

구멍 또는 이종재료를 가진 재료에서의 크랙의 전파 거동

조재웅^{1*}

A Propagation Behavior of Crack in Material with Holes or Another Materials

Jae-Ung Cho^{1*}

요약 본 논문은 구멍 또는 이종 재료들로 채워진 구멍들 사이에 전파하는 피로 크랙의 거동을 연구한다. 중앙 크랙의 선단이 구멍의 중심선 가까이 도달할 때 중앙 크랙은 멈추고 작은 크랙이 구멍이나 다른 이종 재료들로 채워진 구멍 주위로부터 발생하여서 최종 파단에 이르게 된다. 다른 이종 재료들 가까이에서의 중앙 크랙의 역학적 거동이 또한 조사된다. 이러한 크랙이 진행하여 파괴에 이르는 현상을 컴플라이언스법으로 연구한다.

Abstract This study investigates the behavior of fatigue crack propagating between holes or holes filled with another materials. 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 the another materials are also investigated. The phenomenon that this crack propagates to fracture is investigated by compliance method.

Key Words : Fatigue crack propagation, Hole, Another material, Center crack, Small crack, Stress intensity factor range, Compliance

1. 서론

충분한 여유의 강도를 갖도록 설계된 기계 구조물이 급작스럽게 파손되어 경제적으로 큰 손실을 초래하는 경우가 많이 보고되고 있으며 특히 고장력 등과 같은 고풍복점을 갖는 재료로 만든 부재가 항복응력보다 훨씬 낮은 응력하에서 파괴가 되는 사고가 잘 일어난다. 이들 파괴는 기계 구조물을 구성하는 재료 내부에 존재하는 결함에서부터 발생하는 크랙 진전에 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 상호간이 간섭 현상은 중요한 연구과제 중의 하나이며 이 경우 크랙 진전의 양상도 단일 크랙의 경우와는 달리 특이한 현상을 나타내는 경우가 많다. 재료의 파괴는 재료 내부에 존재하고 있는 근접 분포크랙의 간섭, 합체에 의

한 성장으로 인하거나, 이물질 혹은 결함을 기점으로 하여 크랙의 발생 및 전파로 인하여 일어나는 것은 대부분임을 생각할 때, 크랙 선단에서의 역학적 거동을 확실히 규명할 필요가 있다[1][2][3][4][5]. 본 연구는 실제의 상황을 중앙 크랙 선단 주위에 구멍 또는 이물질을 존재시킨 시험편으로 시뮬레이션 해석을 한 것으로, 특히 이들 구멍 사이를 통과하는 피로크랙전파 거동을 규명 하는데 중점을 두었다. 구멍에 동종 혹은 이물질의 금속을 접착시켜서 피로시험을 행하였고, 이들 결과를 구멍이 없는 판재 및 구멍만 있는 경우의 실험결과와도 상호 비교하여 해석하였다. 구조물 내에 있는 구멍 또는 리벳 구멍 등을 이물질로 채웠을 경우, 구멍이 이물질로 채워지지 않은 경우보다도 오히려 약화되기도 하는 현상을 규명할 수가 있었다.

또한 이물질을 포함하고 있는 3점 굽힘 시험편에 대한 크랙 진전을 파괴역학적 방법으로 평가하였는데, 이물질의 모재에 대한 탄성계수비를 변화시켰을 경우 크랙선단에 있어서의 역학적 거동을 이론적으로 규명하였다. 이러한 사항들을 체계적으로 연구, 그 결과를 종합하여 놓으

¹공주대학교 기계·자동차공학부

*교신저자: 조재웅(jucho@kongju.ac.kr)

면 재료의 재질 향상, 연료 저장 탱크로리, 차체의 안전 설계 및 그 평가 등[6]에 이용이 클 것으로 예상된다.

2. 본 론

중양 크랙 선단 주위에 대칭으로 구멍 또는 이물질이 존재하는 판재에서 구멍사이를 통과할 때의 크랙 진전 상황들을 실험 및 해석을 하였다.

2.1 시험편 제작 및 실험

일반 구조용 압연 강재(SS55) 및 7:3 황동판(Bs S1B)을 본 연구에서의 실험 재료로 택하였다. 재료의 화학성분 및 기계적 성질은 표 1 및 표 2와 같다. 그림 1에는 기본 피로 시험편인 강에 구멍을 뚫거나 그 구멍에 은납땜으로 강이나 황동으로 메꾼 시험편을 나타내었고, 피로 시험으로서는 20Hz, Sine파의 하중 형태를 택하였다. 피로예비크랙 길이는 11.52mm로 택했고 피로시험 조건은 표 3에 보였다.

표 1. 시험편 재료의 화학적 성분들

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
	Cu	Zn	Fe	Pb	Ni		
BRASS	68.19	31.45	0.141	0.01	0.072		
	Ag	Cu	Zn	Sn	Pb+Fe		
BAG-7	55 ~57	21~23	15~19	4.5~5.5	REST		

표 2. 시험편 재료의 기계적 성질들

ITEMS	SPECIMENS		STEEL+BRASS	STEEL+STEEL
	STEEL	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

표 3. 피로 시험의 조건들

INTENTS	MATERIALS	
	STEEL	BRASS
MEAN LOAD (N)	14,700	11,760
AMPLITUDE (N)	7,840	5,880
CYCLE RATE (Hz)	20	20

2.2 실험결과 및 해석

사이클 수(N)을 X축으로 잡고, 크랙 반길이 (a)를 Y축으로 잡아서 그림 2에 피로시험의 결과를 나타내었다. 그림 2는 강이 모재인 경우로서 모재만의 경우에 비하여 구멍이 존재하거나 또는 구멍을 은납땜에 의하여 메꾼 경우들의 피로크랙 전파거동이 서로 다르다는 사실을 나타내고 있다. 강에 이물질이나 구멍이 있는 경우가 없는 경우보다 피로 크랙이 빨리 진전함을 나타내었다. 모재 내에 은납땜한 이물질이 있는 경우는 구멍 내에 부착된 이물질의 영향도 물론 받지만 모재와 이물질 간의 약한 결합력으로 인하여 은납땜한 구멍 주위에 발생한 큰 크랙의 영향을 더 많이 받아 구멍이 뚫린 경우보다도 피로 크랙이 빨리 진전되는 것을 그림 2에서 알 수 있다. 그러나

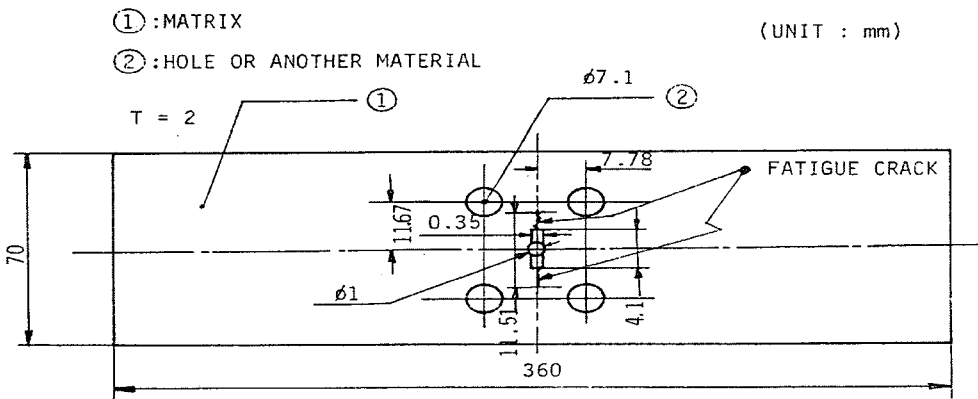


그림 1. 피로 시험편(구멍이나 은납땜으로 채워진 구멍을 가진 경우)

모재와 같은 재료로 은납땀한 경우는 구멍이 뚫린 경우보다도 피로크랙이 더 늦게 진전된다. 이 경우에는 은납땀의 결합력이 강하기 때문에 피로 크랙 진전시에 구멍 주위에는 작은 크랙이 발생되므로 구멍 내에 접착된 이물질의 영향을 더 많이 받는 것으로 생각된다. 즉 이 경우는 구멍 내에 채워진 재료의 탄성계수의 영향으로 탄성 계수가 0인 구멍이 뚫린 경우보다는 크랙 진전이 느리게 된다.

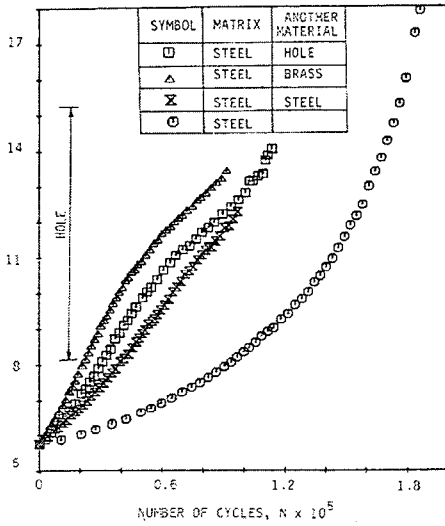


그림 2. 중앙 크랙을 가진 강판들에 대한 크랙 성장 거동

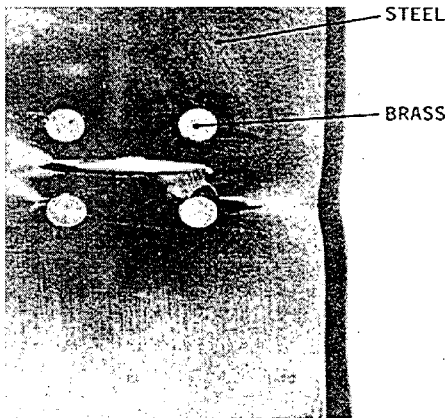


그림 3. 피로 시험후 파단된 시험편

그림 3은 모재가 강이며 구멍에는 황동을 접착한 경우의 파단후의 사진이다. 그림 4에 기본 실험인 강에 대한 ΔK 와 da/dN 의 관계를 나타내었다[7]. 은납땀한 구멍 주위에 따라 크랙이 발생할 때 이것이 피로 크랙 전파에 어떠한 영향을 주는가 고찰하기 위하여 유한요소법으로 해

석하였으며 사용한 요소 분할은 그림 5와 같고 이 정밀도는 Isida의 수치해[8]와 비교한 결과 오차가 3.6%이내이었다.

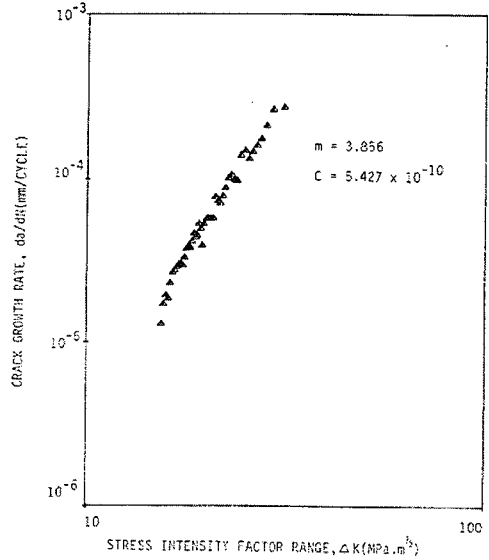


그림 4. 중앙 크랙을 가진 강판에 대한 크랙 성장 속도에 대한 응력확대계수곡 (구멍이 없는 경우)

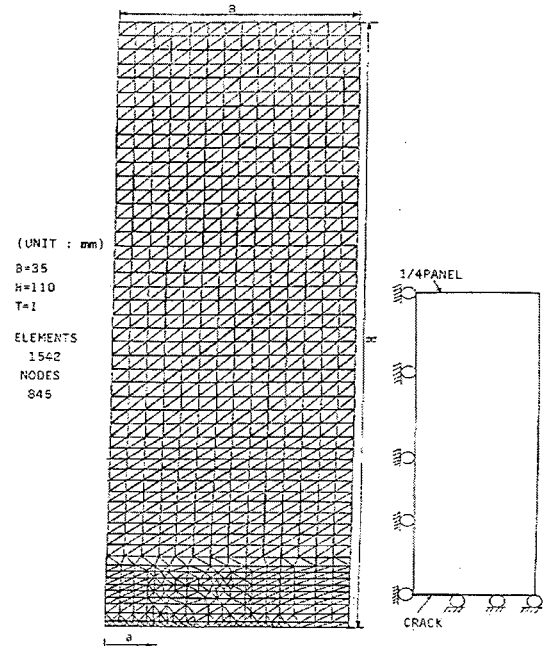


그림 5. 수치해석을 위한 유한요소모델(중앙 크랙을 가진 판)

그림 6은 강 내부에 황동을 접착한 경우를 유한요소법으로써 ΔK 를 구하여 그 실험치와 대조하여 보았는데, 표

시된 바와 같이 접착된 구멍 부위에 발생하는 응력에 비해 접착력이 상당히 약하여 접착된 구멍 주위에서 그림과 같이 상당히 큰 크랙이 초기 단계부터 발생할 수 있다. 이 경우도 유한요소법으로 구한 ΔK 값과 실험치에서 구한 ΔK 값은 대략 일치되고 있다. 또한 실험 데이터로써는 중앙 크랙 반길이가 13.385mm까지의 것이며 실험시 중앙 크랙이 이 길이까지 도달한 후 접착된 구멍 부위에서 파단이 일어났다. 그림 6에서도 볼 수 있는 바와 같이 접착된 구멍을 향하여 중앙 크랙의 초기 진전시에는 ΔK 가 차츰 증가되다가 그 구멍 사이를 통과해 나가기 전 12.44mm에서 유한요소법으로 구한 ΔK 가 20.15 MPa·m^{1/2}으로 낮아졌다. 이 경우 접착된 구멍으로부터 작은 크랙이 발생하였는데 해석시 중앙 크랙은 크랙 반길이가 12.44mm에서 1mm만큼 한번 진전시켰고, 접착된 구멍으로부터 우측으로 발생하는 작은 크랙은 1mm씩 두 번 진전시켰다. 본 해석에서도 19.6MPa의 인장 응력을 주었는데, 그림 7(a)와 같이 중앙 크랙을 진전시켰을 때는 컴플라이언스의 변화는 1.285×10⁻¹⁰m/N이었고, 그림 7(b)와 같이 접착된 구멍에서 작은 크랙을 진전시켰을 때는 1.389×10⁻¹⁰m/N이었다. 작은 크랙 진전개시 때가 중앙 크랙진전시보다 오히려 컴플라이언스의 변화가 약 8.1% 많아졌고, 그림 7(d)와 같이 접착된 구멍에서 생긴 작은 크랙을 한번 더 진전시키면, 컴플라이언스의 변화는 중앙 크랙을 진전시킨 그림 7(c)의 경우인 1.321×10⁻¹⁰m/N보다 거의 1.97배나 되는 2.605×10⁻¹⁰m/N에 달했다. 해석결과로부터 피로시험시 접착된 구멍을 향하여 중앙크랙이 진전하다가 원형으로 은납땜한 부분을 통과하기 전인 크랙 반길이가 12.44mm 부근에서 중앙 크랙 선단의 응력확대계수가 감소되어 중앙크랙 진전은 멈추고 구멍으로부터 작은 크랙이 발생, 진전하여 파단됨을 입증하여 준다. 강에 구멍이 있는 경우나 구멍에 동종 재료로서의 강으로 채워져 있는 경우도 공히 그림 3과 같은 현상을 보이고 있다.

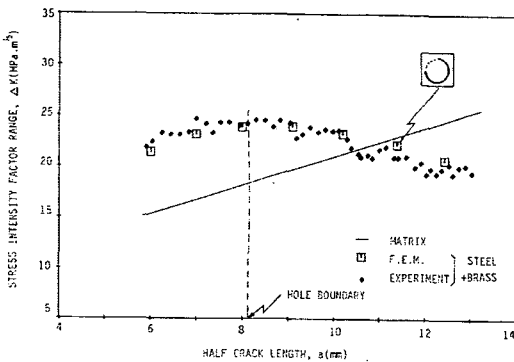


그림 6. 중앙 크랙 반 길이에 대한 응력확대계수폭, ΔK (강 내부에 황동을 접착한 경우)

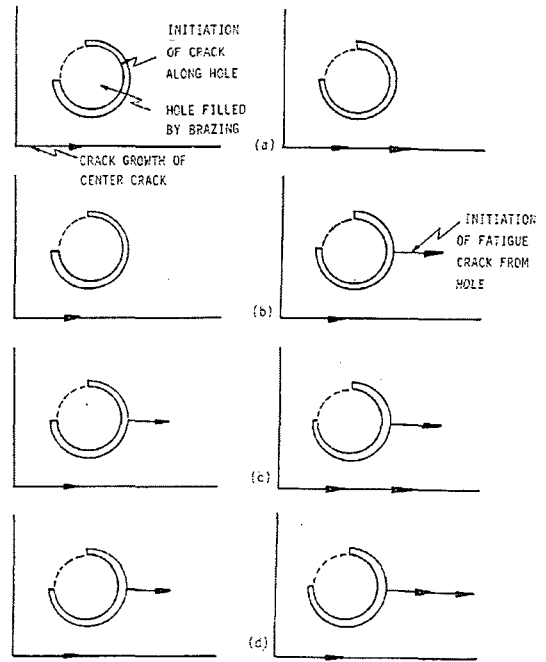


그림 7. 은납땜으로 채워진 구멍으로부터 발생하는 크랙의 형상

3. 결론

본 연구에서는 시험편 내에 존재하는 크랙 주위에 구멍 또는 이물질 등이 대칭으로 분포되어 있는 경우, 중앙 크랙 선단에서의 파괴역학적 거동 및 그 크랙의 진전 상황을 피로 시험 및 유한요소법으로 규명하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 구멍 내에 모재와 같은 동종 재질로 채웠을 경우는 구멍이 채워지지 않는 경우보다는 중앙크랙의 진전 속도가 느려진다.
- 2) 구멍 내에 모재와 다른 이물질로 채웠을 경우는, 접착된 구멍 부위에 발생하는 응력에 비하여 이물질의 모재에 대한 접착력이 약하므로 중앙 크랙이 빨리 진전된다.
- 3) 중앙크랙선단이 구멍의 중심선을 통과할 무렵, 중앙 크랙은 멈춰지고 컴플라이언스가 많이 변화하게 되는 구멍이나 접착된 구멍에서부터 작은 크랙이 발생, 진전하여 파단에 도달함을 컴플라이언스 변화로써 입증하였다.

참고문헌

- [1] S. H. Song, B. H. Choi and J. S. Bae, "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, 2000.
- [2] S. H. Song, B. H. Choi and J. S. Bae, "Crack propagation behavior on the characteristic of the interaction between two fatigue cracks," KSME International Journal, Vol. 12, No. 2, pp. 191-198, 1998.
- [3] C. Mauge and M. Kachanov, "Anisotropic materials with interacting arbitrarily oriented cracks. stress intensity factors and crack-microcrack interactions," International Journal of Fracture, Vol. 65, pp. 115-139, 1994.
- [4] W. C. Park, S. C. Huh, J. W. Jung, H. W. Lee and M. H. Boo, "A study on fatigue crack behavior of metal matrix composites for automobile engine," Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 5, pp. 140-146, 2003.
- [5] D. A. Hancq, A. J. Walters and J. L. Beuth, "Development of an object-oriented fatigue tool," Engineering with Computers, Vol. 16, pp. 131-144, 2000.
- [6] 정성찬, 김국원, "엔드밀 가공에서의 공구 변형에 대한 유한요소해석," 한국산학기술학회논문지, Vol. 6, No. 1, pp. 83-86, 2005.
- [7] P. C. Paris and F. Erdogan, "A critical analysis of crack propagation law," Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, Vol. 85, No. 4, p. 528, 1963.
- [8] M. Isida, "Effect of Width and Length on Stress Intensity Factors of Internally Cracked Plates under Various Boundary Conditions," Int. J. of Frac. Mech., Vol. 7, pp. 301-316, 1971.

조재웅(Jae-Ung Cho)

[정회원]



- 1980년 2월 : 인하대학교 기계공학과(공학사)
- 1982년 2월 : 인하대학교 기계공학과(공학석사)
- 1986년 8월 : 인하대학교 기계공학과(공학박사)
- 1988년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계·자동차공학부 교수

<관심분야>

기계 및 자동차 부품 설계 및 내구성 평가, 피로 또는 충돌시 동적 해석