

내열 세라믹 용기의 인덕션 가열을 위한 전자기 유도용 도전 소재의 제조 공정에 따른 특성 평가

이준우¹, 오지희², 김용남², 구상모¹, 이동원² , 오종민¹ 

¹ 광운대학교 전자재료공학과

² 한국산업기술시험원 재료기술센터

A Study of Conductive Materials and Performance Comparison According to the Manufacturing Process for Induction Heating Ceramics Container

Jun-Woo Lee¹, Ji-Hui Oh², Yong-Nam Kim², Sang-Mo Koo¹, Dong-Won Lee², and Jong-Min Oh¹

¹ Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

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

(Received June 10, 2024; Revised June 20, 2024; Accepted June 21, 2024)

Abstract: Recently, as environmental issues caused by gas stoves have led to the widespread adoption of induction appliances, specialized cookware for induction is essential. However, due to the inability of ceramic containers to be directly used on induction cooktops, a conductive coating is required on the bottom of the cookware, presenting limitations such as complex deposition processes and extended coating times in existing methods including thermal spraying, dip coating, and transcription method. We confirmed the potential of heat-resistant cookware for induction use by coating the bottom of the ceramic container with Ag through a simple manufacturing process of screen-printing and measuring its thermal conductivity and reliability. The Ag-coated ceramic cookware produced by screen-printing demonstrated similar thermal conductivity and reliability to those made using the traditional method of transfer printing. In addition, the adhesive strength before and after thermal shock testing was even superior in the screen-printing method, which suggests a higher expected lifespan. As a result, it is expected that induction-compatible heat-resistant ceramic containers with excellent performance and lifespan will be manufactured through the screen-printing process, which is more cost-effective and efficient compared to other methods.

Keywords: Ag-coated ceramic containers, Screen-printing, Transcription method, Durability, Reliability

최근 유해물질을 배출해 많은 환경문제를 야기하는 가스레인지 대신 청정 에너지인 전기를 사용하며, 가스레인지만큼의 가열 효율을 가지는 인덕션 조리기가 보편화

되고 있다. 인덕션은 유도 전류 기반으로 가열하는 방식이기 때문에 인덕션 전용 조리기를 사용하고 있다 [1]. 하지만 인덕션 레인지는 기기 내의 코일에서 발생하는 유도 전류 및 자기력을 이용해 자기적 성질을 지닌 용기 재질 바닥면에 와류 전류를 발생시켜 용기를 가열하는 방식이기 때문에 비철 소재나 유리 및 도자기와 같은 소재로 만들어진 용기는 인덕션 레인지에 직접적으로 사용할 수 없는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 용기 바닥면

✉ Dong-Won Lee; dwlee@kwl.re.kr

Jong-Min Oh; jmOH@kw.ac.kr

Copyright ©2024 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.

에 자기적 성질을 가진 도판을 부착하거나 용기 바닥면에 전도성 코팅을 형성하는 방법들이 연구되고 있다 [2,3]. 그러나 용기 바닥면에 도판을 부착하는 방법은 사용 중 충격이나 열 변화로 인해 도판이 분리되는 등의 내구성 문제와 열 전달 효율이 떨어진다는 문제점이 있다. 반면, 용기 바닥면에 전도성 재료를 코팅하는 방법은 코팅이 용기와 일체화되어 내구성이 높고, 열 전달 효율이 좋으며, 비용 절감 효과도 기대할 수 있다.

내열 세라믹 등 비철 소재 바닥면에 코팅을 위한 전도성 소재로는 Ag, Ag 복합체, Ag-Cu 합금 등 다양한 방법들이 사용된다. Sasidharanpillai의 연구에서 drop coating 방법으로 Ag을 비롯한 몇 가지 금속을 사용하여 연구한 결과 Ag가 가장 높은 전기 전도도를 보였다 [4]. Varol의 연구에 따르면 구리와 은의 합금 소재가 순수 구리보다 약 24% 높은 전기 전도도가 높으며 인장강도는 약 2배가량 높아짐을 연구했다 [5]. 또한, CNT에 Ag를 도핑한 소재도 활발히 사용된다. Farbod의 연구에 따르면 은을 첨가한 CNT의 열 전도율은 그렇지 않은 소재보다 0.16~8.02%가량 증가했다 [6]. Jian의 연구에 따르면 BT와 Ag의 복합체는 상온에서 약 84 W/mK의 열 전도율을 가짐을 알 수 있다 [7]. 이러한 전도성 소재 중에서 우수한 전기 전도도와 열 전도도가 높으며 산화 저항성이 낮은 Ag을 비철 소재에 코팅하여 가열하는 방식이 가장 많이 사용된다.

내열 세라믹 용기 바닥면에 Ag 소재를 코팅하는 방법으로는 대표적으로 전사 프린팅법이 연구되고 있다 [8]. 하지만 전사 프린팅법은 증착 과정이 복잡하고 오랜 코팅 시간을 필요로 함에도 기판 표면의 특성에 따라 코팅에 어려움이 있을 수 있으며, 다양한 디자인으로 제작하기 어렵다는 한계점이 존재한다. 반면, 스크린 프린팅 공정은 자성체 물질을 함유한 페이스트를 스크린 마스크를 통해 기판 표면에 프린팅하는 방식으로 간단하고 빠른 제조 과정으로 다양한 재질에 복잡한 디자인으로도 프린팅 할 수 있고, 내구성이 우수하며, 대량 생산에 적합하여 다양한 분야에 응용되고 있다 [9-11].

따라서 본 연구에서는 세라믹을 인덕션용 용기로 사용하기 위해 스크린 프린팅법을 사용하여 우수한 전기 전도도 및 열 전도도를 갖는 Ag을 내열 세라믹 용기에 코팅하였으며, 이 소재들의 저항, 전기 전도도, 인덕션 반응 등을 측정해 인덕션 조리 용기에 사용 유무를 확인하였다. 또한, 스크린 프린팅 방법이 내열 세라믹 용기에 적용 가능한지를 확인하기 위해 스크린 프린팅 방법으로 제조된 Ag-coated 내열 세라믹 용기와 전사 코팅 방법으로 제조된 내열 세라믹 용기의 성능, 내구성 및 신뢰성 평가를 진행하였다.

내열 세라믹 용기 바닥에 코팅을 하기 위해서 은 페이스트 제작을 하였으며, 은 페이스트는 충전제와 결합제, Ag 분말 용매로 구성되었다. 이때 사용된 Ag 분말은 Cu-K α 방사선($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$)을 이용한 X-ray diffraction (XRD, X'Pert PRO diffractometer, PANalytical)를 사용해 20~80°의 2-theta 각도에서 결정상을 분석했고, 입자 형상을 측정하기 위해 field emission scanning electron microscope (FE-SEM, MIRA-3XMU, TESCAN)를 이용해 입자 형상을 관찰하였으며, particle size analyzer (PSA, MICROTRAC, Bluewave)를 이용해 분체의 입자크기와 입도 분포를 분석하였다. Ag 분말의 비저항을 측정하기 위해 Ag 분말을 200 kg의 하중으로 가압한 후 4-point 측정법을 이용하여 Ag 분말의 비저항을 측정하였다. 은 페이스트는 세라믹 기판, 세라믹 용기 및 종이에 따라 적절한 점도를 보장하기 위해 적절한 비율로 조정되었으며 (Ag 분말: 충전제 및 결합제=70:30), 결합제로 glass frit을 사용하였다. 내열 세라믹 용기와 유도용 플레이트는 점토, 실리카, 활석 등으로 만들어졌으며, 고밀도(2.173 g/cm³) 및 낮은 다공성(0.235%)을 가진 내열성 세라믹 용기는 유도 용기로 사용될 수 있으며 은에 쉽게 부착되었다.

세라믹 용기와 종이에 전도성 Ag 필름을 제작하기 위해 스크린 프린팅 방법과 전사 프린팅 방법이 사용되었다. 먼저, 세라믹 용기 바닥에 은 페이스트를 스크린 프린팅 방법을 이용해 코팅하였으며, 은 페이스트를 주격으로 2분 동안 저온 후, 반자동 스크린 프린팅기를 사용하여 프린팅 하였다. 프린터에서는 폴리에스테르 메쉬 스크린이 사용되었으며, 스퀴지가 약 45°로 구부러지도록 스퀴지 압력을 조정했다. 코팅 두께에 따라 Ag 페이스트의 증착 과정을 1회에서 3회까지 진행한 다음 110°C에서 30분 동안 오븐에서 건조되었으며, 프린팅 후, 시료를 800°C에서 30분 동안 오븐에서 경화시켰다. 두 번째로, Ag 페이스트를 데칼코마니아 종이에 프린팅 하였으며, 형성된 Ag 페이스트를 브러시로 데칼코마니아 종이에 도포하였다. Ag 페이스트의 증착 과정을 3회 진행한 다음 110°C에서 건조시켰으며, Ag 코팅이 프린팅된 데칼코마니아 종이를 물에 담가 종이에 Ag 코팅층을 분리하였다. Ag 코팅층을 내열성 세라믹 용기의 바닥면에 접착한 후, 완전한 전사를 위해 시료를 800°C에서 30분 동안 오븐에서 경화시켰다.

전사 프린팅 방법 및 스크린 프린팅 방법을 이용하여 Ag가 코팅된 내열 세라믹 용기의 성능 및 내구성을 평가하기 위해 인덕션 레인지 위에 Ag가 코팅된 내열 용기와 내열 plate를 놓고 위치별로 열전대를 부착하여 발열성능 및 온도 사이클 시험을 진행하였으며, 모식도를 그림 1에 나타내었다. 우선, 내열 세라믹 용기의 성능을 평가하기 위해

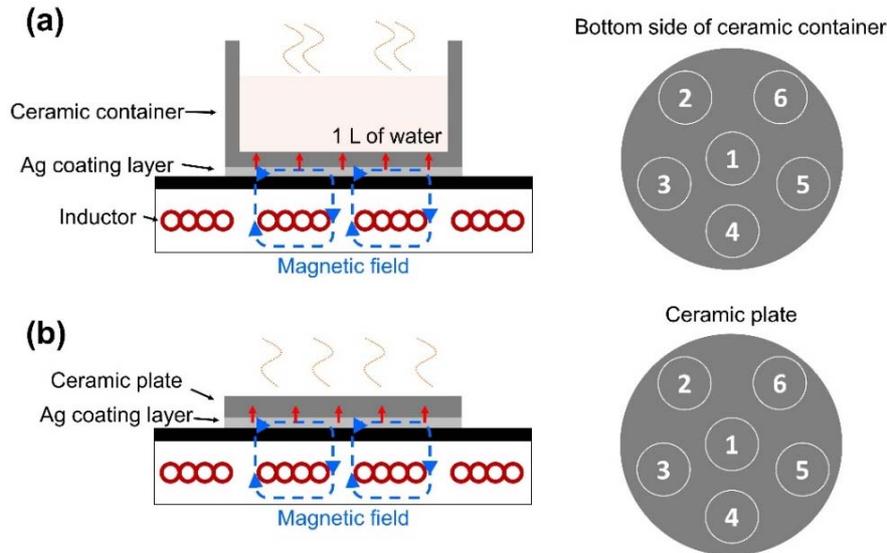


Fig. 1. Schematic diagram of (a) thermal conductivity performance of ceramic container with Ag coating layer and (b) reliability evaluation through temperature cycle test of heat cycle test of ceramic plate coated with Ag film.

상용 인덕션 용기와 전자 프린팅 방법 및 스크린 프린팅 방법을 이용하여 Ag film이 코팅된 내열 세라믹 용기에 1리터의 물을 채운 후 100°C에 도달하는 시간 및 위치별로 물의 온도가 균일한 분포를 보이는지 확인하였다. 세라믹 용기의 부착된 Ag film의 내구성을 평가하기 위해 Ag가 코팅된 내열 세라믹 기판을 대상으로 온도 사이클 시험을 진행하였다. 온도 사이클 시험은 상온에서 10분 유지와 200°C에서 10분 유지를 1사이클로 하여 총 300사이클 시험을 진행하였다. 열 사이클링 시험을 실시한 세라믹 판 위의 Ag 필름의 면저항은 4-point 프로브 시스템을 이용하여 측정하였다. Ag 필름과 세라믹 판 사이의 접착강도는 tensile pull-off 방식으로 로딩 속도 5 mm/min으로 범용 시험기(instron)로 측정하였다. Ag 코팅면에 접착제를 붙여서 와이어를 고정하여 샘플을 준비한 후 시험기를 이용해 인장하여 접착 하중을 측정하였다. Ag 필름의 접착강도 F 는 아래의 식을 이용하여 계산하였다. $F = |f_{max}|/A$, 여기서 f_{max} 는 측정된 파단력의 피크 하중값, A 는 Ag 필름이 박리된 면적이다.

그림 2는 SEM, PSA, XRD를 통해 Ag 분말의 입자 형상, 입도 분포 및 결정상을 측정된 결과이다. 그림 1(a) 및 (b)에서 Ag 분말은 구형의 모양을 갖고 있으며, 평균 입자 크기(D_{50})는 1.01 μm 임을 확인할 수 있다. 또한, 입도 분포의 폭을 나타내는 span 값 $[(D_{90}-D_{10})/D_{50}]$ 은 1.19로 균일한 입도 분포를 갖는 것을 확인하였다. 그림 2(c)를 통해서 사용된 Ag 분말은 XRD를

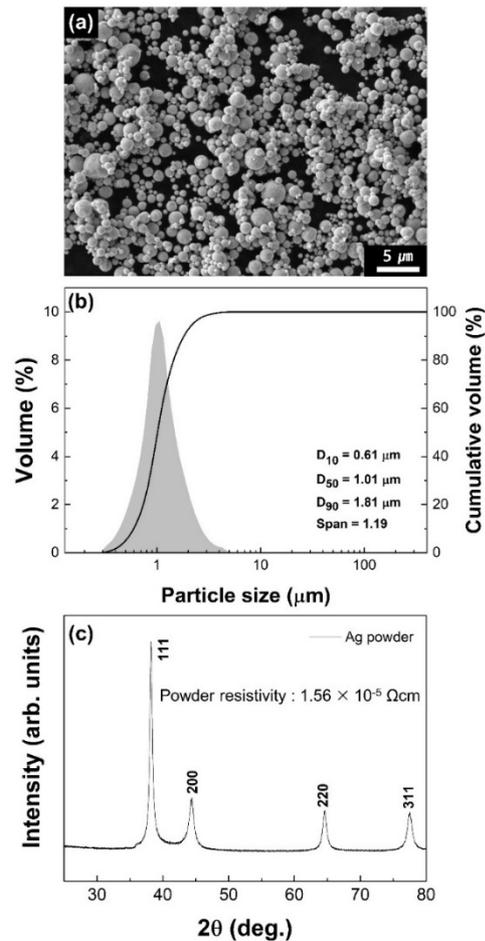


Fig. 2. (a) SEM image, (b) particle size distribution, and (c) XRD pattern of Ag powder.

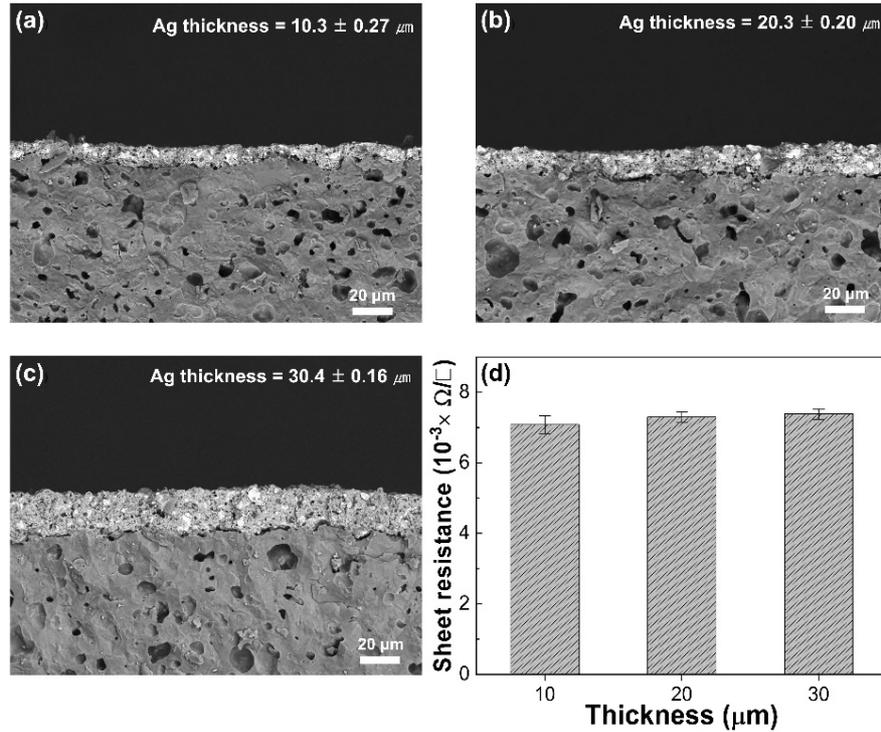


Fig. 3. Cross-sectional SEM image of the Ag layer on the ceramic container according to the number of deposition processes through the screen-printing method: (a) 1 time, (b) 2 times, and (c) 3 times.

통해서 약 38.2°, 44.4°, 64.6°, 77.5°에서 선명한 회절 피크가 측정되었으며, 이를 통해서 다른 불순물이 없는 face centered cubic 구조의 순수한 Ag 분말임을 확인하였다. 추가적으로 Ag powder의 비저항은 1.56×10⁻⁵ Ωcm로 측정되었으며, 이론 값인 1.59×10⁻⁶ Ωcm에 가까운 값을 갖는 것을 확인하였다 [12].

그림 3(a), (b), (c)는 세라믹 용기에 스크린 프린팅 방법을 통해서 Ag 페이스트의 증착 과정을 1회에서 3회까지 진행하여 코팅된 Ag층의 두께별 SEM 단면 사진을 나타냈으며, 각각 10.3±0.27, 20.3±0.20, 30.4±0.16 μm로 코팅된 것을 확인할 수 있다. 또한 Ag 코팅층의 두께의 균일성을 확인하기 위해서 면저항을 5개소를 측정하였으며, 이에 대한 그래프를 그림 3(d)에 나타냈다. 약 10 μm 두께의 Ag 필름의 면저항의 오차가 가장 컸으며, 약 20, 30 μm 두께의 Ag층의 면저항은 작고 유사한 오차를 보이며 상대적으로 균일한 Ag 필름이 코팅되었음을 확인하였다. 또한, Ag 층이 10 μm로 코팅된 세라믹 용기의 경우에는 두께가 얇아 인덕션 레인지와 반응하지 않았다. Ag 필름의 두께가 약 20 μm에서부터 인덕션과의 반응을 관찰하였으며, 코팅된 내열 세라믹 용기에 1리터의 물을 채운 후 100°C에 도달하는 시간을 측정했을 때, 30 μm 두께의 Ag층은 284초

로 20 μm 두께의 Ag층의 300초에 비해 뛰어난 성능을 보여주었다. 이는 두께에 따른 전기 전도도의 차이에 의한 것으로 판단된다. 전기 전도도는 다음과 같은 식 (1)을 참조하여 가장 바깥쪽 표면층의 두께와 반비례한다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \tag{1}$$

δ: Skin depth (m)

f: Frequency of generator (s⁻¹)

μ: Magnetic permeability (H·m⁻¹=kg·m²·s⁻²·A⁻²·m⁻¹)

σ: Electrical conductivity of materials (S·m⁻¹=kg⁻¹·m⁻²·s³·A²·m⁻¹)

두께가 증가할수록 전기 전도도가 높아졌으며, 이에 세라믹 용기로의 열 전도가 증가하여 물의 온도가 더 빨리 증가한 것으로 생각된다. 따라서 세라믹 용기 바닥에 스크린 프린팅 방법과 전사 프린팅 방법을 통해서 30 μm 두께의 Ag 필름을 코팅하여 성능 및 신뢰성을 평가 및 비교를 진행하였다.

Ag 코팅층이 두 가지 공정을 통해 제작된 후, 용기의 열 효율을 비교하여 그림 4에 나타냈다. 그림 1에서 볼 수 있

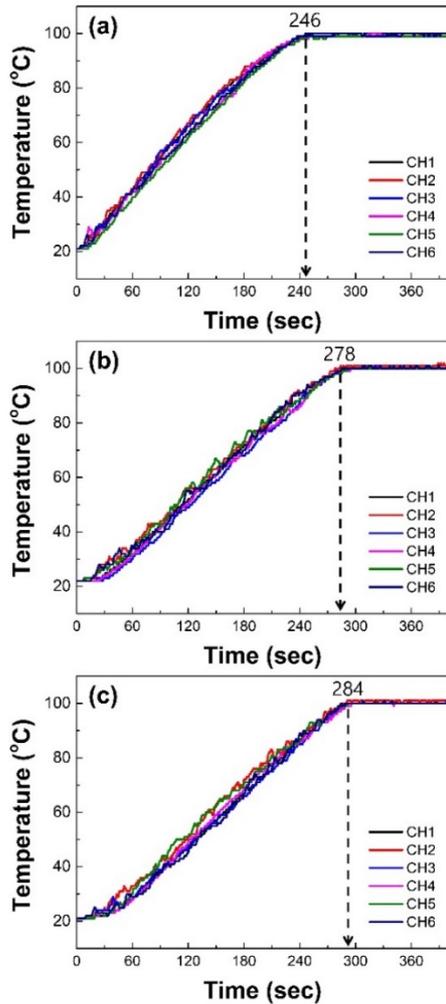


Fig. 4. Results of the time to raise 1 L of the water to 100°C at R.T. (a) Ag metal pot, (b) transcription method, and (c) screen-printing method.

듯이 용기의 바닥은 6개의 지점으로 나누어 용기의 온도 분포를 위치별로 평가했으며, 시간이 지남에 따라 온도가 상승하여 물이 100°C에 도달하는 시간을 측정하여 효율을 비교하였다. 그림 4(a)는 Ag 금속으로만 구성된 상용 용기로 실험되었으며, 그림 4(b)와 (c)는 각각 전사 코팅 방법과 스크린 프린팅 방법을 통해 제작된 Ag 코팅층이 있는 세라믹 용기를 사용하여 실험을 수행하였다. 금속 상용 용기, 두 가지 공정으로 제작된 Ag층이 있는 세라믹 용기 모두 6개의 위치에 따른 온도 차이는 거의 없었으며, 안정적으로 온도가 상승하는 것을 확인하였다. 하지만 다른 세라믹 용기에 비해 전기 및 열 전도율이 현저히 높은 Ag 금속 냄비는 약 246초 후에 물이 100°C에 도달하여 끓기 시작했다. 반면, 전사 프린팅 및 스크린 프린팅으로 Ag 코팅이

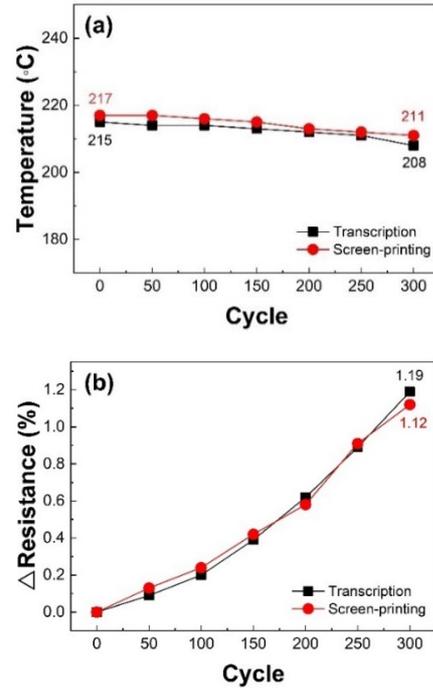


Fig. 5. (a) Temperature deviation and (b) the rate of changes in resistance of ceramic plate with Ag layer by transcription and screen-printing according to temperature cycle test.

된 세라믹 용기의 물은 278초, 284초 후에 100°C에 도달하였으며 큰 차이가 없는 것으로 측정됐다.

그림 5는 두 가지 공정으로 제작된 Ag 코팅층이 있는 세라믹 용기에 대한 수명 테스트 결과를 온도 사이클 시험을 통해 보였으며, 총 300사이클까지의 온도 편차[그림 5(a)] 및 저항 차이[그림 5(b)]를 그래프로 나타냈다. 그림 5(a)를 살펴보면 전사 프린팅 방법은 215°C에서 300사이클 후 208°C로 서서히 감소하였으며, 스크린 프린팅 방법은 215°C에서 300사이클 후 211°C로 점차 줄어들었다. 또한 그림 5(b)를 통해서 300사이클 후의 저항 변화율은 전사 프린팅 공정에서 1.19%였고, 스크린 프린팅 공정에서 1.12%로 측정됐다. 위 결과를 보았을 때, 두 공정으로 세라믹 판 위에 제작된 Ag film의 수명은 준수한 것으로 판단되며, 두 공정에서의 큰 차이는 없는 것으로 확인됐다.

Ag 코팅층이 부착된 세라믹 용기를 실제로 사용하였을 때, Ag 코팅층이 부착된 세라믹 용기와 접착 수명을 파악하기 위해 열 충격 시험 전과 후의 코팅된 층과 세라믹 용기 바닥 사이의 접착 강도(N/mm²)를 시험하여 다음과 같이 그림 6에 나타내었다. 열 충격 시험 전에 스크린 프린팅 공정이 전사 프린팅 공정보다 더 높은 접착 강도인 9.3 N/mm²를 나타냈다는 것이 확인되었고, 열 충격 시험 후

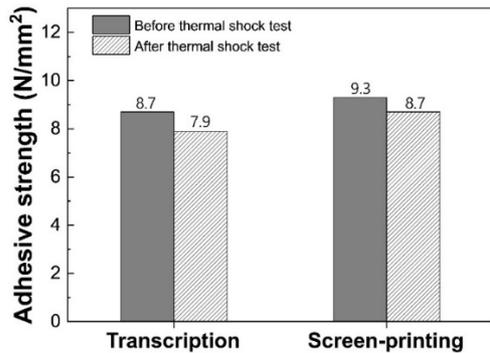


Fig. 6. Strain of adhesion strength after thermal shock test according to each process.

접착 강도가 0.6 N/mm² 감소하여 8.7 N/mm²이 되었다. 또한, 전사 프린팅 공정으로 제조된 세라믹 용기의 접착 강도는 열 충격 시험 후 0.8 N/mm² 감소하여 7.9 N/mm²이 되었다. 전사 프린팅 공정이 접착 강도의 감소 폭이 더 큰 것으로 확인되었으며, 스크린 프린팅 공정이 전사 프린팅 공정에 비해 접착 강도 측면에서 더 우수한 효율성을 보여준다. 이는 건조된 Ag 코팅층을 세라믹 용기에 부착한 후 경화 과정을 진행하는 전사 프린팅 방법과 달리 세라믹 용기에 Ag 페이스트를 직접 코팅하여 건조 후 경화 과정을 하는 스크린 프린팅 방법의 경우 기판 표면의 미세한 요철을 따라 잉크를 전사하여 표면 거칠기에 의한 앵커링 효과로 접착력이 향상되는 것으로 추측된다.

스크린 프린팅 공정과 전사 프린팅 공정으로 내열성 세라믹 용기에 제작된 Ag 코팅층의 물성을 비교 및 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 스크린 프린팅 공정으로 Ag 코팅층을 10, 20, 30 μm의 두께로 제작하여 인덕션 반응 여부, 두께 균일성, 열 효율을 측정하였으며, 30 μm의 두께로 제작한 Ag 필름이 가장 균일하며, 물 1 L가 100°C에 도달하는 시간이 284초로 가장 뛰어난 열 효율을 보였다.
- 2) 스크린 프린팅 공정 및 전사 프린팅 공정으로 제작된 Ag 코팅층의 열 전도성은 물 1 L가 100°C에 도달하는 시간으로 측정하였으며, 각각 278초, 284초로 비슷한 열 전도성을 보이는 것을 파악할 수 있었다.
- 3) 또한, 열 사이클 시험에 따른 온도 편차 및 저항 변화율을 통해서 Ag 코팅된 세라믹 용기의 수명 테스트를 진행했으며, 300사이클 후 스크린 프린팅 및 전사 프린팅 공정으로 제작한 Ag 코팅층의 온도 편차의 차이는 미세했으며, 저항 변화율은 각각 1.12%와 1.19%로 역시 큰 차이 없음을 알 수 있었다.
- 4) 하지만 열 충격 시험 전후의 접착 강도를 비교하였을

때, 열 충격 시험 전후의 스크린 프린팅으로 제작된 Ag 코팅층의 접착 강도가 전사 프린팅으로 제작된 Ag 코팅층에 비해 더 높았으며, 스크린 프린팅으로 제작된 Ag 코팅층이 있는 세라믹 용기가 더 긴 수명을 가질 것으로 평가하였다.

- 5) 따라서 인덕션 사용을 위해 내열성 세라믹 용기의 전도성 코팅층을 만들며, 이를 위한 여러 가지 코팅 방법 중 일반적으로 많이 사용되는 전사 프린팅 공정과 스크린 프린팅 공정을 통한 코팅층을 비교하였을 때, 스크린 프린팅 공정으로 제작된 Ag 코팅층이 더 간단하고 대량 생산이 가능하면서도 전사 프린팅 공정으로 제작된 Ag 코팅층과 비슷한 열 전도도, 수명 및 신뢰성을 보인 것으로 보아 스크린 프린팅 공정이 상용화가 가능하며 다른 공정들에 비해 더 저렴하고 효율적이며, 성능 및 수명이 뛰어난 인덕션용 내열성 세라믹 용기가 제작될 것으로 기대된다.

ORCID

Dong-Won Lee
Jong-Min Oh

<https://orcid.org/0000-0002-1176-4765>
<https://orcid.org/0000-0001-6303-2876>

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 전략 핵심 소재 자립화 기술 사업(No.2001914), 산업통상자원부 한국산업기술진흥원 산업혁신인재성장지원사업(P0012451), 과학기술정보통신부 한국연구재단 기초연구사업(No.RS-2023-00212985)의 지원 및 2024년도 광운대학교 우수연구자 지원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

- [1] O. Lucia, P. Maussion, E. J. Dede, and J. M. Burdío, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **61**, 2509 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2281162>
- [2] H. M. El-Mashad and Z. Pan, *Food Eng. Rev.*, **9**, 82 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1007/s12393-016-9156-0>
- [3] J. Acero, I. Lope, C. Carretero, and J. M. Burdío, *IEEE Access*, **8**, 11219 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965209>
- [4] A. Sasidharanpillai, D. Kim, Y. Lee, G. H. Yun, Y. J. Kim, and S. Lee, *Ceram. Int.*, **47**, 26528 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.067>

- [5] T. Varol, O. Güler, S. B. Akçay, and H. C. Aksa, *Powder Technol.*, **384**, 236 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.020>
- [6] M. Farbod and A. Ahangarpour, *Phys. Lett. A*, **380**, 4044 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2016.10.014>
- [7] G. Jian, Y. Jiao, Q. Meng, L. Feng, Z. Yan, C. Yan, C. Zhang, K. S. Moon, and C. P. Wong, *Composites, Part B*, **204**, 108496 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108496>
- [8] H. H. Gu, B. H. Kim, and Y. J. Yoon, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **29**, 690 (2016).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.11.690>
- [9] K. Yang, R. Torah, Y. Wei, S. Beeby, and J. Tudor, *Text. Res. J.*, **83**, 2023 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1177/0040517513490063>
- [10] J. Machiels, A. Verma, R. Appeltans, M. Buntinx, E. Ferraris, and W. Deferme, *Procedia CIRP*, **96**, 115 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.062>
- [11] W. J. Hyun, S. Lim, B. Y. Ahn, J. A. Lewis, C. D. Frisbie, and L. F. Francis, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 12619 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.5b02487>
- [12] R. Manepalli, F. Stepniak, S. A. Bidstrup-Allen, and P. A. Kohl, *IEEE Trans. Adv. Packag.*, **22**, 4 (1999).
doi: <https://doi.org/10.1109/6040.746536>