

가속 내구 시험을 위한 등가하중 설정과 피로수명 예측을 위한 프로그램 개발

Program Development for the Determination of Equivalent Load for Accelerated Fatigue Testing and the Estimation of Fatigue Life

이 강 용¹, 박 병 화², 이 득 용³

Kang Yong Lee, Byung Hwa Park, Deuk Yong Lee

Keywords : *Damage analysis(손상분석), Accelerated fatigue test(가속 내구 시험),
Equivalent load(등가 하중), Fatigue life(피로 수명), Age degradation(경년열화),
GUI program(GUI 프로그램)*

Abstract

The computer program for the accelerated life testing technique of a machine part under the service conditions is developed under the GUI environment so that the user can easily obtain the results by selecting the program module. Also, the theoretical backgrounds for the computer program and the procedures of the accelerated testing method are introduced by testing the specimens made of the stainless steel 316L under the high temperature and random loading. The reliability of the program is discussed by the experimental results of the fatigue life, age degradation and accelerated testing conditions.

1. 서 론

피로수명 산정을 위한 가속내구시험법은 모든 기계 산업 및 전기전자산업에도 적용되는 기술이기 때문에 굳이 철도산업의 적용[1]을 강조할 필요는 없겠다. 이 가속내구 시험법은 그 연구역사는 길지만 기존의 피로공학이라는 학문을 이용한 응용기법이기 때문에 학술논문으로 발표된 것은 찾아보기 어렵다. 그러나 연구결과들이 보고서나 또는 현장 위주 기술지, 예를 들어서 Wire Industry, Advanced Materials & Processes, Application of Wire Rope Endurance Research, Steel Times, Circuit World, Progress in Technology 등에 게재되거나 회사의 이익과 관련있기 때문에 아예 비공개 자료로 분류하여 그 기술을 습득

하는데 여러 가지 어려움이 있다. 특히 전기전자부품의 가속내구 시험에 관한 자료[2-5]는 비교적 많으나 기계부품의 가속내구 시험에 관한 자료[6-8]는 찾아보기 어렵다.

비록 적지만 있는 자료마저도 전문 학술논문이 아니기 때문에 그 내용의 상세성이나 논리성이 결여되어 있을 뿐 아니라 피로공학이 실험위주의 재래 기술이고 정착된 기술이므로 논문에서 어떤 창의성을 발견하기는 어렵다.

본 연구의 목표는 피로수명과 경년열화정도를 예측할 뿐 아니라 가속등가 내구 시험 조건을 설정할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하는 것이 1차적인 목표이고 이 개발한 프로그램의 error 검증을 수작업의 결과와 프로그램계산 결과를 비교하므로 검증하는 것이 2차 목표이며 실험과의 비교를 통해 프로그램 이론을 점검하는 것이 3차 목표이다.

¹ 정회원 : 연세대학교 기계공학부, 정교수

² 비회원 : 연세대학교 대학원 기계공학과, 석사과정

³ 비회원 : 대림대학교 재료정보공학과, 부교수

2. 이론적 배경

2.1 빗방울 사이클 횟수 계산 (rainflow cycle counting)

빗방울 사이클 횟수 계산(rainflow cycle counting)은 피로 하중의 분석에 있어 가장 널리 사용되고 있으며, ASTM[9]에서 기본적인 방법이 제시되고 있다.

이 기법은 변동 피로 하중을 유한한 수의 일정 피로 하중으로 분류하는 방법으로, 즉 일정한 진폭(amplitude)과 평균(mean)을 갖는 하중의 사이클(cycle)을 결정하기 때문에 평균 하중의 영향을 고려할 수 있다는 것이 중요한 장점이 된다.

최근에는 빗방울 사이클 횟수 계산(rainflow cycle counting) 결과를 Markov matrix (or transitional-matrix) 형태로 표현하여 3차원적인 분석을 용이하게 하는 from-to histogram 기법이 많이 적용되고 있다.

2.2 선형 누적 손상 이론

누적 손상 이론 가운데 가장 대표적인 방법으로는 Miner 법칙[10]이 있다. 이 방법은 하중 진폭의 크기에 관계없이 손상에 미치는 영향이 같다는 선형적인 이론으로, 변동 하중을 받는 기계 요소가 일정 하중 S_1 을 n_1 사이클, S_2 를 n_2 사이클 등과 같이 받을 때, 식 (1)과 같이 누적 손상(D)을 계산한다.

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} \quad (1)$$

여기서, n_i 는 응력 진폭 S_i 가 가해진 사이클 횟수이고 N_i 는 S_i 하에서의 수명이다.

일반적으로 $D = 1$ 인 경우에 파손이 됨을 의미한다.

2.3 노치의 영향을 고려한 수정 S-N 선도

실제의 구조물이나 부품에서와 같이 노치가 있는 경우에는 노치를 고려한 S-N 선도가 필요하며, 노치 계수(notch factor) K_f 를 이용하여 결정한다[10].

노치 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$K_f = \frac{S_e}{S_e^{(notched)}} \quad (2)$$

여기서 S_e 와 $S_e^{(notched)}$ 는 각각 노치를 고려 안한 경우와 고려한 경우의 피로 한도이다. 한편 10^3 사이클에 해당하는 수명을 주는 평활시험편의 응력진폭 S_{1000} 과 노치재의 응력진폭 $S_{1000}^{(notched)}$ 의 비인 피로노치 계수 K_f' 는 다음과 같이 정의된다.

$$K_f' = \frac{S_{1000}}{S_{1000}^{(notched)}} \quad (3)$$

Fig. 1은 일반 구조용 철강 재료의 경우로서, 고주기 영역에서 노치의 피로 수명 약화 효과를 고려하는 방법을 나타낸 수정 S-N선도이다.

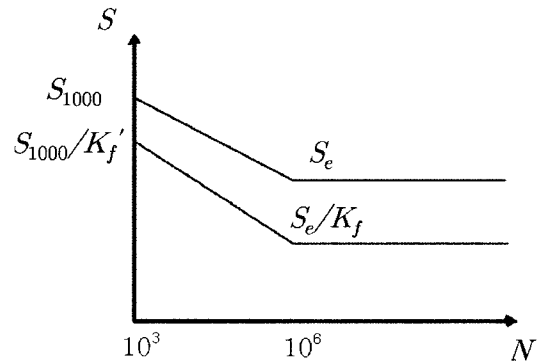


Fig. 1 Estimation of modified S-N curve

3. 분석 프로그램

3.1 개발 프로그램의 구성

프로그램의 사용 환경은 일반적인 PC에서 사용할 수 있도록 MS사의 32비트 윈도우즈(Windows 95, 98, NT, 2000)로 하였으며, 개발 환경은 C언어와 Win32API로 하였다.

개발 프로그램의 구성은 Table 1과 같다.

Table 1 Program module

module name	content
rainflow counting	rainflow cycle counting
matrix view	visualization of rainflow matrix in 2D color graph
damage analysis	accumulated damage calculation

3.2 프로그램의 실행 예

본 프로그램은 사용자가 필요한 기능과 내용을 입력 또는 선택 가능하도록 GUI (Graphic User Interface) 환경으로 구성되어 있다.

Figs 2~5는 실제 피로 실험에 사용할 임의의 변동 하중에 대한 빗방울 사이클 횟수계산(rainflow cycle counting)의 결과 그래프(Fig. 2), 시편의 물성치 입력 화면(Fig. 3) 및 316L 강종에 대한 물성치 데이터(Fig. 4) 및 손상 해석 결과(Fig. 5)를 얻기 위한 프로그램의 실행 예를 보여준다.

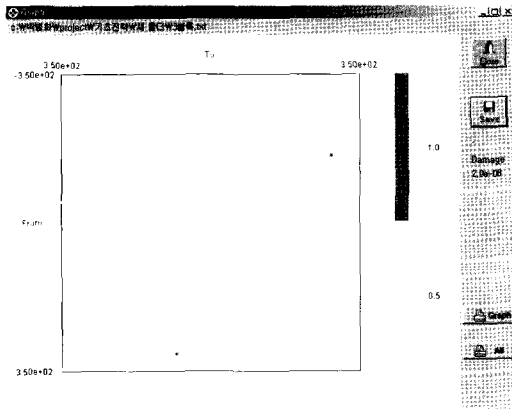


Fig. 2 Graph window of matrix view

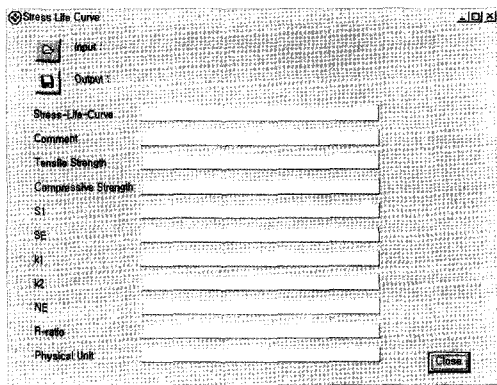


Fig. 3 Initial window of S-N curve edit

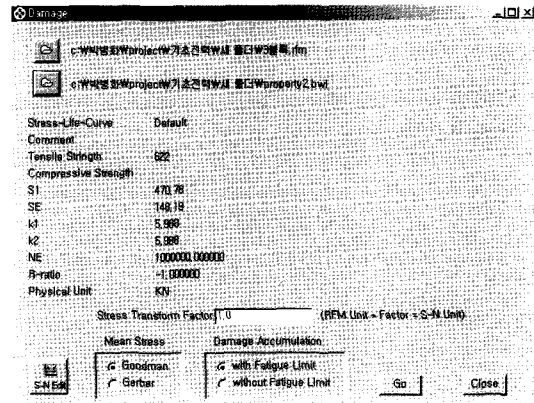


Fig. 4 Window of damage analysis



Fig. 5 Result of damage analysis

3.3 프로그램의 검증

3.3.1 시편 및 시험기기

재료는 스테인레스강 316L 강종이다. 그 화학적 성분은 다음과 같다.

Table 2 Chemical compositions of the stainless steel 316L

chemical composition (%)									
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
0.012	0.51	1.47	0.0291	0.0240	10.52	16.63	2.050	0.43	0.0114

인장시험편은 ASTM[9]의 규격을 따랐다.

피로 실험에서는 Fig. 6과 같이 인장 실험에서 사용한 시험편의 중앙에 60° V형 notch를 낸 시험편을 사용하였으며 그 치수는 t=1 (mm), ρ=0.09 (mm), D=6 (mm), d=4 (mm)이다.

프로그램을 검증하기 위한 실험에 사용되는 기기는 Instron사의 8516모델의 UTM(10 ton)과 SFL의 SF868D 모델의 고온챔버(1,000℃)를 이용하였다.

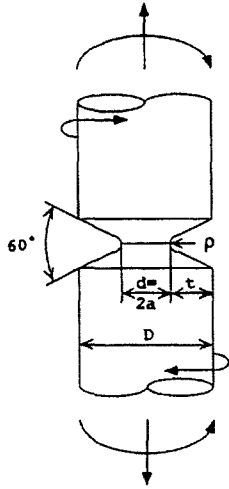


Fig. 6 Notch specimen

3.3.2 notch 해석

notch 민감계수 q 를 다음과 같은 실험식으로 표현할 수 있다[10].

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + a_p / \rho} \quad (4)$$

여기서 ρ 는 notch 저부의 반경이며, a_p 는 재료상수로서 철금속에서 다음과 같은 실험식이 성립한다.

$$a_p = \left[\frac{300}{S_u(\text{ksi})} \right]^{1.8} \times 10^{-3} \text{ (in)} \quad (5)$$

Fig. 7의 300°C에서 인장시험 결과로부터 인장강도 $S_u = 622.47 \text{ (MPa)} = 90.34 \text{ (ksi)}$ 를 얻는다.

Noda 등[11]의 연구결과에 의하면 피로 시험편의 K_t 는 4.78이다.

따라서 식(4)와 식(5)로부터 $K_f = 2.1$ 이 된다. 여기서 $S_e = 0.5 S_u (S_u \leq 200 \text{ ksi})$ 의 실험 관계식을 이용하여 $S_e = 311.24 \text{ MPa}$ 을 얻는다. 따라서 $S_e^{(notched)}$ 는 식(2)에 의해 148.19 MPa을 얻는다. 그리고 $S_{1000} = 0.9 S_u$ 의 실험관계식과 식(3)과 K_f', K_f 와 S_u 사이의 관계 그래프[10]에 의해 $S_{1000}^{(notched)} = 470.78 \text{ MPa}$ 을 얻는다. 이렇게 하여 Fig. 8

의 수정 S-N 선도를 얻는다.

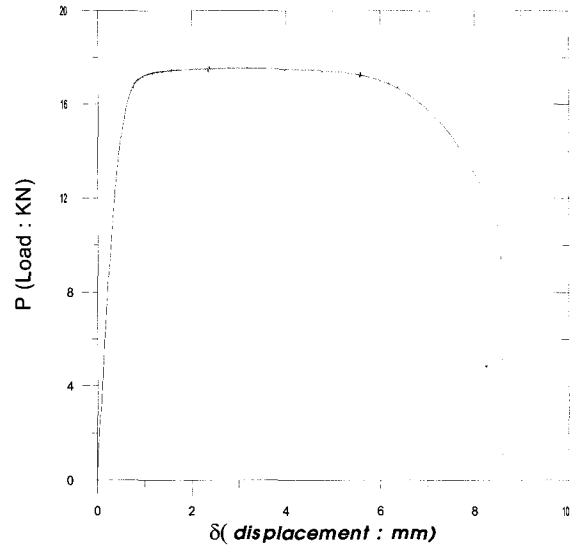


Fig. 7 Result of tensile experiment at 300°C

3.3.3 프로그램 구동 및 검증

프로그램 검증을 위해 이론적인 수명과 피로손실을 수작업으로 얻기 위한 필요한 수식들은 다음과 같다. 수정 S-N 선도를 다음의 식 (6)~(8)로 표시할 수 있다. Fig. 8의 경우 $b = -0.1673, c = 3.176$ 이다.

한편 임의의 수명에서 만족하는 Goodman식[10]은 다음 식(9)와 같다.

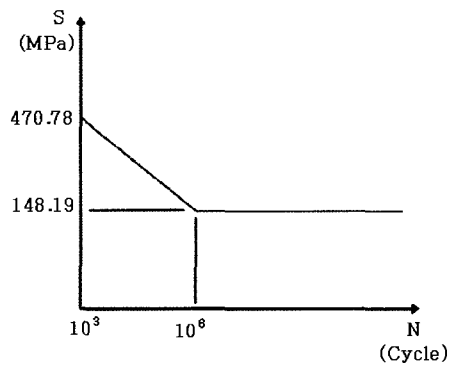


Fig. 8 Modified S-N curve

$$S = 10^c N^b \quad (6)$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \frac{S_{1000}^{(notched)}}{S_e^{(notched)}} \quad (7)$$

$$c = \log \frac{(S_{1000}^{(notched)})^2}{S_e^{(notched)}} \quad (8)$$

$$\frac{\sigma_a}{S} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad (9)$$

식 (9)를 S에 대해 정리하고 그 결과를 식(6)에 대입한 후 N에 대해 풀면 식(10)을 얻는다.

$$N = \left\{ \frac{10^{3.175} \times (S_u - \sigma_m)}{S_u \times \sigma_a} \right\}^{\frac{1}{0.1673}} \quad (10)$$

이러한 σ_a, σ_m 이 1사이클 주어질때 주는 피로손실은 식(1)에 의해 $D=N^{-1}$ 이 된다.

Fig. 9는 실험1의 변동하중의 1블록이다. 이 하중을 빗방울 사이클 횟수 계산(rainflow cycle counting)을 하게 되면 Table 3과 같은 3가지 단순반복하중으로 분할된다. 이 각각의 단순반복하중으로 인한 피로손실은 식(10)에 의해 Table 3과 같이 얻어진다.

Fig. 2는 Fig 9에 대한 빗방울 사이클 횟수 계산(rainflow cycle counting)의 프로그램 결과이다.

Fig. 4와 Fig. 5는 피로손실 프로그램의 결과로써 $D=2.14 \times 10^4$ 을 주고 있으며 이는 수작업에 의한 Table 3의 2.09×10^4 과 근사하다.

실제 300℃ 환경하에서 Fig. 9의 하중으로 실험한 결과는 다음과 같다.

1회 실험 : 각각의 단순반복하중을 4800회씩 모두 완료한 후 2회째에 3번째 단순반복하중의 2cycle에서 깨짐

2회 실험 : 3번째 단순반복하중의 2894 cycle에서 깨짐

이 결과를 통해 프로그램으로 구하여진 결과와 실험결과는 매우 유사한 cycle 수에서 피로파괴 결과가 일어남을 알 수 있다.

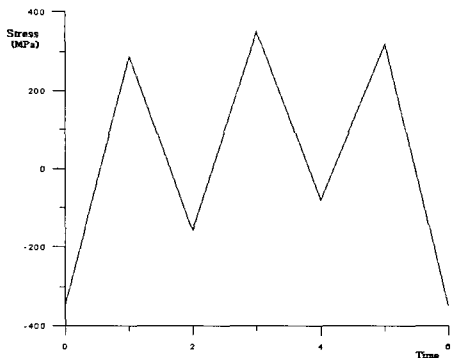


Fig. 9 Random load of experiment 1

Table 3 Result of hand calculation for the loading of experiment 1

constant fatigue stress(MPa)	σ_m (MPa)	σ_a (MPa)	damage/cycle
-159~286	63.5	222.5	2.13×10^{-5}
-350~350	0	350	16.71×10^{-5}
-79~318	119.5	198.5	2.03×10^{-5}
total damage/cycle			2.09×10^{-4}
estimated fatigue life (cycle)			4800

Fig. 10은 실험 2의 random 하중의 1블록을 보여주고 있다. 그리고 Table 4는 실험2의 하중에 대해 수작업한 계산결과이다.

Fig. 11, 12는 프로그램에 의한 결과로서 수작업 결과(Table 4)와 근사하다. 특히 Fig. 11 (b)의 결과는 전체 손상에 영향을 주지 않는 작은 단순반복하중을 필터링을 통해 삭제한 결과로써 Table 4에서 손상이 0이 되는 3개의 단순반복하중이 삭제되었음을 알 수 있다. 이를 통하여 프로그램의 filtering 기능이 정상적으로 수행되고 있음이 입증된다.

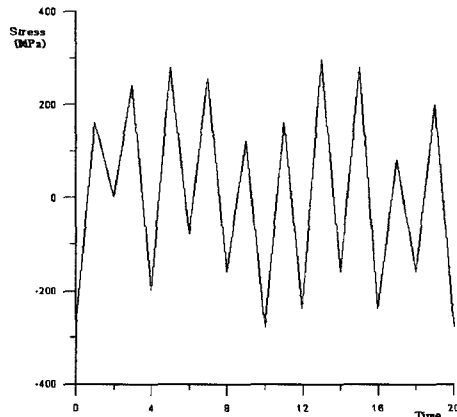


Fig. 10 Random load of experiment 2

Table 4 Result of hand calculation for the loading of experiment 2

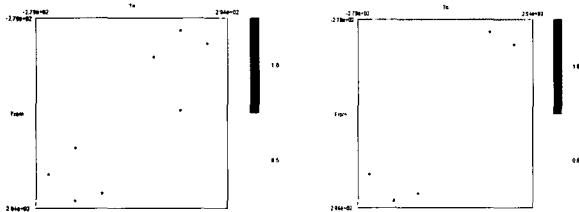
constant fatigue stress(MPa)	σ_m (MPa)	σ_a (MPa)	damage/cycle
-159~79	-40	119	0
0~159	79.5	79.5	0
-239~159	-40	199	0.399×10^{-5}
-159~119	-20	139	0
-279~279	0	279	4.322×10^{-5}
-199~239	20	219	1.242×10^{-5}
-159~279	60	219	1.868×10^{-5}
-239~199	-20	219	0.847×10^{-5}
-79~255	88	167	0.505×10^{-5}
-279~294	7.5	286.5	5.524×10^{-5}
total damage/cycle			14.707×10^{-5}
estimated fatigue life (cycle)			6799

프로그램의 계산결과 각각의 단순반복하중에 6756회씩의 피로하중을 줄 경우 파괴가 되는 결과를 얻었다. 단순반복하중은 피로수명 cycle의 0.1배에 해당하는 676회씩의 피로하중을 반복적으로 가하는 방법을 선택하여 2회의 반복적인 실험을 수행하였다. 여기서 수명의 0.1배에 해당하는 cycle을 각각의 단순반복하중에 모두 가하여 주었을 때를 1 sequence로 정의할 때 그 결과는 다음과 같다.

1회 실험 : 11번째 sequence에서 10번째 단순반복하중의 343 cycle에서 깨짐

2회 실험 : 13번째 sequence에서 10번째의 단순반복하중의 318 cycle에서 깨짐

이 결과로 각각의 실험에서 프로그램으로 구하여진 결과와 10%, 30%의 오차를 보인다고 평가할 수 있다.



(a) without filtering (b) with filtering
Fig. 11 Graph window of matrix view

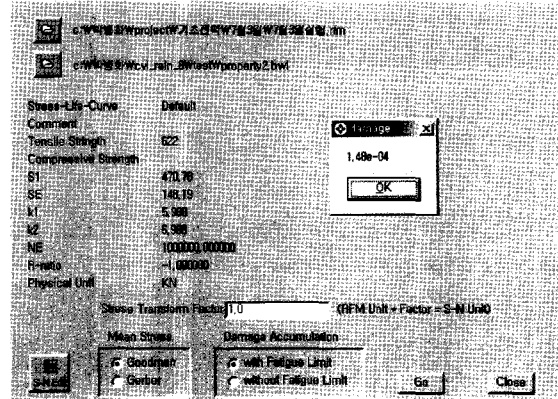


Fig. 12 Result of damage analysis

4. 경년 열화와 가속내구시험 조건설정

4.1 경년열화

경년열화가 일어나면 먼저 재료의 물성이 저하되기 때문에 경년열화를 묘사하기 위하여 시험을 인장강도가 높은 상온시험 결과를 인장강도가 낮은 고온 시험결과와 비교하여 경년열화의 정도를 알아보도록 한다. 일반적으로 스테인레스 316L강의 경우 고온에서 인장강도가 떨어지므로 피로수명 역시 고온에서 짧아질 것이라 예상된다. 그러므로 개발된 프로그램을 이용하여 상온과 실제 작업환경이 되는 고온에서의 인장강도와 S-N 선도를 가지고 프로그램으로 예상 수명을 구하여 경년열화의 정도를 파악할 수 있다. 시험편의 상온 인장강도는 $S_u = 734.34 \text{ (MPa)} = 106.58 \text{ ksi}$ 로 측정되었으며 앞과 동일한 방법으로 낮치 시험편의 수정된 S-N선도를 구하면 Fig. 13과 같다.

상온에서 수정된 S-N선도와 실험2에서 사용되었던 변동하중 블록을 이용하여 프로그램을 이용하여 구한 손상값은 $D = 1.05 \times 10^{-4}$ 이다. 이 결과는 실험2의 고온에서 구하여진 손상값 $D = 1.48 \times 10^{-4}$ 와 비교하여 41% 감소한 값이다. 따라서 상온에서 피로수명은 고온하에서 보다 41%가량 증가할 것이라 예상된다. 실제 실험 결과는 다음과 같다.

1회 실험 : 14번째 sequence에서 9번째 단순반복하중의 10 cycle에서 깨짐

2회 실험 : 16번째 sequence에서 5번째의 단순반복하중의 232 cycle에서 깨짐

위의 실험결과는 프로그램의 예상결과와 근사하며

전체적으로 상온에서 수명이 고온에서의 수명보다 길게 나왔음을 알 수 있다. 이 결과를 통하여 경년 열화도 프로그램을 통하여 예측 가능할 수 있다.

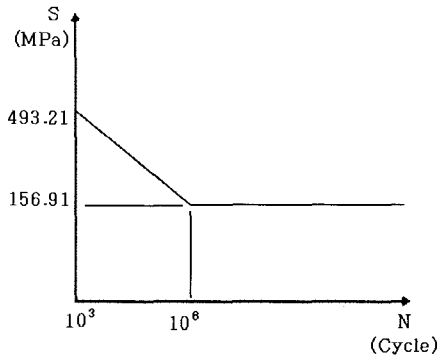


Fig. 13 Modified S-N curve

4.2 가속내구 실험조건의 설정

본 연구에서 개발된 프로그램을 이용하면 연구실에서 손쉽게 기존의 하중보다 큰 값의 하중조건을 생성하여 가속내구 실험조건을 생성할 수 있다. 이번 실험에서는 가속내구 실험의 결과를 원래 실험과 손쉽게 비교하기 위하여 실험2의 손상값과 같은 등가의 하중을 이용하여 3개의 단순반복하중으로 나누어지는 가속내구 실험조건을 설정하였다. 설정한 실험조건은 Table 5와 같다.

손상값은 가속내구시험을 위해 고온실험2와 등가의 값을 갖도록 설정하였으므로 $D=1.48 \times 10^{-4}$ 을 가지며 각각의 단순반복하중에 전체 피로수명의 10%인 676 cycle씩을 가하도록 하는 똑같은 실험방법을 취하였으므로 실험시간은 전보다 30%수준으로 떨어진다. 상온 실험결과는 13번째 sequence의 3번째 단순반복하중의 260cycle에서 파단되었으므로 Table 5의 피로하중은 등가의 가속내구 하중이라 하겠다. 이 결과는 고온실험2에서 가지고 있던 오차와 근사한 실험결과이다.

Table 5 30% level accelerated testing condition of experiment 2

constant fatigue stress(MPa)	σ_m (MPa)	σ_a (MPa)
-262 ~ 262	0	262
-302 ~ 318	8	310
-167 ~ 294	63.5	230.5

5. 결론

본 논문에서는 가속 등가 시험에 대한 기본적인 내용과 과정을 설명하였고 이를 응용 개발한 프로그램에 관하여 소개하였다. 프로그램은 GUI 환경을 채택하였으며, 각 단계별로 필요한 이론을 선택하여 적용할 수 있도록 하여 변동 피로 하중을 받는 모든 형태의 기계 요소에 적용 가능하도록 구성하였다. 또한 가상 피로하중에 대해 수작업 결과와 프로그램의 결과를 비교하므로써 프로그램의 error를 검증하였다. 뿐만 아니라 스테인레스강 316L 재료를 실제 고온 환경하의 변동 피로하중을 주었을 때 피로수명과 프로그램에 의한 예측피로수명과 비교하여 근사한 결과를 얻었다. 그리고 재료의 물성차이가 있고 상온실험과 고온실험을 수행하므로 본 프로그램이 경년열화도 잘 예측함을 보였다. 아울러 가속내구시험을 위한 등가하중을 설정하고 그 등가하중이 가속내구시험조건으로 타당함을 프로그램결과와 실험결과를 비교하므로 입증하였다.

후기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제(관리번호 제 02-012호)임.

참고 문헌

1. K. B. Smith, E. S. Parker and D. J. Iler, "Railcar Service Spectra Generation for Full-Scale Accelerated Fatigue Testing", ASTM Special Technical Publication, pp. 62-84, 2002.
2. L.-G. Liljestrand, L.-O. Anderson, "Accelerated thermal fatigue cycling of surface mounted PWB assemblies in Telecom equipment", Circuit World, Vol. 14, No. 3, p. 69, 1988
3. Seiichi Matsushige. et al., "Concept of accelerated life test and implementation - a study on evaluation for solder joint fatigue of automotive electronic components", Microelectronics and Reliability, Vol. 32, No. 12, pp. 1782-1783, 1992.
4. L. R. Fox, J. W. Sofia and M. C. Shine, "Investigation of solder fatigue acceleration factors", Microelectronics and Reliability, Vol. 26, No. 6, pp. 1189-1190, 1986.

5. D. R. Frear, N. R. Sorensen, and J. S. Martens, "Test methodologies to perform valid accelerated thermomechanical fatigue tests of solder joints", ASTM Special Technical Publication, Vol. 1153, pp. 95-, 1994.
6. K. Staeovski, D. Chankov, "A comparative analysis of accelerated methods for fatigue life and reliability prediction of machine parts under variable loading", Journal of Material Science and Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 30-39, 1995.
7. X. Yang, W. Yao and Y. Chen, "Application of accelerated fatigue tests to study calendar life on airplane structure", Corrosion Science and Protection Technology, Vol. 14, No. 3, pp. 172-174, 2002.
8. R. H. Salzman, S. M. Reaburn, "Probabilistic modelling for timing belt fatigue life predictions using accelerated testing", International Journal of Materials & Product Technology, Vol. 16, No. 4-5, pp. 446-461, 2001.
9. Annual Book of ASTM Standards, Section3, pp. 836-848. 1986
10. 이강용, "재료거동학", 연세대학교 출판부. 1999.
11. N.-A. Noda, M. Sera and Y. Takase, "Stress concentration factors for round and flat test specimens with notches", International Journal of Fatigue, Vol. 17, pp. 163-178, 1995.