

## 고세장비 나노 헤어 성형 및 응용

유영은<sup>#</sup>, 김태훈<sup>1</sup>, 서영호<sup>2</sup>, 최두선<sup>2</sup>, 이학주<sup>2</sup>, 김완두<sup>2</sup>

### Molding of High Aspect Ratio Nano-Hair Array and Its Applications

Y. E. Yoo, T.H. Kim, Y. H. Seo, D.-S. Choi, H. J. Lee, W.D. Kim

#### Abstract

Some nano hair systems in the nature are found to show excellent adhesive characteristic, which is called dry adhesive, and synthetic nano hairs to mimic these adhesiveness are believed to have many applications. To develop a practical synthetic dry adhesive system, we mold nano hairs on plastic substrates using thermoplastic materials including COC, PP, PC and PMMA. and estimate the moldability and the adhesive characteristic. As a template for molding nano hairs, AAO membrane is first adopted, which is 60um thick and 13mm in diameter. This membrane has about a billion of through-holes of which diameter is around 200nm. This AAO membrane and the pellet of materials are stacked in the mold and pressed to mold after heating up to be melted. The AAO membrane is removed using KOH to obtain the molded nano hairs. As a result, the diameter of the molded hairs is around 200nm and the length is 2um ~ 60um depending on the molding conditions and materials. The molded nano hair substrates is estimated to show much better adhesive characteristic than a substrate without nano hairs.

**Key Words :** Nano hairs(나노헤어), molding(성형), AAO, dry adhesive

#### 1. 서론

디스플레이 기기용 광 부품, 미세 유체 소자, 광 저장 매체 등에서 광 전달 효율 개선, 표면 특성 조절 또는 정보 저장 용량 증가를 위해 서브 마이크로 크기의 패턴이나 구조물이 적극적으로 적용되고 있으며, 더욱 많은 응용 제품에서 이러한 미세 패턴이나 구조물을 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 이러한 미세 패턴의 특성은 패턴의 형상, 크기 및 배열 등에 따라 달라지게 되는데, 최근 도마뱀의 우수한 부착력의 근원이나 초소수성 표면 특성을 나타내는 것으로 규명된 나노 헤어 형태의 구조물에 대한 관심이 커지고 있다. 2000 년 Lewis and Clark college 의 Kellar

Autumn 등은 도마뱀의 우수한 부착 능력이 발바닥에 존재하는 나노 헤어인 seta [그림 1]와 부착 표면간의 van der Waals force 에 의한 것임을 규명하였다. 또한 이러한 나노 헤어는 길이가 30 ~ 130 um, 끝부분은 0.2 ~ 0.5 um 크기의 spatula 형태로 되어 있음을 측정하고 이러한 seta 가 1mm<sup>2</sup>의 면적에 약 5000 여개 존재하여 100mm<sup>2</sup>의 면적에서 10N 정도의 부착력이 가능함을 밝혔다[1]. 이를 기반으로 이후 우수한 부착력을 가지는 도마뱀 발바닥 구조를 모사하고자 하는 노력이 이루어지고 있으며, 인공 나노 헤어의 제작은 이러한 노력의 중요한 부분이다. 2003 년 University of Manchester 의 A.K. Geim 등은 폴리이미드 소재에 대해서 리소그래피 공정을 적용하여 길이 2um,

1. 충남대학교

2. 한국기계연구원

# 교신저자: 한국기계연구원

직경 0.5 $\mu\text{m}$ , 헤어간 거리 1.6 $\mu\text{m}$  의 나노 헤어 어레이를 제작, 1 $\text{cm}^2$  의 면적에서 3N의 부착력을 구현한 결과를 발표하였다[2]. Metin Sitti[3] 등은 PDMS 등의 소재를 이용하여 나노 헤어 클러스터를 제작하였으며, Carmel Majidi[4] 등은 epoxy 소재 및 AAO 나노 포어 필터를 직경 200nm, 길이 60  $\mu\text{m}$  의 나노 헤어 어레이를 제작하였다. 또한 최근 University of Akron 의 Betul Yurdumakan 등은 Multi-wall CNT 를 성장시켜 도마뱀 보다 200 배 강한 부착력을 얻었다고 발표하였다[5]. 이와 같이 도마뱀의 나노 헤어 구조를 모방하여 응용하려는 연구가 일부 연구 그룹을 중심으로 진행되고 있으며 긍정적인 결과도 발표되기 시작하였다. 본 연구에서는 다양한 기계적 및 화학적 특성의 소재가 가용한 열가소성 수지를 이용한 성형 공정을 적용하여 고세장비의 나노 헤어 어레이를 제작할 수 있는 기반 기술을 개발하였다.

## 2. 나노 헤어 어레이 성형

열가소성 수지를 이용한 나노 헤어의 성형을 위해서는 우선 적절한 나노 포어 구조의 마스터 제작이 필요하다. 나노 포어를 제작하는 여러 가지 방법이 개발되고 있는데, 이중 알루미늄을 양극 산화시키는 방법은 비용이나 공정 시간의 측면에서 큰 장점이 있다. 본 연구에서는 Whatman사에서 필터용으로 제조 판매하고 있는 AAO 멤브레인[그림 1]을 이용하였다. Whatman사의 AAO 멤브레인은 직경 13mm, 두께 60 $\mu\text{m}$  인 원형의 AAO 박막에 직경 200nm 의 관통된 구멍이 밀집되어 있는 것으로 대략  $10^9$  개의 구멍이 형성되어 있다.

나노 헤어 제작을 위한 열가소성 소재로는 COC(Cyclic Olefin Copolymer), Polycarbonate, Polypropylene, PMMA 를 적용하였으며, 사용된 소재의 주요 물성은 표에 나타내었다

나노 헤어 성형을 위해 그림 3 에 나타낸 바와 같은 금형을 제작하였다. 금형의 상하측에 전기 히터를 각각 설치하여 금형 온도를 250 $^{\circ}\text{C}$  이상 올릴 수 있도록 하였다. 용이한 성형 및 이형 공정을 위해서 별도의 알루미늄 판을 이용하였다.

나노 헤어의 압축 성형을 위해서 1ton 용량의 프레스기를 이용하였다. 우선 AAO 템플레이트 및 펠릿 형태의 열가소성 소재를 220 ~ 230  $^{\circ}\text{C}$  정도로 가열된 하측 금형의 캐비티에 올려놓은 후 소재가 Tg 이상으로 가열된 후 압축하여 성형하였다.

이때 성형 압력은 0, 30, 60, 70  $\text{kgf/cm}^2$  으로 성형하였으며, 성형 시간은 10 초 이하로 설정하였다.

성형 시편은 KOH 용액을 이용하여 AAO 를 부식시켜 제거한 후 나노 헤어 시편을 분리하였다.

## 3. 결과 및 분석

그림 4 ~ 6 에 성형된 나노 헤어 어레이의 SEM 사진을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 200nm 직경의 나노 헤어가 대량으로 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 성형된 나노 헤어의 길이는 대략 10  $\mu\text{m}$  ~ 60 $\mu\text{m}$  정도로 고세장비의 나노 헤어가 비교적 잘 성형되어 있음을 알 수 있다. 그림 4 는 COC 소재에 대해서 압축력 차이에 의한 성형 결과를 보여주고 있으나, 큰 차이는 보이지 않아 비교적 낮은 압력에서도 성형이 가능함을 알 수 있다. COC 소재의 경우 성형이 잘 되는 것을 알 수 있었다. 그림 5 는 COC 나노 헤어를 확대한 사진으로 끝 부분이 오목한 형태로 되어 있어, 성형 중 모세관력에 의해 COC 용융 수지의 유동이 발생한 것으로 판단된다. 성형 압력에 의해 끝 부분의 형상이 다소 차이를 보이고 있어 성형 조건에 따른 유동 및 나노 헤어의 형상에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 그림 6 은 성형된 Polypropylene 나노 헤어 시편으로 그림 5 의 COC 경우와 같이 나노 헤어가 서로 부착되어 클러스터를 형성하고 있는 것을 알 수 있는데, 이는 KOH 용액에서 AAO 를 제거한 후 물로 세정하고 건조하는 과정에서 나노 헤어 사이에 존재하는 물의 표면장력에 의한 것으로 판단되며, 이러한 나노 헤어간의 뭉침 현상은 나노 헤어 어레이의 접착력의 효율을 크게 떨어뜨리는 원인으로 알려져 있다.

성형된 나노 헤어 어레이의 접착력 시험을 위해 AFM 에 적용된 다이아몬드 형상의 캔틸레버로 시편 표면에 하중을 가한 후 제거하는 과정에서 변위 하중 곡선을 이용하여 COC 및 PP 나노 헤어 시편과 나노 헤어가 없는 시편의 접착력을 측정하였다. 측정 결과 나노 헤어가 있는 시편의 접착력이 없는 경우에 비해 크게 나옴을 알 수 있었으며, 나노 헤어 시편의 경우에도 소재 및 나노 헤어의 끝 부분 형상에 따라 접착력에 다소 차이가 발생함을 알 수 있었다(Table 1).

성형된 PP 나노 헤어 시편을 이용하여 그림 7 에 나타낸 바와 같이 20 개의 클립이 들어 있는 지퍼 백(중량 : ~ 13g)을 부착하여, 부착력이 전혀

없는 나노 헤어가 없는 시편의 결과를 고려할 때 Dry adhesive 의 가능성을 확인할 수 있었다.

### 3. 결론

본 연구에서는 COC, PP, PC, PMMA 등의 열가소성 수지 및 압축 성형을 이용하여 고세장비의 나노 헤어 시편을 제작하였다. 높은 점도를 가진 소재 특성에도 불구하고 비교적 우수한 성형 결과를 얻을 수 있었으나, 성형 압력 등에 의한 구체적인 유동 특성이나 나노 헤어의 형상 규명을 위한 추가 연구가 필요하다. 성형된 나노 헤어 시편을 이용한 접착력 시험을 수행하여 나노 헤어가 없는 시편 대비 매우 큰 접착력 결과를 얻었다. 향후 부착력 효율 개선을 위해서는 나노 헤어 시스템 설계, 이형 기술과 이형 후 나노 헤어간의 부착 방지 및 응용 기술 개발에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

### 후기

본 연구는 과학기술부의 “나노섬모 자연모사 원천기술 및 기반구축 사업”의 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분의 노고에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] Kellar Autumn, Yiching A. Liang, S. Tonia Hsieh, Wolfgang Zesch, Wai Pang Chan, Thomas W. Kenny, Ronald Fearing & Robert J. Full, 2000, "Adhesive force of a single gecko foot-hair," Nature, Vol. 405, pp. 681-684.
- [2] A. K. Geim, S.V.Dubonos, I.V. Grigorieva, K.S. Novoselov, A.A. Zhukov and S. Yu. Shapoval, 2003, "Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair," Nature Materials, Vol. 2, pp. 461-463
- [3] Metin Sitti and Ronald S. Fearing, 2003, "Synthetic gecko foot-hair micro/nano structures as dry adhesives," Journal of adhesion science and technology, Vol. 17 No. 8 pp.1055-1074
- [4] Carmel Majidi, Richard Groff, Ron Fearing, 2004, "Clumping and packing of hair arrays manufactured by nanocasting," Proceedings of IMECE'04, IECE2004-62142, pp. 1-6
- [5] Betul Yurdumakan, Nachiket R. Raravikar, Pulickel M. Ajayan and Ali Dhinojwala, 2005, "Synthetic gecko foot-hairs from multiwalled carbon nanotubes," Chem. Commun. 2005, pp. 3799-3801



Fig. 1 Nano-hairs(spatulae) of gecko

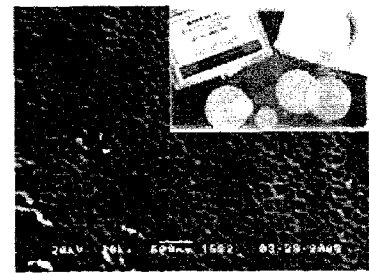


Fig. 2 AAO membrane(Anopore®, Whatman)

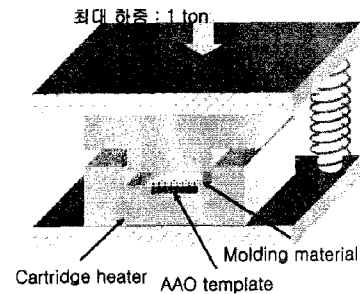


Fig. 3 Schematic of compression mold

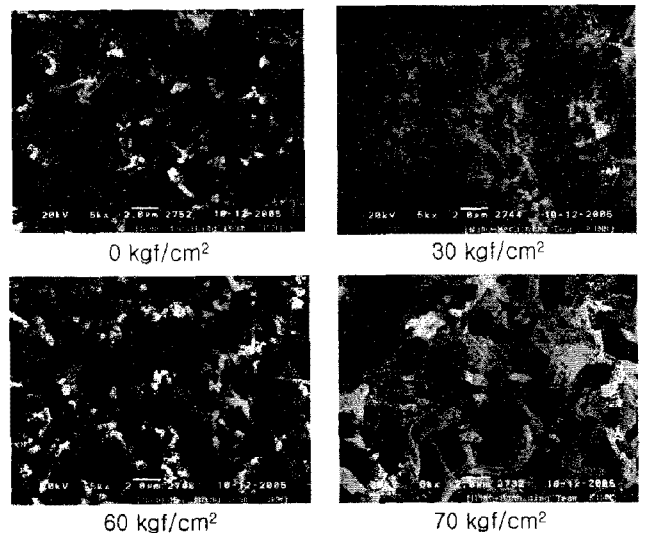


Fig. 4 Synthetic COC nano-hairs from different molding pressures

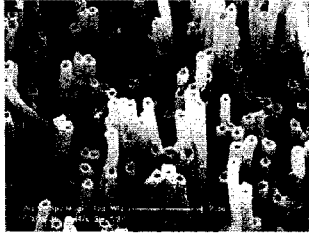


Fig. 5 An image at the end of COC nano-hairs

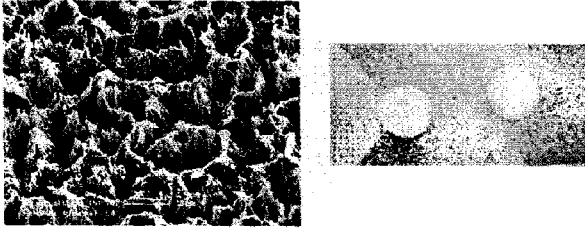


Fig. 6 PP substrate with nano-hairs on its surface



Fig. 7 Diamond-shaped cantilever in AFM system for adhesive test

Table 1 Some results on adhesive test

	COC-I	COC-II	PP	COC-Substrate	PP-Substrate
Maximum Adhesive Force ( $\mu\text{N}$ ): $P$	14.5	11.10	16.45	2.322	3.614
Contact Strength ( $\sigma_{th}$ , KPa): $P/A_{th}$	2.9	2.22	3.29	0.464	0.752
shape of the hair				w/o hairs	w/o hairs



Fig. 8 Adhesion test of PP nano-hair with 20 clip