

# 구멍을 통과하는 계면균열의 전파거동

이억섭\* · 윤해룡\*\* · 황시원\*\*\*  
(2000년 4월 22일 접수)

## Propagation Behavior of the Interface Crack Through a Hole

Ouk Sub Lee, Hai Long Yin and Si Won Hwang

**Key Words:** Dynamic Interface Crack Stress Field(동적 계면균열 응력장), Rayleigh Wave Velocity (레이리 탄성과 속도), Dynamic Crack Propagating Velocity(동적균열전파 속도), Dynamic Stress Intensity Factor(동적 응력확대계수)

### Abstract

The dynamic photoelasticity with the aid of Cranz-Shardin type high speed camera system is utilized to record the dynamically propagating behavior of an interface crack. This paper investigates determined the effects of the hole (existed on the path of the crack propagation) on the crack propagation behavior by comparing the experiment isochromatic fringes to the theoretical stress fields.

### 1. 서 론

산업기술이 발전함에 따라 재료에 대한 요구도 점점 높아지고 있다. 따라서 단일한 재료로 얻기 어려운 기계적 특성을 두 가지 이상의 재료를 접합시켜 사용하는 경우가 점점 많아지고 있다. 최근 자동차나 항공기 엔진의 세라믹 열충코팅, 미소전자부품의 박막코팅, 전자부품의 경남연결 등에 대한 고강도, 경량화의 목적으로 여러 종류의 이종접합재료가 개발되어 널리 사용되고 있다. 그러나 이종재료의 접합계면은 일반적으로 단상의 모재보다 파괴인성치가 낮아서 작은 외력에도 쉽게 파손될 가능성이 높다. 또 접합시의 외부적 조건의 영향으로 말미암아 접합계면에 결함이 생길 확률이 아주 높다. 본 연구에서는 충격하중을 받은 구멍이 있는 계면균열의 전파양상을 Cranz-Shardin 카메라시스템을 이용한 동

적 광탄성 실험방법으로 기록하여 계면균열의 전파거동과 접합계면에 존재하는 구멍이 계면균열의 전파거동에 미치는 영향을 분석하였다.<sup>(1~5)</sup>

### 2. 이 론

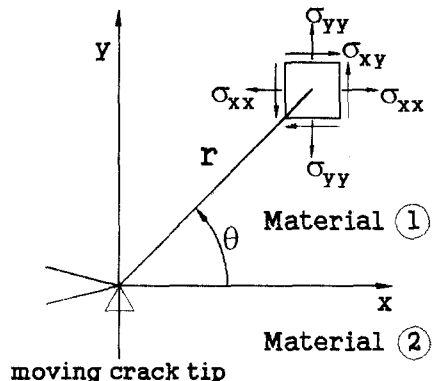


Fig. 1 A coordinate system and stress component for a small element at the dynamic interface crack tip

\* 회원, 인하대학교 기계·항공·자동차공학부

E-mail : leeos@dragon.inha.ac.kr

TEL : (032)860-7315 FAX : (032)868-1715

\*\* 회원, 인하대학교 기계공학과

\*\*\* 동양대학교 기계설계과

Fig. 1과 같은 극좌표계를 동적 계면균열 선단에 세우고 균열선단의 전파속도를  $C$  라 할 때 균열선단의 응력장은 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$\sigma_{xx}(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} [K_1 \cos(\epsilon \ln r) - K_2 \sin(\epsilon \ln r)] \hat{\sigma}_{xx0}^I(\theta, c) + \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \eta [K_1 \sin(\epsilon \ln r) + K_2 \cos(\epsilon \ln r)] \hat{\sigma}_{xx0}^{II}(\theta, c) + \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_3 \hat{\sigma}_{xx0}^{III}(\theta, c)$$

$$\sigma_{yy}(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} [K_1 \cos(\epsilon \ln r) - K_2 \sin(\epsilon \ln r)] \hat{\sigma}_{yy0}^I(\theta, c) + \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \eta [K_1 \sin(\epsilon \ln r) + K_2 \cos(\epsilon \ln r)] \hat{\sigma}_{yy0}^{II}(\theta, c) + \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_3 \hat{\sigma}_{yy0}^{III}(\theta, c)$$

$$\sigma_{xy}(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} [K_1 \cos(\epsilon \ln r) - K_2 \sin(\epsilon \ln r)] \hat{\sigma}_{xy0}^I(\theta, c) + \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \eta [K_1 \sin(\epsilon \ln r) + K_2 \cos(\epsilon \ln r)] \hat{\sigma}_{xy0}^{II}(\theta, c) + \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_3 \hat{\sigma}_{xy0}^{III}(\theta, c)$$

여기서  $r, \theta =$  균열선단이 원점인 극좌표,

$K_1, K_2 =$  평면 계면균열 혼합응력학대계수,

$\epsilon, \eta, \hat{\sigma}_{xx0}^I(\theta, c) =$  재료 특성과 균열전파속도의 함수이다.<sup>(9)</sup>

동적광탄성 실험에서 광탄성 등색선프린지로 나타나는 최대 평면 전단응력  $\tau_m$ 은 응력광학법칙(stress - optics law)  $\tau_m = Nf_\sigma/2t$  와 조합하면 다음 식과 같이 표현된다.<sup>(7,8)</sup>

$$\left[ \frac{Nf_\sigma}{t} \right]^2 = [2\tau_m]^2 = [\sigma_{xx} - \sigma_{yy}]^2 + [2\sigma_{xy}]^2$$

여기서,  $N$ 은 등색선프린지의 차수,  $f_\sigma$ 는 재료의 동적 광탄성프린지상수,  $t$ 는 시험편의 두께이다.

### 3. 실험

#### 3.1 시험편

접합계면에 존재하는 구멍이 전파하는 계면균열에 미치는 영향을 규명하기 위하여 사용한 시

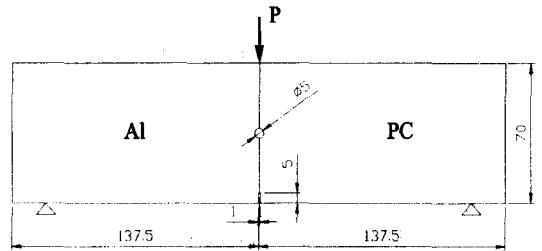


Fig. 2 configuration of test specimen

편 재료는 Polycarbonate(PC)와 Aluminum(Al)이다. 시험편두께는 3mm이며 계면접착제로는 상온 Epoxy를 사용하였다. 시험편의 최대접착각도를 얻기 위하여 시험당 최소 12시간 이상의 경화시간을 주었다. 계면에 발생하는 접착 잔류 응력이 아주 미미하여 무시할 수 있음을 확인하고 실험을 진행하였다. 시험편의 형상은 Fig. 2와 같다.

#### 3.2 동적 광탄성 실험장치

실험 장치는 Fig. 3과 Fig. 4에서 나타낸 것과 같이 Cranz-Shardin형 고속 멀티-스파크 카메라 세트( $10^6$ fps), 하중 장치, 필드렌즈, 편광장치, 콘트롤러로 구성되어 있다. 콘트롤러에서 시간대별로 제어된 빛은 고속 멀티-스파크 시스템에서 발광하여 필드 렌즈를 거쳐 1차 편광판을 거치게 되며 시험편을 통과한다. 이후 2차 편광판을 통과하게 되고 2차 필드 렌즈를 통과하여 카메라 스크린에 순차적으로 상을 이루게 된다.

#### 3.3 하중장치

하중 장치로는 무게 44N의 추를 수직으로 자유 낙하시켜 시험편에 충격하중이 작용하도록 하였으며 추의 자유낙하높이는 80mm로 하였다. 또한 하중과 시간을 측정하기 위하여 충격장치의 낙하턱에 Fig. 5와 같은 휘트스톤 브리지 (Wheatstone bridge)회로를 구성하여 턱 부근에 두 개의 액티브 게이지(active gauge)와 두 개의 더미 게이지(dummy gauge)를 서로 직각이 되도록 부착하였다. 충격 턱에서 생성되는 신호는 스트레인 증폭기(Measurment group, 2311)로 증폭하여 저장용 오실로스코프에 기록하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 6에서는 시편이 충격하중을 받은 후 계면 균열이 전파하는 양상을 나타내었다. Fig. 7에서는 Fig. 6에 나타낸 실험적인 동적 프린지양상에 따라 Overdeterministic LeastSquare(ODLS) 방법으로 결정한 응력확대계수를 이용하여 생성한 이론적인 프린지양상을 나타내었다. 계면균열이 구멍을 통과할 때 즉 Fig. 6에서 나타낸 370  $\mu$  sec

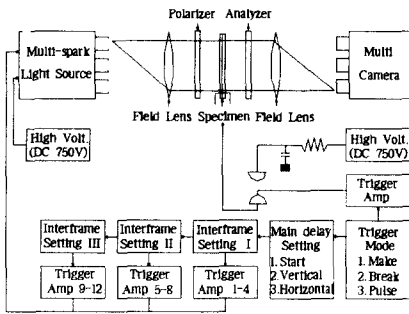
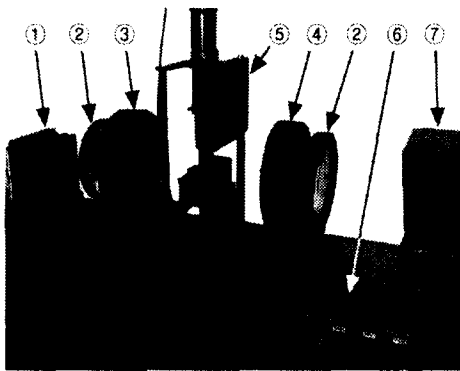


Fig. 3 Block diagram of dynamic photo-elasticity experimental apparatus



1. Camera 2. Field lens 3. Polarizer 4. Analyser  
5. Loading apparatus 6. Trigger controller  
7. Multi-spark high speed light source

Fig. 4 A general view of dynamic photoelasticity experimental apparatus

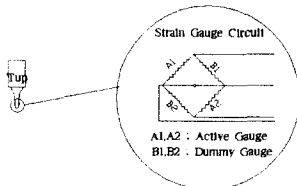


Fig. 5 Configuration of strain gauge circuit on impact tup

에서는 균열이 응력집중이 생긴 곳까지 전파되었다고 가정하고 응력확대계수를 계산하였다. 그림에서와 이론적인 프린지양상이 실험적인 프린지양상과 거의 일치함을 알 수 있다. 그러나 355  $\mu$  sec와 370  $\mu$  sec에서는 구멍에 의한 경계조건의 영향을 받아 차이가 나타나고 있는데 이것을 좀 더 면밀하게 고찰하기 위해서는 고차항을 고려한 연구가 필요하다.

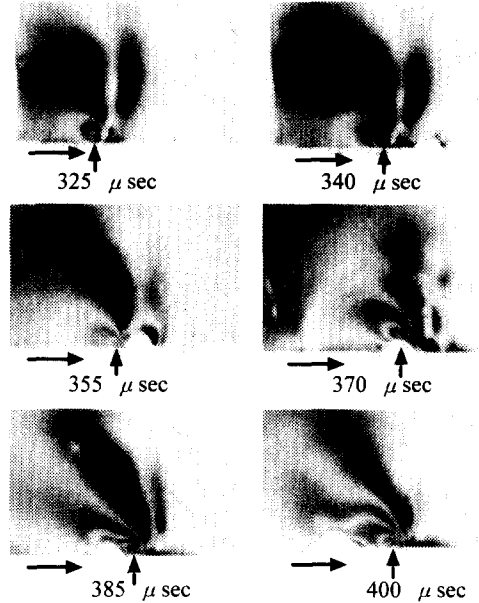


Fig. 6 Experimental isochromatic fringe patterns for a crack propagating along the interface  
(-->: instantaneous crack tip position,  
->: propagating direction)

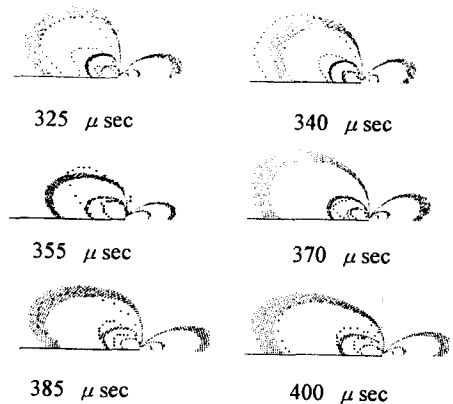


Fig. 7 Theoretical and experimental isochromatic fringe patterns for a crack propagating along the interface  
( $\square$ -theoretical, --- -experimental)

Fig. 8에서는 시편이 충격하중을 받은 후 전파하는 계면균열의 속도를 나타내었다. 계면균열이 구멍을 통과할 때에는 균열이 응력이 집중된 곳까지 전파되었다고 가정하고 속도를 계산하였다. 그림에서 나타낸 것처럼 구멍을 통과할 때 균열 전파속도는 작아졌다가 다시 커지는 것을 알 수 있다. 계면균열의 최대 전파속도는 PC의 Rayleigh Wave( $C_R$ )속도의 약 60%까지 도달한다는 사실이 실험으로 규명되었다.

Fig. 9와 Fig. 10에서는 균열전단의 위치에 따른 계면균열의 동적 응력확대계수  $K_1$ 과  $K_2$ 의 변화양상을 나타내었다. 그림에서와 같이 동적 응력확대계수  $K_1$ 은 균열전단이 구멍을 통과할 때 작아졌다가 다시 커지며 요동을 하는 반면  $K_2$ 는 접합 계면에 존재하는 구멍의 영향을 크게 받지 않는다는 흥미있는 사실이 실험적으로 규명되었다.

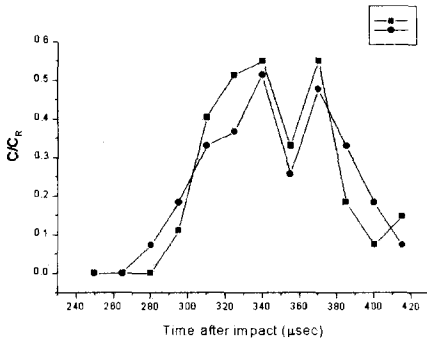


Fig. 8 Crack propagating velocity

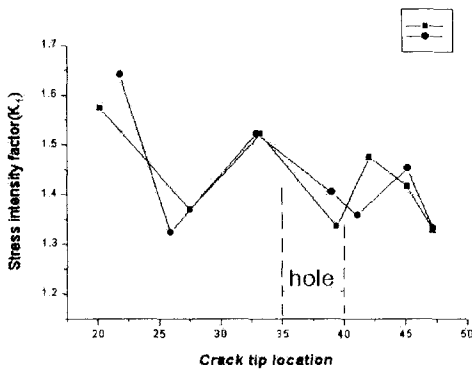


Fig. 9 Stress intensity factor( $K_1$ ) vs. crack tip location

Fig. 11에서는 충격팁에서 생성된 신호를 스트레인 증폭기(Measurment group, 2311)로 증폭하여 저장용 오실로스코프에 기록하고 보정을 거쳐 환산한 실제 하중을 나타내었다. 계면균열은 충격하중이 작용한 후 약 280  $\mu$ sec에서 전파하기 시작했다.

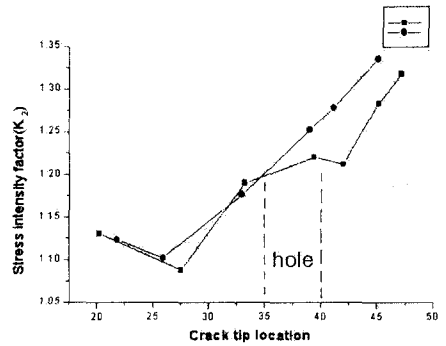


Fig. 10 Stress intensity factor( $K_2$ ) vs. crack tip location

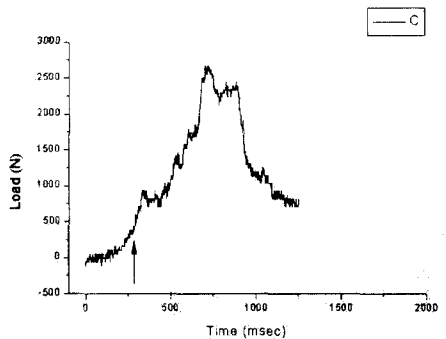


Fig. 11 Load history with respect to time  
(  $\rightarrow$  : crack initiation point)

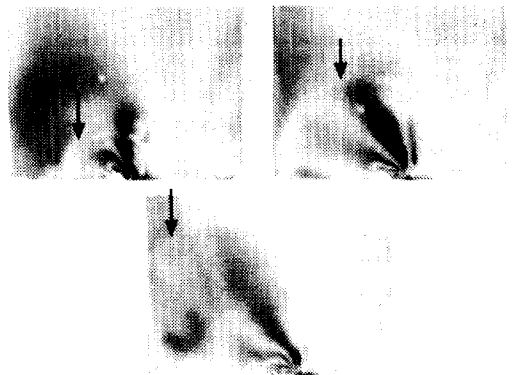


Fig. 12 Shear wave emanating at the hole  
(  $\rightarrow$  : wave front)

Fig. 12에서는 구멍에 정지한 동적 균열선단에서 발생하는 에너지에 의한 횡탄성파(shear wave)의 전파양상을 나타내었으며 균열전진방향과 반대방향으로 각각 656m/sec, 1002m/sec의 속도로 전파하고 있음이 규명되었다. 1002m/sec는 PC내의 횡탄성파의 전파속도와 동일하며 균열전진방향으로의 탄성파의 속도는 압축하중(wave)과의 간섭작용에 의해서 지연되는 사실을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 구멍을 통과하는 계면균열의 전파거동을 Cranz-Shardin 카메라시스템을 이용한 동적 광탄성 실험방법으로 기록하였다. ODLS방법으로 결정한 응력확대계수를 이용하여 생성한 이론적인 프린지양상과 실험적인 프린지 양상을 비교하여 접합계면에 존재하는 구멍이 계면균열의 전파거동에 미치는 영향을 해석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험적으로 얻어진 응력장의 양상이 ODLS 방법을 이용하여 생성한 이론적인 응력장의 양상과 거의 일치함을 밝혔다.

(2) 계면균열의 전파속도는 구멍을 통과할 때 작아졌다가 다시 커지며 PC의 Rayleigh Wave 속도의 약 60%까지 도달하는 것을 알 수 있었다.

(3) 접합계면에 존재하는 구멍은 계면균열의 동적 응력확대계수  $K_1$ 에는 영향을 미치지만  $K_2$ 에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 규명하였다.

(4) 접합계면의 전파경로에 존재하는 구멍이나 공동은 계면균열을 정지시키는 역할을 하며 정지균열이 재전파하기 전에 발생하는 탄성파가 계면균열의 전파거동에 미치는 영향이 상세히 규명되어야 한다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 1997년 특정연구

과제지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Rice, J. R and Sih, G. C., 1965, "Plane Problems of Cracks in Dissimilar Media," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 32, pp. 418~423.
- (2) Comninou, M., 1977, "The Interface Crack," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 44, pp. 631~636.
- (3) Barber, J. R. and Comninou, M., 1983, "The Penny-Shaped Interface Crack With Heat Flow," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50, pp. 770~776.
- (4) Martin-Morgan et al., 1983, "The Penny-Shaped Interface Crack With Heat Flow," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 50, pp. 29~36.
- (5) Lee O. S. and Kang H. S., 1998, "Effects of Interface Thickness on Stress Field around Interface Crack," *Korea Society of Automotive Engineers*, Vol II, pp. 437~440.
- (6) Deng, X., 1993, "General Crack-Tip Fields for Stationary and Steadily Growing Interface Cracks in Aniso-tropic Bimaterials," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 60, pp. 183~189.
- (7) Dally, J. W. and Riley, W. F., 1991, *Experimental Stress Analysis*, McGraw Hill, pp. 424~506.
- (8) Singh, R. P. and Shukla, A., 1996, "Characteri-zation of isochromatic fringe patterns for a dynamically propagating interface crack," *International Journal of Fracture*, pp. 293~310.
- (9) Ouk Sub Lee, Jae Chul Park, Gyu Hyun Kim, 2000, "Dynamic mixed mode crack propagation behavior of structural bonded joints," *KSME International Journal*, Vol. 14, No. 7, pp. 752~763.