

자연모사기반 나노-마이크로패턴의 광 회절 및 간섭에 의한 투명기판의 구조 색 구현

Bio-inspired Structural Colors of Transparent Substrate based on Light Diffraction and Interference on Microscale and Nanoscale Structures

박용민^a, 김병희^b, 서영호^{b*}

Yong Min Park^a, Byeong Hee Kim^b, Young Ho Seo^{b*}

^a Dep. of Tech Information, Korea Credit Information Services, 19, Myeong-dong 11-gil, Jung-gu, Seoul, 04538, Korea

^b Dep. of Mechatronics Engineering, Kangwon National University, 1 Kangwon-daehak-gil, Chuncheon, 24341, Korea

Received 20 September 2019; Revised 16 October 2019; Accepted 21 October 2019

Abstract

This paper addresses effects of nanoscale structures on structural colors of micropatterned transparent substrate by light diffraction. Structural colors is widely investigated because they present colors without any chemical pigments. Typically structural colors is presented by diffraction of light on a micropatterned surface or by multiple interference of light on a surface containing a periodic or quasi-periodic nano-structures. In this paper, each structural colors induced by quasi-periodic nano-structures, periodic micro-structures, and nano/micro dual structures is measured in order to investigate effects of nanoscale and microscale structures on structural colors in the transparent substrate. Using pre-fabricated pattern mold and hot-embossing process, nanoscale and microscale structures are replicated on the transparent PMMA(Poly methyl methacrylate) substrate. Nanoscale and microscale pattern molds are prepared by anodic oxidation process of aluminum sheet and by reactive ion etching process of silicon wafer, respectively. Structural colors are captured by digital camera, and their optical transmittance spectrum are measured by UV/visible spectrometer. From experimental results, we found that nano-structures provide monotonic colors by multiple interference, and micro-structures induce iridescent colors by diffraction of light. Structural colors is permanent and unchangeable, thus it can be used in various application field such as security, color filter and so on.

Keywords: Structural color, Micro and nano-structure, Anodic aluminum oxidation, Iridescent color

1. 서론

일반적으로 색은 색소, 색소포(chromophores) 등에 대한 빛의 선택적 흡수 또는 반사에 의해 표현되지만, 드물게 빛의 회절, 산란, 간섭과 같은 물리적 효과에 의해서도 표현되기도 한다. 이와 같이 빛이 반사되는 표면과 빛의 물리적 효과에 의해서 나타나는 색을 구조색(structural colors) 또는 보는 각도에 따라 색이 달라지는 무지개 색(iridescent colors) 등으로 부른다. 자연계에서 볼 수 있는 구조색에는 나비의 날개, 새의 깃털, 곤충의 큐티클, 보석, 과일 등이 있다^[1-6]. 구조색을 나타내는 특별한 생물학적 미세구조에는 회절격자(diffraction grating), 다층간섭(multilayer interference), 선택적 거울

(selective mirror), 광결정(photonic crystal), 결정섬유(crystal fiber), 불규칙 나노스폰지 구조 등이 있다^[7].

빛의 간섭에 의한 구조색 이론은 아주 오래전에 확립되었다. 아주 얇은 필름의 위쪽 표면에서 빛의 일부가 반사되고, 나머지가 아래쪽 표면에서 반사되었을 때 형성되는 무지개 색은 1804년 Thomas Young의 이론으로 다름과 같이 설명할 수 있다^[8]. 얇은 필름의 위, 아래 표면으로부터 같은 방향으로 반사되는 빛이 특정 파장 전체길이에 대해 1배 이상 차이를 보이게 되면 보강간섭(constructive interference)을 일으켜 그 파장에 대한 강한 빛을 발하게 된다. 이때 얇은 필름으로 입사되는 빛의 각도가 바뀌게 되면 보강간섭을 일으키는 빛의 파장이 변하게 된다.

* Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6378

fax: +82-33-250-6378

E-mail address: mems@kangwon.ac.kr (Young Ho Seo).

그로 인해 보는 방향에 따라 색이 달라지는 무지개 색(iridescent colors)가 형성되게 된다. 이와 같은 무지개 색은 Fig.1(a)와 같은 회절격자(diffraction grating)에 의해서도 구현이 가능하다. 회절격자는 미세한 패턴을 통해 입사된 빛을 파장별로 분리하는 분광 기능을 하기 때문에 자연스럽게 보는 방향에 따라 색이 달라지는 무지개 색의 구현이 가능하다.

이처럼 무지개 색은 간단한 형태의 얇은 필름 구조 또는 1, 2차원으로 배열된 반복되는 회절격자 패턴을 통해 구현할 수 있다. 하지만, 생물학적 미세구조에 의한 생물체의 구조색은 보다 정교하고 복잡한 구조를 가지고 있다. 이와 같이 정교한 미세구조는 강한 무지개 색을 나타내거나, 두 개의 색을 형성하고 합쳐 새로운 색을 나타내거나, 단색을 나타내기 위해 보다 많은 빛을 확산시키는 역할을 한다. 생물체에서 관찰되는 구조색을 나타내는 원리를 살펴보면 다음과 같다.

빛의 간섭과 회절에 기반을 두고 단색으로 찬란하게 빛나는 구조색은 주로 열대 몰포 나비(Morpho butterflies)의 날개 비늘 표면에 형성된 전나무형상(fir-tree-shaped) 미세구조에 의해 만들어진다^{1, 9, 10}. Fig.1(b)는 몰포 나비 날개 비늘에서 관찰된 전나무형상의 미세구조를 나타내는 전자현미경 사진이다. 이러한 나비의 날개 비늘은 비늘의 길이방향을 따라 등간격으로 형성된 수많은 융기구조(ridge)를 가지고 있다며, 이 융기구조의 단면이 전나무형상의 미세구조로 되어 있다¹¹.

일반적으로 융기구조 사이의 간격은 대략 1 μm 정도이다. 강렬한 파란색을 나타내는 블루 몰포 나비(Blue Morpho Rhetenor Butterflies)의 날개 비늘은 큐티클과 공기의 교차구조로 된 전나무형상의 융기구조로 덮여 있으며, 다층 간섭(multilayer interference)에 의해 파란색 파장에서 높은 반사율을 나타낸다^{11, 11}. 큐티클과 공기층의 간격은 대략 150~200 nm 정도 된다. 이와 유사하게 다층 간섭에 의한 강렬한 구조색은 식물에서도 관찰되는데, 대표적인 식물이 대리석 베리라고 불리는 마블 베리(marble berry, *Polia condensate*)이다. 파란 빛의 보강간섭이 가능하도록 간격을 유지하고 있는 셀룰로스 미세섬유(cellulose microfibrils)가 베리의 표면을 덮고 있기 때문에 다층 간섭이 일어나게 된다⁴.

광결정(Photonic crystals, ordered nanosponges) 구조에 기반을 둔 구조색은 회절격자와는 다른 방법으로 색을 나타낸다¹². 광결정 구조는 Fig.1(c)와 같이 나노홀 어레이가 3차원으로 적층된 형태이다. 세소스트리스(*Parides sesostris*, emerald-patched cattleheart butterfly) 나비는 날개 비늘의 키틴(chitin)에 구멍의 직경이 약 150 nm이고, 구멍사이의 간격도 약 150 nm인 나노홀 어레이가 체심입방구조(body-centered cubic)로 구성되어 있다¹³.

광결정기반으로 형성된 구조색은 보는 방향에 따라 색이 바뀌는 동일한 색을 나타내며, 세소스트리스의 경우에는 녹색의 빛을 나타낸다^{12, 13}. 광결정은 주기적으로 배열된 높은 유전율의 나노구조(키틴)와 낮은 유전율의 나노구조(공기)가 규칙적으로 반복되는 영역을 갖는다. 이 규칙적으로 구성된 나노구조에 의해 파동의 특성을 가진 빛의 광자가 유전체 영역을 통과하느냐 통과하지 못하느냐가 결정된다.

규칙적으로 배열된 나노홀 어레이의 나노스폰지 구조인 광결정도 구조색을 나타내지만, Fig.1(d)와 같은 나노채널 구조가 무질서하게 배열된 불규칙 나노스폰지 구조(disordered nanosponges)를 가진 케라틴 매트릭스도 단색의 파란색을 만들어낸다. 이러한 원리로 구조색을 만들어내는 생물에 청금강앵무(Blue-and-gold macaw)로 불리는 유리매커우(*Ara ararauna*), 수컷 이스턴 블루버드(male eastern bluebird, *Sialia sialis*), 수컷 자두목 코팅가(male plum-throated cotinga, *Cotinga maynana*) 등이 있다^{7, 14}. 불규칙 나노스폰지 구조에 빛이 입사하면 모두 같은 방향으로 정렬되어 반사되지 않기 때문에, 불규칙 나노스폰지에 의한 구조색은 보는 각도에 따라 크게 바뀌지 않는다.

색소를 이용하지 않는 인공 구조색을 연구하는 많은 연구자들은 위에서 언급한 것과 같은 자연계에서 관찰되는 구조색 구현원리에 많은 영향을 받았다. 전나무 형상 미세구조와 같이 아주 정교하고

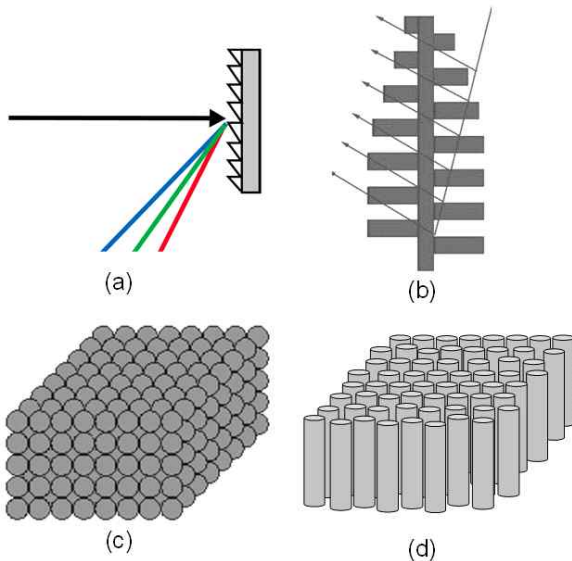


Fig. 1 Schematic drawings of (a) microscale diffraction grating, (b) fir-tree-shaped microstructures in ridge structures on the wing of Morpho butterfly, (c) 3D photonic crystal structure, (d) disordered nanochannel arrays.

복잡한 구조는 구현하기 어렵기 때문에 상대적으로 간단한 구조를 활용한 인공 구조색 연구가 활발히 이루어지고 있다. 예를 들면 광 결정구조^[2, 5, 15-18], 나노슬릿구조^[19, 20], 나노홀구조^[21-25], 나노디스크 구조^[20, 26, 27], 나노필러구조^[28, 29] 등이 인공 구조색 연구에 많이 활용되는 구조이다. 하지만 이와 같은 나노급 인공 구조는 그 제작방법이 대부분 나노비드의 자기조립(self-assembly) 특성과 전자빔 리소그래피에 의존하고 있어 제조단가가 높고 대면적 제조에 한계가 있다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 인공 구조색 구현에 있어 실험을 통해 3가지를 검증하고자 한다. 첫 번째, 전자빔 리소그래피와는 달리 제작되는 나노급 패턴 어레이의 무질서도는 높지만, 제조단가가 매우 저렴한 알루미늄 양극산화공정을 이용하여 불규칙 나노필러 어레이를 제작하고 그 크기에 따른 단색 구조색 발현 특성을 실험적으로 확인한다. 두 번째 2차원 마이크로패턴 어레이의 크기에 따른 회절 색채 분산 효과(diffractive chromatic dispersion effect)를 실험적으로 확인한다. 마지막으로 나노필러-마이크로회절격자를 결합하여 회절격자에 의한 무지개 색 발현에 단색을 구현하는 나노필러 어레이가 어떤 영향을 미치는 실험적으로 확인하고자 한다. 이를 위해 투명기판의 한쪽면에 불규칙 나노필러 어레이를, 다른 면에 2 μm급 회절격자패턴을 성형하는 공정을 사용하였다.

2. 본 론

2.1 패턴 설계

Fig.2는 본연구에서 제작하여 평가하고자 하는 샘플의 개략도를 나타내고 있다. 제작하고자 하는 샘플은 크게 불규칙 나노필러만 형성된 투명기판, 규칙적인 마이크로회절격자만 형성된 투명기판, 마지막으로 나노필러와 마이크로회절격자가 모두 형성된 투명기판 3가지로 구성된다. Fig.2에서 보는 것과 같이 크게 3가지로 분류된 시험시편은 Table 1과 같이 총 8종류로 패턴의 형상을 결정하였다. 불규칙 나노필러 패턴만을 가진 시편은 높이/폭 비를 1을 기준으로 높은 것과 낮은 것으로 구분하여 나노필러 사이의 간격을 조금씩 늘려가며 단색 구조색 발현을 확인하고 하였으며, 마이크로회절격자에 의한 보는 각도에 따라 색이 바뀌는 무지개색 구조색은 선행연구를 통하여 2차원으로 배열된 패턴을 정사각형으로 구성하고 패턴의 폭과 높이, 그리고 패턴 간 간격을 각각 2 μm, 1.5 μm, 2 μm로 설계하였다.

2.2 불규칙 나노필러 어레이에 의한 구조색

불규칙 나노필러 어레이에 의한 단색 구조색 발현 특성을 평가하

기 위해서 사용된 나노홀 어레이 몰드는 알루미늄 양극산화공정을 통해 제작하였고, 마이크로급 회절격자패턴 성형용 몰드는 실리콘 웨이퍼를 반응성 이온 식각을 통해 제작하였다. 투명기판 양면에 패턴을 형성하는 성형공정은 핫엠보싱(hot embossing) 공정을 이용하였고, 성형을 위한 투명기판은 PMMA(Poly Methyl methacrylate) 시트를 이용하였다.

알루미늄 양극산화공정을 통한 불규칙 나노필러 어레이 성형용 나노홀 어레이 몰드 제작을 위해 1 μm 두께의 고순도 알루미늄이 증착된 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 알루미늄 양극산화 공정은 0°C의 0.1M 인산 전해질을 사용하여 180 V의 전압에서 수행되었으며, 나노홀 어레이의 깊이와 직경은 각각 산화공정 시간과 알루미늄 식각시간을 통해 제어하였다. 나노홀 직경 확대를 위해 사용된 알루미늄 식각액은 35°C의 0.1M의 인산용액을 사용하였다. 나노필러 어레이 제작을 위한 나노홀 어레이 몰드는 Table 1에 나타내었듯이 필러의 높이/폭 비(aspect ratio)가 1 이하인 것과 1 이상인 것으로 구분하여 총 6가지 패턴을 제작하였다. Fig.3은 나노필러 어레이 제작을 위한 6종류의 알루미늄 나노홀 어레이의 시편에 대한 전자현미경 사진을 나타낸다.

Table 1 Lists of test samples and their specification

No.	Nanopillars	Micrograting	Comments
N_L100	g 100~150 nm	-	Monochromatic
N_L150	AR < 1 g 150~200 nm	-	Monochromatic
N_L200	g 200~250 nm	-	Monochromatic
N_H100	g 100~150 nm	-	Monochromatic
N_H150	AR > 1 g 150~200 nm	-	Monochromatic
N_H200	g 200~250 nm	-	Monochromatic
M_2	-	sq. width 2 μm	Iridescent
NM_H150	AR > 1 g 150~200 nm	height 1.5 μm	Iridescent

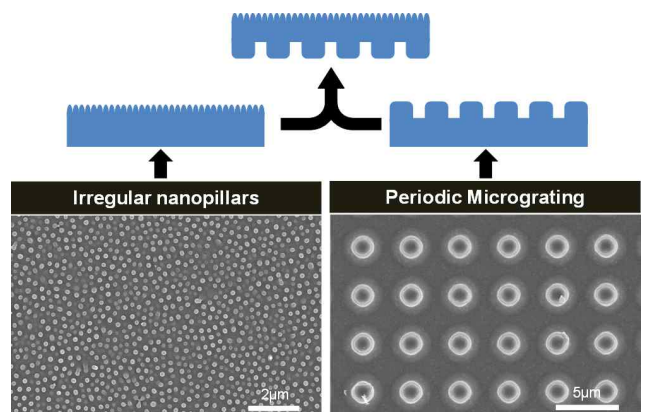


Fig. 2 Classification of test samples having disordered nanopillars, periodic micrograting, and both structures.

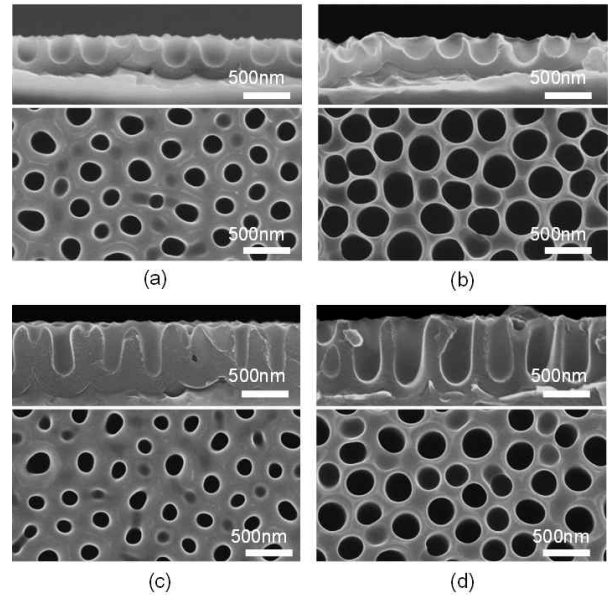
Fig.3(a)와 3(b)는 높이/폭 비가 1 이하이고 나노홀의 직경이 서로 다른 나노홀 어레이 몰드의 전자현미경 사진이고, Fig.3(c)와 (d)는 높이/폭 비가 1 이상인 나노홀 어레이 몰드의 전자현미경 사진이다. Fig.3에 나타난 몰드를 이용하여 핫엠포싱 공정을 통해 제작된 결과를 Fig.4에 나타내었다. 나노필러의 높이/폭 비가 1 이하인 Fig.4(a)와 4(b)를 비교해 보면 나노필러 사이 간격, g 가 100 nm 수준인 샘플 N_L100보다 간격이 200 nm 수준인 샘플 N_L200이 보다 강한 파란색의 구조색을 나타내고 있다. 반면 나노필러의 높이/폭 비가 1 이상인 Fig.4(c)와 (d)를 비교해 보면 나노필러 사이 간격, g 가 나노필러 사이 간격, g 가 200 nm 수준인 샘플 N_H200보다 간격이 100 nm 수준인 샘플 N_H100이 보다 강한 파란색의 구조색을 나타내고 있다. 나노필러의 직경이 100 nm 보다 작은 경우에는 빛의 간섭이 일어나지 않기 때문에 기본적으로 구조색은 100 nm 보다는 큰 구조물이 요구된다.

전체적으로는 푸른 구조색은 높이/폭 비가 클수록, 나노필러 간 거리가 좁을수록 색도가 증가됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 샘플의 광투과율을 측정해보면 좀 더 정확하게 알 수 있는데, 400~500 nm 영역의 빛의 파장에서 광 투과손실을 나타냈으며 이와 같이 손실된 빛의 파장은 구조색으로 발현되는 것으로 분석된다. 붉은 색 계열의 구조색을 얻기 위해서는 나노구조물간 간격, g 가 350 nm 이상 되어야 하는데, 이는 알루미늄 양극산화공정의 한계로 제작이 불가능한 영역이라 알루미늄 양극산화공정으로는 파란색 이외의 다른 색을 구현하기 어렵다. 결과적으로 불규칙 나노필러 어레이 구조에서 나노필러 어레이의 치수변경을 통해 파란 단색 구조색을 나타낼 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

2.3 마이크로 회절격자에 의한 구조색

마이크로 회절격자는 2차원 어레이로 배열된 정사각형 패턴으로 구성하였다. 정사각형 패턴의 폭, 높이, 패턴 간 간격은 각각 $2 \mu\text{m}$, $1.5 \mu\text{m}$, $2 \mu\text{m}$ 로 설계하여 제작을 하였다. 마이크로 회절격자 패턴 몰드는 미세패턴을 제작하는 전통적인 방법인 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 공정을 이용하였다. 먼저 실리콘 웨이퍼 위에 $1.5 \mu\text{m}$ 두께의 실리콘 산화막(SiO_2)을 산화공정(oxidation process)를 통해 형성하였다. 실리콘 산화막 위에 리소그래피 공정으로 포토레지스트 패턴을 형성한 후, 이를 식각 마스크로 사용하여 반응성 이온식각(reactive ion etching)으로 실리콘 산화막을 선택적으로 제거하여 마이크로 회절격자 제작을 위한 몰드를 완성하였다. 이 몰드를 이용하여 핫엠포싱 공정을 통해 투명한 PMMA 기판 표면에 마이크로 패턴을 형성하여 마이크로 회절격자를 완성하였다. Fig.5(a)는 제

작된 마이크로 회절격자의 2차원 마이크로패턴 어레이를 나타내는 전자현미경 사진이다. 제작된 마이크로 회절격자를 이용하여 Fig.5(b)와 같은 실험구성을 이용하여 회절격자의 색 분산 특성을 이용한 보는 각도에 따라 색이 바뀌는 무지개 빛 구조색 발현을 측정하였다. 실험에 사용된 광원은 440 nm와 550 nm에서 피크 파장을 보이는 6500K LED를 사용하였다.



※ AR : Aspect Ratio, g : gap between holes

Fig. 3 SEM images of nanohole arrays molds for nanopillar arrays; (a) N_L200(AR<1, g =200~250nm), (b) N_L100(AR<1, g =100~150nm) (c) N_H200(AR>1, g =200~250nm), (d) N_H100(AR>1, g =100~150nm)

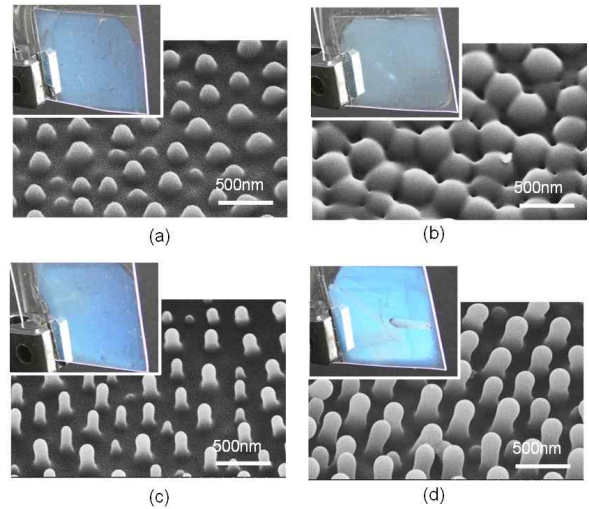


Fig. 4 SEM images of nanopillar arrays on the transparent PMMA sheet and their structural colors; (a) N_L200, (b) N_L100 (c) N_H200, (d) N_H100

Fig.5(c)와 5(d)는 각각 회절격자 기판이 수직축에 대해 기울어진 각도, θ 에 따른 색의 변화를 나타내고 있다. 30° 부근에서는 초록색이 발현되고 60° 부근에서는 붉은 계열의 구조색이 발현됨을 알 수 있다.

2.4 나노-마이크로 복합구조에 의한 구조색

단색 구조색을 강하게 나타내는 동시에 제작에 용이한 샘플 N_H150 제작을 위한 나노홀 어레이 몰드와 마이크로 회절격자 몰드를 동시에 이용하여 투명 PMMA 기판의 양면에 각각 나노필러 어레이와 마이크로 회절격자 패턴을 형성하였다. 이 패턴을 사용하여 Fig.5(b)에 나타난 실험구성을 통해 회절에 의한 보는 방향에 따라 색이 바뀌는 무지개 빛 구조색을 측정하여 나노필러 어레이의 효과를 확인하였다. Fig.6(a)와 6(b)는 각각 제작된 회절격자 기판이 30°와 60°로 기울어졌을 때 관찰되는 구조색을 나타내고 있다. 회절 각도가 30°인 Fig.5(c)와 Fig.6(a), 그리고 60°인 Fig.5(d)와 Fig.6(b)를 비교해 보면, 나노필러 어레이 구조의 영향을 확인할 수 있다. 전체적인 색상의 토피를 살펴보면 나노필러 패턴이 없는 경우, 보다 강한 색을 나타내는 반면, 나노필러 패턴이 있는 경우에는 전체적으로 균일한 색을 나타내고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 평가한 회절에 의한 구조색은 광반사가 아닌 투명기판을 통해 광이 투과한 후 형성되는 회절에 의한 구조색이므로, 정량적인 평가를 위한 자외선/가시광 투과 스펙트럼을 측정하였다.

Fig.7은 마이크로 회절격자만 있는 샘플 M_2와 마이크로 회절격자 패턴과 더불어 나노필러 어레이가 함께 제작된 샘플 NM_H150에 대해서, 초록색계열의 구조색을 보이는 기판 회전각도 30°와 빨간색 계열의 구조색을 나타내는 60°의 각도에 대해 측정된 자외선/가시광 투과 스펙트럼을 나타내고 있는 그래프이다.

30°의 각도에 대해서는 마이크로 회절격자 및 나노-마이크로 회절격자 모두 높은 투과율을 보이는 하나의 피크 파장을 나타내고 있으며, 가시광선 파장 범위 내에서의 피크 파장은 550nm이다. 파장-색 변환 차트를 기준으로 보면 green(550nm)이고 이는 Fig.5(c)와 Fig.6(a)에 나타난 실험결과와 일치하는 내용이다. 60°의 각도에 대해서는 마이크로 회절격자 및 나노-마이크로 회절격자 모두 높은 투과율을 보이는 두 개의 피크 파장을 나타내고 있다. 그 피크 파장이 마이크로 회절격자의 경우에는 450nm와 780nm영역이고, 나노-마이크로 회절격자의 경우에는 피크가 왼쪽으로 시프트되어 420nm와 750nm의 두 영역에서 피크를 나타내고 있다. 파장-색 변환 차트를 기준으로 보면 두 회절격자는 violet-blue(400-450nm)와 extreme spectral red(750-780nm)의 색을 각각 나타내고, 이 두 빛의 조합은 마젠타

색이 나타나게 되는데, 이 역시 Fig.5(d)와 Fig.6(b)에 나타난 실험결과와 잘 일치하고 있다.

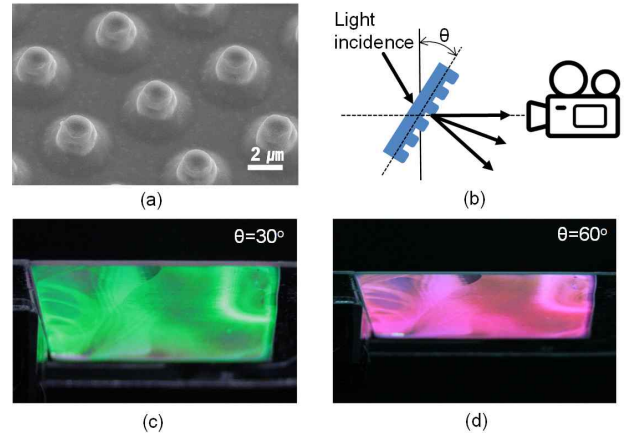


Fig. 5 Iridescent structural colors of light diffraction on micrograting patterns; (a) SEM image of micropattern arrays, (b) schematics of experimental setup, (c) green-tone structural colors at micrograting angle of 30°, (d) red-tone structural colors at micrograting angle of 60°. (Sample No. M_2 in Table 1)

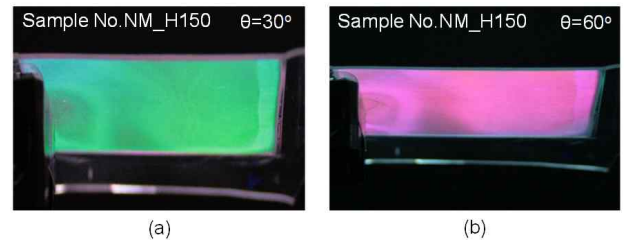


Fig. 6 Iridescent structural colors of light interference and diffraction on nanopillar arrays and micrograting patterns; (a) green-tone structural colors at micrograting angle of 30°, (b) red-tone structural colors at micrograting angle of 60°. (Sample No. NM_H150 in Table 1)

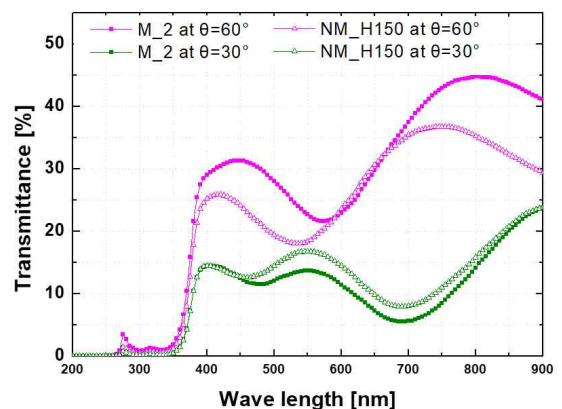


Fig. 7 UV/visible light transmittance spectrum of a micrograting and micrograting with nanopillar arrays for different diffractive angle.

나노-마이크로 회절격자에 의한 구조색 발현에 있어 나노필러 어레이의 역할은 실험으로 관찰된 색상으로 볼 때, 색상의 변화에는 영향을 미치지 못하고, 구조색이 발현되는 영역의 색상 균일도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 인공 구조색을 구현을 위한 3가지 내용을 실험적으로 확인하였다. 첫째, 불규칙 나노필러 어레이를 이용한 빛에 간섭에 의한 단색 구조색 발현을 실험적으로 확인하였다. 실험을 통해 빛의 간섭에 의한 단색 구조색은 파란색의 간섭색을 확인하였으며, 나노필러의 직경, 높이, 필러 간 간격에 따라 색상의 변화는 거의 없고 색채의 강도가 바뀌는 것을 확인하였다. 둘째, 규칙적으로 형성된 2차원 마이크로패턴($2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$) 회절격자에 의해 회절 색채 분산효과에 따라 보는 각도에 따라 색이 바뀌는 무지개 빛 구조색이 나타남을 확인하였다. 가시광 투과 스펙트럼을 통해 무지개 빛 구조색은 단일 파장에 의해 나타나는 것이 아니라 두 개의 파장의 조합으로 나타남을 확인하였다. 마지막으로 불규칙 나노필러 어레이와 마이크로 회절격자 패턴이 동시에 존재하는 경우, 나노필러 어레이는 색상의 변화를 주기 보다는 패턴의 있는 영역의 구조색이 균일한 색상이 되도록 기여하는 것으로 판단된다. 결론적으로 불균질 나노필러 어레이 패턴 및 규칙적 마이크로 패턴에 의해 구조색 구현이 가능함을 실험적으로 확인하였고, 이는 색소없이 구조물을 이용하여 영구적으로 색을 구현이 가능하므로 예술분야 뿐만 아니라 보안 및 위조방지 분야 등 다양한 응용분야에 활용이 가능할 것이다.

후 기

이 연구는 한국기계연구원의 고효율 포토닉스 부품 생산 핵심시스템 개발사업의 연구비지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] Kinoshita, S., Yoshioka, S., 2013, Structural Colors in Nature: The Role of Regularity and Irregularity in the Structure, *Chemphyschem* 6:8 1442-1459.
- [2] Diao, Y.Y., Liu, X.Y., Toh, G.W., Shi, L., Zi, J., 2013, Multiple Structural Coloring of Silk-Fibrion Photonic Crystals and Humidity-Responsive Color Sensing, *Advanced Functional Materials* 23:43 5373-5380.
- [3] Teyssier, J., Saenko, S.V., Van Der Marel, D., Milinkovitch, M.C., 2015, Photonic Crystals Cause Active Colour Change in Chameleons, *Nature communications* 6 6368.
- [4] Vignolini, S., Rudall, P.J., Rowland, A.V., Reed, A., Moyroud, E., Faden, R.B., Baumberg, J.J., Glover, B.J., Steiner, U., 2012, Pointillist Structural Color in Pollia Fruit, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109:39 15712-15715.
- [5] Zhao, Y., Xie, Z., Gu, H., Zhu, C., Gu, Z., 2012, Bio-Inspired Variable Structural Color Materials, *Chemical Society Reviews* 41:8 3297-3317.
- [6] Lee, T., Jang, J., Jeong, H., Rho, J.J.N.C., 2018, Plasmonic- and Dielectric-Based Structural Coloring: From Fundamentals to Practical Applications, *Nano Convergence* 5:1 1-21.
- [7] Ball, P., 2012, Nature's Color Tricks, *Scientific American* 306:5 74-79.
- [8] Young, T., 1804, Experimental Demonstration of the General Law of the Interference of Light, *Philosophical transactions of the Royal Society of London* 94 1.
- [9] Ghiradella, H., Aneshansley, D., Eisner, T., Silberglied, R.E., Hinton, H.E., 1972, Ultraviolet Reflection of a Male Butterfly: Interference Color Caused by Thin-Layer Elaboration of Wing Scales, *Science* 178:4066 1214-1217.
- [10] Kinoshita, S., Yoshioka, S., Kawagoe, K., 2002, Mechanisms of Structural Colour in the Morpho Butterfly: Cooperation of Regularity and Irregularity in an Iridescent Scale, *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 269:1499 1417-1421.
- [11] Vukusic, P., Sambles, J.R., 2003, Photonic Structures in Biology, *Nature* 424:6950 852-855.
- [12] Welch, V., Vigneron, J.-P., 2007, Beyond Butterflies—the Diversity of Biological Photonic Crystals, *Optical and Quantum Electronics* 39:4-6 295-303.
- [13] Yablonovitch, E., 2001, Photonic Crystals: Semiconductors of Light, *Scientific American*, 285, (6), pp. 46-55.
- [14] Dufresne, E.R., Noh, H., Saranathan, V., Mochrie, S.G., Cao, H., Prum, R.O., 2009, Self-Assembly of Amorphous Biophotonic Nanostructures by Phase Separation, *Soft Matter* 5:9 1792-1795.
- [15] McPhedran, R.C., Parker, A.R., 2015, Biomimetics: Lessons on

- Optics from Nature's School, *Physics today* 68:6 32.
- [16] Kim, J.H., Moon, J.H., Lee, S.-Y., Park, J., 2010, Biologically Inspired Humidity Sensor Based on Three-Dimensional Photonic Crystals, *Applied Physics Letters* 97:10 103701.
- [17] Hawkeye, M.M., Brett, M.J., 2011, Optimized Colorimetric Photonic-Crystal Humidity Sensor Fabricated Using Glancing Angle Deposition, *Advanced Functional Materials* 21:19 3652-3658.
- [18] Liu, Y., Chang, Y., Ling, Z., Hu, X., Li, Y., 2011, Structural Coloring of Aluminum, *Electrochemistry Communications* 13:12 1336-1339.
- [19] Zeng, B., Gao, Y., Bartoli, F.J., 2013, Ultrathin Nanostructured Metals for Highly Transmissive Plasmonic Subtractive Color Filters, *Scientific Reports* 3 2840.
- [20] Xu, T., Wu, Y.-K., Luo, X., Guo, L.J., 2010, Plasmonic Nanoresonators for High-Resolution Colour Filtering and Spectral Imaging, *Nature communications* 1 59.
- [21] Barnes, W.L., Dereux, A., Ebbesen, T.W., 2003, Surface Plasmon Subwavelength Optics, *Nature* 424:6950 824-830.
- [22] Chen, Q., Cumming, D.R., 2010, High Transmission and Low Color Cross-Talk Plasmonic Color Filters Using Triangular-Lattice Hole Arrays in Aluminum Films, *Optics Express* 18:13 14056-14062.
- [23] Do, Y.S., Park, J.H., Hwang, B.Y., Lee, S.M., Ju, B.K., Choi, K.C., 2013, Plasmonic Color Filter and Its Fabrication for Large-Area Applications, *Advanced Optical Materials* 1:2 133-138.
- [24] Yokogawa, S., Burgos, S.P., Atwater, H.A., 2012, Plasmonic Color Filters for Cmos Image Sensor Applications, *Nano Letters* 12:8 4349-4354.
- [25] Pashchanka, M., Yadav, S., Cottre, T., Schneider, J.J., 2014, Porous Alumina-Metallic Pt/Pd, Cr or Al Layered Nanocoatings with Fully Controlled Variable Interference Colors, *Nanoscale* 6:21 12877-12883.
- [26] Roberts, A.S., Pors, A., Albrektsen, O., Bozhevolnyi, S.I., 2014, Subwavelength Plasmonic Color Printing Protected for Ambient Use, *Nano Letters* 14:2 783-787.
- [27] Shimamoto, N., Tanaka, Y., Mitomo, H., Kawamura, R., Ijiri, K., Sasaki, K., Osada, Y., 2012, Nanopattern Fabrication of Gold on Hydrogels and Application to Tunable Photonic Crystal, *Advanced Materials* 24:38 5243-5248.
- [28] Kumar, K., Duan, H., Hegde, R.S., Koh, S.C., Wei, J.N., Yang, J.K., 2012, Printing Colour at the Optical Diffraction Limit, *Nature Nanotechnology* 7 557-561.
- [29] Tan, S.J., Zhang, L., Zhu, D., Goh, X.M., Wang, Y.M., Kumar, K., Qiu, C.-W., Yang, J.K., 2014, Plasmonic Color Palettes for Photorealistic Printing with Aluminum Nanostructures, *Nano Letters* 14:7 4023-4029.