

면외 충격하중을 받는 3층 압전 복합재료내의 가장자리 균열거동

권순만* · 손명섭** · 이강용†
(2002년 3월 27일 접수, 2002년 7월 15일 심사완료)

Edge Crack Behavior in a Three Layered Piezoelectric Composite Under Anti-Plane Impact Loads

Soon Man Kwon, Myung Seob Son and Kang Yong Lee

Key Words: Piezoelectric Material(압전재료), Permeable Crack(도전균열), Impermeable Crack(절연균열), Anti-Plane Shear Impact(면외 전단 충격하중), EMCC(기전연성계수)

Abstract

In this paper, we examine the dynamic electromechanical behavior of an edge crack in a piezoelectric ceramic layer bonded between two elastic layers under the combined anti-plane mechanical shear and in-plane electric transient loadings. We adopted both the permeable and impermeable crack boundary conditions. Fourier transforms are used to reduce the problem to the solution of two pairs of dual integral equations, which are then expressed to a Fredholm integral equation of the second kind. Numerical values on the dynamic energy release rate are presented to show the dependences upon the geometry, material combination, electromechanical coupling coefficient and electric field.

기호설명

E_{ki}	: 전기장 성분
D_{ki}	: 전기변위 성분
$G(t)$: 동적 에너지해방률
$K^T(t)$: 동적 응력세기계수
$K^D(t)$: 동적 전기변위 세기계수
w_i	: 변위 성분
ψ_i	: Bleustein 함수
τ_{ij}	: 응력 성분
k	: 기전연성계수

1. 서론

최근, 기계적 전기적 에너지 변환 소재중 하나인 압전재료(piezoelectric material)는 기존 공학적 응용 분야뿐만 아니라 지능형 경량화 구조물에까지 그 응용분야가 확대되고 있다.⁽¹⁾ 즉, 구조물에 압전재료를 사용함으로써 전기적으로 유도된 변위를 통해 적층 구조물의 거동을 제어할 수 있고, 역으로 기계적 변위에 의해 발생된 전기를 통해 구조물의 상태를 피드백(feedback) 할 수 있다. 한편, 압전재료의 본질적 취성(brittleness) 및 압전 적층 구조물 동적(dynamic) 사용 환경으로 인하여 적층형 압전 복합재료에 대한 천이(transient) 파괴에 대한 이해 및 그 연구가 압전 적층 구조물에 대한 신뢰성 확보 측면에서 대단히 중요한 실정이나, 적절한 전기적 균열면 조건, 기전 연성(electromechanical coupling) 및 적층 방법의 다양성 등의 문제로 인하여 이에 대한 연구

* 영남대학교 기계공학부
 ** 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과
 † 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과
 E-mail : ky12813@yahoo.co.kr
 TEL : (02)2123-2813 FAX : (02)2123-2813

는 거의 수행되어 있지 않은 상태이다.

특히, 압전재료내 균열면에 대한 적절한 전기적 경계조건 선정에 대한 논란은 이 분야의 파괴역학적 연구가 시작된 이래 현재까지도 계속되고 있다. 일반적으로 받아들여지는 균열 모델로는 절연균열(electrical impermeable crack)과 도전균열(electrical permeable crack) 모델이 있으나, 주로 절연균열 모델을 이용하여 동적 파괴거동에 관한 연구⁽²⁻⁶⁾가 최근까지 수행되어 왔다. 하지만, 절연균열 모델이 비록 해석을 단순화시키고 노치 문제에서 유효하나 균열문제에서는 실험 결과에 모순된 결과를 보여준다.^(7,8) 즉, 기계적 하중 없이 전기적 하중만 존재할 때 전기변위 세기 계수(electric displacement intensity factor : EDIF)는 전기적 하중에 의존하고 에너지해방률(energy release rate : ERR)은 전기적 하중의 방향에 관계 없이 항상 음의 값을 가진다. 특히, 면외전단(anti-plane shear) 하중하의 문제에서는 균열개구 변위(COD)가 없고 균열의 표면이 완전한 접촉 상태에 있으므로 전기적 연속 도전조건이 적용되어야 함을 알 수 있다. 최근 균열면 도전 경계조건을 사용하여 Yoffe형 편심균열(eccentric crack) 문제를 고려한 연구가 수행되었다.⁽⁹⁾

본 논문에서는 도전 및 절연균열 모두를 고려하여 기계적·전기적 복합 동하중을 받는 3층 압전 복합재료내의 가장자리 균열(edge crack) 거동을 연구하고자 한다. 고려된 혼합 경계치문제는 Laplace 및 Fourier 적분변환을 통하여 제 2종 Fredholm 적분방정식의 해를 구하는 문제로 귀결된다. 이를 통해, 세기계수(intensity factor) 및 동적 에너지해방률(dynamic ERR : DERR)들이 결정된다. 우선 3절에서는 도전균열의 해를, 4절에서는 절연균열의 해를 제시하였다. 또한, 고려된 기하학적 형상 및 기전연성계수(electromechanical coupling coefficient : EMCC)의 영향을 고려한 DERR에 대한 수치결과를 제시하였다.

2. 문제기술

두께 $2h$ 의 압전 띠판(strip)과 각각 h_3 및 h_4 의 두께를 갖는 서로 다른 탄성 띠판으로 구성된 3층의 압전 복합 띠판이 기계·전기적 복합 충격하중을 받는 경우를 Fig. 1과 같이 고려한다. 압

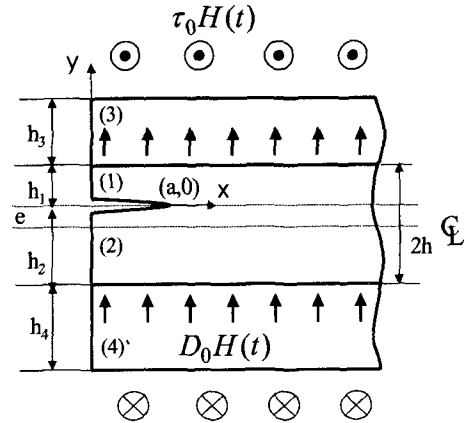


Fig. 1 A piezoelectric ceramic layer with an edge crack bonded between two elastic layers

전 띠내 균열(길이 a) 중앙에 직교 좌표계 (x, y, z) 가 위치하며, 분극(poling)의 방향은 z -축이다. 균열면을 기준으로 압전 띠는 윗부분($y \geq 0$, 두께 h_1)과 아래 부분($y < 0$, 두께 h_2)의 두 영역으로 나누어 고려한다.

Fig. 1에서 τ_0 , D_0 , $H(t)$ 는 압전 구조물에 작용하는 전단응력, 전기변위(electric displacement), Heviside 함수이다.

고려된 압전 구조물의 경계치 문제는 다음과 같이 단순화될 수 있다.

$$u_{xi} = u_{yi} = 0, \quad w_i = u_{zi}(x, y, t), \quad (1)$$

$$E_{xi} = E_{xi}(x, y, t), \quad E_{yi} = E_{yi}(x, y, t), \quad E_{zi} = 0, \quad (2)$$

$$u_{xj} = u_{yj} = 0, \quad w_j = u_{zj}(x, y, t). \quad (3)$$

여기서 u_k 와 E_k ($k=x, y, z$)는 변위 및 전기장 성분을 나타낸다.

압전체와 탄성체의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 w_i = \frac{1}{C_T^2} \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2}, \quad (4)$$

$$\nabla^2 w_j = \frac{1}{C_{Tj}^2} \frac{\partial^2 w_j}{\partial t^2}, \quad (5)$$

$$\nabla^2 \phi_i = 0, \quad (6)$$

여기서

$$C_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}; \quad C_{Tj} = \sqrt{\frac{G_j}{\rho_j}};$$

$$\mu = c_{44} + \frac{e_{15}^2}{d_{11}}; \quad \psi_i \equiv \phi_i - \frac{e_{15}}{d_{11}} w_i. \quad (7)$$

$C_T, C_{Tj}, \mu, G_j, \rho, \rho_j$ 는 압전재료의 횡파속도, 탄성체의 횡파속도, 압전재료의 전단계수, 탄성체의 전단계수, 압전재료의 밀도 및 탄성체의 밀도들이다. $c_{44}, d_{11}, e_{15}, \phi_i$ 는 균일한 전기장에서 측정된 압전재료의 전단계수, 균일한 변형률에서 측정된 유전율(dielectric permittivity), 압전상수(piezoelectric constant) 그리고 Bleustein 함수⁽¹⁰⁾이다. 또한, 하첨자 i ($i=1, 2$)와 j ($j=3, 4$)는 각각 압전띠와 탄성띠들을 나타낸다. 압전재료 및 탄성체에서의 응력 및 전기변위에 대한 구성 관계식은 다음과 같다.

$$\tau_{kzi} = \mu w_{i,k} + e_{15} \phi_{i,k}, \quad \tau_{kzj} = G_j w_{j,k},$$

$$D_{ki} = -d_{11} \psi_{i,k}, \quad (k=x, y), \quad (8)$$

여기서 τ_{kzi}, τ_{kzj} 와 D_{ki} 는 응력 및 전기변위 성분들이다.

3. 도전균열의 해

주어진 문제의 전기적 연속 도전조건을 갖는 균열 경계 조건은 다음과 같다.

$$\tau_{yz1}(x, h_1, t) = \tau_{yz3}(x, h_1, t), \quad (9)$$

$$\tau_{yz2}(x, -h_2, t) = \tau_{yz4}(x, -h_2, t), \quad (10)$$

$$w_1(x, h_1, t) = w_3(x, h_1, t), \quad (11)$$

$$w_2(x, -h_2, t) = w_4(x, -h_2, t), \quad (12)$$

$$\tau_{yz3}(x, h_1 + h_3, t) = \tau_{yz1}(x, -(h_2 + h_4), t)$$

$$= \tau_0 H(t), \quad (13)$$

$$D_{y1}(x, h_1, t) = D_{y2}(x, -h_2, t) = D_0 H(t), \quad (14)$$

$$\tau_{xzi}(0, y, t) = \tau_{xzi}(0, y, t) = 0, \quad (15)$$

$$D_{xi}(0, y, t) = 0, \quad (16)$$

$$\tau_{yz1}(x, 0, t) = \tau_{yz2}(x, 0, t), \quad (a \leq x < \infty), \quad (17)$$

$$D_{y1}(x, 0, t) = D_{y2}(x, 0, t), \quad (a \leq x < \infty), \quad (18)$$

$$\tau_{yzi}(x, 0, t) = 0, \quad (0 \leq x < a), \quad (19)$$

$$w_1(x, 0, t) = w_2(x, 0, t), \quad (a \leq x < \infty), \quad (20)$$

$$D_{y1}(x, 0^+, t) = D_{y2}(x, 0^-, t), \quad (0 \leq x < a), \quad (21)$$

$$E_{x1}(x, 0^+, t) = E_{x2}(x, 0^-, t), \quad (0 \leq x < a), \quad (22)$$

$$\phi_1(x, 0, t) = \phi_2(x, 0, t), \quad (a \leq x < \infty). \quad (23)$$

주어진 문제를 시간 t 에 대해 Laplace 변환을 하고, 식 (4)~(6)에 Fourier cosine 변환을 적용하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$w_i^*(x, y, p) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty [A_{1i}(s, p) e^{\gamma y}$$

$$+ A_{2i}(s, p) e^{-\gamma y}] \cos(sx) ds + \frac{a_0}{p} y, \quad (24)$$

$$\psi_i^*(x, y, p) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty [B_{1i}(s, p) e^{sy}$$

$$+ B_{2i}(s, p) e^{-sy}] \cos(sx) ds - \frac{b_0}{p} y, \quad (25)$$

$$w_j^*(x, y, p) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty [C_{1j}(s, p) e^{\gamma y}$$

$$+ C_{2j}(s, p) e^{-\gamma y}] \cos(sx) ds + \frac{c_{0j}}{p} y + \frac{d_{0j}}{p}, \quad (26)$$

여기서 $A_{ki}(s, p), B_{ki}(s, p)$ 와 $C_{kj}(s, p)$ 는 결정되어야 할 미지 함수이다. 또, a_0, b_0, c_{0j} 와 d_{0j} 는 주어진 하중조건에 의해 결정되는 상수들이다. 그리고, 상첨자 * 와 p 는 Laplace 변환영역과 Laplace 변환 매개변수이며 다음과 같이 정의된다.

$$f^*(p) = \int_0^\infty f(t) e^{-pt} dt, \quad (27)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{Br} f^*(p) e^{pt} dp, \quad (28)$$

식 (28)의 Br 은 Bromwich 적분경로를 의미한다. 변수 γ 와 γ_j 는 다음과 같다.

$$\gamma = \sqrt{s^2 + (p/C_T)^2}, \quad \gamma_j = \sqrt{s^2 + (p/C_{Tj})^2}. \quad (29)$$

해석의 편의를 위하여 식 (17)과 (18)로부터 다음

과 같이 $D(s, p)$ 와 $E(s, p)$ 를 정의한다.

$$\begin{aligned} & A_{11}(s, p) - A_{12}(s, p) \\ &= A_{21}(s, p) - A_{22}(s, p) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} & \equiv D(s, p), \\ & B_{11}(s, p) - B_{12}(s, p) \\ &= B_{21}(s, p) - B_{22}(s, p) \end{aligned} \quad (31)$$

$$\equiv E(s, p).$$

식 (30), (31)과 혼합 경계조건 식 (19)~(23)을 이용하면 다음과 같은 두 쌍의 혼합적분 방정식 (dual integral equations)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty sF(s, p)D(s, p) \cos(sx) ds \\ &= \frac{\pi}{2p} \frac{\tau_0}{c_{44}}, \quad (0 \leq x < a), \end{aligned} \quad (32)$$

$$\int_0^\infty D(s, p) \cos(sx) ds = 0, \quad (a \leq x < \infty), \quad (33)$$

$$\int_0^\infty s \left[\frac{e_{15}}{d_{11}} D(s, p) + E(s, p) \right] \sin(sx) ds = 0, \quad (0 \leq x < a), \quad (34)$$

$$\int_0^\infty \left[\frac{e_{15}}{d_{11}} D(s, p) + E(s, p) \right] \cos(sx) ds = 0, \quad (a \leq x < \infty), \quad (35)$$

여기서

$$F(s, p) = (1 + k^2) \frac{\gamma}{s} Q(s, p) - k^2 R(s), \quad (36)$$

$$Q(s, p) = \frac{[q_3^- - q_3^+ e^{-2\gamma h_1}][q_4^+ - q_4^- e^{-2\gamma h_2}]}{q_3^- q_4^+ - q_3^+ q_4^- e^{-2\gamma(h_1 + h_2)}}, \quad (37)$$

$$R(s) = \frac{(1 - e^{-2sh_1})(1 - e^{-2sh_2})}{1 - e^{-2s(h_1 + h_2)}}, \quad (38)$$

$$q_j^\pm = (\mu / G_j) \gamma \pm \gamma_j H_j(s, p), \quad (39)$$

$$H_j(s, p) = \tanh [(-1)^j \gamma_j h_j], \quad (40)$$

$$k = \sqrt{e_{15}^2 / c_{44} d_{11}}. \quad (41)$$

식 (41)의 상수 k 는 본 논문에서 편의상 새롭게 정의된 기진연성계수(EMCC)이며 Bleustein⁽¹⁰⁾의

EMCC k_e 와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$k = \frac{k_e}{\sqrt{1 - k_e^2}}; \quad k_e = \sqrt{e_{15}^2 / (d_{11} \mu)}. \quad (42)$$

주어진 두 쌍의 혼합적분 방정식중 우선 식 (34)와 (35)로부터 $D(s, p)$ 와 $E(s, p)$ 의 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$E(s, p) = -\frac{e_{15}}{d_{11}} D(s, p). \quad (43)$$

미정의 혼합 적분방정식인 식 (32), (33)을 풀기 위해 보조함수 $\Omega^*(\xi, p)$ 를 도입하여 $D(s, p)$ 를 다음과 같이 정의한다.⁽¹¹⁾

$$D(s, p) = \frac{\pi}{2p} \frac{\tau_0 a^2}{c_{44}} \int_0^1 \sqrt{\xi} \Omega^*(\xi, p) J_0(sa\xi) d\xi, \quad (44)$$

여기서 $J_0(sa\xi)$ 는 제 1종 0차 Bessel 함수이다.

식 (44)를 식 (32), (33)에 대입하면, 식 (33)은 자동만족하며 식 (32)은 다음의 제 2종 Fredholm 적분방정식으로 표현된다.

$$\Omega^*(\xi, p) + \int_0^1 L(\xi, \eta, p) \Omega^*(\eta, p) d\eta = \sqrt{\xi}, \quad (45)$$

여기서

$$\begin{aligned} & L(\xi, \eta, p) \\ &= \sqrt{\xi\eta} \int_0^\infty s [F(s/a, p) - 1] J_0(s\eta) J_0(s\xi) ds. \end{aligned} \quad (46)$$

식 (45)의 보조함수 $\Omega^*(\xi, p)$ 는 Gauss 수치 적분에 의해 구해질 수 있다. 또, 위의 결과에 Tauberian 중치 정리⁽¹²⁾를 적용하면 정하중 해 (static solution)를 얻을 수 있다.

동적 응력세기계수 (dynamic SIF : DSIF) $K^T(t)$, 동적 전기변위 세기계수 (dynamic EDIF : DEDIF) $K^D(t)$ 및 동적 에너지해방률(EDER) $G(t)$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$K^T(t) = \tau_0 \sqrt{\pi a} M(t), \quad (47)$$

$$K^D(t) = \frac{e_{15}}{c_{44}} K^T(t), \quad (48)$$

$$G(t) = \frac{\tau_0^2 \pi a}{2 c_{44}} M^2(t) = \frac{[K^T(t)]^2}{2 c_{44}}, \quad (49)$$

여기서

$$M(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{Br} \frac{\Omega^*(1, p)}{p} e^{pt} dp. \quad (50)$$

위 식 (47)~(49)에서 보듯이 DSIF와 DERR의 관계는 순수 탄성재료의 경우와 같으며, 또한 DERR, DSIF 및 DEDIF는 기계적 변형과 전기적 기계적 상호작용의 의해 생성된 응력에만 의존함을 알 수 있다.

4. 절연균열의 해

전기적 절연균열의 경계조건은 식 (21), (22)를 다음과 같이 대체함으로써 얻을 수 있다.

$$D_{yi}^*(x, 0, p) = 0, \quad (0 \leq x < a). \quad (51)$$

3절의 동일한 유도 과정을 통해 다음과 같이 절연균열에 대한 DSIF, DEDIF, DERR을 얻을 수 있다.

$$K^T(t) = [(1 + \lambda)M_1(t) - \lambda\Omega_2(1)H(t)] \cdot \tau_0 \sqrt{\pi a}, \quad (52)$$

$$K^D(t) = D_0 \sqrt{\pi a} \Omega_2(1)H(t), \quad (53)$$

$$G(t) = \left[\frac{(1 + \lambda)^2}{1 + k^2} M_1^2(t) - \frac{\lambda^2}{k^2} \Omega_2^2(1)H^2(t) \right] \cdot \frac{\tau_0^2 \pi a}{2 c_{44}}, \quad (54)$$

여기서

$$M_1(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{Br} \frac{\Omega_1^*(1, p)}{p} e^{pt} dp, \quad (55)$$

$$\lambda = \frac{e_{15}}{d_{11}} \frac{D_0}{\tau_0}. \quad (56)$$

또한, 식 (54)와 (55)의 보조함수 $\Omega_1^*(1, p)$ 과 $\Omega_2(1)$ 은 다음의 Fredholm 적분방정식에 의해 결정된다.

$$\Omega_1^*(\xi, p) + \int_0^1 \Omega_1^*(\eta, p) L_1(\xi, \eta, p) d\eta = \sqrt{\xi}, \quad (57)$$

$$\Omega_2(\xi) + \int_0^1 \Omega_2(\eta) L_2(\xi, \eta) d\eta = \sqrt{\xi}, \quad (58)$$

여기서

$$L_1(\xi, \eta, p) = \sqrt{\xi\eta} \int_0^\infty s [F_1(s/a, p) - 1] J_0(s\xi) J_0(s\eta) ds, \quad (59)$$

$$L_2(\xi, \eta) = \sqrt{\xi\eta} \int_0^\infty s [F_2(s/a) - 1] J_0(s\xi) J_0(s\eta) ds, \quad (60)$$

$$F_1(s, p) = \frac{\gamma Q(s, p)}{s}, \quad F_2(s) = R(s). \quad (61)$$

식 (52)에서 DEDIF는 작용하는 동적 전기하중에는 비례하지만 기계적 하중에는 무관함을 알 수 있다.

5. 결과 및 고찰

해석상의 편의를 위해 탄성재가 충분히 두껍고 같은 재료일 경우를 고려하였다. 이 경우, 식 (37)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$Q(s, p) = \frac{[q_+ - q_- e^{-2\gamma h_1}][q_+ - q_- e^{-2\gamma h_2}]}{q_+^2 - q_-^2 e^{-2\gamma(h_1 + h_2)}}, \quad (62)$$

여기서

$$q_{\pm} = (\mu/G)\gamma \pm \gamma_E, \quad (63)$$

$$q_+ = q_3^- = q_4^+, \quad q_- = q_3^+ = q_4^-, \quad (64)$$

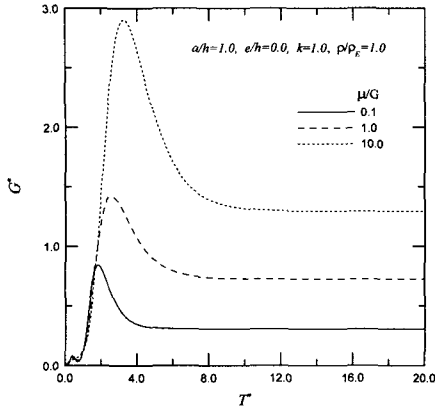


Fig. 2 G^* vs. T^* with the variation of μ/G

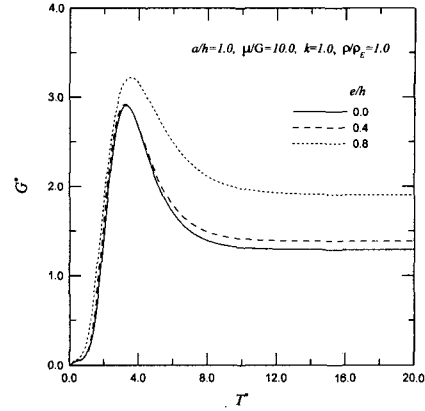
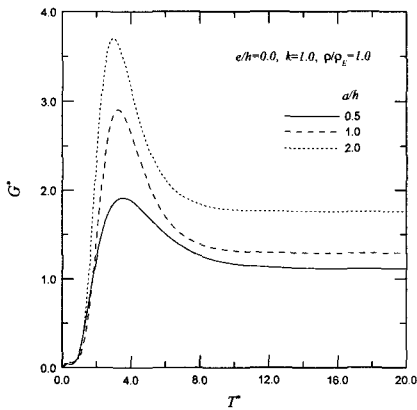
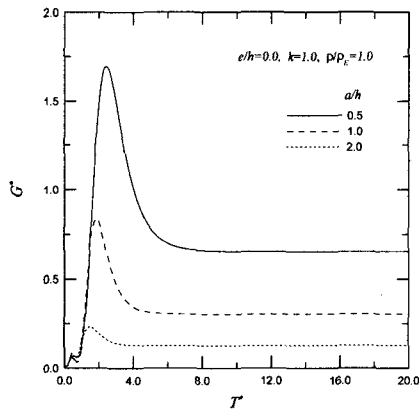


Fig. 4 G^* vs. T^* with the variation of e/h



(a) $\mu/G = 10.0$



(b) $\mu/G = 0.1$

Fig. 3 G^* vs. T^* with the variation of a/h

$$\begin{aligned} \mu/G &= \mu/G_3 = \mu/G_4, \\ \gamma_E &= \gamma_3 = \gamma_4, \\ \rho_E &= \rho_3 = \rho_4. \end{aligned} \tag{65}$$

5.1 도전균열

시간영역에서의 수치적 DERR 값을 얻기 위해 Miller와 Guy의 수치적 Laplace 역변환 방법⁽¹³⁾을 사용하였다.

Fig. 2에서는 무차원화 된 시간($T^* = C_T t/a$)에 대한 무차원화 된 DERR(G^*)의 변화를 전단 계수비 μ/G 에 따라 도시하였다. 여기서 $G^* = 2c_{44}G(t)/t_0^2\pi a$ 이다. 전단계수비 μ/G 가 증가할수록 DERR은 감소함을 알 수 있다.

Fig. 3(a)는 $\mu/G=10.0$ 인 경우 G^* 에 대한 a/h 의 영향을 도시하였다. 균열 길이가 증가함에 따라 DERR은 증가함을 알 수 있다. Fig. 3(b)는 $\mu/G=0.1$ 인 경우로 $\mu/G=10.0$ 인 경우와 반대의 경향을 보인다.

Fig. 4는 균열의 편심정도에 대한 G^* 의 변화를 도시하였다. G^* 는 e/h 의 값이 커질수록 증가함을 알 수 있다.

Fig. 5는 G^* 에 대한 EMCC k 의 영향을 도시하였다. EMCC의 값이 클수록 DERR이 정점에 이르는 시간이 길어진다. 또한, $t \rightarrow \infty$ 일 경우, 즉 정적 상태에서는 EMCC가 증가할수록 DERR이 작아짐을 알 수 있다.

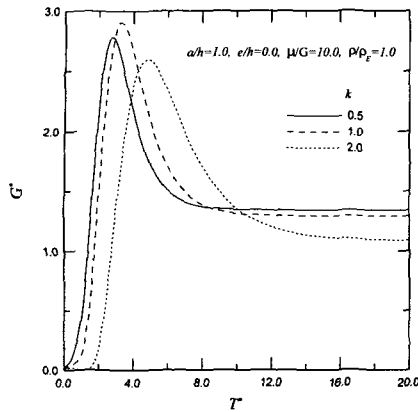


Fig. 5 G^* vs. T^* with the variation of EMCC

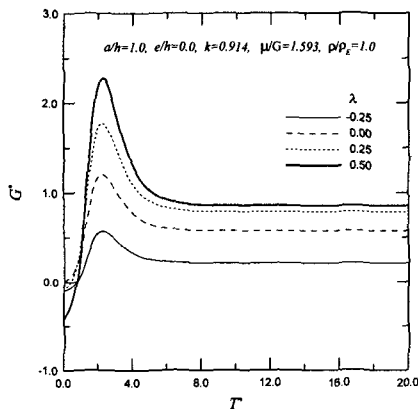


Fig. 6 G^* versus T^* with the variation of the ratio of λ

5.2 절연균열

Fig. 6은 무차원화된 전기적 하중(λ)에 대한 AI/PZT-5H/AI 구조물의 DERR 변화를 도시하였다. 그림에서 보듯이 전기적 하중의 존재가 충격 하중 초기에 균열의 전파를 억제함을 알 수 있다. 그러나 무차원화된 시간이 어떤 값 즉, 2.3을 초과하면 λ 의 값이 증가할수록 DERR의 값이 증가한다. 결과적으로 시간의 경과에 의존하는 압전 재료에서 전기적 하중의 존재는 균열의 전파를 진전 또는 정체(retarding)시킨다.

6. 결론

본 논문에서는 기전 복합 동하중을 받는 3층 압전 복합 구조물의 도전 및 절연균열에 대한 그 거동을 살펴보았다. 고려된 문제의 동적 세기계수와 동적 에너지해방률은 제 2종 Fredholm 적분 방정식의 해를 통해 표현되었다. 도전균열의 경우 동적 에너지해방률과 동적 세기계수는 기계적 변형과 전기적 기계적 상호작용에 의해 발생된 응력의 분포에만 의존하며, 기전연성계수(EMCC)와 전단계수비(μ/G)가 압전 복합재의 거동에 주요한 변수임을 알 수 있었다. 절연균열의 경우 전기적 하중의 존재 및 그 방향에 따라 압전구조물내의 균열은 진전 또는 정체를 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Crawley, E.F., 1994, "Intelligent Structures for Aerospace: A Technology Overview and Assessment," *AIAA Journal*, Vol. 25, pp. 1373~1385.
- (2) Chen, Z.T. and Yu, S.W., 1997, "Anti-plane Dynamic Fracture Mechanics in Piezoelectric Materials," *International Journal of Fracture*, Vol. 85, pp. L3~L12.
- (3) Chen, Z.T. and Yu, S.W., 1998, "Anti-plane Vibration of Cracked Piezoelectric Materials," *Mechanics Research Communications*, Vol. 25, pp. 321~327.
- (4) Chen, Z.T., 1998, "Crack Tip Field of an Infinite Piezoelectric Strip under Anti-plane Impact," *Mechanics Research Communications*, Vol. 25, pp. 313~319.
- (5) Chen, Z.T. and Karihaloo, B.L., 1999, "Dynamic Response of a Cracked Piezoelectric Ceramic under Arbitrary Electro-mechanical Impact," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 36, pp. 5125~5133.
- (6) Chen, Z.T. and Meguid, S.A., 2000, "The Transient Response of a Piezoelectric Strip with a Vertical Crack under Electromechanical Impact Load," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 37, pp. 6051~6062.
- (7) Park, S.B. and Sun, C.T., 1995, "Effect of Electric Field on Fracture of Piezoelectric

- Ceramics," *International Journal of Fracture*, Vol. 70, pp. 203~216.
- (8) Park, S.B. and Sun, C.T., 1995, "Fracture Criteria for Piezoelectric Ceramics," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 78, pp. 1475~1480.
- (9) Kwon, S.M., Choi H.S. and Lee, K.Y., 2002, "Steady State Crack Propagation Behavior in Piezoelectric Strip Bonded to Elastic Material," *Transactions of the KSME A*, Vol. 26, No. 2, pp. 283~290.
- (10) Bleustein, J.L., 1968, "A New Surface Wave in Piezoelectric Materials," *Applied Physics Letters*, Vol. 13, pp. 412~413.
- (11) Copson, E.T., 1961, "On Certain Dual Integral Equations," *Proceedings of the Glasgow Mathematical Association*, Vol. 5, pp. 19~24.
- (12) Sneddon, I.N., 1972, *The Use of Integral Transforms*, McGraw-Hill Book Company.
- (13) Miller, M.K. and Guy, W.T., 1966, "Numerical Inversion of the Laplace Transform by Use of Jacobi Polynomials," *SIAM Journal on Numerical Analysis*, Vol. 3, pp. 624~635.