

친환경 전기전도성 접착체의 고성능과 지속 가능성을 위한 은(Ag) 함량 최적화

조은애¹, 정채환^{1,2} 

¹ 한국생산기술연구원 에너지나노그룹

² 국가연구소대학교 청정공정 및 에너지시스템공학과

Eco-Friendly Electrically Conductive Adhesives: Silver Optimization for High Performance and Sustainability

Eunae Jo¹ and Chaehwan Jeong^{1,2}

¹ Energy and Nano Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 61012, Korea

² Green Process and Energy System, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

(Received January 21, 2025; Revised February 3, 2025; Accepted February 4, 2025)

Abstract: The growing demand for miniaturized, lightweight, and sustainable electronic devices has intensified the need for advanced bonding materials. Existing electrically conductive adhesives (ECAs) often rely on high silver (Ag) content, resulting in elevated costs and environmental concerns. This study successfully developed a novel ECA with significantly reduced Ag content without compromising essential electrical conductivity and adhesion performance. Experimental results revealed that the optimized ECA demonstrates electrical conductivity comparable to that of commercial products, with notable advantages in cost reduction and eco-friendliness. These advancements position the developed ECA as a promising solution for next-generation electronic manufacturing, contributing to low-carbon technologies and sustainable practices. Future applications could further broaden its use across diverse electronic systems, driving progress in environmentally conscious technologies.

Keywords: Electrically conductive adhesives (ECAs), Low silver content, Electrical conductivity, Cost reduction, Low-carbon technologies

1. 서론

전자 기기의 소형화, 경량화, 그리고 친환경적 특성이 강조됨에 따라 전기전도성 접착제(electrically conductive adhesives, ECA)에 대한 수요가 증가하고 있다 [1]. 특히,

태양광 모듈의 와이어링 및 다중 버스바(multi busbar, MBB) 기술은 전력 손실을 줄이고 효율을 높이기 위해 필수적인 접합 기술로 주목받고 있다 [2-4]. 이러한 응용에서 ECA는 낮은 공정 온도와 다양한 소재와의 접합 가능성을 제공하여 기존 솔더링(soldering) 기술의 대안으로 부상하고 있다 [3].

전통적인 솔더링은 높은 공정 온도와 납 사용으로 인해 환경적 문제를 초래하며, 민감한 부품에는 적용하기 어려운 한계가 있다 [4,6]. 이에 따라 환경 친화적이고 낮은 온도에서 공정이 가능한 ECA의 필요성이 대두되고 있다 [7].

✉ Chaehwan Jeong; chjeong@kitech.re.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.

그러나 현재 상용 ECA는 높은 은(Ag) 함량으로 인해 경제적 부담이 크고, 자원 효율성이 낮다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 최근 연구에서는 두 가지 접근법이 주목받고 있다.

첫째, Ag 함량을 줄이면서도 전기전도성을 유지하기 위한 새로운 소재와 첨가제 개발이 활발히 이루어지고 있다 [8-10]. 둘째, 나노 입자 기술을 활용하여 전기전도도와 접착 특성을 개선하고, 낮은 공정 온도에서도 고성능 접합이 가능한 기술이 제안되고 있다 [11-13].

본 연구에서는 Ag 함량을 최적화하여 비용 절감과 환경적 지속 가능성을 강화한 새로운 ECA를 개발하고, 이를 상용 ECA와 비교하여 전기적, 열적, 미세구조적 특성을 평가하였다. 본 연구의 결과는 태양광 모듈 및 전자 기기의 제조 공정에서 경제적이면서도 지속 가능한 대안을 제공할 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

2.1 ECA 제조

본 연구에서는 전도성 접착제(ECA)를 제조할 때, 주요 구성 요소인 전도성 필러, 폴리머 매트릭스, 그리고 첨가제를 정밀하게 혼합하여 최적의 기계적 및 전기적 특성을 구현하였다. 전도성 필러로는 Ag 플레이크(flake)를 사용하였으며, 플레이크의 종류는 표 1에서 제시된 바와 같이 4 μm 와 11 μm 크기의 플레이크가 혼합된 경우와 4 μm 와 8 μm 크기의 플레이크가 혼합된 두 가지를 선택하였다. 폴리머 매트릭스로는 아크릴레이트 기반의 올리고머와 모노머를 사용하였고, 첨가제로는 실란과 경화제를 첨가하여 Ag 플레이크와 레진 매트릭스 간의 계면 접착력을 강화하고 전반적인 성능을 향상시켰다.

제조 공정은 크게 원료 혼합, 분산, 경화의 세 단계로 진행되었다(그림 1). 먼저, Ag 플레이크와 아크릴레이트 기

반의 올리고머 및 모노머를 3롤 밀을 이용하여 균일하게 혼합한 후, 첨가제를 추가하고 교반 혼합기를 사용하여 최종 분산을 완료하였다. 이후, 제조된 ECA는 Ag 함량 및 플레이크의 종류에 따라 세 가지 샘플로 구분되었으며, 경화는 120°C에서 1분간 열풍 건조 방식으로 진행했다.

구체적으로, Commercial ECA의 경우 제조사에서 확인한 바에 따르면 4 μm 와 11 μm 크기의 Ag 플레이크를 사용하여 Ag 함량 80 wt%로 제조되었다. 이에 비해 본 연구의 초기 조건인 ECA #1은 동일한 크기의 Ag 플레이크를 적용하되 Ag 함량을 65 wt%로 낮추어 제조했다. 이후 ECA #2에서는 Ag 함량을 65 wt%로 유지하면서, 전기적 특성 보존을 위해 11 μm 보다 작은 8 μm 크기의 Ag 플레이크를 사용하여 플레이크 간 접촉 면적을 확대함으로써 전도 네트워크를 강화하고자 하였다. 마지막으로, ECA #3은 ECA #2보다 Ag 함량을 낮추어 60 wt% 조건으로 진행하여, Ag 함량 감소에도 불구하고 전기적 특성이 유지되는지를 검증하고자 했다.

표 1에 본 연구에서의 ECA 조건을 상세히 제시하였으며, 각 샘플의 조성 및 제조 조건을 통해 전도성 필러의 크기 및 함량 변화가 전기적 및 기계적 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고자 했다.

2.2 ECA 특성 분석

ECA 샘플에 대해 점도(viscosity), 열중량 분석(TGA),

Table 1. Ag flake conditions of each sample.

Sample	Ag (wt%)	Ag size (μm)
Commercial ECA [13]	80	4, 11
ECA #1	65	4, 11
ECA #2	65	4, 8
ECA #3	60	4, 8

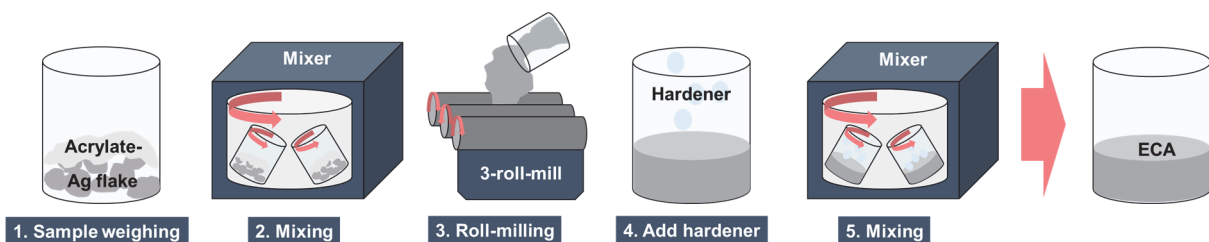


Fig. 1. ECA fabrication process.

주사전자현미경(FE-SEM), FT-IR 분광 분석, 비저항 측정을 수행하였다. 점도는 다양한 전단 속도에서 측정하여 분산 안정성을 평가하였으며, TGA는 Ag 함량과 열적 안정성을 확인하는 데 사용하였다. FE-SEM을 통해 미세구조를 관찰하여 전도성 필러의 분포 및 네트워크 형성을 분석하였고, FT-IR 분석은 화학적 결합과 구조적 차이를 평가하는 데 활용했다. 비저항 측정은 전기전도성 평가를 위해 4-point 프로브를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 ECA의 FT-IR 분석 결과를 보여준다. FT-IR 분석 결과, 상용 ECA와 제조된 ECA #1~3은 유사한 화학적 결합 특성을 보였다. C=O, C-O, 방향족 고리 등의 피크가 모든 샘플에서 확인되었으며, 이는 ECA의 주요 구성요소인 폴리머와 Ag의 간의 상호작용을 반영한다 [15]. 다만, ECA #1~3은 상용 ECA에 비해 O-H 피크가 상대적으로 크게 나타나는 것으로 보아 Ag 함량을 줄인 데에 영향을 받은 것으로 보인다 [16].

ECA의 점도는 다양한 전단 속도(0.3~5 rpm)에서 측정되었으며, 평균 점도 값을 통해 분산 안정성을 평가하였다. 그림 3과 표 2를 통해 알 수 있듯이, 상용 ECA는 5 rpm에서 평균 15,331 cP로 가장 높은 점도를 나타냈다. 이는 높은 Ag 함량과 조밀한 필러 분포로 인한 결과로 해석된다. 반면, 제조된 ECA 샘플에서는 ECA #2가 평균 8,202 cP로 상용 ECA와 가장 유사한 점도를 보였다. ECA #1은 낮은 Ag 함량과 불균일한 입자 분포로 인해 0.5 rpm에서 점도가 불안정하게 나타났으며, ECA #3은 6,568 cP로 안정적인 점도를 보이며 상용 ECA를 대체할 가능성을 보여주

었다. 이 결과는 제조 공정에서 필러 분산과 네트워크 형성이 점도에 미치는 영향을 확인할 수 있는 중요한 지표로 활용될 수 있다 [17,18].

그림 4는 TGA 분석 결과이다. TGA 결과에서, 상용 ECA는 높은 Ag 함량과 안정적인 열적 특성을 보였으며, 400°C 이상에서도 잔여 중량이 높게 유지되었다. 반면, ECA #1~3은 Ag 함량 감소로 인해 잔여 중량이 상대적으로 낮았으나, 열적 안정성 측면에서 실용적인 수준을 유지하였다. 이는 ECA #1~3이 상용 ECA에 비해 자원 효율성을 강화하면서도 충분한 성능을 제공할 수 있음을 나타낸다 [19,20].

그림 5는 ECA 경화 후, FE-SEM으로 표면을 관찰한 이미지 결과이다. 상용 ECA는 균일한 필러 분포와 치밀한 네트워크를 보여 전기전도성이 극대화된 구조를 나타냈다 [1,4,15,17,21]. 반면 ECA #1은 필러의 분포가 불균일하여 일부 입자 간 연결성이 부족할 가능성이 관찰되었다. ECA #3은 상용 ECA와 유사한 분포를 보이며, 필러 간 밀접한 연결로 인해 우수한 전기전도성을 기대할 수 있는 구조를 형성하였다.

비저항 측정 결과(표 3), ECA #3은 $1.4 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 로 상용 ECA 대비 우수한 전기전도성을 나타냈다. 이는 Ag 함량 감소에도 불구하고 필러 간 네트워크 형성이 최적화되었음을 보여준다 [1,4,15,17,21].

Table 2. Average viscosity of ECAs at 5 rpm.

Sample	Commercial ECA	ECA #1	ECA #2	ECA #3
Average viscosity (cP)	15,331	2,539	8,202	6,568

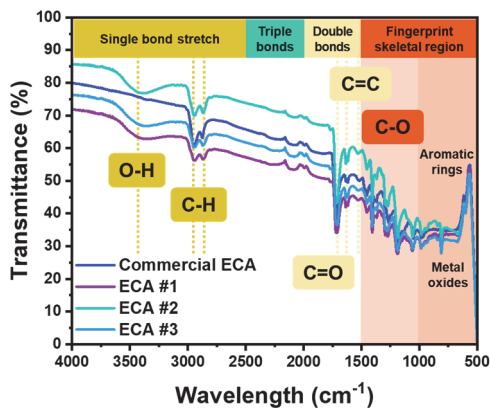


Fig. 2. FT-IR spectra of ECAs.

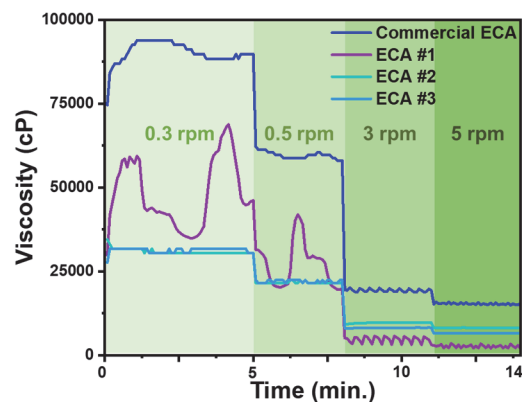


Fig. 3. Viscosity profiles of ECAs.

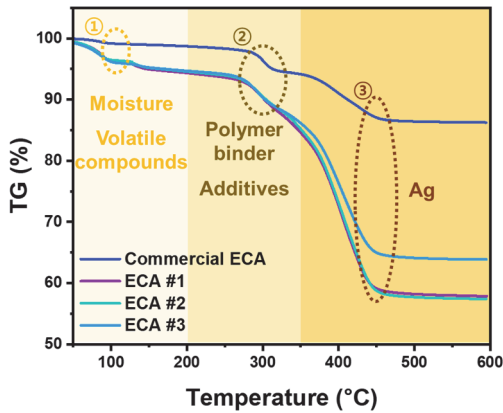


Fig. 4. TGA analysis of ECAs.

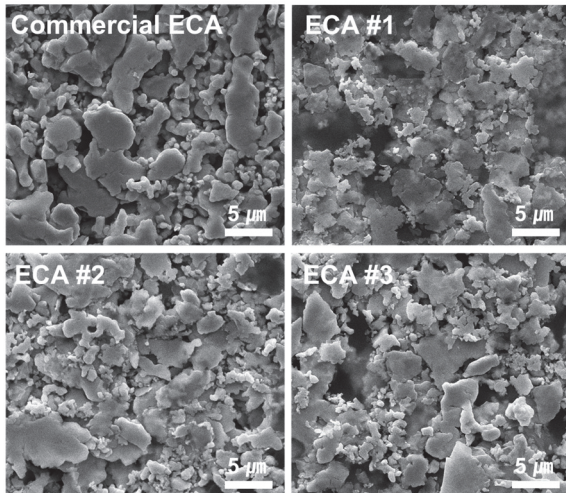


Fig. 5. Surface morphology images of commercial and developed ECAs observed by Fe-SEM.

Table 3. Resistivity of ECA calculated from sheet resistance measurement by 4-point probe.

Sample	Commercial ECA	ECA #1	ECA #2	ECA #3
Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)	3.9×10^{-4}	1.8×10^{-4}	1.8×10^{-4}	1.4×10^{-4}

4. 결론

본 연구에서는 친환경적이고 고성능 전기전도성 접착제 (ECA)를 개발하기 위해 Ag 함량을 최적화하고, 이를 상용 ECA와 비교하여 다양한 특성을 분석하였다. 본 연구에서 개발한 ECA는 상용 ECA 대비 최대 25%까지 은 함량을 감

소시켰음에도 불구하고 우수한 전기적 특성을 유지하였다. 특히, ECA #3은 비저항 값 $1.4 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 로 가장 뛰어난 전기 전도성을 보였으며, 이는 필러 네트워크 형성의 최적화를 통해 구현된 결과이다. 이러한 성과는 비용 절감과 자원 효율성을 강화하면서도 고성능을 유지할 수 있는 가능성을 보여준다. 열 중량 분석과 점도 분석 결과, 개발한 ECA는 Ag 함량 감소에도 불구하고 실용적인 열적 안정성과 안정적인 분산 특성을 유지하였으며, 특히 ECA #3은 상용 ECA에 근접한 점도를 보였다. FE-SEM과 FT-IR 분석을 통해 ECA #3은 균일한 필러 분포와 유사한 화학적 결합 구조를 확인하여 높은 전기전도성과 신뢰성을 확보할 수 있음을 입증하였다.

결론적으로, 본 연구는 Ag 함량 최적화가 고성능 전기 전도성과 환경적 지속 가능성을 동시에 달성할 수 있는 효과적인 전략임을 보여준다. 이는 태양광 모듈 및 전자 기기 제조 공정에서 상용 ECA를 대체할 수 있는 경제적이고 친환경적인 대안을 제시할 수 있을 것으로 기대되며, 앞으로의 연구에서는 기계적 안정성 및 장기 신뢰성 평가를 통해 다양한 응용 분야에서의 실질적인 가능성을 검증할 필요가 있다.

ORCID

Chaehwan Jeong

<https://orcid.org/0000-0002-8577-1853>

감사의 글

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00303745, 탄소배출이 적고 재활용이 용이한 모듈 소재 및 공정 기술개발).

REFERENCES

- [1] D. Chen, X. Qiao, X. Qiu, F. Tan, J. Chen, and R. Jiang, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **21**, 486 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-009-9943-y>
- [2] B. Hartweg, K. Fisher, and Z. Holman, *Proc. 47th IEEE PVSC* (IEEE, Calgary, AB, Canada, 2020).
doi: <https://doi.org/10.1109/PVSC45281.2020.9300776>
- [3] J. Kim and J. Lee, *Curr. Photovolt. Res.*, **11**, 34 (2023).
doi: <https://doi.org/10.21218/CPR.2023.11.1.034>
- [4] X. Yang, W. He, S. Wang, G. Zhou, and Y. Tang, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **23**, 108 (2012).

- doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-011-0485-8>
- [5] J. Kim and J. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 136 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.2.5>
- [6] C.M.V.B. Almeida, M. A. Madureira, S. H. Bonilla, and B. F. Giannetti, *J. Clean. Prod.*, **47**, 457 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.002>
- [7] P. Lall, J. Narangaparambil, V. Soni, and S. Miller, *Proc. 73rd IEEE ECTC* (IEEE, Orlando, FL, USA, 2023).
doi: <https://doi.org/10.1109/ECTC51909.2023.00036>
- [8] A. X. Chen, N. A. Azpiroz, S. E. Brew, A. M. Valdez, G. L. Esparza, Y. Qie, N. J. Valdez, R. Blau, J. A. Bunch, T. J. Perry, T. Rafeedi, A. Abdal, I. Simon, D. W. Harwood, D. J. Lipomi, and D. P. Fenning, *Cell Rep. Phys. Sci.*, **5**, 101967 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.101967>
- [9] J. Guo, C. Su, J. Liu, J. Cheng, J. Zhang, and F. Gao, *Polymer*, **300**, 126959 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.126959>
- [10] Y. Xu, B. Cui, X. Zhang, Y. Sun, and B. Lin, *Surf. Interfaces*, **46**, 104137 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.104137>
- [11] M. I. D. Acevedo, R. Wells, S. Grober, K. Wienands, D. Rudolph, A. Halm, R. Gottschalg, and D. Tune, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, **33**, 143 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1002/pip.3787>
- [12] T. Chen, L. Liu, L. Han, X. Yu, X. Tang, W. Li, Z. Qian, J. Li, and G. Gan, *Langmuir*, **40**, 12059 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c00830>
- [13] F. Zhang, N. Tang, Q. Jiang, K. Qi, X. Zhu, Z. Luo, X. Kong, D. Zang, H. Liu, and B. Fang, *Polym. Compos.*, **45**, 5781 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1002/pc.28188>
- [14] *Ablestik ICP 8311-EN Technical Data Sheet*.
<http://caplinq.com/loctite-ablestik-cip-8311-icp8311.html> (Accessed 08 January 2025).
- [15] X. M. Zhang, X. Yang, and B. Wang, *Int. J. Adhes. Adhes.*, **105**, 102785 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102785>
- [16] K. Kayed, M. Issa, and H. Al-Ourabi, *J. Exp. Nanosci.*, **19**, 2336227 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1080/17458080.2024.2336227>
- [17] E. Sancaktar and L. Bai, *Polymers*, **3**, 427 (2011).
doi: <https://doi.org/10.3390/polym3010427>
- [18] P. Latko-Duratek, R. Kozera, J. Macutkevicius, K. Dydek, and A. Boczkowska, *Materials*, **13**, 4469 (2020).
doi: <https://doi.org/10.3390/ma13204469>
- [19] S. Xu and D. A. Dillard, *J. Adhes.*, **76**, 699 (2003).
doi: <https://doi.org/10.1080/00218460390219564>
- [20] H. Cui, A. Kowalczyk, D. Li, and Q. Fan, *Int. J. Adhes. Adhes.*, **44**, 220 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.03.004>
- [21] J. Wang, X. Feng, W. Li, Y. Wu, and J. Shen, *Colloid Polym. Sci.*, **303**, 119 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1007/s00396-024-05336-w>