

〈논 문〉

두개의 미소원공결합에서의 피로크랙발생과 전파에 관한 연구

송삼홍* · 배준수**

(1996년 11월 30일 접수)

Fatigue Crack Initiation and Propagation from Two Micro Hole Defects

Sam Hong Song and Joon Soo Bae

Key Words : Fatigue Crack Initiation Life(피로크랙발생수명), Stress Concentration Factor(응력집중계수), Local Strain(국부변형률), Plastic Deformation(소성변형), Finite Element Method(유한요소법), Fatigue Crack Propagation Path(피로크랙전파경로), Fatigue Crack Propagation Rate(피로크랙전파속도)

Abstract

The aim of this study is an investigation of the interaction of two micro hole defects affecting fatigue crack initiation life and propagation behavior. The location of two micro hole defects was considered as an angle of alignment and the distance between the centers of two micro hole defects. The fatigue cracking behavior is experimented under bending. When micro defects are located close to each other, the fatigue crack initiation lives are varied with their relative locations. In the experiments, the area of local plastic strain strongly played a role in the fatigue crack initiation lives. Therefore we introduce a parameter which contains the plastic deformation area at stress concentrations and propose a fatigue crack initiation life prediction curve. In addition, the directions and propagation rates of fatigue cracks initiated at two micro hole defects are studied experimentally.

1. 서 론

재료 내의 미소결합이나 개재물은 응력집중원으로 작용하고, 이들을 기점으로 피로크랙이 발생·전파한다. 이 때 재료의 수명은 미소결합이나 개재물의 크기, 형상, 분포위치에 영향을 받는다. 여러 개의 결합이 존재할 때, 이들의 분포위치는 인접하여 있거나 원접하여 있는 등 다양하다. 특히 결합이 인접하여 있을 경우는 결합간의 상호간섭으로

으로 인하여 결합의 상대적 위치에 따라 응력분포가 변화하고, 피로크랙발생수명이 변화한다. 결합간의 간섭이 재료의 피로거동에 미치는 영향은 중요하므로 이에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다. 송등⁽¹⁾은 유한요소법에 의해 미소원공 주위의 응력분포를 해석하여 원공들이 인접하여 있는 경우에 대한 간섭영향을 연구하였다. 유한요소해석 결과, $s/r \leq 2.7$ 일 때 ($h/r=1$, h =원공결합의 깊이, s =원공결합사이의 거리, r =원공결합의 반지름) 결합간에 간섭효과가 발생한다고 하였고, 실험결과는 $s/r \leq 2.2$ 일 때 간섭효과가 발생한다고 하였다. 이밖에도 하중이 작용하는 방향에 대해 수직으로

*회원, 고려대학교 기계공학과

**회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

Table 1 Mechanical properties of Al-5086

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

배열된 두개의 결함들간의 간섭영향에 대한 많은 연구^(2~5)가 있다. 그러나 실제 결함의 배열은 다양하므로, 임의의 방향에 위치한 결함사이의 간섭에 대한 연구가 필요하다. 또한 결함의 분포위치에 따른 피로크랙발생수명의 변화에 대한 연구는 찾아보기 힘들다.

한편, 결함들이 멀리 떨어져 있을 때, 피로크랙은 각 결함에서 독립적으로 발생하지만, 성장하면서 다른 결함에서 발생하여 전파하는 크랙의 영향을 받는다.^(6~9) 이 때 크랙들은 합체되기도 하며, 다른 크랙의 영향으로 성장을 멈추기도 한다. 따라서 크랙간의 간섭으로 인한 크랙전파방향과 속도를 검토하는 일은 재료의 수명을 예측하는데 있어 중요한 일이다.

본 연구에서는 두 개의 미소결합이 존재할 경우, (1) 두 미소결합이 존재하는 위치와 피로거동과의 관계, (2) 응력 및 변형률의 분포와 피로크랙발생 수명과의 관계, (3) 두 미소결합 사이에서 발생한 크랙들의 상호간섭 영향 등을 고찰하였다.

2. 시험방법

시험에 사용한 기기는 굽힘 및 비틀림 피로시험기(TB-10, 최대 모멘트 진폭 98 N·m, 분당 회전수 2000 rpm)이다. 시험에 사용한 재료는 ASTM에 규정되어 있는 Al-5086재이다. 이 재료의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었으며, 화학적 성분은 Table 2에 나타내었다. 인장시험 결과는 Fig. 1과 같다. 작용하중은 응력비 $R = -1$, 최대작용하중 $\sigma_{max} = 90$ MPa의 면외굽힘하중이다. 시편의 형상은 Fig. 2와 같다. 시편의 중앙에 지름 0.5 mm의 드릴을 사용하여 깊이 0.5 mm의 원공결합을 가공하였다. 두 원공결합간의 상호위치는 Fig. 3과 같다. 하중축의 수직방향, 즉 x 축과 두개의 원공결합의 중심을 연결한 선이 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 의 각도를 갖도록 두개의 원공결합을 배열하였다. 원공결합을 가공하기 전에 시편을 연마지 #100~#200를 사용하여 1차 연마하였다. 원공

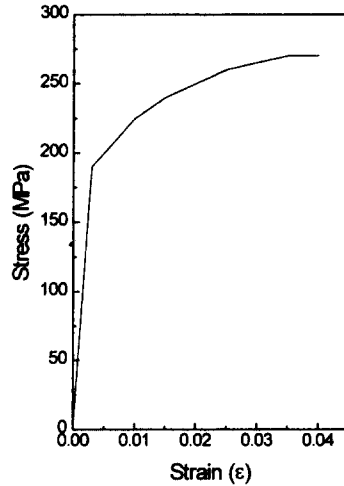
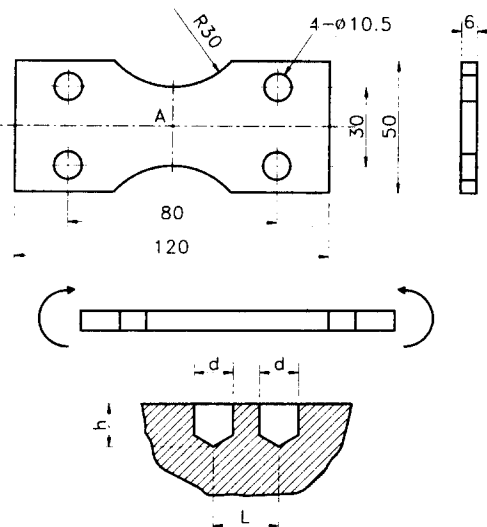


Fig. 1 Stress-strain curve of Al-5086



Detailed drawing of A
 $d = 0.5$ mm, $h = 0.5$ mm

Fig. 2 Geometries of test specimen

Table 2 Chemical properties of Al-5086(wt %)

Al	Mn	Mg	Cr
95.4	0.1	4.0	0.15

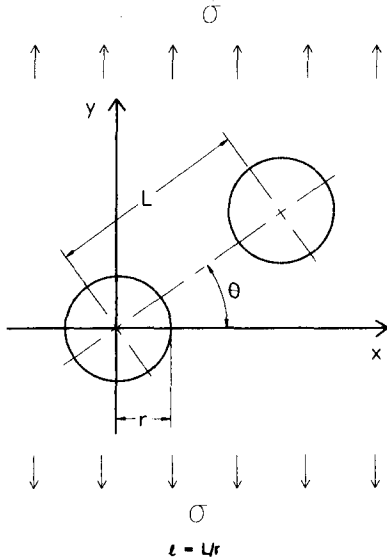


Fig. 3 Relative position of two micro hole defects

결합을 가공한 후에는 주위의 소성변형되어 용기된 부분을 제거하기 위하여, 입자크기가 0.3 μm인 산화 알루미늄(Al₂O₃)로 2차 연마하였다. 크랙길이의 측정에는 자체 제작한 금속현미경과 접안 이동 측미계를 사용하였다. 응력해석에는 상용 유한요소해석 패키지 NISA를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 피로크랙발생수명

결합들이 인접하여 있을 때, 결합간의 상호간섭으로 인하여 발생하는 응력집중부에서 피로크랙이 발생한다. 이 때, 피로크랙발생수명은 결합들의 상호위치에 크게 영향을 받는다. 이러한 크랙발생수명의 변화를 고찰하기 위하여, 원공중심 사이의 거리를 $L=0.75\text{ mm}$ 로 고정시키고, 두개의 원공결합 중심을 연결한 선과 x 축 사이의 각도를 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 로 변화시켰다. Fig. 4는 $\theta=45^\circ$ 일 때 응력집중부에서 발생한 크랙이 전파한 모습을 나타낸다. 원공결합의 상호위치를 변화시켜 얻은 각 응력집중부에서의 크랙발생수명은 Table 3과 같다. 크랙발생수명은 크랙의 길이가 $a=0.1\text{ mm}$ 일 때로 정의하였다. 각각의 크랙발생수명을 비교하기 위하여 원공결합이 1개 있을 때의 크랙발생수명을 기준으로 한 상대값을 함께 나타내었다. $\theta=0^\circ$ 일 때 크랙이 가장 빨리 발생하였다. 이 때

크랙은 약 $N=3 \times 10^4$ 사이클에서 발생하였으며, 이 값은 원공결합이 1개 있을 때에 비하여 0.056배 작은 값이다. $\theta=90^\circ$ 일 때 크랙이 $N=7 \times 10^4$ 사이클에서 발생하여 가장 늦었으며, 이 값은 원공결합이 1개 있을 때에 비하여 1.3배 큰 값이다.

크랙은 결합주위의 응력집중부에서 발생한다. 재료의 수명은 응력집중부의 응력의 크기나 응력분포에 영향을 받으므로^(10,11) 크랙발생수명과 응력집중계수와와의 관계를 살펴볼 필요가 있다. 응력집중계수는 탄성 유한요소해석을 통하여 구하였다. Fig. 5는 원공사이의 각도를 변화시켰을 때 각 경우의 응력집중계수를 나타낸다. 응력집중계수는 $\theta=30^\circ$ 일 때 $K_t=3.77$ 로 최대값을 갖고 이후 계속 감소하다가 $\theta=90^\circ$ 에서 $K_t=2.63$ 으로 최소값을 갖는다. 응력집중계수와 크랙발생수명과의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 응력집중계수와 크랙발생수명과의 관계는 일정하지 않다. 즉 응력집중계수가 큰 곳에서 크랙이 반드시 빨리 발생하지 않았다. $\theta=30^\circ$ 에서 응력집중계수

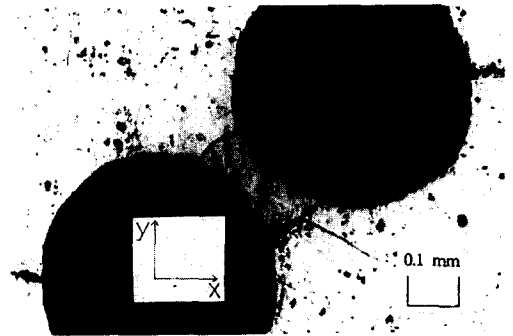


Fig. 4 The crack initiation at stress concentrations between two micro hole defects($\theta=45^\circ$)

Table 3 Crack initiation cycle under bending applied loading

		Cycle	$\frac{\text{Cycle}}{\text{Cycle}_{\text{at one hole}}}$
One hole		5.4×10^5	1.00
Two holes	0°	3×10^4	0.056
	30°	1×10^5	0.19
	45°	1.5×10^5	0.28
	60°	1.2×10^5	0.22
	90°	7×10^5	1.3

는 가장 크지만 $\theta=0^\circ$ 에서 크랙은 가장 빨리 발생한다. 그리고 $\theta=45^\circ$ 일 경우보다 $\theta=60^\circ$ 일 때 응력집중계수가 작음에도 불구하고 크랙이 더 빨리 발생한다.

이와 같이 응력집중계수와 크랙발생수명과의 관계가 일정치 않은 이유중의 하나는 응력집중부에서의 응력이 탄성한도를 넘어섰기 때문이다. 또한 응력집중부위는 응력이 급격히 변화하고, 다축응력상태이기 때문에 응력집중계수만으로는 크랙발생수명을 예측하기 힘들다. 따라서 탄소성 응력해석을 행하여 변형률과 응력분포를 계산하고 이와 크랙발생수명과의 관계를 살펴보았다. 탄소성 해석에는 인

장시험을 통해 얻은 Fig. 1의 응력-변형률곡선을 사용하였다. 소성변형이 발생하였을 경우, 변형률의 관점에서 피로수명을 예측하는 방법이 널리 사용된다.⁽¹²⁻¹⁶⁾ 본 연구에서는 국부변형률을 구하여 피로크랙발생수명과의 관계를 검토하였다. 원공결합주위에 발생하는 최대 국부변형률과 피로크랙발생수명과의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 응력집중계수와 크랙발생수명과의 관계와 마찬가지로, 국부변형률의 크기와 크랙발생수명과의 관계는 일정치 않다. 국부변형률의 크기뿐만 아니라 결함의 기하학적 형상에 따른 응력분포, 응력구배 등이 피로크랙발생에 영향을 미치기 때문이다. 실험을 통하여 얻은 크랙발생수명과 유한요소해석을 통하여 얻은

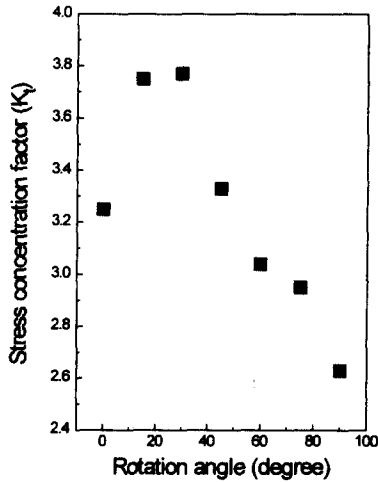


Fig. 5 Stress concentration factor (K_t)

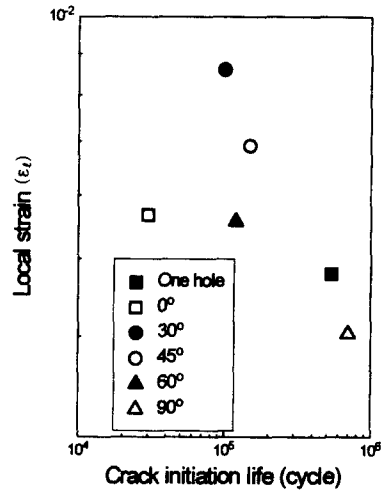


Fig. 7 Relation between local strain and crack initiation life

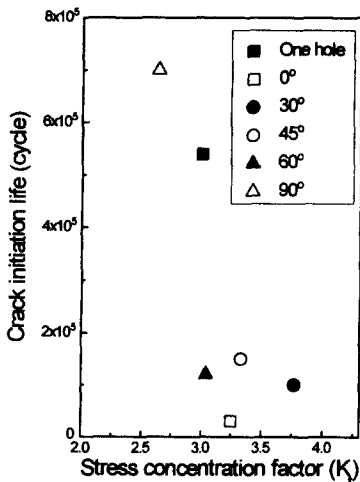


Fig. 6 Relation between crack initiation life and stress concentration factor

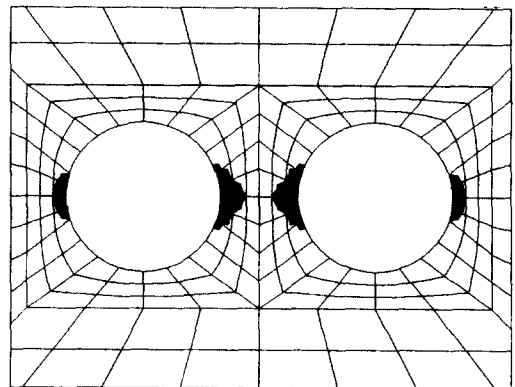


Fig. 8 An example of plastic deformation area obtained by F.E.M. ($L=0.75$ mm, $r=0.25$ mm, $\theta=0^\circ$)

응력분포를 검토해 본 결과, 크랙발생수명은 소성 변형이 일어난 부위의 면적에 많은 영향을 받음을 볼 수 있었다. 즉, 높은 하중이 작용하여 원공결함 주위에 항복응력을 넘는 응력이 발생하였을 때, 크랙발생수명은 탄성응력집중계수의 크기보다는 소성 변형이 발생한 부위의 면적에 더 많은 영향을 받았다. Fig. 8은 유한요소법을 사용하여 소성변형이 발생한 부위를 구한 예이다. 소성변형이 일어난 부위의 면적을 이용하여 크랙발생수명을 정리하기 위해 다음과 같은 변수 A_{pe} 를 도입하였다.

$$A_{pe} = \epsilon_l \times A^3 \tag{1}$$

$$A = \frac{A_l}{A_1} \tag{2}$$

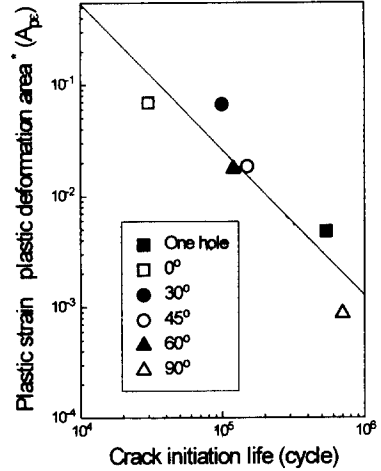
여기서, ϵ_l =국부변형률, A_l =소성변형이 발생한 부위의 면적, A_1 =1개의 원공노치를 가진 시편의 소성변형이 발생한 부위의 면적이다. $\theta=0^\circ$ 에서는 국부변형률은 작지만 소성변형이 발생한 면적이 크므로 A 의 값이 커지기 때문에 A_{pe} 이 값이 커진다. $\theta=30^\circ$ 와 40° 에서는 상대적으로 작은 A 를 곱해주게 되어 국부변형률의 크기가 큼에도 불구하고 A_{pe} 은 작은 값을 갖는다. 이와 같이 정리하여 대수-대수 그래프에 나타내었을 때 크랙발생수명과 A_{pe} 은 선형적인 관계를 갖는다(Fig. 9). 이 관계를 정리하면 다음 식 (3)와 같다.

$$N_i = \left(\frac{A_{pe}}{9.0 \times 10^4} \right)^{-0.76} \tag{3}$$

여기서, N_i =크랙발생수명이다.

3.2 피로크랙전파거동

두 개의 결함이 인접하여 있을 때, 크랙발생수명은 앞에서 살펴본 바와 같이 상호위치에 따라 크게 변화한다. 결함이 멀리 떨어져 있을 경우, 크랙은 각각의 결함에서 독립적으로 발생하지만 전파하면서 상호간섭을 일으킬 수 있다. 이 간섭영향은 재료의 수명에 영향을 미친다. 크랙간의 거리나 응력 분포에 따라 크랙끼리 합체할 수 있고 주 크랙, 즉 긴 크랙이 짧은 크랙의 성장을 정지시킬 수도 있다. Fig. 10은 크랙들간의 상호간섭으로 인하여 크랙이 전파하다가 정지된 모습을 보여준다. 본 절에서는 결함사이의 거리를 변화시켜 각각의 경우에 대해 크랙전파방향과 속도에 대하여 고찰하였다. 원공 사이의 각도를 $\theta=45^\circ$ 로 고정시키고, 원공 중심간의 거리를 $L=0.75, 1.25, 1.5$ mm로 변화



$$*A_{pe} = \epsilon_l \times A^3$$

$$A = \frac{A_l}{A_1}$$

ϵ_l : Local strain obtained by F.E.M.

A_l : The area of plastic deformation occurred at each specimen

A_1 : The area of plastic deformation occurred at one hole notched specimen

Fig. 9 Relation between A_{pe} and crack initiation life

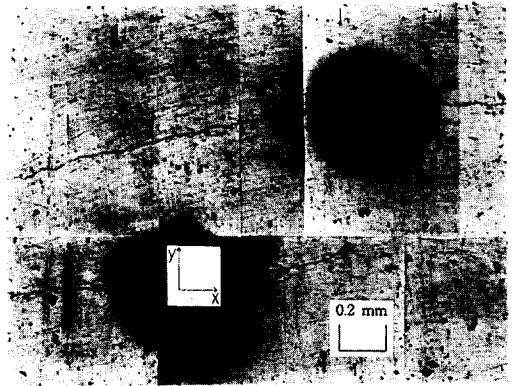


Fig. 10 Crack arrest caused by interaction effect of two cracks

시켰다.

결함이 매우 인접하여 있을 경우($L=0.75$ mm), 크랙은 앞서 살펴본 바와 같이 결함간의 간섭영향으로 만들어진 응력집중부에서 발생한다. 결함사이의 크랙은 전파하면서 상대편 결함으로 합체된다(Fig. 11(a)). 크랙의 전파방향은 최대 주응력 크라이티리언 등⁽¹⁷⁾을 적용하여 예측이 가능하다.⁽¹⁸⁾ 이 때 크랙전파속도는 Fig. 12에 나타난 바와 같이

인접하지 않은 부분의 크랙에 비하여 작다. 결함사이의 거리가 이보다 떨어져 있을 경우 ($L=1.25$ mm), 결함이 인접하여 있는 부분의 크랙은 다른편 결함을 향하여 휘어지면서 전파한다(Fig. 11(b)). 어느정도 전파한 후에는 다른 크랙과의 간섭효과로 인하여 정지하고, 파괴가 일어날 때까지 이 크랙은 성장하지 않는다. 이 크랙의 전파속도는 바깥쪽의 크랙에 비하여 작으며, 다른편 원공결합과 인접하여 있는 많은 부분의 크랙은 거의 일

정한 비율로 크랙전파속도가 증가하였다(Fig. 13). 결함간의 거리가 멀 경우 ($L=1.5$ mm), 크랙은 다른 결함의 영향을 받지않고 독립적으로 발생하여 일정 사이클 동안 독립적으로 성장한다. 어느정도 길이에 이르면 크랙발생이 빠른 결함의 크랙은 계속 성장하고 다른편 결함의 크랙은 정지한다(Fig. 11(c)). 즉, 주크랙이 작용응력을 차단하기 때문에 짧은 크랙은 더 이상 전파하지 않는다. 이때의 크랙전파속도는 Fig. 14에 나타내었다.

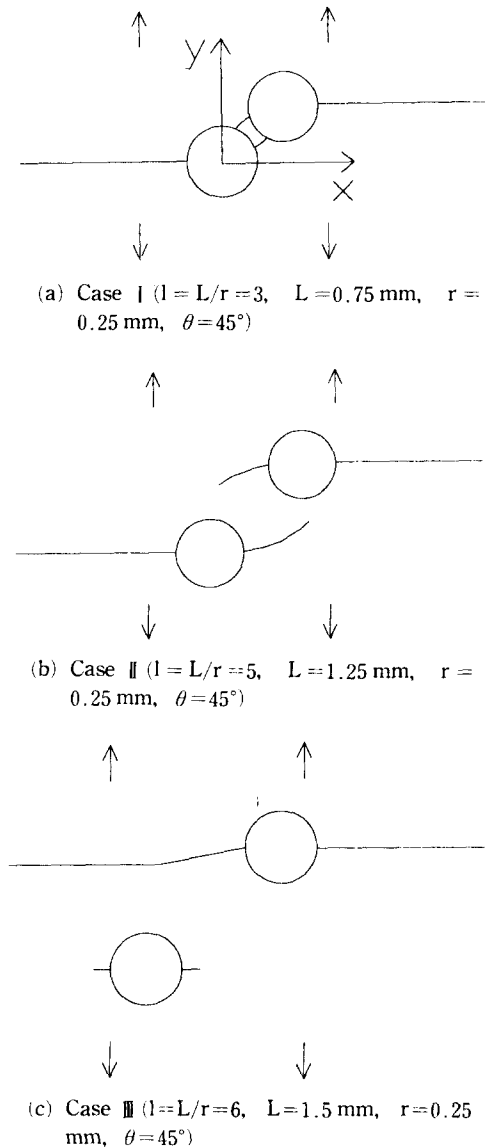


Fig. 11 Model of crack propagation path

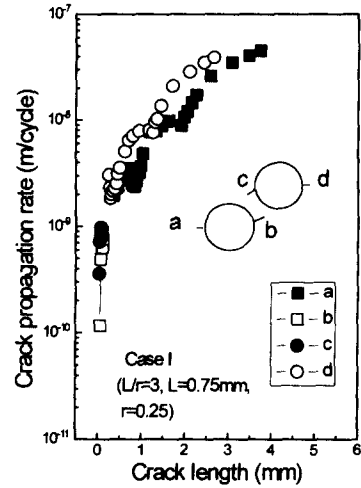


Fig. 12 Relation between crack length and crack propagation rate (Case I, $l=L/r=3, L=0.75$ mm, $r=0.25$ mm, $\theta=45^\circ$)

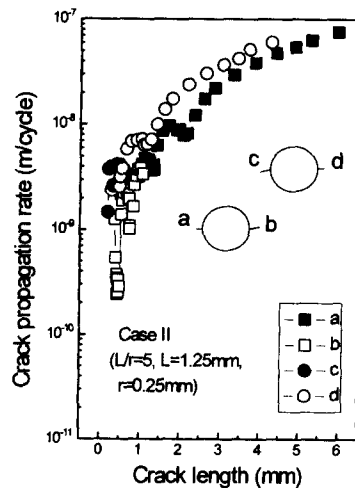


Fig. 13 Relation between crack length and crack propagation rate (Case II, $l=L/r=5, L=1.25$ mm, $r=0.25$ mm, $\theta=45^\circ$)

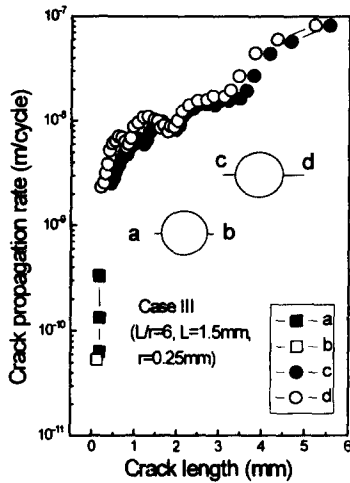


Fig. 14 Relation between crack length and crack propagation rate (Case III, $l=L/r=6$, $L=1.5$ mm, $r=0.25$ mm, $\theta=45^\circ$)

4. 결 론

본 연구에서는 두 개의 미소원공결합을 가진 Al-5086재의 피로크랙발생과 전과거동을 살펴보았다. 두 개의 미소원공결합의 분포위치는 원공결합사이의 각도와 거리를 변화시켜 나타내었다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 피로크랙발생수명은 두 개의 미소원공결합들의 분포위치에 따라 크게 변화한다. 이 경우의 피로크랙발생수명을 예측하기 위해서 새로운 변수 A_{pe} 을 도입하였다. 이 변수는 다음 식과 같이 국부 소성변형률의 크기와 면적을 포함한다.

$$A_{pe} = \epsilon_i \times \left(\frac{A}{A_i} \right)^3$$

Al-5086을 사용하여 실험하였을 경우, 피로크랙 발생수명은 위의 변수를 포함한 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$N_i = \left(\frac{A_{pe}}{9.0 \times 10^4} \right)^{-0.76}$$

(2) 미소원공결합사이의 각도가 $\theta=45^\circ$ 이고, 거리 l (여기서, $l=L/r$, L =미소원공중심사이의 거리, r =미소원공의 반지름) ≥ 6 일 때, 두 미소원공결합 사이에서 발생한 피로크랙은 간섭을 일으킨다. 즉 피로크랙전파속도와 방향이 상대편 크랙의 영향을 받아 변화한다. $\theta=45^\circ$ 이고 $l > 6$ 일 때는,

먼저 발생한 주크랙의 영향으로 상대편 원공에서 늦게 발생한 짧은 크랙은 성장을 멈추고, 주크랙은 계속 전파한다.

참고문헌

- (1) 송삼홍, 김진봉, 1994, "유한요소해석에 의한 미소원공주위의 응력해석," 대학기계학회논문집, 제18권, 제3호, pp. 555~564.
- (2) Murakami and S. Nemat-Nasser, 1982, "Interaction Dissimilar Semi-elliptical Surface Flaws Under Tension and Bending," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 16, pp. 373~386.
- (3) Heath, B. J. and Grandt, Jr. A. F., 1984, "Stress Intensity Factors for Coalescing and Single Corner Flaws Along a Hole Bore in a Plate," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, NO. 4, pp. 665~673.
- (4) Song, S. H. and Lee, K. R., 1992, "Behavior of Fatigue Cracks from Hole Defects in the Surface of the Steel Plates for Pressure Vessel," *Proceedings of the VII International Congress on Experimental Mechanics*, pp. 27~32.
- (5) Song, S. H. and Lee, K. R., 1993, "The Analysis of Interaction Effects by FEM and the Effect of Single Overload on Short Crack," *Proceedings of the Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics*, pp. 275~281.
- (6) Rubinstein, A. A. and Choi, H. C., 1988, "Micro Crack Interaction with Transverse Array of Microcracks," *International Journal of Fracture* 36, pp. 15~26.
- (7) Mauge, C. and Kachanov, M., 1994, "Anisotropic Material with Interaction Arbitrarily Oriented Cracks. Stress Intensity Factors and Crack-Microcrack Interactions," *International Journal of Fracture* 65, pp. 115~139.
- (8) Soboyejo, W. O., 1992, "On the Prediction of the Fatigue Propagation of Semi-Elliptical Defects," *ASTM STP 1122*, pp. 435~438.
- (9) Forsyth, P. J. E., 1983, "A Unified Description of Micro and Macroscopic Fatigue Crack Behavior," *Int. J. Fatigue*, pp. 3~14.
- (10) Shin, C. S., Man, K. C. and Wang, C. M., 1994,

- "A Practical Method to Estimate The Stress Concentration of Notches," *Fatigue*, Vol. 16, pp. 242~256
- (11) Schijve, J. Fraga, W. E. and Hewitt, R. L., 1986, "Comparison of an Engineering Estimate with a Numerical Solution for the Stress Concentration Factor of a Hole near a Circular Edge Notch," *Int. J. Fatigue*, July, pp. 111~118.
- (12) Socea, D. F., Dowling, N. E. and Kurath, P., 1984, "Fatigue Life Estimation of Notched Members," *Fracture Mechanics: Fifteenth Symposium, ASTM STP 833*, pp. 284~299.
- (13) Bannantine, A. and Socie, D. F., 1992, "Multiaxial Fatigue Life Estimation Technique," *ASTM STP 1122*, pp. 249~275.
- (14) Dowling, N. E., 1979, "Fatigue Notches and the Local Strain and Fracture Mechanics Approaches," *Fracture Mechanics, ASTM STP 677*, American Society for Testing and Material, pp. 247~273.
- (15) Newman, Jr. J. C., 1984, "An Elastic-plastic Finite Element Analysis of Crack Initiation, Stable Crack Growth, and Instability," *Fracture Mechanics: Fifteenth Symposium, ASTM STP 833*, American Society for Testing and Material, pp. 93~117.
- (16) Crews, Jr., J. H., 1970, "Crack Initiation at Stress Concentrations as Influenced by Prior Local Plasticity," *Achievement of High Fatigue Resistance in Metals and Alloys, ASTM STP 467*, Philadelphia, pp. 37~52.
- (17) Erdogan, F. and Sih, G. C., 1963, "On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear," *J. Basic Eng.*, 85, p. 519.
- (18) 송삼홍, 배준수, 1996, "국부 혼합응력하에서의 크랙전파방향에 대한 연구," 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, pp. 515~520.