

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()발간등록번호(O)

농업에너지 자립형산업모델 기술개발연구개발사업 2022년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-004392-01

목질계 미이용 바이오매스를 활용한 고성능 탄소전극 소재 및 생산장비 개발

2023. 06. 15.

주관연구기관 / 한국과학기술원
공동연구기관 / 한국에너지기술연구원
공동연구기관 / 레이저닉스(주)
공동연구기관 / (주)레이저앤그래핀

농림축산식품자료실



0015188

농림축산식품부
(전문기관)농림식품기술기획평가원

제출문

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “목질계 미이용 바이오매스를 활용한 고성능 탄소전극 소재 및 생산 장비 개발”(개발기간 : 2021.04.01. ~ 2022.12.31.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2023. 06. 15.

주관연구기관명 : 한국과학기술원 이광형
공동연구기관명 : 한국에너지기술원 김종남
공동연구기관명 : 레이저닉스(주) 김윤석
공동연구기관명 : (주)레이저앤그래핀 이근우



주관연구책임자 : 김 영 진
공동연구책임자 : 윤 하 나
공동연구책임자 : 김 윤 석
공동연구책임자 : 이 근 우

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의 합니다.

최종보고서								보안등급					
								일반[√], 보안[]					
중앙행정기관명		농림축산식품부		사업명	사업명		농업에너지 자립형산업모델 기술개발						
전문기관명 (해당 시 작성)		농림식품기술기획평가원			내역사업명 (해당 시 작성)		목질계 바이오에너지 산업화						
공고번호		제농축2021-27호		총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)		-							
				연구개발과제번호		321077-2							
기술분류	국가과학기술 표준분류		1순위 LB0506	50%	2순위 ED0102	30%	3순위 ED0901	20%					
	농림식품과학기술분류		1순위 PB0201	40%	2순위 CA0202	40%	3순위 PB0103	20%					
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		국문		-									
		영문		-									
연구개발과제명		국문		목질계 미이용 바이오매스를 활용한 고성능 탄소전극 소재 및 생산장비 개발									
		영문		Development of Laser-based Carbon Electrode Manufacturing System by Converting Unused Wood Biomass to Graphene									
주관연구개발기관		기관명		한국과학기술원		사업자등록번호		314-82-01980					
		주소		(우)34141 대전광역시 유성구 대학로 291		법인등록번호		114471-0000668					
연구책임자		성명		김영진		직위		부교수					
		연락처	직장전화		042-350-3017		휴대전화		010-7613-2893				
			전자우편		yj.kim@kaist.ac.kr		국가연구자번호		10682079				
연구개발기간		전체		2021. 04. 01 - 2022. 12. 31 (1년 9개월)									
		단계 (해당 시 작성)		1단계		2021. 04. 01 - 2022. 12. 31 (1년 9개월)							
				n단계		-							
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원		기관부담		그 외 기관 등의 지원금		합계		연구개발비 외 지원금			
		연구개발비		연구개발비		지방자치단체 기타()							
		현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	지원금			
총계		1,080,000	4,000	42,400			1,084,000	42,400	1,126,400				
1단계	1년차	463,000	0	6,700			463,000	6,700	469,700				
	2년차	617,000	4,000	35,700			621,000	35,700	656,700				
n단계	1년차												
	n년차												
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)		기관명		책임자		직위		휴대전화		전자우편		비고	
공동연구개발기관		한국에너지기술연구원		윤하나		책임연구원		010-8767-8239		hanayoon@kier.re.kr		공동 정부출연	
		레이저닉스(주)		김윤석		대표이사		010-8602-1422		kimys@laser-nics.com		공동 중소기업	
		레이저앤그래핀		이근우		대표이사		010-4180-2064		turbono01@gmail.com		공동 중소기업	
위탁연구개발기관													
연구개발기관 외 기관													
연구개발담당자 실무담당자		성명		남한구		직위		박사과정					
		연락처	직장전화		042-350-3257		휴대전화		010-4015-6012				
			전자우편		hanku.nam@kaist.ac.kr		국가연구자번호		11729016				

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

연구책임자: 한국과학기술원 김 영 진



주관연구개발기관의 장: 한국과학기술원

이 광 형 (직인)

공동연구개발기관의 장: 한국에너지기술원

김 종 남 (직인)

공동연구개발기관의 장: 레이저닉스(주)

김 윤 석 (직인)

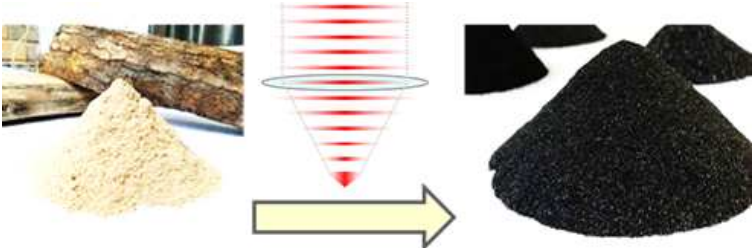
공동연구개발기관의 장: (주)레이저앤그래핀

이 근 우 (직인)



농림축산식품부장관·농림식품기술기획평가원장 귀하

< 요약 문 >

사업명		농업에너지 자립형산업모델 기술개발			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)		
내역사업명 (해당 시 작성)		목질계 바이오에너지 산업화			연구개발과제번호		5
기술 분류	국가과학기술 표준분류	LB0506	50%	ED0102	30%	ED0901	20%
	농림식품 과학기술분류	PB0201	40%	CA0202	40%	PB0103	20%
총괄연구개발명 (해당 시 작성)							
연구개발과제명		목질계 미이용 바이오매스를 활용한 고성능 탄소전극 소재 및 생산장비 개발					
전체 연구개발기간		2021. 04. 01 - 2022. 12. 31 (1년 9개월)					
총 연구개발비		총 1,126,400 천원 (정부지원연구개발비:1,080,000 천원, 기관부담연구개발비: 46,400 천원, 지방자치단체지원연구개발비: 천원, 그 외 지원연구개발비: 천원)					
연구개발단계		기초[] 응용[√] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]		기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준(4) 종료시점 목표(7)	
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)							
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)							
연구개발 목표 및 내용	최종 목표	<p>● 최종목표 :</p> <p>고출력 다중파장 레이저 기반, 목질계 미이용 바이오매스의 레이저-유도-그래핀 탄소전극 변환기술 개발, 공정변수의 최적화를 통한 고생산성 탄소전극 생산장비 개발 및 제작된 탄소전극을 기반으로 하는 이차전지 소자제작 및 셀 성능평가</p> <p>세부목표</p> <p>① 다중파장 레이저 기반 목질계 미이용 파우더형 바이오매스의 이차 전지용 친환경 탄소전극으로의 변환기술 개발 및 최적화</p> <p>② 고성능 탄소전극 변환의 생산성 극대화를 위한 다파장 레이저 기반 고속그래핀 전극 패터닝 공정기술 및 생산장비 개발</p> <p>③ 목질계 바이오매스 기반 탄소전극 이차전지 소자 제작 및 셀 성능 평가</p>					
	전체 내용	<div style="text-align: center;">  <p>[목질계 미이용 바이오매스의 이차전지용 탄소전극화를 위한 레이저 변환기술]</p> </div> <p>(1) 다중파장 레이저 기반 목질계 미이용 파우더형 바이오매스의</p>					

이차전지용 친환경 탄소전극으로의 변환기술 개발 및 최적화

- 본 연구에서는 다중파장 레이저의 포톤 에너지를 이용하여, 친환경 생분해성 미활용 목질계 바이오매스를, 이차전지를 위한 탄소전극화 하는 변환기술을 개발하고자 함.
- 레이저로는 다양한 파장대역 (적외선, 근적외선, 가시광선 및 자외선) 레이저 및 그 조합을 고려하여, 레이저의 바이오매스에의 흡수율을 극대화하고, 바이오매스의 온도상승 제어를 통해 고품질의 레이저-유도-그래핀을 생성하며 및 바이오매스의 탈락 정도를 최소화하여 높은 변환효율을 얻을 수 있는 최적의 탄소전극 변환기술을 개발하고자 함.
- 레이저의 빔 크기 및 빔모드를 빔 프로파일러를 통해 측정/평가하고, 빔을 공간적으로 이송하는 고속 회전거울기반 빔 스캐닝 기술을 개발하며, 이를 넓은 초점평면 상에서도 일정한 빔 패턴을 만들 수 있게 하는 빔 전송 시스템을 개발하고자 함.
- 목질계 미이용 바이오매스에서 변환된 레이저-유도-그래핀 탄소전극의 물성 들을 세부적으로 분석함. 라만 스펙트럼의 D, G 및 2D 밴드의 존재유무 및 비율을 분석하여 그래핀 형성여부 및 그 품질을 체크하고, XRD, XPS, UV-VIS 분광을 통해 이를 재확인하며, TEM 분석을 통해 그 분포의 균일성 및 그래핀 품질을 상세히 확인. 이와 더불어 레이저-유도-그래핀의 전기적 특성을 평가하여, 고품질의 이차전지 탄소전극을 확보할 수 있도록 레이저 및 빔 전송 광학계 조건을 최적화해 나가고자 함.
- 이를 통해, 고품질 고생산성 탄소전극 패터닝을 위한 50 mm/s 이상급 레이저 빔 이송속도 및 100 Ω/□의 면저항을 실현함.

(2) 고성능 탄소전극 변환의 생산성 극대화를 위한 다파장 레이저 기반 고속 그래핀 전극 변환 공정기술 및 생산장비 개발

- 목질계 미이용 바이오매스의 탄소전극으로의 변환효율을 극대화 하기 위해서는, 레이저에 의한 광열효과와 광화학 효과에 관한 이해와 분석이 필수적임.
- 바이오매스가 레이저-유도-그래핀으로 변환되는 과정은 단일한 변환공정이 아닌 여러 단계의 변환과정을 통해 이루어짐. 우선 바이오매스는 200~500℃ 의 온도에서 Char로 변환되며, 이후 1200℃ 이상의 온도에서 그래파이트로 변환된 후, 광화학적 공정을 통해 레이저-유도-그래핀으로 분리됨. 이러한 변환단계에 대한 고려 없이 단순히 온도만을 상승시킬 경우, 재료의 심각한 탈락이 발생하여 바이오매스 대비 탄소전극 변환효율이 낮아짐.
- 이러한 온도와 더불어, 공기 중 산소와의 반응 역시 중요한 변수임.
- 이러한 고려를 통해, 바이오매스의 온도를 적절히 유지하면서 레이저-유도-그래핀 생성을 극대화 하여, 목질대비 그래핀 변환효율을 75% 이상으로 향상시키는 공정기술의 개발 및 이를 반영한 레이저 생산장비를 개발하고자 함.
- 고생산성 탄소전극 변환 레이저 생산장비의 관점에서는 크게 (1) 파우더 베드 기반 연속공정과 (2) 롤(Roll) 기반 연속공정을 고려하고자 함. 해당 두 기술들을 비교하여, 품질, 안정성 및 생산성을 고려하여 최종 사업화를 위한 생산장비를 선택/개발하고자 함.

		<p>함.</p> <p>(3) 목질계 바이오매스 기반 탄소전극 이차전지 소자 제작 및 셀 성능 평가</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 목질계 바이오매스 기반의 레이저-유도-그래핀 전극 소재의 고품위화 제조 공정 기술 확립 및 최적화. ○ 목질계 바이오매스 기반의 레이저-유도-그래핀 전극 소재의 전기화학 특성평가 및 성능 최적화. ○ 장기충방전 과정에서의 전극 소재 구조변화와 안정성을 합성 조건에 따라서 분석하여 내구성이 우수한 최적의 전극소재 합성 조건 확립. ○ 목질계 바이오매스 원료에 이론적으로 높은 에너지밀도를 갖는 Si, SiO_x, MoS₂ 등 나노소재 도입을 통한 그래핀 기반의 이중복합 전극소재 개발을 통하여 수명 특성이 우수하면서도 고용량 및 고출력 특성의 차세대 리튬이차전지 음극 소재 개발. ○ 소재에 따른 최적의 셀 설계를 통한 이차전지 소자 제작기술 개발 및 셀 성능평가 수행 (용량, 율특성, 수명 특성평가 등). ○ 이를 통해, 목질계 미이용 바이오매스 기반의 친환경 전극소재 개발을 통하여 300 mAh/g 이상의 이차전지 음극 용량을 달성하고자 함.
<p>1단계 (해당 시 작성)</p>	<p>목표</p> <p>내용</p>	<p>(1) 고출력 다중파장 레이저 기반 레이저-유도-그래핀 탄소전극 변환기술 개발 및 최적화</p> <p>(2) 공정변수 최적화를 통한 고생산성 탄소전극 개발 및 다파장 레이저 기반 고속 그래핀 공정기술 및 생산장비 개발/최적화</p> <p>(3) 제작된 탄소전극을 기반으로 하는 이차전지 소제제작 및 셀 성능평가를 통한 응용기술 확립하고자 함.</p> <p>1-1) 적외선, 근적외선 및 가시광선 레이저와 유기 물질과의 상호작용 비교 및 심도 있는 이해 : 목질계 미이용 바이오매스 레이저 변환관련 자료 수집, 이론/실험모델 정립 및 다파장 레이저 기반 목질계 미이용 바이오매스 레이저 변환관련 조건 정립</p> <p>1-2) 연속파, 나노초 및 펄스 레이저와 유기 물질과의 상호작용 비교/이해 : 레이저별 레이저-유도-그래핀 탄소전극의 전기적, 화학적, 기계적 특성 기초평가 및 탄소전극의 전기적, 화학적 특성 심도 이해</p> <p>1-3) 패터닝 된 레이저-유도-그래핀의 전기적, 화학적, 기계적 특성의 평가 및 변환 효율 검토 : 패터닝된 레이저-유도-그래핀 탄소전극의 전기적, 화학적, 기계적, 특성 평가</p> <p>2-1) 레이저-유도-그래핀 생성 시, 레이저와 물질의 상호작용 최적화를 통해, 재료의 탈락을 최소화 하는 동시에 높은 전도도 획득 : 재료 탈락 최소화 조건 탐색/선정을 통한 확정 및 최적화</p> <p>2-2) 파우더 베드/ 롤(Roll) 기반 연속공정 구현, 전극 패터닝 최적화 및 탄소전극 품질/생산성 세부 평가 : 파우더 베드/ 롤(Roll) 기반 연속공정 개발 및 생산성 기초평가, 상세평가 및 최적화</p> <p>2-3) 다파장 레이저 기반 고속 그래핀 전극 패터닝 생산장비 비교/평가 및 생산장비 개발 : 연속 공정간 장단점 비교 및 심도있는 이해를 통해 확정.</p>

			3-1) 목질계 바이오매스 기반의 탄소 전극 소재의 고품위화, 물성 분석 및 전기화학적 특성 평가 및 성능 최적화 : 자료 수집 및 모델 정립 3-2) 목질계 바이오매스 기반 탄소 전극소재/이종복합 전극 소재의 이차전지 소자 제작 및 셀 성능 평가 : 시험분석 및 시작품 제작
	n단계 (해당 시 작성)	목표	-
		내용	-

◎ 핵심 목표 성능지표 및 개발 목표치

구분	핵심 기술/제품 성능지표	단위	가중치 (%)	최종 목표	최종 달성치	달성도 (%)
1	레이저-유도-그래핀 면저항	Ω/□	35	100 이하	0.72	100
2	레이저 빔 이송속도	mm/sec	15	50 이상	150	100
3	목질소재 대비 그래핀 변환효율	%	15	75 이상	87.5	100
4	전극 용량	mAh/g	35	300 이상	396	100

◎ 연차별 연구성과 계획

구분		1차년도		2차년도		합계	
		목표	달성	목표	달성	목표	달성
국외논문게재	SCI	1	1	2	7	3	8
	비SCI	-	-	-	-	-	-
	계	1	1	2	7	3	8
국내논문게재	SCI	-	-	-	-	-	-
	비SCI	-	-	-	1	-	1
	계	-	-	-	1	-	1
특허출원	국내	1	3	1	3	2	6
	국외	-	-	-	-	-	-
	계	1	3	1	3	2	6
특허등록	국내	-	-	1	2	1	2
	국외	-	-	-	-	-	-
	계	-	-	1	2	1	2

연구개발성과 활용계획 및 기대 효과

- 본 연구의 결과물로서, 목질계 바이오매스를 그래핀으로 변환할 수 있는 새로운 형태의 레이저 공정기술과 생산장비를 개발/확보할 수 있으며, 이를 통해 사용되지 않던 목질계 바이오매스를 활용하여, 그래핀 대량생산이 가능할 수 있을 것으로 기대됨.
- 특히, 본 연구개발을 통하여 제조한 목질계 바이오매스 기반 그래핀은 고부가가치의 친환경, 고효율 이차전지 전극소재로 활용가능하며, 이차전지 산업 이외에 전자기파 차폐를 위한 건축 구조물, 차세대 유연/신축 센서의 탄소전극 및 고부가가치 마이크로 전자소재 산업의 리페어를 통한 제품가공 수율향상 등의 분야에서 추가적인 다양한 기여가 가능할 것으로 기대됨.
- 더불어, 세부적인 탄소전극 패터닝 조건들을 공유함으로써, 고품위 초정밀 레이저 목재변환/가공 기술에도 적용 가능.
- 목질계 바이오매스 변환기술의 세계 최고 수준으로의 도약/선도입지 구축.
- 국내 기업과 연구소들을 대상으로, 레이저 기반 재료변환 플랫폼의 가능성/우수성 전파 및 활용 성과 홍보를 통해, 레이저 기반 목질계 바이오매스 변환 제품들의 연구/개발 및 시장 적용을 가속화.

연구개발성과의 비공개여부 및 사유

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물

	구입 기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황									
국문핵심어 (5개 이내)	이차전지		탄소전극		레이저		미이용 바이오매스		생산장비
영문핵심어 (5개 이내)	Secondary battery		Carbon electrode		Laser		Unused biomass		Manufacturing equipment

< 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)

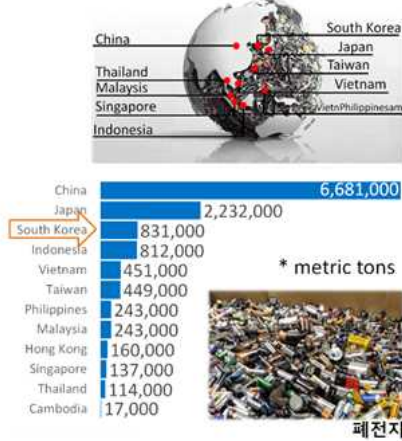
1. 연구개발과제의 개요

1-1. 연구목적

○ 본 연구는 목질계 미이용 산림바이오매스를 고효율 다중파장 레이저를 이용하여 다양한 응용성 (전자소자, 디스플레이, 센서, 방열소재, 에너지 전극소재 등)이 있는 레이저-유도-그래핀으로 변환할 수 있는 기술을 개발/최적화하고, 해당 변환기술을 통해 그래핀 소재를 양산할 수 있는 고생산성 탄소전극 생산 레이저 장비를 개발하는 것을 주 목적으로 함. 특히, 다양한 응용성 중에서 이차전지 전극 소재로의 응용성을 검증하기 위해, 본 연구개발을 통해 제조한 그래핀 소재를 기반으로 이차전지 소자 제작 및 셀 성능평가를 병행하고자 함.

- IT 모바일 기기의 다양화/첨단화에 따른 짧은 교체주기 → 폐전기/전자기기와 내장된 폐전자 발생 증가
- 전자자동차 및 ESS 시장 확대 → 효용 만료 및 폐기 등을 통해 배출되는 폐전자 급증 전망
- 폐전자 성분 : 수은, 카드뮴, 납 등의 중금속과 흔히 양젯물로 알려진 KOH 등이 포함
→ 처리나 자원회수 과정에서 안전성/경제성 이슈 및 환경오염 유발
- 환경 친화적이고, 지속 가능하며, 저비용의 효율적인 방법으로 제조 가능한 에너지 저장소자 개발이 필요함.

E-waste arising in east and southeast Asian countries, 2015



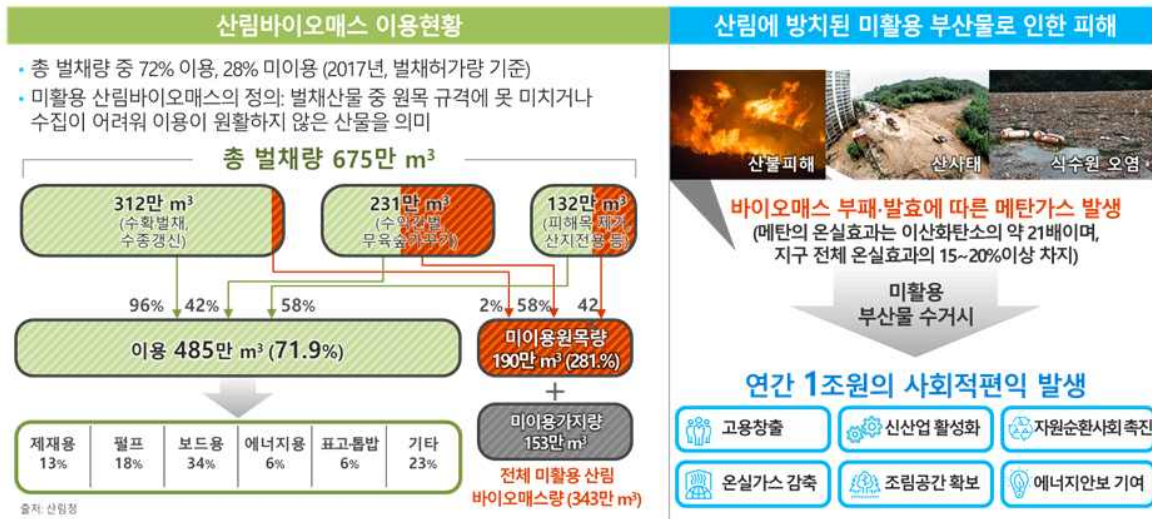
[그림 1. 친환경 에너지 저장소자의 필요성]

1-2. 연구개발의 필요성

[목질계 미이용 산림바이오매스의 활용 측면]

- 우리나라는 산림자원을 풍부하게 보유하고 있으나, 그 활용도는 낮은 수준에 머물러 있음. 2017년 기준 국내에서 벌채된 나무의 72%는 임지로부터 수집되어 제재목, 보드용, 펄프용 등으로 이용되었으나, 나머지 28%는 전혀 사용되지 못하고 임지 내에 방치된 채 버려진 것으로 조사됨.
- 미이용 바이오매스가 산림에 방치될 경우, 그 부산물로 인하여 산불피해, 산사태, 식수원 오염 등 산림 재해가 발생할 수 있음. 이를 수거하여 활용할 경우에는 고용창출, 신산업 활성화, 자원순환 사회 촉진, 조림공간 확보 등 연간 1조원의 사회적 편익이 발생할 것으로 기대됨.
- 이러한 미이용 바이오매스의 활용의 경우, 지금까지는 목재·목제품·목질계 소재 등을 주로 목재생산, 가공/유통, 바이오 연료 등의 분야에 활용해 옴. 아직까지 보다 고부가가치 산업인 ICT, BT, NT 등의 첨단 융복합 기술 기반의 연구 개발은 매우 제한적으로 이루어져 옴.

- ▶ 우리나라의 산림면적은 전 국토의 64%이고, 산림자원의 80%가 숲 가꾸기가 필요한 임령에 도달하여 풍부한 바이오매스 공급 잠재력을 가지고 있으나, 활용도는 낮은 수준에 머물러 있음. (출처: Konic Report 2016-072호, 한국환경산업기술원)
- ▶ 2017년 국내에서 벌채된 나무의 72% 이용, 나머지 28%는 전혀 사용되지 못하고 임지 내에 방치된 채 버려짐.
- ▶ 산림에 방치된 미활용 부산물로 인한 산림재해 발생 → 미활용 부산물 수거시 연간 1조원의 사회적 편익 발생
- ▶ 지금까지는 목재-목제품-목질계 소재 등을 주로 목재생산, 가공/유통, 바이오 연료 등의 분야에 활용해온 반면에, 고부가가치 ICT, BT, NT 등의 첨단 융복합 기술 기반의 연구 개발은 전무하였음.



[그림 2. 목질계 미이용 바이오매스의 활용 필요성]

[전자 폐기물의 증가 및 규제/비용 발생 측면]

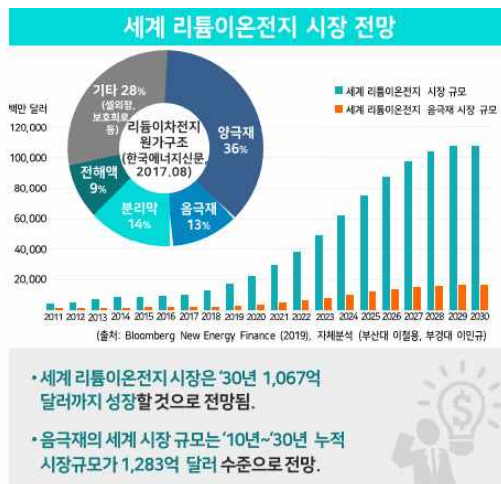
- 우리는 일상생활과 업무환경에서 다양한 전자기기를 사용하고 있으며, 이로 인해 전자 폐기물 역시 급격하게 증가함. 이에 따른 폐기물 처리 문제 및 환경적인 이슈 등이 많은 어려움을 야기함.
- 특히, 증가되는 전자전자제품의 소비/사용뿐 아니라, 모바일 기기의 첨단화에 따른 짧은 교체주기에 따라 폐전자전자제품에 내장된 폐전지의 발생 또한 증가하는 추세임. 하지만 이러한 폐전지의 수거 및 재활용에 어려움이 많으며, 수거 후에도 폐전지의 처리 문제, 안전성 이슈 및 환경적인 이슈들로 인하여 많은 어려움이 존재함.1)
- 더하여, 전기자동차 및 ESS 시장이 더욱 확대됨에 따라, 이차전지 시장은 더욱 커질 것으로 전망되며 이처럼 급성장하는 이차전지 시장의 속도에 상응하여, 효용 만료 및 폐기 등을 통해 배출되는 폐전지 또한 급증할 것으로 전망됨.
- 폐전지는 우리가 일상적으로 사용하는 휴대폰, 노트북, 카메라, 완구 등 각종 전자제품의 전원으로 사용되는 1, 이차전지가 수명이 다하여 발생하는 폐기물을 말하며, 폐전지는 연간 20%씩 증가하고 있어, 우리나라의 경우 연간 약 1억 5000만개의 전지가 사용되고 있는 것으로 나타남. 이중 한번 사용하고 버려지는 1차전지는 전체 중량의 약 80%를 차지하고 있으며, 충전하여 300~400회까지 재사용이 가능한 이차전지로 납축전지가 10%, 니켈-카드뮴 전지, 리튬이온전지 등이 나머지 10%를 차지하는 것으로 파악됨.2)
- 이들 폐전지 중에는 인체에 유해한 수은, 카드뮴, 납 등의 중금속과 흔히 양젯물로 알려진 KOH 등의 전해액이 포함되어 있으며, 단순 매립되거나 소각되는 경우 환경오염을 일으킬 수 있음. 이에 유럽연합(EU), 미국, 일본 등 해외 여러 나라에서는 폐전지를 재활용함으로써 환경오염을 방지하고 아울러 폐전지 내에 포함되어 있는 은, 아연, 니켈, 코발트, 리튬 등의 유가금속을 회수하여 천연자원을 대체하고자 하는 노력들이 진행되고 있음. 하지만, 폐전지의 자원회수 과정에서 안전성이나 경제성 이슈 및 환경오염 유발 가능성이 존재함.3)
- 현재의 CO₂ 배출에 대한 제한과 같이, 장기 전자 폐기물들의 처리로 인한 비용들이 증가할 것으로 예측되고 있으며, 세계적으로 폐기물 처리에 대한 환경규제들의 협의가 시작되고 있음.
- 따라서, 환경 친화적이고, 지속 가능하며, 저비용의 효율적인 방법으로 제조 가능한 에너지저장소재 및

1) 페리튬이온전지 재활용 관리방안 연구, 국립환경과학원 2016.
 2) 폐전지 활용 기술의 특허동향, 정보통신연구진흥원, 주간기술동향 통권 1389호, 2009. 3. 25.
 3) 이차전지의 폐자원흐름 분석 및 자원순환성 제고방안 (2017-08), 한국환경정책·평가연구원 (KEI)

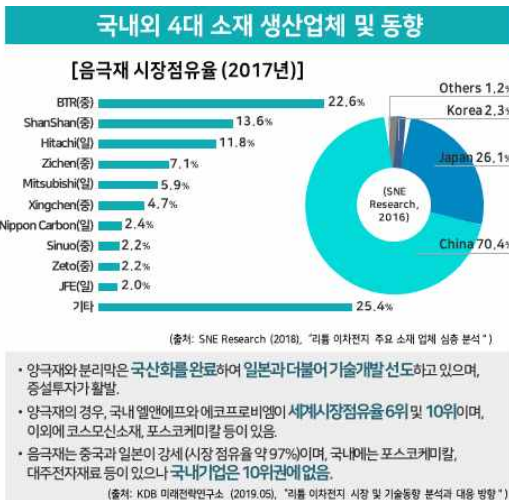
소자개발에 대한 필요성이 점차 증대되는 추세임.

[리튬이차전지 시장 전망 및 기술 동향]

- 최근 전기, 전자 및 정보 통신 분야의 급속한 발전으로 인하여 스마트폰, 노트북 등의 소형 휴대 기기의 수요가 폭발적으로 증가하고 있으며, 환경 및 에너지 문제와 관련하여 에너지 저장시스템 (Energy Storage Systems, ESS)과 전기 자동차 (Electric vehicles, EVs)의 필요성이 크게 대두되고 있음.
- 리튬이온전지의 활용 범위 및 수요 확대에 따라 리튬이차전지 시장은 지속적으로 확대될 전망이며, 전기차 시장의 급성장에 힘입어 리튬이온전지 세계 시장 규모는 점차 증가하여 '30년에는 1,067억 달러까지 성장할 것으로 예상됨.⁴⁾ (ppt 발표자료, 출처: Bloomberg new energy finance 2019, 자체 분석_부산대 이철용, 부경대 이민규)
- 그러나 리튬이온전지 핵심소재의 해외 의존 및 기술한계 봉착으로 인한 개발경쟁 과열 등 이슈가 심화되는 상황으로 국내 배터리 산업의 경쟁력 향상을 위해서는 핵심 소재의 국산화가 필요함.
 - 리튬이차전지는 리튬화합물로 구성된 양극재, 탄소로 구성된 음극재, 분리막 및 전해질의 4대 핵심소재로 구성.
 - 양극재와 분리막은 국산화를 완료하여 일본과 더불어 기술개발 선도하고 있으며, 증설 투자가 활발히 진행중. 양극재의 경우, 국내 엘앤에프와 에코프로비엠이 세계시장점유율 6위 및 10위이며, 이외에 코스모신소재, 포스코케미칼 등이 있음.
 - 음극재는 중국과 일본이 강세 (시장 점유율 약 97%)이며, 국내에는 포스코케미칼 대주전자재료 등이 있으나 국내기업은 10위권에 없음.⁵⁾



[그림 3. 세계 리튬이온전지 시장 전망]



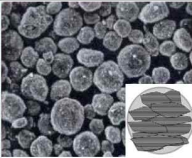
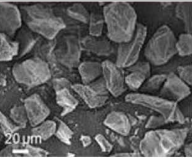
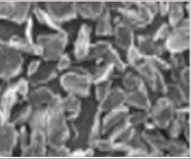
[그림 4. 국내외 4대 소재 생산업체 및 동향]

4) Bloomberg new energy finance 2019, 자체 분석_부산대 이철용, 부경대 이민규

5) 리튬 이차전지 시장 및 기술동향 분석과 대응 방향, KDB 미래전략연구소, 2019. 05.

[리튬이온전지 음극소재 기술 개발의 필요성]

- 리튬이온전지의 충전 및 방전은 전지가 충전이 될 때는 양극에 있던 리튬이온과 전자가 음극으로 들어가며, 반대로 방전이 될 때는 음극에 있던 리튬이온과 전자가 양극으로 이동함. 이때, 음극이 리튬이온을 얼마나 빠른 속도로 받아들일 수 있는지가 리튬이온전지의 충전 속도를 좌우하는 핵심요소로, 이는 음극 소재의 구성 및 전극 구조의 특성에 많은 영향을 받음.⁶⁾
- 현재 상용 음극으로 사용되고 있는 흑연계 및 탄소계 소재를 대체하기 위하여, 이론적으로 높은 에너지 밀도를 갖는 금속계(Si, Sn) 물질 사용이 고려되고 있으나, 수명 문제가 지속적으로 제기되고 있어, 흑연계와 탄소계가 여전히 대세를 이루고 있음.
- 한편, 고출력(충전)용으로 TiO_{2-x}, LTO 등 타이타늄계 후보군들이 대두되었지만, 현재 사용되고 있는 흑연계 소재보다 낮은 이론용량의 한계로 인하여 전기자동차를 비롯한 대용량 리튬이온전지용 전극소재로의 활용이 이루어지지 않고 있음.

구분	천연흑연	인조흑연	금속계	저결정탄소
구조				
원료	천연흑연	피치/코크스	SiO _x , Si 탄소 복합계	피치/코크스 열경화성수지
용량(mAh/g)	350~360	320~340	600~1,600	200~250
출력	하	중	중	상
수명	중	상	하	중
장점	고용량	고수명	고용량	고출력
제조사	포스코케미칼, 애경유화, BTR, Shanghai, Shanshan, Hitachi, Mitsubishi	포스코케미칼, Shanshan, Hitachi, Zichen	Shinetsu, OTC, BTR, 3M, Mitsui	Nippon Carbon, Mitsubishi, JFE Chemical

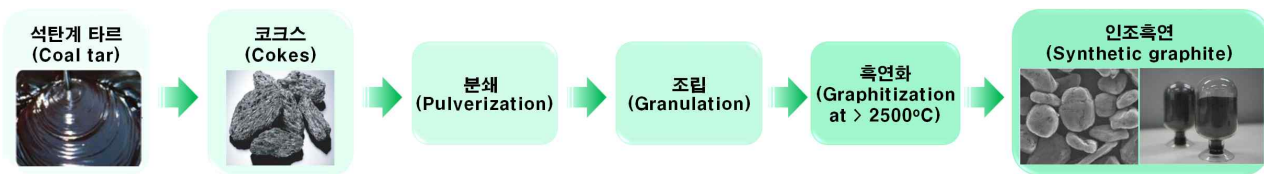
자료 : SNE Research, KDB산업은행, 키움증권

[그림 5. 리튬이온전지 음극활물질 종류 및 특징]

1-3. 기존 기술의 문제점

[기존 흑연 음극소재 제조 공정의 문제점]

- 리튬이온전지의 음극소재로 주로 사용되는 흑연의 경우, 광산에서 채굴하여 획득하는 천연 흑연과 석유 코크스와 피치 코크스를 원료로 하여 2500 °C 이상의 고온으로 가열해서 만들어지는 인조 흑연으로 구분할 수 있음. 인조 흑연의 경우, 천연 흑연에 비해 결정구조가 일정하고 안정적이며 충방전 수명이 천연 흑연보다 길지만 가격이 상대적으로 비싸다는 단점이 있음.



[그림 6. 기존 음극소재(인조흑연) 제조 공정]

- 인조흑연 음극재는 지금까지 일본과 중국 등에서 전량 수입해왔으나 최근 국산화가 진행되고 있음. 2018년 기준 음극재료 시장 규모는 18억 달러로 예상되며 연간 평균 15~30% 사이의 성장률로 2025년 음극재 시장규모는 76억 달러까지 성장할 것으로 예상되며 이는 현재 시장규모의 4배 이상이 될 전망이다.⁷⁾
- 인조흑연의 생산과정을 살펴보면, 보통 콜타르를 가공하여 인조흑연의 원료인 침상코크스(needle coke)를 만든 후, 침상코크스를 적정한 사이즈로 분쇄(pulverization)한 후, 원하는 상태로 뭉치는

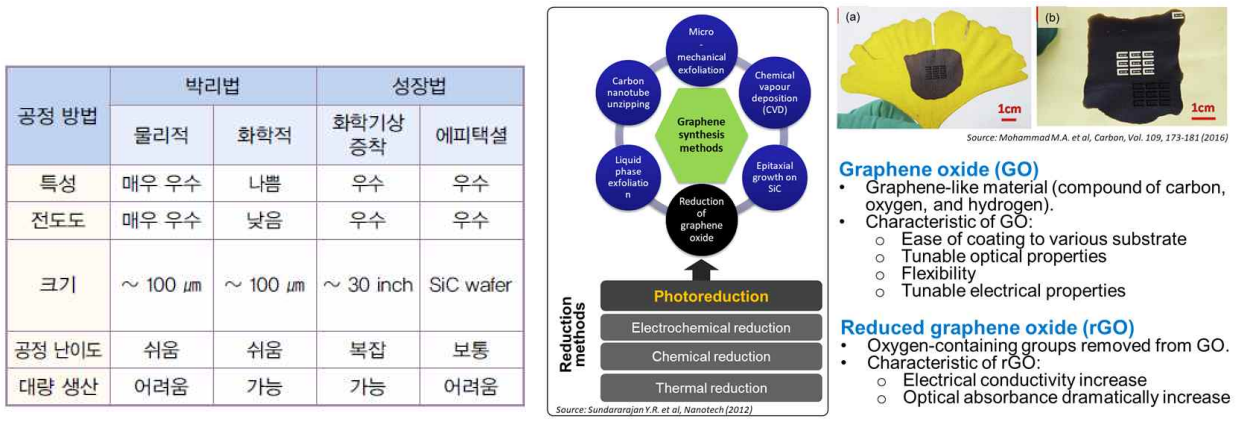
6) 리튬이온전지의 10C(6min)급 급속충전을 위한 융복합 음극소재 개발, 한국산업기술평가관리원 포커싱 이슈, 2018.

7) 리튬이차전지 소재 기술동향, S&T Market Report, Vol. 62, 과학기술일자리진흥원, 2018.09.

(granulation) 과정을 거쳐 음극재로서의 기본 형상을 만든 후 이 탄소덩어리를 2500 °C 이상의 고온에서 가열하면서 흑연화(graphitization)를 통하여 인조흑연을 제조함. 이와 같이 공정이 복잡하고 기존의 석유계 부산물 기반 원료를 사용하여 친환경적이지 못함.

[새로운 음극소재 대체재로서의 그래핀 제조공정의 문제점]

- 현재 그래핀을 합성/생산하는 방법은 크게 셀로판테이프를 활용한 기계적 박리법, 메탄과 수소 등과 탄소의 반응을 이용한 화학증착법, 실리콘 카바이드를 한층 한층 쌓아 올려 만드는 에피텍셜 합성법, 산화-환원 반응을 이용한 화학적 박리법 네 가지로 구분됨.



[그림 7. 그래핀의 합성방법과 이에 따른 생성된 그래핀의 특성 차]

- 화학적 박리법 (Exfoliation)은 그래핀의 대면적 성장과 대량생산이라는 두 가지 목표에 가장 근접해 있는 방법으로 알려져 있으며, 흑연의 산화-환원 특성을 활용한 방법임. 흑연을 강산과 산화제 등으로 산화시켜 산화 흑연(Graphite Oxide)을 제작 후, 물과 달게 하면 산화 흑연의 강한 친수성으로 물 분자간과 면과 면 사이에 침투함. 물 분자에 의해 산화 흑연의 면간 간격이 벌어지면, 초음파 분쇄기 등을 통해 쉽게 산화 그래핀 시트를 생산할 수 있음. 이후 환원(Reduction) 공정을 통해 불순물을 제거하면 그래핀이 생성되나, 이 환원공정에서 불순물 발생 등의 단점이 있음.
- 화학적 박리법으로 그래핀을 합성하는 방법 중 하나로, 빛의 광자 에너지 (Photon-energy)를 기반으로 하는 광환원(Photo-reduction) 방법을 적용할 수 있음. 보다 높은 퀄리티의 그래핀을 획득하기 위해, 광환원의 에너지원으로 일반 램프 및 LED 광원 외에, 레이저를 이용하는 레이저 직접 묘화(Direct Laser Writing)가 최근 활발히 연구되고 있음.

1-4. 개발 기술의 차별성 및 우수성

[친환경 에너지저장 전극소재 및 제조 공정 기술]

- 본 연구에서는 목질계 미이용 파우더형 바이오매스를 활용하여, 다중파장 레이저 직접묘화 (Laser Direct Writing, LDW)를 통한 재료변환 공정을 통하여, 친환경 탄소전극 소재를 높은 변환효율 높은 가격 경쟁력을 가지고 생산하고자 함.



[그림 8. 다양한 목질계 미이용 바이오매스의 탄소전극화를 위한 레이저-유도-그래핀으로의 변환]

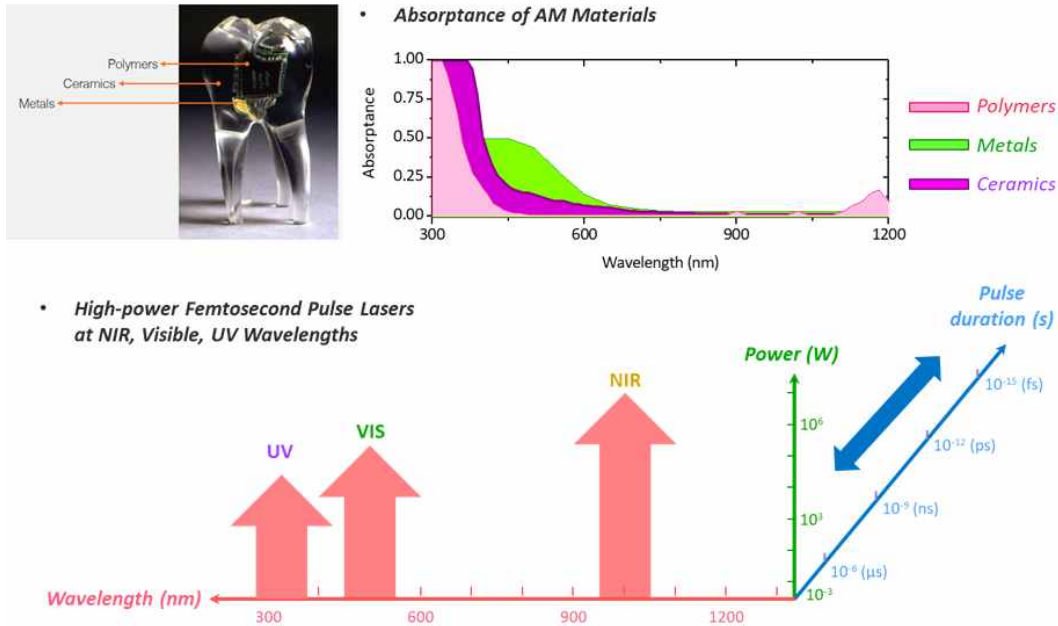
- 그래핀(Graphene)은 탄소 원자들의 sp² 결합으로 이루어진 벌집모양의 2차원 평면 구조의 탄소 동소체로, 2004년 영국 맨체스터 대학의 Geim과 Novoselov는 스카치 테이프를 사용하여 흑연으로부터 그래핀을 박리시키고 해당 그래핀의 독특하고 뛰어난 물성을 확인하였으며, 이후 많은 연구자들이 다양한 응용 연구들을 진행하고 있음. Geim과 Novoselov 교수는 그래핀 분리에 대한 공로로 2010년 노벨 물리학상을 수상함. 그래핀은 우수한 물리적, 전기적 특성을 가짐. 반도체 주 원료인 실리콘보다 100배 이상의 높은 전자 이동도를 보이며, 구리보다 100배 이상의 전기전도도를 가짐. 인장 강도는 강철의 200배 이상이며, 신축성이 좋아 10% 이상 면적을 늘리거나 구부려도 전기전도도가 감소하지 않음. 또한 열전도도가 구리보다 10배 이상이며, 물질 중 가장 높은 열전도도를 가지는 다이아몬드보다도 2배 이상 높은 수치를 제공함. 더불어, 빛에 대해 98% 이상의 높은 투명도를 보임.
- 최근 Graphene Oxide (GO)에 레이저를 조사하여 광환원(Photoreduction)을 반응을 일으킴으로써, reduced Graphene Oxide (rGO) 혹은 레이저의 포톤 에너지를 기반으로 탄소가 포함된 유기물질을 Laser Induced Graphene (LIG) 기반으로 변환시켜 탄소전극을 생성하는 연구 결과들이 보고되고 있음.
- 레이저 직접묘화는, 간단히 레이저 빔의 방향을 스캐닝 하는 것만으로, 디자인된 임의의 패턴의 제작이 가능함. 고비용의 마스크 제작 단계 없이도 패터닝이 가능하므로, 가공 공정이 매우 유연하여, 다양한 응용분야의 요구에 빠르게 대응 가능함. 패터닝 분해능은 광학 회절한계인 마이크로미터 이하 수준까지 도달 가능함. 패터닝 속도는 수백 mm/s의 높은 속도까지 구현이 가능하며, 별도의 후처리가 필요없는 청정 공정임.

	Semiconductor Lithography	Chemical Synthesis	Laser-based DLW
Conceptual Figures			
Process Complexity	Very High	Medium	Low
Design Flexibility	Medium	Very Low	High
Investment cost	Very High	Low	Medium

High Temperature, Vacuum, Chemicals, Skilled Manpower
➔
Room Temperature, Ambient Air, No Chemicals

[그림 9. 레이저 직접묘화 기반 패터닝 공정의 강점/우수성]

- 이러한 레이저 직접묘화 기술은 사용하는 레이저의 출력, 파장, 펄스 폭, 반복률, 빔 크기, 스캔속도 등 다양한 조건들에 의해 그 특성에 의해 포톤-물질의 상호작용 특성이 달라지므로, 이에 대한 깊은 이해, 통찰 및 매개변수 최적화 과정이 필수적임. 레이저의 이득물질 및 물리적인 한계들로 인해, 재료 패터닝에 최적의 조건을 모두 시험해 보기 위해서는, 다수의 다양한 종류의 레이저를 갖추고 비교/평가 하여야 하지만, 이는 실질적으로 매우 어려움. 극초단 펨토초 레이저는, 그 높은 첨두출력을 이용하여 비선형 광학 현상을 통해 파장을 쉽게 변환할 수 있음. 더불어 첨두출력은 수백 테라와트 이상 급까지 높일 수 있으며, 펄스 폭도 분산 조절을 통해 능동적으로 제어가 가능함. 이에, 극초단 펨토초 레이저를 이용하여 최적의 재료 가공조건을 찾고, 해당 조건을 높은 가격 경쟁력으로 구현할 수 있는 레이저 시스템을 찾거나 개발하는 것이 합리적인 접근 방법임.



[그림 10. 물질의 흡수율과 다중파장 레이저의 필요성: 극초단 레이저의 다양한 파장, 출력, 펄스 폭의 접근성]

○ 현재까지 보고된 문헌들을 기반으로, 레이저 종류에 따른 레이저-유도-그래핀의 탄소전극 형성에 있어서의 장단점을 비교하면 아래와 같음. 적외선 대역의 CO₂ 레이저 및 UV 대역의 레이저가 목질계 및 폴리머 재료들에서 우선 높은 흡수율을 보임. 하지만 CO₂ 레이저는 높은 열적 효과에 의해 재료의 대부분이 탈락되어 제거되므로, 실질적으로 전체 재료대비 레이저-유도-그래핀으로 변환되는 비율이 매우 낮음. 이에, N₂ 혹은 Ar과 같은 가스를 통해 산화를 억제하거나 재료탈락 억제를 위한 Fire Retardant를 적용해야 하며, 이는 생산성을 크게 낮추게 됨. UV 레이저는 흡수율이 상당히 높고 포톤 에너지가 높아 레이저-유도-그래핀으로의 변환을 효과적으로 일으킴. 하지만 높은 흡수율로 인해 침투 깊이가 낮아, 재료의 표면 부근에서만 개질이 주로 발생하게 됨. 더불어 CO₂ 레이저보다는 낮으나, 여전히 재료의 탈락의 영향을 받음.

[레이저 종류에 따른 레이저-유도-그래핀 탄소전극 형성에 있어서의 장단점 비교/분석]

- 지금까지는 하나의 레이저를 시스템을 선정하여 레이저-유도-그래핀의 생성에 적용해 옴. 하지만, 목재-그래핀 변환 공정은 실질적으로 온도 대역은 최소 2~3개 이상으로, 이에 대응하기 위한 온도 조합을 만드는 데는, 다중파장의 레이저 시스템이 유리할 수 있을 것으로 판단됨. 이에, 최적의 레이저-유도-그래핀 성능을 구현하면서도 높은 가격 경쟁력을 확보하기 위한, 고효율 다중파장 레이저 기반 레이저-유도-그래핀 생산장비에 대한 연구/개발이 필요함.
- 초단 펄스 레이저는 대기 중 먼저항, 목질 대비 그래핀 변환효율, 전극 용량 면에서 공히 높은 성능을 보이고 있음. 현재는 광원 시스템의 가격이 비교적 높다는 부분이 적용에 있어 제한점으로 작용함.

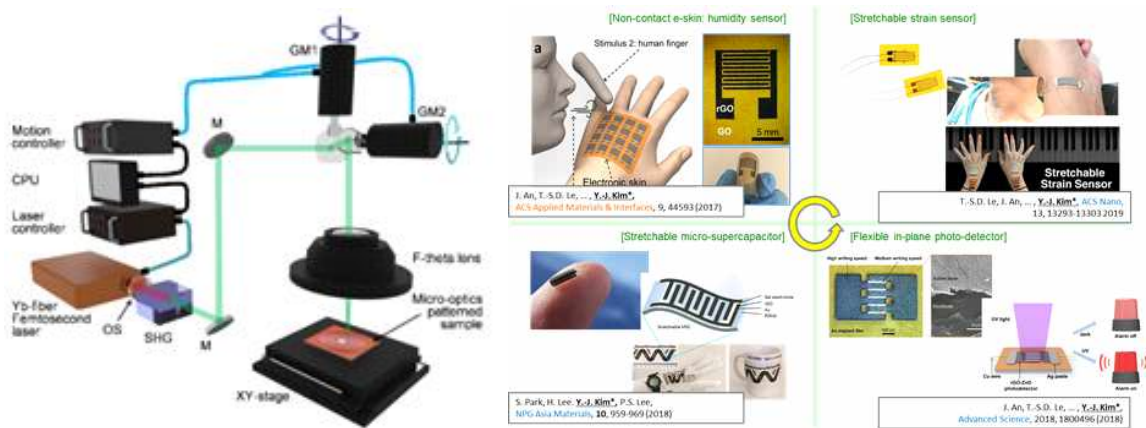
레이저 종류	발진파장 (nm)	대기 중 먼저항 (Ω/□)	목질대비 그래핀 변환효율	전극용량 (mAh/g)
CO ₂ 레이저	10,600	높음	낮음	낮음
Nd:YAG 레이저	532 or 1064	높음	낮음	낮음
Yb 광섬유 레이저	1030 or 1060	높음	낮음	낮음
UV 다이오드 레이저	400	중간	낮음	중간
NIR 다이오드 레이저	830 or 980	높음	낮음	낮음
Yb 광섬유 펄스 레이저	344, 515 or 1030	낮음	높음	높음

- 또한, 지금까지 목질계 미이용 파우더형 바이오매스를 고출력 다중파장 레이저 기반으로 레이저-유도-그래핀으로 변환하는 기술에 대한 접근은 전무하였으며, 그래핀 대량생산을 위한 공정변수의 최적화를 통한 고생산성 그래핀 소재 생산장비 개발 역시 없어왔으며, 이를 실제 이차전지에 적용할 수 있도록 레이저로 변환된 그래핀 탄소전극을 기반으로 하는 이차전지 소자제작 및 셀 성능평가 역시 전무함.
- 따라서 본 연구에서는 다중파장 레이저를 사용하여 파우더형 재료에서의 레이저-유도-그래핀의 생성 메커니즘의 정확한 규명과 더불어, 레이저의 입력변수에 따른 레이저-유도-그래핀 탄소전극의 핵심 성능 최적화에 대한 전략적인 연구/개발을 통해, 양산가능한 생산장비를 개발하여, 다양한 차세대 이차전지 산업분야에서 요구되는, 환경 친화적이며 지속가능한 이차전지 전극 소재 개발 실현을 위한 패터닝 기술을 세계적으로 선점할 수 있을 것으로 기대.

1-5. 연구 개발 대상의 국내·외 현황

[국내 현황]

- 국내에서 이루어진 산림자원 바이오매스를 이용하여 에너지 소재로 응용한 대부분의 연구는 미활용 바이오매스를 수열반응이나 고온에서의 탄화과정을 거친 후 활성화시켜 활성탄 소재를 만들고 그것을 에너지저장 전극 소재로 적용하는 연구들이 주를 이루고 있음.
- 본 연구팀에서는 2004년부터 광결정 기반의 Ti:Sapphire 레이저와 Er- 및 Yb-도핑된 광섬유 기반의 고출력 레이저를 포함하여 다양한 형태의 극초단 레이저를 개발하고, 이를 초정밀 측정 및 가공 분야에 적용해 왔음. 특히 최근에는, 레이저 직접묘화 기반 전자소자 패터닝 기술의 개발에 2014년 이후 집중해 왔으며, 해당 분야의 선도적인 연구결과들을 아래 그림과 같이 ACS Nano, Advanced Science, Advanced Functional Materials, NPG Asia Materials, ACS Applied Materials and Interfaces, Carbon 등 국제 저명 학술지에 보고해 옴.
- 하지만, 목재나 나뭇잎을 그 원재료로 사용하여 극초단 레이저로 레이저-유도-그래핀으로 변환시키는 연구들을 통해, 탄소전극의 패터닝 가능성은 확인하였으나, 대량생산을 위한 파우더 형태의 탄소전극에 대한 접근은 전무하였으며, 극초단 레이저 이외의 다양한 레이저 광원들에 대한 고려를 통한 양산성 향상 및 생산장비의 개발에 대한 접근 역시 전무하였음.



[그림 11. 본 연구단의 레이저 직접묘화 기반 레이저-유도-그래핀 전자소자 패터닝 결과예시]

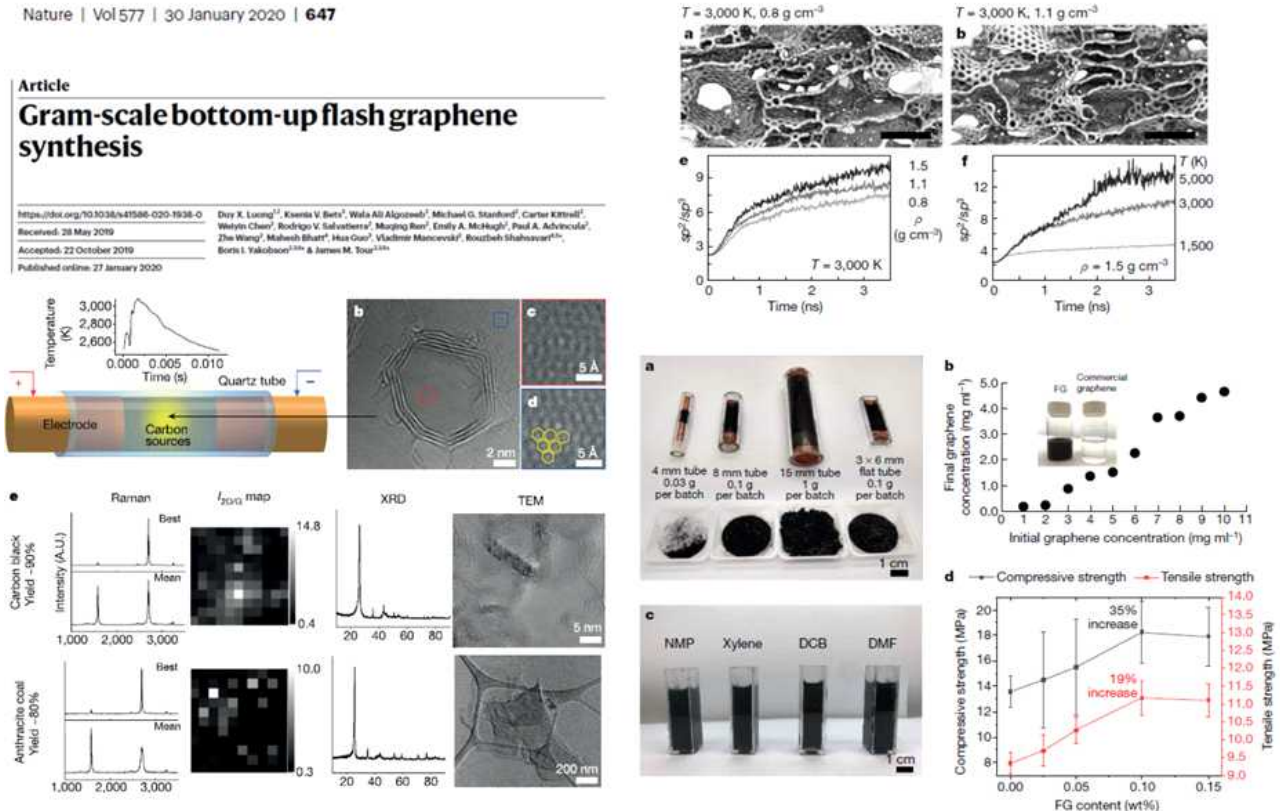
- 더불어, 대면적에서 레이저-유도-그래핀을 이용한 광학 시스템과 관련하여서는 제한된 수준의 연구만이 이루어짐. 정확한 레이저-유도-그래핀의 생성 메커니즘도 아직 규명되지 않았으며, 입력변수에 따른 패터닝된 레이저-유도-그래핀의 광학적 특성변화에 대한 세부적인 이해도 불충분함.
- 요약하면, 현재까지 목질계 미이용 파우더형 바이오매스를 이용하여, 고부가가치의 친환경 생분해성 레이저-유도-그래핀 탄소전극 소재 및 장비연구는 국내에서 진행된 바 없음. 특히 대량 생산장비를 위한 높은 기술성숙도 단계(Technology Readiness Level:TRL)를 지향하는 연구는 전무함.

[국외 현황]

- 나무 등 산림자재상의 레이저 기반 전극 패터닝 기술에 대한 연구는 2015년 이후, 미국 Rice 대학의

James M. Tour 교수 연구팀에서 보고되기 시작함.

- Tour 교수 연구팀은 CO₂ 레이저 기반의 연속파 레이저 기술을 이용하여 전극 패터닝 기술을 개발하고 있음. 하지만, CO₂ 레이저 기반의 연속파 레이저 기술은 강한 열적효과로 인해 재료들이 쉽게 파괴되어, 진공챔버 내에서 혹은 특별한 열적효과를 억제하기 위한 화학물질들을 병용하여서만 가능함. 또한, 고해상도의 선폭 제작이 어렵고 상대적으로 오랜 시간이 소요되며 효율이 낮은 문제가 있음.⁸⁾
- 최근 2020년에는, Tour 교수 연구팀에서, 리그닌 파우더, 커피 파우더, 플라스틱 파우더 등의 파우더형 원재료를, 짧은 시간에 전기장을 통해 높은 에너지를 가해 고온상태를 유도하여 탄소전극으로 변환하는, 플래시 그래핀(Flash Graphene: FS)의 생성을 보고함. 이는 파우더형 재료의 탄소전극의 생성 가능성을 새로이 제시한 것으로 평가되어, 2020년 이후 Nature 본지 및 ACS Nano 등에 다수 보고되고 있음.



[그림 12. Tour Group의 파우더형 목질계 재료의 탄소전극화 가능성 관련 Nature 2020년 논문]

- 하지만 파우더에서 레이저를 기반으로 한 그래핀 탄소전극을 생성한 관련 논문은 현재까지 전무함. 본 연구는 이러한 최초의 레이저-유도-그래핀의 생성 시도에서, 나아가 양산을 위한 생산장비까지의 개발과 사업화를 목표로 함.

8) J. M. Tour et al. Acc. Chem. Res., 51, 1609 (2018)

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

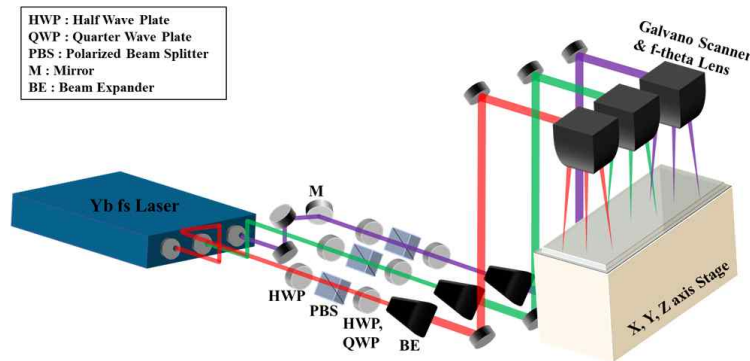
◎ 1차년도 (2021년) 연구 결과

1) 다중파장 레이저 기반 목질계 미이용 파우더형 바이오매스의 이차전지용 친환경 생분해성 탄소전극으로의 변환기술 개발/최적화

- 1차년도 연구에서는 목질계 파우더형 바이오매스의 이차전지용 친환경 생분해성 탄소전극을 생성하기 위한 변환기술을 개발하기 위한 장비 구축 및 변환 기술 확보 및 레이저 광원 측면에서의 파장, 펄스폭, 가공속도 등 다양한 테스트 진행을 통한 최적화를 진행하였고, 이를 통해 높은 전기전도도를 지닌 양질의 탄소전극 획득을 실현함.

1-1) 적외선, 근적외선 및 가시광선 레이저와 유기 물질과의 상호작용 비교/이해

- 극초단 레이저 기반의 친환경 생분해성 미활용 산림 바이오매스를 이용한 그래핀 전극 패터닝 공정 설계를 위해 다양한 파장 영역의 (적외선, 근적외선 및 가시광선) 레이저 기반 레이저 유도 그래핀 전극 패터닝 시스템(그림 13은 해당 시스템의 구성도)을 구현함.



[그림13. 레이저 직접묘화 기반 레이저-유도-그래핀 패터닝 시스템 구성도]

- 본 연구단이 구성한 극초단 펨토초 레이저는 Yb(이터븀)-광섬유 기반 40 μ J 고출력 근적외선 (1040 nm) 펨토초 레이저 엔진과 이를 기반으로 비선형 파장변환을 통해 생성하는 가시광선 (520 nm) /자외선 (347 nm) 파장을 포함하는 다파장 변환 모듈 레이저로써, 레이저의 높은 첨두 출력과 다중파장은 레이저 기반 패터닝 및 리페어링 등에 매우 핵심적인 기능으로 구성함.
- 또한, 250 펨토초 수준의 극초단 펄스폭을 구현하고, 이러한 짧은 펄스 폭은 높은 첨두 출력과 이어지며, 열적인 주변 영향을 최소화한 초미세 가공을 가능하게 함.
- 본 연구에서는 고출력 고반복률 Yb 파이버 기반의 극초단 펨토초 레이저를 기반으로 실제 산업계 적용을 위하여 요구되는 가공 속도, 포커싱 성능 및 집진 기능이 가능한 레이저 직접묘화 가공 시스템을 구축하였음 (그림14.).



[그림14. 레이저 직접묘화 패터닝 시스템 구성 이미지]

○ 또한, 다파장에서의 반복률 및 스캔 속도 등의 광학적 파라미터가 다양한 물질에서의 레이저-유도-그래핀 (Laser Induced Graphene, LIG) 생성에 미치는 영향을 실험적으로 검증함으로써, 최적의 친환경 생분해성 미활용 산림 바이오매스를 이용한 LIG 전자 소자 패터닝 공정을 개발함.

Laser description	Value	Galvano Scanner description	Value
Max Power	Up to 7 W (1040 nm)	Aperture	10 mm
Wavelength	1040 / 520/ 347nm	Scanning Range	110 * 110 mm
Pulsewidth	250 fs	Marking speed	100 mm/s
Repetition rate	0.2 ~ 20 MHz		

[표1. 본 연구에서 사용한 펨토초 레이저 & 갈바노스캐너 사양]

- 자외선 대역 파장의 펨토초 레이저는 광자 자체의 높은 에너지로 인해 강력한 광 흡수가 가능하므로, 가공 측면에서 높은 흡수율로 인해 다양한 재료에 더 쉽고 정밀하게 가공할 수 있다는 장점이 있으며, 근적외선 대역 파장의 펨토초 레이저는 3차 조화파인 자외선 대역 대비 안정적이고, 열손상 깊이를 줄일 수 있으며, 더욱 빠르게 가공할 수 있다는 장점을 지님.
- 해당 펨토초 레이저 직접 묘화 시스템을 이용하여, 탄소 기반 전극인 레이저-유도-그래핀(LIG) 전극을 생성함.
- 리그닌/ 차콜 등의 탄소 기반 파우더를 슬라이드 글라스 위에 고르게 펴주고, 상단에 글라스를 덮어 파우더를 고정함. 파우더 위에 펨토초 레이저 직접 묘화로 패터닝을 시행한 뒤 생성된 LIG 전극의 면저항 혹은 저항 측정 후 생성된 그래핀 파우더를 수집하는 방식으로 실험이 진행됨(그림15.).



[그림15. 본 연구에서의 LIG 생성 및 수집 방법]

- 다파장에서의 스캔 속도 및 출력 조절을 통해 최적의 전기전도도를 전극을 생성하기 위한 테스트를 진행함.
- 하단 결과(표2)에서처럼 근적외선 대역에서 2.5 W에 40 mm/s 조건에서 200 Ω/□ 이하의 낮은 면저항을 얻을 수 있었음. 낮은 레이저 파워 조건(1~1.75 W)에서 탄소전극을 생성하기 위해서는 낮은 속도의 스캔이 필요함. 그러나 레이저 펄스의 겹침 횟수가 늘어남에 따라 열이 많이 축적되어, 열 손상으로 인한 낮은 퀄리티의 탄소 전극 생성됨.
- 열 발생으로 인한 손상을 적절하게 억제하면서도 양질의 그래핀으로의 치환율을 높이기 위해서는 빠른 속도 및 적절하게 높은 광 에너지를 필요로 함.

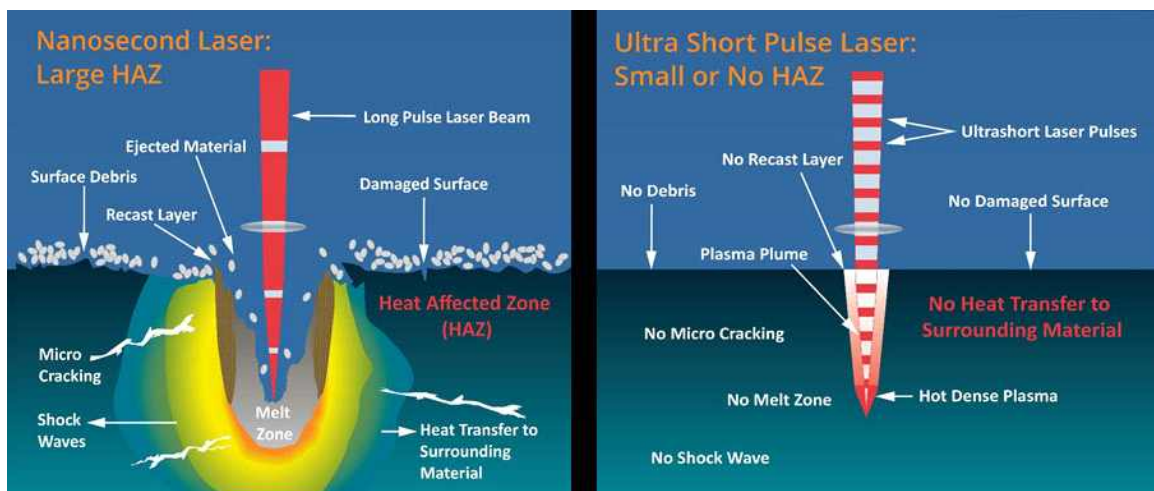
- 반면 가시광선 대역 및 자외선 대역 레이저의 경우 기본 파이버인 근적외선 펄스 레이저의 비선형 광학 현상에 의한 2차 조화파 및 3차 조화파의 생성으로 이루어지고, 해당 과정에서 광출력 손실이 생기기에, 2 W 이상의 높은 출력을 생성하기에 현재 레이저 직접 묘화 시스템에서는 다소 어려움이 있음.
- 향후 레이저닉스 등과의 협업을 통해 높은 출력의 가시광선 및 자외선 대역에서도 양질의 그래핀 파우더를 얻을 수 있는 지 검토할 예정.

Rs (Ω/sq)	NIR (1040 nm)					VIS (520 nm)		UV (347 nm)
	5mm/s	10 mm/s	20 mm/s	30 mm/s	40 mm/s	5 mm/s	10 mm/s	5 mm/s
0.5 W	∞	∞	-	-	-	Ablation	∞	2.34*10 ⁶
0.75 W	∞	∞	∞	-	-	Ablation	6.73*10 ⁶	Ablation
1 W	2.00*10 ⁴	1.28*10 ⁴	7.08*10 ⁴	∞	-	출력 부족		
1.5 W	7.00*10 ³	1.50*10 ⁴	4.90*10 ⁴	∞	∞	- : 카본화되지 않음. ∞ : 일부 카본화, 저항 측정 불가 Ablation : 높은 에너지로 인한 데미지, 크랙 등 발생으로 측정 불가		
2 W	Ablation	6.82*10 ³	1.28*10 ³	4.84*10 ²	2.64*10 ²			
2.5 W	Ablation	Ablation	2.32*10 ³	3.05*10 ²	1.92*10 ²			

[표2. 본 연구의 펄스 레이저 기반 LIG의 각 파장별 면저항 결과]

1-2) 연속파, 나노초 및 펄스 레이저와 유기 물질과의 상호작용 비교/이해

- 펄스 레이저는 매우 짧은 펄스폭과 극도로 높은 첨두 출력의 특징으로 인해 최근 재료 가공에 많이 사용됨. 이는 레이저와 재료간의 상호 반응이 긴 펄스폭 혹은 연속파 레이저에서의 상호 반응과 상이하기 때문임.
- 일반적 레이저 가공의 경우 레이저 광 에너지가 재료에 흡수된 후 열 에너지로 전달되어 재료의 개질 및 용융, 증발 등의 상 변화를 통해 가공이 진행됨.
- 반면, 펄스 레이저의 경우 극초단 펄스의 전자가 여기되는 시간 스케일이 전자-포논 결합 시간(수~수십 피코초)보다 적으므로 열확산을 효과적으로 억제 가능하며, 이는 회절 한계까지의 가공 분해능을 구현할 수 있음.
- 펄스 레이저의 제어 가능한 열 증착 및 저온 가공은 열에 민감한 폴리머 등의 기판에 전도성 마이크로 패터닝을 구현하는 등 다양한 응용 분야에서 유용한 것으로 밝혀짐.
- 이러한 특성으로 인해 펄스 레이저는 재료 과학 분야에서 기존에 해결하지 못한 문제점들을 해결할 수 있는 유망한 도구로서 평가받고 있음.



[그림16. 레이저 가공에서의 긴 펄스폭(나노초)과 짧은 펄스폭(펄스초) 레이저의 가공 비교]

- 본 연구단이 구성한 극초단 펄스 레이저는 Yb(이터븀)-광섬유 기반 40 μJ 고출력 펄스 레이저 엔진

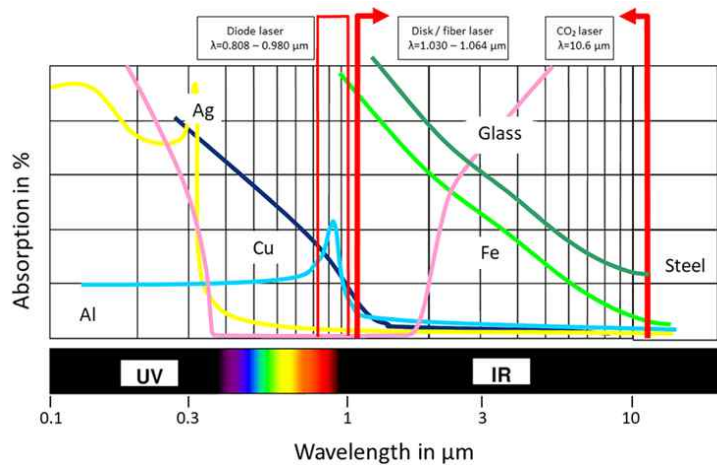
으로써, 레이저의 높은 침투 출력은 레이저 기반 패터닝 및 리페어링 등에 매우 핵심적인 기능으로 구성함.
 ○ 또한, 250 펨토초 수준의 극초단 펄스폭을 구현하고, 이러한 짧은 펄스 폭은 높은 침투 출력과 이어지며, 열적인 주변 영향을 최소화한 초미세 가공을 가능하게 함.

○ 긴 펄스폭, 긴 파장의 레이저 (CO₂ 레이저)를 사용하여, 공기 중에서 그래핀을 생성하는 데 있어서 어블레이션(ablation) 혹은 심각한 연소 발생으로 인하여 제대로 된 그래핀 전극을 형성하는 데 많은 어려움을 겪음.

- 이를 해결하기 위한 방법으로 과거 선행 연구들에서는 내화 처리 혹은 진공 및 산소 억제를 위한 가스 배기 등의 복잡한 방식으로 그래핀 전극을 형성함.

○ 본 연구에서는 해당 문제를 펨토초 레이저의 특징인 매우 짧은 펄스폭과 낮은 플루언스(단위면적당 에너지)의 펄스 트레인으로 해결하였는데, 펄스 트레인은 열적으로 활성화된 재료를 심각한 변형 혹은 열 손상 없이 LIG로 효율적으로 변환이 가능함을 확인하였음.

○ 실제 펨토초 레이저 기반 LIG 생성이 나노초 레이저 혹은 연속파 레이저 대비 양질의 높은 전기전도도를 갖는 전극을 생성할 수 있음을 검증하고자 연속파 레이저 중 가장 많이 활용되는 CO₂ 레이저, 파이버 기반의 Yb 광섬유 기반 나노초 레이저 및 펨토초 레이저를 비교함.



[그림 17. 재료별 파장에 따른 흡수율 그래프]

Ns-Laser Results			
1) Wavelength: 1064 nm 2) Pulse duration: 200 ns			
R (Ω)	10 mm/s	20 mm/s	40 mm/s
1 W	1.67*10 ⁶ 	∞ 	6.30*10 ⁶
2 W	4.15*10 ³ 	3.22*10 ⁶ 	5.21*10 ³
3 W	∞ 	1.28*10 ⁵ 	1.12*10 ⁵

[그림 18. 나노초 레이저 속도/파워별 LIG의 저항 측정]

○ CO₂ 레이저의 경우 10.6 μm의 파장으로 글라스에서 높은 흡수율을 보이며, (그림 17.) 이로 인하여 파우더 기반 샘플의 고정용 상단 글라스에서의 광흡수로 인하여, 광자 에너지가 하단 파우더까지 충분히 도달하지 못하고, 글라스가 깨지는 현상이 발생하므로, 탄소 전극 생성에 부적합함.

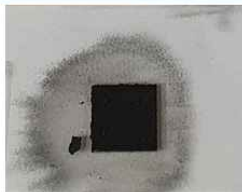
○ 나노초 레이저의 경우 1064 nm 파장에 200 나노초의 Yb 파이버 레이저가 사용되었으며, 높은 광열 발생으로 인하여, 대기 중에서 그래핀을 생성함에 있어 심각한 연소 또는 어블레이션이 일어남. 최적화된 조건에서도 수 kΩ의 낮은 전기전도도를 보이며(그림 18.), 생성된 파우더 퀄리티 또한 낮음.

- 반면 펨토초 레이저의 경우 1040 nm 파장에 250 펨토초의 Yb 도핑된 파이버 레이저가 사용되었으며, 짧은 펄스폭을 가진 펨토초 레이저에 의한 적절한 광열 효과 및 광화학 효과에 의해 그래핀으로 효과적으로 치환됨을 확인할 수 있었으며, 기존 나노초 레이저 대비 수십배 높은 전기전도도를 보임 (그림 19.).
- 최적 조건인 **레이저 파워 2.25 W 및 스캔 속도 40 mm/s 의 조건에서** 형성된 LIG의 **면저항 값이 약 166.39 Ω/□** 값으로 이는 30 mm/s 의 스캔 속도 및 200 Ω/□ 이하의 **1차년도 (2021년) 개발목표를 충분히 초과 달성하였음.**
- 전기 응용 분야에서 전극의 전기 전도도는 중요한 요소로, 다양한 레이저 가공 조건을 조절함으로써 LIG의 면저항 값을 수백에서 수만 Ω/□까지 쉽게 조절 가능함을 보여줌.
- 열 축적은 파우더에서 레이저-유도-그래핀으로 변환되는 데 중요한 요소임. 레이저 스캔 속도에 따라 시간당 특정 영역에 증착되는 레이저 펄스의 수를 조절함으로써, LIG의 화학적 조성, 그리고 전기 전도도를 제어할 수 있음.

Fs-Laser powder-based LIG sheet resistance (Ω/□)				
Power (W) Speed (mm/s)	2	2.25	2.5	2.75
25	227.86	230.18	2332.6	46346
30	483.63	785.47	304.69	1153.3
35	302.16	183.80	320.99	541.68
40	264.39	166.39	192.80	5733.4
50	290.12	2365.9	177.74	586.92

**2.25 W, 40 mm/s 의
최적조건에서의
LIG 파우더 :
166.39 Ω/□**

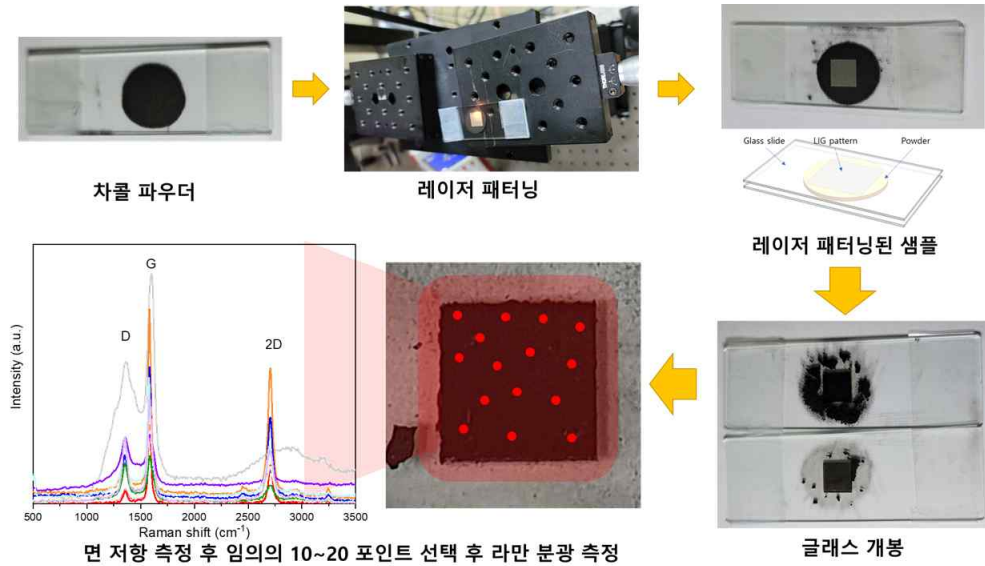
➔



[그림 19. 펨토초 레이저 속도/파워별 LIG의 저항 측정 및 최적 조건]

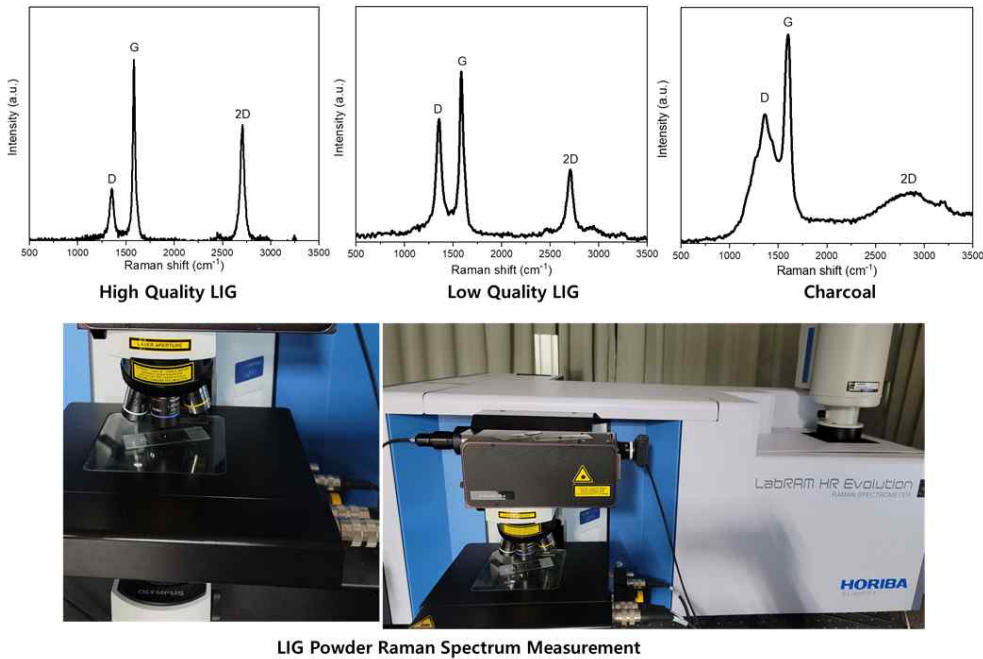
1-3) 패터닝 된 레이저-유도-그래핀의 전기적, 화학적, 기계적 특성의 평가 및 변환 효율 검토

- 극초단 레이저 기반 직접 묘화 기술로 생성된 레이저-유도-그래핀(LIG)의 전기적 및 화학적 특성을 분석하기 위한 방법으로 면저항 및 라만 분광법이 사용되었음.
- 그림 20에서처럼 준비된 차콜 파우더가 레이저에 의해 LIG로 치환된 후, 면저항 측정을 통해 높은 전기 전도도를 가진 양질의 LIG 탄소 전극이 생성되었는지 여부를 검토함.
- 이후 생성된 LIG 전극의 임의의 10 혹은 20 포인트를 라만 분광법을 이용하여 측정함.



[그림 20. 차콜 상 그래핀 생성 및 면저항 및 라만 분광 측정을 통한 전기적 화학적 특성 평가 과정]

- 라만 분광법은 단일 층 혹은 수겹의 그래핀층을 확인 및 특성화함에 있어 가장 널리 사용되는 방법 중 하나로, 차콜 파우더에 조사된 극초단 레이저에 의해 생성된 레이저-유도-그래핀(LIG)의 라만 스펙트럼을 측정하였으며 라만 피크 결과의 비율로 목표치인 목질소재 대비 그래핀 변환효율을 검증함.
- 라만 분광법의 경우 최적의 조건에서 생성된 양질의 LIG의 경우, 1354 cm^{-1} (D 밴드)와 1587 cm^{-1} (G 밴드) 부근에서 모두 강렬한 밴드가 관찰됨.
 - D 밴드는 무질서한 그래핀에 결함이 있음을 나타내고, G 밴드는 sp^2 혼성 탄소 원자들의 E_{2g} 진동 모드와 관련된 육각 탄소 구조에 해당하며, 2D 밴드는 D 밴드의 2차 신호로, 생성된 LIG의 층 수를 알 수 있음.
 - 이에 D 밴드의 픽이 낮을수록, G밴드의 픽이 높으면서 샤프할수록, 양질의 그래핀임을 의미하며, 2D 픽의 높이에 따라 다층의 다공성 그래핀층이 형성됨을 예측할 수 있음.



[그림 21. LIG 파우더 퀄리티별 라만 측정 결과 (높은 퀄리티 : 좌, 낮은 퀄리티 : 중간, 차콜 : 우) 및 라만 분광 측정 과정 (하단)]

- 그림 21처럼 임의의 20포인트를 측정하였을 때, 양질의 LIG 피크, 상대적으로 낮은 질의 LIG 피크 및 낮은 확률로 차콜의 피크가 측정됨.
- 높은 전기전도도를 갖는 조건에서 생성된 LIG 파우더를 여러 개 분석한 결과 높은 퀄리티의 LIG는

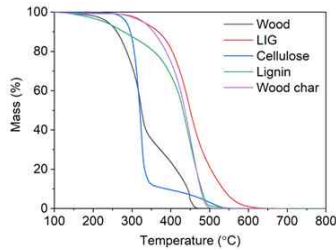
- 35~40 %, 낮은 퀄리티의 LIG 는 55~60 %, 차콜 피크는 5 % 미만으로 관측이 됨을 확인함.
- 이는 레이저 조사 과정에서 레이저의 초점 심도가 그래핀 생성에 영향을 끼치는 것으로 보임.
- 일반적으로 레이저 빔이 포커싱된 표면에서 가장 높은 퀄리티의 레이저-유도-그래핀이 생성되고, 내부에는 상대적으로 낮은 퀄리티의 레이저-유도-그래핀이 생성되는데, 이는 그래핀의 생성과정이 레이저 광자 에너지에 의한 광열 및 광화학적 반응에 의해 파우더가 치환되는 것에 기인함.
- 이를 극복하기 위한 방법으로 글라스를 사용하여 파우더를 고정하고, 양면에 레이저를 조사하여 차콜 파우더를 그래핀으로 치환하였으나, 상대적으로 고르지 않은 파우더의 한계로 중간층까지 에너지가 충분히 전달되지 않은 것으로 확인되며, 이는 더욱 고른 차콜 파우더를 사용하였을 경우 충분히 해결될 수 있다 여겨짐.
- 그럼에도 불구하고, 목표치인 목질소재 대비 그래핀 변환효율을 고려하였을 때, **최적의 면저항 조건에서의 양질의 그래핀 변환 효율은 최소 35 % 이상**으로 이는 변환효율 30 % 이상의 **1차년도 (2021년) 개발 목표를 충분히 초과 달성하였음.**

2) 고성능 탄소전극 변환의 생산성 극대화를 위한, 다파장 레이저 기반 고속 그래핀 전극 패터닝 공정기술 및 생산장비 개발

- 1차년도 연구에서는 레이저-유도-그래핀 생성에 적합한 파우더 재료들 검증 및 선정하였음. 또한 향후 파우더 베드 및 롤(Roll) 기반 연속공정 구현을 위한 전극 패터닝용 장비의 광원으로 이용될 1 μm 대역 광섬유 레이저를 제작함. 또한 레이저 빔 전달 광학부 및 핵심 광학계 설계를 진행하였고, 향후 만들어질 장비의 초기 모델 시제품 3D 디자인 설계 및 해당 장비를 운용할 사용자 친화적 제어가 가능한 프로그램 (GUI) 기반의 시제품을 제작, 이를 테스트하여 패터닝 성능을 검증함.

2-1) 레이저-유도-그래핀 생성 시, 레이저와 물질의 상호작용 최적화를 통해, 재료의 탈락을 최소화 하는 동시에 높은 전도도 획득

- 높은 전도도를 가진 양질의 레이저-유도-그래핀을 생성하기 위해서는 앞 챕터에서 언급된 레이저 자체의 파장 및 펄스폭이 지대한 영향을 미치지만, 이와 더불어 재료 자체의 특성도 중요함.
- 펄스초 레이저의 경우 펄스의 높은 침투출력을 잘 활용하면, 열가공에 의한 가공 잔여물 발생, 열파괴 등에 의한 크랙을 억제할 수 있고, 대기 중에서 특별한 화학적 처리 없이 레이저-유도 그래핀 (LIG)를 생성할 수 있으나, 이 경우 적절한 광열 효과를 필요로 함.
- 이러한 광열 효과를 극대화하기 위해서, 목재 기반 파우더 및 석탄 등의 탄소 기반 재료의 파우더, 커피 가루 등의 폐기물 기반의 목질계 파우더가 방향족 탄소 및 탄소 소스들을 가지고 있다는 점에서 재료로 고려될 수 있음.
- 그림 22의 TGA (열중량분석법) 그래프에서처럼 리그닌 혹은 목탄 (Wood Char)의 경우 목재나 셀룰로오스 대비 높은 열적 안정도를 가진다는 측면에서, 그래핀 파우더를 생성함에 있어 질량 손실을 최소화하고 그래핀 변환효율을 높일 수 있을 것으로 기대되며, 이는 친환경적인 재료의 활용효율을 극대화할 수 있음.
- 본 연구단은 목질계 기반 리그닌 파우더, 커피 파우더, 대나무 목탄(차콜) 파우더 및 일반 목탄(차콜) 파우더를 LIG 생성을 위한 모재료로 선정하고 그래핀 생성, 저항 측정 및 라만 분광(그림 23.)을 통해 성능을 검증함.



재료별 온도에 따른 TGA 그래프



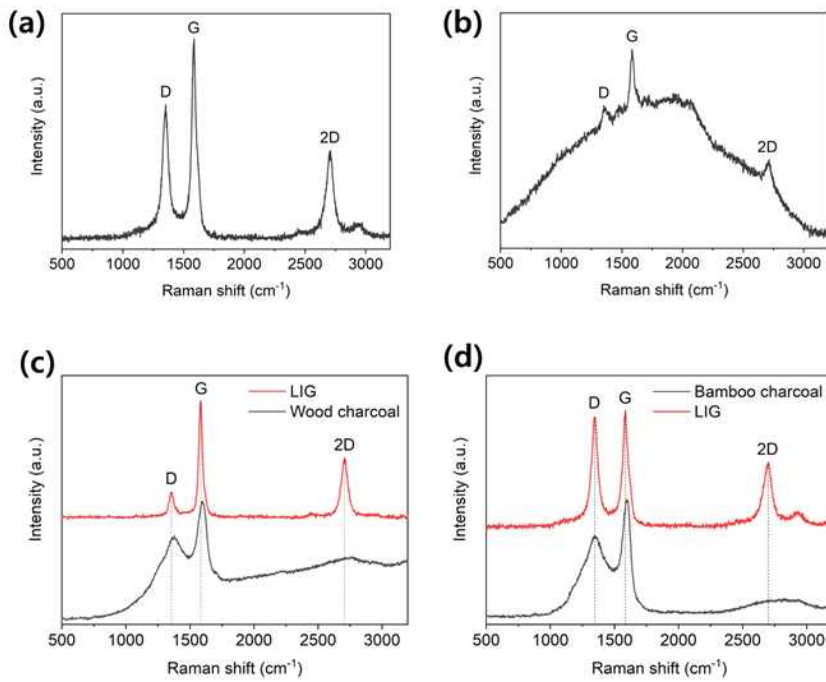
리그닌 파우더



목탄 (차콜)

[그림 22. 온도에 따른 재료별 열 중량 그래프 및 주재료인 리그닌, 목탄 예시]

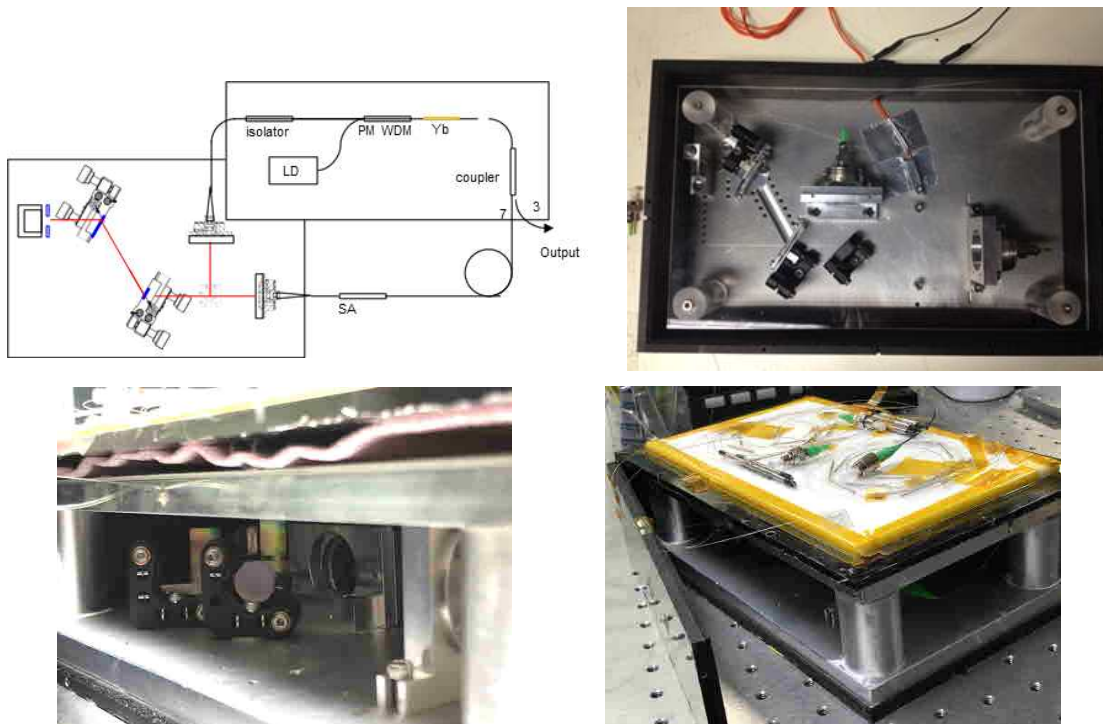
- 초기 테스트 진행을 위하여 1040 nm 파장 및 250 fs 펄스폭의 극초단 펄스 레이저에서 10 mm/s의 스캐닝속도로 (a) 리그닌 파우더, (b) 커피 펄프 파우더, (c) 목탄 차콜 파우더 및 (d) 대나무 차콜 파우더에 LIG를 생성하였음.
- 각 파우더는 슬라이드 글라스 위에 곱게 편 후 고정을 위하여 또 다른 슬라이드 글라스로 덮어준 뒤 양면을 패터닝하여 모든 면에서 레이저-유도-그래핀이 생성될 수 있도록 하였음.
- (a) 리그닌 파우더 기반 LIG의 경우 저항 측면에서는 수백 Ω 이하의 높은 전기전도도의 특성을 보였으나, D픽이 상대적으로 높아 그래핀 자체의 결함이 있고, 안정적이지 않음을 확인.
- (b) 커피 찌꺼기 파우더 기반 LIG의 경우 리그닌 대비 낮은 전기전도도를 보이며, 라만 분광에서도 좋지 않은 결과를 보이며, 이는 낮은 퀄리티의 LIG가 생성됨을 의미함.
- 리그닌 및 커피 파우더의 경우 수분을 함유하고 있고, 이는 레이저의 광자 에너지를 흡수 및 그래핀으로의 치환 과정에서의 열 손실 등의 영향을 주었을 것으로 생각됨.
- 특히 커피의 습식 가공에서 남은 고체 잔류물인 커피 펄프의 경우 리그닌, 셀룰로오스 및 헤미셀룰로오스 외에도 탄닌, 펙티물질, 환원당, 비환원당, 카페인, 클로로젠산, 카페인산 등의 유기성분을 보유하고 있어 이는 LIG 생성을 저해하는 요소들이 될 수 있음.
- 또한 리그닌 기반 LIG가 커피 파우더 대비 방향족 탄소를 다수 보유하고 있기에, 그래핀 생성 과정에서 상대적으로 안정적이고 이는 높은 전기전도도를 가지는 그래핀을 생성할 수 있는 것으로 예상됨.
- (c) 목탄 및 (d) 대나무 차콜의 경우 셀룰로오스 및 헤미셀룰로오스가 300도 이상에서 대부분 사라지고 수분 또한 증발되며, 방향족 카본이 주로 이루어져 있음. 이에 리그닌 파우더 대비 그래핀 생성에 있어 안정적인 재료가 될 수 있으며, 실제로 리그닌 대비 낮은 면저항 (높은 전기전도도) 및 양질의 LIG를 얻을 수 있음을 라만 분광법을 통하여 확인함.
- 다만 일반 목재 대비 대나무의 경우 경도가 낮고, 조직이 치밀하지 않기에 목탄을 생성하는 과정에서 일반 목재 대비 불안정한 상태로 탄화가 되며, 더욱 높은 레이저의 광자 에너지로 그래핀화 하는 과정에서도 영향을 주므로 이는 그래핀 결함 생성에 영향을 주고, 목탄 기반 LIG 대비 낮은 퀄리티의 LIG가 생성되는 것으로 여겨짐.
- 이에 본 연구의 주 재료로 가장 안정적인 목질계 탄화 기반 목탄이 선정되었으나, 향후 다른 재료의 후처리 및 레이저 파워 및 파장, 스캔 속도 조절 등을 통한 에너지 집중 밀도 조절을 통한 최적화 과정을 거친다면 용도에 따라 충분히 탄소전극으로써 사용할 수 있을 것으로 예상됨.



[그림 23. LIG 라만 분석 결과 (순서대로 리그닌, 커피, 목탄, 대나무 목탄 기반 LIG)]

2-2) 파우더 베드 및 롤(Roll) 기반 연속공정 구현, 전극 패터닝 최적화 및 탄소전극 품질/생산성 세부 평가

○ 향후 파우더 베드 및 롤(Roll) 기반 연속공정 구현을 위한 전극 패터닝용 장비에 이용될 1 μm 대역 광섬유 레이저를 제작함.

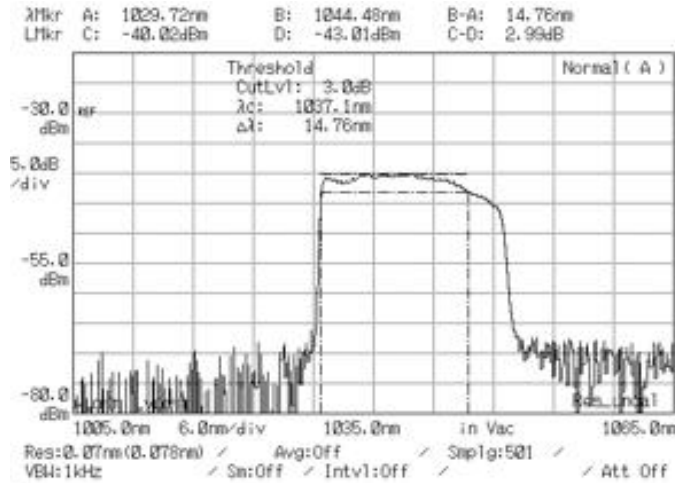


[그림 24. 1 μm 대역 광섬유 펌프초 레이저 layout 및 구성 사진]

- 1 μm, 편광유지 광섬유 펌프초 레이저 특성 이해를 위해 fiber bench를 활용한 공진기 구성함
- 공진기는 pumping part와 grating pair를 활용한 분산보상파트, 그리고 비선형흡수를 통해 모드잠금을 구현하는 saturable absorber 파트로 구성됨.
- grating 간 각도가 유지되며 간격이 조절되는 시스템 구성함.
- fiber port 1에서 출발한 빛은 1차로 grating pair를 지난 후 roof mirror를 거치며 높이가 조정됨. (입

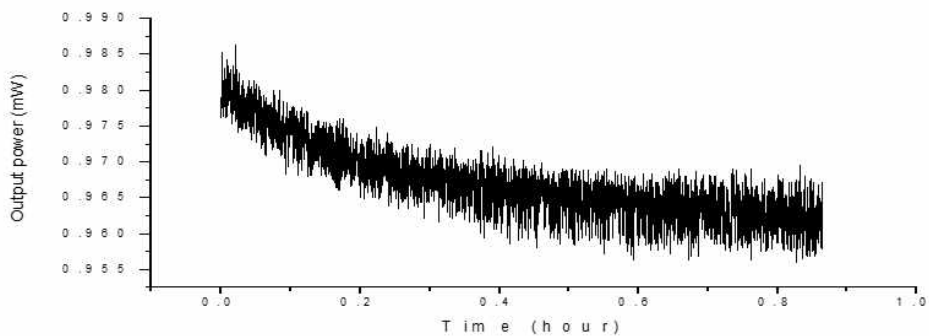
사 빔에 비해 10 mm 높이차 발생). 이후 2차로 grating pair를 거친 후 mirror에 반사되어 fiber port 2로 입사됨.

- 공진기는 두 층으로 구성되어 있으며 하층은 bulk parts, 상층은 fiber components가 위치함.
- 출력 안정성을 확보하기 위해 base plate는 온도 제어가 가능하도록 설계함.
- 온도 센서는 base plate 중앙부에 위치하며 base plate 아랫면에 직렬 연결된 네 개의 펄티어 소자가 위치함.
- 공진기 외부는 두께 1 cm의 단열재로 차폐되어 외부 온도변화 영향이 최소화 되도록 함.



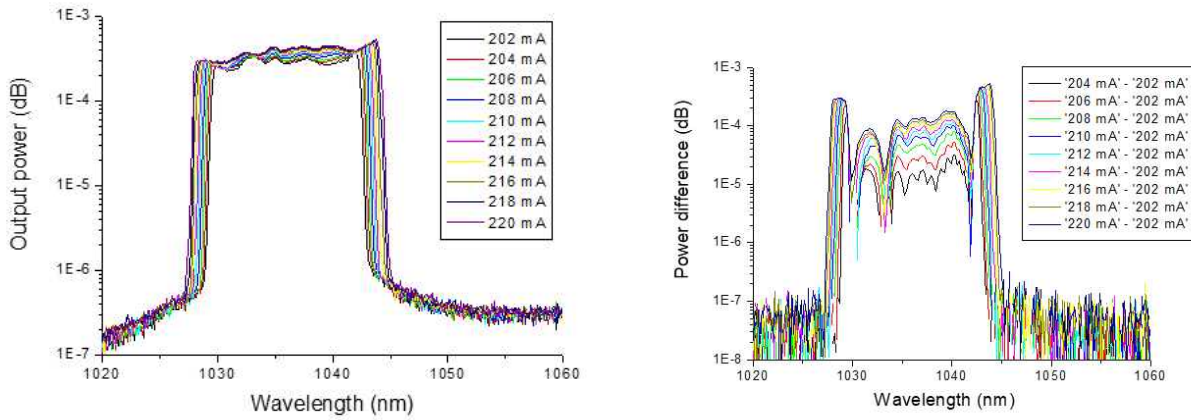
[그림 25. 펄초 레이저 출력 스펙트럼]

- grating pair의 간격 및 각도를 조절하면 다양한 패턴의 스펙트럼을 얻을 수 있으며, 위의 스펙트럼 (그림 25.)은 그 중 일례임. 중심파장 역시 조절이 가능함.
- 위 스펙트럼의 bandwidth는 약 14.7 nm이며, 출력이 높아짐에 따라 스펙트럼 넓이 또한 넓어짐.
- grating pair 조절을 통해 분산 보상이 최적화될 경우 보다 넓은 스펙트럼 확보가 가능함. 현재는 base plate 배치 한계로 인해 최대 15 nm 정도의 스펙트럼을 얻음.
- 펌핑량을 증가시키기에 따라 스펙트럼 중앙부에 좁은 피크가 발생하거나, 혹은 스펙트럼 좌우 side edge 지점에 pedestal 이 생기면서 모드가 불안해짐.



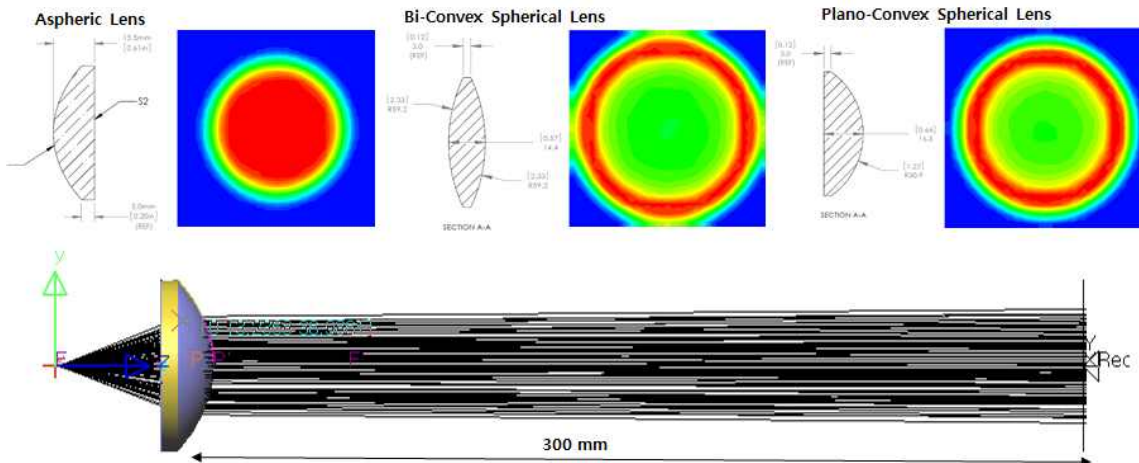
[그림 26. 출력 안정도]

- 약 한 시간 경과 후 출력이 수렴함(그림 26.)을 확인할 수 있음. (rms 0.5 % 이하)
- 추후 fiber port를 모듈화/소형화 하고 grating mount 등을 최적화하면 보다 안정적이고 컴팩트한 시스템 구성이 가능할 것으로 기대됨.



[그림 27. 펌핑 전류량에 따른 스펙트럼 변화. 좌] 202~220 mA에서의 출력 스펙트럼. 우) 스펙트럼의 상대적인 변화 (202 mA 펌핑 대비)]

- 펌핑이 증가하며 스펙트럼이 좌우로 넓어짐(그림 27).
- 펌핑이 증가하며 스펙트럼 중앙부의 주기적인 패턴이 벌어지는 것을 확인할 수 있음.
- 추가 증폭 과정에서 스펙트럼이 좁아지는 경향을 보이기 때문에 공진기 발진 단계에서부터 스펙트럼을 넓게 형성시키는 것이 유리함.
- 레이저 빔 전달 광학부 설계 및 핵심 광학계 설계를 진행함.
 - 먼저 기하광학 시뮬레이션 프로그램(Zmax) 을 통해 각 파장대역에서 레이저 광원의 파면수차 및 색수차를 최소화하여 약 지름 10 mm 의 빔 전달용 평행광을 만들기 위한 기하광학 시뮬레이션을 실시, 광원에서부터 스캐닝부까지의 빔 전달 광학계에 대한 설계 및 광학부 최적화를 수행함.
 - 그림 28은 시준 렌즈(Collimation lens) 설계에 따른 평행 빔의 파면을 나타냄. 그림 28과 같이 설계된 비구면 렌즈(Aspheric lens) 에서 가장 안정적인 평행빔이 생성되며 300 mm 의 전파거리에 대해서도 평행빔의 안정적 광분포 특성이 유지되는 것을 확인하였으며 이렇게 설계된 광학 부품을 이용, 테스트베드를 구축하고 기초 실험을 통해 그 기초 성능을 검증.

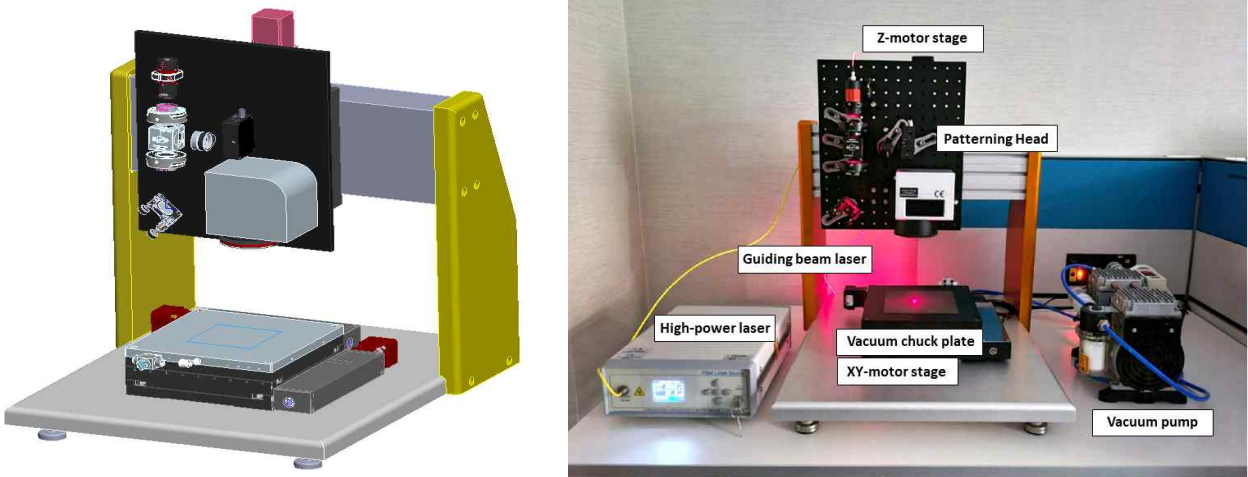


[그림 28. 기하광학 시뮬레이션 프로그램을 통한 $\varnothing 10$ mm 평행광의 파면수차 및 빔 전파 특성 분석]

- 장비 시제품 3D 디자인 설계 및 HW 제작을 진행함.
 - 고성능 탄소전극 최적 변환을 위한 연구용 고속 그래핀 전극 패터닝 공정 장비를 설계 및 제작함.
 - 우선적으로 파장은 1550 nm 에 맞춰서 설계되었으며 다양한 연구환경 및 시편에서의 연구용 패터닝을 위해 소형의, 환경에 강인하면서 다기능성의 특성을 가진 연구용 시제품 장비를 목표로 설계됨.
 - 원격 자동제어 및 최적의 공정 환경을 위한 시제품 HW 제작을 완료하였으며 크게 (1) 고출력 레이저와 가이드빔 레이저 통합 모듈, (2) 3축(XYZ-axis) 모터 구동 스테이지, (3) 레이저 패터닝 헤드부, (4) 유연

/신축 그래핀 소재의 안정적 고정 및 적재를 위한 진공척 샘플판 및 진공펌프로 구성되었으며 그림 29의 왼쪽은 3D 설계 디자인을 나타내고, 오른쪽은 실제 제작된 시제품 HW 를 나타냄.

- 시편 이송 및 패터닝의 편의성을 위해 XYZ-축 모터 스테이지로 제작되었으며, 배큘 펌프 및 배큘 척 플레이트(Vacuum chuck plate) 를 통해 리그닌 파우더 및 목질계 박막 시편의 안정적인 적재를 수행할 수 있음. 한편 패터닝 레이저의 경우, IR 대역으로 눈에 보이지 않기 때문에 공정 안전성과 시인성을 제공하기 위해 빨간색의 빔(Guiding beam) 을 탑재하였으며, 레이저 광원 시스템을 비롯한 모든 광학부품은 모터 제어를 통해 사용 편의성과 제어 편의성을 극대화함.



[그림 29. 장비 시제품 3D 디자인 설계도(좌) 및 연구용 장비 시제품 제작(우)]

2-3) 다파장 레이저 기반 고속 그래핀 전극 패터닝 생산장비 비교/평가

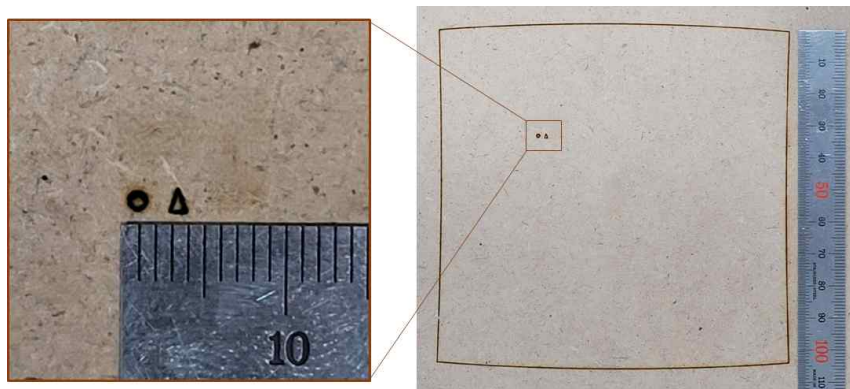
○ 사용자 친화적인 제어 및 운용 프로그램(GUI) 제작함.

- 장비 시제품의 사용자 제어/운용 프로그램의 구조는 아래 그림 29와 같으며 크게 (1)패터닝 레시피 입력부, (2)고출력 레이저 광출력 제어부, (3)모터 구동 제어부, (4)오토포커스(Auto Focus) 기능, (5)패터닝 레이저의 광패킷 제어부, (6)고속 스캐너 제어부로 나뉠 수 있음.



[그림 29. 다기능성, 사용자 편의성의 제어/운용 인터페이스(GUI)]

- 패터닝 레시피 입력부의 경우, CAD 등의 가공 설계도 입력 뿐만 아니라 매뉴얼로 가공 패턴을 자유로이 생성하여 패터닝 레시피를 작성할 수 있도록 구성함.
 - 레이저 광출력 제어부의 경우, 입력 레이저의 파장 및 평행광 지름의 정보를 파악하고 온도를 모니터링 하며 이를 기반으로 패터닝 빔의 광출력을 최소 100 mW 에서 최대 10W 까지 약 100 mW 의 정확도로 제어하고 모니터링 할 수 있도록 구성.
 - 모터 구동 제어부의 경우, HOME 기능을 통해 구동 좌표축의 원점을 지정하고 X,Y,Z 축의 좌표를 실시간 으로 나타내며 화살표로 표시된 이송 버튼을 통해 Slow 모드 : 3 mm/s, Mid 모드 : 10 mm/s, Fast 모 드 : 20 mm/s 로 나누어 수- μ m 정밀도로 XYZ 축 스테이지의 구동 및 편리한 이송이 가능함.
 - 오토포커스 기능의 경우, 직접 묘화를 하고자 하는 대상 표면에 대한 레이저 집광 정도가 무척 중요한데 정초점(In focus) 에 대상 표면이 놓일 때, 면적에 대한 광출력 및 빔 크기 또한 최적이 되며 비초점(Out of focus) 구간에서의 경우, 패터닝 효율 및 패턴폭 등의 결과물의 품질이 낮아지는 경향이 있음으로 Focus Contrast Algorithm 을 구현하여 AF 기능에 대한 개발을 진행함.
 - 가공 광 패킷 및 스캐너 제어의 경우, 레이저 패터닝 스피드 및 광다발의 크기를 조절함으로써 패터닝 물질 표면의 열적 현상을 제어함으로써 가공 정도 및 성능을 제어할 수 있으며 스캐닝 속도는 최소 1 mm/s 에서 최대 10,000 mm/s 까지 설정이 가능함.
- 시제품 운용 테스트 및 패터닝 성능 검증을 진행함.
- 1550 nm 파장 대역의 3W 광출력을 갖는 연속파 레이저 광원을 사용하였으며 제어를 통해 0 mW ~ 2.6 W 까지 광출력 제어 및 100 mW 이내 정밀도로 광출력 모니터링 기능 확인.
 - 스캐너의 경우, 1 mm/s에서 10,000 mm/s 의 스캐닝 속도 제어 가능함을 검증.
 - 레이저 패터닝 장비 시제품의 패터닝 성능 검증을 위해 목재 송판에 패터닝을 수행, 최대 가공 영역 및 최소 가공 분해능 성능을 평가. 아래 그림 30과 같이 최대 105 mm X 105 mm 영역에 대한 패터닝이 가능하며 1 mm X 1 mm 크기의 작은 형상까지도 패터닝이 가능함을 검증하였으며 이때의 패터닝 폭은 ~100 μ m 로 패터닝 성능 검증.



[그림 30. 레이저 패터닝을 통한 최대 가공 영역 및 가공 정밀도 평가]

3) 목질계 바이오매스 기반 탄소전극 이차전지 소자 제작 및 셀 제작

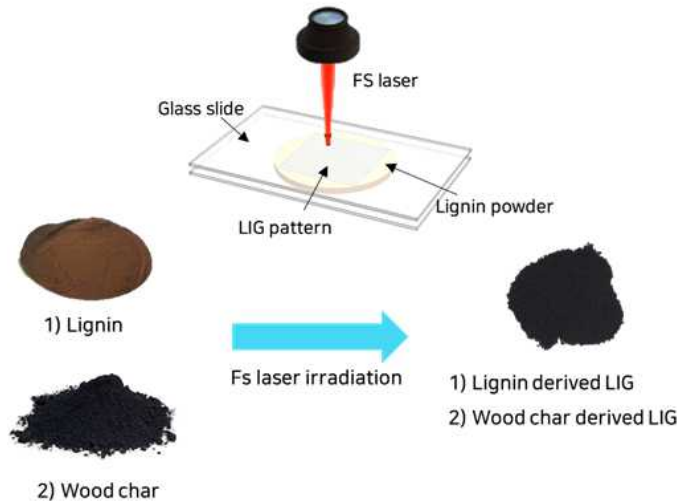
- 1차년도 연구에서는 다양한 파우더형 목질계 바이오매스 소재 중 리그닌과 나무 숯(Wood char) 파우더 를 전구체로 사용하여 레이저-유도-그래핀을 제조하였으며, 제조한 레이저-유도-그래핀 파우더 소재의 물성 분석, 리튬이차전지 소자 제작 및 셀 성능을 평가하였음.

3-1) 목질계 바이오매스 기반의 탄소 전극 소재의 고품위화, 전기화학적 특성 평가 및 성능 최적화

- 목재나 낙엽 등 산림 바이오매스의 구성요소는 페놀 그룹이 있는 리그닌, 당 단량체 (sugar monomer) 로 이루어진 셀룰로스 및 헤미셀룰로스로 구성되어있음.
- 나무의 경우 리그닌 함량이 15-30%, 셀룰로스의 함량이 40-50%, 헤미셀룰로스의 함량이 15-25% 로 구성됨.
 - 리그닌은 지구상에 존재하는 가장 풍부하고 재생 가능한 천연 고분자이며, 높은 탄소 함량과 방향족 카

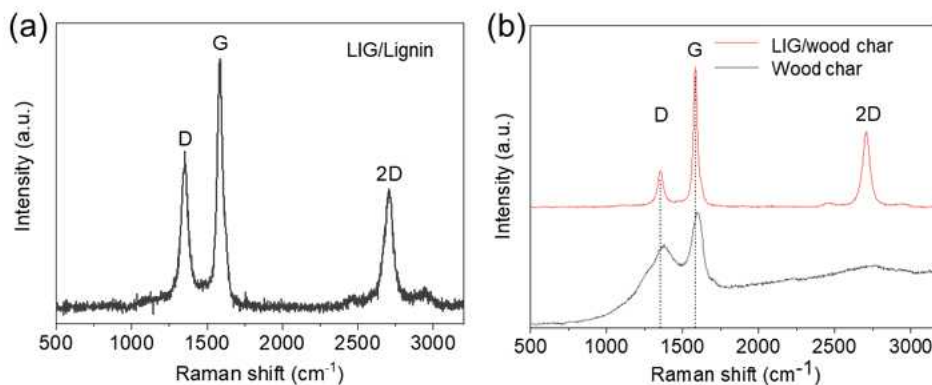
본의 형태로 이루어져 있어 높은 열적 안정성을 가지고 있음. 따라서, 탄소 기반 전극 물질의 전구체로 많이 연구되고 있음.

- 1040 nm의 근적외선 영역대의 레이저 출력 2W 및 레이저 스캔 속도 10 mm/s의 조건에서 리그닌 및 나무 숯 기반의 펄소 레이저-유도-그래핀(LIG)을 제조하였음 (그림 31).
- 파우더 형태의 목질계 바이오매스 소재를 두 개의 유리 기판 사이에 넣어 고정한 후 레이저를 조사하여 레이저-유도-그래핀을 제조하였음.



[그림 31. 리그닌(Lignin)과 나무 숯(Wood char) 기반 펄소 레이저-유도-그래핀 제조 과정]

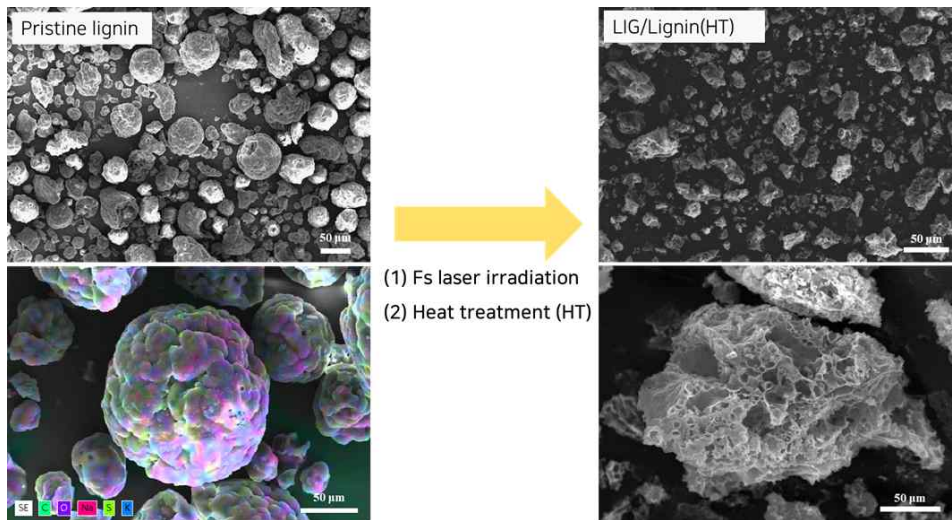
- 생성된 LIG 소재의 물성을 분석하기 위해, 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM), 라만 분광법(Raman spectroscopy) 등의 분석법들을 사용하여 측정함.



[그림 32. 라만 분석 결과. (a) 리그닌 기반 레이저-유도-그래핀(LIG/Lignin), (b) 나무 숯 (Wood char)과 나무 숯 기반 LIG(LIG/wood char)의 라만 분광법 분석 결과]

- 라만 분광법은 단일 층 혹은 수층의 그래핀을 확인 및 특성화함에 있어 가장 널리 사용되는 분석법 중 하나로, 리그닌 및 나무 숯에서 생성된 레이저-유도-그래핀(LIG)의 라만 스펙트럼을 측정하였음 (그림 32).
- 리그닌에서 생성된 LIG의 경우 $\sim 1352 \text{ cm}^{-1}$ 에서 D밴드, $\sim 1587 \text{ cm}^{-1}$ 에서 G 밴드, 그리고 $\sim 2705 \text{ cm}^{-1}$ 에서 2D 밴드가 모두 강렬한 밴드가 관찰됨 (그림 32a).
- 나무 숯에서 생성된 LIG의 경우 $\sim 1351 \text{ cm}^{-1}$ 에서 D밴드, $\sim 1583 \text{ cm}^{-1}$ 에서 G 밴드, 그리고 $\sim 2705 \text{ cm}^{-1}$ 에서 2D 밴드가 모두 강렬한 밴드가 관찰됨 (그림 32b).
- D 밴드는 방향족 고리의 A_{1g} 대칭성이 있는 고유의 포논 모드로, 이 밴드는 무질서한 그래핀에 결함이 있음을 나타냄. G 밴드는 sp^2 혼성 탄소 원자들의 E_{2g} 진동 모드와 관련된 육각 탄소 구조에 해당함. 2705 cm^{-1} 에 위치한 2D 밴드는 D 밴드의 2차 신호로, 생성된 LIG가 수층의 그래핀임을 알 수 있었음.
- 리그닌과 리그닌 기반 형성된 레이저-유도-그래핀을 주사전자현미경(SEM)을 통해 입자 형상을 관찰하였음 (그림 33).

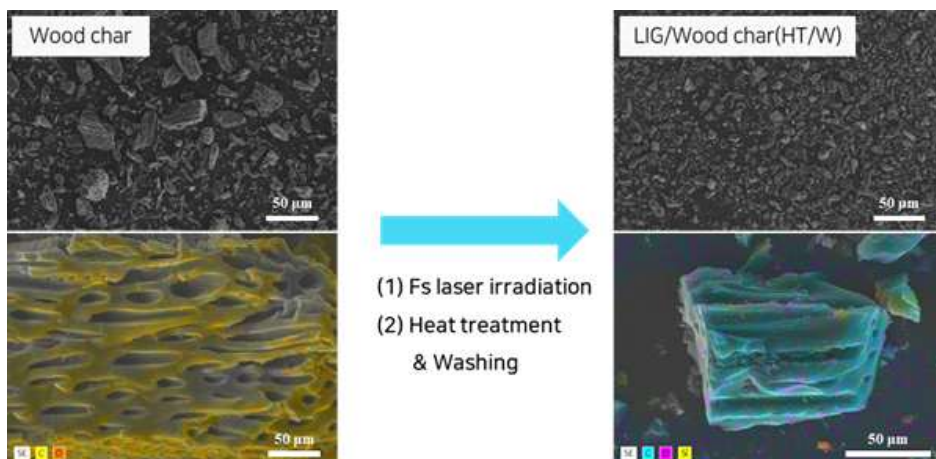
- 리그닌은 둥근 형태를 가지며 표면은 매끄럽지 않은 것을 관찰할 수 있었음. 또한, 전자주사현미경에 부착되어 있는 X선 분광분석(SEM-EDS)을 통해 원소분석을 한 결과, 탄소, 산소, 나트륨, 황, 그리고 칼륨 등으로 이루어진 것을 확인하였음.
- 리그닌 파우더에 레이저를 조사한 이후 파우더를 관찰해본 결과, 입자 형태는 다공성의 불균일한 입자 형태를 가지는 것을 확인할 수 있었음. 또한, SEM-EDS 분석을 통해 원소분석을 한 결과, 리그닌 기반 레이저-유도-그래핀 파우더에서도 나트륨, 칼륨, 실리콘, 황 등 불순물들이 검출되는 것을 확인할 수 있었음.
- 리그닌 기반의 레이저-유도-그래핀 전극 소재에 남아있는 불순물 제거를 위해 900 °C 열처리 (Ar atmosphere, heating rate: 5 °C/min)를 진행하였음.



[그림 33. 리그닌과 리그닌 기반 레이저-유도-그래핀의 SEM 이미지]

○ 나무 숯(Wood char)과 나무 숯 기반 형성된 레이저-유도-그래핀(LIG/wood char)을 주사전자현미경 (SEM)을 통해 입자 형상을 관찰하였음 (그림 34).

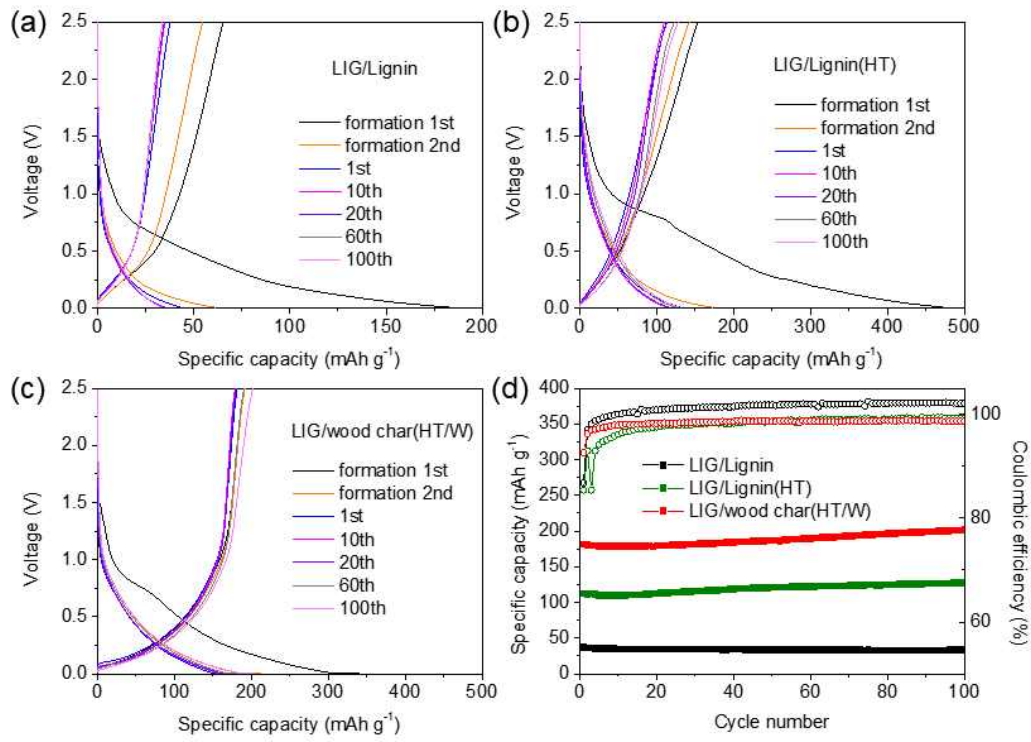
- SEM분석을 통하여, 나무 숯의 입자는 대부분 관 형태의 다공성 구조를 가지고 있는 것을 관찰 할 수 있었음.
- SEM-EDS 분석을 통해 원소분석을 수행한 결과, 리그닌 기반의 LIG에 비하여 적은 양이지만 여전히 실리콘, 황 등 불순물들이 검출되는 것을 확인할 수 있었음. 이러한 불순물들은 전극의 비가역 반응을 야기하고 성능 저하를 유발할 수 있으므로, 이를 제거하기 위하여 열처리 및 세척 공정을 추가적으로 진행하였으며, 이를 통해 불순물의 질량 비율이 감소하는 것을 확인할 수 있었음.
- 나무 숯 상에 레이저 조사한 다음 열처리(Heat treatment, HT) 및 세척(Washing, W) 공정 후에는 전반적인 입자 크기가 작아졌으며, 고배율로 입자를 확인해보았을 때 나무 숯 본래의 형태는 유지되는 것을 확인할 수 있었음.



[그림 34. 리그닌과 리그닌 기반 레이저-유도-그래핀의 SEM 이미지]

3-2) 목질계 바이오매스 기반 탄소 전극소재의 이차전지 소자 제작 및 셀 성능 평가

- 그림 35와 같이 정전류 충방전법(Galvanostatic Charge/Discharge, GCD) 분석을 통하여 리그닌 및 나무 숯으로부터 형성된 LIG 전극 소재의 리튬이차전지 전극 성능 및 기초 전기화학적 데이터를 확보하였음.
- 정전류 충/방전(GCD) 분석 조건은 0.01-2.5V 전압 구간에서 초기 2 사이클은 35 mA/g의 전류밀도 조건에서 충/방전(formation)한 다음 이후부터 100 mA/g의 전류밀도 조건에서 사이클 수명 평가를 진행하였음.
- 그림 35a와 같이 리그닌 기반 LIG (LIG/Lignin) 전극 소재의 경우, 35 mA/g의 전류밀도 조건 하에 첫 번째 사이클(formation 1st)에서 방전용량과 충전용량이 각각 184와 65 mAh/g을 보이며, 현재 상용 음극으로 사용되고 있는 흑연의 이론 용량 값(약 372 mAh/g)에 비하여 현저히 떨어지는 용량 값을 보이는 것을 확인하였음. 또한, LIG/Lignin 전극 소재는 약 35%의 낮은 충/방전 효율을 보임.
- 이와 같은 결과는 일반적으로 초기 충/방전 사이클 시 음극표면에 형성된 피막 (SEI layer, solid electrolyte interphase layer)의 형성에 의해 소모되는 리튬의 양에 의해 낮아진 이유뿐만 아니라, 리그닌 기반 LIG에서 검출된 나트륨, 칼륨, 실리콘, 황 등의 원소가 불순물로 작용하여 비가역성이 높게 나온 것으로 생각됨.
- 그림 35b와 같이 LIG/Lignin에 있는 불순물을 제거하고 전기 전도도를 향상시키기 위하여 추가적인 열처리를 진행하였음 (열처리 온도: 900 °C, Ar atmosphere, heating rate: 5 °C/min).
- LIG/Lignin(HT)의 경우에는 35 mA/g의 전류밀도 조건 하에서, 첫 번째 사이클(formation 1st)의 방전용량과 충전용량이 각각 473와 153 mAh/g으로 측정되었으며, 이는 열처리를 하지 않은 LIG/Lignin의 전극 용량보다 약 2배 이상 증가한 수치임.
- 하지만, 여전히 약 32%의 낮은 충/방전 효율과 전극 용량 개선이 필요한 것으로 생각되어, 열처리에 더하여 산 처리를 통한 세척 공정을 추가적으로 진행하였음.
- 그림 35c는 나무 숯 기반 LIG(LIG/wood char) 파우더를 제조한 이후, 열처리(Heat treatment, HT) 및 세척(Washing, W) 공정을 추가적으로 진행한 전극 샘플에 대하여 측정한 충방전 곡선을 보여줌.
- 열처리와 세척 공정을 수행한 나무 숯 기반 LIG 전극의 경우(LIG/wood char(HT/W)), 35 mA/g의 전류밀도 조건에서, 첫 번째 사이클(formation 1st)에서의 방전용량과 충전용량이 각각 약 340 및 191 mAh/g을 나타내었으며, 초기 효율은 약 56%로 이전보다 향상된 용량과 초기효율을 관찰할 수 있었음.
- 그림 35d와 같이 LIG/Lignin, LIG/Lignin(HT), 그리고 LIG/Wood char(HT/W) 샘플의 충방전 테스트 결과, 100 mA/g의 전류밀도 조건 하에서, 100번째 사이클에서의 전극 용량이 각각 약 34, 128, 및 202 mAh/g으로 측정되었으며, LIG/Wood char(HT/W) 샘플의 경우, 1차년도 (2021년) 개발 목표(전극 용량 \geq 150 mAh/g) 대비 1.35배에 해당하는 값으로 목표치를 초과 달성한 수치임.



[그림 35 (a) LIG/Lignin, (b) LIG/Lignin(HT), 및 (c) LIG/Wood char(HT/W) 기반의 전정전류 충방전(GCD) 곡선과 (d) 셀 수명 특성 평가 결과.]

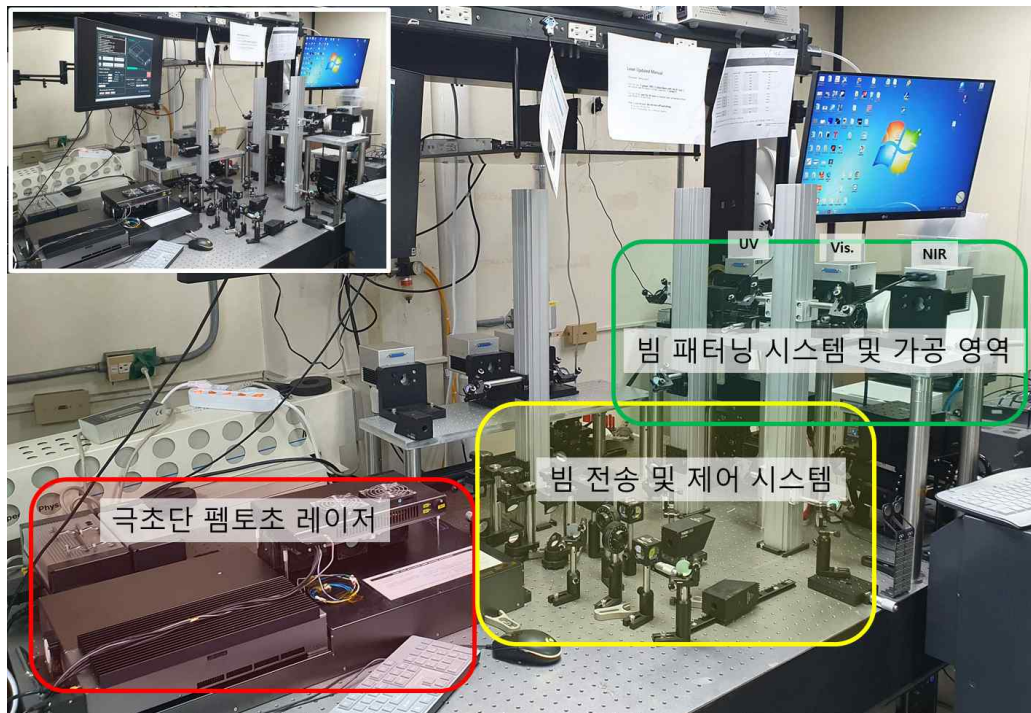
◎ 당해 년도 (2022년) 연구 결과

1) 다중파장 레이저 기반 목질계 미이용 파우더형 바이오매스의 이차전지용 친환경 생분해성 탄소전극으로의 변환기술 개발/최적화

- 당해년도 연구에서는 목질계 바이오매스 및 목재 상 이차전지용 친환경 생분해성 탄소전극 변환 기술을 최적화하기 위하여 레이저 파장, 펄스폭, 반복률, 빔 간 간격 (hatch) 등의 조건에서 레이저 파워 및 스캔 속도를 변조하며 각 조건에서의 레이저-유도-그래핀 성능을 확인함. 또한 열 손상 깊이 및 생성된 레이저-유도-그래핀 두께를 측정하고, SEM, XRD, XPS, TGA 분석을 통해 그래핀 성능을 재검증함. 마지막으로 라만 분광을 임의 여러 지점에 적용하여 그래핀 변환 효율을 확인함.

1-1) 적외선, 근적외선 및 가시광선 레이저와 유기 물질과의 상호작용 심도 이해

- 다중파장 레이저 기반의 목질계 재료 및 바이오매스의 탄소전극 변환기술 최적화를 진행하기 위해 작년 도에 구축한 패터닝 시스템 (그림 36)을 활용하여 각 파장별 목재 상 레이저-유도-그래핀의 전기전도도 특성을 확인함.



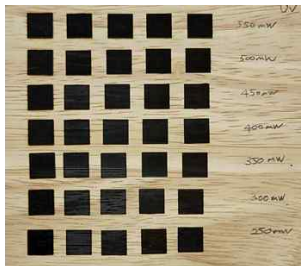
[그림 36. 펄스 레이저 직접묘화 패터닝 시스템 구성 이미지]

- 펄스 레이저의 경우 극도로 높은 첨두 출력을 갖고 있는데, 이는 대상 물질과의 비선형 광학 현상 유발 및 물질 변형에 대한 에너지 임계치를 줄일 수 있음. 또한 가공 중 발생하는 열을 적절히 억제할 수 있다는 점에서 미세 가공 분야에서도 탁월한 성능을 보이는데, 이러한 특징들을 통해 과거 재료 과학 분야에서의 난제를 해결할 수 있는 유망한 도구로써 기대를 받고 있음.
- 구축된 펄스 레이저는 이터븀 도핑된 광섬유 기반 40 uJ 고출력 근적외선 (1040 nm) 펄스 레이저 광원과 비선형 파장 변환을 통해 2차 조화파 및 3차 조화파로 생성되는 가시광선 (520 nm) 및 자외선 (347 nm) 대역의 파장을 포함하는 다파장 변환 모듈 레이저로 표 3과 같은 성능을 가지고 있음.

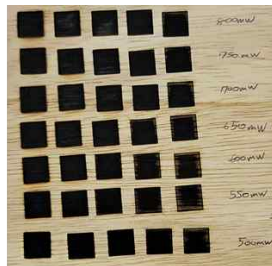
Parameter	NIR	Vis	UV
Center Wavelength	1040 nm	520 nm	347 nm
Pulse Energy	40 uJ	> 12 uJ	> 4.5 uJ
Average Power	6 W	1.2 W	0.8 W
Pulse Duration	< 250 fs		
Beam Quality	< 1.3		
Repetition Rate	0.2 ~ 2 MHz		
Dimension	Laser Head without Heatsink 395 x 590 x 115 mm Laser Head with Heatsink 540 x 590 x 115 mm Controller 290 x 290 x 100 mm		

[표 3. 사용된 펄스 레이저 사양]

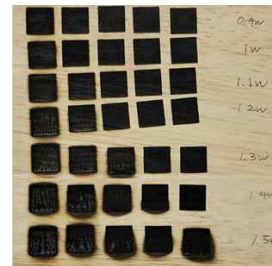
○ 구축된 레이저 및 가공 시스템을 활용하여 적외선, 근적외선 및 가시광선 레이저와 유기 물질과의 상호 작용을 심도있게 이해하고자 그림 37과 같이 레이저-유도-그래핀 생성에 자주 활용되는 하드우드 종 중 하나인 고무목 상에 파장 별로 레이저 파워 및 스캔 속도를 변조하여 패터닝을 진행하였음.



Fs Laser UV (346.7 nm)



Fs Laser VIS (520 nm)

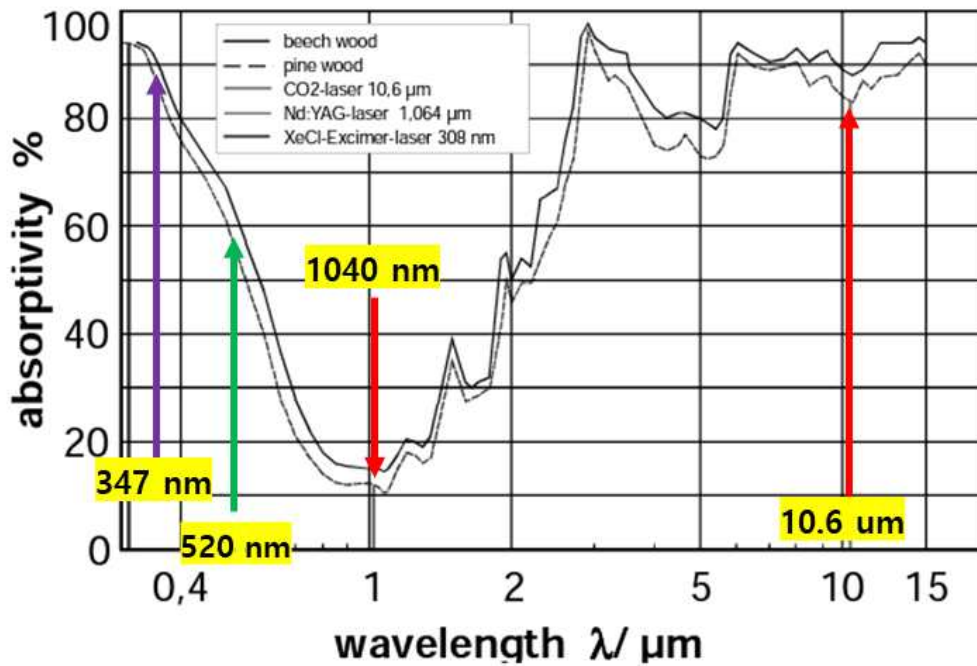


Fs Laser NIR (1040 nm)

346.7 nm Yb fs Laser 250 fs (200 kHz) Ω / □					520 nm Yb fs Laser 250 fs (200 kHz) Ω / □					1040 nm Yb fs Laser 250 fs (200 kHz) Ω / □							
속도 →	10	20	30	40	50	속도 →	10	20	30	40	50	속도 →	10	20	30	40	50
0.25 W	125.19	88.23	244.06	1029.06	375.59	0.5 W	45.21	49.40	107.99	359.24	X	0.9 W	60.62	14.74	42.83	81.03	130.21
0.3 W	85.56	72.66	71.49	324.16	588.06	0.55 W	29.72	38.28	129.19	274.90	1749.92	1 W	207.19	27.26	38.72	63.91	85.21
0.35 W	147.91	58.37	605.91	X	X	0.6 W	26.23	45.42	104.28	310.65	1599.64	1.1 W	46.90	12.76	19.06	38.14	67.39
0.4 W	97.41	53.83	49.71	133.69	202.10	0.65 W	29.42	27.69	34.79	120.39	251.83	1.2 W	198.34	6.22	22.13	62.92	101.00
0.45 W	51.61	46.85	99.70	351.29	459.17	0.7 W	39.11	42.64	25.78	35.34	150.67	1.3 W	120.50	38.10	101.02	18.91	61.88
0.5 W	55.21	38.17	129.83	184.87	351.41	0.75 W	415.72	37.06	43.20	75.96	154.03	1.4 W	34.48	2.69	4.25	52.11	148.60
0.55 W	42.22	55.94	118.17	167.46	230.73	0.8 W	33.70	32.10	26.92	85.03	333.51	1.5 W	x	393.59	5057.43	61.55	1129.77

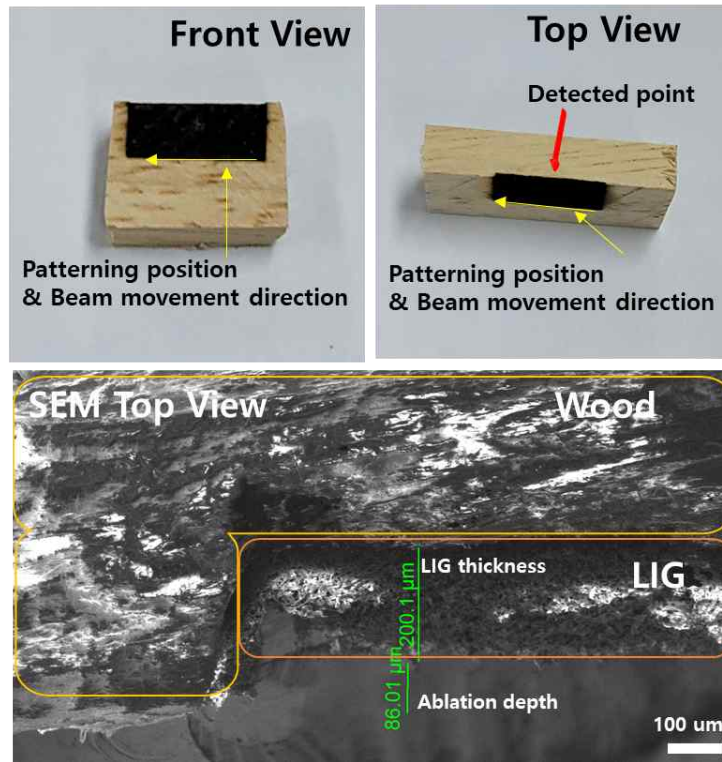
[그림 37. 펄스 레이저의 다른 파장, 다른 파워 및 다른 스캔속도에서의 레이저-유도-그래핀 생성 결과 및 면저항 수치]

- 근적외선 대역의 레이저 파워는 0.9 W부터 1.5 W까지 10~50 mm/s 내에서 패터닝을 진행하였으며, 2차 조화파 및 3차 조화파 생성과정에서의 광손실로 인하여, 모든 광학계를 지난 최종 최대 출력인 가시광선 대역에서의 0.8 W 와 자외선 대역에서의 0.55 W부터 0.05 W 씩 줄여가며 테스트를 진행하였음.
- 면저항 수치에서 노란색은 50 Ω/□ 이하의 결과값, 붉은 색은 20 Ω/□ 의 결과값을 의미함.
- 근적외선 대역의 레이저-유도-그래핀의 경우 1.4 W, 20 mm/s 의 조건에서 최소 2.69 Ω/□, 어블레이션으로 인한 주변부 데미지가 없는 깔끔한 결과에서도 1.2 W, 20 mm/s의 조건에서 6.22 Ω/□ 의 최적 면저항을 얻을 수 있었으나, 가시광선 및 자외선 대역에서는 수 Ω/□ 이하의 면저항을 가진 양질의 레이저-유도-그래핀 획득을 실패함.
- 이는 레이저의 출력 한계로 인한 것으로 예상되며, 두 파장에서의 낮은 속도로 패터닝을 진행할 시 더욱 좋은 전기전도도를 지닌 그래핀을 획득할 수 있을 것으로 예상함.



[그림 38. 파장에 따른 목재의 흡수율 그래프]

- 자외선과 근적외선 파장 기반의 레이저-유도-그래핀 생성 결과를 비교하였을 때 자외선 파장 기반의 레이저-유도-그래핀은 열 손상 깊이도 적으면서 레이저-유도-그래핀의 두께도 얇아짐.
- 이는 챕터 1-2에서 사용된 10.6 μm 대역의 CO₂ 레이저의 결과에서도 보이는데, 이는 그림 38에서의 파장에 따른 목재의 흡수율 차이에 의한 것임.
- 양질의 레이저-유도-그래핀이 생성되기 위해서는 특정한 고온과 고압이 필수적인데, 이론 상으로 2400 k - 3000 k의 온도 및 약 3.2 GPa 의 높은 압력에서 레이저-유도-그래핀이 생성되며, 이보다 낮은 온도에서는 카본 링을 생성하지 못하고, 이보다 높은 온도에서는 백본을 붕괴시켜 더 작은 탄소 클로스터로 열 분해되기 때문에 레이저-유도-그래핀이 생성되지 않음.
- 고압의 경우 모재료의 분해 과정에서 재생성된 일산화탄소 혹은 수소 가스에 의해 순간적으로 높은 압력 환경이 생성되며, 이 때 압력이 충분하지 않을 경우 카본링이 잘 형성되지 않음.
- 최적의 온도에서 이중층 그래핀과 유사한 구조가 만들어지며, 이 때의 층간거리는 흑연의 층간거리와 거의 동일함.
- 자외선 대역 파장의 레이저는 광자 자체의 높은 에너지로 인해 강력한 광 흡수가 가능하며, 근적외선의 경우 3차 조화파에 의해 형성된 자외선 대비 안정적이면서도 낮은 흡수율로 인하여 열 에너지가 상대적으로 긴 시간동안 깊게 침투할 수 있고, 또한 빠른 가공속도를 얻을 수 있다는 장점을 지님.
- 자외선 대역에서는 광열 및 광화학 반응에 의한 빠른 레이저-유도-그래핀 변환이 발생하지만, 높은 흡수에 의한 열 손상도 상대적으로 많이 발생함.
- 근적외선 대역의 경우 낮은 흡수율로 인하여 열이 충분히 쌓이기까지 그래핀 생성이 잘 되지 않으므로, 이를 극복하기 위하여 느린 속도로 원하는 디자인의 테두리를 그림으로써 의도적으로 흡수율을 높이고 내부를 빠른 속도로 채움으로써 열 손상을 최소화함과 동시에 패터닝 속도를 높이는 기술로 안정적으로 레이저-유도-그래핀을 생성함.

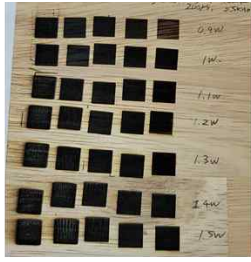


[그림 39. 근적외선 기반 레이저-유도-그래핀 열 손상 깊이 및 레이저-유도-그래핀 두께 측정]

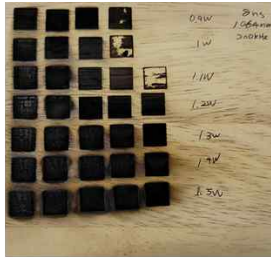
- 근적외선 펄스초 펄스에 의해 생성된 최적화된 레이저-유도-그래핀의 두께 및 열 손상 깊이를 측정함.
- 1.2 W, 20 mm/s 의 조건에서 생성된 목재 상 레이저-유도-그래핀의 측면을 SEM 이미지로 관측하였음 (그림 39).
- 목재의 경우 탄화 과정에서 최소 23 % 에서 최대 61 % 정도의 체적 감소가 발생하는데, 그림에도 근적외선 대역의 레이저 빔을 사용하면 자외선 대역의 레이저-유도-그래핀 대비 열 손상 깊이도 줄어들면서 그래핀의 두께도 높일 수 있어 더 많은 양의 그래핀을 확보할 수 있음.
- 최적 조건에서의 열손상 깊이는 약 86 μm, 그래핀 두께는 약 200 μm로써 빔 사이즈가 70 μm, 초점심도가 100 μm 이하임을 고려하였을 때 거의 3배에 가까운 깊이까지 열이 충분히 침투하여 그래핀화할 수 있음을 확인할 수 있음.
- 본 연구를 통해 목재의 그래핀 생성 과정에서 탄화 과정으로 인해 열 손상을 최소화할 수는 있지만, 완전히 방지하는 것은 불가능하다는 것을 확인할 수 있었으나, 그럼에도 열 손상 깊이의 최소화는 가공 중 부산물 배출이 최소화 됨을 의미하며, 이는 가스 배출이 최소화되어 친환경적으로 전극 생성이 가능함을 시사함.

1-2) 연속파, 나노초 및 펄스초 레이저와 유기 물질과의 상호작용 비교/이해

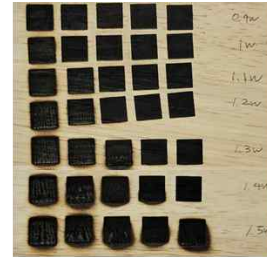
- 펄스폭에 따른 레이저-유도-그래핀 생성 결과를 확인하기 위해 연속파 레이저, 나노초 레이저 및 펄스초 레이저로 각 파워 및 속도 별 패터닝을 진행하고, 그래핀 전기전도도 성능을 확인함.



CO2 Laser (200 us)



ns Laser (8 ns)

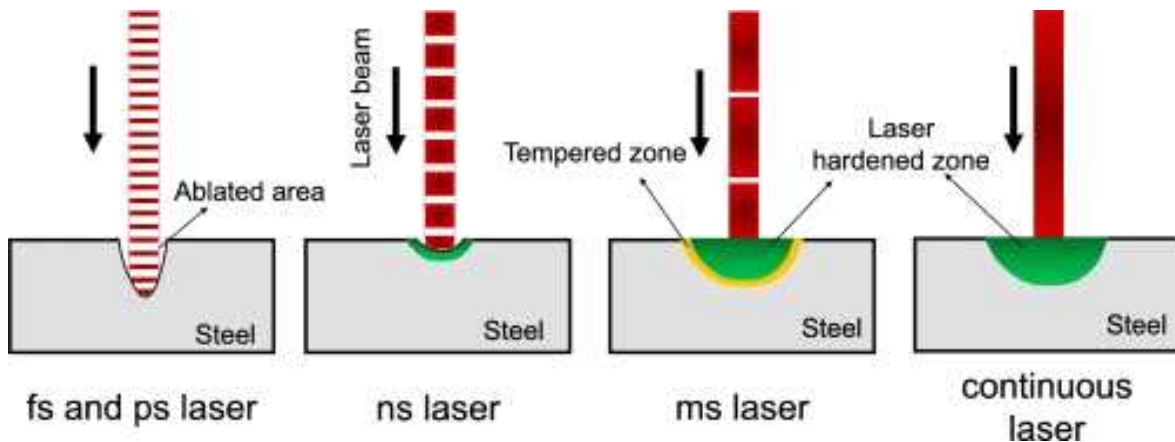


Fs Laser NIR (250 fs)

10.6 um CO2 Laser 200 us (2.5 kHz)						1064 nm Yb ns Laser 8 ns (200 kHz)						1040 nm Yb fs Laser 250 fs (200 kHz)					
속도 →	10	20	30	40	50	속도 →	10	20	30	40	50	속도 →	10	20	30	40	50
0.9 W	364.03	119.94	116.74	x	x	0.9 W	257.42	319.96	x	x	x	0.9 W	60.62	14.74	42.83	81.03	130.21
1 W	86.02	25.71	199.35	132.00	458.75	1 W	104.15	x	x	x	x	1 W	207.19	27.26	38.72	63.91	85.21
1.1 W	361.73	175.82	95.79	115.37	337.20	1.1 W	417.47	331.08	x	x	x	1.1 W	46.90	12.76	19.06	38.14	67.39
1.2 W	1296.50	42.47	55.31	214.74	526.94	1.2 W	2320.60	362.68	x	x	x	1.2 W	198.34	6.22	22.13	62.92	101.00
1.3 W	4852.92	374.96	122.46	120.14	305.86	1.3 W	x	659.30	603.31	498.72	676.82	1.3 W	120.50	38.10	101.02	18.91	61.88
1.4 W	x	572.53	91.29	30.55	31.92	1.4 W	x	2316.99	1984.41	750.67	334.81	1.4 W	34.48	2.69	4.25	52.11	148.60
1.5 W	x	185.14	415.98	32.32	58.91	1.5 W	x	1105.97	99.72	1085.22	49.34	1.5 W	x	393.59	5057.43	61.55	1129.77

[그림 40. 연속파, 나노초 및 펨토초 레이저 기반의 그래핀 생성 결과 및 면저항 수치]

- 그림 40과 같이 10.6 um 대역의 파장을 가진 200 us 펄스폭의 CO₂ 레이저와 1064 nm 파장, 8 ns 펄스폭의 나노초 레이저, 1040 nm 파장, 250 fs 펄스폭을 가진 펨토초 레이저를 0.9 W부터 1.5 W까지 10~50 mm/s 의 속도로 패터닝을 진행하였음.
- 200 us 의 펄스폭은 매우 긴 펄스폭으로 연속파 레이저와 거의 유사한 가공 결과를 보임.
- 우선 펄스폭을 제외한 모든 조건(파장, 레이저 반복률, 속도, 파워)이 동일한 나노초 레이저와 펨토초 레이저 기반의 레이저-유도-그래핀을 비교해봤을 때 펨토초 레이저 기반의 그래핀 성능이 압도적으로 좋고, 어블레이션 및 열손상이 많이 억제됨을 확인할 수 있음.
- 반면 CO₂ 레이저의 경우 펨토초 레이저 대비 성능이 떨어짐에도 불구하고 비교적 깔끔한 가공이 가능하며, 나노초 레이저 대비 우수한 성능을 보이는데, 이는 그림 15에서 보이는 흡수율에 의한 결과임.
- 즉 같은 파장의 레이저를 사용하였을 때 짧은 펄스폭을 가질수록 레이저-유도-그래핀의 성능은 증가하며, 이는 단순히 그래핀 생성 뿐만 아니라 일반적인 가공에서도 전반적으로 보이는 양상임(그림 41 참조).
- 다시 말해서 극초단 펨토초 펄스 레이저의 경우 열 확산을 억제할 수 있으며, 열 영향 영역을 억제할 수 있어 마이크로 및 나노 스케일의 패터닝을 위한 공간 분해능을 크게 향상시킬 수 있고, 극도로 높은 침투 출력을 가지고 있으며, 이는 대상 물질과의 비선형 광학 현상을 유발시킬 수 있고, 또한 물질 변형에 대한 에너지 임계치를 줄일 수 있음. 또한 가공 시 발생하는 열을 적절히 억제할 수 있어 저온 처리가 가능하고 민감하거나 얇은 기판에 그래핀 전극을 공기 중에서 특별한 처리 없이 만들 수 있음.

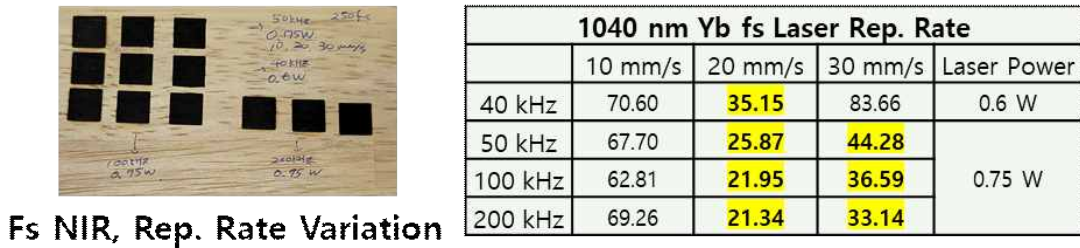


[그림 41. 펄스폭에 따른 레이저 가공 양상 비교]

○ 일반적으로 레이저-유도-그래핀이 생성되는 과정을 보면 온도가 3000 K 정도까지 증가하였을 때 모재료가 훨씬 더 작은 탄소 클로스터로 열분해되며, 250 ps 가 지난 후 더 큰 탄소 클러스터가 형성되며

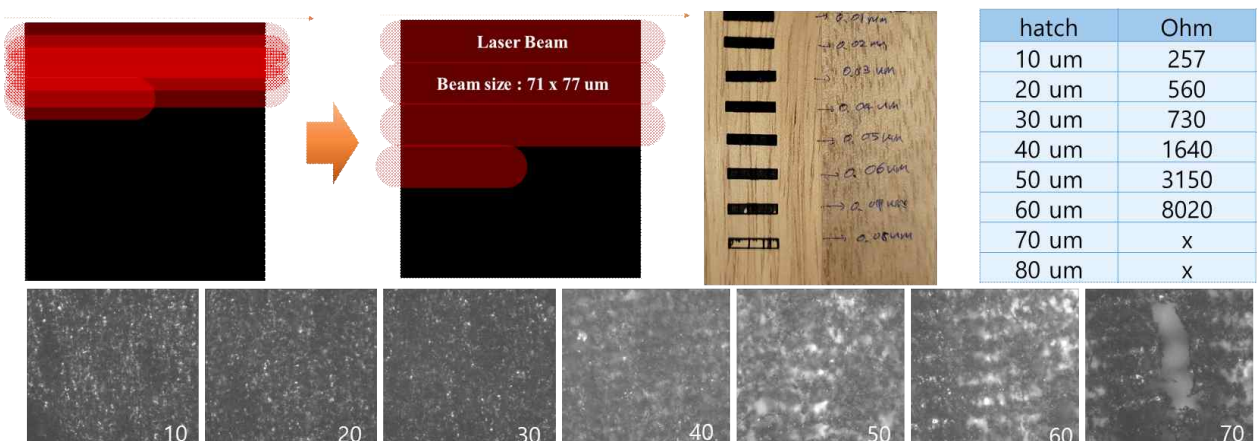
방향족 고리 수가 증가하기 시작하며, 600 ps 이후에 더 큰 탄소 클러스터가 형성되거나 그와 동시에 구조적 결함 발생량도 증가함. 이후 냉각 과정에서 기존 결함이 치유된 후 완벽한 그래핀 플레이크가 형성됨.

- 즉 짧은 펄스폭의 펄스 레이저 펄스가 초고속 에너지 제공을 하며 주변에 열과 스트레스를 충분히 방출하지 못한 채로 극도로 높은 온도와 압력을 갖는 고립된 국부 환경이 형성되어 그래핀 성장이 촉진되며, 이후 급속 냉각으로 인해 그래핀 시트가 성장하는 동안 흑연이 재조직화 되는 것을 방지하게 됨.
- 극초단 펄스 레이저는 고온 어닐링 없이 sp3 탄소가 sp2 탄소가 직접 전환되는 비열 기반의 상 전이를 유도할 수 있는데, 전자-정공 플라즈마의 밀도가 충분히 높으면 sp3 상과 sp2 상 사이의 에너지 장벽이 제거될 수 있고 이는 수백 펄토초 시간 스케일에서 비열적 상 전이를 가능하게 유도함.



[그림 42. 펄토초 레이저의 반복률 차이에 따른 그래핀 성능 비교]

- 다음은 그림 42와 같이 같은 펄스폭 내에서 레이저 반복률의 차이를 확인하기 위해 1040 nm 대역의 250 fs 펄스폭을 가진 펄토초 레이저를 이용하여 40 kHz, 50 kHz, 100 kHz 및 200 kHz의 반복률 변조를 통해 레이저-유도-그래핀의 성능 차이를 확인함.
- 반복률 변조는 펄스를 피킹하는 방식으로 200 kHz가 전체의 펄스를 사용한다면, 100 kHz는 절반의 펄스만 사용하고, 50 kHz는 1/4 개의 펄스만 사용하는 방식이므로 반복률이 낮아질수록 레이저의 최대 출력이 감소함.
- 이에 40 kHz의 최대출력인 600 mW를 처음 테스트한 후 50 kHz의 최대 출력 파워인 750 mW로 고정하여, 100, 200 kHz와의 차이를 비교함.
- 750 mW로 고정함은 제공된 에너지 총량이 같다는 의미로 50 kHz와 200 kHz를 비교하였을 때 펄스 개수는 1/4 개가 들어가지만, 펄스 당 에너지는 4배를 의미함.
- 50 kHz, 100 kHz 및 200 kHz의 결과가 유사함을 보아 총 제공된 에너지가 같으면서 펄스의 개수가 많이 차이 나지 않을 경우 레이저-유도-그래핀의 성능에 크게 차이가 나지 않음을 확인할 수 있음.
- 차후 펄스 개수를 바꾸고 펄스 당 에너지를 고정한 상태에서 시간을 변조하여 펄스 개수의 차이에 의한 결과를 확인하면 재료가 광에너지를 받은 후 열에너지로 바뀌는 과정에서의 식는 시간이 달라질 수 있으므로 펄스 개수에 의한 차이를 더욱 정확히 볼 수 있을 것으로 예상함.

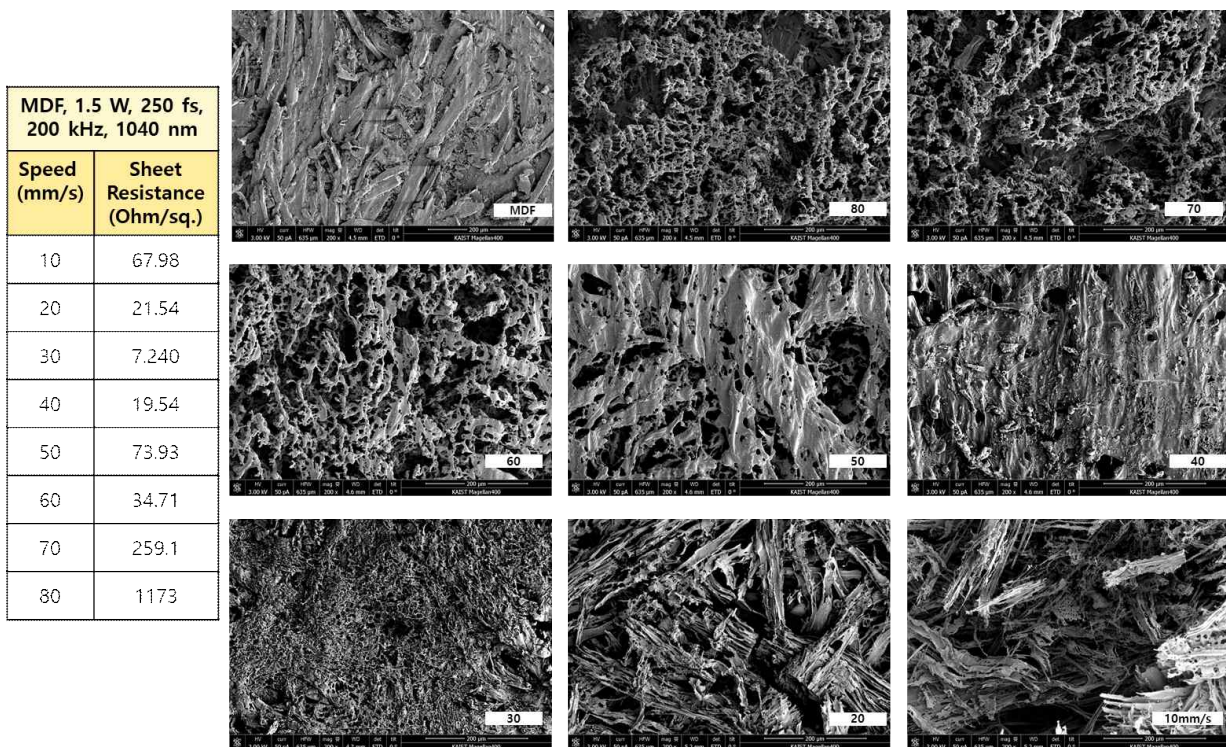


[그림 43. 펄토초 레이저의 hatch 차이에 따른 그래핀 성능 비교]

- 다음은 그림 43과 같이 1040 nm 의 파장, 750 mW의 레이저 파워, 30 mm/s의 스캔 속도, 250 fs 의 펄스폭, 200 kHz의 같은 반복률 내에서 hatch를 비교하고자 0.01 mm부터 0.08 mm 까지 스캐닝을 진행함.
- 빔사이즈는 0.071 x 0.077 mm 의 타원 빔으로 대략 0.077 mm의 타원빔으로 그림 43의 개략도와 같이 0.01 mm의 hatch는 같은 위치를 거의 7번 지나고, 0.07 mm의 hatch에서는 같은 위치를 거의 지나지 않음을 의미함.
- 저항 값 측정 결과 및 백색광 현미경 사진과 같이 hatch 간격이 작아질수록 레이저-유도-그래핀 전극이 더욱 촘촘하게 생기는 것을 알 수 있으며, 저항 수치도 낮아짐을 알 수 있음.
- 이는 그래핀이 생성됨에 있어 양질의 그래핀을 생성하기 위해서는 어느 정도 이상의 충분한 에너지를 필요로 함을 알 수 있음.
- 이를 바탕으로 목질계 재료 상에 양질의 레이저-유도-그래핀을 생성하기 위해서는 짧은 펄스폭을 가진 펨토초 펄스의 레이저가 열적 데미지 및 어블레이션을 적절히 억제할 수 있으면서도 퀄리티를 높일 수 있다는 측면에서 확실히 유리하며, 펨토초 레이저 내에서도 레이저 파워, 스캔 속도, 빔 경로 상의 빔 간 간격인 hatch 등 여러 요소들을 최적화하였을 때 전기전도도가 높은 그래핀을 생성할 수 있음을 알 수 있음.

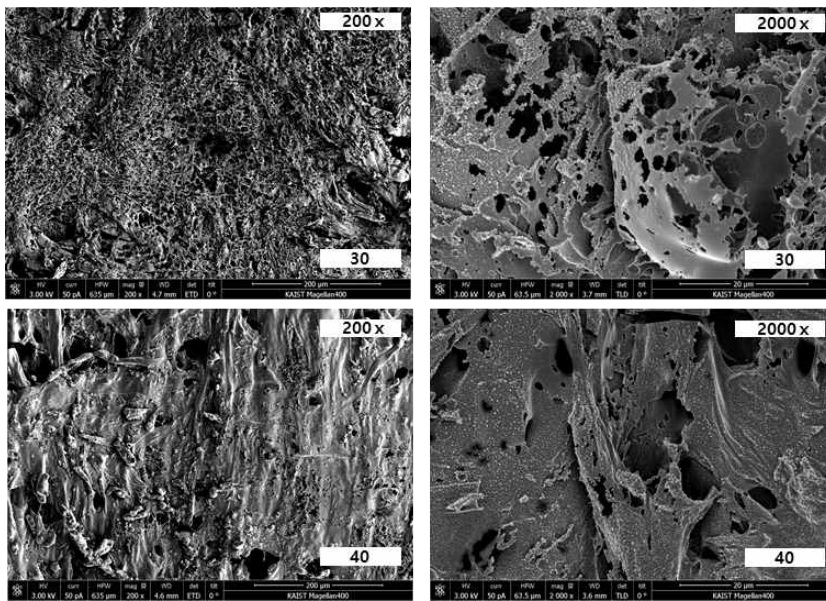
1-3) 패터닝 된 레이저-유도-그래핀의 전기적 및 화학적 특성의 평가

- 순수한 목재를 기반으로 파장, 펄스폭, 반복률, hatch 등의 변수를 통한 최적화된 연구 경험을 바탕으로 본 기술을 미활용 바이오매스에 적용하기 위하여 목질계 바이오매스를 본드와 섞은 후 고온으로 압착하여 만든 중밀도 섬유판 (MDF: Medium Density Fiberboard) 및 목질계 바이오매스를 태워서 파우더화시킨 차콜 파우더를 재료로써 선정하였으며(해당 샘플들의 면저항 최적화 결과는 챗터 2-1에서 언급), 그 중 전기전도도 측면에서 더욱 유리한 중밀도 섬유판 기반의 레이저-유도-그래핀의 전기적 화학적 특성을 분석하기 위하여 SEM (주사전자현미경), XRD (X-선 회절분석법), XPS (X-선 광전자 분광법), TGA (열중량분석법) 으로 분석을 진행하였고, 모재료인 MDF의 레이저-유도-그래핀 변환 비율을 확인하기 위하여 임의의 포인트들에서 라만 분석을 진행함.



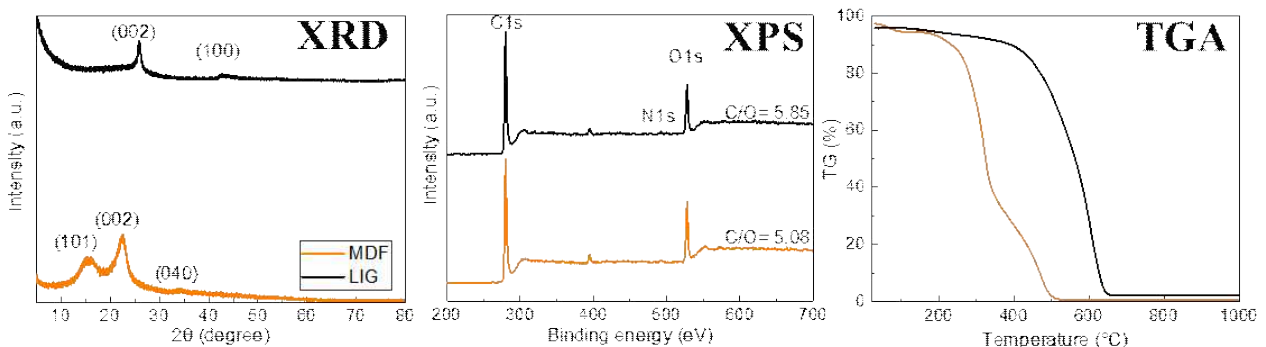
[그림 44. MDF 1.5 W 조건에서의 속도별 레이저-유도-그래핀 전극 면저항 및 SEM 이미지]

- 그림 44과 같이 근적외선 펄스 레이저의 1.5 W 파워 조건에서 10~80 mm/s 까지 먼저항을 측정 후 이를 SEM(주사전자현미경)으로 확대하여, 전극의 미세 구조를 관측함.
- SEM 이미지를 통해 유기 물질의 분해 및 재배열함에 따라 형성된 가스 분자들의 (예로 CO, H₂ 등) 빠른 방출 및 기존 미세구조의 그래핀으로의 변형 및 재생성으로 인한 다공성 구조를 명확하게 확인할 수 있었음.
- 극초단 레이저가 조사되면서 광에너지에 의해 MDF 내부 물질인 리그닌, 헤미셀룰로오스, 셀룰로오스의 공유 결합이 끊기게 되며, 어블레이션이 진행되며 온도가 급속도로 상승됨. 이때 분출된 질소, 산소, 수소, 질소산화물 등의 가스로 인해 순간적으로 엄청 높은 압력이 형성됨.
- 이러한 고온과 고압 조건에서 잔류 탄소들은 재결합하여 3차원 다공성 구조의 그래핀이 생성되도록 유도하며, 어블레이션이 상대적으로 심한 느린 속도 (10, 20 mm/s)의 조건에서는 과분해 및 과응집하여 거대한 덩어리가 관측되는 반면 상대적으로 적절한 30~60 mm/s 조건에서는 적절한 다공성 구조가 형성됨.
- 빠른 속도 (70~80 mm/s) 에서는 일부만 생성되어 빈 공간이 많은 국부적 다공성 구조가 생성됨.



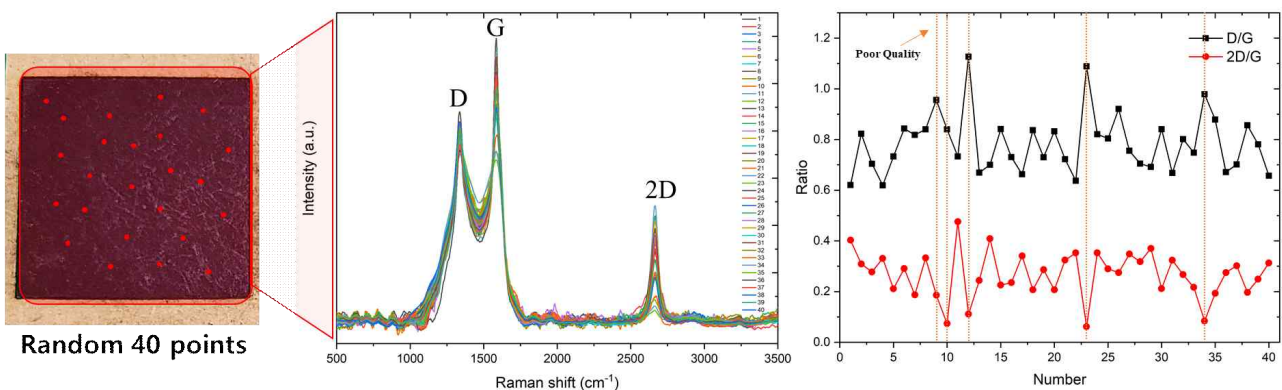
[그림 45. 1.5 W의 파워 조건에서의 30, 40 mm/s 스캔 속도의 MDF 상 레이저-유도-그래핀 전극의 200배, 2,000배 확대된 SEM 이미지]

- 그림 45과 같이 전기전도도 측면에서 가장 좋았던 30~40 mm/s 의 경우 고배율(2,000배)에서는 적절한 다공성 구조가 보이나 저배율(200배)에서는 일부 눌러붙은 듯한 구조들도 관측되는데 이는 MDF 제작 중에 사용된 플라스틱 레진 (Urea-formaldehyde resin glue) 이 가공 과정에서 일부 날아가지 못하고 잔류하고 있기 때문인 것으로 보이며, 이는 용도에 따라 더욱 견고한 전극을 만들 수 있다는 장점을 지님.



[그림 46. 1.5 W, 30 mm/s 의 MDF 및 레이저-유도-그래핀 전극 XRD, XPS, TGA 분석 결과]

- 그림 46과 같이 전기전도도 및 다공성 측면에서 좋은 결과를 보인 1.5 W, 30 mm/s 조건의 레이저-유도-그래핀을 XRD (X-선 회절법), XPS (X-선 광전자 분광법), TGA (열 중량 분석법)로 분석함.
- XRD의 경우 MDF 및 MDF에서 생성된 레이저-유도-그래핀의 결정 구조를 분석하기 위해 사용되었으며, MDF의 XRD 스펙트럼에서 (101), (002) 및 (040)을 포함하는 세 개의 날카로운 피크가 관측되며, 이를 그래핀 피크와 비교하면 피크가 이동하거나 약해지고 사라지는데, 이는 펄스 레이저를 조사한 후 목재 구조가 분해됨에 기인하는 것으로 보임.
- 그래핀의 XRD 스펙트럼에서 $2\theta = 25.9^\circ$ 부근에서 뚜렷한 (002) 피크가 관측되는데, 이를 통해 두 인접한 (002) 격자면 층간 간격이 0.34 nm D-spacing을 갖는 방향족 그래핀 구조가 성공적으로 형성되었음을 의미함.
- 레이저-유도-그래핀은 적절하게 온도가 충분히 높고 올라간 조건(2,400 ~ 3,000 K)에서 이중층 그래핀 유사 구조를 나타내며 층간 간격은 흑연의 층간거리와 거의 동일하며, 다만 생성된 그래핀의 외각부를 측정할 경우 두 인접한 격자면의 층간 간격이 약간 다를 수 있는데, 아로마틱 링이 육각형이 아닌 오각형 혹은 칠각형의 링도 생성될 수 있기 때문임.
- 반면 오각형 및 칠각형의 탄소는 대부분의 산소, 질소 등의 비탄소 원자와 같이 평면보다는 가장자리에 위치하는데, 이는 비탄소 원자가 탄소 고리의 형성을 돕는 중간 원자로 작용할 수 있고, 비탄소 원자를 제거하려면 특정 에너지 장벽을 극복해야 하며 더 높은 온도 혹은 에너지를 필요로 할 가능성이 있음을 의미함. 즉, 기존의 6각형의 카본 링을 연 후 재결합을 해야 하는데 이 때의 최소 온도는 2,100 K 정도로 생각할 수 있음.
- 그럼에도 적절히 높은 온도는 싱글 혹은 더블레이어 그래핀과 유사한 interlayer 간격의 레이저-유도-그래핀을 형성하도록 도움. 본 MDF 기반의 XRD 분석 결과 적절한 층간 간격이 잘 관측된다는 점은 전반적으로 양질의 레이저-유도-그래핀이 제대로 생성되었음을 알 수 있음.
- XPS의 경우 MDF 및 레이저-유도-그래핀 표면의 화학적 구조 및 재료의 구성을 추가로 분석하는 용도로 측정되었으며, MDF의 C/O 원자비는 5.08인 반면, 레이저-유도-그래핀은 5.85으로 더 높은 비율을 가지는 것을 통해 산소를 포함하는 관능기가 그래핀 형성 과정에서 일부 제거되고, 성공적으로 그래핀 구조가 형성되었음을 알 수 있음.
- 단층 및 소수층 그래핀 대비 비탄소 원자 비율이 높은 것은 앞에서 언급한 레이저-유도-그래핀 생성 메커니즘 설명을 통해 유추할 수 있는데, 주요한 비탄소 원자인 산소와 질소가 외각 부분에서 카본링을 만들 때 도와주는 과정에서 오각형 및 칠각형이 생성되므로 비탄소 원자들이 그래핀 생성에 있어 일부 도움을 준다고 할 수 있음.
- TGA는 레이저-유도-그래핀 및 나무의 열적 안정도를 체계적으로 분석하는 용도로 사용되었음.
- MDF는 100 °C 이상에서 내부 수분 등이 증발하고, 200 °C 부근에서 분해가 시작되며, 질량 손실은 셀룰로스 및 헤미셀룰로스의 분해로 인하여 240 ~ 340 °C에서 급격하게 일어나며, 340 ~ 500 °C에서는 리그닌 내의 방향족 탄소의 높은 열 안정적 특성으로 인해 분해 속도가 감소되고 500 °C에서 약간의 재등의 잔류화합물과 함께 최종 분해를 마칩.
- 반면에 레이저-유도-그래핀은 430 ~ 650 °C까지 분해되며, 이는 MDF 대비 열적으로 안정적인 상태를 의미함.



[그림 47. MDF 상 레이저-유도-그래핀의 임의의 40 포인트 라만 분광 측정을 통한 화학적 평가]

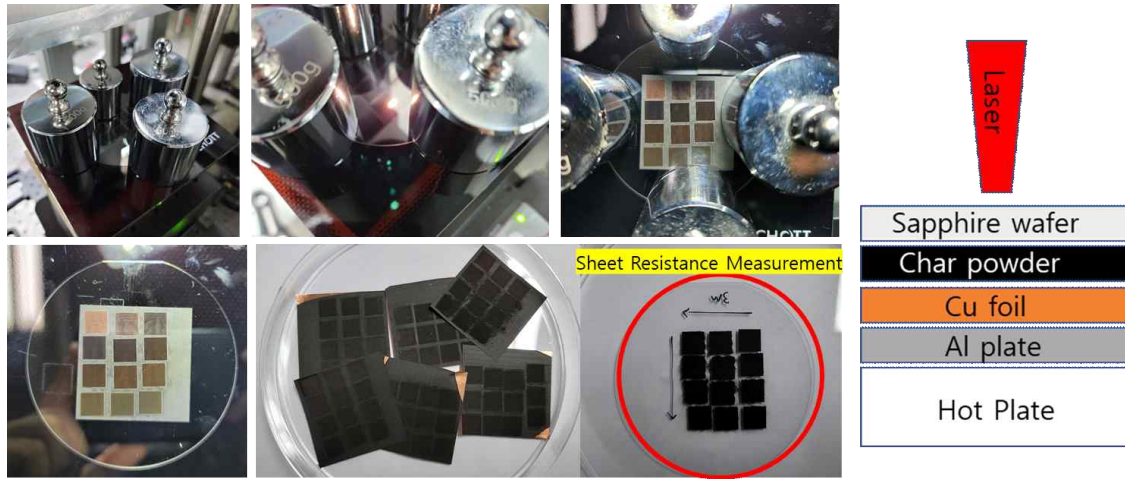
- 라만 분광법은 그래핀 및 그래파이트를 확인하고 특성화함에 있어 가장 많이 사용되는 분석법으로 MDF에 생성된 1.5 W, 30 mm/s 조건에서의 레이저-유도-그래핀 성능을 파악하고, 임의의 40 포인트를 찍어 MDF의 변환효율이 어느 정도 되는지 확인하기 위한 용도로 사용되었음(그림 47 참조).
- 레이저-유도-그래핀의 경우 대부분의 위치에서 D, G 및 2D 밴드에 해당하는 $1,356\text{ cm}^{-1}$, $1,583\text{ cm}^{-1}$ 및 $2,706\text{ cm}^{-1}$ 에서 모두 두드러진 피크가 관찰됨.
- D 밴드는 그래핀의 결함, G 밴드는 육각 탄소 구조, 2D 밴드는 그래핀의 층 수를 확인할 수 있으며, 이에 따라 2D 피크와 G 피크의 비율(I_{2D}/I_G)이 낮을수록, 그리고 D 피크, G 피크의 세기 비율(I_D/I_G)이 높고, I_D/I_{2D} 의 피크가 높을수록 퀄리티가 낮은 레이저-유도-그래핀이라 할 수 있음.
- 이에 따라 그래핀 퀄리티가 떨어지는 9, 10, 12, 23, 34번 포인트들을 제외하고는 모두 양질의 레이저-유도-그래핀 피크를 보이며, 이를 통해 40 포인트 중 35 포인트에서 양질의 그래핀 변환이 가능함을 확인하였고, 이는 **양질의 레이저-유도-그래핀 생성 조건에서 87.5 %의 변환 효율을 보여 본 과제의 최종 개발목표치인 70 %의 변환 효율을 충분히 초과 달성하였음.**

2) 고성능 탄소전극 변환의 생산성 극대화를 위한, 다파장 레이저 기반 고속 그래핀 전극 패터닝 공정기술 및 생산장비 개발/최적화

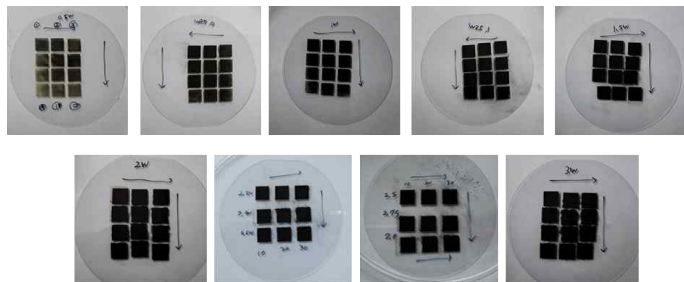
- 당해년도 연구에서는 고성능 탄소전극 변환의 생산성 극대화를 위해 구리필름 상 차콜파우더, 다양한 미활용 목질계 바이오매스 기반 재활용 재료인 (중밀도 섬유판, 파티클보드, 코어합판, OSB 합판) 상에 다양한 레이저 조건에서 최적화를 통해 양질의 그래핀 생성 기술을 확보 및 생산성 향상을 위한 열도움 기반 레이저-유도-그래핀 생성 기술을 개발하였고, 연속 공정 구현을 위한 파우더 배드 기반의 레이저-유도-그래핀 생성 연구 장비 제작, 다파장 레이저 광원 개발/최적화 및 고속 레이저-유도-그래핀 탄소전극 패터닝 장비를 최종적으로 개발함.

2-1) 레이저-유도-그래핀 생성 시, 레이저와 물질의 상호작용 최적화를 통해, 재료의 탈락을 최소화 하는 동시에 높은 전도도 획득

- 차콜 파우더를 구리 호일 위에 고르게 도포시킨 후 레이저-유도-그래핀을 생성하고자 함.
- 그림 48과 같이 작년 연구에 사용된 재료였던 차콜 파우더를 조금 더 균일하게 사용하고자 구리호일 위에 본드와 섞어 균일하게 도포하여 고정시켰음.
- 고정용이었던 슬라이드 글라스 대신 사파이어 웨이퍼로 대체하여, 글라스가 레이저-유도-그래핀 생성 과정에 열로 인해 분해되어 실리콘이 일부 섞일 가능성을 배제함.
- 또한 사파이어 웨이퍼 위에 추로 무게를 가해서 레이저-유도-그래핀 생성 과정에서 발생하는 열 및 가스가 생성을 도울 수 있도록 유도함.
- 제작 과정에서 추에 의한 압력으로 인하여 레이저-유도-그래핀의 대다수는 사파이어 웨이퍼로 전사되며, 본 연구에서는 해당 전사된 그래핀 파우더를 분석함.



[그림 48. 구리호일에 증착된 차콜 파우더 상에 레이저-유도-그래핀 생성 방법]

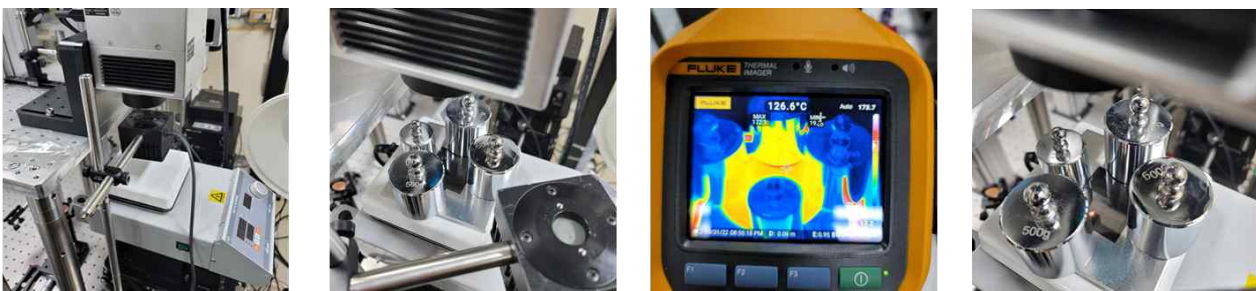


Power (W) / Scanning speed (mm/s)	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2	2.2	2.4	2.5	2.6	2.75	2.8	3
10	X	233.0K	155.2K	159.9K	42.08K	161.3	49.61	56.11	19.74	19.42	11.18	13.98	27.07
20	X	X	X	2314K	324.2K	13.30K	6.180K	3.761K	528.9	583.2	172.4	129.3	164.4
30	X	X	X	4150K	4000K	36.59K	23.30K	28.26K	20.43K	13.36K	10.48K	8.018K	6.156K
40	X	X	296.1K	X	3883K	90.78K							19.40K
50	X	X	X	X	X	153.2K							63.41K
60	X	X	X	X	X	509.2K							82.20K
70	X	X	X	X	X	X							988.0K
80	X	X	X	X	X	X							291.2K
90	X	X	X	X	X	X							2360K
100	X	X	X	X	X	X							X
125	X	X	X	X	X	X							X
150	X	X	X	X	X	X							X

해당 부분은 테스트 진행 안함

[그림 49. 파워 및 속도 별 구리호일에 증착된 차콜 파우더 상 레이저-유도-그래핀 면저항 측정 결과]

- 기 언급된 방식에서 레이저 파워 및 스캔 속도를 변조하여 실험을 진행하였으며, 전사된 사파이어 웨이퍼 상의 레이저-유도-그래핀의 면저항을 그림 49와 같이 측정함.
- 2.75 W, 10 mm/s 의 조건에서 11.18 Ω/\square 의 면저항을 가진 양질의 레이저-유도-그래핀을 생성하였음.
- 그림에도 목재 및 목질계 재료 대비 더욱 강한 레이저 파워 및 느린 속도에서 잘 생성되는 것으로 보아 변환 과정에서 더 많은 에너지를 필요로 함을 알 수 있음.
- 이는 차콜 파우더를 쓸 경우 공유결합으로 연결되어 있는 목질계 재료와는 다르게 입자가 각각 분포되어 있어 레이저에 의해 조사된 부분에서 열을 쉽게 전달하지 못하고, 이는 레이저-유도-그래핀으로 치환하는 과정에서 각각의 입자들이 변환되어야 하기 때문인 것으로 사료됨.



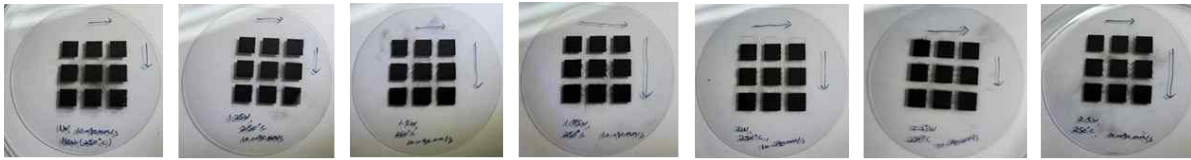
같은 위치에서 파워 측정

샘플 위치 잡은 후 250 C 가열

온도 확인 : 표면 온도 170도 이상으로 올라가면 실험 시작 (1~2분 이내)

패터닝 진행

[그림 50. 구리호일에 증착된 차콜 파우더 상 레이저-유도-그래핀 열도움 기술 적용 방법]

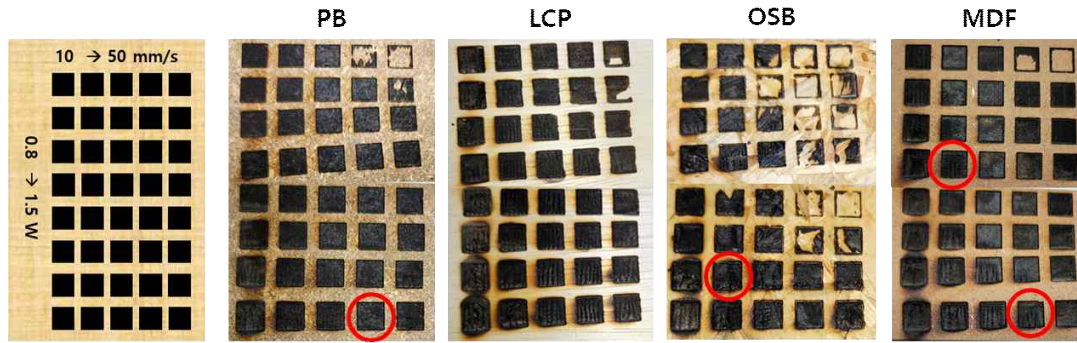


Power (W) \ Scanning speed (mm/s)	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5	2.6	2.75	2.8	3
10	X	167.5K	8.234K	653.6	84.52	28.92	14.84	10.96	9.370	9.040	8.720
20	X	X	55.68K	19.46K	5.369K	1.461K	199.7	669.9	423.2	319.6	79.79
30	X	X	50.85K	26.61K	37.60K	14.673K	6.127K	9.433K	9.481K	4.527K	5.081K
40	X	X	42.38K	38.08K	41.60K	32.20K	24.37K				
50	X	X	49.12K	36.84K	55.55K	37.48K	29.90K				
60	X	X	52.28K	41.01K	39.75K	34.30K	47.89K				
70	X	X	66.70K	48.01K	49.08K	44.71K	66.66K				
80	X	X	70.54K	121.5K	51.18K	49.41K	73.72K				
90	X	X	130.4K	101.0K	68.43K	71.34K	80.57K				

[그림 51. 구리호일에 증착된 차콜 파우더 상 열도움-레이저-유도-그래핀 면저항 측정 결과]

- 이를 극복하기 위한 방안으로 그림50과 같이 열도움 기술을 적용함.
 - 그림 48 개략도와 같이 하단에 핫플레이트를 두고, 그 위에 알루미늄 플레이트를 두어 아래에서는 열을 가하고 위에서는 레이저를 조사하는 방식으로 실험을 진행함.
 - 상부 온도가 170 도 이상까지 올라갔을 때 레이저 패터닝을 진행함.
 - 그림 51과 같이 3 W 조건에서 최대 8.72 Ω/\square 의 최적화된 양질의 레이저-유도-그래핀을 생성할 수 있었으며, 10 mm/s 의 조건에서 2.5 W, 2.6 W, 2.75 W, 2.8 W, 3 W 의 레이저-유도-그래핀을 상온에서의 그래핀 면저항과 비교하였을 때, 각각 33 %, 77 %, 19 %, 55 %, 310 % 등 성능이 많이 증가하였음.
 - 또한 1.5 W 와 2 W 의 고속 조건을 확인했을 때 상온 공정에서 아예 측정이 불가능하던 차콜 파우더가 열도움 조건에서는 면저항 값이 높긴 하지만 그림에도 저항 값이 측정되는 것으로 보아, 본 연구를 통해 제시된 열도움 기반의 레이저-유도-그래핀 생성 기술은 향후 최적화할 경우 확실히 생산 속도를 증가시키면서도 퀄리티를 높일 수 있을 것으로 기대됨.

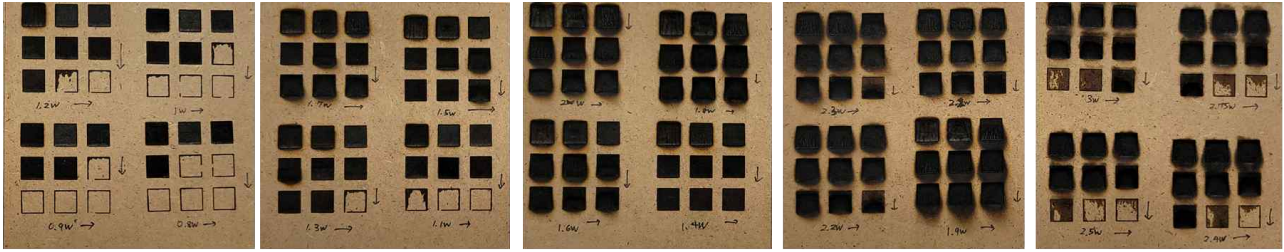
- 다음으로 미활용 목질계 바이오매스를 재활용하기 위한 용도로 상업적으로 제작되어 다양하게 사용되고 있는 중밀도섬유판 (MDF: Medium Density Fiberboard), 파티클보드 (PB: Particle Board), OSB 보드 (OSB: Oriented Strand Board), 코어 합판(LCP : Lumber Core Plywood) 상에 그림 52와 같이 레이저-유도-그래핀을 생성함.
 - MDF의 경우 목재를 고온 입자로 갈거나 원목과 집성목 등의 가공시 발생하는 부산물인 목재가루를 모아 접착제로 반죽해 고온고압에서 굳히는 방식으로 제작되고, PB는 사용하고 남은 목재를 잘게 부순 후 접착제와 함께 강한 힘과 열로 단단하게 뭉쳐서 제작됨.
 - LCP의 경우 두꺼운 코어를 내부에 두고 표판을 양면에 접착하여 제작되며, OSB의 경우 직경이 작고 성장이 빠른 나무의 작은 조각들을 가공한 나무조각을 방수성 수지와 함께 열과 압력으로 강하게 접착해 제작됨.



Particle Board						Lumber Core Plywood					Oriented Strand Board						
속도 →	10	20	30	40	50	속도 →	10	20	30	40	50	속도 →	10	20	30	40	50
0.9 W	33.70	61.26	41.75	x	x	0.9 W	Ab.	172.8	956.8	877.3	x	0.9 W	24.27	43.09	x	x	x
1 W	139.9	41.21	36.85	72.72	x	1 W	Ab.	288.5	639.1	581.6	x	1 W	16.06	32.39	x	x	x
1.1 W	232.2	36.58	15.67	29.08	93.84	1.1 W	Ab.	98.67	261.8	115.0	104.8	1.1 W	11.90	45.11	x	x	x
1.2 W	540.2	31.11	28.54	25.61	50.41	1.2 W	Ab.	267.6	161.3	961.2	233.8	1.2 W	115.7	52.01	25.54	x	x
1.3 W	216.4	50.53	18.76	43.29	54.93	1.3 W	Ab.	Ab.	386.3	124.8	63.40	1.3 W	10.53	13.15	18.12	x	x
1.4 W	88.29	28.91	23.15	25.45	43.57	1.4 W	Ab.	Ab.	432.7	325.7	96.86	1.4 W	29.28	13.53	19.11	x	x
1.5 W	231.0	51.12	15.57	21.69	17.86	1.5 W	Ab.	Ab.	Ab.	248.7	72.18	1.5 W	Ab.	7.300	11.95	23.22	110.9

[그림 52. 다양한 목질계 바이오매스 기반 합판들 상 레이저-유도-그래핀 면저항 측정 결과]

- MDF의 경우 다양한 조건에서 양질의 레이저-유도-그래핀이 생성되어 이를 그림 53과 같이 더욱 체계적으로 분석하였으며, PB, OSB도 다양한 조건에서 20 Ω/□ 이하의 양질의 레이저-유도-그래핀을 생성시킬 수 있음.
- LCP의 경우 상대적으로 낮은 퀄리티의 레이저-유도-그래핀이 생성되며 쉽게 어블레이션이 일어나는데 이는 LCP의 외부 표판이 소프트우드 기반으로 쉽게 연소할 수 있는 재료이기 때문.
- 반면 OSB, PB, MDF 순으로 파우더 입자가 더욱 고르게 사용되며, 그렇기에 입자가 고우면서도 밀도가 높은 재료일수록 레이저-유도-그래핀이 더욱 잘 생성됨을 확인할 수 있음.
- 또한 원목 대비 균일한 재료로써 재현성도 더욱 우수함.
- 다만 OSB, PB, MDF 모두 열과 압력에 의해 제작되며 본드 또한 사용되므로 원목 대비 레이저-유도-그래핀 생성에서 상대적으로 고출력의 에너지를 필요로 하지만, 이는 반대로 어블레이션이 상대적으로 잘 일어나지 않음을 의미하기도 함.
- 소프트우드 대비 하드우드에서의 레이저-유도-그래핀 생성이 용이하고, OSB나 PB 대비 MDF에서의 그래핀 생성이 더욱 용이한 것을 보아 입자가 고르고 밀도가 높은 재료일수록 레이저-유도-그래핀 생성에 유리함을 알 수 있음.



Speed (mm/s)

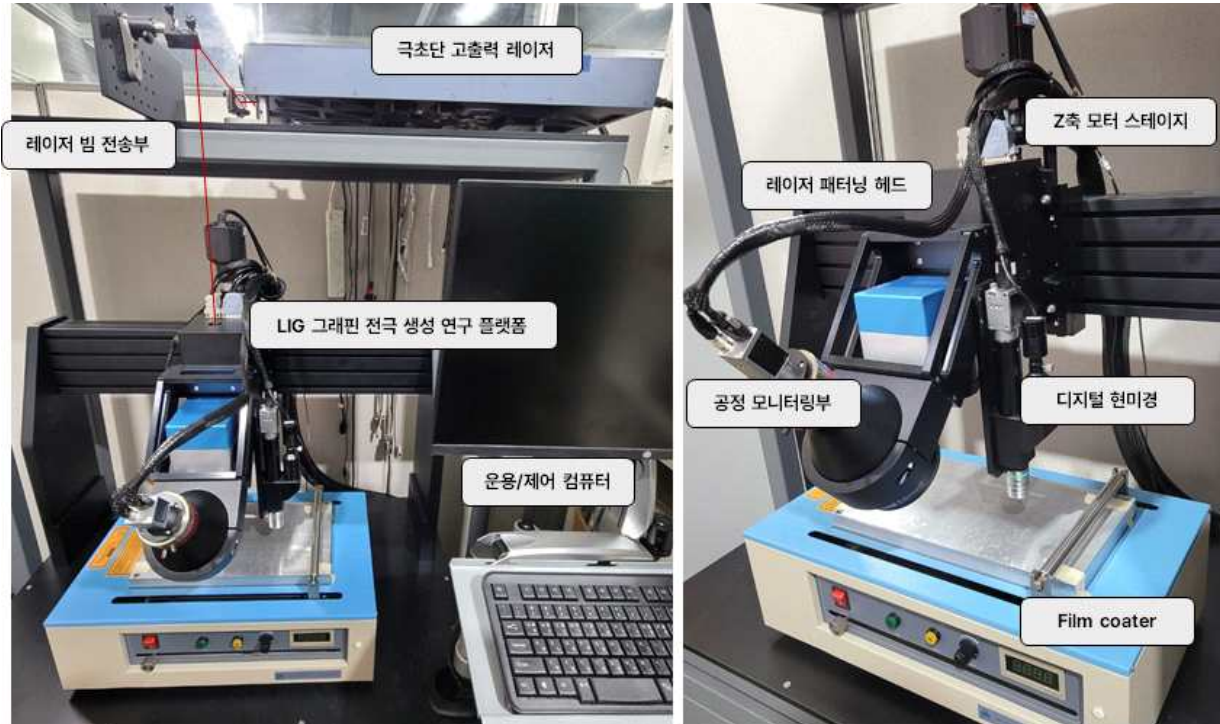
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	125	130	140	150	160	170	175	200	
0.8	17.30	20.09	73.45	312.5	X	X	X	X	X												
0.9	10.93	11.67	48.10	257.2	X	X	X	X	X												
1	22.15	10.85	28.64	135.0	X	X	X	X	X												
1.1	13.43	8.880	17.33	111.6	X	X	X	X	X												
1.2	40.1	8.170	13.99	47.82	111.5	441.9	395.2	X	X												
1.3	113.7	17.33	11.89	17.04	68.19	278.7	445.7	X	X												
1.4	205.3	118.8	11.73	35.49	53.24	124.7	285.4	742.3	X												
1.5	67.98	21.54	7.240	19.54	73.93	34.71	359.1	1173	38.87												
1.6	218.5	0.720	8.850	24.94	22.34	68.68	17.25	40.85	21.15												
1.7	1973	Ab.	40.87	17.94	21.16	152.9	6.970	7.860	12.00												
1.8	88.52	110.0	19.69	2.810	39.54	10.75	30.55	14.93	13.44												
1.9	245.2	74.92	100.6	33.32	15.88	8.720	13.14	7.130	8.130												
2	1089	39.26	2.780	4.590	13.43	89.14	34.45	19.24	19.79												
2.1				100.6	16.83	21.64	13.80	21.07	8.450	14.50			34.70				187.1				
2.2				23.21	4.10	27.06	16.92	59.27	26.60	14.13			26.16				X				
2.3				5.750	33.15	5.110	42.13	9.090	21.95	10.37			12.81				X				
2.4						8.820	44.36	47.17	14.00	23.87			21.26				120.9			X	X
2.5						27.45	9.730	16.28	8.050	6.760			X				X			X	X
2.75						71.88	13.78	12.30	25.80	23.71			25.56				366.8			X	X
3									8.670	19.00	8.510	14.52		24.92	26.64	X	X	X			

[그림 53. MDF 상 레이저-유도-그래핀 면저항 측정 결과]

- 그림 53과 같이 0.9 W ~ 1.5 W까지의 패턴링에서 가장 좋은 결과를 보여줬던 MDF를 메인 재료로 선정하여 0.8 W ~ 3 W 까지 넓은 영역에서 10 ~ 200 mm/s 의 다양한 속도로 레이저-유도-그래핀 생성을 시도함.
 - 가독성을 위하여 10~ 20 Ω/□ 조건은 주황색, 5 ~ 10 Ω/□ 조건은 파란색, 5 Ω/□ 이하의 조건은 초록색으로 표기하였으며, 다양한 조건에서 양질의 레이저-유도-그래핀을 생성할 수 있음을 확인할 수 있음.
 - 최고의 전기전도도는 0.72 Ω/□ 였으며, 다만 5 Ω/□ 이하의 조건에서는 무조건적으로 어블레이션(그을린 부분)도 일부 관측됨.
 - 그러나 용도에 따라 어블레이션을 감안하고 저저항을 최소한으로 하는 조건(예를 들어 파우더 수집 후 사용)과 전극으로써의 어블레이션이 완전히 억제된 깔끔한 조건을 선택적으로 사용할 수 있음.
- 레이저-유도-그래핀의 각 재료 별 가장 높은 전기전도도를 요약하면 구리 호일 상 차콜 파우더의 경우 상온에서 11.18 Ω/□, 열 도움 조건에서 8.72 Ω/□를 달성하였고, PB의 경우 15.57 Ω/□, OSB 의 경우 7.3 Ω/□를 달성하였으며, MDF의 경우 0.720 Ω/□를 획득하였고, 이를 통해 극초단 레이저를 활용하여 공기 중에서 특별한 처리 없이 목질계 바이오매스 상에 양질에 레이저-유도-그래핀을 얻을 수 있음을 확인하였음.
- 이를 각각 보면 최고의 면저항은 0.720 Ω/□, 최대 속도는 150 mm/s로써, 본 과제의 최종 목표치인 100 Ω/□ 이하의 면저항과 50 mm/s 이상의 레이저 빔 이송속도를 훨씬 상회하는 수치이며, 목표 면저항 값과 빔 이송속도를 동시에 만족시키는 MDF 상에서의 2.3 W의 125 mm/s에서 12.81 Ω/□의 최적 레이저-유도-그래핀도 획득하여 본 과제의 목표치를 초과 달성하였음.

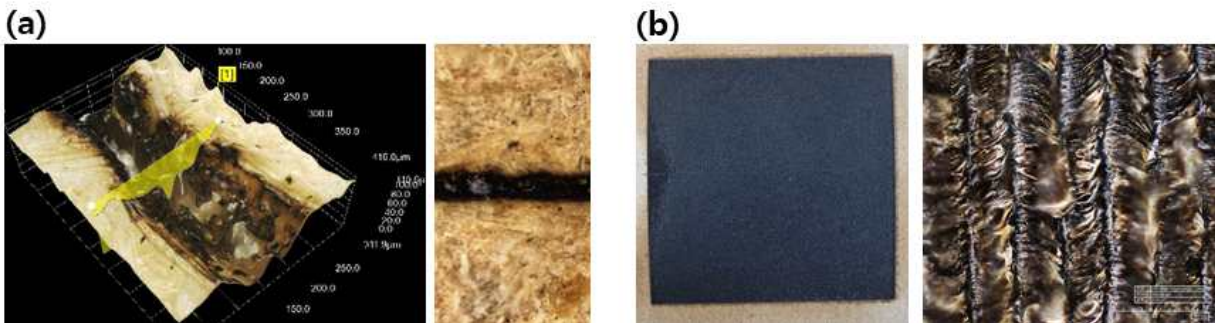
2-2) 파우더 베드 및 롤(Roll) 기반 연속공정 구현, 전극 패턴링 최적화 및 탄소전극 품질/생산성 세부 평가

- 연속 공정 구현을 위한 파우더 베드 기반의 레이저-유도-그래핀 탄소전극 생성 연구 장비를 그림 54와 같이 개발함.
 - 10 μm 이하 두께의 얇은 필름을 생성할 수 있는 Film coater 를 적용하여 얇게 분포된 리그닌 파우더 시료를 생성, 연속공정 구현을 위한 파우더 베드 기반의 기초 실험 수행함.
 - 리그닌 파우더의 경우, 10 μm 두께 및 최대 100 mm/s 의 속도로 파우더 베드에 배치할 수 있음.



[그림 54. 제작된 파우더 베드 기반 레이저-유도-그래핀 탄소전극 생산 연구 장비]

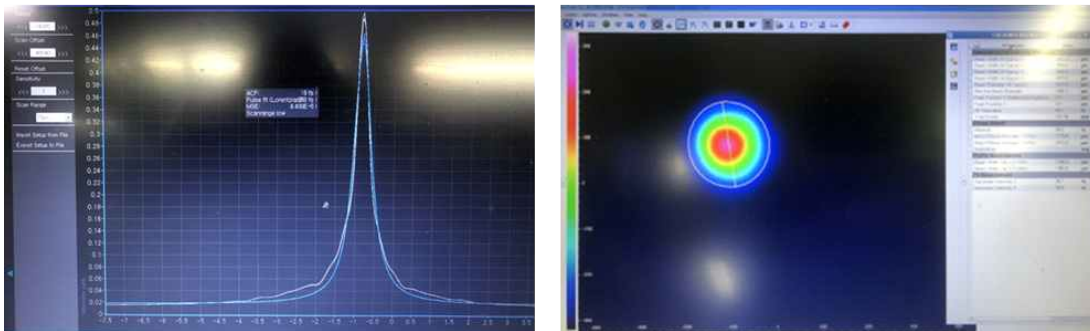
- 파우더 베드 기반의 레이저-유도-그래핀 탄소전극 생성 시스템은 roller가 척 플레이트에 뿌려진 리그닌 파우더를 밀어서 파우더 베드 위에 추가로 얇은 레이어를 형성하고 이후에 레이저 빔을 파우더 층에 조사하여 레이저로 가열 혹은 용융된 파우더가 주변의 파우더와 소결 혹은 융합되게 됨.
- 해당 층의 남은 파우더들은 제거되어 Powder Overflow 파트로 옮겨지고, 다시 얇은 레이어를 Recoater 혹은 Roller로 형성하는 공정이 반복, 이를 반복함으로써 대량 생산 공정 기반의 그래핀 탄소전극 소재를 생성할 수 있음.
- 최적의 전극 패터닝 공정 변수를 확립하고 공정 표준화를 달성하기 위하여 패터닝 변수 차이에 따른 패터닝 결과물의 변화를 관찰하기 위하여 실시간으로 레이저-유도-그래핀 생성 공정을 모니터링할 수 있는 2D 공정 모니터링 광학부가 개발 및 탑재되었으며, 최종적으로 생성된 그래핀 탄소전극의 미세형상 검사를 위한 디지털 현미경 광학계 또한 개발 및 탑재되었음.
- 그림 55 는 생성된 그래핀 탄소전극의 미세형상을 실시간으로 검사한 결과를 나타내며 검사 형상의 크기는 200 μm X 200 μm 이며 분해능은 500 nm 임. 그림 55 a 는 높은 광출력으로 인해 목질계 표면이 Graphitization 되는 것을 넘어 Ablation 에 의한 손상으로 움푹 패인 데이터를 확인할 수 있으며, 그림 65 b 는 생성된 그래핀 파우더를 확대한 표면형상으로 열적 효과로 인해 표면이 조금 튀어나온 것을 확인할 수 있음.



[그림 55. 목질계 표면에 대한 레이저 패터닝 결과물의 현미경 표면형상 검사]

2-3) 다파장 레이저 기반 고속 그래핀 전극 패터닝 생산장비 개발

○ 작년도 설계한 초기 1 μm 대역 레이저 광원을 최적화하여 그림 56과 같이 1040nm의 근적외선 및 520 nm 의 자외선 영역 대역의 펄초 펄스 광섬유 레이저를 제작함.

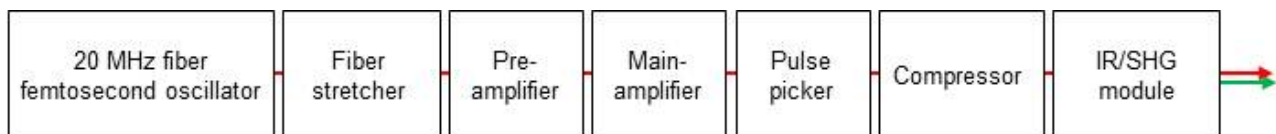


[그림 56. 레이저 랜더링 이미지, 실물 사진, autocorrelator 측정 결과, beam profiler 측정결과]

○ 제작된 레이저의 제원은 다음과 같음.

- 평균출력: 3 W (1040 nm), 1 W (520 nm)
- 반복률: 20 MHz
- 펄스에너지: 1.5 μJ
- 펄스폭: < 300 fs
- Ellipticity : > 90 %
- Footprint: 742 x 350 x 78 mm
- Special features: laser head – controller 일체형 디자인. External triggering mode.
- 레이저 패터닝 및 신터링에 적합한 20 MHz 급 고반복률 펄초 레이저 시스템 제작함.
- 가공 시스템에 장착이 용이하도록 헤드-전장 일체형 설계를 채택함.

○ 다음으로 레이저 광학부를 제작했으며, 레이저 모듈 순서도는 그림 57와 같고, 전장부, 광학부는 그림 58과 같음.



[그림 57. 레이저 모듈 순서도]

- 공진기 반복률 20 MHz를 그대로 증폭하는 컨셉으로, 펄스 반복률 조정 모듈 (pulse picker or multiplier) 을 생략할 수 있어 안정성을 향상시키고 footprint를 줄일 수 있음.
- 높은 반복률로 인해 펄스 당 에너지가 상대적으로 낮기 때문에 100 ps 보다 좁은 펄스폭 정도면 증폭

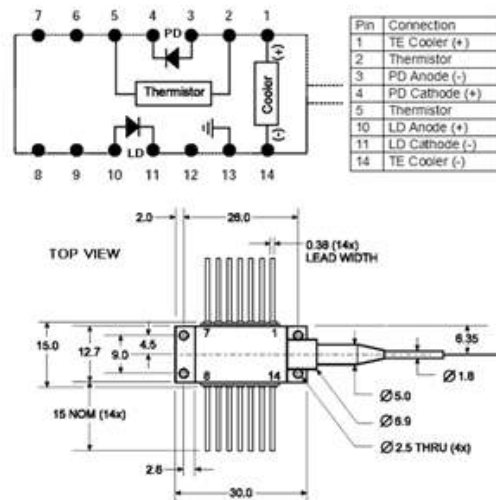
과정에서의 비선형 왜곡을 피할 수 있음.

- 이는 Fiber 기반 스트레칭을 통해 광량 손실 최소화할 수 있고, main pumping을 위한 pre-amplification을 최소화할 수 있음.
- grating pair를 통한 pulse compression을 진행함.
- LBO 광결정 기반 SHG 파장변환부를 구성함.



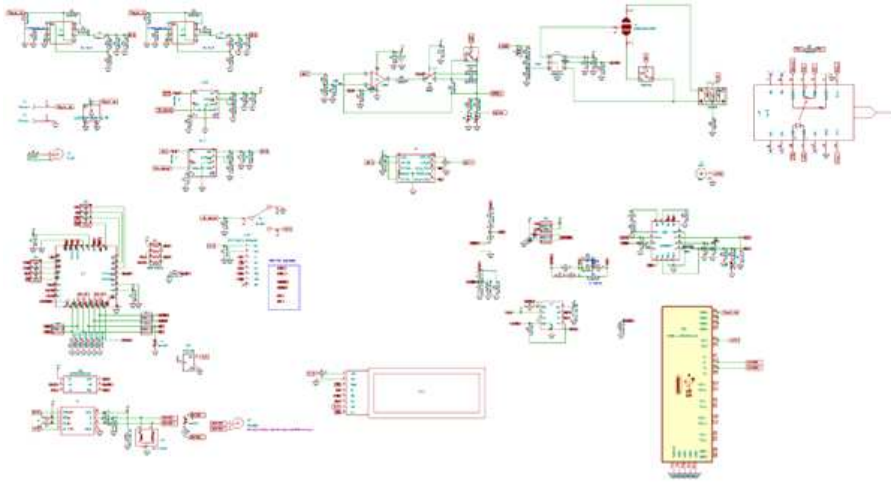
[그림 58. 좌) 전장부 구성 사진. power supply, LD & LD drivers, temperature controllers, main processor. 우) 광학부 구성 사진. 공진기, 증폭부, 압축단, 파장변환부]

○ 다음으로 레이저 다이오드 드라이버를 설계하였으며, 레이저 공진기 구동을 위한 레이저 다이오드는 파장 안정성을 위해 내부에 Peltier element를 가진 그림 59와 같은 14pin butterfly package 타입이 적합함.

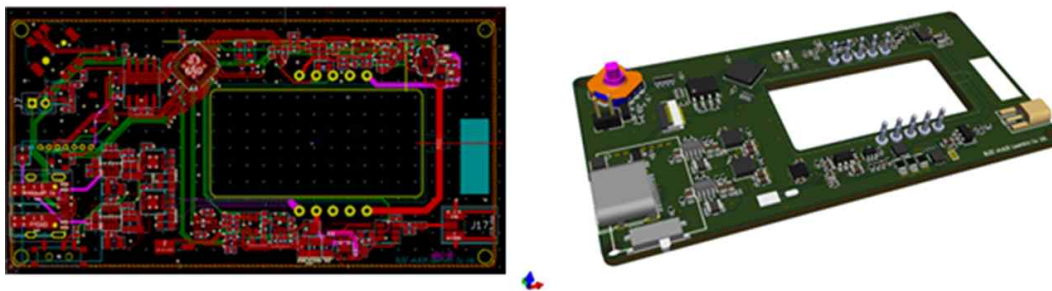


[그림 59. 14핀 Butterfly package 레이저 다이오드의 구조]

- 해당 레이저 다이오드의 전류 변동을 0.1%이하로 유지하면서 안정적으로 구동하는 기 보유 드라이버 기술을 적용하여 레이저 제작함(그림 60, 61 참조).



[그림 60. Butterfly 패키지 레이저 다이오드 드라이버 회로도]

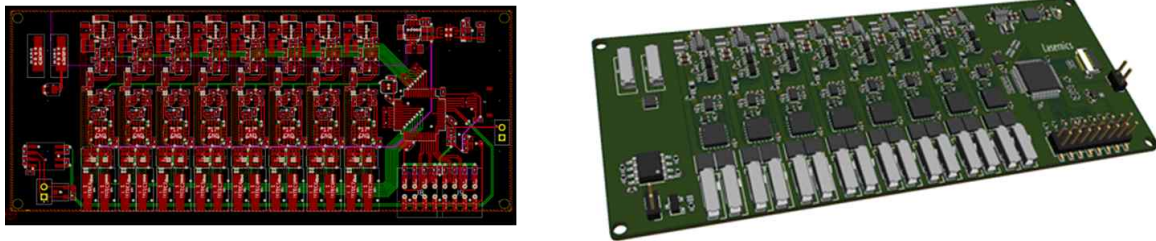


[그림 61. Butterfly 패키지 레이저 다이오드 드라이버 레이아웃 및 3차원 이미지]

- 회로 설계와 레이아웃 설계는 노이즈 및 소자간의 상호영향을 최소화하는 것에 중점을 둠. 단, 방열과 레이저 패키징을 용이하게 하기 위해 적절한 위치 선정이 매우 중요함. 특히 타 상용 드라이버들의 경우 노이즈 특성은 우수하나, 전력변환 효율이 매우 낮고 보드 면적이 커서 레이저 시스템 구성에 특화된 본사(레이저닉스)의 기술이 매우 특징적이라 할 수 있음.
- 설계 제작된 드라이버 제원:
 - 입력전압: 24V이하
 - 인터페이스: RS485
 - 온도센서 타입: Thermistor
 - 온도제어방식: PID
 - 최대 LD전류: 1A, TEC 최대전압: 5V, TEC 최대전류 1.3A
 - Special features: LCD display, 5-way stick input, current throttling at overtemperature
- 다음으로 정밀 온도 제어 및 방열을 위한 설계를 진행함.
- 온도 제어 시 방열을 최소화하기 위해 변환효율이 높은 온도 제어 보드가 필수적임. 방열 최적화를 위해 전용 온도 제어 보드를 제작하여 레이저에 적용함(그림 62, 63 참조).
- 특히 다수의 위치에 대한 독립적인 온도제어를 위해 고출력, 다채널 타입의 모듈이 필요함.
- 설계제작된 드라이버 제원:
 - 입력전압: 24V이하
 - 인터페이스: RS485
 - 온도센서 타입: Thermistor
 - 온도제어방식: PID
 - 채널: 8채널, 각 채널당 최대출력: 12V, 2.5A
 - Special function: tunable current limits, temperature slope control



[그림 62. 8채널 정밀 온도 제어 보드 회로도]

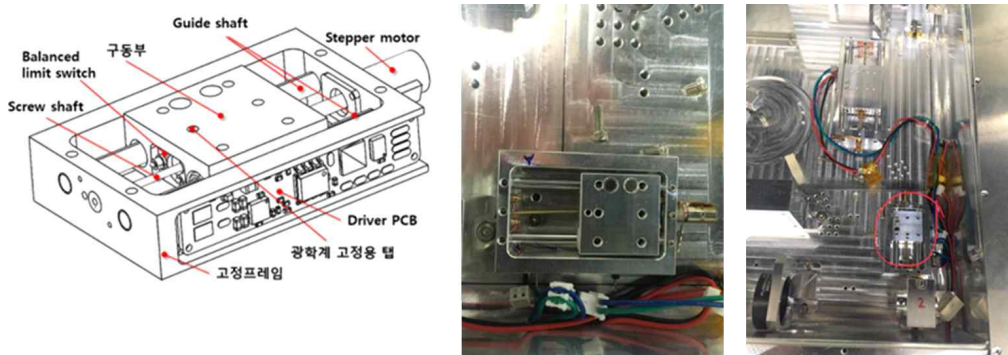


[그림 63. 8채널 정밀 온도 제어 보드 레이아웃 및 이미지]

- 비교적 고전류의 출력을 다수의 채널에서 인가하기 때문에 채널간 crosstalk을 최소화하는 것이 레이아웃에서 매우 중요함. 특히 각 채널용 출력전원을 별도로 두어 전력변환 효율을 극대화하였음. 또한 TEC 출력전원부와 제어부 전원부를 분리하여 노이즈 및 신호간섭을 최소화하였음.

○ 다음으로 파장 변화 시스템을 위한 스테이지를 그림 64와 같이 설계 및 제작함.

- 레이저 광학계 구동을 위해서 low-profile이어야 함. 시판되는 정밀 스테이지는 높이 또는 footprint가 적절하지 않아 파장 변화시스템용 스테이지를 설계 제작하여 레이저에 적용함. 또한 고반복 구동 시에도 sub-micron의 편차를 가져야 하므로 리미트 스위치가 매우 정밀하고 부품의 신뢰성이 높아야 함.



[그림 64. 파장변환 스테이지의 구조도 및 제작품]

- 정밀도를 극대화하기 위해 알루미늄 프레임에 고정밀 SUS샤프트를 채택하였고, 정밀가공한 테플론부시를 사용함. 또한 위치결정의 redundance를 제거하기 위해 5자유도 구속조건을 만족하는 구조로 설계함.
- 위치정밀도는 중간 이송 위치보다 스테이지 양끝에서 중요함. 따라서 고정밀 스프링을 갖는 접촉타입 리미트스위치를 제작하여 사용함.

- 일반 상용 리미트 스위치의 경우 압축력이 커서 작동이 되는 위치에서 구조적인 힘이 과하게 발생해 정밀도를 해칠 수 있고, 부품수가 많아 부품간의 slip/stick 등 트라이볼러지 문제를 내포하고 있음. 본 과제에서 제작한 리미트 스위치는 접점과 저압축력 스프링으로 위치센싱에 최소한의 변위를 발생시킴.

○ 마지막으로 고속 레이저-유도-그래핀 탄소전극 패터닝 장비를 개발함.

- 고성능 그래핀 전자소자의 최적 생성을 위한 연구용 레이저-유도-그래핀 전자소자 패터닝 장비를 설계 및 제작함.

- 우선적으로 파장은 1550 nm 에 맞춰서 설계되었으며 다양한 연구환경 및 시편에서의 연구용 패터닝을 위해 소형의, 환경에 강인하면서 다기능성의 특성을 가진 연구용 시제품 장비를 목표로 설계됨.

- 원격 자동제어 및 최적의 공정 환경을 위한 시제품 HW 제작을 완료하였으며 크게 (1) 고풍력 레이저와 가이드빔 레이저 통합 모듈, (2) 3축(XYZ-axis) 모터 구동 스테이지, (3) 레이저 패터닝 헤드부, (4) 유연/신축 그래핀 소재의 안정적 고정 및 적재를 위한 진공척 샘플판 및 진공펌프로 구성되었음.

- 하단 그림 65는 개발된 그래핀 전자소자 생성 공정 장비 시제품 및 그래핀 생성연구 장비의 주요 성능지표를 나타냄.

- 시편 이송 및 패터닝의 편의성을 위해 XYZ-축 모터 스테이지로 제작되었으며, 배큘 펌프 및 배큘 척 플레이트(Vacuum chuck plate) 를 통해 리그닌 파우더 및 목질계 박막 시편의 안정적인 적재를 수행할 수 있음.

- 한편 패터닝 레이저의 경우, IR 대역으로 눈에 보이지 않기 때문에 공정 안전성과 시인성을 제공하기 위해 빨간색의 빔(Guiding beam) 을 탑재하였으며, 레이저 광원 시스템을 비롯한 모든 광학부품은 모터제어를 통해 사용 편의성과 제어 편의성을 극대화함.

- 해당 제품의 소프트웨어는 작년도에 제작된 사용자 친화적인 제어가 가능한 운용 프로그램(GUI)을 적용함.



Specification of LW series

Laser Sources	
Illuminator	Femtosecond laser, etc. (Options : cw, ns, ps lasers)
Wavelength	1050 / 1550 (nm)
Pulse Width	< 250 fs
Optical Power	10 W (fs laser)
Pulse picking	1 pulse to 1 MHz

Stage System	
Motor type	Linear motor (LM guide) (Options : Step, AC/DC, etc.)
Scan Speed	< 1,000 mm/s
XY- Scan Area	100 X 200 (mm ²)
Z- Scan Range	100 mm
Resolution	10 nm
Position Accuracy	< 1 μm
Repeatability	100 nm
Sample Holder	Vacuum chuck, Porous Chuck
Vacuum Table Size	300 X 300 (mm ²)
Dimension (W X D X H)	800 X 1100 X 1650 (mm ³)
Weight	< 600 kg

Processing Monitoring	
Macro View Area	Up to 110 X 110 (mm ²)
Micro View Area (Digital microscope)	550 X 350 (μm ² , X20 배율) 220 X 140 (μm ² , X50 배율)
Auto Focus Range	100 ~ 280 mm

Laser Scanner (2D/3D)	
Scan Area (3D)	Up to 110 X 110 X 70 (mm ³)
Scan Speed	< 10,000 mm/s
Spot Size	12 ~ 26 μm
Resolution	6 ~ 13 μm
Depth of Focus	< 100 μm
Working Distance	< 186 mm

Objective Lens (OL)	
Magnification	X50
Wavelength	480 ~ 1800 (nm)
Input Aperture	12 mm
Spot Size	3 μm
Resolution	500 nm
Depth of Focus	1.6 μm
Working Distance	17 mm

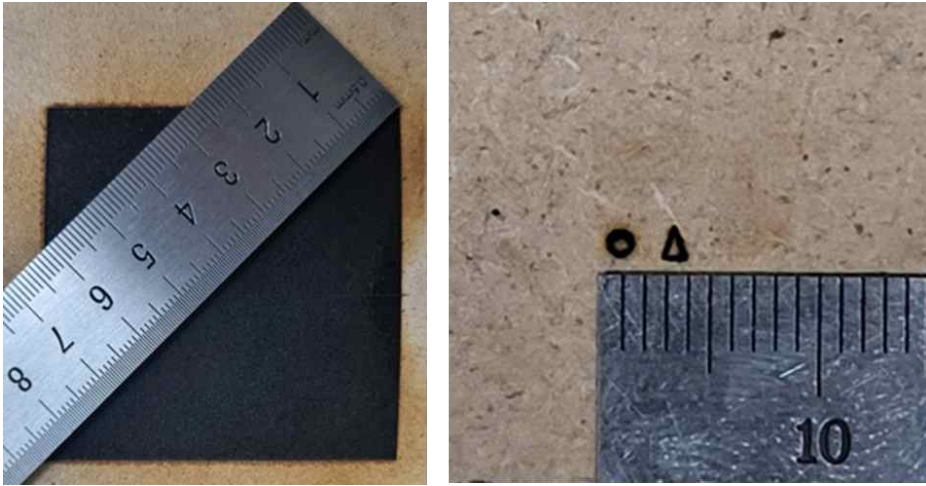
Software Description	
Functions	광축력 제어/모니터링, 광 스위칭, 오토포커스, 빔 사이즈 제어, 공정 모니터링/검사 Macro-, Micro, 패터닝 속도 제어, 연속 광경(Multiple mode)

[그림 65. 개발된 레이저-유도-그래핀 생성 연구장비(좌) 및 장비 성능표(우)]

○ 제작된 고속 그래핀 전극 패터닝 장비 기초 성능을 검증함.

- 레이저 패터닝 성능 검증을 위해 목재 송판에 패터닝을 수행, 최대 가공 영역 및 최소 가공 분해능 성능을 평가.

- 그림 66 과 같이 최대 85 mm 영역(대각선 길이) 에 대한 패터닝이 가능하며 1 mm X 1 mm 크기의 작은 형상까지도 패터닝이 가능함을 검증하였는데 이때의 패터닝 선폭은 ~100 μm 수준으로 이를 통해 ~100 μm 패터닝 분해능 성능 검증함.



[그림 66. 레이저 패터닝을 통한 최대 가공 영역 및 가공 정밀도 평가]

- 그림 66에서의 최대 패터닝 영역인 60 mm X 60 mm 사각형 패턴의 생성시간을 측정하여 패터닝 속도를 측정하였으며 결과는 그림 66과 같음. 산출된 값을 보면 약 240 mm의 사각형 변을 패터닝 하는데 23.52 초가 걸렸으며 이를 통해 의도한 11 mm/s의 패터닝 속도에서 가공이 제대로 이루어 졌음을 확인함.



[그림 67. 자동 계산 프로그램을 통한 레이저 패터닝 속도 측정 결과]

3) 목질계 바이오매스 기반 탄소전극 이차전지 소자 제작 및 셀 제작

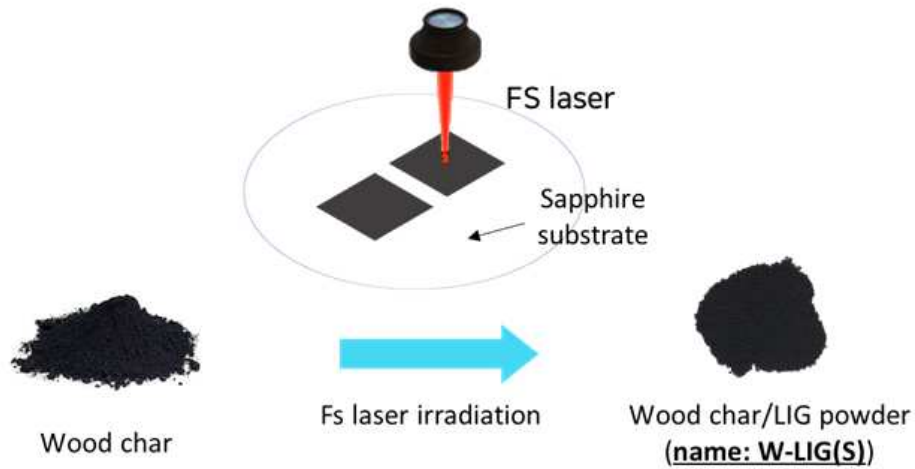
○ 당해연도 연구에서는 파우더형 나무 숯, 필름형 나무 숯, 중밀도 섬유판 기반 레이저-유도-그래핀을 제작하고, 나무 숯, 몰리브덴, 셀레늄 파우더를 섞은 레이저-유도-그래핀 이중복합 전극소재를 제조 후 물성 분석, 전기화학적 특성 평가를 통한 성능 최적화를 진행함. 또한 제작된 다양한 재료 기반의 그래핀 전극을 정전류 충방전법 분석 및 반복 측정을 통하여 전기/화학적 특성을 평가 및 최적화를 진행함.

3-1) 목질계 바이오매스 기반의 탄소 이중복합 전극 소재의 물성분석, 전기화학적 특성 평가 및 성능 최적화

○ 파우더형 나무 숯(Wood char) 기반 레이저-유도-그래핀

- 1040nm의 근적외선 영역대의 레이저 출력 2W 및 레이저 스캔 속도 70 mm/s의 조건에서 파우더형 나무 숯 기반의 펄스 레이저-유도-그래핀(LIG)을 제조하였음. 이는 W-LIG(S)로 명명함 (그림 68).

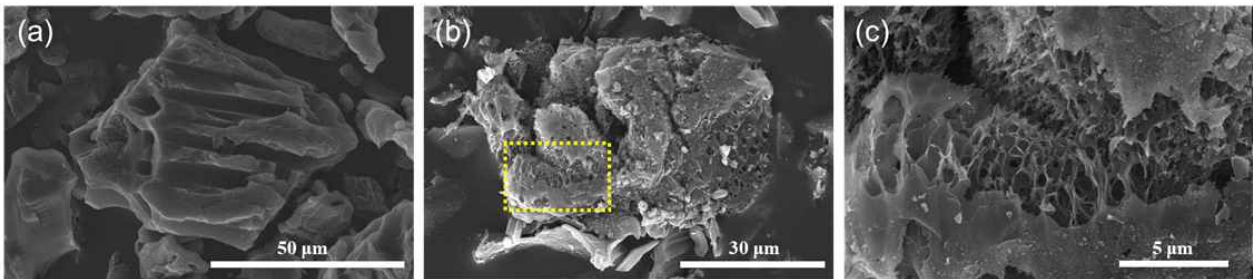
- 제조 시, 유리 기판에 의한 불순물 영향을 없애기 위해 1차년도에서와 달리, 2차년도에서는 열적 안정성이 매우 뛰어난 사파이어 기판 사이에 파우더형 전구체를 넣어 고정된 후 레이저를 조사하여 LIG 파우더 전극 소재를 제조함.



[그림 68. 나무 숯(Wood char) 기반 펨토초 레이저-유도-그래핀(W-LIG(S)) 제조 과정]

○ 나무 숯(Wood char)과 나무 숯 기반 레이저-유도-그래핀(W-LIG(S))을 주사전자현미경(SEM)을 통해 입자 형상을 관찰하였음 (그림 69).

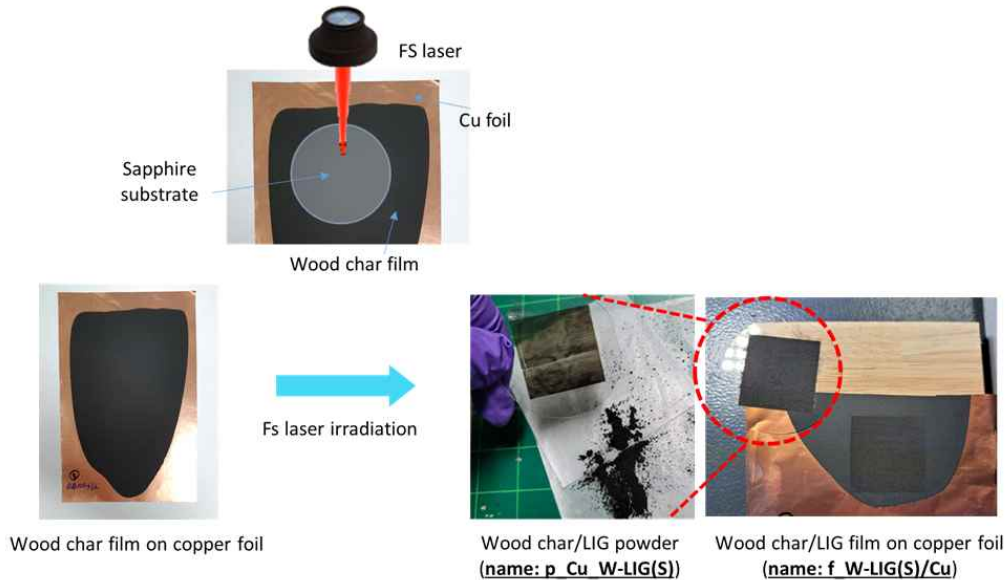
- 그림 69a와 같이 pristine 나무 숯의 입자는 길쭉한 형태의 마이크로 기공들이 늘어서 있는 각진 형태의 입자 형상을 보였으나, 나무 숯 파우더에 레이저를 조사한 W-LIG(S) 소재(그림 69b,c)는 입자 표면에 작고 랜덤한 크기의 기공들이 많이 형성되어 있는 것을 관찰 할 수 있었음. (그림 69b,c)



[그림 69. (a) 나무 숯과 (b,c) 나무 숯 기반 레이저-유도-그래핀(W-LIG(S))의 SEM 이미지]

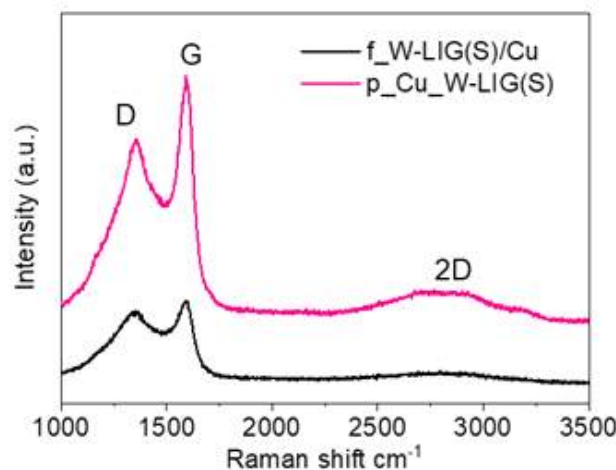
○ 필름형 나무 숯(Wood char) 기반 레이저-유도-그래핀

- 나무 숯 파우더, PVDF 바인더 및 NMP용매를 섞어 슬러리를 만든 후, 구리 금속 포일 위에 약 90 μm의 일정한 두께로 코팅하여 나무 숯 필름을 제작한 후, 나무 숯 필름 위를 사파이어 기판으로 덮어준 후 펨토초 레이저를 조사하여 얇은 레이저-유도-그래핀(LIG) 전극이 코팅된 구리 포일 및 Cu-decorated LIG 파우더를 제조하였음 (그림 70).
- LIG 전극 제조를 위한 레이저 조사 조건은 1040nm의 근적외선 영역대의 레이저 출력 1W 및 레이저 스캔 속도 30 mm/s의 조건에서 진행하였음. 구리 금속 포일 위에 코팅한 나무 숯 필름 위에 덮어둔 사파이어 기판 면에 증착된 Cu-decorated LIG 파우더를 p_Cu_W-LIG(S)로 명명하였고, 구리 포일 표면에 코팅된 얇은 LIG 전극 필름은 f_W-LIG(S)/Cu로 명명함.



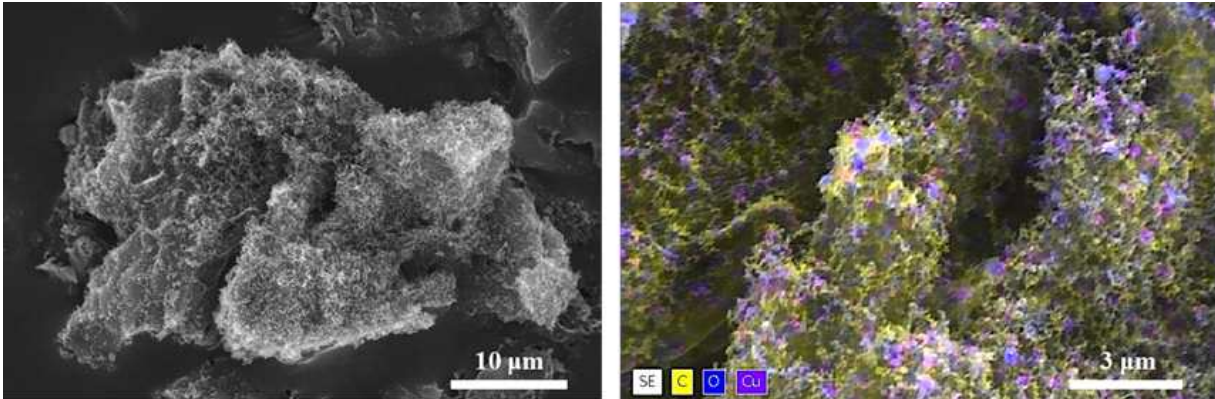
[그림 70. 구리 포일 위 나무 숯(Wood char) 필름 기반 LIG 전극 필름 및 Cu-decorated LIG 파우더 전극 제조 과정]

- 생성된 LIG 소재의 물성을 분석하기 위해, 라만 분광법(Raman spectroscopy), 주사전자현미경 (Scanning Electron Microscopy, SEM), 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy, TEM) 등의 분석법들을 사용하여 측정함.
- 그림 71은 레이저 조사 후, 필름 위에 덮어둔 사파이어 기판 부분에 형성된 p_Cu_W-LIG(S) 전극 파우더와 구리 포일에 코팅된 f_W-LIG(S)/Cu 전극 필름에 있는 전극 소재를 긁어내어 얻은 파우더의 라만 스펙트럼을 나타낸 것임.
- p_Cu_W-LIG(S) 파우더 전극 소재의 경우, $\sim 1353 \text{ cm}^{-1}$ 에서 D밴드, $\sim 1591 \text{ cm}^{-1}$ 에서 G 밴드, 그리고 $\sim 2720 \text{ cm}^{-1}$ 에서 2D 밴드가 관찰되었으며, f_W-LIG(S)/Cu 전극 필름에 있는 전극 소재를 긁어내어 얻은 파우더로부터 얻은 라만 스펙트럼에서는 $\sim 1352 \text{ cm}^{-1}$ 에서 D밴드, $\sim 1593 \text{ cm}^{-1}$ 에서 G 밴드가 관찰됨.
- p_Cu_W-LIG(S)와 f_W-LIG(S)/Cu의 두 LIG 소재의 D, G 밴드의 강도를 비교해본 결과, p_Cu_W-LIG(S) 전극 소재가 더 우세한 것으로 보아 흑연화도/결정화도가 더 높은 것으로 보임. 이는 레이저 조사 시, 레이저 빔과 맞닿는 부분이 가까울수록 상대적으로 더 강한 광열 효과에 의하여 흑연화에 유리하기 때문인 것으로 생각됨.

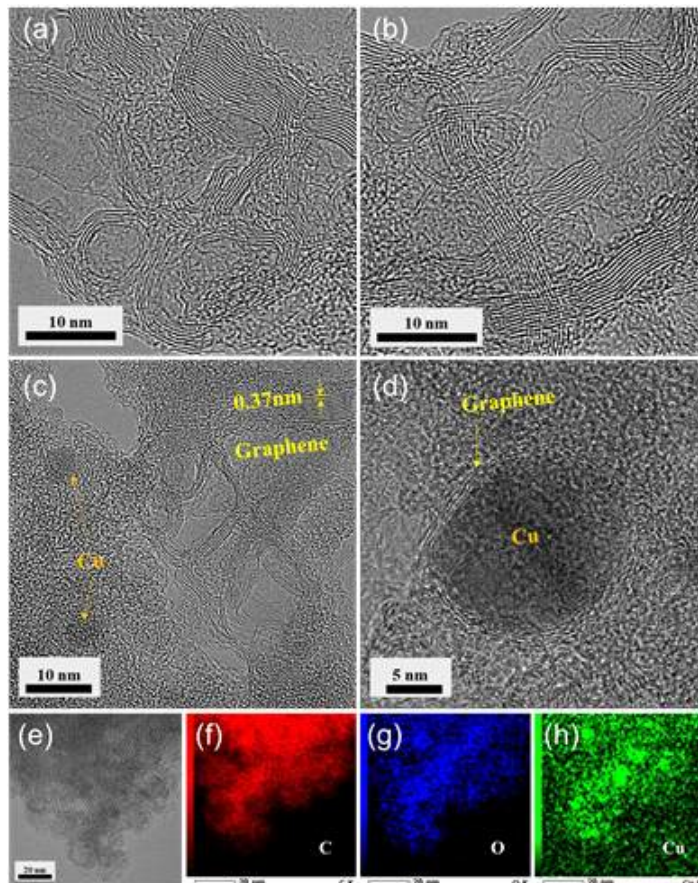


[그림 71. 사파이어 기판에 증착된 레이저-유도-그래핀 파우더(p_Cu_W-LIG(S))와 구리 호일에 코팅된 LIG 전극 필름(f_W-LIG(S)/Cu)으로부터 얻은 파우더의 라만 분광법 분석 결과]

- 그림 72, 73은 펄토초 레이저 조사 후 필름 위에 덮어둔 사파이어 기판에 증착된 레이저-유도-그래핀 파우더(p_Cu_W-LIG(S))의 전자주사현미경(SEM), 투과전자현미경(TEM) 사진을 나타낸 것임.
- SEM을 통해 입자 형상을 관찰해본 결과, 다공성의 불균일한 입자 형태를 가지고 있으며 입자 표면에는 나노입자들이 형성되어 있음을 확인할 수 있었음. (그림 72)
- 그림 73a는 입자의 표면 부분의 투과전자현미경(TEM) 사진을 나타낸 것이며, 이 부분을 TEM-EDS mapping한 결과 탄소, 산소, 및 구리 등의 원소들로 이루어짐을 확인함. (그림 73b-e) 여기서, 구리 원소는 구리 포일에서 기인한 것임.
- 그림 73g,g는 고해상도 TEM 사진을 나타낸 것이며, 잔물결 같은 주름이 있는 수 층의 그래핀을 확인함. 이는 격자 간격은 약 0.37 nm였으며, 이는 흑연 탄소의 두 개의 인접한 (002) 면 사이의 거리에 해당함. 또한, 수 층의 그래핀이 구리 입자를 둘러싸고 있는 형태를 확인함.

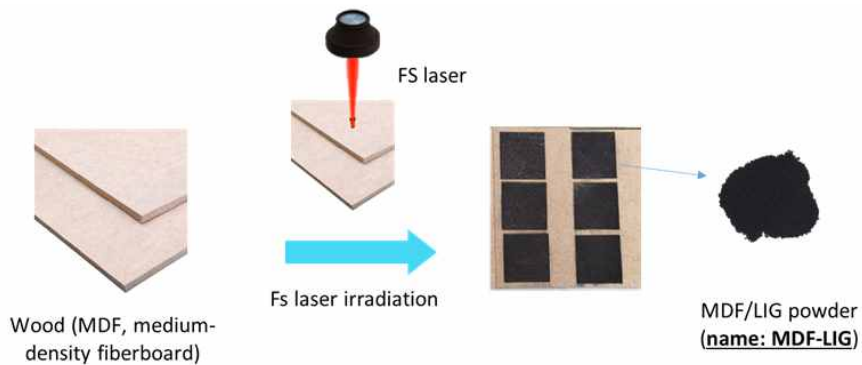


[그림 72. 구리 포일 위 나무 숲 필름 기반 펄토초 레이저-유도-그래핀(p_Cu_W-LIG(S)) 파우더의 SEM 및 SEM-EDS mapping 사진]



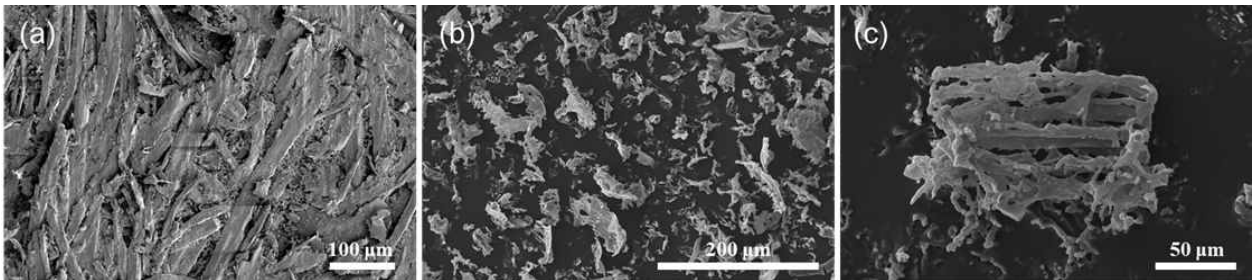
[그림 73. 구리 포일 위 나무 숲 필름 기반 펄토초 레이저-유도-그래핀(p_Cu_W-LIG(S))의 (a-d) High-resolution TEM 사진, (e-h) TEM-EDS mapping 사진]

- MDF(medium density fiberboard) 합판 기반 레이저-유도-그래핀
- 1040nm의 근적외선 영역대의 레이저 출력 1.5W 및 레이저 스캔 속도 40 mm/s의 조건에서 MDF(medium density fiberboard) 합판 기반의 레이저-유도-그래핀(LIG) 전극粉末를 제조하였음 (그림 74). 이는 MDF/LIG로 명명함.



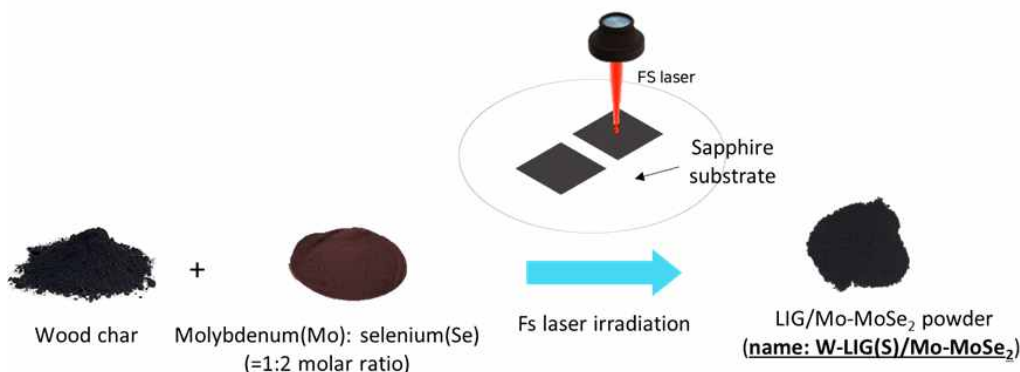
[그림 74. MDF 합판 기반 펄초 레이저-유도-그래핀(MDF-LIG) 제조 과정]

- pristine MDF와 MDF 기반 레이저-유도-그래핀(MDF-LIG)粉末를 주사전자현미경(SEM)을 통해 입자 형상을 관찰하였음 (그림 75).
- 그림 75a는 pristine MDF의 표면 SEM 사진을 나타낸 것이며, MDF에 레이저를 조사한 이후 표면 변화를 관찰해본 결과, 불균일하고 free-standing한 시트들이 형성된 것을 관찰 할 수 있었음. (그림 75b,c)



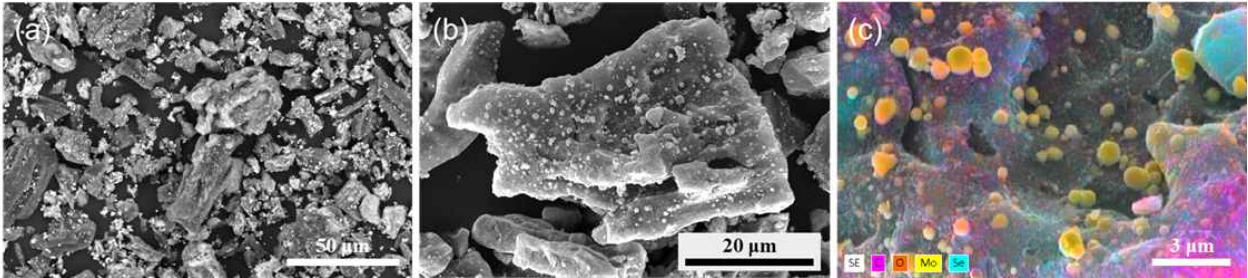
[그림 75. (a) pristine MDF 합판 및 (b,c) MDF 기반 펄초 레이저-유도-그래핀(MDF-LIG)의 SEM 사진]

- 레이저-유도-그래핀 이중 복합 전극 소재
- 1040nm의 근적외선 영역대의 레이저 출력 3W 및 레이저 스캔 속도 30mm/s의 조건에서 powder형 레이저-유도-그래핀 이중복합 전극 소재를 제조하였음.
- 나무 숯(Wood char), 몰리브덴, 그리고 셀레늄粉末를 함께 섞어준 다음, 열적 안정성이 우수한 사파이어 기판 사이에 넣어 고정한 다음 펄초 레이저를 조사하여 레이저-유도-그래핀(LIG) 이중복합 전극 소재를 제조하였음 (그림 76). 이를 W-LIG(S)/Mo-MoSe₂로 명명함.



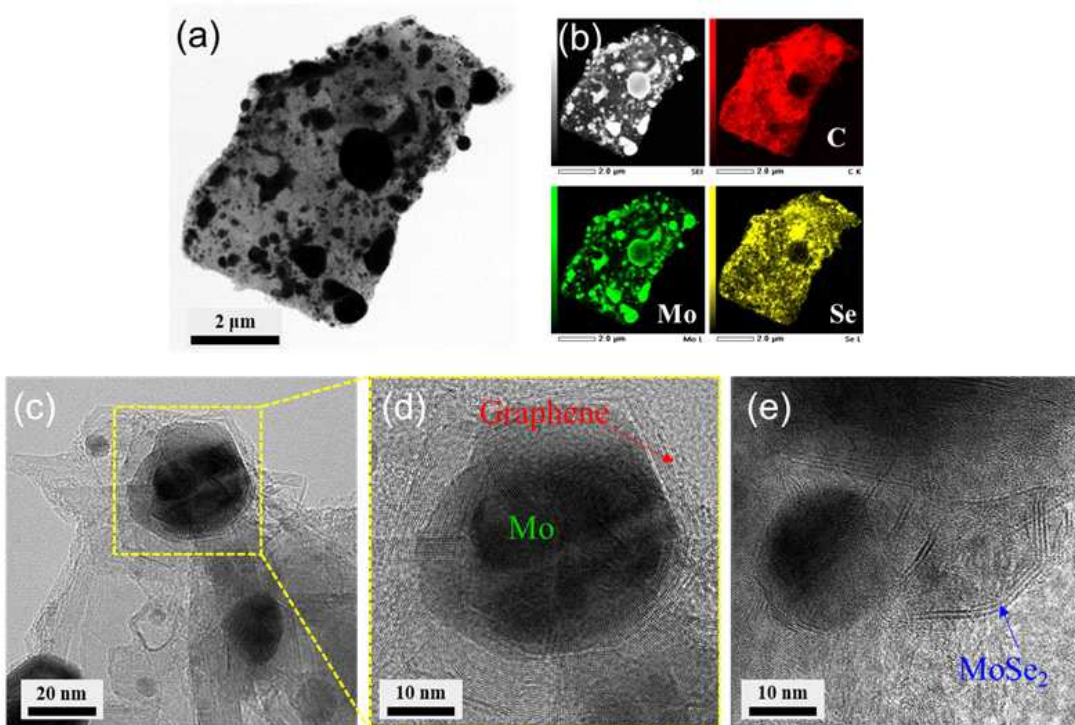
[그림 76. 펄초 레이저-유도-그래핀(LIG) 및 W-LIG(S)/Mo-MoSe₂ 이중 복합 전극 제조 과정]

- 형성된 레이저-유도-그래핀 이종 복합 소재(W-LIG(S)/Mo-MoSe₂)를 주사전자현미경(SEM)을 통해 입자 형상을 관찰하였음 (그림 77).
- 그림 77a,b에서 보는 바와 같이 W-LIG(S)/Mo-MoSe₂ 입자 표면 위에 대략 1 μ m 이하의 둥근 형태의 입자들이 균일하게 분포되어 있는 것을 확인함. 1nm이하의 입자는 SEM-EDS mapping을 통해 원소 분석해본 결과, Mo와 Se임을 확인할 수 있었음.



[그림 77. 펄초 레이저-유도-그래핀 이종복합 소재(W-LIG(S)/Mo-MoSe₂)의 (a,b) SEM 사진, (c) SEM-EDS mapping 사진]

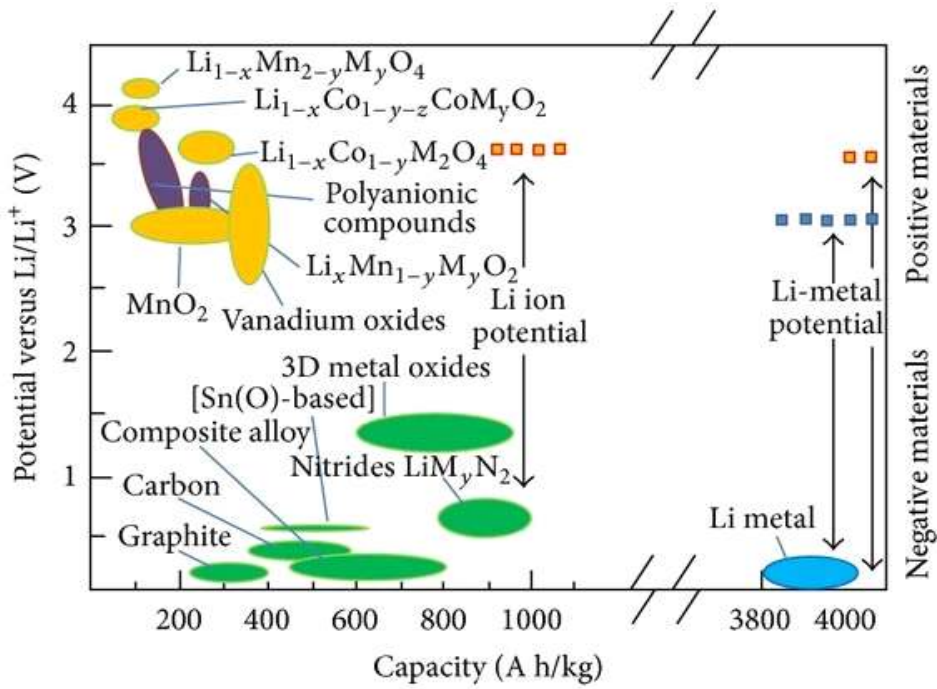
- 그림 78은 형성된 레이저-유도-그래핀 이종복합 소재(W-LIG(S)/Mo-MoSe₂)의 투과전자현미경(TEM) 사진을 나타낸 것임.
- 그림 78a는 TEM-BF(Bright field) 사진을 나타낸 것이며, 나무 숲 입자 표면에 둥근 형태의 입자들이 형성되어 있는 것을 볼 수 있었으며, TEM-EDS mapping 결과 1 μ m이하에서 크기는 2 μ m크기의 둥근 입자는 Mo입자인 것을 확인함. (그림 78b)
- 그림 78c,d는 고배율 TEM 사진을 나타낸 것이며, 둥근 Mo입자 주변에 수 층의 그래핀이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었음. 이를 통하여 Mo 입자가 그래핀 형성에 촉매 역할을 하는 것으로 생각됨. LIG 및 Mo 입자의 형성뿐만 아니라, Mo와 Se precursor가 반응하여 MoSe₂ 나노시트도 잘 형성되어 LIG(S)/Mo-MoSe₂ 이종복합 전극 소재가 성공적으로 합성된 것을 확인할 수 있었음(그림 78e).



[그림 78. 펄초 레이저-유도-그래핀 이종 복합 소재(W-LIG(S)/Mo-MoSe₂)의 (a)TEM 사진, (b) TEM-EDS mapping, (c,d,e) 고배율 TEM 사진]

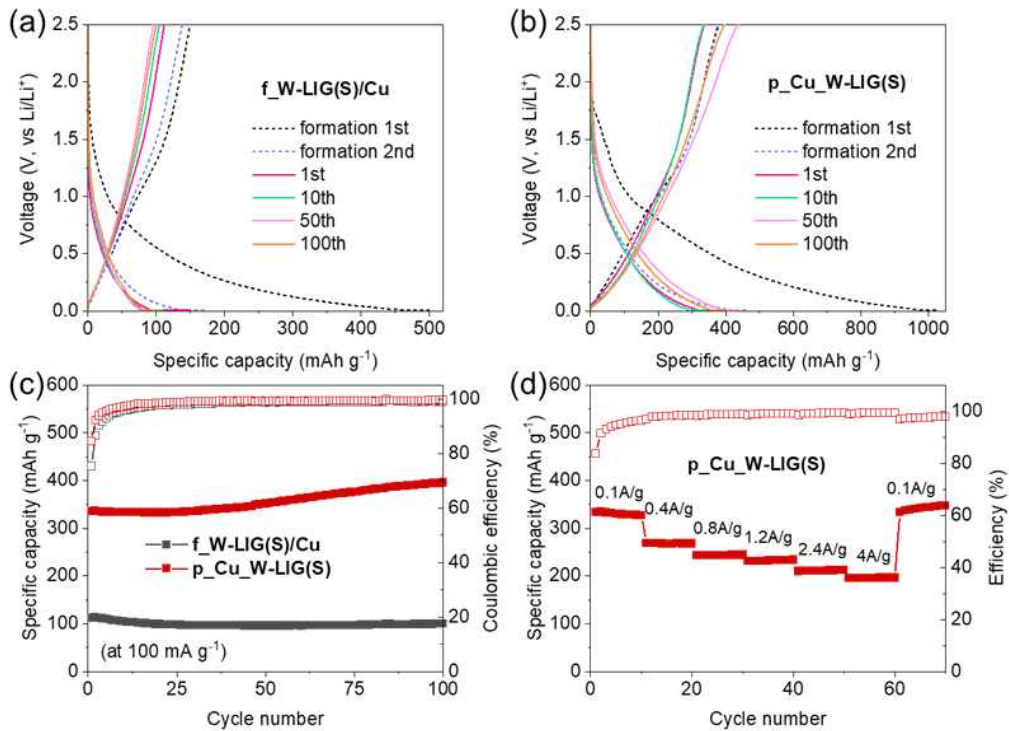
3-2) 목질계 바이오매스 기반의 탄소 전극 및 탄소 이중복합전극의 전기화학적 특성 평가

- 그림 80와 같이 정전류 충방전법(Galvanostatic Charge/Discharge, GCD) 분석을 통하여 파우더형 나무 숯(Wood char), 필름형 나무 숯(Wood char), MDF 합판 등을 원료로 사용하여 제조한 레이저-유도-그래핀 전극 소재들과 레이저-유도-그래핀 이중복합 전극소재를 이용하여 리튬이온전지 소자 제작 및 셀 성능 평가를 진행하였음.
- 셀 성능 및 수명 특성 분석을 위해, 정전류 충/방전(GCD) 분석 방법을 통해 0.01-2.5V 전압 구간에서 초기 2 사이클은 35 mA/g의 전류밀도 조건에서 충/방전(formation)한 다음 이후부터 100 mA/g의 전류밀도 조건에서 진행하였음.
- 셀 속도 특성 분석을 위해, 위와 동일한 분석 방법 및 전압 구간에서 초기 2 사이클은 35 mA/g의 전류밀도 조건에서 충/방전(formation)한 다음, 이후부터 100, 400, 800, 1200, 2400, 그리고 4000 mA/g 등의 저속속부터 고속속의 다양한 전류밀도 조건에서 셀 특성평가를 진행하였음.
- 그림 80a,b는 f_W-LIG(S)/Cu와 p_Cu_W-LIG 전극 소재의 GCD 커브를 나타낸 것임.
- f_W-LIG/Cu 전극 소재의 경우, 35 mA/g의 전류밀도 조건 하에 첫 번째 사이클(formation 1st)에서의 방전용량과 충전용량이 각각 505와 149 mAh/g을 나타내며, 약 30%의 낮은 충/방전 효율을 보임 (그림 80a). 현재 상용 음극으로 사용되고 있는 흑연의 이론 용량 값(약 372 mAh/g)과 충/방전 효율(약 90%)에 비하여 현저히 떨어지는 용량 값과 충/방전 효율을 보임.
- p_Cu_W-LIG(S) 전극 소재의 경우, 35 mA/g의 전류밀도 조건 하에 첫 번째 사이클(formation 1st)에서의 방전용량과 충전용량이 각각 1028와 377 mAh/g을 나타내며, 약 37%의 낮은 충/방전 효율을 보였으나(그림 80b), 현재 상용 음극으로 사용되고 있는 흑연의 이론 용량 값(약 372 mAh/g)과 유사한 용량 값을 보임.
- 이와 같은 첫 번째 사이클 비가역 용량의 문제는 리그닌 기반 LIG의 부분적 흑연화로 인한 비정질 탄소 존재, 입자의 표면적, 결함, 불순물 등에 의해 전해질 분해, 음극표면에 두꺼운 피막(SEI layer, solid electrolyte interphase layer)을 형성하여, 결과적으로 낮은 충/방전 효율을 보이는 것으로 생각됨.
- 흥미롭게도, p_Cu_W-LIG(S) 전극 소재의 경우, f_W-LIG/Cu 전극 소재에 비하여 약 2.5배 더 높은 용량 값을 보였는데, 이는 p_Cu_W-LIG(S) 전극 소재가 레이저 조사 시 레이저 빔과 맞닿는 부분에 가까이 위치하고 있어, 더 강한 광열효과로 인한 흑연화에 유리한 조건을 형성할 수 있었기 때문인 것으로 생각됨. 이에 더하여, Cu 호일로부터 나온 Cu 나노입자가 그래핀 형성의 촉매로 작용하여 흑연화도 향상을 가능하게 하였기 때문인 것으로 생각됨.
- 그림 80c는 f_W-LIG(S)/Cu와 p_Cu_W-LIG(S) 전극의 충/방전 테스트 결과를 나타냄.
- 100 mA/g의 전류밀도 조건에서 100번째 사이클에서의 전극 용량이 각각 약 100, 396 mAh/g으로 측정되었으며, **p_Cu_W-LIG(S) 전극 소재의 경우, 2차년도(2022년) 개발 목표(전극 용량 \geq 300 mAh/g) 대비 약 1.32배에 해당하는 값으로 목표치를 초과 달성한 수치임.** 또한, 1차년도(2021년) 개발 달성치(전극 용량: ~202 mAh/g) 대비 약 2배에 해당하는 높은 수치임.
- 이는 그림 79와 같이 기 상용화된 다양한 리튬 이온 배터리의 전극 용량이 400 mAh/g 이하이며, 주로 100~ 300 mAh/g의 수치를 보이는 것을 고려하였을 때 본 연구팀의 p_Cu_W-LIG(S) 전극소재의 전극 용량인 396 mAh/g 은 충분히 높은 수치라 말할 수 있음.



[그림 79. 리튬 이온 배터리 기반의 다양한 전극 용량 정리표]

○ 그림 80d는 가장 우수한 성능을 보인 p_Cu_W-LIG(S) 전극 소재에 대해 속도 특성을 평가한 결과를 나타냄. 그 결과, 100, 400, 800, 1200, 2400, 그리고 4000mA/g 등의 저속에서 고속에서의 다양한 전류 밀도 조건에서 약 327, 268, 244, 233, 212, 그리고 197mAh/g의 용량을 보임. 4000mA/g의 높은 전류 밀도에서 초기 100mA/g의 저속 전류밀도에서의 용량 값 대비 약 60%의 용량을 유지하는 것으로 보아 우수한 속도 특성을 보이는 것을 확인함. 또한, 4000mA/g의 고속 충/방전 이후 다시 100mA/g의 저속 충/방전 조건에서 초기 100mA/g의 용량 값으로 다시 회복되는 것을 확인할 수 있었음.

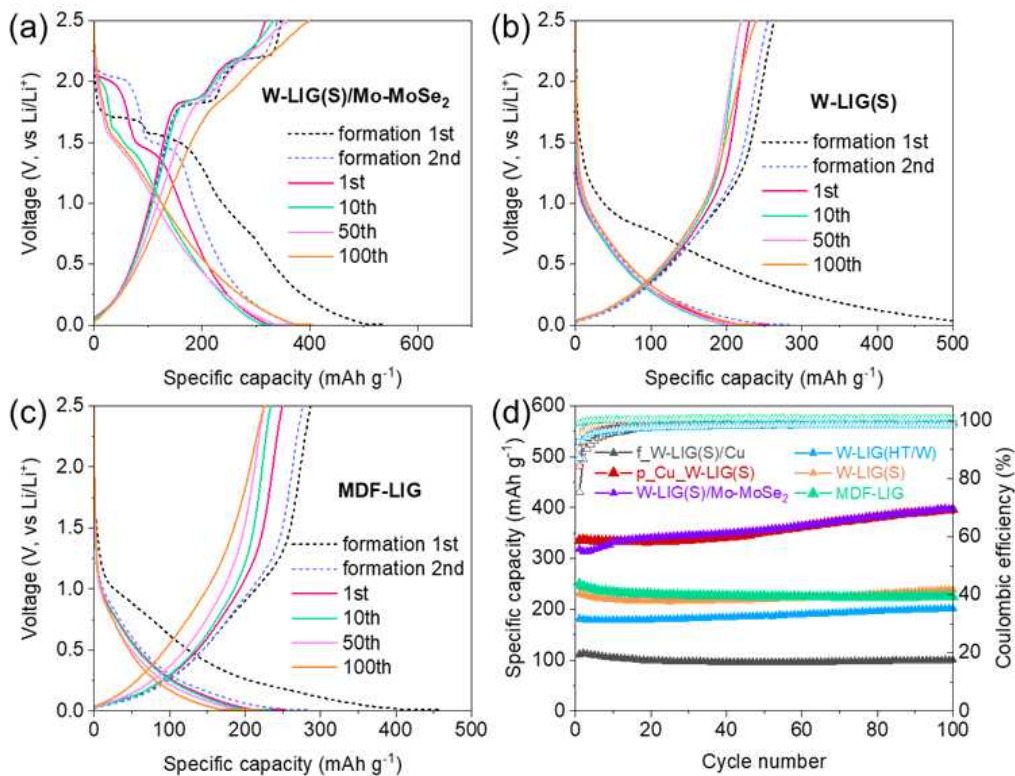


[그림 80. (a) f_W-LIG(S)/Cu, (b) p_Cu_W-LIG(S)의 전정전류 총방전(GCD) 곡선과 (c) 셀 수명 특성 평가 결과, (d) p_Cu_W-LIG(S)의 속도 특성 평가 결과]

○ 그림 81a,b,c는 W-LIG(S)/Mo-MoSe₂, W-LIG(S) 그리고 MDF-LIG 전극 소재의 GCD 커브를 나타낸

것임.

- W-LIG(S)/Mo-MoSe₂의 경우에는 35 mA/g의 전류밀도 조건 하에 첫 번째 사이클(formation 1st)에서의 방전용량과 충전용량이 각각 533와 346mAh/g을 나타내며, 약 65%의 충/방전 효율을 보임 (그림 81a).
 - W-LIG(S)의 경우에는 35 mA/g의 전류밀도 조건 하에 첫 번째 사이클(formation 1st)에서의 방전용량과 충전용량이 각각 591와 263mAh/g을 나타내며, 약 44%의 충/방전 효율을 보임 (그림 81b).
 - MDF-LIG의 경우에는 35 mA/g의 전류밀도 조건 하에 첫 번째 사이클(formation 1st)에서의 방전용량과 충전용량이 각각 456와 287mAh/g을 나타내며, 약 63%의 충/방전 효율을 보임 (그림 81c).
- 그림 81d는 W-LIG(S)/Mo-MoSe₂, W-LIG(S), 및 MDF-LIG 전극의 충/방전 테스트 결과를 나타냄.
- 100 mA/g의 전류밀도 조건에서 100번째 사이클에서의 전극 용량이 각각 약 398, 239, 255 mAh/g으로 측정되었으며, **W-LIG(S)/Mo-MoSe₂의 경우, 2차년도(2022년) 개발 목표(전극 용량 ≥ 300 mAh/g) 대비 1.33배에 해당하는 값으로 목표치를 초과 달성한 수치임.** 또한, 1차년도(2021년) 개발 달성치(전극 용량: ~202 mAh/g) 대비 약 2배에 달하는 수치임.



[그림 81. (a) W-LIG(S)/Mo-MoSe₂, (b) W-LIG(S) 및 (c) MDF-LIG의 전정전류 충방전(GCD) 곡선과 (d) 셀 수명 특성 평가 결과]

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

- 극초단 다중파장 레이저 기반의 미이용 목질계 파우더형 바이오매스의 이차전지용 친환경 생분해성 레이저-유도-그래핀 전극으로의 변환 기술 개발 최적화
- 고성능 탄소전극 생산성 극대화를 위한 다중파장 극초단 레이저 광원 개발 최적화 및 극초단 레이저 기반의 고속그래핀 공정 기술 및 생산장비 개발 및 최적화
- 목질계 미이용 바이오매스 기반 레이저-유도-그래핀을 활용한 이차전지용 이중복합 전극 소자 및 셀 제작 기술 확보

◎ 1차년도 (2021년) 개발 목표 및 달성 정도

- [핵심기술 1] 친환경 생분해성 목질계 파우더형 바이오매스 기반 탄소전극 생성 기술 : 면저항 $\leq 200 \Omega/\square$
 - 목질계 파우더형 바이오매스의 탄소전극으로의 변환 기술 확보
 - 자외선, 적외선 및 근적외선 레이저와 유기 물질과의 상호작용 비교 및 이해
 - 극초단 레이저의 각 파장에 따른 레이저-유도-그래핀 탄소전극 생성 과정 검증
 - 레이저 펄스폭에 따른 탄소전극 생성 메커니즘 및 레이저-유기물질 상호작용 이해
 - 생성된 레이저-유도-그래핀의 전기/화학특성 평가 및 목표 전기전도도 확보 (면저항 : 약 $166 \Omega/\square$)
- [핵심기술 2] 극초단 레이저 기반의 고성능 그래핀 탄소전극의 생산성 극대화를 위한 극초단 다파장 레이저 개발 기술, 생산 장비 개발 기술 및 패터닝 공정 기술 : 패터닝 속도 $\geq 30 \text{ mm/s}$, 목질소재 대비 그래핀 변환효율 $\geq 30 \%$
 - 다양한 목질계 파우더 기반 그래핀 형성 메커니즘 연구를 통한 고성능 탄소전극 생성용 재료 확보
 - 탄소전극 생산성 증대를 위한 테스트를 통한 양질의 그래핀 생성 및 레이저 패터닝 공정 기술 확보 (패터닝 속도 : 40 mm/s)
 - 탄소전극 생산 기술 안정화를 통한 고성능 탄소전극 생성 효율 확보 (목질소재 대비 그래핀 변환효율 : 40%)
 - 안정적인 그래핀 생성에 필요한 극초단 펄스 레이저 광원 제작 기술 확보
 - 차세대 고속 생산을 위한 그래핀 전극 패터닝 생산 장비 개발 기술 확보
- [핵심기술 3] 플렉서블/웨어러블 에너지저장소자 제작 기술: 전극용량 $\geq 150 \text{ mAh/g}$
 - 이차전지용 목질계 바이오매스 기반 탄소전극의 전기화학적 특성 평가 및 성능 최적화
 - 파우더 기반 레이저-유도-그래핀 탄소전극을 활용한 이차전지 소자 제작
 - 레이저-유도-그래핀 탄소전극 기반 이차전지 셀 성능 평가 및 최적화 (전극 용량 : 202 mAh/g)

◎ 당해년도 (2차년도, 2022년) 개발 목표 및 달성 정도

- [핵심기술 1] 친환경 생분해성 목질계 파우더형 바이오매스 기반 탄소전극 생성 기술 : 목질소재 대비 그래핀 변환효율 $\geq 75 \%$
 - 다양한 목질계 바이오매스의 탄소전극으로의 변환 기술 최적화
 - 자외선, 적외선 및 근적외선 레이저와 유기 물질과의 상호작용 심도 이해
 - 레이저 펄스폭, 반복률, hatch에 따른 그래핀 생성 메커니즘 및 레이저-유기물질 상호작용 심도 이해
 - 제작된 레이저-유도-그래핀의 전기/화학적 특성 평가를 통한 생성 기술 최적화 및 고성능 탄소전극

생성 효율 확보 (목질소재 대비 그래핀 변환효율 : 87.5 %)

- [핵심기술 2] 극초단 레이저 기반의 고성능 그래핀 탄소전극의 생산성 극대화를 위한 극초단 다파장 레이저 개발 기술, 생산 장비 개발 기술 및 패터닝 공정 기술 : 패터닝 속도 ≥ 50 mm/s, 면저항 ≤ 100 Ω/\square ,

- 다양한 목질계 바이오매스 기반 그래핀 형성 메커니즘 연구 및 최적화를 통한 고성능 탄소전극 생성용 재료 확보
- 탄소전극 생산성 증대를 위한 테스트를 통한 최적의 그래핀 생성 및 레이저 패터닝 공정 기술 확보 (면저항 : 약 0.72 Ω/\square , 패터닝 속도 : 150 mm/s)
- 생산속도 및 전극 성능 향상을 위한 열도움 기반 레이저-유도-그래핀 생성 기술 개발
- 파우더 베드 기반 레이저-유도-그래핀 탄소전극 생산 연구 장비 개발
- 안정적인 그래핀 생성에 필요한 극초단 펄스 레이저 광원 제작 기술 최적화
- 차세대 고속 생산을 위한 그래핀 전극 패터닝 생산 장비 개발 완료

- [핵심기술 3] 플렉서블/웨어러블 에너지저장소자 제작 기술: 전극용량 ≥ 300 mAh/g

- 파우더형, 필름형 기반 레이저-유도-그래핀 탄소전극 소재 제조 및 최적화
- 파우더 기반 레이저-유도-그래핀 탄소전극 이종복합 전극 소재 제조 및 최적화
- 이차전지용 목질계 바이오매스 기반 탄소전극 및 탄소 이종복합전극의 이차전지 셀 성능 평가 및 최적화 (전극 용량 : 396 mAh/g)

제안기술에 대한 평가	구분	핵심 기술/제품 성능지표	단위	1차년도 목표	1차년도 달성치	2차년도 (최종) 목표	최종 달성치	달성도 (%)
	1	레이저-유도-그래핀 면저항	Ω/\square	200 이하	166.39	100 이하	0.72	100 %
2	레이저 빔 이송속도	mm/sec	30 이상	40	50 이상	150	100 %	
3	목질소재 대비 그래핀 변환효율	%	30 이상	35	75 이상	87.5	100 %	
4	전극 용량	mAh/g	150 이상	202	300 이상	396	100 %	

구분	년도	세부 연구목표	세부 연구개발내용	연구범위	평가목표 및 착안점
1차 년도	2021	1) 다중파장 레이저 기반 목질계 미이용 파우더형 바이오매스의 이차전지용 친환경 생분해성 탄소전극으로의 변환기술 개발	1-1) 적외선, 근적외선 및 가시광선 레이저와 유기 물질과의 상호작용 비교/이해	목질계 미이용 바이오매스 레이저 변환관련 자료수집 및 이론/실험모델 정립	바이오매스 기반 탄소전극 면저항 및 레이저빔 이송속도
			1-2) 연속파, 나노초 및 펄스 레이저와 유기 물질과의 상호작용 비교/이해	레이저별 레이저-유도-그래핀 탄소전극의 전기적, 화학적 특성 기초평가	
			1-3) 패터닝 된 레이저-유도-그래핀의 전기적 및 화학적 특성의 평가	패터닝된 레이저-유도-그래핀 탄소전극의 전기적, 화학적 특성 기초평가	
		2) 고성능 탄소전극 변환의 생산성 극대화를 위한, 다파장 레이저 기반 고속 그래핀 전극 패터닝 공정기술 및 생산장비 개발	2-1) 레이저-유도-그래핀 생성 시, 레이저와 물질의 상호작용 최적화를 통해, 재료의 탈락을 최소화 하는 동시에 높은 전도도 획득	재료 탈락 최소화 조건 탐색/선정	목질소재 대비 그래핀 변환효율, 레이저빔 이송속도 및 생산성
			2-2) 파우더 베드 기반 연속공정 구현, 전극 패터닝 최적화 및 탄소전극 품질/생산성 세부 평가	파우더 베드 기반 연속공정 개발 및 생산성 기초평가	
			2-3) 롤(Roll) 기반 연속공정 구현, 전극 패터닝 최적화 및 탄소전극 품질/생산성 세부 평가	롤(Roll) 기반 연속공정 개발 및 생산성 기초평가	
			2-4) 다파장 레이저 기반 고속 그래핀 전극 패터닝 생산장비 비교/평가	연속공정간 장단점 비교	
		3) 목질계 바이오매스 기반 탄소전극 이차전지 소자 제작 및 셀 제작	3-1) 목질계 바이오매스 기반의 탄소 전극 소재의 고품위화, 전기화학적 특성 평가 및 성능 최적화	자료수집 및 모델정립	전극 소재 에너지저장 용량
			3-2) 목질계 바이오매스 기반 탄소 전극소재의 이차전지 소자 제작 및 셀 성능 평가	시험분석 및 시제품 제작	

2차 년도	2022	1) 다중파장 레이저 기반 목질계 미이용 파우더형 바이오매스의 이차전지용 친환경 생분해성 탄소전극으로의 변환기술 개발/최적화	1-1) 적외선, 근적외선 및 가시광선 레이저와 유기 물질과의 상호작용 심도 이해	다파장 레이저 기반 목질계 미이용 바이오매스 레이저 변환관련 조건정립	바이오매스 기반 탄소전극 면저항 및 레이저빔 이송속도
			1-2) 연속파, 나노초 및 펨토초 레이저와 유기 물질과의 상호작용 비교/이해	레이저별 레이저-유도-그래핀 탄소전극의 전기적, 화학적 특성 심도이해	
			1-3) 패터닝 된 레이저-유도-그래핀의 전기적 및 화학적 특성의 평가	패터닝된 레이저-유도-그래핀 탄소전극의 전기적, 화학적 특성 평가	
		2) 고성능 탄소전극 변환의 생산성 극대화를 위한, 다파장 레이저 기반 고속 그래핀 전극 패터닝 공정기술 및 생산장비 개발/최적화	2-1) 레이저-유도-그래핀 생성 시, 레이저와 물질의 상호작용 최적화를 통해, 재료의 탈락을 최소화 하는 동시에 높은 전도도 획득	재료 탈락 최소화 조건 확정 및 최적화	목질소재 대비 그래핀 변환효율, 레이저빔 이송속도 및 생산성
			2-2) 파우더 베드 기반 연속공정 구현, 전극 패터닝 최적화 및 탄소전극 품질/생산성 세부 평가	파우더 베드 기반 연속공정 개발 및 생산성 상세평가/최적화	
			2-3) 롤(Roll) 기반 연속공정 구현, 전극 패터닝 최적화 및 탄소전극 품질/생산성 세부 평가	롤(Roll) 기반 연속공정 개발 및 생산성 상세평가/최적화	
	2-4) 다파장 레이저 기반 고속 그래핀 전극 패터닝 생산장비 개발		연속공정간 장단점 심도이해/확정		
	3) 목질계 바이오매스 기반 탄소전극 이차전지 소자 제작 및 셀 성능 세부평가	3-1) 목질계 바이오매스 기반의 탄소 이종복합 전극 소재의 물성분석, 전기화학적 특성 평가 및 성능 최적화	자료수집 및 모델정립	전극 소재 에너지저장 용량	
		3-2) 목질계 바이오매스 기반 탄소 이종복합 전극 소재의 이차전지 소자 제작 및 셀 성능 평가	시험분석 및 시제품 제작		

(2) 정량적 연구개발성과

< 정량적 연구개발성과표 >

(단위 : 건, 천원)

성과지표명		연도	1년차 (2021)	2년차 (2022)	계	가중치 (%)	
전담기관 등록·기탁 지표 ¹⁾	국내특허출원	목표	1	1	2	15	
		실적	3	2	5		
	국내특허등록	목표	0	1	1	10	
		실적	0	2	2		
	학술발표	목표	4	6	10	10	
		실적	1	12	13		
	SCI 논문	목표	1	2	3	30	
		실적	1	7	8		
연구개발과제 특성 반영 지표 ²⁾	인력양성		목표	1	2	3	10
			실적	0	3	3	
	기술이전	건수	목표	0	1	1	10
			실적	0	1	1	
	기술이전	기술료	목표	0	20,000	20,000	5
			실적	0	22,000	22,000	
	사업화	제품화	목표	0	1	1	5
			실적	0	1	1	
	기술인증		목표	0	1	1	5
			실적	0	1	1	
계		목표	7	15 / 20,000천원	22 / 20,000천원	100 %	
		실적	5	29 / 22,000천원	34 / 22,000천원		

<연구개발과 성능지표>

평가 항목 (주요성능 ¹)	단위	전체 항목에서 차지하는 비중 ² (%)	세계 최고수준 보유국/보유기관	연구개발 전 국내 수준	연구개발 목표치		목표 설정 근거
			성능수준	성능수준	1차년도	2차년도	
레이저-유도-그래핀 면저항	Ω/□	30	목질계 파우더에 대해 레이저 기반 보고 전무 // 나무, 나뭇잎의 경우 한국/KAIST: 100	목질계 파우더에 대해 레이저 기반 보고 전무 / 나무, 나뭇잎 기반	200 이하	100 이하	나무 기반 레이저 변환 연구논문
레이저 빔 이송속도	mm/sec	20	목질계 파우더에 대해 레이저 기반 보고 전무 // 나무, 나뭇잎의 경우 한국/KAIST: 100	목질계 파우더에 대해 레이저 기반 보고 전무	30 이상	50 이상	나무 기반 레이저 변환 연구논문
목질소재 대비 그래핀 변환효율	%	20	목질계 파우더에 대해 레이저 기반 보고 전무 // 나무, 나뭇잎의 경우에도 변환효율은 보고 전무	목질계 파우더에 대해 레이저 기반 보고 전무	30 이상	50 이상	나무 기반 레이저 변환 연구논문
전극 용량	mAh/g	30	목질계 파우더에 대해 레이저 기반 보고 전무 // 나무, 나뭇잎의 경우 한국/KAIST: 1 mF/cm ²	목질계 파우더에 대해 레이저 기반 보고 전무	150 이상	300 이상	나무 기반 레이저 변환 연구논문

<평가방법 및 평가환경>

순번	평가항목 (성능지표)	평가방법	평가환경
1	레이저-유도-그래핀 면저항 (Ω/□)	표준장비인 LCR meter와 Digital Multi-meter를 기반으로 Sheet Resistance를 측정	대기 중 실험실 환경에서 측정 (상온, 대기압)
2	레이저 빔 이송속도 (mm/sec)	빠른 각도 스캐닝 기반 Galvano Scanner와 Telecentric 렌즈의 조합으로 결정되며, 초점면 상에서의 실제 이송속도를 측정하여 판단	대기 중 실험실 환경에서 측정 (상온, 대기압)
3	목질소재 대비 그래핀 변환효율 (%)	크게 부피, 면적 및 질량 기준으로 변환효율 정의 가능. 패터닝 중 탄소전극에 기여가 없는 CO2 및 H2O의 손실이 있으므로, 부피 및 면적(두께가 일정하다고 가정하는 경우)로의 평가가 합리적으로 판단됨 (기존 측정 예시가 없으므로, 직접 정의하여 평가해야 함)	대기 중 실험실 환경에서 측정 (상온, 대기압)
4	전극 용량 (mAh/g)	목질계 미이용 바이오매스 기반 레이저-유도-그래핀 전극 소재의 충방전시 다음의 조건을 모두 만족하는 상태를 유지한 조건에서 충·방전시험기로 전극 용량 측정 (코인하프셀 기준) -충방전 속도: 0.1C 이상 -충방전 횟수: 100 사이클 이상 (연속운전)	평가 환경에 따라 용량 변화가 생길 수 있으므로 일정한 온도 및 습도를 유지한 상태에서 측정 평가 (온도환경: 25℃±3℃, 습도 환경: 50±5.0%, 대기압)

(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	Recent Advances in Laser-Induced Graphene: Mechanism, Fabrication, Properties, and Applications in Flexible Electronics	Advanced Functional Materials	Truong-Son Dinh Le	32	미국	Wiley	SCIE	2022.08	1616-3028	16.7
2	In Situ Synthesis and Microfabrication of High Entropy Alloy and Oxide Compounds by Femtosecond Laser Direct Writing under Ambient Conditions	Small	Chidanand Hegde	18	미국	Wiley	SCIE	2022.08	1613-6829	14.3
3	Plasmonic Color Printing via Bottom-Up Laser-Induced Photomodification Process	ACS Applied Materials and Interfaces	June Sik Hwang	14	미국	ACS	SCIE	2022.06	1944-8252	14.3
4	One-Step Template-Free Laser Patterning of Metal Microhoneycomb Structures	Small methods	June Sik Hwang, Srinivasan Arthanari	6	미국	Wiley	SCIE	2022.05	2366-9608	14.3
5	Direct-laser-conversion of Kevlar textile to laser-induced-graphene for realizing fast and flexible fabric strain sensors	CIRP Annals	Young-Jin Kim, Dongwook Yang	71	네덜란드	Elsevier	SCIE	2022.05	0007-8506	16.7
6	Fast and precise laser beam scanning by nonperiodic grating on a binary micromirror array	Optical Engineering	Jaeyoung Jang	61	미국	SPIE	SCIE	2022.03	0091-3286	16.7
7	Chloroaluminate Anion Intercalation in Graphene and Graphite: From Two-Dimensional Devices to Aluminum-Ion Batteries	NANO LETTERS	Hana Yoon	22	미국	ACS	SCIE	2022.02	1530-6992	20
8	Graphene-Inorganic-Hybrid Micro-Supercapacitors Made of Fallen Leaves Enabled by Ultrafast Laser Pulses	Advanced Functional Materials	Truong-Son Dinh Le, YeongA.Lee	32	미국	Wiley	SCIE	2021.12	1616-3028	16.7
9	펄스 레이저 기반 목질계 재료상 레이저-유도-그래핀 생성 기술	기계저널	김영진, 남한구	63	대한민국	대한기계학회	비 SCIE	2023.01	-	100

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2022 CLEO-PR	남한구	2022.08.02	삿포로컨벤션센터	일본
2	2022 CLEO-PR	양동욱	2022.08.02	삿포로컨벤션센터	일본
3	International Conference of Additive Manufacturing for A Better World	레딘춘손	2022.08.23	싱가포르 SUTD, 401 Macpherson Road	싱가포르
4	The 9th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2022)	남한구	2022.11.16	싱가폴 Nanyang Executive Centre (NEC)	싱가폴
5	2022 MRS fall meeting	남한구	2022.11.29	Hynes Convention Center, Boston	미국
6	한국정밀공학학회	남한구	2021.11.26	부산	대한민국
7	한국기계공학학회 2022 춘계 학술대회	김영진	2022.04.27	여주EXPO	대한민국
8	한국정밀공학학회 2022 춘계 학술대회	김영진	2022.05.12	제주라마다프라자호텔	대한민국
9	한국정밀공학학회 2022 춘계 학술대회	남한구	2022.05.12	제주라마다프라자호텔	대한민국
10	한국정밀공학학회 2022 춘계 학술대회	남한구	2022.05.13	제주라마다프라자호텔	대한민국
11	한국정밀공학학회 2022 춘계 학술대회	김영렬	2022.05.13	제주라마다프라자호텔	대한민국
12	대한기계학회 생산 및 설계공학부문 2022 춘계 학술대회	김영진	2022.05.27	서울더케이호텔	대한민국
13	한국정밀공학학회 2022 추계 학술대회	김영렬	2022.10.20	대구컨벤션센터	대한민국

[기술적 성과]

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

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여 율	활용 여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호		
1	친환경 에너지 저장 전극 소재, 이의 제조방법 및 이를 포함하는 에너지저장 소자	대한 민국	KAIST, 한국에너지 기술연구원	2021- 10-07	10-2021- 013342 9					30	
2	흑연 및 2차원 전이금속 디칼코게나이드 기반 고성능 하이브리드 복합체 및 이의 제조방법	대한 민국	한국에너지 기술연구원	2021- 12-16	10-2021- 018025 4					30	
3	상 조절된 (Phase-controlled) 나노시트 적층 구조체, 하이브리드 복합체 및 이들의 제조방법	대한 민국	한국에너지 기술연구원	2021- 12-23	10-2021- 018605 6					30	
4	고율속 특성을 갖는 알루미늄 이차전지 및 이의 제조방법	대한 민국	한국에너지 기술연구원	2022- 07-05	10-2022- 008255 4					50	
5	하이브리드 복합체 및 혼합 박리 및 재적층을 이용한 하이브리드 복합체의 제조방법	대한 민국	한국에너지 기술연구원	2020- 11-10	10-2020- 014966 7	10-2440 125	한국에너지 기술연구원	2022- 08-31	10-24 40125	40	
6	2차원 나노시트 및 이의 제조방법	대한 민국	한국에너지 기술연구원	2020- 11-10	10-2020- 014968 8	10-2453 099	한국에너지 기술연구원	10-24 53099	2022- 10-05	30	
7	스마트 그린 홈 구현을 위한 펄토초-레이저-유도-그래핀 기반 센서 및 히터	대한 민국	KAIST	2022- 12-07	10-2022- 016949 0					20	

□ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증 기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증 번호		
1	레이저 가공 장비	한국기계연구원	펄토초 레이저 패터닝 시스템 및 그래핀 변형센서 성능 시험	KIMM-22-0808	2022.12.23	한국

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작 업체명	설치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	펄토초 레이저 패터닝 기반 LIG 그래핀 생성 연구 장비	2022.07.01	(주)레이저앤그 래핀	개발실	LIG 그래핀 패턴 생성 및 초정밀 레이저 가공	7개월	한국기계연구 원	2022.12.23

□ 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	통상실시권	기술실시 계약서(통상실시권)	(주)레이저앤그 래핀	2021	22,000,000 원	22,000,000 원

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식 ¹⁾	사업화 형태 ²⁾	지역 ³⁾	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		
1	기술이전	기술이전_창업	국내	첨단 레이저 기술을 통한 다양한 레이저 가공/응용분야의 혁신 및 LIG 그래핀 상용화	1. 펄토초 레이저 광원 2. LIG 응용제품 생산 시스템 3. LIG 전자 디바이스, LIG 이차전지 음극재	(주)레이저엔그래핀	0		2023년 (사업화 1년)	20년

□ 매출 실적(누적)

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

□ 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)		합계
			2022년	yyyy년	
1	목질계 미이온 바이오매스를 활용한 고성능 탄소전극 소재 및 생산장비 개발	(주)레이저엔그래핀	4명	-	4명
2	목질계 미이온 바이오매스를 활용한 고성능 탄소전극 소재 및 생산장비 개발	레이저닉스	1명	-	1명
합계			5명		5명

[사회적 성과]

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황											
			학위별				성별		지역별					
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타	
1	대기업 연구소 취업	2021	1				1		1					
2	석사 졸업	2022		2			2		2					
3	박사 졸업	2022	1					1						
4	중소기업(레이저엔그래핀) 입사	2022			3		3		3					

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	방송매체 홍보	YTN 사이언스	"붙였다 뗐다" 스티커처럼 활용하는 배터리	2021.03.25
2	방송매체 홍보	YTN 사이언스	작고, 가볍고, 오래가는 K-배터리	2021.06.24
3	지방전문지	뉴스웍스	김영진 KAIST 교수 연구팀, 낙엽 이용해 마이크로 슈퍼커패시터 개발	2022.01.13
4	지방전문지	IT BizNews	KAIST·에너지연, 낙엽 활용한 친환경 마이크로 슈퍼커패시터(MSC) 개발	2022.01.14
5	지방전문지	위키트리	낙엽 상 그래핀-무기-하이브리드 마이크로 슈퍼커패시터 제작	2022.01.17
6	방송매체 홍보	YTN 사이언스	찰나의 혁신, 펄토초 레이저	2022.03.14
7	지방전문지	충청비즈	에너지연구원 "1분 이내 초고속 충전가능한 알루미늄 배터리 개발"	2022.05.25
8	지방일간지	디지털타임스	1분만에 충전 끝... 에너지연, 알루미늄 배터리 개발	2022.05.25
9	중앙일간지	뉴시스	에너지연구원, 1분내 초고속 충전가능한 알루미늄 배터리 개발	2022.05.25
10	기타	산경e뉴스	알루미늄 이온 배터리 "꿈의 이차전지 될까"...에기연 윤하나 박사 세계 최초 개발	2022.05.27

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
1	상장	춘계 학술대회 우수논문상	학술대회 우수논문상	남한구	2021.11.25.	한국정밀공학회
2	상장	젊은과학자상	젊은과학자상 (대통령상)	김영진	2021.12.22	한국연구재단
3	상장	2022 KSME-LG 제1회 퓨처 홀테크 챌린지 장려상	레이저-유도-그래핀 전극 기반의 친환경 스마트 재활용 목재 가구 구현	남한구, 양동욱, 이영근, 김영렬	2022.09.28	KSME-LG
4	상장	KSME-SEMES 제7회 오픈 이노베이션 챌린지 젊은 공학자 동상	친환경 스마트 그린 홈 구현을 위한 목재상 극초단 레이저-유도-그래핀 생성 기술	남한구, 이영근, 김영렬	2022.10.04	KSME-SEMES
5	상장	KSME-SEMES 제7회 오픈 이노베이션 챌린지 전문가 동상	전자섬유 생산을 위한 펄토초 레이저 기반 초고속, 자유-디자인 그래핀 생성 기술	김영진, 양동욱, 레던촌손, 남한구	2022.10.04	KSME-SEMES
6	상장	2022 KSMTE 춘계 학술대회 나노마이크로시스템 분과 우수논문상	레이저 직접 묘화 기반 목질계 재료 상 그래핀 생성 및 응용	남한구, 양동욱, 이영근, 김영렬, 레던촌손, 김승우, 김영진	2022.12.12	생산제조학회

[그 밖의 성과](해당 시 작성합니다)

전시회 2 건

번호	유형	행사명칭	주관기관	국내외	장소	참여품목	참가자	전시일
1	전시회	레이저코리아 2022	레이저코리아	국내	Kintex 제 1전시장	목질계 재료상 레이저-유도-그래핀 기반 센서 및 히터	김영진, 남한구, 양동욱, 이영근, 김영렬, 김대희, 장재영	2022.07.06-2022.07.08
2	전시회	대한민국 과학축제	과학기술정보통신부	국내	성수동 에스펙토리	목질계 재료상 레이저-유도-그래핀 기반 센서 및 히터	김영진, 남한구, 양동욱, 이영근, 김영렬	2022.08.18-2022.08.21

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성합니다)

[기타 학회 및 전시회 사진]



○ 2022년 5월 13일 한국정밀공학회 춘계 학술대회 특별 세션[극초단 레이저 기반 광학/전자소자 패터닝 -2]를 조직하여 과제에 참여 중인 카이스트, 에너지기술연구원, (주)레이저앤그래핀이 각 기관의 연구 진행 상황에 대한 공유 및 논의를 진행.



○ 2022년 7월 6일 ~ 7월 8일까지 레이저 코리아 2022에서 본 연구팀의 목질계 미활용 바이오매스를 통한 고성능 탄소전극 소재 제작에 관한 연구 실적 및 성과에 대하여 홍보를 진행.



○ 2022년 8월 18일부터 8월 21일까지 과학기술정보통신부에서 주관한 대한민국 과학축제에 참여하여 일반인들을 대상으로 본 연구팀의 목질계 미활용 바이오매스를 통한 고성능 탄소전극 소재 제작에 관한 연구 실적 및 성과에 대하여 홍보를 진행하였으며, 과기부 이종호 장관님께도 본 연구팀 및 연구 결과물에 대한 설명을 진행.

2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도 (%)
○ 고효율 다중과장 레이저 기반 레이저-유도-그래핀 탄소전극 변환기술 개발	○ 레이저-유도-그래핀 면저항 100 Ω/□ 이하 달성	100 %
○ 공정변수 최적화를 통한 고생산성 탄소전극 개발	○ 레이저 빔 이송속도 50 mm/s 이상 달성	
○ 제작된 탄소전극을 기반으로 하는 이차전지 소제제작 및 셀 성능평가를 통한 응용기술 확립	○ 목질소재 대비 그래핀 변환효율 75 % 이상 달성	
	○ 전극 용량 300 mAh/g 달성	

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성합니다)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

해당사항 없음

2) 자체 보완활동

목표 충족으로 보완활동 불필요

3) 연구개발 과정의 성실성

성실히 연구개발을 수행하여 목표 달성

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

(단위 : 백만원, %)

총괄과제명	세부과제명	기관명	유형	총 연구개발비 (A)	정부지원 연구개발비 (B)	정부지원 연구개발비 비율 (C=B/A)	성과 유형	기술기여도	
								산정 근거	비율
목질계 바이오에너지 산업화	목질계 미이용 바이오매스를 활용한 고성능 탄소전극 소재 및 생산장비 개발	(주)레이저 앤그래핀	중소기업 (영리)	123.75	99	80	기존 공정개선	①-①	80.0%
	목질계 미이용 바이오매스를 활용한 고성능 탄소전극 소재 및 생산장비 개발	레이저닉스	중소기업 (영리)	52.7	40	75.9	기존 공정개선	①-①	75.9%
계				176.45	139	-	-	-	-

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

< 연구개발성과 활용계획표 >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내				
		2023	2024	2025	2026	2027
국외논문	SCIE	2	1	-	-	-
	비SCIE	-	-	-	-	-
국내논문	SCIE	-	-	-	-	-
	비SCIE	-	-	-	-	-
특허출원	국내	1	1	-	-	-
	국외	-	-	-	-	-
특허등록	국내	-	1	1	-	-
	국외	-	-	-	-	-
인력양성	학사	-	-	-	-	-
	석사	1	-	-	-	-
	박사	2	1	-	-	-
사업화	시제품개발	-	-	-	-	-
	상품출시	1	-	-	-	-
	기술이전	1	-	-	-	-
	공정개발	-	-	-	-	-
	매출액(단위 : 천원)	100,000	260,000	640,000	1,760,000	3,600,000
	기술료(단위 : 천원)	1,120	1,120	2,240	4,480	8,960
비임상시험 실시						
임상시험 실시 (IND 승인)	의약품	1상				
		2상				
		3상				
	의료기기					
진료지침개발						
신의료기술개발						
성과홍보						
포상 및 수상실적						
정성적 성과 주요 내용						

1) 연구개발성과의 활용방안

- 본 연구를 통하여 개발된 목질계 미이용 바이오매스 기반의 친환경 에너지저장 소재 및 소자 핵심기술 확보함. 또한 레이저-유도-그래핀 이중 복합 전극 소재 제조를 통해 차세대 배터리 재료로서의 가능성을 확인함. 이를 통하여 고부가가치의 이차전지 응용이 가능할 것으로 기대됨.
- 또한, 연구 개발 과정에서 친환경 전극 소재 원천기술 확보를 완료하였음. 이를 통해 기업으로의 기술이전 일부 완료 및 추후 추가 진행 예정이며, 기술과의 협업을 통해 장비 제작 및 성능 검증을 진행함. 향후 추가 최적화 등을 통해 해당 장비의 상용화가 가능할 것으로 예상되며, 친환경 에너지저장 소재 기반기술 확보가 가능할 것으로 예상됨.
- 더불어, 레이저-유도-그래핀을 기반으로 차세대 전자소자, 디스플레이, 센서, 방열소재, 에너지 전극소재 등에 적용 가능할 것으로 기대됨.



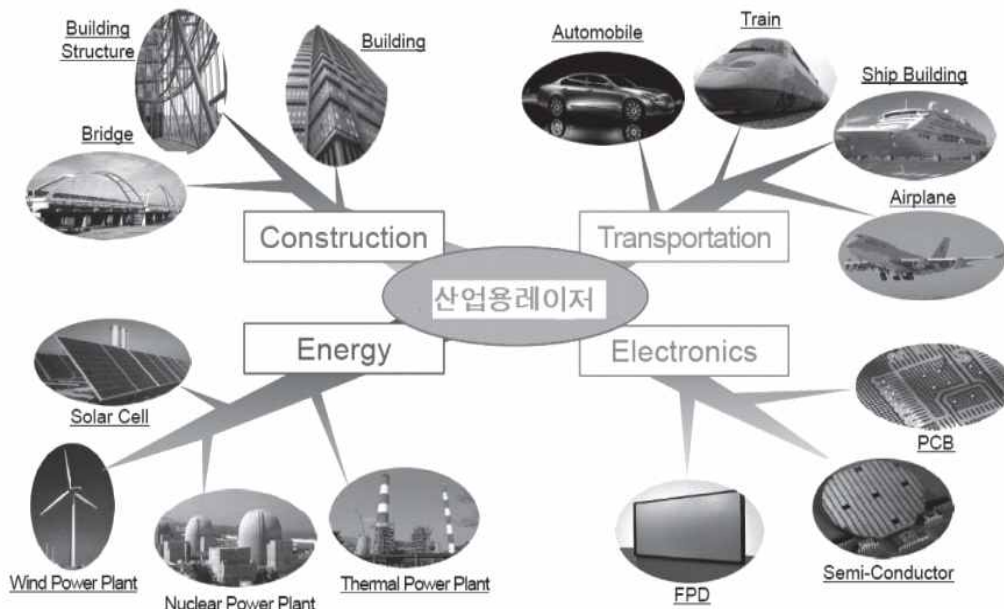
- 에너지 생산 및 저장, 소비를 독립적으로 이룰 수 있는 독립전원 시스템에 적용이 가능하고 소용량부터 대용량 전원까지 대응이 가능하므로 다양한 미래 응용 분야에 적용될 수 있음.
- 국내외 에너지 저장 소자 제조업체, 장비 및 부품·소재 기업 등이 잠재적인 수요기업이 될 수 있음.
- LG화학, SK이노베이션, 삼성전기, LS엠트론, 삼화콘덴서 등의 에너지 저장 관련 기업의 시장 및 기술경쟁이 점차 심화되고 있음. 본 연구개발을 통하여 확보되는 차세대 에너지 저장 소재 및 소자는 국내 에너지 저장 관련 기업 및 재생에너지 제조 기업들이 고부가가치 제품을 창출하고 기술적 우위를 선점할 수 있는 미래 신산업 분야로 활용 가능함.
- 미활용 바이오매스 기반의 차세대 에너지 저장 소재 및 소자 구현을 위해서는 기술 장벽이 높은 새로운 제조 장비 및 공정기술 확보가 필요하므로 기술력 중심의 국내 장비업체의 신규사업 영역 확보에도 일조할 수 있을 것으로 기대됨.
- 기존 에너지 소자에 적용되지 않는 신규 소재 및 부품 사용이 요구될 것으로 예상되므로 관련 중소·중견업체와의 협력 가능성이 매우 높음.

2) 연구개발성과의 사업화 전략 및 계획

[국내외 시장 동향]

- (1) 국내외 시장규모 및 수출입 현황

○ 산업용 레이저 기반의 가공 기술은 가공 도구인 레이저 빔의 고집속 및 시/공간적 정밀제어가 가능하여 최근 반도체, 전자, 자동차, 메카트로닉스 등의 첨단산업 분야에서 고품질의 부품을 가공하는데 필수적인 기술로 널리 활용되고 있으며, 또한 환경 친화적이며 비접촉 공정으로서 수십 ~ 수 μm 크기의 형상을 갖는 부품 가공 영역에서 기존의 공정을 대체하는 신공정 개발의 발전에 크게 기여하고 있음. 따라서 레이저를 활용한 가공기술은 정밀기기, 제어 및 통신 산업, 바이오/의료 산업, 나노/신소재 산업, 환경/원자력 산업, 반도체/컴퓨터 산업 등의 다양한 응용분야에서 그 수요가 증가하고 있으며 현재 전세계적으로 큰 시장을 형성함. 이러한 산업용 고출력 레이저는 자동차, 조선 및 항공 산업 등의 주력 기간 산업의 지속적인 경쟁력 향상을 위해서 용접, 절단, 마킹 등의 μm 고정밀 제조분야에서 레이저 기술의 도입 및 지속적 혁신이 요구되고 있으며 산업혁신의 붐이 일고 있는 최근에는 산업용 레이저의 또 다른 주요 수요처로써 IT, 반도체, 디스플레이, 전기전자 다층기판 등 최첨단 전자분야에서 유연/신축 소자를 비롯한 각종 신소재, 복합소재의 가공 공정 개발을 통해 생산성 향상과 고부가가치화에 기여하고 그 외 바이오 및 의료산업의 경우 레이저모듈에 대한 연구개발이 곧바로 해당 산업의 활성화의 조건으로 작용하기도 함. 아래 그림은 IPG Photonics에서 발췌한 산업용 레이저와 주력산업 및 미래 신성장 동력 산업과의 연관성을 나타낸 그림임.



[산업용 레이저와 주력산업 및 미래 신성장 동력 산업과의 연관성]

○ 이처럼 산업적 중요성과 그 응용분야가 주력기반 산업에서 신성장 동력 산업까지 확대되고 있는 산업용 레이저 시장은 전세계적으로 그 규모가 가파르게 증가하고 있는 추세임. 2017년 발표된 ‘Strategies Unlimited Report’에서는 아래 표와 같이 산업용 레이저의 세계 시장 규모를 전망하였는데, 2017년부터 2023년까지 연평균 5% 이상의 성장률을 보여 2023년에는 약 170억 불의 시장 규모가 예측됨.

Revenue (US\$M)	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Communications	\$4,079.1	\$3,900.4	\$3,730.0	\$3,910.1	\$4,154.8	\$4,545.2	\$4,974.1
y-to-y		-4.4%	-4.4%	4.8%	6.3%	9.4%	9.4%
Data Storage	\$145.6	\$114.1	\$78.1	\$64.1	\$49.0	\$38.9	\$35.0
y-to-y		-21.6%	-31.5%	-17.9%	-23.5%	-20.6%	-10.1%
Displays & Light Shows	\$336.9	\$369.8	\$406.0	\$412.0	\$425.8	\$449.4	\$459.6
y-to-y		9.8%	9.8%	1.5%	3.3%	5.5%	2.3%
Sensors & Instruments	\$801.6	\$1,033.6	\$1,142.3	\$1,217.2	\$1,305.7	\$1,404.2	\$1,501.4
y-to-y		28.9%	10.5%	6.6%	7.3%	7.5%	6.9%
R&D	\$510.7	\$529.0	\$542.5	\$547.5	\$553.9	\$555.6	\$557.2
y-to-y		3.6%	2.5%	0.9%	1.2%	0.3%	0.3%
Military	\$411.3	\$442.9	\$470.7	\$503.2	\$530.3	\$564.6	\$596.9
y-to-y		7.7%	6.3%	6.9%	5.4%	6.5%	5.7%
Medical	\$919.7	\$1,049.6	\$1,191.9	\$1,342.9	\$1,514.9	\$1,691.1	\$1,852.7
y-to-y		14.1%	13.6%	12.7%	12.8%	11.6%	9.6%
Printing	\$59.3	\$56.1	\$52.8	\$50.0	\$47.6	\$45.2	\$43.4
y-to-y		-5.4%	-5.9%	-5.2%	-4.8%	-5.1%	-4.1%
Photolithography	\$1,004.1	\$1,160.6	\$1,336.1	\$1,480.4	\$1,629.8	\$1,775.9	\$1,924.3
y-to-y		15.6%	15.1%	10.8%	10.1%	9.0%	8.4%
Marking	\$645.4	\$685.9	\$711.3	\$720.8	\$721.6	\$723.7	\$726.0
y-to-y		6.3%	3.7%	1.3%	0.1%	0.3%	0.3%
Micro Materials Proc.	\$1,364.9	\$1,491.5	\$1,534.4	\$1,535.5	\$1,503.0	\$1,477.4	\$1,469.5
y-to-y		9.3%	2.9%	0.1%	-2.1%	-1.7%	-0.5%
Macro Materials Proc.	\$2,303.7	\$2,414.9	\$2,530.3	\$2,658.4	\$2,769.6	\$2,885.6	\$3,006.9
y-to-y		4.8%	4.8%	5.1%	4.2%	4.2%	4.2%
TOTAL	\$12,582.3	\$13,248.5	\$13,726.4	\$14,442.3	\$15,206.1	\$16,156.8	\$17,147.1
y-to-y		5.3%	3.6%	5.2%	5.3%	6.3%	6.1%

[산업용 레이저의 세계 시장 전망 (Strategies Unlimited Report, 2017)]

- 2014년 보고된 '광학 세계; 산업용 레이저' 의 분석 보고서에 의하면, 아래 표와 같이 2012년 9,300억 원 이었던 국내 산업용 레이저 및 응용 시장은 외국의 레이저 분야 시장조사 자료와 및 국내의 현황을 고려하였을 때, 매년 안정적인 증가폭으로 성장하여 2025년까지 약 1조 7000억원의 규모에 이를 것으로 전망하였음.

단위(억불)	2012	2013	2015	2018	2020	2022	2025
산업용레이저 & 산업응용	9.3	10.0	11.3	13.0	14.2	15.3	17.0

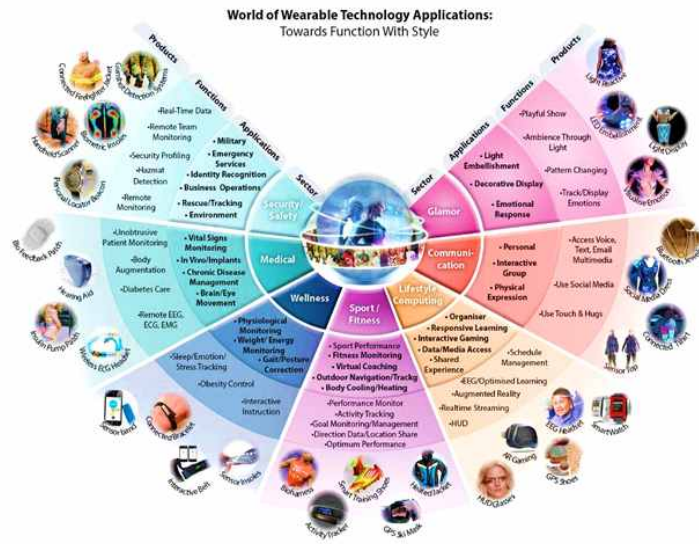
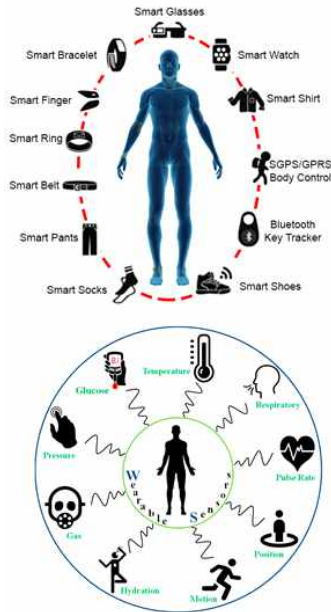
[산업용 레이저의 국내 시장 규모 예측]

- 최근 디지털 산업혁명이라고 부르는 제4차 산업혁명에 맞춰, 맞춤형 생산 및 소자의 고도화를 위한 도구로서의 산업용 레이저의 중요성을 인식되면서, 전세계적으로 산업용 레이저 및 그 응용을 중요 개발기술로 선정하여 적극적인 지원을 하고 있음. 그러나 한국의 산업용 레이저에 대한 정부지원의 경우, 경제성 및 기대효과 그리고 국내외적 역학관계로 인해 실질적이고 광범위한 지원이 이루어지지 않고 있는 실정이며, 국내 레이저 가공 시스템 제작 업체는 대부분이 중소·벤처기업 규모로서 전문적인 설계와 제작 능력을 갖춘 인력과 기반이 영세하여 향후의 시장 확대와 수입 증대에 따른 대응이 어려운 상황임. 따라서 국내 레이저 가공시장의 구조는 국내업체가 발전기 모듈 및 핵심부품을 해외 전문업체에서 구매하여 국내에서 조립 및 시스템화하여 납품하는 경우와 해외 전문업체의 국내 법인이 직판한 경우가 대부분이며 특히, 핵심 요소라 할 수 있는 레이저 발전기와 광학기기 등 핵심모듈 및 부품은 완제품에서 가장 높은 원가를 차지하는 요소임에도 미국, 일본, 독일 등 선진국으로부터 대부분 수입하고 있어 국내 관련 산업체의 수익성 악화가 심각한 수준임. 더욱이 최근 중국을 비롯한 인도 등에서 산업용 레이저 가공산업의 응용시장 확대에 따른 기술개발 및 창업이 활발히 이루어지고 있으며 내수시장을 기반으로 한 산업용 레이저 산업의 성장세가 빠르며(예: 中, Hans Laser Inc. 등), 기존 반도체 마킹 분야 등의 추격이 가속화되어 국내 기업의 국제 경쟁력이 시간이 흐를수록 위협 받고 있음. 국외 선진국 대비 국내 기술개발 수준을 비교해 봐도 현재 큰 시장으로 성장하고 있는 IT 산업의 전자정밀 전자부품과 태양전지·이차전지와 신소재 바이오 등 전 산업분야에서 기술적 한계로 인한 국산화가 미흡하여 수입에 의존하고 있음.
- 2014년 미국 Rice 대학의 Tour 교수 그룹에서 실수로 폴리이미드 필름(Polyimide film) 에 상용 CO₂ 레이저를 조사한 실험에서 검은색으로 그을린 영역에서의 그래핀 생성을 우연히 발견한 이후, Tour 그룹

을 중심으로 직접 레이저를 조사하여 폴리머 필름을 비롯한 다양한 유연/신축 재료 표면의 그래핀 생성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 현재 유수의 연구기관 및 기업간 협업을 통해 상용화 및 산업화를 위해 노력하고 있음. 특히, 사물인터넷으로 대표되는 최첨단 전자제품 및 다양한 복합 신소재 전자소자들의 소형화 및 유연/신축(foldable, wearable and stretchable) 특성이 보다 중요해지고 있는데, 기존의 리소그래피 미세 소자 패턴 및 복합 구조 생성 방식에 비해 본 레이저 직접 유도 그래핀, 고성능 탄소전극 생성 기술은 직접 생성을 통해 공정 효율이 우수하고 공정 과정에서의 유해 물질 및 공정 간 화학적 전구물질(precursor)의 배출이 거의 없는 장점으로 인해 차세대 혁신 소자 공정 기술로서 그 중요성은 더욱 높아질 것으로 예상됨. 특히, 최근 전세계적으로 전자쓰레기(E-waste)의 문제가 심각해지고 있는데, 대략 5천만 톤의 전자 쓰레기가 매년 생산된다. 예시로, 미국에서만 매년 3천만 개의 컴퓨터와 1억 개의 핸드폰을 버리며, 오직 15-20%의 전자 쓰레기만이 재활용되는데 미국 매립지의 약 70%의 무거운 금속은 버려진 전자기기로부터 온 것임. 특히 전자 쓰레기에는 에폭시수지, 섬유유리, PCB(폴리염화 바이페닐), PVC, 열경화성 플라스틱, 납, 주석, 구리, 규소, 베릴륨, 탄소, 철, 알루미늄이 대다수이며, 카드뮴, 수은, 탈륨도 포함되며 거의 모든 전자제품에서 납과 주석이 사용되고 있는데 이는 인체 및 환경에 치명적일 뿐만 아니라 금속 자원의 고갈이라는 문제 또한 안고 있음. 따라서 본 과제의 제안기술인 직접 레이저 유도를 이용하여 미이용 목질계 바이오매스를 활용한 고성능 탄소전극 및 소재 생산장비를 개발하고 공정을 통해 높은 전기 효율의 친환경적, 인체 친화적(Degradable, Biocompatible) 전기 소자 및 소형의 이차전지를 생산하게 된다면 이는 향후 전자소자 최첨단 복잡 서재 시장에서 큰 혁신을 가져올 것으로 예상되며 따라서 본 과제를 통한 원천기술의 확보 및 기술 이전 사업화를 통한 시장의 선점이 무엇보다 중요함.

(2) 국내외 주요 수요처 현황

- 핵심기술인 레이저 직접 묘화를 이용한 미이용 목질계 고성능 탄소전극 및 그래핀 소자 생산기술의 상용화 및 산업화를 통해 많은 응용분야에서의 활용이 예상됨. 먼저 본 과제에서 목표로 하는 다양한 스케일의 이차전지 응용분야들을 고려할 수 있으므로, LG화학, SK이노베이션, 삼성전기, LS엠트론, 삼화콘덴서 등의 에너지 저장 관련 기업을 주요 수요처로 고려할 수 있음. 나아가 친환경 가전제품 및 다양한 전자기능을 갖춘 미래 혁신적 가구의 등장으로 인해 소비자의 생활에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되며, 따라서 삼성전자 및 LG 전자를 비롯한 대형 가전 회사들을 주요 수요기업으로 생각할 수 있음. 또한 목질계에 더하여 직물 재료 및 폴리머 등의 유연/신축 소재로 그래핀화의 적용 소재를 확장하였을 때, 의류 및 패션 산업으로의 확장으로 의류 기업과의 다양한 협업 및 공동 연구 개발이 가능하며 이와 함께 인체 친화적이면서도 다양한 형태의 웨어러블 전자제품 및 전자소자의 개발 가능성으로 인해 개성적인 시계나 전자 악세사리를 비롯한 다양한 소비 시장에서 그 영향력이 증대될 것임. 아래 그림은 웨어러블 전자제품의 종류 및 전세계적 시장의 분류를 나타냄.



[유연/신축 소재 기반 웨어러블 전자제품의 종류 및 다양한 적용 시장]

○ 한편, 자연/인체 친화적이면서 자원고갈에 대한 염려없이 널리 활용 가능한 전자소자 및 에너지 저장 소자의 보급 및 확산을 통해, 산업적으로 최첨단 전자소자 산업의 친환경화 및 저비용 고효율화에 기여 할 것이며, 기존 공정 대비 높은 효율의 유연 생산 공정의 장점을 통해 소량 다품종 생산이 가능하여 다양한 형태의 전자 소자를 자연적으로 쉽게 접할 수 있는 소재를 통해 소모품으로써 생산하고 쉬운 교체가 가능하게 되어, 자동차 및 디스플레이를 비롯한 기간산업에서부터 첨단 IT 산업에 이르기까지 핵심 소자로서 그 중요성이 더욱 커질 것임. 또한 목질계의 기능 다변화를 통해 건축의 다목적화 등 주요 건설 시장의 주요 기업들과도 협업이 가능할 것으로 기대됨.

[사업화 계획]

(1) 사업화 전략

[기술이전을 통한 초도 매출 전략 및 사업화 계획]

○ 본 과제를 통해 개발될 생산장비는, 기술집약적인 시장 선도 장비로서 판매 초기, 수요자를 대상으로 그 성능과 다양한 기능들에 대한 정성적, 정량적 성능 검증이 필요함. 따라서 본 장비와 기술적, 응용적 관련이 있는 정부출연연구소 및 관련분야 대학 연구실들과 교류 관계를 맺고 적극적으로 대외 및 시연을 실시하고 관련 학회들과 전시회를 이용한 장비의 홍보활동을 통해 먼저 그 기술적 우수성을 검증받고 대외적 장비의 홍보 수단으로 활용 중에 있음. 또한 상대적으로 국내 수요자들의 경우 외산 측정기의 가격, 유지보수 및 서비스 등에 불만족 사항이 큰 것으로 확인되고 있으며, 고객마다의 특정 요구사항에 대한 Customizing 대응력이 부족함을 적극 활용하는 전략을 취할 것인데, 특히 본 기술의 특성 상, 많은 공정 조건의 변수 차이에 따라 다양한 생산 결과물의 도출이 가능하고 연구적으로 많은 관심을 받고 있는 기술집약적인 특성으로 주요 연구기관의 연구원들을 우선적 고객으로 유치, 적극적인 Customizing 을 통한 최적의 연구 및 실험 시스템 환경을 제공함으로써 과제 종료 후 사업화 1차 년도인 2023년까지 국내 수요시장에 초도 공급 실적을 확보하는 전략을 가지고 추진 중에 있음. 한편 기술개발 단계에서 미처 고려하지 못했던 여러 가지 문제들이 실제 사용 환경에서 나타나게 되고, 이러한 현장에서 드러나는 문제들을 얼마나 빠르게 해결해 나가는가도 사업화 및 안정적 시장 진입에 있어서 무척 중요함. 따라서 다양한 환경 하에서 다양한 고객을 대상으로 시연 및 필드 테스트를 수행하여 현장에서 공정상 발생하는 여러 가지 예외 상황에 대한 처리를 수행해가면서 기술적 보안을 단계적으로 달성해 나갈 계획이며, 기존의 사용자들에 대한 주기적 사용 피드백을 통해 보완사항을 빠르게 수정하고 장비를 최적화하여 산업적, 연구적으로 안정적이고 뛰어난 장비 제작 및 시스템 구축을 해 나감으로써 현재 아직 사업화 진입 단계

에 있는 본 기술시장을 선점하고 안정적으로 시장 지배력을 강화를 통해 회사 규모를 확장할 것임.

- 한편, 국내 시장에서 초도 매출 실적을 달성한 후, 활발히 국내 전시회에 참가하여 레이저 가공을 비롯한 관련 산업계에서 사업을 수행 중인 국내외 경쟁회사들의 제품과 당사의 기술수준, 가격 및 디자인 등에 대해 비교하여 어느 정도의 수준에 달해 있는지 현 위치를 파악하고 확인할 수 있는 장으로서 활용 중에 있음. 이를 단순한 제품판촉 수단이 아닌 장기적인 마케팅 전략을 시현하도록 하며 국내 시장에 대한 매출 실적 안정화 이후, 해외 진출을 위한 해외 대리점 계약 및 해외영업, 그리고 해외 대리점과 해외 관련 전시회 및 학회 참가를 통해 해외시장 진출을 구체화 진행 중에 있음. 큰 규모와 인접한 지리적 특성으로 중국 시장을 우선적으로 진출하기 위한 계획을 수립하고 중국 대리점을 기점으로 일본, 미국, 유럽 등지에 해외 대리점 계약을 확충해 해외 시장 공략 범위를 넓히고 해외 대리점을 활용, 사전 마케팅을 실시하고 각 해외 대리점에 시연 및 데모 장비를 구비하여 다양한 자재에 대한 필드테스트를 포함한 적극적인 소비자 서비스 대응으로 점진적으로 해외시장 진입의 폭을 넓혀 나가는 다음의 전략을 세우고자 함. 아래 표는 본 기술 사업화를 위한 매출 전략 및 사업화 계획을 요약한 내용을 보여줌.

구분	구체적인 내용
형태/규모	<ul style="list-style-type: none"> ○ 초기 장비 형태 : 목질계 재료의 레이저-유도-그래핀화 스마트 센서/소자 생산 장비 ○ 주요 수요처 : 레이저 직접 유도 그래핀 생성 및 합성과 관련된 연구소 및 연구기관, 친환경 가전, 가구 등 국내외 대형 전자제품 제조사 및 전자부품 업체, 자동차 및 디스플레이를 비롯한 기간 산업, 첨단 IT 산업과 관련 반도체 등의 복합 신소재 소자 부품 제조사. ○ 예상 단가 : 3000만원 ~ 1억 / 대
초도 매출 및 상용화 계획	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정부출연연구소 및 관련분야 대학 연구실과 교류 관계를 맺고 적극적 대어 및 시연을 실시. ○ 국/내외 관련 학회 및 전시회 참가를 통한 장비의 홍보. ○ 국내 수요자를 대상으로 적극적 커스터마이징 수행 및 빠른 에프터서비스 제공. ○ 다양한 환경 하에서 다양한 자재를 대상으로 시연 및 필드 테스트를 수행하고 기존의 사용자들에 대한 사용 피드백을 통해 장비 성능 보완 및 최적 시스템 구축. ○ 개발 종료 1년 후 사업화 1년(2023년) 까지 초도 판매 달성. ○ 개발 종료 3년 후(2025년) 부터 해외시장 초도 판매 및 해외시장 진출 추진. ○ 2025년까지 국내외 10대 이상의 판매실적 확보를 통해 안정적으로 시장 진입 및 본 기술시장을 선점.

[기술 사업화 및 상용화 계획(요약)]

- 일반적으로 극초단 펄스 레이저 가공 장비는 유럽 및 미국 국가에서 제작되며 중국도 일부 시장에 진입하였으나 광원 퀄리티가 상대적으로 떨어짐. 그러나 극초단 펄스 레이저 기반의 가공 장비는 대량 생산도 가능하면서 미세 가공도 가능해야 하기 때문에 광원 성능이 매우 중요함. 상기 표에서와 같이 예상 단가는 기성 제품들과 달리 각 용도에 따라 다르게 커스터마이징이 가능하므로 가격은 옵션 및 조건에 따라 달라짐. 다만 유럽 유명 레이저 대비 레이저 광원 자체를 국산 기술로 자체 제작한다는 점에서 광원 비용이 30 % 정도 이상 저렴함. 또한 기업이 국내에 있기 때문에 각 가공 조건 및 샘플 타겟 용도에 따라 업그레이드 및 변경이 쉽고 빠르게 가능하다는 점에서 한번 제작 후 변경이 거의 불가능한 해외 제품들과의 차별성이 존재하기에 충분히 경쟁력이 있다고 판단되어짐.

[사업 확장 전략]

- 아래 그림은, 사업화 이후 단계적 사업 확장을 위한 판매 제품군의 확대 계획을 나타냄. 먼저 본 과제를 통하여 구현된 레이저-유도-그래핀 탄소전극 소자 생산장비의 사업화 및 성공적인 시장 진입을 최우선 목표로 함. 다음으로, 장비를 통해 생산된 다양한 기능성을 갖는 고성능 목질계 전자, 전극 소자 및 이차 전지 소자에 대한 판매를 수행할 것임. 향후, 레이저-유도-그래핀 기반 신축/유연 고성능 그래핀 전자소자 시장이 향후 회사의 미래 핵심 성장 아이템으로써 기존의 전자제품 및 소자 시장의 혁신을 가져올 것으로 예상됨. 이와 함께 소비자를 대상으로 적극적 시연 및 소비자가 필요로 하는 공정의 테스트 및 맞춤

식 최적화, 그리고 생성 전극에 대한 품질 평가 등의 표준화 서비스 사업을 통해 기술 시장을 선도하고 더 나아가 보다 빠르게 본 기술 및 시장을 전세계적으로 확장하기 위한 역할을 수행할 것임. 한편, 보다 높음 이윤과 시장의 확대를 위해서는 본 시스템의 대량 생산 전용 시스템화와 생산 및 검수를 포함한 공정 자동화 장비로서의 확장이 필요하게 되고 이를 위한 시스템 개발 및 전용 장비로서의 시장 진입을 위해 노력할 것임.



[단계적 사업 확장을 위한 제품군의 확대 개발 계획]

(2) 투자 계획

- 목질계 미이용 바이오매스 기반 레이저-유도-그래핀 고성능 탄소전극 생성, 이차전지 응용 및 생산장비 개발은 기술집약적이며 미래 선도적 사업 분야로서 핵심기술의 연구개발(R&D) 및 원천기술의 발전이 무엇보다 중요하다 판단됨. 따라서, 기업부설 R&D 연구소의 선행기술 연구 및 시스템 개발이 사업화 및 매출 성장을 견인할 매우 중요한 요소임을 인식하고, 불확실한 대내외 여건속에서도 적극적인 R&D 투자를 통해 기술 경쟁력을 공고히 할 예정임. 이에 더불어 과제 이후에도 적극적인 기술이전 및 연구/개발 협업을 통하여 원천기술 확보 및 기술 경쟁력 강화를 소홀히 하지 않을 것임.
- 본 연구개발 과제 종료 1차년도 후 시점부터, 본격적인 사업화 및 장비 판매를 수행하여, 사업화 1차년도(2023년)에는 약 10억원의 매출을 목표로 하고 있으며, 매년 매출액의 25% 을 R&D 투자액으로 배정하여 2025년까지 총 18억원의 연구개발 투자를 목표로 하고 있음. 또한, 매년 기술이전 기업에서 2명 이상씩의 신규 연구인력 확충 계획을 수립하여 2023년부터 2025년까지 3년간 최소 6명 이상의 일자리 창출에 기여할 것임. 채용 후, 핵심인력으로 양성하기 위하여 사내 OJT(On the Job Training) 는 물론 외부 전문교육기관에 위탁교육 실시와 소요기술에 대한 지속적인 세미나 교육을 실시하고, 그 외에도 해당 분야의 무역실무를 비롯한 직무와 외국어 능력을 배양할 수 있도록 세심한 인력 양성 교육 시스템을 구비하여 기술 경쟁력 재고를 위해 노력할 것임. 한편, 매출액 증가와 함께 생산 설비 확충을 위한 적극적 투자를 통해 회사의 생산 역량 및 업무 환경의 개선을 위해 노력할 것임. 특히 본 과제를 통한 개발 종료 3년 후인 2025년에는 해외 대리점 계약 및 해외 초도 판매 매출 실적을 비롯하여 본격적으로 전세계적 시장을 선점하기 위한 계획으로 약 10억원의 투자를 통해 생산 설비의 확충을 꾀할 것임. 아래 표는 과제 종료 후 3개년 투자계획을 인력, R&D, 생산 설비에 따라 정리한 것임.

연도	2023년 개발 종료 후 1년	2024년 개발 종료 후 2년	2025년 개발 종료 후 3년
신규 연구 인력 채용	2	4	6
목표 매출액(백만원)	1,000	2,000	4,000
R&D 투자액(백만원)	30	500	1,000
R&D 투자비율 (%)	30%	25%	25%
생산 설비 확충(백만원)	100	200	1,000

[과제종료 후 3개년 투자계획]

(3) 생산 계획

○ 과제 종료 후 3개년 제품 생산 계획은 아래 표와 같다.

구 분	사업화 년도		
	2023년 (사업화 1년)	2024년 (사업화 2년)	2025년 (사업화 3년)
국내 판매량(단위 : 대)	15	20	30
평균 판매단가(백만원)	66.6	100	100
국내 매출액(백만원)	1,000	2,000	4,000
해외 판매량(단위 : 대)	0	0	8
평균 판매단가(원)	0	0	125
해외 매출액(백만원)	0	0	1,000
생산 계획(대)	15	20	38
당사 생산 능력(대)	20	30	60

[과제 종료 후 3개년 판매 및 제품 생산 계획]

(4) 해외시장 진출 계획

○ 앞서 상술한 대로, 2025년 해외시장 진출 및 해외 초도 판매 및 매출 실적을 계획하고 있으며, 구체적으로는 아래 표와 같이, 2025년 8대의 장비 판매를 통해 약 10억원의 해외 수출액을 달성하는 것을 목표로 하고 있다. 특히, 인접하면서도 시장 규모가 큰 중국 시장을 우선적으로 공략하여 2024년 말부터 중국 대리점 계약 체결을 준비하고 2025년까지 중국시장의 초도 판매를 달성하기 위한 계획을 수립하고자 함. 향후 중국 시장을 시작으로 일본시장으로 확장할 예정이며, 향후 중국법인을 설립하고 이를 기점으로 대만, 필리핀, 말레이시아 등으로 수출을 확대하고 미국, 독일 등의 해외 대리점 계약을 통하여 시장을 확대할 것임. 무엇보다도 핵심기술 확보 ▶ 상품화 ▶ 국내 수요업체 공략 ▶ 시장 레퍼런스 확보 ▶ 해외 시장 진출이라는 기본 전략에 충실히 하여 홍보와 판로를 개척할 계획임. 아래 표는 해외 시장의 홍보 및 판로확보를 위한 기본적인 전략을 정리한 것임.

홍보 전략	<ul style="list-style-type: none"> - 해외 대리점에 데모용 장비 구축 및 잠재 고객사 초청 시연. - 해외 유수의 전시회 및 학회 참가를 통해 기술/장비 홍보. - 필요시 데모 시스템 일정기간 고객사 대여, 피드백 수용 및 평가.
판로확보 전략	<ul style="list-style-type: none"> - 국내시장은 직접 영업, 해외시장은 대리점 영업 실시(중국, 일본, 미국, 대만, 싱가포르, 독일, 스위스 등) - 해외 대리점을 기점으로 및 시장에 대한 글로벌 네트워크 구성. - 해외 주요 연구기관 및 기업들과 긴밀한 컨소시엄 구성.

[해외 시장의 홍보 및 판로확보를 위한 기본 전략]

(5) 사업화에 따른 기대효과

[기술적 측면]

○ 현재 산업용 레이저 및 응용시장의 해외 선진국 대비 국내 기술개발 수준은, 큰 시장으로 성장하고 있는 IT 산업의 고정밀 전자부품을 비롯, 태양전지·이차전지와 신소재 바이오 등 산업 전 분야에 걸쳐 국산화가 미흡하고 대부분 수입에 의존하고 있으며 그 기술 격차가 더욱 커지고 있음. 특히 핵심 요소라 할 수 있는 레이저 발전기와 광학기기 등의 핵심모듈 및 부품은 완제품에서 가장 높은 원가를 차지하는 요소임에도 미국, 일본, 독일 등 선진국으로부터 대부분 수입하고 있어 국내 관련 산업체의 수익성 악화가 심각한 수준임. 반면, 레이저 유도 그래핀 생성 및 고성능 목질계 전자 소자의 생성 및 생산 장비 사업은 2014년 이후 많은 국내외 연구기관들에서 그 상용화 및 사업화를 위한 노력이 경쟁적으로 이루어지고 있음. 따라서 본 과제를 통한 목질계 바이오매스를 활용한 레이저 유도 고성능 전극소자 및 이차전지 생

산 장비의 개발을 통해 향후 최첨단 스마트 전자 산업을 이끌 미래 핵심 산업을 선점하고 원천기술을 확보하는 것이 무엇보다 중요함. 특히 사물인터넷으로 대표되는 최첨단 전자제품 및 다양한 복합 신소재 전자소자들의 소형화 및 유연, 신축(foldable, wearable and stretchable) 특성이 보다 중요해지고 있는데, 기존의 리소그래피 미세 소자 패턴 및 복합 구조 생성 방식에 비해 본 레이저 직접 유도 그래핀, 고성능 탄소전극 생성 기술은 직접 생성을 통해 공정 효율이 우수하고 공정 과정에서의 유해 물질 및 공정 간 화학적 전구물질(precursor)의 배출이 거의 없는 장점으로 인해 차세대 혁신 소자 공정 기술로서 그 중요성은 더욱 높아질 것으로 예상됨. 특히, 최근 전세계적으로 전자쓰레기(E-waste)의 문제가 심각해지고 있는데 본 과제의 제안기술인 직접 레이저 유도를 이용하여 미이용 목질계 바이오매스를 활용한 고성능 탄소전극 및 소재 생산장비를 개발하고 공정을 통해 높은 전기 효율의 친환경적, 인체 친화적(Degradable, Biocompatible) 전기 소자 및 소형의 이차전지를 생산하게 된다면 이는 향후 큰 시장 영향력을 발휘할 것으로 예상되며 따라서 기술 및 시장의 선점이 무엇보다 중요함. 다음의 시장 진입 및 사업화 성공을 발판으로 초정밀 레이저 가공 장비의 핵심 요소의 국산화라는 부가적인 가치로 개발 범위를 확장함으로써, 기존의 외산 장비를 대체하고 이러한 첨단 기술이 지배하는 고부가 가치 시장의 흐름에 대응하고 더 나아가 국가핵심 기반 산업인 산업용 고출력 레이저 시장의 해외 기술 의존도를 줄이고 장비의 국산화를 통해 국가 기술 경쟁력을 높일 수 있음. 공정 효율 증대에 기여하고 이로 인해 함께 기술적 협력 관계를 통하여 장기적으로 핵심 원천 기술 및 국가 경쟁력 강화라는 긍정적인 기술적 효과와 함께 국내 첨단 부품 산업의 연구개발 역량과 응용분야 확대에 기여할 것임.

[경제적·산업적 측면]

- 스마트폰, AI(Artificial Intelligence) 및 자율 주행 자동차와 같은 첨단 기술 산업이 발전함에 따라, 그 핵심 부품인 전자부품 산업의 규모 또한 거대해지고 있음. 특히 최첨단 유연/신축 복합 소재를 바탕으로 한 웨어러블 전자제품 시장의 확대와 함께 자원 고갈을 막고 지구 및 사람을 보호하기 위한 친환경적 전자 소자의 필요성 또한 증가하고 있는 실정임. 이와 함께, 그 공정의 효율을 결정하는 산업용 레이저 가공 및 그 밖의 응용시장 또한 그 크기와 중요성이 커지고 있음. 이처럼 시장의 중요성과 수요가 늘어나고 있음에도 불구하고, 국내 레이저 산업의 경우, 산업적 기반이 취약하고 연구 활동이 활발하지 않아 장기적인 국가경쟁력 약화를 가져올 수 있음. 시장선점 경쟁이 치열하고 국가적으로 보완해야 할 후방장비산업, 소재산업과 밀접한 연관이 있어 핵심기술로 육성이 필요하며 본 과제를 통하여 목질계 및 직물 기반의 친환경적이면서도 어디서든 쉽게 구할 수 있기 때문에 저비용 고효율 첨단 전자소자 및 이를 생산하기 위한 생산 시스템의 개발은 당사의 매출확대와 더불어 무엇보다도 산업적 중요성과 시장이 커지고 있는 광전자융합산업의 경쟁력 강화와 발전에 기여할 것임. 또한 본 생산장비는 최근의 수백 nm 이하의 고정밀 가공을 원하는 레이저 가공과 관련된 모든 산업에 함께 적용될 수 있는 기반 혁신 기술으로써, 기존의 반도체나 디스플레이 핵심 부품 및 공정 장비로서 뿐만 아니라 바이오 등의 산업 전반에 바로 응용이 가능하여 국가 산업기반을 강화하고 산업적 파급효과가 큰 제품이라고 할 수 있음.

[사회적 측면]

- 본 개발 장비는 레이저 기반의 첨단 재료 및 혁신 광학 기술과 전통적인 기계 시스템이 융합된 정밀 시스템으로써 고도의 전문기술이 필요한 기술집약형 산업이면서도, 또한 숙련 기술자의 노동집약도가 높은 고용친화, 고용창출형 고부가가치 산업으로서의 두 가지 특성을 가짐. 본 레이저 유도 목질계 고성능 탄소전극 생산 장비의 기술 이전을 통한 성공적인 사업화가 달성될 수 있도록 추진하여 개발 종료 후인 2023년 10억, 2024년 20억, 그리고 2025년 40억의 매출달성을 계획하고 있으며, 당사의 3년간 6명 이상의 직접적인 고용창출은 물론 향후 투자 집행에 따른 다수의 부품 공급업체에 대한 간접적인 고용까지 고려하면 수십 명 이상의 고용효과를 기대할 수 있을 것으로 예상할 수 있음. 또한 선진 외국업체가 점유하고 있는 레이저 부품 및 전기, 전자소자 시장에서 고효율 생산 장비의 공급으로 국내 독과점화, 종속화되어 있는 외산 제품의 수입대체 이상의 의미가 있으며, 국내 광전자 및 기계 시스템 기술인력의 엔지니어링 역량 향상과 관련 산업계 전반의 직, 간접적인 고용창출에 크게 기여할 것임.

3) 연구개발성과 기반의 후속 연구 계획

[재료 확장성 고려]

- 본 과제에서 사용된 목재 및 목탄 외에도 다양한 목질계 재료들은 레이저-유도-그래핀의 재료로서 활용될 가능성이 있음. 이미 커피 파우더의 가능성은 보고서에서 소개된 바와 같이 레이저-유도-그래핀 생성이 가능성이 밝혀졌고, 감자 껍질 및 코르크 코코넛 껍질 또한 레이저-유도-그래핀 생성의 모재료로 활용될 수 있음을 소개한 연구가 소개된 바 있음.
- 향후 이 점을 고려하여 다양한 목질계 재료인 사탕수수 껍질, 옥수수 껍질 및 곡물 껍질 등의 다양한 미활용 바이오매스를 기반으로 한 레이저-유도-그래핀 탄소 전극 생성을 시도하고자 함.
- 또한 커피 찌꺼기 기반의 레이저-유도-그래핀 탄소 전극 생성 기술을 최적화하여 매년 증가하는 커피 찌꺼기의 활용도를 2차 전지로의 음극재로서 확대하는 방안을 고려하고 있음.
- 본 과제에서 초기에 시도된 리그닌의 경우 대표적인 목재의 리파이닝 후 나오는 부산물임. 종이나 펄프 제작에 있어서 리그닌의 경우 가장 대표적인 폐기물 중 하나라고 할 수 있음. 본 과제를 통해 리그닌 또한 레이저-유도-그래핀 생성의 모재료로 사용할 수 있음을 확인한 바 있음. 향후 이를 최적화하여 대표적 바이오매스 리파이닝 부산물인 리그닌 기반의 레이저-유도-그래핀을 2차 전지로의 음극재로 사용하는 방안을 고려 중에 있음.
- 기 활용된 목재는 주 성분이 탄소 50%, 산소 44%, 수소 5%, 질소 1% 정도이고 이 외 회분, 석회, 칼슘, 마그네슘, 나트륨, 망간, 알루미늄, 철 등이 아주 소량 들어있음. 또한 목탄은 주 성분이 탄소 85%, 수분 10%, 미네랄 3%, 휘발성분 2% 정도임. 이 과정에서 레이저-유도-그래핀으로 그래핀화가 진행될 시에 탄소 85~90%, 산소 10~15% 정도 이내이고 그 외 일부 질소 및 기타 성분이 소량 검출됨.
- 추가적으로 확장된 모재료들에 대하여 원재료의 화학적 조성 특성을 확인하고 레이저를 통한 그래핀화가 진행된 이후의 화학적 조성 변화를 고려하여 향후 특정 재료의 조성에 따른 레이저-유도-그래핀 수득률을 정형화하고자 함.
- 과제가 종료된 이후에도 레이저앤그래핀 사의 장비를 활용한 레이저-유도-그래핀 탄소 전극 대량 생산에 대한 시도는 지속적으로 진행 중에 있음. 과거 기 보유한 미국 스펙트라피직스 사의 레이저 기반으로 생성된 전극과 비교하였을 때 유사한 성능을 보였으며 본 연구에 필요한 방식으로 커스트마이징되어 패터닝 부(빔 경로 및 패터닝 파트)까지 일체화 되어 있는 레이저앤그래핀 사의 장비가 유저 입장에서 더욱 사용이 용이함. 또한 생산 과정에서 필요한 추가적인 요구사항을 지속적으로 기업에 피드백 하여 상용화 과정에서 더욱 매력적인 방향으로 빠르게 업그레이드 추진 중에 있으며, 해당 장비를 단순히 탄소 전극 생성 뿐 아니라 본 연구팀에서 보유하고 있는 기술인 기타 레이저 가공 (글라스 드릴링, 금 박막 선택적 제거, 실리콘 웨이퍼 마킹 등) 등에 적용하여 각 실험 환경에서 더욱 필수적인 장비 요구사항에 대한 피드백도 전달 및 적용함.
- 향후 이를 활용하여 제작된 정형화된 레이저-유도-그래핀 기반의 전극을 잠재적 수요기업인 국내외 에너지 저장 소자 제조업체 및 에너지 저장 관련 기업을 통해 산업계 적용 가능성에 대한 테스트를 진행할 예정임. 현재 적용한 다양한 수치들 (면저항, 그래핀 변환 효율, 배터리 전극 용량)을 재검증 및 성능 분석을 통해 실제 양산화 배터리에서의 적용 가능성을 검토할 예정임.

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 농업에너지 자립형산업모델 기술개발 연구개발사업 목질계 미이용 바이오매스를 활용한 고성능 탄소전극 소재 및 생산장비 개발 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 농림축산식품부(농림식품기술기획평가원)에서 시행한 농업에너지 자립형산업모델 기술개발 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.