

평면굽힘하중을 받는 표면미소균열의 프랙탈 특성에 관한 연구

A Study on Fractal Character of Surface Micro-crack under In-plane Bending

박 승용(동아대 대학원), 주 원식(동아대 기계공학과), 이 선봉(삼척산업대 기계공학과),
장 득열(삼척산업대 기계공학과), 조 석수(동아대 생산기술연구소)
Seung-Yong Park(Graduate School, Dong-A Univ.), Won-Sik Joo(Dong-A Univ.),
Sun-Bong Lee(Samchok Univ.), Deuk-Yul Jang(Samchok Univ.),
Seok-Swoo Cho(Industrial Technology Research Center, Dong-A Univ.)

ABSTRACT

Irregular shapes and growth behavior of surface micro-crack showed very complex and nonlinear properties and many investigators have performed theoretical analyses and experiments on them to characterize fatigue strength. They had difficulties in estimating fatigue life due to random distribution, growth and coalescence of surface micro-cracks. The straightness of crack growth along intergranular and transgranular was prevented from irregular microstructure and precipitates. Euclid geometry can't quantify shape of surface micro-crack but fractal geometry can. Therefore, it is suggested that average fractal dimension of surface micro-cracks is able to estimate fatigue life but fractal dimension of maximum surface micro-crack is not in Al 2024-T3 alloy.

Keywords : surface micro-crack, fractal dimension, scale, extreme statistics, straightness of crack growth

1. 서 론

산업 구조가 고도로 발달함에 따라 예기치 못한 구조물의 파괴로 인하여 막대한 재산 및 인명상의 손실이 일어나고 있다. 이러한 파괴는 사용 응력이 항복응력하에서도 파괴되는 피로에 의하여 대부분 발생된다. 피로 현상에 관한 연구는 기계 또는 구조물을 설계하거나 보수 및 관리하는데 상당한 도움을 주나 이러한 연구를 통하여 유도된 관계식이 얼마나 정확성을 가지고 적용될 수 있는가에 대한 검토가 요구되고 있다. 따라서 이러한 검토를 수행하기 위해서 거시적인 피로현상을 지배하는 미소균열의 분포 및 성장에 관한 체계적인 연구가 먼저 선행되어야 할 것으로 생각된다.

표면미소균열의 불규칙한 형태나 반복수 변화에 따른 거동은 매우 복잡하면서 비선형적 거동을 강하게 보이므로 균열 양단의 길이나 균열 밀도를 평가 파라

미터로 사용하였다. 그러나 재료 표면에 미소균열이 발생할 경우, 균열이 불규칙하게 분포함과 동시에 균열간 합체가 일어나므로 예기치 못한 파손 및 파괴를 일으킬 수 있어 상술의 파라미터만으로 실제 구조물의 피로수명을 평가하기 위해서는 상당한 어려움이 있을 것으로 생각된다.

Kitagawa¹⁾ 등은 확률적으로 비교적 좁은 면적의 위험 영역을 설정하여 불규칙한 분포 특성을 보이는 표면미소균열의 성장과정을 Monte-Carlo법으로 시뮬레이션하였다. 이 방법은 균열의 발생과 성장 및 균열간 합체에 의한 균열성장속도의 가속현상에 착안하여 파괴의 전과정을 모델링하였으나 데이터의 수집 및 처리에 많은 시간과 노력이 필요하였다.

Sakurai²⁾ 등은 SUS 316강을 이용한 고온피로실험에서 재료 표면에서 발생하는 미소균열의 분포와 성장 거동을 기초로 재료 손상을 평가하였다. 기존의 비파괴적 방법으로 재료의 손상을 평가하기 위해서는 재료

의 기계적 물성치를 파라미터로 하는 것에 비하여 본 방법에서는 재료 표면에서 발생하는 미소균열의 크기 및 분포를 손상 파라미터로 사용하였다.

이상의 연구에서 표면미소균열이 결정입내나 결정입계를 따라 성장하다가 결정입계나 개재물과 같은 장애물을 만나게 되면 균열이 휘게 된다. 따라서 균열의 직선성은 재료 조직의 불규칙성과 균열간 상호 간섭에 의한 합체 거동에 의하여 상당한 방해를 받으므로 균열 형상이 매우 뒤뜰리게 된다. 그러나 표면미소균열에 관한 기존의 연구에서는 평활재의 피로 수명을 물리적 의미의 균열 길이나 밀도를 이용하여 평가하려는 시도가 대부분이었고 균열 휨에 의한 균열 곡선의 형태를 정량화하려는 노력은 시도되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 AI 2024-T3합금을 이용하여 반복수비에 따른 표면미소균열의 프랙탈 차원을 고찰 하므로써 프랙탈 차원이 피로수명평가로 적용될 수 있는지에 대한 검토를 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 실험 재료 및 시험편

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

Fig. 1은 피로 시험편의 형상과 치수를 각각 나타낸 것으로 최대굽힘하중과 압연방향을 서로 일치시켜 92 mm × 32mm × 4.2mm의 크기로 절단하여 밀링가공하였다.

2.2 실험방법

본 피로실험에 사용한 시험기는 쉐크형(Schenck type)평면굽힘 피로실험기(Mori testing machine Co. model 5171)로써, 최대굽힘모멘트는 2kgf-m이고 매분 회전수는 1500rpm이다. 실험은 평균응력을 0으로 하는 하중제어형태로 수행되었으며 응력진폭 $\Delta\sigma$ 는 305MPa이었다. 반복수가 증가함에 따라 시험편의 중앙부에서 발생하고 전파되는 표면미소균열의 형태는 시험편 중앙에 임의로 설정한 5mm × 12mm의 영역내에서 100배의 현미경 사진에 의하여 관찰 및 측정되어졌다. 즉, 피로시험중 적당한 반복수에서 시험기를 일시적으로 정지시키고 금속 현미경으로 관찰 영역을 촬영한 후, 다시 시험기를 가동시켰다.

Fig. 2는 5mm × 12mm의 관찰영역을 동일 간격으로 평행하게 25개 분할한(0.2mm × 12mm로 25개 분할)상태를 나타낸 것이다. 또한 표면미소균열길이 2a와 프랙탈차원의 누적상대두수는 관찰영역과 25개 샘플영역에서 구

하였고 그러한 물리량의 통계적 분포 특성을 각종의 확률지에 플로트하여 가장 적합한 분포를 결정하였다.

3. 표면미소균열과 프랙탈

3.1 프랙탈

Mandelbrot³⁾는 1975년에 위상적 차원의 한계성을 극복하기 위하여 프랙탈 차원(fractal dimension)을 제안하였다. 프랙탈 기하학은 곡선의 접선을 정의할 수 없는 즉 미분할 수 없는 형상을 취급하며 이러한 형상은 다른 스케일(scale)에서도 자기 유사성(self-similarity)을 보존하게 된다. 이러한 자기 유사성을 확대시켜 정량적으로 표시한 양이 프랙탈 차원이다. 프랙탈 기하학에서 임의의 형상에 대한 차원은 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$N = S^D \quad (1)$$

여기서 N은 각 단계에서의 subpart수이고 s는 척도 계수(scaling factor)로서 전체 곡선을 투영하였을 때의 길이를 1로 가정하여 그 곡선을 길이 r로 나누었을 때의 역수이다. 식 (1)의 양변에 대수를 취하면 프랙탈 차원 D는 다음과 같다.

$$D = \frac{\ln N}{\ln s} \quad (2)$$

Fig. 3은 인공적인 프랙탈 곡선중의 하나인 Koch곡선이 어떻게 만들어지는가를 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 길이 1/3되는 직선을 그으므로써 만들 수 있다. 이상의 generator를 무한히 반복시키게 되면 인공적인 프랙탈 곡선을 얻을 수 있으며 위의 마지막 곡선의 프랙탈 차원은 $\eta=2$ 단계에서 $r=1/9$ 이고 $N=16$ 이므로 식 (2)에 의하여 계산하면 다음과 같다.

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

따라서 Koch 곡선의 프랙탈 차원은 η 가 아무리 많이 반복되어도 1.2619차원을 가지게 된다.

3.2 프랙탈 차원의 측정

프랙탈에 관한 기초 이론은 현재까지 완전히 정립되어 있지 않아서 본 연구에서 고려하는 표면미소균열을 프랙탈로 해석하기 위해서는 문제에 적합한 모델을 설정하여야 한다. 현재까지 제안된 모델중 coast line model⁴⁾이 표면미소균열의 형상과 비슷하므로 프랙탈 차원을 측정하는 데 가장 효과적이라 생각된다.

Fig. 4는 상술의 모델을 표시한 것으로 표면미소균열의 형태를 스케일 길이 r선분의 집합으로 나타내었다. 곡선의 왼쪽 끝부분을 시점으로 잡고 그것을 중심으로 반경 r의 원을 그리고 그 원과 곡선이 최초로 교차된 점과 시점을 직선으로 연결한다. 이 교점을 새로운 시점이라 정의하여 상술의 과정을 반복한다. 이와 같이 스케일 길이 r에 의하여 표면미소균열을 근사화시킬 때 필요한 선분의 총수를 n이라 할 때 다른 스케일 길이 r로 상술의 절차를 반복하면 당연히 다른 n을 구할 수 있다.

Fig. 5는 이러한 작업을 양대수좌표축에 표시한 모식도를 나타낸 것이다. Richardson⁵⁾은 복잡한 해안선을 프랙탈로 차원화시킨 결과 스케일 길이 r과 선분의 총수 n사이에 다음과 같은 관계식이 성립한다고 주장하였다.

$$n = Fr^{-D} \quad (4)$$

본 연구의 경우 F는 고려하는 프랙탈 도형 즉, 표면미소균열의 곡선 형상에 의하여 결정되는 상수이며 D는 프랙탈 차원(fractal dimension)이다. 총표면미소균열길이 L(r)은 스케일 길이 r로 근사화하면 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$L = nr = Fr^{1-D} \quad (5)$$

식(2)의 양변을 대수로 취하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

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

상술의 관계식을 Fig. 5와 관련시켜 보면 그림의 직선 기울기가 1-D이므로 프랙탈 차원을 간접적으로 구할 수 있다. 그림중의 직선 기울기는 반드시 음의 값을 가지므로 프랙탈 차원 D는 항상 1보다 크다. 이와 같이 L에 대한 스케일 길이 r의 효과를 Richardson효과라 부른다. 그러나 이러한 Richardson효과를 정확히 만족시키기 위해서는 중점이 반드시 스케일 원의 반경내에 들어와야만 한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 프랙탈 차원의 통계적 분포

Fig. 6은 25개의 샘플영역으로 부터 구한 표면미소균열의 프랙탈 차원에 대한 통계적 특성을 구명하기 위하여 누적상대숫수와 프랙탈 차원의 관계를 Weibull 확률지로 정리한 것이다. 그림에서 3모수 Weibull분포를 나타내는 각 곡선은 반복수비가 증가함에 따라 오른쪽으로 이동하고 있으며 최대 프랙탈 차원도 동시에 증가하고 있다. 이것은 주⁶⁾등의 최대 균열길이분포에서 나타낸 것과 동일한 경향이였다. 또한, 여기서 사용된 Weibull 분포 함수 F(x)는 다음 식

과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad (6)$$

여기서 m, η 및 γ 는 각각 형상, 척도 및 위치 모수이며 상관계수법을 이용하여 각각의 모수를 결정하였다.

Fig. 7은 3모수 Weibull 분포의 세가지 모수 m, η , γ 의 반복수비에 대한 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 위치 모수 γ 는 프랙탈 차원의 하한값을 나타낸 것으로 반복수비에 관계 없이 거의 일정하다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 표면미소균열이 생성되거나 정제되는 시기의 프랙탈 차원이 거의 일정하다는 것을 나타내고 있다. 또한, 형상 모수 m은 반복수비에 따라 점진적으로 작아지고 있으나 표면미소균열길이 분포처럼 마모 고장형에서 초기 고장형으로의 신뢰공학 적 천이현상은 볼 수 없다. 이것은 슬립대나 입계를 따라서 성장하는 균열이 초기에 급속히 성장하다가 다른 입계나 석출물에서 휘게 되어 대부분의 균열형태가 지그재그(zigzag)로 됨으로 인해서, 반복수비에 따른 표면미소균열의 형태가 균열길이에 비하여 프랙탈 차원의 변화를 일으키는 균열이 급격하게 감소되지 않았기 때문이다. 또한, 샘플영역내의 최대균열은 최대 프랙탈 차원과 동일한 특성을 보이므로 반복수비와 좋은 상관관계를 가질 것으로 생각되어 다음 절에서는 반복수비에 따른 프랙탈 특성을 조사하기로 한다.

4.2 표면미소균열군과 평균 프랙탈차원 D_{avg} 의 관계

Fig. 8은 반복수비 N/N_0 가 0.84일 때의 최대표면미소균열을 이용하여 프랙탈 차원에 미치는 관찰 배율의 효과를 검토하기 위하여 스케일 길이를 횡축에, 총길이를 종축에 표시한 것이다. 그림에서 각 배율에 따른 프랙탈 차원은 최고 10^{-5} 차원 정도의 차이를 보이고 있다. 이것은 표면미소균열의 프랙탈 곡선이 생성되는 과정중에 있기 때문에 스케일 길이에 따른 총길이의 기울기가 달라지기 때문이다. 즉, 프랙탈 곡선의 generator가 η 회 반복되어 그 생성 과정이 끝난 상태라면 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. 관찰배율에 따른 프랙탈 차원은 최고 10^{-5} 차원 정도의 차이가 나므로 관찰 배율이 피로수명을 평가하는 데에는 그다지 영향을 미치지 못하는 것으로

생각되나 관찰이 용이하기 때문에 각 반복수비에 대한 프랙탈 차원은 1500배의 금속현미경관찰사진을 이용하여 구하였다.

Fig. 9는 프랙탈 차원을 결정하는 데 필요한 스케일 r 과 총표면균열길이 L 사이의 전반적인 특징을 알아보기 위하여 Tsuda⁷⁾등이 수행한 SNCM 439강의 응력부식균열을 프랙탈 차원으로 평가한 결과를 모식적으로 나타낸 것이다. 미소 스케일영역에서는 스케일 r 에 대한 총표면균열길이 L 의 비인 기울기가 완만하다가 중간스케일 영역에서는 급격하게 변화되면서 한계 스케일 이상이 되면 기울기가 0이 된다. 따라서 프랙탈 차원을 구할 수 있는 구간이 미소 스케일 영역과 거시 스케일 영역사이의 중간 크기의 스케일 영역에 한정된다 것을 알 수 있으며 Tsuda에 의하면 프랙탈 차원은 재료 조직에 큰 영향을 받는 것으로 보고하고 있다. Fig. 8에서 사용한 스케일 영역은 0.008mm ~ 0.12mm로서 실제 프랙탈 차원을 구하는 영역과 기울기가 0이 되는 영역만 나타났었다. 이러한 결과는 관찰 배율의 한계성 때문에 완전한 곡선부는 나타나지 않는 것으로 생각된다. 또한, SNCM 439강의 응력부식균열에 대한 프랙탈 차원은 대략 입계파괴가 일어나는 C영역에서는 1.05이고 입내파괴와 입계파괴가 혼재하는 b영역에서는 1.1이었다. AI 2024-T3합금은 명확한 스트라이에이션간격을 가지는 입내파괴를 보이며⁸⁾ 최고 $N/N_f=0.94$ 에서 1.0618로서 본 실험에서 사용한 재료의 균열형태는 응력부식균열형태에 비하여 대단히 평탄함을 알 수 있다.

Fig. 10은 각 시험편의 샘플영역에서 구한 25개의 표면미소균열를 Fig. 5의 직선의 기울기에서 구한 프랙탈 차원의 평균값 D_{avg} 와 반복수비 N/N_f 의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 반복수비 증가에 따른 평균 프랙탈 차원은 선형적으로 증가하고 있으며 최소 자승법으로 커브 피팅(curve fitting)한 결과는 다음과 같다.

$$\frac{N}{N_f} = 0.375122 \cdot D^{38.2165}$$

따라서 부재의 잔존수명(remaining life) L_r 은 1에서 N/N_f 를 뺀 값이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_r = 1 - \frac{N}{N_f}$$

4.3 극치통계해석에 의한 최대균열길이의 추정

Fig. 11은 반복수비 $N/N_f = 0.66, 0.83, 0.94$ 에서 각 샘플 영역의 최대표면균열분포를 극치 확률지에 나타

낸 것이다. 극치통계해석에 사용된 대상면적은 균열이 발생되어 파단에 이를 수 있는 위험면적으로 설정하였으며 본 연구의 경우 시험편의 라운딩 부분의 면적인 910.3mm²으로 잡았고 샘플면적은 가로, 세로를 각각 0.2mm, 12mm로 설정하여 2.4mm²으로 잡았다. 즉, 재귀기간 T 는 대상면적과 샘플면적과의 비인 910.3/2.4이며 계산결과 379.3이 되었다. 따라서 대상면적에서 나타날 수 있는 예상최대균열길이는 극치 확률지의 재귀기간 379.3에서 회귀직선으로 수평선을 긋고 다시 아래로 수직선을 내려서 최대균열길이축과 만나는 점이다. 이상의 방법으로 구한 각 반복수비 0.66, 0.83, 0.94에서 구할 수 있는 최대균열길이는 각각 0.39, 1.57, 2.4mm였다. 이러한 균열에 가장 가까운 길이를 가지는 실제의 최대균열길이는 각각의 반복수비에서 0.58, 1.57, 2.9mm로 실제최대균열길이에 대한 예상최대균열길이의 오차는 0~0.28mm였다.

4.4 최대표면균열길이와 최대 프랙탈 차원 D_{max} 의 관계

주⁶⁾등은 미소균열분포의 극치통계해석을 기초로 대상영역중의 최대균열길이를 추정하여 부재의 잔존수명을 평가하였다. 이러한 개념은 부재의 파괴를 일으키는 주요 인자를 최대균열로 보고 있다. 즉, 안전성을 검사하려는 부재의 대상영역중에 반드시 주균열이 존재하여 이것이 파괴를 일으키는 주균열로 성장해야 된다는 가정을 기본으로 하고 있다. 따라서 최대 주균열의 프랙탈 차원과 반복수비 N/N_f 의 관계를 알아보는 것은 주균열의 프랙탈 차원이 피로수명을 평가하는데 주요한 파라미터로 사용할 수 있는지에 대한 여부를 검토하는 것이다.

Fig. 12는 4.3절의 극치통계해석에서 구한 예상최대균열길이에 가장 가까운 최대균열길이의 프랙탈 차원을 각 반복수비에 대하여 나타낸 것이다. 반복수비 $N/N_f=0.83$ 에서 프랙탈 차원이 갑작스럽게 증가되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 사용한 최대균열길이가 주균열이므로 균열간의 합체에 의하여 균열형상이 갑작스럽게 변화하였기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 파단을 일으키는 주균열의 프랙탈 차원은 표면미소균열간의 합체가 일어나기 이전까지는 반복수비와 프랙탈 차원간에 선형적 거동을 보이지만 $N/N_f=0.83$ 과 같이 합체된 균열의 이전 위치가 상당히 다른 경우 미소균열간의 합체가 발생되면 균열형상이 갑작스럽게 변하므로 프랙탈 차원도 동시에 증가하게 된다. 또한, 피로수명말기인 $N/N_f=0.94$ 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 보다는 역학적 특성에 강하게 의존하기 때문에 균열 합체에 의한 균열형상이 갑작스럽게 변화된 것을 수명말기의 균열성장부분에서 상당히 완화시켜 주는 것으로 생각된다. 따라서 대상 영역내의 최대균열의 프랙탈 차원을 이용하여 부재의 잔존수명을 평가하게 되면 균열성장간의 합체거동에 의하여 수명평가식에 대하여 최대 17%의 오차를 발생시키고 있으므로 잔존수명평가에 상당한 오차를 발생시킬 수 있을 것으로 생각된다.

4.5 표면미소균열군과 평균 프랙탈 차원 $D_{a_{micro}}$ 의 관계

Fig. 13은 대상영역내의 최대균열길이를 제외한 표면미소균열군의 평균 프랙탈 차원값을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것 처럼 반복수비가 증가함에 따라 프랙탈 차원이 선형적으로 증가하고 있다. 이러한 결과는 표면미소균열군의 경우 생성된 균열간의 합체가 일어나기 어렵기 때문이며 기본적으로 평활재의 피로수명평가에서 무시되어져 왔던 표면미소균열도 반복수비 증가에 따른 표면미소균열형상이 점진적으로 변화되어 프랙탈 차원이 점진적으로 증가된다는 것을 나타내고 있다. 이것은 Kitagawa⁹⁾등이 수행한 평활재 피로실험에 의하면 다수의 균열이 발생하여 인접 균열간의 상호간섭이 존재할 경우에도 표면의 균열형상은 연결후의 표면내부방향으로 안정한 변화를 보이면서 거시균열이 될 때까지 안정한 상태를 유지하기 때문이라 생각된다. 따라서 프랙탈 차원을 이용하여 평활재의 피로수명을 평가할 때는 기존의 평가방법인 주균열을 이용하기보다는 미소균열군을 이용하므로써 산업용 부재에 대한 피로수명을 평가하는데 훨씬 더 많은 도움을 주리라 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 Al 2024-T3합금을 이용한 평면굽힘 피로실험을 수행하여 표면미소균열의 형태를 프랙탈 차원으로 해석한 뒤 이것을 반복수비에 따라 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표면미소균열의 프랙탈 차원은 표면미소균열의 통계적 분포와 같이 3모수 Weibull 분포를 나타내고 있었다.
2. 대부분의 표면미소균열은 프랙탈 곡선을 생성하는 과정중에 있기 때문에 배율에 따라 최고 10^{-5} 정도의 오차가 존재하였다.
3. 평활재의 피로수명은 최대표면미소균열의 프랙탈

차원보다 표면미소균열군의 프랙탈 차원과 훨씬 더 좋은 선형 관계를 가지고 있었다.

후 기

본 논문은 97학년도 삼척산업대학교 학술조성연구비로 수행되었으며 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

-이하 참고문헌 생략-

Table 1 Chemical compositions of Al 2024-T3 alloys (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 Al 2024-T3 alloys

material	yield strength σ_{ys} (Mpa)	tensile strength σ_{ts} (MPa)	elongation ϵ (%)	Young's modulus E (GPa)
2024-T3	380	507	21.6	77.02

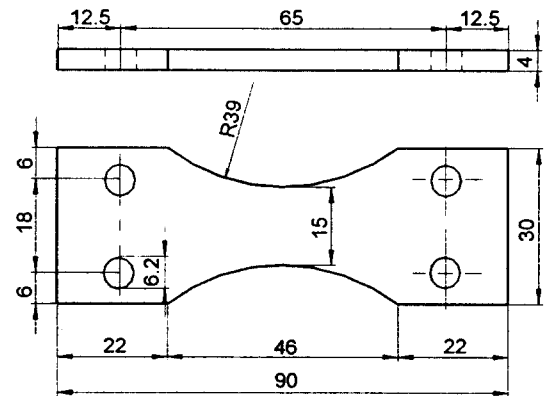


Fig. 1 Geometry and dimensions of fatigue test specimen

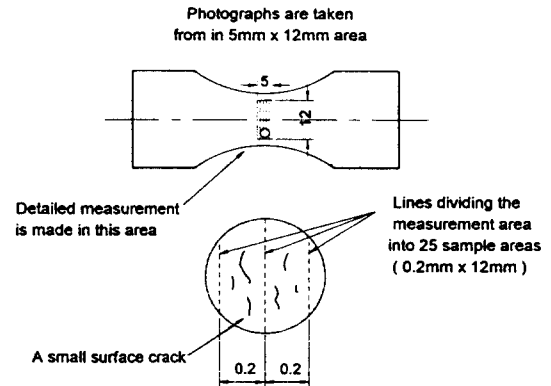


Fig. 2 Sampling method of surface micro-crack

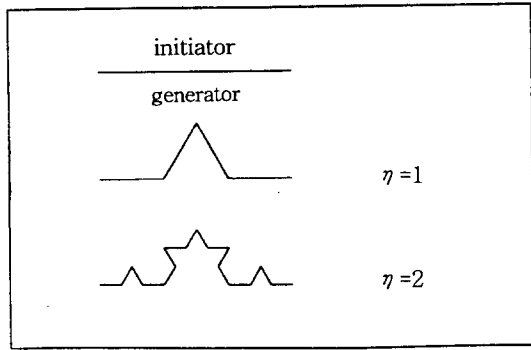


Fig. 3 Stages in the generation of the triadic Koch curve

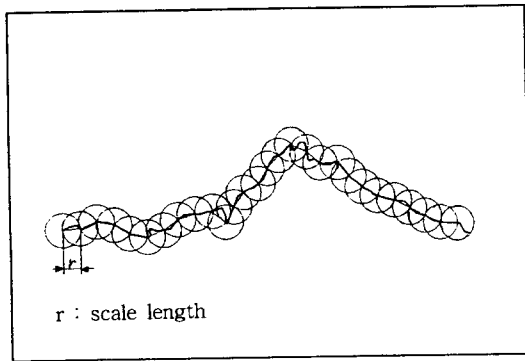


Fig. 4 Measurement of fractal dimension on the basis of coast line model

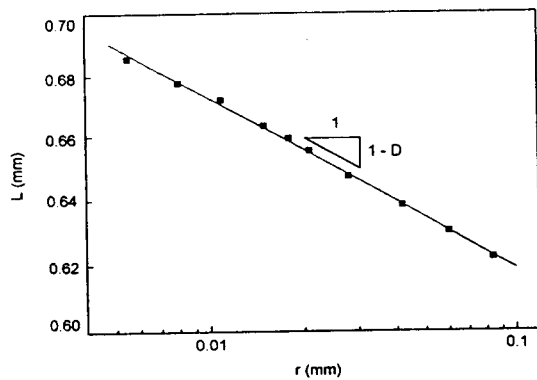


Fig. 5 Relation between total length N and scale length r

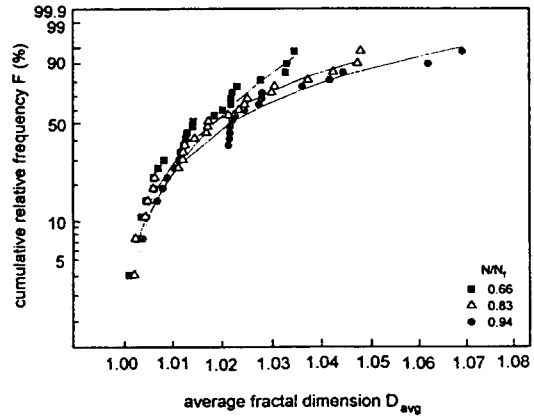


Fig. 6 Weibull distribution of fractal dimension D for surface micro-crack

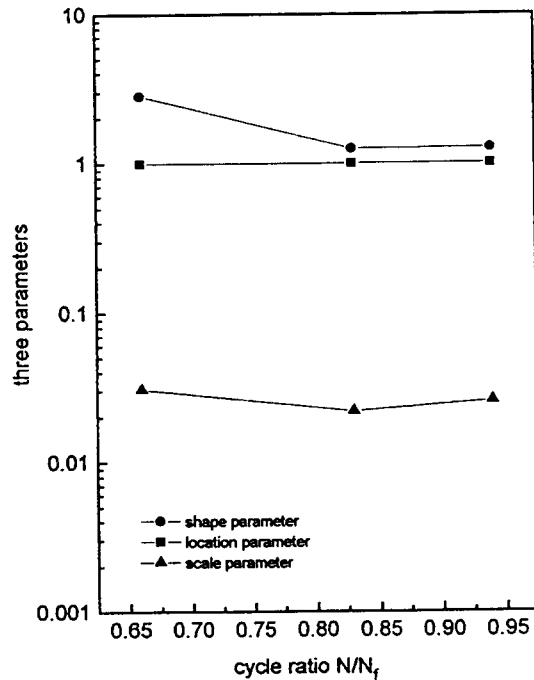


Fig. 7 Variation of parameters in the distribution of fractal dimension D

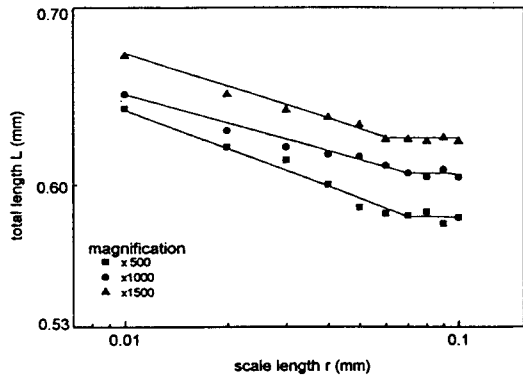


Fig. 8 Fractal plot of surface micro-crack profiles as a function of magnifications

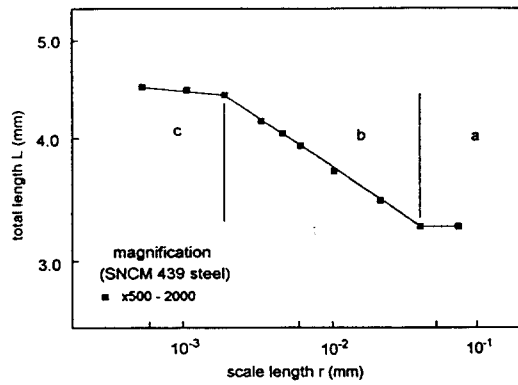


Fig. 9 Fractal plot of fracture profiles in SNCM 439 steel

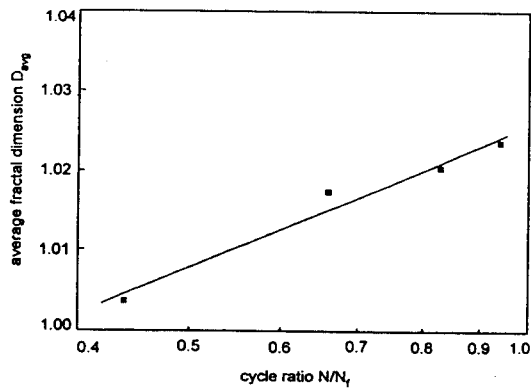


Fig. 10 Relation between average fractal dimension D_{avg} and cycle ratio N/N_f

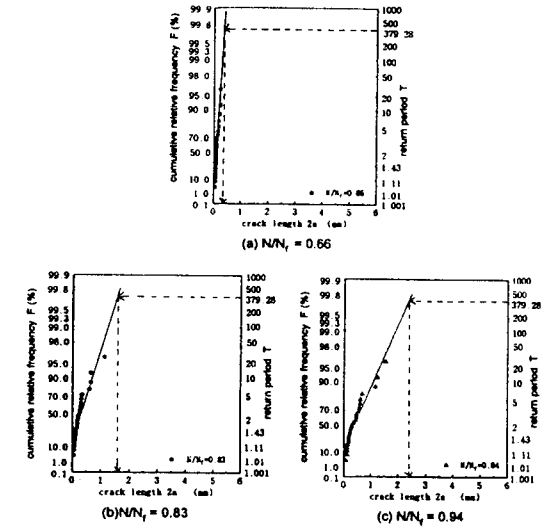


Fig. 11 Extreme distribution of $2a_{max}$ with cycle ratio N/N_f

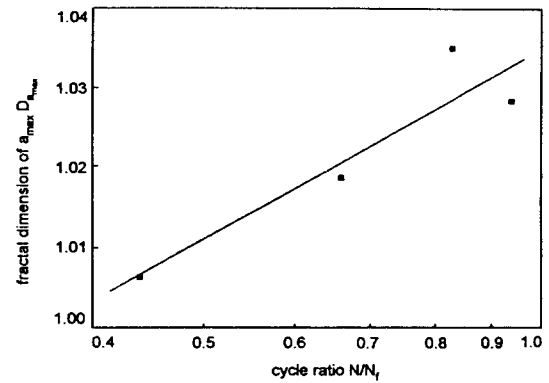


Fig. 12 Relation between fractal dimension of $2a_{max}$ $D_{a_{max}}$ and cycle ratio N/N_f

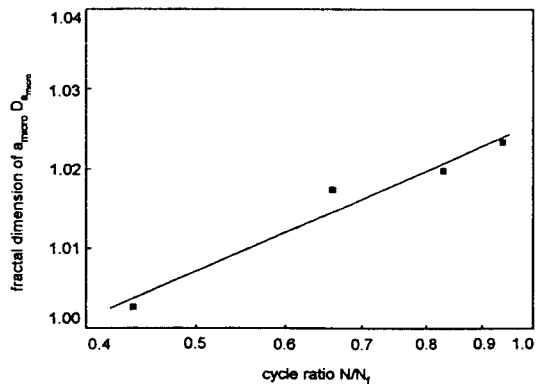


Fig. 13 Relation between average fractal dimension of $2a_{micro}$ $D_{a_{micro}}$ and cycle ratio N/N_f