

전기장을 받는 뼈와 유사한 구조 내의 전도채널 성장

Conductive Channel Growth in a Bone-Like Structure Subjected to Electric Fields

*이보현¹, Song Lin¹, #범현규²

*B. H. Lee¹, S. Lin¹, #H. G. Beom(hgbeom@inha.ac.kr)²

¹ 인하대학교 대학원 기계공학과, ² 인하대학교 기계공학과

Key words : Conductive channel, Hierarchical structure, J integral, Dielectric breakdown, Finite element analysis

1. 서론

유전재료는 캐패시터, 레조네이터, 액츄에이터 등으로 전기산업분야에서 다양하게 사용되고 있다.^{1,2} 유전재료는 효율성을 높이기 위하여 유전체 내부에 전극을 만드는 경우가 많은데 이러한 유전장치에 전기장을 인가하면 전극 선단 부분에 전기장이 과도하게 집중되어 종종 절연파괴(dielectric breakdown)가 발생한다. 최근 연구에서는 유전체 표면에 전도성 결점에서 균열이 진전될 때 에너지 방출률을 구하여 유전체의 절연파괴를 해석했다.³ 절연파괴의 확률을 감소시키기 위해서 재료의 구조와 관련하여 절연파괴를 연구한다. 뼈와 같은 생체모방구조는 주위 환경에 적응하기 위하여 오랜 시간에 걸쳐 진화되고 최적화된 구조로써 강성 및 파괴인성이 보통 구조에 비해 강하다. 뿐만 아니라 계층구조(hierarchical structure)를 이루고 있어 단일재료나 일반 다층구조물보다 우수한 특성을 보인다고 알려져 있다.⁴ 생체모방구조를 절연파괴의 확률을 감소시키기 위한 방법으로 이용한다면 기계적으로 우수한 특성을 보이는 것과 같이 절연파괴 저항성 또한 우수한 특성을 보일 것으로 사료된다.

본 연구에서는 뼈와 유사한 구조를 절연파괴에 적용하였다. 생체모방구조에서 관형 전도채널에 대하여 단위면적에 대한 에너지 방출률과 같은 J 적분을 통해 절연파괴를 해석한다. 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.⁵ 유한요소해석을 통해 얻어진 전기장(electric field)의 분포와 전기변위(electric displacement)의 분포를 통해 J 적분 값을 구하였다.

2. 뼈의 계층구조

뼈와 유사한 구조는 Fig. 1 과 같이 계층구조를 이루고 있다.⁵ 두 가지 다른 특성의 재료가 서로 층을 이루어 쌓여져 있는 구조가 반복된다. 균열허용조건(flaw tolerance criterion)을 이용하여 계층구조의 N=0 일 때의 단단한 부분의 크기를 결정하였다.⁶ 균열허용조건은 모든 계층구조에 대하여

$$\Lambda_{fr} = \frac{\Gamma E}{S^2 h} = 1, \quad \Lambda_n^{fr} = \frac{\Gamma_n E_n}{S_n^2 h_n} = 1 \quad (1)$$

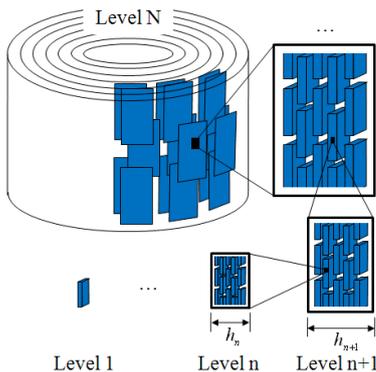


Fig. 1 N-level hierarchical structures

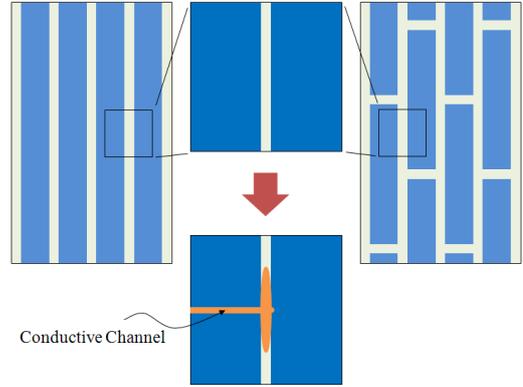


Fig. 2 Conductive channel in a bone-like structure

이다. 식(1)에서 E_n , S_n , Γ_n 는 각각 탄성계수(Young's modulus), 강도(strength), 파괴에너지(fracture energy)이다. 균열공차조건은 n 수준 식과 n+1 수준 식을 이용하여

$$\frac{h_{n+1}}{h_n} = \frac{4(1-\Phi^{1/N})E_m}{\Phi^{1/N}\sigma_{th}} 2^n, \quad h_0 = \frac{2\gamma E_m}{\sigma_{th}^2} \quad (2)$$

와 같이 바뀐다. 식(2)에서 E_m , γ , σ_{th} 은 각각 단단한 부분의 탄성계수, 표면에너지(surface energy), 이론적인 강도다. 그리고 Φ 을 단단한 막대의 전체부분이라고 한다면 $\Phi^{1/N} = \varphi$ 이다. 정확하게는 더 높은 계층 구조에서 단단한 막대의 탄성 특성은 이방성(anisotropic)이지만 간단화를 위해 이러한 복잡함을 고려하지 않았다. 식(2)를 통하여 각 계층수준에서의 h_n 의 크기를 구하였다. 절연파괴에서 채널의 반지름은 약 $30 \mu m$ 이기 때문에 N=3 일 때 계층구조의 크기를 고려하였다.⁶

3. 생체모방구조의 절연파괴

뼈와 같은 생체모방구조는 거시적으로 Fig. 2 과 같이 다층구조와 유사하다고 볼 수 있다. 여러 층으로 이루어진 재료에 전기장을 인가했을 때 채널은 한 층에서 다음 층으로 쉽게 진입하지 못한다.⁵ 상용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 를 이용하여 모델을 만들었다. 요소 타입은 압전축대칭요소(piezoelectric axisymmetric solid element)인 CAX8E 을 사용하였다. 본 연구에서는 재료가 유전체라고 가정하였기 때문에 압전효과는 무시하였다. 계층구조에서의 유전율을 위해 생체모방구조가 N=3 일 때

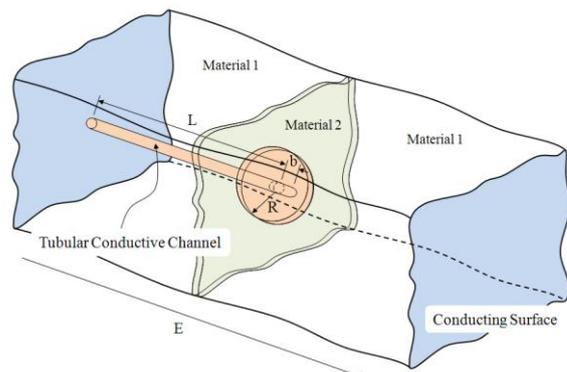


Fig. 3 Conductive channel in a bone-like structure

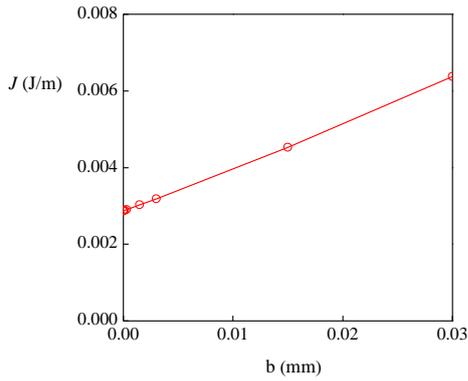


Fig. 4 J integral as a function of b

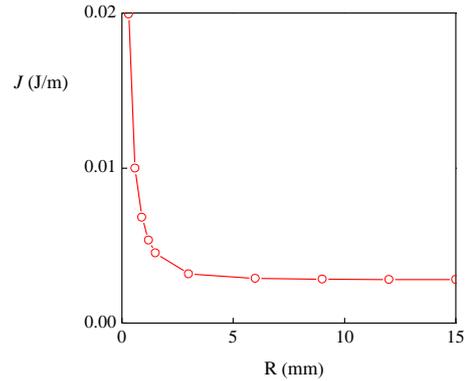


Fig. 5 J integral as a function of R

의 크기를 고려하였기 때문에 N=3 일 때의 내부에 있는 N=2 일 때의 절연과피강도가 강한 층의 유효유전율 (effective permittivity)을 구하여 유한요소해석에서의 재료상수로 사용하였다. 편의를 위해 유전율의 역수를 β 라 하면 유효유전율은

$$\beta_1^{n+1} = \Phi^{1/N} \beta_1^n + (1 - \Phi^{1/N}) \beta_2 \quad (3)$$

이다. 수치적인 계산을 위해서 Fig. 3 에서 재료 1 의 유전율을 $\epsilon_1^{n+1} = 8.719 \times 10^{-9}$ F/m 라고 하였다.⁶ 두 재료의 유전율의 비를 $\beta_1/\beta_2 = \epsilon_2/\epsilon_1 = 2$ 라고 가정하면 식(3)을 통해서 N=2 일 때 $\beta_1^{n+2} = 11.531 \times 10^{-9}$ F/m 를 얻을 수 있다.

4. J 적분

뼈와 같은 생체모방구조가 절연과피강도에 미치는 영향을 알아보기 위해서 J 적분을 사용하였다. 이때 J 적분은 단위면적에 대한 에너지 방출률과 같다. 재료는 에너지 방출률이 커질 때 균열이 진전할 가능성이 높아지기 때문에 J 적분을 절연과피의 판단기준으로 사용하였다.

J 적분은 탄·소성 파괴역학에서 균열 선단 부근의 파괴매개변수로 제안되었다.⁷ 그리고 이것은 유전재료에 대하여 다음과 같이 확장된다.⁸

$$J = \int_A (w n_1 - t_k u_{k,1} + n_k D_k E_1) dA \quad (4)$$

여기서 w 와 t_k 는 각각 전기엔탈피밀도(electric enthalpy density)와 트래션(traction)으로서 $w = -\frac{1}{2} D_k E_k$, $t_k = \sigma_k n_k$ 의 값을 갖는다. 그리고 A 는 채널선단의 면적을 가리킨다. 균열 면에 가해지는 외력은 0 이므로 트래션 항이 소거되고 나머지 항들을 정리하면

$$J = \int_A \frac{1}{2} (D_k E_k n_k) dA \quad (5)$$

와 같이 변형된다. 여기서 n_k 은 균열 선단에서 수직인 단위외향벡터의 x_k 방향 성분이고, 유한요소해석을 통하여 얻은 전기장과 전기변위를 식(5)에 대입하여 수치적분을 수행하였다.

채널의 길이 b 가 증가할수록 J 적분 값이 증가되는 것이 Fig. 4 와 같이 확인되었다. 이것은 절연과피가 발생하기 시작하면 채널이 진전할수록 에너지 방출률이 증가하여 파괴가 가속화 된다는 것을 의미한다. 절연과피가 시작된 후에는 에너지 방출률이 증가하여 파괴가 더욱 쉽게 일어나기 때문에 관형채널이 생성되기 시작하는 순간($b=0$)의 거동을 관찰하였다. 약한 층이 파괴되는 면적의 반지름에 따른 J 적분 값은 Fig. 5 와 같이 나타났다. 그래프에서 약한 층이 파괴되는 면적의 반지름이 커질수록 J 적분 값이 감소하는 것이 확인되었다. 파괴되는 면적의 반지름이 어느 정도까지 J 적분 값이 급격히 감소하다가 그 이후에는 거의 일정한 값을 나타내는 것이 확인되었다.

5. 결론

본 논문에서는 유전체가 뼈와 유사한 구조를 이루고 있을 때 그 내부에서의 절연과피에 대하여 연구하였다. 재료는 에너지 방출률이 큰 방향으로 균열이 성장한다. 절연과피가 일어날 때 에너지 방출률은 J 적분을 통해 계산하였다. J 적분 값은 유한요소해석을 이용하여 계산하였다. 생체모방구조에서 절연과피강도가 강한 층 사이에 있는 절연과피강도가 약한 층에서 파괴면적의 반지름 R 이 커질수록 J 적분 값이 작아지는 것이 확인되었다. 그리고 약한 층의 파괴면적의 반지름 R 이 커짐에 따라 J 적분 값이 감소하지만 그 감소폭이 급격히 작아져서 적분 값 이상에서는 더 이상 감소되지 않는 것이 확인되었다.

후기

이 논문은 2007 년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-313-D00016).

참고문헌

1. Sakabe, Y., "Multilayer Ceramic Capacitors," Current Opinion in Solid state and Materials Science, **2**, 584-587, 1997.
2. Jung, K., Kim, K. J. and Choi, H. R., "A Self-Sensing Dielectric Elastomer Actuator," Sensors and Actuators A: Physical, **143**, 343-351, 2008.
3. Beom, H. G. and Kim, Y. H., "Application of J Integral to Breakdown Analysis of a Dielectric Material," International Journal of Solids and Structures, **45**, 6045-6055, 2008.
4. Gao, H., "Application of Fracture Mechanics Concepts to Hierarchical Biomechanics of Bone and Bone-like Materials," International Journal of Fracture, **138**, 101-137, 2008.
5. Suo, Z., "Models for Breakdown-Resistant Dielectric and Ferroelectric Ceramics," Journal of the Mechanics and Physics of Solids, **41**, 1155-1176, 1993.
6. Lin, S., Beom, H. G., Tao, D. and Kim, Y. H., "Dielectric Breakdown of an Unpoled Piezoelectric Material with a Conductive Channel," Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, **32**, 580-586, 2009.
7. Rice, J. R., "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Crack," Journal of Applied Mechanics, **35**, 379-386, 1968.
8. Pak, Y. E., "Crack Extension Force in Piezoelectric Material," Journal of Applied Mechanics, **57**, 647-653, 1990.