



비접촉식 방법을 이용한 세라믹 박판의 휨 측정 연구

이효동^{1,2}, 문예원^{1,2}, 오지희^{2,3}, 김진애^{2,3}, 이준우³, 구상모³, 이동원² , 오종민³ 

¹ 한양대학교 재료화학공학과

² 한국산업기술시험원 재료기술센터

³ 광운대학교 전자재료공학과

초록: 세라믹 박판은 높은 기계적 강도와 열전도성으로 인해 연료전지 및 방열 기판과 같은 다양한 첨단 기술 분야에서 널리 활용되고 있다. 그러나 세라믹 박판의 두께가 얇아지는 추세에 따라 휨 현상이 증가하게 되며, 이는 제품의 품질과 신뢰성에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 세라믹 박판의 휨을 이해하고 정확히 측정하는 것이 점점 더 중요해지고 있다. 본 연구에서는 고체 산화물 연료전지의 반셀(양극/전해질) 구조를 가진 세라믹 박판의 면적과 두께를 변화시켜 휨을 측정하기 위해 비접촉식 측정 기법인 광 절단법을 적용하였다. 이를 통해 박판의 물리적 특성과 뒤틀림 간의 상관관계를 분석하였다. 또한, 기존 측정 방법인 접촉식 측정 과정 중 압축 하중으로 인해 발생할 수 있는 뒤틀림 오차를 평가하기 위한 비교 분석을 수행하였다. 마지막으로 비접촉식 측정 방법의 신뢰성을 검증하기 위해 광 절단법, 레이저 변위 측정법, 광학 공초점법, 백색광 간섭 등 네 가지 비접촉식 측정 기술을 활용하여 방향에 따른 뒤틀림 데이터를 비교하였다. 아울러, 접촉식 측정 방법을 통해 얻은 결과와 평균 휨 값을 비교 분석하였다. 이를 통해 비접촉식 측정 방법의 우수성과 높은 신뢰성을 입증하였다.

키워드: 세라믹 박판, 휨, 비접촉식 측정방법, 휨 측정

Study on Warpage Measurement of Ceramic Thin Plates Using Non-Contact Methods

Hyo-Dong Lee^{1,2}, Ye-Won Moon^{1,2}, Ji-Hui Oh^{2,3}, Jin-Ae Kim^{2,3}, Jun-Woo Lee³,
Sang-Mo Koo³, Dong-Won Lee², and Jong-Min Oh³

¹ Department of Materials Science & Chemical Engineering, Hanyang University, Seoul 15588, Korea

² Material Technology Center, Korea Testing Laboratory, Seoul 08389, Korea

³ Department of Electronic Materials Engineering, Korea Testing Laboratory, Seoul 01897, Korea

(Received March 6, 2025; Revised March 13, 2025; Accepted March 17, 2025)

Abstract: Ceramic thin plates are widely utilized in various advanced technologies, such as fuel cells and heat dissipation substrates, due to their high mechanical strength and thermal conductivity. However, the trend of thinning ceramic plates increases warpage, which can critically affect product quality and reliability. Therefore, understanding and accurately measuring this warpage has become increasingly important. In this study, a non-contact measurement method, the light sectioning technique, was applied to measure the warpage of thin ceramic plates with a half-cell (anode/electrolyte) structure for solid oxide fuel cells (SOFC) by varying their area and thickness. The relationship between the physical properties of the thin plates and the warpage was analyzed. Additionally, a comparative analysis was conducted to evaluate warpage errors caused by compressive loads during the traditional contact measurement process. Finally, to verify the reliability of the non-contact measurement method, four types of non-contact measurement techniques - light sectioning technique, laser displacement measurement, optical confocal technique, and white-light interferometry technique - were used to compare warpage data by orientation. The results were also compared with those from contact measurement methods to analyze the average warpage values. Through this, the superiority and high reliability of the non-contact measurement method were demonstrated.

Keywords: Ceramic thin plates, Warpage, Non-contact methods, Warpage measurement

✉ Dong-Won Lee; dwlee@ktl.re.kr
Jong-Min Oh; jmOH@kw.ac.kr

Copyright ©2025 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.

세라믹 박판은 높은 기계적 강도, 굽힘 저항성, 우수한 탄성 그리고 탁월한 열전도성을 갖추고 있어 연료전지, 고온수전해기, 방열기판, 전력 모듈 등 다양한 첨단 기술에서 중요한 역할을 하고 있다 [1].

그러나 이러한 세라믹 박판 제품은 제조 과정에서 균열 및 결함, 소성 수축 등과 같은 여러 문제에 직면하며, 특히 소재간 열팽창계수(coefficient of thermal expansion, CTE)의 차이에 의해 발생하는 휨(warping) 문제는 제품의 품질과 신뢰성에 치명적인 영향을 미치는 중요한 문제로 대두되고 있다 [2].

예를 들어, 전기화학적 에너지 변환 기술에 사용되는 고체산화물 수전해기(SOEC)와 고체산화물 연료전지(SOFC)는 연료극, 전해질, 공기극 등을 소성하여 제조되는데, 이때 CTE 차이로 인하여 생기는 휨은 재료에 미세 균열을 일으킬 수 있으며, 연료전지 구동 중 열사이클 과정에서 발생하는 균열은 전체 스택에 대하여 치명적인 손상을 가해 결과적으로 수명단축과 같은 문제를 일으킨다 [3,4].

PCB (printed circuit board), AMB (active metal brazed), DBC (direct bonded copper) 기판과 같이 반도체 실장에 사용되는 세라믹을 활용한 박판에서도 휨은 계면 박리(interfacial delamination), 피로 균열(fatigue cracking) 및 실장된 전자 패키지와와의 뒤틀림으로 인한 솔더 조인트 균열과 같은 여러 형태의 결함을 유발한다 [5-7].

세라믹 박판이 고전압 전력 모듈로써 사용될 경우, 혹독한 작동 환경에서 안정적인 성능이 요구되는데, 박판에서 발생한 휨은 전력 모듈 내 균열, 계면 박리, 접합 결함 등을 유발하여 신뢰성을 저하시키며 안정적인 성능을 구현할 수 없다는 문제점이 있다 [8,9].

상기의 세라믹 박판의 휨 문제점을 해결하기 위해서 휨 해석 및 억제에 대한 연구개발 [10-12]과 함께 휨을 정확하게 측정하는 기술이 연구되어 왔으며, 특히 제품의 신뢰성 확보 및 품질관리를 위해서 휨을 정확하게 측정하는 다양한 연구들이 개발되어 왔다.

초기 연구에서는 두꺼운 세라믹 박판의 휨을 측정하기 위해 프로브(probe)를 사용해 측정을 진행하는 접촉식 방법을 사용하여 측정하였다 [13,14]. 그러나 최근 다양한 첨단 산업에 사용되는 세라믹 기판은 점점 얇아지는 추세를 보이고 있으며, 특정 제품에서는 방열 성능 개선 등을 위해 더 넓은 면적을 채택하려는 경향을 보이고 있다 [15-17].

이러한 경향성은 접촉식 측정 중 프로브로 인한 좌중(compressive load)이 제품에 가해져 실제 시료의 형상과 달리 휨 오차를 발생할 수 있다. 접촉식 방법의 휨 오차를 개선하기 위해 시료 측면을 카메라로 촬영하거나 눈금자를 이용하여 측정하는 방법, 곡률 반경을 계산하여 휨을

측정하는 방법 등 다양한 방법들이 연구되어 왔다 [18-21].

그러나, 눈금자와 카메라를 활용한 방법은 약 1 mm의 낮은 분해능으로 인해 오차가 발생하며, 곡률 반경을 계산하는 방식은 전체 휨 형상을 파악하기 어렵고 단편적인 데이터를 바탕으로 휨을 파악해야 하는 한계를 보였다. 최근에는 휨 형상이 복잡해지고 다양해짐에 따라 단편적인 변위 곡선을 기반으로 한 기존의 방법의 한계를 극복하고자 기판의 휨 형상을 전체적으로 파악할 수 있는 3D 측정 방식에 대한 필요성이 대두되었다.

따라서 본 연구에서는 휨을 정확하게 측정할 수 있는 비접촉식 방법을 소개하고, 접촉식 및 비접촉식 방법을 사용해 세라믹 박판의 휨을 측정하여 세라믹 박판의 두께 및 크기에 따른 휨 크기의 상관관계를 분석하였다. 이를 위해, 비접촉식 측정 방법 중 하나인 광 절단 방식과 프로브를 이용한 접촉식 방법을 사용하여 세라믹 박판의 크기 및 두께에 따른 세라믹 박판의 휨을 비교하였다.

또한, 다양한 비접촉식 측정 방법을 활용하여 세라믹 박판의 휨을 측정하고, 이를 비교 분석하여 세라믹 박판의 휨을 정확하게 측정할 수 있는 비접촉식 측정 방법을 제시하였다.

세라믹 박판의 휨을 측정하기 위해 고체산화물연료전지 하프셀(anode/electrolyte) 구조를 갖는 세라믹 박판을 사용하였다. 세라믹 박판의 두께와 휨과의 상관관계를 확인하기 위해 $120 \times 120 \text{ mm}^2$ 크기를 가지면서 두께가 0.5 mm, 0.7 mm, 0.9 mm, 1.0 mm, 1.25 mm, 1.5 mm, 1.8 mm, 2.0 mm인 8종의 세라믹 박판을 사용하였다. 세라믹 박판 크기와 휨과의 상관관계를 확인하기 위해 동일한 두께(1.0 mm)를 가지면서 크기가 $20 \times 20 \text{ mm}^2$, $40 \times 40 \text{ mm}^2$, $60 \times 60 \text{ mm}^2$, $80 \times 80 \text{ mm}^2$, $100 \times 100 \text{ mm}^2$, $120 \times 120 \text{ mm}^2$ 인 6종의 세라믹 박판을 사용하였다.

세라믹 박판의 휨 측정을 위해서 우선 비접촉식 방법을 이용하여 전체 휨 형상을 3D로 측정하였다. 세라믹 박판의 방향별로 휨 프로파일을 획득하기 위해 그림 1(a)와 같이 시료의 중심을 통과하면서 종방향, 횡방향, 대각선 방향으로 시료의 형상을 측정하였다.

휨 크기를 계산하기 위해 시료 윗면의 각 방향별 변위 곡선에서 최고점과 최저점을 측정한 후, 시료의 최대 높이(H_{max})와 최소 높이(H_{low})의 변위 차이를 이용하여 식 (1)와 같이 계산하였다.

$$Warping_{direction} = H_{max} - H_{low} \quad (1)$$

또한 그림 1(b)에서 보이는 것과 같이 세라믹 박판의 3D 형상에서 휨 크기 계산은 시료의 최대 높이(H_{max})와 최소

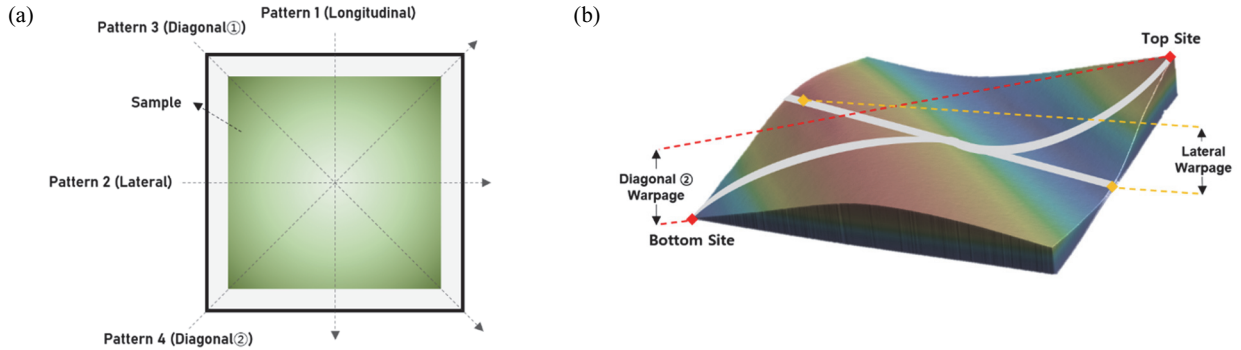


Fig. 1. Methods for quantifying warpage measurements: (a) Axis setting method in 2D representation and (b) example of warpage measurement in a 3D representation.

높이(H_{low})의 변위 차이를 이용하여 식 (2)와 같이 계산하였다.

$$Warpage_{total} = H_{max} - H_{low} \quad (2)$$

접촉식 방법을 이용한 세라믹 박판의 힘 측정은 프로브를 사용하여 종방향, 횡방향, 대각선 방향으로 10개의 높이를 측정한 다음 방향별로 세라믹 박판의 프로파일을 획득한 후 식 (1)을 사용하여 힘을 계산하였다.

비접촉식 힘 측정 방법은 표면 형상을 분석하는 방식에 따라 다양한 기법으로 구분된다. 대표적인 방법으로 광 삼각 측정 방법, 공초점 측정 방법, 간섭현상 활용한 측정법이 있으며, 각 방법은 광원의 종류, 데이터 수집 방식 등에 따라 세분화된다.

광 삼각 측정 방법은 측정 방식에 따라 광 절단 방식(light sectioning technique)과 레이저 변위 측정 방식(laser displacement measurement technique)으로 나뉜다. 광 절단 방식은 일반적으로 레이저 다이오드를 활용하여 광면(light plane)을 시료에 투사하여 생성된 프로파일과 미리 설정된 레이저 광원과 카메라의 배열을 이용하여 시료의 3차원 형상을 측정하는 방식이다 [22,23]. 반면, 레이저 변위 측정 방식은 레이저를 사용하여 시료 표면의 힘을 측정하기 위해 반사된 빛 정보를 수집하여 시료의 표면 형상을 구성하는 방식이다 [24,25].

공초점 측정 방법은 광원에 따라 레이저 공초점 방식(laser confocal technique)과 광학 공초점 방식(optical confocal technique)으로 구분되며, 두 방식 모두 지정한 스캔 영역을 나누어 공초점 필터를 통해 시료의 힘 윤곽을 캡처하고 이를 통합하여 전체 힘 프로파일을 제공하는 방식이다 [24].

간섭현상 활용 방법은 모아레 무늬 방식(Moiré fringe

technique), 레이저 위상 차 방식(laser phase-shift technique), 백색광 간섭계 방식(white-light interferometry technique) 등으로 구분되며 간섭현상(interference effect)을 활용해 시료 표면의 변위 차이를 파악하는 방식이다 [24,26].

그림 2는 일반적으로 많이 사용되는 4가지의 비접촉식 방법을 나타낸 그림이다. 이번 연구에서 그림 2에 나타난 광 절단 방식(light sectioning technique), 레이저 변위 측정 방식(laser displacement measurement technique), 광학 공초점 방식(optical confocal technique), 백색광 간섭계 방식(white-light interferometry technique)을 사용하여 측정한 데이터간 비교를 진행하였다. 또한, 표 1에는 표면 형상을 분석하는 방법에 따라 분류한 상기 4가지 종류의 비접촉식 방법에 대한 정보를 정리하였다.

세라믹 박판의 두께별 힘 형상을 비교하기 위해 0.7 mm에서 2.0 mm까지 다양한 시료를 선정하여 광 삼각 측정 방법 중에 하나인 광 절단 방법을 이용하여 측정한 결과를 나타내었다.

그림 3은 세라믹 박판의 두께를 변화시켜가며 힘을 측정한 결과를 나타낸다. 그림 3(a)는 힘 크기를 contour를 통해 보여주고 있다. 박판의 두께가 2.0 mm에서 0.7 mm로 감소함에 따라 식 (2)에 의해 산출된 힘 크기가 0.469 mm에서 2.366 mm로 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

그림 3(b)는 3차원 형상으로부터 종방향, 횡방향, 대각선 방향으로 힘 형상을 프로파일한 그래프이다. 그래프를 통해 두께가 감소함에 따라 힘이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 종방향 및 횡방향 대비 대각선 방향에서 힘 값이 증가한 것을 알 수 있으며, 두께가 0.7 mm, 1.0 mm, 1.5 mm인 세라믹 박판은 가운데가 볼록한 캠버(camber) 형태를 띄는 반면 두께가 2.0 mm인 세라믹 박판은 볼록일한 힘 형상을 가지는 것을 확인할 수 있다.

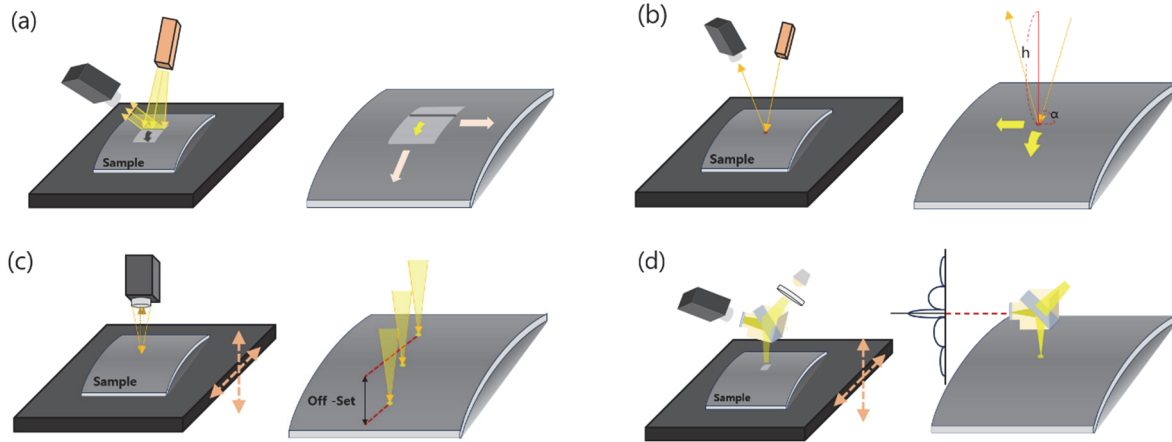


Fig. 2. Non-contact measurement principles and measurement processes categorized by surface shape analysis method: (a) light sectioning technique, (b) laser displacement measurement technique, (c) optical confocal technique, and (d) white-light interferometry technique.

Table 1. Non-contact measurement classified by surface shape analysis method.

	Light sectioning	Laser displacement	Confocal	Interferometer
Resolution	Within 1 μm	Within 1 μm	Within 0.01 μm	Within 0.01 μm
Full-profile measurement	Yes	Selectively Yes	Yes	Yes
Advantage	Capable of measuring large areas	Possibility of rapid measurement	High resolution	High resolution
Disadvantage	Relatively low resolution	Selectively possible of full profile analysis	Possibility of noise at the corners	Size limitations Need for surface finish
Previous research	[22], [27], [28], [29]	[30], [31], [32]	[33], [34]	[35], [36], [37]

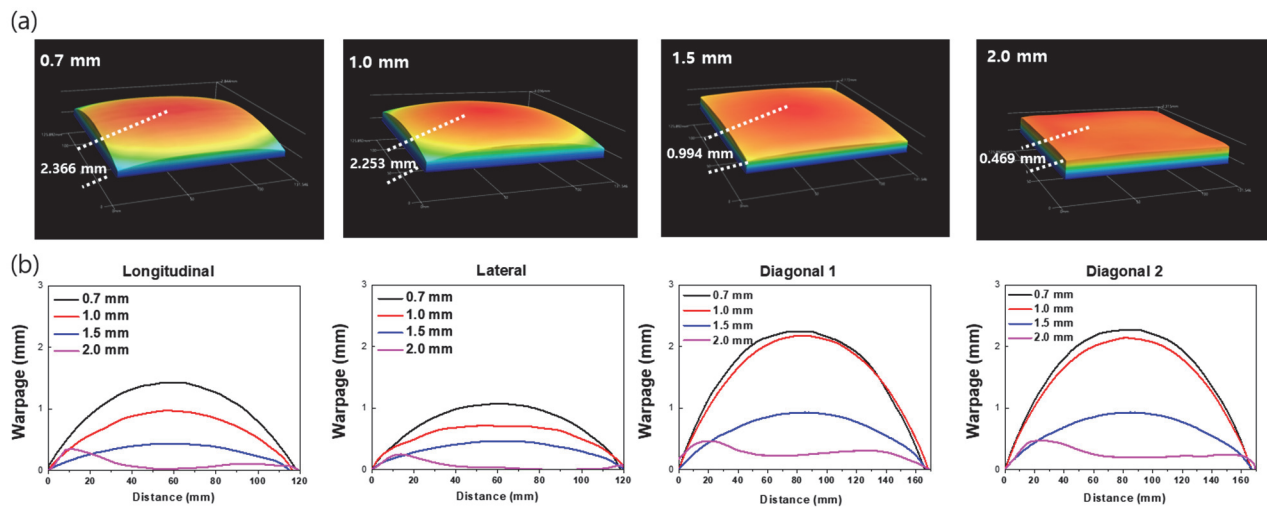


Fig. 3. Warpage as a function of ceramic substrate thickness: (a) 3D profiles and (b) directional 2D displacement curves.

다음으로 세라믹 박판의 크기에 따른 휨 현상을 분석하기 위해 면적이 다른 세라믹 박판을 대상으로 광 절단 방법을 이용하여 휨을 측정하였다.

그림 4(a)는 세라믹 박판의 면적을 변화시키며 휨 크기를 contour를 통해 보여준다. 해당 결과에서 볼 수 있듯이 박판의 면적이 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 에서 $120 \times 120 \text{ mm}^2$ 로 넓어질수록 식 (2)에 의해 산출된 휨 값이 0.046 mm에서 2.347 mm로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4(b)는 3차원 형상으로부터 종방향, 횡방향, 대각선 방향으로 휨 형상을 프로파일한 그래프이다. 그래프를 통해 종방향 및 횡방향에 비해 대각선 방향에서 휨 크기가 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 이하인 세라믹 박판들은 종방향, 횡방향 및 대각선 방향의 휨 크기 차이가 0.012 mm 이하로 방향별로 큰 차이가 없지만, 면적이 $120 \times 120 \text{ mm}^2$ 인 세라믹 박판은 종방향과 횡방향의 휨 크기 차이는 0.437 mm로 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

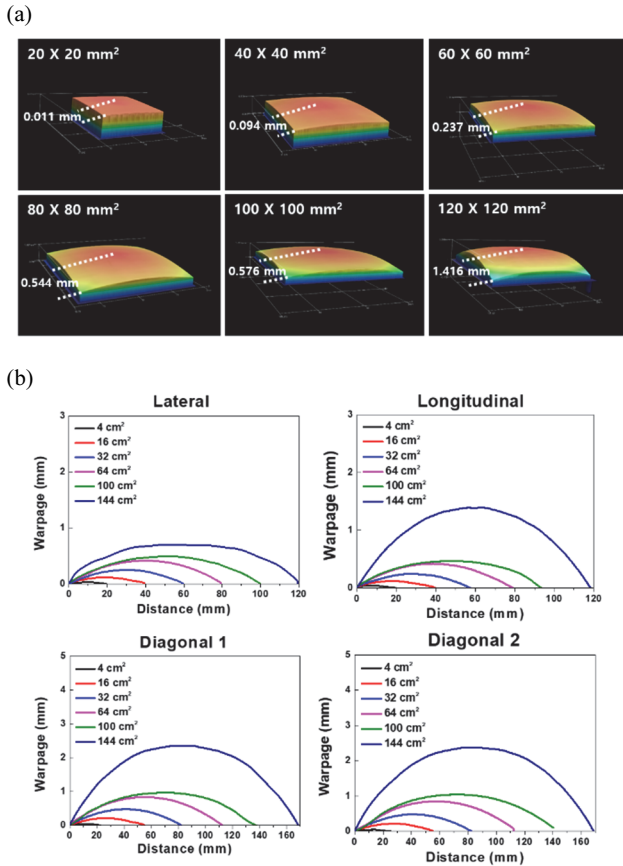


Fig. 4. Warpage based on the area of ceramic substrates: (a) 3D profiles and (b) directional 2D displacement curves.

휨 현상은 제조 과정에서 열과 압력 및 소재의 CTE 차이 등으로 인해 박판이 휘는 현상이 발생하며, 시료의 두께가 감소하고 면적이 넓어질수록 휨이 증가하는 경향을 가지는 것으로 알려져 있다 [21,38-40]. 그림 3과 그림 4의 결과에서 확인할 수 있듯이 세라믹 박판 역시 얇은 두께 및 넓은 면적을 가진 제품을 제조할 경우 이종 소재 간의 CTE 차이 등으로 인해 휨이 증가한 것으로 판단된다.

그림 5는 접촉식 및 비접촉식 방법을 이용하여 세라믹 박판의 두께 및 크기에 따른 휨을 비교분석한 결과를 보여준다. 접촉식 측정 방법의 경우 시료의 최고점을 파악하는데 한계가 있으므로 각 방향 휨의 평균 값을 구하여 비교를 진행하였다.

그림 5(a)는 박판의 두께가 2.0 mm, 1.8 mm, 1.5 mm, 1.25 mm, 1 mm, 0.9 mm, 0.7 mm, 0.5 mm로 점진적으로 감소하는 8개의 시료에 대하여 접촉식과 비접촉식 측정 방법을 활용하여 휨을 측정 및 비교한 결과이다. 그래프를 통해 두께가 감소할수록 두 측정 방법 간의 측정값의 차이가 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

그림 5(b)는 측정 데이터를 바탕으로 두께에 따른 휨 오차 변화를 나타낸 그래프로, 두께가 2.0 mm에서 0.5 mm로 감소함에 따라 휨 오차가 0.039 mm에서 0.5235 mm로 증가하였다.

그림 5(c)는 세라믹 박판의 크기를 $20 \times 20 \text{ mm}^2$, $40 \times 40 \text{ mm}^2$, $60 \times 60 \text{ mm}^2$, $80 \times 80 \text{ mm}^2$, $100 \times 100 \text{ mm}^2$, $120 \times 120 \text{ mm}^2$ 로 변화시키며 접촉식과 비접촉식 측정 방법을 활용하여 휨을 측정 및 비교한 결과이다. 그래프를 통해 면적이 증가할수록 휨이 증가하는 경향과 접촉식 측정 방법과 비접촉식 측정 방법 간의 측정값의 차이가 점차 커지는 경향을 확인할 수 있다.

그림 5(d)는 면적에 따른 휨 오차 변화를 나타낸 그래프이다. 면적이 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 일 때 0.002 mm의 휨 오차를 보였으며 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 까지는 0.052 mm로 점진적인 휨 오차가 증가하였다. 그러나 면적이 $120 \times 120 \text{ mm}^2$ 로 증가할 경우 휨 오차가 0.291 mm로 급격하게 증가하였다.

상기의 결과들을 통해 세라믹 박판의 두께가 감소하고 면적이 증가할수록 접촉식 방법으로 측정 시 휨 오차 (warpage error)가 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 세라믹 박판이 점점 얇아지고 대면적화될수록 접촉식 방법을 이용한 휨 측정 시 신뢰성 있는 측정 값을 얻기 어렵다는 것을 알 수 있다. 따라서 세라믹 박판의 신뢰성 있는 휨 측정 결과를 확보하기 위해서는 비접촉식 측정 방법을 이용하는 것이 접촉식 측정보다 적절하다는 것을 확인할 수 있었다.

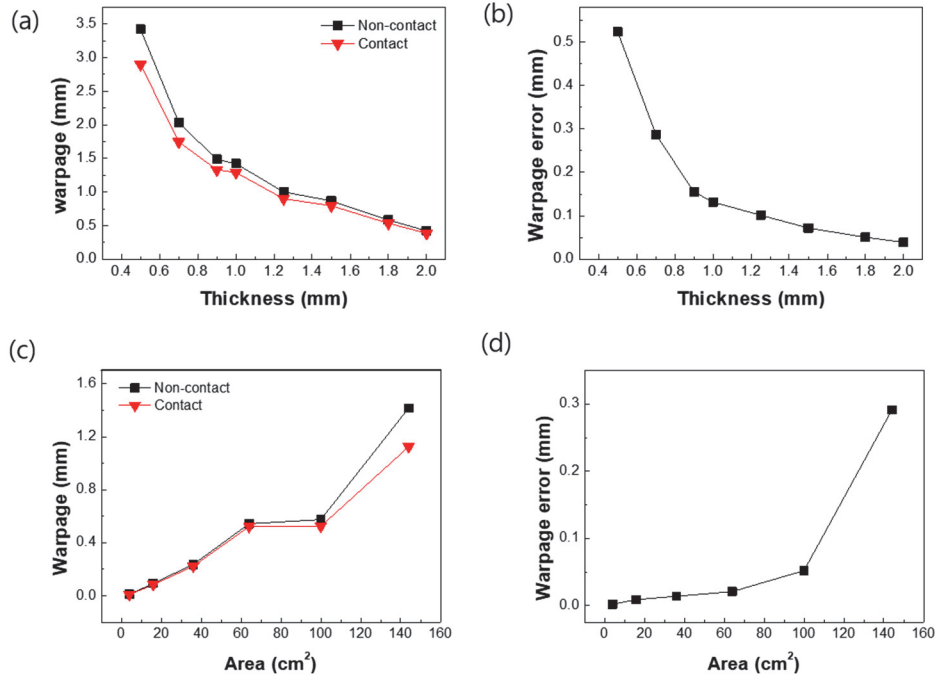


Fig. 5. Comparison of contact and non-contact measurement methods for ceramic substrates: (a) warpage comparison based on thickness, (b) warpage error by thickness, (c) warpage comparison based on area, and (d) warpage error by area.

비접촉식 방법간 힘 측정을 비교분석하기 위해 표면 형상 분석 방법에 따라 네 가지의 비접촉식 방법(광 절단 방식, 레이저 변위 측정 방식, 광학 공초점 방식, 백색광 간섭계 방식)을 이용하여 $120 \times 120 \text{ mm}^2$ 크기와 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm의 두께를 가진 세라믹 박판을 대상으로 힘을 측정하였다.

그림 6(a)는 네 가지 비접촉식 방법을 이용하여 박판의 종 방향, 횡 방향, 대각선 방향의 힘을 측정한 결과를 나타낸다. 네 가지 비접촉식 방법 모두 방향별로 미소한 힘 측정값 차이는 존재하였으나, 오차범위 $\pm 0.030 \text{ mm}$ 내에서 유사한 값을 보였다. 이를 통해 네 가지 비접촉식 측정 방법간 결과가 일관되며, 신뢰성 있는 측정이 가능함을 확인할 수 있었다.

그림 6(b)는 네 종류의 비접촉식 방법과 접촉식 방법을 이용하여 두께가 다른 세 종류의 세라믹 박판의 힘을 비교 분석한 결과이다. 비접촉식 측정 방법을 활용하여 측정한 평균 힘은 네 종류의 비접촉식 방식 모두 오차범위 $\pm 0.030 \text{ mm}$ 내에서 유사한 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

접촉식 방법을 이용하여 힘 측정 시 비접촉식 측정 방법과 비교하였을 때 프로브의 좌중으로 인한 영향으로 평균 힘 값이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 결과적으로 비접촉식 힘 측정은 좌중의 영향을 받지 않아 높은 신뢰성을

가지며, 접촉식 방법을 활용할 경우 접촉식 프로브의 좌중으로 인해 세라믹 박판의 두께가 감소할수록 힘 오차가 증가할 가능성이 크므로, 비접촉식 측정방법이 우선적으로 고려되어야 한다.

결과적으로 비접촉식 방법 간의 힘 측정값은 높은 신뢰성을 가지며, 접촉식 방법을 활용할 경우 접촉식 프로브의 좌중으로 인해 세라믹 박판의 두께가 감소할수록 힘 오차가 커질 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서는 접촉식 및 비접촉식 방법을 이용해 세라믹 박판의 두께 및 면적과 힘의 상관관계를 분석하였다. 첫 번째로 세라믹 박판의 두께와 힘을 비교 분석한 결과 접촉식 및 비접촉식 방법 모두 세라믹 박판의 두께가 감소할수록 힘이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 접촉식 방법을 사용할 경우 박판의 두께가 감소함에 따라 힘 오차(warpage error)가 증가하는 것을 확인하였다. 두 번째로 세라믹 박판의 면적과 힘을 비교 분석한 결과 두 방법 모두 세라믹 박판의 면적이 증가할수록 힘이 증가하는 경향을 보였으며 접촉식 방법의 경우 면적이 증가함에 따라 힘 오차가 증가하는 것을 확인하였다. 마지막으로 네 종류의 비접촉식 방법(광 절단 방식, 레이저 변위 측정 방식, 광학 공초점 방식, 백색 광간섭계 방식)간 측정 값을 비교한 결과 유사한 힘 측정값을 얻었으며, 접촉식 측정 시 발생하는 좌중

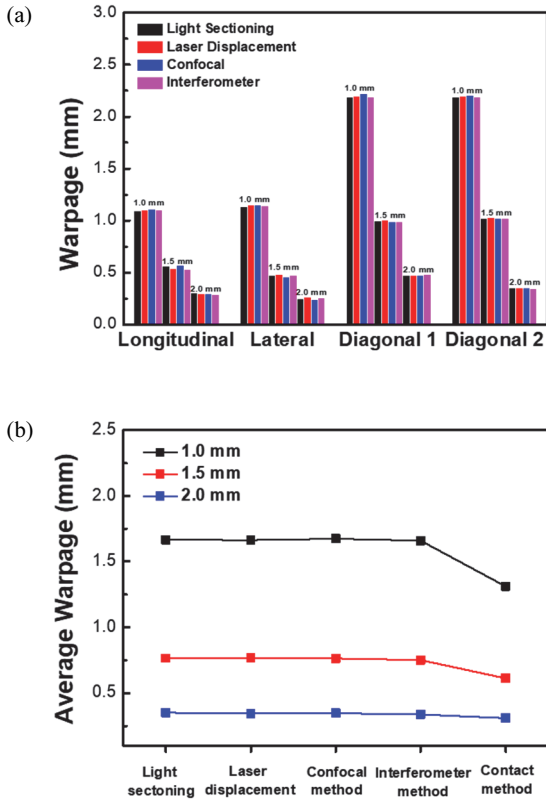


Fig. 6. Comparison of results between measurement methods: (a) comparison of non-contact measurement methods based on measurement direction and (b) comparison of the average measured values between non-contact and contact bending methods.

(compressive load)의 영향을 받지 않아 왜곡 없는 정확한 힘 측정 방법임을 확인하였다.

결과적으로 세라믹 박판이 얇아지고 대면적화됨에 따라 힘 및 뒤틀림을 정밀하게 측정하는 연구의 중요성이 더욱 커지고 있으며, 본 연구를 통해 비접촉식 측정 방법이 보다 신뢰성 있는 힘 측정을 제공할 수 있음을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 향후 실제 세라믹 박판 제품의 공정 조건 변화와 같은 힘 문제 개선 연구에서 보다 정밀한 분석이 가능하도록 하는 측정 방식을 제시하며, 관련 연구의 발전에 기여할 것으로 기대된다.

ORCID

Dong-Won Lee
Jong-Min Oh

<https://orcid.org/0000-0003-0730-2442>
<https://orcid.org/0000-0001-6303-2876>

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 소재부품기술개발 사업 (No.RS-2024-00432123), 산업통상자원부 한국산업기술진흥원 화합물전력반도체 전문인력양성사업(RS-2025-02214408), 과학기술정보통신부 한국연구재단 기초연구사업(No.RS-2023-00212985) 지원 및 2025년도 광운대학교 우수연구자 지원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

Reference

- [1] Y. Chang, X. Yao, Y. Chen, L. Huang, and D. Zou, *Compos. B Eng.*, **254**, 110584 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110584>
- [2] Korean Standards Association, *KS C IEC TR 62878-2-8* (KSA, 2021).
- [3] X. M. Zhang, J. G. Zhu, and W. L. Li, *J. Power Energy Eng.*, **10**, 54 (2022).
doi: <https://doi.org/10.4236/jpee.2022.105004>
- [4] J. Malzbender, W. Fischer, and R. W. Steinbrech, *J. Power Sources*, **182**, 594 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.04.035>
- [5] D. H. Kim, S. J. Joo, D. O. Kwak, and H. S. Kim, *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, **6**, 1667 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2016.2612637>
- [6] D. Li, Z. Ma, H. Yang, C. Xin, and Q. Wang, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **182**, 108737 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108737>
- [7] F. Bechtol, *Proc. Eur. Microelectron. Packag. Conf. (EMPC, 2009)*.
- [8] F. Hou, W. Wang, L. Cao, J. Li, M. Su, T. Lin, G. Zhang, and B. Ferreira, *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, **8**, 223 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2947645>
- [9] Y. Liu, Y. Liu, Z. Yuan, T. Chen, K. Lee, and S. Belani, *Proc. IEEE Electron. Compon. Technol. Conf.*, (IEEE, Las Vegas, NV, USA, 2013) p. 6575614.
doi: <https://doi.org/10.1109/ECTC.2013.6575614>
- [10] Z. Lan, D. Cui, M. Cheng, Y. Ji, B. Wu, T. Meng, and B. Tu, *Int. J. Hydrogen Energy*, **47**, 25378 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.290>
- [11] S. Zhang, H. Yang, K. Gao, L. Yan, X. Pang, and A. A. Volinsky, *Microelectron. Reliab.*, **98**, 49 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.04.025>
- [12] Y. R. Kim, S. K. Kang, S. D. Kim, and S. E. Kim, *Microelectron. Eng.*, **89**, 46 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2011.01.079>
- [13] M. Frewein, T. Krivec, Q. Tao, J. Zuendel, J. Rosc, M.

- Gschwandl, and P. F. Fuchs, *Proc. 20th Int. Conf. Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems* (IEEE, Hannover, Germany, 2019) p. 1.
doi: <https://doi.org/10.1109/EuroSimE.2019.8724518>
- [14] Korean Standards Association, *KS D 0259* (KSA, 2012).
- [15] B. K. Park and S. A. Barnett, *J. Mater. Chem. A*, **8**, 11626 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1039/D0TA04280C>
- [16] L. Blum, W. A. Meulenber, H. Nabielek, and R. Steinberger-Wilckens, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, **2**, 482 (2005).
doi: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2005.02049.x>
- [17] C. Zhang, C. Chen, Y. Zhang, Y. Yan, and Y. Kang, *IEEE Access*, **10**, 125735 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3225657>
- [18] J. H. Lau, M. Li, L. Yang, M. Li, I. Xu, T. Chen, S. Chen, Q. X. Yong, J. P. Madhukumar, W. Kai, N. Fan, E. Kuah, Z. Li, K. H. Tan, W. Bao, S. P. Lim, R. Beica, C. T. Ko, and C. Xi, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, **8**, 1729 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2848666>
- [19] K. Azari, Y. A. Vaghasloo, J. A. Mohandesi, and A. H. Ghobadzadeh, *J. Power Sources*, **279**, 64 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.12.147>
- [20] C. S. Ng and A. K. Asundi, *Phys. Procedia*, **19**, 9 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.06.119>
- [21] J.W.Y. Kong, J. K. Kim, and M.M.F. Yuen, *IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf.*, **26**, 245 (2003).
doi: <https://doi.org/10.1109/TEPM.2003.820806>
- [22] F. Pernkopf and P. O'Leary, *NDT E Int.*, **36**, 609 (2003).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(03\)00081-1](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(03)00081-1)
- [23] B. D. Bradley, A.D.C. Chan, and M.J.D. Hayes, *Proc. IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.* (IEEE, Victoria, Canada, 2008) p. 299.
doi: <https://doi.org/10.1109/IMTC.2008.4547050>
- [24] G. Sun and S. Zhang, *Microelectron. Reliab.*, **160**, 115456 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2024.115456>
- [25] Y. S. Suh, *Sensors*, **19**, 1924 (2019).
doi: <https://doi.org/10.3390/s19081924>
- [26] S. Kang and I. C. Ume, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, **3**, 1533 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2013.2255054>
- [27] T. Takatsuji, A. Kirita, and T. Kurosawa, *Meas. Sci. Technol.*, **8**, 782 (1997).
doi: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/7/013>
- [28] G. Häusler and W. Heckel, *Appl. Opt.*, **27**, 5165 (1988).
doi: <https://doi.org/10.1364/AO.27.005165>
- [29] W. Zhang, H. Zhao, and X. Zhou, *Opt. Eng.*, **49**, 123601 (SPIE, 2010).
doi: <https://doi.org/10.1117/1.3516729>
- [30] Y. Zhou, Z. Wu, N. Cai, D. Zhan, S. Xu, M. Chen, G. Zhou, and H. Wang, *Micromachines*, **14**, 1555 (2023).
doi: <https://doi.org/10.3390/mi14081555>
- [31] G. Cheng, L. Luo, G. Xu, and H. Yang, *Mater. Electron.*, **30**, 11136 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01456-0>
- [32] C. Zhu, *Mater. Electron.*, **31**, 16531 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04207-8>
- [33] S. Fu, F. Cheng, T. Tjahjowidodo, Y. Zhou, and D. Butler, *Sensors*, **18**, 2657 (2018).
doi: <https://doi.org/10.3390/s18082657>
- [34] C. Cai, K. Pan, J. Yang, and S. Park, *Proc. IEEE Intersoc. Conf. Therm. Thermomech. Phenom. Electron. Syst.* (IEEE, Orlando, FL, USA, 2020) p. 945.
doi: <https://doi.org/10.1109/ITherm45881.2020.9190235>
- [35] K. Grochalski, D. Podbereska, M. Wieczorowski, R. Talar, and W. Graboń, *Mater.*, **17**, 2918 (2024).
doi: <https://doi.org/10.3390/ma17122918>
- [36] H. C. Kandpal, D. S. Mehta, and J. S. Vaishya, *Opt. Lasers Eng.*, **34**, 139 (2000).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(00\)00098-1](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(00)00098-1)
- [37] M. Y. Tsai, C.H.J. Hsu, and C.T.O. Wang, *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, **27**, 568 (2004).
doi: <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2004.831817>
- [38] K. Azari, J. A. Mohandesi, and Y. A. Vaghasloo, *J. Power Sources*, **301**, 326 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.10.016>
- [39] J. H. Lau, M. Li, D. Tian, N. Fan, E. Kuah, and W. Kai, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, **7**, 1729 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2017.2715185>
- [40] J. Zhao, Z. Chen, F. Qin, and D. Yu, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **34**, 1790 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-023-11185-0>