

S35C강의 피로균열 발생 및 진전에 관한 연구

진 영 준

충주대학교 기계설계학과

(2000. 11. 10. 접수 / 2001. 3. 6. 채택)

The Research of Fatigue-Crack Initiation and Propagation for S35C Steel

Yeung-Jun JIN

Department of Mechanical Design, Chungju National University

(Received November 10, 2000 / Accepted March 6, 2001)

Abstract : Surface crack growth characteristics and influence of the stress amplitude in rotary bending fatigue test were evaluated for annealed S35C steel, and than fractal dimensions of fatigue crack paths estimated using the box counting method. The following results that will be helpful to understand the fatigue crack growth mechanism were obtained. (1) Crack growth rate ds/dN and db/dN (s : half crack length at the surface crack, b : crack depth) depended on stress amplitude ($\Delta \sigma/2$), stress intensity factor range (ΔK_A , ΔK_C) and crack length. (2) At the effect area of 0.3 mm hole notch ($s < 0.5$ mm) crack growth rate did not depend on these factors. (3) The fractal dimensions (D) increased with stress amplitude ($\Delta \sigma/2$) but decreased with cyclic number.

Key Words : rotary bending fatigue test, crack growth rate, stress intensity factor range, fractal dimension

1. 서 론

기계 구조용 탄소강은 가공성 및 경제성이 뛰어나기 때문에 대표적인 구조용 재료로서 다양한 구조물에 사용되고 있으며, 이 재료의 피로에 관한 많은 연구들이 수행 되어 그 결과들이 보고되고 있다^{1,2}.

그러나 회전굽힘 피로를 받는 기계구조 부재로 많이 사용되고 있는 이러한 재료의 회전굽힘 상태 하에서의 피로균열 발생 및 진전에 관한 정량적인 연구³는 극히 제한되어 있는 것이 현실이다.

또한 자연계의 불규칙하고 복잡한 형태를 프랙털(fractal) 이론을 사용하여 정량적으로 해석 할 수 있다는 사실이 잘 알려져 있다⁴. 금속 강도학 분야에 있어서도 파면형상, 및 슬립 밴드(Slip band) 등이 프랙털 특성을 나타낸다는 사실이 밝혀지고 있다^{5~7}.

이와 같은 관점으로부터, 본 연구에서는 시멘타이트(cementite) 구상화 열처리한 S35C 탄소강을 사용하여 다양한 응력 하에서 회전굽힘 피로시험을

수행하였다.

피로균열의 발생 및 전파특성을 검토하기 위하여 시험편 표면의 레프리카(replica)를 채취하였으며, 레프리카의 표면 관찰로부터 측정된 균열길이를 균열 진전속도를 산출하였다.

더욱이 균열진전경로의 프랙털 해석을 수행하여 균열 진전 메커니즘과 프랙털 특성의 관련성에 관하여도 검토하였다.

2. 실험방법

2.1. 재료, 시험편 및 피로시험

본 연구에서는 직경 16 mm의 S35C 열간 압연 환봉을 구상화 열처리(1000 °C에서 1시간 유지 후 담금질한 다음 725 °C에서 30시간 유지 후 로냉)한 재료를 사용하였으며, 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1과 2에 각각 나타내었다.

표면 및 단면에서 관찰된 조직 사진을 Fig. 1에 나타내었다. 구상화된 시멘타이트 입경은 재료의 단면부보다 표면이 더 크지만 밀도는 낮았다.

Table 1. Chemical composition of S35C (Wt %)

C	Si	Mn	O	S	Ni	Cr	Cu
0.39	0.28	0.76	0.024	0.04	0.01	0.12	0.01

Table 2. Mechanical properties of S35C (Wt %)

Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction area (%)
442	681	24	58

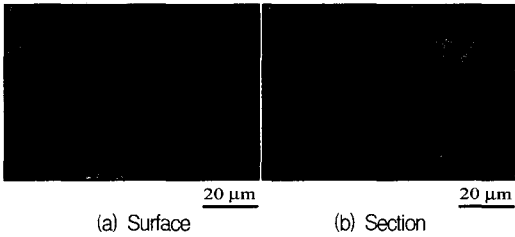


Fig. 1. Optical micrographs of S35C steel

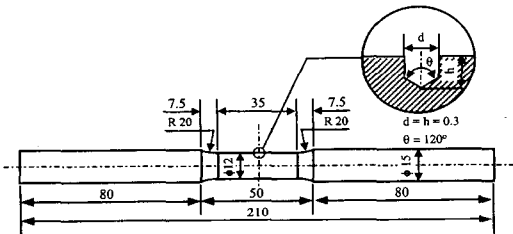


Fig. 2. Shape and dimension of rotary bending fatigue test specimen

Fig. 2는 시험편의 형상 및 치수를 나타내고 있으며, 균열 발생위치를 한정하기 위하여 시험편 중앙부에 직경 0.3 mm, 깊이 0.3 mm의 미소 노치를 가공하였다.

피로 시험은 Ohno식 회전굽힘 피로시험기(회전 속도 3420 rpm)를 이용하였으며, 응력 계산은 미소 노치를 무시하였다.

시험편의 표면관찰 및 균열길이의 측정을 위한 레프리카의 채취는 임의의 반복회수에서 시험기를 정지시킨 후 수행하였다. 균열길이는 레프리카 표면으로부터 시험편 표면 원주방향의 길이(2s)를 광학 현미경으로 측정하였다.

또한 광학 현미경으로 촬영된 균열 경로의 사진을 이용하여 박스 법(box counting method)⁶⁾으로 프랙탈 차원(fractal dimension)을 구하였다.

2.2. 균열진전속도와 응력확대계수의 산출

일반적으로 판상 시험편의 응력확대계수는 임의

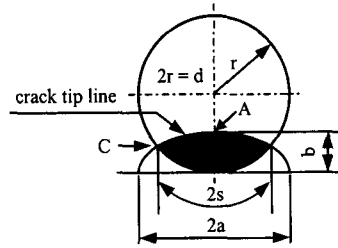


Fig. 3. Definition of Semi-elliptical surface crack under rotar bending test

의 두께와 폭 등에 있어서의 균열에 대하여 수식화되어 있으나, 환봉 시험편에 관해서는 수식화되어 있지 않은 것이 현실이다.

환봉 시험편에 대해서는 Fig. 3에 나타내는 것과 같이 균열 형상을 반 타원으로 가정하고, 표면 균열의 깊이 방향 b 및 원주 방향 2s에 분포하는 임의의 표면력에 대하여 균열 선단 각 점의 응력확대계수를 효과적으로 평가하는 방법^{8,9)}이 제시되어 있다.

그러나 본 실험에서는 균열 길이 2s밖에 측정할 수 없으므로 응력확대계수범위의 산출에 필요한 균열길이 b 및 타원의 장축 길이 2a는 M. Masaki의 동종의 강에 대하여 실험적으로 그 관계를 구한 식(1)과 반 타원 균열의 형상변화, 즉 b/a와 b/d의 관계³⁾로부터 구하였다.

$$(b/d) = 0.86(2s/\pi d)^{0.84} \quad (1)$$

$$\Delta K_C/2 = F_C(\Delta\sigma/2)\sqrt{(\pi s)} \quad (2)$$

$$\Delta K_A/2 = F_A(\Delta\sigma/2)\sqrt{(\pi s)} \quad (3)$$

또한 원주방향의 응력확대계수범위 ΔK_C 와 시험편 중심 방향의 응력확대계수범위 ΔK_A 의 산출은 각각 식(1)과 식(2)를 사용하였으며, 무차원 계수 F_C 와 F_A 는 M. Shiratori의 수치계산 결과(9)로부터 보간법으로 구하였다.

2.3. 프랙탈(Fractal) 차원 해석

본 연구에서는 균열 형상의 굴곡정도 또는 복잡한 정도를 정량화하기 위해 프랙탈 차원(fractal dimension) 해석을 수행하였다.

프랙탈 특성이란 도형의 일부를 확대하여도 원래의 도형과 거의 같은 모양을 가진다고 하는 자기상사성(自己相似性)을 의미하며⁴⁾, 도형의 형상에 관

한 정량화 작업에는 몇 가지 방법들이 사용되어지고 있다.

본 연구에서는 레프리카로 채취된 피로균열의 경로에 대하여 박스 법이라고도 하는 간편한 방법으로 차원해석을 하였다. 이 방법은, 대상으로 하는 균열의 현미경 사진에 정방형의 격자를 씌워서 균열이 지나가는 정방형의 개수 $N(\eta)$ 를 구한다. 정방형 변의 길이 η 를 변화시켜서 같은 작업을 반복하여 정리하면 프랙털 특성이 존재 할 경우에는 다음 식이 성립한다^{4,6)}.

$$N(\eta) = C\eta^{-D} \quad (4)$$

여기서 C와 D는 정수이며, 특히 D를 프랙털 차원이라 한다. D는 1차원에서는 $1 \leq D < 2$, 2차원에서는 $2 \leq D < 3$, 3차원에서는 $3 \leq D < 4$ 가 된다. D가 커질수록 직선 또는 평면으로부터 기복이 심해짐을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

회전굽힘 피로시험으로부터 얻어진 S-N곡선을 Fig. 4에 나타내었다. 그림 중의 데이터는 초기균열 발생까지의 회전수를 표시하고 있으며 화살표를 붙인 시험편은 균열이 발생되지 않았음을 의미한다. 피로한도는 170 MPa정도로 이 값은 상 항복응력 442 MPa의 약 38 %에 해당한다.

원주방향의 균열진전속도 ds/dN 과 원주방향 균열 길이 s 와의 관계를 Fig. 5에, 깊이방향의 균열진전속

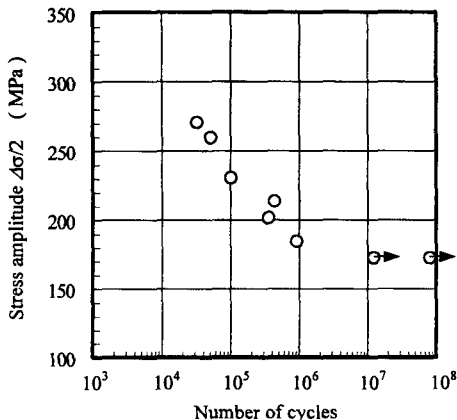


Fig. 4. Relationship between stress amplitude($\Delta\sigma/2$) an number of cycles(N)

도 db/dN 과 깊이방향 균열길이 b 와의 관계를 Fig. 6에 각각 나타내었다. 이들 두 그래프에는 미소 노치의 영향이 미치고 있는 범위라고 생각되는 $s < 0.5$ mm의 값은 표시하지 않았다. 약간의 변화폭은 있으나 두 그래프 모두 동일 s 및 b 에 대한 균열진전속도는 응력 진폭 크기에 의존성을 나타내고 있으며 거의 직선적인 관계가 인정되었다. 또한 $s < 0.5$ mm에서의 관계를 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내고 있으나 이 두 그래프에서는 응력 의존성이 인정되지 않았으며, 균열진전속도가 큰 폭으로 변화하고 있다. 그

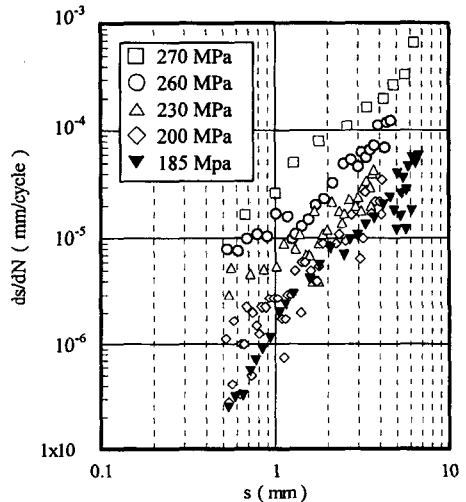


Fig. 5. Relationship between crack growth rate (ds/dN) and crack length(s)

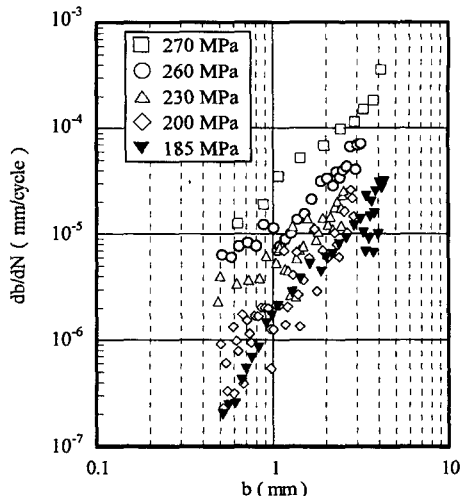


Fig. 6. Relationship between crack growth rate (ds/dN) and crack length(b)

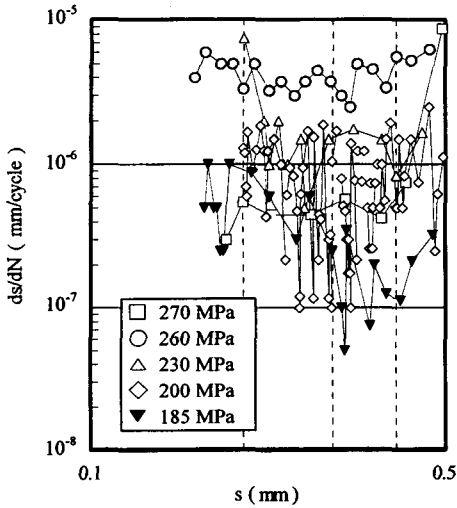


Fig. 7. Relationship between crack growth rate (ds/dN) and crack length(s)

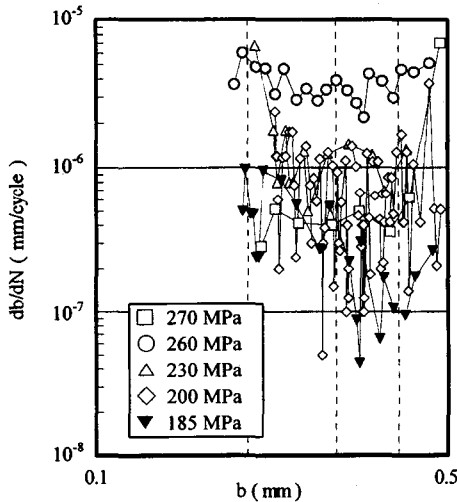


Fig. 8. Relationship between crack growth rate (db/dN) and crack length(b)

이유로는 미소 노치에 의한 응력분포 차이도 개입하고 있다고 생각되나 피로 균열 발생초기와 같은 저속도 영역에서는 재료의 조직학적인 영향을 크게 받기 때문으로 생각된다.

균열 선단에 인접하여 구상화 시멘타이트가 존재할 경우 균열진전속도의 감소 및 정류 현상이 발생할 수 있으며, 이러한 인접 입자간의 상대적인 위치가 균열진전속도에 영향을 미치기 때문으로 사료된다.

앞에서 설명한 식(1) 및 식(2)를 이용하여 구한 원주방향의 응력확대계수범위 ΔK_c 와 ds/dN 과의 관

계를 Fig. 9에, 깊이방향의 응력 확대계수 범위 ΔK_A 와 db/dN 과의 관계를 Fig. 10에 각각 나타내었다. 여기에서도 미소 노치의 영향을 배제하기 위하여 $s < 0.5$ mm의 값은 무시하였다. 이 두 그래프에서도 230 MPa 이하의 응력진폭에서는 의존성이 근소한 차이를 보이지만 전체적으로 응력진폭 의존성은 인정되었다.

Fig. 11~ Fig. 14에 시험편 표면에서 채취한 레프리카의 표면관찰로부터 얻은 균열형상의 사진을 나타내었다.

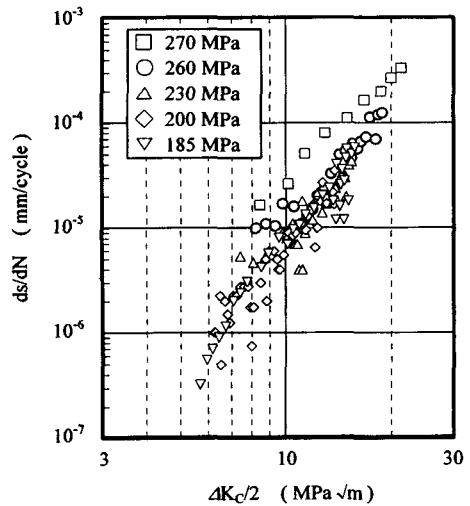


Fig. 9. Relationship between crack growth rate (ds/dN) and stress intensity factor range($\Delta K_c/2$)

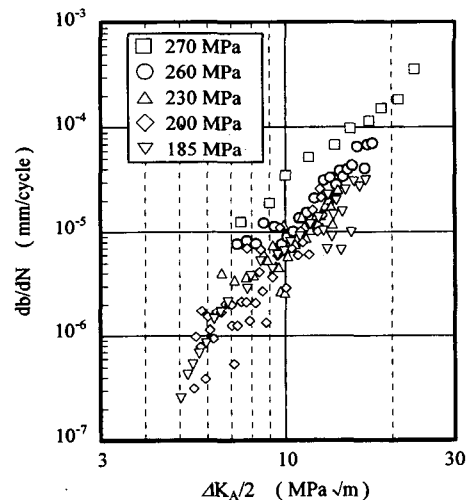


Fig. 10. Relationship between crack growth rate (db/dN) and stress intensity factor range($\Delta K_A/2$)

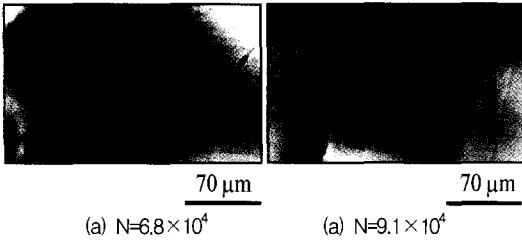


Fig. 11. Optical micrographs of crack initiation and propagation in notched specimen ($\Delta\sigma/2=260$ MPa)

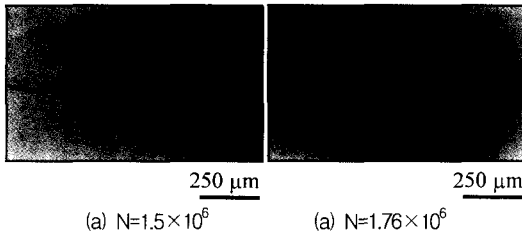


Fig. 12. Optical micrographs of fatigue crack tip shape ($\Delta\sigma/2=200$ MPa)

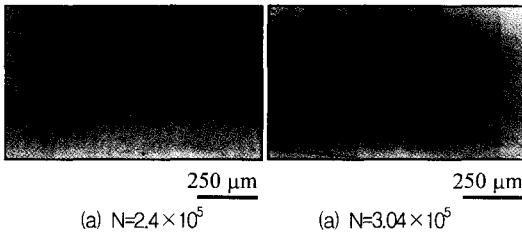


Fig. 13. Optical micrographs of fatigue crack tip shape ($\Delta\sigma/2=260$ MPa)

Fig. 11에는 260 MPa의 응력진폭에 의하여 미소 노치에서 발생한 초기균열의 형상을 나타내었다. 균열의 전파경로를 관찰하여 보면 빈번히 진행방향을 바꾸고 있으며 분기하는 장소도 나타나고 있다. 또한 균열 선단에는 슬립 밴드(slip band) 등이 형성되어 있었다.

하중 반복횟수의 증가에 따르는 균열선단의 소성 영역의 변화를 관찰하기 위하여 Fig. 12와 Fig. 13에 응력진폭 200 MPa 및 260 MPa로 소정의 횟수동안 반복하중을 받은 균열선단의 형상을 나타내었다. 하중 반복 횟수가 증가할수록, 응력진폭이 클수록 소성 영역이 커지고 거칠어지는 경향이 있었다. 또한 Fig. 15에서는 측면의 SEM 관찰 결과를 나타내고 있으며, 이런 부분에서 다수의 미소 균열(2차 균열)이 관찰할 수 있었다. 그러나 손상영역이 균열의 좌우에서 거의 같은 정도로 발생하는 것이 아니고 한쪽

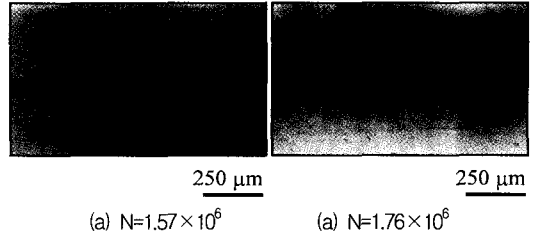


Fig. 14. Optical micrographs of fatigue crack path shape ($\Delta\sigma/2=200$ MPa)



Fig. 15. SEM micrographs of the fatigue crack tip area for S35C ($\sigma=270$ MPa, $N=1.99 \times 10^5$ cycle)

에서 현저히 발생하고 있다. 이것은 회전굽힘이라는 시험 원리상 발생하는 비틀림의 영향이라고 생각되어진다.

또한 동일한 장소에서의 하중반복 횟수의 증가에 의한 균열 형상변화를 관찰하기 위하여 Fig. 14에 제시하는 것과 같이 균열이 형성될 때에 채취된 레프리카 (a)와 균열이 지나간 다음에 채취된 레프리카 (b)를 비교 관찰하였다. 그림에서 알 수 있듯이 (b)에서 관찰된 균열의 소성 영역이 다소 커졌으나 균열 경로는 (a)보다 약간 둔화되는 경향이 있었다. 이것은 시험편이 회전함으로써 응력상태가 역전되어 양 파면이 서로 부딪혀 손상을 입히기 때문으로 생각된다.

응력진폭 200 MPa 및 260 MPa의 시험편 표면의 레프리카 채취로부터 얻어진 균열경로에 대하여 박스 법으로 프랙털 차원 해석을 하였다. 그 결과를 Fig. 16에 나타내었다. 모두 $N(\eta)$ 와 η 의 관계는 양대수 그래프상에서 직선적인 관계로 나타났다. 이것은 식(4)가 성립함을 의미하며 균열형태는 자기 상사성, 즉 프랙털 특성을 가짐을 의미한다. 그림 중의 직선의 기울기가 프랙털 차원 D이며 균열형태가 복잡할수록 이 값이 커진다. 전반적으로 응력진폭 260 MPa인 경우의 D가 큰 값을 나타내었으며, 균열 발생초기의 값보다 균열이 통과하고 난 다음의 D가 적어지는 경향이 있었다. 이것은 앞에서도 설명한 것과 같이 균열이 발생한 다음에 연속되는 반복하중에 의하여 균열이 손상된 것으로 사료된다.

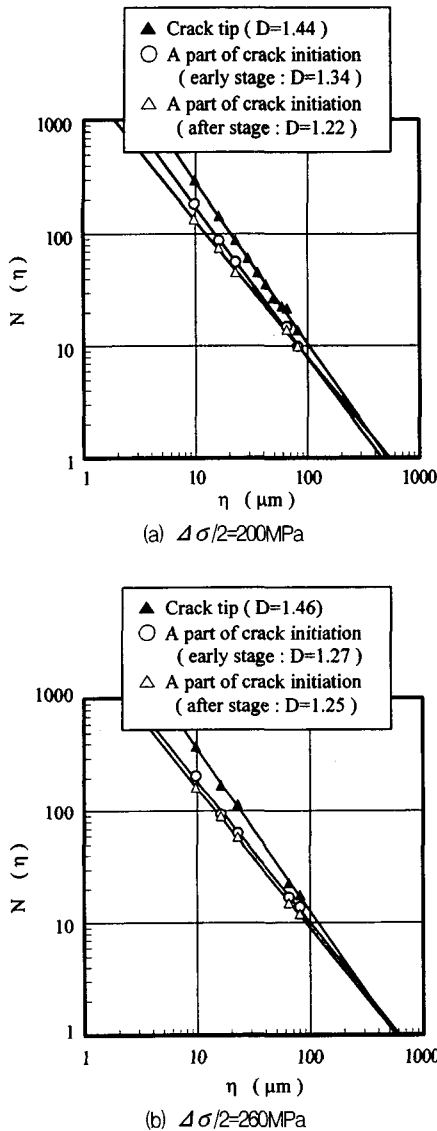


Fig. 16. Relationship between number of square to (N) and square length (η)

4. 결론

구조용 강으로 많이 사용되고 있는 S35C 탄소강을 이용하여 회전굽힘 피로시험을 수행하였으며, 채취된 레프리카의 관찰로부터 균열형상 및 균열길이의 측정, 균열경로의 프랙탈 차원해석을 통하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) 원주방향의 균열진전속도 ds/dN 과 깊이방향의 균열진전속도 db/dN 은 각각의 균열길이 및 응력

확대계수 ΔK_A , ΔK_C 와의 관계에서 거의 직선적으로 표시되었으며 응력 의존성을 나타내었다.

(2) 피로균열 발생 초기부이며, 미소 노치의 영향권이라고 생각되는 $s < 0.5$ mm에서는 조직적인 영향이 더하여 균열진전속도가 큰 폭으로 변화하였으며 응력 의존성이 인정되지 않았다.

(3) 균열 경로에 대한 프랙탈 차원 D는 응력진폭이 클수록 큰 값을 나타내었으며 균열 발생부는 하중반복 횟수가 증가할수록 적어졌다.

참고문헌

- 1) Tokaji, K., Ogawa, T. and Harada, Y. "The Growth of Small Fatigue Cracks in a Low Carbon Steel; The Effect of Microstructure and Limitations of Linear Elastic Fracture Mechanics," *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* Vol. 9, pp. 205~217, 1986.
- 2) Nishida, S., Hattori, N., Kubota, H. and Nisitani, H. "Effect of Carbon Content on Fatigue Crack Initiation of Plain Carbon Steel," *Trans. JSME, A-60*, pp. 1319~1324., 1994.
- 3) Misumi, M. and Shimizu, Y. "Surface Crack Growth Characteristics on Two Kinds of Specimen Diameters in Rotating Bending Fatigue," *Trans. JSME, A-56*, pp. 1540~1547, 1990.
- 4) Charkaluk, E., Bigerelle, M. and Iost, A. "Fractals and Fracture," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 61, pp. 119~139, 1998.
- 5) Minoshima, K. and Komai, K. "Nanometric Visualization of Localized Damage by Scanning Probe Microscopy," *Mater. Sci. Res. Int.*, Vol. 2, pp. 209~219, 1996.
- 6) Sumiyoshi, H., Matsuoka, S., Ishikawa, K. and Nihei, M. "Fractal Character of Scanning Tunneling Microscopic Images of Brittle Fracture Surfaces on Molybdenum," *Trans. JSME, A-57*, pp. 2237~2243, 1991.
- 7) Shibutani, Y., Kitagawa, H. and Nakamura, T. "Fractal Property of Interfacial or Surface Inhomogeneous Deformation," *J. Soc. Sci., Japan*, Vol. 41, pp. 1611~1615, 1992.
- 8) Murakami, Y. and Tsuru, H. "Stress Intensity Factor Equations for a semi-Elliptical Surface Crack in a Shaft under Bending," *Trans. JSME, A-53*, pp. 2062~2065, 1987.
- 9) Shiratori, M., Miyoshi, T., Sakai, Y. and Zang, G. R. "Analysis of Stress Intensity Factors for Surface Crack Subjected to Arbitrarily Distributed Surface Stresses," *Trans. JSME, A-53*, pp. 779~785, 1987.