

X선 반가폭을 이용한 Al 2024-T3 합금의 피로수명에측에 관한 연구

조석수*, 김순호**, 주원식***

A Study on the Prediction of Fatigue Life in 2024-T3 Aluminium using X-ray Half-Value Breadth

Seok Swoo Cho*, Soon Ho Kim**, Won Sik Joo***

ABSTRACT

X-ray diffraction method detects change of crystal lattice distance under material surface using diffraction angle 2θ . This technique can be applied to the behavior on slip band and micro crack due to material degradation. The relation between half-value breadth and number of cycle has three stages which constitute rapid decrease in initial number of cycles, slight decrease in middle number of cycles and rapid decrease in final number of cycles. The ratio of half-value breadth takes a constant value on B/B_0-N diagram with loading condition except early part of fatigue life. The ratio of half-value breadth B/B_0 with respect to number of cycle to failure N_f has linear behavior on $B/B_0-\log N_f$ diagram. Therefore, in this paper the estimation of fatigue life by average gradient method has much less estimated mean error than the estimation of fatigue life by $\log B/B_0-\log N/N_f$ relation.

Key Words : X-ray diffraction (X선 회절), Half-value breadth (반가폭), Diffraction angle (회절각도), Average gradient (평균기울기), Individual gradient (단일 기울기), Cycle ratio (피로수명비)

1. 서론

기계 또는 구조물의 사용 효율은 공학적 해석 방법의 발달과 재료의 경량화로 인하여 점차적으로 증가하고 있으나 반복하중을 받는 기계 구조물의 파손과 파괴는 계속 일어나고 있다. 특히, 해석 방법의 발달에 따른 안전을 저하는 재료 표면이나 그 바로 밑에 결함이 발생하거나 존재하는 경우 치명적인 피로손상을 유발하게 된다. 따라서 피로손상에 의하여 발생하는 제질적 변화 특성과 미소균열의 발생 및 성장 특성 그리고 그 이후의 거시균열로의 천이를 체크하기 위한 비파괴적 파라미터가

필요하다.¹⁾

형광과 자기 탐상등²⁾은 재료의 표면과 내부에 존재하는 결함을 찾는 데 매우 유용하나 초기피로손상을 탐상하기에는 부적합하다. 즉, 피로수명초기 영역에서는 반복슬립밴드(cyclic slip band)의 발생과 이로 인한 미소 균열의 발생과 성장이 일어나므로 피로손상을 체계적으로 모니터링하려면 결정립 변형과 같은 국부적 변화에 민감한 물리적 파라미터가 필요하다. 따라서 위에서 설명한 방법을 피로손상과 관련시키려면 사용 재료나 실험방법의 측면에서 많은 어려운 점이 있다.

X선 회절법은 재료의 극표면층에 존재하는 결

* 삼척대학교 자동차공학과

** 신라대학교 자동차공학과

*** 동아대학교 기계공학과

정 격자 간격의 변화를 회절각 2θ 를 이용하여 알아 낼 수 있다. 즉, 이러한 방법은 피로수명의 초기 영역에서 나타나는 슬립밴드나 미소 균열의 발생등으로 일어나는 결정 변형에 민감하므로 피로손상과 같이 반복수 N 에 의존하는 재질 열화를 충분히 검출할 수 있다.

한편, 일반적으로 사용되는 기계 구조용 재료는 기계가공이나 열처리등으로 조직적 불균일성(textural inhomogeneity)이 일어나 결정격자의 뒤틀림이 발생함과 동시에 이로 인한 미소 잔류응력이 발생하게 된다.³⁾ 그러나 재료내부에서 발생하는 피로손상은 이러한 결정격자의 뒤틀림을 해방시키므로 X선 파라미터인 반가폭(half-value breadth) B 와 피로손상을 나타내는 파라미터인 반복수 N 사이에는 좋은 대응관계에 있으며 이제까지의 연구결과 중 대표적인 것은 다음과 같다.

평등⁴⁾은 0.76% C 탄소강을 어닐링(annealing)시켜 X선으로 조사(irradiation)한 결과 피로가 진행됨에 따라 초기 반가폭에 대한 측정 당시의 반가폭의 비인 반가폭비 B/B_0 가 3단계로 증가한다고 주장했으며 本田⁵⁾은 0.25% C 탄소강을 어닐링시키지 않은 기계 가공재를 피로시험한 결과 반복수가 증가됨에 따라 3단계로 감소된다고 보고하였다. 또한, 0.22% C 탄소강을 어닐링한 실험⁶⁾에서는 반가폭비 B/B_0 가 3단계로 증가하고 있으며 반가폭비 B/B_0 와 파단 반복수에 대한 측정 당시의 반복수의 비인 피로수명비의 대수 $\log N/N_f$ 의 관계식이 응력진폭에 영향을 받지 않는 선형적 거동을 보인다고 주장하였다. 이상의 실험결과에 의하면 재료의 피로손상은 반가폭비 B/B_0 를 이용하여 예측할 수 있음을 알 수 있다.

앞에서 설명한 연구는 반가폭비 B/B_0 와 피로수명비의 대수 $\log N/N_f$ 의 관계를 부하 응력의 크기에 관계 없이 1개의 직선으로 표현하므로 부하응력에 대한 효과를 전혀 고려하지 않고 있다. 그러나 피로수명비의 대수 $\log N/N_f$ 의 증가에 따른 반가폭비 B/B_0 는 피로한도 부근의 부하응력과 피로한도 보다 훨씬 큰 부하응력이 작용할 때 매우 다른 반응을 보이고 있으며 이러한 점을 보완할 수 있는 피로수명 평가 방법이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 Al 2024-T3 합금에 대한 X선 회절과 평면굽힘피로시험을 실시하여 X선 반가폭비 B/B_0 와 피로 수명비 $\log N/N_f$ 를 이용하는 기존의 피로 수명 평가 방법의 결점을 극복하기 위하

여 반복수의 대수 $\log N$ 에 대한 반가폭비 B/B_0 의 평균 기울기와 피로 파단시의 반가폭비 B/B_0 를 기초로 만든 N_f 선을 이용하여 부하 응력의 크기를 고려할 수 있는 피로수명평가방법을 제안하고자 한다.

2. 실험장치와 방법

2.1 재료와 시험편

본 연구에서 사용한 재료는 항공기 구조용으로 널리 이용되고 있는 두께 5mm인 Al 2024-T3 합금 판재로써, 그 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 2에 각각 나타내었다. 기계적 성질을 구하기 위

Table 1 Chemical compositions of 2024-T3 aluminium (wt.%)

Material	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Cr	Zn	Ti	Al
2024-T3	4.82	1.67	0.58	0.18	0.07	0.02	0.06	0.15	Bal

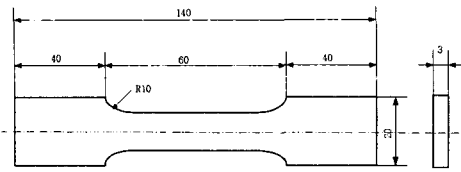
Table 2 Mechanical properties of 2024-T3 aluminium

Material	Yielding strength σ_{ys} (MPa)	Tensile strength σ_{ts} (MPa)	Elongation ϵ_f (%)	Young's modulus E (GPa)
2024-T3	380	507	21.6	77.02

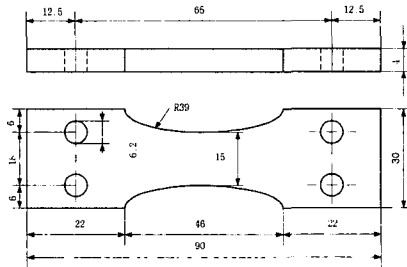
한 인장시험은 정격하중이 15tonf인 만능재료시험기(Instron model 1337)를 이용하여 수행되었으며 시험편의 형상은 Fig. 1 (a)에 보이고 있다. 피로시험편은 최대굽힘하중과 압연방향을 서로 일치시켜 92mm×32mm×4.2mm의 크기로 절단하여 Fig. 1 (b)와 같이 밀링가공하였다. 이러한 시험편의 형상은 Peterson⁷⁾이 제안한 응력집중계수선도와 굽힘피로시험기의 그림 크기를 고려하여 응력집중계수 K_f 가 1.4가 되도록 곡률반경 ρ 를 39mm로 잡았다.

2.2 피로시험

Fig. 2는 본 실험에 사용한 쉐크형(Schenck type) 평면굽힘피로시험기(Mori testing machine co. model 5171)의 모식도를 나타낸 것으로써, 최대굽힘모멘



(a) Tension test specimen



(b) Fatigue test specimen

Fig. 1 Geometry and dimension of test specimen (unit : mm)

트는 2kgf-m이고 매분 회전수는 1500rpm이다. 실험은 평균응력을 0으로 하는 하중제어형태로 수행되었으며 응력진폭 σ_a 는 각각 303MPa, 262MPa, 225MPa, 180MPa로 하였다. 반복수 N 이 증가함에

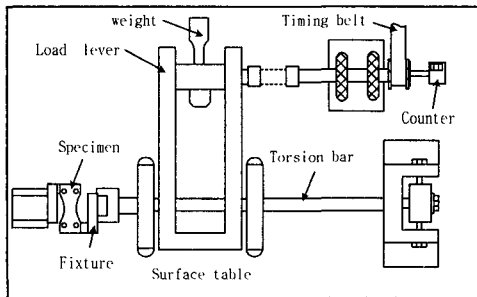


Fig. 2 Schematic illustration of fatigue test machine

따라 시험편 중앙부에서 발생하고 전파되는 표면미스균열의 분포와 길이는 시험편 중앙에 임의로 설정한 5mm×12mm의 영역내에서 150배의 해상처리장

치(Image pro-plus)를 이용하여 관찰하였다.

2.3 X선 회절 실험

X선 반가폭 B 는 시험편 표면의 미세한 소성 변형량을 측정하기 때문에 표면상태가 중대한 영향을 미치게 된다. 따라서 시험편을 가공할 때 생기는 기계 가공 잔류응력은 전해연마(electrolytic polishing)로 제거하였다.

또한, Al 2024-T3합금은 주성분원소가 원자번호 13인 Al이므로 결정격자구조가 면심입방구조(FCC)이고 특정 결정면($h k l$)의 면간거리 d 는 다음 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (1)$$

위에서 설명한 식에서 Al 2024-T3합금의 격자상수 a 는 4.0497Å이며 특정결정면의 면 지수 h, k, l 은 Al 2024-T3의 결정격자구조가 면심입방구조이므로 모두 기수이거나 우수인 면만이 회절에 관여하게 된다.⁸⁾

Fig. 3은 X선이 재료 표면에 입사되어 임의의 원자열과 그 다음의 원자열 사이의 행로 차이가 입사 X선 파장과 일치하면 X선 강도가 커져 X선 회절(X-ray diffraction)이 일어나는 것을 보이고 있다.

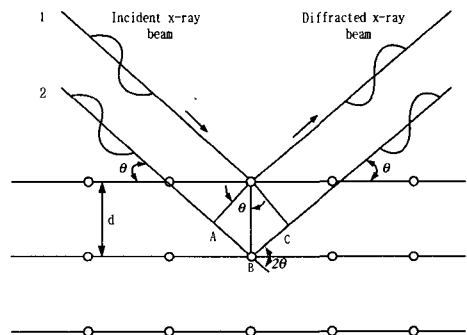


Fig. 3 Schematic illustration of X-ray diffraction in crystal lattice structure

이러한 법칙을 Bragg법칙(Bragg's law)이라 하며 다음 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2)$$

여기서 n 은 반사차수(reflection order)를 표시하는 양의 정수로 일반적으로 1을 사용하며 λ 는 X선

발생장치에서 사용하는 구리 타아깃(Cu target)의 특성 X선인 K_{α} 선의 파장으로서 1.540562 Å이다. 또한, X선 파라미터를 정밀하게 측정하기 위해서는 (1) 회절각도 2θ 는 가능한 180° 에 가깝게 (2) 회절강도가 높게 (3) 독립 피크 (peak)일 것 등의 조건들을 만족하여야 한다. 본 실험에서는 위에서 설명한 조건들을 충분히 고려하여 다음과 같은 방법으로 회절각도 2θ 를 결정한다. 식 (2)를 $1/d$ 로 정리하여 식 (1)에 대입하면 다음 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{d} = \frac{2\sin\theta}{\lambda} \quad (3)$$

$$\frac{4\sin^2\theta}{\lambda^2} = \frac{h^2+k^2+l^2}{a^2} \quad (4)$$

따라서 회절각도 2θ 는 위에서 설명한 식 (4)를 이용하여 다음 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$2\theta = 2 \cdot \sin^{-1} \sqrt{\frac{\lambda^2}{4} \cdot \frac{h^2+k^2+l^2}{a^2}} \quad (5)$$

Table 3은 위에서 설명한 주의 사항을 고려하여 X선 파라미터를 측정하기 위한 X선 실험 조건을 나타낸 것이고 Fig. 4는 Al 2024-T3 합금을 X선 회절장치의 고니아미터(Goniometer)를 $2\theta - \theta$ 연동시스템으로 $134^{\circ} \sim 141^{\circ}$ 까지 연동시켰을 때의 회절 프로파일(diffraction profile)을 보여주고 있다. 그림에서 회절강도곡선의 백그라운드에 평행한 기준선을

Table 3 X-ray diffraction condition of Al 2024-T3 aluminium

Test condition	Parallel-beam method
Diffraction angle	137.44°
Characteristic X-ray	Cu- K_{α}
Diffraction plane	(4 2 2)
Filter	Ni
Tube voltage	35kV
Tube current	30mA
Irradiated area	1×7 mm
Soller slit	1°
Scanning speed	$2^{\circ}/\text{min}$
Chart speed	40 mm/min
Time constant	2 sec

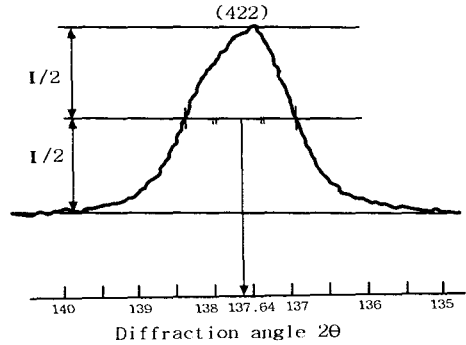


Fig. 4 Determination of diffraction angle 2θ at X-ray diffraction profile for Al 2024-T3 aluminium

곳고, 최고 회절강도에서 거리가 1/2인 지점에서 기준선과 평행선을 그었을 때, 그 중심위치에서의 각도를 2θ 라 하고, 그 폭을 반가폭 B 라 한다.⁹⁾ 또한, 실험적 회절각도 $2\theta_{ex}$ 는 137.64° 에서 회절피크(diffraction peak)가 생기므로 이론적인 회절각도 $2\theta_{th}$ 사이에 0.24° 의 오차가 발생하나 이 정도 오차의 경우 충분한 공학적인 오차범위에 들어가므로 무시할 수 있다.¹⁰⁾

3. 실험결과와 고찰

3.1 Al 2024-T3 합금의 $\sigma_a - N$ 곡선

Fig. 5는 Al 2024-T3 합금의 피로강도(fatigue strength)를 결정하기 위하여 응력진폭 σ_a 와 반복수 N 의 관계를 나타낸 것이다.¹¹⁾ 일반적으로 철강재료는 $\sigma_a - N$ 곡선의 절점이 나타나므로 무한수명개념

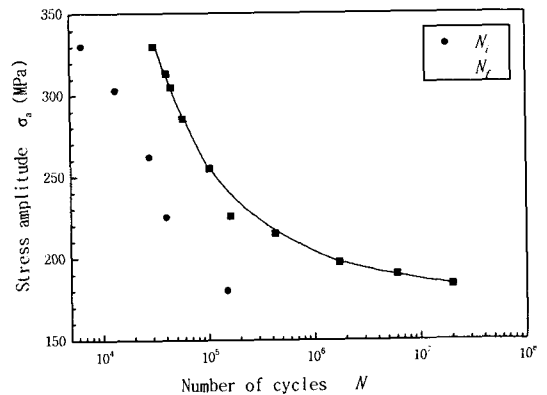


Fig. 5 $\sigma_a - N$ curve for 2024-T3 aluminium

의 피로한도(fatigue limit)를 피로강도로 사용하고 있으나 본 연구에서 사용하는 Al 2024-T3합금의 경우 2×10^7 반복수에서도 절점이 생기지 않았다. 따라서 피로강도 σ_w 는 Fig. 9의 $\sigma_a - N$ 곡선에서 1×10^7 반복수에 대한 시간강도를 피로강도로 설정하여 구하였으며 그 값은 180MPa이었다.

피로수명초기에 시험편 표면에서 다수의 미소 균열이 발생 및 성장하였으며 그 발생 시기는 X선 조사영역내에서 최대균열길이가 결정립 크기의 1~2배 정도에 해당되는 80 μ m정도일 때로 정의하여 ●의 표시로 나타내었다. 균열발생시기 N_f 는 시험편 표면을 배율 150배인 화상처리기로 관찰한 결과 피로수명의 10~20%사이에서 존재하고 있어 西谷¹²⁾등이 실험한 S25C제의 결과와 동일한 경향을 보이고 있다.

3.2 반복수에 따른 반가폭의 변화

Fig. 6은 Al 2024-T3합금의 반복수 변화에 따른 X선 회절선의 반가폭 변화를 나타낸 것이다. 그림

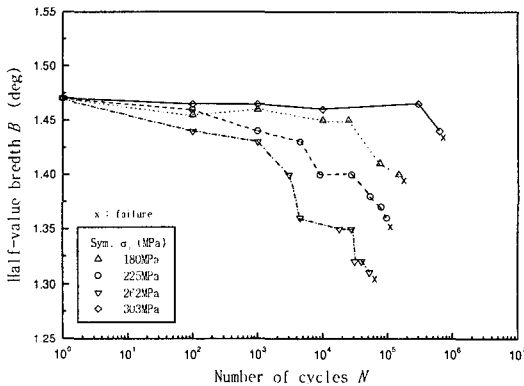


Fig. 6 Change of half-value breadth during fatigue process

에서 피로한도부근의 응력진폭 $\sigma_a=180$ MPa에서는 피로균열발생의 시작점으로 예상되는 약 2×10^5 반복수까지 반가폭 변화가 거의 일어나지 않았으나 그 후 반가폭이 점진적으로 감소하였다. 이러한 결과는 피로한도부근의 응력에서는 반가폭 변화가 일정하다는 平등¹³⁾이 수행한 실험결과와 거의 동일한 경향을 보이고 있다. 또한, 피로한도이상의 비교적 높은 응력진폭에 대해서는 피로수명초기에 반가폭

이 급격히 감소하고 그 후 완만하게 감소하다가 말기에 다시 급격히 감소하고 있다. 이러한 경향은 피로수명초기의 반가폭 B 가 변화하기 시작하는 시점이 기계 가공에서 생긴 많은 전위 및 격자결함이 피로에 의하여 정합되어 일부가 소실되고 에너지적으로 안정된 상태로 떨어지는 시기이기 때문이라 생각된다. 그러나 풀림 처리된 0.76% C 탄소강의 경우⁴⁾ 반가폭이 피로수명초기에 급격히 증가하고 그 후 완만한 증가를 보이다가 말기에 급격히 증가하고 있어 반가폭 B 가 재료 특성에 따라 상당히 의존하는 파라미터임을 알 수 있다.

3.3 반가폭비 B/B_0 에 의한 피로수명비 N/N_f 의 예측

3.3.1 $B/B_0 - \log N/N_f$ 의 관계를 이용하는 방법

Fig. 7은 반복수비의 대수 $\log N/N_f$ 와 반가폭비 B/B_0 를 나타낸 것으로 반가폭비 B/B_0 의 변화가 거의 없는 피로 수명 초기영역을 제외한 후, 각 데이터를 최소자승법에 의해 구한 식으로 표시한 그림이다. 平등^{4,5)}의 연구에 의하면 $B/B_0 - \log N/N_f$ 의 관계

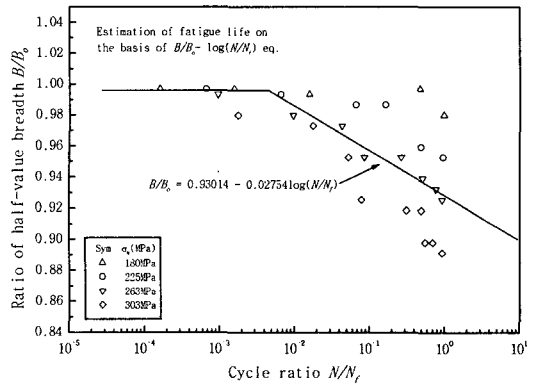


Fig. 7 Relation between ratio of half-value breadth B/B_0 and cycle ratio N/N_f

는 응력진폭에 관계없이 한 개의 직선으로 표시할 수 있으며, 다음 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$B/B_0 = -0.02754 \log\left(\frac{N}{N_f}\right) + 0.93014 \quad (6)$$

위의 식 (6)은 반가폭비 B/B_0 를 측정하므로써 비파괴적으로 피로수명을 예측할 수 있다는 것을 보여 준다. 그러나 그림에서 피로한도부근의 응력진폭

$\sigma_a=180\text{MPa}$ 데이터는 비교적 높은 응력진폭의 데이터와 상당히 다른 경향을 보이고 있다. 즉, $B/B_0\text{-}\log N/N_f$ 의 회귀식은 $\sigma_a=180\text{MPa}$ 데이터로 인하여 큰 오차를 가지게 되므로 $\sigma_a=180\text{MPa}$ 데이터를 제외해야만 회귀식 오차가 감소한다. 따라서 위에서 설명한 방법은 피로한도부근의 응력진폭 데이터로 인하여 피로수명을 예측하는 데 상당한 오차를 초래할 것으로 생각된다.

3.3.2 반가폭비 B/B_0 의 기울기와 N_f 선도를 이용하는 방법

Fig. 8은 반복수의 대수 $\log N$ 에 대한 반가폭비 B/B_0 를 나타낸 것으로 반가폭비 B/B_0 가 1.0인 수평선을 긋고 그 수평선을 기준으로 반가폭비 B/B_0 의 값이 변화되는 데이터를 이용하여 각 응력진폭에 해당하는 데이터를 최소자승법으로 직선 회귀시켜 구한 평균 기울기를 나타낸 것이다. 각 응력진폭에

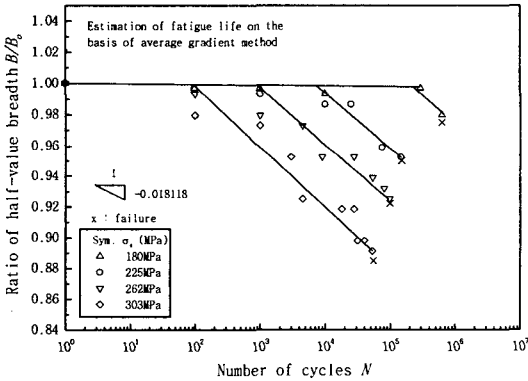


Fig. 8 Estimation of fatigue life on the basis of average gradient method

대한 기울기는 -0.00283 과 -0.03427 사이에 있으며 평균 기울기는 -0.018118 이었다. 즉, 반복수에 따른 반가폭비 B/B_0 의 변화는 반복수의 대수 $\log N$ 선도 상에서 응력진폭 σ_a 에 의존하지 않는 거의 일정한 기울기를 가진 직선으로 표시할 수 있으며 본 연구에서는 이러한 방법을 평균 기울기 피로수명평가방법(estimation of fatigue life on the basis of average gradient)이라 정의한다.

Fig. 9는 반복수의 대수 $\log N$ 에 대한 반가폭비 B/B_0 를 나타낸 것으로 수명 초기에 기울기 변화를

나타내지 않는 데이터는 생략하고 그 나머지 데이터로 정리한 것이다. 그림에서 직선은 각 응력진폭

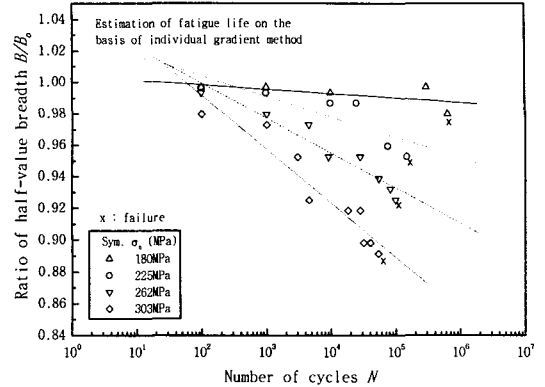


Fig. 9 Estimation of fatigue life on the basis of individual gradient method

에 대한 데이터를 최소자승법으로 직선회귀시켜 구한 것으로 반가폭은 피로수명의 초기영역부터 변화가 생기고 그 변화 개시점은 응력진폭에 관계없이 거의 동일하다. 또한, 그림에서 직선의 기울기는 각 응력진폭에 따라서 -0.0034 에서 -0.018421 까지의 범위에 존재하며 응력진폭이 크면 기울기도 커지고 있다, 이러한 결과는 초기피로수명영역의 반가폭이 결정립의 입내에서 형성되는 슬립 밴드의 생성과 성장에 따른 결정면의 변화와 관계되고 그 이후 영역의 반가폭은 결정립의 세립화 현상과 관계되므로 전자의 경우 응력진폭에 관계없이 거의 동일한 값을 보이거나 후자의 경우 응력진폭이 클수록 더 큰 변화를 보이기 때문이라 생각된다. 본 연구에서는 이러한 수명평가방법을 단일 기울기 피로수명평가 방법(estimation of fatigue life on the basis of individual gradient)이라 정의한다.

Fig. 10은 파단 반복수의 대수 $\log N_f$ 에 대한 반가폭비 B/B_0 를 나타낸 것으로 그림 중에 표시한 직선은 N_f 선(N_f line)이라 정의한다. 그림에서 응력진폭이 작을수록 N_f 에 대한 B/B_0 의 변화는 작게 되고 데이터들은 우측 상방으로 분포되고 있다. 이상의 평균 기울기 피로수명평가법 및 단일 기울기 피로수명평가법과 N_f 선을 이용한 피로수명평가법은 다음과 같은 절차를 통하여 수행된다.

첫째, 임의의 반복수 N 에서의 반가폭비 B/B_0 를

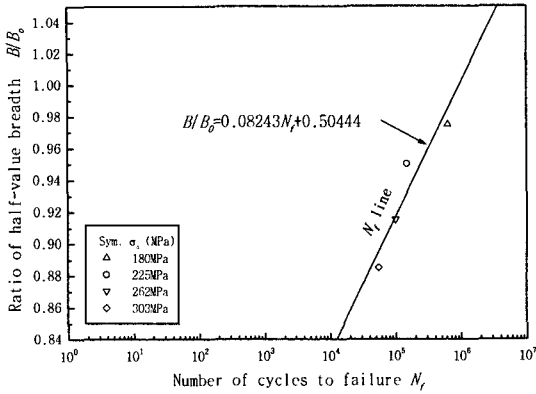


Fig. 10 Relation between B/B_0 and N_f for various stress amplitude σ_a

E/B_0-N 선도에 표시한다.

둘째, Fig. 10의 N_f 선을 B/B_0-N 선도에 표시한다.

셋째, Fig. 8과 9의 평균 기울기 피로수명평가법과 단일 기울기 피로수명평가법에서 구한 기울기를 가진 직선을 첫째 과정에서 수행한 점에서 둘째 과정에서 그은 N_f 선으로 긋는다.

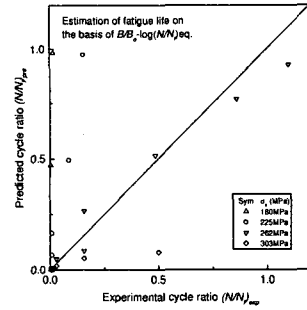
넷째, 셋째 과정에서 N_f 선과 교차된 점을 N 축에 수직하게 그어 만나는 점이 사용 응력진폭에 대한 파단 반복수 N_f 이다.

다섯째, 넷째 과정에서 구한 파단 반복수 N_f 에 대한 임의의 반복수 N 을 나누어 임의의 반복수 N 에 대한 피로수명비 N/N_f 를 구한다.

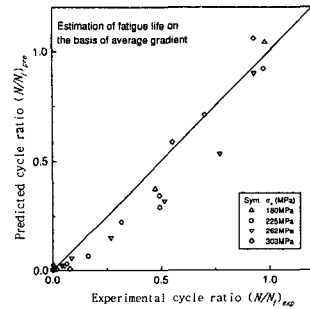
Fig. 11은 위에서 설명한 방법으로 예측된 피로 수명비 $(N/N_f)_{pre}$ 와 실험적 피로 수명비 $(N/N_f)_{exp}$ 를 서로 비교한 것으로 다음 식 (7)로 정의되는 추정평균오차¹⁰⁾를 이용하여 각 방법에 대한 평가를 수행한다.

$$\psi = \frac{|(N/N_f)_{exp} - (N/N_f)_{pre}|}{(N/N_f)_{exp}} \times 100 (\%) \quad (7)$$

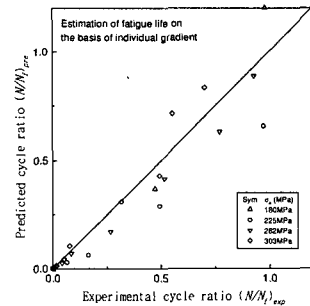
기존의 방법인 Fig. 11 (a)의 $B/B_0-\log N/N_f$ 식에 의한 방법은 실험적 피로수명비 $(N/N_f)_{exp}$ 와 예측 피로수명비 $(N/N_f)_{pre}$ 사이의 실험적 피로수명비에 대한 예측 피로수명비의 오차인 추정평균오차가 400.22% 정도의 매우 큰 평가 오차를 수반하고 있으며, 특히 회귀식을 세울 때 제외하였던 피로 수명 초기 영역의 데이터는 거의 예측할 수 없다. 그러나 Fig. 11 (b)의 평균 기울기 피로수명평가방법과 Fig.



(a) $B/B_0-\log(N/N_f)$ equation



(b) Average gradient method



(c) Individual gradient method

Fig. 11 Relation between predicted cycle ratio and experimental cycle ratio

11 (c)의 단일 기울기 피로수명평가방법은 추정평균오차가 전자의 경우 15.57%, 후자의 경우 16.86%이므로 전자의 방법이 후자의 방법에 비하여 추정평균오차가 1.29% 더 작다. 특히, Fig. 11 (a)의 방법은 Fig. 11 (b)의 방법에 비하여 추정평균오차가

26배나 되므로 $B/B_0 \sim \log N/N_f$ 관계식을 이용하는 기존의 피로수명평가방법이 상당한 평가 오차를 가지고 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 11 (b)와 (c)의 피로수명평가방법은 예측 피로 수명비가 실험적 피로수명비와 잘 일치하고 있으나 피로수명 증기 이후의 각 데이터를 비교해 보면 평균기율기 피로수명평가방법이 개별기율기 피로수명평가방법보다 수명 예측에 더욱 유용하다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 단일 기율기 피로수명평가방법이 피로수명 초기영역의 데이터를 포함하는 것에 비하여 평균기율기 피로수명평가방법에서는 반가폭비 B/B_0 의 변화가 거의 없는 데이터를 제외하였기 때문이라 생각된다. 또한, 단일기율기 피로수명평가방법은 각 응력진폭에 대한 기율기를 개별적으로 알아야 하지만 평균 기율기 피로수명평가방법은 각 응력진폭에 대하여 공통된 기율기를 적용함으로써 피로수명을 간단하게 예측할 수 있다. 따라서 평균 기율기 피로수명평가방법은 피로손상을 받는 부재의 피로수명을 예측하는데 매우 유용한 방법이라고 생각된다.

4. 결론

X선 회절에 의해 피로수명을 예측하기 위하여 항공기 구조용 재료로 사용되고 있는 Al 2024-T3합금에 대하여 평면굽힘 피로실험을 실시하고 반복수의 증가에 따른 X선 반가폭을 연속적으로 측정해 조사영역내의 손상정도와 X선 반가폭의 관계를 규명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 반복수의 증가에 따른 반가폭 B 는 피로한도 부근의 응력을 제외하면 초기에 급격한 감소, 증기에 완만한 감소, 그리고 말기에 급격한 감소의 3단계 과정을 나타내고 있다.

2. 반가폭비 B/B_0 의 변화는 피로수명의 초기를 제외하면 하중조건에 관계없이 반복수의 대수 $\log N$ 에 대하여 각 응력진폭의 평균기율기로 표시할 수 있다.

3. 피로수명비의 대수 $\log N/N_f$ 와 반가폭비 B/B_0 를 이용하여 피로수명을 예측하게 되면 피로수명 초기영역의 데이터로 인하여 추정평가오차가 400.22%로 공학적인 오차범위를 상당히 벗어나고 있다.

4. $\log N$ 과 $\log B/B_0$ 선도의 각 응력진폭에 대한 평균기율기를 이용하는 피로수명평가법은 전 응력진폭에 대한 $\log N/N_f$ 과 $\log B/B_0$ 사이의 관계식을 이

용하는 기존의 평가법에 비하여 추정평균오차가 약 26배 감소되고 있다.

참고문헌

1. B. Reynier, G. Chappuis and J.M. Sprauel, "X-ray diffraction study of fatigue behavior of a shot-peened aluminum alloy," *Experimental Mechanics*, June, pp. 112~118, 1995.
2. 日本材料學會, "機械材料およびその機械的性質と試験法," 日本材料學會, pp. 173~175, 1980.
3. 田中啓介, 廣瀬幸雄, "X線フラクトグラフィ," 材料, 第37卷, pp. 1240~1246, 1988.
4. 平修二, 本田和男, 松木健次, "X線による金属材料疲労破壊に關ある研究(X線回折半價幅, 残留應力およびかたさの諸化について)," 日本機械學會論文誌, 第28卷, 第194號, pp. 1335~1343, 1962.
5. 平修二, 本田和男, "X線による金属材料疲労破壊子知法に關ある研究," 日本機械學會論文誌, 第28卷, 第188號, pp. 452~459, 1961.
6. 한봉희, 최성조, "X線回折法에 의한 残留應力과 疲労에 관한 研究," 大韓金屬學會誌, 第18卷, 第3號, pp. 225~231, 1980.
7. R.E. Peterson, "Stress Concentration Design Factors," John Willey & Sons, P. 44, 1953.
8. 韓鳳熙, "X線 回折," 반도출판사, pp. 151~159, 1990.
9. 理學機電株式會社, "X線回折の手引," 理學機電株式會社, pp. 66~71, 1981.
10. 주원식, 조석수, "신경회로망을 이용한 고온 저사이클 피로균열성장 모델링에 관한 연구," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제9호, pp. 2752~2759, 1996.
11. J.A. Collins, "Failure of Materials in Mechanical Design," John Willey & Sons, pp. 194~228, 1993.
12. 西谷弘信, 藤村顯世, 福田幸雄, 福田孝之, "炭素鋼の疲労過程における疲労被害とX線半價幅の關係," 日本機械學會論文集, 第55卷, 第510號, pp. 192~197, 1989.
13. 平修二, 本田和男, "X線による金属材料疲れ破損に關ある研究(鑄鐵および鑄鋼材料に繰返し應力が作用する場合のX線回折線半價幅の變化について)," 日本機械學會論文集, 第27卷, 第179號, pp. 1066~1073, 1960.