

분산제 함량에 따른 전도성 카본블랙의 분산 특성 및 스크린 인쇄된 OTFTs용 소스-드레인 전극 물질

이미영 · 배경은 · 김성현* · 임상철* · 남수용†

부경대학교 공과대학 화상정보공학부, *한국전자통신연구원

(2008년 3월 14일 접수, 2008년 9월 1일 수정, 2009년 5월 4일 채택)

Effect of Dispersant Contents on the Dispersity of Conductive Carbon-black and Properties of Screen-printed Source-drain Electrodes for OTFTs

Mi Young Lee, Kyung Eun Bae, Seong Hyun Kim*, Sang Chul Lim*, and Su Yong Nam†

Division of Image & Information Engineering, Pukyong National University, Busan 608–739, Korea

**Electronic and Telecommunication Research Institute, Daejeon 305–350, Korea*

(Received March 14, 2008; Revised September 1, 2008; Accepted May 4, 2009)

초록: 유기 박막 트랜지스터(OTFTs)의 소스-드레인 전극을 스크린 인쇄를 통해 제작하였고, 전극용 페이스트로써 전도성 카본블랙 페이스트를 사용하였다. 전도성 카본블랙 페이스트를 제조하기 위해 서로 다른 분자량 및 고분자 사슬 구조를 갖는 2종류의 분산제(DB-2150, DB-9077)를 사용하여 분산제 함량(SOP; solid on powder, 10–40%)에 따른 카본블랙 밀베이스의 분산 특성을 검토한 결과, 분산제 함량이 증가함에 따라 분산 특성이 더 우수해짐을 알 수 있었다. 전도성 카본블랙 페이스트를 제조하여 레올로지 측정을 통해 카본블랙의 분산상태 및 응집구조에 대해 검토한 결과, 분산제로 DB-2150을 사용한 페이스트들은 분산제 함량이 증가함에 따라 페이스트의 분산 특성이 향상되어 저장 탄성률(G')이 감소하였지만, DB-9077을 사용한 페이스트들은 카본블랙 사이의 상호작용에 의해 망목구조가 존재하였고, 분산제 함량이 증가함에 따라 카본블랙과 분산제간 또는 분산제간의 상호작용에 의해 페이스트의 저장 탄성률(G')은 더욱 증가하였다. 이러한 응집구조는 페이스트의 내부 저항력(tacky)을 발생시켜 DB-9077을 사용한 페이스트들은 분산제 함량이 증가함에 따라 스크린 인쇄 적성이 좋지 못하였다. 하지만, 스크린 인쇄된 OTFTs용 소스-드레인 전극의 전기적 특성은 카본블랙 사이에 형성된 망목구조에 의해 카본블랙의 도전 경로(conduction path)가 형성됨에 따라 DB-2150을 사용한 페이스트들의 OTFTs에 비해 더 우수하였다. 그러나, 2종류의 분산제를 사용한 페이스트 모두, 분산제의 함량이 증가함에 따라 카본블랙 표면을 감싸는 분산제 함량 또한 증가하게 되어 이로 인해 카본블랙간의 도전 경로 형성은 어렵게 되고 전극의 특성은 점점 열화되었다.

Abstract: We have fabricated source-drain electrodes for OTFTs using a screen-printing technique with carbon-black pastes as conductive paste. And effects of dispersants contents(SOP 10–40%) on the dispersity of carbon-black pastes and characteristics of screen-printed source-drain electrodes for OTFTs using two types of dispersants(DB-2150, DB-9077) were investigated. As contents of both dispersants were increased the dispersity of carbon-black mill-bases was improved, whereas the carbon-black pastes exhibited different dispersion characteristics. For the case of DB-2150, the dispersity of the pastes was improved with increasing dispersant content and the storage modulus G' in their rheology characteristics were reduced. But, for the DB-9077, the storage modulus G' of pastes were increased with dispersant content due to the flocculated network structure formed by interactions among carbon-black powders and dispersants. But, since this flocculated network structure of the pastes using DB-9077 resulted in the conduction path of carbon-black structures, the conductivities of screen-printed electrodes and mobilities of the OTFTs with them were better than those using pastes with DB-2150.

Keywords: dispersant content, conductive carbon-black paste, dispersity, screen printing, OTFT source-drain electrodes.

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: suynam@pknu.ac.kr

서 론

유기 박막 트랜지스터(OTFTs)는 제작 공정이 간단하고, 비용이 저렴하며, 충격에 의해 깨지지 않고, 구부러거나 접을 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있어, 능동소자 디스플레이(active-matrix displays), 화학 센서(chemical sensors), 플렉시블 일렉트로닉스(flexible electronics)와 같은 저가격, 대면적의 일렉트로닉 분야에서 많이 연구되고 있다. 이러한 OTFTs의 제작 공법에는 물리적/화학적 증착, 포토 리소그래피(photolithography), 식각(etching), 리프트 오프(lift-off)와 같은 종래의 반도체 소자 제조 기술이 많이 이용되어 왔지만, 저가격, 대량 생산을 위해서는 새로운 성막 및 패터닝 공정이 필요하게 되었다. 따라서, OTFTs의 전극, 유전체, 반도체 층의 패터닝을 위해 진공 증착 및 포토리소그래피를 대신하여 스크린 인쇄(screen printing),¹⁻³ 잉크젯 프린팅(inkjet printing),⁴⁻⁷ 마이크로 컨택 프린팅(micro-contact printing)과⁸⁻¹⁰ 같은 고정밀 인쇄 기술이 주목받고 있다.¹¹⁻¹³

이 중, 잉크젯 프린팅은 비접촉 인쇄 방식으로, 잉크젯팅 진동수와 인쇄 헤드 상의 노즐 수를 증가시킴으로써 대량 생산이 가능한 인쇄 속도를 가지기 때문에 OTFTs 제작 공법으로 많이 적용되고 있다. 하지만, 잉크젯 프린팅을 이용하여 전극을 형성할 경우, 균일한 전극 형성을 위해 기판의 표면 처리가 필요하게 되고,^{4,5} 전극 재료로 전도성 고분자를 사용하는 경우에는 고분자 전극 속의 큰 기생 저항에 의해 낮은 전도성을 갖게 되어 OTFTs 소자 성능이 떨어진다는 문제점이 있다. 또한, 마이크로 컨택 프린팅은 탄성 스탬프와 기판 사이의 상호 작용에 의해 스탬프 상의 물질을 기판으로 전이시켜 패터닝하는 방법으로 수십 nm 크기의 작은 패턴을 형성할 수 있는 고해상도를 가지고 있으나,¹⁴ 스탬프의 변형에 의한 패턴의 치수 오차와 적용 가능한 기판의 제한 등 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 반면, 스크린 인쇄법은 마스크를 이용하여 원하는 부분에 성막 및 패턴 형성을 동시에 할 수 있어 공정이 간단하고, 대면적 인쇄가 가능하며, 재료 이용 효율이 높아 오래 전부터 전자 디바이스 및 디스플레이의 제조 공법으로 많이 연구되어져 왔다.¹⁵⁻¹⁸ 박막 및 미세 패턴 형성(대면적 인쇄 시 70 μm 이하 한계)에 불리한 단점은 있으나, 판재인 스크린이 유연하여 다양한 기판에 적용할 수 있고, 잉크가 스크린의 오프닝부만 통과하면 인쇄가 가능하기 때문에 잉크의 종류가 다양하다는 점에 의해 OTFTs의 전극 형성 연구에도 적용되어져 왔다.

본 실험에서는 이러한 스크린 인쇄법을 이용하여 OTFTs의 소스-드레인 전극을 형성하였고, 이를 위해 스크린 인쇄용 전도성 페이스트로 카본블랙 페이스트를 제조하였다. 전도성 필러로 카본블랙을 선택한 이유는 OTFTs 소자의 ohmic contact에서 좋은 특성을 얻기 위함으로 카본블랙이 본 실험의 유기 활성층 재료인 펜타센과 유사한 화학적 성질(π -공액 구조)을 가지고 있어 유기 반도체와의 일함수 적

합성에서 유리할 것으로 판단하였기 때문이다.³

전도성 카본블랙은 축합 벤젠환의 π 전자의 이동에 의해 도전성을 발현하는 물질로, 그 구조는 상당히 복잡하다. 먼저 축합 벤젠환이 결정자로 배열하여, 그 결정자가 집합하여 일차 입자를 형성하고, 일차 입자가 응축하는 것에 의해 structure(aggregate) 구조를 취하고 있다. 고분자 재료 중에 카본블랙을 분산시키는 경우, 이 structure는 더 이상 미세화할 수 없는 최소 단위이며, 따라서 카본블랙 분산이란 일차 입자의 집합체인 structure 단위까지 분쇄하여 그 상태를 안정적으로 유지하는 공정이라 말할 수 있다. 고분자 재료 중에 분산시킨 카본블랙은, ①응집체 그대로 존재하고 있는 경우, ②분산이 진행하여 structure끼리 van der Waals력에 의해 결합하여 구조체(agglomerate)로 존재하고 있는 경우, ③structure까지 완전 분산하고 있는 경우로 크게 구별되며, 이 분산상태는 전도성이나 스크린 인쇄 적성 등 카본블랙 페이스트의 물성에 큰 영향을 미치게 된다. 즉, 분산상태가 좋지 않아 카본블랙 응집체가 존재하는 경우, 그 응집체는 agglomerate나 structure에 의해 이루어지는 도전 경로(conduction path) 형성에 관여할 수 없기 때문에 전도성은 저하되고, 응집 덩어리의 존재에 의해 페이스트의 인쇄 적성도 좋지 못하게 된다. 그러나, 카본블랙의 분산이 너무 과도하게 되었을 경우에도 도전 경로를 형성할 수 있는 카본블랙의 망목구조가 파괴되고, 고분자 수지가 카본블랙을 완전히 감싸게 됨에 따라 페이스트의 작업성은 좋으나, structure 사이의 고분자 장벽에 의해 도전 경로 형성은 어렵게 된다.¹⁹ 따라서, 본 실험에서는 서로 다른 분자량 및 고분자 사슬부를 갖는 2종류의 분산제를 사용하여 분산제 함량에 따른 전도성 카본블랙의 분산 특성을 밀 베이스의 PSA (particle size analysis) 및 도막의 광택치를 통해 검토하였고, 전도성 카본블랙 페이스트를 제조하여 레올로지를 측정함으로써 페이스트 내의 카본블랙의 분산 및 응집구조를 평가하였다. 그리고, 분산제 함량과 카본블랙의 분산 및 응집구조가 전도성 카본블랙 페이스트의 스크린 인쇄 적성 및 스크린 인쇄된 OTFTs용 소스-드레인 전극의 물성에 미치는 영향에 대해 검토하였다.

실 험

시약. 본 실험에서는 전도성 카본블랙 파우더로 불완전연소법 중 oil furnace법에 의해 제조된 HIBLACK 40B2(코리아카본블랙(주))를 사용하였다. 카본블랙의 분산성 및 전도성에 영향을 미치는 대표적인 인자로는 입자 크기(비표면적과 관계), structure(DBP 흡유량과 비례), 그리고 입자의 표면 상태(휘발분과 pH와 관련)를 들 수 있는데^{20,21} 본 실험에서 사용한 카본블랙은 입경 23 nm, 비표면적 120 m^2/g , DBP 흡유량 150 mL/100 g, 휘발분 1.5%, pH 8인 비드(bead)상의 입자이다. 그리고, 분산제 함량에 따른 카본블랙의 분산 특성을 검토하기 위해 BYK사의 분산제 2종류(DB-2150, DB-9077)를

Table 1. The Composition and Typical Properties of Dispersants

Dispersant	Composition	Amine value (mg KOH/g)	Acid value (mg KOH/g)	Density (20 °C, g/mL)	Non-volatile matter (%)	M_w
DB-2150	Solution of a block-copolymer with basic pigment affinic groups	57	—	1.01	52.0	50000-60000
DB-9077	High molecular weight copolymer with pigment affinic groups	48	—	1.05	98.0	25000-35000

사용하였고, 그 물성을 Table 1에 나타내었다. 일반적으로 분산제는 파우더 표면과 친화성을 갖는 흡착부(anchor부)와 액상 매체와의 상용성을 갖는 고분자 사슬부(tail부)로 이루어져 있는데, 흡착부에 의해 분산제는 산성 및 염기성의 성질을 나타내므로 분산제의 산가 및 아민가에 의해 흡착부의 성질을 판단할 수 있다. 또한, 이러한 성질은 카본블랙 표면과의 상호작용과 관련되어 분산 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 본 실험의 분산제는 모두 염기성 흡착부를 갖는 물질로, 서로 다른 분자량과 고분자 사슬 구조를 갖는 고분자량 타입의 분산제이다. 카본블랙 파우더에 인쇄적성을 부여할 도막형성재료로는 중량 평균분자량(M_w) 80000, 산가 7.0 mgKOH/g, 유리전이온도(T_g) 60 °C의 물성을 갖는 스티렌-아크릴계 공중합체인 SW 8390(삼우 고분자(주))을 사용하였다. 그리고, 바인더 수지의 희석용제 역할과 동시에 전도성 카본블랙 페이스트의 인쇄 적성을 조절하기 위해 시약급의 고비점 용제인 ECA(ethyl carbitol acetate, b.p 217 °C, 삼전화학(주))를 사용하였다.

전도성 카본블랙 밀베이스 및 페이스트 제조. 분산제 함량에 따른 전도성 카본블랙의 분산 특성을 검토하기 위해 먼저 Table 2와 같이 2종류의 분산제를 사용하여 분산제 첨가 유무 및 함량에 따른 9종류의 카본블랙 밀베이스를 제조하였다. 카본블랙은 분산 특성에 영향을 줄 수 있는 표면의 수분 성분을 제거하기 위해 100 °C에서 2시간 동안 건조한 후 사용하였고, 분산제는 용제와의 상용성을 검토한 후에 적용하였다. 분산제는 파우더 표면에 흡착되어 그 특성을 발현하는 물질이므로 첨가 함량은 파우더의 입경 및 비표면적과 관련되고, 파우더에 대한 분산제 고형분의 함량(SOP, solid on powder)으로 정의된다. 카

본블랙의 경우, 입경이 작고 비표면적이 매우 크기 때문에 일반적으로 파우더 함량에 대해 30~70%(SOP 30~70%)의 높은 분산제 첨가 농도가 밀베이스의 분산성 향상 및 페이스트의 안정화에 필요하게 된다. 본 실험에서는 상기의 함량을 참고하여 카본블랙 파우더에 대해 분산제 고형분의 함량을 10~40%(SOP 10~40%)로 달리 첨가함으로써 분산제 함량에 따른 카본블랙 밀베이스의 분산 특성을 검토하였다. 그리고, Table 3과 Figure 1과 같이 소스-드레인 전극을 형성하기 위해 전도성 카본블랙 페이스트를 제조하였다. 바인더 수지의 고형분은 페이스트의 분산 안정성, 스크린 인쇄 적성 및 전기 전도성을 고려하여 페이스트 100 wt%에 대해 24 wt%를 첨가하였다. Figure 1에서 볼 수 있듯이 본 실험에서는 분산기(paint shaker) 안에 밀베이스와 비즈(beads)를 함께 투입시킨 후, 분산기가 일정 속도로 좌우 진동을 함으로써 비즈에 의한 충격력과 전단력에 의해 카본블랙 파우더가 분쇄되어지는 비즈밀(beads-mill) 분산을 행하였다. 여기서 실험에 사용된 비즈의 입경과 경도, 재질 및 첨가 함량 등이 분산 특성에 영향을 미치게 되는데, 본 실험에서는 입경 2 mm의 지르코니아(zirconia) 비즈를 밀베이스 함량에 대해 1:1 중량비로 첨가하여 카본블랙 밀베이스를 2시간 동안 분산시켰다. 그리고, 분산된 밀베이스를 바인더 수지와 혼합하여 600 rpm의 속도로 1시간 동안 교반기를 통해 교반시킴으로써 전도성 카본블랙 페이스트를 완성하였다.

스크린 인쇄 및 OTFTs 소자 제작. 본 실험에서는 스크린 인쇄를 하기 위해 (주)삼본스크린에서 제판된 스크린 인쇄판을 사용하였다. 일반적으로 스크린 인쇄에서 가장 많이 사용되고 있는 망사는 폴리에스테르 망사이지만, 전자 디스플레이 및 디바이스에 적용되는 미세 패턴용 인쇄에는 페이스트의 토출성이 좋고 치수 안정성이 우수한 스테인레스(SUS) 망사가 주로 사용된다. 또한, 망사가 고메쉬(high mesh)일수록 미세패턴 및 박막 인쇄에 유리하고, 감광 유제막의 두께가 얇을수록 박막 인쇄에 유리하다. 본 실험에서는 320×320 mm 프레임에 캘린더(calender) 가공을 한 500 메쉬의 스테인레스 망사를, 1.00 mm/kgf의 장력(tension)과 34°의 각도(mesh angle)로 사매기하여 5 μ m의 감광 유제막 두께를 형성한 스크린 인쇄판을 사용하였다. 그리고, air 구동 방식의 반자동 스크린 인쇄기(BS-150ATC, 반도체산업(주))를 이용하여 스크린 인쇄하였고, 6 kgf/cm²의 air 압으로 기계를 작동하였다. 이때 스퀴지는 경도 80°의 평형 타입인 우레탄 고무를 사용하였고, 스퀴지 각도는 80°, 판과 기판 사이의 거리인 이격거리는 1.5~2.0 mm, 인쇄압과 비례하는 값인 스퀴지 밀어 넣는 양(degree of

Table 2. The Formulations of Conductive Carbon-black Mill-bases

Mill base (wt%)	Carbon black powder	ECA	Dispersant	
CBM-0	30	70	—	—
CBM-210	30	64.23	DB-2150	5.77 (SOP 10%)
CBM-220		58.46		11.54 (SOP 20%)
CBM-230		52.69		17.31 (SOP 30%)
CBM-240		46.92		23.08 (SOP 40%)
CBM-910	30	66.94	DB-9077	3.06 (SOP 10%)
CBM-920		63.88		6.12 (SOP 20%)
CBM-930		60.82		9.18 (SOP 30%)
CBM-940		57.76		12.24 (SOP 40%)

Table 3. The Formulations of Conductive Carbon-black Pastes

Paste (wt%)	Carbon black powder	ECA	Dispersant	Binder resin (N.V 60%)	
				Solid	ECA
CBP-210	20	36.15	3.85 (SOP 10%)	24	16
CBP-220		32.31	7.69 (SOP 20%)		
CBP-230		28.46	11.54 (SOP 30%)		
CBP-240		24.62	15.38 (SOP 40%)		
CBP-910	20	37.96	2.04 (SOP 10%)	24	16
CBP-920		35.92	4.08 (SOP 20%)		
CBP-930		33.88	6.12 (SOP 30%)		
CBP-940		31.84	8.16 (SOP 40%)		

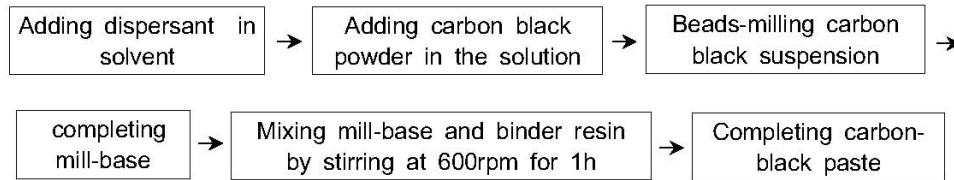


Figure 1. The manufacturing process of conductive carbon-black paste.

squeegee pushing in)은 0.05–0.5 mm, 인쇄 속도는 100–180 mm/sec로 하여, 페이스트에 따라 인쇄 조건을 조절하였다.

전도성 카본블랙 페이스트를 이용하여 스크린 인쇄된 OTFTs용 소스-드레인 전극의 특성을 검토하기 위해 bottom contact 구조의 OTFTs 소자를 제작하였다. 먼저 기판 및 게이트 전극으로써 높은 전도성의 Si wafer(비저항 5–10 $\Omega \cdot \text{cm}$)를 사용하였고, 그 위에 300 nm 두께의 SiO_2 층(단위 면적당 캐패시턴스 $C_0=10 \text{ nF/cm}^2$)을 게이트 유전체층으로 형성하였다. 또한, 유전체층 위에 본 실험에서 제조한 전도성 카본블랙 페이스트를 이용하여 상기의 조건으로 스크린 인쇄한 뒤, 120 $^\circ\text{C}$ 에서 30분간 열건조함으로써 소스-드레인 전극을 형성하였다. 마지막으로 소스-드레인 전극 위에 10^{-8} Torr의 압력 하에서 진공 열증착에 의해 p형 반도체인 펜타센층을 형성함으로써 bottom contact 구조의 OTFTs 소자를 제작하였다.

측정 및 분석. 액체 매체에 분산되어 있는 카본블랙의 분산 특성을 검토하는 방법에는 분산 입자경(PSA) 측정, 점도 측정, 건조 도막의 광택 측정, 희석 분산액의 헤이즈(haze) 측정 등 여러 가지 방법이 있다. 본 실험에서는 서로 다른 분자량 및 고분자 사슬부를 갖는 2종류의 분산제를 사용하여 분산제 함량에 따른 카본블랙의 분산특성을 검토하기 위해, 먼저 카본블랙 밀베이스의 분산 입자경을 PSA(LS 13320, Beckman Coulter) 장비를 통해 측정하였다. 소량의 밀베이스를 용제(ECA)에 희석시켜 샘플을 제작한 후, 레이저 회절법에 의해 밀베이스 내에 분산되어 있는 카본블랙의 입자 크기 및 입도 분포를 얻을 수 있었다. 또한, 10 μm 의 bar-coater를 이용하여 카본블랙 밀베이스의 건조 도막을 형성한 뒤, 광택계(Ref 260, Sheen)를 통해 도막의 광택도(입사각 60 $^\circ$)를 측정함으로써 분산특성을 판단하였다. 그리고, 제조된 전도성 카본블랙 페이스트의 분산상태 및 응집구조를 검토하기 위해 페이스트 건조 도막의 광택 측정 및 레오미터(Rheoscope 1, Haake)를 이용하여 페이스트의 레올로지를 측정하였다. 레올로지 측정 시, 사용한 센서는 직경 35 mm의 평행판으로, 시료간격은 0.8 mm, 측정온도는 25 $^\circ\text{C}$ 로 하였다. 또한, 스크린 인쇄된 소스-드레인 전극 패턴의 형상을 광학현미경(BX 60, Olympus)을 이용하여 50배율로 촬영하였고, 전극의 전기 전도성을 저항 측정기(3541 resistance hitester, Hioki)를 이용하여 측정하였다. 그리고, 제작된 OTFTs 소자의 특성을 air 분위기의 실온에서 반도체 특성 측정 장비(4200-SCS, Keithley)를 통해 측정하였다.

결과 및 토론

전도성 카본블랙 밀베이스의 분산 특성. Tables 4와 5에 서로 다른 분자량 및 고분자 사슬부를 갖는 2종류의 분산제를 사용하여 분산제 함량에 따른 전도성 카본블랙 밀베이스의 분산 특성을 PSA 및

Table 4. The Particle Distribution Data of Conductive Carbon-black Mill-bases

Mill-base	Mean diameter (nm)	D_{10} (nm)	D_{50} (nm)	D_{90} (nm)
CBM-0	417.8	295.2	412.4	587.4
CBM-210	197.7	156	167	179
CBM-220	153.8	126.9	150.7	179
CBM-230	140.9	111.6	119.9	128.8
CBM-240	133.9	105.8	113.7	122.4
CBM-910	205.4	176.8	188.3	200.6
CBM-920	165.7	145.8	161	177.8
CBM-930	138.1	114.3	123.3	133.2
CBM-940	129.5	114.3	121.9	130

Table 5. The 60 $^\circ$ Gloss Values of Conductive Carbon-black Mill-bases

Mill-base	60 $^\circ$ Gloss values
CBM-0	16.8
CBM-210	2.76
CBM-220	57.96
CBM-230	70.96
CBM-240	73.62
CBM-910	14.4
CBM-920	66.58
CBM-930	67.12
CBM-940	73.56

도막 광택치 결과로 각각 나타내었다. 먼저 Table 4의 PSA 결과를 보면, 분산제를 넣지 않은 CBM-0에 비해 분산제를 첨가한 카본블랙 밀베이스들의 분산 특성이 더 우수하고, 분산제 함량이 증가함에 따라 밀베이스 내에 분산된 카본블랙의 입자경은 더욱 미세하며 입도 분포도 좁아지는 것을 볼 수 있었다. 이것은 카본블랙 표면에 분산제가 흡착됨에 따라 카본블랙 사이에 입체 장애를 부여함으로써 그들 간의 상호작용을 감소시켜 분산 특성이 우수하게 된 것으로 생각된다. 특히 분산제 함량이 증가함에 따라 카본블랙 표면에 흡착되는 분산제의 함량도 증가하게 되고 이것이 카본블랙간의 응집력을 더욱 감소시켜 분산 특성이 향상된 것이다. 그러나, 밀베이스 상태에서 2종류의 분산제(DB-2150과 DB-9077) 사이의 카본블랙에 대한 분산 효과 차이는 거의 없는 것을 볼 수 있었다.

Table 5에 카본블랙 밀베이스의 도막 광택치 결과를 나타내었다. 일반적으로 파우더의 분산 특성이 우수할수록 미세 입자가 존재하게 되고, 그것에 의해 막의 표면이 평활하게 되어 도막의 광택치는 높게 된다. Table 5의 결과를 보면, 분산제 함량이 10%(SOP 10%)인 CBM-210, -910을 제외하고는 분산제를 넣지 않은 CBM-0에 비

해 고광택의 도막을 얻었고, 분산제의 함량이 증가함에 따라 도막의 광택치가 증가하는 경향을 보였다. 이것은 상기의 PSA 측정 결과와도 일치한다. 즉, 분산제 함량이 증가함에 따라 밀베이스 내의 카본블랙의 분산 특성 또한 향상된 것을 볼 수 있다. 그러나, CBM-0, -210, -910의 도막 광택 결과는 PSA 결과와 차이를 보이는데 이것은 분산제가 첨가되지 않았거나 그 함량이 10%인 밀베이스의 경우에는 카본블랙의 분산특성이 좋지 않아 밀베이스의 점도가 높게 되고 이것이 광택 측정용 도막의 표면 평활성을 저하시킨 결과로 보여진다.

전도성 카본블랙 페이스트의 분산 및 레올로지 특성. Table 3과 같이 분산제 종류 및 함량을 달리하여 제조된 전도성 카본블랙 페이스트의 분산 및 응집구조를 평가하기 위해 페이스트의 레올로지를 측정하였고, 그 결과를 Figures 2~4에 나타내었다. 일반적으로 페이스트의 점도 특성은 두 개의 전단 영역으로 분류되는데, 높은 전단속도 영역에서의 점도는 바인더, 용제 그리고 파우더에 의해 지배되고, 낮은 전단속도에서의 점도는 첨가제, 파우더의 응집 또는 바인더의 콜로이드 특성에 의해 결정된다.²² Figure 2의 전단속도에 따른 점도 결과를 보면, 제조된 8종류의 페이스트 모두 높은 전단 영역에서 전단속도가 증가함에 따라 점도가 감소하는 shear-thinning 거동을 보이고 있다. 이것은 카본블랙과 분산제 그리고 바인더 수지에 의해 형성된 망목구조가 전단력에 의해 파괴되어짐에 따라 점도가 감소한 결과이다. 그러나, DB-2150을 분산제로 사용한 페이스트들(a)은 분산

제의 함량이 증가함에 따라 점도가 큰 폭으로 증가하는 반면, DB-9077을 분산제로 사용한 페이스트들(b)은 분산제 함량이 증가하여도 점도 증가 폭이 작고 전단속도가 증가함에 따라 점도가 하나의 값으로 수렴하는 경향을 보이고 있다. 반면, 낮은 전단속도 영역에서는 DB-2150을 분산제로 사용한 페이스트들이 분산제 함량의 증가에 따라 작은 폭의 점도 증가를 보이는데 반해, DB-9077을 분산제로 사용한 페이스트들은 SOP 40%인 CBP-940을 제외하고는 분산제 함량의 증가에 따라 페이스트의 점도가 큰 폭으로 증가하고 있다. 분산제 종류 및 함량에 따라 페이스트들의 점도 거동이 이처럼 다른 이유는 2종류의 분산제가 서로 다른 분자량 및 상호작용을 갖기 때문인 것으로 해석된다. 즉, 약 50000-60000의 중량평균분자량을 갖는 DB-2150은 25000-35000의 분자량을 갖는 DB-9077에 비해 같은 중량 %로 첨가했을 때 높은 전단 영역에서 페이스트의 점도를 더 높이는 것과 동시에 분산제 함량의 증가에 따라 페이스트의 점도 증가 현상을 더욱 두드러지게 하고 있다. 하지만, 낮은 전단 영역에서의 점도 거동은 분산제의 분자량 영향보다는 카본블랙 파우더간의 상호작용 및 분산제간 그리고 카본블랙과 분산제간의 상호작용에 의한 결과로 사료된다. 즉, DB-9077의 구조 중 바인더 수지와 상용성을 갖는 고분자 사슬부가 본 실험에서 사용한 아크릴 수지와 상용성이 좋지 못하여 바인더 수지가 카본블랙을 확실하게 감싸지 못하게 되고 노출된 카본블랙간의 상호작용에 의해 망목구조가 형성되어 페이스트의 점도가 상승한 것으로 생각된다. 또한, 분산제 함량이 증가함에 따라 바인더 수지와 상용성이 좋지 못한 분산제의 고분자 사슬부가 그들간의 상호작용 또는 분산제와 카본블랙과의 상호작용에 의해 낮은 전단 영역에서의 점도를 더욱 높게 된 것으로 생각된다. 반면, DB-2150의 경우엔 바인더 수지가 분산제의 고분자 사슬부와 상호작용을 하여 분산제가 흡착된 카본블랙 표면을 잘 에워싸게 됨으로써 분산제 함량의 증가에 따라 점도 상승만 약간 있을 뿐, 카본블랙간의 상호작용에 의한 망목구조 형성은 없는 것으로 판단된다. 또한, 분산제 또는 카본블랙간의 상호작용에 의한 일시적인 망목구조는 불안정하므로 전단속도의 증가에 따라 쉽게 파괴되어 매우 sharp한 점도 감소를 나타내는데,²³ DB-9077을 SOP 40% 함유한 CBP-940의 점도 거동을 보면, 8종류의 페이스트 중 가장 sharp한 점도 감소를 나타내며 불안정한 망목구조가 가장 많이 존재함을 보여 주고 있다. 페이스트들의 점도 거동을 통한 카본블랙의 분산상태 및 응집구조의 결과는 Table 6에 나타난 페이스트들의 도막 광택치 결과와도 일치한다. 즉, DB-2150을 사용한 페이스트들은 분산제의 함량이 증가함에 따라 도막의 광택치도 증가하는 반면, DB-9077을 사용한 페이스트들은 분산제 함량이 증가함에 따라 오

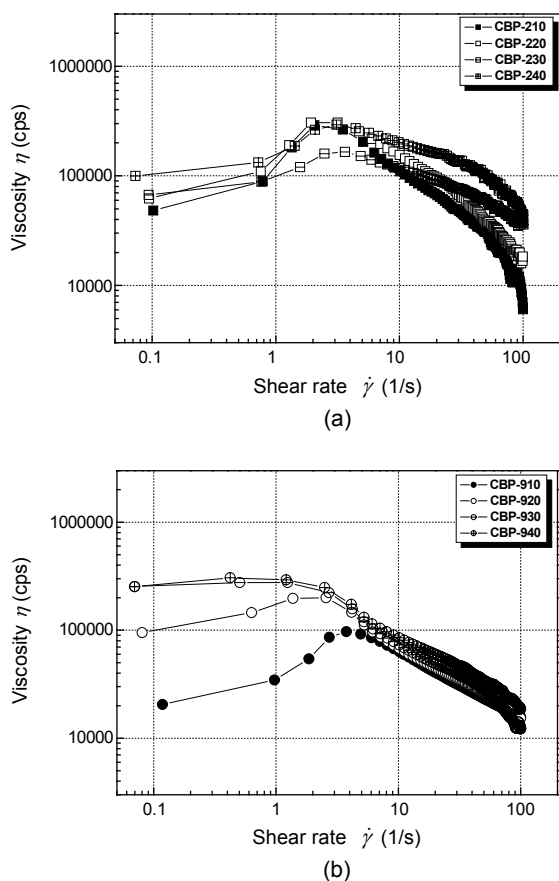


Figure 2. Shear rate dependence of viscosity for conductive carbon-black pastes ((a) pastes using DB-2150; (b) pastes using DB-9077).

Table 6. The 60° Gloss Values of Conductive Carbon-black Pastes

Paste	60° Gloss values
CBP-210	66.5
CBP-220	76.88
CBP-230	82.24
CBP-240	84.06
CBP-910	62.2
CBP-920	69.46
CBP-930	57.7
CBP-940	56

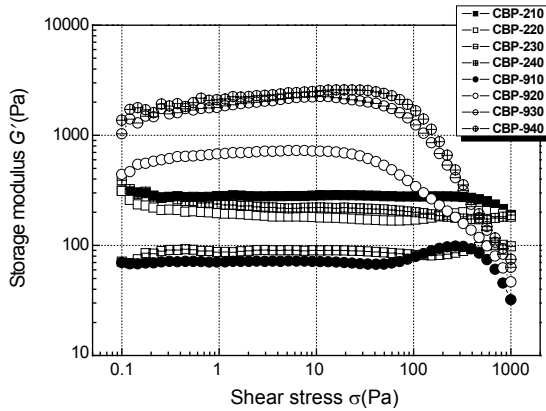


Figure 3. Shear stress dependence of storage modulus at a frequency of 1 Hz for conductive carbon-black pastes.

히려 광택치가 감소하는 현상을 보여주고 있다.

페이스트 상에서 카본블랙과 분산제에 의해 형성된 분산 및 응집구조에 대해 좀 더 자세히 알아보기 위해 페이스트의 동적 점탄성을 측정하였고, 그 결과를 Figures 3과 4에 나타내었다.

Figure 3은 일정한 각주파수(1 Hz)에서 응력의 변화에 따른 저장 탄성률(G')의 변화를 측정한 그래프로, DB-2150을 사용한 페이스트들은 응력의 변화에 대해 G' 이 거의 독립적인 반면, DB-9077을 사용한 페이스트들은 낮은 응력 영역에서는 거의 일정한 값을 보이다가 응력이 증가함에 따라 G' 이 감소하는 거동을 나타내고 있다. Figure 2에서 이미 설명한 대로, DB-9077을 사용한 페이스트들은 카본블랙 파우더간 또는 카본블랙과 분산제간의 상호작용에 의해 응집구조가 형성되고, 이것이 낮은 응력 하에서는 파괴되지 않다가 응력이 증가함에 따라 파괴되어져 G' 이 감소한 것으로 생각된다.²⁴ 반면, DB-2150을 사용한 페이스트들의 경우엔, 바인더 수지가 카본블랙 표면을 감싸게 되어 카본블랙 파우더간의 3차원 망목구조는 형성되지 않아 G' 의 응력에 대한 의존성이 거의 없는 것으로 생각된다.²⁵ 또한, DB-9077을 사용한 페이스트들은 Figure 2처럼 SOP 40%인 CBP-940을 제외하고는, 분산제 함량이 증가함에 따라 분산제간 또는 카본블랙과 분산제간의 상호작용에 의해 망목구조가 더 많이 형성되어 G' 이 점점 더 증가하는 경향을 보이고 있지만, DB-2150을 사용한 페이스트들은 분산제 함량이 증가함에 따라 카본블랙 표면에 흡착하는 분산제 양도 증가하여 바인더 수지가 카본블랙을 잘 감싸게 됨에 따라 파우더간의 망목구조는 형성되지 않고, 따라서 G' 도 점점 감소하는 경향을 나타내고 있다. 하지만, 분산제 함량이 40%인 CBP-240의 경우엔 높은 분산제 함량에 의해 분산제간의 상호작용이 발생하여 G' 이 증가한 것으로 사료된다.

Figure 4에는 Figure 3의 결과로부터 알 수 있었던 페이스트의 구조 변형이 없는 응력 영역(1 Pa)에서의 각주파수에 따른 저장 탄성률(G') 및 손실 탄성률(G'')의 결과를 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이, DB-9077을 사용한 페이스트들의 경우(b)엔, 분산제 함량이 증가함에 따라 탄성을 나타내는 G' 과 점성을 나타내는 G'' 이 모두 증가하는 경향을 보이고 있고, 또한 G' 과 G'' 의 차이가 점점 크게 되는 것을 볼 수 있다. 그리고, SOP 30% 부터는 각주파수 전 영역에서 G' 이 G'' 보다 높은 값($\tan \delta < 1$)을 나타내고 있음을 알 수 있다. 반

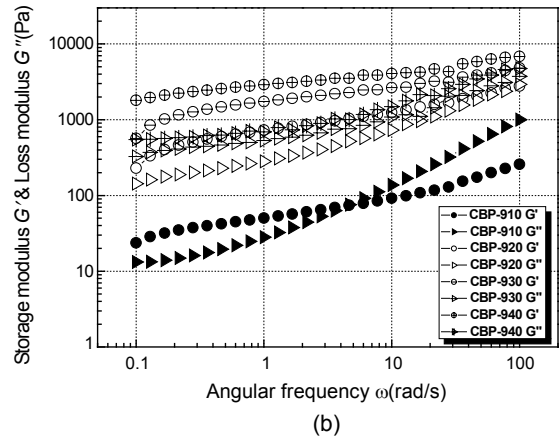
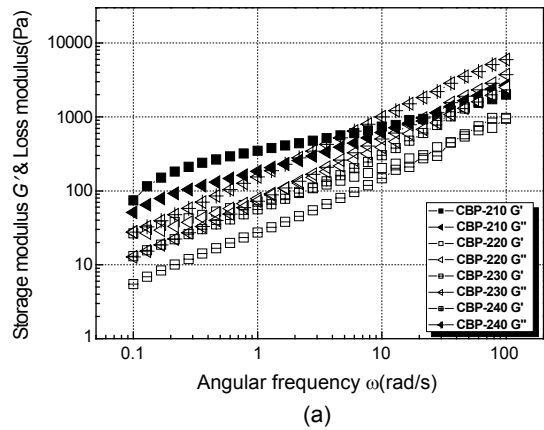


Figure 4. Angular frequency dependence of storage & loss modulus at a stress of 1 Pa for conductive carbon-black pastes ((a) pastes using DB-2150; (b) pastes using DB-9077).

면, DB-2150을 사용한 페이스트들의 경우(a)엔, SOP 40%인 CBP-240을 제외하고는 분산제 함량이 증가함에 따라 G' 이 감소하고, SOP 30%부터는 각주파수 전 영역에서 G'' 이 G' 보다 높은 값($\tan \delta > 1$)을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이러한 레올로지 거동의 결과 또한 분산제 및 카본블랙에 의한 상호작용에 기인한 것으로써 DB-9077을 사용한 경우, 분산제 함량이 증가함에 따라 분산제간 또는 분산제와 카본블랙간의 상호작용에 의해 망목구조가 형성되어, 그 구조에 의해 탄성을 나타내는 G' 의 증가 크기가 점성을 나타내는 G'' 의 증가 크기보다 크게 되는 것이다. 반면, DB-2150을 사용한 경우에는 분산제 함량이 증가함에 따라 바인더 수지가 카본블랙 표면을 더욱 감싸게 됨에 따라 카본블랙 파우더간의 응집구조가 형성되지 않고, 따라서 SOP 30%부터는 각주파수 전 영역에서 G'' 이 G' 보다 크게 되는 거동을 보이고 있다. 그러나, Figure 3에서처럼 SOP 40%인 CBP-240의 경우엔, 고농도의 분산제간의 상호작용으로 G' 이 CBP-230보다 더 증가한 것으로 보인다.²⁶⁻²⁸

전도성 카본블랙 페이스트의 스크린 인쇄 적성. 전도성 카본블랙 페이스트를 이용하여 스크린 인쇄된 전극 패턴을 Figure 5에 나타내었다. 목표로 한 OTFTs의 채널 길이는 100 μm 이었지만, 인쇄 시, 인입에 의해 페이스트가 다소 퍼짐에 따라 100 μm 보다는 작은 채널 길이의 전극을 형성하였다. 일반적으로 페이스트의 레올로지 특성 중

Figure 4의 frequency sweep에서 탄성의 성질을 나타내는 G' 이 점성의 성질을 나타내는 G'' 보다 클 경우($\tan \delta < 1$), 페이스트의 흐름성은 좋지 못하고, G'' 이 G' 보다 클 경우($\tan \delta > 1$), 페이스트의 흐름성은 좋다고 판단하는 경우가 많다. 본 실험에서 DB-9077이 첨가된 페이스트들의 경우, frequency sweep에서 분산제의 함량이 증가함에 따라 $\tan \delta$ 가 작아지는 경향을 보이는데, 인쇄된 패턴 또한 분산제 함량이 증가함에 따라 가장자리가 샤프니스가 좋지 못하고, 표면 평활성도 저하되는 것을 알 수 있었다. 이것은 분산제 함량이 증가함에 따라 분산제간 또는 분산제와 카본블랙간의 상호작용에 의해 형성된 망목구조가 페이스트의 흐름성을 저하시키고, 또한 페이스트 내부에 저항력(tacky)이 발생하기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 스핀 코팅의 접착에 의해 전단력을 받은 페이스트는 망사의 오프닝을 통과한 후, 판떨어짐 공정에서 내부 분열이 일어나는데, 페이스트 내부에 존재하는 이러한 저항력이 내부 분열을 방해하게 되고 따라서 인쇄 적성이 좋지 못한 패턴을 얻게 된 것이다. 반면, DB-2150을 첨가한 페이스트들의 경우엔 frequency sweep에서 높은 각주파수 영역에서의 $\tan \delta$ 가 가장 큰 CBP-230이 가장자리가 샤프하면서도 표면 평활성이 우수한 인쇄 패턴을 얻었다. 그러나, SOP 40%인 CBP-240의

경우엔 Figure 4의 레올로지 결과에서 각주파수 전 영역에 걸쳐 $\tan \delta > 1$ 이지만, 고농도의 분산제간의 상호작용에 의해 페이스트가 내부 저항력을 갖게 되어 표면 평활성은 우수하나, 패턴의 가장자리는 샤프하지 못한 패턴을 얻게 되었다.

전극의 전기 전도성 및 OTFTs의 소자 특성. 전도성 카본블랙 페이스트를 이용하여 스크린 인쇄된 전극의 전기 전도성(a) 및 OTFTs의 전하 이동도(b) 결과를 Figure 6에 나타내었다. OTFTs의 전하 이동도(μ)는 하기의 식 (1)에 의해 측정되었다.

$$I_D = \frac{W}{2L} \mu C_0 (V_G - V_T)^2 \quad (1)$$

여기서, L 은 채널 길이, W 는 채널 폭(channel width), I_D 는 소스-드레인 전류, V_G 는 게이트 전극 전압, V_T 는 문턱 전압 그리고 C_0 는 게이트 유전체 캐패시턴스를 말한다.²⁹ 전기 전도성 및 OTFTs의 전하 이동도 결과를 보면, 2종류의 분산제 모두 분산제 함량이 증가함에 따라 전극의 전기 전도성 및 OTFTs의 전하 이동도가 저하됨을 알 수 있었다. 그리고, DB-2150을 사용한 페이스트들에 의해 제작된 전극의 특성이 DB-9077을 사용한 것들에 비해 떨어짐을 알 수 있었다. 이것은 페이스트 내의 분산제와 카본블랙에 의한 분산 및 응집구조와 관계된 결과로써, DB-2150의 경우엔 분산제의 함량이 증가

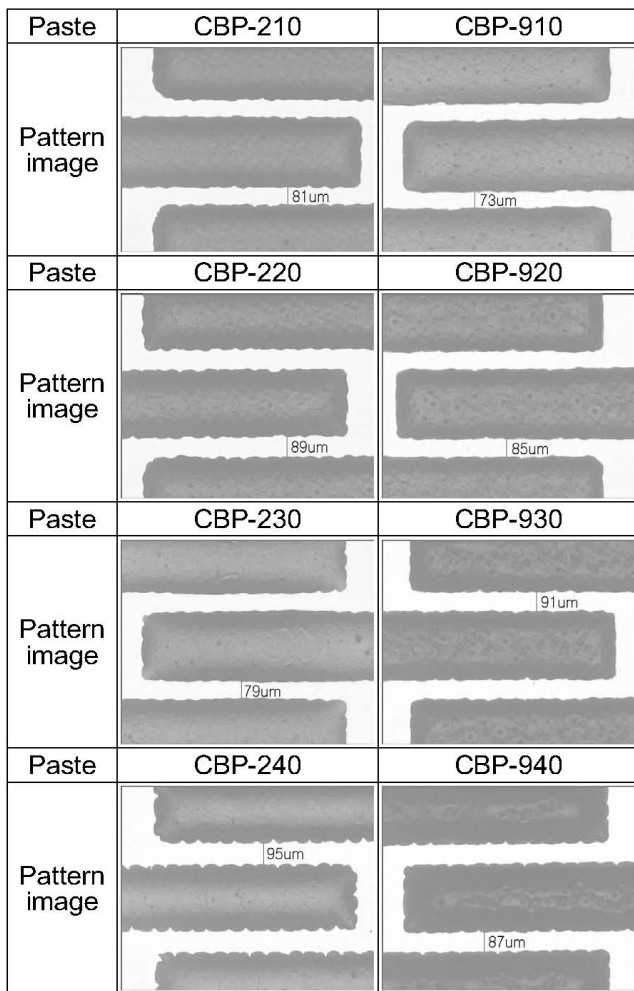


Figure 5. The micrographs of patterns of screen-printed source-drain electrodes.

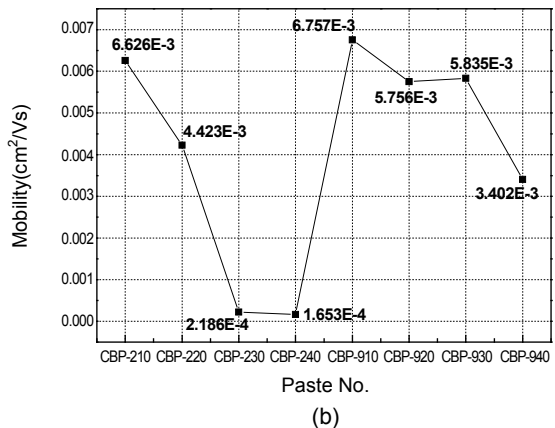
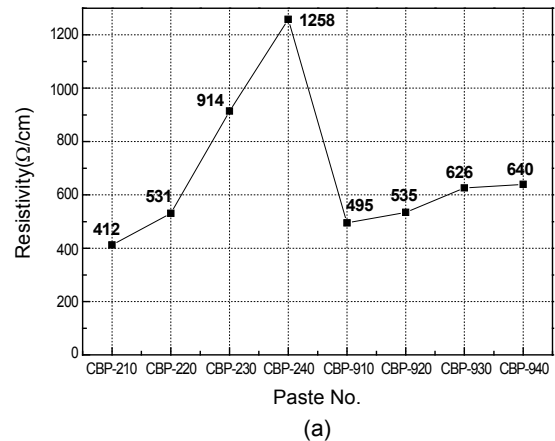


Figure 6. Resistivities of screen-printed source-drain electrodes (a); charge carrier mobilities of OTFTs (b).

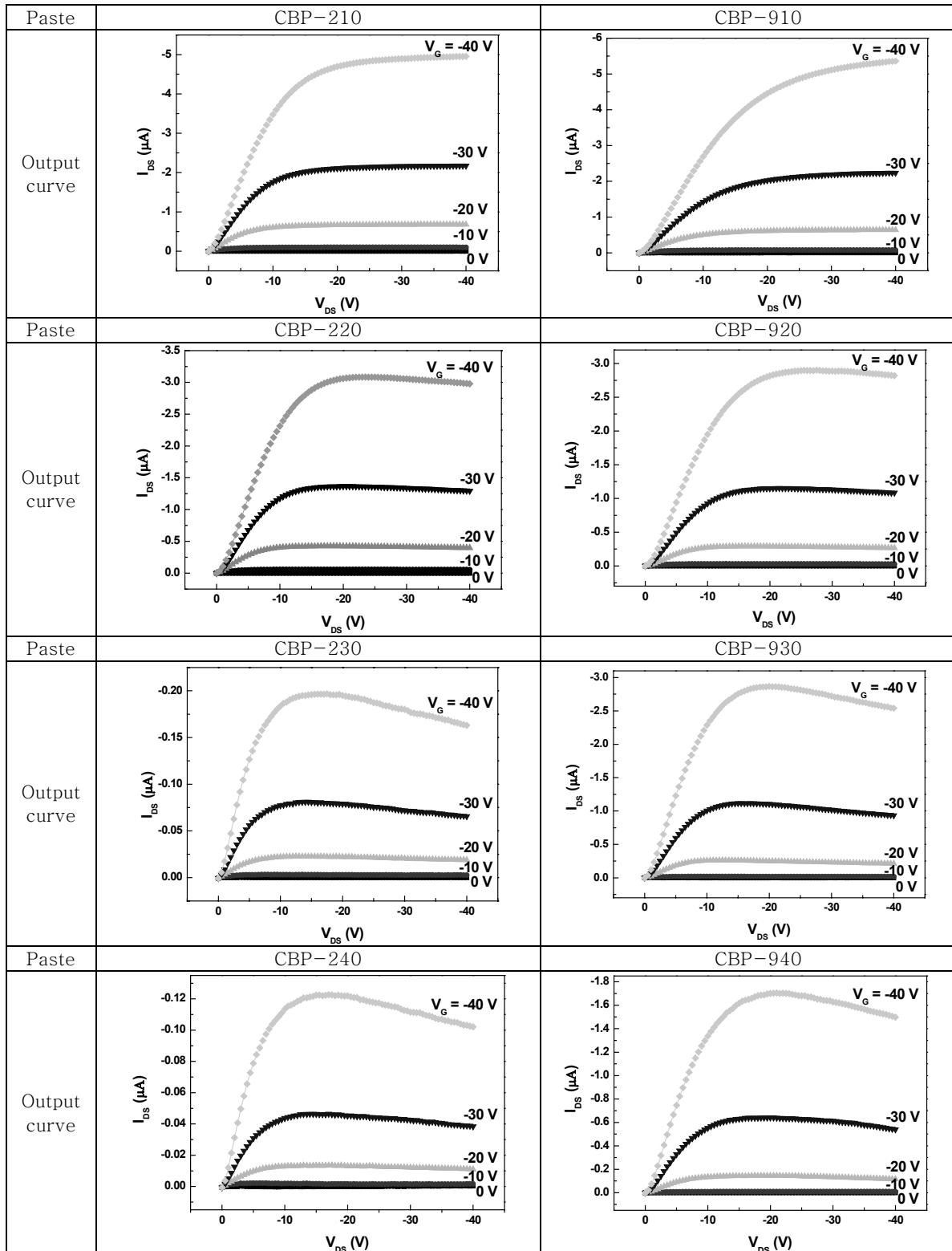


Figure 7. The output characteristics of OTFTs using screen-printed source-drain electrodes.

함에 따라 카본블랙 표면을 감싸는 바인더 수지의 양도 증가하게 되고 그에 따라 카본블랙간의 상호작용에 의한 도전 경로는 제대로 형성되지 못하였다. 따라서, 분산제 함량이 증가함에 따라 OTFTs용 소스-드레인 전극으로써의 특성을 더욱 발현하기 어렵게 되었다. 반

면, DB-9077의 경우엔, DB-2150에 비해 바인더 수지와와의 상용성이 좋지 않아 카본블랙간의 상호작용이 존재하게 되고, 그로 인해 형성된 망목구조가 카본블랙의 도전 경로를 만들게 되었다. 따라서, DB-2150을 사용한 것에 비해 OTFTs용 소스-드레인 전극으로써

더 우수한 특성을 발현할 수 있었다. 그러나, 분산제 함량이 40%로 너무 높을 경우엔 분산제가 카본블랙 표면을 감싸게 되어 카본블랙간의 도전 경로 형성이 어렵게 됨으로써 전극의 특성 또한 열화됨을 알 수 있었다.^{30,31} Figure 7에 본 실험에서 제작된 OTFTs의 출력 특성(output characteristic) 결과를 그래프로 나타내었다. 그래프에서도 볼 수 있듯이, DB-9077을 사용하여 제작된 OTFTs의 전기적 특성이 DB-2150을 사용한 것보다 더 우수하지만, 2종류의 분산제를 사용한 페이스트 모두 분산제 함량이 증가함에 따라 포화 영역에서 소스-드레인 전극의 전압이 증가할수록 전류가 감소하는 OTFTs 소자의 열화 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 드레인 전압이 증가함에 따라 소스-드레인 전극 속에 존재하는 분산제가 열을 발생시켜 전극의 접촉 저항이 증가되면서 소자 특성이 저하된 것으로 사료된다. 본 실험에서는 활성층 재료인 펜타센과 유사한 화학적 성질(π -공액 구조)을 갖고 있는 전도성 카본블랙을 이용하여 소스-드레인 전극을 제작함으로써, 펜타센과 유사한 일함수로 인해 OTFTs의 전하 이동도가 향상될 것으로 기대하였으나, 카본블랙의 분산성을 향상시키기 위해 첨가한 분산제로 인해 그 특성이 오히려 저하되는 결과를 볼 수 있었다.

결 론

본 실험에서 서로 다른 분자량 및 고분자 사슬부를 갖는 2종류의 분산제(DB-2150, DB-9077)를 사용하여 분산제 함량(SOP 10-40%)에 따른 전도성 카본블랙의 분산 특성을 검토한 결과, 분산제 함량이 증가함에 따라 카본블랙 밀베이스의 분산 특성이 우수해지고, 2종류의 분산제 사이에 카본블랙에 대한 분산 효과는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 이것은 분산제 함량이 증가함에 따라 카본블랙 표면에 흡착하는 분산제의 양도 증가하게 되어 카본블랙 사이에 입체 장애를 부여함으로써 그들간의 상호작용을 감소시켜 분산 특성이 우수하게 된 것으로 생각된다. 또한, 본 실험에서 사용한 분산제의 분자량 및 고분자 사슬 구조의 차이가 카본블랙, 분산제, 용제로 구성된 밀베이스에서는 크게 나타나지 않은 것으로 생각된다. 전도성 카본블랙 페이스트를 제조하여 레올로지 측정을 통해 페이스트에서의 카본블랙의 분산상태 및 응집구조를 검토한 결과, DB-2150을 사용한 페이스트들의 분산 특성이 DB-9077을 사용한 것들에 비해 우수함을 알 수 있었다. 이것은 2종류의 분산제가 페이스트 내에서 바인더 수지와 서로 다른 상호작용을 하고 있기 때문으로 해석된다. 즉, DB-2150의 경우에는 분산제의 고분자 사슬부와 바인더 수지와의 친화성이 우수하여 바인더 수지가 분산제가 흡착되어 있는 카본블랙 표면을 잘 에워싸게 됨으로써 카본블랙의 분산 특성은 우수하고, 분산제 함량이 증가함에 따라 그 특성이 더 향상된 반면, DB-9077의 경우에는 분산제의 고분자 사슬부와 바인더 수지와의 상용성이 좋지 못해 바인더 수지가 카본블랙을 확실히 감싸지 못함에 따라 노출된 카본블랙 파우더 사이의 상호작용이 발생하고, 그로 인해 망목구조가 형성되었다. 또한, 분산제 함량이 증가함에 따라 분산제간 또는 분산제와 카본블랙간의 상호작용에 의해 페이스트의 응집구조는 더욱 많이 형성된 것이다. 이러한 해석은 페이스트의 점도 거동 및 동적 점탄성 결과로부터 알 수 있는데 DB-2150을 사용한 페이스트의 동적 점탄성 결과, 분산제 함량이 증가함에 따라 카본블랙의 분산 특성이 향상

되어 탄성을 나타내는 저장 탄성률(G')은 감소하였다. 물론 SOP 40%인 CBP-240의 경우엔 고농도의 분산제에 의해 분산제간의 상호작용이 발생하여 G' 이 증가된 것으로 생각된다. 반면, DB-9077을 사용한 페이스트의 경우, 카본블랙간의 상호작용에 의해 형성된 망목구조에 의해 SOP 10%인 페이스트를 제외하고는 DB-2150을 사용한 페이스트에 비해 높은 G' 값을 나타내고 있다. 또한, 분산제 함량이 증가함에 따라 분산제간 또는 카본블랙과 분산제간의 상호작용에 의해 응집구조가 형성되어 저장 탄성률(G')이 더욱 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 점도 거동에서도 SOP 40%인 CBP-940에서 형성된 불안정한 망목구조가 전단력에 의해 파괴됨으로써 8종류의 페이스트 중 가장 큰 shear-thinning index를 나타내고 있다. DB-9077을 사용한 페이스트들의 이러한 상호작용 및 응집구조에 의해 페이스트는 내부 저항력(tacky)을 발생하게 되고 분산제 함량이 증가함에 따라 그 크기가 더욱 커져 좋지 않은 스크린 인쇄 적성을 나타내었다. 하지만, 스크린 인쇄된 OTFTs용 소스-드레인 전극의 전기적 특성을 검토한 결과, DB-9077을 사용한 페이스트들의 경우에는 카본블랙 사이에 형성된 망목구조가 카본블랙의 도전 경로를 형성함으로써 DB-2150을 사용한 것에 비해 전기 전도성 및 전하 이동도에서 더 우수한 특성을 나타내었다. 그러나, 2종류의 분산제를 사용한 페이스트 모두, 분산제의 함량이 증가함에 따라 카본블랙 표면을 감싸는 분산제에 의해 카본블랙간의 도전 경로 형성이 방해되어 OTFTs용 전극의 특성은 점점 열화됨을 알 수 있었다.

감사의 글: 본 논문은 2004-2007년도 한국전자통신연구원 핵심기술개발사업의 위탁연구과제로 수행한 연구결과임으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Z. Bao, Y. Feng, A. Dodabalapur, V. R. Raju, and A. Lovinger, *Chem. Mater.*, **9**, 1299 (1997).
2. Y. Wu, Y. Li, B. S. Ong, P. Liu, S. Gardner, and B. Chiang, *Adv. Mater.*, **17**, 184 (2005).
3. E. J. Brandon, W. West, and E. Wesseling, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 3945 (2003).
4. T. Kawase, T. Shimoda, C. Newsome, H. Sirringhaus, and R. H. Friend, *Thin Solid Films*, **438**, 279 (2003).
5. F. Xue, Z. Liu, Y. Su, and K. Varshney, *Microelectron. Eng.*, **83**, 298 (2006).
6. D.-J. Kim, S.-H. Jeong, S. Lee, B.-K. Park, and J.-H. Moon, *Thin Solid Films*, **515**, 7692 (2007).
7. S. P. Li, D. P. Chu, C. J. Newsome, D. M. Russell, T. Kugler, M. Ishida, and T. Shimoda, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 232111 (2005).
8. J. A. Rogers, Z. Bao, and L. Dhar, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 294 (1998).
9. J. A. Rogers, Z. Bao, A. Makhija, and P. Braun, *Adv. Mater.*, **11**, 741 (1999).
10. M. Leufgen, A. Lebib, T. Muck, U. Bass, V. Wagner, T. Borzenko, G. Schmidt, J. Geurts, and L. W. Molenkamp, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 582 (2004).

11. U. Zschieschang, H. Klauk, M. Halik, G. Schmid, and C. Dehm, *Adv. Mater.*, **15**, 1147 (2003).
12. Z. Bao, J. A. Rogers, and H. E. Katz, *J. Mater. Chem.*, **9**, 1895 (1999).
13. M. M. Ling and Z. Bao, *Chem., Mater.*, **16**, 4824 (2004).
14. H. W. Li, B. V. O. Muir, G. Fichet, and W. T. S. Huck, *Langmuir*, **19**, 1963 (2003).
15. F. C. Krebs, H. Spanggaard, T. Kjaer, M. Biancardo, and J. Alstrup, *Mater. Sci. Eng. B*, **138**, 106 (2007).
16. F.-G. Zeng, C.-C. Zhu, W. Liu, and X. Liu, *J. Microelec-tronics*, **37**, 495 (2006).
17. D. A. Pardo, G. E. Jabbour, and N. Peyghambarian, *Adv. Mater.*, **12**, 1249 (2000).
18. S. E. Shaheen, R. Radspinner, N. Peyghambarian, and G. E. Jabbour, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 2996 (2001).
19. D.-J. Kim, K.-H. Seo, K.-H. Hong, and S.-Y. Kim, *Polym. Eng. Sci.*, **39**, 500 (1999).
20. K. W. Lee, D. H. Kim, J. H. Lee, and H. S. Sohn, *Elastomer*, **33**, 246 (1998).
21. D. Pantea, H. Darmstadt, S. Kaliaguine, and C. Roy, *Appl. Surf. Sci.*, **217**, 181 (2003).
22. J. C. Lin and C. Y. Wang, *Mater. Chem. Phys.*, **45**, 136 (1996).
23. K. Lakdawala and R. Salovey, *Polym. Eng. Sci.*, **27**, 1035 (1987).
24. Y. Otsubo and M. Horigome, *Korea-Australia Rheology Journal*, **15**, 27 (2003).
25. T. Amari, K. Uesugi, and H. Suzuki, *Prog. Org. Coat.*, **31**, 171 (1997).
26. C. Renger, P. Kuschel, A. Kristoffersson, B. Clauss, W. Oppermann, and W. Sigmund, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **27**, 2361 (2007).
27. M. Kawaguchi, M. Okuno, and T. Kato, *Langmuir*, **17**, 6041 (2001).
28. A. A. Zaman, P. Singh, and B. M. Moudgil, *J. Colloid Interf. Sci.*, **251**, 381 (2002).
29. D. Gamota, P. Brazis, K. Kalyanasundaram, and J. Zhang, *Printed Organic and Molecular Electronics*, Kluwer Academic Pub., Boston/Dordrecht/New York/London, 2004.
30. M. Ghofraniha and R. Salovey, *Polym. Eng. Sci.*, **28**, 58 (1988).
31. H.-G. Im, H.-S. Lee, and J.-H. Kim, *Polymer(Korea)*, **31**, 543 (2007).