

판재에 있는 구멍 또는 이종재료 사이에서의 크랙 전파 거동

한문식*, 조재웅⁺

(논문접수일 2005. 4. 24, 심사완료일 2005. 10. 6)

A Behavior of the Crack Propagation between Holes or Another Materials on the Panel

Moon-Sik Han*, Jae-Ung Cho⁺

Abstract

This study investigates the behavior of fatigue crack propagating between holes or holes filled with another materials. When holes or the holes bonded with another materials exist near center crack symmetrically, crack propagation rate is influenced by the bonding force of brazing part and the elastic modulus ratio of another material to matrix. 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. The mechanical behaviors of center crack near another materials are also investigated.

Key Words : Hole(구멍), Another material(이종재료), Center crack(중앙크랙), Crack propagation rate(크랙전파속도), Bonding force(결합력), Elastic modulus ratio(탄성계수비)

1. 서론

일반적으로 강도상에 있어서 충분한 여유를 가지고 설계된 기계 내지 구조물에 있어서 파손이 일어나는 경우가 허다하며, 특히 고장력강등과 같은 경우 의외로 항복응력보다 훨씬 낮은 저응력하에서도 파괴가 잘 일어난다. 왜냐하면 기계 내지 구조물의 파손은 대부분 재료 내부에 존재하고 있는 결함에서 발생하는 크랙진전에 의한 것이기 때문이다. 그리고 실제적으로 이들 크랙은 밀집하여 존재하는 일이 허다하기

때문에 단일 피로크랙의 성장 특성과 함께 근접 분포 크랙의 간섭, 합체에 의한 성장도 생각하지 않으면 안된다. 또한 크랙 상호간의 간섭은 중요한 연구 대상의 하나로서 크랙진전의 양상도 단일 크랙때와는 달리 특이한 현상을 나타내는 경우가 많다. 한편, 현재 공업상 사용되고 있는 재료를 생각하여 볼 때 성질이 서로 다른 물질로 이루어져 있는 것이 많고 비교적 균일재료로 알려진 강재 등도 미시적 입장에서 보면 이물질의 조합으로 이루어져 있다고 볼 수 있다. 최근에는 2종 이상의 재료를 조합시켜 성형하는 것에 의해서 소재 단

* 계명대학교 기계·자동차공학부 (sheffhan@kmu.ac.kr)
주소: 704-701 대구광역시 달서구 신당동 1000

+ 공주대학교 기계·자동차공학부

독으로는 가질 수 없는 성질을 발휘 할 수 있는 재료인 복합 재라 부를 수 있는 재료분야에 대한 연구가 급속한 진보를 이루고 있다⁽¹⁻³⁾. 또한 재료의 강도를 높이기 위하여 이물질 을 고의적으로 첨가하는 경우도 있고 이와 같은 복합재료에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 재료내부에 존재하고 있는 이물질은 분포크랙의 경우와 같이 결함의 원인이 되고, 일반적으로 재료의 강도를 저하시킨다⁽⁴⁻⁷⁾. 따라서, 이물질의 존재도 재료강도의 향상내지 저하에 끼치는 영향이 큼을 알 수 있다. 결국 재료의 파괴는 재료 내부에 존재하고 있는 근접 분포크랙의 간섭, 합체에 의한 성장으로 인하거나, 이물질내지 결함을 기점으로 하여 크랙의 발생 및 전파로 인하여 일어나는 것이 대부분임을 생각할 때, 크랙 선단에서의 역학적 거동을 확실히 규명할 필요가 있다. 기존의 연구에서는 이물질이 있는 복합재료의 피로 파단시에 그 재질의 강화나 약화에 대한 체계적인 규명이 드문 실정이다. 그러나 본 연구에서는 이물질을 포함하고 있는 재료에 대한 강도를 파괴역학적 방법으로 평가하는 기초적 연구로서 중앙균열에 대칭으로 구멍이 존재하거나 이물질로 접착된 구멍이 존재할 때의 중앙균열 진전 속도는 은납땀한 부분의 접착력과 모재와 이물질과의 탄성계수비에서도 복합적으로 영향을 받으며 중앙 균열 진전은 멈추고 구멍이나 접착된 구멍에서부터 발생한 작은 균열이 발생, 진전하여 파단에 이르는 현상을 실험과 해석에 의하여 그 현상 규명을 체계적으로 하였다.

2. 본 론

본 연구에서는 구멍 또는 이물질 근방을 통과하는 피로크랙 전파거동을 규명하기 위하여 구멍에 동종내지 이물질의 금속을 접착시켜서 피로시험을 행하였고, 이들 결과를 구멍이 없는 판재 및 구멍만이 있는 경우에 대해서도 상호 비교하여 해석하였다.

2.1 시편제작 및 실험

본 시험에서의 재료는 일반구조용 압연강재(SS55) 및 7:3 황동판(Bs S1B)을 택하였다. 모든 시험편의 길이 방향을 압연방향에 수직이 되도록 절단 가공하였으며 재료의 화학성분 및 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같다. 그리고 ASM위원회에서 규정한 AWS 종별⁽⁸⁾인 BAG-7의 Filler의 화학성분도 Table 1에 함께 표시하였다. 또한 결합력을 측정하기 위한 인장시험편은 모재와 이물질을 맞접으로 은납땀(Brazing)하였으며 그 결합력들에 대해서도 Table 2에

Table 1 Chemical composition

Materials	Components(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	15~19	4.5~5.5	Rest		

Table 2 Results of tensile test

Items	Specimens	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 force (MPa)			78	184	254	

함께 표시하였는데 모재내의 구멍에 이물질을 은납땀한 것과는 실제로 그 차이는 없다고 본다. 이물질이 들어갈 구멍은 엔드밀로써 정밀하게 뚫었다. 이상의 가공작업 후에 800℃의 전기로에서 BAG-7의 Filler를 사용하여 은납땀을 실시하였으며, 은납땀한 후 그 시험편을 줄질 및 버핑 작업으로 가공면을 깨끗이 연마하였다.

Fig. 1 및 Fig. 2에 기본 피로시험편 및 구멍을 은납땀으로 메꾼 시험편을 각각 나타내었다. 강이나 황동의 기본 피로시험편 및 구멍만을 가공한 시험편도 은납땀 작업조건인 800℃로 열을 가한 다음 상온상태에서 공냉하였다. 구멍은 시험편 재료인 강과 황동으로 은납땀하였으며 결과적으로 구멍을 은납땀한 시험편들은 강판을 모재로 하였을 때는 구멍내에 황동이나 강을 접착한 2종류가 되며, 황동판을 모재로 하였을 때는 구멍내에 황동이나 강을 접착한 2종류가 되어 총 4종류가 된다. 이와 같이 본 시험에서는 총 8종류의 시험편으로 피로시험을 하여 그 결과를 상호 비교하였다. 또한 중앙크랙은 Fig. 1과 같이 ϕ 1mm의 구멍을 뚫고 가는 실톱(두께 T=0.35mm)을 사용하여 압연 방향과 같은 방향으로 Slit 길이가 4.1mm가 될 때까지 손작업을 하였다. 피로시험

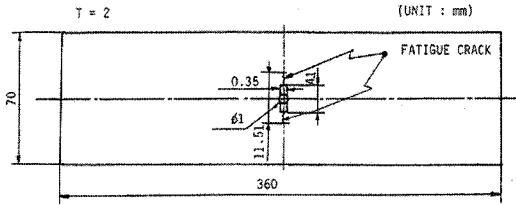


Fig. 1 Fatigue test specimen(center cracked panel without holes)

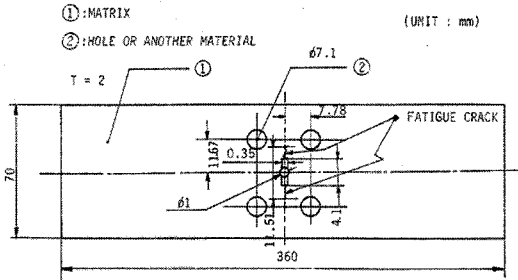


Fig. 2 Fatigue test specimen(center cracked panel with holes or holes filled by brazing)

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

은 유압 Servo 피로시험기(10 Ton)를 사용하였으며, 파형으로는 공히 20Hz의 Sine파를 택하였고 피로예비균열 길이는 11.51mm로 주었고 피로시험조건은 Table 3에 보였는데 하중조건은 ASTM E-647⁽⁹⁾을 근거로 하여 설정하였다.

2.2 실험결과

피로시험의 결과를 사이클수(N)을 x축으로 잡고, 그때의 균열 반길이(a)를 y축에 표시하여 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3은 강을 모재로 한 경우이며 Fig. 4는 황동을 모재로 한 경우로서 이 그림에는 모재만의 경우 및 구멍만이 있는 경우에 대한 실험 데이터도 함께 표시하여 놓았다. 모재만의 경우에 비하여 구멍이 존재하거나 또는 구멍을 은납땜에 의하여 때곤 경우들은 서로 다른 피로 균열전파거동을 나타내고 있다. Fig. 3에서 보면 강에 이물질이나 구멍이 있

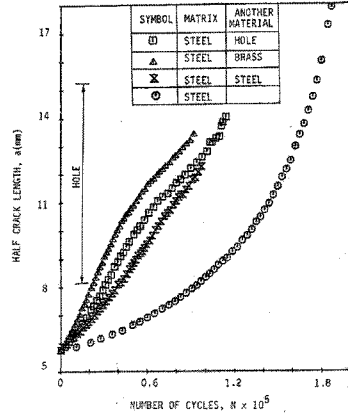


Fig. 3 Crack growth curves for steel center cracked panels

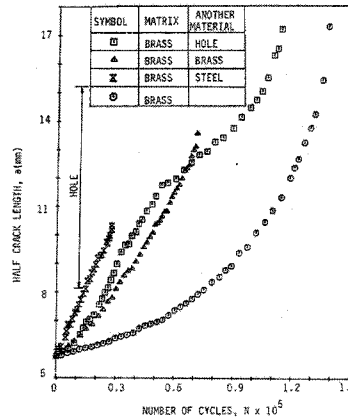


Fig. 4 Crack growth curves for brass center cracked panels

는 경우, 강만 있는 경우보다 약화되어 균열이 빨리 진전하였고 모재가 황동인 경우(Fig. 4)도 같은 현상을 나타내었다. 이것은 모재내에 은납땜한 이물질이 있을 경우 피로균열 진전시 은납땜한 부위에 균열이 생겨 구멍이 없는 판재에 비하여 약화되어 피로균열이 빨리 진전되었기 때문이다. 또한 Fig. 3에서 강내부에 강을 접착한 경우를 강에 구멍을 뚫은 경우 및 강에 황동을 접착한 경우와 비교하여 보았다. 여기서는 강에 황동을 접착한 경우가 가장 빨리 진전하였고, 그 다음 강에 구멍(탄성계수 0)을 뚫은 경우 및 강에 강을 접착한 순으로 나타났다. 이러한 현상은 모재인 강에 접착된 이물질의 모재에 대한 탄성계수비가 작을수록 균열 진전속도가 빨라지는데 그 원인이 있다. 그러나 이물질의 모재에 대

한 접착력이 약할수록 더 빨리 진전되고 강에 황동을 접착한 경우에는 구멍부위에 발생하는 응력에 비하여 접착력이 상당히 약하여 중앙균열이 진전됨에 따라 접착된 구멍주위를 따라 작은 균열이 상당히 크게 발생하였다. 강에 강을 접착한 경우는 강에 황동을 접착한 경우보다 은납땀한 부위의 접착력이 더 강하여 피로균열 진전이 더 늦어졌음을 알 수 있다. 그리고 이 경우는 강에 구멍을 뚫은 경우보다도 중앙균열의 전파속도는 늦어진다. 이러한 현상은 모재에 대한 구멍을 뚫은 이물질의 탄성계수 및 Poisson's Ratio와 관계가 있고 모재인 강에 접착된 이물질의 모재에 대한 탄성계수비가 작을수록 균열 진전속도는 빨라짐을 알 수 있다.

모재가 황동인 Fig. 4에서 황동 내부에 구멍을 뚫은 경우 및 황동에 강을 접착한 경우 그리고 황동에 황동을 접착한 경우를 비교하여 보았다. 황동에 강을 접착한 경우가 가장 빨리 진전하였고, 그 다음 순서로 황동에 구멍(탄성계수 0)을 뚫은 경우 및 황동에 황동을 접착한 순으로 나타났다. 그런데 일반적으로 탄성계수비가 심하게 차이가 나는 재료 두 가지를 접착한 경우는 접착력이 상당히 약하여진다. 따라서 강의 경우와 마찬가지로 황동에 강을 접착한 경우에는, 접착력이 상당히 약하여 접착된 구멍 부위에서 상당히 큰 균열이 발생하여 진전되고 황동내부에 구멍이 뚫린 경우보다 중앙균열이 더 빨리 진전됨을 알 수 있다. 그리고 황동에 황동을 접착한 경우는 황동에 강을 접착한 경우보다 은납땀한 부위의 접착력이 더 강하여 그 피로균열 진전이 더 늦어졌음을 알 수 있다. 또한 이 경우는 황동에 구멍을 뚫은 경우보다도 중앙균열 전파속도는 늦어지게 되는데 모재인 황동에 접착된 이물질의 모재에 대한 탄성계수비가 작을수록 균열 진전

속도가 빨라짐을 알 수 있다. 강만 있는 경우와 황동만 있는 경우에 대해 ΔK 와 da/dN 의 관계를 Fig. 5와 Fig. 6에 도시하였으며, 최소자승법을 적용하여

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

의 식 (10)으로 곡선 접합시켜 실선으로 표시하였다.

2.3 실험결과에 대한 수치 해석

은납땀한 구멍주위를 따라 균열이 발생하면 피로균열 전파에 어떠한 영향을 주는가를 고찰하기 위해서 유한요소해석을 실시하였다. 이를 위한 유한 요소 모델은 Fig. 7과 같다. 해석은 3절점의 삼각형 평면 변형을 응력 요소로서 선형 elastic-analysis 프로그램을 사용하였다⁽¹¹⁾. 또한 평면 변형 상태하에서 균일 분포하중 1372N의 인장을 주었다. 중앙균열만이 존재하고 있는 경우에 대하여 구한 균열 반길이에 대한 응력확대계수를 Table 4에서 Isida의 해⁽¹²⁾도 함께 보았다. 이 Table로부터 본 해석의 오차는 약 3.6% 이내에 들어 있음을 알 수 있다. 이로 미루어 구멍이나 이물질이 존재하고 있을 때의 해석의 상호 비교에는 큰 지장이 없는 것으로 사료된다.

Paris는 Irwin의 응력확대계수(ΔK)의 함수로서 크랙 진전 속도를 앞에서 언급한 (1)의 식으로 표현하였다. 여기서 Paris의 식은 피로 실험에 의한 데이터 값을 정할 때 사용하는 식이다. 정수 C와 m 값은 논문 본문 2.2 실험결과에서 나온 바와 같다. 따라서 $\frac{da}{dN}$ 는 크랙 길이의 증분에 대한

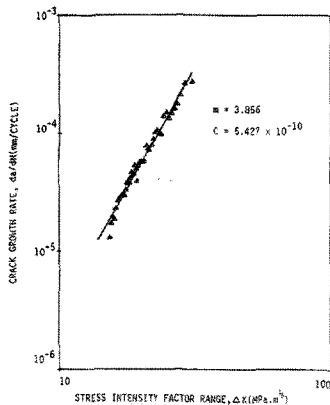


Fig. 5 Stress intensity factor range vs. crack growth rate for steel center cracked panel without holes

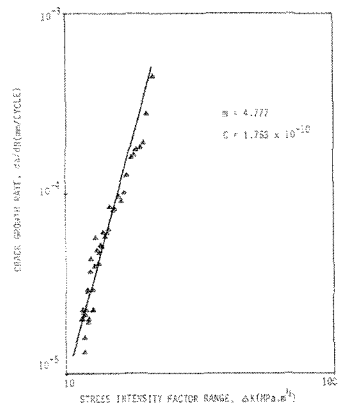


Fig. 6 Stress intensity factor range vs. crack growth rate for brass center cracked panel without holes

Table 4 Calculated K_I value by total energy method for center cracked panel(fatigue)

a	Calculated K_I value	K_I value by Isaida	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

(Unit : a = mm, K_I = MPa · m^{1/2})

반복사이클의 회수(해당 크랙길이의 증분이 그 해당 시간동안의 반복 사이클 수)이어서 $\frac{da}{dN}$ 을 계산하고 역으로 ΔK 를 구할 수가 있다. 균열이 여러개 존재할 때는 미세하게 보아서, 그 해당되는 크랙이 진전되는 것을 볼 수 있습니다. 여기서도 적용이 가능하여 그 하나의 크랙선단에서의 ΔK 를 구할 수 있다.

그리고 크랙이 존재할 때에 강도 평가의 Parameter가 되는 응력확대계수의 값을 구하는데 있어 변위법 중에서 비교적 적은 요소의 갯수로서 상당히 정확한 해를 구할 수 있는 전에너지법(Total energy method)⁽¹³⁾을 이용하였는데 컴플라이언스로 에너지 해방율(Energy Release Rate : ζ)을 구하여 응력확대 계수를 계산할 수 있다. 지금 Fig. 1에서 탄성체가 그다지 크지 않은 범위내에서는 탄성체의 하중방향으로의 변위(처짐량 δ)와 하중과의 직선관계를 유지한다. 이때 단위힘에 의하여 일어나는 변위(λ)는 다음식과 같이 표시한다.

$$z = \delta/P \tag{2}$$

또한 λ 는 아래 식에 의하여 구할 수도 있다.

$$\lambda = 2U/P^2 \tag{3}$$

여기서 U는 판의 탄성에너지로

$$U = \sum_{i=1}^n P_i \delta_i / 2$$

이고 λ 는 컴플라이언스라 칭한다. n은 시편의 하중작용 절

점수를, P_i 와 δ_i 는 각각 하중작용 절점의 작용하중과 변위량을 나타낸다. 또 에너지 해방율(ζ)은 크랙 단위 면적 증가에 따른 변형에너지 변화율로서 하중(P)이 일정할 때

$$\begin{aligned} \zeta &= dU/dA = d/dA \cdot (P\delta/2) \\ &= P/2 \cdot d\delta/dA \\ &= P/2 \cdot d/dA \cdot (P \cdot \lambda) \\ &= P^2/2 \cdot d\lambda/dA \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 dU는 변형 에너지의 변화량, dA는 균열의 미소면적 증가이다.

판의 두께를 T, 크랙의 진전길이를 da라고 할 때 dA=T · da 이므로

$$\begin{aligned} \zeta &= P^2/2 \cdot d\lambda/(T \cdot da) \\ &= P^2/2 \cdot d\lambda/dA \end{aligned} \tag{5}$$

크랙을 da만큼 진전시킴으로써 방출되는 변형에너지를 이 크랙을 닫는데 필요한 일과 등치하여 놓으면

$$\zeta = dU/dA = K_I^2/E_m \tag{6}$$

의 식을 유도할 수 있는데 여기서 E_m 은 평면응력상태인 경우 E, 평면변형상태인 경우 $E/(1-\nu^2)$ 이다. 또한 E는 탄성계수, ν 는 포아송비이다. 식 (4)로부터

$$K_I = \sqrt{E_m \cdot dU/dA} = \sqrt{E_m/T \cdot dU/da} \tag{7}$$

가 된다. 따라서 유한요소해석으로서 크랙길이에 대한 변형에너지(U)와 크랙이 da만큼 증가되었을 때의 변형에너지의 변화량 (dU)과의 관계를 (7) 식에 넣어 응력확대 계수(K)의 값을 구한다. 본 연구에서는 ΔK 값이 된다.

Fig. 8은 강에 구멍이 뚫린 경우로서 유한요소법에서 구한 ΔK 의 값을 비교한 것으로서 대략 일치되고 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 8에서도 볼 수 있는 바와 같이 구멍이 있는 경우에는, 구멍을 향하여 중앙균열이 진전하는 초기에는 ΔK 가 점점 낮아져 구멍사이를 다 통과하기 전에, 즉 중앙균열 반길이 13.24mm에서 유한요소법으로 구한 ΔK 가 19.54MPa · m^{1/2}으로 낮아짐을 보였다.

실험에 있어서는 균열이 반길이 a=14.01mm인 때 구멍으로부터 균열이 발생 진전하였는데 ΔK 가 작아진 때 균열 반 길이 a=13.24mm를 사용하여 이를 컴플라이언스로 해석하였다. 이러한 컴플라이언스 해석에서도 Fig. 7의 모델에 19.6MPa의 인장응력을 주었다.

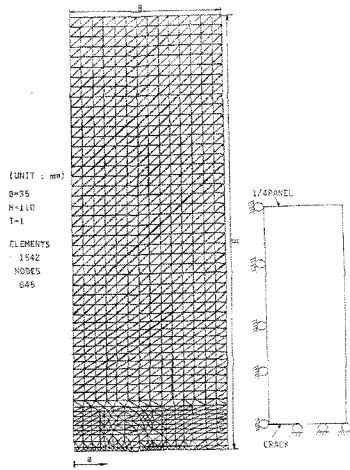


Fig. 7 Finite element model for numerical analysis and boundary condition(center cracked panel)

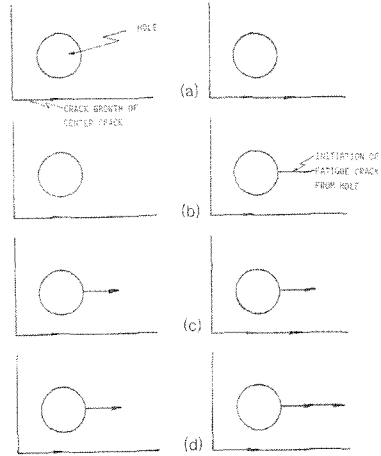


Fig. 9 Configuration of crack initiated from holes

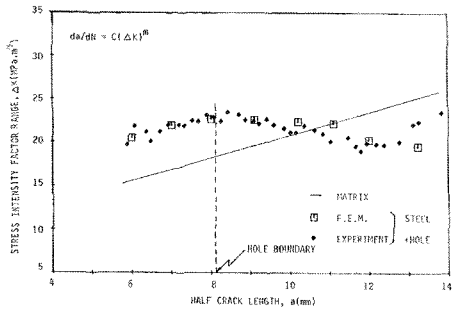


Fig. 8 Stress intensity factor range vs. half crack length (K_I of steel + hole center cracked panel(fatigue))

중앙균열은 균열 반길이 13.24mm에서 1mm만큼 한 번 진전시켰고, 구멍으로부터 우측으로 발생하는 작은 균열은 1mm씩 두 번 진전시켰다.

Fig. 9 (a)와 같이 중앙균열을 진전시켰을때 컴플라이언스 변화는 1.209×10^{-10} m/N이었는데, Fig. 9 (b)와 같이 구멍에서 작은 균열을 진전시켰을 때는 9.946×10^{-11} m/N이었다. 이 경우 작은 균열 진전이 중앙균열 진전시보다 컴플라이언스 변화가 약 17.7% 정도 적어졌다. 그러나 Fig. 9 (d)와 같이 구멍에 생긴 작은 균열을 한 번 더 진전시키면, 컴플라이언스의 변화는 중앙균열을 진전시킨 Fig. 9 (c)의 경우인 1.165×10^{-10} m/N보다 거의 1.9배 이상의 2.221×10^{-10} m/N에 달했다. 해석에 의하면 구멍을 향하여 중앙균열은 진전하다가 구멍사이를 완전히 벗어나기 전에 중앙균열 선단의 응

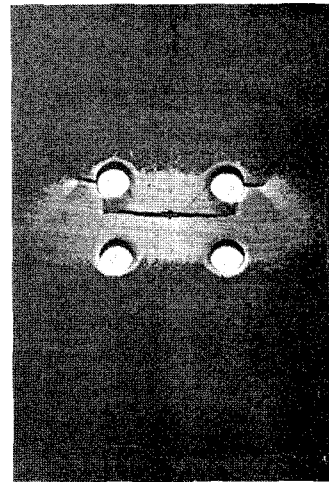


Fig. 10 Fractured specimen of steel center cracked panel with holes

력확대계수가 심히 감소되었다. 실험에 있어서는 Fig. 10과 같이 피로시험 시 파단직전에 구멍으로부터 균열이 발생되었다. 이러한 경우 일단 구멍으로부터 균열이 발생하면 중앙균열 진전보다 컴플라이언스 변화가 월등하게 많은 쪽인 구멍에서 발생하는 작은 균열 진전을 택하게 된다. 또한 중앙균열은 전파를 중지하고 오히려 구멍에서 파단이 일어남을 위의 해석결과가 입증하여 준다. Fig. 11은 강내부에 강을 집착한 경우와 강자체에 대한 중앙균열 진전에 따르는 ΔK 의 변화를 표시한 것이다.

강내부에 강을 접착한 경우의 실험치로부터 역산한 ΔK 는 강자체 보다는 크게 나타났으며 이러한 사실은 실험 도중 확인되었다.

Fig. 12는 강내부에 강을 접착한 경우, 구멍주위에 균열이 발생하였다고 가정하여 유한요소법으로써 ΔK 를 구하여 실험치와 대조하여 본 것이다. 이 그림에는 은납땀한 부위중 응력이 가장 큰 부분에 균열이 발생하였을 경우에 대하여 중앙균열이 진전함에 따르는 ΔK 의 변화를 해석하여 놓았는데 은납땀한 구멍주위의 균열의 크기는 2가지로 택하였다.

이 그림에서도 알 수 있는 바와 같이 실험에서 구한 ΔK 가 대략 이 사이 부분에 들어 있다. 또한 피로시험시 은납땀한 주위에 그림에 표시한 바와 같이 초기에 발생하여 중앙균열이 진전함에 따라 점차 은납땀한 왼쪽 아래 부위로부터 오른쪽 위 부위로 반원형 균열이 생겨서 성장됨을 알 수 있다.

Fig. 12의 실험 데이터는 중앙균열 반길이 12.25mm까지의 것이며 실험시 중앙균열이 이 길이까지 도달한 후 접착된 구멍부위에서 파단이 일어났다. Fig. 11 및 Fig. 12에서도

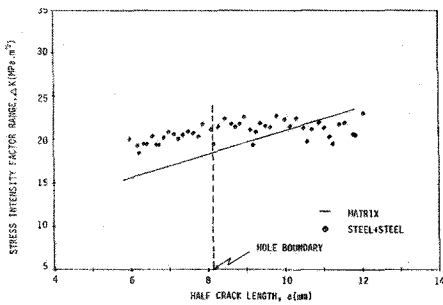


Fig. 11 Stress intensity factor range vs. half crack length (K_I of steel, steel + steel center cracked panels)

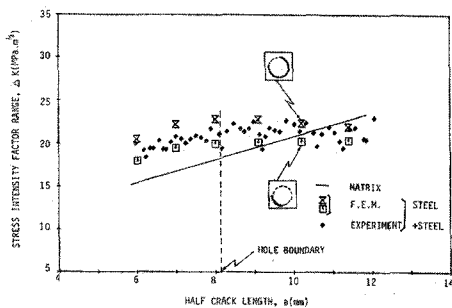


Fig. 12 Stress intensity factor range vs. half crack length (K_I of steel + steel center cracked panels(fatigue))

볼수 있는 바와 같이 중앙균열이 접착된 구멍을 향하여 나가는 동안, 점차적으로 접착된 구멍주위로 균열이 발생, 진전하면서 중앙균열의 ΔK 가 차츰 증가되다가 구멍사이를 통과해 나가는 동안에는 ΔK 가 점점 낮아진다. 또한 구멍사이를 통과해 나가는 중간지점에서 즉, 파단직전인 중앙균열 반길이 11.4mm에서 유한요소법으로 구한 ΔK 가 $22.11\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 로 되었는데 모재만 있을 때의 ΔK 의 값 $22.73\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 보다 작았다. 이때는 은납땀한 구멍부위의 균열이 왼쪽 아래 부위로부터 오른쪽 위 부위로 크게 성장된 때이다.

이 부근에서 중앙균열이 진전시에 접착된 구멍주위로부터 우측으로 작은 균열이 발생하였는데, 역시 Fig. 7과 같은 모델을 사용하여 19.6MPa의 인장응력을 주어 이 현상을 해석하였다.

중앙균열은 균열 반길이 11.4mm에서 1mm만큼 한번 진전시켰고, 접착된 구멍으로부터 우측으로 발생하는 작은 균열은 1mm씩 두 번 진전시켰다. 여기서 Fig. 13 (a), (b), (c), (d)는 접착된 구멍부위를 따라 상당히 찢어져 나갔을 때 그 구멍주위에서 발생하는 작은 균열을 나타내고 있다.

Fig. 13 (a)와 같이 중앙균열을 진전시켰을 때는 컴플라이언스의 변화는 $1.547 \times 10^{-10}\text{m/N}$ 이었는데, Fig. 13 (b)와 같이 접착된 구멍에서 작은 균열을 진전시켰을 때는 1.052

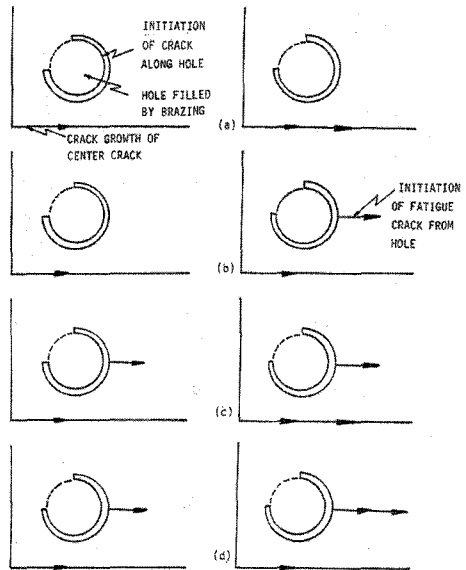


Fig. 13 Configuration of crack initiated from holes filled by brazing

$\times 10^{-10} \text{m/N}$ 이었다. 이 경우 작은 균열 진전시가 중앙균열 진전보다 컴플라이언스 변화가 약 32% 적었다. 그러나 Fig. 13 (d)와 같이 접착된 구멍에서 생긴 작은 균열을 한번 더 진전시키면, 컴플라이언스의 변화는 중앙균열을 진전시킨 Fig. 13 (c)의 경우인 $1.580 \times 10^{-10} \text{m/N}$ 보다 거의 1.375배 이상이나 되는 $2.172 \times 10^{-10} \text{m/N}$ 에 달했다. 위 해석결과는 피로시험시 접착된 구멍을 향하여 중앙균열이 진전하다가 원형으로 은납땀한 부분을 통과하기 전인 균열 반길이 11.4mm 부근에서 중앙균열 선단의 응력확대계수가 감소된다. 그리고 파단시 중앙균열 진전은 멈추고 구멍으로부터 작은 균열이 발생, 진전하여 파단함을 입증하여 준다.

한편, Fig. 14는 강내부에 황동을 접착한 경우를 유한요소법으로써 ΔK 를 구하여 그 실험치와 대조하여 보았다. 표시된 바와 같이 접착된 구멍부위에 발생하는 응력에 비해 접착력이 상당히 약하여 접착된 구멍주위에서 Fig. 15와 같이 상당히 큰 균열이 초기단계부터 발생함을 알 수 있다.

이 경우도 유한요소법으로 구한 ΔK 값과 실험치에서 구한 ΔK 값은 대략 일치되고 있다. 또한 실험 데이터로써는 중앙균열 반길이 13.385mm까지의 것이며 실험시 중앙균열이 이 길이까지 도달한 후 접착된 구멍부위에서 파단이 일어났다. Fig. 15에서도 볼 수 있는 바와 같이 접착된 구멍을 향하여 중앙균열의 초기 진전시에는 ΔK 가 차츰 증가되다가 그 구멍사이를 통과해 나가기 전 12.44mm에서 유한요소법으로 구한 ΔK 가 $20.15 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 으로 낮아졌다. 이 경우 접착된 구멍으로부터 작은 균열이 발생하였는데 해석시 중앙균열은 균열 반길이 12.44mm에서 1mm만큼 한 번 진전시켰고, 접착된 구멍으로부터 우측으로 발생하는 작은 균열은 1mm씩 두 번 진전시켰다.

본 해석에서도 19.6MPa의 인장응력을 주었는데, Fig. 13 (a)와 같이 중앙균열을 진전시켰을 때는 컴플라이언스의 변화가 $1.285 \times 10^{-10} \text{m/N}$ 이었다. Fig. 13 (b)와 같이 접착된 구멍에서 작은 균열 진전시켰을 때는 $1.389 \times 10^{-10} \text{m/N}$ 이었다. 강에 황동을 은납땀한 경우는 강에 강을 은납땀한 경우와는 달리 작은 균열 진전개시 때가 중앙균열 진전보다 오히려 컴플라이언스 변화가 약 8.1% 많아졌다. Fig. 13 (d)와 같이 접착된 구멍에서 생긴 작은 균열을 한번 더 진전시키면, 컴플라이언스의 변화는 중앙균열을 진전시킨 Fig. 13 (c)의 경우인 $1.321 \times 10^{-10} \text{m/N}$ 보다 거의 1.97배나 되는 $2.605 \times 10^{-10} \text{m/N}$ 에 달했다. 이 해석결과에 의하면 모재인 강에 황동을 은납땀한 경우가 강에 강을 은납땀한 경우에 비하여 구멍주위로부터 작은 균열이 더욱 용이하게 발생하여 빠른 속도로 진행함을 알 수 있다. 그리고 중앙균열 진전

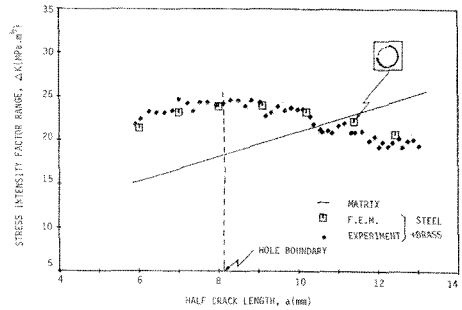


Fig. 14 Stress intensity factor range vs. half crack length (K_I of steel + brass center cracked panels(fatigue))

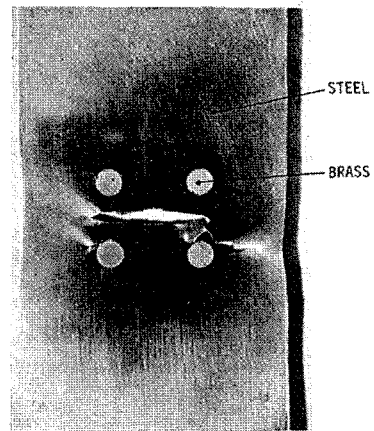


Fig. 15 Fractured specimen of steel + brass center cracked panel

은 멈추고 구멍으로부터 작은 균열이 발생 진전되어 파단되는 것을 알 수 있었다. 그리고 본 연구의 피로 시험에서는 일반 변동하중을 주고 유한요소해석에서는 정적인 하중을 부과하고 있다. Fig. 8, 12 및 14에서도 볼 수 있듯이 실험 데이터와 컴퓨터 해석에 의하여 구한 응력확대계수들이 일치가 되는 경향을 보이고 있다. 이들 자료로서 보아도 알 수 있듯이 규칙적인 변동하중을 받는 피로 시험의 유한 요소 해석을 하는데 있어 정적인 하중으로서도 타당하다고 볼 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 시험편 내에 존재하는 균열 주위에 구멍 또는 이물질 등이 분포되어 있는 경우, 균열 선단에서의 파괴역학적 거동 및 그 균열의 진전 상황을 규명하였으며 다음

과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 중앙균열에 대칭으로 구멍이나 이물질이 접착한 구멍이 존재하는 경우 이물질의 모재에 대한 탄성계수비가 클수록 중앙균열의 피로진전속도가 느려진다.
- (2) 접착된 구멍부위에 발생하는 응력에 비하여 이물질의 모재에 대한 접착력이 약할수록 중앙균열은 빨리 진전된다.
- (3) 피로시험시 균일인장응을 받는 판재에 있어서 중앙 균열 진전은 멈추고 구멍이나 접착된 구멍에서부터 작은 균열이 발생, 진전하여 파단에 도달함을 컴플라이언스 변화로써 해석하였다.

참고 문헌

- (1) Chen, W. H., and Huang, Y. H., 1979, "On the J-Integral for Cracked Structure with Inclusions," *Int. J. of Frac.*, Vol. 15, pp. 73~76.
- (2) Chang, R., 1979, "Finite Element Stress Analyses of a Spherical Inclusions in Metals and Alloys," *Int. J. of Frac.*, Vol. 15, pp. 127~130.
- (3) Hilton, P. D., and Mayville, R. A., 1984, "Finite Element Modelling in Fracture Mechanics," *Machine Design*, pp. 89~91.
- (4) Song, S. H., Choi, B. H., and Bae, J. S., 2000, "An Experimental Study on the Fatigue Behavior and Stress Interaction of Arbitrarily Located Defects(1)," *Journal of Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 24, No. 5, pp. 1288~1296.
- (5) Song, S. H., Choi, B. H., and Bae, J. S., 1998, "Crack Propagation Behavior on the Characteristic

- of the Interaction Between Two Fatigue Cracks," *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 2, pp. 191~198.
- (6) Mauge, C., and Kachanov, M., 1994, "Anisotropic Materials with Interacting Arbitrarily Oriented Cracks. Stress Intensity Factors and Crack-microcrack Interactions," *International Journal of Fracture*, Vol. 65, pp. 115~139.
- (7) Park, W. C., Huh, S. C., Jung, J. W., Lee, H. W., and Boo, M. H., 2003, "A Study on Fatigue Crack Behavior of Metal Matrix Composites for Automobile Engine," *Transactions of KSAE*, Vol. 11, No. 5, pp. 140~146.
- (8) *Metals Handbook*, 1971, "Welding and Brazing," Vol. 6, pp. 148~151.
- (9) *Annual Book of ASTM Standards*, 1983, Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates above 10^{-8} m/Cycle E647-83.
- (10) Paris, P. C., and Erdogan, F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Law," *Trans. ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol. 85, No. 4, p. 528.
- (11) Huebner, K. H., 2001, *Finite Element Method for Engineers*, Wiley Publishing Company.
- (12) Brown, w. F., and Srawley, J. E. after Isida, M. (Unpublished), "Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials," *ASME, Special Technical Publication*, No. 410.
- (13) Dixon, J. R., and Rook, L. P., 1969, "Stress Intensity Factors Calculated Generally by the Finite Element Technique," *Nature*, Vol. 224.