

프랙탈 차원을 이용한 Al 2024-T3 합금의 피로수명비 해석에 관한 연구

조석수
삼척대학교 자동차공학과

A Study on the Analysis of Cycle Ratio Using Fractal Dimension in Al 2024-T3

SEOK-SWOO CHO
Department of Vehicle Engineering, Samchok National University, Samchok 245-080, Korea

KEY WORDS: Fractal dimension 프랙탈 차원, Coast line method 해안선 방법, Extreme statistics 극치통계, Scale length 스케일 길이, Surface micro-crack 표면미소균열, Cycle ratio 피로수명비

ABSTRACT: Surface micro-crack grows along intergranular or transgranular region of crystal grains. But if it meets the barrier such as sessile dislocation and precipitates, it loses straightness and deflects. Investigators had many difficulties in estimating fatigue life of smooth specimen because of the random distribution, growth and coalescence of surface micro-cracks. The path of surface micro-crack has irregularity due to nonhomogeneous microstructure. Euclidian geometry can't quantify the shape of surface micro-crack but fractal geometry can. Therefore, in this paper fractal dimension is measured at various stage of cycle ratio and estimated cycle ratio in 2024-T3 aluminium alloy.

1. 서 론

기계나 구조물에서 일어나는 파괴의 대부분은 피로에 의하여 일어나는 것이며 자동차, 항공기, 터빈등의 사고위인도 대부분 피로파괴인 것으로 지적되고 있다. 따라서 반복하중을 받는 부재의 경우 안전율을 설정할 때 피로한도에 관한 항목이 반드시 포함되고 있다. 수송기계는 이러한 내용을 충분히 고려하고 운전성능을 향상시키기 위하여 기존의 철강 재료를 대신하여 고강도 알루미늄 합금을 사용하고 있다. 특히, 이 재료는 합금원소의 첨가와 인공시효를 통하여 석출경화시키므로서 피로 손상 형태가 복잡해져 단일 균열에 의한 파손과 파괴를 가지는 경우는 매우 드물며 노치가 없는 평활재의 경우 피로 손상의 대부분이 표면미소균열에 의하여 발생되어 주균열로 성장하여 파괴된다(조와 주, 1990).

Sakurai *et al.*(1986)은 재료 표면에서 발생하는 미소 균열의 분포와 성장기동을 기초로 피로 손상을 평가하였고, Kitagawa *et al.*(1984)은 확률적으로 비교적 좁은 면적의 위험 영역을 설정하여 균열의 발생과 성장 및 균열간 합체에 의한 균열성장 속도의 가속 현상을 모델링하였으나 데이터의 수집 및 처리에 많은 시간과 노력이 필요하였다.

이들의 연구에서 표면미소균열은 결정입내나 입계를 따라 성장하다가 부동 전위나 개재물과 같은 장애물을 만나게 되면 균열이 휘게 됨으로서 균열의 직진성(crack straightness)이 재료 조직의 불규칙성과 미소 균열사이의 상호 간섭에 의한 합체

에 의하여 상당한 방해를 받아 균열 형태가 매우 불규칙하게 뒤틀리게 된다. 그러나 기존의 표면미소균열에 관한 연구에서는 평활재의 피로수명을 불리적 의미의 균열 길이나 밀도를 이용하여 평가하려는 시도가 대부분이었고 균열 휘에 의한 균열 곡선의 형태를 정량화하려는 노력은 시도되지 않았다.

프랙탈 기하학(fractal geometry)은(Cherepanor *et al.*, 1995) 균열과 같이 불규칙한 곡선 형태를 정량화할 수 있다. 즉, 복잡한 형태의 도형 차원을 비정수화 함으로서 그 특징을 표현하고 있다. 특히, 이러한 개념은 측정 스케일 크기의 중간영역에서 나타나고 복잡한 형상 과정에서 자기 조직적 인자(self-organizing factor)를 추출하여 그 복잡한 형태를 평가할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 Al 2024-T3 합금을 이용하여 피로수명비에 따른 표면미소균열의 복잡한 양상을 프랙탈 차원으로 해석하여 피로수명비와 프랙탈 차원의 관계를 검토함으로써 프랙탈 차원이 피로수명평가에 유용함을 보였다.

2. 실험방법

2.1 재료와 시험편

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

Fig. 1은 인장시험편과 피로 시험편의 형상과 치수를 각각

Table 1 Chemical composition of Al 2024-T3 (wt. %)

Material	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Cr	Zn	Ti	Al
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 Al 2024-T3

Material	Yield strength σ_{ys} (MPa)	Tensile strength σ_{ts} (MPa)	Elongation ϵ_l (%)	Young's modulus E (GPa)
Al 2024-T3	380	507	21.6	77

나타낸 것으로 최대압입하중의 작용방향과 압연방향을 일치시켜 92mm×32mm×4.2mm의 크기로 절단하여 밀링가공하였다. 또한 시험편중 표면미소균열을 관찰할 영역은 #240에서 #1500 샌드 페이퍼(sand paper)까지 폴리싱(polishing)한 후 알루미늄(Al_2O_3)로 경면 연마하였다.

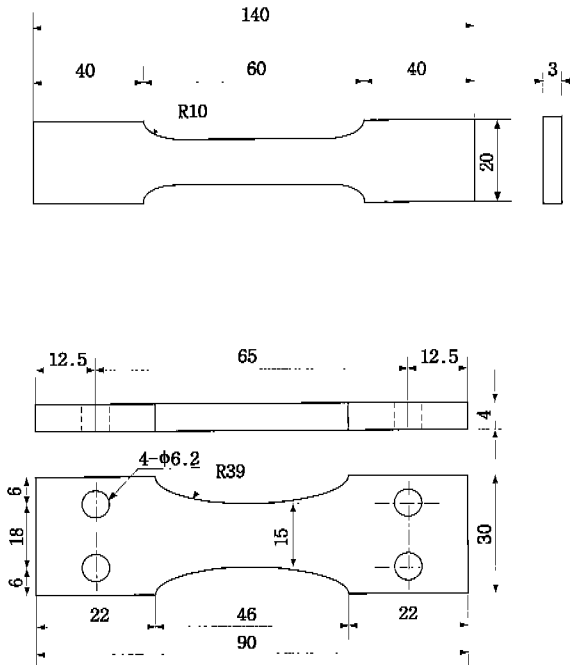


Fig. 1 Geometry and dimension of test specimen (unit: mm)

2.2 피로균열관찰과 프랙탈 차원 측정 실험

본 피로실험에 사용한 시험기는 쉐크형(Schenck type) 평면압입 피로실험기(Mori testing machine Co. Model 5171)로써, 최대 압입모멘트는 2 kgf·m이고 회전수는 1500rpm이다. 실험은 응력비를 0으로 하고 응력진폭(stress amplitude) σ_a 를 305MPa로 하는 양진피로시험형태로 수행되어졌다.

Fig. 2는 반복수가 증가함에 따라 시험편의 중앙부에서 발생하고 전파되는 표면미소균열의 형태를 측정하기 위한 화상치

리시스템(image processing system)을 나타낸 것으로 시험편 중앙에 임의로 설정한 5mm×12mm의 영역내에서 100배의 현미경으로 관찰 및 측정할 수 있는 장치를 나타낸 것이다. 또한 프랙탈 차원 측정 실험은 피로시험 도중 적당한 반복수에서 시험편을 시험기에서 분리하여 금속 현미경으로 관찰 영역을 금속 현미경이 부착된 화상처리시스템(0.01mm의 분해능)으로 촬영한 후 시험편을 다시 장착하여 시험기를 재가동시켜 피로 시험을 계속 수행하였다. 표면미소균열사진은 화상처리시스템으로 촬영한 사진을 Adobc(R) Photoshop(R) 4.0으로 최대 15배 정도까지 다시 확대하여 편집함으로써 최대 1500배의 배율을 가지게 된다. 그리고 프랙탈 차원 D_f 는 이상의 균열사진을 이용하여 자체 개발한 Fractal Analyser 1.0 프로그램으로 측정하였다.

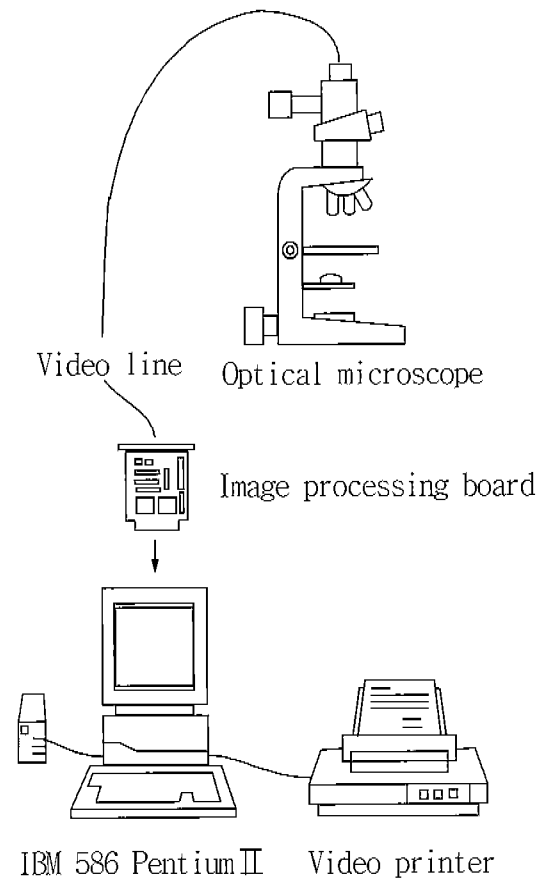


Fig. 2 Schematic view of test setup with image processing system

Fig. 3은 5mm×12mm의 관찰영역을 0.2mm의 동일 간격으로 평행하게 25개 분할한 상태를 나타낸 것이다. 또한 표면미소균열길이 2a와 프랙탈 차원 D_f 의 누적상대숫수는 관찰영역의 25개 샘플영역에서 각각 구하였고 그리한 물리량의 통계적 분포 특성은 각종의 확률지에 플롯트하여 가장 적합한 분포로 결정하였다.

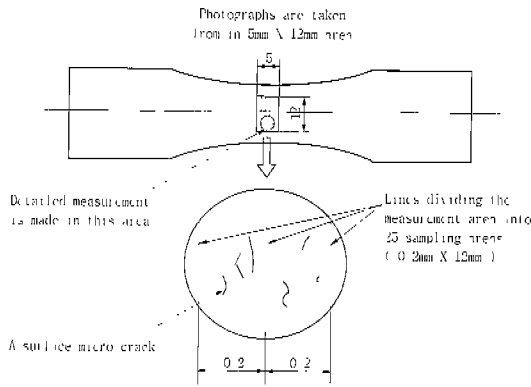


Fig. 3 Sampling method of surface micro-crack

3. 표면미소균열과 프랙탈 차원

3.1 프랙탈 차원의 정의

Mandelbrot(1983)는 1975년에 위상적 차원의 한계성을 극복하기 위하여 프랙탈 차원(fractal dimension)을 제안하였다. 프랙탈 기하학은 곡선의 접선을 정의할 수 없는 즉 미분할 수 없는 형태를 취급하며 이러한 형태는 다른 스케일(scale)에서도 자기 유사성(self-similitude)을 보존하게 된다. 이러한 자기 유사성을 확대시켜 정량적으로 표시한 양이 프랙탈 차원이다. 프랙탈 기하학에서 임의의 형태에 대한 차원은 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$N = S^{D_f} = \left(\frac{1}{r}\right)^{D_f} = r^{-D_f} \quad (1)$$

여기서 N 은 각 단계에서의 subpart 수이고 S 는 척도 계수 (scaling factor)로서 전체 곡선을 투영하였을 때의 길이를 1로 가정하여 그 곡선을 길이 r 로 나누었을 때의 역수이다. 식 (1)의 양변에 대수를 취하면 프랙탈 차원 D_f 는 다음과 같다.

$$D_f = \frac{\ln N}{\ln S} \quad (2)$$

Fig. 4는 인공적 프랙탈 곡선중의 하나인 Koch곡선(Lung and Mu, 1988)의 형성 과정을 나타낸 것이다. 그림에서 Initiator는 길이 1인 초기의 기하학적 형상을 나타낸 것이고 Generator는 Initiator의 형상을 변화시키는 도구이다. Koch곡선의 Generator는 먼저 Initiator를 3등분하여 가운데 부분을 제거한 뒤 각각의 Initiator 내측 끝점에서 처음 Initiator의 중간 상측까지 Initiator 길이 1/3되는 직선을 그음으로서 만들수 있다. 이상의 Generator를 무한히 반복시키면 인공적인 프랙탈 곡선을 얻을 수 있으며 위의 마지막 곡선의 프랙탈 차원은 $n=2$ 단계에서 $S=1/9$ 이고 $N=16$ 이므로 식 (2)에 의하여 계산하면 다음과 같다.

$$D_f = \frac{\ln 16}{\ln 9} = 1.2619 \quad (3)$$

따라서 Koch곡선의 프랙탈 차원 D_f 는 n 가 아무리 많이 반복

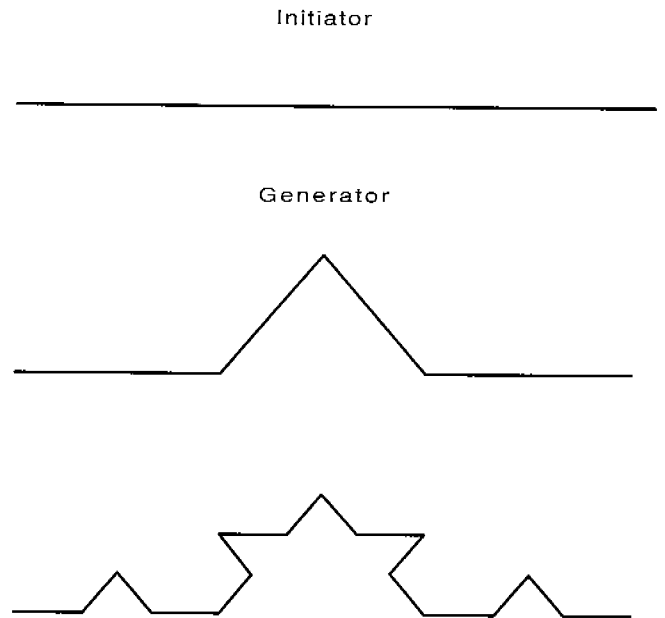


Fig. 4 Stages in generation of the triadic Koch curve

복되어도 1.2619차원을 가지게 된다.

3.2 프랙탈 차원의 측정

현재까지 프랙탈 차원을 측정하기 위한 다양한 방법이 제안되고 있으므로 본 연구에서 고려하는 표면미소균열을 프랙탈 차원으로 해석하기 위해서는 문제에 적합한 방법을 설정하여야 한다. 그 방법중 해안선 방법(高安, 1986)이 표면미소균열의 형상과 비슷하므로 프랙탈 차원을 측정하는 데 상당히 효과적이라 생각된다.

Fig. 5는 해안선 방법을 표시한 것으로 표면미소균열의 형태를 스케일 길이 r 선분의 집합으로 나타내었다. 곡선의 왼쪽

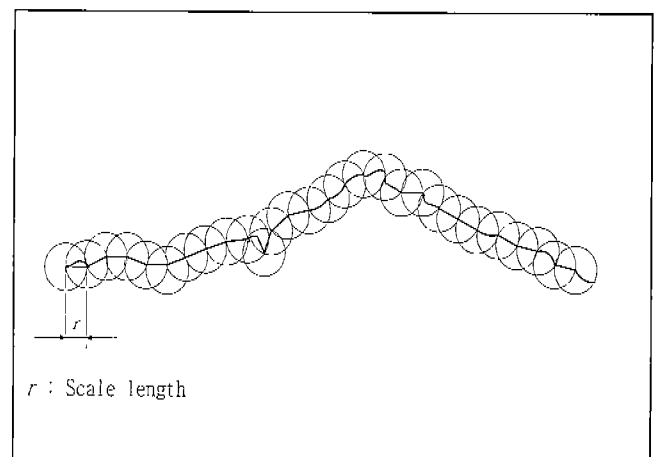


Fig. 5 Measurement of fractal dimension D_f on the basis of coast line method

끝 부분을 시점으로 설정하고 그것을 중심으로 반지름 r 인 원을 그리고 그 원과 곡선이 최초로 교차된 점과 시점을 직선으로 연결한다. 이 교점을 새로운 시점이라 정의하여 이러한 과정을 반복한다. 이와 같이 스케일 길이 r 에 의하여 표면미소균열 형태를 측정할 때 필요한 총 선분 개수를 N 이라 할 때 다른 스케일 길이로 상술의 절차를 반복하면 당연히 다른 총 선분 개수를 구할 수 있다.

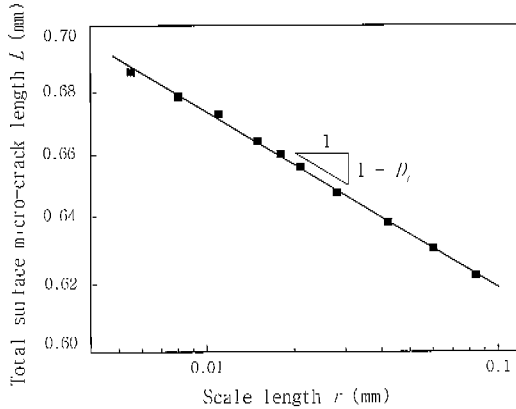


Fig. 6 Relation between total surface micro-crack length L and scale length r

Fig. 6은 이러한 작업을 양 대수 좌표축에 표시한 모식도를 나타낸 것이다. Richardson(酒井; 勝川, 1992)은 복잡한 해안선을 프랙탈로 차원화시킨 결과 스케일 길이 r 과 총 선분의 개수 N 사이에서 다음과 같은 관계식이 성립한다고 주장하였다.

$$N = Fr^{-D_f} \quad (4)$$

본 연구의 경우 F 는 고려하는 프랙탈 도형 즉, 표면미소균열의 곡선 형상에 의하여 결정되는 상수이며 D_f 는 해안선 방법에 의한 프랙탈 차원이다. 총표면미소균열길이 L 은 스케일 길이 r 로 근사화하면 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$L = Nr = Fr^{1-D_f} \quad (5)$$

식 (5)의 양변을 대수로 취하면 다음 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\ln L = \ln(F) + (1 - D_f) \ln r \quad (6)$$

이 관계식을 Fig. 6과 관련시켜 보면 그림의 직선 기울기가 $(1 - D_f)$ 이므로 프랙탈 차원 D_f 를 간접적으로 구할 수 있다. 그림 중의 직선 기울기는 반드시 음의 값을 가지므로 프랙탈 차원 D_f 는 항상 1보다 크다. 이와 같이 스케일 길이에 대한 총표면미소균열길이의 영향을 Richardson 효과(김 등, 1996)라 부른다. 그러나 이러한 Richardson 효과를 정확히 만족시키기 위해서는 종점이 반드시 스케일 길이 r 을 반지름으로 하는 원 내부로 들어 와야만 한다.

4. 표면미소균열의 프랙탈 특성과 피로수명평가

4.1 프랙탈 차원에 미치는 관찰 배율의 영향

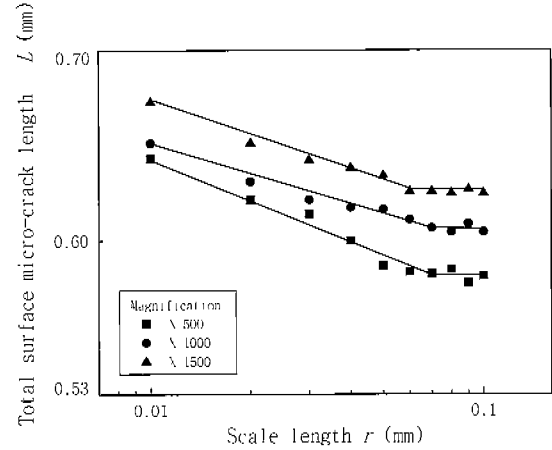


Fig. 7 Fractal plot of surface micro-crack as a function of magnifications

Fig. 7은 피로수명비 N/N_f 가 0.84일 때의 최대표면미소균열 $2a_{max}$ 을 이용하여 프랙탈 차원 $D_{f, 2a_{max}}$ 에 미치는 관찰 배율의 효과를 검토하기 위하여 스케일 길이 r 를 횡축에, 총최대표면미소균열길이 L 을 종축에 표시한 것이다. 스케일 길이가 증가함에 총최대표면미소균열길이가 감소하고 있으나 0.07mm 이상의 스케일 길이가 되면 총최대표면미소균열길이는 거의 일정하게 된다. 이러한 결과는 Al 2024-T3합금의 최대표면미소균열이 나타낼 수 있는 프랙탈 특성이 0.07mm 스케일 이하에서만 나타난다는 것을 보이고 있다. 또한, 그림에서 프랙탈 차원은 각 관찰 배율에 따라 최대 10^5 차원 정도의 차이를 나타내고 있다. 이것은 최대표면미소균열의 프랙탈 곡선이 생성되는 과정에서 있기 때문에 스케일 길이에 따른 총최대표면미소균열길이의 기울기가 달라지기 때문이다. 즉, 프랙탈 곡선의 Generator가 n 회 반복되어 그 생성 과정이 끝난 상태라면 관찰 배율에 관계없이 Richardson식이 그대로 적용될 수 있으나 본 실험의 표면미소균열의 경우 그러한 조건을 만족시키는 균열 형상은 거의 존재하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 프랙탈 차원을 결정할 때 스케일로 측정하고 남은 여분의 균열길이는 무시하였다. 또한, 관찰 배율에 따른 프랙탈 차원은 최고 10^5 차원 정도의 오차를 발생시킴으로 관찰 배율이 피로수명을 평가하는 데 그다지 영향을 미치지 못하는 것으로 생각되어 각 피로수명비에 대한 프랙탈 차원은 1500배의 표면미소균열관찰사진을 이용하여 구하였다.

Fig. 8은 프랙탈 차원 D_f 를 결정하는 데 필요한 스케일 길이 r 과 총표면미소균열길이 L 사이의 재료적 특성에 따른 차이를 파악하기 위하여 Tsuda(Tsuda et al., 1991)등이 수행한 SNCM 439강의 응력부식균열을 프랙탈 차원으로 평가한 결과를 모식적으로 나타낸 것이다. 미소 스케일영역에서는 스케일 길이에 대한 총표면미소균열길이의 비인 기울기가 완만하다가 중간스케일

영역에서는 급격하게 변화되면서 한계 스케일이상이 되면 기울기가 0이 된다. 따라서 프랙탈 차원을 구할 수 있는 구간이 미소 스케일 영역과 거시 스케일 영역사이의 중간 크기의 스케일 영역에 한정된다는 것을 알 수 있으며 Tsuda에 의하면 프랙탈 차원은 재료 조직에 큰 영향을 받는 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서 사용하는 스케일 길이는 0.008~0.12mm로서 실제 프랙탈 차원을 구하는 직선 영역과 기울기가 0이 되는 영역만 나타났었다. 이러한 결과는 관찰 배율의 한계성으로 인하여 완전한 기울기를 가지고 있는 미소 스케일 영역을 촬영하지 않았기 때문이다. 또한, SNCM 439강의 응력부식균열에 대한 프랙탈 차원은 대략 입계파괴가 일어나는 c영역에서는 1.05이고 입내파괴와 입계파괴가 혼재하는 b영역에서는 1.1이었다(Tsuda *et al.*, 1991). A1 2024-T3합금은 명확한 스트라이에이션 간격(striation spacing)을 가지는 입내파괴를 보이며(Nageswararao *et al.*, 1975) 프랙탈 차원은 $N/N_f=0.94$ 에서 1.0618로서 가장 큰 값을 보이고 있으므로 본 실험에서 사용한 재료의 표면 미소 균열의 형태는 응력부식균열형태에 비하여 상당한 직진성을 가지고 있음을 알 수 있다.

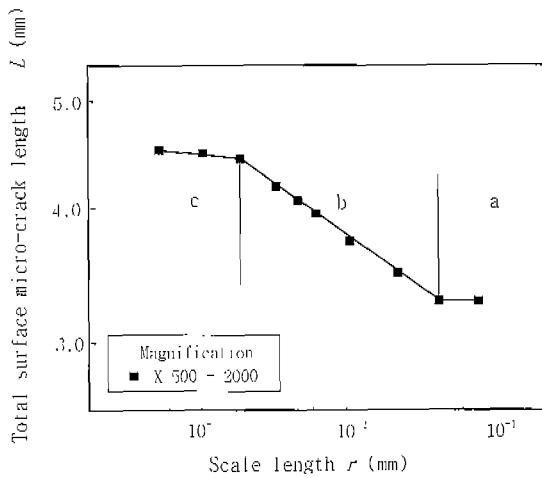


Fig. 8 Fractal characteristics of surface crack in SNCM 439 steel

4.2 프랙탈 차원의 통계적 특성

Fig. 9는 25개의 샘플영역으로 부터 구한 표면미소균열의 프랙탈 차원에 대한 통계적 특성을 규명하기 위하여 각 표면미소균열에서 측정된 프랙탈 차원의 평균값 $D_{f avg}$ 와 누적상대숫자 F 의 관계를 Weibull 확률지(Walpole and Myers, 1985)로 정리한 것이다. 그림에서 3모수 Weibull 분포를 나타내는 각 곡선은 피로수명비 N/N_f 가 증가함에 따라 오른쪽으로 이동하고 있으며 프랙탈 차원의 최대값도 동시에 증가하고 있다. 이러한 결과는 주 등의 최대균열길이분포에서 나타난 것과 동일한 경향을 나타내고 있다. 또한, 여기서 사용된 Weibull 분포 함수 $F(x)$ 는 다음 식과 같이 표현할 수 있으며 m 과 η 및 γ 는 이러한 분포의 모수를 나타내고 있다.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad (7)$$

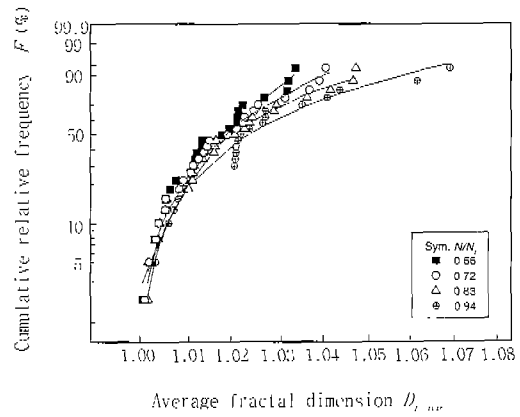


Fig. 9 Weibull distribution of fractal dimension $D_{f avg}$ for surface micro-crack

여기서, m : 형상모수, η : 척도모수, γ : 위치모수

각각의 모수는 위치 모수 γ 를 변수로 하여 $X=\ln(x-\gamma)$ 와 $Y=\ln\{\ln[1/(1-F)]\}$ 를 1차회귀시킴으로서 X 와 Y 의 상관계수가 최대로 될 때의 γ 를 위치모수 γ 로 결정한 뒤, m 과 η 를 이러한 회귀 직선식에 대입하여 구하는 상관계수법에 의하여 결정하였다.

Fig. 10은 3모수 Weibull 분포의 세가지 모수 m , η , γ 를 피로수명비 N/N_f 에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 위치 모수 γ 는 프랙탈 차원 $D_{f avg}$ 의 하한값을 나타내는 것으로 피로수

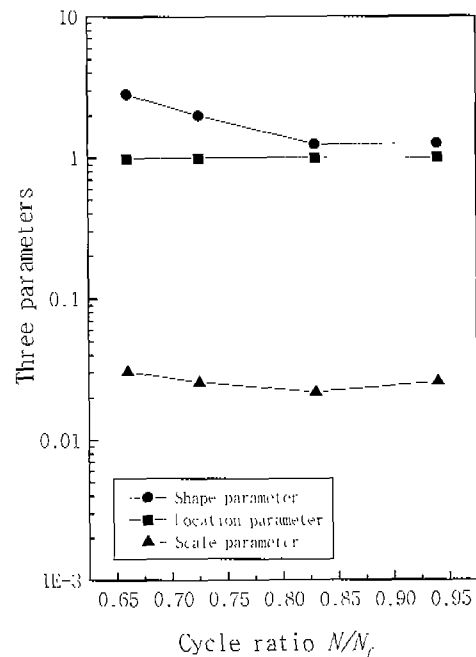


Fig. 10 Variation of parameters in the distribution of fractal dimension $D_{f avg}$

명비에 관계없이 거의 일정하다는 것을 알 수 있다(안 등, 1996). 이러한 결과는 표면미소균열이 생성되거나 정제되는 시기의 프랙탈 차원이 거의 일정하다는 것을 나타내고 있다. 또한, 형상 모수 m 은 피로수명비에 따라 점진적으로 작아지고 있으나 표면미소균열길이분포처럼 그 값이 1보다 큰 마모 고장형에서 1보다 작은 초기 고장형으로의 신뢰공학적 전이현상은 볼 수 없다. 이러한 현상은 피로수명초기에 슬립대나 입계를 따라서 성장하는 균열이 급속히 성장하다가 다른 입계나 석출물에서 휘게 되어 대부분의 표면미소균열형태가 지그재그(zigzag)로 됨으로서 표면미소균열길이에 비하여 피로수명비에 따른 프랙탈 차원의 변화를 일으키는 표면미소균열의 개수가 급격히 감소되지 않았기 때문이다.

4.3 프랙탈 차원 $D_{f, avg}$ 와 피로수명비 N/N_f 의 관계

Fig. 11은 시험편의 25개 샘플영역을 기초로 전체 표면미소균열에 대한 프랙탈 차원을 Fig. 6의 직선의 기울기로 각각 구한 뒤 그 값들을 평균한 $D_{f, avg}$ 와 피로수명비 N/N_f 의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 피로수명비의 증가에 따라 평균 프랙탈 차원이 선형적으로 증가하고 있으며 최소자승법으로 키브 피팅(curve fitting)한 결과는 다음과 같다.

$$D_{f, avg} = 1.00235 + 0.02206 \cdot (N/N_f) \quad (8)$$

이러한 결과는 표면미소균열 형태가 피로수명비의 증가에 따라 점진적으로 프랙탈적 특성을 가지게 된다. 따라서 전체 표면미소균열의 프랙탈 차원 $D_{f, avg}$ 는 피로수명비 N/N_f 에 대하여 선형적 관계를 가지고 있으므로 실험적인 파괴역학 파라미터가 될 수 있음을 알 수 있다.

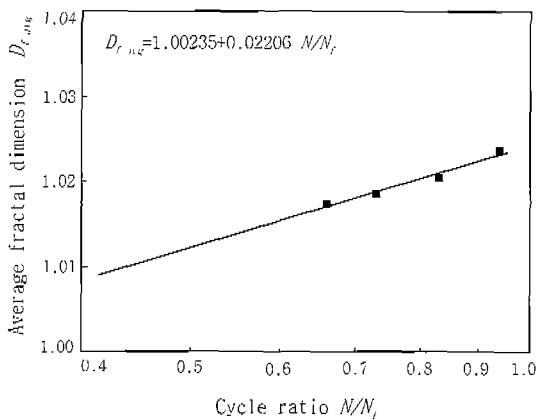


Fig. 11 Relation between average fractal dimension $D_{f, avg}$ and cycle ratio N/N_f

4.4 극치통계해석에 의한 최대균열길이의 추정

Fig. 12는 각 피로수명비 $N/N_f = 0.66, 0.72, 0.83, 0.94$ 에서 각 샘플 영역의 최대표면미소균열분포를 극치 확률지(안 등, 1996)에 나타낸 것이다. 극치통계해석에 사용된 대상면적은 표면미소균열이 발생되어 파단에 이를 수 있는 위험면적으로 설정하

였으며 본 연구의 경우 시험편의 라운딩 부분의 면적인 910.3 mm²로 잡았고 샘플면적은 가로, 세로를 각각 0.2mm, 12mm로 설정하여 2.4mm²로 잡았다. 즉, 재귀 기간 (return period) T는 대상면적과 샘플면적과의 비인 910.3/2.4이며 계산 결과 379.3이 되었다. 따라서 대상면적에서 나타날 수 있는 예상최대표면미소균열길이는 극치 확률지의 재귀 기간 379.3에서 회귀직선으로 수평선을 긋고 다시 아래로 수직선을 내려서 최대표면미소균열길이 축과 만나는 점이다. 상술의 방법으로 $N/N_f = 0.66, 0.72, 0.83, 0.94$ 에서 구할 수 있는 최대표면미소균열길이는 각각 0.39, 0.72, 1.57, 2.4mm이다. 이러한 균열에 가장 가까운 길이를 가지는 실제 최대표면미소균열길이는 각각의 피로수명비에서 0.58, 0.98, 1.57, 2.9mm로 실제 최대표면미소균열길이에 대한 예상 최대표면미소균열길이의 오차는 0~0.5mm이다.

4.5 프랙탈 차원 $D_{f, 2\sigma_{max}}$ 와 피로수명비 N/N_f 의 관계

안 등(1996)은 표면미소균열분포의 극치통계해석을 기초로 대상영역중의 최대표면미소균열길이를 추정하여 부재의 피로수명을 평가하였다. 이러한 개념은 부재의 파괴를 일으키는 주요 인자를 최대표면미소균열로 가정하고 있다. 즉, 안전성을 검사하려는 부재의 대상영역중에 반드시 최대표면미소균열이 존재하여 이것이 파괴를 일으키는 주균열로 성장한다는 가정을 기본으로 하고 있다. 따라서 최대표면미소균열의 프랙탈 차원과 피로수명비의 관계를 알아보는 것은 최대표면미소균열의 프랙탈 차원이 피로수명을 평가하는데 주요한 파라미터로 사용할 수 있는지를 검토할 수 있다.

Fig. 13은 4.4절의 극치통계해석에서 구한 예상최대표면미소균열길이에 가장 가까운 최대표면미소균열의 프랙탈 차원 $D_{f, 2\sigma_{max}}$ 을 각 피로수명비 N/N_f 에 대하여 나타낸 것이다. 전체적으로 피로수명비에 대하여 프랙탈 차원이 점진적으로 증가되고 있으나 $N/N_f=0.83$ 에서 프랙탈 차원이 갑작스럽게 증가되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 사용한 최대표면미소균열이 주균열이므로 표면미소균열사이의 합체에 의하여 표면미소균열형태가 갑작스럽게 변화하였기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 파괴를 일으키는 주균열의 프랙탈 차원은 표면미소균열사이의 합체가 일어나기 이전까지는 피로수명비와 주균열의 프랙탈 차원사이 선형적 거동을 보이지만 $N/N_f=0.83$ 과 같이 합체된 균열의 이전 위치가 상당히 다른 경우 표면미소균열사이의 합체가 발생되면 균열형상이 갑작스럽게 변화되므로 주균열의 프랙탈 차원도 동시에 증가하게 된다. 또한, 피로수명발기인 $N/N_f=0.94$ 의 프랙탈 차원은 $N/N_f=0.83$ 의 프랙탈 차원에 비하여 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 $N/N_f=0.83$ 이후의 표면미소균열이 재료 조직적 특성에 의존하기 보다 1차원적 균열길이와 부하 응력이 강하게 의존하기 때문에 표면미소균열사이의 합체에 의한 균열형상이 갑작스럽게 변화된 것을 수명발기의 균열성장부분에서 상당히 완화시켜 주기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 대상 영역내의 최대표면미소균열의 프랙탈 차원을 이용하여 부재의 피로수명을 평가하게 되면 표면미소균열사이의 합체거동에 의하여 식 (8)의 피로수명평가식이 각 실험 데이터에 대하여 최대 17%

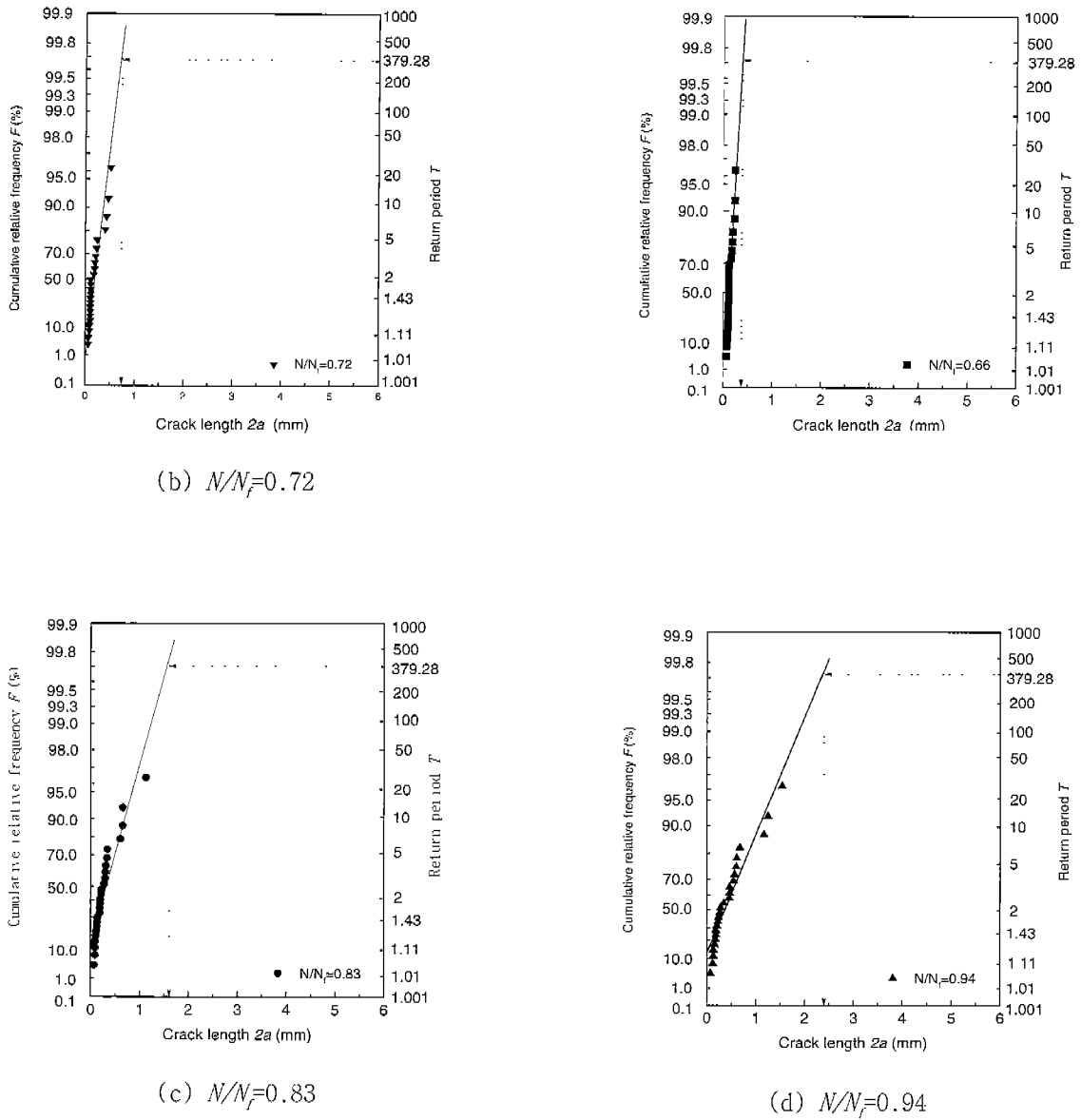


Fig. 12 Extreme distribution of $2a_{max}$ with cycle ratio N/N_f

의 추정 오차를 발생시키고 있다.

이상의 결과에서 평활재의 피로수명비 N/N_f 는 주균열의 프랙탈 차원에 비하여 전체표면미소균열의 프랙탈 차원에 대하여 상당히 좋은 선형적 관계를 가지고 있으므로 전체표면미소균열의 프랙탈 차원이 피로수명평가에 훨씬 더 유용하다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 AI 2024-T3 합금을 이용한 평면굽힘피로실험을 수행하여 표면미소균열의 형태를 프랙탈 차원으로 해석한 뒤 이것을 피로수명비에 따라 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전체표면미소균열의 프랙탈 차원을 평균한 $D_{f_{avg}}$ 은 표면미소균열의 통계적 분포와 같이 3모수 Weibull 분포를 나타내고 있다.
- (2) 표면미소균열은 대부분 프랙탈 곡선을 생성하는 과정 중에 있으므로 관찰 배율에 따라 프랙탈 차원 D_f 는 최고 10^5 정도의 오차가 존재한다.
- (3) 전체 표면미소균열의 프랙탈 차원 $D_{f_{avg}}$ 는 피로수명비 N/N_f 에 대하여 선형적 관계를 가지고 있으므로 실험적인 파괴역학 파라미터이다.
- (4) 평활재의 피로수명수비 N/N_f 는 최대표면미소균열의 프랙탈 차원 $D_{f_{2a_{max}}}$ 보다 전체 표면미소균열의 평균 프랙탈 차원 $D_{f_{avg}}$ 과 훨씬 더 좋은 상관 관계를 가지고 있다.

참 고 문 헌

- 김임기, 남승훈, 고성위(1996). “입자강화 복합재료의 파괴인성에 관한 프랙탈 해석”, 한국해양공학회지, 제10권, 제4호, pp 84~91.
- 안원기, 주원식, 장득열, 박수영, 조석수(1996). “2024-T3합금의 표면미소균열성장특성과 잔존수명평가법에 관한 연구”, 한국자동차공학회 1996년도 추계학술대회 논문집, pp 512~520.
- 조석수, 주원식(1999). “프랙탈 차원을 이용한 재료손상의 자기상사성에 관한 연구”, 동아대학교 부설 생산기술연구소 논문집, 제4권 제1호, pp 7~15.
- Cherapanor, G. P., Balankin, A. S., and Ivanova, V. S.(1995). “Fractal Fracture Mechanics - A Review”, Eng. Fracture Mechanics, Vol. 51, pp 997~1033.
- Lung, C. W. and Mu, Z. Q.(1998). “Fractal Dimension Measured with Perimeter-area Relation and Toughness of Materials”, The American Physical Society, Vol. 38, No. 11, pp 781~784.
- Mandelbrot, B. B.(1983). “The Fractal Geometry of Nature”, Freeman, San Francisco, pp 25~29.
- Nageswararao, M., Kralik, G. and Gerold, V.(1975). “Slip Band Cracking, at Low Fatigue Crack Growth Rates in Two Al-Zn-Mg Alloys”, Z. Metallkde, 66, pp 479.
- Walpole, R. E., and Myers, R. H.(1985). “Probability and Statistics for Engineers and Scientists”, Macmillan pub. company, U.S.A., pp 170~173.
- 櫻井, 宇佐美外 2人(1986). “SUS316鋼平滑材のクリーブ 疲勞下における微小き裂の分布と進展舉動に基づく余壽命平價法”, 材料, 第35卷, 第389號, pp 170~175.
- 北川, 中曾根, 島崎, 飯田(1984). “最大き裂表面長さの分布による材料比較と疲勞壽命豫測”, 材料, 第34卷, 第378號, pp 314~320.
- 高安(1986). “フラクタル”, 朝倉書店, 東京, pp 5~7.
- 酒井, 騰川(1992). “Richardson効果に基づくセラミックス粒子の形状不規則性に關する定量的解析法”, 材料, 第41卷, 第470號, pp 1605~1610.
- 津田, 廣瀬, 黒瀬, 松岡, 黒部, 田中(1991). “SNM 439鋼の應力腐食割れき裂成長に及ぼす結晶粒徑の影響とフラクタル特性”, 材料, 第40卷, 第455號, pp 1066~1072.
- 村上(1993). “微小缺陷と介在物の影響”, 養賢堂, pp 233~252.

1999년 6월 10일 원고 접수

2000년 1월 12일 수정문 채택