전기장에 의한 PZT807 세라믹 내의 전도채널 성장

Conductive channel growth in PZT807 ceramics under electric field

*D. Tao[1], L. Song[1], 김유환[1], #범현규[2]
*D. Tao[1], L. Song[1], Y.H. Kim[1], #H.G. Beom(hgbeom@inha.ac.kr)[2]
[1] 인하대학교 대학원 기계공학과, [2]인하대학교 기계공학부

Key words : Dielectric Breakdown; Tubula r channel propagation, Piezoelectricity

1. 서론

압전세라믹은 여러 산업에서 광범위하게 사용되는 대표적인 지능형재료이다. 압전세라믹은 레조네이터 초음파발진기 등에 센서 및 엑추에이터 형태로 사용된다[1]. 압전세라믹은 전기-기계 에너지 변환효과가 뛰어나지만 취성이 강해 기계적 하중에 의하여 파손되기 쉽다. 또한 재료내부의 결함 근처의 강한 전기장으로 인하여 유전파괴가 발생할 수 있다. 순수 기계하중하, 순수 전기하중하, 그리고 전기-기계 복합하중 하에서 압전세라믹의 균열전파에 관한 연구가 수행되었다[(2,3)]. 이 밖에도 교류전기장 혹은 직류전기장하에서 압전세라믹의 균열거동에도 많은 연구가 수행되었다. Suo[4]는 유전세라믹에서 일반적으로 발견되는 전도채널전파에 의한 유전세라믹의 파손에 관심을 두었고 파괴역학 관점에서 이에 대한 물리모델을 개발하였다. 지금까지 압전세라믹의 파손에 대한 연구는 균열전파에 의한 파손에만 집중되었다.

본 논문에서는 전기장하 압전세라믹의 유전강도를 측정하고 실험적으로 관찰된 전도채널전파에 의한 압전세라믹의 파손특성에 대하여 논의한다.

2. 실험

압전세라믹의 유전강도 측정실험을 수행한다. 유전강도 측정실험은 비분극 압전세라믹과 분극 압전세라믹에 대하여 수행되었다. 압전세라믹에 전도채널을 형성시키고 직류전기장을 인가한다. 압전세라믹 내에서 전도채널이 성장하는 시점의 유전파괴전압(dielectric breakdown voltage)을 측정한다. 압전세라믹은 상용으로 쓰이는 PZT807(Morgan Ceramics, UK)을 사용한다. 시편의 형상은 Fig. 1과 같이 원통형이며 깊이(l_s)는 10mm이고 반경(r_s)은 2.5mm이다. 압전세라믹 내에 전도채널을 만든다. 압전세라믹 시편 내에 깊이(l_c)가 5mm와 7mm인 채널을 초경드릴을 이용하여 가공한다. 깊이의 각 경우에 따라 0.3mm에서 0.7mm까지 0.1mm 간격의 반경(r_c)으로 시편을 제작한다. 채널을 전도체로 만들기 위해 실버페인트(TED Pella Co., USA)를 채널에 채운다. 또한 전기장을 인기하기 위해 시편의 양면에 전도처리한다. 시편에 전도접착제(DURALCO 122, Cotronics, USA)를 이용하여 구리선을 붙이고 고전압발생장치와 연결한다. 시편전기장을 측정한다. 공기 중에서의 방전을 방지하기 위해 압전세라믹의 유전파괴 실험은 실리콘오일이 담긴 수조에서 수행하였다. 전압은 ASTM Strandard D3755 규정에 따라 500V/s의 속도로 높여주었으며 유전파괴시 임계전압을 측정하였다. 마찬가지로 분극 압전세라믹에 대한 실험에서는 Fig. 2와 같이 분극방향과 전기장의 방향이 일치하는 경우와 반대인 경우에 대하여 유전강도를 측정하였다.

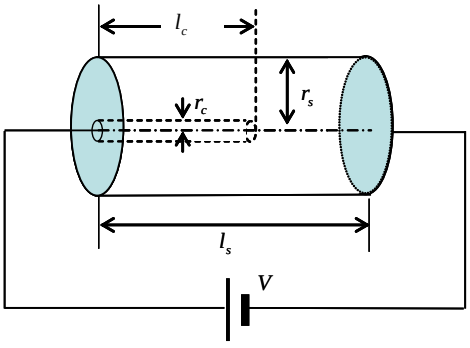
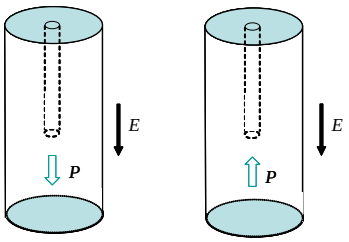


Fig. 1 Schematic of experiment



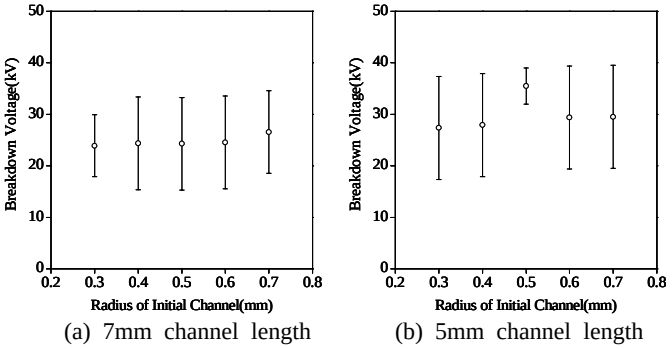
(a) postive (b) negative

Fig.2 Direction of electric fields in tests for poled piezoelectric ceramics

2. 실험결과

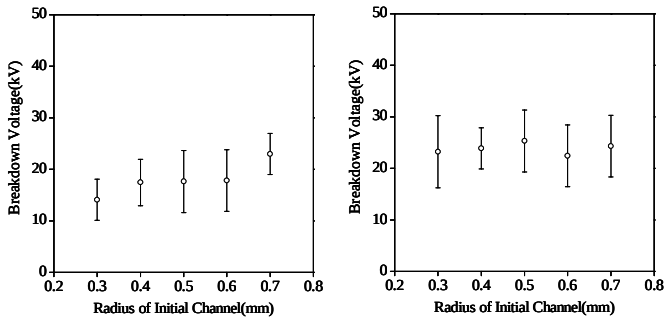
비분극 압전세라믹의 유전강도를 측정하였으며 초기채널의 반경 및 깊이에 따른 유전강도를 Fig. 3으로 나타내었다. 유전강도는 초기채널의 반경에 거의 의존하지 않았다. 비분극 압전세라믹의 평균 유전강도는 초기채널의 깊이가 5mm일 때 28.4kV이고 7mm일 때는 24.7kV정도로 측정되었다. 현상학적으로 시편에서 유전파괴가 발생할 때 짧은 휴지기가 있는 연속적인 스파크 관찰되었으며 동시에 시편은 수 개의 조각으로 깨져나갔다. 유전파괴가 재료의 기계적인 파괴를 동반하는 원인은 압전세라믹의 분극화(poling) 및 분극회전(polarization switching) 현상과 밀접한 관련이 있다. 비분극 압전세라믹은 압전성을 가지고 있지 않다. 하지만 유전파괴채널 선단부근의 국부영역은 강한 전기장으로 인해 분극화됨으로써 압전성(piezoelectricity)을 띠게 된다. 세라믹 내부는 압전영역과 유전영역이 존재하게 되며 이 두 영역의 변형률의 부적합으로 인해 강한 응력이 발생하게 되면 결국 비분극 압전세라믹은 기계적으로 파괴된다. 한편 초기채널 끝단에서 전도면까지 확장된 유전파괴경로(breakdown path)는 직선경로를 따라 형성되기 보다는 불규칙한 곡선 경로를 따라 형성되는 사례가 많았다. 또한 채널이 세라믹내부에서 형성되지 않고 표면으로 채널경로가 형성되는 경우도 관찰되었다. 새롭게 형성된 유전파괴채널의 반경은 초기채널의 반경 및 깊이와 거의 상관관계를 발견할 수 없었다.

분극 압전세라믹의 유전강도를 양의 전기장하에서 측정하였으며 초기채널의 반경과 깊이에 따른 유전강도를 Fig. 4에 나타내었다. 채널의 깊이가 감소할수록 유전강도의 세기는 증가한다. 초기채널의 깊이가 7mm인 경우 반경이 커질수록 유전강도가 증가한 반면 초기채널의 깊이가 5mm인 경우 유전강도는 반경의 깊이에 무관하였다. 또한 전기장이 분극방향과 반대인 경우에 대한 유전강도를 Fig. 5와 같이 측정하였다. 초기채널의 깊이가 증가할수록 유전강도의 크기는 감소하였다.



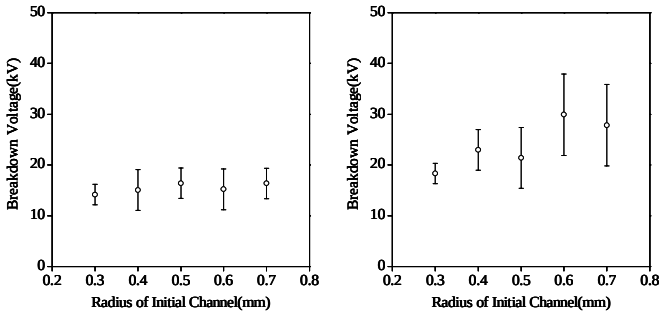
(a) 7mm channel length (b) 5mm channel length

Fig.3 Dielectric strengths of unpoled piezoelectric specimens



(a) 7mm channel length (b) 5mm channel length

Fig. 4 Dielectric strengths of poled piezoelectric specimens under positive electric fields



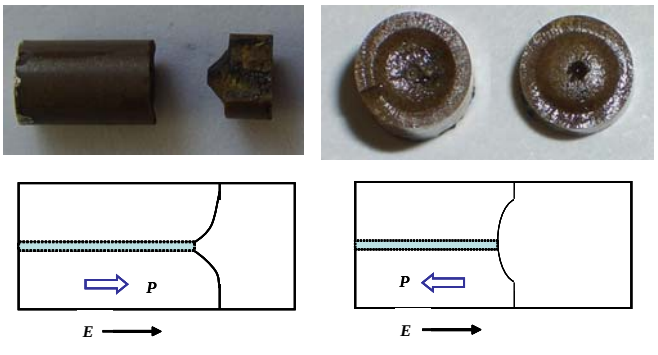
(a) 7mm channel length (b) 5mm channel length

Fig. 5 Dielectric strengths of poled piezoelectric specimens under negative electric fields

초기채널의 깊이가 5mm인 경우 반경이 커질수록 유전강도가 증가한 반면 초기채널의 깊이가 7mm인 경우 유전강도는 반경의 깊이에 무관하였다.

분극화된 압전세라믹은 유전파괴가 일어남과 동시에 Fig. 6과 같이 마치 화산과 같은 형태의 파단면을 형성하면서 깨졌다. 전기장이 분극방향과 일치하는 경우의 파단면은 전기장이 분극방향과 반대인 경우와 확연하게 구별되었다. 표면은 매우 매끄로웠다. 분극화된 압전세라믹은 압전성을 띠기 때문에 전기장에 의하여 발생하는 최대주응력 방향으로 균열이 발생하는 것으로 보인다. 유전파괴채널을 Fig.7과 같이 광학현미경으로 관찰하였다. 압전세라믹 시편의 초기채널에서 유전파괴는 시작되고 유전파괴채널 끝단의 높은 온도장에 의하여 세라믹 재료가 분해되어 방출되고 최종적으로 유전파괴 채널은 전도면에 도달한다. 유전파괴채널의 반경은 $30\mu m$정도로 초기채널의 깊이와 반경에 관계없이 거의 일정하였다.

분극화된 압전세라믹의 유전강도는 비분극 압전세라믹의 유전강도보다 낮았다. 또한 비분극 압전세라믹의 유전파괴경로가 일직선인 경우는 거의 없었음에 비해 분극화된 상당수의 압전세라믹의 유전파괴는 직선경로를 따라 일어났다.



(a) positive (b) negative

Fig.6 Fractures of poled piezoelectric specimens

Fig.7 Tubular channel in the poled piezoelectric specimen with 5mm length and 1.4mm diameter initial channel

3. 토론

비분극 압전세라믹 및 분극화된 압전세라믹의 유전파괴는 기계적 파괴를 동반한다. 비분극 압전세라믹의 기계적인 파손은 불규칙한 수개의 조각으로 분리되었지만 분극화된 압전세라믹은 대부분 두 개의 조각으로 분리되었으며 파단면은 화산과 유사한 형태를 띠었다. 유전파괴강도는 비분극 압전세라믹이 우수하였다. 또한 유전파괴채널은 비분극 압전세라믹에 대해서는 관찰하기가 어려웠으나 분극화된 압전세라믹의 유전파괴채널은 직선형태의 경로를 보였다. 분극화된 압전세라믹의 압전성이 유전파괴채널과 재료의 파단의 중요한 요인임을 알 수 있다.

4. 결론

초기 채널을 갖는 비분극 및 분극화된 유전세라믹에 대한 유전파괴 실험을 실시하고 유전강도를 측정하였다. 유전파괴전압은 비분극 압전세라믹이 분극화된 압전세라믹보다 높다. 비분극 압전세라믹의 유전강도는 채널의 반경에 의존하지 않는다. 압전세라믹의 분극방향과 일치한 전기장을 인가할 때 유전강도는 초기채널의 반경에 의존하지 않은 반면에 전기장 방향이 분극방향과 반대인 경우 유전강도는 초기채널의 반경에 비례한다. 유전파괴는 반드시 기계적인 파괴를 동반하였으며 유전파괴가 압전세라믹의 분역회전과 밀접한 관련이 있음을 말한다.

후기

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-41-D00027).

참고문헌

1. Aburatani, H., Harada, S., Uchino, K., and Furuta, A., "Destruction Mechanism of Ceramic Multilayer Actuator," Japanese Journal of Appled Physics 33, 3091-3094, 1994.
2. Zhang, T. Y., Lie, G. Wang, Y., "Failure Behavior and Failure Criterion of Conductive Cracks(deep notches) in Piezoelectric Ceramics," Acta Materialia 52, 2025-2035, 2004
3. Park, S. and Sun, C. T., "Fracture Criteria for Piezoelectric ceramics," American Ceramic Society 78, 1475-1480, 1995.
4. Suo, Z., "Models for Breakdown-resistant Dielectric and Ferroelectric Ceramics," Journal of the Mechanics and Physics of solids 41, 1155-1993, 1992