



겹눈 구조의 이해 및 응용

Understanding Compound Eye Structures and Their Applications

저자 (Authors)	이길주, 유영진, 송영민 Gil Ju Lee, Young Jin Yoo, Young Min Song
출처 (Source)	고분자 과학과 기술 27(6) , 2016.12, 801-807 (7 pages) POLYMER SCIENCE AND TECHNOLOGY 27(6) , 2016.12, 801-807 (7 pages)
발행처 (Publisher)	한국고분자학회 The Polymer Society Of Korea
URL	http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07088247
APA Style	이길주, 유영진, 송영민 (2016). 겹눈 구조의 이해 및 응용. 고분자 과학과 기술 , 27(6), 801-807.
이용정보 (Accessed)	광주과학기술원 210.107.***.33 2017/01/16 13:43 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

겹눈 구조의 이해 및 응용

Understanding Compound Eye Structures and Their Applications

이길주 · 유영진 · 송영민 | Gil Ju Lee · Young Jin Yoo · Young Min Song

School of Electrical Engineering and Computer Science, Gwangju Institute of Science and Technology, 123 Cheomdan gwagi-ro, Buk-gu, Gwangju 61005, Korea
E-mail: ymsong@gist.ac.kr

1. 서론

일상생활에서 빼놓을 수 없는 주요 전자기기로 자리매김한 디지털 카메라는 본래 인간의 안구(eye ball) 구조에서 착안하여 개발된 제품이다. 이런 견지에서, 자연계 시각 시스템에 대한 이해는 새로운 광학계 및 이미징 시스템의 개발 가능성을 높인다. 동물의 눈은 피식자 탐색이나 포식자 포착에 최적화되어 설계되어 있으며, 적절한 주행 또는 비행, 적합한 교미 대상자를 찾는 데에도 효과적인 형태로 구성되어 있다. A. Parker의 '빛스위치 이론(light switch theory)'에 따르면 지질시대를 시각전(pre-vision)과 시각후(post-vision)으로 나눌 수 있으며, 캄브리아기에 눈이 형성됨으로써 빛을 활용할 수 있게 되어 폭발적 진화가 가능해졌다고 한다.¹ 이처럼 동물의 감각기 중 시각은 생태계의 다양성에도 매우 큰 의미를 가진다. 자연계에는 무수히 많은 종류의 눈 구조가 있으며, 이들은 세부적으로 크게는 두 가지 - 단일 렌즈 눈(single lens eye) 및 겹눈(compound eye) - 으로 구분되며, 그 구조적 및 기능적 측면에서 대략 10가지 종류의 눈으로 구분 가능하다. 단일렌즈 눈은 인간 등 포유류 및 조류, 어류 등에서 발견되며, 수정체(crystalline lens)가 안구의 전면에 위치하고, 후면에는 망막(retina)이 존재하는 형태이다(그림 1a). 겹눈은 잠자리, 벌 등 곤충과 새우, 가재 등 갑각류를 포함하는 절지동물류에서 볼 수 있으며, 여러 개의 홑눈이 다발로 모여 있는 형태이다(그림 1b).^{2,3} 인간의 눈을 모방해서 카메라를 만들었다는 것은 다시 말해 단일 렌즈 눈의 구조 및 기능을 모방했다는 것이다. 그렇다면, 자연계 눈의 다른 한 축을 차지하는 겹눈을 모방하면 어떨까? 겹눈 구조의 모방은 이러한 물음에서 나온 것이며, 겹눈이 갖는 장점을 통해 새로운 형태의 시각 시스템을 구현할 수 있다는 점에서 매우 매력적인 연구이다. 본 총설에서는 먼저 겹눈의 구조 및 광학적 특징에 대해 다루고, 최근까지 진행되어온 곤충 눈 모방 연구를 소개하고자 한다.

Author



이길주

2016
2016-현재
부산대학교 전자공학과 (학사)
광주과학기술원 전기전자컴퓨터
공학과 (석박사 통합과정)



유영진

2016
2016-현재
부산대학교 전자공학과 (학사)
광주과학기술원 전기전자컴퓨터
공학과 (석사과정)



송영민

2004
2006
2011
2011-2013
2013-2016
2016-현재
연세대학교 의용전자공학과 (학사)
광주과학기술원 정보통신공학과 (석사)
광주과학기술원 정보기전공학부 (박사)
일리노이대 재료공학과 (Post-Doc.)
부산대학교 전자공학과 조교수
광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학과 조교수

2. 겹눈 구조

겹눈의 구조를 이해하기 위해서는 먼저 단일 렌즈 눈의 형태 및 특징에 대한 이해가 필요하다. 단일 렌즈 눈의 경우, 피사체에서 반사되어 수정체를 통해 들어온 빛은 망막에서 전기 신호로 전환되며 뇌로 보내져서 이미지를 형성하게 된다. 따라서 망막에서 초점이 정확히 맞을 때에 선명한 이미지를 얻을 수 있으며, 이를 위해 수정체를 잡고 있는 모양체의 수축을 통해 수정체의 곡률반경이 조절 가능하도록 되어 있다. 이것이 근시 또는 난시가 되는 이유이며, 이를 보정하기 위해 별도의 렌즈를 사용하여 빛의 굴절을 조절해서 초점이 정확히 망막에 맞도록 해야 한다. 우리가 흔히 사용하는 카메라의 경우 렌즈의 곡률반경을 조절하기는 어렵기 때문에, 초점을 맞추기 위해서 렌즈와 광센서 간의 거리를 조절한다. 단일 렌즈 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. 인간의 눈이 한 개의 렌즈만 갖는 것과는 달리 카메라는 3~6개 정도의 렌즈를 갖는데, 이것은 렌즈의 초점면과 이미지 센서의 위치가 불일치하기 때문이다. 렌즈가 한 개인 경우 피사체에 대한 초점면은 중심점을 기준으로 측면으로 갈수록 오목한 형태를 띠고, 이미지 센서는 평면으로 구성되어 있기 때문에 측면으로 갈수록 초점면과 센서의 위치 간 불일치가 매우 커지기 때문에 광학적 수차가 크게 발생한다. 이를 보완하기 위해 여러 개의 렌즈가 요구되는 것이다. 곡면으로 구성된 이미지 센서가 있을 경우, 상기 문제점을 해결하여 하나의 렌즈로만 카메라를 구성할 수 있다. 안구 모방 카메라의 일환으로 미국 일리노이대 J. A. Rogers 교수팀은 2008년에 박막형 실리콘 광검출기 어레이를 이용한 곡면형 이미지 센서를 개발하였고, 영상의 측면에서 발생하는 수차를 효과적으로 개선하였다.⁴ 2014년에는 소니사에서 상용 수준의 곡면형 CMOS 센서를 개발하였다.⁵

한편, 겹눈은 일반적으로 수백에서 수만 개의 홑눈(ommatidium)이 불록한 형태로 모여 다발을 이루고 있는

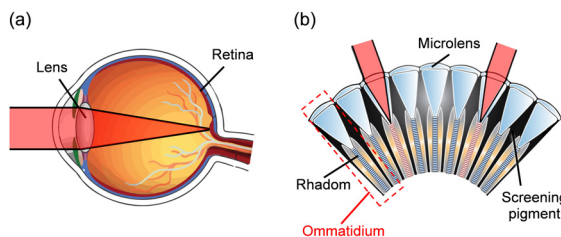


그림 1. 단일 렌즈 눈 (single lens eye) 및 겹눈(compound eye)의 구조.

며, 앞서 언급한 곤충, 갑각류 뿐 만 아니라 고생대 대표 화석인 삼엽충에서도 발견된다. 각 홑눈은 겉에서부터 마이크로 렌즈 형태의 각막, 수정추(crystalline cone), 감간(rhabdom) 순으로 구성된다(그림 1b). 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 불록한 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 구분되어지며, 세부적으로는 그림 2와 같이 5가지 눈으로 구분된다.^{3,6-9} 연립상 눈과 중립상 눈은 똑같이 홑눈들이 불록하게 튀어나와 있으므로 외양으로의 구분은 어려우나 겹눈의 단면을 봤을 때 해부학적 구조가 크게 차이난다. 연립상 눈은 주행성 곤충에서 주로 발견되며 각 홑눈 사이에 보호막 색소(screening pigment)가 있어 홑눈 간에 빛의 간섭이 없다. 즉, 축광(axial ray)은 광수용체에 흡수되고, 축을 벗어난 빛(off-axis light)은 보호막 색소에 흡수된다. 연립상 눈의 구조를 갖지만 평형한 광축을 갖는 신호를 모아서 민감도를 증가시키는 방식을 신경중립상겹눈(neural superposition eye)이라 한다. 이외의 중립상 눈 - 굴절중립상눈(refractive superposition eye), 반사중립상눈(reflective superposition eye), 포물중립상눈(parabolic superposition eye) - 은 홑눈과 광수용체가 투명대(clear zone)에 의해 분리되어 있으며 여러 개의 홑눈이 모여서 하나의 광학기구를 구성한다.^{8,10-12} 즉, 어둠에 적합하도록 구성되어 있는 것이다. 중립상 눈의 감간은 연립상 눈에서 보이는 홑눈 단위가 아니라 1장의 막으로 구성된다. 각막과 감간의 사이는 투명대로 카메라눈에서의 유리체에 해당되며, 빛이

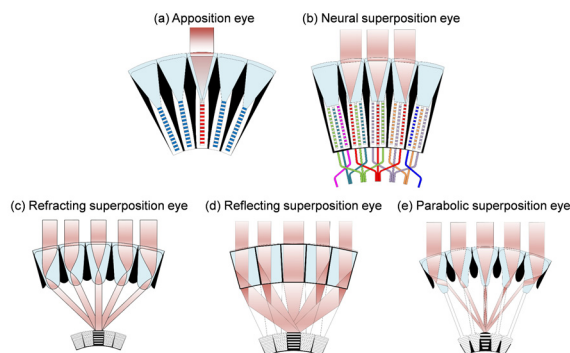


그림 2. 겹눈의 다섯 가지 구조. (a) 연립상 눈(apposition eye), (b) 신경중립상 눈(neural superposition eye), (c) 굴절중립상눈(refractive superposition eye), (d) 반사중립상눈(reflective superposition eye), (e) 포물중립상눈(parabolic superposition eye).

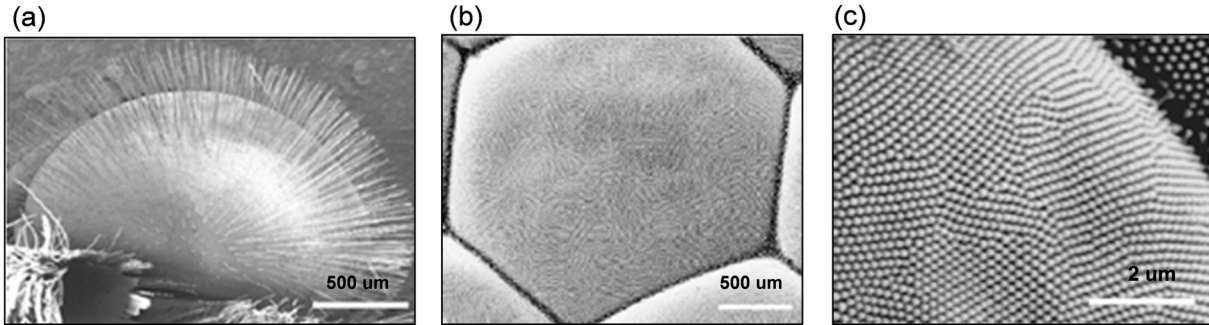


그림 3. 겹눈(Nymphalid butterfly) 구조의 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 사진: (a) 전체 겹눈, (b) 개별 홑눈의 표면, (c) 나노구조 표면.¹³

이곳을 지나 감간에 상을 맺는다.

중립상 눈의 몇 가지 특징을 좀 더 살펴보면, 십각목에 속하는 새우는 유성 시기에서는 육각형 홑눈을 가진 연립상 눈을 갖지만 변태를 통해서 사각형 홑눈을 가진 중립상 눈으로 변한다. 이는 시기적으로는 중립상 눈이 나중에 진화했다는 것을 의미하고, 광학적으로는 어두운 환경에서 더 밝은 이미지를 얻기 위해서는 중립상 눈이 필요하다는 것을 의미한다. 진화된 십각목으로 여겨지는 단미류 게(brachyuran crab)는 성체가 되어서도 연립상 눈이 유지되는데 이는 게의 생활환경이 더 밝기 때문으로 생각된다. 더 많은 빛을 모으기 위한 겹눈의 특징으로는 반사판도 존재하는데, 이는 감간 밑에 존재하며 기능은 고양이 눈의 반사판과 같다.^{2,3} 나방, 모기 등 야행성 곤충의 경우 각막(cornea)의 표면에 200 nm 이하 직경을 갖는 돌기형태의 나노구조가 존재하며, 이는 표면의 반사를 획기적으로 줄이는 역할을 한다(그림 3).¹³ 이를 모방한 무반사 나노구조는 최근 나노기술의 발달로 최근에 많이 보고가 되고 있으며, '나방 눈 구조(moth eye structures)'라 통칭된다.¹³⁻¹⁵ 중립상 눈은 빛에 대한 민감도가 높기 때문에 낮에는 시색소에 대한 보호가 필요하고, 빛의 밝기를 줄일 적응기전이 필요하다. 이를 위해 일부 중립상 눈에서는 색소 이동(pigment movement)이 관찰되며, 낮에는 색소들이 보호막 역할을 해서 시색소에 도달하는 빛의 양을 줄인다.

3. 겹눈 구조의 모방

겹눈 시각 시스템의 모방 연구는 크게 세 가지로 구분된다. 첫째는 겹눈에서 발견되는 마이크로 렌즈 어레이를 기존 이미지 센서에 적용한 겹눈 이미지징 시스템 연구이며,¹⁶⁻¹⁸ 둘째는 마이크로 렌즈 어레이를 반구면에 배치해 겹눈의 각막 렌즈 모방 구조에 대한 연구이다.¹⁹⁻²² 한편 자연계 겹눈은 마이크로 렌즈 어레이 및 이미지 센서가 모두 곡면에 배치되어야 하는데 이에 대한 연구가 최근에 활발히 이루어지고 있으며 이를 세 번째로 볼 수 있다.²³⁻²⁴ 이 밖에도 빛의 표면 반사를 줄이기 위한 나방 눈 표면의 무반사 나노구조 모방연구,

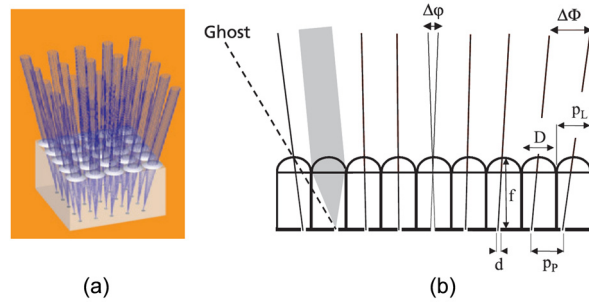


그림 4. 마이크로 렌즈 어레이 기반 평면형 인공 겹눈 이미징 시스템: (a) 개별 홑눈의 영상 획득 모식도 및 (b) 단면 구조.¹⁷

흡수되지 못한 빛을 반사를 통해 높이하고자 하는 감간 밑에 존재하는 고효율 반사층 등에 대한 연구가 있으나,^{15,25-27} 이러한 구조들은 겹눈 이외에 다른 기관에서도 발견되기 때문에 본 총설에서는 논외로 하고자 한다.

3.1 평면형 겹눈 이미징 시스템

겹눈 이미징을 위해서는 홑눈의 주요 구성요소인 각막렌즈와 감간이 필수적이다. 각막렌즈는 마이크로 렌즈로 대체 가능하며, 감간으로는 상용 이미지 센서를 이용할 수 있다. 그러나, 기존 CCD 또는 CMOS 센서가 실리콘 웨이퍼 기반의 평판으로 구성되므로, 자연계 겹눈처럼 반구형으로 구성되기는 어려우며, 따라서 겹눈 구조 모방의 초기 형태는 모두 평면형으로 구성된다. 독일 프라운호퍼의 J. W. Duparre 등은 인공 연립상(apposition-type) 겹눈 카메라를 제작하였으며 그 구조는 그림 4와 같다.¹⁷ 마이크로 렌즈 어레이(microlens array, MLA)를 이미지 센서 위에 배치하는데, 수용각(acceptance angle)을 조절하기 위해 적합한 크기를 갖는 핀홀(pinhole)을 마이크로 렌즈의 밑면에 형성한다. 이 때, 보다 넓은 시야각을 갖도록 하기 위해서, 핀홀의 위치를 이미지 센서의 가운데 픽셀에서는 중심에 배치하고, 측면으로 갈수록 중심에서 벗어나도록 구성하였다. 이렇게 하면 홑눈간 각(inter-ommatidial angle)과 수용각 사이의 관계를 조절할 수 있으며, 시야각을 다소 넓힐 수 있는 장점이 있다. 이 외에

도 일본 오사카 대의 Tanida 등은 렌즈 어레이와 광검출기 어레이 사이에 적절한 간격과 분리층(separation layer)을 두어 각 홀눈이 마이크로이미지를 형성하게 하고, 이들의 재구성을 통해 원래의 상을 얻을 수 있는 구조를 개발하였다.²⁸

조금 더 복잡한 접근으로서, 렌즈어레이를 다층으로 중첩하여 중립상 눈에서 발견되는 이미징 시스템을 구현한 사례도 있다.¹⁸ 이러한 평면형 겹눈 이미징 시스템은 벌크 광학계(bulk optics)를 이용하지 않기 때문에 카메라 모듈의 크기를 보다 작게 구성할 수 있다는 특징이 있다. 겹눈의 동작원리와는 전혀 다르게, 마이크로렌즈 어레이 자체의 특징을 활용한 카메라도 있다. Ren 등은 일반 카메라의 초점면에 이미지 센서를 배치하는 것이 아니라 마이크로렌즈 어레이를 배치하고, 다시 마이크로 렌즈의 초점면에 이미지 센서를 배치함으로써 서로 다른 초점거리를 갖는 물체의 영상을 동시에 획득할 수 있도록 하였다.²⁹ 이 경우 초점거리를 넓힐수록 해상도는 떨어지게 되지만, 다초점 영상의 획득이 중요한 경우 그 활용도가 높아지게 된다.

3.2 곡면형 겹눈 구조 제작

평면형 이미지 센서에 마이크로렌즈 어레이를 집적하는 경우 시야각을 넓이기는 어렵다. 따라서 넓은 시야각을 얻기 위해서는 겹눈과 유사하게 생긴 3차원 형태의 마이크로 렌즈 어레이를 만드는 것이 필요하다. 일반적으로 마이크로렌즈는 투명 글래스를 기계적으로 가공하여 제작하기 때문에 3차원으로 구조물을 만드는 것은 기존의 방식으로는 어려우며, 정교한 장비가 요구된다. 이를 극복하기 위해 몇몇 연구그룹에서 고안한 방법은 글래스 대신 투명 고분자 물질을 이용하는 것이다. 중국 Jiatong 대학의 H. Liu 등은 펄초 레이저로 실리카 글래스를 가공하여 오목형 마이크로 렌즈를 제작한 뒤 몰딩기법을 이용해 PMMA 재질의 볼록형 마이크로 렌즈 어레이를 만들고 이를 반구형 글래스 위에 부착한 뒤 열

과 압력을 가함으로써 반구형 인공 겹눈 구조를 형성하였다(그림 5).¹⁹ 인하대 이한섭 교수팀은 실린더형 마이크로채널(cylindrical microchannels, CMCs)을 이용하여 고분자 필름에 압력을 가함으로써 2~3 μm 크기의 마이크로렌즈 어레이를 형성하였다.²¹ 이때 압력을 적절히 조절하여 볼록렌즈 및 오목렌즈의 곡률반경을 조절할 수 있으며, 마이크로 채널의 직경을 조절하면 마이크로렌즈의 직경을 변경할 수 있다. 또한, 렌즈 위에 렌즈 어레이를 집적하는 계층적 구조의 제작도 가능하다.

자연계 겹눈 구조에서는 각막 역할을 하는 마이크로렌즈 뿐만 아니라 수정추 및 감각이 존재한다. 수정추는 외부에서 들어온 빛을 모아주는 역할을 하고, 감각은 광신호를 전기신호로 바꿈과 동시에 광신호를 뇌로 전달시키는 광도파로 역할을 한다. 위 구성요소들을 모두 포함하는 구조를 만들기 위해서 UC 버클리 L. P. Lee 교수팀은 감광성 고분자 물질을 활용하였다.²² 즉, 감광성 고분자 물질로 마이크로 렌즈 어레이를 제작한 뒤, 레이저광을 조사하면 렌즈를 통과한 빛이 집광되어 하부로 전달되며, 조사된 광량의 차이로 인해 렌즈 하부의 중심영역에서만 높은 굴절률을 갖도록 고분자 구조가 변형된다. 즉, 인공 수정추 및 광도파로가 형성되는 것이다. 제작된 인공겹눈은 실제 꿀벌의 겹눈과 렌즈 개수, 크기, 화각 등이 매우 유사한 것으로 알려져 있다(그림 6a). 실제 곤충

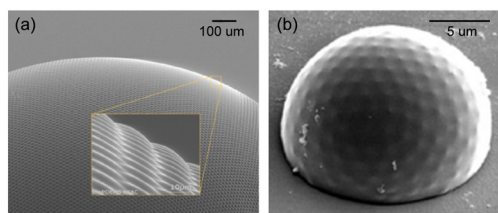


그림 6. (a) 광도파로를 포함하는 인공 겹눈의 SEM 이미지, (b) 자기조립방식에 의한 인공겹눈 구조의 SEM 이미지.²²

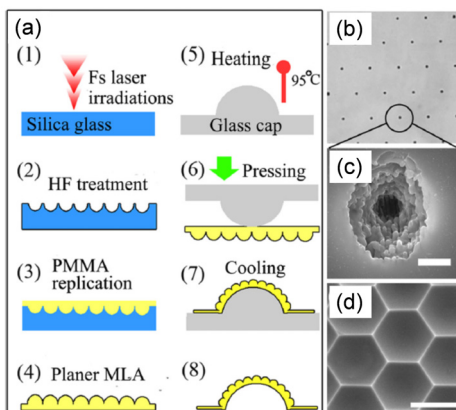


그림 5. (a) 몰딩 기법을 이용한 반구형 인공 겹눈 구조 제작방법, (b) 펄초 레이저를 이용해 가공된 마이크로 홀 어레이, (c) 단일 홀의 확대사진, (d) 마이크로렌즈 템플릿의 표면 사진.¹⁹

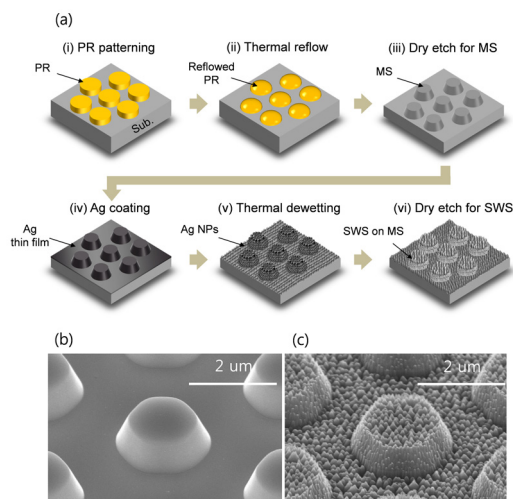


그림 7. (a) 야행성 겹눈 표면구조를 모방한 마이크로/나노 계층구조의 제조방법. (b) 제작된 마이크로 구조 및 (c) 마이크로/나노 계층구조의 SEM 사진.³⁰

의 겹눈보다 작은 크기의 돔 구조를 만드는 연구도 이루어졌는데, 바로 자기조립방식에 의한 것이다.²⁰ 우선 크기가 수백 나노미터인 유리구슬을 물속에 분산시킨 후, 균일한 기름방울을 주입하고 물-기름-유리구슬 사이의 표면화학적 힘의 균형을 유지시키면 유리구슬이 물과 기름방울 사이 경계면으로 이동한다. 이후 유리구슬 혼합물을 기판 위에 뿌리면 기름방울이 돔 모양으로 변형되고, 유리구슬이 기름방울 표면위에 육방밀집구조로 배열하게 되어 초소형 겹눈형태가 된다 (그림 6b).

최근에는, 마이크로렌즈 위에 추가로 나노구조를 형성하는 계층구조에 관한 연구도 진행된 바 있으며, 이 경우 마이크로렌즈의 집광효과 뿐만 아니라 나노구조에 의한 계면에서의 빛의 반사를 최소화하는 효과도 얻을 수 있다.³⁰⁻³² 이는 2장에서 언급된 대로 주로 야행성 곤충에서 발견되는 구조를 본 딴 것이며, 영차 회절 모드(zeroth diffraction order)를 만족하기 위해서 약 200 nm 이하의 주기를 가져야 하고 매질의 유효 굴절률이 서서히 변경되도록 하기 위해서 기울어진 형태를 가져야 하는 특징이 있다. 마이크로 구조물 위에는 포토 레지스트를 균일하게 도포하는 것이 어렵기 때문에 나노구조를 집적하기 위해서는 기존 리소그래피 방식의 이용이 제한된다. 이를 해결하기 위해 광주과기원 이용택 교수팀은 전자빔 증착방식을 통해 금속박막 마이크로 구조물의 전면에 증착한 뒤에 열처리를 통해 금속박막을 금속 나노입자 형태로 변형시키고 이를 식각 마스크로 이용하여 나노구조를 형성하였다(그림 7).²⁵ 나노구조의 크기 및 분포형태는 금속박막의 두께 및 열처리 온도에 따라 조절 가능하기 때문에 나노구조물의 형태를 변형할 수 있는 특징이 있다. 구조물의 형태가 비주기적이라는 점은 자연계 나노구조물과 다르나, 유효굴절률의 변화를 이용한다는 점에서는 동일하다. 또한 자연계 구조물의 굴절률은 1.5 정도이나 실리콘이나 갈륨비소 등 광소자 제작에 응용되는 소재들은 대부분 3.0 이상의 굴절률을 가지며 흡수계수도 존재하기 때문에 각 소재 및 응용 목적에 따라 나노구조물의 크기 및 형태가 결정되어야 한다. 광주과기원 송영민 교수팀은 박막형 실리콘 태양전지에 나노구조물을 적용하고자 할 경우, 박막의 두께에 따라 최적

나노구조가 다르다는 것을 보고하였다.³³ 즉, 수백 nm 이하의 매우 얇은 두께에서는 나노기둥 형태가 광포집에 더 효과적이며, 그 이상의 두께를 갖는 경우 파라볼라형 구조가 우수한 특성을 가짐을 보였다.

3.3 곡면형 겹눈 이미징 시스템

3.1절에서 소개된 평면형 겹눈 이미징 시스템은 단일렌즈 시스템과 비교하여 광학적 차별성을 갖기는 하나 겹눈의 가장 큰 특징인 광시야각을 확보하기 어렵다. 3.2절에서 다른 곡면형 겹눈 구조는 자연계 겹눈과 그 구조가 매우 유사하나 렌즈를 통해 포획된 빛을 전기신호로 변환하는 광수용체가 없기 때문에 이미징이 불가능하다. 스위스의 로잔공대에서는 개별 카메라를 반구면에 배치함으로써 초광각 이미징이 가능한 시스템을 구현한 바 있으나, 부피가 매우 크고 처리해야 하는 데이터량이 매우 많기 때문에 엄밀한 의미에서 겹눈을 모방한 형태로 보기 어렵다. 한편, 최근 플렉서블 소자기술의 발달로 인해 각종 전자소자 및 광전자소자를 곡면기판 위에 형성하는 것이 가능해졌으며, 이를 활용하여 겹눈 시스템에 적용하고자 하는 시도가 최근에 이루어졌다. 스위스 로잔공대의 Floreano 교수팀은 기존 이미지 센서의 상부에 마이크로 렌즈 어레이를 집적하고, 이를 기계적 식각을 통해 1차원 배열로 분리한 뒤 플렉서블 기판(flexible printed circuit board, FPCB) 위에 부착함으로써, 횡방향으로 180도의 화각을 가질 수 있도록 하였다. 반면, 종방향으로는 동일한 방식을 적용할 수 없기 때문에 화각이 60도로 제한되는 단점이 있다.²³

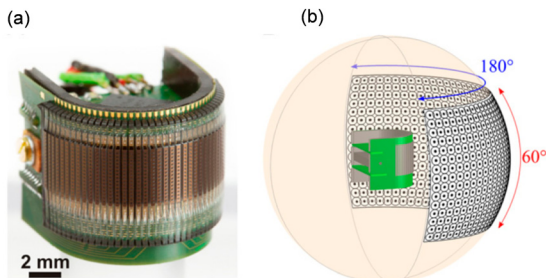


그림 8. (a) 플렉서블 기판위에 제작된 곡면형 겹눈 카메라 사진 및 (b) 영상 획득 구조 모식도.²³

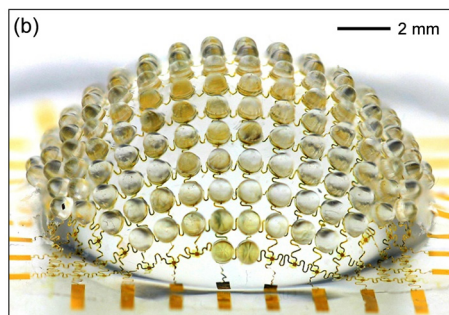
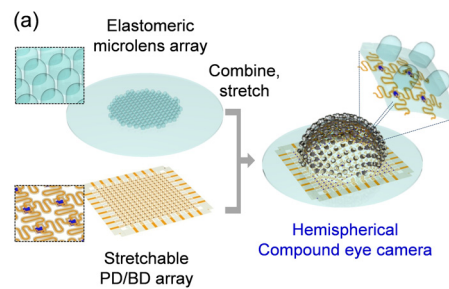


그림 9. (a) 신축성 전자소자 제작기술을 활용한 인공 겹눈 카메라의 제작과정 및 (b) 제작된 카메라의 이미지.²⁴

일리노이대 Rogers 교수팀은 신축성(stretchable) 전자소자 제작기술을 겹눈 구조 개발에 활용하였다. 즉 신축성 광검출기 어레이 및 마이크로렌즈를 제작하여 이를 정렬 및 부착하고 원통형 기구물을 이용하여 반구형으로 변형시키는 것이다(그림 9).²⁴ 선행연구로 이루어진 곡면형 이미지 센서의 제작과는 달리, 겹눈형 이미지 센서의 개발에는 구조적 측면에서 몇 가지 추가 고려사항이 있다. 첫째로, 160도 이상의 광각 이미징을 위해서 이미지 센서의 배치가 단순히 곡면에 배치되는 것이 아니라 반구면 전체에 배치되어야 한다. 이는 대변형(very large deformation)을 야기하기 때문에 소자 설계에 기계적 안정성이 매우 중요한 고려대상이 된다. 둘째로, 개별 홑눈의 구성을 위해서 마이크로렌즈가 이미지 센서의 상부에 집적되어야 한다. 이 경우 마이크로렌즈의 설계는 각 홑눈의 수용각(acceptance angle)을 고려해야 하며, 이미지 센서의 반구형 변형시 형성되는 홑눈간 각(interommatidial angle)보다는 작게 설계되어야 한다. 만약 수용각이 홑눈간 각보다 커지게 되면 각 홑눈에서 얻어진 정보간의 간섭이 발생하여 영상이 흐릿해지게 된다(image blurring effect). 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. 셋째로, 대변형 시 형성된 마이크로렌즈 어레이의 곡률반경이 변경되지 않도록 하는 장치가 요구된다. 이를 위해 마이크로렌즈 하부에 일정 두께를 갖는 기둥을 배치함으로써 렌즈의 곡률반경은 유지되도록 구성할 수 있다. 넷째로, 인접한 마이크로렌즈를 통해 들어오는 빛을 차단할 수 있는 보호

막 색소가 필요하다. 이를 위해서 검은색 색소를 포함하는 얇은 고무막을 제작하고 각 렌즈의 위치에 구멍을 뚫은 뒤 이를 겹눈 구조의 사이사이에 끼워 넣음으로서 인공 보호막 색소를 형성할 수 있다. 또한, 홑눈의 아래쪽에서 반사되는 빛을 차단하기 위해 검은색 곡면 지지대도 요구된다.

인간은 곤충이 획득한 영상정보를 볼 수 없기 때문에 곤충이 바라보는 세상이 어떤지 명확히 확인할 방법은 없으나, 광학적 구조의 분석을 통해 어느 정도 유추할 수 있다. 반구면 위에 제작한 인공 겹눈은 자연계 겹눈의 영상획득 형태와 유사할 것으로 예상되며, 측정된 영상은 광선 추적(ray tracing) 방법에 의해 얻어진 모델링 결과와도 매우 일치한다. 물체의 위치를 카메라 정면이 아닌 측면으로 이동하여도 이미지를 왜곡 없이 얻어낼 수 있으며, 물체가 어느 곳에 있든지 상을 맺을 수 있는 깊은 심도(depth of field)를 가짐을 확인할 수 있다. 게다가 이런 넓은 화각과 깊은 심도를 렌즈 광학계나 이미지 센서의 이동 없이 얻을 수 있기 때문에 에너지 효율 측면에서도 이점을 가진다. 반면, 해상도 측면에서는 단일 렌즈 시스템에 비해서 떨어지는데, 그 이유는 각 홑눈이 마이크로렌즈를 포함하기 때문이다. 이를 극복하기 위해, 광주과기원의 이홍노 교수팀은 겹눈에서 얻어진 영상정보에 압축 센싱(compressed sensing) 알고리즘을 적용하여 해상도를 높이는 연구를 진행하였다.³⁴ 즉, 각 홑눈의 수용각을 인위적으로 넓히고 영상을 얻게 되면, 인접한 홑눈으로 들어오는 정보가 서로 중첩되기 때문에 최종 영상에서는 blurring 효과가 발생하지만, 중첩된 영상 정보를 활용하여 신호처리를 수행하면 보다 높은 해상도의 영상을 얻을 수 있다(그림 10). 재구

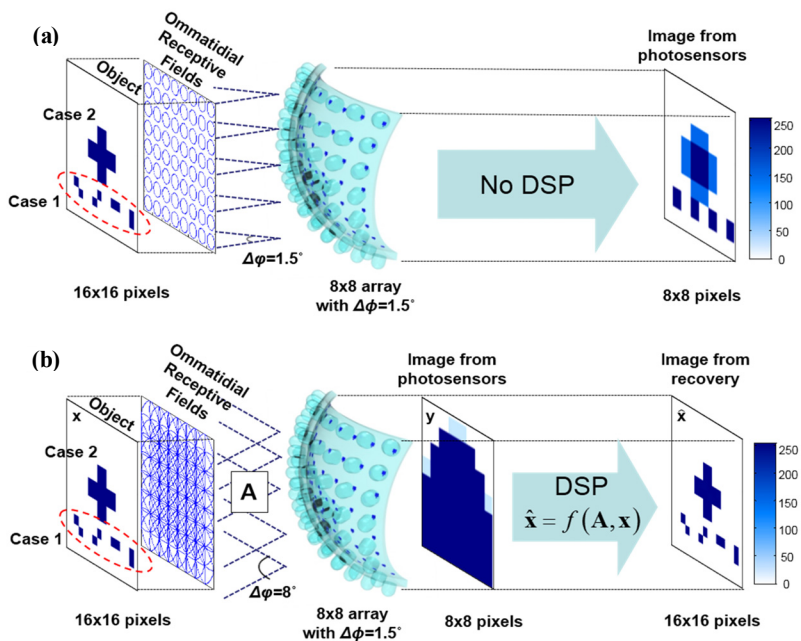


그림 10. (a) 기존 겹눈의 영상 획득 방식, (b) 넓어진 수용각을 활용한 고해상도 영상 획득 방식.³⁴

성된 영상은 기존 방식으로 획득된 영상에 비해 4배 높은 해상도를 가진다.

4. 결론

본 총설에서는 자연계에 존재하는 겹눈의 광학적 구조 및 특징에 대해 살펴보고 이를 모방하기 위한 연구자들의 연구 방향을 세 가지(평면형 센서, 곡면 구조, 곡면형 센서)로 구분하여 소개하였다. 자연계 겹눈 구조를 연구하고 이를 모방하는 것은 지구상에 존재하는 작은 개체들의 영상획득 방법을 이해하고 활용하기 위한 중요한 작업이다. 연구 개발의 결과로 얻어지는 겹눈 카메라는 넓은 화각과 깊은 심도를 주요 특징으로 하기 때문에 초소형 무인 비행로봇, 전 방위 물체 감지 센서, 초광각 내시경 등 다양한 분야에 응용이 가능하다. 현재까지 개발된 겹눈 시스템은 주행성 곤충의 일부 구조만을 모방한 것으로서, 앞으로 다양한 구조들이 개발될 여지가 남아 있으며, 단순히 모방한 것이 아니라 초고해상도 비전, 광원 집적 구조, 환경 적응형 구조 변형 기술 등 독창적 기능도 추가하는 방향으로 전개될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. A. Parker, *In the Blank of an Eye: How Vision Sparked The Big Band of Evolution*, Basic Books, New York, 2009.
2. S. Jenkins, *Eye to Eye: How Animals See the World*, Houghton Mifflin Harcourt, Boston, 2014.
3. M. F. Land and D. Nilsson, *Animal Eyes*, Oxford Univ. Press, Oxford, 2012.
4. H. C. Ko, M. P. Stoykovich, J. Song, V. Malyarchuk, W. M. Choi, C. Yu, J. B. Geddes, J. Xiao, S. Wang, Y. Huang, and J. A. Rogers, *Nature*, **454**, 748 (2008).
5. O. Enoki, T. Udaka, M. Murata and R. Morimoto, US 20140160327 A1 (2014).
6. G. M. Mazzotta and R. Costa, *Ethol. Ecol. Evol.*, **28**, 1 (2016).
7. B. Katz and B. Minke, *Front. Cell. Neurosci.*, **3**, 1 (2009).
8. J. Morante and C. Desplan, *Nat. Neurosci.*, **8**, 401 (2005).
9. M. F. Land, *Annu. Rev. Entomol.*, **42**, 147 (1997).
10. J. Marshall, T. W. Cronin, and S. Kleinlogel, *Arthropod Struct. Dev.*, **36**, 420 (2007).
11. M. F. Land, *Contemp. Phys.*, **29**, 435 (1988).
12. R. Dudley, *The Biomechanics of Insect Flight: Form, Function, Evolution, Second Edition*, Princeton Univ. Press, Princeton, 2002.
13. International Symposium on the Functional Organization of the Compound Eye, *The Functional Organization of the Compound Eye :Proceedings*, Oxford Univ. Press, Oxford, 1966.
14. D. G. Stavenga, S. Foletti, G. Palasantzas, and K. Arikawa, *Proc. Biol. Sci.*, **273**, 661 (2006).
15. Y. M. Song, S. J. Jang, J. S. Yu, and Y. T. Lee, *Small*, **6**, 984 (2010).
16. K. Stollberg, A. Brückner, J. W. Duparre, P. Dannberg, A. Bräuer, and A. Tünnermann, *Opt. Express*, **17**, 15747 (2009).
17. J. W. Duparre and F. C. Wippermann, *Bioinsp. Biomim.*, **1**, R1 (2006).
18. J. W. Duparre, P. Schreiber, A. Matthes, E. Pshenay-Severin, A. Bräuer, A. Tünnermann, R. Völkel, M. Eisner, and T. Scharf, *Opt. Express*, **13**, 889 (2005).
19. H. Liu, F. Chen, Q. Yang, P. Qu, S. He, X. Wang, J. Si, and X. Hou, *App. Phys. Lett.*, **100**, 133701 (2012).
20. S. H. Kim, S.-H. Kim, and S.-M. Yang, *Adv. Mater.*, **23**, 3771 (2009).
21. B. G. Park, K. Choi, C. J. Jo, and H. S. Lee, *Soft Matter*, **8**, 175 (2012).
22. K. H. Jeong, J. Kim, and L. P. Lee, *Science*, **312** (5773), 557 (2006).
23. D. Floreano, R. P. Camaraa, S. Violletb, F. Ruffierb, A. Brücknerc, R. Leitelc, W. Bussc, M. Menounid, F. Expertb, R. Justonb, M. K. Dobrzynskia, G. L'Eplatteniera, F. Recktenwalde, H. A. Mallote, and N. Franceschinib, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **110**, 9267 (2013).
24. Y. M. Song, Y. Xie, V. Malyarchuk, J. Xiao, I. Jung, K.-J. Choi, Z. Liu, H. Park, C. Lu, R.-H. Kim, R. Li, K. B. Crozier, Y. Huang, and J. A. Rogers, *Nature*, **497**, 95 (2013).
25. J. W. Leem, Y. M. Song, and J. S. Yu, *Opt. Express*, **19**, A1155 (2011).
26. Y. M. Song, J. S. Yu, and Y. T. Lee, *Opt. Lett.*, **35**, 276 (2010).
27. J. W. Leem, Y. M. Song, and J. S. Yu, *Nanotechnology*, **22**, 485304 (2011).
28. J. Tanida, T. Kumagai, K. Yamada, S. Miyatake, K. Ishida, T. Morimoto, N. Kondou, D. Miyazaki, and Y. Ichioka, *Appl. Opt.*, **40**, 1806 (2001).
29. R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, *Stanford University Computer Science Tech Report CSTR*, **2**, 1 (2005).
30. Y. M. Song, G. C. Park, S. J. Jang, J. H. Ha, J. S. Yu and Y. T. Lee, *Opt. Express*, **19**, A157 (2011).
31. Y. M. Song, G. C. Park, E. K. Kang, C. I. Yeo and Y. T. Lee, *Nanoscale Res. Lett.*, **8**, 505 (2013).
32. L. Zhou, X. Dong, Y. Zhou, W. Su, X. Chen, Y. Zhu and S. Shen, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 26989 (2015).
33. W. I. Nam, Y. J. Yoo, and Y. M. Song, *Opt. Express*, **24**, A1033 (2016).
34. W. B. Lee, H. C. Jang, S. J. Park, Y. M. Song, and H. N. Lee, *Opt. Express*, **24**, 2013 (2016).