

보안 과제( ), 일반 과제( ) / 공개( ), 비공개( ) 발간등록번호( )  
스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발사업 2024년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-004729-01

# 스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발

2024.05.28.

주관연구기관 / 한국과학기술연구원  
공동연구기관 / 고려대학교 산학협력단  
국민대학교 산학협력단

농림축산식품부  
과학기술정보통신부  
농촌진흥청  
(전문기관)농림식품기술기획평가원  
스마트팜연구개발사업단

제출문

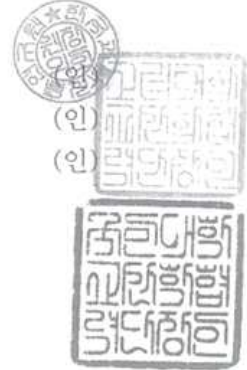
## 제 출 문

농림축산식품부 장관 · 과학기술정보통신부 장관 · 농촌진흥청장 귀하

본 보고서를 “스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발”(개발기간 : 2021.04.07. ~ 2023.12.31.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2024.05.28.

주관연구기관명 : 한국과학기술연구원      오 상 록  
공동연구기관명 : 고려대학교 산학협력단      권 정 환  
위탁연구기관명 : 국민대학교 산학협력단      이 인 형



주관연구책임자 : 민 병 권  
공동연구책임자 : 전 용 석  
공동연구책임자 : 도 영 락

「국가연구개발혁신법」 제17조에 따라 보고서 열람에 동의 합니다.

최종보고서										보안등급	
										일반[ <input checked="" type="checkbox"/> , 보안[ <input type="checkbox"/> ]	
중앙행정기관명		농림축산식품부 과학기술정보통신부 농촌진흥청			사업명		사업명			스마트팜 다부처패키지 혁신기술 개발사업	
전문기관명 (해당 시 작성)		농림식품기술기획평가원 (재)스마트팜연구개발사업단			내역사업명 (해당 시 작성)		차세대 융합/원천기술 연구사업				
공고번호		제농축 2021-45호			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)			421036-03			
		연구개발과제번호									
기술분류	국가과학기술 표준분류	LB0805		40%	LB0901		40%	LB0806			20%
	농림식품과학기술분류	CA0201		50%	CA0302		50%				
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		국문	스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발								
		영문	Development of Wavelength-Selective Solar Cell Technology for Self-Powered Smart Greenhouse								
연구개발과제명		국문	스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발								
		영문	Development of Wavelength-Selective Solar Cell Technology for Self-Powered Smart Greenhouse								
주관연구개발기관		영문	Development of Wavelength-Selective Solar Cell Technology for Self-Powered Smart Greenhouse				법인등록번호		114422-0000174		
		기관명	한국과학기술연구원		사업자등록번호		209-82-03522				
연구책임자		주소		(02792) 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5 한국과학기술연구원				법인등록번호		114422-0000174	
		연락처	성명	민병권		직위		책임연구원			
			휴대전화			직장전화					
연구개발기간		전체	2021. 04. 07 - 2023. 12. 31( 2년 9개월)								
		단계	1단계[ <input type="checkbox"/> ]	2021. 04. 07 - 2022. 12. 31( 1년 9개월)							
			2단계[ <input checked="" type="checkbox"/> ]	2023. 01. 01 - 2023. 12. 31( 1년 개월)							
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계		연구개발 외 지원금
		현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계
총계		3,800,000							3,800,000		3,800,000
1단계		1년차	1,200,000						1,200,000		1,200,000
		2년차	1,300,000						1,300,000		1,300,000
2단계		1년차	1,300,000						1,300,000		1,300,000
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)		기관명	책임자		직위	휴대전화		전자우편		비고	
		고려대학교	전용석		교수					역할	기관유형
		국민대학교	도영락		교수					공동	대학
		위탁연구개발기관									
		연구개발기관 외 기관									
연구개발담당자 실무담당자		성명	이필립		직위	책임연구원					
		연락처	직장전화			휴대전화					
			전자우편			국가연구자번호					

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2024 년 1 월 26 일

연구책임자: 한국과학기술연구원 민병권 (인)  
 주관연구개발기관의 장: 한국과학기술연구원 문석진 (인)  
 공동연구개발기관의 장: 고려대학교 산업협력단 권정환 (인)  
 공동연구개발기관의 장: 국민대학교 산업협력단 이인형 (인)

농림축산식품부장관 과학기술정보통신부장관 농촌진흥청장 농림식품기술기획평가원장



## < 요약 문 >

사업명	스마트팜 다부처패키지 혁신기술개발사업	총괄연구개발 식별번호					
내역사업명	차세대 융합·원천기술 연구사업	연구개발과제번호	421036-03				
기술분류	국가과학기술 표준분류	LB0805	40%	LB0901	40%	LB0806	20%
	농림식품 과학기술분류	CA0201	50%	CA0302	50%		
총괄연구개발명	스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발						
연구개발과제명	스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발						
전체 연구기간	2021. 04. 07. - 2023. 12. 31( 2년 9개월)						
해당 단계	2021. 04. 07. - 2022. 12. 31( 1년 9개월)						
연구개발단계	기초[ ] 응용[ <input checked="" type="checkbox"/> ] 개발[ ] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]		기술성숙도 (해당 시 작성)		착수시점 기준(3) 종료시점 목표(5)		
연구개발과제 유형							
연구개발과제 특성							
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		스마트 온실용 프린팅 기반 선택적 광투과형 무기박막 태양전지 제조 기술 개발 및 실증				
	전체 내용		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 광투과 태양전지 스마트 온실 활용 가능성 연구</li> <li>- 용액공정기반 저밴드갭 고효율 박막 태양전지 개발</li> <li>- 광투과 태양전지 모듈 시뮬레이션 및 제작</li> <li>- 온실용 작물 성장 맞춤형 이색성 광필터의 시뮬레이션 및 설계</li> <li>- 유연기판 기반 이색성 광필터 개발</li> <li>- 이색성 광필터 증착을 위한 용액 공정 개발</li> <li>- 개발된 태양전지와 이색성 광필터의 실증 실험</li> </ul>				
	1단계	목표	선택적 광투과형 태양전지 단위모듈 기술 개발 및 작물 시험 재배 평가				
		내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 용액공정 CIS 태양전지 및 태양전지 배치 제어 플랫폼 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 저가 용액공정기반 CIS 박막 태양전지 기술 개발 (35 mA/cm<sup>2</sup>, 전압 0.55V)</li> <li>- Bifacial 구조 박막 태양전지 기술 개발</li> <li>- 기계적 메타물질 기반 태양전지 배치 제어 플랫폼 개발</li> </ul> </li> <li>○ 체결형 태양광 모듈 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 체결형 태양광 모듈 제작을 위한 전극 설계 및 프로토타입 제작</li> <li>- 직·병렬형 단위 모듈 제작 및 최적화</li> </ul> </li> <li>○ 이색성 광필터 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 작물 생산과 태양광 발전을 고려한 이색성 광필터 소재 설계 및 시뮬레이션</li> <li>- 층상 자기조립법 기반 광결정 적층 플랫폼 기술 확립</li> <li>- 고성능 이색성 광필터 소재/소자 제작 및 광학 특성 평가</li> </ul> </li> <li>○ 스마트팜 실증                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 광투과 태양전지 모듈 적용 시설원에 작물 2종 (토마토, 새싹삼) 시험 재배</li> <li>- 광합성 및 생육 특성 분석을 통한 재배 적정성 평가</li> <li>- 광투과 태양전지 모듈 광투과도 및 광질 변화 분석</li> </ul> </li> </ul>				
	2단계	목표	선택적 광투과형 태양전지 모듈 체결 대면적화 및 스마트팜 실증				
내용		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 용액공정 CIS 태양전지 및 태양전지 배치 제어 플랫폼 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 용액공정기반 저밴드갭 고효율 (전류 40 mA/cm<sup>2</sup>, 전압 0.55 V) CIS 박막 태양전지 개발</li> <li>- Bifacial 구조 박막 태양전지 기술 최적화</li> </ul> </li> </ul>					



			<ul style="list-style-type: none"> <li>- 태양전지 대면적화를 위한 코팅 기술 개발</li> <li>- 태양전지 배치 제어 플랫폼의 최적화 및 대면적화</li> <li>○ <b>체결형 태양광 모듈 개발</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 단위 모듈간 체결 기반 대면적 모듈 구조 설계, 실증 및 최적화</li> </ul> </li> <li>○ <b>이색성 광필터 개발</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 저온 기상증착법을 이용한 투명 유연 기판 이색성 광필터 소자 제작</li> <li>- 유연기판 표면 처리를 통한 광필터 접합성 강화 기술 개발</li> <li>- 이색성 광필터 보호용 봉지 기술을 통한 내구성 강화</li> </ul> </li> <li>○ <b>스마트팜 실증</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 한국과학기술연구원 스마트팜 실증 온실 활용, 광투과 태양전지 시험 설치</li> <li>- 광투과 태양전지 설치 스마트팜 활용 시설원에 작물 2종 (토마토, 새싹삼) 1회 실증 재배</li> <li>- 기존 온실 대비 작물 생산성 및 에너지 투입비용 비교 검증</li> <li>- 토마토 및 새싹삼 생육-성분 조절을 위한 광환경(광질 및 광량) 탐색 및 제어조건 도출</li> </ul> </li> </ul>
--	--	--	--

연구개발성과	- 특허출원 12.2건, 특허등록 3건, 기술실시 2건, 기술료 3.05억원, 논문 15건, 논문평균 IF (1단계 8.9, 2단계 11.8), 학술발표 8건, 인력양성 16건, 정책활용 1건, 홍보전시 4건, 타연구 활용 1건 달성
--------	--

연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3세대 스마트팜의 지속가능성 확보, 자원순환과 탄소제로 구현을 위한 핵심 기반 기술인 광투과 태양전지 기술의 고도화와 실용화를 위한 기반 데이터 확보</li> <li>- 스마트팜 지속가능성 확보를 위한 원천기술 확보와 스마트팜 피복소재 시장 개척, 이를 통한 글로벌 시장 선점 기대</li> <li>- 광투과율 조절이 용이한 이점 활용, 작물의 생육 환경에 적합한 구조 설계 가능</li> <li>- 개발기술은 건물일체형 태양전지로서 스마트온실 외 다양한 건축물과 투광성을 요구하는 분야로의 사업 확장 가능</li> <li>- 개발되는 CIS 태양전지는 경량화 및 유연성 확보가 가능하여 결정질 실리콘 태양전지 대비 다양한 응용성 확보 가능</li> <li>- CIS 박막 제조 공정을 기존 상용화 되어있는 진공공정에서 비진공 용액공정으로 대체함으로써 다양한 응용가능성, 저가 대량생산, 초박막, 원료 손실량의 감소 효과 기대</li> <li>- 이색성 광필터 소재 및 소자 원천 기술은 태양광 에너지를 전력생산 및 식물생장에 효율적으로 분배하는데 활용 가능</li> <li>- 광필터는 광통신, 스마트폰, 디스플레이, 광전소자를 비롯한 다양한 산업 분야에서 부속품으로 활용되는 핵심 소재 기술이며, 차세대 성장 산업인 드론, AR, VR, 사물인터넷 등 확장 적용이 가능</li> </ul>
---------------------	--

연구개발성과의 비공개여부 및 사유

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신물질	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입 기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
국문핵심어 (5개 이내)	선택적 광투과			광필터		CIS 박막		용액 공정		스마트팜		
영문핵심어 (5개 이내)	Wavelength-selective Transmission			Light filter		CIS film		Solution process		Smart farm		

## < 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도
4. 목표 미달 시 원인분석 (해당 시 작성)
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

별첨 자료 (참고 문헌 등)

## 1. 연구개발과제의 개요

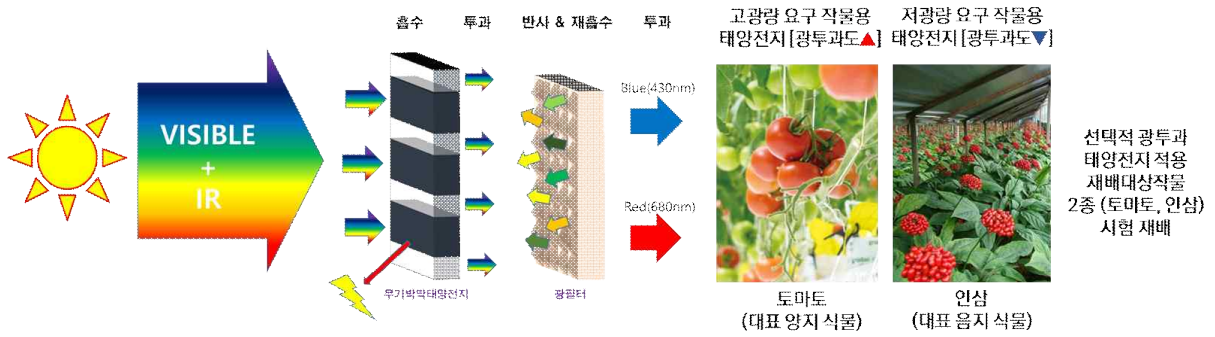


그림 1. 스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개요

### ■ 개발 대상 제품 : 스마트 온실용 프린팅 기반 선택적 광투과형 무기박막 태양전지

### ■ 개발 대상 기술

- 작물의 광합성 생리 및 광적응성을 고려한 선택적 광투과 태양전지 개발
- 광투과 태양전지 스마트 온실 활용 가능성 연구
- 용액 공정 기반 저밴드갭 고효율 박막 태양전지 개발
- 광투과 태양전지 모듈 제작 (광투과도 및 태양전지 효율 동시 확보)
- 이색성 광필터 개발 (작물 생산성/품질 및 태양전지 효율 동시 확보)
- 개발된 태양전지와 이색성 광필터의 실증 실험

## 2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

### ■ 선택적 광투과 태양전지 적용 재배 대상 작물 선정

- 광투과 태양전지의 실용화와 사업화 가능성을 고려하여 국내의 대표적인 시설원에 작물인 토마토와 고부가 기능성 작물인 인삼(새싹삼)을 광투과 태양전지 적용 재배 대상 작물로 선정
- 토마토의 광포화점은  $800 \sim 1,400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이며, 이를 대상으로 한 시험재배를 통해 고광량 요구 작물(양지 식물)에 대한 광투과 태양전지 활용 시설재배 적합성 평가 수행
- 토마토와 달리 인삼은 음지 적응성 식물로써 전천일사량의 25% 이하 광량만을 요구하며,  $500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  이상의 광량 조건은 인삼의 생산성 및 품질을 크게 떨어뜨리는 요인임
- 인삼을 대상으로 한 시험 재배를 통해 저광량 요구 작물 (음지 식물)에 대한 광투과 태양전지 활용 시설재배 적합성 평가 수행

### ■ 선택적 광투과 태양전지 적용시 시설원에 작물 2종(토마토, 인삼)에 대한 재배 적합성 평가

- 선택적 광투과 태양전지 모듈을 유리온실에 적용하는 경우, 모듈의 구조적 특성과 이색성 광필터에 의해 광합성 유효 광에서 청색과 적색 파장대 광만 식물체에 조사 되며, 이에 따라 재배 작물의 발달, 생육 및 성분 특성이 변화할 수 있으므로 이와 관련된 조사 분석 필요

- 광필터링 조건 하에서 시험 대상 작물 2종 (토마토 및 새싹삼)에 대한 시험재배 및 생육 모니터링, 발달 특성, 광합성 특성 분석을 통해 재배 적합성 평가 수행, 토마토 및 인삼 생육-성분 조절 광환경 조건 도출
- 실제 선택적 광투과 태양전지 모듈을 적용한 미니 스마트팜 제작 (태양전지 면적 2m<sup>2</sup> 규모)
- 실증에 활용된 태양전지 면적은 목표로 잡은 면적 1m<sup>2</sup>에 비하여 2배 크기이기는 하나, 작물 성장 데이터를 얻기에는 여전히 많이 부족한 면적임. 하지만, 해당 연구과제는 원천기술형 과제로써, 기존에 농가에서 활용도가 극히 낮거나 심하게는 기피되는 태양전지 활용의 돌파구를 찾기 위한 연구이기 때문에 실증면적의 대면적화는 2단계 이후로 진행하는 것이 합리적이라고 판단함. 즉, 한정된 자원을 가지고 기존에 기술적 병목현상을 겪고 있는 스마트온실용 태양전지의 개발에 있어서, 대면적화는 필수적이지만 먼저 돌파구를 마련할 수 있는 태양전지의 개발이 우선되어야 하기 때문임. 새로 제안된 태양전지의 최적화가 이루어지기 이전에 단순히 대면적화를 시도하는 것은 연구비의 비효율적인 집행과 직결되기 때문에, 단위모듈의 효율 극대화를 우선적으로 달성하고자 함. 제안된 방식은 체결형 태양전지로써, 30cm X 30cm 의 단위모듈 태양전지로 이루어져 있으며, 간결한 결합으로 전기적 연결을 함으로써, 대면적화에 용이한 접근법을 가지고 있기 때문에, 전력 생산을 위한 대면적화 측면에서는 단위모듈 측정을 통한 선형적 전력 추산이 가능함. 따라서 단위모듈 전력생산 및 광질제어에 본 연구에서는 연구 자원을 집중하고자 하며 이러한 부분은 과제 선정시 심사 측면에서 고려 및 동의를 구할 수 있었음. 다만, 크기가 작은데서 오는 작물 성장 데이터 오차는, 과장을 잘 제어한 LED를 활용한 작물 성장 데이터 분석을 통해, 적합한 광질을 찾기 위한 연구의 정확도를 높이고자 함. 그리고 크기가 크지 않은 새싹삼과 같은 작물을 활용하여 최대한 광질 및 광량 변화에 따른 작물 성장 데이터를 해당 데이터와 교차 분석함으로써 오차를 최소화하고자 함.
- 유리온실 선택적 광투과 태양전지 모듈 설치시 유리 판넬 대비 광투과도 및 광질 변화 분석 수행
- 선택적 광투과 태양전지 모듈 적용 미니 스마트팜 활용 대상 작물 2종 시험 재배

## ■ 용액공정 기반 저밴드갭 고효율 CIS 박막 태양전지 개발

- 현재 상용화되어 있는 1세대 실리콘 태양전지는 효율이 높다는 장점이 있으나 웨이퍼 기판을 사용하기 때문에 소자 유연화가 불가능하며 단순 발전용 이외에는 활용도가 낮다는 단점이 있음. 반면, 박막형 태양전지는 유리 기판뿐 아니라 다양한 유연 기판에도 제조할 수 있기 때문에 곡면을 포함한 장소에도 쉽게 설치가 가능함. 또한, 박막형 태양전지는 광흡수층의 두께 조절이 용이하고, 상황에 따라 광학적·전기적 특성을 조절할 수 있기 때문에 투광형, 양면 수광형, 건물 일체형, 탠덤소자 등 다양한 태양광 분야에 활용 가능함. 또한 박막형 태양전지들은 1세대 실리콘 태양전지보다 더 얇은 광흡수층을 사용하고 열처리공정 온도가 훨씬 낮기 때문에 가격 절감의 측면에서 큰 잠재력을 가지고 있음.
- 현재까지 다양한 종류의 박막 태양전지들이 개발되어 왔으나, 대부분의 소자들은 화학적 안정성이 낮아 실질적인 활용이 어려운 상황임. 반면, CIS 박막 태양전지는 매우 안정한 물질을 사용하기 때문에 1세대 실리콘 태양전지와 유사한 수준의 수명을 보장할 수 있으며, 다양한 설치 환경에서도 안정적으로 발전할 수 있다는 장점이 있음.
- 진공공정 기반 CIS 박막 태양전지의 경우 약 23.4%의 단위셀 효율이 보고된 바 있으나, 소자 대면적화가 어렵고 가격경쟁력이 부족하여 아직 상용화에 이르지 못하고 있는 상황임. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 CIS 박막 태양전지의 양산성을 획기적으로 개선할 기술의 도입이 필수적임.

- 본 연구과제에서는 제안하는 용액공정은 대면적 기판에 쉽게 박막을 적층할 수 있기 때문에 CIS 박막 태양전지의 제조 속도, 생산량 등을 획기적으로 향상시킬 수 있음. 또한, 진공공정에 비해 원료 사용 효율이 매우 높고, 저가 장비만으로도 소자 제조가 가능하기 때문에 생산 단가를 낮추거나 가격경쟁력을 확보할 수 있음.

## (1) 용액공정기반 고효율 (35 mA/cm<sup>2</sup>) 발전 CIS 태양전지 기술 개발

### o 광흡수층

- 온실형 태양광에 적합한 태양전지를 위해서는 입사된 태양광 중 온실 내부로 투과되는 빛을 제외한 태양광을 효과적으로 전기로 변환할 수 있어야 함
- 넓은 파장의 태양광 스펙트럼 활용, 산란광 및 후면에서 재반사되는 넓은 파장 범위의 태양광을 효과적으로 흡수하기 위해 낮은 밴드갭의 박막 태양전지 개발이 필요함
- 따라서 본 개발 과제에서는 구리, 인듐 금속 원소를 바탕으로 제작된 칼코겐 화합물을 기반으로 한 박막 태양전지 (CIS)를 용액법으로 개발하려고 함
- 상변환 과정 중 6족 원소와 전구체 박막의 금속 원소 간 비율에 의해 박막의 밴드갭이 결정되고, 먼저 인듐 대비 구리 비율에 따른 박막의 밴드갭 확인 및 태양전지 특성 변화를 확인
- 한편 칼코겐 화합물 반도체 내부에 황의 총량이 증가할수록 밴드갭이 증가하는 것으로 알려져 있으며, 상변환 열처리 과정 중 셀렌의 비율, 온도 및 불활성 캐리어 기체 도입을 통한 황 유입 최소화 셀렌화 열처리 공정 기술을 개발할 계획임
- 최종적으로 35 mA/cm<sup>2</sup> 이상의 광전류를 구현하기 위해 최소 밴드갭 약 1.05 eV 이내의 박막 제작 조건을 개발할 계획임

### o 버퍼층

- 광흡수 손실 최소화를 위한 다원계 큰 밴드갭을 가진 버퍼층 개발
- CIS 태양전지는 주로 CdS를 버퍼 및 n-type 물질로 사용함. 하지만 CdS는 2.4 eV의 낮은 밴드갭으로 인해 ~500 nm 이하의 단파장을 흡수하여 광전류를 감소시키고 효율을 떨어뜨림
- 또한 낮은 밴드갭 및 CIS/CdS간 일함수의 차에 의해 계면에서의 캐리어 재결합 손실이 발생하고, 태양전지 특성의 감소를 야기할 수 있음
- CIS와 좋은 계면을 형성하면서 기존의 CdS 버퍼층에 비해 큰 밴드갭을 가지는 버퍼층을 개발함으로써 1. 단파장대의 빛을 활용, 2. 계면 페시베이션 증가 효과를 토대로 태양전지 효율이 증가할 것으로 예상됨
- 버퍼층의 원소 및 조성의 조절로 CIS와의 좋은 계면형성 및 큰 밴드갭 특성을 동시에 구현할 수 있을 것으로 예상되기 때문에, 태양전지의 효율 증가가 가능
- CBD 기법을 기반으로 하여 Zn, Sn, Cd 등 다양한 원소들로 이루어진 삼원계 버퍼층을 개발하고자 함

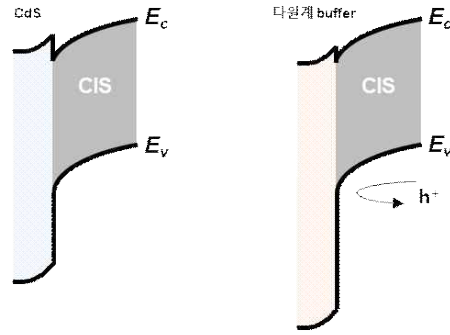


그림 2. 버퍼층 물질 종류에 따른 에너지 밴드 구조 모식도

## (2) 후면 밴드갭 그레이딩 구조 형성을 통한 CIS 박막 태양전지 성능 개선

- CIS 광흡수층의 후면에서 생성된 전자 및 정공은 p-n 접합으로 인해 형성된 전기장으로부터 멀리 위치해있기 때문에 원활한 수집이 어렵다는 한계가 있음
- 이를 해결하기 위해서는 광흡수층의 후면부에 의도적으로 전기장을 형성하여 전자와 정공을 원하는 방향으로 이동시킬 수 있는 기술의 적용이 필수적임
- 광흡수층 후면부에서의 재결합 억제를 위해 후면으로 갈수록 밴드갭이 증가하는 후면 밴드갭 그레이딩 구조를 형성하고자 하며, 이를 위해 광흡수층의 후면부의 조성 조절 및 분포 최적화를 진행하고자 함
- 또한, 칼코겐화 열처리 가스 종류, 시간, 온도 등의 다양한 변수 조절을 통해 최적의 후면 밴드갭 그레이딩을 구현하여 태양전지 내 전기적 손실을 최소화 할 수 있는 기술을 개발

## (3) 알칼리 원소 Na 도핑을 통한 CIS 박막 태양전지 효율 개선

- CIS 박막 태양전지 내 알칼리 원소(Na, K, Rb, Cs 등)는 광흡수층의 다양한 광학적 및 전기적 특성과 태양전지 성능에 큰 영향을 주기 때문에 이를 잘 조절하는 것이 고효율 달성을 위해 중요함
- 하지만 기존의 보고들은 진공 공정 기반의 CIS 태양전지를 대상으로 하기 때문에 용액 공정에 적합한 알칼리 원소 도핑 기술 개발이 필수적임
- 기존 문헌에 따르면 알칼리 원소 Na는 광흡수층 내 불필요한 결함을 제거하고 정공 농도를 증가시켜 특히 태양전지의 개방전압과 충전률을 증가시킨다고 보고되어 왔음
- 따라서, 본 연구과제에서는 용액공정을 기반으로 한 Na 원소 도핑법을 개발하여 CIS 광흡수층 내의 재결합 손실을 줄이고 태양전지의 성능을 개선시키고자 함
- precursor 내 copper 대비 도핑 원소의 조성 비율을 조절함으로써 CIS의 전기적, 광학적 특성 평가 및 태양전지 성능 평가를 수행

## (4) 중알칼리 원소 Rb 도핑 용액공정기반 CIS 태양전지 기술 개발 (35 mA/cm<sup>2</sup> 전류, 0.55 V 전압)

- CIS 박막 태양전지 내의 알칼리 금속은 원소의 종류에 따라 광흡수층과의 상호작용이 상이함이 보고되어 왔음. 2차년도에는 전년도에 개발한 경알칼리 (light alkali-metal) Na와 함께 중알칼리 (heavy alkali-metal) 원소 Rb, Cs 등을 함께 도핑하여 CIS 광흡수층 박막의 다양한 특성들을 조절하고자 함
- 도핑 원소 별 몰농도, 도핑 방식, 용매, CIS 박막 내 도핑의 위치를 조절함으로써 최적의 태양전



지 특성을 갖는 공정 기술을 개발할 계획임

- 알칼리 원소의 종류 및 비율에 따른 태양전지 특성에 미치는 영향을 고찰하고 태양전지 전체 성능과 관련된 파라미터를 개선할 계획임. 용액 공정은 도핑 원소를 정량할 수 있으며, 벌크 도핑 기술 개발을 토대로 진공 증착에서 구현하기 어려운 다중 원소 벌크 도핑 효과 관련 용액공정만의 독창적인 도핑 기술을 개발하고 지적재산권 및 논문 확보를 통해 관련 분야에 크게 기여할 수 있을 것으로 예상됨

#### (5) 알칼리 금속 동시 도핑을 통한 고성능 CIS 태양전지 구현

- 알칼리 금속은 광흡수층에 도핑되었을 때 그 종류에 따라 상이한 개선 효과를 제공하기 때문에 단일 원소 도핑으로는 성능 개선에 제한이 있음. 따라서 CIS 박막 태양전지의 성능을 획기적으로 향상시키기 위해서는 다양한 알칼리 금속들을 동시에 도핑하여 복수의 개선 효과를 확보할 필요가 있음
- 알칼리 금속 동시 도핑의 영향을 깊게 이해하기 위해서는 개별 원소의 농도를 쉽고 정확하게 조절할 수 있어야 함. 용액공정에서는 개별 알칼리 금속 전구체를 용매에 용해시키는 방식을 활용하기 때문에 개별 원소의 농도 및 원소 간의 비율을 매우 쉽게 조절할 수 있다는 장점이 있음. 따라서, 본 연구에서 수행하는 동시 도핑에 대한 연구는 소자 성능 개선의 가능성 뿐만 아니라 추후 상업화 잠재력까지 우수하다고 할 수 있음

#### (6) 전이금속 Ti 도핑 용액공정기반 CIS 태양전지 기술 개발

- CIS 박막 태양전지는 다양한 원소(경알칼리 Na, K 및 중알칼리 Cs, Rb)의 도핑을 통해 CIS 광흡수층의 특성 및 태양전지의 성능을 발전시켜 옴. CIS 박막 태양전지에서 다양한 원소의 도입은 고성능 태양전지 발전의 핵심 요소임
- 하지만, 기존의 보고에 따르면 CIS 에 도핑되는 원소는 알칼리, 알칼리 토금속 등 일부 족에 한정된 원소를 채택하여 활용하고 있으며, 이에 따라 CIS 태양전지의 성능 발전이 매우 더딘 상황임.
- 태양전지의 획기적인 성능 발전을 위해서는 CIS 박막 태양전지에 도핑과 관련된 새로운 돌파구가 필요함
- 용액 공정은 진공 공정과 비교하여 다양한 원소의 도입 및 정량이 매우 용이하기 때문에 기존에 보고 되지 않은 다양한 족의 원소를 CIS 내부에 도입하기 수월함
- 따라서, 용액공정을 활용하여 CIS 내 다양한 원소를 도입하고, 도핑 원소, 도핑 농도, 도핑 방식, 도핑 위치 조절 등 다양한 시도를 통해 원소별 가장 최적화된 고품질의 광흡수층 제작 및 태양전지의 구현
- 이 과정에서 기존에 보고 되지 않은 다양한 원소 도핑 CIS 박막 태양전지에 대한 지적재산권 및 논문 확보가 가능할 것으로 보여지며, 관련 분야에 크게 기여할 수 있을 것으로 예상함

#### (7) Bifacial 구조 박막 태양전지 기술 개발

- 태양광 입사 시 온실 내부로 빛 투과 증대 과정에서 태양전지의 광흡수에 제약이 발생함
- 식물 성장에 필요한 특정 파장의 빛 (400, 600 nm)을 제외한 태양광 스펙트럼을 추가로 흡수하기 위해 양면 수광 방식의 태양전지 개발이 요구됨
- 일반적 CIS 태양전지는 후면 전극으로 Mo를 적용하며, 상변환 열처리 과정 중 Mo/CIS 계면에 MoSe<sub>2</sub> 등의 칼코제나이드 화합물이 형성되며, 형성된 화합물은 계면 접촉저항을 낮추며 동시

에 후면 passivation 물질로 작용하는 것으로 알려져 있음

- 따라서, 칼코제나이드 화합물이 형성되지 못하는 Oxide 기반의 TCO와 CIS 사이의 접촉저항 최소화를 위해 두께 방향으로의 CIS 조성 및 각 박막 물질 별 일함수 설계를 통해 태양전지 특성을 확보할 계획임
- TCO 박막 위 균일한 코팅 기술 개발 및 물질 조성 제어를 통해 최종적으로 양면 수광 구조의 CIS 태양전지를 제작하고 전면 대비 후면 광입사 효율을 평가

#### (8) 프린팅 기반 용액공정 개발

- 연구실 스케일에서 일반적으로 활용되는 딥코팅, 스핀코팅 등은 소면적 소자를 제조하기에는 적합하지만, 소자의 면적이 커질수록 낭비되는 용액의 양이 기하급수적으로 증가하기 때문에 명확한 한계가 있음. 또한 이러한 방식들은 기본적으로 유리와 같은 단단한 기판을 요구하기 때문에 유연 태양전지 소자를 제조하는데 어려움이 있음. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 다양한 기판에 대면적 코팅이 가능한 프린팅 기반 용액공정의 도입이 필수적임.
- 프린팅 기반 용액공정에는 닥터블레이드, 바코팅, 슬롯-다이 코팅, 스프레이 코팅, 잉크젯 코팅 등이 있음. 본 연구과제에서는 대면적 CIS 박막 태양전지 제조를 위해 바코팅 기술을 활용하였으며, 이를 통해 용액의 낭비를 획기적으로 줄이고 기존 스핀코팅 대비 훨씬 넓은 면적에 코팅할 수 있는 기술을 개발하였음. 또한, 목표 두께 적층을 위한 코팅 횟수를 획기적으로 절감하여 공정 시간을 단축하였으며 박막이 받는 열적 스트레스를 효과적으로 감소시켰음
- 이와 같은 프린팅 기반 용액공정은 추후 롤투를 공정과의 연계를 통해 단위시간당 생산량을 획기적으로 증가시킬 수 있을 것으로 예상됨

#### (9) 대면적 CIS 광흡수층 제작을 위한 셀렌화 열처리 공정 개발

- CIS 태양전지의 상업화를 위해서는 저비용, 대면적, 대량 생산이 가능해야 함. 상업화 이슈에 대응하기위해서 본 연구실에서는 전구체 용액을 활용한 인쇄 공정 CIS 전구체 박막을 제작하였음
- 인쇄 공정을 통해 제작된 대면적의 전구체 박막은 작은 사이즈로 제단 후 2단 열처리 튜브 퍼니스(2-stage tube furnace)에서 셀렌화 공정을 통해 최종적으로 CIS 광흡수층으로 변환시킴. 이는 셀렌화 공정을 위한 열처리 튜브 퍼니스의 크기가 제한적이기 때문에 일정 크기 이상의 박막에 대해 수용이 불가능함
- 또한, 2단 열처리 튜브 퍼니스는 캐리어 가스와의 온도 차이를 활용하여 전구체 박막위에 셀레늄을 도포 후, 추가 열처리를 통해 CIS 로 상이 변하기 때문에 전구체 박막의 크기가 증가할수록 균일성이 떨어지는 단점을 가짐
- 따라서 대면적에 대응할 수 있는 새로운 셀렌화 열처리 공정이 필요함
- 본 연구과제에서는 그래파이트 박스를 도입하여 셀렌화를 진행하였음. 전구체와 셀레늄 펠릿을 좁은 간격으로 같은 공간에 위치시킨 후 셀레늄의 분압을 증가시켜 전구체의 전 영역에 셀레늄을 균일하게 전달할 수 있음
- 또한, 셀레늄의 분압이 높아짐에 따라 전구체 하단부까지 셀레늄이 충분히 공급되어 큰 결정립을 가진 CIS 상이 형성될 것으로 예상됨. 새로운 공정의 도입으로 대면적 이슈에 대한 대응 외에도 추가적인 전류 개선 효과를 기대해 볼 수 있음

## ■ 기계적 메타물질 기반 구조 제어 기술 확보

- 우리나라는 지리적으로 일사량이 평균적으로 적고, 계절적 요인에 의해 일사량 차이가 크다는 여건을 가지고 있음. 또한 전체 시설 재배에서 유리 온실 비율이 적고, 비닐 하우스가 많음
- 본 과제는 유리 온실에 유리판을 대응할 수 있는 태양전지의 개발을 목표로 하고 있으나, 국내 유리온실 대비 비닐 온실의 비율이 매우 높기 때문에 이에 대응할 수 있는 스마트 온실용 태양전지의 개발 역시 필요함
- 비닐 하우스에 대응하기 위한 태양전지는 유연화와 경량화가 핵심이라 할 수 있음. 유연화와 경량화는 본 과제에서 개발하고 있는 용액 공정 기반 태양전지 기술 개발을 통한 기관 경량화가 핵심인데, 본 연구에서는 기계적 메타물질 기반 구조를 도입하여 더 적극적인 형태의 태양전지 기술을 확보하고자 함
- 해당방식은 얇은 태양전지를 활용하되, 기존의 유리판은 그대로 두고, 작은 부피로 독립적 설치가 가능하기 때문에, 온실에 하중 부담을 줄일 수 있으며 이에 따라 비닐 하우스에 적합한 기술로 판단함
- 또한 지리적, 계절적으로 일사량이 적고 편차가 큰 우리나라의 경우에는 태양광을 추적하는 방식으로 효율을 극대화하는 것이 중요한데, 추적식 태양전지는 현재 온실쪽에는 거의 활용이 못되고 있음. 이는 태양전지를 태양위치에 따라 제어하는 액츄에이터, 모터 등의 광추적 시스템이 매우 무겁기 때문인데, 이러한 광추적 태양전지는 유리 온실에도 그 무게 때문에 활용이 불가함
- 이에 따라 광추적 태양전지 시스템을 전체로 경량화하고자 하는 본 접근법은 농가에서 태양광 활용의 효율성을 높이 올려줄 것으로 기대함
- 태양전지 3차원 구동이 가능한 기계적 메타물질 평가 및 선정을 수행함
- 태양전지를 3차원적으로 구동할 수 있도록 제어하는 기술은 작물 재배를 위한 최적의 광량 조절 및 발전의 극대화를 실시간으로 제어할 수 있는 기술임
- 해당 기술의 난이도는 높을 것으로 예상이 되나, 해당 기술의 가능성을 바탕으로 원천기술을 확보하고, 스마트팜에 적용하기 위한 장기적인 계획을 수립하는 것은 차세대 스마트팜 기술을 선점하기 위한 원천 기술이 될 수 있을 것으로 판단함
- 기계적 메타물질은 다양한 구조적인 제어를 통하여, 기계 구조체에 자연의 일반적인 속성과는 상반되는, 이질적인 물성을 부여하는 기술로써, 소자의 성능을 직접적으로 향상시키거나 전혀 새로운 물성을 인가하기 때문에 최근 높은 관심도로 다양한 연구가 선보여지고 있음
- 태양전지의 3차원 배치는 태양전지의 성능에, 특히 전력 및 투과도 측면에서 큰 영향을 미치기 때문에, 기계적인 메타물질을 활용한 3차원 구조 제어는 기존 기술에서는 어려웠던 영역에 대한 효과적인 제어가 가능함
- 3D 프린팅 기술은 설계 자유도가 매우 높은 기술로서, 다양한 3차원 기계적 메타물질을 제조함에 있어서 가장 효율적인 기술 중 하나이며, 본 연구팀에서 확보한 3차원 인쇄기술을 활용하여 다양한 설계에 대한 즉각적인 적용 및 평가를 진행하고자 함
- 1년차 연구에서는 본 연구팀에서 확보하고 있는 다양한 기계적 메타물질 3D 프린팅 기술을 활용하여, 태양전지 3차원 배치 제어에 적용하고, 가능성이 높은 구조체를 선정하는 작업을 진행하고자 함



그림 3. 본 연구팀에서 확보한 다양한 기계적 메타물질 구조체 3D 프린팅 기술을 3차원 태양전지 배치 접근에 활용

### ■ 체결형 태양광 모듈 제작을 위한 전극 설계 및 프로토타입 제작

- 제안하는 구조는 모듈을 구성하는 태양전지를 체결형으로 조립이 가능하도록 하는 새로운 형태의 구조로써, 투광형 태양전지 단위 모듈의 제작 공정을 간소화할 수 있고 모듈의 확장(대면적화)이 직관적이고 용이하며 크기와 형태, 모양 등의 제약을 최소화할 수 있음
- 또한, 모듈을 구성하는 태양전지의 각도, 크기, 모양, 간격 등의 조절이 용이하도록 하므로 광투과율을 쉽게 조절할 수 있으며, 이러한 아이디어를 바탕으로, 용액공정을 통해 제작된 CIS 단위 태양전지를 체결형 모듈 프레임에 직렬 또는 병렬연결할 수 있도록 5×5 cm<sup>2</sup> 크기의 프레임 전극 구조를 설계하고자 함
- 광투과 단일 태양광 모듈을 완성하기 위한 선행단계로 체결형 모듈의 프레임 및 전극을 설계하고 제작
- CIS 태양전지를 사각형의 모듈 프레임에 수평 또는 격자 구조로 체결하고자 하며, 이 경우 각 태양전지는 종래와 달리 태양광의 입사 방향과 나란하므로 광투과 특성이 뛰어날 것으로 기대함
- 우수한 투광성과 발전 효율을 동시에 만족하는 태양광 모듈은 현재 개발된 사례가 없음
- 광투과 단일 태양광 모듈에 대한 내부 선행연구는 광투과 특성이 없는 종래 태양광 모듈 대비 현재 약 65% 정도 수준에 도달하였으며, 3단계 시점에서 약 90% 정도 수준까지 향상이 가능할 것으로 기대함

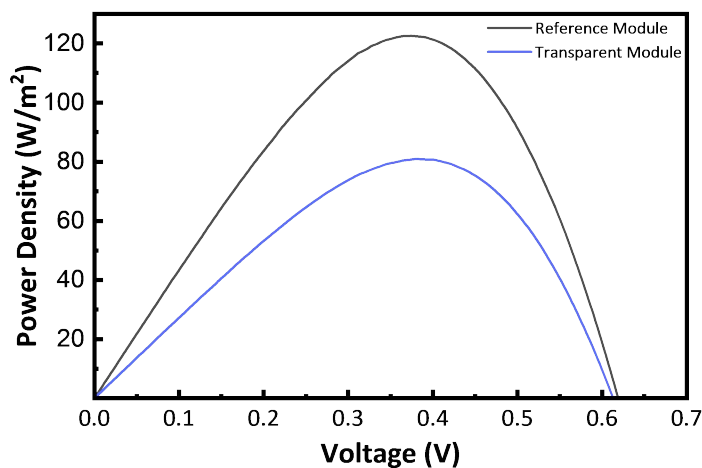


그림 4. 기존 태양광 모듈과 제안하는 태양광 모듈의 선행연구 단계에서의 성능 차이

#### (1) 체결형 전극 구조 설계 및 소재 선택

- 모듈 내 태양전지를 직렬 또는 병렬로 연결할 수 있도록 두 종류의 전극 구조를 설계

- 태양전지의 전극이 양면으로 배치되는 경우, 직렬형 전극은 이웃한 태양전지의 반대전극을 연결하는 ㄷ자 모양으로, 병렬형 전극은 이웃한 태양전지의 동일 전극을 연결하는 가지 모양으로 구현하고자 함

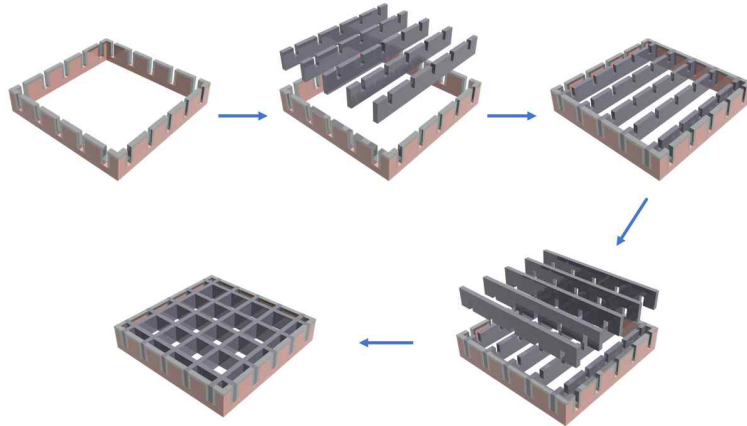


그림 5. 전극 구조 설계를 통한 태양전지 체결형 단위 모듈 제작 공정 전체 모식도

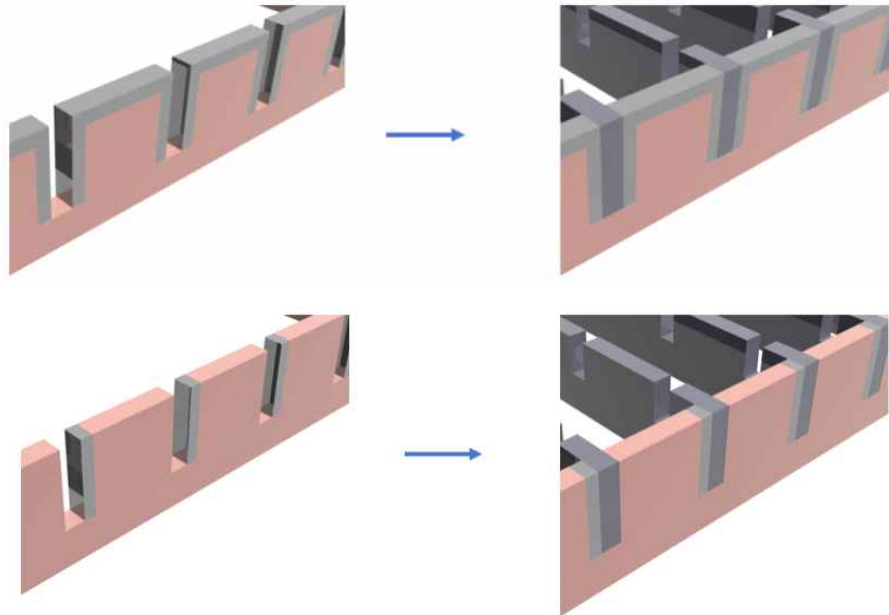


그림 6. 양면 전극형 태양전지의 체결형 전극 구조 모식도. (상) 직렬, (하) 병렬

- 태양전지의 전극이 단면으로 배치되는 경우, 직렬형 전극은 이웃한 태양전지의 반대전극을 연결하는 ㄷ자 모양으로, 병렬형 전극은 이웃한 태양전지의 동일 전극을 연결하는 다리 모양으로 구현하고자 함



그림 7. 단면 전극형 태양전지의 체결형 전극 구조 모식도. (좌) 직렬, (우) 병렬

- 태양전지 전극부를 모듈 프레임 전극부에 기계적으로 쉽게 체결할 수 있도록 전극을 디자인
- 전극 소재 자체의 탄성을 이용하거나 탄성을 갖는 구조물을 삽입하는 등의 방법을 고안

- 전기전도도가 우수하여 널리 사용되고 있는 Cu 금속, Cu-Ni 합금 등을 전극의 소재로 고려하고 있으며, 전극 저항에 의한 손실을 최소화하고자 함

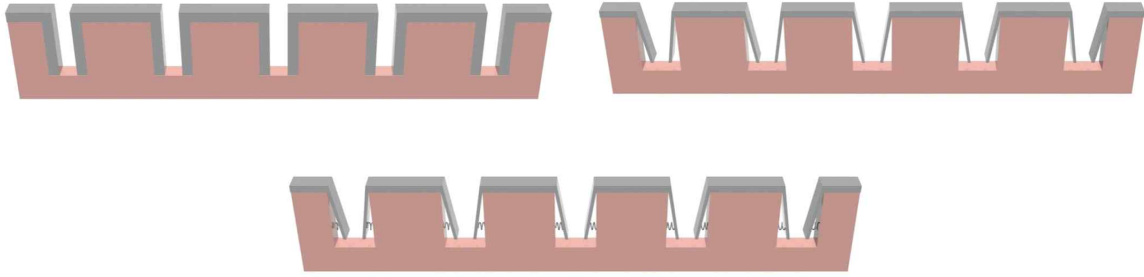


그림 8. 모듈 프레임에 배치된 다양한 체결형 전극 구조 모식도(직렬)  
(살구색:모듈 프레임, 은색: 전극)

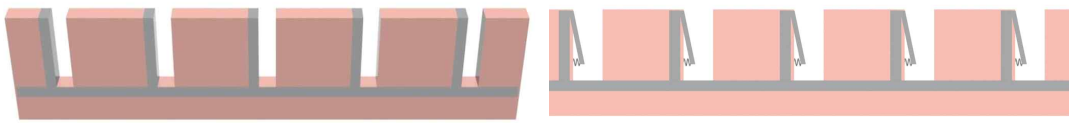


그림 9. 모듈 프레임에 배치된 다양한 체결형 전극 구조 모식도(병렬)

## (2) 전극 포함 모듈 프레임 프로토타입 제작

- 모듈 프레임의 치수에 따라 체결할 태양전지의 수, 규격, 배열, 각도 등이 결정되고, 이는 모듈의 광학적 및 광전기적 특성의 균형을 결정
- 다양한 모듈 구조를 시험하기 위해 신속한 설계와 출력이 가능한 3D 프린터를 응용하여 최적화된 모듈 프레임 프로토타입을 제작

## ■ 직·병렬형 단위 모듈 제작 및 최적화

### (1) 직렬 또는 병렬형 전극 구조 설계 및 단위 모듈 제작

- 1차년도에 설계한 체결형 전극 구조 및 프레임을 기반으로 30×30 cm<sup>2</sup> 크기의 태양광 모듈을 직렬 및 병렬형으로 제작
- 단위 모듈은 태양전지의 폭, 간격 등 설계를 따르며 태양전지 체결 후 강화유리, 터미널 박스 등 모듈의 구동을 위한 부속물을 포함

[표.. 고강도 단위 모듈 프레임 소재 탐색 및 적용 (프레임소재 후보군)]

프레임소재 후보군	주요 특성
PC (polycarbonate)	내충격성이 좋음. 가시광 투과율 좋음(80~90%). 내열성 좋음(실사용 온도범위 -40~120 ℃). 변형이 적어 정밀 형성에 최적. 이외에도 난연성, 무독성, 내후성 등의 장점이 있음. 내화학성이 부족하고 인장강도 이상의 외력을 받으면 결함이 생기며 투명성 저하되며 가격이 비싼 편임
PBT (polybutylenetere)	결정화 속도가 빨라 복합항 성형물 사출에 적합, 내화학성 우수하며 절연성이 우수함, 내후성 강하며, 첨가제를 이용하여 난연화 하기에 용이함. 강화제



phalate)	보강 효과 탁월함. 하지만 가수분해에 취약하고 성형시 휨 변형 발생, 내알칼리성 부족
PC/ABS (Alloy)	PC의 우수한 기계적 특성과 내열성, ABS의 가공성을 이상적으로 조합한 엔지니어링 플라스틱 소재임. 두 소재를 적절히 혼합하여 PC의 가공성 및 내화학성의 보완이 가능하고 가격 측면에서도 충분히 사용 가능하다고 판단됨. 하지만 투명성이 부족하여 차광효과 생길수 있음
PVDF (polyvinylidene fluoride)	다른 불소중합체와 달리 밀도가 낮으며 기계적 강도 우수, 높은 장기사용온도(140 ° C), 내후성, 절연성 등의 특징이 있음

## (2) 태양전지 간격 및 폭 최적화

- 단위 모듈을 구성하는 태양전지의 두께와 수는 모듈에 사용되는 태양전지의 폭과 간격에 따라 결정되며, 단위 모듈 내 태양전지의 총 면적을 최적화
- 체결형 모듈에서 태양전지의 너비는 모듈의 너비와 동일하며, 폭은 태양전지 너비와 수직 방향의 길이로 정의할 수 있음. 태양전지의 폭은 모듈 프레임 두께와 동일하거나 작을 수 있으며, 너비가 고정되어 있으므로 폭이 감소할수록 면적이 감소
- 태양전지의 간격은 단위 모듈 내 태양전지 사이의 거리로 정의할 수 있으며, 태양전지 폭을 기준으로 1:1, 1:0.5, 1:2 등으로 나타낼 수 있음 (태양전지 간격이 감소할수록 광흡수 면적은 증가하므로 모듈의 출력이 증가하게 되지만, 측면에서의 투광성은 감소할 수 있음)

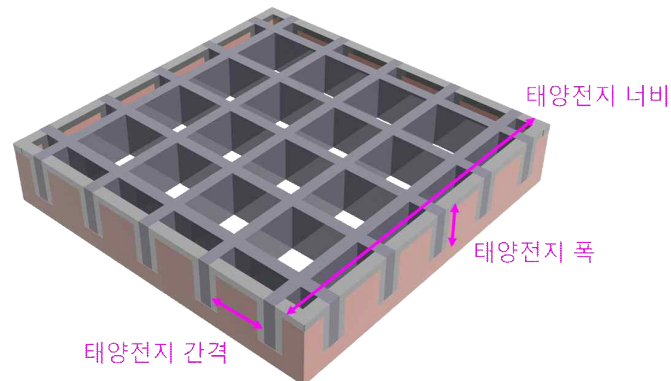


그림 10. 태양전지 폭, 간격 및 너비 개념도

## (3) 태양전지 각도 조절 영향 평가

- 단위 모듈 내 태양전지의 배열 각도는 설치면 대비 90도에서부터 그 이하로 설계할 수 있고, 태양전지의 각도를 조절함으로써 작물의 광보상점 및 광포화점을 고려한 최적의 모듈 투광도를 구현할 수 있음
- 태양전지의 각도를 조절할 경우 태양광의 입사 밀도가 변화하므로 모듈 효율이 최적화되는 각도에 대한 고려가 필요함
- 태양전지의 각도에 따라 광필터로부터 반사되는 광 활용도를 조절



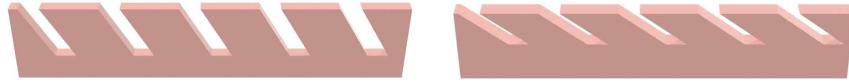


그림 11. (상) 다양한 각도로 체결된 태양전지 예시. (하) 각도를 적용하여 태양전지를 체결할 수 있도록 설계한 프레임 예시

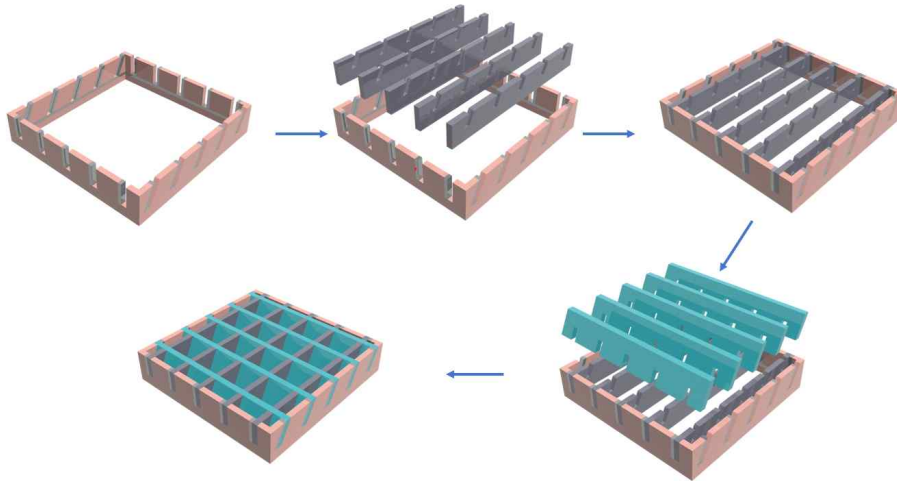


그림 12. 각도를 적용한 태양전지 체결형 단위 모듈 제작 공정 모식도. 각도를 적용한 태양전지는 옥색으로 표시하였음

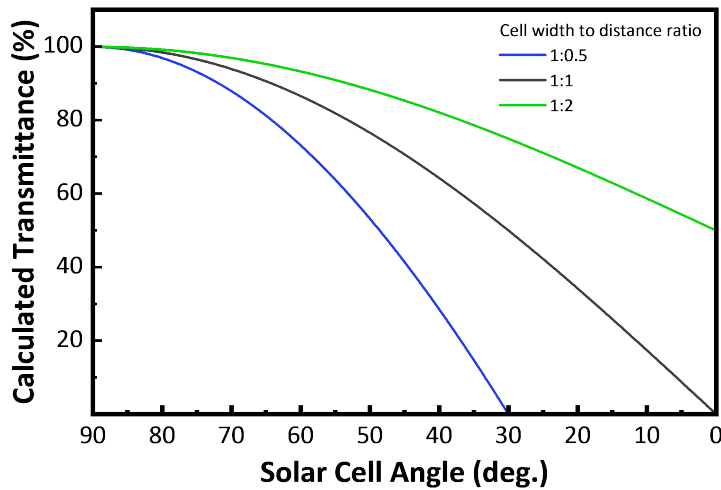


그림 13. 다양한 태양전지 간격에서의 태양전지 배열 각도에 따른 투과도 예상도 (반사필름 적용 전)

#### (4) 태양전지 수직 영향 평가

- 최적화 : 단위 모듈의 두께와 태양전지의 폭이 다르게 설계하는 경우 태양전지의 수직 위치는 다양할 수 있으며, 태양전지의 위치에 따라 광필터로부터의 반사광 활용도가 다를 것으로 예상



그림 14. 태양전지 수직 위치를 조절한 모듈 프레임 예시

### (5) 효율 증대를 위한 태양전지 후면 반사소재 도입

- CIS 태양전지는 광흡수층이 한쪽 면에만 위치하는 단면수광형 구조를 가짐. 후면의 비활성 영역으로 입사하는 태양광은 대부분 흡수 손실되므로, 후면에 반사소재를 도입하여 이웃한 태양전지의 광흡수층으로 태양광을 반사하여 효율을 증대하는 전략을 제안하고자 함

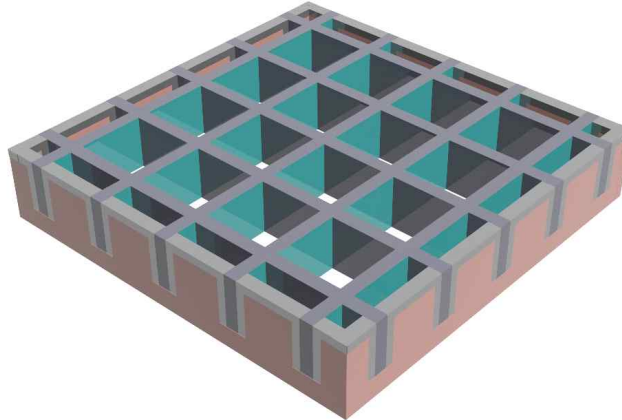


그림 15. 각 태양전지의 후면에 반사소재(하늘색)를 적용한 체결형 단위 모듈의 개념도

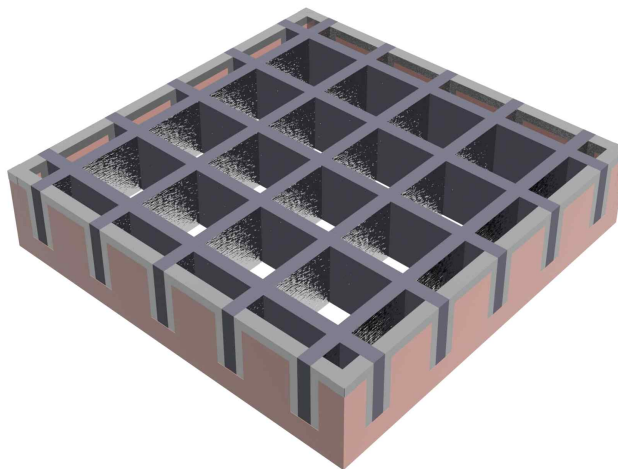


그림 16. 각 태양전지의 후면에 난반사소재를 적용한 체결형 단위 모듈의 개념도

- 반사소재로서 알루미늄은 대부분의 파장 영역에서 우수한 반사율을 나타내지만 700-900 nm 파장 영역에서의 반사율이 다소 떨어짐. 니켈 및 백금은 상대적으로 반사율이 낮으므로 반사소재로는 부적합할 것으로 사료됨. 은의 경우, 광학 응용 분야에서 널리 사용되는 재료 중 하나로 반사율이 높고 반사막 형성이 용이함. 다만, 대기와 접촉할 경우 산화가 발생하는 문제가 있으나 금속층 상부에 유전체 박막을 형성하여 공기와의 접촉을 차단하는 방법으로 산화를 효과적으로 예방할 수 있음. 금 및 구리는 유사한 반사 스펙트럼을 나타내며, 700 nm 이상 파장 영역의 적외선 반사에 유용함
- 반사소재의 형성은 atomic layer deposition(ALD), chemical vapour diposition(CVD), e-beam deposition, thermal evaporation, electroplating, spray coating 등 다양한 방법으로 가능함

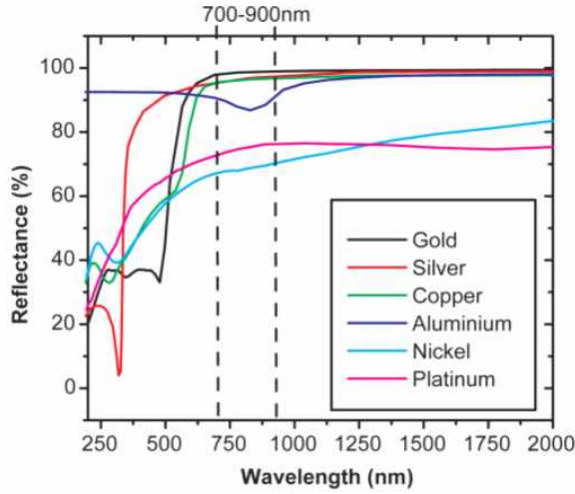


그림 17. 일반적으로 사용되는 금속의 200 - 2000 nm 범위 내 반사율 (출처: Opt. Express 2013, 21(12), 14698)

■ 작물 생산과 태양광 발전을 고려한 이색성 광필터 최적화 설계

- 이색성 광필터 소자 기술을 통해 태양광 발전 에너지를 전력원으로 사용하는 스마트 온실에 설치된 태양전지의 효율 및 전력을 향상시키고 별도의 광원 공급 없이 식물의 성장을 도모할 수 있게 하여 태양광 스펙트럼의 활용을 극대화할 수 있는 기술임

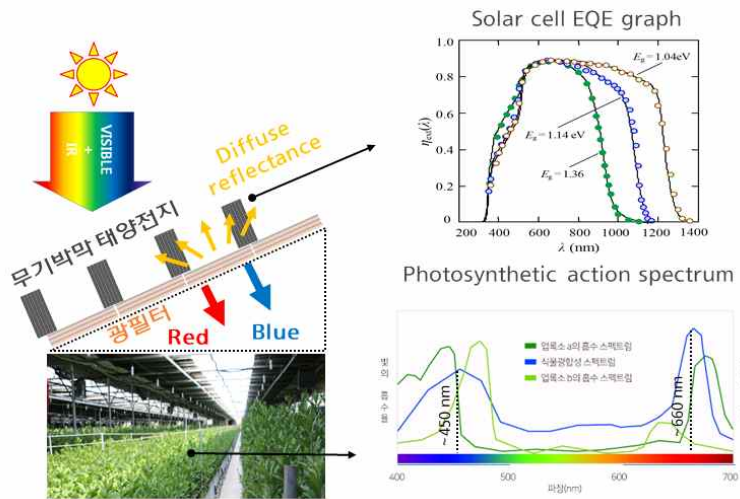


그림 18. 스마트 온실용 이색성 광필터를 통한 파장 분리를 나타낸 모식도와 무기박막 태양전지 및 식물 광합성의 파장별 광효율 스펙트럼

(1) 식물의 고효율 성장을 위한 투과 파장 영역 설계

- 식물은 빛을 흡수할 수 있는 다양한 색소를 가지고 있으며, 주요하게는 엽록소 a, 엽록소 b, 베타카로틴 등의 색소가 작용함
- 이러한 주요 색소들의 파장별 광 흡수 스펙트럼은 식물이 어떠한 파장에서 광합성을 일으키는지와 깊은 연관성이 있으며, 식물의 광합성 작용 스펙트럼(photosynthetic action spectrum, PAS)은 광합성을 유도하기 위한 빛의 파장별 효율을 나타낸 것으로, 이를 통해 식물 성장을 위해 최대 효율을 보이는 파장 분포를 확인할 수 있음
- German institute for standardization (DIN 5031-10) 기관에 따르면 식물의 광합성은 평균적으로

로 약 450 nm 그리고 약 660 nm 부근에서 최대의 광효율을 보이는 것으로 알려져 있음. 반면, 400 nm 미만 그리고 700 nm 이상의 파장 영역에서는 광합성에 대한 기여도가 매우 낮음. 식물의 광합성 작용 스펙트럼에 근거하여, 450 nm와 660 nm를 중심으로 일정 이상의 반치폭 (full width at half maximum, FWHM)을 가지며, 400~500 nm, 640~700 nm 파장 영역의 가시광선을 선택적으로 투과할 수 있는 이색성 광필터 디자인이 요구됨

## (2) 저밴드갭 무기박막 태양전지의 효율 향상을 위한 반사 파장 영역 설계

- CIGSSe 무기박막 태양전지는 박막층의 조성비(인듐과 갈륨의 비율 및 황과 셀레늄의 비율)에 따라 광흡수층의 밴드갭 조절이 가능하며, 외부 양자 효율 (external quantum efficiency, EQE) 그래프에서 알 수 있듯이 300 nm의 단파장에서 1000~1400 nm에 이르는 장파장 영역까지 광범위한 파장의 빛을 흡수할 수 있는 장점이 있음
- 따라서 식물 생장에 필요한 400~500 nm, 600~700 nm 파장 영역을 제외한 빛을 이색성 광필터에서 반사하도록 하여 태양전지에 광자를 공급하도록 광필터를 설계할 계획임. 구체적으로 350~400 nm, 500~600 nm, 700~1300 nm 파장 영역에 해당하는 빛을 반사할 수 있는 이색성 광필터를 디자인하고 시뮬레이션함

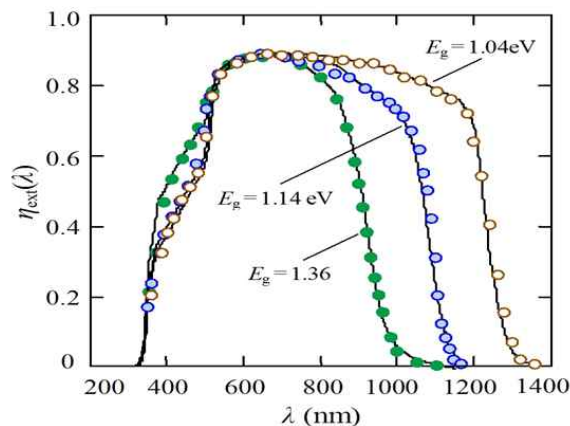
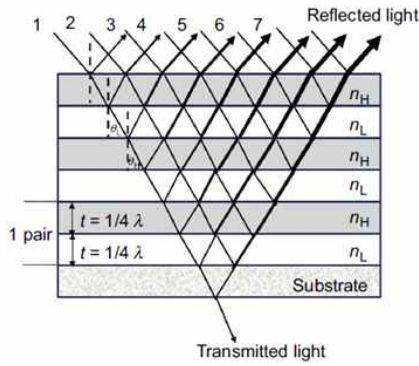


그림 19. CIGSSe 태양전지의 조성비에 따른 외부 양자 효율 변화

## (3) FDTD 기반 이색성 광필터 소재 설계 및 전산모사

- 1차원 광결정(1-D photonic crystal)은 굴절율이 서로 다른 유전체 박막을 겹겹이 쌓아서 빛의 간섭을 유도하여 입사되는 빛의 파장 중 일부만 선택적으로 투과되고 나머지는 반사시킬 수 있는 유용한 광필터 소재 중 하나임
- 1차원 광결정에서 반사되는 파장은 각 유전체 박막의 두께, 굴절율 및 빛의 입사각에 따라 달라지며, 다층 박막의 단순한 모델을 바탕으로 변수들 간의 상관관계는 아래 그림에서 나타나는 식에 의해 표현될 수 있음
- 본 연구에서는 식물 광합성의 광효율 스펙트럼과 태양전지의 외부 양자 효율을 고려한 이색성 광필터 소재를 디자인하기 위해, 유한차분시간구역(Finite-difference time-domain, FDTD) 모델링 기법에 기반한 전산모사 방법을 도입하여, 유전체 박막의 두께를 제어하고 굴절율이 다른 여러 가지 유전체 박막(TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등)을 조합하여 반사되는 빛의 파장이 조절된 1차원 광결정 소재를 시뮬레이션 하고자 함





$$m\lambda = 2(n_H d_H \cos \theta_H + n_L d_L \cos \theta_L)$$

$$R = \left[ \frac{\left( n_S - \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N} \right)}{\left( n_S + \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N} \right)} \right]^2$$

그림 20. 단순 1차원 광결정 모델의 반사 파장과 반사 강도 관계식

( $n_H, n_L$  = 유전체 박막의 굴절율 /  $d_H, d_L$  = 박막의 두께 /  $\theta_H, \theta_L$  = 입사각 /  $\lambda$  = 반사 파장 /  $N$  = 단위 박막의 적층 수 /  $n_S$  = 기판의 굴절율 /  $R$  = 반사되는 빛의 강도)

- 반사파의 강도는 유전체 박막의 굴절율 비율과 기판의 굴절율 및 적층 수에 따라 결정되는 것을 알 수 있음. 유전체 박막의 굴절율은 이미 결정되어 있고, 기판은 반사에 거의 영향을 미치지 않는 투명 유리 기판을 사용함. 따라서, 적층 수를 조절하여 반사되는 빛의 강도를 향상시킬 수 있으며, 특정 빛의 파장만 선택적으로 고강도로 반사시킬 수 있는 광결정 소재를 시뮬레이션할 수 있음. 두께 및 적층 수와 같은 핵심 변수는 refinement process를 통해 미세 조정이 이루어질 수 있으며, 이를 통해 목표하는 반사 파장 및 반사도를 가지는 소재 설계가 가능함
- 본 제안 연구 과제의 구성원인 국민대 도영락 교수 연구팀은 유전체 박막의 두께와 적층 수를 조절하여 반사되는 빛의 파장을 정밀하게 제어하고 반사도가 약 100%에 달하는 전산모사 결과를 2019년 ACS Appl. Mater. Interfaces에 발표한 바 있음
- 더 나아가서는 적층 구조를 변경하여 투과되는 파장 영역에서 나타나는 잔물결 모양의 반사 파동(ripple)를 제거하고자 함. 가령, 적층 구조의 단위를  $(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)_n$  구조가 아닌  $\text{SiO}_2$ 가 양 끝단에 위치해 있는  $(0.5\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/0.5\text{SiO}_2)_n$  구조를 사용하거나, 오히려 비주기적 적층(nonperiodic stacking) 구조를 활용하면 투과되는 파장 영역에서 ripple을 제거하는데 큰 도움을 줄 것이라 예상함. 해당 연구 결과는 2010년, 2019년에 광학 분야 권위학술지인 Optics Express와 ACS Nano 저널에 게재된 바 있음

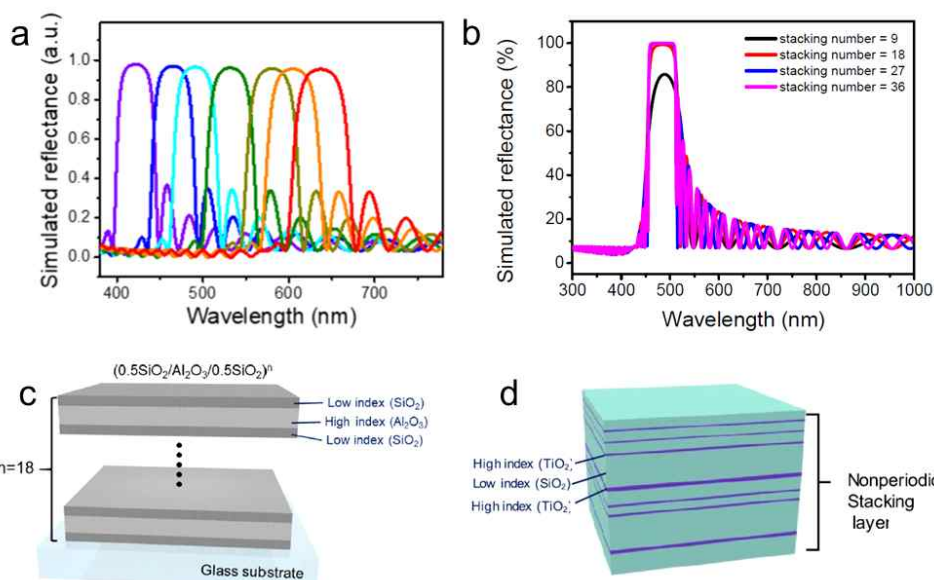


그림 21. FDTD 시뮬레이션을 이용하여 전산모사한 광결정의 (a) 박막 두께별, (b) 적층 수별 반사 스펙트럼. (c, d) 향상된 투과도를 보여주는 광결정 적층 구조의 모식도



#### (4) 층상 자기조립법 기반 광결정 적층 플랫폼 기술

- 층상 자기조립법(layer-by-layer assembly method)은 나노미터 단위에서 적층 두께를 제어할 수 있으며 대량생산이 용이하고 비용이 저렴한 용액공정으로, 대상 기판과 표면 개질된(surface-functionalized) 나노입자 간에 정전기적 상호작용 혹은 분자 간 인력을 통해서 단일 층의 소재막을 기판에 균일하게 흡착시킬 수 있는 유용한 기술임
- 본 연구에서는 일정한 두께의 산화물 나노입자로 구성된 밀도 높은 박막을 제작하기 위해, 기판을 각각 양의 전하와 음의 전하를 띠는 나노입자가 분산된 용액에 주기적으로 침지하여 정전기적 상호작용에 의해 나노입자 박막을 적층하고자 함
- 층상 자기조립법의 단위 공정은 (1) 기판을 양전하 나노입자 용액에 침지하는 단계, (2) 물에 세척하는 단계, (3) 다시 음전하 나노입자 용액에 침지하는 단계, (4) 물에 세척하는 단계의 4 단계로 구성됨. 단위 공정을 반복함에 따라 박막의 총 두께를 선형적으로 증가시킬 수 있음. 단위 공정 수에 따른 박막의 두께 변화를 측정하고 함수식을 결정하여, 이를 기반으로 특정한 목표 두께를 증착하기 위한 단위 공정의 수를 설정할 수 있음

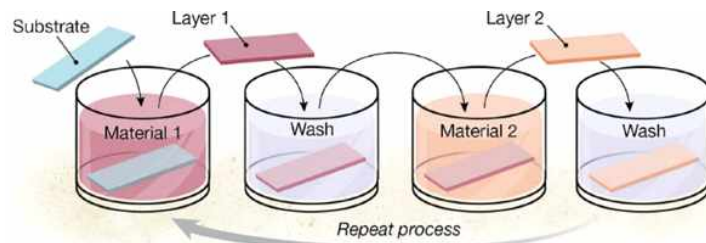


그림 22. 층상 자기조립법을 이용한 광결정 적층 기술의 공정 모식도

- 수용액에서 콜로이드 산화물 나노입자가 띠는 표면 전하는 pH에 따라 달라지며, 제타 포텐셜(zeta potential) 데이터를 통해 영전하점(point of zero charge, PZC)을 기준으로 산성 용액에서 양전하를, 염기 용액에서 음전하를 띠고 있음을 알 수 있음. 따라서, 용액의 pH를 조절하여 양전하 및 음전하로 대전된 나노입자 콜로이드 용액을 제조하며, 과증착을 막기 위해 산화물 나노입자의 농도 및 침지 시간을 달리하여 증착된 막의 두께 및 표면 거칠기(roughness) 등을 분석하여 최적 공정 변수를 도출할 계획임. 산화물 나노입자의 표면 전하, 증착된 막의 두께 및 표면 거칠기는 각각 제타포텐셜, 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM) 및 원자현미경(Atomic force microscopy, AFM)법을 이용하여 분석함.

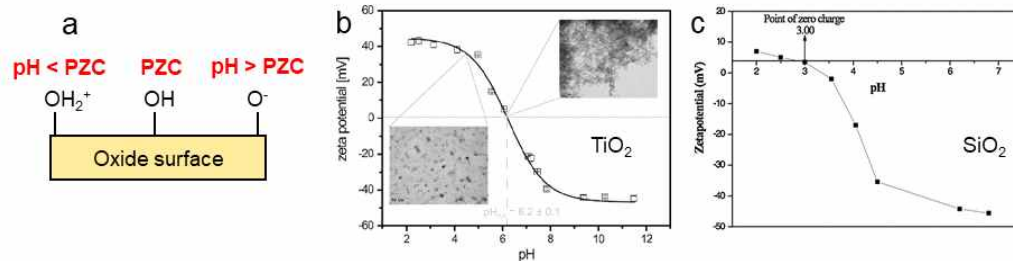


그림 23. (a) pH에 따른 수용액 내 콜로이드 산화물 나노입자 표면의 전하 변화. (b) TiO<sub>2</sub> 및 (c) SiO<sub>2</sub> 입자의 제타 포텐셜 곡선

#### ■ 유연 기판 이색성 광필터 소자 제작 기술 개발

##### (1) 저온 기상증착법을 이용한 투명 유연 기판 이색성 광필터 소자 제작

- 이색성 광필터용 유연 기판 소재를 선정하기 위해서 열적/기계적/화학적 안정성, 파장별 투과도를 기준으로 적절한 소재를 탐색할 필요가 있음. 기상 증착 공정 동안 뒤틀림이나 물리적, 기계적 물성 변화가 적어야 하며, 장기간 내구성을 확보하기 위해 수분이나 대기 및 온도, pH 변화에 대해 민감하지 않아야 함. 또한 유연 기판 위에 광결정을 증착하기 때문에 광결정에서 투과된 식물생장에 필요한 빛을 잘 투과할 수 있어야 함
- 본 연구에서는 일차적으로 무색 투명 폴리이미드(colorless transparent polyimide) 필름을 유연 고분자 기판으로 활용하고자 함
- 투명 폴리이미드 필름은 420 nm 이상의 가시광선 영역에서 85-90%에 달하는 높은 투과도를 보여주며, 표면 경도(surface hardness)가 1H 이상으로 표면 스크래치에 견고하며, 굽힘 변형에 대한 곡률 반경(banding radius)이 작아 유연하게 구부러지며, 열팽창계수가 15 ppm/°C 이하이고 330-350 °C의 높은 유리 전이 온도(glass transition temperature, Tg)를 갖고 있어 열적 안정성이 뛰어나. 이러한 물성 덕분에 유연 디스플레이(flexible display) 소자 분야에도 많은 적용 사례를 보여주고 있어 본 연구에서 적용하고자 하는 유연 기판으로 적합하다고 판단함
- 본 연구에서는 기상 증착법을 활용하여 기판 온도, 전구체 및 분압 등을 조절하여 유연 기판 위에 고품질의 1차원 광결정을 저온에서 증착하고자 함

## (2) 유연 고분자 기판 표면 처리를 통한 광필터 접합성 강화 기술 개발

- 본 유연기판용 광필터 소자는 기판이 구부러지는 상황에서도 광필터 소재와 유연 기판간의 강한 접합성을 바탕으로 내부 구조의 변형이 최소화되어야 함. 이를 위해서는 저온 기상증착 시 사용되는 금속 전구체 및 기체 반응물이 원활하게 높은 coverage로 기판에 흡착될 뿐만 아니라 더 나아가서 화학적으로 결합을 이루어 낼 수 있는 표면 처리 기술이 필요함
- 본 저온 기상 증착에서 사용하는 전구체와 반응물은 소수성 보다는 친수성을 띠고 있기 때문에, 접합성 강화를 위해서는 고분자 기판을 친수성을 띠는 작용기로 치환해야 함. 본 연구에서는 자외선-오존(UV-O<sub>3</sub>) 처리나 산소 플라즈마(oxygen plasma) 처리를 통해 쉽고 간편하게 유연 고분자 기판의 오염물을 제거하고 표면을 산화시킬 수 있는 공정을 수립할 계획임. 표면 처리의 정도는 기체 분압, 표면 처리 시간, 에너지 공급 파워 등에 따라 조절이 가능하며, 표면 거칠기(surface roughness)와 접촉각(contact angle)을 측정하여 최적의 표면 처리 조건을 도출함. 거칠기는 원자힘 현미경(atomic force microscope)으로, 접촉각은 측각기(goniometer)를 이용하여 측정. 또는 상온 기상 증착을 통해 자기조립단분자막(self-assembled monolayer)을 형성하여 친수성 표면 개질을 달성할 수 있는 공정을 추가로 모색

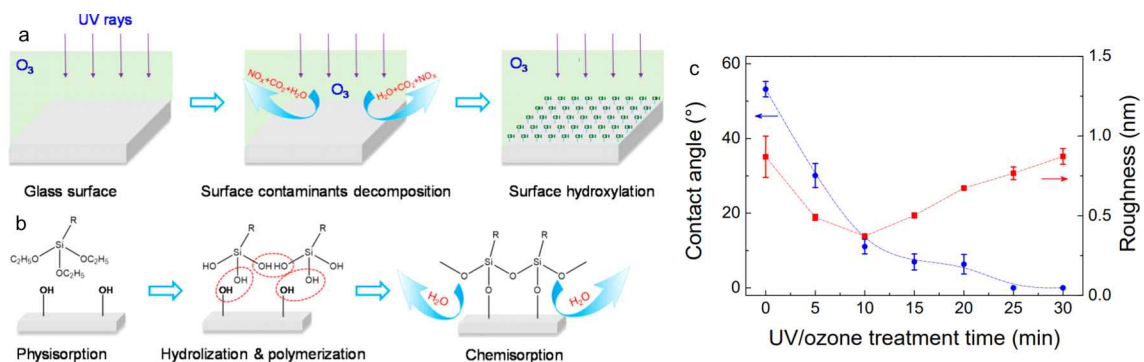


그림 24. (a) 자외선-오존 처리 공정, (b) 제작된 친수성 표면에서 Si 전구체의 화학적 흡착 반응, (c) 자외선-오존 처리 시간에 따른 접촉각과 표면 거칠기를 나타낸 그래프

### (3) 미니 광투과 태양전지 성능 측정 기술 개발

- 이전 과제 연구 계획에 따르면 “이색성 광필터 보호용 봉지 기술을 통한 내구성 강화”가 수행 연구 내용으로 되어 있으나, 내구성이 뛰어난 소재인 금속산화물을 기반으로 하는 이색성 광필터 특성상 보호용 봉지 기술이 크게 요구되지 않을 것으로 사료되어, 실질적으로 광투과 태양전지에서 광필터의 역할을 검증하기 위한 연구 내용으로서 다음과 같이 “미니 광투과 태양전지 성능 측정 기술 개발”이라는 연구 내용을 진행하였음.
- 기상 증착 방식으로 제작한 1차원 광결정 전극을 flexible CIGS solar cell과 결합하여, 광투과 태양전지를 제작하고 solar simulator를 이용하여 solar illumination 환경을 조성한 뒤에, 광투과 태양전지를 투과한 빛의 스펙트럼과 태양전지에서 발생하는 전력생산량을 측정함.
- 광투과 태양전지를 투과한 빛의 조도(Irradiance)는 식물 생장에 중요한 역할을 하며, 본 연구에서는 청색광(400~500 nm)과 적색광(600~700 nm)에 해당하는 빛의 조도를 해당 파장 영역에서 integration하여 계산값을 도출함.
- 태양전지 전력생산량은 multimeter를 이용하여 여러 개의 CIGS solar cell strip에서 solar simulator illumination 시에 발생하는 전류와 전압 출력값을 읽고 이를 곱하여 전력생산량을 도출함.
- 투과광의 조도와 태양전지 전력생산량 값을 여러 가지 실험 조건(태양전지 스택 수, 광필터 각도, CIGS solar cell 높이, solar cell 배치, 광필터 조성 등)에 따라 측정하고, 적색/청색광을 잘 투과하면서도 높은 전력생산량을 만들어낼 수 있는 최적의 실험환경을 위한 최적화 변수 조합을 찾아냄.

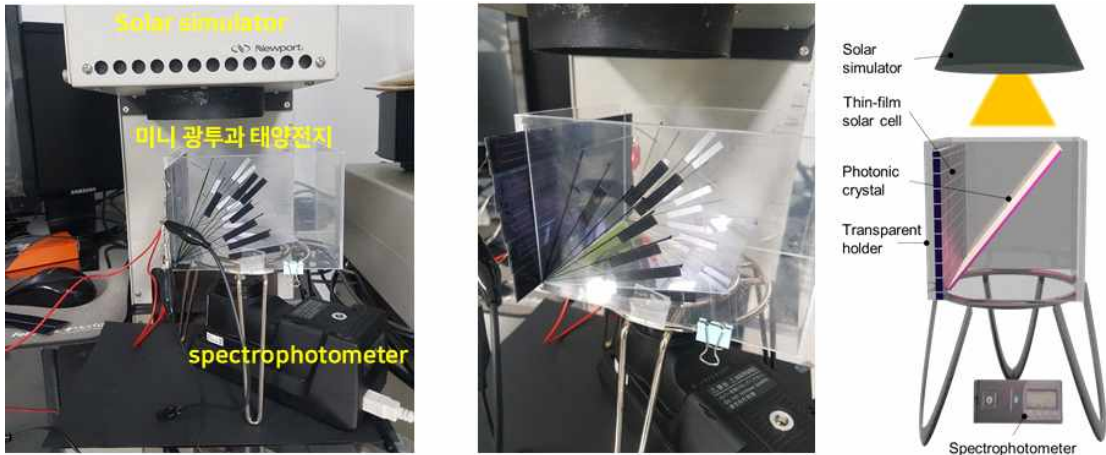


그림 25. 미니 광투과 태양전지를 이용한 투과광 조도 및 태양전지 전력생산량 측정을 위한 실험 장치 사진과 그 구성요소를 나타낸 개략도

## 3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

### 1) 연구수행 결과

#### (1) 정성적 연구개발성과

- 선택적 광투과 태양전지 적용시 토마토 및 새싹삼 시설재배 적합성 평가 및 재배 작물 생육-성분 조절을 위한 광환경 (광량·광질) 탐색 및 제어 조건 도출



- 선택적 광투과 태양전지가 투과시키는 청색 파장대(400~500nm)와 적색 파장대(600~700nm) 혼합 광 환경 조건(Blue+Red)을 LED 광원으로 모사하여, 토마토 (방울토마토 품종 마이크로톱) 및 2년생 인삼 2개 품종 (천풍, 연풍)에 대한 시험 재배 및 해당 광환경 조건에서의 재배 적합성 평가 수행 (그림 24)
- 비교 대조구 광환경으로써 청색 파장대(Blue), 적색 파장대(Red) 광환경 및 일반 유리 온실 자연광 모사 full-spectrum 광환경 조건(White)에서 비교 재배 시험 수행

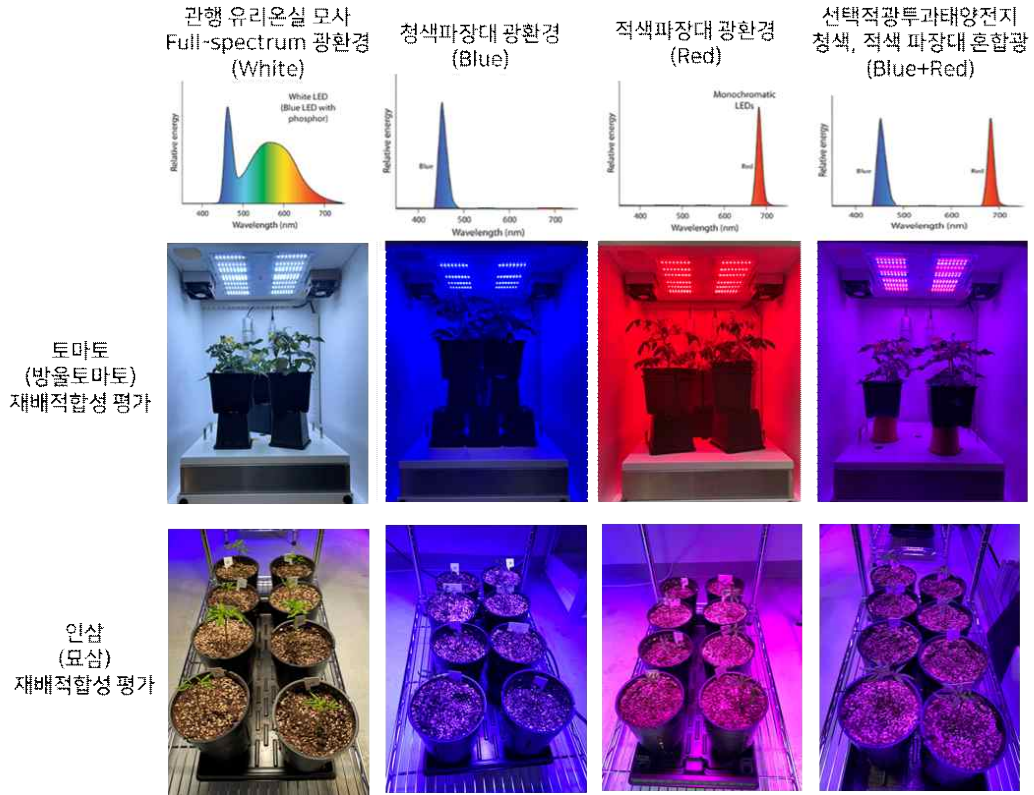


그림 26. 선택적 광투과 태양전지 광환경 재배 적합성 평가를 위한 광파장대별 토마토 및 인삼 시험재배

- 시설재배 광환경 조건 중 광파장대 차이뿐 아니라, 선택적 광투과 태양전지의 적정 광투과도 설정을 위해 일적산광량 차이에 따른 토마토 및 인삼의 생육 변화 분석 수행 (그림 25)

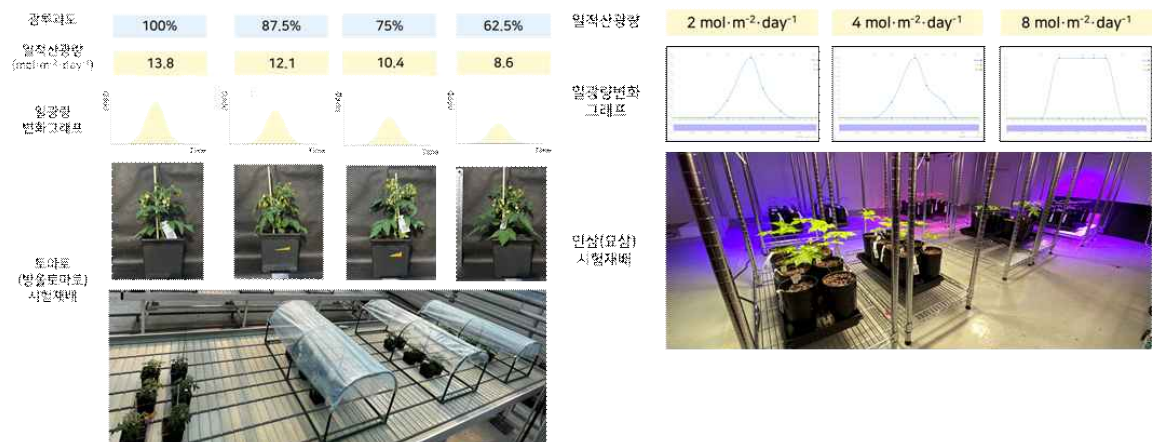


그림 27. 선택적 광투과 태양전지 광환경 재배 적합성 평가를 위한 일적산광량 차이에 따른 작물

생육-성분 변화 분석 (좌: 토마토 시험재배, 우: 인삼 시험재배)

○ 광파장대 및 일적산광량 차이에 따른 토마토 생육-성분 특성 변화 분석

- 광파장대별 단위 시간 및 단위 면적당 동일한 광량( $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $15\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ )을 조사한 재배환경에서 토마토(마이크로톰) 총과수와 성숙과 평균과중은 White > Red > Blue+Red > Blue 순으로 낮게 나타나지만, 처리구간 통계적으로 유의하게 다르지 않음.
- 조사 광파장대 차이에 의해 토마토 과실내 성분 변화가 나타나며, 선택적 광투과 태양전지에 의한 청색 파장대(400~500nm)와 적색 파장대(600~700nm) 혼합광(Blue+Red) 조건과 청색 파장대(Blue) 광환경은 과실내 주요 성분인  $\beta$ -Carotene과 Lycopene 함량을 증대시킴.

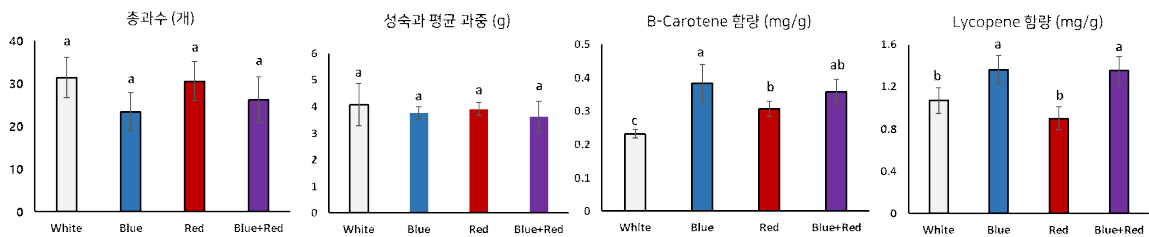


그림 28. 광환경 광파장대 차이에 따른 토마토 생육 및 성분 변화

- 선택적 광투과 태양전지의 적정 광투과도 설정을 위해 일적산광량 13.8, 12.1, 10.4, 8.6  $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  조건에서 토마토 시험 재배를 수행하였으며, 그 결과 토마토 과실의 총과수와 성숙과 평균과중,  $\beta$ -Carotene과 Lycopene 함량은 처리구간 차이 없음.

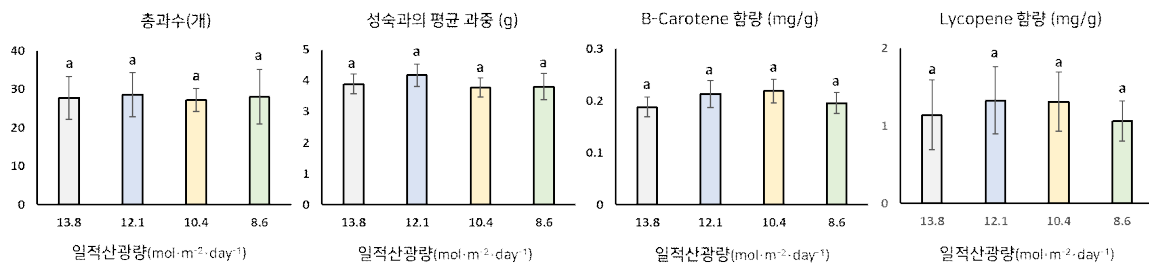


그림 29. 광환경 일적산광량 차이에 따른 토마토 생육 및 성분 변화

- 위 결과를 종합하여, 일적산광량이 동일한 조건에서 관행 유리온실의 자연광 조건과 비교하여 선택적 광투과 태양전지에 의한 청색 파장대(400~500nm)와 적색 파장대(600~700nm) 혼합광 조건은 방울토마토 과실 생산량을 크게 떨어뜨리지 않으면서, 과실내 주요성분 함량 증대를 가능하게 할 것으로 판단함.
- 다만, 토마토가 고광량 요구 작물임을 감안하였을 때, 선택적 광투과 태양전지의 광투과도는 최대한 설정할 필요 있음.

○ 광파장대 및 일적산광량 차이에 따른 인삼 생육-성분 특성 변화 분석

- 광파장대별 단위 시간 및 단위 면적당 동일한 광량( $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $5\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ )을 조

사한 재배환경에서 인삼 품종 천풍과 연풍 묘삼의 뿌리 길이, 두께, 뿌리 생산량은 광환경 조건간에 통계적으로 유의하게 다르지 않음.

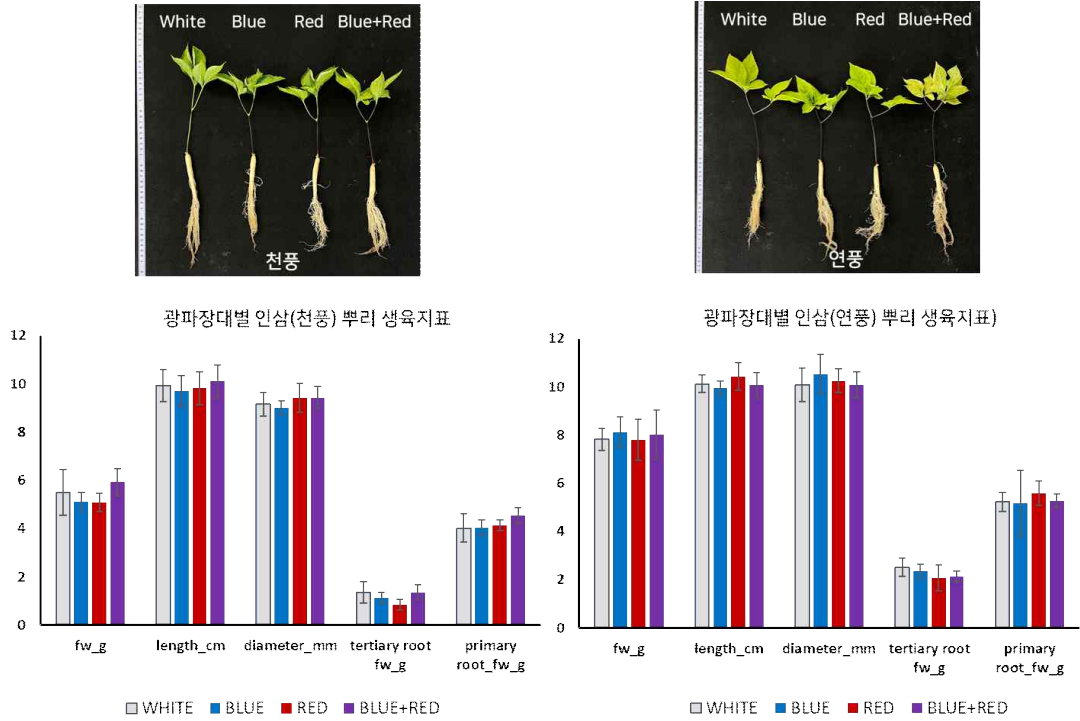


그림 30 광환경 광파장대별 인삼 (천풍 및 연풍) 뿌리 생육 비교 분석

- 인삼 재배시 선택적 광투과 태양전지의 적정 광투과도 설정을 위해 일적산광량 2, 4, 8 mol · m<sup>-2</sup> · day<sup>-1</sup> 조건에서 시험 재배 수행
- 일적산광량이 낮을수록 인삼 지상부 줄기가 상대적으로 길어지는 음지회피반응 보임.
- 인삼 재배시 일적산광량 2mol · m<sup>-2</sup> · day<sup>-1</sup> 조건 대비, 4mol · m<sup>-2</sup> · day<sup>-1</sup>와 8mol · m<sup>-2</sup> · day<sup>-1</sup> 조건에서 천풍과 연풍 모두 뿌리 상대생장과 생산성이 우수하였으며, 일적산광량 4mol · m<sup>-2</sup> · day<sup>-1</sup> 와 8mol · m<sup>-2</sup> · day<sup>-1</sup> 간에는 통계적으로 유의하게 다르지 않음.
- 다만, 4mol · m<sup>-2</sup> · day<sup>-1</sup> 조건 대비, 8mol · m<sup>-2</sup> · day<sup>-1</sup> 조건에서는 광합성 최대양자수율이 낮고, 해당 조건에서 인삼 재배시 고풍스트레스로 인한 광저해 현상이 발생할 가능성이 클 것으로 판단함.



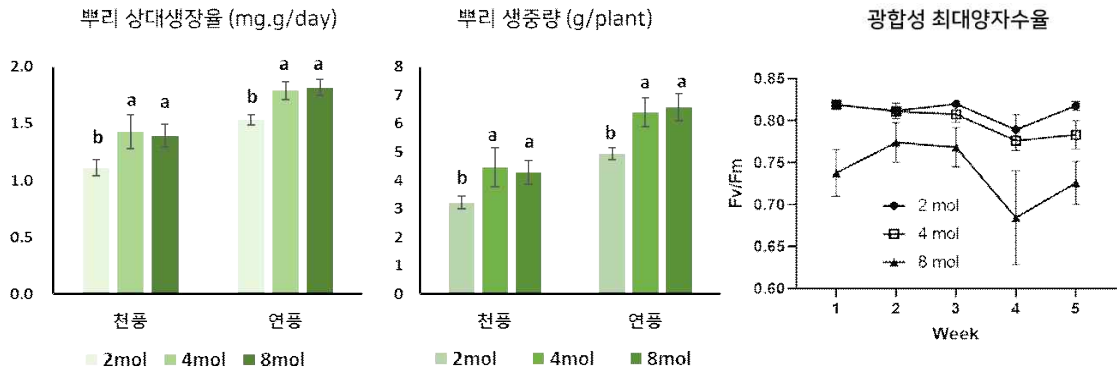


그림 31. 일적산광량 차이에 따른 인삼 (천풍 및 연풍) 뿌리 생육 및 광합성 특성 변화

- 위 결과를 종합하여, 선택적 광투과 태양전지에 의한 청색 파장대(400~500nm)와 적색 파장대 (600~700nm) 혼합광 조건과 일적산광량  $4\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  광환경 조건에서 인삼 시설 재배는 적합할 것으로 판단함.
- 광파장대 차이에 따른 인삼 성분 변화 분석 결과, 연풍 2년생 지상부의 진세노사이드 함량은 광파장대 처리군내에서 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않지만, 뿌리 진세노사이드 함량은 full-spectrum 광환경 조건(White) 대비, 청색, 적색, 청색+적색 혼합광 조건에서 감소하는 것을 확인하였음
- 인삼 품종 천풍의 경우, full-spectrum 광환경 조건(White) 대비 청색 및 적색 파장대 광환경 조건에서 지상부 진세노사이드 함량이 감소하는 경향을 보이지만, 청색+적색 혼합광 조건에서는 그 함량이 증가하며, 뿌리 진세노사이드 함량은 full-spectrum 광환경 조건(White) 대비, 청색+적색 혼합광 조건에서 그 함량이 감소하는 경향 보임
- 일적산광량 차이에 따른 진세노사이드 함량 변화 분석 결과,  $2\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  광환경 조건 대비  $4\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  광환경 조건,  $8\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  광환경 조건에서 지상부와 지하부 진세노사이드 함량이 증가하는 경향을 보임
- 따라서 인삼 생산성과 진세노사이드 함량 변화 양상 등을 종합하였을 때 인삼 시설재배시 일적산광량  $4\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  광환경 조건이 적합할 것으로 판단하며, 품종간 차이는 있지만 청색+적색 혼합광 조건에서 인삼 지상부 진세노사이드 함량을 증대시킬 수 있을 것으로 판단함

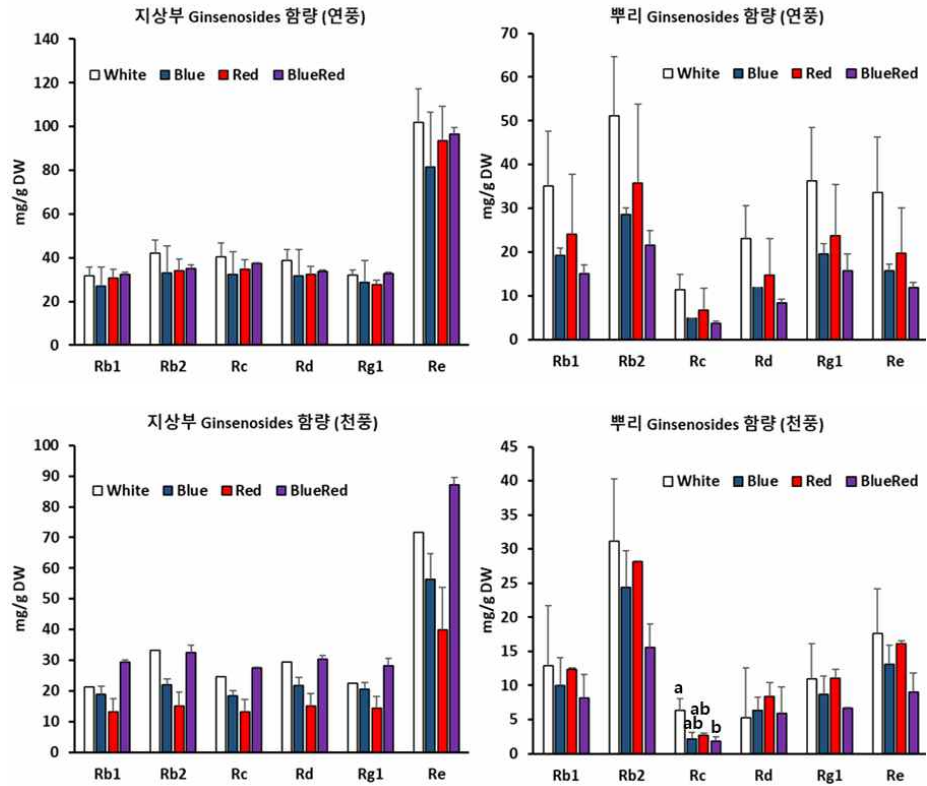


그림 32. 인삼 재배시 광과장대 변화에 따른 인삼 지상부 및 뿌리 진세노사이드 함량 변화

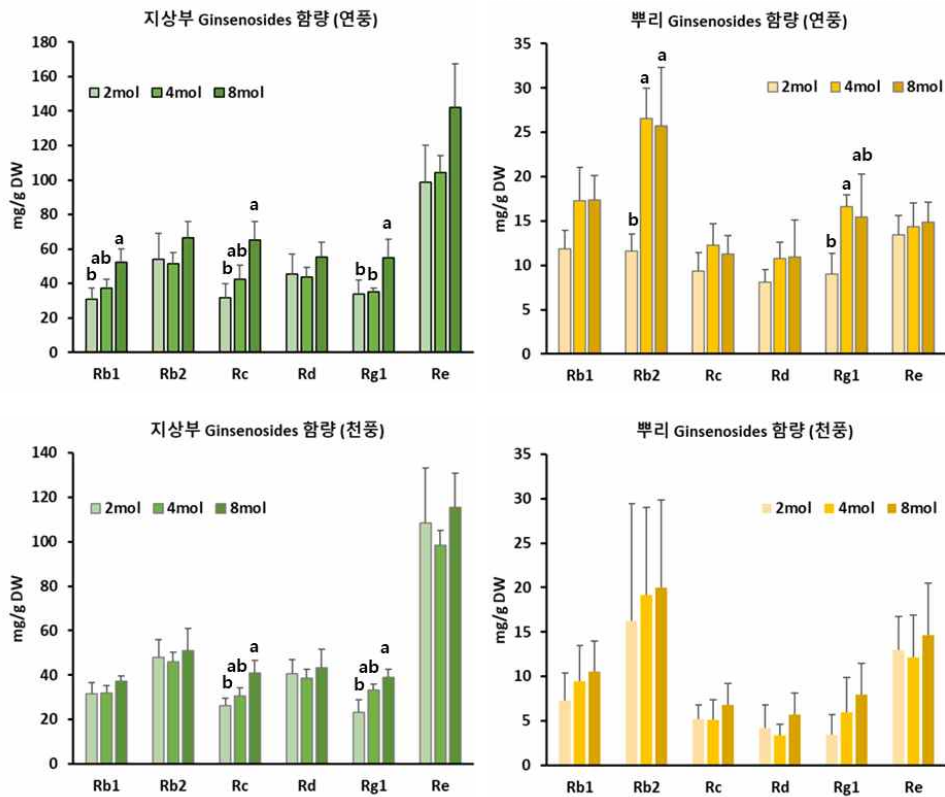


그림 33. 인삼 재배시 일적산광량 변화에 따른 인삼 지상부 및 뿌리 진세노사이드 함량 변화

■ 선택적 광투과 태양전지 적용 유리온실 제작, 일반 유리온실 대비 광투과율 및 광질 비교 분석

- 개발한 태양전지 모듈에 대한 설치 및 성능 시험, 작물 재배 특성 평가가 용이하도록 하기 위해 선택적 광투과 태양전지 적용 유리온실(바닥면적 6m<sup>2</sup>, 2,350×2,550mm) 별도 제작 (그림 30)
- 양지붕형 유리온실 각 지붕면의 1/2 면적에 선택적 광투과 태양전지 모듈 (가로×세로×높이, 350×350×105mm) 9개, 총 18개를 설치하였으며, 나머지 지붕면에는 대조구로서 유리 판넬(16mm) 설치
- 태양전지 설치 지붕면 면적은 2.2m<sup>2</sup>이며, 당초 성과 목표인 1m<sup>2</sup> 대비, 2.2배 규모로 설치

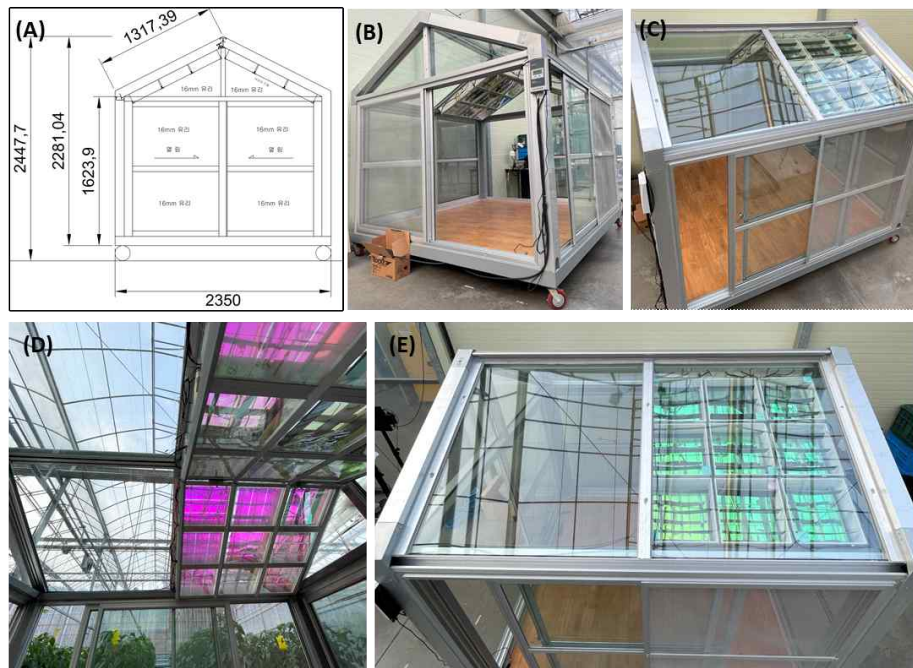


그림 34. 선택적 광투과 태양전지 성능 및 특성 평가용 유리온실 제작 (A) 도면, (B, C): 온실전경, (D) 온실 내부 좌측 일반유리 지붕면, 우측 선택적광투과태양전지 지붕면, (E) 온실 외부 지붕면

- 선택적 광투과 태양전지 모듈 하부와 유리 판넬(16mm) 하부에서 광투과도 및 광질 차이 비교 분석
- 유리온실 유리 판넬과 선택적 광투과 태양전지 모듈의 광투과율은 각 92.8%와 47.8% 임.
- 유리온실 유리 판넬 또는 선택적 광투과 태양전지 모듈 투과광의 광파장대별 광량과 상대적 비율은 그림 31과 같음.

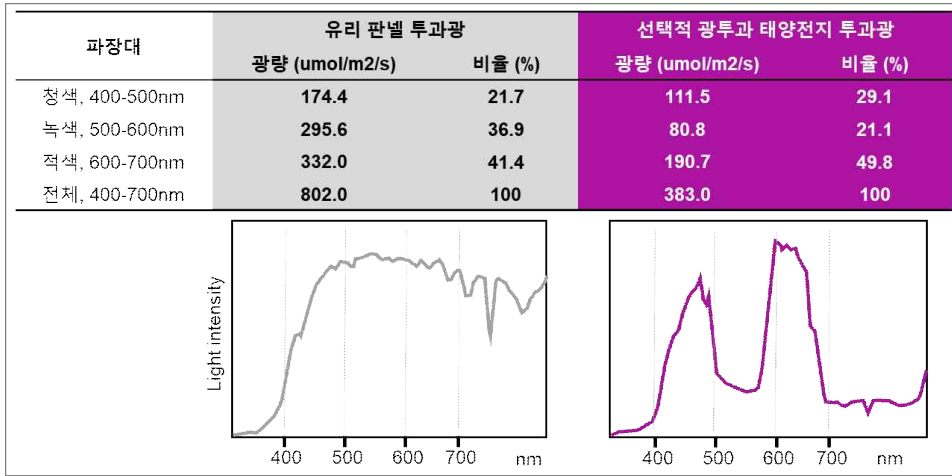


그림 35. 유리 판넬과 선택적 광투과 태양전지간 광투과율 및 파장대별 비율 비교

- 선택적 광투과 태양전지 모듈 투과광은 이색성 광필터에 의해 청색(400~500nm)과 적색(600~700nm) 파장대 대비 녹색(500~600nm) 파장대의 감소율이 크며, 감소율은 각각 36.1%, 42.6%, 72.7% 임.
- 선택적 광투과 태양전지에 의한 온실내 광파장대별 상대적 비율은 청색:녹색:적색 = 30:20:50으로써, 전체 투과광 중 80%가 청색과 적색 파장대이며, 이는 일반 유리 온실의 63% 대비 27% 높은 수준 임.
- 또한, 선택적 광투과 태양전지의 이색성 광필터에 의해 700 nm 이상 (근)적외선 비율이 크게 낮아짐.
- 위 결과를 종합하면, 일반 유리 판넬과 비교하여 선택적 광투과 태양전지 활용시, 광투과율은 50% 정도 떨어질 수 있으며, 청색과 적색 파장대 광이 상대적으로 많고, (근)적외선이 적은 환경을 조성할 수 있음.

■ 선택적 광투과 태양전지 설치 스마트팜 활용 시설원에 작물 2종 (토마토, 새싹삼) 실증 재배 및 일반유리 온실 대비 생산성 및 주요 성분 함량 비교 분석

○ 토마토 (품종 : 베타티니)

- 선택적 광투과 태양전지 설치 유리온실을 활용하여 국산 토마토 재배 품종인 ‘베타티니’ (대추방울토마토)에 대한 실증 재배 수행
- 3주간 관행 육묘한 후, 일반유리 온실과 선택적 광투과 태양전지 온실에 각각 정식 한 후, 6화방까지 재배한 후 각 조건간 생육 및 성분 특성 차이 분석

[표 1. 일반유리온실과 선택적광투과태양전지 온실간 토마토 생육 및 생산량 비교]

구분	초장 (cm)	착과수 (개/plant)	평균과중 (g/fruit)	생산량 (g/plant)
일반유리	155 ± 10	18.33 ± 6.84	13.22 ± 2.46	242.32
선택적 광투과 태양전지	182 ± 14	13.17 ± 4.86	13.06 ± 1.85	172.00
증감율	+ 17%	- 28%	- 1.2%	- 26.9%



일반유리온실

선택적 광투과 태양전지 온실



그림 36. 선택적 광투과 태양전지 적용 토마토 시험 재배

- 6화방 까지 생육 조사 결과, 선택적 광투과 태양전지 적용 토마토 재배시 일반 유리 온실 조건 대비 초장은 17% 증가
- 평균 과중은 두 조건간 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않지만, 일반 유리 온실 대비 선택적 광투과 태양전지 온실에서 개체당 착과수가 28% 감소하여 개체당 생산량은 26.9% 감소하였음
- 또한, 일반 유리 온실 대비 선택적 광투과 태양전지 온실 조건에서는 1 화방에서 6 화방 까지 개화와 개화 후 착과까지 약 18일이 더 소요됨
- 착과후 과실이 Red-ripe stage까지 성숙하는데 소요되는 일수는 선택적 광투과 태양전지에서 약 9일 정도 짧았으며, 이는 선택적 광투과로 인한 광환경 변화에 기인한 것이라 할 수 있음

[표 2. 일반유리온실과 선택적광투과태양전지 온실간 토마토 착과 특성 및 과실 성분 함량 비교]

구분	개화소요일수 (일)	착과소요일수 (일)	과실성숙 소요일수(일)	라이코펜 (mg/g)	베타카로틴 (mg/g)
일반유리	9.0±1.6	14.3±3.8	33.7±6.4	1.07±0.12	0.23±0.01
선택적 광투과 태양전지	14.6±3.7	32.3±5.3	24.3±4.3	1.35±0.13	0.36±0.04
차이 또는 증감율	5.6일	18.0일	-9.4일	+ 26%	+57%

- Red-ripe stage의 만숙한 토마토 과실의 라이코펜과 베타카로틴 함량을 분석한 결과, 일반 유리 온실 조건 대비, 선택적 광투과 태양전지 온실 조건에서 통계적으로 유의하게 라이코펜 함량이 26%, 베타카로틴 함량이 57% 증가하였음

○ 새싹삼 (재배중)

- 음지 식물인 인삼을 재배하기 위해서는 차광이 요구됨에 따라, 재배 기간 중 정오 기준으로 인삼 재배 포트 지상 30cm에서 최대 광량이 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ 이 되도록 일반유리온실과 선택적 광투과 태양전지 온실을 PE 필름으로 차광하고 인삼 재배 시험 수행

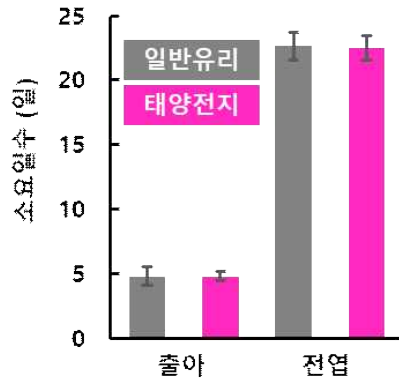
- 인삼 재래종 1년생 묘삼을 재배 포트에 정식하고, 일반유리온실과 선택적광투과 태양전지 온실에서 각각 16주간 재배하며 발달 단계 및 생육 조사 수행



그림 37 선택적 광투과 태양전지 적용 인삼(새싹삼) 시험 재배

- 일반유리온실 조건과 선택적광투과 태양전지 온실 조건간에 정식 후 출아와 전엽까지 인삼 식물체 발달에는 차이를 보이지 않으며, 두 조건에서 동일하게 정식 후 출아까지는 약 4.8일, 전엽 완료까지는 약 22.5일 소요됨
- 두 조건간 인삼 뿌리 생중량 변화율을 분석한 결과, 정식 후 6주차까지는 두 조건간에 변화율이 동일하지만, 12주 차에는 선택적광투과 태양전지 온실에서 재배한 인삼의 뿌리 생중량 변화율이 통계적으로 유의하게 97% 높고, 16주 차에는 일반유리온실 조건에서 변화율이 17% 높게 나타남
- 이는 인삼을 12주간 재배하는 경우 선택적광투과 태양전지 온실 조건에서 인삼의 뿌리 생육을 촉진할 수 있고, 일반유리온실 대비 생산량을 높일 수 있음을 의미함
- 일반유리온실 조건에서는 정식 후 12주에서 16주 사이에 상대적으로 인삼 뿌리 생육이 활발하며, 인삼을 16주 간 재배하는 경우 선택적광투과 태양전지 온실 조건 대비 생산량을 높일 수 있음

새싹삼 출아 및 전엽 소요일수



새싹삼 근생체중 변화율

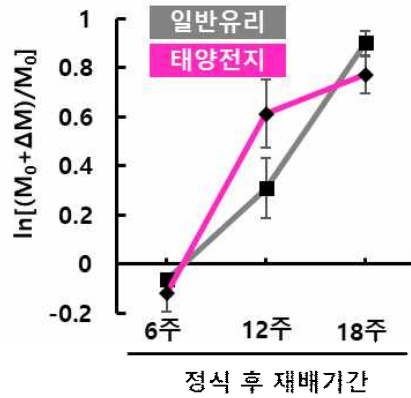
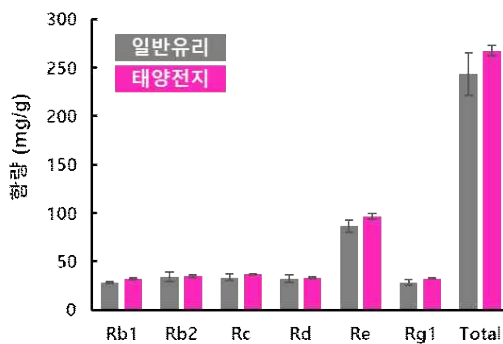


그림 38. 일반유리온실과 선택적광투과태양전지 온실간 인삼 생육 비교

- 일반유리온실 조건과 선택적 광투과 태양전지 온실 조건에서 재배한 인삼 지상부와 지하부(뿌리)의 진세노사이드 함량을 분석한 결과 지상부 진세노사이드 함량은 두 조건간에 통계적으로 유의한 차이가 없었지만, 뿌리의 진세노사이드 함량은 선택적 광투과 태양전지 온실 조건에서 감소하였음
- 일반유리온실 조건과 비교하여 선택적 광투과 태양전지 온실 조건에서는 뿌리의 총 진세노사이드 함량이 52% 감소하였고, 진세노사이드 종류별로 Rb1, Rb2, Rc, Rd, Re, Rg1 함량이 47%~60% 감소하였음

진세노사이드 함량 (지상부)



진세노사이드 함량 (뿌리)

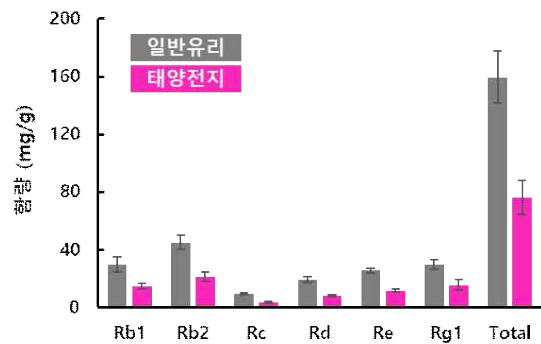


그림 39. 일반유리온실과 선택적광투과태양전지 온실간 인삼 진세노사이드 함량 비교 분석

### ○ 토마토와 새싹삼 결과 고찰

- 선택적 광투과 태양전지 설치로 인해 온실내 일조량이 감소하게 되므로 선택적 광투과 태양전지 온실은 양지 식물보다는 음지 식물 재배에 적합함
- 음지 식물 중 인삼, 특히 새싹삼은 고부가 고기능성 특용 작물로서 최근 소비 수요 증대와 노지 재배 부적합지 증가로 인해 시설재배 면적이 증가 추세임, 선택적 광투과 태양전지 온실을 새싹삼 시설재배에 활용하는 경우 전력 생산과 함께 별도 차광 자재 없이 새싹삼 재배에 적합한 광환경 조건을 조성해 줄 수 있고, 선택적 광투과로 인해 초기 생육을 촉진해 줄 수 있으므로 온실 운용 및 새싹삼 시설 재배 경제성을 제고할 수 있음



## ■ 실증 온실 활용 선택적 광투과 태양전지 시험 설치 및 검증

- KIST 강릉분원 U-FARM 내에 천장부에 1m x 1m 크기의 태양전지 패널을 설치하여 활용 가능성을 검증하였음



선택적광투과태양전지 설치전



선택적광투과태양전지 설치후

그림 40. 실증 온실 활용 선택적 광투과 태양전지 설치 모습

## ■ 용액공정 기반 저밴드갭 고효율 CIS 박막 태양전지 개발

### (1) 후면 밴드갭 그레이딩 구조 형성을 통한 CIS 박막 태양전지 성능 개선

#### 가. 후면 밴드갭 그레이딩 구조

- CIS 박막 태양전지 최소 밴드갭 구간의 위치와 너비, 밴드갭 그레이딩의 정도 등에 따라 광흡수량, 전자수명, 전자확산거리, 전자수집 등 광전기적 특성이 매우 크게 바뀌는 것으로 알려져 있음. CIS 박막의 깊은 영역에서 발생하는 광 생성 캐리어(전자)의 경우 전자 수집 확률이 현저하게 떨어지고, 재결합의 확률이 매우 높음.
- CIS와 물리브데늄 접합면 쪽인 후면에서 발생하는 전자를 SCR 영역으로 돌아가게 전도대 밴드구조를 디자인 하면 후면에서 재결합 손실을 크게 낮출수 있으며, 높은 개방전압을 얻을 수 있음. 때문에 CIS 박막 내에서 발생한 광 생성 캐리어들을 재결합 손실 없이 최대로 수집하기 위해서는 후면 밴드갭 그레이딩은 필수적임.
- 일반적으로 CIS 박막 내의 Ga/(Ga+In)의 비율과 S/(S+Se)이 밴드갭 그레이딩을 제어한다고 알려져있으며 특히 박막 제작 과정 중 Cu는 6족 원소인 황 및 셀레늄을 공급하는 것과 상관이 있다고 알려지며, Cu의 함량이 증가할수록 Se의 함량이 증가된다고 보고되어짐. 따라서 박막 CIS 박막 깊은 영역에서 발생하는 광 생성 캐리어를 재결합 손실 없이 수집할 수 있도록 Cu의 함량 제어를 통해 후면 밴드갭 그레이딩을 형성하였음.



나. Chalcogenization 공정을 이용한 밴드갭 그레이딩 구조 형성

- 2-stage tube furnace를 이용한 Chalcogenization 공정으로, CIG oxide 박막을 Se과 H<sub>2</sub>S 가스 분위기로 500°C 에서 15분간 열처리를 진행시켜 결정립 성장 및 defect 감소시킨 band-gap graded CIGS 박막 흡수층을 구현시킴.

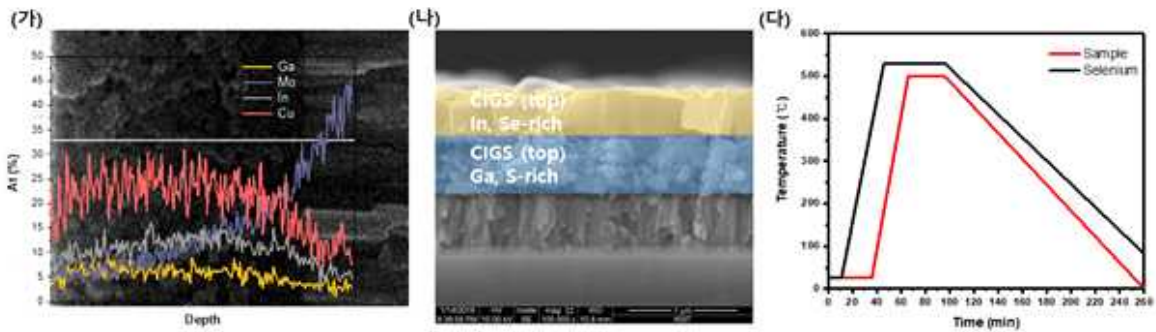


그림 41. (가) CIG oxide 박막 EDX depth 원소분석 (나) Band gap graded CIS박막 (다) Chalcogenization 공정 온도 profile

- CIS 흡수층은 위의 ‘용액공정기반 고전류 (35 mA/cm<sup>2</sup>) 발전 CIS 태양전지 기술 개발 ‘ 내용과 같이 상부에는 In, Se-rich층이, 하부에는 Ga, Se-rich층으로 나뉘어, 생성된 캐리어 수집에 유리한 band-gap grading 구조를 가지게 되었음.
- CIG oxide 박막은 동일한 precursor 용액으로 적층하였으며, CIG oxide 박막 또한 precursor 비율이 EDX오차 이내로 유지됨을 확인했음. 추가적으로 더 정확한 분석을 이용하여 확인할 계획임.

다. 후면 밴드갭 그레이딩 형성에 따른 CIS 박막 특성 변화

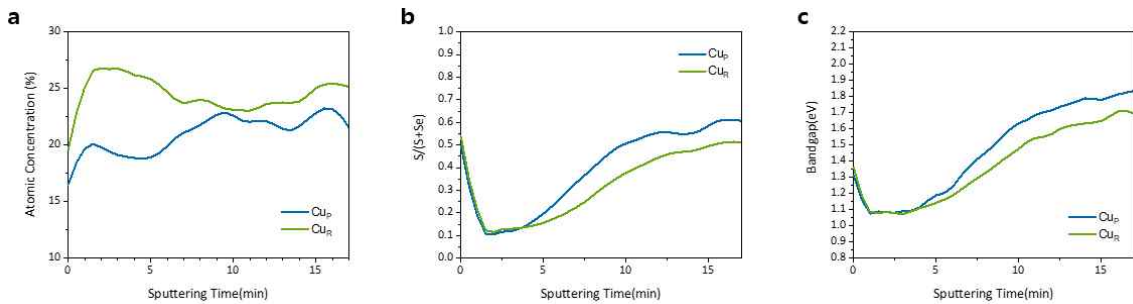


그림 42. CIS 박막 내 Cu 함량에 따른 깊이별 조성 및 밴드갭 변화. (a) Cu 함량 변화, (b) S/(S+Se) 비율 변화 및 (c) 밴드갭 변화

- 후면 밴드갭 그레이딩을 형성하기 위해 전구체 용액에 Cu 용해 양을 조절을 통해 Cu 농도가 적은 Cu poor (CuP) 와 Cu 농도가 높은 Cu rich (CuR) CIS 박막을 제작하였음. Cu 의 함량에 따라 S와 Se의 도입 함량이 크게 달라지는 것을 알 수 있으며, Cu 농도의 증가에 따라 Se의 도입 함량 증가는 일반적으로 알려진 경향과 유사하게 나타남.
- CuP CIS 박막에서 S/(S+Se)의 조성 변화가 더 크게 나타났으며, 특히 CIS 박막의 후면에서 기울기의 변화가 더 큰 것으로 나타남. 박막 후면에서의 표면쪽으로 감소하는 더 큰 밴드갭 기울기 변화는 박막 깊은 곳에서 발생한 광 생성 캐리어들이 원활하게 SCR영역으로 도달할 수 있도록 만들어주며, 재결합의 손실을 크게 줄여주는 효과를 기대할 수 있음.

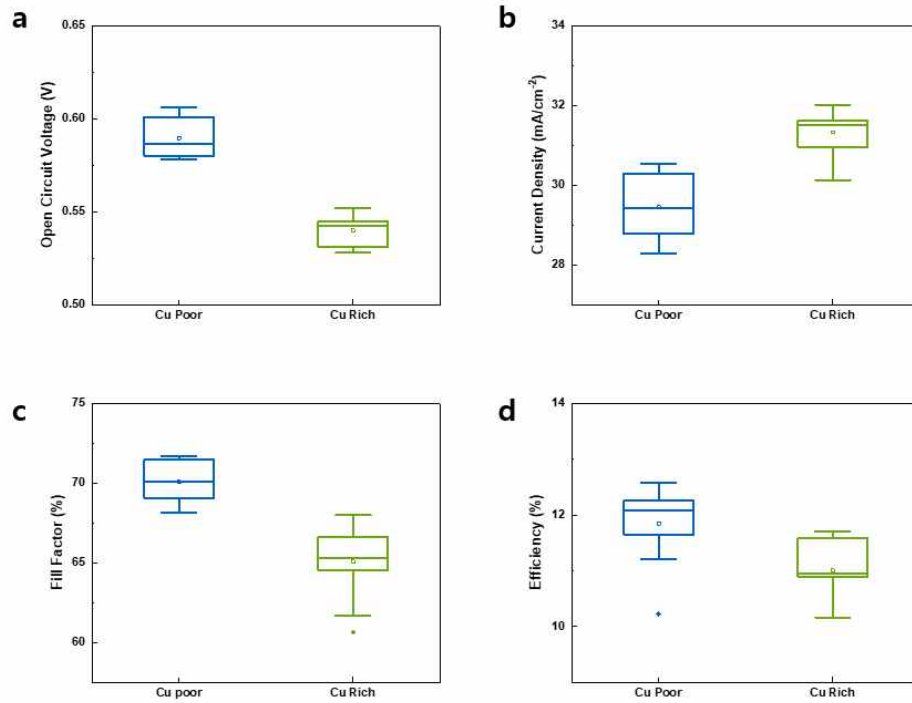


그림 43. CIS 박막 내 Cu 함량에 따른 CIS 태양전지 성능 평가  
(a) 개방회로전압, (b) 단락전류, (c) 충전효율 및 (d) 동력변환효율

표 3. CIS 박막 내 Cu 함량에 따른 CIS 다이오드 성능 평가

	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )	n	$J_0$ (mA/cm <sup>2</sup> )
Cu <sub>P</sub>	$6.13 \times 10^3$	1.07	2.67	$2.11 \times 10^{-3}$
Cu <sub>R</sub>	$2.94 \times 10^2$	0.23	2.94	$8.57 \times 10^{-2}$

- Cu 함량에 따른 CIS 박막 태양전지의 성능 평가 결과 Cu의 함량이 낮은 CuP CIS 태양전지에서 개방회로전압(VOC) 및 충전효율(FF)에서 성능 개선 효과를 확인하였음. 개방회로전압의 개선은 후면쪽의 밴드갭 그레이딩의 도입으로 인해 박막 깊은 곳에서 발생한 광 생성 캐리어들이 원활하게 SCR영역으로 이동에 의해 캐리어 수집의 증가에 따른 결과이며, 재결합 손실의 저하는 포화 전류 값( $J_0$ )의 감소를 통해 보다 이상적인 구조로 형성되었음을 확인할 수 있음.
- CuP CIS 태양전지에서의 단락 전류의 감소는 밴드갭 그레이딩 조절을 위한 후면에서의 S 함량 증가에 따라 후면에서 밴드갭이 약간 증가하여 장파장에서의 약간의 광 흡수 손실을 겪었기 때문. 하지만 후면에서의 광 흡수 손실 보다 후면에서 생성되는 캐리어의 수집 영역이 훨씬 우세하기 때문에 Cu의 함량을 낮게 조절함으로써 인한 밴드갭 그레이딩은 태양전지의 전기적 특성 및 효율 상승에 높은 기여를 함. 결과적으로 CIS 박막 내의 Cu의 함량을 낮게 조절하여 박막 후면에 성공적으로 밴드갭 그레이딩을 형성시켰으며, 개방회로전압이 최대 50mV 상승하였음.

## (2) 탄소 불순물 제거에 용이한 다단계 용액 코팅법을 통해 고품질 CIS 박막 합성 (<4%)

가. CIS 산화막 열처리 온도에 따른 탄소 불순물 함량 조절

- 용액 공정은 진공 공정에 대비 높은 재료 사용 효율과 쉬운 대면적화, 낮은 제조 비용 및 설비 투자

비용 등 다양한 장점을 기반으로 여러 공정에서 활용되어왔음. 전착, 슬롯 다이 코팅, 잉크젯 코팅, 블레이드 코팅, 스핀 코팅 등 다양한 용액 공정을 활용한 CIS 태양전지가 제작되었으나 진공 공정 대비 낮은 효율을 보여줌. 박막의 잔류 불순물(예: 탄소, 산소 및 기타 전구체의 원소)이 원인으로 간주되며, 특히 탄소의 경우 유기 용매나 고분자 바인더, 유기 리간드의 형태로 페이스트나 잉크 용액에 활발히 활용되기 때문에 잔류 가능성이 매우 높음. 잔류 탄소는 칼코겐화 공정이 진행되는 동안 원소 재분배를 방해하여 CIS 결정 성장을 억제하고, 칼코겐화 공정 동안 폴리브데늄 후면 전극쪽으로 이동하여 탄소층을 형성함. 전극 후면부에 형성된 탄소층은 전도성을 가지지만 폴리브데늄 후면 대비 몇 배 더 높은 저항을 가짐. 또한 후면 전극과의 낮은 접착력으로 인해 CIS 광 흡수층의 박리를 유발시킴. 즉, 광흡수층에 잔류 하는 탄소 층은 직렬 저항 및 재결합을 증가시켜 실질적인 저항체로 거동하며, 낮은 충전율(FF)과 동력변환효율을 야기함. 따라서 용액 공정 기반의 CIS 태양전지의 성능을 향상시키기 위해서는 CIS 박막 내의 탄소 불순물을 제거하는 것이 필수적임.

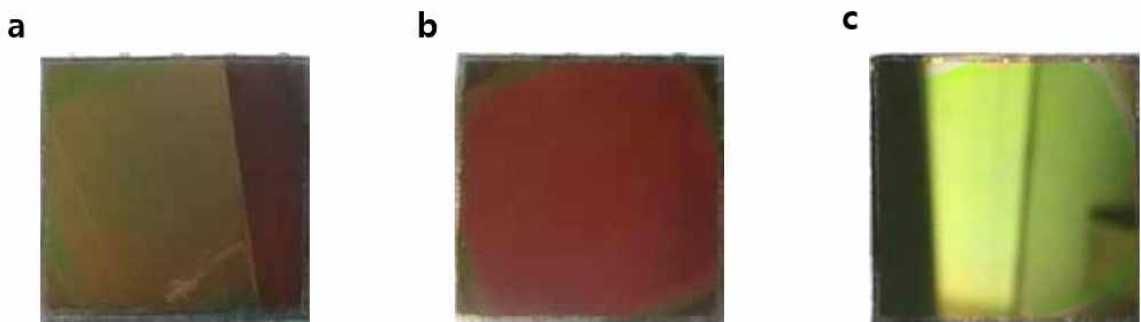


그림 44. CIS 산화막 열처리 온도에 따른 이미지. (a) 270°C, (b) 290°C 및 (c) 310°C

- 산화막의 잔류 탄소는 칼코겐화 공정이 진행되는 동안 박막의 품질에 영향을 미치기 때문에 산화막 형성 단계에서 제어되어야함. CIS 산화막을 제작하기 위한 전구체 용액에 박막의 균일도와 두께를 향상시키기 위해 고분자 바인더를 사용하며, 이후 열처리 공정을 통해 고분자 바인더는 제거됨. 충분하지 못한 열처리 온도는 고분자 바인더의 탄소 체인을 완전히 끊어내지 못하여 박막 내의 탄소를 잔류하게 함. 이에 따라 잔류 탄소의 함량을 억제하기 위해서 산화막 공정의 열처리 온도 조절하는 것이 매우 중요함.
- 열처리 온도 차이에 따른 산화막을 제작하였으며, 산화막을 육안상으로 확인하였을 때 색상과 반사도의 차이를 보였음. 내부에 균일한 박막이 형성되었을 경우 높은 반사도를 특징으로 하지만 내부에 탄소 불순물이 잔류 할 경우 낮은 반사도를 가진 박막으로 제작됨. 또한 온도에 따른 색상의 차이는 내부 조성의 변화를 의미함. 색상과 반사도 차이를 통해 형성된 CIS 산화막의 품질 및 조성이 다를 것으로 예상할 수 있음.

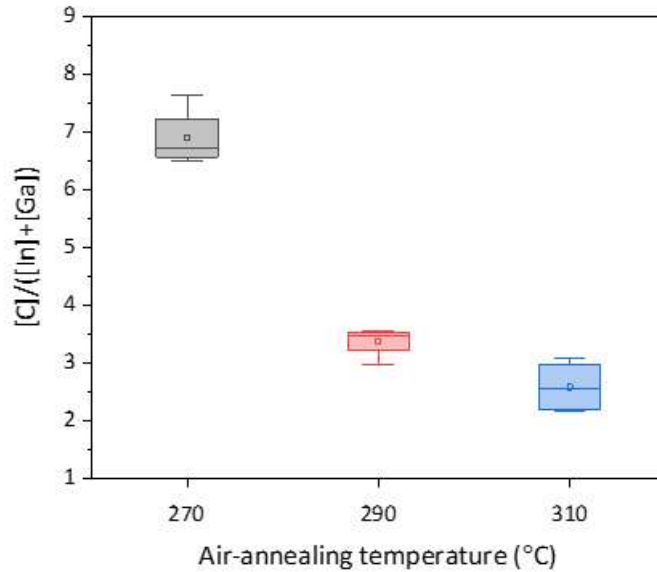


그림 45. CIS 산화막 열처리 온도에 따른 탄소 함량

- 열처리 온도 차이에 따라 제작된 산화막의 조성 분석 결과 열처리 온도가 증가할수록 박막 내부 잔류 탄소 함량이 감소하는 것을 확인함. 열처리 온도가 증가함에 따라 고분자 바인더의 체인이 완전히 분해되어 제거되기 때문임. 본 결과를 바탕으로 더 낮은 탄소 함량을 가진 박막을 제작하기 위해 310°C 이상의 조건에서 추가 실험을 진행하였으나, 310°C 이상의 고온에서는 잦은 박리의 발생으로 인해 박막의 제작이 어려움. 결과적으로 산화막 단계에서 달성할 수 있는 가장 고품질의 박막을 제작하였으며, 칼코젠화 공정을 통해 고품질의 CIS 박막을 제작이 가능할 것으로 보여짐.

나. 최적 산화막 칼코젠화를 다단계 용액 공정 기반 고품질 CIS 박막 제작

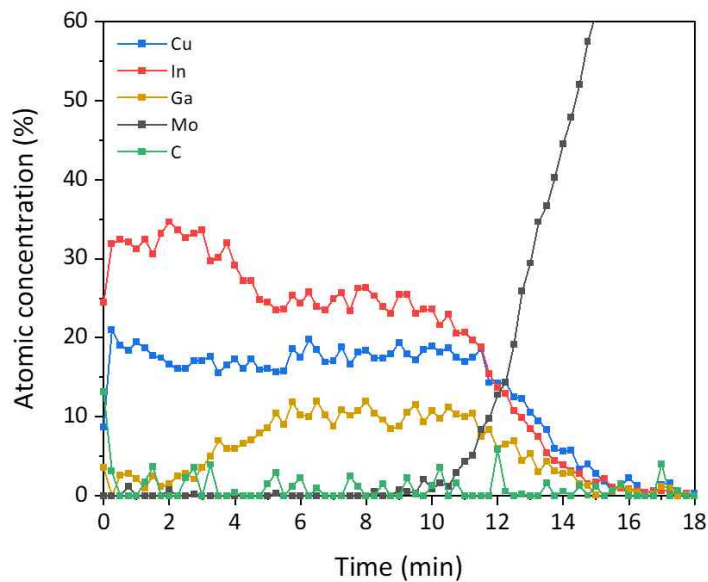


그림 46. 산화막 공정 열처리 최적화를 통해 제작된 CIS 박막의 깊이 조성 분석

- 310°C 에서 제작된 산화막을 사용하여 CIS 광 흡수층 박막을 제작하였으며, AES를 통한 깊이별 조성 분석 결과 박막 내부의 잔류 탄소는 0.59 at%로 확인 되었음. 기존에 기재한 EDX를 통한 박막의 조성 분석은 박막의 내부 전체에 대한 조성이 한번에 나타나기 때문에 잔존 탄소층의 위치에 대한 정보를 얻는 것이 어려움. 이에 EDX 보다 분해능이 뛰어나며 깊이 별 조성 분석이 가능한 AES 분석을 통해

잔류 탄소의 함량을 분석하였음. 본 과제의 정량목표 평가 기준으로 제시된 ‘용액공정 태양전지의 EDX 원소 분석 결과 5 at% carbon 검출’ 목표를 달성하였으며, 이에 따라 용액 공정기반의 고품질 CIS 태양전지 제작이 가능해졌음. 이후 고품질의 CIS 박막과 증가된 전기적 특성을 통해 높은 동력변환효율을 기대해 볼 수 있음.

### (3) 알칼리 원소 Na 도핑을 통한 용액공정기반 고전압( $> 0.55\text{ V}$ ) 발전 및 더블 밴드갭 그레이딩 구조의 CIS 박막 태양전지 기술 개발

#### 가. 알칼리 원소 Na 도입으로 인한 CIS 박막 태양전지의 알칼리 농도 제어

- CIS 박막 태양전지의 경우, 소다라임 글래스(Soda-lime Glass, SLG) 위에 폴리브데늄이 증착된 유리를 기판으로 사용하여 CIS 결정을 성장시켜 박막을 제작하는데, SLG 기판에 함유된 알칼리 원소 Na가 CIS 제작 공정 과정 중 CIS로 확산되어짐.
- 일반적으로 알칼리원소 Na는 CIS 성장 및 전기적인 특성에 영향을 미친다고 알려져있으며, CIS 박막내의 불균일한 Na의 도핑 농도는 박막내의 균일도 저하 및 전기적 특성의 재현성을 낮추는 요인이 됨. 즉 균일도 향상 및 전기적인 특성 제어를 위해 알칼리 Na 의 도핑 농도의 제어 기술 개발은 필수적임.
- 이에 알칼리 원소를 도입하여 용액 공정 CIS의 전기적 특성 및 균일도 개선 실험을 진행하였음. 알칼리 원소 Na의 경우, 홀 농도의 증가와 쇼트키 접합(schottky barrier)를 완화시키는 것으로 알려져 있어 특히 전기적인 특성의 개선을 통해 고전압을 기대할 수 있음. 따라서, SLG 기판으로부터 확산되는 알칼리 Na를 SiO<sub>2</sub> 층으로 확산을 방지시키고 CIS 전구체 용액에 Na를 첨가하는 방식을 통해 CIS 박막 내에 알칼 농도를 제어를 통해 전기적 특성 및 균일도를 제어하였음.

#### 나. 알칼리 원소 Na 도입으로 인한 CIS 박막 태양전지의 성능 개선

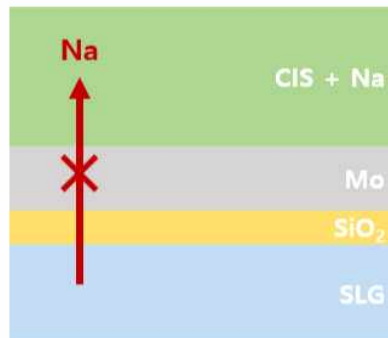


그림 47. 알칼리 원소 Na 도입 CIS 박막 모식도

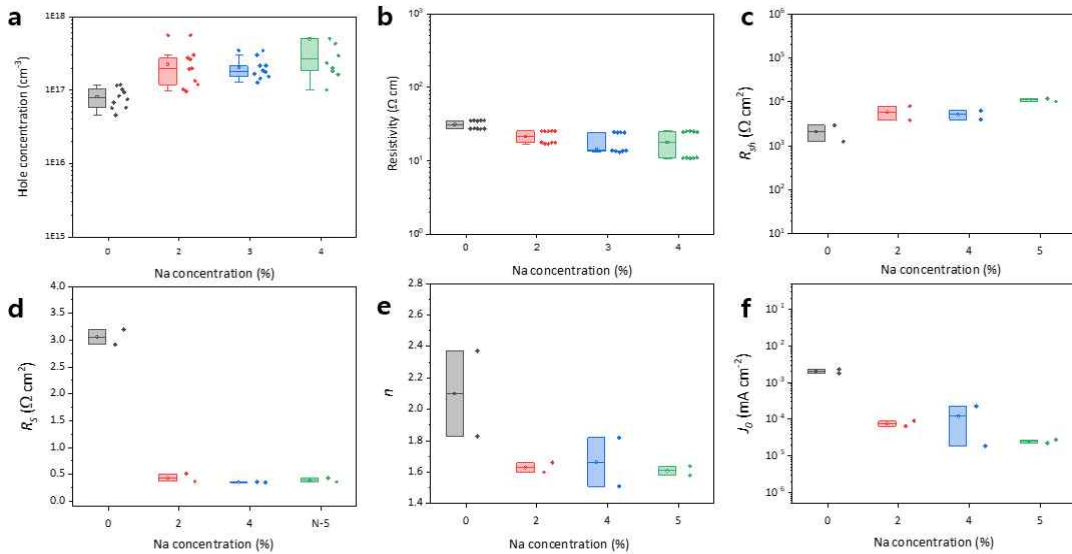


그림 48. 알칼리 원소 Na 도입에 따른 CIS 박막 전기적 특성.  
 (a) CIS 박막 홀 농도, (b) 저항, (c) 병렬저항, (d) 직렬저항, (e) 이상계수 및 (f) 포화전류

- Na 도입 농도별 CIS 박막의 저항 Hall measurement 측정을 통해 Na의 도핑 함량이 증가할수록 CIS 내부의 홀 농도가 증가함을 알 수 있었음. 이와 같은 홀 농도의 증가 및 다이오드 포화 전류의 감소는 도핑된 Na가 CIS 내부의 도너 결함을 치환함에 따라 홀 농도의 증가로 이어진 것을 의미함. 결과적으로 CIS 박막 내부 벌크 영역의 결함이 패시베이션 되어 감소되었으며, CIS의 P 타입 전기적 특성이 강화되었음. 또한 CIS의 저항 또한 감소한 결과는 특히 직렬 저항 감소에 기인한 결과로 보이며, 직렬 저항 감소는 CIS 박막 후면에서 Na가 MoSe의 형성을 촉진시켜 쇼트키 접합 (schottky barrier)을 완화시켰기 때문임. 이러한 전기적 특성의 강화로 다이오드 이상계수가 Na 도핑 농도가 증가함에 따라 감소한 것을 확인할 수 있으며, 결과적으로 Na의 도핑 농도의 증가에 따라 CIS 태양전지의 성능 개선을 기대해 볼 수 있음.

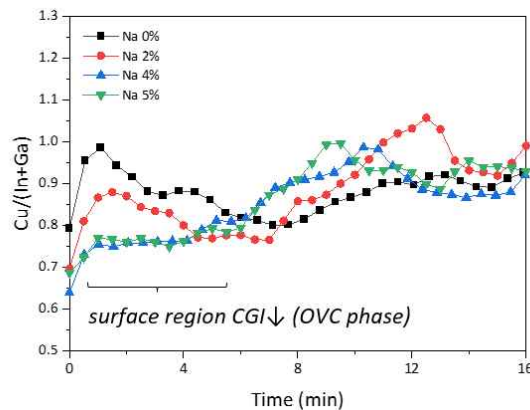


그림 49. 알칼리 원소 Na 도입에 따른 CIS 박막 깊이별 조성

- Na 도입 농도별 CIS 박막의 깊이 조성 분석을 통해 Na의 도입 농도가 증가할수록 CIS 박막 표면의  $[Cu]/([Ga]+[In])$ 의 함량이 감소하는 것을 확인할 수 있었음. 감소된  $[Cu]/([Ga]+[In])$ 는 CIS 박막 표면에 ordered vacancy compound (OVC) 상이 형성시키며, 형성된 OVC 상은 p-n 접합에서 발생하는 계면재결합을 억제시키는데 효과적임. 따라서 Na의 도입을 통해 높은 개방회로전압 ( $V_{oc}$ )을 기대할 수 있음.



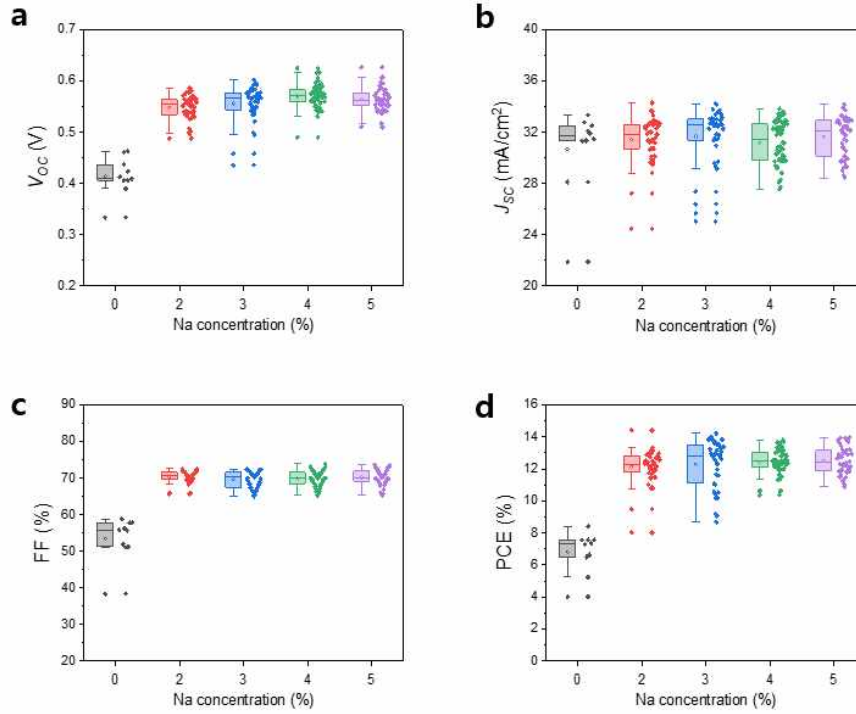


그림 50. 알칼리 원소 Na 도입 농도에 따른 CIS 박막 태양전지 성능 평가  
(a) 개방회로전압, (b) 단락전류, (c) 충전효율 및 (d) 동력변환효율

- Na 도입 농도별 CIS 박막 태양전지의 성능 평가 결과 개방회로전압( $V_{oc}$ ) 및 충전율(FF)에서 성능 개선 효과를 확인하였음. 개방회로전압의 개선은 Na 도입으로 인해 CIS 박막의 p-형 특성이 강화됨에 따라 CIS 박막 내부에서의 재결합 손실 억제 및 표면에 형성된 OVC 층에 따른 계면 재결합의 억제 때문임. 또한 증가된 충전효율은 앞서 언급한 후면에서 Na가 MoSe의 형성을 촉진시켜 쇼트키 접합(schottky barrier)을 완화의 결과임.
- Na 도입 농도 증가에 따라 CIS 박막 태양전지의 동력변환효율이 증가함을 확인할 수 있으며, 균일도 또한 농도의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타남. 이는 SLG 기판에서 무작위로 확산되는 Na를 차단한 후 인위적으로 특정량을 균일하게 공급함으로써 균일한 CIS 박막을 제작하였기 때문임. 하지만 5% 이상의 과량의 Na 도입시 박막의 박리가 발생하며, 현재까지는 동력변환효율은 도핑 농도 3%에서 가장 높았으며 균일도는 4%에서 가장 최적임을 확인하였음. 이러한 특성을 기반으로 알칼리 원소 Na 도입을 통해 높은 균일도와 0.55 V 이상의 고전압 발전을 하는 용액공정 기반 CIS 박막 태양전지를 성공적으로 제작하였음.



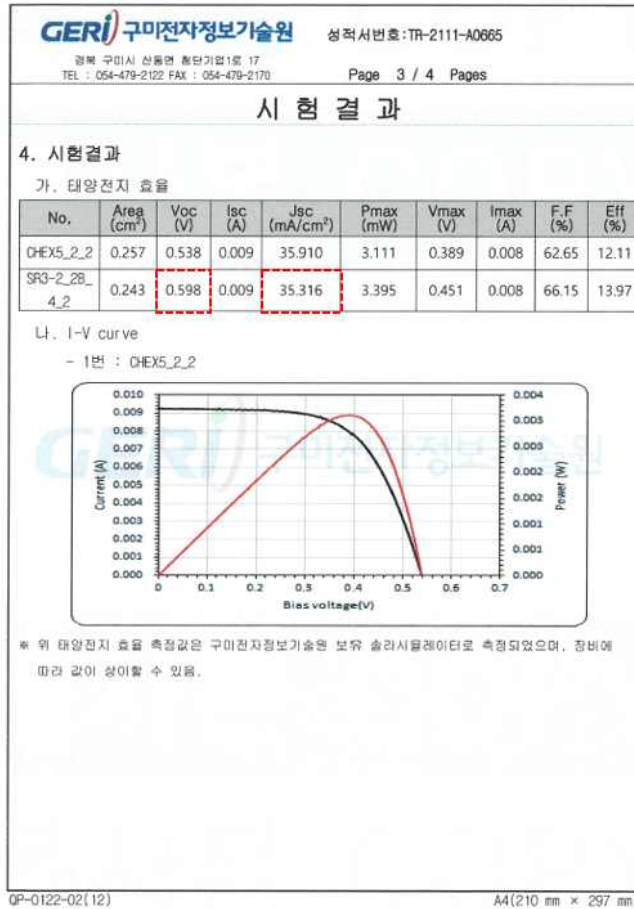


그림 51. 알칼리 원소 Na 도핑을 통한 용액공정기반 고전압( $> 0.55$  V) 발전 CIS 박막 태양전지 타기판 성능 분석 시험지

#### (4) 용액공정기반 고전류 ( $35 \text{ mA/cm}^2$ ) 발전을 위한 저밴드갭 구조 CIS 태양전지 기술 개발

가. 전구체 용액의 In 비율 증가를 통한 고전류 발전 CIS 태양전지 기술 개발

- CIS는 3족(In 및 Ga)과 6족(S 및 Se)의 원소 조성에 따라 1~2.48 eV 까지 밴드갭을 다양하게 조절할 수 있음. 박막 내의 In과 Se의 함량이 증가할수록 밴드갭이 감소하며, 반대로 Ga과 S의 함량이 증가할수록 밴드갭은 증가함. 낮은 밴드갭을 가진 CIS 박막은 장파장 영역의 빛을 흡수할 수 있으며, 흡수한 빛의 총량이 증가하기 때문에 많은 양의 캐리어를 생성할 수 있음. 때문에 고전류 발전용 CIS 태양전지를 제작하기 위해서는 광흡수층의 밴드갭을 빛의 흡수와 캐리어 생성에 유리한 저밴드갭 구조로 변경해야함.
- 용액 공정의 경우 전구체 용액을 사용하기 때문에 정확한 정량이 가능하며, 전구체의 조성을 변화시키기 쉬움. 전구체 용액 내의 In 농도를 직접 조절하는 방법을 통해 In의 함량이 증가된 전구체를 제작하여 산화막을 구현하였음. 증가된 인듐은  $[Ga]/([Ga]+[In])(GGI)$ 의 비율로 표기하였으며, 일반적으로 많이 제작되는 GGI 비율 0.3을 기준으로 In의 함량이 증가하는 방향인 GGI 0.2, GGI 0.1, GGI 0 CIS 박막 제작을 시도함.

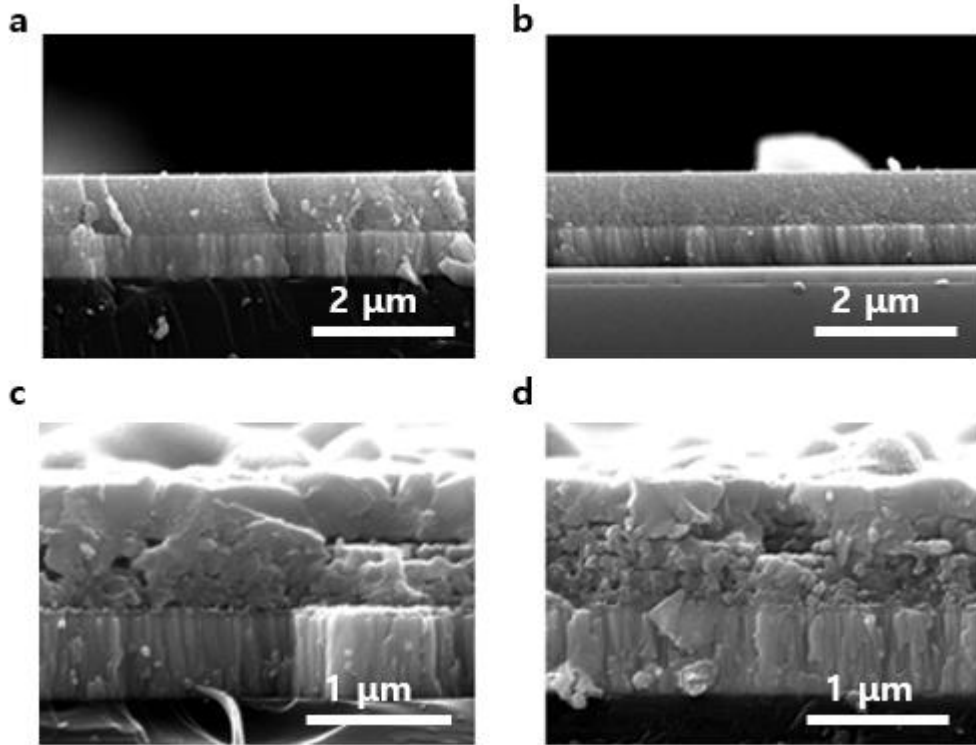


그림 52. GGI 함량에 따른 전구체 산화막 및 CIS 광흡수층 SEM 단면 형상 이미지. (a) 산화막 (GGI 0.2), (b) 산화막 (GGI 0.3), (c) CIS (GGI 0.2) 및 (d) CIS (GGI 0.3)

- CIS 광흡수층 단면의 SEM 분석결과 In의 함량이 증가한 GGI 0.2 CIS 박막에서 상대적으로 표면쪽의 큰 결정립을 형성하는 것을 확인하였음. 이는 In양 증가로 인해 결정립의 크기가 증가한다는 보고들과 결과가 일치함. GGI 0.1과 0은 제작 과정 중 산화막의 박리가 발생하여 결과를 확인할 수 없었음. Ga의 함량이 감소함에 따라 접착력이 감소되었기 때문임. 따라서 안정적인 산화막이 형성되는 한계는 GGI 0.1~0.2 사이임. 저밴드갭 구조를 만들기에는 여전히 Ga의 함량이 높기 때문에 전구체 용액의 In비율을 더 증가시킬 수 있는 추가적인 공정 및 새로운 박막 제작 기술의 도입이 필요함.

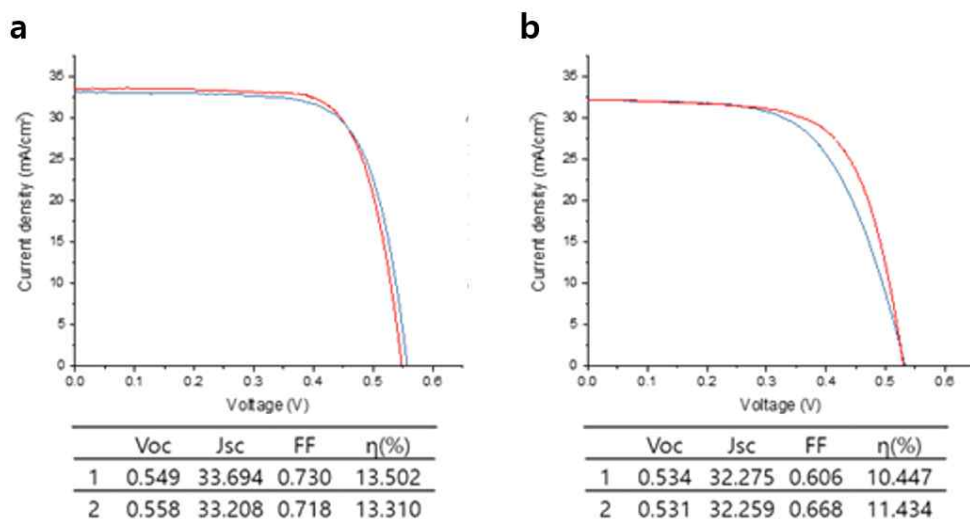


그림 53. CIS 광흡수층 박막의 [Ga]/([Ga]+[In]) (GGI) 비율에 따른 태양전지 소자의 Light I-V 곡선. (a) GGI 0.2, (b) GGI 0.3

- Light  $J$ - $I$ 곡선에서 GGI 0.2가 0.3에 비해 전체적인 파라미터들이 증가한 것으로 확인하였음. 증가된 단락 전류밀도( $J_{sc}$ )는 SEM에서 확인한 바와 같이 In양이 증가에 기인하여 낮은 밴드갭의 형성되었기 때문으로 추정함. 또한, 충진률(FF)의 증가는 결정립 증가로 인한 캐리어의 재결합의 감소에 의한 것으로 보여짐.

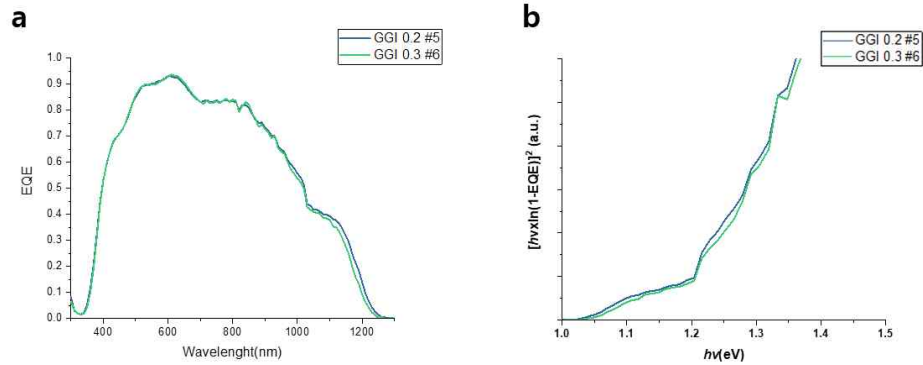


그림 54.  $[Ga]/[Ga]+[In]$  (GGI)비율에 따른 CIS 태양전지의 IPCE 측정. (a)외부양자효율(EQE), (b)밴드갭

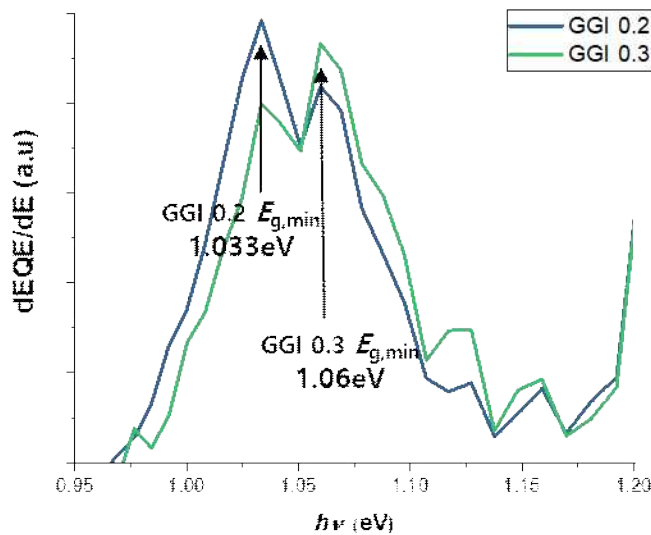


그림 55. EQE를 통해 계산한 최소 밴드갭

- EQE를 통해 미분값으로 얻어진 광학적 최소 밴드갭을 대략적으로 계산하여 나타내었고, 확인한 최소 밴드갭은 각각 GGI 0.2에서는 1.033eV, GGI 0.3는 1.06eV로 알 수 있었음. 이를 통하여, 목표했던 최소 밴드갭 1.05eV 이내의 박막의 제작이 가능함을 확인하였음.
- CIS 박막 내에 높은 In의 함량으로 인해 기존 대비 낮은 밴드갭을 가진 것으로 보이나, 장파장 (800~1200nm)영역에서 GGI 0.2의 양자효율 및 밴드갭에 대해 매우 근소한 차이로 확인하였음. 이는 외부양자효율의 결과가 광흡수에 기인한 캐리어의 생성뿐 아니라 수집에도 영향을 받기 때문임. 또한, 외부양자효율 그래프를 통해 추산된 밴드갭의 경우 박막내의 가장 작은 부분에 대한 정보만 얻을 수 있기 때문에 정확한 밴드갭 및 광흡수도를 알기 위해서는 추가적인 분석을 진행해야 함. 다만, 저밴드갭 구조의 구현에도 EQE의 변화가 나타나지 않은 것은 밴드갭이 낮은 구역

이 충분하지 않아 발생하는 장파장 빛 흡수 부족, 생성된 캐리어의 재결합 손실로 예상할 수 있음.

나. GGI 0 중간층 도입을 통한 저밴드갭 구조의 고전류 발전 CIS 태양전지 기술 개발

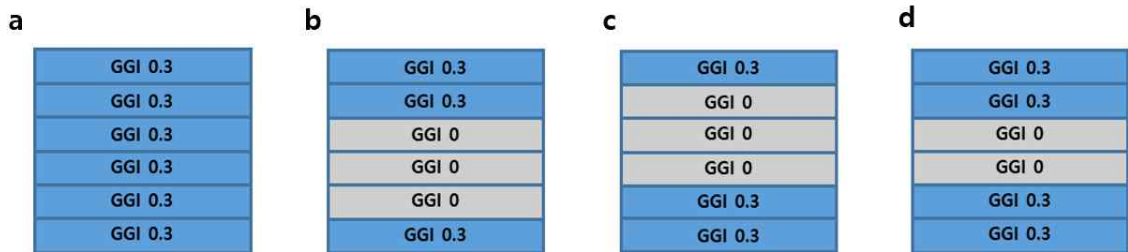


그림 56. GGI 0 중간층 도입 위치별 전구체 산화막 모식도.  
(a) 큰밴드갭 구조 (b) 2,3,4 층 도입 (c) 3,4,5 층 도입 및 (d) 3,4 층 도입

- 기존의 연구는 CIS 광흡수층의 전체 In 함량을 증가시키기 위해 GGI가 낮은 전구체 용액을 모든 층에 동일하게 적용하는 방식을 적용하였음. In의 함량이 소폭 증가하였으나, Ga의 함량이 작아짐에 따라 산화막의 박리 현상이 발생하여 0.1 이하의 GGI를 갖는 전구체 산화막은 제작이 불가능하였음. 이는 전구체 용액 내의 Ga이 기판과의 접착력을 높이는 역할을 하기 때문임.
- 기존의 연구를 바탕으로 높은 접착력과 In의 함량을 모두 가져갈 수 있는 새로 적층 방법이 고안됨. 물리브데늄 기판과 맞닿는 부분에서 높은 Ga의 함량을 가진 전구체 용액을 활용하여 접착력을 증가시키고, 이후 낮은 Ga이 전혀 포함되지 않은 GGI 0 용액을 중간층에 적층하여 전체 CIS 박막의 In 함량을 증가시킴. 마찬가지로, 가장 상층에는 Ga의 함량이 높은 층을 배치하여 박막의 접착력을 증가시키는 샌드위치 구조로 전구체 산화막을 구성하였음.

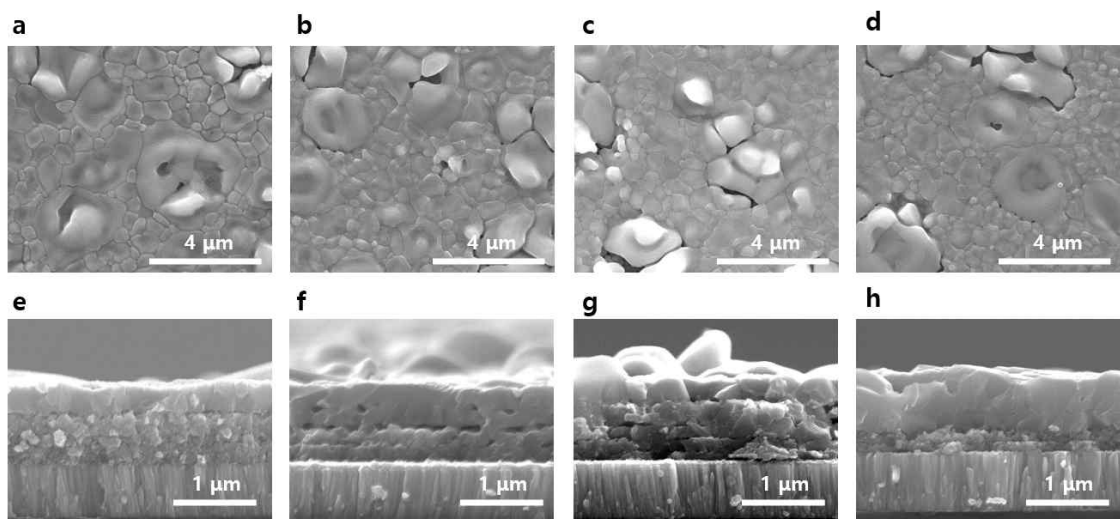


그림 57. GGI 0 중간층 도입 위치별 CIS 광흡수층 SEM 형상 이미지.

(a), (e) 큰밴드갭 구조, (b), (f) 2,3,4 층 도입 (c), (g) 3,4,5 층 도입 및 (d), (h) 3,4 층 도입

- GGI 0 중간층의 도입 위치 따라 CIS 광흡수층의 표면 이미지에서는 유의미한 차이가 확인되지 않았으나, 단면에서는 큰 결정립층의 두께에 증가가 관찰되었음. 이는 CIS 전구체 산화막 내부에 형성에너지가 작은 인듐의 함량이 증가함에 따라 CIS 상이 형성이 유리해졌기 때문임. 이에 큰 밴드갭 구조 대비 높은 단락전류밀도를 기대해 볼 수 있음. 또한, 큰 결정립층 두께의 크기 증가

로 인해 결함 사이트가 될 수 있는 작은 결정립층의 두께가 감소하여 높은 충진률을 기대해 볼 수 있음.

- 3,4,5 층 도입한 광흡수층의 경우 상대적으로 불균일하고 일부에서는 반복적인 박리가 발생하였음. 이는 상층부에 접착력이 높은 층이 부족하여 물리적 불안정 구조를 유발시켰기 때문으로 추정됨. 반대로 상층부에 접착력이 높은 층을 많이 확보한 2,3,4 층 및 3,4 층 도입 CIS 광흡수층의 경우 박리 현상이 발견되지 않았으나, 3,4 층 도입 CIS 광흡수층의 큰 결정립 두께보다 작은 두께를 가졌음. 이는 2,3,4 층 구조의 광흡수층은 하단부에 접착력이 높은 층이 얇게 적층되어 상대적으로 작은 결정립을 가지는 것으로 예상됨.

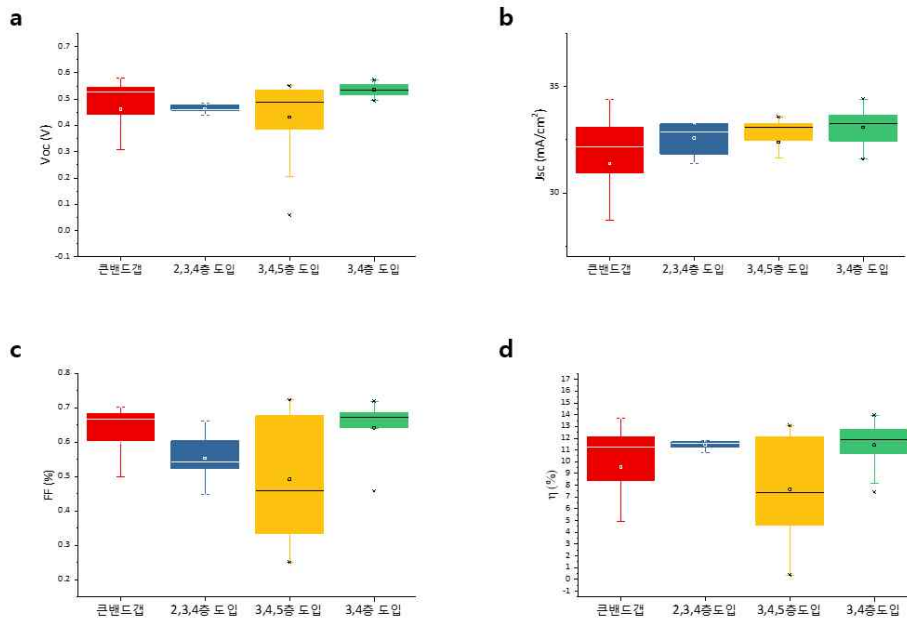


그림 58 GGI 0 중간층 도입 위치별 CIS태양전지 소자의 Light  $J-V$  파라미터. (a) 개방전압( $V_{oc}$ ), (b) 단락 전류밀도( $J_{sc}$ ), (c) 충진률(FF) 및 (d) 효율( $\eta$ )

- GGI 0 중간층의 도입 위치별 CIS 박막 태양전지의 성능 평가 결과 중간층이 도입된 태양전지에서 모두 단락전류밀도( $J_{sc}$ )의 개선 효과를 확인하였음. 개선된 단락전류밀도는 In의 도입으로 인한 저 밴드갭 구조의 형성 때문임. 반면, 2,3,4 층 및 3,4,5 층 도입 CIS 태양전지의 경우 큰 밴드갭 대비 개방회로전압( $V_{oc}$ ) 및 충진효율(FF)의 성능이 감소함. 3,4,5 층 도입 CIS 태양전지에서는 확인된 파라미터들 간의 큰 편차는 박막의 부분적인 박리 때문임. 또한 2,3,4 층 도입 CIS 태양전지의 충진률의 감소는 광흡수층의 단면에 존재하는 결정립간의 공극 때문임. 때문에 두 구조에서는 태양전지의 품질이 감소함에 따라 낮은 개방회로전압( $V_{oc}$ ) 및 충진효율(FF)을 보여주었음.
- 3,4 층 도입 CIS 태양전지의 경우 큰 밴드갭 태양전지 대비 개방회로전압( $V_{oc}$ ) 및 충진효율(FF)에서도 개선 효과를 확인하였음. In 원소의 도입을 통해 큰 결정립 층의 두께가 증가함에 따라 생성된 광 캐리어의 재결합을 억제하였기 때문임. 따라서 GGI 0 중간층의 도입으로 인해 저 밴드갭 구조의 구현과 고전류 발전 CIS 태양전지 기술 개발을 성공적으로 수행함.

다. Chemical bath deposition(CBD) 공정 기반의 Se 중간층을 도입을 통한 저밴드갭 구조의 고전류 발전 CIS 태양전지 기술 개발



- Se은 황화수소( $H_2S$ ) 캐리어 가스를 통해 전구체 산화막에 공급되어지며, 표면부터 칼코젠화 반응이 일어남. 표면 반응을 통해 전구체 산화막의 상단부에 밀도 높은 CIS 상이 먼저 형성됨에 따라 하단부에 Se의 공급이 어려워져 낮은 Se의 조성을 가진 흡수층이 제작됨. 흡수층 내의 낮은 Se 함량은 큰 밴드갭 구조를 형성하기 때문에 장파장의 빛을 흡수할 수 없음. 때문에 저밴드갭 구조를 구현하기 위해서는 흡수층의 하단부의 Se 함량을 증가시키는 것이 매우 중요함.
- 칼코젠화 공정이 시작되면 표면에서부터 셀레늄의 공급을 차단하기 때문에 공정에 앞서 전구체 산화막 하단에 Se 중간층을 직접 도입하는 방법을 고안함. Chemical bath deposition(CBD)은 이온화되어 용매에 녹아 있는 분자를 화학적 반응을 통해 샘플의 표면에 석출시켜 증착시키는 방법임. 기존 문헌을 참고하여 진행하였음.(출처 : Bindu et al./Solar Energy Materials & Solar Cells 79 (2003) 67-79). 기존의 문헌에서는 염기 용액 기반으로 공정을 수행하지만 염기 용액은 전구체 산화막의 박리를 유발할 수 있음. 때문에 반응 용액의 전구체를 기존의 Sodium selenite ( $Na_2SeO_3$ )에서 산성의 성질을 가지는 Selenium oxide( $SeO_2$ )로 변경하여 산성 용액에서 공정을 진행하였음.

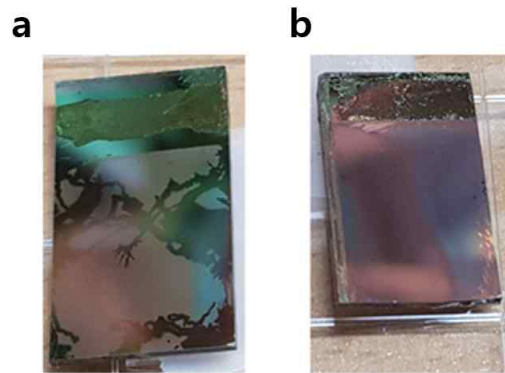


그림 59. Se 전구체 농도에 따른 Se 중간층 도입 전구체 산화막  
(a) Ascorbic acid 0.006M, (b) Ascorbic acid 0.0036M

- 문헌에 기재된 0.006M의 농도에서 수행된 산화막의 경우 육안상으로도 매우 불균일한 Se층이 도입된 것을 짐작할 수 있음. 이후 균일한 Se의 입자 형성 및 층의 도입을 위해 전구체인 Ascorbic acid ( $C_6H_8O_6$ )의 농도를 0.6배로 낮추어 반응 속도의 감소를 유도하였음. 이를 통해 육안상으로 Se층이 산화막 위에 균일하게 구현되었음을 확인함.

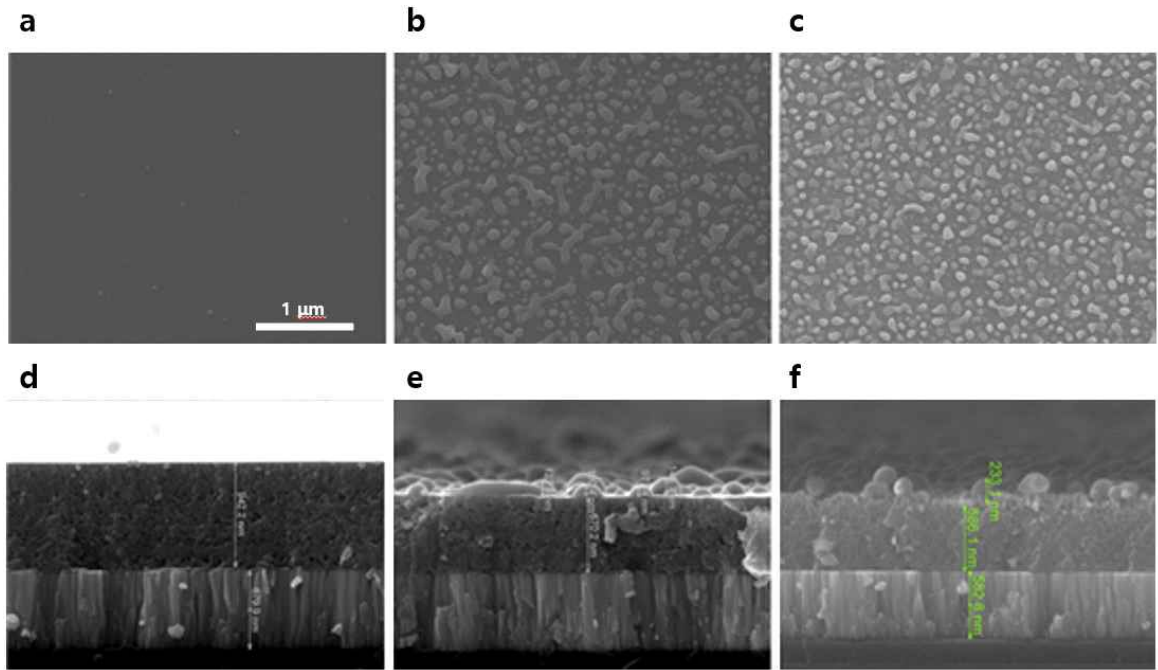


그림 60. CBD 반응 시간에 따른 Se 도입 전구체 산화막 형상 이미지  
(a) 전구체 산화막, (b) 90분 및 (c) 180분(90분씩 2번)

- CBD 반응 시간에 따른 Se 도입 산화막의 형상 분석 결과를 통해 표면에는 Se이 섬형태로 증착되며, 표면의 요철 구조 외에는 상당히 균일한 두께의 박막으로 형성되는 것을 확인함. 이는 반응의 속도를 제어했기 때문임. 하지만 180분 동안 약 200nm의 Se 층을 구현했으며, 너무 느린 증착 속도로 인해 낮은 생산성을 야기함. 또한, CBD 반응시간이 증가할수록 전구체 산화막의 두께가 감소하는 것을 확인하였음. 산화막 두께의 감소는 산화막 공정의 횟수의 증가를 요구하며, 공정 동안 팽창과 수축을 통해 박막의 잦은 스트레스를 유발하여 박리를 유발할 수 있음. 때문에 본 공정은 Se 중간층 도입을 위한 방법으로 적합하지 않음.

라. 비진공 증발 증착법 기반의 Se 중간층을 도입을 통한 저밴드갭 구조의 고전류 발전 CIS 태양전지 기술 개발

- 셀레늄은 비금속으로 녹는점은 약 220°C, 끓는점은 약 685°C 이지만 녹는점과 끓는점 사이에 일부가 기화되기 때문에 적절한 온도 조절을 통해 증발량을 통제하여 Se 층을 형성을 수행함. 온도의 증가에 따라 반응기 하단에서부터 Se이 기체의 형태로 상단부로 이동하게 되고, 낮은 온도로 유지되는 전구체 산화막에 온도차에 의한 Se의 석출을 유도하였음.



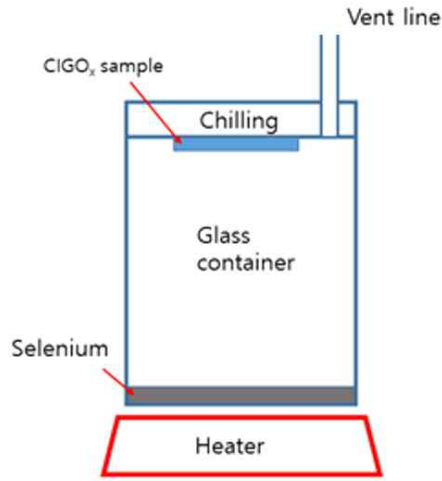


그림 61. Se 중간층을 도입을 위한 비진공 Se 증발 증착 반응기 모식도

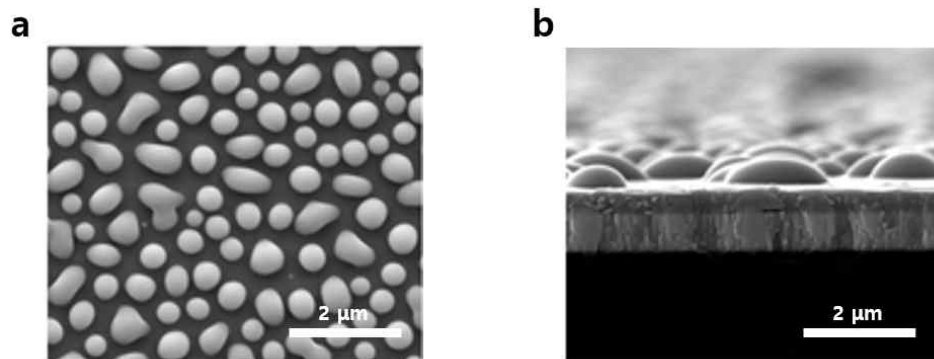


그림 62. 전구체 산화막 위에 구현된 비진공 증발 증착법 기반 Se층 형상이미지  
(a) 표면, (b) 단면

- 전구체 산화막 위에 비진공 증발 증착법을 통해 Se을 도입하였고, 주사현미경 분석을 통해 형성된 Se이 섬 형태로 존재하는 것을 확인하였음. 기존 화학적 반응 기반의 CBD 방식의 경우 전구체 산화막의 손상을 유발하였으나, 물리적 증착 방법인 비진공 증발 증착법으로 구현된 산화막은 표면의 손상이 없음을 확인. 형성된 Se 중간층 위에 산화막을 추가적으로 형성하여 Se 층이 전구체 산화막의 중반부에 위치하도록 진행

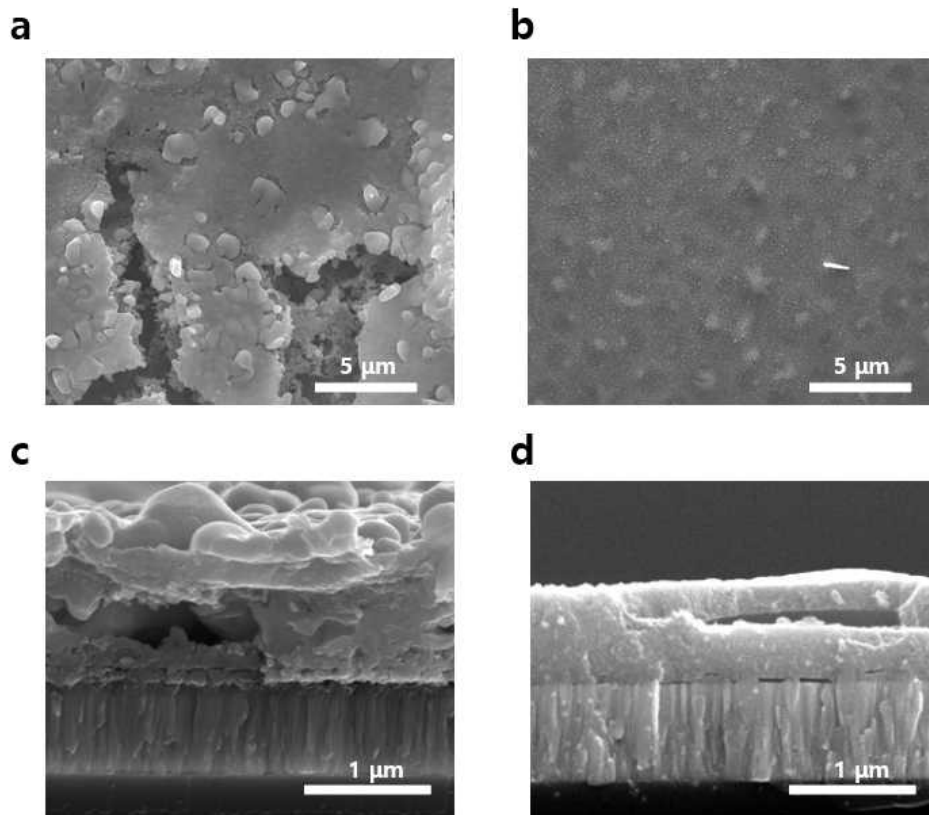


그림 63. 비진공 증발 증착법 기반 Se 중간층 두께에 따른 CIS 전구체 산화막 형상 이미지 (a), (c) 300nm, (b), (d) 50nm

- Se 중간층의 도입 후 주사현미경 이미지 분석을 통해 중간층의 두께에 상관없이 전구체 산화막이 불균일하고 빈 공간이 많은 형태로 형성된 것을 확인하였음. 산화막의 접착력이 낮아진 이유는 비진공 증발 증착법으로 도입된 Se이 섬 구조로 인해 표면의 거칠기를 증가되었기 때문임. 이후 칼코겐화 공정을 진행하여 Se 중간층 도입을 통한 저밴드갭 구조의 구현 가능성을 평가함.

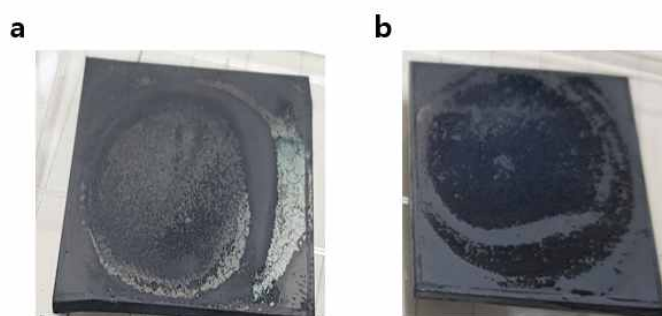


그림 64. Se 중간층 두께에 따른 CIS 광 흡수층 이미지 (a) 300nm, (b) 50nm

- Se 중간층 산화막을 활용하여 CIS 광 흡수층으로 제작하였으나, 칼코겐화 공정 동안 박리 현상으로 인해 온전한 흡수층을 제작할 수 없었음. Se 중간층 도입 산화막 단면의 내부 빈 공간의 존재는 최종적으로 CIS 상 형성 단계에서 원소들의 이동을 방해하여 결정립의 성장에 부정적인 영향을 미침. 또한 결함 증가 및 불균일한 두께의 박막 형성, 박리를 유발함. 때문에 Se 중간층 도입을

위한 방법으로 비진공 증발 증착법은 적합하지 않음. CIS 흡수층 하단까지 Se의 공급을 할 수 있으면서 균일하고 높은 밀도를 보장할 수 있는 새로운 공정의 개발이 필요함.

### (5) Cd-free Zn 기반 고밴드갭 버퍼층 도입

가. 고밴드갭 버퍼층의 필요성.

- 버퍼층의 물질로 가장 많이 사용하는 CdS로 사용함에 있어서, 2.4 eV의 낮은 밴드갭으로 인해 ~500 nm 이하의 단파장을 흡수하여 광전류를 감소시키고 효율을 떨어뜨림. 또한 Cd는 중금속으로 Zn 화합물은 환경 친화적인 물질로 대체가 가능할 것으로 기대되고 있음.
- Zn 기반의 버퍼층의 원소 및 조성의 조절로 큰 밴드갭 (2.83~3.76eV) 특성을 구현할 수 있을 것으로 예상되기 때문에, 단파장(500nm 이하)의 흡수 증가로 인한 단락전류밀도( $J_{sc}$ )의 증가로 태양전지의 효율 증가가 가능할 것으로 기대됨.

나. Chemical bath deposition(CBD) 공정 기반 Zn(O, S) 버퍼층 성장 및 특성분석

- 버퍼층의 제작방법은 여러가지가 존재하지만, 크게 진공방법과 비진공방법으로 구분할 수 있음. 대면적으로 제작하는데 있어 진공방법의 경우 비용이 커짐. 반면 비진공방법중 Chemical bath deposition(CBD) 방법을 사용할 경우, 공정이 단순하고 대면적공정으로 전환이 상대적으로 수월함. 또한 최고효율은 진공공정이 아닌 CBD 방법으로 버퍼층을 성장시켜 얻었다고 보고되었음.
- CBD는 용액에 기판을 담지하여, 용액내의 화학적인 반응을 통하여 기판위에 화합물을 합성과 성장을 유도하는 방법임. 담지하는 시간과 반응시키는 화합물의 농도등에 따라서 화합물이 성장하는 메커니즘과 특성, 두께등이 결정됨.
- 기본적인 CBD Zn(O, S) 박막 합성방법은 현재 사용중인 CdS 박막 합성방식과 화학적 원리는 유사함. 하지만 박막으로 성장에 필요한 조건은 용액의 원소와 분자특성에 따라서 반응속도, 반응 용액의 환경, 전구체의 양, S 공급원 분자등 미세하게 조절해야 필요한 특성을 가지는 균일한 박막으로 성장이 가능함.

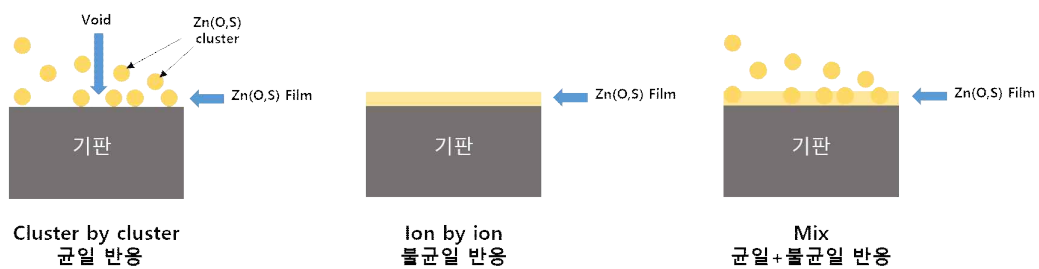


그림 65. Zn(O, S) 박막 형성 메커니즘에 따른 개략도

- 위의 개략도에서 균일한 반응이 유도될 경우, 클러스터들이 형성되고 클러스터들이 물리적인 형태로 기판위에 결합됨. 클러스터들 사이의 공극들과 기판과의 접합부의 결합으로 태양전지로 구동되었을 때, 효율저하의 원인이 된다고 알려져 있음. 이상적인 박막으로는 불균일 반응을 유도해, 결정성을 확보하여 결합이 적고 균일한 필름 형태의 박막으로 성장시켜야 함. 현실적으로 균일과 불균일 반응이 섞인 형태로 박막이 형성되지만 불균일한 반응이 우세하도록 유도하며, 결정성을 가지는 형태로 성장시키는 것이 목표임.

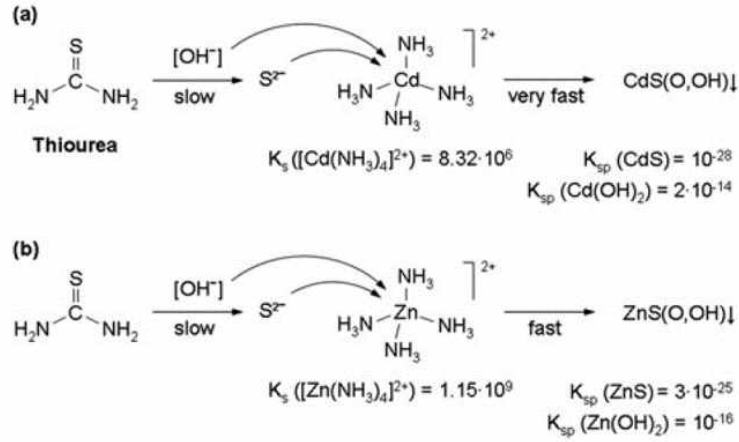


그림 66. Thiourea/ $NH_3$ 를 통해 CdS, Zn(O, S)층을 성장시키기 위한 단순화된 반응 경로

(ref :Prog. Photovolt: Res. Appl. 2012; 20:534 - 542)

- CdS는 박막 성장을 위해,  $CdSO_4$ 와  $NH_3$ 을 물에 녹여 Cd를 이온화를 유도하고, Thiourea(TU)를 첨가하여 Cd이온과 S를 반응시켜 필름형태로 성장을 유도함. 하지만 Zn(O, S)는 TU를 사용할 경우,  $K_{sp}$ 값이 CdS에 비하여 약 3000배 차이로 반응속도가 매우 느리고, 반응속도가 느려짐에 따라서 균일과 불균일 반응이 유도되는 것이 매우 달라짐.

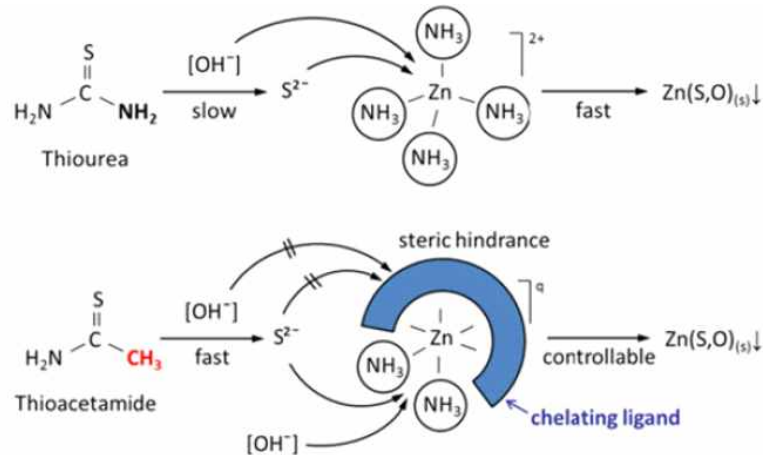
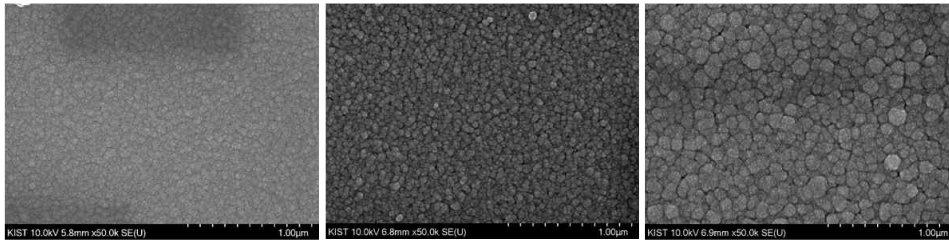


그림 67. Thiourea, Thioacetamide 기반의 반응계략도

(ref : IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, VOL. 6, NO. 5, SEPTEMBER 2016. Dimitrios Hariskos et al.)

- 반응속도를 증가시키기 위하여 Thioacetamide(TAA)를 사용하여 박막을 성장시키는 방법이 보고되어 있음. 또한 반응을 조절하기 위하여  $NH_3$ 이외의 킬레이트제를 사용하여 반응위치를 제한적으로 조절할 수 있고, 이에 따라 반응속도도 조절이 가능함. 위의 정보들을 바탕으로 Mo 기판위에 성장시켜, 성장 조건에 따른 박막특성을 분석함.

(가)



CdS 15분 증착

Zn(O, S)-TAA 15분 증착

Zn(O, S)-TU 45분 증착

(나)

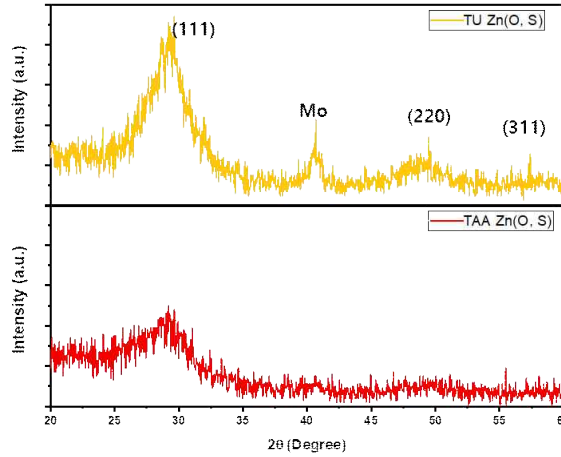


그림 68. (가) CdS, Zn(O,S)-TAA, Zn(O,S)-TU 표면 SEM. (나) Zn(O,S)-TAA, Zn(O,S)-TU GIXRD

- 우선 Zn(O, S) 합성 조건에서 TU와 TAA에 따른 박막 성장 변화를 확인하기 위하여, 다른 변수들은 동일하게 설정하여 반응을 시킴. CdS와 TAA, TU를 사용하여 성장시킨 Zn(O, S)로 전부 비슷한 두께로 성장시킨 버퍼층을 표면구조와 결정성을 확인하기 위하여 SEM, GIXRD 분석을 진행하였음. 위 그림의 (가)에서 TAA로 성장시켰을 때, 기존의 CdS와 표면이 가장 유사함을 확인할 수 있었고, TU를 사용한 경우 큰 결정들이 뭉쳐있는 것으로 확인함. 또한 TAA와 TU로 성장시킨 박막 둘 다 결정사이 틈 부분이 확인됨. 이는 태양전지로 제작 시, 병렬저항이 낮아지도록 작용하여 전자와 정공의 재결합을 유도하며 효율을 저하시키는 큰 원인으로 작용하므로 개선이 필요함. 위 그림 (나)의 GIXRD에서는 30도 근처의 Zn(O, S) (111) 피크가 확인 되었으며, 피크의 강도는 TU를 사용한 박막이 조금 더 세게 확인되고 이는 결정성이 더 커졌음을 의미함.
- 반응속도가 빠른 TAA를 사용하면서, 킬레이트제를 추가로 사용하면 반응속도를 조절하여 두께 조절이 용이해짐과 동시에, Zn이온이 S와 반응하는 위치를 제한적으로 가져갈 경우, 밀도와 결정성이 증가된 박막으로 성장을 유도 가능할 것으로 예상됨.



ligand	primary $\log_{10}K_s$ (25 °C)	Primary $\log_{10}K_s$ (90 °C)
EDTA	18	17.853
NTA	10.45	10.412
citrate	4.93	4.993
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2.37	2.548
ammonia	2.21	1.864
acetate	1.57	1.83
Cl <sup>-</sup>	0.46	1.452
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.4	0.365

그림 69. CBD 반응에서 일반적인 킬레이트 리간드들의 평형 상수  
(Ref : Cryst.GrowthDes.2015, 15, 4893–4900)

- 위의 그림은 CBD 반응에서 킬레이트 리간드들의  $K_s$  값을 계산한 표이고,  $K_s$ 는 평형상수로 값이 클수록, 금속이온과의 결합 강도가 강해짐을 나타냄. 적당한 결합세기를 가지는 킬레이트제를 사용할 경우 구조적으로 S와의 결합을 특정위치로 유도함에 따라서, 반응속도를 적절하게 늦추고 결정성을 가지도록 조절하게 유도 할 수 있음.
- 위의 그림을 토대로 암모니아(NH<sub>3</sub>) 보다 큰 평형상수를 가지는 ethylene-diamine-tetraacetic acid (EDTA)와 citrate를 선택하였고, 관련하여 보고된 논문들을 참고하여 성장조건을 설정함. 각각 EDTA는 ZnSO<sub>4</sub> 0.04M, TAA 0.12M, EDTA 0.039M, Hexamethylenetetramine (HMTA) 0.3M로 반응을 진행하였고, citrate는 ZnSO<sub>4</sub> 0.002M, TAA 0.01M, citric acid 0.1M, NH<sub>3</sub> 1.2M로 반응을 진행하였음. 두 조건을 동일한 두께로 비교하기 위해 20nm 정도로 조절하였고, 이에 따라 EDTA 조건의 반응시간은 40분, citric acid조건의 반응시간은 4분으로 Mo기판 위에 성장시켜 Zn(O, S) 박막의 특성을 분석하였음.

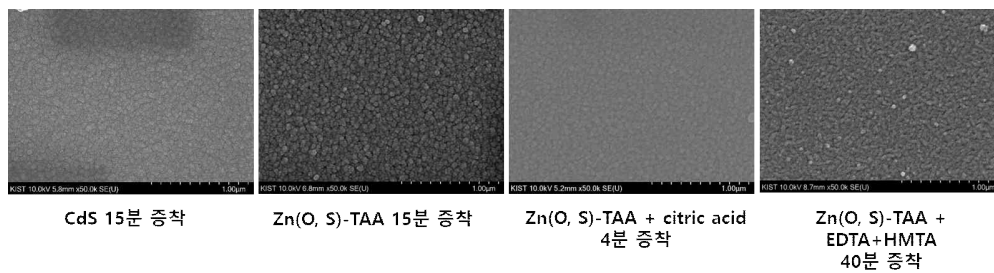


그림 70. CdS, Zn(O,S)-TAA, Zn(O,S)-TAA+citric acid,  
Zn(O,S)-TAA+EDTA+HMTA 표면 SEM

- 표면 SEM 분석에서 Zn(O, S) 표면 중 가장 매끄럽고 결정사이 틈이 가장 없어 보이는 citric acid을 사용한 조건으로 확인되었고, EDTA는 결정크기는 작고 뾰뾰하나 결정사이 틈이 일부 보이며, 표면 또한 필름이 아닌 클러스터가 일부 붙어있는 것들도 확인이 되었음.



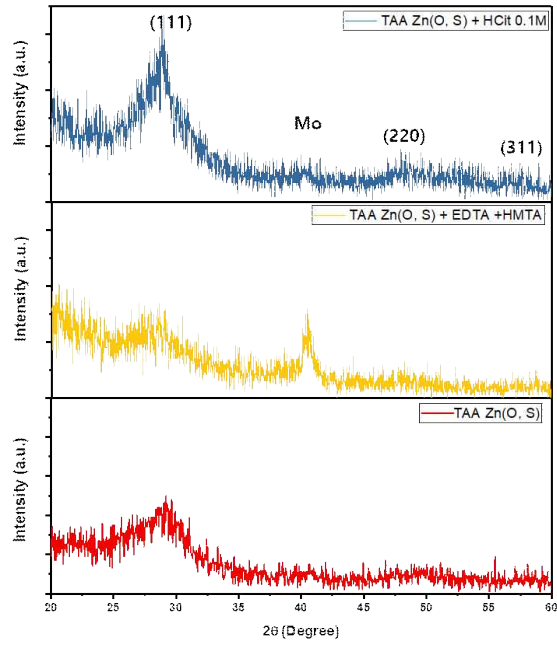


그림 71. CdS, Zn(O,S)-TAA, Zn(O,S)-TAA+citric acid, Zn(O,S)-TAA+EDTA+HMTA GIXRD

- Citric acid를 사용한 조건에서 가장 결정성이 크게 성장했음을 GIXRD를 통하여 확인하였고, TAA만 사용한 조건과 비교했을 때, 킬레이트제에 의하여 반응속도가 줄었음에도 반응시간을 줄여, 두께는 절반 이하로 얇아졌을 것으로 예상되는데도, (111)피크의 강도가 더 세졌음. 이를 통해 얇은 박막임에도 결정성이 더 증가했음을 확인 가능함. 또한 EDTA를 사용한 조건에선 반응시간을 TAA만 사용한 조건보다 더 긴 40분으로 가져갔음에도 박막두께가 citric acid를 사용해 4분 반응시킨 조건과 비슷했고, 결정성 또한 더 떨어짐을 확인했음.
- 이 결과를 토대로  $K_s$ 값이 너무 커지는 킬레이트제를 선택했을 경우, 반응 속도를 매우 늦춰 성장을 유도하여도 결정성이 떨어지는 결과를 확인하였고, 적절한  $K_s$ 값을 가진 citric acid를 사용할 경우, 반응속도와 결정성을 조절하기 수월함을 확인하였음. 결론적으로 citric acid를 사용하여 성장된 Zn(O, S) 박막이 버퍼층으로 가장 적합한 조건으로 확인함.
- 이 결과를 바탕으로 하여 citric acid 조건으로 성장한 Zn(O, S) 버퍼층이 적용된 태양전지에서 구동이 가능한지와 성능을 비교확인하기 위하여, 기존의 CdS 버퍼층을 가진 CIS 태양전지를 함께 제작하였음.

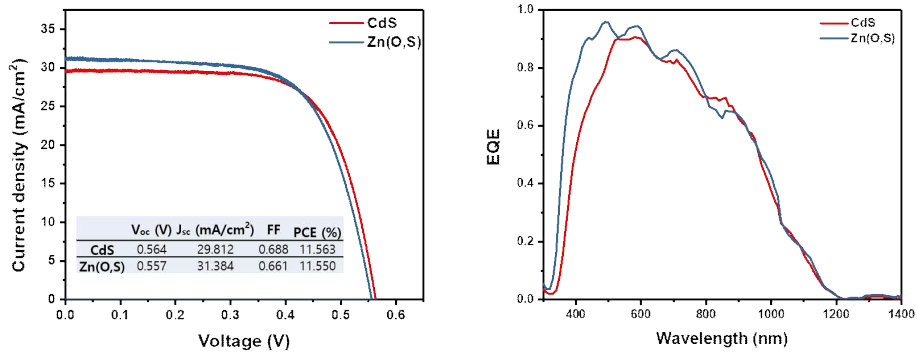
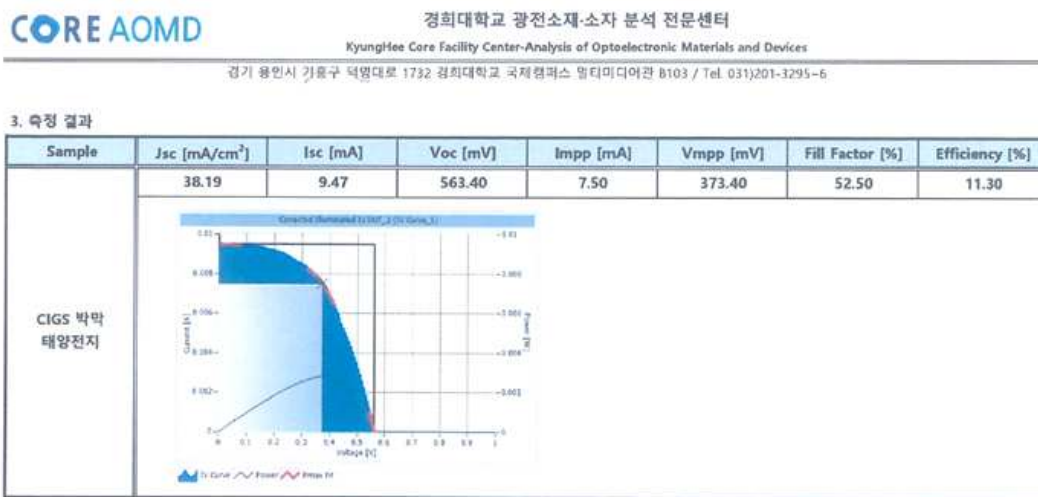


그림 72. CdS, Zn(O,S) 버퍼층을 적용한 CIS 태양전지의 Light I-V, IPCE 측정

- 각각 Zn(O, S) 버퍼층과 CdS 버퍼층이 적용된 CIS 태양전지 성능을 비교하기 위하여 제작된 태양전지의 Light J-V 분석과 파장별 흡수도를 확인하기 위하여 EQE 분석을 진행하였음. 실제 확인한 효율에서 단락전류밀도( $J_{sc}$ )가 증가했음을 확인하였고, EQE에서도 버퍼층의 밴드갭의 증가로 인하여, 기대했던 대로 500nm이하의 단파장에서 흡수도가 눈에 띄도록 증가했음을 확인함.
- 기대했던 결과로 단파장의 흡수가 증가했음을 성공적으로 확인하였고, 다만 개방전압( $V_{oc}$ )과 충전률(FF)의 약간의 감소가 있어, CIS/Zn(O, S) 결합부가 개선되는 조건의 최적화가 조금 더 진행된다면, 전체적인 효율의 향상이 기대됨.

### (6) CIS 광흡수층 및 Zn 기반 고밴드갭 버퍼층을 통한 고전류 CIS 박막 태양전지 개발

가. GGI 0 중간층을 도입한 광흡수층과 Zn(O,S) 버퍼층을 통한 고전류 구현



- 이 하 여 백 -

그림 73 고전류 CIS 박막 태양전지에 대한 경희대학교 광전소재·소자 분석센터 타기관 인증 자료. ( $V_{oc}=0.563$  V,  $J_{sc}=38.19$  mA cm<sup>-2</sup>)

- 상기 연구 결과에서 GGI 0 중간층을 3, 4층에 위치시켰을 때 가장 높은 전류를 얻을 수 있었음. 이러한 광흡수층에 고밴드갭을 가진 Zn(O,S) 버퍼층을 도입하여 단락 전류를 최대화 할 수 있는 소자를 구현하고자 하였음.
- 두 가지 기술을 융합한 결과, 소자의 양자효율이 전체적인 파장에 대하여 크게 개선됨을 확인하였음. 이는 밴드갭 그레이딩 구조의 조절과 고밴드갭 버퍼층의 도입으로 CIS 박막의 광흡수량이 효과적으로 개선되었기 때문으로 볼 수 있음.
- 결과적으로 경희대학교 타기관 인증 결과, 개방전압( $V_{oc}$ ) 0.563 V, 단락전류( $J_{sc}$ ) 38.19 mA cm<sup>-2</sup>를 달성하였으며, 특히 단락전류 값은 용액공정 기반 CIS 박막 태양전지 중 가장 높은 값으로 볼 수 있음.

### (7) 중알칼리 원소 Rb 도핑을 통한 용액공정 고전류 발전 CIS 박막 태양전지 기술 개발

가. 알칼리 원소 Rb 도입으로 인한 CIS 박막의 광 흡수성 조절

- CIS 박막 태양전지 내의 알칼리 금속은 광흡수층과의 상호작용을 통해 소자 전기적 특성 및 성능을 크게 개선시키는 것으로 알려져 있음. 선행연구에서 Na 원소의 벌크 도입은 CIS 박막의 p-형 특성이 강화를 통한 CIS 박막 내부에서의 재결합 손실 억제 및 표면에 형성된 OVC 층에 따른 계면 재결합의 억제함. K원소의 벌크 도입은 점 결함의 패시베이션 및 Se원소와의 높은 친화력을 바탕으로 용점이 낮은 K-Se 중간상을 형성해 박막의 하단 부분의 원활한 Se 공급으로 박막 전체의 band-gap을 낮춤.
- 후열처리 공정을 통한 도입된 Rb 원소는 광흡수층 표면, 결함 농도가 높은 결정립계, 후면 계면에서 결함을 제거하는 역할을 수행을 하는 것으로 알려져 있음. 또한 Rb의 농도 증가에 따라 CIS 흡수층 내부의 Cu와 Ga의 농도를 감소시키며, In과 Se의 농도 증가시킴. CIS 광흡수층에 In과 Se의 함량이 증가할수록 밴드갭은 감소하며, 장파장의 빛을 효율적으로 활용할 수 있어 고전류 생성이 가능함. 벌크 도입 공정을 통해 박막의 하단부에 Rb 원소를 우선적으로 배치시켜 CIS 성장 동안 In과 Se의 농도가 높게 형성되도록 CIS 광 흡수층을 구현하려함. 이를 통해 저밴드갭 구조를 가진 태양전지의 제작 기술 확보 및 고전류 태양전지의 개발을 수행하려 함.

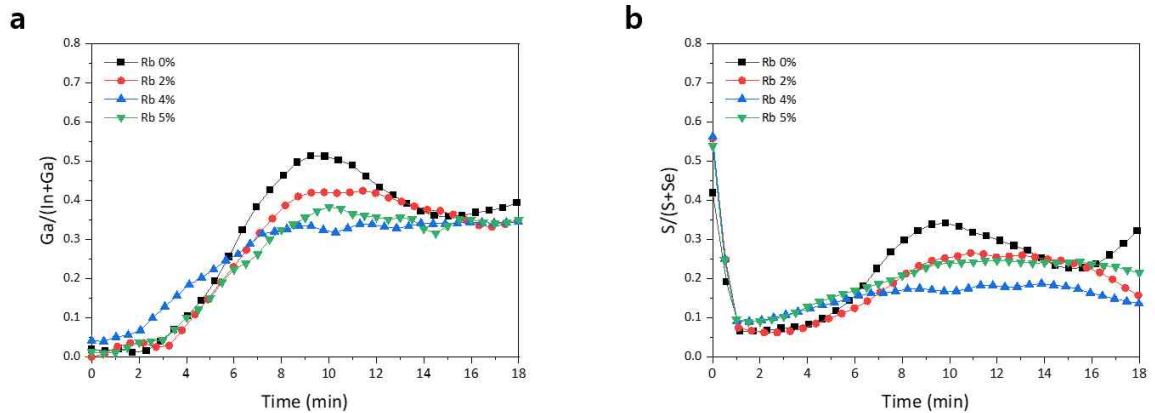


그림 74. 알칼리 원소 Rb 도입에 따른 CIS 박막 깊이별 조성  
(a)  $[Ga]/([Ga]+[In])$ , (b)  $[S]/([S]+[Se])$

- CIS 광흡수층내부로 중알칼리 Rb 원소의 벌크 도입은 경알칼리 Na 원소의 도입 방법과 마찬가지로 CIS 전구체 용액에 Rb 전구체를 첨가하는 방식을 채택함. 경알칼리와 중알칼리의 상호작용에 따른 변수를 차단하기위해 소다라임유리에서 공급되어지는 Na 원소를 SiO<sub>2</sub> 층을 활용해 제어하였음.
- Rb 도입 농도별 CIS 광흡수층의 깊이 조성 분석을 통해 Rb의 도입 농도가 증가할수록 CIS 박막 중단 및 하단부의  $[S]/([S]+[Se])$  감소함. 하단부의 Ga 및 S의 감소는 CIS 박막의 밴드갭이 감소를 의미하며, 이는 CIS 성장 중에 Rb 원소가 불안정한 하단부에 위치함으로써 Ga의 농도 감소와 In과 Se의 농도의 증가를 이끌었기 때문임. 결과적으로 밴드갭 감소에 의한 광흡수 증가 효과가 예상되며 CIS 박막 태양전지의 높은 단락전류밀도( $J_{sc}$ )가 기대됨.

나. 알칼리 원소 Rb 도입으로 인한 CIS 박막 태양전지의 단락전류밀도( $J_{sc}$ ) 성능 개선

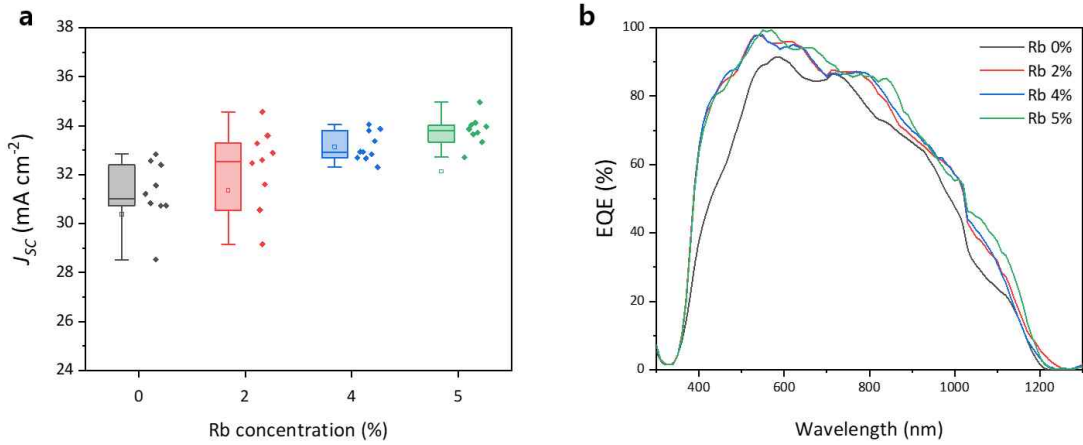


그림 75. 알칼리 원소 Rb 도입 농도에 따른 CIS 박막 태양전지 성능 평가  
(a) 단락전류밀도, (b) 외부양자효율

- Rb 도입 농도별 CIS 박막 태양전지의 성능 평가 결과 벌크 내부의 Rb 원소의 함량이 증가할수록 단락전류밀도( $J_{sc}$ )의 선형적 증가를 확인하였음. 단락전류밀도( $J_{sc}$ )의 증가는 박막 하단부의 감소된 Se 및 In의 함량은 낮은 밴드갭을 형성시키기 때문임. 낮은 밴드갭으로 인해 광흡수층은 더 많은 빛을 흡수하기 때문에 생성되는 광캐리어의 총량이 증가함. 장파장 영역에서 생성된 광캐리어 증가는 외부양자효율 측정 결과를 통해 확인할 수 있음. Rb 원소가 도입된 CIS 태양전지에서는 800nm 이상의 영역에서 뚜렷한 증가를 보여줌.
- 또한, Rb 원소가 도입된 CIS 태양전지에서 장파장 영역의 외부양자효율 증가 외에 500nm 이하의 단파장 영역 및 전체 파장에 걸친 외부양자효율의 증가는 p-n 접합의 품질 향상에 기인한 결과로 보여짐. Rb 원소가 CIS의 성장에 영향을 주어 CIS의 표면이 버퍼층과 유리한 구조로 형성되었을 것으로 보이며, p-n 접합의 품질 향상은 접합 계면의 결함 농도 감소, 광생성 캐리어의 분리 동력이 되는 공간 전하 영역(Space charge region)의 증가와 같은 전기적인 특성에 영향을 주었을 것으로 예상됨..
- 결과적으로 CIS 광 흡수층의 중알칼리 Rb 원소 도입을 통해 저밴드갭 구조의 구현하였으며, 그에 따른 장파장 영역에서의 광 생성 캐리어 농도를 증가시킴. 더불어 p-n 접합의 품질 향상을 통해 광 생성캐리어를 효과적으로 수집하였음. 이러한 특성을 기반으로 35 mA/cm<sup>2</sup> 이상의 고전류 발전을 하는 용액공정 CIS 박막 태양전지를 성공적으로 제작하였음.

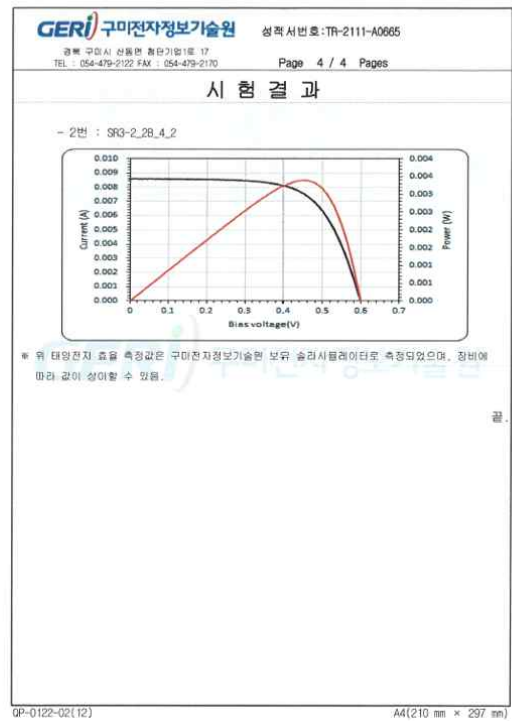
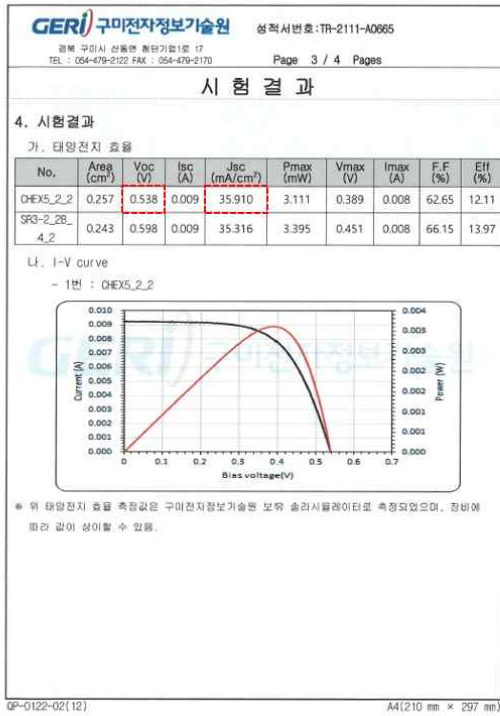


그림 76. 알칼리 원소 Rb 도핑을 통한 용액공정기반 고전압(> 0.55 V) 발전 CIS 박막 태양전지 타기관 성능 분석 시험지

### (8) 알칼리 금속 동시 도핑을 통한 고성능 CIS 박막 태양전지 구현

가. 단일 알칼리 금속 도핑의 효과 및 한계점

- 기존 1단계 연구 과제에서는 확산방지막 (SiO<sub>2</sub>) 및 알칼리 금속이 포함된 용액을 활용하여 단일 알칼리 금속 도핑의 효과를 고찰하였음. 요컨대, Na 도핑은 광흡수층 정공 농도 증가, 계면 및 벌크 재결합 억제, 후면 계면 저항 감소 등과 같은 전기적 특성을 주로 개선시켰음. 반면에 Rb 도핑은 결정화를 위한 열처리 과정 중 박막 하단부의 조성 변화를 야기하여 광학적 밴드갭을 낮추고 광흡수도를 개선시켰음. 이와 같은 결과는 알칼리 금속의 종류에 따라 상이한 개선 효과를 얻을 수 있음을 의미함.
- 단일 알칼리 금속 도핑은 소자 성능에 긍정적인 영향을 주지만 적정 농도 이상이 도핑될 경우에는 오히려 성능이 떨어지거나 박막 안정성이 감소하는 한계점이 있음. 이와 같은 단점을 극복하고 소자 성능을 더욱 개선하기 위해서는 다양한 알칼리 금속의 개선 효과를 동시에 확보해야 할 필요가 있음. 따라서, 2단계 연구 과제에서는 구체적인 개선 효과가 잘 파악된 Na와 Rb를 동시 도핑하여 광흡수층 품질과 소자 성능을 극대화하고자 하였음. 또한, 알칼리 금속 도핑에 대해 좀 더 깊이 이해하기 위해 단일 알칼리 금속 도핑된 광흡수층에 대해서도 추가적인 분석을 진행하였음.

나. 알칼리 금속 동시 도핑을 통한 광흡수층 특성 개선

- 알칼리 금속 동시 도핑을 위해 Na와 Rb 화합물이 목표 농도만큼 용해되어 있는 금속 전구체 용액을 제조하였으며, 이를 이용해 광흡수층 박막을 적층하였음. 동시 도핑 시 개별 알칼리 금속의 영향을 정확히 파악하기 위해 전체 알칼리 금속의 농도를 Cu 이온 농도의 4%로 고정한 후, Rb/(Rb+Na) 비율을 0에서 1까지 변화시키며 다양한 분석을 진행하였음.



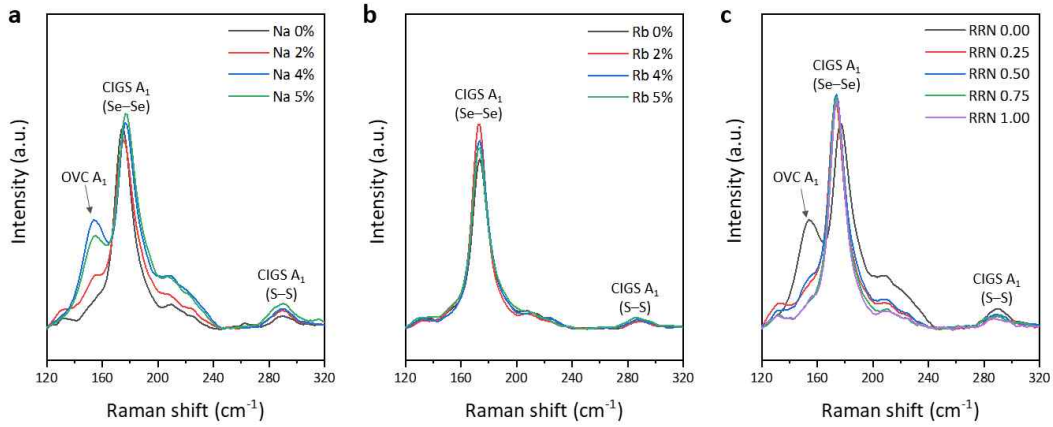


그림 77. 알칼리 금속 종류 및 도핑 농도에 따른 CIGS 광흡수층 표면 라만 스펙트럼. 동시 도핑 박막은 전체 알칼리 금속의 농도가 4%로 고정되어 있음. (a) Na 도핑, (b) Rb 도핑, (c) Na+Rb 동시 도핑

- [그림 1]에 나타난 바와 같이 단일 Na 도핑은 농도가 증가할수록 CIGS A<sub>1</sub> 피크가 소폭 오른쪽으로 이동하며, 이는 1단계 연구 결과에 서술된 바와 같이 광흡수층 박막 표면의 Cu/(Ga+In) 비율이 감소하고 S/(S+Se) 비율이 증가하기 때문으로 볼 수 있음. 다만, 이와 같은 조성의 변화는 그 정도가 미미하기 때문에 소자 성능에 큰 영향을 주는 요소는 아니라고 판단됨.
- Na 도핑 농도가 증가할수록 OVC A<sub>1</sub> 피크가 일관되게 증가하는 경향을 확인할 수 있으며, 이는 박막 표면의 Cu/(Ga+In) 비율이 감소하여 CuIn<sub>3</sub>Se<sub>5</sub>, CuIn<sub>5</sub>Se<sub>8</sub>과 같은 OVC (ordered vacancy compound) 상이 새롭게 형성되었기 때문임. 이러한 OVC 상은 광흡수층과는 다른 결정 구조 및 에너지 밴드를 가지고 있으며, p-n 접합에서의 재결합을 억제시켜주는 긍정적인 역할을 한다고 보고되어 있음. 따라서, Na 도핑은 새로운 상의 형성을 통해 소자의 전기적 특성을 강화해주는 역할을 수행한다고 볼 수 있음.
- 반면에 단일 Rb 도핑은 농도와 무관하게 도핑되지 않은 대조군 광흡수층과 매우 유사한 표면 라만 스펙트럼을 보였음. 이와 같은 결과는 도핑된 Rb 원자들이 표면 결정 구조를 변화시키거나 OVC와 같은 새로운 상의 형성을 유도하지 않는다는 것을 의미함.
- 알칼리 금속의 총량을 고정하고 Rb/(Rb+Na) 비율을 변화시킨 결과, 그 비율이 증가할수록 OVC A<sub>1</sub> 피크가 감소하는 경향을 확인할 수 있으며 이는 동시 도핑이 되더라도 OVC 상의 형성은 오직 도핑된 Na의 양에만 의존함을 의미함. 또한, Rb/(Rb+Na) 비율이 증가할수록 CIGS A<sub>1</sub> 피크가 왼쪽으로 이동하였으며, 이는 알칼리 금속이 도핑되지 않은 광흡수층과 유사한 조성으로 복귀함을 의미함. 따라서, Na와 Rb가 동시 도핑된 경우에는 광흡수층의 표면 결정 구조가 Na 도핑 농도에만 크게 영향을 받는다는 결론을 얻을 수 있음.
- 그림 78에 나타난 바와 같이 단일 Na 도핑의 경우에는 농도가 증가할수록 일관되게 광흡수층의 정공 농도가 증가하는 경향을 확인할 수 있음. 이는 도핑된 Na가 광흡수층 내 존재하는 다양한 점결함(point defect)들의 농도에 영향을 주기 때문임. 문헌상에 보고된 바에 따르면 Na는 다양한 기작을 통해 핵심 어셉터(acceptor)인 V<sub>Cu</sub>의 농도를 증가시키고, 도너(donor)인 In<sub>Cu</sub>, Ga<sub>Cu</sub>, V<sub>Se</sub>의 농도를 감소시킴. 본 연구에서 제조된 용액공정 기반 광흡수층도 유사한 기작을 통해 Na가 광흡수층의 정공 농도를 증가시켰을 것으로 예상됨.
- 반면에 단일 Rb 도핑의 경우에는 농도와 무관하게 광흡수층의 정공 농도가 거의 유사한 수준으로 유지되는 것을 알 수 있음. 이와 같은 상반된 결과는 Na와 Rb의 다양한 화학적 특성이 다르기



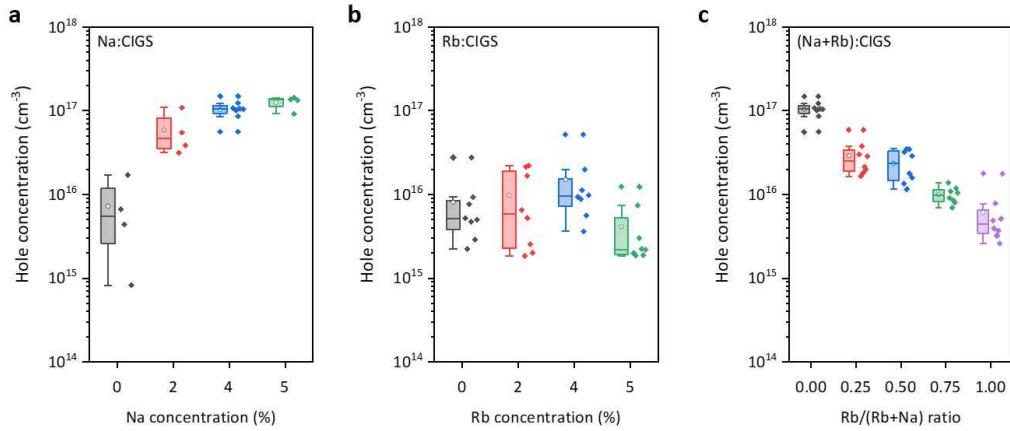


그림 78. 알칼리 금속 종류 및 도핑 농도에 따른 CIGS 광흡수층의 정공 농도. 동시 도핑 박막은 전체 알칼리 금속의 농도가 4%로 고정되어 있음. (a) Na 도핑, (b) Rb 도핑, (c) Na+Rb 동시 도핑

때문으로 볼 수 있음. 특히 Rb는 Na에 비해 훨씬 큰 이온 반지름을 가지고 있기 때문에 열역학적으로 Cu 원자를 치환하기 어려우며, 이는 곧 어셉터 형성하거나 도너를 제거하는 것이 매우 어려움을 의미함.

- 알칼리 금속이 동시 도핑된 광흡수층의 경우, Rb/(Rb+Na) 비율이 증가할수록 정공 농도가 감소하며 결국에는 알칼리 금속이 도핑되지 않은 박막의 정공 농도와 유사해짐을 알 수 있음. 이러한 결과는 동시 도핑된 광흡수층의 정공 농도는 도핑된 Na의 농도에만 의존함을 의미함.

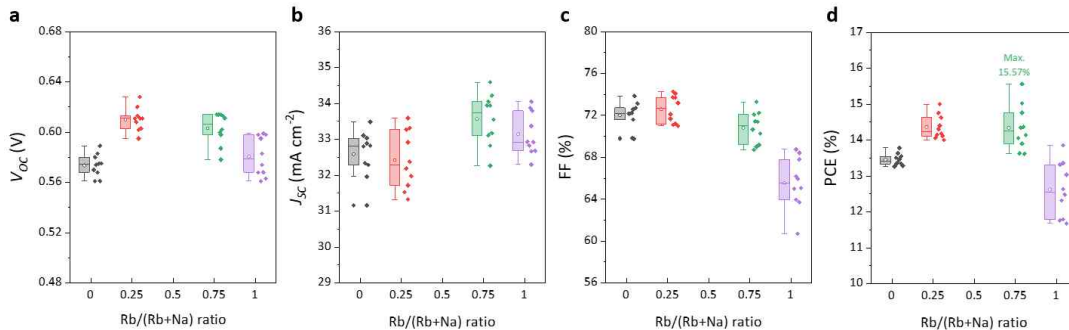


그림 79. Rb/(Rb+Na) 비율에 따른 용액공정 CIGS 박막 태양전지의 Light J-V 파라미터. (a) 개방회로전압(VOC), (b) 단락전류밀도(JSC), (c) 충전률(FF), (d) 광전환효율(PCE)

- 그림 79에 나타난 바와 같이 Rb/(Rb+Na) 비율에 따른 태양전지 성능을 분석한 결과, 동시 도핑된 소자가 단일 도핑된 소자들에 비해 더 우수한 파라미터를 가진다는 점을 확인하였음. 특히 동시 도핑된 소자(비율 0.25와 0.75)의 경우 평균적으로 약 40 mV 더 높은 개방회로전압( $V_{OC}$ )을 보였으며, 이는 Na에 의한 광흡수층 정공 농도 증가와 Rb에 의한 벌크 재결합 감소가 동시에 긍정적인 효과를 보였기 때문으로 예상됨. 모든 소자들의 전체 알칼리 금속 농도가 동일하다는 점을 고려해보면, 이와 같은 결과는 동시 도핑이 단일 도핑에서는 얻을 수 없던 시너지 효과를 발휘한다는 점을 알 수 있음.
- 1단계 연구 과제 수행 결과, Rb는 광흡수층 하단부의 Ga/(Ga+In) 및 S/(S+Se)를 낮추어 광학적 밴드갭을 감소시키고 광흡수도를 증가시키는 역할을 수행하였음. 따라서 단순히 광흡수도만 고려한다면 Rb/(Rb+Na) 비율이 증가할수록 단락전류밀도( $J_{SC}$ )가 증가하는 경향이 도출되어야 함. 하지만, 실제로 단락전류밀도는 광흡수에 의해 생성된 캐리어를 분리하는 능력에도 영향을 받기 때문에 Rb/(Rb+Na) 비율 0.75 소자가 비율 1.00 소자보다 더 높은 단락전류밀도를 보임을 확인하였음.

- Rb/(Rb+Na) 비율이 증가할수록 충전률(FF)이 일관되게 감소하는 경향을 확인하였으며, 이는 주로 높은 직렬저항에 기인한다는 점을 확인하였음 (Dark J-V 분석을 통한 다이오드 파라미터 분석 결과). 여타 분석 결과와 종합해보면 이러한 저항의 증가는 광흡수층과 Mo 후면 전극 간의 계면에서 큰 저항이 발생하였기 때문으로 예상되며, 특히 Rb이 포함된 이차상이 부정적인 영향을 주었을 것으로 판단됨.
- 동시 도핑된 소자들이 단일 도핑된 소자들에 비해 평균적으로 약 1~3% 높은 효율을 보임을 확인하였으며, 이는 알칼리 금속 동시 도핑이 단일 도핑보다 훨씬 우수하며 시너지 효과를 제공한다는 점을 재확인시켜줌. 특히 Rb/(Rb+Na) 비율 0.75 소자에서는 최대 15.57% 효율을 성공적으로 달성하였으며, 이는 문헌상에 보고된 용액공정 기반 CIS 박막 태양전지 중에서도 매우 높은 수준의 효율임.

## (9) 전이금속 Ti 도핑 용액공정기반 CIS 태양전지 기술 개발

### 가. 용액공정을 활용한 전이금속 Ti 도입 CIS 박막 제작

- 기존 문헌 보고에 따르면 CIS 성장 시 경알칼리 Na 도입을 통한 광흡수층의 전기적 특성 개선, CIS 성장 이후 경알칼리 Na, K 및 중알칼리 Cs, Rb 후처리(post deposition treatment, PDT)를 통한 CIS 광흡수층 표면 개선 등 CIS 박막 태양전지는 다양한 원소의 도입을 통해 고성능 태양전지를 성공적으로 구현해 왔음.
- 하지만, 보고된 CIS 도핑 원소는 알칼리 및 알칼리 토금속 등 일부 족에 한정된 원소를 채택하여 활용하고 있으며, 이에 따라 CIS 태양전지의 성능 발전이 매우 더딘 상황임.
- 본 연구실에서는 독창적인 벌크 도핑 기술을 통해 경알칼리 Na 및 중알칼리 Rb 원소를 CIS 광흡수층에 성공적으로 도입하였으며, 결과적으로 우수한 태양전지 성능을 확보하였음. 이를 통해 본 연구실에서 개발된 벌크 도핑 기술이 고성능 CIS 박막 태양전지에 매우 적합한 것을 증명하였음.
- 본 연구실만의 독창적인 벌크 도핑 기술을 활용하면 CIS 내 다양한 원소의 도입이 가능하며, 도입된 원소의 정확한 역할을 규명할 수 있음. 또한, 도핑 원소, 도핑 농도, 도핑 방식, 도핑 위치 등 다양한 변수 조절을 통해 원소별로 가장 최적화된 광흡수층 제작 및 태양전지의 구현을 기대해 볼 수 있음.
- 전이 금속은 알칼리, 알칼리 토금속과 달리 d 오비탈을 가지고 있으며, 전기 전도성이 좋고 다양한 산화수를 특징으로 함. 그 중 티타늄(Ti)는 중량 대비 강도가 매우 높고, 다양한 산화수(-2, -1, 0, +1, +2, +3, +4)를 가지는 것으로 알려져 있음. CIS 광흡수층 내에서 Ti의 다양한 산화수와 d 오비탈의 존재는 기존의 알칼리 및 알칼리 토금속 도핑에서 나타나지 않았던 새로운 기작을 기대해 볼 수 있음. 따라서, 전이금속 Ti를 전구체 용액을 활용하여 CIS 광흡수층 및 박막 태양전지를 제작하고 역할을 규명

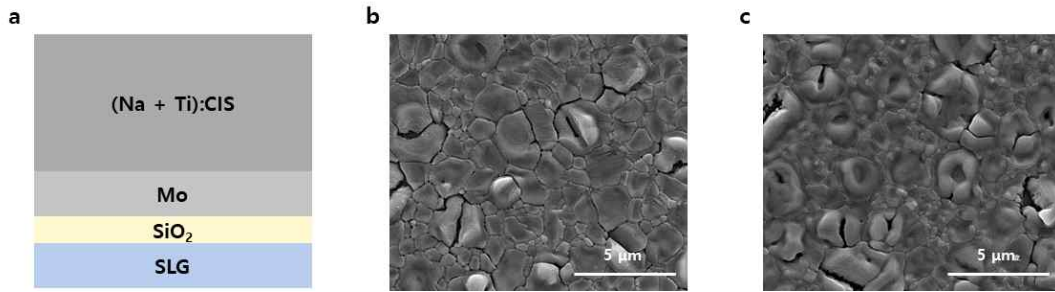


그림 80. (a) Ti 도입 CIS 박막 태양전지 모식도, (b) Ti 가 도입되지 않은 CIS 박막 표면 이미지 및 (c) Ti 도입 CIS 박막 표면 이미지

- SEM 이미지 분석을 통해 Ti 가 CIS 광흡수층에 도핑됨에 따른 표면 형상 분석을 진행하였음. Ti 가 도입된 CIS 박막의 표면에서는 결정립 계면의 거칠기가 다소 감소한 듯한 형상을 확인할 수 있었으며, 이 결과로부터 결정립 계면에서의 패시베이션 효과를 기대해 볼 수 있음. 또한, 전체적으로 결정립의 크기가 약간 증가하고, CIS가 치밀하게 성장하였음을 확인 하였음. 증가된 결정성과 치밀한 CIS 는 광흡수를 증가시키고 재결합을 감소시킬 수 있기 때문에 전이금속 Ti가 도입된 CIS 태양전지의 성능에서 고전류 및 고전압을 기대해 볼 수 있음.

#### 나. 용액공정을 활용한 전이금속 Ti 도입 CIS 태양전지의 전기적 및 광학적 특성 분석

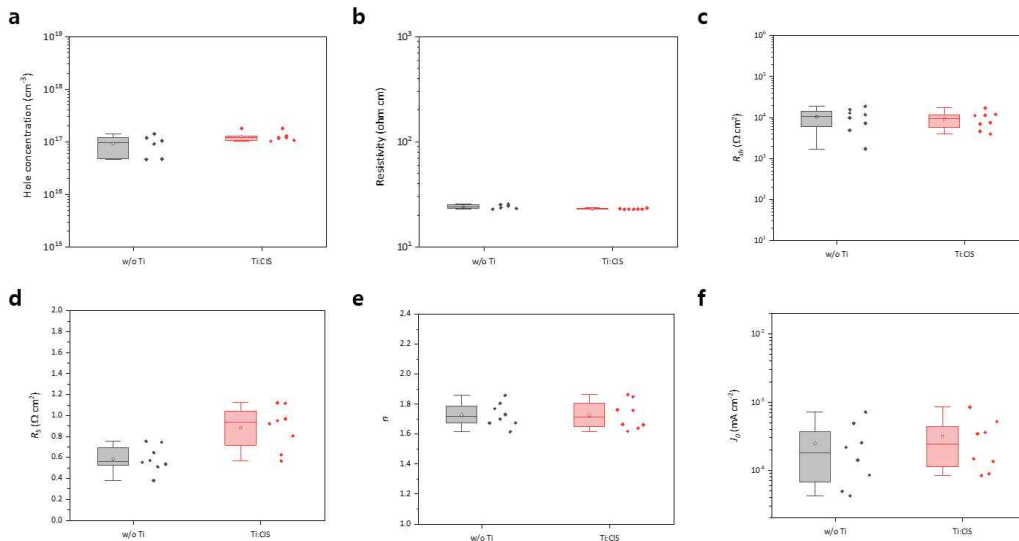


그림 81. Ti 도입에 따른 CIS 박막 및 소자 전기적 특성. (a) CIS 박막 홀 농도, (b) CIS 박막 저항, (c) 병렬저항, (d) 직렬저항, (e) 이상계수 및 (f) 포화전류

- Ti의 도입 유무에 따른 CIS 박막의 Hall measurement 분석을 통해 Ti가 CIS 박막 내에 존재할 경우 내부 홀 농도가 소량 증가함을 확인하였음. 이와 같은 홀 농도의 증가는 전이금속 Ti가 CIS 내부에서 억셉터로 거동하며 CIS의 p타입이 특성이 더욱 강화시켰음을 의미함. Ti 가 도입된 CIS 흡수층 내부의 홀농도 증가는 SCR 영역이 감소를 유발하며, 더 큰 내장 전위 (Built-in voltage)를 갖게 함. 때문에 Ti가 CIS에서 긍정적인 기작으로 거동할 것으로 예상할 수 있음.
- 또한, Hall measurement 측정 결과로부터 얻어진 박막의 저항에서 전이금속 Ti의 유무와 상관없이 비슷한 저항값을 가지는 것으로 보아 Ti가 박막의 전기적 특성에 부정적인 역할을 하지 않을 것

으로 판단할 수 있었음.

- CIS 박막 태양전지 소자에서도 병렬저항이나 이상계수, 포화전류에서도 Ti 도입에 따른 큰 차이를 확인할 수 없었음. 하지만, 직렬저항이 소폭 증가한 것으로 보아 계면에서의 저항이 증가되었음을 유추할 수 있었음. 직렬저항의 증가는 태양전지 소자에서 충전물의 저하를 유발하기 때문에, 추후 계면 분석을 통해 계면 저항을 낮출 수 있는 방법을 도입

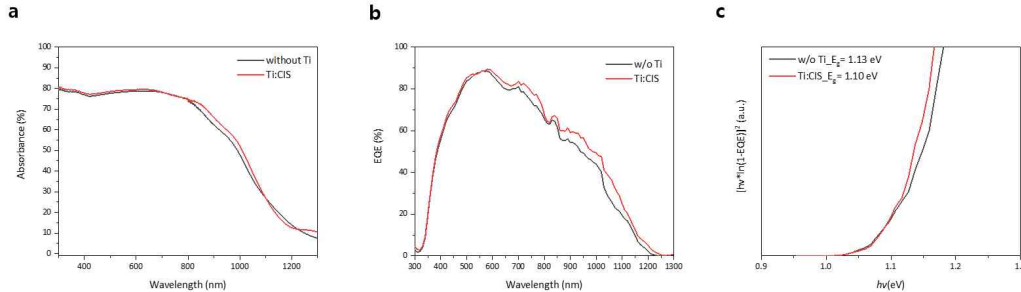


그림 82. 전이금속 Ti 도입에 따른 CIS 박막 및 소자 광학적 특성.

(a) CIS 박막 광흡수도, (b) 외부양자효율 및 (c) 외부양자효율 밴드갭 분석

- Ti의 도입 유무에 따른 CIS 박막의 UV-vis 측정을 통해 광흡수도를 확인하였음. Ti가 CIS 박막 내에 존재할 경우 약 800 nm부터 1200 nm 까지 장파장 영역에서의 광흡수도가 증가함을 확인하였음. 장파장 영역에서의 광흡수도 증가는 CIS 박막의 밴드갭이 감소하였음을 의미하며, CIS 박막의 밴드갭 그레이딩을 고려하였을 때 해당 파장이 위치하는 영역이 광흡수층 표면의 200 nm 부근임을 예상할 수 있음. SCR 영역과 노치가 존재하는 광흡수층 상단부에서 밴드갭의 저하는 광생성 캐리어의 증가와 더불어 효과적인 캐리어 수집이 가능함. 때문에 Ti 도입된 CIS 소자와 도입되지 않은 CIS 소자의 재결합 손실이 동일하다면 Ti가 도입된 CIS 박막 태양전지 소자에서 더 큰 단락 전류를 가짐.
- Ti가 도입된 CIS 박막의 UV-vis 측정 결과와 마찬가지로 태양전지 소자에서도 800 nm이상 파장대에서 증가된 외부양자효율(External Quantum Efficiency, EQE)을 확인할 수 있었으며, 외부양자효율 그래프를 통해 추산된 밴드갭에서 Ti가 도입된 CIS 박막 태양전지에서 밴드갭의 소폭 감소가 확인되었음. 이는 UV-vis 측정을 통한 흡수도 분석에서 얻은 결과와 일치함.
- 결과적으로, CIS 박막 내부에 도입된 전이금속 Ti는 광흡수층의 밴드갭을 소량 감소시키는 역할을 하며, 감소된 밴드갭이 단락 전류의 증가시키는 것임을 증명하였음.
- 또한, 밴드갭과 관련한 장파장 영역뿐 아니라 전 영역에 걸친 외부양자효율의 증가는 제작된 Ti 도입 CIS 광흡수층과 버퍼층의 p-n 접합에서의 품질이 향상됨을 의미함. 이는 계면 재결합 감소로 이어질 수 있음. 이러한 점들을 미루어볼 때 Ti 도입이 태양전지 성능에 상당히 긍정적인 역할을 할 것으로 기대됨.

#### 다. 용액공정을 활용한 전이금속 Ti 도핑 CIS 태양전지 성능 평가

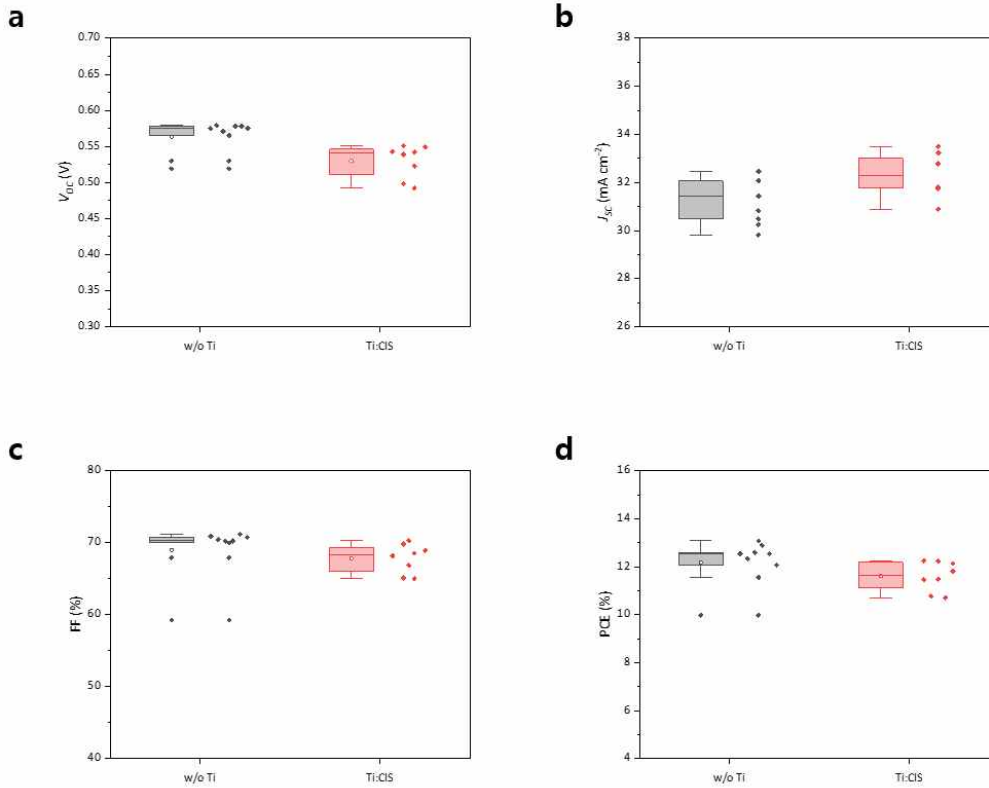


그림 83. 전이금속 Ti 도입에 따른 CIS 박막 태양전지 성능 평가.  
 (a) 개방회로전압, (b) 단락전류밀도, (c) 충전률 및 (d) 동력변환효율

- Ti 도입에 따른 CIS 박막 태양전지의 성능 평가 결과 단락전류밀도( $J_{sc}$ )의 증가를 확인 하였음. 이는 앞서 언급한 밴드갭의 감소로 인해 장파장 영역에서 광생성캐리어가 증가하였기 때문임. 밴드갭의 감소로 인해 단락전류밀도가 증가한 반면, 소폭의 개방회로전압( $V_{oc}$ ) 감소를 확인할 수 있음. 이는 이론상 최대 개방회로전압이 밴드갭에 비례하기 때문임. 또한 Ti 도입에 따른 직렬저항의 증가로 인해 충전률(FF)의 저하를 확인할 수 있었음. 외부양자효율의 결과에 따라 p-n 접합의 품질이 강화됨을 고려하였을 때, 후면 계면에서의 저항이 증가하였음을 유추해 볼 수 있음. 결과적으로 Ti 도입 시 개방회로전압과 충전률의 저하로 CIS 태양전지의 성능이 감소하였음.
- 이러한 성능 저하를 해결하기 위해서는 CIS 광흡수층 전반에 걸친 Ti 도입이 아니라 Ti 원소의 도입 위치 조절이 필요함. CIS 광흡수층 내부의 Ti의 위치를 조절함에 따라 내부 밴드갭 미세 조정 및 후면계면에서의 저항 감소가 가능할 것으로 예상되며, 이 경우 단락전류밀도와 개방회로, 충전률을 모두 증가시킬 수 있을 것으로 판단됨.



(10) Bifacial 구조 박막 태양전지 기술 개발

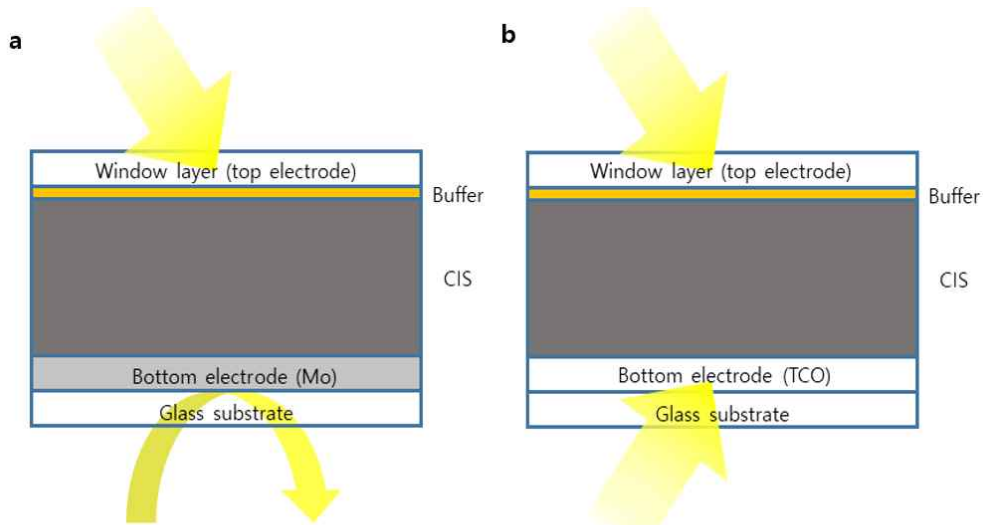


그림 84. 후면 전극 기판에 따른 CIS 박막 태양전지 구조.  
(a) 기본 CIS 태양전지, (b) Bifacial CIS 태양전지

- Bifacial 구조의 태양전지는 태양광의 입사가 전면만 통해서 입사되는 것이 아니라 후면까지 동시에 입사되는 구조의 태양전지로 일반적인 구조의 태양전지에 비해 동일한 조건에서 더 많은 전력을 생성할 수 있음. 전면과 후면 모두 태양전지로 활용하기 위해서는 기존의 불투명한 후면 전극이 빛을 흡수 할 수 있도록 투과도가 확보되는 형태로 대체해 주어야 함. 이에 따라 보편적으로 많이 사용되는 ITO 기판을 후면 전극으로 사용하여 CIS 박막 태양전지 제작을 시도 하였음.

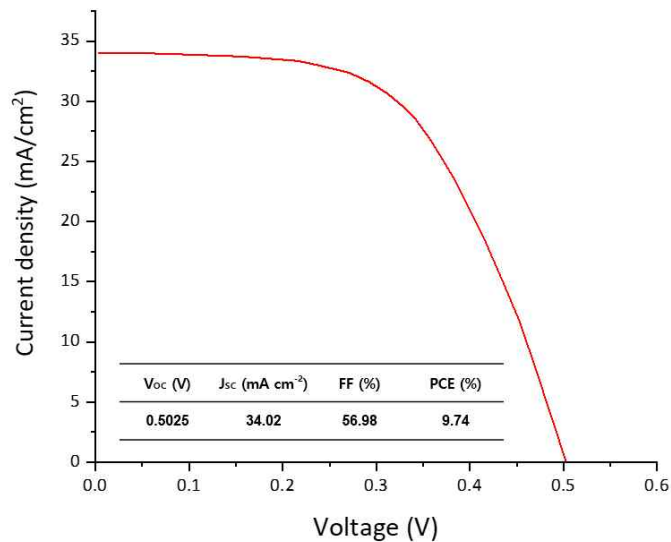


그림 85. ITO 후면 전극을 활용한 Bifacial CIS 박막 태양전지의 Light J-V 곡선

- ITO 100nm 기판을 후면 전극으로 활용하여 Bifacial CIS 태양전지 제작 및 성능 평가를 진행하였으며, 약 10%의 동력 변환 효율(PCE)을 달성하였음. Mo 후면전극을 사용하였을 때보다 최대 약 15% 낮은 충전율(FF)을 확인하였으며, 이는 CIS 광흡수층과 ITO 간의 계면에서 큰 쇼트키 배리어 (Schottky barrier)가 형성되어 정공이 원활하게 수집되지 못했기 때문으로 예상됨. 또한 금속산화물에 직접 CIS 상을 형성할 경우 후면전극 계면에 n-타입 갈륨 산화물이 생성된다고 알려져 있음. 큰 쇼트키 배리어와 갈륨 산화물은 큰 직렬 저항을 유발하며, 본 결과에서도 동일하게 CIS 박막 태양전지 내부에 큰

직렬 저항이 형성되었음을 알 수 있음. 이에 추후 후면 전극의 직렬 저항을 감소시킬수 있는 기술 적용하여 고발전의 양면수광형 CIS 박막 태양전지를 개발

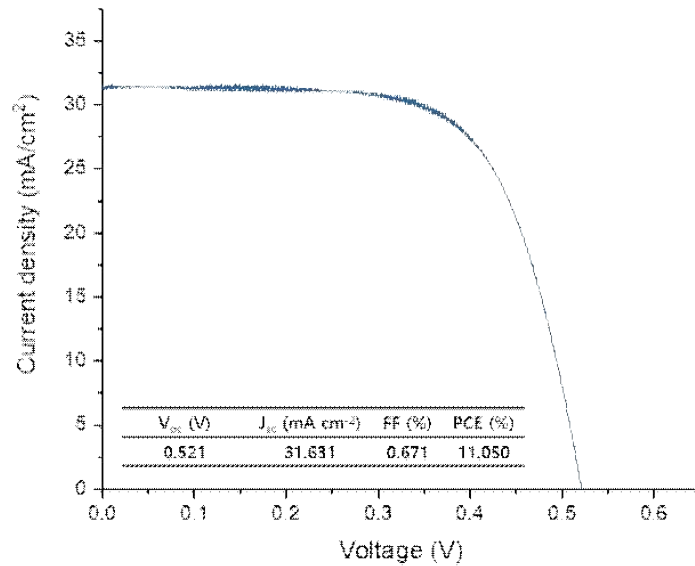


그림 86. ITO 후면 전극 개선을 통한 Bifacial CIS 박막 태양전지의 Light J-V 곡선

- ITO 후면전극의 직렬 저항을 줄이기 위하여, 두께를 2배로 늘려 면저항을 절반 이하로 줄인 ( $<9 \Omega/\square$ ) 200nm ITO 기판을 사용하여 Bifacial CIS 태양전지 제작 및 성능을 비교하였음. Mo 후면전극에 비하여 낮은 충전률(FF)이 일부 회복되었음을 확인할 수 있었고, ITO 후면전극의 면저항의 개선만으로도 Mo 후면전극에 근접한 효율(PCE)을 달성할 수 있었음.

### (11) 대면적 코팅을 위한 바코팅 공정용 전구체 용액 개발

#### 가. 대면적 코팅을 위한 새로운 용액 공정 도입

- 상업화를 위해서는 제조원가를 낮추는 것이 매우 중요하기 때문에 대면적 인쇄공정이 필수적임. 이에 따라 스핀코팅, 스프레이코팅, 딥코팅 등 다양한 용액 공정을 통해 CIS 태양전지가 제작되었음. 하지만, 스핀 코팅의 경우 대면적 기판이나 유연성 기판에 사용이 불가능하고, 딥 코팅의 경우 균일한 필름 형성을 위해 공정을 아주 천천히 진행해야 하기 때문에 대면적화에 적합하지 않음. 또한 스프레이 코팅법의 경우 입자크기의 불균일한 분포도로 인해서 높은 성능을 기대하기 어려움. 따라서 대면적 인쇄 공정이 가능한 새로운 CIS 제작 공정의 방법 도입이 필요한 실정임.
- 바코팅의 경우 스핀코팅, 스프레이코팅, 딥코팅에 비해 용액의 소비량이 현저히 적으며, 대면적 코팅을 위한 롤투롤 공정에도 직접 활용이 가능함. 또한 용액 공정기반의 다른 태양전지인 유기태양전지, 페로브스카이트 태양전지를 제작에도 많이 활용되고 있으며, 높은 균일도 및 성능을 가진 태양전지의 제작 가능성을 증명함. 이에따라 바코팅 공정 도입을 통해 용액공정기반의 대면적 CIS 태양 전지 제작이 가능할 것으로 보여짐.

#### 나. 바코팅 공정용 CIS 전구체 용액 개발

- 바코팅은 과량의 용액을 기판위에 도포한 후 일정 속도로 바를 이동시켜 바와 기판 사이에 형성된

메니스커스를 이용하여 균일한 박막을 얻는 코팅 기술임. 바가 일정한 속도로 이동함에 따라 용액과 기판 사이에 표면 장력이 발생하기 때문에 마랑고니 효과와 커피링 효과와 같은 부가적인 반응이 함께 발생할 수 있음. 부가적인 반응들은 불균일한 박막의 형성을 초래함. 따라서 균일한 박막을 형성하기 위해서는 블레이드의 이동속도와 메니스커스 면에서 일어나는 용매의 증발 속도를 제어하는 것이 매우 중요한 요소임. 때문에 균일한 박막을 형성하기 위해서는 전구체 용액의 점도와 휘발성이 가장 먼저 고려되어야 함.

- 기존 스프인코팅 공정에 활용되었던 전구체 용액은 메탄올을 용매로 제작되기 때문에 점도가 매우 낮고 휘발성이 높아 바코팅 공정에서 용액의 제어가 어려우며, 결과적으로 얇고 분균일박 박막이 형성됨. 이에 따라 균일도 및 박막의 두께 확보를 위해 새로운 높은 점도와 낮은 휘발성을 가진 새로운 용매 기반의 바코팅 공정용 CIS 전구체 용액의 개발이 필요함.

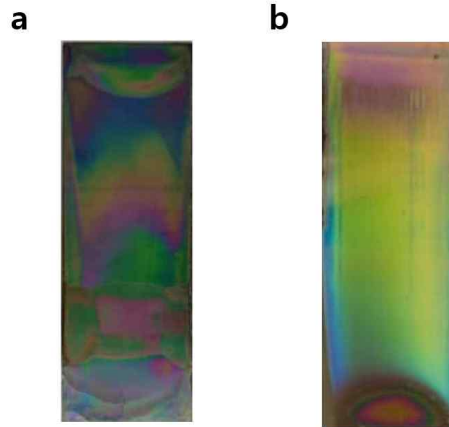


그림 87. 전구체 용매에 따른 산화막 이미지. (a) 메탄올, (b) 2-메톡시에탄올

- 전구체 금속인 Cu, In, Ga 과 바인더 물질인 폴리비닐아세테이트(PVA)가 모두 녹을 수 있는 용매를 일차적으로 선별하였으며, 그 중 기존 용매인 메탄올 대비 점도와 끓는점 모두 높은 2-메톡시에탄올이 최종 선정되었음. 기존의 메탄올과 2-메톡시에탄올을 용매로 활용하여 산화막을 형성시켰으며, 2-메톡시에탄올을 용매로 사용한 산화막이 더 균일하고 제어된 듯한 이미지를 보여주었음. 이는 메탄올 용매 대비 높은 점도로 인해 바와 기판 사이에서 안정적인 메니스커스가 형성되었기 때문이며, 상대적으로 균일한 박막의 색은 용매의 휘발성 감소로 인해 용액 내부의 원소들이 균일하게 배열될 수 있도록 충분한 시간이 주어지기 때문임.

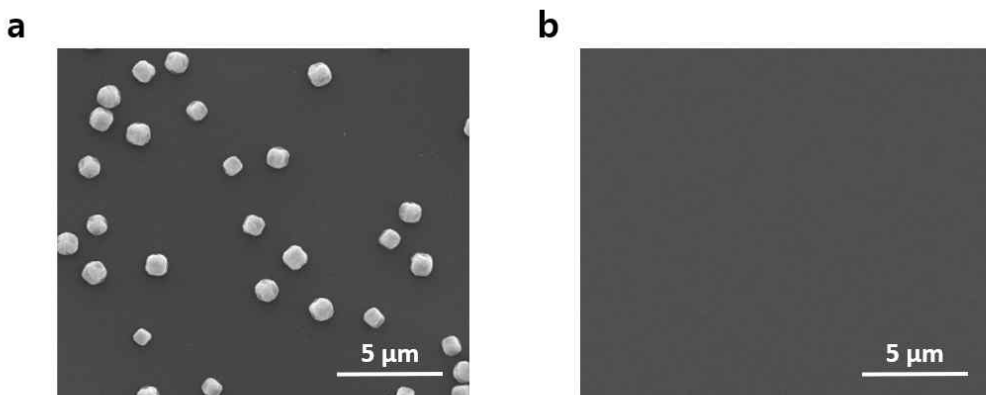


그림 88. 전구체 용매에 따른 산화막 SEM 이미지. (a) 메탄올, (b) 2-메톡시에탄올

- 용매에 따른 산화막 SEM 이미지에서 메탄올 기반의 용매의 경우 산화막 제작 후에 작은 입자가 확인되었음. CIS 산화막 표면에 형성된 입자는 구리 산화물로 칼코겐화 공정 진행시 완전히 CIS 상으로 바뀌지 않으며, 불순물로 작용하기 때문에 필수적으로 형성을 억제하여야 함. 반면 2-메톡시에탄올을 용매로 사용한 산화막에서는 매우 균일한 박막이 형성되었음. 이는 2-메톡시에탄올의 낮은 휘발성 및 높은 끓는점으로 인해 용매에 용해되어 있는 금속 전구체, 특히 반응성이 높은 구리 이온의 노출을 현저히 줄여주었기 때문임. 결과적으로 2-메톡시에탄올을 바코팅 공정용 용매로 사용하여 효과적인 용액의 제어가 가능해 졌으며 균일한 CIS 산화막을 얻을 수 있었음.

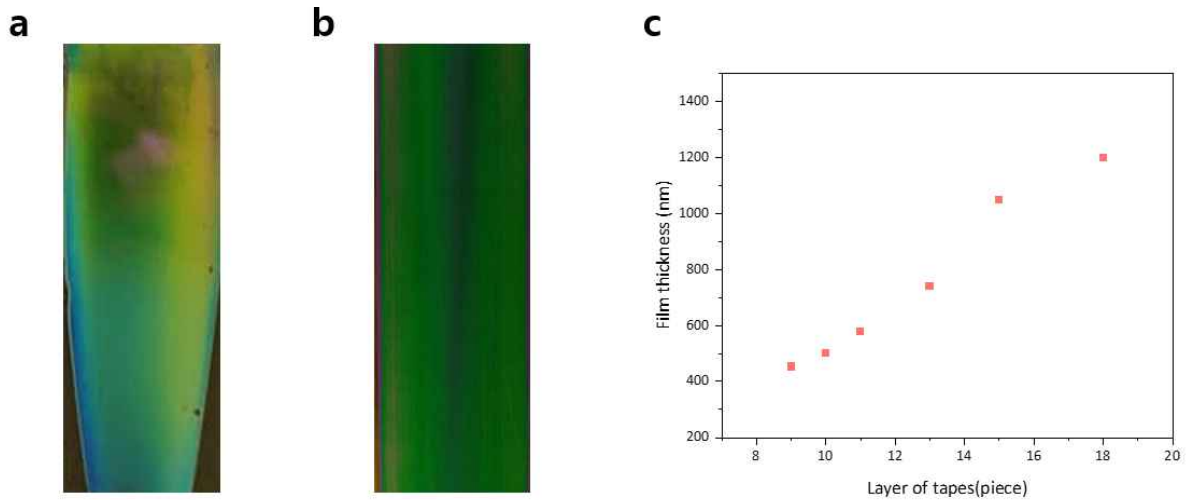


그림 89. 전구체 용액의 바인더 함량 증가에 따른 산화막 이미지 (a) 기존 용액, (b) 고농도 용액 및 (c) 바와 기판 사이의 간격에 따른 전구체 박막의 두께

- 기존의 용액(2-메톡시에탄올로 용매를 변경한 전구체 용액)으로 산화막을 제작한 경우 형성된 산화막 위로 아래층의 폴리브데늄 기판이 보이며 옅은 색의 산화막이 형성된 것을 알 수 있음. 이는 형성된 박막이 매우 얇은 것을 의미함. CIS 박막을 태양전지로 구동시키기 위한 최적의 두께는 1~2 마이크로 정도로 얇은 CIS 산화막 두께는 최적 두께에 도달하기 위해 반복적인 공정의 수행이 필요함. 공정의 반복을 수행함에 따라 열적 스트레스 및 추가 시간이 필요하기 때문에 공정의 반복 횟수의 증가는 상업화 측면에서 매우 불리함. 따라서 공정의 간소화 및 스트레스 완화를 위해 공정 1회 수행당 더 두꺼운 산화막을 확보할 필요가 있음.
- 바의 이동 속도, 바와 기판 사이의 간격, 사용하는 바의 틈새 규격, 코팅 용액의 점도는 바코팅 공정에서 박막의 두께를 변화시킬 수 있는 요소임. 우선적으로 코팅 용액의 점도 증가를 통해 박막의 두께 증가를 시도함. 전구체 용액에서 전구체 금속(Cu, In, Ga)의 농도를 모두 두배씩 증가하여 고농도 전구체 용액을 제작하였음. 고농도 전구체 용액을 사용하여 제작한 산화막이 기존 대비로 더 균일하고 짙은 색을 나타내는 것을 확인하였음. 바코팅 공정을 통해 일차적으로 형성되는 젖은 박막(용질 및 용매)의 내부에 용질의 함량이 기존 용액 사용대비 2배 증가하였기 때문임. 이후 열처리 공정을 통해 증발하는 용매는 동일하기 때문에 고농도 일수록 박막이 두껍게 형성됨. 이후 바와 기판 사이를 조절 및 최적화 과정을 통해 1회 코팅당 최대 1.2 마이크로미터의 산화막을 확보하였음.

## (12) 바코팅 공정을 통한 대면적 균일 코팅 기술 확보

가. 바코팅 공정을 통한 대면적 산화막 구현

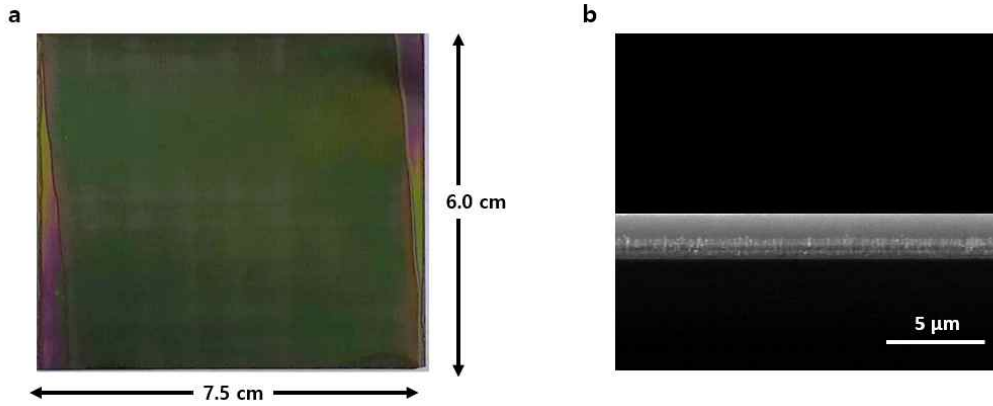


그림 90. 바코팅 공정을 통해 제작된 CIS 산화막. (a) 산화막 이미지, (b) 산화막 단면 SEM 이미지

- 바코팅 공정을 통해 대면적 CIS 산화막 제작을 구현하였으며, 약 1 마이크로미터의 박막을 제작할 때 총 2번의 코팅을 진행하였음. 바코팅 시 바가 이동함에 따라 바와 기판 사이의 코팅 용액이 소량 감소하기 때문에 박막의 하단부와 상단부의 두께 차이가 발생할 수 있음(약 30nm). 때문에 이를 보완하기 위해 상단부에서 하단부 방향으로, 하단부에서 상단부 방향으로 코팅 방향을 바꾸어 두 번의 코팅을 진행하였음. 제작된 박막은 가로 7.5 cm 와 세로 6.0 cm의 크기로 제작되었으며, 박막의 단면을 SEM 분석을 통해 전체적으로 균일한 두께의 박막이 형성되었음을 확인하였음. 이는 기존 CIS 태양전지 공정에 활용하였던 스핀 코팅 대비 6배 큰 사이즈임.
- 기존 연구실 규모의 소형 열처리 장비를 활용하여 제작된 박막이기 때문에 대면적 산화막 구현에 있어 박막의 크기 제한이 존재하였지만, 대형 열처리 장비를 활용하면 더 큰 규모의 산화막을 제작할 수 있음.

#### 나. 바코팅 공정용 CIS 박막 제작

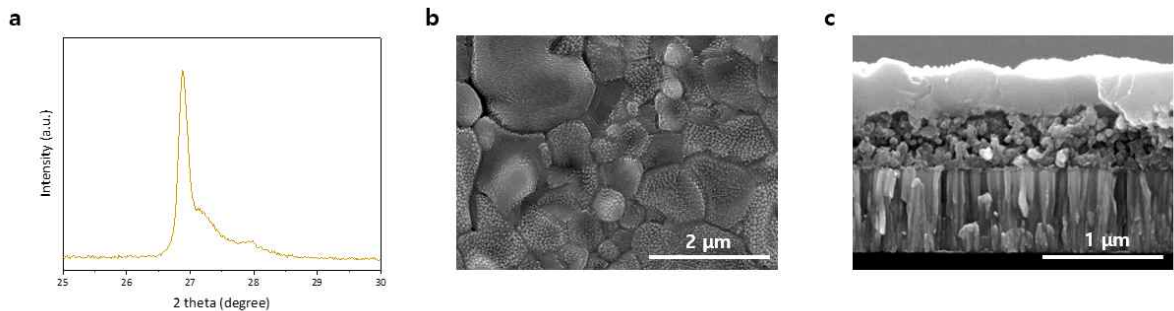


그림 91. 바코팅 공정을 통해 제작된 CIS 박막 특성 분석  
(a) 결정성 분석, (b) 표면 형상 분석 및 (c) 단면 형상 분석

- 바코팅 공정을 통해 제작된 CIS 산화막을 칼코화 공정을 통해 CIS 박막으로 제조하였음. 제조된 박막의 특성을 확인하기 위해 XRD 결정성 분석을 진행하였으며, 얻어진 스펙트럼을 통해 CIS (112) 상이 잘 형성되었음을 확인하였음. 또한 SEM 장비를 활용한 표면 및 단면 형상 분석을 통해 기존 스핀 코팅에서 제작된 CIS 와 유사한 박막이 형성 됨을 확인하였음. 이의 결과를 기반으로 바코팅 공정을 통해 제작된 CIS 박막 태양전지의 구동을 기대해 볼 수 있음.



다. 바코팅 공정용 CIS 태양전지 단위셀 구현

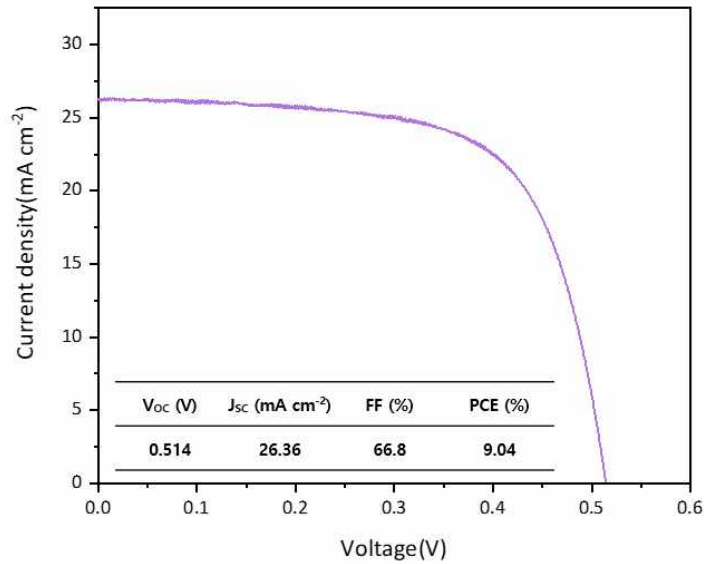


그림 92. 바코팅 공정을 통해 제작 된 CIS 박막 태양전지의 Light  $J-V$  곡선

- 바코팅 공정 기반의 CIS 박막 태양전지를 제작하여 성능 평가를 진행하였으며, 약 9%의 동력 변환 효율(PCE)을 달성하였음. 기존 스핀 코팅 대비 다소 효율이 낮은 편이지만 이는 CIS 박막 태양전지에서 효율과 직결되는 요소인  $[Cu]/([Ga]+[In])$  및  $[Ga]/([Ga]+[In])$  조성의 최적화가 진행되지 않았기 때문임. 또한 낮은 단락전류밀도( $J_{sc}$ )의 값은 태양전지 단위 셀 제작시 산화막 제작시 사용한 폴리브데늄 보다 두께가 약 400nm 증가된 기판을 사용함으로써 인해 바와 기판 사이의 간격이 감소하여 보다 얇은 광 흡수층이 제작되어졌기 때문임. 이후 광 흡수층의 두께 증가 및 조성의 최적화를 통해 보다 향상된 CIS 박막 태양전지의 성능을 기대해 볼 수 있음.
- 스핀 코팅 공정에서는 반복된 열처리 공정으로 인해 박막에 많은 스트레스가 형성되어 산화막의 두께를 제작하는 것이 어려웠음. 반면 바코팅 공정의 경우 1회 코팅 당 형성되는 산화막의 두께가 스핀 코팅 공정 대비 훨씬 두껍고 전구체 용액의 특성을 변경시키지 않으면서 산화막의 두께를 증가시킬 수 있는 다양한 공정 요인(바의 이동 속도, 바와 기판 사이의 간격, 사용하는 바의 틈새 규격)들이 존재하며, 열처리 공정 횟수가 1/3로 감소하여 박막에 형성되는 스트레스가 현저히 감소함. 때문에 스핀 코팅 대비 더 적은 열처리 공정 횟수로 훨씬 두꺼운 산화막 제작이 가능하며 증가된 CIS 광 흡수층은 보다 많은 빛을 흡수하여 많은 광 생성 캐리어를 형성시켜 보다 높은 효율을 가진 용액 공정 기반의 CIS 태양전지의 제작을 기대해 볼 수 있음. 또한, 바코팅 공정을 활용하여 태양전지 제작시 스핀 코팅 공정 대비 용액의 소모량을 약 1/88로 줄일 수 있음. 결과적으로 바코팅 공정을 활용하여 대면적 CIS 박막 제작시 경제적, 시간적 소모를 현저히 줄일 수 있고, 높은 효율을 기대할 수 있기 때문에 상업화에 매우 적합하다 보여짐.

### (13) 용액공정기반 대면적 CIS 태양전지 모듈 구현

가. 바코딩 공정을 통한 30X5 cm<sup>2</sup> 대면적 CIS 모듈 디자인

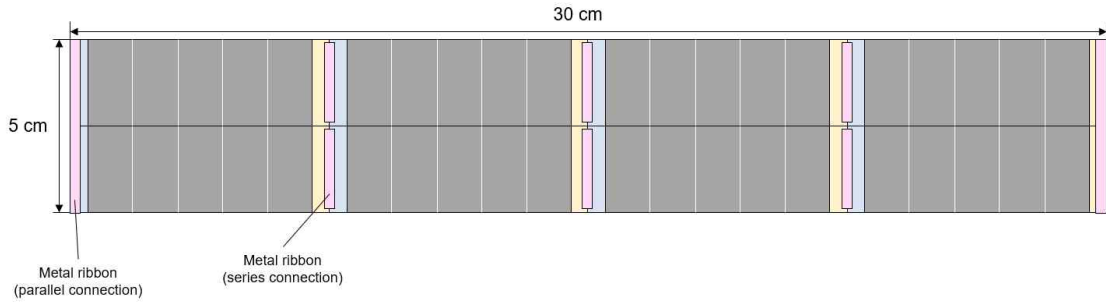


그림 93. 바코딩 공정 기반의 30X5 cm<sup>2</sup> 대면적 CIS 모듈 디자인

- 연구실 규모에서 바코딩을 활용하여 용액 공정 기반 대면적 CIS 모듈을 제작해봄으로써 대형 모듈의 제작 가능성을 평가해 보려함. 기존의 체결형 태양광 모듈과의 호환을 위해 최종적으로 제작되어야 할 모듈의 크기가 가로 30cm, 세로 5cm로 고정되어있음. 하지만, 연구실 규모에서는 대면적의 소자 제작을 위한 장비들이 구비되어있지 않기 때문에 제작할 수 있는 소자의 크기 제한적임. 따라서 하나의 모듈로 구성된 형태가 아닌 단위 모듈의 연결을 통해 용액 공정 기반 대면적 CIS 모듈을 제작하려함. 단위 모듈 연결을 통한 대면적 모듈의 구현은 현재 제한된 장비에 기인한 결과임. 때문에 대면적용 장비만 있다면 하나의 큰 모듈로 제작 가능할 것으로 판단됨.
- 기존 체결형 모듈의 크기(가로 30cm, 세로 5cm)를 고려하여, 바코딩 기반의 CIS 단위 모듈을 가로 7.5cm, 세로 2.5cm 의 크기로 제작한 후 8개의 단위 모듈을 잇는 형태로 최종 모듈의 구조를 설계하였음. 가로 방향으로 4개의 단위 모듈을 직렬로 연결하여 30cm×2.5cm 크기로 우선적으로 제작한 후, 같은 크기로 두세트 제작하여 양끝을 병렬 연결시켜 최종 30cm×5cm 크기의 최종 모듈을 구현.

나. 바코딩 공정을 통한 30X5 cm<sup>2</sup> 대면적 CIS 모듈 구현

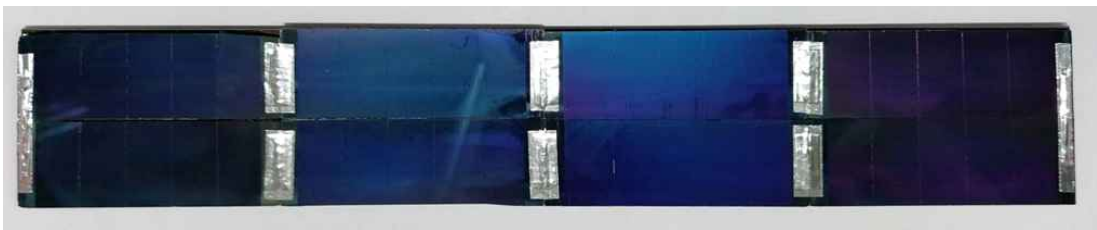


그림 94. 바코딩 공정을 통해 구현된 용액 공정 기반 30X5 cm<sup>2</sup> 대면적 CIS 모듈 이미지

- 용액 공정 기반 대면적 CIS 모듈의 구현을 통해 대형 모듈 제작 가능성이 충분하다고 판단됨. 다만, CIS 전구체 산화막의 구현 외에 칼코겐화, 버퍼층, 윈도우 층 도입 공정 또한 대면적을 위해 공정 최적화가 필요함. 특히 칼코겐화 공정의 경우 셀레늄을 공급하기 위해 캐리어 가스를 활용하기 때문에 공정 면적이 증가할수록 제작된 광 흡수층의 균일도가 감소함. 모듈은 단위셀을 직렬로 연결한 형태이기 때문에 모듈에서의 단락전류밀도( $J_{sc}$ )는 단위셀 중 가장 작은 값의  $J_{sc}$ 를 따름. 따라서 불균일한 CIS 광흡수의 형성은 다양한 값의  $J_{sc}$ 를 가진 단위셀 제작을 이끌어 태양전지 모듈 발전량의 감소를 초래함. 때문에 용액 공정 기반 CIS 모듈의 성공적인 대면적화를 위해서 대면적용 칼코겐화 공정 기술 개발과 균일도를 확보하는 것이 매우 중요함.

다. 바코팅 공정을 통한 30×1.0 cm<sup>2</sup>대면적 CIS 모듈 디자인

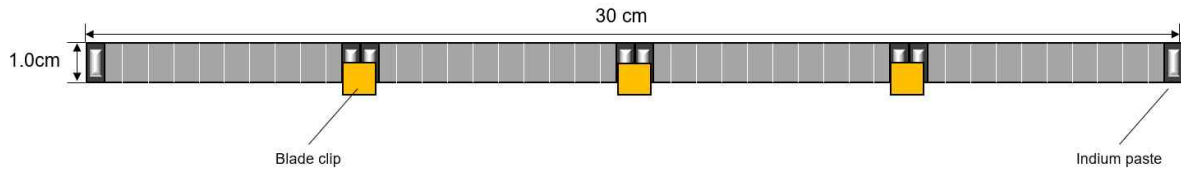


그림 95. 바코팅 공정을 통한 30×1.0 cm<sup>2</sup> 대면적 CIS 모듈 모식도

- 사업단으로부터 기존에 설계한 모듈의 두께(세로 5cm)가 실제 스마트팜 온실의 유리 및 천장 구조체를 대체하기에 적합하지 않다는 의견을 수렴해 두께가 얇은 대면적 모듈을 새로 설계하였음. 새롭게 설계된 용액 공정 기반 대면적 CIS 모듈은 세로 두께는 기존대비 약 1/5 수준으로 감소된 1.0cm 임. 가로 30cm 크기의 모듈을 제작하기 위해 이전의 30cm×5cm 크기를 가진 모듈 제작 때와 동일하게 가로 7.5cm, 세로 1.0cm 의 단위 모듈을 4개 잇는 방식을 채택하였으며, 직렬 연결을 통해 하나의 모듈 형태로 구현함.
- 단위 모듈 간의 전기적 연결과 더불어 물리적 연결을 위해 상용 날클립을 활용함. 날클립의 경우 형태가 특정 부분만 맞물리는 구조이기 때문에 틈이 있는 부분에서는 CIS 모듈이 손상 없이 안정적으로 배치되고, 맞물리는 부분에서는 알루미늄 구성 기반의 높은 전도도를 통해 단단한 접착을 형성할 수 있음. 단위 모듈의 연결은 두 단계에 걸쳐 구현됨. 인듐 페이스트를 사용하여 단위 셀 안에서 양 극을 형성시킨 후 형성된 전극을 다시 날클립을 활용해 직렬로 연결하여 구현함.

라. 바코팅 공정을 통한 30×1.0 cm<sup>2</sup>대면적 CIS 모듈 구현



그림 96. 단위 모듈 개수에 따른 저항. (a) 1개, (b) 2개 및 (c) 4개

표 4. 단위 모듈 개수에 따른 저항

모듈 개수(개)	1	2	4
저항 (Ω)	5.2	10.6	20.4

- 날클립이 단위 모듈 간의 전기적 연결에 적합한 전기적인 특성을 가지는지 평가하기 위해 단위 모듈 개수에 따른 저항을 측정하였음. 날클립이 없이 인듐으로만 전극이 형성된 단위 모듈의 저항은 약 5.2Ω 임이 확인되었고, 이후 연결된 모듈의 개수가 증가함에 따라 저항도 연결된 모듈 개수와 같은 배수로 증가되는 것을 확인함. 이는 단위 모듈을 연결하는 날클립에서 저항 손실이 거의 없이 전기적

접촉이 형성되었음을 의미함. 이를 기반으로 단위셀 간의 단단한 물리적 연결 및 전기적 연결을 위해 날클립의 특성이 매우 적합하다 평가됨.

- 바코팅 공정은 코팅 면적의 변화에 따라 쉽게 대응할 수 있기 때문에 감소된 크기의 모듈을 제작하기 유리함. 모듈 제작 방법으로는 감소된 모듈 크기에 맞추어 기판을 제단한 후 CIS 전구체 산화막을 제작하는 방법과 대면적의 산화막을 구현한 후 원하는 크기에 맞추어 제단하는 방법이 있음. 공정의 간소화를 위해 산화막 구현 후 제단하는 후자의 방법을 통해 모듈을 제작하였음. 제작된 전구체 산화막을 기반으로 CIS 모듈의 제작 및 연결까지 모두 진행하였음. 모듈의 세로 두께가 감소함에 따라 모듈의 높은 균일도를 확보하였음. 또한 상면 이미지를 통해 모듈에 의한 그림자 영역이 최소화 됨을 확인하였음. 이는 용액 공정 기반의 30X1.0 cm<sup>2</sup> 대면적 CIS 모듈을 스마트팜 온실에 적용시 식물이 사용할 수 있는 빛의 양을 최대화 할 수 있음을 의미함. 이러한 특성을 기반으로 추후 용액 공정 기반의 대면적 CIS 모듈이 스마트팜용 태양전지 모듈로 많이 활용될 수 있을 것으로 보여짐.

#### (14) 수분방지막 개발을 통한 용액공정 태양전지 재현성 개선

가. 수분에 저항성 있는 새로운 기술 확보 필요성

- 용액 공정은 외부 환경과 완전히 단절된 상태가 아니기 때문에 공정 도중 외부 환경과 상호 작용이 발생할 수 있음. 특히 대기 중의 수분은 제어하는 것이 매우 어려울 뿐 아니라 반응 경로의 직접 기여를 통해 형태 및 결정 구조를 변화시켜 태양전지 소자의 성능 및 재현성을 급격히 감소시킴. 현재까지 개발된 최고 효율의 태양전지들은 글러브 박스나 드라이룸 같은 극도로 제어된 환경에서 제작되어짐. 연구된 소자를 대면적에 활용하기 위해서는 소면적 태양전지 소자의 제작 환경과 동일하게 환경이 제어되어야 함. 대면적 공간 내부의 수분을 통제하는 것은 매우 어려운 일이며, 제어 공간의 설치 및 유지 측면에서도 많은 비용을 요구함.
- 기존 선행 연구에서 수분 방지 레이어의 도입, 용매로써 물 활용 등 다양한 기술들이 수행되었으나 새로운 층 혹은 새로운 물질로 인해 흡수층 특성을 온전히 구현할 수 없거나 복잡한 공정 과정이 추가됨으로 인해 추가적인 공정 비용 및 시간을 요구해 근본적인 개선 방향이라 보기 어려움. 따라서 기존 태양전지의 특성을 바꾸지 않으면서 태양전지 소자가 수분에 영향을 받지 않도록 하는 새로운 기술이 필요함.

나. 수분방지막 도입을 통한 용액공정 CIS 태양전지의 재현성 개선

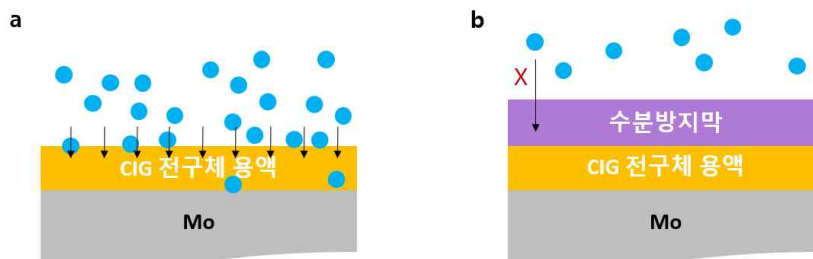


그림 97 수분방지막 적용 유무에 따른 CIS 제작 모식도.

(a) 수분방지막 미적용, (b) 수분방지막 적용

- 선행 연구에서 활용된 수분 방지 레이어는 고체의 형태로 수분으로부터 흡수층을 보호하지만 흡수층에 잔류된 형태이기 때문에 흡수층 내부 혹은 흡수층 위에서 태양전지의 전기적인 특성의 방해 요소로 작용할 수 있음. 때문에 본 실험에서는 공정 도중에만 수분으로부터 흡수층을 보호하고, 공정 이후 태양전지의 성능에 영향을 미치지 않도록 완전히 사라질 수 있도록 수분방지막을 액상으로 설계하였음. 용액 코팅 이후 수분 차단용 용매는 산화막 코팅 직후 핸드 드랍 방식을 통해 캐스팅하여 수분방지막을 구현함. 구현된 수분 장벽은 수분으로부터 흡수체 필름을 완전히 격리시키고 이후 산화막을 제작하기 위한 열처리 공정 중에 자연스럽게 휘발되어 제거됨.

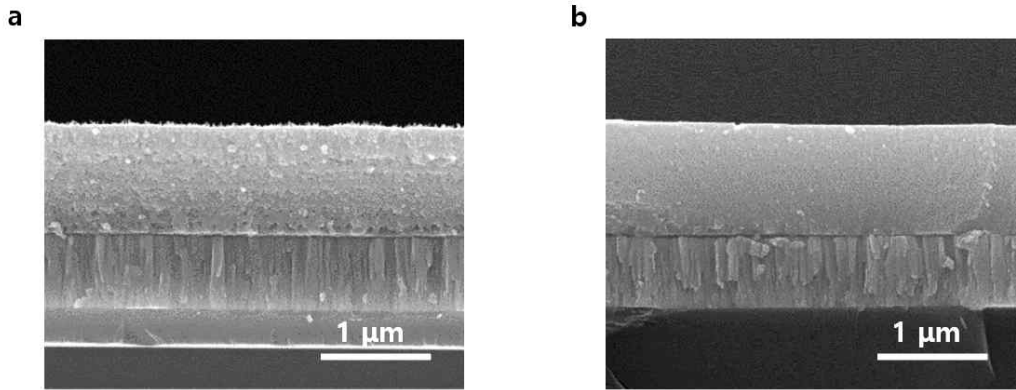


그림 98. 수분방지막 적용 유무에 따른 CIS 산화막 단면 형상 이미지

(a) 수분방지막 미적용, (b) 수분방지막 적용

- 수분방지막 적용 유무에 따른 CIS 산화막을 형성하였으며, 두 박막의 단면 형상 분석 결과 완전히 다른 형상을 가진 박막이 형성되었음을 확인할 수 있음. 수분방지막이 적용되지 않은 CIS 산화막은 표면이 매우 거칠고 단면이 엉성한 형태로 형성되었음. 거친 박막의 표면은 용액 코팅 도중 수분이 직접 박막의 표면에 상호 작용하여 표면의 입자를 형성하였기 때문이며, 이로 인해 다음 층의 거친 표면위에 엉성한 형태로 산화막이 성장하게 됨. 반면 수분방지막이 적용된 CIS 산화막은 표면에 요철 현상이 확인되지 않았으며, 단면에서도 매우 조밀한 형상을 나타내었음. 수분방지막의 적용으로 용액 공정시 수분으로부터 발생할 수 있는 이차반응들을 성공적으로 통제하였으며, 고품질 CIS 박막에 기인한 높은 태양전지 효율을 기대해 볼 수 있음.



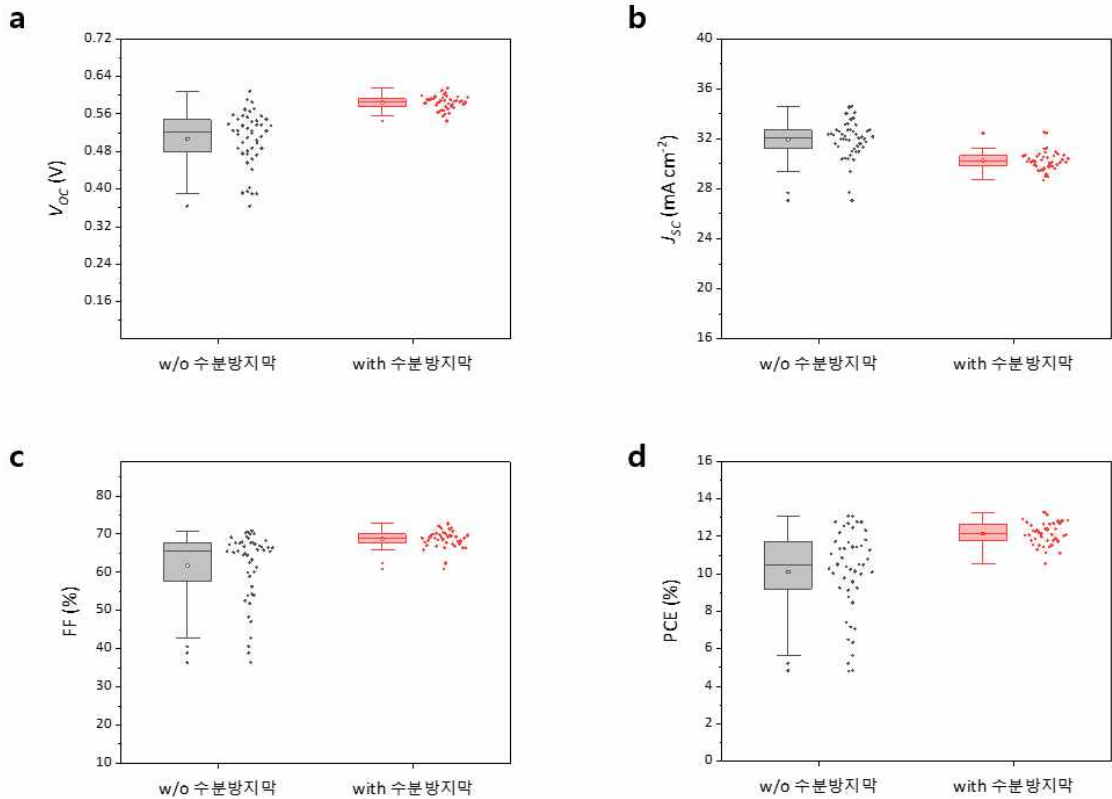


그림 99. 수분 방지막 사용 유무에 따른 CIS 박막 태양전지 성능 평가.

(a) 개방회로전압, (b) 단락전류, (c) 충전효율 및 (d) 동력변환효율

- 수분차단막을 사용 유무에 따른 CIS 박막 태양전지 소자의 성능 평가 결과 수분차단막이 도입된 CIS 태양전지에서 개방회로전압( $V_{oc}$ ) 및 충전효율(FF)에서 성능 개선 효과를 확인하였음. 개방회로전압 개선은 수분차단막의 도입으로 인해 용액 공정 과정에서 수분의 유입을 차단하여 2차 반응(이차상 형성, 증발 속도 변화 등)이 억제로 고품질의 CIS 박막이 형성되었기 때문이며, 충전효율의 증가는 고품질의 CIS 형성을 통해 재결합손실이 크게 감소되었기 때문임.
- 또한 수분차단막을 사용한 CIS 박막 태양전지 소자 성능 평가의 모든 파라미터 균일도가 증가한 것을 확인하였음. 이는 수분차단막의 사용으로 공정 변수가 완전히 제어됨으로 인해 높은 재현성이 확보된 것임. 결과적으로 고성능의 동력변환효율(PCE)을 가진 용액공정기반 CIS 태양전지 소자를 안정적으로 구현하였음. 액상의 수분차단막은 아주 간단하고, 추가 장비의 도입 없이 매번 동일한 환경을 조성할 수 있으며, 태양 전지 소자에 국한할 뿐 아니라 용액 공정 기반의 모든 소자에 적용 가능하기 때문에 상업화에 긍정적 영향을 미칠 것으로 기대됨.

**(15) 추가 고분자 안정화제를 통한 수분 저항성 용액 개발**

가. 수분에 저항성이 있는 새로운 저항성 용액 개발 필요성

- 대기 중의 높은 수분에 의해 고품질의 전구체 산화막을 제작하기 어려워졌으며, 저품질의 전구체 산화막은 CIS 상 형성을 방해해 CIS 상이 제대로 형성되지 않음. 기존 전구체 용액은 수분에 취약하기 때문에 외부 환경을 저습 환경으로 철저히 통제해야 함. 반대로 전구체 용액의 저항성을 높인다면, 더 경제적으로 재현성 있는 산화막을 얻을 수 있음.

나. 고분자 안정화제를 추가하여 용액공정 CIS 태양전지의 재현성 개선.

- 대기중의 높은 수분에 Cu가 반응해 산화구리 형태로 뭉쳐서 표면의 거칠기가 증가하고, 원소의 균일도가 떨어져, 결과적으로 칼코겐화 과정에서 균일한 CIGS 박막으로 성장이 힘든 것으로 알려짐. Cu가 용액안에서 수분과의 반응하여 먼저 석출되지 않도록 고분자 리간드로 결합시켜, 전구체 용액내의 In, Ga과 300°C 근처에서 비슷한 속도로 균일한 비정질 산화막을 형성하도록 유도

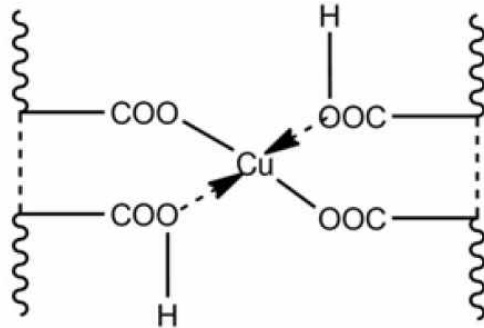


그림 100. 카르복실 그룹과 상호작용하는 Cu 원자구조

[출처 : E. B. Tarabukina, E. I. Fatullaev, A. P. Filippov, and K. A. Abzaeva, Int. J. Polym. Anal. Charact. 24, 10 (2019).]

- PAA는 Cu와 리간드 결합을 형성하며, 현재 사용중인 메탄올 용매에도 PAA는 용해되기 때문에 고분자 안정화제 물질로 적합함. 또한, PVAc의 열분해 온도(300°C) 보다 낮은 온도에서 PAA가 분해가 되는 것으로 알려져 있어 열처리 이후에 탄소 불순물로 잔존할 확률이 매우 낮음. 바인더 물질인 PVA와 PVAc의 총량을 고정하고 PAA양을 무게비율로 조절하여 비교를 전구체 산화막을 제작하였음.

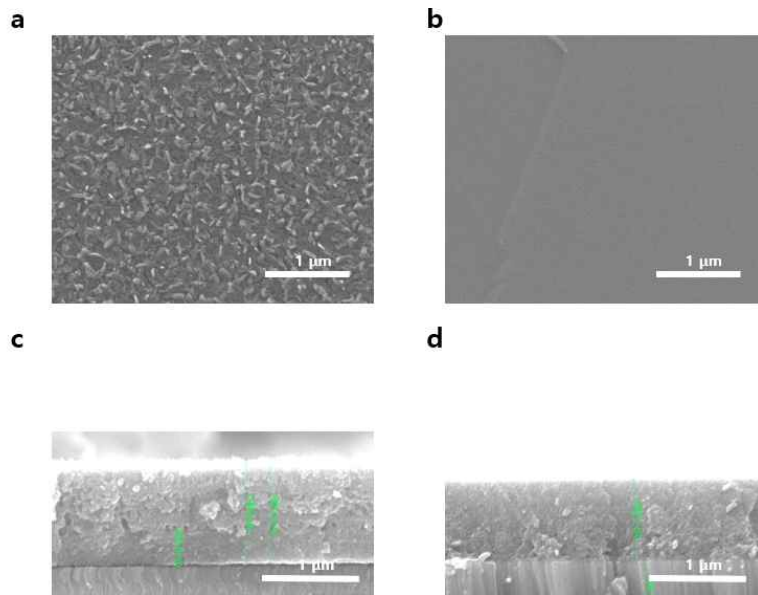


그림 101. PVA 및 PVAc 함량에 따라 고습도 환경에서 제작된 전구체 산화막의 형상 이미지.  
(a),(c) PVAc 1g 사용, (b),(d) PAA 0.6g + PVAc 0.4g 사용

- 기존과 동일하게 6번 코팅한 경우, 위의 그림과 같이 적층되는 두께를 확인하였을 때, PVAc만 사용한 전구체 산화막과 PAA와 PVAc를 사용한 전구체 산화막의 두께는 각각 1μm, 0.78μm로 확

인됨. 두께는 PVAc의 감소에 기인하는 것 같고, PAA는 코팅시 두께의 변화에 대한 요소는 거의 없는 듯함. 수분이 높은 환경에서 PVAc만 사용한 경우, 표면의 거칠기가 증가하고 단면에서의 구멍들이 확인됨. 밀도가 낮아 보임. 반면 PAA를 같이 사용한 경우, 표면의 거칠기가 매우 낮고 단면에서의 밀도가 높아 보임. 이는 반복적으로 확인되었음. 위에 목표로 했던 표면의 거칠기가 낮고, 밀도가 높아 보이는 형태가 습도가 낮았을 때 제작한 전구체 산화막에 가까움. 이를 바탕으로 두 개의 전구체 산화막을 칼코젠화를 진행하여, 낮은 습도에서 PVAc만 사용하여 정상적으로 만들어진 CIS 박막과 XRD 비교 분석을 진행함.

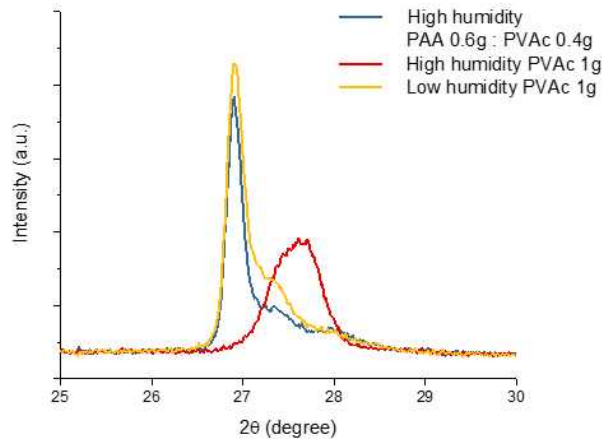


그림 102. CIS 박막의 112 피크 XRD 그래프

- CIS 박막의 (112) 피크의 위치는 원소의 비율에 의하여 원자간의 결합거리가 변함에 따라 피크의 위치가 대략 25~30도 사이에서 변하는 것으로 알려져 있으며, 주로 높은 각도에서 확인 되는 경우는 Ga과 S가 풍부한 결정구조를 가진다고 알려져 있음. 수분이 낮은 환경에서 기존의 용액으로 만든 CIS 박막과 수분이 높은 환경에서 PAA를 첨가하여 만든 CIS 박막의 (112)의 주 피크의 위치와 반폭(FWHM)이 비슷하고, 수분이 낮은 환경에서 기존의 용액으로 만든 CIS 박막의 (112) 피크의 높은 각도에서 어깨 피크가 더 발달되어 있는데, 이는 내부 결정립의 영향으로 Ga과 S가 상대적으로 많은 결정립의 차이로 예측하고 있다. 그 외의 형태와 intensity가 비슷함을 확인. 반면 수분이 높은 환경에서 PVAc만 사용한 기존의 용액은 CIS 박막의 (112) 피크가 높은 각도에서 확인 되었고, 피크의 세기가 감소하고 반폭(FWHM)도 더 커짐을 확인. 추가 분석 및 태양전지로 제작하여 특성 및 분석

## (16) 대면적 CIS 광흡수층 제작을 위한 새로운 셀렌화 열처리 공정 개발

가. 대면적 CIS 광흡수층 제작을 위한 새로운 셀렌화 열처리 공정 도입

- CIS 태양전지의 상업화를 위해서는 저비용, 대면적, 대량 생산이 가능해야 함. 상업화 이슈에 대응하기 위해 본 연구실에서는 전구체 용액을 활용한 인쇄 공정 CIS 전구체 박막을 제작하였음. 인쇄 공정을 통해 제작된 대면적의 전구체 박막은 작은 사이즈로 제단 후 2단 열처리 튜브 퍼니스(2-stage tube furnace)에서 셀렌화 공정을 거쳐 최종적으로 CIS 광흡수층으로 변환됨. 이는 셀렌화 공정을 위한 열처리 튜브 퍼니스의 제한된 크기로 인해 일정 크기 이상의 박막에 대해 수용이 불가능하기 때문임. 또한, 2단 열처리 튜브 퍼니스 공정은 캐리어 가스와 온도 차이를 활용하여 전구체 박막 위에 일차적으로 셀레늄을 하고, 이후 고온에서 CIS 로 상이 변하기 때문에 전구체 박막의 크기가 증가할수록 균일성이 떨어지는 단점을 가짐. 따라서, 대면적에 대응할 수 있는 새로운 셀렌화 열처리 공정의 도입

이 필요한 실정임.

- 일반적으로, 셀렌화에 많이 사용되는 공정으로는 2단계 열처리 공정, 공증발(co-evaporation), 스퍼터링, RTP 등이 있음. 공증발과 스퍼터링 방법은 재료의 소비량이 많고, 장비의 크기에 따라 제작할 수 있는 박막의 크기가 제한되기 때문에 박막 면적에 대한 유연한 대응이 불가능함. 또한, 두 공정 모두 진공 공정 장비이기 때문에 비용적인 측면에서도 대면적 대응이 어려움. RTP 공정의 경우 할로겐 램프를 활용하여 매우 빠르게 온도를 높혀 박막에 열을 반응을 진행하기 때문에 대면적 고르게 전달하지 못하는 치명적인 단점이 존재함.
- 반면, 그래파이트 박스를 활용할 경우 온도와 가스 분위기가 만족되면 고가의 장비 도움 없이 셀렌화 열처리 공정을 진행할 수 있음. 그래파이트 박스를 활용한 셀렌화의 핵심은 기화 및 분압임. 좁고 밀폐된 그래파이트 박스 내부에서 셀레늄의 기화를 통해 높은 셀레늄 분압 분위기가 형성되고, 박막에 균일한 셀레늄 공급과 반응이 유도됨. 또한, 그래파이트 박스 내부의 높은 셀레늄 분압은 전구체 박막의 하단부까지 셀레늄의 공급이 원활하게 함. 이에 따라 박막 하단부까지 CIS 상의 형성을 유도하여 큰 결정립을 가진 광흡수층 제작이 가능해짐. 따라서, 그래파이트 박스를 활용할 경우 대면적에 대한 공정 대응과 균일도 확보, 큰 결정립에 따른 광흡수층의 재결합의 개선 효과까지 기대해 볼 수 있음.

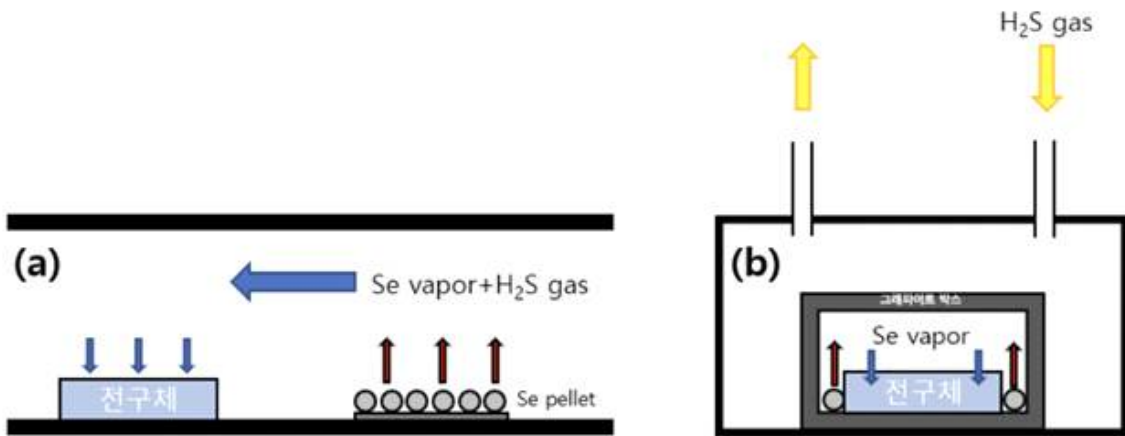


그림 103. 셀렌화 열처리 공정 모식도 (a) 2-stage tube furnace를 사용한 공정, (b) 그래파이트 박스를 활용한 공정



그림 104. 그래파이트 박스

#### 나. 그래파이트박스를 활용한 CIS 광흡수층 제작

- 그래파이트 박스를 활용한 셀렌화 열처리 공정은 전구체와 셀레늄 펠릿을 좁은 간격으로 같은 공간

에 위치시킨 후 셀레늄의 분압을 증가시켜 균일한 셀레늄 공급을 통해 고품질의 CIS 상을 얻는 기술임. 고품질의 셀레늄 펠릿이 밀폐된 공간에서 기화됨에 따라 내부 셀레늄 분압이 상승하고 전구체 박막 위에 균일하게 공급되기 때문에 셀레늄 펠릿의 수량이 매우 중요한 요소임. 셀레늄 펠릿이 부족할 경우 형성되는 분압과 공급되는 셀레늄의 양이 감소하기 때문에 CIS 상으로의 치환이 부족할 수 있음. 반면, 셀레늄 펠릿이 과잉 공급될 경우 오히려 CIS 상으로의 치환을 방해하고, 반응 이후에도 셀레늄이 잔존한다고 보고되어 있음. 따라서, 그래파이트 박스 내부에 셀레늄 펠릿의 수량을 최적화하는 것이 매우 필수적임.

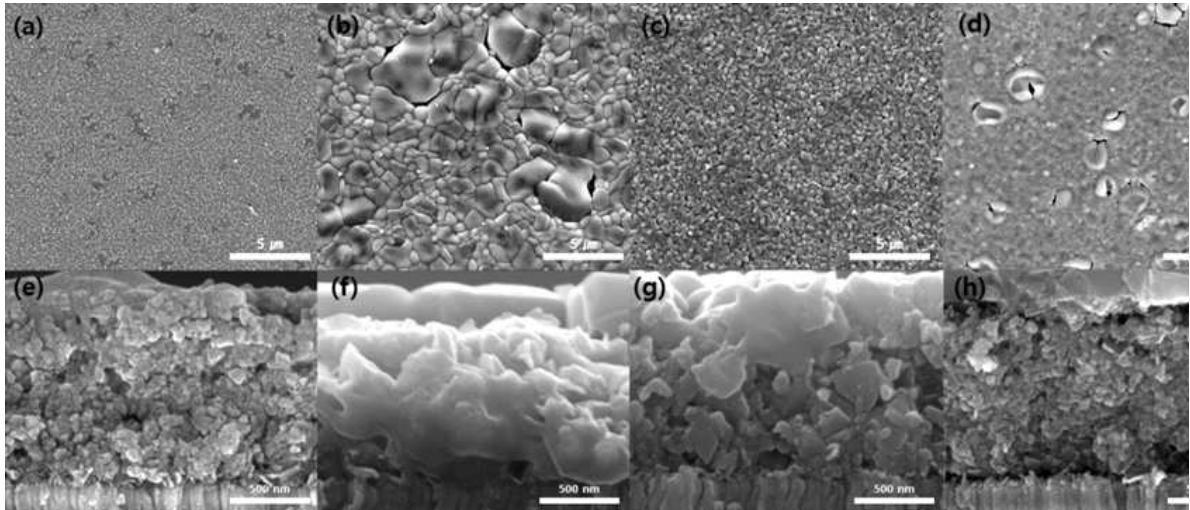


그림 105. 셀레늄 펠릿 수량에 따른 CIS 광흡수층 SEM 이미지.(a), (e) 2개, (b), (f) 6개, (c), (g) 10개 (h) 튜브퍼니스 공정을 통해 제작된 CIS 광흡수층 SEM 이미지

- 셀레늄 펠릿 2개의 경우 표면에서 CIS 상으로 성장하지 못하고 전구체로 남아있는 부분이 확인되었으며, 단면 이미지에서도 박막의 표면 부분만 달라진 것으로 나타남. 이는 셀레늄 분압 및 셀레늄 공급량의 부족으로 상의 치환이 온전히 이루어 지지 않은 것으로 예상됨. 셀레늄 함량이 더 증가된 셀레늄 펠릿 6개에서는 기존 공정인 튜브퍼니스 공정에서 제작된 박막 대비 단면에서 큰 결정립을 가진 CIS 상을 확인하였으며, 표면에서도 결정립이 증가한 것을 확인할 수 있었음. 높은 셀레늄의 분압과 충분한 셀레늄의 공급으로 결정이 잘 자란 것으로 추정됨. 셀레늄 펠릿 10개에서는 튜브퍼니스 공정에서 제작된 박막 대비 결정립이 더 크게 성장한 것을 확인하였으나 오히려 표면에서는 결정립이 작게 성장한 것을 확인하였음. 이는 CIS 상의 화학양론적 비(1:1:2)를 고려하였을 때, 과잉 공급된 셀레늄으로 인해 성장 배향성이 달라졌기 때문이라 추측됨. 결과적으로 셀레늄 펠릿이 6개 일 때 가장 고품질의 CIS 박막이 제작되었으며, 기존의 공정인 튜브 퍼니스를 활용해 얻어진 박막보다 더욱 진보된 박막을 확보할 수 있었음. 추후 공정의 온도, 가스 농도, 반응 시간 등 다양한 변수 조절을 통해 더욱 고품질의 대면적 CIS 광흡수층 제작이 가능할 것으로 판단됨.



## ■ 기계적 메타물질 기반 구조 제어 기술 확보

### (1) 기계적 메타물질 구조체 설계 및 제조 공정 확보

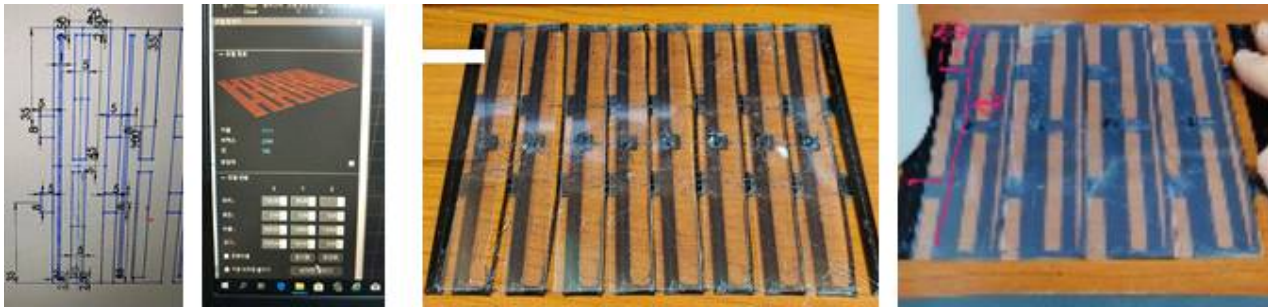


그림 106. 기계적 메타물질 3차원 설계 및 출력 모습

- 태양전지의 3차원 제어를 위한 기계적 메타물질 구조체의 효율적인 설계를 위하여 3차원 구조 설계 프로그램을 활용함. 확보된 구조체의 3차원 데이터를 Fused Deposition Method 방식 3D 프린터에 적용하여 출력하고, 이를 최적화하는 연구를 수행함.
- 기계적 메타물질 구조체 중에서 태양전지 시스템의 투과도와, 태양전지에 입사되는 태양광 입사각을 효율적으로 제어할 수 있는 후보 구조체를 선별하고, 해당 구조체의 실질적인 출력 및 작동 가능성을 확인함.
- 특히 태양전지의 각도를 제어하는 기술은 태양전지의 발전 특성에 굉장히 주요한 요소이기 때문에, 가벼우면서도, 슬림한 구조체로써 태양전지의 각도를 효율적으로 제어할 수 있는 기계적 메타물질에 집중하여 선별함. 기존에 태양전지 각도를 제어하는 시스템인 광추적 장치 (solar tracker)는 회전을 위한 두꺼운 회전축을 필요로 하기 때문에, 거치형 태양전지 시스템에는 적합하나, 스마트팜 혹은 건물 외벽에 적용에 한계가 있었음. 해당 방식은 얇은 시트의 형태로써 스마트팜 온실을 포함한 다양한 외벽 혹은 구조체 위에 적용 가능하기 때문에, 높은 잠재성을 갖는 기술로 기대함.
- 기계적 메타물질 가운데, 키리가미 구조체는 단순한 인장만으로도 각도 제어가 가능한 구조체이기 때문에 해당 구조체의 다양한 설계변수를 제어함으로써, 각도 제어의 효율성을 높이는 접근법을 취하였음.
- 키리가미 구조체를 활용할 경우에는 단순히 광각 제어 뿐만 아니라, 태양전지간의 간격 제어도 동시에 가능하기 때문에, 태양전지 시스템의 투과도를 동적으로 제어할 수 있는 가능성이 있음. 이러한 제어가 단순한 인장으로 가능하며, 이러한 인장 민감도를 높일 수 있는 다양한 설계 변수에 대한 성능 비교 연구를 수행함.

### (2) 태양전지 모듈 연결을 위한 3차원 구조체 전극 도포 기술

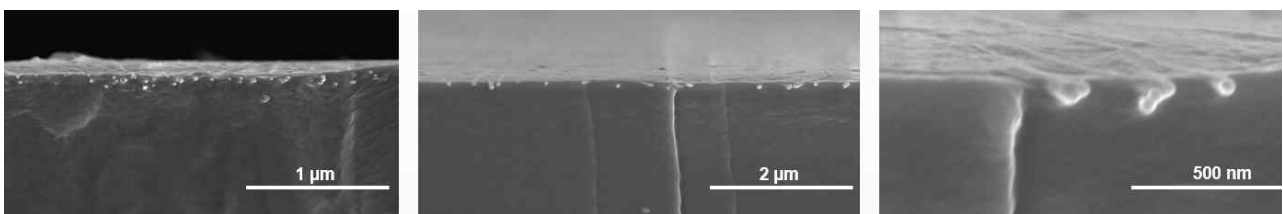


그림 107. 3D 프린팅 된 출력물 표면에 도포된 전극 SEM 사진

- 기계적 메타물질에 태양전지를 집적하고 연결하기 위해서는 기계적 메타물질에 적용가능한 전극기술 확보가 선행되어야함. 태양전지의 각 모듈은 전기적, 기계적으로 잘 연결을 시키는 것이 중요하며, 특히 전기적으로 매우 높은 전도성을 갖는 것이 태양전지 시스템의 효율 면에서 결정적인 요소임.
- 기계적 메타물질 상에 형성되는 전극의 전기적 저항값이 높아지게 되면, 해당 연결부에서 전력 손실이 일어나며, 이로인한 발전효율의 저하가 야기됨. 따라서 높은 전도성의 확보는 시스템 구축에 필수적임.
- 전기적 전도성과 더불어서 기계적 안정성 역시 필수적임. 기계적 메타물질은 외부 응력, 특히 본 접근법에서는 기계적인 인장에 따라 휘어지기도 하고, 일부 늘어나게 되는 구간이 있는데, 기계적 안정성 혹은 유연성이 확보되지 않으면 형성된 전극이 버티지 못하고 깨지는 현상이 나타나게 됨.
- 전도성 전극의 경우 일반적으로, 전기적 전도성과 기계적 유연성은 서로 trade-off 되는 성향이 있어서, 두가지 물성을 모두 극대화하는 것은 쉽지 않음. 특히 본 접근법과 같이 기계적 구조체를 패터화 하면서 전극을 도입하는, 인쇄 방식에 적용하는 경우에는 이것이 더 어려움. 인쇄 방식의 경우 전도성을 부여하기 위한 전도성 나노구조체 도입시, 전도성 나노구조체 비율을 높일 경우에는 전도성을 높일 수 있으나 취성이 함께 높아져 잘 부스러지게 되고, 구조체의 비율을 낮추면 전도성 확보가 어려움.
- 본 과제의 접근법에서는 기계적 유연성과 전도성이 좋은 메탈 나노와이어를 기계적 메타물질 표면에 함침시키는 공리적 접근법을 바탕으로, 기계적 유연성과 전도성을 동시에 확보하는 방식을 취하였음.
- 제안된 기계적 메타물질 표면 전극 함침 기술은 반복적인 인장과 굽힘에도 안정적으로 높은 전도성을 유지하였음.

### (3) 스마트팜용 3차원 태양전지 구조 제어 기술

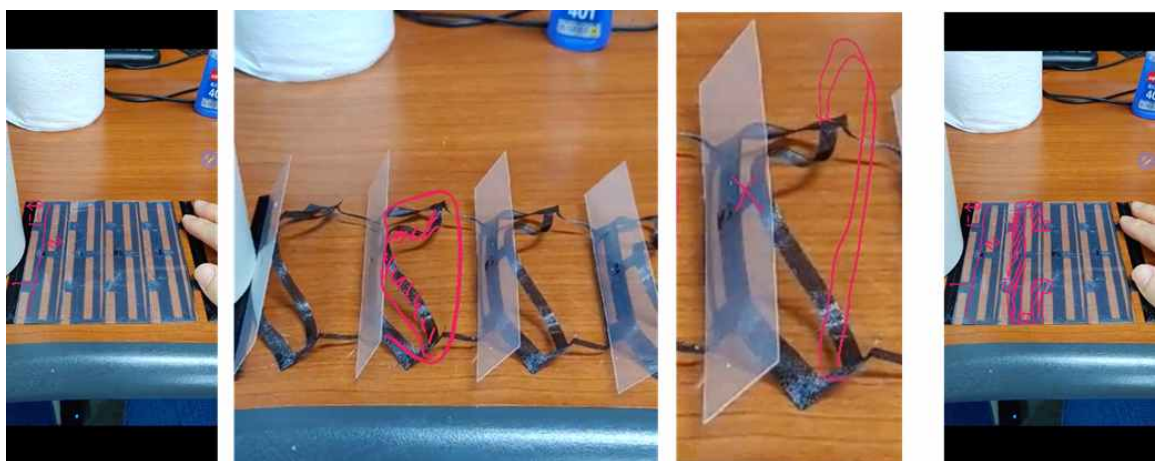


그림 108. 기계적 메타물질을 활용한 태양전지 광각 제어 가능성 확인

- 키리가미 형상의 기계적 메타물질의 다양한 설계 변수를 제어하면서, 이에 따른 각도 제어 양상에 대한 다양한 실험을 진행함. 구동 양상 분석을 통해, 기존 키리가미 구조체에서 각도 제어폭 혹은 민감도를 제한하는 다양한 변수를 확인하고, 이를 제거하기 위한 접근법을 취함. 특히 각도의 변동폭을 제한하는 기계적 구조체를 최소화하고, 굽혀지는 구조체의 범위를 제

어하여 태양전지의 이격을 최소화하기 위한 접근법을 활용함. 이를 위하여 각 요소 구조체별로 두께, 키리가미 배치 및 거리 등을 설계 변수로 두고 다양한 구조체를 출력, 분석함.

- 위의 구조체는 인장률에 따라 각도가 연속적으로 변동되지 않고, 어느 지점에 0도에서 90도로 불연속적으로 제어되는 구조체를 설계한 모습임.



그림 109. 인장에 따른 광각 제어 및 구조 변환 인자 제어 최적화

- 위의 구조체는 광각 제어 변수 설계를 통하여, 좀더 인장률에 따라 연속적으로 제어가 가능해진 기계적 메타물질의 작동 모습을 보인 사진임. 이를 통해 인장률에 선형적으로 비례하여 각도가 제어되는 구조체를 확보하였으며, 90도에 가까운 각도 변화가 가능하였음. 90도에 가까울수록 태양전지 시스템의 투과도를 높일 수 있기 때문에 각도 제어 자유도는 해당 기계적 메타물질의 중요한 성능 지표임.



그림 110. 태양전지 모듈의 기계적 메타물질 구조체 상 집적 (기계적, 전기적 연결)

- 앞서 언급된 3D 프린팅 출력물 표면에 적용 가능한 고전도성 고유연 전극 기술과, 기계적 메타물질 설계 기술을 함께 도입하여, 태양전지 모듈을 집적할 수 있는 3차원 구조체를 제작하였음. 그리고 제작된 구조체 위에 태양전지 모듈을 집적하였음.
- 해당 전극기술이 도입된 구조체는 매우 높은 전기 전도도를 보였으며, 반복적인 인장 후에도 초기의 저항값을 유지하는 높은 기계적 안정성을 보임.
- 태양전지 모듈의 경우, +/- 극의 분리가 중요하기 때문에 3D 프린팅의 패터닝 공정을 통하여

+극과 -극이 서로 통하지 않도록 막아주었음. 반복적인 인장시에도 해당 전기적 분리가 유지되었으며 적용 가능성을 확인함.

## ■ 체결형 태양광 모듈 제작을 위한 전극 설계 및 프로토타입 제작

### (1) 체결형 전극 구조 설계 및 소재 선택

- 체결형 태양광 모듈의 기초 구성요소는 태양전지, 전극, 모듈 프레임으로 총 세 가지로 구성됨. 태양전지는 모듈 프레임에 체결되어 빛을 받으면 광전효과에 의해 전력을 생산함. 전극은 태양전지로부터 생산된 전력을 수송하고, 태양광 모듈 프레임은 태양전지가 일정한 간격으로 배열되고 전극과 연결될 수 있게 지지함.
- 기존 태양광 모듈의 구조에서 태양전지를 직렬 연결하면 태양광 모듈의 개방전압( $V_{OC}$ , open circuit voltage)은 각 태양전지의 개방전압의 값을 합한 값이 측정되고, 태양전지를 병렬 연결하면 태양광 모듈의 단락전류( $I_{SC}$ , short circuit current)는 각 태양전지의 단락전류 값을 합한 값이 측정됨.
- 본 연구에서 개발하고자 하는 체결형 태양광 모듈은 태양전지가 이축으로 체결된 구조로 한 축에 여러 개 체결되기 때문에, 일축 및 이축의 직병렬 연결에 따라 모듈의  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ , 채움인자(FF, fill factor), 광전효율 등 광전특성 파라미터가 변함. 이에 따라 체결형 태양광 모듈의 효율적인 전력생산을 위한 체결형 전극구조 설계 연구를 진행함.

### ○ 체결형 전극 구조 설계

#### 체결형 모듈 프레임 및 태양전지 기초설계

- 체결형 전극 구조를 설계하기에 앞서 먼저 체결형 태양광 모듈의 직렬 및 병렬 연구를 진행함. 체결형 태양광 모듈의 직렬 및 병렬 연결에 대한 태양광 모듈의 광전특성 파라미터 변화를 파악하기 위해  $5 \times 5 \times 2 \text{ cm}^3$  규격의 모듈 프레임 프로토타입을 제작하였고, 태양전지로는 임의의 크기로 잘라서 사용이 가능한 상용 CIGS 태양전지를 사용함.  $5 \times 5 \times 2 \text{ cm}^3$  모듈 프레임 프로토타입은 한 축에 5개의 태양전지를 체결, 모듈 프레임에 이축으로 총 10개의 태양전지를 체결하는 것을 기준으로 설계함.

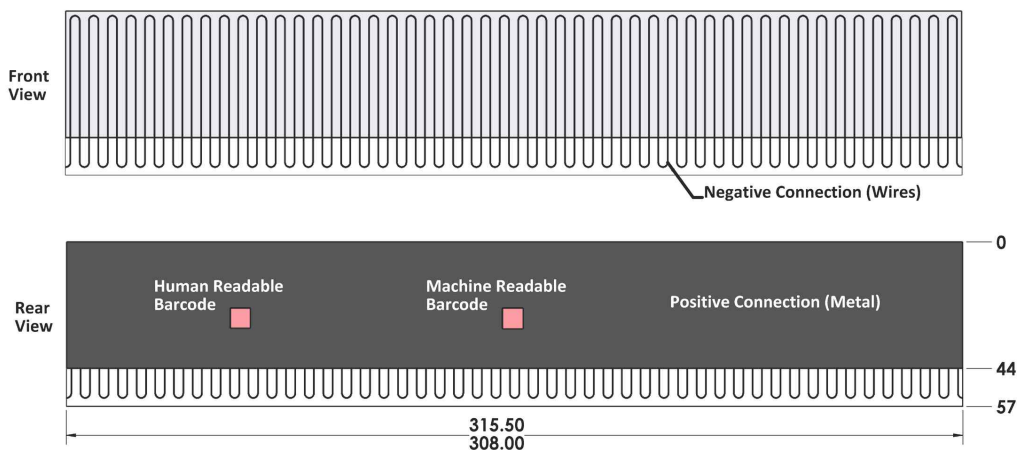


그림 111. 상용 CIGS 태양전지의 전면 및 후면 모식도



표 5. 상용 CIGS 태양전지의 광전기적 특성

Cell Efficiency	단위	>14.0%	>14.5%	>15.0%	>15.5%	>16.0%
Power	W	1.95	2.02	2.08	2.15	2.20
Maximum Power Voltage	V	0.524	0.537	0.541	0.546	0.552
Minimum Power Current	A	3.73	3.77	3.84	3.93	3.98
Open Circuit Voltage	V	0.651	0.663	0.667	0.671	0.676
Short Circuit Current	A	4.26	4.25	4.30	4.36	4.39

표 6. 상용 CIGS 태양전지의 특성

Length	308~315.5 mm
Width : Cell Only	44.0 mm ± 0.25 mm
Width : Including Interconnect	57.2 mm ± 0.25 mm
Thickness	0.33 mm ± 0.1 mm
Weight	8.7 g ± 0.1 mm
Cell Type	Thin Film CIGS on Stainless Stell Substrate

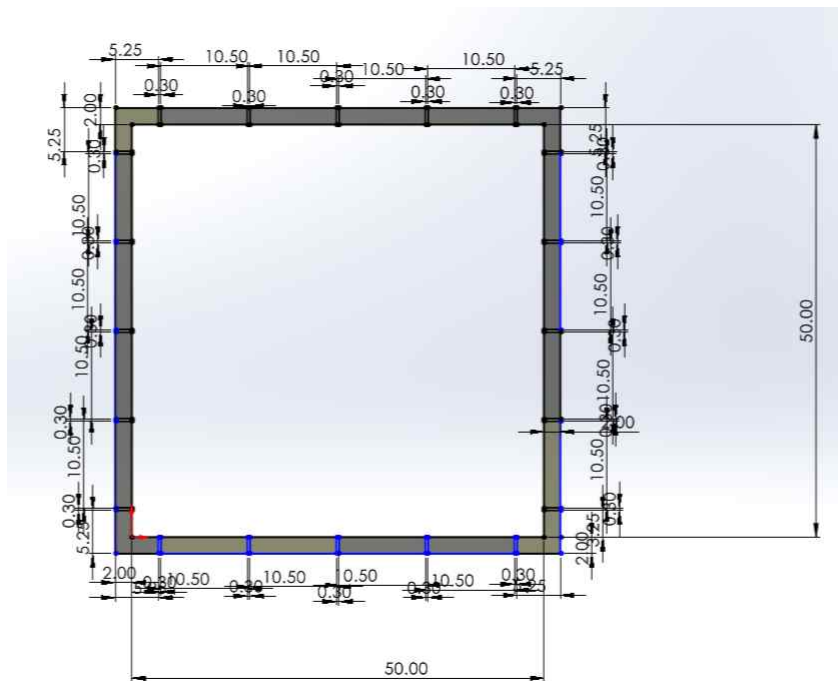


그림 112 체결형 모듈 프레임 프로토타입 설계 평면도

- 상용 CIGS 태양전지는 전면에 wire로 구성된 음극과 후면에 metal plate로 구성된 양극으로 구성되어 있음. 태양전지를 이축으로 체결하기 위해 태양전지를 1 cm 간격으로 잘라낸 후, 각 태양전지가 일정한 간격을 가지도록 홈을 잘라내어 체결형 태양전지를 제작한 후 단위 태양전지의 효율을 측정 하였음.
- 홈 절단 위치와 정도에 따라 제작한 3개의 단위 태양전지의 광전특성을 측정함.



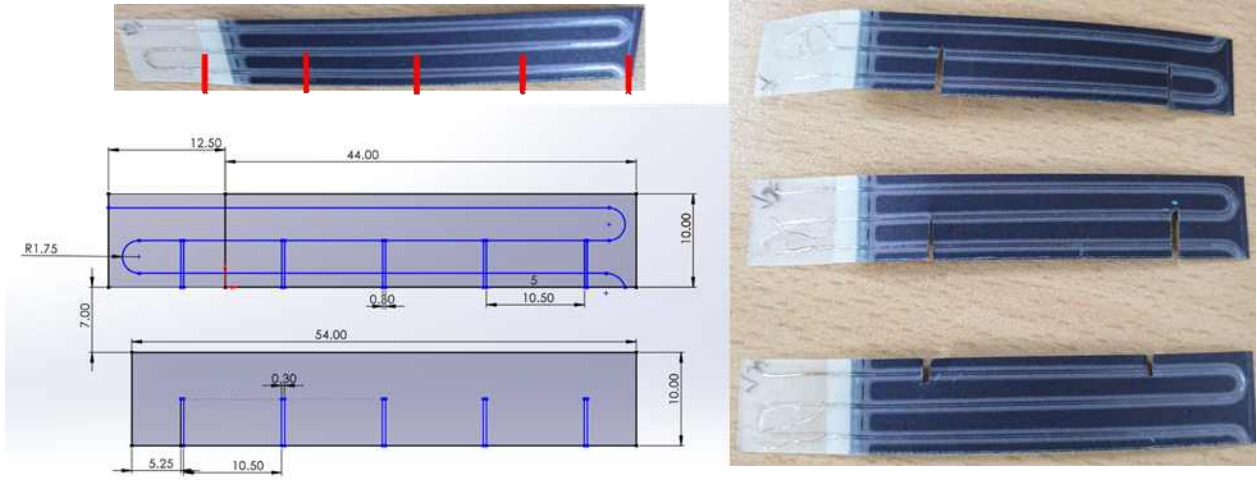


그림 113. (좌) 너비 1 cm의 체결형 단위 태양전지의 실사 및 평면도. (우) 절단 위치와 강도에 따라 홈을 자른 3개의 단위 태양전지

표 7. 체결을 위해 홈을 판 단위 태양전지의(너비 1cm) 시간에 따른 광전효율 파라미터

sample 1	홈 적용 전	홈 적용 후	24시간 경과	48시간 경과	120시간 경과
$I_{sc}$	143.95 mA	142.60 mA	132.09 mA	105.1 mA	36.81 mA
$V_{oc}$	0.724 V	0.713 V	0.684 V	0.693 V	0.690 V
FF	61.3%	43.5%	39.6%	28.2%	30.9%
Efficiency	14.5%	10.1%	8.12%	4.67%	1.79%
sample 2	홈 적용 전	홈 적용 후	24시간 경과	48시간 경과	120시간 경과
$I_{sc}$	143.37 mA	26.05 mA	126.34 mA	23.12 mA	31.7 mA
$V_{oc}$	0.719 V	0.482 V	0.294 V	0.516 V	0.680 V
FF	54.8%	23.9%	22.2%	24.8%	34.9%
Efficiency	12.9%	0.68%	1.87%	0.67%	1.71%
sample 3	홈 적용 전	홈 적용 후	24시간 경과	48시간 경과	120시간 경과
$I_{sc}$	147.18 mA	138.8 mA	125.37 mA	123.75 mA	89.53 mA
$V_{oc}$	0.729 V	0.701 V	0.684 V	0.660 V	0.684 V
FF	63.8%	53.2%	35.8%	35.5%	33.4%
Efficiency	15.6%	11.8%	6.98%	6.59%	4.65%

- 체결을 위해 홈을 판 단위 태양전지의 J-V curve 측정 결과 시간에 따라 효율 저하가 크게 일어난 것을 확인함. 각 태양전지의  $V_{oc}$ 는 크게 감소하지 않았지만,  $I_{sc}$ 와 FF이 크게 감소하였음.
- 이는 홈 형성을 위한 전면 전극의 절단으로, 절단된 전극 구역에서의 전류 수송이 원활하지 못하여 발생하는 전자와 정공의 재결합에 의해 감소한 것으로 추론됨.
- 이에 따라 태양전지 간 체결이 가능한 체결형 태양광 모듈을 제작하기 위해서는 체결형 태양전지용 전면 전극의 새로운 패턴의 필요성을 확인하였지만, 상용 태양전지 전면 전극의 패턴닝 수정이 제한적이므로 이축으로 태양전지를 프레임에 적용할 때, 한 축의 태양전지를 프레임에 체결하고 나머지 축의 태양전지를 다른 태양전지 위에 체결하는 적층형 태양전지 구조를 도입하였음.
- 또한 체결 홈을 판 단위 태양전지의 효율을 시간에 따라 측정한 결과, 1 cm 간격으로 자른 태양전지가 시간이 경과함에 따라 체결 홈 절삭에 의한 공기 중 산소와 수분의 노출되어 CIGS 태양전지의 열화 현상이 일어나 효율이 감소하는 경향을 파악하였고, 절단된 면으로부터 전면 전극의 손상에 의한 효율 감소로 추론되어 전면 전극의 U자형 패턴을 기준으로 전극이 연결부에서 끝나는 1패턴의 태양전지와, 전극이 태양전지 수광부에서 끝나는 1.5패턴의 태양전지 두 종류의 시간에 따른 효율 변화를

측정 후 분석함.



그림 114. 태양전지의 너비에 따른 전면전극의 (상) 1패턴 및 (하) 1.5패턴 구성 이미지

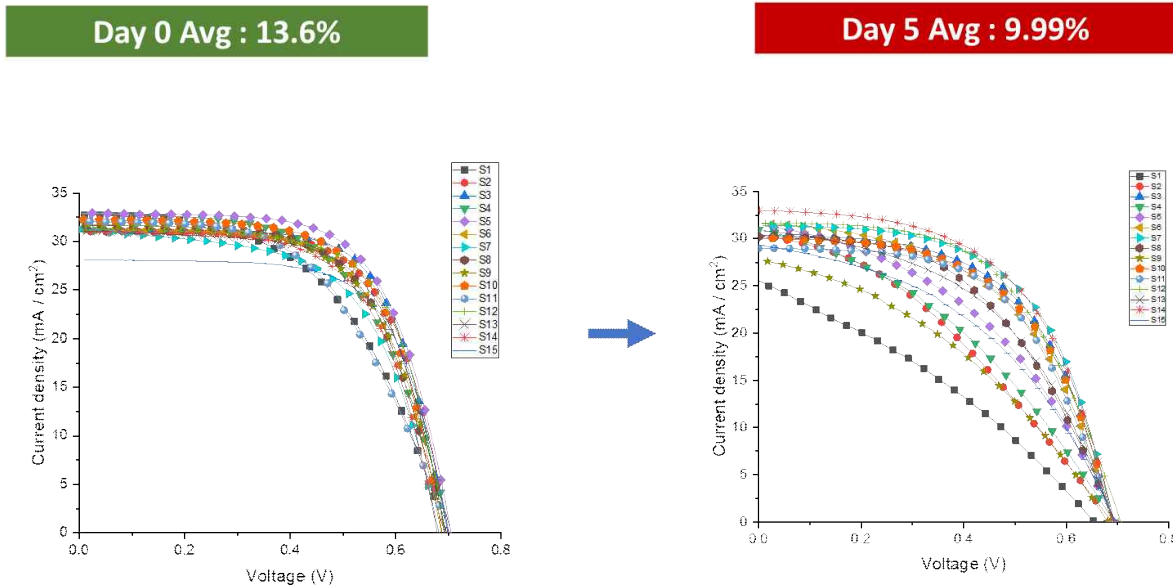


그림 115. 1.5패턴 단위 태양전지의 잘라낸 후 시간에 따른 J - V curve, (좌) 0일, (우) 5일 후

표 8. 1.5패턴 단위 태양전지의 잘라낸 후 시간에 따른 광전효율 파라미터

절단 직후	sample 1	sample 2	sample 3	sample 4
$I_{sc}$	144.1 mA	139.8 mA	141.8mA	141.2 mA
$V_{oc}$	0.707 V	0.701 V	0.700 V	0.704 V
FF	61.3%	59.8%	63.7%	53.6%
Efficiency	13.7%	13.5%	14.4%	12.1%
120시간 경과	sample 1	sample 2	sample 3	sample 4
$I_{sc}$	132.9 mA	122.2 mA	132.3 mA	127.4 mA
$V_{oc}$	0.705 V	0.680 V	0.691 V	0.704 V
FF	48.7%	37.7%	55.7%	55.5%
Efficiency	10.4%	7.1%	11.6%	11.3%
절단 직후	sample 5	sample 6	sample 7	sample 8
$I_{sc}$	137.5 mA	136.5 mA	136.3 mA	123.7 mA
$V_{oc}$	0.704 V	0.705 V	0.691 V	0.700 V
FF	65.4%	63.6%	61.9%	66.9%
Efficiency	14.4%	13.9%	13.2%	13.2%

120시간 경과	sample 5	sample 6	sample 7	sample 8
$I_{sc}$	139.3 mA	136.0 mA	145.0 mA	129.0 mA
$V_{oc}$	0.718 V	0.704 V	0.706 V	0.708 V
FF	53.4%	46.3%	54.1%	42.6%
Efficiency	12.2%	10.2%	12.6%	8.8%

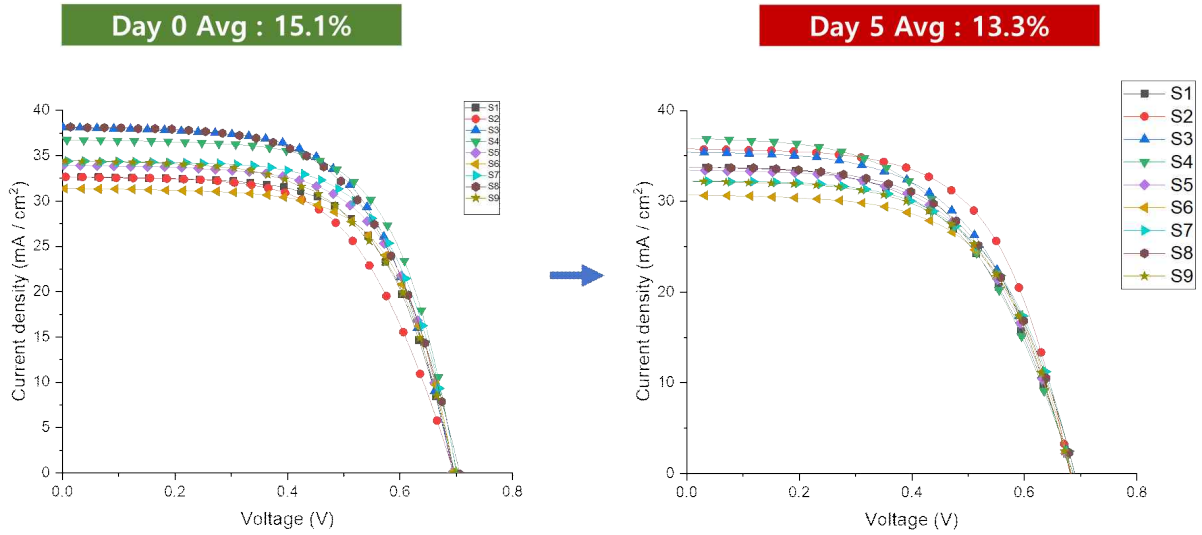


그림 116. 1.5페턴 단위 태양전지의 잘라낸 후 시간에 따른 J - V curve, (좌) 0일, (우) 5일 후 (추가)

표 7. 1페턴 단위 태양전지의 잘라낸 후 시간에 따른 광전효율 파라미터

절단 직후	sample 1	sample 2	sample 3	sample 4
$I_{sc}$	144.1 mA	139.8 mA	141.8mA	141.2 mA
$V_{oc}$	0.707 V	0.701 V	0.700 V	0.704 V
FF	61.3%	59.8%	63.7%	53.6%
Efficiency	13.7%	13.5%	14.4%	12.1%
120시간 경과	sample 1	sample 2	sample 3	sample 4
$I_{sc}$	132.9 mA	122.2 mA	132.3 mA	127.4 mA
$V_{oc}$	0.705 V	0.680 V	0.691 V	0.704 V
FF	48.7%	37.7%	55.7%	55.5%
Efficiency	10.4%	7.1%	11.6%	11.3%
절단 직후	sample 5	sample 6	sample 7	sample 8
$I_{sc}$	137.5 mA	136.5 mA	136.3 mA	123.7 mA
$V_{oc}$	0.704 V	0.705 V	0.691 V	0.700 V
FF	65.4%	63.6%	61.9%	66.9%
Efficiency	14.4%	13.9%	13.2%	13.2%
120시간 경과	sample 5	sample 6	sample 7	sample 8
$I_{sc}$	139.3 mA	136.0 mA	145.0 mA	129.0 mA
$V_{oc}$	0.718 V	0.704 V	0.706 V	0.708 V
FF	53.4%	46.3%	54.1%	42.6%
Efficiency	12.2%	10.2%	12.6%	8.8%

- 수광면적을 4.4 cm<sup>2</sup>으로 측정하여 총 15개의 잘라낸 단위 태양전지의 효율을 측정하여 비교한 결과, 상용 CIGS 태양전지를 잘라낸 직후로부터 5일이 지났을 때 단위 태양전지의 평균 효율이 초기 대비 약 3.6% 감소되었고 채움인자(fill factor, FF)가 약 14.51% 감소되었음. 수광영역 위의 전극이 잘려지면서 태양전지 위 표면의 EVA 코팅의 접착이 떨어짐에 따라 전극이 표면으로부터 이격되었고, 태양전지를 자르기 때문에 셀 가장자리가 시간이 경과할수록 태양전지가 열화되어 효율이 저하된 것으로 추정됨. 전면전극 1.5 패턴으로 잘린 단위 태양전지는 태양전지 위 EVA 코팅이 손상되는 것이 불가피하여 효율 감소를 최소화 하고자 전면전극 1패턴으로 단위 태양전지 크기를 조정된 뒤 시간에 따른 효율 변화를 분석함.
- 전면전극 1패턴의 단위 태양전지 10개의 시간에 따른 J-V curve의 변화를 측정한 결과, 평균 1.8%의 효율 감소를 보여 1.5패턴의 단위 태양전지보다 비교적 효율 감소가 저하된 것으로 확인됨. 1.8%의 효율 감소는 단위 태양전지 가장자리의 공기 노출로 인한 효율 감소로 추정되며, 모듈화 후에 봉지재를 넣어 공기 노출을 최소화하거나 가장자리에 코팅을 이용한 봉지처리를 하게 되면 단위 태양전지의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 예상함. 따라서 체결형 전극 구조 연구에 전면전극 1패턴의 태양전지를 적용하였고, 이 단위 태양전지를 이축으로 적층하는 적층형 태양광 모듈 구조와 프레임을 설계하였음. 태양전지와 모듈 프레임의 기본적인 구조를 확보한 뒤 전극 구조 및 소재에 따른 체결형 태양광 모듈의 특성을 분석함.

### 클립형 전극 설계

- 태양전지 체결과 전선 연결이 용이한 금속 클립을 도입하여 각 태양전지를 직렬로 연결하고 태양광 모듈의 광전효율 파라미터를 분석함.

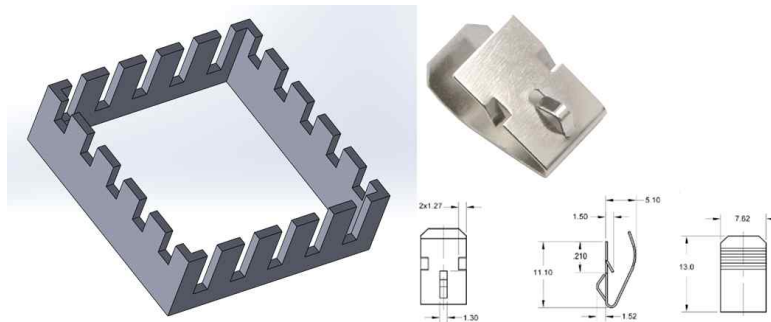


그림 117. (좌) 체결 적층형 태양광 모듈 프레임 설계도, (우) 체결형 클립 이미지 및 도면

- 두께를 높인 모듈 프레임에 클립형 전극 적용 후 3개의 단위 태양전지를 연결한 샘플을 제작함. 각 태양전지 간 연결은 클립형 전극에 실리콘 태양전지의 리본 전극으로 사용되는 Sn-Pb-Cu 소재를 이용하여 연결한 후 및 납땀하여 구현함.

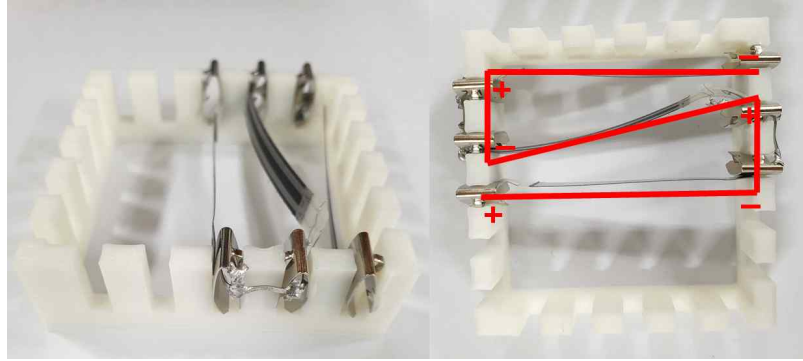


그림 118. 클립 적용된 적층형 프레임의 태양전지를 직렬연결한 이미지

- 태양전지의 전극은 와이어 전면전극(음극)과 금속 후면전극(양극)으로 구성되어 있음. 적용한 체결형 클립은 한 면이 돌출되어 있어 클립의 양면을 태양전지 간 연결부로 사용하지 못하고 평평한 단면에만 태양전지를 연결 가능하다는 제약이 있음. 이를 극복하고 태양전지를 직렬로 연결하기 위해서는 각 태양전지의 전·후면을 번갈아 연결하거나, 상단 우측 그림처럼 태양전지의 음극을 교차 연결하여 'K' 모양으로 체결해야 함. 태양광을 보다 효과적으로 수광하기 위해 태양전지의 앞면을 번갈아 구성하는 것보다 전면전극을 교차하여 연결하는 것이 효율적이라고 판단하여 'K' 모양으로 태양전지를 체결하는 구조의 사용 가능성을 탐구함. 태양전지를 직렬 연결하기 위해 'K' 모양으로 태양전지를 체결할 때, 전면 전극의 연결부를 태양전지마다 반대로 체결하면 단면으로만 적용할 수 있는 클립의 구조에 의해 제작 시 태양전지가 모듈 프레임과 평행하지 않고 왜곡되어 90° 구조의 정확한 효율 측정이 제한되므로 프레임의 체결형 홈 구조의 변경이 필요하다고 판단함.

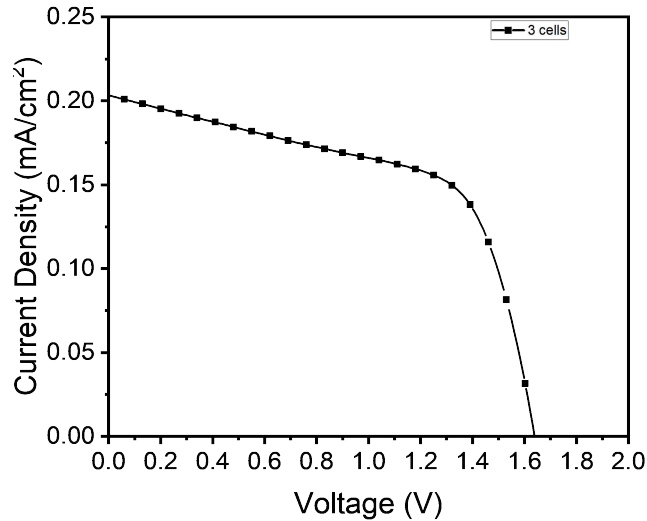


그림 119. 3개의 태양전지가 직렬로 구성된 모듈의 J - V curve

- 태양전지를 모듈에 이축으로 체결하기에 앞서 단위 태양전지 3개를 직렬 연결하여 구성한 모듈을 분석한 결과, 위 그림과 같은 J-V curve가 나타남. 클립과 납땀을 이용하여 태양전지 간 직렬 연결이 가능함을 확인하였으나 단락 저항이 낮은 특징을 보임. 신뢰성을 확인하기 위해 동일한 태양광 모듈을 재측정한 결과 태양전지 간 연결이 단절되어 태양광 모듈의  $V_{oc}$ 가 측정되지 않음. 이를 통해 프레임에 체결된 전극 및 태양전지 간의 접합 중요성을 확인함.



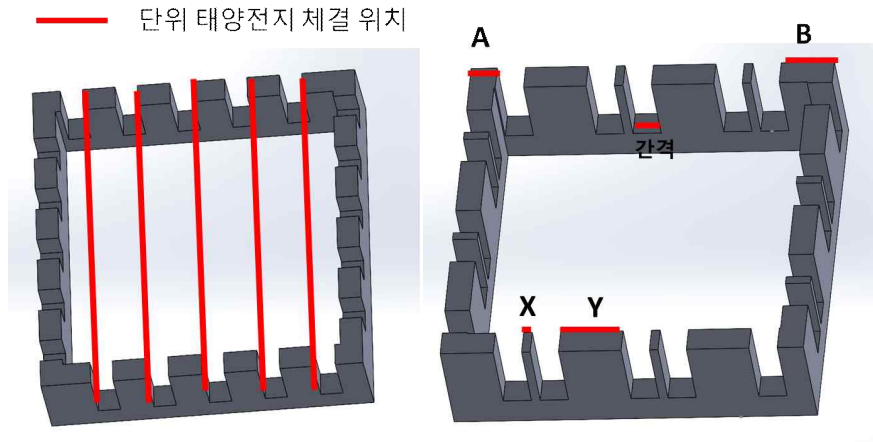


그림 120. 적층형 클립 체결형 모듈 프레임 (좌) 기존, (우) 홈 간격 개선된 설계도



그림 121. (좌) 태양전지 체결된 홈 간격 개선된 모듈 프레임 이미지, (우) 좁은 간격에 의한 프레임 손상

- 클립형 전극을 적용한 모듈 프레임에 태양전지를 수평하게 체결하기 위해 모듈 프레임의 홈 간격을 조정함. 사용된 체결형 클립은 한 면이 돌출되어 있어 단면으로밖에 사용하지 못하기 때문에 태양전지를 수평으로 체결하기 위해서는 전면전극 및 후면전극 체결에 따라 프레임의 홈 위치 변경이 필수적임. 태양전지를 직렬로 연결하기 위해 클립 간 납땜 방식을 적용한 결과 단위 태양전지 체결 위치에 의해 조정된 프레임 홈이 프레임 몸체로부터 떨어지는 현상이 일어남. 이는 프레임 홈이 두께가 얇아져 떨어진 것으로 추론됨. 한 면이 돌출되어 있는 단면형 클립을 적용하여 모듈 프레임에 태양전지를 연결하기 어렵다는 판단으로 양면에 태양전지 연결이 가능한 클립을 혼합하여 사용하기 위해 모듈 프레임을 다시 설계하여 5개의 단위 태양전지를 직렬 연결한 후 측정함.

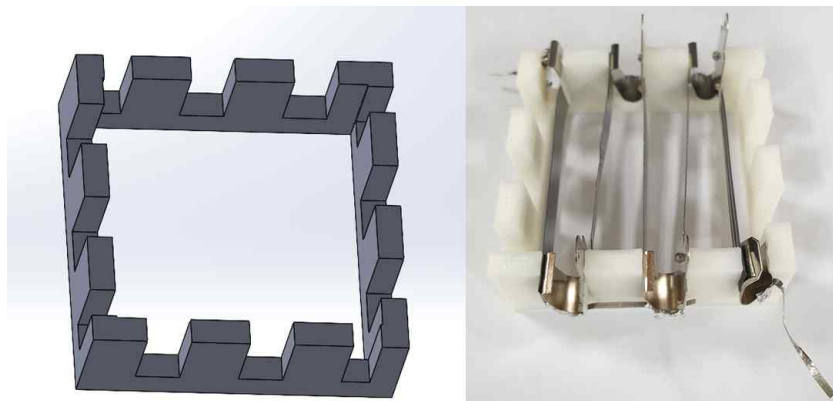


그림 122. (좌) 단면 클립과 양면 클립을 혼합 적용하기 위한 모듈 프레임 설계 이미지, (우) 제작된 모듈 프레임에 단위 태양전지 5개를 직렬 연결한 사진

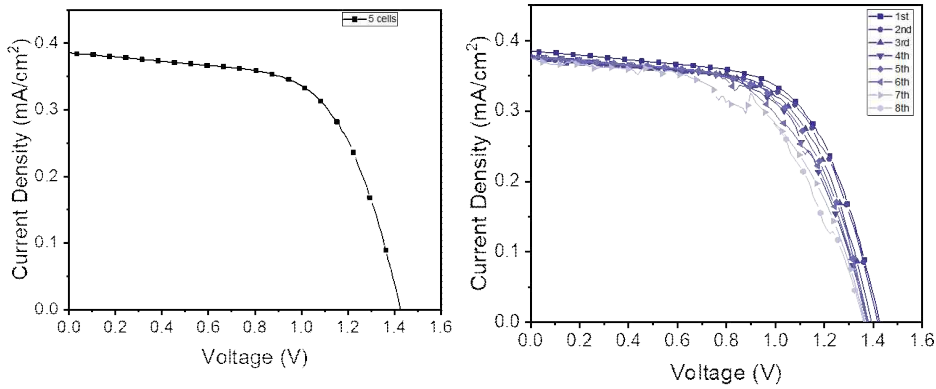


그림 123. (좌) 단면, 양면클립을 혼용한 태양광 모듈 프레임에 5개의 단위 태양전지를 직렬 연결하여 측정된 J - V curve, (우) 측정 횟수에 따른 J - V curve 변화

- 단면 및 양면 클립을 적용하여 태양광 모듈 프레임에 단위 태양전지를 5개 직렬 연결하여 1 sun(AM 1.5G)의 광 세기 하에서 측정을 진행하였음. 모듈 프레임에 체결된 태양전지의 수광면은 광원으로부터 수직 방향이며 위 그림과 같은 J-V 특성이 나타남. 광활성면이 입사광에 수직이기 때문에 광전효율은 0.3%로 낮게 나타남. 또한, 단락 저항이 여전히 낮게 나타나고, 5개의 단위 태양전지를 직렬 연결한 태양전지의 이론적인 개방전압(약 3.5 V) 대비 낮은 개방전압(약 1.4 V)이 측정됨. 이는 단위 태양전지의 수광면이 광원으로부터 수직 방향으로 정렬되어 1 sun의 광세기로 조사하였으나 실제 태양전지 수광면에서의 광밀도가 감소하여 이에 따른 영향으로 개방전압 및 단락전류밀도가 낮게 측정되어 효율이 낮은 것으로 추론됨. 이론적으로는 0%의 효율을 기록해야 하는 것이 맞으나, 프레임, 클립 또는 태양전지 후면전극에서의 빛 반사에 의한 영향과 태양전지가 완벽하게 지면으로부터 수직으로 체결이 되어있지 않을 수도 있는 원인으로 낮은 효율이 기록된 것으로도 추론됨. 태양광 모듈을 7회 재측정한 결과,  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ , FF 모두 감소하는 경향을 확인했으며, 이는 태양전지의 열화 및 태양전지 전극간 접촉 불량에 따른 것으로 예상됨.

### 테이프형 전극 설계(구리)

- 클립을 태양광 모듈에 적용하면 태양전지를 태양광 모듈에 쉽게 체결할 수 있지만 클립의 규격에 따라 일정 개수 이상의 태양전지 적용이 어려워 모듈 구조 설계가 제한됨. 따라서 태양전지의 체결이 용이하고, 모듈 구조 설계가 비교적 자유로운 테이프형 전극 도입에 대한 연구를 진행하였음.
- 도전성 테이프의 가능성을 확인하기 위해 시중에 판매하는 구리 및 알루미늄 테이프를 이용하여 태양광 모듈 프레임에 적용하고자 테이프형 전극을 위한 모듈 프레임을 설계함.

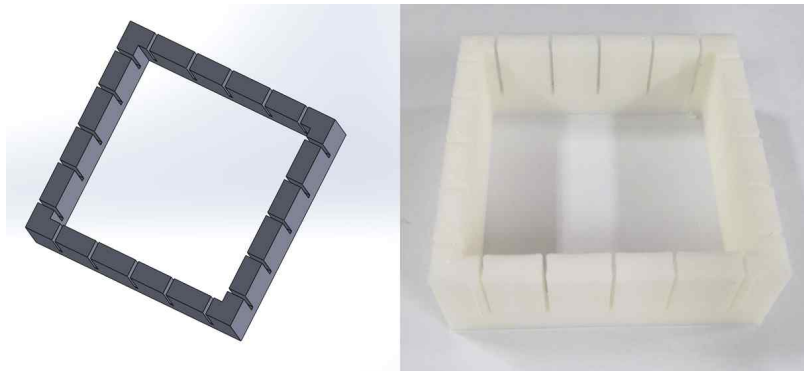


그림 124. 테이프형 전극 체결용 태양광 모듈 프레임 (좌) 설계 이미지 및 (우) 3D 프린터를 이용하여 제작한 프레임 사진

- 클립형 전극은 클립의 규격을 고려하여 태양광 모듈 프레임의 홈 두께를 설계해야 하는 반면, 테이프형 전극은 두께가 얇아 이를 크게 고려하지 않아도 되므로 모듈 프레임 구조를 구성하기 용이함. 테이프를 프레임에 적용하기 위해 태양전지 체결 홈은 1 mm으로 설정하여 프레임을 제작 후 테이프를 적용하였음. 테이프형 전극이 전극으로 작용하는지 확인하고자 태양전지 두 개를 연결하고, 멀티미터로 저항을 측정된 결과 저항이 측정되지 않았고, 이는 넓은 체결 홈 간격에 의해 태양전지와 테이프 전극이 접촉되지 않은 현상으로 확인되어 모듈 프레임의 태양전지 체결 홈 간격을 0.5 mm로 줄여 재제작함.

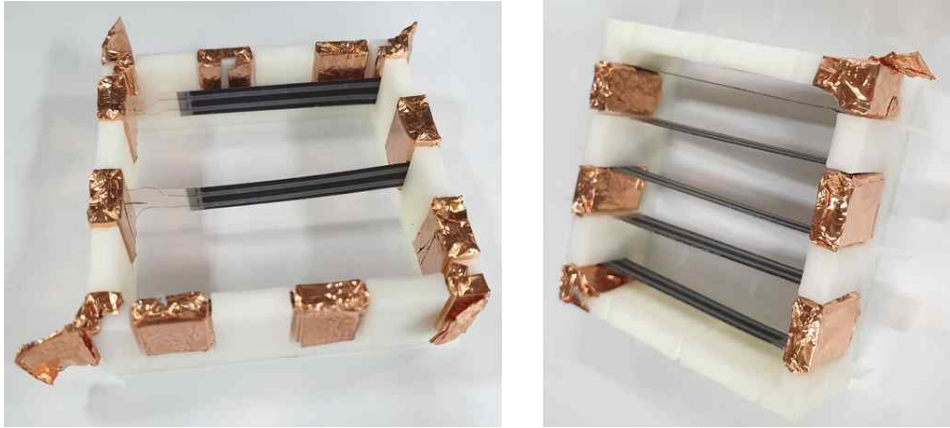


그림 125. (좌) 구리 테이프의 전극 가능성 확인하기 위해 태양전지 두 개를 체결한 이미지, (우) 구리 테이프를 적용한 체결 홈 간격이 조절된 모듈 프레임의 단위 태양전지 5개를 직렬 연결한 이미지

- 모듈 프레임의 태양전지 체결 홈 간격을 0.5 mm으로 줄인 후 구리 테이프를 태양전지 체결 홈에 감아 부착하는 방법을 적용하여 단위 태양전지를 5개 직렬 연결하였음. 멀티미터로 저항을 확인한 결과 저항이 측정되어 태양광 모듈의 태양전지 연결을 확인하였고, 1 sun 하에서 태양광 모듈의 광전효율을 측정된 결과 약 0.3%의 광전효율이 측정됨. 클립을 사용한 태양광 모듈과 비슷한 수준의 효율이 측정되었지만, 낮은 단락 저항과 FF를 기록함. 모듈 프레임의 태양전지 체결 홈 간격을 줄여 태양전지 간 연결은 구현하였으나, 태양전지와 테이프형 전극 사이의 낮은 접촉압력에 기인하여 단락저항이 낮은 것으로 추측됨.
- 테이프를 틀에 감아 부착하는 방식을 적용하였을 때 J-V curve에서 낮은 단락 저항을 기록하였으므로, 태양전지와 테이프와의 접촉을 보완하기 위해 태양전지에 테이프형 전극을 적용함. 테이프형 전극을 태양전지에 직접 적용한 경우, 기존의 테이프 전극과 태양전지 간 접촉불량이 개선되며, 모듈 프레임의 추가적인 설계 없이 태양전지의 다양한 연결 구조를 시험할 수 있으므로 연구를 효율적으로 진행할 수 있는 장점이 있음.

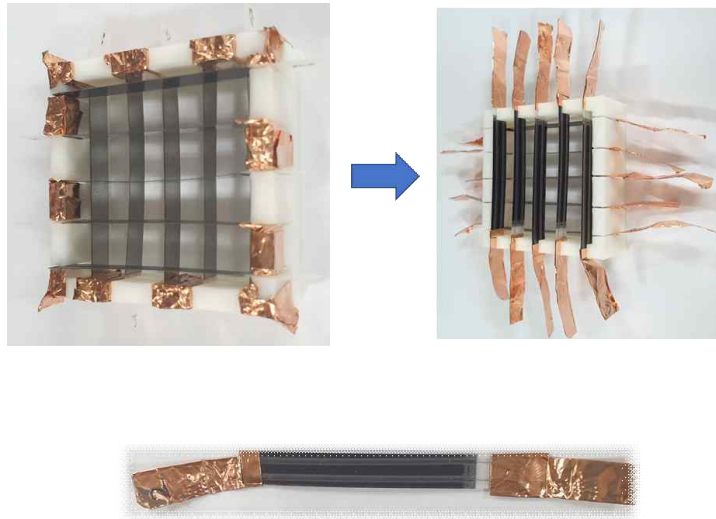


그림 126. (상) 테이프형 전극을 적용한 모듈 프레임과 테이프를 태양전지에 직접 적용하여 체결한 태양광 모듈 이미지, (하) 테이프 전극이 적용된 단위 태양전지 사진

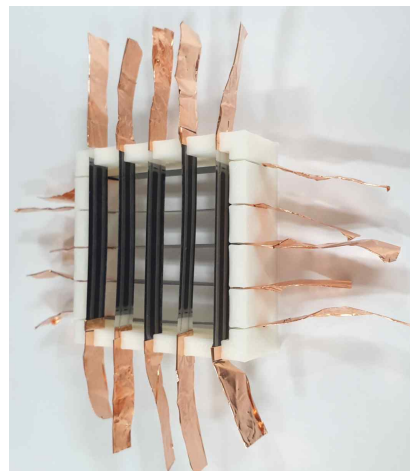


그림 127. 테이프를 단위 태양전지에 직접 붙여 프레임에 체결한 태양광 모듈 이미지

- 테이프를 단위 태양전지에 직접 붙인 후 태양광 모듈 프레임에 체결하였음. 태양광 모듈의 광전효율을 측정하기 위해 각 층의 단위 태양전지는 직렬 연결하였고, 각 층간 직렬 연결한 태양전지는 병렬 연결함. 본 연구에서 광전효율을 측정하기 위해 사용하는 가변 전위기(potentiostat)의 장비 스펙 상 5 V를 초과할 수 없어 1층과 2층은 병렬로 연결하여 광전효율을 측정함.
- 테이프형 전극을 태양전지에 직접 연결한 태양광 모듈의 광전효율을 3회 측정한 결과 평균 효율은 0.379%로 측정됨. 태양광 모듈 프레임에 테이프형 전극을 붙여 적용한 모듈과 광전특성 파마리터 차이가 크게 없는 것으로 확인되며, 이는 단위 태양전지의 수광 각도가  $0^\circ$  인 영향이 큰 것으로 판단됨. 따라서 수광 각도의 영향을 줄이기 위해 태양전지의 각도를  $90^\circ$  로 설정하고 태양전지와 전극 간 연결방식에 따른 접촉 불량 정도를 확인하기 위해 단위 태양전지를 적용할 수 있는 프레임을 제작하여 태양광 모듈 체결용 전극으로 연결한 단위 태양전지의 광전효율과 전극을 연결하지 않은 단위 태양전지의 광전효율을 측정함.

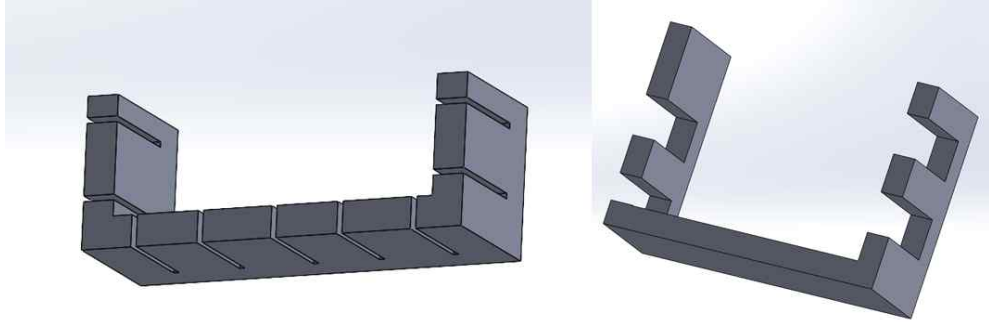


그림 128. (좌) 테이프형 전극 체결용 프레임, (우) 클립형 전극 체결용 프레임 설계 이미지

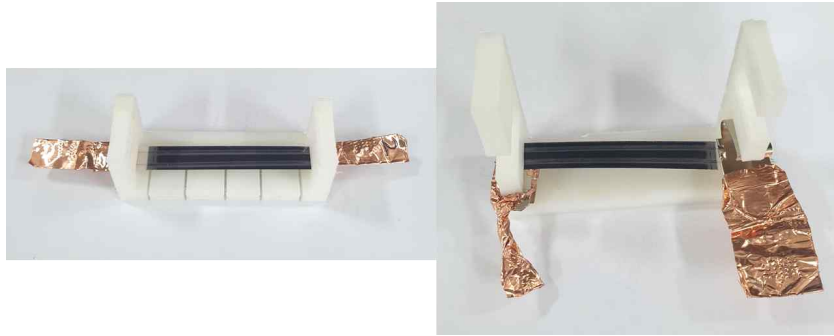


그림 129. 3D 프린터로 제작된 모듈 프레임에 단위 태양전지 체결된 이미지. (좌)테이프형 전극 체결용 프레임, (우)클립형 전극 체결용 프레임

- 측정 결과 테이프형 전극이 연결된 단위 태양전지와 전극을 연결하지 않고 가변 전위기에 직접 연결한 단위 태양전지의 광전효율 파라미터를 살펴보면 테이프형 전극이 연결된 단위 태양전지의 광전효율이 소폭 하락하나, FF를 제외한 다른 파라미터에서 큰 변화가 없는 것으로 확인됨. 두 전클립형 전극을 적용할 경우에도 전극을 연결하지 않은 단위 태양전지와 큰 효율 변화가 없는 것으로 확인됨. 따라서 단위 태양전지 스케일에서의 전극 적용은 태양전지의 효율에 큰 차이가 없으며, 태양광 모듈 프레임에 직렬 연결된 태양전지의 효율은 전극에 상관없이 태양광 수광면에서의 각도가 효율에 큰 영향을 미치는 것으로 판단함.

표 10 테이프 적용 전 후의 단위 태양전지의 광전효율 파라미터

	Sample 1	Sample 1 - taped	Sample 2	Sample 2 - taped	Sample 3	Sample 3 - taped
$I_{sc}$	100.9 mA	101.2 mA	88.8 mA	88.3 mA	91.4 mA	91.8 mA
$V_{oc}$	0.693 V	0.701 V	0.681 V	0.697 V	0.697 V	0.694 V
FF	59.5%	58.0%	52.8%	49.1%	55.0%	54.3%
Efficiency	15.8%	15.6%	12.1%	11.5%	13.3%	13.1%

표 11. 클립 적용 전 후의 단위 태양전지의 광전효율 파라미터

	Sample 1	Sample 1 - clipped	Sample 2	Sample 2 - clipped	Sample 3	Sample 3 - clipped
$I_{sc}$	90.9 mA	90.95 mA	97.4 mA	96.4 mA	85.2 mA	86.28 mA
$V_{oc}$	0.702 V	0.704 V	0.701 V	0.698 V	0.699 V	0.699 V
FF	60.9%	61.1%	60.3%	60.4%	62.7%	61.8%
Efficiency	14.7%	14.8%	15.6%	15.4%	14.2%	14.1%



### 테이프형 전극 설계(알루미늄)

- 각 층의 태양전지를 병렬 연결하고, 태양전지의 각 층간 직렬 연결한 적층형 태양광 모듈을 병렬-직렬 적층형 태양광 모듈이라고 정의함. 빛의 반사를 줄이기 위해 모듈 프레임 제작 재료를 백색 필라멘트에서 흑색 필라멘트로 변경함. 알루미늄 테이프 전극을 적용하고, 각 태양전지 간, 각 층간 구리 집게로 연결함. 각도에 따른 병렬-직렬 적층형 태양광 모듈의 효율을 측정함.

표 12. 알루미늄 테이프 전극이 적용된 병렬-직렬 적층형 태양광 모듈에 체결된 단위 태양전지의 광전특성 파라미터

	unit cell - 1	unit cell - 2	unit cell - 3	unit cell - 4	unit cell - 5
<b>I<sub>sc</sub></b>	90.96 mA	89.80 mA	91.47 mA	92.91 mA	91.12 mA
<b>V<sub>oc</sub></b>	0.667 V	0.671 V	0.686 V	0.666 V	0.665 V
<b>FF</b>	62.7%	64.9%	64.8%	65.2%	64.3%
<b>Efficiency</b>	14.4 %	14.8%	15.4%	15.3%	14.8%
	unit cell - 6	unit cell - 7	unit cell - 8	unit cell - 9	unit cell - 10
<b>I<sub>sc</sub></b>	90.27 mA	92.77 mA	90.14 mA	91.25 mA	91.79 mA
<b>V<sub>oc</sub></b>	0.665 V	0.675 V	0.669 V	0.671 V	0.674 V
<b>FF</b>	61.9%	63.1%	64.2%	62.6%	62.0%
<b>Efficiency</b>	14.1%	15.0%	14.7%	14.5%	14.5%

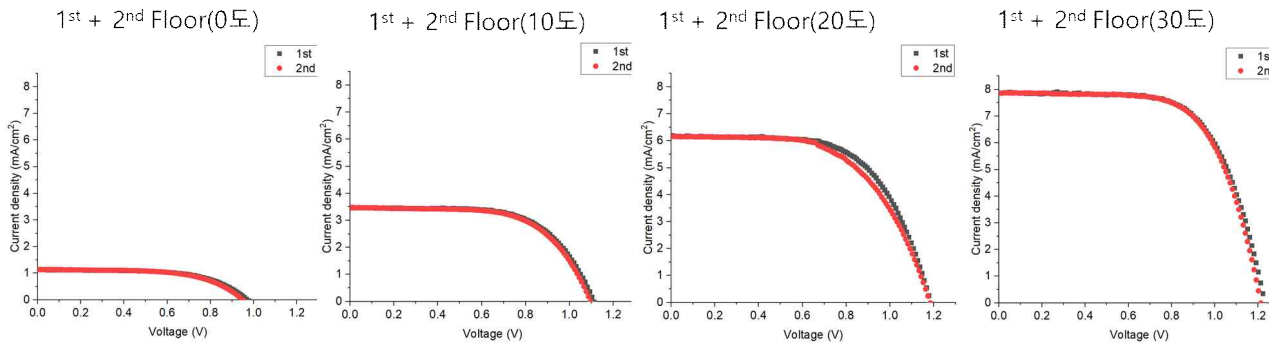


그림 130. 태양전지 각도에 따른 알루미늄 테이프 전극 적용한 병렬-직렬 적층형 태양광 모듈의 J - V curve. 좌측에서부터 0°, 10°, 20°, 30°

표 12. 알루미늄 테이프 전극이 적용된 병렬-직렬 적층형 태양광 모듈의 태양전지 각도에 따른 광전특성 파라미터

1차 측정	0°	10°	20°	30°
<b>I<sub>sc</sub></b>	19.98 mA	61.37 mA	109.34 mA	139.31 mA
<b>V<sub>oc</sub></b>	0.972 V	1.111 V	1.187 V	1.231 V
<b>FF</b>	60.6%	62.9%	61.4%	65.0%
<b>Efficiency</b>	0.67%	2.43%	4.51%	6.32%
2차 측정	0°	10°	20°	30°

<b>I<sub>sc</sub></b>	20.13 mA	61.19 mA	108.60 mA	138.61 mA
<b>V<sub>oc</sub></b>	0.950 V	1.097 V	1.183 V	1.213 V
<b>FF</b>	59.9%	62.7%	58.2%	65.9%
<b>Efficiency</b>	0.65%	2.38%	4.24%	6.29%

- 알루미늄 전도성 테이프를 사용한 경우, 구리 전도성 테이프에 비해 I<sub>sc</sub>가 감소함을 확인함. 이는 구리보다 높은 비저항을 가진 알루미늄의 소재 특성상 I<sub>sc</sub>가 감소된 것으로 추론됨.

## (2) 전극 포함 모듈 프레임 프로토타입 제작

### ○ 5×5 2축 적층형 태양전지 모듈 프레임 제작

#### 적층형 모듈 프레임 설계

- 이축 태양전지 간 체결이 가능하도록 태양전지의 전면전극을 포함하는 수광면을 잘라 홈을 제작하는 방법은 CIGS 태양전지 전면전극의 패터닝 손상에 따라서 태양전지의 특성이 매우 저하되기 때문에, 태양전지의 전면전극 및 수광면을 손상하지 않으며 발전할 수 있는 적층형 모듈 프레임을 설계함. 전극은 태양전지 구조에 따른 효율 분석의 용이성을 위해 테이프를 태양전지에 적용하는 방식으로 태양광 모듈에 태양전지를 체결하였음. 각 층의 태양전지는 상호간 직렬로 연결하고, 1층과 2층은 병렬로 연결하여 총 10개의 단위 태양전지를 직·병렬 연결한 태양광 모듈의 광전특성을 측정함. 태양전지의 각도를 0°로 배치하는 경우 낮은 광밀도에 의해 V<sub>oc</sub>가 현저히 감소하여 태양광 모듈의 J-V 분석이 제한되므로 모듈 프레임과 태양전지 체결 각도를 30°로 설정하여 모듈 프레임을 제작함.

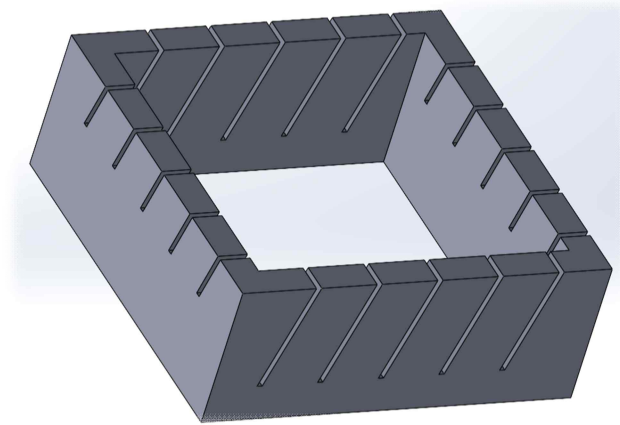


그림 131. 이축 적층형 태양광 모듈 프레임 설계 이미지

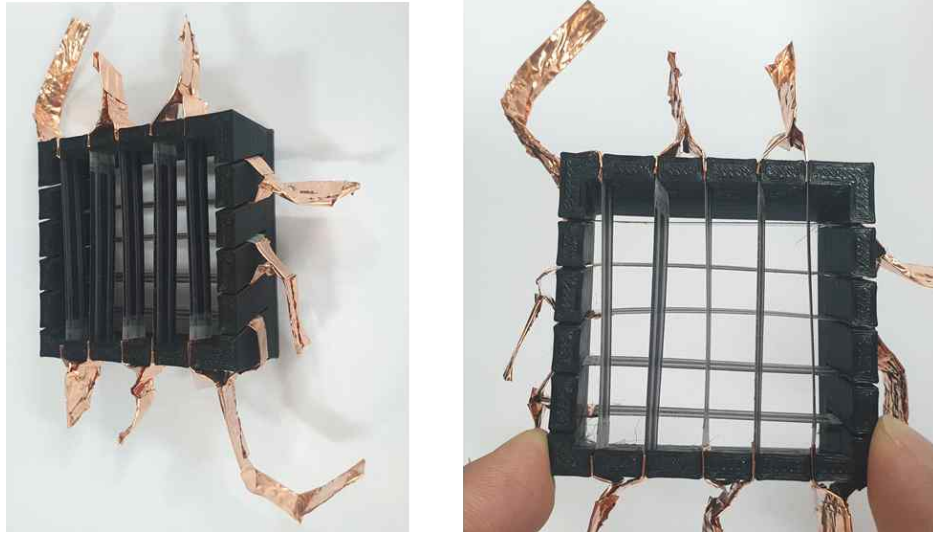


그림 132. 이축 적층형 태양광 모듈 프레임에 태양전지를 직·병렬로 체결한 사진.

### 이축 적층형 태양광 모듈 광전특성 분석

- 빛의 반사를 줄이기 위해 프레임 소재를 검정색으로 변경하였고, 이축 태양전지 간 구리 테이프를 이용하여 병렬 연결하였음. 1층 태양전지와 2층 태양전지의 광전효율 특성을 비교하기 위해 직렬 연결된 1층, 2층의 단위 태양전지 5개의 효율을 각각 측정하여 비교분석하였고, 1층, 2층의 태양전지를 병렬 연결하여 태양광 모듈 전체의 효율을 측정하였음.

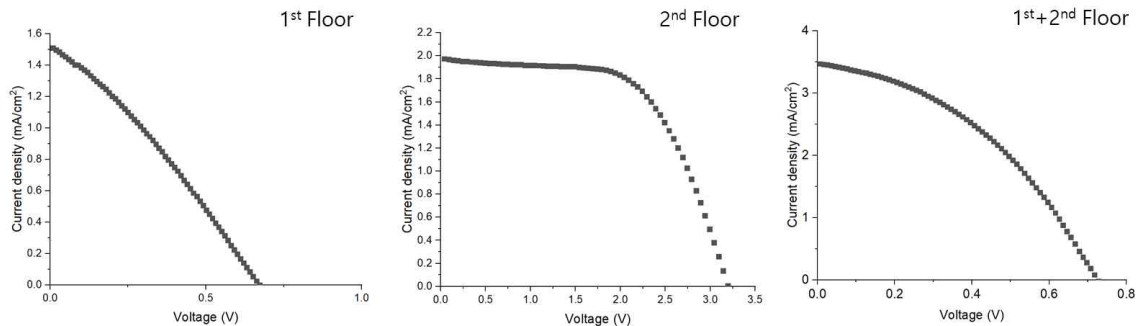


그림 133. 이축 적층형 태양광 모듈 각 층과 모듈 전체의 J - V curve

표 13. 이축 적층형 태양광 모듈 각 층 및 전체 모듈의 광전효율 파라미터

	1 <sup>st</sup> Floor	2 <sup>nd</sup> Floor	1 <sup>st</sup> +2 <sup>nd</sup> Floor
$I_{sc}$	26.97 mA	34.85 mA	61.45 mA
$V_{oc}$	0.662 V	3.194 V	0.738 V
FF	30.2%	60.2%	39.6 %
Efficiency	0.305%	3.80%	1.02 %

- 30°로 체결된 이축 적층형 태양광 모듈의 각 층과 모듈 전체의 광전효율을 비교한 결과, 각 태양전지가 직렬 연결된 2층의 효율은  $V_{oc}$ 와  $I_{sc}$ 가 감소하는 경향을 보였고, 이는 단위 태양전지 5개를 직렬 연결한 값과 유사하게 측정되었지만 1층의 태양전지 모듈은 2층의 약 절반에 해당하는 낮은 FF가 측

정됨. 이러한 현상은 태양전지 간 접촉 결함에 의한 것으로 판단되어 단위 태양전지를 교체하여 재측정함. 태양전지를 직·병렬 연결하는 경우 각각 태양전지의 가장 작은  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  값을 따르기 때문에 단위 태양전지의 효율을 개별 측정 후 비슷한 군으로 선별하여 이층 적층형 태양광 모듈에 체결 후 모듈의 광전효율을 재측정하였음.

표 14. 재측정한 이층 적층형 태양광 모듈에 사용된 단위 태양전지의 광전효율 파라미터

1차 측정	unit cell - 1	unit cell - 2	unit cell - 3	unit cell - 4	unit cell - 5
$I_{sc}$	91.42 mA	88.62 mA	90.71 mA	97.72 mA	95.37 mA
$V_{oc}$	0.701 V	0.696 V	0.697 V	0.690 V	0.699 V
FF	52.0%	50.1%	51.3%	44.2%	47.5%
Efficiency	12.6%	11.7%	12.3%	11.3%	12.0%
2차 측정	unit cell - 6	unit cell - 7	unit cell - 8	unit cell - 9	unit cell - 10
$I_{sc}$	91.48 mA	90.70 mA	90.13 mA	88.17 mA	85.52 mA
$V_{oc}$	0.655 V	0.679 V	0.687 V	0.679 V	0.676 V
FF	54.7%	49.4%	45.6%	49.2%	47.0%
Efficiency	12.5%	11.5%	10.7%	11.2%	10.3%

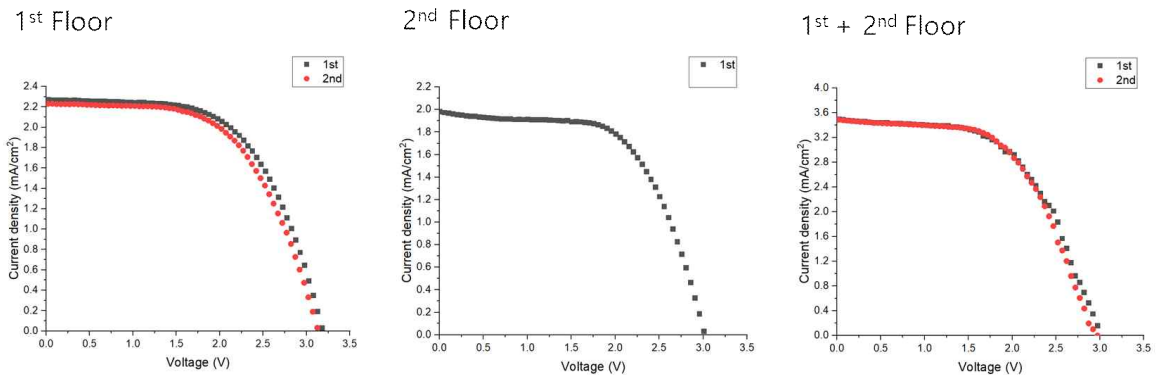


그림 134. 재측정한 이층 적층형 태양광 모듈 각 층과 모듈 전체의 J - V curve

표 15. 재측정한 이층 적층형 태양광 모듈 각 층과 모듈 전체의 광전효율 파라미터

	1 <sup>st</sup> Floor - 1 <sup>st</sup>	1 <sup>st</sup> Floor - 2 <sup>nd</sup>	2 <sup>nd</sup> Floor	1 <sup>st</sup> +2 <sup>nd</sup> Floor - 1 <sup>st</sup>	1 <sup>st</sup> +2 <sup>nd</sup> Floor - 2 <sup>nd</sup>
$I_{sc}$	40.16 mA	39.35 mA	34.95 mA	61.82 mA	61.53 mA
$V_{oc}$	3.19 V	3.13 V	3.02 V	3.032 V	2.983 V
FF	58.7%	58.0%	60.1%	55.6%	56.2%
Efficiency	4.27%	4.06%	3.61%	5.91%	5.84%

- 각 층의 광전효율을 측정할 때 다른 층의 태양전지를 탈착한 후에 측정을 진행하였고, 모듈 전체의 광전효율을 측정할 때 모든 층의 단위 태양전지를 모두 체결한 후 측정을 진행하였음. 30°의 기울기

로 태양전지가 체결된 이층 적층형 태양광 모듈의 J-V 특성을 각 층과 모듈 전체로 측정한 결과, 각 층에서는 높은 단락 저항을 나타내었음. 이를 통해 태양전지 간 접촉 결함이 없는 것을 확인하였고, 1층은 2회 측정 후 평균 4.16%의 광전효율을 기록함. 단위 태양전지는 약 0.7 V의  $V_{oc}$ 를 기록하여 직렬 연결 시 약 3.5 V의  $V_{oc}$ 를 예상하였으나, 태양전지 수광면에서 약  $30^\circ$  각도로 태양광을 수광하기 때문에 약  $\sin(\pi/6)=1/2$  sun의 광밀도로 수광함에 따른 개방전압 저하로 예상됨. 5개의 단위 태양전지가 직렬 연결된 2층의 광전효율은 3.61%로 1층의 태양전지보다 비교적 낮은 광전효율을 기록하였지만, 1층, 2층에 적용된 단위 태양전지의 광전특성 파라미터를 비교하였을 때, 2층에 적용된 단위 태양전지의 낮은 성능에 의한 것으로 판단됨.

- 직렬로 연결된 1층, 2층 태양전지를 병렬로 연결한 뒤 효율을 2회 측정하였을 때, 평균 5.87%의 광전효율을 기록함. 평균 3.008 V의  $V_{oc}$ 를 기록하였으며,  $I_{sc}$ 는 61.53 mA으로 1층과 2층 태양전지의  $I_{sc}$ 를 더한 값인 74.705 mA보다 약 18%정도 감소하였음. 이는 2층의 태양전지가 기울어져 1층 태양전지의 수광면을 가려 생기는 shading effect로 인하여  $I_{sc}$ 가 감소한 것으로 추론됨. 2층 태양전지에 의한 1층 태양전지의 shading effect 분석은 병렬-직렬 태양전지 각도별 shading effect 분석( $50-90^\circ$ )에서 후술함.

### ○ 단위 태양전지 각도별 광전특성 분석( $0-90^\circ$ )

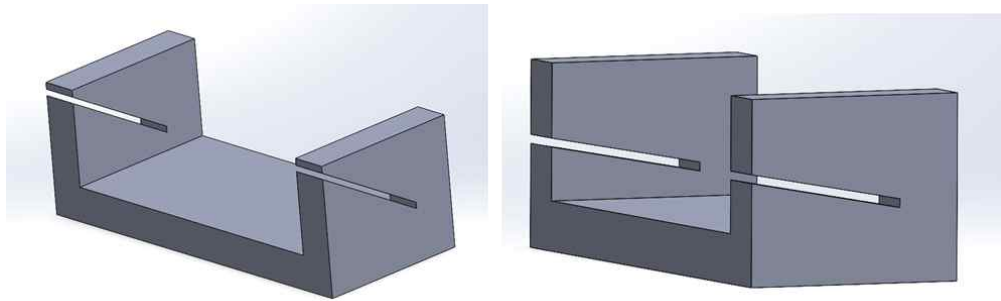


그림 135. 태양전지 각도별 체결 가능한 프레임 설계 이미지

- 적층형 태양광 모듈의 태양전지 각도에 따른 효율 변화에 대한 원인을 분석하기 위해 단위 태양전지의 각도별 광전효율을 측정함. 단위 태양전지를  $0^\circ$  부터  $10^\circ$  씩 증가한 각도로  $90^\circ$  까지 총 10개의 프레임에 체결한 후, 효율을 측정함. 각 각도  $x$ 에 따른 이론 효율은 다음과 같은 식으로 얻음.

$$E_{ideal} = E_{90^\circ} \times \sin(90^\circ - x)$$

- $E_{ideal}$ 은 태양전지의 각도가  $x$ 일 때의 효율이고,  $E_{90^\circ}$ 는 태양전지 수광면이 광원과 수직하여 1 sun일 때의 효율임.

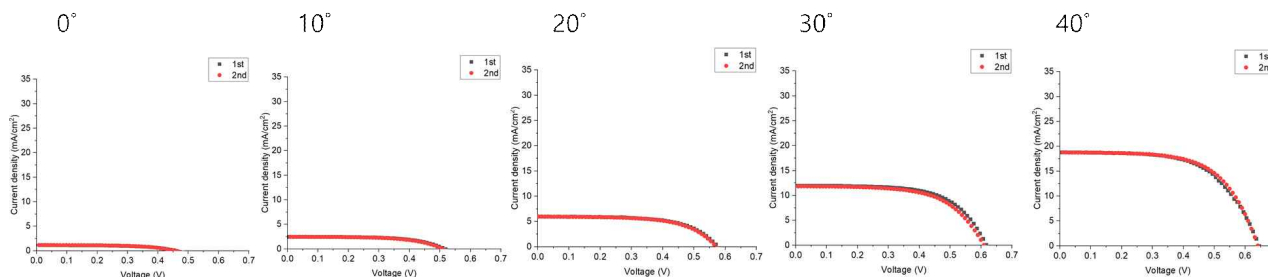


그림 136. 단위 태양전지 각도별 J-V curve(1차). 좌측부터  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$



표 16. 단위 태양전지 각도에 따른 광전특성 파라미터(0°, 10°, 20°, 30°, 40°)(1차)

1차 측정	0°	10°	20°	30°	40°
I <sub>sc</sub>	3.070 mA	6.62 mA	15.81 mA	31.64 mA	49.65 mA
V <sub>oc</sub>	0.460 V	0.517 V	0.576 V	0.617 V	0.645 V
FF	56.9%	59.7%	61.4%	62.1%	60.0%
Efficiency	0.30%	0.77%	2.12%	4.60%	7.28%
2차 측정	0°	10°	20°	30°	40°
I <sub>sc</sub>	3.096 mA	6.51 mA	15.77 mA	31.23 mA	49.62 mA
V <sub>oc</sub>	0.458 V	0.510 V	0.571 V	0.610 V	0.641 V
FF	56.5%	59.0%	61.0%	60.7%	61.7%
Efficiency	0.30%	0.74%	2.08%	4.38%	7.44%

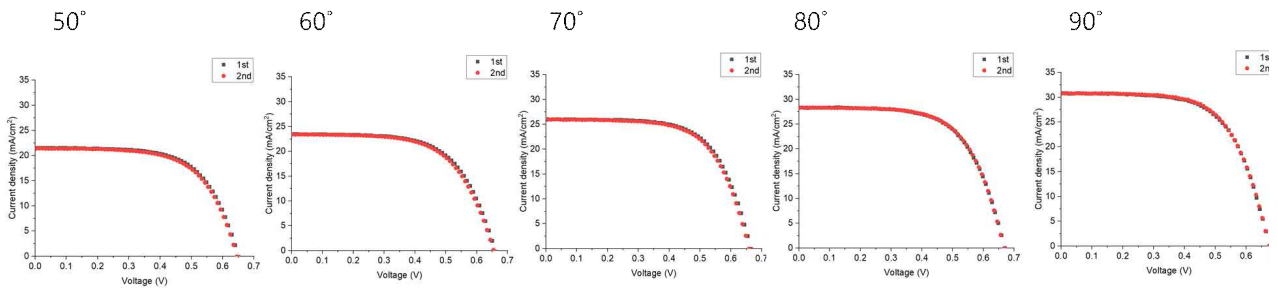


그림 137. 단위 태양전지 각도별 J - V curve(1차). 좌측부터 50°, 60°, 70°, 80°, 90°

표 17. 단위 태양전지 각도에 따른 광전특성 파라미터(50°, 60°, 70°, 80°, 90°)(1차)

1차 측정	50°	60°	70°	80°	90°
I <sub>sc</sub>	56.84 mA	62.00 mA	68.57 mA	74.90 mA	81.40 mA
V <sub>oc</sub>	0.649 V	0.659 V	0.665 V	0.670 V	0.631 V
FF	63.7%	62.1%	64.7%	63.1%	63.1%
Efficiency	8.90%	9.62%	11.18%	11.98%	13.14%
2차 측정	50°	60°	70°	80°	90°
I <sub>sc</sub>	56.46 mA	61.75 mA	68.75 mA	74.76 mA	81.18 mA
V <sub>oc</sub>	0.645 V	0.655 V	0.659 V	0.667 V	0.638 V
FF	60.2%	61.8%	64.2%	63.6%	63.8%
Efficiency	8.73%	9.47%	11.01%	12.02%	13.23%

표 17. 단위 태양전지 각도에 따른 효율 비교(1차)

1차 측정	0°	10°	20°	30°	40°
이론 효율		2.28%	4.49%	6.57%	8.44%
실제 효율	0.30%	0.77%	2.12%	4.60%	7.28%
이격률		66.22%	52.78%	29.98%	13.74%

	50°	60°	70°	80°	90°
이론 효율	10.06%	11.37%	12.34%	12.94%	
실제 효율	8.90%	9.62%	11.18%	11.98%	13.14%
이격률	11.53%	15.39%	9.40%	7.41%	
2차 측정	0°	10°	20°	30°	40°
이론 효율		2.29%	4.52%	6.61%	8.50%
실제 효율	0.30%	0.74%	2.08%	4.38%	7.44%
이격률		67.68%	53.98%	33.73%	12.47%
	50°	60°	70°	80°	90°
이론 효율	10.13%	11.45%	12.43%	13.02%	
실제 효율	8.73%	9.47%	11.01%	12.02%	13.23%
이격률	13.82%	17.29%	11.42%	7.68%	

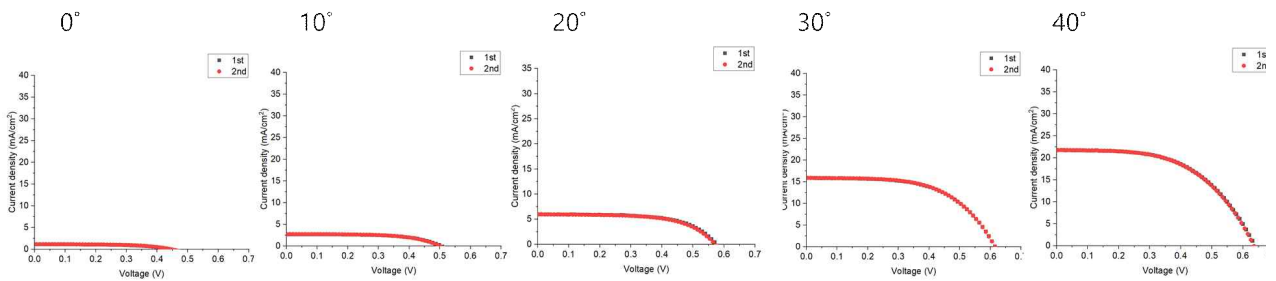


그림 138. 단위 태양전지 각도별 J - V curve(2차). 좌측부터 0°, 10°, 20°, 30°, 40°

표 18. 단위 태양전지 각도에 따른 광전특성 파라미터(0°, 10°, 20°, 30°, 40°)(2차)

1차 측정	0°	10°	20°	30°	40°
$I_{sc}$	2.48 mA	5.88 mA	22.13 mA	34.06 mA	46.69 mA
$V_{oc}$	0.446 V	0.505 V	0.591 V	0.615 V	0.638 V
FF	56.6%	59.5%	58.1%	57.3%	54.0%
Efficiency	0.29%	0.82%	3.54%	5.60%	7.50%
2차 측정	0°	10°	20°	30°	40°
$I_{sc}$	2.49 mA	5.90 mA	22.13 mA	34.10 mA	46.70 mA
$V_{oc}$	0.446 V	0.501 V	0.587 V	0.615 V	0.635 V
FF	56.8%	59.4%	58.1%	57.4%	54.1%
Efficiency	0.29%	0.82%	3.52%	5.62%	7.47%

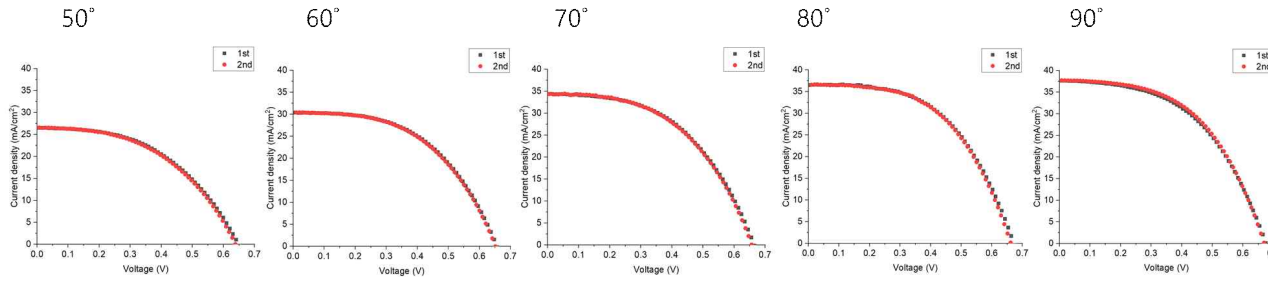


그림 139. 단위 태양전지 각도별 J - V curve(2차) 이미지. 좌측부터 50°, 60°, 70°, 80°, 90°

표 19. 단위 태양전지 각도에 따른 광전특성 파라미터(50°, 60°, 70°, 80°, 90°)(2차)

1차 측정	50°	60°	70°	80°	90°
I <sub>sc</sub>	57.00 mA	65.27 mA	73.90 mA	78.46 mA	80.82 mA
V <sub>oc</sub>	0.647 V	0.656 V	0.664 V	0.672 V	0.675 V
FF	47.8%	50.8%	49.7%	52.5%	50.5%
Efficiency	8.22%	10.13%	11.37%	12.89%	12.84%
2차 측정	50°	60°	70°	80°	90°
I <sub>sc</sub>	57.11 mA	65.32 mA	73.72 mA	78.54 mA	80.99 mA
V <sub>oc</sub>	0.638 V	0.651 V	0.657 V	0.662 V	0.670 V
FF	47.6%	50.6%	50.0%	52.8%	51.8%
Efficiency	8.09%	10.03%	11.28%	12.80%	13.11%

표 20. 단위 태양전지 각도에 따른 효율 비교(2차)

1차 측정	0°	10°	20°	30°	40°
이론 효율		2.22%	4.39%	6.42%	8.25%
실제 효율	0.29%	0.82%	3.54%	5.60%	7.50%
이격률		63.06%	19.36%	12.77%	9.09%
	50°	60°	70°	80°	90°
이론 효율	9.83%	11.11%	12.06%	12.64%	
실제 효율	8.22%	10.13%	11.37%	12.89%	12.84%
이격률	16.37%	8.82%	5.72%	-1.97%	
2차 측정	0°	10°	20°	30°	40°
이론 효율		2.27%	4.48%	6.55%	8.42%
실제 효율	0.29%	0.82%	3.52%	5.62%	7.47%
이격률		63.87%	21.42%	14.19%	11.28%
	50°	60°	70°	80°	90°
이론 효율	10.04%	11.35%	12.31%	12.91%	

실제 효율	8.09%	10.03%	11.28%	12.80%	13.11%
이격률	19.42%	11.62%	8.36%	0.85%	

- 태양전지 체결 각도가 90°에서 0°로 내려감에 따라 광밀도 감소만을 적용한 이론 효율에 따른 실제 효율의 차이가 증가함. 태양광 모듈의  $V_{oc}$ 는 FF가 낮고 직렬 저항(series resistance)가 높을수록 광밀도에 따라 값이 크게 변함. 태양광 모듈의 이격률은 낮은 각도를 제외하고 이격률이 20% 미만인 것을 확인함. 전극 소재의 영향을 확인하기 위해 알루미늄 테이프로 단위 태양전지의 각도별 광전효율을 측정함.

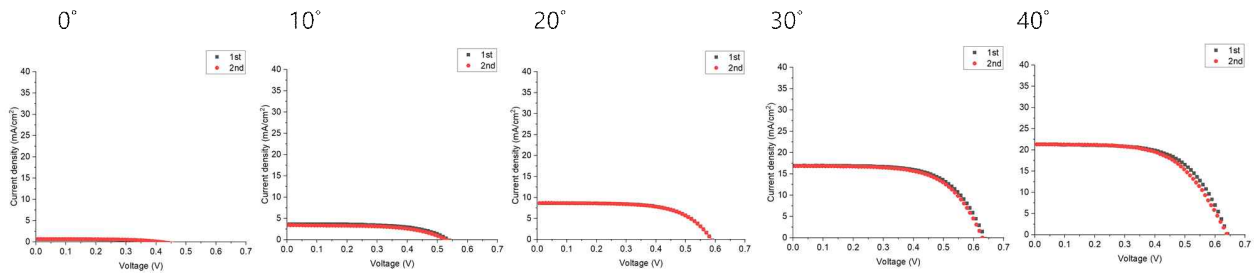


그림 140. 단위 태양전지 각도별 J - V curve(3차). 좌측부터 0°, 10°, 20°, 30°, 40°

표 21. 단위 태양전지 각도에 따른 광전특성 파라미터(0°, 10°, 20°, 30°, 40°)(3차)

1차 측정	0°	10°	20°	30°	40°
$I_{sc}$	1.42 mA	7.92 mA	18.61 mA	36.34 mA	45.77 mA
$V_{oc}$	0.415 V	0.537 V	0.588 V	0.636 V	0.642 V
FF	55.6%	59.7%	63.1%	63.5%	61.7%
Efficiency	0.15%	1.18%	3.22%	6.84%	8.45%
2차 측정	0°	10°	20°	30°	40°
$I_{sc}$	1.42 mA	7.31 mA	18.69 mA	36.13 mA	45.61 mA
$V_{oc}$	0.414 V	0.530 V	0.587 V	0.629 V	0.640 V
FF	55.7%	57.7%	62.5%	62.6%	59.5%
Efficiency	0.15%	1.04%	3.19%	6.63%	8.10%

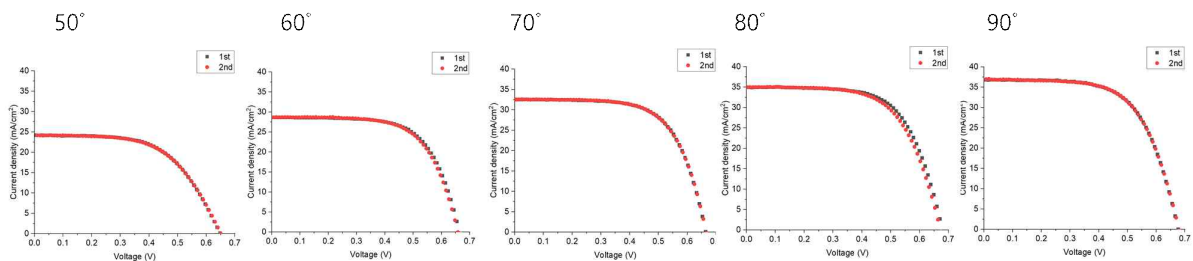


그림 141. 단위 태양전지 각도별 J - V curve(3차). 좌측부터 50°, 60°, 70°, 80°, 90°

표 21. 단위 태양전지 각도에 따른 광전특성 파라미터(50°, 60°, 70°, 80°, 90°)(3차)

1차 측정	50°	60°	70°	80°	90°
I <sub>sc</sub>	51.89 mA	61.53 mA	69.94 mA	75.15 mA	79.06 mA
V <sub>oc</sub>	0.648 V	0.664 V	0.664 V	0.678 V	0.676 V
FF	57.6%	65.1%	65.1%	64.1%	63.2%
Efficiency	9.03%	12.40%	14.11%	15.23%	15.76%
2차 측정	50°	60°	70°	80°	90°
I <sub>sc</sub>	51.92 mA	61.68 mA	69.79 mA	75.07 mA	79.23 mA
V <sub>oc</sub>	0.650 V	0.658 V	0.649 V	0.673 V	0.679 V
FF	57.3%	64.6%	64.9%	62.6%	62.7%
Efficiency	9.02%	12.23%	14.08%	14.75%	15.72%

표 22. 단위 태양전지 각도에 따른 효율 비교(3차)

1차 측정	0°	10°	20°	30°	40°
이론 효율		2.73%	5.38%	7.88%	10.12%
실제 효율	0.15%	1.18%	3.22%	6.84%	8.45%
이격률		56.77%	40.14%	13.19%	16.50%
	50°	60°	70°	80°	90°
이론 효율	12.07%	13.64%	14.80%	15.52%	
실제 효율	9.03%	12.40%	14.11%	15.23%	15.76%
이격률	25.18%	9.09%	4.66%	1.86%	
2차 측정	0°	10°	20°	30°	40°
이론 효율		2.72%	5.37%	7.86%	10.10%
실제 효율	0.15%	1.04%	3.19%	6.63%	8.10%
이격률		61.76%	40.59%	15.64%	19.80%
	50°	60°	70°	80°	90°
이론 효율	12.04%	13.61%	14.77%	15.48%	
실제 효율	9.02%	12.23%	14.08%	14.75%	15.72%
이격률	25.08%	10.13%	4.67%	4.71%	

- 알루미늄 테이프도 마찬가지로 일정 각도 이상에서는 20% 이하의 낮은 이격률을 기록하였으나, 10°, 20°의 낮은 각도에서 이격률이 커지는 것으로 확인됨. 이는 태양전지의 높은 직렬저항으로 인하여 각도에 따라서 광 세기가 감소할 시, 개방전압이 감소하여 이격률이 증가한 것으로 판단됨.



○ 각도에 따른 적층형 태양광 모듈 설계 및 효율 특성평가

직렬-병렬 적층형 태양광 모듈 각도별 효율 측정(0°, 10°, 20°, 30°)

- 적층형 태양광 모듈 프레임에 단위 태양전지를 기울여 체결할 때, 태양광 모듈의 광전특성을 각도에 따라 비교함. 태양전지의 각도에 따라(0°, 10°, 20°, 30°) 적층형 태양광 모듈 프레임을 제작함. 적층형 태양광 모듈 구조에 의해 2층의 단위 태양전지들이 1층의 태양전지를 가리게 되는데, 각도에 따라 1층의 태양전지를 가리는 면적이 넓어짐. 각도에 따른 1층 태양전지의 shading effect의 영향을 알아보기 위해 태양광 모듈의 수광 면적 대비 태양전지가 차지하는 면적을 계산함.  $\theta$ 는 태양전지 수광면과 빛의 각도이며,

$$X = (\text{태양전지의 폭}) \times \sin(\theta)$$

$$(\text{모듈 수광면적 대비 태양전지의 수광 면적}) = (\text{충진률}) =$$

$$\frac{(\text{태양전지 갯수}) \times (\text{프레임 너비} + \text{프레임 폭}) \times X - (\text{태양전지 갯수}/2) \times X^2}{(\text{프레임 너비} \times \text{프레임 폭})}$$

으로 태양전지의 충진률을 계산함. 프레임 한 축에 같은 개수에 태양전지를 체결한 것으로 가정하였고, 프레임 너비 및 프레임 폭은 상용 CIGS 태양전지의 길이에 최적화된 너비(4.2 cm)를 적용함. 프레임의 한 축에는 다섯 개의 태양전지를 체결하여 총 10개의 태양전지를 체결하여 계산함. 90°를 기준으로 각도에 따라 이론 광전효율에 충진률을 곱한 후 실제 광전효율과 값을 비교함. 각 층의 태양전지는 직렬 연결하였고, 층간 병렬 연결한 태양광 모듈로 측정을 진행함. 각 층의 태양전지 간 직렬 연결하고, 각 층의 태양전지를 병렬 연결한 적층형 태양광 모듈을 직렬-병렬 태양광 모듈로 정의함.

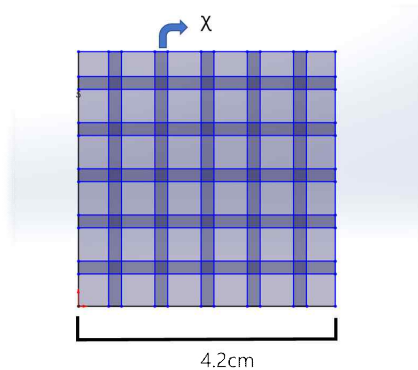


그림 142. 적층형 태양광 모듈의 태양전지 평면도. X는 각도에 따른 단위 태양전지의 너비, 파란 면은 태양전지의 면적을 가리킴

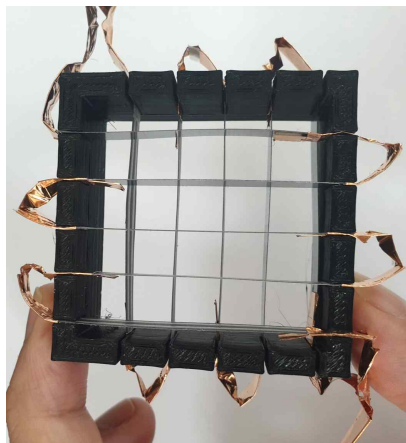


그림 143. 직렬-병렬 적층형 태양광 모듈 사진

표 23. 직렬-병렬 태양광 모듈에 체결된 단위 태양전지의 광전특성 파라미터

	unit cell - 1	unit cell - 2	unit cell - 3	unit cell - 4	unit cell - 5
$I_{sc}$	92.81 mA	94.03 mA	94.47 mA	94.50 mA	89.96 mA
$V_{oc}$	0.711 V	0.703 V	0.698 V	0.699 V	0.697 V
FF	62.4%	62.6%	60.5%	63.5%	63.3%
Efficiency	15.6%	15.7 %	15.1%	15.9%	15.0%
	unit cell - 6	unit cell - 7	unit cell - 8	unit cell - 9	unit cell - 10
$I_{sc}$	91.69 mA	97.21 mA	89.33 mA	96.24 mA	92.51 mA
$V_{oc}$	0.696 V	0.710 V	0.702 V	0.707 V	0.701 V
FF	64.0%	62.0%	61.9%	63.0%	60.7%
Efficiency	15.5%	16.2%	14.7%	16.2%	14.9%

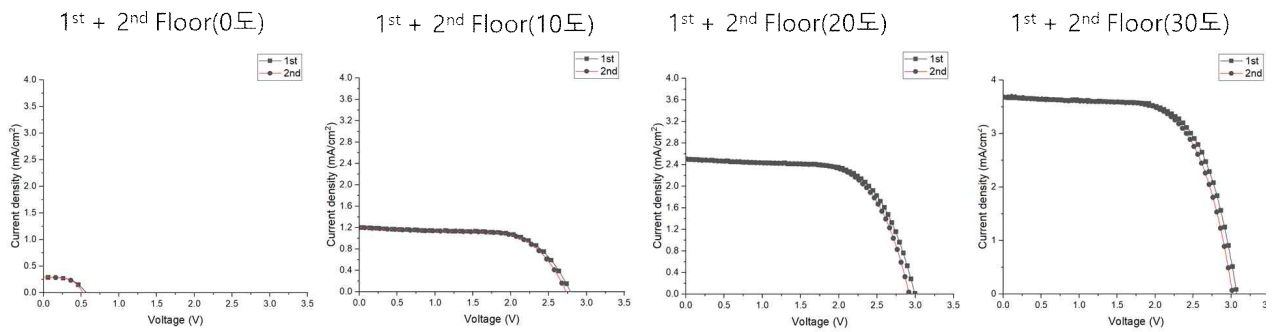


그림 144. 태양전지 각도에 따른 직렬-병렬 적층형 태양광 모듈 J - V curve. 좌측에서부터 0°, 10°, 20°, 30°

표 24. 태양전지 각도에 따른 직렬-병렬 적층형 태양광 모듈의 광전특성 파라미터

1차 측정	0°	10°	20°	30°
$I_{sc}$	5.183 mA	21.25 mA	44.26 mA	65.02 mA
$V_{oc}$	0.572 V	2.788 V	2.994 V	3.073 V
FF	51.8%	65.4%	65.5%	67.0%
Efficiency	0.09%	1.63%	4.92%	7.59%
2차 측정	0°	10°	20°	30°
$I_{sc}$	5.186 mA	21.21 mA	44.15 mA	64.95 mA
$V_{oc}$	0.520 V	2.732 V	2.920 V	3.019 V
FF	55.6%	65.4%	65.8%	66.2%
Efficiency	0.08%	1.54%	4.81%	7.36%

표 25. 태양전지 각도에 따른 직렬-병렬 적층형 태양광 모듈의 효율 비교

1차 측정	90°	30°	20°	10°	0°
이론 효율		9.66%	7.10%	3.87%	0%
실제 효율	15.48%	7.59%	4.92%	1.63%	0.09%
이격률		21.42%	30.70%	57.88%	
2차 측정	90°	30°	20°	10°	0°
이론 효율		9.66%	7.10%	3.87%	0%
실제 효율	15.48%	7.36%	4.81%	1.54%	0.08%
이격률		23.80%	32.25%	60.20%	

- 이론 효율로 제시한 15.48%은 단위 태양전지 10개의 광전효율의 평균값이며, 각 각도의 이론 효율은 90°의 이론효율에 각도에 따른 충전률을 곱하여 계산함. 이론 효율의 값은 태양전지의 직·병렬 연결의 shading effect에 따른 영향을 계산하지 않음. 따라서 각도가 커질수록 2층 태양전지에 의한 shading effect가 커져 실제 효율과 이론 효율의 오차율이 높을 것으로 예상하였지만, 실제로 직렬-병렬 적층형 태양광 모듈의 경우 각도가 0°에 가까워질수록 이론 효율 대비 실제 효율의 오차율이 증가함. 이는 shading effect보다 태양전지의 기울기에 따른 빛의 세기가 더 큰 영향을 준다고 판단됨. 따라서 저각도 뿐만 아니라 모든 각도에서 적층형 태양광 모듈의 광전특성에 대한 비교가 필요하며, 병렬-직렬 적층형 태양광 모듈의 광전특성과 비교할 필요가 있음.

**병렬-직렬 적층형 태양광 모듈 각도별 효율 측정(10°, 20°, 30°)**

- 각 층 태양전지 간 병렬 연결, 각 층 간 직렬 연결한 적층형 태양광 모듈을 병렬-직렬 적층형 태양광 모듈로 정의함. 측정 결과 단위 태양전지의 평균 효율이 직렬-병렬 적층형 태양광 모듈에 사용된 단위 태양전지보다 낮은 값으로 측정되어 30° 기울어진 태양전지 체결된 태양광 모듈의 광전효율을 비교하였을 때, 평균 약 6.15%로 낮은 값이 측정됨. 하지만, 10° 기울어진 태양전지 체결된 태양광 모듈에서는 병렬-직렬 태양광 모듈이 더 높은 효율과 낮은 이격률을 기록함. 이는 태양전지 고유의 낮은 FF 값으로 인하여 낮은 광조사 각도에서  $V_{OC}$  값이  $I_{SC}$  감소율보다 크게 감소된 것으로 판단됨.



그림 145. 병렬-직렬 연결된 단위 태양전지 사진

표 26. 병렬-직렬 태양광 모듈에 체결된 단위 태양전지의 광전특성 파라미터

	unit cell - 1	unit cell - 2	unit cell - 3	unit cell - 4	unit cell - 5
$I_{sc}$	82.65 mA	78.66 mA	80.80 mA	69.16 mA	89.94 mA
$V_{oc}$	0.664 V	0.667 V	0.681 V	0.681 V	0.673 V
FF	58.3%	55.5%	57.8%	67.0%	58.7%
Efficiency	12.1%	11.0%	12.1%	12.0%	13.4%
	unit cell - 6	unit cell - 7	unit cell - 8	unit cell - 9	unit cell - 10
$I_{sc}$	87.78 mA	86.41 mA	80.76 mA	73.50 mA	82.74 mA
$V_{oc}$	0.684 V	0.686 V	0.668 V	0.666 V	0.676 V
FF	63.9%	57.9%	56.2%	61.0%	58.5%
Efficiency	14.5%	13.0%	11.5%	11.3%	12.4%

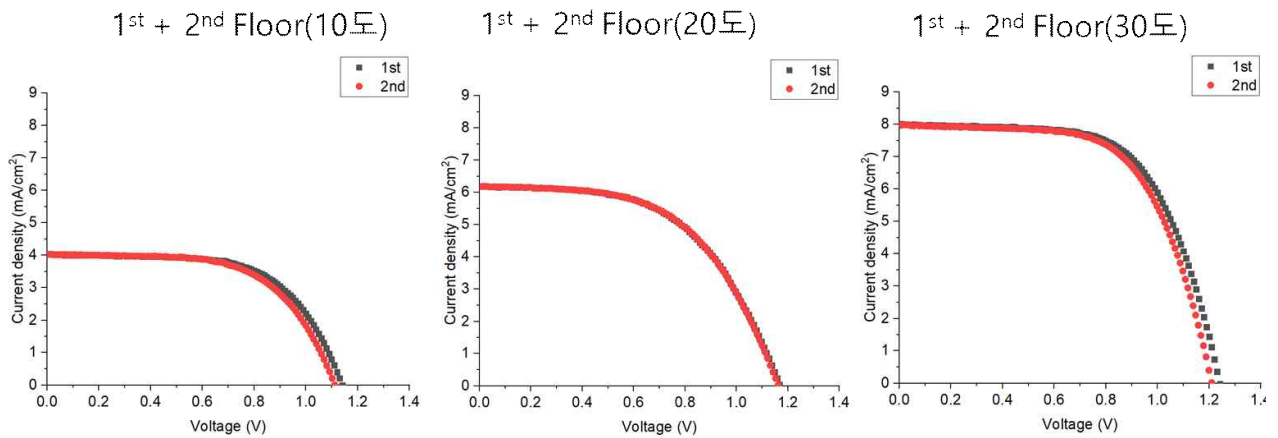


그림 146. 태양전지 각도에 따른 병렬-직렬 적층형 태양광 모듈 J - V curve. 좌측에서부터 10°, 20°, 30°

표 27. 태양전지 각도에 따른 병렬-직렬 적층형 태양광 모듈의 광전특성 파라미터

	10° - 1 <sup>st</sup>	10° - 2 <sup>nd</sup>	20° - 1 <sup>st</sup>	20° - 2 <sup>nd</sup>	30° - 1 <sup>st</sup>	30° - 2 <sup>nd</sup>
$I_{sc}$	71.39 mA	71.02 mA	109.16 mA	109.08 mA	141.05 mA	140.46 mA
$V_{oc}$	1.140 V	1.112 V	1.170 V	1.163 V	1.242 V	1.211 V
FF	61.5%	60.7%	54.3%	54.7%	63.1%	62.7%
Efficiency	2.84%	2.72%	3.93%	3.93%	6.26%	6.05%

표 28. 태양전지 각도에 따른 병렬-직렬 적층형 태양광 모듈의 효율 비교

1차 측정	90°	30°	20°	10°
이론 효율		7.69%	5.66%	3.08%
실제 효율	12.33%	6.26%	3.93%	2.84%
이격률		18.59%	29.85%	7.79%
2차 측정	90°	30°	20°	10°
이론 효율		7.69%	5.66%	3.08%
실제 효율	12.33%	6.05%	3.93%	2.72%
이격률		21.32%	29.85%	11.68%

병렬-직렬 태양전지 각도별 광전특성 분석(0-90°)

- 병렬-직렬 태양광 모듈의 태양전지 각도별 광전효율을 측정하기 위해 각도별 모듈 프레임을 제작함. 각 단위 태양전지는 구리 테이프를 이용하여 연결하였고, 병렬 연결의 용이성을 위해 구리 집게를 이용하여 연결함. 사용된 단위 태양전지는 다음과 같음.



그림 147. 구리 테이프 적용된 단위 태양전지 사진

표 29. 병렬-직렬 태양광 모듈에 체결된 단위 태양전지의 광전특성 파라미터

	unit cell - 1	unit cell - 2	unit cell - 3	unit cell - 4	unit cell - 5
I <sub>sc</sub>	88.24 mA	87.91 mA	81.13 mA	91.98 mA	92.85 mA
V <sub>oc</sub>	0.692 V	0.673 V	0.680 V	0.689 V	0.677 V
FF	62.6%	57.3%	63.8%	57.7%	65.2%
Efficiency	14.5%	12.8%	13.3%	13.7%	15.5%
	unit cell - 6	unit cell - 7	unit cell - 8	unit cell - 9	unit cell - 10
I <sub>sc</sub>	86.61 mA	91.73 mA	91.32 mA	91.94 mA	86.12 mA
V <sub>oc</sub>	0.676 V	0.693 V	0.691 V	0.692 V	0.681 V
FF	63.1%	63.8%	63.4%	59.6%	64.2%
Efficiency	14.0%	15.4%	15.2%	14.4%	14.3%



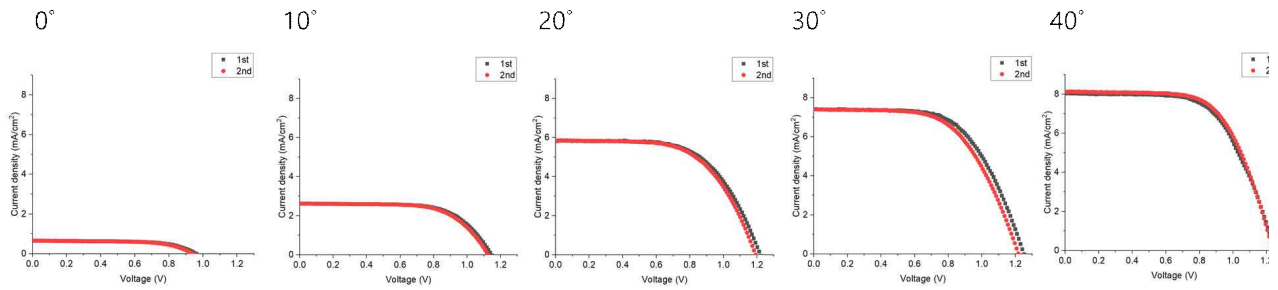


그림 148. 각도별 병렬-직렬 태양광 모듈의 J - V curve. 좌측부터 0°, 10°, 20°, 30°, 40°

표 30. 각도별 병렬-직렬 태양광 모듈의 광전특성 파라미터(0°, 10°, 20°, 30°, 40°)

1 <sup>st</sup>	0°	10°	20°	30°	40°
I <sub>sc</sub>	11.72 mA	46.39 mA	103.35 mA	130.57 mA	141.89 mA
V <sub>oc</sub>	0.960 V	1.144 V	1.219 V	1.250 V	1.247 V
FF	64.0%	65.1%	60.3%	60.6%	62.0%
Efficiency	0.41%	1.96%	4.30%	5.61%	6.23%
2 <sup>nd</sup>	0°	10°	20°	30°	40°
I <sub>sc</sub>	11.61 mA	46.29 mA	103.48 mA	130.82 mA	143.35 mA
V <sub>oc</sub>	0.940 V	1.125 V	1.192 V	1.217 V	1.238 V
FF	63.5%	64.7%	59.8%	58.9%	63.6%
Efficiency	0.39%	1.91%	4.18%	5.32%	6.40%

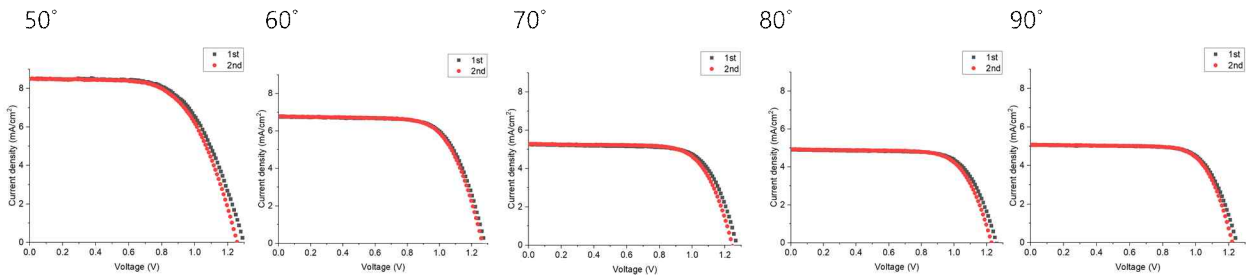


그림 149. 각도별 병렬-직렬 태양광 모듈의 J - V curve. 좌측부터 50°, 60°, 70°, 80°, 90°

표 31. 각도별 병렬-직렬 태양광 모듈의 광전특성 파라미터(50°, 60°, 70°, 80°, 90°)

1 <sup>st</sup>	50°	60°	70°	80°	90°
I <sub>sc</sub>	150.50 mA	119.41 mA	92.86 mA	86.72 mA	89.59 mA
V <sub>oc</sub>	1.297 V	1.281 V	1.272 V	1.259 V	1.247 V
FF	61.7%	69.1%	70.9%	71.2%	71.6%
Efficiency	6.83%	5.99%	4.75%	4.41%	4.53%

2 <sup>nd</sup>	50°	60°	70°	80°	90°
I <sub>sc</sub>	149.95 mA	119.66 mA	93.26 mA	87.02 mA	89.74 mA
V <sub>oc</sub>	1.257 V	1.266 V	1.246 V	1.230 V	1.221 V
FF	61.8%	69.3%	70.8%	71.0%	72.3%
Efficiency	6.61%	5.95%	4.66%	4.31%	4.49%

- 태양전지 각도에 따른 병렬-직렬 태양광 모듈의 효율을 측정한 결과 40°, 50°에서 높은 효율을 나타내었고 40°, 50°를 기준으로 각도가 더 높아지거나 각도가 낮아지면 효율이 감소하는 경향을 확인함. 또한, 각도가 높아질수록 FF가 상승하였고, 0°를 제외한 모든 각도에서 단위 태양전지 2개를 직렬 연결한 V<sub>oc</sub>를 일정하게 나타내었음. 이는 층별 태양전지 간 병렬 연결하고 층간 직렬 연결된 적층형 모듈의 구조적인 특징에 의한 것인데, 층간 태양전지를 직렬 연결하였기 때문에 태양광 모듈의 I<sub>sc</sub>는 1층 혹은 2층에서 작은 값을 따르게 됨에 의함. 따라서 2층에 병렬 연결된 태양전지의 I<sub>sc</sub> 값보다 1층 태양전지의 I<sub>sc</sub>에 의존함. 따라서 90° 각도의 병렬-직렬 태양광 모듈은 수평으로 태양전지를 체결했음에도 불구하고 낮은 I<sub>sc</sub> 값을 기록함.

### 병렬-직렬 태양전지 각도별 shading effect 분석 (50-90°)

- Shading effect에 의한 효율 감소율이 높은 50° 이상의 각도에서 병렬-직렬 태양전지의 shading effect를 분석하기 위해 2층의 태양전지를 병렬 연결한 모듈, 2층에 태양전지를 체결하지 않고 1층만 태양전지를 체결하고 병렬 연결한 모듈, 2층에 체결하였지만 연결하지 않고 1층의 태양전지를 병렬 연결한 모듈의 효율 측정을 진행하였음. 70°의 각도를 가지는 모듈에 태양전지를 체결하여 측정함.

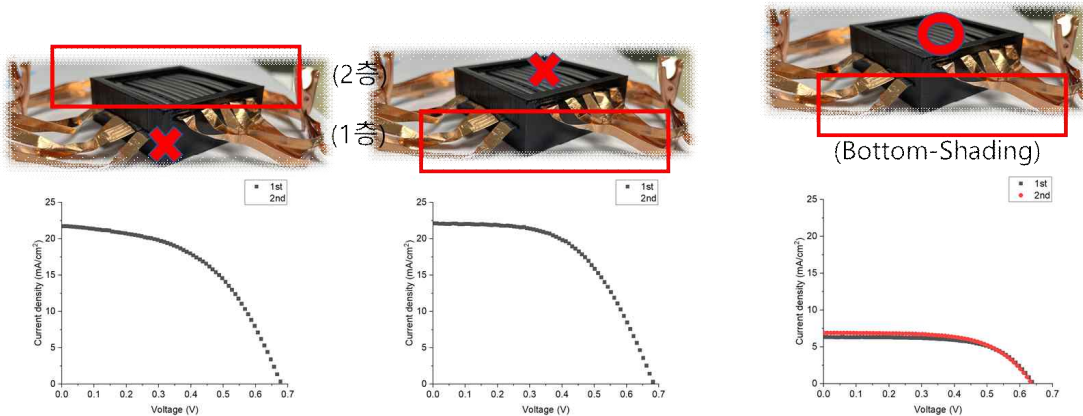


그림 150. 태양전지 연결 방법 및 체결 여부에 따른 병렬 태양광 모듈과 J - V curve. (좌) 2층에만 체결하여 병렬 연결한 태양광 모듈, (중) 2층에는 태양전지를 체결하지 않고 1층에만 체결하여 병렬 연결한 태양광 모듈, (우) 2층에 태양전지를 체결하였지만 연결하지 않고 1층에 태양전지를 병렬 연결한 태양광 모듈

표 32. 태양전지 연결 방법 및 체결 여부에 따른 병렬 태양광 모듈의 광전특성 파라미터

	Top	Bottom w/ top	Bottom w/o top - 1 <sup>st</sup>	Bottom w/o top - 2 <sup>nd</sup>
I <sub>sc</sub>	385.26 mA	390.51 mA	112.26 mA	121.69 mA
V <sub>oc</sub>	0.680 V	0.684 V	0.640 V	0.636 V
FF	50.0%	54.5%	63.1%	61.0%
Efficiency	7.41%	8.25%	2.57%	2.68%

- 세 가지의 태양전지 연결 및 체결 여부에 따른 광전효율 특성을 비교한 결과, 각 층에만 병렬 연결한 태양광 모듈은 높은 전류밀도를 기록하였으나, 2층에 태양전지를 체결하여 1층 태양전지의 shading을 유도한 태양광 모듈의 I<sub>sc</sub>는 평균 116.98 mA로 같은 각도의 병렬-직렬 태양광 모듈의 I<sub>sc</sub>값과 유사하게 측정됨. 따라서 적층형 태양광 모듈의 효율을 높이기 위해서는 1층의 shading effect에 의한 영향을 최소화하기 위해 전극 길이를 최소화하여 모듈의 직렬 저항 최소화가 요구됨. 또한 10개의 태양전지를 모두 같은 방식으로 연결해야 하는 것으로 예상됨. 하지만, 직렬-직렬 태양광 모듈은 1층의 전류로 결정되기 때문에 비효율적이므로 병렬-병렬 태양광 모듈의 각도별 광전효율을 측정하여 비교함.

병렬-병렬 태양전지 각도별 광전효율 측정 및 비교 (0-90°)

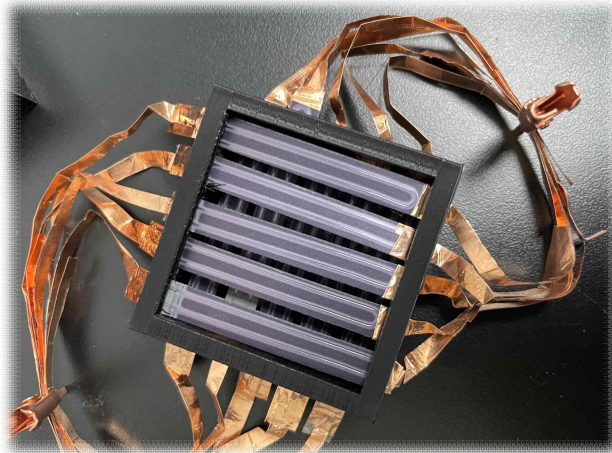


그림 151. 병렬-병렬 태양광 모듈 사진

- 각 층의 태양전지를 병렬연결하고, 층간 태양전지를 병렬연결하여 각도별로 효율 측정을 진행함. 병렬로 연결하기 위해 구리 테이프를 태양전지 전면전극, 후면전극에 부착하여 연결하였고, 구리 집게로 고정하였음. 사용된 단위 태양전지는 아래의 표와 같음.

표 33. 병렬-병렬 태양광 모듈에 체결된 단위 태양전지의 광전특성 파라미터

	unit cell - 1	unit cell - 2	unit cell - 3	unit cell - 4	unit cell - 5
I <sub>sc</sub>	91.02 mA	86.46 mA	83.39 mA	81.81 mA	91.09 mA
V <sub>oc</sub>	0.682 V	0.695 V	0.690 V	0.684 V	0.679 V
FF	52.5%	56.2%	58.3%	63.9%	54.7%
Efficiency	12.3%	12.8 %	12.7%	13.6%	12.8%

	unit cell - 6	unit cell - 7	unit cell - 8	unit cell - 9	unit cell - 10
<b>I<sub>sc</sub></b>	95.80 mA	88.19 mA	83.02 mA	80.06 mA	84.93 mA
<b>V<sub>oc</sub></b>	0.693 V	0.690 V	0.686 V	0.672 V	0.683 V
<b>FF</b>	53.9%	59.3%	59.4%	61.3%	59.8%
<b>Efficiency</b>	13.5%	13.7%	12.8%	12.5%	13.2%

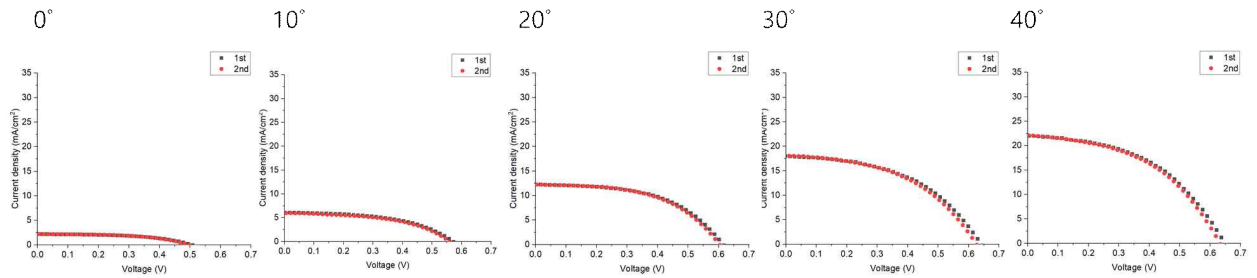


그림 152. 병렬-병렬 태양광 모듈의 각도별 J - V curve. 좌측부터 0°, 10°, 20°, 30°, 40°

표 34. 각도별 병렬-병렬 태양광 모듈의 광전특성 파라미터(0°, 10°, 20°, 30°, 40°)

1 <sup>st</sup>	0°	10°	20°	30°	40°
<b>I<sub>sc</sub></b>	38.90 mA	108.18 mA	216.43 mA	317.81 mA	388.75 mA
<b>V<sub>oc</sub></b>	0.506 V	0.572 V	0.615 V	0.642 V	0.648 V
<b>FF</b>	52.2%	50.1%	51.9%	47.8%	47.0%
<b>Efficiency</b>	0.58%	1.76%	3.92%	5.52%	6.72%
2 <sup>nd</sup>	0°	10°	20°	30°	40°
<b>I<sub>sc</sub></b>	38.89 mA	105.27 mA	215.66 mA	318.77 mA	390.01 mA
<b>V<sub>oc</sub></b>	0.496 V	0.560 V	0.603 V	0.626 V	0.633 V
<b>FF</b>	52.3%	50.2%	52.2%	47.4%	46.8%
<b>Efficiency</b>	0.57%	1.68%	3.85%	5.36%	6.55%

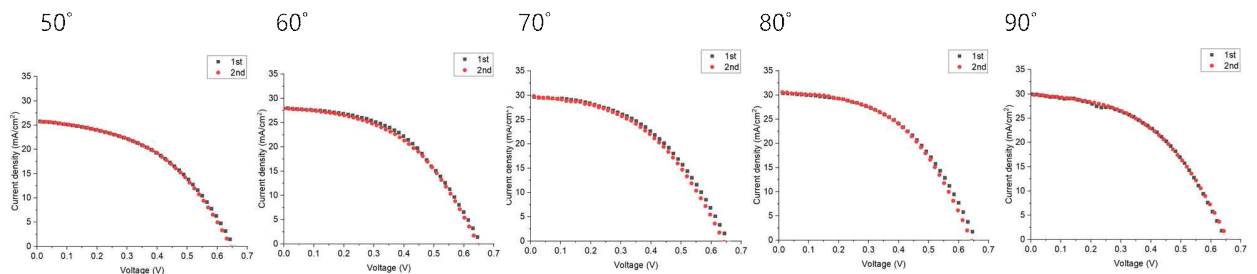


그림 153. 병렬-병렬 태양광 모듈의 각도별 J - V curve. 좌측부터 50°, 60°, 70°, 80°, 90°

표 35. 각도별 병렬-병렬 태양광 모듈의 광전특성 파라미터(50°, 60°, 70°, 80°, 90°)

1 <sup>st</sup>	50°	60°	70°	80°	90°
I <sub>sc</sub>	457.16 mA	493.88 mA	524.89 mA	537.21 mA	528.55 mA
V <sub>oc</sub>	0.655 V	0.657 V	0.656 V	0.658 V	0.649 V
FF	45.4%	48.3%	46.2%	48.4%	47.7%
Efficiency	7.71%	8.89%	9.01%	9.69%	9.28%
2 <sup>nd</sup>	50°	60°	70°	80°	90°
I <sub>sc</sub>	454.65 mA	492.56 mA	524.99 mA	540.55 mA	526.15 mA
V <sub>oc</sub>	0.645 V	0.646 V	0.641 V	0.643 V	0.656 V
FF	46.3%	47.5%	45.6%	48.9%	47.0%
Efficiency	7.69%	8.58%	8.71%	9.62%	9.19%

- 병렬-직렬 적층형 태양광 모듈의 shading effect에 각도별 광전특성을 비교 후 병렬-병렬 적층형 태양광 모듈의 각도별 광전특성을 측정함. 병렬-직렬 적층형 태양광 모듈은 각도가 증가할수록 shading effect가 증가하여 효율이 감소하였으나, 병렬-병렬 적층형 태양광 모듈은 각도가 증가할수록 2층 태양전지의 수광면적이 넓어지고, 1층 태양전지가 shading에 의한 영향을 받음에도 불구하고 병렬로 연결되어 단위 태양전지 1개의 V<sub>oc</sub>를 유지하며 I<sub>sc</sub>는 증가하는 것을 확인함. 하지만 구리 테이프를 이용하여 10개의 이층 태양전지를 병렬로 연결하기 위해서는 전선의 길이가 증가함에 따른 직렬 저항의 증가로 전반적으로 낮은 FF가 측정되어 40°의 연결 방식에 따른 태양광 모듈의 광전효율을 비교하였을 때 병렬-병렬 태양광 모듈과 병렬-직렬 태양광 모듈의 광전효율이 큰 차이가 없음을 확인함.
- 본 연구에서는 태양전지 연결이 용이한 구리 테이프를 사용하여 각 태양전지 및 층간 태양전지의 연결방식의 가능성을 확인함. 하지만 구리 테이프를 이용한 병렬-병렬 전극 설계로 전선의 길이가 최적화되지 않아 높은 직렬 저항 값에 의해 낮은 효율이 측정됨. 따라서 태양전지 연결 길이 변화에 따른 직렬저항 변화 및 모듈 성능 영향에 관한 연구가 필요하며, 이를 최적화하기 위한 병렬-병렬 태양광 모듈 프레임 및 전극 구조 설계가 필요함.

### (3) 직렬 또는 병렬형 전극 구조 설계 및 단위 모듈 제작

#### ○ 프레임에 적용 가능한 태양전지 설계

- 1차년도 단위 모듈에 사용되었던 태양전지는 CIGS 온장셀을 얇게 자른 형태로 30×30 이상의 모듈 프레임에 태양전지를 체결하기 위해서는 열압착기를 이용하여 각 태양전지의 전면전극과 후면전극을 연결하여 확장하여야 함. EVA 필름이 타거나 심하게 변형되는 것을 방지하기 위해 105 °C로 고정시킨 후 가하는 압력을 최적화하여 열 압착된 단위 태양전지 모듈을 제작하는데 성공함. 열 압착된 단위 태양전지 모듈의 전면전극과 후면전극에 단자를 두어 저항을 측정한 결과 저항 수치가 표기되는 것을 확인함.
- 이를 이용하여 모듈에 적용 결과 전면전극이 노출된 eva 필름의 유연성에 의해 태양전지의 마디마다 휘어진 상태로 고정되는 것을 확인함. 따라서 열 압착기를 이용하여 단위 태양전지를 제작하였을 때, 태양전지 수광면마다 휘어진 정도가 달라 모듈의 특성을 연구하는데 어려움이 있다고 판단되어 태양전지를 얇게 자르지 않고 CIGS 온장셀의 셀 길이를 유지한 채로 모듈 프레임에 체결함.



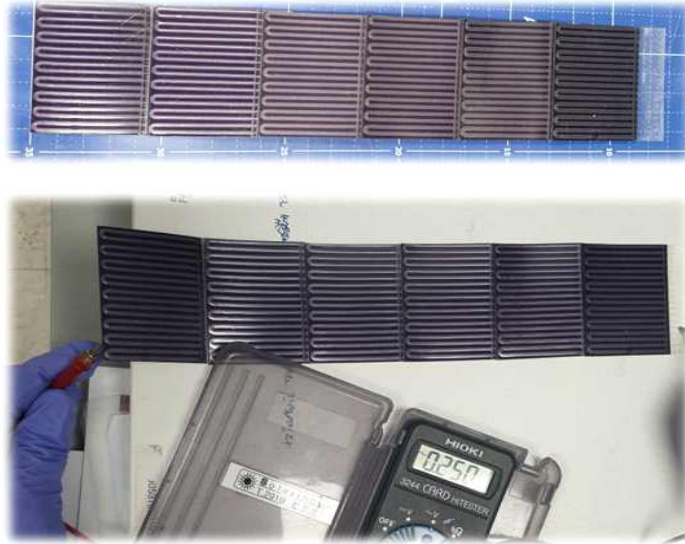


그림 154. 열 압착기를 이용하여 제작한 단위 태양전지 모듈 이미지



그림 155. 모듈 프레임에 적용하기 (좌)전, (우)후의 단위 태양전지 이미지. 프레임에 체결 후 고정을 위해 레진을 바닥에 도포함

### ○ 체결형 태양전지 기초설계

- 1단계 1차년도 연구 내용을 바탕으로  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  2축 적층형 태양전지 모듈 프레임의 스케일을 확장하여 수광면적  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  이상의 단위모듈을 제작함. 태양전지를 프레임에 적용할 때 앞서 고려되었던 태양전지에 홈을 판 형태로 태양전지의 홈끼리 맞물어 같은 높이에 태양전지를 위치시키는 체결 형과, 1층 2층 구분하여 태양전지를 위아래로 쌓는 적층형 모듈을 고려함.



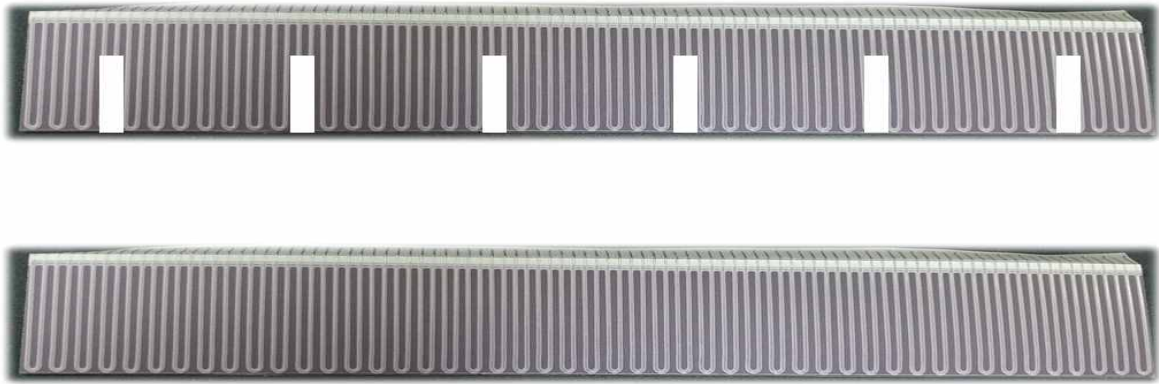


그림 156. 모듈구조(체결형, 적층형)에 따른 CIGS 태양전지 예시. (상) 체결형 모듈, (하) 적층형 모듈

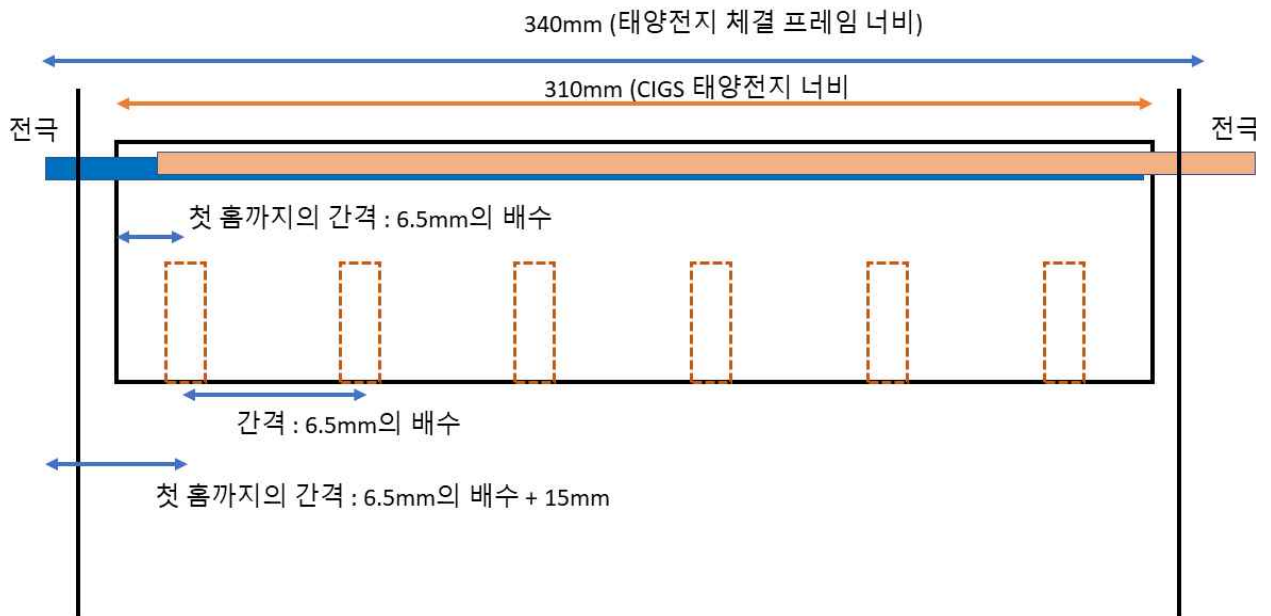


그림 157. 체결형 모듈용 CIGS 태양전지의 홈 설계도면

- 초기에는 단위모듈 한 축에 태양전지 여섯 개를 체결하고자 하였고, 여섯 개를 프레임에 체결함과 동시에 이축의 태양전지와 체결되어야 하므로 태양전지에도 태양전지의 간격에 따라 여섯 개의 홈을 설계함. 태양전지 간 접합을 방지하기 위해 홈을 넓게 파는 것은 전극의 손상이 불가피함. 따라서 전극 손상을 최소화하면서 태양전지 간 접합을 막기 위해 태양전지의 전면전극을 손상시키지 않게끔 홈을 관 후 절연체를 도포 후 접합 테스트를 진행함. 절연체는 투명 액상 실리콘을 사용함.

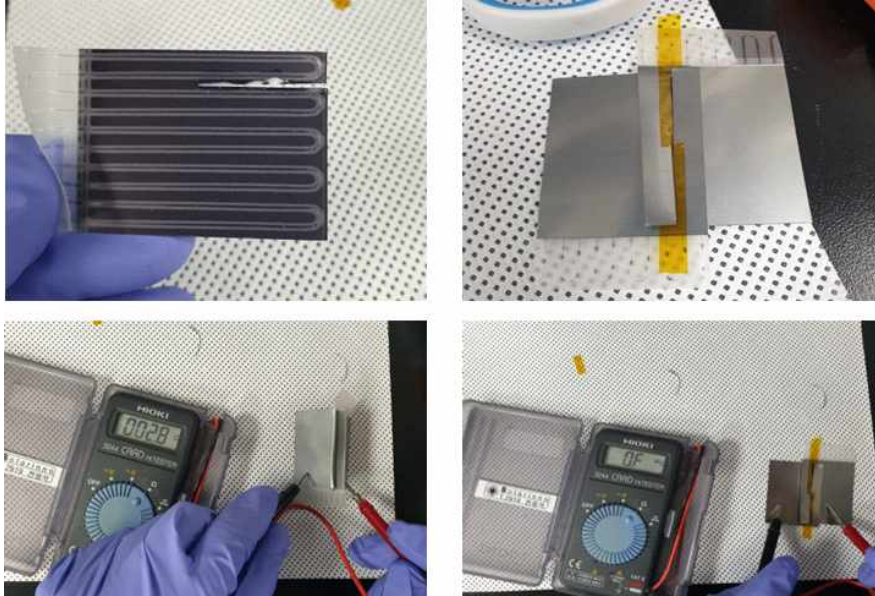


그림 158. 절연 방법에 따른 체결형 태양전지 저항 측정 테스트 이미지.  
 (좌) 절연체 도포한 CIGS 태양전지 (우) 폴리이미드 테이핑한 CIGS 태양전지

- 그 결과 절연체를 이용하여 태양전지 간 체결을 했을 경우 양 태양전지의 후면전극에 멀티테스터로 저항 측정 결과 28 옴이 측정됨. 이는 태양전지 간 체결을 할 때 절연체를 통하여 절연되지 않은 것으로 확인됨. 확실히 비교하기 위하여 태양전지 홈을 폴리이미드 테이프로 테이핑 후 측정 결과 저항이 측정되지 않으나, 캡톤 테이프를 이용하여 체결할 경우 미관 상 그리고 태양전지 수광면 테이핑에 의해 효율이 저하될 수 있으므로 적용이 제한됨. 따라서 본 연구에서는 광흡수층 손상을 최소화하고, 태양전지 간 접합을 방지하고자 CIGS 온장셀 태양전지 기반 적층형 단위모듈을 제작함.

### ○ 35×35 cm<sup>2</sup> 단위모듈 제작

- 본 연구에서 사용하는 상용 CIGS 태양전지의 길이는 308 ~ 315 mm으로 모듈 프레임과 전극 홈을 고려하여 모듈 프레임의 크기를 34×34 cm<sup>2</sup> 으로 책정함. 상용 CIGS 온장셀의 폭은 약 5.5 cm 정도로, 전면전극을 뒤로 접으면 약 5 cm 정도의 폭을 가지게 됨. 적층형 모듈을 제작하기 위해 태양전지를 쌓으면 단위 모듈의 높이가 10 cm 이상이 되어 추후에 채움재를 채우고 지붕에 적용하였을 때 하중에 의한 문제가 생길 수 있음. 따라서 단위 모듈의 높이를 줄이기 위해 온장셀을 2.5 cm으로 절단한 뒤 단위 모듈을 제작하였음.



그림 159. 2.5 cm의 폭으로 절단된 CIGS 이미지

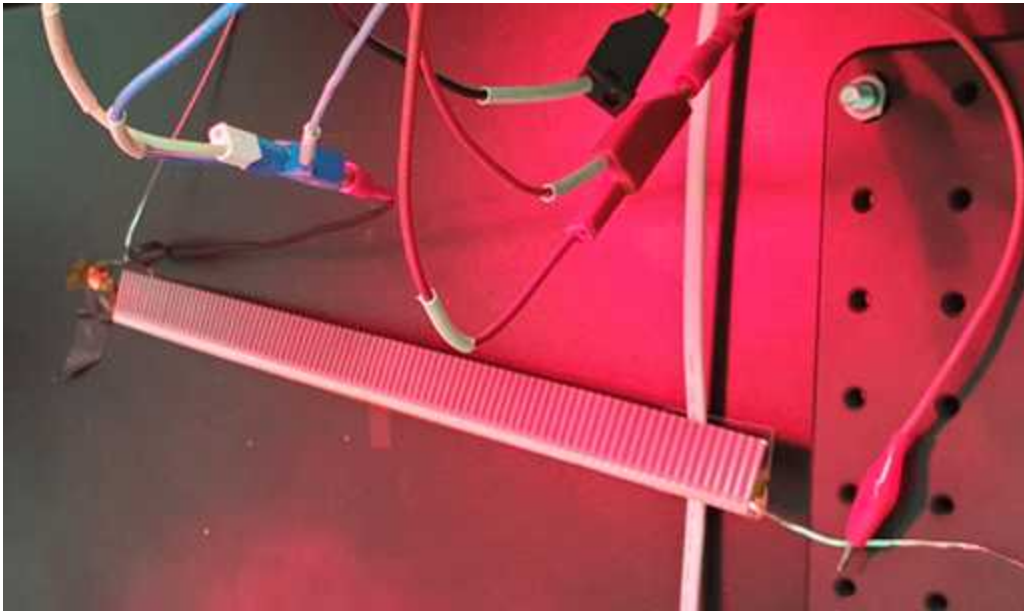


그림 160. 적외선 램프를 이용한 절단된 CIGS 광전효율 측정 이미지

- 아래 광전효율 그래프와 표는 7개의 CIGS 태양전지를 절단 직후, 24시간 경과되었을 때의 측정된 단위 태양전지의 J-V 곡선과 광전특성 파라미터를 각각 나타냄. 그 결과 CIGS 태양전지는 절단 후에 개방전압은 유지되었으나, 단락전류와 채움인자가 감소하는 것을 확인하였고, 특히 채움인자의 감소 폭이 샘플에 따라 적게는 약 4% 크게는 약 43% 정도로 크게 차이 나는 것을 확인함. 종합하여 광전효율이 평균 1%에서 0.52%로 약 48% 감소함을 확인하였고, 이는 태양전지의 표면 손상에 의해서 체결형 태양전지의 효율이 열화되는 것과 같은 경우로 광흡수층이 열화된 것으로 판단되며, 열화의 정도는 절단에 의한 손상 정도에 따른 것으로 추정됨. 따라서 스마트팜 실증을 위한 단위 태양전지의 안정성 및 효율의 신뢰성을 확보하기 위해서는 손상되지 않은 CIGS 온장셀을 사용한 모듈이 요구됨.

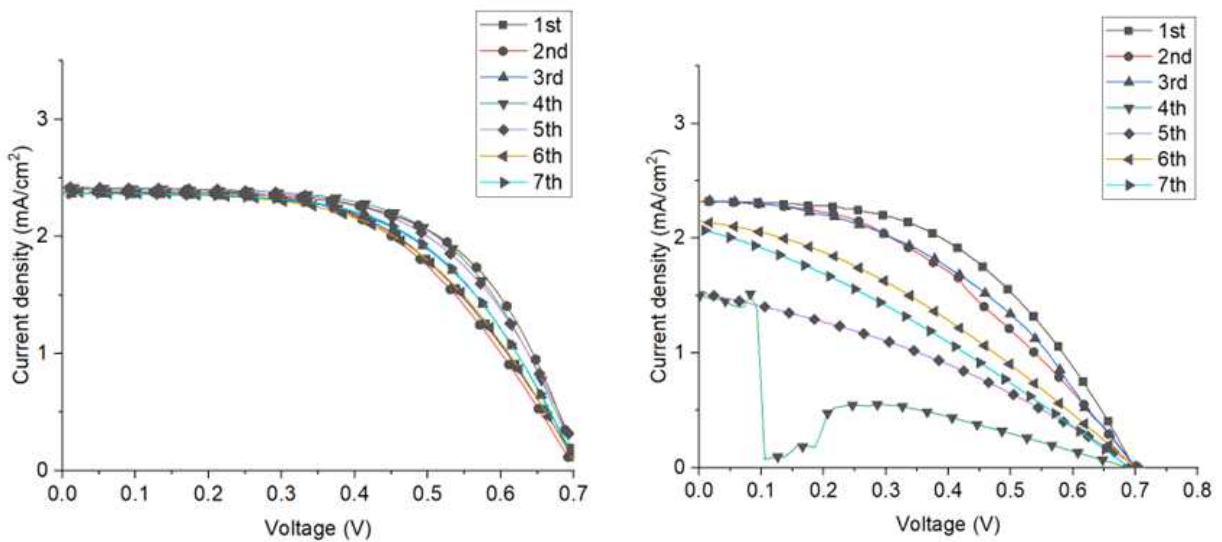


그림 161. 태양전지의 (좌)절단 직후, (우) 24시간 경과 후 측정된 J-V curve 그래프

표 36. CIGS 태양전지 절단 직후 측정된 광전효율 파라미터

	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)
sample 1	2.41	0.710	0.536	0.92
sample 2	2.41	0.703	0.532	0.90
sample 3	2.37	0.708	0.567	0.95
sample 4	2.40	0.709	0.603	1.03
sample 5	2.42	0.715	0.578	1.00
sample 6	2.38	0.707	0.541	0.91
sample 7	2.37	0.706	0.571	0.96

표 37. CIGS 태양전지 절단 24시간 경과 후 측정된 광전효율 파라미터

	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)
sample 1	2.32	0.698	0.494	0.80
sample 2	2.32	0.700	0.424	0.69
sample 3	2.33	0.702	0.431	0.70
sample 4	1.51	0.689	0.172	0.18
sample 5	1.53	0.705	0.334	0.36
sample 6	2.15	0.701	0.342	0.52
sample 7	2.08	0.691	0.307	0.44

- 태양전지를 체결하기 위한 단위 모듈의 프레임 규격은 340×340×50 mm<sup>3</sup>, 프레임 및 태양전지를 보호하고 광필터의 두께 및 전극 두께를 고려하여 아크릴 박스는 350×350×55 mm<sup>3</sup> 으로 설계함. 광필터는 태양전지의 위치를 고려하여 10×10 cm<sup>2</sup> 9개를 모듈 중앙에 부착하였음. 아크릴 박스 하단에 레진을 최대한 얇게 도포 후 광필터를 부착하여 아크릴 박스에 고정함.

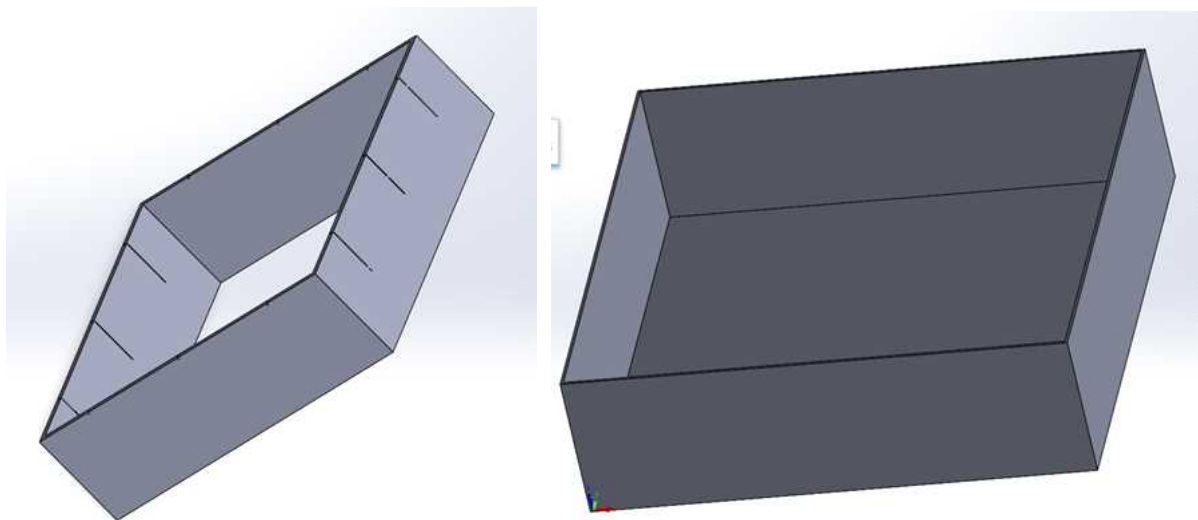


그림 162. (좌) 모듈 프레임, (우) 아크릴 박스 예시 이미지



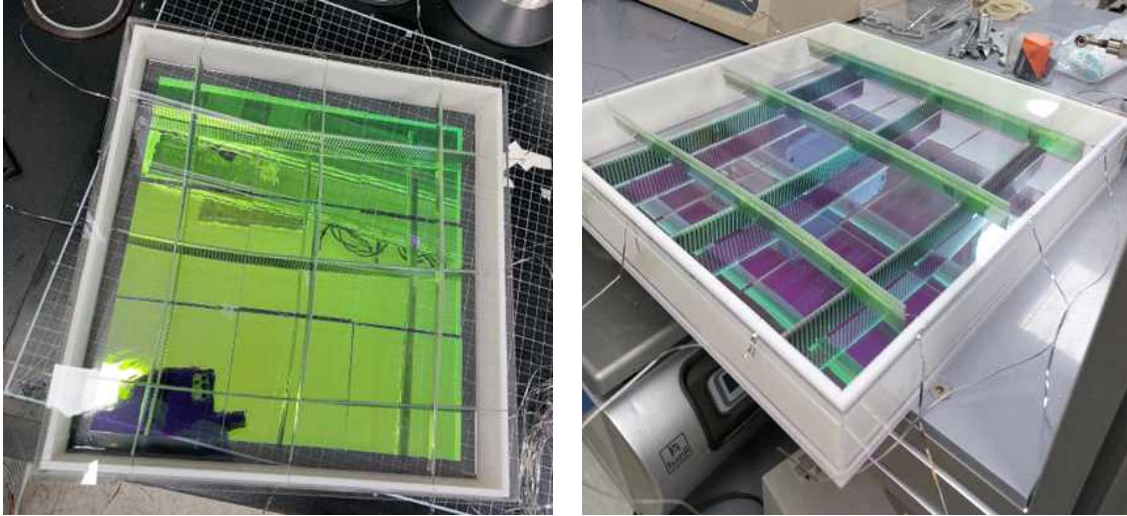


그림 163. 절단된 CIGS를 이용한 단위 모듈의 완성된 이미지

- CIGS 온장셀을 적용할 적층형 모듈 프레임 및 아크릴 박스의 규격을 각  $340 \times 340 \times 100 \text{ mm}^3$ ,  $350 \times 350 \times 105 \text{ mm}^3$  으로 재설계함. 단위 태양전지의 높이가 절삭 전 태양전지의 두 배 정도로 높기 때문에 2층 태양전지에 의한 shading effect를 고려하여 태양전지 간 간격은 10 cm으로 설정하여 한 층에 3개, 단위 모듈에 총 6개를 사용함. 각 층의 태양전지는 병렬 연결하였음,

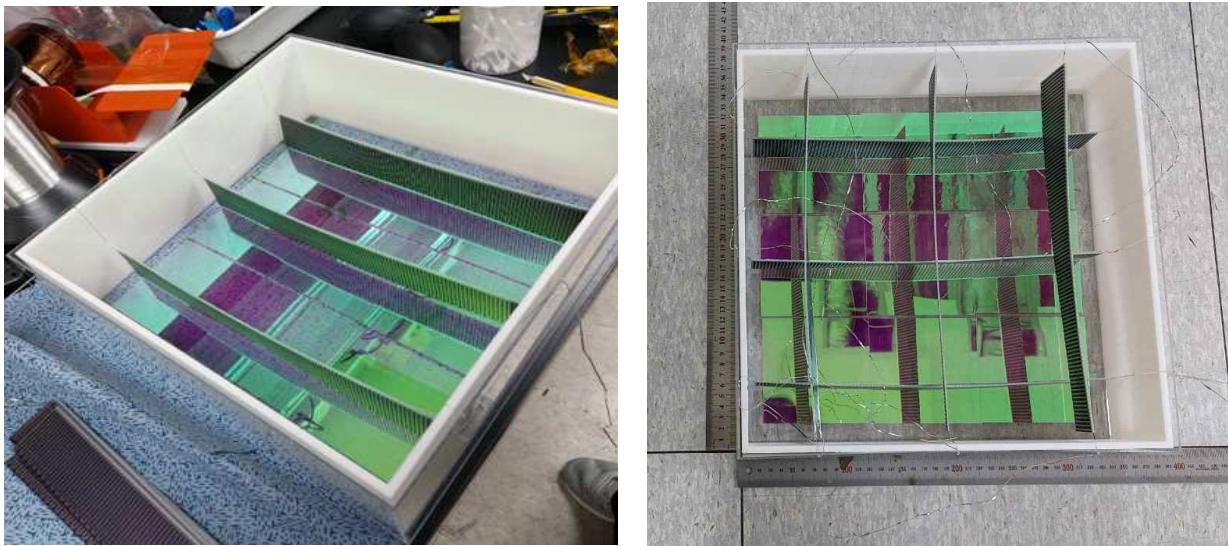


그림 164. CIGS 온장셀을 체결하여 제작한  $35 \times 35 \times 10.5 \text{ cm}^3$  크기의 단위모듈 이미지

- 2022년 9월 6일 오후 1시 30분부터 오후 3시까지 약 1시간 30분동안 CIGS 온장셀을 이용하여 제작한 적층형 모듈의 야외 측정을 진행하였음. 1층 태양전지의 수광 방향과 2층 태양전지의 수광 방향이 바닥을 기준으로 서로  $90^\circ$  회전되어 있기 때문에 1층 태양전지가 바닥에 수평한 조건(R1)과 수직한 조건(R2)을 구분하여 측정함. 1차년도 연구결과 1, 2 층을 직렬 또는 병렬로 연결할 시 shading effect에 의해 출력이 감소하기 때문에 1층, 2층 분리하여 측정함. 수광면적은  $1156 \text{ cm}^2$  으로 계산함.

일일	일출	남중	일몰	남중고도(도 분 초)
09/07	06:06	12:31	18:54	58 55 07.02

- 1층, 2층 태양전지의 수평 조건(R1, R2) 및 모듈의 기울기(90°, 45°, 0°)에 따른 측정 결과, 모듈의 기울기가 1층, 2층 태양전지 어레이의 광전특성에 크게 영향을 주는 것과 반대로, 태양전지가 바닥과의 수평, 수직 방향에 위치하는 것에 따라서는 비슷한 결과값이 측정되는 것을 확인함. 야외 측정을 진행했던 날짜의 태양의 남중고도는 12시 30분에 약 59도로, 야외 측정을 1시 30분 이후부터 진행하였으므로, 측정 당시 실제 태양의 위치는 모듈 오른쪽에 위치하였음. R1 조건의 2층 태양전지의 수광면은 좌측을 향하고, R2 조건의 2층 태양전지의 수광면은 모듈을 좌측으로 90° 회전하여 위를 향하므로 R2 조건의 광전특성 파라미터가 클 것으로 예상되었지만, R1, R2 조건에 상관없이 모든 각도에서 유사한 값이 측정되는 경향이 확인됨.
- 모듈의 기울기에 따라서는 모듈이 바닥으로 기울어질수록 2층 태양전지의 효율은 감소하지만, 1층 태양전지의 효율은 45°에서 가장 높은 효율을 기록하였으나, 0°에서 감소하는 경향을 보임. 이는 2층 태양전지의 효율이 기울기가 감소함에 따라 효율이 감소하는 것과 반대로 기울기가 감소함에 따라 증가할 것으로 예상되었으나, 2층 태양전지의 shading effect에 의해서 효율이 소폭 감소하는 것으로 판단됨. 또한, 90°에서 1층 태양전지의 효율이 0.56%인 반면, 0°에서 2층 태양전지의 효율은 1층 태양전지보다 낮은 0.37%를 기록하였는데, 이는 2층 태양전지보다 1층 태양전지가 광필터에 근접하기 때문에 광필터로부터 반사된 빛을 더 많이 흡수하여 최저치가 더 높은 것으로 판단됨.



그림 165. 단위 모듈의 각도별 (좌) 45°, (우) 90° 야외측정 중인 이미지.



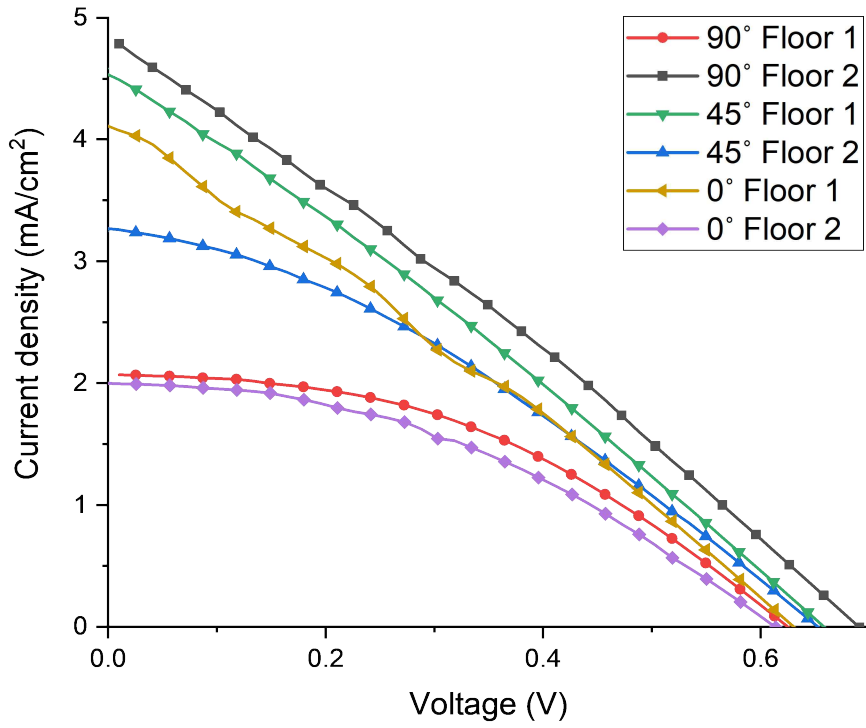


그림 166. R1 조건에서 각도별 단위 모듈의 J-V curve

표 39. R1 조건에서 각도별 단위 모듈의 광전효율 파라미터

90 °	$I_{sc}$ (A)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF	Power (W)	$\eta$ (%)
Floor 1	2.39	2.07	0.625	0.431	0.643	0.82
Floor 2	5.61	4.85	0.690	0.276	1.068	1.35
45 °						
Floor 1	5.24	4.53	0.658	0.276	0.952	1.21
Floor 2	3.78	3.27	0.653	0.335	0.826	1.06
0 °						
Floor 1	3.77	3.26	0.632	0.355	0.846	1.07
Floor 2	1.69	1.46	0.604	0.425	0.434	0.54

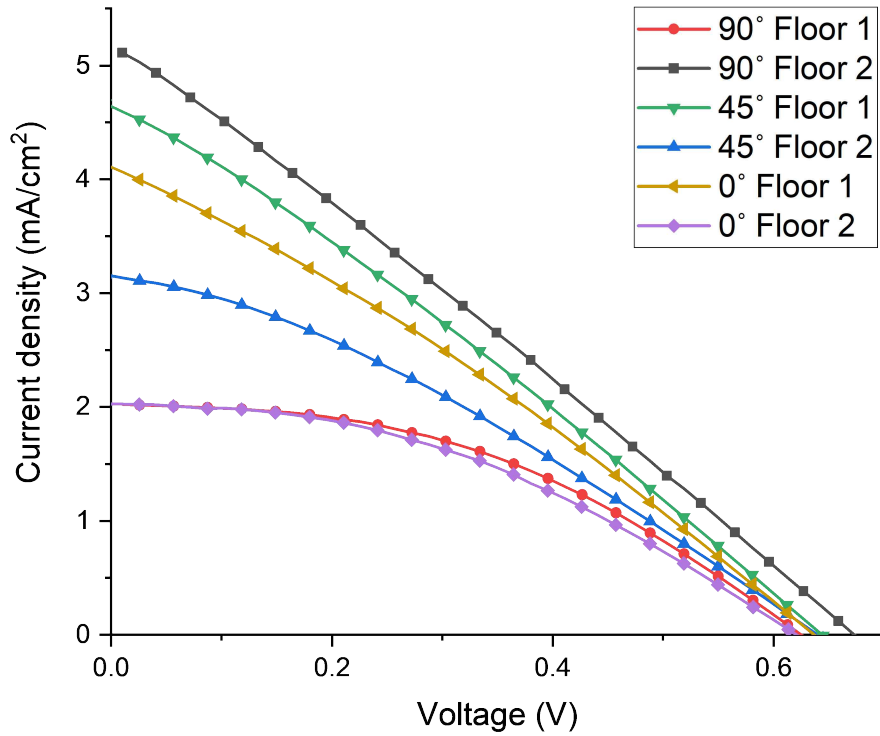


그림 167. R2 조건에서 각도별 단위 모듈의 J-V curve

표 40. R2 조건에서 각도별 단위 모듈의 광전효율 파라미터

90 °	$I_{sc}$ (A)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF	Power (W)	$\eta$ (%)
Floor 1	2.35	2.03	0.625	0.431	0.633	0.81
Floor 2	5.96	5.16	0.673	0.267	1.071	1.37
45 °						
Floor 1	5.36	4.64	0.644	0.278	0.960	1.22
Floor 2	3.64	3.15	0.640	0.318	0.741	0.94
0 °						
Floor 1	3.70	3.20	0.626	0.354	0.820	1.04
Floor 2	1.69	1.46	0.605	0.420	0.430	0.55

- 최종적으로 단위 태양전지를 모듈에 수직으로 체결한 적층형 모듈의 1층 2층 태양전지 출력을 합한 결과 모듈의 기울기에 따라 약 1.25 W에서 1.778 W를 기록함. 야외측정 당시 광밀도는 약 65 mW/cm<sup>2</sup> (0.65 sun) 정도로 1 sun 기준으로 측정된다면 약 1.92 W에서 약 2.74 W 이상의 출력값을 얻을 수 있음.

#### (4) 모듈 및 모듈 프레임의 광필터 광투과 특성 분석

##### ○ 모듈 프레임의 광필터 광투과 특성 분석

- 본 연구에서 광필터의 움직임에 의하여 발생하는 불규칙적인 광흡수 및 반사를 최소화하기 위해 아

크릴 박스 위에 레진을 도포하고 광필터를 붙여 고정시키는 작업을 진행하였음. 따라서 빛은 아크릴 박스를 통해 태양전지에 도달하게 되고, 태양전지에 도달하지 않은 나머지 빛들은 광필터에 투과, 반사 및 흡수하게 되는데, 흡수된 빛은 다시 레진과 아크릴에 의해서 투과, 반사 및 흡수하게 됨. 따라서 레진 적용으로 인해서 생기는 영향을 확인하고자 모듈에 적용된 아크릴과 레진, 그리고 광필터에 대한 광투과 테스트를 진행하였음.

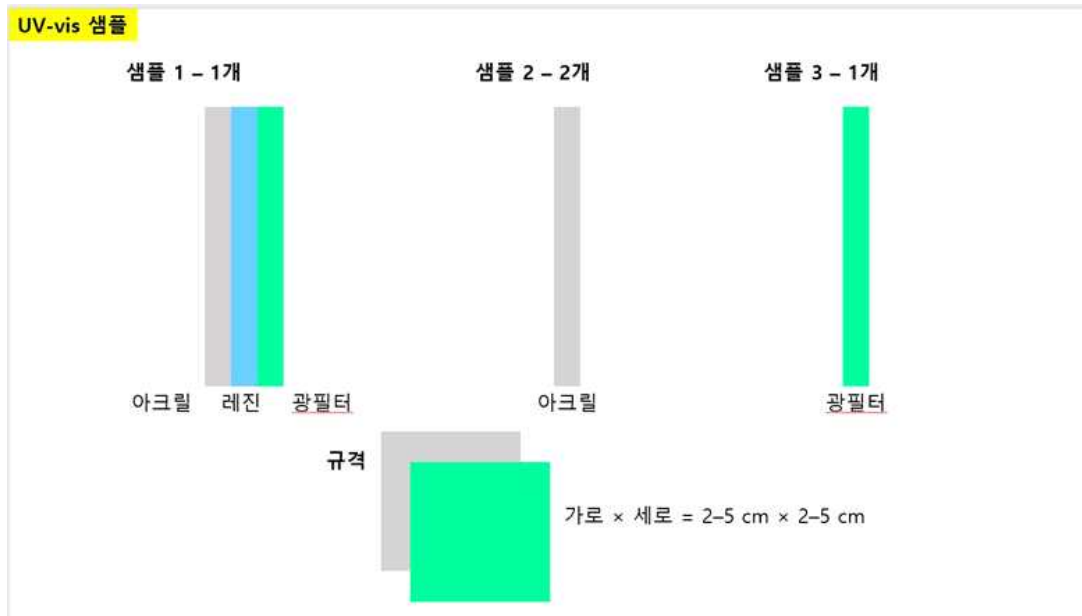


그림 168. 태양전지를 제외한 모듈 단위의 광투과도 측정용 샘플 예시

- 아크릴과, 광필터, 그리고 아크릴과 광필터 사이에 레진을 채운, 그리고 채우지 않은 네 샘플에 대한 투과도 및 흡광도 분석을 진행하였고 결과는 아래와 같음.
- 아크릴은 가시광 영역에서 90% 이상의 투과율을 기록하였고, 광필터가 적용된 비교군은 400-500 nm, 그리고 600-700 nm 파장 영역에서 75% 이상의 높은 투과율을 기록하였으며, 그 중 광필터가 가장 높은 투과율을 기록하였음. 레진을 사용하지 않고 아크릴에 부착한 광필터는 광필터의 광투과 스펙트럼을 유지한 채 투과도 광투과 파장에서 약 7% 감소하였지만, 레진을 이용하여 아크릴에 부착한 광필터는 공기층보다 소폭 감소한 투과도를 기록하였으며, 소폭 이동한 광투과 스펙트럼이 관찰되었음. 아크릴에 의해 투과도가 감소한 것으로 판단되며, 레진에 의해서 모듈의 광투과도가 크게 변하지 않음을 확인함.

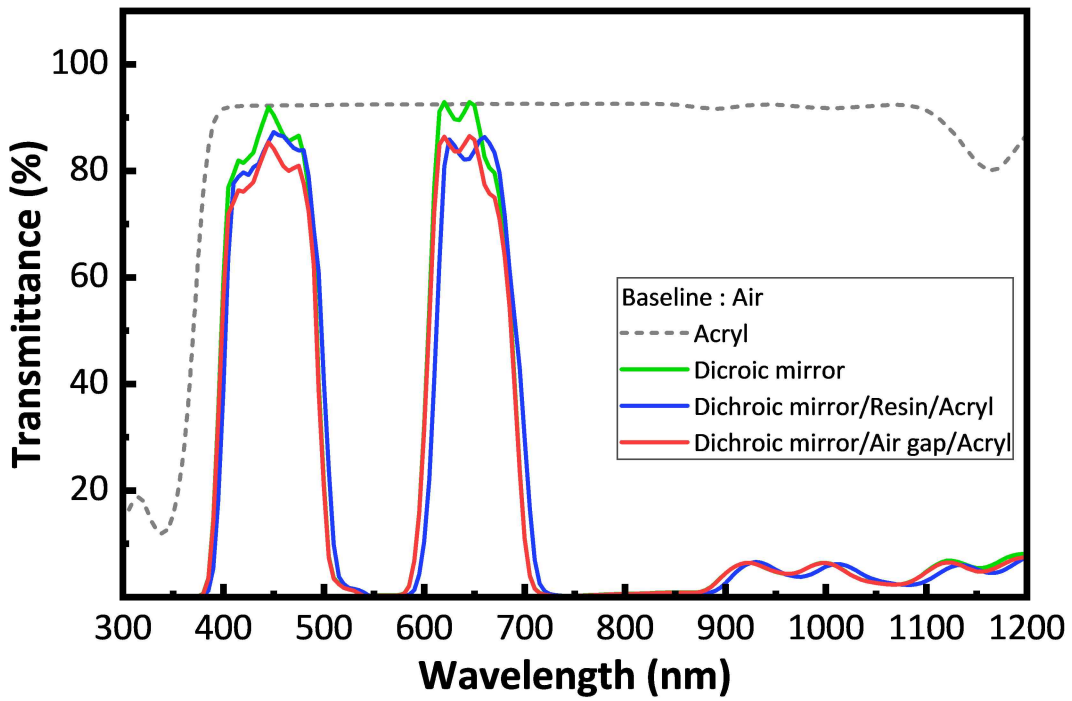


그림 169. 태양전지를 제외한 모듈 단위의 광투과도 측정용 샘플의 광투과도 그래프

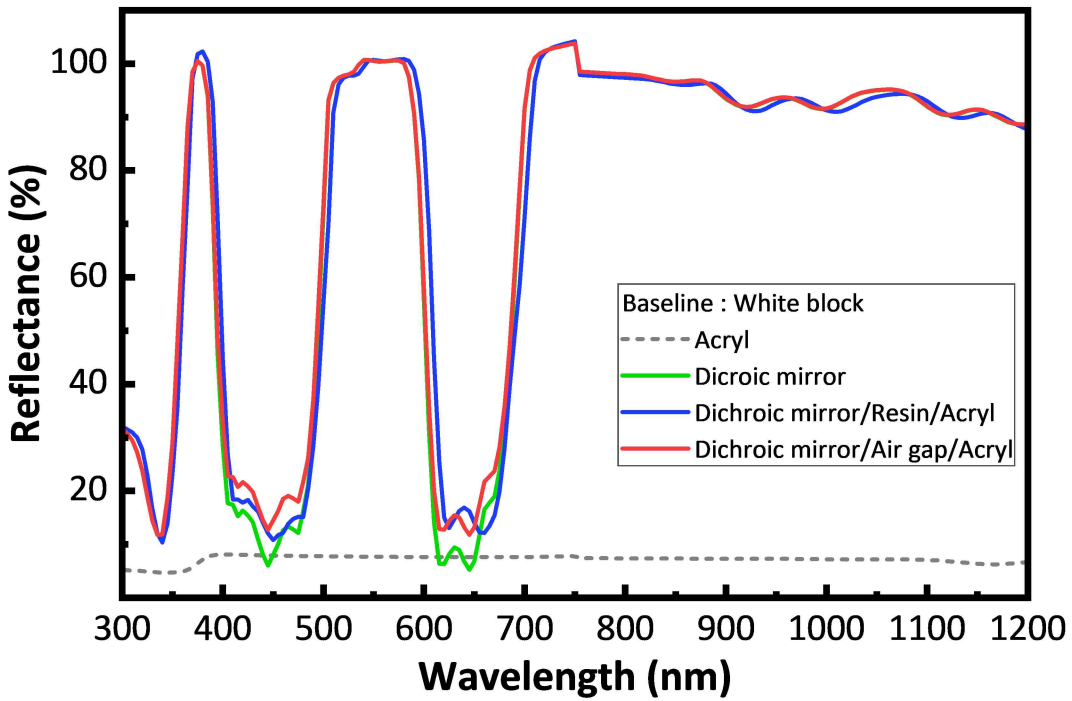


그림 170. 태양전지를 제외한 모듈 단위의 광투과도 측정용 샘플의 흡광도 그래프

○ 태양전지 적용된 모듈 광투과도 분석

- UV-vis spectrometer의 슬릿에 부착하여 측정할 수 있는 샘플 크기가 최대  $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$  정도로  $35 \times 35 \times 10.5 \text{ cm}^3$  크기의 단위 모듈을 직접적으로 측정하기 어렵기 때문에 광투과도 측정용 모듈을 단위 모듈의 비율과 일치하게끔 제작하였음. 규격은  $3 \times 3 \times 0.9 \text{ cm}^3$  이고, 한 축에 태양전지 세 개가

체결된 적층형 모듈 구조를 적용하였음. 광필터를 제외한 실제 모듈의 광투과도를 측정하기 위해 모듈에 아크릴 박스를 적용후 광투과도를 측정한 결과는 다음과 같음.

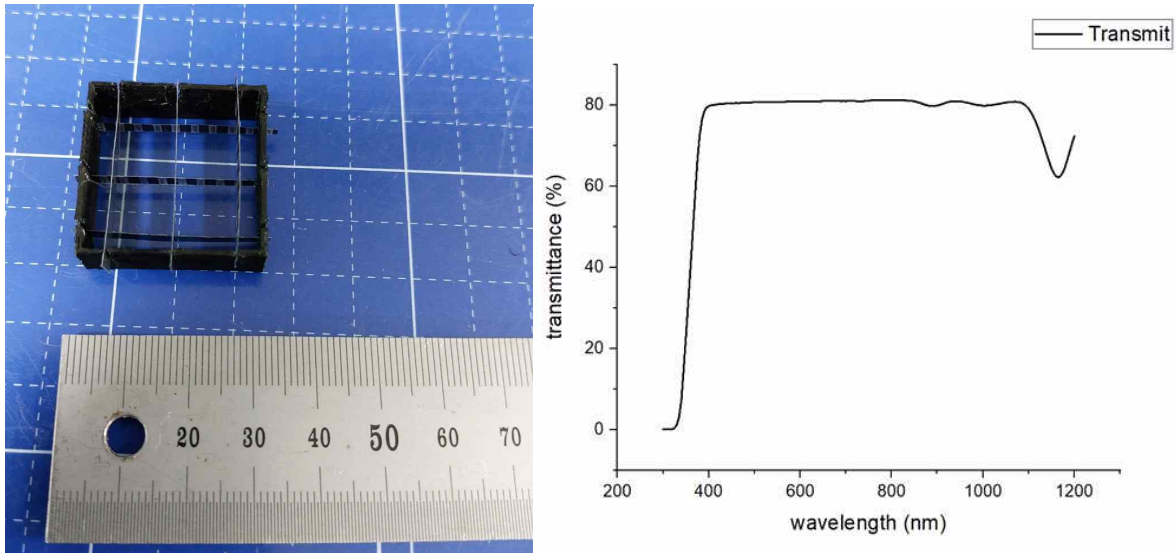


그림 171. 광투과도 측정용 모듈과 측정된 데이터 그래프 이미지

- 광투과도 분석 결과 400-1100 nm 파장 영역에서 약 80%의 투과도를 달성함. 아크릴과 광필터 및 레진의 광투과도를 분석한 데이터 중 아크릴의 광투과도가 가시광 영역에서 평균 90%로 측정된 값과 비교하였을 때 모듈에 의해서 광투과도가 약 10% 감소한 것으로 판단됨.

### ○ 후면 반사소재 도입된 태양전지 효율 변화 분석

- 태양전지 후면에 반사소재를 도입하여 모듈 효율을 증대시키기 위해 알루미늄 반사필름을 적용하고, 후면 반사에 대한 모듈 효율의 영향을 분석하기 위해 후면에 흡광 필름을 붙인 태양전지와 기존 태양전지, 반사필름 적용된 태양전지의 광전특성을 비교함.
- 반사광에 대한 영향을 확인하기 위해 각 층마다 태양전지 두 개를 적용하였고, 효율 변화를 가시화하기 위해 입사광 각도는 30°로 프레임을 제작하여 측정을 진행함. 태양전지의 수광면적은 43 cm<sup>2</sup>으로, 모듈의 수광면적은 100 cm<sup>2</sup>으로 계산함. 같은 층의 태양전지는 병렬로 연결함.

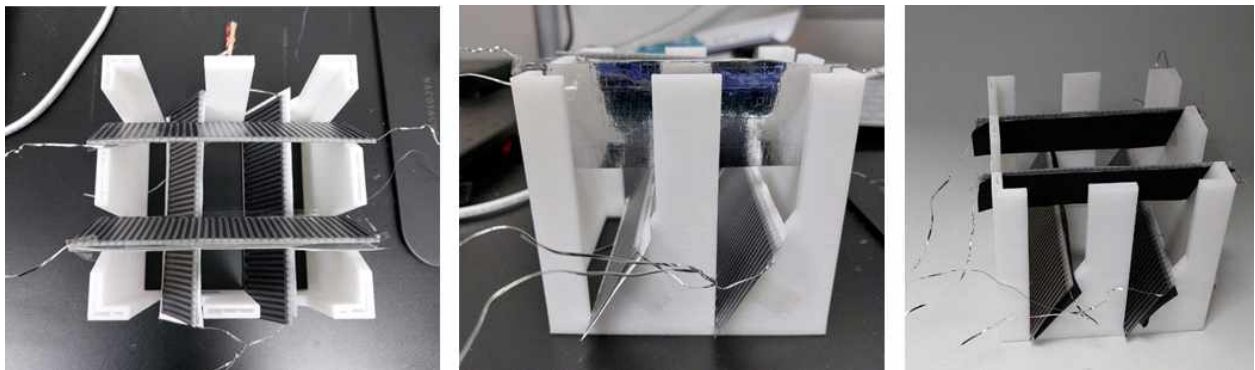


그림 172. 30° 모듈 프레임에 고정된 태양전지 이미지. (좌) 일반 CIGS 태양전지, (중) 반사필름 적용 CIGS 태양전지, (우) 흡광필름 적용된 태양전지



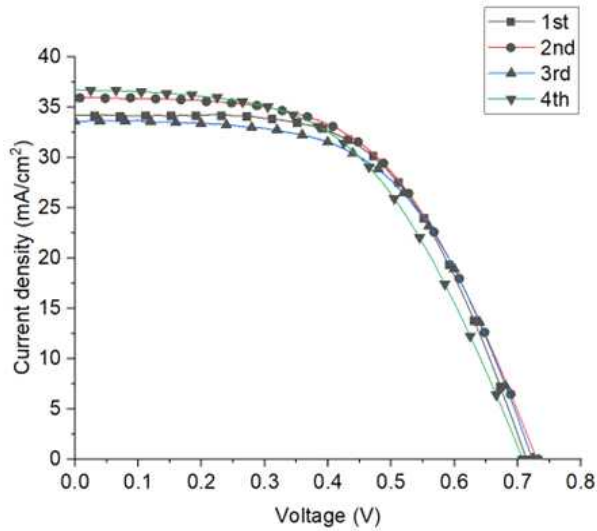


그림 173. 반사필름 영향 분석에 사용된 태양전지 4개의 J-V curve

표 41. 반사필름 영향 분석에 사용된 태양전지 4개의 광전특성 파라미터

	$J_{sc}(mA/cm^2)$	$V_{oc} (V)$	FF	$\eta$ (%)
Sample 1	34.25	0.714	0.582	14.23
Sample 2	35.93	0.730	0.548	14.36
Sample 3	33.63	0.723	0.570	13.86
Sample 4	36.74	0.708	0.519	13.52

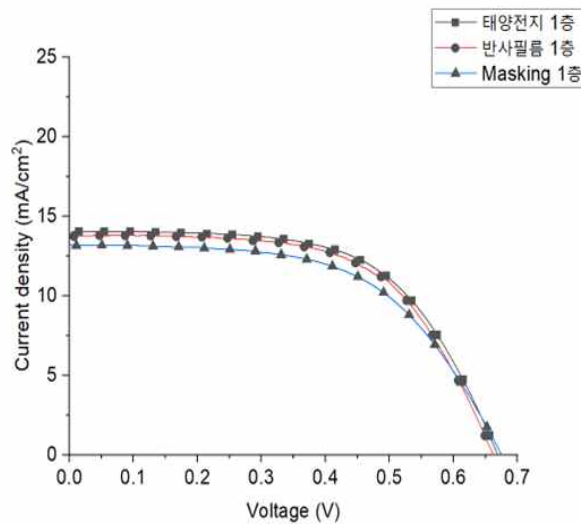


그림 174. 태양전지 후면 반사 조건에 따른 1층 태양전지의 J-V curve

표 42. 태양전지 후면 반사 조건에 따른 1층 태양전지의 광전특성 파라미터

	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc} \text{ (V)}$	FF	$\eta \text{ (%)}$
태양전지 1층	14.05	0.669	0.597	5.61
반사필름 1층	13.77	0.662	0.599	5.46
Masking 1층	13.20	0.675	0.568	5.06

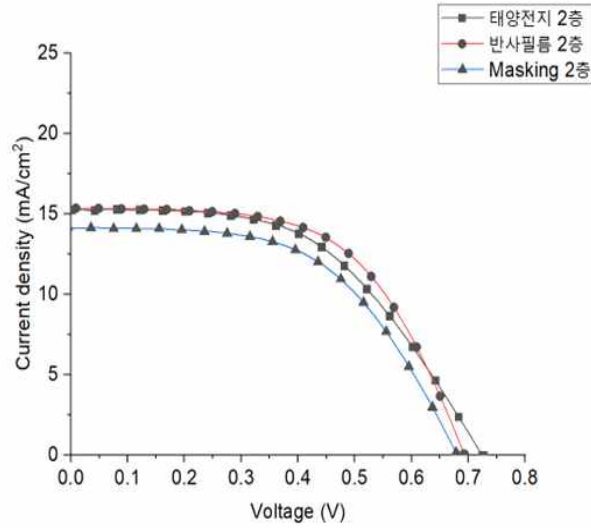


그림 175. 태양전지 후면 반사 조건에 따른 2층 태양전지의 J-V curve

표 43. 태양전지 후면 반사 조건에 따른 2층 태양전지의 광전특성 파라미터

	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc} \text{ (V)}$	FF	$\eta \text{ (%)}$
태양전지 2층	15.25	0.724	0.519	5.74
반사필름 2층	15.34	0.693	0.577	6.14
Masking 2층	14.15	0.680	0.546	5.25

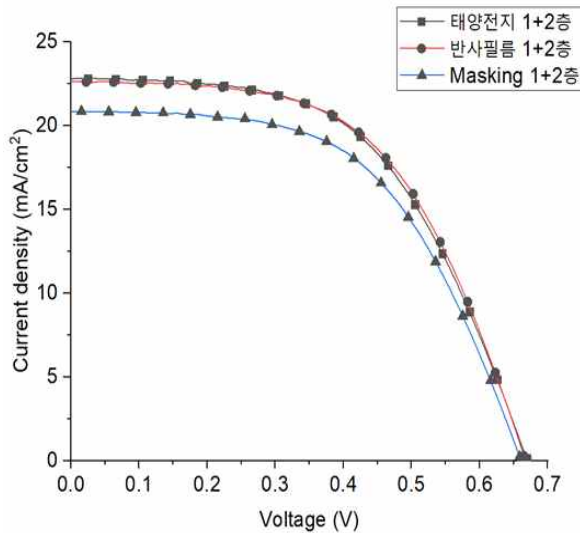


그림 176. 태양전지 후면 반사 조건에 따른 광투과 태양광 모듈의 J-V curve

표 44. 태양전지 후면 반사 조건에 따른 광투과 태양광 모듈의 광전특성 파라미터

	$J_{sc}(mA/cm^2)$	$V_{oc} (V)$	FF	$\eta (%)$
태양전지 1+2층	22.80	0.670	0.541	8.27
반사필름 1+2층	22.65	0.667	0.554	8.38
Masking 1+2층	20.86	0.661	0.549	7.57

- 측정 결과 후면을 흡광필름으로 마스킹한 태양전지는 1층, 2층 그리고 1,2층 병렬 연결한 모듈에서 가장 낮은 효율이 측정되었으나, 후면 처리하지 않은 태양전지, 그리고 반사필름을 적용한 태양전지는 단락전류밀도, 개방전압, 그리고 채움인자가 비슷하게 측정되었음. 반사필름을 적용했을 때 광전 효율 증가율이 평균 약 1.83%으로 효율 증가량이 낮게 측정됨. 후면 반사필름의 영향을 분석하기 위해 태양전지 후면전극과 반사필름의 반사도를 측정함.

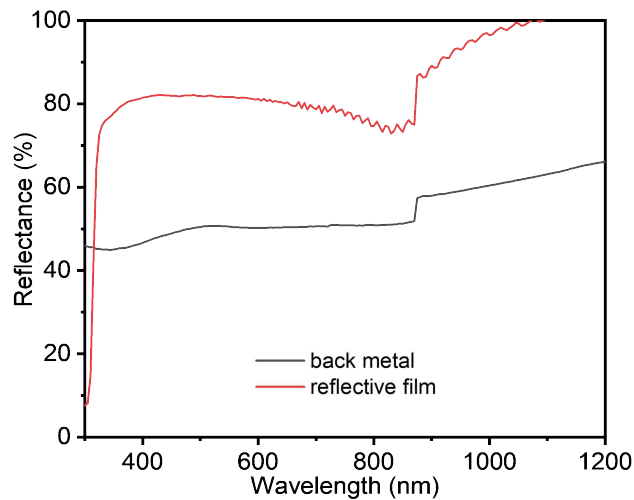


그림 177. 태양전지 후면전극과 반사필름의 반사도 그래프

- 측정 결과 후면전극은 400-900 nm에서 약 50%의 반사도를 나타내고, 900-1200에서 약 60%의 반사도가 측정됨. 반사필름은 400-1200 nm 전역에서 후면전극보다 약 20%가량 높은 반사도가 측정되었음. 이색성 광투과 필름의 투과 파장이 400-500, 600-700 nm인 점과 효율 증가폭을 고려하였을 때, 이색성 필름과 반사필름의 효과를 최대한으로 보기 위해서는 모듈 프레임 내벽에 반사필름을 적용해야 할 것으로 판단됨. 또한 각도에 따라 이색성 필름과 반사필름의 영향이 다를 것으로 추측됨.

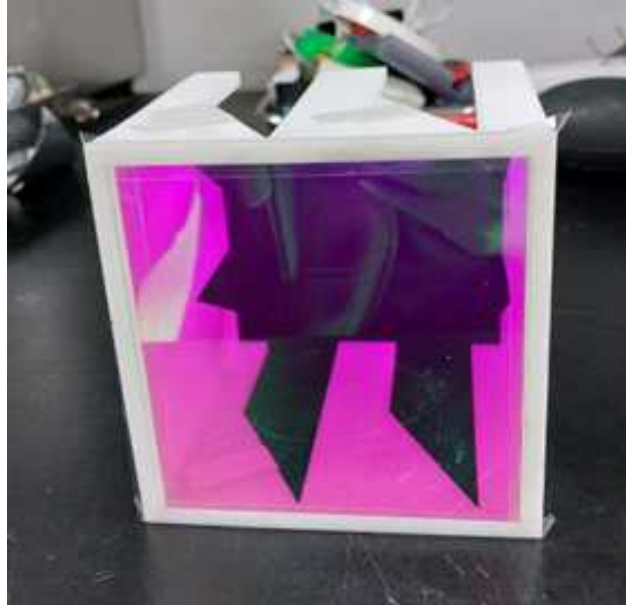


그림 178. 모듈 프레임에 이색성 필름을 적용한 이미지

- 이색성 광필터를 적용했을 때 후면 반사 유무에 대한 영향을 살펴보기 위해 모듈 프레임 하단에 이색성 광필터를 부착 후 효율 측정을 진행함. 수광면적은  $100 \text{ cm}^2$ 으로 계산하였음.

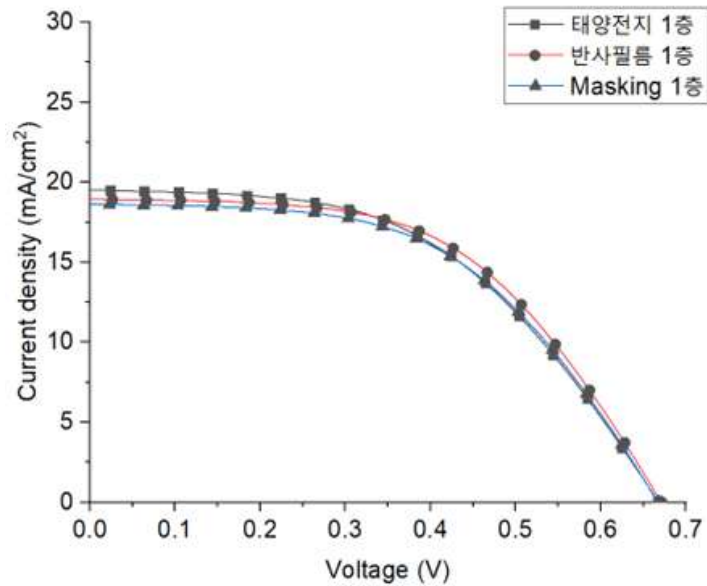


그림 179. 태양전지 후면 반사 조건에 따른 이색성 필름을 적용한 1층 태양전지의 J-V curve

표 45. 태양전지 후면 반사 조건에 따른 이색성 필름을 적용한 1층 태양전지의 광전특성 파라미터

	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc} \text{ (V)}$	FF	$\eta \text{ (%)}$
태양전지 1층	19.51	0.668	0.501	6.53
반사필름 1층	18.95	0.671	0.534	6.79
Masking 1층	18.63	0.667	0.525	6.52

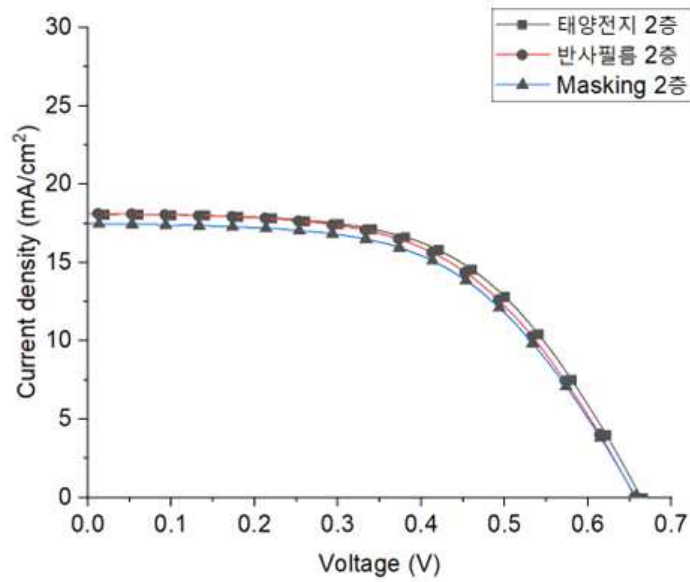


그림 180. 태양전지 후면 반사 조건에 따른 이색성 필름을 적용한 2층 태양전지의 J-V curve

표 46. 태양전지 후면 반사 조건에 따른 이색성 필름을 적용한 2층 태양전지의 광전특성 파라미터

	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc} \text{ (V)}$	FF	$\eta \text{ (%)}$
태양전지 2층	18.10	0.664	0.560	6.72
반사필름 2층	18.13	0.657	0.548	6.53
Masking 2층	17.49	0.658	0.549	6.31

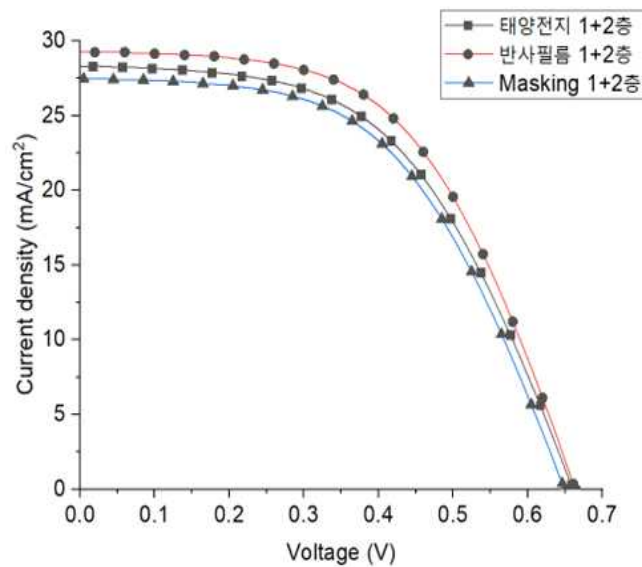


그림 181. 양전지 후면 반사 조건에 따른 이색성 필름을 적용한 광투과 태양광 모듈의 J-V curve



표 47. 태양전지 후면 반사 조건에 따른 이색성 필름을 적용한 광투과 태양광 모듈의 광전특성 파라미터

	$J_{sc}(mA/cm^2)$	$V_{oc} (V)$	FF	$\eta (%)$
태양전지 1+2층	28.32	0.662	0.519	9.73
반사필름 1+2층	29.28	0.663	0.539	10.48
Masking 1+2층	27.48	0.649	0.527	9.39

- 이색성 광필터 적용 결과 모든 후면 반사 조건에서의 광전효율이 광필터 적용 전 광전효율보다 약 1% 증가된 것을 확인함. 그러나 후면 반사 조건에 따른 광전효율을 비교하였을 때 후면을 흡광필름으로 마스크한 태양전지와 후면이 반사처리 된 태양전지와의 광전효율 차이가 이색성 광필터 적용 전보다 감소함. 이는 효율 증대에 대한 이색성 광필터의 효과가 후면 반사처리 여부에 대한 효과보다 큰 것으로 판단됨. 최종적으로 반사필름을 적용한 광투과 태양광 모듈이 10.48%의 광전효율을 달성하였고, 기존 스테인리스 후면전극을 반사판으로 이용한 광투과 태양광 모듈이 9.73%의 광전효율을 달성하였으나, 1층, 2층을 병렬로 연결함에 따른 전류에 대한 손실을 최소화하기 위해 1층, 2층을 따로 연결하여 발전하게 된다면 더 높은 출력과 광전효율을 달성할 수 있을 것으로 예상함.

(5) 개발된 태양전지와 이색성 광필터의 실증 실험

○ 광투과 태양광 모듈 가격비 분석

- 광투과 태양광 모듈의 상업화 가능성을 파악하기 위해 기존 태양전지 대비 가격 비율을 계산함. 광투과 태양광 모듈에는 단위 태양전지, 모듈 프레임, 아크릴 박스, 전극, 그리고 레진이 포함되어 있음. 각 사용되는 자재의 대한 단가와 합계는 다음과 같음.

표 48. 35×35 광투과 태양광 단위모듈 단가 표

자재	규격	수량	단가	계
태양전지	55×310 mm	5 pcs	7,260원/pcs	36,300원
모듈 프레임	340×340×100 mm <sup>3</sup>	520 g (필라멘트)	USD \$7/1.3kg	3,984.4원
아크릴 박스	350×350×2 mm <sup>3</sup> ×2 (상하) 350×101×2 mm <sup>3</sup> ×4 (옆면)	927 g	USD \$1.5/kg	1,978.7원
전극	0.22×0.02×500 mm <sup>3</sup>	3 m	190,000원/km	570원
레진	-	50 g	26,600원/kg	1330원
합계				44,163.1원

- 환율은 1,423원/USD로 계산하여 본 연구단계에서 제작한 350×350×105 mm<sup>3</sup> 크기의 단위 태양광 모듈의 단가는 약 44,163.1원으로 계산되었으며, 단위모듈의 크기는 350×350×105 mm<sup>3</sup> 이므로 단위 면적당 광투과 태양광 모듈의 가격은 360,515원/m<sup>2</sup> 으로 계산됨. 단위 태양광 모듈 단가에서 태양전지가 가장 큰 비중을 차지하여 단가를 낮추기 위해서는 사용되는 태양전지의 개수를 줄이거나 태양전

지의 도매가를 낮추는게 필수적임.

- 기존 태양전지 대비 가격 경쟁력을 판단하기 위해 시중에 판매되고 있는 실리콘 태양광 모듈 4개의 가격을 비교함. 단위면적당 가격은 투광성 50%를 기준으로 하여 기존 태양전지 가격을 2배로 책정하여 비교함.

**표 49. 기존 실리콘 태양광 모듈의 규격, 가격과 광투과 태양전지와 가격비**

회사 및 제품명	규격 (mm <sup>3</sup> )	가격	단위면적당 가격 (투과율 50% 계산)	단위면적당 가격 (투과율 80% 계산)
LG전자 LG300S1W-A5	1686×1016×40	399,000	465,856 원	745,370 원
LG전자 LG450S2W-U6	2,110×1042×40	429,000	390,245 원	624,392 원
한화큐셀 Q.PEAK_DUO_G6	1740×1030×32	314,000	350,407 원	560,651 원
썬셀 200W	1555×705×40	148,000	270,000 원	432,000 원
평균값			369,127.00	590,603.25
가격비			0.98:1	0.61:1

- 기존 태양전지 모듈의 가격과 비교한 결과 투광성 50%으로 계산하였을 때 0.98:1, 축소된 모듈의 광 투과도를 측정하였을 때의 값인 투광성 80%으로 계산하였을 때 0.61:1이 도출되었음. 1단계 연구개발 목표치  
가 1인 점을 고려하였을 때, 목표치에 소폭 낮은 값을 달하였지만, 모듈에 필수적인 태양전지의 가격 이 모듈 제작 비용에 큰 비중을 차지하기 때문에 추후 가격비를 맞추기 위해서는 태양전지의 개수를 줄이는 것이 불가피함.
- 한 축에 2개씩 태양전지를 체결, 단위모듈 1개당 총 4개의 태양전지를 체결할 때의 가격을 산정하게 되면 단위 모듈당 36903.1원, 301,249원/m<sup>2</sup>이 산정됨. 이는 투광성 50%으로 계산하였을 때의 시중 태양광 모듈의 평균값에 대한 가격비가 0.87:1로 목표치를 달성하였으나, 광투과 태양광 모듈의 요구 출력을 달성하기 위해서는 단위 태양전지에 기울기를 주어 수광면적을 넓히는 것이 필요하다고 판단 됨.
- 2단계에서는 태양전지의 높이를 줄여 원감을 절감하고자 하였음. 환율은 1,297 원/\$로 계산하였으며, 모듈 프레임의 높이는 고정하고 태양전지의 개수를 감소시켰음. 한 축에 절반의 태양전지 3개를 결합 하는 방식으로 이축에 태양전지 총 3개를 결합할 때 350×350×105 mm<sup>3</sup> 크기의 단위 모듈의 원가는 다음과 같음.

표 60. 35×35 광투과 태양광 단위모듈 단가 표

자재	규격	수량	단가	계
태양전지	55×310 mm	3 pcs	7,260원/pcs	21,780원
모듈 프레임	340×340×100 mm <sup>3</sup>	260 g (필라멘트)	USD \$7/1.3kg	1,816원
아크릴 박스	350×350×2 mm <sup>3</sup> ×2 (상하) 350×50×2 mm <sup>3</sup> ×4 (옆면)	630 g	USD \$1.5/kg	1,469원
전극	0.22×0.02×500 mm <sup>3</sup>	3 m	190,000원/km	570원
레진	-	50 g	26,600원/kg	1330원
합계				26,965원

표 61. 기존 실리콘 태양광 모듈의 규격, 가격과 광투과 태양전지와 가격비

회사 및 제품명	규격 (mm <sup>3</sup> )	가격	단위면적당 가격 (투과율 50% 계산)	단위면적당 가격 (투과율 80% 계산)
LG전자 LG300S1W-A5	1686×1016×40	399,000	465,856 원	745,370 원
LG전자 LG450S2W-U6	2,110×1042×40	429,000	390,245 원	624,392 원
한화큐셀 Q.PEAK_DUO_G6	1740×1030×32	314,000	350,407 원	560,651 원
썬셀 200W	1555×705×40	148,000	270,000 원	432,000 원
평균값			369,127.00	590,603.25
가격비			0.60:1	0.37:1

- 기존 태양전지의 모듈의 가격과 비교한 결과 투과율 50%로 계산하였을 때 가격비는 0.6:0.1, 축소된 모듈의 광투과율 80%로 계산하였을 때의 값인 투과율 80%로 계산하였을 때 0.37:1이 도출됨. 이 결과를 통해 태양전지의 개수에 따라 단위모듈 원가에 큰 영향을 미치고, 스마트온실 광투과 태양광 모듈의 상업성을 위해서는 태양전지의 원가 절감을 위한 저렴한 생산 공정 개발이 필수적임.

○ 단위 태양전지 입사광 각도에 따른 성능 변화 평가

- 1차년도에 사용하였던 단위 태양전지와 2차년도에 사용한 단위 태양전지의 형상이 변화함에 따라 단위 태양전지의 기울기에 따른 성능 변화를 재평가함. 입사광 각도별 단위 태양전지의 효율을 측정하기 위해 기울기 변화 평가용 모듈 프레임을 제작하였고, 시뮬레이터에 적용 가능하며, 입사광 각도, 그리고 1층의 shading effect를 비교하기 위해 30×30 모듈 프레임의 비율로 축소한 소형 모듈로 측정 진행함.



그림 182. 입사광 각도별( $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ) 태양전지 효율 측정용 프레임 이미지

- $0^{\circ}$  부터  $10^{\circ}$  마다  $90^{\circ}$  까지의 10개의 각도별 효율 측정용 모듈 프레임을 이용하여 단위 태양전지의 입사광 각도에 따른 태양전지의 광전특성을 비교함. 태양전지의 수광면적은  $43\text{ cm}^2$ , 태양광 모듈의 수광면적은 모듈의 크기인  $100\text{ cm}^2$ 으로 계산하였고, 태양전지 간 병렬로 연결하여 측정함.

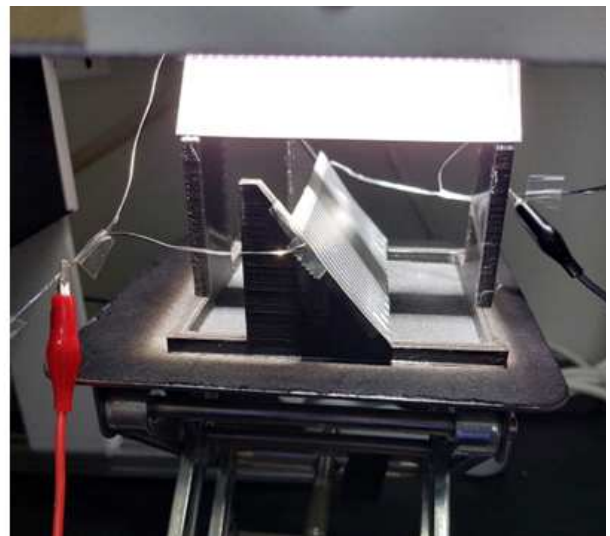
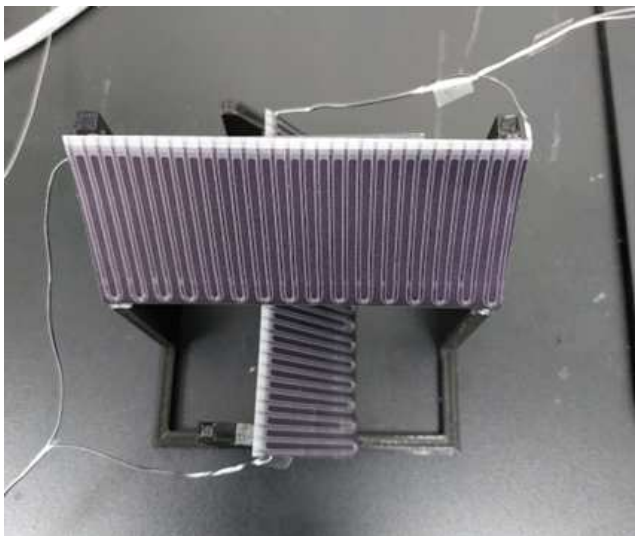


그림 183. 각도별 태양전지 효율 측정용 프레임에 체결된 단위 태양전지(좌), 태양광 시뮬레이터를 이용하여 측정하는(우) 이미지

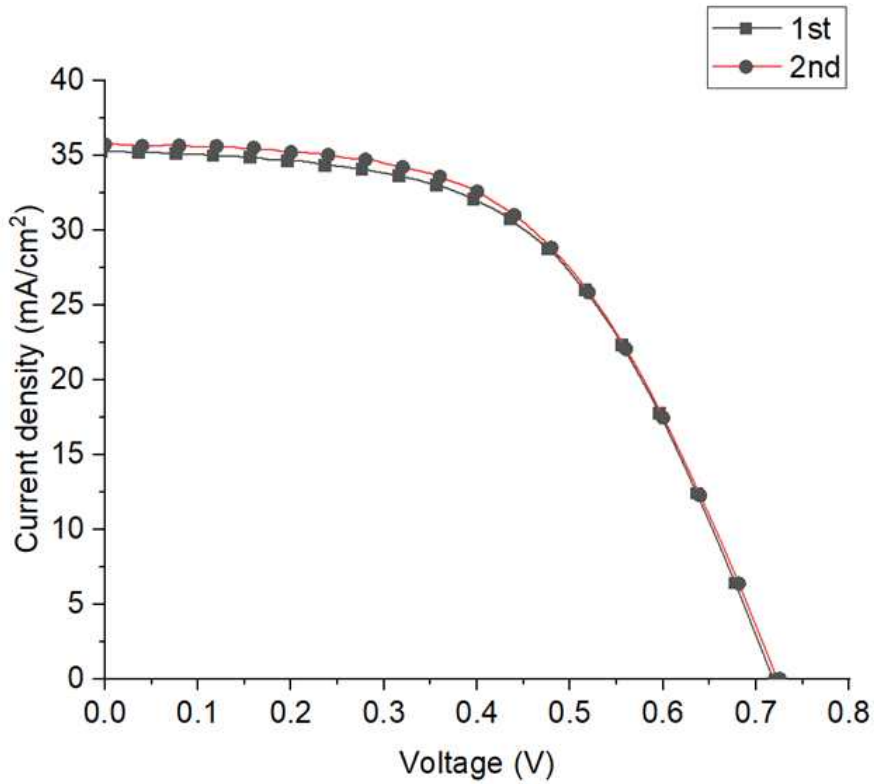


그림 184. 입사광 각도별 태양전지 효율 변화 측정에 사용된 태양전지 두 개의 J-V curve

표 50. 입사광 각도별 태양전지 효율 변화 측정에 사용된 태양전지 두 개의 광전효율 파라미터

	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF	$\eta$ (%)
1 <sup>st</sup>	35.29	0.718	0.541	13.71
2 <sup>nd</sup>	35.75	0.725	0.534	13.84

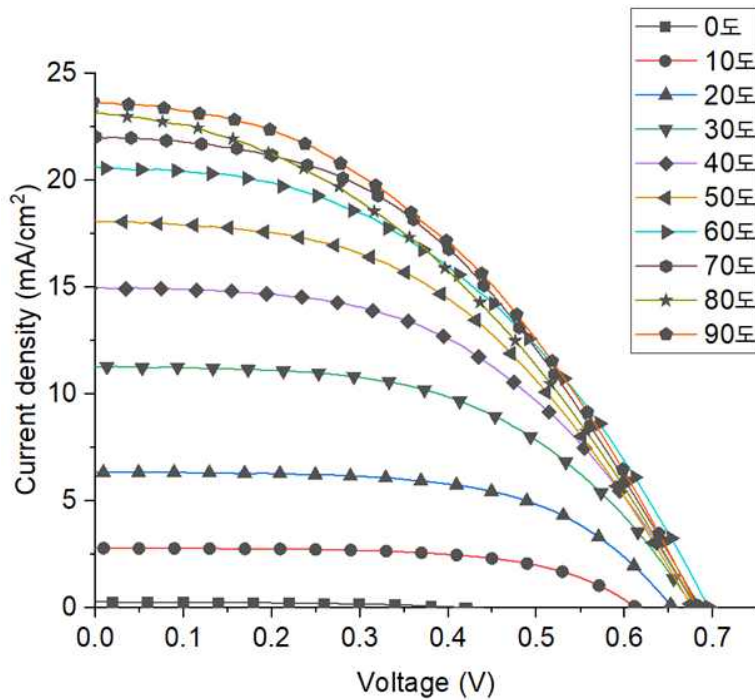


그림 185. 입사광 각도별 태양광 모듈의 J-V curve



표 51. 입사광 각도별 태양광 모듈의 광전효율 파라미터

	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF	$\eta$ (%)	광전효율 비율 (90°기준)	연구개발 목표치 기준
0°	0.26	0.419	0.458	0.05	0.7%	-
10°	2.77	0.613	0.608	1.03	15.0%	-
20°	6.33	0.654	0.594	2.46	35.8%	27%
30°	11.26	0.679	0.531	4.06	59.1%	40%
40°	14.97	0.680	0.500	5.09	74.1%	50%
50°	18.09	0.677	0.476	5.82	84.7%	60%
60°	20.63	0.695	0.449	6.43	93.6%	70%
70°	22.04	0.685	0.446	6.74	98.1%	75%
80°	23.16	0.681	0.399	6.30	92.3%	80%
90°	23.67	0.683	0.425	6.87	-	-

- 측정 결과 태양전지가 지면에 수평하여 수광 광밀도가 증가할수록 전류밀도가 증가하는 것을 확인함. 개방전압의 경우 광밀도에 자연로그로 비례하기 때문에 입사광 각도에 따라서 크게 변화하지 않았으나 낮은 입사광 각도에서 급격히 감소하는 것을 확인함. 채움인자는 0°를 제외한 각도에서 입사광 각도가 증가할수록 감소하는 경향을 보였는데, 이는 입사광 각도가 증가할수록 가리는 면적이 증가하기 때문에 2층 태양전지에 의한 1층의 shading effect에 영향으로 판단됨.
- 입사광 각도별 광전효율 계산 결과 0°에서는 0.7%, 10°에서는 1.03%, 20°에서는 2.46%, 30°에서는 4.06%, 40°에서는 5.09%, 50°에서는 5.82%, 60°에서는 6.43%, 70°에서는 6.74%, 80°에서는 6.30%, 90°에서는 6.87%의 광전효율이 각각 계산됨. 입사광 각도에 따른 성능 변화를 평가하기 위해 입사광 각도 90°의 광전효율과 비교해봤을 때 각도별로 각각 0.7%, 15.0%, 35.8%, 59.1%, 74.1%, 84.7%, 93.6%, 98.1%, 92.3%가 계산되어 연구개발 목표치보다 상회하는 결과값을 달성함.
- 1층 태양전지의 shading effect에 의한 단락전류밀도 및 개방전압의 감소로 인한 전체적인 효율 감소를 감안하고 원활한 측정을 위해 1층, 2층 태양전지를 병렬로 연결하여 이러한 결과값을 나타낸 것으로, 실제 모듈을 구동할 때 1층 태양전지, 2층 태양전지를 구분하여 발전하게 된다면 소폭 높은 값을 얻을 수 있을 것으로 예상됨.

### ○ 기준 태양광 모듈 대비 광투과 태양광 모듈 출력비 평가

- 광투과 태양광 모듈은 단위 태양전지의 개수, 그리고 단위 태양전지의 입사광 각도에 따라 모듈의 광투과도 및 출력이 크게 변화함, 따라서 광투과도 50%에 근사한 입사광 각도 30°로 체결된 단위 태양전지를 이용한 광투과 태양광 모듈 출력과 솔라 시뮬레이터를 이용하여 광투과 태양광 모듈의 출력 측정 후 기준 태양광 모듈의 투광성 50% 이하 고려한 출력을 비교함. 광투과 태양광 모듈의 수광면적은 100 cm<sup>2</sup>으로 계산함. 1층, 2층 병렬 또는 직렬 연결로 인한 출력 손실을 줄이기 위해 1층 태양전지 및 2층 태양전지 따로 측정 후 출력값을 합산하여 비교함.
- 기준 태양광 모듈로는 광투과 태양광 모듈에 적용된 상용 CIGS 태양전지를 적용함. 광투과 태양광 모듈과의 출력비를 비교하기 위해 측정된 태양전지 4개의 광전특성 파라미터를 이용함. 수광면적은

136.4 cm<sup>2</sup>으로 계산함.

표 52. 기준 태양전지의 광전특성 파라미터

	I <sub>sc</sub> (A)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF	Power (W)	η (%)
Sample 1	4.67	34.25	0.714	0.582	1.94	14.23
Sample 2	4.90	35.93	0.730	0.548	1.96	14.36
Sample 3	4.59	33.63	0.723	0.570	1.89	13.86
Sample 4	5.02	36.74	0.708	0.519	1.84	13.52
평균값	4.80	35.14	0.72	0.55	1.91	13.99

표 53. 단위 태양전지 입사광 각도 30°로 측정된 광투과 태양광 모듈의 광전효율 파라미터

	I <sub>sc</sub> (A)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF	Power (W)	η (%)
1층	1.90	18.95	0.671	0.534	0.679	6.79
2층	1.81	18.13	0.657	0.548	0.652	6.53

- 단위 태양전지 입사광 각도 30°로 설정된 광투과 태양광 모듈의 출력은 1층 출력과 2층 출력을 합하여 100 cm<sup>2</sup>에 약 1.33W의 출력을 달성함. 기준 태양광 모듈과 광투과 모듈의 규격이 다르기 때문에 출력을 100 cm<sup>2</sup> 단위로 나누어 출력 밀도를 비교함.
- 단위 태양전지는 1.33 W/100 cm<sup>2</sup>을 달성하였고, 기준 태양광 모듈은 1.40 W/100 cm<sup>2</sup>을 달성함. 광투과도 50%를 고려하게 된다면 0.70 W/100 cm<sup>2</sup>이 계산되어 광투과 태양광 모듈과의 출력을 비교하였을 때 광투과 태양광 모듈은 약 1.9:1의 출력비를 달성함.

○ 105×105 cm<sup>2</sup> 크기의 대면적 프로토타입 모듈 제작

- 제작된 350×350×105 mm<sup>3</sup> 스케일의 단위 모듈을 바탕으로 9개의 단위모듈을 3×3 배열로 1050×1050×105 mm<sup>3</sup> 스케일의 대면적 프로토타입 모듈을 제작함. CIGS 태양전지는 단위모듈 1개당 6개씩 총 54개를 사용하였으며, 적층형 태양전지 단위모듈을 제작하여 연결함. 각 층마다 태양전지는 병렬 연결하였으며, 층간 shading effect를 최소화하기 위해 1층, 2층을 구분하여 연결하였음. 단위 모듈 제작에 앞서 54개의 태양전지를 선별 및 분류하여 제작함.

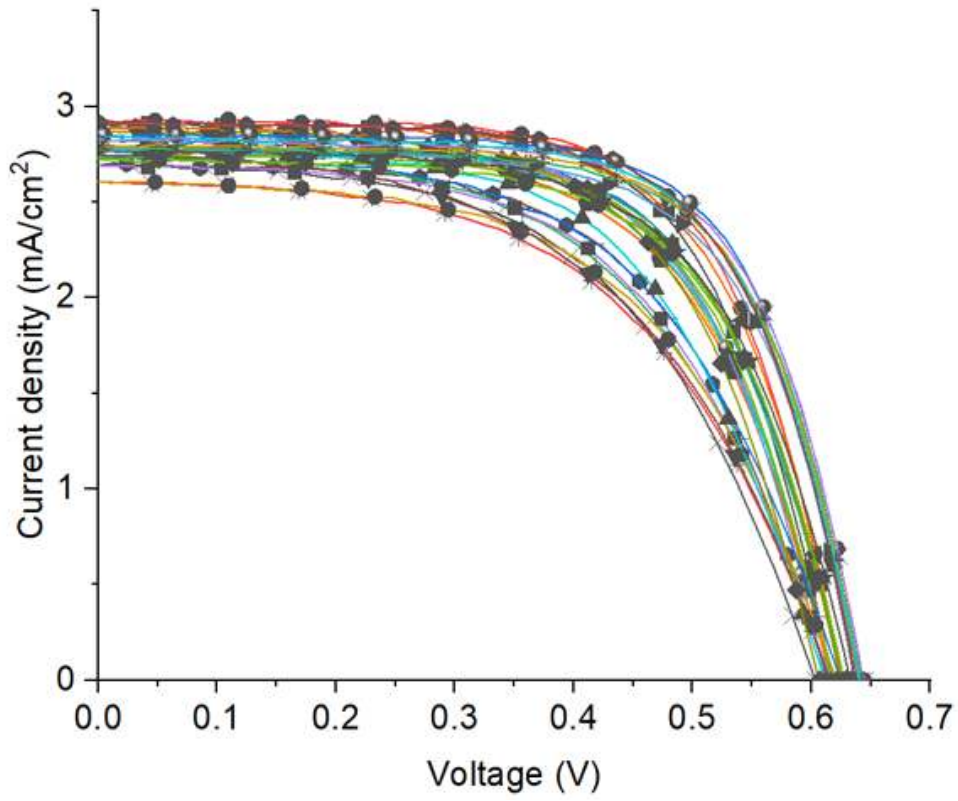


그림 186. 대면적 프로토타입 모듈에 사용된 CIGS 태양전지의 J-V curve (1-32번)

표 53. 대면적 프로토타입 모듈에 사용된 CIGS 태양전지의 광전효율 파라미터 (1-32번)

	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)
Device 1	2.91	0.619	0.645	1.16
Device 2	2.93	0.625	0.662	1.21
Device 3	2.82	0.629	0.627	1.11
Device 4	2.79	0.626	0.637	1.11
Device 5	2.85	0.617	0.614	1.08
Device 6	2.87	0.622	0.597	1.06
Device 7	2.82	0.618	0.611	1.06
Device 8	2.69	0.616	0.579	0.96
Device 9	2.79	0.627	0.628	1.10
Device 10	2.76	0.619	0.614	1.05
Device 11	2.77	0.611	0.642	1.09
Device 12	2.74	0.616	0.645	1.09
Device 13	2.69	0.603	0.549	0.89
Device 14	2.60	0.616	0.539	0.87
Device 15	2.73	0.625	0.563	0.96
Device 16	2.73	0.623	0.539	0.92
Device 17	2.69	0.617	0.560	0.93
Device 18	2.60	0.620	0.553	0.89
Device 19	2.77	0.612	0.584	0.99
Device 20	2.75	0.615	0.519	0.88
Device 21	2.88	0.606	0.611	1.07
Device 22	2.88	0.626	0.652	1.18
Device 23	2.77	0.636	0.665	1.17
Device 24	2.72	0.627	0.633	1.08
Device 25	2.76	0.633	0.629	1.10
Device 26	2.91	0.639	0.657	1.22
Device 27	2.85	0.644	0.679	1.25
Device 28	2.77	0.644	0.675	1.21
Device 29	2.82	0.646	0.673	1.23
Device 30	2.80	0.642	0.672	1.21
Device 31	2.84	0.640	0.673	1.22
Device 32	2.92	0.637	0.659	1.22

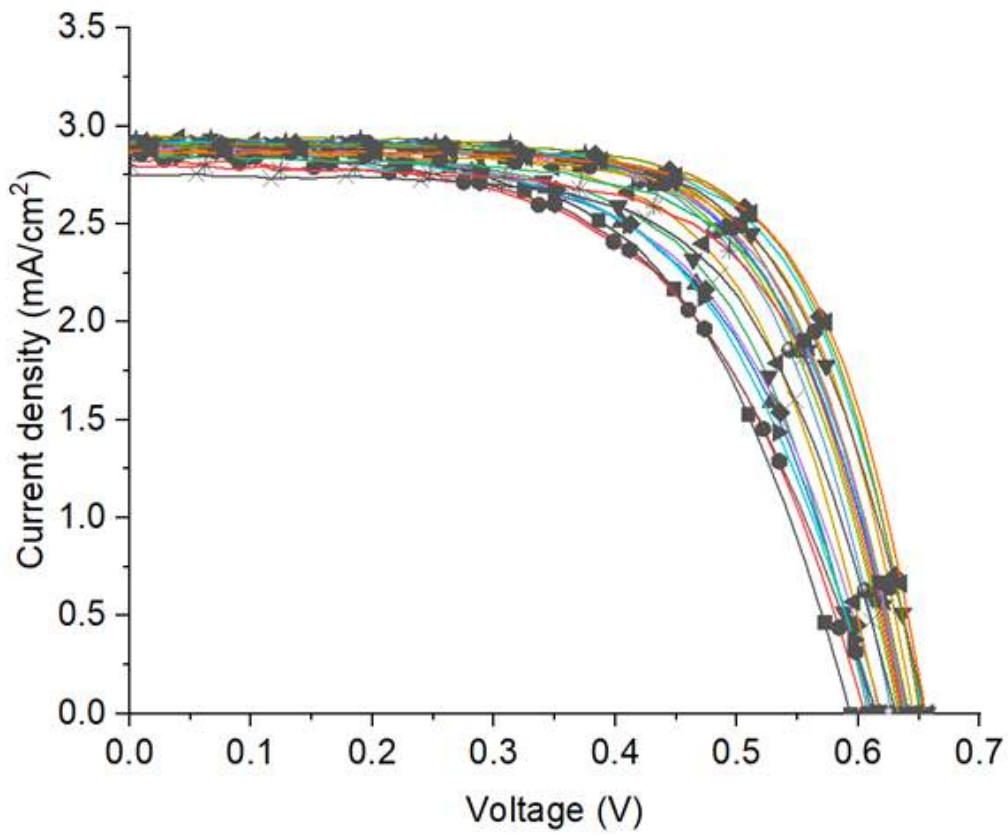


그림 187. 대면적 프로토타입 모듈에 사용된 CIGS 태양전지의 J-V curve (33-54번)



표 54. 대면적 프로토타입 모듈에 사용된 CIGS 태양전지의 광전효율 파라미터 (33-54번)

	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)
Device 33	2.91	0.594	0.576	0.99
Device 34	2.82	0.607	0.569	0.98
Device 35	2.89	0.611	0.585	1.03
Device 36	2.86	0.608	0.623	1.08
Device 37	2.90	0.618	0.583	1.05
Device 38	2.94	0.619	0.624	1.14
Device 39	2.86	0.615	0.590	1.04
Device 40	2.88	0.615	0.554	0.98
Device 41	2.94	0.642	0.658	1.24
Device 42	2.91	0.635	0.663	1.22
Device 43	2.91	0.627	0.651	1.19
Device 44	2.91	0.633	0.652	1.20
Device 45	2.75	0.633	0.632	1.10
Device 46	2.80	0.637	0.655	1.17
Device 47	2.93	0.642	0.648	1.22
Device 48	2.86	0.641	0.654	1.20
Device 49	2.88	0.639	0.665	1.23
Device 50	2.87	0.648	0.675	1.25
Device 51	2.91	0.653	0.677	1.29
Device 52	2.91	0.656	0.658	1.26
Device 53	2.91	0.653	0.689	1.31
Device 54	2.87	0.658	0.692	1.31

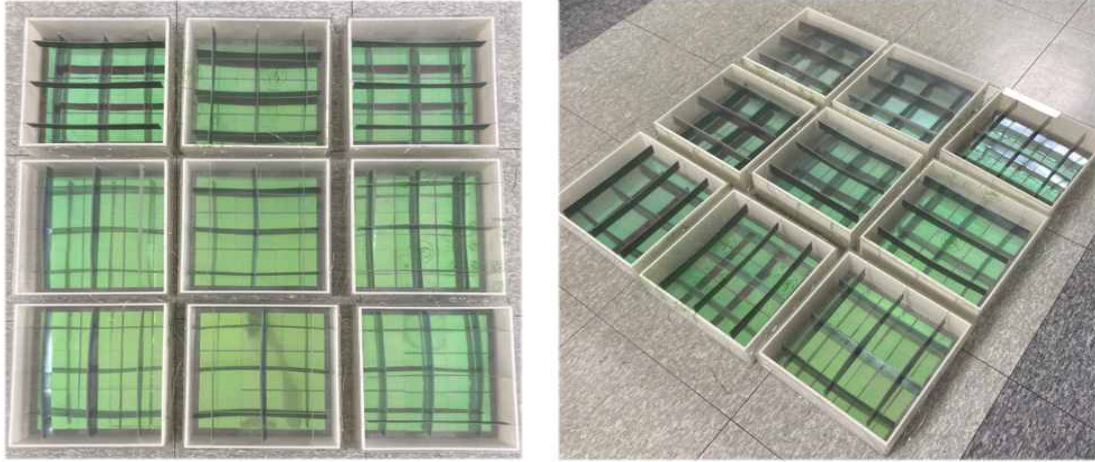


그림 188. 9개의 단위 모듈을 3×3으로 배열한 105×105 cm<sup>2</sup> 크기의 대면적 포토로타입 모듈 이미지

## (6) 채움재 특성 분석

### ○ 채움재 교반 조건 탐색

- 이색성 필터와 모듈 프레임을 고정시키고, 태양전지를 보호하기 위해 광투과 태양광 모듈에 채움재 적용은 필수적임. 고분자 채움재를 도포하고 경화하기 위해서는 주재와 경화제를 충분히 교반 후 적절한 교반 시간과 경화 온도가 요구됨. 이에 따라 채움재 교반, 경화 최적화 조건을 탐색함
- 연구 초기에는 고분자 봉지재를 교반하기 위해 주재와 경화제의 비율을 맞춘 전구체 일정량을 수동으로 10분 교반 후 도포하는 방식으로 진행하였음. 하지만 단위 모듈의 크기가 증가함에 따라 요구되는 채움재의 양이 증가하였고, 이에 따라 수동으로 교반하였을 때, 전구체를 동시다발적으로 교반하는데 한계가 있어 빠르게 만들어진 전구체일수록 경화가 진행됨에 따라 채움재에 아지랑이가 형성되는 것을 확인함.
- 이를 해결하기 위해 채움재의 교반 공정에 자전공전식 혼합기(planetary mixer)를 활용하여 혼합 공정을 최적화하여 채움재 내부의 아지랑이를 개선함.

### ○ 채움재 광투과도 평가

- 모듈 프레임과 이색성 필터를 아크릴 상자에 고정시키고 태양전지를 보호하기 위해 사용되는 채움재 종류와 두께에 따른 모듈의 광투과도 특성을 파악하기 위해 채움재 광투과도 평가를 실시하였음. 실제 모듈 스케일의 채움재를 평가하기에는 많은 양과 긴 경화시간이 소요되어 5 × 5 × 2 cm<sup>2</sup> 규격으로 채움재 블록을 설계하였으며, 이를 제작하기 위해 광투과도 평가용 블록 틀을 설계함. 3D 프린터를 이용하여 구조체를 제작하면 프린터의 노즐의 굵기에 따라 표면의 패턴이 형성될 수 있어 빛이 투과하는 영역은 아크릴 판을 대어 표면의 패턴을 최소화하여 제작함.



그림 189. (좌)광투과도 평가용 채움재 블록 틀, (우)광투과도 평가용 채움재 블록 이미지

- 광투과도가 높은 고분자 채움재로 주로 사용되는 PDMS와 에폭시 레진의 투과도 측정을 진행함. 광투과도 평가용 채움재 블록을 제작하기 위해 틀에 각 고분자를 넣어 상온에서 48시간 경화하였음. 그 결과, PDMS와 레진 모두 400-700 nm 가시광 영역 평균 90%의 광투과도가 측정됨. PDMS는 약 400 nm에서 서서히 광투과도가 감소하지만, 레진은 400 nm에서 광투과도가 급격히 감소하는 것을 확인함. 고분자의 결정성에 따라서 흡광도가 변하는 것으로 추측함.

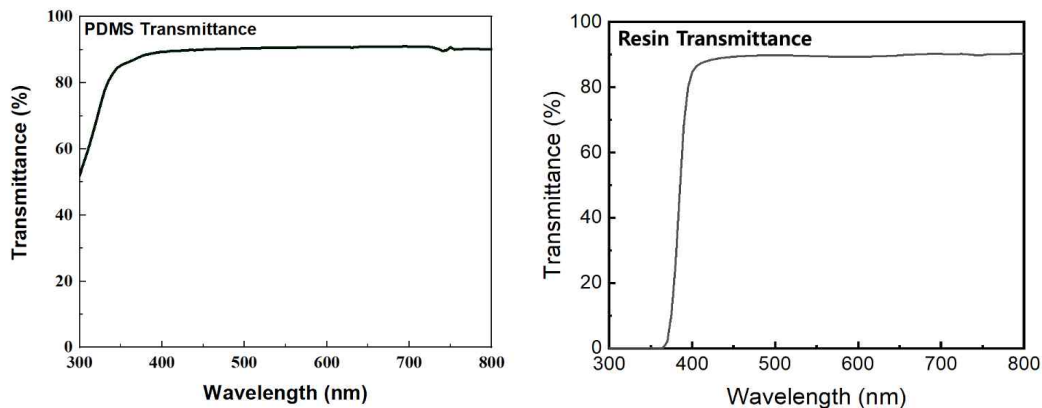


그림 190. 광투과 측정용 채움재 블록의 광투과도 이미지. (좌) PDMS (우) 레진

## ■ 이색성 광필터가 결합된 태양광 발전시 에너지 이동도 최적화 (국민대학교)

### (1) 이색성 광필터 및 광합성 스펙트럼이 고려된 자연광 스펙트럼 계산

- 이색성 광필터가 결합된 태양전지에서의 작물 생산을 위해 필요로 하는 개구율 확인을 위해 자연광 스펙트럼을 기준으로 계산을 진행하였음. 자연광은 ASTM G-173-03 (ISO 9845-1, 1992) 를 기준으로 설정하였으며, AM 1.5의 global irradiance에서 300 ~ 1300 nm에 대해서 사용하였음. 이색성 광필터의 경우 (SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>)<sup>8</sup>의 구조를 갖도록 설계되었으며, 이 때 400 ~ 500 nm, 600 ~ 1000 nm의 투과 밴드를 가짐.
- 300 ~ 1300 nm의 파장대에서 1000 W/m<sup>2</sup>의 irradiance를 가질 경우, 124524 lx의 조도임을 확인하였으며, 이색성 광필터를 통과한 빛의 irradiance는 626.8 W/m<sup>2</sup>, 조도는 50970 lx였음. 나머지 빛은 모두 반사되었다고 가정하였으므로 반사된 빛의 irradiance는 373.2 W/m<sup>2</sup>였음.

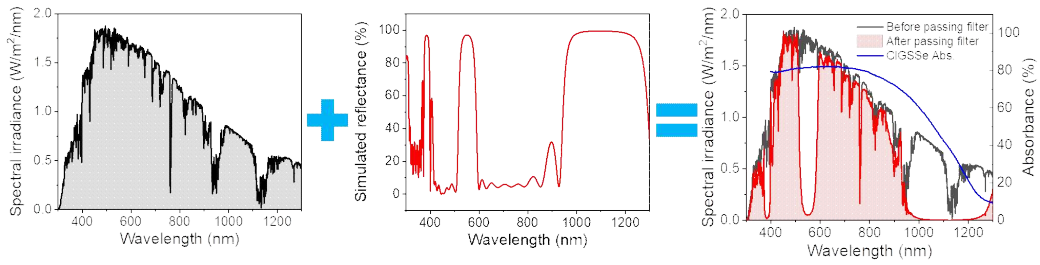


그림 191. 이색성 광필터를 통과한 자연광 스펙트럼

- 동일한 자연광 스펙트럼에 대해 식물 광합성과 관련이 있는 photosynthetic action spectrum (PAS)을 가중함으로써 식물 광합성에 필요로 하는 빛의 양과 재활용이 가능한 빛의 양을 정량적으로 확인하였음. 마찬가지로 동일한 파장대역에서 1000 W/m<sup>2</sup>의 irradiance를 가질 경우, 광합성에 사용되는 빛의 irradiance는 107.4 W/m<sup>2</sup>였으며, 나머지 892.6 W/m<sup>2</sup>는 재활용이 가능한 것으로 판단됨.

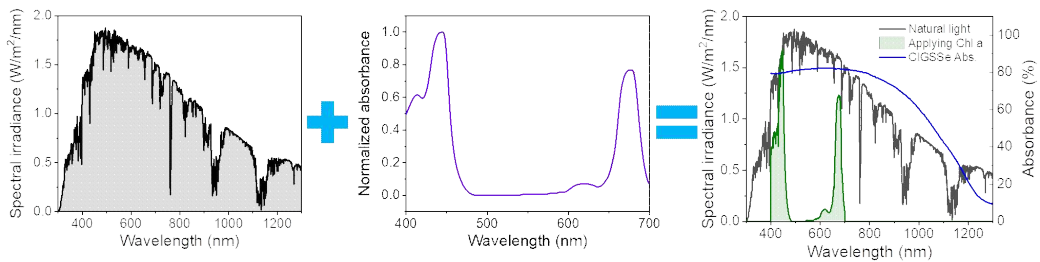


그림 192. 광합성 작용 스펙트럼 (PAS)이 가중된 자연광 스펙트럼

- 위의 두 계산결과를 종합하여 볼 때, 300 ~ 1300 nm의 1000 W/m<sup>2</sup>의 irradiance를 갖는 자연광에 대해 태양전지의 개구율이 0%인 경우 태양전지에 의해 73.4%의 빛이 흡수되고 나머지 26.6%는 투과할 것으로 계산됨. 투과된 빛의 52.1% (전체의 13.9%)는 이색성 광필터에 의해 반사되며, 나머지 47.9% (전체의 12.8%)는 투과하여 식물 광합성에 사용될 수 있음. 특히 이색성 광필터에서 반사된 빛의 45.3% (전체의 6.3%)는 태양전지에서 재흡수되어 태양전지의 효율을 증가시킬 것으로 확인됨. 결과적으로 1000 W/m<sup>2</sup>의 irradiance를 갖는 자연광 중 6.3%만이 실제 광합성에 사용되며, 토마토의 광포화점 (1400 μmol/m<sup>2</sup>/s) 대비 53.4% (748 μmol/m<sup>2</sup>/s)의 PPFD를 가지는 것을 확인하였음. 광합성에서 이보다 더 높은 수준의 빛을 사용하기 위해서는 개구율에 대한 최적화가 필요함.

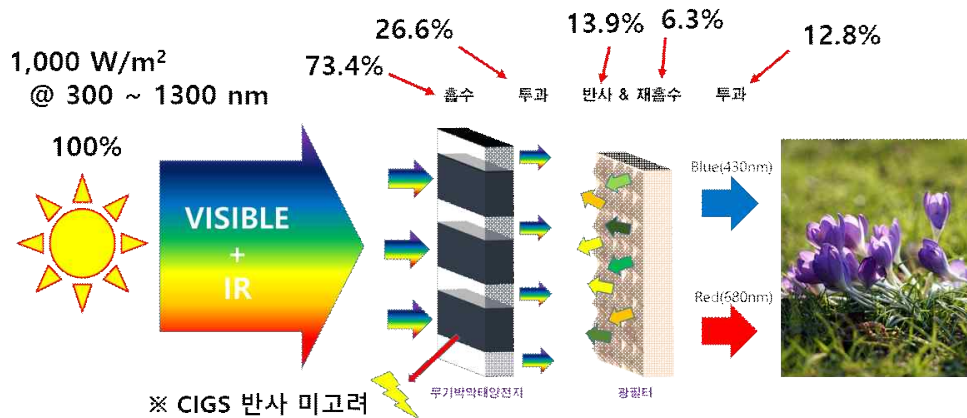


그림 193. Irradiance 기준 에너지 이동도 계산

## (2) 태양전지의 개구율에 따른 에너지 이동도 계산

- 앞서 진행한 에너지 이동도에 대해 태양전지의 개구율에 따른 식물 광합성에 사용가능한 빛의 양을 확인하였음. 태양전지 층과 후면의 이색성 광필터를 모두 통과한 빛만이 광합성에 사용이 가능하며, 아래 그림과 같이 25%의 개구율을 가질 때 토마토의 광포화점 PPF를 100% 만족할 수 있을 것으로 계산됨.

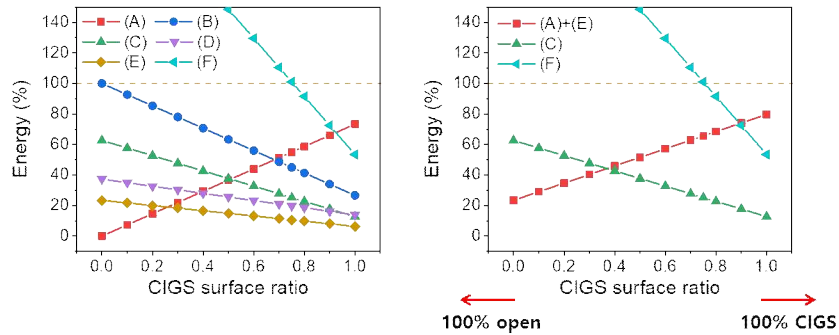


그림 194. 태양전지 개구율에 따른 에너지 이동도 계산. 태양전지 층에서 (A) 흡수, (B) 투과되는 광량, 필터 층에서 (C) 투과, (D) 반사되는 광량, (E) 필터 층에서 반사된 후 태양전지로 재흡수되는 광량, (F) (C)로부터 계산된 토마토 광포화점 대비 PPF

- Spectral irradiance를 기준으로 각 case별 사용가능한 스펙트럼을 확인하였음. 개구율 0%와는 다르게 45%의 빛이 태양전지를 투과할 수 있으며, 그 중 56% (전체 25.2%)의 빛이 후면의 이색성 광필터를 통과하여 광합성에 사용될 것으로 보임. 이색성 광필터에 의해 반사된 빛은 다시 태양전지로 입사되어 전체의 10.6%의 빛이 재활용이 가능할 것으로 계산되었음. 따라서 태양전지 단독으로 사용할 경우 55%의 빛만이 태양광 발전에 사용되지만, 이색성 광필터에 의해 반사된 빛을 추가로 활용하게 되면 총 65.6%의 빛을 발전에 사용할 수 있으므로 약 19.3%의 효율 증가 효과가 있을 것으로 기대됨.

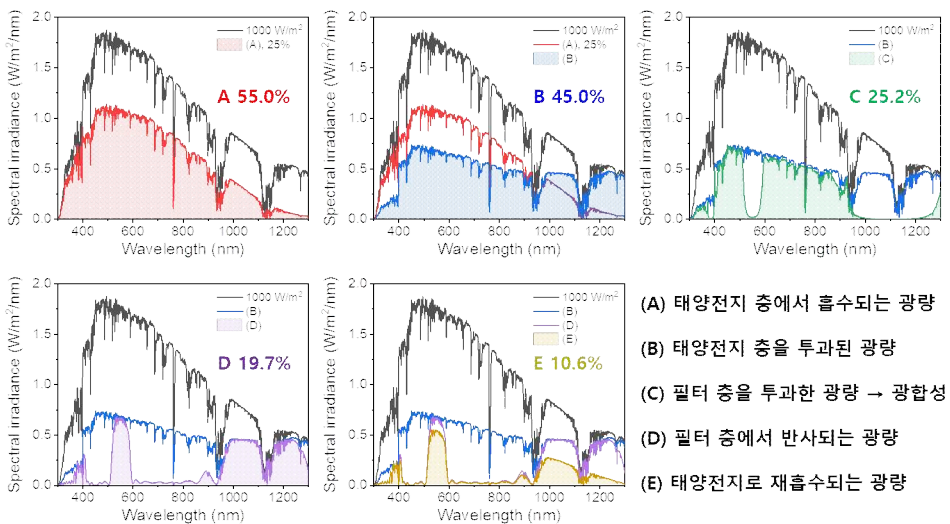


그림 195. 개구율 25% 기준에서의 각 case별 spectral irradiance



## ■ 작물 생산과 태양광 발전을 고려한 이색성 광필터 최적화 설계

### (1) FDTD 기반 이색성 광필터 소재 설계 및 전산모사

- 이색성 광필터 제작을 위해 먼저 FDTD 전산모사 방법을 사용하여 설계를 진행하였음. 일반적으로 이색성 광필터는 고굴절률을 가지는 물질과 저굴절률을 가지는 물질을 순차적으로 적층하여 제작되므로, 우선적으로 물질에 따른 굴절률과 흡광계수 탐색을 실시하였음. 아래 그림과 같이 TiO<sub>2</sub>가 가장 높은 굴절률을 가지고 있으며, SiO<sub>2</sub>가 가장 낮은 굴절률을 가지고 있음을 확인함. 특히 TiO<sub>2</sub> 및 SiO<sub>2</sub>는 가격이 싸고 기상 증착이 용이하다는 장점이 있으므로 해당 물질을 사용하여 FDTD 전산모사를 실시하였음.

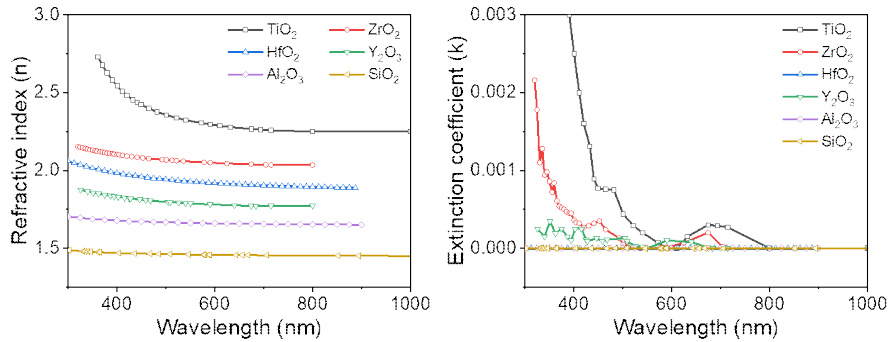


그림 196. 이색성 광필터 설계에 사용된 재료의 파장에 따른 굴절률 및 흡광계수

- 청색광 및 적색광과 같이 식물 생장에 필요한 파장대의 빛을 선택적으로 투과시키고 녹색광은 반사시키기 위해 식물의 주요 색소인 엽록소 a와 엽록소 b의 흡수 스펙트럼을 탐색하였음. 아래 그림과 같이 엽록소는 주로 400~500 nm의 영역과 600~700 nm 영역의 빛을 흡수하는 것으로 알려져 있으므로 식물 생장을 위한 이색성 광필터의 투과밴드는 다음과 같이 총 4종류로 디자인하였음: (1) 400~450 nm / 650~700 nm, (2) 450~500 nm / 600~650 nm, (3) 400~500 nm / 640~700 nm, (4) 400~500 nm / 600~700 nm. 모든 이색성 광필터의 설계는 두 개의 투과밴드에 대해서는 투과율 95% 이상, 반사되어야 하는 나머지 영역에서의 투과율은 5% 기준을 목표로 하여 진행되었음.

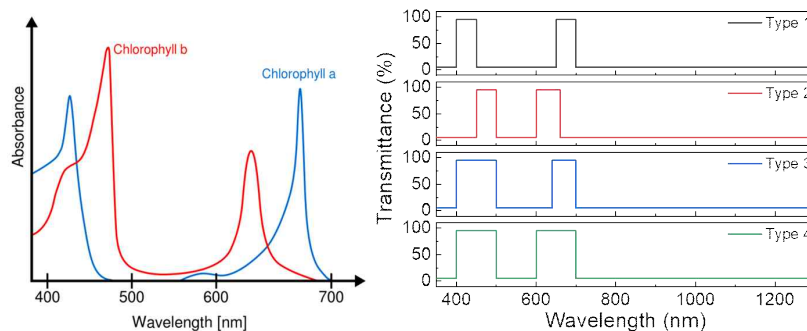


그림 197. 엽록소 a, b의 흡수 스펙트럼과 4종류의 이색성 광필터 설계 목표

- 초기 이색성 광필터의 시뮬레이션을 진행한 후 원하지 않는 영역에서의 투과/반사를 최소화하기 위한 추가적인 정제 과정을 수행하였음. 이를 통해 최종적으로 52~62층의 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 다층 구조의 이색성 광필터 설계가 완료되었으며, 아래 투과 및 반사 스펙트럼과 같이 설계 목표대로 총 4종류의 이색성 광필터가 잘 구현된 것을 확인함.



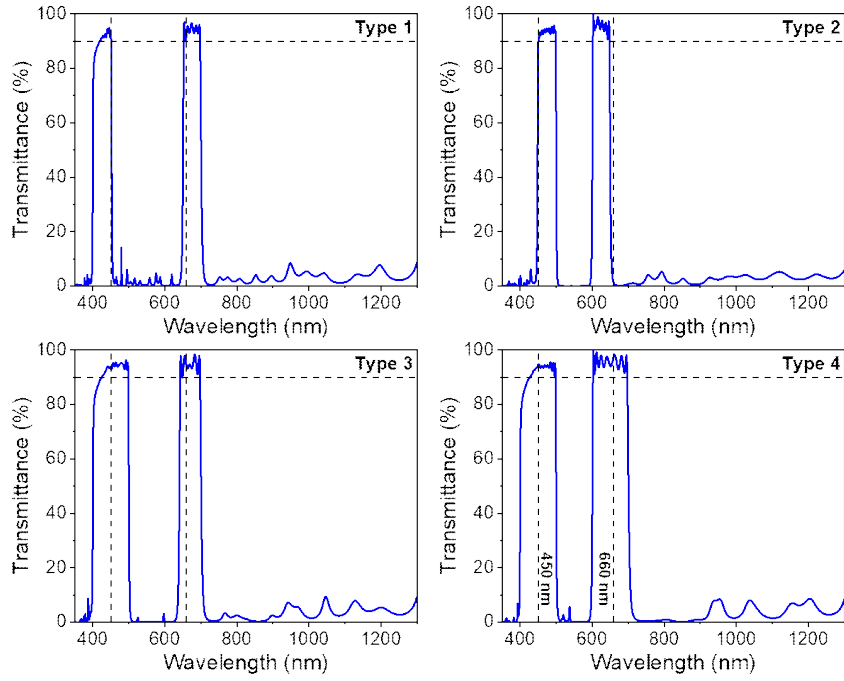


그림 198. 4종류의 이색성 광필터의 시뮬레이션 투과 스펙트럼

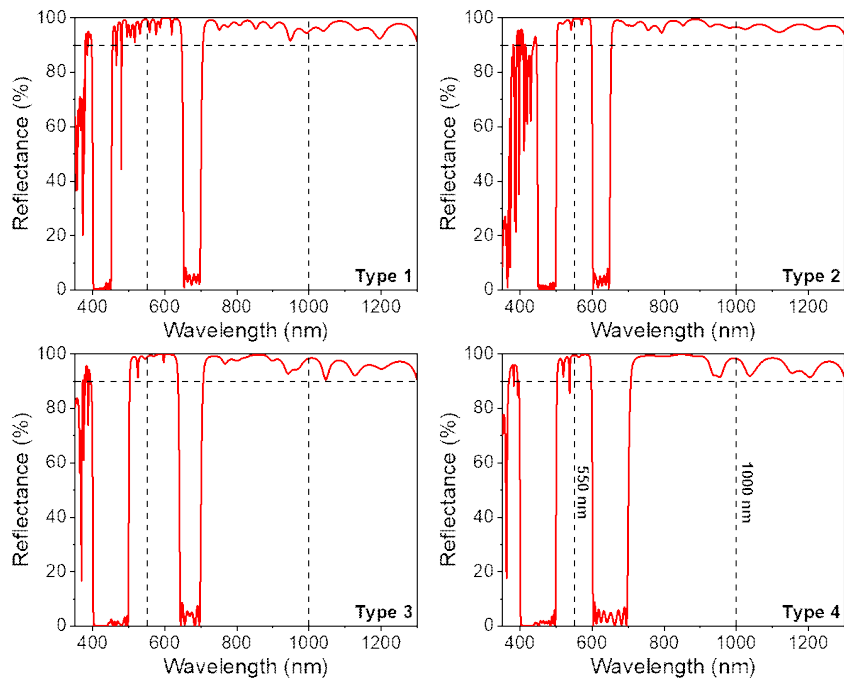


그림 199. 4종류의 이색성 광필터의 시뮬레이션 반사 스펙트럼

## (2) 층상 자기조립법 기반 광결정 적층 플랫폼 기술

- 층상 자기조립법은 전통적으로 연구 개발 분야에서 함침법을 이용하여 진행되어 왔으며, 연구 제안서 작성 당시에는 함침법을 이용하여 광결정 적층의 원천기술을 일차적으로 확립하는 것을 계획하였음. 그러나 함침법 기반의 층상 자기조립법을 대량 생산 공정에 적용할 시에 교차 오염의 우려가 있으며, 광결정을 증착하는데 시간이 오래 걸리는 문제가 있음. 따라서 본 연구진은 추후 용액 공정 기반 대면적 생산에 빠르게 대응하기 위해서 1단계 1차년도부터 스포

레이 코팅을 활용하는 층상 자기조립법 시스템을 구축하였음.

- SiO<sub>2</sub> 박막을 코팅하기 위한 사이클은 크게 다음과 같이 4단계로 구성하였음: (1) 양전하를 띠고 있는 PDDA 용액을 분사하는 단계, (2) 탈이온수를 분사하는 단계, (3) 음전하를 띠고 있는 SiO<sub>2</sub> 나노입자 분산 용액을 분사하는 단계, (4) 탈이온수를 분사하는 단계
- TiO<sub>2</sub> 박막을 코팅하기 위한 사이클은 크게 다음과 같이 4단계로 구성하였음: (1) 양전하를 띠고 있는 PDDA 용액을 분사하는 단계, (2) 탈이온수를 분사하는 단계, (3) 음전하를 띠고 있는 TiO<sub>2</sub> 나노입자 분산 용액을 분사하는 단계, (4) 탈이온수를 분사하는 단계



그림 200. 층상 자기조립법 기반 스프레이 코팅 시스템과 단위 코팅 사이클의 모식도

- 산화물 나노입자 박막의 두께를 미세하게 제어하기 위해서는 수 nm 크기의 SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> 나노입자가 용액에 잘 분산되도록 하는 것이 중요함. 이를 위해 묽은 산화물 나노입자 농도 (0.03 wt%)를 선택하였으며, 최종적인 용액의 pH를 10으로 적정하였음. 제타 포텐셜 곡선 데이터를 참조해보면, 두 금속 산화물 모두 pH 10에서 상당량의 음전하를 띠고 있는 것으로 확인되며, 나노입자 간 정전기적 상호작용에 의해 나노입자의 분산이 가능함.
- 사진에서 확인할 수 있는 것처럼 TiO<sub>2</sub> 입자의 침전물이 없이 거의 투명한 TiO<sub>2</sub> 분산 용액을 준비하였으며, TiO<sub>2</sub> 콜로이드 용액을 성공적으로 제작하였음을 확인.

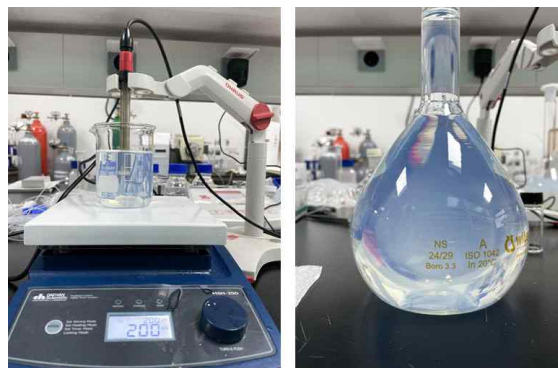


그림 201. pH 적정을 통해 제조된 TiO<sub>2</sub> 나노입자 수용액

- 층상 자기조립법 기반 스프레이 코팅의 미세 두께 제어 능력을 검증하기 위해서, 코팅 사이클 횟수를 달리하여 나노입자 분산액을 유리 기판에 스프레이 코팅하였음. 그리고 표면 형상 측

정기(profilometer)를 이용하여 산화물 박막의 두께를 측정하였음. 표면 형상 측정기는 유리 기판의 표면을 scan할 때, 코팅된 영역과 코팅되지 않은 영역 사이에 생기는 단차를 측정함으로써 박막의 평균적인 두께를 손쉽게 측정하는 기기임.

- 두께-사이클 횟수 곡선은 높은 선형성을 보여주며 그 기울기는 약 7.05 nm/cycle 로 한 사이클당 약 7 nm의 나노입자 박막이 코팅된다는 것을 알 수 있음. 사용한 SiO<sub>2</sub> 나노입자의 크기가 약 7 nm 라는 것을 고려해 보면, 한 번의 코팅 사이클로 나노입자 monolayer의 증착이 이루어지고 있음을 알 수 있음. 결과적으로 층상 자기조립법 기반 스프레이 코팅을 활용하여 7 nm 단위로 두께 제어가 가능하다는 것을 확인하였음.

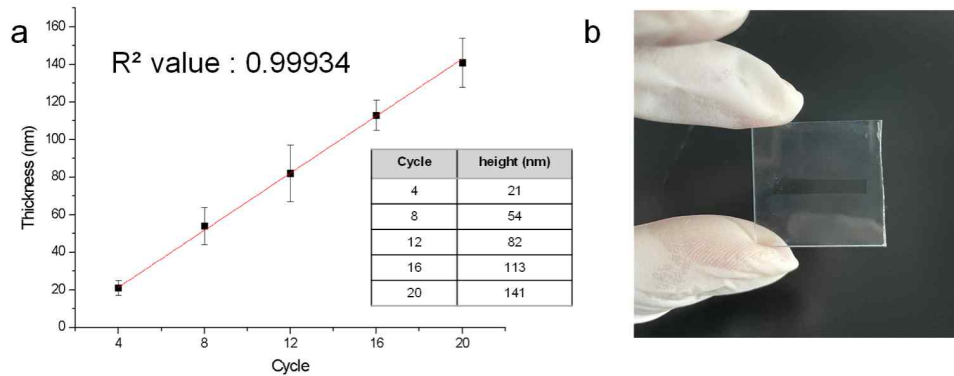


그림 202. (a) 스프레이 코팅 사이클 횟수에 따른 SiO<sub>2</sub> 나노입자 박막의 두께. (b) 유리 기판위에 20 사이클로 코팅된 SiO<sub>2</sub> 나노입자 박막의 사진 (투명한 부분은 단차 측정을 위해 붙여 두었던 테이프를 제거하여 생긴 것으로 두께가 0인 영역을 나타냄).

- 유사한 방식으로 유리 기판 위에 TiO<sub>2</sub> 나노입자 분산액을 20 사이클로 코팅한 뒤에 TiO<sub>2</sub> 박막의 두께를 측정한 결과 107.5 ± 2.6 nm 인 것으로 확인되었음. 이는 단위 사이클당 5.38 nm 두께의 나노입자 박막이 형성된다는 것을 보여주며, 사용한 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 크기가 약 5 nm 라는 것을 고려해 보면, SiO<sub>2</sub> 나노입자 박막과 마찬가지로 한 번의 코팅 사이클로 나노입자 monolayer의 증착이 성공적으로 이루어지고 있음을 확인하였음.

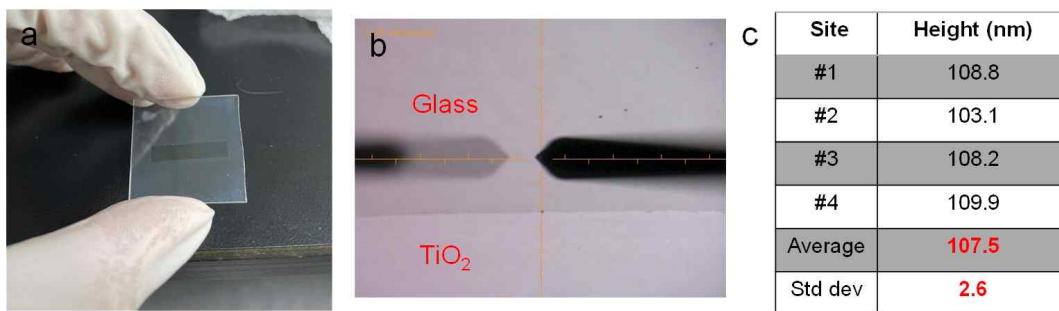


그림 203. (a) 유리 기판위에 20 사이클로 코팅된 TiO<sub>2</sub> 나노입자 박막의 사진. (b) 표면 형상 측정기에서 측정한 기판의 이미지. (c) 다양한 위치에서 측정한 두께 결과

## ■ 고성능 이색성 광필터 제작 및 광학 특성 평가

### (1) 기상 증착법 기반 이색성 광필터 제작 및 이색성 광필터의 광학 특성 평가 시스템 구축

- 설계된 각 층별 두께를 토대로 기상 증착을 통해 이색성 광필터를 실제로 제작하여 평가를 진행하였음. 모든 이색성 광필터는 전자빔 증착기를 통해 제작되었으며, 실제로 제작된 이색

성 광필터의 각 층별 두께는 FE-SEM을 통해 분석되었음. 아래 그림과 같이 완성된 이색성 광필터의 총 두께는 5.55~5.73  $\mu\text{m}$  였으며, 전체 레이어에 대한 시뮬레이션과 실제 증착 간의 오차는 평균  $8.93 \pm 7.58\%$ 였다. 이는 각 층별로 평균 8~11 nm의 두께 오차가 있어 실제 증착시 증착 조건에 대한 최적화가 필요함을 의미함. 각 층별 상세 정보는 아래 표에 정리하였음.

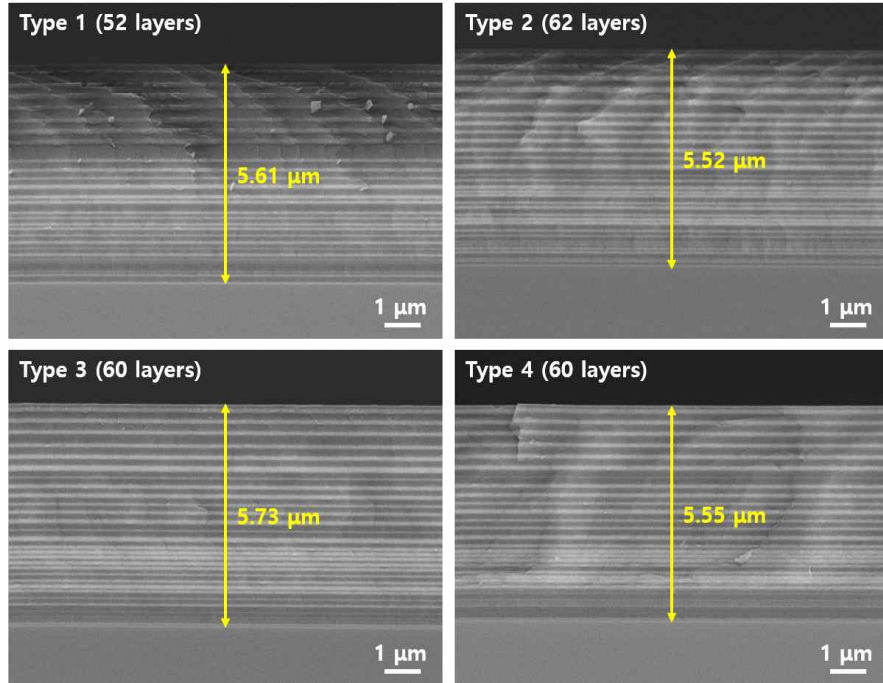


그림 204. 실제 제작된 이색성 광필터의 FE-SEM 단면 이미지

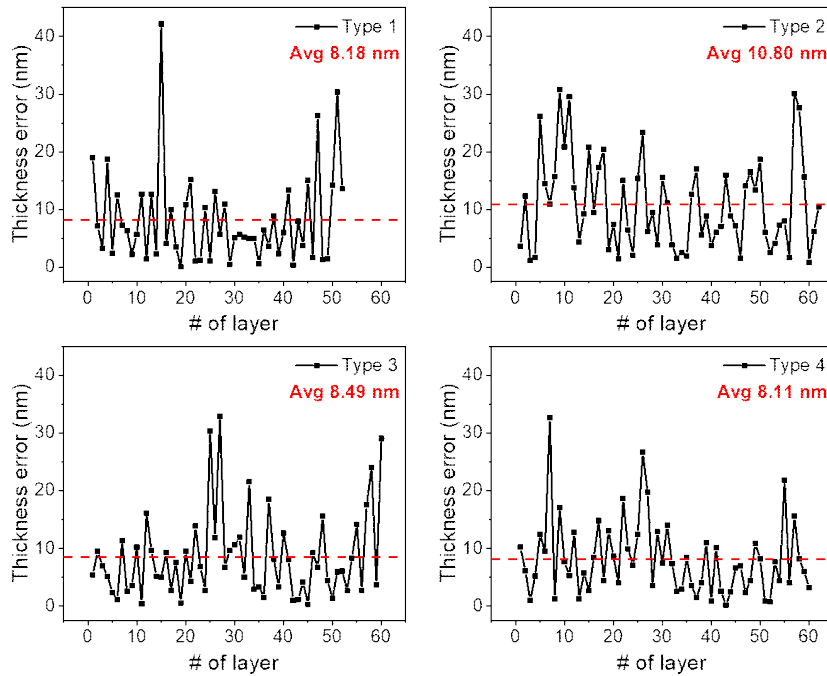


그림 205. 시뮬레이션 및 실제 제작된 이색성 광필터 간의 각 층별 두께 오차

#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)
		설계	실제				설계	실제				설계	실제	
1	SiO <sub>2</sub>	173.68	154.70	18.98	22	TiO <sub>2</sub>	110.32	109.29	1.03	43	SiO <sub>2</sub>	76.62	84.55	7.93
2	TiO <sub>2</sub>	80.83	87.92	7.09	23	SiO <sub>2</sub>	165.97	167.16	1.19	44	TiO <sub>2</sub>	16.79	20.53	3.74
3	SiO <sub>2</sub>	210.85	207.64	3.21	24	TiO <sub>2</sub>	83.15	72.86	10.29	45	SiO <sub>2</sub>	73.21	58.14	15.07

4	TiO <sub>2</sub>	106.63	125.33	18.70	25	SiO <sub>2</sub>	71.83	72.86	1.03	46	TiO <sub>2</sub>	6.97	8.60	1.63
5	SiO <sub>2</sub>	153.95	151.52	2.43	26	TiO <sub>2</sub>	79.58	66.43	13.15	47	SiO <sub>2</sub>	243.09	216.80	26.29
6	TiO <sub>2</sub>	149.66	137.18	12.48	27	SiO <sub>2</sub>	196.61	202.25	5.64	48	TiO <sub>2</sub>	13.25	14.50	1.25
7	SiO <sub>2</sub>	183.37	176.12	7.25	28	TiO <sub>2</sub>	64.45	53.58	10.87	49	SiO <sub>2</sub>	72.17	73.60	1.43
8	TiO <sub>2</sub>	94.35	100.68	6.33	29	SiO <sub>2</sub>	91.67	92.15	0.48	50	TiO <sub>2</sub>	48.40	34.24	14.16
9	SiO <sub>2</sub>	238.02	235.82	2.20	30	TiO <sub>2</sub>	41.51	36.43	5.08	51	SiO <sub>2</sub>	131.39	161.75	30.36
10	TiO <sub>2</sub>	101.12	106.76	5.64	31	SiO <sub>2</sub>	121.36	115.72	5.64	52	TiO <sub>2</sub>	56.05	42.48	13.57
11	SiO <sub>2</sub>	184.72	172.06	12.66	32	TiO <sub>2</sub>	54.43	49.29	5.14					
12	TiO <sub>2</sub>	119.19	120.57	1.38	33	SiO <sub>2</sub>	63.69	68.58	4.89					
13	SiO <sub>2</sub>	157.41	144.74	12.67	34	TiO <sub>2</sub>	56.32	51.43	4.89					
14	TiO <sub>2</sub>	134.61	132.33	2.28	35	SiO <sub>2</sub>	127.62	127.04	0.58					
15	SiO <sub>2</sub>	412.98	370.79	42.19	36	TiO <sub>2</sub>	42.04	35.59	6.45					
16	TiO <sub>2</sub>	80.60	76.51	4.09	37	SiO <sub>2</sub>	135.24	131.62	3.62					
17	SiO <sub>2</sub>	173.32	163.35	9.97	38	TiO <sub>2</sub>	65.53	56.73	8.80					
18	TiO <sub>2</sub>	83.39	86.84	3.45	39	SiO <sub>2</sub>	118.05	115.73	2.32					
19	SiO <sub>2</sub>	134.42	134.40	0.02	40	TiO <sub>2</sub>	27.24	21.27	5.97					
20	TiO <sub>2</sub>	64.60	53.76	10.84	41	SiO <sub>2</sub>	134.93	121.57	13.36					
21	SiO <sub>2</sub>	146.19	131.06	15.13	42	TiO <sub>2</sub>	53.85	53.50	0.35		Glass		0.15	T

표 55. Type 1 이색성 광필터의 두께 정보

#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)
		설계	실제				설계	실제				설계	실제	
1	SiO <sub>2</sub>	78.60	82.22	3.62	22	TiO <sub>2</sub>	68.31	53.26	15.05	43	SiO <sub>2</sub>	19.75	35.70	15.95
2	TiO <sub>2</sub>	135.65	123.33	12.32	23	SiO <sub>2</sub>	138.44	131.98	6.46	44	TiO <sub>2</sub>	85.36	76.50	8.86
3	SiO <sub>2</sub>	162.90	161.78	1.12	24	TiO <sub>2</sub>	117.82	115.77	2.05	45	SiO <sub>2</sub>	138.03	130.90	7.13
4	TiO <sub>2</sub>	128.44	130.14	1.70	25	SiO <sub>2</sub>	132.83	148.19	15.36	46	TiO <sub>2</sub>	52.51	51.00	1.51
5	SiO <sub>2</sub>	168.94	142.77	26.17	26	TiO <sub>2</sub>	50.78	27.38	23.40	47	SiO <sub>2</sub>	91.59	105.62	14.03
6	TiO <sub>2</sub>	137.79	123.36	14.43	27	SiO <sub>2</sub>	101.66	95.54	6.12	48	TiO <sub>2</sub>	56.63	40.17	16.46
7	SiO <sub>2</sub>	165.70	154.74	10.96	28	TiO <sub>2</sub>	63.86	54.36	9.50	49	SiO <sub>2</sub>	109.61	122.97	13.36
8	TiO <sub>2</sub>	157.13	141.43	15.70	29	SiO <sub>2</sub>	100.18	103.98	3.80	50	TiO <sub>2</sub>	38.19	19.53	18.66
9	SiO <sub>2</sub>	159.15	189.94	30.79	30	TiO <sub>2</sub>	89.22	73.69	15.53	51	SiO <sub>2</sub>	47.62	53.61	5.99
10	TiO <sub>2</sub>	133.17	112.32	20.85	31	SiO <sub>2</sub>	48.07	59.17	11.10	52	TiO <sub>2</sub>	21.73	19.24	2.49
11	SiO <sub>2</sub>	177.50	207.01	29.51	32	TiO <sub>2</sub>	57.95	54.12	3.83	53	SiO <sub>2</sub>	68.11	72.24	4.13
12	TiO <sub>2</sub>	110.16	96.41	13.75	33	SiO <sub>2</sub>	25.34	26.82	1.48	54	TiO <sub>2</sub>	43.80	36.51	7.29
13	SiO <sub>2</sub>	133.55	129.20	4.35	34	TiO <sub>2</sub>	76.90	74.43	2.47	55	SiO <sub>2</sub>	54.37	62.33	7.96
14	TiO <sub>2</sub>	95.50	104.68	9.18	35	SiO <sub>2</sub>	117.17	119.10	1.93	56	TiO <sub>2</sub>	46.63	45.00	1.63
15	SiO <sub>2</sub>	144.33	123.51	20.82	36	TiO <sub>2</sub>	62.21	49.55	12.66	57	SiO <sub>2</sub>	102.78	132.89	30.11
16	TiO <sub>2</sub>	71.09	80.57	9.48	37	SiO <sub>2</sub>	83.07	66.09	16.98	58	TiO <sub>2</sub>	47.39	19.78	27.61
17	SiO <sub>2</sub>	157.48	140.27	17.21	38	TiO <sub>2</sub>	69.61	64.11	5.50	59	SiO <sub>2</sub>	24.68	40.29	15.61
18	TiO <sub>2</sub>	111.72	91.30	20.42	39	SiO <sub>2</sub>	119.26	128.14	8.88	60	TiO <sub>2</sub>	28.39	29.21	0.82
19	SiO <sub>2</sub>	145.23	148.19	2.96	40	TiO <sub>2</sub>	57.42	53.69	3.73	61	SiO <sub>2</sub>	78.02	84.21	6.19
20	TiO <sub>2</sub>	105.48	98.05	7.43	41	SiO <sub>2</sub>	57.45	63.46	6.01	62	TiO <sub>2</sub>	39.50	29.03	10.47
21	SiO <sub>2</sub>	116.69	118.09	1.40	42	TiO <sub>2</sub>	61.93	54.88	7.05		Glass		0.15	T

표 56. Type 2 이색성 광필터의 두께 정보

#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)
		설계	실제				설계	실제				설계	실제	
1	SiO <sub>2</sub>	87.36	92.78	5.42	22	TiO <sub>2</sub>	86.90	73.03	13.87	43	SiO <sub>2</sub>	76.45	75.30	1.15
2	TiO <sub>2</sub>	108.57	118.09	9.52	23	SiO <sub>2</sub>	146.24	153.03	6.79	44	TiO <sub>2</sub>	86.30	82.14	4.16

3	SiO <sub>2</sub>	181.29	174.32	6.97	24	TiO <sub>2</sub>	92.52	95.26	2.74	45	SiO <sub>2</sub>	47.81	48.11	0.30
4	TiO <sub>2</sub>	110.08	115.28	5.20	25	SiO <sub>2</sub>	187.40	157.02	30.38	46	TiO <sub>2</sub>	64.53	55.29	9.24
5	SiO <sub>2</sub>	187.97	185.57	2.40	26	TiO <sub>2</sub>	21.98	33.83	11.85	47	SiO <sub>2</sub>	145.19	138.44	6.75
6	TiO <sub>2</sub>	97.27	98.41	1.14	27	SiO <sub>2</sub>	179.98	147.04	32.94	48	TiO <sub>2</sub>	13.72	29.32	15.60
7	SiO <sub>2</sub>	256.00	244.61	11.39	28	TiO <sub>2</sub>	109.77	116.54	6.77	49	SiO <sub>2</sub>	126.45	122.02	4.43
8	TiO <sub>2</sub>	95.33	92.78	2.55	29	SiO <sub>2</sub>	125.18	115.59	9.59	50	TiO <sub>2</sub>	54.78	53.41	1.37
9	SiO <sub>2</sub>	193.25	196.81	3.56	30	TiO <sub>2</sub>	79.94	69.35	10.59	51	SiO <sub>2</sub>	154.97	149.03	5.94
10	TiO <sub>2</sub>	109.69	99.50	10.19	31	SiO <sub>2</sub>	37.76	49.67	11.91	52	TiO <sub>2</sub>	24.36	18.30	6.06
11	SiO <sub>2</sub>	171.22	171.64	0.42	32	TiO <sub>2</sub>	85.47	90.51	5.04	53	SiO <sub>2</sub>	117.34	114.66	2.68
12	TiO <sub>2</sub>	160.00	143.84	16.16	33	SiO <sub>2</sub>	65.79	44.24	21.55	54	TiO <sub>2</sub>	5.11	13.47	8.36
13	SiO <sub>2</sub>	152.72	143.09	9.63	34	TiO <sub>2</sub>	82.50	85.42	2.92	55	SiO <sub>2</sub>	76.17	61.97	14.20
14	TiO <sub>2</sub>	31.79	36.98	5.19	35	SiO <sub>2</sub>	68.97	65.61	3.36	56	TiO <sub>2</sub>	10.88	13.64	2.76
15	SiO <sub>2</sub>	165.83	160.85	4.98	36	TiO <sub>2</sub>	83.19	84.74	1.55	57	SiO <sub>2</sub>	56.24	73.79	17.55
16	TiO <sub>2</sub>	93.51	84.26	9.25	37	SiO <sub>2</sub>	34.69	53.17	18.48	58	TiO <sub>2</sub>	8.73	32.77	24.04
17	SiO <sub>2</sub>	150.16	147.46	2.70	38	TiO <sub>2</sub>	76.79	68.67	8.12	59	SiO <sub>2</sub>	35.57	31.84	3.73
18	TiO <sub>2</sub>	106.91	99.31	7.60	39	SiO <sub>2</sub>	102.24	105.62	3.38	60	TiO <sub>2</sub>	9.72	38.77	29.05
19	SiO <sub>2</sub>	140.30	140.87	0.57	40	TiO <sub>2</sub>	55.92	43.29	12.63					
20	TiO <sub>2</sub>	68.72	59.18	9.54	41	SiO <sub>2</sub>	111.61	119.69	8.08					
21	SiO <sub>2</sub>	128.62	132.91	4.29	42	TiO <sub>2</sub>	62.87	63.89	1.02		Glass		0.15	T

표 57. Type 3 이색성 광필터의 두께 정보

#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)
		설계	실제				설계	실제				설계	실제	
1	SiO <sub>2</sub>	86.70	96.92	10.22	22	TiO <sub>2</sub>	118.50	99.85	18.65	43	SiO <sub>2</sub>	14.12	13.93	0.19
2	TiO <sub>2</sub>	108.59	102.47	6.12	23	SiO <sub>2</sub>	141.57	151.50	9.93	44	TiO <sub>2</sub>	91.74	89.27	2.47
3	SiO <sub>2</sub>	187.15	186.12	1.03	24	TiO <sub>2</sub>	62.18	55.09	7.09	45	SiO <sub>2</sub>	69.92	76.57	6.65
4	TiO <sub>2</sub>	103.81	98.60	5.21	25	SiO <sub>2</sub>	126.15	138.62	12.47	46	TiO <sub>2</sub>	78.30	71.34	6.96
5	SiO <sub>2</sub>	202.80	190.30	12.50	26	TiO <sub>2</sub>	85.19	58.53	26.66	47	SiO <sub>2</sub>	116.27	113.94	2.33
6	TiO <sub>2</sub>	97.18	106.65	9.47	27	SiO <sub>2</sub>	165.05	145.34	19.71	48	TiO <sub>2</sub>	11.89	16.27	4.38
7	SiO <sub>2</sub>	231.30	198.67	32.63	28	TiO <sub>2</sub>	102.42	105.97	3.55	49	SiO <sub>2</sub>	163.05	152.21	10.84
8	TiO <sub>2</sub>	97.45	96.20	1.25	29	SiO <sub>2</sub>	138.39	125.50	12.89	50	TiO <sub>2</sub>	20.82	12.61	8.21
9	SiO <sub>2</sub>	202.60	185.51	17.09	30	TiO <sub>2</sub>	80.93	73.48	7.45	51	SiO <sub>2</sub>	73.05	73.89	0.84
10	TiO <sub>2</sub>	107.35	99.70	7.65	31	SiO <sub>2</sub>	43.55	57.59	14.04	52	TiO <sub>2</sub>	6.44	7.16	0.72
11	SiO <sub>2</sub>	188.19	182.90	5.29	32	TiO <sub>2</sub>	101.95	94.56	7.39	53	SiO <sub>2</sub>	61.46	53.80	7.66
12	TiO <sub>2</sub>	114.65	101.83	12.82	33	SiO <sub>2</sub>	29.38	26.80	2.58	54	TiO <sub>2</sub>	22.68	27.05	4.37
13	SiO <sub>2</sub>	185.43	186.68	1.25	34	TiO <sub>2</sub>	82.18	79.20	2.98	55	SiO <sub>2</sub>	173.22	151.37	21.85
14	TiO <sub>2</sub>	22.91	17.15	5.76	35	SiO <sub>2</sub>	28.56	36.97	8.41	56	TiO <sub>2</sub>	11.02	6.99	4.03
15	SiO <sub>2</sub>	171.02	173.68	2.66	36	TiO <sub>2</sub>	102.58	98.99	3.59	57	SiO <sub>2</sub>	120.91	136.52	15.61
16	TiO <sub>2</sub>	92.39	83.93	8.46	37	SiO <sub>2</sub>	40.80	42.27	1.47	58	TiO <sub>2</sub>	21.04	29.18	8.14
17	SiO <sub>2</sub>	161.15	146.33	14.82	38	TiO <sub>2</sub>	63.90	67.92	4.02	59	SiO <sub>2</sub>	29.06	35.04	5.98
18	TiO <sub>2</sub>	95.54	91.08	4.46	39	SiO <sub>2</sub>	120.21	109.22	10.99	60	TiO <sub>2</sub>	23.45	26.69	3.24
19	SiO <sub>2</sub>	128.99	142.03	13.04	40	TiO <sub>2</sub>	73.93	74.82	0.89					
20	TiO <sub>2</sub>	64.61	55.95	8.66	41	SiO <sub>2</sub>	41.98	52.10	10.12					
21	SiO <sub>2</sub>	134.85	130.84	4.01	42	TiO <sub>2</sub>	87.55	84.95	2.60		Glass		0.15	T

표 58. Type 4 이색성 광필터의 두께 정보

- 제작된 이색성 광필터의 실제 투과율과 반사율을 측정하기 위해 UV-Vis spectroscopy 장비를 사용하여 분석을 실시하였음. 이색성 광필터를 제작하는 데 있어 약간의 두께 오차가 있음에도 불구하고 실제 이색성 광필터의 투과율과 반사율은 크게 차이가 나지 않음을 확인함.



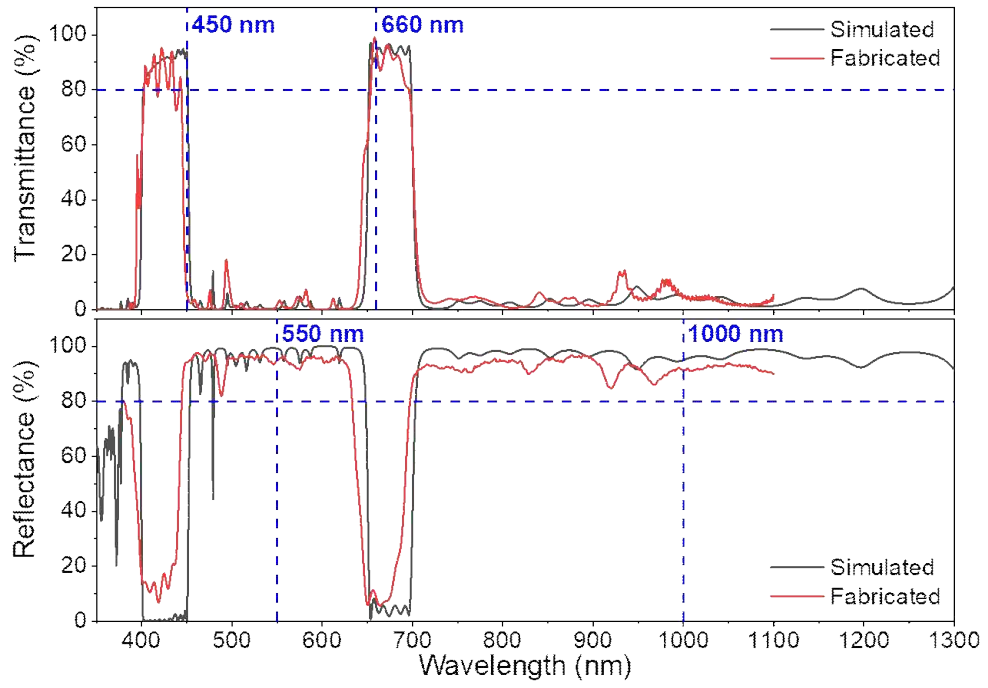


그림 206. Type 1 이색성 광필터의 시뮬레이션 및 실제 투과율과 반사율

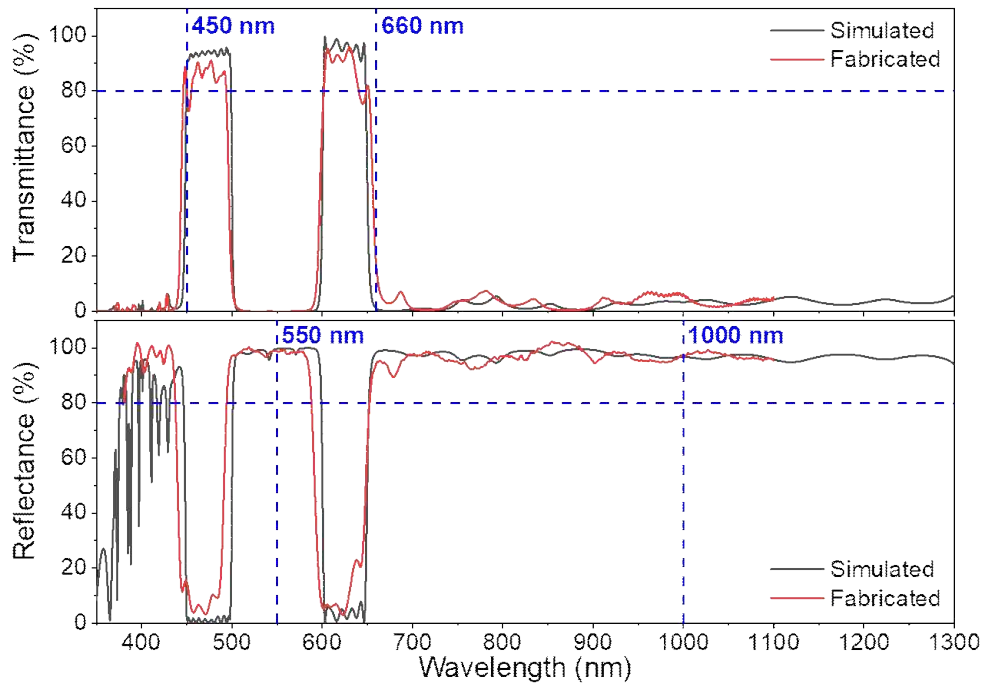


그림 207. Type 2 이색성 광필터의 시뮬레이션 및 실제 투과율과 반사율

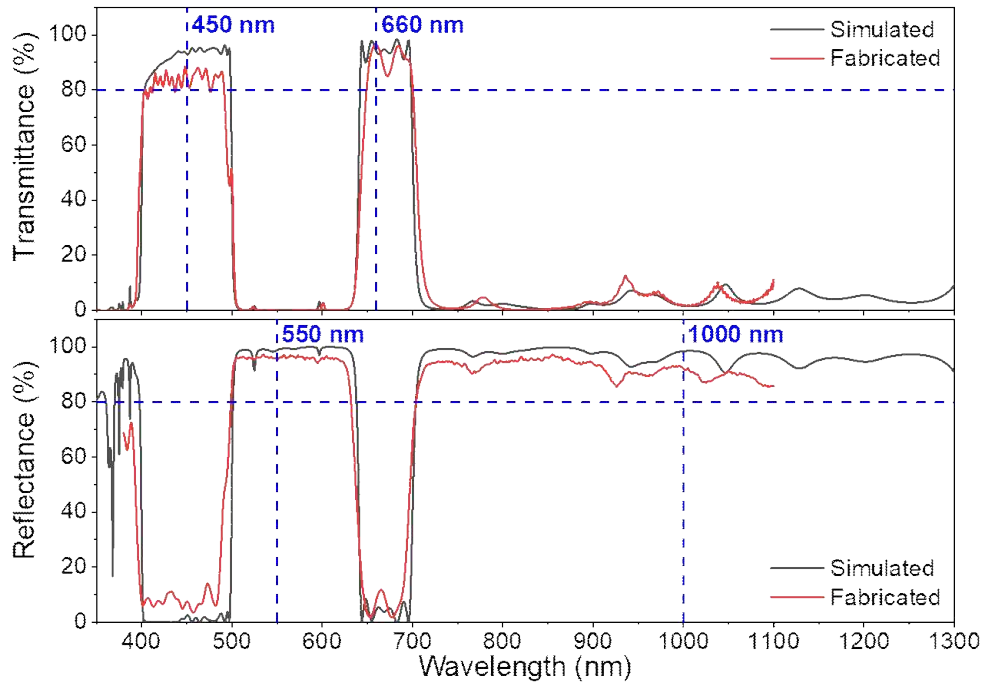


그림 208. Type 3 이색성 광필터의 시뮬레이션 및 실제 투과율과 반사율

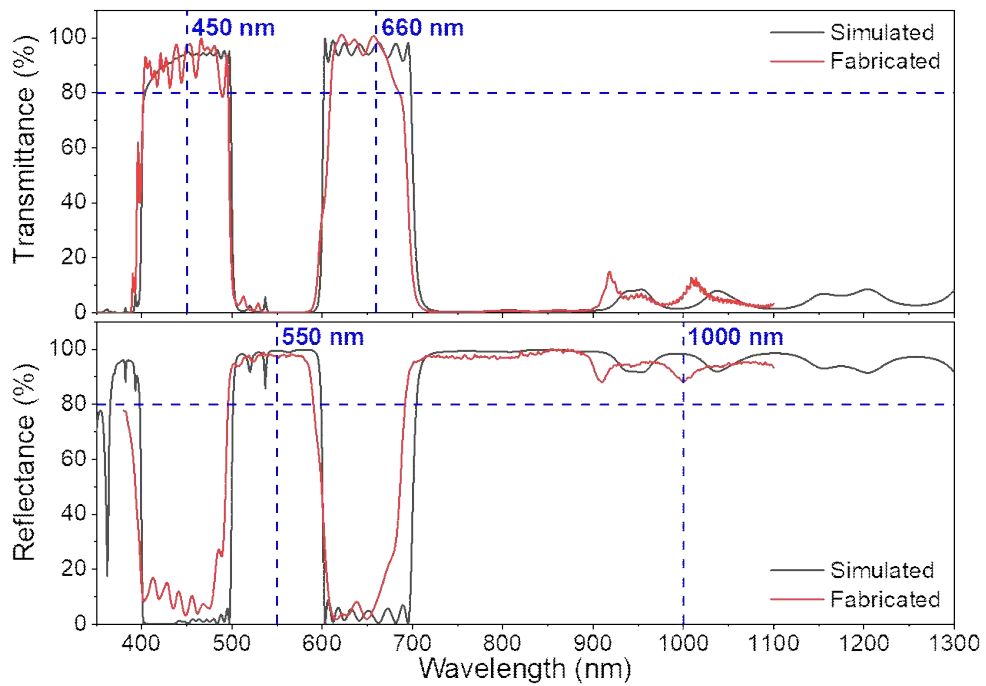


그림 209. Type 4 이색성 광필터의 시뮬레이션 및 실제 투과율과 반사율

- 제작된 이색성 광필터는 작물 생산 및 태양광 발전 효율 증가에 효과적으로 사용될 것으로 기대됨. 그러나 50~60층의 다층 박막은 상용화하기 어려울 것으로 보이며, 층수를 줄여 더욱 간단한 구조를 갖도록 최적화가 필요함. 또한 재료의 균질성에 따라 굴절률과 흡광계수가 달라질 수 있을 것으로 판단되어, 추후 원자힘현미경 (AFM)을 통한 표면 거칠기 분석을 병행.
- 제작된 광필터의 투과 및 반사 특성에 의해 백색광이 투과하면 적색과 청색의 혼합색인 보라색이 표현되고, 백색광이 반사되면 녹색으로 표현되는 것이 특징임. 각 이색성 광필터의 투과/반사 스펙트럼에 따라 표현되는 색상에는 조금씩 차이가 있으며, 투과밴드가 가장 넓은 Type 4가 가장 선명한 보라색으로 표현됨. 아래 그림은 제작된 광필터의 투과 및 반사 이미지를 보

여준.

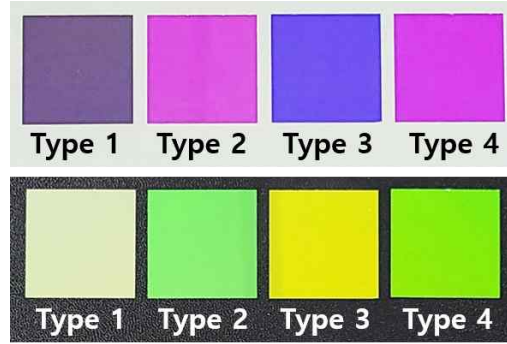


그림 210. 제작된 이색성 광필터의 투과 이미지 (위) 및 반사 이미지 (아래)

- Type 1과 2를 제외하고 이색성 광필터의 설계와 제작과 관련된 정량적 단계목표 또한 모두 달성하였음. Type 1의 청색 투과 파장 목표가 400~450 nm이고, Type 2의 적색 투과 파장 목표가 600~650 nm임을 감안하면 특정 파장 (450 nm 및 660 nm)에서의 낮은 투과율은 충분히 예상할 수 있음. 그럼에도 불구하고 Type 3 및 4는 모두 설계투과율 90% 이상, 실제투과율 80% 이상을 기록하여 우수한 성능을 확인하였음. 또한 4종류의 이색성 광필터의 투과 밴드 반치폭은 정량 목표인 40 nm를 모두 초과 달성하여, 식물 성장을 위한 이색성 광필터의 설계와 제작 모두 성공적으로 진행되었다고 할 수 있음. 자세한 정량 목표 및 결과를 아래 표에 정리하였음.

		반치폭 (FWHM)		투과율 (%T)		반사율 (%R)	
		청색 밴드	적색 밴드	450 nm	660 nm	550 nm	1000 nm
정량목표	계산	≥ 40 nm	≥ 40 nm	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%
	실제	-	-	≥ 80%	≥ 80%	≥ 80%	≥ 80%
Type 1	계산	52 nm	50 nm	93.9%	93.2%	99.3%	95.0%
	실제	47 nm	56 nm	6.2%	95.3%	95.0%	91.3%
Type 2	계산	52 nm	49 nm	89.3%	1.0%	99.6%	96.7%
	실제	52 nm	57 nm	81.5%	16.0%	98.8%	97.2%
Type 3	계산	100 nm	60 nm	92.9%	93.9%	98.8%	98.4%
	실제	102 nm	62 nm	85.7%	96.2%	96.0%	92.0%
Type 4	계산	100 nm	100 nm	94.6%	97.8%	99.5%	98.4%
	실제	100 nm	89 nm	97.5%	99.5%	97.6%	88.3%

그림 211. 시뮬레이션 및 실제 제작된 이색성 광필터의 정량 목표 및 결과

- 이색성 광필터와 관련된 정량목표는 자체평가로 진행됨에 따라, 제작된 이색성 광필터의 모든 평가는 본교 공동기기원에 분석을 의뢰하여 진행하였음. 아래 그림은 분석을 증빙할 수 있는 서류임.

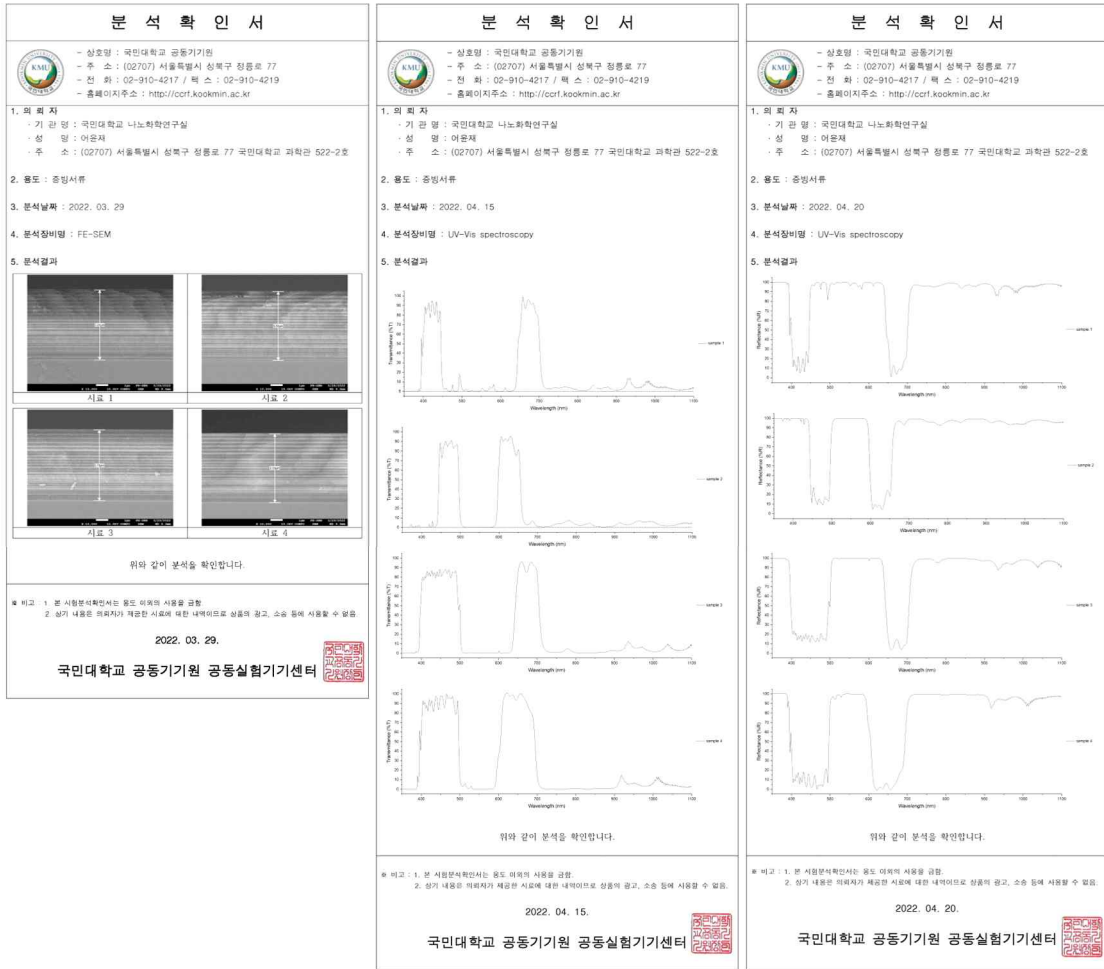


그림 212. 자체평가에 따른 분석증빙자료

- 식물 성장을 위한 이색성 광필터가 성공적으로 제작되어 스마트팜에 적용이 가능할 것으로 판단됨. 또한 여러 종류의 이색성 광필터 제작을 통해 투과 밴드의 조절이 가능함을 확인하였으며, 이에 따라 작물별로 다른 광색소의 흡광 대역에 맞추어 이색성 광필터를 제작할 수 있을 것으로 판단됨. 따라서 본 과제에서 확인하고자 하는 작물 이외에도 여러 가지 다양한 작물에도 맞춤형 이색성 광필터를 사용하여 충분히 효율적인 스마트팜을 구축할 수 있을 것으로 기대됨.
- 본 연구팀에서는 해당 광필터를 활용하여 식물 성장을 위한 적/청색광 센서를 제작하여 제작된 이색성 광필터의 활용처를 넓히고자 함. 식물 성장용 센서는 일반적인 조도계와 같은 원리로 작동하며 수광부로서 포토다이오드를 사용함. 특히 적/청색광만을 선택적으로 받아들여 광전류를 생성하기 위해서는 앞서 제작된 이색성 광필터가 필수적임.
- 제작된 4종류의 이색성 광필터 중 한가지를 선정하기 위해 표준광 D에 대해 투과광 및 반사광에 대한 색좌표 계산을 진행함. 이색성 광필터가 적색광과 청색광 만을 선택적으로 투과하게끔 설계되었기 때문에 투과광의 색좌표는 색영역의 끝쪽에 위치한 것을 볼 수 있으나, 반사광의 경우 대부분 중심(백색광 영역)에 위치한 것을 볼 수 있음. 그 중에서도 Type 4의 반사광 색좌표가 중심에서 가장 멀리 떨어져있어 원치않는 녹색광을 효과적으로 반사시킬 수 있을 것으로 판단됨.

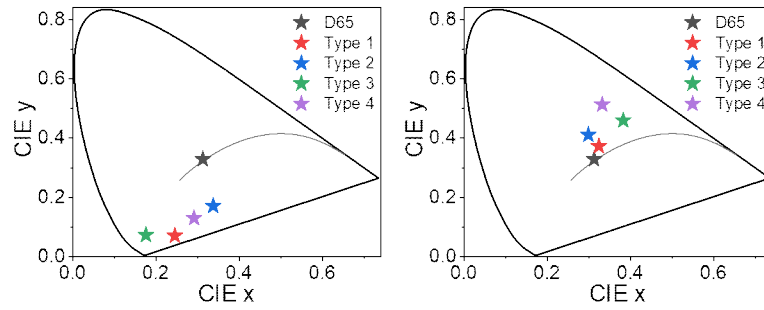


그림 213. 표준광 D에 의해 계산된 투과광의 색좌표 (좌) 및 반사광의 색좌표 (우)

- 광합성에 필요한 광량을 측정하는 센서에 사용하기 위해 Type 4 광필터를 선정하였으며, 센서 제작과 더불어 스마트팜 미니하우스 제작과 태양광 전지와 융합하기 위해 KIST와 고려대학교에  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  크기의 필터를 총 349장 제공하였음. 대량제작된 필터의 투과율 및 반사율 그래프는 아래 그림과 같으며, Lot별로 제작된 광필터일지라도 과제의 정량목표는 모두 달성함을 확인함.

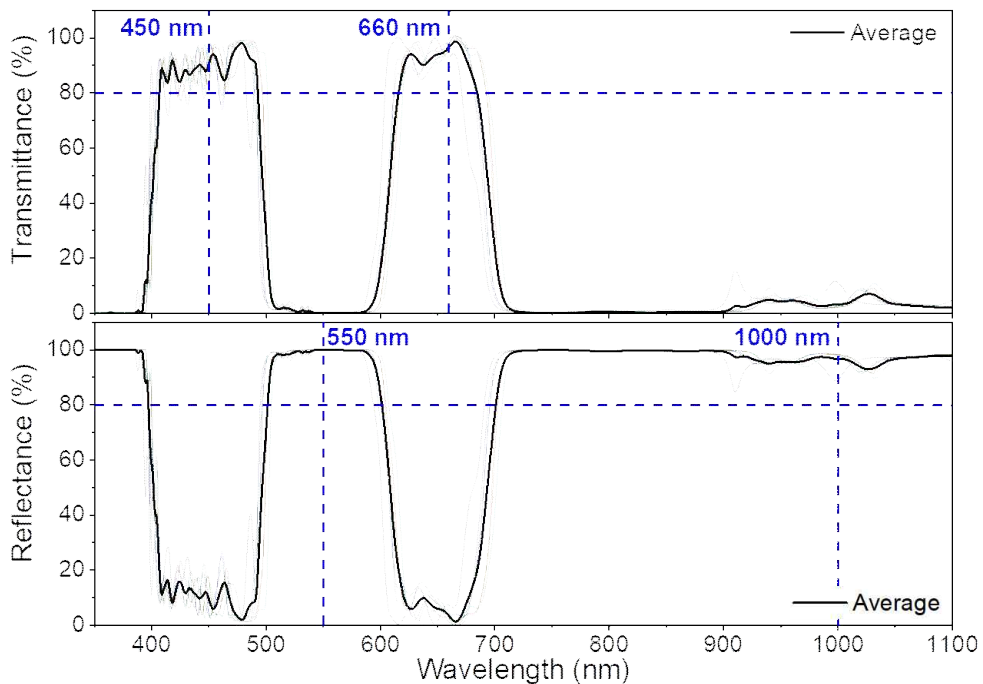


그림 214. 대량제작된 Type 4 광필터의 측정된 투과 및 반사 스펙트럼

	(평균 ± 표준편차)			
	실제 투과율 (%T)		실제 반사율 (%R)	
	450 nm	660 nm	550 nm	1000 nm
정량목표	≥ 80%	≥ 80%	≥ 80%	≥ 80%
측정값	90.56 ± 6.00%	96.62 ± 2.02%	99.97 ± 0.03%	96.67 ± 3.49%

표 59. 대량제작된 Type 4 광필터의 정량목표

- 식물 생장에 필요한 빛은 PPFD (photosynthetic photon flux density)로 표현되며,  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ 의 단위를 가짐. 다만 PPFD는 400~700 nm의 PAR (photosynthetically active radiation)에 대해 계산되므로, 적색/청색광만을 선택적으로 확인하기 위한 센서를 위해서는 PAR 중 녹색광 영역이 제외되어야 함. 따라서 PPFD에서 400~500 nm의 청색광과 600~700 nm의 적색광만을 계산

한  $PPFD_{RB}$  개념을 도입함.

- 식물성장용 센서를 실제 태양광 환경에서도 사용하기 위해서는 넓은 영역의 PPFD에 대해 대응이 가능해야함. 따라서 표준광 A에 대해 최대  $0.05\sim 3048 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의  $PPFD_{RB}$ 를 가지는 환경에 대해 포토다이오드의 출력과 계산된  $PPFD_{RB}$ 간의 관계를 통해 관계식을 설정함. 이 때, 포토다이오드가 생성한 광전류를 증폭하고 넓은 PPFD 범위에 대응하기 위해 log-scale의 증폭기가 사용되어 관계식은 선형이 아닌 로그함수의 형태로 나타나게 됨. 아래 그림에 실제 제작된 센서의 형태와 센서의 출력 - PPFD 간의 관계를 나타내었음. 수정된  $R^2$ 가 1에 근접하는 것으로 보아 약 3천  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  PPFD에 까지 충분히 대응이 가능할 것으로 판단되며, 이는 실제 본 과제에서 진행하고자 하는 토마토 재배를 위한 광포화점 (약  $1200\sim 1500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )까지 충분히 대응한 가능한 수준임.

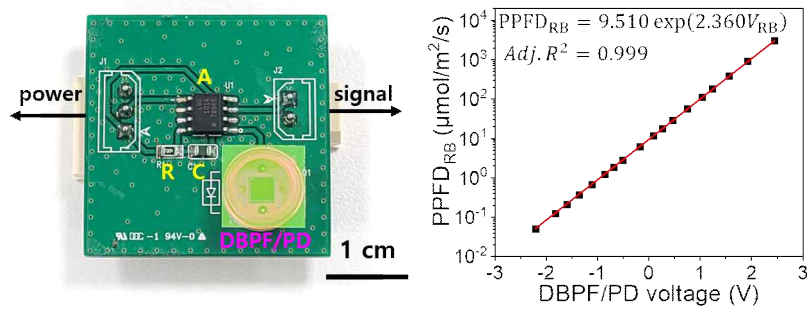


그림 215. 실제 제작된 식물성장용 센서와 센서의 출력 - PPFD 간의 관계

- 보정이 완료된 식물성장용 센서에 대해 총 5가지 LED 조명 환경 (8000 K 백색광, 2700 K 백색광, 적색광, 청색광, 적색+청색광)에서 10회 반복 평가를 진행하였음. 모든 조명환경은  $30 \text{ W}/\text{m}^2$ 의 irradiance를 갖도록 설정되었으며, 각 조명별 스펙트럼은 아래 그림에서 확인할 수 있음. 특히 아래 표에 정리된 바와 같이 매우 낮은 수준의 측정 편차를 보이며, 평균 3.7%의 측정 오차를 기록함. 이는 약 60\$ 정도의 가격으로 저렴하게 제작된 식물성장용 센서가 충분히 활용이 가능하다는 것을 의미함. 이 연구결과는 ACS Applied Electronic Materials에 게재되었음. (4, 6125-6132 (2022))

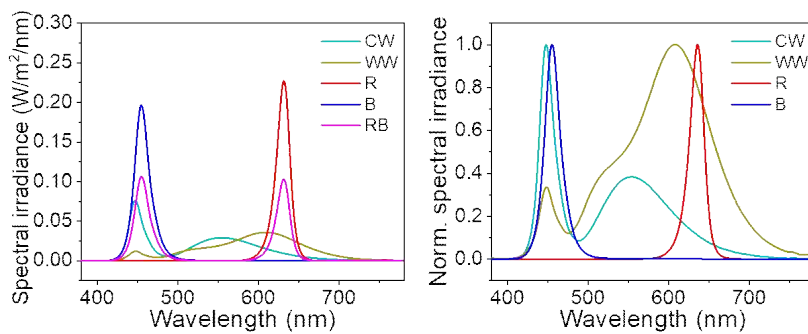


그림 216. 식물성장용 센서 검증에 사용된 LED 조명의 스펙트럼 (좌)과 표준화된 스펙트럼 (우)

조명 환경	조도 (lx)	PPFD ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	$PPFD_{RB}$ ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )		측정 오차 (%)
			실제	측정	
백색광 (8000 K)	$9187\pm 6.9$	$130.3\pm 0.15$	$68.6\pm 0.11$	$69.0\pm 1.23$	1.7



백색광 (2700 K)	9758±4.6	141.6±0.10	83.2±0.07	78.8±0.08	5.3
적색	5152±10.3	158.4±0.13	156.4±0.12	149.1±0.36	4.7
청색	1407±5.6	114.7±0.15	113.1±0.13	107.8±0.21	4.6
적색+청색 (1:1)	3249±5.1	135.3±0.12	133.6±0.09	129.0±0.43	3.4

표 60. 여러 LED 조명 환경에서 식물성장용 센서를 사용한 10회 반복측정 결과

(2) 용액 공정 기반 이색성 광필터 제작

- 분산도가 뛰어난 SiO<sub>2</sub> 및 TiO<sub>2</sub> 나노입자 용액을 제조하고 스프레이 싸이클별 증착 두께를 미세하기 조절하기 위해, ~수 nm의 입자 크기를 가지는 SiO<sub>2</sub> 분산액과 TiO<sub>2</sub> 분말을 선택하였음. 다음에 해당하는 시판 상품의 정보를 상세히 기입함: LUDOX SM colloidal silica (supplier: Sigma Aldrich, Product number: 420794, 30 % suspension in H<sub>2</sub>O, average size 8.2 nm), TiO<sub>2</sub> nanoparticles (supplier: MTI Korea, Product number: Np-Ag-7930DL, 99.9% purity, average size 5.6 nm). SiO<sub>2</sub> 및 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 평균 입자 크기는 8.2 nm, 5.6 nm로 측정되었으며, 나노미터 단위 층상자기조립법에 활용되기에 적합함을 확인하였음.

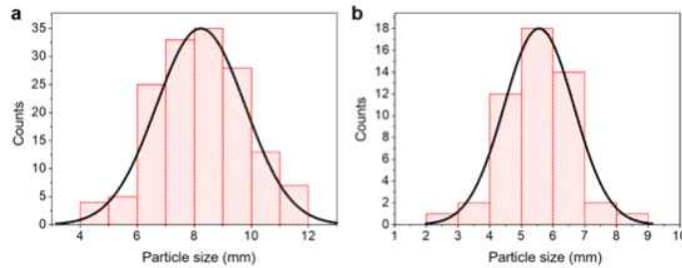


그림 217. (a) SiO<sub>2</sub> 및 (b) TiO<sub>2</sub> 나노입자의 입자 크기 분포

- 나노입자의 분산 용액을 제조하기 위해 pH 10을 사용하였음. 수용액에서 콜로이드 산화물 나노입자가 띠는 표면 전하는 pH에 따라 달라지며, 제타 포텐셜(zeta potential) 데이터를 통해 영전하점(point of zero charge, PZC)을 기준으로 산성 용액에서 양전하를, 염기 용액에서 음전하를 띠고 있음을 알 수 있음. 따라서, pH 10에서 음전하로 대전된 나노입자 콜로이드 용액을 제조할 수 있으며, 아래 사진처럼 나노입자가 잘 분산된 수용액을 얻을 수 있음.

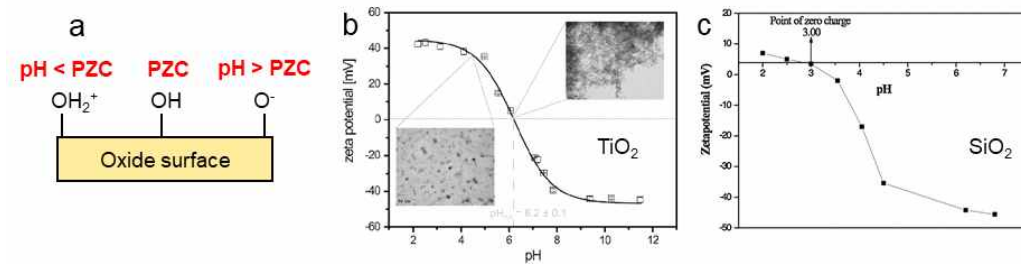


그림 218. (a) pH에 따른 수용액 내 콜로이드 산화물 나노입자 표면의 전하 변화. (b) TiO<sub>2</sub> 및 (c) SiO<sub>2</sub> 입자의 제타 포텐셜 곡선.

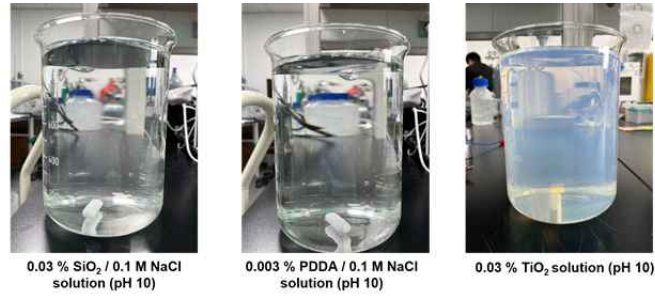


그림 219. 스프레이 코팅에 사용된 분산 용액들의 사진

- 층상자기조립법 기반 이색성 광필터 제작을 위해 스프레이 싸이클 횟수에 따른 SiO<sub>2</sub> 및 TiO<sub>2</sub> 막의 두께 변화를 측정하였음. 스프레이 싸이클은 양전하로 대전된 PDDA 고분자를 스프레이 코팅하는 단계, 물로 세척하는 단계, 음전하로 대전된 금속산화물 나노입자를 스프레이 코팅하는 단계, 그리고 물로 세척하는 단계로 구성됨. 스프레이 싸이클을 반복함에 따라 SiO<sub>2</sub> 및 TiO<sub>2</sub> 층의 두께가 증가함을 확인하였음.
- 두께가 증가하는 기울기를 향상시키기 위해서 금속산화물 나노입자 분산용액 혹은 PDDA 수용액에 NaCl을 첨가하였음. NaCl은 나노입자 표면에 형성되어 있는 전하의 크기를 감소시켜서 나노입자 간 반발을 약화시키는 영향을 미치며, 그 결과 스프레이 싸이클에 따른 두께 증가 기울기는 증가하는 것을 확인하였음. SiO<sub>2</sub>와 TiO<sub>2</sub> 나노입자에 대하여 증착 속도는 각각 17.4 nm/cycle, 8.4 nm/cycle로 측정되었음.

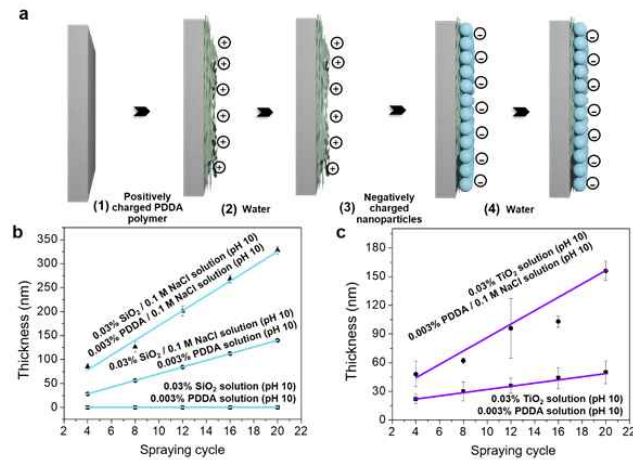


그림 220. (a) 스프레이 코팅 싸이클을 구성하는 단계를 나타낸 모식도, (b) SiO<sub>2</sub> 나노입자의 스프레이 싸이클별 두께 변화, (c) TiO<sub>2</sub> 나노입자의 스프레이 싸이클별 두께 변화

- 측정한 검정 곡선과 시뮬레이션 결과를 바탕으로 SiO<sub>2</sub>와 TiO<sub>2</sub> 나노입자로 구성된 다층 구조 박막을 스프레이 코팅 방식으로 제작하였음. 다층 구조의 반복 단위는 (0.5SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/0.5SiO<sub>2</sub>)이며, 이를 n번 반복하여 (0.5SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/0.5SiO<sub>2</sub>)<sup>n</sup>에 해당하는 1차원 광결정을 얻을 수 있음.
- 반복 단위 공정은 SiO<sub>2</sub> 나노입자의 스프레이 싸이클을 반복하여 원하는 두께의 SiO<sub>2</sub> 막을 증착한 뒤에, TiO<sub>2</sub> 나노입자의 스프레이 싸이클을 반복하여 원하는 두께의 TiO<sub>2</sub> 막을 증착하고, SiO<sub>2</sub> 나노입자의 스프레이 싸이클을 반복하여 원하는 두께의 SiO<sub>2</sub> 막을 한 번 더 증착하는 방식으로 진행되며, 이를 반복함으로써 광결정 박막을 완성함.

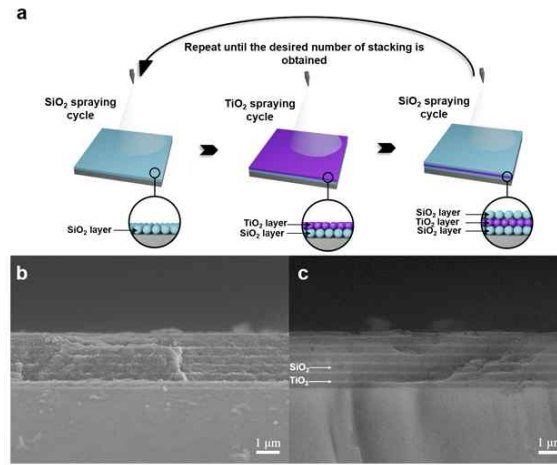


그림 221. (a) 1차원 광결정 박막 제작을 위한 스프레이 공정 단계를 다타낸 모식도, (b, c) 증착한 광결정의 주사전자현미경 이미지

- 스프레이 코팅된 다층구조 박막(Type E,  $(0.5\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/0.5\text{SiO}_2)^6$ )의 주사 전자 현미경(Scanning electron microscopy) 분석을 통해 원소 분포 및 조성을 정성/정량 분석하였음. Si 22.6 at%, O 57.8 at%, Ti 6.01 at%, Na 0.12 at%, N 1.94 at%, Cl 0.28 at%, C 11.25 at%가 검출되었으며, 이 결과로부터 코팅 용액에 존재하는 구성물인  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ , NaCl, PDDA의 구성 원소들이 원소 분석에서 감지되었음을 보여줌.

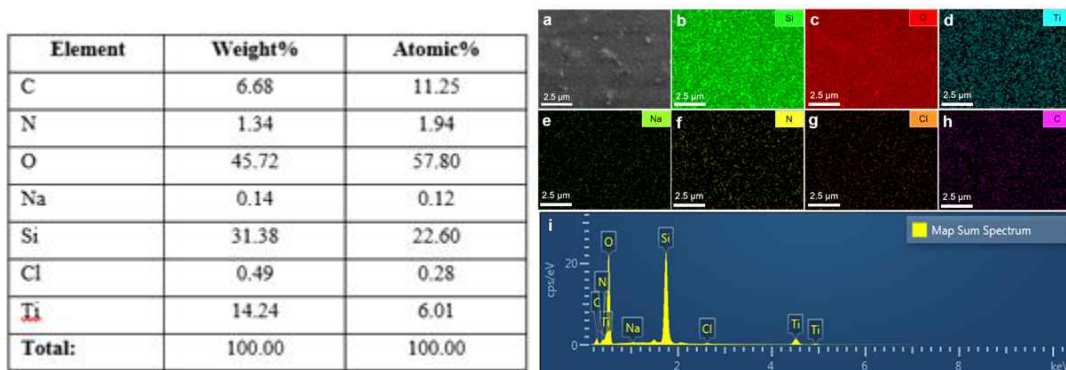


그림 222. (a-h) 2차원 elemental mapping 분석 이미지와 (i) SEM-EDS 스펙트럼 분석 결과

- Type A부터 Type G에 이르는 다양한 디자인의 광결정을 제작하였으며, 상세 디자인과 두께 측정 결과를 아래 표에 요약하였음. Type A부터 Type C는 단위  $\text{TiO}_2$ 층과  $\text{SiO}_2$ 층의 두께를 달리하여 제작한 박막이며, Type C부터 Type G는 단위  $\text{TiO}_2$ 층과  $\text{SiO}_2$ 층의 두께는 고정하고, 적층 횟수를 2회에서 10회까지 증가시켜서 제작한 박막임.

Film Type	Number of cycles for one $\text{TiO}_2$ layer	Number of cycles for one $\text{SiO}_2$ layer	Stacking number, $n$ , of the repeating unit	Thickness of $\text{TiO}_2$ layers (nm)	Thickness of $\text{SiO}_2$ layers (nm)	Total thickness (nm)
A	16	24	2	226	748	974
B	16	16	2	185	493	678
C	16	18	2	201	567	768
D	16	18	4	390	1145	1535
E	16	18	6	658	1799	2457
F	16	18	8	915	2200	3115
G	16	18	10	1158	2843	4001

- UV-vis 분광분석기를 이용하여 용액 공정으로 제작한 광결정의 투과도 및 반사도를 측정하였음. 단위 TiO<sub>2</sub>층과 SiO<sub>2</sub>층의 두께를 변경함에 따라 광결정의 반사 파장 및 색깔이 달라지는 것을 확인하였음. 또한 적층 횟수를 증가시키에 따라 빛의 반사 강도가 점진적으로 향상되는 것을 관찰하였음. 결과적으로 550 nm 근방에 있는 녹색 빛을 선택적으로 반사(약 70% 반사도) 하고, 청색(450 nm) 및 적색(660 nm) 빛을 70% 이상의 투과도로 투과시킬 수 있는 이색성 광필터를 제작함.

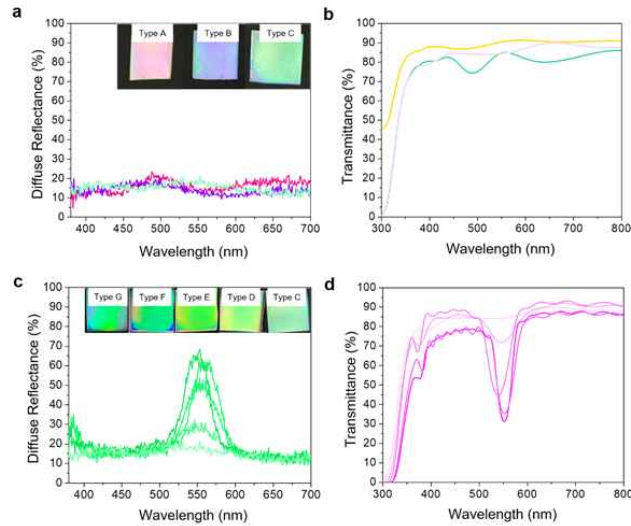


그림 223. 층상자기조립법 기반 스프레이 공정으로 제작한 광결정 박막의 투과도 및 확산 반사도 측정 결과

## ■ 유연 기판 이색성 광필터 소자 제작 기술 개발

### (1) 저온 기상증착법을 이용한 투명 유연 기판 재료 탐색

- 이색성 광필터용 유연 기판 소재를 선정하기 위해서는 여러 가지 물리적 특성이 고려되어야 함. 특히 기상증착이 진행되는 동안 필연적으로 열이 발생하므로 소재의 녹는점 또는 유리전이온도가 먼저 고려되어야 하며, 광필터가 제작된 이후 장기간 공기, 수분 및 태양광에 노출되므로 관련 내구성 확보도 필요함. 여러 가지 재료 중 폴리이미드 (polyimide; PI)는 이러한 특성을 가장 잘 만족할 것으로 조사되었음.

물리적 특성	PET	PAcr	PEN	PC	PS	PI
Tg (°C)	70	105	120	145	203	270
Upper Tm (°C)	115	175	268	115-160	180-220	250-320
CTE (ppm/°C)	33	70	20	75	54	8-20
% Transparency	90	>90	88	92	89	35-60
Water Absorption (%)	0.6	0.2	0.4	0.25	1.4	2-3
Y. Modulus (GPa)	2-2.7	2.4-3.4	0.1-0.5	2.6	-	2.5
Solvent Resistance	Good	Good	Good	Poor	Poor	Good
Surface Roughness	Poor	Fair	Poor	Good	Good	Good
Dimensional Stability	Good	Good	Good	Fair	Fair	Fair

표 60. 여러 고분자 유연 기판의 물리적 특성. (출처: 10.1109/JSEN.2014.2375203.)

- 일반적인 PI는 열적/기계적/화학적 안정성이 뛰어난 편이나, 재료 자체의 색상이 노란색을 띠

므로 가시광 투과율이 상대적으로 낮은 편임. 이러한 가시광 투과율은 앞서 제시된 표에서도 35-60%의 낮은 투과율로 표현됨. 그러나 이색성 광필터에 적용하기 위해서는 재료 자체의 색상도 고려되어야 함. 따라서 일반적인 노란색의 PI 보다는 물성은 다소 낮으나 가시광선 영역에서 훨씬 높은 투과도를 갖는 무색 투명 PI (colorless PI; CPI) 필름을 유연기판의 재료로 활용하고자 함. 투과도 측정 결과 약 450 nm 이상의 가시광선 영역에서 약 90%의 높은 투과율을 보였으며, 사용된 CPI 필름의 물리적 성질은 아래 표와 같음.

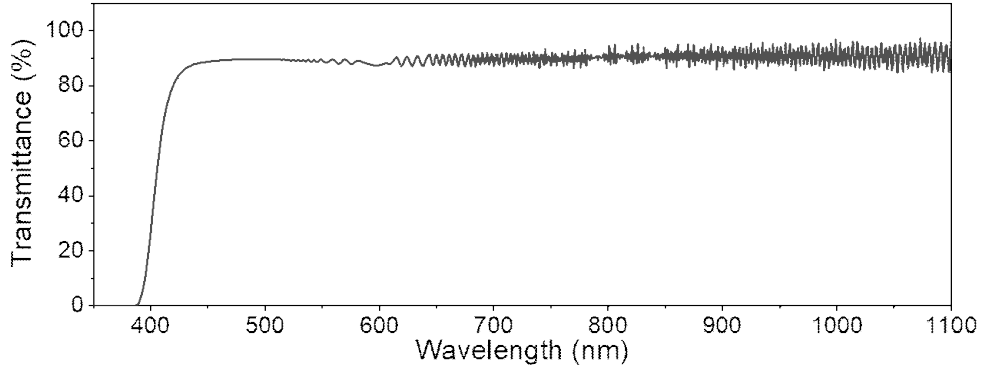


그림 224. Bare 상태의 무색 투명 PI 필름의 투과도 그래프

Item	Value
Mean thickness	79.2 $\mu\text{m}$
Thickness deviation	1.2%
Transmittance (550 nm)	89.9%
Transmittance (D65)	89.9%
Yellow index	1.7
Haze	0.3%
Tensile strength	288 MPa
Elongation	31%
Modulus	6.7 GPa
Pencil hardness	2H

표 61. 이색성 광필터 제작에 사용된 무색 투명 PI 필름의 물리적 특성

## (2) 저온 기상증착법을 이용한 투명 유연 기판 이색성 광필터 소자 설계 및 제작

- 앞서 선정된 CPI 필름 상에 이색성 광필터를 제작하기 위해 저온 기상증착법이 사용되었음. 기상증착을 통해  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{TiO}_2$ 를 순차적으로 증착하는 방식은 동일하나, 증착 온도가 낮으면 증착되는 산화물 자체의 굴절률 등 광학 특성이 달라지게 되므로 새로운 설계가 도입되었음. 기존 유리 기판 상에 제작된 Type 4 이색성 광필터와 동일한 투과 밴드 (400-500 nm, 600-700 nm)를 갖도록 총 90층의 산화물층이 설계되었으며, 원하지 않는 영역에서의 투과/반사를 최소화하기 위해 마찬가지로 정제 과정이 수행되었음.

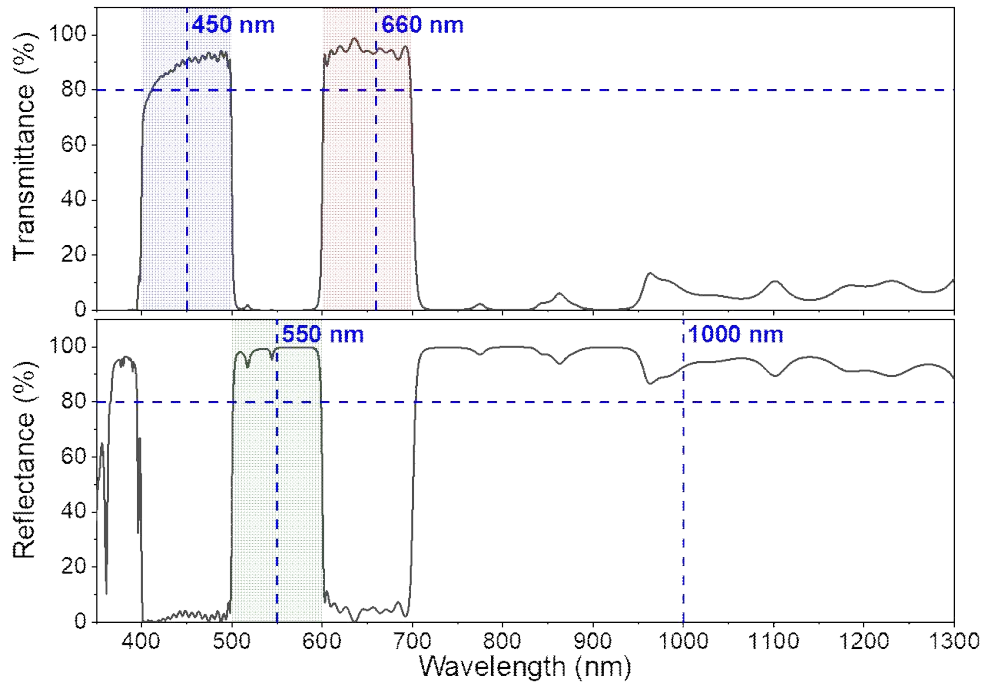


그림 225. 투명 유연 기판 이색성 광필터의 투과/반사 시뮬레이션 결과

- CPI 필름 상에 제작된 이색성 광필터는 뒤틀리거나 기계적/물리적 특성의 변화가 확인되지 않았으며, 소재의 손상없이 잘 만들어지는 것을 확인하였음. 기존 유리기판 상에 제작된 이색성 광필터와 육안으로 비교할 시 색상의 차이가 다소 존재하였으며, 이는 시뮬레이션과 실제 제작된 이색성 광필터의 투과/반사 스펙트럼에 차이가 있음을 시사함.



그림 226. 유리기판과 CPI 필름 상에 제작된 이색성 광필터. (좌) 투과이미지, (우) 반사이미지.

- 제작된 CPI 이색성 광필터의 투과 스펙트럼 측정시 투과 밴드는 시뮬레이션과 같이 400-500 nm, 600-700 nm 대역에서 형성되었으나, 다소 red-shift 되어 있고, 반치폭이 좁은 것을 확인함. 이러한 차이는 육안으로 확인되는 색상의 차이가 발생할 수 있음. 그럼에도 불구하고 450 nm에서의 투과율은 81.4%, 660 nm에서의 투과율은 91.1%로 과제 목표인 70%를 문제없이 달성할 수 있었음.



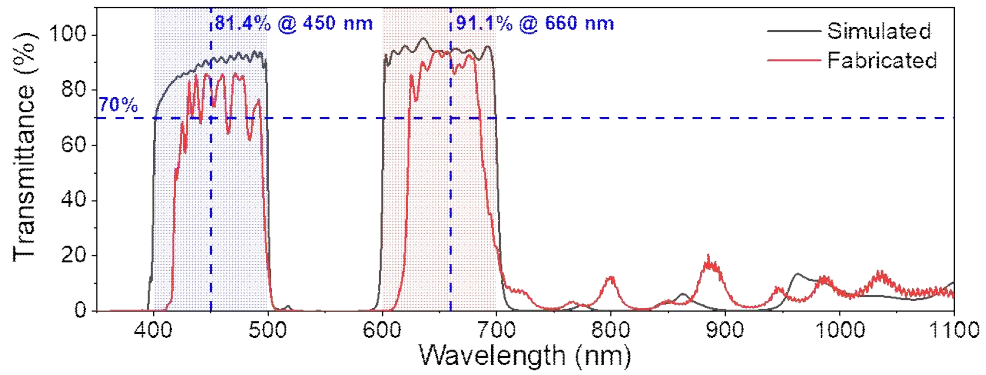


그림 227. 제작된 투명 유연 기판 이색성 광필터의 투과 스펙트럼

- 시뮬레이션 설계와 실제 제작된 이색성 광필터의 증착 오차를 확인하기 위해 FE-SEM 분석을 진행하였음, 총 90층의 산화물층에 대해 총 두께는 7.02  $\mu\text{m}$ 였으며, 평균 12.56 nm의 오차가 있음을 확인하였음. 유리 기판상에 제작된 이색성 광필터와 최대한 유사하게 제작하기 위해 훨씬 많은 수의 층수가 도입되었으나 저온 기상증착된  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{TiO}_2$ 의 광학 특성을 정확히 분석하고 증착 오류를 줄이면 층수를 더욱 낮출수 있으므로 충분히 활용이 가능할 것으로 판단됨.

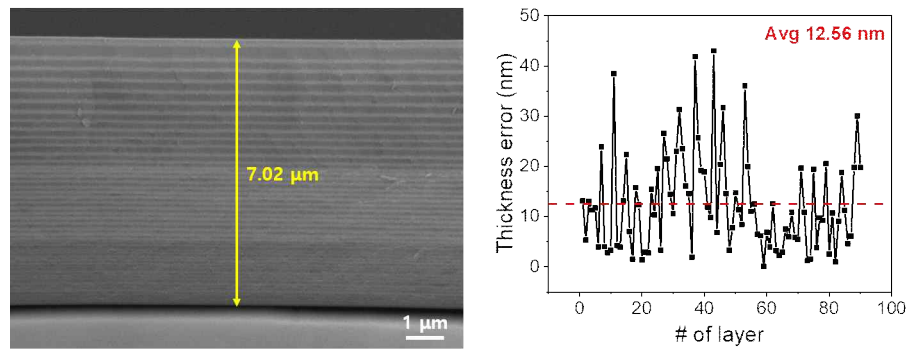


그림 228. 제작된 투명 유연 기판의 FE-SEM 이미지 및 설계-실제 두께 오차

#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)
		설계	실제				설계	실제				설계	실제	
1	$\text{SiO}_2$	88.87	102.03	13.16	31	$\text{SiO}_2$	34.12	57.18	23.06	61	$\text{SiO}_2$	101.91	97.94	3.97
2	$\text{TiO}_2$	106.67	101.33	5.35	32	$\text{TiO}_2$	95.32	63.96	31.36	62	$\text{TiO}_2$	5.00	17.58	12.58
3	$\text{SiO}_2$	324.71	311.64	13.07	33	$\text{SiO}_2$	54.92	78.44	23.52	63	$\text{SiO}_2$	58.89	62.09	3.20
4	$\text{TiO}_2$	106.48	95.16	11.32	34	$\text{TiO}_2$	76.07	59.98	16.10	64	$\text{TiO}_2$	22.41	20.16	2.25
5	$\text{SiO}_2$	188.99	177.26	11.73	35	$\text{SiO}_2$	109.52	94.90	14.62	65	$\text{SiO}_2$	90.97	88.05	2.92
6	$\text{TiO}_2$	100.11	96.14	3.97	36	$\text{TiO}_2$	66.83	68.78	1.95	66	$\text{TiO}_2$	15.14	22.71	7.57
7	$\text{SiO}_2$	229.33	205.46	23.87	37	$\text{SiO}_2$	16.92	58.79	41.87	67	$\text{SiO}_2$	67.28	61.30	5.98
8	$\text{TiO}_2$	97.39	93.38	4.02	38	$\text{TiO}_2$	97.94	72.24	25.70	68	$\text{TiO}_2$	15.55	26.40	10.85
9	$\text{SiO}_2$	200.17	203.00	2.83	39	$\text{SiO}_2$	40.06	59.26	19.20	69	$\text{SiO}_2$	90.56	84.64	5.92
10	$\text{TiO}_2$	97.23	93.86	3.37	40	$\text{TiO}_2$	80.80	61.93	18.88	70	$\text{TiO}_2$	23.48	18.03	5.46
11	$\text{SiO}_2$	224.35	185.86	38.49	41	$\text{SiO}_2$	90.48	78.58	11.91	71	$\text{SiO}_2$	82.12	62.46	19.66
12	$\text{TiO}_2$	98.38	94.13	4.26	42	$\text{TiO}_2$	82.77	72.94	9.83	72	$\text{TiO}_2$	5.00	15.89	10.89
13	$\text{SiO}_2$	182.05	178.11	3.94	43	$\text{SiO}_2$	31.19	74.20	43.01	73	$\text{SiO}_2$	103.00	101.76	1.24
14	$\text{TiO}_2$	89.33	102.45	13.12	44	$\text{TiO}_2$	86.25	79.41	6.84	74	$\text{TiO}_2$	23.40	24.96	1.56
15	$\text{SiO}_2$	132.59	154.94	22.35	45	$\text{SiO}_2$	50.59	70.96	20.37	75	$\text{SiO}_2$	91.65	72.20	19.45
16	$\text{TiO}_2$	81.45	74.40	7.05	46	$\text{TiO}_2$	95.94	64.21	31.73	76	$\text{TiO}_2$	11.06	14.84	3.78
17	$\text{SiO}_2$	142.66	141.14	1.52	47	$\text{SiO}_2$	31.47	46.08	14.61	77	$\text{SiO}_2$	84.74	74.96	9.78

18	TiO <sub>2</sub>	99.88	84.10	15.78	48	TiO <sub>2</sub>	82.26	85.58	3.32	78	TiO <sub>2</sub>	5.00	14.25	9.25
19	SiO <sub>2</sub>	151.21	138.86	12.35	49	SiO <sub>2</sub>	44.72	52.53	7.81	79	SiO <sub>2</sub>	127.37	106.84	20.53
20	TiO <sub>2</sub>	69.05	70.43	1.38	50	TiO <sub>2</sub>	92.77	78.01	14.76	80	TiO <sub>2</sub>	24.29	26.83	2.54
21	SiO <sub>2</sub>	132.19	129.25	2.94	51	SiO <sub>2</sub>	64.68	76.01	11.33	81	SiO <sub>2</sub>	80.55	69.80	10.75
22	TiO <sub>2</sub>	80.81	78.01	2.80	52	TiO <sub>2</sub>	86.04	77.60	8.44	82	TiO <sub>2</sub>	13.18	14.15	0.97
23	SiO <sub>2</sub>	162.35	146.89	15.46	53	SiO <sub>2</sub>	25.04	61.05	36.01	83	SiO <sub>2</sub>	78.87	69.76	9.11
24	TiO <sub>2</sub>	99.24	88.89	10.35	54	TiO <sub>2</sub>	103.83	83.86	19.97	84	TiO <sub>2</sub>	19.64	38.39	18.75
25	SiO <sub>2</sub>	129.18	109.58	19.61	55	SiO <sub>2</sub>	31.41	42.46	11.05	85	SiO <sub>2</sub>	86.28	75.03	11.26
26	TiO <sub>2</sub>	72.72	76.06	3.34	56	TiO <sub>2</sub>	63.01	50.50	12.51	86	TiO <sub>2</sub>	17.79	22.43	4.64
27	SiO <sub>2</sub>	109.84	83.25	26.59	57	SiO <sub>2</sub>	43.32	49.79	6.47	87	SiO <sub>2</sub>	84.38	78.23	6.15
28	TiO <sub>2</sub>	92.64	71.13	21.52	58	TiO <sub>2</sub>	16.02	22.23	6.21	88	TiO <sub>2</sub>	8.59	28.39	19.80
29	SiO <sub>2</sub>	5.00	19.46	14.46	59	SiO <sub>2</sub>	52.69	52.78	0.09	89	SiO <sub>2</sub>	89.78	59.71	30.07
30	TiO <sub>2</sub>	79.84	90.48	10.64	60	TiO <sub>2</sub>	39.21	32.34	6.87	90	TiO <sub>2</sub>	11.48	31.25	19.77

표 62. 투명 유연 기판에 제작된 이색성 광필터의 두께 정보

- 유리기판에 제작된 이색성 광필터와 마찬가지로 CPI에 제작된 이색성 광필터에 대한 모든 분석은 본교 공동기기에 분석을 의뢰하였음. 아래 그림은 분석을 증빙할 수 있는 서류임.

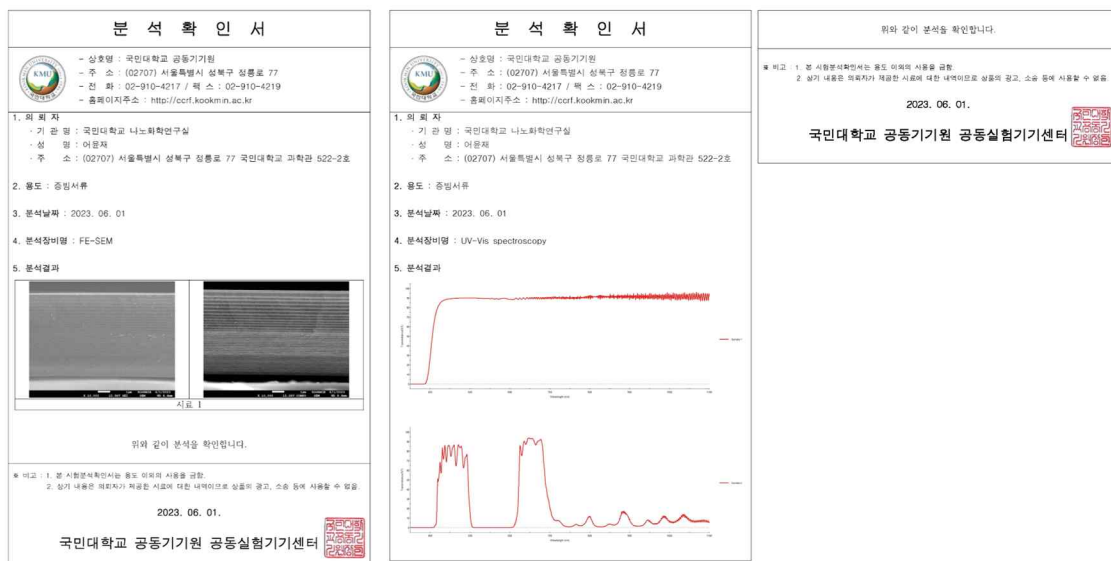


그림 229. 자체 평가에 따른 CPI 이색성 광필터 분석 증빙자료

### (3) 유연 고분자 기판 표면 처리를 통한 광필터 접합성 강화 기술 개발

- 본 연구에서는 1차원 광결정 박막을 증착할 시에 금속 전구체 및 반응물 등이 원활하게 높은 coverage로 기판에 흡착되어 광결정 박막의 품질을 향상시키고, 더 나아가서 광결정 박막과 기판 간에 화학적 결합이 이루어질 수 있도록 하기 위한 표면처리 기술로서 자외선-오존 처리 기술을 채택하였음.
- 상압 상태에서 기판에 자외선을 조사하면, 대기 중에 존재하는 산소 분자가 자외선의 큰 에너지에 반응하여 산소 원자가 분해될 수 있으며 최종적으로 오존 물질을 만들어낼 수 있음. 이러한 오존 물질은 산화력이 강하고 표백살균에 사용되는 기체로서, 기판의 표면을 산화시킬 수 있으며 대기 중에 존재하는 수분, 습기 등이 관여하여 기판의 표면을 수산화기로 치환된 표면으로 바꾸어 줄 수 있음. 이에 따라 기판의 표면 성질(거칠기(roughness), 접촉각(contact angle) 등)이 달라지게 되며 이는 광필터의 접합성을 강화하는 중요 파라미터로 작용함.
- 거칠기는 profilometer 장비를 나노미터 단위로 기판의 높이를 스캔하여 측정하였으며, 접촉각

은 스마트폰에 고배율 렌즈를 조합하여 기판과 같은 면 상에 스마트폰 렌즈를 위치시킨 뒤에, 물방울의 이미지를 촬영하고 접촉각을 각도기로 계산하여 측정하였음.

- 아래 그림에서 확인할 수 있는 것처럼, 자외선-오존 처리 시간에 따라 투명폴리이미드 기판의 roughness 및 contact angle이 크게 달라지는 것을 확인할 수 있음. 처리 시간이 증가하면 거칠기는 점차 증가하며 hydroxylation 됨에 따라 접촉각은 점차 감소하는 것으로 드러남.

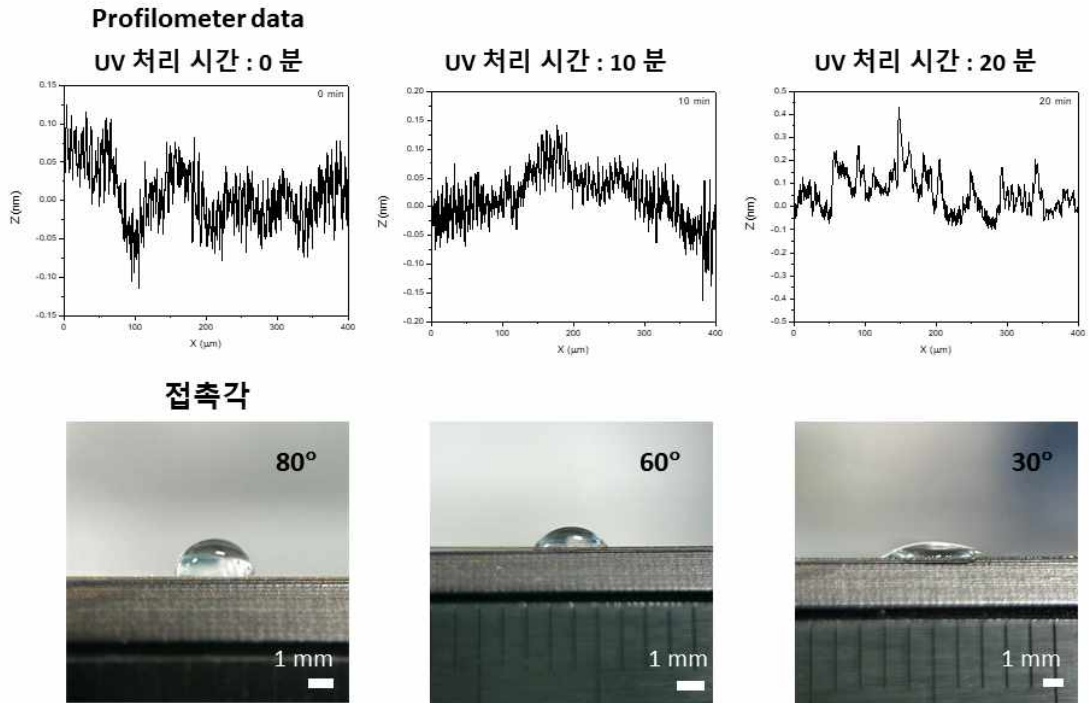


그림 230. 다양한 자외선-오존 처리 시간을 이용하여 제작한 투명폴리이미드 기판을 이용하여 profilometer 및 스마트폰을 기반으로 기판의 거칠기 및 접촉각을 측정한 결과

- 자외선-오존 처리를 하지 않을 경우, 거칠기는 평균 약 0.5 nm이며 접촉각은 약 77도로 측정되었음. 자외선-오존 처리를 10분 진행할 경우, 그 거칠기는 0.67 nm로 증가하였으며 접촉각은 대략 58도 수준으로 감소함. 한편, 자외선-오존 처리 시간이 더 길어지면 접촉각이 30도 아래로 상당히 친수성을 띠는 표면이 형성되지만, 거칠기가 0.91 nm 수준으로 크게 증가하여 기판의 표면이 상당히 불균일한 상태가 되며, 이는 오히려 섬세하게 디자인된 1차원 광결정이 고품질로 증착되기에 불리한 표면 상태를 만들어 냄. 따라서 최적 자외선-오존 처리 시간은 10분으로 확인되었으며, 이를 이용할 경우 본 과제의 접촉각 관련 목표인 70도를 성공적으로 달성할 수 있음.

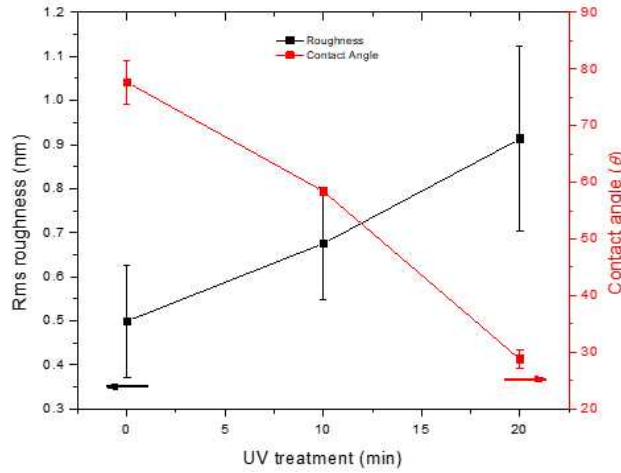


그림 231. 자외선-오존 처리 시간별 Rms roughness 및 contact angle 도시 그래프

### (3) 미니 광투과 태양전지 성능 측정 기술 개발

- 광필터와 태양전지를 결합한 광투과 태양전지의 성능을 검증하는 차원에서, flexible CIGS solar cell과 고효율 광필터를 조합하여 미니 광투과 태양전지를 제작하고 그 투과광 조도와 태양전지 전력생산량을 측정하였음.
- 여러 가지 실험 조건(태양전지 스택 수, 광필터 각도, CIGS solar cell 높이, solar cell 배치, 광필터 조성 등)을 바꾸어 시험함으로써 핵심 변수(광필터 각도, 태양전지 스택 수 등)를 확인할 수 있었으며, 이를 위주로 측정 결과를 도시함.
- 아래 그림은 spectrophotometer를 이용하여 측정한 투과광의 spectral irradiance 그래프를 보여줌. spectrophotometer의 성능 한계상 가시광선 영역의 파장만을 검출할 수 있었음. 광필터 없이 solar simulator에서 나온 투과광을 측정하면, 표준 태양광 조건 중 하나인 AM1.5G 스펙트럼과 유사한 스펙트럼을 얻을 수 있음을 확인하였음.
- 광필터를 광투과 태양전지에 삽입하면, 광필터가 가지고 있는 광물리적 특성 덕분에 적색광과 청색광 파장 영역을 선택적으로 투과시킬 수 있어, 적색광, 청색광 영역에서 높은 irradiance 값을 보임을 확인할 수 있음. 반면, 다른 파장 영역(green, yellow, IR 등)에 해당하는 빛은 irradiance가 거의 0으로 투과되지 않았음을 알 수 있으며, 이는 광필터가 해당 파장의 빛들을 반사시킬 수 있기 때문임.
- 하지만 광필터 각도를 0도에서 60도로 점차 증가시킬 경우, 투과광의 파장이 크게 달라짐을 확인할 수 있음. 예를 들어, 광필터를 기울이지 않을 경우 투과된 적색광의 파장 범위가 600~720 nm에 걸쳐있는 반면, 광필터 각도를 60도까지 증가시키면 투과광의 파장 범위가 510~630 nm에 걸쳐 있음. 즉, 광필터를 기울이면 투과광의 파장이 red-shift가 일어난다는 것을 알 수 있음.
- 또한 파장 shift와 함께 투과광의 최대 조도값이 감소하는 것으로 관찰됨. 광필터 각도가 0도 일 때, 적색광 최대 조도 값이 1.1 수준이었지만, 60도로 기울이면 그 최대값이 0.8 수준으로 감소함. 즉, 광필터를 기울임에 따라 적색광과 청색광 영역의 빛이 투과되는 정도가 감소하는 것으로 확인됨.

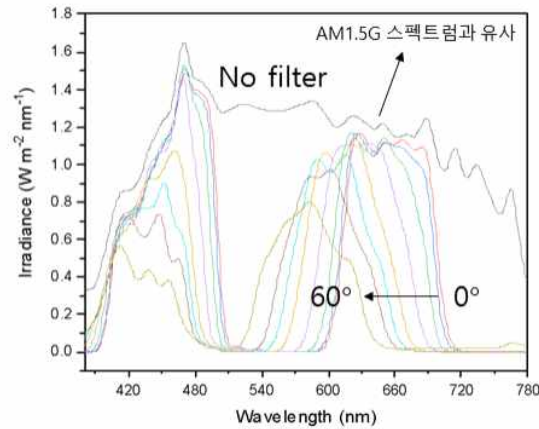
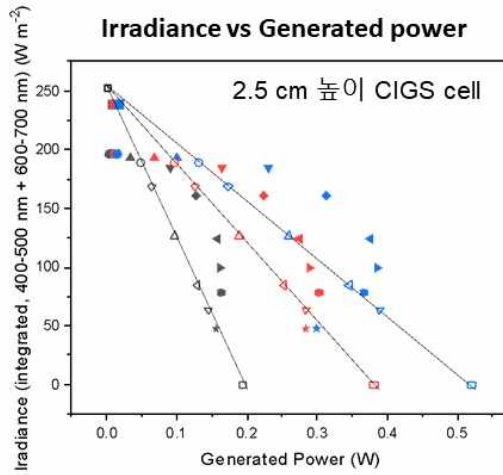


그림 232. 광필터 유무, 광필터 각도에 따른 투과광 조도 그래프 도시 결과

- 광필터 각도를 0도에서 60도까지 다르게 하여 태양전지로부터 발생하는 전력생산량을 측정해 보면(붉은색 채워진 그래프), 0도에서 0.01W 전력이 생산되는 반면, 40도에서 0.274W 전력이 생산되는 것을 확인할 수 있음. 이는 광필터 각도를 조절함에 따라 태양전지로부터 발생하는 전력생산량을 극대화할 수 있음을 의미함. 이는 조사되는 빛이 광필터 표면으로부터 반사될 때, 광필터의 각도를 조절하면 반사광의 경로를 조절할 수 있기 때문이며, flexible CIGS solar cell 쪽으로 반사광을 더 잘 유도할 수 있기 때문.
- 광필터를 40도로 기울일 경우, 0.274W의 전력이 생산되며 청색/적색 투과광의 조도는 124.56 W/m<sup>2</sup>으로 측정되었음. CIGS solar cell을 수평으로 배치하여 측정할 경우, 0.379W의 전력이 생산되며 청색/적색 투과광의 조도는 0에 수렴함. 따라서 미니광투과 태양전지는 conventional solar cell 대비 대략 72%의 전력생산량을 유지할 수 있으면서 동시에, 투과광 조도를 0 W/m<sup>2</sup>에서 124.56 W/m<sup>2</sup>으로 개선할 수 있으므로, 광필터를 이용한 광투과 태양전지 전략이 태양전지의 전력생산량을 향상시키는데 획기적으로 기여함을 증명함. 또한, 광필터를 사용하지 않을 경우와 비교하여, 광필터를 40도 기울기로 삽입하여 사용할 경우, 전력생산량이 29배 상승하며, 투과광 조도는 61% 유지되는 성능 향상 결과를 보여줌.
- 미니광투과 태양전지에서 flexible CIGS solar cell은 수직 방향으로 배치가 이루어지며, 이에 따라 solar cell strip을 스택하여 배열할 수 있음. 스택 수에 따라 투과광 조도 및 태양전지 전력생산량을 측정한 결과, 스택 수가 1개, 2개, 3개일 때, 투과광 조도는 거의 유사한 한편, 전력생산량은 대략 0.16W, 0.28W, 0.375W로 증가하는 것을 확인할 수 있음. 이는 태양전지를 상단에 스택함으로써 산술적으로 전력생산량을 향상시킬 수 있다는 것을 보여줌.
- 앞서 확인한 것처럼, tilting을 진행함에 따라 투과광의 파장 영역이 shift하기 때문에, 투과하는 빛의 파장 영역이 달라져서 적색/청색광의 투과광 조도가 낮아지는 문제가 있음. 이를 개선하기 위해 추가적으로 새로운 디자인의 광필터를 설계하여 투과광조도 및 태양전지 전력생산량을 측정하였음. 이를 통해 전력생산량은 유사하지만, 투과광조도를 획기적으로 개선하는 결과를 얻을 수 있었음. 광필터를 40도로 기울이는 경우에, 전력생산량이 0.292W에 달하며, 청색/적색 투과광의 조도가 147.07W 정도로 측정되었음. 이는 동일 면적의 수평 CIGS 셀과 비교하여 전력 생산은 77% 유지하면서, 투과광 조도는 0 W/m<sup>2</sup>에서 147 W/m<sup>2</sup>으로 개선한 것임. 이러한 미니 광투과 태양전지를 기반으로 한 소형 실증 결과는 추후 대형화 실증 연구개발에 필요한 backdata로서 큰 역할을 수행할 것으로 사료됨.





수평 배치된 태양전지

수직 배치된 태양전지

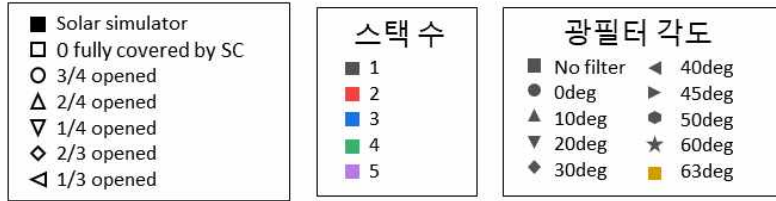


그림 233. 미니 광투과 태양전지의 태양전지 스택 수 및 광필터 각도에 따른 투과광조도-전력생산량 그래프 도시 결과

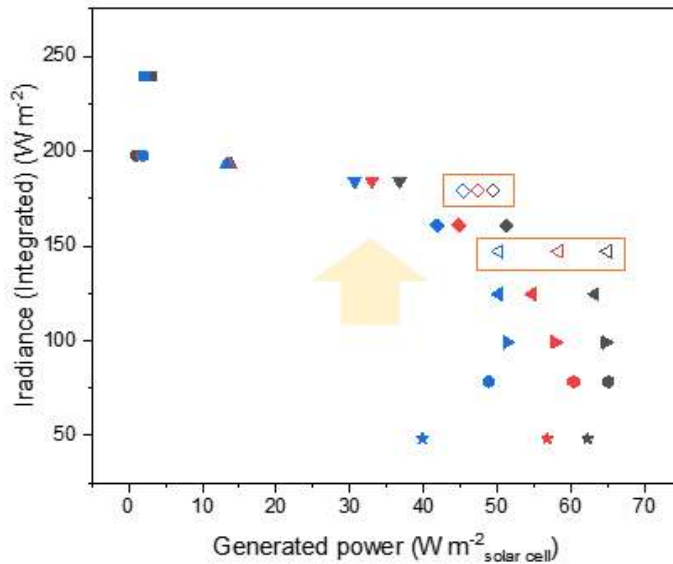


그림 234. 미니 광투과 태양전지의 광필터 디자인 변화에 따른 투과광조도-전력생산량 그래프 도시 결과

## ■ 이색성 광필터의 상용화를 위한 최적화 연구

### (1) 적층수에 따른 이색성 광필터의 특성 평가

- 유리 기판상에 제작된 이색성 광필터의 경우 타입에 따라 52~62층의 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 구조를 가짐. 특히 가장 특성이 좋은 것으로 평가되는 Type 4 이색성 광필터의 경우 400-500 nm, 600-700 nm의 명확한 투과 밴드가 확인되지만 총 60층의 산화물 적층수는 실제 양산에서 비용과 시간적인 측면에서 대량생산에 걸림돌이 될 것으로 판단됨. 이에, 실제 스마트팜에 활용이 가능하도록 적층수를 줄여 성능과 비용을 합리적으로 결정하기 위한 최적화 연구를 진행하였음.
- 이색성 광필터를 구성하는 산화물의 적층수가 감소하더라도 스마트팜에서 충분히 활용이 가



능도록 청색/적색광의 투과율은 최대로 높이고, 녹색광은 반사시킬 수 있도록 Type 4 이색성 광필터를 base로 하여 이색성 광필터를 설계하였음. 그 결과 아래 그림과 같이 40층, 30층, 16층을 갖는 이색성 광필터 시뮬레이션이 완료되었음. 이색성 광필터는 적층수가 감소하면 빛의 간섭이 감소하므로 이색성 광필터의 성능은 감소하는 trade-off 관계에 있음. 16층의 경우 적색 투과밴드가 상대적으로 넓어지고, 특히 1000 nm 대역의 적외선 영역의 투과율이 증가하게 되는 것을 확인할 수 있었음. 또한 적층수가 감소할수록 녹색 반사대역은 완전히 차단되지 않는 것이 확인되었음.

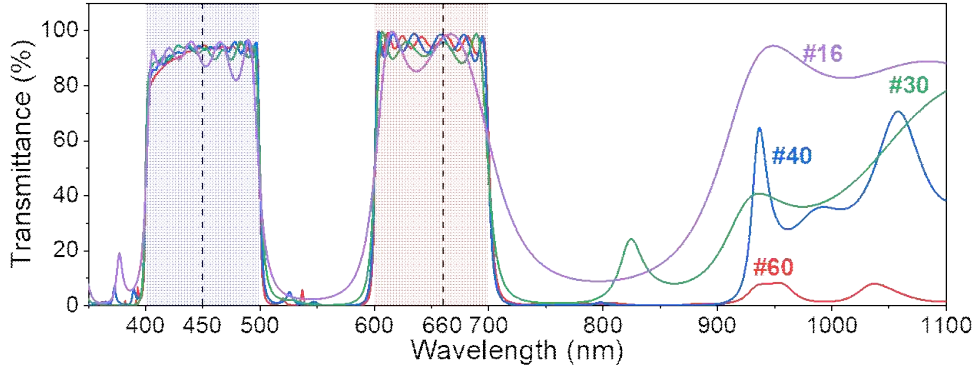


그림 235. 적층수에 따른 이색성 광필터의 계산된 투과 스펙트럼

- 시뮬레이션 결과를 토대로 40층, 30층, 16층의 적층수를 갖는 이색성 광필터를 추가로 제작하였으며, 60층의 적층수를 갖는 Type 4 이색성 광필터와 동일한 기상증착 방식으로 유리기판 상에 제작을 진행하였음. 육안으로 확인된 이색성 광필터의 투과 색상과 반사 색상은 모두 유사한 것을 확인함. 정확한 분석을 위해 UV-Vis spectroscopy를 사용하여 측정된 투과 스펙트럼은 아래 그림과 같음. 계산된 투과 스펙트럼과 거의 유사한 투과밴드를 가지는 것이 확인되었으며, 16층 이색성 광필터의 경우 특히 적색 투과밴드가 더욱 넓어져 FWHM은 122 nm에 달하는 것을 확인함. 또한 적층수가 감소할수록 청색 투과밴드 상단의 ripple이 더욱 두드러지는 현상이 있었음. 이러한 현상은 빛에 의한 간섭효과 감소하기 때문이며, 정제 과정을 진행했음에도 완전히 해결되지 않아, 실제 스마트팜 적용시 문제가 되는 부분에 대한 피드백이 필요할 것으로 판단됨.

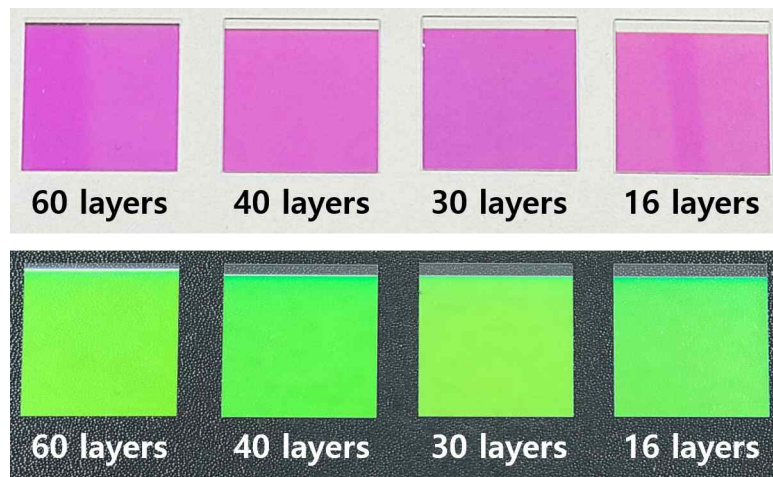


그림 236. 적층수에 따른 이색성 광필터의 투과 이미지 (위) 및 반사 이미지 (아래).

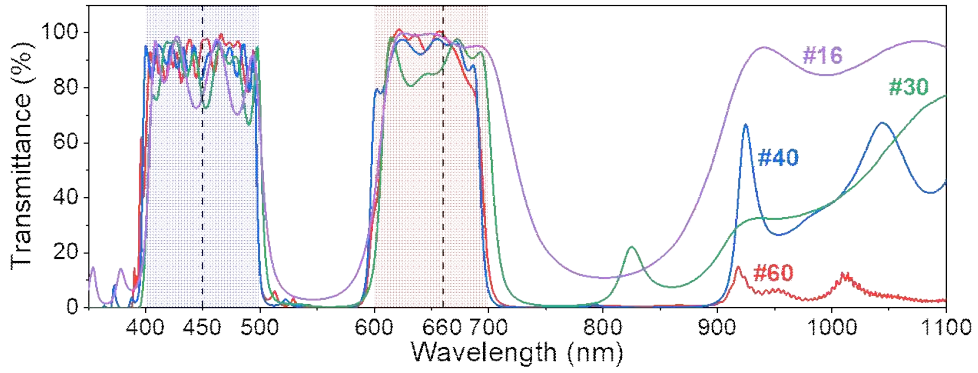


그림 237. 적층수에 따른 이색성 광필터의 실제 투과 스펙트럼

		반치폭 (FWHM)		투과율 (%T)		반사율 (%R)	
		청색 밴드	적색 밴드	450 nm	660 nm	550 nm	1000 nm
60층	계산	100 nm	100 nm	94.6%	97.8%	99.5%	98.4%
	실제	100 nm	89 nm	97.5%	99.5%	97.6%	88.3%
40층	계산	100 nm	100 nm	93.5%	98.0%	97.8%	64.5%
	실제	100 nm	95 nm	84.2%	96.4%	99.8%	62.0%
30층	계산	100 nm	100 nm	93.3%	95.7%	99.4%	60.9%
	실제	100 nm	97 nm	74.9%	87.9%	99.6%	61.7%
16층	계산	101 nm	117 nm	81.3%	95.1%	96.0%	11.3%
	실제	99 nm	122 nm	77.4%	98.3%	96.9%	15.3%

표 63. 적층수에 따른 이색성 광필터의 계산 및 실제 광학 특성

- FE-SEM 분석 결과, 적층수가 감소할수록 이색성 광필터의 두께가 확연히 감소하는 것을 확인할 수 있었음. 40층, 30층, 16층의 이색성 광필터는 각각 4.05  $\mu\text{m}$ , 2.86  $\mu\text{m}$ , 1.43  $\mu\text{m}$ 의 총 두께를 가짐. 또한 설계와 실제 증착된 각 층별 두께 오차 평균도 각각 8.73 nm, 5.54 nm, 8.47 nm 로써 이전에 제작된 이색성 광필터와 유사한 수준임을 확인하였음. 적층수의 감소는 시간과 증착 비용 감소와 직결적으로 연결되므로 광필터 전체 두께가 낮을수록 제작에 유리하다고 할 수 있으며, 유사한 두께 오차 평균은 적층수가 낮아지더라도 설계와 실제 제작간 크게 차이가 나지 않고 사용된 기상증착법이나 증착장비에 영향을 받는 것으로 생각해 볼 수 있음.

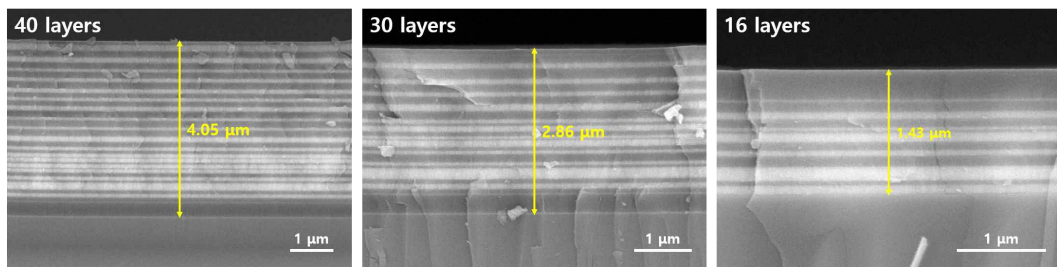


그림 238. 적층수에 따른 이색성 광필터의 FE-SEM 분석 이미지

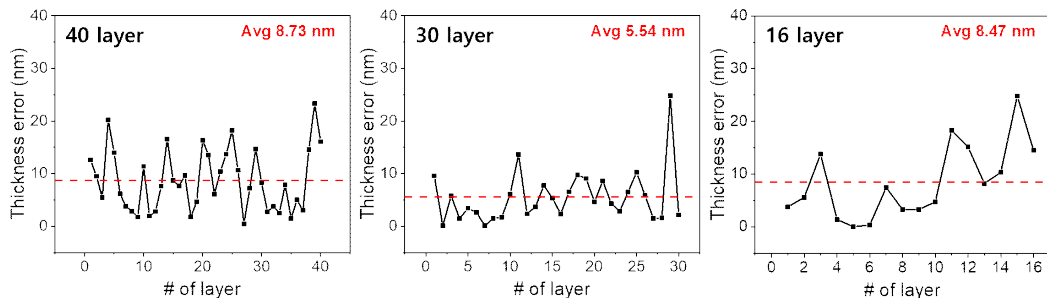


그림 239. 적층수에 따른 이색성 광필터의 층별 설계-실제 두께 오차

#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)
		설계	실제				설계	실제				설계	실제	
1	SiO <sub>2</sub>	70.01	82.65	12.64	15	SiO <sub>2</sub>	159.29	168.02	8.73	29	SiO <sub>2</sub>	24.26	38.96	14.70
2	TiO <sub>2</sub>	152.12	142.62	9.50	16	TiO <sub>2</sub>	63.28	55.65	7.64	30	TiO <sub>2</sub>	83.82	75.51	8.31
3	SiO <sub>2</sub>	148.59	154.05	5.46	17	SiO <sub>2</sub>	151.73	161.35	9.62	31	SiO <sub>2</sub>	86.29	89.04	2.75
4	TiO <sub>2</sub>	122.40	102.19	20.22	18	TiO <sub>2</sub>	60.68	58.91	1.77	32	TiO <sub>2</sub>	84.31	80.54	3.78
5	SiO <sub>2</sub>	144.49	158.48	13.99	19	SiO <sub>2</sub>	153.61	158.27	4.65	33	SiO <sub>2</sub>	51.21	53.70	2.49
6	TiO <sub>2</sub>	70.03	63.87	6.16	20	TiO <sub>2</sub>	123.15	106.83	16.33	34	TiO <sub>2</sub>	174.15	166.27	7.88
7	SiO <sub>2</sub>	147.59	143.81	3.78	21	SiO <sub>2</sub>	119.80	133.36	13.56	35	SiO <sub>2</sub>	88.32	89.81	1.49
8	TiO <sub>2</sub>	85.24	88.09	2.85	22	TiO <sub>2</sub>	77.44	71.37	6.08	36	TiO <sub>2</sub>	85.64	80.63	5.02
9	SiO <sub>2</sub>	161.88	160.13	1.76	23	SiO <sub>2</sub>	72.90	83.32	10.42	37	SiO <sub>2</sub>	100.93	97.90	3.04
10	TiO <sub>2</sub>	98.46	87.08	11.38	24	TiO <sub>2</sub>	86.96	73.29	13.67	38	TiO <sub>2</sub>	12.52	27.10	14.58
11	SiO <sub>2</sub>	112.40	110.44	1.96	25	SiO <sub>2</sub>	20.24	38.45	18.21	39	SiO <sub>2</sub>	339.64	316.33	23.32
12	TiO <sub>2</sub>	76.66	73.86	2.80	26	TiO <sub>2</sub>	93.59	82.95	10.65	40	TiO <sub>2</sub>	15.02	31.10	16.08
13	SiO <sub>2</sub>	119.90	127.50	7.60	27	SiO <sub>2</sub>	43.27	42.80	0.47					
14	TiO <sub>2</sub>	110.49	93.92	16.57	28	TiO <sub>2</sub>	91.51	84.31	7.21		Glass		0.5	T

표 64. 40층의 이색광 광필터의 두께 정보

#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)
		설계	실제				설계	실제				설계	실제	
1	SiO <sub>2</sub>	82.64	92.24	9.60	12	TiO <sub>2</sub>	62.92	65.29	2.36	23	SiO <sub>2</sub>	50.98	53.82	2.84
2	TiO <sub>2</sub>	11.60	11.51	0.09	13	SiO <sub>2</sub>	53.58	57.28	3.70	24	TiO <sub>2</sub>	186.10	179.58	6.53
3	SiO <sub>2</sub>	132.68	138.47	5.79	14	TiO <sub>2</sub>	94.10	101.87	7.77	25	SiO <sub>2</sub>	79.88	90.14	10.26
4	TiO <sub>2</sub>	91.59	90.14	1.46	15	SiO <sub>2</sub>	79.43	74.05	5.39	26	TiO <sub>2</sub>	92.75	86.91	5.84
5	SiO <sub>2</sub>	177.88	181.30	3.42	16	TiO <sub>2</sub>	45.73	43.40	2.33	27	SiO <sub>2</sub>	81.03	82.53	1.50
6	TiO <sub>2</sub>	88.60	91.24	2.64	17	SiO <sub>2</sub>	23.79	30.35	6.56	28	TiO <sub>2</sub>	18.57	20.12	1.55
7	SiO <sub>2</sub>	132.14	132.24	0.10	18	TiO <sub>2</sub>	111.55	101.77	9.79	29	SiO <sub>2</sub>	338.92	314.10	24.83
8	TiO <sub>2</sub>	76.50	78.01	1.51	19	SiO <sub>2</sub>	67.97	77.05	9.08	30	TiO <sub>2</sub>	16.94	19.11	2.17
9	SiO <sub>2</sub>	134.11	132.40	1.72	20	TiO <sub>2</sub>	55.33	50.67	4.66					
10	TiO <sub>2</sub>	122.69	128.79	6.10	21	SiO <sub>2</sub>	140.66	149.29	8.63					
11	SiO <sub>2</sub>	146.52	132.87	13.65	22	TiO <sub>2</sub>	54.12	49.82	4.30		Glass		0.5	T

표 65. 30층의 이색광 광필터의 두께 정보

#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)
		설계	실제				설계	실제				설계	실제	
1	SiO <sub>2</sub>	10.83	7.01	3.82	7	SiO <sub>2</sub>	95.78	103.26	7.48	13	SiO <sub>2</sub>	114.92	123.16	8.24
2	TiO <sub>2</sub>	94.37	88.75	5.62	8	TiO <sub>2</sub>	100.28	96.94	3.34	14	TiO <sub>2</sub>	30.89	20.51	10.38
3	SiO <sub>2</sub>	47.27	61.08	13.81	9	SiO <sub>2</sub>	31.38	34.71	3.33	15	SiO <sub>2</sub>	311.01	335.85	24.84
4	TiO <sub>2</sub>	156.80	155.37	1.43	10	TiO <sub>2</sub>	30.97	26.21	4.76	16	TiO <sub>2</sub>	25.55	11.03	14.52
5	SiO <sub>2</sub>	123.34	123.41	0.07	11	SiO <sub>2</sub>	95.83	114.17	18.34					
6	TiO <sub>2</sub>	62.85	62.45	0.40	12	TiO <sub>2</sub>	81.76	66.60	15.16		Glass		0.5	T

표 66. 16층의 이색광 광필터의 두께 정보

- 적층수별로 제작된 이색성 광필터 분석은 이전과 마찬가지로 본교 공동기기원에 분석을 의뢰 하였으며, 아래 그림은 분석을 증빙할 수 있는 서류임.

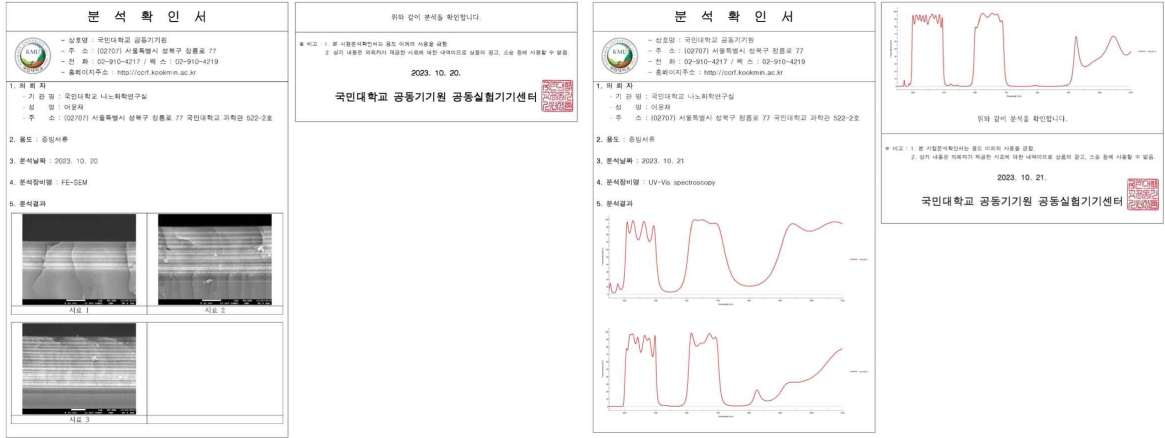


그림 240. 자체 평가에 따른 적층수별 이색성 광필터 분석 증빙자료

- 제작된 각 층수별 이색성 광필터의 성능을 비교하기 위해 PAR 범위에서 계산을 진행하였음. 필터가 없는 경우를 100%로 적용할 시, irradiance는 16층을 제외하고 약 47% 수준이었으며, 16층 광필터는 상대적으로 FWHM가 넓은 적색 투과밴드에 의해 소폭 증가한 56.6% 수준이었음. PPFD로 계산할 경우에도 이러한 특성은 동일한 경향을 보였어 55.3%~60.7%의 범위를 나타내었음. PPFD 중 청색 (400~500 nm)과 적색 (600~700 nm)만을 고려한 PPFD<sub>RB</sub>의 경우 적층수에 따라 84.3%~88.5% 수준을 보였으며, 이는 이색성 광필터를 적용하지 않았을 때 대비 최소 84.3% 이상의 청/적색광을 투과할 수 있음을 의미함. 반대로 녹색 (500~600 nm)만 고려한 PPFD<sub>G</sub>는 3.1%~11.8% 수준을 나타냄으로써 최대 11.8%의 녹색광만이 투과하고 나머지는 반사되어 태양전지의 효율을 높일 수 있음을 의미함. 앞서 분석한 바와 같이 16층의 광필터는 반사대역이 완전히 차단되지 않으므로 다른 광필터와 비교하여 상당히 높은 수준의 PPFD<sub>G</sub>를 보이는 것으로 판단됨. 실제 태양전지와의 조합 및 효율 증가폭은 확인해보아야겠지만, 적층수를 줄여도 충분히 스마트팜 및 태양전지에 사용이 가능할 것으로 판단됨.

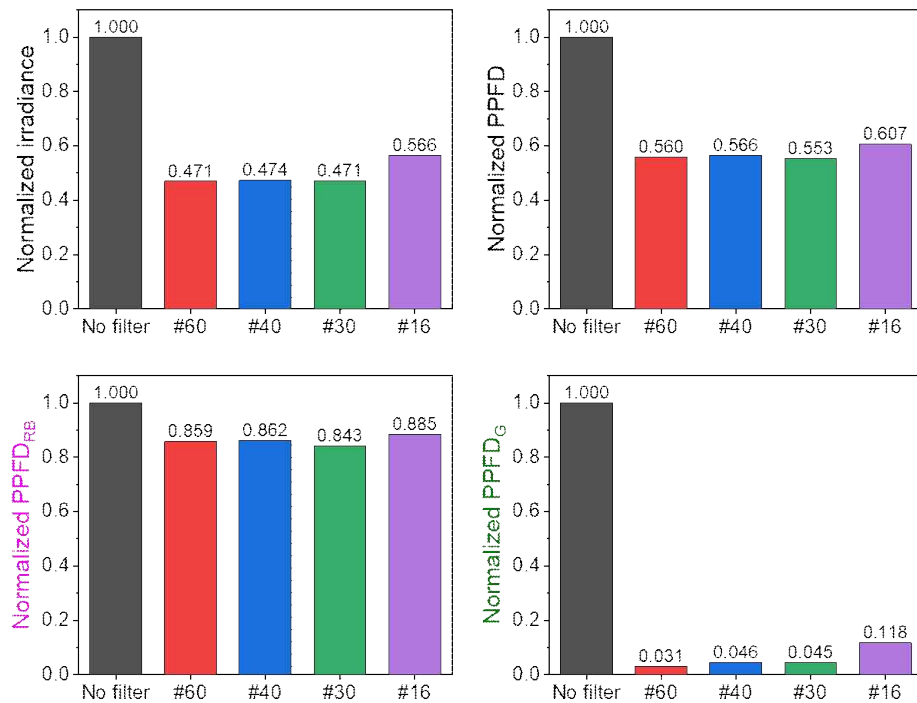


그림 241. 적층수에 따른 이색성 광필터의 효율 그래프

## (2) 기상증착 장비에 따른 이색성 광필터 특성 평가

- 앞서 제작한 16층의 이색성 광필터는 전자빔 증착기 (e-beam evaporator)로 제작되었음. 이에 동일한 사양의 이색성 광필터를 sputter를 통해 제작하여 평가함으로써 증착 장비에 따른 성능 차이가 있는지 확인해보고자 함. Sputtering 방식으로 제작된 이색성 광필터는 총 1.412  $\mu\text{m}$ 의 두께를 가졌으며, 이는 전자빔 증착기로 제작된 것과 비교하여 각각의 산화물에 약간의 두께 오차만이 존재한다고 할 수 있음. 설계상의 적층 총 두께는 1.414  $\mu\text{m}$ 로써 전체 두께는 sputter로 제작된 광필터가 설계에 조금 더 가까웠으며, 각 층별 평균 두께 오차 또한 6.68 nm 었음. 반복적인 평가가 필요하겠지만 전자빔 증착기를 활용하기 보다는 sputter를 활용하는 것이 완성도 높은 이색성 광필터를 제작할 수 있을 것으로 기대됨.

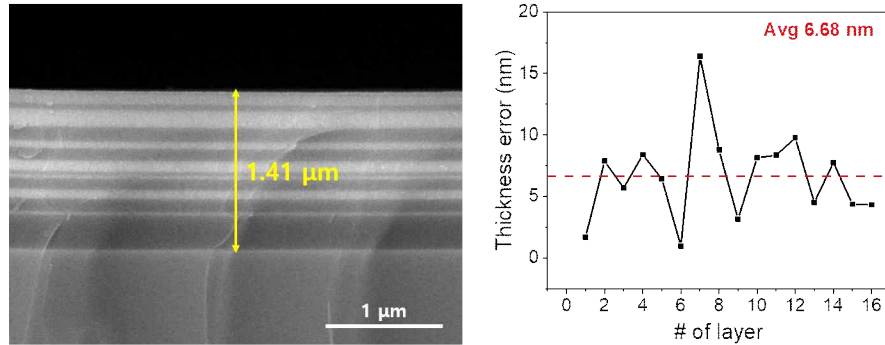


그림 242. Sputter로 제작된 16층 이색성 광필터의 FE-SEM 이미지 및 설계-실제 두께 오차

#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)
		설계	실제				설계	실제				설계	실제	
1	SiO <sub>2</sub>	10.83	9.10	1.73	7	SiO <sub>2</sub>	95.78	112.17	16.39	13	SiO <sub>2</sub>	114.92	119.45	4.53
2	TiO <sub>2</sub>	94.37	102.26	7.89	8	TiO <sub>2</sub>	100.28	91.50	8.78	14	TiO <sub>2</sub>	30.89	23.13	7.76
3	SiO <sub>2</sub>	47.27	52.97	5.70	9	SiO <sub>2</sub>	31.38	34.56	3.18	15	SiO <sub>2</sub>	311.01	306.62	4.39
4	TiO <sub>2</sub>	156.80	148.40	8.40	10	TiO <sub>2</sub>	30.97	22.81	8.16	16	TiO <sub>2</sub>	25.55	21.21	4.34
5	SiO <sub>2</sub>	123.34	129.79	6.45	11	SiO <sub>2</sub>	95.83	104.19	8.36					
6	TiO <sub>2</sub>	62.85	61.86	0.99	12	TiO <sub>2</sub>	81.76	71.99	9.77		Glass		0.5 T	

표 67. Sputtering 방식으로 제작된 16층의 이색광 광필터의 두께 정보

- 두 증착장비를 활용해 제작된 이색성 광필터는 육안상으로 큰 차이가 없었음. UV-Vis spectroscopy를 사용하여 투과도를 분석한 결과, 청색 투과밴드는 유사한 형태가 확인되었음. 그러나 적색 투과밴드의 경우 전자빔 증착기로 제작된 이색성 광필터가 상대적으로 더 넓어졌으며, sputter로 제작된 광필터는 설계와 비교하여 다소 red-shift 되었지만 전반적으로 계산된 투과율과 잘 맞는 것을 확인함. 다른 광필터와 마찬가지로 분석은 본교 공동기기원에서 진행하였으며 증빙 서류를 첨부하였음.

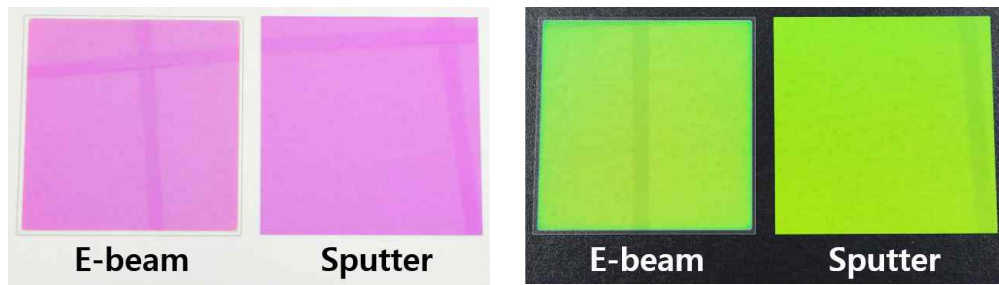


그림 243. 전자빔 증착기와 sputter로부터 제작된 16층 이색성 광필터. (좌) 투과이미지, (우) 반사이미지.



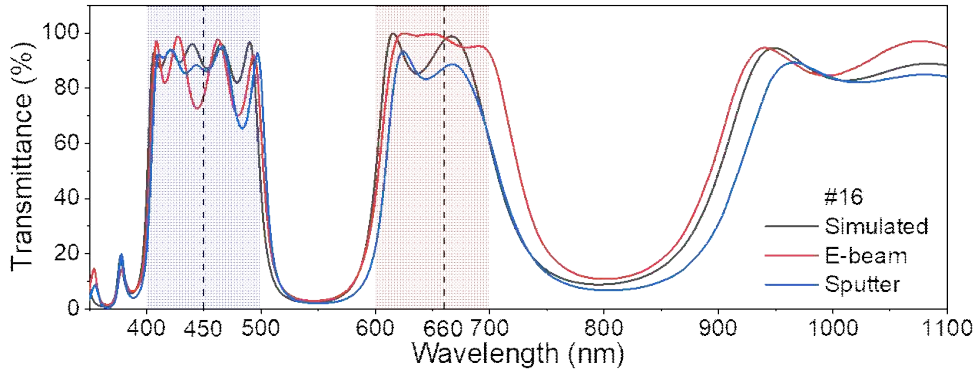


그림 244. 전자빔 증착기와 sputter로부터 제작된 16층 이색성 광필터의 투과 스펙트럼

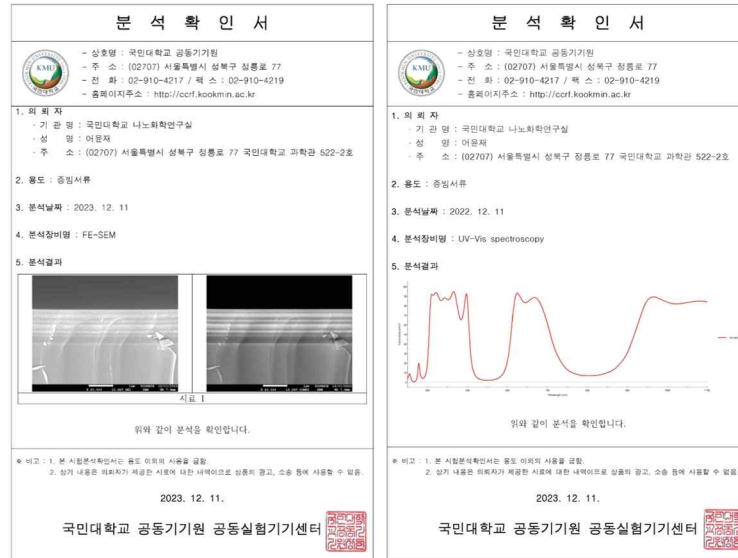


그림 245. Sputtering 방식으로 제작된 이색성 광필터의 분석 증빙자료

- 두 광필터간 차이는 설계와 실제 증착된 산화물의 두께 차이에 의해서도 발생하겠지만, 근본적으로 다른 장비를 사용하여 산화물을 적층하므로 동일한 물질이라도 굴절률과 흡광계수가 다를 수 있음. 따라서 장비에 투입가능한 기관 크기와 제작비용 등을 고려하여 제작에 더 유리한 장비를 선택할 수 있음을 확인하였으며, 장비별로 산화물의 물리적 특성을 먼저 평가한 이후, 이를 토대로 설계 피드백을 진행하여 설계-실제 두께 오차를 줄이면 더욱 완성도 높은 이색성 광필터를 제작할 수 있을 것으로 판단됨.

### (3) 대량생산을 위한 10층 이하의 이색성 광필터 설계

- 16층만을 갖는 이색성 광필터도 충분히 활용이 가능할 것이라 판단됨에 따라, 10층만을 갖는 이색성 광필터의 설계를 추가로 진행하였음. 시뮬레이션은 두 가지 버전으로 진행되었으며, 동일한 층수를 갖더라도 설계된 산화물의 총 두께에는 차이가 있음.

1) 총 0.94  $\mu\text{m}$ 를 갖는 광필터의 경우 청색 투과 밴드에 크게 3개의 피크를 갖도록 계산되었지만 약 450 nm에서 가장 큰 투과율을 가질 것으로 보임. 다만 밴드 내에서 투과율이 약 60% 수준까지 낮아지는 구간도 있어 실제 식물 광합성에 어떠한 영향을 미칠지에 대해서는 확인 필요할 것으로 보임. 반면 적색 투과밴드는 660 nm에서 피크를 가지도록 잘 설계되었음.

2) 총 1.20  $\mu\text{m}$ 의 두께를 갖는 광필터의 경우 청색 투과밴드에서 2개의 피크를 갖도록 설계되



었지만, 약 450 nm에서 약 75%의 투과율을 가질 것으로 기대됨. 적색 투과밴드의 경우 메인 피크가 다소 blue-shift 되어 있는 형태이며, 675 nm 부근에 작은 피크가 보이는 구조임.

- 두 가지 설계 모두 녹색 반사밴드는 유사한 형태와 값을 가질 것으로 기대되며, 700-1000 nm 구간에서도 최고의 성능을 보인 Type 4 광필터와 비교하여 상대적으로 높은 투과율 (낮은 반사율)을 보임. 또한 밴드가 전체적으로 broad 하며, 이는 앞서 언급한 바와 같이 적층수가 감소함에 따라 빛의 간섭효과가 감소하기 때문임. 1000 nm의 반사율은 약 53~56% 수준을 가질 것으로 기대되며, 이 또한 이색성 광필터가 실제 제작이 되었을 때 광합성에 미치는 영향을 확인할 필요가 있음. 물론 이색성 광필터의 성능과 제작 비용 및 시간의 적절한 타협점을 찾는 것이 선행되어야 하겠지만 10층 이하의 이색성 광필터는 충분히 경쟁력이 있을 것으로 판단됨.

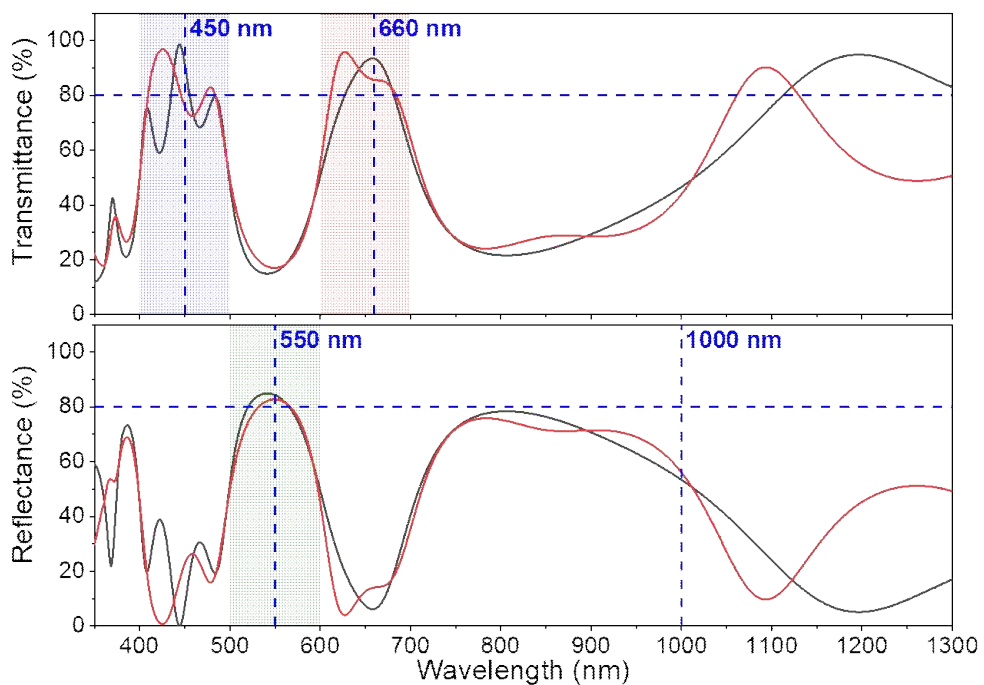


그림 246. 두 가지 버전의 10층 이색성 광필터의 계산된 투과/반사 스펙트럼

	반치폭 (FWHM)		투과율 (%T)		평균 투과율		반사율 (%R)	
	청색밴드	적색밴드	450 nm	660 nm	청색밴드	적색밴드	550 nm	1000 nm
Ver 1	99 nm	109 nm	91.5%	93.4%	73.2%	79.0%	84.3%	53.4%
Ver 2	100 nm	116 nm	76.0%	85.7%	79.1%	83.2%	82.8%	56.1%

표 68. 두 가지 버전의 10층 이색광 광필터의 계산된 광학적 특성

#	재료	두께 (nm)	
		Ver. 1	Ver. 2
	Air		
1	SiO <sub>2</sub>	55.08	77.54
2	TiO <sub>2</sub>	112.13	189.63
3	SiO <sub>2</sub>	141.99	81.35
4	TiO <sub>2</sub>	66.11	95.74
5	SiO <sub>2</sub>	129.85	202.69

6	TiO <sub>2</sub>	146.53	80.03
7	SiO <sub>2</sub>	81.63	108.79
8	TiO <sub>2</sub>	87.53	59.90
9	SiO <sub>2</sub>	78.18	231.81
10	TiO <sub>2</sub>	42.44	78.15
Glass			
총두께		941.47	1205.64

표 69. 두 가지 버전의 10층 이색광 광필터의 각 층별 설계 데이터

#### (4) Insulator-metal-insulator (IMI) 구조의 이색성 광필터

- 앞서 설계하고 제작된 이색성 광필터는 굴절률이 서로 다른 물질 2종을 사용한 산화물 기반의 광필터임. 이러한 이색성 광필터는 두 물질이 가지는 굴절률의 차이가 클수록 더욱 정교한 투과밴드를 가지도록 설계가 가능하므로 본 연구에서는 TiO<sub>2</sub>와 SiO<sub>2</sub>를 선정하여 설계와 제작을 진행하였음.
- 최근에는 insulator-metal-insulator (IMI) 또는 metal-insulator-metal (MIM)의 3층 구조를 갖는 이색성 광필터에 대한 연구도 활발히 진행되고 있음. 이러한 3층 구조는 앞서 제작한 최소 16층의 이색성 광필터와 비교하여 매우 적은 층수로도 목적에 따라 이색성을 구현할 수 있다는 장점이 있음. 따라서 본 연구에서도 이러한 IMI 구조의 이색성 광필터에 대해 스마트팜을 위한 청/적색광을 선택적으로 투과가 가능한 이색성 광필터 적용 가능성을 확인하기 위한 추가 연구를 진행하였음.
- IMI 이색성 광필터 설계를 위해 insulator로써는 앞서 사용했던 TiO<sub>2</sub>와 SiO<sub>2</sub> 2가지를 사용했으며 metal 선정은 여러 metal 물질 중에서 상대적으로 낮은 굴절률과 흡광계수를 갖는 Ag를 사용하였음. 아래 그림은 IMI 구조의 이색성 광필터 설계에 사용된 물질의 굴절률과 흡광계수 데이터임. TiO<sub>2</sub>와 SiO<sub>2</sub>는 약 2.3과 1.5의 굴절률을 가지는 반면, Ag는 거의 0에 가까운 굴절률을 가졌으며, 흡광계수의 경우 TiO<sub>2</sub>는 SiO<sub>2</sub>는 거의 0에 가까우나, Ag는 매우 높은 값을 가짐. 특히 흡광계수가 높을수록 해당 파장의 빛을 흡수하게 되므로, IMI 구조의 이색성 광필터는 투과, 반사와 더불어 흡수되는 빛의 비율도 추가적으로 확인할 필요가 있음.

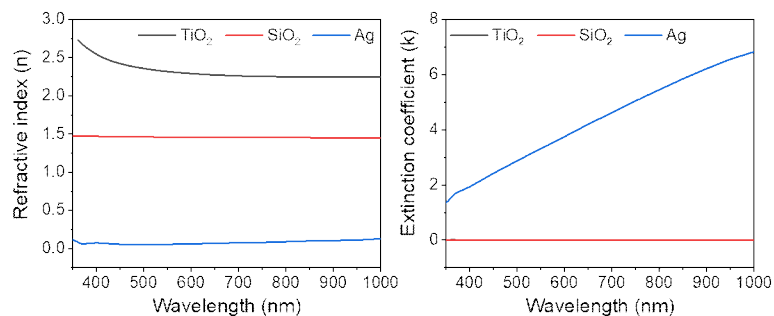


그림 247. IMI 구조 이색성 광필터 설계에 사용된 물질의 광학적 특성

- IMI 구조 이색성 광필터의 설계는 1층과 3층에 동일한 물질과 두께를 갖도록 설정하였음. 이색성 광필터의 층수 자체가 적기 때문에 약간의 두께 변화만으로도 투과밴드의 위치나 투과율, 반치폭이 쉽게 변하게 됨. 일반적으로 insulator의 두께가 증가할수록 투과밴드가 red-shift 하며, metal의 두께가 증가할수록 이색성 광필터의 전체적인 투과율이 감소하게 되는 특징을 확인하였음. 최종적으로 TiO<sub>2</sub> 기반 IMI 광필터는 208 nm/20 nm/208 nm의 두께를, SiO<sub>2</sub> 기반 IMI 광필터는 350 nm/18 nm/350 nm의 두께를 갖도록 설계하였음. IMI 이색성 광필터의 투과

밴드는 사각형의 잘 형성된 밴드라기보다는 가우시안의 형태를 보였으며, FWHM는 청색 투과 밴드보다 적색 투과밴드가 훨씬 큰 값을 가져 매우 넓게 형성되었음. 또한 450 nm 부근에 잘 형성된 투과밴드의 피크 파장과는 달리 적색 투과밴드는 700 nm 부근에 형성되었는데, 이는 물질의 광학적 특성과 직접적인 관련이 있음. 전체적으로 SiO<sub>2</sub> 기반 IMI 광필터가 TiO<sub>2</sub> 기반 IMI 광필터보다 투과/반사 밴드가 뚜렷하지 않고 고저차 (peak-to-valley; P-V)가 작은데 이는 SiO<sub>2</sub>의 굴절률이 TiO<sub>2</sub>의 굴절률보다 작기 때문으로 판단됨. 따라서 IMI의 3층 이색성 광필터를 구현할 때에도 두 insulator와 metal간의 굴절률 차이가 클수록 더욱 고성능의 광필터를 구현할 수 있을 것으로 보임.

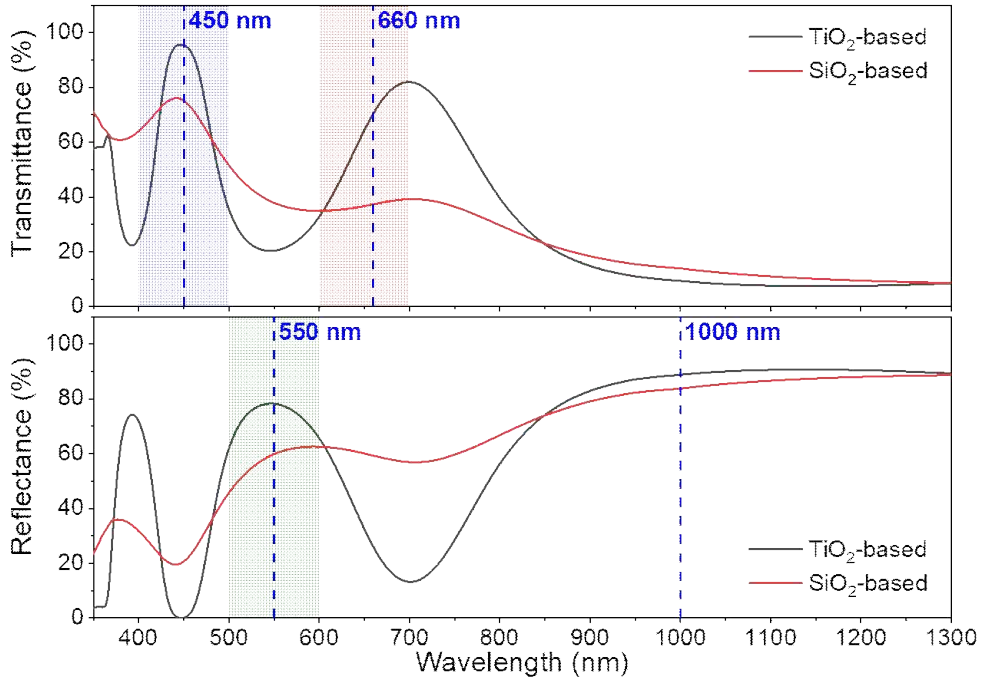


그림 248. TiO<sub>2</sub> 및 SiO<sub>2</sub> 기반 IMI 광필터의 계산된 투과/반사 스펙트럼

- 앞서 언급한 바와 같이 Ag가 포함됨에 따라 흡광 스펙트럼도 동시에 계산되었으며, 가시광 영역에서 약 5%의 빛이 흡광되는 것으로 나타남. Ag에 의해 흡수된 빛은 phonon 또는 열의 형태로 바뀌게 되므로 실제 IMI 광필터 제작시 장기간 안정성에 대한 부분에 대한 평가도 이루어져야 할 것으로 판단됨.

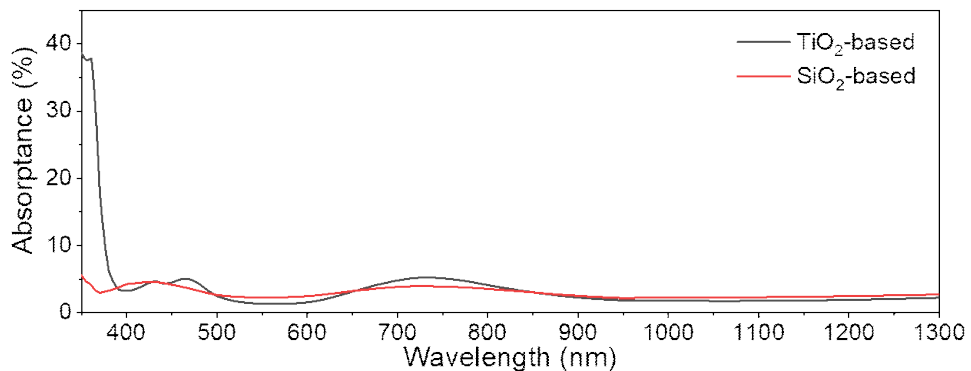


그림 249. TiO<sub>2</sub> 및 SiO<sub>2</sub> 기반 IMI 광필터의 계산된 흡광 스펙트럼

- 설계된 자료를 토대로 실제 IMI 광필터 2종을 제작하였음. 산화물 적층형 이색성 광필터와 동일한 방식인 기상증착법으로 제작을 진행하였지만, 금속 물질이 포함됨에 따라 다른 전자빔

증착 장비가 사용되었음. 또한 금속 물질의 경우 설계 두께가 얇기 때문에 고온에 장시간 노출되면 박막의 형태가 변형될 가능성이 높으므로 저온에서 증착할 필요가 있음. 결과적으로 일반적인 이색성 광필터 제작과는 다른 장비와 다른 조건에서 IMI 광필터가 제작되므로 실제 증착되는 물질의 굴절률 및 흡광계수가 설계에 사용된 값과 큰 차이가 있을 수 있으며, 이를 위해서는 반복적인 피드백이 필요할 것으로 판단됨.

- 실제 제작이 완료된 2종의 IMI 광필터의 실제 투과 스펙트럼을 보면,  $\text{TiO}_2$  기반의 IMI 광필터는 450 nm와 660 nm에서의 설계 투과도가 각각 95.4%와 70.5%이나, 실제 투과도는 각각 73.6%와 68.8%로 상당한 차이가 있었음. 또한  $\text{SiO}_2$  기반의 IMI 광필터의 경우 설계 투과도가 각각 75.1%, 37.3%이나, 실제 투과도는 각각 45.8%, 26.8%에 불과했음. 또한 투과 밴드의 위치도 많이 벗어나 있는데, 이는 실제 증착된 물질의 두께가 설계와 많이 다르기 때문으로 보임. 의도한 바는 아니지만,  $\text{TiO}_2$  기반 IMI 광필터의 투과밴드는 blue-shift 되어 특히 적색 투과밴드의 적합성이 훨씬 좋아진 것으로 보임. 그럼에도 불구하고 스펙트럼의 P-V가 계산된 스펙트럼 상의 P-V 보다 작는데, 이는 실제 증착된 물질의 굴절률, 특히 insulator의 굴절률이 계산에 사용된 값보다 더 작기 때문으로 추정됨. 따라서 투과가 되어야 할 청/적색광은 설계보다 덜 투과되고, 반사되어야 할 녹색광은 덜 반사되어 이색성 광필터의 특성이 전반적으로 약화되었다고 할 수 있음. 특히,  $\text{SiO}_2$  기반 IMI 광필터의 경우 투과 스펙트럼의 P-V가 특정 파장의 빛을 선택적으로 투과시킨다고 하기 어려울 정도로 작은 차이만을 보이고 있음. 이는 실제 필터의 투과 및 반사 이미지에도 확인될 만큼 나쁜 특성을 가지는 것을 확인되는데,  $\text{TiO}_2$  기반 IMI 광필터는 기존의 광필터와 유사하게 보라색의 투과 색상과 녹색의 반사 색상이 확인되는 반면  $\text{SiO}_2$  기반 IMI 광필터의 경우 청색 계통의 투과 색상과 보라색의 반사 색상을 보여 전혀 다른 색상이 확인됨.

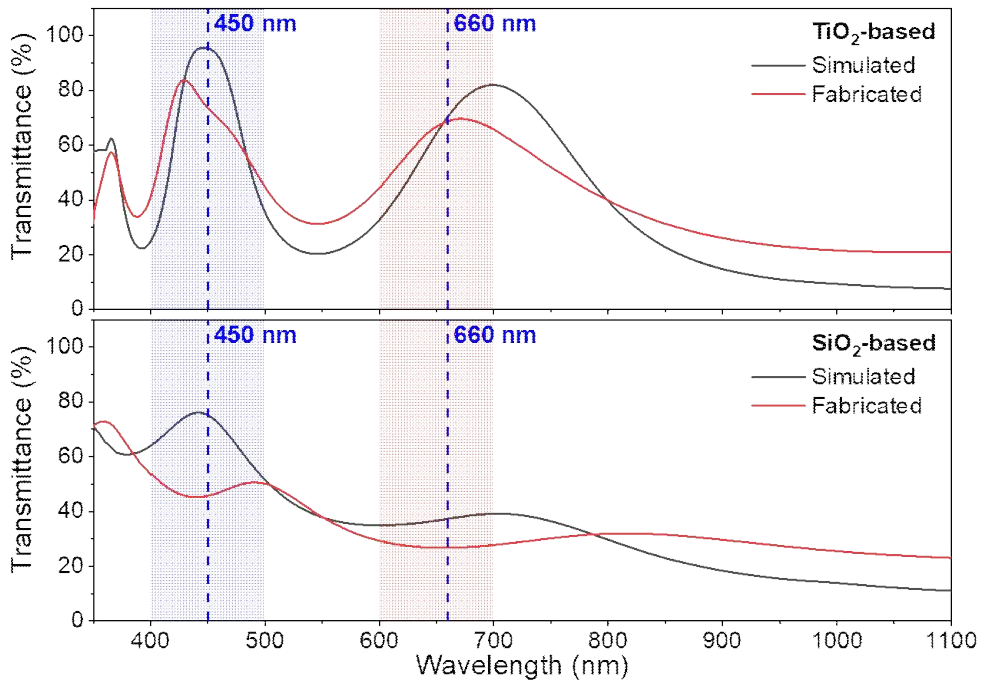


그림 250.  $\text{TiO}_2$  및  $\text{SiO}_2$  기반 IMI 광필터의 실제 투과 스펙트럼

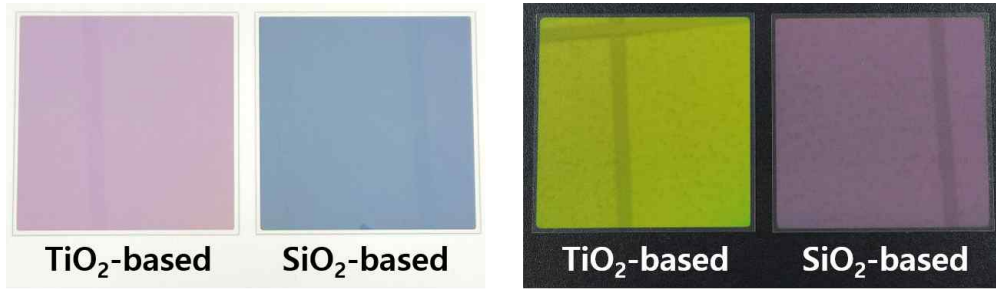


그림 251. IMI 이색성 광필터의 투과 이미지 (좌) 및 반사 이미지 (우).

- 실제 제작된 IMI 이색성 광필터의 각 층별 두께를 확인하기 위해 FE-SEM 분석을 진행하였음. 앞서 언급한 바와 같이 insulator 사이에 metal 층이 얇게 존재하여 metal 층이 영향을 받아 증착된 두께가 다소 균일하지 못한 것으로 보임. 무엇보다 두 IMI 광필터 모두 설계-실제 두께 오차가 크게 존재했는데, TiO<sub>2</sub>의 경우 22.01 nm, 18.70 nm, SiO<sub>2</sub>의 경우 46.48 nm, 36.84 nm로 insulator 층의 두께 오차가 큰 폭으로 존재했음. 이는 물질 자체의 굴절률이 다른 부분보다도 증착 조건에 대한 피드백이 먼저 이루어져야 할 것으로 판단됨. 3층의 이색성 광필터는 제작하기에 매우 용이하다는 장점이 있으나, 단지 3층의 존재로 빛의 간섭을 선택적으로 제어해야 하는 광필터의 특성상 몇 가지 파라미터가 조금만 변경되어도 그 결과가 매우 달라질 수 있어 고성능, 고품질의 IMI 광필터 제작을 위해서는 많은 변수 실험을 필요할 것으로 판단됨.

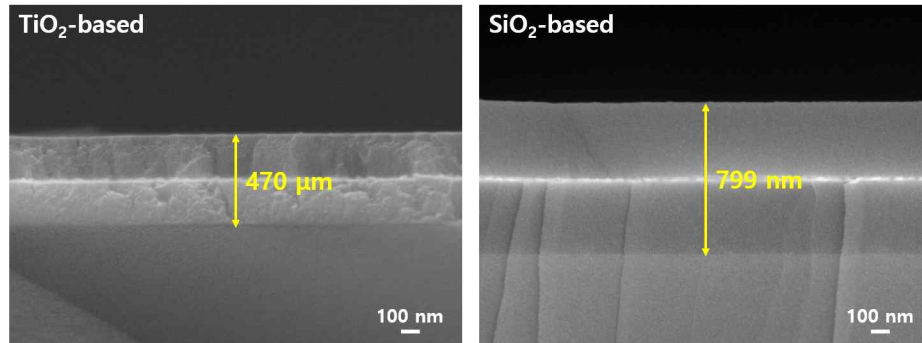


그림 252. IMI 이색성 광필터의 FE-SEM 분석 이미지

#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)	#	재료	두께 (nm)		오차 (nm)
		설계	실제				설계	실제	
	Air					Air			
1	TiO <sub>2</sub>	208.00	230.01	22.01	1	SiO <sub>2</sub>	350.00	396.48	46.48
2	Ag	20.00	13.34	6.66	2	Ag	18.00	15.75	2.25
3	TiO <sub>2</sub>	208.00	226.70	18.70	3	SiO <sub>2</sub>	350.00	386.84	36.84
	Glass					Glass			

표 70. IMI 이색성 광필터의 설계 및 실제 층별 데이터



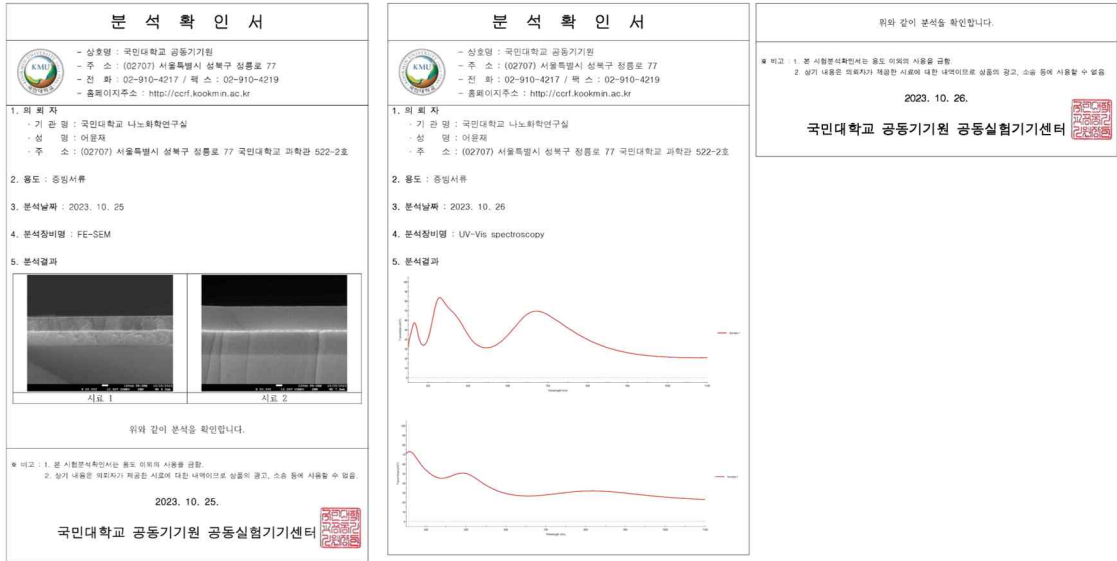


그림 253. 자체 평가에 따른 IMI 이색성 광필터 분석 증빙자료

### (5) 이색성 광필터의 균질성 확인

- 이색성 광필터를 구성하는 재료의 균질성에 따라 굴절률과 흡광계수가 달라질 수 있을 것으로 판단되어 제작된 이색성 광필터에 대한 표면 거칠기 분석을 원자힘현미경 (AFM)을 사용하여 평가하였음. AFM은 미세한 팁과 시료 표면에 작용하는 반데르발스 힘으로부터 시료의 표면의 정보를 얻을 수 있으며, 이로부터 표면 거칠기를 직접 확인이 가능함. 표면 거칠기 분석은 유리관상에 제작된 60층의 Type 4 이색성 광필터, 전자빔 증착기와 sputtering으로 제작된 16층의 이색성 광필터 2종, IMI 구조의 이색성 광필터 2종, 총 5종에 대해 tapping mode 방식을 사용하여  $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$  면적에 대해 분석을 진행하였음.
- 표면 거칠기는 계산 방법에 따라 두 가지로 얻어지며, 산술평균으로부터 얻어지는 Ra와 제곱평균제곱근 (root-mean-square)로부터 얻어지는 Rq가 있음. 두 값은 거의 비슷한 수준이나, 일반적으로 Rq가 Ra보다 다소 큰 값을 가진다고 알려져 있음. 5종의 이색성 광필터에 대해 60층의 이색성 광필터를 제외하고는 대부분 분석 영역에 대해 별도의 패턴이 보이지 않으면서 거의 균일한 것을 확인할 수 있음. 60층의 이색성 광필터의 경우, 분석 영역 중심에 143.8 nm의 매우 큰 피크가 확인되는데, 적층된 산화물이 별도의 패턴을 갖지 않으므로 단순 오염에 의한 것으로 추정됨. 또한 FE-SEM 분석에서도 균일하고 평탄한 분석 이미지가 확인되었으므로 이를 뒷받침한다고 할 수 있음. 정량적인 표면 거칠기는 Ra의 경우 1.186-2.683 nm의 범위를 가지며, Rq의 경우 1.554-8.167 nm로 앞서 언급한 바와 같이 Rq가 Ra보다 더 큰 값을 가지는 것으로 나타남. 특히, IMI 이색성 광필터의 경우 FE-SEM 분석 결과상 중간의 금속층이 다소 불균일해 보였으나, AFM 분석 결과는 매우 균일한 것으로 나타났으며 이는 금속층이 실제로 균일하게 증착되었거나, 금속층 이후 증착된 두꺼운  $\text{TiO}_2$  또는  $\text{SiO}_2$  층이 불균일한 금속층을 덮음으로써 최상단의 표면이 균일하게 나타났을 수도 있음. 이를 확인하기 위해서는 금속층만을 증착한 이후 AFM 분석이 필요할 것으로 판단됨. 그럼에도 불구하고 이색성 광필터 제작에 사용된 산화물 층의 최소 두께가 약 5 nm임을 감안하면 이색성 광필터를 제작하는 데 있어 그 균질성은 뛰어나다고 할 수 있음.



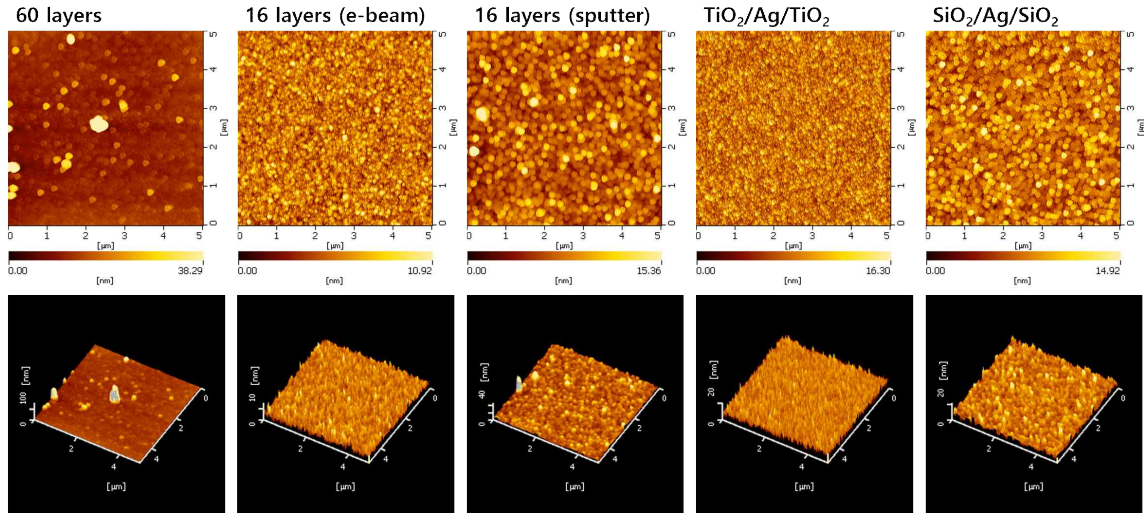


그림 254. 원자힘현미경을 통해 분석된 이색성 광필터의 표면 이미지

	60 layers	16 layers (e-beam)	16 layers (sputter)	TiO <sub>2</sub> /Ag/TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> /Ag/SiO <sub>2</sub>
Ra (nm)	2.683	1.186	1.690	1.879	1.702
Rq (nm)	8.167	1.554	2.527	2.380	2.226

표 71. 원자힘현미경을 통해 분석된 이색성 광필터별 표면 거칠기

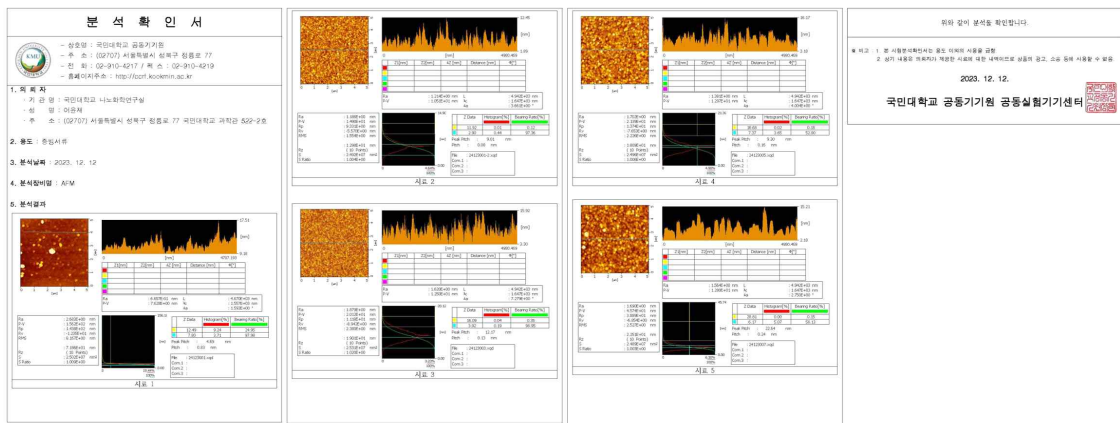


그림 255. 원자힘현미경 분석 증빙자료

### ■ 빅데이터 연계 및 활용 결과보고

- 제조된 이색성 광필터와 태양전지의 효율적인 3차원 배치를 통한 스마트 온실용 태양전지를 온실에 적용하였으며, 이와 관련된 모든 데이터는 ‘스마트팜 빅데이터 R&D 플랫폼’에 업로드하였으며, 빅데이터 연계/활용 결과 보고 완료함
- 토마토 및 인삼 실증 재배 데이터 세트, 데이터 논리 모델, 데이터 연계 및 서비스활용 사례를 모두 업로드 완료하였으며, 내용은 다음과 같음



그림 256. 데이터 세트 '스마트팜 빅데이터 R&D 플랫폼' 업로드 및 빅데이터 연계/활용 결과 보고

## (2) 정량적 연구개발성과

< 정량적 연구개발성과표 >

(단위 : 건, 천원)

성과지표명		연도	1단계 (2021~2022)	2단계 (2023)	계	가중치 (%)
전담기관 등록·기탁 지표 <sup>1)</sup>	특허출원	목표(단계별)	8	4	12	10
		실적(누적)	9.8	2.4	12.2	
	특허등록	목표(단계별)	-	1	1	10
		실적(누적)	-	3	3	
논문	목표(단계별)	6	4	10	-	
		실적(누적)	9	6		15
	논문평균 IF	목표(단계별)	7	7	7	10
		실적(누적)	8.9	11.8	20.7	
연구개발과제 특성 반영 지표 <sup>2)</sup>	학술발표	목표(단계별)	3	2	5	10
		실적(누적)	6	2	8	
	기술실시	목표(단계별)	-	3	3	10
		실적(누적)	1	2	2	
	기술료 (백만원)	목표(단계별)	-	500	500	10
		실적(누적)	300	305	305	
	인력양성	목표(단계별)	13	7	20	10
		실적(누적)	8	8	16	
	정책활용	목표(단계별)	1	1	2	10
		실적(누적)	-	1	1	
홍보(전시)	목표(단계별)	2	1	3	10	
	실적(누적)	3	1	4		
기타	목표(단계별)	-	1	1	10	
	실적(누적)	-	1	1		
계					85.77	

\* 1) 전담기관 등록·기탁 지표: 논문[에스시아이 Expanded(SCIE), 비SCIE, 평균Impact Factor(IF)], 특허, 보고서원문, 연구시설·장비, 기술요약정보, 저작권(소프트웨어, 서적 등), 생명자원(생명정보, 생물자원), 표준화(국내, 국제), 화합물, 신물질 등을 말하며, 논문, 학술발표, 특허의 경우 목표 대비 실적은 기재하지 않아도 됩니다.

\* 2) 연구개발과제 특성 반영 지표: 기술실시(이전), 기술료, 사업화(투자실적, 제품화, 수출액, 고용창출, 고용효과, 투자유치), 비용 절감, 기술(제품)인증, 시제품 제작 및 인증, 신기술지정, 무역수지개선, 경제적 파급효과, 산업지원(기술지도), 교육지도, 인력양성(전문 연구인력, 산업연구인력, 졸업자수, 취업, 연수프로그램 등), 법령 반영, 정책활용, 실제 기준 반영, 타 연구개발사업에의 활용, 기술무역, 홍보(전시), 국제화 협력, 포상 및 수상, 기타 연구개발 활용 중 선택하여 기재합니다  
(연구개발과제 특성별로 고유한 성과지표를 추가할 수 있습니다).

< 연구개발성과 성능지표 >

평가 항목 (주요성능 <sup>1)</sup> )	단위	전체 항목에서 차지하는 비중 <sup>2)</sup> (%)	세계 최고		연구개발 전 국내 성능수준	연구개발 목표치		목표설정 근거
			보유국/보유기관	성능수준	성능수준	1단계 (2021-2022)	2단계 (2023-2023)	

1	광투과 태양전지 적용 대상 작물 선정 (2종)	종	6	N/A		N/A	2종		작물별 시설원에 적용 가능성 및 작물별 광합성 생리 및 광적응성 고려
2	태양광 모듈 면적	cm <sup>2</sup>	5	N/A		N/A	30×30	100×100	*K1 <sup>3)</sup>
3	CIS 박막 내 탄소불순물 잔류량	at%	6	N/A		N/A	<4	<2	기 개발된 용액공정 태양전지의 EDX 원소 분석 결과 5 at% carbon 검출
4	태양전지 단락전류	mA/cm <sup>2</sup>	6	중국/Nanjing University of Posts & TelecommunicationsN	38.5		>35	>40	문헌상 보고된 용액법 CIS 박막 태양전지 최고효율 기준 전류 밀도 <sup>4)</sup>
5	태양전지 개방전압	V	6	중국/Nanjing University of Posts & TelecommunicationsN	0.52		>0.55	>0.55	문헌상 보고된 용액법 CIS 박막 태양전지 최고효율 기준 개방 전압 <sup>4)</sup>
6	태양광 모듈 최대 광투과 가능량 (과장 선택 필름 부착전)	%	5	미국/미시건 대학 <sup>5)</sup>		과학기술 연합대학원 <sup>6)</sup>	75	85	*K2 <sup>7)</sup>
7	시물레이션 투과밴드 반치폭 (FWHM)	nm	5	N/A		N/A	≥40	≥40	논문 보고를 바탕으로 산정
8	시물레이션 투과도 @ 450, 660 nm	%	6		88-98	N/A	≥90	≥90	논문 보고를 바탕으로 산정
9	시물레이션 반사도 @ 550, 1000 nm	%	5		90-96	N/A	≥90	≥90	논문 보고를 바탕으로 산정
10	광필터 적용 미니 스마트팜 제작 및 작물 2종에 대한 광합성 및 생산성 검증 데이터 확보	set	6	N/A		N/A	미니스마트팜 1set / 작물별 재배 데이터 1set (총2set)		광필터 적용에 따른 작물 생육특성 변화 분석을 위한 시험설비 필요 / 시험데이터 확보 및 공유
11	투과도 @ 450, 660 nm 측정	%	6		70-90	N/A	≥80	≥80	논문 보고를 바탕으로 산정
12	유연 고분자 기관의 접착각	°	5		56-105	N/A	≤70	≤70	논문 보고를 바탕으로 산정

13	유연기관 광필터의 측정 투과도 @ 450, 660 nm	%	5		65~75	N/A	≥70	≥70	논문 보고를 바탕으로 산정
14	산화물 나노입자의 증착 cycle당 두께	nm	6		5~50	N/A	≤10	≤10	논문 보고를 바탕으로 산정
15	박막의 총 두께	nm	6		220	N/A	≥400	≥600	논문 보고를 바탕으로 산정
16	용액공정 기반 광필터의 측정 투과도 @ 450, 660 nm	%	6		60~80	N/A	≥70	≥70	논문 보고를 바탕으로 산정
17	광투과 태양광 모듈 가격비		2	N/A		N/A	1	0.7	*K3 <sup>8)</sup>
18	1m <sup>2</sup> 선택적 광투과 태양전지 보급시 스마트팜 센서 전력 공급 가능성 확인	W	2	N/A		N/A		최소 15W, 최대 55W	1ha 기준 스마트팜 센서 전력 소모량 기준 (내외부 환경모니터링 센서 소모전력 15W, 작물생육계측 센서류 40W)
19	프로토타입 건수 (1 m <sup>2</sup> 이상 스케일)	건	2	N/A		N/A	1	2	모듈 구조 참고
20	기준 태양광 모듈 대비 광투과 태양광 모듈 출력비		2	N/A		N/A	1	1.3	*K4 <sup>9)</sup>
21	단위 태양전지 입사광 각도에 따른 성능 변화 평가	%	2	N/A		N/A	80° ≥80, 70° ≥75, 60° ≥70, 50° ≥60, 40° ≥50, 30° ≥40, 20° ≥27		입사광 각도( $\theta$ )에 따른 광밀도 감소율( $\sin \theta$ ) 대비 약 80% 수준의 광전류 값 적용

<sup>1)</sup> 정밀도, 인장강도, 내충격성, 작동전압, 응답시간 등 기술적 성능판단기준이 되는 것을 의미합니다.

<sup>2)</sup> 비중은 각 구성성능 사양의 최종목표에 대한 상대적 중요도를 말하며 합계는 100%이어야 합니다.

<sup>3)</sup> K1 근거 : 2단계 1차년도 모듈 실증을 위한 최소 단위 모듈 제작 및 평가 후 모듈 연결 저항 등 최소화 과정 필요 면적 제안

<sup>4)</sup> Jiang et al., Nano Energy, 2020 69 104438

<sup>5)</sup> Li et al, PNAS, 2020 117 21147-21154, [10.1073/pnas.2007799117]

<sup>6)</sup> Ahn et al, J. Mater. Chem. A, 2016 10542-10551, [10.1039/c6ta01909a]

<sup>7)</sup> K2 근거 : PDMS 비롯한 제안 모듈 구조체 사이 채움재 투명도 및 구조체에 따른 투명도 개선

<sup>8)</sup> K3 근거 : 1 m<sup>2</sup> 모듈을 구성하는 태양전지, 채움재, 보호유리, 모듈 프레임 및 전극의 전체 사용량에 각 도매가를 적용하여 산출하여 기존 태양전지 대비 가격 경쟁력 비율, 투광성 50% 기준 (기존 태양전지 가격 : 2배로 인상하여 비교)

<sup>9)</sup> K4 근거 : 기존 태양전지 투과성 50% 이하 고려한 P<sub>max</sub> 대비 비율 비교

### (3) 세부 정량적 연구개발성과

#### [과학적 성과]

논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/ 비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Toward Understanding Chalcopyrite Solar Cells via Advanced Characterization Techniques	Advanced Materials Interfaces	Soohyun Bae	9(14)	독일	Wiley	SCIE	2022.4.13.	2196-7350	90%
2	Hydrolysis-Regulated Chemical Bath Deposition of Tin-Oxide-Based Electron Transport Layers for Efficient Perovskite Solar Cells with a Reduced Potential Loss	Chemistry of Materials	Seungkyu Kim, Yong Ju Yun	33	USA	ACS Publications	SCIE	2021.09.07.	0897-4756 (print) 1520-5002 (web)	33%
3	First-Principles Study of Pt-Based Bifunctional Oxygen Evolution & Reduction Electrocatalyst: Interplay of Strain and Ligand Effects	Energies	Seung-hoon Kim	14	Switzerland	MDPI	SCIE	21.11.22.	1996-1073	50%
4	Efficient n-i-p Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells with Tin Oxide via a Chemical Bath Deposition Method	Energies	Jiyeon Hyun	20	스위스	MDPI	SCIE	2021.11.15.	1996-1073	30%
5	Alleviating Interfacial Recombination of Heterojunction Electron Transport Layer via Oxygen Vacancy Engineering for Efficient Perovskite Solar Cells Over 23%	Energy Environmental Materials	Yohan Ko, Taemin Kim	0	미국	Wiley	SCIE	2022.01.06.	2575-0356	33%
6	Color Balanced Transparent Luminescent Solar Concentrator Based on Polydimethylsiloxane Polymer Waveguide with Coexisting Polar and Non-Polar Fluorescent Dyes	Optics Express	Chanyong Lee	20	미국	Optica Publishing Group	SCIE	2022.09.23.	1094-4087	30%
7	Amorphous BaTiO <sub>3</sub> Electron Transport Layer for Thermal Equilibrium-Governed $\gamma$ -CsPbI <sub>3</sub> Perovskite Solar Cell with High Power Conversion Efficiency of 19.96%	Energy & Environmental Materials	Yohan Ko, Changhun Lee	Early Access	미국	Wiley	SCIE	2023.03.21.	2575-0356	50%

8	Synergetic effect of a battery-like nickel phosphide and a pseudocapacitive cobalt phosphide electrodes for enhanced energy storage	Journal of Energy Storage	Moo Young Jung, Hyobeen Cho	66	네덜란드	Elsevier	SCIE	2023.05.03.	2352-152X	33%
9	Shell isolated nanoparticle enhanced Raman spectroscopy for mechanistic investigation of electrochemical reactions	Nano Convergence	Andi Haryanto	9	독일	Springer Nature	SCIE	2022.02.14	2196-5404	25%
10	Metal-Organic framework catalysts: A versatile platform for bioinspired electrochemical conversion of carbon dioxide	Chemical Engineering Journal	Devina Thasia Wijaya	446	스위스	Elsevier	SCIE	2022.10.15	1385-8947	30%
11	Rational Design of Dimensionally Stable Anodes for Active Chlorine Generation	ACS Catalysis	Hyun Woo Lim, Jin Young Kim, Chan Woo Lee	20	미국	American Chemical Society	SCIE	2021.10.15.	2155-5435	16.7%
12	Development of photosynthetically active radiation sensor applicable to greenhouse using red/blue dual-band bandpass filter	ACS Applied Electronic Materials	Yun Jae Eo	4	미국	American Chemical Society	SCIE	2022.11.17.	2637-6113	70%
13	Layer-by-Layer Assembly of 1-D Photonic Crystal for Wavelength-Selective Optical Filter	Applied Surface Science	Andi Haryanto	611	네덜란드	Elsevier	SCIE	2023.02.15	0169-4332	30%
14	Heterostructured Mixed Metal Oxide Electrocatalyst for Hydrogen Evolution Reaction	Frontiers in Chemistry	Dwi Sakti Aldianto Pratama	11	스위스	FRONTIERS MEDIA SA	SCIE	2023.03.14	2296-2646	
15	Solid-State Electrolyte-Based Electrochemical Conversion of Carbon Dioxide: Progress and Opportunities	ChemCatChem	Annisa Luthfiah	15	독일	WILEY-VCH VERLAG GMBH	SCIE	2023.11.08	1867-3880 / 1867-3899	10
16	Photonic Crystal Integrated Semi-Transparent Solar Cell for Solar Greenhouse Application	International Journal of Energy Research	Devina Thasia Wijaya	-	영국	WILEY-HINDAWI	SCIE	under review	0363-907X / 1099-114X	40
17	Tomato Fruit Growth and Nutrient Accumulation in Response to Blue and Red Light Treatments during the Reproductive Growth Stage	Horticulture	Su Hyeon Lee, Hyo Jun Won	-	스위스	MDPI	SCIE	2023.10.09.	2311-7524	100



18	Amorphous TiO <sub>2</sub> Passivating Contacts for Cu(In,Ga)(S,Se) <sub>2</sub> Ultrathin Solar Cells: Defect-State-Mediated Hole Conduction	Advanced Energy Materials	Gi Soon Park	13(8)	독일	Wiley-VCH	SCI	2023.01.04	1614-6832	50
----	---	---------------------------	--------------	-------	----	-----------	-----	------------	-----------	----

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	"CIGS thin film photovoltaic technology for solar-chemical production", Nano Korea 2021	민병권	2021.07.08..	경기도 고양시 킨텍스	대한민국
2	"3D Printer-based Kirigami/Origami Approach for Ultrastretchable Photovoltaics with High Areal Coverage", Nano Korea 2021	이필립	2021.07.08.	경기도 고양시 킨텍스	대한민국
3	태양전지 고유연화 및 3차원 구조 기반 제어 연구	이필립	2022.04.28.	제주 오리엔탈호텔	대한민국
4	태양전지 고유연화 및 3차원 구조 기반 제어 연구	유지원	2022.10.21.	대구 EXCO	대한민국
5	"The Energy-Level-Tuned-TiO <sub>2</sub> /SnO <sub>2</sub> Electron Transport Bilayer for high efficiency Perovskite solar cells over 22%", Nano Korea 2021	김태민	2021.07.07.	경기도 고양시 킨텍스	대한민국
6	"Dimethylammonium Halide Induced Cesium Based Perovskite for Efficient and Stable Solar Cells over 15%", GVPC 2021	이창현	2021.07.07.	광주광역시 김대중컨벤션센터	대한민국
7	"Hydrolysis-regulated Chemical Bath Deposition of Tin Oxide Electron Transport Layers for Efficient Perovskite Solar Cells with a Reduced Potential Loss", 한국태양광발전학회 2021 추계 학술대회	김승규	2021.11.18.	강원도 강릉시 세인트존스 호텔	대한민국
8	"Colour Balanced Transparent Luminescent Solar Concentrator Based on Polydimethylsiloxane Polymer Waveguide with Coexisting Polar and Non-Polar Fluorescent Dyes", 한국태양광발전학회 2022 추계 학술대회	이찬용	2022.11.24.	부산광역시 웨스틴조선부산	대한민국
9	"Amorphous Titanium Oxide Passivating Contacts for CIGS Ultrathin Solar Cells", Global Photovoltaic Conference 2023 (GPVC 2023)	박기순	2023.09.07	광주광역시 김대중컨벤션센터	대한민국

□ 기술 요약 정보

연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용여부	허용방식

□ 보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일	등록 번호

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화학물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화학물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

## [기술적 성과]

### □ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여율	활용 여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호		
1	스마트팜용 태양전지	한국	한국과학기술연구원, 국민대학교	2022.04.13	10-2022-0045561	-	-	-	-	100%	향후 활용 예정
2	수분차단막을 이용한 화합물의 형성방법, 및 이를 이용한 칼코파이라이트 화합물 박막과 태양전지의 제조방법	한국	한국과학기술연구원	2022.01.28	22-13632	-	-	-	-	100%	향후 활용 예정
3	신축 균일도가 향상된 신축성 기판 및 그 제조방법	한국	한국과학기술연구원	2021.12.31	10-2021-0193784	-	-	-	-	50%	향후 활용 예정
4	STRETCHABLE SUBSTRATE HAVING IMPROVED STRETCH UNIFORMITY AND METHOD OF MANUFACTURING THE SAME	미국	한국과학기술연구원	2022.03.24	17/703520	-	-	-	-	50%	향후 활용 예정
5	확장이 용이한 조립형 태양광 모듈 및 어셈블리의 구조 및 공정	대한민국	고려대학교 산학협력단	2021.05.04	10-2021-0057767	-	2023-11-08	2023-10-30	10-2596269	70%	향후 활용 예정
6	확장이 용이한 조립형 태양광 모듈 및 어셈블리의 구조 및 공정	PCT	고려대학교 산학협력단	2022.03.07	PCT/KR2022/003189	-	-	-	-	70%	향후 활용 예정
7	STRUCTURE AND PROCESS OF EASILY EXPANDABLE ASSEMBLED SOLAR MODULES AND ASSEMBLIES	미국	고려대학교 산학협력단	2023-07-31	18/362,611	-	-	-	-	70%	향후 활용 예정
8	고투광성 태양광 모듈	대한민국	고려대학교 산학협력단	2021.05.04	10-2021-0058073	-	고려대학교 산학협력단	2023-10-16	10-2590394	60%	향후 활용 예정
9	충격 흡수구조체를 포함하는 태양광 모듈	대한민국	고려대학교 산학협력단	2021.06.16	10-2021-0077742	-	고려대학교 산학협력단	2023-11-08	10-2599896	50%	향후 활용 예정
10	충격 흡수구조체를 포함하는 태양광 모듈	PCT	고려대학교 산학협력단	2022.06.14	10-2021-0077742	-	-	-	-	50%	향후 활용 예정
11	PHOTOVOLTAIC MODULE WITH SHOCK ABSORBING STRUCTURE	미국	고려대학교 산학협력단	2023-12-18	18/362,611	-	-	-	-	50%	향후 활용 예정
12	광 가이드 투명 태양전지를 이용한 자가 충전 투명 슈퍼캐패시터 구조	대한민국	고려대학교 산학협력단	2023.04.07	10-2023-0045960	-	-	-	-	50%	향후 활용 예정
13	전기화학 소자용 전극재	대한민국	고려대학교 산학협력단	2023.06.28	10-2023-0083122	-	-	-	-	50%	향후 활용 예정
14	니오븀 함유 티타늄-루테튬 복합 나노 입자의 제조 방법, 니오븀 함유 티타늄-루테튬 복합 나노 입자 및 이를 포함하는 염소발생 전극	대한민국	서울대학교 산학협력단, 국민대학교 산학협력단	2022.02.08	10-2022-0016054	-	-	-	-	10%	향후 활용 예정

15	니오븀 함유 티타늄-루테튬 복합 나노 입자의 제조 방법, 니오븀 함유 티타늄-루테튬 복합 나노 입자 및 이를 포함하는 염소발생 전극	PCT	서울대학교 산학협력단, 국민대학교 산학협력단	2022.02.08	PCT/KR 2022/001877	-	-	-	-	10%	향후 활용 예정
16	광학필터 제조방법, 이를 통해 제조된 광학필터 및 이를 포함하는 온실용 광투과 태양광 모듈	대한민국	국민대학교 산학협력단, 한국과학기술연구원	2022.06.17	10-2022-0074002	-	국민대학교 산학협력단, 한국과학기술연구원	2023.05.30	10-2539447	70%	향후 활용 예정
17	LED 구조물, 이를 포함하는 잉크젯 용 잉크 및 광원	대한민국	국민대학교 산학협력단	2021.10.26	10-2021-0143366	-	-	-	-	100%	향후 활용 예정
18	LED structure, ink for inkjet and light source comprising the same	미국	국민대학교 산학협력단	2022.10.26	US 18/049,705	-	-	-	-	100%	향후 활용 예정
19	LED structure, ink for inkjet and light source comprising the same	중국	국민대학교 산학협력단	2022.10.26	CN 202211319834.X	-	-	-	-	100%	향후 활용 예정
20	고체 전해질을 이용한 이산화탄소 환원 생성물의 제조방법 및 이에 사용되는 장치	대한민국	국민대학교 산학협력단	2021.07.22	10-2021-0096651	-	-	-	-	50%	향후 활용 예정
21	광학필터 제조방법 및 이를 통해 제조된 광학필터	대한민국	국민대학교 산학협력단, 한국과학기술연구원	2023.05.30	10-2023-0068965	-	-	-	-	40%	향후 활용 예정

○ 지식재산권 활용 유형

※ 활용의 경우 현재 활용 유형에 √ 표시, 미활용의 경우 향후 활용 예정 유형에 √ 표시합니다(최대 3개 중복선택 가능).

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	기타

저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율

신기술 지정

번호	명칭	출원일	고시일	보호 기간	지정 번호

기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증 기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증 번호		

표준화

○ 국내표준

번호	인증구분 <sup>1)</sup>	인증여부 <sup>2)</sup>	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류 <sup>3)</sup>	제안/인증일자

\* 1) 한국산업규격(KS) 표준, 단체규격 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.

\* 2) 제안 또는 인증 중 해당하는 사항을 기재합니다.

\* 3) 신규 또는 개정 중 해당하는 사항을 기재합니다.

○ 국제표준

번호	표준화단계구분 <sup>1)</sup>	표준명	표준기구명 <sup>2)</sup>	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식 <sup>3)</sup>	제안자	표준화 번호	제안일자

\* 1) 국제표준 단계 중 신규 작업항목 제안(NP), 국제표준초안(WD), 위원회안(CD), 국제표준안(DIS), 최종국제표준안(FDIS), 국제표준(IS) 중 해당하는 사항을 기재합니다.

\* 2) 국제표준화기구(ISO), 국제전기기술위원회(IEC), 공동기술위원회1(JTC1) 중 해당하는 사항을 기재합니다.

\* 3) 국제표준(IS), 기술시방서(TS), 기술보고서(TR), 공개활용규격(PAS), 기타 중 해당하는 사항을 기재합니다.

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작 업체명	설치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황
1	(국내외) 전용실시권 및 통상실시권	인쇄 CIGS 박막 태양전지 기술	(주)파루	2022.11.04.	300,000,000 (마일스톤기술료납부: 1차: 200,000,000 (투자유치금액 50억 달성시) 2차: 500,000,000 (매출발생시))	300,000,000
2	통상실시권	엑소좀 배양기용 다색광 필터	(주)인코스팜	2023.12.11.	5,000,000	5,000,000

□ 사업화 투자실적

번호	추가 연구개발 투자	설비 투자	기타 투자	합계	투자 자금 성격*

\* 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식 <sup>1)</sup>	사업화 형태 <sup>2)</sup>	지역 <sup>3)</sup>	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

\* 1) 기술이전 또는 자기실시 중 해당하는 사항을 기재합니다.

\* 2) 신제품 개발, 기존 제품 개선, 신공정 개발, 기존 공정 개선 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.

\* 3) 국내 또는 국외 중 해당하는 사항을 기재합니다.

□ 매출 실적(누적)

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(달러)		
합계					

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과



[사회적 성과]

법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	졸업	2021	1	4			3	2	5				
2	졸업	2022		3			2	1	3				
3	졸업	2023	3	5			4	4	8				

산업 기술 인력 양성

번호	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비

국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

홍보 실적



번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	기타	머니투데이 주관	2021 그린뉴딜 엑스포 (수소 엑스포가 함께하는 청정에너지의 미래)	2021.10.06.~10.08.
2	기타	Green & Agritech Asia 2022	Green & Agritech Asia 2022 스마트팜연구개발사업단 공동관 참가	2022.08.25.~ 08.27.
3	기타	2050 탄소중립녹색성장위원회	탄소중립녹색성장위원회 위촉장 수여식 및 전체회의 행사 성과전시물로 홍보활동	2022.10.26.
4	기타	Green & Agritech Asia 2023	Green & Agritech Asia 2023 스마트팜연구개발사업단 공동관 참가	2023.08.30.~ 09.01.

포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

연구시설·장비

구축기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

\* 「과학기술기초법 시행령」 제42조제4항제2호에 따른 연구시설·장비 종합정보시스템을 의미합니다.

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항

2) 목표 달성 수준

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	달성 내용	달성도 (%)
광투과 태양전지 적용 대상 작물 선정 (2종)	토마토 및 인삼	100
태양광 모듈 면적	105 X 105 cm2 크기 광투과 태양광 모듈 제작	100
CIS 박막 내 탄소불순물 잔류량	광흡수층 내 잔류 탄소량 0.59 at% 달성	100
태양전지 단락전류	목표값 40mA/cm2 대비 38.19mA/cm2 달성	96
태양전지 개방전압	개방전압 0.598 V 달성	100
태양광 모듈 최대 광투과 가능량 (과장 선택 필름 부착전)	400-1100 nm에서 평균 85.9%의 광투과도 달성	100
시뮬레이션 투과밴드 반치폭 (FWHM)	투과 밴드의 반치폭 $\geq 40$ nm 달성	100

시물레이션투과도 @ 450, 660 nm	Type 1 (93.9% @ 450 nm, 93.2% @ 660 nm)과 Type 4 (94.6% @ 450 nm, 97.8% @ 660 nm) 달성	100
시물레이션반사도 @ 550, 1000 nm	550 nm와 1000 nm의 반사율 $\geq 90\%$ 달성	100
광필터 적용 미니 스마트팜 제작 및 작물 2종에 대한 광합성 및 생산성 검증 데이터 확보	광 필터링에 따른 작물 2종 광합성 및 생육 특성 데이터 확보	100
측정 투과도 @ 450, 660 nm	450 nm와 660 nm의 투과율은 각각 97.5%, 99.5% 달성	100
유연 고분자 기관의 접촉각	유연 고분자 기관의 표면처리를 통해 $60^\circ$ 의 접촉각 달성	100
유연기관 광필터의 측정 투과도 @ 450, 660 nm	450 nm와 660 nm의 투과율 각각 81.4%, 99.1% 달성	100
산화물 나노입자의 증착 cycle당 두께	Cycle당 10 nm 이하의 두께 증착이 달성	100
박막의 총 두께	용액 공정으로 제작된 광필터 박막 총 두께 최소 678 nm 달성	100
용액공정 기반 광필터의 측정 투과도 @ 450, 660 nm	450 nm 및 660 nm의 측정 투과도는 70% 이상 달성	100
광투과 태양광 모듈 가격비	기준 태양광모듈 가격 대비 광투과태양광모듈 가격 0.6:1 달성	100
1m2 선택적 광투과 태양전지 보급시 스마트팜 센서 전력 공급 가능성 확인	1ha 기준 스마트팜 센서 전력 공급 가능 확인	100
프로토타입 건수 (1 m2 이상 스케일)	1 m2 이상 스케일 프로토타입 3개의 다수 제작	100
기준 태양광 모듈 대비 광투과 태양광 모듈 출력비	기준 태양광 모듈 기준 광투과 태양광 모듈 출력비 1.9:1 달성	100
단위 태양전지 입사광 각도에 따른 성능 변화 평가	$20^\circ$ 에서 35.8%, $30^\circ$ 에서 59.1%, $40^\circ$ 에서 74.1%, $50^\circ$ 에서 84.7%, $60^\circ$ 에서 93.6%, $70^\circ$ 에서 98.1% $80^\circ$ 에서 92.3% 달성	100
합계		99.8

#### 4. 목표 미달 시 원인분석

##### 1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- 2단계 목표치 중 단락전류밀도 목표 ( $J_{sc} > 40 \text{ mA cm}^{-2}$ )를 원활하게 달성하기 위해서는 진공공정 (예:스퍼터링, 동시증발법 등) 기반 CIS 광흡수층과 유사한 품질 및 특성을 용액공정에서 구현해야 함. 현재 보완이 필요한 광흡수층의 핵심 특성에는 두께, 결정성, 조성이 있음. 본 연구팀에서 달성 및 인증한  $38.19 \text{ mA cm}^{-2}$ 값은 용액공정에서 세계적으로 찾기 어려운 가장 높은 값으로 판단함.
- 높은 단락전류밀도( $J_{sc}$ )를 확보하기 위해서는 광흡수층의 두께가 충분하여 대부분의 입사광을 흡수할 수 있어야 함. 진공공정의 경우에는 일반적으로 약 2~3  $\mu\text{m}$  두께의 광흡수층을 활용하지만,

용액공정에서는 반복적인 열처리에 기인하는 스트레스로 인해 충분한 두께를 확보하기 어려움 (일반적으로 약 1 um 두께 사용). 또한 진공공정에서는 챔버를 활용하여 불순물의 유입이 없고, 원하는 조성을 원하는 깊이에 적층할 수 있지만, 용액공정에서는 그러한 조건들을 쉽게 달성하기 어려움. 특히 불순물이 개입하여 광흡수층 결정화에 영향을 주기 때문에 진공공정보다 더 까다로운 열처리 조건이 요구됨.

## 2) 자체 보완활동

- 상기한 원인들을 해결하고 단락전류밀도 목표를 달성하기 위해서 다음과 같은 보완이 이루어지고 있음. 먼저 열처리 횟수를 최소화하기 위해 적은 코팅 횟수로도 두꺼운 박막을 적층할 수 있는 바코팅 기법을 활용하여, 진공공정과 유사한 두께의 CIS 광흡수층을 확보하고자 노력하고 있음. 기존에 주로 사용하던 스프인코팅에서 바코팅으로 전환 시 열처리 횟수를 절반 이하로 줄일 수 있기 때문에 광흡수층 두께의 상한을 2 um 이상으로 높일 수 있을 것으로 예상됨.
- 광흡수층의 결정성과 조성을 개선하기 위해서는 현재 사용중인 칼코겐화 열처리 방식의 개선이 가장 중요할 것으로 판단됨. 작은 결정립 크기와 불안정한 조성 분포는 열처리 중 공급되는 셀레늄(Se) 기체의 압력이 충분하지 않기 때문이며, 이를 해결하기 위해 그래파이트 박스를 활용한 칼코겐화 열처리 기법을 개발중에 있음. 예비 실험 결과, 그래파이트 박스 기반 열처리에서 광흡수층의 결정립이 유의미하게 커지는 것을 확인하였으며, 지속적인 연구를 통해 진공공정과 유사한 수준의 결정성과 조성 분포를 구현 예정임.
- 광흡수층의 품질 개선과 더불어 추가적으로 전류를 확보하기 위해서는 n-type 버퍼층에 대한 개선이 필수적임. 현재 버퍼층에서의 불필요한 광흡수를 줄이기 위해 고밴드갭 특성을 가지는 Zn(O,S) 버퍼층에 대한 연구를 수행하고 있으며, 단파장 영역에 대한 양자효율 개선 효과를 확인하였음. 광전류를 더욱 확보하기 위해서는 S/(S+O) 비율을 최적화하여 밴드갭을 증가시키면서도 에너지 밴드 구조상 재결합이 일어나지 않는 조건을 확보하는 것이 중요할 것으로 판단됨. 또한 제 3의 원소 도핑을 통해 전자 농도를 조절하여, 소자 내 전하 수집 능력을 더욱 개선할 수 있을 것으로 예상됨.

## 3) 연구개발 과정의 성실성

- 도전적인 목표를 달성하지는 못하였으나 연구개발 과정에서 많은 실험을 진행하였고, 다양한 세부 주제에 대한 결과물을 확보하였음. 추후 지속적인 연구를 통해 목표 달성을 위해 부단히 노력할 예정임.

## 5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

### ■ 스마트팜 시스템 관점

- 스마트팜 지속가능성 확보와 운용 효율성 증대를 위한 핵심 원천 기술 확보
- 스마트팜용 광투과 태양전지 기술 표준화 기반 마련
- 스마트팜 지속가능성 확보를 위한 원천기술 확보와 스마트팜 피복소재 시장 개척, 이를 통한 글로벌 시장 선점 기대
- 스마트팜 지속가능성 확보, 탄소중립 농업 생산 구현

## ■ 스마트팜 투광형 태양전지 관점

- 종래 태양광 패널은 광투과 특성이 없어 광포화점이 낮은 음식물의 경작에만 활용 가능하였으나, 제안하는 투광형 태양광 모듈 구조는 종래 하우스 형태로 응용 가능하므로 스마트온실 확산으로 인해 증가하는 전력 수요 대응에 효과적일 것으로 기대함
- 또한 종래 태양광 패널은 효율적인 발전을 위하여 지붕 위에 특정한 각도로 설치하여 스마트온실의 외관을 해칠 수 있다는 단점이 있지만, 스마트팜 투광형 태양광 모듈을 활용하였을 경우 모듈 내부의 태양전지 기층기를 주어 설치하는 것이 가능하여 스마트온실의 외관을 해치지 않으며 설치 가능함
- 온실 지붕에 태양광 모듈을 설치하지 않는 경우, 전력 수요를 위해 스마트온실 부지 활용이 불가피한 종래의 태양광 모듈과 달리 지붕, 외벽에 설치 가능함으로써 부지 활용에 대한 기회비용 최소화
- 제안하는 투광형 태양광 모듈 구조는 건물일체형 태양전지 (building integrated photovoltaic, BIPV)로써 스마트온실 외 다양한 건축물과 투광성을 요구하는 분야 (차량 유리 등)에도 활용이 가능할 것으로 기대함
- 아래 그림과 같이 스마트 온실내 냉난방에 소요되는 에너지는 스마트팜 전체 소요 에너지의 대부분을 차지하기 때문에, 향후 연구에서는 센서류 전력을 넘어서서 냉난방 소요 에너지를 대응하기 위한 연구에 집중할 예정임. 이는 제작되는 태양전지의 전력생산성을 높임으로써 가능한데, 스마트 온실에서의 가장 우선순위는 작물생산성을 저해하지 않으면서 달성할 수 있는 전략을 취하여 진행하고자 함

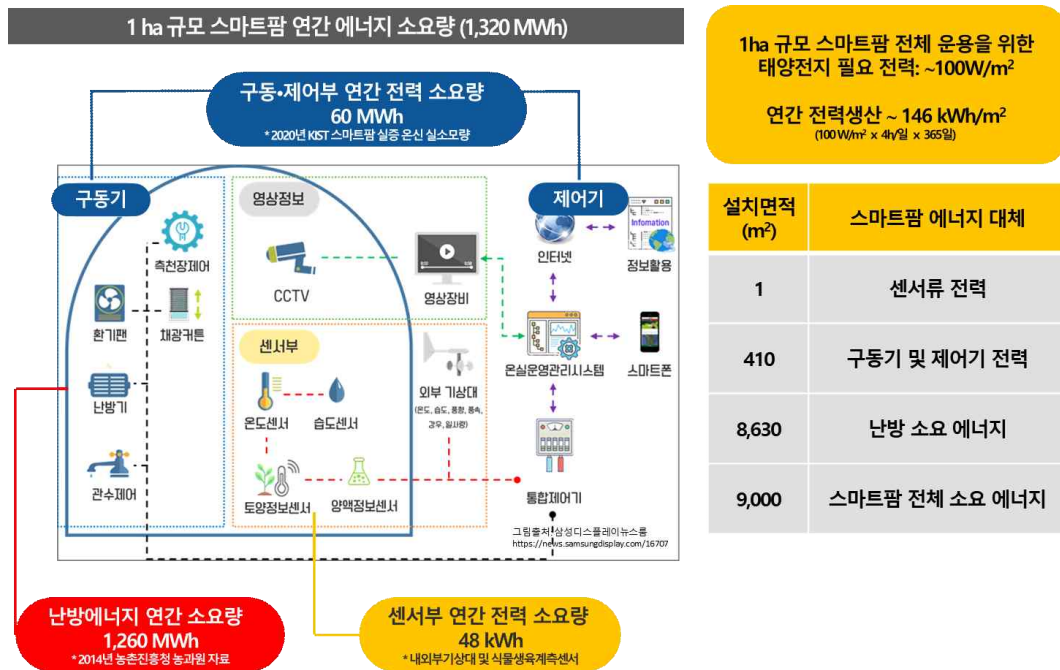


그림 257. 1 ha 규모 스마트팜 연간 에너지 소요량

- 또한 온실내 냉난방에 소요되는 에너지를 충당하기 위해서는 효율뿐만 아니라 대면적에 태양전지를 대응하는 기술이 중요한데, 후속 연구에서는 양산에 유리한 체결부 제조 및 설계 최적화를 통해, 시장에서의 경쟁력을 확보할 예정임. 또한 현장 적용 난이도를 낮추기 위한 기술 제안 및 설치 매뉴얼 제공을 통해, 양산에 적합한 대면적화 방안 핵심 원천 기술 및 IP를 확보하고자 함

## ■ 용액공정 CIS 태양전지 관점

- 현재 CIGS 광흡수층 제조 기술인 진공증착법을 용액 코팅법으로 대체하여 제품의 대면적화 및 생산속도를 증가시키고, 제조비용을 줄일 수 있음
- 현재 다양한 종류의 태양전지가 BIPV 용으로 사용되고 있으나 일정량의 투광도가 요구되는 창호용 BIPV로 사용될 수 있는 태양전지는 극히 제한적임
- 염료감응형 태양전지가 투과율 조절이 용이하고 다양한 색상 디자인이 가능하나 태양전지 응용에서 가장 중요한 요소인 내구성에 대한 문제가 해결되지 않았음
- 박막태양전지(CIS, 박막실리콘 태양전지)의 경우는 레이저 공정을 통하여 광흡수층 및 전극층을 제거하여 투광부를 형성하는 방식으로 시야를 확보할 수 있으나 고비용의 레이저 공정을 여러번 수행해야 하는 고비용 요소가 존재함
- CIS 박막 태양전지는 레이저 스크라이빙 방식 대신 기존 CIS 박막 태양전지 모듈 제조에 사용되고 있는 기계적 스크라이빙 공정으로 광흡수층 제거가 가능하여 비용 절감이 예상되며 특히 CIS 박막 태양전지를 저가 용액공정으로 제조하여 제조단가를 획기적으로 낮출 수 있음
- CIS 태양전지 원소비율 조절을 통하여 흡수 파장대를 디자인 가능하며, 이를 이용한 여러 분야의 적용이 가능함.
- 태양전지의 보급 확대는 향후 기후변화 대응시대에 요구되는 이산화탄소 저감에도 기여를 할 수 있으며 특히 고효율 저비용 CIS 박막 태양전지 개발로 이러한 태양전지 사용 확대를 가속화 할 수 있음
- 현대사회에선 분산형 발전 시스템이 요구되고 있으며 특히 건물 일체형 태양전지에 대한 사회적 수요가 증가되고 있음. 따라서 경량화, 유연화가 가능한 CIS 박막 태양전지는 향후 BIPV 등 여러 곳에 접목하여 분산형 발전 시스템을 가속화 할 수 있음
- 세계 최고 수준의 반도체 및 디스플레이 기반기술을 보유하고 있는 우리나라에서 인쇄공정을 적용한 차세대 박막 태양전지를 BIPV에 응용할 수 있다면 향후 태양전지 산업에서 세계적 우위를 차지할 수 있으므로 본 기술의 개발은 매우 중요함
- CIS 태양전지를 스마트팜에 적용하여 농업에 필요한 전력을 자체적으로 생산하여, 작물의 성장과 관리에 필요한 전력생산이 가능한 전력 독립형 스마트팜을 구현 가능
- 단위면적에 작물 생육과 전력생산이 동시에 가능하며, 면적을 효율적으로 사용할 수 있음
- 알칼리 금속 동시 도핑은 아직 학계에서 거의 연구가 되지 않았기 때문에 기술 개발 시 큰 학술적 가치를 가지고 있으며, 오랫동안 정체됐던 CIS 박막 태양전지의 레코드 효율을 높이는 데 있어 새로운 돌파구가 될 수 있는 기술임.
- 기존의 후열처리 기반 도핑이 아닌 본 연구실만의 독창적인 용액공정 기반 도핑 기술 개발을 통해 알칼리 금속뿐만 아니라 그 외 다양한 원소의 도입이 용이해졌음. 또한 이러한 도핑 기술을 통해 획기적인 CIS 박막 태양전지의 성능 개선을 기대 할 수 있음.
- 기존에 보고 되지 않은 원소가 도핑된 CIS 박막 태양전지에 대한 지적재산권 및 논문 확보가 가능할 것으로 보여지며, 관련 분야의 학술적 및 기술적 발전에 크게 기여할 수 있을 것으로 예상함.
- 본 연구실만의 독창적인 도핑 기술은 도핑된 원소의 역할을 규명하는데 매우 적합한 공정이며, 원하는 소자의 특성에 따라 도핑 원소를 조합하여 효율적으로 CIS 박막 태양전지의 성능을 증가시킬 수 있음.

- 바코팅 공정 도입을 통해 저렴한 비용으로 균일하게 대면적 코팅이 가능해짐에 따라 상업용 CIS 박막 태양전지의 구현이 가능하고, 태양전지 외 CIS와 관련된 여러 소자에 활용 가능할 것으로 예상됨.
- 그래파이트 박스를 활용한 셀렌화 공정을 통해 균일하고 대면적의 고품질 CIS 박막 태양전지의 제작이 가능할 것으로 보여지며, CIS 박막 태양전지 상업화에 적극적인 대응이 가능할 것으로 기대됨.

## ■ 광필터 관점

- 광필터는 광통신, 스마트폰, 디스플레이, 광전소자를 비롯한 다양한 산업 분야에서 부속품으로 활용되는 핵심 소재 기술이며, 차세대 성장 산업인 드론, AR, VR, 사물인터넷 등의 분야에서도 수요가 증가할 것으로 예상됨. 본 연구과제에서 개발하는 광필터 기술은 스마트온실 분야에 대한 활용을 넘어서서 다른 산업 분야에도 확장 적용될 수 있을 것으로 기대함
- 스마트 온실의 전력 생산 및 식물 성장의 최적화를 통해 스마트 온실 관련 원천 기술을 확보하고 기술을 사업화하여 국가 기간 산업인 농업 분야의 신성장동력을 확보할 수 있을 것으로 예상함
- 작물마다 특화된 광필터를 디자인하게 되면 작물별로 다량의 원천 특허 기술을 확보할 수 있을 것으로 예상함. 작물의 확장성이 큰 원천기술이기 때문에, 본 연구과제에서 실증하지 않은 작물로 확장이 가능할 것으로 기대함
- 이색성 광필터 기술을 탑재하여 생산성이 향상된 스마트 온실은 국내 농식품 산업에 종사하는 인력 감소 문제에 대한 실질적인 기술적 해결 방안이 될 수 있으며, 인식 전환을 통해 젊은 세대가 농식품 산업에 새롭게 진입할 수 있도록 하는 유인을 제공할 수 있음
- 건물 일체형 태양전지 시스템을 구성하여 친환경적인 에너지 생산을 통해, 농식품 산업 분야에서 발생하는 탄소 배출을 줄이고 전세계적 탄소 배출 감축 기조에 걸맞는 농식품 산업 생태계를 구성할 수 있음. 또한, 탄소 배출권 거래 이익을 통해 추가적인 수익성 창출을 도모할 수 있음
- 광필터를 단순히 적용하는 것이 아닌, 광투과 태양전지 내 광필터 배열을 정교하게 튜닝함으로써, 통상적으로 사용되는 수평적으로 배치되는 태양전지와 비교하여, 70%-80% 수준의 높은 전력 생산량을 얻으면서도 동시에 작물 생산에 필요한 적생광, 청색광을 일반적인 태양광 대비 60% 가량 투과시킬 수 있으므로, 영농형 태양광 스마트팜에 적용하여 사용할 경우, 기존의 태양전지보다 더 경쟁력이 있으며, 스마트팜용 태양전지 분야에서 타 상품 대비 경쟁 우위를 확보할 수 있을 것으로 예상됨.
- 광필터의 조성 및 디자인 전략에 따라, 광필터의 배치를 어떻게 하느냐에 따라 광투과 태양전지의 성능이 크게 달라지는데, 투과파장, 전력생산 및 투과광 조도를 customize하여 제작할 수 있으므로 광필터를 조작하여 다양한 제품군을 확보할 수 있으며, 특정 작물에 최적화된 광필터를 제작함으로써 실제 영농형 스마트팜 사용자 입장에서 유용한 태양전지를 제작하는데 기여할 수 있음.

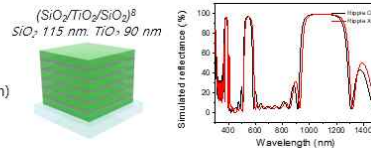
## ■ 광필터 결과물의 실용화에 따른 경제성 분석

- 본 연구를 통해 개발한 광필터는 evaporation 방법을 이용하여 제작되었으며, 광필터의 품질과 성능이 우수한 한편, 본 광필터 결과물의 기술 실용화를 위해서는 경제성이 담보된 제작방식을 채택해야 할 필요성이 있음.



- 따라서 본 연구에서 용액 공정 기반의 광필터를 생산하는 기술을 개발하였으며, 이를 기반 기술로 활용하여 경제성을 획기적으로 확보할 수 있을 것으로 예상됨. 가장 기본적인 딥코팅 기술을 이용하여 본 광필터를 증착할 경우 evaporation을 이용하는 방법과 비교하여 약 7.5% 수준의 생산단가를 보여준다는 것을 간단 계산을 통해 확인하였음.

- 광필터의 개당 생산 단가를 소재비와 장비비로 산정
- 광필터 면적은 30 x 30 cm<sup>2</sup> 으로 가정
- 광필터 디자인은 (SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>)<sup>8</sup> 으로 설정 (SiO<sub>2</sub> 두께 = 115 nm, TiO<sub>2</sub> 두께 = 90 nm)
- 장비 사용 기간 = 5년, 장비당 5년간 생산량 = 1947개



소재 항목	단위 가격	30x30 cm <sup>2</sup> 면적에 필요한 양	광필터 개당 소재 비용
TiO <sub>2</sub> 나노입자 (~20 nm)	3 원/g (출처: Alibaba)	0.143 g	0.426 원
SiO <sub>2</sub> 나노입자 (~8 nm)	126 원/g (출처: Sigma Aldrich)	0.230 g	28.98 원
Polyethyleneimine (PEI)	140 원/g (출처: Alibaba)	0.015 g	2.1 원
투명 폴리이미드 필름	96050 원/m <sup>2</sup> (출처: Alibaba)	0.09 m <sup>2</sup>	8644 원

장비 항목	단위 가격	5년간 생산량	광필터 개당 감가상각 비용
ND-R Rotary Dip Coater	15,000,000 원 (출처: 동아무역)	1947 개	7704 원

기타비용 항목	단위 가격	사용량	광필터 개당 비용
전기세	20.97 원/kWh	5년 x 365 일 x 24 시간 = 43800 시간	472 원
인건비	8590 원/시간	5년 x 365 일 x 8 시간 = 14600 시간	64414 원
창고 월임대료	220000 원/월 (10평 기준)	5년 x 12 개월 = 60 개월	6780 원

용액 공정 기반 광필터의 생산 단가는 **88,045원**으로

기상 증착을 이용한 광필터 제작 단가인 **1,200,000원**과 비교하여 **7.5%** 수준임.

### 그림 258. 용액 공정 기반 광필터의 생산 단가 분석

- 또한 역사적으로 용액 공정을 이용하여 생산 비용을 절감한 사례들이 있음. 대표적으로 OLED 생산공정에서 증착공정 대비 공정비용을 50% 절감할 수 있고, 원재료 사용량은 43% 절감할 수 있는 것으로 보고되었음. 게다가, 연료전지 생산공정에서 용액공정을 기반으로 설계함으로써 인건비, 재료 사용량 절감을 통해 최대 60%까지 생산비용을 절감한 사례가 있음. 이러한 용액 공정 기반 접근법은 본 기술의 경제성을 우수하게 확보할 수 있는 하나의 전략으로 활용할 수 있음.

용액공정 간접사례	용액공정 적용으로 인한 경제적 예상효과	출처
OLED 생산공정	증착공정 대비 공정비용 50% 절감	- Marie O'Regan et al, The Korean Information Display Society, 2006. - Marie O'Regan, et al, Clearing the Road to Mass Production of OLED Television. Information Display 27, 8-13 (2011).
	원재료 사용량 43% 절감	- 2015 Solution Process OLED Report, UBI research
연료전지 생산공정	인건비, 재료 사용량 절감으로 인한 최대 60%의 생산비용 절감	- Quadrennial Technology Review 2015: Roll-to-Roll processing, US department of energy, 2015

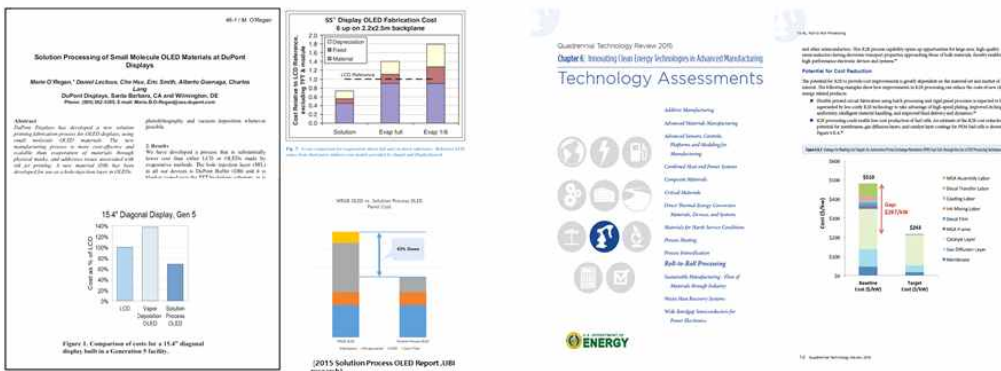


그림 259. 용액공정 비용절감 효과의 타산업 사례

- 또한 스퍼터링 기술은 반도체, 태양전지 패널, 디스플레이 패널, 그리고 기타 많은 전자기기의 제조 과정에서 널리 사용되는 박막 증착 방식 중 하나임. 스퍼터링을 이용하여 양산 공정을 성공한 사례는 다음과 같음.
- 태양 전지 패널 제조: 스퍼터링 기술은 태양 전지 패널의 효율을 향상시키기 위해 사용됨. 예를 들어, CIGS(구리 인듐 갈륨 셀레나이드) 태양 전지는 스퍼터링을 통해 제조될 수 있는데, 이 기술을 사용하여 얇은 필름 층을 고르게 증착할 수 있으며, 이는 전체 패널의 효율성을 높이는 데 기여함.
- 반도체 산업: 반도체 칩 제조 과정에서 스퍼터링은 금속 층을 웨이퍼에 증착하는 데 사용됨. 이 공정은 칩의 전기적 연결성을 향상시키고, 고도의 정밀도가 요구되는 다양한 구조를 만들어 낼 수 있음. 예를 들어, 알루미늄이나 구리 같은 전도성 금속을 스퍼터링을 통해 증착하는 것은 매우 일반적인 공정임.
- 디스플레이 기술: 평판 디스플레이 제조, 특히 액정 디스플레이(LCD)와 유기 발광 다이오드(OLED) 스크린 제작에 스퍼터링이 사용됨. 스퍼터링을 통해 투명 전도성 필름(예: 인듐 주석 산화물, ITO)을 유리나 플라스틱 기판에 증착할 수 있으며, 이는 터치스크린 기능을 가능하게 함.
- 따라서 스퍼터링 기술을 이용하여 광필터를 양산하는 것도 기술 상업화를 위해 고려해 볼 수 있음. 구체적으로, 60층 높이 광필터를 스퍼터링으로 1장 생산할 경우, 그 단가는 구입 기준으로 e-beam에 비교시 약 31.3% 수준이며, 광필터 두께를 60층에서 16층으로 줄이면 가격이 더 떨어짐. 대량 구매 시 10x10cm<sup>2</sup> 가격은 23,600원으로 더 떨어지며 (1.2% 수준), 생산단가는 구매 단가의 60% 수준으로 예상함 (장당 13,800 원 (0.70% 수준)).

	E-beam evaporator system (Co-dep, 1-chamber)	Sputtering system (Single-dep, 2chamber)
광학필터 제조공정	Co-deposition	Single deposition
제조 가능 최대 크기 (단위;cm)	28*28	34*6.4
제조 단가-소량제조 (60layer/100cm <sup>2</sup> 기준)	1,980,000원 (100%)	618,800원 (31.3%)
제조 단가-소량제조 (16layer/100cm <sup>2</sup> 기준)	880,000 (44.4%)	165,000원 (8.3%)
제조 단가-대량제조 (16layer/100cm <sup>2</sup> 기준)	66,000원 (3.3%) (28x28cm <sup>2</sup> , 700장기준)	23,600원 (1.2%) (34x6.4cm <sup>2</sup> 720장기준)

그림 260. 스퍼터링 증착을 이용한 광필터 생산 단가 분석

### ■ 투광형 태양광 모듈의 스마트팜 도입 경제성 분석

- 태양광 모듈의 설치 구조물은 시험용 온실과 유사한 0.14 ha 면적(100 m × 14 m)의 온실로 가정하였으며, 모듈의 설치 면인 지붕은 지면과 30도 각도를 이루는 것으로 가정함
- 기존 실리콘 모듈의 경우 효율적인 발전을 위해 남향면에만 배치하며, 투광을 위해 남향측 지붕의 1/2 면적(0.04 ha)에만 설치하는 것으로 가정함
- 개발 예정인 투광형 모듈의 경우 모듈 내 태양전지의 각도상 북향측 지붕면에서도 발전이 가능하므로, 전체 면적(0.16 ha)에 설치하는 것으로 가정함. 한편, 투광형 모듈은 벽면에도 설치가 가능하나, 본 분석에서는 제외함
- 기존 실리콘 태양광 모듈은 상용 모듈의 성능(300 W/1.7 m<sup>2</sup>)값을 사용함

- 태양광 모듈은 0.1 m<sup>2</sup> 크기(1 m × 0.1 m)의 CIS 태양전지 16개가 체결된 1 m<sup>2</sup> 면적을 갖는 단위 모듈로 구성하였으며, 각 태양전지는 15.4%의 성능(0.55 V × 40 mA/cm<sup>2</sup> × 0.7)을 가지며 투광형으로 설계되어 수직 배치된 점을 감안하여 50%의 성능을 나타내는 것으로 가정함

표 61. 기존 실리콘 태양광 모듈의 설치 및 발전 시나리오

항목	단위	값	비고
온실 면적	ha	0.14	100×14 m <sup>2</sup>
태양광 발전 설치 면적	ha	0.04	8×100×0.5 m <sup>2</sup> . 지붕 각도 30도 가정. 투광을 위해 남향 부분 1/2만 설치
발전량	kWh	70.6	상용 모듈 300 W / 1.7 m <sup>2</sup> 적용

표 72. 제안하는 투광형 태양광 모듈의 설치 및 발전 시나리오

항목	단위	값	비고
온실 면적	ha	0.14	100×14 m <sup>2</sup>
태양광 발전 설치 면적	ha	0.16	8×100×2 m <sup>2</sup> . 지붕 각도 30도 가정. 2면 모두 설치. 벽면 설치도 가능하나 일단 제외
발전량	kWh	197.1	셀 크기(1 m × 0.1 m, 16개), 출력 = 0.55 V × 40 mA/cm <sup>2</sup> × 0.7, 발전량 50%

- 태양광 모듈의 총 설치비용은 설치 면적과 시공사에 따라 약 15-30만원/m<sup>2</sup>(15-30억원/ha)으로 상이하므로 정확한 산정이 불가함. 따라서, 농림수산식품부의 ‘첨단온실 신축지원사업’의 지원 기준단가 30억원/ha를 적용하여 산정함(Chung et al. 2014)
- SMP의 경우 2016-2020년 평균(한국전력거래소)을 적용함. REC의 경우 2020년 REC 현물 가격 평균을 적용하고, 건축물 등 기존 시설물을 이용하는 경우의 가중치 1.5를 적용함
- 평균 발전 시간은 2000-2019년 일평균 일조시간(국가통계포털)을 적용함
- 감가상각비는 모듈 수명 20년을 적용하였으며, 수명이 다한 후 잔존가치는 소멸하는 것으로 가정함
- 분석 결과, 스파트팜 상부에 기존 실리콘 태양광 모듈을 설치할 경우 연간 예상 발전량은 156,478 kWh 이고, 이를 RPS 제도에 따라 발전사업으로 전부 판매할 경우 예상되는 발전 소득은 연간 22,874,692원으로 분석되었음
- 한편, 제안하는 투광형 태양광 모듈을 설치할 경우 연간 예상 발전량은 436,970 kWh 이고, 이를 RPS 제도에 따라 발전사업으로 전부 판매할 경우 예상되는 발전 소득은 연간 63,878,088원으로 분석되었음

표 73. 기존 실리콘 태양광 모듈의 운영 비용 및 발전 수익 시나리오

항목	단위	값	비고
총 설치비용	원/kWh	12,000	농림수산식품부의 ‘첨단온실 신축지원사업’ 기준단가 300,000 원/m <sup>2</sup> × 모듈설치면적 0.04 ha
SMP	원/kWh	82.7	전력거래소, 2016-2020년 SMP 평균
REC	원/kWh	63.5	Solar Connect, 2020년 REC 현물 가격 42309.5 원/REC. 가중치 1.5 (건축물 등 기존 시설물을 이용하는 경우). 1 REC = 1,000 kWh
평균 발전 시간	hr	6.1	국가통계포털, 2000-2019년 일평균일조시간
연간 유지보수비용	%/yr	1.0	산업자원부, ‘신·재생에너지 원별 경제성 분석과 통계체계 개선방안 연구’, 2004
연간 효율감소율	%/yr	0.5	
감가상각비	원	600	20년 사용 기준 (잔존가치 = 0)
연간발전량	kWh/yr	156,478	발전량 × 평균 발전 시간 × 365일
발전 수익	원/yr	22,874,602	연간발전량 × (SMP + REC)

표 64. 제안하는 투광형 태양광 모듈의 운영 비용 및 발전 수익 시나리오

항목	단위	값	비고
총 설치비용	원/kWh	48,000	농림수산식품부의 '첨단온실 신축지원사업' 기준단가 300,000 원/m <sup>2</sup> × 모듈설치면적 0.16 ha
SMP	원/kWh	82.7	전력거래소, 2016-2020년 SMP 평균
REC	원/kWh	63.5	Solar Connect, 2020년 REC 현물 가격 42309.5 원/REC. 가중치 1.5 (건축물 등 기존 시설물을 이용하는 경우). 1 REC = 1,000 kWh
평균 발전 시간	hr	6.1	국가통계포털, 2000-2019년 일평균일조시간
연간 유지보수비용	%/yr	1.0	산업자원부, '신·재생에너지 원별 경제성 분석과 통계체계 개선방안 연구', 2004
연간 효율감소율	%/yr	0.5	
감가상각비	원	2,400	20년 사용 기준 (잔존가치 = 0)
연간발전량	kWh/yr	436,970	발전량 × 평균 발전 시간 × 365일
발전 수익	원/yr	63,878,088	연간발전량 × (SMP + REC)

- 기존 실리콘 태양광 모듈을 스마트팜 지붕에 설치하는 경우 투광성 확보를 위해 설치 면적에서 불리하므로 제안하는 투광형 태양광 모듈 대비 연간 발전량 및 발전 소득이 적을 것으로 예상됨

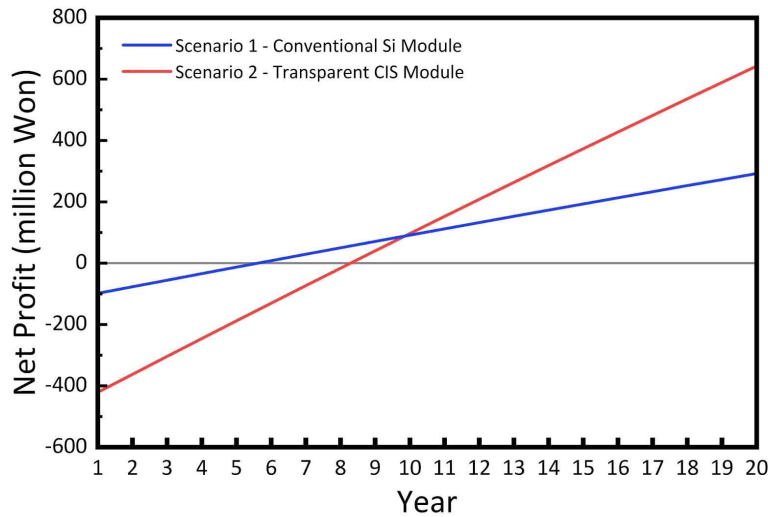


그림 261. 경제성 분석 결과를 바탕으로 스마트팜 지붕에 기존 실리콘 태양광 모듈을 설치하는 경우(시나리오 1)와 제안하는 투광형 태양광 모듈을 설치하는 경우(시나리오 2)의 누적 순이익 그래프

- 누적 순이익 계산은 태양광 모듈의 연간 유지보수비용을 설치비용의 1.0%, 연간 효율감소율을 0.5%로 가정하여 계산함(Chung et al. 2014)
- 기존 실리콘 태양광 모듈은 설치 5년 후 투자비용을 회수할 수 있을 것으로 예상되며, 이는 투광형 태양광 모듈의 8년보다 3년 정도 빠름. 이는 단위 면적당 실리콘 태양광 모듈의 출력이 더 높기 때문임. 그러나, 설치 면적의 한계로 생애 발전량 및 수익은 투광형 태양광 모듈의 절반 이하일 것으로 예상됨
- 실리콘 태양광 모듈을 설치하는 경우 누적 순이익은 약 2.9억원, 투광형 태양광 모듈의 경우 약 6.4억원으로 계산되었음. 따라서, 제안하는 투광형 태양광 모듈을 스마트팜에 도입하는 경우 기존 실리콘 태양광 모듈 대비 약 2배의 경제성을 가질 것으로 예상됨. 한편, 생산한 전기



를 온실의 운영 비용에서 큰 부분(육종에 따라 상이하나 약 30% 이상)을 차지하는 난방에 사용할 경우, 경제성을 극대화할 수 있을 것으로 예상됨

## ■ 스마트 온실용 광투과 태양전지의 시장 대응 방안

- 스마트 온실용 광투과 태양전지의 시장 진입을 위해서는 기존 스마트 온실용 태양전지 시장의 규모 및 사업화/연구개발 현황에 대해서 살펴볼 필요가 있음. 전세계 스마트팜 시장 전망에 따르면, 2025년 시장규모는 약 220억 달러로 2021년부터 2025년 까지 연평균 약 10%정도 성장률로 지속적인 증가가 예상됨. 또한 국내 스마트팜 시장은 2021년 4조 4,493억원에서 연평균 5%로 성장하여 2025년에는 5조 9,588 억원 규모에 이를 것으로 전망함.
- 현재 많은 경우에 국내외의 스마트팜(온실) 태양전지는 기존의 상업화된 실리콘 태양전지 패널을 이용함. 예를 들어, 국내에서는 작물의 광포화점을 만족하기 위해 경작지 위에 일정 간격으로 태양전지를 설치한 영농형 태양광을 운영 중임. 추가로 이탈리아에서는 실리콘 태양전지 패널을 이용하여 태양전지 각도와 계절에 따른 광투과율 및 출력 연구를 수행 중임. 한편, 일본에서는 태양전지 배열과 형태에 따른 투과도 연구를 수행하여 실증연구 결과를 보고한 바 있음.
- 또한 덴마크 크리스텐센 농장에서는 태양광 및 인공광을 병행한 광원시스템으로 스마트팜의 환경을 인공적으로 조절하는 실험을 수행하였으며, 일본 LED 조명기기 제조업체인 CCS는 미쓰비시화학과 공동으로 태양전지를 이용한 식물공장 시스템 실용화 실증 실험에 착수한 바 있음.
- 또한 미국의 Soliculture 사에서는 파장 변환형 염료를 이용하여 태양빛의 일부는 투과시키고 일부는 형광 원리로 다시 태양전지에 조사시켜서 에너지를 생산하는 시스템을 특허 출원하고 현재 사업화를 진행 중에 있음.
- 하지만 위와 같은 기존의 기술들은 에너지를 크게 소모하여 에너지 관점에서 불리하거나, 혹은 광질, 광량 및 광조사 면적을 정밀하게 조절하는 것이 불가능함. 본 연구팀에서 독자적으로 개발한 이색성 광필터 기술을 기반으로 한 스마트 온실용 광투과 태양전지 기술은 에너지 효율이 우수할 뿐만 아니라, 투과광 파장 및 반사광의 파장을 원하는 대로 설계할 수 있으며, 소재적 관점에서 제품의 안정성 또한 담보할 수 있음. 이러한 여러 가지 장점들을 바탕으로 스마트팜용 태양전지 시장에 진입할 수 있을 것으로 사료됨.
- 시장에서 통할 수 있는 본 연구팀 접근법의 신규성과 차별성을 확인하기 위하여 온실용 태양전지와 관련한 특허 분석을 진행함. 특허는 스마트 온실에 활용되는 태양전지 중에서도, 광질을 제어하는 개념을 가진 특허에 한정함. 국내 특허에서는 (스마트팜 + 온실 + 광합성 + 작물+ greenhouse + smartfarm + smartfarming + verticalfarming) \* (태양전지 + 광발전 + 태양광) 검색식을, 해외 특허의 경우에는 (photosynthesis + crop + greenhouse + smartfarm + smartfarming + verticalfarming) \*(solarpower + photovoltaics) 검색식을 활용
- 특허 검색 결과, 아래와 같이 국내 39건, 해외 39건의 특허가 각각 검색됨. 이때, 중복된 특허는 제외하였음

## 국내외 특허 동향

해외 검색식: (photosynthesis+crop+greenhouse+smartfarm+smartfarming+verticalfarming)\*(solarpower+photovoltaics)  
 국내 검색식: (스마트팜+온실+광합성+작물+greenhouse+smartfarm+smartfarming+verticalfarming)\*(태양전지+광발전+태양광)

해외특허: 39건		국내특허: 39건	
특허번호	특허명	특허번호	특허명
US20170100000	PHOTOVOLTAIC GREENHOUSE STRUCTURE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES	10-2017-0076352	광합성작물 투과형 광발전광발전필름 그 제조방법
US20170100000	PHOTOVOLTAIC GREENHOUSE STRUCTURE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES	10-2022-0046793	스마트 팜용 광발전지배널 및 그 제조방법
US20170100000	PHOTOVOLTAIC GREENHOUSE STRUCTURE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES	10-2021-0134143	스마트 팜용 광발전지배널 및 그 제조방법
US20170100000	PHOTOVOLTAIC GREENHOUSE STRUCTURE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES	10-2022-0074002	광합성의 제조방법, 이를 통해 제조된 광발전필름 및 이를 포함하는 온실용 광발전 태양광 모듈
US20170100000	PHOTOVOLTAIC GREENHOUSE STRUCTURE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES	10-2019-0018315	반투명 태양전지를 이용한 온실
US20170100000	PHOTOVOLTAIC GREENHOUSE STRUCTURE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES	10-2019-0041448	온실 생산을 위한 태양광변환소재, 필름을 포함하는 광발전 모듈용 태양광 변환용 수지 필름들
US20170100000	PHOTOVOLTAIC GREENHOUSE STRUCTURE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES	10-2022-0045561	스마트팜용 태양전지
US20170100000	PHOTOVOLTAIC GREENHOUSE STRUCTURE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES	202011722	LIGHT GUIDE FILM, DEVICE PROMOTING PHOTOSYNTHESIS OF PLANT USING THE SAME, SOLAR CELL, AND PHOTOELECTRIC CONVERSION ELEMENT
US20170100000	PHOTOVOLTAIC GREENHOUSE STRUCTURE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES	13275045.8	Photovoltaic greenhouse structure
US20170100000	PHOTOVOLTAIC GREENHOUSE STRUCTURE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES	15179743	AMORPHOUS COPOLYMER-BASED MATERIAL IN A PHOTOVOLTAIC MODULE
US20170100000	PHOTOVOLTAIC GREENHOUSE STRUCTURE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES	16368807	STRUCTURES AND METHODS FOR SIMULTANEOUSLY GROWING PHOTOSYNTHETIC ORGANISMS AND HARVESTING SOLAR ENERGY
US20170100000	PHOTOVOLTAIC GREENHOUSE STRUCTURE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES	13416164	Photovoltaic greenhouse structure
US20170100000	PHOTOVOLTAIC GREENHOUSE STRUCTURE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES	13579424	PHOTOVOLTAIC MODULES FOR AN AGRICULTURAL GREENHOUSE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES
US20170100000	PHOTOVOLTAIC GREENHOUSE STRUCTURE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES	12505823	Photovoltaic greenhouse structure

▶ 스마트 온실에 활용되는 태양전지 중 광질 제어 관련 특허로 한정: 국내, 해외 각각 39건 (중복 제외)

그림 262. 광질 제어 온실 태양전지 관련 특허 검색 결과

- 위 특허 78건에 대한 상세 특허 분석을 진행하였으며, 특허 검색식이 광질에 대한 넓은 범위를 포함하는바, 실질적인 광과장 영역을 다루는 특허로 한정하여, 스마트 온실에 활용되는 과장과 관련한 태양전지로 영역을 국한하고, 이를 바탕으로 분류를 진행함. 아래는 그 결과를 보여줌

## 국내외 특허 동향

해외 검색식: (photosynthesis+crop+greenhouse+smartfarm+smartfarming+verticalfarming)\*(solarpower+photovoltaics)  
 국내 검색식: (스마트팜+온실+광합성+작물+greenhouse+smartfarm+smartfarming+verticalfarming)\*(태양전지+광발전+태양광)

국내	특허명	종류
10-2021-0076352	102521330900	광합성작물 투과형 광발전광발전필름 그 제조방법
10-2022-0046793		스마트 팜용 광발전지배널 및 그 제조방법
10-2021-0134143	102623964900	스마트 팜용 광발전지배널 및 그 제조방법
10-2022-0074002	102534452000	광합성의 제조방법, 이를 통해 제조된 광발전필름 및 이를 포함하는 온실용 광발전 태양광 모듈
10-2019-0018315	102149376000	반투명 태양전지를 이용한 온실
10-2019-0041448	102191059000	온실 생산을 위한 태양광변환소재, 필름을 포함하는 광발전 모듈용 태양광 변환용 수지 필름들
10-2022-0045561		스마트팜용 태양전지
해외		
202011722		LIGHT GUIDE FILM, DEVICE PROMOTING PHOTOSYNTHESIS OF PLANT USING THE SAME, SOLAR CELL, AND PHOTOELECTRIC CONVERSION ELEMENT
13275045.8		Photovoltaic greenhouse structure
15179743		AMORPHOUS COPOLYMER-BASED MATERIAL IN A PHOTOVOLTAIC MODULE
16368807		STRUCTURES AND METHODS FOR SIMULTANEOUSLY GROWING PHOTOSYNTHETIC ORGANISMS AND HARVESTING SOLAR ENERGY
13416164	6745919	Photovoltaic greenhouse structure
13579424		PHOTOVOLTAIC MODULES FOR AN AGRICULTURAL GREENHOUSE AND METHOD FOR MANUFACTURING SUCH MODULES
12505823	01186160	Photovoltaic greenhouse structure

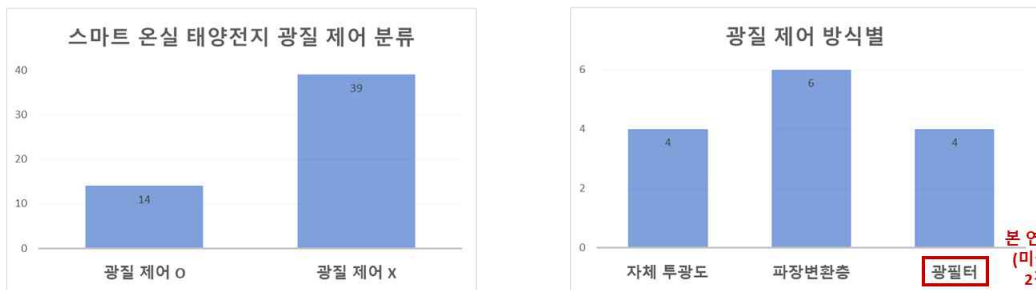


그림 263. 광질 제어 온실 태양전지 관련 특허 분류

- 이 중에서 광과장 영역을 제어하는 온실용 태양전지는 총 14건이었으며, 방식으로는 자체투과도 관련 4건, 과장변환층 활용 6건, 광필터 활용이 4건이었음. 이와 관련한 장단점은 아래 표에서 비교를 하였음. 이 중에서 광필터를 활용한 접근방식은 본 연구팀에서 출원한 특허 이외



의 접근법은 찾아볼 수 없었음

- 자체 투광형의 경우에는 작물의 생장 보다는 태양전지 자체의 광학적 특성에 의존하기 때문에, 작물 생장의 극대화가 애초에 어려운 접근으로 판단하며, 이에 따른 시장내 경쟁력은 제한적인 것으로 판단됨. 또한 해당 방식의 유기 혹은 유기/무기 복합 페로브스카이트 태양전지를 주로 활용하기 때문에 20년의 수명을 보장하는 기존 실리콘 태양전지와 경쟁 역시 어려움
- 광합성에 도움이 되는 파장만을 선별적으로 활용하는 접근 방식은 결국 파장변환형과 이색성 광필터 두가지 뿐인데, 파장 변환형의 경우에는 앞서 언급한 Soliculture사에서 실증 사업을 진행하고 있으며, 이와 관련한 핵심 특허를 확보하고 있기 때문에 해당 접근법으로는 해당 특허에 대한 회피가 어려울 것으로 보임
- 본 연구팀에서 확보한 이색성 광필터 기술의 경우에는 파장변환층을 활용하는 방식에 비하여 변환에 따른 손실을 줄이는 것이 가능하기 때문에, 더 높은 효율성을 보일 수 있을 것으로 판단하며, 설계 자유도 역시 높기 때문에 다양한 작물 및 필요 환경 조건에 대한 높은 대응성으로 높은 경쟁력을 기대할 수 있음

스마트 온실용 특허 제안 기술군 비교			
	 <p>ACS Appl. Mater. Interfaces 2020, 12, 35, 39496-39504</p> <p>자체 투광형</p>	 <p>파장 변환형</p>	 <p>이색성 광필터형</p>
고효율	○	△ LSC 방식 효율 한계?	○
설계 자유도	△	△	○
안정성	X (유기/유기복합 소재)	△	○
해외 IP 확보 가능성	○ (개개 기술이 서로 상이)	X Soliculture社 핵심 IP 확보 및 사업화 진행	○ 본 연구팀 독자 기술/ IP 확보 (미국 출원 진행중)

그림 264. 본 연구팀 기술의 차별성, 시장성 및 사업성 비교

- 광과장 영역대를 제어하는 스마트 온실용 태양전지 관련한 시장은 아직 열리지 않은 상황이며, 단순히 실리콘 태양전지 간격을 제어하는 방식으로 광량만을 제어하는 방식만이 차용되는 상황임. 하지만 향후 스마트팜의 중요성이 높아지면서 광질을 제어하기 위한 시장이 형성될 것으로 예상이 되며, 이를 위해서는 제품화에 앞서, 해당 사업화를 이끌 의지를 가진 회사의 기술이전이 사업화에 앞서서 매우 중요한 상황임
- 본 연구팀에서는 스마트팜에 융합시 시너지 효과를 발휘할 수 있는 태양전지 기술을 2022년, (주) 파루에 이전하였으며, 태양전지와 광필터를 3차원적으로 결합한 광질제어가 가능한 3차원 태양전지 기술에 대한 (주)에스앤피글로벌로의 이전을 2024년 목전에 두고 있음
- 이와 관련하여 2027년 제품화를 목표로 연구를 진행중에 있으며, 구체적인 사업화 내용은 아래 그림과 같음

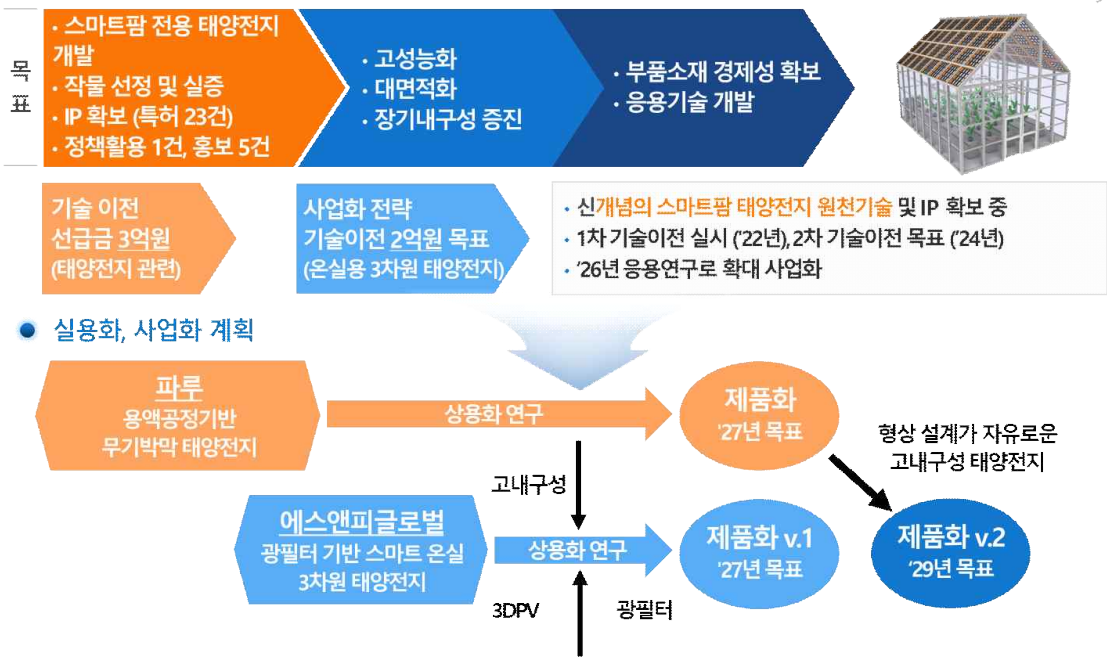


그림 265. 사업화 전략 모식도

■ 연구개발 결과물의 홍보 방안

- 본 연구를 통해 발생한 결과물은 전세계 최대 전자제품 박람회인 CES 2024에 전시된 바 있으며, “신개념 광필터 기반 스마트 온실 태양전지 기술 “ 혁신 기술로 기사화되어 해외업체들과 협업을 논의 중인 상황임.
- 또한 2050 탄소중립 녹색성장위원회 전체회의의 대표성과 전시물로 게시되어, 국무총리 주관을 비롯 6개 부서장관 및 농림부 차관이 참석하여 본 기술을 홍보한 바 있음.
- 또한 Green & Agritech Asia 2022, 2023 사업단 공동부스 전시를 수행하였으며, 스마트팜 연구개발사업단 홍보 유튜브를 통해 해당 연구의 핵심 기술을 소개하고 홍보한 바 있음.
- 본 연구진의 위와 같은 홍보 채널을 이용하여 기술의 우수성과 대중성을 바탕으로 개발 결과물의 홍보를 진행하고자 함. 특히, 농림축산식품부와 협업하여 유튜브 채널에서 기술 홍보를 수행할 예정에 있음.

홍보 실적



- 2050 탄소중립녹색성장위원회 전체회의 대표성과 전시물
- 국무총리 주관, 6개 부서 장관, 농림부 차관 참석



- Green & Agritech Asia 2022, 2023 사업단 공동부스 전시
- 스마트팜연구개발사업단 홍보 유튜브 기술 소개

CES 2024 참가

아시아투데이 | <https://me2.do/FzQzIEp>

KIST, CES 2024 참가...9개 혁신 기술 선배

기사승인 2024-01-04 14:44



- 신개념 광필터 기반 스마트 온실 태양전지 기술 전시
- 해외업체들과 협업 논의

그림 266. 연구개발 결과물의 CES 2024 참가 및 홍보 노력

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

< 연구개발성과 활용계획표(예시) >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내
국외논문	SCIE	
	비SCIE	
	계	
국내논문	SCIE	
	비SCIE	
	계	
특허출원	국내	
	국외	
	계	
특허등록	국내	11
	국외	
	계	11
인력양성	학사	
	석사	
	박사	
	계	
사업화	상품출시	
	기술이전	
	공정개발	
제품개발	시제품개발	3
성과홍보		
포상 및 수상실적		
정성적 성과 주요 내용		

< 별첨 자료 >

중앙행정기관 요구사항	별첨 자료
1. IRIS 등록 별첨자료	1) 자체평가의견서
	2) 연구성과 활용계획서
2.스마트팜연구개발사업단 요청 별지자료	1) 사업화계획서
	2) 실증 성과보고서
	3) 빅데이터 플랫폼 연계 활용계획서
3.	1)
	2)

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부, 과학기술정보통신부, 농촌진흥청에서 시행한 “스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발” 사업의 “스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발” 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 농림축산식품부, 과학기술정보통신부, 농촌진흥청((재)스마트팜연구개발사업단)에서 시행한 “스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발” 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.

## 자체평가의견서

### 1. 과제현황

		과제번호	421036-03		
사업구분	스마트팜 다부처패키지 혁신기술개발사업				
연구분야				과제구분	단위
사업명	차세대 융합·원천기술 연구사업				주관
총괄과제	기재하지 않음			총괄책임자	기재하지 않음
과제명	스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발			과제유형	응용
연구개발기관	한국과학기술연구원			연구책임자	민병권
연구기간 연구개발비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차년도	2021.04.07 - 2021.12.31	1,200,000		1,200,000
	2차년도	2022.01.01 - 2022.12.31	1,300,000		1,300,000
	3차년도	2023.01.01 - 2023.12.31	1,300,000		1,300,000
	4차년도				
	5차년도				
	계		3,800,000		3,800,000
참여기업					
상대국				상대국연구개발기관	

※ 총 연구기간이 5차년도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성 요망

2. 평가일 : 2024. 01.10.

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
한국과학기술연구원	책임연구원	민병권

4. 평가자(연구책임자) 확인 :

본인은 평가대상 과제에 대한 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확인하며, 본 자료가 전문가 및 전문기관 평가 시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

확 약





## 1. 연구개발실적

※ 다음 각 평가항목에 따라 자체평가한 등급 및 실적을 간략하게 기술(200자 이내)

### 1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : 우수

본 과제 수행 연구는 광량만을 제어하는 기존 스마트팜 태양전지 접근방식의 한계를 벗어나 광질까지 제어하는 방안을 제안함. 이에 따른 우수성 및 창의성을 인정받아 국내에서는 국무총리가 주재한 2050 탄소중립녹색성장위원회 전체회의에서 성과전시물로 홍보가 되었으며, 해외에서는 세계 최대 전자박람회인 CES 2024에서 KIST 대표 기술로 홍보부스에 설치, 4일간 전시를 진행.

### 2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : 우수

2023년도 K-스마트팜 산업은 전년도 대비 168% 증가하는 등, 향후 수출산업으로써 높은 기대를 받고 있으나 여전히 높은 에너지 소비는 큰 걸림돌이 되고 있음. 이에 따라 탈탄소 에너지 정책과 결합된 스마트팜 모델 전략은 필수적이라고 할 수 있는데, 작물 상품성을 해치지 않는 광질까지 제어하는 새로운 방식의 신재생 에너지 활용 방안은 스마트팜 에너지 분야에서 큰 경쟁력을 가짐.

### 3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : 우수

기존 농가에서는 주로 스마트팜 지붕에 태양전지를 설치하나, 이에 따른 작물 상품성 저하가 발생되어 농가의 외면을 받고 있음. 이에따라 설치된 태양전지를 지붕에서 제거하는 상황까지 벌어지는 상황임. 하지만 농업농촌 RE100등 농촌도 탄소중립시나리오에서 더 이상 자유롭기 어려운 상황이 될 것이며, 이에 따라 작물의 상품성을 최대한 유지하기 위한 태양전지 활용 기술에 대한 수요가 올라갈 것으로 예상. 이에따라 광합성에 필요한 빛을 오롯이 작물에 대응하기 위한 본 접근방안은 성공시 활용가능성이 기존 어떠한 일반 태양전지 보다도 좋을 것으로 기대함.

### 4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : 우수

본 과제에 활용되는 태양전지는 용액공정기반 무기박막 태양전지, 3차원 투광형 태양전지, 이색성 광필터 기술을 요소기술로 포함하고 있음. 해당 요소기술에 대한 정량목표를, 세계 최고수준 대비 높은 값으로 매우 도전적으로 설정하고, 해당값들과 비교하여 향상된 결과값을 보이는 등 성실히 수행하였음. 또한 성과로 인정되는 2023년 이후에도 성과 인정 여부와 상관없이, 제안된 스마트팜 태양전지 개선 및 확대 활용을 위하여, CES 2024 전시를 진행하였으며 기술 이전 논의를 진행중임.

### 5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : 우수

특허출원 12.2건, 특허등록 3건, 기술실시 2건, 기술료 3.05억원, 논문 15건, 높은 논문평균 IF (1단계 8.9, 2단계 11.8), 학술발표 8건, 인력양성 16건, 정책활용 1건, 홍보전시 4건, 타연구 활용 1건 달성

## II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
광투과 태양전지 적용 대상 작물 선정 (2종)	6	100	토마토 및 인삼
태양광 모듈 면적	5	100	105 X 105 cm <sup>2</sup> 크기 광투과 태양광 모듈 제작
CIS 박막 내 탄소불순물 잔류량	6	100	광흡수층 내 잔류 탄소량 0.59 at% 달성
태양전지 단락전류	6	96	목표값 40mA/cm <sup>2</sup> 대비 38.19mA/cm <sup>2</sup> 달성
태양전지 개방전압	6	100	개방전압 0.598 V 달성
태양광 모듈 최대 광투과 가능량 (파장 선택 필름 부착전)	5	100	400-1100 nm에서 평균 85.9%의 광투과도 달성
시뮬레이션 투과밴드 반치폭 (FWHM)	5	100	투과 밴드의 반치폭 $\geq 40$ nm 달성
시뮬레이션 투과도 @ 450, 660 nm	6	100	Type 1 (93.9% @ 450 nm, 93.2% @ 660 nm)과 Type 4 (94.6% @ 450 nm, 97.8% @ 660 nm) 달성
시뮬레이션 반사도 @ 550, 1000 nm	5	100	550 nm와 1000 nm의 반사율 $\geq 90\%$ 달성
광필터 적용 미니 스마트팜 제작 및 작물 2종에 대한 광합성 및 생산성 검증 데이터 확보	6	100	광 필터링에 따른 작물 2종 광합성 및 생육 특성 데이터 확보
측정 투과도 @ 450, 660 nm	6	100	450 nm와 660 nm의 투과율은 각각 97.5%, 99.5% 달성
유연 고분자 기판의 접촉각	5	100	유연 고분자 기판의 표면처리를 통해 60°의 접촉각 달성
유연기판 광필터의 측정 투과도 @ 450, 660 nm	5	100	450 nm와 660 nm의 투과율 각각 81.4%, 99.1% 달성
산화물 나노입자의 증착 cycle당 두께	6	100	Cycle당 10 nm 이하의 두께 증착이 달성
박막의 총 두께	6	100	용액 공정으로 제작된 광필터 박막 총 두께 최소 678 nm 달성
용액공정 기반 광필터의 측정 투과도 @ 450, 660 nm	6	100	450 nm 및 660 nm의 측정 투과도는 70% 이상 달성
광투과 태양광 모듈 가격비	2	100	기준 태양광모듈 가격 대비 광투과태양광모듈 가격 0.6:1 달성
1m <sup>2</sup> 선택적 광투과 태양전지 보급시 스마트팜 센서 전력 공급 가능성 확인	2	100	1ha 기준 스마트팜 센서 전력 공급 가능 확인
프로토타입 건수 (1 m <sup>2</sup> 이상 스케일)	2	100	1 m <sup>2</sup> 이상 스케일 프로토타입 3개의 다수 제작
기준 태양광 모듈 대비 광투과 태양광 모듈 출력비	2	100	기준 태양광 모듈 기준 광투과 태양광 모듈 출력비 1.9:1 달성



단위 태양전지 입사광 각도에 따른 성능 변화 평가	2	100	20°에서 35.8%, 30°에서 59.1%, 40°에서 74.1%, 50°에서 84.7%, 60°에서 93.6%, 70°에서 98.1%, 80°에서 92.3% 달성
합계	100점	99.8	

### III. 종합의견

#### 1. 연구개발결과에 대한 종합의견

- 기후 위기로 인한 작물 재배의 어려움을 최소화할 수 있는 스마트팜 기술은 최근 수출량이 전년 대비 2배 이상 증가하는, 높은 성장세를 보이고 있으나 지속적인 성장을 위해서는 에너지 자립형 스마트팜의 구축이 필수적임. 이러한 필요성을 바탕으로 태양전지를 스마트팜에 적용하려는 시도는 있었으나, 태양전지 설치에 따른 작물 상품성 저하는 스마트팜 태양전지 회피로 이어짐. 하지만 탄소중립시나리오에 따라 농촌에서도 신재생에너지 활용은 선택이 아닌, 필수 상황이 되고 있으며 이에 따라 작물 상품성 저하 최소화가 가능한 전략적인 접근에 대한 수요가 높아질 것으로 판단함. 본 과제 의 결과는 기존 스마트팜 태양전지의 광량만을 제어하는 접근법에서 벗어나, 광질까지 제어함으로써 한정된 광에너지에 대한 효율적인 역할 분담이 가능한, 기존에는 없는 방식의 태양전지 개발을 목표로 하였음. 기존 사례가 없는 접근 방안으로써 연구개발에 많은 난관과 예상치 못한 이슈가 있었으나, 이러한 접근법을 선구적으로 진행함으로써, 필요한 기술을 인지하여 기술 개발 및 특허확보를 선제적으로 진행할 수 있었음. 이러한 연구 및 특허 확보는 현재 진행형이며, 해당 핵심 특허는 국내뿐만 아니라 미국 특허 및 PCT 특허 확보까지 진행하고 있음. 광질을 제어하는 태양전지 조합 및 3차원 배치에 대한 고민을 통해, 향후 스마트팜 태양전지에 대한 특허망 전략을 세우고 있으며, 이는 에너지 자립형 K-스마트팜 기술로써, 세계적인 경쟁에서 우위를 점할 수 있을 것으로 기대함. 성능적인 측면에서는 그 가능성을 확인하였으나, 시장 선점을 위해서는 저가화가 필수적이며, 이를 위한 후속 연구를 시급히 진행할 필요가 있음.

#### 2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

##### <연구목표 달성도 관련>

- 상기 연구목표 달성도에서는 21개 항목에 대하여 20개 항목에 대한 정량목표를 달성하였음. 미 달성된 1건에 대해서는 제시한 단락전류밀도  $40\text{mA}/\text{cm}^2$  값은 용액공정을 도입한 사례에서는 세계적으로도 달성된 적이 없는 굉장히 도전적인 값임. 본 연구팀에서 달성 및 인증한  $38.19\text{ mA}/\text{cm}^2$  값은 용액공정에서 세계적으로 찾기 어려운 가장 높은 값으로 판단함

- 2단계 목표치 중 단락전류밀도 목표 ( $J_{sc} > 40\text{ mA cm}^{-2}$ )를 원활하게 달성하기 위해서는 진공공정(예:스퍼터링, 동시증발법 등) 기반 CIS 광흡수층과 유사한 품질 및 특성을 용액공정에서 구현해야 함. 현재 보완이 필요한 광흡수층의 핵심 특성에는 두께, 결정성, 조성이 있음.

- 높은 단락전류밀도( $J_{sc}$ )를 확보하기 위해서는 광흡수층의 두께가 충분하여 대부분의 입사광을 흡수할 수 있어야 함. 진공공정의 경우에는 일반적으로 약 2~3  $\mu\text{m}$  두께의 광흡수층을 활용하지만, 용액공정에서는 반복적인 열처리에 기인하는 스트레스로 인해 충분한 두께를 확보하기 어려움(일반적으로 약 1  $\mu\text{m}$  두께 사용). 또한 진공공정에서는 챔버를 활용하여 불순물의 유입이 없고, 원하는 조성을 원하는 깊이에 적용할 수 있지만, 용액공정에서는 그러한 조건들을 쉽게 달성하기 어려움. 특히 불순물이 개입하여 광흡수층 결정화에 영향을 주기 때문에 진공공정보다 더 까다로운 열처리 조건이 요구됨.

- 상기한 원인들을 해결하고 단락전류밀도 목표를 달성하기 위해서 다음과 같은 보완이 이루어지고 있음. 먼저 열처리 횟수를 최소화하기 위해 적은 코팅 횟수로도 두꺼운 박막을 적용할 수 있는 바코팅 기법을 활용하여, 진공공정과 유사한 두께의 CIS 광흡수층을 확보하고자 노력하고 있음. 기

존에 주로 사용하던 스프인코팅에서 바코팅으로 전환 시 열처리 횟수를 절반 이하로 줄일 수 있기 때문에 광흡수층 두께의 상한을 2 um 이상으로 높일 수 있을 것으로 예상됨.

- 광흡수층의 결정성과 조성을 개선하기 위해서는 현재 사용중인 칼코겐화 열처리 방식의 개선이 가장 중요할 것으로 판단됨. 작은 결정립 크기와 불완전한 조성 분포는 열처리 중 공급되는 셀레늄 (Se) 기체의 압력이 충분하지 않기 때문이며, 이를 해결하기 위해 그래파이트 박스를 활용한 칼코겐화 열처리 기법을 개발중에 있음. 예비 실험 결과, 그래파이트 박스 기반 열처리에서 광흡수층의 결정립이 유의미하게 커지는 것을 확인하였으며, 지속적인 연구를 통해 진공공정과 유사한 수준의 결정성과 조성 분포를 구현할 예정임.

- 도전적인 목표를 달성하지는 못하였으나 연구개발 과정에서 많은 실험을 진행하였고, 다양한 세부 주제에 대한 결과물을 확보하였음. 추후 지속적인 연구를 통해 목표 달성을 위해 부단히 노력할 예정임.

#### <전략성과 달성도 관련>

- 특허출원 12.2건, 특허등록 3건, 기술실시 2건, 기술료 3.05억원, 논문 15건, 높은 논문평균 IF (1단계 8.9, 2단계 11.8), 학술발표 8건, 인력양성 16건, 정책활용 1건, 홍보전시 4건, 타연구 활용 1건 달성

- 특허 출원, 특허등록, 논문, 논문평균 IF, 학술발표, 홍보전시, 타연구 활용건에서는 대부분 100% 초과달성

- 기술실시 관련하여 달성도는 2024년 협의중인 2억원 기술이전 진행시 목표달성할 수 있음

- 기술이전과 관련하여 2023년 가능한 업체들은 있었으나, 서둘러 진행하여 실적을 맞추는 것보다는 조건과 방향 측면에서 더 적합한 업체를 찾는 것이 중요하다고 판단, 2024년에 기술 이전을 협의중에 있음

- 인력양성 관련하여서는 2021년 계획서 작성 당시, 2024년 2월 졸업자까지 포함하는 것이 실적으로 가능하다고 판단, 기입하였기 때문에 졸업자 인원이 적게 집계됨. 원래 계획했던 2024년 2월 졸업자까지 포함시킬 경우, 100% 목표 달성 가능

- 정책활용 관련하여서는 한국연구재단 국책연구본부 유망기술 동향 보고서 발간 및 보고서 내 정책제언 내용 포함하였으나, 해당 건이 사사 관련 이슈로 성과 불인정되어 1건 미달성. 해당 건이 예상대로 성과 인정되었다면 100% 목표 달성 가능한 상황이었음.

- 요약하자면 인력양성과 정책활용 성과는 목표 달성을 위해 열심히 노력했고, 100% 달성을 예상했으나, 기간상 혹은 형식상 성과 불인정에 따른 불인정 사례가 아쉽음. 그리고 기술이전과 관련하여서는 기술이전과 관련한 기회가 과제기간내 여러번 있었으나, 더 합리적인 계약을 위하여 서두르지 않고 현 2024년에 관련 협의를 진행중에 있음. 이에따라 성과종료후 성과창출로 이어질 것으로 예상됨.

#### <기술 평가 관련>

- 본 과제연구결과는 광량만을 제어하는 기존 스마트팜 태양전지 접근방식의 한계를 벗어나 광질까지 제어하는 방안을 제안함. 이에 따른 우수성 및 창의성을 인정받아 다양한 설치 및 홍보를 진행

- 국무총리가 주재한 2050 탄소중립녹색성장위원회 전체회의에서 성과전시물로 홍보가 되었으며 (주요참석자: 국무총리, 경제부총리, 산자부장관, 환경부장관, 국토부장관, 과기부장관, 외교부장관, 통일부장관, 농림부차관, 기상청장 등)

- 세계최대 전자박람회인 CES 2024에서 KIST 대표 기술로 홍보부스에 설치, 4일간 전시를 진행.

- Green & Agritech Asia 스마트팜연구개발사업단 공동관 참가 (2022년, 2023년)

- 관련사진 첨부





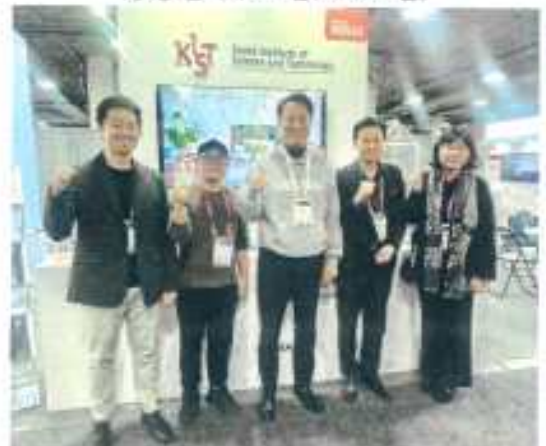
2050 탄소중립녹색성장위원회의 전체회의



Green & Agritech Asia 스마트팜연구개발사업 공동관 (2022년, 2023년)



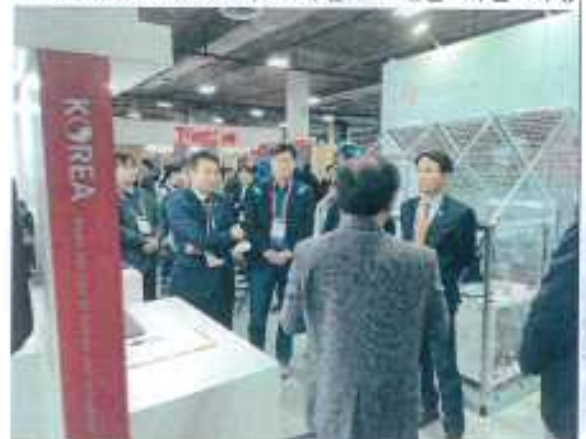
CES 2024 KIST 부스내 스마트팜 태양전지 설치



CES 2024 KIST 주요내빈: 오세훈 서울 시장



CES 2024 KIST 주요내빈: 홍남표 창원 시장



CES 2024 KIST 주요내빈: 김진태 도지사

### 3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

- 본 과제에서는 기존 태양광 발전에 활용되는 상용 태양전지를 단순히 스마트팜에 적용하는 방식에서 벗어나, 스마트팜에 적합한, 작물의 생장을 고려한 태양전지를 개발하는 전략을 취하였음. 광질을 제어하기 위한 선행 연구 사례가 거의 없기 때문에, 실증과 관련한, 충분한 후속 연구가 필요하며, 이와 더불어서 시장 경쟁력을 높이기 위한 저가화 연구가 동시에 진행되어야함. 최근 스마트팜 기술 선점을 위하여 국가간 경쟁이 심화되는 가운데, K-스마트팜을 이끌기 위한 에너지 자립형 스마트팜 기술로써 해당 연구에 대한 적극적인 관심과 투자가 필요한 시점으로 생각함. 본 연구팀에서도 이러한 측면에서 핵심 IP 확보 및 추가적인 요소 핵심 기술 확보를 위하여 최선을 다할 계획임.

## IV. 보안성 검토

※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성함.

### 1. 연구책임자의 의견

### 2. 연구개발기관 자체의 검토결과



## 연구성과 활용계획서

### 1. 연구과제 개요

사업추진형태	<input type="checkbox"/> 자유응모과제 <input checked="" type="checkbox"/> 지정공모과제		분 야	
연구과제명	스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발			
주관연구개발기관	한국과학기술연구원		주관연구책임자	민병권
연구개발비	정부지원 연구개발비	기관부담연구개발비	기타	총연구개발비
	3,800,000,000			3,800,000,000
연구개발기간	2021. 04. 07 - 2023. 12. 31( 2년 9개월)			
주요활용유형	<input checked="" type="checkbox"/> 산업체이전 <input type="checkbox"/> 교육 및 지도 <input type="checkbox"/> 정책자료 <input type="checkbox"/> 기타(    ) <input type="checkbox"/> 미활용 (사유:    )			

### 2. 연구목표 대비 결과

당초목표	당초연구목표 대비 연구결과
광투과 태양전지 적용 대상 작물 선정 (2종)	달성
태양광 모듈 면적	달성
CIS 박막 내 탄소불순물 잔류량	달성
태양전지 단락전류	미달성 (목표 전류값의 96% 달성)
태양전지 개방전압	달성
태양광 모듈 최대 광투과 가능량 (파장 선택 필름 부착전)	달성
시뮬레이션 투과밴드 반치폭 (FWHM)	달성
시뮬레이션 투과도 @ 450, 660 nm	달성
시뮬레이션 반사도 @ 550, 1000 nm	달성
광필터 적용 미니 스마트팜 제작 및 작물 2종에 대한 광합성 및 생산성 검증 데이터 확보	달성
측정 투과도 @ 450, 660 nm	달성
유연 고분자 기판의 접촉각	달성
유연기판 광필터의 측정 투과도 @ 450, 660 nm	달성
산화물 나노입자의 증착 cycle당 두께	달성
박막의 총 두께	달성
용액공정 기반 광필터의 측정 투과도 @ 450, 660 nm	달성
광투과 태양광 모듈 가격비	달성
1m <sup>2</sup> 선택적 광투과 태양전지 보급시 스마트팜 센서 전력 공급 가능성 확인	달성
프로토타입 건수 (1 m <sup>2</sup> 이상 스케일)	달성
기준 태양광 모듈 대비 광투과 태양광 모듈 출력비	달성
단위 태양전지 입사광 각도에 따른 성능 변화 평가	달성

### 3. 연구목표 대비 성과

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표										연구기반지표											
	지식 재산권			기술 실시 (이전)		사업화				표준 화		학술성과			교육지 도	인력양 성	정책 활용·홍 보		기타 (타연구 활용예) (명)			
	특허 출원	특허 등록	S W 저작권	S M A R T	건 수	기 술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출	부 자 유 치	국 내	국 제	논 문 S C I			논 문 비 S C I	논 문 평 간 I F		학 술 발 표	정 책 활 용	홍 보 전 시
단위	건	건	건	건	건	백 만 원	건	백 만 원	백 만 원	명	백 만 원	건	건	건	건		건	명	건	건	건	
가중치	10	10			10	10										10	10		10	10	10	10
최종 목표	12	1			3	500								10		7	5		20	2	3	1
1단계 실적	9.8													9		8.9	6		8		3	
2단계 실적	2.4	3			2 <sup>1)</sup>	305 <sup>2)</sup>								6		11.8	2		8 <sup>3)</sup>	1 <sup>4)</sup>	1	1
달성률 (%)	102	300			66.7	61								150		295.7	160		80	50	133	100

<sup>1)</sup> 2024년 기술실시 1건 협의중

<sup>2)</sup> 2024년 기술실시 200(백만원) 협의중

<sup>3)</sup> 초기 목표 설정시 2024년 2월 졸업자를 고려하여 설정, 100% 달성률을 예상하였으나, 2024년 2월 졸업 인원 포함 불가 방침으로 2명 미달성

<sup>4)</sup> 2022년 한국연구재단 국제연구본부 유망기술 동향 보고서 발간 및 보고서 내 정책제언 내용을 포함, 100% 달성률을 예상하였으나, 사사 관련 이슈로 성과 불인정되어 1건 미달성

### 4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	용액공정기반 무기박막태양전지
②	3차원 투광형 태양전지
③	이색성 광필터

### 5. 연구결과별 기술적 수준

구분	핵심기술 수준					기술의 활용유형(복수표기 가능)					
	세계 최초	국내 최초	외국기술 복	외국기술 제	외국기술 소화·흡수 개선·개량	특허 출원	산업제이전 (상용화)	현장애로 해	결	정책 자료	기타
①의 기술	v					v	v				
②의 기술	v					v					
③의 기술	v					v	v				

6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	유연, 경량형 무기박막 태양전지 저가화에 따른 상용화 경쟁력 확보
②의 기술	투광형 태양전지 활용
③의 기술	광필터 활용으로 광질 제어 응용분야 활용

7. 연구종료 후 성과창출 계획

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표											연구기반지표								
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				표준 화		학술성과			교육 지도	인력 양성	정책 활용-홍보		기타 (타 연구활용등)
	특허 출원	특허 등록	S W 저작권	S M A R T P R O T O C O L	건 수	기술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출	투 자 유 치	국 내	국 제	논문				학 술 발 표	정 책 활 용	
														SCI	비 SCI					
단위	건	건	건	건	건	백 만 원	백 만 원	백 만 원	명	백 만 원	건	건	건	건	건	명	건	건	건	
가중치		80																		
최종목표		12					3													
연구기간내 달성실적		3																		
연구종료후 성과창출 계획		9					3													

8. 연구결과의 기술이전조건(산업체이전 및 상품화연구결과에 한함)

핵심기술명 <sup>1)</sup>			
이전형태	<input type="checkbox"/> 무상 <input type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	천원
이전방식 <sup>2)</sup>	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타( )		
이전소요기간		실용화예상시기 <sup>3)</sup>	
기술이전시 선행조건 <sup>4)</sup>			

- 1) 핵심기술이 2개 이상일 경우에는 각 핵심기술별로 위의 표를 별도로 작성
- 2) 전용실시 : 특허권자가 그 발명에 대해 기간·장소 및 내용을 제한하여 다른 1인에게 독점적으로 허락한 권리  
통상실시 : 특허권자가 그 발명에 대해 기간·장소 및 내용을 제한하여 제3자에게 중복적으로 허락한 권리
- 3) 실용화예상시기 : 상품화인 경우 상품의 최초 출시 시기, 공정개선인 경우 공정개선 완료시기 등
- 4) 기술 이전 시 선행요건 : 기술실시계약을 체결하기 위한 제반 사전협의사항(기술지도, 설비 및 장비 등 기술이전 전에 실시기업에서 갖추어야 할 조건을 기재)



## 사업화 계획서

연구개발과제명	스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발			과제번호	421036-03		
주관연구개발기관	한국과학기술연구원			주관연구책임자	민병권		
공동연구개발기관	고려대학교, 국민대학교			공동연구책임자	전용석, 도영락		
제품명	스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지			제품 형태	H/W	O	S/W
관련 선행기술	종류 (해당 시)	특허명 (등록번호)	스마트팜용 태양전지 스마트팜용 3차원 태양광 발전시스템				
		기술이전명	스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지				
사업화 종류	구분	수입품 대체	신규시장 창출	기존 상품 개선	O		
	내용	기존 스마트팜에서 활용되지 않는 광량 제어방식 태양전지 문제점 개선					
개발 제품 주요 경쟁력	목표 수요처	시장규모	국내 37억 달러, 해외 1131억 달러 (2025년 예상치)				
		기술개발 필요성	탄소중립시나리오에 따른 농업 농촌 태양전지 의무 활용				
		목표 시장 예상 점유율	스마트팜용 태양전지 100% 점유율 목표				
	기술 차별성	구분	비용 절감		기술 고도화	O	
내용		이익 증대	O	기타			
		기존 스마트 온실 태양전지 대비 생산되는 작물의 생육 질과 발전량의 향상					
타사 제품 비교	제품명	LG 단결정, 한화큐셀, 썬셀		본 연구 제안 태양전지			
	단가	1m <sup>2</sup> 당 평균 37만원선 (작물 생육에 대한 고려 없음)		1m <sup>2</sup> 당 22만원선 (광필터 제외) (작물 생장에 필요한 파장 확보)			
예상 매출액 (백만원)	구분	2021	2022	2023	2024		
	연구개발계획서			기술이전 500			
	매출액 수출액		기술이전 300	기술이전 5	기술이전 200협의중		
생산계획	생산능력						
	양산 체계 구축 계획						
판매전략	판로확보 방안	전자 인쇄기술 및 에너지 시스템 관련 업체와의 협업을 통한 양산 기술력 확보 및 기술 이전 추진					
	마케팅 전략	전자 인쇄기술 및 에너지 시스템 관련 업체와의 협업을 통한 기술력 설득 및 협업					
기타 부가설명							

본 과제는 차세대 융합 원천기술 연구사업으로써, 농가에서 기피되는 기존 태양전지의 한계를 극복할 수 있는 새로운 태양전지 기술 개발을 핵심으로 하고 있음. 이에 따라 사업화를 통한 매출액 발생은 추가적인 시간이 필요한 것으로 판단함. 2022년에 태양전지 및 전자 인쇄기술관련 회사에 기술이전을 진행하였으며, 2024년에는 3차원 선택적 광투과 태양전지 조립이 가능한 에너지 소자 관련 업체에 기술이전을 목표로 추가 연구를 수행중에 있음.

사업화 계획을 위와 같이 제출합니다.

2024 년 1 월 20 일

주관연구개발기관 : 한국과학기술연구원  
주관연구책임자 : 민 병 권



## 실증 성과보고서

연구개발과제명	스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발		과제번호	421036-3				
주관연구개발기관	한국과학기술연구원		주관연구책임자	민병권				
공동연구개발기관			공동연구책임자					
실증개요	실증성과명	선택적 광투과 태양전지 설치 온실의 광환경 분석 및 이를 활용한 시설원에 작물 2종 (토마토, 새싹삼) 실증 재배		구분	H/W	O	S/W	
	실증장소	제3자농장	해당	미해당	O	스마트팜혁신벨리		
		장소명	한국과학기술연구원 강릉분원		실증장소유형	일반(법인)농가		
		실증면적(m <sup>2</sup> )	6			정부출연·지자체	O	
주소	강원도 강릉시 사임당로 679		기타					
실증현황	실증조건	실증품목(종)	선택적광투과태양전지 설치 온실 및 시설원예작물 2종 (토마토, 새싹삼)					
		필수기자재	선택적광투과태양전지 설치 온실, 광량 및 광파장 분석기					
		기타필수조건						
	실증목적	구분	성과물 성능에 대한 검·인증	트랙레코드·실증데이터 확보	O			
			목표 환경 신뢰성·재현성 검증	제품서비스 시연(시범농가)				
		내용	기존 유리온실 대비 선택적광투과태양전지 온실의 광투과율 및 광질 비교 / 선택적광투과태양전지 온실 활용시 시설원에 작물 2종에 대한 작물 재배 적합성 평가					
	실증방법	활용기술	인공지능	빅데이터	사물인터넷			
			지능형로봇	신재생에너지	O	기타		
		수집데이터	환경데이터	O	생육데이터	O	제어데이터	
			경영데이터		기타	성분 함량 데이터		
	내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 선택적 광투과 태양전지 설치 유리온실 구축 (바닥면적 6m<sup>2</sup>)</li> <li>- 온실 지붕면의 1/2 면에 일반유리, 남은 1/2면에 선택적광투과 태양전지 설치 (설치 지붕면 면적은 2.2m<sup>2</sup>, 성과 목표인 대비, 2.2배 규모), 일반유리 대비 태양전지 모듈의 광투과율 및 광질 비교 분석</li> <li>- 태양전지 모듈 설치 유리온실 활용 토마토 및 인삼에 대한 실증 재배 각 1회 수행</li> <li>- 토마토(베티티니) 3주간 관행 육묘한 후, 일반유리 온실과 선택적 광투과태양전지 온실에서 각각 정식 한 후, 6화방 까지 재배한 후 각 조건간 생육 및 성분 특성 차이 분석</li> <li>- 인삼(재래종) 1년생 묘삼을 재배 포트에 정식하고, 일반유리온실과 선택적광투과 태양전지 온실에서 각각 16주간 재배하며 발달 단계 및 생육 조사, 전세노사이드 함량 분석 수행</li> <li>- 음지 식물인 인삼을 재배하기 위해서는 차광이 요구됨에 따라, 재배 기간 중 정오 기준으로 인삼 재배 포트 지상 30cm에서 최대 광량이 200 <math>\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}</math>이 되도록 일반유리온실과 선택적 광투과태양전지 온실을 PE 필름으로 차광하고 인삼 재배 시험 수행</li> </ul>						
실증결과	내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 일반 유리온실의 광투과도는 92.8%이고, 선택적 광투과 태양전지 모듈의 광투과율은 47.7% 수준임</li> <li>- 광질 비교 결과, 선택적 광투과 태양전지 모듈 적용시 녹색(500-600nm) 파장대 광투과율이 22%에 불과하며, 전체 투과광 중 청색과 적색 파장대의 비율이 일반 유리 온실 대비 23% 높음</li> </ul>						

실증결과	내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 일반유리온실 조건 대비, 선택적광투과태양전지 온실 조건에서 토마토(베타티니) 재배시 개체당 착과수와 생산량이 각 28%, 27% 감소, 1화방에서 6화방 까지 개화와 개화 후 착과까지 약 18일이 더 소요될 수 있음</li> <li>- 반면 선택적광투과태양전지 온실 조건에서 착과후 과실이 Red-ripe stage까지 소요되는 시간을 9일 단축할 수 있고, 과실내 라이코펜 함량 26%, 베타카로틴 함량 57% 증가시킬 수 있음</li> <li>- 일반유리온실 조건과 비교시, 선택적광투과태양전지 온실 조건에서 묘삼 정식 후 2년생 인삼 재배시 출아와 전엽까지 도달하는 시간에는 차이가 없으며, 정식후 12주까지는 뿌리 생중량 변화율이 97% 정도 높고, 12주부터는 생중량 변화율이 상대적으로 떨어짐 (선택적광투과태양전지 온실에서 묘삼 정식 후 12주까지는 인삼 뿌리 생육 속도 상대적으로 빠름)</li> <li>- 두 조건 간에 지상부 진세노사이드 함량 차이는 없지만, 뿌리내 진세노사이드 함량은 선택적광투과태양전지 온실 조건에서 52% 감소할 수 있음</li> </ul>
------	----	--

결과를 위와 같이 제출합니다.

2024년 1월 20일

주관연구개발기관 : 한국과학기술연구원

주관연구책임자 : 민 병 권





# 스마트팜 R&D 빅데이터 플랫폼 연계/활용 계획서

연구개발 과제명	스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발			과제번호	421036-03		
주관연구 개발기관	한국과학기술연구원			주관연구 책임자	민병권		
<b>기본 정보</b>							
데이터 용량(MB)	정형	영상	음향	이미지	3D	분광 데이터	기타
	0.8						
<b>수집</b>							
구분	양식명	유형	부류품목	용량	수집 시작일	수집 종료일	등록일시 (예정)
1	일반 유리온실 인삼 재배환경 및 생육, 성분 데이터	정형	인삼	0.2	23.04.	23.07.	23.10.
2	선택적 광투과 태양전지 설치 온실 인삼 재배환경 및 생육, 성분 데이터	정형	인삼	0.2	23.04.	23.07.	23.10.
3	일반 유리온실 토마토 재배환경 및 생육, 성분 데이터	정형	방울토마토	0.2	22.11.	23.02.	23.10.
4	선택적 광투과 태양전지 설치 온실 토마토 재배환경 및 생육, 성분 데이터	정형	방울토마토	0.2	22.11.	23.02.	23.10.
<b>분석</b>							
정상 파일 수		타입오류		범위오류			
4		0		0			
<b>모델</b>							
구분	양식명	유형	운영체제	개발언어	라벨링 도구	성능지표/ 결과	등록일시 (예정)
1	투표본 t 검정	데이터 논리모델	Windo ws 11	R 4.3.0	-	p-value / 0.005012, p-value / 2.691e-05	23.12.
<b>활용</b>							
구분	양식명	유형	대분류	사이트 URL	동영상 URL	등록일시 (예정)	
1	선택적 광투과 태양전지 개발과 이를 활용한 자가 발전 온실	장치 개발	영농	<a href="https://www.kist.re.kr/ko/news/press-release.do?mode=view&amp;articleNo=8573">https:// www.kis t.re.kr/k o/news/ press-re lease.do ?mode =view&amp; articleN o=8573</a>	<a href="http://naver.me/5dPkgnr5">http://nav er.me/5d Pkgnr5</a>	23.12.	
<b>기타 부가설명</b>							
※ 과제별 데이터/인공지능 관련 연구 개발 및 스마트팜 R&D 빅데이터 플랫폼 연계/활용 과정의 추가 의견 등 관련 내용작성							

결과를 위와 같이 제출합니다.

2024년 1월 20일

주관연구개발기관 : 한국과학기술연구원

주관연구책임자 : 민 병 권



## 스마트팜 R&D 빅데이터 플랫폼 정보 제공·활용 동의서

스마트팜 R&D 빅데이터 플랫폼 이용약관 제13조(플랫폼 게시물의 관리 및 운영)에 따라 스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발사업 수행을 통하여 생산 및 업로드된 결과물(정형·비정형 데이터, AI모델, 소프트웨어 등)의 정보 제공 및 활용에 동의합니다.

**< 스마트팜 R&D 빅데이터 플랫폼 정보 제공·활용 관련 주요 고지 및 동의 사항 >**

- 정보 수집·이용의 목적: 스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발사업 R&D 성과물의 스마트팜 현장 보급 기반 마련 및 연구개발 재이용
  - 수집하려는 정보: 스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발사업('21~'27) 수행을 통하여 생산된 결과물(정형·비정형 데이터 등)일체 및 2차적 저작물 등
  - 수집 정보의 보유·이용기간: 데이터 업로드 일로부터 플랫폼 운영 종료시까지
  - 수집 정보의 공유·활용 범위: 플랫폼에 수집된 데이터는 연구 등의 목적으로 사업단이 직접 활용하거나 사업단이 제3자의 사용을 허용할 수 있음
- ※ 주관연구책임자의 동의로 연구과제구성에 포함된 공동과제책임자도 플랫폼 정보 제공·활용에 동의한 것으로 봄

또한, 본인(연구주관책임자)이 서명날인한 동의서의 복사본은 원본과 동일하게 유효함을 인정합니다.

2024년 2월 20일

주관과제명(과제번호): 스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발 (421036-03)

주관연구책임자:

민 병 권

(서명 또는 인)



(재)스마트팜연구개발사업단장 귀하

## 주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부·과학기술정보통신부·농촌진흥청에서 시행한 “스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발사업”의 “스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발”연구개발 과제 최종보고서입니다.
2. 이 연구개발 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부·과학기술정보통신부·농촌진흥청 ((재)스마트팜연구개발사업단)에서 시행한 “스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발사업”의 “스마트 온실 전용 선택적 광투과 태양전지 기술 개발” 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.