

이종재료의 진전 계면 균열에 대한 동적 광탄성 실험법

신 동 철* · 황 재 석**

Dynamic Photoelastic Experimental Method for Propagating Interfacial Crack of Bimaterials

Dong-Chul Shin and Jai-Sug Hawong

Key Words: Dynamic Photoelastic Experimental Method(동적 광탄성 실험법), Two Dissimilar Isotropic Bimaterials(두 상이한 등방성 이종재료), Isotropic/Orthotropic Bimaterials(등방성/직교이방성 이종재료), Molding Method(주형법), Bonding Method(접착법), Cranz-Schardin Pattern Camera System(크랭즈-샤딘 형식 카메라 장치), Dynamic Photoelastic Hybrid Method(동적 광탄성 실험 하이브리드 법), Propagating Interfacial Crack(진전 계면 균열), Crack Propagating Velocity(균열 전파속도)

Abstract

In this research, the dynamic photoelastic experimental hybrid method for bimaterial is introduced. Dynamic biaxial loading device is developed, its strain rate is 31.637 s⁻¹ and its maximum impact load is 20 ton. Manufactured methods for model of the dynamic photoelastic experiment for bimaterial are suggested. They are bonding method(bonding material: AW106, PC-1) and molding method. In the bonding method, residual stress is not occurred in the manufactured bimaterial. Crack is propagated along the interface or sometimes deviated from the interface. While in the molding method, residual stress is occurred in the manufactured bimaterial. Crack is always deviated from the interface and propagated in the epoxy region(softer material). In order to propagate with constant velocity along the interface of bimaterial with arbitrary stiffer material, edge crack should be located along the interface of the acute angle side of the softer material in the bimaterial.

1. 서론

이종재료는 단일 재료로서는 얻을 수 없는 많은 장점을 가지고 있기 때문에 최근의 산업 구조물들에서 많이 이용되고 있다. 그러나 대부분의 이종재료들은 각 재료사이의 계면이 가장 취약하다는 단점을 갖고 있다. 그러므로 다양한 형태의 하중을 받는 이종재료의 분리(debonding) 혹은 층간분리(delamination)에 대한 문제가 주요한 관심거리이다. 따라서 이러한 이종재료의 문제에 대해 연구하고자 할 때, 이종재료 시편의 제작방법

과 균열이 계면을 따라 진전하게 하기 위한 실험 방법 및 균열의 위치 등에 대한 연구가 우선 되어야 할 것이다.

지금까지의 이종재료에 대한 광탄성 실험은 접착법에 의해 두 상이한 등방성 재료를 접착하여 3점 굽힘 실험, 또는 계면에서 조금 떨어진 위치의 강한 재료쪽에 충알을 쏘아 충격하중을 가하거나 강한 재료의 계면 반대쪽에 가지를 내어 여기에 화약을 폭발시켜 충격인장하중을 가하는 방법이 주로 이용되었다. 그러나 이러한 방법들은 균열 진전에 따른 등색선 무늬뿐만 아니라 충격 응력파에 의한 무늬도 발생되며, 균열이 등속으로 진전하지 못할 뿐 아니라 진전하다가 정지(arrest)하는 단점을 가지고 있다.

그러므로 본 연구에서는 이종재료 시편의 제작

* 회원, 영남대학교 대학원 기계공학부

** 회원, 영남대학교 기계공학부

방법과 균열 위치에 따른 균열의 진전 양상에 대해 연구하고자 한다.

2. 이종재료 계면진전균열의 선단 응력장

선형 동-탄성(elastodynamic) 평면문제에서 계면 균열이 c 의 속도로 계면을 따라 진전할 때, (X, Y) 는 초기 균열선상을 X -축으로 하는 고정 좌표계이고, (x, y) 는 균열선단을 원점으로 하는 이동좌표계라면 두 좌표계 사이에는 $x = X - ct$, $y = Y$ 의 관계가 있다. 이러한 좌표계에 대해 본 연구자들은 이미 선단 응력장을 유도하였으며, 각 재료 $k(=1,2)$ 에 대해서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \sum_{n=1}^{\infty} \text{Real} \left[\lambda_n \left(E_{1k} M_{1kn} z_{1k}^{\lambda_n-1} + \bar{E}_{1k} M_{2kn} \bar{z}_{1k}^{\lambda_n-1} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + E_{2k} M_{3kn} z_{2k}^{\lambda_n-1} + \bar{E}_{2k} M_{4kn} \bar{z}_{2k}^{\lambda_n-1} \right) \beta_n \right] \\ \sigma_{22} &= \sum_{n=1}^{\infty} \text{Real} \left[\lambda_n \left(F_{1k} M_{1kn} z_{1k}^{\lambda_n-1} + \bar{F}_{1k} M_{2kn} \bar{z}_{1k}^{\lambda_n-1} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + F_{2k} M_{3kn} z_{2k}^{\lambda_n-1} + \bar{F}_{2k} M_{4kn} \bar{z}_{2k}^{\lambda_n-1} \right) \beta_n \right] \\ \sigma_{12} &= \sum_{n=1}^{\infty} \text{Real} \left[\lambda_n \left(G_{1k} M_{1kn} z_{1k}^{\lambda_n-1} + \bar{G}_{1k} M_{2kn} \bar{z}_{1k}^{\lambda_n-1} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + G_{2k} M_{3kn} z_{2k}^{\lambda_n-1} + \bar{G}_{2k} M_{4kn} \bar{z}_{2k}^{\lambda_n-1} \right) \beta_n \right] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 E_{ik} , F_{ik} , G_{ik} ($i=1,2$)는 정의된 복소계수 들이며, M_{mkn} ($m=1,2,3,4$)은 n 번째 고유치에 대한 멱급수 형태로 표현된 에어리 응력함수의 각 복소계수들에 대한 β_n 과의 관계를 규명하는 복소계수이며, 이들 계수들은 주어진 재료(k)의 물성치와 균열진전속도에 관계되는 알고 있는 값들이다. λ_n 은 n 번째 고유치를 의미하며, z_{ik} 는 각 재료의 특성근과 균열선단에서의 위치만 주어지면 결정되는 알고 있는 값이다. 따라서 식 (1)의 미지수는 오직 β_n 만 존재한다.

3. 동적 광탄성 하이브리드 법

식 (1)을 광-응력 법칙인 식 (2)에 대입하면 식 (3)과 같은 등색선 데이터와 응력성분들과의 관계식을 얻는다.

$$D = \left(\frac{f_{od} N_f}{t} \right)^2 = (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2 \quad (2)$$

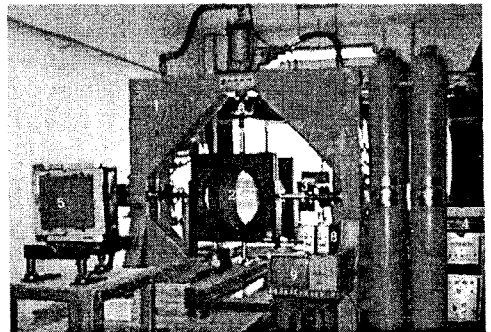
$$\begin{aligned} D &= \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \text{Real} \left[\lambda_n \left(2E_{11} z_1^{\lambda_n-1} + 2\bar{E}_{11} M_{21n} \bar{z}_1^{\lambda_n-1} \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (E_{21} - F_{21}) M_{31n} z_2^{\lambda_n-1} + (\bar{E}_{21} - \bar{F}_{21}) M_{41n} \bar{z}_2^{\lambda_n-1} \right) \beta_n \right] \right\}^2 \\ &+ 4 \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \text{Real} \left[\lambda_n \left(G_{11} M_{11n} z_1^{\lambda_n-1} + \bar{G}_{11} M_{21n} \bar{z}_1^{\lambda_n-1} \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + G_{21} M_{31n} z_2^{\lambda_n-1} + \bar{G}_{21} M_{41n} \bar{z}_2^{\lambda_n-1} \right) \beta_n \right] \right\}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 f_{od} 는 동적 응력프린지치로 실험에 의해 구해진다. N_f 는 등색선 무늬차수이고, t 는 시편의 두께이다. 그러므로 식 (3)은 오직 β_n 만의 함수이다. 그러므로 동적 광탄성 실험을 통해 두 상이한 등방성 이종재료 내의 계면 진전균열선단 주위의 동적 등색선 무늬 데이터를 얻고, 이것을 사용하여 식 (3)의 미지 복소계수 β_n 를 뉴우튼 랩슨(Newton-Raphson)법에 의한 비선형 최소자승법을 통해 구하고 이것을 식 (1)에 대입하여 각 경우의 균열선단의 각 응력성분과 변위성분 및 동적 응력확대계수를 구하는 이러한 방법을 본 연구에서는 "이종재료용 동적 광탄성 하이브리드 법"이라 칭한다.

4. 동적 광탄성 실험

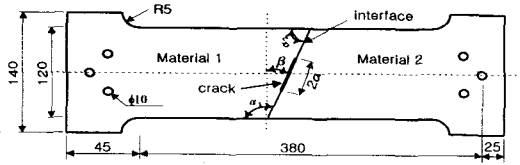
4.1 실험장치

본 연구에서 사용된 동적 광탄성 실험장치는 Fig. 1과 같으며 이 장치는 정적 및 동적 1축, 2축 시험을 할 수 있는 기능을 갖고 있다. 본 장치로 가할 수 있는 변형률 속도(strain rate)는 31.637 s^{-1} 이다. 이 장치에 적당한 용량의 로드셀



1. Dynamic biaxial loading frame
2. Field lens & Polarizer & Quarter wave plate
3. Multi-spark light source 4. Multi-spark control box
5. Multi-camera 6. Load-cell 7. Accumulator
8. Dynamic amplifier 9. Oscilloscope

Fig. 1 Dynamic loading device



Material 1 : Araldite(Ciba Geige Co.)+Hardner(HT-903) ; Epoxy Resin
 Material 2 : Aluminum 6061 or Ca. F. E. C.((주) 한국파이버)

Fig. 2 Schematic of the specimen

(load-cell)을 장착하고 이 장치의 유압을 조절하면 우리가 원하는 1축 혹은 2축 충격하중을 가할 수 있다.

시편에 발생하는 동적 응력상태를 동색선 무늬 형태로 보기 위해 볼 수 있도록 크랭스-샬딘형식 카메라 시스템(Cranz-Schardin pattern camera system)을 동적 광탄성 실험장치에 장착하였으며, 이 카메라 장치는 프레임율이 10^6 frame/sec로써 전체 16개의 상(image)을 얻을 수 있으며, $1 \mu\text{sec}$ 단위까지 광원의 스파킹(sparking) 시간을 조절할 수 있다.

4.2 시편 제작 방법

본 연구에서는 에폭시 수지(Epoxy resin)과 알루미늄(Al 6061) 및 Ca. F. E. C. (Carbon Fiber Epoxy Composite: 한국 파이버 (주))을 이용하여 시편을 제작하였다. 에폭시 수지는 시바사(Ciba Geige Co.)의 주재인 아랄다이트(Aradite)와 경화제인 HT-903을 중량비 10:3으로 혼합하여 135°C 정도의 노내에서 12시간 정도 성형하였다.

시편의 형상과 크기는 Fig. 2와 같으며 시험편의 제작은 성형된 에폭시판과 알루미늄 혹은 Ca. F. E. C를 소정의 치수로 기계가공 하였다. 두 재료의 접합계면은 밀링가공으로 완전한 수직이 될 수 있도록 세심한 주의를 하였으며 결합력을 증가시키기 위하여 줄과 #200사포(sand paper)로 접합계면의 적당한 표면 거칠기를 주었다. 가공이 끝난 후에는 두 재료의 표면을 증류수로 깨끗이 씻은 후 이종재료 시편을 제작하는데 크게 세 가지로 나누어 볼 수 있다

(1) 접착법에 의한 접착(접착제:AW106)-1

세정된 시편의 접합부의 옆면에 약 0.5 mm 정도 떨어진 위치에 셀로판테이프를 부착하여 접합

시 흘러내리는 접착제가 시험편에 붙지 않도록 한다. 사용된 접착제는 접착력이 우수한 에폭시 접착제(AW106)을 사용하였다. 시험편을 일직선이 되도록 고정하여 접착력이 우수한 종이테이프를 시험편 표면에 부착한 후 시험편 양쪽 계면에 접착액을 충분히 도포한 후 잔류응력이 발생하지 않도록 상온($18-20^\circ\text{C}$)에서 경화시킨다. 접착제의 두께가 50 m미만일 때는 접착하여 만든 이종재료일지라도 순수 이종재료로 간주할 수 있으므로 본 연구에서는 두께가 30 mm미만인 테프론 시트(Teflon-Sheet)를 이용하여 균열을 주형하였다.

Fig. 3 (a)는 접착하였을 때 시편에 발생하는 잔류 등색선 무늬를 CCD 카메라로 촬영한 것이다. Fig. 3 (a)에서 알 수 있듯이 이 경우에는 동색선 무늬가 거의 발생하지 않았다.

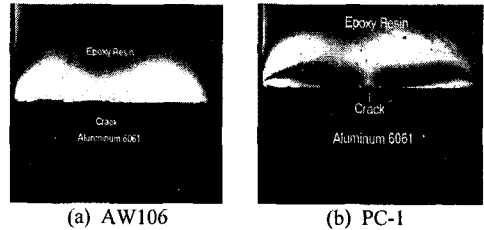


Fig. 3 Residual isochromatic fringe pattern of the bonded specimen

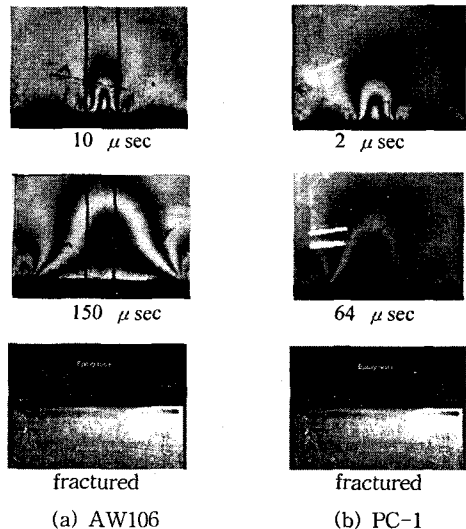


Fig. 4 Isochromatic fringe patterns(bonding method)

(2) 접착법에 의한 접착(PC-1)-2

PC-1(Resin)과 PCH-1(Hardner) (Measurement Group Inc., NC, USA; BATCH-2) 접착제를 사용하고 AW106과 같은방법으로 접착하였다. 먼저 주재와 경화제를 혼합하기 전에 주재인 PC-1을 32℃정도로 예열시키고 예열이 끝난 후에 주재와 경화제를 중량비 10:1으로 완전혼합하여 기포가 발생하지 않도록 천천히 잘 저어준다. 완전히 혼합이 끝난 후에는 접착액을 계면에 균일하게 도포하여 두 재료를 접착하고 상온(24℃)에 24시간 경화시킨다. 접착된 시편은 상온에서 경화되었기 때문에 잔류응력이 거의 없다.

Fig. 3 (b)는 이중재료를 PC-1을 사용하여 시편에 발생되는 잔류 등색선 무늬를 나타낸 것으로 잔류 등색선 무늬는 거의 발생하지 않는다.

Fig. 4는 접착법에 의해 접착된 이중재료 시편의 동적 광탄성 실험을 통해 얻은 등색선 무늬와 파손된 시편을 보여주고 있다. Fig. 4에서 보듯이 접착법에 의해 제작된 이중재료는 충격 인장하중을 가하더라도 균열이 계면을 따라 진전함을 볼 수 있다.

(3) 주형법에 의한 접착

Fig. 5는 주형법에 의해 접착된 이중재료의 잔류 등색선무늬를 나타낸다. 완전한 이중재료로 볼 수 있는 주형법에 의한 이중재료는 두 재료의 기계적 물성이 다르고 선팽창계수가 다르기 때문에 잔류응력이 많이 발생한다. 동적 광탄성 실험에서 이러한 잔류등색선 무늬는 크랙이 전파됨에 따라 해방되므로 해석하기가 매우 어렵다.

Fig. 6은 크랙이 전파하는 경우의 동적 등색선 무늬사진을 나타낸다. 여기서 주형법에 의한 이중재료는 균열이 계면을 따라 전파되지 않는다는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 균열이 완전히

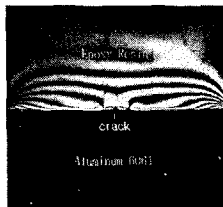


Fig. 5 Residual isochromatic fringe pattern of the molded specimen

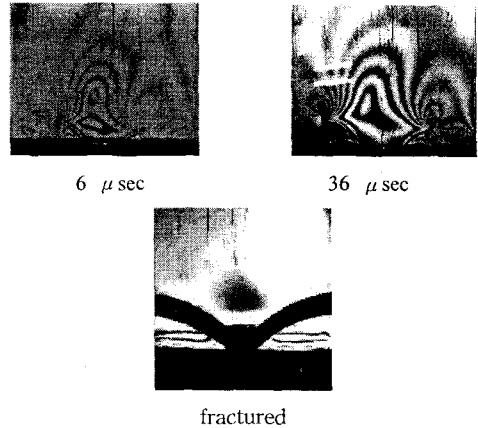


Fig. 6 Isochromatic fringe patterns(Molding method)

진전하고 난 후의 파단된 시편의 잔류 등색선 무늬를 분포를 보면 파단된 후의 에폭시쪽에는 잔류응력이 해방되어 등색선 무늬가 거의 없으나 알루미늄에서 분리되지 않은 에폭시쪽의 잔류응력은 해방되지 않았다는 것을 알 수 있다. 따라서 주형법에 의한 완전한 이중재료의 동적 광탄성 실험에 있어서는 반드시 잔류응력과 균열의 진전에 따른 잔류응력 해방 문제를 고려하여야 한다.

4.3 균열 위치에 따른 계면 균열 진전 양상

균열 위치에 따른 계면 균열의 진전양상에 대해 두 상이한 등방성 이중재료인 에폭시/알루미늄으로 이루어진 경우와 등방성/직교이방성 이중재료인 에폭시/Ca.F.E.C.인 경우로 나누어 생각해 보았다. 두 종류 모두 접착법에 의해 시편을 제작하였으며 가장자리 균열(edge crack)을 에폭시 재료의 예각과 둔각 부분에 테프론 삽입법에 의해 균열 길이 5 mm로 하였다.

(1) 에폭시/알루미늄 이중재료

Fig. 8은 두 상이한 등방성 이중재료인 에폭시/알루미늄 이중재료내 에폭시판의 예각인 부분에 가장자리 균열을 가지는 경우의 동적 광탄성 실험을 통해 얻은 등색선 무늬를 보여주고 있다. 여기서 계면 경사각에 관계없이 균열은 이중재료의 계면을 따라 진전함을 볼 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 8의 각 경우에 대한 균열진전시간에 대한 균열 전파속도를 나타낸 것으로 45° 인

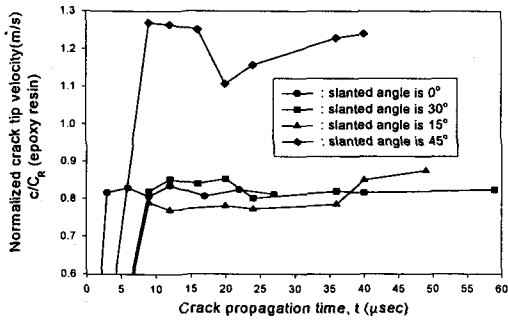


Fig. 9 Variations of crack tip velocity

경우를 제외하고는 에폭시 판의 레이레이파 속도 (Rayleigh wave velocity)의 약 74~88 % (알루미늄의 약 23~27 %)의 값으로 거의 일정한 값으로 진전함을 알 수 있다.

Fig. 10은 두 상이한 등방성 이종재료에서 에폭시 판의 둔각부분에 가장자리 균열을 가지는 경우의 충격인장하중에 의한 동적 광탄성 무늬를 보여주고 있으며, 균열은 계면을 따라 진전하지 않고 약한 재료인 에폭시 수지쪽으로 진전함을 볼 수 있다.

이러한 결과에서 에폭시/알루미늄으로 이루어진 이종재료의 경우 계면 균열이 계면을 따라 진전하게 하기 위해서는 에폭시 판(약한 재료)의 예각 부분에 균열을 있어야 함을 알 수 있다.

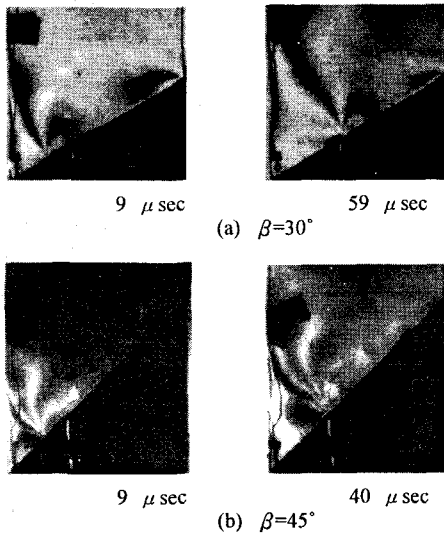


Fig. 8 Dynamic isochromatics of lower edge crack

(1) 에폭시/Ca.F.E.C 이종재료

Fig. 11은 등방성/직교이방성 이종재료인 에폭시/Ca.F.E.C로 이루어진 이종재료에 대해 에폭시 판의 예각쪽에 가장자리 균열을 둔 경우의 동적 광탄성 등색선 무늬를 보여주고 있으며, 균열은 계면을 따라 진전함을 관찰할 수 있었다.

Fig. 12는 에폭시/Ca.F.E.C 이종재료에 대해 에폭시의 둔각쪽에 가장자리 균열을 둔 경우의 동적 등색선 무늬를 보여주는 것이다. 여기서 계면 균열은 계면을 따라 감을 관찰 할 수 있으나, 파 단된 시편을 보면 계면 경사각이 30° 인 경우 에폭시 판의 예각 부근에서 미세한 균열을 관찰 할 수 있었으며, 45° 인 경우에는 계면 길이의 약 85%인 예각 부근에서 균열이 에폭시 쪽으로 전파된 것을 볼 수 있었다. 따라서 에폭시/Ca.F.E.C 이종재료인 경우 계면 경사각이 30° 이상에서는 균열이 계면을 따라 진전하지 않는다고 할 수 있다.

Fig. 13은 에폭시/Ca.F.E.C 이종재료의 각 경우에 대한 균열전파시간에 대한 균열길이를 나타낸 것으로 모든 경우에서 균열 전파속도가 일정함을 볼 수 있다.

Fig. 14는 에폭시/알루미늄 이종재료 및 에폭시/Ca.F.E.C 이종재료내의 계면 경사각 $\beta=0^\circ$ 인 경우에 "이종재료용 동적 광탄성 하이브리드 법"을 적용하여 얻은 응력성분들을 가하여진 초기 충격 응력으로 무차원화하여 0.1차 단위로 나타낸 것

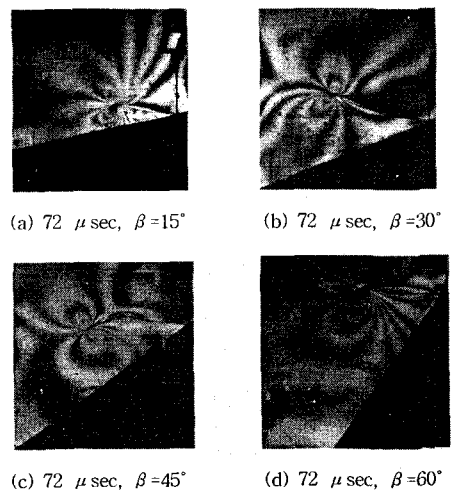


Fig. 10 Dynamic isochromatics of upper edge crack

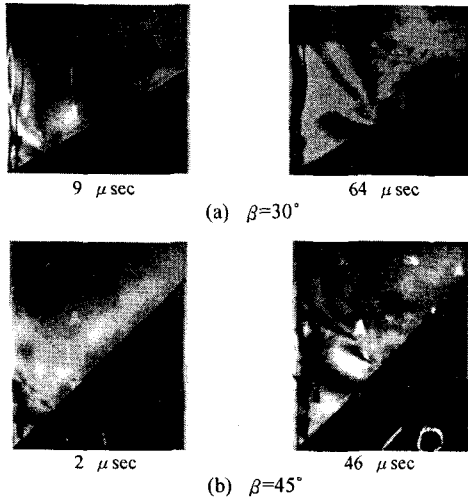


Fig. 11 Dynamic isochromatics of lower edge crack

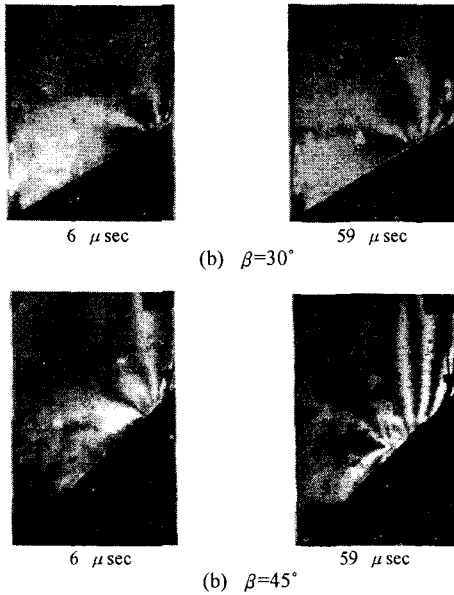


Fig. 12 Dynamic isochromatics of upper edge crack

으로 균열 표면에서의 표면력-자유 조건(traction-free condition)을 잘 만족하고 있다.

5. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이종재료내의 진전하는 계면 균열에 대한 동적 광탄성 실험의 하이브리드법이 소개되었다.

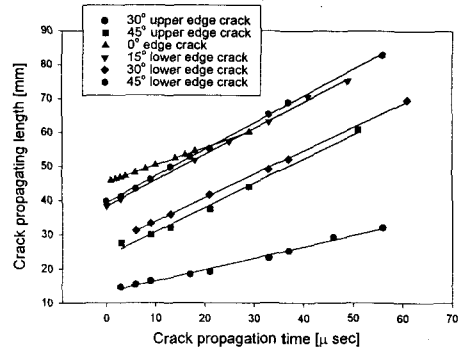


Fig. 13 Variations of crack propagating length with propagation time(epoxy resin/Ca.F.E.C)

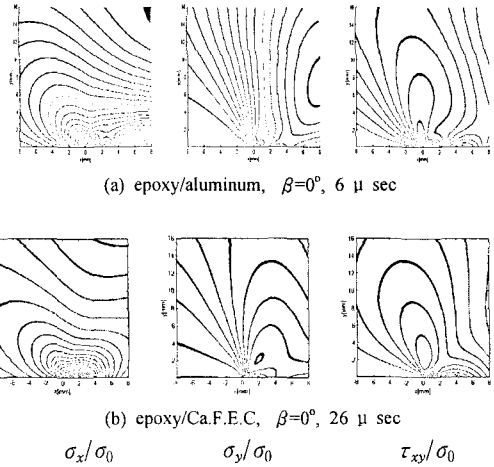


Fig. 14 Contours of normalized stress components

- (2) 이종재료의 시편의 제작에서 접착법을 사용하여야만 잔류응력이 적고, 균열이 계면을 따라 등속으로 진전한다.

- (3) 계면 경사각을 가지는 이종재료에서 계면 균열이 계면을 따라 진전하기 위해서는 균열을 약한 재료의 예약쪽에 있어야 한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구과제(과제번호: 97-0200-04-01-3)의 일부로써 수행된 것임

참고문헌 생략