

• Topical Issue • 레이저를 이용한 가공 기술(Laser Processing Technologies)
스마트 섬유 구현을 위한 섬유상 레이저-유도 그래핀 직접묘화 기술
Laser-Induced Graphene Direct Writing on Textile for Smart Textile

양동욱¹, 김영진^{1,#}
Dongwook Yang¹ and Young-Jin Kim^{1,#}

¹ 한국과학기술원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)
Corresponding Author / E-mail: yj.kim@kaist.ac.kr, TEL: +82-042-350-3017
ORCID: 0000-0002-4271-5771

KEYWORDS: Laser-induced graphene (레이저-유도 그래핀), Laser direct writing (레이저 직접 묘화), Smart textile (스마트 섬유)

Laser-induced graphene (LIG) presents a promising route toward next-generation smart textiles by enabling direct patterning of conductive materials onto textiles through a single-step laser writing process. In particular, femtosecond laser-based fabrication offers high-resolution processing without damaging substrates. This review summarizes LIG formation mechanisms, laser manufacturing parameters, physical/chemical characteristics, electrical, thermal, and optical properties of LIG. Furthermore, it categorizes representative applications including biosignal monitoring, energy storage, thermal regulation, optical absorber, and extraterrestrial adaptability, all based on textile-integrated LIG. With its porous morphology, high conductivity, and structural versatility, LIG offers outstanding multifunctionality for smart textile applications. Future research should explore precise functional tuning of LIG through laser parameter optimization, accurate characterization of LIG, and advanced smart textile applications.

Manuscript received: April 24, 2025 / Revised: June 13, 2025 / Accepted: June 18, 2025

1. 서론

웨어러블 전자소자는 생체 신호 감지, 환경 모니터링, 스마트 헬스케어 및 국방·우주 응용까지 폭넓은 분야에서 활용되고 있다. 특히 스마트 섬유는 피부에 밀착 가능한 유연성, 통기성, 기계적 안정성 등의 특성 덕분에 가장 이상적인 형태로 간주되며, 이에 따라 다양한 전자 기능을 섬유 구조에 직접 통합하려는 시도가 활발하게 이루어지고 있다[1-3].

한편, 그래핀은 sp^2 탄소 원자들이 2차원 벌집 구조로 배열된 소재로, 뛰어난 전기전도도, 기계적 강도, 유연성, 화학적 안정성, 열전도도 등을 동시에 지닌 차세대 나노소재이다. 이러한 특성 덕분에 그래핀은 트랜지스터, 슈퍼커패시터, 센서, 투명전극, 플렉서블 디스플레이 등 다양한 분야에서 핵심 재료로 주목받고 있다. 그래핀은 일반적으로 화학 기상 증착법(CVD), Hummers법

기반의 산화-환원 방식, 또는 기계적 박리 등을 통해 생성되며, 각 방식은 결정성, 단일층 품질, 면적 제어, 기판 호환성 등에 따라 장단점이 나뉜다. 그러나 이러한 합성 방식은 고온 진공 장비, 촉매 금속, 복잡한 전자 공정 등을 필요로 하여 공정 비용이 높고, 기판 선택의 유연성에도 한계가 있으며, 특히 섬유와 같은 비정형 3차원 기판에는 적용이 어렵다[4-6]. 이러한 현실적 제약으로 인해, 그래핀의 활용을 보다 간소화하거나 유연한 기판에 적용하기 위한 대안으로 환원 그래핀 산화물(Reduced Graphene Oxide, rGO), 그래핀 산화물(Graphene Oxide, GO), 탄소나노튜브(Carbon Nanotube, CNT) 등 다양한 탄소 기반 나노 소재들이 지속적으로 제시되어 왔다.

레이저-유도 그래핀(Laser-Induced Graphene, LIG)은 2014년 Rice University의 James Tour 연구팀에 의해 처음 보고되었으며, 고분자 필름(Polyimide, PI) 표면에 CO_2 레이저를 조사함으로써

sp^2 탄소 결합 기반의 다공성 그래핀 구조로의 전환이 가능함이 입증되었다[7]. 해당 기술은 진공, 촉매, 전사 공정 없이 대기압 하에서 단일 레이저 스캔만으로 전도성 그래핀을 직접 형성할 수 있다는 점에서 간단하고 비용 효율적인 공정으로 주목받았다. 초기에는 PI에 한정되었던 LIG 형성은 이후 다양한 폴리머 소재뿐만 아니라 셀룰로오스, 종이, 나무 등 바이오매스 기반 소재와 Kevlar, PI 섬유 등 섬유 소재까지 확장되었다. 형성된 LIG는 분자 동역학 시뮬레이션과 투과전자현미경(TEM) 분석을 통해, 일반적인 벌집형 육각 구조 외에도 5각형, 7각형 탄소 고리들이 혼재된 비정질적 구조를 가지며, 결합 원자(예: N, H)가 포함되어 있음이 밝혀졌다[8]. 이러한 그래핀 유사 물질은 다층 구조로 적층되어 복잡한 구조를 이룬다. 결과적으로, 단결정 그래핀과 비교해 구조적 정렬성은 낮지만, 높은 전기전도성, 기계적 유연성, 고비표면적, 다공성 등 LIG만의 독자적 특성이 다양한 응용 가능성을 제시한다. 또한, LIG의 구조 및 물성은 레이저 공정 조건에 따라 정밀하게 조절될 수 있다[9,10]. 각 공정 변수는 다공성, 전기전도도 등에 직접적인 영향을 미치며, 이를 바탕으로 기판 내 서로 다른 영역에 목적에 맞는 특성을 갖는 구조를 동시에 패터닝하는 것도 가능하다. 이러한 특성은 하나의 공정만으로 전극, 센서 등 다양한 기능 소자를 통합할 수 있다는 점에서 LIG의 중요한 기술적 강점으로 작용한다. 이러한 LIG 공정은 전사 공정 없이 대기 중에서 직접 원하는 패턴을 형성할 수 있어, CVD 기반 공정에 비해 제작 공정이 간단하고 공정 유연성이 뛰어나다. 특히 고온 공정이나 금속 기판이 불필요하다는 점에서 다양한 유연 기판에 적용이 가능하며, 이는 스마트 섬유를 포함한 웨어러블 응용에 적합하다. 반면, 결정성이나 단층 그래핀의 정밀 제어 측면에서는 CVD 공정에 비해 한계가 존재하므로, 적용 분야에 따라 공정 선택이 중요하다[11].

이러한 특성을 바탕으로 strain 센서, 온도 센서, 슈퍼커패시터, 배터리 전극, 흡광코팅, 바이오센서, 가스 센서 등 다양한 분야에 활용되고 있다. 특히 섬유 기판 위에 직접 고해상도로 패터닝이 가능하다는 점은 스마트 섬유 구현에 매우 큰 장점으로 작용한다.

섬유는 일반적으로 nonwoven, woven, knit 구조로 분류되며, 각 구조는 물리적 특성, 열 확산 효율, LIG 생성 밀도, 기계적 유연성, 센서 적합성 등에서 차이를 보인다. 예를 들어 nonwoven은 무작위 섬유 배열로 높은 기계적 강도를 보이며, woven은 직교 구조를 통해 응력 분산 및 전도성 네트워크 형성에 유리하다. Knit 구조는 루프 형태로 형성되어 매우 높은 신축성과 복원력을 제공한다. 이러한 구조적 특성은 LIG 기반 스마트 섬유 응용에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 적합한 응용을 섬유 구조에 따라 맞춤 설계할 필요가 있다[12].

레이저-유도 그래핀 공정의 기반이 되는 레이저 가공 기술은 마스크, 포토레지스트, 진공 공정 없이 원하는 위치에 자유로운 패턴을 실시간으로 형성할 수 있기에 고정밀성, 디자인 자유도, 친환경적 공정 등의 장점을 지니며, 마이크로/나노 스케일의 패터닝, 절단, 표면 개질 등에 활용되어 전자소자, 배터리 리페어링,

반도체 공정 등 광범위한 산업 분야에 걸쳐 응용되고 있다. 그중 펄스 레이저는 짧은 시간안에 높은 피크 파워를 전달할 수 있기 때문에, 비선형 광학적 상호작용을 통해 물질 구조를 변화시키며, 이 과정에서 열 확산을 거의 유발하지 않기 때문에 비열적 가공이 가능하다. 결과적으로 열 손상을 최소화하면서, 미세한 마이크로/나노 구조를 정밀하게 형성할 수 있다[13,14]. 이러한 펄스 레이저는 레이저-유도 그래핀 공정의 기반 기술로서, 정밀한 패턴을 기판을 손상시키지 않으며 가공이 가능하다는 점에서 섬유 기반 웨어러블 디바이스 제작에 매우 유망한 솔루션으로 자리잡고 있다.

본 논문에서는 섬유 기판 상의 레이저-유도 그래핀 기술의 스마트 섬유 응용가능성을 제시하고자 한다. 섬유상 LIG 직접 묘화 기술은 레이저 조사만으로 섬유 표면에 국소적인 고성능 탄소 구조를 구현할 수 있는 차세대 스마트 섬유 공정으로 주목받고 있다. 이러한 특성은 섬유 자체의 유연성, 통기성, 기계적 적응성을 유지하면서 여러 기능들을 부여할 수 있다는 점에서 주목을 받고 있다. 레이저 파라미터(출력, 파장, 반복률, 펄스폭, 주사 속도 등)에 따른 LIG 물질 조절 및 전기전도도, 광흡수도, 열전도도, 화학적 분석(XRD, 라만 분광법) 등의 특성평가와 이를 기반으로 한 strain 및 온도 센서, 광 흡수 코팅, 에너지 저장 전극 등 다양한 응용 사례를 종합적으로 분석한다. 이를 통해 섬유상 LIG 형성 기반의 스마트 섬유 응용 가능성을 제시하고자 한다.

2. 섬유상 레이저-유도 그래핀 직접 묘화 및 특성평가

2.1 레이저-유도 그래핀 생성 메커니즘 및 공정 변수

레이저-유도 그래핀(Laser-Induced Graphene, LIG)은 고분자 및 바이오매스 기반의 탄소 전구체에 고에너지 레이저를 직접 조사함으로써 형성되는 다공성 sp^2 탄소 기반 재료로, 탄화 및 흑연화 등의 단계를 거쳐 형성된다. LIG의 형성은 주로 광열적(Thermal) 반응에 기반하지만, 레이저의 특성에 따라 비열적 메커니즘이 동시에 작동할 수 있다. 특히 펄스폭이 짧은 레이저의 경우 다광자 흡수와 비선형 광학 효과를 통해 열 확산이 발생하기 전에 구조 전이를 유도하는 경로가 보고되고 있다[15].

LIG의 원자 수준 형성 과정을 분석하기 위한 방법으로 분자 동역학(Molecular Dynamics, MD) 시뮬레이션이 활용되어 왔다. MD 시뮬레이션 결과, Kevlar 고분자가 고온에서 분해된 후 6각형 중심의 sp^2 클러스터로 재배열됨이 보고되었다[16,17]. Figs. 1(b)-1(d)의 분자 동역학 시뮬레이션에 따르면, 90개의 Kevlar 단량체로 구성된 초기 구조를 설정한 후, 1500 K에서 4000 K까지 점진적으로 온도를 상승시키고 냉각하는 과정을 통해 원자 수준의 구조 전이를 추적하였다. 이 과정에서 초기의 방향족 고리가 열에 의해 붕괴되고, 탄소 원자들이 재배열되며 5각형, 6각형, 7각형이 혼재된 비정질 그래핀 구조로 전환되었으며, 최종적으로 다층성의 sp^2 탄소 구조가 형성되었다. 또한, LIG 생

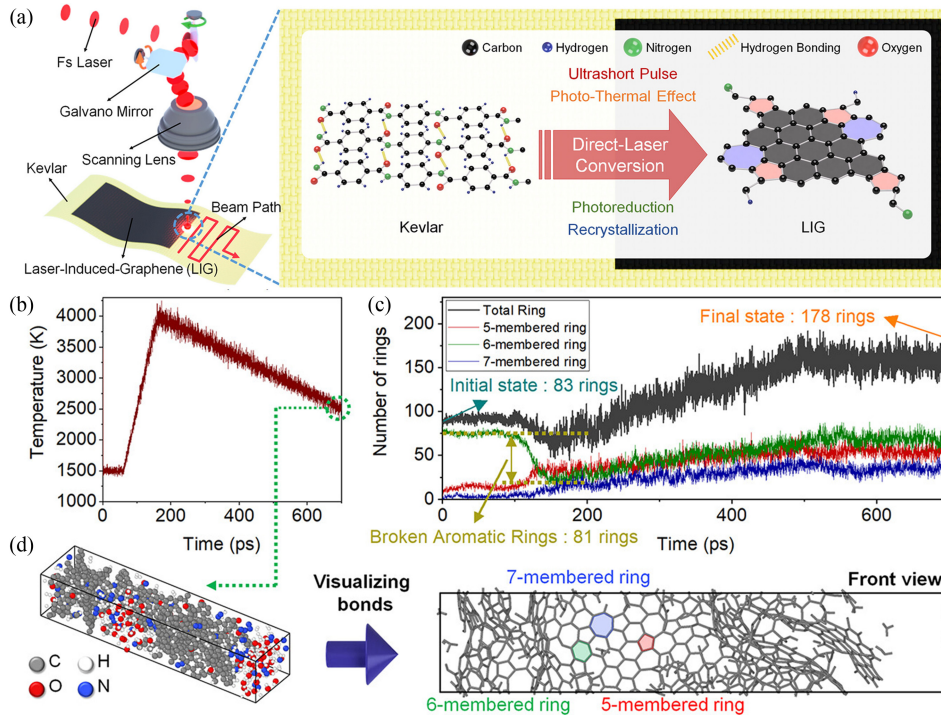


Fig. 1 Formation of laser-induced graphene (LIG) on Kevlar textile and its molecular dynamics (MD) simulation [18] (Adapted from Ref. 18 with permission)

성과정에서 질소(N), 수소(H) 등의 결합 원자가 포함되었고, 전체 고리 수는 83개에서 178개로 증가하여 그래핀화가 급격하게 진행되었음을 나타낸다. 이 전 과정은 수백 피코초의 짧은 시간 안에 진행되며, 실제 레이저 조사 환경에서의 초고속 반응을 잘 반영한다[18]. 특히, 펨토초 레이저를 이용한 LIG 공정에서는 이와 같은 초고온 환경이 수백 피코초 내에 형성되고 급격한 냉각이 뒤따르기 때문에, 시뮬레이션 결과와 같이 고온-고압-급속냉각 조건에 의한 탄소 재배열이 실제 공정에서도 잘 구현될 수 있다. 이러한 펨토초 기반 공정은 sp^2 클러스터의 성장과 결정화가 균일하게 진행되도록 도와주며, 고품질의 비정질 그래핀 구조 형성에 유리하게 작용한다[19].

LIG의 형성 품질은 레이저 공정 변수에 따라 정밀하게 조절될 수 있다. 대표적인 영향 인자로는 출력(Power), 주사 속도(Scanning Speed), 펄스폭(Pulse Duration), 반복률(Repetition Rate), 플루언스(Fluence), 빔 직경(Beam Size), 중첩도(Overlap Ratio), 파장(Wavelength) 등이 있으며, 이들은 구조의 깊이, 다공성, 층 수, 결합 밀도, 전도도 등에 복합적인 영향을 미친다[15].

레이저의 출력(Power)과 스캔 속도(Scanning Speed)는 LIG 형성 시 국소적인 열 축적(Thermal Accumulation)에 밀접한 영향을 미친다. 출력이 높을수록, 혹은 주사 속도가 느릴수록 동일 위치에 전달되는 에너지 밀도가 증가하여, 탄화가 촉진되고 전기전도도가 향상되는 경향을 보인다. 그러나 이러한 조건이 과도할 경우, 과열로 인한 기판 손상이 발생할 수 있으며, 형성된 LIG의 품질이 저하된다. 반복률(Repetition Rate) 또한 열 축적 제어에 핵심적인 변수로, 일정 수준 이상의 반복률(예: 100 kHz

이상)에서는 안정적인 LIG 형성이 가능하지만, 지나치게 높은 반복률에서는 과도한 열축적이 유발될 수 있다. 이와 함께 파장(Wavelength) 역시 전구체의 광흡수 효율, 침투 깊이, 광자 에너지와 밀접히 연관되어 형성 메커니즘과 구조 특성에 영향을 미친다. 일반적으로 짧은 파장(자외선) 영역은 높은 광자 에너지로 인해 표면 중심의 고해상도 LIG 형성에 유리하며, 긴 파장(적외선)은 깊은 침투와 강한 광열 효과를 통해 3차원 다공성 구조 형성에 적합하다.

펄스폭(Pulse Width)은 LIG 형성 메커니즘에 있어 매우 중요한 인자이다. CO₂ 레이저는 마이크로초(μs) 수준의 긴 펄스를 방출하며, 열 안정성이 높은 고분자에서 국소 고온-고압 환경을 형성해 광열 반응 기반의 LIG 형성을 유도한다. 이때 다량의 가스가 방출되며, 다공성 3차원 그래핀 네트워크로 재배열된다. 반면, 펨토초 레이저는 수십~수백 펨토초 범위의 초단 펄스를 사용해 열 확산 이전에 그래핀 형성을 유도하며, 열에 민감한 기판에서도 전처리 없이 정밀한 LIG 형성이 가능하다. 펄스폭이 짧을수록 열 영향 영역은 작아지고, 구조 정밀도는 향상되며, 5 μm 이하의 고해상도 그래핀 라인 형성이 가능하다는 보고도 존재한다[20-22]. 이러한 공정 변수들을 정밀하게 조절함으로써, 동일한 섬유 기판 위에서도 전도성 전극, 물리적/화학적 센서, 에너지 저장소자, 광흡수 코팅 구조 등 목적에 따라 다양한 기능을 동시에 구현할 수 있는 패터닝 전략이 가능해진다. LIG 공정의 이와 같은 설계 유연성은 섬유 기반 스마트 소자 구현에 매우 적합하다.

Fig. 2는 펨토초 레이저 기반 직접 묘화를 위한 패터닝

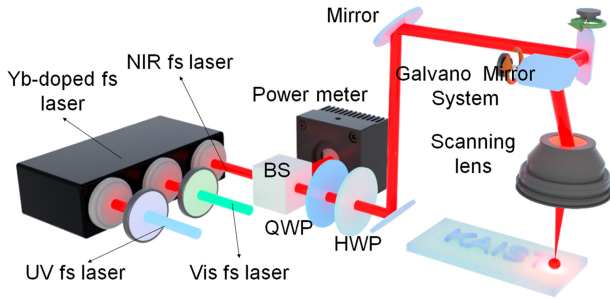


Fig. 2 Optical patterning system for femtosecond laser direct writing

시스템이다. 해당 시스템은 고해상도 정밀 가공을 위한 광학 시스템과 스캐닝 제어 모듈로 구성된다. 펄스폭이 펨토초 수준인 레이저를 광원으로 사용하며, 적외선, 가시광선, 자외선 등의 다양한 파장을 선택적으로 구현할 수 있다. 파장 선택 시에는 가공 대상 물질의 파장 의존 흡수 특성을 고려하여 최적의 스펙트럼 범위가 설정되며, 편광판을 추가하여 레이저 빔의 편광 상태를 조절함으로써 입사 방향에 따른 흡수율 변화나 패턴 품질 향상 등도 고려할 수 있다. 레이저 빔은 빔 전달 광학계와 스캐닝 렌즈를 통해 정밀하게 집속되며, 갈바노 스캐너에 의해 가변 각도로 제어되어 대상 기판 상에 원하는 패턴을 직접 형성한다. 레이저 빔의 경로는 적절한 디자인에 따라 결정되며, 이 과정에서 파워, 스캔 속도, 반복률 등 주요 가공 조건도 함께 조절되어 패턴링이 이루어진다. 실험에 사용된 펨토초 레이저는 255 fs의 펄스폭을 가지며, 1035.67 nm (IR) 및 347.8 nm (UV)의 파장을 갖는 레이저를 삼차고조파 변환을 통해 생성하였다. 반복률은 201.5 kHz로 측정되었으며, 초점 레이저 빔의 크기는 IR의 경우 70.95 μm (초점거리: 100 mm), UV의 경우 129 μm (초점거리: 180 mm)로 측정되었다. 또한, 1.5 W 출력 기준 단일 펄스당 에너지는 약 7.45 μJ 이다.

2.2 LIG 특성 평가

2.2.1 전기적 특성

섬유 기반 레이저-유도 그래핀(LIG)의 전기전도도는 웨어러블 전자섬유 구현을 위한 핵심 성능 지표로, 저항(Resistance) 또는 면저항(Sheet Resistance) 단위로 평가된다. 전기적 특성은 레이저 출력, 파장, 스캔 속도, 반복률, 조사 횟수 등의 공정 변수에 따라 정밀하게 조절될 수 있으며, 섬유 기판의 구조 또한 전도도 형성에 중요한 영향을 미친다. Fig. 3(a)에서는 woven, knit, nonwoven 형태의 Kevlar 섬유상에 펨토초 레이저를 조사하여 형성된 LIG의 면저항을 비교하였다. 그 결과, 최적값으로 woven 구조에서 2.86 Ω/sq , knit 구조와 nonwoven 구조에서는 각각 13.7 Ω/sq , 53.6 Ω/sq 로 측정되었다. 스캐닝 속도와 레이저 파워 변화에 따른 면저항의 변화는 열축적 정도와 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 낮은 스캔 속도 또는 높은 레이저 파워 조건에서는 단위 면적에 더 많은 에너지가 전달되어 열축적이 증가하며, 이로 인해 그래핀화가 더욱 촉진되어 면저항이 감소하는

경향을 보인다. 그러나 이러한 조건이 과도해질 경우, 열이 임계치를 초과하면서 재료 어블레이션(Ablation)이 유발될 수 있으며, 이는 전기적 특성을 저하시킬 수 있다. 따라서 면저항 감소와 열적 손상의 경계 사이에서 최적의 가공 조건을 설정하는 것이 중요하다. 또한, 섬유 종류에 따른 면저항 값의 차이는 섬유 배열의 정렬성 및 열 전달 균일성 차이에 기인한 결과이다. 또한, Fig. 3(b) 및 3(c)에서는 펨토초 레이저의 출력 및 스캔 속도에 따라 형성된 LIG의 저항 값이 수백~수천 Ω 범위에서 조절될 수 있음을 보여주었으며, 이는 LIG의 전기적 특성이 공정 변수에 따라 효과적으로 튜닝 가능함을 입증한다. 이러한 결과는 섬유 조직 구조와 공정 조건의 상호작용을 고려한 최적 설계가 섬유형 전자소자의 성능 확보에 결정적임을 시사하며, 목적에 따라 면저항을 수 Ω/sq 에서 수 $\text{k}\Omega/\text{sq}$ 까지 조절할 수 있는 유연성을 제공한다. LIG의 전기전도도는 사용된 기판 소재에 따라 달라지나, 일반적으로 폴리이미드(PI) 기판 상에 형성된 LIG의 경우 약 10^3 S/m 수준으로 보고되고 있다. 이에 비해 graphite는 10^4 - 10^5 S/m [23], graphene은 10^6 - 10^8 S/m [24], 그리고 CNT는 10^5 - 10^7 S/m [25] 수준으로 알려져 있어, LIG는 상대적으로 낮은 전기전도도를 보인다. 열전도도의 경우에도 유사한 경향을 보이며, 케블라 섬유 위에 형성된 LIG는 약 18.6 W/m·K, PI 위에 형성된 LIG는 약 0.85 W/m·K로 보고된다. 반면, graphite는 150-500 W/m·K [26], graphene은 1000-5000 W/m·K [6], CNT는 100-3000 W/m·K [27]로 측정되어 LIG보다 현저히 높은 수치를 나타낸다. 이러한 차이는 레이저 유도 그래핀 공정 특성에 기인한다. LIG는 레이저 조사에 의해 국소적으로 형성되며, 표면에는 고품질 그래핀 구조가 존재하지만, 조사 깊이에 따라 전달되는 에너지 밀도가 감소하면서 구조적 불균일성이 증가하게 된다. 이러한 요인은 전체적인 전기적 및 열적 특성을 저하시키는 주된 원인으로 작용한다. 또한, 본 공정의 제조속도는 0.674 s/ mm^2 로 전기적 전도도가 가장 우수하게 도출되는 5 mm/s 기준 4 s/ mm^2 의 제조속도를 갖는다.

2.2.2 물리적 특성

레이저-유도 그래핀은 가공 과정에서 형성되는 다공성, 다층 sp^2 탄소 구조를 기반으로 다양한 물리적 장점을 제공한다. 특히 광흡수, 열전도, 유연성, 기계적 안정성 측면에서 단일층 그래핀이나 박막 탄소 재료에 비해 우수한 특성을 나타내며, 이는 여러 스마트 섬유 기능 구현에 핵심적인 역할을 한다. 이러한 구조는 열분해 중 발생하는 기체 팽창, 급속한 냉각, 비정질 탄소 시트의 적층에 의해 형성되며, 비표면적 증가를 통해 광 차폐와 에너지 저장 효율을 효과적으로 향상시킨다. 섬유상에서 형성된 LIG는 섬유 고유의 기계적 직조 구조를 유지하면서도 균일한 다공성 탄소 네트워크가 형성됨이 확인되었다. Fig. 4(a)의 SEM 분석 결과, 직조된 섬유의 물리적 특성이 잘 유지된 상태에서 섬유 표면을 따라 연속적인 LIG가 생성되었으며, 이로 인해 기계적 유연성과 통기성은 보존되면서 고품질 레이저-유도 그래핀 형성이 가능하였다.

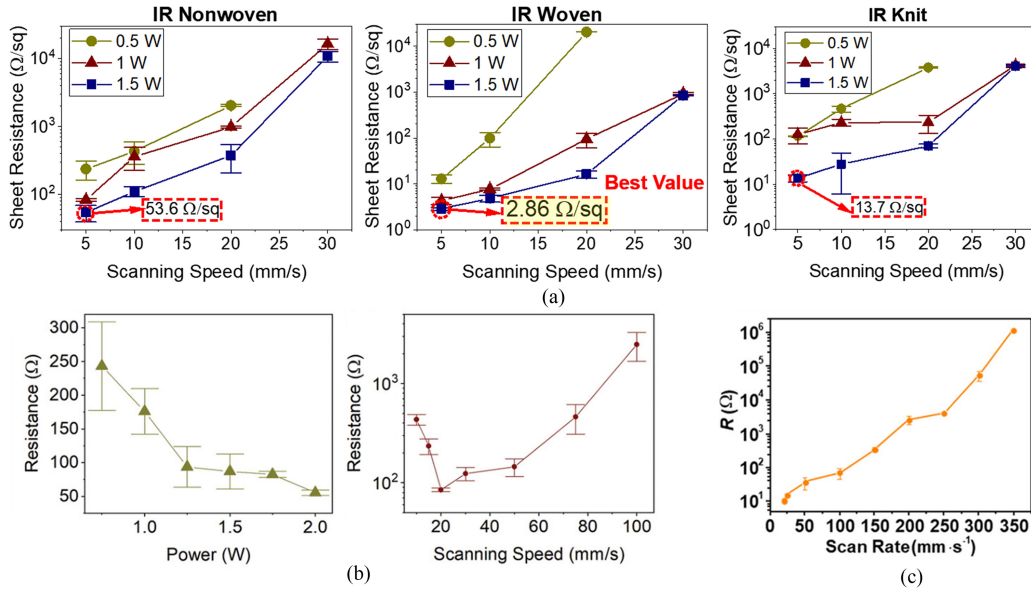


Fig. 3 Electrical properties of LIG formed on Kevlar textiles. (a) Sheet resistance of LIG on nonwoven, woven, and knit Kevlar with different laser power and scanning speed [18], (b) Resistance of LIG on Kevlar with respect to different processing parameters [28], (c) Resistance change of LIG on aramid textile depending on laser scanning speed [29] (Adapted from Ref. 18 with permission, and from Refs. 28, 29 on the basis of OA)

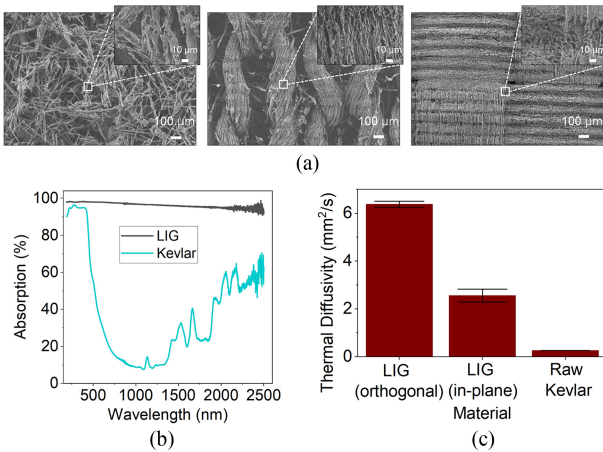


Fig. 4 Morphological and thermophysical characterization of textile-based LIG. (a) SEM images [18], (b) Optical absorption [28], and (c) Thermal diffusivity [28] (Adapted from Ref. 18 with permission, and from Ref. 28 on the basis of OA)

LIG의 열전달 특성은 기존 케블라 섬유에 비해 현저히 향상되었다. Fig. 4(c)의 레이저 플래시 분석(Laser Flash Analysis, LFA)을 통해 측정된 열확산도(Thermal Diffusivity)는 in-plane 방향에서 2.554 mm²/s, thickness 방향에서는 6.376 mm²/s로 확인되었으며, 이는 LIG 형성 전의 섬유의 열확산도(0.258 mm²/s) 대비 약 10-25배 이상 향상된 수치이다. 열확산도 수치를 기반으로 계산된 열전도도는 18.6 W/m·K로 측정되었으며, 이는 일반적인 Kevlar 섬유 (0.04 W/m·K)는 물론 PI 기반 LIG (0.85-13.05 W/m·K)를 상회하는 수치이다. 다층 sp² 구조, 기공 네트워크 내 확장된

열 전달 경로, 섬유 기관과의 연속적 결합 특성이 이러한 우수한 열전달 성능에 기여한다. 이러한 특성은 방열 섬유소재, 고온 대응 시스템, 체열 확산 기반의 웨어러블 온도 관리 등에 활용될 수 있다. 그리고, 복사율(Emissivity)도 0.95 이상을 유지함에 따라, 광 차폐 기능성 섬유, 복사 냉각 의류 등의 응용 가능성이 제시된다. 더불어, 광학적 흡수 특성 또한 우수한 수준을 보인다. 또한, Fig. 4(b)의 190-2500 nm 범위의 스펙트럼 분석 결과, 레이저 처리된 LIG 섬유의 평균 광흡수율은 97.57%로 측정되었으며, 이는 무처리 Kevlar의 37.95% 대비 약 2.5배 이상 향상된 수치이다. 이와 같은 흡광 특성은 LIG의 다공성 탄소 시트 내 다중 산란, 표면 거칠기, 미세 구조에 기인한다.

2.2.3 화학적 특성

레이저-유도 그래핀의 화학적 특성은 sp² 탄소 구조의 형성 정도, 결합, 층 수 등을 중심으로 평가되며, 라만 분광, XRD (X-ray Diffraction), XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy), FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) 분석을 통해 정량적으로 확인된다. 이와 같은 일련의 화학적 특성 분석 결과는 레이저 공정을 통해 섬유 표면 위에 고결정성, 다층성 sp² 탄소 구조가 안정적으로 형성될 수 있음을 보여준다.

먼저, Fig. 5(a)의 라만 분광에서는 D, G, 2D 피크가 뚜렷하게 나타났으며, 각각 결합 구조, sp² 탄소 간 평면 진동, 층 수 및 결정성의 지표로 해석된다. LIG의 I_D/I_G 비는 0.265-0.666, I_{2D}/I_G 비는 0.438-0.727 범위에서 측정되었고, 2D 피크의 FWHM은 약 47.5-52.2 cm⁻¹ 수준이다. 이러한 결과는 형성된 LIG가 결합이 적고 층 수가 적은 few-layer graphene 구조임을 시사하며, 섬유 조직에 관계없이 고품질의 그래핀화가 일어났음을 나타낸다.

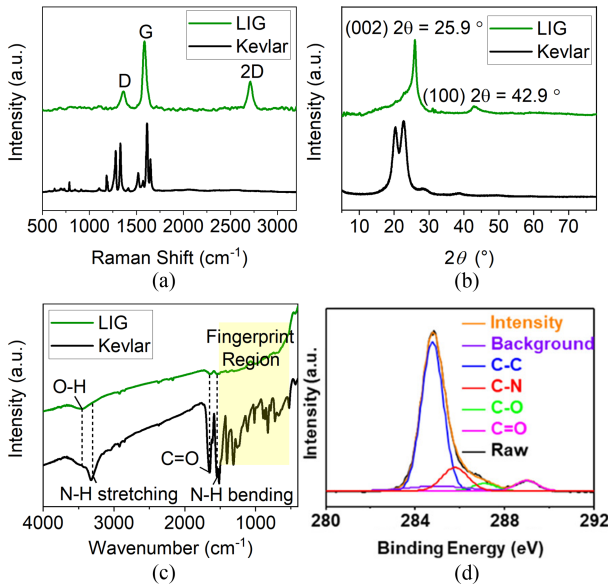


Fig. 5 Chemical characterization of textile-based LIG via Raman spectroscopy, XRD, FT-IR, and XPS [18,29] (Adapted from Ref. 18 with permission, and from Ref. 29 on the basis of OA)

그리고, XRD 결과에서는 레이저 가공 전 섬유 기판에서 $2\theta = 20.5^\circ, 22.8^\circ, 28.6^\circ$ 부근에 Kevlar 고유의 결정성 피크가 관찰되었으나 (Fig. 5(b)), 처리 이후에는 $2\theta = 25.9^\circ$ 및 42.9° 에서 흑연의 (002), (100) 면에 해당하는 피크가 형성되었다. 특히 (002) 피크로부터 도출된 층간 간격은 약 0.34 nm로, 이는 다층 그래핀 구조의 형성을 의미한다.

또한, Fig. 5(c)상의 결과와 같이 FT-IR 스펙트럼에서는 레이저 처리 이후 N-H, C=O, C-O 관련 진동 피크가 약화되거나 소실되었으며, 동시에 비정질 sp^2 탄소 구조와 관련된 광범위한 흡수 밴드가 형성되었다. 이러한 변화는 표면 기능기의 제거와 동시에 다공성 sp^2 네트워크의 형성을 반영한다. XPS 분석을 통해 C-C(sp^2), C-O, C=O, C-N 결합의 상대적 비율 변화를 확인할 수 있었으며, 레이저 조사 후에는 sp^2 탄소 비중이 증가하고 산소 및 질소계 결합의 강도는 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 5(d)). 이는 고분자 내 결합들의 열분해와 함께 전도성 탄소 구조가 형성되었음을 보여준다.

3. 스마트 섬유 응용

레이저-유도 그래핀은 섬유 기판 위에 직접 패터닝이 가능하며, 유연성과 전기적 성능을 동시에 확보할 수 있어 스마트 섬유 구현에 적합한 차세대 소재로 주목받고 있다. 특히, 구조적 특성이 상이한 nonwoven, knit, woven 섬유에 따라 신호 감지 방식, 전기화학적 반응 특성, 열적 안정성 등이 달라지므로, 해당 기질 특성에 최적화된 응용 설계가 필수적이다. 본 장에서는 섬유 기반 LIG 응용을 생체신호 측정, 가스 센서, 에너지 저장

소자, 열전도 제어, 광흡수 코팅, 우주환경용 스마트 섬유 등 여섯 가지 측면에서 섬유/LIG 기반 스마트 섬유 응용을 정리하였다.

3.1 생체신호 측정 센서

섬유/LIG 기반 센서는 인체의 움직임, 심박, 체온 등 다양한 생체신호를 전기적으로 감지할 수 있는 유연한 플랫폼으로 활용된다. 유연한 섬유 기판 위에 LIG를 직접 형성함으로써, 별도의 전극 부착이나 전사 공정 없이 착용 가능한 신호 감지 소자를 구현할 수 있으며, 직조 구조에 따라 물리적 감응 특성과 응용 적합성이 달라진다. 예를 들어, 넓은 변형 범위를 감지해야 하는 관절 동작 측정에는 신축성과 복원력이 우수한 knit 구조가 유리하며, 미세한 압력 변화나 음성·맥박 등 정밀한 감지가 요구되는 응용에는 민감도와 신호 민감도가 뛰어난 woven 구조가 보다 적합하다. 이와 같이 섬유 조직 구조에 따른 선택적 감응 특성을 바탕으로 LIG 기반 센서는 생체신호의 범위와 정밀도에 따라 맞춤형 구조 설계가 가능하다.

LIG 패턴이 적용된 strain 감지 소자는 주로 knit 구조 섬유에 구현된다. Knit 구조는 루프 기반의 높은 신축성을 지녀, 인장 범위가 넓고 반복 변형에 유리한 특성을 제공한다. 이에 따라 인체 관절, 팔꿈치, 손목 등의 strain 범위가 큰 움직임 감지에 적합하다. Fig. 6상에서 볼 수 있듯이 LIG strain 센서는 0-3% 구간에서 GF (Gauge Factor) 117.9를 기록하였고, 1200회 반복 인장 실험에서도 저항이 잘 유지되어 높은 내구성과 민감도를 동시에 확보하였다. 보다 짧은 strain 범위 내에서 높은 정밀도를 요구하는 굽힘(Bending) 기반 생체신호 측정에는 woven 섬유 구조가 적합하다. Woven 조직은 가로·세로 실의 교차로 인해 국소 변형이 집중되고, 균일한 응력 분포가 형성되어 소규모 진동(예: 성대 진동, 맥박 등)을 정밀하게 감지할 수 있다. 이 구조 기반의 LIG bending 센서는 0-0.5%의 작은 변형 구간에서 GF 230이라는 높은 감도 계수를 나타냈으며, 반복 구부림 실험에서도 우수한 재현성과 빠른 응답 시간(0.14 s)을 보여주었다. (Fig. 7) 실제로, 해당 센서는 반복적인 소리의 성대 진동을 명확히 분리하여 음성 기반 인터페이스 구현 가능성을 입증하였다.

한편, LIG 기반 온도 센서는 일반적으로 nonwoven 섬유 기판에 형성되며, 이는 인장에 덜 민감하고 구조 안정성이 높은 특성을 지닌다. Fig. 8에서 구현됐듯이, Kevlar 기반 LIG 온도 센서는 $-0.068\%/^{\circ}\text{C}$ ($30\text{-}60^{\circ}\text{C}$)의 TCR (Temperature Coefficient Of Resistance)을 기록하였으며, 이는 PI 기반 LIG ($-0.05\%/^{\circ}\text{C}$) 및 CVD 그래핀($-0.0017\%/^{\circ}\text{C}$)보다도 우수한 온도 민감도를 의미한다. $23\text{-}60^{\circ}\text{C}$ 구간에서의 반복 온도 변화에 대해 센서의 응답 및 회복 시간은 각각 24.2 s 및 27.5 s로 측정되었고, 10회 반복 사이클 내에서도 오차율은 3% 미만으로 유지되었다. 온도 센서의 10회 반복 사이클 테스트 이후에도 저항 변화가 거의 없이 성능이 잘 유지되는 것을 볼 수 있다. 이러한 온도 센서의 메커니즘은 그래핀의 반금속적 전자 구조와 열 전하 캐리어 증가, phonon 산란 감소 특성이 이러한 고성능을 유도하는 주된 원인으로 분석된다.

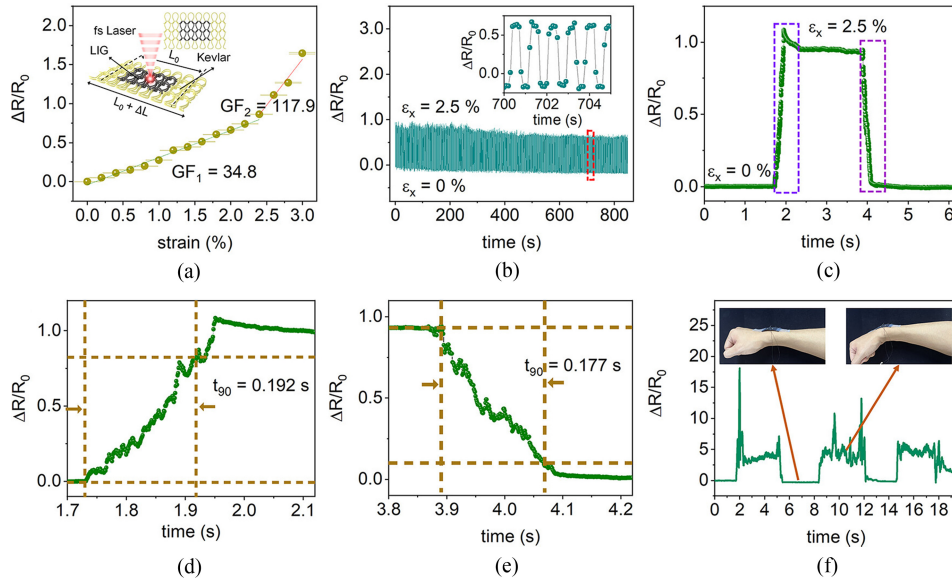


Fig. 6 Textile/LIG-based strain sensor [18] (Adapted from Ref. 18 with permission)

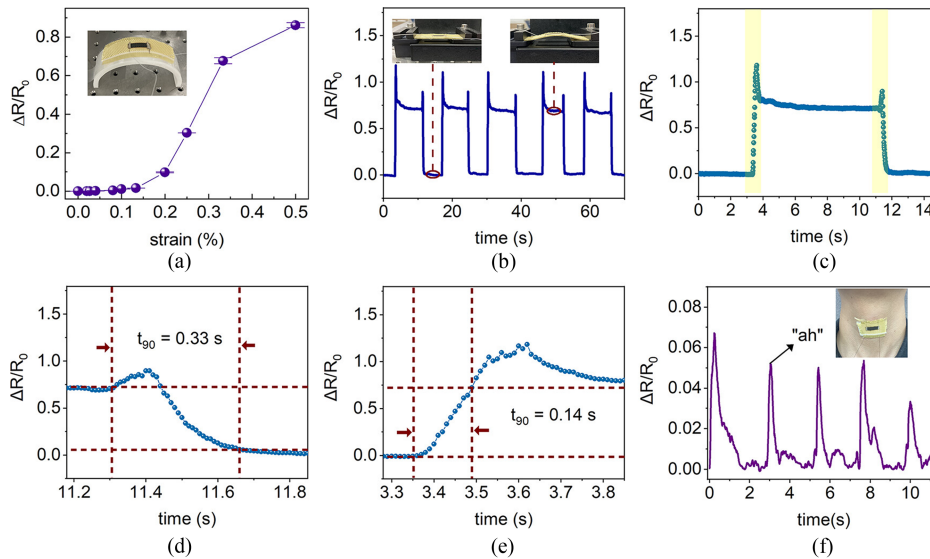


Fig. 7 Textile/LIG-based bending sensor. [18] (Adapted from Ref. 18 with permission)

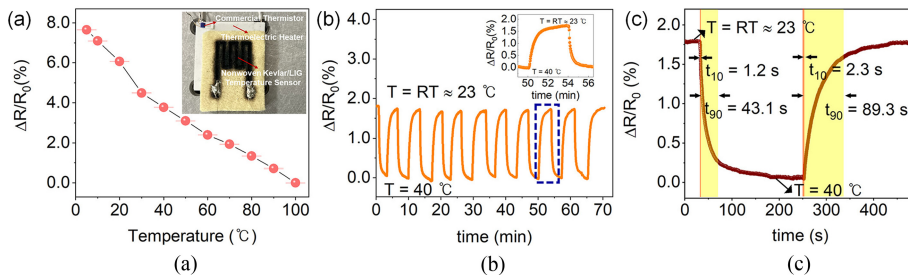


Fig. 8 Textile/LIG-based temperature sensor [18] (Adapted from Ref. 18 with permission)

3.2 가스센서

LIG 기반 섬유형 가스 센서는 유해가스 감지, 환경 모니터링, 지능형 소방복 등의 응용에서 높은 잠재력을 보인다. 특히 다공성

구조의 LIG는 높은 비표면적과 sp^2 결합 기반의 전자 이동을 바탕으로, 가스 분자의 흡착에 따른 저항 변화를 민감하게 반영할 수 있다. 전형적인 p형 반도체 특성을 가지는 LIG는

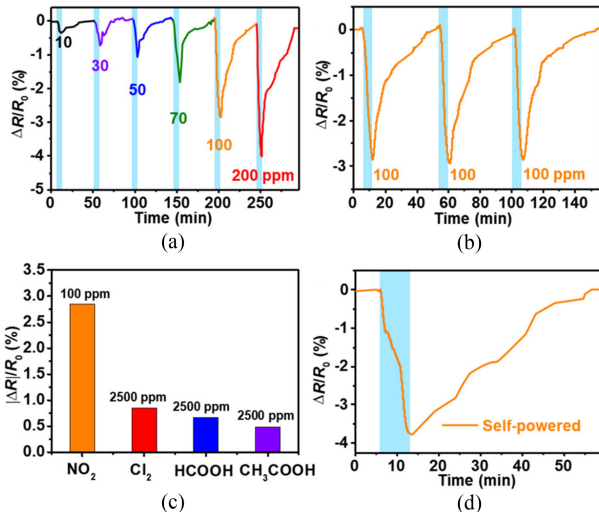


Fig. 9 Textile/LIG-based gas sensor [29] (Adapted from 29 on the basis of OA)

전자받개 성질이 강한 NO₂와 접촉 시 정공(Hole) 농도 증가로 인해 저항이 감소하는 특성을 보이며, 이는 감지 메커니즘의 핵심이 된다. 실제로 10-200 ppm 범위의 NO₂에 대해 저항 변화 값은 0.33%에서 4.02%까지 선형 증가하였으며, 100 ppm 조건에서 세 번의 반복 측정에서도 표준편차가 0.06%로 매우 낮게 유지되었다. (Figs. 9(a)-9(c)) 또한 간접 가스인 Cl₂, 메탄산, 아세트산에 대해서는 각각 0.85%, 0.67%, 0.49%의 반응만을 보여 높은 선택성이 입증되었다. 이는 NO₂의 강력한 전자담금 특성과 LIG의 정공 기반 전도 특성 간의 상호작용에 기인한다. 더불어, 이러한 섬유형 LIG 센서는 Zn-air 배터리와 결합해 자가 구동형 가스 감지 시스템으로도 구현되었다. 해당 구조는 외부 전원 없이도 200 ppm NO₂에 대해 뚜렷한 응답을 나타냈으며, 이는 웨어러블 디바이스 통합에 적합한 플랫폼의 가능성을 시사한다. 결과적으로, LIG 기반 섬유형 가스 센서는 고감도, 고선택성, 기계적 유연성이라는 요건을 충족하며, 향후 스마트 텍스타일 기반의 유해 환경 감시 및 실시간 독성가스 감지 기술로의 확장이 기대된다. 본 Zn-air 배터리는 30회의 충방전 사이클 동안 안정적인 전압 출력을 유지하였으며, 이는 저전력 센서 구동에 필요한 초기 성능 평가로 적합하다. 추후 레이저 유도 그래핀 기반 전극을 활용한 장기 안정성 향상에 대한 연구들이 보고되고 있으며, 최근 연구에서는 2000회 이상의 사이클에서도 안정적인 성능이 확보된 바 있다[30].

3.3 에너지 저장 소자

섬유 기반 위에 직접 형성된 LIG는 유연성과 높은 전기전도성을 동시에 갖춘 전극 소재로서, 웨어러블 에너지 저장 장치 구현에 적합하다. 특히, 다공성 sp² 탄소 구조에 기인한 높은 비표면적과 우수한 이온 접근성은 슈퍼커패시터(Supercapacitor) 및 Zn-air 배터리 등 다양한 에너지 저장 소자에서 뛰어난 전기화학적 성능을 제공한다.

Nonwoven Kevlar 섬유 위에 직접 패터닝된 LIG 기반의 유연 슈퍼커패시터는 우수한 유연성과 높은 전기화학적 성능을 동시에 나타내었다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 Kevlar/LIG 슈퍼커패시터는 CV 평가에서 5-100 mV/s의 스캔 속도에서 이상적인 형태의 곡선을 나타냈으며, 특히 5 mV/s 조건에서 최대 36.17 mF/cm²의 높은 비정전용량을 기록하였다. 또한, GCD 테스트에서는 20-100 μ A/cm²의 전류밀도 구간에서 안정적인 형태의 충/방전 특성을 보였으며, 20 μ A/cm² 조건에서 17.06 mF/cm²의 용량 값을 나타냈다. Nyquist plot을 통한 EIS 분석 결과 고주파수 영역에서의 ESR (Equivalent Series Resistance)은 288 Ω 으로 낮게 나타났고, 저주파수 영역에서 급격한 수직 형태를 유지해 우수한 충전 성능을 입증하였다. 아울러 6,000회 충/방전 사이클 후에도 초기 대비 96.3% 이상의 용량 유지율을 기록하여, 우수한 사이클 안정성을 나타냈다. 실제로, 이러한 Kevlar/LIG 슈퍼커패시터는 직렬로 연결하여 LED를 성공적으로 구동하는 실험을 통해 실용 가능성을 입증하였다.

한편, CO₂ 레이저로 제작된 Kevlar/LIG는 Zn-air 배터리 전극 소재로 활용되어 역시 뛰어난 성능이 보고된 바 있다(Fig. 11). 특히 LIG 표면에 Co₃O₄ 나노 구조를 전기도금 및 열처리를 통해 형성함으로써, 산소 발생 반응(OER) 및 산소 환원 반응(ORR) 활성화의 현저한 향상을 구현하였다. 이 전극을 이용한 Zn-air 배터리는 약 1.37 V의 개방전압을 기록했고, 배터리의 장기적 안정성을 평가하기 위한 cyclic GCD 테스트에서도 1.0 mA/cm² 조건 하에서 30회 충-방전 사이클 동안 안정적인 전기화학적 성능이 유지되었다. 특히 배터리의 기계적 유연성을 활용한 변형 테스트에서도 성능 저하 없이 LED를 점등하는 실험을 성공적으로 수행함으로써, 실제 웨어러블 응용 가능성을 명확히 입증하였다.

이러한 결과들은 Kevlar 섬유 기반의 LIG 전극이 슈퍼커패시터 및 Zn-air 배터리와 같은 다양한 웨어러블 에너지 저장 시스템에서 매우 우수한 성능을 제공하며, 향후 센서와 통합된 자가 구동형 스마트 섬유 시스템의 주요 전력 공급 장치로 활용 가능성을 보여준다.

3.4 열관리 소자

섬유 표면에 형성된 LIG는 기존 Kevlar 섬유 대비 열확산 및 열전도 특성이 현저히 향상된 것으로 나타났다. 레이저 플래시 분석(Laser Flash Analysis, LFA)을 통해 평가한 열확산도(Thermal Diffusivity)는 기존 Kevlar 섬유(0.258 mm²/s)에 비해 LIG가 두께(Thickness) 방향에서 6.376 mm²/s, 면(In-plane) 방향에서 2.554 mm²/s로 약 10-25배 높은 값을 기록하였다. 이를 바탕으로 계산된 LIG 섬유의 열전도도(Thermal Conductivity)는 18.6 W/m·K로 일반 Kevlar 섬유(0.04 W/m·K)는 물론, PI 기반의 기존 LIG(0.85-13.05 W/m·K)의 성능을 크게 상회하였다 (Fig. 12 (a)). 이러한 우수한 열확산 특성을 명확히 검증하기 위해 Figs. 12(b)-12(d)와 같이 Kevlar 섬유와 Kevlar/LIG 섬유를 80°C로 설정된 세라믹 히터 위에 놓고 표면 온도가 50°C까지 상승하는 데 걸린 시간을 비교 평가한 결과, Kevlar/LIG 섬유(15.0 s)는 기존 Kevlar 섬유(29.5 s)

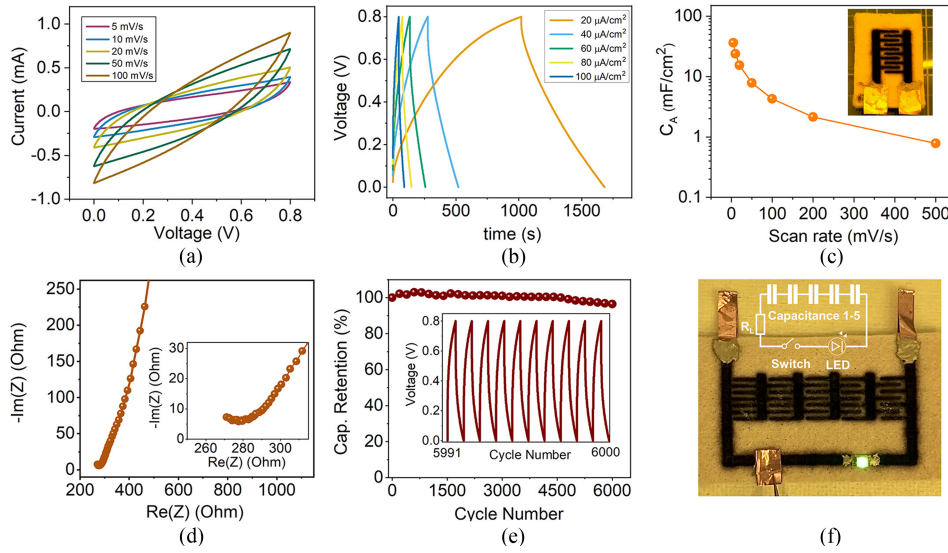


Fig. 10 Textile/LIG-based supercapacitor [18] (Adapted from Ref. 18 with permission)

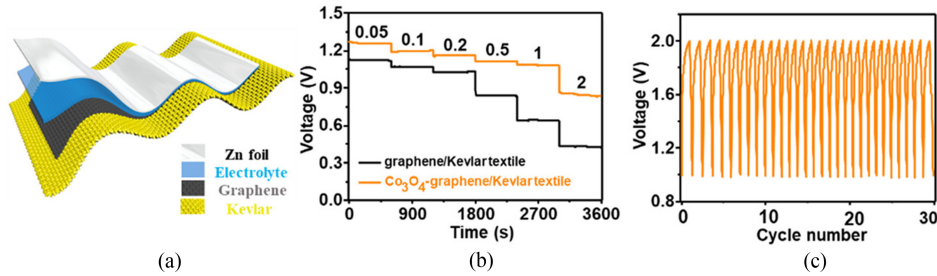


Fig. 11 Textile/LIG-based battery [29] (Adapted from 29 on the basis of OA)

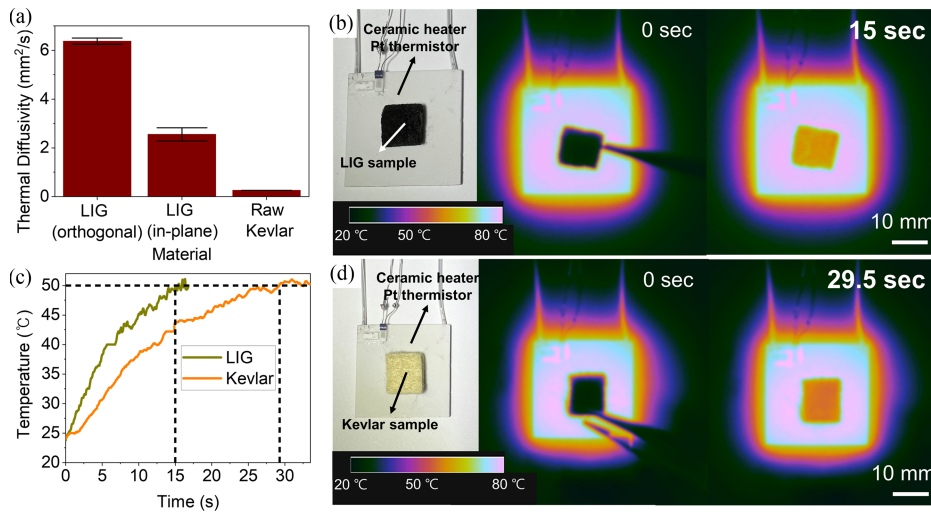


Fig. 12 Thermal properties and heat dissipation performance of textile/LIG [28] (Adapted from 28 on the basis of OA)

대비 약 50% 더 빠른 열확산 성능을 나타냈다.

추가적으로, LIG 섬유는 0.95-0.97 수준의 높은 복사율 (Emissivity)을 가지며, 이러한 특성은 효과적인 열 관리가 필수인 고성능 우주복, 우주 망원경과 같은 장치에 적합하다. 특히 우수한 열전도도와 열확산 특성은 우주 망원경 등 정밀 광학 장비에

서 발생하는 내부 열을 신속히 방출하여, 시스템 내의 열적 왜곡을 방지하고 장치의 온도 안정성을 확보하는 데 크게 기여할 수 있다. 이러한 결과는 LIG 기반 섬유 소재가 방열 섬유, 우주용 정밀 장비, 웨어러블 온도 관리 시스템 등 열관리가 필수적인 분야에 탁월한 응용 가능성을 제시한다.

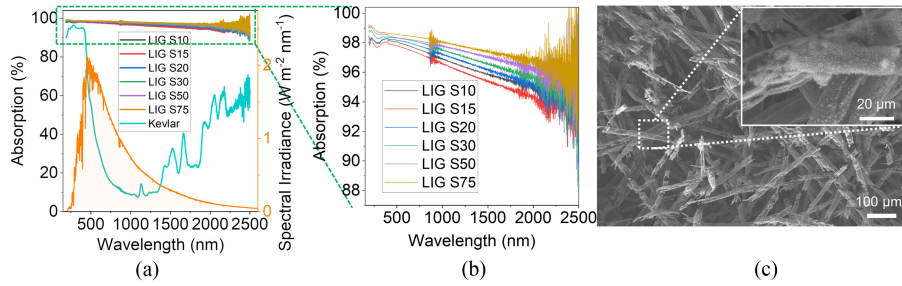


Fig. 13 Optical absorption characteristics of textile/LIG [28] (Adapted from 28 on the basis of OA)

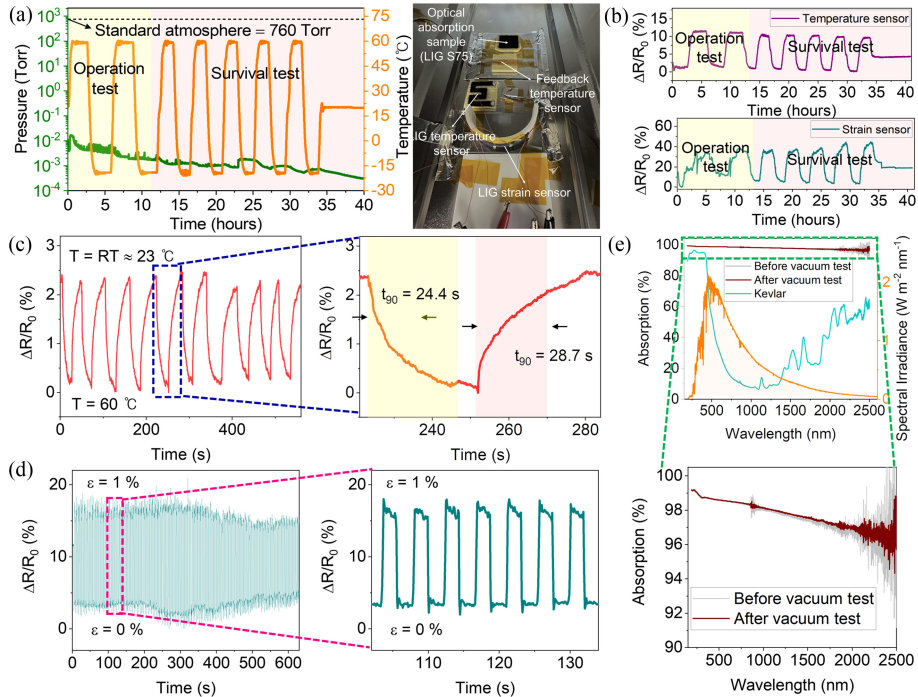


Fig. 14 Temperature vacuum test of textile/LIG [28] (Adapted from 28 on the basis of OA)

3.5 광흡수 섬유

레이저 유도 그래핀은 다공성 구조와 탄소 특유의 전자 구조로 인해 매우 높은 수준의 광흡수 특성을 가지며, 이는 기능성 섬유소재의 태양광 차폐 응용에 적합한 특성을 제공한다. 특히 펄초 레이저 기반의 직접 패터닝 공정은 섬유 위에 국소적으로 LIG를 정밀 형성할 수 있어, 별도의 후처리 없이 고흡광 특성의 섬유 기반 코팅을 구현할 수 있다. 흡수 스펙트럼 측정 결과에 따르면, 190-2500 nm 범위의 광 전체 파장대역에서 LIG 섬유는 평균 97.57%의 광흡수율을 나타냈으며, 이는 Kevlar 섬유 자체의 흡수율(37.95%)에 비해 2.5배 이상 향상된 수치이다 (Figs. 13(a)-13(b)). 이와 같은 높은 흡수 특성은 레이저 가공을 통해 형성된 3차원 다공성 구조와 숲과 같은(forest-like) 섬유 기공 네트워크 내에서의 다중 산란 효과에 기인한다. 실제로 Fig. 13(c)와 같이 SEM 관찰 결과, 섬유 간 교차 지점마다 다층 탄소 구조가 입체적으로 형성되었으며, 구조의 효과로 인해 광의 반사 및 산란 경로를 증가시키는 효과를 유도한 것으로 보인다. 이와 같은 결과는 LIG 기반 섬유 코팅이 고효율 광원, 우주

환경, 또는 야외 환경에서도 안정적으로 고흡광 특성을 유지할 수 있음을 보여주며, 차세대 태양광 억제용 코팅 섬유소재로의 응용 가능성을 보여준다.

3.6 우주환경용 스마트 섬유

레이저-유도 그래핀 기반 섬유 소재는 우주 내복(IVA) 환경에서도 안정적인 생체신호 감지, 광 흡수, 열 관리 기능을 유지해야 하며, 이에 따라 열-진공 환경에서의 성능 안정성 검증이 필수적이다. Figs. 14(a)-14(e) 와 같이 -20부터 60°C의 온도 범위와 약 10⁻³ Torr 수준의 진공 조건에서 수행된 테스트 결과, LIG 섬유 센서들은 전기적 신호 안정성과 구조적 일관성을 모두 유지하였다. 온도 센서는 -20부터 60°C 사이의 환경에서도 정확한 저항 변화 특성을 유지하였으며, -0.068%/°C의 TCR 값은 열-진공 테스트 이후에도 잘 유지되었다. 반복 테스트에서도 저항 값의 변화가 1% 미만으로 유지되었고, 반응/복원 시간도 각각 3.48% 이내로 감소하여 신뢰성을 입증하였다. Strain 센서 역시 극한 온도 사이클 및 진공 하에서 100회 이상 반복 인장

(1.0%) 테스트를 통해 구조적 안정성과 전기적 응답성을 모두 유지하였으며, 고유한 크랙 전파 메커니즘과 터널링 효과에 기반해 우주복 내 인체 움직임 추적용으로 적합함을 보였다. 또한, 광흡수 코팅 기능 역시 유지되었다. 190-2500 nm 범위의 스펙트럼에서 97.7%의 흡수율을 유지하며, 이는 우주망원경 내부에서 stray light 차단을 위한 광흡수 baffle 구조로의 응용 가능성을 보여준다. LIG의 다공성 구조는 다중 산란과 열전도 경로 확장을 동시에 가능하게 하며, 높은 복사율(0.95 이상)과 더불어 복사 및 전도 중심의 열관리 소자로 작용할 수 있다. 이러한 결과는 LIG 섬유 기반 소자들이 단순히 지상 기반 웨어러블 기술을 넘어서, 우주환경에서도 기능을 유지하는 통합형 생체 모니터링과 광흡수 및 열관리 모듈로 사용될 수 있음을 보여준다. 우주복 내부에 직접 삽입 가능한 센서 및 코팅 소재로서, 향후 우주 생체계측 및 광학 시스템 안정화에 실질적으로 기여할 수 있는 가능성을 제시한다.

4. 결론

레이저-유도 그래핀(LIG)은 섬유 기반 기판 위에 전도성 구조를 형성할 수 있는 단일 공정 기반 기술로, 스마트 섬유 구현에 최적화된 공정 유연성과 기능 통합성을 제공한다. 특히 펄스 레이저를 이용한 고해상도 직접 묘화 기술은 고품질의 그래핀 패턴 형성이 가능하며, 다양한 직조 구조에서도 구조 손상 없이 우수한 전기적·물리적 특성이 확보됨이 확인되었다. 본 리뷰에서는 섬유 위 LIG 형성 메커니즘, 공정 변수에 따른 물성 변화, 그리고 전기·열·광·화학 특성을 종합적으로 정리하였으며, 이를 기반으로 한 섬유형 센서, 에너지 소자, 열전 응용, 광흡수 응용, 우주 환경 적용 플랫폼까지의 응용 사례를 고찰하였다. 특히 LIG의 다공성 구조와 고전도성은 다양한 신호 감지 및 에너지 저장 응용에 효과적으로 활용될 수 있으며, 섬유 구조에 따라 응답 특성을 정밀하게 제어할 수 있다는 점에서 웨어러블 시스템 구현에 있어 핵심적인 재료 기반으로 평가된다. 향후 연구에서는 레이저 파라미터 정밀 제어 기반의 기능 분할 패터닝, 다중 센서 통합 등을 기반으로 LIG 스마트 섬유는 차세대 핵심 기술로 발전할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) provided by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (No. MAFRA: RS-2024-00401642), the R&D Program for Forest Science Technology (No. RS-2023-KF002530) provided by Korea Forest Service (Korea Forestry Promotion Institute), National Research Foundation of the Republic of Korea (Nos. NRF-2020R1A2C210233813, RS-2024-00401786).

REFERENCES

- Zeng, W., Shu, L., Li, Q., Chen, S., Wang, F., Tao, X. M., (2014), Fiber-based wearable electronics: A review of materials, fabrication, devices, and applications, *Advanced Materials*, 26(31), 5310-5336.
- Kubicek, J., Fiedorova, K., Vilimek, D., Cerny, M., Penhaker, M., Janura, M., Rosicky, J., (2020), Recent trends, construction, and applications of smart textiles and clothing for monitoring of health activity: A comprehensive multidisciplinary review, *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 15, 36-60.
- Syduzzaman, M., Patwary, S. U., Farhana, K., Ahmed, S., (2015), Smart textiles and nano-technology: A general overview, *J. Text. Sci. Eng*, 5(1), 1-7.
- Mehmood, A., Mubarak, N., Khalid, M., Walvekar, R., Abdullah, E., Siddiqui, M. T. H., Baloch, H. A., Nizamuddin, S., Mazari, S., (2020), Graphene based nanomaterials for strain sensor application—a review, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3), 103743.
- Novoselov, K. S., Colombo, L., Gellert, P., Schwab, M., Kim, K., (2012), A roadmap for graphene, *Nature*, 490(7419), 192-200.
- Whitener Jr, K. E., Sheehan, P. E., (2014), Graphene synthesis, *Diamond and Related Materials*, 46, 25-34.
- Lin, J., Peng, Z., Liu, Y., Ruiz-Zepeda, F., Ye, R., Samuel, E. L., Yacaman, M. J., Yakobson, B. I., Tour, J. M., (2014), Laser-induced porous graphene films from commercial polymers, *Nature Communications*, 5(1), 5714.
- Chyan, Y., Ye, R., Li, Y., Singh, S. P., Arnusch, C. J., Tour, J. M., (2018), Laser-induced graphene by multiple lasing: Toward electronics on cloth, paper, and food, *ACS Nano*, 12(3), 2176-2183.
- Ye, R., James, D. K., Tour, J. M., (2018), Laser-induced graphene, *Accounts of Chemical Research*, 51(7), 1609-1620.
- Ye, R., James, D. K., Tour, J. M., (2019), Laser-induced graphene: From discovery to translation, *Advanced Materials*, 31(1), 1803621.
- Munoz, R., Gómez-Aleixandre, C., (2013), Review of cvd synthesis of graphene, *Chemical Vapor Deposition*, 19(10-11-12), 297-322.
- Shi, Q., Sun, J., Hou, C., Li, Y., Zhang, Q., Wang, H., (2019), Advanced functional fiber and smart textile, *Advanced Fiber Materials*, 1, 3-31.
- Gattass, R. R., Mazur, E., (2008), Femtosecond laser micromachining in transparent materials, *Nature Photonics*, 2(4), 219-225.
- Kerse, C., Kalaycıoğlu, H., Elahi, P., Çetin, B., Kesim, D. K., Akçalan, Ö., Yavaş, S., Aşık, M. D., Öktem, B., Hoogland, H., (2016), Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses, *Nature*, 537(7618), 84-88.

15. Le, T. S. D., Phan, H. P., Kwon, S., Park, S., Jung, Y., Min, J., Chun, B. J., Yoon, H., Ko, S. H., Kim, S. W., (2022), Recent advances in laser-induced graphene: Mechanism, fabrication, properties, and applications in flexible electronics, *Advanced Functional Materials*, 32(48), 2205158.
16. Dong, Y., Rismiller, S. C., Lin, J., (2016), Molecular dynamic simulation of layered graphene clusters formation from polyimides under extreme conditions, *Carbon*, 104, 47-55.
17. Vashisth, A., Kowalik, M., Geringer, J. C., Ashraf, C., Van Duin, A. C., Green, M. J., (2020), Reaxff simulations of laser-induced graphene (lig) formation for multifunctional polymer nanocomposites, *ACS Applied Nano Materials*, 3(2), 1881-1890.
18. Yang, D., Nam, H. K., Le, T.-S. D., Yeo, J., Lee, Y., Kim, Y.-R., Kim, S.-W., Choi, H.-J., Shim, H. C., Ryu, S., (2023), Multimodal e-textile enabled by one-step maskless patterning of femtosecond-laser-induced graphene on nonwoven, knit, and woven textiles, *ACS Nano*, 17(19), 18893-18904.
19. Chen, Y., Long, J., Zhou, S., Shi, D., Huang, Y., Chen, X., Gao, J., Zhao, N., Wong, C. P., (2019), Uv laser-induced polyimide-to-graphene conversion: Modeling, fabrication, and application, *Small Methods*, 3(10), 1900208.
20. Kondo, Y., Terakawa, M., (2025), High-resolution patterning of graphitic carbon structures in laser carbonization of cellulose nanofiber film, *Laser-based Micro-and Nanoprocessing XIX*, PC1335100.
21. Stanford, M. G., Zhang, C., Fowlkes, J. D., Hoffman, A., Ivanov, I. N., Rack, P. D., Tour, J. M., (2020), High-resolution laser-induced graphene. Flexible electronics beyond the visible limit, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(9), 10902-10907.
22. Beckham, J. L., Li, J. T., Stanford, M. G., Chen, W., McHugh, E. A., Advincula, P. A., Wyss, K. M., Chyan, Y., Boldman, W. L., Rack, P. D., (2021), High-resolution laser-induced graphene from photoresist, *ACS Nano*, 15(5), 8976-8983.
23. Sengupta, R., Bhattacharya, M., Bandyopadhyay, S., Bhowmick, A. K., (2011), A review on the mechanical and electrical properties of graphite and modified graphite reinforced polymer composites, *Progress in Polymer Science*, 36(5), 638-670.
24. Zhang, Y., Zhang, L., Zhou, C., (2013), Review of chemical vapor deposition of graphene and related applications, *Accounts of chemical research*, 46(10), 2329-2339.
25. Popov, V. N., (2004), Carbon nanotubes: Properties and application, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 43(3), 61-102.
26. Chung, D., (2002), Review graphite, *Journal of Materials Science*, 37, 1475-1489.
27. Akoshima, M., Hata, K., Futaba, D. N., Mizuno, K., Baba, T., Yumura, M., (2009), Thermal diffusivity of single-walled carbon nanotube forest measured by laser flash method, *Japanese Journal of Applied Physics*, 48(5S2), 05EC07.
28. Yang, D., Nam, H. K., Lee, Y., Kwon, S., Lee, J., Yoon, H., Kim, Y. J., (2025), Laser-induced graphene smart textiles for future space suits and telescopes, *Advanced Functional Materials*, 35(1), 2411257.
29. Wang, H., Wang, H., Wang, Y., Su, X., Wang, C., Zhang, M., Jian, M., Xia, K., Liang, X., Lu, H., (2020), Laser writing of janus graphene/kevlar textile for intelligent protective clothing, *ACS Nano*, 14(3), 3219-3226.
30. Ren, M., Zhang, J., Tour, J. M., (2019), Laser-induced graphene hybrid catalysts for rechargeable zn-air batteries, *ACS Applied Energy Materials*, 2(2), 1460-1468.



Dongwook Yang

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST). His research interest is femtosecond laser processing, direct laser writing of flexible/stretchable electronics/energy storage, and laser-induced graphene (LIG).

E-mail: dw.yang@kaist.ac.kr



Young-Jin Kim

Associate professor in the Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST). His research interest is ultrafast photonics and its applications in high-precision metrology, surface topography, bio-medical diagnosis, space LIDARs and nano/micro material processing.

E-mail: yj.kim@kaist.ac.kr