

스크린 인쇄 공정에서 고체면의 젖음성이 인쇄형상에 미치는 영향

박종권 · 김종엽[†]

고려대학교 화공생명공학과
136-713 서울시 성북구 안암동
(2009년 12월 18일 접수, 2010년 3월 24일 채택)

The Effect of the Wettability of Solid Surface on Printing Pattern in Screen Printing

Jungkwon Park and Chongyup Kim[†]

Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University, Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-713, Korea
(Received 18 December 2009; accepted 24 March 2010)

요 약

스크린 프린팅에서의 계면유체역학적인 문제를 알루미늄 나노입자를 물에 분산시킨 점성과 탄성을 갖는 모델잉크를 대상으로 실험적으로 연구하였다. 형상이 다른 스크린 패턴을 통과한 잉크를 젖음성이 다른 고체면에 인쇄될 때 인쇄형상에 대하여 연구한 결과 고체면에서의 인쇄 형상은 단순히 스크린 패턴이나 평형상태의 접촉각에 의하여만 결정되지 않음을 알 수 있었다. 또한 오목한 모서리와 볼록한 모서리의 차이는 점도에 따라 달라짐을 볼 수 있었다. 특히 잉크의 탄성이 테두리의 형태에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

Abstract – The interfacial hydrodynamic issues in the screen printing are experimentally investigated by using model inks that are prepared by dispersing alumina nanoparticles in water. The printing patterns of the inks that are passed through differing geometrical shapes of screen on solid surfaces with differing wettability are not solely determined by the pattern on the screen. The dynamic contact angle cannot solely explain the physics of the problem, either. The difference between the screen and printing patterns was not the same for concave and convex corners. Especially the elasticity of ink affects the edge shape.

Key words: Contact Line, Wettability, Rheological Properties

1. 서 론

스크린 인쇄는 오래 전부터 종이나 옷감에 이미지를 인쇄하는데 쓰여왔으며 현재는 전통적인 인쇄뿐만 아니라 전자회로를 구성하는 공정에서도 많이 이용되고 있다. 스크린 인쇄는 공정이 단순하고 다양한 종류의 잉크를 사용할 수 있는 장점이 있지만 μm 크기의 패턴을 인쇄할 때 정밀하게 인쇄되지 않는 단점이 있다. 따라서 정밀도를 높이기 위해서는 공정과 관계된 문제를 다양한 각도에서 검토할 필요가 있다. 특히 전자 산업에서 다양한 종류의 물질을 다루게 되고, 회로의 선폭이 작아지며, 3차원적인 개념, 즉 적층이 필요해짐에 따라 공정 변수에 대한 자세한 검토가 필요하게 되었다. 또한 전자 산업에서는 전기전도성 등의 문제도 중요하기 때문에 기존의 인쇄의 질을 평가하는 방법인 잉크가 마른 후 나타나는 기하학적인 형상뿐만 아니라 기능성에 대한 평가도 중요하게 되었다[1-3].

스크린 인쇄는 크게 다음의 공정으로 나뉜다. 잉크를 스크린에 적

제한 후 스퀴지(squeegee)가 스크린 메쉬(screen mesh)를 지나가면서 잉크를 각 메쉬(mesh)의 구멍(opening)으로 통과시키는 과정, 고체 인쇄면에 잉크가 인쇄된 후 표면의 평탄화와 인쇄면의 표면에너지의 차이에 의해 퍼져나가는 과정, 퍼진 잉크가 마르는 과정으로 나뉜다. 공정조건으로는 스퀴지가 움직이는 속도, 각도, 스퀴지의 경도, 스테인리스스틸 메쉬와 인쇄 면이 떨어져 있는 거리 등이 중요한 변수로 작용하게 된다. 또한 스크린 메쉬의 조건에는 인쇄하려는 형상의 크기, 메쉬의 구멍 크기, 스크린을 구성하는 선의 직경, 메쉬의 재질, 인쇄 패턴을 포함하는 포토레지스트(photoresist)의 재질 등에 따라 다른 결과를 보이게 된다.

현재까지 스크린 인쇄의 기술적인 측면에 대하여 주로 연구가 이루어졌으며[4,5], 특히 메쉬를 빠져나가는 잉크의 양에 대한 연구가 주로 이루어져 왔다[6-8]. 이러한 연구는 기존의 스크린 인쇄가 주로 섬유질의 종이나 형겔 위에 잉크 패턴을 만드는 것이기에 섬유 사이로 유동 만이 존재하기 때문으로 생각된다. 전자회로를 인쇄하는 경우는 고체면에 인쇄를 하기 때문에 잉크의 점탄성뿐만 아니라 고체면과 잉크의 젖음성이 매우 중요한 역할을 할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 잉크의 유변학적 물성과 함

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: cykim@grtrkr.korea.ac.kr

계 아직까지 거의 연구되고 있지 못한 고체면의 젖음성이 따른 인쇄형상에 미치는 영향에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 실험

잉크로는 분산성이 좋은 모델 현탁액으로서 Sasol사의 Dispal T25N4 알루미나 나노입자를 증류수에 분산시켜 사용하였다. 시료 입자는 얇은 판형의 사각형 형태를 갖고 있으며, 한 변의 길이는 50~100 nm 이다. 입자 농도는 무게비로 20, 23, 25%로 만들어 실험하였다. 주어진 나노입자는 1 일 정도의 자석식 교반과 초음파처리 에 의하여 균일한 현탁액이 된다. 진한 현탁액은 제조 시에 기포 가 다수 존재할 수 있으므로 잉크를 제조하는 과정에서 발생한 기포를 제거하기 위해 원심분리기에서 30 g으로 4시간 돌려 기포를 상승시키고 진공펌프로 5분간 진공을 걸어 기포의 크기를 키움으로써 현탁액으로부터 빠져 나오게 하였다.

유변물성은 Rheometer인 AR-2000(TA Instrument)에 60 mm의 스테인리스스틸 평행원판을 이용하여 측정하였다. 물의 증발을 막기 위해 용매 트랩을 사용하였고, 실험은 인쇄공정과 같은 298K에서 수행하였다. Fig. 1에는 유변물성 측정결과를 도시하였다. 시료 들은 모두 강한 shear thinning 현상을 보이며, 대개의 스크린인쇄 공정에서 잉크가 메쉬를 빠져나가는 경우의 전단율(약 1,000 s⁻¹)에서 0.1 Pa.s의 크기를 갖고, 표면의 평탄화가 이루어지는 낮은 전단율 영역에서는 10 Pa.s 이상의 점도를 갖는 것을 볼 수 있는데 이는 스크린 인쇄에서 사용되는 잉크가 갖는 전형적인 물성이다. 전단율을 증가시키면서 측정하는 경우와 감소시키면서 측정하는 경우 서로 다른 형태를 띠는데 이는 입자들이 유동에 따라 배열하는 속도가 느리기 때문에 현탁액의 측정 시 일반적으로 나타나는 현상이다. Fig. 2에는 잉크의 점탄성 측정결과를 도시 하였다. G'와 G''가 교차하는 진동수의 역수는 물질의 이완시간으로 간주할 수 있는 데 농도가 전해짐에 따라 이완시간이 증가하는 것을 볼 수 있으며 이는 탄성이 증가하는 것을 의미한다.

인쇄는 폴리아우레탄으로 제작된 두께 5 mm의 스퀴지를 100 mm/s의 속도로 인쇄면과 45°의 각도로 내압을 주면서 움직여 수행하였다. 마스크로는 폴리에스터와 스테인리스스틸의 두 종류의 스크린 마스크

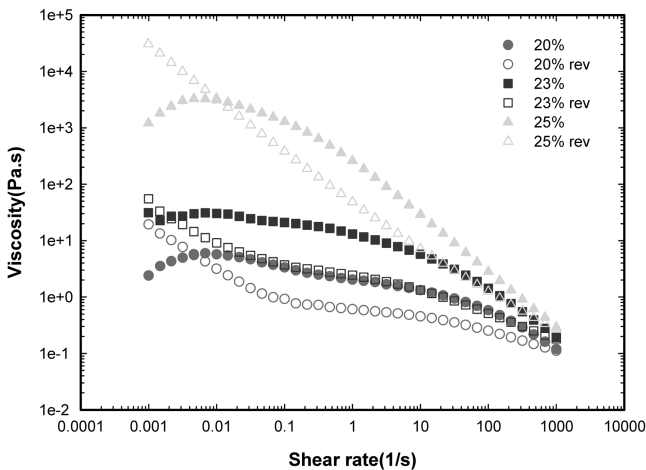


Fig. 1. The Shear-viscosity of alumina suspension in deionized water at 298K. rev refers to the fact that the experiment was performed while reducing shear rate.

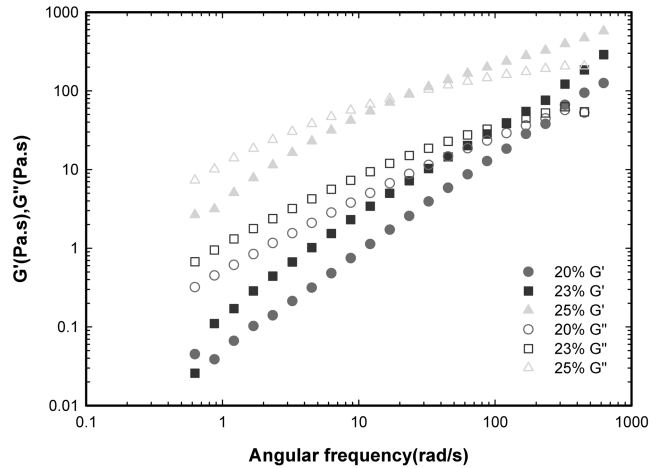


Fig. 2. Frequency sweep test for the samples.

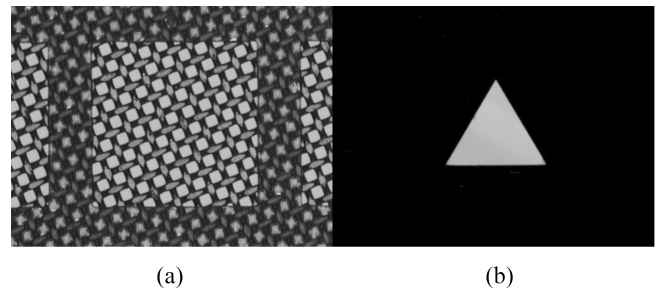


Fig. 3. Two kinds of screen masks: (a) Polyester screen mesh; (b) stainless steel screen mask (The side of the triangle is 6 mm).

를 사용하였다. Fig. 3에서 폴리에스터 마스크의 메쉬 수는 인치 당 가로 세로 방향으로 각각 420이며, 스크린의 구멍 크기는 70 μm 이다. 스크린의 두께는 폴리에스터의 두께가 30 μm이고, 구멍을 제외한 부분의 포토레지스트 두께는 10 μm이다. 스테인리스스틸로 제작된 메탈 마스크로 메쉬 없이 인쇄될 부분은 빈 공간으로 되어 있다. 마스크의 두께는 1 mm이다. Snap off 거리는 폴리에스터의 경우에는 1 mm 고정하고 실험을 하였고, 금속 마스크의 경우에는 인쇄면과 스크린 메쉬를 붙이고 실험을 하였다.

유리 인쇄면의 젖음성은 슬라이드 글라스를 세척 후에 OTS(octadecyltrichlorosilane)의 자기조립단층막(self assembled monolayer)을 흡착시킨 후 톨루엔으로 세척하고 오븐에서 가열한 후 오존 플라즈마로 소수성 관능기를 산화시킴으로써 물과의 접촉각이 15°, 30°, 60°, 100°가 되도록 조절하였다[9-11]. 잉크의 접촉각은 점도가 커서 측정이 불가하므로 물의 접촉각과 같다고 가정하였다. 스크린 인쇄된 패턴은 Nikon D100 디지털 사진기에 접사용 확장 튜브를 장착하여 촬영하였다.

3. 결 과

Fig. 4는 스테인리스스틸 마스크를 이용해서 인쇄한 결과이다. 잉크 내 고체의 농도와 접촉각이 커짐에 따라서 마스크의 원형크기와 인쇄된 형상이 달라지는 것을 볼 수 있다. 즉 잉크의 고체 농도가 낮을수록(즉 점도가 낮을수록), 또한 접촉각이 작을수록 인쇄된 형상의 크기가 마스크의 원형보다 큰 현상, 즉 dot gain을 볼 수 있다. 이러한 현상은 물론 마스크를 빠져 나간 후 스크린을 들어올리는 순

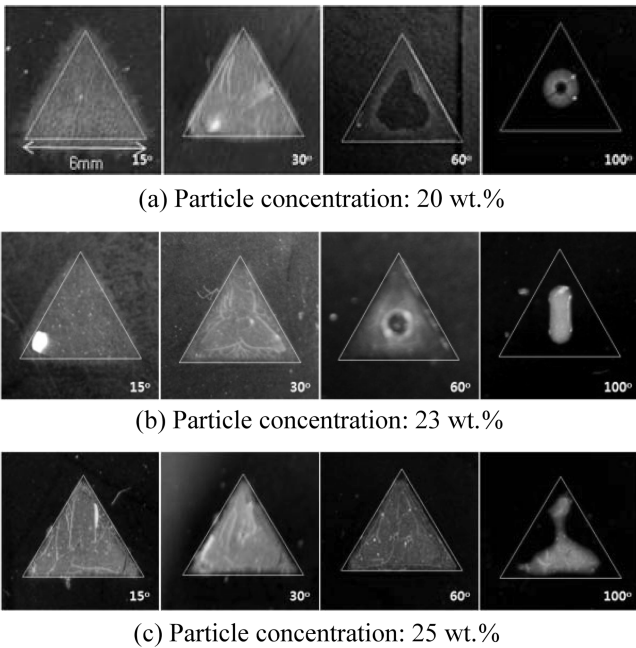


Fig. 4. Stainless steel screen printing images (a)20%, (b)23%, (c)25%.

간의 동적 접촉각과 평형접촉각의 차이에 의하여 접촉선이 움직이기 때문에 나타나는 현상으로서 평형 접촉각이 같은 경우 현탁액의 점도가 달라지면 평형에 도달하는 시간은 차이가 나지만 인쇄형상이 같아야 하는 이론적인 결과와는 다른 것이다. 즉 이러한 문제는 동적 접촉각의 문제로서 현재까지 현탁액의 동적 접촉각에 대해서는 거의 연구가 되어 있지 못하고 특히 점도가 높은 경우에 대한 연구는 전혀 없는 실정으로 스크린 인쇄의 경우 실험식에 의존할 수밖에 없을 것으로 판단된다. Fig. 5의 그래프는 메탈 스크린 마스크에서 접촉선이 움직인 거리를 접촉각과 농도에 따라 도시한 결과이다. 점도가 증가함에 따라 접촉선이 움직인 거리가 접촉각에 따라 감소하는 기울기가 작아짐을 볼 수 있다. 이는 접촉선의 움직임이 점도에 큰 영향을 받음을 의미하는 것이지만 점도에 비해하지는 않는다. 이러한 현상은 접촉선이 움직이면서 동시에 잉크가 건조되기

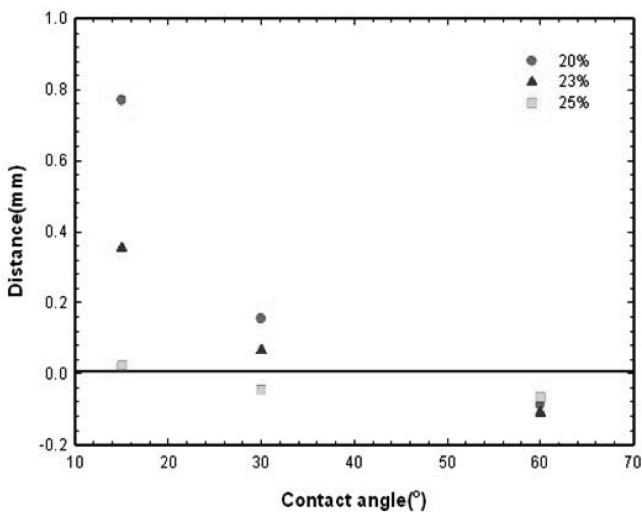


Fig. 5. Moving distance of the contact line. The horizontal line refers to the no movement.

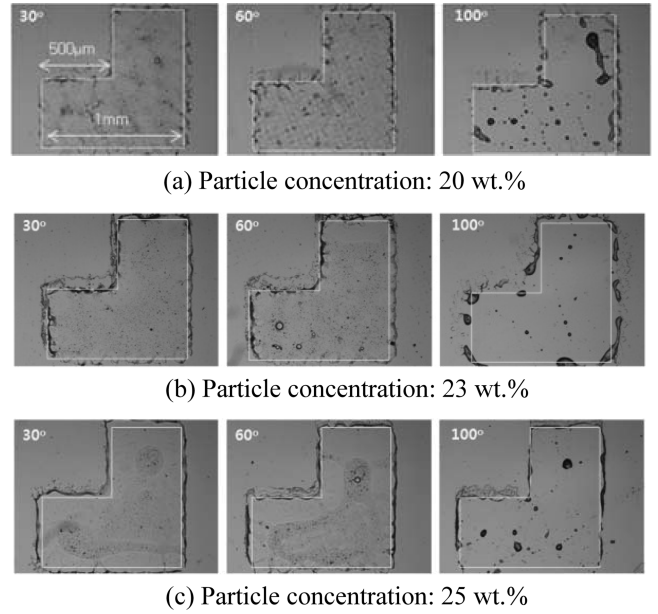


Fig. 6. Silk screen printing image (a)20%, (b)23%, (c)25%.

때문에 발생하게 되는 것으로 판단된다. 즉 접촉선이 움직이면서 건조가 되면 접촉선 부근은 잉크의 두께가 얇으므로 바로 건조되고 점도가 커지면서 움직이지 못하게 되는 현상이 발생되기 때문으로 판단된다. 따라서 접촉선의 움직임의 문제는 표면성질과 점도뿐만 아니라 열 및 물질전달에 의하여도 영향을 받게 됨을 알 수 있다. 현재 저자들이 알고 있는 범위에서는 잉크와 같은 현탁액의 접촉선이 동과 관련된 열 및 물질전달에 대해서는 보고된 바가 없다.

폴리에스터 마스크를 이용하여 크기가 1,000 µm인 L자형의 형상을 20, 23, 25 wt.%의 용액을 접촉각이 다른 표면에 인쇄 실험을 수행하여 Fig. 6에 도시하였다. 금속 마스크의 경우와는 달리 인쇄형상이 접촉각의 크기에 민감하게 변하지 않으며, 특히 접촉선이 모두 패턴 밖으로 나가는 현상이 관찰된다. 이는 인쇄된 잉크가 마스크와 인쇄면 양쪽에 정착되어 접촉선의 움직임이 제약을 받게 됨으로써 퍼짐성이 크게 차이가 나지 않게 되기 때문이다. 즉 젖음성이 서로 다른 평면 사이의 유동이 됨으로써 인쇄면의 젖음성에 덜 민감한 것으로 나타난다. 또한 100°에서는 인쇄가 잘 이루어지지 않고 잉크에 포함된 입자들끼리 국부적으로 뭉치는 현상이 관찰되는데 이는 젖음성이 나쁜 면에서 액체 필름이 불안정성에 의하여 작은 액적으로 뭉치는 현상으로 설명된다. 한편 입자의 농도가 높을수록 인쇄 형상의 접촉선이 깨끗한 형상을 볼 수 있는데 이는 입자의 농도가 높을수록 잉크의 점탄성이 커지게 되고 이는 마스크에 인쇄된 이후 마스크와 고체 인쇄면 분리될 때 마스크와 고체 인쇄면에 접촉되어 있는 잉크가 떨어지면서 점탄성이 큰 물질이 빠르게 끊어져 깨끗한 테두리를 형성할 수 있게 되는 것으로 판단된다. 즉 메탈 마스크의 경우에는 인쇄시 잉크가 직접 고체 인쇄면에 전사되어 인쇄된 형상의 접촉선이 잉크의 점탄성에 크게 영향을 받지 않게 되지만 폴리에스터 스크린 마스크의 경우는 전사된 잉크가 고체 인쇄면과 마스크에 정착된 이후 떨어지기 때문에 점탄성이 중요하게 작용하는 것으로 판단된다.

스크린 인쇄에서의 접촉선의 이동에 대하여 좀더 자세히 검토하기 위해 서로 다른 기하학적인 형태, 즉 원형, 사각형과 L자 형태의

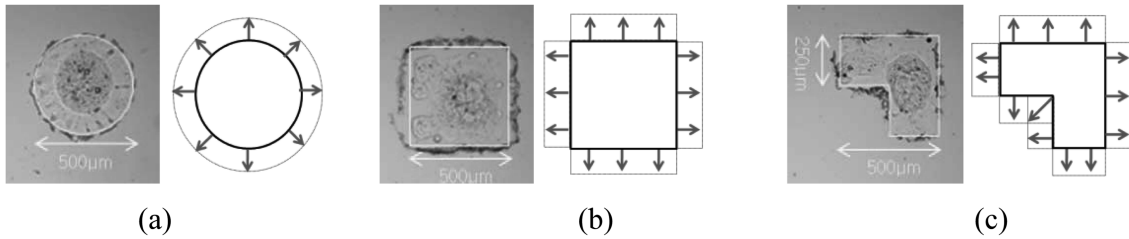


Fig. 7. Silk screen printing images and the schemes of contact line movement. The ink concentration is fixed at 20% (a) Circle (b) Square (c) L-type.

형상에서의 접촉선의 움직임을 관찰하였다. Fig. 7은 점도가 낮은 잉크를 이용하여 폴리에스터 스크린 메쉬로 인쇄한 결과를 x40의 현미경으로 촬영한 사진과 접촉선의 이동과 표면의 평탄화가 어떻게 진행되는지 도식화한 것이다. 원형의 형상의 경우에는 인쇄된 잉크가 동심원 형태로 퍼지는 것이 관찰된다. 사각형의 경우에는 사각형의 직선 부분에서는 접촉선이 일정하게 퍼지는 데 반해 직각을 이룬 부분에서는 잉크가 퍼지지 않는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 양쪽의 직선부분에서는 잉크가 빠져 나가는 것에 반해 직각을 이룬 부분에서는 더 이상 빠져 나갈 잉크가 없을 뿐만 아니라 곡률이 커서 표면장력에 의하여 안쪽으로 액체를 밀게 되기 때문이다. L자형의 형상에서는 사각형과 마찬가지로 직선부분에서는 잉크가 퍼지는 현상을 보인다. 하지만 볼록한 꼭지점과 오목한 꼭지점 부근에서의 이동은 반대로 나타나는 것을 볼 수 있다. 즉 오목한 꼭지점 부근에서는 접촉선이 움직이면서 액체가 모이고, 이에 더해서 표면장력도 액체를 대각선 방향으로 끌어낸다. 이는 볼록한 꼭지점의 경우와 반대되는 현상이다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 전자산업에서 행해지는 스크린인쇄와 유사한 공정조건에서 실험함으로써 스크린 인쇄에서 어떠한 물리적인 현상이 일어나는가에 대한 계면유체역학적인 문제를 알루미나 나노입자를 물에 분산시킨 점성과 탄성을 갖는 모델잉크를 대상으로 실험적으로 고찰하였다. 현재까지 스크린 프린팅에 대한 연구는 주로 잉크를 스크린을 통하여 밀어내는 것에 대한 연구가 거의 전부인 것이 사실이다. 그러나 고체면의 스크린 프린팅에서 접촉선의 이동으로 형성되는 인쇄 형상은 단순히 평형상태의 접촉각에 의하여 결정되지 않는다. 또한 동적 접촉각의 문제로도 해결되지 않으며, 길이에 대한 스케일로는 설명되지 않는 표면장력의 역할로 볼 때 두 접촉각이 다른 두 면, 즉 인쇄면과 스크린 사이에서의 동적 접촉선의 이동으로 해석되어야 하는 문제인 것으로 판단된다. 또한 오목한 모서리와 볼록한 모서리의 차이는 점도에 따라 달라짐을 볼 수 있었다. 특히 잉크의 탄성이 테두리의 형태에 영향을 미치는 것도 볼 수 있었다. 현재 여기서 고려하지 않은 인자는 열 및 물질 전달의 문제이다. 대부분의 스크린 인쇄는 상온에서 행해지고 있으나 온도와 습도에 따라, 또한 대부분의 클린 룸의 조건에서 존재하는 바람의 영향으로 접촉선에서 빠른 증발이 일어나고 이에 의하여 접촉선이 바로 고정되는 문제도 생길 수 있다. 스크린 인쇄의 정밀도와 반복성을 향상시키기 위해서는 젖음성이 서로 다른 두 면 사이의 접촉선의 이동과 접촉선 부근에서의 열 및 물질 전달에 대한 근본적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감 사

이 연구(논문)는 지식경제부의 지식경제프론티어기술개발사업인 차세대정보디스플레이기술개발사업단의 연구비(과제번호F0004021-2009-32)지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Mallik, S., Schmidt, M., Bauer, R. and Ekere, N. N., Influence of Solder Paste Components on Rheological Behaviour, 2nd Electronics Systemintegration Technology Conference Greenwich, UK, 1135-1140(2008).
- Pan, J., Tonkay, G. L. and Quintero, A., Screen printing Process Design of Experiments for Fine Line printing of Thick Film Ceramic Substrate, *J. Electron. Manuf.*, **9**, 203-213(1999).
- Lin, H. W., Chang, C. P., Hwa, W. H. and Ger, M. D., The rheological behaviors of screen-printing pastes, *J. Mater. Process. Technol.*, **197**, 284-291(2008).
- Riemer, D. E., Analytical Engineering Model of the Screen printing Process: *Part 1, Solid State Technol.*, 107-111(1988).
- Riemer, D. E., Analytical Engineering Model of the Screen printing Process: *Part 2, Solid State Technology.*, 85-90(1988).
- Owczarek, J. A. and Howland, F. L., A study of the Off-Contact Screen printing Process-Part 1: Model of the printing Process and Some Results Derived From Experiments, *IEEE Transaction on components, hybrids, and manufacturing technology.*, **6**, 358-367 (1990).
- Owczarek, J. A. and Howland, F. L., A study of the Off-Contact Screen printing Process- Part 2: Analysis of the Model of the printing Process, *IEEE Transaction on components, hybrids, and manufacturing technology.*, **6**, 368-375(1990).
- Claypole, T. C., Gethin, D. T. and Danias, J., Dot gain and ink Transfer behavior in the Screen printing Process, *Surface Coatings International.*, 222-229(1997).
- Ulman, A., *An introduction to ultrathin organic film from langmuir-blodgett to self-assembly*, Academic Press, New York, 237-304(1991).
- Yasserli, A. A., Sharma, S. and Kamins, T. I., Alkylsiloxane self-assembled monolayer formation guided by nanoimprinted Si and SiO₂ templates, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 153121(2006).
- Xue, C. Y. and Yang, K. L., Chemical modifications of inert organic monolayers with oxygen plasma for biosensor applications, *Langmuir*, **23**, 5831-5835(2007).