

유한요소법에 의한 적층형 세라믹 히터의 전극 패턴 최적화

한운수, 김시연, 여동훈^a

한국세라믹기술원 엔지니어링세라믹센터

Optimization of Electrode Pattern for Multilayer Ceramic Heater by Finite Element Method

Yoonsoo Han, Shi Yeon Kim, and Dong-Hun Yeo^a

Engineering Ceramic Center, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, Icheon 17303, Korea

(Received October 23, 2017; Accepted October 27, 2017)

Abstract: In this study, we investigated the effect of electrode pattern design on the thermal shock resistance and temperature uniformity of a ceramic heater. A cordierite substrate with a low thermal expansion coefficient was fabricated by tape casting, and a tungsten electrode was printed and used as a heating element. The temperature distribution of the ceramic heater was calculated by a finite-element method (FEM) by considering various electrode patterns, and the tensile stress distribution due to the thermal stress was calculated. In the electrode pattern with a single-line width, the central part of the ceramic heater was heated to the maximum temperature, and the position of the ceramic heater having a double-line width was changed to the maximum temperature, depending on the position of the minimum line width pattern. The highest tensile stress was found along the edges of the ceramic heater. The temperature gradient at the edge determined the tensile stress intensity. The smallest tensile stress was observed for electrode pattern D, which was expected to be advantageous in resisting thermal shock failures in ceramic heaters.

Keywords: Multilayer ceramic heater, Finite element method, Electrode pattern, W paste

1. 서론

적층형 세라믹 히터는 경량, 우수한 열적 특성과 열적/기계적 내구 신뢰성 및 용이한 온도제어 등의 장점으로 인하여 전기머리인두, 자동차용 보조 히터 등으로 세라믹 히터 채용이 확대되고 있다. 특히, 니크롬선 히터에 비해 내열성, 열 충격에 강하며, 승온 속도가 빠르고 발열 시 균일한 열을 얻을 수 있고, 전력 소비는 적으며, 절연성, 내전압에 강하다 [1-4]. 또한 LCD나 OLED 설비 및 태양광 셀 웨이퍼 건조와 소결 공정에 사용되고 있는 IR 히터와 할로겐램프 히터는 제품의 부피가 크고 잦은 교체 주기

로 인해 운영상의 부담을 갖고 있어 적층형 세라믹 히터 적용 필요성이 높아지고 있다.

적층형 세라믹 히터 제작을 위해서는 열 충격에 강한 세라믹 소재 선정이 중요하다. 세라믹 히터로 적용 가능한 소재로는 전기머리인두, 정전척, 자동차용 보조 히터에 적용되고 있는 알루미늄, 저열팽창계수 특성을 지닌 코디어라이트, 열전도도가 높은 AlN (aluminum nitride) 등이 있다 [5-7].

세라믹 소재를 이용하여 tape casting으로 성형한 그린시트 상에 저항이 높은 W, Mo-Mn 저항 발열체 패턴을 스크린 프린터를 사용하여 인쇄한 후 그린시트를 적층하여 고온에서 소결하여 제작한다. 이렇게 제작된 적층형 세라믹 히터가 제품에 적용되기 위해서는 균일한 열 분포 특성이 구현되어야 한다 [8]. 특정 부분으로 전계나 응력이 집중되는 경우 열 충격으로 세라믹 히터가 파손되기 쉽다. 이러한 균일한 열 분포

a. Corresponding author; ydh7@kicet.re.kr

Copyright ©2017 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

특성을 구현하기 위해서는 저항 발열체 패턴 구조 설계가 무엇보다 중요하다. 저항 발열체의 형상 및 패턴 간격에 따라 다양한 열 분포 특성이 구현되므로 최적의 패턴 구조를 위해서는 패턴 형상, 패턴 간격, 패턴 폭을 변화시켜 가며 다양하게 설계할 필요가 있으며, 이들의 최적화를 위한 선행 시뮬레이션 작업이 중요하다 [9]. 시뮬레이션을 통해서 패턴 형상에 따른 열 분포 특성의 경향을 파악할 수 있으며, 세라믹 히터 패턴 최적화를 위한 공정시간을 크게 단축시킬 수 있다.

본 연구에서는 50×50 mm 크기의 적층형 세라믹 히터를 제조하기 위하여 다양한 형상의 전극 패턴 형상 및 간격을 유한요소법에 의한 시뮬레이션을 통해 온도 분포가 균일하며 열 충격에 강한 최적의 전극 패턴을 구현하고자 하였다.

2. 실험 방법

세라믹 히터의 열응력 해석은 상용 소프트웨어인 COMSOL 5.2a를 사용하여 FEM 기법으로 진행하였다. 해석을 위해 DELL사의 PRECISION T7610 (Intel (R) Xeon (R) DUAL CPU E5-2650 v2 @ 2.60 GHz, RAM 192 GB) 워크스테이션을 사용하였다. Auto Cad에서 그려진 전극 패턴 도면을 COMSOL로 불러들여 사용하였고, 세라믹 기판과 텅스텐 전극의 소재 물성 데이터는 COMSOL에서 제공하는 material database를 이용하여 사용하였다. 메쉬는 약 17만 개의 사면체 (tetrahedral element)를 사용했고, 최소 요소 품질 (minimum element quality)는 0.057이었다. 계산을 위해 structural mechanics, heat transfer, AC/DC 모듈을 사용하였으며, 전극 패턴 종류에 따라 차이가 나지만, 평균 10분 이내의 계산 시간이 소요되었다.

세라믹 히터를 제조하기 위하여 코디어라이트 분말에 분산제(BYK-111, BYK Chemie, Germany) 및 유기용매인 에탄올과 톨루엔과 함께 볼밀에 넣고 20시간 동안 원료를 분쇄, 혼합하였다. 1차 볼 밀링한 후 PVB (polyvinyl butyral, BM-SZ, Sekisui, Japan) 바인더와 DBP (dibutyl phthalate, Daejung Chemical and Metals Co. Ltd., Korea) 가소제를 첨가하여 20시간 동안 2차 볼 밀링하여 슬러리를 제조한 후 거품제거기를 통하여 진공상태에서 슬러리 제조 시 생성된 기포를 제거하였다. 기포 제거가 끝난 슬러리는 coater 장비를 이용하여 그린시트 형태로 제조하였다. 이때 슬러리 제조 시 사용된 에탄올, 톨루엔의 유기용매를 4개의 zone

으로 나누어 40~80°C 온도로 건조시켜 casting하였다.

Tape casting으로 성형한 그린시트 상에 텅스텐 paste를 사용하여 저항 발열체 패턴을 스크린 프린터를 사용하여 인쇄한 후 적층기를 이용하여 60°C에서 60 kgf/cm² 압력으로 그린시트를 적층하였다. 여기서 사용된 텅스텐 paste는 중심입경이 1~2 μm이며, 100,000~150,000 cps의 점도를 나타내었다. 적층된 그린바를 탈지용 오븐에서 270°C까지 온도를 올리며 유기물을 burn-out한 후 1,300~1,350°C에서 텅스텐 paste와 코디어라이트 기판을 동시 소성하였다. 이때 텅스텐 전극이 산화되는 것을 방지하기 위하여 N₂, H₂ 가스를 이용하여 환원분위기에서 소결을 진행하였다.

제작된 세라믹 히터의 크기는 50×50 mm이며, 두께는 1.2 mm를 나타내었다. 제작된 세라믹 히터의 발열특성을 측정하기 위하여 220 V 전원을 공급하며 슬라이드 스톱을 이용하여 전압을 변화시켜 가며 전류계와 전압계를 사용하여 발열특성을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전극 패턴 설계 및 시뮬레이션 타당성 검토

그림 1은 시뮬레이션을 위하여 본 연구에서 적용한 서로 다른 형상의 다섯 가지 텅스텐 전극 패턴을 보여

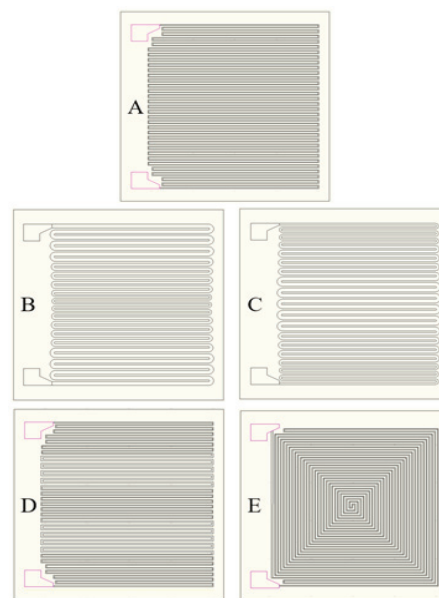
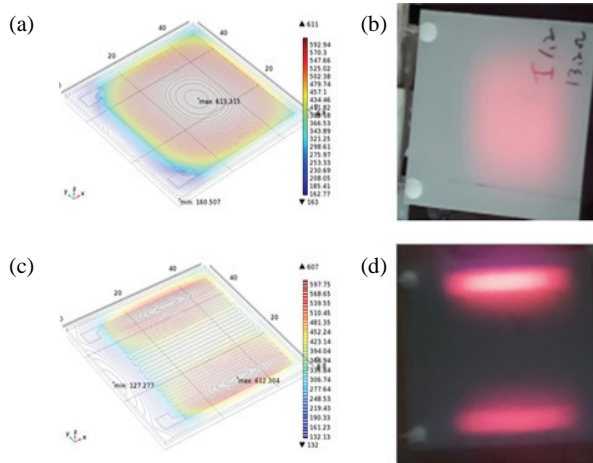


Fig. 1. Layout of electrode patterns for ceramic heater.

Table 1. Design parameter of various electrode patterns.

Pattern code	Maximum line width	Minimum line width
A	20	20
B	100	50
C	150	50
D	50	20
E	20	20

**Fig. 2.** (a) The calculated temperature distribution, (b) the actual temperature distribution the electrode pattern A, (c) the calculated temperature distribution, and (d) the actual temperature distribution of the electrode pattern C.

준다. 전극 패턴은 공통적으로 좌측에 두 개의 단자가 존재한다. 실제 발열이 되는 전극은 동일 선폭을 가지는 A, E 패턴과 선폭이 변하는 B, C, D 패턴 두 종류가 존재한다. 상세한 전극 선폭은 표 1에 정리하였다. 크기는 50×50 mm이고, 두께가 0.96 mm인 세라믹 기판 중앙에 패턴 전극을 위치하도록 하였으며, 세라믹 히터를 제조한 후 시뮬레이션 결과와 비교해 보았다.

그림 2(a)는 전극 패턴 A를 적용하여 세라믹 히터의 온도 분포를 계산한 결과이고, 그림 2(b)는 동일 패턴을 적용하여 제작한 세라믹 히터에 직접 전압을 인가하여, 발열한 세라믹 히터 이미지이다. 측정 결과 세라믹 히터의 중앙부는 610°C 정도의 온도가 측정되어, 시뮬레이션 결과와 근사한 결과를 보였다. 최대 온도를 가지는 발열부는 세라믹 히터의 정중앙부에서 우측으로 좀 벗어난 곳으로 확인되었는데, 이는 발열에 영향을 주지 못하는 단자부의 존재에 기인한다. 그림 2(c)는 전극 패턴 C를 적용하여 세라믹 히터의 온도 분포

를 계산한 결과이고, 그림 2(d)는 동일 패턴을 적용하여 제작한 세라믹 히터에 전압을 인가하여, 발열한 세라믹 히터 이미지이다. 측정 결과 세라믹 히터의 상하 두 부분에서 최고 온도가 측정되었으며, 이 역시 시뮬레이션 결과와 일치하였다. 앞의 두 가지 전극 패턴에 대해, 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과가 명백히 일치하는 것으로 보아 시뮬레이션 모델이 타당함을 알 수 있으며, 이 모델을 적용하여 여러 가지 전극 패턴을 가진 세라믹 히터의 특성을 예측하여도 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 이중 전극 선폭 패턴을 가진 세라믹 히터

이중 전극 선폭의 패턴을 가진 세라믹 히터의 온도 분포와 이에 따른 응력 분포를 계산하였다. 그림 3(a)는 중앙부가 50 μm, 가장자리가 100 μm인 전극 선폭을 갖는 전극 패턴 B를 적용한 히터의 온도 분포이며, 그림 3(d)는 중앙부가 100 μm, 가장자리가 50 μm인 전극 선폭을 갖는 전극 패턴 C를 적용한 히터의 온도 분포이다. 일반적으로 전극 선폭이 작을수록 저항이 높아 발열량이 크므로, 그림 3(a)과 같이 세라믹 히터 중앙부의 온도가 높은 반면, 그림 3(d)는 히터의 좌우 가장자리 온도가 높다. 전극 패턴 B와 C의 열응력 분포 특성을 그림 3(b)와 (e)에 각각 나타내었으며, 전극 패턴 B보다 전극 패턴 C의 가장자리에서 상대적으로 낮은 인장응력이 존재함을 알 수 있었다. 이러한 이유는 기판에서의 온도 기울기에 관련되는데, 세라믹 히터는 가열 시, 전극 패턴이 집중되어 있는 기판 중앙부에 비해 가장자리는 필연적으로 온도가 낮게 되고, 열응력에 의해 기판의 가장자리에는 인장응력이 걸리게 된다. 세라믹 기판 내부 온도의 기울기가 클수록 인장응력의 크기도 커지며, 생성된 인장응력이 소재의 파괴응력을 넘어 서면 세라믹 히터의 파괴가 일어나게 된다 [10]. 전극 패턴 C는 전극 패턴 B보다 가장자리에 존재하는 온도 기울기가 작아 인장응력 크기 또한 작다.

이러한 현상을 좀 더 자세히 알아보기 위해 전극 패턴 B를 가진 세라믹 기판에 수직 및 수평 방향으로 가상의 선을 긋고, 이 가상의 선을 따라 온도 및 응력 변화를 조사하여, 그림 3(c)에 각각 점선과 실선으로 나타내었다. 수직 방향의 가상선(흑색 점선)은 좌우 대칭인 온도 분포가 얻어진 반면, 수평 방향의 가상선(회색 점선)은 비대칭 온도 분포를 보이는데, 이는 앞에서 실험에 의해 관찰된 것과 일치하며, 발열과 무관한 세라믹 히터 단자부의 존재로 기인한다. 수직 방향의 온

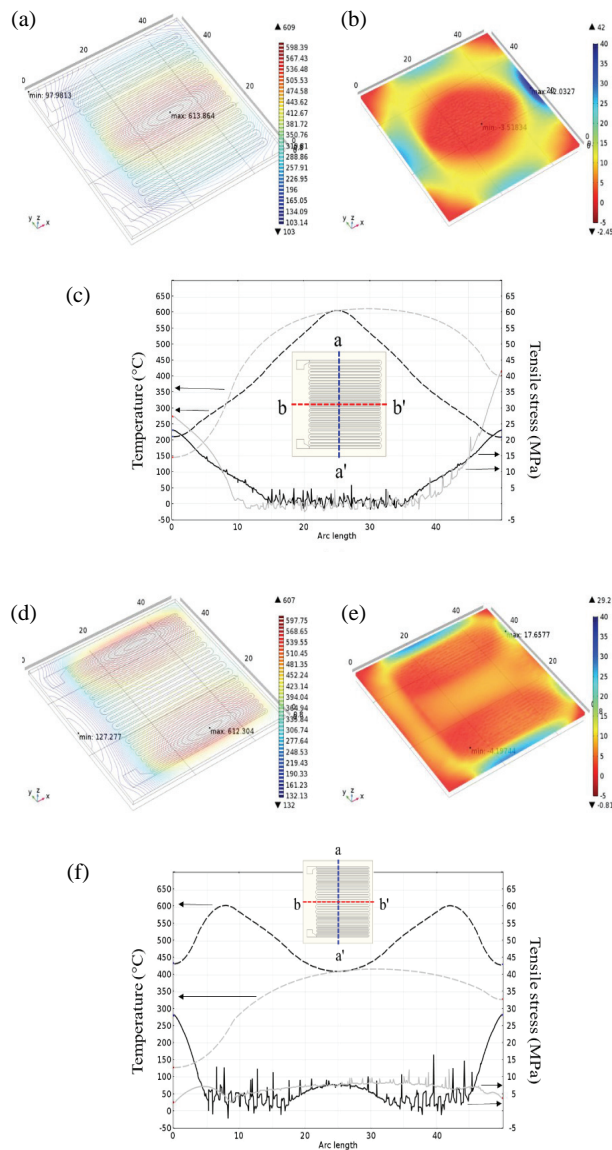


Fig. 3. (a) The temperature distribution, (b) the tensile stress distribution, (c) the temperature and stress variation with respect to the imaginary line of the electrode pattern B, (d) the temperature distribution, (e) the tensile stress distribution, and (f) the temperature and stress variation with respect to the imaginary line of the electrode pattern C.

도 분포를 보면, 최대 600°C인 중앙부에서 최소 150°C인 가장자리까지 450°C 정도의 온도 차이가 존재하여, 중앙부와 가장자리의 온도 편차가 심함을 알 수 있다. 전극 패턴 B에서 최대응력이 걸리는 영역은 가상선 b-b'의 오른쪽 영역인 b'이고, 약 42 MPa의 인장응력이 걸리는데, 이는 이 영역에서 온도 기울기가 가장

급하기 때문이며, 세라믹 히터 작동 시 열 충격 파괴가 시작될 가능성이 크다. 전극 패턴 C를 가진 세라믹 기판에도 동일한 방법으로 가상의 수직 및 수평선을 긋고, 이 가상의 선을 따라 온도 및 응력 변화를 조사하여, 그림 3(f)에 점선과 실선으로 나타내었다. 전극 패턴 C도 세라믹 히터 단자부 영향으로 수평 방향의 가상선(회색 점선)은 비대칭 온도 분포가 관찰된다. 수직 방향의 온도 분포를 보면, 최대 600°C인 이중 피크가 관찰되며, 최소 440°C인 가장자리까지 약 160°C 정도의 온도 차이가 존재하여, 온도 편차가 전극 패턴 B에 비해 개선되었음을 알 수 있다. 전극 패턴 C에서 최대응력이 걸리는 영역은 가상선 a-a'이 끝나는 곳인 a와 a' 영역이고, 약 29 MPa의 인장응력이 걸리는데, 이는 영역에서 온도 기울기가 전극 패턴 B에서의 b' 영역보다 완만하기 때문이며, 열 충격 파괴에 대한 저항이 상대적으로 강할 것으로 추측된다.

3.3 동심 나선형(concentric spiral) 전극 패턴을 가진 세라믹 히터

앞에서 논의한 이중 전극 패턴의 개념을 확장한 전극 패턴 D와 동심 나선형의 전극 패턴 E를 적용하여 온도 균일도 및 열 충격 저항이 향상되는지 살펴보았다. 그림 4(a)는 중앙부와 가장자리가 50 μm이며, 나머지 부분은 100 μm인 전극 선폭을 갖는 전극 패턴 D의 온도 분포이며, 그림 4(d)는 선폭 20 μm의 동심 나선형 전극 패턴 E의 온도 분포이다. 그림 4(a)에서 보면 적은 선폭의 패턴이 존재하는 중앙부 및 좌우 가장자리 영역의 온도가 높은 반면, 그림 4(d)는 패턴 A처럼 중앙부의 온도가 가장 높다. 전극 패턴 D와 E의 열응력 분포를 그림 4(b)와 (e)에 각각 나타내었으며, 두 패턴 모두 가장자리에서 인장응력이 걸림을 알 수 있다.

앞에서와 동일한 방법으로 전극 패턴 D를 가진 세라믹 기판에 수직 및 수평 방향으로 가상의 선을 긋고, 이 가상의 선을 따라 온도 및 응력 변화를 조사하여, 그림 4(c)에 점선과 실선으로 나타내었다. 수직 방향(회색 점선)의 온도 분포를 보면, 최대 600°C인 영역과 최소 400°C인 가장자리까지 약 200°C 정도의 온도 차이가 존재하는 삼중 피크가 관찰된다. 전극 패턴 D에서 최대응력은 그림 4(c)에서 a와 a' 지역이며, 약 26 MPa의 인장응력이 걸려 유사한 패턴을 가진 B, C, D 중 가장 열 충격 파괴에 유리한 구조였다. 전극 패턴 E를 가진 세라믹 기판에도 가상 선을 따라 온도 및 응력 변화를 조사하여, 그림 4(f)에 각각 점선과 실선으

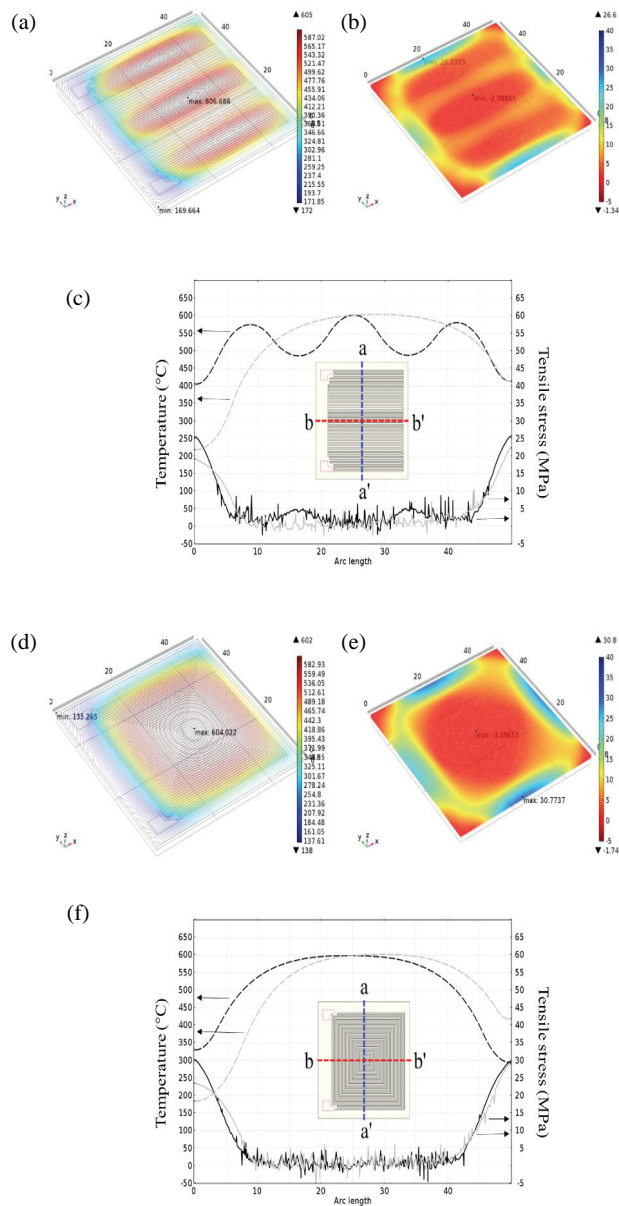


Fig. 4. (a) The temperature distribution, (b) the tensile stress distribution, (c) the temperature and stress variation with respect to the imaginary line of the electrode pattern D, (d) the temperature distribution, (e) the tensile stress distribution, and (f) the temperature and stress variation with respect to the imaginary line of the electrode pattern E.

로 나타내었다. 수직 방향(흑색 점선)의 온도 분포를 보면, 중앙부에 최대 600°C인 피크가 관찰되며, 최소 340°C인 가장자리까지 약 260°C 정도의 온도 차이가 존재하여, 이중 선폭 패턴보다는 온도 편차가 심하였

다. 전극 패턴 E 패턴에서 최대응력이 걸리는 부분은 a와 a' 지역이며, 약 30 MPa의 인장응력이 존재하는데, 앞 절에서 설명했듯이 가장자리 부분에 존재하는 온도 기울기 차이가 원인이며, 전극 패턴 E는 D에 비해 열 충격 파괴에 불리하다.

이상 5가지 패턴에 대해 온도 분포와 응력 분포를 함께 고려한 결과, 전극 패턴 D가 온도 편차는 전극 패턴 C보다 40°C 정도 높아 불리하나, 세라믹 히터의 가장자리에 존재하는 최대 인장응력은 약 26 MPa로 가장 열 충격 파괴에 강한 양상을 보였으며, 전극 패턴 D의 이점을 극대화한 방향으로 패턴 선폭 및 모양을 적용하여 최적화를 진행하여야 할 것으로 사료된다.

3.4 기판 종류에 따른 여러 가지 세라믹 히터

앞에서 가장 우수한 특성을 보인 전극 패턴 D를 기준으로 기판 종류에 따른 온도 및 응력 분포를 살펴보았다. 그림 5(a)는 코티어라이트 기판, (b)는 알루미나 기판, (c)는 AlN 기판의 응력 분포를 보여준다. 세라믹 히터의 최대 온도를 600°C로 유지했을 때, 기판에 걸리는 인장응력은 AlN과 코티어라이트 기판이 각각 23 MPa와 26 MPa를 나타내어 큰 차이가 없었으며, 알루미나 기판은 203 MPa로 약 10배 정도 높게 계산되었다. 식 (1)은 열 충격 계수(thermal shock parameter)를 나타내는 식이고, 표 2에 각각 소재의 물성과 열 충격 계수를 계산하여 정리하였다. 열 충격 계수는 소재의 파괴 강도를 고려하였기 때문에 AlN이 열 충격 저항이 가장 높고, 코티어라이트와 알루미나가 유사한 값을 보였다. 열전도도가 높은 AlN이 가장 좋은 온도 균일도를 보였으며, 코티어라이트의 온도 균일도가 가장 낮았다. 하지만 우수한 특성을 보인 AlN의 경우 대형 기판 제조가 어렵고, 가격이 높아 일반적인 세라믹 히터에 적용하기에는 어려움이 있다. 코티어라이트는 알루미나에 비해 단순한 식 1에 의한 열 충격 계수는 유사한 것으로 계산된다. 하지만 평판 히터의 기하학적 구조를 고려한 시뮬레이션 결과를 보면, 세라믹 히터로 사용 시에는 코티어라이트는 알루미나에 비해 최대 인장 응력이 1/10 수준으로, 상대적으로 높은 알루미나의 파괴 강도를 고려하더라도 코티어라이트가 세라믹 히터의 소재로 더 유리한 것으로 판단된다.

$$R_T = \frac{k(1-\nu)}{\alpha E} \cdot \sigma_T \quad (1)$$

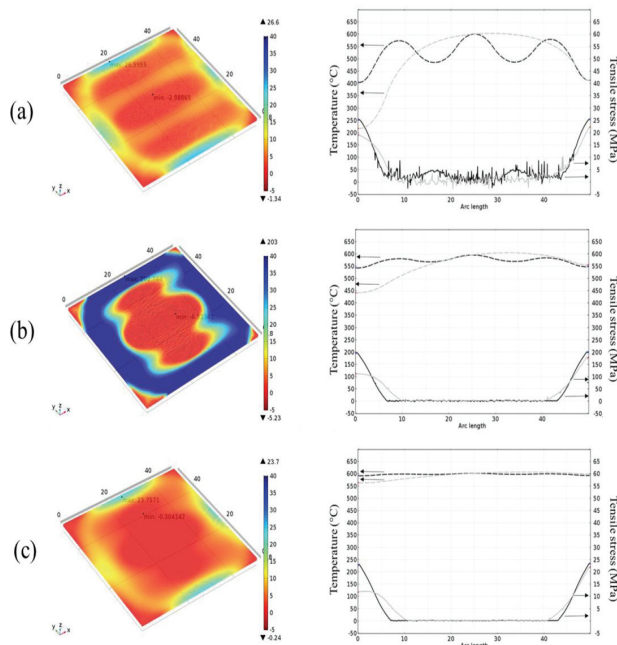


Fig. 5. Overall stress distribution, and temperature and stress change on imaginary lines of (a) cordierite, (b) alumina, and (c) AlN substrates.

Table 2. Properties of ceramic substrates materials and their thermal shock coefficient.

Material	Cordierite	Al ₂ O ₃	AlN
Thermal conductivity (W/(m·K))	3	25	150
Poisson's ratio	0.21	0.21	0.24
Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁶ /K)	1.7	8.2	4.5
Young's modulus (GPa)	70	300	330
Fracture strength (MPa)	117	345	320
RT	2.3	2.8	24.6

4. 결론

- 1) 시뮬레이션을 통해 5가지 전극 패턴을 적용하여 열 분포를 계산한 결과, 코디어라이트 기판에 이중 전극 패턴의 개념을 확장한 전극 패턴 D를 적용하여 세라믹 히터를 약 600°C의 온도로 가열되었을 때, 히터의 가장자리에 약 26 MPa의 인장응력이 존재하여 열 충격 저항성이 가장 우수하였다.
- 2) 세라믹 히터 작동 시 가장자리에 걸리는 응력은 그 영역의 온도 기울기와 관련되어 있었으며, 이를 최소화하는 방향으로 전극 패턴 설계가 필요하다.

- 3) 코디어라이트, 알루미나, AlN 세라믹 소재를 적용하여 세라믹 히터를 시뮬레이션한 결과, AlN이 가장 우수한 특성을 보였으며, AlN과 코디어라이트 세라믹 히터에 걸리는 인장응력 값이 각각 23 MPa와 26 MPa를 나타내어 큰 차이가 없었다. 기판 제조의 난이도와 가격을 고려했을 때는 코디어라이트 소재가 일반 세라믹 히터로 가장 적합한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2017년도 중소기업기술혁신사업(No.S2458685)의 연구 수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

REFERENCES

- [1] K. A. Peterson, K. D. Patel, C. K. Ho, S. B. Rohde, C. D. Nordquist, C. A. Walker, B. D. Wroblewski, and M. Okandan, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, **2**, 345 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2005.02039.x>]
- [2] H. Liu, Q. Qu, Q. Pan, Y. Wu, C. Huang, L. Li, M. Yu, and L. Guo, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **24**, 7700204 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2013.2287278>]
- [3] N. M. Alford, J. Breeze, X. Wang, S. J. Penn, S. Dalla, S. J. Webb, N. Ljepojevic, and X. Aupi, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **21**, 2605 (2001). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(01\)00324-7](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(01)00324-7)]
- [4] D. G. Cahill, *Rev. Sci. Instrum.*, **73**, 3701 (2002). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1141498>]
- [5] T. Kojima, Y. Kuroki, and K. Yanagi, *U.S.* **5895591 A**, 20 April, 1999.
- [6] G. A. Cogotsi, V. P. Zavada, and F. Ya. Kharitonov, *Strength Mater.*, **16**, 1651 (1984). [DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01537992>]
- [7] X. Ding and J. J. Frye, *U.S.* **6929974 B2**, 16 August, 2005.
- [8] W. K. Jones, Y. Liu, and M. Gao, *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, **26**, 110 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2003.811475>]
- [9] B. Souhir, G. Sami, C. S. Hekmet, and K. Abdennaceur, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **17**, 189 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2016.17.4.189>]
- [10] G. A. Gogotsi, *Ceramurgia Int.*, **6**, 31 (1980). [DOI: [https://doi.org/10.1016/0390-5519\(80\)90030-7](https://doi.org/10.1016/0390-5519(80)90030-7)]