

이방성재료내 혼합모드균열의 진전 해석

Analysis of Mixed Mode Crack Extension in Anisotropic Solids

임 원 균* 강 석 진** 진 영 균**
Lim, W.K. Kang, S.J. Jin, Y.K.

ABSTRACT

The problem of predicting crack propagation in anisotropic solids which is a subject of considerable practical importance is examined. The effect of the second term in the asymptotic expansion of the crack tip stress field on the direction of initial crack extension is made explicitly. We employ the normal stress ratio theory to determine values for the direction of initial crack extension. The theoretical analysis is performed for the wide range of the anisotropic material properties. It is shown that the use of second order term in the series expansion is essential for the accurate determination of crack growth direction in anisotropic solids.

1. 서 문

이방성균열체에 대하여 균열선단과 인접한 부근에서의 응력과 변위상태는 소위 말하는 특이해 즉, 급수 전개식에서 제1차항으로 적절히 나타낼 수 있다고 하는 개념이 파괴역학에서 보편화되어 있다[1,2]. 따라서 현재 이들 이방성체내 균열문제에서는 특이해만을 이용한 균열의 해석이 대부분을 차지하고 있으며, 이와 같은 해석은 균열체의 크기, 형상 그리고 경계에서의 하중조건에 관계없이 유효하다는 것이 이방성균열체 문제의 해석에서 보편적으로 받아들여지고 있다. 이와 같은 개념은 1921년 Griffith의 연구를 시작으로 하여 널리 퍼지게 되었으며 그 후 이방성재료의 해석에서도 그대로 이어졌다. 국부균열선단에서의 급수전개식 중 1차항만을 선호하게 된 이유는 1차항이 균열선단으로부터의 거리 r 의 $1/\sqrt{r}$ 의존성을 나타내고 있다는데 뿌리를 두고 있다. 이에 반하여 거리에 독립인 2차항은 균열선단으로부터의 작은 거리에서는 1차항과 비교하여 정량적으로 덜 중요하게 된다. 균열선단 부근에서의 응력과 변위에 대한 특이해가 정량적으로 충분한 근사적인 값을 제공하고는 있으나 균열체의 재료특성치에 따라서는 특이해만의 해석만으로는 충분치가 않다. 모드 I 균열의 경우 균열의 진전각도는 균열선과 평행하지 않을 수도 있으며 이는 이방성재료의 특성치에 의존적임이 나타났다.^{(1),(2)}

* 경희원 · 명지대학교 기계공학과 교수

** 명지대학교 기계공학과 석사과정

본 연구에서는 무한이방성 평판에서 혼합모드하에 있는 균열진전의 문제를 다룬다. 이를 위하여 이방성체의 외부경계에서 인장하중을 받는 중앙경사균열에 대하여 해석을 수행한다. 이방성체내 균열선단부근의 응력의 표현식에서 2차항의 산출을 유도하고 이것이 균열주위의 원주응력분포분포와 균열진전각도에 미치는 영향을 정량적으로 제시한다. 이를 통하여 균열진전각도의 계산에서 보편화된 특이해의 적합성 여부를 체계적으로 분석한다. 아울러 이방성재료의 특성치가 균열진전각도에 미치는 영향에 대해서도 검토를 한다.

2. 이방성체의 기초방정식

이방성재료를 거시적으로 보아 균질이방성탄성체라고 생각할 때 2차원 평면응력 상태에서 Hooke의 법칙은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= a_{11}\sigma_{xx} + a_{12}\sigma_{yy} + a_{16}\tau_{xy} \\ \varepsilon_{yy} &= a_{12}\sigma_{xx} + a_{22}\sigma_{yy} + a_{26}\tau_{xy} \\ \gamma_{xy} &= a_{16}\sigma_{xx} + a_{26}\sigma_{yy} + a_{66}\tau_{xy}\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 $a_{ij}(i, j=1, 2, 6)$ 는 컴프라이언스 계수이다. Airy의 응력함수 $U(x, y)$ 로 나타낸 적합방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_{22}\frac{\partial^4 U}{\partial x^4} - 2a_{26}\frac{\partial^4 U}{\partial x^3 \partial y} + (2a_{12} + a_{66})\frac{\partial^4 U}{\partial x^2 \partial y^2} - 2a_{16}\frac{\partial^4 U}{\partial x \partial y^3} + a_{11}\frac{\partial^4 U}{\partial y^4} = 0 \quad (2)$$

응력함수 $U(x, y) = e^{x+sy}$ 라고 가정하면 식(2)는 다음과 같이 상미분방정식으로서 나타낼 수 있다.

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

한편 탄성대칭인 완전직교이방성체인 경우에는 $a_{16} = a_{26} = 0$ 이므로 식(3)은 다음과 같이 간단하게 된다.

$$a_{11}s^4 + (2a_{12} + a_{66})s^2 + a_{22} = 0 \quad (4)$$

이 때 식(4)인 특성방정식의 근은 다음과 같다.⁽³⁾

$$\begin{aligned}s_1 &= \sqrt{\frac{\alpha_0 - \beta_0}{2}} + i\sqrt{\frac{\alpha_0 + \beta_0}{2}} = \alpha_1 + i\beta_1 \\ s_2 &= -\sqrt{\frac{\alpha_0 - \beta_0}{2}} + i\sqrt{\frac{\alpha_0 + \beta_0}{2}} = \alpha_2 + i\beta_2 \\ s_3 &= \overline{s_1}, \quad s_4 = \overline{s_2}\end{aligned}\quad (5)$$

여기서 $\alpha_0 = \sqrt{\frac{a_{22}}{a_{11}}} = \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}}$, $\beta_0 = \frac{1}{a_{11}} \left(\frac{a_{66}}{2} + a_{12} \right) = \frac{E_{11}}{2\mu_{12}} - \nu_{12}$ 이다. 결과적으로 응력함수 $U(x, y)$ 는 식(4)과 식(5)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U(x, y) = 2 \operatorname{Re} [U_1(z_1) + U_2(z_2)] \quad (6)$$

여기서 $z_1 = x + s_1 y$, $z_2 = x + s_2 y$ 이다. 식(6)에서 응력함수 $U_j(z_j)$ ($j=1,2$)의 첨자변환을 피하기 위하여 다음과 같은 새로운 해석함수 $\phi(z_1) = dU_1(z_1)/dz_1$ 과 $\psi(z_2) = dU_2(z_2)/dz_2$ 도입하면 응력성분식들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= 2\text{Re} [s_1^2 \phi'(z_1) + s_2^2 \psi'(z_2)] \\ \sigma_{yy} &= 2\text{Re} [\phi'(z_1) + \psi'(z_2)] \\ \tau_{xy} &= - 2\text{Re} [s_1 \phi'(z_1) + s_2 \psi'(z_2)]\end{aligned}\quad (7)$$

3. 경사균열선단부근의 응력식에서 2차항 유도

Fig. 1과 같이 인장하중을 받는 무한이방성평판내에 하중방향과 각도 α 의 경사를 이루고 있는 균열의 해석함수는 타원공 문제에 대한 Savin⁽⁴⁾의 해석함수로부터 구할 수 있다. 타원의 단축을 영으로 접근시킴으로써 얻은 이의 함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\phi(z_1) &= \frac{s_2 \sigma^\infty \sin^2 \alpha + \sigma^\infty \sin \alpha \cos \alpha}{2(s_1 - s_2)} [z_1 - \sqrt{z_1^2 - a^2}] + B^* z_1 \\ \psi(z_2) &= -\frac{s_1 \sigma^\infty \sin^2 \alpha + \sigma^\infty \sin \alpha \cos \alpha}{2(s_1 - s_2)} [z_2 - \sqrt{z_2^2 - a^2}] + (B^* + iC^*) z_2\end{aligned}\quad (8)$$

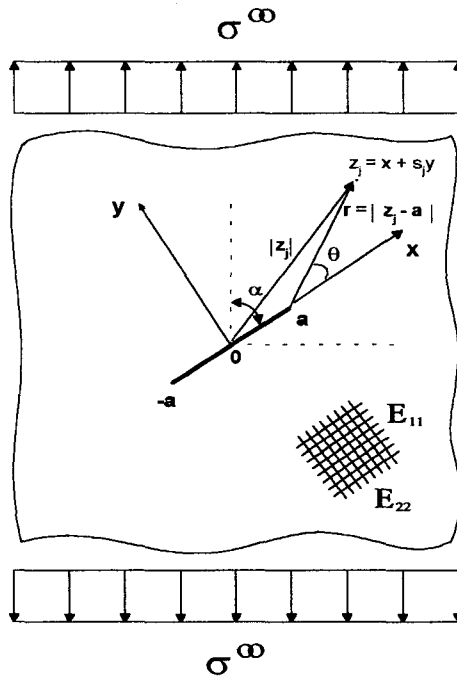


Fig. 1 Inclined crack in anisotropic plate under uniaxial load.

여기서 B^* , B'^* 그리고 C^* 는 하중조건 및 재료특성치에 따른 상수항으로서 이는 각각 다음과 주어진다.

$$B^* = \sigma^\infty \frac{\cos^2 \alpha + (\alpha_2^2 + \beta_2^2) \sin^2 \alpha + \alpha_2 \sin 2\alpha}{2[(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + (\beta_2^2 - \beta_1^2)]}$$

$$B'^* = \sigma^\infty \frac{[(\alpha_1^2 - \beta_1^2) - 2\alpha_1 \alpha_2] \sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha - \alpha_2 \sin 2\alpha}{2[(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + (\beta_2^2 - \beta_1^2)]}$$

$$C^* = \sigma^\infty \left\{ \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \cos^2 \alpha + [a_2(\alpha_1^2 - \beta_1^2) - \alpha_1(\alpha_2^2 - \beta_2^2)] \sin^2 \alpha}{2\beta_2[(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + (\beta_2^2 - \beta_1^2)]} + \frac{[(\alpha_1^2 - \beta_1^2) - (\alpha_2^2 - \beta_2^2)] \sin \alpha \cos \alpha}{2\beta_2[(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + (\beta_2^2 - \beta_1^2)]} \right\}$$

여기서 $\alpha_j, \beta_j (j=1, 2)$ 는 특성방정식의 실수부와 허수부로서 모두 상수값을 가진다. 아울러 함수 $\phi(z_1)$ 과 $\phi(z_2)$ 의 미분은 다음과 같이 된다.

$$\phi'(z_1) = \frac{s_2 \sigma^\infty \sin^2 \alpha + \sigma^\infty \sin \alpha \cos \alpha}{2(s_1 - s_2)} \left[1 - \frac{z_1}{\sqrt{z_1^2 - a^2}} \right] + B^* z_1$$

$$\phi'(z_2) = -\frac{s_1 \sigma^\infty \sin^2 \alpha + \sigma^\infty \sin \alpha \cos \alpha}{2(s_1 - s_2)} \left[1 - \frac{z_2}{\sqrt{z_2^2 - a^2}} \right] + (B'^* + iC^*) z_2 \quad (9)$$

계산을 편리하게 하기 위하여 다음과 같은 균열선단에서 시작하는 새로운 극좌표 ξ_j 를 도입한다.(Fig. 1)

$$z_j - a = \xi_j = r(\cos \theta + s_j \sin \theta), \quad z_j = x + s_j y \quad (j=1, 2) \quad (10)$$

따라서 식(9)의 도함수는 복소변수 $\xi_j (j=1, 2)$ 의 향으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi'(\xi_1) = \frac{s_2 \sigma^\infty \sin^2 \alpha + \sigma^\infty \sin \alpha \cos \alpha}{2(s_1 - s_2)} \left[1 - \frac{(\xi_1 + a)}{\sqrt{(\xi_1^2 + 2a\xi_1)}} \right] + B^*$$

$$\phi'(\xi_2) = -\frac{s_1 \sigma^\infty \sin^2 \alpha + \sigma^\infty \sin \alpha \cos \alpha}{2(s_1 - s_2)} \left[1 - \frac{(\xi_2 + a)}{\sqrt{(\xi_2^2 + 2a\xi_2)}} \right] + (B'^* + iC^*) \quad (11)$$

여기서 $0 < |\xi_j| = r \ll 1, (j=1, 2)$ 이다. 식(11)을 간단하게 나타내기 위하여 우변의 중괄호내 두번째 항에 대한 급수전개후 $\xi^{-1/2}$ 항과 복소변수와 무관한 ξ^0 인 비특이항만 유지하고 나머지 고차항들을 생략하면 해석함수식의 미분식은 다음과 같은 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$\phi'(\xi_1) \cong -\frac{\sigma^\infty s_2 \sin^2 \alpha + \sigma^\infty \sin \alpha \cos \alpha}{2\sqrt{2}(s_1 - s_2)} \left[\left(\frac{\xi_1}{a} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] + \left(B^* + \frac{\sigma^\infty s_2 \sin^2 \alpha + \sigma^\infty \sin \alpha \cos \alpha}{2(s_1 - s_2)} \right)$$

$$\psi(\xi_2) \cong \frac{\sigma^\infty s_1 \sin^2 \alpha + \sigma^\infty \sin \alpha \cos \alpha}{2\sqrt{2}(s_1 - s_2)} \left[\left(\frac{\xi_2}{a} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] + \left(B' + iC'^* - \frac{\sigma^\infty s_1 \sin^2 \alpha + \sigma^\infty \sin \alpha \cos \alpha}{2(s_1 - s_2)} \right) \quad (12)$$

따라서 균열선단에서의 응력성분들은 해석함수들로 표시된 식(7)에 극좌표변수인 식(12)를 대입하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{s_1 s_2}{(s_1 - s_2)} \left(\frac{s_2}{\sqrt{\cos \theta + s_2 \sin \theta}} - \frac{s_1}{\sqrt{\cos \theta + s_1 \sin \theta}} \right) \right] \\ &+ \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{(s_1 - s_2)} \left(\frac{s_2^2}{\sqrt{\cos \theta + s_2 \sin \theta}} - \frac{s_1^2}{\sqrt{\cos \theta + s_1 \sin \theta}} \right) \right] \\ &+ \sigma^\infty \operatorname{Re} [(\cos \alpha + s_1 \sin \alpha)(\cos \alpha + s_2 \sin \alpha)] \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{(s_1 - s_2)} \left(\frac{s_1}{\sqrt{\cos \theta + s_2 \sin \theta}} - \frac{s_2}{\sqrt{\cos \theta + s_1 \sin \theta}} \right) \right] \\ &+ \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{(s_1 - s_2)} \left(\frac{1}{\sqrt{\cos \theta + s_2 \sin \theta}} - \frac{1}{\sqrt{\cos \theta + s_1 \sin \theta}} \right) \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{s_1 s_2}{(s_1 - s_2)} \left(\frac{1}{\sqrt{\cos \theta + s_1 \sin \theta}} - \frac{1}{\sqrt{\cos \theta + s_2 \sin \theta}} \right) \right] \\ &+ \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{(s_1 - s_2)} \left(\frac{s_1}{\sqrt{\cos \theta + s_1 \sin \theta}} - \frac{s_2}{\sqrt{\cos \theta + s_2 \sin \theta}} \right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $K_I = \frac{\sigma^\infty \sqrt{\pi a}}{2} [1 - \cos 2\alpha]$ 이고 $K_{II} = \frac{\sigma^\infty \sqrt{\pi a}}{2} \sin 2\alpha$ 이다. 식(13)에서 보듯이 직각좌표로 표시한 균열선단부근의 응력식에서 2차항은 x 방향의 응력성분에만 나타남을 알 수 있다.

4. 초기균열진전각도의 결정

이방성균열체에서 균열진전각도를 구하기 위하여 Buczek 와 Herakovich⁽⁵⁾에 의하여 제안된 수직응력비이론을 적용하였다. 이는 각도에 따라 변화하는 이방성체의 강도함수 $T_{\theta\theta}$ 를 정의하여 원주응력 $\sigma_{\theta\theta}$ 를 강도함수로 무차원화시킨 수직응력비 R_0 를 이용하는 것으로서 이의 값이 최대가 되는 방향으로 균열이 진행한다고 가정한다. 즉, 이 기준은 균열선단으로부터 미소거리 r_0 에서 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$R_0(r_0, \theta) = \frac{\sigma_{\theta\theta}(r_0, \theta)}{T_{\theta\theta}}, \quad \left[\frac{\partial R_0}{\partial \theta} \right]_{\theta_0} = 0, \quad \left[\frac{\partial^2 R_0}{\partial \theta^2} \right]_{\theta_0} < 0, \quad (14)$$

상기식에서 강도함수 $T_{\theta\theta} = T_{\theta\theta} = X_T \sin^2 \theta + Y_T \cos^2 \theta$ 이며, X_T 와 Y_T 는 각각 이방성체에서의 주축방향 및 횡방향으로의 인장강도이다. 한편 직각좌표계의 응력성분으로 표시한 원주응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{xx} \sin^2 \theta + \sigma_{yy} \cos^2 \theta - 2 \tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (15)$$

상기식에 직각좌표계로 표시한 경사균열주위의 응력성분인 식(13)을 대입하면 다음과 같은 2차항이 내포된 원주응력식을 얻을 수 있다.

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{s_1 - s_2} (s_1 \varphi_2^{3/2} - s_2 \varphi_1^{3/2}) \right] + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{s_1 - s_2} (\varphi_2^{3/2} - \varphi_1^{3/2}) \right] + \sigma^\infty \operatorname{Re} [(\cos \alpha + s_1 \sin \alpha)(\cos \alpha + s_2 \sin \alpha)] \sin^2 \theta \quad (16)$$

여기서 $\varphi_j = \cos \theta + s_j \sin \theta$ ($j=1, 2$) 이다. 따라서 균열주위의 원주응력인 식(16)과 이방성강도함수를 식(14)에 대입하면 수직응력비 R_0 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_0 = \frac{\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{s_1 - s_2} (s_1 \varphi_2^{3/2} - s_2 \varphi_1^{3/2}) \right] + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{s_1 - s_2} (\varphi_2^{3/2} - \varphi_1^{3/2}) \right] + \sigma^\infty \operatorname{Re} [(\cos \alpha + s_1 \sin \alpha)(\cos \alpha + s_2 \sin \alpha)] \sin^2 \theta}{X_T \left[\sin^2(\beta - \theta) + \frac{Y_T}{X_T} \cos^2(\beta - \theta) \right]} \quad (17)$$

5. 해석결과 및 고찰

이방성재료내 균열선단주위의 응력식에서 2차항의 영향을 분석하기 위하여 Fig. 1과 같이 인정하중을 받는 완전직교이방성체내 중앙경사균열에 대한 균열주위의 원주응력분포와 초기균열진전각도를 예측하여 보았다. 이방성체 경사균열주위의 원주응력분포를 결정하기 위해서 이방성재료의 특성치들은 $\alpha_0=1.2$ 그리고 $\beta_0=1.0$ 으로 일정하게 놓았다. Fig. 2는 균열각 $\alpha=15^\circ$ 인 경우의 해석결과이다. 그림에서 실선은 응력식에서 특이응력성분만을 고려하여 해석한 결과이고 점선은 균열주위 응력식에서 2차항까지를 고려한 해석결과로서 이때 균열선단으로 부터의 거리 $r_0/a=0.01$ 로 놓았다. 응력식에서 2차항까지를 고려함으로써 얻은 원주응력 분포는 특이항만을 고려한 결과와 많은 차이를 보이고 있으며 원주응력의 최대값이 일어나는 각도에서도 큰 차이를 보이는 등 원주응력의 분포에서 2차항의 영향이 뚜렷이 나타남을 알 수 있다. 그림으로는 나타내지 않았으나 $\alpha=45^\circ$ 에서는 두 해석결과는 거의 일치함을 보이고 있으며, $\alpha=75^\circ$ 에서는 균열각 15° 의 해석결과와 유사하다. 이와 같이 응력식에서 2차항의 고려는 균열선단주위의 응력을 기초로 하는 균열진전각도의 결정에 있어서도 큰 영향을 미치리라는 것을 예견할 수 있다.

Fig. 3은 재료주축의 인장강도비 X_T/Y_T 와 응력의 급수전개식에서 2차항이 균열진전각도에 미치는 영향을 나타낸 것으로서 균열각의 변화에 따라 도시하였다. 이때 재료주축의 탄성계수비 $\alpha_0=1.2$ 그리고 $\beta_0=1.0$ 으로 일정하게 놓았으며 균열선단으로부터의 거리 r_0/a 는 두가지로 달리 취하였다. 그림에서 실선은 특이항만을 고려하여 해석한 결과이고, 긴선은 $r_0/a=0.01$ 로 취한 경우의 해석결과, 그리고 점선은 $r_0/a=0.05$ 로 취한 경우의 해석결과를 나타낸다. 그림에서 보듯이 균열진전각도는 재료주축의 인장강도비에 따라서 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 특히 인장강도비가 5이하의 값을 가지면 균열진전각도는 인장강도비의 값에

매우 예민하며 이의 값에 따라서 균열진전각도는 가파른 변화를 보이고 있다. 반면에 인장강도비가 5이상의 값을 가지면 균열진전각도의 변화는 완만해 지면서 거의 직선적인 관계를 보이는데 점차적으로 0° 로 접근하고 있음을 알 수 있다. 이는 모든 균열각에서 일어나는 공통적으로 일어나는 현상으로 이방성재료의 특성이 강할 수록 균열의 진전각도는 이방성재료주축과 평행하게 진행하게 됨을 의미한다. 한편 균열진전각도에 미치는 2차항의 영향은 인장강도비가 작을 수록 더욱 뚜렷하게 나타남을 보인다. 그러나 인장강도비가 커져서 이방성의 특성이 강해지면 2차항의 영향은 점차적으로 작아지며 이 경우 특이항만으로서도 균열진전각을 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있다. 또한 균열각에 따른 2차항의 영향은 균열각이 작아서 모드 II의 성질이 활발히 일어날 수록 균열진전각도에 미치는 이의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 균열각이 45° 주위의 값을 가진 경우에는 2차항의 영향이 거의 나타나지 않으며 특이항만의 해석으로도 충분함을 알 수 있다. 균열선단으로 부터의 거리 r_0/a 의 값을 달리 취하여 해석한 결과에서는 역시 작은 균열각에서 아주 민감하게 이들의 값에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 조건에서 정확한 균열진전각도의 결정을 위해서는 r_0/a 의 선택이 더욱 중요하다. 적절한 r_0/a 의 선택을 위해서는 실험이 동반되어야 할 것으로 생각된다.

이상의 결과들을 종합해 볼 때 이방성균열체에서 균열진전각도에 미치는 2차항의 영향은 일반적으로 재료주축의 인장강도비와 같은 이방성재료특성이 약할 수록 그리고 균열각이 작을 수록 이의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

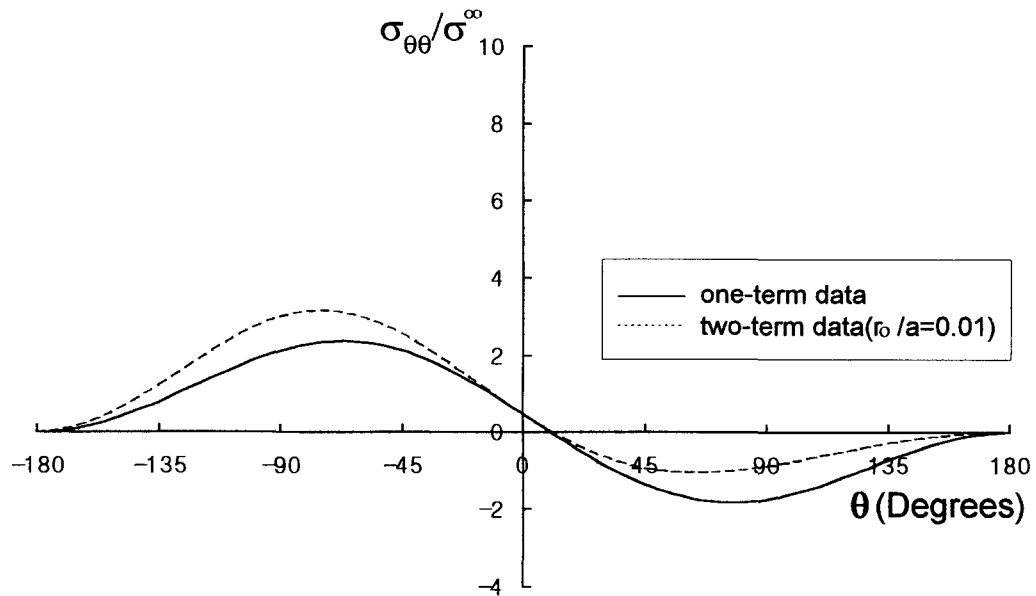


Fig. 2 Variation of $\sigma_{\theta\theta}$ for $\alpha=15^\circ$

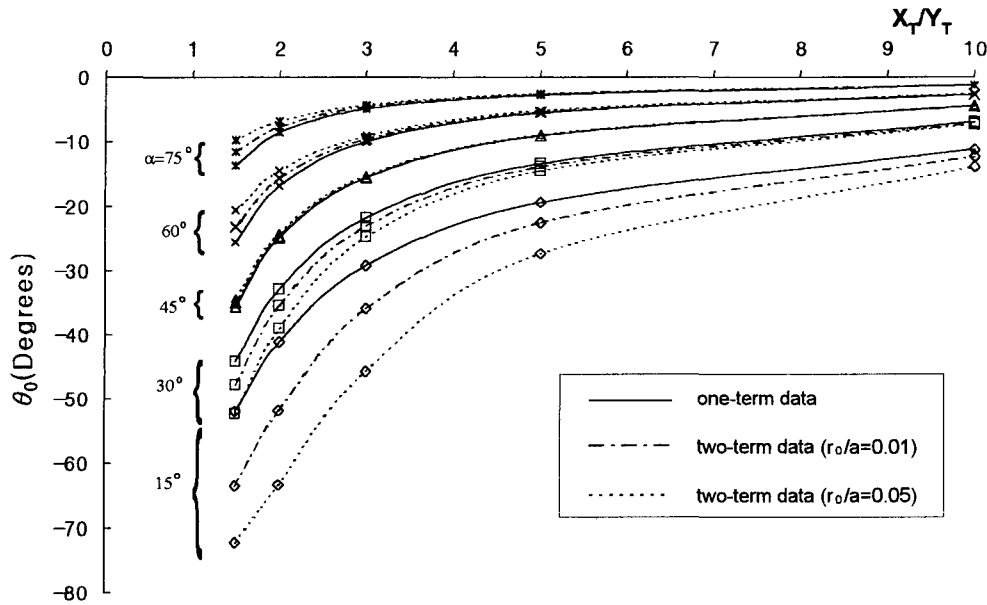


Fig. 3 The effect of tensile strength ratio and second-order term on the direction of crack extension in anisotropic solid.

6. 결론

인장하중을 받는 이방성체내 경사균열 균열주위의 원주응력분포와 경사균열의 진전각도는 2차항의 존재에 따라서 크게 변화함을 확인하였다. 균열진전각도의 결정에 있어서도 2차항의 영향은 재료주축의 인장강도비가 작을 수록 크게 나타나며 아울러 하중방향과 균열선이 이루는 균열각이 작을 수록 이의 영향이 가장 크게 나타났다. 균열진전각도에 미치는 탄성계수비 역시 인장강도비가 작은 재료에서만 그 영향이 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 이방성특성이 약한 재료일 수록 정확한 균열진전각도의 결정을 위해서는 응력식에서 2차항을 고려한 해석이 필수적임을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 임원균, 최승룡, 안현수, "단축하중을 받는 이방성체내 균열의 진전", 한국전산구조공학회 논문집, 제12권 제2호, 1999, pp.161-169.
2. Lim, W.K., Choi, S.Y. and Sankar, B.V., "Biaxial Load Effects on Crack Extension in Anisotropic Solids", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 68, 2001, pp.403-416.
3. Lekhnitskii, S.G., Anisotropic Plates, Gordon and Breach Science Publishers, NewYork, 1968.
4. Savin, G.N., Stress Concentration Around Holes, Pergamon Press, Oxford, 1961.
5. 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.