

인쇄공정을 이용한 flexible sensor 및 인공피부

김상우·변정환·홍용택 (서울대학교)

I. 서론

Flexible sensor는 그 이용 목적에 따라 수많은 종류가 존재한다. 대표적으로, 주변의 특정 가스 농도나 화학물질 등을 측정하는 Chemical/Bio sensor나 외부에서 가해지는 압력의 변화를 측정하는 Pressure/Tactile sensor, 주변의 온도 변화를 측정하는 Temperature sensor가 있다. 이외에도 광 펄스를 감지하거나 유량, 자기장의 세기 등을 감지하는 다양한 sensor 들이 존재한다. Sensor가 주변의 환경 변화를 감지하기 위해서 일반적으로, sensor의 전기적 특성의 변화를 감지하거나 기계적 혹은 광학적 특성 등의 변화를 감지하는 방법을 사용한다. 이외에도 사용 목적에 따라 수많은 감지 원리가 존재한다.

Chemical/Bio sensor의 경우 감지하고자 하는 목적물질의 종류가 워낙 다양하기 때문에 그에 따라 각각의 감지 원리도 매우 다양하여 위에서 언급한 모든 감지 원리들이 적용된다고 볼 수 있다. Pressure/Tactile sensor는 대부분 sensor의 전기적 특성의 변화를 직접 감지하는 방법을 주로 사용한다. 여기서 말하는 전기적 특성이란 sensing element의 resistance나 capacitance를 말한다. Temperature sensor도 전기적인 특성의 변화, 그 중에서도 resistance의 변화를 측정하는 원리를 주로 사용한다.

제작 방법에 있어서도 다양한 종류가 존재한다. 많은 종류의 제작 방법 중 본 고에서 다루고자 하는 인쇄공정은 많은 장점을 가진다. 그 중 대표적인 장점으로 빠른 공정 시간과 타 공정 방법에 비해 저가격으로 대면적 제작에 용이하다는 점을 들 수 있다. 이러한 장점은 경제적인 측면에서 볼 때 flexible sensor의 제작에 큰 도움을 준다고 할 수 있다.

제작 방법의 측면에서 볼 때, 인쇄공정을 이용해 flexible

sensor를 제작하는 방법은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 먼저 sensor 소자의 제작에 있어 인쇄공정과 그 이외의 다른 종류의 공정을 혼용하는 방법이 있고, 두 번째는 처음부터 마지막까지 모든 과정을 인쇄공정만으로 제작하는 방법이 있다. 현재까지 발표된 연구들의 경우, 인쇄공정과 다른 공정 방법을 혼용한 경우가 대부분으로 본 고에서는 flexible sensor의 제조 방법으로서 전 공정 혹은 일부라도 인쇄공정이 적용이 된 대표적인 연구들을 소개하도록 하겠다. 또, 마지막에는 인쇄공정이 적용된 flexible sensor array의 응용 분야로서 많은 관심을 받고 있는 인공피부에 대해 간략하게 소개하고자 한다.

II. 인쇄공정을 이용한 Flexible Sensor 기술 현황

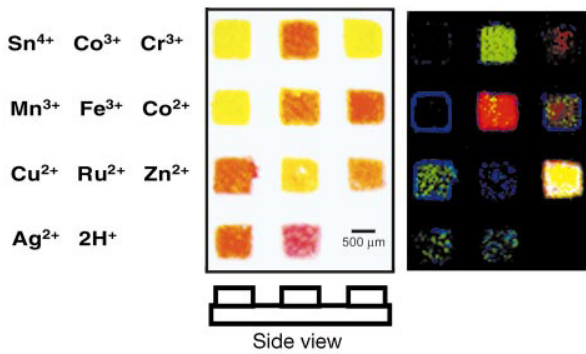
Flexible sensor 제작에 적용되고 있는 인쇄 기술의 종류는 매우 다양하다. 발표된 연구들을 살펴보면 screen printing, ink-jet printing, gravure printing, flexography, micro-contact printing, nano-imprint lithography 등 매우 다양한 종류의 인쇄 공정을 이용함을 알 수 있다. 인쇄공정이 적용된 flexible sensor의 대표적인 연구들을 살펴보기 위해 공정종류에 따른 분류보다는 sensor의 기능적인 분류를 기준으로 알아보도록 하겠다.

제일 먼저 Chemical/Bio sensor 중 sensor의 광학적인 성질을 이용하는 colorimetric sensor에 대해 소개하겠다. colorimetric sensor는 sensor가 특정 물질에 노출됨에 따라 시각적으로 색이 변하는 현상을 이용해 대상 물질의 존재 유/무 혹은 그 농도 까지도 측정 할 수 있는 소자를 의미한다. N.A. Rakow와 K.S. Suslick 이 2000년 *Nature*에 발표한 연

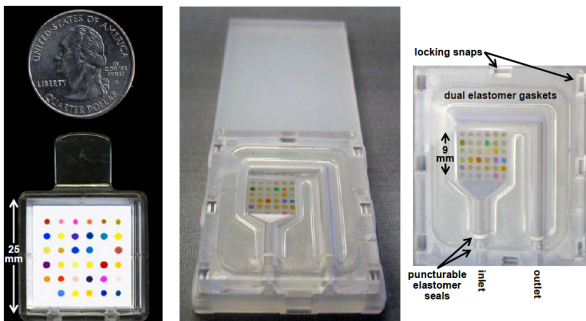
구는 ink-jet printing을 이용한 colorimetric sensor array의 구현에 관한 내용을 다루고 있다.^[1] 이들이 화학물질 감지를 위해 sensing element로서 사용한 metalloporphyrin은 화학 물질에 노출이 되면 그 물질의 성분에 따라 특정한 색으로 변화하는데, 이 metalloporphyrin을 ink-jet printing 공정으로 patterning해 <그림 1>과 같은 sensor array로 구현하였다. <그림 1>은 사용하기 전의 sensor array와(가운데), n-butylamine에 노출되어 색이 변한 결과(오른쪽)를 보여주고 있다. 이 sensor array의 경우 재사용이 가능하다는 장점을 가진다.

이 연구를 발표한 K.S. Suslick group에서는 앞선 연구와 마찬가지로 ink printing공정을 이용해 더 발전된 colorimetric sensor array를 만들어 2009년 *Nature Chemistry*에 발표했다.^[2] 이전의 결과와 비교하여 보면, patterning의 정밀도나 해상도 등의 특성이 향상되었고, sensor array를 cartridge화하여 보다 실용적인 사용을 가능케 했다. <그림 2>는 제작된 sensor cartridge를 보여주고 있다.

다른 종류의 인쇄공정을 이용한 colorimetric sensor에 대한 연구 결과도 있다. N.T. Green과 K.D. Shimizu는 molecular imprinting기법을 이용해 제작한 colorimetric sensor array에 대한 연구를 2005년 *Journal of American Chemical Society*에 발표했다.^[3] Molecular imprinting된 7가지 종류의 polymer들은 서로 다른 7가지의 방향족 화합물들을 정확히 구별해 냈다.



<그림 1> metalloporphyrin으로 만들어진 colorimetric sensor array^[1]

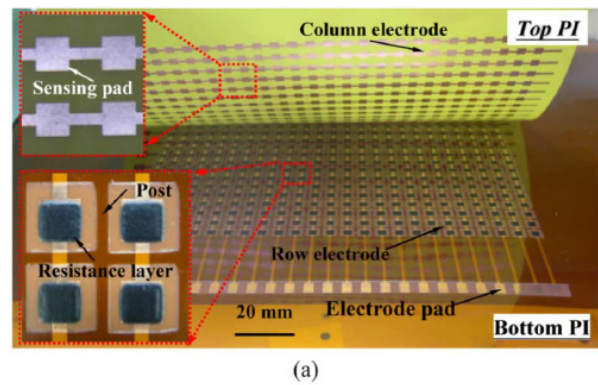


<그림 2> Cartridge로 제작된 colorimetric sensor array^[2]

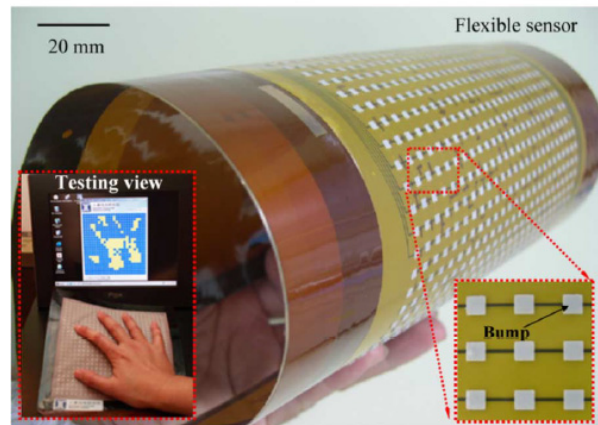
Colorimetric sensor 이외에도 다른 감지 원리를 가지는 flexible chemical sensor가 있다. R. Nagata 등은 screen printing기법을 이용하여 제작한 glucose sensor를 1995년 *Biosensors and Bioelectronics*에 발표 했다.^[4] 이들은 glucose의 농도 측정을 위한 물질로 ferrocene이 처리된 glucose oxidase(GOD)를 사용하였는데, 이 물질에 organic solvent를 혼합해 screen printing에 적합한 점도를 가지는 ink로 만들었다. 제작된 ink는 copper electrode가 patterning된 polyimide 기판 위에, mask와 squeeze를 사용하는 screen printing기법을 이용해 patterning되었다.

인쇄공정을 이용한 pressure sensor array에 대한 연구도 있다. W.Y. Chang등은 screen printing 기법을 이용해 외부 압력에 따라 저항이 변하는 pressure-sensitive resistor를 polyimide 기판 위에 patterning 해 대면적 pressure sensor array를 제작했다.^[5] <그림 3(a)>는 제작된 pressure sensor array를 보여 주고 있다.

Screen printing 공정을 이용해 상판과 하판의 전극을 각각의 기판에 형성한 후, screen printing에 적당한 점도로 제작된 pressure sensitive resistor ink를 polyimide 하판 전극 위에 printing하여 완성하였다. 이 flexible pressure sensor array의 경우 sensitivity를 증가시키기 위해 인쇄공정으로



(a)



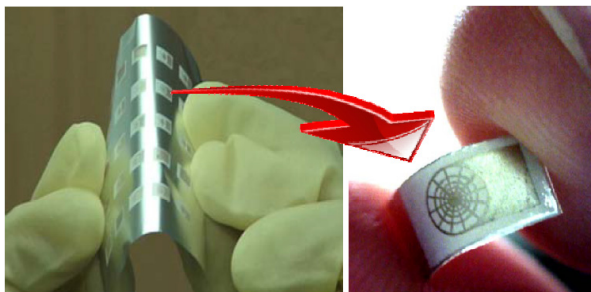
(b)

<그림 3> screen printing을 이용해 제작된 pressure sensor array^[5]

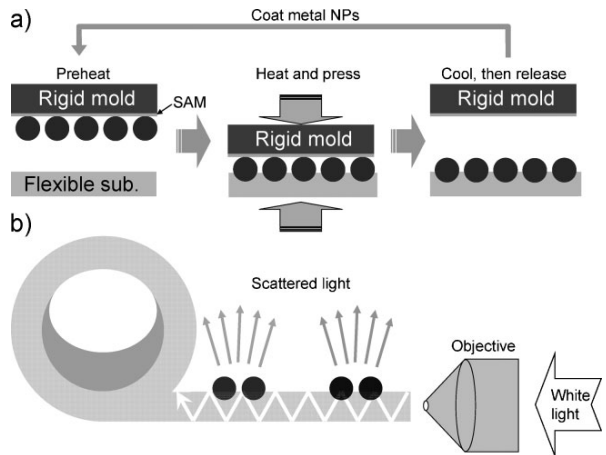
array의 표면에 돌기를 만들어 놓은 특징이 있다. 이렇게 제작된 sensor array는 <그림 3(b)>에서 보이는 것처럼 매우 유연한 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

이상 설명한 대표적인 연구 외에도 다른 목적을 가지는 flexible sensor에 대한 연구도 많이 있다. 아래 설명할 ink-jet printing 공정으로 제작된 flexible proximity sensor가 그 중 하나다. C.T. Wang 등이 2010년 발표한 이 flexible proximity sensor는 flexible aluminium 기판 위에 ink-jet printed 된 ZnO layer를 sensing element로서 사용하였다.^[6] Aluminium 기판 위에 ZnO를 인쇄하기 위해서 플라즈마 처리를 통해 aluminium 기판과 ZnO solution의 contact angle을 줄여 주었고, sensor로서의 성능 향상을 위해서 5번 반복 인쇄를 통해 ZnO layer를 형성하였다. 이 연구에서 사용된 ZnO는 pyroelectric 특성을 가지고 있어 주변으로부터의 열 입사에 대해 전기적인 반응을 일으키게 되는데, 이런 특성을 이용하여 열을 가진 물체가 접근하는 정도를 감지하는 용도로 사용되었다. <그림 4>는 제작된 proximity sensor를 보여 주고 있다.

D. Wan 등이 Advanced Functional Materials에 2010년 발표한 flexible surface plasmon resonance based scattering waveguide sensor는 nano-imprint lithography 공정을 적용한 연구이다.^[7] Sensor에 입사된 빛의 scattering을 위해 Gold nano-particle을 사용했는데 nano-particle을 flexible polycarbonate 기판 위에 patterning 하기 위해 nano-imprint lithography 기술을 이용했다. 이 연구는 flexible 기판에 어떠한 표면처리 과정도 필요 하지 않다는 장점을 지닌다. Nano-particle layer가 형성된 rigid 기판을 flexible polycarbonate 기판에 밀착시키고 그 위에 적절한 열과 압력을 가해주기만 하면 gold nano-particle 들이 polycarbonate 기판으로 옮겨가게 된다. 이 연구에서는 scattering wave guide sensor를 제작하기에 알맞은 수준의 열과 압력 같은 공정 조건을 제시하고, 이를 통해 제작된 sensor의 특성에 대해 소개하고 있다. <그림 5>는 sensor 제작에 사용된 nano-imprint lithography 방법과 제작된 sensor의 간단한 모식도이다.



<그림 4> Ink-jet printing 공정으로 제작된 flexible ZnO proximity sensor^[6]



<그림 5> Nano-imprint lithography 공정으로 제작된 scattering wave guide sensor^[7]

Ⅲ. 인공피부

지금까지 소개한 flexible sensor는, rigid한 특성을 지니는 기존 sensor들의 환경 변화 감지능력을 유지하면서도 기존의 sensor와는 다르게 유연한 특성을 가지고 있어 보다 넓은 분야에서 응용이 가능하다는 장점이 있다. Flexible sensor의 응용 분야로 최근 많은 관심을 받는 분야가 인공피부 혹은 전자피부라 불리는 large area flexible sensor array이다. 산업용/가정용 로봇이나 훗날 인체로의 적용까지도 목표로 하는 인공피부는 실제 인체 피부의 기능을 모사하고 있다. 즉, 인간이 그러하듯이 촉각이나 온도의 변화 등을 감지하고자 하는 것이다.

인공피부를 구현하는 데에 있어 인쇄공정이 적용된 flexible sensor가 필요한 이유는 인공피부가 대면적으로 제작되어야 하고 곡면이나 기계적 변형이 생기는 부분에 적용되어야 하기 때문이다. 로봇 또는 인체의 표면은 여러 모양의 곡면이 혼재 되어 있고 이와 동시에 여러 방향으로 움직임이 발생하는 관절 부위가 존재한다. 이러한 표면에 적용될 센서



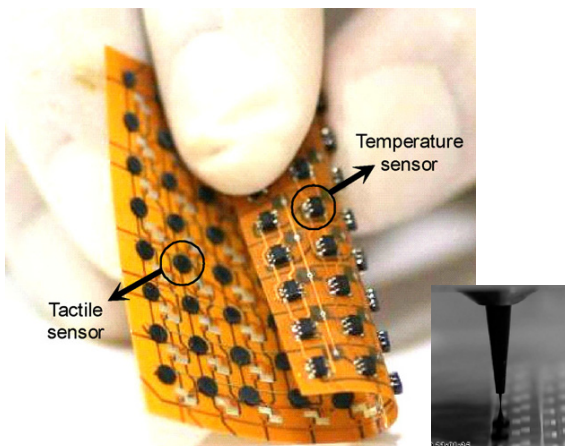
<그림 6> 인공팔과 인공피부를 이식받은 상이군인과(왼쪽) 인공피부의 모식도(오른쪽)^[8]

는 당연히 유연한 특성을 가져야만 할 것이다. 또한 그 면적 역시 넓기 때문에 기존의 공정으로 인공피부를 제작할 경우 긴 공정시간과 많은 비용이 발생하게 될 것이다.

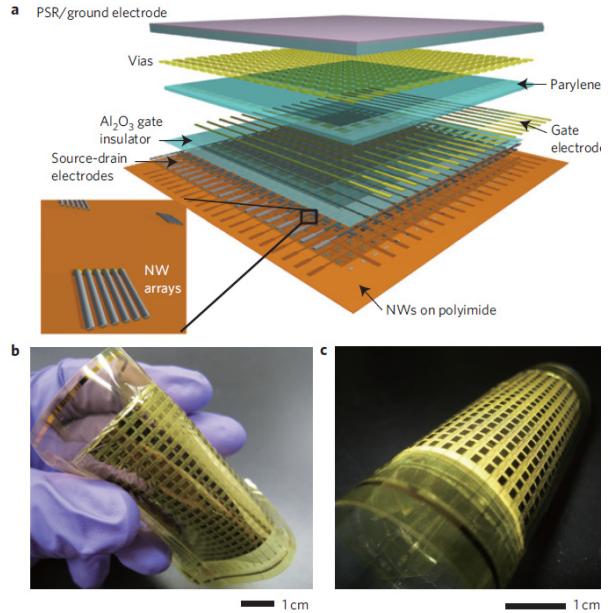
이런 문제점을 해결하기에는 인쇄공정이 적절하다고 볼 수 있다. 하지만 아직까지 인쇄공정이 적용된 인공피부에 대한 연구가 많지 않은 것도 사실이다. 이는 인공피부에 대한 연구 자체가 아직 크게 성장하지 못한 부분에서 기인한 이유가 있다. 또, 인공피부의 이상적인 기능성을 생각해보면 최소한 2가지 이상의 다른 감각을 감지할 sensor가 집적되어야 하는데, 단순한 구조의 단일 flexible sensor 혹은 그 array를 인쇄공정으로 제작하는 수준의 연구가 진행 중인 현재 수준으로 보았을 때 인공피부를 인쇄공정으로 제작하기에는 아직 무리가 있는 것도 사실이다. 하지만 최근에 초기 수준으로서 인쇄공정이 적용된 몇몇 연구, 또 향후 인쇄공정 적용의 가능성이 보이는 연구들이 발표되어 눈길을 끌고 있어 이를 소개하고자 한다.

Y.J Yang 등이 2008년 발표한 연구는 제한적이기는 하지만 인쇄공정을 이용해 pressure sensor와 temperature sensor를 집적해 제작한 인공피부라 볼 수 있다.^[9] Flexible polyimide 기판을 사이에 두고, 한 쪽 면은 pressure sensitive rubber를 인쇄공정으로 patterning해 제작된 pressure sensor array가 있고, 반대쪽 면에는 상용 temperature sensor를 array화 해 놓았다. 제작된 전자피부는 <그림 7>과 같다.

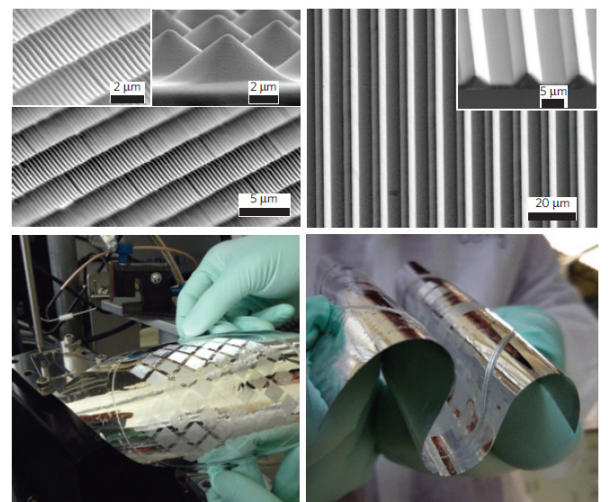
2010년 *Nature Material*에 인공피부에 대한 연구 두 건이 같은 호에 소개된 바가 있다. 두 연구 모두 인쇄공정이 적용되지는 않았었지만, 발표된 내용이나 향후의 목적으로 볼 때 인쇄공정의 적용 가능성이 매우 높을 것으로 기대되어 간략하게 소개하고자 한다. K. Takei 등이 발표한 연구는 nano-wire active matrix와 pressure sensitive rubber를 사용해 기존 연구들에 비해 저 전력 동작이 가능한 <그림 8>의



<그림 7> 인쇄공정이 일부 적용된 인공피부^[9]



<그림 8> Nano-wire active matrix가 적용된 저 전력 구동이 가능한 인공피부^[10]



<그림 9> 측정감도를 개선하기 위한 구조가 적용된 인공피부^[11]

전자피부에 대해 다루고 있다.^[10]

S. Mannfeld 등이 발표한 연구는 압력측정 감도를 비약적으로 향상시키기 위해 특별한 구조로 제작된 rubber layer를 사용하는 인공피부에 대해 다루고 있다.<그림 9>^[11] 구조물의 기계적 변형에 따른 capacitance 변화를측정하는 이 전자피부의 경우 단 한 마리의 파리가 위에 앉아도 정확히 감지할 수 있을 정도의 압력 측정 감도를 보이고 있다.

IV. 결론

지금까지 설명한 바와 같이 flexible sensor는 매우 다양한 분야에서 기존의 rigid sensor를 대체하는 용도뿐만 아니라

sensor가 가지는 유연한 성질로 말미암아 대면적의 감지 영역이 필요하거나 1회용으로 간단히 사용할 수 있는 등의 새로운 분야에서의 사용도 증가하는 추세이다. 이런 점에서 보았을 때 flexible sensor를 제작하는 공정 방법으로는 인쇄공정이 매우 적절하다고 볼 수 있다. 다양한 종류의 플라스틱 기판을 사용해 대면적으로 제작하기에 적절할 뿐만 아니라 다른 공정 방법과 비교하여 경제적인 측면에서도 장점을 가지고 있기 때문이다. 이러한 장점을 바탕으로 다양한 종류의 인쇄공정 기반 flexible sensor에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 비록 전체 sensor array를 인쇄공정을 통해 제작하는 flexible sensor에 대한 연구는 아직까지 많이 이루어지지 못한 것도 사실이지만, 인쇄공정 기술의 발전 추세와 flexible sensor의 사용 요구가 증가하는 점을 보았을 때 머지않은 시일에 지금보다 더 발전한 인쇄공정 기반 flexible sensor를 사용할 수 있을 것이라 예상한다.

마지막에 소개한 인공피부는 flexible sensor의 한 가지 응용 분야로서 최근 많은 주목을 받고 있다. 로봇이나 장애를 가진 인체에 인공적인 촉각을 부여하기 위한 목적을 가지고 있는 인공피부는 필수적으로 유연성을 가지고 있어야 하며 대면적으로 제작되어야 할 것이기에 인쇄공정의 필요성이 매우 높다고 볼 수 있다. 본고에 소개한 세 연구처럼 지금까지의 인공피부는 인쇄공정의 적용이 매우 제한적으로 이루어져 왔다. 하지만 지금의 성능을 유지 혹은 개선하면서 보다 대면적으로 그리고 더 유연한 특성을 가져야 할 발전된 인공피부의 제작을 위해서는 향후 인쇄공정의 적용이 필수적이라 예상된다.

참고문헌

- [1] NA, Rakow and K.S. Suslick, A colorimetric sensor array for odor visualization, Nature, 406, pp.710-713, 2000.
- [2] S.H. Lim et al., An optoelectronic nose for the detection of toxic gases, Nature Chemistry, 1, pp.562-567, 2009.
- [3] N.T. Green and K.D. Shimizu, Colorimetric molecularly imprinted polymer sensor array using dye displacement, Journal of American Chemical Society, 127, pp.5695-5700, 2005.
- [4] R. Nagata et al., A glucose sensor fabricated by the screen printing technique, Biosensors and Bioelectronics, 10, pp.261-267, 1995.
- [5] W.Y. Chang et al., A large area flexible array sensors using screen printing technology, Journal of Display Technology, 5, pp.178-183, 2009.
- [6] C.T. Wang et al., A flexible proximity sensor fully fabricated by inkjet printing, Sensors, 10, pp.5054-5062, 2010.
- [7] D. Wan et al., Use of reversal nanoimprinting of nanoparticles to prepare flexible waveguide sensors exhibiting enhanced scattering of the surface plasmon resonance, Advanced Functional Materials, 20, pp.1742-1749, 2010.
- [8] Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), Northwestern Univ.
- [9] Y.J. Yang et al., An integrated flexible temperature and tactile sensing array using PI-copper films, Sensor and Actuators A, 143, pp.143-153, 2008.
- [10] K. Takei et al., Nanowire active-matrix circuitry for low-voltage macroscale artificial skin, Nature Materials, 9, pp.821-826, 2010.
- [11] S. Mannsfeld et al., Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers, Nature Materials, 9, pp.859-864, 2010.



김 상 우

2008년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 학사.
2008년 3월~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석박사
통합과정.
〈관심 분야〉 Stretchable Electronics & Sensors



변 정 환

2011년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 학사.
2011년 3월~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
과정.
〈관심 분야〉 Stretchable Electronics & Sensors



홍용택

1994년 2월 서울대학교 전자공학과 학사.
1996년 2월 서울대학교 전자공학과 석사.
2003년 12월 미시건 대학교 전기공학과 박사.
2003년 12월~2006년 2월 이스트만 코닥 회사 시니어 연구원.
2006년 3월~2010년 3월 서울대학교 전기공학부 조교수.
2010년 4월~현재 서울대학교 전기공학부 부교수.
〈관심 분야〉 Device Physics TFT, OLED, OLET, Sensor, Device Fabrication Printing (Inkjet, Screen), Maskless Lithography, Circuit Fabrication Printed Digital and Analog Circuit, Flexible Platform Plastic, Metal Foil, Paper, System Implementation Printed, Flexible, Stretchable Electronics, Electronic Skin