

## 점용접 표준시편에 대한 가속내구시험법의 적용

김 관 주<sup>\*1)</sup> · 조 성 산<sup>1)</sup> · 정 진 성<sup>2)</sup>

홍익대학교 기계시스템디자인공학과<sup>\*1)</sup> · 홍익대학교 대학원 기계공학과<sup>2)</sup>

### Application of Accelerated Vibration Testing to Spot-welding Specimen

Kwanju Kim<sup>\*1)</sup> · Sung-San Cho<sup>1)</sup> · Chin-sung Chung<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering and System Design, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

<sup>2)</sup>Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received 7 September 2002 / Accepted 7 March 2003)

**Abstract** : It is advantage of accelerated vibration testing to compress service exposures to operating vibration into a reduced laboratory test by increasing the amplitude or frequency of the applied input excitations. This paper proposes an accelerated test method to estimate the high-cycle fatigue life under random excitation. The method consists of conducting a test with amplified input excitation and extrapolating linearly the life in the accelerated condition into the real life in field condition. The extrapolation is carried out applying the high-cycle irregular excitation fatigue theory including the rainflow counting, Miner's damage accumulation rule, and Goodman's mean stress correction. As a verification, those estimated life is compared with that acquired by experiment for the simple case of spot welding specimen with good agreement. This testing procedure will provide an useful scheme that can reduce testing period associated with developing time schedule of new product.

**Key words** : Accelerated vibration testing(가속내구시험법), Fatigue(피로), Stress amplification(응력 증폭)

#### Nomenclature

$\bar{\sigma}_a$  : stress amplitude modified by average stress value

$D_B$  : fatigue damage by normal testing

$D_{Ba}$  : fatigue damage by accelerated testing

#### 1. 서 론

내구연한이 상대적으로 긴 구조물들, 예를 들어 자동차나 항공기 같은 경우, 장시간 운행하게 되면, 구조물의 진동에 의한 피로가 누적되어서 결함이 발생하게 된다. 이런 피로에 의한 결함을 제품 개발

시 찾아내기 위해서는 관련 기기의 원형을 제작하여 실제 운행 조건에서의 실험을 장시간 수행해야 된다. 그러나, 개발일정에 제품의 사활이 걸린 현대 사회에서는 장시간의 실험 대신 운행실험 기간을 단축시키면서 동시에 원하는 피로 예측을 정확히 예측할 필요가 있다.

가속내구 시험법(accelerated vibration testing)은 실험실내에서 임의로 변경된 운행조건에 의해 단축된 시간 내에 실제 사용기간 및 운행조건에 의한 피로 관련한 결과를 예측하고자 하는 해석분야이다. 변경할 수 있는 운행 조건의 변수는 주파수의 증가, 혹은 변위 크기의 증가, 또한 유효사이클 추출 등을 고려해 볼 수 있다. 각각의 방법에 대한 개요와 장단점을 비교해 보면 다음과 같다. 첫 번째로 가진주파

\*To whom correspondence should be addressed.  
kwanju@hongik.ac.kr

수를 증가시키는 방법은 운행조건하의 제품에 대하여 취약부의 최대 응력이나 변형률을 계산 혹은 측정하여, 그 크기를 변화하지 않고, 가진 주파수만을 증가시켜서 수명을 예측하는 방법이다. 이 방법은 표준 시편에서는 쉽게 적용을 할 수 있지만, 실제 제품에서는 운행조건에 의한 피로 결과와 동일한 결과를 가속내구법으로 구하기 위해서는 고려할 사항이 많아진다. 두 번째로 진동 크기를 증가시키는 방법은 피로 발생 메커니즘을 실제 상황과 동일하게 유지하는 조건하에서 최대 응력이나 변형률의 크기를 증가시켜야 한다. 마지막 방법인 피로손상 편집 방법 (fatigue damage editing method)은 손상발생이 미미한 사이클을 제거하여 단위 시간당 사이클의 개수를 감소하는 방법이다. 관련된 가속내구의 체계적인 설명은 Farrar의 논문<sup>1)</sup>에 상세히 설명되어 있다. Hu<sup>2)</sup>는 랜덤가진을 갖는 구조물에 대한 가속내구방법에 의한 수명을 예측하는 해석을 incomplete Gamma 함수와 일정한 크기의 임의 하중을 적용하여 수행하였다. Liou<sup>3)</sup>는 랜덤가진을 갖는 구조물에 대해서 피로해석의 한 단계인 피로손상 누적 법칙에서 하중의 이력을 고려한 Morrow 식을 적용하여 구조물의 수명예측을 수행하였다. 김효식<sup>4)</sup>등은 자동차 차체구조물에 대해서 동하중 이력, 유한요소법을 이용한 정적 응력해석, 선형 손상이론 등에 의해서 내구 수명 예측 기법을 제안하였다.

본 논문에서는 랜덤가진에서 진동크기를 증가시키는 방식의 시간단축시험법을 제안하였다. 대부분의 기계 구조물은 low-cycle 피로 발생을 배제시키고 설계되므로, high-cycle 피로의 경우를 고려하였다. 점용접 표준시편에 대해 실제 및 시간단축조건에서의 피로수명시험을 수행하여 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

## 2. 시간단축 피로시험법

### 2.1 불규칙 하중 피로수명식

구조물 취약부에 시간에 따라 변화하는 응력  $\sigma(t)$ 가 작용하는 경우를 고려한다. 실제 운행조건에서는 취약부에 결함이 발생될 때까지 작용응력  $\sigma(t)$ 는 불규칙하게 변화한다. 그러나, ergodic stationary한 불

규칙 하중인 경우, 피로내구시험에서는 일반적으로 전형적인 응력변화 양상(이후 응력블록이라고 칭함)이 존재한다고 가정하고 응력블록을 반복적으로 가하면서 시험을 수행한다. 따라서, 한 응력블록의 주기를  $\tau$ 로 표시하면, 작용응력  $\sigma(t)$ 는 주기가  $\tau$ 인 함수, 즉  $\sigma(t) = \sigma(t + \tau)$ 가 된다.

다양한 종류의 응력사이클로 구성된 하나의 응력블록  $\sigma(t)$ 에 의해 발생하는 high-cycle 피로손상은 기존의 피로이론<sup>5)</sup>을 적용하면 다음과 같이 예측할 수 있다.

우선 응력이력  $\sigma(t)$ 를 대상으로 rainflow counting을 수행하여 응력이력  $\sigma(t)$ 를 구성하는 응력사이클을 추출한다. 추출된 각각의 응력사이클에 대해 응력진폭  $\sigma_a$ 와 평균응력  $\sigma_m$ 을 산출한다. 평균응력의 영향이 배제된 S-N 선도(응력비  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = -1$ ,  $\sigma_m = 0$ )를 이용하기 위해 각각의 응력사이클에 대해 평균응력보정을 수행한다. 본 논문에서는 Goodman의 평균응력보정을 이용하였으며, 이 경우 평균응력이 보정된 등가 응력사이클의 응력진폭  $\bar{\sigma}_a$ 는 아래 식으로 주어진다.

$$\bar{\sigma}_a = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{S_u}} \quad (1)$$

여기서,  $S_u$ 는 인장강도이다. 한 응력블록 내에서 응력진폭이  $\bar{\sigma}_a$ 인 사이클이 발생하는 빈도수  $N(\bar{\sigma}_a)$ 를 산출한다.

일정한 응력진폭  $\bar{\sigma}_a$ 가 작용할 때 피로파손을 발생시키는 사이클의 수  $N_f(\bar{\sigma}_a)$ 는 S-N 선도에 의해 식 (2)로 주어진다.

$$N_f(\bar{\sigma}_a) = A \bar{\sigma}_a^B \quad (2)$$

여기서,  $A$ 와  $B$ 는 재료와 평균 응력 값에 따라 변화하는 상수이다. 응력블록은 진폭이 다양한 응력사이클로 구성되어 있으므로 Miner의 피로손상 누적법칙을 적용하면 하나의 응력블록에 의해 발생하는 피로손상  $D_B$ 는 식 (3)으로 주어진다.

$$D_B = \sum_{\sigma_a} \frac{N(\bar{\sigma}_a)}{N_f(\bar{\sigma}_a)} \quad (3)$$

피로한계  $S_e$ 가 존재하는 재료의 경우에는  $\bar{\sigma}_a$ 가  $S_e$ 보다 큰 경우의 응력사이클에 대해서만 식 (3)을 적용한다.

식 (3)에는 응력블록을 구성하는 다양한 진폭의 응력사이클의 발생순서에 따른 피로손상 순차효과(sequence effect)가 고려되어 있지 않다. 즉, 식 (3)에 의해 예상하는 피로손상은 순차효과가 존재하는 실제 상황과는 같을 수도 있고 다를 수도 있다. 순차효과를 고려한 다양한 모델들이 개발되었으나,<sup>5)</sup> 적용이 비교적 복잡하며 또한 모델의 신뢰성에 대한 일치된 결론이 없는 상태이다. 따라서 본 논문에서는 순차효과를 고려한 상수  $K$ 를 식 (3)에 도입하여 식 (4)와 같이 수정한다.

$$D_B = K \sum_{\sigma_a} \frac{N(\bar{\sigma}_a)}{N(\sigma_a)} \quad (4)$$

상수  $K$ 는 단순히 순차효과가 있을 때와 없을 때의 차이를 비로 표시한 상수이다. 상수  $K$ 를 알면 블록손상을 예측할 수 있고, 따라서 피로수명도 예측할 수 있다. 그러나, 상수  $K$ 의 이론적 평가가 쉽지 않다.

## 2.2 시간단축피로시험법

이론적으로 피로수명을 정확하게 예측할 수 있다면 피로수명시험은 불필요하다. 그러나, 모든 상황을 고려한 정확한 예측은 현실적으로 불가능하므로 실험과 이론적 해석을 혼합하여 빠르게 수명을 평가하는 방법을 제안한다. 본 논문에서는 하중크기의 증폭방식, 즉 구조물 취약부에 작용하는 실제 하중보다 큰 하중조건에서 수행된 피로수명 실험결과를 토대로 실제 하중조건에서의 피로수명을 평가하는 시간단축 피로시험법을 제안한다.

High-cycle 피로의 경우, 작용응력의 진폭과 평균값이 증가하면 피로손상이 증가하여 수명이 단축된다. 따라서, 응력은 식 (5)와 같이 선형적으로 증폭시킨다.

$$S(t) = a\sigma(t) + b \quad (5)$$

여기서  $a$ 는 작용응력의 진폭증가비율,  $b$ 는 평균응력 상승량을 나타낸다. 응력증폭시 피로 메커니즘의 변화를 방지하기 위해 증폭된 응력의 최대 값

은 재료의 항복응력보다 낮아야 한다.

증폭된 응력  $S(t)$ 에 대해 2.1절에서 기술한 것과 동일한 과정으로 증폭된 응력블록에 의한 피로손상을 평가한다. 즉, rainflow counting을 통해 응력진폭  $S_a$ 와 평균응력  $S_m$ 을 산출한다. Goodman 평균응력 보정을 이용하여, 보정된 응력진폭  $\bar{S}_a$ 와 응력진폭별 사이클의 빈도수  $N(\bar{S}_a)$ 를 추출한다. S-N 선도와 Miner의 법칙을 적용하고, 순차효과를 감안한 비례상수를 도입하여 가속조건에서의 블록손상  $D_{B,a}$ 를 구한다.

$$D_{B,a} = K^* \sum_{S_a} \frac{N(\bar{S}_a)}{N(\bar{S}_a)} \quad (6)$$

응력 증폭시 사이클의 순차를 변화시키지 않더라도 응력진폭 및 평균값이 변화한다면 순차효과를 고려하는 비례상수가 변화할 수 있다. 따라서, 식 (6)에서는 비례상수를  $K^*$ 로 표시하였다.

일반적으로 식 (4)와 식 (6)에 도입된 순차효과 비례상수  $K$ 와  $K^*$ 는 다를 것이다. 그러나, 응력증폭과정에서 사이클의 순차를 유지하고 피로손상 메커니즘을 그대로 유지한다면 순차효과 비례상수의 변화는 미미할 것으로 예상되므로, 본 연구에서는  $K = K^*$ 로 가정한다. (이 가정의 합당성은 3절의 실험결과에서 확인한다.) 그러면, 증폭 전후의 블록손상의 비,  $D_{B,a}/D_B$ 에는 순차효과 비례상수가 포함되지 않는다. 즉,

$$\frac{D_{B,a}}{D_B} = \frac{\sum_{S_a} N(\bar{S}_a) / N(\bar{S}_a)}{\sum_{\sigma_a} N(\sigma_a) / N(\sigma_a)} \quad (7)$$

한편, 수명  $T$ 와 블록손상  $D_B$ 의 곱은 일정하므로, 식 (8)의 관계를 얻을 수 있다.

$$T = \frac{D_{B,a}}{D_B} T_a \quad (8)$$

여기서,  $T$ 와  $T_a$ 는 각각 실지 응력조건과 증폭 응력조건에서의 피로수명을 나타낸다. 따라서, 증폭된 응력으로 시간단축 피로시험을 수행해서 얻은 수명  $T_a$ 와 이론식에서 얻은 응력증폭 전후의 블록손상비  $D_{B,a}/D_B$ 를 식 (8)에 대입하면 실지상태에서의 피로수명  $T$ 를 평가할 수 있다.

### 3. 검증실험

#### 3.1 실험시편

두께 1.2mm인 SPCC 판재를 겹치기 방식으로 점 용접한 시편에 대해 검증실험을 수행하였다. Fig. 1 은 시편의 개략도와 주요 재원을 보여준다. Table 1 은 피용접물의 기계적 성질, Table 2는 용접조건, 그리고, Table 3은 용접부 크기와 강도를 보여준다.

다양한 전단하중에 대해 피로시험을 수행하여 점 용접부의 S-N 선도를 얻었다. 시편의 특성상 압축전 단하중을 가할 수 없기 때문에 하중비  $R=0$ 의 조건에서 최대하중을 변화시키면서 일정 진폭 피로실험을 수행하였다. 즉, 하중의 진폭과 평균값 모두 변화하는 상황에서 실험이 수행되었으므로, Goodman 방식으로 평균응력을 보정하여  $R=-1$  경우에 대한 S-N 선도를 얻었다.

자료를 분석한 결과, 점용접부의 수직하중진폭과 피로수명의 관계식은

$$N_f(S_a) = 2.2029 \times 10^{18} \times S_a^{-3.736} \quad (9)$$

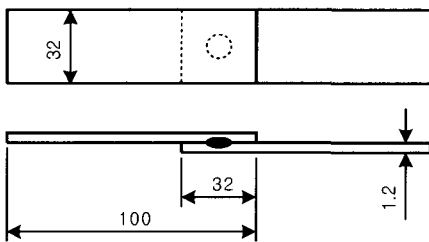


Fig. 1 Spot-welded specimen

Table 1 Mechanical properties of base metal

$S_u$ (MPa)	$S_y$ (MPa)	$E$ (GPa)
374.7	222.1	209

Table 2 Spot welded conditions

Electrode (mm)	C 6
Welding force (kg)	300
Welding current (kVA)	14
Welding time (cycle)	15
Holding time (cycle)	10

Table 3 Size and strength of joint

Nugget size (mm)	4.7
Static shear strength (kN/spot)	8.3

으로 주어지며, 피로한계  $S_e$ 는 약 2100N 으로 평가되었다.

#### 3.2 시간단축 피로시험

식 (8)에 근거한 시간단축 피로시험법을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 불규칙하게 변화하는 하중에 의한 피로수명을 평가하기 위해 Fig. 2에 제시된 한 블록의 하중 파형을 반복적으로 가하는 방식을 채택하였다. Fig. 2에 제시된 10초 동안에 최소 0, 최대 3 kN의 범위에서 변화하는 응력 파형을 실지조건으로 간주하고, 시간단축 시험에 사용될 하중 파형은 식 (5)와 같이 선형적으로 증폭하여 사용하였다. 실험에 사용된 4가지 블록하중의 범위를 Table 4에 정리하였다. 실지조건에 해당되는 실험조건 RT는 블록 당 피로손상이 가장 적은 경우이며, 가속조건 AT1, AT2, AT3 순서로 블록 당 피로손상이 증가한다. 실험은 Instron 8511에서 시편이 완전 파단될 때 까지 수행되었다.

피로시험 결과는 Table 5에 정리하였다. 본 시험에서 조건 RT는 실지조건으로 간주되므로 시험을 3회 수행하였으며, 나머지 조건은 각각 2회 수행하였다. 조건 RT의 첫 번째 시험결과와 나머지 2회의 시험결과와 비교적 큰 차이를 나타내며, 조건 AT2에서 수행된 2회의 시험결과도 비교적 큰 차이를 나타낸다.

Table 5에 주어진 가속시험결과와 식 (8)을 이용

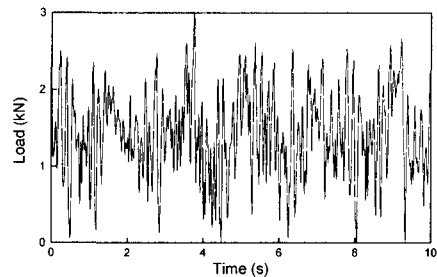


Fig. 2 A block of random load history

Table 4 Fatigue test conditions

Test condition	Load range (kN)
RT	0.0 - 3.0
AT1	1.5 - 4.5
AT2	0.0 - 4.5
AT3	0.0 - 5.0

Table 5 Test results

Test No.	No. of blocks to failure			
	RT	AT1	AT2	AT3
1	15981	5173	1757	931
2	19582	5825	2789	1173
3	20553			
Mean	18705	5499	2273	1052

Table 6 Life prediction based on accelerated tests

Test No.	No of blocks to failure			
	Real (RT)	Prediction		
		AT1	AT2	AT3
1	15981	17430	17299	16236
2	19582	19627	27460	20456
3	20553			
Mean	18705	18529	22379	18346

하여 조건 RT에서의 피로수명을 예측한 결과를 Table 6에 정리하였다. 예측수명 중에서 조건 AT2의 2번째 시험결과에 근거한 예측수명을 제외한다면 모든 예측결과가 조건 RT에서 수행된 시험결과의 범위에 포함된다. 즉, 가속조건에서 수행된 시험결과로 실지조건에서의 수명을 비교적 높은 신뢰성으로 예측할 수 있음을 알 수 있다. 현 실험자료로는 아직 불충분하지만, 가속조건에서의 실험결과의 통계적 분포로부터 실지조건에서의 수명의 통계적 분포의 평가도 가능할 수도 있다는 추정을 하게 된다.

#### 4. 결론

불규칙 가진시 진동크기를 증가시키는 방식의 시간단축 피로시험법을 제안하였다. 이 방법의 합리성을 검증하기 위해 불규칙 하중이 작용하는 점용

접 표준시편에 적용하여 시험을 수행하였다.

가속시험 결과를 근간으로 실지조건에서의 수명의 평균값을 비교적 정확하게 평가할 수 있음을 확인하였다. 또한, 가속시험결과로 실지 피로수명의 통계적 분포도 평가할 수 있는 가능성이 있음을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구의 지원으로 수행하였습니다. 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### References

- 1) C. Farrar, T. Duffey, P. Cornwell, M. Bement, "A Review of Methods for Developing Accelerated Testing Criteria," Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference, Kissimmee, FL, ASCE, pp.8-11, Feb. 1998.
- 2) J. Hu, "Life Prediction and Damage Acceleration Based on the Power Spectral Density of Random Vibration," Journal of the IES, pp.34-40, January/February, 1995.
- 3) H. Liou, W. Wu, C. Shin, "A Modified Model for the Estimation of Fatigue Life Derived from Random Vibration Theory," Probabilistic Engineering Mechanics, Vol.14, pp.281-288, 1999.
- 4) H. Kim, H. Yim, C. Kim, "Computational Durability Prediction of Body Structures in Prototype Vehicles," IJAT, Vol.3, No.4, pp.129-135, 2002.
- 5) H. Fuchs, R. Stephens, Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons, pp.56-104, pp.188-216, 1980.