

## 論文

## 직방성 복합재료에서 혼합모드 균열의 진전

강석진\*, 조형석\*, 임원균\*

## Mixed Mode Crack Extension in Orthotropic Materials

Seok-Jin Kang\*, Hyung-Seok Cho\* and Won-Kyun Lim\*

## ABSTRACT

The problem of an orthotropic composite material with a central crack inclined with respect to the principal axes of material symmetry is studied. The material is subjected to uniform biaxial loading along its outer boundaries. The normal stress ratio theory is applied to predict initial crack extension behavior in cracked composite materials. The dependence of the crack extension angle with respect to the biaxial loading and the principal axes of material symmetry is discussed. Our analysis shows significant effects of horizontal loading, crack angle and fiber angle on the crack extension.

## 초 록

재료주축과 경사진 중앙균열을 내포하는 직방성 복합재료 내 균열문제를 해석하였다. 이 균열체에는 외부경계에서 2축방향으로 작용하는 하중을 받고 있다. 복합재료 내 초기 균열의 진전각을 예측하기 위하여 수직응력비 이론을 적용하였으며, 균열진전각에 미치는 2축하중과 섬유재료주축의 영향을 분석하였다. 본 해석을 통하여 균열진전각은 수평하중에 많은 영향을 받고 있으며, 또한 균열경사각과 섬유배향각에도 큰 영향을 받음을 확인하였다.

**Key Words** : Crack extension(균열진전), Orthotropic material(직방성재료), Biaxial loading(2축하중), Mixed mode(혼합모드)

## 1. 서 론

균열을 가진 복합재료구조물에서 균열의 진전방향과 하중을 결정하는 일은 해석적으로 매우 복잡하다. 그러므로 이방성재료의 응력장 해석이 여러 연구자[1-3]에 의하여 오래전에 이루어졌음에도 불구하고 이방성체의 혼합모드 균열진전에 대한 연구는 많지가 않으며, 현재 소수의 파괴기준만이 이루어졌을 뿐이다. 여기에는 등방성재료에서의 최대원주응력을 이용하는 방

법[4,5]과 변형에너지밀도를 이용하는 방법[6,7] 등이 대표적으로 보고되고 있다. 이들 대부분은 응력확대계수가 주요 상관정수로서 유효하게 사용되고 있으며, 이들 정수만을 이용한 이방성재료 내 균열진전의 해석이 대부분을 차지하고 있다. 더욱이 이들 복합재료의 해석의 대부분은 단축하중을 받는 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 복합재료구조물은 일반적으로 2축방향으로의 하중상태에 놓일 수 있으므로, 이와 같은 복잡한 하중을 받는 복합재료에서의 균열진전에 대한 해석은 이들 구조물의 안전을 위하여 매우 중요하다.

복합재료의 파괴기준들은 균열선단부근의 응력성분을 기초로 만들어졌으므로 복합재료의 균열진전을 정확히 예측하기 위해서는 균열주위의

† 2005년 3월 15일 접수 ~ 2005년 8월 22일 심사완료

\* 정회원, 명지대학교 기계공학과  
연락처자, E-mail: limwk@mju.ac.kr  
경기도 용인시 남동 산38-2

분포응력을 정확히 나타내는 것이 무엇보다 중요하다. 이방성이론에 의하면 균열선단부근의 응력식에는 제2항인 비특이항이 존재하며, 특히 구조물에 2축하중이 주어지는 경우 이의 성분은 균열과 평행인 수평작용하중의 크기로서 나타난다. 그러므로 수평작용하중이 크게 작용할수록 이는 점점 큰 값을 가지게 된다. 따라서 균열선단부근에서의 응력성분들을 이용한 파괴기준 역시 응력의 제2항 성분에 영향을 갖게 되며, 2축하중이 크게 작용할수록 이의 성분은 무시할 수가 없게 된다. 그러므로 이방성재료 내 균열진전거동을 연구함에 있어서 균열선단부근 응력식의 제2항의 영향에 대한 연구는 균열을 가진 복합재료의 파괴기구를 정확히 이해하는데 매우 중요하다.

등방성 균열문제의 연구에서 균열의 거동은 2축하중의 영향을 받는 것으로 알려져 있다 [8,9]. 또한 이방성복합재료의 균열문제에서도 2축하중과 2항의 영향을 분석한 연구도 보고되고 있다[10,11]. 그러나 이방성재료의 주축과 균열경사축이 평행인 경우에 대해서만 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 보다 일반화된 균열문제로 균열축이 재료주축과 일치하지 않으며, 임의의 각도를 이루는 직방성 복합재료를 다룬다. 중앙에 경사진 균열이 2축방향으로 하중을 받는 복합재료를 해석모델로 하여 균열축에 대한 특성방정식의 근을 구하고, 균열체의 가로축과 평행으로 작용하는 수평하중의 크기, 균열각, 섬유배향각 그리고 복합재료의 특성이 균열진전각도에 미치는 영향을 정량적으로 제시하고자 한다.

## II. 본 론

### 2.1 2축하중을 받는 혼합모드균열 주위의 응력

Fig. 1과 같은 2축하중을 받는 무한 이방성평판 내 경사균열의 해석함수식은 Savin[1]에 의한 경사하중을 받는 타원공 해석해를 중첩하여 구할 수 있다. 이와 같은 수법을 이용한 균열선단에서의 응력성분들은 다음의 식(1)~(3)과 같이 나타낼 수 있다[12].

직각좌표로 표시한 식(1)의 응력식에서 우측의 마지막 항은 직교이방성체내 균열선단 부근의 응력함수에 대한 급수전개식에서 비특이항 성분을 나타낸다. 이의 성분은 외부응력  $\sigma^\infty$  와 수평하중비  $k$ , 균열경사각  $\alpha$  그리고 특성방정

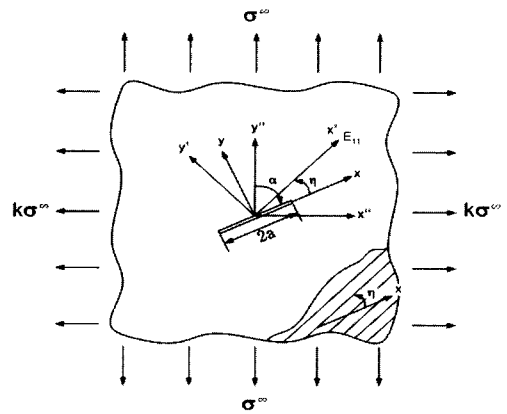


Fig. 1. Infinite center cracked plate under biaxial loading

식의 근  $s_1, s_2$ 의 향으로 되어 있다. 그러므로 수평하중의 증가와 함께 이의 성분은 큰 값을 가지게 된다.

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} = & \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[ \frac{s_1 s_2}{(s_1 - s_2)} \left( \frac{s_2}{\sqrt{\cos \theta + s_2 \sin \theta}} \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{s_1}{\sqrt{\cos \theta + s_1 \sin \theta}} \right) \right] \\ & + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{(s_1 - s_2)} \left( \frac{s_2^2}{\sqrt{\cos \theta + s_2 \sin \theta}} \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{s_1^2}{\sqrt{\cos \theta + s_1 \sin \theta}} \right) \right] \\ & + \sigma^\infty \operatorname{Re} [(\cos \alpha + s_1 \sin \alpha)(\cos \alpha + s_2 \sin \alpha) \\ & + k(\sin \alpha - s_1 \cos \alpha)(\sin \alpha - s_2 \cos \alpha)] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{yy} = & \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{(s_1 - s_2)} \left( \frac{s_1}{\sqrt{\cos \theta + s_2 \sin \theta}} \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{s_2}{\sqrt{\cos \theta + s_1 \sin \theta}} \right) \right] \\ & + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{(s_1 - s_2)} \left( \frac{1}{\sqrt{\cos \theta + s_2 \sin \theta}} \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{1}{\sqrt{\cos \theta + s_1 \sin \theta}} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} = & \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[ \frac{s_1 s_2}{(s_1 - s_2)} \left( \frac{1}{\sqrt{\cos \theta + s_1 \sin \theta}} \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{1}{\sqrt{\cos \theta + s_2 \sin \theta}} \right) \right] \end{aligned}$$

$$+ \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{(s_1 - s_2)} \left( \frac{s_1}{\sqrt{\cos \theta + s_1 \sin \theta}} - \frac{s_2}{\sqrt{\cos \theta + s_2 \sin \theta}} \right) \right] \quad (3)$$

여기서 응력확대계수  $K_I$  과  $K_{II}$ 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$K_I = (\sigma^\infty \sin^2 \alpha + k \sigma^\infty \cos^2 \alpha) \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

$$= \frac{\sigma^\infty \sqrt{\pi a}}{2} [(1+k) - (1-k) \cos 2\alpha]$$

$$K_{II} = -(k \sigma^\infty - \sigma^\infty) \sin \alpha \cos \alpha \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

$$= \frac{\sigma^\infty \sqrt{\pi a}}{2} (1-k) \sin 2\alpha$$

### 2.2 균열축에 대한 특성방정식의 근

Fig. 1과 같은 직방성 복합재료에서 재료주축인  $x', y'$  축에 대한 특성방정식은 다음과 같다.

$$a_{11}s^4 - 2a_{16}s^3 + (2a_{12} + a_{66})s^2 - 2a_{26}s + a_{22} = 0 \quad (6)$$

여기서  $a_{ij}$ 는 컴플라이언스 계수로서 직교이방성체에서는  $a_{12} = a_{26} = 0$  이다. 상기 특성방정식으로부터 구한 특성방정식의 근을  $s_1', s_2'$  이라고 하면 균열축인  $x, y$  축에 대한 이들의 값은 다음의 Lekhnitskii[2] 축변환식을 이용할 수 있다.

$$s_1 = \frac{s_1' \cos \eta - \sin \eta}{\cos \eta + s_1' \sin \eta} \quad (7)$$

$$s_2 = \frac{s_2' \cos \eta - \sin \eta}{\cos \eta + s_2' \sin \eta}$$

식(7)의 근은 실수가 아니며 복소수나 순허수의 값을 가진다. 이렇게 변환된 특성방정식의 근  $s_1, s_2$ 을 식(1)~(3)에 대입하여 균열선단주위의 응력분포를 구할 수 있다.

### 2.3 수직응력비 기준

직방성복합재료 내 균열진전의 해석을 위하여 Buczek 와 Herakovich[4]에 의해 개발된 수직응력비 기준을 적용한다. 이의 기준에서 균열의 진전은 Fig. 2 에서와 같이 주어질 이방성체의 강도함수  $T_{\theta\theta}$ 에 대한 원주인장응력  $\sigma_{\theta\theta}$ 의 비인 수직응력비  $R_0$ 의 값이 최대인 방향으로 진행

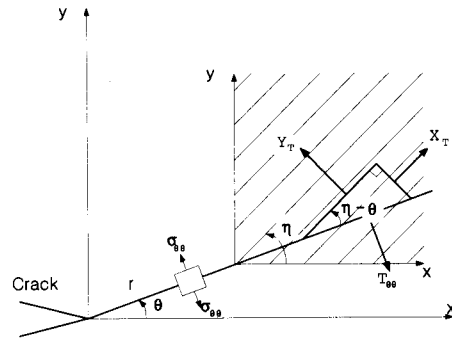


Fig. 2. Parameters of normal stress ratio

한다고 가정한다. 이에 대한 필요충분조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_0(r_0, \theta) = \frac{\sigma_{\theta\theta}(r_0, \theta)}{T_{\theta\theta}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial R_0}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 R_0}{\partial \theta^2} < 0 \quad (9)$$

여기서  $T_{\theta\theta}$ 는 정확하게 측정하기가 곤란하므로 다음의 조건을 만족하는 함수로서 정의한다.

- (a) 재료가 등방성이면  $T_{\theta\theta}$ 는  $\theta$ 에 독립이다.
- (b) 균열이 재료주축을 따라 성장한다면  $T_{\theta\theta}$ 는 재료주축과 수직방향의 인장강도  $Y_T$ 와 같아야 한다.
- (c) 균열이 재료주축과 수직으로 성장한다면  $T_{\theta\theta}$ 는 재료주축 방향의 인장강도  $X_T$ 와 같아야 한다.

위의 조건을 만족하는 강도함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{\theta\theta} = X_T \sin^2(\eta - \theta) + Y_T \cos^2(\eta - \theta) \quad (10)$$

한편 균열선단 주위의 원주응력  $\sigma_{\theta\theta}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{xx} \sin^2 \theta + \sigma_{yy} \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (11)$$

식(1)~(3)을 식(11)에 대입하면 다음과 같은 원주응력분포식을 얻을 수 있다.

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} (A \sin^2 \theta - 2E \sin \theta \cos \theta + C \cos^2 \theta) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} (B \sin^2 \theta - 2F \sin \theta \cos \theta + D \cos^2 \theta) + L \sin^2 \theta \quad (12)$$

여기서

$$A = \text{Re} \left[ \frac{s_1 s_2}{s_1 - s_2} \left( \frac{s_2}{z_2} - \frac{s_1}{z_1} \right) \right]$$

$$B = \text{Re} \left[ \frac{1}{s_1 - s_2} \left( \frac{s_2^2}{z_2} - \frac{s_1^2}{z_1} \right) \right]$$

$$C = \text{Re} \left[ \frac{1}{s_1 - s_2} \left( \frac{s_1}{z_2} - \frac{s_2}{z_1} \right) \right]$$

$$D = \text{Re} \left[ \frac{1}{s_1 - s_2} \left( \frac{1}{z_2} - \frac{1}{z_1} \right) \right]$$

$$E = \text{Re} \left[ \frac{s_1 s_2}{s_1 - s_2} \left( \frac{1}{z_1} - \frac{1}{z_2} \right) \right]$$

$$F = \text{Re} \left[ \frac{1}{s_1 - s_2} \left( \frac{s_1}{z_1} - \frac{s_2}{z_2} \right) \right]$$

$$L = \sigma^\infty \text{Re} \left[ (\cos \alpha + s_1 \sin \alpha) (\cos \alpha + s_2 \sin \alpha) + k (\sin \alpha - s_1 \cos \alpha) (\sin \alpha - s_2 \cos \alpha) \right]$$

식(10)와 식(12)를 식(8)에 대입하고 정리하면 수직응력비  $R_0$ 는 다음과 같이 된다.

$$R_0 = \frac{1}{\sqrt{2r}} \frac{(K_I A + K_{II} B) \sin^2 \theta + (K_I C + K_{II} D) \cos^2 \theta}{X_T \sin^2(\eta - \theta) + Y_T \cos^2(\eta - \theta)} - \frac{1}{\sqrt{2r}} \frac{2(K_I E + K_{II} F) \sin \alpha \cos \theta}{X_T \sin^2(\eta - \theta) + Y_T \cos^2(\eta - \theta)} + L_R \quad (13)$$

여기서

$$L_R = \frac{L \sin^2 \theta}{X_T \sin^2(\eta - \theta) + Y_T \cos^2(\eta - \theta)}$$

위의 식에서  $L_R$ 은  $\sigma_{\theta\theta}$ 의 원주응력성분에서 비특이항인  $L \sin^2 \theta$ 을 고려하였을 때 부가되는 새로운 항으로, 여기에는 작용하중, 특성방정식의 근, 수평하중비, 균열경사각, 재료의 강도 그리고 섬유배향각 등이 내포되어 있다.

### 2.4 수치해석결과 및 고찰

수치해석을 위하여 Fig. 1과 같은 2축하중을 받는 직방성 복합재료 내 중앙경사균열에 대하여 해석을 수행하였다. 본 해석에서는 2종류의 복합재료를 사용하였으며, 균열선단으로부터의 거리  $r_0/a=0.01$ 로 놓았다. 재료 A는 Graphite-Epoxy(AS4/3501-6)복합재이며, 재료 B는 임의로 선택하였다. 이들 두 종류의 복합재료특성치는 각각 다음과 같다.

[재료 A]

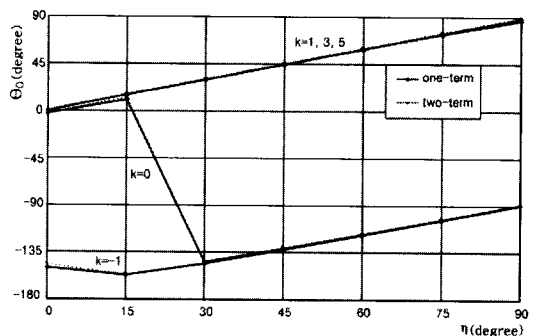
$$E_{11}=126\text{GPa}, E_{22}=10\text{GPa}, \mu_{12}=5.61\text{GPa}, \nu_{12}=0.305, X_T=1.45\text{GPa}, Y_T=53.4\text{MPa}$$

[재료 B]

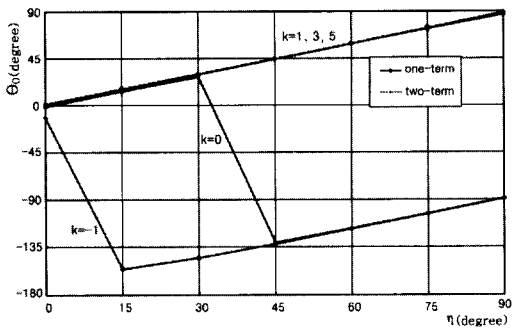
$$E_{11}=2.0\text{GPa}, E_{22}=1.389\text{GPa}, \mu_{12}=0.769\text{GPa}, \nu_{12}=0.3, X_T=20\text{MPa}, Y_T=10\text{MPa}$$

Fig. 3은 재료 A에 대한 해석결과로서 섬유배향각  $\eta$ 에 따른 균열진전각도  $\theta_0$ 를 나타낸 것으로서 수평하중비  $k$ 의 변화에 따라서 도시하였다. 이의 결과는 균열경사각  $\alpha$ 의 값을 달리 주어가며 해석을 수행하였다. 그림에서 실선은 균열선단주위의 응력식에서 특이응력성분만을 고려하여 해석한 결과이고, 점선은 응력식에서 2차항인 비특이항까지를 고려한 결과이다.

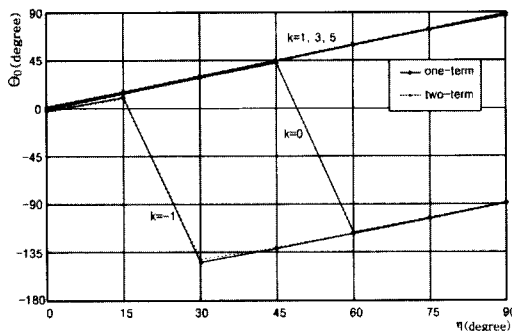
그림에서 보듯이 수평하중비가 1이상의 값을 갖는 경우에 균열진전각도  $\theta_0$ 는 모두 양의 값을 가지며 재료주축방향, 즉 섬유방향으로 일어남을 알 수 있다. 이러한 현상은 어떠한 균열각이나 어떠한 섬유배향각에 대해서도 동일하게 나타난다. 그러나 수평하중비의 값이 1보다 작은 경우에  $\theta_0$ 는 음의 값을 가지며 섬유를 따라서 진행할 수 있다. 예를 들어 수직하중만이 작용하는 경우( $k=0$ )에  $\theta_0$ 는 재료주축이 y"축(수직하중이 작용하는 축)을 벗어나기 전까지는 대체적으로 양의 값을 가지며 일어나지만, 섬유배향각이 하중축을 벗어나 있으면 음의 값을 가진 섬유방향으로 일어난다. 이러한 재료주축을 따르는 균열의 진전은 단축하중을 받는 직방성복합재료(균열선과 재료주축이 평행)의 실험결과와도 일치한다[13]. 이와 비슷한 현상은  $k=-1$ 인 수평압축하중을 받는 경우에서도 일어난다. 이와 같이 수평하중비가 1보다 작은 경우에 균열의 진전은 섬유배향각의 영향을 받게 되며,  $\theta_0$ 는 양의 값 또는 음의 값을 가지며 섬유방향으



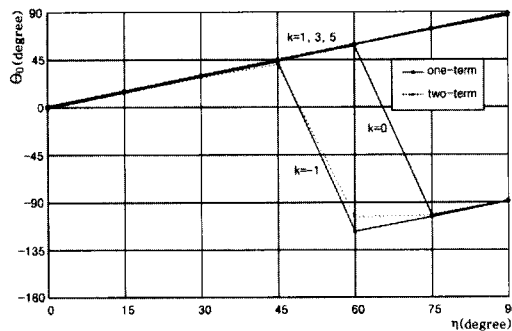
(a)  $\alpha = 30^\circ$



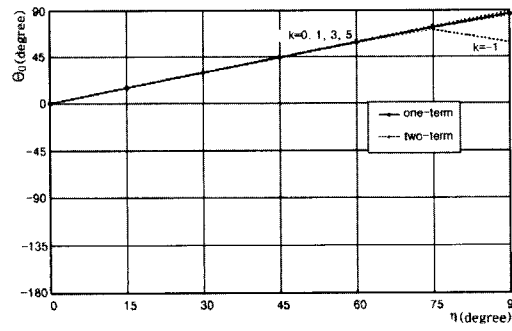
(b)  $\alpha = 45^{\circ}$



(c)  $\alpha = 60^{\circ}$



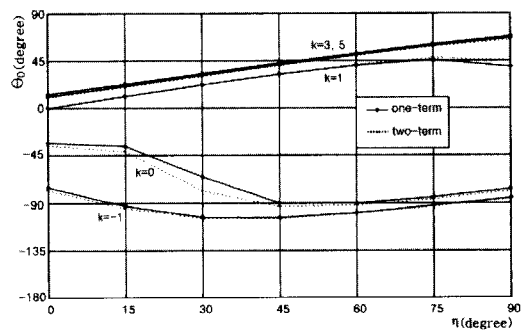
(d)  $\alpha = 75^{\circ}$



(e)  $\alpha = 90^{\circ}$

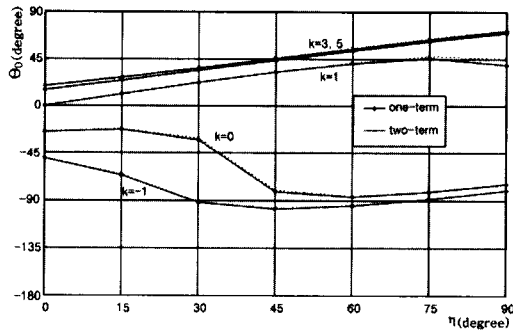
로 진행하게 된다. 또한 균열진전각도에 미치는 응력의 제2항의 영향이 거의 없으며, 특이항만으로 진전각도를 충분히 예측할 수 있음을 알 수 있다. 다만  $\alpha=90^{\circ}$ ,  $\eta=90^{\circ}$ 에서  $k=-1$ 의 경우 제2항을 고려한 해석결과에서는  $\theta_0$ 는 재료주축을 벗어나기 시작한다. 이는 압축수평하중이 크게 작용할수록 0에 접근할 것으로 보인다.

재료 B에 대한 해석결과는 Fig. 4에 나타내었다. 재료 B는 재료 A에 비하여 이방성재료의 특성치에서 그 차이가 그다지 크지 않은 재료이다. 이의 해석결과에서는 복합재료에서의 균열진전이 재료주축과 평행으로 일어난다고 하는 일반적 규칙과는 다른 현상을 보이고 있으며, 재료주축과 임의의 각도를 가지고 진행한다. 전체적으로 재료 A에서의 결과와 비슷한 현상을 보이고 있으나, 수평하중비의 값이 1보다 작은 값을 가지는 경우에 섬유각에 따른 균열진전각도가 부드럽게 변화하고 있으며, 수평하중비의 값에 따른 균열진전각도의 변화가 더욱 뚜렷하게 나타난다. 아울러 균열진전각도에 미치는 응력식의 제2항의 영향은 수평하중과 수직하중이 동일하게 작용하는 경우 즉,  $k=1$ 에서는 거의 없으나, 수직하중과 수평하중 크기의 차이가 커질수록 이의 영향이 나타나기 시작한다. 특히 섬유각에 따른 균열진전각도의 변화에서 수평하중비가 1보다 작은 값을 가지며, 균열진전각이 급변하는 섬유각에서 이의 영향이 가장 크게 나타난다. 또한 균열각에 따른 2항의 영향은  $\alpha = 45^{\circ}$ 를 벗어나면서 나타나기 시작한다. Fig. 4(e)는 균열각  $\alpha = 90^{\circ}$ 인 수평균열에 대한 해석결과로서 균열진전각은 섬유배향각에 따라서 2항의 영향이 뚜렷이 나타나며, 수평하중비에 따라서도 많은 영향을 받고 있음을 보여준다. 그러므로 수평하중비의 값이 존재하는 경우 즉, 2축하중을 받는 균열 문제에서 정확한 균열진전각도의 예측을 위해서는 2항을 고려한 해석이 필요하다.

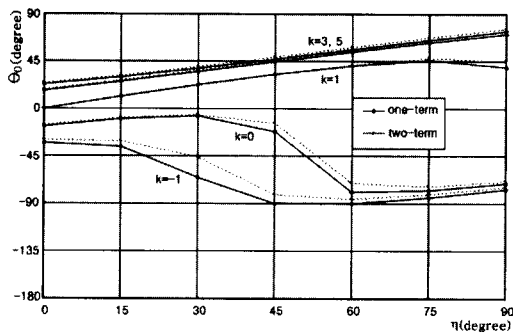


(a)  $\alpha = 30^{\circ}$

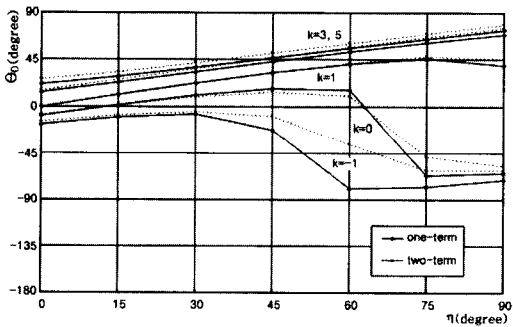
Fig. 3. Variation of an initial crack extension angle for Material A



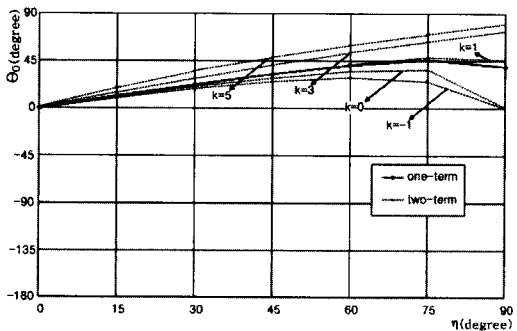
(b)  $\alpha = 45^0$



(c)  $\alpha = 60^0$



(d)  $\alpha = 75^0$



(e)  $\alpha = 90^0$

Fig. 4. Variation of an initial crack extension angle for Material B

### III. 결 론

직방성 복합재료의 외부경계에서 2축하중을 받는 중앙균열에 대한 균열진전문제의 해석을 수행하였다. 수직응력비기준을 적용한 균열진전각도의 예측에서 진전각도는 재료의 특성치, 수평하중비 그리고 섬유배향각에 많은 영향을 받고 있음을 확인하였다. 이방성재료의 특성이 비교적 큰 복합재료에서 균열의 진전은 수평하중의 크기에 상관없이 거의 재료주축방향을 따라서 일어나며, 이는 또한 응력식의 특이항만으로 해석이 가능하다. 일반적으로 수평하중비가 1보다 큰 값을 가지면 균열진전각도는 양의 값을 가지며 섬유방향으로 일어난다. 그러나 수평하중비가 1보다 작은 값을 가지는 경우에 균열진전각도는 음의 값을 가지며 섬유방향으로 진행할 수 있다. 이와 같은 현상은 섬유배향각에 영향을 받는다. 그러나 이방성의 성질이 약한 복합재료에서 균열진전은 재료주축을 따르지 않으며, 수평하중비의 값에 따른 균열진전각도의 변화가 뚜렷하게 나타난다. 아울러 균열진전각도는 응력식의 제2항의 존재에 영향을 보인다. 특히 균열각이 90도인 수평균열이 2축하중을 받는 경우에 2항의 영향이 가장 크게 나타난다. 이와 같은 경우에 정확한 균열진전각도의 예측을 위해서는 2항을 고려한 해석이 필수적임을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

- 1) Savin, G.N., Stress Concentration Around Holes, Pergamon Press, Oxford, 1961.
- 2) Lekhnitskii, S.G., Theory of Elasticity of an Anisotropic Body, Holden-Day, San Francisco, USA, 1963.
- 3) Sih, G.C., Paris, P.C. and Irwin, G.R., "On Cracks in Rectilinearly Anisotropic Bodies", Int. J. Fract Mech. Vol. 1, 1965, pp. 189-203.
- 4) Buczek, M.B. and Herakovich, C.T., "A Normal Stress Criterion for Crack Extension Direction in Orthotropic Composite Materials", J. Compos. Mater, Vol. 19, 1985, pp. 544-553.
- 5) Saouma, V.E., Ayari, M.L and Leavell, D.A., "Mixed Mode Propagation in Homogeneous Anisotropic Solids", Engng Fracture Mech., Vol. 27, 1987, pp. 171-184.
- 6) Sih, G.C., Failure of Composites as

Predicted by the Strain Energy Density Theory, in Cracks in Composite(Ed. Sih, G.C.), Martinus Nijhoff, The Hague, 1981.

7) Ye, Z. and Ayari, M.L., "Prediction of Crack Propagation in Anisotropic Solids", Engng Fracture Mech., Vol. 49, 1994, pp. 797-808.

8) Eftis, F and Jones, D.L., "Influence of Load Biaxiality on the Fracture Load of Center Cracked Sheets", Int. J. Fract., Vol. 20, 1982, pp. 267-289.

9) Maiti, S.K and Smith, R.A., "Criteria for Brittle Fracture in Biaxial Tension", Engng Fracture Mech., Vol. 19, 1984, pp. 793-804.

10) 임원균, "이방성체내 경사균열의 진전 예측", 한국항공우주학회지, 제29권, 제3호, 2001, pp. 46-54.

11) 임원균, 최승용, "2축하중을 받는 직교이방성체내 경사균열의 해석", 대한기계학회논문집 A, 제26권 제6호, 2002, pp. 993-1000.

12) Choi, S.Y, "Biaxial Load Effects on the Crack Extension in Orthotropic Materials, MS Thesis, Myongji University, 1996.

13) Beuth Jr, J.L. and Herakovich, C.T., "Analysis of Crack Extension in Anisotropic Materials Based on Local Normal Stress", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 11, 1989, pp. 27-46.