

## 계면에 존재하는 구멍의 모양이 동적 계면균열전파에 미치는 영향

이역섭\* · 윤해룡\*  
(2001년 2월 23일 접수, 2002년 5월 2일 심사완료)

### Effect of Interface Hole Shape on Dynamic Interface Crack Propagation

Ouk Sub Lee and Hai Long Yin

**Key Words:** Dynamic Interface Crack Stress Field(동적 계면균열 응력장), Rayleigh Wave Velocity(레이리 탄성파 속도), Dynamic Crack Propagating Velocity(동적 균열전파 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 the interface crack. This paper investigates the effects of the hole (existed along the path of the crack propagation) shape on the dynamic interface crack propagation behavior by comparing the experimental isochromatic fringes to the theoretical stress fields.

#### 1. 서론

산업기술이 발전함에 따라 재료의 기계적 특성에 대한 요구도 점점 높아지고 있다. 따라서 단일한 재료로 얻기 어려운 기계적 특성을 두 가지 이상의 재료를 집합시켜 사용하는 경우가 점점 많아지고 있다. 최근 자동차나 항공기 엔진의 세라믹 열충코팅, 미소전자부품의 박막코팅, 전자부품의 경납연결 등에 대한 고강도, 경량화의 목적으로 여러 종류의 이종집합재료가 개발되어 널리 사용되고 있다. 그러나 이종재료의 집합계면은 일반적으로 단상의 모재보다 파괴인성치가 낮

아서 작은 외력에도 쉽게 파손될 가능성이 높다. 또 집합시의 외부적 조건의 영향으로 말미암아 집합계면에 결함이 생길 확률이 아주 높다. 본 연구에서는 충격하중을 받은 구멍이 있는 계면균열의 전파양상을 Cranz-Shardin 카메라시스템을 이용한 동적 광탄성 실험방법으로 기록하여 계면균열의 전파거동과 집합계면에 존재하는 구멍의 모양이 계면균열의 전파거동에 미치는 영향을 분석하였다.<sup>1~4)</sup>

#### 2. 이론

Fig. 1과 같은 극좌표계를 동적 계면균열 선단에 세우고 균열선단의 전파속도를  $C$  라 할 때 균열선단의 응력장은 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>5~10)</sup>

\* 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학부

E-mail : leeos@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7315 FAX : (032)868-1716

\* 회원, 인하대학교 대학원



계 되고 2차 필드 렌즈를 통과하여 카메라 스크린에 순차적으로 12개의 상을 이루게 된다.

3.3 하중장치

하중 장치로는 무게 44N의 추를 수직으로 자유 낙하시켜 시편에 충격하중이 작용하도록 하였으며 추의 자유낙하높이는 80 mm로 하였다. 또한 하중과 시간을 측정하기 위하여 충격장치의 낙하 턱에 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 구멍이 없는 시편이 충격하중을 받은 후 고속으로 전파하는 계면균열의 등색선 프린지양상과 이론적으로 생성한 프린지양상을 정량적으로 비교하여 나타내었다. image-pro 프로그램을 사용하여 실험적으로 얻어진 광탄성 프린지상의 극좌표값, r과  $\theta$ 를 측정 후 ODLS (Over Deterministic Least Square)<sup>(15)</sup>방법을 이용하여 작성한 C프로그램을 실행하여 동적 응력확대계수  $K_1$ 과  $K_2$ 를 산정하였다. 이 과정에서 얻어진  $K_1$ 과  $K_2$ 의 정확성을 확인하기 위하여 이  $K_1$ 과  $K_2$ 를 이용하여 동적 광탄성 프린지를 생성하여 실험적으로 얻어진 프린지와 비교하였으며 그림에서와 같이 이론적인 프린지와 실험적인 프린지양상과 유사함을 확인하였다. 그림에서 프린지 사진은 실험적으로 얻은 전파되는 계면균열선단부근의 광탄성 프린지를 확대하여 나타낸 것이다. 그림에서 점선으로 표시된 것은 image-pro 프로그램을 사용하여 실험적으로 얻은 광탄성 프린지에 대해 측정된 r과  $\theta$ 를 나타낸 것이며, 사선으로 표시된 것은 ODLS방법을 이용하여 산정한  $K_1$ 과  $K_2$ 를 이용하여 생성한 이론적인 동적 광탄성 프린지를 나타낸다. Fig. 7, Fig. 8과 Fig. 9에서는 각각 구멍의 단축 a가 4, 3, 2 mm 인 시편의 이론적인 프린지양상과 실험적인 프린지양상을 나타낸 것이다.

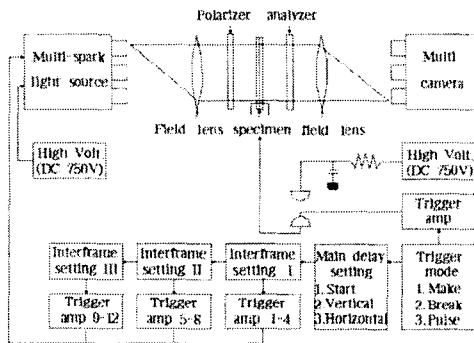


Fig. 3 Block diagram of dynamic photoelasticity experimental apparatus

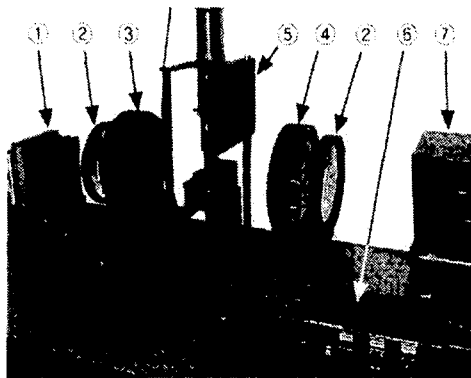


Fig. 4 A general view of dynamic photoelasticity experimental apparatus

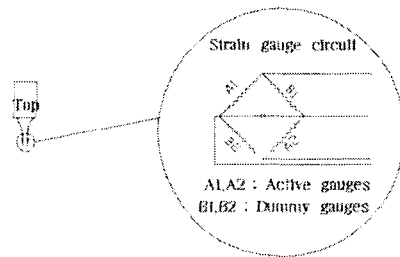


Fig. 5 Configuration of strain gauge circuit on impact tup

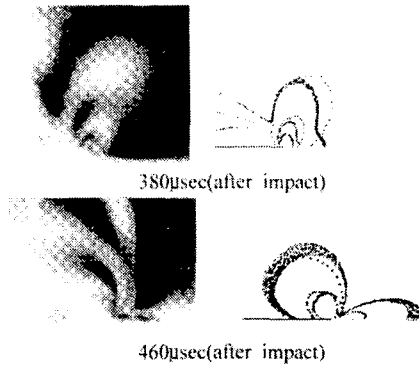


Fig. 6 Experimental and theoretical isochromatic fringe patterns for a crack propagating along the interface (no hole,  $\square$ -theoretical,  $-$ -experimental)

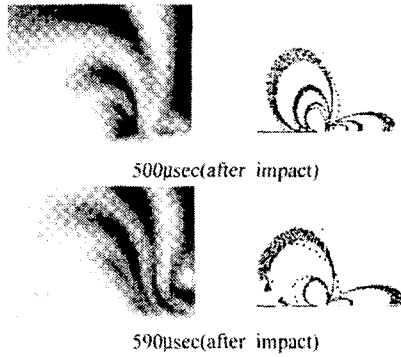


Fig. 7 Experimental and theoretical isochromatic fringe patterns for a crack propagating along the interface ( $a=4$ ,  $\square$ -theoretical,  $-$ -experimental)

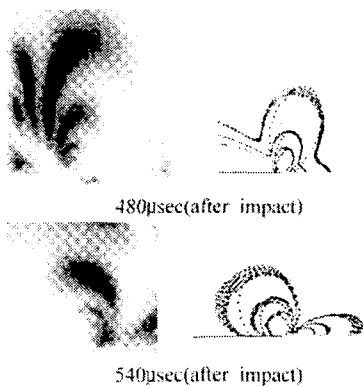


Fig. 8 Experimental and theoretical isochromatic fringe patterns for a crack propagating along the interface ( $a=3$ ,  $\square$ -theoretical,  $-$ -experimental)

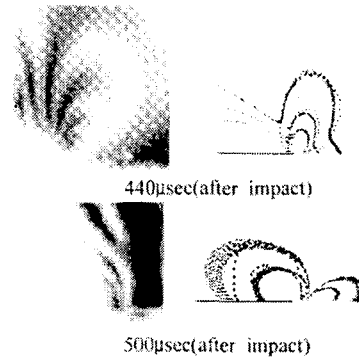


Fig. 9 Experimental and theoretical isochromatic fringe patterns for a crack propagating along the interface ( $a=2$ ,  $\square$ -theoretical,  $-$ -experimental)

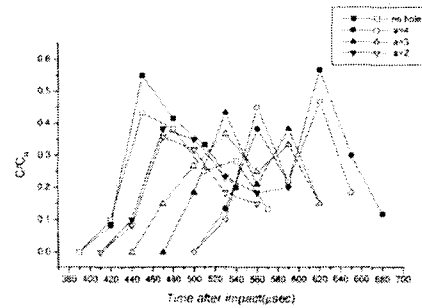


Fig. 10 Crack propagating velocity( $C_k$ : Rayleigh wave speed of PC)

Fig. 10은 각 시편이 충격하중을 받은 후 계면 균열이 전파하는 속도를 레이리 탄성과 속도에 비교하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 균열이 구멍을 지날 때 일정한 시간동안 정지하지만 정지하는 동안의 에너지축적에 의해 구멍을 지난 후에 균열 전파속도가 오히려 더욱 커진다. 구멍의 단축  $a$ 가 작아질수록 균열 전파개시시간은 구멍이 없는 시편의 균열 전파개시시간에 가까워지지만 균열전파 최고속도는 오히려 작아진다. 계면에 존재하는 구멍은 계면균열의 전파를 억제하는 역할을 하지만 구멍의 단축  $a$ 가 작아질수록 그 역할은 선형적으로 감소되며 이 현상에 대한 상세한 설명은 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 10에서 검은 기호( $\blacksquare$ )는 처음에 실험한 데이터이고 흰색 기호( $\square$ )는 나중에 같은 조건으로 2주일 후 재 실험을 하여 얻은 데이터이다.

Fig. 11에서는 계면균열이 구멍을 지난 후 다시

전파될 때 최고 전파속도의 평균치를 나타내었다. 구멍의 단축  $a$ 가 작아질수록 구멍을 지난 후 계면균열의 최고 전파속도는 선형적으로 작아지는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 12에서는 계면균열의 전파개시시간과 구멍의 단축의 크기와의 관계를 나타내었으며 구멍의 단축  $a$ 가 작아질수록 균열전파개시시간은 점점 빨라지는 경향을 알 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12에서 알 수 있듯이 구멍의 단축  $a$ 가 작아질수록 구멍의 균열전파 억제효과는 작아지며 선형적으로 비례하고 있다.

Fig. 13은 충격탑에서 생성된 동적 하중에 관한 신호를 보정을 거쳐 환산한 실제 하중을 나타낸 것이다. 각각의 화살표는 좌로부터 구멍이 없는 경우,  $a=2$  mm,  $a=3$  mm,  $a=4$  mm인 시편의 균열전파개시시간을 나타낸다.

Fig. 14와 Fig. 15에서는 Figs. 6~9에서 삼정환 각 시편에서의 동적 응력확대계수  $K_1$ ,  $K_2$ 와 균열선단위치와의 관계를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 계면에 존재하는 구멍을 지날 때  $K_1$ 은 작아졌다가 다시 커지지만  $K_2$ 는 큰 영향을 받

지 않는다. 계면에 존재하는 구멍의 단축  $a$ 가 작을수록 계면균열의 동적 응력확대계수  $K_1$ 은 작아지지만  $K_2$ 는 큰 영향을 받지 않는다는 사실을 규명하였다.

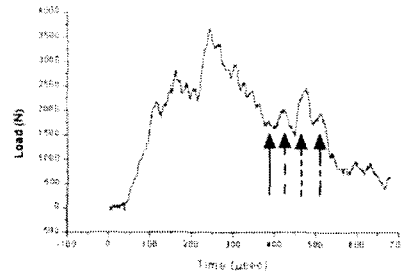


Fig. 13 Load history with respect to time (crack initiation points  $\rightarrow$ : no hole,  $- \rightarrow$ :  $a=2$ ,  $\cdots \rightarrow$ :  $a=3$ ,  $- \cdot \rightarrow$ :  $a=4$ )

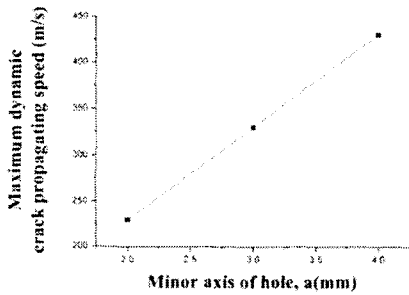


Fig. 11 Maximum dynamic crack propagating speed vs. minor axis of hole

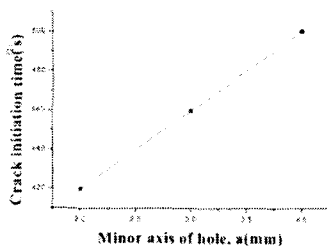


Fig. 12 Crack initiation time vs. minor axis of hole

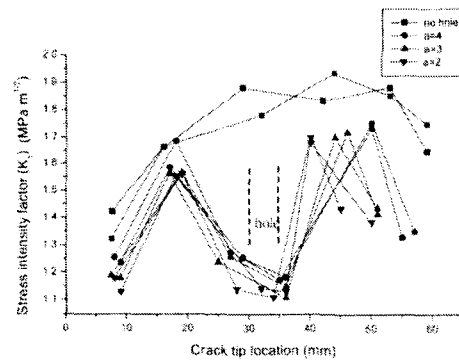


Fig. 14 Stress intensity factor,  $K_1$  vs. crack tip location

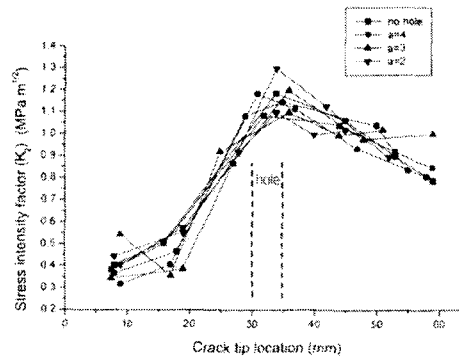


Fig. 15 Stress intensity factor,  $K_2$  vs. crack tip location

## 5. 결론

본 연구에서는 계면에 존재하는 구멍의 모양이 계면균열의 동적 전파거동에 미치는 영향을 규명하기 위하여 동적 광탄성실험을 진행하였다. 계면에 구멍이 존재하는 시편이 충격하중을 받은 후 동적으로 전파하는 균열선단부근의 응력장파 계면균열 전파양상을 기록하기 위하여 Cranz-Shardin 카메라시스템을 사용하였다. 기록된 동적 광탄성 프린지를 해석하기 위하여 ODLS 방법을 응용하였다. ODLS방법으로 결정한 응력확대계수를 이용하여 생성한 이론적인 응력장파, 실험적인 응력장을 비교하여 해석의 정확성을 증명하였다. 이러한 실험과 이론해석을 통하여 계면에 존재하는 구멍의 모양이 계면균열의 동적 전파거동에 미치는 영향을 정량적으로 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 계면에 존재하는 구멍은 계면균열의 전파를 억제하며 구멍의 단축  $a$ 가 작아짐에 따라 그 영향은 작아진다. 구멍의 단축  $a$ 와 균열전파 억제 효과는 선형적으로 비례한다.
- (2) 구멍의 단축  $a$ 가 작아짐에 따라 균열 전파 개시시간은 구멍이 없는 시편의 균열 전파개시시간에 가까워지며 균열전파 최고속도는 오히려 낮아짐을 규명하였다.
- (3) 계면균열의 동적 응력확대계수  $K_I$ 은 구멍을 지날 때 작아졌다가 다시 커지지만  $K_{II}$ 는 큰 영향을 받지 않는다. 계면에 존재하는 구멍의 단축이 작아지면 계면균열의 동적 응력확대계수  $K_I$ 은 감소하지만  $K_{II}$ 는 큰 영향을 받지 않는다.

## 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) Martin-Morgan, 1983, "The Penny-Shaped Interface Crack With Heat Flow," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50, pp. 29-36.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Lee, O. S., Park, J. C., Kim, G. H., 2000, "Dynamic Mixed Mode Crack Propagation Behavior of Structural Bonded Joints," *KSME International Journal*, Vol. 14, No. 7, pp. 752-763.
- (7) Lee, O. S., Park, J. C., Yin, H. L. and Byun, K. H., 2000, "Dynamic Interface Crack Propagating Along a Line Between Two Holes," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 2, pp. 172-179.
- (8) Freund, L. B., 1976, "Dynamic Crack Propagation," *Mechanics of Fracture*, Vol. 19, Edited by F. Erdogan, ASME, pp. 105-134.
- (9) Kobayashi, A. S. and Mall, S., 1978, "Dynamic Fracture Toughness of Homalite-100," *Experimental Mechanics*, Vol. 18, No. 1, pp. 11-18.
- (10) Shin, D. C., Hawong, J. S., 2000, "A Study on the Development of the Dynamic Photoelastic Hybrid Method for Isotropic material," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 24, No. 9, pp. 2220-2227.
- (11) Xu, X. P., and Needleman, A., 1996, "Numerical Simulations of Dynamic Crack Growth Along an Interface," *International Journal of Fracture*, Vol. 74, pp. 289-324.
- (12) Wang, W., 1998, "Effect of Elastic Mismatch in Intersonic Crack Propagation Along a Bimaterial Interface," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 61, pp. 471-485.
- (13) Dally, J. W. and Riley, W. F., 1991, *Experimental Stress Analysis*, McGraw Hill, pp. 424-506.
- (14) Singh, R. P. and Shukla, A., 1996, "Characterization of Isochromatic Fringe Patterns for a Dynamically Propagating Interface Crack," *International Journal of Fracture*, pp. 293-310.
- (15) Sanford, R. J., 1980, "Application of the Least Square Method to the Photoelastic Analysis," *Experimental Mechanics*, Vol. 20, pp. 192-197.