

# 가전 제품용 세라믹 히터의 수명 및 고장 원인에 대한 연구

최형석<sup>†</sup>

한국세라믹기술원, 융합사업단 시뮬레이션팀

## Study of Life Prediction and Failure Mechanisms of Cramic Heater for Home Appliance

Hyoungseuk Choi<sup>†</sup>

Conversions R&D Division, Simulation Team, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology

**Purpose:** The purpose of this research is to establish the life test method for ceramic heater and identify the failure mechanisms.

**Methods:** We do accelerated life test in the condition of thermal shock and failure analysis for failed samples.

**Conclusion:** The main failure mechanisms of ceramic heater are identified as overstress failure mechanisms as results of failure analysis and the shape parameters of weibull distribution by accelerated life test are identified as 0.8, 1.2 and 0.4 each at 400 °C, 600 °C and 900 °C. At 900 °C, the shape parameter 0.4 means that It is exactly initial failure caused that the stress exceeds the strength of ceramic heater highly and the shape parameters 0.8, 1.2 at 400 °C, 600 °C means that the shape parameters are around 1.0 so that the main failure mechanism is overstress failure which is same result as failure analysis. It means that the appropriate life test method for ceramic heater is reliability qualification test method rather than accelerated life test.

**Keywords:** Ceramic, Heater, Overstress Failure Mechanism, Thermal Shock

### 1. 서론

#### 1.1 연구의 배경

세라믹히터는 세라믹 자체의 발열 특성을 가지는 소재는 아니다. 세라믹히터는 <Fig. 1(a)>와 같이 세라믹 기관으로 만들어진 단순한 형태의 히터이다. 내부 구조는 <Fig. 1(b)>와 같이 내부의 금속 발열 전선과 두 개의 세라믹 평판으로 구성되어 있다. 세부적인

구조로는 텅스텐 또는 팔라듐 열선을 알루미늄 기관 위에 프린팅한 후에 다른 기관을 위에 덮은 뒤 소결하여 열선이 외부 공기에 완전히 밀폐되어 고온 산화가 발생하지 않도록 한다. 이와 같은 단순한 구조의 세라믹히터는 900 °C의 고온까지 온도를 올릴 수 있으며 저렴한 가격과 높은 내구성으로 산업계에서 널리 사용되고 있다. 세라믹 히터는 단순한 구조에 일반 열선 히터로 불가능한 고온 발열이 가능하고 승온 속도도

<sup>†</sup> 교신저자 hschoi@kicet.re.kr

2017년 10월 23일 접수; 2017년 11월 9일 수정본 접수; 2017년 11월 22일 게재 확정.

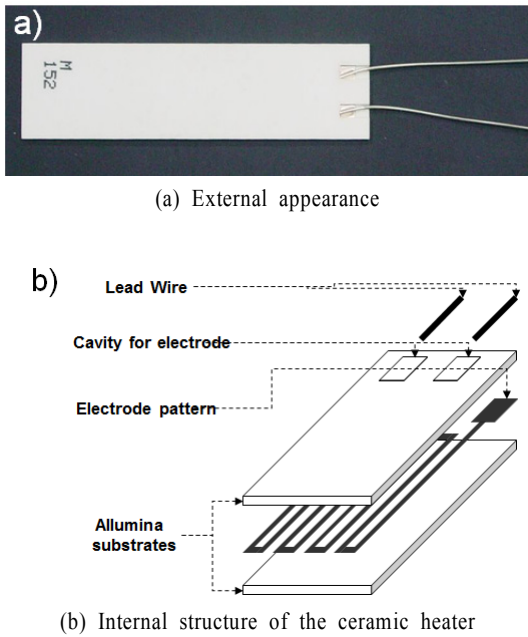


Fig. 1 Photographs of ceramic heater

빠르기 때문에 가정용 고대기, 자동차용 에어 히터 등 산업계에 많이 사용되고 있다. 그러나, 세라믹 특유의 열적, 기계적 충격에 약하다는 단점 때문에 응용에 상당한 제약을 받고 있다. 따라서, 신뢰성 평가를 통하여 신뢰성을 개선하고 정확한 수명을 예측할 수 있다면 산업계의 응용이 더욱 확대되는데 도움이 될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 가전용 세라믹히터의 수명 특성과 고장 메커니즘에 대해 알아본다.

1.2 잠재고장 메커니즘

세라믹 기판으로는 고순도 알루미나( $Al_2O_3$ ) 소결체를 사용하였다. 알루미나 내에 기공이나 균열 등의 결함은 응력을 집중시켜 파괴의 원인이 된다[1]. 따라서 고순도 알루미나를 사용하면 내부 불순물 등에 의해 발생할 수 있는 결함이나 기공 등을 최소화할 수 있으므로 고온에서 동작하는 세라믹히터의 용도에 적합하다. 고순도 알루미나는 열응력과 기계적 응력에 강하다는 장점이 있다. 만약 알루미나 내에 결함이 있다면 <Fig. 2>와 같은 잠재적인 고장원인을 가지게 된다. 전원의 ON/OFF로 인해 세라믹히터는 가열과 냉각이 반복되게 되며 알루미나 기판의 두께나 밀도 등이 위치에 따라 다르다면 자체적으로 부분적인 변

형을 반복하게 된다. 표면에 존재하는 핀홀이 내부의 금속 패턴과 연결되어 있을 경우 내부 패턴은 공기와 맞닿아 순간적으로 산화가 진행되어 열응력을 발생하게 된다. 이 산화 때문에 단선이 되며 열응력 때문에 알루미나의 파괴가 진행된다. 또한 알루미나 내부에 기공, 균열이 있다면 이 또한 굽힘시 응력의 집중이 발생하여 알루미나 파괴의 원인이 된다[2-6]. 전극 패턴과 알루미나 사이에 박리(Delamination)가 있다면 이 박리는 굽힘시 전파되어 최종적으로 두 개의 알루미나가 분리되는 원인이 된다[7-8]. <Fig. 2>는 이러한 잠재적인 고장 메커니즘을 도식화한 것이다 <Fig. 2(a)>는 세라믹히터 기판의 밀도, 두께 등의 불균일 때문에 발생한 굽힘에 의하여 기판에 가해지는 외부 스트레스이며 <Fig. 2(b)>는 핀홀 및 균열 등에 의하여 열점(Hot spot)이 생성되면 이를 중심으로 균열이 전파되어 내부 스트레스가 감소하는 경우이다. <Fig. 2(c)>는 Pinhole이 고온 동작에서 산화된 모습이다. <Fig. 2(d)>는 실제 사용 중 파괴된 세라믹 히터의 모습이다.

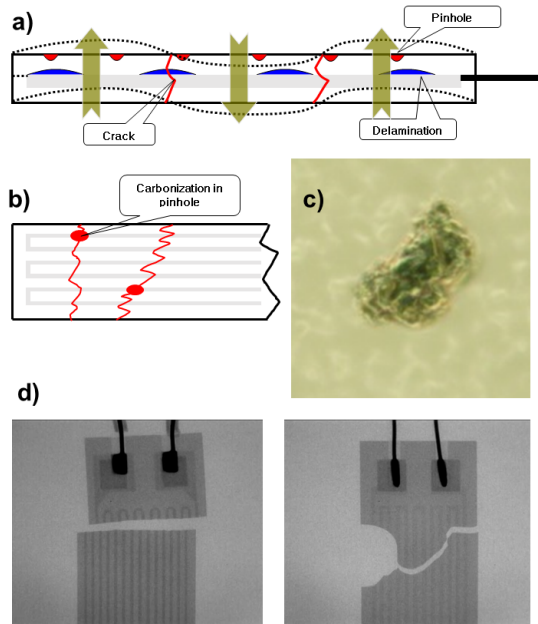


Fig. 2 Failure modes of ceramic heater: (a) bending of ceramic heater during thermal shock, (b) carbonization caused by pinhole and (c) its image, (d) crack caused by delamination

## 2. 실험

### 2.1 수명 시험 계획

제1.2절에서 확인한 잠재 고장메커니즘을 기반으로 <Table 1>, <Table 2>와 같이 2수준 품질기능전개(2 Level Quality Function Deployment: QFD)를 수립하였다. 품질기능전개의 결과 자체 발열에 의한 열충격 시험이 Field 고장을 가장 많이 재현할 수 있는 것으로 파악되었다. 따라서 자체발열 열충격 시험을 가속수명시험법으로 채택하고 이를 위한 시험 장비를 제작하였다. <Fig. 3>은 수명 시험 장비이다. 전압은 일반적으로 세라믹히터에 적용되는 AC 전압을 적용하였다. 온도 조절기를 통하여 세라믹 히터에 들어가는 전류를 조정한다. 조정된 전류는 각 세라믹히터를 동작시켜 자체 열충

격을 발생시킨다. <Table 3>은 가속수명시험 계획이다. 열충격 가속으로 저온은 상온(Room temperature), 고온은 각각 400℃, 600℃, 900℃로 정하였다. 저항이 ±5% 이상 변할 경우 고장으로 판단하였다. <Fig. 4>는 각 온도에서의 세라믹히터의 온도 프로파일이다. 최고 온도만 다를 뿐 각 온도당 상승 프로파일은 동일하다는 것을 알 수 있다. 또한, 자체 열용량이 작은 관계로 온도가 급속하게 상승하고 급속하게 하강하는 것을 알 수 있다. 이러한 빠른 반응성이 세라믹히터의 장점이지만 자체 열충격을 극대화시키기 때문에 신뢰성 측면에서는 단점이 될 수 있다. 다른 종류의 전기-열 세라믹스 소재와는 달리 세라믹히터는 세라믹스 자체적으로 발열하는 전기-열 세라믹스는 아니다. 따라서, 가속수명시험 거동도 다른 소재와는 다르다는 것이 예상된다.

**Table 1** Two-level quality function deployment for ceramic heater Requirements(stresses and performance) and failure mode matrix mark depending on the relation with reliability

Failure modes/Mechanism Requirements(Stress and Performance)		Crack	Void	Open	Delamination
		Performance	Electrical properties	-	◎
Calorific value	△		◎	△	◎
Temperature distribution	○		△	-	◎
Stress	Humidity: max 95%	-	△	◎	-
	Temp: -40~80℃	○	◎	△	◎
	Vibration/Shock	◎	○	△	○
Life	Life Time: 10 year	○	◎	◎	○
Score		14	14	18	18

◎ most important: 5, ○ important: 3, △normal: 1.

**Table 2** Two-level quality function deployment for ceramic heater Failure modes and test methods matrix Mark depending on the relation with reliability

Test methods Failure modes/Mechanism		Environment test						Life test
		Insulation resistance	Voltage withstand	cold resistance	Heat resistance	Sault spray	Vibration	ON/OFF thermal cycle
Crack	15	◎	◎	○	○	-	○	◎
Void	25	-	○	○	○	-	△	◎
Open	13	△	△	-	△	◎	-	○
Delamination	22	-	-	○	○	-	-	◎
Score		88	162	186	199	65	70	349
Ranking		5	4	3	2	7	6	1

◎ most important: 5, ○ important: 3, △normal: 1.

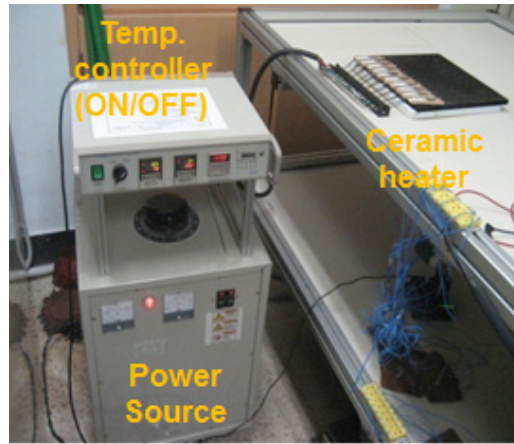


Fig. 3 Accelerated life test setup for ceramic heater

Table 3 Accelerated life test conditions(3 levels)

Run	Factor	Surface temperature	Number of specimen
1		900 °C	5
2		600 °C	5
3		400 °C	5

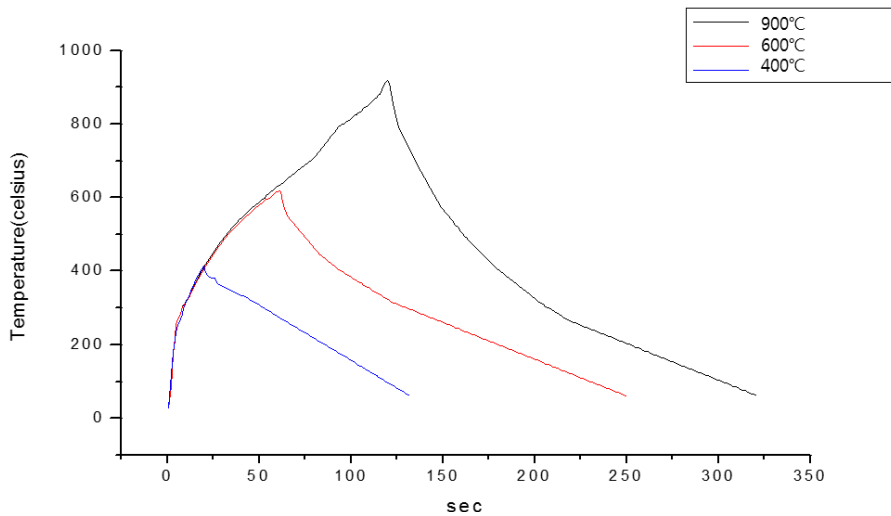


Fig. 4 Temperature profiles of ceramic heater depending on the different maximum temperature

### 3. 결과

#### 3.1 수명 시험

<Fig. 5>는 세라믹히터의 가속수명시험 결과이다. 열충격 사이클의 최고 온도를 400 °C, 600 °C, 900 °C 3

조건으로 각각 5개의 시료로 시험하였으며 각각 형상 모수가 0.8, 1.2, 0.4 Weibull 분포를 보여서 세 조건의 형상 모수가 일정하지 않았다. 3조건에서의 형상 모수가 달라 가속성이 성립되지 않는 것이 확인이 되었다.

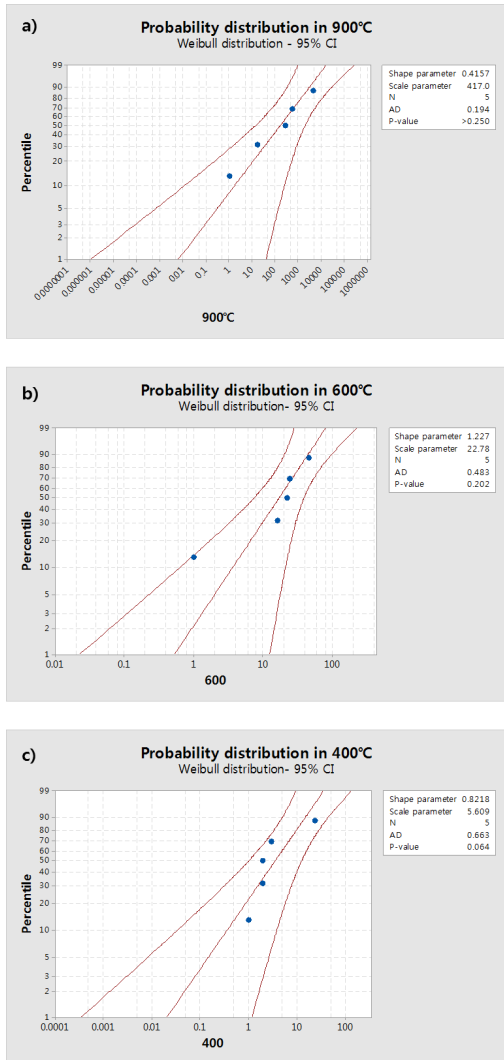


Fig. 5 Accelerated life test results for ceramic heater tested at (a) 400°C, (b) 600°C and (c) 900°C

### 3.2 고장 분석

가속수명시험 결과 주요 고장 모드는 세라믹 부분의 파괴로 나타났다. 정확한 고장 메커니즘을 규명하

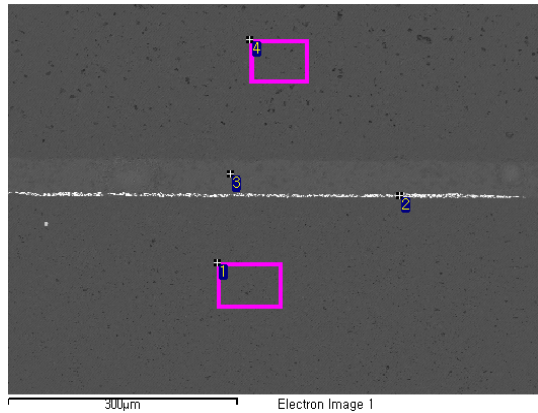


Fig 6 Cross section of ceramic heater

기 위하여 열화상 측정, 초음파 측정, SEM 분석 등을 수행하였다. <Fig. 6>은 세라믹 히터의 단면이며 <Table 4>는 <Fig 6>의 각 부분의 EDS 성분 분석 결과이다. <Fig. 6>의 2번 부분이 텅스텐 발열체 부분이며 3번 부분은 상하부 알루미늄소재의 접합 부분이다. 1, 4번 부위는 알루미늄 판넬이다. 총 3개 부분의 소재가 이종 접합된 구조이다 여기서 3번 부위의 세라믹 접착제와 알루미늄 기판의 열팽창 계수 차이에 의한 스트레스가 발생할 수 있으며 세라믹접합이 불완전할 경우 산소의 유입에 의한 텅스텐 발열체의 산화가 발생하여 궁극적으로는 세라믹히터의 파단을 야기할 수 있다.

<Fig. 7>과 <Fig. 8>은 접합 불량에 중축과 횡축으로 발생한 시료의 고장 발생 과정이다. <Fig. 7(a)>, <Fig. 8(a)>는 초음파 탐상기로 측정된 세라믹히터의 모습이다. C-scan으로 분석하였으며 흰 부분이 투과 부분이고 투과가 잘 되었다는 것은 접합이 잘 되었음을 의미한다. 검은 부분이 박리가 발생한 부분이다. <Fig. 6(b)>, <Fig. 7(b)>는 열화상 카메라로 측정된 온도 분포이다. 접합 부분이 양호한 부분은 온도가 높으나 박리가 발생한 부분은 온도의 전파가 약한 것을 알 수 있다. 따라서 온도 구배가 형성되며 <Fig. 7(c)>,

Table 4 Components analysis data using SEM/EDS

Spectrum	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Sr	W	Total
1	60.14		38.87	0.99					100.00
2	3.65						4.66	91.69	100.00
3	57.97		33.03	7.76	0.91	0.33			100.00
4	59.62	0.26	38.95	1.17					100.00

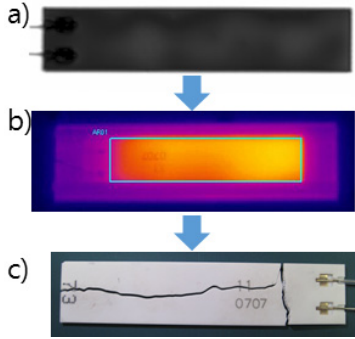


Fig. 7 Delamination failure mechanism in vertical axis analyzed by a) SAM b) thermo trace c) visual inspection

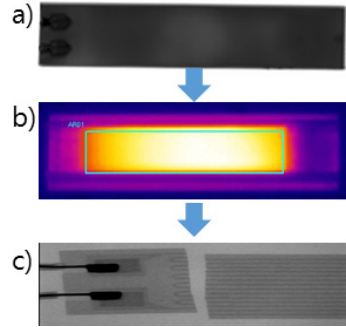


Fig. 8 Delamination failure mechanism in transverse axis analyzed by a) SAM b) thermo trace c) visual inspection

<Fig. 8(c)>는 이러한 시료들의 파단 모습입니다. 각 종축 온도 구배가 있는 시료는 종적으로 파단되며 횡적으로 온도 구배가 있는 시료는 횡축 방향으로 파단되는 것을 알 수 있다. 따라서 박리가 온도 구배를 야기하고 온도 구배가 열충격에 의한 파괴를 야기하는 것을 알 수 있다.

<Fig. 9>는 기타 고장 제품에 대한 비파괴 분석 결과이다. <Fig. 9(a)>는 Pin hole에 의한 산화로부터 시

작된 크랙 전파이며 <Fig. 9(b)>~<Fig. 9(e)>는 내부 박리에 의한 절연 저항 약화로 인한 인접 패턴과의 단락에 의해 발생한 고장이다. 또한 간헐적으로 <Fig. 98(f)>와 같이 납땜 부위의 고장이 발생함을 알 수 있었다. 대체로 내부 균열, 핀홀에 의한 산소의 유입 및 산화에 의한 단선이 주 고장 모드이다 주 고장 원인이 우발 고장성이므로 세라믹의 특성 및 가속수명시험 결과와 잘 일치됨을 알 수 있다.

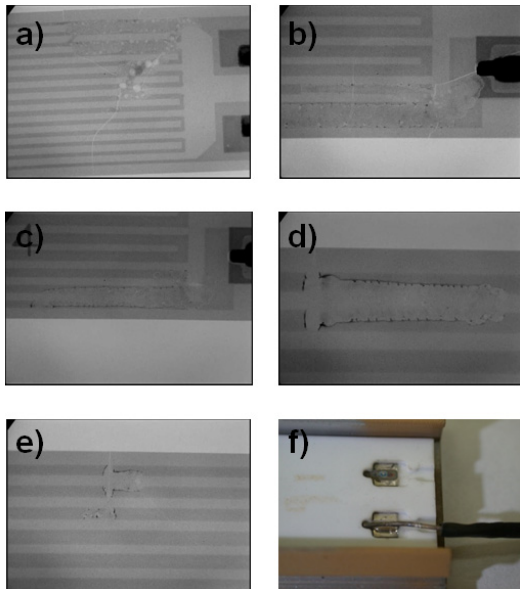


Fig. 9 Failure modes after accelerated life test: (a) crack by hotspot, (b) crack by hotspot and short, (c) short, (d) short, (e) short, and (f) open of electrode

#### 4. 토의

형상 모수가 1보다 작은 경우는 마모 고장, 우발 고장보다는 초기 고장이 많은 경우이다 즉, 스트레스-강도 관계에서 스트레스가 설계치보다 높거나 제품의 품질이 너무 안 좋을 경우 나타나는 그래프이다 여기서 900℃에서 가속수명시험 결과 형상 모수가 0.4인 것은 지나치게 높은 온도 때문에 세라믹히터의 강도보다 외부 스트레스가 높기 때문에 초기 고장이 많이 발생하였기 때문으로 판단된다. 즉, 실사용 조건에서의 고장메커니즘이 아닌 다른 고장메커니즘이 발생한 것이다. 400℃, 600℃에서의 형상 모수는 0.8, 1.2로  $1 \pm 0.2$ 의 값을 가진다. 이는 시험상의 오류를 감안하면 형상 모수 1로 판단된다. 형상 모수 1은 Weibull 분포에서 지수함수로 수명 분포가 바뀔을 의미한다 지수함수는 전형적인 우발 고장의 수명 분포로서 400℃, 600℃ 두 수준의 형상 모수가 1인 것은 세라믹히터의 고장 모드가 우발 고장임을 보여주는 것이다[9]. 세라믹히터의 특성상 마모 고장이 발생할 여지는 적다. 세

라믹기판 자체가 강성이 높아서 마모되거나 피로가 쌓이기 전에 파괴되는 특성을 가지기 때문이다 또한 열선 패턴도 산소와 닿는 즉시 산화되기 때문에 열화될 가능성은 없다. 따라서, 우발 고장 패턴을 가질 것으로 예상되며 가속수명시험도 같은 결과를 보여주고 있다. 따라서, 세라믹히터의 경우에는 가속 모델을 세울 수가 없는 것으로 판단된다. 외부 스트레스를 높일 경우 다른 고장 모드가 발현되기 때문이다 따라서, 이럴 경우 외부 스트레스를 높여 가속을 하기 보다는 온도 사이클의 주기를 단축시키는 방향으로 가속수명시험을 수행하는 것이 합리적이다

## 5. 결론

본 연구에서는 가전제품용 세라믹 히터의 가속수명 시험을 시행하였다. 가속수명시험 결과 마모성 고장보다는 열충격에 의한 우발성 고장이 주로 발생하여 가속수명시험이 적합하지 않음을 확인하였으며 사이클 가속 방법이 적합함을 알 수 있었다. 따라서, 발체시험 방법의 보증 수명 시험 방법이 세라믹히터에는 맞을 것으로 판단된다. 이와 함께 고장 분석을 통하여 세라믹 히터의 고장이 우발 고장성임을 증명하였다

## References

- [1] Kingery, W. D. (1960). "Introduction to Ceramics". John Wiley & Sons.
- [2] Lamon, J. (1990). "Ceramics Reliability: Statistical Analysis of Multiaxial Failure Using the Weibull Approach and the Multiaxial Elemental Strength Model". *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 73, No. 8, pp. 2204-2212.
- [3] Miyazakia, H., Iwakiri, S., Hirao, K., Fukuda, S., Izu, N., Yoshizawa, Y., and Hyuga, H. (2017). "Effect of high temperature cycling on both crack formation in ceramics and delamination of copper layers in silicon nitride active metal brazing substrates". *Ceramics International*, Vol. 43, No. 6, pp. 5080-5088.
- [4] Kee, R. J., Almand, B. B., Blasi, J. M., Rosen, B. L., Hartmann, M., Sullivan, N. P., and Martin, J. L. (2011). "The design, fabrication, and evaluation of a ceramic counter-flow microchannel heat exchanger". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 11-12, pp. 2004-2012.
- [5] Lee, G. C. and Garino, J. P. (2011). "Reliability of ceramic components". *Seminars in Arthroplasty*, Vol. 22, No. 4, pp. 271-275.
- [6] Pietranico, S., Pommier, S., Lefebvre, S., Khatir, Z., and Bontemps, S. (2009). "Characterisation of power modules ceramic substrates for reliability aspects". *Microelectronics Reliability*, Vol. 49, No. 9-11, pp. 1260-1266.
- [7] Dupont, L., Khatir, Z., Lefebvre, S., and Bontemps, S. (2006). "Effects of metallization thickness of ceramic substrates on the reliability of power assemblies under high temperature cycling". *Microelectronics Reliability*, Vol. 46, No. 9-11, pp. 1766-1771.
- [8] Meftah, M., Ebrahimpour, P. B., He, C., Ranawat, A. S., and Ranawat, C. S. (2011). "Short-term wear analysis and clinical performance of large ceramic heads on highly cross-linked polyethylene in young and active patients". *Seminars in Arthroplasty*, Vol. 22, No. 4, pp. 225-228.
- [9] Hall, P. L. and Strutt, J. E. (2003). "Probabilistic physics-of-failure models for component reliabilities using Monte Carlo simulation and Weibull analysis: a parametric study". *Reliability Engineering & System Safety* Vol. 80, No. 3, pp. 233-242.