

# 축 단면 내 대칭 위치의 미소 원공 결함에서 발생한 피로균열 특징

송삼홍\* · 배준수\*\* · 안일혁\*\*\*

## The Characteristics of Fatigue Cracks Emanating from Micro Hole Defects Located Opposite Position of the Shaft Cross Section

Sam-Hong Song\*, Jun-Su Bae\*\* and Il-Hyuk Ahn\*\*\*

**Key Words:** Fatigue Life(피로수명), Surface Crack (표면균열), Internal Crack(내부균열), Fatigue Crack Propagation Rate(피로균열전파속도,  $da/dN$ ), Stress Intensity Factor Range (응력확대계수범위,  $\Delta K$ ), Cycle Ratio(수명비,  $N/N_f$ ), Aspect Ratio(수명비,  $a/C$ )

### Abstract

The components with the circular cross section have the symmetric combination parts for rotating balance and the crack emanates from the symmetric combination parts. The symmetric cracks from symmetric combination parts make a decrease in the component fatigue life more than single crack. In this study, to estimate the behavior of symmetric cracks, the fatigue test was performed using rotary bending tester on the specimen with a symmetric defects in circular cross section. The material used in this study is Ni-Cr-Mo steel alloy. Under the same stress, the result from the rotary bending fatigue test turned out that the symmetric cracks made a decrease in the fatigue life by 35% more than single crack and the relation between  $\log a$  and cycle ratio  $N/N_f$  obtained linearly.

### 1. 서론

유니버설 조인트, 터빈 축과 같은 축재는 회전 시 균형을 위해서 축 단면에 대칭적으로 결합부를 만든다. 이런 대칭적인 결합부들은 응력집중부가 되어서 균열을 발생시키고, 낮은 작용하중 하에서도 파괴를 가져온다.<sup>(1-4)</sup> 결합부 중에서 실제 균열이 발생하는 지점은 조직상태, 응력집중

정도, 하중상태에 따라서 달라지게 된다. 축재는 회전에 의한 전단하중과 자중에 의한 굽힘하중을 받게 된다. 이런 하중상태 하에서 한쪽의 결합부에서 균열이 발생하게 되면 대칭위치의 결합부에서도 균열이 발생할 가능성은 증가하게 된다. 따라서 축 단면에 대하여 대칭적으로 발생한 균열의 거동에 대한 연구는 축재의 안전 설계측면에서 매우 중요하다.

Lin, Smith 등<sup>(5)</sup>은 환봉재의 단면에  $60^\circ$ 의 위상차를 가지는 두 개의 균열이 반복 인장하중을 받고 있을 때의 거동을 유한요소법을 이용하여 연구한 결과, 두 개의 균열이 전파하여 서로 매우 가까워지게 되면 외부에서보다 내부에서 빠른 균열전파를 보인다고 보고하였다.

Fonte, Freitas 등<sup>(6)</sup>은 환봉재에 대해서 굽힘하중과 인장하중을 동시에 받는 반타원 표면균열의 응력확대계수를 구하는데 유한요소법을 이용하

\* 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : shsong@korea.ac.kr

\*\* 회원, 삼성 SDI Product Design Team

\*\*\* 회원, 고려대학교 대학원

였고, 그 결과를 보고 하였다. 회전체 구조물의 원형단면에 발생하는 균열에 대한 연구는 실험적인 연구보다는 해석적인 연구가 주를 이루고 있으며, 원형단면에 대칭적으로 발생한 균열의 거동에 대한 보고는 찾아 볼 수 없었다. 따라서 회전체 구조물의 원형단면에 대칭적으로 발생한 균열은 어떠한 거동을 하는가에 대한 실험적 연구가 더욱 필요하다.

따라서 본 연구에서는 원형단면내 대칭위치에 존재하는 미소결함 주위의 피로균열거동을 고찰하기 위하여 실제 축 재료로 사용되는 Ni-Cr-Mo 합금강을 시험편으로 하고, 그 시험편 표면에 인위적으로 2개의 미소원공을 가공한 후, 이 미소원공의 주위에 발생, 전파하는 피로균열의 전파 거동을 실험을 통하여 상세히 고찰하였다.

## 2. 실험방법

본 실험에 사용한 시험편 재료는 축재, 기어등의 재료로 쓰이는 기계구조용 Ni-Cr-Mo 합금강 (KS D 3709에 규정되어 있음)을 사용하였다. 본 재료의 화학적 성질과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 시험편은 치수가공을 하기 전에 재료의 사전 응력제거와 조직의 균일화를 위하여 전기로에서 850℃, 50분 동안 어닐링 처리한 후 Fig. 1과 같이 가공하였고, 시험편의 표면은 연마지 #100~#2000로 가능한 거울면에 가깝도록 연마를 실시하였다.

시험편 표면에 가공된 원공결함은 깊이 0.5mm, 직경 0.5mm이고, 이것은 시험편의 평행부 단면에 대칭적으로 가공되었다. 단일 원공결함은 Fig. 1의 시험편 A부분에 가공하였다. 실험에 사용된 시험기는 최대굽힘 모멘트 98 N·m인 Ono식 회전 굽힘 피로시험기이고, 이때 사용한 실험기의 회전수는 3600rpm이며, 응력비는 R=-1 이다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 표면균열길이과 내부균열길이와의 관계

단면 내 대칭적으로 발생한 피로균열은 응력반복수에 따라 빠른 균열발생을 보이는 주균열과 늦은 균열발생을 보이는 부균열로 나눌 수 있다. 이와 같은 결과는 가공한 원공결함 주변의 조직이나 원공결함에 의한 응력집중도의 차이에 따라

Table 1 Chemical composition of SNCM220

Composition ( Wt% )					
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
0.29	0.23	0.60	0.57	0.66	0.20

Table 2 Mechanical properties of SNCM220

Yield Stress ( MPa )	Ultimate Stress ( MPa )	Hardness ( Hv )
385.4	536.4	149

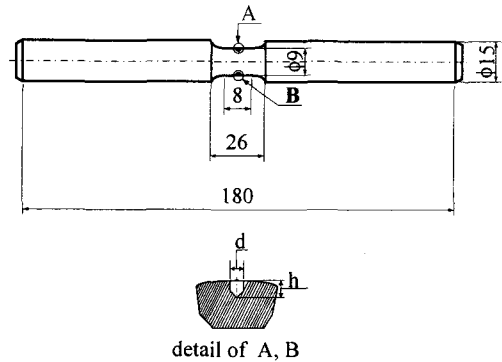


Fig. 1 Geometry of specimen ( unit : mm )

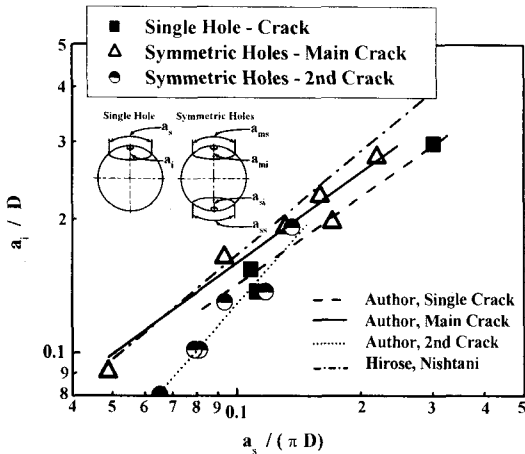
서 서로 다른 균열발생을 보이기 때문이라고 생각된다. 또한 이렇게 발생한 피로균열은 그후에 응력반복수에 의하여 전파하는데, 그것들의 전파 속도는 다르다는 것을 관찰할 수 있었다. 이런 결과와 관련하여, 三角, 清小 등<sup>(7)</sup>은 대소형 시험편의 회전굽힘 피로시험을 통해 다음과 같은 무차원식을 제안하였다.

$$\frac{a_i}{D} = A \left( \frac{a_s}{\pi D} \right)^B \quad (1)$$

여기서  $a_i$ 는 내부균열길이,  $a_s$ 는 표면균열길이,  $D$ 는 평행부의 직경을 나타낸다. 이 관계식은 응력 레벨, 시험편의 직경 및 강종류의 차이에 의해 영향을 받지 않는다고 하였다. 따라서 본

**Table 3** Material constant of equation (1)

Crack type Constant	Single hole crack	Symmetric holes Main crack	symmetric holes 2nd crack
A	1.06	1.06	0.99
B	0.79	1.00	1.37

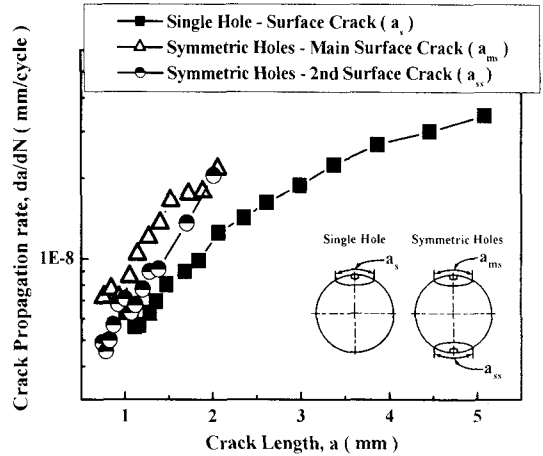


**Fig. 2** The relation between surface crack length

연구결과도 이 식으로 정리 될 수 있다고 생각된다. 내부균열길이는 시험편에 고하중과 저하중을 반복적으로 가하여 만든 비치마크를 산화착색하여 구하였다. 이렇게 하여 얻어진 상수값은 Table 3에 나타낸 바와같다. 그 결과를 보면, 상수 A값에 비하여 B값의 차이가 상대적으로 큰데, 이것은 초기 균열의 형상이 서로 다르기 때문인 것으로 생각된다.

### 3.2 응력반복수의 변화에 따른 표면균열의 거동

Fig. 3는 단일원공을 갖는 경우의 피로균열전파속도와 단면 내 대칭적인 2개의 원공을 갖는 경우의 그것을 비교한 것이다. 단일균열의 균열전파속도는 일정하게 증가하는 형태를 보이는 반면, 대칭균열의 주균열과 부균열의 균열전파속도는 서로 증가-감소, 또는 감소-증가의 형태로 교차하면서 증가하는 형태를 보이고 있다. 이것은 동일한 하중 하에서의 일정한 균열전진력이 주균



**Fig. 3** The relation between surface crack propagation rate and surface crack length

열과 부균열의 내부균열 형상이 변함에 따라 다르게 작용하며, 균열을 전파시키기 때문인 것으로 생각된다. 또한 대칭균열의 전파속도증가는 단일균열의 그것에 비하여 더욱 빠른데, 이것이 시험편의 피로수명을 더욱 감소 시킨다.

### 3.3 표면균열 길이와 파단수명비와의 관계

Fig. 4는 표면균열길이와 파단수명비와의 관계를 나타낸 것이다. 이때 응력의 대소에 관계없이 피로균열 성장특성을  $a_s-N/N_f$  선도로 나타내면 각각의 데이터들은 하나의 직선에 좁은 폭을 가지며 모이게 된다. 즉, 동일수명비에 대하여  $\log a_s - N/N_f$ 는 하나의 비례관계를 나타낸다. 西谷등<sup>(8)</sup>은 이런 관계를 다음과 같이 표시하였다.

$$\log(a_s) = \alpha + \beta \left( \frac{N}{N_f} \right) \quad (2)$$

여기에서,  $\alpha$ 는 원공의 크기에 따라 주어지는 상수이고,  $\beta$ 는 비례상수이다. Table 4는 본 실험에서 식(2)를 이용하여 얻어진 상수  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 나타내었다. 이 값들은 표면균열의 발생, 성장거동을 파악하는데 중요하며, 이것의 정량적 분석 검토는 피로균열의 발생, 성장특성 등을 예측 가능하게 한다. 본 연구에서 얻은 결과를 보면 상수  $\alpha$ 값은 세 경우가 거의 같은 값을 보이고 있으며,

Table 4 Material constants of equation (2)

Crack type \ Constant	Single hole crack	Symmetric holes Main crack	Symmetric holes 2nd crack
$\alpha$	-0.509	-0.568	-0.508
$\beta$	1.411	1.302	0.968

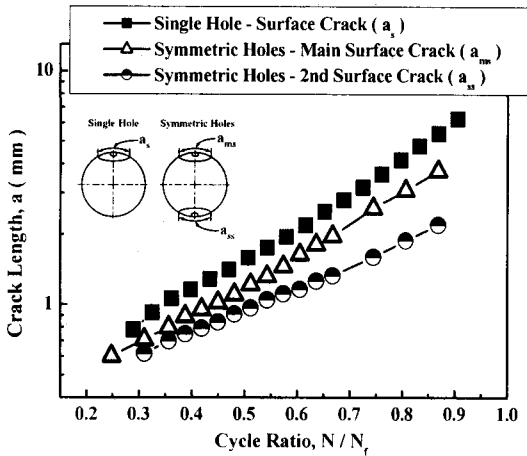


Fig. 4 Relation between surface crack length and cycle ratio

$\beta$ 값은 단일균열과 대칭균열의 주균열에서는 비슷하다. 그러나 대칭균열중 부균열의  $\beta$ 값은 차이를 보이고 있다. 이것은 부균열이 다른 두 균열에 비해서 전체 표면균열길이가 짧고, 반복수에 대한 균열증가율이 작기 때문인 것으로 생각된다.

### 3.4 수명비와 형상비와의 관계

Fig. 5는 수명비에 따른 균열의 형상비 변화를 나타낸 것이다. 단일균열인 경우의 형상비는 1.0~1.5 값의 범위에서 감소하는 경향을 보이는 반면, 대칭균열의 경우 주균열의 형상비는 0.7, 부균열의 형상비는 0.17로 거의 일정한 형태를 보이고 있다. 환봉재의 표면균열은 응력반복수가 증가함에 따라 계속적으로 증가하는 경향을 보이나, 내부균열은 초기에는 증가하는 경향을 보이지만, 일정 크기 이상에서는 더 이상 증가하지

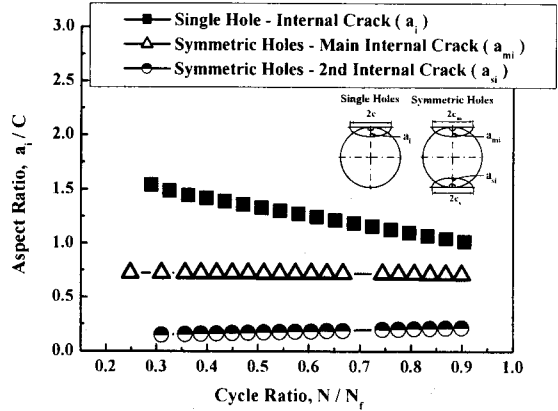


Fig. 5 The relation between cycle ratio and aspect ratio

않는다. 이와 같은 결과는 단일균열의 형상비가 수명비의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이는 이유이다. 하지만 대칭균열의 형상비가 일정한 것은 표면균열길이의 증가량이 주균열과 부균열의 간섭 때문에 일정하게 되고, 내부균열길이가 일정하게 계속적인 증가를 나타냄으로서 표면균열길이와 내부균열길이가 비가 일정하게 유지되기 때문이라고 생각된다.

### 3.5 응력확대계수범위와 내부균열진전속도와의 관계

#### 3.5.1 배경 이론

실제로 환봉재의 표면균열은 그 형상이 3차원적이고, 내부와 외부에서의 응력상태가 다르기 때문에 정확한 응력확대계수가 정의되고 있지 않다. 따라서 환봉재의 응력확대계수는 유한요소법을 이용하여 구하는게 일반적이고, 이에 대한 연구도 많이 이루어지고 있다. 환봉재의 3차원 표면균열에 대해서 보고된 결과를 보면, 회전굽힘하중 하에서의 응력확대계수는 표면과 내부에서 다르며, 형상비에 따라서도 다르게 나타난다고 보고되고 있다. 그러나, 회전굽힘하중 하에서의 반타원형 균열의 최대응력확대계수는 굽힘하중 방향과 균열면을 수직이등분 하는 면이 일치할 때, 내부균열의 최하부에서 계산된다고 보고되고 있다. 이것은 시험편에 단순 굽힘하중만이 작용할 때 내부균열 최하부에서 계산된 응력확대계수

와 같다. 따라서 회전 굽힘하중 하에서의 최대응력확대계수는 단순 굽힘하중 하에서의 내부균열 최하부에서 계산된 응력확대계수와 같이 생각할 수 있다.

또한 Murakami 등<sup>(9)</sup>은 근사해석법을 이용하여 3차원 표면균열의 단순 굽힘하중 하에서의 응력확대계수범위를 다음과 같은 식으로 제안하였다.

$$\Delta K_{1,3}^B = \Delta \sigma_0 \sqrt{\pi a_i} \cdot F_{1,3}^B \quad (3)$$

$$\frac{F_{1,3}^B}{F_{1,3}^T} \cong \frac{F_{1,2}^B}{F_{1,2}^T} \quad (4)$$

$F_{1,2}^B$  굽힘하중 하에서의 2차원 모서리 균열의 무차원 응력확대계수

$F_{1,2}^T$  인장하중 하에서의 2차원 모서리 균열의 무차원 응력확대계수

$F_{1,3}^T$  인장하중 하에서의 반타원 표면균열의 무차원 응력확대계수

$F_{1,3}^B$  굽힘하중 하에서의 반타원 표면균열의 무차원 응력확대계수

여기서, 각각의 값들은 다음과 같은 식으로 제안되었다.

$$F_{1,2}^B = 1.121 - 1.199 \lambda + 4.775 \lambda^2 - 1.628 \lambda^3 - 7.035 \lambda^4 + 13.27 \lambda^5 \quad (5)$$

$$F_{1,2}^T = 1.12 - 0.231 \lambda + 10.55 \lambda^2 - 21.72 \lambda^3 + 30.39 \lambda^4 \quad (6)$$

단 (5),(6)에서  $\lambda = \frac{c}{w} = \frac{a_i}{D}$

$$F_{1,3}^T = (1.0 + 0.157 \lambda - 0.634 \lambda^2 + 4.590 \lambda^3 - 6.628 \lambda^4) \times (1.122 - 0.230 \beta - 0.901 \beta^2 + 0.949 \beta^3 - 0.280 \beta^4) \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{2a_i}{D}, \quad \beta = \frac{2a_i}{C}$$

여기에서  $c$ 는 2차원 모서리 균열길이,  $w$ 는 2차원 부재의 폭,  $C$ 는 3차원 반타원 균열의 장축 길이,  $D$ 는 평행부 직경이다.

위의 (5),(6),(7)에서 구한 값들을 (4)식에 대입하여  $F_{1,3}^B$ 을 구하고 이 값을 다시 (3)식에 대입하여 최종적인 최대응력확대계수범위를 구하였다.

### 3.5.2. 응력확대계수범위와 내부균열전파속도와와의 관계

Fig. 6은 앞에서 Murakami 등<sup>(9)</sup>이 제안한 식을 통하여 최대응력확대계수를 구하고, 이를 내부균열전파속도에 대하여 나타낸 것이다.

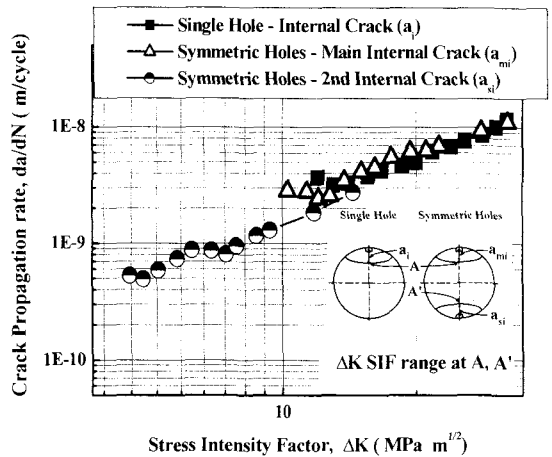


Fig. 6 The relation between stress intensity factor range and internal crack growth rate

본 실험 결과는 단일균열과 대칭균열의 주균열의 경우 비슷한 경향을 보여 주었고, 부균열의 경우 다른 경향을 보여 주었다. 하지만 결과 데이터들은 하나의 직선에 좁은 폭을 가지고 모여 나타나고 있다.

### 결론

본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 표면균열길이와 내부균열길이와의 관계는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\frac{a_i}{D} = A \left( \frac{a_s}{\pi D} \right)^B$$

- A, B : 비례 상수  
 $a_i$  : 내부균열길이  
 $a_s$  : 표면균열길이  
D : 평행부 직경

(2) 단일 균열의 균열진전속도는 일정하게 증가하는 형태를 나타내나, 대칭균열의 주균열과 부균열의 균열진전속도는 서로 증가-감소, 또는 감소-증가의 형태로 교차하면서 증가한다.

(3) 표면균열길이와 수명비와의 관계는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\log(a_s) = \alpha + \beta \left( \frac{N}{N_f} \right)$$

- $a_s$  : 표면균열길이  
 $\alpha, \beta$  : 비례상수  
N : 응력반복수  
 $N_f$  : 파단수명

(4) 피로균열의 형상비를 고찰한 결과 단일균열의 경우 형상비는 1.0~1.5를 얻었고, 대칭균열에서 주균열의 형상비는 0.7, 부균열의 형상비는 0.17로 거의 일정한 값을 보였다.

### 참고문헌

- (1) 徐昌敏, 金楨圭, 1982, "破面解析과 그應用 (III)," 대한기계학회지, Vol. 24, No. 3, pp. 193 ~202.
- (2) 송삼홍, 오환섭, 1987, "미소 원공 주위의 피로 크랙 발생 전과 거동에 관한연구," 한국해양 공학회지, 제1권, 제2호, pp. 250~258.
- (3) Brooksank. D., K.W.Andrews, 1972, "Stress fields around inclusions and their relation to Properties," *Journal Iron & Steel Inst.*, pp. 246 ~255.
- (4) Trantina, G.G, M.Barishpolsky, 1984, "Elastic

- plastic analysis of small defect-void and inclusion," *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 20, No. 1, pp. 1~20.

- (5) Lin, X.B., Smith, R.A., 1999, "Shape evolution surface cracks in fatigued round bars with a semicircular circumferential notch," *International Journal of Fatigue*, Vol. 21, pp. 965~973.
- (6) Fonte M., Freitas M., 1999, "Stress intensity factors for semi-elliptical surface cracks in round bar under bending and torsion," *International Journal of fatigue*, Vol. 21, pp. 457~463.
- (7) 三角, 清水, 1990, 日本機械學會論文集, A권, pp. 56~57,
- (8) 西谷, 1966, "“電解鍊磨した横穴材の回轉げ波,” 日本機械學會論文集, 第39卷, 第323號.
- (9) Murakami Y. and Tsuru H. 1987, "Stress- intensity factor equations for semi-elliptical surface crack in a shaft under bending," *Stress Intensity Factors Handbook*, Vol II, Oxford: Pergamon Press, pp. 653~705.