

축단면 내 대칭위치에 존재하는 원공결함에서 발생하는 피로균열 거동

송삼홍*, 안일혁**, 이정무**

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

Sam Hong Song*, Il Hyuk Ahn** and Jeong Moo Lee**

ABSTRACT

The shaft with the circular cross section have symmetric structural combination parts to keep the rotating balance. Hence the crack usually emanate from symmetric combination parts due to the stress concentration of these parts. In this study to estimate the fatigue behavior of symmetric cracks, the fatigue test was performed by using rotary bending tester and the specimen with symmetric defects in circular cross section. From the facts the characteristics of crack initiation and propagation on the symmetric surface cracks in circular cross section was examined. Also we observed the internal crack using oxidation coloring and investigated the fatigue behavior using the relationship between surface crack and internal crack. As a result of fatigue life of symmetric cracks was reduced to 35% compared to single crack's. We examined the characteristics of fatigue behavior in element with symmetric cracks using internal crack propagation rate and maximum stress intensity factor range obtained from approximation method.

Key Words : Fatigue Life (피로수명), Surface Crack (표면균열), Internal Crack (내부균열), Fatigue Crack Propagation Rate (피로균열전파속도, da/dN), Stress Intensity Factor Range (응력확대계수범위, ΔK), Cycle Ratio (수명비, N/N_f)

1. 서론

유니버설 조인트, 터빈 축 등을 포함한 기계와 기계구조물 등의 부재는 자연결함과 인공결함 등의 초기결함들을 가지게 되는데 이러한 초기 결함들은 때로는 응력집중원으로 작용하여 피로균열 발생의 주된 원인이 된다.⁽¹⁻³⁾

동일한 초기결함이라 하더라도 피로균열은 내부의 초기결함보다는 표면의 초기결함에서 주로 발생하게 되는데 그 이유는 표면이 내부보다 소성변형에 대한 저항이 작고 최대응력 또한 표면에서 나타나기 때문이다. 그리고 같은 표면 초기결함도 초기결함의 크기, 모양, 분포양상 등에 따라서 피로균열 발생과 전파 거동은 차이를 보이는 것으로 보

2002년 2월 15일 접수
* 고려대학교 기계공학과
** 고려대학교 대학원 기계공학과

고되고 있다.^(4,7) 그러나 자연결합을 대상으로 한 실험은 결합의 위치나 크기 등 재연성이 어렵기 때문에 많은 연구자들은 자연결합을 대신하여 인공결합을 이용하여 미소결합에서 발생 전파하는 피로균열을 연구하여 왔다.^(8,9)

송 등^(10,11)은 초기 인공결합이 미소원공결합인 경우 피로균열은 발생 초기에 원공의 표면 양끝에서 성장하지만 피로균열이 성장하여 균열의 내부길이 초기결합의 깊이를 초과하면 내부균열 형상은 반타원형으로 나타난다고 보고하였다.

또한 Smith 등⁽¹²⁾은 환봉재의 단면에 60°의 위상차이를 가지는 2개의 균열이 반복 인장 하중을 받고 있을 때의 거동을 유한요소법을 이용하여 연구한 결과 2개의 균열이 전파하여 서로 매우 가까워지게 되면 표면에서보다 내부에서 빠른 균열전파를 보인다고 보고하였다.

M. Fonte 등⁽¹³⁾은 환봉재에 대하여 굽힘하중과 인장하중을 동시에 받는 반타원 표면균열의 거동과 응력확대계수를 구하는데 유한요소법을 이용하였다. 따라서 회전체 구조물의 축단면에 발생하는 균열거동에 대한 연구⁽¹⁴⁾는 아직까지 통일된 견해가 없다고 생각된다. 그러므로 축단면에 대칭적인 위치에서 발생하는 균열의 거동에 대한 보고는 거의 찾아보기가 힘들었다.

본 연구에서는 축단면 내 대칭위치에 결합이 함께 존재하는 경우의 피로거동을 고찰하였다. 즉 축단면 내 대칭위치에 미소원공을 가공하고 축단면의 대칭위치에서 발생하는 피로균열과 내부로의 피로균열의 특성, 피로균열 전파속도 및 피로균열 파단수명 등의 거동이 연구되었다.

2. 실험방법

본 실험에서 사용한 시험편 재료는 축재 기어 등의 재료로 쓰이는 기계구조용 Ni-Cr-Mo 합금강(KS3709에 규정되어 있음)이다. 본 재료의 화학성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타낸 것과 같다.

시험편 재료는 잔류응력 제거와 조직의 균질화를 위하여 사전에 전기로에서 850℃, 50분 동안 어닐링 처리되었으며, 시험편은 Fig. 1과 같이 가공되었다.

시험편 표면에 가공된 미소원공결합은 1개의

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 Strength (MPa)	Hardness (Hv)
385.4	536.4	149

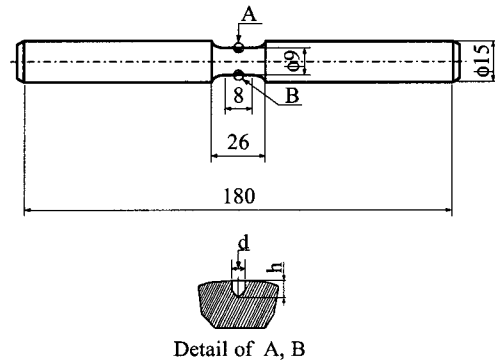


Fig. 1 Geometry of specimen (dimensions in mm)

경우는 지름 $d=0.5\text{mm}$, 깊이 $h=0.5\text{mm}$ 로 가공되었고 원형단면 내의 대칭위치에 가공된 2개의 미소원공결합은 지름 $d=0.5\text{mm}$, 깊이 $h=0.5\text{mm}$ 로 가공되었다. 또한 1개의 미소원공결합은 Fig. 1의 A부분에 가공되었고 2개의 미소원공결합은 Fig. 1의 단면의 대칭위치인 A부분과 B부분에 가공되었다. 실험에 사용된 시험기는 최대굽힘 모우멘트 98N·m인 Ono식 회전굽힘 피로시험기이며, 실험회전수는 3600rpm, 응력비 $R=-1$ 이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 축단면 내 대칭피로균열의 a-N곡선

여기에 기술되는 대칭피로균열이란 축단면 내 대칭위치에서 각각 발생하는 피로균열을 뜻한다. 1개의 단일피로균열과 대칭단면내의 2개의 피로균열의 거동은 각각의 경우에 대한 피로균열길이 a 와 응력반복수 N 과의 관계를 이용하여 비교되었다.

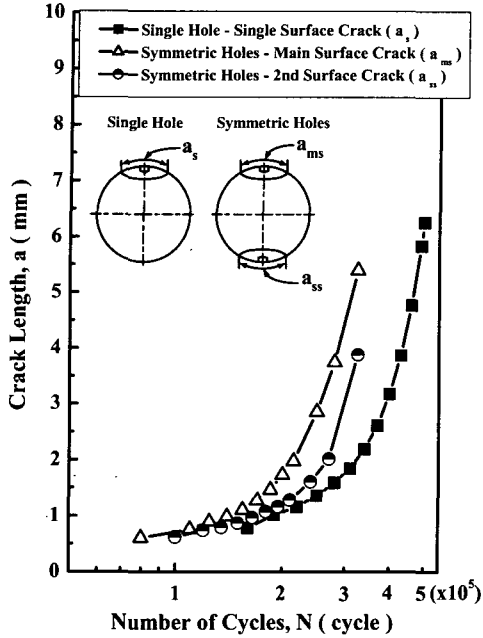


Fig. 2 The relationship between number of cycles and surface crack length

Fig. 2는 단일균열과 대칭피로균열의 주균열과 부균열의 a-N곡선을 나타낸 것이다. 여기서 주균열 및 부균열의 의미는 다음과 같다.

Photo 2중에서 윗부분의 미소원공을 중심으로 피로파단된 파단면은 면적이 크고, 아랫부분의 파단 면적은 작다. 따라서, 응력반복수에 따라 윗부분에서 발생한 피로균열은 아랫부분의 그것에 비해 빠르게 발생 전파하고(이것을 주균열이라 칭한다), 아랫부분의 피로균열은 윗부분에 비하여 느리게 발생 전파한다(이것을 부균열이라고 칭한다).

대칭피로균열의 주균열과 부균열은 발생초기에는 단일피로균열의 발생과 비슷하나 응력반복수가 증가할수록 특히 대칭피로균열중 주균열의 균열전파 길이는 부균열의 그것에 비하여 증가하며 그 증가량이 크다는 것을 알 수 있다(Fig. 2).

피로균열의 발생초기에 축단면의 대칭위치에서 각각 발생한 균열중에서 주균열과 부균열의 구분은 처음부터 관찰할 수는 없었다. 그러나 응력반복수의 증가와 균열선단의 조직상태나 응력집중 정도의 차이에 따라서 한 쪽의 균열길이가 다른 쪽의 그것에 비하여 빠르게 증가하여 주균열로 성장함으로써

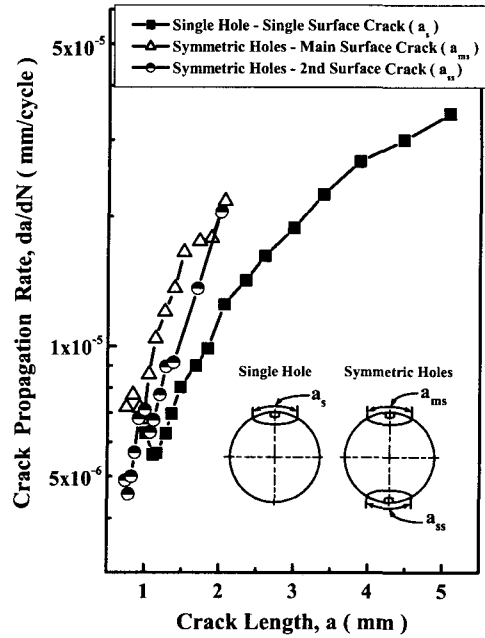


Fig. 3 The relationship between surface crack length and surface crack propagation rate

주균열과 부균열의 구분이 가능하였다.

또한 대칭피로균열중 주균열은 그후의 응력반복수에 따라서 초기에는 단일균열의 균열길이와 비슷한 균열길이를 나타내지만, 응력반복수가 증가함에 따라서 주균열의 길이는 단일균열의 그것보다 커진다는 것도 관찰할 수 있었다.

Schijve 등⁽¹⁵⁾은 알미늄 2024-T3재의 3개의 손상(MSD: Multi Site Damage)균열에 대한 수명평가를 보고하였으며, 이 경우 초기의 균열들은 서로 간섭되지 않는 상태에서 비슷하게 발생 전파하고 이들의 수명은 단일균열의 수명보다 약 20%정도의 감소를 나타낸다고 보고하였다.

따라서 본 실험의 결과는 Schijve 등⁽¹⁵⁾이 보고한 내용과 유사하지만, 대칭피로균열의 주균열과 부균열의 발생 반복수는 동일 응력하에서 단일균열의 발생 반복수에 비하여 50% 빠르게 나타나며, 전체 수명은 약 35% 감소되는 것으로 관찰되었다.

3.2 축단면 내 대칭 피로균열의 전파속도

Fig. 3은 단일 원공에서 발생하는 피로균열의

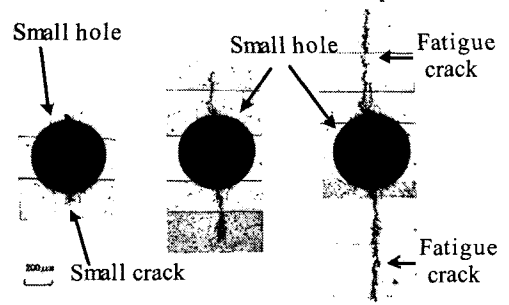
전파속도와 축단면 내 대칭적인 위치에 존재하는 2개의 미소원공에서 발생하는 대칭피로균열의 전파속도를 비교한 것이다. 단일피로균열의 균열전파속도는 일정하게 증가하는 형태를 나타내는 반면, 대칭피로균열의 주균열과 부균열의 균열전파속도는 서로 증가감소, 또는 감소증가의 형태로 교차하면서 증가하는 형태를 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 동일한 하중 하에서의 피로균열 진전력 때문이라고 생각된다. 즉 피로균열진전력은 주균열과 부균열에도 작용하는데, 그 결과 각각의 균열선단 주위의 응력집중정도, 조직의 상태 및 하중상태 등에 따라서 피로균열은 각각의 특성을 가지고 전파한다고 생각된다. 또한 대칭피로균열의 전파속도는 단일피로균열의 그것에 비하여 빠르고 그 결과 피로수명은 감소된다.

3.3 축단면 내 대칭위치에서의 표면균열과 내부피로균열

축표면 내 미소원공에서 발생 전파하는 피로균열(Photo 1)과는 다르게, 축단면 내 대칭위치에 있는 2개의 미소원공에서 발생하는 각각의 피로균열은 동시에 발생 전파하지 않는다(Photo 2). 즉, Photo 2에서 관찰할 수 있는 바와 같이 파단면 상에서의 윗부분 및 아랫부분의 피로파단된 파단면 면적과 그 모양의 대소 차이로 보아 피로균열 발생 전파과정들이 완전히 동일하다고 생각하기는 힘들다. 이 차이는 시험편 표면에 가공된 미소원공결함 주변의 조직이나 미소원공결함 등에 의한 응력집중도의 차이에 따라서 서로 다른 피로균열의 발생 전파 형태를 보이기 때문이라고 생각된다. 또한 이렇게 발생한 피로균열은 그후의 응력반복수에 의하여 지속적으로 전파하는데 그것들의 전파속도가 다르다는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과와 관련하여 Murakami 등⁽¹⁶⁾은 대소형 시험편의 회전굽힘 피로시험을 통하여 다음과 같은 표면균열길이와 내부균열길이와의 관계를 나타내는 무차원 식을 제안하고 있다.

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

여기서 a_i 는 내부균열의 길이, a_s 는 표면균열의 길이, D 는 평행부의 지름을 나타낸다. A와 B는 무차



(a) $N=8 \times 10^4$ (b) $N=15 \times 10^4$ (c) $N=25 \times 10^4$

Photo 1 Illustration of fatigue crack initiation from one small hole

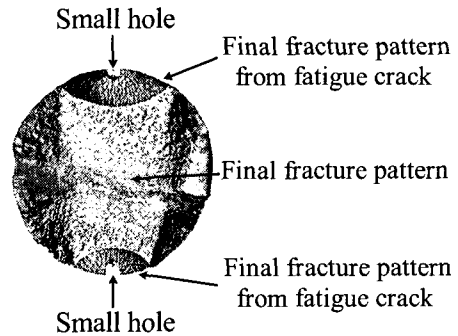


Photo 2 Illustration of final fracture from two small holes

원의 비례상수이다. 이 관계식은 응력 레벨 시험편의 지름 및 강 종류의 차이에 의하여 영향을 받지 않는다. 따라서 대칭피로균열의 표면균열길이와 내부균열길이 사이의 관계도 식 (1)을 이용하여 정리될 수 있다고 생각된다.

Fig. 4는 단일 및 대칭피로균열에 대하여 무차원화시킨 표면균열길이와 내부균열길이 사이의 관계를 나타낸 것이다. 이때 표면균열의 전파양상과 비교하기 위하여 내부균열은 시험편에 고하중과 저하중을 반복적으로 가하여 만든 비치 마크를 산화착색시키는 방법으로 관찰되었다(Photo 2). 이렇게 하여 얻어진 실험결과들을 토대로 하여 식 (1)로부터 계산된 상수값들은 Table 3에 나타낸 바와 같다. 이로부터 단일 및 대칭피로균열에 대한 내부균열의 길이는 각각의 위치에서 측정된 표면균열의 길이와

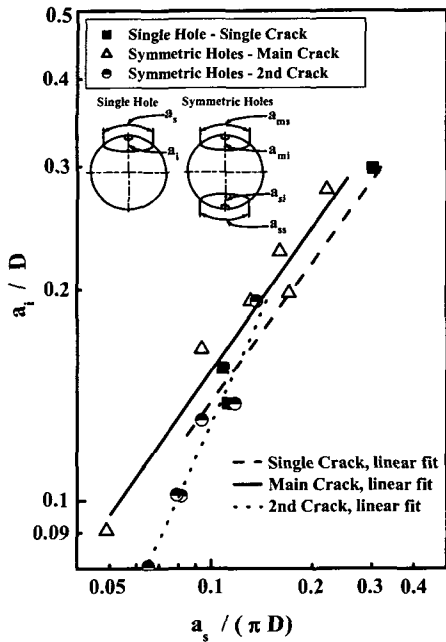


Fig. 4 The relationship between surface crack length and internal crack length

Table 3 Material constant A, B of equation

	Single Hole Crack	Symmetric Holes Main Crack	Symmetric Holes 2nd Crack
A	0.69	0.78	1.36
B	0.71	0.70	1.02

식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다. 이 결과를 보면 1개의 피로균열과 축단면 내 대칭위치에서 발생 전파된 2개의 피로균열중 주균열의 상수 A, B값은 약간의 차이를 보이며, 이는 두 경우의 표면균열과 내부균열길이 사이에 유사한 관계가 있음을 나타낸다. 이것은 대칭균열중 주균열이 단일균열과 유사하게 표면균열에 대한 내부균열의 거동을 보이는 것이다. 반면 부균열의 경우는 상대적으로 이들과 차이를 보이며, 그러한 결과는 주균열의 영향으로 다소 다른 내부균열거동을 하는 것으로 생각된다.

3.4 축 대칭피로균열의 파단수명

Fig. 5는 단일 및 대칭 표면균열길이와 수명비

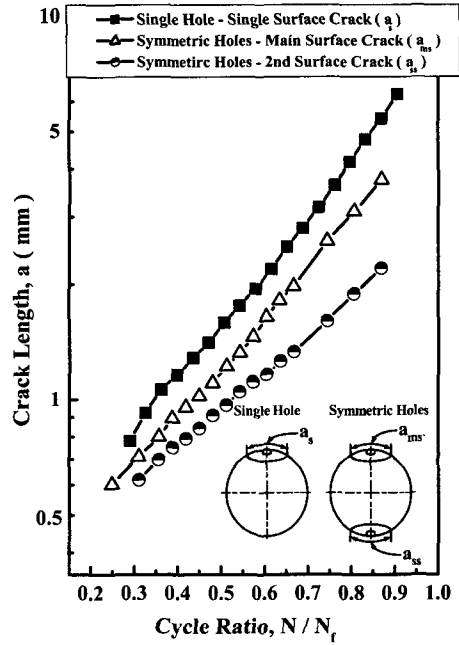


Fig. 5 The relationship between surface crack length and cycle ratio

Table 4 Material constant α , β of equation

	Single Hole Crack	Symmetric Holes Main Crack	Symmetric Holes 2nd Crack
α	-0.509	-0.568	-0.508
β	1.411	1.302	0.968

와의 관계를 나타낸 것이다. 이것은 응력의 대소에 관계없이 피로균열의 전파특성을 나타낸 것으로 Fig. 5에서 알 수 있듯이 a_s-N/N_f 사이에는 비례관계가 성립하는 것을 알 수 있다. 西谷弘信 등⁽¹⁷⁾은 이와 같은 관계를 다음과 같이 제안하였다.

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

여기서 a_s 는 표면균열길이, α 는 미소원공의 크기에 따라서 주어지는 상수이고, β 는 비례상수이다. N과 N_f 는 응력반복수 및 피로수명을 뜻한다.

Table 4는 본 실험에서 식 (2)를 이용하여 얻어

진 상수값 α 와 β 를 나타낸 것이다. 이 값들을 살펴보면 α 값은 3 종류의 경우가 거의 같으며, β 값은 단일균열과 대칭균열중 주균열에서는 비슷하다. 그러나 대칭균열중 부균열의 β 값은 이들과 차이를 나타내고 있다.

이러한 결과는 단일균열과 대칭균열중 주균열의 피로균열 전파형태가 유사하다는 것을 뜻한다. 대칭균열중 부균열의 경우에는 다른 두 균열에 비하여 전체 표면균열의 길이가 짧고, 응력반복수에 대한 균열증가율이 작기 때문에 추후 별도의 의미를 부여해야할 것으로 생각된다.

3.5 축단면 내 대칭피로균열전파속도와 ΔK 와의 관계

실제로 환봉재의 표면균열은 그 형상이 3차원적이고, 내부와 외부에서의 응력상태가 다르기 때문에 엄밀한 응력확대계수가 정의되고 있지 않다. 하지만 반타원 균열의 최대응력확대계수는 굽힘하중방향과 균열면을 수직이등분하는 면이 일치할 때, 내부균열의 최하부에서 계산된다.^(16,18) 이는 단순굽힘하중만이 작용할 때 내부균열 최하부에서 계산된 응력확대계수와 같은 것이다. 따라서 본 연구에서는 Murakami 등⁽¹⁶⁾이 제안한 근사해석법으로 구한 3차원 굽힘하중 하에서의 최대응력확대계수를 이용하여 단일 및 대칭결함으로부터 발생 전파한 내부균열들의 전파속도를 비교하였다. Fig. 6은 최대응력확대계수범위를 이용하여 단일균열과 축단면 내의 대칭균열에 대한 내부균열 전파속도를 나타낸 것이다.

본 실험결과는 대칭 내부균열의 전파속도가 피로수명 결과와 마찬가지로 단일 내부균열의 전파속도보다 빠른 것으로 나타났다. 그리고 대칭균열의 주균열과 부균열의 내부균열 전파속도는 서로 약간의 차이만을 보이고 있어 대칭결함에 의한 피로수명의 현저한 감소를 확인할 수 있다. 또한 이 결과는 Fig. 3의 단일 및 대칭균열에 대한 표면균열 전파속도의 경향과 유사하게 나타나고 있다. 이상으로부터 축단면 내 단일 및 대칭피로균열의 전파거동은 내부균열길이에 대한 최대응력확대계수범위를 이용하여 비교 평가할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 회전굽힘응력 하의 축단면 내 대

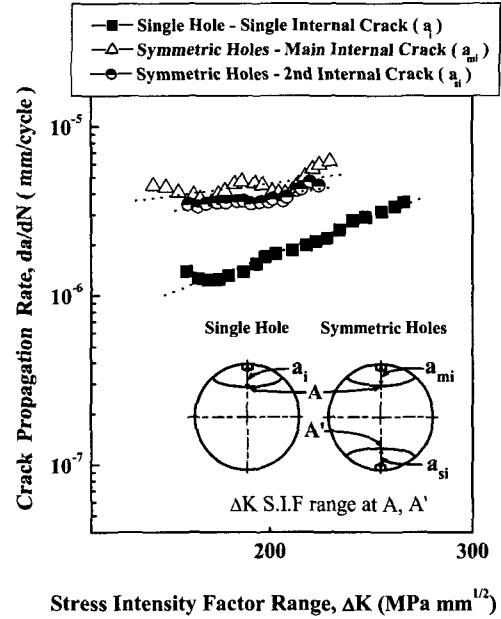


Fig. 6 The relationship between maximum stress intensity factor range and internal crack propagation rate

칭위치에 존재하는 미소원공결함으로부터 발생, 전파하는 대칭균열의 피로거동에 대하여 고찰하였다. 이로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 축단면 내 대칭위치에서 함께 발생 전파하는 전체 피로균열의 수명은 축표면 단일결함으로부터 발생 전파하는 피로균열의 수명보다 약 35% 감소하였다.
- (2) 축표면 단일 피로균열의 균열전파속도는 일정하게 증가하는 형태를 나타내지만, 축단면 내 대칭 표면피로균열의 전파속도는 주균열과 부균열의 전파속도로 각각 나눌 수 있고, 이것들은 서로 증가-감소 또는 감소-증가의 형태로 교차하면서 증가한다.
- (3) 축단면 내 대칭에 위치하는 표면피로균열과 내부피로균열과의 관계는 Murakami 등⁽¹⁶⁾이 제안한 식을 이용, 아래와 같은 비례상수를 구하여 정리될 수 있었다.

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

여기서 a_i 는 내부균열의 길이,
 a_s 는 표면균열의 길이,
 D 는 축 평행부의 지름을 나타낸다.

	Single Hole	Symmetric Holes	Symmetric Holes
	Crack	Main Crack	2nd Crack
A	0.69	0.78	0.36
B	0.71	0.70	1.02

이로부터 대칭피로균열중 주균열은 단일피로균열과 유사한 내부균열의 거동을 보이며, 부균열은 다른 내부균열거동을 보였다.

(4) 축단면 내 대칭 피로균열길이와 파단수명비의 관계는 西谷弘信 등⁽¹⁷⁾이 제안한 식을 이용, 비례상수를 구하여 정리될 수 있었다.

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

여기서 a_s 는 표면균열길이,
 α 는 미소원공의 크기에 따라 주어지는 상수,
 β 는 비례상수,
 N 및 N_f 는 응력반복수 및 피로수명이다.

	Single Hole	Symmetric Holes	Symmetric Holes
	Crack	Main Crack	2nd Crack
α	-0.509	-0.568	-0.508
β	1.411	1.302	0.968

단일피로균열과 대칭피로균열중 주균열의 피로균열 전파형태는 유사하며, 부균열의 경우에는 수명비에 대한 균열증가율이 작은 것으로 나타났다.

(5) 대칭 내부균열의 전파속도는 단일 내부균열의 전파속도보다 빠르고, 대칭균열 중 주균열의 내부균열 전파속도는 부균열의 내부균열 전파속도보다 약간 크다.

후 기

본 연구는 고려대학교 2001년도 특별연구비에 의하여 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 송삼홍, 오환섭, "미소원공 주위의 피로크랙 발생 전파거동에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제1권, 제2호, pp. 250-258, 1987.
2. Endo, M. and Murakami, Y., "Effects of Artificial Small Defect on Torsional Fatigue Strength of Steel," Trans. ASME, Vol. 109, pp. 124-129, 1987.
3. 송삼홍, 김진봉, "응력집중원에서 발생하는 초기 균열의 거동에 미치는 응력장의 영향," 한국정밀공학회지, 제16권, 제3호, pp. 145-153, 1999.
4. D. Brooksank and K. W. Andrews, "Stress Fields Around Inclusions and Their Relation to Properties," Journal Iron & Steel Inst., Vol. 117, No. 2, pp. 246-255, 1972.
5. G.G. Trantina and M. Barishpolsky, "Elastic-Plastic Analysis of Small Defect-Void and Inclusion," Eng. Fracture Mech., Vol. 20, No. 1, pp. 1-10, 1984.
6. H. Kitagawa and C. M. Suh, "Crack Growth Behavior of Fatigue Microcracks in Low Carbon Steels," Fatigue Fracture Engineering Material Structure, Vol. 9, No. 6, pp. 409-424, 1987.
7. Young Jong Kim and Duk Sang Cho, "Mode Decomposition of Three-Dimensional Mixed-Mode Cracks using the Solution for Penny-Shaped Crack," International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 11-18, 2001.
8. Mauge, C. and Kachanov, M., "Anisotropic Material with Interacting Arbitrarily Oriented Cracks. Stress Intensity Factors and Crack-Microcrack Interactions," Int. J. Fracture, Vol. 65, pp. 115-139, 1994.
9. Sam-Hong Song and Jun-Soo Bae, "Fatigue Crack Initiation and Propagation from Hole Defects," Society for Experimental Mechanics, Vol. 38, No. 3, pp. 161-166, 1998.

10. Sam-Hong Song and Kyeong-Ro Lee, "Analysis of Short and Long Crack Behavior and Single Overload Effect by Crack Opening Stress," International Journal of the Korean Society of Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 12, pp. 865-878, 1999.
11. Sam-Hong Song, Kyeong-Ro Lee and Amkee Kim, "Analysis on Short Crack Growth Rate after Single Overload under Cyclic Bending Moment," International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 19-26, 2001.
12. R.A. Smith and X.B. Lin, "Shape Evolution of Surface Cracks in Fatigued Round Bars with a Semicircular Circumferential Notch," Int. J. Fatigue, Vol. 21, pp. 965-973, 1999.
13. M. Fonte and M. Freitas, "Stress Intensity Factors for Semi-elliptical Surface Cracks in Round Bars under Bending and Torsion," Int. J. Fatigue, Vol. 21, No. 5, pp. 457-463, 1999.
14. 송삼홍, 최병호, "고주파 표면경화에 의한 피로 강도 특성과 예측에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제18권, 제9호, pp. 122-130, 2001.
15. J. Schijve and O. Partl, "Multiple-site Damage in 2024-T3 Alloy Sheet," Int. J. Fatigue, Vol. 15, No. 4, pp. 293-299, 1993.
16. Y. Murakami and H. Tsuru, "Stress-Intensity Factor Equations for Semi-elliptical Surface Crack in a Shaft under Bending," Stress Intensity Factors Handbook, Vol II, pp. 653-705, 1987.
17. 西谷弘信, 森光武則, "小穴付き 試験曲によるき裂伝特性の評価," 日本機械學會論文集, 第 42卷, 第 354號, p. 328, 1976.
18. A. Carpinteri and R. Brighenti, "Fatigue Growth Simulation of Part-through Flaws in Thick-walled Pipes under Rotary Bending," Int. J. Fatigue, Vol. 22, pp. 1-9, 2000.