

스크린 프린팅 공정에 의해 제조된 비데용 Ag-Pd 봉형 발열체의 내구성 및 물성 평가

박태웅¹, 현다은^{2,3}, 김익수², 이성철⁴, 이연숙³, 김용남³, 이동원³, 오종민² 

¹ 한국기술교육대학교 에너지신소재화학공학부

² 광운대학교 전자재료공학과

³ 한국산업기술시험원 재료기술센터

⁴ 위너테크놀로지

Durability and Characteristics of Ag-Pd Rod Heater for Bidet Fabricated by Screen Printing Process

Tae-Ung Park¹, Da-Eun Hyun^{2,3}, Ik-Soo Kim², Sung-Chul Lee⁴, Yeon-Sook Lee³,
Yong-Nam Kim³, Dong-Won Lee³, and Jong-Min Oh²

¹ School of Energy Materials and Chemical Engineering, Korea University of Technology and Education,
Cheonan 31253, Korea

² Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

³ Material Technology Center, Korea Testing Laboratory, Seoul 08389, Korea

⁴ Winner Technology, Pyeongtaek 22012, Korea

(Received September 3, 2022; Revised October 11, 2022; Accepted October 11, 2022)

Abstract: Heaters using the resistance heating principle are used in various industrial fields that require heat and are also essentially used in bidet among small home appliances. A planar heater and a coil-inserted heater mounted on a conventional commercially used bidet have disadvantages and limitations of complicated manufacturing process and local heating. In this study, silver-palladium (Ag-Pd) powder material was used for a screen-printing process that is more advantageous in achieving simplification than the existing process, and a rod-type heater for bidet was manufactured. The on-off cycle test under actual conditions was conducted to confirm the durability and the capability of the fabricated heater, and the fabricated heater operated more than 2,600 on-off cycles, which means it could be applied for a commercial product. In addition, through the on-off cycles under harsh conditions, the cause of failure was identified after the test that the durability limit temperature of the heater was 850°C. Through Ag-Pd rod heater in this study, it is expected to contribute to the efficient development of electrode materials for heaters and the improvement of the durability of heaters in the future.

Keywords: Heater, Silver/Palladium composite, Screen printing, Degradation durability test

✉ Dong-Won Lee; dwlee@ktl.re.kr

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

Copyright ©2023 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.

발열체는 소재에 따라 금속 발열체, 비금속 발열체, 발열체와 절연체를 일체화한 기타 발열체(세라믹 발열체, 시스 히터 등)로 구분된다. 이용자의 요구 온도 및 필요 환경에 따라 적합한 유형의 발열체가 사용되며 열을 필요로 하는 다양한 산업 분야에 사용되고 있다. 발열체는 저항 가열 원리를 이용하며, 간단한 설비 구조 및 원리의 이점으로 열을 필요로 하는 여러 산업 분야로의 추가 적용이 용이하기 때문에 시장 규모는 점차 증가되고 있어 그에 따른 발열체 제조 기술의 중요성 역시 커지고 있다 [1-9].

상기 발열체 중 세라믹 발열체는 여러 장점으로 인하여 소형 가전제품, 침구류, 기계부품 및 농업용 설비 등에 사용되고 있다. 특히 소형 가전에 속하는 비데 장치의 발열체로도 사용되는데, 이러한 비데용 발열체의 경우 비데 구조물의 핵심부품으로써 상수도관에서 공급된 물을 공급받아 일정 온도로 급속 가열시키는 것을 목적으로 사용된다. 현재 사용되는 비데용 발열체는 면상형 세라믹 발열체 혹은 코일 삽입형 금속 발열체가 대부분인데 두 방식 모두 국부 가열로 인한 온도의 온도 편차 문제를 갖고 있으며, 코일 삽입형 금속 발열체의 경우 제작 공정이 복잡하다는 한계를 갖고 있다 [10]. 소비자원에서 조사된 비데에 대한 다양한 고장 원인 가운데 온도 조절 불능을 포함하는 온도 편차가 다수 보고되었으며, 이는 통증 및 불쾌감을 유발할 수 있기 때문에 성능확보를 위한 대체 발열체의 설계 및 신뢰성의 확보가 필수적으로 여겨진다.

본 연구에서는 상기 언급된 복잡한 제작공정을 개선하고자 기존 발열체에 이용되지 않은 스크린 프린팅 공정을 새롭게 도입하여 제작을 간소화하고자 하였으며, 발열체를 봉 형상의 제작함으로써 국부 가열 문제를 최소화하였다 [11-13]. 또한, 제작된 제품의 발열 성능 및 내구성 확인을 위해 제작 과정 중 발생된 불량 샘플을 선별 분류하여 정상 샘플과 가혹조건 열화시험을 대조 진행하여 고장 원인을 분석하였다. 최종적으로, 봉형 발열체를 비데 모듈에 장착 후 실제 사용 조건 on-off 열화시험을 진행하여 내구성을 최종 평가하였다.

봉형 발열체의 제작은 전극 페이스트의 스크린 프린팅(screen printing) 공정으로 진행되었다. 저항 발열 특성 확보를 위해 비저항이 높은 팔라듐(palladium(Pd) 비저항: $105.4 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$) 분말은 은(silver(Ag) 비저항: $15.9 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$) 분말에 미량 혼합한 95:5 질량비의 Ag-Pd 혼합 분말(GDA-9505, Daiken, Japan)을 출발 분말로 사용하였으며, 에틸 셀룰로스 바인더(EC, Dow Chemical Co, China) 및 알파-테르피네올과 부틸 카비톨 아세테이트(BCA)를 첨가한 뒤 2롤 밀링 공정을 2시간동안 진행하여 페이스트를 제작하였다 [14-18]. 스크린 프린터(BAI-265, Banseok

precision industry, Korea)에 제작된 Ag-Pd 페이스트를 주입하였고, $100 \text{ mm (L)} \times 10 \text{ mm } (\varphi)$ 크기의 봉형 세라믹(알루미나) 기판상에 0.8 mm의 선폭, 1 mm의 간격 나선 패턴을 스크린 프린팅하여 저항 값을 조절하였다. 페이스트가 스크린 프린팅 된 알루미늄 봉(rod)을 전기로(Box furnace, Klin-technology, Korea)에서 30분간 소결 진행함으로써, 최종적으로 비데용 Ag-Pd 봉형 발열체를 제작하였다. 추가적으로, 스크린 프린팅 이전의 Ag-Pd 혼합 출발 분말과 소결 제작된 Ag-Pd 봉형 발열체에 대한 분석을 다양한 장비로 진행하였다. 출발 분말의 경우 입자 크기/분포 분석을 레이저 회절 방식의 입도분석기(PSA: Microtrac S3500, Retsch Technology, Germany)를 통해 진행하였으며, 전계 방사형 주사전자현미경(FE-SEM: MIRA3 XMU, TESCAN, Czech)을 사용하여 입자 크기 및 미세구조를 확인하였다. X선 회절 분석(XRD: X'pert PRO, Panalytical, Netherlands)를 이용하여 Ag-Pd 혼합 출발 분말 및 소결한 Ag-Pd 봉형 발열체의 분석을 진행하였다.

후막 전극 패턴의 인쇄불량은 스크린-프린팅 제작 방식 발열체의 주된 고장 원인 중 하나이다. 정상 인쇄전극패턴 샘플과 불량 패턴 샘플 사이의 관계를 파악하고, 내구성 평가를 진행하기 위하여 앞서 제작된 Ag-Pd 봉형 발열체 제품 중 결함이 없는 정상 발열체와 결함을 갖는 불량 발열체의 샘플 선별을 진행하였다. Digital multimeter (Multimeter 2000, Keithley, USA)을 이용한 제품의 전극에 대한 전기 저항의 측정 및 광학현미경(KH-1300, Hirox, Japan)을 통한 분석으로 발열체의 선별을 진행하였다. 해당 과정을 통해 선별된 정상 샘플에 한하여 내전압 시험을 1,800 V, 5 mA, 1 s 조건으로 진행하였다. 해당 시험은 IEC 60065에 기초한 전압 시험기(GPT-715A, GWINSTEK, Taiwan)로 진행되었다.

그림 1은 시제품으로 사용될 비데용 발열체 샘플의 내구성 평가를 목적으로 진행된 실제 비데 동작 조건 on-off 열화시험의 모식도이다. 해당 시험은 상기 제작된 Ag-Pd 봉형 발열체 중 결함이 없는 정상 샘플을 비데 히터 모듈에 장착한 뒤, 단락 발생시까지 on-off cycle을 반복함으로써 진행되었다. 비데 모듈을 거친 물의 목표 출수 온도는 40°C , on-off cycle은 1분 on 뒤 1분 off 동작으로 설정되었다. on-off 동작에 따른 저항과 온도는 컨트롤러(UP35A, Yokogawa, Japan)와 thermocouple(K-type, I-sensor, Korea)로 측정되었다. 해당 시험의 시험조건은 210 V 전압, 6.3 A 전류였으며 이는 컨트롤러로 설정되었다. 또한 실제 사용되는 비데의 유량조건(800~1,000 mL/min)과 수온(약 15°C)을 맞추기 위한 metering pump(CFC-Water

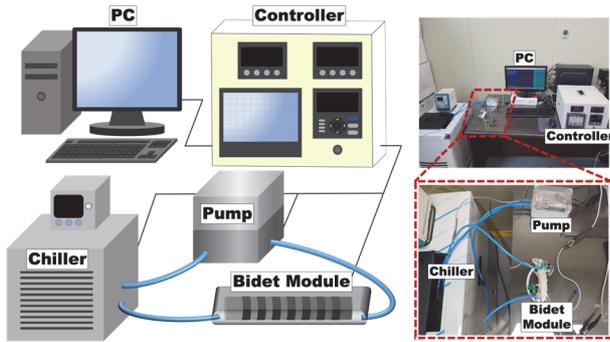


Fig. 1. Schematic diagram of on-off test conducted to evaluate the durability of actual-use condition.

CTR, Camfree, Korea), chiller (HD-01A, Jeiotech, Korea)를 사용하였다.

실제 비데 동작 조건 on-off 열화시험 이외에도 가혹 조건 on-off 열화시험을 진행하였다. 해당 시험은 내구성 분석 및 고장 원인 분석을 위해 발열체가 과부하를 일으킬 수 있는 가혹 조건에서의 반복 동작으로 진행되었다. 가혹 조건은 실제 비데 동작 조건 on-off 열화시험과 다르게 냉각 효과를 갖는 유수가 존재하지 않으며, 외부에 직접 노출된 Ag-Pd 봉형 발열체의 전극에 직접 전압을 인가하는 방식으로 진행되었다. 해당 열화시험은 정상 샘플과 결함이 포함된 불량 샘플 모두에서 진행되었고 on-off cycle은 실제 조건 on-off 열화시험과 마찬가지로 1분 on, 1분 off 동작으로 설정되었다. 60 V, 80 V, 90 V 전압에서 각각 100 회의 on-off cycle이 진행하였으며, 매 cycle시 Ag-Pd 봉형 발열체의 온도를 동시에 측정하였다. 가장 낮은 전압 단계인 60 V부터 cycle이 시작되었으며, 단계의 on-off cycle 100회가 완료되면 다음 전압 단계에서 또다시 100 cycle

을 수행하였다. 단락이 일어나면 시험은 즉시 중단되었다. 시험에 사용된 장비는 전압인가장치(DM-10, Rotech instrument, Korea), 컨트롤러, thermocouple이었으며 thermocouple은 Ag-Pd 봉형 발열체의 내부 공간에 장착되었다.

그림 2(a)는 Ag-Pd 출발 분말 및 소결 진행이 완료된 Ag-Pd 봉형 발열체 전극부의 XRD 패턴을 나타낸다. 30°~70°의 영역에서 Ag-Pd 분말은 $2\theta = 38.29^\circ, 44.49^\circ, 64.73^\circ$ 의 피크를 형성하고 있었으며 지배적인 Ag의 성분 비로 알 수 있듯이 패턴의 피크치는 $2\theta = 40.11^\circ, 46.65^\circ, 68.12^\circ$ 를 보이는 순수 Ag의 그것과 매우 유사함을 보였으며, Pd 분말의 매우 적은 영향력을 확인할 수 있었다 (reference code: 01-087-0719). 또한 Al_2O_3 기판상 소결된 Ag-Pd 발열체 전극의 XRD 패턴에서도 상변화는 관측되지 않았으며 Ag-Pd 고유 패턴을 확인할 수 있었다.

그림 2(b)는 Ag-Pd 출발분말의 입도분포 결과 및 FE-SEM 관측 이미지이다. D50값과, D90값은 각각 0.65 μm , 1.00 μm 이었고, 표준 편차 값은 0.17을 보임으로써 출발 분말의 고른 입자 분포를 확인할 수 있었다. FE-SEM 이미지는 3,000배의 배율로 진행되었으며, 이를 통해 선행 진행된 입도 분포 분석으로부터 측정된 1 μm 입자 크기를 효과적으로 검증하였다.

Ag-Pd 봉형 발열체의 전극 결함 여부를 통한 정상 샘플, 불량 샘플 선별을 진행하였다. Digital multimeter를 이용하여 각 샘플에 10 V의 전압을 인가하였고, 해당 발열체의 전극 저항 편차를 측정하여 구분을 진행하였다. 표 1의 결과는 불량 샘플과 정상 샘플의 저항 값을 나타낸다. 전극 결함이 없는 정상 샘플과, 결함이 1~2개 있는 불량 샘플의 저항 평균은 각각 27.34 Ω , 27.60 Ω 였다. 매우 적은 차이

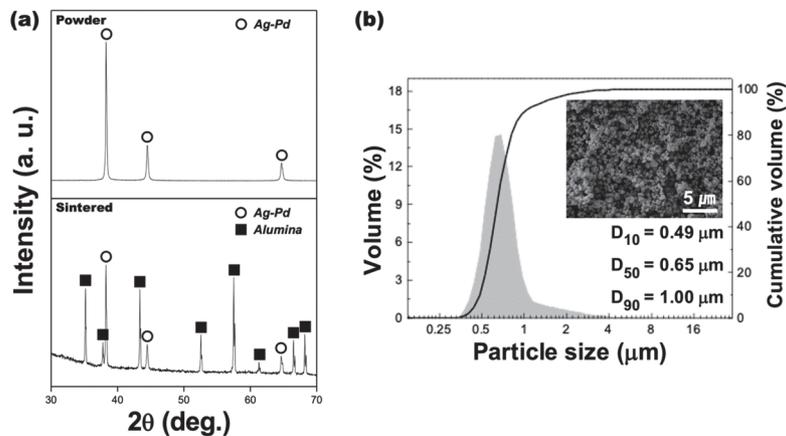


Fig. 2. (a) XRD patterns of starting powder(Ag-Pd), and rod-shaped heater fabricated by screen printing and sintering on Al_2O_3 substrate and (b) the particle size distribution graph was measured by PSA and the 3000x magnification of starting powder was measured by FE-SEM.

Table 1. Resistance measurement results of the non-defective product and containing defect product.

Non-defect		Defect	
No.	Resistance (Ω)	No.	Resistance (Ω)
1	27.30	1	27.28
2	27.39	2	27.48
3	27.20	3	27.79
4	27.34	4	27.89
5	27.47	5	27.55
Average	27.34	Average	27.60
SD	0.22	SD	0.22

를 보였기 때문에 digital-multimeter 측정법은 불가능하다는 결론을 얻었다. 하지만 스크린 프린팅으로 제작된 Ag-Pd 봉형 발열체의 저항 균일도가 매우 높게 측정된 점을 확인하였는데, 이는 업계에 시판된 기존 발열체의 $\pm 6\%$ 수준보다 훨씬 우수한 것이다.

상기 2가지 분석의 구분에 어려움이 있었기에 광학현미경을 통해 정확한 분석을 진행하였고, 샘플을 분류하였다. 결함 개수에 따른 3종의 대표 샘플을 선정하였다. 그림 3(a)의 발열체는 정상 샘플로서, 우수한 나선형 전극 인쇄 품질을 보인다. 정상 샘플과 대조적으로, 그림 3(b)와 그림 3(c)의 발열체는 제조 결함으로 인한 불량 샘플이며, 각각 1개, 2개의 pore 형상 결함을 전극 내에서 확인할 수 있었다. 상기 3종의 샘플은 가혹 조건 on-off 열화시험에 사용되었다.

앞서 언급한바와 같이, 현미경으로 확인된 인쇄 불량은 발열체의 성능 저하를 야기하는 주요 요소이자 고장 원인이다. 해당 요소를 제거하는 공정 역시 큰 중요성을 띤다. 하지만 이를 현미경을 통해 확인하는 현행 분류 방식은 많은 시간을 요하며 작업 속도가 더딘 명확한 단점을 갖는다. 하지만 이 방법은 현 공정에서의 유일한 분류법이므로 향

후 간소화된 판별법의 개발이 요구된다.

그림 4는 정상 샘플을 대상으로 진행된 가혹 조건 on-off 열화시험의 이미지이다. 열화시험에서의 스트레스 인자는 전압과 온도로 설정되었으며, 스트레스의 수준은 60 V, 80 V, 90 V로 구간별 점진적 증가 방식으로 설정하였다. 1분 on 작동 후 1분 off 과정을 1 cycle로 규정하여 각 스트레스 수준당 100 cycle씩 반복 진행하였고, Ag-Pd 봉형 발열체의 내부 공간에 thermocouple을 위치하여 cycle당 발열체의 온도를 측정하였다.

정상 샘플 Ag-Pd 봉형 발열체는 그림 4(a)와 같이 전압별 on-off cycle에 따른 온도 그래프를 보였다. 60 V 구간의 cycle에선 평균 450~500°C의 온도 등락을 보였으며, 80V 구간의 cycle에서는 평균 580~630°C의 온도를 보이며 각각 50°C 편차의 온도 변화를 보이는 등 일정한 동작을 확인할 수 있었다. 하지만 전압이 90 V로 상승됨에 따라 온도가 급상승하였는데, 300°C의 등락을 보이며 최고 온도 868°C를 넘기는 등 기존 구간보다 약 6배 증가된 편차를 보였다. 급등과 급락을 반복하다 12사이클 뒤 단선되었다.

그림 4(b), 4(c)는 각각 정상 샘플의 가혹조건 on-off 열

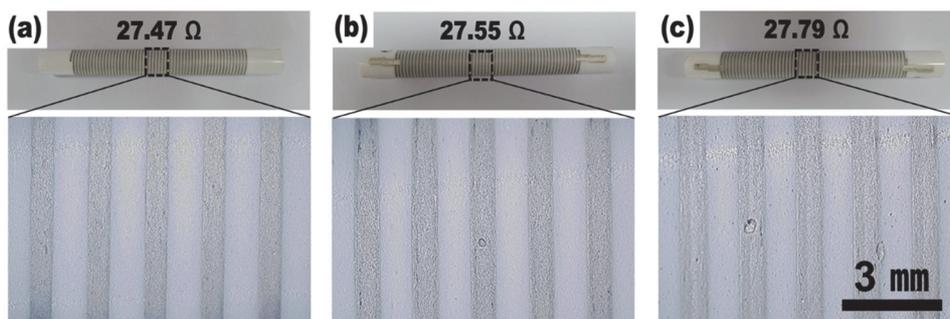


Fig. 3. Images of the fabricated product and enlarged image for analysis of the print status of electrodes. (a) Non-defective product, (b) product with one pore defect, and (c) product with two pore defects.

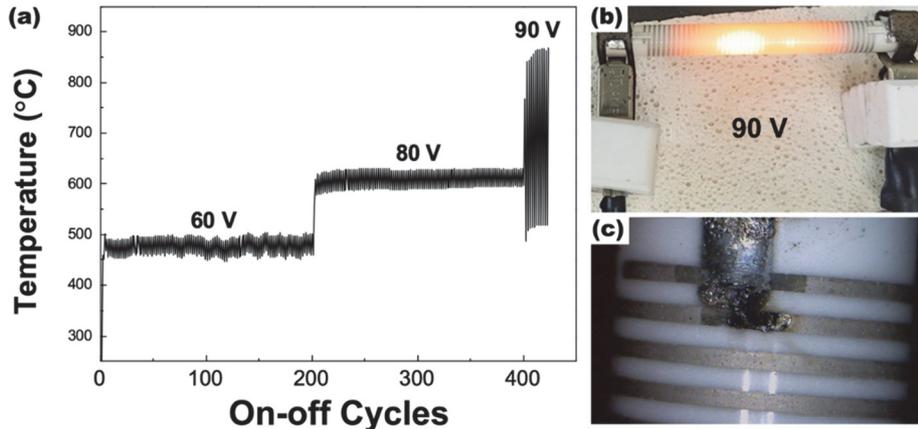


Fig. 4. (a) Graph of durability on-off test graph of non-defective product, (b) image of the heating element under test at 90 V voltage, and (c) the maximum temperature was 868°C and degraded and short-circuited after 12 cycles.

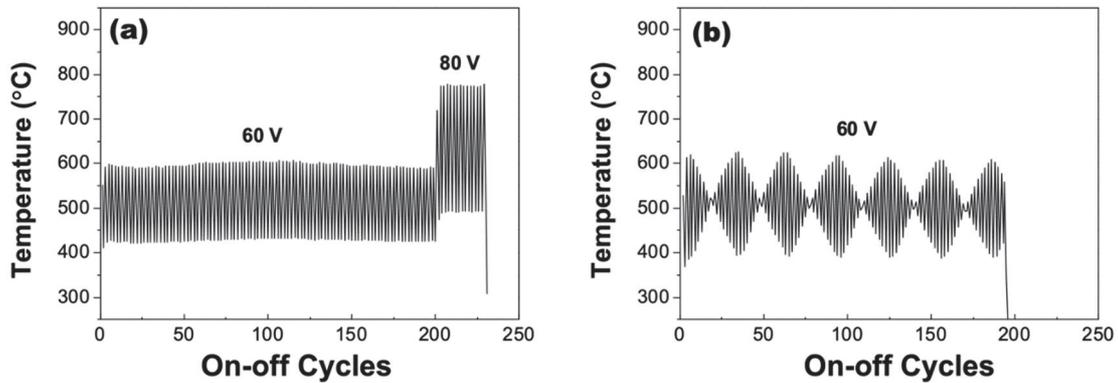


Fig. 5. (a) Graph of durability on-off test graph product with one pore defect and (b) graph of durability on-off test graph product with two pore defects.

화시험 중 90 V에서 샘플의 상태와 단선 진행 이후의 사진을 나타낸다. 60 V, 80 V 전압 구간에서는 샘플의 전 부위에 걸쳐 열이 전달되었으나, 90 V 전압 구간에 진입함과 동시에 과부하로 인하여 특정 부위에 열이 집중되며 열화 단락 되었다. 해당 결과를 통해 전극의 내구 한계점이 850°C 근방임을 확인하였다.

그림 5은 불량 샘플 2종의 가혹 조건 on-off 열화시험 결과를 나타낸다. 그림 5(a)는 1개의 pore 결함을 갖는 불량 샘플(그림 3(b))의 그래프이다. 정상 샘플의 온도 편차 (≒ 50°C)보다 큰 200~300°C 사이의 등락을 보였다. 60 V 구간에서는 정상 동작을 보였으나 80 V 구간에 진입하자 정상품의 90 V 구간과 마찬가지로 300°C에 가까운 급등락을 보이며 최고 온도 778°C를 보인 뒤 15사이클만에 단선 되었다. 그림 5(b)는 2개의 pore를 갖는 불량 샘플(그림 3(c))이었는데, 1개 pore 불량 샘플보다 더욱 약한 내구성

을 보였으며 60 V 전압이 인가된 뒤 99사이클만에 단선이 진행되었다. 특히 사항으로 500°C를 기준으로 온도 등락이 감소-증가하는 일정한 경향성을 보였는데 이는 오로지 해당 샘플에서만 관측된 결과이다.

정상 샘플 Ag-Pd 봉형 발열체는 비데 히터 모듈 최종 장착 이전, 물과의 직접 접촉 차단 및 안정성 확보를 위해 전극 외부에 세라믹 절연시트를 접착 후 소성하여 절연층을 형성하는 과정을 거치게 된다. 절연시트가 결합된 발열체의 양쪽 단자에 전원 인가 선을 연결하여 내전압 시험기와 연결하였다. 이후 정상 샘플 10종을 대상으로 내전압 시험을 진행하였으며 조건은 앞서 언급한 1,800 V, 5 mA, 1s로 설정되었다. 시험 진행 결과 10종 모두 내전압 시험 통과하였으며 1s를 넘어서 3분이상 내전압을 유지하였는데, 이는 통상적 비데 히터에 요구되는 내전압 요구 수준인 1,500 V, 1s 조건을 크게 상회하는 수치이므로 Ag-Pd 봉

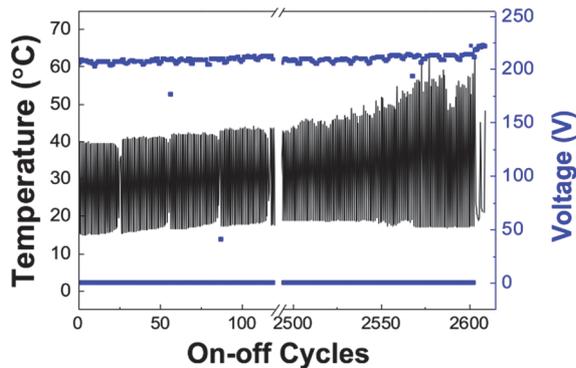


Fig. 6. Graph of durability on-off test of bidet module with non-defective product measured under actual conditions.

형 발열체의 내구성 향상이 크게 진행되었음을 의미한다.

최종적으로 정상 샘플 Ag-Pd 봉형 발열체를 사용한 실제 비데 동작 조건 on-off 열화시험을 진행하였다. 비데의 실 사용을 일 2회로 가정하였고 통상적 발열체의 교체 주기가 3~3.5년인 점을 고려하여 수명 기한을 2,500 cycle로 설정하였으므로, 최소 2,500회 이상 관측을 목표로 하였다. 이외 각종 조건들을 충족시키기 위해 앞서 언급한 on-off 반복 동작 시험법을 새롭게 고안하여 사용하였다. 컨트롤러를 이용해 210 V 전압, 6.3 A 전류로 조건 설정을 하였으며 1 cycle은 1분 on 후 1분 off로 설정하였다. 그림 6은 상기 조건을 준수하여 시행한 발열체의 실제 비데 동작 조건 on-off 열화시험 결과를 나타낸 그래프이다. 반복 동작 시험을 진행한 결과, 2,606번째 cycle에서 전류가 급격히 감소되며 전선의 저항이 앞서 진행된 cycle의 28 Ω과는 달리 측정되지 않았음을 확인하였다. 이는 비데 히터 모듈 내 전극의 단선으로 인한 것으로 판단된다. 전극의 단선 징후는 2,500 cycle 이후부터 관측되었다. 이전 cycle의 경우 15~40°C의 규칙적인 냉각과 가열이 진행되었으나 2,500 cycle이 넘어가면서 온도의 상승폭은 점차 증가하여 60°C에 육박하는 온도를 기록하였다. 이는 가혹 조건에서 진행된 열화시험 결과 패턴과 유사성을 보인다.

결론적으로 본 연구에선 스크린 프린팅 공정을 도입하여 봉형 형상의 Ag-Pd 비데용 발열체를 제작하였으며, 기존 공정 대비 간소화를 이룰 수 있었다. 또한 다양한 방식의 on-off 열화시험 측정을 통해 인가 전압에 따른 발열체의 온도 확인, 고장 원인 및 내구한도를 확인하였다. 본 연구결과를 기반으로 하여 스크린 프린팅 공정의 표면 제어 기술 개선, 전극 내 결함 확인 및 불량 샘플 판별법 개발, 다양한 전극 소재 도입 및 내구성 평가, 발열체 및 모듈의 내구성 향상 등 향후 발열체의 제작 공정 및 성능개선이 기대된다.

ORCID

Jong-Min Oh

<https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 전략 핵심소재 자립화 기술 사업(No. 2001914), 산업통상자원부 한국산업기술진흥원 산업혁신인재성장지원사업(P0012451) 및 과학기술정보통신부 한국연구재단 기초연구사업(No.2020R1F1A107349113)의 지원들을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

- [1] H. N. Choi, S. H. Jee, J. Ko, D. J. Kim, and S. H. Kim, *Nanomaterials*, **11**, 904 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.3390/nano11040904>]
- [2] V. Koncar, C. Cochrane, M. Lewandowski, F. Boussu, and C. Dufour, *IJCST*, **21**, 82 (2009). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/09556220910933808>]
- [3] H. Becker, and H. Ohnmacht, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **IA-21**, 896 (1985). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.1985.349538>]
- [4] Y. G. Ko, Y. S. Kang, and Y. S. Chung, *Textile Coloration and Finishing*, **32**, 65 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.5764/TCF.2020.32.1.65>]
- [5] Maria Prudenziati and Jacob Hormadaly, *Printed Films: Materials Science and Applications in Sensors, Electronics and Photonics*, (Elsevier, 2012), pp. 30-62.
- [6] Y. H. Lee, and M. J. Kim, "Planar Heater Using Conductive Paste", KR Patent KR 10-1754819 B1, June 30, 2017.
- [7] Y. S. Cho, H. S. Lee, and B. K. Kim, "Planar Heater", KR Patent KR 10-1026364 B1, March 25, 2011.
- [8] K. E. Choi, C. H. Park, and M. K. Seo, *Appl. Chem. Eng.*, **27**, 210 (2016). [DOI: <http://dx.doi.org/10.14478/ace.2016.1018>]
- [9] K. H. Park, BP Tech trade, Seoul, Korea, November, 2016.
- [10] S. S. Ahn, and W. H. Kim, *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, **53**, 1739 (2016).
- [11] G. Radosavljevic and W. Smetana, *Printed Films: Materials Science and Applications in Sensors, Electronics and Photonics*, 429-468, 2012. [DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857096210.2.429>]
- [12] F. Ménéil, H. Debéda, and C. Lucat, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **25**, 2105 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.03.017>]
- [13] D. W. Jung, D. H. Kim, K. H. Lee, L. J. Overzet, and G. S. Lee, *Sens. Actuators, A: Phys.*, **199**, 176 (2013). [DOI: <http://doi.org/10.1016/j.sna.2013.05.024>]
- [14] K. Reinhardt, C. Kretzschmar, R. Schmidt, and M. Eberstein,

- 18th European Microelectronics & Packaging Conference* (pp. 1-6). IEEE, 2011. [DOI: https://www.researchgate.net/publication/241635645_Silverpalladium_pastes_for_aluminium_nitride_applications]
- [15] M. Antler, *Platinum Metals Rev.*, **26**, 106 (1982). [DOI: <https://www.technology.matthey.com/article/26/3/106-117>]
- [16] G. Wiranto, I D. P. Hermida, Hiskia, B. Rama, and D. Rusdiana, *Mater. Sci. Forum*, **887**, 108 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.887.108>]
- [17] D. Wang, Y. H. Mei, H. Xie, K. Zhang, Kim S. Siow, X. Li, and G. Q. Lu, *Mater. Lett.*, **206**, 1 (2017). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2017.06.066>]
- [18] C.B. van den Berg, M. Topic, B. Magunje, D.T. Britton, and M. Harting, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, **114**, 145 (2014). [DOI: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2225-62532014000200004]