

〈논 문〉

두 크랙의 간섭형태에 따른 피로크랙전파거동의 변화

송삼홍* · 최병호** · 배준수**

(1996년 10월 12일 접수)

Variation of Fatigue Crack Propagation Behavior based on the Shape of the Interaction Between Two Cracks

S. H. Song, B. H. Choi and J. S. Bae

Key Words : Crack Interaction(크랙간섭), Fatigue Life(피로수명), Plastic Zone(소성역), Crack Propagation Rate(크랙전파속도), Finite Element Analysis(유한요소해석), Crack Propagation Path(크랙진전경로)

Abstract

Because of the existence of stress interaction field made by other defects and propagating cracks, the structure may be weakened. Therefore in this study, the crack behavior in the interaction field made by two different cracks is studied experimentally. In the experiment, vertical distance between two cracks and applied stress are varied to make different stress interacted field. In addition, the effect of plastic zone is used to examine crack propagation path and rate. Three types of crack propagation in the interacted field were found, and crack propagating path and rate of two cracks were significantly changed according to different applied stress as each crack propagates. And the results are attributed to the effect of the size and shape of the plastic zone.

기호설명

a : 전체 크랙길이(mm)
 d : 원공결함의 직경(mm)
 h : 두 크랙의 수직거리(mm)
 D : 두 크랙선단 사이의 x방향 거리(mm)
 H : 두 크랙선단 사이의 y방향 거리(mm)
 N : 반복수(cycle)
 N' : 수정 반복수(cycle)
 N_{2.5} : 주크랙길이 2.5 mm시의 반복수(cycle)
 PZS : 소성역의 크기
 R : 응력비
 da/dN' : 전체 피로크랙전파속도(m/cycle)
 da_m/dN' : 주크랙전파속도(m/cycle)

그리스문자

σ_{max} : 최대 반복응력(MPa)
 σ_{eq} : Von Mises 상당응력(MPa)

1. 서 론

재료 내부 또는 표면에 결함이나 크랙 등이 존재 하면 그것들을 기점으로 크랙이 성장하고, 파단에 이르게 된다. 이때, 크랙진전거동이 주위의 다른 결함이나 크랙 등에 의해 간섭되어지는 경우도 있고, 지금까지 이러한 간섭효과에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다. 우선 원공 사이의 간섭에 대한 연구로는 송 등⁽¹⁾은 원공들이 서로 인접하여 위치한 경우에 대하여 유한요소법을 이용하여 응력간섭효과를 고찰하였고, Song 등⁽²⁾은 원공이 임의의 각

*회원, 고려대학교 기계공학과

**고려대학교 대학원

도를 갖고 인접한 경우의 간섭효과를 고찰하였다. Wu 등⁽³⁾은 소성역의 크기가 크랙의 진전방향에 미치는 영향을 원공에 의한 응력간섭장에서 관찰하였다. 반면, 크랙사이의 간섭에 대한 연구로 Rubinstein 등⁽⁴⁾은 적분방정식을 이용하여 크랙선단에 근처에 미소크랙이 존재하는 경우의 응력확대계수를 계산하였고, 또, Mauge 등⁽⁵⁾은 이방성재료에 임의로 배치되어져 있는 크랙선단의 응력확대계수를 계산하였다. 이런 결과들에 의하면 원공, 크랙 또는 재료보다 낮은 강성을 지닌 개재물이 주크랙선단의 앞쪽에 위치하면 응력확대계수를 증가시키며, 반대로 주크랙선단의 뒤쪽에 위치하면 응력확대계수를 감소시킨다.

그런데 크랙간의 간섭에 대한 연구는 수적으로도 적으며, 대부분의 연구가 크랙진전시의 응력확대계수의 변화에 대한 것으로, 크랙간섭시 결함재의 수명평가나 진전거동에 대한 연구는 거의 되어 있지 않다. 하지만 수명이나 진전거동은 구조물 등의 안전성 평가에 중요하므로 본 연구에서는 다음의 사항을 고찰하였다. 우선, 서로 다른 두개의 크랙을 크랙진전방향에 대하여 수직방향으로 거리를 변화시켜 발생하는 응력장에서 실험적으로 그 거동을 조사하였고, 또한 서로 다른 응력상태에서 진전하는 크랙간의 간섭거동을 살펴보기 위하여 탄소성 유한요소해석을 실시하여 실험결과와 비교하였다.

2. 실험방법

본 연구에는 실험재료로 내식성 알루미늄 합금인 Al-5086을 사용하였으며, 이에 대한 화학성분과 기계적 성질은 Tables 1, 2에 나타내었다. 시험기

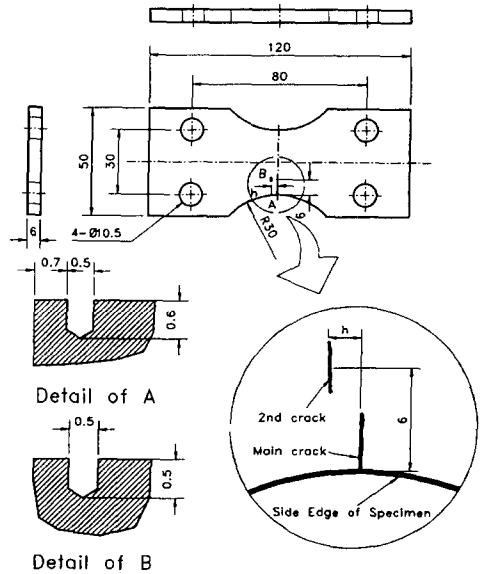


Fig. 1 Geometry of specimen

는 굽힘 및 비틀림 시험기를 사용하였으며, 피로시험시의 응력비는 -1로 하였고, 응력형식은 주파수 33.3 Hz의 정현파이다.

실험에 사용한 시험편의 형상과 크랙발생을 위한 원공노치의 형상을 Fig. 1에 나타내었으며, 원공노치는 주크랙을 만들기 위한 것으로 지름 0.5 mm, 길이 0.6 mm로 그림 하단에서 0.7 mm의 위치에 가공하였고, 제 2크랙을 만들기 위하여 좌단에서 6 mm의 위치에 주크랙이 2.5 mm에 이르렀을 때, 지름, 길이 모두 0.5 mm로 드릴가공하였다. 이때, h를 0, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0 mm로 변화시켜 실험하였고 σ_{max} 를 90 MPa로 하였다. 또한 σ_{max} 를 h=0.5 mm인 경우에 90, 105 MPa로, h=1.0 mm

Table 1 Chemical composition of the testing material

Material	Composition (weight percent, %)			
	Al	Mn	Mg	Cr
Al-5086	95.4	0.4	4.0	0.15

Table 2 Mechanical properties of the testing material

Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)	Elongation (%)	Elasticity modulus (GPa)	Poisson's ratio
190	260	22	62.4	0.32

Table 3 Elasto-plastic finite element analysis model

Applied stress	Model number	No. of nodes	No. of elements
90 MPa	SPEC90_1	2421	764
	SPEC90_2	2339	708
	SPEC90_3	2192	688
	SPEC90_4	2328	728
	SPEC90	2314	730
120 MPa	SPEC120_1	2421	764
	SPEC120_2	2092	658
	SPEC120_3	1966	616
	SPEC120_4	2248	708
	SPEC120	2477	778

인 경우에는 90, 120 MPa로 변화시켜 실험을 수행하였다.

유한요소해석에는 (주)EMRC의 상용 프로그램 NISA를 사용하였으며, $h=0.5\text{ mm}$ 인 경우에 대하여 응력 90, 120 MPa의 두 가지 경우에 총 10가지의 모델로 탄소성 유한요소해석을 행하였다. 사용된 모델의 요소수와 절점수를 Table 3에 나타내었다. 이 때 해석에 사용된 요소는 2차원 8절점 등매개요소이고, 크랙선단에는 응력의 특이장을 고려하여 특이요소를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 제 2크랙의 위치와 전체 크랙거동

3.1.1 제 2크랙의 성장

크랙성장의 양상은 Fig. 2에 나타내어진 것과 같이 세 가지의 양상을 가진다. 실제 경우에는 크랙이 원공에서 성장하지만, 크랙이 일단 발생후 어느 정도의 크기에 이르면 원공의 영향은 상대적으로 적다고 생각하여 크랙으로만 간주하였다. Type A와 같이 주크랙이 제 2크랙과 합체하는 형태는 주크랙의 선단에서 수직선상 거리 h 가 작은 곳에 제 2균열이 위치하는 경우이다. Forsyth⁽⁶⁾는 이 경우의 수직거리는 진전하는 두 크랙의 소성역의 크기에 의존하여 소성역이 크면 그 거리가 약간 멀어도 두 크랙은 합체할 수 있다고 하였다.

Type B와 같이 주크랙과 주크랙쪽 제 2크랙이

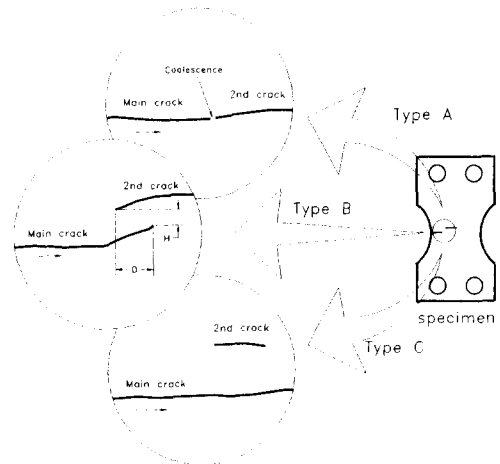


Fig. 2 Configuration of crack propagation type under crack interaction

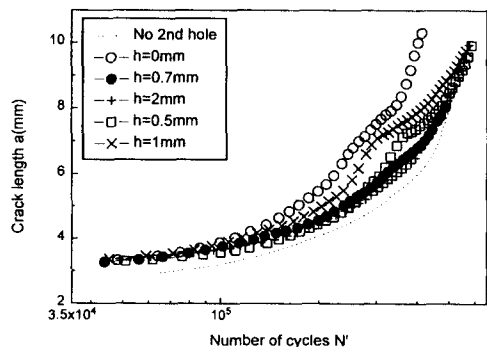


Fig. 3 Relation between crack length and number of cycles

Table 4 Number of cycles at a=10 mm

Vertical distance h(mm)	Number of cycles at a=10 mm	Rate of variation(%)
Non-2nd crack	5.70×10^5	-
0	4.20×10^5	-26.32
0.5	5.99×10^5	5.44
0.7	6.11×10^5	7.19
1	6.05×10^5	6.14
2	6.01×10^5	5.44

휘어서 정지하는 경우는 $h=0.5, 1.0$ mm의 경우에 볼 수 있었다. 제 2크랙이 약간 성장후 정지하고 주크랙의 성장이 계속되는 Type C인 경우는 $h=0.7, 2.0$ mm의 경우에서 볼 수 있었다. $h=0.7$ mm의 경우는 Type B의 형태의 크랙전파가 일어나야 할 것으로 생각되지만, 그 경우와는 다르게 제 2크랙의 발생이 늦게 시작되어 간섭의 효과가 Type B와 같이 될만큼 크지 못하기 때문이다. 만약 제 2크랙의 성장이 빨랐다면 Type B의 전파형태를 가졌을 것으로 생각된다.

3.1.2 전체 크랙의 a-N'곡선

제 2크랙이 성장한 후의 전체 시편의 수명영향에 대하여 검토한 a-N'선도는 Fig. 3과 같다. 여기서 N'은 다음과 같이 계산하였다.

$$N' = N - N_{2.5} \quad (1)$$

여기서, N' : 수정반복수

N : 반복수

$N_{2.5}$: 주크랙길이 2.5 mm(제 2원공 가공)시의 반복수

제 2크랙의 성장과 그에 따른 크랙의 간섭에 의한 세 가지 진전형태마다 a-N'선도는 각각 다른 형태를 갖는다. 실험결과 Type A의 형태인 $h=0$ mm인 경우는 시편의 수명이 90 MPa의 경우에 제 2크랙이 없는 경우보다 약 26%정도 감소하였다. 이는 비슷한 형태인 MSD(multiple site damage) 균열에 대한 논문⁽⁷⁾에서 보여지는 취약성과 같은 결과를 갖는다. Schijve 등은 알루미늄 2024-T3 재의 3개의 MSD 균열에 대한 수명평가를 보고하였다. 그들은 수명이 초기에는 간섭되지 않은 경우와 거의 비슷하다가 나중에는 하나의 균열의 경우

보다 수명이 감소함을 보고하고, 이 경우에 약 20%정도의 수명감소를 보고하였다. 하지만 그 외의 경우($h=0.5, 0.7, 1.0, 2.0$ mm)에는 제 2균열을 발생시키지 않은 경우보다 최종적인 전체 수명은 약간 증가하는 경향을 보이기는 하지만 증가율은 매우 작다. 따라서 Type B, C의 형태로 전파하면, 전체 수명에는 큰 차이가 생기지 않는다는 것을 알 수 있다(Fig. 3참조). Table 4는 각 경우의 최종 파단 직전인 크랙길이 10 mm에서의 수명을 나타낸다.

하지만 두 형태의 a-N'의 양상은 서로 다르다. 즉, Type B($h=0.5, 1.0$ mm)인 경우는 두 크랙의 선단이 가까워지면서 생기는 가속과 두 크랙 선단이 지나가면서 발생하는 감속이 명확하게 관찰되는 반면, Type C($h=0.7, 2.0$ mm)인 경우는 전파하는 크랙의 가속과 감속이 불분명하다.

3.1.3 전체 크랙의 크랙전파속도

전체 크랙의 전파속도는 Fig. 4에 나타내어진 것과 같다.

Fig. 4에서 제 2크랙이 없는 경우(점선)는 전파속도가 거의 일정하게 증가한다. Fig. 4(a)에서 보는 것처럼 $h=0$ mm인 경우는 크랙이 합체하기 전까지는 크랙전파속도가 크게 증가하다가 합체후 내부크랙이 완성되는 시기까지는 크랙전파속도가 저하되는 특징을 갖는다. 그 후 다시 크랙이 본래의 속도로 회복해 간다. 전파양상이 Type B인 $h=0.5, 1.0$ mm의 경우도 Fig. 4(a)에 나타내었으며, 전반적인 전체 크랙의 전파속도의 양상이 앞의 경우와 비슷하다. 하지만 전파속도의 상승치는 $h=0$ mm의 경우와 비슷한데 반하여 전파속도의 감소치는 더 커서 앞절에 언급한 전체 수명의 차이가 발

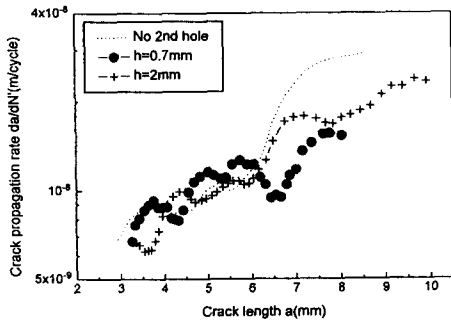


Fig. 4(a) Relation between crack length and crack propagation rate ($h=0.7, 2.0$ mm)

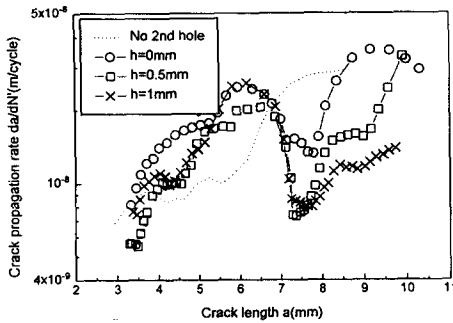


Fig. 4(b) Relation between crack length and crack propagation rate ($h=0, 0.5, 1.0$ mm)

생한다고 생각된다. 즉, 이 경우 두 크랙이 가까워짐에 따라 두 크랙선단 간섭의 영향으로 크랙전파속도가 상승했다가 두 크랙선단이 서로 지나친 후에 전체 수명은 제 2크랙의 주크랙 반대쪽의 성장속도만이 반영되며, 이 크랙성분의 전파속도는 간섭장내에서 빨라진 전파속도보다 아직 상당히 늦기 때문이다. $h=0.7, 2.0$ mm인 경우의 da/dN 선도는 Fig. 4(b)와 같이 나타난다. 그림에서 알 수 있듯이 $h=2.0$ mm인 경우는 그 영향이 거의 없고, $h=0.7$ mm인 경우는 전파속도의 가속과 감속이 약간 보이지만 두 경우 모두 Type B의 가속특성에 비하면 그 정도는 매우 작다. 이것으로 Type C의 경우에 크랙선단의 응력간섭효과가 크지 않아 수명이나 전파속도에 큰 영향을 주지 못한다는 것을 알 수 있다. $h=2.0$ mm 정도에 이르면 크랙의 전파속도나 $a-N$ 선도 상에서 보여지는 것처럼 제 2크랙의 효과는 없어진다는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 Type B로 전파하는 $h=0.5$ mm인 경우의 주크랙선단과 제 2크랙의 주크랙쪽 선단의 수평거리 D 와 수직거리 H (Fig. 2 참조)의 변화에 따

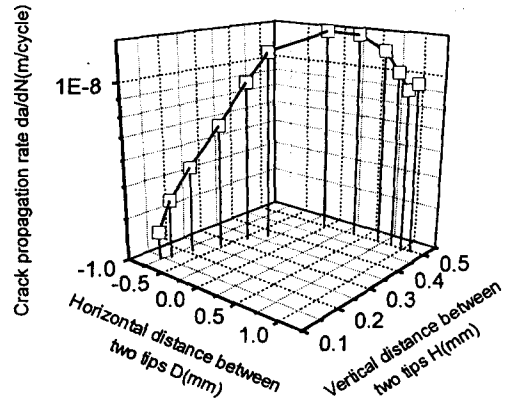


Fig. 5 Relation between crack propagation and relative distance of two tips ($h=0.5$ mm)

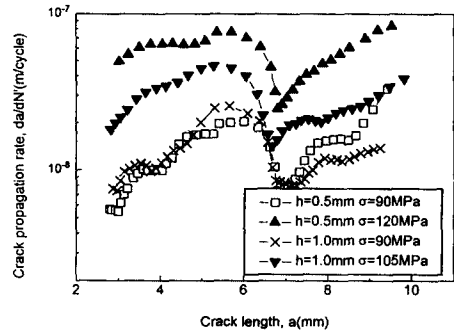


Fig. 6 Relation between crack length and crack propagation rate at different stress

른 주크랙의 크랙전파속도를 나타낸 것이다. 주크랙은 D 가 0이 되는 지점부근으로 갈수록 전파속도가 빨라지다가 D 가 (-)로 가고, H 가 작아질수록 크랙전파속도는 감소해 가는 경향을 갖는 것을 알 수 있다.

3.2 응력변화에 따른 크랙전파거동

3.2.1 응력변화에 따른 크랙전파양상

Fig. 6에는 $h=0.5$ mm의 $\sigma_{max}=90$ MPa, 120 MPa인 경우, $h=1.0$ mm의 $\sigma_{max}=90$ MPa, 105 MPa인 경우의 크랙전파속도가 표시되어져 있다.

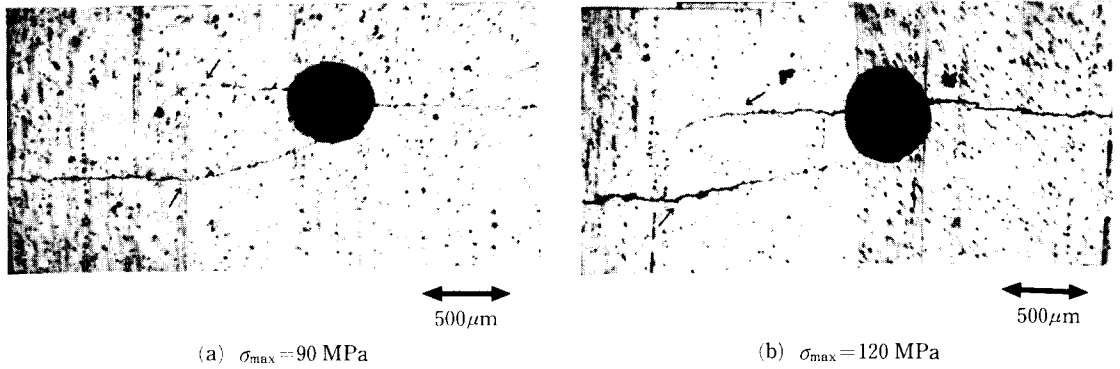
그림에서 알 수 있는 것처럼 적용응력이 크면 그만큼 전반적인 크랙의 진전속도는 빨라지지만 가속과 감속의 형태는 그다지 큰 차이가 없이 수직이동한 것으로 나타난다. 그리고 모든 경우에 있어 Type B의 크랙진전이 관찰되었다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 크랙이 진전함에 있어 응력의 변화

는 전반적인 크랙의 진전속도와 최종 수명에 영향을 미친다.

Fig. 7은 수직거리 $h=0.5\text{ mm}$ 에서의 $\sigma_{\max}=90\text{ MPa}$, 120 MPa 인 때의 진전크랙의 사진을 나타낸다.

사진에서 볼 수 있듯이 크랙전파방향은 $\sigma_{\max}=120\text{ MPa}$ 쪽에서 더 빨리 휘기 시작했음을 알 수 있

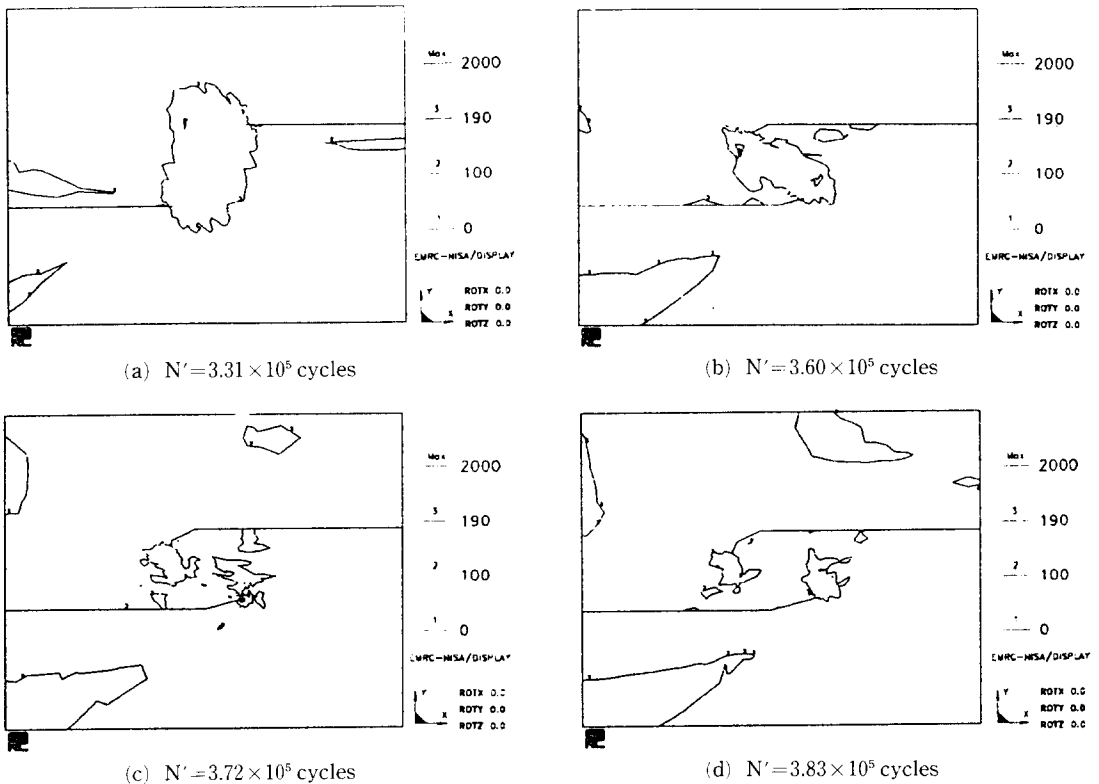
다. 그림에서 화살표한 부분은 두 크랙이 휘기 시작하는 부분을 나타낸다. 그 사이의 거리는 $\sigma_{\max}=120\text{ MPa}$ 쪽이 $\sigma_{\max}=90\text{ MPa}$ 쪽보다 크게 됨을 알 수 있다. 이는 소성역의 크기가 $\sigma_{\max}=90\text{ MPa}$ 일 때 보다 $\sigma_{\max}=120\text{ MPa}$ 쪽이 더 커서 크랙이 간섭의 영향을 먼저 받기 때문으로 생각된다. 이것을 고려하기 위하여 유한요소해석을 실시하였다.



(a) $\sigma_{\max}=90\text{ MPa}$

(b) $\sigma_{\max}=120\text{ MPa}$

Fig. 7 Shapes of crack propagation at different stress



(a) $N'=3.31 \times 10^5$ cycles

(b) $N'=3.60 \times 10^5$ cycles

(c) $N'=3.72 \times 10^5$ cycles

(d) $N'=3.83 \times 10^5$ cycles

Fig. 8 Equivalent stress distribution at 90 MPa

3.2.2 유한요소해석

본 연구에서는 크랙이 진전하면서 그 경로가 바뀔 때의 소성역의 크기의 변화를 고찰하기 위하여 탄소성 유한요소해석을 행하였다. 소성역의 해석에는 Von Mises 조건을 사용하였다.

$$\sigma_y = \sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2)$$

응력이 90, 120 MPa인 두 경우에 대하여 각각 다섯 가지의 모델을 만들었으며, 실제로는 크랙이 연속적으로 휘지만, 실험에서 측정된 경로를 이용하여 크랙의 진전방향을 최저 0.16 mm의 단위로 직선으로 가정하여 모델링하였다. Fig. 8은 h=0.5 mm, 응력 $\sigma_{max}=120$ MPa인 경우의 각 모델에서의 Von Mises 응력분포를 나타내며, Fig. 9는 h=0.5 mm, 응력 $\sigma_{max}=120$ MPa일 때의 각 모델의 Von Mises 응력분포를 나타낸다.

두 그림에서 볼 수 있는 것처럼 두 크랙선단이 교차하기 전과 교차한 후의 크랙선단에서의 소성역

의 모양이나 크기가 확연히 달라짐을 알 수 있다. 따라서 일정한 h의 거리에서 크랙이 진전한다 하더라도 간섭의 효과에 의하여 그만큼 크랙진전시의 방향이나 속도가 달라지게 된다. Fig. 10에 다른 두 응력 사이에서 같은 D, H일 때의 응력분포를 보인다(D=1.5 mm, H=0.5 mm). 여기서 알 수 있는 것처럼 $\sigma_{max}=120$ MPa쪽이 소성역의 크기가 크고 따라서 간섭효과에 더 민감할 것이라는 것을 알 수 있다.

Forsyth⁽⁶⁾는 이 경우의 두 크랙의 소성역의 변화 양상을 설명한 바 있는데, 그는 K값의 변화가 소성역의 크기에 영향을 준다고 생각하여 Fig. 11과 같은 소성역 변화모델을 제시하였다. 물론 이러한 형상을 갖고 진전하는 크랙에 있어 주크랙의 응력 확대계수 K의 값은 두 크랙의 선단이 마주치는 부분까지는 커지지만,⁽⁸⁾ 이러한 K값의 증가가 그대로 소성역의 증가로 되지는 않는다. 왜냐하면 두 크랙이 서로 접근하면서 소성역을 발생시킬 수 있는 영역이 상대적으로 작아지기 때문이며, Fig. 9

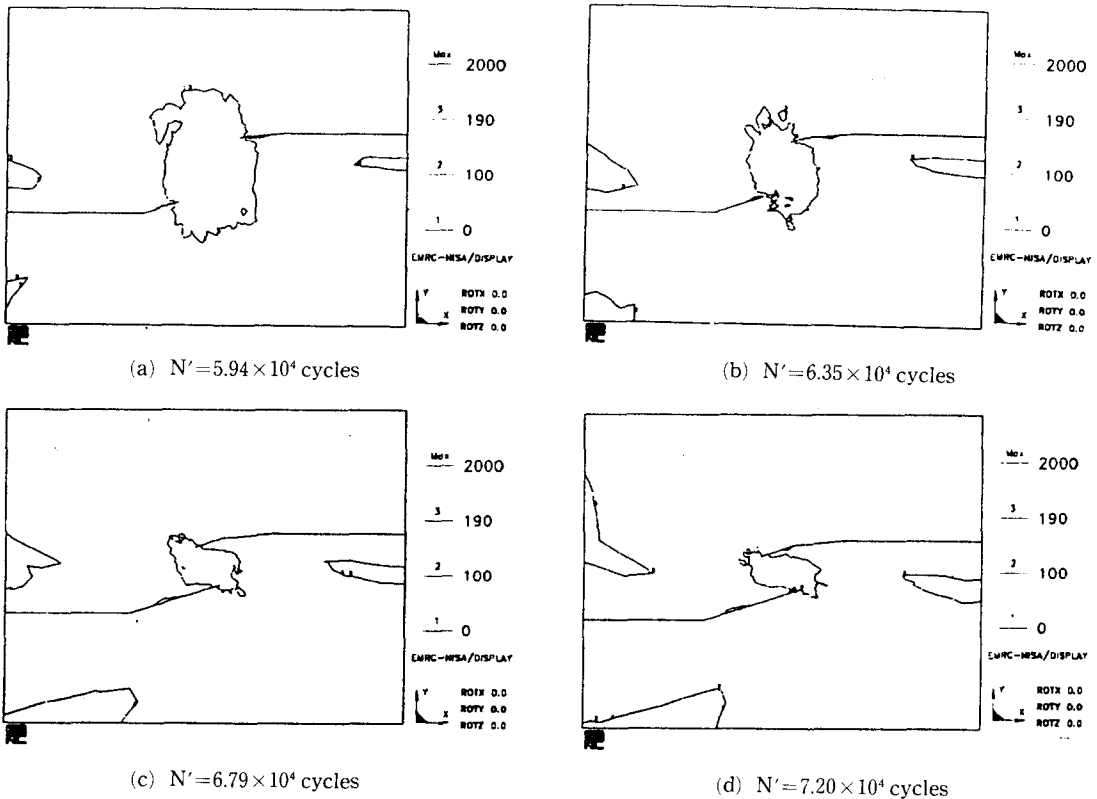
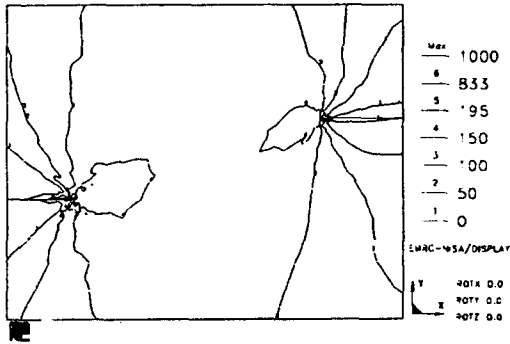
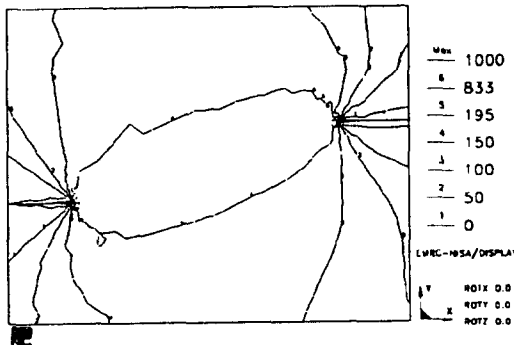


Fig. 9 Equivalent stress distribution at 120 MPa



(a) $\sigma=90$ MPa



(b) $\sigma=120$ MPa

Fig. 10 Stress distribution at different stress (Same D & H)

의 유한요소해석의 결과에서 이것을 확인할 수 있다. 따라서 Forsyth의 모델은 두 크랙의 성장으로 인한 형상의 변화를 고려하지 않아 이 모델만으로는 소성역과 크랙간섭의 효과를 바르게 예측할 수 없다.

그러므로 크랙간섭의 효과를 바르게 예측하기 위해서는 변화하는 형상과 소성역의 관계를 고려해야 한다. 일반적으로 크랙이 하나만 존재하는 경우에는 응력확대계수의 변화가 그대로 소성역의 크기의 변화로 연결되므로, 다음 식과 같이 크랙의 전파속도를 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = f(PZS, R) \quad (3)$$

하지만 크랙간섭장에서는 형상의 변화도 고려하여 다음과 같이 나타내어야 할 것이다.

$$\frac{da}{dN} = f(PZS, R, D, H) \quad (4)$$

Fig. 12에는 이에 따른 변화양상의 모델을 나타

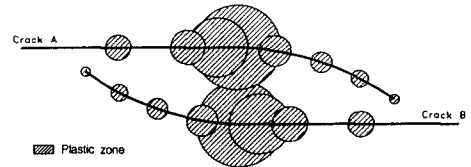


Fig. 11 Crack tip plastic zone size changes for approaching and passing offset cracks by Forsyth

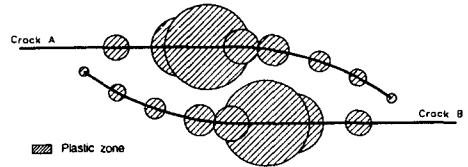


Fig. 12 Modified model of crack tip plastic zone size changes for approaching and passing offset cracks

내었다. 크랙의 최대 소성역의 크기가 되는 곳은 크랙의 선단이 마주치는 부분이 아니고 그보다 약간 이전이 되며, 최대 소성역이 발생하는 곳으로부터 두 선단이 마주치는 부분까지는 소성역의 절대값은 작아지지만 실질적인 간섭효과는 K의 값의 변화에서 보는 것처럼 더 커진다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 두 개의 크랙이 서로 간섭하는 경우의 크랙전파 특성을 고찰하기 위하여 두 크랙을 진전방향에 대하여 수직으로 이동시키며, 피로실험을 수행하고 균열선단의 응력해석을 하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 두 크랙이 서로 간섭하며 진전하는 경우, 전파양상은 두 크랙이 합체하는 Type A, 마주 진전하던 크랙선단이 휘며 정지하고, 제 2크랙의 계속된 진전으로 파단한 Type B, 제 2크랙의 영향이 거의 없이 주크랙이 계속 진전하여 파단한 Type C의 세 가지 형태가 관찰된다.

(2) Type A의 경우에는 제 2크랙이 없는 경우에 비하여 전체 수명이 약 26%가 감소하였지만, 크랙이 합체하지 않은 Type B와 Type C의 경우에는 전체 수명에는 그다지 변화가 없으며, 크랙의 전파속도의 경우 Type A, B에서는 크랙이 진전하다가 가속과 감속을 차례로 겪는 반면 Type C의

경우는 그러한 특징없이 제 2크랙이 없는 경우와 거의 비슷한 전파양상을 나타낸다.

(3) Type B로 진전하는 경우에는 두 크랙선단이 마주치는 부분까지는 주크랙의 크랙전파속도가 증가하다가 교차한 직후에는 급격히 크랙전파속도가 감소하여 정지한다. 또한 다른 응력상태에서는 두 크랙의 진전방향과 속도가 상당히 달라지며, 이는 소성역의 크기와 형상을 이용하여 설명할 수 있으나 이 때 소성역의 변화양상은 그 크기의 절대값의 변화만으로는 나타낼 수 없으며, 그때의 형상변화를 고려하여야 한다.

참고문헌

- (1) 송삼홍, 김진봉, 1994, "유한요소법에 의한 미소원공 주위의 응력분포해석," 대한기계학회논문집, 제18권, 제3호, pp. 555~564
- (2) Song, S. H. and Bae, J. S., 1996, "Crack Initiation and Propagation in Stress Interaction Field," *Post Conference Proceedings of the 1996 VIII International Congress on Experimental Mechanics*, pp. 429~434
- (3) Wu, S., Ivanova, E. and Chudnovsky, A., 1994, "The Effect of a Process Zone on the Fracture Path in a Complex Stress Field," *International Journal of Fracture*, Vol. 67, pp. R13~R19
- (4) Rubinstein, A. A. and Choi, H. C., 1988, "Macrocrack Interaction with Transverse Array of Microcracks," *International Journal of Fracture*, Vol. 36, pp. 15~26
- (5) Mauge, C. and Kachanov, M., 1994, "Anisotropic Material with Interacting Arbitrarily Oriented Cracks. Stress Intensity Factors and Crack-microcrack Interactions," *International Journal of Fracture*, Vol. 65, pp. 115~139
- (6) Forsyth, P. J. E., 1983, "A Unified Description of Micro and Macroscopic Fatigue Crack Behaviour," *International Journal of Fatigue*, pp. 3~14
- (7) Partl, O. and Schijve, J., 1993, "Multiple-site damage in 2024-T3 Alloy Sheet," *International Journal of Fatigue*, Vol. 15, No. 4, pp. 293~299
- (8) Mauge, C. and Kachanov, M., 1994, "Anisotropic Material with Interacting Arbitrarily Oriented Cracks. Stress Intensity Factors and Crack-microcrack Interactions," *International Journal of Fracture*, Vol. 65, p. 134