

곤충 눈 구조를 모방한 광소자 및 광 이미징 시스템 연구

DOI: 10.3938/PhiT.22.040

송영민·이용탁

Research on Optical Devices and Optical Imaging Systems Inspired by the Structure of an Insect's Eye

Young Min SONG and Yong Tak LEE

An understanding of the light-sensing organs in biology creates opportunities for the development of novel optic systems that cannot be made available with existing technologies. Insects' eyes are particularly notable for their exceptional and interesting optical characteristics, such as wide fields of view and infinite depths of field. Also, some insects contain nanophotonic structures that provide exceptional optical behaviors. Here, we introduce recent progress in optical devices and optical imaging systems with designs inspired by insects' eyes.

들어가며

그리스어로 생명을 뜻하는 'bios'와 모방이나 흉내를 의미하는 'mimesis'에서 따온 'biomimetics', 즉 생체모방은 자연에서 볼 수 있는 구조적 또는 기능적 특성들의 연구 및 모방을 통해 인류의 과제를 해결하는 데 그 목적이 있다. 이제 일반인에게도 생소하지 않은 이 연구 분야는 최근에는 마이크로 및 나노기술의 발전과 더불어 동물 또는 식물에 존재하는 독특한 특징을 갖는 미세구조를 모방하는 방향으로 연구가 활발히 이루어지고 있다. 대표적인 예로는 연꽃잎의 표면 구조를 이용한 자기 세척 물질, 도마뱀의 발바닥 구조를 모사한 접착제 등이 있다. 광학 및 광 이미징 분야에서도 생체모방 연구는 활발히 이루어지고 있는데, 자연계에 존재하는 시각 시스템(vision

저자약력

송영민 교수는 연세대학교 졸업 후 2011년 광주과학기술원 정보통신공학부에서 박사 학위를 받았으며, 일리노이 대학교(UIUC)에서 박사후 연구원을 거쳐 현재 부산대학교 전자공학과에 재직 중이며, 곤충 눈 카메라와 관련된 연구를 하고 있다. (ysong@pusan.ac.kr)

이용탁 교수는 서울대학교를 졸업하고 KAIST 물리학과에서 박사 학위를 받았으며, 한국전자통신연구원 광전자 연구실장, 화합물반도체 연구부장을 역임했고, 1994년부터 광주과학기술원 정보통신공학부에서 교수로 재직 중이다. (ytlee@gist.ac.kr)

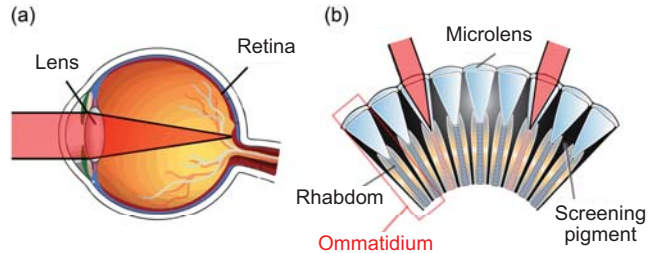


Fig. 1. Schematic illustration of anatomy of (a) single lens eye and (b) compound eye.

system), 그 중에서도 곤충 등 작은 생명체의 겹눈(compound eye) 구조를 모방하는 연구는 그 독특한 구조적, 기능적 특징으로 인해 많은 사람들의 주목을 받고 있다. 이 글에서는 곤충 눈이 가지는 주요 특성을 살펴보고, 최근까지 진행되어온 곤충 눈 모방 연구에 대해 소개하고자 한다.

인간의 눈과 곤충의 눈

자연계에 존재하는 눈의 종류는 약 10가지로 분류할 수 있으며, 이들은 다시 단일렌즈(single lens) 눈과 겹눈으로 구분되어진다.^[1,2] 단일렌즈 눈은 인간 등 포유류 및 조류, 어류 등에서 쉽게 확인되어지며, 커다란 렌즈(수정체, crystalline lens)가 안구의 전면에 위치하고, 후면에는 망막이 존재하는 형태이다(그림 1(a)). 피사체에서 반사되어 각막(cornea) 및 수정체를 통해 들어온 빛은 망막에서 전기 신호로 전환되며 뇌로 보내져 이미지를 형성하게 된다. 따라서 망막에서 초점이 정확히 맞을 때에만 선명한 이미지를 얻을 수 있으며, 이를 위해 수정체를 잡고 있는 모양체의 수축을 통해 수정체의 곡률반경이 조절 가능하도록 되어 있다. 수정체가 제 역할을 하지 못하면 망막에서 초점이 맞질 않아 상이 흐려지게 된다. 이것이 근시 또는 원시가 되는 이유이며, 이를 보정하기 위해 오목렌즈나 볼록렌즈를 사용하여 빛의 굴절을 조절해서 초점이 정확히 망막에 맞도록 해야 한다. 우리가 흔히 사용하는 카메라의 경우

REFERENCES

- [1] E. Warrant and D.-E. Nilsson, *Invertebrate Vision* (Cambridge Univ. Press, New York, 2006).
- [2] M. F. Land, *Contemp. Phys.* **29**, 435 (1988).

렌즈의 곡률반경을 조절하기는 어렵기 때문에, 초점을 맞추기 위해서 렌즈와 광센서 간의 거리를 조절한다. 단일렌즈 눈의 시야각은 각 동물마다 제각각이지만 일반적으로 포식자들은 좁은 시야각을 갖고 초식동물은 그 반대이다. 인간은 약 50도의 시야각을 갖는다. 사각지대를 보기 위해 눈동자를 움직여 시야각을 높일 수 있으며, 어류의 경우 눈동자 조절이 어려운 반면 각막이 크게 휘어 있어 매우 넓은 시야각을 갖도록 되어 있다.

겹눈은 잠자리, 벌 등 곤충과 새우, 가재 등 갑각류를 포함하는 절지동물류에서 볼 수 있으며, 고생대 대표 화석인 삼엽충에서도 발견된다. 겹눈은 일반적으로 수백에서 수만 개의 홑눈(ommatidium)이 불룩한 형태로 모여 다발을 이루고 있으며, 각 홑눈은 겉에서부터 마이크로렌즈 형태의 각막, 수정추(crystalline cone), 감간(rhabdom) 순으로 구성된다(그림 1(b)). 각막의 크기는 생물종에 따라 다양하나 보통 주행성 곤충의 경우 20 마이크로미터 정도로 매우 작다. 피사체에서 반사된 빛은 각 홑눈을 통해 들어와 전기 신호로 변환되며 각 홑눈에서 얻어진 빛의 양에 따라 이미지를 형성하게 된다. 겹눈은 불룩한 형태로 구성되기 때문에 단일렌즈 눈에 비해 매우 넓은 시야각(140~180도)을 가지며, 피사체의 각 부분은 특정 홑눈을 통해서만 들어오며 각 홑눈간 이미지 정보의 중첩이 없기 때문에 거의 모든 초점거리에서 초점이 맞는 심도 깊은 사진을 얻을 수 있다. 겹눈은 구조에 따라 연립상 눈(apposition eye)과 중립상 눈(superposition eye)으로 구분되어 지는데, 연립상 눈은 주행성 곤충에서 주로 발견되며 각 홑눈 사이에 보호색소(screening pigment)가 있어 홑눈 간에 빛의 간섭이 없다. 반면, 중립상 눈은 야행성 곤충에서 발견되는데 눈에 노출되는 빛의 정도에 따라 색소가 위축될 수 있어 홑눈 간에 받아들인 빛이 어느 정도 겹치게 되기 때문에 빛에 대한 민감도가 높아진다. 즉, 어둠에 적합하도록 구성되어 있는 것이다.

3차원 마이크로렌즈 어레이 모방기술

겹눈이 가지는 가장 큰 특징 중 하나인 넓은 시야각을 얻기 위해서는 겹눈과 유사하게 생긴 3차원 형태의 마이크로 렌즈 다발을 만드는 것이 필요하다. 일반적으로 마이크로렌즈는 투명 유리를 기계적으로 가공하여 제작하기 때문에, 3차원으로 구조물을 만드는 것은 기존의 방식으로는 매우 어렵고, 정교한 장비가 요구된다. 이를 극복하기 위해 몇몇 연구 그룹에서 고안한 방법은 바로 유리 대신 투명 고분자 물질을 이용하는 것이다.^[3] 먼저 실리콘(silicone) 재질의 PDMS(Polydimethylsiloxane)와 같은 탄력 있는 고분자 물질을 이용해 틀을 만든다. 수천 개의 렌즈 모양을 별집처럼 평면에 배열한 다음 이 위에 고분자 물질을 막처럼 깔면 울퉁불퉁한 막이 만들어진다.

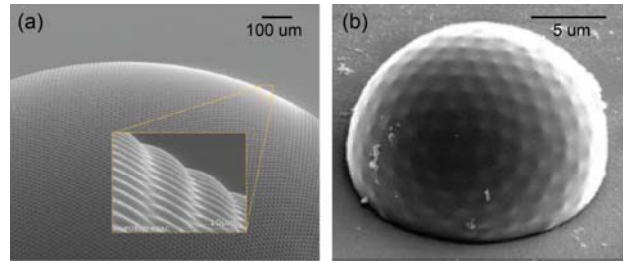


Fig. 2. (a) Scanning electron microscope (SEM) image of an artificial compound eye fabricated by the biologically inspired 3D optical synthesis method.^[3] (b) SEM image of the dome patterns with 2D crystals on the hemispherical surfaces.^[4]

여기에 진공 원통을 대고 적당한 음압으로 빨아들이면 바닥이 울퉁불퉁한 그릇 모양의 틀이 완성된다. 그 다음 여기에 고분자를 부어 경화시키면 3차원 마이크로렌즈 어레이가 만들어진다(그림 2(a)). 마이크로렌즈 및 반구모양의 크기와 곡률반경은 제작 틀의 크기와 진공 원통에 가해지는 음압 등을 통해 조절 가능하다.

실제 곤충의 겹눈보다 작은 크기의 돔 구조를 만드는 연구도 이루어졌는데, 바로 자기조립방식에 의한 것이다.^[4] 우선 크기가 수백 나노미터인 유리구슬을 물속에 분산시킨 후, 크기가 수십 마이크로미터인 균일한 기름방울을 주입하고 물-기름-유리구슬 사이의 표면화학적 힘의 균형을 유지시키면 유리구슬이 물과 기름방울 사이의 경계면으로 이동하게 된다. 이후 물-유리-기름방울의 혼합물을 기관 위에 뿌리면 기름방울이 반구의 돔 모양으로 변형되고, 유리구슬렌즈는 저절로 기름방울 표면 위에 촘촘히 육방밀집구조로 배열하게 된다(그림 2(b)). 그 다음 단계로 자외선을 기름방울에 조사하여 고형화시킴으로써 초소형 겹눈구조를 제작할 수 있게 된다.

카메라로의 발전

반구형 모양을 갖는 겹눈구조는 그 자체로도 매우 큰 가치를 지니지만, 실제 물체의 이미지를 담아낼 수 없기 때문에 활용범위가 제한적이다. 실제 겹눈과 유사한 영상을 얻어내기 위해서는 감간(rhabdom)의 역할을 대체할 수 있는 이미지 센서를 개발하는 것이 필수적이다. 그러나 기존 이미지 센서들은 반도체 공정기술을 기반으로 하기 때문에 딱딱하고 부서지기 쉬워서 각 센서들을 실제 감간의 위치에 형성하는 것이 불가

REFERENCES

- [3] L. P. Lee and R. Szema, *Science* **310**, 1148 (2005).
- [4] S.-H. Kim, S.-H. Kim and S.-M. Yang, *Adv. Mater.* **21**, 3771 (2009).

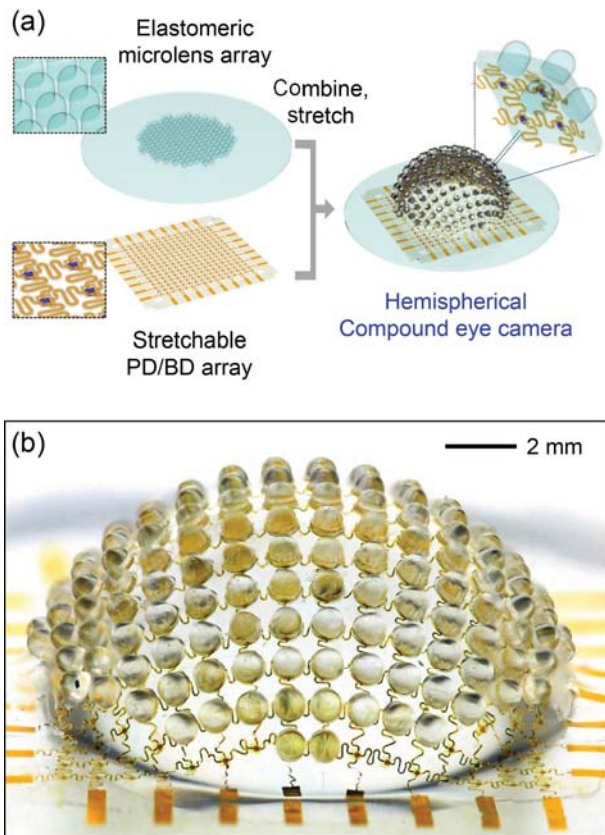


Fig. 3. (a) Schematic illustration of integration schemes for a digital camera that takes the form of a hemispherical, apposition compound eye. (b) Image of a representative compound eye system after hemispherical deformation.^[5]

능하다. 이를 해결하기 위해 최근에 고안된 방법은 늘어나는 이미지 센서를 이용하는 것이다.^[5] 제작 방법은 다음과 같다. 먼저 고무 재질로 된 늘어나는 마이크로 렌즈 어레이를 제작한다(그림 3(a), 좌측 상단). 이후 실리콘 반도체 공정을 통해 이미지 센서들을 제작하게 되는데, 센서 간에는 S자형 금속선으로 연결하여 전기적, 기계적으로 연결이 되도록 구성한다. 제작된 이미지 센서들은(그림 3(a), 좌측 하단) 전사 프린팅(transfer printing) 기법을 통해 수 마이크로미터 두께의 얇은 박막 형태로 반도체 기판에서 떼어내어 마이크로 렌즈 어레이의 밑바닥에 부착이 가능하다. 결합된 렌즈와 이미지 센서를 진공 원통에 대고 적당한 음압으로 빨아들이면, 렌즈 사이의 고무층이 늘어나고 이미지 센서 사이 S자형 전선들이 퍼지면서 돔 구조를 형성하게 된다(그림 3(a), 우측). 형성된 돔 구조는 동일한 곡면을 갖는 지지대에 부착되어 그 형태를 유지할 수 있도록 되어있다(그림 3(b)). 각 렌즈와 이미지 센서 조합은 한 개의 홑눈과 동일한 역할을 하게 된다.

각 홑눈이 빛을 받아들일 수 있는 각도를 수용각(acceptance

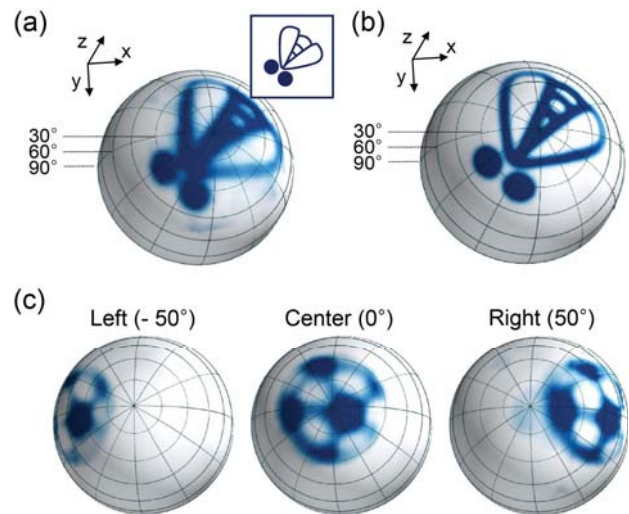


Fig. 4. (a) Picture of line art illustration of a fly captured with a hemispherical, apposition compound eye camera, rendered on a hemispherical surface that matches the shape of the device. (b) Simulation image computed by ray-tracing analysis, assuming ideal construction and operation of the camera. (c) Pictures of a soccer ball captured at three different angles relative to the center of the camera: -50° (left), 0° (center), and 50° (right).^[5]

angle)이라 하는데, 이 수용각이 각 홑눈간의 각도(interommatidial angle)보다 작아야 홑눈간의 빛의 간섭을 방지할 수 있다.^[6] 따라서 겹눈 카메라의 구조 설계시 이러한 사항들이 고려되어야 하는데, 수용각을 조절하기 위해서는 렌즈의 곡률반경 및 초점거리, 이미징 픽셀의 크기 등을 조절해야 하고, 홑눈간 각을 조절하기 위해서는 렌즈 간 거리 및 반구면의 곡률반경 등을 고려해야 한다. 겹눈 카메라가 실제로 이미지를 얻어내기 위해서는 몇 가지 추가적 장치가 필요하다. 먼저, 실제 곤충의 홑눈 사이에 보호막 색소가 있는 것처럼 인공 겹눈에도 유사한 구조가 있어야만 인접한 마이크로렌즈를 통해 들어오는 빛을 효과적으로 차단할 수 있다. 인공 보호막 색소는 검은색 색소를 포함하는 얇은 고무막을 제작하고 각 렌즈의 위치에 구멍을 뚫은 뒤 이를 겹눈 구조의 사이사이에 끼워 넣음으로써 형성된다. 또한, 홑눈의 아래쪽에서 반사되는 빛을 차단하기 위해서도 검은색 곡면 지지대가 필요하다. 이렇게 하여 조립된 곤충 눈 카메라는 이미지 측정을 위해 인쇄회로판에 전기적으로 연결된다.

실제 이미지의 형성은 어떻게 이루어질까? 누구나 한번쯤 TV나 영화를 통해 곤충의 눈에 무수히 많은 다중 이미지가 형

REFERENCES

[5] Y. M. Song *et al.*, Nature **497**, 95 (2013).
 [6] M. F. Land, Annu. Rev. Entomol. **42**, 147 (1997).

성되는 장면을 본 적이 있을 것이다. 그러나 이것은 사실이 아니다. 물체에서 반사된 빛은 각 마이크로렌즈를 통해 들어와서 작은 크기의 이미지를 형성하게 되며, 각 이미지가 형성되는 위치는 마이크로렌즈와 물체 간 거리 및 방향에 따라 다르게 된다. 이렇게 형성된 마이크로이미지의 위치가 감간의 역할을 하는 이미징 픽셀의 위치와 중첩되는 경우, 이미징 픽셀에서 전류가 생성되게 되며, 각 픽셀에서 생성된 전류정보를 통해 최종적으로 단일 이미지가 얻어진다. 제작된 겹눈 카메라를 통해 찍힌 영상은 그림 4(a)에 나타나 있는 것처럼 반 구면에 얻어지게 된다. 이는 광선 추적(ray tracing) 방법에 의해 얻어진 모델링 결과와도 매우 일치한다. 물체의 위치를 카메라 정면이 아닌 측면으로 이동하여도 이미지를 왜곡 없이 얻어낼 수 있다(그림 4(b)). 현재까지 개발된 곤충 눈 카메라의 화각은 160도이며, 기술적으로는 180도 또는 그 이상까지도 가능하다. 게다가 렌즈 곡면의 변형이 없이도, 물체가 어느 곳에 있는지 상을 맺을 수 있는 깊은 심도(depth of field)를 가지고 있다. 개발된 곤충 눈 카메라는 넓은 화각과 무한 심도를 주요 특징으로 하기 때문에 초소형 무인 비행로봇, 전 방위 물체 감지 센서, 초 광각 내시경 등 다양한 분야에 응용이 가능하다.

곤충 눈의 나노 과학 - 나방 눈 구조

모기, 나방 등 야행성 곤충의 경우 앞서 언급한 대로 어둠에 적합하도록 몇 가지 장치가 고안되어 있다. 그 중 한 가지가 바로 각막에 존재하는 찌꼭지(nipple) 형태의 나노구조이다. 통상 나방 눈(moth eye) 구조라 일컬어지는 이 구조는 약 200 nm의 주기를 가지며, 높이는 약 150 nm 정도로 찌꼭지처럼 표면에서부터 서서히 기울어지는 형태로 구성되어 있으며 각막의 전면에 고르게 분포하고 있다. 이러한 나방 눈 구조의 특징은 공기와 매질 간 빛의 반사를 빛의 파장에 무관하게 매우 효과적으로 줄인다는 것이다.^[7] 원리는 간단하다. 나노구조의 주기가 빛의 파장보다 충분히 작은 경우, 빛의 관점에서 그 구조는 마치 하나의 매질로 인식되게 되는데, 나방 눈 구조의 경우 구조물이 표면에서부터 서서히 기울어지는 형태로 되어 있기 때문에 유효 굴절률(effective refractive index)이 서서히 변하는 매질로 인식을 하게 된다. 빛의 반사는 매질 간 굴절률의 차에서 기인하기 때문에 이러한 구조는 빛의 반사를 파장에 거의 무관하게 효과적으로 줄일 수 있게 된다. 특정 파장 대역에서만 빛의 반사를 줄일 수 있는 무반사 코팅 방법과는 대조적이다.

나방 눈 구조의 독특한 무반사 특성으로 인해 최근에는 그 구조를 모사하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 실리콘, 갈륨비소 등 반도체 기판의 굴절률은 3.0 또는 그 이

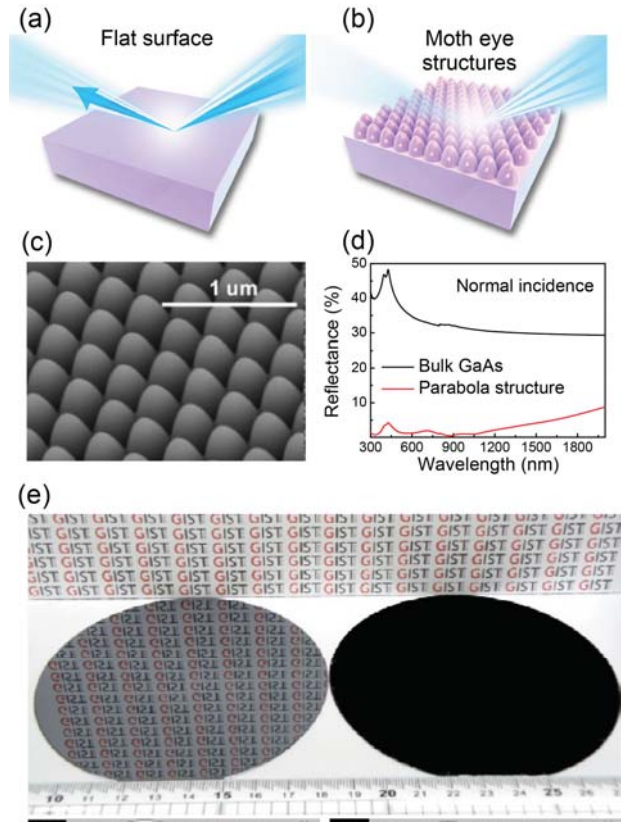


Fig. 5. Schematic illustrations of surface reflection at (a) flat surface and (b) moth eye structure. (c) SEM image of parabola shaped moth eye structures on a GaAs substrate, fabricated by pattern transfer of lens-like shaped photoresists.^[8] (d) Measured reflectance as a function of wavelength for the fabricated parabola-shaped nanostructures on a GaAs substrate. The measured reflectance of bulk GaAs is shown as a reference. (e) Comparison of 4-inch processed antireflective black silicon (right) with reflective polished bare silicon (left).

상으로 매우 높기 때문에 기판의 표면에서 약 30% 이상의 높은 반사가 발생하고, 이는 태양전지, 발광다이오드 등 반도체 광소자의 효율을 급격히 저하시키는 요인이 된다(그림 5(a)). 반면, 나방 눈 구조를 반도체 기판의 표면에 적용할 경우 넓은 파장 대역에서 5% 미만으로 줄일 수 있기 때문에 소자의 효율 향상에 매우 효과적이다(그림 5(b)). 나방 눈 구조의 제작은 전자빔 리소그래피, 레이저 간섭 리소그래피 등 기존에 알려진 나노 패터닝 기술들을 주로 이용하는데, 기판의 식각 단계에서 패터닝 기둥 모양이 아닌 기울어진 형태가 되도록 한다. 나방 눈 구조 제작의 당면한 과제는 크게 두 가지이다. 하나는

REFERENCES

- [7] P. B. Clapham and M. C. Hutley, Nature **244**, 281 (1973).
- [8] Y. M. Song *et al.*, Small **6**, 984 (2010).

이상적인 구조의 구현이고, 다른 하나는 대 면적에서 제작 가능한 값싼 공정기술의 개발이다. 반사특성을 가능한 한 우수하게 만들기 위해서는 유효 굴절률의 변화가 최대한 서서히 진행되어야 하는데, 이런 관점에서 파라볼라(parabola) 형의 구조가 기존의 피라미드형이나 원뿔형 구조에 비해 우수하다. 기존 나노 패턴 기술로는 단순히 기울어진 형태를 제작하는 것은 가능하지만, 파라볼라 형태를 갖도록 하기 위해서는 매우 정교한 작업이 필요하다. 이를 비교적 쉽게 구현하기 위해, 최근에는 포토레지스트를 나노 크기로 패터닝한 후, 열처리를 통해 나노렌즈 형태로 변형시키고, 이를 패턴 전사(pattern transfer)함으로써 기판이 파라볼라 형태를 갖도록 하였다(그림 5(c)).^[8] 위 방식을 통해 갈륨비소 기판 위에 제작된 파라볼라 형 나노구조는 300 nm-1800 nm의 파장 대역에서 5% 미만의 반사율을 갖는다(그림 5(d)). 편평한 표면을 갖는 갈륨비소 기판이 30~50%의 반사율을 갖는 것과는 매우 대조적이다.

대면적 제작을 위해 연구자들이 시도하는 방식은 금속 나노 입자를 이용하는 것이다.^[9,10] 금속 나노 입자를 전자빔 증착기로 증착하거나, 스핀 코팅을 통해 기판에 도포한 뒤 이를 마스크로 하여 식각함으로써 나노 패턴이 형성되도록 한다. 이 경우, 주기적 구조를 형성하기는 어렵지만, 입자의 크기와 간격은 어느 정도 조절 가능하기 때문에 광파장보다 충분히 작은 패턴을 형성함으로써 나방 눈 구조와 비슷한 효과를 낼 수 있다. 게다가 4인치 이상의 대면적에서 패턴 형성이 가능하기 때문에 상업적으로 이용하기에 다른 공정에 비해 유리한 면이 있다. 그림 5(e)는 금속 나노 입자를 이용하여 4인치 실리콘

웨이퍼 위에 제작된 나방 눈 구조(우측)를 나타낸다. 일반 실리콘 웨이퍼(좌측)는 가시광 대역에서 반사율이 매우 높기 때문에 마치 거울처럼 빛의 반사가 심하지만, 나방 눈 구조가 형성된 웨이퍼는 빛의 반사가 거의 없기 때문에 표면이 매우 검게 보인다. 나방 눈 구조 및 이와 유사한 패턴들은 태양전지의 표면에 집적되어 흡수효율을 높이는 데에 이용되고, 광검출기, LED 등 기타 광소자에서도 효율을 높이는 데에 활용되고 있다. 또한 투명 유리 및 고분자 물질의 투과율을 극대화시키는 데에도 활용된다.

맺음말

현존하는 생물종의 80%를 차지하는 절지동물은 대부분 겹눈 구조를 갖고 있다. 따라서 곤충의 겹눈 구조를 연구하고 이를 모방하는 것은 지구상에 존재하는 대다수 생물종의 이미징 메커니즘을 이해하고 활용하기 위한 첫 걸음이다. 이를 실생활에 응용하기 위해서는 아직 해결해야 할 문제가 많이 남아 있지만, 곤충 눈 구조를 기반으로 하는 혁신적인 광학 기술들은 광학소자 및 광 이미징 시스템의 전반적인 측면에서 큰 영향을 끼치고 있으며, 앞으로도 더욱 새롭고 효율적인 기술들이 개발될 것으로 기대한다.

REFERENCES

- [9] Y. M. Song *et al.*, Opt. Express **19**, A157 (2011).
- [10] C. I. Yeo *et al.*, Opt. Express **19**, A1109 (2011).