

반사방지 나노구조의 성형성과 광학적 특성에 대한 이형 온도의 영향

여나은¹ · 심영보¹ · 조상욱² · 김두인³ · 김기남⁴ · 장경수⁵ · 정명영^{1,†}

¹부산대학교 광메카트로닉스공학과

²부산대학교 인지메카트로닉스공학과

³부산대학교 BK21+나노융합인지메카트로닉스공학 사업단

⁴(주)서영

⁵나노종합기술원

Effects of Demolding Temperature on Formability and Optical Properties of Anti-reflective Nanostructure

N. E. Yeo¹, Y. B. Shim¹, S. U. Cho², D.-I. Kim³, K. S. Jang⁴, K. N. Kim⁵ and M. Y. Jeong^{1,†}

¹Department of Opto-Mechatronics Engineering, Pusan National University, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

²Department of Cogno-Mechatronics Engineering, Pusan National University, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

³BK21+Nano-integrated Cognomechatronics Engineering, Pusan National University, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

⁴Seo Yeong Co., Ltd., Ganseo-gu, Busan 46744, Korea

⁵National Nanofab Center, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Korea

(Received June 15, 2016: Corrected June 22, 2016: Accepted June 27, 2016)

초 록: 본에서는 저반사 나노구조 필름의 열 나노임프린트 공정 최적화를 위해 나노구조의 성형성과 광학적 특성에 대한 이형 온도의 영향을 평가하였다. 이형 온도에 따른 광학적 특성을 평가한 결과 70°C까지는 이형 온도가 증가함에 따라 투과율과 반사율 특성이 향상되는 거동을 보였으나 그 이후에는 오히려 투과율이 감소하고 반사율이 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 이형온도에 따른 거동은 성형성에도 유사하게 관찰되었으며 자유체적 형성과 고분자 유동에 의한 것으로 보인다. 따라서, 이형 온도에 따라 고분자의 유동과 자유체적의 형성에 의한 패턴의 성형성이 결정되며, 이로 인해 광학적 특성에 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.

Abstract: In this study, effects of demolding temperature (DT) on the formability and optical properties were evaluated in order to optimize thermal nanoimprint lithography for anti-reflective film. Characterization on optical property showed that optical performance was gradually enhanced as the DT increased up to 70°C while the transmittance and the reflectance was degraded as the DT increased further to 100°C. In addition, similar behavior was observed from formability analysis. It was contributed to the formation of free volume and viscose flow. Therefore, it was concluded that the formability and optical property are highly influenced by the formation of free volume and viscous flow of polymer depending on the DT.

Keywords: Nano imprint lithography, Polymer viscosity, Demolding temperature

1. 서 론

최근 나노 제작기술에 발전에 따라 나노미터 크기의 패턴을 이용하여 다양한 소자에 적용하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 나노미터의 크기를 가지는 패턴을 응용한 연구로 자연의 생명체를 모사하는 연구가 활발히 진행되고 있다.¹ 나방 눈 구조는 수백 나노의 포물

선 기둥들이 일정한 간격을 이루도록 배열되어 있어 반사 방지(Anti-reflection)와 같은 독특한 특성을 가진다.² 기존의 반사 방지막은 주로 굴절률이 다른 박막을 다층으로 적층하는 방법으로 제작되어 왔다.^{3,4} 이와 같은 방법은 다층을 균일하게 제작하는데 어려움이 있으며, 모든 파장영역에서 적용하기에는 어려운 단점이 있다. 따라서 최근에는 가시광선 파장 대 이하의 주기를 가지는 포물

[†]Corresponding author

E-mail: myjeong@pusan.ac.kr

© 2016, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

선 구조의 원뿔 패턴을 형성하여 나방의 눈을 모사하는 반사방지막을 제작하고 있다.⁵

이러한 반사방지막은 디스플레이 및 유리 표면에 적용했을 경우, 눈부심 현상을 줄여줄 수 있을 뿐만 아니라 다양한 각도에서 우수한 반사도 특성을 가지고 있어, 넓은 각도에서 선명한 시야를 확보할 수 있다. 이와 같은 우수한 저반사의 특성으로 인하여 반사에 의한 손실을 줄여 광 효율을 증가시키는 장점이 있으며, 디스플레이의 경우 반사광을 줄여 선명도를 향상시킬 수 있어 다양한 분야에 적용될 수 있다.⁶ 특히, 이러한 나노구조를 이용한 저반사 필름은 나노임프린트 공정을 이용하여 낮은 비용으로 대면적화가 가능한 장점이 있다.

열 나노임프린트 공정은 레지스트 고분자(resist polymer)를 유리전이온도(glass transition temperature, T_g) 이상으로 가열한 후, 높은 압력을 가하여 스탬프의 모양대로 성형하는 방법이다. 열 나노임프린트 공정은 재현성이 높고 저 비용으로 공정이 가능하여 매우 경제적이라는 장점이 있어 나노스케일의 패턴의 대면적 성형에 적합한 차세대 리소그래피 기술로 인정받고 있다.^{5,7} 그러나 구조물의 크기가 점점 감소하고 복잡해질수록 불완전 충전(non-fill)과 같은 문제점들이 발생하고 있다.⁸ 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 성형과정의 고분자의 유동 특성과 관련하여 임프린트 공정 변수를 최적화할 필요가 있다.⁹

본 논문에서는 이와 같은 불완전 충전 등의 결함을 감소시킬 수 있는 방법으로 임프린트 공정변수들 중 이형 온도(demolding temperature, DT)의 영향을 평가하였다. 이를 위하여 다양한 이형 온도에서 열 나노임프린트를 이용하여 저 반사 나노구조를 성형하였으며, 성형된 나노구조의 성형성 및 필름의 광학적 특성을 평가하였다.

2. 이론적 배경

나방 눈을 모사한 포물선 구조의 원뿔 패턴은 효과적인 저 반사 필름을 제작하기에 용이하므로 본 연구에서는 스탬프를 나방 눈 패턴 형상으로 제작하였다. 나방의 눈을 원뿔 패턴들은 빛의 파장이하의 주기를 가지고 배열되어 있어 빛이 반사되지 않고 패턴으로 굽어들어 갈 수 있다. 패턴 간격은 좁아질수록 단파장대, 넓어질수록 장파장 대에서 반사율을 낮춰줄 수 있다. 패턴의 너비는 패턴의 밀도와 상관성이 있는데, 패턴의 간격이 일정할 때 패턴의 크기가 너무 작으면 패턴밀도가 감소하기 때문에 패턴의 굴절률 변화를 유도하기에 어려움이 따르며, 높이가 증가에 한계가 따른다. 패턴의 높이는 반사율을 효과적으로 낮추는 것과 관련이 있다.¹⁰ 나방 눈 패턴의 높이는 패턴의 충전 밀도(packing density)를 증가시키고 공기에서 기판으로 내려갈수록 패턴의 비율이 증가하여 굴절률 변화를 유도할 수 있고 그로인해 반사방지 효과를 얻을 수 있다. 패턴의 높이는 증가할수록 넓은 영역에서 낮은 반사율을 보일 수 있지만 스탬프를 제작하기에 어

려움이 따를 수 있다. 이러한 이유들을 고려하여 가시광선 영역 대 400 nm~900 nm에 적용하기 적절한 구조로 설계하였다.¹¹

3. 실험방법

3.1. 스탬프 제작

사용된 스탬프는 실리콘 기판에 포토레지스트를 코팅하여 KrF excimer laser source (KrF Scanner System)를 이용하여 육각형 모양의 패턴들을 일정한 주기로 패터닝하였다. 그 후 건식에칭을 진행하여 포물선 모양의 원뿔 패턴을 형성하였다. 이렇게 만들어진 실리콘 스탬프를 니켈을 통해 전주도금 하였고, 최종적으로 제작된 니켈 스탬프는 Fig. 1과 같이 패턴 간격 300 nm, 너비 280 nm, 높이 330 nm로 일정한 간격을 두고 포물선 모양의 패턴들이 배열되어 있다.^{12,13} 니켈 스탬프는 4×4 cm²의 것으로 사용하였다. 그리고 스탬프 세척을 위해 오투 플라즈마(O₂ plasma)를 통해 전처리 과정을 진행 한 후 이형 시 스탬프와 PMMA 필름 간의 접촉을 방지하기 위하여 불소계 이형제를 딥 코팅(dip coating)하는 방식을 사용하여 코팅 하였다.¹⁴

3.2. 실험 방법

임프린트 공정에 사용한 필름은 PMMA(Poly(methyl-methacrylate))으로 $T_g = 105^{\circ}\text{C}$ 를 가진다. 실험 방법은 Hot-embossing Machine(NIL-60-ss-UV, Obducat) 장비를 사용하여 온도 145°C, 최대압력 4 MPa, 시간 120s의 조건으

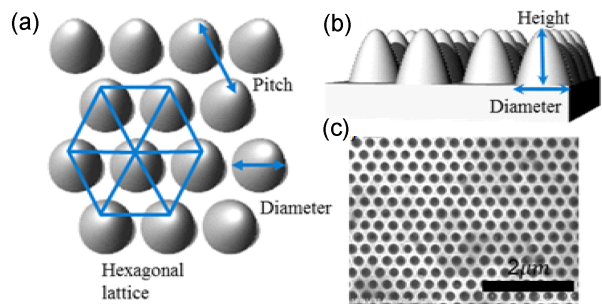


Fig. 1. Schematic illustration of anti-reflective nano-cone structures (a) top view (b) side view (c) SEM image of Ni stamp.

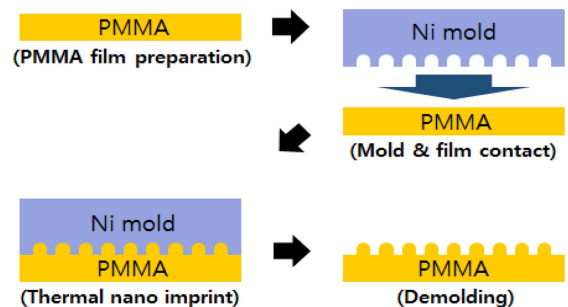


Fig. 2. Overall process of fabrication of nano-cone pattern using nanoimprint lithography.

로 DT를 장비의 최저 설정온도 30°C부터 20°C씩 증가시켜 PMMA 필름의 T_g 이하로 최대 100°C까지 30°C, 50°C, 70°C, 90°C, 100°C순으로 나노임프린트 리소그래피를 진행하였다.

FE-SEM(S-4700, HITACHI)장비를 사용하여 달라지는 이형 온도에 따른 패턴의 모양과 성형성을 SEM 이미지로 확인하였으며, Thin Film Analyzer(F20-EXR, Filmetrics) 장비를 사용하여 가시광선 영역 대 400 nm~900 nm 파장에서의 원뿔 패턴의 반사율과 투과율을 측정을 통해 광학특성을 분석하였다.

4. 결과 및 검토

앞에서 서술했던 것처럼 공정온도, 압력, 시간은 모두 동일하기 때문에 달라지는 이형 온도에 따른 나노임프린트 공정 결과 그래프를 Fig. 3에 나타내었다. 이형 온도 100°C에서는 공정시간이 약 150s 정도로 매우 짧지만 이형온도가 감소할수록 공정시간은 늘어나며 이형온도 30°C의 경우에는 약 670s로 상당한 시간이 소요된다. 이로 인하여 성형 압력이 가해지는 시간이 상대적으로 길어지게 된다. 저반사 필름 제작 시 높은 이형온도의 경우 필름의 패턴이 제대로 형성되지 않은 채 분리되어 구형에 가까운 형태를 보이며, 낮은 이형온도의 경우 높은 성형 온도에서는 유동성을 가졌던 소재의 유동성이 급격히 감소할 것으로 보인다.

Fig. 4는 임프린트 공정 결과 PMMA 필름의 주사전자 현미경 이미지를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 이형온도에 따른 나노구조의 성형성을 살펴보면 패턴의 피치의 경우 평균적으로 300 nm로 거의 동일함을 확인할 수 있으나 패턴의 모양과 너비는 온도에 따라 상이한 형태를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 먼저, 가장 낮은 이형온도 조건인 30°C일 때 패턴의 크기가 작고 폭이 일정하지 않으며 이형 시 나노구조물이 부분적으로 탈락되는 현상이 관찰되었다. 50°C일 때에는 패턴이 탈락되어 나가는 현상이 감소하는 경향을 보였으며, 크기가 증가하여 몰드의

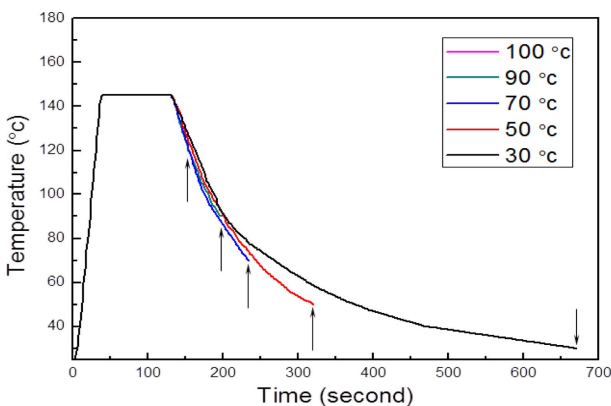


Fig. 3. Condition of nanoimprint lithography with various demolding temperature.

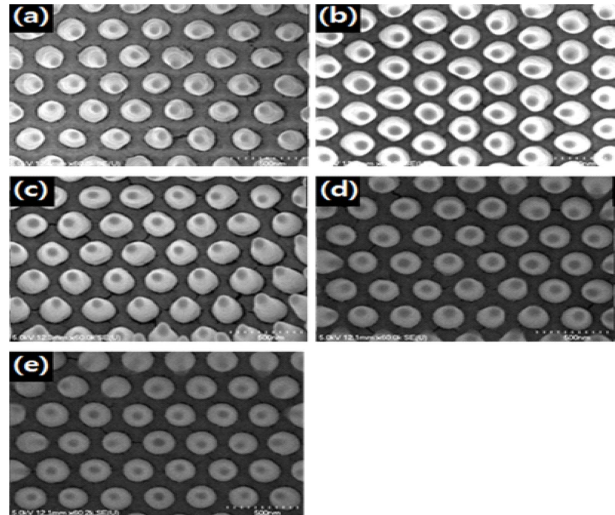


Fig. 4. SEM images of imprinted nano-cone structures with various DT conditions. (a) DT=30°C, (b) DT=50°C, (c) DT=70°C, (d) DT=90°C, (e) DT=100°C.

크기와 거의 일치하는 것으로 측정되었다. 70°C 조건에서는 패턴의 이형성 문제로 인한 구조물의 파손 현상은 사라졌으며, 패턴의 모양이 전체적으로 일정한 경향을 보였다. 또한 구조물의 폭은 다시 감소하여 전체적으로 고른 형태를 보이고 있다. 이형 온도가 더 증가하여 90°C와 100°C일 경우에는 전체적으로 패턴의 모양이 몰드의 형상과는 상이하게 전체적으로 둥근 형태를 보였으며, 두 온도간의 패턴 크기 차이는 크지 않았지만 100°C에서 패턴의 크기가 약간 증가하는 경향을 보였다.

이와 같은 현상이 발생하게 된 이유를 분석하기 위해서는 온도에 따른 고분자의 유동 특성을 이해하는 것이 중요하다. 낮은 이형 온도의 측면에서 분석할 때 고려할 수 있는 이유는 두 가지가 있다. 첫째로, 자유부피(free volume)로 인한 수축 때문이다. 자유 부피란 고체나 액체에서 고분자가 차지하지 않은 빈 공간을 말한다. 고분자는 T_g 이상으로 온도가 상승하면 자유부피가 증가하여 유동성을 지니고 낮은 점성을 갖는다. 고분자의 전체 부피는 분자들이 채워진 공간의 부피와 빈 공간인 자유공간으로 구성된다. T_g 이상의 온도에서 자유부피 증가로 인해 유동성을 가진 고분자는 다시 T_g 이하의 온도로 냉각시킬 경우 고분자의 부피수축을 발생시킨다. 이로 인해 패턴의 크기가 제각각으로 고르지 못한 형태를 보인 것이다. 따라서 이러한 자유부피의 수축을 최소화 한다면 임프린트 패턴의 성형 정밀도를 크게 향상시킬 수 있다. 두 번째 고려사항으로 이형력(demolding force)이 작용하기 때문이다. 냉각 시 스탬프와 고분자 간의 열팽창 계수 차이로 인한 계면에서 발생하는 힘과 이형 시 스탬프와 고분자 필름 간의 경계면에서의 접착력과 측벽에서의 마찰력으로 인해 기계적인 힘이 발생한다. 이러한 힘은 매우 낮은 온도에서 패턴이 뜯겨져 나가는 현상 등의 결함을 초래한다.¹⁵ 이와 같이 이형 시 발생한 이형력으로 인

해 30°C와 50°C에서 패턴이 파손되는 현상이 발생한 것으로 보인다. 자유부피 수축으로 인한 패턴크기 감소와 이형 시 나노구조물과 몰드 사이의 작용 이형력으로 인해 30°C와 50°C의 두 조건에서 패턴 성형성이 저하되는 것으로 보인다. 하지만 두 실험 결과에서 상이한 점도 확인할 수 있다. 30°C 보다 50°C에서 패턴의 너비가 급격하게 증가하였으며, 이는 오히려 70°C에서 이형 된 구조물의 너비보다 크를 확인할 수 있다. 이러한 현상은 이형 온도 감소로 인해 이형 시간이 길어지는 것과 연관이 있을 것으로 생각된다. 이형 시간이 너무 짧게 되면 급격한 가열과 급격한 냉각으로 인해 고분자에 미치는 열적 스트레스 증가로 고분자가 부풀어 오르는 증상이 발생하고, 그 후 시간이 더 지나 자유부피 감소로 인한 수축현상이 발생한다. 이형 시간에 따라 나타나는 현상이 달라질 수 있고, 그에 따라 패턴 형상도 변화할 수 있다.¹⁴ 본 실험에서 이형온도 50°C로 설정 하였을 때, 145°C의 높은 공정온도에서 낮은 온도로 급격히 냉각 시켜 고분자는 상당한 열적 스트레스를 받게 되고 그로인해 부풀어 오르는 현상이 나타나 패턴의 폭이 증가하였을 것으로 보인다. 그리고 이형온도가 30°C로 그보다 더 감소하게 되었을 경우, 더 긴 이형시간으로 부풀어 오른 고분자에 수축현상이 진행되고 그로 인해 패턴은 불균일한 모양을 가지게 되고 구조물의 폭도 감소하였을 것이다. 이러한 결과로 인해 두 온도 모두 패턴 성형에는 결함으로 나타나지만 앞서 언급했던 바와 같이 패턴의 너비는 패턴의 성형 밀도와 관련이 있기 때문에 더 큰 폭으로 인해 구조물의 성형 밀도가 높은 50°C에서 성형된 나노구조물의 광학적 특성이 더욱 우수할 것으로 예상된다.

높은 이형 온도 측면에서 분석할 때 고려할 것은 고분자 필름과 공기 간의 계면에서 자유에너지에 의해 표면적을 최소화하려는 힘의 발생이다. 이형 온도가 높은 경우 패턴은 더 둥근모양이 되고 높이는 감소하게 되는데, 그 이유는 온도가 증가할수록 고분자의 유동성은 증가하고 이로 인하여 표면에너지에 의해 고분자와 공기 간의 계면을 최소화하는 형상으로 변하기 때문이다.¹⁶ 따라서 상대적으로 높은 이형 온도 조건인 90°C와 100°C에서는 패턴이 더 구형 모양에 가깝게 성형이 되고 전체적인 너비는 증가하였을 것이라 예상할 수 있으며, 이형 온도가 더 높아질 경우, 성형된 구조물이 완전한 구형이 근접하여 조금 더 큰 크기를 가질 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 5는 다양한 이형온도 조건에서 성형한 시편에 대해 가시광선 파장영역에서 측정된 반사율 및 투과율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 모든 시편은 성형하지 않은 평탄한 시편에 비해 투과율과 반사율 특성이 급격히 향상된 것을 확인할 수 있다. 투과율의 경우, 30°C와 100°C에서 성형한 구조물이 가장 낮은 투과율을 보였으며, 70°C에서 성형된 필름이 모든 파장 대에서 가장 우수한 투과 특성을 보이고 있다. 반사율 특성은 관찰된 투과율 특성과 일치하는 경향을 보이며 70°C에서 성형

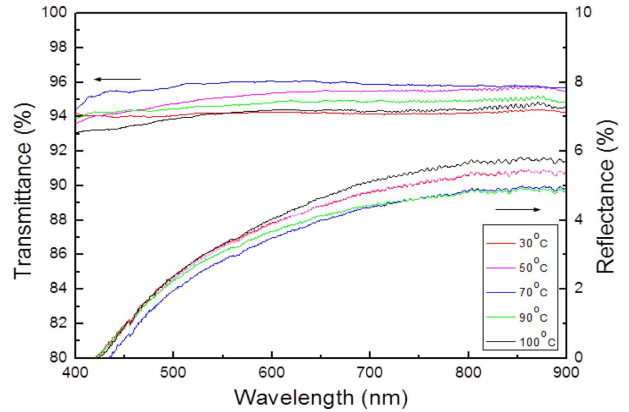


Fig. 5. Reflectance and transmittance change of moth eye patterned PMMA film.

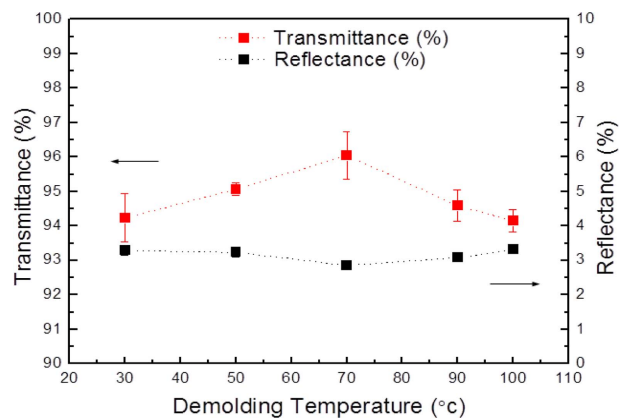


Fig. 6. Reflectance and transmittance properties measured at 550 nm as a function of demolding temperature.

된 나노 구조물이 가장 낮은 반사율을 보임을 알 수 있다.

Fig. 6을 통해 단면 성형된 필름의 550 nm에서의 광학 특성을 비교하여보면, 30°C에서 성형된 필름의 경우 반사율은 3.3%, 투과율은 94.2%, 50°C에서의 반사율은 3.2%, 투과율은 95.1%, 70°C에서의 반사율은 2.9%, 투과율은 96.1%로 온도가 상승할수록 반사율은 감소하며 투과율은 증가하였다. 반면에 90°C에서의 반사율은 3.1%, 94.6%, 100°C의 반사율은 3.3%, 투과율은 94.2%으로 온도가 상승할수록 반사율은 증가하며 투과율은 감소하는 현상이 발생했다. 본 연구에서와 같이 극저반사 필름의 투과율과 반사율 특성을 평가함에 있어서 반사율 평가는 측정기기의 측정한계로 인하여 정확히 측정하는데 한계가 있을 수 있음을 확인하였다. 그러나 투과율은 상대적으로 정확히 측정이 가능하며, 측정된 반사율은 일관성 있게 투과율에 반비례하므로 정성적으로 유의미한 것으로 평가할 수 있다.

이형 온도 70°C를 기준으로 이형온도가 증가할수록 반사율은 증가하고, 투과율은 감소함을 확인할 수 있다. 또한, 반사율과 투과율이 30°C~50°C구간보다 50°C~70°C구간이 더 기울기가 급하고, 100°C~90°C구간보다 90°C~70°C구간이 더 기울기가 급격함을 확인할 수 있다. 이와

같은 현상은 이형 온도 70°C를 기준으로 낮은 온도 구간과 높은 온도 구간으로 구분하여 고찰할 필요가 있다. 먼저, 70°C보다 낮은 온도 구간에 대해 살펴보면 50°C~70°C 사이에서는 스탬프와 필름 간의 접착력으로 인한 패턴 뜯겨짐 현상과 함께 유동성을 가지던 고분자의 급격한 냉각에 의해 부풀어 오름이 나타나고 패턴의 모양에 결함을 주었을 것으로 예상할 수 있다. 따라서 광학특성이 급격하게 감소하였다, 30°C~50°C 사이에서는 패턴 뜯겨짐 정도 차이가 크게 보이지 않았지만 자유부피 수축 현상으로 인해 패턴은 더 수축하게 되고 그로인해 광학특성은 30°C에서 더 안 좋은 결과를 초래한 것을 알 수 있었다. 70°C보다 높은 온도 구간을 살펴보면 온도가 상승할수록 표면 자유에너지 증가로 인해 패턴은 더 둥근 모양에 가까워지는 현상이 발생한다. 이러한 이유로 패턴의 높이가 감소할 수 있는데 이것은 나방 눈 구조의 저 반사 효과를 감소시키는 중요한 원인이 될 수 있다.¹⁷ 나방 눈 구조에서 패턴의 높이는 상승할수록 패턴의 밀도를 증가시키고 그로 인해 공기에서 기관으로 내려갈수록 굴절을 변화율을 증가시켜 우수한 반사방지 효과를 얻을 수 있다.¹⁸ 90°C~70°C구간에서 패턴 높이 차이가 100°C~90°C구간에서 보다 더 심할 것이고, 그로 인해 더 급격한 기울기를 보였을 것으로 생각하였다. 하지만 더 높은 100°C에서 패턴 높이는 가장 낮을 것이고 그로인해 광학특성이 더 안 좋은 결과가 보였다. 결론적으로 앞에서 본 SEM 이미지와 연관 지어 생각해 보면 이형온도가 낮을 경우 급격한 온도 변화로 인한 고분자의 부풀어 오름과 그 후 자유 부피 수축현상이 나타나고, 이형온도가 높을 경우 자유 표면 에너지 증가에 의한 패턴 모양과 높이 변화로 패턴이 제대로 형성되는데 방해받게 된다. 따라서 이형 온도 70°C가 극 저반사 필름으로 사용하기에 패턴의 성형 및 결합 개선 측면에서 가장 적절한 온도임을 실험적으로 확인할 수 있었으며, 양면 패턴을 형성한 경우, 투과율은 98.8% 이상, 반사율은 최대 0.18% 이상 달성할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 나노임프린트 공정을 사용하여 나방 눈 패턴의 저 반사 효과를 얻기 위해 공정 변수의 하나인 이형 온도를 변화시켜 최적의 공정조건을 연구하였다. 이형 온도는 30°C에서 100°C까지 20°C씩 증가시켜 진행하였으며, 반사율 및 투과율 측정 장치를 통해 나방 눈 패턴의 PMMA 필름의 SEM 이미지와 반사율 및 투과율을 측정하여 비교 하였다. 그 결과 70°C의 이형온도 조건에서 가장 우수한 특성으로 보였으며, 단면의 경우 평균 투과율 96.1% 이상, 평균 반사율 2.9% 이하를 보임을 확인하였으며, 양면의 경우 투과율을 98.8% 이상 반사율 최대 0.18%의 특성을 보임을 확인하였다. 이형온도에 따른 성형성과 광학적 특성을 평가한 결과, 고분자 필름을 이

용한 나노임프린트 공정에서는 이형 온도가 패턴 성형에 중요한 변수임을 확인하였으며, 이형온도에 따라 고분자 표면 자유에너지 변화에 의한 표면적 최소화 현상과 자유부피의 변화의 영향으로 인해 성형성에 큰 영향을 미침을 확인하였다. 또한 이로 인하여 이형 시 발생하는 계면 응착으로 인한 파손 현상도 이형 온도에 민감함을 확인하였다. 본 연구 결과는 저 반사 나노구조물의 대면적화 연속공정을 위한 공정 최적화 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgments

“이 논문은 미래창조과학부·산업통상자원부가 공동 지원한 ‘나노융합2020사업(www.nanotech2020.org)’으로 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다. [스마트 IT 기기용 나노구조 방사방지 필름 상용화 개발].”

이 논문은 여나은과 심영보가 공동 일 저자로 작성되었습니다.

References

1. A. R. Parker and H. E. Townley, “Biomimetics of photonic nanostructures”, *Nature nanotechnology* 2(6), 347 (2007).
2. S. H. Kim, S. U. Cho, Y. S. Kim and M. Y. Jeong, “Fabrication of Multi-height Nanostructures for High Antireflection and Superhydrophobicity”, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 349 (2011).
3. B. J. Bae, S. H. Hong, S. U. Kwak and H. Lee, “Fabrication of Moth-Eye Pattern on a Lens Using Nano Imprint Lithography and PVA Template”, *Journal of the Korean institute of surface engineering* 42(2), 59 (2009).
4. S. R. Kennedy and M. J. Brett, “Porous broadband antireflection coating by glancing angle deposition”, *Applied optics*, 42(22), 4573 (2003).
5. D. G. Choi, K. J. Lee, J. H. Jeong, K. D. Kim, J. H. Choi, J. H. Lee, A. Ali and E. S. Lee, “Fabrication of Synthetic Moth-Eye Anti-Reflection Structure Using Nanoimprint”, *Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers spring conference*, 13-17 (2008).
6. M. H. Kwon and H. Lee, “Fabrication of Functional ZnO Nano-particles Dispersion Resin Pattern Through Thermal Imprinting Process”, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 28(12), 1419 (2011).
7. K. H. Moon, S. B. Shin, I. S. Park, H. Lee, H. S. Cha and J. H. Ahn, “UV-nanoimprint Patterning Without Residual Layers Using UV-blocking Metal Layer”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 12(4), 275 (2005).
8. Y. Hirai, M. Fujiwara, T. Okuno, Y. Tanaka, M. Endo, S. Irie, K. Nakagawa and M. Sasago, “Study of the resist deformation in nanoimprint lithography”, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 19(6), 2811 (2001).
9. B. H. Kim, K. S. Kim, J. H. Ban, J. K. Shin and H. Y. Kim, “Micro/Nano Rheological Characteristics of PMMA in Hot Embossing Process”, *Journal of the Korean Society for Technology of Plasticity*, 259 (2004).
10. C. Gourgon, C. Perret, G. Micouin, F. Lazzarino, J. H. Tortai,

- O. Joubert and J. P. E. Grolier, "Influence of pattern density in nanoimprint lithography", *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 21(1), 98 (2003).
11. S. A. Boden and D. M. Bagnall, "Tunable reflection minima of nanostructured antireflective surfaces", *Applied Physics Letters*, 93(13), 133108 (2008).
 12. H. Schulz, M. Wissen and H.-C. Scheer, "Local mass transport and its effect on global pattern replication during hot embossing", *Microelectronic engineering*, 67, 657 (2003).
 13. W. K. Cho, S. U. Cho, D. I. Kim, D. U. Kim and M. Y. Jeong, "Effects of Static Contact Angle and Roughness on Rolling Resistance of Droplet", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 23(1), 23 (2016).
 14. H. S. Park, H. H. Shin, S. W. Seo, M. Y. Sung, W. B. Choi, S. W. Choi and S. Y. Park, "Novel Process to Improve Defect Problems for Thermal Nanoimprint Lithography", *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 20(1), 13 (2007).
 15. S. G. Park, Z. Song, L. Brumfield, A. Amirsadeghi and J. J. Lee, "Demolding temperature in thermal nanoimprint lithography", *Applied Physics A*, 97(2), 395 (2009).
 16. T. Leveder, S. Landisa, L. Davoustb and N. Chaixc, "Optimization of demolding temperature for throughput improvement of nanoimprint lithography", *Microelectronic Engineering*, 84(5), 953 (2007).
 17. H. K. Raut, V. A. Ganesh, A. S. Nair and S. Ramakrishna, "Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review", *Energy Environ. Sci.*, 4(10), 3779 (2011).
 18. N. Yamada, O. N. Kim, T. Tokimitsu, Y. Nakai and H. Masuda, "Optimization of anti-reflection moth-eye structures for use in crystalline silicon solar cells", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(2), 134 (2011).