

Maskless용 스크린 제판 기술 연구(I)

이미영[†], 박경진, 남수용

부경대학교 공과대학 화상정보공학부

(2008년 1월 21일 접수, 2008년 2월 15일 최종 수정본 접수)

A Study on the Maskless Plate Making Technology for Screen Printing(I)

Mi-Young Lee[†], Kyoung-Jin Park, Su-Yong Nam

Division of Image & Information, College of Engineering, Pukyong National University

(Received 21 January 2008, in final from 15 February 2008)

Abstract

We have manufactured a photoresist which has excellent dispersity and good applying property due to 330cps of viscosity for environment-friendly and economical maskless screen plate making. And the photoresist applied on the screen stretched was exposed without mask by beam projector with CRT light source. Then it was developed by air spray with 1.7kgf/cm² of injection pressure. The pencil hardness and solvent resistance of curing photoresist film were worse than those of conventional photoresist film and the maximum resolution of line image formed by maskless screen plate making was 0.5 mm since the exposure system for maskless plate making has weak light intensity and the diffusion of light. But we could obtain maskless screen plate which has sharp edges of line image and confirm a possibility of dry development process by air spray method.

1. 서 론

스크린 인쇄란 판으로써 망사를 사용하고, 그 망사의 비화선부를 감광유제 또는 금속

으로 형성하여 잉크가 통과되지 않도록 판 화상을 만든 뒤, 판 위의 잉크를 스퀴지로 밀어내어 화선부의 오프닝을 통해 피인쇄체로 전이시키는 방식이다. 이렇게 스크린 인쇄는 잉크를 스크린 판의 오프닝만 통과시키면 인쇄가 가능하기 때문에 사용할 수 있는 잉크의 종류가 다양하며, 판재인 망사가 유연하므로 여러 가지 형상을 가진 물체에 인쇄가 가능하다.¹⁾ 또한 인쇄 공정이 간단하고, 대면적 인쇄가 가능하며, 재료 이용 효율이 높고, 잉크와 제판 기술의 향상으로 $100\mu\text{m}$ 이하의 패턴 형성도 가능하게 되고 있다. 이러한 여러 가지 장점에 의해 스크린 인쇄는 현재 PCB(Printed circuit board) 뿐만 아니라, LCD(Liquid crystal display), PDP(Plasma display panel), 유기 EL(Electroluminescence) 등 display 관련 전기, 전자 부품 제조의 모든 분야에 활발히 적용되고 있으며, 전기, 전자 산업의 핵심 기술로 자리 잡고 있다.^{2~11)}

스크린 인쇄의 공정은 크게 원고준비, 제판, 인쇄로 이뤄지는데, 이 중 제판은 다시 PC 원고 입력 → 마스크 제작 → 망사 견장 → 포토레지스트 도포 → 마스크 노광 → 습식 현상의 공정을 거쳐 완료하게 된다. 그러나 이러한 제판 공정 중, 마스크 제작 및 습식 현상 공정에서 다량의 폐액 및 폐수가 발생하게 되고, 제판이 완료된 후에는 필름 폐기물이 발생하는 등 친환경적이지 못한 문제점이 발생하게 된다. 또한 마스크를 사용함으로써 마스크 필름의 위치 맞춤 불량 및 밀착 불량, 마스크 필름의 치수 변화 및 열화가 발생하고, 마스크 필름의 보관 장소가 필요하게 되는 문제점이 생긴다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 제판 공정에서 마스크가 없어도 패턴 노광이 가능한 maskless 노광 시스템과 함께 현상액을 이용한 습식 현상이 아닌 건식 현상 공정을 개발한다면, 기존 공정에서 발생하던 다량의 폐액 및 폐수, 필름 폐기물들이 발생하지 않고, 마스크 필름의 위치 맞춤과 밀착에서의 불량을 없앨 수 있으며, PC에 입력된 원고를 마스크 제작 공정 없이 바로 패턴 노광에 이용함으로써 In-Line system에 의한 제판 공정 시간의 단축 및 생산성 향상이 가능할 것으로 기대된다.^{12~13)} 본 실험에서는 이러한 친환경적이고 경제적인 maskless 제판 공정을 위해 maskless용 노광 및 건식 현상 시스템을 이용하여 스크린 제판을 하였고, 일반 감광유제가 아닌 maskless 제판용 photoresist를 제조하여 그 특성을 검토하였다.

2. 실 험

2-1. Maskless용 스크린 제판 공정

Table 1에 현재 일반적으로 사용되고 있는 스크린 인쇄의 제판 공정과 본 실험에서 실행한 제판 공정을 비교 설명하였다. 현재 상용화된 공정에서 film 또는 glass를 지지체로 하는 마스크(mask)가 제작되고, 이를 이용한 패턴 노광 및 현상액(주로 물)을 이용

한 습식 현상을 통해 스크린 제판이 완료된다. 하지만 본 실험에서는 마스크 제작 공정 없이 PC에 입력된 원고가 노광 시스템을 통해 바로 패턴 노광을 함으로써 maskless 노광이 가능하게 되고, 또한 현상액을 사용하지 않고 air spray를 이용하여 건식 현상을 통해 제판을 완료하였다. 이렇게 마스크 제작 공정과 습식 현상 공정이 없어짐으로써, 이 공정에서 발생될 수 있는 폐액 및 폐수, 그리고 마스크 폐기물 등이 발생하지 않으며, 마스크 밀착 공정에서 발생할 수 있는 위치 맞춤 불량 및 밀착 불량, 그리고 주변 환경에 의해 발생할 수 있는 마스크 필름의 치수 변화와 그에 따른 제판 패턴의 치수 변화 등이 발생하지 않게 된다. 그와 함께 제판 공정 단계가 단축됨으로써 작업 시간이 줄어들고, 생산성이 향상되는 등 친환경적이고 경제적인 제판 공정을 확립할 수 있다. 뿐만 아니라, 마스크 제작 공정이 생략됨으로써, 원하는 제판 형상을 실시간 PC 작업만을 통해 바꿀 수 있어 편리하면서 신속한 제판도 가능하다는 장점이 있다.

Table 1. Comparative Conventional and Novel Plate Making Processes of Screen Printing

Conventional Process	Novel Process
Inputting a Copy into PC	Inputting a Copy into PC
↓	↓
Manufacturing a Mask	
↓	
Stretching Screen and Attaching it to Frame	Stretching Screen and Attaching it to Frame
↓	↓
Applying Photoresist & Drying	Applying Photoresist
↓	↓
Exposing with Mask	Exposing without Mask
↓	↓
Wet-Developing & Drying	Dry-Developing
↓	↓
Completing Plate Making	Completing Plate Making

2-2. Maskless용 photoresist 제조

2-2-1. Photoresist용 바인더 수지

본 실험에서는 photoresist용 바인더 수지로써 UV 경화형 수지를 사용하였고, 그 물성을 Table 2에 나타내었다. Photoresist에서 바인더 수지는 photoresist의 물성을 결정짓

는 가장 중요한 성분으로 도포 적성(레오로지 특성), 망사에 대한 접착력, 경화성, 해상력, 현상성 그리고 내구성 등에 큰 영향을 미친다. 본 실험에서 제조된 photoresist는 먼저 버킷(bucket)이라는 도포 기구에 의해 망사 위에서 도포되어질 때 우수한 도포 적성을 갖춰야 하고, 도포된 후에는 본 실험의 노광 시스템의 광원에 의한 경화성 및 해상력, 그리고 비노광부의 성분은 air spray에 의한 우수한 현상성을 갖춰야 한다. 뿐만 아니라, 경화된 부분은 스크린판의 비화선부가 되므로, 망사와의 접착력이 우수해야 하고, 스크린 인쇄시, 스퀸지와의 마찰에 잘 견뎌야 하며, 사용하는 잉크 속의 용제 및 세정액에 대한 내약품성이 우수하여야 한다. 이 모든 물성에 가장 큰 영향을 미치는 것이 photoresist의 바인더 수지이며, 본 실험에서는 이러한 점을 감안하여 높은 해상력과 경도 그리고 우수한 접착력을 갖춘 에폭시계 아크릴레이트 수지(EB 9695, SK-cytec(주))와 접착력 및 내약품성이 우수한 우레탄계 아크릴레이트 수지(APU 1000, SK-cytec(주))를 혼합하여 바인더 수지로 사용하였다.

Table 2. The Properties of Binder Resins for Photoresist

Items	UV Curing Resin	
	EB 9695	APU 1000
Composition	Epoxy Acrylate (Cresol Type)	Urethane Acrylate
Molecular Weight (Mw)	25,000 -30,000	35,000- 50,000
Tg Temperature(℃)	55.2	32.6
Viscosity (mpa · s)	32,000	80,000
Base Solvent	PGMEA	BA
Solid (N.V, %)	65	60

(PGMEA : Propylene Glycol Monomethyl Ether Acetate, BA : Butyl Acetate)

2-2-2. Photoresist 제조

본 실험에서 maskless용 photoresist를 제조하기 위해 Table 3과 같은 조합비로 paste를 제조하였다. 제조된 photoresist에는 상기의 바인더 수지 외에 화선부와 비화선부의 구별을 위한 소량의 녹색 안료(2Y301)가 첨가되었고, 바인더 수지와의 상용성 및 광경화성이 우수한 6관능 모노머 DPHA(dipentaerythritolhexaacrylate, SK-Cytec(주))와 3관능 모노머 TMP3EOTA(trimethylolpropane triacrylate, modified EO, SK-Cytec(주))가 각각 사용되었다. 또한 본 실험의 maskless용 노광 시스템은 광원의 발광 세기가 약하고, 가시광 영역대의 발광 파장을 가지고 있어 photoresist에 사용되는 광중합개시제는 가시

광 영역대까지 흡수 파장을 가지고 있는 Irgacure 784(Ciba)를 사용하였고, 광개시제가 분말 상태이므로 용해력이 우수한 용제(NMP(1-methyl-2-pyrrolidone))에 녹여 사용하였다. 그리고 photoresist의 도포적성을 위하여 바인더 수지 및 모노머와 상용성이 좋은 PGMEA(propylene glycol monomethyl ether acetate)를 용제로 사용하였고, 소포성, 분산성을 위해 BYK사의 소포제 및 분산제를 각각 사용하였다.

Table 3. The Formulation of Photoresist

Mill Base				
Pigment	Solvent	Monomer		Dispersant
2Y301	PGMEA	DPHA	TMP3EOTA	BYK-163
Wt(%)	2	10	7.5	7.5
Clear Resist				
Binder Resin	Photoinitiator	Solvent	Defoamer	
EB 9695	APU 1000	I-784	NMP	BYK-A535
Wt(%)	40	30	0.8	1.2

이러한 재료를 사용하여 photoresist를 제조하는 공정을 Fig. 1에 나타내었다. 먼저 안료, 용제, 광경화형 모노머, 분산제를 넣고 고속 교반기(Dispermat CV, Germany)를 이용하여 2000rpm으로 90min간 비즈밀(beads-mill) 분산을 함으로써 millbase를 만든다. 이 때 입경 1mm의 지르코니아(zirconia) 재질의 비즈를 밀베이스 함량에 대해 1:1 중량비로 첨가하여 분산하였다. 그 다음에 바인더 수지와 용제에 녹인 광개시제와 소포제를 넣고, 동일 고속 교반기로 500rpm에서 30min간 교반함으로써 clear resist를 만든다. 마지막으로 millbase와 clear resist를 동일 고속 교반기를 통해 500rpm으로 30min간 교반함으로써 maskless용 photoresist를 완성하였다.

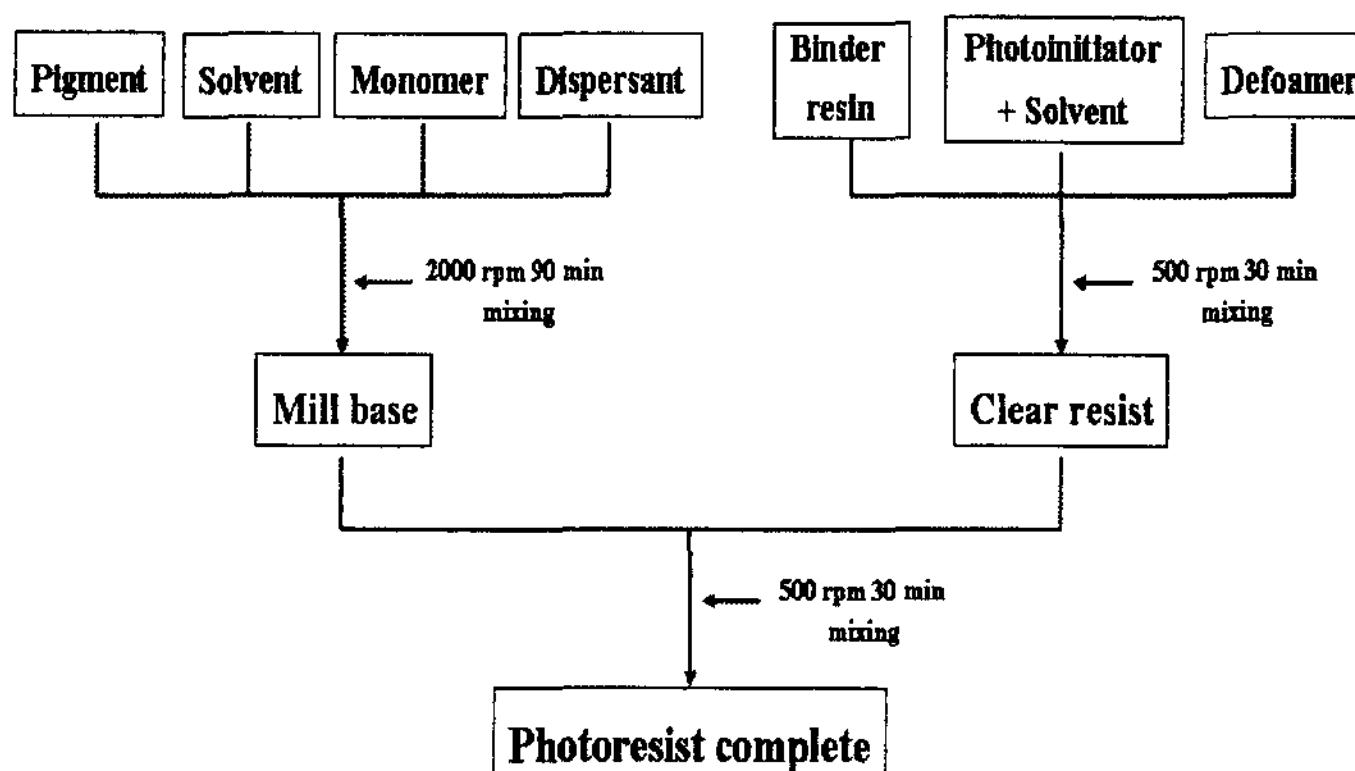


Fig. 1. The manufacturing process of photoresist.

2-3. Maskless용 노광 및 건식 현상 시스템

본 실험에서 제조된 photoresist를 버킷을 이용하여 스크린 망사 위에 도포하였고, 이 때 도포된 감광막의 두께는 스퀴지면과 인쇄면에 각각 1회씩 도포함으로써 약 $3\mu\text{m}$ 의 두께를 얻었다. 스크린 망사 위에 도포된 wet 상태의 감광막은 mask와의 contact 공정이 없기 때문에 별도의 건조 공정 없이 바로 maskless 노광을 하였다. 본 실험에서 사용한 maskless용 노광 시스템을 Fig. 2에 나타내었다. 일반 사무용 PC에 Fig. 3과 같은 패턴을 입력하고, 노광 장치로 현재 일반적으로 사용되고 있는 CRT 광원을 가진 beam projector(MP7630, 3M)를 사용하여 노광 장치와 스크린 틀($320\times320\text{mm}$)사이의 거리를 900mm , 노광 면적을 $150\times150\text{mm}$, 노광 시간을 3min으로 하여 빛이 들어오지 않는 암실에서 maskless 노광을 하였다.

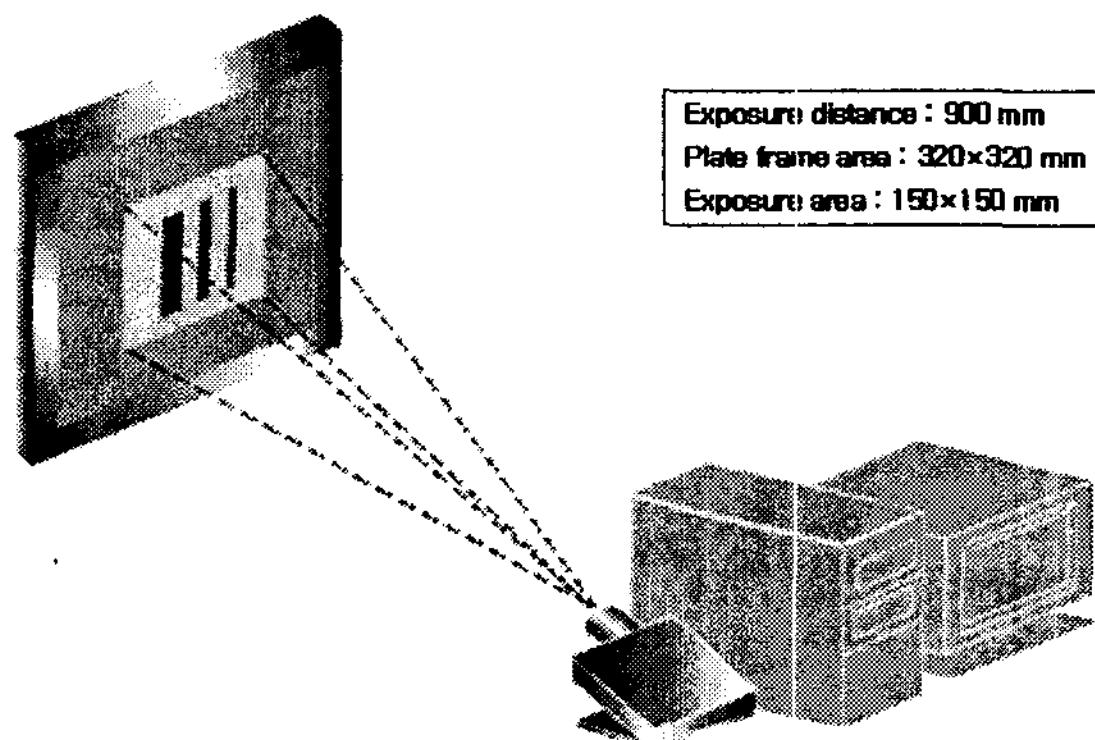


Fig. 2. The exposure system of maskless screen plate making.

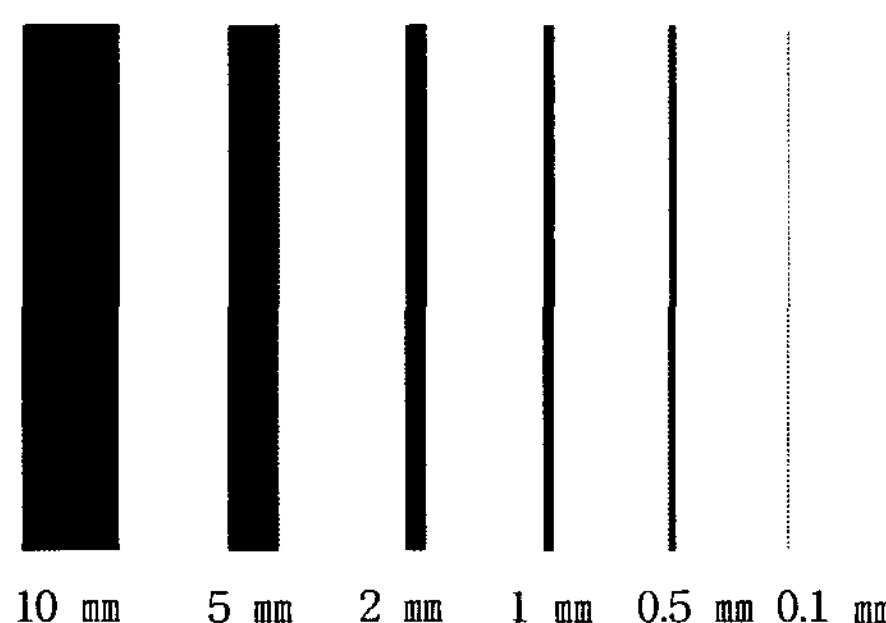


Fig. 3. The pattern image of copy for maskless screen plate making.

그리고 노광후 빛을 받지 않은 비노광부의 photoresist를 제거하기 위해 air spray를 통한 건식 현상을 행하였으며, 이 때 air spray의 노즐 직경은 3mm 이고, 분사시 압력은 1.7kgf/cm^2 , spray와 스크린 판과의 거리는 3cm , 분사 시간은 $50\sim60\text{s}$ 로 하였다.

2-4. 측정

제조된 maskless 스크린 제판용 photoresist의 분산 특성을 KS M2141(도료의 연화도 시험 방법)에 준하여 grindometer(BYK Gardner, Germany)를 사용하여 측정하였고, 광학 현미경(Olympus BX60, Japan)을 통해 그 결과를 관찰하였다. 또한 photoresist의 점도 거동을 HAAKE RheoScope 1(HAAKE, Germany)을 이용하여 측정하였고, 이때 센서는 직경이 35mm 평행판이고, 시료 간격은 0.8mm로 설정하였으며, 측정온도는 25°C로 하였다. Maskless용 노광 장치에 의해 경화된 도막의 경도를 측정하기 위해 KS M ISO 15184에 의거하여 연필 경도를 측정하였고, 이때 가해준 추의 무게는 750g이었다. 또한 경화된 도막의 내용제성을 측정하기 위해 IPA(isopropylalchol), EA(ethylacetate), Xylene, Aceone, NMP(n-methylpyrrolidone)에 각각 경화 도막을 1h동안 침지한 후, 막의 상태를 광학현미경을 통해 관찰하였다. 그리고 maskless 제판 시스템에 의해 제판이 완료된 패턴의 형상을 광학현미경을 통해 관찰하였고, 제판된 스크린 인쇄판을 이용하여 Ag paste로 스크린 인쇄한 후의 패턴 및 전기 저항치를 광학 현미경 및 전기 저항 측정기 3541 resistance HiTester(HIOKI, Japan)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. Maskless용 photoresist의 분산특성 및 점도 거동

본 실험에서 제조한 maskless용 photoresist는 화선부와 비화선부의 구별을 위해 소량의 녹색 안료를 첨가하였는데, 이 안료가 바인더 속에 잘 분산되지 않으면 photoresist의 도포적성, 경화성, 내구성 등의 특성을 저해할 수 있다. 따라서 본 실험에서 제조한 photoresist의 분산특성을 측정하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Grindometer를 이용하여 분산 특성을 검토한 결과, Fig. 4에서 나타난 것처럼 $3\mu\text{m}$ 의 지점뿐만 아니라 그 이하의 위치에서도 굽힘이 나타나지 않는 우수한 분산 특성을 보이고 있다. 본 실험의 photoresist 제조 공정에서 beads-mill 분산 공정에 의해 resist 속의 안료 입자가 바인더 속에 잘 분산되어 있음을 알 수 있었고, 이로 인해 형성될 감광막의 특성도 균일할 것으로 사료된다.

Fig. 5에 photoresist의 전단속도 변화에 따른 점도 거동을 나타내었다. Photoresist의 점도 거동은 버킷을 이용하여 망사 위에 resist를 도포할 때, 그 도포 적성에 큰 영향을 미치게 된다. 본 실험에서 제조한 photoresist는 그래프에서도 알 수 있듯이 전단속도의 변화에 따라 점도가 거의 일정하여 newtonian flow에 가까운 거동을 보이고 있고, 이 때 resist의 점도는 약 330cps이다. 전단속도가 증가함에 따라 점도가 감소하는 shear thinning 거동의 photoresist는 도포 속도가 빠를 때에 유동성이 우수하여 망사에 잘 젖

게 되지만, 도포 후에 곧바로 점도가 증가하게 되어 도포된 감광막의 레벨링 특성은 좋지 않게 될 수 있다. 본 실험의 photoresist의 경우, 330cps라는 낮은 점도와 newtonian flow의 특성을 가지고 있음으로써 버킷에 의해 망사 위에 도포될 때 도포 특성이 우수하였고, 감광막의 레벨링성 또한 양호하였다. 하지만 낮은 점도와 newtonian flow에 의해 도포 도막의 두께가 얇아 후막 제판에는 한계가 있을 것으로 생각된다.

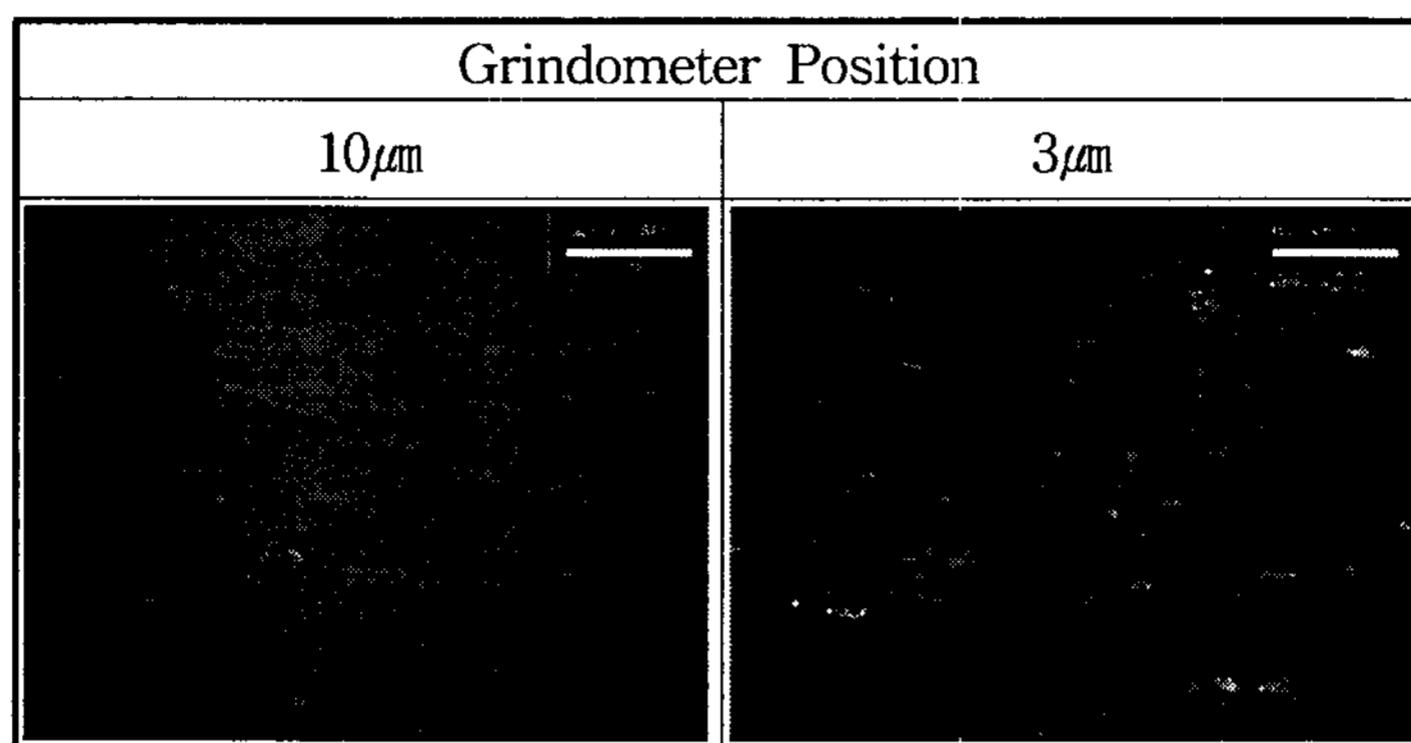


Fig. 4. The dispersity result of photoresist.

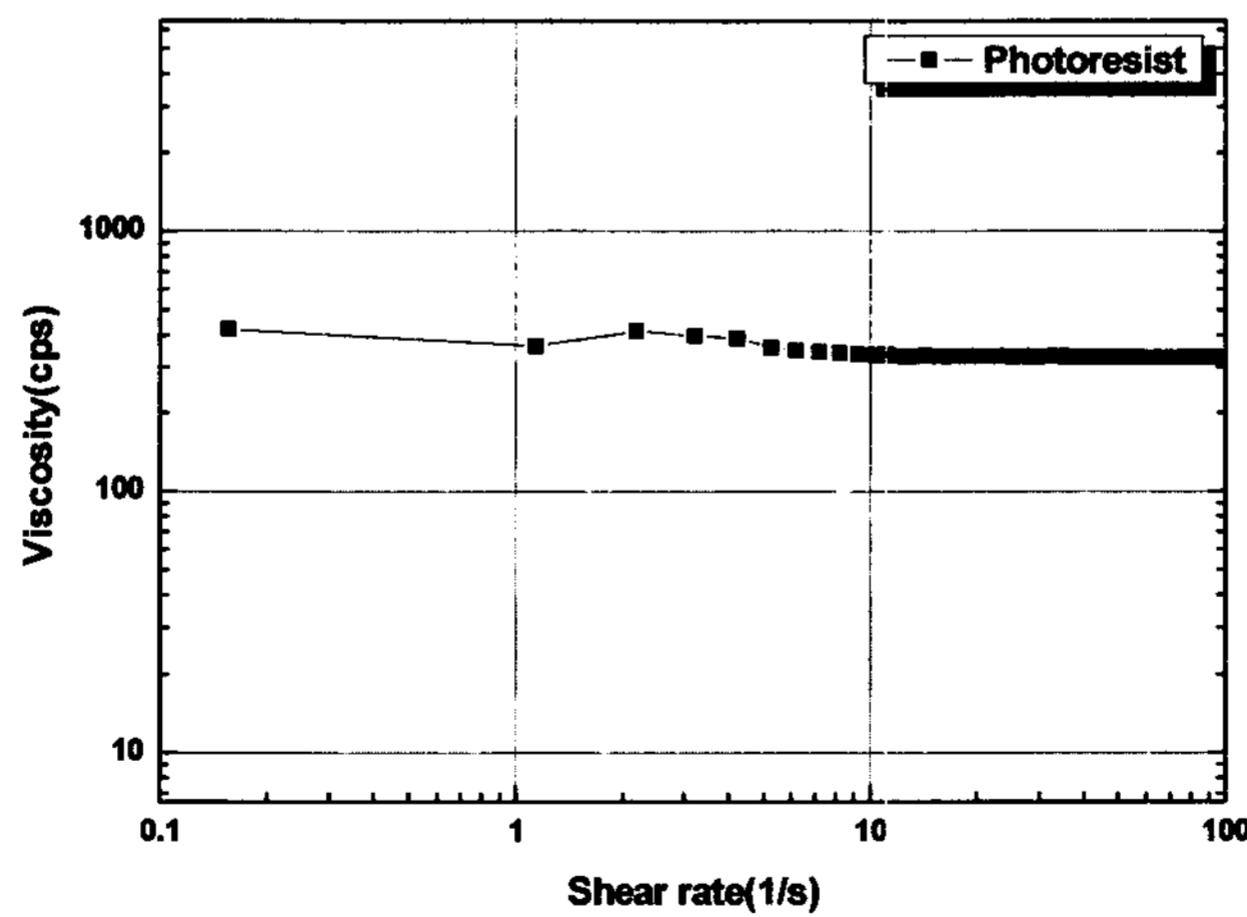


Fig. 5. The shear rate dependence of viscosity for photoresist.

3-2. Maskless용 photoresist 경화막의 물성

망사 위에 photoresist를 도포한 후, 노광 및 현상 공정을 통해 경화되어 남겨진 감광 막은 스크린 판의 비화선부 역할을 하게 된다. 이 비화선부는 스크린 판의 우수한 내쇄력을 위해 스크린 인쇄시 스퀴지의 마찰에 견디는 경도와 잉크 속에 들어 있는 용제 및 세정 용제에 견디는 내용제성을 갖춰야 한다. 본 실험의 maskless용 노광 시스템에 의해 경화된 photoresist 도막의 경도는 연필 경도 측정을 통해 판단하였고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그리고 현재 시판 중인 디아조 수지-PVA계 감광 유제(Dirasol 22, Fuji film) 경화막의 경도와 비교하여 검토하였다. 그 결과, 현재 시판 중인 감광 유제 경화막의 연필 경도는 4H의 연필에는 긁히지 않고 5H부터 긁히는 반면, 본 실험에서 제조된 photoresist 경화막은 2H의 연필에서부터 긁힘이 나타나 현재 시판 중인 감광 유제 경화막에 비해 경도가 약한 것을 알 수 있었다.

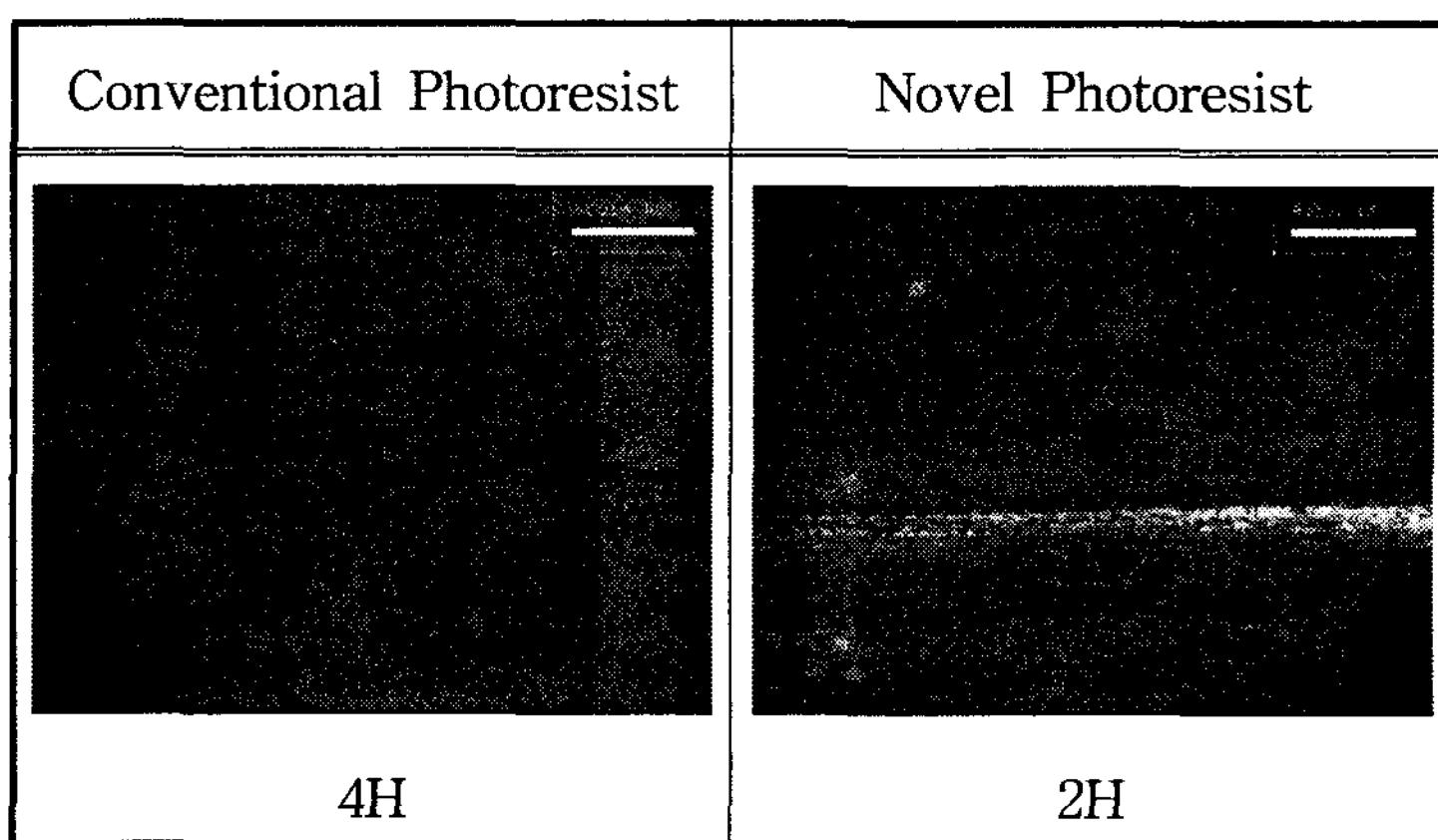


Fig. 6. The pencil hardness results of photoresist films.

Fig. 7에는 본 실험의 photoresist 경화막의 내용제 특성을 현재 시판 중인 감광 유제 경화막과 비교하여 나타내었다. 내용제성 테스트에 사용된 5종류의 용제는 현재 스크린 잉크용 세정 용제로 사용되거나 용해력이 강한 용제들로 이뤄져 있다. Fig. 7의 결과와 같이 경화막의 내용제성은 현재 시판 중인 감광 유제 경화막의 경우, 5종류의 용제 모두에서 우수한 내성을 보이고 있는 반면, 본 실험에서 제조된 photoresist 경화막은 IPA와 acetone을 제외한 나머지 용제에서 도막의 팽윤 및 벗겨짐이 나타나는 등 내성이 약한 결과를 보이고 있다.

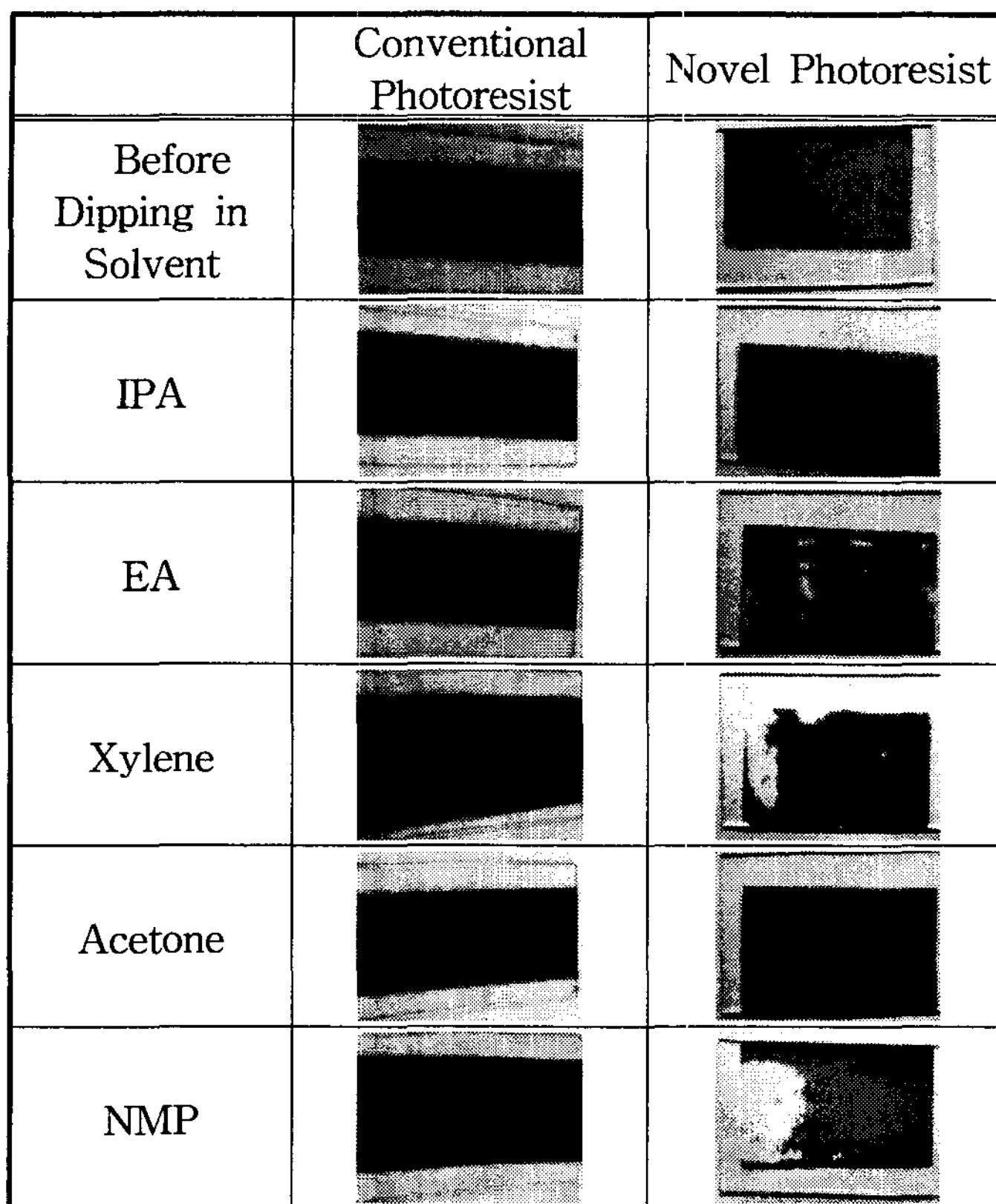


Fig. 7. Images of curing photoresist films after dipping in solvents for 1h.

Photoresist 경화막의 경도 및 내용제성 측정 결과를 통해 본 실험에서 제조된 photoresist 경화막은 스크린 인쇄판의 비화선부로써 그 물성이 시판되는 제품에 비해 떨어짐을 알 수 있었다. 이것은 photoresist용 바인더 수지의 물성 문제라기보다는 maskless용 노광 시스템의 문제로 사료되며, 본 실험에 사용된 노광 장치의 광원 세기가 너무 약하여 경화막을 충분히 경화시키지 못한 결과로 판단된다.

3-3. Maskless 스크린 제판의 패턴 형상 및 인쇄 결과

본 실험의 maskless용 노광 시스템 및 air spray를 이용한 건식 현상에 의해 제판된 스크린 인쇄판의 패턴 형상을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 3의 패턴 이미지를 PC에 입력하여 beam projector를 통해 maskless 노광한 후, air spray에 의해 건식 현상한 결과로써 0.1mm의 폭을 가진 선은 beam projector의 광 확산 현상에 의해 모두 경화되어 화선부가 제대로 구현되지 않았고, 0.5mm는 약 0.88mm로, 1mm는 1.5mm로 제판되었다. Maskless 노광 시스템에서의 광 확산과 air spray에 의한 건식 현상 공정에서의 over-blowning에 의

해 제판된 패턴의 치수 오차가 발생하였지만, 가장자리가 샤프한 화선부를 얻을 수 있었고, 이 결과를 통해 air spray에 의한 건식 현상의 가능성을 확인할 수 있었다.

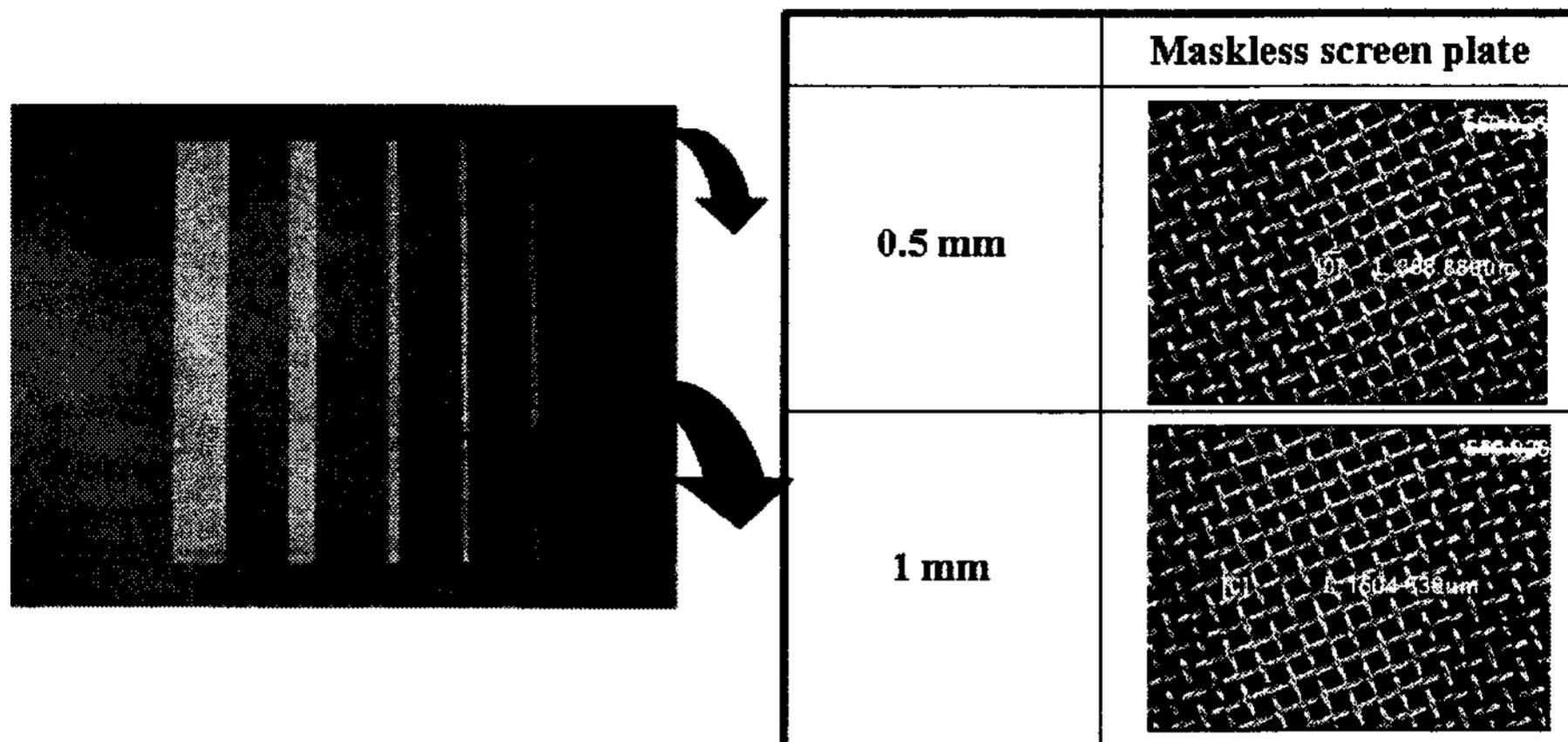


Fig. 8. The pattern image of maskless screen plate.

Fig. 9에 본 실험에서 제판된 maskless 스크린 인쇄판을 이용하여 스크린 인쇄된 패턴을 나타내었다. 사용한 잉크는 Ag paste로써 인쇄 결과를 보면 패턴의 가장자리가 샤프하고, 도막의 표면이 균일하게 나타나는 등 잉크의 토출성이 우수함을 알 수 있으며, 스크린 인쇄된 Ag 도막의 전기 전도성은 $0.8\Omega/cm$ 으로 나타났다.



Fig. 9. The Ag pattern image screen-printed using maskless screen plate.

4. 결 론

본 실험에서는 maskless용 스크린 제판 기술에 관해 연구하기 위해 분산성 및 도포적 성이 우수한 maskless용 photoresist를 제조하였고, CRT 광원을 가진 beam projector를

이용하여 maskless용 노광 시스템을 구현하였으며, air spray를 이용하여 현상액에 의한 습식 현상이 아닌 air 분사방식에 의한 건식 현상을 행하였다. 이러한 maskless용 스크린 제판 기술에 의해 폐액, 폐수 그리고 필름 폐기물이 발생하지 않고, 제판 공정이 단축되며, In-Line system이 가능한 경제적이고, 친환경적인 스크린 인쇄 제판을 완성할 수 있었다. 그러나 광원의 광세기가 약하고 노광시, 광 확산 현상이 발생하는 maskless 노광 시스템에 의해 경화된 도막의 경도 및 내용제성은 현재 시판되고 있는 감광 유제에 비해 떨어졌고, 제판 가능한 화선부의 선폭도 0.5mm가 한계였다. 그러나 제판된 화선부의 가장자리가 샤프한 결과를 통해 air spray 방식에 의한 건식 현상 공정의 가능성을 확인할 수 있었다.

본 실험에서는 친환경적이고 경제적인 maskless용 스크린 제판을 하기 위해 photoresist를 제외한 노광 시스템 및 건식 현상 장치를 현재 상용화되어 있는 제품을 이용함으로써 본 실험과 같이 스크린 인쇄판으로 사용하기에는 부족한 제판 결과를 얻었다. 그러나 차후에는 새로운 maskless용 노광 시스템 및 건식 현상 장치 그리고 이러한 제판 시스템에 적합한 photoresist에 대해 연구함으로써 더 향상된 maskless용 스크린 인쇄 제판 기술을 확립해 나갈 계획이다.

Acknowledgement

본 연구는 환경기술진흥원 차세대 핵심환경기술개발사업으로서 “포토마스크가 없는 무배출 친환경적 포토레지스트용 스크린제판 제조기술” 연구개발 사업에 의하여 연구된 논문입니다.

참 고 문 헌

- 1) 남수용, 알기 쉬운 스크린 인쇄 공학, pp. 1~4 (2005).
- 2) F. C. Krebs, H. Spanggard, T. Kjaer, M. Biancardo, and J. Alstrup, *Mater. Sci. Eng. B*, **138**, 106 (2007).
- 3) F-G Zeng, C-C Zhu, W. Liu, and X. Liu, *J. Microelectronics*, **37**, 495 (2006).
- 4) D. A. Pardo, G. E. Jabbour, and N. Peyghambarian, *Adv. Mater.*, **12**, 1249 (2000).
- 5) S. E. Shaheen, R. Radspinner, N. Peyghambarian, and G. E. Jabbour, *App. Phys. Lett.*, **79**, 2996 (2001).
- 6) 在野 康, 月刊 ディスプレ, 2月号, 29 (2000).
- 7) 二村 浩, 日本印刷学会誌, **40**, 10 (2003).
- 8) 日口洋一, 日本印刷学会誌, **40**, 33 (2003).

- 9) Z. Bao, Y. Feng, A. Dodabalapur, V. R. Raju, and A. Lovinger, *Chem. Mater.*, **9**, 1299 (1997).
- 10) Y. Wu, Y. Li, B. S. Ong, P. Liu, S. Gardner, and B. Chiang, *Adv. Mater.*, **17**, 184 (2005).
- 11) E. J. Brandon, W. West, and E. Wesseling, *App. Phys. Lett.*, **83**, 3945 (2003).
- 12) Toshiyuki Horiuchi, Tomoki Miyakawa and Shinnosuke Hosoda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39**, 324 (2000).
- 13) Toshiyuki Horiuchi and Hiroshi Kobayashi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, 394 (2000). .