

판재 내의 구멍 사이를 통과하는 피로크랙 전파 거동

趙 在雄\*, 李 億燮\*\*, 金 相哲\*\*

The Behavior of Fatigue Crack Propagation  
between Holes in Panel

J. U. Cho,\* O. S. Lee\*\* and S. C. Kim\*\*

Abstract

In this study, the mechanical behaviors of a center crack which propagates between two holes in a panel are investigated. It is confirmed experimentally and analytically that a center crack stops and a small crack initiates from holes and propagates to fracture because of the compressive stress arising along the path of the fatigue crack propagation. Furthermore, it is noted that regardless of the configuration of the crack and the structure, Paris' law can be applied to the fatigue crack propagation.

Key Words

Center Crack(중앙크랙), Small Crack(작은크랙), Hole(구멍), Compressive Stress(압축응력), Fatigue Crack Propagation(피로크랙진전), Paris' Law(파리스 법칙), Stress Intensity Factor Range(응력확대계수폭), Compliance(컴프라이언스)

\* 천안공업전문대학 기계과

\*\* 인하대학교 기계공학과

## 1. 서 론

재료역학적인 측면으로 보아서는 충분한 여유를 가지고 설계된 기계 구조물이 파손되는 사고가 많이 발생되고 있으며, 특히 고장력강 등과 같은 재료로 제작된 기계구조물은 항복응력보다 훨씬 낮은 저응력하에서 파괴사고가 잘 일어난다.

이들 기계 구조물의 파손은 대부분 재료 내부에 존재하고 있는 결함에서부터 발생하는 크랙진전에 의한 것이 대부분이다. 그리고 실제적으로 이들 크랙들은 밀집하여 존재하는 경우가 많기 때문에 단일 피로 크랙의 성장특성은 물론 근접 분포크랙들의 간섭, 합체에 의한 성장거동도 고려하지 않으면 안된다.

또한 크랙 상호간의 간섭현상은 중요한 연구과제 중의 하나이며 크랙진전의 양상도 단일크랙때와는 달리 특이한 현상을 나타내는 경우가 많다.

이러한 분포크랙의 발생 및 거동양상은 Stress Corrosion(1) 혹은 Corrosion Fatigue(2) 환경하에서 잘 나타나며 이들에 대하여는 파괴역학과 통계적인 방법을 이용한 여러가지 연구결과가 발표되고 있다(3-7).

내압 응력을 받으며 내측에 다수의 표면크랙이 존재하고 있을 때의 압력용기의 응력확대계수에 대하여서도 실험결과가 발표되어 있다(8).

결국, 재료의 파괴는 재료내부에 존재하고 있는 근접 분포크랙의 간섭, 합체에 의한 성장에 기인하거나, 이물질 내지 결함을 기점으로 하여 크랙의 발생 및 전파로 인하여 일어나는 것이 대부분임을 생각할 때, 크랙 선단에서의 역학적 거동을 확실히 규명할 필요가 있는 것이다.

본 연구는 실제의 기계구조물에서의 피로크랙진전 상황을 크랙 선단 주위에 대칭으로 구멍이 있는 2차원 판재로 Simulation 해석을 한 것으로, 특히 이들 구멍 사이를 통과할 때의 피로크랙전파 거동을 규명하였다.

또한, 여기에서 얻어진 결과를 구멍이 없는 판재에 대한 결과와 상호 비교하여 해석하였다. 또한 구조물 내에 볼트 구멍을 뚫고 볼트로 결합시켰을 경우, 크랙이 볼트 구멍 또는 공동(Cavity) 근처로 전파하는 경우를 고려했을 때, 구멍등에서 크랙이 전파되어

판재가 약화됨으로써 파단되는 과정을 여기에서의 실험과 Simulation 해석에 의하여 규명할 수 있도록 기초 자료, 근거를 제시하였다.

아울러 본 연구 결과는 기계구조물의 정밀 안전설계 내지 정밀 안전수명의 평가(건설업 내지 원자력 발전소등)등에도 이용이 클 것으로 예상이 된다.

## 2. 실험

### 2-1. 시편 및 실험방법

시험편 재료는 일반 구조용 압연강재(SS34)이며, 그 화학성분은 Table 1과 같으며, 인장시험에 의하여 얻은 재료의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical Composition(Wt %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu
0.05	0.005	0.31	0.006	0.008	0.05	0.01

Table 2 Results of Tensile Test

YIELD STRENGTH (MPa)	ULTIMATE STRENGTH (MPa)	MODULUS OF ELASTICITY (GPa)	POISSON'S RATIO
229	317	201	0.28

Table 3 Conditions of Fatigue Test

MEAN LOAD (N)	AMPLITUDE LOAD (N)	CYCLE RATE (Hz)
11,760	7,840	15

기본 피로시험편의 모양은 Fig. 1과 같으며 중앙에  $\phi 1mm$ 의 구멍을 뚫고 가는 실톱(두께  $T=0.35mm$ )으로 Slit 길이가  $4.1mm$ 가 될 때까지 손작업을 한 후 피로시험기로 크랙길이가  $7.8mm$ 가 될 때까지 피로크랙을 주었으며 그 하중조건은 피로시험시와 같다. 또한 구멍이 존재하는 시편은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 Fig. 1과 같은 모양의 시편에 중앙크랙을 중심으로 하여 대칭인 4개의 구멍을 가공하였다.

피로시험은 유압 Servo 피로시험기(Saginomia Co.; 10 Ton)를 사용하여 Fig. 1 및 2의 시험편들을 각각 시험기의 Chuck에 장착하고  $1/100mm$ 까지

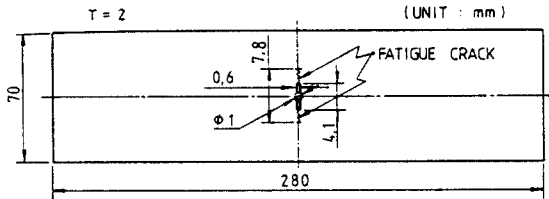


Fig. 1 Fatigue Test Specimen  
(Center Cracked Panel Without Holes)

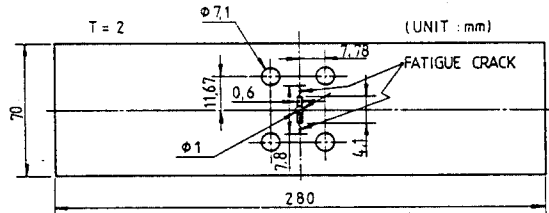


Fig. 2 Fatigue Test Specimen  
(Center Cracked Panel With Holes)

측정할 수 있는 이동식 현미경(Travelling Microscope)으로 크랙 선단을 따라가면서 반복 사이클수에 따르는 크랙길이를 측정하였다. 피로시험조건은 Table 3에 보였는데 하중조건은 ASTM E-647(9)을 근거로 하여 설정하였다.

2-2. 결 과

본 피로시험에 있어서의 반복하중의 진폭은 일정하게 하였으며 반복사이클수에 대한 크랙길이의 관계를 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다.

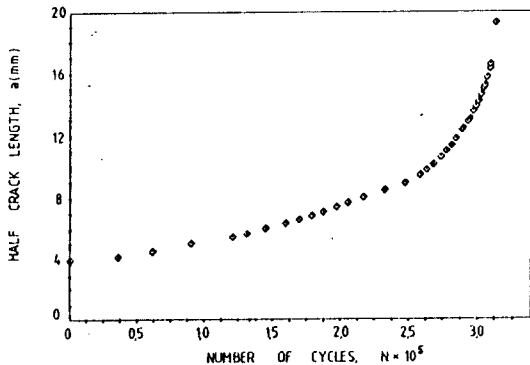


Fig. 3 Crack Growth Behavior for Center Cracked Steel Panel without Holes

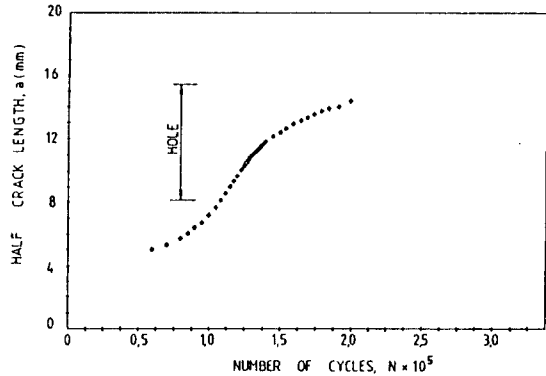


Fig. 4 Crack Growth Behavior for Center Cracked Steel Panel with Holes

Fig. 3은 중앙크랙만 있는 경우의 반복 사이클수에 대한 크랙길이의 관계를 나타낸 것이고 Fig. 4는 중앙크랙의 주위에 구멍이 존재하는 경우에 대한 반복사이클수에 따르는 크랙길이의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보인 바와 같이 중앙크랙만 있는 경우는 311, 350사이클에서 갑자기 파단되고 Fig. 4에서와 같이 구멍과 함께 있는 중앙크랙의 경우는 202, 560사이클에서 작은 크랙이 구멍주위로부터 발생하여 곧바로 파단까지 도달되었는데, 이 경우 정지된 중앙크랙의 반길이는 약 14.32mm 정도이었다.

Fig. 3의 실험결과로부터 중앙크랙만이 있는 경우에 대하여  $\Delta K$ 와  $da/dN$ 의 관계를 Log-Log Scale로 그리면 Fig. 5와 같이 된다. 이 그림에서 보는 바와 같이 양대수 그래프 용지에서  $\Delta K$ 와  $da/dN$ 는

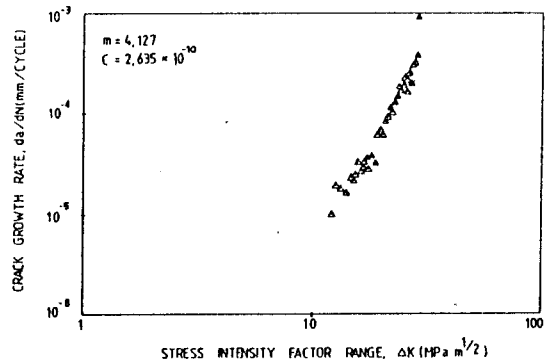


Fig. 5 Stress Intensity Factor Range vs. Crack Growth Rate for Center Cracked Steel Panel without Holes

직선관계로 나타남을 알 수 있다. 최소 자승법(Least Square Method)으로 직선의 방정식을 구하고 Paris의 식  $da/dN=C(\Delta K)^m$ 에서의 기울기( $m$ )와 상수( $C$ )를 구하면,  $m$ 와  $C$ 는 각각  $m=4.127$ ,  $C=2.635 \times 10^{-10}$ 이다.

중앙크랙만 있는 경우와 구멍이 함께 있는 중앙크랙의 경우의 크랙 진전거동을 검토하여 보면 구멍과 함께 있는 중앙크랙의 경우(Fig. 4), 초기에는 중앙크랙만 있는 경우(Fig. 3)와 거의 동일하게 진전하다가 구멍에 가까와짐에 따라 점차 그 전파속도가 커지며 구멍주위를 통과하게 되면서 그 속도는 감소함을 알 수 있다. 이 경우에 대한 시편의 최종파단 형태는 Fig. 6 및 7과 같다.



Fig. 6 Fractured Specimen  
Center Cracked Panel

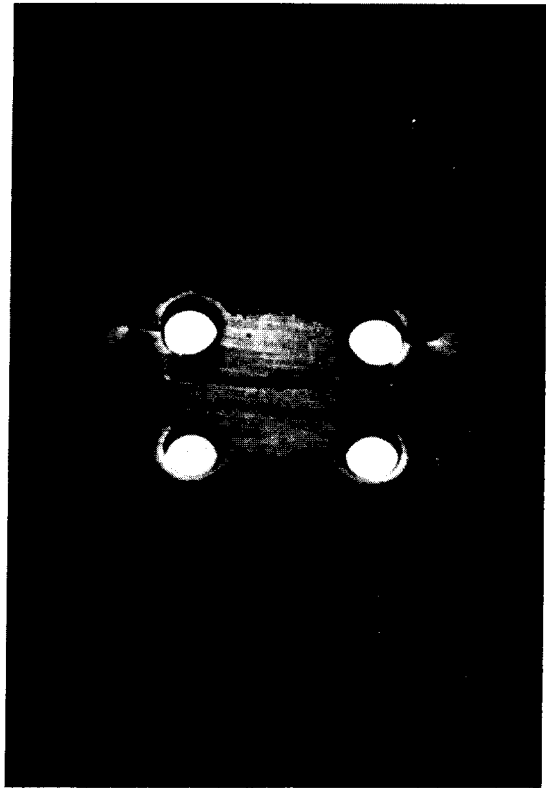


Fig. 7 Fractured Specimen  
Center Cracked Panel with Holes

Fig. 7에 보인 바와 같이 구멍이 존재하는 경우에는 중앙크랙이 진전하다가 멈추고 구멍주위로부터 크랙이 발생하였는데 이 때의 중앙크랙 반길이는 14.32mm이었다. 이는 구멍주위에 발생하는 압축응력의 영향으로 크랙선단의 응력확대계수가 심히 감소되어 중앙크랙이 멈춰지기 때문이라 사료된다.

### 2-3. 고 찰

Isida (10)는 본 연구의 기본 시험편과 같이 중앙크랙만이 있는 경우에 대하여 다음과 같은 응력확대계수( $K$ ) 값을 제시하였다.

$$K = \alpha \sqrt{a} Y$$

여기서 Y는 F(a/W)로 표시되는 형상계수이며 다음과 같이 주어진다.

$$Y = 1.77 [1 - 0.1(2a/W) + (2a/W)^2]$$

또한  $\Delta K = K_{max} - K_{min} = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \sqrt{a} Y$

$$= \frac{P_{max} - P_{min}}{A_0} \sqrt{a} Y$$

- 여기서
- b ; 공칭응력
  - a ; 크랙 반길이
  - W ; 시편의 폭
  - A<sub>0</sub> ; 시편의 단면적
  - P ; 시편에 걸리는 하중

이다.

위의 Isida의 해석결과는 피로시험시 구멍이 없는 중앙 크랙만이 있는 경우의 응력확대계수와 같다. 따라서 위의 해석결과와 유한요소법을 사용하여 얻어진 결과와 비교하고 실험결과에 대한 고찰도 하였는데, 이 경우 크랙진전에 따르는 응력확대계수 해석은 전에너지법 (Total Energy Method)을 이용하였다. 또한 Model의 치수는 피로시험편의 형상과 같이 하였고 중앙크랙주위에 상하좌우 대칭으로 위치하고 있는 구멍직경은 7.1mm로 취하였다. 유한요소해석을 하기 위한 조건으로서는 평면변형(Plane Strain)상태 하에서 균일분포인장응력은 19.6 MPa이었으며, 탄성계수(E)는 205.8GPa, Poisson's Ratio(ν)는 0.3으로 하였다. 중앙크랙만이 존재하고 있는 경우에 대하여 구한 크랙 반길이에 대한 응력확대계수를 Table 4에 보였는데 이 Table에는 Isida의 해로 결정된 피로시험하는 동안의 응력확대계수도 함께 보였고, 이 Table로부터 본 해석의 오차는 약 3.6% 이내에 들어 있음을 알 수 있다.

이로 미루어 본 연구에서 사용한 유한요소해석과정을 구멍이 존재하고 있을 때의 해석에 사용하여 그 결과를 상호 비교하여도 큰 오차는 없을 것으로 사료된다. 구멍이 있을 때도 역시 중앙크랙 길이의 진전에 따라 응력확대계수들을 구하였다. 이 Model 해석에서 결정한 형상계수들을 이용하여 피로시험에서의 공칭응력폭(σ<sub>max</sub>-σ<sub>min</sub>)과 똑같은 응력 즉, 112MPa을 가했을 때의 응력확대계수폭을 계산하여

시 Fig. 8과 Fig. 9에 도시하였다.

Fig. 8은 중앙크랙만이 있는 경우, 유한요소법으로 구한 크랙 반길이 a에 대한 ΔK(응력확대계수폭)의 변화를 나타낸 그림이다.

Fig. 9는 구멍이 뚫린 경우에 대한 것으로서 유한요소법에서 구한 ΔK값과 실험결과에서 구한 크랙진전속도를 da/dN=C(ΔK)<sup>m</sup>에 대입하여 위에서 결정한 C와 m을 사용하고, 역산으로 구한 실험치 ΔK값을 비교한 것인데 두 값들이 잘 일치되고 있음을 알 수 있다.

이러한 해석결과는 피로 크랙진전거동에 있어서는 크랙 및 부재의 형상에는 관계없이 Paris' Law를 일반적으로 적용할 수 있는 것을 입증하고 있다 할 수 있겠다. Fig. 9는 중앙크랙의 반길이가 14.32mm까지의 실험결과이며 실험시 중앙크랙이 이 길이까지 도달한 후 구멍으로부터 크랙이 발생함을 관찰할 수 있었다.

Fig. 8과 Fig. 9를 비교하여 보면 중앙크랙만이 있는 경우인 Fig. 8에서는 중앙크랙이 진전함에 따라 ΔK가 직선적으로 증가되나, 구멍이 있는 경우(Fig. 9)는 구멍을 향하여 중앙크랙이 진전하는 구간에서는 크랙 반길이가 약 8mm가 될 때까지 ΔK가

Table 4 Calculated K<sub>I</sub> Value by Total Energy Method for Center Cracked Panel

a	CALCULATED K <sub>I</sub> VALUE	K <sub>I</sub> VALUE BY ISIDA	ERROR (%)
3.9	2.15712	2.16994	-0.5913
4.9	2.50618	2.44280	2.5944
6	2.76979	2.72096	1.7936
7	3.01840	2.96149	1.9206
8	3.20447	3.19511	0.2923
9	3.43836	3.42522	0.3833
10	3.62287	3.65440	-0.8632
11.1	3.93387	3.90795	0.6630
12	4.03362	4.11801	-2.0498
13.16	4.23596	4.39413	-3.5996
14.32	4.83671	4.36799	3.3924

(UNITS: a=mm, K<sub>I</sub> = MPa·m<sup>1/2</sup>)

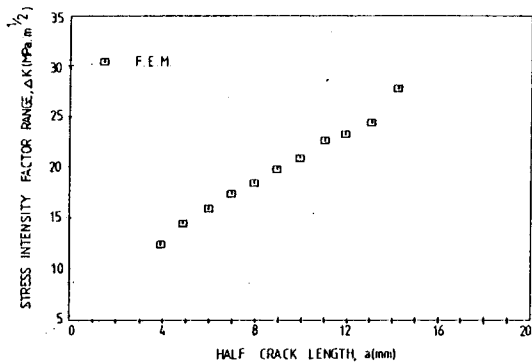


Fig. 8 Stress Intensity Factor Range vs. Half Crack Length for Center Cracked Steel Panel without Holes

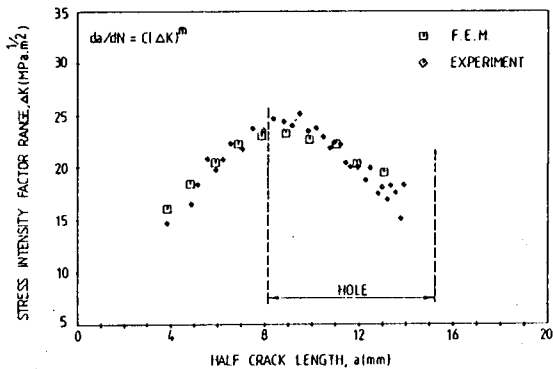


Fig. 9 Stress Intensity Factor Range vs. Half Crack Length ( $K_I$ ) of Center Cracked Steel Panel with Holes (Fatigue)

차츰 증가되다가, 구멍사이를 통과해 나가는 동안  $\Delta K$ 가 점점 감소되었으며, 구멍사이를 통과하기 전, 즉 중앙크랙 반길이 13.16mm에서 유한요소법으로 구한  $\Delta K$ 는  $19.54 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 이었다.

또한 이 부근에서 중앙크랙의 진전시에 구멍으로부터 우측으로 작은 크랙이 발생함을 확인하였는데 이 상황을 Compliance법에 의하여 고찰하였다.

본 해석에서는 앞에서 언급한 전에너지법을 사용하였는데 중앙크랙은 크랙 반길이 13.16mm에서 1.16mm씩 한 번 진전시켰고, 구멍으로부터 우측으로 발생하는 작은 크랙은 1.16mm씩 두 번 진전시켰다. 이 경우, Fig. 10(a)와 같이 중앙크랙을 진전시켰

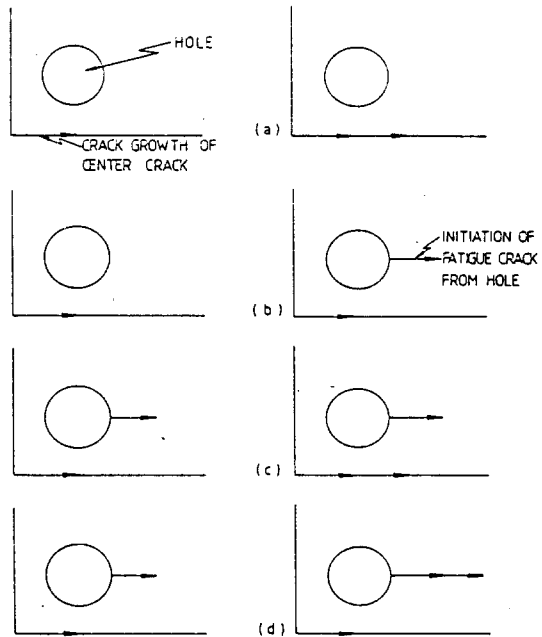


Fig. 10 Configuration of the Crack Initiated from Holes

을 때는 Compliance의 변화는  $0.1272 \times 10^{-9} \text{ m/N}$ 이었는데 Fig. 10(b)와 같이 구멍에서 작은 크랙을 진전시켰을 때는  $0.1137 \times 10^{-9} \text{ m/N}$ 이었다. 또한 작은 크랙진전이 중앙크랙 진전보다 Compliance변화가 약 10.58% 적었으나 Fig. 10(d)와 같이 구멍이 생긴 작은 크랙을 한 번 더 진전시키면 Compliance의 변화는 중앙크랙을 진전시킨 Fig. 10(c)의 경우의  $0.1233 \times 10^{-9} \text{ m/N}$ 보다 거의 2배 이상이나 되는  $0.2508 \times 10^{-9} \text{ m/N}$ 에 달함을 확인하였다.

피로시험시 파단직전에 구멍으로부터 처음에 크랙이 발생하는 경우(Fig. 10(b))가 중앙크랙이 진전하는 경우(Fig. 10(a))보다 Compliance 변화는 작았지만 구멍으로부터 피로크랙이 발생하였는데 이 현상을 유한요소법으로 해석하였다.

즉, 구멍주위에 최대 인장의 주응력이 걸리는 구멍우측부와 최소 인장의 주응력이 걸리는 구멍하단부를 택하여 그 응력 분포 양상을 Fig. 11과 같이 나타내었는데 중앙크랙 진전에 따르는 구멍우측부에서 인장응력은 높아지고 있고 또한 구멍하단부에서

의 응력도 높아지고 있다. 그림에서와 같이 구멍하단부의 응력은 크랙이 구멍 중심선으로 들어가기 전인 크랙 반길이(a)가 11.1cm가 될 때까지 10.119MPa 이었다가 크랙이 구멍 중심선으로 들어가고 난 후 즉, 크랙 반길이가 12cm가 될 때 그 응력이 2.465MPa로 4배 이상 감소된다. 크랙이 약간 더 진전하여 구멍을 벗어나가기 직전인 크랙 반길이가 13.16cm 되는 부근에서는 다소 응력이 증가되어 4.074MPa이 된다. 그러나 구멍 우측부는 크랙 반길이가 13.16cm가 될 때까지 계속 응력은 증가되어 공칭응력(19.6MPa)의 4배 이상이나 되는 84.300MPa의 높은 인장응력이 발생한다.

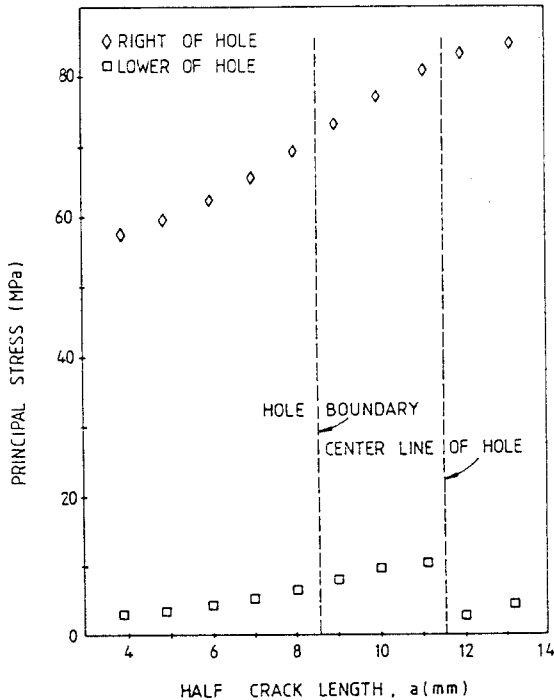


Fig. 11 Principal Stress near Hole and Tip of Center Crack

실험결과에서도 나타난 바와 같이 크랙 반길이가 13.16cm 일때 피로크랙진전은 멈추고 구멍으로부터 크랙이 생겨 파단이 일어남을 확인할 수 있었다.

즉, 피로크랙이 구멍 상하단부 사이를 전파해 나갈 때는 피로크랙 선단가까이에서의 인장응력은 계속 존재하지만 구멍들 사이에서의 압축응력(11)의 영향을 상당히 받아 피로크랙은 진전하지 못하고 정지된다고 해석된다. 그리고 구멍 주위의 우측 부근에서는 중앙크랙 선단가까이에서의 인장응력의 영향도 많이 받아 높은 응력집중이 일어나서 구멍으로부터 우측으로 피로크랙이 발생되는데 이 발생시기는 재료의 피로한계, 시편형상에 따라 다르다. 또한 일단 구멍으로부터 작은 크랙이 발생하고 나면 중앙크랙의 진전보다 작은 크랙 진전시의 Compliance 변화가 월등하게 크기 때문에 중앙크랙은 전파를 중지하고 오히려 구멍에서 발생한 크랙이 진전되어 파단이 일어나게 된다.

### 3. 결론

본 연구에서는 재료내의 중앙크랙주위에 구멍이 대칭으로 분포되어 있는 경우의 중앙크랙 선단에서의 파괴역학적 거동 및 피로 크랙의 진전상황을 실험 및 유한요소법으로 규명하였으며, 이에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 피로시험시 균일인장을 받는 판재에 있어서 피로크랙 전파양상은 재료의 피로한계, 시편형상에 따라 다르지만, 일단 구멍으로부터 작은 크랙이 발생하고 나면 중앙크랙이 구멍 중심선을 통과하는 부근에서 중앙크랙 진전보다, 작은 크랙 진전시의 Compliance 변화가 2배 이상이나 되기 때문에 중앙크랙은 전파를 중지하고, 오히려 구멍에서 발생한 크랙이 진전되어 파단이 일어나게 된다.

2. 중앙크랙만이 있는 경우로서는 중앙크랙이 진전함에 따라  $\Delta K$ 가 직선적으로 증가되나 구멍이 있는 경우는 구멍을 향하여 중앙크랙의 초기 진전시에는  $\Delta K$ 가 차츰 증가되다가 구멍사이를 통과해 나가는 동안 구멍하단부의 압축응력의 영향으로  $\Delta K$ 는 낮아진다. 중앙크랙이 구멍 중심선을 들어가기 전에서 구멍 중심선을 통과하고 난 후 구멍하단부의 압축응력의 영향으로 구멍하단부의 응력이 4배이상이나

감소되며 구멍우측부는 공칭응력의 4배이상이나 되는 높은 인장응력이 생겨 구멍우측으로부터 크랙이 생겨 파단됨을 확인하였다.

3. 피로에 의한 크랙 진전 거동에 있어서는 크랙 및 부재의 형상에는 관계없이 Paris' Law를 일반적으로 적용을 할 수가 있음을 확인하였다.

### 參 考 文 獻

1. Ichikawa, M., Takura, T. and Tanaka, S., "A Statistical Aspect of Stress Corrosion Cracking of Al High Strength Steel in NaCl Solution", Int. J. of Frac. Vol. 16, pp. 251-257, 1980.
2. Kitagawa, H., Fujita, T. and Miyazawa, K., "Small Randomly Distributed Cracks in Corrosion Fatigue", 生研 Seminar-Text, pp. 382-398, 1979.
3. Talreja, R., "Fatigue Reliability under Random Multiple-Amplitude Loads," Eng. Frac. Mech., Vol. 11, pp. 839-849, 1979.
4. Talreja, R., "On Fatigue Reliability under Random Loads", Eng. Frac. Mech., Vol. 11, pp. 717-732. 1979.
5. Tanaka, S., Ichikawa, M. and Akita, S., "Variability of m and C in the Fatigue Crack Propagation Law,  $da/dN=C(\Delta K)^m$ ", Int. J. of Frac., Vol. 17, pp. 121-124, 1981.
6. Bogdanoff, J. L. and Kozin, F., "Probabilistic Models of Fatigue Crack Growth-II", Eng. Frac., Mech., Vol. 20, pp. 255-270, 1984.
7. Tanaka, S., Ichikawa, M. and Akita, S., "A Probabilistic Investigation of Fatigue Life and Cumulative Cycle Ratio," Eng. Frac. Mech., Vol. 20, pp. 501-513, 1984.
8. Baratta, F.I., "Stress Intensity Factors for Internal Multiple Cracks in Thick Walled Cylinders Stressed by Internal Pressure Using Load Relief Factors", Eng. Frac. Mech., Vol. 10, pp. 691-697, 1978.
9. Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates above  $10^{-8}$  m/Cycle E647-83, Annual Book of ASTM Standards, 1983.
10. Brown, W.F. and Srawley, J.E. after Isida, M. (Unpublished), Plain Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials, ASME, Special Technical Publication, No. 410.
11. 西田正孝, "應力集中", 森北出版株式會社, p. 217, 1967.