

PDMS 마이크로웰을 이용한 구면 형태의 실크 마이크로렌즈 제작

유찬영^{1*}, 에화엘라이자¹, 네티오폴에지키엘에드워드¹, 변경민², 최승호¹

연세대학교 미래캠퍼스 의공학부¹, 경희대학교 생체의공학과²

Facile fabrication of concave silk microlens using PDMS microwell

Chan Yeong Yu^{1*}, Elijah Effah¹, Ezekiel Edward Netthey-Oppong¹, Kyung Min Byun², Seung Ho Choi¹

Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Wonju, Republic of Korea¹

Department of Biomedical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Republic of Korea²

*yu01010356@yonsei.ac.kr

Abstract

The growing necessity for optical devices, such as microlens, with excellent biocompatibility has spurred the use of silk fibroin which possesses excellent intrinsic biocompatibility. However, since silk fibroin protein structure is sensitive to physical and chemical reactions, there is a high risk in directly applying the existing microlens process methods to silk fibroin. Although soft lithography process can be applied, it is complicated and inefficient to manufacture a spherically-shaped microlens mold for the fabrication of microlenses. This study finds a processing method for fabricating spherical silk microlens using a simple cylindrically patterned PDMS microlens mold without a spherically-shaped PDMS microlens mold.

1. 연구 배경-현재

최근, 생체 재료를 기반으로 한 광학 장치에 대한 수요가 증가함에 따라 기본적인 생체 광학 소자로서 조직과 광학 사이의 인터페이스 역할을 수행하는 마이크로렌즈 (microlense)가 생체고분자(biopolymer) 형태로 구현되어야 할 필요성이 증가했다. 합성 기술의 발전으로 콜라겐, 키토산, 실크 피브로인(silk fibroin)과 같은 생체고분자를 사용한 다기능 생체 의료 장치가 개발되었고, 이중 생체 고분자 중에서 누에나방(*Bombyx mori*)의 누에 실크가 생체 광학 소자의 이상적인 소재로 떠올랐다[1]. 천연 누에 실크에서 추출한 재생 실크 피브로인 (regenerated silk fibroin)은 필름, 섬유, 입자 등의 다양한 형태로 합성 및 변형될 수 있는 수성 형태(aqueous form)이다. 이를 재료로 사용하여 제작된 실크 필름은 우수한 투명도, 높은 표면 평탄도와 기계적 강도를 가져 광학 장치에 사용하기에 적합한 특성을 가지며, 간접 소프트 리소그래피(soft lithography) 방법으로 간단하고 효율적으로 제작될 수 있다[2]. 그러나, 표면이 매끄러운 오목한 마이크로렌즈의 마스터몰드를 제작하는 것이 어렵고 복잡하기에[3], 구면 형태의 마스터몰드를 사용하여 광학적 특성이 우수한 마이크로렌즈를 생산하는 것은 어렵다.

이 연구에서는 실크 마이크로렌즈의 간단하고 효율적인 제작을 위한 새로운 공정 방법을 제안한다. 이는 오목한 마스터몰드의 정교한 제작 없이 재현 가능한 구형의 매끄러운 실크 마이크로렌즈를 제작하기 위함이다.

이 새로운 공정 방법은 실크 피브로인의 액상과 고체 결정의 독특한 특성을 이용하며, 오목한 마이크로렌즈의 몰드 대신 미세기둥 구조를 가진 단순패턴 PDMS 몰드를 사용한다. 균일한 실크 마이크로렌즈를 형성하기 위해 일정한 접촉각으로 실크 용액의 방울을 생성한다. 그림1과 같이 실크용액 - PDMS - 기체 계면(silk solution - PDMS - vapor interface)부근에서 실크 용액은 부분적 습윤 상태(partial wetting state)를 띄며, 마이크로 웰 어레이(microwell array) 내에서 구형 표면을 형성한다. 이때, 단위 패턴화된 영역의 동일한 표면적으로 인해 부분적 습윤 상태의 단위 실크 방울은 PDMS 마이크로 웰 어레이 내부의 실크용액 - PDMS - 기체 계면 부근에서 균일한 접촉각을 이룬다. 실크 단백질이 정렬되면 견고하고 일관된 매끄러운 곡면을 가진 렌즈를 형성한다.

이 연구에서는 3x3cm 크기의 영역에 걸쳐 일정한 렌즈

직경과 곡률 반경을 갖는 균일한 평면-볼록 실크 마이크로렌즈 어레이를 제작한다. 그리고 이러한 렌즈 구조가 한 영역 내에 통일되고 일관성 있게 제작될 수 있음과, 같은 공정 방법으로 반복 제작했을 때 렌즈 구조가 높은 정확도와 효율로 재현될 수 있음을 확인한다.

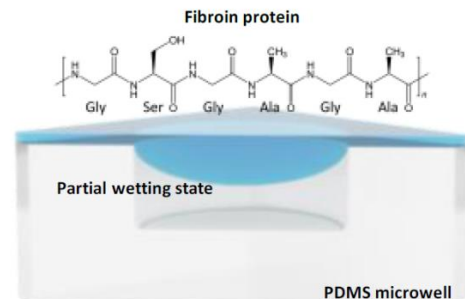


그림 1. 미세기둥 구조를 가진 PDMS에 실크 용액을 채운 단면도

2. 연구 방법

누에나방의 고치에서 염증 반응을 유도하는 세리신 단백질을 제거하고 재생 실크 피브로인을 추출하기 위해 누에 고치를 작은 조각으로 잘라 0.02M 탄산나트륨 수용액에 100°C에서 30분 동안 끓였다. 그리고 탈검된 피브로인 다발을 4시간 동안 60°C에서 9.3M 농도의 LiBr 용액에 용해했다. 생성된 용액에서 불순물을 제거하기 위해 3일 동안 투석하고 900rpm에서 20분간 원심분리하여 7~8%(wt/vol)의 순수 실크 피브로인 용액을 얻었다.

실크 마이크로렌즈 어레이는 PDMS 마이크로웰 어레이에 실크 피브로인 용액을 캐스팅하여 제작했다. SU8 마스터에서 PDMS를 성형하여 PDMS 마이크로웰 어레이를 제작했다. 이후 실크 피브로인 용액 400~1mL를 PDMS 마이크로웰 어레이에 부어 캐스팅했다. 용액의 건조가 완료되면 실크 마이크로렌즈 어레이를 PDMS 마이크로웰 어레이에서 부드럽게 제거하여 완성했다.

그림 1과 같이 실크 용액은 부분적 습윤 상태에서 표면 구조에 오목한 렌즈 모양을 만든다. 마이크로웰 어레이 내부에서 부분적 습윤 상태는 고체-액체, 액체-기체, 고체-기체 계면을 가지며, 단위 패턴 영역의 동일한 표면적 때문에 부분적 습윤 상태의 단위 실크 방울은 고체-기체-액체 계면에서 균일한 접촉각 θ 를 이룬다. 따라서 실크

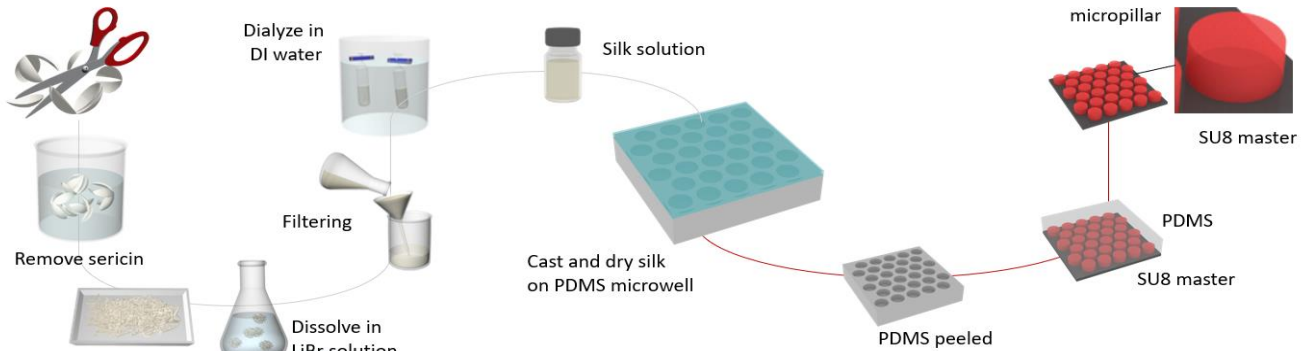


그림 2. 실크 마이크로렌즈 어레이 제작 과정

용액의 방울은 PDMS 마이크로웰 어레이와 일정한 접촉각을 유지하며 매끄러운 곡면을 가진 실크 마이크로렌즈를 형성한다.

이 방법을 통해 전체 영역에 걸쳐 일정한 렌즈 직경과 곡률 반경을 갖는 균일한 평면 - 볼록 실크 마이크로렌즈 어레이를 제작하였다.

표면 장력보다 작기 때문에 PDMS 마이크로웰 내부에서 부분적 습윤 상태를 형성한다. 실크 단백질이 풀리면 대부분의 2차 구조가 결정화되어 견고하고 일관된 곡면을 가진 렌즈를 형성한다. 마이크로렌즈의 크기와 모양은 액체의 표면장력과 액체-기체 계면의 면적비, PDMS 마이크로웰 어레이의 고체-액체 계면의 면적비에 의해 결정된다. 이는 오목한 몰드의 정교한 제작 없이 균일한 크기의 PDMS 마이크로웰을 제작하여 일관된 구면 렌즈 구조를 간단하게 재현할 수 있음을 의미한다.

또한, 소프트 리소그래피 기반 주조 공정은 주조 용액의 부피 변화에 대해 견고하여 일관성 있게 통일된 렌즈 구조를 생성하며 이는 초점 거리, 초점 직경, 개구수, 이미징 성능 등의 광학적 특성을 포함하여 단일 영역 내에서 다른 렌즈 간에 매우 일관된 구조를 효율적으로 제조할 수 있는 효율적인 방법을 제공한다.

이 연구에서는 매끄러운 곡면과 균일한 곡률을 가진 실크 마이크로렌즈를 제작하는 새로운 방법을 제시하였다. 이 공정 방법으로 생체소재의 신흥 분야에 대해 높은 정확도와 효율을 가진 실크 마이크로렌즈의 경제적이고 친환경적인 지속 가능한 생산을 제공할 수 있다.

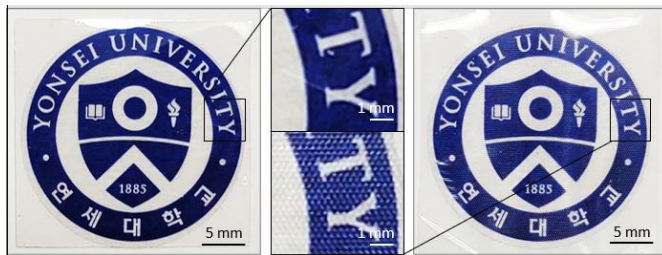


그림 3. 실크필름과 실크 마이크로렌즈 어레이의 "YONSEI UNIVERSITY" 로고 촬영

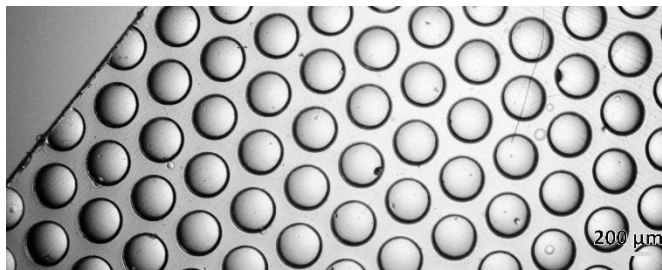


그림 4. 제작한 실크 마이크로렌즈 어레이

3. 연구 결과

그림 3은 각각 "YONSEI UNIVERSITY" 로고에 실크 필름을 배열한 것(좌)과 실크 필름 위에 제작한 실크 마이크로렌즈 어레이를 배열한 것(우)이다. 좌측에서는 실크 필름을 통해 "YONSEI UNIVERSITY" 로고가 선명하게 보이지만, 우측에서는 실크 마이크로렌즈 어레이가 로고를 픽셀로 나뉜 것처럼 보인다. 로고의 'TY' 부분을 확대하면 마이크로렌즈 어레이를 관찰할 수 있다. 전체 영역 (3×3cm)에 걸쳐 실크 마이크로렌즈 어레이는 일관된 렌즈 직경을 가지며, 이는 단일 영역 내에서 높은 구조적 일관성을 가짐을 의미한다.

실크 피브로인의 2차 구조는 온도, 기계적 전단력 및 이온 강도에 취약해, 나노구조에 강한 영향을 미치는 가공 단계가 필요한 대부분의 마이크로렌즈 제작 기술이 실크 피브로인의 공정에 적용할 수 없다. 따라서 연구에서는 실크 피브로인의 액상과 고체 결정의 특성을 이용하는 새로운 방법을 소개한다. 실크 용액이 액상에서 PDMS 마이크로웰 어레이 내부의 표면 장력에 의해 매우 매끄러운 곡면으로 형성된다. 실크 용액의 표면 장력은 증류수의

4. Acknowledgements

This work was carried out with the support of the "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ015373)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

5. 참고 문헌

- [1] Huang, W. W., Ling, S. J., Li, C. M., Omenetto, F. G. & Kaplan, D. L. "Silkworm silk-based materials and devices generated using bio-nanotechnology." *Chemical Society Reviews*, Vol 47, No 17, p.6486-6504, 2018
- [2] Perry, H., Gopinath, A., Kaplan, D. L., Dal Negro, L. & Omenetto, F. G. "Nano and micropatterning of optically transparent, mechanically robust, biocompatible silk fibroin films." *Advanced Materials*, Vol 20, No 16, p.3070-3072, 2008
- [3] Albero, J. et al. "Fabrication of spherical microlenses by a combination of isotropic wet etching of silicon and molding techniques." *Optics Express*, Vol 17, No 8, p.6283-6292, 2009