

인쇄소자용 공액계 화합물의 전기/광학적 특성 제어 기술

이창진 · 홍재민 · 정재윤 · 윤성철 · 이성구

1. 기술의 정의

인쇄소자(Printed electronics: PE)란 다양한 방법의 인쇄 기술로 전자 및 광전 회로를 생성하는 기술로 정의할 수 있으며 **그림 1**과 같

이 잉크젯 프린팅, 플렉소, 그라비아 등의 롤프린팅 및 스크린 프린팅 등이 적용되어 전자부품에 적용될 수 있는 제품을 제조하는 것을 뜻한다. 즉, 인쇄기법으로 제작되는 박막을 이용하여 전자, 전기 및 광전 회로에 적용될 수 있는 부품을 제조할 수 있으면 인쇄소자 기술로

이창진

1981 서울대학교 화학과(이학사)
1983 서울대학교 화학과(이학석사)
1983~1989 University of Minnesota 화학과(이학박사)
1989~1991 University of Texas at Austin (Post-Doc.)
1991~현재 한국화학연구원 화학소재연구단 책임연구원

홍재민

1985 서울대학교 공업화학(학사)
1987 서울대학교 공업화학(석사)
1993 서울대학교 공업화학(박사)
1994 KIST 고분자 연구부 Post Doc.
1995~1996 Colorado State Univ. 화학과 Post Doc.
2000 Stanford Univ. 화공과 방문연구원
2008 MIT 재료공학과 방문연구원
1996~현재 KIST 재료연구본부 책임연구원

정재윤

1980~1987 부산대학교 화학(이학사)
1995~1998 Kyoto Institute of Technology 재료공학(박사)
1987~1998 한국화학연구소 선임연구원
1998~2000 정우화인(주) 연구소장
2000~현재 한양대학교 분자시스템공학과 교수

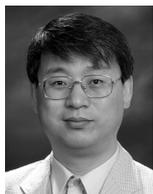
윤성철

1992 한양대학교 공업화학(공학사)
1994 서울대학교 화학과(이학석사)
1997 서울대학교 화학과(이학박사)
1997~2001 삼성종합화학 연구소 선임연구원
2001~2004 LG전자기술원 OLED그룹 책임연구원
2004~현재 한국화학연구원 화학소재연구단 선임연구원

이성구

1990 고려대학교 화학공학과(학사)
1992 고려대학교 화학공학과(석사)
1997 고려대학교 화학공학과(박사)
1999 한국화학연구원 Post-doc
2003 LG전자기술원 책임연구원
2004~현재 한국생산기술연구원 선임연구원

이창진



홍재민



정재윤



윤성철



이성구



Development of Conjugated Compounds with Controlled Electrical and Optical Properties for Printed Electronics

한국화학연구원 화학소재연구단(Changjin Lee and Sung Cheol Yoon, Advanced Materials Division, Device Materials Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT), P.O.Box 107, Yuseong, Daejeon 305-600, Korea)

e-mail: cjlee@kRICT.re.kr

한국과학기술연구원 재료연구부(Jae-Min Hong, Korea Institute of Science and Technology, P.O. Box 131, Cheongryang, Seoul 130-650, Korea)

한양대학교 분자시스템공학과(Jae Yun Jaung, Department of Fiber and Polymer Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea)

한국생산기술연구원 (Sung-Goo, Lee, Korea Institute of Industrial Technology, 35-3, Hongcheon-Ri, Ipchang-Myun, Seobuk-gu, Cheonan-Si, Chungnam 331-825, Korea)

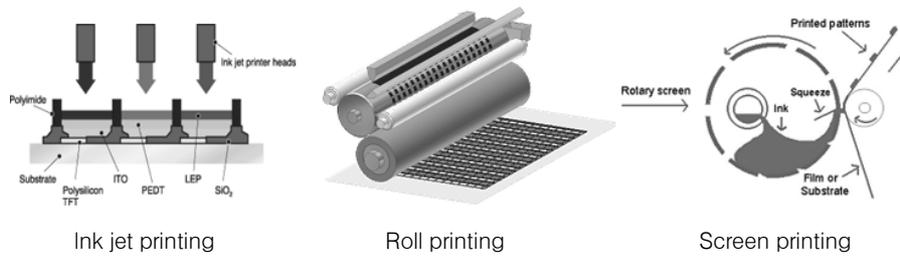


그림 1. 여러 가지 인쇄기법 모식도.

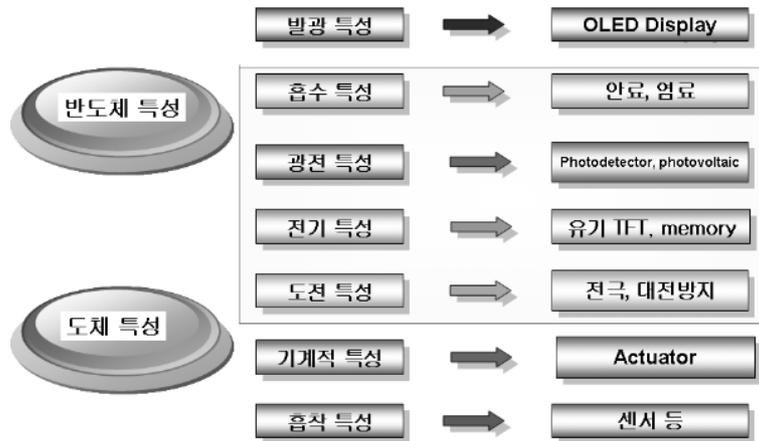


그림 2. 공액계화합물의 특성과 응용분야.

정의할 수 있다.

비록 대부분의 경우 PE는 유기전자소자(organic electronics)와 유사어로 많이 사용되고 있으나, 현재의 유기전자소자는 대부분 진공 증착법으로 제조되고 있으며 금속 나노 잉크를 이용한 금속 배선을 형성하는 기술이 인쇄소자에서 가장 상업화에 근접한 기술로 인정되고 있다. 그러나 최근 다양한 유기 혹은 고분자 재료와 무기, 금속 잉크를 같이 사용하여 원하는 전자 회로를 구성할 수 있다는 것이 알려지면서 인쇄소자 기술은 가능성이 높은 시장으로 부각되기 시작하였다. 또한 궁극적인 인쇄소자의 타겟이 유연성이 있는 기질(플라스틱 필름 혹은 종이)에 인쇄하여 사용하는 것이므로 plastic electronics나 flexible electronics와 혼용되어 사용되어지기도 한다.

π -공액계 화합물은 탄소-탄소간의 결합이 이중결합과 단일 결합이 반복적으로 연결된 화합물로 가장 널리 알려진 물질로는 폴리아세틸렌, 폴리아닐린, 폴리티오펜 등의 공액계 고분자물질과 펜타센, 프탈로시아닌 등의 공액계 화합물이 있다. 이러한 공액계 화합물은 이중 결합의 연결 정도 및 화합물 내부의 화학 구조의 차이에 따라 각기 다른 전기/광학적 특성을 보인다. 즉, 일반적인 반도체가 가지는 밴드 갭과 유사한 특성을 가지고 있으며 화학적 및 모폴로지의 구조 제어를 통해 화합물의 색상, 전기 전도도 및 전자 구조(밴드 구조) 등을 조절할 수 있다. **그림 2**에 대표적인 공액계화합물의 특성과 이와 연관된 응용 분야에 대해 보인다. 그동안의 축적된 기술로 과학자 들은 이들의 전도도를 어떻게 제어할 수 있으며, 또한 구조적인 특성상 일반적인 유기용매에 잘 녹지 않는 성질을 가진 이 물질들을 용매에 녹게 할 수 있는 방법 등에 대해 알아내게 되어 응용 가능성을 높이고 있다.

이들 공액계 화합물이 가진 반도체적인 특성을 이용하여 발광소자에 적용하여 디스플레이에 적용하고자 하는 노력이 가시화되고 있다. 뿐만 아니라, 전자주계 특성을 가진 공액계 화합물과 전자 받게 재료를

혼합하여 유기박막 태양전지에 성공적으로 적용하고 있으며, 회로 구성에 필요한 트랜지스터 등이 인쇄 기법 등과 결합되어 진정한 인쇄 소자의 가능성이 제시되고 있다. 그러나 아직까지 실제적인 적용을 위한 특성을 가지기 위해서는 여전히 고성능의 신규 화합물이 개발되어야 하며 더 많은 연구가 집중되어야 한다.

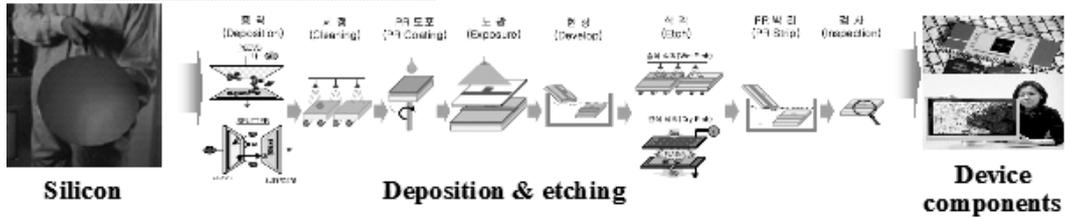
2. 기술 개발의 필요성

현재 거의 모든 전자소자 부품들은 핵심 전자회로에 실리콘의 우수한 성능으로 인하여 실리콘 칩이 사용되고 있으나 기존의 반도체 제조는 고온 공정, 진공 증착 및 여러 단계의 패터닝 공정을 거쳐야 하는 데 고가의 설비 및 장비 등이 필요하여 생산원가의 비용이 높다는 한계를 가지고 있어, 이에 대한 대안 연구에서 그동안 탄소에 기초한 소재, 즉 유기전자소자 개발에 많은 연구가 진행되어 왔다.

유기반도체는 제조와 공정이 쉽고, 실리콘과 달리 잘 휘어지는 굴곡 표면에도 활용할 수 있는 등과 같은 기존의 반도체가 가지지 못한 여러 가지 장점들을 가지고 있다. 또한 기존의 잡지나 신문 등을 제작하는 인쇄 기술과 접목이 가능하므로 회로 제작에 있어서 인쇄법을 적용하여 고속의 대량생산이 실현될 경우 실리콘보다 성능은 떨어지지만 저가격이 가능하다는 장점이 있다. 이는 새로운 응용 분야를 창출할 많은 가능성을 잠재하고 있다고 전문가들은 보고 있다. **그림 3**에 기존의 반도체 공정과 인쇄소자 공정을 비교하여 보인다.

그림 4에 보인 것과 같이 회로의 복잡성이 낮을 경우 플라스틱 상에 회로를 구현하는 것이 실리콘을 사용하는 것보다 가격적으로 유리하다는 것을 PolyIC에서 발표하였는데 약 1만개 정도의 트랜지스터가 하나의 칩에 내장될 때 실리콘 칩과 플라스틱 소자의 가

전자소자 제조의 전통적 공정



인쇄소자 제조의 미래 공정

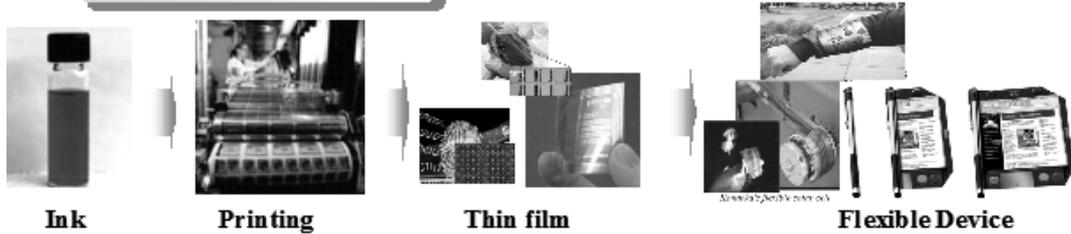


그림 3. 전자소자 제조공정과 인쇄소자 제조공정의 비교 모식도.

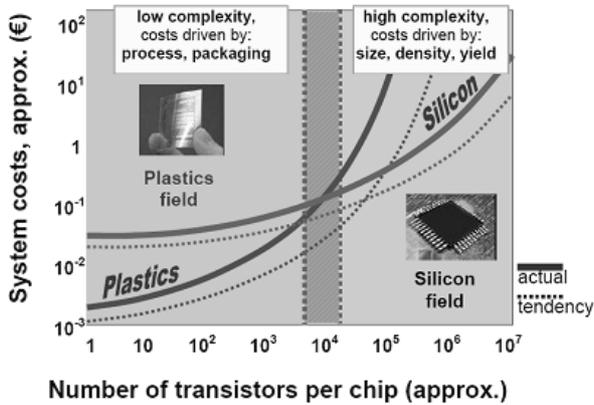


그림 4. 칩당 집적화된 트랜지스터의 수와 가격간의 비교(source: PolyIC).¹

격 경쟁력이 비슷해진다고 발표하였다.¹ 결국 회로의 복잡성이 낮은 전자 제품이나 소자는 프린팅 기법으로 제작할 경우 실리콘보다 저렴하며 일회용 전자 제품으로 새로운 시장을 창출할 수 있다고 보여진다. 그러나 성능 면에서는 단연 실리콘에 비해 떨어진다는 것이 인쇄 소자의 특성이며 이러한 성능의 열세를 가격으로 만회하고 새로운 시장 창출의 기회를 찾고 있다.

특히 미래 시장의 요구 사항이 경량화와 휴대의 용이성이 매우 강조되고 있으며(유비쿼터스 시대의 도래) 유기소재를 이용한 인쇄소자 기술이 플렉서블화, 경량화 및 저가격화에 가장 잘 대응할 수 있는 기술로 파악되고 있다. 그러나 아직 유기소재 등의 개발이 부진하여 현재로서는 제조비용이 실리콘기반의 전자소자보다 비싸거나 유사한 실정이다. 만약 성능과 함께 대용량 초고속 생산에 적합한 소재의 개발이 이루어진다면 '구부릴 수 있는 컴퓨터'나 '종이와 같은 디스플레이' 등을 실현할 수 있다고 보며, 신문과 같이 둘둘 말아 휴대할 수 있는 디스플레이와 벽지로부터 발광하는 조명 장치, 벽이나 마룻바닥 표면의 필요한 곳에 집적된 센서를 이용한 보안, 방화 및 청소 로봇 안내 장치, 대면적 전자 디바이스 등 신규 시장이 창출될 것이다.

전술한 바와 같이 인쇄전자 기술을 활용하면 부품의 제조비용과 무

계를 90% 이상 줄이고 기계적 유연성도 높일 수 있을 것으로 기대되기 때문에, 이 기술은 지난 수년 동안 광범위한 부품 개발 분야에서 혁신적인 잠재 기술로서 많은 관심의 대상이 되어 왔다. 하지만 이 기술은 IC와 디스플레이 등 반도체 기술에 기반을 둔 제품에 비해 상대적으로 단순한 회로만 구성할 수 있고 전기 특성도 약하다는 문제점이 제기되어 왔다. 또한 일반적으로 수천 시간에 불과한 디바이스 수명이 치명적인 약점이었고 일부 제품 중 비교적 수명이 긴 디바이스라고 해도 겨우 2년을 넘지 못하였다. 따라서, 전문가 집단에 의해 이 시장이 실제로 형성되는 데에는 십년에서 이십년 이상이 걸릴 것으로 예상되었다.

그러나, 최근 상황이 상당히 바뀌었다. 인쇄 기법의 성능과 안정성이 크게 향상되었고 이에 대응하여 소재 부문에서도 상당한 진척이 이루어지는 등의 기술적인 발전이 이루어지고 있어 다양한 응용 분야에 진입할 가능성이 매우 높아지고 있다. 즉, 단순한 금속 배선을 이용한 와이어링 패드와 안테나 등은 상업화가 일부 진행 중이며, LCD 배향막, 컬러필터 및 백라이트 마이크로 렌즈 등에도 인쇄 기술이 적용되고 있다.²

LCD 배향막의 경우, 세이코 엡슨은 2005년 중반부터 일부 고온 폴리 실리콘 TFT의 배향막을 형성하는 공정에 잉크젯 기술을 처음으로 응용하여 표시 성능을 높였다. 세이코-엡슨의 잉크젯 배향막 형성은 기존의 플렉소 기법에 비해 후막의 균일성 향상, 막 형성 시 결합 발생의 감소, 그리고 제조공정에 필요한 공간의 절약이라는 세 가지 장점이 있다. 종래의 플렉소 법은 4~5%의 두께 오차를 보였는데 잉크젯 기술을 사용하는 것으로 공정상의 오차를 2% 내외에서 제어가 가능하다고 하였다. 즉, 낮은 점도의 잉크를 사용함으로써 막의 두께를 조절할 수 있게 되었고, 비접촉의 도포 방식인 잉크젯 프린팅으로 결합발생의 감소를 이룰 수 있었다. 또한, 잉크젯 설비가 기존의 설비보다 소형이므로 공간도 절약할 수 있는 이점도 있었다. 이후 이 기술은 국내에도 전파되어 현재 일부 라인에서의 배향막 도포는 잉크젯 법을 이용하여 진행되고 있다. 이러한 잉크젯 기술에 의한 배향막 형성은 단순한 코팅 기술로 인쇄소자 기술로 인정하기는 어렵지만 양산 공정에 적용해

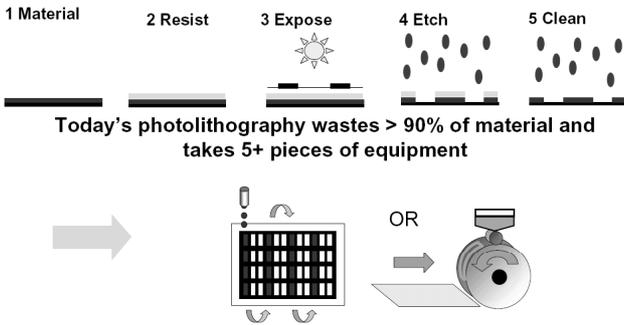


그림 5. 기존의 리토그래피법과 인쇄법의 비교.³

봄에 따라 새로운 것을 알게 되고, 다른 분야에서의 잉크젯 기술의 응용 역시 가속시킬 수 있다는 장점이 있다.

일반적으로 사용되는 프린트 기판은 반도체 등과 마찬가지로 포토리소그래피 법에 의해 제조된다. 감광제(포토레지스트)를 도포한 기판 위에 배선 마스크(포토마스크)를 겹쳐 노광한 후, 현상, 에칭, 레지스트 제거 등의 공정을 거쳐 완성된다. 이에 비해 잉크젯 방식의 경우, 필요한 부분에만 재료를 분사하기 때문에 재료 사용량이 적고 공정 수를 줄일 수 있어 공장 면적을 절감할 수 있을 뿐만 아니라, 현상액, 에칭액 등의 폐액이 나오지 않는 장점이 있다. 또한, 포토마스크를 제작할 필요가 없기 때문에, 다품종 소량생산에 적합하다. 실용화 측면에서는 포토리소그래피 법에 비해 비용을 절반 정도로 줄일 수 있는 용도에서 활용될 수 있을 것으로 예상되어, 이 분야에서의 개발이 적극적으로 검토되고 있다.

컬러필터는 최근 LCD 등 디스플레이 산업의 비약적 성장에 따라 향후 20% 이상의 성장이 예상되는 부품이다. 컬러필터는 그 자체로 이미 대형시장을 이루고 있어 2003년의 세계시장은 18억US\$로 추정되었으며, 국내의 컬러필터 수효는 연간 약 7억US\$로 추산되었다. 기존의 컬러필터 제조공법은 안료분산법(안료를 분산한 photopolymer를 이용한 포토리소그래피법)을 주로 사용하고 있으나 최근 LCD 패널의 대형화와 이의 고속, 대량, 열가생산을 위하여 잉크젯 프린팅법이나 롤프린팅법에 의한 컬러필터 생산이 적극 검토되고 있다. 특히 그림 5에 보인 것과 같이 재료 및 장비의 절감 등에 상당한 장점이 있는 것으로 파악된다.

3. 인쇄 전자 산업의 응용 분야

인쇄소자를 이용한 다양한 응용 예를 그림 6에 보인다.⁴ 여기서 보다 시피 인쇄전자 기술을 적용한 플렉서블 전자 제품의 핵심 부품은 배선과 트랜지스터로 볼 수 있다. 실리콘 트랜지스터 대신 유기 트랜지스터를 사용함으로써 인쇄 공정에 적용이 가능하고, 유연하고 가벼우며 대면적 일렉트로닉스 제품을 값싸게 실현할 수 있다.

유기 재료를 사용함으로써 얻을 수 있는 장점은 다음의 두 가지이다. 첫 번째는 플라스틱 기판 상에 비교적 용이하게 제작할 수 있다는 것으로 유기 트랜지스터는 플라스틱 기판의 내열 온도보다 훨씬 낮은 200도 이하의 온도에서 제작이 가능하기 때문이다. 실리콘 기술을 이용하더라도 플라스틱 기판 상에 트랜지스터를 형성할 수는 있으나, 일단 글래스 기판 상에 트랜지스터를 제작한 후 기판을 플라스틱으로 바꾸는 등의 복잡한 공정이 필요하다. 이러한 방법으로는 제조 공정 수가

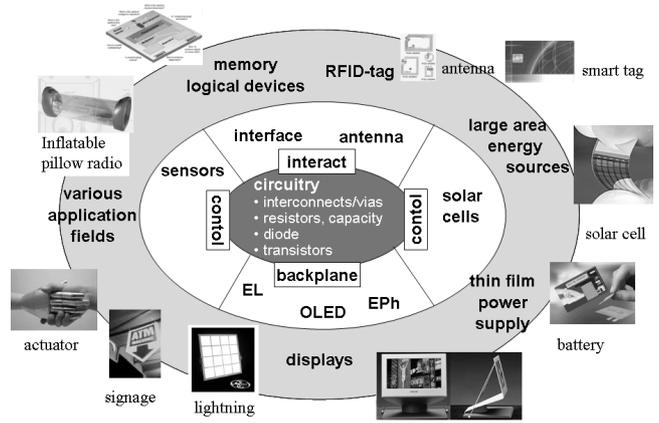


그림 6. 인쇄소자의 응용 분야 예.⁴

증가하여, 저비용화에는 한계가 있다.

두 번째는 신문을 인쇄하는 방식으로 트랜지스터를 롤투롤 인쇄로 형성할 수 있다는 점이다. 유기 트랜지스터에 사용되는 유기 반도체 재료와 배선 재료, 절연체 재료는 조금만 노력하면 모두 용액 상태로 취급될 수 있다. 이들 용액을 잉크젯 기술이나 스크린 인쇄 기술, 특히 롤투롤 인쇄 등으로 적절히 도포하면 트랜지스터의 구조를 직접 형성할 수 있다. 진공 장치를 사용하는 막의 형성, 리소그래피 기술과 에칭 공정에 의한 트랜지스터 제작 방법에서의 거대한 장치 사용과 다수의 공정이 불필요하다. 대량 생산에 용이하여 저가격화가 가능하고 플렉서블한 특징은 제품의 디자인 등에 매우 유리하다고 볼 수 있다.

결국 이러한 장점으로부터 나오는 저가격, 경량화의 특징은 성능상의 하락을 극복할 수 있으리라 생각되며 RFID 등의 신규 시장 진입이 가능하다고 예측된다. 즉, 인쇄소자 기술을 이용하여 상품의 포장에 간략하게나마 디스플레이 기능을 부여한다면 정적인 포스터가 아닌 동적인 영상을 보여주는 포스터와 같은 새로운 시장을 창출할 것이다. 또한, 벽 자체가 발광하여 조명한다거나 떨어뜨려도 동작하는 노트북이나 태양전지는 유연성을 강점으로 갖고 있는 인쇄소자를 이용하면 실현 가능성이 높다. 실리콘 IC 칩에 비해 인쇄법으로 제작되는 ID 카드와 RFID 태그 등의 제품들은 쉽고 저렴하게 생산할 수 있으며, 인쇄법으로 제작된 ID 카드는 바코드보다 복제하기가 훨씬 어렵다. 폴리 IC가 연구 중인 RFID 태그는 겨우 수천 개의 유기 TFT와 8 bit ROM을 데이터용으로 사용하므로 이들 애플리케이션은 극소량 정도의 데이터밖에 처리하지 못하지만 제한적인 애플리케이션용 ID 카드로는 충분하다고 보인다. 이와 같은 다양한 응용이 가능하면 미래는 훨씬 더 편리해질 것이고, 이런 상품이 새로운 시장을 지배할 것이다. 휴대성과 플렉서빌리티는 미래 유비쿼터스 시대의 필수적인 항목이다.

4. 화학소재 원천기술 개발사업의 구성과 세부 분야별 국내외 연구개발 동향

인쇄소자용 공액계 화합물의 원천기술을 개발하기 위하여 그림 2에 보인 것과 같은 응용 분야를 검토하였으며 전자회로에서 가장 핵심적인 트랜지스터와 배선에 관련된 트랜지스터용 공액계 화합물 재료, 이를 위한 절연막 소재 그리고 배선에 관련된 전도성 전극 소재 개발과 더불어 화상소재 및 유기 태양 전지용 소재 개발을 포함한 5개

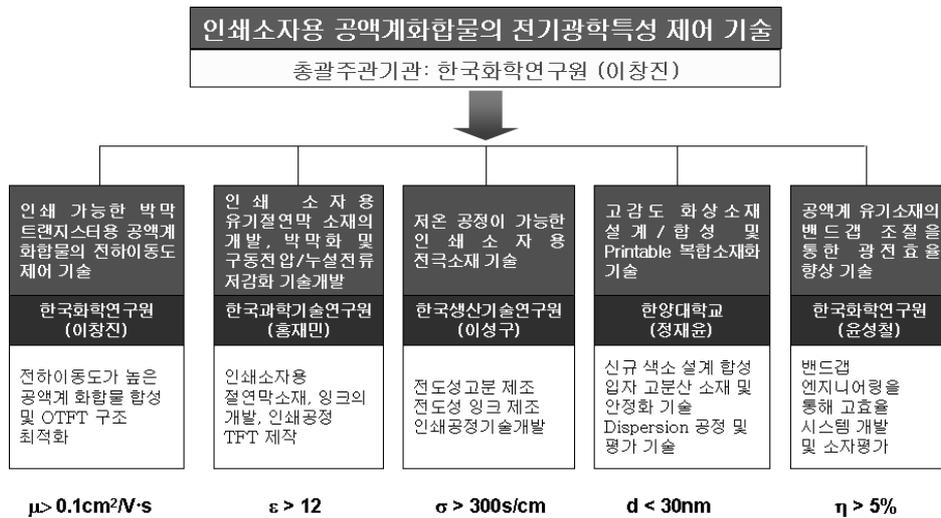


그림 7. 인쇄소자용 공액계 화합물 관련 소재 원천 기술 개발 사업 구성도.

과제를 포함한 5개 과제가 구성되었다. 이 중에서도 상당히 중요한 분야인 전기발광소재 개발은 누락되었다. 그림 7에 각 세부과제명과 간략한 연구 개발 내용 그리고 대표적인 연구 개발 목표를 보였다.

4.1 인쇄소자용 박막트랜지스터 개발 동향

전 세계에서 유럽이 인쇄소자 기술의 상용화에 가장 적극적으로 대응하고 있으며 가장 기술적으로 앞서 나가고 있다고 본다. 일본이나 한국의 업계가 대부분 디스플레이 관련된 응용에 집중하고 있고, 해결해야 할 기술적인 문제의 난이도가 높아서 시간을 끌고 있는 동안 유럽은 단순한 전자부품을 개발하는데 역점을 두고 있어 실제적인 기술의 발달은 유럽이 전반적으로 앞서 가고 있는 현실이다.

특히 유럽의 대부분의 업체는 기술을 가진 벤처 기업으로 단기간에 성과를 내야 하는 압력에 상용화가 가능한 응용에 집중하여 연구 개발을 추진하고 있다. 물론 장기적인 관점에서 디스플레이 시장 규모는 매우 크므로 이 분야에 대한 연구는 중요하다고 생각되나 새로운 특성을 지닌 신규 제품을 개발할 기회를 잃을 수 있다.

따라서, 다양한 분야에 적용이 가능한 공액계 화합물의 개발이 전제가 되어야 한다고 생각되며, 현재 인쇄공정을 이용한 유기전자소자 분야는 선진국에서도 아직 연구개발 초기단계의 기술로서 소재의 개발이 필수적으로 선행되어야 하는 분야인데, 공액화합물 소재의 개발을 위해 설계 및 합성에 관한 원천기술 개발이 어느 때보다 시급하다고 판단된다. 이러한 고이동도의 공액화합물 소재를 사용한 플렉서블 디스플레이, RFID, 메모리 등의 국내 유기/고분자 소재 시장 규모는 2015년도 약 5,000억원 수준으로 예상된다.

PARC (Palo Alto Research Center)에서 PQT-12을 인쇄공정으로 단위 박막 트랜지스터의 전하이동도 $0.06\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 을 달성하였고 50×50 픽셀 어레이(디스플레이 백플레인)에서 $0.01\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 을 달성하였다(2004년).

PlasticLogic사에서 F8T2를 스펀코팅하여 전하이동도 $0.04\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 인 단위 박막 트랜지스터를 개발하였고 전극을 잉크젯 프린팅 공정으로 제작하여 e-paper용 backplane으로 사용 가능함을 보여 주었으며, PolyIC사에서는 P3AT을 이용하여 전하이동도 $0.01\sim 0.1\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 인 단위 박막 트랜지스터를 스펀 코팅하여 개발하였으며, 또한 PlasticLogic사와 공동 연구로 인쇄공정으로 13.56 MHz RFID

태그를 개발하였다.

Merck사에서 pentacene 유도체(TIPS-pentacene, TES-pentacene) 및 기타 poly(arylamine), PBTTT 등을 개발하여 전하이동도 $0.06\sim 0.2\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 인 단위 박막 트랜지스터를 스펀 코팅하여 개발하였다. 또한, 국내 삼성전자, 삼성 SDI 및 LPL 등에 샘플을 납품하고 있다.

현재까지 국외에서 발표된 유기트랜지스터용 고분자 재료에 대한 결과를 그림 8에 보인다.

일본 미쯔비시 화학그룹 과학기술 연구센터(Mitsubishi Chemical Group Science & Technology Research Center)가 개발한 포피린 전구체(porphyrin precursor)의 경우, 전구체 용액을 코팅한 후 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 생성된 포피린 막을 이용하여 트랜지스터를 제작하였다(그림 9).⁵ 최대 캐리어 이동도는 $1.8\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 유기TFT 임계점 5 V, 온/오프 비(온/오프 전류비)는 10^5 이며, 온도 $50\text{ }^\circ\text{C}$, 습도 50%에서 테스트한 결과, 2백 시간 후에도 캐리어 이동도는 떨어지지 않는 매우 우수한 결과를 발표하였다.

상기 국외 결과에서 파악되는 바와 같이 증착한 유기계 트랜지스터는 전하이동도가 $0.1\sim 1\text{cm}^2/\text{Vs}$ 내외로 상당히 높게 나온 반면 스펀 코팅의 경우 $0.01\sim 0.2\text{cm}^2/\text{Vs}$ 정도로 5배 내지 10배 정도 낮게 관측되었으며, 인쇄법으로 제조한 경우에는 스펀코팅보다 대략 10배 정도 낮은 값을 보이는 것을 알 수 있다. 또한, 일반적으로 전구체에서 제작된 필름의 물성이 우수하게 나타나 열처리 온도가 대부분 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 이상이므로 플라스틱 기질에 적용하기에는 적합하지 않다.

그 밖에 유기 박막트랜지스터를 이용한 가스센서, 압력센서 및 메모리는 도쿄대, 코벨대 및 AIST 등 많은 대학과 연구소에서 개발 초기이다. 유기TFT를 사용하는 인쇄전자 기술의 색다른 애플리케이션으로는 일본 도쿄대 연구그룹이 개발한 전기공급 시트가 있다. 시트 내부의 코일과 시트 위에 있는 물체 내부 코일 간에 비접촉식으로 전력의 전달이 이뤄진다. 별도의 코일을 사용하여 물체의 존재를 감지하고 물체 아래에 있는 전달 코일에만 전력을 공급한다. 물체는 최대 $29.3\text{ W/inch}^2/\text{coil}$ 을 얻게 되며, 최대 전달효율은 62.3%다. 유기 반도체를 만드는 데에는 진공 기술이 사용됐지만 금속 막은 인쇄됐다.

국내에서는 주로 디스플레이 관련 연구에 치중되어 있으며, 차세대

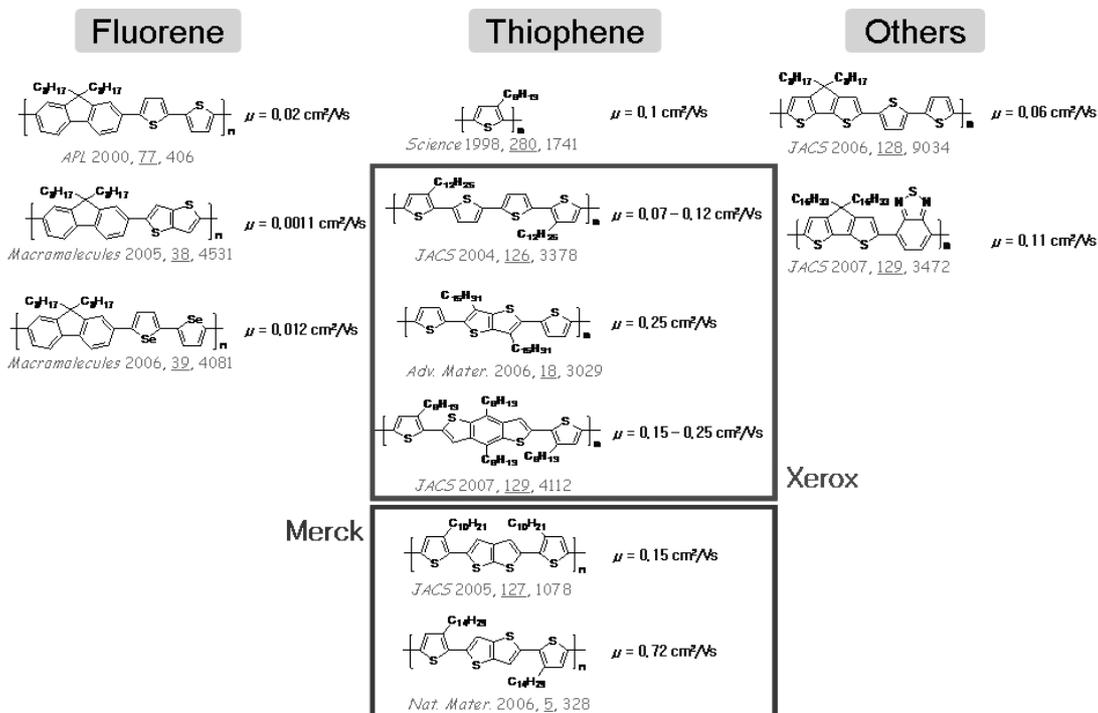


그림 8. 대표적 고분자 트랜지스터 재료의 화학 구조 및 전하이동도.

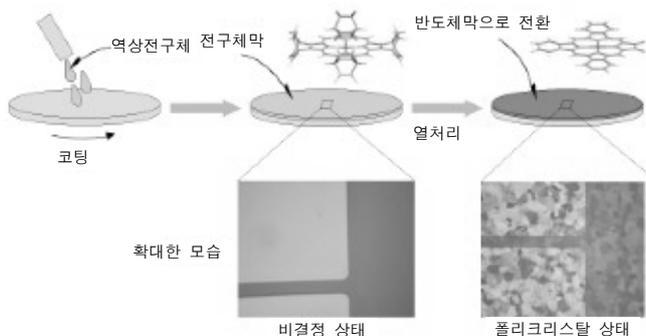


그림 9. 포피린 전극체를 이용한 유기트랜지스터.^{2,5}

정보디스플레이 사업단, 삼성전자 및 LG 필립스 LCD 등에서 연구 개발을 추진 중이다. 주로 디스플레이 백플레인용으로 개발 중이며 단위 유기 박막트랜지스터로는 세계 최고인 $7 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 을 달성했으나 이는 pentacene을 진공 증착하여 박막을 형성한 경우이다. 인쇄공정으로 제작한 유기 박막트랜지스터 백플레인의 전하이동도는 $0.03 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 이나 디스플레이 동작에 성공하지 못하였다. 최근 삼성중공업에서 결정성을 갖는 고분자를 이용한 박막트랜지스터를 제작하였는데 인쇄법을 이용하여 $0.4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 의 전하이동도와 10^7 이상의 점멸비를 얻었다.⁶ 이는 국외 수준과 비교하여도 우수하다고 생각된다.

ETRI에서 pentacene을 진공 증착하여 AMOLED용 백플레인에 성공하였으나 인쇄공정으로 유기 박막트랜지스터 개발은 계획 중이다. 또한 포터에서 사업인 차세대 정보디스플레이 사업단에서 동아대 및 경희대 등에서 진공증착법으로 제작되는 유기 박막트랜지스터를 연구하고 있으며, 용액공정용 공액계 화합물 합성을 추진하고 있으나 인쇄공정용 유기 박막트랜지스터 소재 합성의 연구는 아직 미미하다.

순천대 및 파루에서 SW-CNT를 이용한 박막트랜지스터로 RFID의 개발을 추진 중이며, 지경부의 프론티어 사업으로 경상대, 서울대,

화학(연) 등이 같이 연구를 수행하고 있으며, 백플레인 등에 대해서는 LGD 등이 연구를 수행 중이며 주로 디스플레이 관련된 TFT 개발에 치중하고 있다.

4.2 유기 전극 재료

독일의 Ormecon사는 폴리아닐린을 나노입자화하여 유기용매에 분산시킨 제품을 개발하여 Ormecon이라는 제품을 출시하였는데 전도도는 약 20 S/cm 정도이다. 독일의 바이엘사는 폴리티오펜 유도체인 PEDOT의 나노입자를 수용액에 분산시킨 제품 Baytron을 판매하고 있는데, Baytron은 가공성은 뛰어나지만 코팅되었을 때 전도도는 1 S/cm 정도이다. 독일의 아그파사는 폴리티오펜 유도체를 이용하여 Orgacon이라는 이름으로 전도성 용액과 전도성 필름을 출시하였다. 그러나 동 제품은 전도도가 낮고, 필름의 경우 불균일한 단점을 가지고 있다.

미국의 TDA research사는 PEDOT와 PEG의 공중합체를 합성하여 다양한 도펀트를 함유한 제품을 개발하였다. 이 제품은 유기용매에 쉽게 용해되는 장점을 가지고 있으나 전도도가 0.3 S/cm 정도로 낮다는 단점을 가지고 있다.

미국의 DuPont사는 전도성 고분자와 탄소나노튜브의 복합체를 전극으로 개발하여 갭이 $7 \mu\text{m}$ 이고, 선포이 $500 \mu\text{m}$ 인 전극 라인을 인쇄하여 소스/드레인 전극으로 사용하였다. 특히 이렇게 제작된 전극을 이용한 OTFT 소자의 전하이동도는 금 전극을 사용한 소자보다 높게 관측되어 유기전극이 OTFT에서 유리할 수도 있다는 것을 암시하고 있다.

인듐주석산화물(ITO)을 전도성 고분자로 대체한 OLED 소자가 OLLA 내부에서 시연되었다(그림 10). ITO는 OLED와 액정 디스플레이(LCD) 패널에서 전도성 애노드 물질로 흔히 사용되고 있는 투명 전극이다. 평판 디스플레이에 대한 수요가 계속 증가해서, 금속 인듐의 가격은 2002년의 kg당 60달러에서 현재의 1,000달러로 매우 비

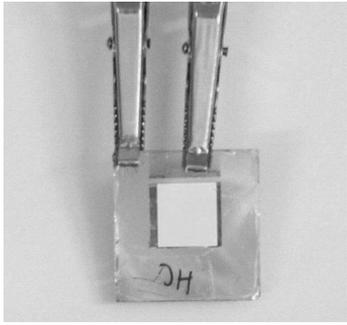


그림 10. 전도성 고분자를 전극으로 사용한 OLED 소자.

짜졌다. OLED가 조명 응용 분야에서 더 많은 관심을 얻음에 따라, 인덱스 소비는 앞으로 더욱 증가할 것으로 예상되어 ITO를 대체하기 위해, 새로 개발된 전도성 폴리머가 OLLA 프로젝트에서 채용되었다.

개발된 물질은 Baytron(R)이라고 불리는데, OLED 응용에 사용하기 위한 높은 전도성과 우수한 광학적 특성에 도달하기 위해 특별히 맞춰졌다고 하며, Baytron(R) PH500은 새로운 계통의 전도성 폴리머, 폴리(3,4-에틸렌다이옥시티오펜) 폴리(스티렌술포네이트)로 일반적인 스펀코팅, 인쇄 혹은 잉크젯 기술에 의해 용해 상태로 응용될 수 있다. OLLA (Organic LEDs for ICT & next generation Lighting Applications) 프로젝트는 유럽에서 OLED를 조명용으로 사용하기 위해서 지원하는 프로젝트로 2008년까지 긴 수명과 고효율을 갖는 백색 OLED 조명 타일을 개발한다는 목표를 가지고 있다.

ITO 대신에 PH500을 양극으로 사용한 OLED 인광 소자의 경우, 1,000 cd/cm² 밝기에서 18.7 lm/W의 효율이 측정되었는데, 이것은 굉장히 높은 값으로 PH500이 ITO보다 훨씬 더 효율적으로 정공을 전달한다는 것을 보인 것이다. 그러나, 아직 1 cm² 크기의 소자에서만 입증되었을 뿐이어서 더 넓은 면적에 대한 추가 연구가 필요하다.

국내의 경우에는 업체에서 전도성 고분자를 전극용으로 개발하는 예는 찾아보기 힘들었으며, 대부분 대전방지용 코팅으로 사용하고 있다. KIST, 순천대, 고려대, 아주대, 명지대, 성균관대, 국민대 등의 일부 대학에서 전도성 고분자 혹은 도전성 고분자 복합체를 합성하거나 응용 연구를 수행하고 있는 실정이다. 그러나, 이러한 용액공정이 가능한 전도성 고분자도 아직 전극용으로 적용하기에는 코팅공정과 전기전도도 측면에서 미흡하여 지속적인 연구가 필요하다.

4.3 고감도 화상소재 설계/합성 및 Printable 복합소재

칼라 밀베이스 개발에 선두를 달리고 있는 도요잉크의 경우에는 green, red, blue 안료의 특성에 맞는 모폴로지의 개발 및 결정화도를 개선하는 안료 전처리기술을 개발하여 색선명성이나 분산안정성을 확보하고 있다. 분산기술에서 가장 핵심적인 것은 열역학적으로 불안정한 나노입자를 안정화하는 시스템의 개발로 이때의 분산조제의 설계 및 분산제의 선정이 핵심이라 할수 있으며 도요잉크는 이러한 관점에서 기술개발에 주력하고 있다.

안료의 3차입자를 1차입자로 분산하였을 때의 계면과 분산공정 시 필연적으로 수반되는 1차입자의 파쇄에 의한 비결정질의 형성에서 이를 안정화하기 위해 분산된 안료계면과 친화력을 가지며 분산제와의 결합력을 가진 분산조제 또는 안료의 유도체의 개발이 필연적이다. 현재 안료에 적합한 분산조제 system을 도요잉크, DIC(Dainippon Ink & Chemical), Dainichiseika Color & Chemical이 계속적으로 연구 개발하고 있다.

또한, red에서 가장 요구되어지는 기술은 high contrast ratio와 열안정성이다. High contrast를 구현하기 위하여 red 안료는 안료유도체에 의해 표면처리 되어지거나 이중의 안료를 첨가하여 co-salt milling의 공정이 특히나 문헌에 보고되어지고 있다. Red 안료는 안료의 texture가 낮아 분산 시 쉽게 비결정질을 형성하며 이렇게 형성된 비결정질은 칼라필터의 제조 공정에 있어서 색 변화를 일으키며 이 문제를 해결하기 위한 많은 시도가 보고되고 있고 특히 미쿠니에서는 열적 안정성이 뛰어난 고분자의 개발이 특히에 보고되고 있다.

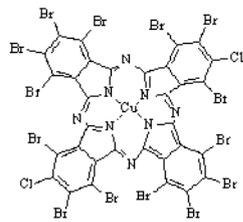
국내의 image sensor용 pigment는 대부분 해외 수입에 의존하고 있는 상황이고 사용되는 색상별 분류는 기본색인 red, green, blue에 고감도 색상 구현을 위하여 violet, yellow, magenta, orange 등이 적용되고 있는 실정이다. 각 색상별로 pigment는 보색에 해당하는 파장의 흡수가 강해야 하며 이는 해당파장의 흡광계수가 높아야 함을 의미한다. 또한, 해당파장의 흡수폭이 매우 좁아야 선명하고 고감도의 색상을 구현하므로 흡수파장의 FWHM value가 우수하여야 한다. 여기에 해당 파장 이외의 기타 흡수 peak가 없어야함은 물론이다. 아울러 이들 pigment는 water soluble 시스템이 아닌 solvent 사용 시스템을 감안하여 구조식이 제안되고 합성되어야 한다.

해외에서 수입 사용되는 대표적인 안료를 살펴보면 green36, blue 15:6, yellow 150, yellow 138, red 254, red 177 등으로 언급할 수 있다(그림 11).

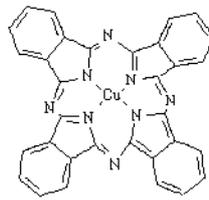
현재 전 세계시장의 90% 이상, 국내 시장의 95% 이상을 Fuji Film Electro Material사에서 독점적으로 공급되고 있으며, 기술 수준은 2003년 300 nm 회로 선폭에 따른 5.0 um의 RGB pixel 구현용 감광재료를 공급하였으며, 2007년에는 180 nm 회로선폭에 따른 1.7 um pixel 구현용 감광재료를 공급할 것으로 예상하며, 이후 계속적으로 독점적 지위를 가지고 기술개발이 진행될 것으로 판단되며, 또한 이미지 센서용 감광재료 업계의 경쟁사가 거의 전무함에 따라 업체 간 기술력의 비교 분석은 어려운 실정이다.

국내 여러 업체에서 칼라 밀베이스 개발을 진행하고 있지만 연구개발 설비 및 기술력 부족으로 성과를 거두지 못하고 있다. 또한, 칼라 밀베이스용 안료의 공급가격이 일본 내 공급가격에 비해 1.5~2.0 배 가량 높은 뿐만 아니라 공급 자체도 거의 불가능한 실정이다. 연구개발 설비로는 고가의 시험분석 및 측정 장비 다수가 필요한 분야이며, 여러 학문이 integration된 다수의 전문가와 그를 보유한 회사만이 성공적으로 개발할 수 있다. 하지만 국내업체 가운데 이와 같은 설비와 인력을 갖춘 업체는 현재로서는 거의 없다. 구축된 산, 학, 연 공동연구체계 및 연구인력 양성기반을 최대한 집중 활용하기 위한 프로그램이 부족하여 지금까지 성공적인 개발이 불가능하였으나 부품소재에 대한 인식의 변화와 인프라의 공동 활용으로 인하여 그 어느 때 보다도 성공할 수 있는 기반 여건은 조성된 상태이다. 표 1에 국내 칼라필터 기술 개발 현황에 대해 정리하였다.

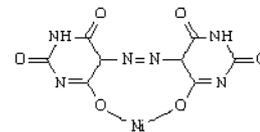
그 동안 전통적인 사업의 대명사인 안료업체(예, 옥성화학)와 4~5년 정도의 연구개발 수행으로 기반 기술 확보를 목전에 둔 color mill base(ENF, PANAX EM) 업체와 일본원료 평가에만 주력을 해온 color PR업체들의 인식전환에 의한 공동협력 체제 구축이 용이하게 됨에 따라 원천기술 확보가 가능한 환경이 조성되어 있다고 판단된다. 특히 최근 다국적 기업인 솔베이스가 울산에 투자를 하여 안료관련 사업을 추진 중이어서 국내에서도 안료, 안료분산제, 컬러필터 포토 레지스터 등의 사업의 수직 계열화가 가능하게 되었다.



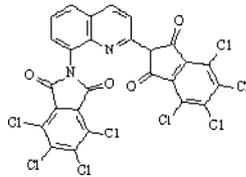
C.I. pigment Green 36



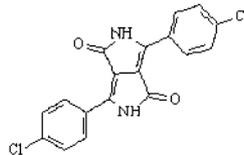
C.I. pigment Blue 15:6



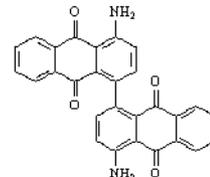
C.I. pigment yellow 150



C.I. pigment yellow 138



C.I. pigment Red 254



C.I. pigment Red 177

그림 11. 대표적 안료의 구조.

표 1. 국내 칼라필터 기술개발 현황

구분	지원사업	개발단계	과제명	개발주체
산자부	부품소재기술 개발사업	Pilot	LCD칼라필터(ColorFilter)용 잉크젯잉크개발	(주)엔디엠
			BM 레지스트용 고차광성 안료분산체 개발	(주)파낙시엠
기업 연구	자체예산	기술 검토	이미지센서용 칼라 포토레지스트의 개발	동우화인켄(주)
			이미지센서 칼라밀베이스 분산기술 개발	(주)파낙시엠
중소 기업청	신기술아이디어 타당성 평가	기술 검토	LCD 컬러필터용 안료분산형 포토레지스트 개발	한국과학기술 정보연구원
중소 기업청	중소기업 기술혁신개발	Pilot	LCD컬러필터용 안료분산형 포토레지스트개발	씨엔에이인더스트리

반도체 이미지 센서용 감광재료 분야로 특화된 국내 기술개발은 현재 시작하는 정도의 수준이나, TFT-LCD color filter용 감광재료에 관련한 color mill base 기반기술을 2~3년내 확실히 보유 가능함에 따라, 그 접근성이 매우 용이할 것으로 판단된다.

4.4 공액계 유기소재의 밴드갭 조절을 통한 광전효율 향상기술

고효율 박막형 유기태양전지 실현을 위한 하나의 분야로 이어져 온 전자주계-전자받계 블랜드 막을 사용한 박막형 유기태양전지에 관해 미국의 A. J. Heeger, N. S. Sariciftci 그룹 및 유럽과 일본의 몇몇 그룹에서 활발하게 진행되고 있다. 주로 용액공정을 통해 소자 제작을 하는 경우, 대표적인 전자주계 재료로는 폴리페닐렌비닐렌계 재료와 폴리(3-알킬티오펜)과 이들의 공중합체들이 이용되고 있으며, 전자받계 재료로는 PCBM이라는 메타노플러렌 유도체가 사용되고 있다. 폴리페닐렌비닐렌 유도체중의 한 가지인 MDMO-PPV와 PCBM을 이용한 소자의 경우, 1.5% 내외의 에너지 변환효율을 보여주었다. 반면에 2003년 P3HT[폴리(3-헥실티오펜)]과 PCBM을 이용하여 제작한 소자를 열처리하므로써 분자배열을 조절해 결정성을 변환하고 PCBM의 응집을 개선하여 3% 이상의 고효율 달성이 가능하였으며 이를 통해 박막형 유기태양전지의 관심을 집중시키는 계기가 되었다

표 2. P3HT:PCBM을 이용한 유기태양전지 소자의 후처리를 통한 발전 현황

년도	저자	Active Layer	후처리공정	에너지 변환효율
2003	J. C. Hummelen	P3HT:PCBM(1:4)	pristine	0.2%
2003	F. Padingger	P3HT:PCBM(1:1)	75 °C 4분간 annealing	3.5%
2004	C. J. Brabec	P3HT:PCBM(1:1)		5%
2005	M. Reyes-Reyes	P3HT:PCBM(1:0.6)	155 °C 3분간 annealing	5.2%
2005	Y. Yang	P3HT:PCBM(1:2)	용매 증발속도 조절	4.4%
2005	D. Carroll	P3HT:PCBM(1:0.8)	155 °C 5분간 annealing	4.9%
2006	Y. Kim	P3HT:PCBM(1:1)	140 °C 120분간 annealing	4.4%
2006	P. Schilinsky	P3HT:PCBM(1:1)	Ca-Ag cathode/xylene 용매	5%
2006	K. Lee	P3HT:PCBM(1:0.8)	TiOx optical spacer 이용	5%

(표 2).

이후 유기박막의 성막공정을 개선하고, cathode와 유기막 계면을 개선하는 등의 발전을 통해 5%내외의 에너지 변환효율을 달성하고 있다. 하지만, 최고 효율을 보여주는 박막형 유기태양전지의 재료들은 거의 모든 그룹에서 동일한 재료를 사용 중이며(P3HT[폴리(3-헥실티오펜)]와 메타노플러렌 유도체인 PCBM) 보다 높은 광전변환효율을 달성하기 위해서는 재료적인 측면에서의 접근이 이루어지지 않는 이상 어렵다고 보아야 할 것이다. 이러한 이유로 인해, 광전변환효율의 극대화를 위한 공액계 유기/고분자 소재의 개발이 시급하며 기술적인 선점을 통해 소재의 원천기술 확보를 통한 기술적 우위를 달성할 수 있을 것으로 사료된다. 유기박막 태양전지와 관련된 국외 기업의 현황을 표 3에 보인다.

2007년 현재 미국의 Konarka사와 네델란드의 DPI(Dutch Polymer institute) 및 기타 미국, 유럽, 일본의 학계에서 Lab단계의 단위 소자 중심의 연구개발이 진행되고 있는 상황이다. 특이할 만한 것은 2007년 3월 미국 DOE에서 태양전지개발관련 신규 사업이 발족되었는데, 연간 \$51,600,000 규모의 연구비로 13개의 기업이 참여하는 프로그램이 시작되었다. 이 중에서 Konarka사는 연간 \$1,200,000 규모로 3년간 염료감응 유기태양전지를 포함하는 유기태양전지관련 연구를 계획하고 있다. 이 프로그램을 통해 2015년까지 kWh당

표 3. 해외 주요국의 유기태양전지 기술개발 현황

구분	기술명	개발단계	개발 내용	개발주체
DOE, US	Next Generation PV-Organics	Pilot	Building-integrated Organic Photovoltaics	Konarka(미국)
-	Conjugated polymer	Lab	Conjugated polymers for OPVC	UCSB(미국)
-	Push-pull copolymers	Lab	Push-pull copolymers for OPVC	HP(미국)
-	donor/acceptor Materials	Lab	Organic materials for OPVC	DPI(네덜란드)
자체 개발	전사법	Lab	전사법을 이용한 유기박막 태양전지	Dainippon Printing Co.(일본)
자체 개발	광전변환 소자	Lab	벌크헤테로접선 유기 태양전지용 소재 개발	Mitsubishi Chemicals(일본)
자체 개발	광전변환소자	Lab	안테나 포피린 집합체를 이용한 유기태양전지	Sony(일본)

\$0.1이하의 평균화발전원가(LCOE, Levelized Cost of Energy)와 1,000~3,000 MW의 용량의 생산량을 달성하겠다는 목표를 가지고 있다(Overview of Solar America Initiative Awards, March 8-9, 2007, DOE).

올해 Konarka에서 발표한 실험 결과로부터는 플렉시블 유기태양전지가 가속 시험 조건에서 1,000시간 이상의 안정화 수명을 가지고 있으며 rooftop 테스트에서 일년 이상의 수명을 갖는 것을 발표하였다(그림 12).⁷

최근 들어, 국내에서도 유기전자소자(organic electronics)를 연구하는 몇몇 그룹들에 의해 연구가 시작되고 있다. 정부의 에너지 지원 정책과 더불어 관심이 폭발적으로 증가하고 있는데, 앞서 설명한 바와 같이 동일한 재료들을 이용해 소자구조를 변형하여 효율을 향상시키는 연구가 대부분이며 신규 소재 개발관련 연구는 많지 않다.

부산대에서 교육과학기술부의 지원으로 택토닉 분자구조 설계에 의한 p-공액고분자 나노복합체 하이브리드형 재료합성 및 유기태양전지 응용, 신기능 고효율 광전소자를 위한 점진적 나노구조 제어기술 개발 등이 지원되었으며, KAIST에서 유기 고분자 태양전지 개발에 관한 기초연구를 수행한 바가 있으며 한국화학연구원에서는 지경부의 핵심연구개발 사업의 지원으로 광전소자용 기능성 고분자소재개발 등을 수행한 바 있다. 또한, 올해 지경부의 신재생에너지 원천기술개발사업의 일환으로 광주과학기술원에서 프린팅 기법에 의한 고효율의 적층형 플라스틱 태양전지 개발, 한국화학연구원에서 차세대 유기박막 태양전지용 원천소재 개발 등의 사업을 올해부터 추진 중에 있다. 유기태양전지 분야에 선진국의 소재 독과점이 더욱 심화될 가능성이 크므로 국가적인 차원에서 지원과 기술개발이 필요하다고 생각되며, 이를 통해 소재 원천기술의 확보가 충분히 가능할 것으로 기대된다.

5. 결론

목판인쇄는 7세기 중국에서 시작되었다고 알려져 있으며 이후, 서기 740년경에 각각 동·서양에 전파되었다. 경주 불국사에서 발견된 무구정광대다라니경(無垢淨光大陀羅尼經)은 현존하는 세계 최고의 목판 두루마리 인쇄물이며 또한 고려시대에 제작된 팔만대장경 등은 세계적

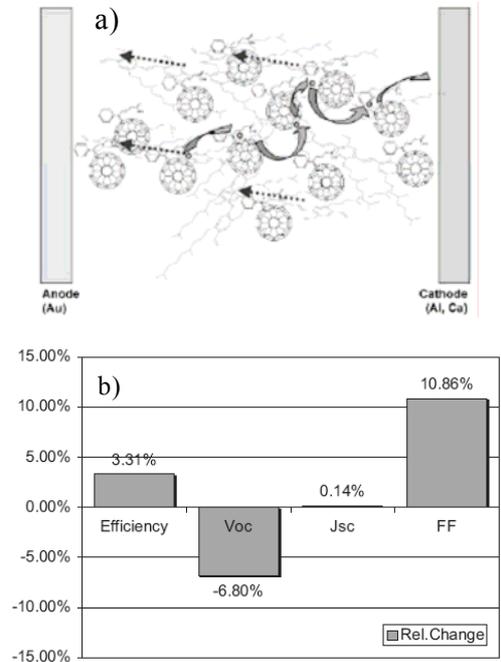


그림 12. (a) Bulk heterojunction 고분자 태양전지의 전하이동에 대한 모식도, (b) 1년 rooftop 테스트 후의 유기태양전지의 성능 비교.⁷

으로 귀한 유산이다. 특히, 세계에서 가장 오래된 금속활자본인 백운화상초록불조지직심체요철(白雲和尚抄錄佛祖直之心體要節) 역시 우리 선조의 기술로 자랑할 만하다. 21세기에 들어 전자기술에 인쇄기술이 접목되는 현 시점에서 우리가 선조에 못지않은 기술을 개발해야겠다는 각오가 필요하며 기존의 전자기술보다 훨씬 더 융복합기술이 강조되는 인쇄전자 기술개발은 우리가 신념을 가지고 꾸준히 노력하면 선진국보다 앞선 기술개발이 가능하다고 생각한다.

참고문헌

1. "Innovations with printed polymer electronics", W. Mildner, *Proceedings of Printed Electronics Europe 2006*, Apr. 19, Cambridge, U.K., 2006.
2. "인쇄전자 시대 '성큼, 전자부품도 인쇄하라!'", S. Ookubo, *Nikkei Electronics Asia*, 3 (2007).
3. "Inkjet printable flexible display circuitry Comparing inkjet printing to conventional processes", K. Vanheusden, *Printed Electronics EUROPE 2006*, Cambridge, UK, 2006.
4. Printed Systems의 CTO인 A. Huebler박사와 Pixdro의 D. Muallem 부사장이 *Printed Electronics EUROPE 2006*, Cambridge, UK에서 발표한 내용을 조합하고 일부 사진을 대체하여 제작한 그림임.
5. S. Aramaki, Y. Sakai, and N. Ono, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 2085 (2004).
6. "Active Matrix E-paper using Printed TFT Array", B. Koo, *Printed Electronics EUROPE 2008*, Dresden, Germany, 2008.
7. J. A. Hauch, P. Schilinsky, S. A. Choulis, R. Childers, M. Biele, and C. J. Brabec, *Sol. En. Mater. Sol. Cells*, **92**, 727 (2008).
8. C. J. Brabec, *Sol. En. Mater. Sol. Cells*, **83**, 273 (2004).