

〈論 文〉

# 구멍 또는 이물질 사이를 통과하는 피로크랙 전파거동

조재웅\* · 김상철\*\* · 이억섭\*\*

(1989년 10월 26일 접수)

## The Behavior of Fatigue Crack Propagation between the Holes or Another Materials

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

**Key Words :** Crack Propagation Rate(크랙전파속도), Bonding Force(접착력), Elastic Modulus(탄성계수), Brazing(은납땜), Fatigue Test(피로시험), Finite Element Model(유한요소모델), Stress Intensity Factor Range(응력확대계수폭), Compliance(컴플라이언스)

### Abstract

This study investigates the behavior of fatigue crack propagating between holes or holes filled with another materials. When holes or the holes filled with another materials are located symmetrically near a center crack, it is noted that the crack propagation rate is influenced by both the bonding force of the brazing part and the elastic modulus of another material. It is experimentally and analytically confirmed that the center crack stops when its tip reaches near the center line of the holes and a small crack is initiated from the boundaries of holes or the holes filled with another materials and it propagates to final fracture.

### 1. 서 론

충분한 여유의 강도를 갖도록 설계된 기계 구조물이 급작스럽게 파손되어 경제적으로 큰 손실을 초래하는 경우가 많이 보고되고 있으며 특히 고장력강등과 같은 고향복점을 갖는 재질로 만든 부재가 항복응력보다 훨씬 낮은 저응력하에서 파괴가 되는 사고가 잘 일어 난다.

이들 파괴는 기계 구조물을 구성하는 재료 내부에 존재하는 결함에서부터 발생하는 크랙진전에 의한 것이 대부분이다. 실제적으로 이들 크랙은 대개

밀집되어 존재하기 때문에, 단일 피로 크랙의 성장 특성과 함께 근접 분포크랙의 간섭, 합체에 의한 영향도 고려하여야 된다. 따라서 크랙 상호간의 간섭현상은 중요한 연구과제중의 하나이며 이경우 크랙진전의 양상도 단일크랙의 경우와는 달리 특이한 현상을 나타내는 경우가 많다.

현재 공업적으로 사용되고 있는 재료에는 기계적 성질이 서로 다른 물질로 이루어져 있는 것이 많고 비교적 균일재료로 알려진 강재등도 미시적으로 보면 이물질의 조합으로 이루어져 있다고 볼 수 있는 것이다. 최근에는 2종이상의 재료를 조합시켜 성형함으로써 단독 소재만으로는 나타낼 수 없는 여러 가지 기계적인 성질을 나타낼 수 있는 복합재료 분야에 대한 연구가 활발하다. 또한, 재료의 강도를 높이기 위하여 이물질을 고의적으로 첨가하는 경우

\*정회원, 천안공업전문대학 기계과

\*\*정회원, 인하대학교 공과대학 기계공학과

도 연구되고 있다<sup>(1~5)</sup>.

그러나, 재료 내부에 존재하고 있는 이물질은 분포크랙의 경우와<sup>(6~8)</sup> 같이 결함의 원인이 되고, 일반적으로 재료의 강도를 저하시키는 경우가 많다. 따라서, 이물질의 존재는 재료 강도의 향상 혹은 저하에 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

재료의 파괴는 재료내부에 존재하고 있는 근접 분포크랙의 간섭, 합체에 의한 성장으로 인하거나, 이물질 혹은 결함을 기점으로 하여 크랙이 발생하고, 이것의 전파에 기인하는 것이 대부분임을 생각할 때, 중앙 크랙 선단에서의 역학적 거동을 명확히 규명하여야 할 필요가 있다.

본 연구는 실제의 상황을 중앙 크랙 선단 주위에 대칭으로 구멍 또는 이물질을 존재시킨 2차원 판재로써 시뮬레이션해석을 한 것으로, 특히 이들 구멍 사이를 통과하는 피로크랙전파 거동을 규명하는 데 중점을 두었다. 구멍에 동종 혹은 이물질의 금속을 접착시켜서 피로시험을 행하였고, 이들 결과를 구멍이 없는 판재 및 구멍만이 있는 경우의 실험결과와 상호 비교하여 해석하였다. 이러한 사항들을 체계적으로 연구, 그 결과를 종합하여 놓으면 구조물 내에 있는 구멍 또는 리벳 구멍 등을 이물질로 채웠을 경우, 구멍이 이물질로 채워지지 않은 경우보다도 오히려 더 악화되기도 하는 현상을 규명할 수가 있다.

## 2. 시편제작 및 실험

일반구조용 압연강재(SS55) 및 7:3 황동판(Bs S1B)을 본 연구에서의 실험재료로 택하였다. 모든 시험편의 길이방향을 압연방향에 수직이 되도록 절단 가공하였으며 재료의 화학성분 및 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같다. 그리고 ASM 위원회에서 규정한 AWS<sup>(9)</sup> 중별인 BAG-7의 필러(filler)의 화학성분도 Table 1에 함께 표시하였다.

결합력을 측정하기 위한 인장시험편은 모재와 이물질을 맞점으로 은납땜(brazing)<sup>(10)</sup>하였으며 그 결합력들을 Table 2에 함께 표시하였다.

은납땜공정은 공냉시 미소한 열팽창을 수반하지만 금속조직에는 영향을 주지는 않아 재질의 변화는 거의 없기 때문에 잔류응력은 무시할 수 있다고 가정하였다. 이상의 가공작업 후에 800°C의 전기로에서 BAG-7의 필러를 사용하여 시험편 재료인 강과 황동으로 은납땜하였다. 결과적으로 구멍을 은

**Table 1** Chemical composition of specimen materials

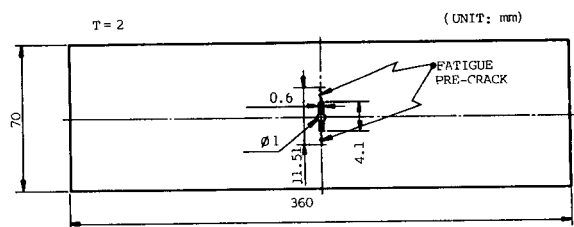
Materials	Composition(Wt %)						
	C	Si	Mn	P	S	W	Cr
Steel	0.035	0.005	0.31	0.006	0.007	0.47	0.012
Brass	Cu	Zn	Fe	Pb	Ni		
	68.19	31.45	0.141	0.01	0.072		
Bag-7	Ag	Cu	Zn	Sn	Pb+Fe		
	55~57	21~23	14~19	4.5~5.5	Rest		

**Table 2** Mechanical properties of specimen materials

Specimens Items	Composition				
	Steel	Brass	Steel + Brass	Steel + Steel	Brass + Brass
Yield strength (MPa)	490	152			
Ultimate strength (MPa)	647	340			
Modulus of elasticity (GPa)	186	97			
Poisson's ratio	0.31	0.38			
Bonding strength (MPa)			78	184	254

납땜한 시험편들은 강판을 모재로 하였을 때는 구멍내에 황동이나 강을 접착한 2종류가 되며, 황동판을 모재로 하였을 때는 구멍내에 황동이나 강을 접착한 2종류가 되어 총 4종류가 된다. 그리고 은납땜한 후 줄작업 및 버핑 작업으로 시험편의 가공면을 깨끗이 연마하였다.

Fig. 1 및 Fig. 2에 기본 피로시험편 및 구멍을 은납땜으로 메꾼 시험편을 각각 나타내었다. 강이나 황동의 기본 피로시험편 및 구멍만이 존재하는 시험편도 은납땜 작업조건인 800°C로 열을 가한 다음 공냉하였다.



**Fig. 1** Fatigue test specimen  
(center cracked panel without holes)

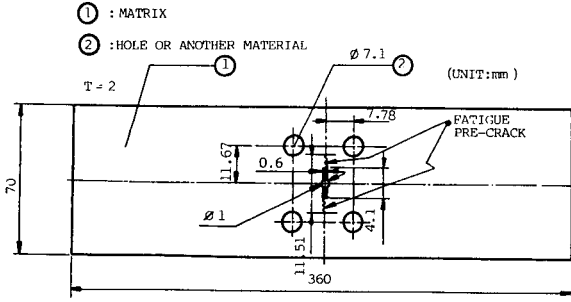


Fig. 2 Fatigue test specimen (center cracked panel with holes or holes filled with brazing)

Table 3 Conditions of fatigue test

Intents	Materials	
	Steel	Brass
Mean load(N)	14,700	11,760
Amplitude(N)	7,840	5,880
Cycle rate(Hz)	20	20

이와같이 본 연구에서는 총 8종류의 시편으로 피로시험을 수행하여 그 결과를 상호 비교검토하였다. 중앙크랙은 Figs.1, 2와 같이  $\phi 1\text{mm}$ 의 구멍을 뚫고 가는 신탄을 사용하여 암연 방향과 같은 방향으로 슬릿 폭이 0.6mm로 길이가 4.1mm가 될 때까지 손작업을 하였다.

피로시험은 유압 서보 피로시험기(10ton)를 사용하였으며, 피로하중 파형으로는 20Hz의 Sine파를 택하였다. 피로예비크랙 길이는 11.51mm로 택하였으며 피로시험조건은 Table 3에 보였다.

### 3. 실험 결과

사이클수(N)를 X축으로 잡고, 크랙 반길이(a)를 Y축으로 잡아서 Figs. 3 및 4에 피로시험의 결과를 나타내었다.

Fig. 3은 강이 모재인 경우이며 Fig. 4는 황동이 모재인 경우로서 모재만의 경우에 비하여 구멍이 존재하거나 또는 구멍을 은납매에 의하여 메꾼 경우들의 피로크랙 전파거동이 서로 다르다는 사실을 나타내고 있다. Fig. 5는 모재가 강이며 구멍에는 황동을 접착한 경우의 파단후의 사진이다.

Fig. 3은 강에 이물질이나 구멍이 있는 경우가

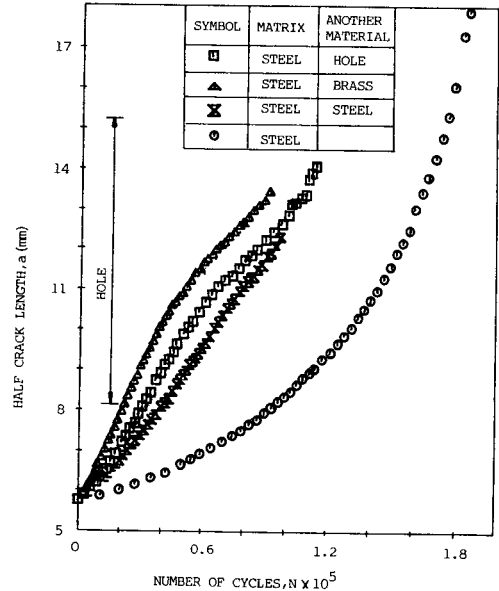


Fig. 3 Crack growth behavior for center cracked steel panels

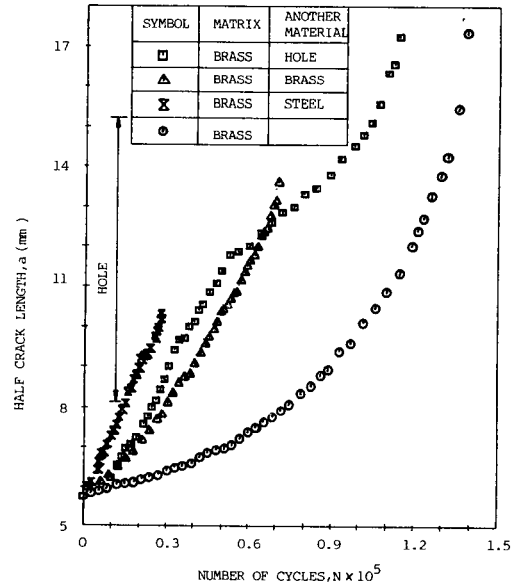


Fig. 4 Crack growth behavior for center cracked brass panels

없는 경우보다 피로 크랙이 빨리 진전함을 나타내었고 모재가 황동인 경우 (Fig. 4)도 같은 현상을 나타내었다. 모재내에 은납매한 이물질이 있는 경우는 구멍내에 부착된 이물질의 영향도 물론 받지만 모재와 이물질간의 약한 결합력으로 인하여 은

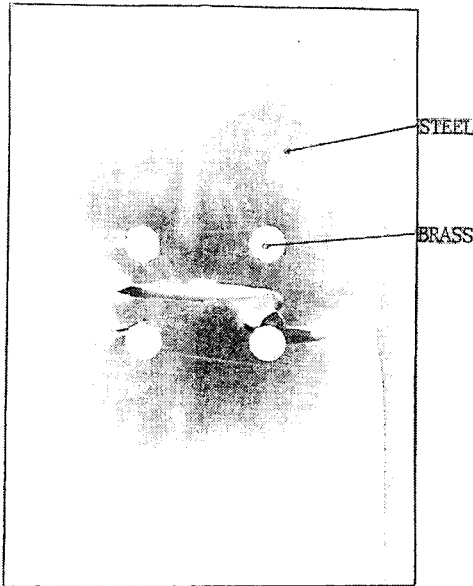


Fig. 5 Fractured specimen after fatigue test

납땀한 구멍주위에 발생한 큰 크랙의 영향을 더 많이 받아 구멍이 뚫린 경우보다도 피로 크랙이 빨리 진전되는 것을 Figs. 3 및 4에서 알 수 있다. 그러나 모재와 같은 재질로 은납땀한 경우는 구멍이 뚫린 경우보다도 피로크랙이 더 늦게 진전 된다. 이 경우에는 은납땀의 결합력이 강하기 때문에 피로크랙진전시에 구멍 주위에는 크지 않은 크랙이 발생되므로 구멍 내에 접착된 이물질의 영향을 더 많이 받는 것으로 생각된다. 즉 이 경우는 구멍내에 채워진 재질의 탄성계수의 영향으로 탄성계수가 0인 구멍이 뚫린 경우보다는 크랙진전이 느리게 된다.

또한 Fig. 3에서 강내부에 강을 접착한 경우를 강에 구멍을 뚫은 경우 및 강에 황동을 접착한 경우와 비교하여 보면 강에 황동을 접착한 경우가 가장 빨리 진전하였고, 그 다음에 강에 구멍(탄성계수 0)을 뚫은 경우 및 강에 강을 접착한 순으로 나타났다.

모재가 황동인 Fig. 4에서 황동내부에 구멍을 뚫은 경우 및 황동에 강을 접착한 경우 그리고 황동에 황동을 접착한 경우를 비교하여 보면 황동에 강을 접착한 경우가 가장 빨리 진전하였고, 그 다음 황동에 구멍(탄성계수 0)을 뚫은 경우 및 황동에 황동을 접착한 순으로 나타났다.

강의 경우와 마찬가지로 황동에 강을 접착한 경우, 접착력이 상당히 약하여 접착된 구멍 부위에서

상당히 큰 크랙이 발생하여 진전되고 황동내부에 구멍이 뚫린 경우보다 중양크랙이 더 빨리 진전됨을 알 수 있다.

그리고 황동에 황동을 접착한 경우는 황동에 강을 접착한 경우보다 은납땀한 부위의 접착력이 더 강하여 피로크랙 진전이 더 느리게 되었음을 알 수 있다.

Table 2에서 보는 바와 같이 황동에 황동을 접착한 경우(brass+brass)가 강에 강을 접착한 경우(steel+steel)보다도 접착력이 크기 때문에 은납땀한 구멍부위를 따라 크랙이 쉽게 발생 못할 것으로 생각되어 황동에 황동을 접착한 경우의 구멍이 없는 황동만의 경우에 대한 피로수명의 비가 강에 강을 접착한 경우의 구멍이 없는 강만의 경우에 대한 그 비보다 더 클 것으로 예상된다.

그러나 균일 인장을 받는 판재에 대한 피로시험 결과, 황동판이 강판보다도 접착력은 높았으나 은납땀한 구멍부위를 따라 크랙이 쉽게 발생하여 중양크랙 진전에 많은 영향을 끼친 것으로 나타났다.

크랙 반길이가 10mm로 될 때까지의 사이클수가 강내부에 강을 접착한 경우 및 구멍을 뚫은 경우(Fig. 3)에 각각  $0.7 \times 10^5$  사이클 및  $0.5 \times 10^5$  사이클이었는데 그 바는 0.71이었다.

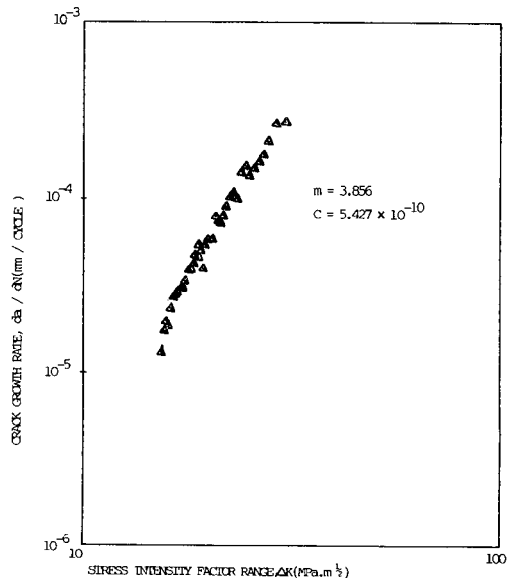


Fig. 6 Stress Intensity factor range vs. crack growth rate for center cracked steel panel without holes

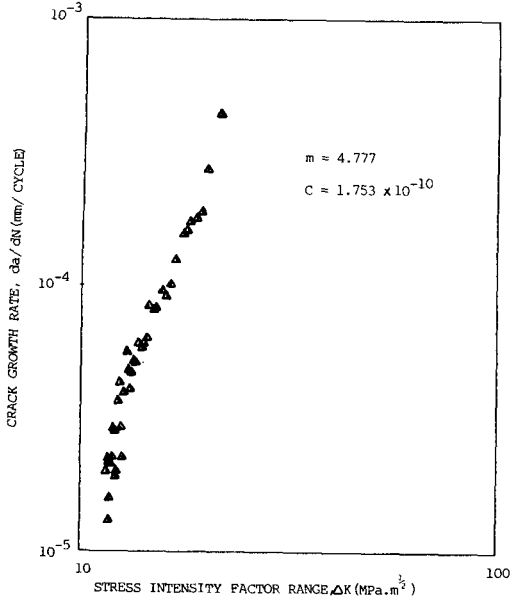


Fig. 7 Stress intensity factor range vs. crack growth rate for center cracked brass panel without holes

마찬가지로 Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 크랙 반길이 10mm로 될 때 까지의 사이클수가 황동 내부에 황동을 접착한 경우 및 구멍을 뚫은 경우에 각각  $0.5 \times 10^5$  사이클에서  $0.4 \times 10^5$  사이클로 그 비가 약 0.8정도이었다.

여기서 강경의 경우가 황동의 경우보다 그 비가 더 적어진 것을 알 수 있다. 이것은 황동보다 강경의 탄성계수가 구멍에 비하여 2배 정도나 차이가 나기 때문에 강경이 황동에 비해서 탄성계수의 영향을 더 크게 받기 때문이라 생각된다.

Figs. 6 및 7에 기본 실험인 강경 황동에 대한

$\Delta K$ 와  $da/dN$  관계를 각각 나타내었다.

이것을 Paris식  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 을 사용하여 최소자승법으로 재료상수인  $m$ 과  $C$ 를 구하면 강경의 경우는

$$m = 3.856, \quad C = 5.427 \times 10^{-10}$$

이고 황동의 경우는

$$m = 4.777, \quad C = 1.753 \times 10^{-10}$$

이 된다.

#### 4. 실험 결과에 대한 고찰

은납땀한 구멍주위에 따라 크랙이 발생할 때 이것이 피로크랙 전파에 어떠한 영향을 주는가를 고찰하기 위하여 유한요소법을 응용하였으며 사용한 요소분할은 Fig. 8과 같다. 유한요소 모델링의 정밀도를 검토하기 위하여 중앙크랙만이 있는 경우의 응력확대계수를 구하여, Isida의 수치해와 비교한 결과 오차가 3.6%이내이었다.

Fig. 9에서는 강경에 구멍이 뚫린 경우, 유한요소법에서 구한  $\Delta K$ 값과 실험에서의 크랙 진전속도를  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 에 대입하여 위에서 결정된  $C$ 와  $m$ 을 이용하여 역산으로 구한 실험치  $\Delta K$ 의 값을 비교한 것으로써 서로 잘 일치되고 있음을 알 수 있다.

또한, Fig. 9에서 특기할 수 있는 것은 구멍을 향하여 중앙크랙이 진전할 때 초기에는  $\Delta K$ 가 증가되다가 구멍사이를 통과해 나가는 동안  $\Delta K$ 가 점점 낮아져 구멍사이를 다 통과하기전, 즉 중앙크랙 반길이 13.24mm에서 유한요소법으로 구한  $\Delta K$ 가 19.54 MPa·m<sup>1/2</sup>으로 감소되는 현상이다. 그리고 중앙크랙의 진전과 구멍에서의 작은 크랙진전에 대한 고찰을 하기 위하여 유한요소법으로 컴플라이

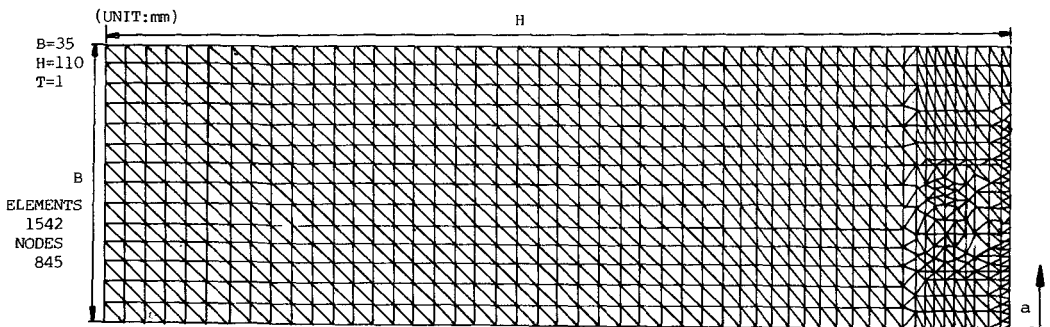


Fig. 8 Finite element model for numerical analysis (center cracked panel)

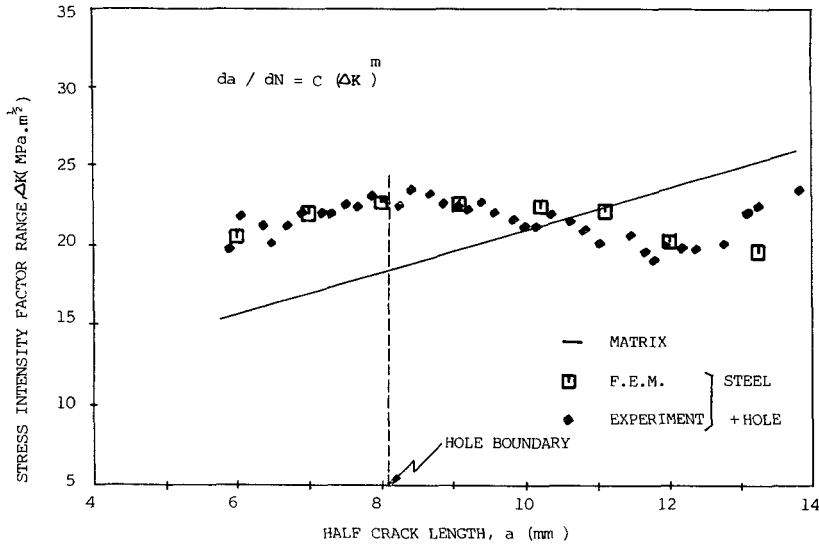


Fig. 9 Stress intensity factor range vs. half crack length ( $K_I$  of steel+hole center cracked panel (fatigue))

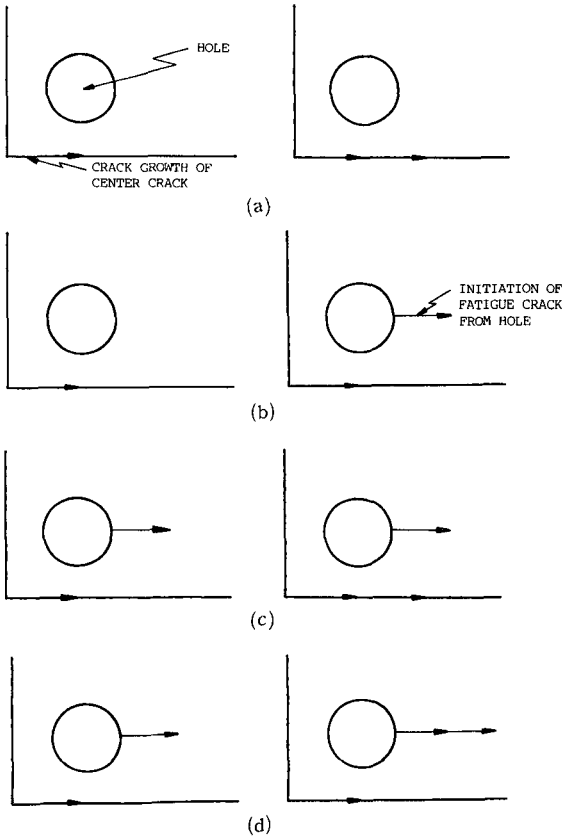


Fig. 10 Configuration of the crack initiated from the holes

언스를 계산하였다.

Fig. 10(a)와 같이 중앙크랙을 진전시켰을 때 컴플라이언스 변화는  $1.209 \times 10^{-10} \text{ m/N}$  이었으며, Fig. 10(b)와 같이 구멍에서 작은 크랙을 진전시켰을 때의 컴플라이언스 변화는  $9.946 \times 10^{-11} \text{ m/N}$  이었다. 즉 작은 크랙 진전시가 중앙크랙 진전시 보다 컴플라이언스 변화가 약 17.7% 정도 감소되었으나 Fig. 10(d)와 같이 구멍에 생긴 작은 크랙을 한 번 더 진전시키면, 컴플라이언스의 변화는 중앙크랙을 진전시킨 Fig. 10(c)의 경우인  $1.165 \times 10^{-10} \text{ m/N}$  보다 거의 1.9배 이상이나 되는  $2.221 \times 10^{-10} \text{ m/N}$ 에 달했다.

위의 해석 결과에 의하면 구멍을 향하여 중앙크랙이 진전하다가 구멍사이를 완전히 벗어나기 전에 중앙크랙 선단의 응력확대계수가 감소됨을 알 수 있는데 피로시험시에는 파단직전에 구멍으로부터 크랙이 발생되었다.

일단 구멍으로부터 크랙이 발생하면 중앙크랙 진전보다 컴플라이언스 변화가 월등하게 큰 경우인 구멍에서 발생하는 작은 크랙진전을 택하게 되면서 중앙크랙은 전파를 중지하고 오히려 구멍에서 파단이 일어남을 알 수 있다<sup>(11)</sup>.

Fig. 11은 강내부에 강을 접착한 경우와 강자체에 대한 중앙크랙 진전에 따르는  $\Delta K$ 의 변화를 표시한 것이다.

강내부에 강을 접착한 경우의 실험결과로 부터

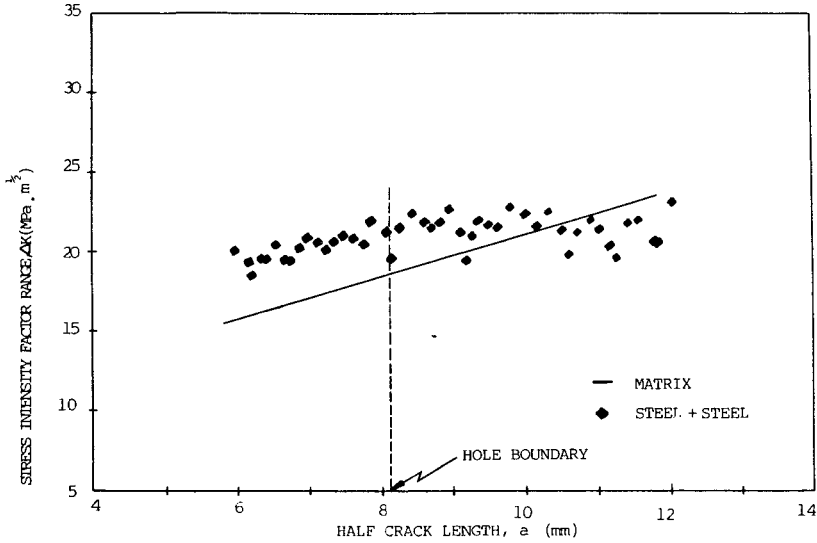


Fig. 11 Stress intensity factor range vs. half crack length ( $K_I$  of steel, steel+steel center cracked panels)

역산한  $\Delta K$ 는 강자체보다는 크게 나타났는데 이는 피로크랙 진전시 강을 접착한 구멍 부위를 따라 크랙이 생겨났음을 의미하는 것으로 이러한 사실은 실험으로도 확인되었다.

Fig. 12는 강내부에 강을 접착한 경우 구멍주위에 크랙이 발생하였다고 가상하여 유한요소법으로써  $\Delta K$ 를 구하여 실험치와 대조하여 본 것이다.

이 그림은 은납땜한 부위중 가장 큰 응력이 발생

하는 부분에 크랙이 발생하는 경우에 대하여 중앙크랙이 진전함에 따르는  $\Delta K$ 의 변화를 해석한 것으로 은납땜한 구멍주위의 크랙의 크기는 그림에서 보인 바와 같은 2가지로 택하였다.

실험으로 결정한  $\Delta K$ 와 잘 일치하는 것을 이 그림에서도 알 수 있으며 피로시험시 은납땜한 부위에 그림에 표시한 바와 같이 초기에 크랙이 발생하여 중앙크랙이 진전함에 따라 점차 은납땜한 왼쪽

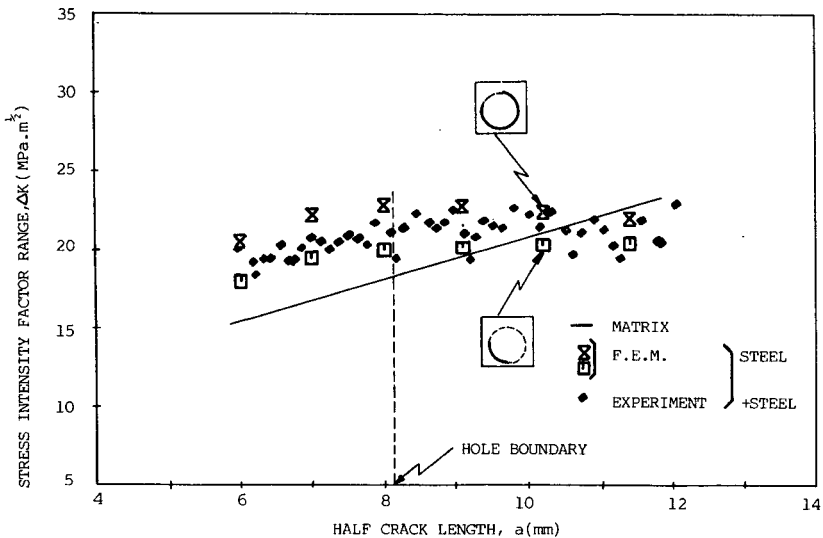


Fig. 12 Stress intensity factor range vs. half crack length ( $K_I$  of steel+steel center cracked panel (fatigue))

아래 부위로 부터 오른쪽 위 부위로 반원형 크랙이 생겨서 성장됨을 알 수 있다.

Fig. 12의 실험 데이터는 중앙크랙 반길이 12.25 mm까지의 것으로서 실험시에는 중앙크랙이 이 길이까지 도달한 후 접착된 구멍 부위에서 파단이 일어났다.

Fig. 13(a), (b), (c), (d)는 접착된 구멍부위를 따라 상당히 찢어져 나갔을 때 그 구멍주위에서 발생하는 작은 크랙을 나타내고 있다.

Fig. 13(a)와 같이 중앙크랙을 진전시켰을 때는 컴플라이언스의 변화는  $1.547 \times 10^{-10}$  m/N이었는데, Fig. 13(b)와 같이 접착된 구멍에서 작은 크랙을 진전시켰을 때는  $1.052 \times 10^{-10}$  m/N이었다. 이 경우 작은 크랙 진전시가 중앙크랙 진전시 보다 컴플라이언스 변화가 약 32% 정도 적었으나 Fig. 13(d)와 같이 접착된 구멍에서 생긴 작은 크랙을 한 번 더 진전시키면, 컴플라이언스의 변화는 중앙크랙을 진전시킨 Fig. 13(c)의 경우인  $1.580 \times 10^{-10}$  m/N보다 거의 1.375배 이상이나 되는  $2.172 \times 10^{-10}$  m/N로 나타났다.

위 해석결과로부터 피로시험시 접착된 구멍을 향하여 중앙크랙이 진전하다가 원형으로 은납땀한 부분을 통과하기 전인 크랙 반길이 11.4mm 부근에서 중앙 크랙 선단의 응력확대계수가 감소되어 중앙크랙 진전은 멈추고 구멍으로부터 작은 크랙이 발생, 진전하여 파단함을 입증하여 준다.

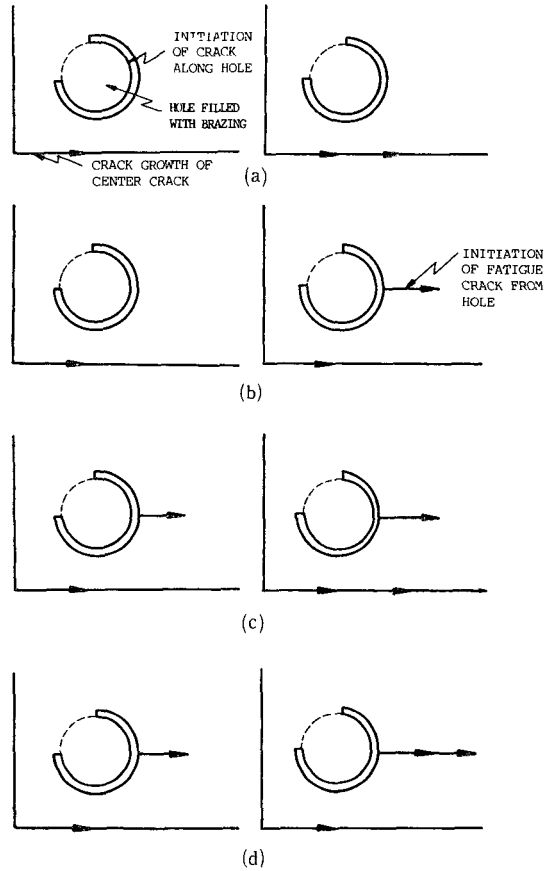


Fig. 13 The configuration of the crack initiated from the holes filled with brazing

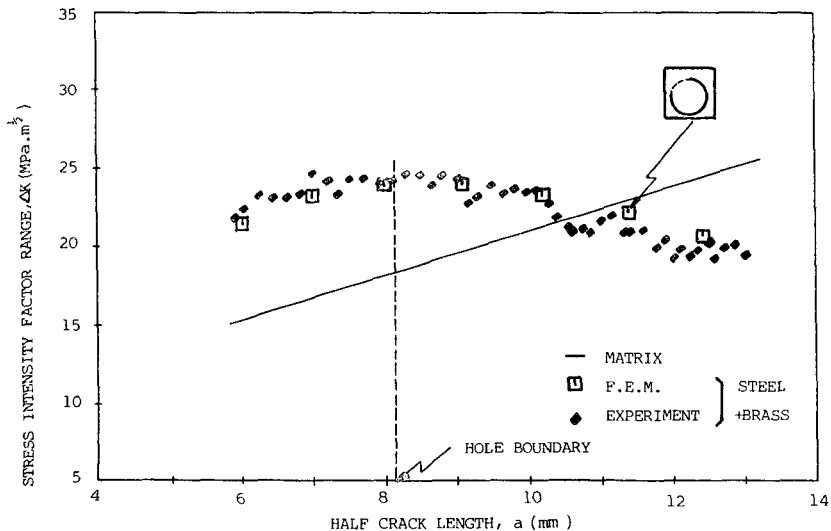


Fig. 14 Stress intensity factor range vs. half crack length [ $K_I$  of steel+brass center cracked panel (fatigue)]



Fig. 14는 강내부에 황동을 접착한 경우, 유한요소법으로써  $\Delta K$ 를 구하여 그 실험치와 대조한 것으로 그림과 같이 접착된 구멍부위에 발생하는 응력에 비해 접착력이 상당히 약하여 접착된 구멍주위에서 그림과 같이 상당히 큰 크랙이 초기단계부터 발생함을 알 수 있다.

이 경우도 유한요소법으로 구한  $\Delta K$ 값과 실험치에서 구한  $\Delta K$ 값은 잘 일치되고 있으며 강 내부에

강을 접착한 경우처럼 실험시 중앙크랙이 이 길이까지 도달한 후 접착된 구멍부위에서 파단이 일어났다.

Fig. 15는 황동에 구멍을 뚫은 경우, 실험결과와 유한요소법에 의한 해석결과를 비교한 것인데 실험 결과는 해석결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 16은 황동내부에 황동을 접착한 경우와 황동자체에 대한 중앙크랙 진전에 따르는  $\Delta K$ 의 변

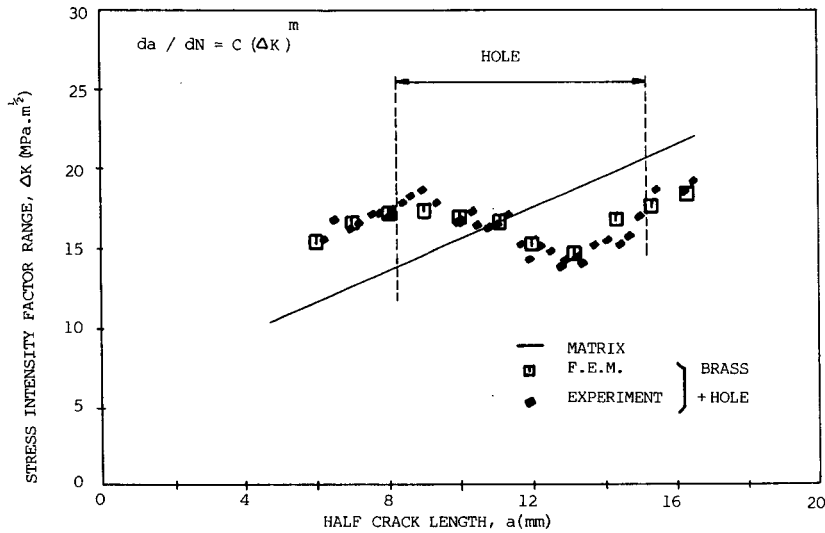


Fig. 15 Stress intensity factor range vs. half crack length ( $K_I$  of brass+hole center cracked panel (fatigue))

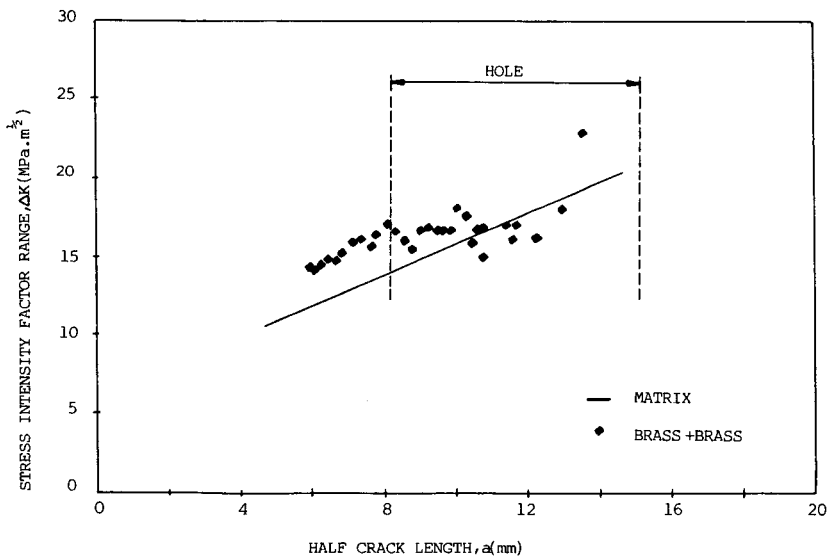


Fig. 16 Stress intensity factor range vs. half crack length ( $K_I$  of brass, brass+brass center cracked panels)

화를 표시한 것인데 황동내부에 황동을 접착시킨 경우의 응력확대계수폭이 크을 알 수 있다.

Fig. 17은 황동내부에 황동을 접착한 경우, 구멍 주위에 크랙이 발생하였다고 가상하여 유한요소법으로써  $\Delta K$ 를 구하여 실험치와 대조하여 본 것이며, 실험을 토대로 하여 Fig. 17과 같이 접착된 구멍 주위의 왼쪽 하단부에서 점차적으로 오른쪽 위 부위로 작은 크랙이 생기는 동안에 모재인 황동과

접착된 구멍부위의 상대변위에 의하여 크랙은 폭을 가졌다고 생각하여 유한요소법으로 모델링한 결과이다.

이 때도 강 내부에 강을 접착한 경우처럼 은납땀한 구멍주위의 크랙이 왼쪽 아래 부위로 부터 오른쪽 위 부위로 크게 성장하였으며, 중앙크랙 진전은 정지되고 은납땀한 주위의 원형크랙에서 작은 크랙이 진전하여서 파단되었다. 또한 구멍을 다 통과해

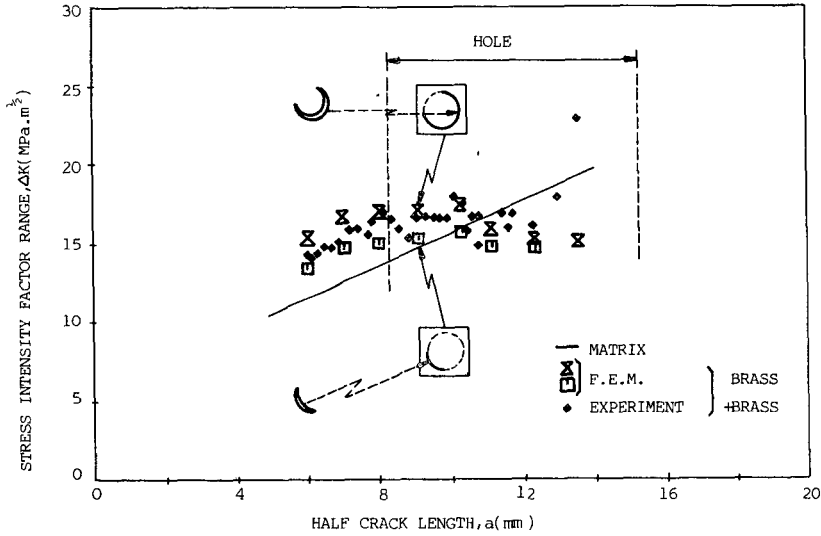


Fig. 17 Stress intensity factor range vs. half crack length [ $K_I$  of brass+brass center cracked panel (fatigue)]

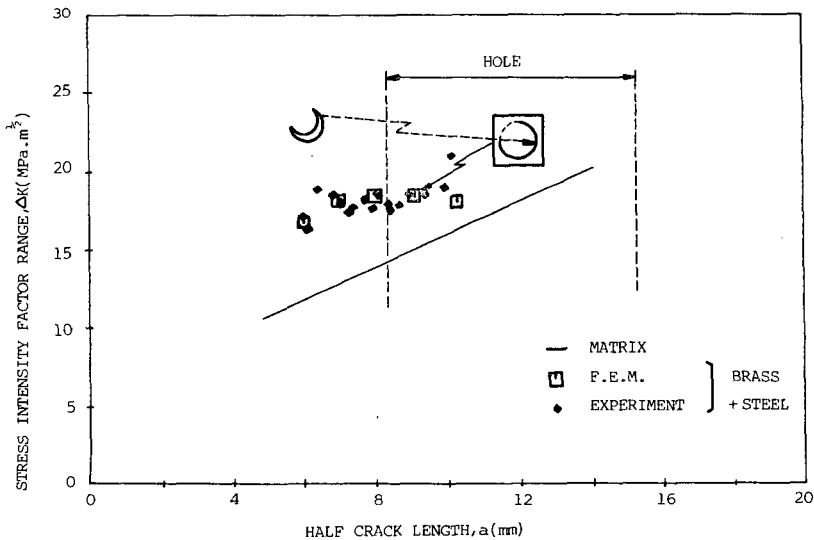


Fig. 18 Stress intensity factor range vs. half crack length [ $K_I$  of brass+steel center cracked panel (fatigue)]

나가기 전 중앙크랙 반길이 13.54mm 부근에서 유한요소법으로 구한  $\Delta K$ 가 15.26 MPa·m<sup>1/2</sup>으로 낮아졌는데 모재만 있을 때의  $\Delta K$ 의 값 19.23 MPa·m<sup>1/2</sup>보다 작아짐을 관찰할 수 있었다.

Fig. 18은 황동내부에 강을 접착한 경우이며 Fig. 14의 강내부에 황동을 접착한 경우와 같이 접착된 구멍주위에서 상당히 큰 크랙이 초기단계부터 발생함을 알 수 있다.

중앙크랙이 진전함에 따라 어느정도  $\Delta K$ 가 대략 일정하게 유지하다가 접착된 구멍사이에 들어가고 난 후 낮아지다가 그 다음 지점에서 즉 중앙크랙 반길이  $a=10.29\text{mm}$ 에서 유한요소법으로 구한  $\Delta K$ 가 17.77 MPa·m<sup>1/2</sup>으로 더 낮아짐을 Fig. 18에서 관찰할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 판재내에 존재하는 중앙크랙주위에 구멍 또는 이물질등이 대칭으로 분포되어 있는 경우, 중앙크랙선단에서의 파괴역학적 거동 및 그 크랙의 진전상황을 피로시험 및 유한요소법으로 규명하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구멍내에 모재와 같은 동종재질로 채웠을 경우는 구멍이 채워지지 않은 경우보다는 중앙크랙의 진전속도가 느려지나 구멍내에 모재와 다른 이물질로 채웠을 경우는, 접착된 구멍부위에 발생하는 응력에 비하여 이물질의 모재에 대한 접착력이 약하므로 중앙크랙이 빨리 진전된다.

(2) 구멍에 이물질이 접착된 경우는 중앙크랙이 진전함에 따라 점차 은납땀한 구멍 왼쪽 아래부위로부터 오른쪽 위 부위로 반원형 크랙이 생겨서 성장됨을 피로시험과 유한요소해석을 응용하여 밝혔다.

(3) 중앙크랙선단이 구멍의 중심선을 통과할 무렵, 중앙크랙은 멈춰지고 컴플라이언스가 많이 변

화하게 되는 구멍이나 접착된 구멍에서부터 작은 크랙이 발생, 진전하여 파단에 도달함을 컴플라이언스 변화로써 입증하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) 座古勝, 三好後郎, 1979, “複合材料の破壊力學”, 日本機械學會誌, 第82卷, 第732號, pp. 1273~1278.
- (2) Papaioannou, S.G. Hilton, P.D. and Lucas, R.A., 1974, “A Finite Element Method for Calculating Stress Intensity Factors and Its Application to Composites”, Eng. Frac. Mech., Vol. 6, pp. 807~823.
- (3) Chen, W.H. and Huang, Y.H., 1979, “On the J-Integral for Cracked Structure with Inclusions”, Int.J. of Fac., Vol. 15, pp.73~76.
- (4) Chang, R., 1979, “Finite Element Stress Analyses of a Spherical Inclusion in Metals and Alloys”, Int.J. of Frac., Vol. 15, pp. 127~130.
- (5) Kühne, K., Redmer, J. and Dahl, W., 1982, “Elastic-plastic FEM Calculations of the Stress Distribution of Notches with Different Geometry”, Eng. Frac. Mech., Vol. 16, pp. 845~855.
- (6) Kitagawa, H., Fujita, T. and Miyazawa, K., 1978, 生研セミナーテキスト, pp. 382~398.
- (7) 北川英夫, 石川晴雄, 1976, 日本機械學會講演論文集, No. 760-1, p.175.
- (8) Tanaka, S., Ichikawa, M. and Akita, S., 1981, “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.
- (9) Metals Handbook, 1971, “Welding and Brazing”, Vol. 6, pp. 148~151.
- (10) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, an American National Standard, 1983, “Section IX Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators”, pp. 147~221.
- (11) 西田正孝, 1967, “應力集中”, 森北出版株式會社, 日本 東京, p.217.