KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY
Vol. 29, No. 2 111~118 (2023)
https://doi.org/10.20909/kopast.2023.29.2.111

펨토초 레이저를 이용한 식품포장 필름의 표면 패터닝 및 특성

조영진*

한국식품연구원 안전유통연구단

Surface Patterning and Characterization of Food Packaging Films Using Femtosecond Laser

Youngjin Cho*

Food Safety and Distribution Research Group, Korea Food Research Institute, Wanju 55365, Jeollabuk-do, Republic of Korea

Abstract In this study, the feasibility of laser patterning on the surface of food packaging polymer film was confirmed, and the surface patterning process conditions of femtosecond laser were established. In addition, it was proved that the surface properties of the film can be changed and controlled through the fabrication of various patterned films on the surface of food packaging films such as HDPE, PP, and PET. Various patterned surfaces, including large-scale circular patterns induced by a single femtosecond laser pulse, roughness patterns achieved by overlapping single pulses by 30%, straight line patterns, roughness patterns obtained by overlapping straight line patterns, and grid patterns formed by intersecting straight line patterns were fabricated. The characteristics of the patterned HDPE, PP, and PET films, based on the surface pattern structure and size, were analyzed using SEM, AFM, and contact angle measurements. Compared to the surface of each control film without femtosecond laser patterning, the contact angles of the surfaces of large-area circular patterning HDPE and PP films, large-area roughness patterning HDPE and PP films by overlapping 30% of single pulses, and large-area roughness patterning PET film by overlapping rectilinear patterning were in the range of 27.1-37.5 degree. This indicated that the HDPE, PP, and PET films became more hydrophilic after patterning. On the other hand, the HDPE film patterned with a large-scale grid pattern exhibited a contact angle of 120.4 degree, indicating that the HDPE film became more hydrophobic after patterning. Therefore, films that have been changed to hydrophilic surfaces through patterning can be used in anti-fouling applications where proteins, cells, viruses, and other food materials do not adhere or are easily detached. In addition, if a superhydrophobic surface of 150 degrees or more is fabricated through more precise lattice patterning in the future, it will be possible to use it for superhydrophobic surface applications such as self-cleaning.

Keywords Femtosecond laser, Surface patterning, Food Packaging Film, Hydrophilicity, Hydrophobicity

서 론

식품의 종류에 따라 다양한 식품포장 필름 및 용기들이 개발되어 사용되고 있다. 유통 및 소비과정에서 식품의 특성에 따라 고품질 상태로 유지하고, 안전하게 보관할 수 있는 다양한 기능성 포장재 및 시스템이 개발되고 있다[1-8]. 그 중에서 식품포장 필름의 표면 특성에 따라 저장 및 유통기한을 조절할 수 있는 기능을 부여할 수 있다. 또한, 식품포장 필름 및 용기 표면에 식품의 내용물이 달라붙어 모두 사용하지 못하고, 버려지는 양이 많아 경제적 손실이 발생하고, 버려지는 내용물에 의한 환경오염이 초래하고 있다. 가령, 소스류는 3~15%, 화장품류는 17~25%, 세제류는 7~16%, 치약은 1~13%의 내용물이 용기 표면에 달라붙어 사용되지 못하고, 쓰레기로 버려지고 있는 실정이다. 그 밖에도 점성이 있는 많은 식품 내용물들이 이와 같이 버려짐으로써 손실되는 경우가 많다. 또한, 식품포장 및 식품가공 설비를 비롯한 시스템의 표면에 달라붙은 물질들을 제거하기 위한 비용이 전체 유지 및 관리 비용의 75% 이상을 차지하는 등의 경제적 손실이 큰 상황이다. 특히, 유가공 시스템에서 가공설비 표면에 달라붙은 파울런트를 제거하

*Corresponding Author: Youngjin Cho
Food Safety and Distribution Research Group, Korea Food Research Institute, Wanju 55365, Jeollabuk-do, Republic of Korea
Tel: ++82-63-219-9428
E-mail: yjcho74@kfri.re.kr

는데, 많은 비용과 시간이 소비되고 있는 현실이다. 단백질을 비롯하여 미생물들이 해당 표면에 달라붙으면서, 바이오필름이 형성되고, 2차 오염이 발생하고 있다.

이러한 문제들은 해당 물질과 접촉하고 있는 표면의 성질을 변환 및 조절하면서 해결할 수 있다. 대표적으로 다양한 패터닝 표면을 도입하거나, 폴리머 브러시와 같은 화학적 그룹을 도입함으로써 해결할 수 있다. 또한, 다양한 초친수성 및 초소수성 표면과 표면 코팅 방법들이 연구되고 있다[9-10]. 그러나, 화학적 그룹의 도입의 경우에는 주로 불소 계열의 화학물질들이 사용됨으로써, 생태계에 악영향을 주는 문제를 안고 있다. 다양한 패터닝 표면을 제작하는 경우에는 반도체 공정 등에 사용되는 리소그래피 공정 등을 거쳐야 하기 때문에, 각 공정 단계에서 유해한 화학물질들을 사용함으로써, 경제적 및 환경적인 이슈를 안고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 표면에 one-step으로 원하는 패턴을 구현할 수 있고, 화학물질을 전혀 사용하지 않는 경제적이고, 친환경적인 레이저 패터닝 기술을 도입하였다. 특히, 펨토초 레이저는 10^{-15}초의 아주 짧은 펄스 폭을 갖는 레이저를 말한다. 10^{-15}초의 매우 짧은 시간 펄스 폭과 높은 첨두 출력으로 인하여 가공 표면의 열확산 시간보다 조사되는 레이저 펄스의 시간이 짧아 물질 및 표면의 열적 변성이 없이 가공이 가능하다. 또한, 기존의 연속파 또는 나노초 레이저 보다 상대적으로 적은 에너지로 큰 첨두 출력을 내기에 가공 물질 및 표면에 가해지는 충격이 적어 고품질의 초정밀 미세 가공이 가능하다. 즉, 펨토초 레이저는 연속파 또는 나노초 레이저에 비해 열영향 영역, 열손상, 크랙, 데브리 발생, 충격파에 의한 표면 왜곡 등을 최소화 할 수 있다[11]. 펨토초 레이저를 이용하여 금속의 표면 가공 분야에서 많은 연구들이 진행되고 있다. 특히, 한국기계연구원의 레이저가공연구팀에서는 금속의 표면을 레이저 가공을 통해 연꽃 잎 표면과 유사한 다양한 마이크로 및 나노 구조를 만들어 self-cleaning 표면을 개발하고 있다. 미국 UC 버클리대 기계공학과 연구팀에서는 펨토초 레이저로 나노 패터닝을 구현하여 세포에 저항성을 갖는 표면을 제작하여 세포의 이동을 조절하는 연구결과를 보고하였다[12]. 중국 북경공대 연구팀에서는 펨토초 레이저를 이용하여 그래핀 필름 표면에 장미꽃 모양의 마이크로 패터닝을 통해서 초수소성 표면을 구현하였다[13]. 레이저 비천공 기술을 활용하여 식품포장 필름의 기체 배리어 조절을 연구한 사례들이 있다. 레이저로 포장필름을 비천공 시켜 과채류의 포장에 적용한 연구와 김치포장의 부풀음을 방지하는 연구가 보고되었다[14-15].

그러나, 펨토초 레이저를 비롯한 레이저 기술을 활용하여 식품분야에서 포장필름을 비롯하여 다양한 표면의 성질을 변환 및 조절한 연구는 아직 시도되지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 펨토초 레이저를 활용하여 식품포장 필름의 표면 패터닝 기술을 개발하고자 한다. 식품포장용 고분자 필름의 표면에 펨토초 레이저로 패터닝 가능 여부를 확인 한 후, 나노 및 마이크로 표면 패터닝을 위한 펨토초 레이저의 최적 공정조건을 확립하였다. 또한, 이것을 기반으로 HDPE, PP, PET 필름 표면에 나노 및 마이크로 패터닝을 구현 한 후, 표면 패터닝 구조와 크기에 따른 표면 특성을 분석하였다.

재료 및 방법

1. 실험재료

Low Density Polyethylene (LDPE), High Density Polyethylene (HDPE), Polypropylene (PP), Polyethylene terephthalate (PET)는 식품포장 필름으로 사용되고 있는 일반적인 스펙의 각 필름을 구입하여 사용하였다.

2. 펨토초 레이저 장비

표면 패터닝을 위한 펨토초 레이저 장비(S-Pulse HP, Amplitude, France)는 펨토초 레이저 발생 부분, 셔터 및 빔 확장기 부분, 렌즈, NIR 반사경 및 대물렌즈(objective lens) 등의 레이저 헤드 부분, 스캐너 및 샘플 거치 3 D

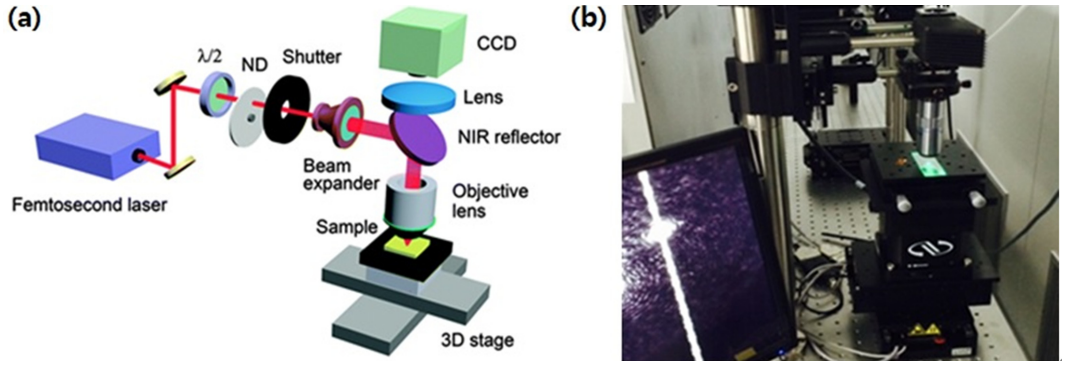

Fig. 1. 펨토초 레이저의 구성 모식도(a) 및 펨토초 레이저를 이용한 표면 패터닝 실험 사진(b).

스테이지 부분으로 구성되어 있다 (Fig. 1a). Fig. 1b는 본 연구에서 사용된 펨토초 레이저 표면 패터닝 장비 및 패터닝 수행 모습을 보여준다.

3. 식품포장 필름 표면에 나노 및 마이크로패턴 공정 조건 연구

펨토초 레이저의 싱글 펄스 에너지가 식품포장 필름으로 사용되고 있는 HDPE와 PP 필름에 영향을 미치는 임계 에너지를 찾기 위하여 다음과 같은 공정조건을 기반으로 싱글 펄스 실험을 진행하였다. Wavelength (515 nm), Pulse width (400 fs), Pulse rate (1 kHz), Pulse energy (2.55 μJ, 0.85 μJ, 0.425 μJ, 0.216 μJ, 0.144 μJ, 0.072 μJ), Scanning speed (10 mm/s), Beam spot size (~10 μm). 포장 필름 자체가 수평하지 않기 때문에, 슬라이드 글라스 위에서 포장 필름을 당겨서 밀착시켜 투명테이프로 양끝을 부착하여 사용하였다.

싱글 펄스 실험 결과를 기반으로 나노 및 마이크로미터 수준의 전체 거칠기를 갖는 대면적화 표면을 구현하기 위하여 다음과 같은 공정조건을 기반으로 실험을 진행하였다. Wavelength (515 nm), Pulse width (400 fs), Pulse rate (10 kHz), Pulse energy (2.55, 0.85, 0.425, 0.216, 0.144, 0.072 μJ), Scanning speed (100 mm/s), Beam spot size (~10 μm).

HDPE, PP, PET 필름 표면에 직선 패턴을 구현하기 위하여 다음과 같은 공정 조건을 기반으로 실험을 진행하였다. Wavelength (515 nm), Pulse width (400 fs), Pulse rate (1 kHz), Pulse energy (150 nJ), Scanning speed (1, 3 mm/s), Beam spot size (~10 μm), Line spacing (3, 5, 7 μm).

격자 패터닝 표면을 제작하기 위하여 다음과 같은 공정조건을 기반으로 실험을 진행하였다. Wavelength (343 nm), Pulse width (400 fs), Pulse rate (1 kHz), Pulse energy (17 μJ), Beam spot size (125 μm), Line spacing (50 μm), Scanning speed (10 mm/s).

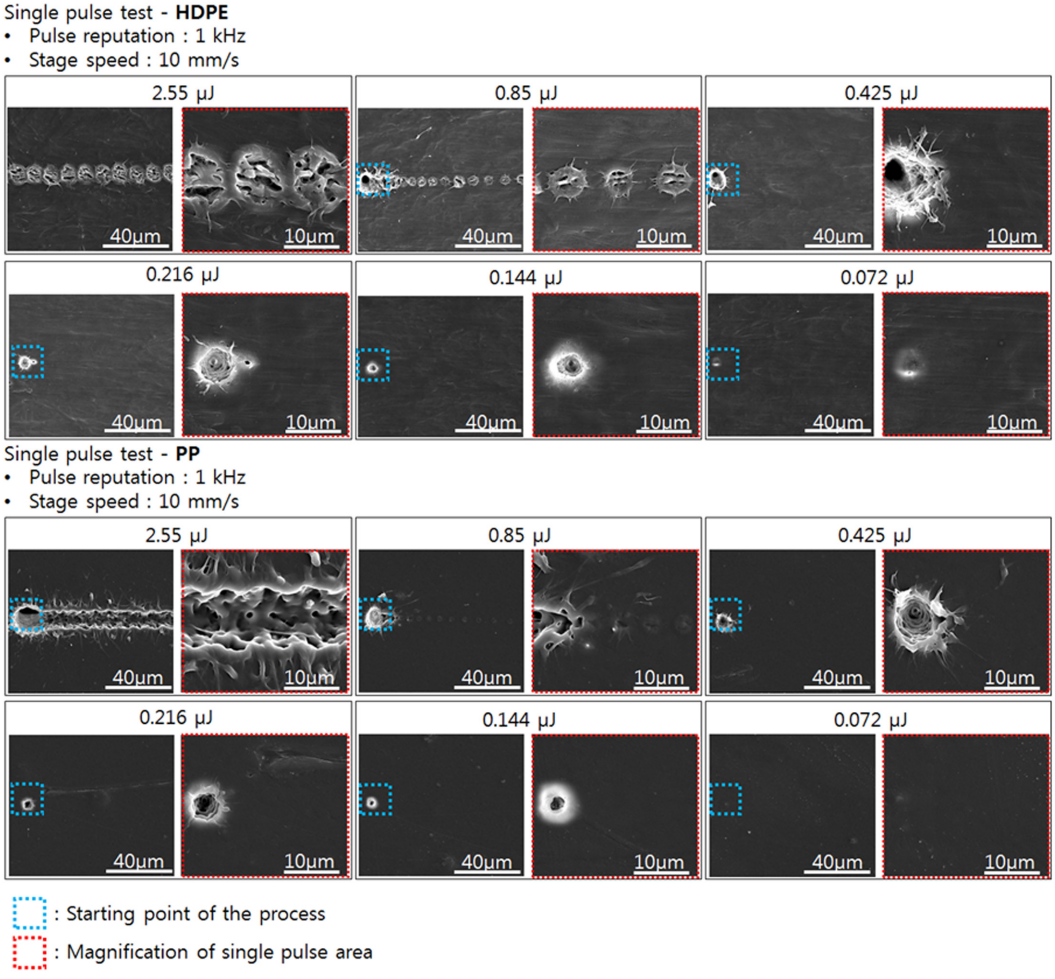

Fig. 2. 펨토초 레이저의 싱글 펄스 조건에 따른 HDPE 및 PP 포장필름 표면의 SEM 이미지.

4. 식품포장 필름 표면에 나노 및 마이크로 패턴 제작

펨토초 레이저의 최적화된 각 공정 조건들을 사용하여 식품포장 필름으로 사용되고 있는 HDPE, PP, PET 필름 표면에 싱글 펄스에 의한 대면적 원형 패턴, 싱글 펄스를 30% 중첩하여 전체 거칠기 대면적 표면, 직선 패턴, 격자 패턴 등의 수백 나노 ~ 수십 마이크로 미터 크기의 나노 및 마이크로 패턴을 제작하였다.

5. 제작된 패터닝 필름의 표면 특성 분석

주사전자현미경(FE-SEM, Inspect F, Hitachi, Japan)을 사용하여 패턴화된 샘플의 표면 형상을 관찰하였다. 완전히 건조된 샘플을 스터브에 장착하고, 스퍼터 코터에서 60초 동안 백금으로 코팅하였다. 패턴화된 표면의 거칠기는 원자력 현미경(AFM, XE-100M Park System, Korea)으로 측정하였다. 비접촉식 캔틸레버(PPP-NCHR, Park Systems, Korea)를 이용하여 표면을 검사하기 위해 비접촉식 모드를 사용하였다. 표면접촉각은 접촉각 분석기(Contact Angle Analyzer, Pheonix 150, Korea)를 이용하여 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 식품포장 필름 표면에 나노 및 마이크로 패턴 공정 조건 최적화

식품포장용 HDPE 및 PP 필름의 표면 패턴 제작을 위한 펨토초 레이저의 최적의 매개변수 설정을 위한 싱글 펄스 실험을 수행하여 최적화하였다. 우선, 다른 레이저 공정 조건들은 고정하고, 펄스 에너지를 0.072 - 2.55 μJ까지 변화시켜 실험한 필름의 표면 이미지는 SEM 이미지 분석으로 확인하였다 (Fig. 2). 파란색의 점선 사각형 부분은 스테이지가 움직이기 전에 레이저가 머물러 있는 곳으로 굉장히 많은 펄스의 중첩이 되어 있음을 보여준다. 싱글 펄스 수준에서 HDPE 및 PP필름 모두 펄스 에너지가 0.85 μJ 미만에서는 영향이 없는 것으로 확인되었다. 펄스 에너지가 2.55 μJ일 때 가장 분명하게 필름 표면의 개질이 확인되었다. 이와 같은 방식으로 펨토초 레이저 패터닝의 각 공정 조건들을 최적화하였다.

2. 식품포장 필름 표면에 나노 및 마이크로 패턴 제작

연속형 레이저와 나노초 레이저의 경우에는 고분자와 조건이 맞지 않아서, 고분자 필름 표면에 특정 패터닝이 구현되지 않았다. 펨토초 레이저를 사용하여 싱글 펄스에 의하여 HDPE 및 PP 필름 표면에 대면적 원형 패턴을 제작하였고, 싱글 펄스를 30% 중첩하여 전체 거칠기 대면적 표면을 제작하였다 (Fig. 3). 싱글 펄스 실험에서 펄스 에너지가 2.55 μJ 일 때, HDPE와 PP 필름 표면에서 스폿(spot)의 직경 크기가 각각 약 10과 7 μm였지만, 전체 거칠기 대면적 패터닝 실험에서는 HDPE와 PP 필름에서 7과 5 μm로 확인되었다.

Fig. 4는 1 mm/s의 스캐닝 속도 및 7 μm의 Line spacing에서 HDPE, PP, PET 필름 표면에 직선 패터닝을 진행한 결과를 보여준다. 설정한 펨토초 레이저 공정의 모든 조건에서 직선 패턴이 잘 만들어지고, 패터닝 영역에 나노 및 마이크로 미터의 거칠기 표면이 형성되었다. 특히, PET 필름에서 가장 선명한 직선 패턴이 구현되었다.

초소수성을 갖고 있는 연꽃 잎의 표면은 3~10 μm 크기의 수많은 돌기 구조를 갖고 있고, 각 마이크로 크기의 돌

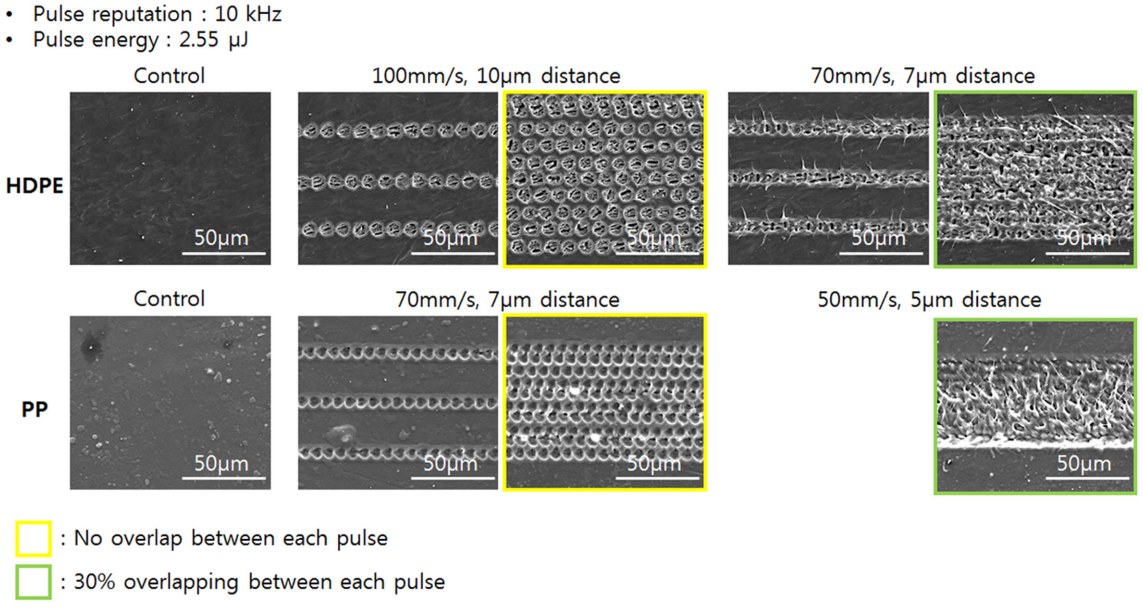

Fig. 3. HDPE와 PP 필름 표면에서 펨토초 레이저를 이용한 대면적 패터닝 결과를 보여주는 SEM 이미지.

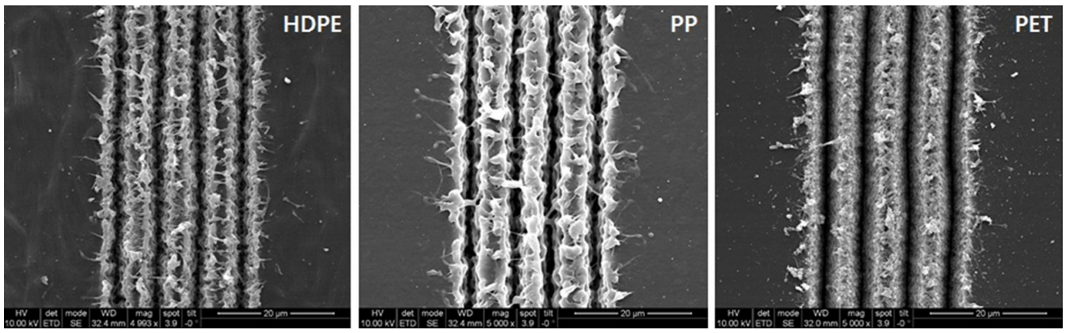

Fig. 4. HDPE, PP, PET 필름 표면에서 펨토초 레이저를 이용한 직선 패터닝 결과를 보여주는 SEM 이미지 (Scanning speed: 1 mm/s, Line spacing: 7 μm)

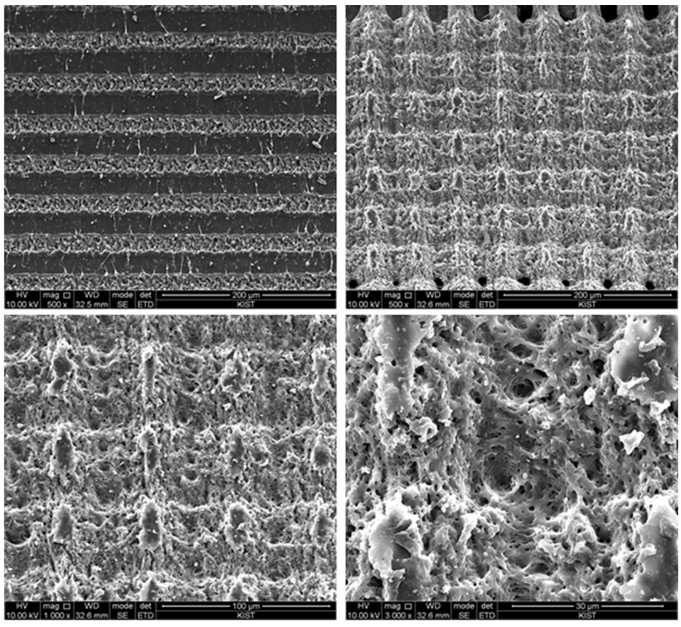

Fig. 5. HDPE 필름 표면에서 펨토초 레이저를 이용한 격자 패터닝 결과를 보여주는 SEM 이미지 (Scanning speed: 4 mm/s).

기들의 표면에는 나노 크기의 돌기들을 갖고 있다. 이와 같은 나노-마이크로 크기의 돌기 구조 표면이 초소수성을 갖도록 역할을 한다. 특히, 이 나노 크기의 돌기들은 표면장력이 크기 때문에 물방울을 퍼뜨리지 않고, 동그랗게 맺히게 한다. 본 연구에서 연꽃 잎의 표면 구조와 유사한 형태의 소수성 표면을 구현하기 위하여 나노-마이크로 구조를 갖을 수 있는 격자 패턴을 디자인하여 펨토초 레이저로 HDPE 필름 위에 패터닝을 진행하였다. 10 mm/s의 스캔닝 속도에서는 직선 패턴을 교차하여 만든 격자 패턴이 명확하게 구현되지 않았다. 스캐닝 속도를 낮추어, 4 mm/s에서 계란판 모양과 유사한 격자 패턴이 구현되었다 (Fig. 5). 연꽃 잎 표면의 나노-마이크로 크기의 명확한 돌기 구조와는 다른 형태의 구조지만, 50 μm 크기의 규칙적인 돌기 구조와 그 돌기 표면은 다양한 나노 크기의 거친 구조가 형성됨으로써, 패터닝 이후에 필름의 표면이 소수성을 갖을 수 있도록 표면 구조가 변화되었다. 그러나, 동일한 조건에서 물성이 HDPE와 다른 PP 필름에서는 유사한 격자 패턴이 구현되지 않았다.

3. 제작된 패터닝 필름의 표면 특성 분석

HDPE, PP, PET 필름 표면에 펨토초 레이저를 이용하여 대면적 원형 패턴, 싱글 펄스를 30% 중첩하여 전체 거칠기 대면적 표면, 직선 패턴, 격자 패턴 등으로 제작된 패터닝 필름은 SEM 분석으로 표면 이미지와 그 특성을 확인하였다 (Fig. 2-5).

원형 대면적 패터닝 및 전체 거칠기 대면적 표면 패터닝 HDPE 및 PP 필름의 표면 거칠기(Roughness)를 AFM으로 분석하였다. 패터닝을 하지 않은 대조군인 HDPE 필름의 표면은 2~300 nm 내외의 표면 거칠기를 보인 반면, 10 μm의 원형 대면적 패터닝 및 7 μm 전체 거칠기 대면적 패터닝 표면은 각각 1.5 및 2 μm 내외의 거칠기를 갖고 있음이 확인되었다 (Fig. 6). PP필름의 경우, 대조군인 PP 필름

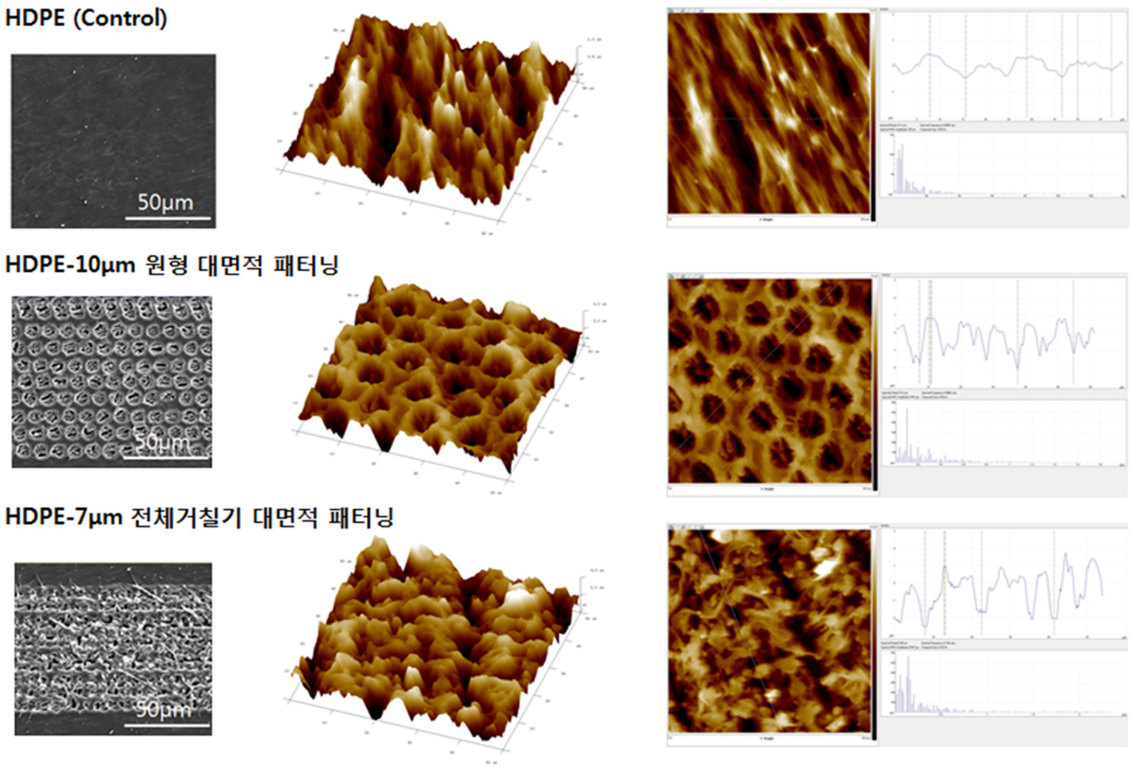

Fig. 6. 대면적 원형 및 전체 거칠기 대면적 패터닝 HDPE 필름 표면의 AFM 이미지.

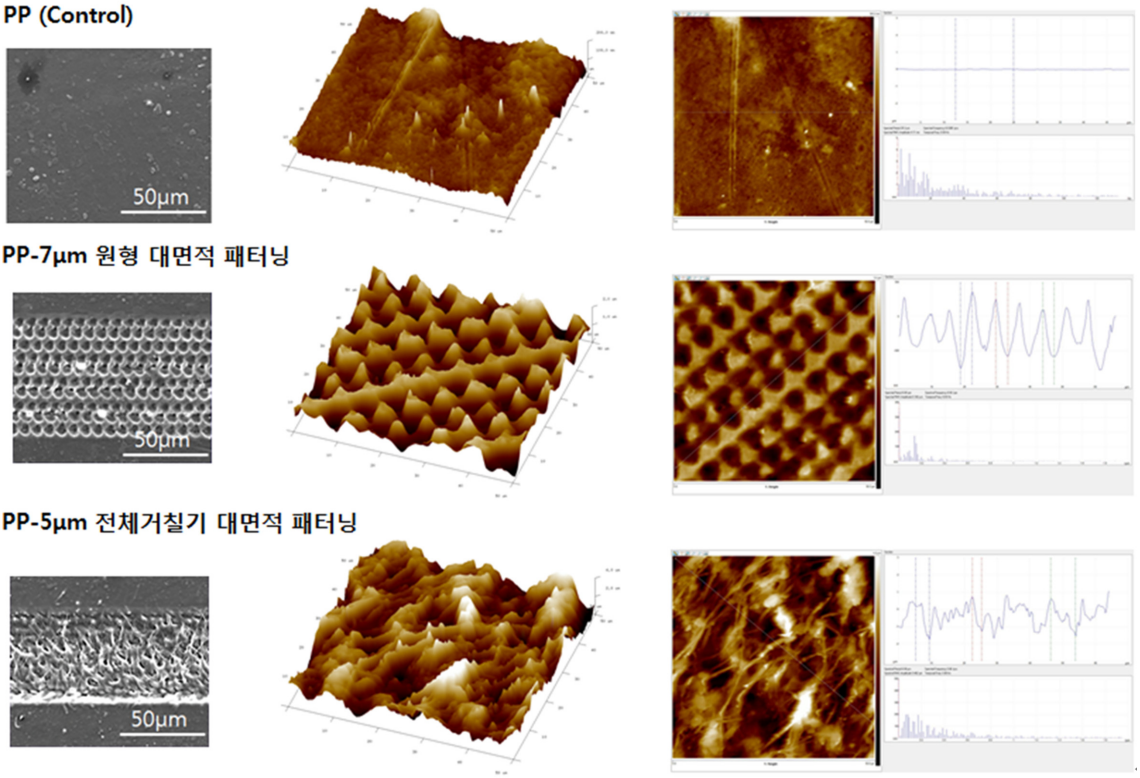

Fig. 7. 대면적 원형 및 전체 거칠기 대면적 패터닝 PP 필름 표면의 AFM 이미지.

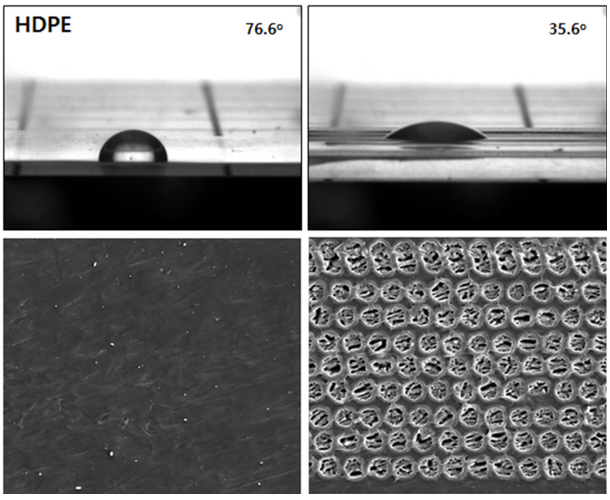

Fig. 8. HDPE (대조군) 및 대면적 원형 패터닝 HDPE 필름의 표면 접촉각.

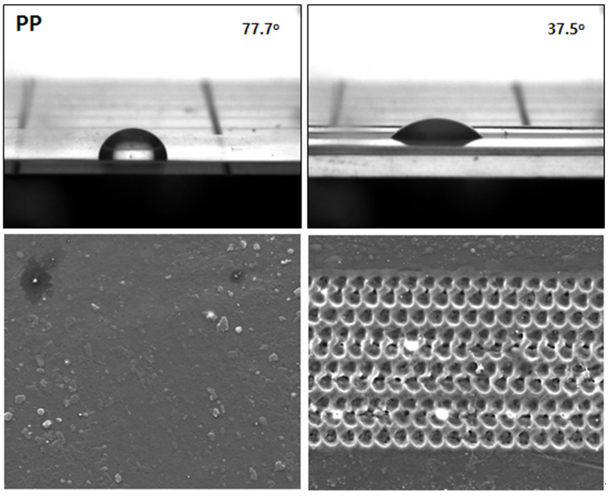

Fig. 9. PP (대조군) 및 대면적 원형 패터닝 PP 필름의 표면 접촉각.

Fig. 10. PET (대조군) 및 전체 거칠기 패터닝 PET 필름의 표면 접촉각.

의 표면은 20 nm 내외의 표면 거칠기를 보인 반면, 7 μm의 원형 대면적 패터닝 및 5 μm 전체 거칠기 대면적 패터닝 표면은 각각 500 nm 및 1.5 μm 내외의 거칠기를 보여주었다 (Fig. 7).

대면적 원형 패턴의 HDPE 및 PP 필름, 전체 거칠기 대면적 PET 필름, 대면적 격자 패턴의 HDPE 필름의 접촉각 분석을 통하여 표면의 성질 변화를 확인하였다. 펨토초 레이저 패터닝을 하지 않은 HDPE 필름의 표면은 76.6°의 접촉각을 갖고 있다. 대면적 원형 패터닝 후, 표면 접촉각은 35.6°로 떨어졌다. 즉, 원형 패터닝 후, HDPE 필름이 친수성 표면으로 변화되었음을 보여준다 (Fig. 8). HDPE 필름의 결과와 유사하게, 펨토초 레이저 패터닝을 하지 않은 PP 대조군 필름의 표면은 77.7°의 접촉각을 갖는다. 대면적 원형 패터닝 후, 표면 접촉각은 37.5°로 떨어졌고, 이것은 패터닝 후에 PP 필름이 친수성 표면으로 변화되었음을 보여준다 (Fig. 9). 펨토초 레이저 패터닝을 하지 않은 PET 필름 표면은 84.5°의 접촉각을 보여주었다. 직선 패터닝을 오버랩 시켜 구현한 전체 거칠기 대면적 패터닝 표면 접촉각은 27.1°로 떨어짐으로써, 패터닝 후, PET 필름은 친수성 표면으로 변화되었다 (Fig. 10). 원형 대면적 패터닝 필름 표면에 비하여 직선 패터닝을 오버랩 시켜 구현한 전체 거칠기 대면적 패터닝 필름 표면이 더 친수성으로

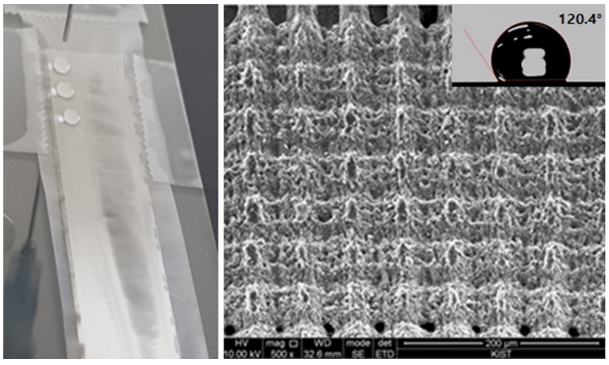

Fig. 11. 대면적 격자 패터닝 HDPE 필름 및 표면 접촉각.

변화되었다. Fig. 11의 좌측 사진은 HDPE 대면적 격자 패터닝 필름과 그 위에 물방울을 떨어뜨렸을 때의 모습을 보여준다. 격자 패터닝 HDPE 필름은 120.4°의 접촉각을 보임으로써, 패터닝을 하지 않은 대조군(76.6°)과 비교하여, 소수성 표면으로 변화되었다.

요 약

본 연구에서 연속형 레이저와 나노초 레이저의 경우에는 고분자와 물성 조건이 맞지 않아서, 고분자 필름 표면에 특

정 패터닝이 구현되지 않았다. 그러나, 펨토초 레이저를 활용하여 HDPE, PP, PET 등의 식품포장 필름의 표면에 패터닝이 구현됨을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서 식품포장 필름에서 펨토초 레이저 패터닝 공정 조건을 확립하였고, 싱글 펄스에 의한 대면적 원형 패턴, 싱글 펄스를 30%를 중첩한 대면적 거칠기 패턴, 직선 패턴, 직선 패터닝을 중첩한 대면적 거칠기 패턴, 직선 패터닝을 교차하여 격자 패턴 등의 표면 패터닝 필름을 제작하였다. 또한, 표면 패턴 구조와 크기에 따른 패터닝 HDPE, PP, PET 필름은 SEM, AFM, 접촉각 분석을 통하여 그 특성을 확인하였다. 펨토초 레이저 패터닝을 하지 않은 각 대조군 필름의 표면 대비 대면적 원형 패터닝 HDPE 및 PP 필름, 싱글 펄스를 30%를 중첩한 대면적 거칠기 패터닝 및 직선 패터닝을 중첩한 대면적 거칠기 패터닝 PET 필름의 표면은 27.1-37.5º의 접촉각을 나타냄으로써, 패터닝 후에 HDPE, PP, PET 필름은 친수성 표면으로 변화되었다. 반면, 나노-마이크로 크기의 돌기 표면구조를 갖고 있는 대면적 격자 패터닝 HDPE 필름의 경우에는 120.4º의 접촉각을 보임으로써, 패터닝 후에 소수성 표면으로 변화되었다. 따라서, 패터닝을 통해 친수성 표면으로 바뀐 필름들은 단백질, 세포, 바이러스 등을 비롯하여 식품의 물질들이 달라붙지 못하거나, 쉽게 떨어지는 엔티파울링 응용분야에 활용이 가능하다. 또한, 향후 좀더 정밀한 나노 및 마이크로 돌기 구조를 갖는 격자 패터닝을 통해 150º 이상의 초소수성 표면을 제작하게 된다면, 자가 청소(Self-cleaning) 등의 초소수성 표면 응용분야에 활용 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 지원에 의한 한국식품연구원의 기본연구사업(E0133115-06 및 E0211002-03)으로 수행되었습니다.

펨토초 레이저 장비 활용에 도움을 주신 한국과학기술연구원 전호정 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Rovera, C., Ghaani, M. and Farris, S. 2020. Nano-inspired oxygen barrier coatings for food packaging applications: An overview, Trends in Food Science & Technology, 97: 210-220.
2. Fereydoon, M. and Evnesajjad, S. 2013. Development of high-barrier film for food packaging, Plastic Films in Food Packaging, 71-92.
3. Nayik, G.A. and Muzaffar, K. 2014. Developments in packaging of fresh fruits- shelf life perspective: A review, American Journal of Food Science and Nutrition Research, 1(5): 34-39.
4. Irkin, R. and Esmer, O.K. 2015. Novel food packaging systems with natural antimicrobial agents, Journal of Food Science and Technology, 52: 6095-6111.
5. Chen, S., Brahma, S., Mackay, J., Cao, C. and Aliakbarian, B. 2020. The role of smart packaging system in food supply chain, Journal of Food Science, 85(3): 517-525.
6. Biji, K.B., Ravishankar, C.N., Mohan, C.O. and Srinivasa Gopal, T.K. 2015. Smart packaging systems for food applications: a review, Journal of Food Science and Technology, 52: 6125-6135.
7. Afolabi, A.S., Choi, I.L., Lee, J.H., Beom, K.Y. and Kang, H.M. 2022. Comparison of storability and quality of sweet pepper(Capsicum annum L.) grown in two different hydroponics media, Korean Journal of Packaging Science & Technology, 28(1): 39-46.
8. 이학래, 고의석, 심원철, 김종서, 김재능. 2021. Zeolite/Zinc-polypeptide를 코팅한 폴리프로필렌필름의 항균 및 항진균 특성에 관한 연구. 한국포장학회지, 27(1): 1-8.
9. Syafig, A., Vengadaesvaran, B., Pandey, A.K. and Rahim, N.A. 2018. Superhydrophilic smart coating for self-cleaning application on glass substrate, Journal of Nanomaterials, 2018: 1-10.
10. Samaha, M.A., Tafreshi, H.V. and Gad-el-Hak, M. 2012. Superhydrophobic surfaces: From the lotus leaf to the submarine, Comptes Redus Mecanique, 340(1-2): 18-34.
11. Cumpston, B.H., Ananthavel, S.P., Barlow, S., Dyer, D.L., Ehrlich, J.E., Erskine, L.L., Heikal, A.A., Kuebler, S.M., Lee, I.Y.S., McCordMaughon, D., Qin, J., Rockel, H., Rumi, M., Wu, X.L., Marder, S.R. and Perry, J.W. 1999. Two-photon polymerization initiators for three-dimensional 67 optical data storage and microfabrication, Nature, 398 (6722): 51-54.
12. Jeon, H., Koo, S., Reese, W.M., Loskill, P., Grigoropoulos, C.P. and Healy, K.E. 2015. Directing cell migration and organization via nanocrater-patterned cell-repellent interfaces, Nature Materials, 14(9): 918-925.
13. Shi, X., Li, X., Jiang, L., Qu, L., Zhao, Y., Ran, P., Wang, Q., Cao, Q., Ma, T. and Lu, Y. 2015. Femtosecond laser rapid fabrication of large-area rose-like micropatterns on freestanding flexible graphene films, Scientific Reports, 5: 17557.
14. Choi, H. K., Sohn, I.B., Noh, Y.C., Choi, Y.J. and Chang, I.G. 2013. Fabrication of breathable film using laser pulses, J. Korean Soc. Precis. Eng. 30(4): 409-413.
15. Yoo, S.R., Han, E.S., Lee, H.J., Cho, G.R., Song, H.Y., Kim, Y.J. and Kim, Y.H. 2016. A packaging method of kimchi product for preventing volumeincrement. KR 10-1677594.

투고: 2023.08.01 / 심사완료: 2023.08.10 / 게재확정: 2023.08.10