

계면에 존재하는 결함의 모양이 동적 계면균열전파에 미치는 영향

이억섭(인하대 기계·항공·자동화공학부) 윤해룡*, 조운기(인하대원), 황시원(동양대)

Effect of Interface Hole Shape on Dynamic Interface Crack propagation

O. S. Lee(Inha Univ.), H. L. Yin, W. K. Cho(Graduate Student, Inha Univ.),
S. W. Hwang(Dong Yang Univ.)

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.

Key Words : Interface Crack(계면균열), Stress Intensity Factor(동적응력확대계수), Photoelasticity(광탄성)

1. 서론

기계구조물의 고급화 및 경량화와 산업기술이 발전함에 따라 재료의 기계적인 특성에 대한 요구가 점점 높아지고 있다. 따라서 단일 재료로 얻을 수 없는 기계적 성질을 두 개 또는 그 이상의 재료를 접합시켜 사용함으로써 얻을 수 있는 방안이 개발되고 있다. 예를 들면 자동차나 항공기 엔진의 세라믹 열충코팅, 미소전자부품의 박막코팅, 전자부품의 경납연결, 선박등 여러 가지 구조물에 대한 고강도, 경량화 목적으로 각종 복합재료가 개발되고 있으며, 특히 사용목적에 따라 여러 종류의 이종접합재료가 개발되어 공학의 여러 분야에 널리 사용되고 있다. 그러나 이종재료 접합계면은 일반적으로 모재보다 파괴인성치가 낮아 작은 외력에 의해서도 균열이 발생할 위험이 높으며 특히 충격하중을 받을 경우에는 더욱 더 위험하다. 따라서 이종재료의 접합계면에 대한 연구가 많이 진행되고 있으나 대부분 정적하중을 받는 계면의 파괴거동에 관한 것들이며, 동적 계면균열의 파손해석에 대한 연구결과는 매우 적다.^[1,2,3,4,5]

본 연구에서는 계면에 구멍이 있는 시편이 충격하중을 받은 후, 계면을 따라 전파하는 균열선단에 발생하는 응력장의 양상을 Cranz-Shardin 카메라

시스템을 이용한 동적 광탄성실험방법으로 기록하고 해석하였다. 기존의 필자의 연구실에서 제시한 실험데이터와 비교하면서 계면에 존재하는 결함의 모양이 동적 계면균열의 전파거동에 미치는 영향을 면밀하게 조사하였다.

2. 이론

일반적으로 계면균열의 동적 응력확대계수를 다음과 같이 나타낸다. $K=K_1+iK_2$ (여기서 K_1 과 K_2 는

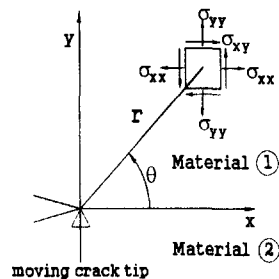


Fig. 1 A coordinate system and stress component for a small element around the dynamic interface crack tip

Mode I 과 Mode II 하중에 대한 응력확대계수인 K_I 과 K_{II} 가 아님). Fig. 1과 같은 극좌표계를 동적 계면 균열 선단에 세우고 균열 선단의 전파속도를 C 라 할 때 균열선단의 응력장은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[6]

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

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

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

여기서 $r, \theta =$ 균열선단이 원점인 극좌표

$K_I, K_{II} =$ 평면 계면균열 혼합응력확대계수

$\epsilon, \eta, \hat{\sigma}_{xx0}^I(\theta) =$ 재료 특성과 균열전파속도의 함수

이다.

동적광탄성 실험에서 광탄성 등색선프린지로 나타나는 최대 평면 전단응력 τ_m 은 응력광학법칙 (stress-optic law) $\tau_m = Nf_\sigma/2t$ 와 조합하면 다음 식과 같이 표현된다.^[7]

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

여기서, N 은 등색선프린지의 차수, f_σ 는 재료의 동적 광탄성프린지상수, t 는 시험편의 두께이다.

3. 실험방법

3.1 시험편

계면상에 존재하는 구멍의 모양이 계면균열의 전파 거동에 미치는 영향을 해석하기 위하여 시험편 재료는 Polycarbonate(PC)와 Aluminum(Al)을 사용하였으며, 계면접착제로는 상온Epoxy를 사용하였다. 시험편의 최대접착강도를 얻기 위하여 시험당 최소 24시간 이상의 경화 시간을 주었다. 계면에 발생하는 접착 잔류응력이 아주 미미하여 무시할 수 있음을 확인하고 실험을 진행하였다. 시험편의 형상은 Fig. 2와 같으며, 구멍이 없는 경우와 구멍의 장축을 5mm로 유지시키고 단축 a 가 각각 4, 3, 2mm인 경우 등 네가지 종류의 시험편을 사용하였다.

시험편의 아래쪽 양끝은 3점 굽힘 시험형태로 고정되어 있으며 시험편의 두께는 3mm이다.

3.2 동적 광탄성 실험장치

실험 장치는 Fig. 3과 같이 Cranz-Shardin형 고속 멀티-스파크카메라 세트 (10^6 fps), 하중 장치, 필드렌즈, 편광 장치, 콘트롤러로 구성되었다.

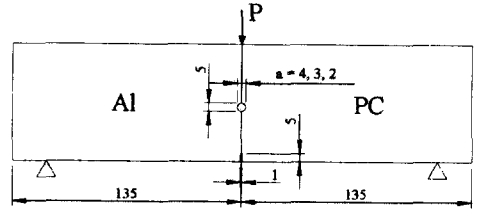
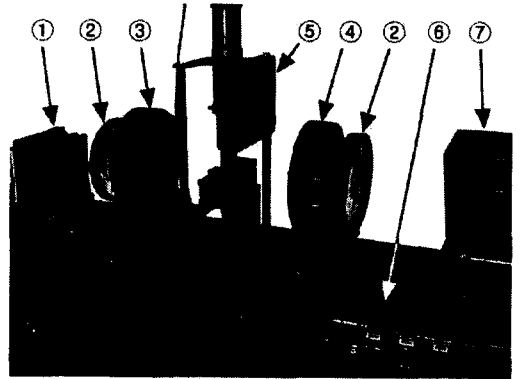


Fig. 2 Configuration of test specimen (dim. = mm)



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

Fig. 3 A general view of dynamic photoelasticity experimental apparatus

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 카메라스크린에 순차적으로 상을 이루게 된다.

3.3 하중 장치

하중 장치로는 무게 44N의 추를 수직으로 자유 낙하시켜 시험편에 충격하중이 작용하도록 하였으며 추의 자유낙하높이는 80mm로 하였다. 또한 하중과 시간을 측정하기 위하여 충격장치의 낙하 팁에 Fig. 4와 같은 휘트스톤 브리지 (Wheatstone bridge) 회로를 구성하여 팁 부근에 두 개의 액티브 게이지(active gauge)와 두 개의 더미 게이지(dummy gauge)를 서로 직각이 되도록 부착하였다. 충격 팁에서 생성되는 신호는 스트레인 증폭기 (Measurement group, 2311)로 증폭하여 저장용 오실로스코프에 기록하였다.

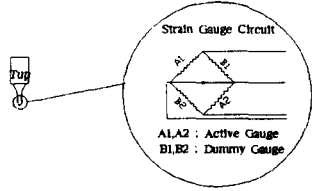


Fig. 4 Configuration of strain gauge circuit on impact tup

4. 결과 및 고찰

Fig. 5에서는 구멍이 없는 시편이 충격하중을 받은 후 고속으로 전파하는 계면균열의 등색선 프린지양상과 이론적으로 생성한 프린지양상을 정량적으로 비교하여 나타내었다. Overdeterministic Least Square (ODLS) 방법을 이용하여 결정한 응력확대계수를 이용하여 생성한 이론적인 프린지양상이 그림에서와 같이 실험적인 프린지양상과 유사함을 알 수 있다. Fig. 6, Fig. 7과 Fig. 8에서는 각각 구멍의 단축 a 가 4, 3, 2mm 인 시편의 이론적인 프린지양상과 실험적인 프린지양상을 나타내었다.

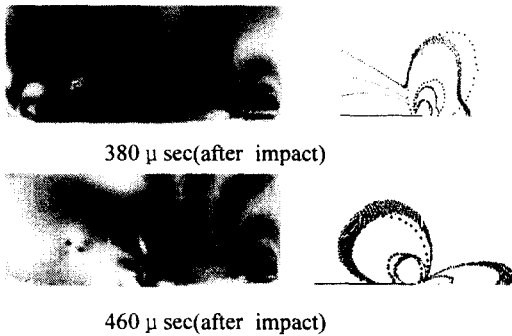


Fig. 5 Experimental and theoretical isochromatic fringe patterns for a crack propagating along the interface (no hole, \square -theoretical, \cdots -experimental)

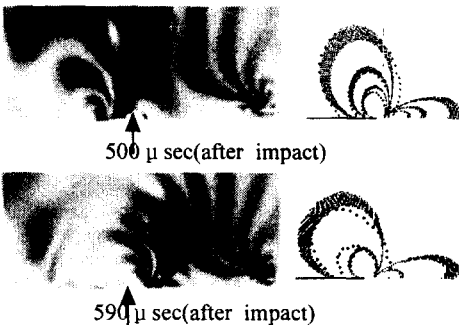


Fig. 6 Experimental and theoretical isochromatic fringe patterns for a crack propagating along the interface (hole \uparrow minor axis $a=4$, \square -theoretical, \cdots -experimental)

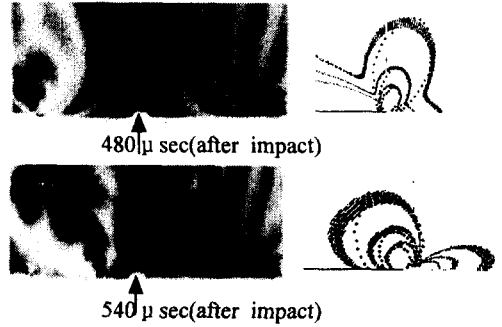


Fig. 7 Experimental and theoretical isochromatic fringe patterns for a crack propagating along the interface (hole \uparrow minor axis $a=3$, \square -theoretical, \cdots -experimental)

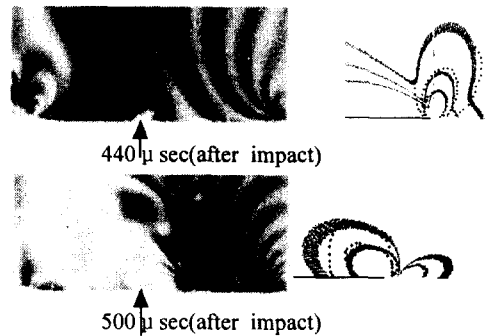


Fig. 8 Experimental and theoretical isochromatic fringe patterns for a crack propagating along the interface (hole \uparrow minor axis $a=2$, \square -theoretical, \cdots -experimental)

Fig. 9에서는 각 시편이 충격하중을 받은 후 계면균열이 전파하는 속도들 가운데서 대표적인 것을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 계면에 존재하는 구멍은 계면균열의 전파를 억제하는 역할을 하지만 구멍의 단축 a 가 작아질수록 그 역할은 감소된다. 구멍의 단축 a 가 작아질수록 균열 전파개시시간은 구멍이 없는 시편의 균열 전파개시시간에 가까워지지만 그 최고속도는 오히려 작아진다. 그림에서 open으로 된 것은 추가로 실험하여 얻은 것이다. 기존의 데이터와 비교하여 잘 일치함을 알 수 있다.

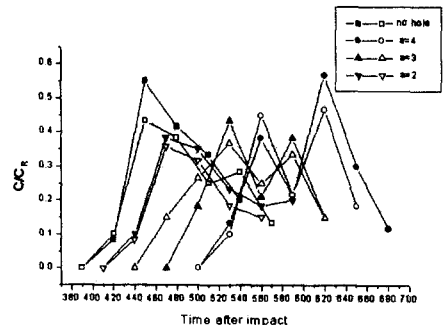


Fig. 9 Crack propagating velocity(CR: Rayleigh wave speed of PC)

5, 결 론

Fig. 10에서는 충격팁에서 생성된 동적 하중에 관한 신호를 보정을 거쳐 환산한 실제 하중을 나타내었다. 각각의 화살표는 좌로부터 no hole, a=2mm, a=3mm, a=4mm인 시편의 균열전파개시시간을 나타낸다.

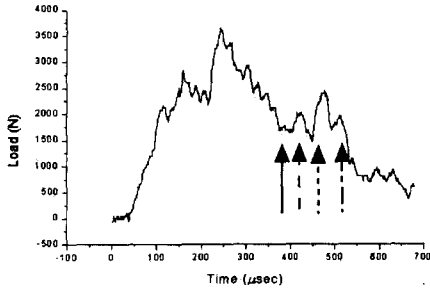


Fig. 10 Load history with respect to time (crack initiation points \blacktriangleright : no hole, \blacktriangle : a=2, \blacktriangleleft : a=3, \blacktriangleright : a=4)

Fig. 11과 Fig. 12에서는 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 받지 않는다. 계면에 존재하는 구멍이 작을수록 계면균열의 동적 응력확대계수 K_1 은 작아지지만 K_2 는 큰 영향을 받지 않는다.

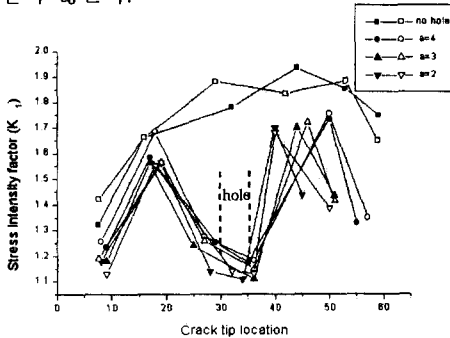


Fig. 10 Stress intensity factor vs. crack tip location (K_1)

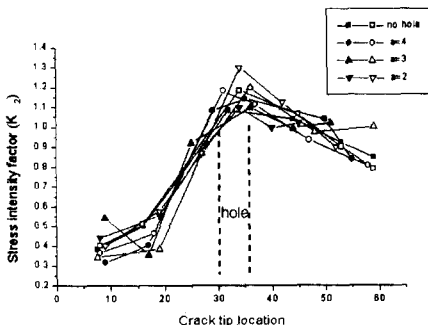


Fig. 10 Stress intensity factor vs. crack tip location (K_2)

본 연구에서는 계면에 구멍이 존재하는 시편이 충격하중을 받은 후 동적으로 전파하는 균열선단부근의 응력장과 계면균열 전파양상을 Cranz-Shardin 카메라 시스템을 이용한 동적 광탄성 실험방법을 이용하여 기록하였다. ODLS 방법으로 결정된 응력확대계수를 이용하여 생성한 이론적인 응력장과 실험적인 응력장을 비교하여 계면에 존재하는 구멍의 모양이 계면균열의 동적 전파거동에 미치는 영향을 정량적으로 해석하여 기존의 실험데이터와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 계면에 존재하는 구멍은 계면균열의 전파를 억제하지만 구멍의 단축 a가 작아짐에 따라 그 영향은 작아진다. 구멍의 단축 a가 작아짐에 따라 균열 전파개시 시간은 구멍이 없는 시편의 균열 전파개시시간에 가까워지지만 균열전파 최고속도는 오히려 낮아짐을 규명하였다.

(2) 계면균열의 동적 응력확대계수 K_1 은 구멍을 지날 때 작아졌다가 다시 커지지만 K_2 는 큰 영향을 받지 않는다. 계면에 존재하는 구멍이 작을수록 계면균열의 동적 응력확대계수 K_1 은 작아지지만 K_2 는 큰 영향을 받지 않는다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정연구과제지원에 의한 것이며 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Rice, J. R and Sih, G. C., J. Appl. Mech., E32, pp. 418-423, 1965.
- [2] Comninou, M. J. Appl. Mech, E44, pp. 631-636, 1977.
- [3] Barber, J. R. and Comniou, . M. J. Appl. Mech., Vol. 50, pp. 770-776, 1983.
- [4] Martin-Morgan et al., J. Appl. Mech. vol. 50, pp. 29-36, 1983.
- [5] Lee., O. S. and Kang, H. S. "Effects of Interface Thickness on Stress Field around Interface Crack", Korea Society of Automotive Engineers, Vol II, pp. 437-440, 1998.
- [6] Deng, X. "General Crack-Tip Fields for Stationary and Steadily Growing Interface Cracks in Anisotropic Bimaterials", Journal of Applied Mechanics, Vol. 60, pp. 183-189, 1993.
- [7] Singh, R. P. and Shukla, A, "Characterization of isochromatic fringe patterns for a dynamically propagating interface crack", International Journal of Fracture, pp. 293-310, 1996.