

전자는

180도 이상의 넓은 화각 가진 곤충눈 카메라

글 **고흥조**

광주과학기술원
신소재공학부 교수
heungcho@gist.ac.kr



글쓴이는 서강대학교 화학과에서 박사학위를 받았으며 일리노이대학교에서 박사후 연구원을 지냈다.

글 **정인화**

경희대학교
기계공학과 교수
ijung@khu.ac.kr



글쓴이는 LG전자에서 공조시스템을 개발했으며, 이후 노스웨스턴대학교 기계공학과에서 박사학위를 받았다. 텍사스오스틴 대학, 일리노이대학교에서 박사 후 연구원을 지냈다.

글 **송영민**

일리노이대학교
재료공학과 박사후 연구원



글쓴이는 연세대학교 졸업 후 광주과학기술원 정보통신공학부에서 박사학위를 받았다. 현재 일리노이대학교 재료공학과에서 박사후 연구원으로 근무하면서 곤충 눈 카메라에 대한 연구를 진행하고 있다.

인간은 '세상을 어떻게 하면 잘 볼 수 있을까?' 라는 화두에 답변하고자 많은 노력을 기울여왔다. 돋보기, 안경, 망원경, 현미경, 사진기 등의 인위적인 광학 장치의 개발을 통해 인류 문화 발전에 직·간접적으로 많은 기여를 하였다. 광학장치 중에서 카메라는 정밀한 광학 렌즈 시스템과 고해상도 이미지 센서 기술의 집합체라 할 수 있으며 정보화 사회에서 필수불가결하다. 카메라의 역사를 살펴볼 때 일반인들이 느낄 수 있는 큰 변화 중 하나는 광화학반응을 이용한 아날로그(필름) 방식에서 빛의 신호를 전기신호로 바꾸는 센서(CMOS 또는 CCD)를 이용한 디지털 방식으로의 전환일 것이고, 이는 시장 수요의 혁신적인 반전을 일으켰다.

최근 학계에서는 또 다른 큰 변화가 일어나고 있는데, 이는 일리노이대학교(UIUC)의 존 A. 로저스(John A. Rogers) 교수팀이 개발한 평면이 아닌 곡면 구조의 이미지 센서를 이용한 전자는 카메라다. 이 지면을 통해 필자들이 과거 또는 현재 로저스 교수팀에서 박사후 연구원으로 주도적으로 개발한 크게 세 가지 종류의 전자는 카메라에 대해 간단히 소개하고자 한다.

인간의 눈 모사한 전자눈 카메라

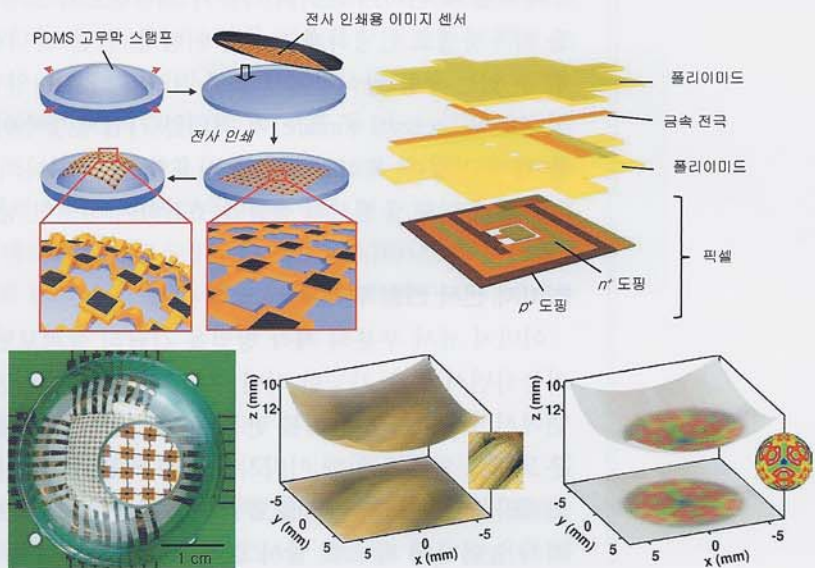
인간의 눈과 일반 카메라의 구조를 살펴보면 전자눈은 단순한 광학렌즈와 반구면 이미지 센서 구조로, 후자는 복잡한 복합렌즈와 평면 이미지 센서 구조로 되어 있다. 이런 구조적 차이와 인간의 눈이 일반 카메라에 비해 시야각이 넓은 이유는 간단한 광학적 실험을 통해 쉽게 이해될 수 있다. 상이 맺히기 위해서는 볼록렌즈를 사용해야 하는데 원래의 상이 평면인 경우 렌즈를 통해 맺히는 상을 자세히 살펴보면 평면이 아닌 포물면이다. 이런 광학적 수차로 인해 일반 카메라와 같이 평면형의 이미지 센서를 사용할 경우 전 영역에서 초점을 맞출 수 없고 이를 해결하기 위해서는 복잡한 복합렌즈의 사용이 불가피하다.

반면, 이미지 센서의 구조가 초점면과 비슷하거나 같은 반구면 또는 포물면일 경우, 단순한 초점렌즈로도 이미지 센서 전 영역에서 선명한 이미지를 얻을 수 있다. 이런 이점에도 불구하고 리소그래피, 물질 성장, 도포, 에칭 등의 대부분의 반도체 공정이 평면 기판에 기반을 두기 때문에 곡면 구조의 이미지 센서를 직접 제작하기에는 많은 어려움이 있었다.

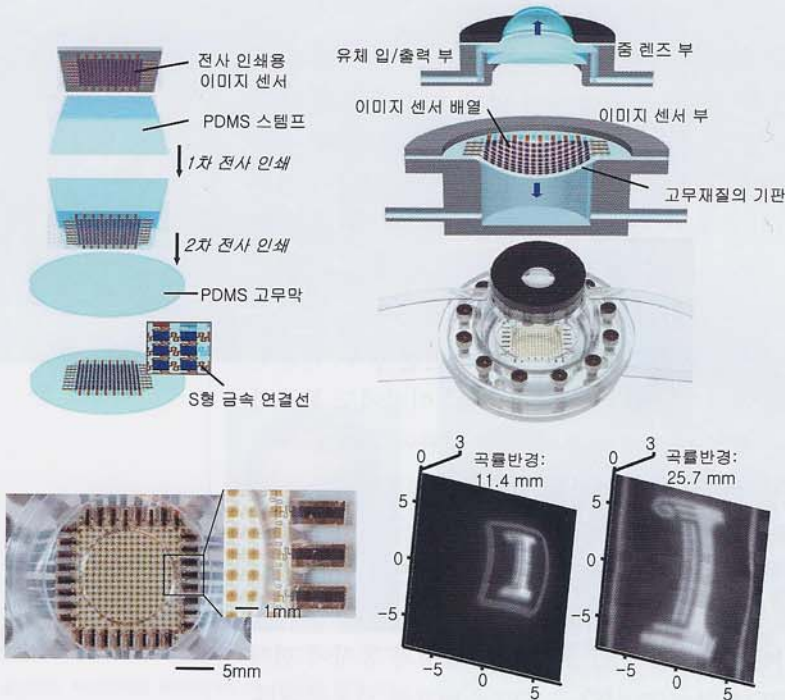
2008년에서 2010년 사이에 로저스 교수팀에서 발표한 반구면 또는 포물면 구조의 카메라는 곡면 구조 위 직접적인 공정 대신 평면 기판에서 단결정 실리콘을 이용해 전자 인쇄가 가능하고 수축이 가능한 초박막 구조(소자 두께 : $\sim 3 \mu\text{m}$) 이미지 센서를 제작한 후 이를 떼어 내어 곡면 구조로 변형 부착시키는 방법을 사용하였다(그림 1 왼쪽 위). 변형과 동시에 전자 인쇄시키기 위해 곡면구조로 성형된 폴리디메틸실록산(PDMS) 고무막 스템프를 사용하였다. 이를 방사방향으로 늘리면 평평하게 되고 그 위에 제작된 초박막 소자를 전자 인쇄한 후 고무막의 장력을 풀면 소자들이 수축하면서 곡면 상태로 된다.

전자 인쇄하는 과정에서 유념해야 할 사항은 소자의 구조가 평면에서 곡면으로 변하기 위해서는 변형이 대략 12%(반구형) \sim 25%(포물면) 정도로 필요한데 단결정 실리콘인 경우 최대 변형률은 0.7% 정도라는 점이다. 구조적으로 큰 변형에도 소자의 작동 성능이 유지되기 위해서는 픽셀에 위치한 단결정 실리콘은 거의 변형이 없어야 하고 픽셀과 픽셀 사이의 금속 연결선에서 대부분의 변형이 이루어져야 한다. 금속 연결선에 큰 유연성을 제공하기 위해 초박막 기판으로 사용된 폴리이미드 고분자 층의 중간 위치에 150 나노미터 두께의 금속 연결선을 형성시켜 수축 변형시 전기적인 단락 현상없이 아치 모양으로 구부러질 수 있도록 하였다.

곡면 구조로 변경된 소자를 구동시 스템프에 연결을 한 후 초점렌즈를 장착하면 눈과 흡사한 전자눈 카메라가 완성된다. 초기 모델의 이미지 센서의 전체 픽셀 수는 256개이며, 이미지 센서의 각 픽셀은 빛에 감응을 하는 실리콘 광다이오드와 주변 픽셀에서 생기는 신호의 혼선을 막아주는 다이오드로 이루어져 있는 수동형 구동방식



▶▶ 그림 1. 반구면 전자눈 카메라의 제작 방법, 구조 및 촬영한 영상



▶▶ 그림 2. 튜너블 카메라의 제작 방법, 구조 및 촬영한 영상

전자능 카메라보다 향상된 튜너블 카메라

전자능 카메라의 곡면형 이미지 센서 기술을 바탕으로 기존 방식의 반도체 공정으로는 구현할 수 없었던 다양한 카메라를 개발할 수 있다. 그 중 괄목할 만한 사례로, 2011년에 발표된 다양한 렌즈의 줌 상태에 따라 최적의 이미지 조건을 빠르게 구현할 수 있는 튜너블 카메라 (tunable-eye camera)를 들 수 있다(그림 2). 소자의 구조적 측면과 작동 원리를 살펴볼 때, 이 카메라는 앞서 언급한 전자능 카메라 방식보다 크게 향상된 점이 있다.

제작할 때 이미지 센서의 곡률과 초점렌즈의 초점 거리가 정해질 경우 먼 곳 또는 가까운 곳을 자유자재로 선명하게 보기는 어렵다. 반면, 튜너블 카메라는 이미지 센서의 곡률을 변화시킬 수 있는 구동 방식이어서 초점 거리가 다른 다양한 초점렌즈를 사용할 경우 변하는 이상적인 초점면(petzval surface)에 최대한 가깝게 맞추어 광학적 수차를 최소화할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 특히 줌렌즈를 사용할 경우, 하나의 렌즈로 배율을 조절할 수 있고 이에 따라 신속하게 이미지 센서의 곡률을 조절하여 선명한 상을 얻을 수 있다.

이미지 센서 변형 위해 유체 압력 이용

이미지 센서 부분의 제작 방법을 간단히 살펴보면, 단결정 실리콘을 이용하고 전자 인쇄가 가능하면서 신축 가능한 이미지 센서를 제작하였고 이를 PDMS 고무막 기판에 붙여 옮겨 평면에서 3차원 곡면 사이를 반복적으로 변형될 수 있도록 하였다. (그림 2 왼쪽 위)는 이와 같은 카메라 제작을 위해 이미지 센서를 기판에 옮기는 방법의 그림을 보여준다. 특히 이와 같은 카메라 구조에서는 PDMS 고무막 기판이 3차원적으로 변형함에 따라 픽셀과 픽셀 사이의 거리가 늘어나게 되므로, 앞서 소개한 카메라의 금속 연결선과 같이 ‘—’자형일 경우 기계적 스

이다(그림 1 오른쪽 위). 이 방법의 장점으로서는 평면기판에 사용되는 기존 반도체 공정을 대부분 사용할 수 있다는 것이다.

현재 출시되고 있는 수천만 픽셀 수로 이루어진 카메라와 비교할 때 초기 모델의 전자능 카메라는 해상도가 아주 떨어지지만, 생물학적 눈의 작동 원리를 모사하면 이 한계를 많이 극복할 수 있다. 예를 들어, 인간은 세상을 잘 보기 위해 의식적 또는 무의식적으로 눈동자를 움직여 많은 영상을 수집 및 처리한다. 이를 모사하여 전자능 카메라의 픽셀 사이를 미세하게 움직여 얻어진 영상을 조합하면 높은 해상도의 이미지를 얻을 수 있다(그림 1 아래).

트레스가 증가하여 전기적 단락 현상을 피할 수 없다.

이를 극복하기 위해 늘어남에 따라 퍼질 수 있는 구조인 'S'자 형태의 연결선을 사용하였다. 튜너블 카메라의 개발에서 주목할 만한 점은 이미지 센서 형태 변형을 위해 유체의 압력을 이용했다는 것이다. 유체를 이용할 경우 이미지 센서 면의 곡률이 연속적으로 원형에 가깝게 변형되며 센서에 가해지는 기계적 스트레스를 최소화할 수 있다.

튜너블 카메라 제작 방법

〈그림 2 오른쪽 위〉는 유체를 이용해서 초점면의 곡률반경을 변화시키는 장치의 개념도와 실제로 제작된 시스템의 사진을 보여준다.

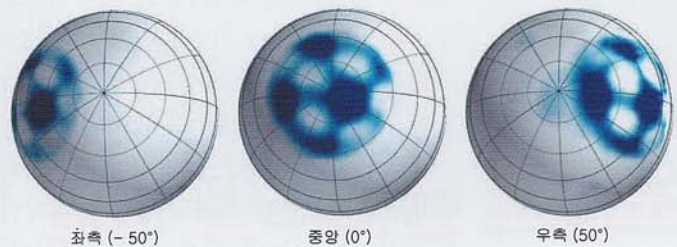
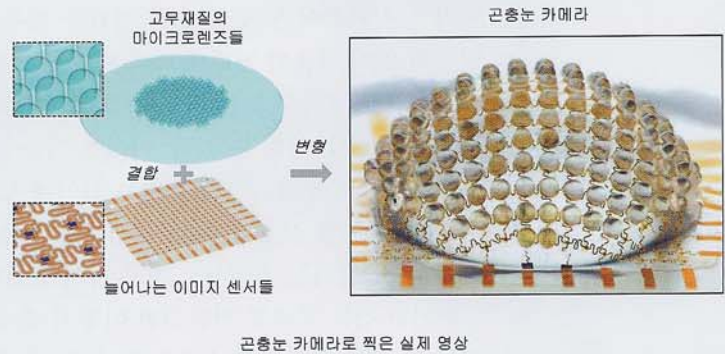
같은 방식으로 줌이 가능한 렌즈부를 구현하였고 이미지 센서부와 조합하면 전체 카메라 시스템이 완성된다. 유체의 압력을 이용한 시스템에서는 유체의 기밀성이 중요한데 본 카메라는 고무재질의 기판을 기밀성을 향상시키기 위한 요소로 활용하였다. 이를 위해 기판의 상하부에 밀착을 위한 구조물을 배치하고 고무재질의 기판을 기계적으로 압축하였다. 이와 같은 경우 기판이 늘어나 평면에서 벗어나므로 추가로 기판에 인장을 가하였다.

튜너블 카메라에서는 이미지 센서가 반복적으로 변형하므로 센서의 전기적인 신호를 컴퓨터로 전송하기 위한 연결부에 높은 신뢰성이 요구된다. 이를 해결하기 위해 〈그림 2 왼쪽 아래〉와 같이 이미지 센서의 전극 끝 부분과 외부 연결용 금속전극 사이의 기계적인 접촉을 통해 신호를 컴퓨터로 전달할 수 있도록 하였다. 이 경우 전극 사이의 접촉력이 미약한 경우 전기적인 접촉이 이루어지지 않고, 반대로 과도한 경우 이미지 센서에 손상이 가해지는 문제를 가지고 있었다. 이를 해결하기 위해 캔틸레버 스프링을 이용하여 접촉력을 적절한 범위로 조절하였고 전체 전극에 균등하게 분산시킬 수 있도록 하였다.

〈그림 2 오른쪽 아래〉는 튜너블 카메라를 이용하여 동일한 이미지를 두 가지 줌 상태에 따라 촬영한 결과를 보여준다. 두 경우 이상적인 초점 평면의 곡률이 다르므로 튜너블 카메라를 이용하여 이에 맞춰 주었고 결과적으로 전체 이미지 면에 초점이 잘 맞는 것을 보여준다. 수차례의 이미지 측정 실험을 통해 제작된 카메라는 최대 3.5배의 줌 성능을 나타내고 여러 가지의 줌 상태에 따라 측정된 이미지를 광학적 광선 추적법(ray tracing)을 통해 계산된 이미지와 비교한 결과 잘 일치한다.

곤충눈 카메라, 사람눈 시야각보다 훨씬 넓어

최근에는 사람의 눈뿐만 아니라 곤충 등 작은 생명체의 눈을 모방하는 연구가 진행되고 있다. 파리, 개미, 잠자리 등 곤충의 눈은 수백에서 수만 개의 미세한 홑눈이 모여 하나의 겹눈을 이루는데, 반구 형태로 구성돼 있어 매우 넓은 시야각(140~180도)을 갖는다. 사람 눈이나 카



▶▶ 그림 3. 곤충눈 전자는 카메라의 제작 방법, 구조 및 촬영한 영상

메라의 시야각이 50도 정도인 것과는 매우 대조적이다. 또한, 사람의 눈은 수정체와 망막이 떨어져 있어 사물의 거리에 따라 별도로 초점을 맞춰야 한다.

하지만 곤충의 홑눈은 바로 아래 광수용체가 있어 멀든 가깝든 초점을 따로 맞추지 않고도 선명한 영상을 얻을 수 있다. 이러한 겹눈구조는 곤충뿐 아니라, 새우, 가재 등 갑각류에서도 볼 수 있으며, 보다 구체적으로는 자연계 모든 생물종의 80%를 차지하는 절지동물의 대다수가 겹눈 구조를 갖고 있다. 따라서 곤충의 눈을 모방하는 것은 인간이 자연을 보다 깊이 이해할 수 있게 된다는 점에서도 매우 가치가 있다.

이러한 겹눈 구조를 만들려면 어떻게 해야 할까? 실제 겹눈과 유사한 영상을 얻어내기 위해서는 각 홑눈 구성에 필수요소인 마이크로렌즈와 이미지 센서를 반구형으로 배치시키는 것이 필수적이다. 그러나 기존 이미지 센서들은 반도체 공정기술을 기반으로 하기 때문에 딱딱하고 부서지기 쉬워 각 센서들을 실제 감관의 위치에 형성하는 것이 불가능하다. 이를 해결하기 위해 최근에 고안된 방법은 늘어나는 이미지 센서를 이용하는 것이다.

제작 방법은 다음과 같다. 먼저 금속 재질의 틀을 이용하여, 늘어날 수 있는 고무 재질로 된 마이크로 렌즈들을 배열된 형태로 제작한다. 이후 실리콘 반도체 공정을 통해 이미지 센서들을 제작하게 되는데, 픽셀과 픽셀 사이에는 앞서 언급했듯이 늘어날 수 있는 S자형 금속선으로 전기적, 기계적으로 연결이 되도록 구성한다.

제작된 이미지 센서들은 수마이크로미터 두께의 얇은 박막 형태로 반도체 기판에서 떼어내어 마이크로 렌즈 배열의 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. 형성된 돔 구조는 동일한 곡면을 갖는 지지대에 부착되어 그 형태를 유지할 수 있도록 되어있다. 각 렌즈와 이미지 센서 조합은 한 개의 홑눈과 동일한 역할을 하게 된다.

넓은 화각, 무한 심도 가져

그렇다면 실제 이미지의 형성은 어떻게 이루어질까? 누구나 한번쯤 TV나 영화를 통해 곤충의 눈에 무수히 많은 다중 이미지가 형성되는 장면을 본 적이 있을 것이다. 그러나 이것은 사실이 아니다. 물체에서 반사된 빛은 각 마이크로렌즈를 통해 들어와서 작은 크기의 이미지를 형성하게 된다. 각 이미지가 형성되는 위치는 마이크로렌즈와 물체 간 거리 및 방향에 따라 다르게 된다. 이렇게 형성된 마이크로이미지의 위치가 감관의 역할을 하는 이미징 픽셀의 위치와 중첩되는 경우, 이미징 픽셀에서 전류가 생성되며, 각 픽셀에서 생성된 전류정보를 통해 최종적으로 단일 이미지가 얻어진다.

제작된 겹눈 카메라를 통해 찍힌 영상은 그림에 나타나 있는 것처럼 반구면에 얻어진다. 이는 광선 추적법에 의해 얻어진 모델링 결과와도 일치한다. 물체의 위치를 카메라 정면이 아닌 측면으로 이동하여도 이미지를 왜곡 없이 얻을 수 있다. 현재까지 개발된 곤충눈 카메라의 화각은 160도이며, 기술적으로는 180도 또는 그 이상까지도 가능하다. 더욱이 렌즈 곡면의 변형이 없이도, 물체가 어느 곳에 있던지 상을 맺을 수 있는 깊은 심도(depth of field)를 가지고 있다. 개발된 곤충눈 카메라는 넓은 화각과 무한 심도를 가지기 때문에 초소형 무인 비행로봇, 전 방위 물체 감지 센서, 초 광각 내시경 등 다양한 분야에 응용이 가능하다. **ST**