

가속시험을 통한 불규칙하중을 받는 실구조물의 피로수명평가

김형익*(성균관대 대학원 기계설계학과), 배봉국, 박재실,
석창성(성균관대 기계공학부), 모진용(삼성전자)

Fatigue Life Evaluation of an Actual Structure under the Irregular Loading using an Acceleration Test

H. I. Kim(Graduate school of SKKU), B. K. Bae, J. S. Park,
C. S. Seok(SKKU), and J. Y. Mo(SEC)

ABSTRACT

A fatigue test was used to evaluate the fatigue life of an actual structure. The loaded state and the constraint condition of an actual structure must be same as the specimen in order to apply the test results to an actual structure by the specimen. The loaded state and constraint conditions can't be same as the specimen in the actual structure which is complicated. In order to reduce these differences, an actual structure test with a lot of frequencies is need to get a fatigue life curve. Therefore, ten sets of accelerated test units which attached unbalanced mass were composed in this study. Acceleration history about the vibration of an actual structure was acquired. Rainflow counting was used on acceleration history, and the life curve return formula was assumed. The return formula that damage satisfied '1' was acquired in a feedback process by the Miner's rule, which was the linear cumulative damage theory. A conservative fatigue life curve was determined with a return formula to have been presumed by each set. The fatigue life of regular rpm condition was calculated by these conservative fatigue life curves.

Key Words : Cycle Counting(사이클 집계), Fatigue Life Evaluation(피로수명평가), Rainflow counting, Miner's Rule, Linear Cumulative Damage Theory(선형 누적손상이론)

1. 서론

실구조물의 피로수명을 평가하기 위해서는 피로 시험에 의한 S-N 선도를 이용하게 된다. 시편에 의한 시험 결과를 실구조물에 적용하기 위해서는 시편과 실구조물이 동일한 하중상태이어야 하며, 시편과 실구조물의 구속조건 또한 동일해야 한다. 하지만, 실구조물에서의 하중상태가 국부적인 곳을 제외하면 시편과 동일하기가 어렵고, 유한요소해석 결과 등에서 알 수 있는 바와 같이 복잡한 실구조물에서는 구속조건이 시편과 같을 수는 없다.

시편과 실구조물의 차이를 줄이기 위해 시편을 사용하지 않고 실구조물을 대상으로 피로 시험을 수행하는 방법이 있다. 그러나 실구조물의 피로시험도 만능시험기에 지그(jig) 등을 설치하여 시편 시험과 동일하게 일정 진폭 하중 상태에서 시험을 수행하고

있다. 일정 진폭 하중 상태에서의 피로 시험 결과를 실제 가동 조건에서의 결과와 비교하기 위해서는 실제 가동 조건에서의 시간에 따른 하중 이력과 비교해야 한다. 실제 가동 조건에서의 하중 이력은 대부분이 불규칙하고 복잡한 형태로 나타나 해석에 어려움이 따른다. 따라서 사이클 집계 방법을 이용하여 하중 대 반복수를 정리하고 일정 하중 상태에서의 실구조물 피로 선도와 누적손상이론을 적용하여 피로수명을 평가하게 된다. 하지만, 이러한 방법은 피로수명 선도를 얻기 위해서 많은 횟수의 실구조물 시험을 필요로 하게 된다.^{1,2,3}

따라서 본 연구에서는 시편의 피로시험 없이 실구조물을 이용한 가속시험으로부터 직접 하중이력 데이터를 획득하고, damage를 계산하여 피로수명선도를 추정하는 방법을 제안하였다.

2. 구조물의 가속 시험

2.1 가속 시험 장치 구성

모터 구동부가 있는 실구조물을 시험대상으로 하였다. 구조물의 중앙부에 모터 구동부가 위치하며, 모터와 연결되어 있는 휠(wheel)에 불평형 인자(unbalance mass)를 부착하였다. 이러한 불평형 인자로 인하여 모터 구동시에는 구조물이 과대한 상하 진동을 하게 된다. 각기 다른 질량을 가진 불평형 인자를 부착하여 총 10세트의 가속 시험을 하였다.

구조물의 중앙부에 가속도계를 부착하여 상하진동에 따른 가속도의 크기를 측정하여 기록하였다.

2.2 가속 시험의 결과

각 세트별 불평형 인자의 크기와 파손 시간을 Table 1에 나타내었다. 파손 시간은 최소 85시간에서 최대 1,400시간으로 나타났다. 불평형 인자의 크기에 따른 파손시간과의 연관성은 나타나지 않았다. 이는 휠에 부착되는 불평형 인자의 크기가 휠에 가해지는 하중의 크기와 비례하지 않기 때문이며, 불평형 인자를 부착한 부분의 반경 크기가 일정하지 않기 때문에 나타난 결과라 생각된다.

1번 세트에서의 0.5초 동안의 가속도 이력 데이터를 Fig. 1에 나타내었다. 짧은 시간임에도 불구하고 많은 고주기 사이클이 복합적으로 생성되었음을 보여준다. 4번 세트의 결과는 파손 시간 측정에 문제가 발생하여 평가 대상에서 제외되었다.

3. 가속 시험 데이터의 사이클 카운팅

3.1 가속 시험 데이터 분석의 가정

Table 1과 Fig. 1과 같이 0.5초 동안에도 많은 고주기 복합 사이클이 존재하는 이력데이터를 1,000시간이 넘는 기간 동안 기록하여 분석하는 것은 많은 어려움이 따른다. 따라서, 본 연구에서는 1초 동안의 가속도 이력데이터가 파손 시간까지 연속적으로 발생한다고 가정하여 데이터를 분석하였다. 또한, 구조물에서의 진동은 상하 방향으로만 발생한다고 가정하였다.

3.2 사이클 카운팅 방법

가변하중이력을 받는 부재의 수명을 예측하기 위하여 복합된 하중이력을 유용한 일정 진폭시험 데이터와 비교할 수 있는 몇 개의 단순화된 하중이력으로 줄이는 것이 필요하다. 복합 하중이력을 몇 개의 일정 진폭과정으로 줄이는 것을 “사이클 집계(Cycle Counting)”라 한다. 불규칙한 하중 이력을 분석하는 방법으로는 rainflow counting, peak counting 등이 ASTM E1049에 제시되어 있다. 이들 방법 중 사이클

Table 1 Results of the accelerated test

Set No.	Unbalance mass(g)	Failure time
1	15	1,351 hr. 30 min.
2	22	421 hr. 20 min.
3	15	231 hr. 40 min.
4	22	Failure
5	10	1,403 hr. 10 min.
6	15	1,340 hr. 40 min.
7	10	1,390 hr. 10 min.
8	10	461 hr. 20 min.
9	22	85 hr. 00 min.
10	10	97 hr. 15 min.

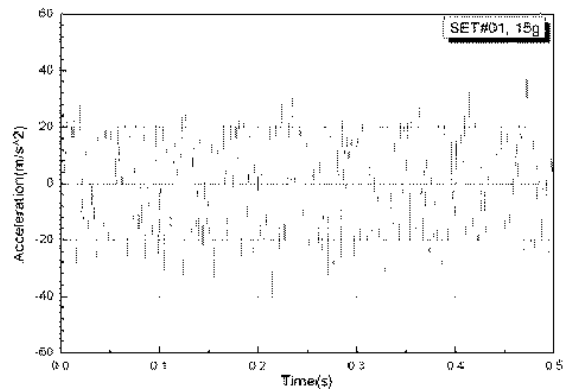


Fig. 1. Acceleration data of set no.1

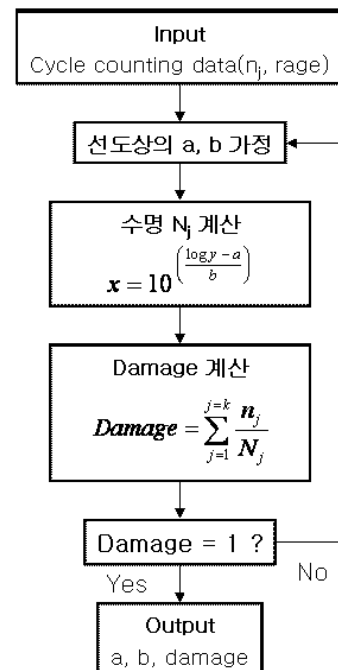


Fig. 2 Analysis algorithm

순서에 따른 연속효과(sequence Effects)를 모사하기 유용한 방법은 rainflow counting 방법이다.^{4,5}

Fig. 1과 같이 짧은 시간에 많은 복합 사이클이 존재하므로, 이를 수작업으로 분석하는 것은 어려움이 따른다. 따라서 공학용 상용 계산 프로그램인 MATLAB을 이용하여 ASTM E1049에 제시된 rainflow counting 방법으로 사이클 카운팅 프로그래밍을 하였다. 프로그램 작성 후 ASTM E1049의 예제를 수행하여 프로그램의 타당성을 검증하였다.

4. Damage 계산 이론과 해석 과정

4.1 Miner's rule

Damage 계산 이론에는 선형 누적손상이론인 Miner's rule을 사용하였다. Miner's rule은 식 (1)과 같이 기계시스템에 작용하는 불규칙 하중에 대한 사이클 카운팅 결과, 각 응력에서의 사이클 반복수와 그때의 피로 수명의 비의 합이 '1'이 될 때 피로 파손이 발생한다고 가정하고 있다.

$$\sum D_j = \sum \frac{n_j}{N_j} \geq 1 \quad \dots\dots (1)$$

4.2 Damage 계산의 가정

Damage를 계산하기 위하여 3가지 가정을 하였다.

1. 가속도계로 측정된 가속도와 하중, 응력 사이의 관계는 선형적이며, 가속도-수명 선도가 성립한다.
2. 가속도-수명 선도상의 회귀식은 로그 좌표상의 직선식 (2)와 같다.

$$y = 10^a \times x^b \quad \dots\dots (2)$$

3. 데이터의 해석에 있어서 수명에 큰 영향이 없는 가속도인 10 m/s^2 이하의 값은 무시한다.

4.3 Damage 해석 과정

Fig. 2에 damage 해석 과정을 나타내었다. 먼저 각 세트의 사이클 카운팅을 수행하여 각각의 가속도 range 정보와 피로파손 수명 사이클을 입력 데이터로 한다. 다음으로 가속도-수명 선도의 파라미터인 'a', 'b'를 가정하여 식 (2)의 회귀식을 추정한다. 추정된 회귀식으로 각각의 가속도 range에 따른 수명을 계산하였다. 계산된 수명으로 damage를 계산하고, 이러한 damage의 합이 '1'을 만족하는지 여부를 판단한다. '1'을 만족하지 않을 경우, 가정된 회귀식이 Miner's rule을 만족하지 하지 않는 것이므로, 피드백과정을 거쳐 damage가 '1'을 만족하는 회귀식의 'a'와 'b'를 추정한다. 이러한 방법으로 각 세트별로 해석을 수행하였다.

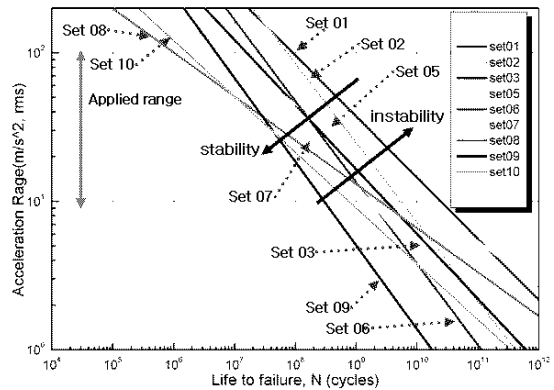


Fig. 3 Acceleration range-life to failure results by damage analysis

Table 2 Results of parameters and damages

Set No.	a	b	damage
01	5.28	-0.412	0.999618
02	6.20	-0.534	0.999535
03	5.14	-0.436	0.999962
04	-	-	Failure
05	4.12	-0.308	0.999866
06	6.06	-0.548	0.999922
07	5.30	-0.466	0.999553
08	3.78	-0.296	1.000150
09	5.78	-0.564	1.000249
10	4.34	-0.376	0.999877

5. Damage 해석 결과

Damage 해석 결과를 Fig. 3과 Table 2에 나타내었다. 전체 세트의 가속도 range를 비교해본 결과, 최대 가속도 range는 약 20 m/s^2 로 나타나 유효한 가속도 range는 약 $10 \sim 20 \text{ m/s}^2$ 인 것으로 나타났다. 각 세트의 결과를 비교해 보면, 최소 수명 대 최대 수명의 비가 약 100배 정도로 나타났다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 각 세트별 실구조물에 포함되어 있는 가공상의 잔류응력과 노치의 생성 등에 의한 것으로 판단된다. 이러한 이유로 넓은 산포를 갖는 밴드 형태의 피로수명 선도를 구하게 되었다.

밴드 형태의 피로수명 선도 중, 특히 동일한 가속도 range에서 저수명에 속하여 보수적인 평가를 할 수 있는 세트 8, 9, 10의 결과로 '보수적 피로수명선도'를 추정하였다. 선도의 추정에는 유효한 가속도

range인 약 $10\sim 20\text{ m/s}^2$ 를 사용하였다. ‘보수적 피로 수명선도’식을 식 (3)에 나타내었다.

$$y = 10^{4.482} \times x^{-0.4068} \quad \dots\dots (3)$$

불평형 인자를 부착하지 않고 모터와 휠만으로 구동할 때, 가속도계에서 획득한 가속도 이력을 사이클 집계하여 Table 3에 나타내었다. 이러한 사이클 집계 결과를 ‘보수적 피로수명선도’식인 식 (3)으로 damage 계산을 하였다. 계산 결과, 단위시간당 damage는 $1.40 \times 10^{-07}/\text{sec}$ 였으며, 예상수명은 약 8.25개월로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 불평형 인자를 부착한 10세트의 가속 시험 장치를 구성하여 실구조물의 상하진동에 대한 가속도 이력을 획득하였다. 가속도 이력을 rainflow counting 방법으로 사이클 집계하고 수명선도 회귀식을 가정하였다. 선형 누적손상이론인 Miner's rule에 의하여 damage가 ‘1’을 만족하는 회귀식을 피드백과정으로 추정하였다. 각 세트별로 추정된 회귀식으로 ‘보수적인 피로수명선도’를 선정하고, 이러한 선도로부터 정상 운전조건에서의 가속도 이력의 단위시간당 damage를 계산하여 피로 수명을 추정하였다.

이러한 연구를 바탕으로 시편이나 구조물의 시험에 의한 S-N선도 없이, 변동하중 시험으로부터 S-N 선도를 추정하여 피로수명을 평가하는 방법을 제안하였다.

후기

이 논문은 2004년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

Table 3 Results of cycle counting for regular rpm test

Acceleration rage	Cycle count
21.10	1.5
20.30	0.3
19.14	0.5
18.83	0.5
18.48	1
17.68	0.5
17.08	1
16.67	1
16.57	2
...	...

참고문헌

1. 강기원, 김정규, 유승원, “블록 하중을 받는 충격 손상 적층 복합재료의 피로수명 예측”, 대한기계학회논문집 A권, 제 25권 제 7호, pp.1089-1096, 2001.
2. Yang, J. N. and Jones, D. L., " Effect of load sequence on the statical Fatigue of Composite," AIAA Journal, Vol. 18, No. 12, pp. 1525-1531, 1980.
3. Guangxu Cheng and Alan Plumtree, "A fatigue damage accumulation model based on continuum damage mechanics and ductility exhaustion," Int. J. Fatigue, Vol. 20, No. 7, pp. 495-501, 1998.
4. Amzallag C, Grrey JP, Robrert JL, and Bahuaud J., "Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis," Int. J. Fatigue, Vol. 16, No. 4, pp. 287-293, 1994.
5. Nagode M. and Fajdiga M., "A general multi-modal probability density function suitable for the rainflow ranges of stationary random processes," Int. J. Fatigue, Vol. 20, No. 3, pp. 211-223, 1998.