

## 고주파수용 저유전 및 저손실의 폴리머-세라믹 타입 Photo Solder Resist

남현진<sup>✉</sup> · 신민경\* · 정재웅 · 조영빈 · 박윤식 · 유종인 · 박세훈<sup>†</sup>

한국전자기술연구원 ICT디바이스패키징연구센터, \*한국전자기술연구원 융복합전자소재연구센터  
(2023년 5월 10일 접수, 2023년 5월 25일 수정, 2023년 5월 26일 채택)

### Low Dielectric Constant and Low Dielectric Dissipation Polymer-ceramic Photo Solder Resist for High Frequency Applications

Hyun Jin Nam<sup>✉</sup>, Minkyung Shin\*, Jae-Woong Jung, Young Bin Cho, Yunsik Park,  
Jong-In Ryu, and Se-Hoon Park<sup>†</sup>

ICT Device Packaging Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Seongnam 13509, Korea

\*Electronic Convergence Materials and Devices Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Seongnam 13509, Korea

(Received May 10, 2023; Revised May 25, 2023; Accepted May 26, 2023)

**초록:** 본 연구에서는 기성 photo solder resist(PSR)를 다양한 소재를 활용하여 유전 특성이 우수한 소재로 개발을 진행하였다. 다양한 소재는 유전율이 낮은 소재 자체 개발품의 폴리이미드와 다공성 실리카, 아니솔, 계면활성제, 광 개시제를 통해 기성 제품의 PSR을 개질하여 10 GHz 기준으로 유전상수 1.899, 유전손실 0.006을 나타내는 유전 특성이 우수한 PSR 소재로 개발하였다. 개발된 PSR 필름의 경우, 내부 개열형 광 개시제를 통해 현상이 가능하여 80  $\mu\text{m}$  선폭까지 현상이 가능한 것을 확인하였고, 이에 따라 추후 현장에서 패터닝 공정 또는 PCB에 직접 적용이 가능하다. 마지막으로, 250  $\mu\text{m}$  선폭의 테프론 위에 제작된 전송선로 위에 인캡슐레이션 공정을 진행하여, S11과 S21 값의 결과를 20~35 GHz 범위에서 확인하였다. 그 결과, S11과 S21 모두 비슷한 경향을 보였으며, S11에서는 개질된 PSR이 기성 PSR보다 약 -12 dB로 더 우수하였으며, S21 결과값 또한 40% 이상의 우수한 성능을 보였다.

**Abstract:** In this study, a photo solder resist(PSR) with excellent dielectric properties was developed using various materials, including self-developed polyimide, porous silica, anisole, surfactants, and photoinitiators with low dielectric constant, to modify PSR (MPSR). The resulting PSRs exhibited a dielectric constant of 1.899 and dielectric loss of 0.006 at 10 GHz. The MPSR film was shown to be capable of internal cleavage type photoinitiation and was able to be developed up to a line width of 80  $\mu\text{m}$ , indicating potential for direct application in PCB patterning processes. Finally, the encapsulation process was performed on a transmission line fabricated on Teflon with a line width of 250  $\mu\text{m}$ , and S11 and S21 values were confirmed in the range of 20 to 35 GHz. The MPSR exhibited superior characteristics to existing PSRs, with S11 showing an improvement of about -12 dB and S21 showing over 40% improvement in value.

**Keywords:** hybrid materials, photo solder resist, high frequency, low-k materials, transmission line.

## 서 론

최근에는 고주파 전자 부품의 빠른 성장으로 인해 고주파 및 신호 손실을 감소시키는 기술에 대한 수요가 증가하고 있다.<sup>1,3</sup> 전자 부품 간 간섭을 방지하고 printed circuit board (PCB)에서 전기 절연을 제공하는데 중요한 구성 요소 중 하나가 photo solder resist(PSR)이다.<sup>4</sup> 이러한 증가하는 수요를 충족시키기 위해, 낮은 유전상수( $D_k$ )와 유전손실( $D_f$ )을 가진

PSR의 개발이 제안되었다. PSR은 감광성 공정을 통해 제작되는 솔더 리지스트의 일종으로, 고주파 전자 부품 간 상호작용을 줄일 수 있어 PCB의 성능을 향상시킬 수 있다.<sup>5,6</sup> 낮은  $D_k$ 와  $D_f$  가진 PSR의 주요 장점은 고주파 회로에서 신호 감쇠를 감소시켜 전체적인 신호 무결성을 향상시키는 것이다. 또한, 낮은  $D_k$ 와  $D_f$ 을 가진 PSR은 에너지 소모를 줄이고 전자 회로의 효율성을 향상시킬 수 있다.<sup>7,8</sup> 낮은  $D_k$ 와  $D_f$ 을 가진 PSR을 개발하기 위해 다양한 재료가 연구되어 왔다. 이 중 세라믹-폴리머 복합재료를 사용하여 PSR을 개발하는 것이 최근 연구의 주요 관심사이다. 이러한 세라믹-폴리머 복합재료는 낮은  $D_k$ 와  $D_f$  특성을 모두 제공할 수 있다. 낮은  $D_k$ 와  $D_f$ 을 가진 PSR의 잠재적인 장점이 있음에도 불구하고, 실용적인

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
psh104@keti.re.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0002-6173-875X  
©2023 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

응용을 위해서는 고열 안정성, 접착성 및 기계적 강도가 높은 PSR의 개발이 필수적이다.<sup>9-12</sup>

본 논문에서는 세라믹-폴리머 복합재료를 사용하여 낮은  $D_k$ 와  $D_f$ 를 가진 PSR을 개발하였다. PSR의  $D_k$ 를 2.0,  $D_f$ 를 0.01 이하로 설정하여 개발을 진행하였다. 그 결과, 1.899의  $D_k$  값과 0.006의  $D_f$  값을 달성하였다. 이렇게 개발된 modified PSR(MPSR)의 유전 특성을 조사하고 상용 PSR 제품과 비교 분석하였다. 특히, 유전손실을 감소시키기 위해서 세라믹 소재로  $D_f$ 가 낮은 소재인 다공성 실리카를 사용하였고, 폴리머 소재로는 자체 개발한 polyimide(PI) 소재를 활용하였다. 향후 어플리케이션 특성 검증을 위해 개발된 MPSR의 현상 (development) 특성과 전송선로 위에 인캡슐레이션 후 전송 손실 변화를 관찰하였다. 그 결과, 80  $\mu\text{m}$ 의 선폭을 현상하는데 기존 PSR의 특성과 동일하게 현상되는 것을 광학현미경으로 확인하였다. 그리고 전송선로 선폭 250  $\mu\text{m}$ 의 S11, S21 결과를 MPSR 인캡슐레이션 유무에 따른 전송선로의 결과를 비교한 결과, 거의 동일한 것으로 나타났다.

## 실 험

$D_k$ 와  $D_f$ 가 낮은 MPSR hybrid ink를 제작하기 위해 상용 PSR(SPI-606, Seoul chemical research laboratory, Korea)을 활용하여 개발하였다. PSR은 주체와 경화제로 이루어진 2액형 용액이며, 4:1의 무게비로 혼합하여 사용하였다. 첨가제 중 핵심 소재는 자체 개발된 modified polyimide(MPI)이며, 25 GHz에서  $D_k$  2.5,  $D_f$  0.002를 나타내는 우수한 소재를 적극 활용하였다(Figure 1(a)). MPI는 이미드 그룹내에 방향족 부분과 지방족 부분이 존재하여 유연성과 내구성, 내열성을 보유하였고, 저온에서 경화가 가능하다. 그 다음 소재로는  $D_k$  값은 높지만,  $D_f$  값이 낮은 다공성 실리카를 활용하여  $D_f$  값을 감소시켰다. 다공성 실리카의 분산성을 위해 계면활성제를 투

여하였고, 향후 노광처리와 현상특성을 위해 라디칼형의 광개시제를 소량 투여하였다. 이런 소재들을 혼합하기 위해 방향족 용매인 아니솔을 활용하였다.

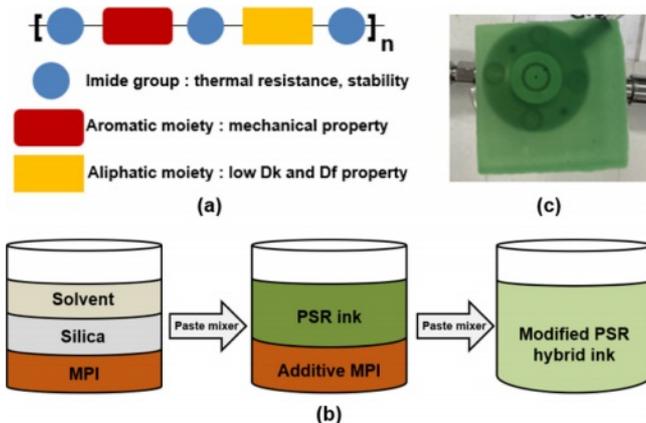
이렇게 혼합된 MPSR 잉크를 고속 페이스트믹서(PDM-300, Deawha tech Co. Ltd, Korea)를 통해 1350 rpm으로 30초간 혼합하였다(Figure 1(b)). 혼합된 MPSR 잉크를 200  $\mu\text{m}$  두께로 이형필름 위에 스텐실 인쇄하였다. 이렇게 인쇄된 MPSR을 레벨링을 위해 상온에 5분간 보관한 뒤에 핫플레이트에서 70  $^{\circ}\text{C}$ 에서 40분간 가경화를 진행하였고, 메탈화라이드 기반의 노광기로 전면 100초(=1000  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ), 이형필름에서 분리시킨 뒤에 뒤집어서 후면 100초(=1000  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ) 노광하였다. 최종 경화를 위해 핫플레이트 200  $^{\circ}\text{C}$ 에서 90분간 진행하였으며 경화가 완료된 MPSR을 이형필름에서 분리시켰다.

분리된 MPSR 필름을 10 GHz 유전율 측정 장비를 통해  $D_k$  값과  $D_f$  값을 측정하였다(Figure 1(c)). 측정이 완료된 필름의 내부 결함의 변화를 관찰하기 위해 Fourier transform infrared spectroscopy(FTIR)를 통해 PSR ink, PSR film, MPSR film의 분석하였다. 향후 어플리케이션 적용을 위해 MPSR의 현상 가능여부를 검증하였고,  $D_k$ 와  $D_f$  특성을 추가 검증하기 위해 테프론 기판에 선폭 250  $\mu\text{m}$ 로 제작된 구리 전극기반의 전송선로 위로 인캡슐레이션 공정을 진행하여 고주파(20-35 GHz) 영역에서 S11, S21 값을 통해 검증하였다.

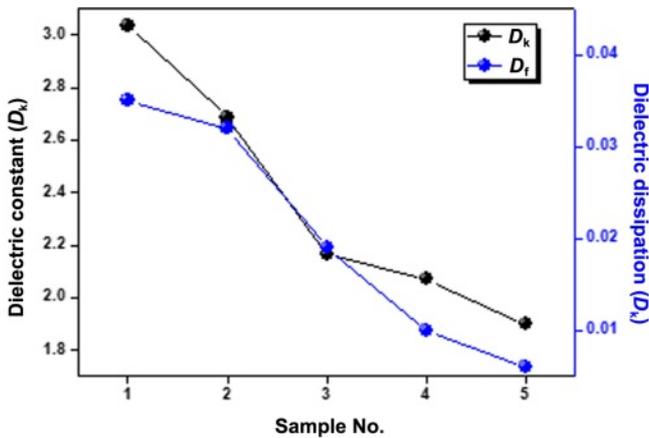
Scattering(S) 파라미터는 RF에서 가장 널리 사용되는 회로 결과 값이다. 주파수분포상에서 입력전압대 출력전압의 비율 의미한다. S11이란, 1번 포트에서 전압을 입력했을 때, 얼마나 반사하는지를 의미한다. 반사되는 것이 적을수록 유전체의 특성이 우수한 것을 의미한다. 그리고 S21이란, 1번 포트에서 입력한 전압과 2번 포트에서 출력된 전압의 비율을 의미한다. 즉, 1번으로 입력된 전력이 2번 포트로는 얼마나 출력되는가를 나타내는 수치이다. 따라서 손실 값이 - 값으로 측정되지만, 0에 가까울수록 전력손실이 없는 것을 의미한다.

## 결과 및 토론

순수(4:1) PSR 필름은 10 GHz에서  $D_k$ 와  $D_f$  이 각각 3.037에서 0.035를 나타냈다(sample 1). 여기서 MPI를 0.5 g만 혼합하여도  $D_k$ 는 2.688,  $D_f$ 는 0.035로 감소하였다(sample 2). MPI 잉크의 함량을 4 g까지 증가와 코팅성을 향상시키기 위해 용해성이 우수한 아니솔 용매를 1 g 첨가하였으며,  $D_k$ 와  $D_f$ 를 2.164, 0.019까지 감소시켰다(sample 3).  $D_f$ 를 추가적으로 감소시키기 위해, MPI 함량을 더 이상 증가할 수 없어,  $D_f$  값이 낮은 소수성의 porous한 다공성 실리카를 0.5 g 첨가하여  $D_k$ 와  $D_f$ 를 2.069, 0.010까지 감소시켰다(sample 4). 그러나, 분산성이 좋지 못하여 표면상태가 좋지 않았으며, 현상공정시 실리카가 스웰링 현상이 나타났다. 이를 해결하기 위해 분산성과 레벨링성을 모두 높일 수 있는 계면활성제(TW-S120V,



**Figure 1.** (a) Molecular structural formula of MPI; (b) image of MPSR film; (c) manufacturing process of MPSR ink.

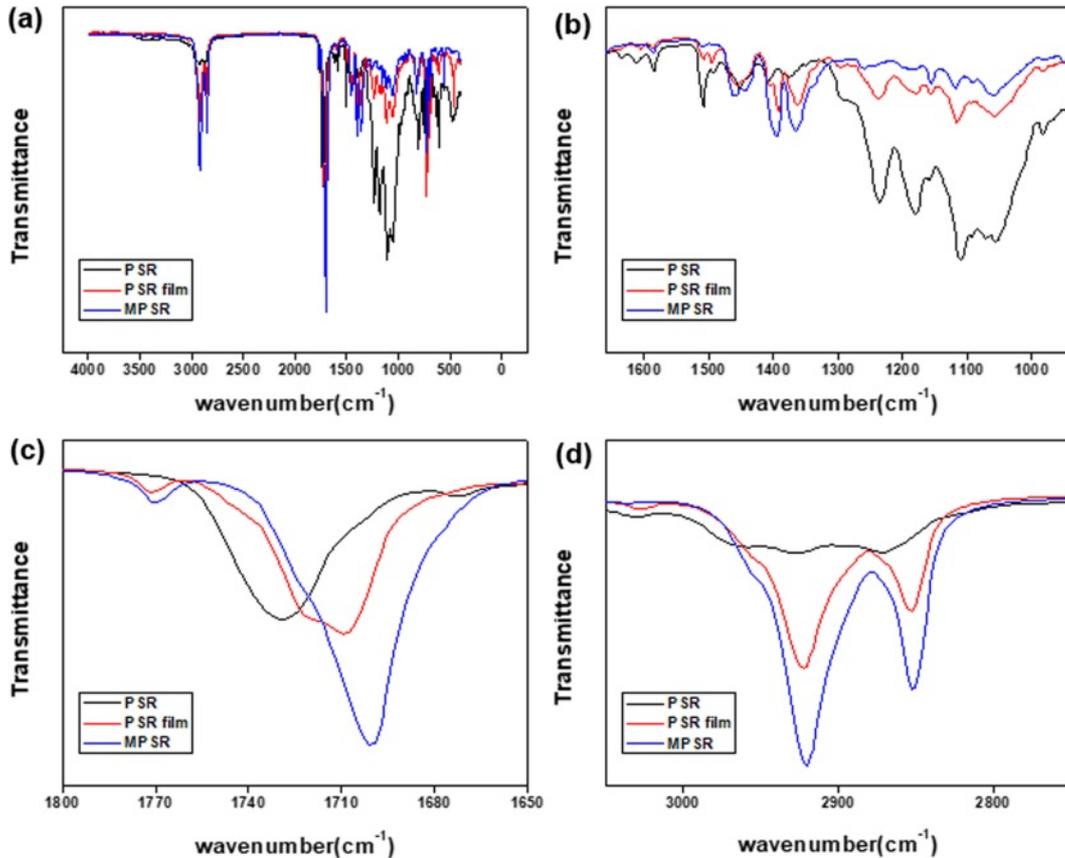


**Figure 2.**  $D_k$  and  $D_f$  values of the PSR change as the process progresses.

Cosnet Co., Ltd, Korea)를 0.1 g을 혼합하여 사용하였다 (sample 5). 마지막으로 MPI는 감광성 소재가 아니므로, 현상 공정이 불가능하다. 현상성을 높이기 위해 라디칼 광개시제(FPP-110MP, FP Co., Ltd, Korea)를 투여하였는데, 이는 라

디칼 농도가 어느 정도 되어야 현상이 가능하다. 따라서, 라디칼 광개시제를 넣음으로써 말레이미드가 주된 소재인 MPI와 고온에서 반응하면 diels-alder 반응에 의해 cyclo-olefin(혹은 norbornene)구조의 폴리이미드로 개질할 수 있고, 이는 유전율을 낮추고 동시에 가교도를 올릴 수 있다. 이렇게 완성된 MPSR의  $D_k$ 와  $D_f$  값은 1.899, 0.006으로 처음 계획한 목표를 달성하였다(Figure 2).

이렇게 완성된 MPSR 필름을 PSR 필름과 PSR ink의 FTIR 분석을 통해 peak 구간별 변화를 관찰하였다(Figure 3(a)). Peak  $1000\text{ cm}^{-1}$ 에서  $1300\text{ cm}^{-1}$ 까지의 구간에서 C-O 결합,  $1500\text{ cm}^{-1}$  부근의 N-O,  $1600\text{ cm}^{-1}$  구간 부근의 C=C 결합의 peak가 감소하였고, 광개시제가 포함된 MPSR film의 경우 더욱 감소한 결과를 나타냈다. 반면,  $1400\text{ cm}^{-1}$  부근의 구간 C-H(Figure 3(b)),  $1690\text{ cm}^{-1}$ 에서  $1770\text{ cm}^{-1}$ 까지의 C=O 구간 peak(Figure 3(c))와  $2840\text{ cm}^{-1}$  부근과  $2950\text{ cm}^{-1}$  부근의 C-H 결합(Figure 3(d)), MPSR film이 PSR ink와 PSR film에 비해 더 증가하였다. 위 결과를 보아, 단일 결합들의 과장 영역인  $1000\text{ cm}^{-1}$ 에서  $1600\text{ cm}^{-1}$  구간에선 감소하고(예외 구간인  $1400\text{ cm}^{-1}$  부근), 다중 결합이  $1650\text{ cm}^{-1}$ 에서  $2950\text{ cm}^{-1}$



**Figure 3.** Measurement results for each FTIR wavelength range of PSR ink, PSR film, and MPSR film: (a) all; (b)  $1000\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ ; (c)  $1650\text{--}1800\text{ cm}^{-1}$ ; (d)  $2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ .

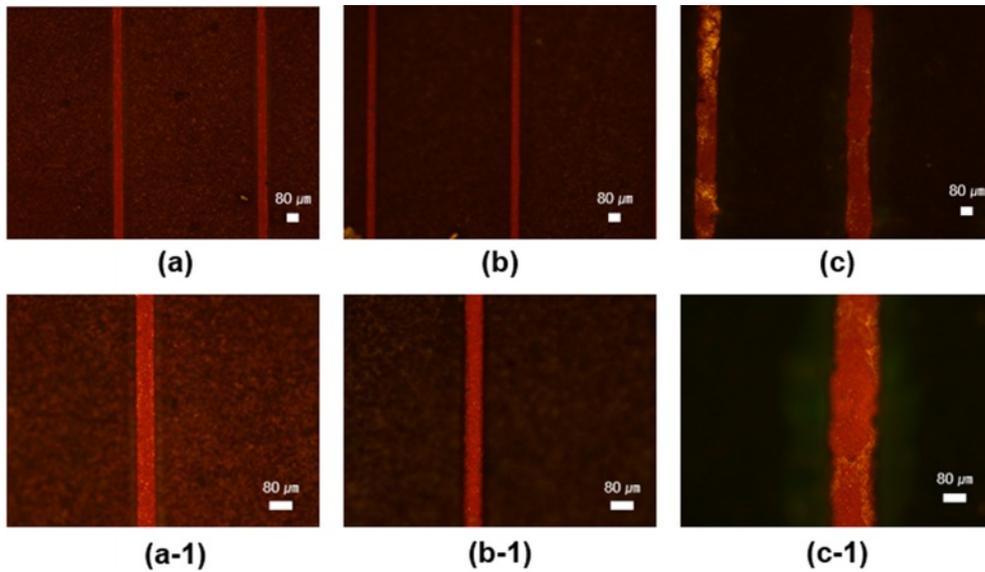


Figure 4. After development process of optical image of (a) PSR; (b) MPSR; (c) PSR/PI, enlarged image: (a-1); (b-1); (c-1).

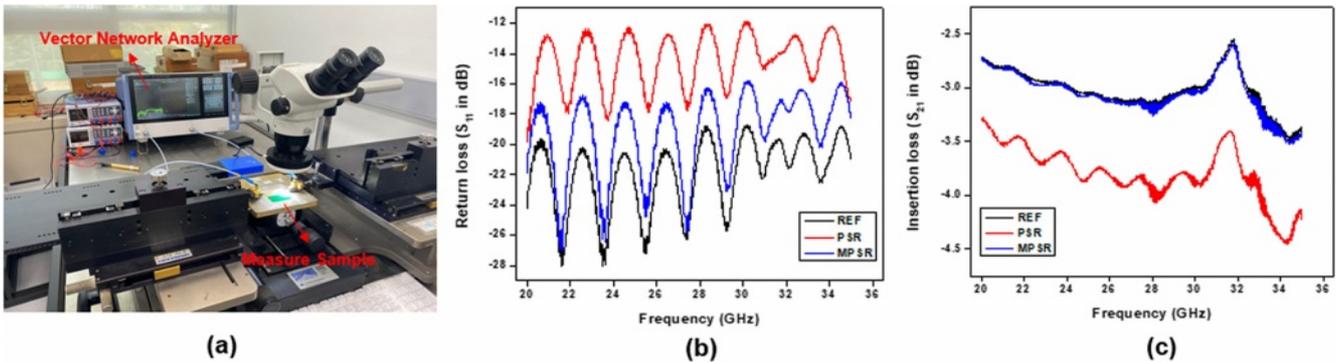


Figure 5. (a) Image of network analyzer; (b) S11; (c) S21 results of each material.

까지의 구간에서는 증가하는 방향으로 나타나면,  $D_k$  값과  $D_f$  값이 감소하는 것을 알 수 있다.

추후, 실제 산업에서 적용가능한지 PSR과 MPI만 혼합된 것(PSR/PI)과 MPSR, PSR 잉크만을 사용한 것을 구리 동박에 80  $\mu\text{m}$  선폭을 패터닝하여 현상공정을 진행하였다. 그 결과를 광학현미경을 통해 MPSR, PSR, PSR/PI의 현상 전후 이미지를 비교하였다. 사이클로펜타논을 통해 현상 공정을 진행한 결과, PSR의 현상정도와 MPSR의 현상정도는 유사하게 우수한 특성을 보이는 반면, PSR/PI의 경우 현상 특성이 감소하는 것을 확인할 수 있었다(Figure 4(c)).

마지막으로, 테프론 기판 위에 구리 도금으로 형성한 250  $\mu\text{m}$  선폭의 전송선로에 PSR과 MPSR ink로 각각 인캡슐레이션 하여 S11, S21 특성을 비교하였다. 측정 장비는 네트워크 어널라이저(vector network analyzer)를 사용하였다. Sweep은

3201번의 point로 결과 값을 나타냈다. Calibration은 250  $\mu\text{m}$  프로브를 활용하였으며, through-open-short-match(TOSM) 방식으로 진행하였다.

반사계수의 S11의 경우 인캡슐레이션을 하지 않은 전송선로(REF), MPSR, PSR 순으로 값이 낮게 측정되었으며, 유사한 경향을 보였다. S11의 반사계수 값은 감소할수록 우수한 특성을 나타내며, REF 샘플의 경우, 가장 낮은 값을 보이는 21 GHz 구간에서 최소 약 -27 dB 손실을 보여주었으며, PSR의 경우 약 -15 dB, MPSR의 경우 약 -27 dB로 우수한 특성을 보였다.

S21의 경우 REF와 MPSR의 특성이 거의 유사하게 나왔고, 손실이 거의 없는 것을 확인하였다. 반면, PSR의 손실은 약 40% 정도 낮게 측정되었다. 이 결과를 통해 MPSR을 도포한 후에도 전송손실 값의 변화가 거의 없는 것을 확인하였다.

## 결 론

MPSR film의 1.899의  $D_k$  값과 0.006의  $D_f$  값을 달성하여 초기 설정한 목표인  $D_k$ 를 2.0,  $D_f$ 를 0.01 이하로 개발하였다.  $D_k$  값과  $D_f$  값이 낮은 MPI, 용해성이 우수한 아니솔 용매, 그리고  $D_f$  값이 낮은 다공성 실리카를 활용하여 1차적으로 PSR을 개질하였다. 현상공정시 스웰링이 발생하는 것을 개선하기 위해 분산제이자 계면활성제인 rheodol을 통해 표면의 조도를 개선하고, 스웰링을 방지하였다. 마지막으로 분자내부개열 타입의 광개시제를 통해 MSPR의 현상성을 증가시켰으며, 기존의 PSR과 유사한 현상 특성을 나타나게 개발하였다. 마지막으로, 실제 전송선로 전극 위에 인캡슐레이션하여 S11과 S21 값을 측정하였을 때, S11에서 21 GHz 기준으로 REF 약 -27 dB, PSR의 경우 약 -15 dB, MPSR의 경우 약 -27 dB로 거의 차이가 없는 것을 보여줬으며, S21에서도 MPSR이 PSR보다 약 40% 이상 우수한 결과를 보였다.

**감사의 글:** 본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제고유번호: RS-2023-00228627).

**이해상충:** 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

## 참 고 문 헌

1. Alanazi, M. D. A Review of Dielectric Resonator Antenna at Mm-Wave Band. *Eng.* **2023**, 4, 843-856.
2. Lou, W.; Mao, M.; Song, K.; Xu, K.; Liu, B.; Li, W.; Yang, B.;

- Qi, Z.; Zhao, J.; Sun, S.; Lin, H.; Hu, Y.; Zhou, D.; Wang, D.; Reaney, I. M. Low Permittivity Cordierite-based Microwave Dielectric Ceramics for 5G/6G Telecommunications. *J. Eur. Ceram.* **2022**, 42, 2820-2826.
3. Kim, M.; Bae, B.; Cheon, J. Experimental Characterization of Millimeter-Wave Substrate-Integrated Waveguide Interconnect with Slot Transition in Flexible Printed Circuit Boards. *Electronics* **2022**, 11, 2995.
4. Choi, J. H.; An, C. H. Development of an Online Monitoring Device for the Mixing Ratio of Two-Part Epoxy Adhesives Using an Electrical Impedance Spectroscopy Technique and Machine Learning. *Processes* **2022**, 10, 951.
5. Kim, D. K.; Park, S. D.; Yoo, M. J.; Sim, S. H.; Kyoung, J. B. Fabrication of Photosensitive Polymer Resistor Paste and Formation of Finely-Patterned Thick Film Resistors. *J. Ind. Eng. Chem.* **2009**, 20, 622-627.
6. Kim, D. K.; Park, S. D.; Lee, K. B.; Kyoung, J. B. Thick Film Resistors with Low Tolerance Using Photosensitive Polymer Resistor Paste. *Appl. Chem. Eng.* **2010**, 21, 411-416.
7. Mahan, K.; Kim, B.; Wu, B.; Han, B.; Kim, I.; Moon, H.; Hwang, Y. N. Modified Single Cantilever Adhesion Test for EMC/PSR Interface in Thin Semiconductor Packages. *Microelectron. Reliab.* **2016**, 63, 134-141.
8. Anderson, T. L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. *CRC Press*, 2017.
9. Alshabo, A.; Stirling, D.; Ros, M.; Vial, P. J.; Wysocki, B.; Wysocki, T. An Approach to Ultra-Wideband Channel Calibration using a Vector Network Analyser. *Aust. J. Electr. Electron.* **2014**, 11, 347-356.

**출판자 공지사항:** 한국고분자화학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.