

FEA를 이용한 Lug의 피로 수명 평가에 관한 연구

이 원 석*, 이 현 우**

A Study on the Prediction of the Fatigue Life of a Lug through the Finite Element Analysis

Won-Suk Lee*, Hyun-Woo Lee**

ABSTRACT

The purpose of this study is to predict the life of a Lug under the real service load history. The techniques of predicting a fatigue life under load spectrum are discussed and some are developed. The stress is calculated by multiplying the stress under unit force with the Finite Element Analysis. The cycles are counted by the Rainflow counting method and then the mean stress effect is considered by the suggested conversion function. The Manson's Double Linear Damage Rule is used as the cumulative damage method.

Key Words : Double Linear Damage Rule(이중 선형 손상 법칙), conversion function(변환함수), real service load history(실 운전 하중 이력), cumulative damage(누적 손상)

1. 서 론

구조물 및 기계요소에 대해 실운전하중으로 피로시험을 수행하는 경우에 있어서는 많은 시간의 소모와 장비 사용의 어려움이 있으므로, 일반적으로 simulation을 통한 해석의 필요성이 점차적으로 증가되고 있으며, 이 경우에는 그 신뢰성의 확보가 중요한 문제점으로 부각된다. 실 운전하중을 사용하여 구조물의 피로 수명을 평가하는 이론적인 방법은 운전시 발생하는 load history sequence에 상당하는 응력이력을 산출하며, 이를 적절한 계수법

(counting method)을 적용하여 spectrum을 생성한다. 또한 피로수명에 영향을 미치는 인자들 중에서 평균응력의 효과는 상당히 중요한 영향을 미친다. 즉, 압축평균응력이 구조물에 작용하는 경우에는 구조물의 피로수명을 향상시키지만, 인장의 경우에 있어서는 피로수명을 단축시킨다. 그러므로 실운전하중에 따른 응력이력에서의 평균응력의 영향을 등가 0 평균응력의 경우로 전환하며, 이 등가응력을 사용하여 S-N선도에 의한 손상함수를 적용함으로써 피로 수명 평가를 실시한다. 이러한 평가방법에 있어서 가장 널리 알려진 손상함수는 Palmgren-Miner

* 연암공업대학 기계설계과
 ** 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

에 의해 제시된 선형 손상 법칙(linear damage rule)^{(1),(2)}으로서, 손상(damage, D)은 $\sum \frac{n_i}{N_i}$ 로 정의되며, 이 값이 1 인 경우에 재료는 파손이 일어난다. 이때, N_i 는 일정 진폭하에서의 재료의 피로수명, n_i 는 임의의 응력 진폭에서 가해진 반복수이다. 이 이론은 실용적인 면에서 누적 손상 이론으로 많이 사용되어 왔다. 그러나 손상은 하중의 정도에 따라서 달라지므로, Palmgren-Miner법칙은 복합 하중 상태를 처리하는 데 있어서 편리하다는 이점이 있는 반면에 예측되는 값이 실험치와 비교하여 과대 또는 과소 평가된다. 즉, 하중의 작용순서가 high-low 인 경우에는 손상이 1이 되기전에 파손이 일어나며, low-high인 경우에는 손상이 1을 넘어서도 파손이 일어나지 않는다. 이러한 이유로 Marco, Starkey⁽³⁾, Henry⁽⁴⁾, Gatts⁽⁵⁾, Corton, Dolan⁽⁶⁾, Marin⁽⁷⁾, Manson⁽⁸⁾등은 하중의 작용순서의 영향을 고려하기 위하여 선형손상누적법칙보다 신뢰성 있는 손상곡선을 제안하였다. 특히, Manson's double linear damage rule(DLDR)은 하중의 정도에 따른 손상함수의 차이를 살림과 동시에 손상곡선의 선형화로 인하여 하중순서에 무관하게 손상의 중첩을 가능하게 함으로써, 실운전하중의 경우를 계수법을 적용하여 block하중으로 해석함으로써 실운전하중에 의한 실험 결과와 비교가 용이하게 한다. 또한, 평균응력이 존재할 경우 S-N 곡선과 피로한도의 정량적인 값이 변하므로, 평균응력은 피로 수명에 많은 영향을 준다. Wang⁽⁹⁾은 평균응력의 영향을 포함시키는 변환함수(conversion function)를 제시하였다.

본 연구에서는 Wang이 제시한 이론을 바탕으로 항공기 부품인 Lug의 재료인 Al7050-T7452에 대해서 실험을 통하여 변환함수를 구하고, Lug의 운전하중 이력을 사용하여 DLDR을 적용함으로써 피로 수명을 평가하고자 한다.

2. 본 론

2-1. 손상 함수

2-1-1. 이중 선형 손상 법칙(Double Linear Damage Rule, DLDR)

일반적으로 손상곡선이 직선이면 2단계 하중-수명 level의 경우에서 각각의 직선에 대해서 파단수명으로 나눔으로서 정규화(normalizing)할 수 있고, 이는 한 개의 직선으로 표현이 가능하다. 이는 일반적으로 Palmgren-Miner 법칙으로 알려져 있다. 이는 Fig. 1과 같고, 하중

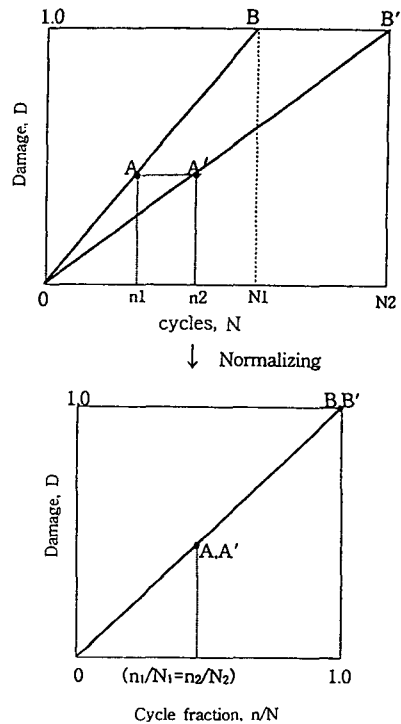


Fig. 1 손상곡선이 직선일 경우의 중첩

의 작용순서는 고려하지 않는다. 그러므로 하중 이력에서 같은 하중 level이 여러지점에 분포되어 있어도 그 하중 선형 중첩이 가능하다.

만일 손상곡선이 Fig. 2(a)와 같이 꺾어진 직선의 형태로 나타내어진다면 정규화과정에 의하여 삼각형의 모형을 가질 것이다. 이는 Fig. 2(b)와 같다. 원점에서 AB까지를 상 I (Phase I), AB에서 CE까지의 영역을 상 II (Phase II)라고 하면, 상 I의 수평축을 N_A 와 N_B 로, 수직축을 D_I 로 나누면 하나의 직선으로 표현된다. 이는 Fig. 2(c)와 같다. 또한 상 II의 수평축을 $(N_C - N_A)$, $(N_E - N_B)$ 로, 수직축을 D_{II} 로 나누면 하나의 직선이 되며, 이는 Fig. 2(d)와 같다. OA'를 따르는 손상은 하중 순서에 관계없이 반복수에 따라서 계산하고, OB'를 따르는 손상을 OA'를 따르는 손상과 관계없이 독립적으로 계산하여 더하면 상 I의 해석이 가능하며 반복수 비의 합이 1이 되면 상 I은 끝나고 상 II로 연결되어서 상 I에서와 동일한 방법으로 A'C'와 B'E'를 따라서 각각 계산하여 더한다. 그러므로 어떠한 순서 및 얼마나 많은 하중이 OAC, OBE를 따라서 가해지는 가에는 관계없이 손상의 누적은 각 하중의 피로 수명에 대한 반복수 비의 합으로

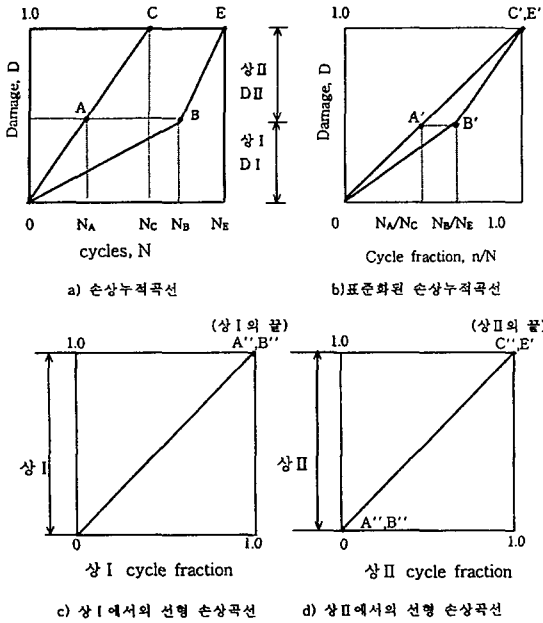


Fig. 2 손상곡선이 꺾어진 형태일때의 중첩

만 계산된다. 단, 반복수 비의 계산에 사용되는 피로수명은 각 상에 해당되는 수명이다. 이러한 방법으로 2단계 하중이 작용할 경우에 대한 해석이 가능하다.

Manson⁽⁶⁾이 제안한 임의의 피로수명을 직선의 형태로 취하고 다른 피로수명(N)에 있어서의 손상곡선의 임의의 피로수명(N_{ref})에 대한 비로서 나타내면 식(1), (2)와 같다.

$$D_{N_{ref}} = \frac{n}{N_{ref}} \tag{1}$$

$$D_N = \left[\frac{n}{N} \right]^{(N/N_{ref})^{0.4}} \tag{2}$$

2-1-2. 손상곡선의 선형화

이중 선형 손상 법칙의 적용을 위하여 사용되는 손상합수는 2단계 하중이 작용하는 경우의 손상곡선을 잔여 수명 비(remaining life fraction)와 초기수명 비(initial life fraction)의 축으로 표현하면 식 (3) 및 Fig. 3과 같다.

$$\left(\frac{n_1}{N_1} \right)^{\left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{0.4}} + \frac{n_2}{N_2} = 1 \tag{3}$$

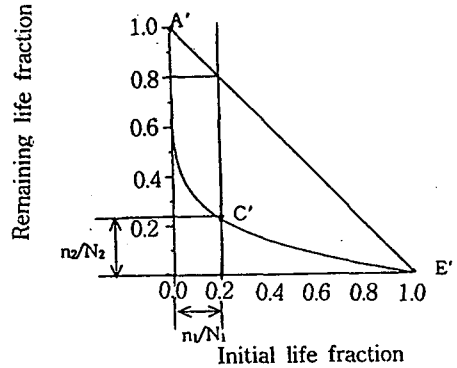


Fig. 3 초기 수명비 대 잔여 수명비로 표현한 손상곡선

여기서 N₁, N₂는 처음 및 두 번째 가해진 하중에 대한 S-N 선도상의 피로수명이고, n₁, n₂는 가해진 반복수이다.

식(3)은 Fig. 3에서와 같이 (0,1), (1,0)을 지나는 매끄러운(smooth) 곡선이 된다. 2단계 하중이 작용하는 경우에는 이 손상곡선은 두 개의 직선으로 선형화할 수 있다. 선형화과정에서의 교차점은 식(4)의 조건을 만족하여야 한다.

$$\left[\frac{n_1}{N_1} \right]_{\text{교차점}} = A \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{\beta_1} \tag{4}$$

$$\left[\frac{n_2}{N_2} \right]_{\text{교차점}} = B \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{\beta_2}$$

이 교차점은 많은 2단계 하중 실험에 의해 결정되며, 이는 1단계 하중의 경우에도 만족해야 한다. Manson과 Halford는 많은 실험을 통하여 N₁/N₂를 대수 좌표계로 나타내면, 실험상수 β₁, β₂는 거의 비슷한 기울기를 갖고 있음을 보였다. 따라서 β₁, β₂를 β로 통일하여 표시하면 식 (4)는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\left[\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} \right]_{\text{교차점}} = (A + B) \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{\beta} \tag{5}$$

또한, 식 (5)를 1단계 하중의 경우에 적용하면 N₁ = N₂, n₁ + n₂ = N 이므로 A + B = 1 이 된다.

2-1-3. 두 기준수명사이에 있는 값들을 보간하는 방법
2단계 하중이 작용할 경우에 상(Phase) I 및 II에서의

수명곡선은 직선이며, 이는 중첩이 가능하다. 그러므로 다단계 하중이 작용하는 경우로의 확대 해석을 하기 위하여, 각 응력 단계의 손상곡선을 각 상(Phase)에서 선형화하기 위한 식은 (6)과 같이 표현된다. 다단계 하중이 작용하는 경우의 손상곡선은 Fig. 4와 같다.

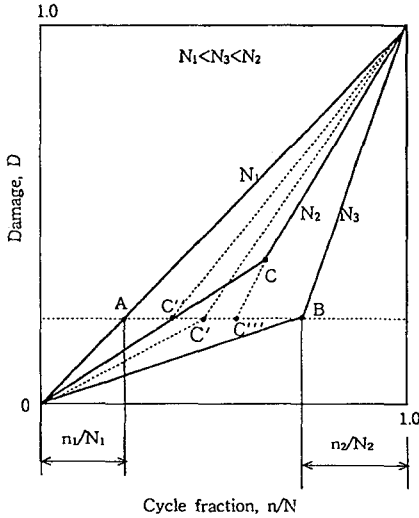


Fig. 4 기준수명의 손상곡선의 보간

즉, 2단계 하중이 작용하는 경우의 실험을 통하여 A, B점을 결정할 수 있으므로, 각 수명곡선에 대한 상 I 및 II에 대한 수명(n_I, n_{II})을 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} n_I &= N_f \exp(ZN_f^\phi) \\ n_{II} &= N_f (1 - \exp(ZN_f^\phi)) \end{aligned} \quad (6)$$

이때, ϕ, Z 는 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{1}{\ln(N_1/N_2)} \ln \left(\frac{\ln[A(N_1/N_2)^\beta]}{\ln[1 - B(N_1/N_2)^\beta]} \right) \\ Z &= \frac{\ln[A(N_1/N_2)^\beta]}{N_1^\phi} \end{aligned} \quad (7)$$

2-2. 평균 응력의 영향

응력비 ($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$)가 -1인 경우의 S-N 선도는 $S_{a,0} = S_{\max,0} = 10^C N^B$ 로 표현된다. 이때 $S_{a,0}$,

$S_{\max,0}$ 에서의 아래첨자 0은 평균응력이 Zero임을 의미한다. 그러나, 평균응력이 존재할 경우에는 평균응력의 효과를 고려하여야 하며, Goodman식과 Gerber식이 널리 사용된다. 이는 식(8)과 같다.

$$\frac{S_{a,0}}{S_u} = \frac{\frac{S_a}{S_u}}{1 - \left(\frac{S_m}{S_u}\right)^n} \quad (8)$$

여기서, S_a 는 평균응력이 존재할 경우에서의 작용 응력의 크기, S_u 는 인장강도, S_m 은 평균응력, $S_{a,0}$ 는 S_a 의 값이 평균응력이 Zero인 경우로 환산한 등가응력이다. (단, Goodman식은 $n=1$, Gerber식은 $n=2$ 이다.). 식(8)을 $R, S_{\max}, S_{\max,0}$ 의 경우로 바꾸어 표현하면 식(9)와 같다.

$$S_{\max,0} = \frac{S_{\max} \frac{1-R}{2}}{1 - \left(S_{\max} \frac{R+1}{2S_u}\right)^n} \quad (9)$$

일반적으로, 대부분 재료의 등가 Zero 평균 응력은 재료의 특성에 따라서 Goodman식의 적용에서는 약간 높고, Gerber식에서는 낮은 값을 나타낸다⁽¹⁰⁾. 그러므로 Goodman식의 피로수명이 과소 평가된다. 따라서 평균 응력을 고려한 수정된 변환함수의 사용이 필요하다. 변환함수(conversion function)는 평균응력이 존재하는 경우의 S_{\max} 와 평균응력이 존재하지 않는 경우에서의 동일한 피로수명을 가지는 $S_{\max,0}$ 와의 관계식이다.⁽¹⁰⁾

Fig. 5는 동일한 수명을 가지는 점들을 이은 Haigh diagram이다. $(-S_a, S_a)$ 와 (S_{ul}, S_{ul}) 을 지나는 실선은 Goodman line이며, 그 위의 파선은 Gerber curve이다. 대부분의 재질은 각 재료의 특성에 따라서 Goodman line보다는 약간 높고, Gerber curve보다는 약간 낮은 동일수명 곡선상태에 존재한다.⁽¹⁰⁾ 그러므로 Goodman line의 방정식을 근거로 하여 실험에 따른 실험상수의 적용으로 변환함수를 구한다. 이 변환함수의 Haigh diagram에서의 분포는 $R=1, -1$ 의 경우를 제외한 다른 경우에는 Goodman line보다는 다소 증가된 형태로 나타난다.

Fig. 5에서 $(-S_a, S_a)$ 와 (S_{ul}, S_{ul}) 을 지나는 직선의 방정식은 식(10)과 같다.

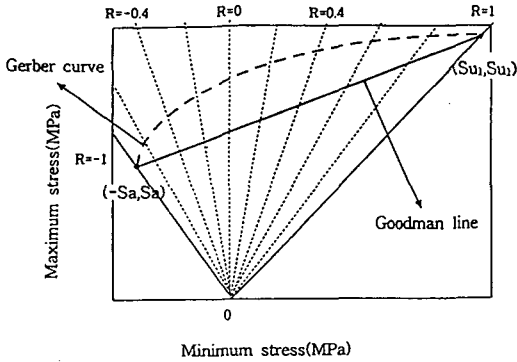


Fig. 5 동일 수명 선도(Goodman, Gerber식)

$$\begin{aligned}
 S_{\max} &= \frac{S_{ul} - S_a}{S_{ul} + S_a} R S_{\max} + 2 \frac{S_a S_{ul}}{S_a + S_{ul}} \\
 &= \frac{S_{ul} - S_{\max,0}}{S_{ul} + S_{\max,0}} R S_{\max} + \frac{2 S_{\max,0} S_{ul}}{S_{\max,0} + S_{ul}} \quad (10) \\
 &= \frac{(S_{ul} - S_{\max,0}) R S_{\max} + 2 S_{\max,0} S_{ul}}{S_{\max,0} + S_{ul}}
 \end{aligned}$$

R이 -1 인 경우에는 $S_a = S_{a,0} = S_{\max,0}$ 이다. 아래첨자 0는 평균응력이 0인 경우이다. 또한, $S_{\min} = R \cdot S_{\max}$ 이다.

R의 값이 1, -1 일 때는 증분이 존재하지 않으며, R이 1 과 -1 사이에서 변화하는 동안에는 Haigh diagram에서 곡선이 되도록 가중치 ω 를 곱하고, $S_{\max,0}$ 으로 정리를 하면 식(11), (12), (13)과 같다. (단, ω 는 실험에 의한 값이며, R의 함수이다.)

$$\begin{aligned}
 S_{\max} (S_{\max,0} + S_{ul}) &= \omega [(S_{ul} - S_{\max,0}) R S_{\max} + 2 S_{\max,0} S_{ul}] \\
 &= \omega [(2 S_{ul} - R S_{\max}) S_{\max,0} + S_{ul} R S_{\max}] \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [S_{\max} + (R S_{\max} - 2 S_{ul}) \omega] S_{\max,0} &= \omega S_{ul} R S_{\max} - S_{\max} S_{ul} \\
 &= S_{\max} S_{ul} (\omega R - 1) \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{\max,0} &= \frac{S_{\max} S_{ul} (\omega R - 1)}{S_{\max} + \omega (R S_{\max} - 2 S_{ul})} \\
 &= \frac{(\omega R - 1) S_{ul} S_{\max}}{(1 + \omega R) S_{\max} - 2 \omega S_{ul}} \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(1 - \omega R S_{ul})}{2 \omega S_{ul} - (1 + \omega R) S_{\max}} S_{\max} \\
 &= \frac{(\frac{1}{\omega} - R) S_{ul}}{2 S_{ul} - (\frac{1}{\omega} + R) S_{\max}} S_{\max}
 \end{aligned}$$

또한, MIL-HDBK-5F의 동일 재료에 대한 S-N 테이터를 이용하여 각 응력비 R에 따른 실험 결과를 식(13)에 대입하여 구한 ω 의 값은 R = 0일 때 1.00175, R = 0.5일 때 1.0754 이다. 가정에 의하여 ω 는 R이 -1, 1 일 때 1의 값을 가진다. 이를 R에 대한 2차함수로 만들면 식(14)와 같다.

$$\omega = 1.04115 - 1.98722 \times 10^{-8} R - 0.0411469 \times R^2 \quad (14)$$

식(14)를 식(13)의 최종식에 대입하여 $S_{\max,0}$ 과 S_{\max} 와 의 관계를 R의 함수로 나타내면 식(15)와 같다.

$$S_{\max,0} = \frac{\left(\frac{1}{1.04115 - 1.98722 \times 10^{-8} R - 0.0411469 \times R^2} - R \right) S_{ul}}{2 S_{ul} - \left(\frac{1}{1.04115 - 1.98722 \times 10^{-8} R - 0.0411469 \times R^2} - R \right) S_{\max}} S_{\max} \quad (15)$$

Al7050-T7452 의 재료에 대한 Goodman, Gerber, 제안된 변환함수의 식에 따른 곡선은 Fig. 6과 같다.

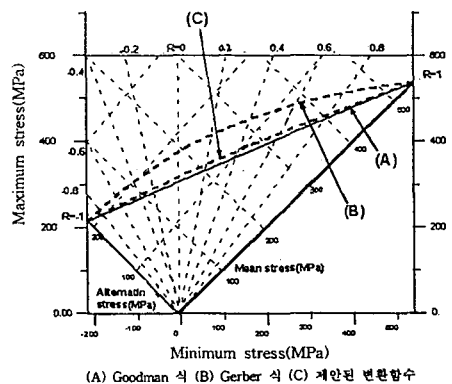


Fig. 6 Al7050-T5452 에 대한 동일 수명 선도

3. 실험

3-1. 단순인장 실험

실험은 데이터가 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에서 자

Table 1 Al7050-T7452의 화학성분(wt%)

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Al
Al7050-T7452	0.12	0.15	2.0~2.6	0.1	1.9~2.6	0.04	5.7~6.7	0.06	0.08~0.15	나머지

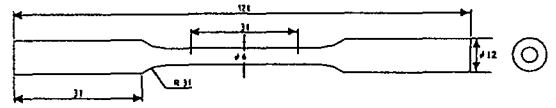


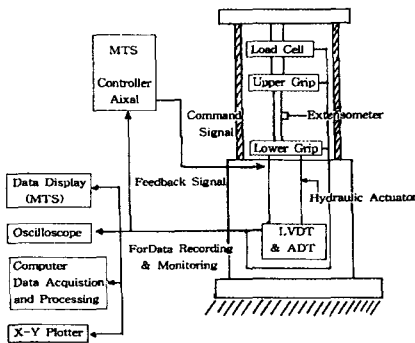
Fig. 8 단순인장시험편의 형상 및 치수

Table 2 Al7050-T7452의 기계적인 물성치

탄성계수	항복강도	극한강도	연신율
69104(MPa)	438.55(MPa)	538.55(MPa)	10.6



(a)



(b)

Fig. 7 (a) 실험장비 (b) MTS 개략도

동 처리 및 제어되는 최대용량 10 ton의 폐쇄 유압 회로 방식의 MTS(Material Testing System)를 사용하였다. 실험장비 및 MTS의 개략도는 Fig. 7과 같다. 또한, 실험에 사용된 시험편은 Al7050-T7452으로서 그 화학적인 성분은 Table 1과 같다. 단순 인장 시험편은 물림부의 지름 12mm, 중앙부의 지름 6mm, 중앙부의 평형부는 게이지 길이가 25mm인 extensometer를 사용할 수 있도록 30mm로 가공하여 연마하였다. 단순 인장 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 8과 같고, 실험 결과는 Table 2와 같다.

3-2. Al7050-T7452의 S-N 선도

Al7050-T7452에 대한 S-N 선도는 Fig. 9와 같다.⁽¹¹⁾

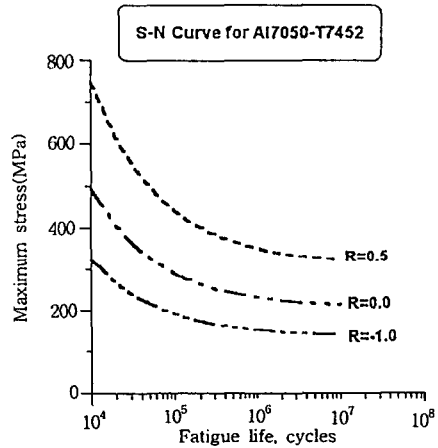


Fig. 9 Al7050-T7452의 S-N 선도

3-3. DLDR적용을 위한 손상계수

2단계 블록 하중이 작용하는 경우의 손상 곡선은 식 (4), (5)와 같다. 이때 A, B, β값은 실험 상수이다. 실험에 의하여 P₁=7kN을 10⁴ cycles을 가한 후(σ₁=248MPa, N₁=27376 cycles) 다시 P₂=5kN을 가하여(σ₂=177MPa, N₂=188256 cycles)파단시까지의 수명을 구하였고 이 결과를 식 (4), (5)에 대입하여 Al7050-T7452 합금에 대한 실험상수를 구하였다. 그 결과 실험상수 β는 0.19, A는 0.20, B는 0.80이다. 이 실험 상수를 대입한 식 (5)은 식(16)과 같다.

$$\left[\frac{n_1}{N_1}\right]_{\text{교차점}} = 0.20\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{0.19}, \left[\frac{n_2}{N_2}\right]_{\text{교차점}} = 0.80\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{0.19} \quad (16)$$

3-4. 실온전하중에 의한 Lug의 피로 실험

Lug에 대한 실온전하중의 하중 이력은 국방 과학 연구

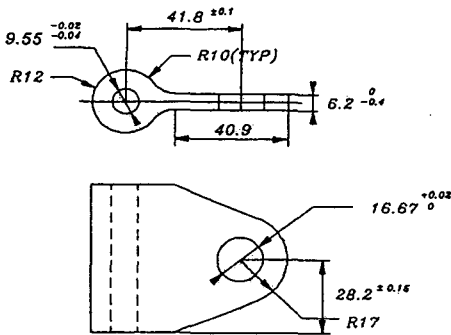


Fig. 10 Lug의 형상

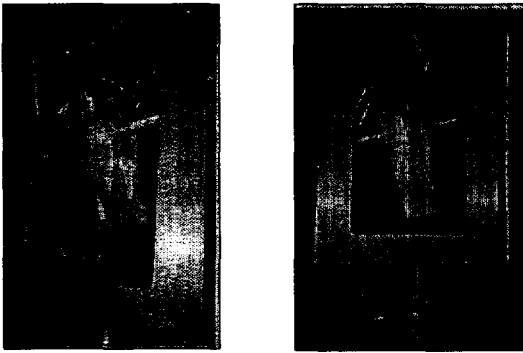


Fig. 11 이축 하중 상태를 고려하여 만든 Jig와 체결된 형상

소에서 제공한 spectrum을 사용하였으며 A/D, D/A 변환기를 설치한 486 컴퓨터를 이용하여 MTS의 입·출력을 수행하였다. Lug의 실온전하중의 하중 이력은 총 44182개의 Peak-Valley이며, 최대 하중 및 최소하중은 23.26 kN과 -8.24 kN이다. Lug의 형상과 하중상태를 고려하여 만든 jig와 체결된 형상은 Fig. 10, Fig. 11과 같다.

Manson의 실험에서는 Hole주위에 0.381~0.761 mm의 균열이 생성될 때를 손상의 기준으로 하였으나, 본 연구에서는 MIL-A-83444에 제시된 초기 균열 가정에 의하여 1.27mm까지의 균열 생성을 손상으로 하였다.

4. 결과 및 고찰

Lug 부품의 FEM(finite element method) 모델링은 3-D 20-Node Structural Solid 요소를 사용하여 3792 개의 절점과 699개의 요소로 세분화하였다. Lug에 작용

하는 하중이력은 탄성인 경우에 선형 중첩이 가능하므로 단위하중을 가한 응력 성분의 결과를 이용하여 하중이력 전체에 대한 응력을 산출함으로써 하중이력 전체 데이터에 대한 FEM해석의 반복에 따른 시간과 노력을 절감하였다. 최대 응력의 발생부위는 하중방향과 45° 위치에서 나타났으며, 1kN에 대한 최대 응력값은 18.492MPa이다. 중첩법을 이용한 하중이력에 대한 응력 sequence는 평균응력의 값이 변동적이므로 $R=-1$ (평균응력이 Zero) 경우로 재계산하여야 한다. 가해진 하중 sequence중 최대하중 23.26kN과 최소하중 -8.24kN의 경우 등가응력 폭은 197.457MPa이고 평균응력은 232.667MPa이다. 이를 Goodman식에 의하여 평균응력이 Zero인 상태로 변환하면 최대응력이 347.651MPa이며 식(15)의 변환 함수를 대입하여 계산하면 최대응력이 323.841MPa이다. 식(15)에서의 $S_{max,0}$ 값이 전체적으로 Goodman의 것보다 낮게 나타났다. 또한, 44182개의 Peak-Valley에 대한 응력 sequence에 대해 평균응력을 고려한 Rainflow Counting방법⁽¹²⁾을 적용하여 응력과 빈도수를 구하였다.

A17050-T7452의 실험을 통하여 knee부분의 지정을 위한 실험상수 A, B, β 는 각각 0.20, 0.80, 0.19의 값으로 나타났다. 기준 수명으로 N_1 은 최대하중에 해당하는 수명을 택하여 Goodman식에 의한 변환의 경우 7661cycles, 식(15)에 의한 변환의 경우 9428cycles로 한다. 피로한도로 10^7 을 선택하여 이를 N_2 로 하였다. 종합적으로 DLDR에 의한 손상평가와 Palmgren-Miner에 의한 손상평가를 실시한 결과는 Table 3과 같다. Table 3에서 1 Block은 하중이력의 전체 데이터수인 44182개를 의미한다.

Table 3 손상평가 실시결과

	평균응력 변환식	수명
Miner' rule	Goodman 식	40 Block
	제한된 식(15)	54 Block
DLDR	Goodman 식	38 Block
	제한된 식(15)	51 Block
실험		48~53 Block

Table 3에서와 같이 DLDR의 방법이 Palmgren-Miner에 의한 손상에 비해 수명이 상대적으로 작게 평가되며, 실험과 더 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결 론

일반적으로 실운전하중의 경우는 변동하중의 상태이며, 이를 적용하여 운전 수명을 평가하는 방법으로 운전 하중 이력에 대해서 평균응력의 영향을 고려하기 위해 Goodman식을 적용하고 있고, 손상 평가는 Palmgren-Miner의 수명식을 사용하고 있다. 그러나 이러한 적용은 실 운전하중에 대한 수명을 과대 평가하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 평균응력을 고려하기 위하여 실험을 통하여 변환함수를 제시하고, DLDR의 방법을 적용하여 수명을 평가하였다.

항공기 부품인 Lug는 Al7050-T7452합금이며, 이 합금의 S-N 선도를 근거로 하여 평균응력을 고려한 변환함수를 식(15)와 같이 제시하였다. 식(15)에 의한 등가응력의 경우는 Goodman식의 적용시보다 낮은 $S_{max,0}$ 값이 나타났다. 또한, DLDR를 적용한 결과의 수명은 Palmgren-Miner 손상 평가보다 다소 작게 나타났다. 이 평가는 실험에 의한 결과와 비교해 볼 때 신뢰성이 있다.

6. 참 고 문 헌

1. Palmgren, A., Die Lebensdauer von Kugellagern, Verfahrenstechnik(Berlin) 68, pp. 339-341, 1924.
2. Miner, M. A., "Cumulative damage in fatigue," J. appl. Mech., Vol. 12, Trans. ASME, Vol. 67, pp. A159-A164, 1945.
3. Marco, S. M., and Starkey, W. L., "A Concept of Fatigue Damage," Trans., ASME, Vol. 76, No. 4, pp. 627-632, 1954.
4. Henry, D. L., "Theory of Fatigue Damage

- Accumulation in Steel," Trans., ASME, Vol. 77, pp. 913-918, 1955.
5. Gatts, R. R., "Application of a Cumulative Damage Concept to Fatigue," Trans., ASME, Vol. 83, series D, No. 4, pp. 529, 1961.
6. Corten, H. T., and Dolan, T. J., "Cumulative Fatigue Damage," Proceedings of International Conference on Fatigue of Metal, ASME and IME, pp. 235, 1956.
7. Marin, J., Mechanical Behavior of Engineering Materials, Prentice-Hall, Englewood cliffs, N. J., 1962.
8. Manson, S. S., Halford, G. R., "Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for cumulative fatigue damage," International Journal of Fracture, Vol. 7, No. 2, pp. 169-192, 1981.
9. Yu Gui-Lan and Wang Yue-Sheng, "A new cumulative damage rule for multilevel cyclic loading with mean stresses," International Journal of Fracture 75, R29-35, 1996.
10. Julie A. Bannantine, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," Prentice-Hall, pp. 3-13, 1990.
11. Military Standardization Handbook 5D, pp. 3-311.
12. "Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis," ASTM Standard E1049. ASTM, pp. 789-797, 1990.