

< 논문 >

## UV 나노 엠보싱 공정을 이용한 고종횡비 고분자 나노 섬모 어레이 제작

김동성<sup>†</sup> · 이현섭<sup>\*</sup> · 이정현<sup>\*\*</sup> · 이건홍<sup>\*\*</sup> · 권태현<sup>\*</sup>  
(2005년 9월 21일 접수, 2006년 5월 1일 심사완료)

### Manufacture of High-Aspect-Ratio Polymer Nano-Hair Arrays by UV Nano Embossing Process

Dong Sung Kim, Hyun Sup Lee, Junghyun Lee, Kun-Hong Lee and Tai Hun Kwon

**Key Words :** Anodic Aluminum Oxide(AAO; 양극 산화 알루미늄), High-Aspect-Ratio(고종횡비), Nano-Hair(나노 섬모), Nano-Mold Insert(나노 금형 인서트), Nano-Pillar(나노 기둥), UV Nano Embossing(UV 나노 엠보싱)

#### Abstract

High-aspect-ratio nano-hair or nano-pillar arrays have great potential in a variety of applications. In this study, we present a simple and cost-effective replication method of high-aspect-ratio polymer nano-hair arrays. Highly ordered nano-porous AAO (anodic aluminum oxide) template was utilized as a reusable nano-mold insert. The AAO nano-mold insert fabricated by the two-step anodization process in this study had close-packed straight nano-pores, which enabled us to replicate densely arranged nano-hairs. The diameter, depth and pore spacing of the nano-pores in the fabricated AAO nano-mold insert were about 200nm, 1 $\mu$ m and 450nm, respectively. For the replication of polymer nano-hair arrays, a UV nano embossing process was applied as a mass production method. The UV nano embossing machine was developed by our group for the purpose of replicating nano-structures by means of non-transparent nano-mold inserts. Densely arranged high-aspect-ratio nano-hair arrays have been successfully manufactured by means of the UV nano embossing process with the AAO nano-mold insert under the optimum processing condition.

#### 1. 서론

2000년 미국의 National Nanotechnology Initiative의 선언에 힘입어 현재 나노 크기의 구조물을 제작하는 기술은 많은 진보를 이루었다. 또한 나노 기술은 그 잠재적 기술의 파급성으로 인해 다양한 방면의 연구자들로부터 많은 관심을 받고 있다.

이 때, 여러 가지 나노 기술의 응용을 위해서는 나노 크기의 작은 구조 제작에 대한 연구가 선행적으로 이루어져야 할 것이다. 나노 구조물 제작 기술에 있어서, 전자 빔 리소그래피(electron beam lithography)와 같은 포토 리소그래피(photo-lithography) 공정 기술은 최근 수십 나노 미터 정도 크기의 구조물까지 정밀하게 제작하는 것을 가능하게 하고 있다. 하지만 전자 빔 리소그래피의 경우 제작 시간과 제작 비용이 많이 든다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 전자 빔 리소그래피 등의 방법으로 제작한 마스터를 이용하여 고분자 나노 구조물을 제작하는 소프트 리소그래피(soft lithography) 공정<sup>(1)</sup>이 많은 관심을 받고 있다. 여러 가지 종류의 소프트 리소그래피 공정 중에서

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과  
E-mail : thkwon@postech.ac.kr  
TEL : (054)279-2175 FAX : (054)279-5899

<sup>\*</sup> 포항공과대학교 기계공학과  
<sup>\*\*</sup> 포항공과대학교 화학공학과

나노임프린트 리소그래피(nano-imprint lithography) 기술<sup>(2,3)</sup>은 경제적이고 효과적으로 나노 구조물을 제작할 수 있는 방법으로 인식되고 있다.

이렇게 제작되는 여러 가지 나노 구조물들 중에서, 나노 섬모(nano-hair) 혹은 나노 기둥(nano-pillar) 어레이 구조는 다양한 분야의 적용 가능성을 가지고 있다.<sup>(4-9)</sup> 나노 섬모 어레이의 적용 예로서, gecko 도마뱀의 발바닥에 존재하는 마이크로/나노 섬모 구조를 모사하여 건조 접착제(dry adhesive)를 구현하고자 하는 연구가 수행되었다.<sup>(4,5)</sup> 또한 마이크로 채널에 나노 기둥 어레이를 도입하여 직류 전기장을 통해 간단하게 긴 DNA 분자를 분리하는 연구가 이루어졌다.<sup>(6)</sup> 그리고 밀집된 나노 기둥 어레이를 이용하여 면역검정(immunoassay)의 효율을 높이거나,<sup>(7)</sup> 역학적 센서로 적용하려는 시도가 이루어졌다.<sup>(8)</sup> 마지막으로 나노 섬모를 기판 위에 제조하여 초소수성(superhydrophobic) 박막을 제작<sup>(9)</sup>하는 연구가 수행되었다.

이에, 본 논문에서는 간단하고 경제적으로 높은 고풍비를 가지는 고분자 나노 섬모 어레이를 성형하는 연구를 소개하고자 한다. 고분자 나노 섬모의 성형을 위해 나노임프린트 리소그래피 기술의 하나로서, 본 연구 그룹이 UV 비투과 금형 인서트로도 고분자 나노 구조물 성형이 가능하도록 개발한 UV 나노 엠보싱 공정(UV nano embossing process)<sup>(10,11)</sup>을 적용하였다. UV 나노 엠보싱 공정에 사용될 나노 금형 인서트로써는 기존의 전자 빔 리소그래피 공정으로 제작되는 금형 인서트보다 간단하고 값싸게 제작할 수 있는 양극 산화 알루미늄(anodic aluminum oxide; AAO)을 사용하였다. 이때, 본 연구에서 제작된 AAO 금형 인서트는 2 단계 산화(two-step anodization) 공정을 통해 제작되며, 밀집하여 정렬된 높은 고풍비의 나노 구멍(nanopore)들을 가지고 있어, 이를 이용한 UV 나노 엠보싱 공정을 통해 밀집하여 정렬된 높은 고풍비의 나노 섬모들을 제작할 수 있다. 또한 UV 나노 엠보싱 공정에서는 제작된 AAO 나노 금형 인서트를 나노 섬모 어레이 성형에 재사용할 수 있어, 보다 경제적으로 나노 섬모 어레이를 대량으로 제작하는 것이 가능하다.

## 2. AAO 나노 금형 인서트 제작

Fig. 1 은 본 연구의 UV 나노 엠보싱 공정에서 나노 금형 인서트로 사용된 AAO 기판의 제작을 위한 2 단계 산화 공정을 도식적으로 보여준다.

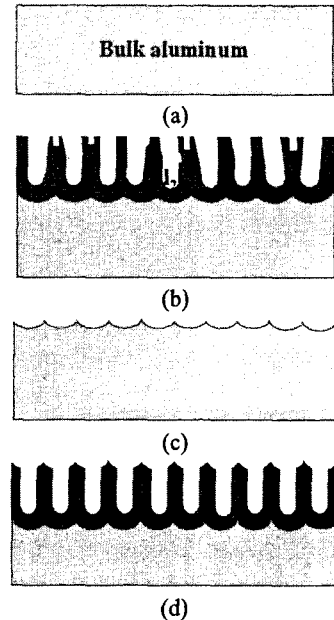


Fig. 1 Schematic diagram of fabrication process of AAO nano-mold insert: (a) electropolishing of bulk aluminum substrate, (b) first anodization, (c) selective wet etching of  $Al_2O_3$  and (d) second anodization (final AAO nano-mold insert)

제작 공정을 설명하면 다음과 같다. 우선 산화 공정에 앞서, 10mm × 24mm 에 1mm 두께를 가지는 99.999% 알루미늄 기판을 Fig. 1(a)와 같이 전해연마(electropolishing)하여 기판 표면을 고르게 한다. 알루미늄 기판의 전해연마는 과염소산( $HClO_4$ )과 에탄올( $C_2H_5OH$ )을 1:4 부피 비로 섞은 용액 안에서, 기판을 양극으로 하고 백금을 음극으로 하여 양극과 음극 사이의 전압을 20V로 인가한 상태에서 약 3 분간 수행하였다. 이 때 용액의 온도는 7°C 로 유지되었으며, 용액을 일정 속도로 교반(stirring)하여 주었다.

전해연마를 통해 고른 표면을 가진 알루미늄 기판에 Fig. 1(b)~(d)의 2 단계 산화 공정을 가해 알루미늄 기판 위에 육각형으로 일정하게 배열되는 나노 구멍 구조의 산화 알루미늄 층을 얻을 수 있다. 우선 연마된 알루미늄 기판을 양극으로, 백금을 음극으로 하여 0.1M 인산 ( $H_3PO_4$ ) 용액 안에서 0°C 의 일정 온도로 195V 의 전압을 인가하여 약 12 시간 동안 Fig. 1(b)와 같이 1 차 산화 공정을 수행하였다. 이 때, 1 차 산화 공정에서 형성된 AAO 층은 Fig. 1(b)에서 도식적으로 보여주듯이 불규칙적으로 배열된 나노 구멍들을 가지게 된다. 이에 AAO 가 형성된 알루미늄 기판을 Fig. 1(c)와 같이 1.8 wt. %의 크롬산( $H_2CrO_4$ )과 6 wt. %의 인산의 혼

합 용액에 65°C의 일정 온도로 5시간 가량 담궈 1차 산화과정 동안 형성된 불규칙적인 AAO 층을 식각한다. 이렇게 1차 산화과정을 통해 형성된 AAO 층을 모두 식각하고 나면 Fig. 1(c)가 도식적으로 보여주듯이 알루미늄 기판 위에 규칙적으로 정렬된 나노 딥플(nano-dimple) 구조가 형성된다. 이 규칙적인 나노 딥플 구조를 기초로 2차 산화공정을 수행하면 규칙적으로 밀집하여 정렬된 나노 구멍 구조를 얻을 수 있다. 이에 마지막으로 Fig. 1(c)의 알루미늄 기판에 Fig. 1(d)와 같이 1차 산화공정과 마찬가지로 방법으로 약 20분간 산화공정을 수행하여 약 2μm 두께의 AAO 층을 형성한다. 그 후 30°C의 일정 온도로 5 wt. %의 인산에 화학 처리하여 나노 구멍의 지름을 변화시켜 원하는 나노 구멍의 구조를 얻게 된다. 즉, 2차 산화 공정 중에 인가 전압을 변화시켜 나노 구멍의 지름을 바꿀 수 있으며, 산화 시간을 변화시켜 나노 구멍의 깊이를 선택적으로 바꿀 수 있다.<sup>(12)</sup> 이는 본 연구에서 사용된 AAO 나노 금형 인서트를 통해 제작되는 나노 섬모의 지름과 높이를 선택적으로 디자인할 수 있음을 의미한다.

Fig. 2는 이렇게 제작된 AAO 나노 금형 인서트의 SEM(scanning electron microscope) 사진을 보여준다. 10mm × 24mm의 알루미늄 기판 위에 제작된 AAO 나노 구멍의 지름, 깊이는 각각 약 200nm, 1μm으로 중형비는 5에 해당하였다. 또한 나노 구멍들간의 거리는 약 450nm였다. Fig. 2로부터 2차 산화 과정을 거쳐 제작된 나노 구멍들이 육각형 구조로 규칙적으로 밀집되어 정렬되어 있음을 알 수 있다.

### 3. 나노 섬모 어레이 성형을 위한 UV 나노 엠보싱 공정

Fig. 3은 본 연구 그룹에 의해 제작된 UV 나노 엠보싱 장치를 도식적으로 보여준다. 본 UV 나노 엠보싱 장치는 UV가 투과되지 않는 금형 인서트로도 마이크로/나노 수준의 구조물 성형이 가능하도록 고안되었다.<sup>(10,11)</sup> 본 장치는 크게 다음과 같은 5개의 요소 장치들로 구성되어 있다: (1) 엠보싱 시에 나노 금형 인서트에 압력을 전달하기 위한 공압 엠보싱 시스템(pneumatic embossing system), (2) 엠보싱 과정 중에 나노 금형 인서트와 UV 경화 고분자 사이에 형성될 수 있는 포착 공기(air entrapment)나 미세 먼지들에 의한 오염을 방지하기 위해, 엠보싱 공간을 진공 환경으로 만들어주기 위한 진공 챔버 시스템, (3) 공정시, UV 경화

고분자 수지를 일정량 공급하기 위한 UV 수지 토출 시스템(UV resin dispensing system), (4) UV 광원, UV 거울 및 UV 광원의 냉각을 위한 냉각 채널로 구성되는 UV 조사 시스템, (5) 마지막으로 전체 UV 나노 엠보싱 공정을 자동화하기 위한 제어/모니터링 시스템. 이 때, 사용된 UV 광원(SEN Lights Corp.)은 365nm의 파장을 가지며, 1.5kW의 출력을 가지고 있다. UV 광(UV light)은 Fig. 3에 보여지듯이 석영 기판을 통해 UV 경화 수지에 조사되며, UV 조사량(UV dose)은 석영 기판 바로 밑에 위치하는 UV 셔터를 통해 조절된다.

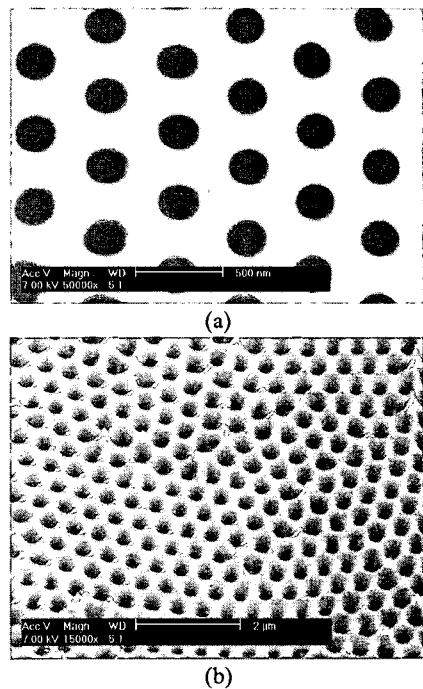


Fig. 2 SEM pictures of the fabricated AAO nano-mold insert: (a) top view and (b) tilted view

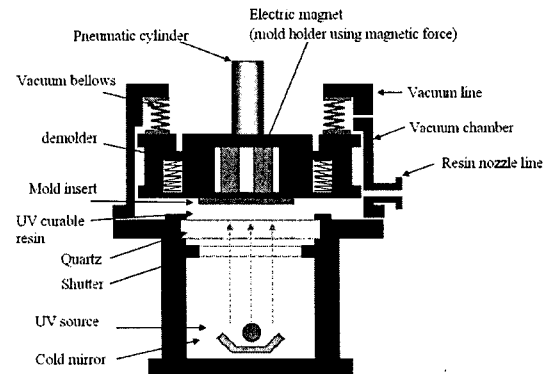


Fig. 3 Schematic diagram of a UV nano embossing machine developed by our group<sup>(10,11)</sup>

본 연구의 UV 나노 엠보싱 공정은 실온에서 수행되며, 자세한 공정 순서를 설명하면 다음과 같다. (1) 우선 제작된 AAO 나노 금형 인서트를 위쪽 금형 홀더(mold holder)에 장착한다. (2) 제작되는 나노 섬모의 오염을 방지하기 위해 진공 플랜지(vacuum flange)를 이용하여 진공 환경을 만든다. (3) UV 경화 고분자 수지인 RenShape SL 5180(Vantico Inc.)을 아래쪽 석영 기판 위에 놓여진 슬라이드 유리 위에 일정량 토출한다. (4) 공압 엠보싱 시스템을 통해 AAO 나노 금형 인서트를 공급된 UV 경화 수지에 엠보싱한다. 본 연구 그룹에서 개발한 UV 나노 엠보싱 장치는 0.2MPa의 압력으로 엠보싱을 수행하도록 설계되어 있다. (5) UV 셔터를 열어 석영 기판을 통해 일정 조사 시간(exposure time) 동안 UV 광을 UV 경화 수지에 조사한다. (6) 진공을 방출(release)하고 AAO 나노 금형 인서트로부터 나노 섬모를 포함하는 경화된 고분자를 떼어낸다.

UV 경화 수지는 UV 광에 민감하게 반응하기 때문에 나노 섬모 어레이의 성공적인 제작을 위해 적합한 공정 조건을 결정하는 것이 중요하다. 일반적으로 낮은 종횡비를 가지는 나노 구조물의 경우 나노 구조물의 이형(de-embossing)이 그리 어렵지 않으나, 본 연구에서 디자인된 상대적으로 높은 종횡비를 가지는 나노 구조물 성형에 있어서는, UV 광 조사 후 나노 금형 인서트와 경화된 고분자 나노 섬모 어레이 모두가 손상되지 않게 고분자 나노 구조물을 박리(detachment)하는 것이 어려운 문제 중 하나이다. 이에 본 연구에서는 UV 광 조사 시간을 조절하여 UV 나노 엠보싱 공정에서 가장 중요한 공정 변수인 UV 조사량을 변화시키며 나노 섬모 성형 실험을 수행하였다. 실제로 조사 시간이 적정 조사 시간보다 짧아 과소 경화(under-curing)된 경우 UV 경화 수지와 나노 금형 인서트 간의 접착력이 커져 이형이 어려워질 수 있으며, 조사 시간이 길어져 과다 경화(over-curing)된 경우는 UV 경화 수지가 취화(brittle)되어 이형을 어렵게 한다.

#### 4. 결과 및 토론

언급한 바와 같이 UV 광 조사 시간이 길어질 경우, UV 경화 수지가 취화되어 이형이 어려워진다. 이에 엠보싱 및 UV 조사 후(즉, 3장에서 소개한 공정의 (5)번 과정 후)에 나노 금형 인서트와 경화된 수지를 증류수에 넣어 이형을 용이하게 하였다. Fig. 4는 이런 과정을 거쳐 제작된 고분자 나노 섬모 어레이를 보여준다. 증류수를 이용하여 경화된 고분자

를 이형한 결과 나노 섬모들이 끊어지는 경우 없이 나노 금형 인서트로부터 고분자를 박리(detachment)하는 것이 가능하였으나, Fig. 4가 보여 주듯이 이형 후 나노 섬모들 사이의 증류수가 증발하면서 표면 장력 효과에 의해 근접한 나노 섬모들끼리 달라붙는 현상이 일어난 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 증류수 등을 이용한 이형 방법보다는 직접 이형 방법이 필요함을 알 수 있었다.

Fig. 5는 이와 달리 UV 조사 시간이 짧아서 과소 경화된 상태로 제작된 나노 섬모 어레이와 박리 후 나노 금형 인서트의 모습을 보여준다. 언급한 바와 같이 과소 경화된 고분자는 금형의 접촉면과 접착력이 커지게 되어 이형이 어려워진다. Fig. 5(a)는 실제로 박리가 제대로 이루어지지 않아 많은 수의 고분자 나노 섬모들이 끊어져 금형에 남아있는 모습을 보여준다. 결과적으로 성형된 나노 섬모 어레이는 Fig. 5(b)와 같이 많은 수의 나노 섬모들이 끊어져 짧은 섬모들이 성형된 것을 확인할 수 있다. 또한 과소 경화된 고분자의 경우 낮은 탄성 계수(Young's modulus)를 가지기 때문에 고종횡비를 가지는 나노 섬모들이 형상을 유지하지 못하고 바닥면에 눕는 것을 확인할 수 있었다.

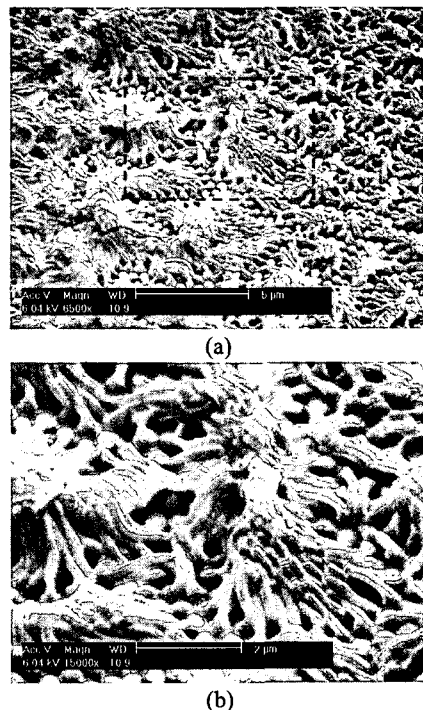
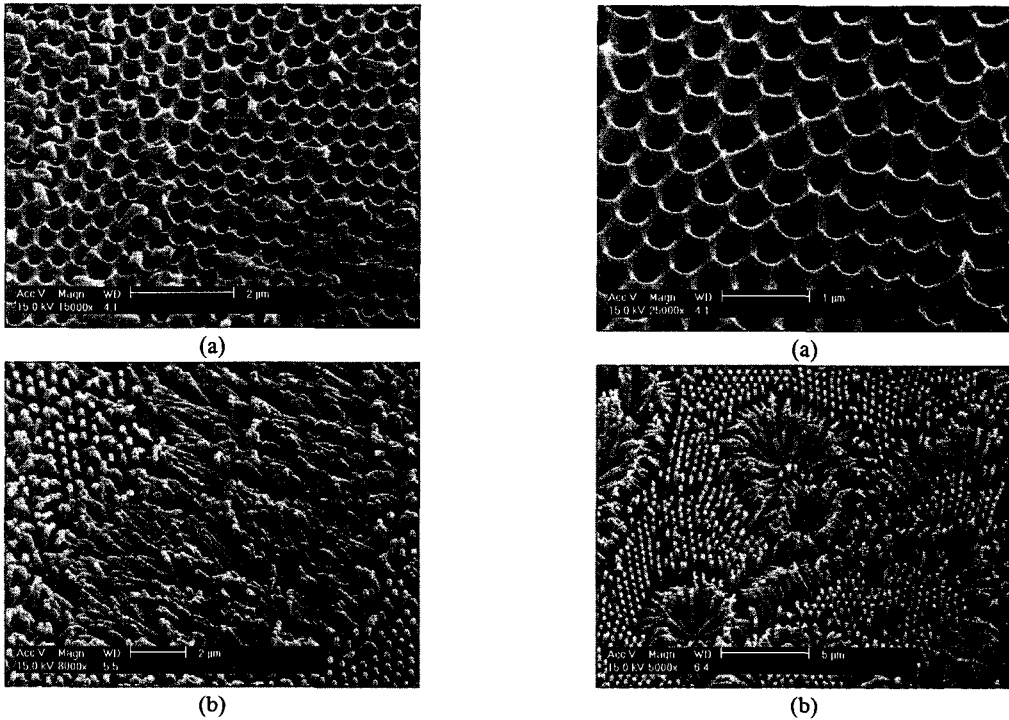
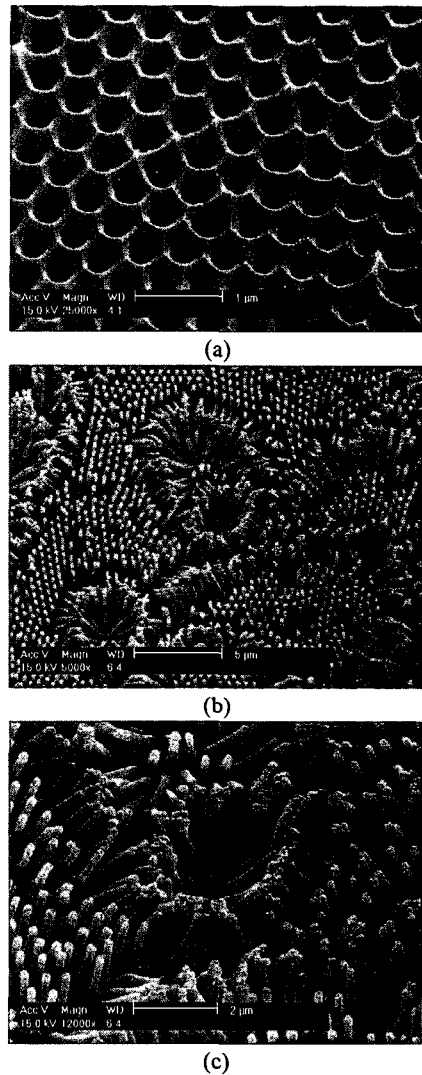


Fig. 4 Titled SEM pictures of (a) fabricated polymer nano-hair arrays by immersing nano-mold insert and over-cured polymer into distilled water to help de-embossing and (b) enlarged view of the dashed area in (a)



**Fig. 5** Tilted SEM pictures as an example of failure due to under-curing: (a) AAO nano-mold insert after de-embossing and (b) fabricated polymer nano-hair arrays

이렇게 UV 조사 시간에 대한 공정 변수 연구를 수행해 본 결과, 본 연구 그룹이 개발한 UV 나노 엠보싱 장치를 이용할 경우 12 분의 UV 조사 시간을 적용할 경우 성공적으로 나노 섬모 어레이를 제작할 수 있음을 알 수 있었다.<sup>(11)</sup> Fig. 6 은 이렇게 성공적으로 제작된 고분자 나노 섬모 어레이와 함께 이형 후의 AAO 나노 금형 인서트를 보여준다. 제작된 나노 섬모 어레이는 AAO 나노 금형 인서트에 존재하는 나노 구멍 어레이로 성형했기 때문에 전체 10mm × 24mm 크기의 고분자 박막에 지름, 높이가 각각 약 200nm, 1μm 이며, 나노 섬모 간의 거리가 약 450nm 가 되도록 성형되었다. Fig. 6(a)로부터 금형에 끊어진 나노 섬모없이 성형이 잘 이루어졌음을 확인할 수 있다. Fig. 6(b)로부터 대부분의 나노 섬모들이 비슷한 치수를 가지고 있으나, 높이가 길게 성형된 나노 섬모들이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이는 우선 AAO 나노 금형 인서트의 나노 구멍들이 가질 수 있는 약간의 불규칙성으로 인해 긴 나노 섬모들이 성형될 수 있다고 생각할 수 있다. 혹은 경화된 고분자의 이형 과정에서 금형 접촉면과의 접착력에 의해 나노 섬모의 길이가 늘어난 것으로도 볼 수 있다. 이러



**Fig. 6** Tilted SEM pictures of (a) AAO nano-mold insert after de-embossing, (b) successfully fabricated polymer nano-hair arrays and (c) enlarged view of the dashed area in (b)

한 나노 섬모의 성형 특징들은 성형된 10mm × 24mm 크기의 고분자 박막에 전체적으로 나타나고 있음을 확인하였으며, 넓은 면적에 걸쳐 존재하는 나노 섬모 어레이의 패턴을 모두 파악할 수는 없었지만, 여러 번의 성형 과정을 통해 비슷한 패턴의 나노 섬모 어레이들을 재현성있게 성형할 수 있음을 확인하였다.

특히, Fig. 6(c)에서 볼 수 있듯이, 상대적으로 중형비가 작은 나노 섬모의 경우 스스로 형상을 유지하며 서 있는 것을 확인할 수 있으며, 중형비가 크게 성형된 나노 섬모의 경우 인접한 나노 섬모들과 어느 정도 달라붙는 현상이 나타나고 있음을

확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 사용된 고분자의 탄성 계수로는 인접한 고중형비의 나노 섬모 사이에 형성되는 전자기적 혹은 분자학적 인력을 지탱할 수 없음을 의미한다. 결과적으로 본 연구에서 사용된 UV 경화 수지를 사용할 때, 이렇게 달라붙는 현상을 해결하기 위해서는 나노 섬모의 중형비를 조절하여 스스로 형상을 유지할 수 있는 나노 섬모 구조를 제작할 수 있을 것이다. 혹은 보다 높은 탄성 계수를 가지는 고분자를 이용할 경우 스스로 형상을 유지할 수 있는 고중형비 나노 섬모 구조를 제작할 수 있을 것이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 높은 고폭비를 가지는 고분자 나노 섬모 어레이를 넓은 면적에 걸쳐 간단하고 경제적인 방법으로 제작할 수 있는 방법을 소개하였다. 나노 섬모 어레이의 경제적인 대량 생산을 위해 본 연구 그룹에서 개발한 UV 나노 엠보싱 장치를 적용하여 고분자 나노 섬모 어레이를 제작하였다. UV 나노 엠보싱 공정에 사용할 나노 금형 인서트로서, 밀집되어 정렬된 나노 구멍을 가지는 간단하게 제작된 양극 산화 알루미늄(AAO)이 사용되었다. UV 나노 엠보싱 공정에 대한 공정 변수 연구를 통해 나노 금형 인서트에 끊겨진 나노 섬모 없이 고중형비를 가지는 나노 섬모 어레이를 성공적으로 성형할 수 있었다. 특히 본 공정에서는 AAO 나노 금형 인서트를 재사용할 수 있어 보다 경제적으로 나노 섬모 어레이를 제작하는 것이 가능하였다.

마지막으로 본 연구에서 제작된 나노 섬모 어레이는 gecko 도마뱀 발 섬모의 생체 모사, 긴 DNA 분자 분리, 면역검정, 역학적 센서 및 초소수성 박막 제작 등으로 적용이 가능할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술부의 특장기초연구지원사업(R01-2005-000-10917-0)의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사한다.

## 참고문헌

- (1) Xia, Y. and Whitesides, G.M., 1998, "Soft Lithography," *Angew. Chem. Int. Ed.*, Vol. 37, pp. 550~575.
- (2) Chou, S. Y. Krauss, P. R. and Renstrom, P. J., 1996, "Nanoimprint Lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 14, pp. 4129~4133.
- (3) Haisma J., Verheijen M., van den Heuvel, K. and van den Berg, J., 1996, "Mold-Assisted Nanolithography: A Process for Reliable Pattern Replication," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 14, pp. 4124~4128.
- (4) Geim A. K., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Novoselov K. S., Zhukov A. A. and Shapoval S. Y., 2003, "Microfabricated Adhesive Mimicking Gecko Foot-Hair," *Nat. Mater.*, Vol. 2, pp. 461~463.
- (5) Sitti M. and Fearing R. S., 2003, "Synthetic Gecko Foot-Hair Micro/Nano-Structures as Dry Adhesives," *J. Adhes. Sci. Technol.*, Vol. 17, pp. 1055~1073.
- (6) Kaji, N., Tezuka, Y., Takamura Y., Ueda, M., Nishimoto, T., Nakanishi, H., Horiike, Y. and Baba, Y., 2004, "Separation of Long DNA Molecules by Quartz Nanopillar Chips under a Direct Current Electric Field," *Anal. Chem.*, Vol. 76, pp. 15~22.
- (7) Kuwabara, K., Ogino, M., Motowaki, S. and Miyauchi, A., 2004, "Fluorescence Measurements of Nanopillars Fabricated by High-Aspect-Ratio Nanoprint Technology," *Microelectron. Eng.*, Vol. 73-74, pp. 752~756.
- (8) Schmitz, G. J., Brücker, Ch. and Jacobs P., 2005, "Manufacture of High-Aspect-Ratio Micro-Hair Sensor Arrays," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 15, pp. 1904~1910.
- (9) Öner, D. and McCarthy T. J., 2000, "Ultrahydrophobic Surfaces. Effects of Topography Length Scales on Wettability," *Langmuir*, Vol. 16, pp. 7777~7782.
- (10) Lee, H. S., Kim, D. S. and Kwon, T. H., 2005, "UV Nano Embossing Process for Replication of Polymer Nanostructures with UV Non-transparent Mold Inserts," *Proc. High Aspect Ratio Micro Structure Technology (HARMST) 2005*, Gyeongju, Korea, pp. 232~233.
- (11) Lee, H. S., Kim, D. S. and Kwon, T. H., 2005, "UV Nano Embossing Process for Polymer Nano Structures with Non-transparent Mold Insert," accepted for publication.
- (12) Hwang, S.-K., Jeong, S.-H., Hwang, H.-Y., Lee, O.-J. and Lee, K.-H., 2002, "Fabrication of Highly Ordered Pore Array in Anodic Aluminum Oxide," *Korean J. Chem. Eng.*, Vol. 19, pp. 467~473.