

누적 손상 이론을 이용한 가속 등가 하중 분석 프로그램의 개발

권중호 · 공현식* · 이강용** · 오철성 · 정순배 · 설인환 · 김태진***

Development of Accelerated Equivalent Load Analysis Program using Cumulative Damage Theory

J.H.Kwon, H.S.Gong, K.Y.Lee, C.S.Oh, S.B.Jung, I.H.Seol and T.J.Kim

Key Words : Data classification, Damage analysis, Accelerated test, Equivalent load, GUI program

Abstract

The accelerated testing technique using the equivalent load condition plays an important part in development process. However, in the industrial field, the theoretical background and advantages of this accelerated testing technique have been lack of understanding. Because the environmental durability condition forms the foundation of the accelerated testing technique, it is important to analyze the loading components and damage in service environment. In this work, we present the theoretical background and process for accelerated testing, and introduce our accelerated equivalent load analysis program. We developed the GUI program, and the user can easily obtain the result by selecting the program module.

1. 서론

자동차는 발명된 이후 현재에 이르기까지 지속적인 발전을 거듭하여 사람과 물자를 신속하고 안전하게 운송하는 현대의 대표적인 수송 기기로 자리를 잡았으며, 최근에는 안전성(safety), 안락성(comfort) 및 조종의 용이성(easy handling) 등에 대한 소비자의 요구가 점차로 증가하고 있다. 그러나 이러한 요구를 반영하기 위하여 자동차 업계가 적극적으로 대응하고 있음에도 불구하고, 차량 및 관련 부품의 개발 계획에서 양산에 이르는 과정은 보통 수년간의 설계, 시험, 분석, 생산 등으로 이루어진다.

따라서 초기 시험 단계에서 저 비용, 고효율의 검증을 위한 P/G(proving ground) 시험과 실내 장치 시험(rig test) 등의 중요성이 점차로 높아지고 있다. 이러한 시험을 위한 가속 등가 하중(accelerated equivalent load) 조건을 설정하기 위해서는 실제 내구 환경에 대한 정확한 이해가 무엇보다도 중요하며, 이는 사용 환경에서 받는 변동 피로 하중과 이로 인한 손상(damage)을 분석함으로써 가능해진다.

그러나 부품 업체의 경우 가속 시험 조건의 설정에 대한 이해 및 정보의 부족으로 많은 시간과 비용을 낭비하고 있으며, 최근에는 이 분야에 대한 외국의 상용 S/W들이 소개되고 있으나 전문적으로 사용하기에는 가격상의 어려움이 있다.

본 논문에서는 불규칙한 변동 피로 하중을 정량화 하여 가속 등가 하중을 결정하기 위한 이론적 배경을 제시하였으며, 이와 관련하여 개발한 프로그램의 구성과 내용에 대하여 소개하였다.

* 정희원, 연세대학교 기계공학과 대학원

** 정희원, 연세대학교 공과대학 기계전자공학부

*** 정희원, 국방과학연구소

2. 이론적 배경

가속 시험은 실제 주행 환경에서의 시험과 동일한 결과를 얻기 위해 요구되는 시간과 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. 그러나 가속 시험을 위한 등가 부하 조건이 적합하지 못한 경우에는 실제 환경에서의 영향을 충분히 재현할 수 없는 문제도 발생할 수 있다.

Fig. 1은 기존의 이론적 배경을 기초로 하여 가속 등가 하중을 설정하는 방법을 보여준다.

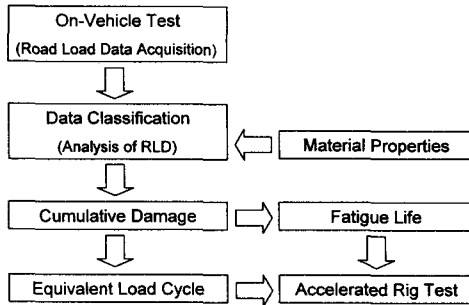


Fig. 1 Work flow for accelerated load test

2.1 피로 하중 분석 기법

공학 분야에서 많이 사용되는 데이터 분류(data classification) 기법에는 Random sample counting, Level cross counting, Time at level counting, Revolution counting, Peak counting, Range counting, Range pair counting, Range mean counting, Markov matrix, Rainflow cycle counting 등이 있다.

2.1.1 Rainflow cycle counting

Rainflow cycle counting은 피로 하중의 분석에 있어 가장 널리 사용되고 있으며, ASTM⁽¹⁾에서 제시한 기본적인 방법 이외에 최근에도 다양한 적용 방법에 대한 연구 결과들^(2,4)이 발표되고 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 rainflow cycle counting 결과를 Markov

matrix(or transitional-matrix) 형태로 표현하여 3차원적인 분석을 용이하게 하는 From-To histogram 기법이 많이 적용되고 있다.

2.1.2 Revolution counting

이 방법은 rotating moment histogram이라고도 불리며, 축(shaft)과 같은 회전 요소에서 측정된 신호의 분류에 적용되는 방법으로, 작용하는 토크(torque)에 해당하는 회전수(revolution)를 계산한다. 각각의 토크 대역에 대한 회전수(R_c)의 산출은 다음의 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$R_c = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot T \quad (1)$$

여기서, n 은 토크 대역에 해당하는 데이터의 수, ω_i 는 i 번째 데이터의 회전 속도, T 는 데이터 측정시의 sampling interval을 나타낸다.

2.2 누적 손상 이론

2.2.1 선형 누적 손상 이론

일정한 진폭의 피로 하중에 대한 수명은 간단한 실험으로 구할 수 있으나, 하중의 진폭이 일정하지 않은 변동 하중에 의한 수명 예측을 위해서는 누적 손상 분석의 단계가 수반되어야 한다.

누적 손상 이론 가운데 가장 대표적인 방법으로는 Miner 법칙⁽⁵⁾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 (2)와 같이 누적 손상(D)을 계산한다.

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} \quad (2)$$

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 의미하나, 많은 실험 결과에서 0.5에서 2사이에 있을 때 파손된다고 보고되고 있다. 또한, 식 (2)의 결과는 하중 진폭의 순서에 대한 영향을 고려하지 못하는 단점은 있으나, 비교적 간편하고 정확한 결과를 주기 때문에 가장 많이 사용되고 있다.

2.2.2 비선형 누적 손상 이론

선형 Miner 이론의 단점을 보완하고 더욱 정확한 수명 예측을 하기 위하여 하중 진폭의 영향을 고려한 비선형 누적 손상 이론들⁽⁶⁻¹⁰⁾이 개발되어 왔으나, 지금까지 제안된 이론들은 식의 형태가 복잡하고 추가적인 실험 단계가 필요하며 신뢰성이 확보되지 않은 단점이 있다.

몇 가지 비선형 손상 이론들에 대한 제안자와 내용을 소개하면 다음과 같다.

(a) Marco and Starkey

$$D = \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^{P_i} \quad (3)$$

여기서 P_i 는 응력 진폭의 영향을 고려한 지수

(b) Fatemi and Yang

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \left(\frac{S_i}{S_m} \right)^{1/d} \quad (4)$$

(c) Zhu and Jiang

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \left(\frac{S_i}{S_m} \right)^d \quad (5)$$

여기서 S_m 은 최대 응력 진폭, $d = \frac{b}{b+c+1}$ 는 상관지수(interactive exponent), b 는 피로강도지수(fatigue strength exponent, $-0.05 \sim -0.12$), c 는 피로연성지수(fatigue ductility exponent, $-0.5 \sim -0.7$)

(d) Bui Quoc

$$D = \sum \frac{r_i}{r_i + (1-r_i) \frac{\sigma_i - (\sigma_i/\sigma_u)^m}{\sigma_i - 1}} \quad (6)$$

여기서 $r_i = n_i/N_i$, $\sigma_i = S_i/S_e$ (S_e : 피로한도), $\sigma_u = S_u/S_e$ (S_u : 인장강도), m 은 재료상수

(e) Frudenthal and Heller

$$D = \sum \left(\frac{n_i \omega_i}{N_i} \right) \quad (7)$$

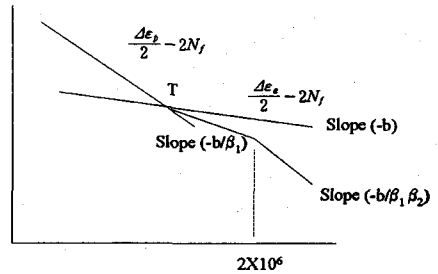
여기서 ω_i 는 상관 계수(interaction factor)

2.3 수정 피로 수명 선도

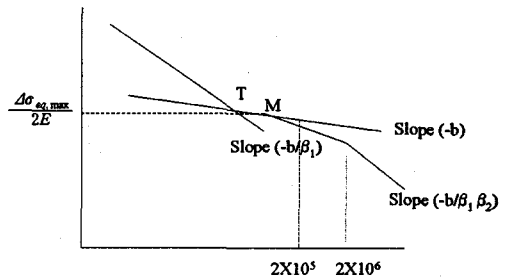
2.3.1 Kikukawa-Jono-Song의 수정 S-N 선도

고주기 피로에서 하중 변동은 응력 간섭 효과를 나타내어, 이 응력 간섭 효과를 무시할 경우 Miner 방법에 의한 수명 평가는 위험한 예측이 될 수 있다. 이러한 응력 간섭 효과를 평가하는

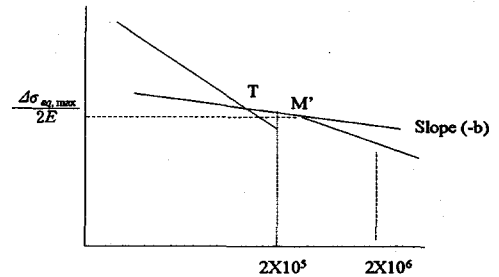
방법 중 유명한 것으로 S-N 선도의 기울기를 β 배만큼 단수명 쪽으로 수정하는 Corten-Dolan, Frudenthal-Heller의 수정 S-N 선도 방법이 있다. 그러나 이 방법들은 변동 하중의 범위가 넓어 특히 피로 한도 이하의 응력이 많이 존재하는 경우에는 위험한 예측이 되는 경우가 많다. 이러한 이유로 Kikukawa, Jono, Song 등은 피로 한도 이하의 낮은 응력 영역에서 S-N 선도의 기울기를 다시 변화시키는 다음과 같은 수정 S-N 선도 방법⁽¹¹⁾을 제시하였다.



(a) $\Delta\sigma_{eq, max} \geq \Delta\sigma_T$



(b) $\Delta\sigma_{2N_f=2 \times 10^5} \leq \Delta\sigma_{eq, max} \leq \Delta\sigma_T$



(c) $\Delta\sigma_{2N_f=2 \times 10^5} \leq \Delta\sigma_{eq, max} \leq \Delta\sigma_{2N_f=2 \times 10^6}$

Fig. 2 Modifications of S-N curve for stress interaction effect

탄성변형률-수명선($\frac{\Delta\epsilon_e}{2} - 2N_f$)이 소성변형률-

수명선($\frac{\Delta\epsilon_p}{2} - 2N_f$)과 만나는 점을 T라 할 때,

(a) 최대 변동 하중 진폭이 T에 대응하는 하중 진폭 이상인 경우 ($\Delta\sigma_{eq, max} \geq \Delta\sigma_T$)

: Fig. 2 (a)와 같이 T점을 시점으로 탄성변형률-수명선의 기울기를 $1/\beta_1$ 배만큼 수정한 다음, $2N_f = 2 \times 10^6$ 이 되는 시점에서 다시 $1/\beta_2$ 만큼 수정한다.

(b) 최대 변동 하중 진폭이 T에 대응하는 하중 진폭보다 작고, $2N_f = 2 \times 10^5$ 에 대응하는 하중 진폭 이상인 경우 ($\Delta\sigma_{2N_f=2 \times 10^5} \leq \Delta\sigma_{eq, max} \leq \Delta\sigma_T$)

: Fig. 2 (b)와 같이 $\Delta\sigma_{eq, max}$ 에 대응하는 탄성 변형률-수명선상의 점 M을 시점으로 (a)와 마찬가지로 수정한다.

(c) 최대 변동 하중 진폭이 $2N_f = 2 \times 10^5$ 에 대응하는 하중 진폭보다 작고, $2N_f = 2 \times 10^6$ 에 대응하는 하중 진폭 이상인 경우

$$(\Delta\sigma_{2N_f=2 \times 10^5} \leq \Delta\sigma_{eq, max} \leq \Delta\sigma_{2N_f=2 \times 10^6})$$

: Fig. 2 (c)와 같이 $\Delta\sigma_{eq, max}$ 에 대응하는 탄성 변형률-수명선상의 점 M'을 시점으로 $1/\beta_1$ 배만큼 수정한다.

2.3.2 노치의 영향을 고려한 수정 S-N 선도

S-N 선도는 대개 평활 시험편(smooth specimen)을 실험한 결과이다. 그러나, 실제의 구조물이나 부품에서와 같이 노치가 있는 경우에는 노치를 고려한 S-N 선도가 필요하며, 노치 계수(notch factor) K_f 를 이용하여 결정한다.^(5,11)

노치 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$K_f = \frac{S_e^{(unnotched)}}{S_e^{(notched)}} \quad (8)$$

여기서 $S_e^{(unnotched)}$ 와 $S_e^{(notched)}$ 는 각각 노치를 고려 안한 경우와 고려한 경우의 피로 한도이다.

Fig. 3에는 일반 구조용 철강 재료의 경우로서, 저주기 피로 영역에서 노치의 피로 수명 강화 효과를 무시하고, 고주기 영역에서 노치의 피로 수명 약화 효과를 고려하는 방법을 나타내었다.

여기서, S_e 는 노치가 없는 평활 시험편의 피로

한도이고, σ_f' 은 $N_f = 1$ 에 대응하는 응력 진폭이다. N 은 저주기 피로와 고주기 피로의 경계 부근이다.

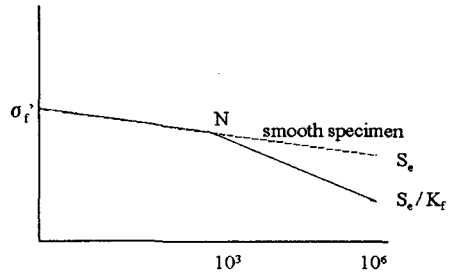


Fig. 3 Estimation of notched S-N curve

노치가 없는 S-N 선도로부터 노치가 있는 경우에 대한 S-N 선도를 유추하기 위해서는 앞서 설명한 노치 계수를 다음과 같이 이용한다.

(a) 노치가 없는 S-N 선도상에서 $N_f = 10^3$ 가 되는 점 N 을 설정한다.

(b) $N_f = 10^6$ 에서 노치가 없는 S-N 선도의 피로 한도 S_e 에 대응하는 점 S_e/K_f 를 설정한다.

(c) σ_f' 과 N 과 S_e/K_f 를 차례로 직선으로 이으면 노치 효과를 고려한 수정 S-N 선도가 구성된다.

3. 분석 프로그램

3.1 개발 프로그램의 구성

앞서 기술한 이론들을 응용하여 기계 요소에 발생하는 누적 손상을 계산하기 위해서는 컴퓨터를 이용한 반복적인 계산 과정이 요구되어지나, 여러 가지 이론들이 복합적으로 통합 적용되어야 하기 때문에 개발 환경의 구축이 쉽지 않은 어려움이 있다.

본 연구에서는 주행 부하 주기의 정량화를 위한 피로 하중과 손상 분석을 위한 전용 프로그램을 개발하였다. 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.

후 기

이 논문은 국방과학연구소의 산학협동연구비의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Annual Book of ASTM Standards, Section3, pp.836-848, 1986.
- (2) G. Glinka et al., "Rainflow counting algorithm for very long stress histories", International Journal of Fatigue, Vol.9, No.3, pp.223-228, 1987.
- (3) C. Amzallag et al. " Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis", International Journal of Fatigue, Vol.16, pp.287-293, 1994.
- (4) R. J. Anthes, "Modified rainflow counting keeping the load sequence", International Journal of Fatigue, Vol.19, No.7, pp.529-535, 1997.
- (5) 이강용, 재료거동학, 연세대학교 출판부, 1999.
- (6) Julie A. Bannantine et al., Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice hall, 1990.
- (7) Fernand Ellyin, Fatigue Damage Crack Growth and Life Prediction, Champman & Hall, 1997.
- (8) A. Fatemi and L. Yang, "Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials" International Journal of Fatigue, Vol.20, No.1, pp.9-34, 1998.
- (9) W. Q Zhu and M. X. Jiang, "Nonlinear fatigue damage accumulation under random loading", Transactions of the ASME Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.118, pp.168-173, 1996.
- (10) Bui Quoc Thang et al., "Cumulative fatigue damage under stress-controlled conditions", Transactions of the ASME Journal of Basic Engineering, Vol.93, pp.691-698, 1971.
- (11) 하재선, 송지호, 이시중, "변동하중하의 피로수명 예측", 대한기계학회 논문집, 제12권, 제4호, pp. 760-780, 1988.

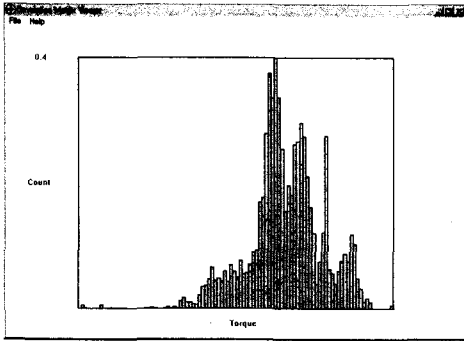


Fig. 9 2D graph of RevolView_API

3.2 프로그램의 검증

개발 프로그램의 검증을 위하여 변속기의 축을 대상으로 토크 이력을 측정하여 누적 손상 및 수명을 예측하고 가속 등가 하중을 결정하는 과정을 수행하였다. 검증 시험은 시간과 비용을 단축하기 위하여 원주 방향을 따라 노치를 가공한 축을 대상으로 하였다.

노치의 설계는 동일한 하중 조건하에서 형상과 크기를 변화시킬 때 축에 발생하는 손상과 수명을 예측하고, 이 중 검증 시험에 가장 적합한 형상과 크기를 갖는 노치를 선택하여 가공하였다.

검증 시험은 3회를 실시하였으며, 이 중 1회의 시험에서 예측된 수명 결과를 나타내었다. 제한된 시간과 횟수로 인하여 충분한 결과를 확보하지는 못하였으나, 피로 시험 결과의 분산이 큰 점을 고려하면 만족할 만한 결과라 할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 가속 등가 시험에 대한 기본적인 내용과 과정의 설명과 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 구성되었다. 최근에는 이 분야에 대한 인식의 확대로 외국의 전문적인 상용 S/W들이 소개되고 있으며, 본 연구에서 개발한 프로그램도 내용과 기능적인 면에서 충분한 경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 생각된다.