

전기장을 받는 강유전체 세라믹의 분역회전 인성화

정 경 문* · 범 현 규†

(2002년 8월 30일 접수, 2003년 2월 21일 심사완료)

Domain Switching Toughening of Ferroelectric Ceramics Subjected to Electric Fields

Kyoung Moon Jeong and Hyeon Gyu Beom

Key Words: Ferroelectric Ceramics(강유전체 세라믹), Coercive Electric Field(항전기장), Yield Electric Field(항복 전기장), Polarization(분극), Domain Switching(분역회전), Crack Growth(균열성장)

Abstract

A crack with growth in ferroelectric ceramics under purely electric loading is analyzed. The crack tip stress intensity factor for the growing crack under small-scale conditions is evaluated by employing the model of nonlinear domain switching. The crack tip stress intensity factor increases or decreases with crack growth, depending on the electrical nonlinear behavior and the direction of an applied electric field. It is shown that the ferroelectric material can be either toughened or weakened as the crack grows. The steady state crack growth in ferroelectric ceramics is also discussed.

1. 서 론

자발분극(spontaneous polarization)을 갖고 있는 BaTiO₃ 또는 Pb(Zr_xTi_{1-x})와 같은 강유전체 세라믹은 센서, 액주에이터와 불휘발성 기억소자(nonvolatile memory)에 응용되고 이외에도 많은 분야에서 사용되고 있다. 그러나 세라믹 재료와 같은 취성 재료는 기공이나 균열과 같은 다양한 결함이 존재한다. 따라서 강유전체 세라믹의 응용범위가 증가하면서 재료의 신뢰성 또한 중요한 문제가 되고 있다.

강유전체 세라믹의 신뢰성에 대하여 많은 연구자들에 의해 최근까지 집중적으로 연구되고 있다. 전기장이 압전재료의 균열성장예 미치는 영향에 대한 실험적 연구는 현재까지 다른 결과들

을 제시하여 혼란을 가져오고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 그들의 연구결과를 압전재료의 분극방향과 전기장의 방향에 따라 파괴 인성치(fracture toughness)가 각각 다른 실험결과를 제시하고 있다.

최근까지 전기장이 강유전체 세라믹에 미치는 파괴기동의 실험적 연구를 설명하기 위한 이론적인 모델이 몇몇 연구자들에 의해 제안되었다. 그러나, 선형 유전체(linear dielectric)이론을 적용한 해석결과는 전기장의 함수로서 파괴인성치가 대칭적인 변화를 보이는데 이는 실험적 결과⁽¹⁻⁴⁾와 전혀 일치하지 않는다. 강유전체 세라믹의 파괴기동을 이론적으로 설명하기 위하여 분역회전(domain switching)과 비선형 파괴역학의 이론을 이용하고 있다. 강유전체 세라믹은 높은 전기장에서 전기적으로 비선형거동을 나타낸다. Yang과 Zhu⁽⁵⁾는 전기-기계적 하중을 받는 강유전체에서 분역회전에 의한 인성강화기구를 연구하였다. 그들은 균열선단 근처에서 분역회전에 의한 균열선단 응력강도의 변화로부터 파괴 인성치 변화를

* 전남대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 전남대학교 기계공학과

E-mail : hgbeom@chonnam.ac.kr

TEL : (062)530-1682 FAX : (062)530-1689

평가하였고, 전기장의 함수로 강유전체의 파괴인성치가 비대칭 변화를 보인다고 보고하였다. Zeng과 Rajapakse⁽⁶⁾는 분역 회전 모델을 이용하여 전기-기계적 커플링을 갖는 이방성 강유전체의 파괴인성치의 변화를 해석하였다. 최근에 Beom과 Atluri⁽⁷⁾는 전기-기계적 하중을 받는 강유전체의 파괴거동에 대한 전기장의 영향을 해석하였다. 그들은 압전재료의 파괴거동에 대한 전기장의 영향에 대하여 다양한 실험적 결과⁽¹⁻⁴⁾를 이론적으로 설명하기 위해 단일화된 비선형 분역회전 모델을 제안하였다. 전기장의 작용 방향과는 상관없이 강유전체 세라믹의 물성치인 항전기장(coercive electric field)과 항복전기장(yield electric field)의 비가 균열선단 응력강도계수를 증가 또는 감소를 결정하는 중요한 인자임을 해석하여 기존 연구자들의 실험결과⁽¹⁻⁴⁾에 대하여 이론적으로 설명이 가능하게 되었다.

세라믹의 인성장화기구(toughening mechanism)는 변태 인성화(transformation toughening)를 이용하여 해석되었다.^(8,9) 이를 이용하여 최근에 분역회전을 이용한 강유전체 세라믹내의 균열성장에 대하여 해석하였다. Meschke 등⁽¹⁰⁾은 응력에 의한 강탄성체(ferroelastic) 분역회전을 이용하여 BaTiO₃는 증가하는 파괴저항곡선을 보임을 해석하였다. 또한, 면외전단 상태에서 강유전체 세라믹의 파괴 저항곡선을 측정하였으며, 이를 분역회전을 이용하여 설명하였다.⁽¹¹⁾ Mao 등⁽¹²⁾은 분극회전 띠모델(strip model)을 이용하여 강유전체 세라믹의 파괴인성 변화를 해석하였다. 균열성장은 전기장의 크기와 방향에 의존함을 보였다. Liu 등^(13,14)은 강유전체 세라믹내에 균열이 성장하면서 균열선단에 응력집중 현상이 발생하여 제한된 분역회전영역이 생성됨을 투과형 전자 현미경(Transmission Electron Microscopy, TEM)을 이용하여 관찰하였다. 그들은 Yang과 Zhu⁽⁵⁾의 해석모델에서 보여준 분역회전영역이 띠형태로 균열이 성장함을 증명하였다. 그러나, 강유전체 세라믹의 분역회전영역은 재료 물성치인 항전기장과 항복전기장의 비에 따라 각각 다르게 나타난다.⁽⁷⁾ 따라서, 재료에 따라 다양하게 나타나는 분역회전영역을 고려한 강유전체 세라믹의 균열성장에 대한 해석이 필요하다.

본 연구의 목적은 전기장을 받는 강유전체 세라믹내의 균열 성장에 관하여 Beom과 Atluri⁽⁷⁾에

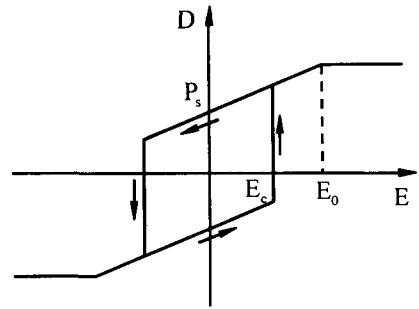


Fig. 1 Idealized electric displacement-electric field curve for a typical ferroelectric material

의해 제안된 비선형 분역회전 모델을 적용하였다. 재료 물성치인 항전기장과 항복 전기장의 비에 따라 강유전체 세라믹내의 균열 주위에는 모양과 크기가 다른 분역회전 영역이 발생한다. 가중함수(weight function)를 균열선단 근처의 비선형 강유전체 분역회전 영역에 적용하여 균열선단 응력강도계수를 해석하였다.

2. 강유전체 세라믹

강유전체는 특유의 분역구조(domain structure)를 가지고 있는데 이것은 자발분극(spontaneous polarization)의 방향이 일정한 지역을 가리키는 층으로서 분역벽(domain wall)에 의해 나누어진다.⁽¹⁵⁾ 강유전체는 절연파괴가 일어나지 않을 정도의 작은 전기장으로도 분극의 방향을 변화시킬 수 있는 재료를 의미하며, 항전기장(coercive electric field) 이상의 전기장을 인가하였을 때 페롭스카이트(perovskite) 구조 내에서 +이온과 -이온이 변위하여 분극의 방향이 전기장의 방향과 가장 근접하게 변화한다.

강유전체 세라믹은 높은 전기장에서 전기적 비선형성을 갖는다. 전기장을 증가시키면 강유전체의 전기변위(electric displacement)는 전기적 포화(saturation)상태에 이르게 된다. 강유전체 세라믹의 파괴거동에 대한 전기장의 영향을 해석하기 위하여 전기변위(D)와 전기장(E)에 대하여 Fig. 1과 같이 전형적인 강유전체 세라믹의 구성모델을 도입하였다. 강유전체는 완전한 분극 포화(perfect polarization saturation)를 갖는다고 가정하였다. 강유전체 세라믹은 자발분극 P_s , 항전기장 E_c , 항복전기장 E_0 을 갖는다. 전기장이 작용할 때 항전기

장에 도달하게 되면 강유전체 분극반전이 발생한다. 분극은 전기장의 작용방향과 함께 회전한다. 전기장이 증가하여 전기변위가 완전한 포화상태에 도달하게 되면($E=E_0$), 분극 포화(polarization saturation)가 발생한다.

강유전체 세라믹에 전기장 또는 응력과 같은 외부하중이 균열선단에 작용하면 90° 또는 180° 분역회전을 일으킨다. 강유전체의 분역은 균일한 분극을 갖고 단일분역(mono-domain)으로 가정한다. 분역회전 기준은 Hwang 등⁽¹⁶⁾에 의해 제안되었으며 다음과 같다.

$$\sigma_{ij} \Delta \gamma_{ij} + E_i \Delta P_i \geq 2P_s E_c \quad (1)$$

여기서, σ_{ij} 와 E_i 는 응력과 전기장을 나타내고, $\Delta \gamma_{ij}$ 와 ΔP_i 는 자발 변형률(spontaneous strain)과 자발분극의 변화를 나타낸다. 전기-기계적 하중하에서 식 (1)을 만족할 때 분역회전이 발생한다.

90° 분역회전으로 인한 분극과 자발 변형률에 대한 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$\Delta P_i = \sqrt{2} P_s \begin{Bmatrix} \cos\left(\phi + \frac{3}{4}\pi\right) \\ \sin\left(\phi + \frac{3}{4}\pi\right) \end{Bmatrix}$$

$$\Delta \gamma_{ij} = \gamma_s \begin{bmatrix} -\cos 2\phi & -\sin 2\phi \\ -\sin 2\phi & \cos 2\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 ϕ 는 초기 분극벡터가 x_1 축에 이루고 있는 각도이고, γ_s 는 90° 분역회전을 갖는 자발 변형률이다. 식 (2)에서 $-3\pi/4$ 와 $+3\pi/4$ 는 시계방향과 반시계 방향의 90° 회전에 대한 양이다. 180° 분역회전에 대하여 분극회전벡터와 회전 변형률 텐서는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_i = -2P_s \begin{Bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{Bmatrix}$$

$$\Delta \gamma_{ij} = 0 \quad (3)$$

90° 분역회전은 변형률을 일으키지만 180° 회전으로 인한 변형률은 없다. 따라서, 180° 분역회전 영역에 대하여는 응력강도계수를 계산하지 않아도 된다.

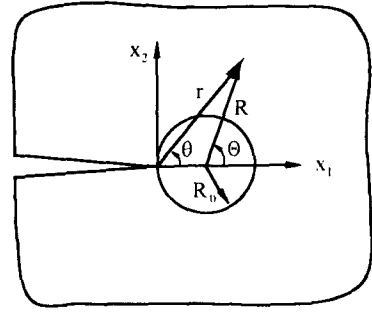


Fig. 2 Asymptotic problem of a crack in a ferroelectric material

3. 문제의 수식화

전기적 하중을 받는 강유전체 세라믹내의 균열을 생각한다. 균열면에 트래션과 전하(charge)는 없다고 가정한다. 균열선단 주위의 비선형 영역과 분역회전 영역의 크기는 균열길이에 비하여 아주 작다고 가정한다. 소규모(small scale) 조건하에서 전기적 하중을 받는 강유전체 세라믹내의 반무한 균열의 점근(asymptotic) 문제를 Fig. 2에 나타내었다. 재료는 등방성이고, 압전효과에 의한 전기-기계적 연성효과는 없다. r 과 θ 의 원통 좌표계를 이용하고, 균열선단에 원점이 놓이게 한다. 전기장의 해를 표현하기 위하여 원점이 $(R_0, 0)$ 인 다른 원통 좌표계 (R, Θ) 를 도입한다. Fig. 2에서 원형의 형태를 갖는 포화영역의 반경은 R_0 로 다음과 같이 정의한다.⁽¹⁷⁾

$$R_0 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_E^*}{E_0} \right)^2 \quad (4)$$

여기서 K_E^* 는 전기장이 작용하는 강도계수이다. 반경 R_0 을 갖는 원형의 외부($R > R_0$) 재료는 선형 유전체(linear dielectric)이고, 내부($R < R_0$)는 완전히 포화상태인 재료로 생각할 수 있다. 전기장의 해는 전기적 비선형영역의 경계에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁷⁾

$$E_R = \frac{K_E^*}{\sqrt{2\pi R}} \sin \frac{1}{2} \Theta$$

$$E_\Theta = \frac{K_E^*}{\sqrt{2\pi R}} \cos \frac{1}{2} \Theta \quad \text{for } R > R_0$$

$$E_r = 0$$

$$E_\theta = \frac{2E_0R_0}{r} \cos \theta \quad \text{for } R < R_0 \quad (5)$$

균열선단에서 분역회전된 강유전체 세라믹은 주위의 회전되지 않는 재료의 구속으로 인하여 부적합 회전 변형률을 일으킨다. 이 변형률은 균열선단에서 응력을 발생시킨다. 분역회전 변형률에 의한 균열선단 응력강도계수는 열응력해석에 대한 Eshelby 기법 또는 Duhamel 유사성에 대한 해석으로 생각될 수 있다. 균열선단 응력강도계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^(18,19)

$$K_I^{fp} = \frac{Y}{1+\nu} \int_A U_{ij} \delta \gamma_{ij} dA \quad (6)$$

$$U_{ij}(r, \theta) = \frac{1}{16(1-\nu)\sqrt{2\pi r^{3/2}}} \times \begin{bmatrix} \cos \frac{3}{2} \theta + 3 \cos \frac{7}{2} \theta & -3 \sin \frac{3}{2} \theta + 3 \sin \frac{7}{2} \theta \\ -3 \sin \frac{3}{2} \theta + 3 \sin \frac{7}{2} \theta & 7 \cos \frac{3}{2} \theta - 3 \cos \frac{7}{2} \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 K_I^{fp} 은 모드 I의 균열선단 응력강도계수이고, Y 와 ν 는 Young 계수와 Poisson 비를 나타내고, A 는 분역회전영역, $U_{ij}(r, \theta)$ 는 가중함수(weight function)를 나타낸다. 우선, 분역회전 영역이 결정되면 균열선단 응력강도계수는 식 (6)으로부터 계산될 수 있다.

4. 결과 및 토론

전기적 하중만을 받는 강유전체 세라믹내의 분극방향에 수직인 정지 균열(stationary crack)을 생각한다. 균열면은 분극방향에 수직인 $\phi=90^\circ$ 의 경우에 대하여 계산한다. 분극벡터와 같은 방향을 갖는 양의 전기장이 작용할 때 전기장 강도계수 K_E^∞ 는 양(+)의 값을 갖고, 분극벡터와 반대방향인 음의 전기장에서는 음(-)의 값을 갖는다. 분역회전영역의 대칭성(symmetry)으로 인하여 균열선단 근처의 분역회전 영역을 갖는 균열에 대한 모드 II의 응력강도계수는 없다.

4.1 분역회전영역(Domain switching zone)

전기적 하중만을 받는 강유전체 세라믹내의 분극방향에 수직인 정지 균열(stationary crack)에 대

하여 양의 전기장과 음의 전기장이 작용할 때 나누어서 계산한다. 먼저, 식 (5)를 식 (1)에 대입하면 분극벡터와 같은 방향을 갖는 양(positive)의 전기장 ($K_E^\infty > 0$)에 대한 90° 분역회전영역의 형태를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\frac{r}{R_c} = \sqrt{2} \frac{E_c}{E_0} \cos \theta \cos \left(\left| \theta - \frac{3}{4} \pi \right| \right) \quad \frac{\pi}{4} < \left| \theta \right| < \frac{\pi}{2} \quad \text{for } R < R_0$$

$$\frac{R}{R_c} = \frac{1}{2} \cos^2 \left(\frac{3}{4} \pi - \frac{1}{2} \left| \theta \right| \right) \quad \frac{\pi}{2} < \left| \theta \right| < \pi \quad \text{for } R > R_0 \quad (8)$$

여기서 R_c 의 정의와 R_0 와의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$R_c = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_E^\infty}{E_c} \right)^2, \quad R_c = R_0 \left(\frac{E_0}{E_c} \right)^2 \quad (9)$$

식 (8)과 비슷하게 음의 전기장 ($K_E^\infty < 0$)에 대한 회전영역은 다음과 같이 구할 수 있다.

For 90° switching

$$\frac{r}{R_c} = -\sqrt{2} \frac{E_c}{E_0} \cos \theta \cos \left(\left| \theta + \frac{3}{4} \pi \right| \right), \quad \left| \theta \right| < \frac{\pi}{2} \quad \text{for } R < R_0$$

$$\frac{R}{R_c} = \frac{1}{2} \cos^2 \left(\frac{3}{4} \pi + \frac{1}{2} \left| \theta \right| \right), \quad \left| \theta \right| < \pi \quad \text{for } R > R_0 \quad (10)$$

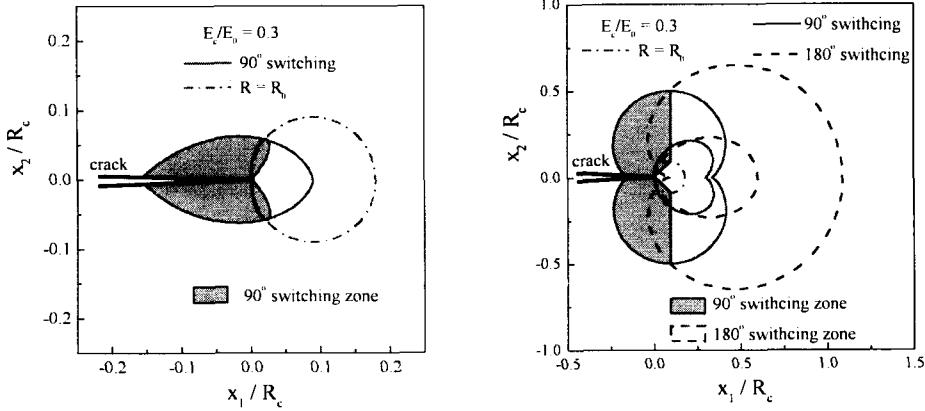
For 180° switching

$$\frac{r}{R_c} = 2 \frac{E_c}{E_0} \cos^2 \theta \quad \text{for } R < R_0$$

$$\frac{R}{R_c} = \cos^2 \frac{1}{2} \left| \theta \right| \quad \text{for } R > R_0 \quad (11)$$

180° 분역회전은 분극방향과 같은 방향의 전기장인 양의 전기장에서는 발생하지 않는다. 식 (8)-(11)을 이용하여 $E_c/E_0=0.3$ 인 특정한 값에 대한 분역회전 영역을 전기장의 방향에 따라서 Fig. 3에 나타내었다.

분역회전 영역을 이용하여 응력강도계수를 구하는데 다음과 같은 적분을 도입한다.



(a) Positive electric field (b) Negative electric field
Fig. 3 Domain switching zones induced by an electric field

Positive electric field		Negative electric field		E_c/E_0
Initial crack	Growing crack	Initial crack	Growing crack	
				0.0
				0.2
				0.3
				0.4
				1.0

Fig. 4 90° domain switching zones for electric-field-induced growing crack

$$I = -\frac{3}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{\frac{r}{R_c}} \sin \theta \sin \frac{5}{2} \theta d\theta \quad (12)$$

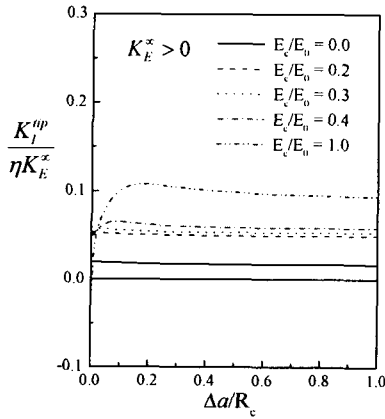
균열선단 응력강도계수 K_I^{hp} 는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$K_I^{hp} = \eta |K_E^{\infty}| I(\Delta a/R_c, E_c/E_0; \text{sgn}(K_E^{\infty})) \quad (13)$$

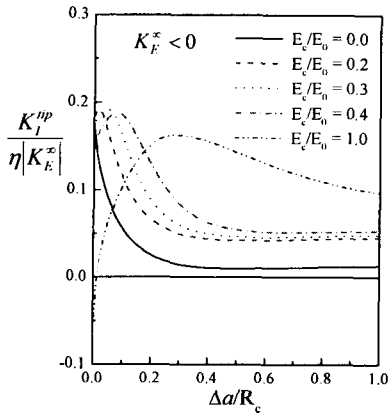
여기서 $\eta = \frac{Y\gamma_s}{(1-\nu^2)E_c}$ 이다. 적분 I 는 E_c/E_0 와 K_E^{∞} 의 부호만의 함수이므로 K_I^{hp} 는 K_E^{∞} 에 선형으로 의존한다.

4.2 성장하는 균열(Growing crack)

균열이 성장하면 분역회전 영역은 바뀌게 된



(a) Positive electric field



(b) Negative electric field

Fig. 5 The crack tip stress intensity factor for a growing crack

다. 양(positive)의 전기장에서는 균열이 성장하면서 분극방향과 전기장의 방향은 같은 방향이므로 90° 회전영역만이 계속해서 생성되고 180° 회전은 일어나지 않는다. 그러나, 음(negative)의 전기장에서는 Fig. 3(b)와 같이 균열선단 앞부분에서 180° 회전영역이 발생하므로 이 영역에서는 전기장의 방향과 분극방향이 같게 되므로 양의 전기장이 작용할 때의 분역회전 영역이 발생하게 된다. 따라서, 분극방향과 반대의 전기장이 작용하는 음의 전기장에서는 균열이 성장하면 양의 전기장이 작용할 때의 분역회전 영역이 생성된다. 균열이 성장하면서 전기장이 작용하는 방향에 대하여 다른 형상의 분역회전 영역을 갖는 E_c/E₀의 특징한 값에 따라 Fig. 4에 나타내었다.

비선형 분역회전 영역을 이용하여 해석한

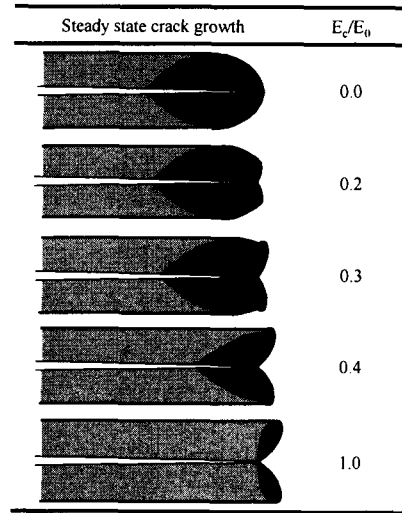


Fig. 6 90° domain switching zones for steady state crack growth

Beom과 Atluri⁽⁷⁾의 연구에서 강유전체는 E_c/E₀<0.4인 재료에 대하여는 균열이 성장하고, E_c/E₀>0.6인 재료에 대해서는 균열선단 부분에 접촉(contact)이 발생하여 파괴가 일어나지 않는다고 보고하였다. 따라서, 본 논문에서는 E_c/E₀<0.4인 경우에 성장하는 균열에 대한 결과를 주로 제시한다.

전기장과 분극의 방향에 따라 Fig. 4에서 결정된 분역회전영역과 식 (13)을 이용하여 균열선단 응력강도계수를 계산하였다. 성장하는 균열(growing crack)에 대하여 전기장의 방향에 따라 Fig. 5에 균열선단 응력강도계수를 나타내었다. 균열이 성장하면서 양의 전기장에서는 약간의 균열선단 응력강도계수의 감소를 보이고 음의 전기장에서는 급격하게 감소한 후에 안정적 상태에 도달하게 된다. E_c/E₀>0.6인 경우에는 초기균열(Δa/R_c=0)의 응력강도계수의 값이 음의 값을 가지므로 균열이 성장하지 않는다.

4.3 안정적 상태(steady state)의 균열성장

균열이 성장하게 되면 양의 전기장이 작용할 때의 분역회전 영역은 Fig. 4에서와 같이 일으킨다. 따라서, 안정적 상태의 균열에 대한 분역회전 영역은 전기장 방향에 관계없이 Fig. 6에서와 같이 양의 전기장 방향일 때로 발생한다. 초기균열 상태와 안정적 상태에서의 균열성장에 대한 균열선단 응력강도계수를 Fig. 7에 E_c/E₀의 함수로

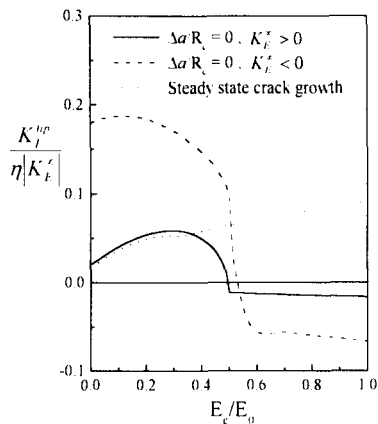


Fig. 7 The crack tip stress intensity factor for a steady state crack growth

나타내었다. 강유전체 세라믹의 재료 물성치가 $E_c/E_0 > 0.6$ 인 재료는 초기에 파괴가 발생하지 않기 때문에 안정적상태의 균열성장에서의 해석은 큰 의미를 갖지 못한다. 그러나, $E_c/E_0 < 0.4$ 인 재료는 균열이 성장하면서 인성이 강해지는 효과를 기대할 수 있다. 강유전체 세라믹 내에서 균열이 성장하게 되면 변환된 분역회전에 의하여 강유전체 세라믹의 인성이 증가하게 된다.

5. 결 론

전기적 하중을 받는 강유전체 세라믹내의 분극 방향에 수직인 반무한 균열의 성장에 대하여 해석하였다. 균열선단 근처의 분역회전 영역의 강계는 전기적 비선형 이론을 이용하여 분역회전으로 인한 균열선단 응력강도계수를 결정하였다. 분역회전 영역은 항전기장과 항복전기장의 비에 크게 의존한다. 분극방향과 전기장의 방향에 따라 성장하는 균열과 안정적 상태에서의 균열선단 응력강도계수를 해석하였다. 양의 전기장이 작용할 때는 균열이 성장하면서 안정적 상태에 바로 도달하게 되고, 음의 전기장에서는 불안정한 균열성장을 보인 후에 안정적 상태에 도달하게 된다. 강유전체 세라믹 내에서 균열이 성장하게 되면 변환된 분역회전에 의하여 강유전체 세라믹의 인성이 증가하게 되는 것을 비선형 강유전체 분역회전 모델을 이용하여 해석하였다.

후 기

이 논문은 2002년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Tobin, A. G. and Pak, Y. E., 1993, "Effect of Electric Fields on Fracture Behavior of PZT Ceramics." *Proc. SPIE, Smart Struct. Mater.*, 1916, pp. 78~86.
- (2) Park, S. and Sun, C.-T., 1995, "Fracture Criteria for Piezoelectric Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 78, pp. 1475~1480.
- (3) Wang, H. and Singh, R. N., 1997, "Crack Propagation in Piezoelectric Ceramics: Effects of Applied Electric Fields," *J. Appl. Phys.*, Vol. 81, pp. 7471~7479.
- (4) Fu, R. and Zhang, T.-Y., 2000, "Effects of an Electric Field on the Fracture Toughness of Poled Lead Zirconate Titanate Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 83, pp. 1215~1218.
- (5) Yang, W. and Zhu, T., 1998, "Switch-Toughening of Ferroelectrics Subjected to Electric Fields," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 46, pp. 291~311.
- (6) Zeng, X. and Rajapakse, R. K. N. D., 2001, "Domain Switching Induced Fracture Toughness Variation in Ferroelectrics," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 10, pp. 203~211.
- (7) Beom, H. G. and Atluri, S. N., 2003, "Effect of Electric Fields on Fracture Behavior of Ferroelectric Ceramics," *J. Mech. Phys. Solids*, In press.
- (8) McMeeking, R. M. and Evans, A. G., 1982, "Mechanics of Transformation-Toughening in Brittle materials," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 65, pp. 242~246.
- (9) Budiansky, B., Hutchinson, J. W. and Lambropoulos, J. C., 1983, "Continuum Theory of Dilatant Transformation Toughening Ceramics," *Int. J. Solids Structures*, Vol. 19, pp. 337~355.
- (10) Meschke, F., Kolleck, A. and Schneider, G. A., 1997, "R-Curve Behaviour of BaTiO₃ due to

- Stress-Induced Ferroelastic Domain Switching," *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 17, pp. 1143~1149.
- (11) Kolleck, A., Schneider, G. A. and Meschke, F. A., 2000, "R-Curve Behavior of BaTiO₃-and PZT Ceramics Under the Influence of an Electric Field Applied Parallel to the Crack Front," *Acta mater.*, Vol. 48, pp. 4099~4113.
- (12) Mao, S. X., Li, X. and Han, X., 2000, "Toughening of Ferroelectric Ceramics Under Polarization Switching," *Mater. Sci. Engng.*, Vol. A292, pp. 66~73.
- (13) Liu, Y. G., Jia, D. C. and Zhou, Y., 2002, "Microstructure and Mechanics Properties of a Lithium Tantalate-Dispersed-Alumina Ceramic Composite," *Ceram. Int.*, Vol. 28, pp. 111~114.
- (14) Liu, Y. G., Zhou, Y., Jia, D. C., Meng, Q. C. and Chen, Y. H., 2002, "Domain Switching Toughening in a LiTaO₃ Dispersed Al₂O₃ Ceramic Composite," *Scripta Mater.*, Vol. 47, pp. 63~68.
- (15) Jaffe, B., Cook, W. R. and Jaffe, H., 1971, *Piezoelectric Ceramics*, Academic Press, New York.
- (16) Hwang, S. C., Lynch, C. S. and McMeeking, R. M., 1995, "Ferroelectric/Ferroelastic Interactions and a Polarization Switching Model," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 43, pp. 2073~2084.
- (17) Beom, H. G., 1999, "Small Scale Nonlinear Analysis of Electrostrictive Crack Problems," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 47, pp. 1379~1395.
- (18) Rice, J. R., 1985, "Three-Dimensional Elastic Crack Tip Interactions with Transformation Strains and Dislocations," *Int. J. Solid Structures*, Vol. 21, pp. 781~791.
- (19) Gao, H., 1989, "Application of 3-D Weight Functions - I. Formulations of Crack Interfaces with Transformation Strains and Dislocations," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 37, pp. 133~153.