

전도채널을 갖는 뼈와 유사한 재료의 절연파괴 해석

이보현* · Song Lin* · 범현규*†

* 인하대학교 기계공학과

Dielectric Breakdown Analysis of Bone-Like Materials with Conductive Channels

Bo Hyun Lee*, Song Lin* and Hyeon Gyu Beom*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received December 28, 2009 ; Revised March 8, 2011 ; Accepted March 11, 2011)

Key Words : Dielectric Breakdown(절연파괴), Hierarchical Structure(계층구조), Conductive Channel(전도채널), J Integral(J 적분), Finite Element Analysis(유한요소해석)

초록: 순수한 전기장 하에서의 뼈와 유사한 재료의 절연파괴에 대하여 연구하였다. 일반적으로 뼈와 유사한 재료는 강한 유전강도를 가지는 층과 약한 유전강도를 가지는 층이 서로 평행하게 엇갈려 있는 형태로 구성되어 있다. 뼈와 유사한 재료의 약한 층을 관통하는 전도채널의 성장은 전기장의 집중이 완화되기 때문에 지연된다. 관형채널의 선단에서 전기장의 분포를 유한요소해석을 통해 구하였다. 뼈와 유사한 재료의 절연강도를 J 적분을 사용하여 계산하였고, 절연강도에 영향을 미치는 인자들을 찾아내었다. J 적분은 약한 층에서의 절연파괴 면적이 증가할 수록 작아짐을 보였다. 또한, 약한 층과 강한 층의 유전율의 비가 절연파괴에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Abstract: The dielectric breakdown of bone-like materials subject to purely electric fields is investigated. In general, these materials consist of some layers with stronger dielectric strength and others with weaker dielectric strength in a parallel staggered pattern. The growth of the conductive channel is impeded during penetration of the weaker layer in the bone-like material because the electric-field concentration is relieved. The electric-field distribution around the head of the tubular channel is obtained from finite element analysis. The dielectric strength of the bone-like material is evaluated using the J integral, and some parameters affecting the dielectric strength are determined. It is shown that the J-integral values are reduced with an increase in the breakdown area in the weaker layer. It is also found that the ratio of the permittivity of the weaker layer to that of the stronger layer can strongly affect the dielectric breakdown.

- 기호설명 -

h_n : 각 계층구조의 두께
 Y : 탄성계수
 S : 강도
 Γ : 파괴에너지
 γ : 표면 에너지
 σ_{th} : 이론강도
 β : 유전율의 역수
 E_i : 전기장
 D_i : 전기변위
 ϵ_1^n : 재료 1의 유효 유전율

ϵ_2^n : 재료 2의 유효 유전율
 c : 전도채널의 반지름
 ω : 전기엔탈피밀도
 t_i : 트랙션

1. 서론

유전재료(dielectric material)는 전자산업 분야에서 안테나, 캐패시터, 레조네이터, 액추에이터 등에 다양하게 사용되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 유전재료는 효율성을 높이기 위하여 유전체 내부에 전극을 만드는 경우가 많은데 이러한 유전장치(dielectric devices)에 전기장(electric field)을 인가하면 전극 선단 부분에 전기장이 과도하게 집중되어 종종 절연파괴(dielectric breakdown)가 발생한다. 최근 연구에서는

† Corresponding Author, hgbeom@inha.ac.kr
 © 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

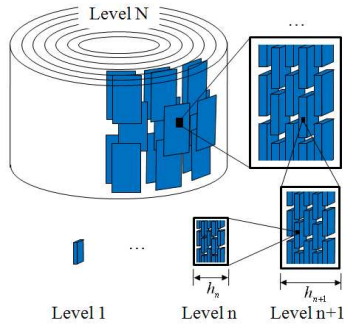


Fig. 1 The N -level hierarchical structures

유전체 표면에 전도성 결점에서 균열이 진전될 때 에너지 방출률을 구하여 유전체의 절연파괴를 해석했다.⁽⁴⁾ 절연파괴는 단순히 전기의 방전에 지나지 않으나 이는 유전체재료에 기계적인 파괴를 동반한다. 그러므로 절연파괴를 감소시켜 유전장치의 수명을 연장하는 것이 중요한 과제로 대두되고 있다. 특히 최근 반도체 기술의 급성장에 따라 회로가 집적화되면서 절연파괴로 인한 전자장치의 파괴가 문제가 되고 있다. 절연파괴를 감소시키기 위해서는 절연파괴에 대한 이론 정립과 수많은 실험이 요구되는데 아직 정확한 이론적인 틀이 마련되지 못하고 있는 실정이다. 더욱이 재료의 구조가 절연파괴에 미치는 영향에 관한 연구는 거의 없다. 이에 본 논문에서는 재료의 구조와 관련하여 절연파괴를 연구하고자 하였다.

최근 뼈, 조개와 같은 생체모방구조에 대한 관심이 높아지고 있다. 뼈와 같은 생체모방구조는 주위 환경에 적응하기 위하여 오랜 시간에 걸쳐 진화되고 최적화 된 구조로써 강성(stiffness) 및 파괴인성(fracture toughness)이 보통 구조에 비해 강하다. 뿐만 아니라 계층구조(hierarchical structure)를 이루고 있어 한가지로 이루어진 재료나 일반 다층구조물보다 우수한 특성을 보인다고 알려져 있다.⁽⁵⁾ 지금까지 몇몇 연구자들에 의해 여러 가지 모델이 제안되었고 생체모방구조가 가지는 특성을 이해하기 위한 이론연구가 활발히 진행되고 있다.^(6,7) 절연파괴를 감소시키기 위한 방법으로 생체모방구조를 이용한다면 기계적으로 우수한 특성을 보이는 것과 같이 절연파괴 저항성 또한 우수한 특성을 보일 것이다.

본 논문에서는 뼈와 유사한 구조를 절연파괴에 적용하였다. 거시적으로 뼈와 같은 생체모방구조는 다층구조(multi-layer)와 유사하기 때문에 그 구조적인 유사성을 이용해 절연파괴를 연구하였다. 생체모방구조에서 단위길이당 에너지 방출을 의미

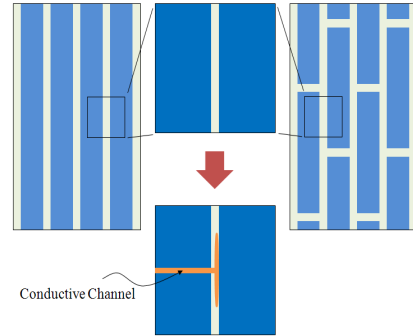


Fig. 2 Analogy of the multi-layer structure and the bone-like structure

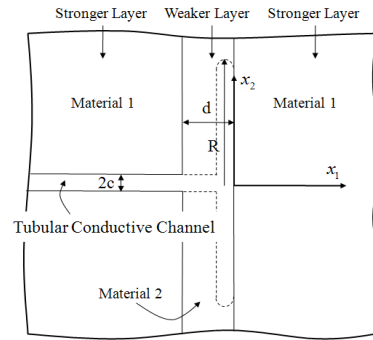


Fig. 3 Two-dimensional schematic illustration of the bone-like material

하는 J 적분(J integral)을 통해 절연파괴를 연구하였다. 절연파괴가 발생하여 절연파괴강도(dielectric strength)가 강한 층(stronger layer)을 투과하다가 절연파괴강도가 약한 층(weaker layer)을 만나면 약한 층에서 넓은 면적에 걸쳐 파괴가 일어난다고 가정하였다.⁽⁸⁾ 유한요소해석(finite element analysis)을 이용하여 전도채널 선단에서의 전기장의 분포를 얻었다. 유한요소해석을 통해 얻어진 전기장의 분포와 전기변위(electric displacement)의 분포를 가지고 J 적분 값을 계산하였다. 또한 강한 층과 약한 층의 유전율의 비에 따라 J 적분 값을 비교하였다.

2. 생체모방구조

2.1 계층구조의 초기 크기 결정

우선 절연파괴를 감소시키기 위한 방법으로 생체모방구조로부터 접근하였다. 생체모방구조 중에 뼈는 Fig. 1 과 같이 계층구조를 이루고 있어서 강도와 파괴인성에서 우수하다고 알려져 있다.⁽⁵⁾ 두 가지 다른 특성의 재료가 서로 층을 이루어 쌓여져 있는 구조가 반복되면서 그 안에 계층구조를 이루고 있다. 뼈와 같은 생체모방구조의 크기는

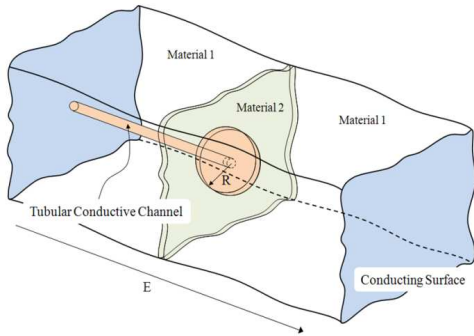


Fig. 4 Three-dimensional schematic illustration of the bone-like material

나노 크기(nano scale)부터 시작해서 계층구조로 되어 있다. 균열허용조건(flaw tolerance criterion)을 이용하여 Fig. 1에서 계층구조 레벨 N 의 $N=0$ 일 때의 단단한 부분의 크기를 결정하였다.⁽⁵⁾ 균열허용조건은 모든 계층구조에 대하여

$$\Lambda_{fi} = \frac{\Gamma Y}{S^2 h} = 1, \quad \Lambda_n^{fi} = \frac{\Gamma_n Y_n}{S_n^2 h_n} = 1 \quad (1)$$

이다.⁽⁵⁾ 여기서 Y_n , S_n , Γ_n 는 각각 탄성계수(Young's modulus), 강도(strength), 파괴에너지(fracture energy)이다. 균열허용조건은 n 레벨과 $n+1$ 레벨의 결과를 이용하면

$$\frac{h_{n+1}}{h_n} = \frac{4(1-\Phi^{1/N})Y_m}{\Phi^{1/N}\sigma_{th}} 2^n \quad (2)$$

이 얻어진다.⁽⁵⁾ 여기서 Φ 를 계층구조 N 에서의 단단한 부분의 전체 부피라고 가정한다면 각 계층구조에서의 단단한 부분의 부피는 $\Phi^{1/N} = \phi$ 로 고정된 값이다.

나노구조에서 $n=0$ 일 때 균열허용조건은 가장 기본이 되는 재료의 특성에 대한 것으로

$$\Lambda_0^{fi} = \frac{2\gamma Y_m}{\sigma_{th}^2 h_0} = 1, \quad h_0 = \frac{2\gamma Y_m}{\sigma_{th}^2} \quad (3)$$

로 표현된다.⁽⁵⁾ 여기서 Y_m , γ , σ_{th} 은 각각 단단한 부분의 탄성계수, 표면 에너지(surface energy), 이론적인 강도(theoretical strength)이다. 식 (3)에서 파괴에너지는 표면에너지의 두 배이고 이론적인 강도는 재료의 극한강도가 사용된다. 각 계층적 레벨에 대하여 단단한 부피 부분과 그 형상이 상수라고 가정한다. 수치적인 계산을 위하여 $\gamma=1\text{J/m}^2$, $Y_m=100\text{GPa}$, $\sigma_{th}=Y/30\text{GPa}$ 의 값들을 사용한다.⁽⁵⁾ 식 (3)으로부터 단단한 부분의 $N=0$ 일 때의 크기는 $h_0=18\text{nm}$ 이다. 식 (2)로부터 각 계층레벨에서의 h_n 의 크기를 구하면 Table 1과 같다. 절연파괴에서 채널의 반지름은 $c=30\mu\text{m}$ 을 사용하였다.⁽⁹⁾ 뼈와

Table 1 Variation of the normalized size H/h_0 with the number of hierarchical levels

N	1	2	3
H/h_0	0.10×10^3	0.49×10^4	0.26×10^6

같은 생체모방구조의 절연파괴를 연구하기 위해서 $N=3$ 일 때 계층구조의 크기를 고려한다.

3. 생체모방구조의 절연파괴

3.1 뼈의 계층구조

뼈와 같은 생체모방구조는 거시적으로 Fig. 2와 같이 다층구조와 유사하다고 볼 수 있다. 여러 층으로 이루어진 재료에 전기장을 인가했을 때 채널은 한 층에서 다음 층으로 쉽게 진입하지 못한다.⁽⁸⁾ 절연파괴강도가 약한 층이 넓은 면적에 걸쳐 파괴되면서 전기장의 집중을 완화시키기 때문에 다음 층에서의 채널의 진전을 지연시킨다. 절연파괴 강도가 강한 층 사이에 약한 층이 있는 Fig. 3과 같은 형상에 대하여 관찰하였다. 절연파괴가 발생하여 채널이 진전하다가 약한 층을 통과하여 다음 강한 층의 채널이 시작하기 전에 약한 층에서 채널이 넓게 분포하게 된다고 가정한다. 채널이 절연파괴강도가 강한 층에서 성장하다가 절연파괴강도가 약한 층을 만나면 Fig. 4와 같이 반지름 R 의 원형으로 파손된다고 가정한다. 상용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 Fig. 5와 같은 모델을 만들었다. 요소 타입은 압전축대칭요소(piezoelectric axisymmetric solid element)인 CAX8E를 사용하였다. 본 연구에서는 재료가 유전체라고 가정하였기 때문에 압전효과는 무시하였다.

3.2 계층구조의 유전율

생체모방구조가 $N=3$ 일 때의 크기를 고려하였기 때문에 $N=3$ 일 때의 내부에 있는 $N=2$ 일 때의 절연파괴강도가 강한 층의 유효 유전율(effective permittivity)을 구하여 유한요소해석에서의 재료상수로 사용하였다. 편의를 위해 유전율의 역수를 β 라 하면 $E = \beta D$ 와 같이 쓰인다. 여기서 E , D 는 각각 전기장, 전기변위이다. 두 가지 재료로 이루어져 있고 계층구조를 적용하였을 때 유전역율은

$$\beta_1^{n+1} = \Phi^{1/N} \beta_1^n + (1-\Phi^{1/N})\beta_2 \quad (4)$$

이다. 위 식에서 계층구조가 Fig. 1과 같은 구조로 되어 있을 때 단단한 부분의 유전율이 그 전 레벨에 부피 비에 영향을 받는다고 가정하였다. 수치적인 계산을 위해서 Fig. 4에서 재료 1의 유전율을

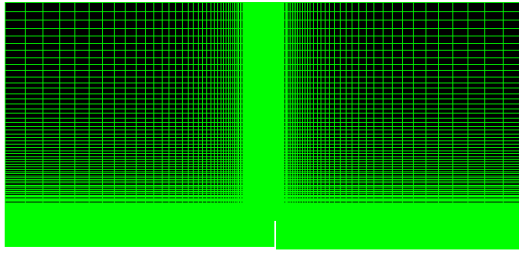


Fig. 5 Mesh configuration of the bone-like material

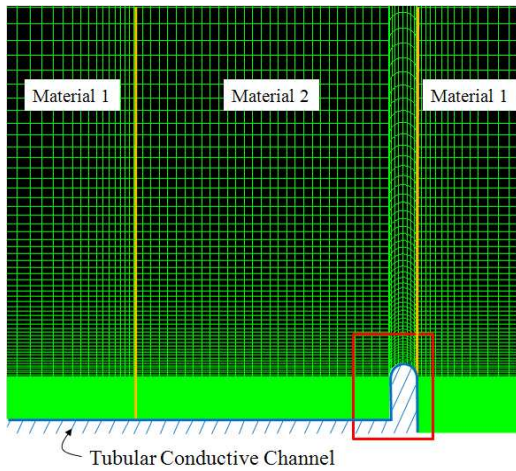


Fig. 6 Finite element model for the tubular conductive channel

을 $\epsilon_1^{n=0} = 8.719 \times 10^{-9}$ F/m 라고 하였다.⁽⁸⁾ 두 재료의 유전율의 비가 $\beta_1/\beta_2 = \epsilon_2/\epsilon_1 = 2$ 일 때 식 (4)를 통해서 Table 2 와 같이 $N=2$ 일 때 $\epsilon_1^{n=2} = 11.531 \times 10^{-9}$ F/m 를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 계층구조가 두 가지 재료로 이루어져 있을 때 두 재료의 유전율의 비에 따라 시뮬레이션을 수행하였다.

4. 전기장 해석

4.1 약한 층 파괴면적의 영향

뼈와 유사한 구조에서 두 재료는 유전체라고 가정하였다. 유전체는 외부 전기장의 영향으로 내부에 전기장의 분포를 형성한다. Fig. 6 과 같이 절연 파괴가 발생하여 전도채널이 성장하다가 절연 파괴 강도가 약한 층에서 동전형태로 절연 파괴가 일어나는 문제를 해석하였다. 동전형태로 절연 파괴가 일어나는 부분에서의 전기장의 분포는 Fig. 7 에 나타냈다. 약한 층에서의 파괴 면적이 증가함에 따라 Fig. 8 과 같이 R 을 증가 시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 전기장의 분포를 Fig. 7 에 나타낸 바와 같은 거리 r 에 대하여 Fig. 9 에 나타냈다.

Table 2 J integral according to vary the permittivity and the hierarchical levels

N ϵ_2/ϵ_1	0	1	2	3
1.25	8.719	9.046	9.385	9.737
1.5	8.719	9.373	10.08	10.83
1.75	8.719	9.7	10.79	12.01
2	8.719	10.03	11.53	13.26
2.25	8.719	10.35	12.3	14.6

N ϵ_2/ϵ_1	0	1	2	3
2.5	8.719	10.68	13.9	17.55
2.75	8.719	11.33	13.9	17.55
3	8.719	11.33	14.74	19.16
3.25	8.719	11.66	15.6	20.86
3.5	8.719	11.99	16.48	22.67

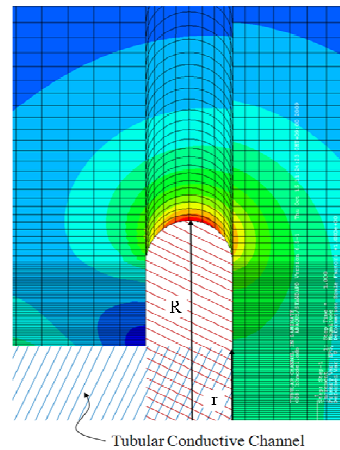


Fig. 7 Contour of the electric field around the tip

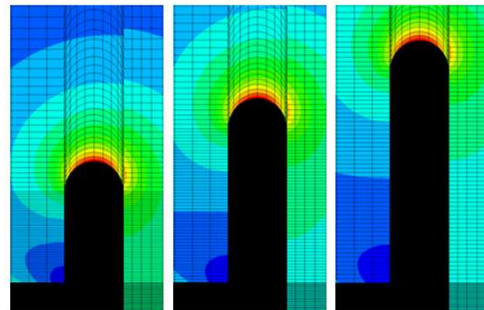


Fig. 8 The channel growth changes in the weaker layer

여기서 r 은 동전형태 절연 파괴면에서 채널 중심축으로부터 거리이다.거리 r 이 증가함에 따라 전기장도 약간 증가하였다. 이는 약한 층의 파괴가 진행될 때 그 부분에 전기장의 집중이 발생하기

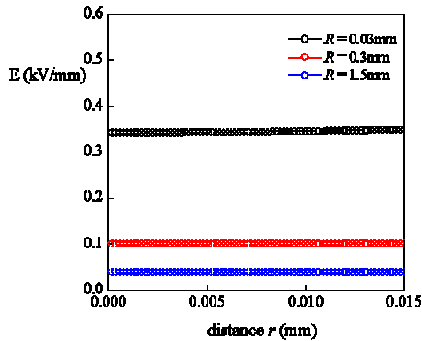


Fig. 9 Distribution of electric fields on the surface of the head of the channel with $\epsilon_2 / \epsilon_1 = 2$

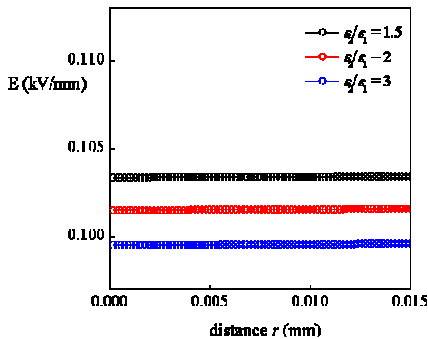


Fig. 10 Distribution of electric fields on the surface of the head of the channel with $R=0.6\text{mm}$

때문이다. 그리고 전체적으로 약한 층에서의 파괴 면적의 반지름이 작을 때 전기장의 분포가 더 크게 나타났다. 이는 약한 층의 파괴면적이 클수록 절연파괴를 감소시킬 수 있음을 나타낸다.

4.2 유전율 비의 영향

절연파괴강도가 강한 층과 약한 층, 두 재료의 유전율의 비 ϵ_2 / ϵ_1 가 변할 때 전기장의 분포를 확인하였다. 여기서 사용한 구조는 뼈와 같은 생체모방구조이기 때문에 $N=3$ 일 때 그 내부에 있는 $N=2$ 일 때의 ϵ_1 의 유전율을 시뮬레이션에 적용하였다. 식 (4)를 통하여 Table 2와 같이 얻은 유전율을 시뮬레이션에 적용한 결과 Fig. 10과 같이 유전율의 비가 커질수록 전기장의 분포가 작아지는 것을 확인하였다. 이는 ϵ_2 의 값이 커짐에 따라 약한 층에서 파괴가 더 쉽게 일어나는 것을 나타낸다.

5. J 적분

5.1 J 적분 공식화

절연파괴는 외부의 전기장에 의하여 유전재료가

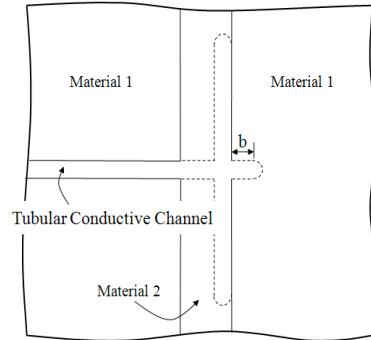


Fig. 11 The channel growth in bone-like material

급격하게 이온화되면서 재료가 파손되는 현상이다. 절연재료와 접촉한 전극의 물성, 절연재료내의 미소공동 및 미소균열의 밀도 등 다양한 조건으로부터 영향을 받는다. 절연파괴가 일어나면 전하들이 재료를 관통하며 지나가는데 이때 전하가 이동하는 통로가 마치 긴 원통형 관과 유사하여 관형전도채널(tubular conductive channel)이라고 부른다. 뼈와 같은 생체모방구조가 절연파괴강도에 미치는 영향을 알아보기 위해서 J 적분을 사용하였다. 이때 J 적분은 물리적으로 균열 면에서의 단위 길이당 에너지 방출(energy release per unit length)을 의미하고 경로에 무관하다. 재료는 에너지 방출률이 커질 때 균열이 진전할 가능성이 높아지기 때문에 J 적분을 절연파괴의 판단 기준으로 사용하였다.

J 적분은 탄소성 파괴역학에서 균열 선단 부근의 파괴매개변수로 제안되었으며,⁽¹⁰⁾ 압전재료에 대하여 확장되었다.⁽¹¹⁾ 채널을 갖는 유전재료에 대하여 J 적분은 다음과 같이 쓸 수 있다.^(4,8)

$$J = \int_A (\omega n_1 + n_k D_k E_1) dA \quad (5)$$

여기서 ω 는 전기엔탈피밀도이고, n_1 은 채널 면에 수직한 단위외향벡터의 x_1 방향 성분이다. A 는 채널 선단을 감싸는 면적이다. 식 (5)를 변형하면

$$J = \frac{1}{2} \int_{A_c} D_k E_k n_1 dA \quad (6)$$

이 얻어진다. 여기서 A_c 는 채널 선단의 면적을 가리킨다. 유한요소해석을 통하여 얻은 전기장과 전기변위를 식 (5)에 대입하여 수치적분을 수행하였다.

5.2 J 적분 결과

약한 층에서의 파괴 면적이 증가하다가 다시 다음 층에서의 절연파괴에 의한 채널의 성장이 Fig. 11과 같이 일어난다고 가정하면 채널길이 b 가 증가할수록 J 적분 값이 증가되는 것이 Fig. 12에서

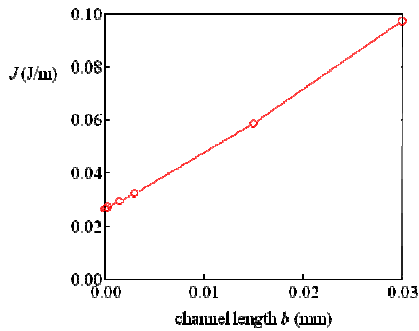


Fig. 12 J integral as a function of b

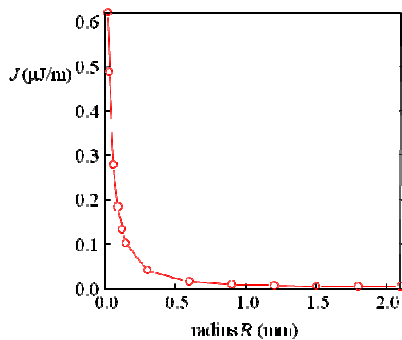


Fig. 13 The channel growth in bone-like material

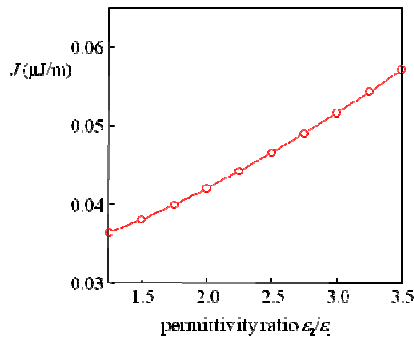


Fig. 14 J integral as a function of ϵ_2/ϵ_1

처럼 확인된다. 이것은 절연파괴가 발생하기 시작하면 채널이 진전할수록 에너지 방출률이 증가하여 파괴가 가속화 된다는 것을 의미한다. 절연파괴가 시작된 후에는 에너지 방출률이 증가하여 파괴가 더욱 쉽게 일어나기 때문에 관형채널이 생성되기 시작하는 순간의 거동을 관찰하였다. 약한 층이 파괴되는 면적의 반지름에 따른 Fig. 7의 모델에서 R 에 대한 J 적분 값은 Fig. 13과 같이 나타났다. 그래프에서 약한 층이 파괴되는 면적의 반지름이 커질수록 J 적분 값이 감소하는 것이 확인되었다. 파괴되는 면적의 반지름이 약 0.6mm까지 J 적분 값이 급격히 감소하다가 그 이후에는

거의 일정한 값을 나타내는 것이 확인되었다. J 적분을 유전율비의 함수로 Fig. 14에 나타냈다. 유전율비 ϵ_2/ϵ_1 가 증가하면 J 적분 값도 증가하였다.

6. 결론

본 논문에서는 유전체가 뼈와 유사한 구조를 이루고 있을 때 그 내부에서의 절연파괴에 대하여 연구하였다. 절연파괴에 대한 연구를 위해 단위 길이당 에너지 방출을 의미하는 J 적분을 이용하였다. J 적분 값은 유한요소해석을 이용하여 계산하였다. 생체모방구조에서 절연파괴강도가 강한 층 사이에 있는 절연파괴강도가 약한 층에서 파괴면적 반지름이 커질수록 J 적분 값이 작아지는 것이 확인되었다. 또한 유전율에 대하여 계층구조를 적용하였을 때 J 적분 값을 계산하였다. 계층구조를 적용하였을 경우 유전율의 비가 커짐에 따라서 J 적분 값이 커지는 것이 확인되었다. 그리고 약한 층의 파괴면적의 반지름이 커짐에 따라 J 적분 값이 감소하지만 그 감소폭이 급격히 작아져서 적분 값 이상에서는 더 이상 감소되지 않는 것이 확인되었다.

후 기

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2009-0067592).

참고문헌

- (1) Sakabe, Y., 1997, "Multilayer Ceramic Capacitors," *Current Opinion in Solid state and Materials Science*, Vol. 2, pp. 584~587.
- (2) Wersing, W., 1996, "Microwave Ceramics for Resonators and Filters," *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 1, pp. 715~731.
- (3) Jung, K., Kim, K. J. and Choi, H. R., 2008, "A Self-Sensing Dielectric Elastomer Actuator," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 143, pp. 343~351.
- (4) Beom, H. G., Kim, Y. H., 2008, "Application of J Integral to Breakdown Analysis of a Dielectric Material," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 45, pp. 6045~6055.
- (5) Gao, H., 2008, "Application of Fracture Mechanics Concepts to Hierarchical Biomechanics of Bone and Bone-Like Materials," *International Journal of Fracture*, Vol. 138, pp. 101~137.
- (6) Wang, R. Z., Suo, Z. and Evans, A. G., Yao, N., Aksay, I. A., 2001, "Deformation Mechanisms in

- Nacre," *Material Research Society*, Vol. 16, No. 9, pp. 2485~2493.
- (7) Gupta, H. S., Wagermaier, Wolfgang., Zaslansky, P., Boesecke, P. and Fratzl, P., 2006, "Cooperative Deformation of Mineral and Collagen in Bone at the Nanoscale," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 103, No. 47, pp. 17741~17746.
- (8) Suo, Z., 1993, "Models for Breakdown-Resistant Dielectric and Ferroelectric Ceramics," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 41, No. 7, pp. 1155~1176.
- (9) Lin, S., Beom, H. G., Tao, D., Kim, Y. H., 2009, "Dielectric Breakdown of an Unpoled Piezoelectric Material with a Conductive Channel," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 32, pp. 580~586.
- (10) Rice, J. R., 1968, "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Crack," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, No. 2, pp. 379~386.
- (11) Pak, Y. E., 1990, "Crack Extension Force in Piezoelectric Material," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, No. 3, pp. 647~653.