THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2025 September; 36(9), 829～835.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2025.36.9.829
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

폐 태양광 모듈 유래 실리콘 회수를 위한 마이크로파 용융로의 반사파 세기에 기반한 적응형 출력 제어 기술

Adaptive Power Control Based on Reflected Strength for a Microwave Melting Furnace Used to Recover Silicon from Waste Photovoltaic Modules

류승환 · 김선욱 · 정회경 · 박형기*

Seunghwan Ryu · Sunwook Kim · Hoekyung Jeong · Hyungki Park*

요 약

국내 태양광 모듈의 대량 보급에 따라 폐 모듈의 발생이 급증하고 있으며, 이로 인해 환경 유해성 저감 및 자원 회수를 위한 효율적인 처리 기술이 요구되고 있다. 본 연구에서는 마이크로파를 열원으로 활용한 고온 용융 시스템을 구축하고, 폐 태양광 모듈로부터 실리콘을 회수하기 위한 용융 환경에서 반사파 세기에 기반한 적응형 출력 제어 기법을 적용하였다. 총 8개의 마그네트론을 3축 직교 배열로 배치하여 입체적인 전자기장 형성을 유도하였고, 실시간 반사파 측정과 출력 피드백 제어 시스템을 통해 공진 조건을 유지하였다. 본 연구를 통해 출력에 따른 승온 특성을 분석하였고, 반사파 제어를 통해 승온 효율을 향상시켰다. 그 결과, 출력 80 % 수준과 반사파 0.4 kW 이하 유지 조건에서 안정적인 1,400℃ 도달과 함께 시스템 효율성이 극대화됨을 확인하였다. 본 연구는 폐 태양광 모듈의 친환경 처리와 자원화에 기여할 수 있는 실용적 기술 기반을 제공한다.

Abstract

With the expansion of photovoltaic (PV) deployment in Korea, the number of end-of-life solar modules is rapidly increasing. These modules require efficient treatment technologies for environmental safety and resource recovery. In this study, a microwave-based melting furnace with adaptive power control was developed based on reflected wave strength to recover silicon and improve energy efficiency. Eight magnetrons in a three-axis orthogonal configuration ensured uniform heating, and the real-time reflected wave system enabled dynamic feedback control. Two series of experiments were used to evaluate the temperature increase characteristics and effect of the reflected wave control. The results show that stable heating at temperatures up to 1,400℃ was achieved with optimal efficiency during operation at 80 % power with reflected power below 0.4 kW. Therefore, this study offers a practical solution for eco-friendly and resource-efficient disposal of waste PV modules.

Key words: Microwave Heating, Reflected Wave Control, Waste Solar Modules, Power Optimization, Real-Time Measurement

「이 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 녹색혁신기업 성장지원 프로그램 사업의 지원을 받아 연구되었음(RS-2022-KE002068).」

㈜에이치에스쏠라에너지(HS Solar Energy Co., Ltd.)

*한국생산기술연구원(Korea Institute of Industrial Technology)

· Manuscript received June 18, 2025 ; Revised July 28, 2025 ; Accepted August 28, 2025. (ID No. 20250618-003S)

· Corresponding Author: Sunwook Kim (e-mail: skim@hsse.co.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ⅰ. Introduction

국내 태양광 발전 설비가 도입된 지 20년 이상 지남에 따라, 폐 태양광 모듈의 발생이 급증하고 있다. 그림 1은 폐 태양광 모듈의 발생 전망을 나타내고 있다. 이러한 폐 모듈은 자원 회수의 가치가 높지만, EVA, 셀 잔류물 등 환경 유해성 물질이 포함되어 있어 단순 매립이나 소각은 2차 오염을 유발할 수 있다. 이에 따라, 자원 회수와 환경 안전을 동시에 고려한 처리 기술 개발이 요구되고 있다.

본 연구는 마이크로파를 열원으로 활용한 고온처리 방식을 통해 내부 유전체 발열을 유도하고, 신속하고 균일한 가열이 가능한 시스템을 제안한다. 특히 마이크로파 시스템에서 문제가 되는 반사파를 실시간으로 계측하고, 이를 기반으로 출력 제어를 수행함으로써 시스템 안정성과 에너지 효율을 확보하고자 한다.

Ⅱ. Review of Existing Technologies and Differentiating Features

폐 태양광 모듈의 처리 기술은 기계적 파쇄, 전기 가열, 산 처리, 소각 등 다양한 방식이 존재한다[1]. 기계적 방식은 물리적 분리에는 용이하지만 유해물 제거에 한계가 있고, 전기 가열 방식은 높은 온도 도달이 가능하나 가열 속도가 느리고 에너지 소비가 크다. 산 처리는 분리 효율은 높지만, 화학물질 사용에 따른 환경적 부담이 크다. 최근에는 플라즈마 기반 고온처리와 같은 방식도 연구되고

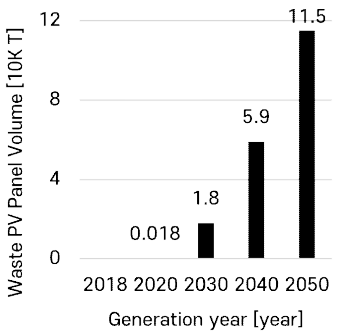


그림 1. 폐 태양광 모듈 예상 발생량
Fig. 1. Projected generation of waste solar modules.

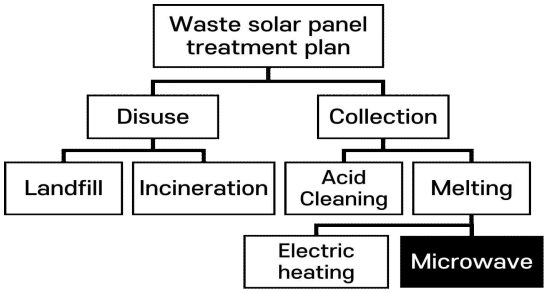


그림 2. 폐 태양광 모듈의 처리 방법에 대한 개요
Fig. 2. Overview of waste solar module treatment methods.

있다[2]. 그림 2는 폐 태양광 모듈 처리 방법에 대한 개요도를 나타낸다.

폐 태양광 모듈의 처리공정은 지금까지 주로 저항 가열 방식이나 화학적 열분해 방식에 기반해 연구되었으며, 에너지 효율성 측면에서 한계를 지닌다. 본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위해 마이크로파 기반의 고온처리 시스템을 개발하고, 안정성과 효율을 확보하였다. 현재 마이크로파 기반의 가열 시스템이 적용된 사례는 많지 않으며, 본 연구는 해당 기술의 초기 적용 사례로서, 유의미한 실험 결과를 제시한다.

마이크로파 유전체 가열은 재료 내부의 유전손실계수(ε")에 따라 발생하는 유도 전류를 통해 발열이 유도되는 원리이다. 특히 고온 영역에서는 유전손실계수가 증가하여 마이크로파 흡수율이 향상되어 빠른 승은을 가능하게 한다[3]. 하지만 공진 조건이 불안정할 경우 반사파가 증가하여 출력 손실 및 장비 수명 저하 문제가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 마이크로파를 열원으로 활용하여 고온처리를 수행하고, 반사파 계측 기반의 실시간 출력 제어와 3축 배열 구조를 결합하여 기존 기술의 한계를 보완하고, 안정적인 고온처리 기반 기술을 확보하고자 한다. 이는 폐 태양광 모듈 열처리 분야에 새로운 적용 가능성을 제시한다는 점에서 차별성을 갖는다.

Ⅲ. System Configuration and Experimental Methodology

3-1 마이크로파 고온처리 시스템 개요

본 연구에서 구축한 마이크로파 기반 고온처리 시스템

은 폐 태양광 모듈 내의 태양전지를 신속하고 균일하게 가열하기 위한 구조로 설계되었으며, 총 8개의 마그네트론(magnetron)을 사용하여 최대 24 kW의 출력을 구현할 수 있도록 하였다. 사용된 마그네트론은 산업용 고출력모델인 2M285 모델로, 각 장치는 중심 주파수 2.45 GHz의 약 3 kW 출력을 제공하며, 개별 제어가 가능하도록 구성하였다.

3-2 마그네트론 배열 및 챔버구조

마그네트론은 3축 직교 방식으로 배열되어 X축 방향 2개, Y축 방향 2개, Z축 방향 4개로 구성되었고, 이러한 직교 배열은 입체적인 전자기장 분포를 형성하여, 서셉터(susceptor, 부하)의 가열 균일성을 확보하고 국부 가열(hot spot)을 방지하는데 기여한다(그림 3). 가열 챔버는 SUS 304 스테인리스 재질의 판을 4면 조립식 구조로 설계하여 외부 누설 전자파를 최소화하였으며, 내부에는 단열 세라믹으로 이루어졌다[3].

일반적으로 화학 반응을 유도하는 시스템은 반응의 일관성을 위해 챔버의 가열 균일성이 핵심적인 설계요소로 고려된다. 그러나 본 연구에서는 폐 태양광 모듈 셀 스크랩을 고온에서 용융하는 공정 특성상, 에너지를 전체에 분산시키는 것보다 집중시키는 것이 효과적인 방식으로 판단하였다. 이에 따라 시스템은 에너지 집중과 전자기장 밀도 최적화를 우선하여 설계하였다.

설계의 타당성을 검증하기 위해 전자기장 시뮬레이션을 통해 전계 분포를 분석하였으며, 열화상 카메라(FLIR 모델) 측정을 통해 실제 가열된 부하의 표면 온도 분포를 관찰하였다. 그 결과, 고온이 형성된 영역이 중심에 집중

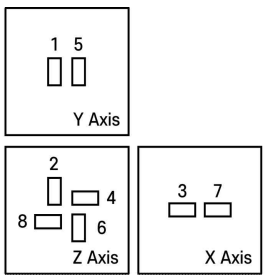
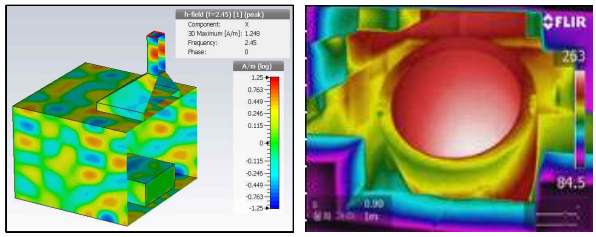


그림 3. 시스템의 마그네트론 3축 직교 배열
Fig. 3. Three-axis orthogonal arrangement of magnetrons.



(a) (b)

그림 4. (a) 전자기파 시뮬레이션 결과, (b) 열화상 카메라 촬영 결과
Fig. 4. (a) Results of electromagnetic wave simulation, (b) Results of infrared thermography.

되었으며 설계와 일치함을 확인하였다. 관련 결과는 그림 4(a) 및 그림 4(b)에 제시하였다.

3-3 반사파 측정 및 제어 시스템

마이크로파 시스템 운용 시 출력 안정성을 확보하기 위해 실시간 반사파 측정장치를 마그네트론과 직접 연결된 웨이브 가이드(WR-340 규격)에 탑재하였다. 각 마그네트론에 전력 분배기를 연결하고, 디렉셔널 커플러(directional coupler) 및 파워센서를 이용해 정방향 및 반사 방향의 마이크로파 전력을 측정한다[4].

본 시스템은 측정한 반사파 변화를 PID(proportional integral derivative) 제어 기반의 피드백 알고리즘을 통해 구현하였으며, 해당 제어 방식은 실시간으로 계측된 반사파를 기준값과 비교하여, 오차에 따라 출력을 비례(P), 적분(I), 미분(D) 요소로 연산하여 조정한다. 이를 통해 반사파의 급격한 증가를 억제하고, 시스템의 공진 조건을 안정적으로 유지하였다. 공진 조건이란 반사파가 최소화되어 에너지가 효과적으로 흡수되는 상태로, 출력 안정성과 가열 효율성을 확보할 수 있는 상태를 말한다. 신호의 경로는 그림 5의 다이어그램을 통해서 확인할 수 있다.

본 연구에서는 시제품 시스템의 하드웨어 구성 및 예산상의 한계로 인해 디렉셔널 커플러가 Z축 1개의 마그네트론에만 설치되어 있어 8개의 마그네트론 각각의 반사파 전력을 동시 측정하기에는 제한이 있었다. 다만, 반사파 분포 특성을 확인하기 위해 반사파가 입사된 포트를 통해 되돌아가는 것이 아니라 다른 포트로 분산되는

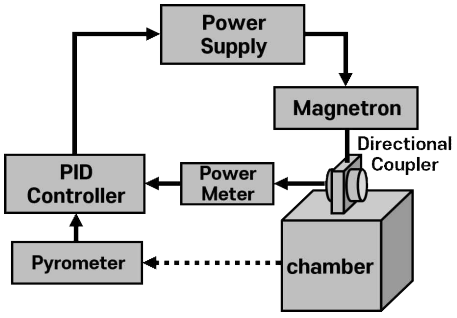


그림 5. 전체 시스템 블록 다이어그램
Fig. 5. System block diagram.

점을 고려하여 각 채널 마그네트론을 단독으로 작동시키고, 반사파 전력을 측정하였다.

그 결과, 각 마그네트론 채널에서 측정된 반사파 수준은 유사한 경향을 보였으며, 값은 아래 표 1과 같다. 특정 채널에서만 비정상적으로 높은 반사파가 나타나는 경우가 없어, 단일 디렉셔널 커플러 기반 측정 시스템이 시스템 반사파 특성을 대표하는 것이 타당하다는 결론에 도달하였다.

3-4 온도 측정 및 제어 시스템

가열 챔버 내부의 온도는 비접촉식 적외선 온도 센서(pyrometer, IMPAC140)를 통해 측정하였다. 특히 실시간 온도 모니터링을 기반으로 마그네트론 출력을 PID 제어하여 일정한 온도 프로파일을 유지할 수 있도록 구성하였다[6].

3-5 부가요소

반사파를 효과적으로 제어하기 위해 3-스터브 튜너(3-stub tuner)를 사용하였으며, 이를 통해 가열 중 시료의

표 1. 마그네트론별 반사파 전력 측정값
Table 1. Reflected power measurements for individual magnetrons.

(unit: kW)

Channel	Reflected wave	Channel	Reflected wave
1 (X)	0.013	5 (X)	0.013
2 (Z)	0.015	6 (Z)	0.008
3 (Y)	0.008	7 (Y)	0.008
4 (Z)	0.008	8 (Z)	0.015

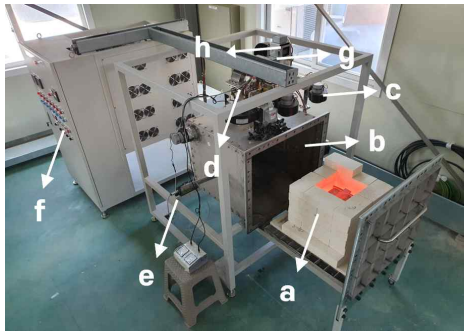


그림 6. 마이크로웨이브 가열 용융로
Fig. 6. Microwave-heated melting furnace.

특성이 변하면서 발생하는 임피던스 불일치를 조정하여 반사파 발생을 줄일 수 있도록 하였다. 또한, 마이크로파 아이솔레이터(isolator)를 함께 적용하여, 발생한 반사파가 다시 마그네트론으로 들어가 장비에 손상을 주는 것을 방지하였다.

그림 6은 앞서 나열한 구조와 시스템을 통해 제작된 장비의 사시도이다.

각 부분의 구성은 아래와 같다.

a: 내화 단열재 b: 가열 챔버
c: 마그네트론 d: 디렉셔널 커플러
e: 적외선 온도계 f: 제어계측 패널
g: 3-스터브 튜너 h: 아이솔레이터

3-6 실험 설계

실험Ⅰ: 온도 상승 특성 및 최적 출력 확인

(목표) 마그네트론 출력 수준에 따른 시료의 승온속도를 분석하여, 효율적인 온도 상승을 유도할 수 있는 최적 출력 조건을 도출

(시료) 폐 태양광 모듈에서 분리한 태양전지 스크랩

(조건) 마그네트론 총 출력 기준으로 70 %에서 100 %까지 10 % 단위로 설정하며, 각 조건에서 가열 시간과 승온 특성을 비교

실험Ⅱ: 반사파 제어 기반 승온 효율 분석

(목표) 반사파를 실시간 제어하여 출력 손실을 최소화

하고, 온도 상승효율을 향상할 수 있는지 검증

(시료) 폐 태양광 모듈에서 분리한 태양전지 스크랩

(조건) 마그네트론 작동 중 반사파를 0.4 kW 이하로 유지되도록 출력 피드백 제어

Ⅳ. Experimental Results and Analysis

4-1 실험Ⅰ: 출력 조건에 따른 온도 상승 특성

본 실험은 마그네트론 출력 수준이 시료의 승온 속도에 미치는 영향을 파악하고, 고온처리를 위한 적정 출력 조건을 도출하는 데 목적이 있다. 실험은 마그네트론 총 출력의 70, 80, 90, 100 %를 적용한 4단계 조건에서 수행되었다. 그림 7 및 표 2는 각 출력 단계별 온도 변화를 나타내고 있다.

본 연구에서 정의한 승온 속도는 초기 온도(상온)부터 목표 온도(1,200℃)까지 도달하는 전체구간의 온도 상승률을 기준으로 산정하였다.

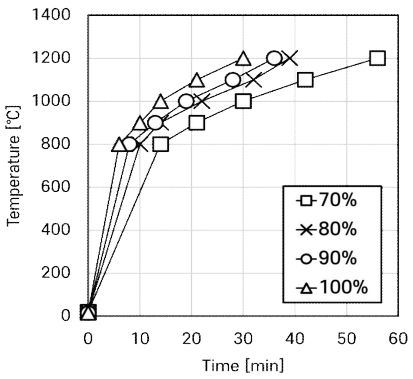


그림 7. 출력 단계별 온도변화 그래프

Fig. 7. Temperature variation at different output levels.

표 2. 출력 단계별 온도 변화값

Table 2. Temperature values at different output levels.

(unit: min)

Power (%)	800℃	900℃	1,000℃	1,100℃	1,200℃
70	14	21	30	42	56
80	10	14	22	32	39
90	8	13	19	28	36
100	6	10	14	21	30

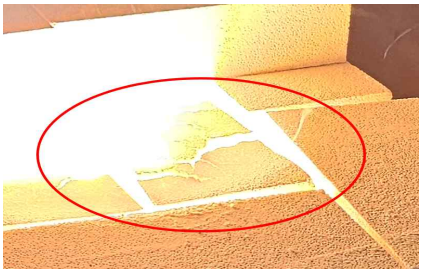


그림 8. 국부 가열 현상으로 단열구조 파손

Fig. 8. Damage to insulation structure caused by local overheating.

70 % 출력 조건에서는 1,200℃에 도달하는 데 총 56분이 소요되어 승온 속도는 약 20.9℃/min으로, 본 연구에서 설정한 목표인 30℃/min에는 미치지 못했다.

승온 속도는 출력 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하였으나, 90 % 이상에서는 급격한 반사파 발생 및 가열 불균일성 증가가 함께 관찰되었다. 이는 부하(서셉터)의 마이크로파 흡수 한계를 초과하여 일정 수준 이상의 출력이 투입되면 공진 조건을 벗어나기 때문이다. 잉여 에너지는 반사파의 형태로 되돌아오고, 전자기장의 불균일 분포로 인한 국부 가열 현상이 발생하면서 고온 도달은 가능하나, 장비 부담이 커지고 재현성에 불리한 조건임을 확인하였다. 실제 실험에서 국부 가열 현상으로 인해 그림 8 같이 내화 단열구조의 파손이 발생하였다.

따라서, 80 % 출력 조건이 적절한 승온 속도와 안정적인 온도 분포를 동시에 확보할 수 있으며, 에너지 효율성과 시스템 안전성의 균형점으로 판단된다.

4-2 실험Ⅱ: 반사파 제어 기반 승온 효율 분석

본 실험에서는 실험Ⅰ의 결과에 따라 80 % 출력으로 마그네트론 작동 시 반사파를 0.4 kW 이하로 제어함으로써, 시스템 효율과 온도 상승의 안정성을 확보할 수 있는지를 평가하였다. 동일한 출력 조건에서 반사파 제어에 따른 승온 특성과 반사파 변화를 비교하였다.

그림 9는 온도 상승에 따른 반사파 변화를 보여준다. 그래프에서 나타난 바와 같이, 반사파/입사파의 비율은 약 1,000℃ 구간에서 최고점에 도달한 후, 온도 상승과 함께 점진적으로 감소하였다. 특히 1,200℃ 이상 구간에서

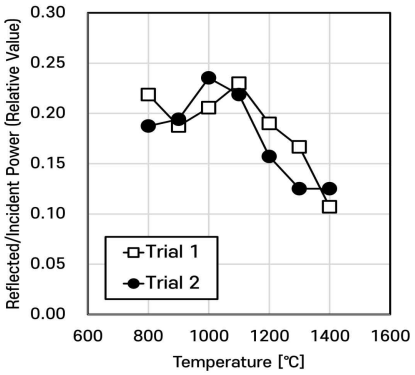


그림 9. 온도 상승에 따른 반사-입사 전력비 변화
Fig. 9. Reflected/incident power ratio vs. temperature.

는 두 실험 모두 반사파 비율이 급격히 저하되어, 마이크로파 에너지가 더 효과적으로 시료 내부에 흡수되고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 고온 영역에서 유전체 손실이 증가하며 마이크로파 에너지 전달 효율이 향상된 결과로 해석된다. 두 실험 모두 유사한 경향을 보이며 재현성이 확보되었고, 실시간 반사파 제어 시스템의 안정적인 동작도 확인되었다.

Ⅴ. Conclusion

본 연구에서는 마이크로웨이브를 열원으로 활용한 고온처리 시스템에 실시간 반사파 계측 및 전력 제어 기능을 적용하여, 폐 태양광 모듈 내 태양전지 실리콘 셀의 효율적 처리 가능성을 평가하였다. 총 8개의 마그네트론을 3축 직교 방식으로 배열하여 출력 균일성을 확보하였으며, 반사파 피드백 제어를 통해 마그네트론 보호 및 에너지 전달 효율 향상을 도모하였다.

실험 결과, 마그네트론 총 출력의 80 % 조건에서 반사 전력을 0.4 kW 이하로 유지할 경우, 평균 승온 속도 30℃/min 이상으로 1,400℃에 안정적으로 도달할 수 있었으며, 반사파 비율은 온도 상승에 따라 최대 0.26에서 0.12 수준까지 감소하였다. 이는 마이크로파 에너지의 효과적인 흡수를 의미하여, 시스템의 출력 안정성과 열처리 효율이 향상되었음을 입증한다.

추후 시스템 정밀도를 향상시키기 위해서는 축별(3축 기준)로 1개씩 총 3개의 디렉셔널 커플러를 배치하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 이와 같은 다채널 측정 시스템 구성은 후속연구의 개선방향으로 제안하고자 한다.

본 시스템은 폐 태양광 모듈의 자원화 공정에 있어 반사파 제어 기반 고온처리 기술로서의 적용 가능성을 보여주며, 향후 반사파-온도 상관 모델 고도화 및 다양한 폐기물 대상 확장을 통한 후속 연구가 기대된다.

References

[1] A. Mulazzani, P. Eleftheriadis, and S. Leva, "Recycling c-Si PV modules: A review, a proposed energy model and future perspectives," *Energies*, vol. 15 no. 22, p. 8419, Nov. 2022.

[2] P. F. Chang, S. Han, M. J. Claire, N. J. Maurice, M. Vakili, and A. S. Giwa, "Sustainable treatment of spent photovoltaic solar panels using plasma pyrolysis technology and its economic significance," *Clean Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 432-452, Apr. 2024.

[3] K. Kong, S. Jiang, L. Kong, Q. Wang, H. Hu, and X. Zhang, et al., "Transparent metamaterial absorber with broadband RCS reduction for solar arrays," *arXiv preprint,* Mar. 2020.

[4] Y. Zhao, S. Wang, Z. He, L. Yan, and C. Liu, "Experimental study of magnetron's power-pulled characteristic to realize a quasi-dual-frequency microwave output," *Electronics*, vol. 13, no. 7, p. 1323, Apr. 2024.

[5] J. Tang, "A temperature-control system for conditions-flow microwave heating using a magnetron as microwave source," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 44391-44399, Apr. 2020.

류 승 환 [㈜에이치에스쏠라에너지/주임연구원]
https://orcid.org/0009-0002-2303-461X

2019년 8월: 국립한밭대학교 화학생명공학과 (공학사)
2023년 4월～현재: ㈜에이치에스쏠라에너지 주임연구원
[주 관심분야] 마이크로파

정 회 경 [㈜에이치에스쏠라에너지/선임연구원]
https://orcid.org/0009-0000-8278-298X

2021년 2월: 국립한밭대학교 화학생명공학과 (공학석사)
2023년 3월～현재: ㈜에이치에스쏠라에너지 선임연구원
[주 관심분야] 마이크로파

김 선 욱 [㈜에이치에스쏠라에너지/연구소장]
https://orcid.org/0009-0008-2310-3180

2004년 8월: 단국대학교 물리학과(고체물리) (이학박사)
2022년 6월～현재: ㈜에이치에스쏠라에너지 연구소장
[주 관심분야] 마이크로파

박 형 기 [한국생산기술연구원/수석연구원]
https://orcid.org/0009-0004-6943-0014

1991년 7월: 성균관대학교 기계공학과(열공학) (공학석사)
1991년 7월～현재: 한국생산기술연구원 수석연구원
[주 관심분야] 산업용전자렌지, 유전가열