

## 크랙 사이의 간섭에 의한 피로크랙 전파거동의 변화

### The Variation of Fatigue Crack Propagation Behavior by Crack-crack Interaction

송 삼 홍(고려대 기계공학과), 배 준 수(고려대 대학원), 최 병 호\*(고려대 대학원)

S. H. Song(Korea Univ. Dept. of Mechanical Engineering), J. S. Bae(Korea Univ. Graduate School),  
B. H. Choi\*(Korea Univ. Graduate School)

**Keywords :** Crack-crack interaction(크랙 간섭), Fatigue life(피로 수명), Crack propagation rate(크랙전파속도), Finite element method(유한요소해석), Plastic zone(소성역), Crack propagation path(크랙진전경로)

**Abstract :** It is important to examine life or crack propagation behavior of structures because of its safety evaluation. The purpose of this study is to investigate the effect of crack-crack interaction to evaluate fatigue life and crack behavior. In this study, the behavior of the interaction of two cracks is studied by experiment. The vertical distance of two cracks is varied to make different interaction stress field. In addition, the effect of plastic zone is considered to examine crack propagation path and propagation rate.

#### 1. 서론

어떠한 재료 내부 또는 표면에 결함이나 크랙등이 존재하면 그러한 것들을 기점으로 작용하여 크레이가 성장하게 되고 파단에 이르게 된다. 이러한 경우에 크랙의 진전중에 주위의 다른 결함이나 크랙등에 의하여 간섭되어지는 경우도 있어 이에 대한 연구가 필요하며, 따라서 지금까지 이러한 간섭효과에 대하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 우선 표면결함의 한 가정으로 원공의 간섭에 의한 연구가 많아서, 김<sup>(1)</sup>은 원공들이 서로 인접하여 위치한 경우에 대하여 유한요소법을 이용하여 응력간섭효과를 고찰하였고, 송등<sup>(2)</sup>은 원공이 임의의 각도를 갖고 인접한 경우에 간섭효과를 고찰하였다. Wu등<sup>(3)</sup>은 소성역의 크기가 크랙의 진전방향에 미치는 영향을 원공을 가진 응력간섭장내에서 관찰하였다. 반면, 크랙간의 간섭에 대한 연구로 Rubinstein등<sup>(4)</sup>은 적분방정식을 이용하여 크랙선단에 미소크랙이 존재하는 경우에 대하여 응력확대계수를 계산하였고, 또, Mauge등<sup>(5)</sup>은 이방성의 경우에 대하여 크레이 임의로 배치되어져 있는 크랙들 선단의 응력확대계수를 계산하였다.

그런데 크랙간의 간섭에 대한 연구는 수적으로도 적으며 대부분의 연구가 크랙진전시의 응력확대계수의 변화에 대한 연구가 대부분으로 크랙간섭시의 결함재의 전체수명평거나 진전거동에 대한 연구는 거의 되어 있지 않

다. 이와 같은 수명이나 진전거동의 평가는 구조물 등의 안전성 평가에 중요하므로 이에 주목하여 본 연구에서는 서로 다른 두개의 크랙에 의해 발생하는 간섭장에서 실험적으로 그 거동을 조사하고, 진전시의 소성역의 변화에 대하여 고찰하여 간섭되어진 피로 크랙의 진전경로와 전파속도를 검토하였다.

#### 2. 실험방법

본 연구에는 실험재료로 내식성 알루미늄 합금인 Al-5086을 사용하였으며, 이에 대한 화학성분과 기계적 성질은 Table 2-1, Table 2-2에 나타내었다. 실험은 굽힘 및 비틀림 시험기를 사용하였으며 응력비는 R=1, 사용응력은  $\sigma_{max}=90, 120\text{MPa}$ 의 두 가지를 사용하였다. 실험에 사용한 시험편의 형상과 크랙발생을 위한 원공노치의 형상을 Fig. 2-1에 나타내었으며, 원공노치는 주크랙을 만들기 위하여 지름 0.5mm, 깊이 0.6mm로 좌단에서 0.7mm의 위치에 가공하였고, 제 2크랙을 만들기 위하여 좌단에서 6mm의 위치에 주크랙이 2.5mm에 이르렀을 때, 지름, 깊이 모두 0.5mm로 드릴가공하였다. 두 번째 원공은 종축으로  $h=0, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0\text{mm}$ 로 변화시켜 가면서 가공하였다. 유한요소 해석은 EMRC의 상용프로그램 NISA를 사용하였으며,  $h=0.5\text{mm}$ 인 경우에 대하여 응력 90, 120MPa의 두 가지 경우에 총 10가지의 모델로 탄

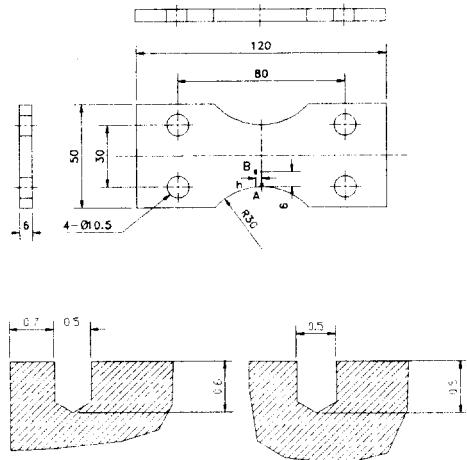
소성 유한요소해석을 행하였다. 사용된 모델의 요소 수는 616~782, 절점수는 1966~2488개이다. 또한 해석에 사용된 요소는 2차원 8절점 등매개요소이고, 크랙선단에는 특이요소를 사용하였다.

Table 2-1 Chemical composition of the testing material

Material	Composition			
	Al	Mn	Mg	Cr
Al-5086	95.4	0.4	4.0	0.15

Table 2-2 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



Detail of A      Detail of B

Fig. 2-1 Geometries of test specimen

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 제 2크랙의 위치와 전체 크랙거동

##### 3.1.1 제 2크랙의 성장

크랙성장의 양상은 Fig. 3-1에 나타내어진 것과 같이 세 가지의 양상을 가진다. 실제 경우에는 크랙이 원공에서 성장하였지만 여기에서는 원공 자체의 영향은 크랙이 일단 발생하여 어느 정도의 크기에 이르면 상대적으로 적다고 생각하여 크랙으로만 간주하였다. Type A와 같이 주크랙이 제 2크랙과 합체하는 형태는 주크랙의 선단에서 수직선상 거리  $h$ 가 작은 곳에 제 2균열이 위치하는

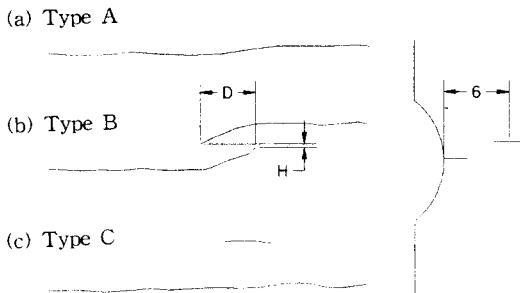


Fig. 3-1 Three shapes of crack propagation

경우이다. Forsyth<sup>(6)</sup>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 휘어서 정지하는 경우는  $h=0.5, 1.0\text{mm}$ 의 경우에 볼 수 있었다. Type C와 같은 경우의 제 2크랙이 약간 성장후 정지하고, 주크랙이 계속적으로 성장하는 경우는  $h=0.7, 2.0\text{mm}$ 의 경우에서 볼 수 있었다.  $h=0.7\text{mm}$ 의 경우는 0.5와 1.0mm의 사이의 값이므로 Type B의 형태의 크랙전파가 일어나야 할 것으로 생각되지만, 그 경우와는 다르게 제 2크랙의 발생시간이 늦어 그만큼 주크랙과 간섭을 일으킬 정도의 크랙으로 성장하지 못하였기 때문이다.

##### 3.1.2 전체 크랙의 a-N'곡선

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

$$N' = N - N_{2.5}$$

여기서 N' : 수정반복수

N : 반복수

$N_{2.5}$  : 주크랙 길이 2.5mm시의 반복수

제 2크랙의 성장과 그에 따른 크랙의 간섭에 의한 3가지 진전 형태마다 a-N'선도 각각 다른 a-N'선도를 갖는다. 즉, Type A와 같은 경로형태인, 시편의 주크랙의 선단에 제 2크랙을 성장시킨 경우( $h=0\text{mm}$ )에는 그 시편의 전체 수명은 90MPa의 경우에 제 2크랙이 없는 경우보다 약 28%정도 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 MSD(Multiple-site damage)균열에 대한 다수의 논문<sup>(7)</sup>상에 나타내어지고 있는 취약성과 같은 결과를 갖는다. 하지만 그 외의 경우( $h=0.5, 0.7, 1.0, 2.0\text{mm}$ )에는 제 2균열을 발생시키지 않은 경우와 최종적인 전체 수명은 그다지 변화없이 거의 같게 되어 Type B, C의 형태로 전파하면 전체 수명에는 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 하지만 두 형태의 a-N'의 양상은 서로 다르

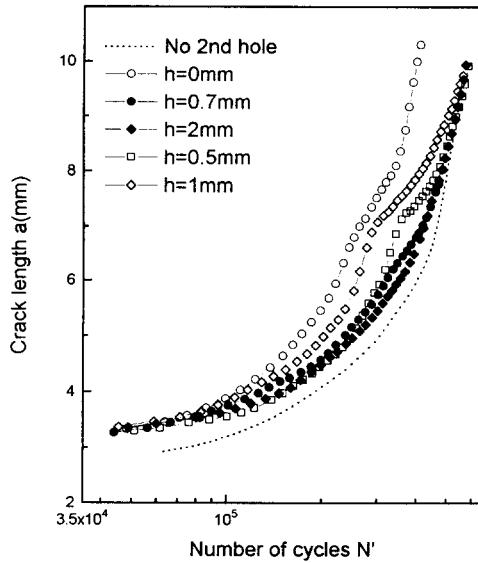


Fig. 3-2 Relation between crack length and test cycle

다. 즉, Type B의 형태는 두 크랙의 선단이 가까워지면서 생기는 가속과 두 크랙선단이 지나가면서 발생하는 감속이 명확하게 관찰되는 반면, Type C의 형태로 전파하는 크랙의 경우에는 가속과 감속이 불분명하다.

### 3.1.3 전체 크랙의 크랙전파속도

전체 크랙의 전파속도는 Fig. 3-3에 나타내어진 것과 같다. Fig. 3-3에 점선으로 표시한, 제 2크랙이 없는 경우는 전체 크랙이 크게 속도가 증가하거나 감소하는 부분없이 거의 일정하게 증가한다. Fig. 3-3(b)에서 보는 것처럼  $h=0\text{mm}$ 인 경우는 크랙이 합체하기 전까지는 크랙전파속도가 크게 증가하다가 내부크랙이 완성되는 시기까지는 크랙전파속도가 저하되는 특징을 갖는다. 그 후 다시 크랙이 본래의 속도로 회복해간다. 전파양상이 Type B인  $h=0.5, 1.0\text{mm}$ 인 경우도 Fig. 3-3(b)에 나타내었으며 전반적인 전체 크랙의 전파속도의 양상이 앞의 경우와 비슷하다. 하지만 전파속도의 상승치는  $h=0\text{mm}$ 의 경우와 비슷한데 반하여 전파속도의 감소치는 더 커서 앞절에 언급한 전체 수명의 차이가 발생한다고 생각된다. 또한 이처럼 크랙의 전파속도의 급격한 상승과 감소는 두 크랙이 가까워짐에 따라 두 크랙의 선단에 간섭의 영향으로 크랙전파속도가 상승했다가 두 크랙선단의 x좌표가 같아진 후에 전체수명은 제 2크랙의 주크랙 반대쪽의 성장속도만이 반영되는데 이 크랙성분의 전파속도는 간섭장내에서 빨라진 전파속도보다 아직 상당히 늦기 때문

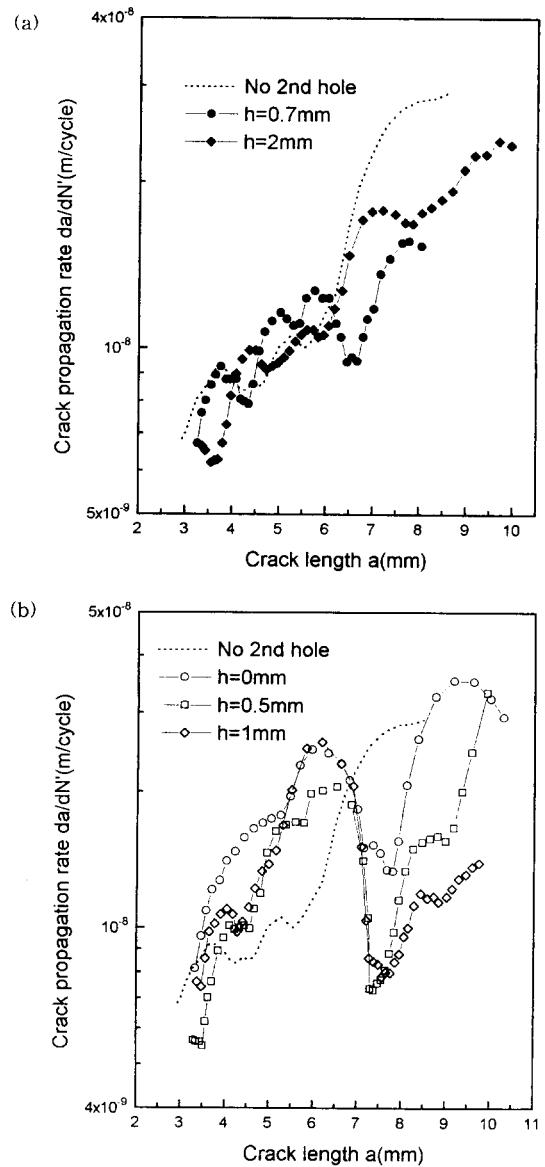


Fig. 3-3 Relation between crack length and crack propagation rate

이다. Fig. 3-4는  $h=1.0\text{mm}$ 인 경우에 대하여 주크랙 선단과 제 2크랙의 주크랙쪽 선단의 수평거리 D와 수직거리 H의 변화에 따른 주크랙의 크랙전파속도를 나타낸 것이다. 주크랙은 D가 0이 되는 지점부근으로 갈수록 전파속도가 빨라지다가 D가 (-)로 가고, H가 작아질수록 크랙전파속도는 감소해 가는 것을 알 수 있다. 그에 반하여 Fig. 3-3(a)에는  $h=0.7, 2.0\text{mm}$ 인 경우의  $da/dN'$ 선도가 보여져 있으며 이렇게 Fig. 3-1(c)와 같은 형태의 전파양

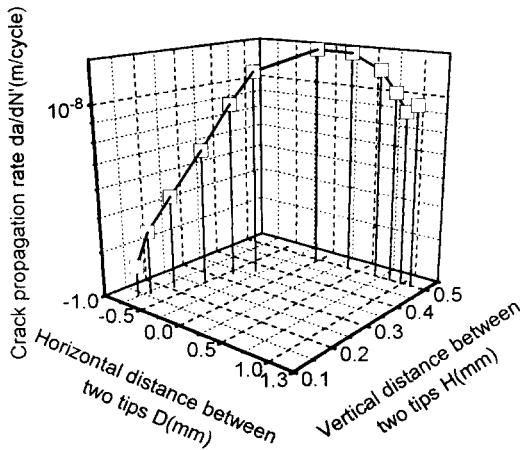


Fig. 3-4 Relation between crack propagation rate and relative distance of two tips( $h=1.0\text{mm}$ )

상을 갖는 경우는 상승치나 감소치가 거의 없거나 ( $h=2.0\text{mm}$ ), 약간 갖는( $h=0.7\text{mm}$ ) 형태를 취한다.

### 3.2 응력변화에 따른 크랙전파방향

본 해석은 크랙이 진전하면서 그 경로를 바꾸어 가는 과정에서의 소성역의 크기를 고찰하기 위하여 탄소성 유한요소해석을 행하였다. 소성역의 크기는 Von Mises 항복조건을 사용하여 구하였고, 재료거동은 탄성-완전소성으로 가정하였다.

응력이 90, 120MPa인 두 가지의 경우에 대하여 각 다섯 가지의 모델을 만들었으며, 실제는 크랙이 계속적으로 휘지만, 실험적으로 측정한 경로를 확실히 방향이 바뀐 곳에 대하여 최저 0.16mm에서 직선으로 가정하여 모델링하였다. 또한 Fig. 3-7(a)는  $h=0.5\text{mm}$ , 응력  $\sigma=120\text{MPa}$ 인 경우의  $N'=5.94 \times 10^4\text{cycle}$ 일 때의 상당응력분포이고, Fig. 3-7(b)는  $h=0.5\text{mm}$ , 응력  $\sigma=120\text{MPa}$ ,  $N'=6.79 \times 10^4\text{cycle}$ 일 때의 상당응력분포이다. 두 그림에서 볼 수 있는 것처럼 두 크랙선단이 교차하기 전과 교차한 후의 크랙선단의 모양이나 크기가 확연히 달라짐을 알 수 있다. Fig. 3-5는 두 응력상태에서의 크랙전파속도를 나타낸 것이며, Fig. 3-6은 두 응력상태에서 진전한 크랙의 사진이다. Fig. 3-5에서 두 크랙의 전체 크랙전파 속도의 양상은 그다지 큰 차이를 나타내지 않고 수직이동한 것처럼 보인다. 반면 Fig. 3-6에서 보이는 것처럼 크랙전파 방향은  $\sigma=120\text{MPa}$ 쪽이 더 빨리 휘기 시작했음을 알 수 있다. 그림에서 화살표한 부분은 두 크랙이 휘기 시작하는 부분을 나타내며 그 사이의 거리는  $\sigma$

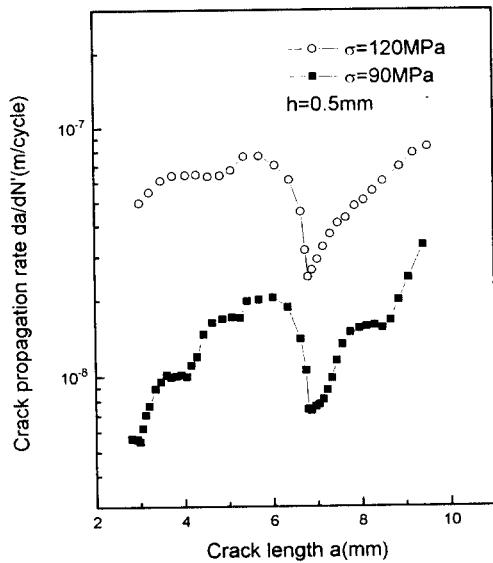


Fig. 3-5 Relation between crack propagation rate at different stress

(a)  $\sigma=90\text{MPa}$

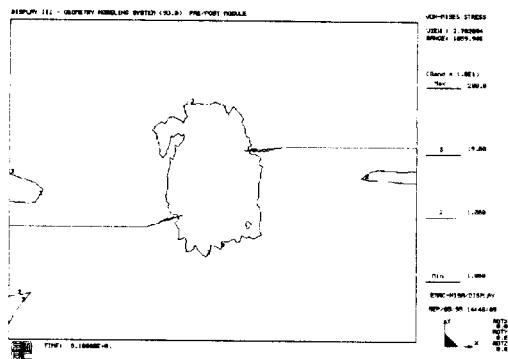


(b)  $\sigma=120\text{MPa}$

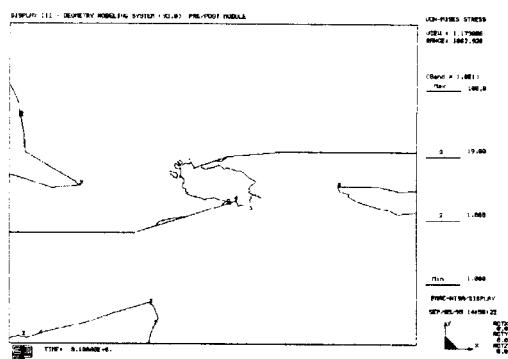


Fig. 3-6 Photograph of fatigue crack at different stress

$=120\text{MPa}$ 쪽이  $90\text{MPa}$ 쪽보다 3배 정도가 됨을 알 수 있다. 이는 소성역의 크기가  $\sigma=90\text{MPa}$ 보다  $\sigma=120\text{MPa}$ 일 때 더 커서 크랙이 간섭의 영향을 더 많이 받기 때문이다. 이것은 실제로 소성역이 크랙선단보다 간섭의 영향을 일찍 받으며 응력이 높을수록 소성역의 크기가 커지므로 그만큼 간섭의 영향을 빨리 받게 되기 때문으로 생각된다. 따라서 일정한  $h$ 의 거리에서 크랙이 진전한다 하더라도 간섭의 효과에 의하여 그만큼 크랙진전시의 방향이나 속도가 달라지게 된다. Fig. 3-8에 다른 두 응력 사이에



(a)  $\sigma = 120 \text{ MPa}$ ,  $N' = 5.94 \times 10^4 \text{ cycles}$



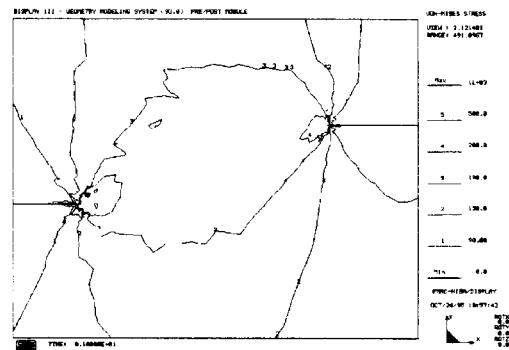
(b)  $\sigma = 120 \text{ MPa}$ ,  $N' = 7.20 \times 10^4 \text{ cycles}$

Fig. 3-7 Equivalent stress distribution

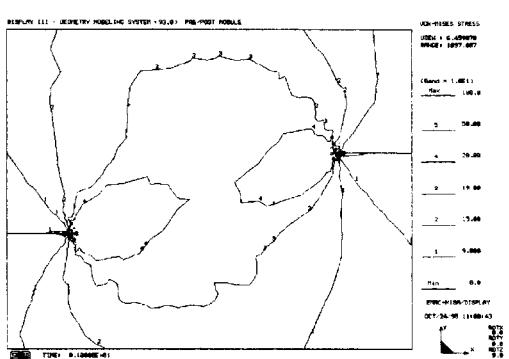
서 같은 D, H일 때의 응력분포를 보인다( $D=1.5\text{mm}$ ,  $H=0.5\text{mm}$ ). 여기서 알 수 있는 것처럼  $\sigma=120\text{MPa}$ 쪽이 소성역의 크기가 크고 간섭효과에 더 민감할 수 있을 것이라는 것을 알 수 있다. 하지만 두 크랙의 선단이 어느 정도까지 가까워지면 D, H가 작아져서 소성역이 충분히 발생할 수 있는 영역의 절대값이 작아져 간섭효과는 더 커지지만 오히려 소성역은 작아지는 현상을 보인다. 따라서 Fig. 3-9에 보인 것처럼 소성역의 크기의 절대값을 두 크랙 선단사이의 면적( $D \times H$ )로 나누어 PZS'이라 하고 이것을 주크랙길이와 비교하였다. 즉, 크랙이 진전하면서 두 크랙이 교차할 때까지는 일반적으로 소성역이 증가하다가 교차 후에는 소성역이 점차 작아지며 크랙의 전파속도가 느려지는 경향을 갖고 이는 Fig. 3-5에 나타낸 것과 일치한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 두개의 크랙이 서로 간섭하는 경우의 크



(a)  $\sigma = 90 \text{ MPa}$



(b)  $\sigma = 120 \text{ MPa}$

Fig. 3-8 Stress distribution of different stress at the same D, H

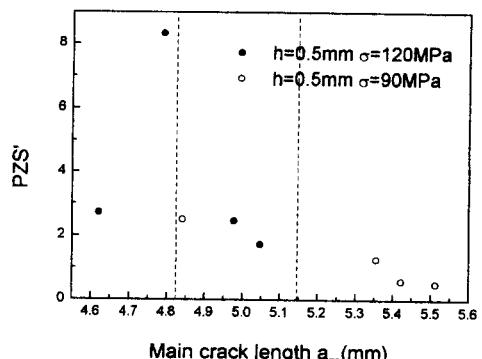


Fig. 3-9 Relation between crack length and PZS'

랙전파특성을 고찰하기 위하여 두 크랙의 수직방향거리  $h$ 를 변화시키며 실험 및 고찰을 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1)  $h=0\text{mm}$ 인 경우에는 다른 크랙이 없는 경우에 비하여 전 수명의 약 28%가 감소하였지만, 크랙이 합체하지 않은 경우에는 그 전 수명의 변화는 거의 없다.
- (2) 전체 크랙의 전파속도는 세 가지의 전파양상에 따라 각기 다른 특징을 갖는다. Type A, B 두 형태는 진전하다가 가속과 감속을 차례로 겪는 반면, Type C의 경우는 그러한 특징없이 제 2크랙이 없는 경우와 거의 비슷한 전파양상을 나타낸다.
- (3) 다른 용력상태에서는 두 크랙의 진전방향과 속도가 상당히 달라지며 소성역의 크기와 형상을 이용하여 설명 할 수 있다.

## 5. 참고문헌

- (1) 김진봉, 1994, “표면 미소 원공 사이의 용력 간섭 및 초기 균열 발생과 성장에 미치는 용력장의 영향에 관한 연구”, 고려대학교 기계공학과 박사학위 논문
- (2) 송삼홍, 배준수, 1995, “용력간섭장에서의 크랙의 발생 및 전파”, 대한기계학회 춘계학술대회논문집(I), pp. 196~200
- (3) S. Wu, E. Ivanova and A. Chudnovsky, 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) A. A. Rubinstein, H. C. Choi, 1988, “Macrocrack interaction with transverse array of microcracks”, International Journal of Fracture, Vol. 36, pp. 15~26
- (5) C. Mauge, M. Kachanov, 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) P. J. E. Forsyth, 1983, “A unified description of micro and macroscopic fatigue crack behaviour”, International Journal of Fatigue, pp. 3~14
- (7) O. Partl and J. Schijve, 1993, “Multiple-site damage in 2024-T3 alloy sheet”, International Journal of Fatigue, Vol. 15 No. 4, pp. 293~299