

MLCC 제조공정에서 발생하는 잔류응력에 대한 열·구조 연성해석 Thermo-Mechanical Analysis of MLCC for Residual stress

이은규¹, *#김창완²

E. K. Lee¹, *#C. W. Kim(goodant@konkuk.ac.kr)²

¹ 건국대학교 기계설계학과, ² 건국대학교 기계설계학과

Key words : MLCC, electronic printing, R2R, residual stress, FEM

1. 서론

MLCC(Multi-layer ceramic capacitor)는 전자 산업 분야에서 현재 가장 널리 쓰이는 수동소자 부품의 한 종류로서 점점 소형화와 첨단 고성능 다기능의 제품 개발과 출시에 발맞추어 그 필요성과 사용량이 늘어가고 있는 추세이다. 또한 제한된 작은 크기의 소자 내부에 보다 높은 적층 공정을 통한 고효율의 제품 개발이 요구되고 있다. 이러한 요구에 따라 현재는 내부 적층의 두께가 1 μm 에 이르는 초 박막 적층이 신기술로서 보편화 되는 추세이다. 이러한 고밀도의 적층은 제한된 공간에 보다 높은 유전율을 실현함으로써 제품의 소형화에 크게 기여하고 있다.

일반적으로 이러한 MLCC 의 개발과 생산에는 내부 유전체와 전극의 적층과 함께 고온의 성형 과정이 가장 중요한 핵심 공정으로 작용한다. 각각 서로 다른 물성을 가진 두 물질의 다층 결합체는 공정에서 수반되는 고온(약 1250 ℃)의 열에 의해 소결되어 완성된다. 특히 이 과정에서 작용하는 고온의 열은 각 물질의 열팽창계수 차에 따른 각 층에서의 서로 다른 변위를 발생 시키고 이러한 차이는 소결 후 냉각 과정을 거쳐 상온으로 온도 변화가 끝난 후에도 내부에 응력이 잔류하게 되는 가장 큰 원인으로 작용한다. 이렇게 발생된 잔류응력(Residual stress)은 제품 내부에 성능의 저하를 일으키는 결함을 발생 시키거나 형상의 변화를 통한 제품의 손상을 초래하여 불량률의 요인으로 작용하게 된다. 따라서 공정에서 필수적으로 수반되는 열에 의한 잔류응력의 수치해석을 통한 예측과 분석은 결함의 발생을 줄이고 불량률의 발생을 억제하기 위한 설계 및 공정의 최적화를 위하여 꼭 필요한 과정이라 할 수 있다.

본 논문은 MLCC 제조 공정의 소결 과정에서 수반되는 열에 의한 잔류응력의 발생과 분포를 확인하기 위한 유한요소해석법(FEM)을 이용한 열-구조 연성 수치해석 연구이다.

2. MLCC 개요

MLCC 의 구조는 Fig. 1 에 나타낸 것과 같다. 내부는 유전체 세라믹 층과 전극이 서로 적층되어 구성되며 내부 전극은 외부의 전극과 서로 교차되어 양쪽으로 연결되는 구조이다. 또한 적층부와 외부 몸체 사이에는 여유부가 존재하며 양끝 단의 외부전극 연결부는 중앙의 적층부 보다 절반의 적층으로 구성된다.

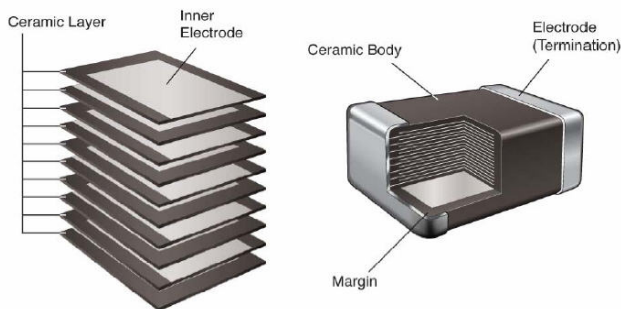


Fig. 1 MLCC

BaTiO₃(티탄산 바륨)과 Ni(니켈)은 각각 현재 가장 널리 쓰이고 있는 MLCC의 유전체 세라믹과 전극의 재료이다. 과거에는 전극의 재료로 고가의Pd(팔라듐) 등의 금속을 사용하여 매우 높은 원가의 주 요인이었으나 현재는 고온에서 전극의 산화를 방지하는 공정기술의 개발로 Ni전극을 사용한 MLCC가 보편화 되어 많은 원가 절감을 이루었다. 수치해석을 위한 유한요소해석에 적용 할 재료물성을 Table 1 과 같이 적용하였다.

Table 1 Materials property of the ceramic and electrode layers

	BaTiO ₃	Ni
Elastic modulus (GPa)	108	205
Poisson's ratio	0.33	0.31
CTE(10 ⁻⁶ /deg)	7.6	13.3
Density (kg/m ³)	6000	8902
Thermal conductivity (W/m K)	5	67

서로 다른 차이를 보이고 있는 물성값 중 열팽창계수(Coefficient of Thermal Expansion)의 차이가 잔류응력 발생의 주요한 요인으로 작용한다.

해석모델의 생성에는 현재 제품으로 상용화 되어있는 X7R/0201 MLCC 모델을 참고하여 모델링을 하고 수치해석을 위해 유한요소해석법을 사용하였다. 실제 수치해석 과정에는 모델의 대칭성을 고려하여 1/4 모델을 사용 하였으며, 모델링에 사용된 치수 및 형상은 Table 2 와 Fig. 2 과 같다.

Table 2 Geometry of X7R/0201 type MLCC.

Length	600 μm
Width	300 μm
Height	97 μm
Thickness of electrode layer	1 μm
Thickness of dielectric layer	2 μm
Thickness of cover layer	10 μm
Number of laminated layer	50 layers

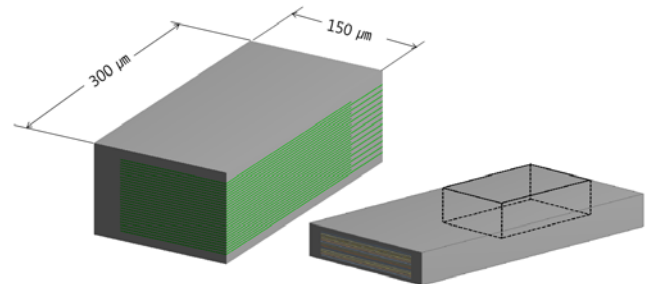


Fig. 2 1/4 model of X7R-0201 type MLCC

3. 열-구조 유한요소 해석

MLCC 의 제조 공정은 크게 각 층의 패턴 평성과 적층을 통한 전처리, 절단 후 소결(melting)을 통한 제품의 성형과정 그리고 외부 전극의 형성 등을 통한 후처리 과정으로 나누어 진다. 여기서 각 층의 박막 형성은 나노 입자의 인

쇄방식을 통한 패턴의 생성을 통하여 이루어지며, 고온의 소결 과정을 거쳐 각 층은 비로소 완성이 된다. 따라서 이러한 공정 과정을 수치해석 모델에 적용하기 위한 시뮬레이션의 적용이 필요하다. 실제 공정의 소결온도인 약 1250 °C 이전까지 각 층은 입자 상태로서 존재 하며 각 재료는 성형되기 이전이므로 열에 의한 응력이나 변형 등의 조건은 적용되지 않는다고 가정하고, 최초 적용온도(Initial temperature)를 소결온도(1250°C)로 적용하고 상온 20°C까지 냉각되는 과정을 통한 열 해석을 실시 하였다.

소결온도를 지나 상온까지 냉각의 과정 동안 MLCC 는 내부를 이루고 있는 각 층에서는 재료가 성형되며 온도의 변화에 의한 서로 다른 팽창과 수축이 반복되며 응력을 발생 시킨다. 이러한 발생 응력은 공정이 끝난 후에도 내부에 잔존하는 잔류응력으로 작용하여 결함과 불량 발생의 주 요인이 된다.

열전달 수치해석 과정 후의 조건을 구조해석 최초 적용 조건(Initial condition)으로 연계하여 변형(Deformation)과 응력(stress)에 대한 수치해석을 실시 하였다. 이 과정에서 경계조건(Boundary condition)은 1/4 모델의 대칭 면(Symmetry) 조건을 제외한 다른 구속조건은 주어지지 않으며 외력에 의한 하중 및 압력 등의 조건 또한 적용되지 않는다.

이상의 과정에 따라서 열전달 및 구조해석의 연성해석을 실시 하였으며 선행된 열전달 수치해석으로부터 얻은 조건을 구조해석에 적용 함으로서 공정 후 잔류응력의 분포와 발생을 확인 할 수 있었다.

4. 잔류응력의 발생과 분포

모든 공정조건의 수치해석을 마치고 난 후의 응력 분포를 확인하면 Fig. 3 과 같이 각 층의 경계 면에서 잔류응력이 분포하고 있음을 알 수 있다. 특히 적층이 보다 조밀한 중심부보다 절반의 적층이 이뤄지는 양 끝 단의 전극 연결부 부근에서 최대의 응력이 분포하고 있음을 보인다.

발생된 잔류응력 분포를 평면응력(in-plan stress)과 수직 응력(out-of-plan stress)으로 구분하여 그 분포를 알아 보면 모델의 좌표계에 나타난 방향성분으로 구분하여 평면응력은 X 와 Z 방향성분의 응력, 그리고 수직응력은 Y 방향성분의 응력으로 나타낼 수 있다. 각 방향의 응력분포를 통하여 평면응력과 수직응력의 분포를 확인하면 Fig. 4 및 Fig. 5 와 같다.

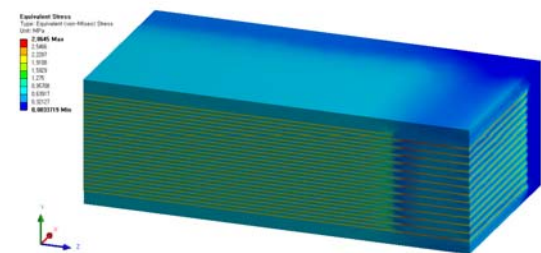


Fig. 3 Contour plot of equivalent stress

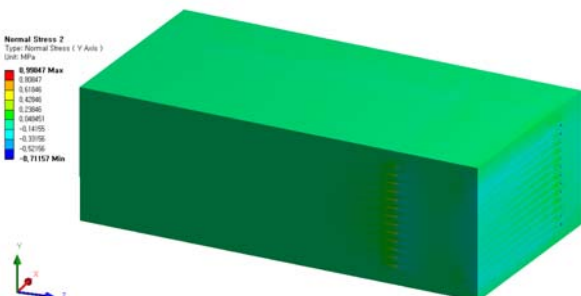


Fig. 4 Contour plot of out-of-plan stress (Y axis)

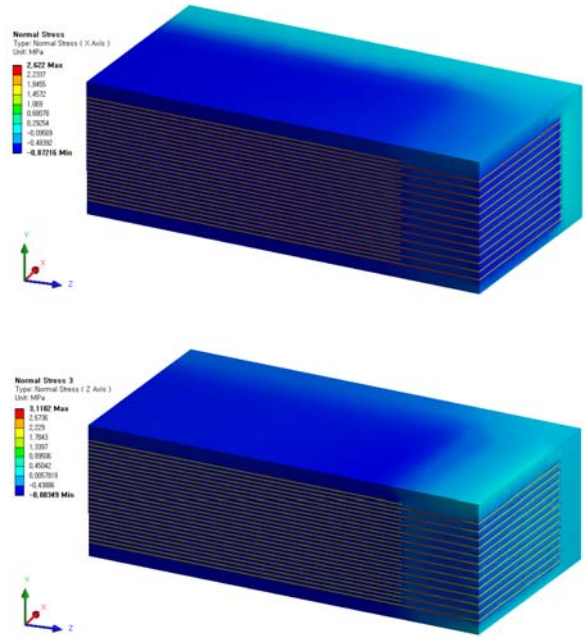


Fig. 5 Contour plot of in-plan stress (X axis, Z axis)

각 방향성분 별 응력의 발생과 분포 중, 수직응력의 발생 분포를 살펴보면 내부 전극 층의 말단부에서 응력이 집중 발생된 모습을 보이며 인장응력은 폭(width)방향의 여유면과 맞닿은 영역에서, 그리고 압축응력은 그 영역의 길이(length)방향의 말단에 각각 최대 발생을 보이고 있음을 확인 할 수 있다. 평면응력의 압축응력은 주로 전극의 내부 말단부에 집중분포하며 1/2 의 적층이 이루어진 영역에서 서로 다른 압축과 인장의 분포 방향을 보인다. Z 방향의 압축응력은 주로 말단의 중앙부에 집중하는 반면, X 방향의 압축응력 최대값은 양 끝 단으로 분포하는 경향을 파악 할 수 있었다. 또한 인장응력의 분포는 주로 적층영역의 모서리 영역을 따라 길이 방향으로 분포하고 있음을 보이고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 MLCC 제조공정의 소결 과정에서 수반되는 열에 의한 잔류응력의 발생과 분포를 확인하기 위하여 유한요소해석법을 이용하여 열-구조 연성 수치 해석을 수행하였다. 이를 통하여 발생된 잔류응력의 분포와 각 방향에 따른 수직 및 평면 응력의 압축과 인장 등의 경향을 파악 함으로서 결함과 불량의 발생을 억제하고 공정 및 설계의 최적화 실현을 위한 제품 생산 공정조건에 따른 잔류응력 발생과 분포를 고찰 하였다.

후기

본 논문은 2009 년도 “서울시 산학연 협력사업(10848)”, “정부(교육과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단(No. K20701040597-07A0404-05110)” 의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- Gang Yang, Zhenxing Yue, Tiejun Sun, Wugui Jiang, Xiang Li and Longtu Li “Evaluation of Residual Stress in a Multilayer Ceramic Capacitor and its Effect on Dielectric Behaviors Under Applied dc Bias Field” J. Am. Ceram. Soc., 91 [3] 887–892 (2008)