

## 분역회전이 강유전체 세라믹내의 균열성장에 미치는 영향

정경문\*, 박재연\*, 범현규#

### Effect of Domain Switching on Crack Growth in Ferroelectric Ceramics

Kyoung Moon Jeong\*, Jae Youn Park\* and Hyeon Gyu Beom#

#### ABSTRACT

Domain switching effect on crack growth in ferroelectric ceramics under combined electric and mechanical loading is investigated. The shape and size of the switching zone is shown to depend strongly on the relative magnitude between the applied electric field and stress field as well as on the ratio of the coercive electric field to the yield electric field. The toughening mechanism is thought to be ferroelectric domain switching leading to the development of a process zone around the crack. Crack-tip stress intensity factor induced by domain switching for the steady state crack growth is numerically obtained.

**Key Words** : Domain switching(분역회전), Crack growth(균열성장), Ferroelectric ceramics(강유전체 세라믹), Coercive electric field(항전기장), Yield electric field(항복전기장)

#### 1. 서론

페로브스카이트(perovskite) 구조를 보이는 압전 세라믹은 고온에서는 중심대칭성을 나타내는 상유전체(paraelectric)인 입방정(cubic) 구조를 갖지만, 상온에서는 정방형의 비대칭 격자구조를 갖는 강유전체(ferroelectric)로 상전이한다. 강유전체는 특유의 분역구조(domain structure)를 가지고 있는데 이것은 자발분극의 방향이 일정한 지역을 가리키는 층층으로서 분역벽(domain wall)에 의해 나누어진다. 강유전체는 절연파괴가 일어나지 않을 정도의 작은 전기장으로도 분극의 방향을 변화시킬 수 있

는 재료이다. 이러한 강유전체의 특성을 이용하여 전기-기계적 센서, 액츄에이터, 트랜스듀서 및 MEMS 등 다양한 응용분야를 가지고 있다.<sup>1,2</sup>

최근까지 강유전체 세라믹의 광범위한 적용분야로 인하여 이 재료의 신뢰성에 대한 연구가 집중적으로 연구되고 있다. 전기장이 강유전체 세라믹의 파괴거동에 미치는 영향에 대한 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<sup>3-6</sup>와 전혀 일치하지 않는다. 최근에는 강유전

접수일: 2003년 2월 26일; 게재승인일: 2003년 8월 14일

\* 전남대학교 대학원 기계공학과

# 교신저자: 전남대학교 기계공학과

E-mail: hgbeom@chonnam.ac.kr, Tel: (062) 530-1682

체 세라믹의 파괴거동을 이론적으로 설명하기 위하여 분역회전(domain switching)모델을 적용하고 있다.<sup>7-10</sup> 강유전체 세라믹은 높은 전기장에서 전기적으로 비선형거동을 나타낸다. 최근에 Beom과 Atluri<sup>11</sup>는 전기-기계적 하중을 받는 강유전체의 파괴거동에 대한 전기장의 영향을 해석하였다. 그들은 압전 재료의 파괴거동에 대한 전기장의 영향에 대하여 다양한 실험적 결과<sup>3-6</sup>를 이론적으로 설명하기 위해 단일화된 비선형 분역회전 모델을 제안하였다. 강유전체 세라믹은 전기장의 방향과는 상관없이 재료의 물성치인 항전기장(coercive electric field)과 항복전기장(yield electric field)의 비가 균열선단 응력강도계수를 증가 또는 감소를 결정하는 중요한 인자임을 해석하였고, 기존 연구자들의 실험결과<sup>3-6</sup>에 대한 이론적 설명이 가능하게 하였다. 또한, 전기장에 확대 적용한 유한두께의 띠항복모델을 적용하여 기존의 연구<sup>11</sup>와 동일한 결과를 얻었다.<sup>12</sup>

전형적인 세라믹의 파괴인성을 향상시키기 위한 미소기구는 미소균열 인성화, 변태 인성화, 연성상 인성화, 섬유 인성화, 그리고 휘스커 인성화로 나누어진다.<sup>13</sup> 이러한 세라믹의 지배적인 인성기구를 이용하여 강유전체 세라믹의 균열성장 거동을 설명하지 못하기 때문에, 분역회전모델을 강유전체 세라믹내의 균열성장에 적용하기 시작하였다. 강유전체 세라믹의 강탄성체 인성화를 분역회전모델을 적용하여 기존의 변태 인성화와 유사하게 설명하였다.<sup>14-17</sup> 최근에 Jeong과 Beom<sup>18</sup>은 전기장을 받는 강유전체 세라믹내의 분역회전 인성화를 해석하였다. 재료의 물성치인 항전기장과 항복전기장의 비에 따라 균열성장 거동이 다름을 보였다. 그러나, 전기-기계적 하중을 받는 강유전체 세라믹내의 균열성장에 대하여는 아직까지 연구되지 않았다.

본 연구의 목적은 전기-기계적 하중하에서 분역회전이 강유전체 세라믹내의 균열성장에 미치는 영향에 대하여 해석하고자 한다. 비선형 분역회전 모델을 적용하여 분역회전 영역을 구하고 균열선단의 응력강도계수를 계산한다. 계산결과는 재료 물성치인 항전기장과 항복전기장의 비에 따라 나타낸다.

## 2. 분역 회전(Domain switching)

분역회전과 전기적 포화(saturation)를 이용하여 강유전체 세라믹의 구성모델을 만드는데 많은 노력

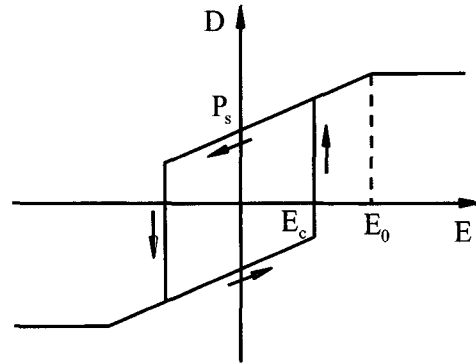


Fig. 1 Idealized electric displacement(D)-electric field (E) curve for a ferroelectric material

이 이루어졌다. 강유전체 세라믹은 높은 전기장에서 강한 전기적 비선형 거동을 보인다. 전기장을 증가시키면서 강유전체 세라믹의 전기적 변위(electric displacement)는 전기적 포화상태인 한계에 도달하게 된다. 따라서, 강유전체 세라믹의 구성모델을 Fig. 1과 같이 도입하였다. 강유전체는 완전한 분극(polarization)포화 현상을 갖는다고 가정하고, 자발분극(spontaneous polarization)  $P_s$ , 항전기장  $E_c$ 와 항복전기장  $E_0$ 의 크기를 갖는다. 전기장이 작용할 때  $E_c$ 에 도달하게 되면 강유전체는 분극회전이 발생하여 변형을 일으킨다. 분극은 전기장의 작용방향과 같게 회전하고, 압축하중이 작용할 때는 하중방향에 수직으로 분극이 회전한다. 전기장이 증가하여 전기변위가 완전한 포화상태에 도달하게 되면 분극포화가 발생하게 된다. 강유전체 세라믹은 각각의 재료에 따라 Fig. 1과 같이 항전기장과 항복전기장을 갖는다.

전기장 또는 응력과 같은 외부하중이 강유전체 세라믹에 작용하는 경우 다음의 조건을 만족하면  $90^\circ$  또는  $180^\circ$  분역회전이 발생한다.<sup>19</sup>

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

여기서  $\sigma_{ij}$ 와  $E_i$ 는 응력과 전기장을 나타내고,  $\Delta \gamma_{ij}$ 와  $\Delta P_i$ 는 자발변형률과 자발분극의 변화를 나타낸다. 강유전체의 분역은 균일한 분극을 갖고 단일분역(mono-domain)를 갖는다고 생각하자. 전기-기계적 하중하에서 분역회전 조건식 (1)을 만족하면 강유전체는 분역회전이 발생한다.

$90^\circ$  분역회전으로 인한 자발 변형률과 분극의

변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>8</sup>

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

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

여기서  $\phi$ 는 초기분극벡터가 이루는 각도이고,  $\gamma_s$ 는 90° 분역회전과 관련된 자발변형률이고,  $-3\pi/4$ 와  $+3\pi/4$ 는 시계방향과 반시계 방향의 90° 회전에 대한 양이다. 180° 분역회전에 대한 분극회전벡터와 회전 변형률 텐서는 다음과 같다.

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

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

90° 분역회전은 변형률을 일으키지만 180° 분역회전으로 인한 변형률은 없다. 또한, 분역회전 조건식 (1)을 만족하는 기계적 하중은 90° 분역회전만 발생시키고, 반면에 전기적 하중은 90° 또는 180° 분역회전을 일으킬 수 있다.

### 3. 응력강도계수

강유전체 세라믹과 같은 취성재료는 기공이나 균열과 같은 다양한 결함이 존재한다. 강유전체 세라믹에 전기장을 인가하면 세라믹내의 결함 주위에는 전기장이 집중되어 분역회전이 발생한다. 강유전체 세라믹내의 균열선단에서 전기장 분포와 분역회전 영역을 Fig. 2에 나타내었다. 강유전체 분역은 전기장의 방향과 같은 방향으로 회전한다.

전기-기계적 하중을 받는 강유전체 세라믹내의 균열을 생각하자. 균열면에 트랙선과 전하(charge)는 없고, 균열선단 주위의 비선형 영역과 분역회전 영역의 크기는 균열길이에 비하여 아주 작다고 가정한다. 소규모 조건(small-scale condition)하에서 전기-기계적 하중을 받는 강유전체 세라믹내의 반무한 균열의 접근(asymptotic) 문제를 Fig. 3에 나타내었다. 초기 분극벡터는  $x_1$ 축에 대하여 각도  $\phi$ 를 이루고 있다.  $r$ 과  $\theta$ 의 원통 좌표계를 이용하고 균

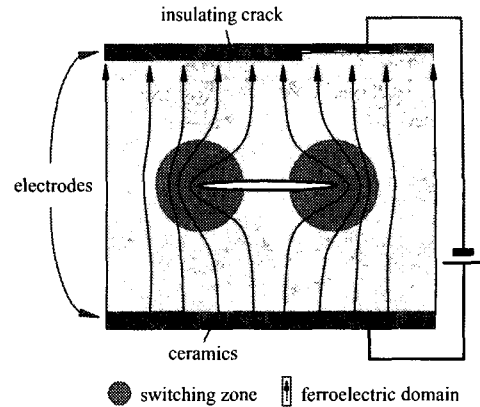


Fig. 2 Electric switching zone and electric field distribution at the crack tip

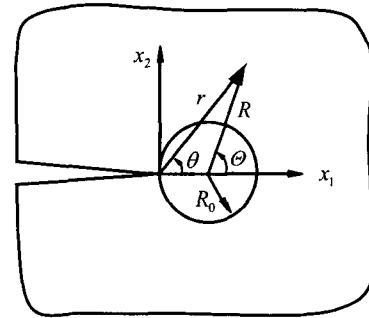


Fig. 3 Asymptotic problem of a crack

열선단에 원점이 놓이게 한다. 전기적 비선형성의 해를 나타내기 위하여 또다른 원통 좌표계  $(R, \theta)$ 를 도입하고 원점은  $(R_0, 0)$ 에 놓이게 한다. 원형의 형태를 갖는 포화영역의 반경은  $R_0$ 로 다음과 같이 정의한다.<sup>20</sup>

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

여기서  $K_E^\infty$ 는 전기장이 작용하는 강도계수이다. 반경  $R_0$ 를 갖는 원형의 외부재료는 선형 유전체이고 내부는 완전히 포화상태인 재료로 생각할 수 있다. 균열선단 근처에서 재료는 기계적으로는 선형 거동을 보이지만, 반면에 전기적으로는 비선형거동을 보인다. 균열선단 응력장은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I^{tip}}{\sqrt{2\pi r}} \bar{\sigma}_{ij}(\theta) \text{ as } r \rightarrow 0 \quad (5)$$

여기서  $\bar{\sigma}_{ij}(\theta)$ 는 응력의 일반적인 분포함수이다.  $K_I^{tip}$ 은 모드 I의 균열선단 응력강도계수를 나타낸다. 전기장의 해는 전기적 비선형영역의 경계에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>20</sup>

$$\begin{aligned} E_R &= \frac{K_E^\infty}{\sqrt{2\pi R}} \sin \frac{1}{2} \theta \\ E_\theta &= \frac{K_E^\infty}{\sqrt{2\pi R}} \cos \frac{1}{2} \theta \text{ for } R > R_0 \\ E_r &= 0 \\ E_\theta &= \frac{2E_0 R_0}{r} \text{ for } R < R_0 \end{aligned} \quad (6)$$

분역회전영역은 일반적으로 세라믹내의 균열선단 주위에 발생한다. 분역회전으로 인한 균열선단 응력강도계수를 평가하기 위하여 먼저 분역회전영역의 형상을 결정한다. 응력장 (5)와 식 (6)을 분역회전 조건식 (1)에 대입하면 분역회전영역 경계에 대하여 다음과 같은 무차원화된 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{r}{R_c} = \tilde{r}(\theta, \beta, \frac{E_c}{E_0}) \quad (7)$$

여기서  $R_c$ 와  $\beta$ 는 다음과 같다.

$$R_c = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\gamma_s K_I^\infty}{P_s E_c} \right)^2, \quad \beta = \frac{P_s K_E^\infty}{\gamma_s K_I^\infty} \quad (8)$$

분역회전은 식 (1)이 90° 회전과 180° 회전을 동시에 만족할 때  $r$ 이 더 큰 값을 갖는 방향에 대하여 발생한다. 회전영역에 대한 각도  $\theta$ 의 범위는 조건  $r \geq 0$ 을 만족하기 위하여 결정된다.

균열선단에서 분역회전된 강유전체 세라믹은 주위의 회전되지 않은 재료의 구속으로 인하여 부적합 회전변형률을 일으키고, 회전변형률에 의해 균열선단에서 응력이 발생한다. 분역회전 변형률에 의한 균열선단 응력강도계수는 열응력 해석에 대한 Eshelby 기법 또는 Duhamel 유사성에 대한 해석으로 구할 수 있다. 따라서 균열선단 응력강도계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_I^{tip} = \frac{Y}{1+\nu} \int_A U_{ij} A \gamma_{ij} dA \quad (9)$$

여기서  $Y$ 와  $\nu$ 는 Young 계수와 Poisson 비,  $A$ 는 분역회전 영역의 면적이다.  $U_{ij}(r, \theta)$ 는 가중함수(weight function)로 다음과 같다.<sup>11</sup>

$$U_{ij}(r, \theta) = \frac{1}{16(1-\nu)\sqrt{2\pi r^3}} \times \begin{pmatrix} \cos \frac{3}{2} \theta + 3 \cos \frac{7}{2} \theta & -3 \sin \frac{3}{2} \theta + 3 \sin \frac{7}{2} \theta \\ -3 \sin \frac{3}{2} \theta + 3 \sin \frac{7}{2} \theta & 7 \cos \frac{3}{2} \theta - 3 \cos \frac{7}{2} \theta \end{pmatrix} \quad (10)$$

분역회전영역이 결정되면 균열선단 응력강도계수는 식 (9)로부터 계산 될 수 있다.

#### 4. 결과 및 토론

전기-기계적 하중을 받는 강유전체 세라믹내의 분극방향에 수직인 정지균열(stationary crack)을 생각하자. 균열면은 분극방향에 수직인  $\phi = 90^\circ$ 의 경우에 대하여 계산한다. 분극벡터와 같은 방향을 갖는 양의 전기장(positive electric field)이 작용할 때 전기장 강도계수  $K_E^\infty$ 는 식 (6)에서 양(+)의 값을 갖고, 분극벡터와 반대 방향인 음의 전기장(negative electric field)에서는 음(-)의 값을 갖는다.  $x_1$ 축에 대하여 분역회전영역이 대칭(symmetry)으로 발생하므로 균열선단 근처의 분역회전 영역을 갖는 균열에 대한 모드 II의 응력강도계수는 없다.

비선형 분역회전 모델을 적용하여 전기장만을 받는 강유전체 세라믹의 균열성장에 대하여 연구되었다.<sup>18</sup> 그들은 균열이 성장하여 안정적 상태에 도달하게 되면 전기장의 방향과는 상관없이 양의 전기장에 의한 분역회전영역과 음의 전기장에 의한 회전영역이 같음을 보였다. 왜냐하면, 음의 전기장이 작용하면 균열 뒤쪽에서는 90° 회전이 발생하고 균열선단 앞쪽에서는 180° 회전이 발생한다. 180° 회전영역에서는 전기장의 방향과 분극방향이 같아 지므로 균열이 성장하게 되면 양의 전기장이 작용할 때의 회전영역이 발생하게 된다. 따라서, 전기-기계적 하중을 받는 강유전체 세라믹내의 안정적 상태의 균열성장은 전기장의 방향과는 무관하게 양

의 전기장이 작용할 때만을 계산한다.

식 (2)와 (3)과 식 (5)와 (6)을 분역회전 조건식 (1)에 대입하면 분극벡터와 같은 방향을 갖는 양의 전기장 ( $K_E^\infty > 0$ )에 대한  $90^\circ$  분역회전영역의 형상을 다음과 같이 결정할 수 있다. 먼저, 전기적 포화영역 내부 ( $R < R_0$ )의 분역회전영역의 경계는 다음과 같다.

$$\sqrt{\frac{r}{R_c}} = -\frac{1}{4} \sin \theta \sin \frac{3}{2} \theta + \left[ \frac{1}{16} \sin^2 \theta \sin^2 \left( \frac{3}{2} \theta \right) + \sqrt{2} \frac{E_c}{E_0} \beta^2 \cos \theta \cos \left( \left| \theta - \frac{3}{4} \pi \right| \right) \right]^{1/2} \quad \left( \frac{\pi}{4} < |\theta| < \frac{\pi}{2} \right) \text{ for } R < R_0 \quad (11)$$

전기적 포화영역 외부 ( $R > R_0$ )의 분역회전영역의 경계는 다음과 같다.

$$\sqrt{\frac{r}{R_c}} = -\frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{3}{2} \theta + \frac{1}{\sqrt{2}} \beta \sqrt{\frac{\sin \theta}{\sin \theta}} \cos \left( \frac{3}{4} \pi - \frac{1}{2} |\theta| \right) \text{ for } R > R_0 \quad (12)$$

균열의 윗면 ( $x_2 > 0$ )과 아랫면 ( $x_2 < 0$ )에서  $90^\circ$  회전영역은 시계방향과 반시계 방향의  $90^\circ$  분역회전을 갖는다. 그러나 두 가지 방향의 분역회전은 똑같은 변형률을 갖는다. 따라서, 모드 II에 대한 균열 선단 응력강도계수는 없다. 식 (11)과 (12)에서  $\beta$ 가 무한대이면 기계적 하중이 없이 순수하게 전기장이 작용하는 경우와 일치한다.<sup>18</sup> 식 (11)과 (12)로부터 분역회전영역을 정지된 균열에 대하여 Figs. 4-6에 나타내었다. 무차원 변수  $\beta$ 가 0.1, 1과 10일 때 항 전기장과 항복전기장의 비가 각각 1/3과 1일 때에 대하여  $90^\circ$  분역회전영역을 나타내었다. 무차원 변수  $\beta$ 가 증가하면서 분역회전영역은 더 커진다. 무차원 변수  $\beta$ 가 작은 값을 가지면 회전영역의 모양과 크기는  $E_c/E_0$ 에 거의 의존하지 않는다. 반면에, 무차원 변수  $\beta$ 가 커지면서 회전영역은  $E_c/E_0$ 에 크게 의존함을 알 수 있다. 정지된 균열에서 균열이 성장하여 안정적 상태에 도달하게 되면 분역회전은 동일한 모양과 크기를 가지면서 분역회전영역이 발생한다. 안정적 상태에서의 균열성장 에 대한 분역회전영역을 Fig. 7에 나타내었다. 전기-기계적 하중의 크기  $\beta$ 와  $E_c/E_0$ 의 값에 따라 분역회전 영

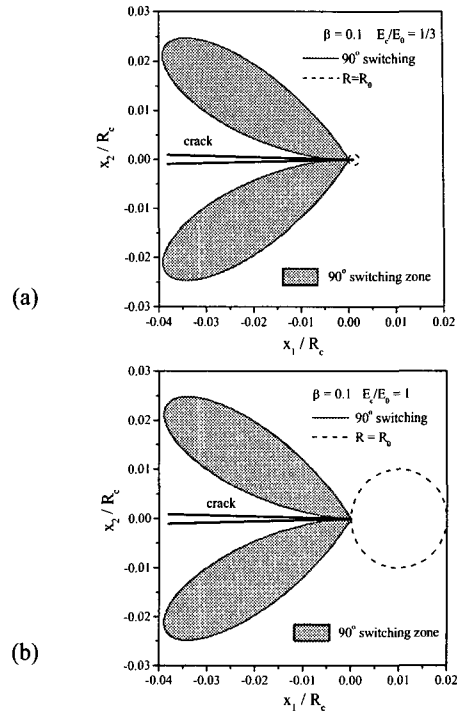


Fig. 4 Domain switching zones for  $\beta = 0.1$

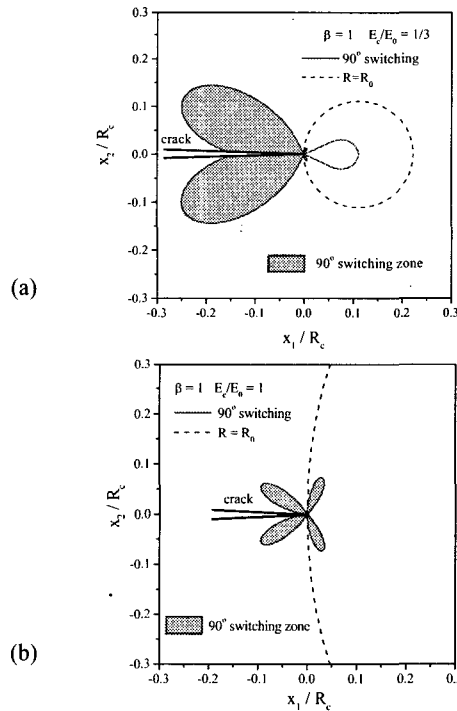


Fig. 5 Domain switching zones for  $\beta = 1$

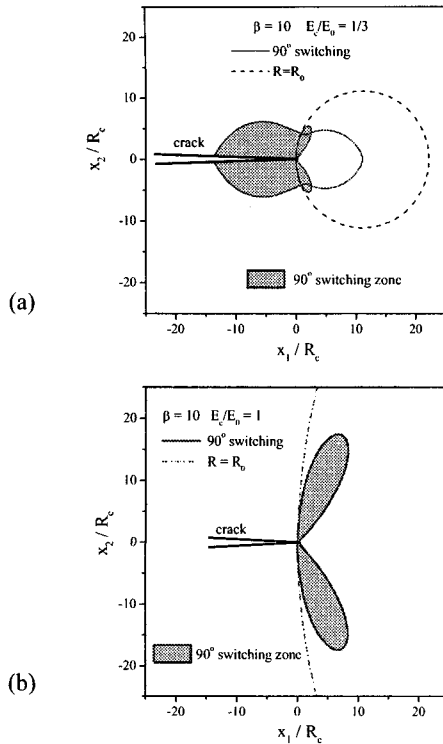


Fig. 6 Domain switching zones for  $\beta = 10$

역은 다르게 발생한다.

식 (2)와 (9)를 이용하여  $\phi = 90^\circ$ 인 경우에 대하여 균열선단 응력강도계수  $K_I^{tip}$ 은 다음과 같이 얻어진다.

$$K_I^{tip} = -\frac{3}{2\pi} \zeta K_I^\infty \int_0^{\pi} \sqrt{\frac{r}{R_c}} \sin \theta \sin \frac{5}{2} \theta d\theta \quad (13)$$

여기서  $r$ 은  $\theta$ 의 함수로서  $90^\circ$  회전영역의 경계를 나타내고,  $\zeta$ 는 무차원 변수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\zeta = \frac{Y \gamma_s^2}{(1-\nu^2) P_s E_c} \quad (14)$$

전기-기계적 하중을 받는 강유전체 세라믹내의 안정적 상태의 균열성장에 대한 응력강도계수를 정지 균열에 대한 응력강도계수<sup>11</sup>와 함께 Fig. 8에 나타내었다. 정지 균열에 대한 균열선단 응력강도계수는  $E_c/E_0 < 0.4$ 에 대하여 양(+)의 값을 갖고,  $E_c/E_0 > 0.6$ 에 대하여는 음(-)의 값을 갖는다. 이 결

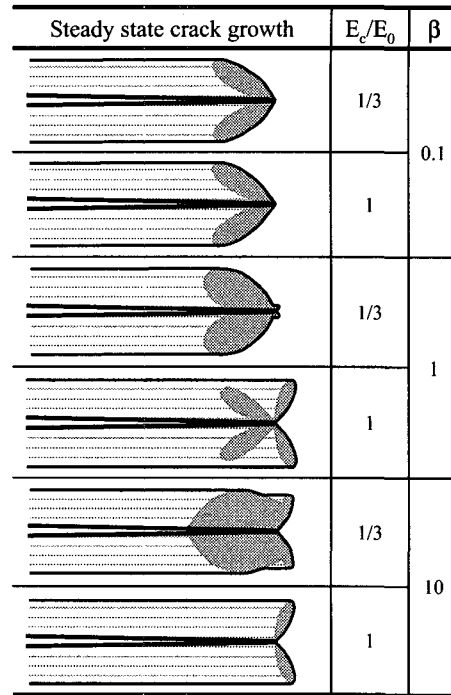


Fig. 7  $90^\circ$  domain switching zones for steady state crack growth

과는 강유전체의 파괴인성은  $E_c/E_0$ 의 값에 따라 증가 또는 감소할 수 있다는 것을 보여준다. 안정적 상태의 균열성장에서는 무차원 변수  $\beta$ 가 작은 값에서는 균열이 성장하지 않으나  $\beta$ 가 증가하면  $E_c/E_0$ 에 따라 균열이 성장한다. 또한,  $E_c/E_0 < 0.4$ 인 강유전체 세라믹은 균열이 성장하면서 응력강도계수는 감소함을 알 수 있다.  $E_c/E_0 > 0.6$ 인 경우에 정지균열일 때 음의 응력강도계수를 갖기 때문에 균열은 성장하지 않는다.  $\beta > 1$ 인 경우에 균열이 성장하면서 분극과 반대방향을 갖는 음의 전기장이 작용할 때 균열선단 응력강도계수가 크게 감소함을 알 수 있다. 이것은 음의 전기장일 때 균열성장과 함께 재료의 인성이 양의 전기장일 때보다 더 증가함을 의미한다.

분역회전으로 인한 균열선단 응력강도계수를 다양한  $E_c/E_0$ 의 값에 대하여  $\beta$ 의 함수로 Fig. 9에 나타내었다. 작용 전기장과 응력장 사이의 상대적인 크기인  $\beta$ 가 증가하면서 균열선단 응력강도계수는 증가한다.

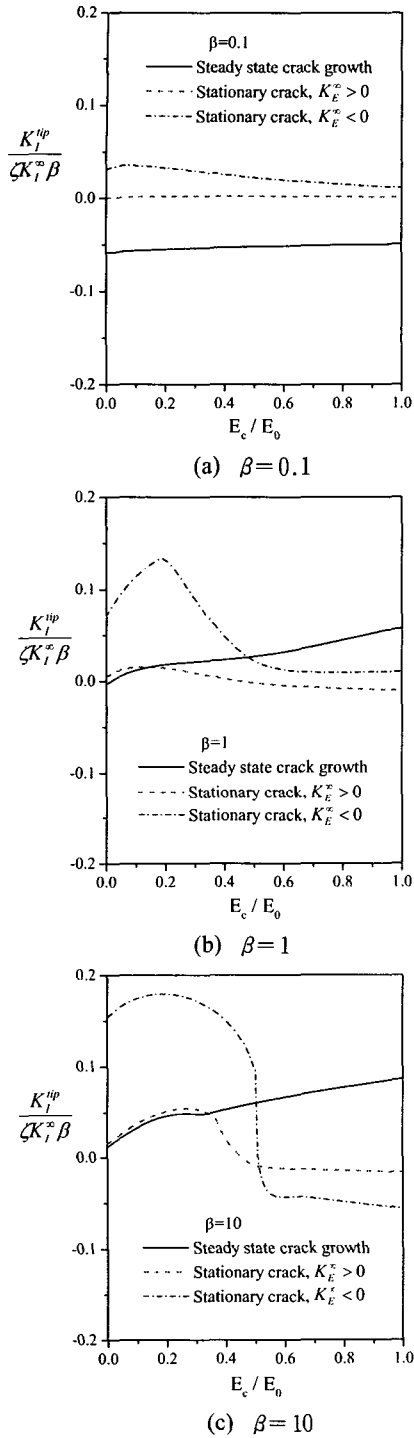


Fig. 8 The crack-tip stress intensity factor for steady state crack growth

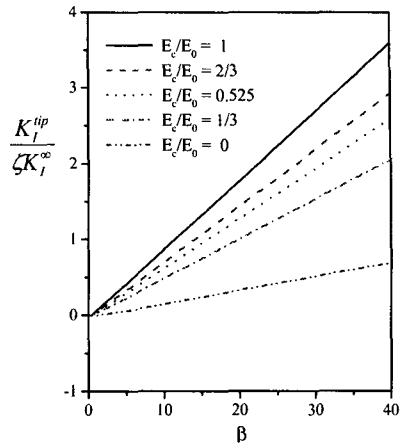


Fig. 9 The crack-tip stress intensity factor as a function of  $\beta$

### 5. 결론

전기-기계적 하중을 받는 강유전체 세라믹내의 안정적 상태의 균열성장에 대하여 해석하였다. 분역회전으로 인한 균열선단 응력강도계수를 평가하기 위해 균열선단 근처의 분역회전영역의 경계에 전기적 비선형이론을 적용하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 안정적 상태의 균열성장에 대한 분역회전영역의 모양과 크기는 작용 전기장과 응력장 사이의 상대적인 크기와 항전기장과 항복전기장의 비에 크게 의존한다.

(2) 분극과 같은 방향인 양의 전기장이 작용하는 경우에 강유전체 세라믹내의 균열이 성장하면서 안정적 상태에 바로 도달하게 되고, 음의 전기장에서는 불안정한 균열성장을 보인 후에 안정적 상태에 도달하게 된다.

(3) 안정적 상태의 균열성장은 전기장의 방향과는 무관하게 항전기장과 항복전기장의 비가 0.4보다 작은 경우에 응력강도계수가 감소함을 비선형 분역회전 모델을 적용하여 설명할 수 있다.

### 후기

이 논문은 2002년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

## 참고문헌

1. Jaffe, B., Cook, W. R. and Jaffe, H., *Piezoelectric Ceramics*, Academic Press, New York, 1971.
2. Xu, Y., *Ferroelectric Materials and Their Applications*, North Holland, Amsterdam, 1991.
3. Tobin, A. G. and Pak, Y. E., "Effect of Electric Fields on Fracture Behavior of PZT Ceramics," *Proc. SPIE, Smart Struct. Mater.*, 1916, pp. 78-86, 1993.
4. Park, S. and Sun, C.-T., "Fracture Criteria for Piezoelectric Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 78, pp. 1475-1480, 1995.
5. Wang, H. and Singh, R. N., "Crack Propagation in Piezoelectric Ceramics: Effects of Applied Electric Fields," *J. Appl. Phys.*, Vol. 81, pp. 7471-7479, 1997.
6. Fu, R. and Zhang, T.-Y., "Effects of an Electric Field on the Fracture Toughness of Poled Lead Zirconate Titanate Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 83, pp. 1215-1218, 2000.
7. Zhu, T. and Yang, W., "Toughness Variation of Ferroelectrics by Polarization Switch Under Non-uniform Electric Field," *Acta Mater.*, Vol. 45, pp. 4695-4702, 1997.
8. Yang, W. and Zhu, T., "Switch-Toughening of Ferroelectrics Subjected to Electric Fields," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 46, pp. 291-311, 1998.
9. Zhu, T. and Yang, W., "Fatigue Crack Growth in Ferroelectric Driven by Cyclic Electric Loading," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 47, pp. 81-97, 1999.
10. Zeng, X. and Rajapakse, R. K. N. D., "Domain Switching Induced Fracture Toughness Variation in Ferroelectrics," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 10, pp. 203-211, 2001.
11. Beom, H. G. and Atluri, S. N., "Effect of Electric Fields on Fracture Behavior of Ferroelectric Ceramics," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 51, pp. 1107-1125, 2003.
12. Kim, I. O. and Beom, H. G., "Analysis of a Crack in Ferroelectric Ceramics Subjected to Electric Fields," *J. of the KSPE*, Vol. 20, No. 6, pp. 138-144, 2003.
13. Anderson, T. L., *Fracture Mechanics : Fundamentals and Applications*, CRC Press, 1995.
14. Meschke, F., Kolleck, A. and Schneider, G. A., "R-curve Behaviour of BaTiO<sub>3</sub> due to Stress-Induced Ferroelastic Domain Switching," *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 17, pp. 1143-1149, 1997.
15. Mao, S. X., Li, X. and Han, X., "Toughening of Ferroelectric Ceramics Under Polarization Switching," *Mater. Sci. Engng. A*, Vol. 292, pp. 66-73, 2000.
16. Kolleck, A., Schneider, G. A. and Meschke, F. A., "R-curve Behavior of BaTiO<sub>3</sub> and PZT Ceramics under the Influence of an Electric Field Applied Parallel to the Crack Front," *Acta Mater.*, Vol. 48, pp. 4099-4113, 2000.
17. Forderreuther, A., Thurn, G., Zimmermann, A. and Aldinger, F., "R-curve Effect, Influence of Electric Field and Process Zone in BaTiO<sub>3</sub> Ceramics," *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 22, pp. 2023-2031, 2002.
18. Jeong, K. M. and Beom, H. G., "Domain Switching Toughening of Ferroelectric Ceramics Subjected to Electric Fields," *KSME*, Vol. 26, No. 4, pp. 577-584, 2003.
19. Hwang, S. C., Lynch, C. S. and McMeeking, R. M., "Ferroelectric/Ferroelastic Interactions and a Polarization Switching Model," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 43, pp. 2073-2084, 1995.
20. Beom, H. G., "Small Scale Nonlinear Analysis of Electrostrictive Crack Problems," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 47, pp. 1379-1395, 1999.