

감광성 에칭 레지스트의 잉크젯 인쇄를 이용한 인쇄회로 기판 제작

박성준[#], 이로운^{*}, 정재우^{*}

Fabrication of the Printed Circuit Board by Direct Photosensitive Etch Resist Patterning

Sung-Jun Park[#], Ro-Woon Lee^{*} and Jaewoo Joung^{*}

ABSTRACT

A novel selective metallization process to fabricate the fine conductive line based on inkjet printing has been investigated. Recently, Inkjet printing has been widely used in flat panel display, electronic circuits, biochips and bioMEMS because direct inkjet printing is an alternative and cost-effective technology for patterning and fabricating objects directly from design without masks. The photosensitive etching resist used in this process is an organic polymer which becomes solidified when exposed to ultraviolet lights and has high viscosity at ambient temperature. A piezoelectric-driven inkjet printhead is used to dispense 20-30 μm diameter droplets onto the copper substrate to prevent subsequent etching. Repeatability of circuitry fabrication is closely related to the formation of steady droplets, adhesion between etching resist and copper substrate. Therefore, the ability to form small and stable droplets and surface topography of the copper surface and chemical attack must be taken into consideration for fine and precise patterns. In this study, factors affecting the pattern formation such as adhesion strength, etching mechanism, UV curing have been investigated. As a result, microscale copper patterns with tens of μm high have been fabricated.

Key Words : Microscale patterning (마이크로 패터닝), Etch resist (에칭 레지스트), Inkjet printing (잉크젯 인쇄), Curing (경화), Adhesion (접착력)

1. 서론

인쇄 회로 기판은 휴대폰, PMP 와 같은 멀티미디어용 전기, 전자제품에 필수적으로 내장되는 부품으로 최근들어 제품의 집적화와 소형화에 따라 회로의 선폭이 점차 감소하고 복잡해지고 있다.

또한, 저가격화의 요구에 따라 공정단축을 통한 비용의 감소, 수율 및 생산성 향상에 대한 연구가 계속적으로 진행되고 있다. 이러한 이유로 회로를 형성하기 위한 마스크 제작 작업에 사용되는 포토 리소그래피(photolithography) 공정을 대체하려는 시도가 최근 들어 지속적으로 증가하고 있다.¹⁻⁵

☞ 접수일: 2006 년 6 월 1 일; 게재승인일: 2007 년 2 월 12 일

교신저자: 삼성전기 중앙연구소 eMD Center

E-mail: sung-jun.park@samsung.com Tel. (031) 218-2576

* 삼성전기 중앙연구소 eMD Center.

노광공정을 이용한 마스크 제작방식의 기존 인쇄회로기판 제작공정은 프로토타입이나 소량생산의 경우에는 layout 별로 마스크를 제작해야 하고 원하는 회로 선폭의 정밀도를 얻기 위해서는 마스크의 재질을 달리해야 하기 때문에 가격적인 측면에서 유리하지 못하지만, 잉크젯 인쇄 방식은 원하는 이미지를 그대로 출력할 수 있고, 형성하고자 하는 회로 위에만 에칭 레지스트를 증착하기 때문에 재료비를 절감할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 노광공정을 대체하기 위한 수단으로서 감광성 에칭 레지스트를 잉크젯 인쇄방식으로 기판상에 직접 토출하여 마스크를 형성한 후, 에칭을 통해 인쇄회로 기판을 제작하는 공정의 실현 가능성에 대하여 검토하였다.

2. 잉크젯 프린팅

잉크젯 인쇄 방식은 액체상태의 잉크를 미세한 노즐을 통해 토출하여 기판상에 원하는 형상대로 액적을 탄착시키는 기술이다. 초기에는 대부분 사무용으로 적용되었지만, 최근에는 나노입자를 포함한 메탈잉크, 폴리머, 바이오 재료 등 기능성 물질을 사용하는 산업용 용도에 적용이 늘어가는 추세이다. OA 용과는 달리 산업용 잉크젯 헤드의 토출가능한 잉크의 점도 범위는 약 10-20 cPs 이며, 표면장력은 약 25-35 dyne/cm 이다.

잉크젯 인쇄 방식의 가장 큰 장점은 바로 직접 성형기술(direct writing technology)이라는 점에 있다. 원하지 않는 부분의 재료를 제거하여 형상을 제작하는 방식(subtractive process)이 아니라, 제작하고자 하는 대상을 설계대로 직접 성형하는 방식(additive process)이다. 도금(electro plating), 증착(deposition)과 비슷한 종류의 생산기술이지만, 선택적 제작이 가능하다는 점에서 차별성이 있으며, 두가지 방식에 비하여 훨씬 제작속도가 빠르고, 가격적인 측면에서 효율적이다.

본 연구에서는 자체적으로 개발한 잉크젯 프린팅 장비를 이용하였다. 기본적으로 직교 3 축이송계 구조이며, 기판이 장착되어 인쇄를 위해 이송하는 xy 축은 0.1 μm 의 분해능을, 잉크젯 헤드 가 장착되어 기판과의 높이를 조절하는 z 축은 1 μm 의 분해능을 가지고 있다. 인쇄속도는 최대 400 mm/s 이고, 보정 후 각축의 위치 결정정밀도(positional accuracy)는 3 μm 이하이다.

3. 제작 공정

인쇄회로 기판을 제작하는 기존 공법에서는 기판에 D/F(dry film)을 부착한 후 노광 후 현상작업에 의해 보호층을 형성하고, 에칭을 통해 회로를 형성하게 된다. 이러한 보호층 형성과정을 잉크젯 공법으로 대체하는 것이 가능하다면, 고가의 노광장비와 유지비, 마스크 제작비용, 레지스트 현상을 위한 화학약품 및 단순히 제거되는 레지스트 비용등을 절감할 수 있게 된다.

마스크의 제작없이 잉크젯 인쇄방식으로 원하는 회로의 형상대로 에칭 레지스트(etch resist)를 직접 토출하여 인쇄회로 기판을 제작하는 공정의 개략도를 Fig. 1 에 나타내었다.

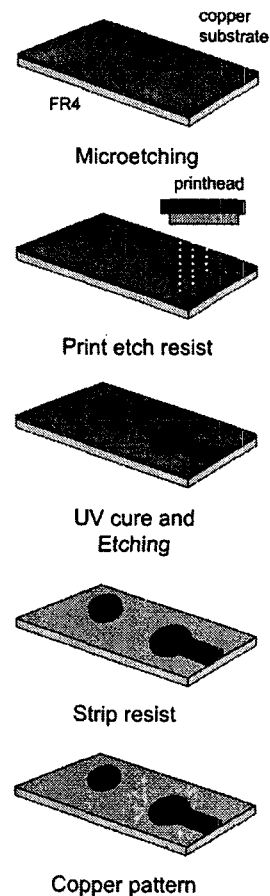


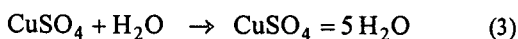
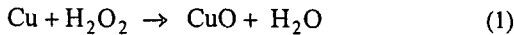
Fig. 1 Circuit fabrication using direct etch resist patterning

잉크젯 인쇄 방식에 의한 인쇄회로 기판 제작 공정은 크게 5 단계로 구분할 수 있다. 각 공정에 대해 간단하게 살펴보면 첫째로, 기판과 에칭 레지스트와의 접착력을 향상시키기 위한 전처리 공정이 있다. 기판 전처리는 기판과 에칭 레지스트와의 접촉면적을 증가시켜 에칭시 박리되지 않도록 하는데 목적이 있다. 두번째 공정은 잉크젯 인쇄 공정이다. 마스크 없이 원하는 회로 형상대로 에칭 레지스트를 토출하여 보호층을 형성한다. 세번째 공정은 UV 가경화 공정이다. 토출된 에칭 레지스트는 기판 상에 탄착된 뒤 점차 퍼지게 되는데, 원하는 높이가 선풍을 얻기 위해서는 바로 가경화 시켜야 한다. 네번째 공정은 기존 공정과 동일한 에칭 공정이다. 에칭 레지스트가 보호하고 있는 동박을 제외한 부분은 제거된다. 마지막으로 에칭 레지스트를 제거하면 회로 제작이 완료된다. 각 단계별로 공정을 살펴보면 다음과 같다.

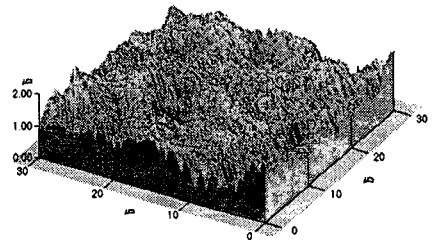
3.1 마이크로 에칭

마이크로 에칭은 동박 표면의 거칠기를 크게 하기 위하여 0.5 - 3 μm 정도 화학적으로 얇게 에칭하는 공정을 말한다. Micro etchant 는 PCB 제조 모든 공정의 전처리제로 사용되며 표면의 산화막 제거, 오염물질 및 불순물 제거, 표면거칠기 형성 등의 역할과 D/F(Dry Film), 화학동, 최종처리(Tin 도금, 니켈도금, 금도금 등)등에서 밀착력 증대를 목적으로 사용된다. Micro etchant 는 크게 황산과수와 과황산소다(sodium persulfate)로 구분되며, 황산과수의 경우 금속표면의 과도한 에칭을 요구할 때 주로 사용하는데 에칭을 조절이 가능하다는 장점으로 현재에도 널리 사용되고 있다.

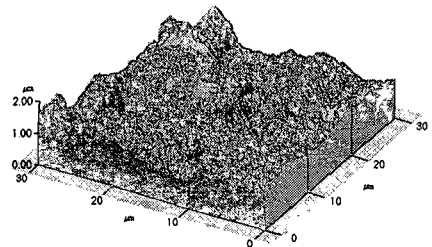
황산과수 에칭 용액과 구리표면과의 화학적인 반응은 간단하게 다음 식 (1)-(3)으로 나타낼 수 있다. 마이크로 에칭 공정에서 사용되는 기본적인 황산과수 용액은 결정립계(grain boundary) 부근에 국부적인 에칭을 증대시키지 않기 때문에 일반적으로 전체 표면이 편평하게 에칭되는 경향이 존재한다.



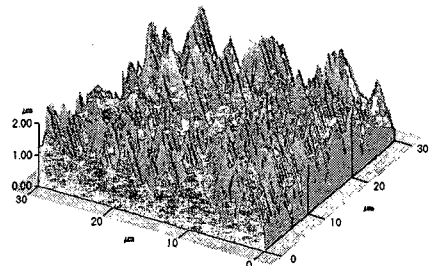
이러한 특성을 보이는 황산과수 용액에 특정한 유기물을 첨가하면 국부적인 에칭이 증가하여 매우 낮은 에칭율을 가지면서도 표면거칠기를 증가시킬 수 있다. 첨가제에 따른 마이크로 에칭 특성은 Fig. 2 에서도 확인할 수 있다. 기판소재로 일반적으로 사용되는 CCL (Copper Clad Laminate)의 표면과 산탈지한 시편, 그리고 NBD-II 라는 첨가제를 포함한 황산과수용액에 에칭한 시편을 AFM으로 표면 형상을 분석하였다. 기판표면 세정목적으로 산용액으로 탈지처리한 시편은 일반 CCL 에 비해서 표면거칠기가 약간 증가하였으나, 특별히 표면형상에 유의한 차이는 가져오지 못하였다.



(a) CCL (R_a 0.184 μm)



(b) after cleaning (R_a 0.193 μm)



(c) NBD-II (R_a 0.452 μm)

Fig. 2 Surface topography of the copper substrate with different treatment

유기물 첨가제를 포함한 황산과수 용액에 에칭한 시편의 분석결과는 Fig. 2(c)에 나타내었다. 일반 CCL 에 비해 표면거칠기가 증가하였으며, 표면 형상 또한 고주파 성분이 증대되어 많은 차이를 보이고 있다. 표면거칠기의 증가는 곧 에칭 레지스트와의 접촉면적이 증가함을 의미하며, 밀착력 또한 향상된다. 마이크로 에칭 공정에서 적절한 유기물 첨가제의 선택은 원하는 표면 형상의 제어와 밀착력 증가의 측면에서 중요하다.

3.2 인쇄 및 경화

산업용 잉크젯 헤드로 토출가능한 잉크의 일반적인 점도범위는 10-20 cPs 이다. 하지만 기관 제작공정에서 에칭 레지스트로 사용하고 있는 대부분의 액상 포토레지스트(liquid photoresist)의 점도는 상온에서 수백에서 수천 cPs 에 달한다. 따라서, 잉크를 가열하여 점도를 토출가능한 범위로 낮추어서 사용해야 한다. 본 실험에서 사용한 잉크의 가열온도에 따른 점도 특성은 Fig. 3 에 나타내었다. 점도가 약 10 cPs 가 되는 50 ℃ 로 가열하여 사용하였다.

상온에서 점도가 높은 잉크는 가열해서 사용해야 하며 액적 토출은 어렵지만, 탄착 후 퍼짐성이 억제되는 장점이 있으며, 라인 형성 후 경계부에서 레지스트의 두께가 확보되어 에칭 시 박리가 쉽게 되지 않는다.

잉크젯 헤드에서 토출된 액적은 기관상에 탄착된 후 점진적으로 퍼지게 되는데, UV 조사를 통해서 액적 외곽부위만을 선택적으로 가경화 해서 패턴 형상을 유지시켜야 한다.

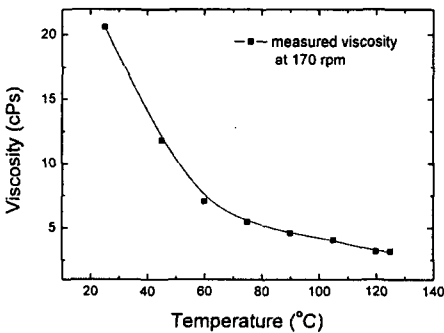


Fig. 3 Viscosity behavior according to heating temperature

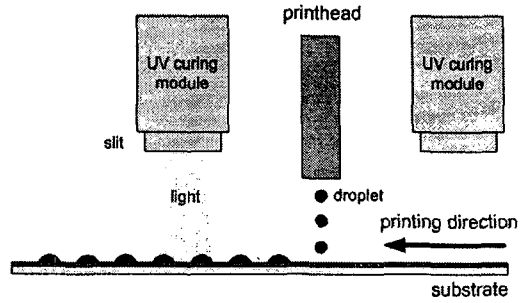


Fig. 4 Subsequent curing process after printing

사용된 UV 경화시스템의 개략적인 형태는 Fig. 4 와 같다. 양방향 인쇄를 해야 하기 때문에 헤드 앞 뒤로 배치되며 인쇄방향에 따라 선택적으로 조사된다. 액적이 탄착된 후 퍼지는 것을 최대한 억제하기 위하여 가능한 한 잉크젯 헤드와 밀착되게 장착하였다. UV 소스의 출력은 4500 mW/cm² 이지만, 기관과 slit 과의 거리가 10 mm 일 경우 총출력의 10%만이 단위영역으로 방출된다. 기관의 인쇄속도가 150 mm/s 일 때 기관상의 한 지점에서는 0.01 초 동안 4.5 mJ/cm² 의 에너지가 조사된다.

에칭 레지스트는 300-400 nm 파장대의 빛에 반응하는 광개시제(photoinitiator)를 함유하고 있어 일정한 에너지 이상이 순간적으로 조사되면 필요한 에너지를 흡수하여 중합반응(polymerization)을 통해 경화되는데, 에칭 레지스트의 종류마다 이러한 경화 에너지가 틀리므로, 조사에너지의 적절한 선택이 중요하다.

가경화 조건에 따른 탄착 후 액적 거동은 Fig. 5 에 나타내었다. UV 를 이용하여 탄착 후 경화 시킨 경우와 경화 시키지 않은 경우를 비교 하였는데, UV 조사하지 않은 경우에는 시간에 따라 액적이 퍼져서 원하는 형태를 이루고 있지 못함을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 5(c)에서 더욱 두드러지게 나타나고 있으며, 기관 표면상에서 임의의 형태로 퍼져서 원하는 크기의 보호층을 형성하지 못하고 있다. 가경화 시키지 않은 보호층을 완전 경화 시킬 경우 경계부분의 두께가 얇기 때문에 에칭 공정에서 내산성을 가지지 못하고 박리될 가능성이 크며, 오버 에칭될 수 있다.

탄착 후 곧바로 가경화 시켜 형성한 보호층은 Fig. 5(d)에 나타나고 있다. 경계부분이 어느정도 단차를 가지고 있음을 확인할 수 있으며, 선풍오

차(line tolerance)가 양호한 것을 알 수 있다.

현재 일반적인 기판제작공정에서 적용하고 있는 배선의 선폭은 75 μm 이며, 허용되는 선폭오차는 ±10 % 이다. 실험결과를 통해 탄착 후 퍼짐을 최대한 억제하면 미세 배선 제작의 가능성을 확인할 수 있으며, 적절한 인쇄조건 선택을 통해 인쇄오차를 최소화 할 수 있다.

실험에 사용된 인쇄조건은 Table 1 에 정리하였다. 잉크젯 헤드는 Spectra 사의 SE 헤드를 사용하였으며, 노즐의 개수는 128 개이다. 구동전압은 60-100 V 이내에서 원하는 선폭을 구현하도록 적절히 선택하였다. 가경화 후 120 °C에서 10 분간 완전 경화하여 밀착력을 증대시키고 에칭하였다.

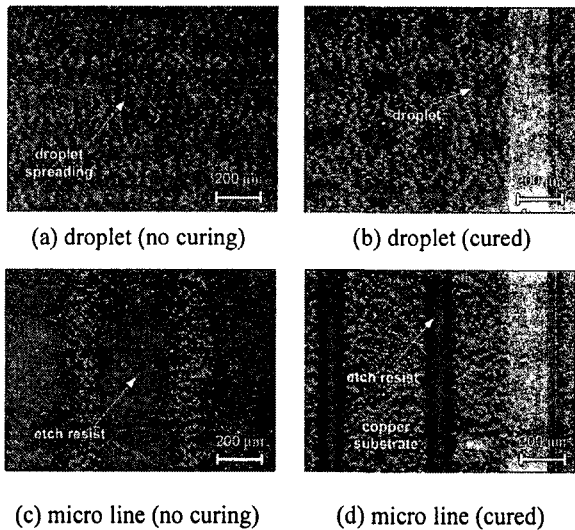


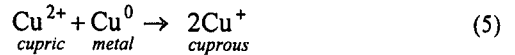
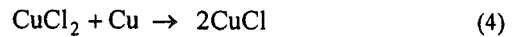
Fig. 5 Effect of the UV curing on the line formation

Table 1 Printing conditions

| parameter | condition |
|---|------------|
| printhead | Spectra SE |
| driving volatage (V) | 60-100 |
| nozzle diameter (μm) | 35 |
| etch resist | Sunjet |
| ink surface tension (dyne/cm ²) | 26 |
| heating (°C) | 70 |
| printing speed (mm/s) | 150 |
| resolution (dpi) | 300x600 |
| UV energy (mJ/cm ²) | 4.5 |
| etch rate (μm/min) | 2 |
| hard bake (min/°C) | 10/120 |

3.3 에칭

에칭은 인쇄회로 기판 제작에서 가장 중요한 공정 중의 하나이다. 최근에는 환경오염 등의 문제로 염화동(CuCl₂)을 에칭액으로 주로 사용하며, 다른 에칭액과 비교할 때 포화 용존 구리량이 높고, 유해물질이 부산물로 발생하지 않는 장점을 가지고 있다.⁶ 동박 에칭 과정은 다음 식(4)와 식(5)와 같이 간단하게 표현할 수 있는데, 2 개의 구리 이온 형태로 존재하는 에칭액이 에칭 레지스트로 보호되지 않는 동박과 결합하여 2 개의 1 가 구리 이온으로 변환되는 과정이다.⁷



에칭은 이방성 식각 공정이기 때문에 필연적으로 오버컷이 발생하게 되는데 높은 에칭율을 가지면서 오버컷을 줄이는 것이 필요하다. 이방성 식각의 개략도는 Fig. 6 에 나타내었다. 에칭이 깊이 방향뿐만 아니라 폭 방향으로도 진행된다. 에칭 계수(etch factor)를 그림에 도식적으로 나타낸 치수로 정의하면 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{etch factor} = \frac{D}{(A - B)/2} = \frac{D}{O} \quad (6)$$

여기서, D는 에칭 깊이, O는 오버컷 량, A는 에칭 후 패턴 간격, 그리고 B는 에칭 전 마스크 패턴 간격이다.

정확한 선폭을 유지하기 위해서는 에칭 계수가 높아야 하기 때문에 일반적으로 에칭액을 스프레이 형태로 분사하면서 공정을 진행하며, 첨가제를 부가하여 오버컷을 최소화 한다.

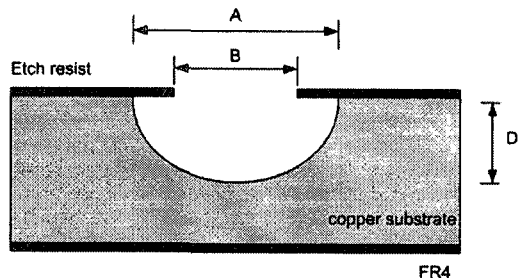


Fig. 6 Etching factors

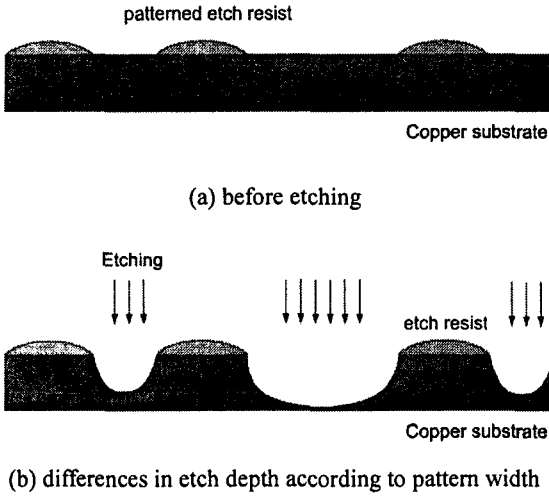


Fig. 7 Etching mechanism

인쇄회로 기판에서 회로 간의 간격은 일반적으로 일정하지 않다. 에칭 레지스트로 보호층을 형성한 인쇄회로 기판 임의의 영역에서의 단면모습은 Fig. 7(a)에 나타낸 것처럼 인접하는 두 보호층 간의 간격이 동일하지 않은 경우가 대부분이다. 이러한 기판을 에칭 했을 경우 Fig. 7(b)에서 확인할 수 있는 것처럼 에칭 레지스트로 보호되지 않은 넓이에 따라서 에칭 깊이가 달라지게 된다. 회로 간 간격이 넓을수록 에칭율이 상대적으로 빠르기 때문에 오버컷이 크게 발생하여 실제 회로 선폭이 작아질 가능성이 많아진다.

실제 이러한 현상을 고려하여 기판 회로 설계를 동일 간격으로 하거나 오버컷을 고려한 보상 패턴을 제작해야 한다. 하지만, 본 연구에서는 이러한 영향을 최소화 하기 위하여 선폭 및 회로 간 간격을 일정하게 설계하여 제작하였다.

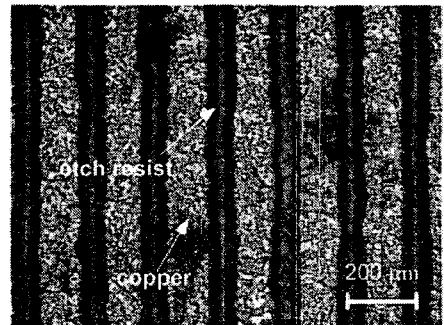
4. 제작 결과

현재 실기판 제작에 적용되는 수준인 선폭 75 μm 배선을 제작하기 위해 에칭 레지스트를 이용하여 보호층을 형성한 결과를 Fig. 8(a)에 제시하였다. 사진에 보이는 것처럼 기판의 전처리 상태나 오염정도, 토출상태에 따라서 선폭오차가 존재한다. 일반적인 조건에서 토출했을 경우 에칭 레지스트의 두께는 약 20-30 μm 정도이며, 충분히 내산성을 가지지만, 기판의 전처리 조건이 최적화

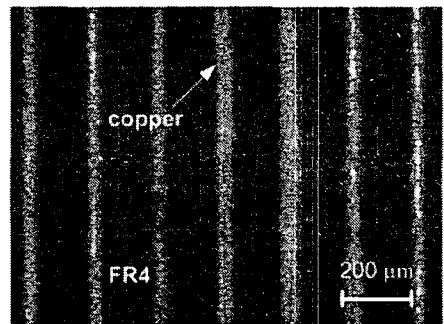
되지 않은 경우 퍼짐성이 커지거나 가경화 되지 않은 경우 보호층 양 끝의 두께가 얇아져서 에칭 시 박리되거나 에칭액에 견디지 못할 수 있다.

잉크젯 헤드는 기본적으로 노즐 간 토출되는 액적의 속도나 볼륨의 편차가 존재한다. 헤드 제작업체에서 발표하는 자료에 의하면 평균적으로 속도편차는 20 %, 볼륨편차는 8 % 정도의 범위를 가진다. 하지만, 실제 구동조건에서는 더 큰 차이를 보일 수 있으며, 이러한 문제로 인하여 배선간 선폭 오차가 존재할 수 있다. 노즐 간 편차는 개별노즐구동(DPN : Drive-Per-Nozzle)을 통해 약 3 % 이내로 개선할 수 있기 때문에 필수적으로 기능을 구비해야 한다.

에칭을 통해 제작한 회로의 모습은 Fig. 8(b)에 나타내었다. 공구현미경 사진 상에 검은 부분은 FR4 이며, 밝은 부분이 에칭 레지스트로 보호되어 에칭되지 않은 배선이다. 약 75 μm 의 선폭과 15 μm 의 두께를 갖는 비교적 균일한 배선이 형성되었으며 선폭오차도 상당히 양호한 편이다.



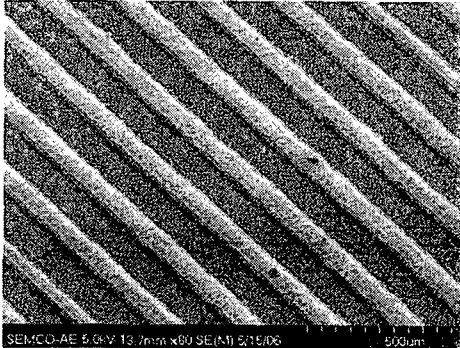
(a) printed etch resist pattern



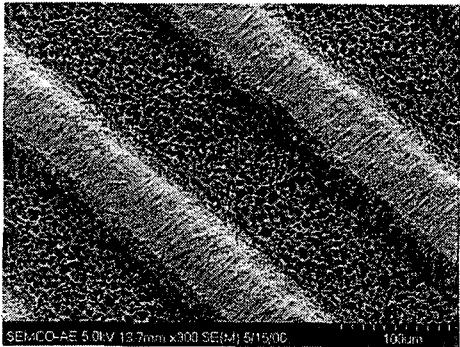
(b) etched copper pattern

Fig. 8 Fabricated microscale copper pattern using direct etch resist patterning

주사전자 현미경(SEM)을 사용하여 에칭 후 형성된 배선의 모습을 촬영한 결과는 Fig. 9에 나타내었다 각각 80 배, 300 배로 확대한 결과를 제시하였다. Fig. 9(b)를 보면 FR4의 거친 바닥 표면을 확인할 수 있으며, 배선의 경계부위와 선폭이 비교적 균일하게 제작되었음을 알 수 있다.



(a) x80



(b) x300

Fig. 9 SEM images of etched copper patterns

5. 결론

본 연구에서는 인쇄회로 기판을 잉크젯 프린팅 공법을 이용하여 제작하는 신공정에 대하여 기초적인 연구 수행을 통해 적용 가능성을 검토하였다. 제안한 전체 공정에 대하여 개괄적으로 고찰하였으며, 최종적으로 75 μm 배선 제작에 성공하였다. 하지만, 잉크젯 프린팅 공법의 특성과 현수준 잉크젯 헤드의 토출 특성 한계로 인하여 선폭 50 μm 이하 배선 제작은 곤란하다.

현재 노광공정에서 사용되고 있는 액상 포토 레지스트는 잉크젯 방식으로 토출하기에는 점도가

가 너무 높아 사용할 수 없다. 따라서, 점도가 토출가능하도록 낮고 퍼짐성이 적으며, 내산성과 등박과의 부착력이 좋은 잉크의 개발이 필수적이다.

균일한 배선을 제작하기 위해서는 잉크젯 헤드의 노즐간 편차를 반드시 억제해야 하며, 에칭시 이방성 식각 특성을 고려한 패턴 설계도 병행되어야 한다. 배선 제작 결과를 통해 종합적으로 판단해볼 때, 에칭 레지스트의 잉크젯 인쇄를 이용한 인쇄회로 기판 제작은 충분히 적용 가능하다. 마스크 제작, 노광 및 현상 공정을 하나의 공정으로 단축하여 전체 공정을 5 단계로 단순화시킬 수 있으며, 재료비 절감 등을 통한 제작 단가 인하 효과를 기대할 수 있다.

참고문헌

1. Jawits, M. W., "Printed Circuit Board Handbook," McGraw-Hill, 1997.
2. de Gans, B. J., Duineveld, P. C. and Schubert, U. S., "Inkjet Printing of Polymers: State of the Art and Future Developments," *Advanced Materials*, Vol. 16, No. 3, pp. 203-213, 2004.
3. Cho, B. O., Ryu, J. H., Hwang, S. W. and Lee, G. R., "Direct Pattern Etching for Micromachining Applications without the use of a Resist Mask," *Journal of Vacuum Science and Technology B.*, Vol. 18, pp. 2769-2773, 2000.
4. Cheng, K., Yang, M. H., Chiu, W., Huang, C. Y., Chang, J. and Ying, T. F., "Ink-Jet Printing, Self-Assembled Polyelectrolytes and Electroless Plating: Low Cost Fabrication of Circuits on a Flexible Substrate at Room Temperature," *Macromolecular Rapid Communication*, Vol. 26, pp. 247-264, 2005.
5. Cho, B. H., Jeong, H. D. and Jeong, H. W., "Development of Build-up Printed Circuit Board Manufacturing Process using Rapid Prototyping Technology and Screen Printing Technology," *J. of the KSPE*, Vol. 17, No. 2, pp. 130-136, 2000.
6. Coombs Jr, C. F., "Printed Circuit Board," McGraw-Hill, 1995.
7. Cakir, O., "Copper Etching with Cupric Chloride and Regeneration of Waste Etchant," *Journal of Materials Processing Technology*, in press, 2005.