

초기 혼합모드 동적 하중을 받는 경사계면균열의 동적 전파거동

이억섭*, 박재철**, 윤해룡**

Dynamic Slant Interface Crack Propagation Behavior under Initial Mixed Impact Loading

Ouk Sub Lee*, Jae Chul Park**, and Hai Long Yin**

ABSTRACT

The effects of slant interface in the hybrid specimen on the dynamic crack propagation behavior have been investigated using dynamic photoelasticity. The dynamic photoelasticity with the aid of Cranz-Shardin type high speed camera system is utilized to record the dynamic stress field around the dynamically propagating inclined interface crack tip in the three point bending specimens. The dynamic load is applied by a hammer dropped from 0.08m high without initial velocity. The dynamic crack propagation velocities and dynamic stresses field around the interface crack tips are investigated. Theoretical dynamic isochromatic fringe loops are compared with the experimental results. It is interesting to note that the crack propagating velocity becomes comparable to the Rayleigh wave speed of the soft material of a specimen when slant angle decreases.

Key Words : Dynamic Crack Propagation (동적 균열전파), Slant Interface (경사계면), Dynamic Photoelasticity (동적 광탄성), High Speed Camera (고속 카메라), Theoretical Dynamic Isochromatic Fringe Loop(이론적인 등색선프린지)

1. 서론

산업기술이 발전함에 따라 재료에 대한 요구가 점점 높아지고 있다. 최근 자동차나 항공기의 엔진에 세라믹 열충코팅, 미소전자부품의 박막코팅, 전자부품의 경납연결, 선박 등의 구조물에 대한 고강도, 경량화 목적으로 각종 복합재료가 개발되고 있

으며, 특히 사용목적에 따라 여러 종류의 이종접합 재료가 개발되어 공학의 여러 분야에 널리 사용되고 있다. 그러나 이종재료 접합계면은 일반적으로 모재보다 파괴인성치가 낮아 작은 외력에 의해서도 균열이 발생될 위험이 높으며 특히 충격하중을 받

* 인하대학교 기계·항공·자동차 공학부

** 인하대학교 대학원

을 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.^[1,2,3,4,5,6]

본 연구에서는 경사 계면균열이 충격하중을 받은 후, 계면을 따라 전파할 경우 계면균열선단에 발생하는 응력장의 양상을 Cranz-Shardin 카메라 시스템을 이용한 동적광탄성실험방법으로 규명하였다.

2. 이 론

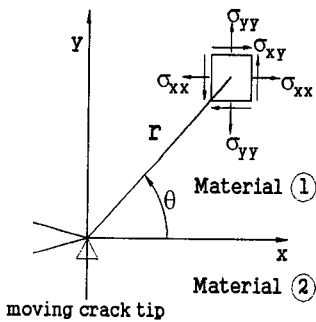


Fig. 1 A coordinate system and stress component for a small element at the dynamic interface crack tip

동적 계면균열의 동적 응력확대계수를 다음과 같이 나타낼 수 있다. $K = K_I + iK_{II}$ (여기서 K_I 와 K_{II} 은 Mode I과 Mode II의 응력확대계수인 K_I 과 K_{II} 가 아니다). Fig. 1과 같은 극좌표계를 동적 계면 균열 선단에 세우고 균열 선단의 전파속도를 C 라 할 때 균열선단의 응력장은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[7,8,9]

$$\begin{aligned} \sigma_{\omega}(r, \theta) = & \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} [K_I \cos(\varepsilon \ln r) - K_{II} \sin(\varepsilon \ln r)] \hat{\sigma}_{xx0}^I(\theta) \\ & + \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \eta [K_I \sin(\varepsilon \ln r) + K_{II} \cos(\varepsilon \ln r)] \hat{\sigma}_{xy0}^{II}(\theta) \\ & + \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_{III} \hat{\sigma}_{xx0}^{III}(\theta) \end{aligned}$$

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

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

여기서 r, θ = 균열선단이 원점인 극좌표

K_I, K_{II} = 평면 계면균열 혼합응력확대계수

$\varepsilon, \eta, \hat{\sigma}_{xx0}^{III}(\theta)$ = 재료 특성과 균열전파속도의

함수이다. 기타 자세한 기호설명은 참고문헌 [11]을 참고하십시오.

동적 광탄성실험에서 광탄성 등색선프린지로나타나는 최대 평면 전단응력 τ_m 은 응력광학법칙 (stress-optic law) $\tau_m = Nf_\sigma/2t$ 와 조합하면 다음 식과 같이 표현된다.^[8,9]

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

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

3. 실험 방법

3.1. 시험편

전파하는 경사계면균열의 동적 광탄성 응력장을 해석하기 위하여 시험 재료는 Polycarbonate(PC)와 Aluminum(Al)을 사용하였으며, 계면접착재료는 상온 Epoxy를 사용하였다. 시험편의 최대접착강도를 얻기 위하여 시험당 최소 24시간 이상의 경화시간을 주었다. 계면에 발생하는 접착 잔류 응력이 아주 미미하여 무시할 수 있음을 확인하고 실험을 진행하였다. 시험편의 형상은 Fig. 2와 같으며, 경사각 α 는 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 로 세 가지 종류의 시험형상을 사용하였다. 시험편의 아래쪽 양끝은 3점 굽힘 시험 형태로 고정되어 있으며, 시험 두께는 3mm와 4.5mm를 사용하였다.

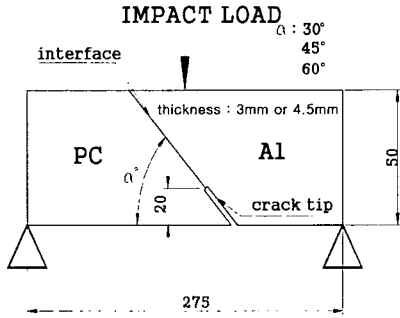


Fig. 2 Configuration of test specimen(dim. = mm)

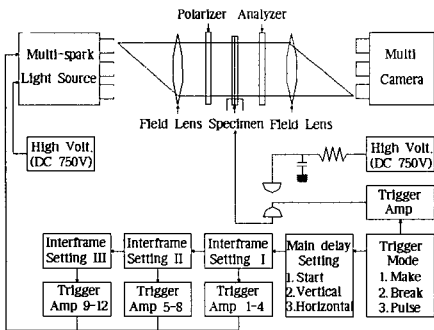


Fig. 3 Block diagram of dynamic photoelasticity experimental apparatus

3.2 동적 광탄성 시험장치

실험 장치는 Fig. 3과 같이 Cranz-Shardin형 고속 멀티-스파크 카메라 세트(10^6 fps), 하중 장치, 필드 렌즈, 편광장치, 콘트롤러로 구성되었다. 콘트롤러에서 시간대별로 제어된 빛은 고속 멀티-스파크 시스템에서 발광하여 필드 렌즈를 거쳐 1차 편광판을 거쳐게 되며 시편을 통과한다. 이후 2차 편광판을 통과하게 되고 2차 필드 렌즈를 통과하여 카메라 스크린에 순차적으로 상을 이루게 된다. Fig. 4에서는 실험장치의 사진을 나타내었다.

3.3 하중 장치

하중 장치로는 무게 44N의 추를 수직으로 자유낙하시켜 시편에 충격하중이 작용하도록 하였으며 추의 자유낙하높이는 80mm로 하였다. 또한 하중과 시간의 관계를 측정하기 위하여 충격장치의 낙하 팁에 Fig. 5와 같은 휘트스톤 브리지 (Wheatstone bridge)회로를 구성하였으며 팁 끝부분에 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.

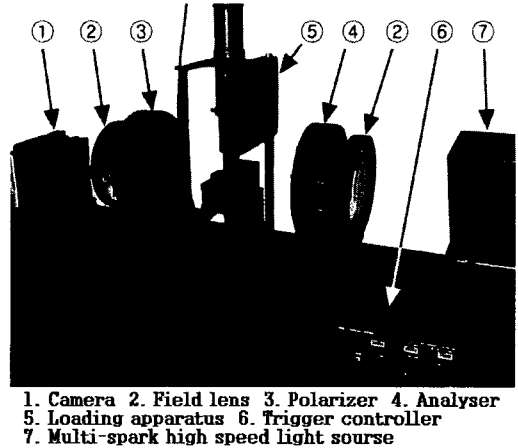


Fig. 4 A general view of dynamic photoelasticity experimental apparatus

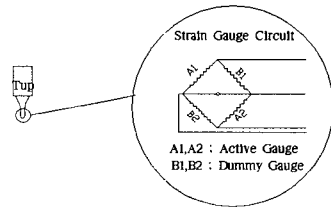


Fig. 5 Configuration of strain gauge circuit on impact tup

4. 결과 및 고찰

Fig. 6에서는 경사각 α 가 60° 인 시편이 충격 하중을 받은 후 고속으로 전파하는 계면균열의 선단부근에서의 등색선 프린지양상과 이론적으로 생성한 프린지양상을 정량적으로 비교하여 나타내었다. 그림에서와 같이 Overdeterministic Least Square(ODLS)^[6,8]방법을 이용하여 추출한 응력확대 계수를 이용하여 생성한 이론적인 프린지양상^[10]이 실험적인 프린지양상과 유사함을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8에서는 각각 경사각 α 가 45° , 30° 인 시편의 이론적인 프린지양상과 실험적인 프린지양상을 비교하여 나타내었다.

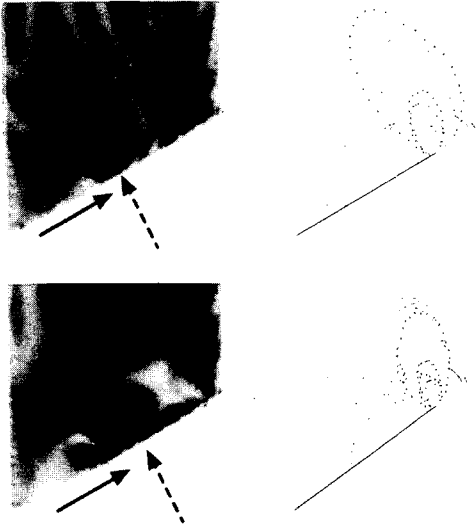


Fig. 6 Experimental and theoretical isochromatic fringe patterns for a crack propagating along the interface ($\alpha=60^\circ$, \square -theoretical, \cdots -experimental) ($--\blacktriangleright$: crack tip location \longrightarrow : crack propagation direction)

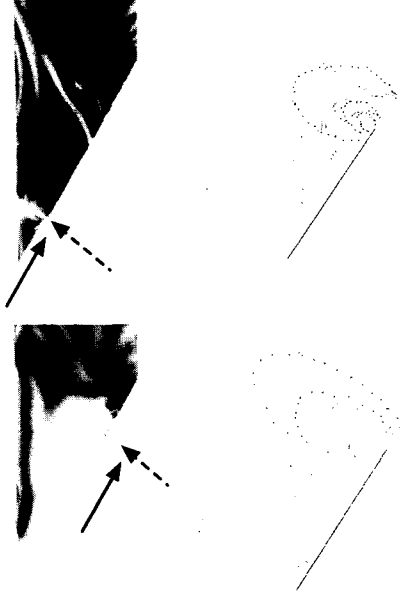


Fig. 8 Experimental and theoretical isochromatic fringe patterns for a crack propagating along the interface ($\alpha=45^\circ$, \square -theoretical, \cdots -experimental) ($--\blacktriangleright$: crack tip location \longrightarrow : crack propagation direction)

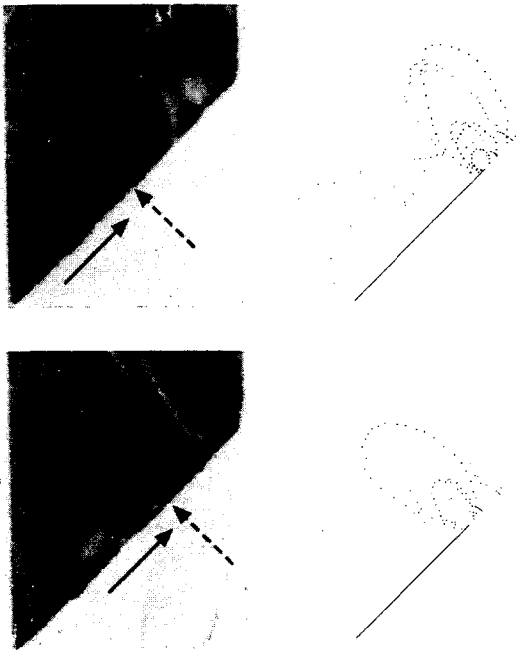


Fig. 7 Experimental and theoretical isochromatic fringe patterns for a crack propagating along the interface ($\alpha=45^\circ$, \square -theoretical, \cdots -experimental) ($--\blacktriangleright$: crack tip location \longrightarrow : crack propagation direction)

Fig. 9에서는 경사각 α 가 30° , 45° , 60° 인 시편이 충격하중을 받은 후 경사계면균열이 전파하는 속도를 나타내었다. 동적 계면균열의 전파속도(C)와 PC의 Rayleigh wave 속도(C_R)로 무차원화하여 비교한 이 결과에서 알 수 있듯이 균열 경사각 α 가 감소함에 따라 균열 전파개시시간은 늦어지지만 균열 전파속도는 오히려 증가되는 경향이 있음을 알 수 있다.

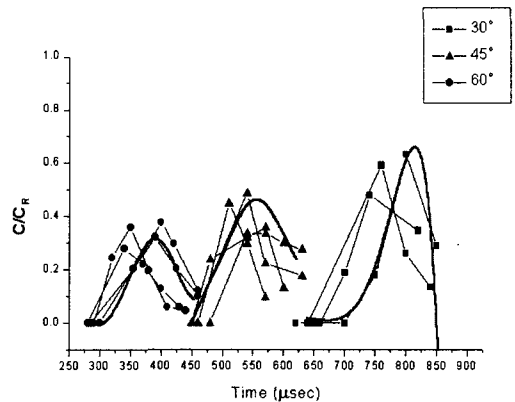


Fig. 9 Crack propagating velocity(C/C_R) for various slant angle specimens (dark line : best fitted)

Figs. 10, 11, 12에서는 각각 경사각 α 가 60° , 45° , 30° 시편에 따른 충격팁에서 생성된 신호를 보정을 거쳐 환산한 신호를 나타내었으며 화살표는 동적 균열전파개시점을 표시한다. 충격팁에 strain gage를 부착하여 충격하중을 가할 경우 생성되는 신호를 oscilloscope에 저장하고 origin 프로그램을 이용하여 환산하였다. 이러한 신호는 컴퓨터로 시뮬레이션할 경우 하중신호로 사용한다.

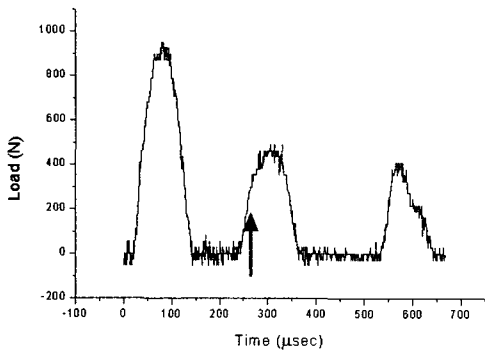


Fig. 10 Load history with respect to time(60°) (→: crack initiation point)

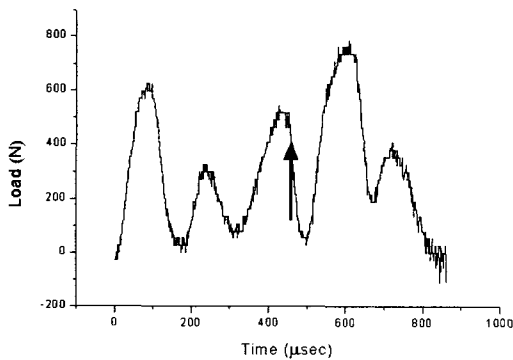


Fig. 11 Load history with respect to time(45°) (→: crack initiation point)

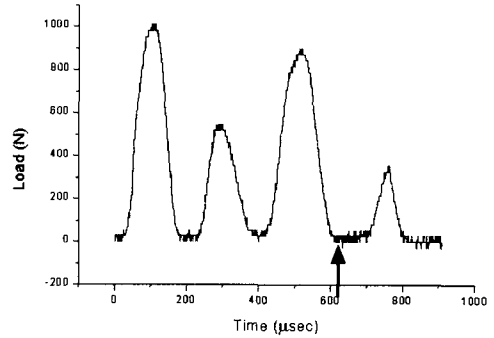


Fig. 12 Load history with respect to time(30°) (→: Crack initiation point)

결과에서 경사계면의 경사각은 K_1 에 크게 영향을 미치지 않으며 경사각이 작을수록 K_2 값은 감소한다는 사실을 실험적으로 규명하였다. 경사각 α 가 90° 인 경우에 대한 결과는 참고문헌[8]에 기술되어 있으며, Fig. 13에서 보이는 바와 같은 변화양상을 두 개의 응력확대계수 K_1 과 K_2 에 대해서 확인하였다.

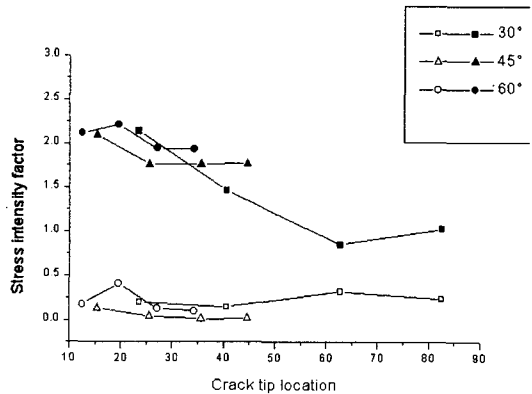


Fig. 13 Stress intensity factor vs. crack tip location for various slant angle specimens (Open- K_1 , solid- K_2)

5. 결 론

본 연구에서는 이종재료내에서 동적으로 전파하는 경사 계면균열선단부근의 응력장을 동적 광탄성실험을 이용하여 해석하였다. 충격 하중을 받은 후 계면을 따라 빠르게 전파하는 경사계면균열

Fig. 13에서는 각 시편에서의 동적 응력확대계수 K_1 , K_2 와 균열선단위치와의 관계를 나타내었다. 이

선단부근의 응력장과 계면균열 전파속도 양상을 Cranz-Shardin 카메라시스템을 이용한 동적 광탄성 실험방법을 이용하여 측정한 후 ODLs 방법으로 추출한 응력확대계수를 이용하여 생성한 이론적인 응력장과 비교하여 경사 계면균열 동적 전파거동을 해석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험적으로 얻어진 응력장의 양상이 Overdeterministic Least Square 방법을 이용하여 생성한 이론적인 응력장을 이용하여 정량적으로 모사(simulation) 될 수 있음을 밝혔다.

(2) 경사 계면균열의 경사각 α 가 클수록 균열 전파 개시시간이 빠르나 균열전파속도는 오히려 낮음을 실험적으로 밝혔다.

(3) 3점 굽힘 시편내의 동적 계면균열에 대한 동적 파괴인성치, K_{I1} 및 K_{I2} 의 변화 양상을 Hybrid-Experimental 방법으로 결정하였다.

(4) 경사계면의 경사각은 K_{I1} 값에는 크게 영향을 미치지 않으나 경사각이 작을수록 K_{I2} 값은 감소한다는 사실을 실험적으로 밝혔다.

후 기

본 연구는 KOSEF 특정연구과제(97-02-00-04-01-3)에 의해 수행된 것입니다.

참고문헌

- Rice., J. R and Sih, G. C., J. Appl. Mech., E32, pp. 418-423, 1965.
- Comninou, M. J. Appl. Mech, E44, pp. 631-636, 1977.
- Barber, J. R. and Comniou, . M. J. Appl. Mech., Vol. 50, pp. 770-776, 1983.
- Martin-Morgan et al., J. Appl. Mech., Vol. 50, pp. 29-36, 1983.
- 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.
- Lee, O. S. et al., "Dynamic Mixed Mode Crack Propagation Behavior of Structural Bonded Joints," KSME International Journal Vol. 14, No. 7, 2000.
- Deng, X. "General Crack-Tip Fields for Stationary and Steadily Growing Interface Cracks in Aniso-tropic Bimaterials," Journal of Applied Mechanics, Vol. 60, pp. 183-189, 1993.
- 이역섭, 박재철, 윤해룡, 변귀한 "충격 하중을 받는 동적 계면균열의 전파특성" 제9차 유도무기 학술대회 논문집 pp. 615~622, 1999.
- Dally, J. W. and Riley, W. F., Experimental Stress Analysis, McGraw Hill, pp. 424~506, 1991.
- 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.
- Ouk Sub Lee, Jae Chul Park, Gyu Hyun Kim "Dynamic mixed mode crack propagation behavior of structural bonded joints," KSME International Journal , Vol. 14, No. 7, pp. 752-763, 2000.