

잉크젯 프린팅을 이용한 종이 디지털 유체칩

글을 쓰는 노트, 인쇄용 사무용지, 물기를 닦는 화장지 그리고 포장용 박스까지 종이는 우리 주변에 가장 흔하게 사용되는 물질 중 하나이다. 값이 저렴하고, 인쇄 및 착색이 간편하며, 질긴 성질 때문에 종이를 기반으로 한 많은 화학 및 생물학적 센서가 활용되어 왔다. 우리가 흔히 알고 있는 리트머스 시험지나 분리에 이용되는 종이 크로마토그래피부터 가정용 임신테스트기, 또는 혈당을 확인하는 검사지 등이다.

기존의 종이 진단칩의 문제점

대부분 종이의 셀룰로오스 섬유(cellulose fiber)가 모세관 현상에 의해 액체 시료를 천천히 흡수하여 시료를 이동시키고, 이것이 미리 종이 위에 고정시켜놓은 시약과 반응하는 방식이다. 액체시료의 흡수 방향을 제어하기 위해 종이로 흡수되는 친수성 기질에 소수성 패턴으로 격벽을 만들어, 흡수되는 액체 시료가 특정 부분으로 흡수되도록 하는 방식의 진단용 종이칩이 개발된 바 있다.

이를 통해 액체시료를 여러 위치로 흡수되도록 제어할 수는 있다. 하지만 이러한 방식 또한 이미 제작된 패턴을 따라 한쪽 방향으로 시료가 모세관 젖음을 통해 흡수되는 방식이기 때문에 하나의 시

료가 종이에 흡수되면, 다른 시료를 통과시킬 수 없으며, 흡수 속도를 제어할 수 없는 문제가 있다. 특히, 연속적인 반응으로 이뤄져 있기 때문에 반복적이거나, 시료의 정량적인 생화학적 반응을 제어할 수 없는 단점이 있다.

디지털 미세 유체칩의 필요성

기존에 이러한 액체의 이동을 제어하는 방법은 가장 대표적인 PDMS와 같은 연성투명소재를 이용한 마이크로유체칩이 가장 많은 관심을 받고 있으며, 다양한 분야에 화학, 생물학적 반응을 집적화한 랩온어칩(Lab on a Chip)의 목적으로 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 미세 유체칩 또한 연속적인 유체의 흐름으로 반응을 제어하기 때문에 정량적인 비율로 배합되거나, 단계적으로 액체시료 부피의 양을 다르게 하는 반응에는 활용하기 어렵다. 또한 미세한 관으로 연속적인 유체의 흐름을 제어하기 위한 압력장비와 설계, 제작에 필요한 청정실을 이용해야 하는 문제가 있다.

한편, 신속한 병원균의 탐지나 오염도 측정을 위해 현장에서 신속하게 생산하고, 전문인력과 전문기기가 구비된 병원이나 생물-화학실험실에서 여러 스텝을 통해 판정할 수 있는 바이오물질의 오염



글_신관우

서강대학교 화학과 교수
kwshin@sogang.ac.kr

글쓴이는 서강대학교 화학과 졸업 후, 카이스트에서 석사학위, 미국 뉴욕주립대에서 박사학위를 받았다. 광주과학기술원 신소재공학과 교수를 지냈으며 현재 바이오계면연구소 소장을 겸임하고 있다.

및 감염 탐지를 현장에서 신속하게 진단하기 위해서는 새로운 개념의 유체칩이 필요하다. 따라서 종이 가 갖는 장점인 손쉬운 프린팅기술과 마이크로유체칩의 유체 방향과 액적의 제어를 결합하여 새로운 개념의 디지털 유체칩이 최근 발표되었다.

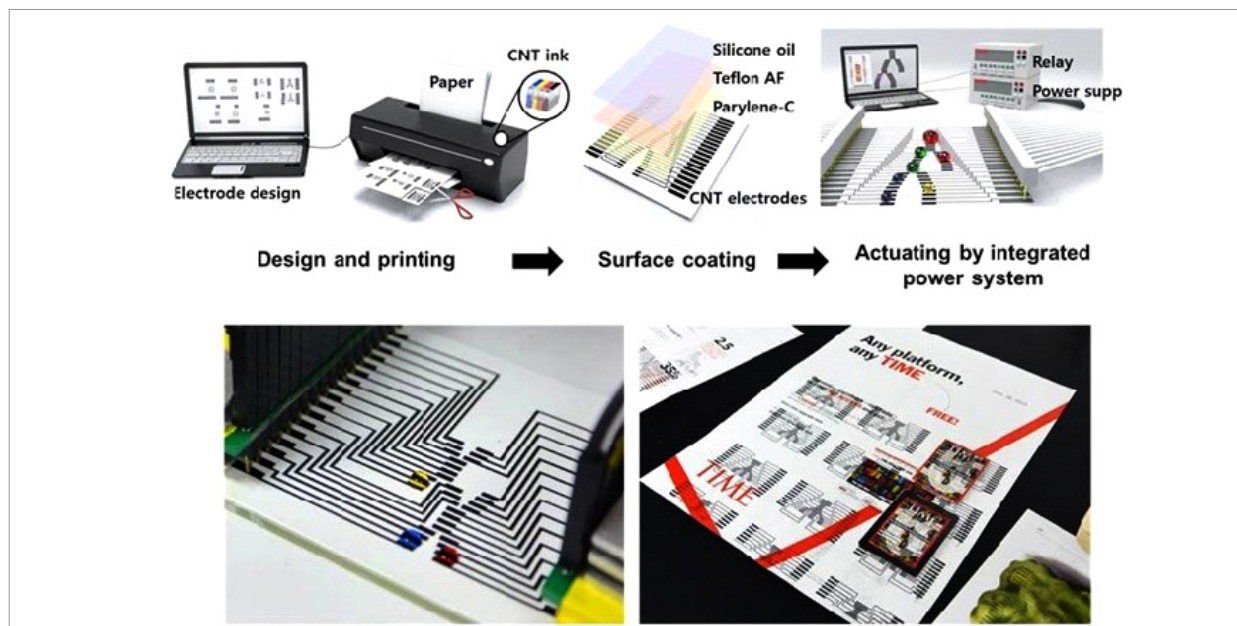
자동화된 프로그램에 의해 정량적인 액적을 제어하기 위해 종이 위에 맺힌 액체방울을 하나의 단위로 하여 종이 위에 프린팅된 전도성 패턴에 의해 유체의 이동을 제어하는 기술이다. <그림 1>에 모식도로 보여 주고 있는 것과 같이 가정용 프린터에 카본나노튜브를 분산시킨 수용성 전도잉크를 넣어서 액체 시료를 이송시킬 수 있는 기차레일과 비슷한 형태의 패턴을 프린팅하게 된다. 이때 패턴의 모양 및 구성에 따라 기존의 PDMS기반의 연속적인 유체이동의 약점을 보완하여 제어된 정량의 액체들을 혼합, 분산, 희석하거나, 특정위치에서 화학적인 반응을 정확하게 제어된 시간으로 제어할 수 있는 디지털 이동이 가능하게 된다. 다양한 모션과 구동의 결과는 <http://bit.ly/1nDfQyj>에서 동영상으로 확인할 수 있다.

전도성 잉크 이용한 종이 기반 전극 인쇄

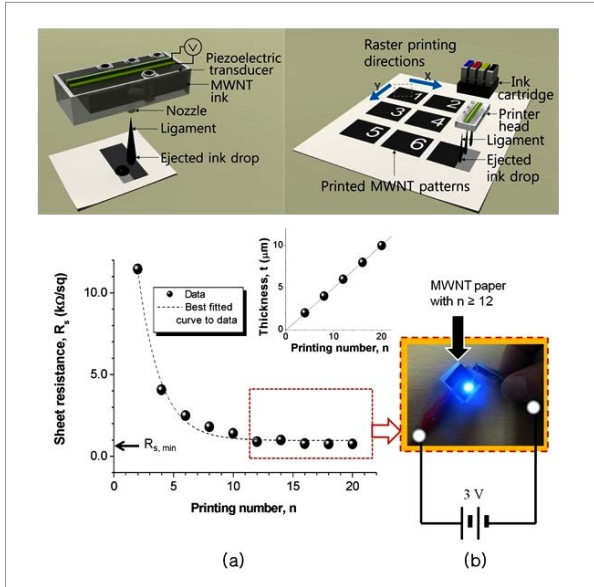
단위 액적을 이동시키는 기술은 종이에 패턴된 전

도성 레일을 따라서 가해지는 순차적인 전압에 의해 액체방울의 표면 접촉각을 변화시키는 전기젖음성 (electrowetting)이라는 방법을 사용하게 된다. 이때, 가해진 전압에 의해 액체방울이 부드럽게 이동되기 위해서는 외부에서 가해진 전압이 인쇄된 전도성 잉크를 따라서 잘 전달돼야 하므로, 전도성 잉크의 개발이 선행돼야 했다. <그림 2>는 잉크젯 프린터로 종이 위에 프린팅하여 저항이 급격히 떨어지는 저항값의 감소를 보여주고 있다.

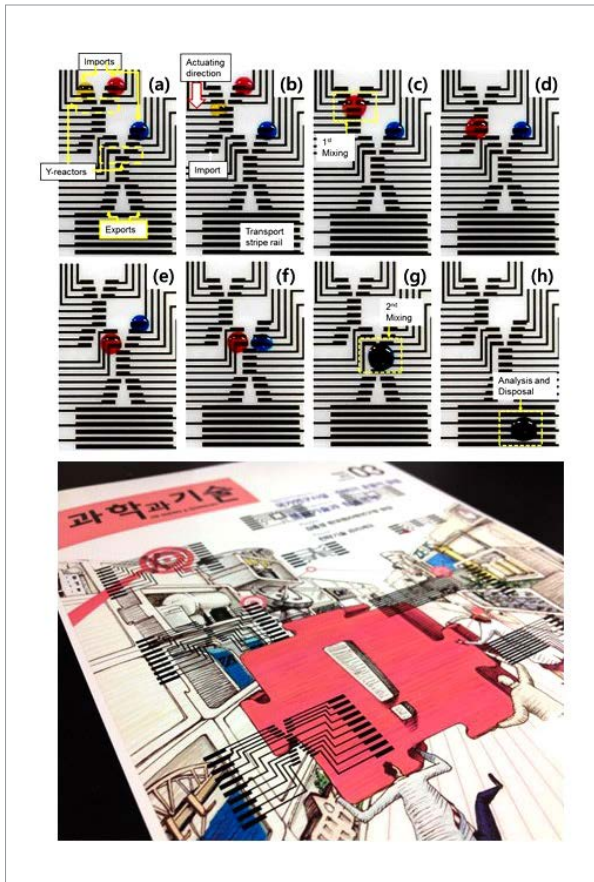
본 연구팀은 일반 가정용프린터에 사용할 수 있는 수용성 잉크를 제작하기 위해 탄소나노튜브를 이용하여 전도성 잉크를 개발하였고, 이를 이용하여 가정용 잉크젯 프린터로 종이 위에 손쉽게 직접 전극을 제작하였다. 기존의 전도성 잉크의 인쇄 방식들은 고가의 금속 물질을 사용하거나, 값비싼 공업용 프린터를 사용하여 많은 사람들이 쉽게 접근할 수 없었던 반면 우리가 사용한 방식은 저렴한 탄소나노튜브 잉크와 가정용 잉크젯 프린터로 종이 위에서 760 Ω /sq의 세계 최고 수준의 전도도를 얻을 수 있었다. 덕분에 기존에 전극을 제작하기 위해 필요했던 복잡하고 어려운 화학 공정이 필요 없어, 컴퓨터와 프린터만 있으면 직접 전극의 모양을 디자인하고 제작할 수 있게 되었다.



▶▶ 1. 디지털 종이칩의 제작 과정과 완성된 칩의 모습 (Adv. Mater. (2014), 26, 2335-2340)



▶ 2. 카본나노튜브 잉크를 잉크젯 프린터에 삽입하여 출력하는 모식도 및 종이에 인쇄한 전극의 인쇄 횟수에 따른 표면 저항 (Carbon (2013) 58, 116-127)



▶ 3. 종이칩에 의하여 분석하고자 하는 시료를 순차적으로 혼합 반응하는 과정을 보여주고 있으며 (Adv. Mater. (2014), 26, 2335-2340), 아래는 본 잡지 표면에 출력한, 혼합, 이동, 희석 등이 가능한 다양한 디지털 종이칩을 제작한 사진

종이에 손쉽게 제작하는 센서로 활용

전도성 잉크를 이용하여 종이 위에 전극을 인쇄하는 기술은 그 방식이 간편할 뿐만 아니라, 특수용지가 아닌 일반 사무용지부터 <그림 3>의 그림과 같이 주변의 잡지를 재활용하여 사용할 수 있다는 점에서 혁신적이라 할 수 있다. 기존의 전자칩을 만드는 공정은 전문적인 기술이 필요하고, 값비싼 화학물질과 장비들을 사용해야 하므로 자원이 부족한 지역에서는 그 시설을 확충하는 것부터 현실적으로 쉽지 않다.

반면 본 연구진이 개발한 방법은 가정용 컴퓨터와 프린터만 있으면 언제 어디서든지 손쉽게 전기구동 바이오칩을 제작할 수 있는 기술을 제공하며, 그 기판도 버려지는 종이를 재활용함으로써 제작비용이 거의 들지 않는다. 또한 사용 후에는 소각하여 쉽게 폐기할 수 있어 유해 물질 배출에 관한 문제도 쉽게 해결된다.

이러한 종이칩은 <그림 3>에서 예시한 것과 같이, 분석이 필요한 액체시료를 이동, 혼합, 생화학적 반응, 침전 등을 거쳐서 종이 표면의 엔자임과 같은 반응과 같은 방법을 쓰면 다양한 바이오센서로 활용할 수도 있다. 특히, 자원이 부족하거나 의료기술이 낙후된 지역에서 물과 식품의 오염 등이 발생할 경우, 많은 인명과 건강을 해치는 문제를 조기에 차단하기 위해서는, 신속하면서도 질병이 발생한 지역의 현장에서 확인할 수 있는 선제적 스크리닝의 기술이 요구된다. 발병 초기에 정밀한 검출에 의한 선제적인 치료를 통해 위험요소 제거와 확산의 최소화를 위한 접근방법의 중요한 수단으로 활용될 수 있다.

특히, 이동의 궤적 및 반응시간이 모두 입력된 프로그램에 의해 자동으로 분석이 가능하므로, 비전문가에 의해서도 확인될 수 있는 정밀 진단, 프린팅으로 제작된 엔자임에 의한 감염 및 특이적 표적 진단, 신속한 계측 및 판독이라는 장점을 제공하게 된다. 본 연구결과는 이러한 활용이 가능한 전기 구동 디지털종이칩을 만들기 위한, 간편한 현지 생산, 현장 측정 및 판정을 위한 단순한 조작 및 자동화의 개념을 종이표면에 쉽게 구현할 수 있는 기술을 보여주고 있다.