

# 정적 광탄성 실험 하이브리드 법에 의한 두 상이한 등방성 이종재료의 계면균열전파 기준에 관한 연구

최콘스탄틴<sup>†</sup> · 황재석<sup>\*</sup> · 신동철<sup>\*</sup> · 남성수<sup>\*\*</sup> · 남정환<sup>\*\*\*</sup>

## A Study on the Interfacial Crack Propagation Criterion for Two Dissimilar Isotropic Bimaterial by the Static Photoelastic Experimental Hybrid Method

Konstantin Tche, Jai-Sug Hawong,  
Dong-Chul Shin, Sung-Su Nam and Jeong-Hwan Nam

**Key Words :** Two Dissimilar Isotropic Bimaterial(두 상이한 등방성 이종재료), Static Photoelastic Experimental Hybrid Method(정적 광탄성 실험 하이브리드 법), Crack Propagation Criterion(균열전파 이론), Minimum Strain Energy Density Criterion(최소 변형률 에너지 밀도 이론), Maximum Tangential Stress Criterion(최대 접선응력 이론), Mode Mixity(모드 혼합도), Initial Angle of Crack Propagation(균열진전 초기각도).

### Abstract

The specimen materials used in this research is bimaterial. The static photoelastic experiment was applied to them. And then the specimens used in photoelastic experiment were fractured under static load. The static photoelastic hybrid method was introduced and it's validity had been assured. The static photoelastic hybrid method was applied to the Minimum Strain Energy Density Criterion, the Maximum Tangential Stress Criterion and Mode Mixity. Crack propagation criterion by the static photoelastic hybrid method was introduced and it was applied to the above various failure theories. Comparing the experimental initial angle of crack propagation with the theoretical initial angle of crack propagation from the various failure criterions. And then the optimal crack propagation criterion was suggested and it's validity was assured.

### 1. 서 론

최근 각종 산업분야에서 경량화, 고강도화, 고신뢰성을 목적으로 성질이 단일한 재료를 사용하기 보다는 서로 다른 두 재료를 접합하여 사용하는 경우가 점차 증가하고 있다. 이러한 이종접합 재료를 사용하는 기계 구조물에 있어서, 파괴양상의 대부분은 계면파괴 (interfaces failures)이다. 따라서 이러한 구조물을 설계할 때에는 계면균열

에 대한 파괴특성들의 상세한 분석과 올바른 파괴역학적 강도해석이 무엇보다도 중요하다.

광탄성 실험 하이브리드 법에 관해서는 1998년에 신동철, 황재석<sup>(1)</sup> 등은 단순 인장하중을 받는 균열을 가진 등방성체 및 직교 이방성체용 투과형 광탄성실험 Hybrid 법을 개발 하여 균열 주위의 응력성분 및 응력확대계수 등을 연구하였다.

Crack 진로에 관한 이론은 Griffith<sup>(2)</sup>가 처음으로 재료의 표면에너지 이상으로 에너지가 축적이 되었을 때 파손된다고 제안한 이후에 많은 연구가 이루어졌다. 그 후 Hussain<sup>(3)</sup> 등은 Griffith의 에너지 법칙을 기초로 균열의 초기각도는 에너지 해방률이 최대인 방향으로 파손된다는 G-criterion을 제안 했다.

Erdogan과 Sih<sup>(4)</sup>는 균질재의 혼합모드 균열의 전파각도에 대해 평판의 균열은 재료의 포아송의 비  $\nu$ 에 관계없이 균열선단에서의 최대접선응력

<sup>†</sup> 영남대, 기계공학부 대학원

<sup>\*</sup> 영남대, 기계공학부

E-mail : jshawong@yumail.ac.kr

TEL : (053)810-2445 FAX : (053)813-3703

<sup>\*\*</sup> 영남대, 기계공학부 대학원

<sup>\*\*\*</sup> 일본, 사이타마공업대학, 기계공학부

( $\sigma_{\theta_{max}}$ ) 방향으로 진전한다고 가정한 최대 접선응력 이론(MTSC)를 주장하였고 또한, 1축과 2축 응력상태에서 중앙균열이 존재하는 평판의 균열전파각도를 응력확대계수와 에너지 해방률의 개념을 이용하여 구하였다. 또한 Sih는 이러한 파괴기준에 변형에너지밀도가 최소인 방향으로 최초 균열이 진전한다는 최소 변형에너지 이론(S-criterion)을 주장하였고<sup>(5)</sup>, 변형에너지 밀도계수를 혼합모드에 적용하였다<sup>(6)</sup>.

본 연구에서는 광탄성 하이브리드 법을 통하여 얻은 균열선단 주위의 고차항이 고려된 응력성분을 사용하여 앞서의 균열전파 이론에 적용함으로써 이종재료 계면균열의 초기균열전파각도에 관한 최적의 전파이론을 제시하고자 한다.

## 2. 기 초 이 론

### 2.1 두 상이한 등방성 이종재료내의 진전 계면 균열의 선단 응력장 및 변위장

정적 하중을 받는 등방성 재료의 특성근은 명백한 한 쌍의 중근( $\mu = \pm i$ )를 가지며, 이 경우의 Muskhelishvili 의 복소함수<sup>(7)</sup>는 두 개의 해석적인 함수  $\Omega_{1k}, \Omega_{2k}$  의 항으로 표현되는 식 (1)과 같은 Airy 응력함수( $\Phi$ )로 표현된다.

$$\Phi = \text{Re} \left[ \bar{z}_k \Omega_{1k} + \int \Omega_{2k} dz_k \right] \quad (1)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Omega_{1k} &= C_{1k} z_k^\lambda + D_{1k} \bar{z}_k^\lambda \\ \Omega_{2k} &= C_{2k} z_k^\lambda + D_{2k} \bar{z}_k^\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

이러한 Airy 응력함수를 사용하여 Fig. 1 과 같은 좌표계에서 식 (1)의 Airy 응력함수를 사용하여 각 응력 및 변위 성분들은 각 재료  $k(=1,2)$  에 대해 식 (3)과 같이 표현할 수 있음을 본 연구자에

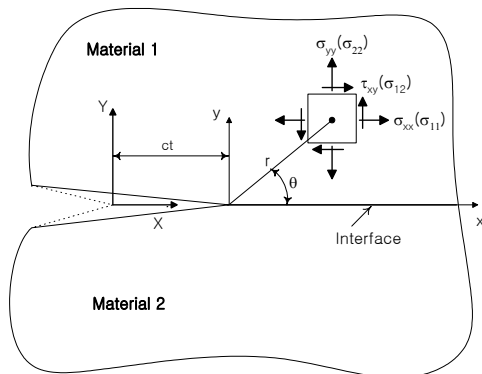


Fig. 1 Coordinate system and stress components at the crack-tip

의해 유도되었다<sup>(8)</sup>.

$$\begin{aligned} \sigma_{lk} &= \sum_{n=1}^{\infty} \text{Re} [\lambda_n (S_{l1kn} z_k^{\lambda_n-1} + S_{l2kn} \bar{z}_k^{\lambda_n-1} \\ &\quad + S_{l3kn} \bar{z}_k z_k^{\lambda_n-2} + S_{l4kn} z_k \bar{z}_k^{\lambda_n-2}) \beta_n] \\ u_{pk} &= \sum_{n=1}^{\infty} \text{Re} [(D_{p1kn} z_k^{\lambda_n} + D_{p2kn} \bar{z}_k^{\lambda_n} \\ &\quad + D_{p3kn} \bar{z}_k z_k^{\lambda_n-1} + D_{p4kn} z_k \bar{z}_k^{\lambda_n-1}) \beta_n] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $l=1,2,3$  에 대해  $\sigma_{lk}$  는  $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]_k = [\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}]_k = [\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}]_k$  를,  $p=1,2$  인 경우  $u_{pk}$  는  $[u_1, u_2]_k = [u, v]_k$  를 의미한다[계수관계: 참고 문헌 [8]참조].

이 때 복소계수( $\beta_1$ )와 응력확대계수와와의 관계는 식 (4)와 같다<sup>(8)</sup>.

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{\sqrt{2}}{\cosh(\pi \varepsilon)} \text{Re}[A_2 \beta_1] \\ K_1 &= \frac{\sqrt{2}}{\cosh(\pi \varepsilon)} \text{Re}[A_3 \beta_1] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} A_2 &= \lambda_1 [(2 + M_{311}) + (2M_{211} + M_{411}) + (\lambda_1 - 1)(1 + M_{211})] \\ A_3 &= \lambda_1 [(-iM_{311}) + (iM_{411}) - i(\lambda_1 - 1)(1 - M_{211})] \end{aligned}$$

이러한 정의는  $\varepsilon=0$  인 단일 재료 문제의 정의로 변환될 수 있음을 보여주고 있다. 두 상이한 등방성 이종재료 정지 계면 균열에서는 다음의 관계가 있다<sup>(8)</sup>.

$$A_{20} = -iA_3 \quad (5)$$

### 2.2 파괴진로 이론

#### 2.2.1 최대 접선 응력 이론

직각좌표계로 표현된 응력성분을 극좌표로 표시하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \sigma_\theta &= \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \tau_{r\theta} &= (\sigma_y - \sigma_x) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{aligned} \quad (6)$$

균열이 최대 접선 응력 ( $\sigma_{\theta_{max}}$ ) 방향으로 진전한다고 가정한 최대 접선 응력 이론 (Maximum tangential stress criterion)으로부터 균열 초기 전파각도 (initial angle of crack propagation) 은 식 (6)을  $\theta$  에 관해 미분함으로써 구할 수 있다. 즉

$$\frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 \sigma_{\theta}}{\partial \theta^2} < 0 \quad (7)$$

그러나 바로 균열선단( $r=0$ )인 위치에서의 응력 성분을 구하는 것은 불가능하며, 또한 선행 연구자들에 의해 소성영역이 존재하고 있으므로 식 (7)은 균열선단으로부터의 거리  $r$  에 무관하지 않으리라 생각된다. William 과 Ewing<sup>(9)</sup> 은  $r_c = 0.05\text{mm}$ 로 가정하면 그들의 이론적 예측은 시험 결과들과 훌륭한 일치율을 얻는다고 주장하고 있으나, 그 값의 물리적 의미는 분명하지 않다.

2.2.2 최소 변형률 에너지 밀도 이론

균열선단에서의 단위 체적  $V$  에 축적되는 변형률 에너지  $W$  는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dW}{dV} = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} \quad (i, j = x, y) \quad (8)$$

그리고 변형률 에너지 밀도함수는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S = r \frac{dW}{dV} = \frac{r}{2} (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}) \quad (9)$$

Sih<sup>(7)</sup> 은 파괴는  $S$  가 최소인 방향으로 일어나며, 한계값  $S_{cr}$  에 도달하면 파괴가 개시된다고 하였다. 이때 최소 변형률 에너지 밀도 이론 (minimum strain energy density criterion)에 의한 균열 초기 전파각도는 식 (10)으로 구할 수 있다

$$\frac{\partial S}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} > 0 \quad (11)$$

여기에서도 균열 초기진전각도는 균열 선단으로부터의 거리  $r$  에 무관하지 않으리라 생각된다.

3. 실험 및 실험결과

본 연구에서는 투과형 광탄성실험 Hybrid법으로 구한 고차항이 고려된 응력성분이 대입된 최대 접선응력 이론과 최소 변형에너지 밀도 이론을 사용하고 각 균열선단에서 떨어진  $r$  을 변화시키면서 균열전파 초기각도를 구하고 또 모우드 혼합도 이론을 이용하여 구한 균열전파 초기각도도 구한다. 이때 균열 방향을 x축으로 균열전파 초기각도의 방향은 x축과 균열 제적의 최초 접선과 이루는 각도이다. 이렇게 구한 균열전파 초기각도와 실제로 파손된 균열전파 초기각도를 비교하여 최적의 균열전파 이론을 확립하고자 한다.

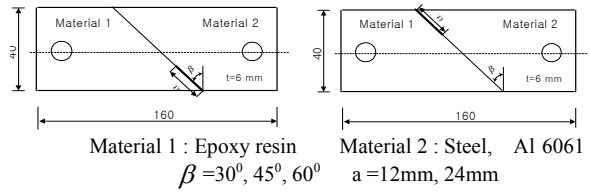


Fig. 2 Specimen of Photoelastic Experiment for isotropic material

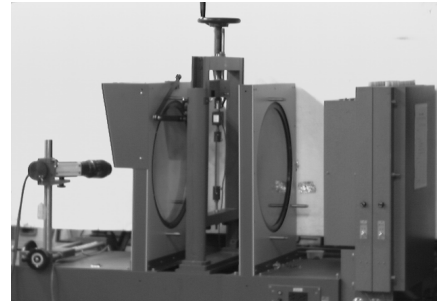


Fig. 3 Optical system of transparent photoelastic device

각 경우의 시편들을 Fig. 2 와 같이 가공하고 Fig. 3 의 투과형 광탄성 실험장치에서 축방향으로 단순 인장응력을 가한다.

두 상이한 등방성 이종재료의 경우 에폭시 판의 예각인 부분에 가장자리 균열을 경우에는 모든 시편에서의 파단이 계면을 따라서 진전하였다. 그러므로 본 연구에서는 균열전파가 접착계면을 따라서 진전하는 경우를 제외하고, 약한 재료인 에폭시쪽으로  $-\theta$  만큼의 초기진전각도를 가지는 경우인 균열의 위치가 에폭시 재료의 둔각인 경우 중 균열의 비( $a/w$ )가 0.3, 0.6 이고, 기울기 ( $\beta$ )가  $30^\circ, 45^\circ$  와  $60^\circ$  인 경우에 대해서만 언급한다.

Figs. 4 와 5 는 각각 에폭시 재료의 둔각위치에  $30^\circ, 60^\circ$  의 편축 계면균열이 존재하는 에폭시/알루미늄과 에폭시/강의 이종재료가 균일한 단순인장을 받을 때 나타나는 실제 전체 등색선 무늬(좌측), 데이터를 취한 영역의 실제 등색선 무늬(우측상단) 그리고, 그래픽한 등색선 무늬(우측하단) 등을 나타낸 것이다. 균열선단의  $\square$  은 실험 데이터를 취한 영역을 의미한다. 그리고 그래픽의 등색선 무늬의 x 와 y 좌표영역은 실험 데이터를 취한 영역을 나타낸다. 이 때, 프로그램의 특성상 x 와 y 좌표를  $-x$  와  $-y$  좌표로 표현하였다. 균열선단의 등색선 무늬차수의 식별이 불가능하므로 식별이 가능한 균열선단에서 조금 떨어진 지점(2mm 이상 의지점)의 데이터를 취하였다. “+” 표시는 데이터를 취한 위치를 나타내며, 무늬차수는 각 0.5 차의 중심선상에서 측정되었다. 그래픽의 등색선 무늬상의 “+”는 각 0.5 차의 중심선상에 존재한다. 그러므로 본 연구에서 사용된 이종재료용 광탄성 실험 Hybrid 법이 유효하다는 것을 알 수 있다.

Figs. 6, 7 은 각각 Figs. 4 와 5 의 경우에 대한

균열선단에서의 각응력성분을 가하여진 응력( $\sigma_0$ )로 무차원화하여 0.1 차 단위로 나타낸 것이다. Figs. 6 과 7 에서 보듯이 균열 선단에서의 표면력 자유조건을 만족하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 6 과 7 을 비교하여 보면 응력성분의 분포는 균열 경사각 및 균열 길이비에 따라서는 다소 차이를 보이으나, 두 재료의 물성치 차이( $E_{Al} : E_{st} = 71:210$ )에 대해서는 거의 차이가 없다.

Fig. 8 은 에폭시/알루미늄 이종재료로써 각각 균열 경사각도가  $60^\circ$ 이고 폭에 대한 균열길이의 비가 각각 0.3 과 0.6 인 경우의 파단된 시편이며,  $\sigma_f$  는 파단응력을 나타낸 것이다. 실제 실험을 통해 측정된 균열전과 초기각도는 균열길이 비가

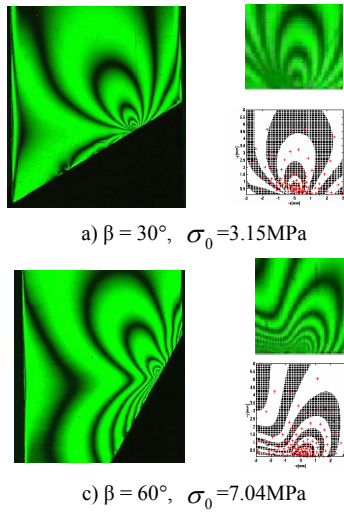


Fig. 4 Actual static isochromatics[left side], actual isochromatic of region [right-upper side] and graphic isochromatics[right-lower side] with upper crack (Epoxy/Aluminum, a/w=0.3)

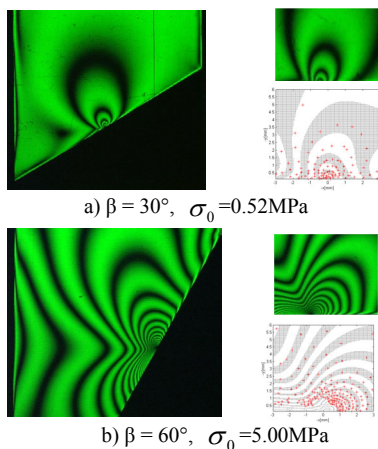


Fig. 5 Actual static isochromatics[left side], actual isochromatic of region □[right-upper side] and graphic isochromatics[right-lower side] with upper crack (Epoxy/Steel, a/w=0.6)

0.3 인 경우는  $58.91^\circ$ 이고, 균열길이 비가 0.6 인 경우는  $57.60^\circ$ 이며, 균열전과 초기각도가 균열길이의 비가 증가할수록 작아진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9 는 Epoxy/Steel 이종재료로써 각각 균열 경사각도가  $60^\circ$ 이고 폭에 대한 균열길이의 비가 각각 0.3 과 0.6 인 경우의 파단된 시편 사진이며, 실제 균열전과 초기각도는 균열길이의 비가 0.3 인 경우는  $51.43^\circ$ 이고, 균열길이의 비가 0.6 인 경우는  $46.78^\circ$ 이며, 균열전과 초기각도가 균열길이의 비가 증가할수록 작아진다는 것을 알 수 있다. 그러나 Epoxy/Steel 이종재료인 경우의 실제 균열전과 초기각도는 동일한 조건의 Epoxy/Aluminum 이종재료의 균열전과 초기각도보다 0.3 인 경우는 약  $7^\circ$  정도 적고, 0.6 인 경우는 약  $11^\circ$  정도 적게 나온다.

Figs. 8 과 9 에서 볼 수 있듯이 균열 경사각도

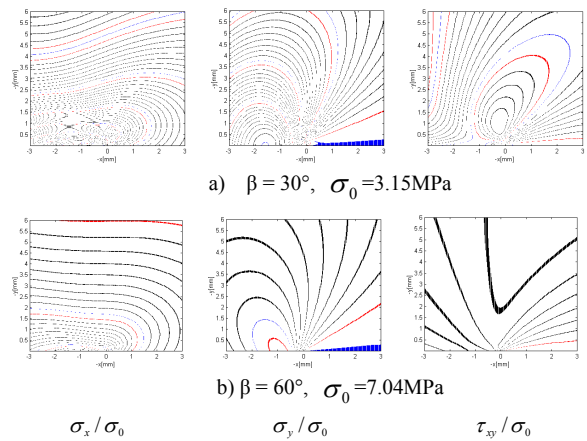


Fig. 6 Contour plot of  $\sigma_x / \sigma_0$ ,  $\sigma_y / \sigma_0$ ,  $\tau_{xy} / \sigma_0$  obtained from the static photoelastic experimental hybrid method for isotropic/isotropic bimerial (Epoxy/Al, a/w=0.3)

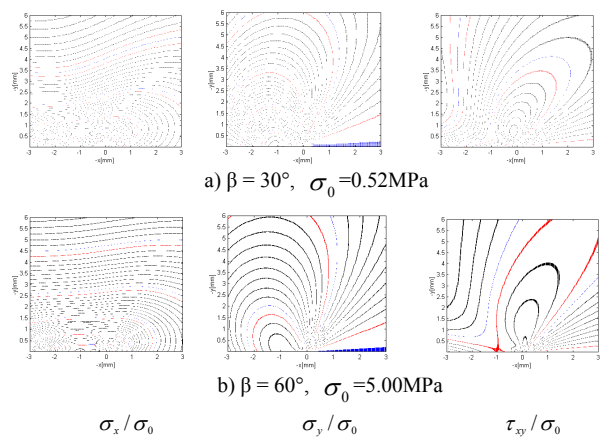


Fig. 7 Contour plot of  $\sigma_x / \sigma_0$ ,  $\sigma_y / \sigma_0$ ,  $\tau_{xy} / \sigma_0$  obtained from the static photoelastic experimental hybrid method for isotropic/isotropic bimerial (Epoxy/Steel, a/w=0.3)

**Table 1** Initial angle of crack propagation in the isotropic/isotropic biomaterial with upper edge crack

	Mode Mixture $\phi$ [°]	Calculated initial branched angle, $\theta_0$ [°]										Actual initial angle
		$r=0.0001\text{mm}$		$r=0.005\text{mm}$		$r=0.01\text{mm}$		$r=0.05\text{mm}$		$r=0.1\text{mm}$		
		MTSC	MSEDC	MTSC	MSEDC	MTSC	MSEDC	MTSC	MSEDC	MTSC	MSEDC	
$e/a$ $a/w=0.3$	56.03	68.22	23.22	<b>59.50</b>	<b>59.49</b>	60.50	60.49	69.75	65.25	73.50	61.50	<b>58.91</b>
$e/a$ $a/w=0.6$	60.20	68.22	23.74	<b>57.57</b>	<b>57.56</b>	57.44	57.43	64.05	64.04	68.15	66.85	<b>57.60</b>
$e/s$ $a/w=0.3$	55.87	62.12	62.11	<b>51.73</b>	<b>51.72</b>	51.39	51.38	60.60	60.15	66.49	66.48	<b>51.43</b>
$e/s$ $a/w=0.6$	55.54	62.48	62.47	<b>47.94</b>	<b>47.93</b>	45.35	45.34	47.95	47.94	48.42	48.41	<b>46.78</b>

Note : MTSC = Maximum Tangential Stress Criterion  
MSEDC=Minimum Strain Energy Density Criterion

가 증가할수록, 균열전파 초기각도는 증가한다는 것도 알 수 있다.

Figs. 10 과 11 은 폭에 대한 균열길이의 비( $a/w$ )가 0.3 과 0.6 인 경우, 각 재료에 대한 균열의 기울기( $\beta$ )에 대한 응력확대계수  $K_0(=\sigma_0\sqrt{\pi a})$ 로 무차원화한 정적응력확대계수의 관계를 나타낸 것이다. 단일재료와 마찬가지로 균열의 기울기( $\beta$ )가 증가할수록  $K_1/K_0$ 는 점점 줄어들고,  $K_2/K_0$ 는 점점 증가하는 것을 볼 수 있다.

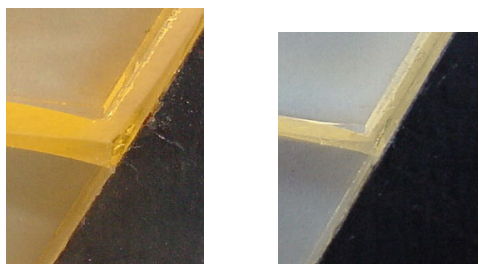
Table 1 은 Epoxy/Aluminum 및 Epoxy/ Steel 이중 재료로서 각각 균열 기울기( $\beta$ )가 60°에 대한 균열길이 비( $a/w$ ) 0.3 과 0.6 인 경우의 균열 선단에서 떨어진 거리( $r$ )에 대한 파손 시편의 실제 초기 전진각도, 광탄성 실험 Hybrid 법으로 구한 응력성분

들을 이용하여 구한 최대 접선응력 이론 (MTSC) 과 최소 변형에너지밀도 이론(MSEDC) 등에서 구한 균열전파 초기각도, 그리고 균열이 전파되기 전의 등색선 무늬로부터 응력확대계수를 이용한 모드 혼합도(Mode mixity)<sup>(7)</sup>인  $\phi(=\tan^{-1}[K_2/K_1])$ 에 구한 값들을 나타낸 것이다. Table 1 에서 알 수 있듯이 실제 균열전파각도는  $r=0.05\text{mm}$  일 때, 투과형 광탄성 실험 Hybrid 법으로 구한 응력성분을 이용한 최대 접선응력이론(MTSC)과 최소변형에너지밀도이론 (MSEDC)에서 얻은 균열전파 초기각도와 매우 잘 일치한다. 또한 모드 혼합도(Mode Mixity)의 경우에도 실제 균열전파 초기각도와 다소 차이는 있지만 상당히 실제 균열전파 초기각도에 근접함을 볼 수 있다.



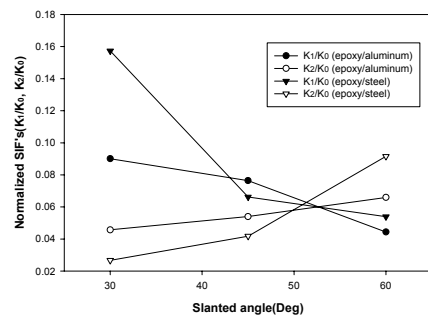
(a)  $a/w=0.3, \sigma_0 = 7.34\text{MPa}$  (b)  $a/w=0.6, \sigma_0 = 5.36\text{MPa}$

**Fig. 8** Fractured specimens of epoxy/aluminum bimaterial with upper edge crack( $\beta = 60^\circ$ )

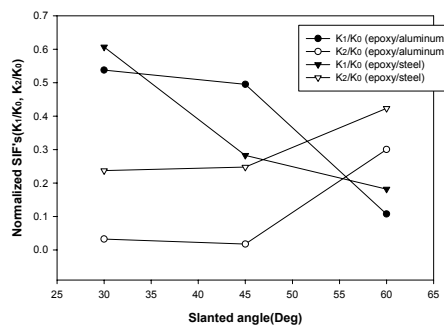


(a)  $a/w=0.3, \sigma_0 = 10.25\text{MPa}$  (b)  $a/w=0.6, \sigma_0 = 5.15\text{MPa}$

**Fig. 9** Fractured specimens of epoxy/steel bimaterial with upper edge crack( $\beta = 60^\circ$ )



**Fig. 10** Variations of normalized static stress intensity factor with slanted angle for iso/iso bimaterial( $a/w=0.3$ )



**Fig. 11** Variations of normalized static stress intensity factor with slanted angle iso/iso bimaterial( $a/w=0.6$ )

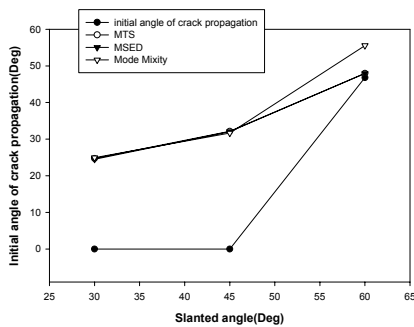


Fig. 12 Variations of initial angle of crack propagation with slanted angle for epoxy/steel bimaterial with upper edge crack ( $a/w=0.6$ ,  $r=0.005\text{mm}$ )

Epoxy/Aluminum 이종재료로서 MTSC 에서 구한 균열전파 초기각도는 각각 균열길이 비( $a/w$ )가 0.3 와 0.6 에 대해  $r=0.001\text{mm}$  일 때의 균열전파 초기각도는 크다가  $r=0.005\text{mm}$  일 때 실제 균열전파 초기각도와 거의 일치하고,  $r=0.005\text{mm}$  이후에는 균열전파 초기각도가 점점 커져서 실제 초기각도와는 많은 차이를 보인다. 반면 MSEDC 에서 구한 균열전파 초기각도는 균열선단 에서의 거리와 관계없이 증가하며,  $r=0.005\text{mm}$  일 때 실제 균열전파 초기각도와 거의 일치한다. 또한 모드 혼합도(Mode mixity)에서 구한 균열 전파 초기각도는 실제 균열전파 초기각도보다 약  $3^\circ$ 이내의 차이로 실제 균열전파 초기각도에 상당히 근접한다.

Epoxy/Steel 이종재료로서 각각 균열길이 비( $a/w$ )가 0.3 과 0.6 일 때 MTSC 와 MSEDC 에서 구한 균열전파 초기각도는  $r=0.001\text{mm}$  일 때 제일 큰 값을 가지다가  $r=0.005\text{mm}$  일 때 실제 각도와 거의 일치하고,  $r=0.01\text{mm}$  이후에는 점점 커져서 실제 균열전파 초기각도와는 많은 차이를 보인다. 그리고, 모드 혼합도(Mode mixity)에서 구한 균열전파 초기각도는 실제 초기 전파 각도보다 각각  $4^\circ$ 와  $9^\circ$ 정도의 큰값을 가지나 상당히 실제 균열전파 초기각도에 근접한다.

Fig. 12 는 Epoxy/Steel 이종재료의 균열길이 비( $a/w$ )가 0.6 인 경우,  $r=0.005\text{mm}$  일 때의 균열의 기울기( $\beta$ )에 대한 균열전파 초기각도를 나타낸 것이다. 이때 균열 기울기( $\beta$ )가  $30^\circ$ 와  $45^\circ$ 인 경우에는 약한 재료인 에폭시쪽으로 파단될려는 힘보다 계면의 접착강도가 약하기 때문에 균열은 접착 계면을 따라서 진전하였기 실제 균열전파 초기각도를  $0^\circ$ 로하여 나타내었다. 그리고, MTSC 와 MSEDC 에서 구한 균열전파 초기각도와 모드 혼합도에서 구한 균열전파 초기각도는 균열 기울기( $\beta$ )가  $30^\circ$ 와  $45^\circ$ 인 경우에 약한 재료인 에폭시 쪽으로 파단되는 경우를 가정하여 계산한 값들이다.

## 5. Conclusions

1. 편축 계면균열을 가진 두 상이한 등방성 이

종재료가 단순 정적 인장하중을 받을 때 대부분의 계면 균열은 재료의 강도가 두 재료간의 접착강도보다 훨씬 강하기 때문에 계면을 따라 진전한다. 그러나 기울기( $\beta$ )가  $60^\circ$ 이고, 에폭시 재료의 둔각에 편축 계면균열이 존재하는 경우는 균열의 비( $a/w$ )와 관계없이 계면을 따라 진전하다가 약한 재료인 에폭시 쪽으로 전파한다.

2. 투과형 광탄성 실험 하이브리드 법을 이용하여 구한 고차항을 고려한 응력성분을 이용한 최대 접선응력이론, 최소변형에너지밀도이론을 균열전파 초기각도를 구하는데 이용할 때 균열선단에서 떨어진 최적의 거리( $r$ )는  $0.005\text{mm}$  인 지점이다.

3. 편축 계면 균열을 가진 두 상이한 등방성 이종재료의 경우에는 최대접선응력이론과 최소 변형에너지밀도 이론에서 구한 균열전파 초기각도가 실제 균열전파 초기각도와 거의 일치하였고, 모드 혼합도에서 구한 균열전파 초기각도 역시 조금의 차이는 있지만 실제 균열전파 초기각도와 거의 일치 하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 지역대학 우수과학자 지원연구(과제번호: R05-2001-000-01135-0)의 일부로써 수행된 것으로 지원에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) J. S. Hawong, D. C. Shin and H. J. Lee, 2001, "Photoelastic Experimental Hybrid Method for Fracture Mechanics of Anisotropic Materials," Experimental Mechanics, Vol. 41, No. 1, pp. 92-99.
- (2) Griffith, A.A., 1921, "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids," Phi. Trans. Royal Soc. London A, Vol. 221, pp. 163-198.
- (3) Hussain M.A., Pu S.L., Underwood J., 1974, "Strain Energy Release Rate for a crack under combined mode I and mode II," Fract. Anal. ASTM STP, Vol. 560, pp. 2-28.
- (4) Erdogan, F. and Sih, G. C., 1963, "On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear," Tran. ASME, pp. 519-528.
- (5) Sih, G.C., 1972, "Mechanics of Fracture," Noordhoff, Leyden.
- (6) Sih, G.C., 1974, "Strain-energy-density factor applied to mixed crack problems," Int. j. Frac..
- (7) Muskhelishvili, N. I., 1963, "Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity," 4th Edition, P. Noordhoff Ltd., Groningen, Netherlands.
- (8) 신동철, 황재석, 2002, "두 상이한 등방성 이종재료 정지 계면균열의 선단 응력장과 변위장에 관한 연구," 대한기계학회2002년도 춘계학술대회 논문집, pp. 331-336.
- (9) Williams, J. G. and Ewing, P. D., 1972, "Fracture under Complex Stress the Angled Crack Problem," Int. J. Frac. Mech., Vol. 8, No. 4, pp. 441-445.