

SUS316강의 정적균열진전 평가에 대한 프랙탈차원의 응용

윤유성 · 권오현*

부경대학교 대학원 안전공학과 · *부경대학교 안전공학과

1. 서 론

인명이나 물질 재산에 많은 손실을 가져주는 기계설비 및 구조물의 파괴현상에 대한 연구는 재해 원인을 분석하고 안전대책을 수립하기 위한 측면에서 대단히 중요하며, 지금까지 많은 연구가 행하여져 오고 있다. 프랙탈기하학에 대한 연구는 Mandelbrot¹⁾에 의하여 제안되어 20년 정도의 짧은 기간임에도 불구하고 여러 분야의 자연현상을 모델화하기 위하여 다양하게 발표가 되고 있다. 프랙탈 특성은 자연현상의 불규칙한 변화를 정량적으로 나타내기 위한 프랙탈차원으로 평가된다. 프랙탈차원은 파면 및 균열의 불규칙성을 정량화함으로써 균열수명을 보다 더 정확히 예측하는데 적용될 수 있다.

프랙탈 연구는 Takashi²⁾ 등이 Mg계 알루미늄합금 A2505 및 기계구조용 탄소강 S25C에 대해 피로파괴표면에서 프랙탈과 파괴기구 해석을 파괴역학적으로 고찰하였고, Dauskardt³⁾ 등은 입계 및 입내파괴를 일으키는 균열의 성장 합체거동을 정량적으로 평가하기 위하여 프랙탈 개념을 사용하였다. Underwood⁴⁾ 등은 AISI4340강을 이용하여 파단면에 대한 수직단면의 프랙탈 특성을 실험적으로 연구하였다. 또한 Sotoaki⁵⁾ 등은 섬유강화 polyamide의 피로손상에 대한 음향방출과 프랙탈차원과의 손상평가를 검토하였다. 이와 같이 재료의 각종 파면성상의 해석에 있어서, 파면형태나 입자형태의 불규칙성에 대한 정량적 평가수법으로서 기존의 fractography적 수법과는 다른 프랙탈 개념을 응용한 해석법이 보고되어지고 있다²⁾. 본 연구에서는 전보⁶⁾에서의 연구결과를 바탕으로 SUS316에 대하여 균열성장에 따른 프랙탈차원을 구하여 프랙탈특성을 평가하였고 또한 균열성장 동안에 소산되는 파괴에너지와 관련하여 파괴평가 매개변수와 프랙탈차원과의 관계를 조사하였다.

2. 프랙탈의 정의 및 차원평가수법

Mandelbrot¹⁾가 제안한 프랙탈은 그 속성이 자기상사성(Self-Similarity)과 순환성(Recursiveness)의 특징을 가지는 것으로 일정구간을 축소 또는 확대를 계속하여 무한히 반복할 때 얻어지는 기하학적 도형이다.

Fig. 1은 프랙탈의 이해를 돕기 위해 인위적으로 코흐곡선의 일부로 확대해 가는 결과이다. Fig. 1 (a)와 같이 길이 1의 선분 하나를 생각한 후, 3등분하여 단위길이가 1/3인 3선분으로 나누어 Fig. 1 (b)와 같이 확대하고, 이것을 다시 3등분하여 1/3인 부분을 확대하면 Fig. 1 (c)와 같이 형성된다. Fig. 1 (c)에 대하여 다시 1/3등분씩 하여 동일한

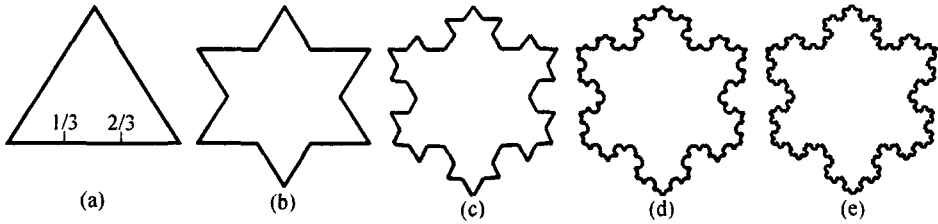


Fig. 1 Self-Similarity of irregular curve(Koch curve)

작업을 되풀이한다. 이와 같이 동일한 작업을 무한히 반복하여 극한에서 정의된 곡선이 Fig. 1 (e)의 코흐곡선이다. 즉 일정구간을 확대해 보면 전체의 구간과 같은 모양을 가지며 어느 배율에서도 같은 프랙탈 특성을 가지는 곡선의 형태가 주어지 스케일변환에 대하여 자기상사성의 불변량을 지닌다. 이러한 성질로부터 새로운 정량적 수치를 계산하여 균열과 같은 불규칙한 곡선의 정량적 수치를 계산할 수 있다. 유클리드 기하학의 개념에서는 부드러운 선은 1차원, 면은 2차원, 공간은 3차원이라는 정수 차원으로 나타나지만, 프랙탈차원은 정수가 아닌 소수로 얻어진다. 균열면의 불규칙 곡선은 비정수차원의 특성을 나타내며 다음 식(1)에 의하여 평가할 수 있다⁴⁾.

$$L(\eta) = L_0 \cdot \eta^{-(D-1)} \quad (1)$$

여기서, L 은 균열윤곽선의 길이, L_0 길이차원의 상수이며 각각 측정되는 불규칙한 실측길기와 측정되어지는 전체의 직선길기에 해당한다. 또한 η 는 측정단위척도이며 무차원길이 값을 가진다. 식 (1)을 양변에 대수를 취하면 선형방정식으로 나타나므로 직선의 기울기가 Mandelbrot¹⁾ 정의에 의한 프랙탈차원 D 를 의미하게 된다. 이러한 프랙탈의 자기상사성을 나타내는 프랙탈차원은 프랙탈을 해석하는데 매우 중요하며, 자기상사성이 큰 프랙탈일수록 높은 프랙탈차원을 가지며 보다 거칠고 불규칙하게 보인다.

균열곡선에 대한 프랙탈차원의 측정방법은 Mandelbrot¹⁾가 제시한 박스카운팅법(box-counting method)을 이용하였다. 기준의 곡선길이에 대하여 측정단위 척도 η 를 기준단위측정길이에 해당하는 r 로 선택하여 정방형 격자로 구성한다. 구성된 정방형 격자 중 프랙탈곡선이 포함되는 개수 N 을 측정하여 대수비에 대한 직선의 기울기를 구하면 식 (2)와 같은 프랙탈차원 D 가 얻어진다. 여기서 얻어진 차원 D 는 Minkowski-Bouligand 차원⁷⁾과 동일하다.

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(L, r)}{\ln r} \quad (2)$$

여기서 D 차원은 상사차원의 의미를 가지는 것으로 $1 < D < 2$ 의 비정수값을 가지게 되며 이러한 비정수값을 가지는 선과 면은 프랙탈거동특성을 나타낸다. 식 (2)을 이용한 박

스카운팅법을 적용하기 위해서는 먼저 CCD을 부착한 광학현미경에 의해 균열곡선면의 평면을 획득하여 PC에 저장한 후 균열면을 포함하는 평면 위에 한 변 길이가 r 인 정방형 격자를 Fig. 2와 같이 이산화한다. 균열면을 포함하는 평면상에서 균열곡선이 포함되어 있는 정방형의 격자 개수 N 을 상용 이미지처리 소프트웨어에 의해 측정한다. 정방형 격자의 한 변 길이인 r 를 감소시켜 앞의 작업을 반복한다.

기준단위측정길이인 r 은 상사비의 의미를 가지며 프랙탈곡선형성 반복단계에서의 단위구간으로서 격자간격에 대응한다. Fig. 2에서 50배로 촬영된 균열면에 박스 카운팅법의 격자를 형성하여 적용한 예를 나타내고 있으며 측정하고자 하는 균열곡선에 있어서 정방형의 격자를 형성하여 얻어지는 N 을 r 에 대하여 양대수좌표에서 얻어지는 곡선의 기울기를 구하면 된다. 균열면을 따라 해칭되어진 부분의 격자수가 $N(L, r)$ 이다.

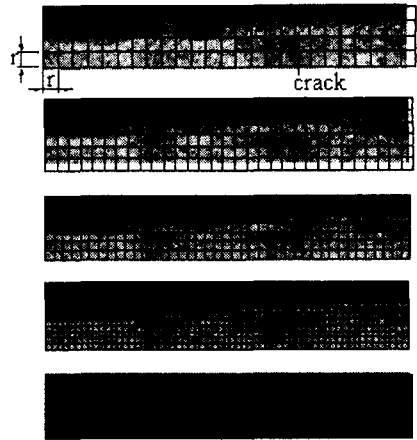


Fig. 2 Box counting fractal dimension($\times 50$). The crack curve lies in the unit square which has been subdivided into small boxes with side r measuring unit scale

3. 시험편 및 실험방법

3.1 시험편

본 실험에 사용된 실험재료는 SUS316으로서 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1 및 2에 나타내었다. 시험편은 1/2" CT시험편으로 ASTM-E647-93 추장법에 따라 피로예 균열을 삽입하여 $a_0/W=0.55, 0.6, 0.64$ 와 0.67 이 되게 하였다. 여기서 a_0 는 초기균열길이, W 는 시험편 폭을 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions(Wt, %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
0.072	0.09	1.582	0.043	0.028	9.381	17.46	1.620	Bal

Table 2 Mechanical properties

Tensile strength	Yielding stress	Elong. (%)	Reduction (%)
588 MPa	240.1 MPa	56	66

3.2 실험 및 측정방법

피로균열은 S(日)사 EHF Servopulser 피로시험기를 사용하여 응력비 0.1, 반복수 25Hz 인 정현파의 하중제어로 실온·대기중에서 행하였다. 프랙탈균열의 파괴실험은 최저인장속도 0.1mm/min으로 행하여 직경 57mm의 클립게이지(RA20SAH)의 변위와 하중 및 균열길이를 동시에 측정하였다. 균열길이는 전기저항식 다이얼 게이지가 부착된 이동식 현미경을 이용하여 측정하였으며 X-Y기록계에 하중-변위 곡선과 동시에 기록하였다.

프랙탈차원은 광학현미경에 연결된 CCD로부터 50배로 촬영하고, 촬영된 균열형상은 Image 보드가 장착된 PC시스템을 통해 전체 균열길이에 대한 균열면을 저장하였다. 전체 균열형상은 전체 프랙탈균열성장길이를 취득하기 위해 각각 촬영된 이미지를 파노라마로 연결하였다. 연결된 파노라마 이미지를 각 균열성장길이에서의 프랙탈차원을 박스카운팅법으로 적용하기 위한 균열성장길이구간을 50배에서는 단위길이 5cm로 등분하였다. 각 구간에 대하여 r 은 측정척도로서 1mm~5mm의 눈금격자로 실제길이는 50배에서는 $20.0\ \mu\text{m} \sim 100\ \mu\text{m}$ 로 취하여 격자를 형성하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 하중, 변위 및 성장균열길이 곡선

Fig. 3은 a_0/W 가 0.55, 0.6, 0.64 및 0.67에 대한 X-Y 레코드를 통한 하중과 하중점 변위 및 균열성장길이와의 관계를 나타낸다. 측정된 균열성장길이는 시편의 한 방향에서 측정된 결과를 나타낸 것으로 반대면에서의 측정결과와 η 가 일치하여 좌우 균일하게 성장함을 가정하였다. 여기서의 균열성장길이는 통상의 겉보기 직선 측정길이이며 프랙탈곡선에 의한 균열길이는 차이가 발생할 것이다. 프랙탈균열길이는 식 (2)을 이용하여 식 (3)과 같이 주어진다. 여기서 $r = \frac{\eta}{L_0}$ 이다. 프랙탈차원이 구하여지면 식 (3)에 의하여 프랙탈 균열성장길이를 구할 수 있다.

$$a_f = a^D r^{(1-D)} \quad (3)$$

4.2 균열면 형상의 프랙탈 차원

균열면이 $a_0/W=0.55, 0.6, 0.64$ 및 0.67 의 50배의 경우 일정구간에 대한 균열성장길이에 대해서 50mm 구간에 대하여 격자를 형성하였다. 각 구간에 대하여 r 을 50배에서는 $20\ \mu\text{m} \sim 100\ \mu\text{m}$ 로 변화시켜 균열이 격자를 통과하는 N값을 구하였다. Fig. 4는 $a_0/W=0.64$ 일 때 50배에서 각 성장균열길이에 따른 $\log r$ 과 $\log N$ 과의 관계를 나타내고 있다. 어느 경우에 있어도 r 이 커짐에 따라 N의 값이 거의 직선적으로 감소하고 있어 균열이 성장함에 따라 식 (2)가 성립함을 알 수 있다. 따라서 각 균열성장형상은 프랙탈 특성을 지님을 나타낸다. 또한 프랙탈 차원 D 는 직선회귀하여 기울기를 구하

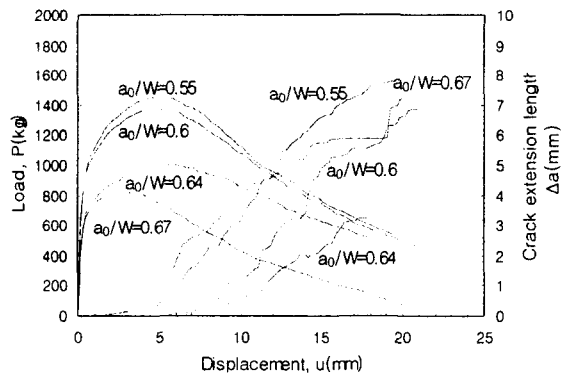


Fig. 3 The relationship of the load-displacement and crack extension length

여 얻어진다. 얻어진 프랙탈차원 D는 $a_0/W=0.55$ 일 때 50배의 각 성장균열길이 4.672, 6.42, 8.39, 10.364 및 12.26mm에 대하여 각각 1.006, 1.037, 1.0207, 1.0239 및 1.0023이 얻어졌고, $a_0/W=0.6$ 일 때 성장균열길이 3.3, 5.2, 7.18, 9.15, 11.12 및 13.08mm에서 각각 1.0579, 1.0334, 1.076, 1.0182, 1.0177 및 1.0342가 얻어졌고, $a_0/W=0.64$ 일 때 성장균열길이 4.54, 6.38, 8.392, 및 10.38mm에 대하여 각각 1.0212, 1.0467, 1.0372 및 1.0388이 얻어졌고, $a_0/W=0.67$ 일 때는 각 성장균열길이 4.73, 6.64, 8.7, 10.7, 12.6 및 14.58mm에 대하여 각각 1.0988, 1.0578, 1.0289, 1.0676, 1.0953 및 1.0789가 얻어졌다.

4.3 프랙탈차원과 균열진전거동과의 관계

Fig. 5는 균열성장에 따른 프랙탈차원의 변화를 나타내고 있다. a_0/W 의 변화에 따른 프랙탈 차원은 균열발생 개시부터 대균열이 되기까지 약 1.002에서 1.09사이에서 변화하여 균열성장길이에 따라 거의 일정한 값을 나타내고 있으며, 이것은 균열면의 형상변화가 일정한 형태를 유지하고 있음을 나타낸다. Fig. 6은 프랙탈균열길이와 직선균열길이와의 관계를 나타내고 있다. 현재의 프랙탈차원의 범위에 있어서는 50배의 경우에 대해 거의 직선 변화하였다. Fig 7은 식 (4)에 프랙탈균열성장길이를 적용한 J-R을 나타내고 있다.

$$J_{n+1} = \left[J_n + \frac{f(a_n/W)}{b_n} \frac{A_n \cdot A_{n+1}}{B} \right] \times \left[1 - \frac{\gamma_n}{b_n} (a_{n+1} - a_n) \right] \quad (4)$$

여기서 $f\left(\frac{a_n}{W}\right) = 2(1+\alpha)/(1+\alpha^2)$, $\alpha = \sqrt{\left(2\frac{a_n}{b_n}\right)^2 + 2\left(2\cdot\frac{a_n}{b_n}\right) + 2 - \left(2\cdot\frac{a_n}{b_n} + 1\right)}$,

및 $\gamma_n = 1 + 0.76\frac{b_n}{W}$ 이다.

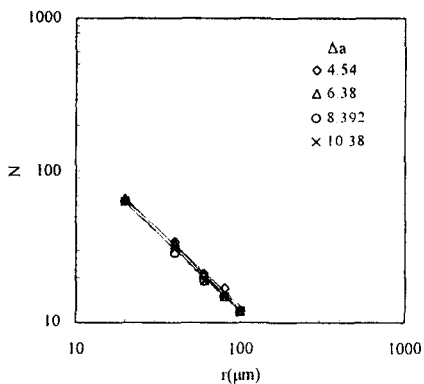


Fig. 4 Logarithmic fractal dimension through linear regression line for $a_0/W=0.64, \times 50$

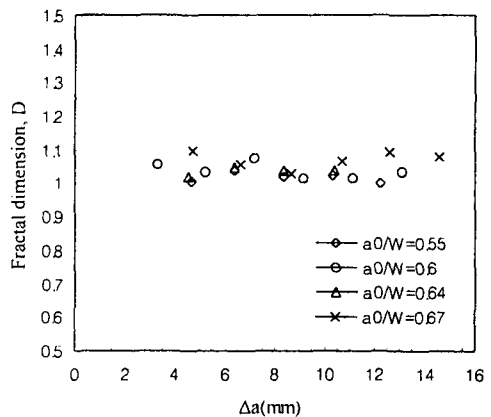


Fig. 5 Variations of fractal dimension D as a function of extension crack length

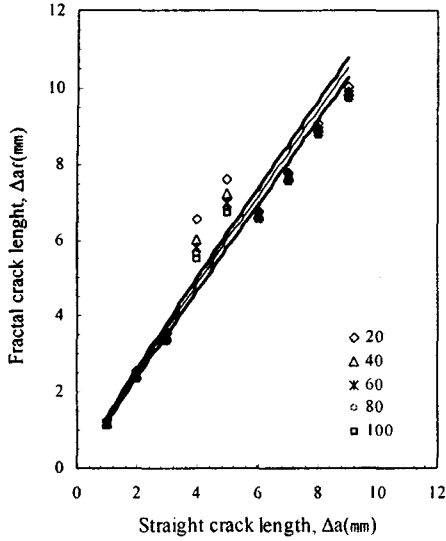


Fig. 6 Relation of the fractal crack length and conventional crack length

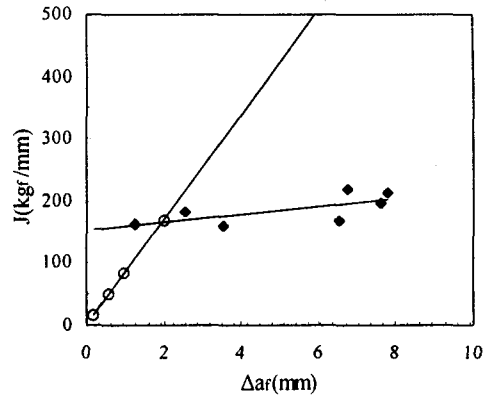


Fig. 7 J-R curve by fractal crack extension length

곡선에서 파괴인성치 $J_{IC} = 164.8 \text{ kgf/mm}$ 를 얻었다. 따라서 프랙탈성장균열길이를 사용할 경우에는 재료와 파단면형태 또는 균열면 형상에 기준하여 보다 더 정확한 균열 수명을 예측하여 파괴의 특성 거동을 보다 더 정확히 표현할 수 있는 하나의 파라미터에 원용될 수 있으므로 설비구조물의 안전성평가에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 실험은 측면 홈을 가진 SUS316 CT시험편의 균열성장거동에 대한 프랙탈차원을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

박스카운팅법으로 프랙탈차원을 구하여 성장균열면에서 프랙탈특성을 지님을 확인하였고 균열이 성장함에 따라 프랙탈차원은 1.0023~1.0988로 평균 1.0428이 얻어졌으며 취성재료보다 비교적 안정적으로 일정한 변화를 하였다. 프랙탈성장균열과 직선성장균열과의 관계는 거의 직선적으로 변화하였다. 또 프랙탈균열성장길이를 적용한 J적분저항곡선을 구하여 $J_{IC} = 164.8 \text{ kgf/mm}$ 를 구하였다. 이러한 프랙탈차원의 정량적 평가에 의하여 파단 및 균열면 에너지변화에 기초한 보다 정확한 균열수명을 예측하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) Mandelbrot, B. B., The Fractal Geometry of Nature, W. H. Freeman and Company New

York, 1983.

- 2) Takashi SAKAI, Tatsuo ASAKAI, and Akira UENO, “フラクタル特性に基づく金属疲労破面性状の破壊力學的考察”, 日本機械學會論文集, 66卷, 652号, pp. 2183~2190, 2000.
- 3) Dauskardt, R. H., Haubensak, F. and Richie, R. O., On the Interpretation of the Fractal Character of Fracture Surfaces, Acta mater., Vol. 38, No. 2, pp. 143~159, 1990.
- 4) Underwood, E. E., Fractures in Fractography, Materials Science and Engineering, Vol. 80, pp. 1~14, 1986.
- 5) Sotoaki KIDA, Kazuto AIKAWA, Hiroyuki TASHIRO, Hiroyshi NAKANISHI and Megumi SUZUKI, “疲労損傷したFRPAのAE振幅分布のフラクタル次元と損傷評価”, 日本機械學會論文集, 66卷, 652号, pp. 2191~2197, 2000.
- 6) 권오현, “성장균열 형상에 대한 기초적 프랙탈 특성연구”, 한국박용기관학회지, Vol. 22, No. 4, 1998.
- 7) G. Bouligand, Bull. Sci. Math. 2, 185(1929).