

곤충을 모방해서 무전원 습도 센서를 만들 수 있을까?

이 승 열*

(서강대학교 기계공학과)

2010년 9월 23일자 네이처지는 국내 연구자의 장수풍뎅이를 모방한 습도 센서를 Research Highlights란에 소개하였다. 이에 대한 연구와 생체모방공학을 소개하도록 한다.

1. 머리말

최근 국내외적으로 생명체의 특징을 모방하여 이를 새로운 과학적 원리나 공학적인 제품에 응용하는 생체모방공학(biomimetics)이 활발히 연구되고 있다. 생체모방공학은 살아있는 생물의 행동이나 구조, 그들이 만들어내는 물질 등을 모방함으로써 새로운 기술을 만드는 전자·기계 기술로, ‘생체(bio)’와 ‘모방(mimetics)’이란 단어의 합성어이다. 이 글에서는 생체모방공학 중에서 광결정(photonic crystal)에 의한 구조색(structural color) 연구 동향과 남미에 서식하는 헤라클

레스 장수풍뎅이를 겹질 구조를 모방하여 만든 무전원 습도 센서를 소개한다.

2. 생체모방공학과 생명체의 구조색

자연계에 존재하는 생체물질의 표면은 현존하는 엔지니어링 소재를 이용해 제작한 표면에 비해 매우 뛰어난 성능을 가지고 있다. 표면 자체의 마찰을 줄이는 것과 같은 기본적인 성능뿐 아니라 자기조립(self-assembly), 자기 세정(self-cleaning), 자기 회복(self-healing), 외부 환경에 대한 지능적 특성 조절 기능과 같은 다양한 기능을 가지

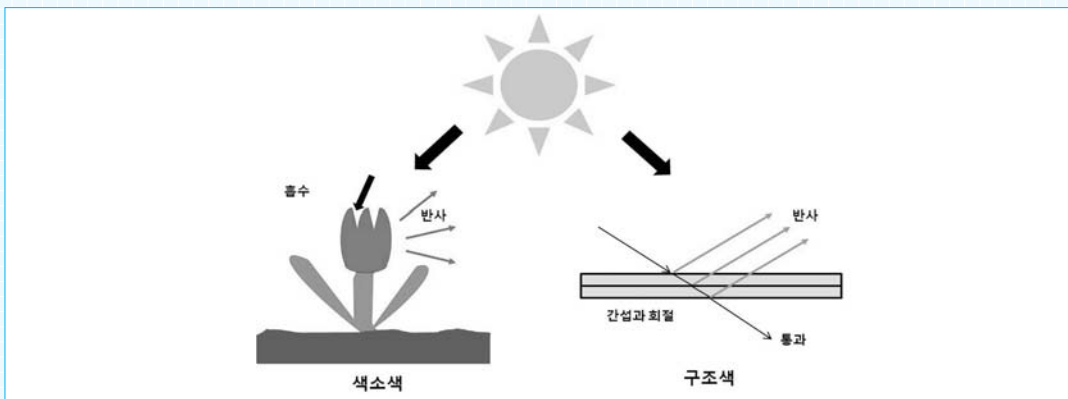


그림 1 색소에 의한 색깔과 구조에 의한 색깔을 발광 원리를 비교함

* E-mail : sylee@sogang.ac.kr / (02) 705-8638

는 표면을 형성하고 있을 뿐 아니라 광결정 (photonic crystal)이라 불리는 주기적인 나노 격자 구조를 통하여 특정한 파장대의 빛을 발광하기도 한다. 공작새의 깃털이나 모포나비의 화려한 색깔은 색소에 의한 빛의 발광이 아닌 구조색이라 불리는 나노 격자 구조에 의한 특정 색깔의 반사나 회절을 통하여 발생한다. 그림 1과 같이 대부분의 생명체는 색소 단백질에 의해서 특정한 색깔을 반사하게 되지만 일부 생명체는 표면 구조가 주기적인 격자 구조를 갖고 있어서 빛의 간섭과 회절에 의해서 광밴드갭

(photonic band gap)이라 불리는 특정한 파장의 빛만을 반사하게 된다.

그림 2는 다양한 생명체의 광결정 특성을 보여준다. 암컷 앞에서 한껏 펼쳐 보인 수컷 공작의 화려한 깃털 색상이 바로 표면에 있는 500~700 nm의 나노막대로 구성된 멜라닌 원통이 만들어내는 것이다. 이 멜라닌 원통 자체는 현미경으로 보면 색을 띠지 않지만 빛을 받아 산란하면서 공작 특유의 화려한 색상을 발산된다. 초록, 주황, 코발트블루의 화려한 색상은 바로 이 나노 크기 멜라닌 막대의 배열 즉 나노 패턴의 모양에 따라 만들어진다. 공작새 뿐 아니라 청둥오리, 전복껍질이나 다양한 풍뎅이들의 화려한 색상도 모두 이런 나노 구조물이 빛에서 산란한 결과다. 파란색을 나타내는 몰포나비(Morpho peleides butterfly)의 날개는 광결정 구조 때문에 나타나는 색으로 일반적인 천연 염료(dye)때문에 나타나는 식물의 잎과는 근본적으로 발색 원리가 다르다. 나비뿐만 아니라, 다양한 곤충이 이러한 방식으로 날개 또는 몸의 색을 나타내는 것으로 알려져 있다. 또한 나방의 눈은 모든 파장대의 빛을 차단하는 나노 구조로 되어있고 흰 딱정벌레는 흰 색깔을 내도록 나노 패턴이 되어 있다. 이러한 생명체의 나노구조물 원리를 화려한 색상을 내주는 자동차 페인트나 반도체 광소자 개발에 활용하고 있으며 나방 눈의 구조를 모방하여 무반사 코팅 기법과 태양광 흡수 기술에 상용화되었다. 그림 2의 마지막은 화장품회사인 L'Oreal의 광결정 화장품과 일본의 광발색 섬유인 Morphotex를 사용한 옷과 가방을 보여준다.

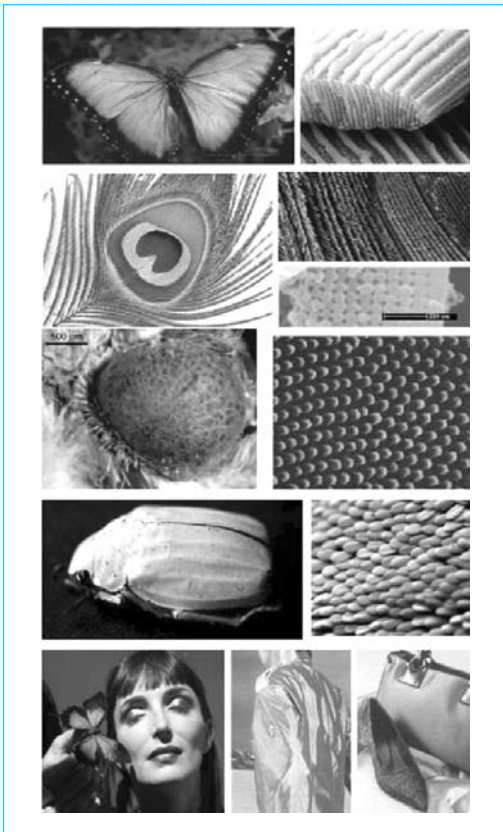


그림 2 자연 속에서 존재하는 광결정 구조에 의한 색깔 변화, 위로부터 모포나비, 공작 깃털, 나방의 무반사 눈, 흰 딱정벌레 그리고 이런 광결정 특성을 이용하여 상용화된 화장품과 섬유

3. 풍뎅이 모방 습도 센서

지구상에 존재하는 곤충 중 크기가 가장 크다고 알려진 헤라클레스 장수풍뎅이

(*Dynastes Hercules*)는 중남미에 서식한다. 헤라클레스 장수풍뎅이의 겹날개(elytra) 색은 그림 3(b)과 같이 건조한 대기에서 연카키색(khaki-green)을 띄지만 습도가 높아지면 그림 3(c)와 같이 검은색을 띄게 된다. 이러한 장수풍뎅이와 습도와 관계는 M. Rassart 등에 의해 그 원리가 밝혀졌는데 딱딱한 겹겹질 바로 아래에 그림 3(d)와 같이 250~300 nm 크기의 주기적인 격자 모양을 갖는 3차원 광결정 구조를 갖고 있다. 습도가 증가하게 되면 이러한 격자 구조에 습기가 머물게 되면서 광결정 구조에서 반사되는 색깔이 변화하게 된다. 연구자들은 헤라클레스 장수풍뎅이의 이러한 습도에 의한 변색 현상을 모방하여 실제 생체모방형 습도센서를 제작하고 실험하였다.

광결정 습도 센서의 제작 과정은 그림 4에 나타난 바와 같이 나노 실리카 오팔(nano silica opal)을 침지 코팅법으로 실리콘 웨이퍼(silicon wafer)에 코팅한 후에 친수성(hydrophilic) 수화젤(hydrogel)인 PEG(polyethylene glycol)를 주입하고 PET 필름으로 덮은 후에 자외선(ultra violet)으로 경화시킨다. 경화된 샘플은 접착력의 차이에 의해 PET 필름으로 모두 전사된다.

이렇게 전사된 시편은 BOE(buffer oxide etchant)를 사용하여 나노 실리카 오팔을 식각(etching)하여 제거한다. 이러한 과정을 통해 얻어진 시편은 PEG와 공기의 주기적인 배열을 갖는 광결정 습도 센서가 완성된다. 완성된 3차원 PC(Polycarbonate) 구조는 PEG가 친수성 물질임에도 불구하고, 그 3차원 나노구조에 의해 소수성을 띄게 되어 만들어진 공극사이로 물이 잘 침투하지 못하게 된다. 이 연구에서는 O₂ 플라즈마처리를 추가적으로 해줌으로써, 친수성 표면을 형성시킨다. 그림 4의 마지막 그림은 광결정 습도 센서를 SEM으로 확대한 사진을 보여주는데 PEG로 이루어진 틀에 나노 크기의 구 모양의 홈이 주기적으로 배열되어 있는 것을 확인할 수 있다. 평소 건조한 대기에서는 위의 홈이 공기로 채워지지만 습도가 높은 대기에서는 공기 대신 물이 침투하여 나노 크기의 구멍을 채우게 되어 시편 전체의 평균 반사율이 변하게 되고 그로 인해 광밴드 갭이 변화하게 된다.

275 nm 크기의 다공성 층을 갖는 광결정 습도센서를 제작하여 측정한 실험 결과를 그림 5에 보여준다. 다양한 습도 환경에서 습도 센서의 색깔이 변하게 됨을 확인할 수 있는데

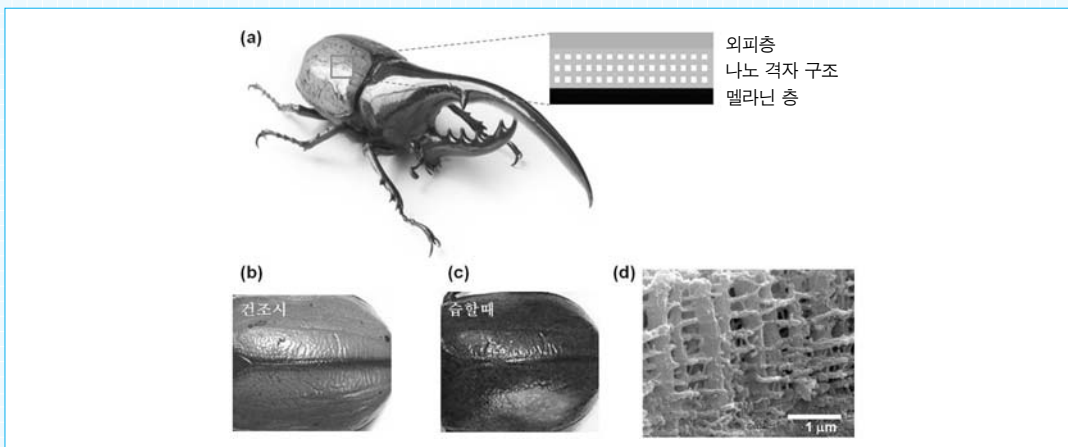


그림 3 헤라클레스 장수풍뎅이 모습과 건조한 대기과 습한 대기에서의 색깔 변화 그리고 겹질 구조의 SEM 사진

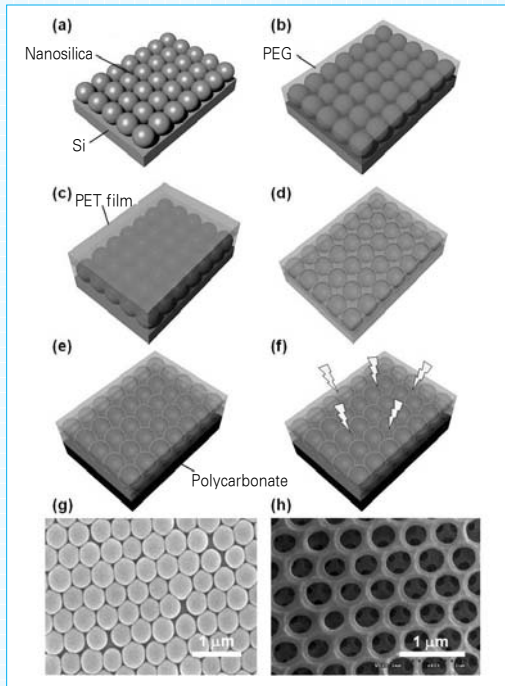


그림 4 275 nm 크기의 3차원 홀 구조를 만들기 위한 나노 공정 개략도. (f)와 (g)는 사용된 콜로이드 크리스탈의 SEM 사진과 제작된 나노 광결정 구조의 SEM 사진을 보여준다.

25%에 498 nm 파장의 색깔이 98% 습도에서 637 nm 파장의 주황색으로 변하게 됨으로써 137 nm의 파장 변화가 생겨났다. 이러한 변색은 습도가 높아지고 낮아짐을 반복적으로 실행해도 동일하게 변하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 만일 표면처리를 하지 않을 경우에는 그 변색범위가 14 nm 정도밖에 되지 않으므로 이러한 습도 센서 제작에서는 친수성 표면 처리가 필수적임을 알 수 있다. 이러한 습도에 따른 파장의 변화는 이론적으로 Bragg 방정식을 사용하여 예측할 수 있는데 광결정 구조에서 반사되는 광밴드갭은 반복적인 격자 구조의 2배와 실제 굴절율의 곱으로 표시된다. 굴절률이 공기는 1이지만 물에서는 1.33이므로 이러한 차이에 의해서 광밴드 변화가 발생한다.

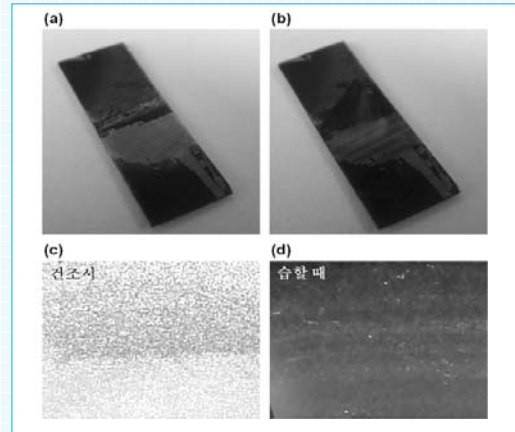


그림 5 제작된 습도센서 사진과 습도에 따른 실제 색깔 변화 실험

4. 맺음말

이 연구에서는 헤라클레스 장수풍뎅이의 표피 구조를 모방한 생체모방형 무전원 습도 센서를 제작하였다. 제작된 센서는 구조적으로 헤라클레스 장수풍뎅이의 표피와 유사할 뿐만 아니라, 실제 표피에서 습도가 높아짐에 따라 반사되는 빛의 파장이 변화되는 것을 확인하였다. 이 연구는 습도에 따라 구조색의 변화를 일으키는 습도 센서를 세계 최초로 제작하였다는데 의의가 있으며 서강대학교 연구팀은 특정한 가스나 바이오 물질의 농도에 따라 색깔이 변화하는 필름 형태 센서에 대한 연구를 추가적으로 진행하고 있다. [KSNVE](#)

참고문헌

- [1] Research Highlights, 2010, "Materials Monitors Mugginess," Nature, Vol. 467, p. 370.
- [2] Kim, J. H., Moon, J. H., Lee, S.-Y. and Park, J. Y., 2010, "Biologically Inspired Humidity Sensor based on Three Dimensional Photonic Crystals," Applied Physics Letters, Vol. 97, p. 103701.