

Roll-to-Roll 프린팅 공정 및 장비 기술

이 글에서는 PEMS 제품 생산을 위한 roll-to-roll 프린팅 공정 및 장비 기술에 대해 소개하고자 한다.

21세기에 들어와 선진 각국은 차세대 성장기술 개발에 국가적 역량을 기울이고 있다. 그 중 하나가 제2반도체인 폴리머 칩에 의한 가격 부담이 없는 RFID 태그, 스마트 센서, 플라스틱 태양전지 등의 생산 프로세스를 개발하여 유비쿼터스 환경 구축에 총당될 새로운 제품의 대량생산 기술이다. 이러한 인쇄전자소자(printed electronics)를 대량으로 생산할 수 있는 유일한 방법으로 주목되고 있는 것이 롤투롤(roll-to-roll) 인쇄 방식을 이용한 생산 시스템이다. 이러한 생산 방식이 상용화되기 위해서는 전도성 잉크, 전도성 폴리머 등의 전자 잉크와 인쇄 장비의 두 가

지 기술이 확보되어야 한다. 유기 폴리머와 무기 나노 입자 물질은 상온에서 비교적 쉬운 방법으로 액체 용액의 잉크로 만들어 인쇄에 폭 넓게 적용할 수 있도록 인쇄에 필요한 점도와 레올로지 특성을 조절할 수 있다. 이처럼 쉽게 인쇄와 코팅에 활용할 수 있는 전자기능성 잉크가 확보된다면 IC 전자회로를 인쇄방식으로 값 싸게 생산할 수 있을 것으로 보는 것이다.

우리나라는 이런 잉크 소재 개발도 중요하지만 이를 활용하여 생산할 수 있는 인쇄 공정기술과 장비를 확보하는 문제가 다른 선진국과 달리 심각하게 고려되어야 한다. 전자소자의 인쇄는 기존

인쇄기와 달리 마이크로 선 패턴을 구현하는 새로운 인쇄기와 공정기술이 필요하기 때문이다. 이미 고급 인쇄 장비의 기반기술을 확보하고 있는 선진국에서는 잉크 개발과 거의 동시에 생산 장비도 개발할 수 있지만 우리나라는 여건이 그렇지 못하다. 국내 신문사에서 도입하는 고급 윤전 인쇄기들의 예까지 가지 않아도 4~6도 오프셋(offset) 인쇄기를 생산하는 기술도 우리는 확보하지 못하고 있어 독일, 일본, 미국 등 선진국과의 기술 격차가 매우 큰 실정이다. 장차 이와 같은 전자소자의 인쇄가 유비쿼터스 기반을 형성하는 데 막대하게 소요되는 RFID 태그와 무선센서 등

최 병 오 | 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부, 책임연구원
김 충 환 | 한국기계연구원 정보장비연구센터, 선임연구원

_e-mail : bochoi@kimm.re.kr
_e-mail : chkim@kimm.re.kr

을 생산하는 기술로 크게 사용될 전망에 따라 선진국의 관련 기업과 연구소, 정부들은 21세기에 들어오면서 연구·개발에 이미 상당한 투자를 지원하고 있다. 핀란드의 Oulu 대학팀의 Seppo Leppävuori 교수는 최근 미세한 전자회로 인쇄를 위한 사전실험 결과⁽¹⁾를 발표하였는데 현재 나노 사이즈의 은가루로 만든 PTF잉크를 사용하여 roll 인쇄의 가능성을 검토하였다. 같은 핀란드의 VTT 연구팀은 PANI-DBSA(polyaniline-dodecylbenzenesulfonic acid)의 전도성폴리머로 잉크를 만들어 1.7m/sec의 고속 그라비아(Gravure) 인쇄를 하여 잉크, 인쇄속도, 인쇄압 그리고 전도도에 관한 기초실험을 수행하였다.⁽²⁾ 영국 Brunel 대학의 D.J. Harrison 교수는 코일, 콘덴서, 자판의 멤브레인 스위치 등을 유연한 종이나 플라스틱 필름에 평판 오프셋 인쇄를 처음으로 시도한 국책연구를 수행하였다.^(3,4) 미국의 GE와 태양전지로 유명한 ECD Ovonic의 기계개발 프로젝트는 미 상무성 국가표준기술연구소(NIST)의 연구자금 지원으로 4년간에 걸쳐 그라비아 인쇄 프로세스와 스크린 인쇄 프로세스를 조합한 롤투롤(roll-to-roll) 방식의 전자인쇄물 대량인쇄기의 개발을 세계최초로 추진하고 있다.⁽⁵⁾ 따라서 우리는 이러한 롤투롤 방식에 의한 전자소자 생산

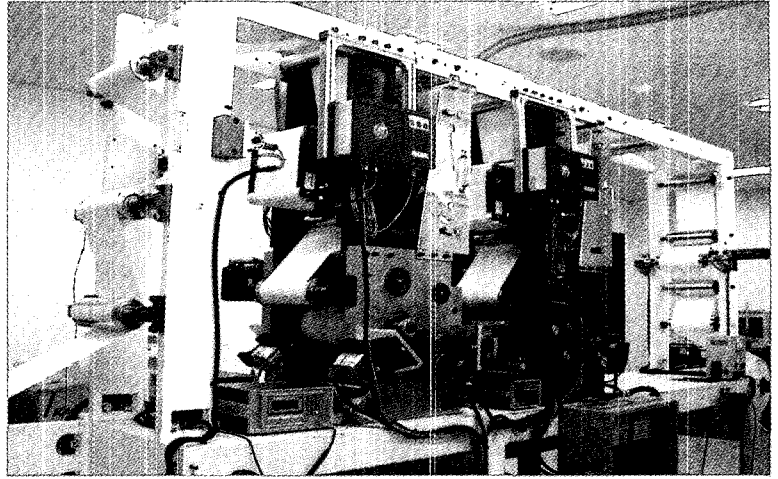


그림 1 PEMS 소자 생산용 Roll-to-Roll 프린팅 장비(자료 : 한국기계연구원)

기술을 확보하지 못하면 우리는 고급 인쇄기에 이어 또다시 세습적으로 선진 외국의 기술독점에 희생될 우려가 크다. 따라서 새로운 인쇄 장비 개발에 선행적으로 대처하여 세계시장에서 관련 산업의 경쟁력을 확보하고 고유의 기술을 축적할 필요가 있다.

이러한 필요에 따라 한국기계연구원에서는 향후 전자소자 인쇄 산업을 대비할 수 있는 기초 기술 확보를 위해 고도화된 인쇄기 설계기술을 확보하고 실험을 통하여 마이크로 인쇄기술과 중첩인쇄기술을 개발할 수 있는 롤투롤 공정에 의한 프린팅 공정 및 장비의 개발을 수행하고 있다.

Roll 프린팅 공정

여기서는 롤 프린팅 공정의 개념과 롤 프린팅 공정을 이용한 미세 선폭 인쇄 실험에 대해 언급하고자 한다.

평판 오프셋 공정

평판 오프셋 인쇄는 물과 기름의 반발성을 이용한다. 평판 형태의 인쇄판 위에 비화선부는 친수성 상태로 화선부는 친유성 상태를 유지하여 인쇄가 가능하도록 한다. 그림 2와 같이 평판 오프셋의 인쇄방법은 습수라고 하는 친수성 물질을 롤러를 통해 제판 표면에 고르게 바르고 그 위에 원하는 색의 잉크를 바르면 잉크는 친유성 물질이므로 친수성인 비화선부에는 묻지 않고 친유성인 화선부에만 묻게 된다. 인쇄방법에서 오프셋이라 표현되는 방법은 기본적으로 제판과 피인쇄체 사이에 전달자 역할을 하는 블랑켓 실린더가 위치하고 있다. 제판과 피인쇄체가 직접 접촉하는 방식보다 정밀한 인쇄가 가능하며 고급인쇄에 널리 사용되는 방법이다. 또한 제판형태가 실린더 형태인 관계로 고속회전하면서 다량의 인쇄물을 빠른 시간에

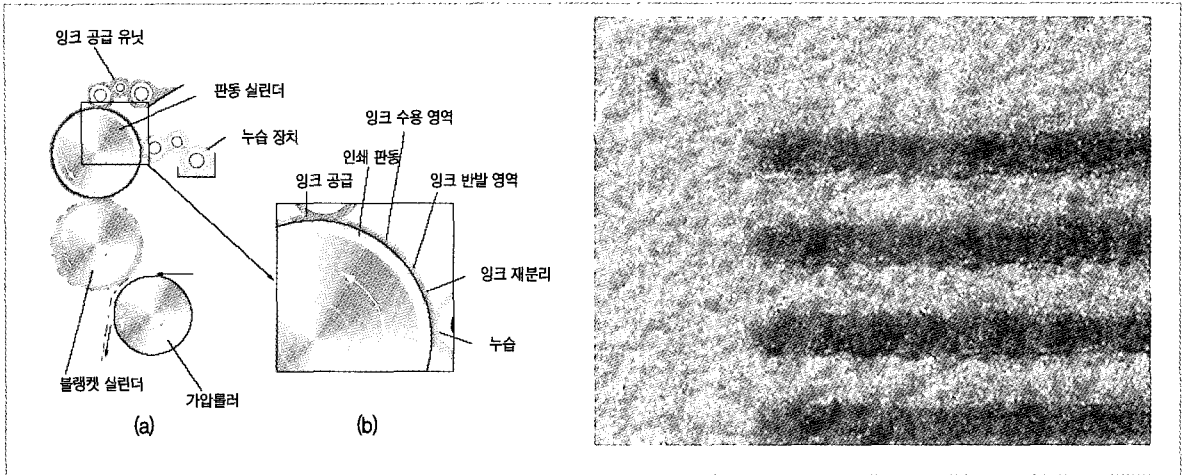


그림 2 오프셋 프린팅 공정과 오프셋 프린팅용 미세 패턴

인쇄할 수 있어 그 생산성이 매우 높은 방법이다.

평판 오프셋의 제판방법은 현재 PS판을 주로 이용하며 PS판은 디아조 감광재를 사용하는 것으로서 중크롬산 감광재를 사용하는 평요(凹)판이나 난백판에 비해 보존성이 대단히 크며, 온도 및 습도의 영향을 받지 않으므로 암반응 및 계속반응 같은 제판처리상 많은 불안정 요소가 없어 매우 안정된 판이다. 이러한 PS판에 원하는 인쇄패턴을 노광하고 현상하면 빛을 통과하지 않은 부분(비화선부)은 감광액이 팽윤되어 떨어져 버리고 빛을 통과한 부분(화선부)만 감광막이 경화되어 판면에 남는다. 이렇게 되면 표면 현상 잉크를 받아들이는 사물의 바탕이 되어 판의 화선부가 된다.

그림 2에서 진한 선으로 표현된 부분이 화선부이며 나머지 부분은 알루미늄 금속 표면이다. 선

폭과 선 간격은 각각 $20\mu\text{m}$ 로 구성되어 있다.

그라비아 오프셋 공정

그라비아 인쇄도 요판이기 때문에 오목한 홈에 잉크를 채우고 그림 3에서와 같이 blade를 사용하여 남은 잉크를 긁어내고 피 인쇄체에 인쇄압을 가하여 인쇄하는 방식이다. 그라비아 오프셋 인쇄 방법은 그라비아 인쇄에서 제판과 피 인쇄체 사이에 블랭킷 실린더가 있어 보다 정밀하고 선명한 인쇄를 가능하게 하는 방법이다. 전형적인 이미지 인쇄에서는 그라비아의 잉크를 채우는 홈이 대단히 작은 정사각형의 피막 같은 것으로 되어 있으며 제판전체의 표면에 무수히 만들어져 망목과 같이 질서 정연하게 벌려져 있다. 이와 같이 사방에 똑으로 둘러 쌓인 작은 홈을 셀(cell)이라고 부른다. 이러한 셀의 크기와 깊이에 따라 잉크의 농도가 달라

진다. 그러나 기존의 그라비아 인쇄방법은 점 인쇄 방법으로서 이러한 셀의 크기와 깊이, 모양을 제판위에 만들었지만 실험에 사용된 미세 선 패턴은 셀 모양이 아닌 직접 선 모양 패턴을 구리층 위에 부식시켜 사용하였다. 실험에서 사용한 그라비아 제판은 국내에서 제판할 수 있는 최소사이즈이며 현재 고급 그라비아 인쇄에 사용되는 일반적인 제판 사이즈에 1/3 수준의 고급제판 기술을 적용한 것이다.

현재 사용되고 있는 그라비아의 제판은 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있는데 다이아몬드 칩을 사용하여 구리표면에 기계적인 방법으로 직접 패턴을 만드는 방법과 레이저를 이용하여 구리표면 상에 코팅된 흑색 에폭시 수지 페이스트 경화막을 현상하여 노출된 패턴형상을 부식시키는 방법이 있다. 본 연구에 사용되는 그라비아 제판 방식은 두

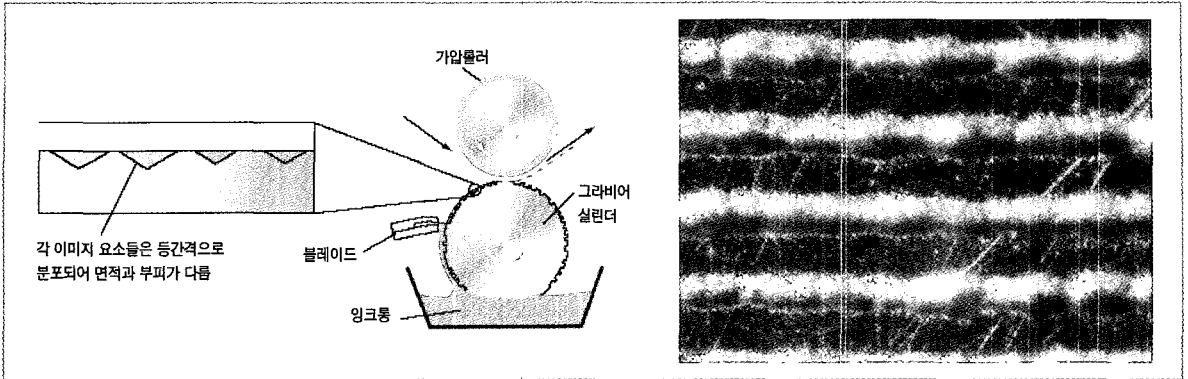


그림 3 그라비아 프린팅 공정과 그라비아 프린팅용 미세 패턴

번째 방법을 이용하여 제판을 제작하였으며 평판제판과 같이 국내에서 상용화된 제판 제작기술이 없어 자체적으로 초정밀 작업을 통해 만들었다.

일반 인쇄기에 사용되는 그라비아 제판은 내구성을 높이기 위해 구리표면에 크롬을 도금하여 사용하지만 본 실험에 사용된 제판은 이러한 크롬 도금과정은 적용하지 않았다.

그림 3에서 진하게 보이는 부분이 부식이 되지 않은 비화선부이고 밝게 보이는 부분이 부식으로 인해 생긴 화선부이며 그라비아 제판은 이 부분에 잉크가 채

워지게 된다. 실험에 사용된 제판은 선폭과 선 간격이 평판 오프셋과 동일한 $20\mu\text{m}$ 간격으로 구성되어 있으며 홈의 깊이는 대략 $10\mu\text{m}$ 정도이다.

미세선폭 인쇄 실험

오프셋 인쇄방식을 결정하는 중간 전달자 즉 제판과 피 인쇄체 사이의 잉크 전이 역할을 담당하는 블랑켓의 성질에 따라 인쇄물의 품질이 결정된다. 기존의 인쇄에서는 $50\mu\text{m}$ 정도의 간격을 가지며 인쇄되어 블랑켓 표면의 거칠기 정도가 큰 문제점이 되지 않았다. 오히려 잉크의 정착성을

높이기 위해 블랑켓 표면에 인위적으로 거칠기를 주기도 한다. 그러나 연구의 목표는 피 인쇄체에 선폭과 선 간격이 각각 $20\mu\text{m}$ 인 패턴을 인쇄하는 것이기 때문에 블랑켓 표면의 거칠기 정도 또한 $20\mu\text{m}$ 이하로 매끄러워야 한다. 그림 4(a), (b)와 같이 블랑켓마다 거칠기가 다르며 잉크 전이 실험을 한 결과 블랑켓 표면이 거친 블랑켓(a)에 비해 미세 선 패턴 인쇄에는 블랑켓 표면이 거칠지 않은 블랑켓(b)가 적합하다고 판단된다.

그림 5(a), (b)는 평판 제판과 그라비아 제판에 일반 인쇄용 검

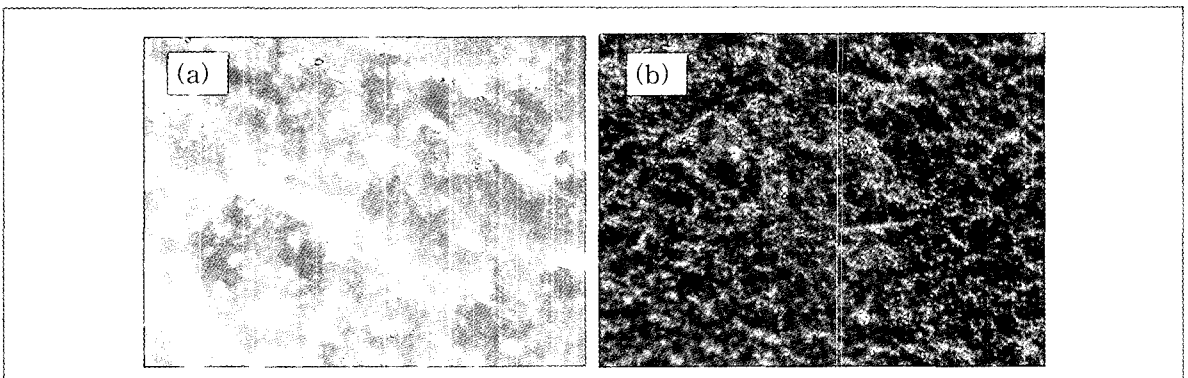


그림 4 블랑켓 (a), (b)의 표면

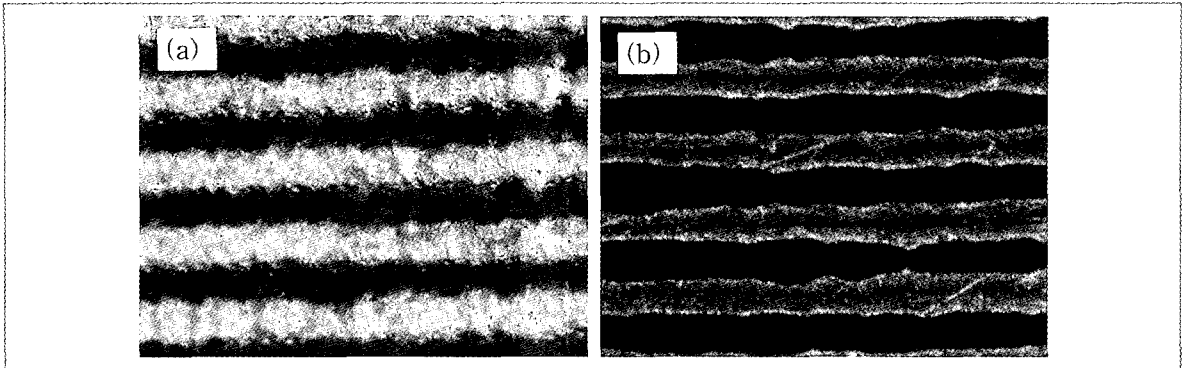


그림 5 오프셋 제판과 그라비아 제판에 전이된 잉크 형상

정잉크를 잉크롤러를 이용하여 전이한 형상이다. 일반적인 인쇄에서는 그라비아 방식보다 평판 오프셋 방식이 정밀 인쇄에 보다 적합한 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구에서 최종 목표로 삼는 기능성 미세 선 패턴 인쇄는 선폭의 정밀성도 요구되지만 선의 끊김이나 일정한 두께도 궁극적이 목적이 되므로 평판 오프셋 인쇄방식이 적합하지 않다고 판단된다. 물론 기존의 인쇄패턴에 비해 1/3 수준 이하인 $20\mu\text{m}$ 선폭과 선 간격으로 제판을 제작하였으므로 일반잉크 전이 형상이 원하는 만큼 충분히 형성되지 못하는 원인일 수 있다. 그러나 요

판 형식을 이용한 그라비아 제판은 일반잉크의 전이 형상이 평판 오프셋 제판과 동일한 사이즈임에도 불구하고 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 따라서 미세 선 패턴에 적합한 제판은 그라비아 제판으로 판단된다.

그림 6은 각각 그라비아 제판에 롤러를 사용하여 잉크를 전이한 다음 인쇄압을 가해 블랑켓으로 전이시킨 사진과 블랑켓에 전이된 잉크를 알루미늄 실린더 표면에 전이시킨 사진이다. 그라비아 인쇄방식이 그러하듯 제판에서 블랑켓, 블랑켓에서 피인쇄체로 잉크가 전이해 가면서 전이되는 잉크의 양은 줄어들고 gain은

증가함을 확인할 수 있다. 이러한 이유로 보다 많은 잉크 전이를 위해서는 블랑켓의 재질을 개선해야 하며 인쇄압을 충분히 줄 수 있는 구조로 장비를 개선해야 한다. 그리고 제판, 블랑켓, 피인쇄체의 표면 거칠기 정도가 미세 선 패턴 인쇄에 중요한 요소로 작용함을 알 수 있다.

Roll-to-Roll 프린팅 장비

그림 1은 설계된 시스템의 사진을 보여준다. 먼저 피 인쇄체인 두루마리를 일정한 장력의 통제 하에 인쇄부로 공급할 수 있는

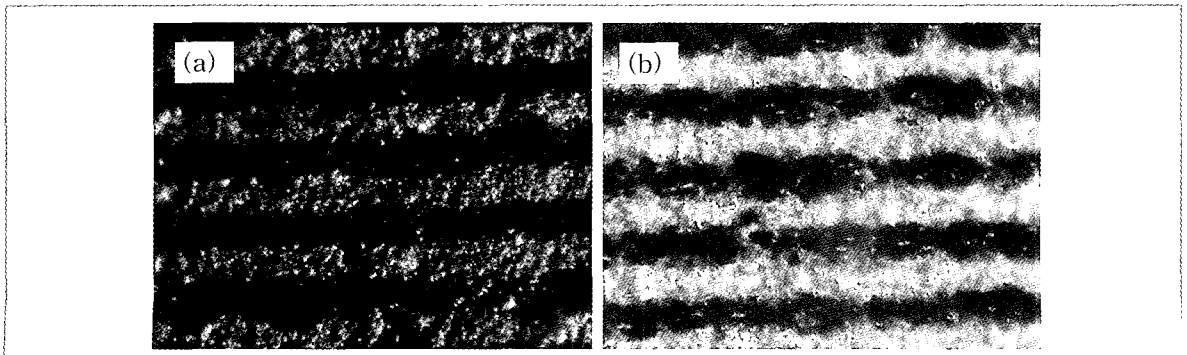


그림 6 블랑켓에 전이된 잉크 및 알루미늄 실린더 표면에 전이된 잉크 형상

연와인더와 피인쇄체의 장력을 제어하는 장력 제어 장치와 연계하여 조정되는 파우더 브레이크가 설치된다. 피인쇄체의 사행을 제어하는 롤 가이드를 제1인쇄유닛 진입 전에 설치하였다. 인쇄유닛의 설계는 그라비아 오프셋 방식의 인쇄를 수행하기 위하여 먼저 인쇄회로를 재판한 판통 표면이 잉크 저장통에 잠겨 있다가 나오면서 닥터 블레이드로 표면의 잉크는 제거되고 회로패턴의 인쇄잉크는 탄성체인 블랑켓 실린더 상에 전달되면 이를 피인쇄체에 인쇄 실린더로 가압하여 인쇄를 수행하는 시스템으로 구성하였다. 또한 2개의 인쇄 유닛이 동일한 방식에 의하여 제1, 제2인쇄가 이루어지는 인라인 구조이다. 각 인쇄 유닛의 정렬 마크를 정확하게 측정 평가하고 조정하는 장치로서 고해상의 CCD 카메라, 화상처리장치 및 서보제어가 구성되었다. 인쇄된 인쇄물의 건조를 위한 건조기는 열풍 및 UV 램프로 설계하였다. 피인쇄체에 인쇄된 회로선을 보호하기 위한 도포나 박막유전체 도포를 위한 코팅기는 그라비아 코팅 방식으로 설계하였다.

롤투롤 프린팅 장비는 세 부분으로 구성된다. 인쇄부, 인-라인 측정검사부와 시스템 제어부가 서로 연계되어 작동하는 구조로 시스템을 구성한다. 개발 시스템은 웹(web) 제어를 기본으로 한 자동화 기능의 운전인쇄기를 모

델로 하고 인쇄부는 라벨인쇄기가 가진 인-라인 구성의 유연성과 다기능을 도입하여 메커니즘을 구성하였다. 그리고 인쇄 컬러 제어와 정렬(registration) 제어 기술을 발전시켜 실시간으로 인쇄 과정에서 품질측정과 자동제어가 이루어지도록 하였다. 인-라인으로 광학측정 검사하여 목표로 하는 미세 패턴 사양을 제어하고 이를 위한 서보시스템을 구축하였다.

인쇄부

인쇄부는 실리콘 반도체 공정과 달리 인쇄의 부가적인 방법을 이용하기 때문에 전자제품을 하나의 장치에서 인-라인으로 연속공정이 가능하도록 구성할 수 있다. 피인쇄체의 피딩 유닛, 인쇄 유닛, 코팅 유닛과 권취부로 기본적인 플랫폼이 구성되어 추가적으로 다른 기능이 필요에 따라 쉽게 부가 장착될 수 있도록 한 워크플로로의 개념으로 설계가 가능하다. 예를 들어 주문되는 전자제품이 라미네이팅 공정을 추가해야 완성된다면 라미네이팅 유닛을 이 플랫폼에 올려 작업하면 가능하도록 공정 확장의 유연성을 갖춘 설계이다. 각 유닛의 각 주요 구동부분은 정밀한 서보모터에 의해 정확히 구동하고 조정할 수 있게 구성하였다.

인-라인 측정검사부

일반적으로 반도체 공장에서

패턴구성의 결과로 회로가 끊어지지 않고 제대로 연결되었는지, 끊기지 않고 연결되었다면 선의 굵기와 두께의 오차에 따라 전도저항의 차이가 어느 정도인지를 검사하는 것은 오프라인으로 검사실에서 행해지며 전도도 측정기를 이용한 단자 접촉으로 검사하여 불량품을 골라낸다. 실리콘 반도체에 비하여 낮은 기능의 인쇄 IC회로라고 하더라도 측정요소와 요구품질의 균일성을 확보하기 위해 동일한 검사수준이 요구된다. 그러나 오프라인 검사의 비경제적인 방식으로 값싼 인쇄 전자제품을 검사할 수 없다. 따라서 인쇄프로세스의 컬러 측정과 제어 방식을 도입하여 비접촉방식으로 인라인 측정을 실현하는 것이 중요하다. 전자기능성 잉크 재료에 필요한 만큼 색상을 주어 색상의 농도로 전도성 등 기능성의 함량을 나타내게 함으로써 제어가 되도록 하는 것이다. 이 방법은 2003년 3월 IMAPS 컨퍼런스에서도 제안된 바 있다. 그러나 색상 차이로 전도성을 측정하는 방법은 상당한 잉크 데이터의 개발이 필요하다. 이 연구에서는 일단 비전 컨트롤의 비접촉식을 이용하기로 하였다. 무엇보다 먼저 레지스터 컬러 마크의 대표적 표시방법을 활용하여 각 유닛에서의 인쇄결과가 정확한 위치에 중첩 인쇄 되는지를 디지털 카메라에 의하여 이미지를 확보하여 검사할 수 있게 하고 오차를 시

정하게 하는 피드백 제어 시스템을 구축한다. 이를 위하여 미시적으로 인쇄마크를 정밀하게 측정하고 빠른 이미지 프로세싱의 기능으로 실시간 조정능력을 높여야 한다.

시스템 제어부

측정검사부에서 보낸 이미지 데이터를 빠른 시간 내에 처리하여 조작함으로써 인쇄부의 서보 모터에 구동을 수정시키고 제어하는 부분이다. 구체적으로는 모니터를 갖춘 컴퓨터 콘솔 부분으로서 인쇄부와 측정검사부와 전체 시스템을 회로와 연결하여 제어하고 외부와 워크플로를 통신 제어 한다. 비전 콘트롤의 데이터 양은 실시간으로 고속처리 할 수 있도록 한다. 고속의 인쇄일수록 측정량은 더 많아질 것이고 빠른 구동 제어가 필요할 것이다. 광파이버의 고속 통신체계에서는 고속의 프로세싱으로 지원할 수 있다. 설정한 파라미터 허용오차 내에서 피드백으로 표준작업을 빨리 확보하는 기능도 중요한 기능이지만 시스템을 환경변화와 이상 또는 노후로부터 보전할 수 있는 시스템 진단과 위험대처기능 등의 자동관리 시스템이 되어야 한다.

실험용 인쇄 패턴의 설계

마이크로 미세 패턴 인쇄의 해상도 재현과 맞춤 정밀도 실험을

위한 시험전용 인쇄패턴을 디자인하였다. 일반적인 시각 인쇄물의 인쇄 정밀도는 인간의 시각 구분 능력의 한계에 따라 50 μ m 수준이면 충분하다. 그러나 회로나 트랜지스터의 구현을 위해서는 20 μ m 이내의 해상 정밀도가 구현되어야 한다. 따라서 우선적으로 20 μ m 수준의 선폭 해상도와 정렬 정밀도를 넘기 위하여 레이저를 이용하여 패턴을 디자인하였다. 여기서 선의 굵기는 최소 20 μ m에서 최대 150 μ m까지의 범위 내에서 7종류로 분할하여 가공하였고, 선간의 간격은 최소 10 μ m에서 최대 1,000 μ m까지의 범위 내에서 11종류로 분할하여 가공하였으며, 선의 두께는 선의 굵기에 따라 최소 5 μ m에서 최대 50 μ m까지의 범위 내에서 7종류로 분할하는 구조로 패턴을 디자인하여 실험용 인쇄판 실린더를 재판하였다. 이러한 패턴 인쇄 실험으로부터 10 μ m 이내의 선폭 해상도와 정렬 정밀도를 구현하게 되면 향후 RFID 태그의 IC 회로 수준을 인쇄할 수 있는 기술을 확보할 수 있게 된다.

참고문헌

(1) Marko Pudas, Seppo Leppävuori, et al. 2004, "Gravure offset printing of polymer inks for conductors" Progress in

Organic Coatings, Vol. 49, pp. 324~335.

(2) T. Mäkelä, R. Korhonen, et al., 2003, "Roll-to-roll method for producing polyaniline pattern on paper" Synthetic Metals, Vol. 135, pp. 41~42.

(3) B. J. Ramsey, D. Harrison, et al., 1997, "A novel circuit fabrication technique using offset lithography" J. Electronic Manufacturing, Vol. 7, No.1, pp. 63~67.

(4) P.M. Harry, D.J. Harrison, et al., 2000, "Integrated capacitors by offset lithography" J. Electronic Manufacturing, Vol.10, No.1, pp. 69~77.

(5) www.ovonic.com

(6) Brien W. Broller, 2003, "Print characterization for graphics vs. electronics" IMAPS 2nd Advanced Technology Workshop, March 16~19, Boston USA.

(7) Eike Becker, et al., 2003, "A New Structuring Technique for Polymer Integrated Circuits" IEEE Polytronic 2001 Conference proceedings.