

계면에 존재하는 결함의 강성도가 동적 계면균열전파에 미치는 영향

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

Effect of the Stiffness of Interface Defect on Dynamic Interface Crack propagation

O. S. Lee(Inha Univ.), H. L. Yin(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 stiffness of interface defect(existed along the path of the crack propagation) 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(응력확대계수), 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 동적 균열전파계면에 존재하는 결함의 강성도가 동적 계면균열전파양상에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.

2. 이론

일반적으로 계면균열의 동적 응력확대계수를 다음과 같이 나타낸다. $K = K_I + iK_{II}$ (여기서 K_I 과 K_{II} 는 Mode I 과 Mode II 하중에 대한 응력확대계수인 K_I 과 K_{II} 가 아님). Fig. 1과 같은 극좌표계를 동적 계면균열 선단에 세우고 균열 선단의 전파속도를 C 라 할 때 균열선단의 응력장은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

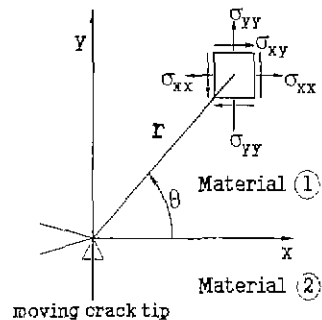


Fig 1 A coordinate system and stress component for a small element around the dynamic interface crack tip

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}(r, \theta) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} [K_1 \cos(\varepsilon \ln r) - K_2 \sin(\varepsilon \ln r)] \hat{\sigma}_{\sigma_{xx}}^H(\theta) \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \eta [K_1 \sin(\varepsilon \ln r) + K_2 \cos(\varepsilon \ln r)] \hat{\sigma}_{\sigma_{xy}}^H(\theta) \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_3 \hat{\sigma}_{\sigma_{\theta\theta}}^H(\theta) \\ \sigma_{yy}(r, \theta) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} [K_1 \cos(\varepsilon \ln r) - K_2 \sin(\varepsilon \ln r)] \hat{\sigma}_{\sigma_{yy}}^H(\theta) \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \eta [K_1 \sin(\varepsilon \ln r) + K_2 \cos(\varepsilon \ln r)] \hat{\sigma}_{\sigma_{xy}}^H(\theta) \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_3 \hat{\sigma}_{\sigma_{\theta\theta}}^H(\theta) \\ \sigma_{xy}(r, \theta) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} [K_1 \cos(\varepsilon \ln r) - K_2 \sin(\varepsilon \ln r)] \hat{\sigma}_{\sigma_{xy}}^H(\theta) \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \eta [K_1 \sin(\varepsilon \ln r) + K_2 \cos(\varepsilon \ln r)] \hat{\sigma}_{\sigma_{yy}}^H(\theta) \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_3 \hat{\sigma}_{\sigma_{\theta\theta}}^H(\theta) \end{aligned}$$

여기서 r, θ = 균열선단이 원점인 극좌표

K_1, K_2 = 평면 계면균열 혼합응력학대계수

$\varepsilon, \eta, \hat{\sigma}_{\sigma_{ij}}^H(\theta)$ = 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

제면상에 존재하는 결함의 강성도가 계면균열의 전파거동에 미치는 영향을 해석하기 위하여 시험 재료는 Polycarbonate(PC)와 Aluminum(Al)이며, 결합충진재로는 PC, Al, Steel을 사용하였으며, 계면접착재로는 상온 Epoxy를 사용하였다. 시험편의 최대적합강도를 얻기 위하여 시험당 최소 24시간 이상의 경화시간을 주었다. 계면에 발생하는 접착 잔류응력이 아주 미미하여 무시할 수 있음을 확인하고 실험을 진행하였다. 시험편의 형상은 Fig. 2와 같으며, 시험편의 아래쪽 양끝은 3점 굽힘 시험형태로 고정되어 있으며 시험편의 두께는 3mm이다.

3.2 동적 광탄성 실험장치

실험장치는 Fig. 3과 같이 Cranz-Shardin형 고속멀티

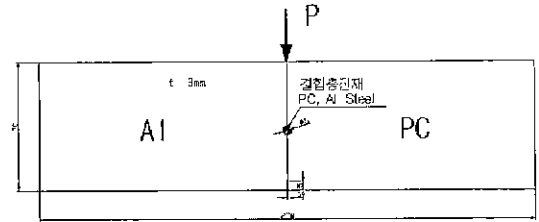
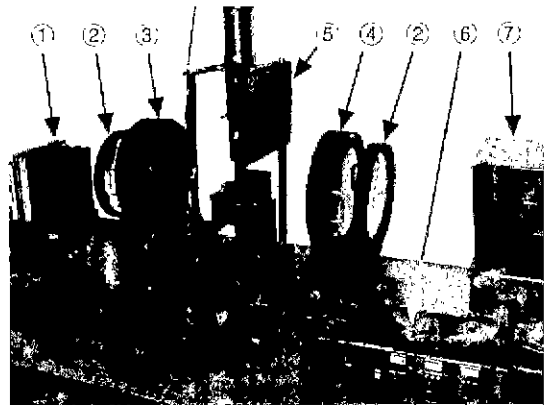


Fig 2 Configuration of test specimen (dim = mm)



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

-스파크 카메라 세트 ($10^6/ps$), 하중 장치, 필드렌즈, 편광 장치, 콘트롤러로 구성되었다.

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 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 턱에 Fig. 4와 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 (Measurement group, 2311)로 증폭하여 저장용 오실로스코프에 기록하였다.

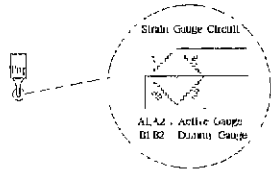


Fig. 4 Configuration of strain gauge circuit on impact tip

4. 결과 및 고찰

Fig 5에서는 구멍만 있는 시편이 충격하중을 받은 후 고속으로 진파하는 계면균열의 등색선 프린지 양상을 이론적으로 생성한 프린지양상과 정량적으로 비교하여 나타내었다. 그림에서와 같이 Over Deterministic Least Square (ODLS) 방법을 이용하여 추출한 응력확대계수를 이용하여 생성한 이론적인 프린지양상이 실험적인 프린지양상과 유사함을 알 수 있다 Fig 6, Fig. 7과 Fig. 8에서는 각각 PC, Al, Steel 결함충진체를 사용한 시편의 실험적인 프린지양상과 이론적인 프린지양상을 나타내었다

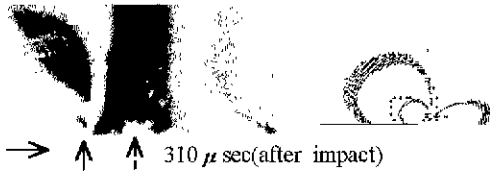


Fig 5 Experimental and theoretical isochromatic fringe patterns (no fill, -theoretical, -experimental) (→: crack propagating direction, ↑: crack tip location, : hole location)

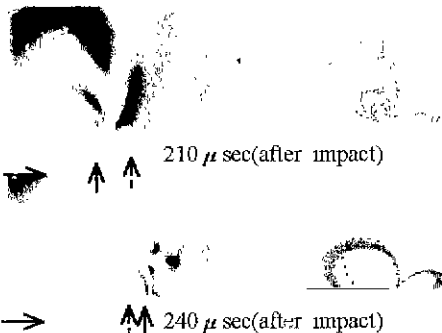


Fig 6 Experimental and theoretical isochromatic fringe patterns (PC fill, -theoretical, -experimental) (→: crack propagating direction, ↑: crack tip location, : fill location)

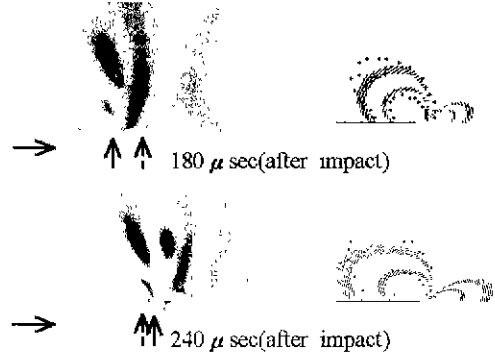


Fig 7 Experimental and theoretical isochromatic fringe patterns (Al fill, -theoretical, -experimental) (→: crack propagating direction, ↑: crack tip location, : fill location)

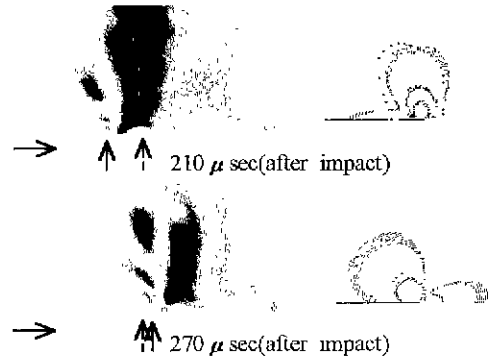


Fig 8 Experimental and theoretical isochromatic fringe patterns (Steel fill, -theoretical, -experimental) (→: crack propagating direction, ↑: crack tip location, : fill location)

Fig. 9에서는 각 시편이 충격하중을 받은 후 고속으로 진파하는 계면균열의 전파속도가운데서 대표적인 것을 나타내었다. 그림에서와 같이 결함충진체를 사용한 시편의 균열전파계시시간은 결함충진체가 없이 구멍만 있는 경우의 시편보다 빠르다. 결함충진체는 계면균열의 전파를 억제하며 그 영향이 구멍만 있는 시편보다 크며 결함충진체의 재료의 탄성계수가 클수록 그 영향이 크다

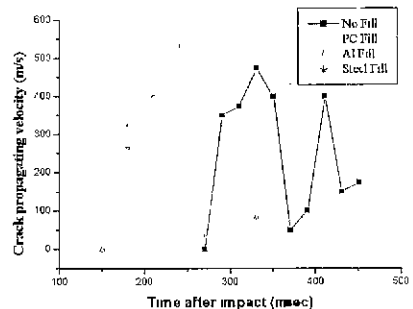


Fig 9 Crack propagating velocity

5, 결 론

Fig. 10에서는 충격탑에서 생성된 동적 하중에 관한 신호를 보정을 거쳐 환산한 실제 하중을 나타내었다 각각의 화살표는 균열전파개시시간을 나타낸다.

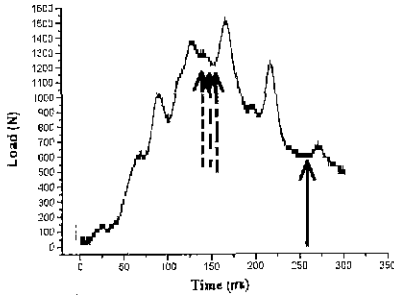


Fig. 10 Load history with respect to time (crack initiation points → no fill ---→ PC fill --→ Al fill ----→ Steel fill)

Fig 11에서는 각 시편에서의 동적 응력확대계수 K_1 , K_2 와 균열선단위치와의 관계중 대표적인 것을 나타내었다 그림에서 알 수 있듯이 균열전파개시시 결함충진재가 있는 경우의 계면균열의 동적 응력확대계수 K_1 과 K_2 는 결함충진재가 없는 경우보다 크며 결함충진재의 탄성계수가 클수록 K_1 은 크나 K_2 는 오히려 작아진다. 계면균열이 구멍이나 결함충진재를 지날 때 결함충진재가 있는 경우에 없는 경우보다 K_1 이 작고 결함충진재의 탄성계수가 클수록 더 작아 지지만 K_2 는 큰 영향을 받지 않는다

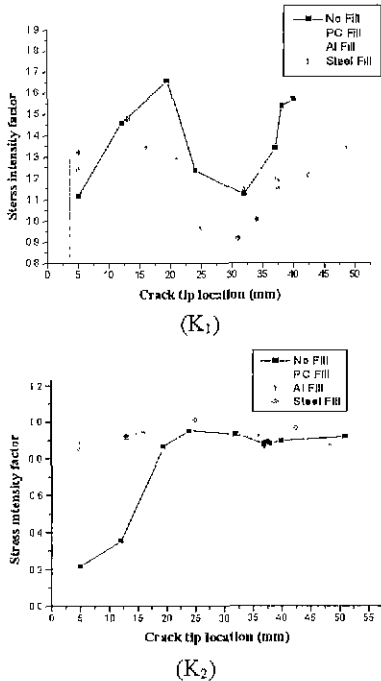


Fig. 11 Stress intensity factor vs. crack tip location

본 연구에서는 계면에 구멍이 존재하는 시편이 충격하중을 받은 후 동적으로 전파하는 균열선단부근의 응력장과 계면균열 전파양상을 Cranz-Shardin 카메라시스템을 이용한 동적 광탄성 실험방법을 이용하여 기록하였다. ODSL 방법으로 추출한 응력확대계수를 이용하여 생성한 이론적인 응력장과 실험적인 응력장을 비교하여 계면에 존재하는 구멍의 보강재가 계면균열의 동적 전파거동에 미치는 영향을 정량적으로 해석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 결함충진재가 있는 경우에 계면균열전파개시 시간은 결함충진재가 없이 구멍만 있는 경우에 비해 빠르다 계면균열이 구멍이나 결함충진재를 지날 때 보강재가 있는 경우에 계면균열의 전파를 억제하는 영향이 크며 결함충진재의 탄성계수가 클수록 그 영향이 더욱 커진다

(2) 균열전파개시시 결함충진재의 탄성계수가 클수록 계면균열의 동적 응력확대계수 K_1 은 증가하고 K_2 는 오히려 감소한다. 계면균열이 결함충진재를 지날 때 결함충진재의 탄성계수가 클수록 K_1 은 감소되나 K_2 는 큰 영향을 받지 않는다

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 Comninou, 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