

〈기술논문〉

## 영상처리기법을 이용한 CCT 시편 균열의 자동관측법에 관한 연구

이현우\* · 문기태\*\* · 오세종\*\*\* · 정병우\*\*\*

(1996년 3월 9일 접수)

### The Measurement of the Crack in CCT Specimen Using the Image Processing Techniques

Hyun-Woo Lee, Gi-Tae Mun, Se-Jong Oh and Byung-Woo Jeong

**Key Words :** Crack Propagation Rates(균열성장률), Crack Opening Displacement Method(균열열림 변위법), Image Processing Technique (영상처리기법), Optical Measurement(광학적 측정)

#### Abstract

In the analysis of fatigue crack propagation behavior, the crack length is one of the most important factors. In the test of crack propagation, compliance method is widely used to detect crack length. The measurement of surface crack length is not so easy with compliance method. In this study, the image processing technique was applied to measure the surface crack length. CCD(Charge-coupled device) camera was used to observe the crack image and the computer program to detect crack length from stored crack image was developed. CCT(Center cracked tension) specimen was used to compare the compliance method with the image processing technique. The crack length which detected by the image processing techniques was found to be well consistent with that from the optical measurement.

#### 1. 서 론

반복 하중을 받는 기계 구조물은 노치(notch)나 연결부 주위에서의 응력집중으로 인한 균열의 발생, 성장, 파손으로 연결되는 피로파손의 위험을 항상 내포하고 있다. 그러므로 기계 구조물의 피로 거동에 대한 해석은 중요한 연구 과제이다. 특히, 균열의 성장거동을 파악하기 위하여 일정진폭 하중 또는 변동진폭 하중에 의한 균열성장률 실험이 행

해지고 있다. 균열길이의 검출에는 광학적 방법과 COD(crack opening displacement)법이 널리 이용되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

광학적인 방법에 의한 균열길이의 관측은 정확하지만 많은 시간을 요구하며, 지속적인 측정이 요구된다. 반면, COD법은 컴플라이언스를 이용한 간접적인 측정방법으로 컴퓨터에 의한 온라인(on-line) 제어와 관측이 가능하므로 관측자에 의한 지속적인 측정이 필요없는 편리한 방법이다. 그런데 COD법은 표면균열과 같이 COD 게이지의 부착이 곤란한 경우에는 적용할 수 없는 어려움이 있다.

그러므로 본 연구에서는 영상처리기법에 의한 표

\*회원, 부산대학교 기계기술연구소

\*\*회원, 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\*\*회원, 국방과학연구소

면균열의 자동관측법에 대하여 연구하였다. 균열의 측정은 COD법, 광학적인 방법, 영상처리기법을 상호비교하기 위하여 AI7075-T73511 재료의 CCT (center cracked tension) 시편에 대하여 적용하였다. 영상처리기법에 의하여 측정된 균열길이의 변화를 광학적인 방법과 COD법에 의하여 측정된 균열길이 변화와 비교하고 영상처리기법의 적용 가능성에 대하여 검토하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 균열성장률식

피로균열성장률 실험결과에서 균열성장속도 ( $da/dN$ )와 응력확대계수 폭 ( $\Delta K$ )의 관계식은 Paris<sup>(3)</sup>에 의해 제안된 식 (1)이 적용된다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

여기서,  $C$ 와  $m$ 은 Paris식에 의하여 제시된 상수이다.

### 2.2 응력확대계수폭

본 연구에서 사용된 CCT 시편의 응력확대계수는 식 (2)과 같이 주어진다.<sup>(4)</sup>

$$K = \frac{P}{BV} \sqrt{\frac{P}{B} \sec \frac{\pi a}{2}} \quad (2)$$

여기서,  $a = \frac{2a}{W}$ ,  $a$ 는 균열의 길이,  $P$ 는 가해진 하중,  $W$ 는 시편의 폭,  $B$ 는 시편의 두께이다. 위의 식 (2)은 집중하중인 경우(인장-인장)에 대하여 적용된다.

### 2.3 COD법에 의한 균열길이의 측정

일반적인 균열길이의 측정은 COD법에 의하여 이루어진다. COD값에 대한 균열길이는 식 (3)과 같다.<sup>(4)</sup>

$$\begin{aligned} \frac{2a}{W} &= C_0 + C_1 u_x + C_2 u_x^2 + C_3 u_x^3 + C_4 u_x^4 + C_5 u_x^5 \\ u_x &= 1 - e^\alpha \\ \alpha &= \exp \left[ -\frac{\sqrt{(EBC + 2y/W)(EBC - 2y/W)}}{2.141} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$C = \nu/P$  : 컴플라이언스 (compliance)

$E$  : Elastic modulus

$\nu$  : Poisson's ratio

$y$  : 균열의 개구변위

$B$ 는 시편의 두께

## 2.4 영상처리

영상처리 (image processing)란 CCD 카메라 또는 영상 획득장치에 의하여 얻어진 영상의 모든 점에서의 정보를 저장한 영상샘플 (sample)을 다양한 알고리즘 (algorithm)에 의해 원하는 결과로 가시화시키는 방법이다. 본 연구에서는 영상처리의 기본단위인 마스크<sup>(5)</sup> (Fig. 1)를 정의하고, Fig. 2와 같이 화상처리하였다. 화상처리에 의한 균열의 검출을 용이하게 하기위하여 적용된 기법으로는 선명도 (contrast)의 조절,<sup>(6)</sup> 선 (line)의 검출,<sup>(7)</sup> 경계 (edge) 검출<sup>(8~10)</sup> 등이 있다. 본 연구에서 사용한 영상처리방법은 명암의 분석을 통한 경계검출법의 하나이다.

균열길이의 측정에 사용된 영상처리 프로그램은 Fig. 3의 흐름도와 같이 구성되었다. 프로그램의 동작순서는 다음과 같다. 먼저, 센서로부터 입력된 영상신호를 영상데이터로 연속적으로 변환<sup>(11)</sup>한다. 변환되는 영상데이터는 하중의 강하에 의한 시편 파손이나 설정한 사이클수에 도달할 때까지 일정한 사이클수 간격을 영상의 저장을 반복한다. 실험의

$w_1$	$w_2$	$w_3$
$w_4$	$w_5$	$w_6$
$w_7$	$w_8$	$w_9$

Fig. 1 A general 3×3 mask

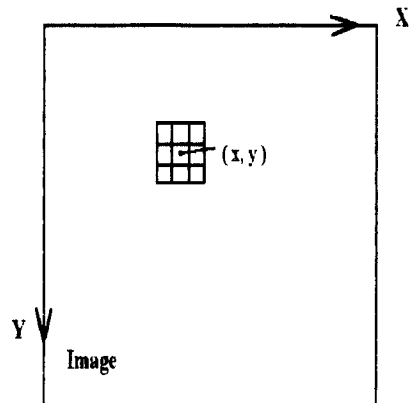


Fig. 2 (3×3) mask about a point (x, y) in an image

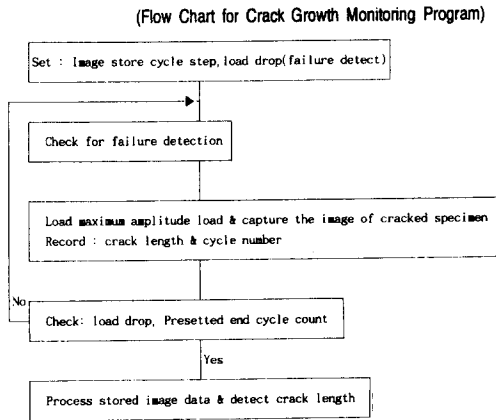


Fig. 3 Flow chart of image processing program

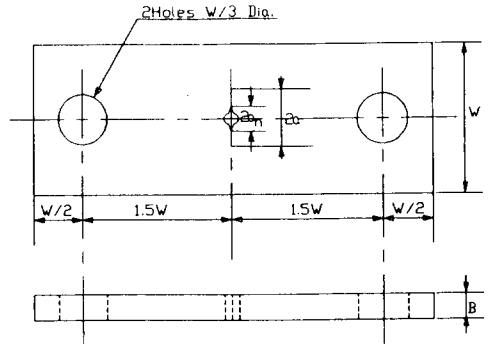
종료 후에 저장된 영상데이터 (file) 들은 일괄적으로 영상처리되어 균열의 길이를 검출한다. 영상처리에 사용되는 프로그램은 자체적으로 개발하여 사용하였고 프로그램에 사용되는 영상데이터의 형식은 TGA (true graphic adapter) 형식<sup>(12, 13)</sup>으로 통일하였다.

### 3. 실험

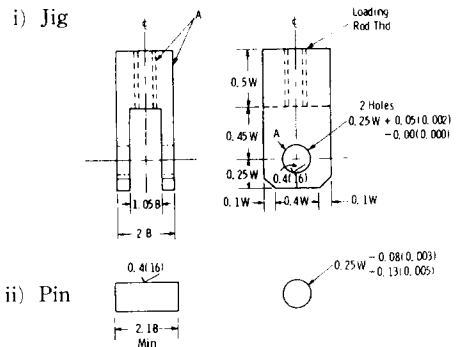
#### 3.1 시편 및 실험장치

균열성장률 실험에 사용된 시편과 치구는 Fig. 4와 같으며, 재료는 A17075-T73511이다. 사용된 CCT 시편의 두께는 3.2 mm이고, 시편의 폭은 40 mm이다. 시편의 노치는 길이가 18.2 mm로 입자 (grain) 방향에 수직한 방향으로 방전 가공을 통하여 0.5 mm의 곡률반경을 갖도록 가공하였으며, 표면은 연마처리를 하였다. 사용된 재료의 상온에서의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

본 연구에 사용된 실험장치는 데이터가 A/D 변환되어 컴퓨터로 자동처리되는 최대용량 10톤의 폐쇄 유압회로방식의 MTS(axial and torsional material test system)를 사용하였다. 실험은 기존의 COD법과 영상처리법을 비교하기 위하여 Fig. 5에 나타난 바와 같이 시편의 전면에는 영상처리 장비를 설치하고 맞은 편에는 COD 게이지를 부착하



(a) CCT Specimen for crack growth rate test.



NOTE 1—Dimensions are in millimetres (inches).  
NOTE 2—A surfaces shall be perpendicular and parallel as applicable to within 0.05 mm (0.002 in), TIR.

(b) Jig for pin hole specimen

Fig. 4 Test specimen and jig

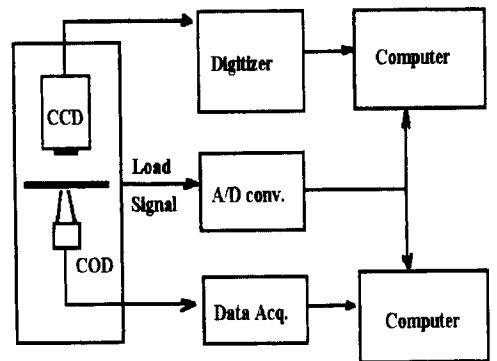


Fig. 5 Schematic representation of fatigue test & image processing system

Table 1 Mechanical properties(RT)

Ultimate stress(MPa)	Yield stress (MPa)	Yield strain(mm/mm)	Young's modulus(MPa)
508.4	394	0.0759	70640

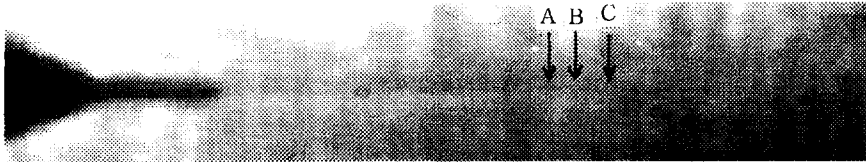


Fig. 6 Original image of cracked CCT specimen

였다. 이 각각의 장치로부터 측정된 COD값과 영상은 MTS 제어용 컴퓨터와 영상처리용 컴퓨터에 각각 동시에 저장되도록 하였다.

3.2 실험방법 및 조건

모든 실험은 실온(25°C)에서 정현파(sine wave)를 이용하였으며, 하중의 범위는 3~5.2 kN이다. 실험에 사용된 하중비( $R = \frac{P_{min}}{P_{max}}$ )은 0.1, 0.3, 0.5이다. 주파수는 8~10 Hz의 범위로 데이터의 처리 속도에 따라 융통성있게 하여 데이터를 저장처리하였다. 화상처리에서 조명은 균열의 관측이 용이하도록 균열에 수직인 방향으로 하였다. 영상처리를 용이하게 하기 위하여 인장하중이 최고점에 달했을 때 영상파일을 저장하여 영상처리를 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

균열의 성장거동의 해석에서는 균열길이의 검출은 중요한 인자로 작용한다. 일반적인 균열성장률 실험에서 균열길이의 검출방법은 COD법이 이용되고 있다. 그러나 표면균열이나 곡면에서의 균열검출과 COD계이저를 부착하기 힘든 상황에서의 균열길이의 검출은 광학적인 방법에 의존할 수밖에 없는 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 영상처리기법의 도입을 통하여 이러한 문제점의 해결을 시도하였다. 본 연구에서 사용된 영상처리기법은 Fig.5와 같은 시편의 표면에 CCD 카메라를 설치하고 이 카메라로부터 Fig.6과 같은 영상을 획득하였다. 이 획득된 영상은 적색, 황색, 청색의 3색으로 구성된 화상정보를 가지므로 이 영상정보를 디더링기법<sup>(5)</sup>을 적용하여 영상의 명암정보만을 획득하였다. 이상과 같은 방법에 의하여 획득된 영상으로부터 균열의 선단을 판단하기위하여 Fig.7에서와 같이 균열의 수직방향으로의 밝기변화를 검사하였다. 균열에서의 수직한 세로방향 밝기가 ①점에서 ②점으로 감소했다가 ③로 증가하고 다시 ④로 감소하는 규칙적인

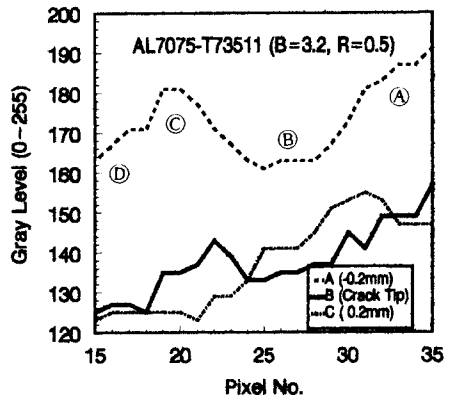


Fig. 7 Gray level difference near the crack tip

경향을 나타냄을 이용하여 노치에서부터 균열의 선단방향으로 차례로 검색하여 이러한 규칙적인 경향이 유지되는 범위까지를 균열로 정의하였다. 그 결과 Fig.7에 나타난 바와 같이 균열이 존재하는 위치인 A위치에서 명암값의 변화는 전형적인 경향을 유지하지만 C위치에서의 명암 값의 변화는 전형적인 변화를 나타내지 않는 것을 알 수 있다. 명암정보에 의한 영상처리기법을 이용한 균열의 길이 측정결과와 광학적인 측정결과를 Fig.8에 나타내었다. 그 결과 두 측정결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 영상처리기법과 COD법에 의하여 얻어진 수명과 균열길이의 상관관계를 보면 광학적인 방법과 영상처리기법의 균열길이 측정결과는 서로 잘 일치하고 있으나 COD법에 의한 결과는 42000회 이상의 구간에서 서로 다른 거동을 보이고 있다. 이러한 거동의 차이는 COD법에서 사용하고 있는 균열길이의 환산 다항식에 의한 것으로 사료된다.

영상처리기법과 COD법에 의하여 얻어진  $da/dN - \Delta K$ 선도(Figs. 9, 10, 11)를 비교해 보면 Fig.9의 경우 COD법에 의하여 구해진 경우  $\Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이하의 영역에서는 데이터의 분산이 심해 균열의 성장거동의 파악이 어려웠다. 이와 같은 경향이 나타나는 이유는 얇은 판에 하중이 가해질 때

시편의 COD계이지 부착부위에 시편의 두께 방향으로 변위가 발생하여 계이지에 부가적인 하중이 가해짐으로 균열길이의 계산에 많은 오차가 포함되어 이와 같은 데이터의 분산을 나타내는 것으로 사료된다. 그리고 또 다른 이유는 계이지를 부착하는 예지의 각도가 서로 수평을 이루지 못하는 경우에 이러한 경향이 나타나는 것으로 알려져 있다. 그리

나 영상처리기법을 사용한 경우는 전체적으로 양호한 결과를 나타내었으며, COD법에 의한 문제점이 나타나지 않는 구간에 대해서 비교해 볼 때 서로 좋은 상관관계를 보임을 알 수 있다.  $\Delta K=10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  이상의 구간에서는 파로균열성장이 선형적으로 나타나고 있으며 COD법과 영상처리기법에 의한 결과가 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있

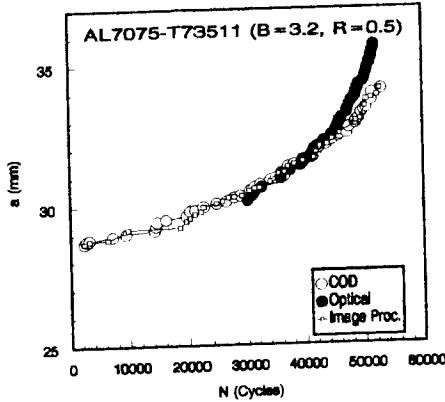


Fig. 8 Crack length versus life curves

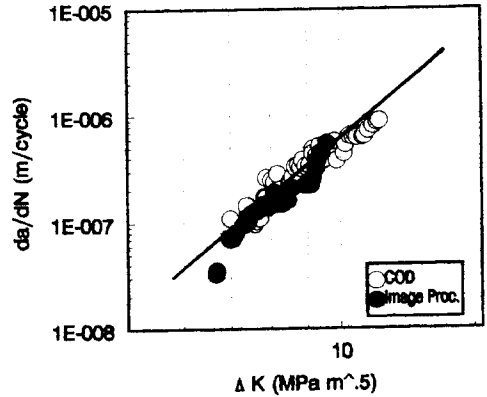


Fig. 10 da/dN - ΔK curve (R=0.3)

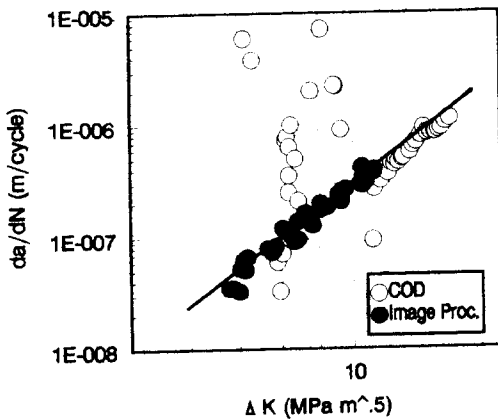


Fig. 9 da/dN - ΔK curve (R=0.1)

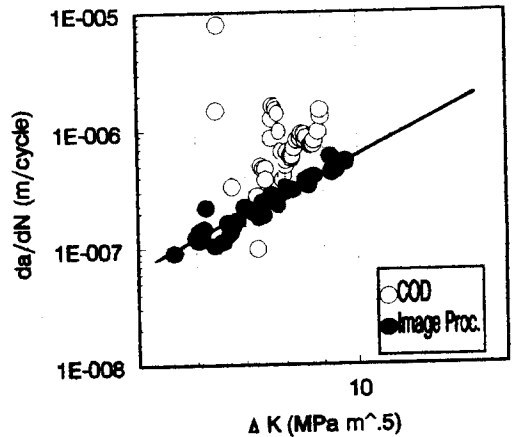


Fig. 11 da/dN - ΔK curve (R=0.5)

Table 2 Crack growth rate test (Paris eq's parameter)

Test Method	COD method		Image processing technique	
	C (10 <sup>-11</sup> )	m	C (10 <sup>-12</sup> )	m
0.1	1.65	4.253	5.82	4.678
0.3	3.4	4.20	6.17	4.851
0.5	17.9	3.625	42.4	3.141

다. 이 구간에서 구해진 Paris식에 의한 파라미터는 Table 2와 같았다.

영상처리에 의한 균열의 길이 검출에서 가장 문제시되는 것은 조명의 위치와 상태, 그리고 카메라의 분해능에 많이 의존한다는 것이다. 즉, 조명의 위치가 균열의 방향과 일치하여 균열선에 따른 명암의 차이가 나타나는 경우에는 좋은 측정결과를 기대할 수 있으나 균열이 성장하면서 성장방향이 변화하거나 균열선을 따라 일정한 조명을 얻을 수 없는 경우에는 균열의 선단을 파악할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 경우에 대한 추가적인 연구가 있어야 할 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

CCT시편에 대한 균열성장률 실험에 대하여 영상처리기법을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 명암의 영상처리에 의해서 CCT 시편에서 성장하는 균열의 길이는 자동으로 측정될 수 있다.
- (2) A17075-T73511 재료의 CCT 시편에 대한 균열성장률 실험의 영상처리기법에 의한 결과는 광학적측정법에 의한 실험결과와 비교하여 불 때 양호한 결과를 나타내었다.

## 참고문헌

- (1) ASTM E647-01, 1991, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," pp. 654~681.
- (2) Donahue, R. J., Clark, H. M., Atamo, P., Kumble, R. and Mcevily, A. J., 1972, "Crack Opening Displacement and Rate of Fatigue Crack Growth," *International Journal of Fracture Mechanics*, 8, pp. 209~219.
- (3) Paris, P. C. and Edrogan, F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, Vol. D85, pp. 528~534.
- (4) Ashbough, N., 1986, "Crack Length Expression as Function of Compliance for Center Crack Tension Specimen," *ASTM Research Report RR-E24-1012*, June.
- (5) Rafel C. Gonzalez, Richard E. Woods, 1992, *Digital Image Processing*, Addison Wesley, pp. 7~10.
- (6) Gonzalez, R. C., 1986, "Image Enhancement and Restoration," *Handbook of Pattern Recognition and Image Processing*, pp. 191~213.
- (7) Prewitt, J. M. S., "Object Enhancement and Extraction," *Picture Processing and Psychopictories*, Lipkin, B. S. and Rosenfeld, A., eds.
- (8) Petrou, M. and Kittler, J., "Optical Edges Detector for Ramp Edges," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell*, Vol. 13, No. 3, pp. 483~491.
- (9) Clark, J. J., "Authenticating Edges Produced by Zero-crossing Algorithms," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell*, Vol. 12, No. 8, pp. 830~831.
- (10) Sid-Ahmed, M. A., 1995, *Image Processing* McGraw-Hill, pp. 88~98.
- (11) Lindly, C. A., 1991, *Image Processing*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 385~421.
- (12) Rimmer, S., 1993, *Windows Bitmapped Graphics*, McGraw-Hill, pp. 207~215.
- (13) Luse, M., 1993, *Bitmapped Graphics Programming in C++*, Addison Wesley, pp. 658~661.