동하중파형의 발생	7
2. 파형계수법	8
3. 등가하중 산정법	10
III. 실험장치 및 방법	13
IV. 결과 및 고찰	15
1. 랜덤진동하중파형의 발생	15
2. 파형계수	16
2·1. 하중진폭	16
2·2. 평균하중	17
3. 등가하중	17
V. 결 론	35
VI. 참고문헌	37

Abstract

This paper was the study on the fatigue fracture of structural materials under a random vibration loading. It was investigated of the generation of random waves, cycle counting methods and evaluation of equivalent amplitudes about both a computer simulation and service loadings. The simulation random waves are generated by inverse Fourier transformation. The service loading waves are examined at four parts of the automobile, i.e., front axle(FA), transmission(TM), universal joint(UJ) and manifold(MF).

Results obtained are as follows:

- 1) In the case of simulation random waves, the wave amplitude have a wide frequency band fluctuated larger than that of a narrow one. And, the fluctuations of the service loading waves are large at FA and TM, and small at UJ and MF, respectively.
- 2) The service loading waves of the four parts had frequency band from 0 to 5Hz, especially, they are shown to the most power spectral density at 4Hz.
- 3) The difference between the results of range and rainflow cycle counting method on the simulation random waves generated the wide

frequency band is large, but the narrow band one is similar. And those of service loading waves are about the same at the each part, since the waves had narrow frequency bands.

- 4) The equivalent amplitudes of the service loading waves by the rainflow method are alike FA and TM, and UJ and MF, respectively, but those by range method are different all parts. Therefore, the former is more available than the latter according to consideration of fatigue damage and the cycle counting results.

I. 서론

1. 연구배경 및 연구목적

근년 우주항공, 원자로, 해양구조물등의 대형 기계구조물의 안전성, 효율성 및 신뢰성을 위하여 파괴역학 수법을 이용한 손상허용 피로설계의 도입이 비약적으로 확대되고 있고 그 중요성이 크게 인식되고 있다. 이는 기계구조물들의 파괴가 대부분 피로파괴이므로 강도설계의 입장에서 기계구조물 부재의 피로강도를 파악하는 것이 대단히 중요하기 때문이다. 재료의 피로파괴는 반복하중이 작용하여서 파괴가 일어나는 현상인데, 이 반복하중은 하중의 상한치와 하한치(Peak)가 일정하게 반복되는 일정진폭하중과 불규칙적인 변동하중이 있다. 또 변동하중은 Peak치가 변할 때 일정한 규칙성을 가진 계단상의 변동하중(High-Low Loading Cycle)과 통계적 처리로만 규칙성을 찾아볼 수 있는 랜덤진동하중이 있다. 각종 기계구조물들이 운용중에 받는 실사용하중은 다양하지만, 대부분의 경우 하중의 평균치와 진폭이 시시각각 변하는 랜덤진동하중 특성을 갖기 때문에 랜덤진동하중하의 피로강도해석이 필요하다.

랜덤진동하중하의 피로강도 해석에 대한 연구를 대별하여 보면, 일정진폭하중하의 실험 데이터로부터 랜덤피로강도를 추정하고자 하는 연구(八木順吉, 1988), 2단 혹은 3단의 변동하중파형을 시험기에 재현시켜서 파형의 대소 혹은 그 순서등의 기본패턴이 피로파괴에 미치는 영향을 명확히하여 일반적인 랜덤진

동하중 피로파괴문제에 접근시켜 가는 연구(菊川 등, 1983, 1984), 실제 기계구조물에서의 실동하중상태로 모의하여 시험하거나 혹은 실동하중상태와 동가로 되는 프로그램하중으로 치환시켜 검토하는 연구(Hewitt, R. L., 1987) 및 확률 통계적으로 해석 가능한 정상가우스 랜덤진동하중파형에 대한 이론적인 연구(Alawi, H., 1986)가 있다.

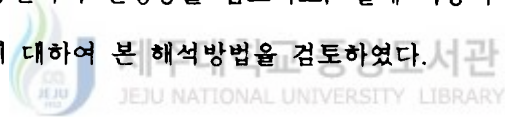
이중 실기하중파형시험 혹은 그것과 동가로 되는 프로그램하중 치환시험이 가장 합리적인 시험방법인데, 실기시험의 한 예로서 항공기 분야에서 일반적으로 이용하는 방법을 들어보면, Fig. 1에 보이는 것처럼 비행기의 기체 전체에 걸쳐 극히 복잡하게 피로시험을 행하고있다(薄一平, 1988). Fig. 1에서의 피로시험 부하장치는 수직방향의 부하장치만을 표시하고 있으나 여기에 수평방향, 전단방향 부하시험을 표시하면 훨씬 더 복잡하다. 이러한 복잡한 피로시험을 대처할 수 있는 실험실 규모내에서 실사용 조건을 모의하여 행하기 위해서 랜덤진동하중 이력을 하중스펙트럼으로 수집하여 표준하중스펙트럼을 작성하고 있지만 항공기 제작회사의 경우에 있어서는 노하우로서 공개하지 않고 있다.

근년 유압서보시험 기술의 보급과 계측제어 기술의 급속한 발전과 더불어 일정진폭하중시험 결과가 정도있게 되고, 블럭랜덤진동하중시험이 가능하게 됨으로서 일정진폭하중시험과 랜덤진동하중시험 결과를 비교검토하여 랜덤진동하중시험을 일정진폭하중시험으로 부터 추정가능 여부의 검토가 연구되고 있다(駒井 등, 1989). 이 방법은 실동하중 파형중 랜덤성을 유지할수 있는 길이를 단위 블럭으로하여 블럭 랜덤하중파형을 실험·해석하여, 일정진폭하중과의 상관관계로 규명하는 것인 데, 이에 대한 연구단계로서는 ① 랜덤진동하중파형의 시뮬레이션 및 랜덤진동하중파형의 해석방법의 검토 ② 시뮬레이션 랜덤진동하중파형의 피로시험기구의 재현 ③ 랜덤진동하중하의 피로기구의 해명 및 일정 진폭

시험과의 상관관계 검토 ④ 랜덤진동하중 피로파괴의 일정진폭시험에 의한 추정법의 제안으로 정리할 수 있다. 랜덤진동하중파형과 일정하중진폭시험과의 상관관계를 파괴역학적으로 검토하기 위해서는 랜덤진동하중파형의 하중진폭과 사이클의 정의가 문제로 되는데, 이를 위해 등가하중진폭의 산정법과 파형사이클 계수방법이 필요하다.

협대역 랜덤파형의 경우에는 1사이클의 구분이 비교적 명확하여 등가하중진폭의 산정만 문제가 되는데, 현재로서는 총하중진폭의 2승 평균치(RMS), 3승 평균치(RMC), 혹은 일정하중진폭시험에서의 Paris의 지수를 이용한 평균치(RMM)를 이용하여 등가하중진폭을 산정하고 있다. 그러나, 광대역 랜덤파형의 경우에 있어서는 사이클이 구분이 불분명하므로 파형 사이클계수를 행하여야 하며 계수된 하중진폭에 대하여 등가하중진폭을 산정하는 것이 문제가 된다.

본 연구에서는 랜덤진동하중파형의 발생 및 해석방법의 검토를 목적으로 협대역과 광대역의 랜덤진동하중파형을 퍼스널컴퓨터에서 시뮬레이션하여 파형계수방법, 등가하중진폭의 산정등을 검토하고, 실제 자동차 구동(Idling)시의 랜덤진동하중파형에 대하여 본 해석방법을 검토하였다.



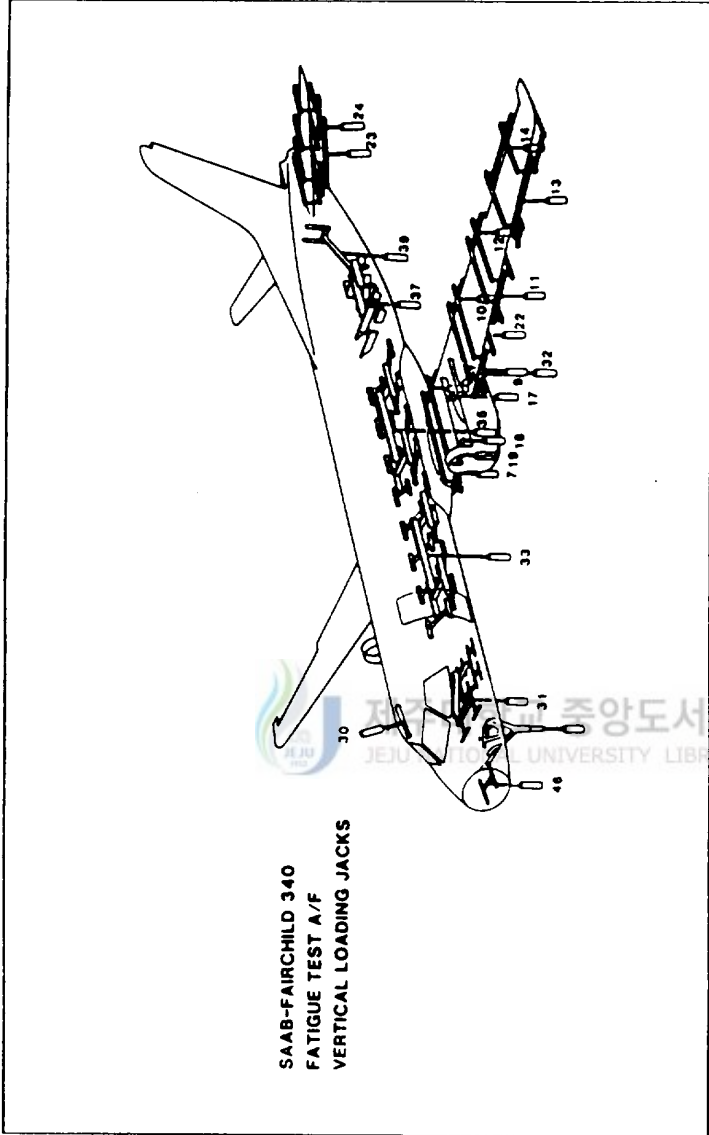


Fig. 1 Service loading fatigue test of airplane

II. 해석 방법

1. 시뮬레이션 랜덤진동하중파형의 발생

컴퓨터 시뮬레이션에 의한 랜덤진동하중파형의 발생방법은 1자유도진동계에 랜덤기진력이 작용하는 계의 응답을 이용하는 1자유도 진동계 응답법과 여현급수합법이 있다. 1자유도 진동계 응답법은 계산이 간단하여 계산시간이 짧지만, 파워스펙트럼을 임의로 변화시켜 정도좋은 시뮬레이션을 행하기에는 곤란하다.

여현급수합법은 계산과정에서 반복계산의 횟수가 많아 계산시간이 길기 때문에 실험시에 주파수의 제한을 받지만, 임의의 파워스펙트럼을 가진 파형의 시뮬레이션이 가능하므로 이 방법을 이용했다. 이 방법은 푸리에 역변환을 이용하는 것으로 옅고드성을 가진 정상가우스과정이 중심극한정리에 의해 식(1)을 이용하여 계산하는 것이 가능하므로 폭넓게 응용되고 그 실용성이 확인되고 있다. (송지호 등, 1989, Shinozuka, M. and Jan, C. M., 1972)

랜덤진동하중파형의 시계열은 식(1)로 표현된다.

$$X(t) = \sum_{n=1}^N C_n \cdot \cos(2\pi \cdot f_n \cdot t + \phi_n) \quad \text{————— (1)}$$

$$C_n = [2W(f_n) \cdot \Delta f]^{1/2}$$

$$f_n = f_L + (n - 1/2) \cdot \Delta f$$

$$\Delta f = (f_H - f_L) / N \quad (n = 1, 2, \dots, N)$$

여기에서 $W(f_n)$ 은 파워스펙트럼 밀도함수, ϕ_n 은 랜덤파형 위상각, f_H 은 상한주파수, f_L 은 하한 주파수를 나타내고 N 은 분할수이다. 식(1)에서 파워스펙트럼 밀도함수 $W(f_n)$ 의 형태가 주어지면 랜덤진동하중파형이 작성된다. 식(1)의 위상각 ϕ_n 에 대해서는 균일난수발생법으로 이용하는 곱셈합동법은 식(2)에 의해 난수를 발생시켜 $[0, 2\pi]$ 사이의 값으로 변환하여 사용하였다.

곱셈합동법은

$$x_{n+1} = \lambda \cdot x_n \cdot (\text{mod } P) \quad (2)$$

으로 표시된다. 여기에서 $\text{mod } P$ 는 P 의 정수배를 버린다는 의미이며, λ, P, x 의 초기값(津田孝夫, 1977)으로는 $\lambda = 513$, $P = 242$, $x_1 = 566387$ 로 하였다.

2. 파형계수법

랜덤진동하중파형에 의한 재료의 피로파괴를 파괴역학의 수법으로 평가하기 위해서는 시간계열로 표시된 랜덤진동하중파형으로 부터 진폭과 평균치의 빈도수를 구할 필요가 있다. 이것을 파형계수라 한다. 파형계수법은 크게 Range법과 Range pair법으로 나눌수 있다(송지호, 1990). Range법은 간단히 계속되는 Peak

치간(진폭)을 $1/2$ Cycle로서 계수하는 것이고, Range pair법은 먼저 Peak치간의 $1/2$ Cycle를 취하고 같은 크기의 진폭을 찾아내어 1쌍을 만들어 1 Cycle로서 계수하는 것이다. 랜덤진동하중의 경우에는 Range pair법의 한 종류인 Rainflow법이 유효한 것으로 알려져 있으며(町田進 등, 1983, Wirsching, P. H. et al., 1977), 본 연구에서는 Rainflow법에 대하여 검토하여 그 비교로서 Range법을 이용하였다.

Rainflow법의 계수는 Fig. 2에 도시한 것처럼 랜덤진동하중(응력) 혹은 변형률을 횡축에, 시간축을 종축 즉, 수직·하향방향으로 해서 극대치와 극소치간을 결합하여 여러개의 지붕으로 가정해서 위에서 흘러내리는 빗물의 흐름을 생각하여 다음의 2가지의 전제조건을 두어서 계수를 행한다.

- ① 흐름은 각 지붕의 이음점에서 시작하고, 위에서 떨어지는 흐름과 밑의 지붕에서의 흐름이 만나는 점에서 이음점과의 수평거리가 긴것이 흐름을 계속하고 짧은 것은 중지한다.
- ② 흐름은 극대치 혹은 극소치 보다도 절대치가 큰 극대치 혹은 극소치가 나타나면 중지하게되며, 중지된 흐름의 수평거리를 $1/2$ Cycle로 계수한다.

그러나 이대로는 알고리즘이 복잡하므로 본 연구에서는 보다 간단화되어 있는 방법(遠藤達雄 등, 1981, Rychlik, I. 1987)을 이용하였다. 이 방법을 요약하면, Fig.2에서 각 Peak치의 점 1-2, 2-3, 3-4의 연속되는 3개의 진폭에 대하여 중앙진폭 (2-3)이 전진폭 (1-2)와 후진폭 (3-4)보다 작을 때는 1개의 히스테리시스 루프를 형성한다고 보아 중앙진폭 (2-3)을 1Cycle로서 계수하여 제거하고, 1-4, 4-5, 5-6의 진폭을 비교하여 상기 조건의 만족 여부를 검토하는 것으로 전체파형에 대하여 순차적으로 1Cycle의 계수를 행한 후, 나머지 진폭에 대하여는 2개의 진폭중 작은 진폭을 $1/2$ Cycle로 계수하는 방법이다.

3. 등가하중진폭의 산정법

본 연구에서 랜덤진동하중파형의 등가하중진폭은 선형누적손상법칙(Miner, M. A., 1945)을 응용하여 다음과 같이 구한다. 일정하중진폭시험의 피로파괴에 대한 균열진전속도 da/dN 와 응력확대계수 (ΔK)의 관계(Paris, P. C. and Erdogan, F. A., 1963)는 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} da/dN &= C(\Delta K)^m \\ \Delta K &= \sigma (\pi a)^{1/2} \cdot F \\ da/dN &= C \sigma^m [(\pi a)^{1/2} \cdot F]^m \end{aligned} \quad (3)$$

a : 균열길이, N : 하중반복수, σ : 응력진폭,

C, m : 일정하중진폭시험에서의 상수, F : 시험편형상함수

여기서 한 Cycle당 균열성장이 균열길이 보다 충분히 작다면($da/dN \ll a$), Cycle당 균열성장의 증분은 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta a_1 &= C \sigma_1^m [(\pi a)^{1/2} \cdot F]^m \\ \Delta a_2 &= C \sigma_2^m [(\pi a)^{1/2} \cdot F]^m \\ \Delta a_n &= C \sigma_n^m [(\pi a)^{1/2} \cdot F]^m \\ (\Delta a_1 + \Delta a_2 + \dots + \Delta a_n) &= C (\sigma_1^m + \sigma_2^m + \dots \\ &\quad + \sigma_n^m) [(\pi a)^{1/2} \cdot F]^m \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)의 좌변은 N 사이클에서의 균열성장의 증분이므로 사이클당 균열성장 속도는 식(5)로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 da/dN &= C (\sigma_1^m + \sigma_2^m + \dots + \sigma_n^m) / N \cdot [(\pi a)^{1/2} \cdot F]^m \\
 &= C \left[\frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i^m}{N} \right] \cdot [(\pi a)^{1/2} \cdot F]^m \\
 &= C \left[\left\{ \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i^m}{N} \right\}^{1/m} \cdot (\pi a)^{1/2} \cdot F \right]^m \\
 &= C \left[\left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i^m \right\}^{1/m} \cdot (\pi a)^{1/2} \cdot F \right]^m \\
 &= C \{ \sigma_{eq} (\pi a)^{1/2} \cdot F \}^m
 \end{aligned} \tag{5}$$

식(5)의 우변항으로부터 등가응력 σ_{eq} 는 식(6)로 표시된다.

$$\sigma_{eq} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i^m \right]^{1/m} \tag{6}$$

그러나 장시간의 랜덤진동하중의 경우 시시각각으로 응력진폭이 변하고 등가응력을 구하는 데에 많은 시간이 소요되므로 본 연구에서는 파형계수를 행한 후 다음의 식(7)로 등가하중진폭 L_{eq} (등가응력진폭과 같은 의미)을 구하였다.

$$L_{eq} = \left[\sum_{i=1}^N r_i L_i^m \right]^{1/m} \tag{7}$$

L_i : 하중진폭, r_i : 빈도수

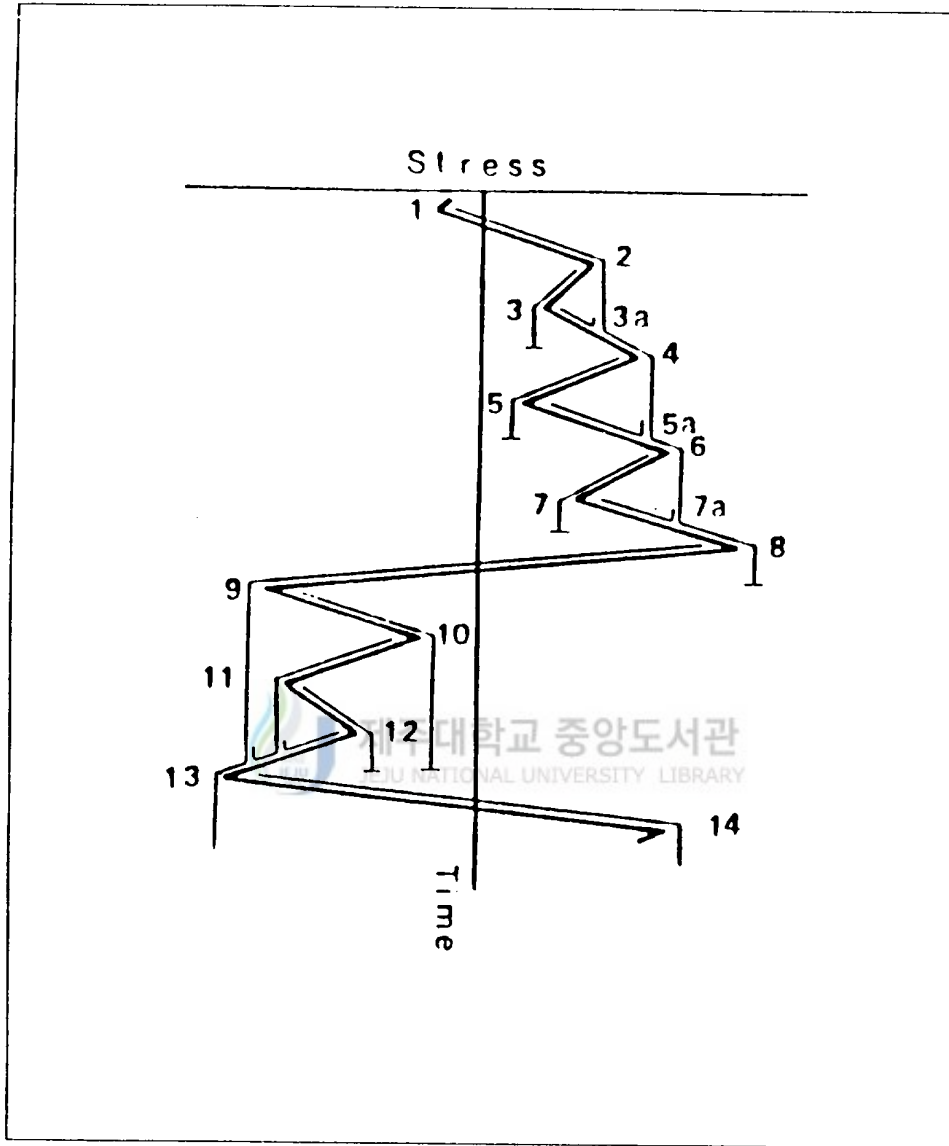


Fig. 2 Rainflow cycle counting method

Ⅲ. 실험장치 및 방법

본 연구에서 해석대상으로한 랜덤진동하중파형은 임의의 파워스펙트럼을 앞의 식(1)과 (2)에 적용시켜 발생시킨 시뮬레이션 랜덤진동하중파형과 실제 기계의 구동시 발생하는 실사용하중파형이다. 시뮬레이션 랜덤진동하중파형은 송등(1989)이 행한 바와 같은 $W(f_n)$ 의 세가지 형태 즉, 비교적 광대역, 1자유도계 진동계를 가정한 협대역, 2자유도계 진동계를 가정한 파워스펙트럼 밀도함수를 가지고 랜덤진동하중파형을 발생시켰다. 이 랜덤진동하중파형은 길이가 길어지면 주기성이 나타나므로(그 주기는 $T_p=2/\Delta f=2N/(f_H-f_L)$ 와 같다), 1주기를 단위 블럭의 길이로 하여 단위블럭에 대하여 해석하였으며, 상한주파수 1 Cycle을 16 등분하여 극치의 오차가 2%이내에 있도록 조절하였다.

실사용 랜덤진동하중파형은 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 자동차의 엔진 구동시의 비교적 큰 하중을 받는 자동차 밑부분의 4개소[(a): Front Axle(FA), (b): Transmission(TM), (c): Universal Joint(UJ), (d): Manifold(MF)]에 스트레인 게이지(Strain Gage)를 부착하여 응력파형을 검출하였다. 본 실험에 이용한 자동차의 제원은 4Cycle, 4Cylinder, Automatic Type의 승용차[대우자동차(주), 85년식 로얄살롱]이었고, 회전속도는 공회전(Idling)시 약 1,000RPM이었다. 스트레인 게이지로 부터 검출된 Analogue Signal의 응력파형은 Strain Amplifier를 통하여 증폭한 후 A/D Converter를 통하여 퍼스널 컴퓨터에 Digital Data로 입력하였고 고속 푸리에변환(FFT)을 이용하여 파워스펙트럼을 구하였다.

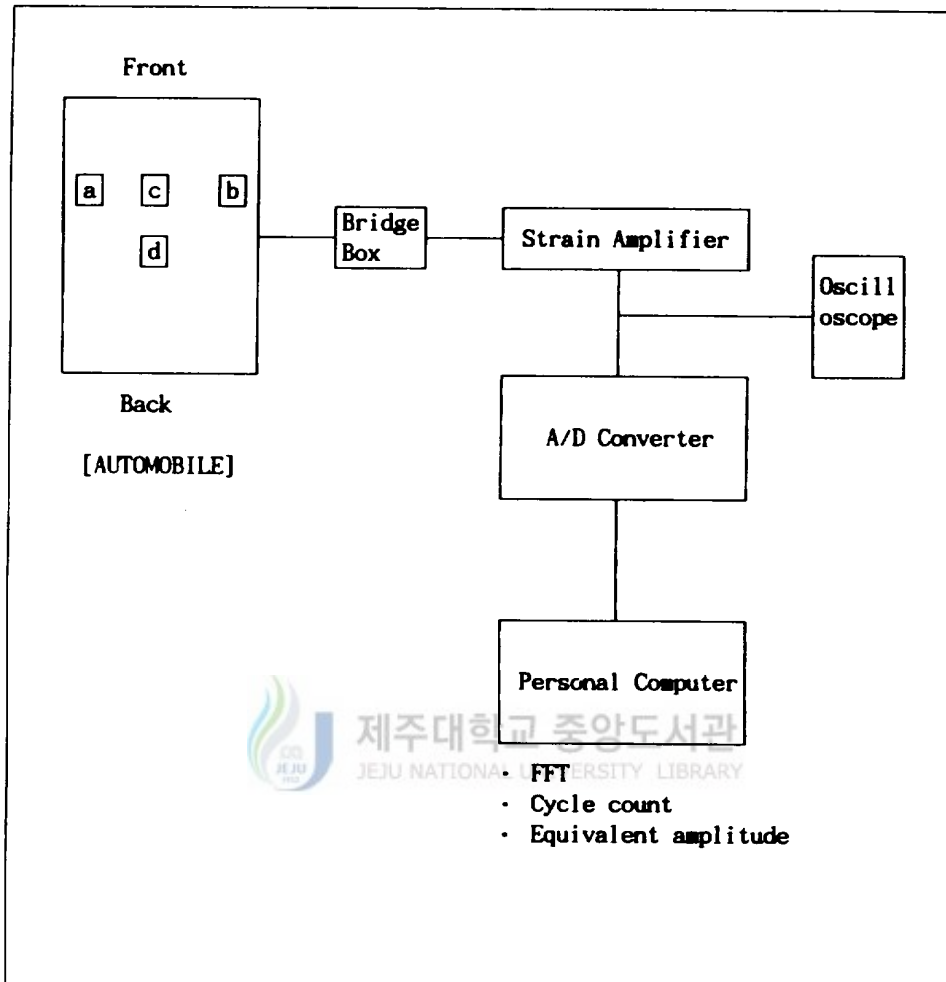


Fig. 3 Experimental apparatus

IV. 결과 및 고찰

1. 랜덤진동하중파형 발생

Fig. 4은 시뮬레이션 랜덤진동하중파형을 3가지 형태의 파워스펙트럼 밀도함수에 대해 발생시킨것으로서, Fig. 4(a)는 광대역(Wide band) 랜덤파형, (b)와 (c)는 비교적 협대역(Narrow band) 랜덤파형이다. 광대역 파형인 (a)는 파형진폭과 평균치 및 Cycle의 변화가 크게 나타나며, 협대역 파형 (b)는 진폭의 변화는 크나 평균치가 일정하고 사이클의 변화가 작다. 그리고 (a)와 (b)의 중간 단계인 (c)의 경우는 진폭 및 평균치의 변화는 크게 나타나지만 사이클의 변화는 (a)보다 작다.

Fig. 5 ~ Fig. 8에는 자동차 구동시의 각각 Front axle부, Transmission부, Universal joint부 및 Manifold부의 하중파형과 파워스펙트럼 밀도함수를 나타내었다. 이들 4개소의 파형은 모두 랜덤파형의 특성을 갖고 있다. 4개소의 파형을 비교하여 보면, 파형진폭의 크기는 FA부가 가장 크고, TM부, MF부, UJ부의 순으로 작다. FA부, TM부, MF부가 인장방향(+방향)의 파형이 형성되어 있으나 UJ부는 압축방향(-방향)의 파형이 주로 형성되고 있어서 FA부, TM부, MF부에는 인장응력이, UJ부에는 주로 압축응력이 작용함을 알 수 있다. 파워스펙트럼 밀도함수를 비교하여 보면 4개소의 대역폭은 0~5Hz로서 자동차 구동시(1,000rpm) 하중파형의 주파수 영역은 저주파임을 보인다. 이는 불규칙한 도로면을 주행하

는 차량의 파워스펙트럼 해석(張湘偉 등, 1989)에서 파워스펙트럼이 강한 주파수 영역이 5Hz이하인 것과 유사하다. Fig. 5의 FA부에서는 주파수영역 전체에 걸쳐 강한 파워스펙트럼 밀도를 형성하고 있으며 특히 3.2Hz와 4Hz에서 크게 나타났다. Fig. 6의 TM부에서는 4Hz와 4.6Hz에서 파워스펙트럼 밀도가 크고, 그 이외의 부분에서는 작으며 Fig. 7의 UJ부는 전 부분의 파워스펙트럼 밀도가 작고 Fig. 8의 MF부는 4Hz에서 크게 나타나고 다른 부분은 작음을 알 수 있다.

2. 파형계수

2.1. 하중진폭

시뮬레이션 랜덤진동하중파형에 대한 하중진폭의 파형계수 결과를 Table 1에 나타내었고, 각 계수방법에 대한 하중진폭계수 결과와 빈도수(\ast)와의 관계를 각각 Fig. 9(Rainflow method)와 Fig. 10(Range method)에 나타내었다. Table 1과 Fig. 9, 10에 의하면 광대역 파형인 (a)인 경우 계수방법에 관계없이 협대역 파형인 (b)와 (c)보다 큰 하중진폭의 빈도수가 크게 나타났고 협대역 파형일지라도 대역폭이 넓은 (c)가 (b)보다 큰 하중진폭이 빈도수가 많다. 양 계수방법을 비교하여 보면 협대역 파형인 (b)와 (c)의 파형의 경우는 Range법과 Rainflow법에 의한 계수결과가 유사하고, 광대역 파형인 (a)파형은 차이가 큼을 Fig. 9, 10에서 알 수 있다.

자동차 구동시의 하중파형에 대한 하중진폭의 파형계수 결과는 Table 2에 제시하였고 각 계수방법에 대한 하중진폭 계수결과와 빈도수(\ast)의 관계를 Fig. 11 Fig. 11(Rainflow Method)과 Fig. 12(Range Method)에 나타내었다. Table 3과 Fig. 11, Fig. 12에서 살펴보면 Rainflow Method에 의한 파형계수 결과는 FA부

와 TM부에서 다른 곳에 비해 비교적 큰 하중진폭이 나타나지만 빈도수는 작다. 또 소진폭의 경우는 4개소 전부분이 거의 유사하게 계수되어 자동차를 공회전시켰을 때 진동하중이 4개소에 거의 유사하게 작용하고 있음을 알 수 있다. Fig. 12의 Range Method에 의한 파형계수 결과는 대진폭의 경우 Fig. 11의 Rainflow 법과 마찬가지로 FA부, TM부에 거의 유사하게 나타나지만 소진폭의 경우는 측정된 4개소에서 차이를 보인다.

2. 2. 평균하중

시뮬레이션 랜덤진동하중파형의 평균하중에 대한 파형계수 결과를 Table 3에, 자동차 구동시 하중파형의 평균하중에 대한 파형계수 결과를 Table 4에 나타내었다. Table 3과 4에 있어서 각 부분의 평균하중 변동이 큼을 보여주고 있다. 본 연구에서는 평균하중의 영향은 고려하지 않았다. 이는 재료의 피로파괴에 있어서 평균하중의 영향은 일정하중진폭시험의 경우 유효응력확대계수로서 균열성장속도를 정리하면 무시되므로(菊川眞 등, 1983, 町田進 등, 1988), 랜덤하중시험의 경우에 있어서도 랜덤진동하중파형의 하중-변형률곡선을 찰취하고 균열개구하중을 산정하여 균열개구하중 이상의 파형을 상기의 파형계수법에 의해 계수하고, 유효등가하중진폭을 결정하면 되기 때문이다(駒井謙治郎 등, 1989).

3. 등가하중

Fig. 13은 시뮬레이션 랜덤진동하중파형의 등가하중 L_{eq} 와 Paris의 지수 m 과의 관계를 나타낸 것이다. Paris의 지수 m 은 구조용 재료에 있어서는 3~11의

값으로 되며(薄一平, 1988) 여기에서 m 이 2이면 2승평균치(RMS), m 이 3이면 3승평균치(RMC)의 값과 같다. 먼저 m 과 L_{eq} 의 상관관계를 보면 m 이 크면 L_{eq} 의 값이 크게 되며 m 의 증가에 따른 L_{eq} 의 증가의 폭은 Rainflow법에 의한 L_{eq} 가 Range법에 의한 것 보다 크다. Fig. 4(b)의 가장 협대역의 파워스펙트럼을 가진 파형의 경우는 Fig. 13에서 보듯이 Rainflow법과 Range법에서 L_{eq} 는 모두 거의 같음을 알 수 있다. 광대역 파형인 Fig. 4(a)의 L_{eq} 는 파형계수방법에 의한 차이가 크게 나타나며 (a)와 (b)의 중간 단계인 (c)파형은 m 의 증가에 따라 L_{eq} 의 차이를 보인다.

실제 자동차 구동시의 등가하중 L_{eq} 와 m 과의 관계는 Rainflow법에 대해서는 Fig. 14에, Range법에 대해서는 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 14를 보면 파형계수 결과에서 대진폭의 계수결과가 유사한 FA부와 TM부의 등가하중이 거의 유사하게 나타나고, 소진폭이 많은 UJ부와 MF부가 거의 같다. 또 대진폭이 많은 FA부와 TM부가 UJ부와 MF부 보다 등가하중이 크게 나타난다. Fig. 15의 Range법에 의한 등가하중의 결과는 4개소 모두 차이를 보이고 있다. 이것은 등가하중 산정에 Rainflow법이 대진폭의 영향이 크게 반영되고, Range법은 대진폭보다는 소진폭의 영향이 크게 반영된 것으로 보인다. 피로파괴의 경우 균열발생 및 균열진전에 미치는 하중진폭의 영향은 소진폭의 하중진폭보다 대진폭의 하중진폭이 크므로 대진폭의 하중진폭이 주로 반영된 Rainflow법에 의한 등가하중 산정이 유효하다고 생각되지만 이에 대한 정성적인 해석은 차후의 연구과제로 생각된다.

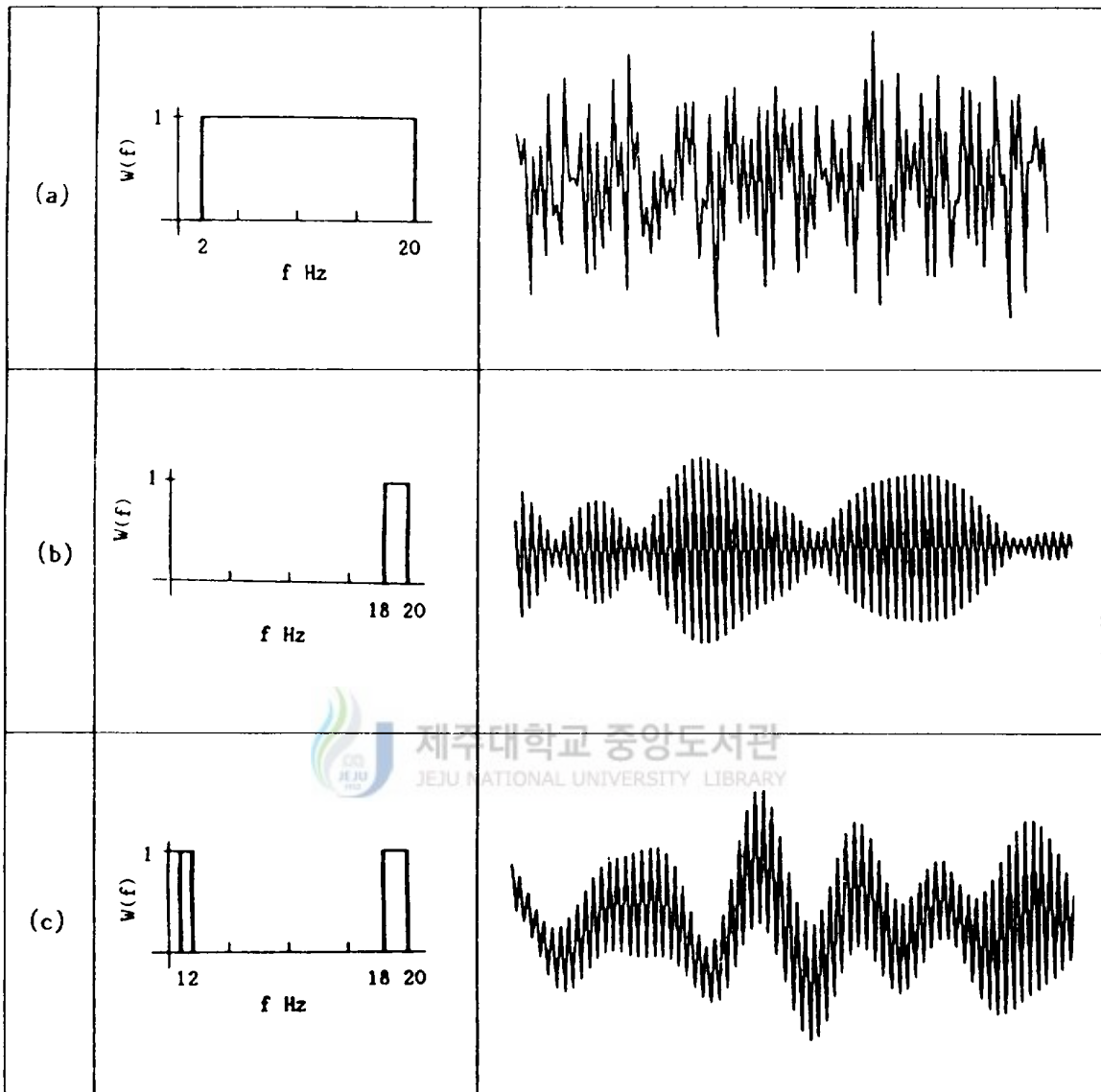
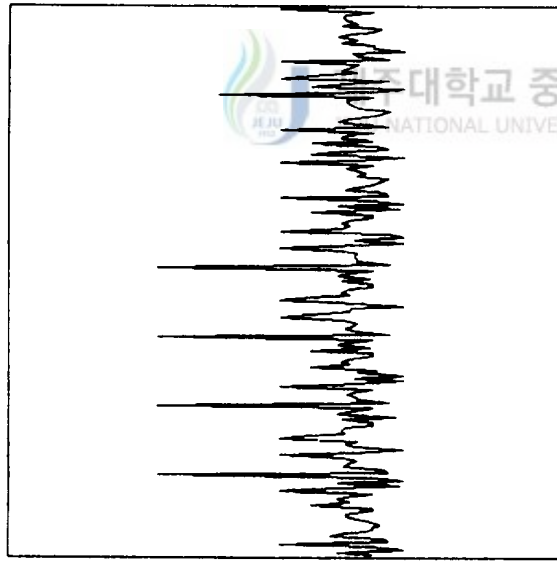
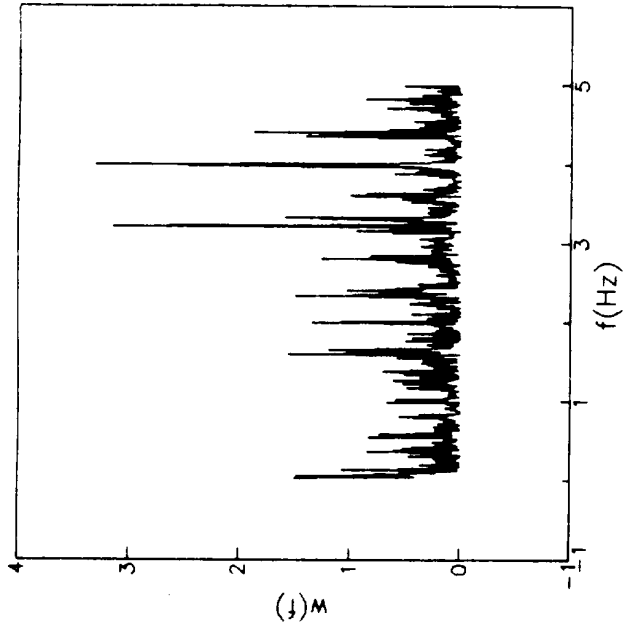


Fig. 4 Power spectral density functions and simulation random waves

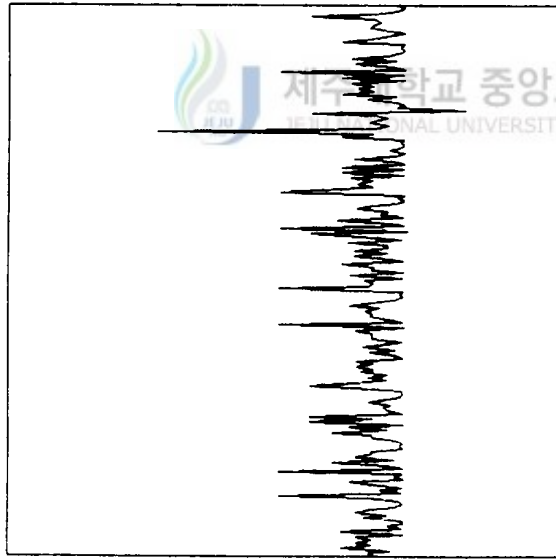


(a) Wave

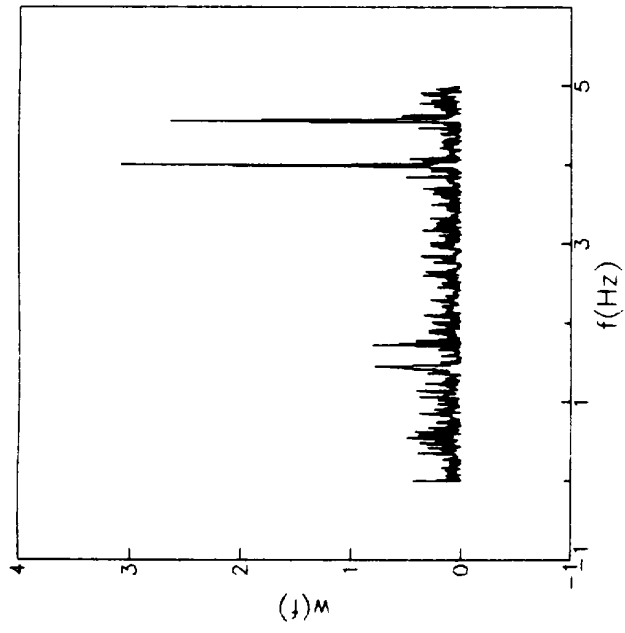


(b) Power spectrum

Fig. 5 Service loading wave and power spectrum at the front axle of automobile

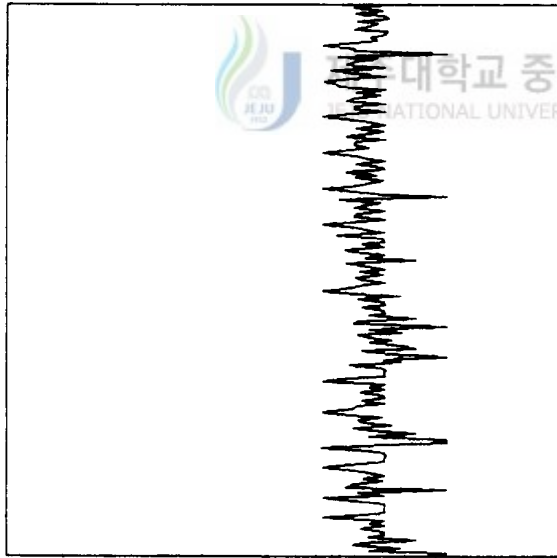


(a) Wave

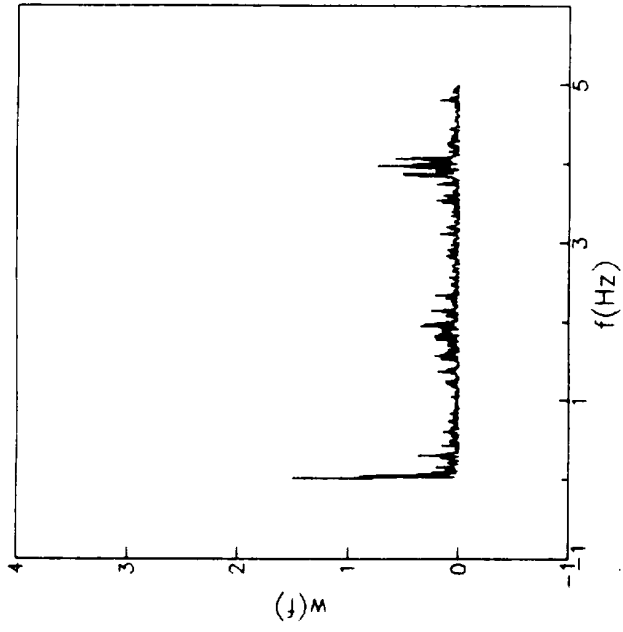


(b) Power spectrum

Fig. 6 Service loading wave and power spectrum
at the transmission of automobile

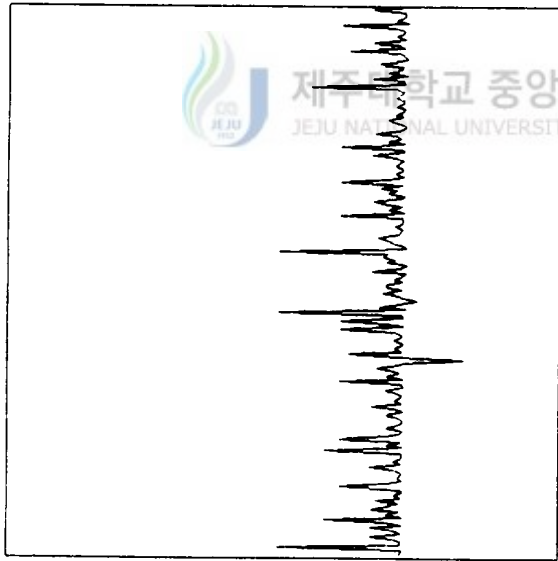


(a) Wave

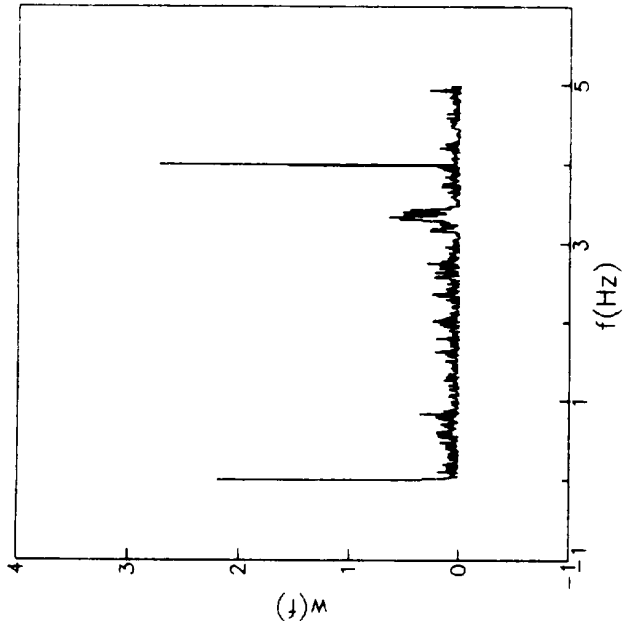


(b) Power spectrum

Fig. 7 Service loading wave and power spectrum
at the universal joint of automobile



(a) Wave



(b) Power spectrum

Fig. 8 Service loading wave and power spectrum
at the manifold of automobile

Table 1. Results of cycle count about load amplitude(simulation waves)

	Rainflow Method		Range Method	
	Amplitude	Count No.	Amplitude	Count No.
(a)	1.33	86	1.33	54
	3.99	86	3.99	83
	6.65	99	6.65	113
	9.31	41	9.31	80
	11.97	75	11.97	79
	14.63	49	14.63	57
	17.29	41	17.29	19
	19.95	11	19.95	11
	22.61	6	22.61	3
25.27	5			
(b)	0.90	90	0.90	90
	1.71	66	1.71	66
	2.53	88	2.53	86
	3.34	44	3.34	56
	4.15	61	4.15	51
	4.97	36	4.97	36
	5.78	54	5.78	52
	6.59	34	6.59	36
	7.41	14	7.41	12
8.22	12	8.00	14	
(c)	0.64	54	0.64	51
	1.74	102	1.74	90
	2.84	90	2.84	99
	3.94	118	3.94	130
	5.04	84	5.04	70
	6.14	23	6.14	39
	7.24	17	7.24	17
	8.34	5	8.34	3
	9.44	3		
	10.54	3		

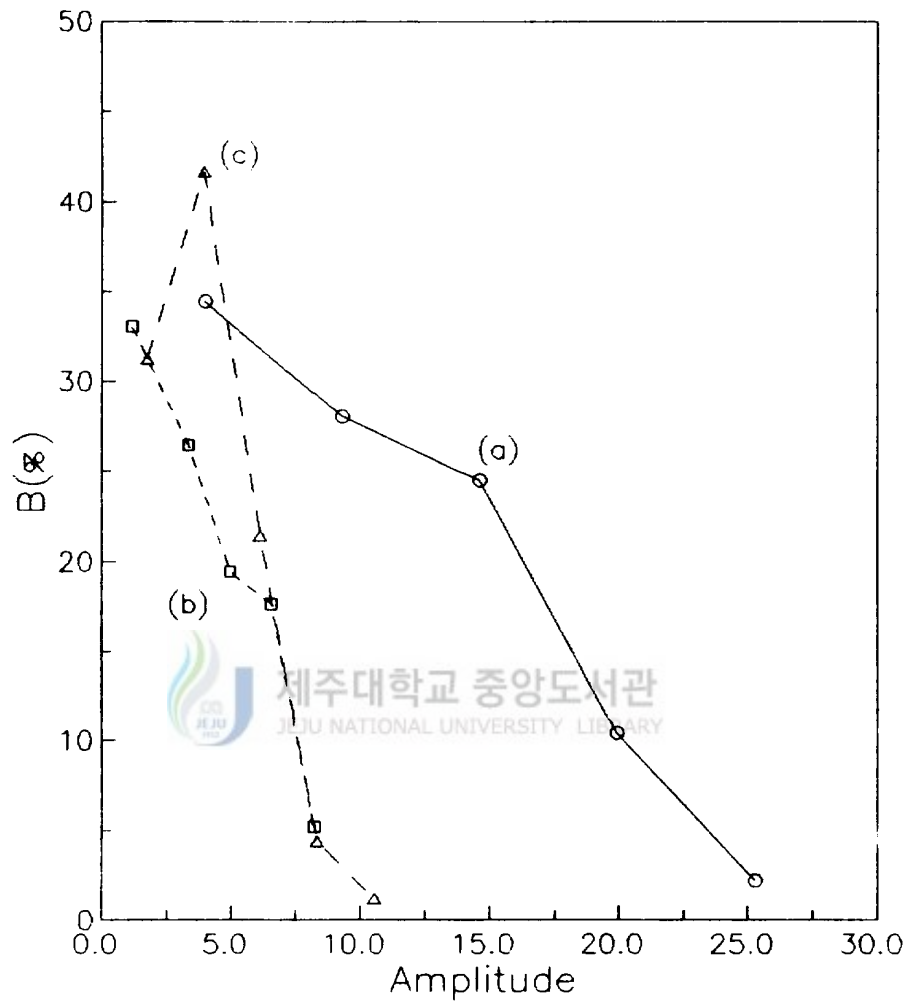


Fig. 9 Rainflow cycle counting results of simulation random waves

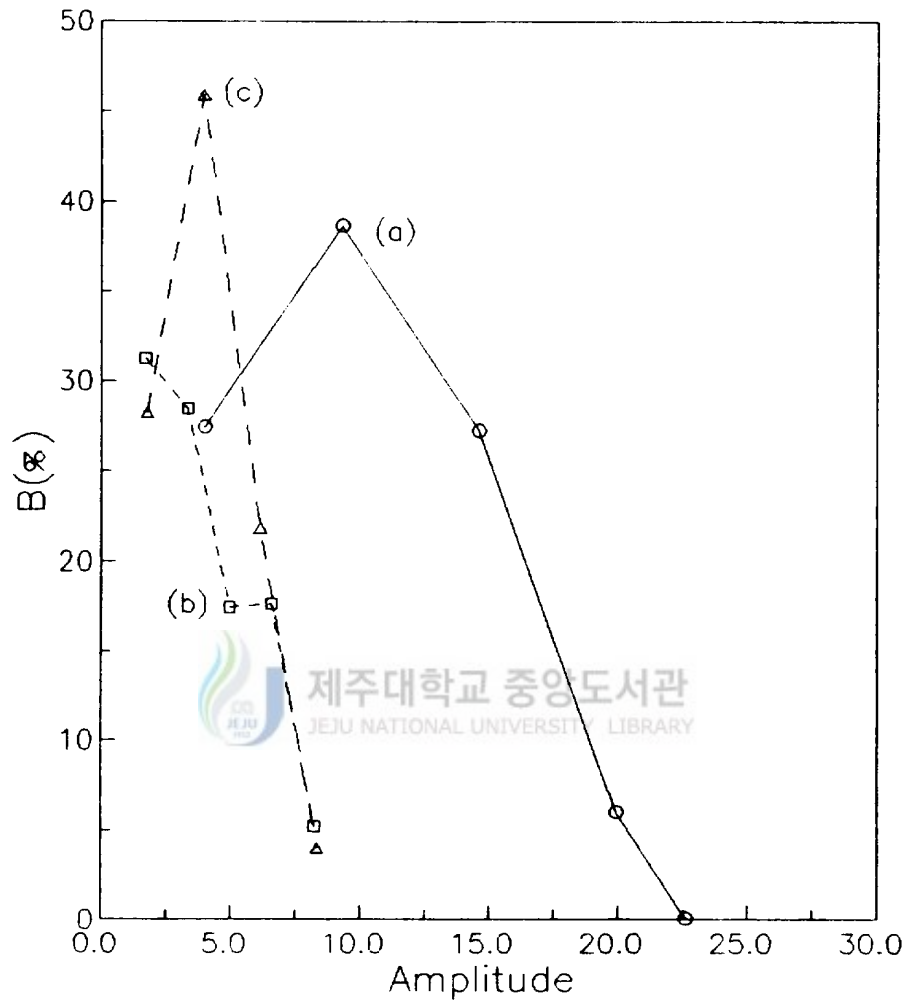


Fig. 10 Range cycle counting results of simulation random waves

Table 2. Results of cycle count about load amplitude(service waves)

	Rainflow Method		Range Method	
	Amplitude	Count No.	Amplitude	Count No.
Front axle	0.32	739	0.32	526
	0.96	179	0.96	266
	1.60	67	1.60	105
	2.24	17	2.24	52
	2.88	5	2.88	19
	4.16	3	3.52	7
	4.80	1	4.16	15
	5.44	8	4.80	16
	6.08	4	5.44	9
			6.08	8
Transmission	0.39	852	0.39	708
	1.17	113	1.17	197
	1.95	37	1.95	65
	2.74	7	2.74	24
	3.52	7	3.52	16
	4.30	1	4.30	4
	5.08	2	5.08	9
	5.86	1		
	6.64	3		
Universal joint	0.31	924	0.31	656
	0.94	74	0.94	266
	1.57	20	1.57	73
	2.20	2	2.20	21
	2.83	2	2.83	6
	3.45	1	3.45	1
Manifold	0.39	946	0.39	815
	1.17	64	1.76	120
	1.95	8	1.96	62
	2.74	4	2.74	16
	3.52	1	3.52	9

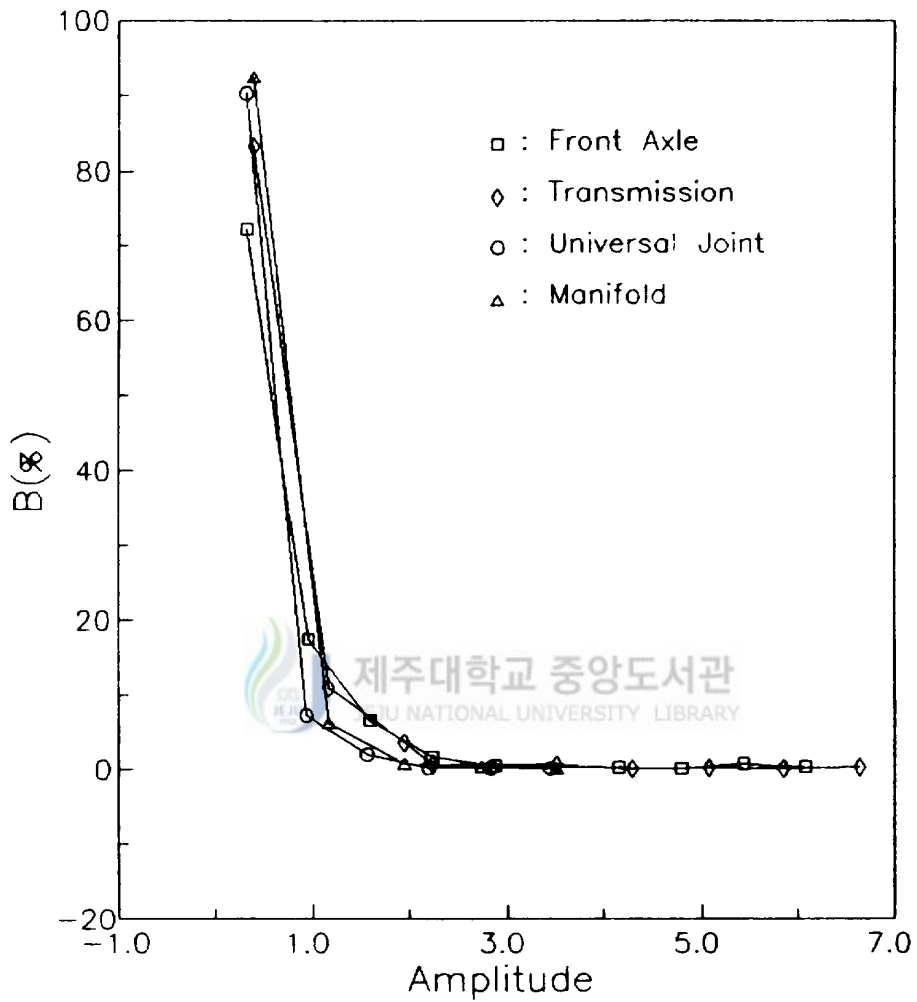


Fig. 11 Rainflow cycle counting results of service loading waves

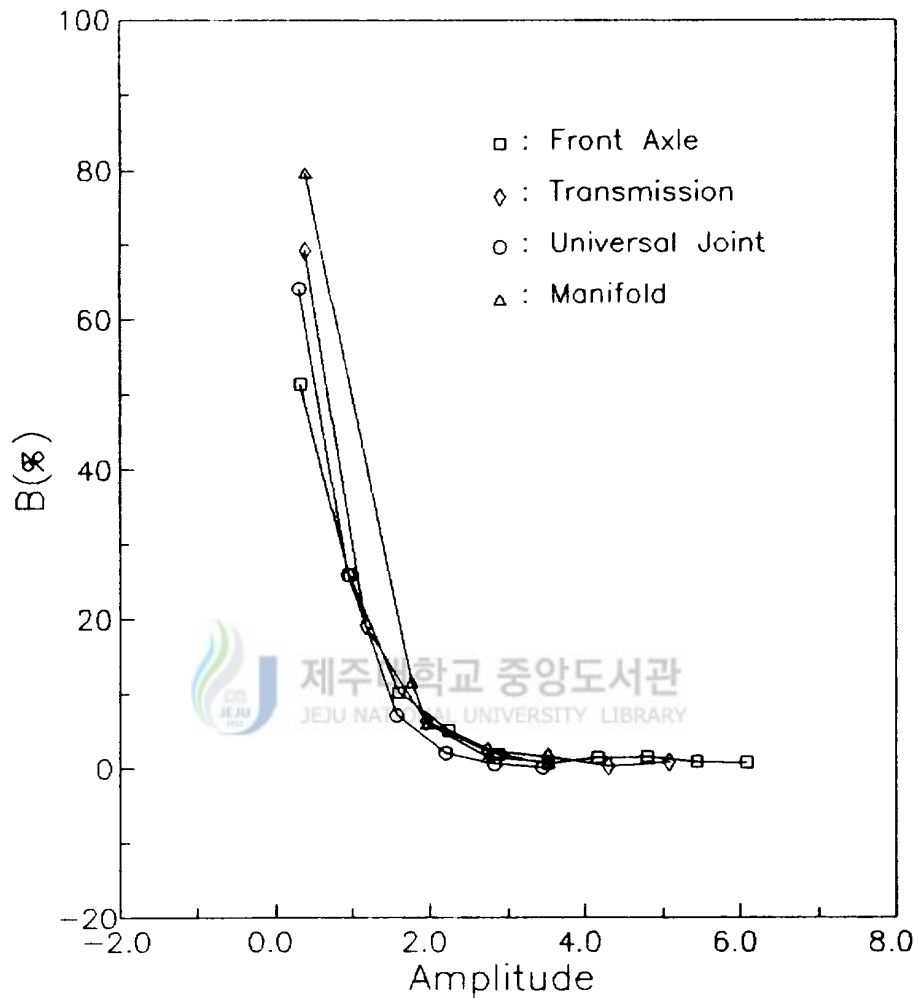


Fig. 12 Range cycle counting results of service loading waves

Table 3. Results of cycle count about mean load(simulation waves)

	Rainflow Method		Range Method	
	Mean load	Count No.	Mean load	Count No.
(a)	15.68	2	14.80	11
	16.56	12	16.01	28
	17.43	24	17.22	38
	18.31	77	18.44	95
	19.19	82	19.65	97
	20.07	104	20.87	97
	20.94	109	22.08	73
	21.82	44	23.29	38
	22.70	25	24.51	17
	23.58	18	25.72	4
	24.45	2	26.94	1
(b)	19.32	1	19.32	1
	19.83	8	19.85	42
	19.91	83	19.94	181
	20.00	322	20.03	193
	20.08	85	22.12	82
(c)	17.62	10	17.48	10
	18.17	20	18.05	17
	18.73	24	18.62	36
	19.28	77	19.20	71
	19.84	141	19.77	120
	20.39	130	20.34	129
	20.94	57	20.91	68
	21.50	28	21.48	32
	22.05	4	22.05	6
	22.61	8	22.62	9
	6.14	23	23.19	1

Table 4. Results of cycle counting about mean load(service waves)

	Rainflow Method		Range Method	
	Mean load	Count No.	Mean load	Count No.
Front axle	0.24	149	0.29	468
	0.87	387	0.87	267
	1.51	320	1.44	152
	2.14	64	2.02	48
	2.77	55	2.60	21
	3.40	16	3.18	29
	4.67	14	4.33	12
	5.30	8	4.91	15
	5.93	10	5.49	10
Transmission	-0.52	2	0.27	554
	0.03	364	0.82	278
	0.58	364	1.37	104
	1.13	179	1.91	30
	1.68	58	2.46	15
	2.23	36	3.01	29
	2.77	6	4.10	2
	4.42	14	5.74	9
Universal joint	-2.87	8	0.15	375
	-2.32	71	0.46	287
	-1.77	101	0.77	192
	-1.22	144	1.08	84
	-0.67	511	1.39	36
	-0.12	141	1.69	24
	0.42	21	2.00	7
	0.97	12	2.31	12
	1.52	8	2.62	2
	2.62		3.23	3
Manifold	-0.55	6	0.16	515
	-0.002	699	0.48	230
	0.55	205	0.80	95
	1.10	49	1.12	77
	1.65	34	1.43	59
	2.21	20	1.75	14
	2.76	6	2.07	11
	4.96	4	3.02	19

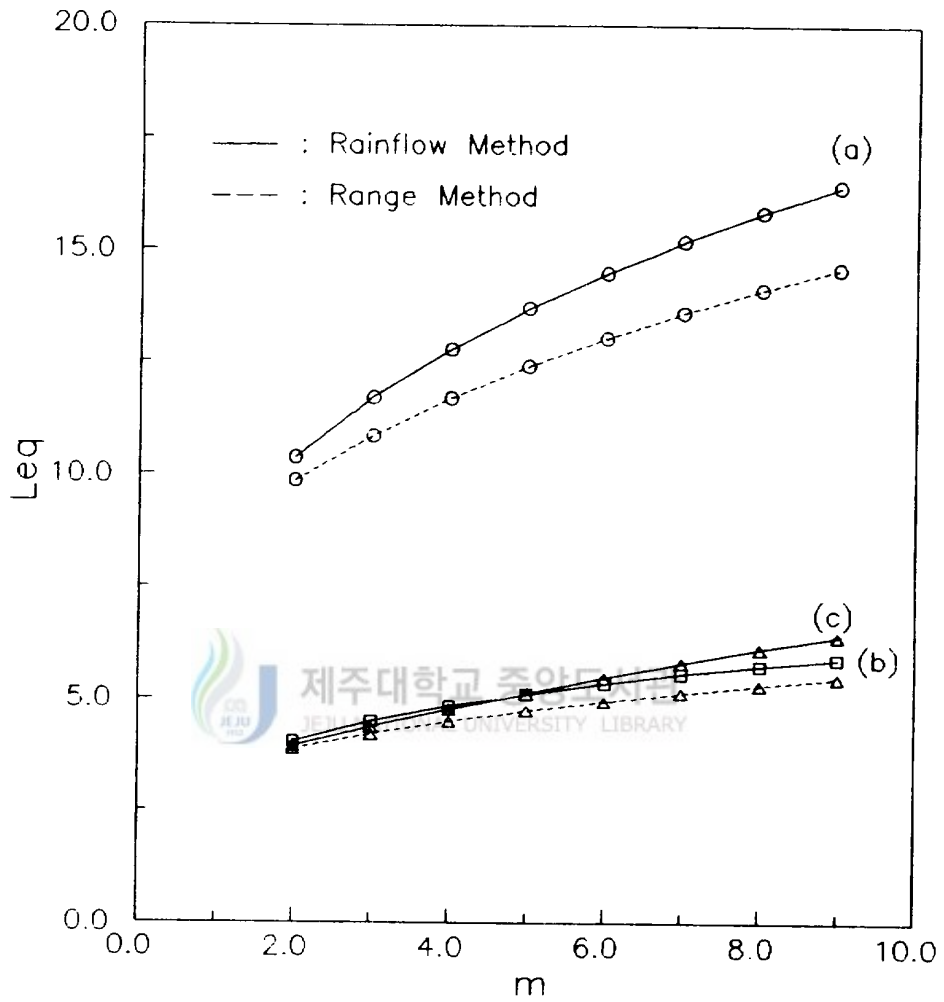


Fig. 13 Relation between Leq and m of simulation random waves

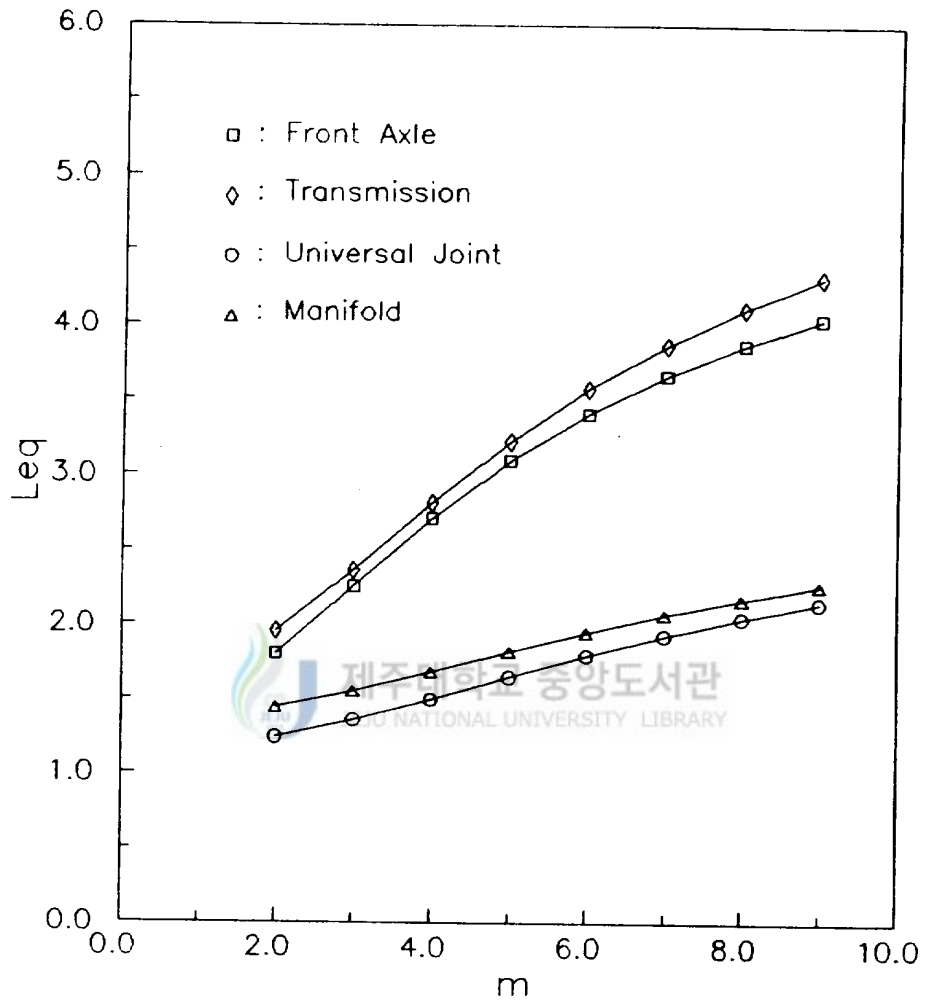


Fig. 14 Relation between Leq and m of service loading waves(Rainflow method)

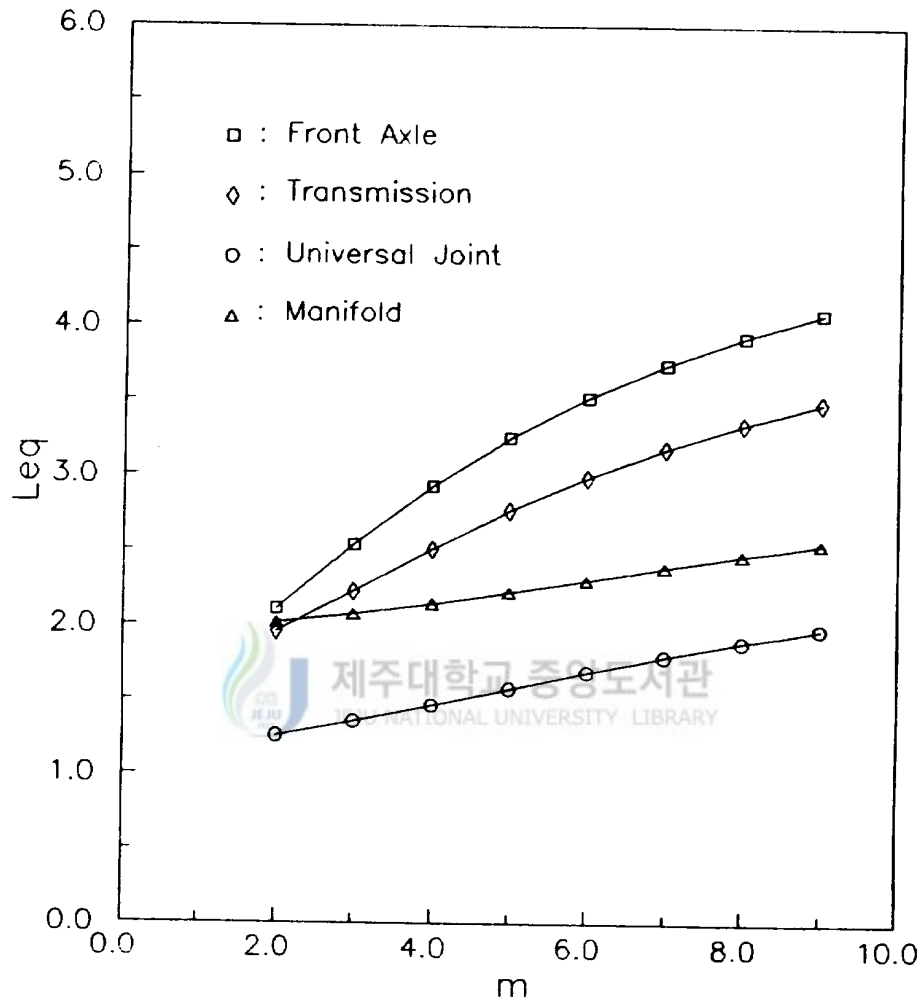


Fig. 15 Relation between Leq and m of service loading waves(Range method)

V. 결 론

랜덤진동하중파형의 발생 및 해석방법의 검토를 목적으로 유사랜덤파형을 컴퓨터에서 시뮬레이션하여 파형계수의 방법과 등가하중진폭의 산정등을 검토하고, 실제 자동차 구동시 큰 하중을 받는 Front axle(FA)부, Transmission(TM)부, Universal joint(UJ)부, Manifold(MF)부에서 검출된 하중파형에 대하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1). 시뮬레이션 랜덤파형의 경우, 주파수 대역폭이 광대역으로 갈수록 하중파형의 진폭과 평균치의 변화가 크게 나타난다. 자동차 구동시의 4개소의 실하중파형은 모두 진폭과 평균치가 변동하지만 변동폭의 크기는 FA부, TM부, UJ부, MF부의 순으로 나타나고, 주파수 대역폭의 경우 0~5Hz의 범위에 나타나며 4Hz부근에서 가장 큰 파워스펙트럼 밀도를 보인다.
- 2). 시뮬레이션 랜덤진동하중파형에서 협대역의 하중진폭은 Range법과 Rainflow법으로 계수한 결과가 유사하나 광대역인 경우 차이가 크다. 자동차 구동시의 4개소의 실하중 파형의 대역폭은 0~5Hz의 비교적 협대역 파형이므로 하중진폭의 계수방법에 따른 차이는 크지 않으며, 큰 하중진폭의 빈도수는 FA부와 TM부, UJ부와 MF부가 유사하다.
- 3). 등가하중 L_{eq} 와 Paris' rule의 지수 m 과의 상관관계를 보면, 시뮬레이션 랜덤진동하중파형에서 m 이 크면 L_{eq} 의 값이 크게되며, m 의 증가에 따른 L_{eq} 의 증가의 폭은 Rainflow법에 의한 L_{eq} 가 Range법에 의한 것 보다 크다. 또

협대역 파형인 경우는 Rainflow법과 Range법의 L_{eq} 는 동일한 m 이면 거의 같으나 광대역 파형의 L_{eq} 는 파형계수방법에 의한 차가 크게 나타난다.

자동차 구동시의 4개소의 실하중 파형의 경우의 등가하중 L_{eq} 는 Rainflow법에 의하면 FA부와 TM부, UJ부와 MF부가 각각 거의 같고, Range법에서는 4개소 모두 차이를 보인다. 하중진폭의 계수결과와 피로파괴에 미치는 하중진폭의 영향을 고려하면 Rainflow법에 의한 L_{eq} 가 유효하다.



VI. 参考文献

- Alawi, H., 1986, A probabilistic model for fatigue crack growth under random loading, *Engineering Fracture Mechanics*, 23(3), 479~487.
- 薄一平, 1988, 航空宇宙機器の疲労損傷評価, *日本材料学会誌*, 37, 813~817.
- Hewitt, R. L., 1987, Some effects of load spectrum representation on crack growth predictions and problems in prediction validation, *Int. J. Fatigue*, 9(3), 157~162
- 張湘偉, 中桐滋, 1989, 不規則路面上を走行する回輪車輛の時刻歴パワースペクトル解析, *日本機械学会論文集(A)*, 53(492), 1706~1712.
- 町田進, 大岡俊之, 渡邊佐千雄, 森田明保, 1983, 實動荷重下の疲労き裂傳播の研究, *日本造船学会論文集*, 154, 396~406.
- 町田進, 吉成仁志, 渡邊佐千雄, 森田明保, 石橋文彦, 1988, 實動荷重下の疲労き裂傳播の研究, *日本造船学会論文集*, 162, 467~473.
- 津田孝夫, 1977, モンテカルロとシミュレーション, *倍風館*, 11~23.
- 駒井謙治郎, 箕島弘二, 金貴植, 1989, 高張力鋼の海洋波浪應力下の腐蝕疲労き裂進展特性, *日本機械学会論文集(A)*, 55(515), 1512~1518.
- 菊川眞, 城野政弘, 三上省二, 1983, 正常變動荷重下の疲労き裂進展とき裂閉開口暴動, *日本材料学会誌*, 31, 483~488.
- 菊川眞, 城野政弘, 近藤良之, 1984, K_{th} レベルをはさむ繰り上げ二段變動荷重下

- の疲労き裂進展, 日本材料學會論文集, 27(302), 1069~1102.
- 菊川眞, 城野政弘, 近藤良之, 1984, 低 K 領域における変動荷重下の疲労き裂進展挙動と進展速度の評価法, 日本機械學會論文集(A), 47(417), 468~482.
- Miner, M. A., 1945, Cumulative damage in fatigue, J. Applied Mech., Trans. ASME, A152~A164.
- Paris, P. C. and Erdogan, F. A., 1963, A critical analysis of crack propagation laws, J. Basic Eng. Trans. ASME, D85, 528~534.
- 八木順吉, 1988, ランダム荷重下の疲労挙動に関する研究, 日本造船學會論文集, 162, 461~466.
- Rychlik, I., 1987, A new definition of the rainflow cycle counting method, Int. J. fatigue, 9(2), 119~121.
- Shinozuka, M. and Jan, C. M., 1972, Digital simulation of random process and its application, J. Sound and Vibration, 25(1), 111~128.
- 송지호, 김종한, 김정업, 1989, 유사랜덤하중파형 작성과 이를 이용한 랜덤하중하의 표면피로균열 진전에 관한 기초적 검토, 대한기계학회논문집, 13, 125~134.
- 송지호, 1990, 변동하중하의 피로파괴, 대한기계학회논문집, 30, 115~130.
- Wirsching, P. H. and Shehata, A. M., 1977, Fatigue under wide band random stresses using the rainflow method, J. Engineering Materials Technology, ASME, 205~211.
- 遠藤達雄, 安在弘幸, 1981, 簡明にされたレインフローアルゴリズム「P/V差法」について, 日本材料學會, 30, 89~93.

謝 辭

本 論 文 을 위 해 誠 心 으 로 指 導 하 여 주 신 金 貴 植 教 授 님 께 感 謝 를 드 리 오 며, 이 論 文 을 校 閱 하 여 주 신 金 萬 守 教 授 님 과 玄 明 澤 教 授 님 그 리 고 恒 常 關 心 을 갖 고 助 言 과 激 勵 를 아 께 지 않 으 신 高 長 權 教 授 님, 權 麒 麟 教 授 님 과 許 鐘 哲 教 授 님 께 도 깊 은 感 謝 를 드 립 니 다.

바쁘신 中 에 도 많 은 도 움 과 激 勵 를 주 신 大 學 院 同 僚 여 러 분 에 게 謝 意 를 表 하 고 物 心 兩 面 으 로 도 와 주 신 누 님 과 兄 님 들, 그 리 고 聘 父 母 와 妻 男 들 에 게 도 感 謝 드 리 며, 作 故 하 신 叔 母 와 큰 누 이 의 靈 前 에 이 작 은 結 實 을 드 립 니 다.

끝 으 로 本 研 究 를 수 행 하 는 데 誠 心 으 로 뒷 바 라 지 를 다 한 아 내 에 게 고 마 움 을 前 하 며, 사 랑 하 는 유 나, 유 리 와 오 늘 이 있 기 까 지 사 랑 과 정 성 을 다 하 여 보 살 펴 주 신 父 母 님 께 깊 은 感 謝 를 드 립 니 다.