

레이저 직접 패터닝에 의한 폴리이미드의 표면 특성 제어

Tailoring Surface Properties of Polyimides by Laser Direct Patterning

*Corresponding author

Ki-Ho Nam

(knam@knu.ac.kr)

황윤찬, 손정민, 박재희, 남기호*

경북대학교 섬유시스템공학과

Yun Chan Hwang, Jeong Min Sohn, Jae Hui Park, and Ki-Ho Nam*

Department of Textile System Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

Received_June 12, 2023

Revised_June 19, 2023

Accepted_June 23, 2023

Abstract In this study, a comprehensive investigation was conducted on the morphological and property changes of laser-induced nanocarbon (LINC) as a function of laser process parameters. LINC was formed on the surfaces of polyimide films with different backbone structures under various process conditions, including laser power, scan speed, and resolution. Three different forms of LINC electrodes (i.e., continuous 3D porous graphene, wooly nanocarbon fibers, line cut) were formed depending on the laser power and scan speed. Furthermore, heteroatom doping induced from the chemical structure of the polyimide during laser patterning was found to be effective in modifying the electrical properties of LINC electrodes. The LINC surfaces exhibited different microstructures depending on the laser beam resolution under constant laser power and scan speed, allowing for controllable surface wettability. The correlation between the chemical structure of the polymer substrate, laser process parameters, and carbonized surface properties in this study is expected to be utilized as fundamental understanding for the manufacturing of next-generation carbon-based electronic devices.

Textile Coloration and Finishing

TCF 35-2/2023-06/121-127

© 2023 The Korean Society of Dyers and Finishers

Keywords polyimide, laser-induced nanocarbon, laser parameters, surface wettability, electrical resistivity

1. 서 론

탄소 원자가 육각형 벌집 구조로 배열된 2차원 평면형 구조를 이루며 원자 단위의 두께를 갖는 그래핀(graphene)은 뛰어난 전기 전도성, 기계적 강도, 광학적 특성으로 인해 다양한 분야에서 응용을 위한 연구가 활발히 진행 중이다¹⁾. 특히 그래핀은 종래의 재료와 비교하여 매우 뛰어난 전하 이동도를 보이기 때문에 차세대 전자 소자에 적용될 것으로 기대되고 있다.

레이저 직접 패터닝(laser direct patterning)에 의한 그래핀 제조기술은 현재 전 세계적으로 초기 단계로 미국 Rice 대학의

Jame M. Tour 교수 그룹에 의해 주도적으로 연구가 진행되고 있다²⁾. 이 기술은 대표적인 고온 내열성의 상용 고분자인 폴리이미드(polyimide: PI) 필름 표면에 레이저 빔을 조사하여 원하는 패턴 모양으로 3차원 다공성 그래핀을 형성하는 기술이다.

따라서 폴리이미드 필름 표면에 일정 에너지 이상의 레이저를 조사하면 국부적으로 높은 온도가 발생하여 폴리이미드 필름의 화학적 결합(C-O, C=O, C-N)이 끊어지고, 마이크로 스케일에서 균일한 광열·광화학 탄화를 가능케 하기에, 고전도성의 탄소소재로 전환된다³⁾. 3차원 다공성 그래핀에서 나노섬유 구조에 이르기까지 다양한 탄소화된 형태를 생성할 수 있는 레이저 패터닝 기술은 슈퍼커패시터, 트랜지스터, 센서, 배터리

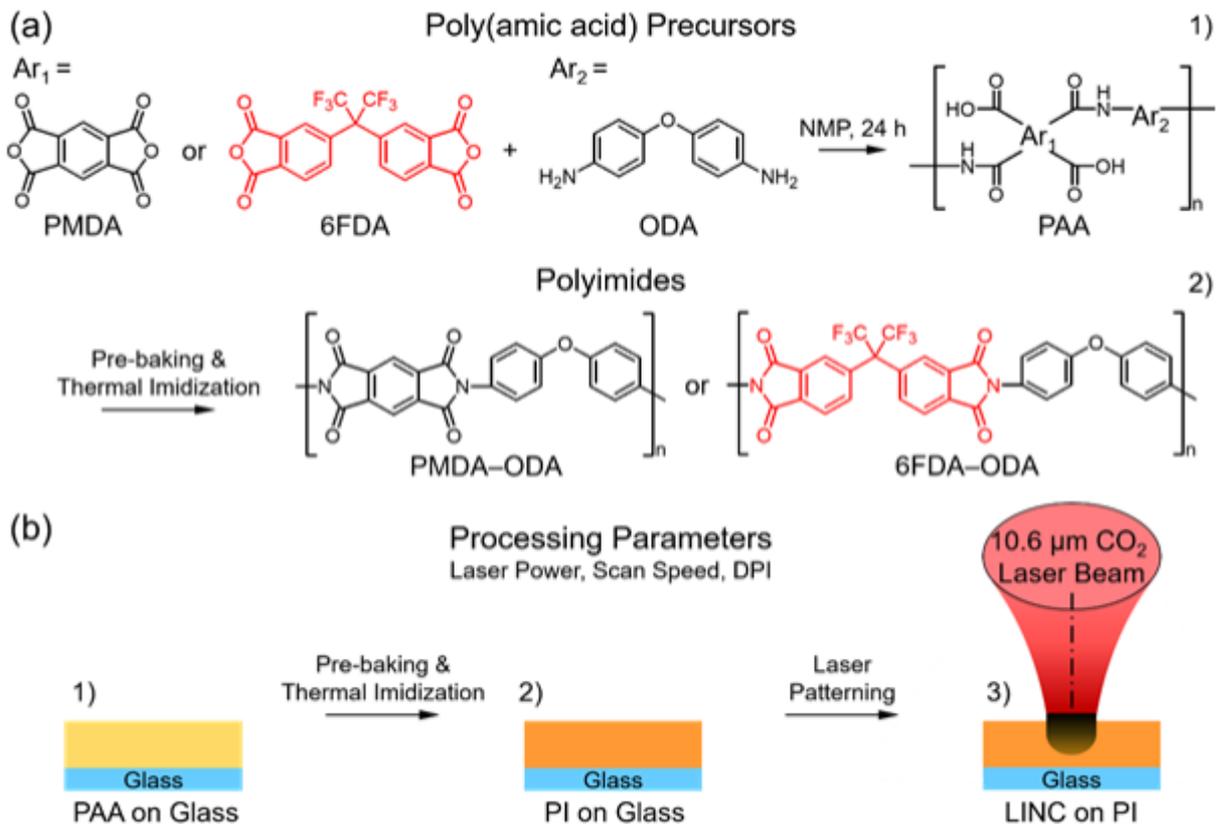


Figure 1. Synthesis of PIs from ODA diamine with various tetracarboxylic dianhydrides.

전극, 태양 전지, 전열 히터 및 수지 정화 등 많은 응용 영역을 확장하고 있으며, 이를 통한 다양한 성능 개선을 위한 기반 기술로 자리매김하고 있다⁴⁾.

그러나 폴리이미드 표면에 레이저 유도 그래핀 전극을 패터닝 한 후 제작된 소자를 물리적으로 구부릴 때 전극이 쉽게 파손되거나 훼손되는 현상이 발생할 수 있으며, 레이저 조사 시 폴리이미드 필름 표면에 순간적으로 발생하는 높은 온도에 의해 필름이 변형되어 작은 물리적 변화와 충격에도 전극이 쉽게 박리되는 기계적 안정성 문제가 보고된 바 있다⁵⁾. 이처럼 레이저 공정 변인인 레이저 출력, 스캔 속도, 해상도, 주파수 등은 그래핀의 형태, 구조, 물성에 직접적인 영향을 미친다. 예를 들어, 레이저 플루언스가 증가하면 그래핀의 결정성장 속도가 변화하거나, 결함 형성이 증가할 수 있다⁶⁾.

따라서 고분자 기판 소재의 화학 구조와 레이저 공정 변인에 따른 광열·광화학 탄화 거동과 형성되는 그래핀의 구조-물성 간 상관관계에 대한 이해가 필요하다.

본 연구에서는 최근 레이저 유도 그래핀 패터닝에 주로 사용되는 CO₂ 레이저를 이용하여 서로 다른 주쇄 구조를 갖는 폴리이미드 필름을 기판소재로 레이저 공정 변인에 따른 탄소 구조 발달 및 표면 물성 변화에 대하여 고찰하였다. 이를 통해 다양한 첨단 고부가가치 산업(전자재료, 우주항공, 청정 환경 및 에너지 분리막, 바이오메디컬 디바이스, 유연 로봇 등)에서

의 핵심소재 제조기술로서 기초 결과로 활용될 것을 기대한다.

2. 실험

2.1 시료 및 재료

본 연구에서는 TCI사(Tokyo, Japan)로부터 단량체인 4,4'-oxydianiline(ODA), pyromellitic Dianhydride(PMDA), 4,4'-(hexafluoroisopropylidene)diphthalic Anhydride(6FDA)를 구입하여 사용하였으며, 유기 용매인 N-methyl-2-pyrrolidone (NMP)는 덕산약품공업(Ansan, Korea)으로부터 구입하여 사용하였다.

2.2 폴리아믹산 합성 및 폴리이미드 필름 제조

본 연구의 폴리이미드는 폴리아믹산(poly(amic acid): PAA)을 경유하는 2단계 합성법으로 제조되었으며, 합성 과정을 Figure 1(a)에 도시하였다.

첫 번째 단계는 단량체의 친핵성 치환반응에 의한 단계중합 반응으로 폴리아믹산이 형성되는 단계이고, 두 번째 단계는 합성된 폴리아믹산을 열적 이미드화법을 통해 탈수 및 폐환 반응

을 거쳐 최종 폴리이미드를 제조하는 과정에 해당한다. 단량체 별 폴리아믹산의 합성 및 폴리이미드 필름 제조는 디아민과 산 이무수물을 1:1 몰비율로 동일하게 진행하였으므로, 6FDA와 ODA를 이용한 합성 및 필름 제조 방법만을 구체적으로 예를 들어 설명하겠다.

초기 반응 물질인 ODA(3 mmol)를 25 mL 삼각 플라스크에 넣고 NMP에 5분간 상온에서 교반시켜 완전히 용해시켰다. 제조된 혼합용액에 동일한 몰수의 6FDA(3 mmol)를 서서히 첨가한 후, 질소 분위기하에서 24시간 동안 교반하여 고점도의 폴리아믹산을 합성하였다. 이때, 캐스팅이 용이하도록 용액 중 고형분이 농도는 약 15 wt%로 조절하였다. 합성된 폴리아믹산 전구체를 코팅기를 이용하여 유리 기판에 고르게 캐스팅한 후, 50 °C 진공 하에서 2시간 동안 예비 열처리(pre-baking)를 진행하였다. 이후 90 °C에서 1시간, 150 °C에서 1시간, 200 °C와 250 °C에서 각 30분간 단계별 열처리를 실시하였다. 제조된 폴리이미드 필름은 증류수에 담가 유리 기판에서 박리시키고 70 °C에서 6시간 동안 건조하였다.

2.3 레이저 유도에 의한 탄소 전극 합성

본 실험에 사용된 레이저는 FLS사의 FSL Pro-Series CO₂ 레이저 조사 장비($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$)를 사용하였으며, 실험 과정은 Figure 1(b)에 도시하였다. 레이저 빔을 스캔하기 위하여 X-Y-Z 3축으로 이동 가능한 스테이지와 컨트롤러를 이용하였다. 먼저 레이저 조사 장비에 폴리이미드 필름을 로딩(loading)하고 레이저를 조사하여 탄소 전극을 형성하였다. 이때 레이저 출력(power; P), 레이저 스캔 속도(speed; S), 레이저 빔 해상도(dot per inch; dpi)의 주요 레이저 공정 변인을 조절하여 패턴화된 탄소 전극의 형태학적 구조를 제어하였다.

3차원 다공성 그래핀을 포함하여 레이저 공정 변인에 따라

서로 다른 나노·메조 스케일 형태를 갖는 모든 레이저 패턴화된 탄소 구조를 총칭하기 위해 본 연구에서는 레이저 유도 나노카본(laser-induced nanocarbon; LINC)이라 정의하였다.

2.4 특성 분석

푸리에 변환 적외선(Fourier transform infrared; FTIR) 스펙트럼은 Thermo Fisher Scientific사(USA)의 PerkinElmer 적외선 분광광도계를 이용하여 4,000 ~ 400 cm⁻¹ 범위에서 측정하였다.

레이저 유도 나노카본 전극의 저항은 PM8232 디지털 멀티미터(digital multimeter)를 사용하여 측정하였다. 단일 선 전극의 전기 저항값(R)은 저항률, 길이, 선포 세 가지 요인에 따라 달라지므로, 단일 선 전극의 저항을 계산하기 위해서 측정된 저항(R)을 전극 선 길이(L)로 나누어 길이에 의존하지 않는 저항 측정값을 얻을 수 있으며, 이는 다음의 식(1)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{W \times t} = R_s \frac{L}{W} \quad (1)$$

where,

ρ : Material resistivity ($\Omega \cdot \text{m}$)

R_s : Electrode resistivity ($\Omega \cdot \text{sq}^{-1}$)

t : Thickness of electrode

표면 습윤성은 SEO사의 PHX 300 접촉각 측정기를 이용하여 평가하였다.

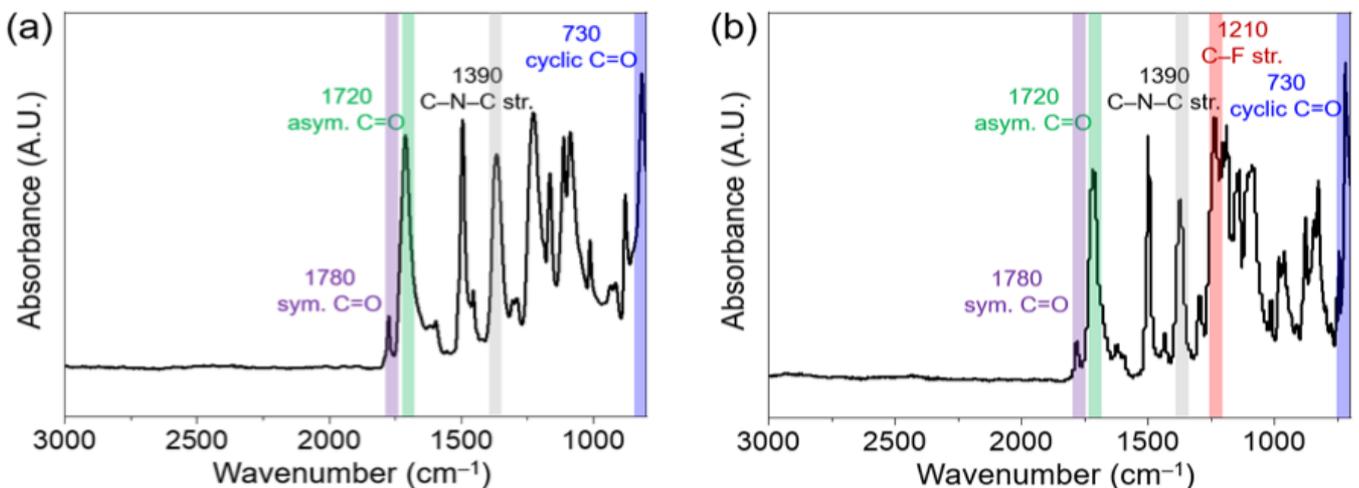


Figure 2. FTIR spectra of (a) PMDA-ODA and (b) 6FDA-ODA films.

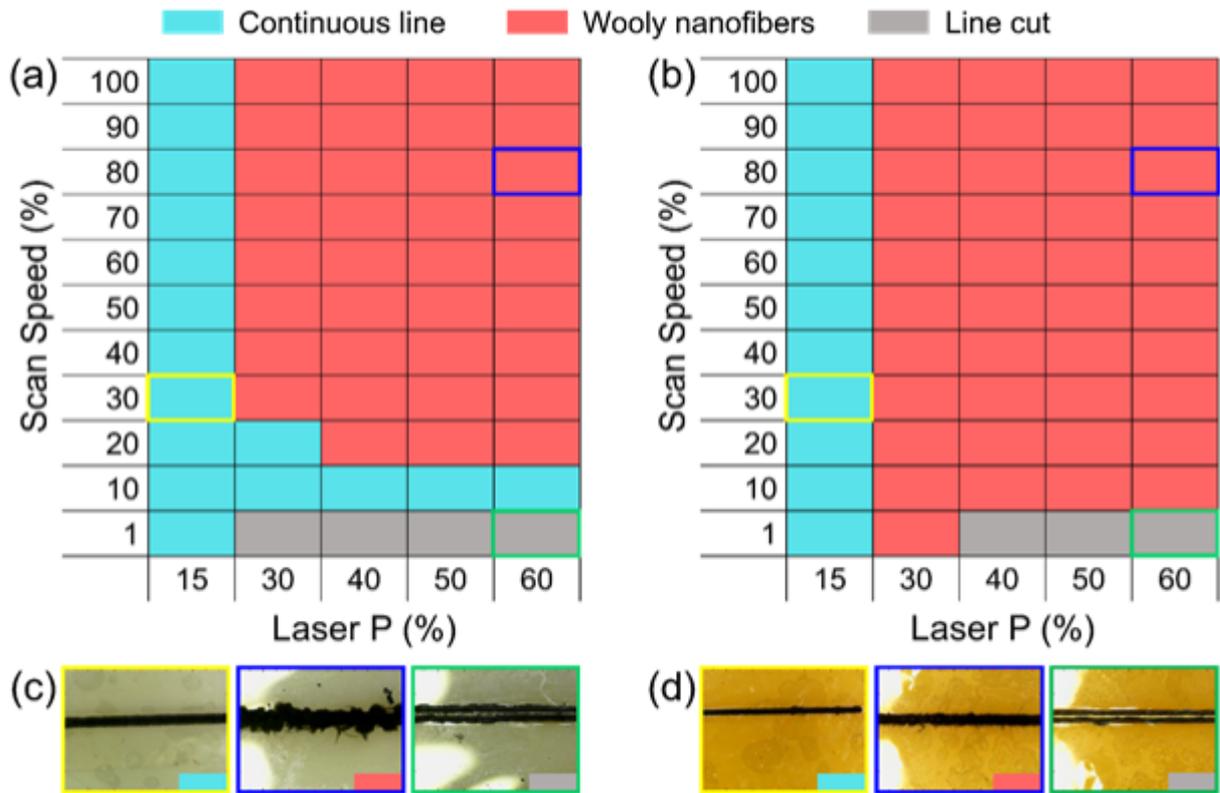


Figure 3. Correlation map of laser power with scan speed to achieve laser carbonization for (a) PMDA-ODA and (b) 6FDA-ODA films. Representative laser-scribed LINC line morphologies on (a) PMDA-ODA and (b) 6FDA-ODA films at different laser processing conditions.

3. 결과 및 고찰

3.1 푸리에 변환 적외선 분광 분석

열적 이미드화법에 의해 제조된 PMDA-ODA와 6FDA-ODA 폴리이미드 필름의 화학적 구조 분석은 FT-IR로 확인하였다. Figure 2에 의하면, 모든 폴리이미드 필름은 공통적으로 1780 cm^{-1} 과 1720 cm^{-1} 에서 이미드 주사슬 내 asymmetric과 symmetric C=O stretching, 1390 cm^{-1} 에서 C-N-C stretching 및 730 cm^{-1} 에서 cyclic C=O 흡수 피크가 관찰되었다^{7,8)}. 1650 cm^{-1} 에서 폴리아믹산 전구체 특성 피크가 존재하지 않음으로 모든 필름이 완전한 이미드화가 진행됨을 알 수 있었다. 또한 Figure 2(b)를 보면 1210 cm^{-1} 에서 트리플루오로메틸 치환체의 C-F stretching 흡수 피크가 관찰되었다^{3,9)}.

3.2 레이저 공정 변인과 LINC 구조 발달 관계

Figure 3(a)~(b)는 레이저 공정 변인으로써 레이저 출력(P) 및 스캔 속도(S)에 대해 폴리이미드 필름 표면에 생성된 나노카본의 형태학적 구조 간 상관관계를 나타낸다. 레이저 출력은

15~60%, 스캔 속도는 1~100%의 범위에서 조절되었으며, 이에 따른 3가지 다른 형태의 단일 선 레이저 유도 나노카본 전극이 형성됨을 확인하였다(Figure 3(c)~(d), 다공성 그래핀(녹색), 탄소 나노섬유(붉은색), 전극 선 절단(회색)).

서로 다른 주쇄 구조를 갖는 폴리이미드 필름의 탄화 거동, 나노카본 구조 및 전극 치수는 레이저 출력과 스캔 속도에 크게 의존하였다. 레이저 플루언스(fluence: F)는 레이저 빔의 파워 밀도로써 레이저 빔의 에너지를 나타내는 레이저 출력과 레이저 빔이 소재 표면을 횡단하는 속도를 나타내는 스캔 속도의 함수이며, 이로부터 소재에 전달되는 열의 양이 결정된다.

따라서 레이저 플루언스가 증가하면 레이저 빔으로부터 소재 표면에 가해지는 열이 증가하게 된다. 약한 레이저 플루언스에서는 폴리이미드 필름 표면에서 열이 발생하여 팽윤 및 다공성 그래핀 구조를 형성한다. 이때 열은 폴리이미드 필름 내부까지 전달되지 않고 표면에서 발생한 증발이나 가열에 의한 기체 생성 등을 통해 빠르게 방출된다. 레이저 플루언스가 증가하면 레이저 빔이 폴리이미드 필름 표면을 통과하는 동안 더 많은 열이 필름 내부까지 전달된다. 이 과정에서 기공의 수와 크기가 점차 증가하고 이방성 섬유질 구조가 발달된다. 결과적으로 강한 레이저 플루언스에서는 폴리이미드 필름의 분해에 따른

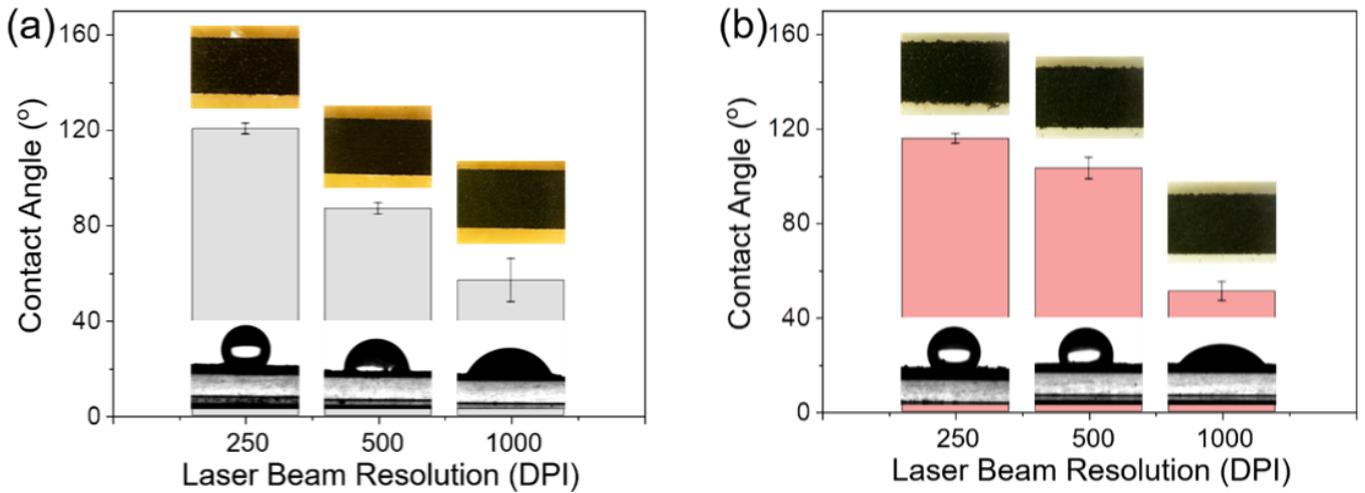


Figure 4. Relationship between surface roughness and contact angle of LINC as a function of laser resolution at constant laser fluence. (a) LINC formed on PMDA-ODA and (b) LINC formed on 6FDA-ODA. Inset shows an optical micrograph of the LIG surface.

다량의 기체가 발생하여 개별 나노섬유 간 밀집도가 낮고 부피가 큰 털 형태를 띠게 된다.

따라서 일정한 defocus(레이저 빔 waist에서 필름 표면까지의 거리)에서 레이저 출력이 증가함에 따라 탄화 효율이 증가하며, 안정적인 나노카본 전극을 형성하고 필름의 과도한 연소 및 균열을 방지하려면 레이저 스캔 속도 또한 증가해야 한다. 또한 탄화 효율과 나노카본의 나노/마이크로 스케일 구조가 폴리이미드의 주쇄 구조에 크게 의존함을 알 수 있다.

즉, PMDA-ODA와 비교하여 상대적으로 열 안정성이 낮은 6FDA-ODA 필름은 낮은 레이저 플루언스(낮은 출력 및 높은 스캔 속도)에서 표면 나노카본 구조가 연속 다공성 구조에서 나노 섬유로의 형태적 전이가 쉽게 발생하였다. 레이저 공정 변인과 나노카본의 형태학적 전이 간 상관관계를 설명하는 수학적 모델은 본 연구팀의 선행연구에서 보고된 바 있다¹⁰⁾.

3.3 레이저 공정 변인과 LINC 표면 습윤성 관계

Figure 4는 일정한 레이저 출력($P = 15\%$)과 스캔 속도($S = 100\%$)에서 레이저 빔 해상도(dpi)에 따른 서로 다른 주쇄 구조를 갖는 폴리이미드 필름 표면에 생성된 레이저 유도 나노카본의 습윤성 거동을 나타낸다. 또한 각 레이저 조건에서 생성된 레이저 유도 나노카본의 표면구조를 광학현미경으로 측정하였으며, 그 결과를 Figure 4에 삽입하였다.

레이저 빔 해상도를 250 dpi로 설정하여 조사하였을 때, 폴리이미드 필름 표면에 형성된 나노카본은 필름의 화학 구조와 상관없이 약 120° 의 소수성 특성을 보였다. 이는 상대적으로 낮은 레이저 빔 해상도 조건에서 레이저 빔의 중첩이 감소하여 탄화된 표면이 매끄러운 형태가 아닌 요철과 같은 형태를 형성함으로써 액적과 요철 형태의 탄화된 표면과 접촉 면적이 감소

하기 때문에 사료된다¹¹⁾.

반면, 레이저 빔 해상도가 증가함에 따라 6FDA-ODA 필름 위 탄화된 표면은 115.8° 에서 51° 까지, PMDA-ODA 필름 위 탄화된 표면은 120.5° 에서 56.9° 까지 접촉각이 큰 폭으로 감소하여 습윤성이 크게 향상됨을 보였다. 이는 국소 레이저 조사 영역에 대한 누적 플루언스 및 인접한 레이징 영역에 의해 전달되는 플루언스의 상당한 중첩에 의한 매끄럽고 다공성의 탄화 표면 형성에 기인하며, 유사한 결과가 선행연구에서 보고된 바 있다^{10,12)}.

3.4 레이저 공정 변인과 LINC 전극 전도성 관계

Figure 3에서 폴리이미드의 주쇄 구조와 상관없이 레이저 출력이 15%일 때, 모든 레이저 스캔 속도 범위에서 연속 다공성의 탄화 구조가 발달되어, 일정한 레이저 출력($P = 15\%$)에서 레이저 스캔 속도($S = 1 \sim 100\%$)에 따른 레이저 유도 나노카본 전극의 전기 전도성에 관한 영향을 평가하였다(Figure 5).

일반적으로 15%의 일정한 레이저 출력에서 스캔 속도가 100%로 증가(레이저 플루언스는 감소하는 경향)함에 따라 전기 저항이 점차 증가함을 보였다¹³⁾. 이는 레이저 스캔 속도의 감소가 폴리이미드 필름 표면에 조사되는 레이저 빔의 노출시간을 증가시켜 강한 레이저 플루언스에 의한 효과적인 탄소화 전환을 유도하여 전기 저항을 현저히 감소시킬 수 있음을 나타낸다. 레이저 스캔 속도가 90%에서 1%로 감소함에 따라 PMDA-ODA 필름 위 형성된 나노카본 전극의 전기 저항은 $847 \Omega \cdot \text{sq}^{-1}$ 에서 $34.2 \Omega \cdot \text{sq}^{-1}$ 로 약 96% 감소하였으며, 6FDA-ODA 필름 위 형성된 나노카본 전극은 $372.2 \Omega \cdot \text{sq}^{-1}$ 에서 $35.1 \Omega \cdot \text{sq}^{-1}$ 로 약 91% 감소하였다. 특히 6FDA-ODA 필름 위 형성된 나노카본 전극이 PMDA-ODA 필름 위 형성된 나노카본 전극과 비교

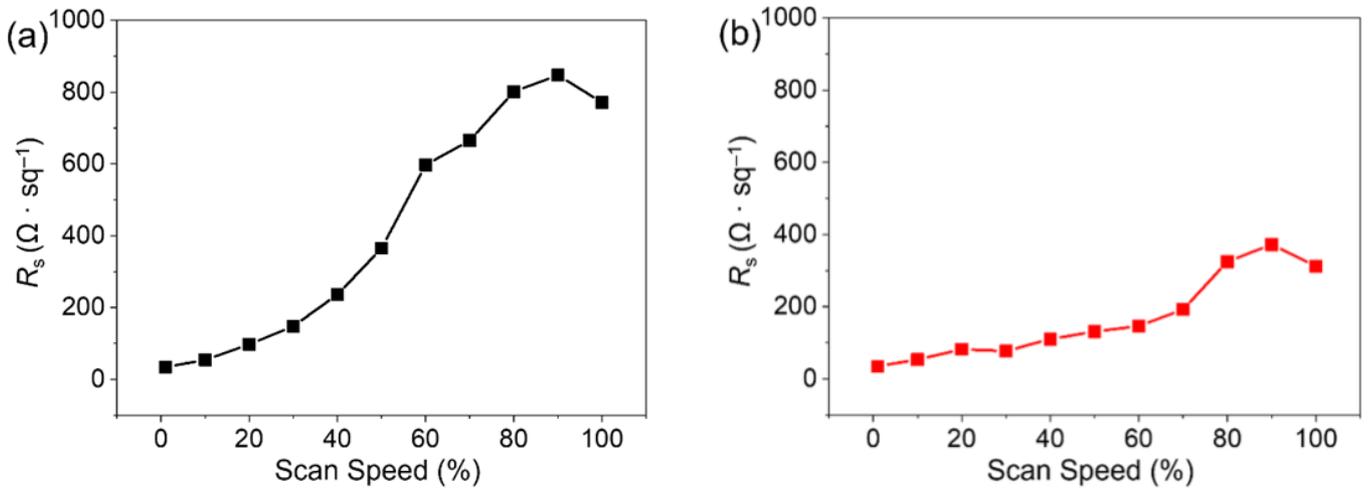


Figure 5. Comparison of the electrode resistivity and scan speed of LINC at constant laser power of 15% (a) LINC formed on PMDA-ODA and (b) LINC formed on 6FDA-ODA.

하여 상대적으로 높은 전기 전도성을 보였다.

이는 동일한 레이저 플루언스에서 PMDA-ODA 필름과 비교하여 6FDA-ODA 필름은 다량의 가스 방출로 인한 유체 조각화(fluid fragmentation)로 다층 그래핀의 불규칙한 구조와 층간 빈 공간에 따른 높은 비표면적과 늘어난 활성 사이트로 인한 것으로 사료된다. 이를 통해 헤테로 원자 도핑이 나노카본의 전기적 특성을 개선하는데 효과적임을 알 수 있다¹⁴⁾.

4. 결 론

본 연구에서는 레이저 공정 변인에 따른 레이저 유도 나노카본의 형태학적 구조 및 물성 변화에 대한 포괄적인 조사를 수행하였다. 레이저 출력, 스캔 속도, 해상도 등 다양한 공정 조건에서 서로 다른 주쇄 구조를 갖는 폴리이미드 필름 표면에 나노카본을 형성하고, 이들의 구조-공정-물성 간 상관관계를 체계적으로 분석하였다. 레이저 출력과 스캔 속도에 따라 다양한 형태의 나노카본 전극(다공성 그래핀, 탄소 나노섬유, 전극선 절단)이 형성되었으며, 특히 상대적으로 열 안정성이 낮은 6FDA-ODA 필름은 낮은 레이저 출력 및 높은 스캔 속도에서 나노카본의 형태학적 변화가 뚜렷하였다. 또한 레이저 패터닝 과정에서 6FDA-ODA 필름의 화학 구조로부터 유도되는 헤테로 원자 도핑이 나노카본의 전기적 특성을 개선하는데 효과적이었다. 일정한 레이저 출력과 스캔 속도에서 레이저 빔 해상도에 따라 탄화 표면의 요철 구조가 상이하였으며, 이로 인해 표면 습윤성이 제어 가능하였다.

본 연구의 고분자 기반소재의 화학구조-레이저 공정 변인-탄화 표면 물성 간 상관관계를 통하여 탄소소재 기반 차세대 전

자 소자 개발과 성능 향상을 위한 기초 자료로 활용될 것을 기대한다.

References

1. F. M. Vivaldi, A. Dallinger, A. Bonini, N. Poma, L. Sembranti, D. Biagini, P. Salvo, F. Greco, and F. D. Francesco, Three-Dimensional(3D) Laser-Induced Graphene: Structure, Properties, and Application to Chemical Sensing, *ACS Applied Materials and Interfaces*, **13**(26), 30245(2021).
2. J. Lin, Z. Peng, Y. Liu, F. Ruiz-Zepeda, R. Ye, E. L. G. Samuel, M. J. Yacaman, B. I. Yakobson, and J. M. Tour, Laser-induced Porous Graphene Films from Commercial Polymers, *Nature Communications*, **5**, 5714(2014).
3. K. H. Nam, M. Abdulhafez, E. Castagnola, G. N. Tomaraci, X. T. Cui, and M. Bedewy, Laser Direct Write of Heteroatom-doped Graphene on Molecularly Controlled Polyimides for Electrochemical Biosensors with Nanomolar Sensitivity, *Carbon*, **188**, 209(2022).
4. M. Yuan, F. Luo, Z. Wang, H. Li, Y. Rao, J. Yu, Y. Wang, D. Xie, X. Chen, and C. P. Wong, Facile and Scalable Fabrication of High-Performance Microsuper Capacitors Based on Laser-Scribed In Situ Heteroatom-Doped Porous Graphene, *ACS Applied Materials and Interfaces*, **13**(19), 22426(2021).
5. J. D. Kim, T. Kim, and J. Pak, Fabrication and Transfer of Laser Induced Graphene(LIG) Electrode for Flexible

- Substrate-based Electrochemical Sensor Applicatins, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, **67**(3), 406(2018).
6. L. Cao, S. Zhu, B. Pan, X. Dai, W. Zhao, Y. Liu, W. Xie, Y. Kuang, and X. Liu, Stable and Durable Laser-induced Graphene Patterns Embedded in Polymer Substrates, *Carbon*, **163**, 85(2020).
 7. S. Khim, Y. C. Hwang, J. Choi, H. Park, and K. H. Nam, Temperature-Invariant Large Broadband Polyimide Dielectrics with Multimodal Porous Networks, *ACS Applied Polymer Materials*, **5**(6), 4159(2023).
 8. Y. C. Hwang, S. Khim, J. M. Sohn, and K. H. Nam, Controllable Growth of Porous Morphology in Low Dielectric Polyimides via Thermal-driven Spontaneous Phase Separation, *European Polymer Journal*, **195**, 112195(2023).
 9. S. Kim, J. Son, H. Park, E. Jeong, K. H. Nam, and J. S. Bae, Polymer Concentration and Liquid-Liquid Demixing Time Correlation with Porous Structure of Low Dielectric Polyimide in Diffusion-Driven Phase Separation, *Polymers*, **14**(7), 1425(2022).
 10. K. H. Nam, M. Abdulhafez, G. N. Tomaraei, and M. Bedewy, Laser-Induced Fluorinated Graphene for Superhydrophobic Surfaces with Anisotropic Wetting and Switchable Adhesion, *Applied Surface Science*, **574**, 151339(2022).
 11. J. Nasser, J. Lin, L. Zhang, and H. A. Sodano, Laser Induced Graphene Printing of Spatially Controlled Superhydrophobic/hydrophilic Surfaces, *Carbon*, **162**, 570(2020).
 12. B. Chen, Z. T. Johnson, D. Sanborn, R. G. Hjort, N. T. Garland, R. R. A. Soares, B. V. Belle, N. Jared, J. Li, D. Jing, E. A. Smith, C. L. Gomes, and J. C. Claussen, Tuning the Structure, Conductivity, and Wettability of Laser-Induced Graphene for Multiplexed Open Microfluidic Environmental Biosensing and Energy Storage Devices, *ACS Nano*, **16**(1), 15(2022).
 13. M. T. Gilavan, M. S. Rahman, A. Minhas-Khan, S. Nambi, and G. Grau, One-Step Fabrication of Low-Resistance Conductors on 3D-Printed Structures by Laser-Induced Graphene, *Applied Electronic Materials*, **3**(9), 3867(2021).
 14. L. Liu, Z. Mei, Y. Hou, H. Liang, A. Azarov, V. Venkatachalapathy, A. Kuznetsov, and X. Du, Fluorine Doping: a Feasible Solution to Enhancing the Conductivity of High-resistance Wide Bandgap $Mg_{0.51}Zn_{0.49}O$ Active Components, *Nature*, **5**, 15516(2015).

Authors

- 황윤찬** 경북대학교 섬유시스템공학과 석사과정 학생
손정민 경북대학교 섬유시스템공학과 석사과정 학생
박재희 경북대학교 섬유시스템공학과 학사과정 학생
남기호 경북대학교 섬유시스템공학과 교수