

## 플렉시블 디스플레이용 Stainless Steel 기판의 에폭시 평탄막 연구

홍용택\* · 정승준\* · 최지원†

\*서울대학교 전기컴퓨터 공학부, 경희대학교 환경응용화학대학 화학공학·영상정보소재기술연구센터  
(2007년 7월 30일 접수, 2007년 10월 3일 채택)

### Epoxy Planarization Films for the Stainless Steel Substrates for Flexible Displays

Yongteak Hong\*, Seungjoon Jung\*, and Jiwon Choi†

\*Department of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University,

San 56-1, Shinlim-dong, Kwanakgu, Seoul 151-742, Korea

Department of Chemical Engineering,

Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi-do 449-701, Korea

(Received July 30, 2007; Accepted October 3, 2007)

**초록 :** 본 논문은 플렉시블 디스플레이용 stainless steel(SS) 기판의 평탄막 재료로서 유기 및 유기/무기 하이브리드 에폭시 레진을 연구한 첫 결과를 보고한다. 유기 에폭시로는 diglycidyl ether of bisphenol A(DGEBA)를, 하이브리드 에폭시는 실세스퀴옥산이 포함된 octa(dimethylsiloxypolyglycidylether) silsesquioxane(OG)를 선택하였다. 경화제로는 diaminodiphenylmethane(DDM)을 에폭시와 1 : 2 당량비로 사용하였으며 두 물질 모두 SS 기판위에 어려움 없이 코팅이 되었다. TGA로 살펴본 열 안정성 분석은 순수한 물질이나 경화된 필름이나 모두 OG가 DGEBA 보다 안정하며 AFM에 의한 필름 표면의 관찰은 필름이 충분히 두꺼운 경우(> 1 μm) 1~2 nm 정도의 표면 거칠기 값을 갖는 평탄한 면이 얻어진다는 것을 보여주었다. 또 이 필름들은 0~10000 초에 걸치는 시간 동안 100 V와 100 °C의 외부 스트레스를 받은 후에도 일정한 유전 상수(~3.5), 정전 용량 및 전류의 흐름을 나타내 절연 특성이 안정되어 있다는 것을 알 수 있었다.

**Abstract :** This paper reports the first results of a series of planarization film study for the stainless steel (SS) substrates for flexible displays. Diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA) and octa(dimethylsiloxypolyglycidylether) silsesquioxane (OG) were chosen for the organic and the hybrid epoxies respectively and diaminodiphenylmethane (DDM) was used as a curing agent at 1:2 stoichiometric ratio. These materials were spin-coated on SS substrates and thermal-cured. TGA study indicated that both the pristine and the cured OG were more thermally stable than DGEBA. AFM study showed that the smooth surfaces of 1~2 nm roughness can be prepared for both DGEBA and OG when the films were thick (> 1 μm). The electrical properties such as dielectric constant, capacitance and the leakage current with respect to the applied voltage were all stable even after the stress of 100 V/100° C was applied for 0~10000 seconds indicating that the insulating properties of DGEBA and OG films were very reliable.

**Keywords :** epoxy, silsesquioxane, flexible display, planarization, stainless steel.

## 서 론

디스플레이 산업은 유리 기판을 기본으로 하는 LCD, PDP, OLED 방식의 디스플레이를 중심으로 과거 10여 년 동안 급격하게 발전, 성숙되어 왔으며 최근에는 더욱 진화된 차세대 디스플레이로서 플렉시블 디스플레이의 연구가 한창이다. 이러한 흐름은 곡면 형태나 가역적으로 구부러질 수 있는 형태, 더 나아가 두루마리 형태의 새로운 디스플레이가 상용화되면 포화되어 있는 전통적인 디스플레

이 시장에서 새로운 영역을 개척할 수 있으리라는 기대에 바탕을 두고 있다. 또, 플렉시블 디스플레이는 기존의 디스플레이와 비교하여 가볍고 잘 깨지지 않으며 roll-to-roll 형태의 연속 공정이 가능하여 저가의 대량 생산이 가능하리라는 점도 기존의 디스플레이와 크게 차별화된다.

플렉시블 디스플레이의 제작에는 플렉시블 기판이 반드시 필요한데, 두께를 줄인 유리 기판,<sup>1</sup> 플라스틱 기판,<sup>2-5</sup> 그리고 stainless steel (SS) 기판 등이<sup>6-18</sup> 사용 가능한 후보 물질들이다. 이 중에서 유리 기판은 물리적 충격에 약하기 때문에 연구에서 점차 배제되고 있으며, 유리보다 얇고 가볍고 깨지지 않으며 roll-to-roll 연속 공정이

†To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: g1choi@khu.ac.kr

가능하다는 특징 때문에 플라스틱 기판이나 SS 기판이 최근 많이 연구되고 있다. 그러나 이 두 재료들은 다음과 같은 뚜렷한 차이점을 가지고 있다. 플라스틱 기판의 경우 투명해서 투과형 LCD 등에 적용이 가능하지만 열에 약하기 때문에 기존의 공정과 호환성이 적어 특별한 저온 공정(< ~200 °C)이 따로 개발되어야 한다. SS 기판의 경우는 불투명하기 때문에 반사형이나 발광형 디스플레이용 기판으로 사용되어야 하지만 고온 열처리가 가능하므로 기존 유리 기판용 제조 공정과 호환성이 높고 전자의 mobility가 좋은 poly Si 막의<sup>6-10</sup> 형성이 가능한 장점이 있다. 또 물이나 기체에 대한 장벽 물성이 좋아 LED용 기판으로<sup>11-14</sup> 유리하다.

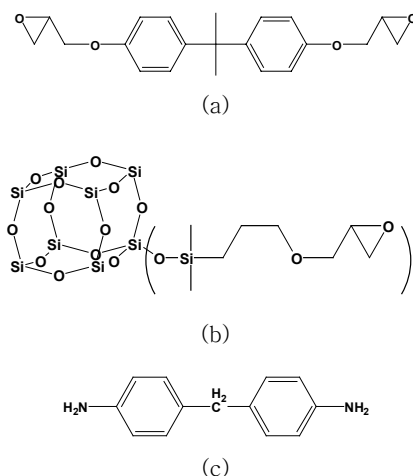
그러나, 있는 그대로의 SS 기판은 한 가지 단점이 있는데 그것은 SS는 도체이며 표면이 거칠어서 절연막 및 평탄막 없이는 회로 소자의 제작이 불가능하다는 것이다. 이 문제를 해결하기 위해서 실리콘 웨이퍼용 메모리 칩 공정 중에 하나인 화학-기계적 연마(CMP)<sup>6-11</sup> 방법을 그대로 SS에 적용하여 표면의 거칠기를 감소시키고 SiO<sub>2</sub><sup>7-10,12,13</sup> SiN<sup>11,17,18</sup> 막을 진공 증착하여 절연막으로 사용하는 방법이 소규모 연구에 흔히 사용되는데 CMP 공정은 대면적에 적용이 곤란한 방법이며 진공 증착 공정과 더불어 디스플레이를 연속 공정으로 저가 대량 생산한다는 방향과는 일치하지 않는 공정이다. 한편, 스펀 코팅으로 간단히 막 형성이 가능한 고분자나<sup>6,7</sup> 실세스퀴옥산<sup>19-23</sup> 계열의 재료도 메모리 칩용으로는 연구되어 왔으나 아쉽게도 디스플레이 연구에 사용된 사례는 많지 않다.

이에 본 연구에서는 유기 및 유기/무기 하이브리드 레진을 SS 기판의 평탄막으로 연구하였다. 유기 재료로는 PCB 기판 등에 흔히 사용되는 에폭시를, 유기/무기 하이브리드 재료로는 실세스퀴옥산을 포함한 에폭시를 선택하였다. 평탄 필름의 제작은 스펀 코팅으로 이루어졌으며 TGA와 AFM을 통하여 필름의 열 안정성과 표면 거칠기를 살펴보았다. 또 형성된 막의 절연 특성을 살펴보기 위하여 전압과 온도 스트레스 조건하에서의 정전 용량과 전류의 흐름을 살펴보았다.

## 실 험

본 연구에서는 에폭시/실세스퀴옥산 하이브리드 물질로서 octa(dimethylsiloxylpropylglycidylether) silsesquioxane(OG)를 합성하여 사용하였다. 합성은 참고문헌에 나온 방법을<sup>24,25</sup> 따랐으며 반응의 완결은 <sup>1</sup>H-NMR로 확인되었다. 비교를 위한 유기 에폭시로는 diglycidyl ether of bisphenol A(DGEBA, MW ~380)를 사용하였으며 경화제로는 diaminodiphenyl methane(DDM)을 공통으로 사용하였다. 각 물질들의 구조는 Scheme 1에 나타내었다.

평탄막 코팅액은 DGEBA/DDM과 OG/DDM의 2가지 조성(total 10 wt% solution in THF)으로 준비하였으며 에폭시/아민기의 비율은 가교 밀도가 가장 높은<sup>25-27</sup> 2 : 1로 맞추었다. SS 기판은 SS 304(Fe 69 Cr 19 Ni 9)를 50×50 mm로 자른 후 사용하였다. 평탄막 필름은 코팅액을 스펀코터(500~2000 rpm)를 사용하여 코팅을 한 후, 50 °C/30분/100 °C/1시간/180 °C/1시간의 열경화를 통해 준비하였으며 필름의 표면 거칠기는 AFM(PSIA사 XE-150)을 사용하여 측정하였다. 한편, 필름의 두께는 실리콘 웨이퍼에 위와 똑같은 방법으로 필름을 형성한 후 ellipsometry 기기인 nano-spec



**Scheme 1.** Materials used in the research. (a) diglycidyl ether of bisphenol A, (b) octa(dimethylsiloxylpropylglycidyl ether) silsesquioxane(OG), and (c) diaminodiphenylmethane(DDM).

(K-Mac ST-2000)으로 측정된 값을 사용하였으며 필름의 열 안정성은 같은 성분의 두꺼운 필름을 따로 준비하여 TGA를 통하여 살펴보았다.

평탄막의 절연 특성은 shadow mask와 E-gun Evaporator Maestech)를 이용하여 지름 2 mm, 두께 100 nm의 원 모양의 크롬을 평탄막/SS 위에 증착한 후, 반도체 파라미터 측정기(Agilent 4155C)를 이용하여 정전 용량 및 전류의 흐름을 측정하여 파악하였다. 이때 사용한 측정 전압은 -15 ~ +15 V였다. 또한, 온도와 전압을 각각 100 °C/100 V를 걸어준 가혹 조건에서도 같은 실험을 반복하였다. 평탄막의 유전율은 측정된 정전 용량으로부터 식 (1)을 이용하여 계산하였으며 유전 상수는 진공의 유전율과의 비율에서 구하였다. 여기서  $C$ 는 정전용량( $F$ ),  $\epsilon$ 는 유전상수,  $\epsilon_0$ 는 진공 유전율( $8.854 \times 10^{-12} F/m$ ),  $A$ 는 크롬 단자의 면적( $m^2$ ), 그리고  $d$ 는 막의 두께( $m$ )이다.

$$C = \epsilon_0 \epsilon \frac{A}{d} \quad (1)$$

## 결과 및 토론

**물질의 열 안정성 분석.** 본 평탄막 연구에 기본이 되는 유기 에폭시는 DGEBA이다. DGEBA는 유전율이 약 3.5 정도로 보고되고 있으며<sup>26,27</sup> 물리적, 화학적, 전기적 안정성이 뛰어나고 가격이 저렴한 장점 때문에 아크릴산 변성 레진 등의 형태로 PCB 기판 등에 많이 사용되고 있다. 그러나 순수 유기 재료는 열 안정성이 떨어질 수 있기 때문에 열 안정성 향상을 위하여 실세스퀴옥산이 포함된 하이브리드 에폭시를 함께 비교하기로 하였다. 우리의 선택은 OG였는데 그 이유는 OG는 점도가 10 cP<sup>24</sup> 정도인 액상 물질로서 DDM과 혼합이 잘되어 코팅막 형성이 용이할 것이며 DGEBA와 에폭시 가지 부분의 구조가 동일하기 때문에(Scheme 1) 실세스퀴옥산에 의한 영향을 쉽게 파악할 수 있기 때문이다.

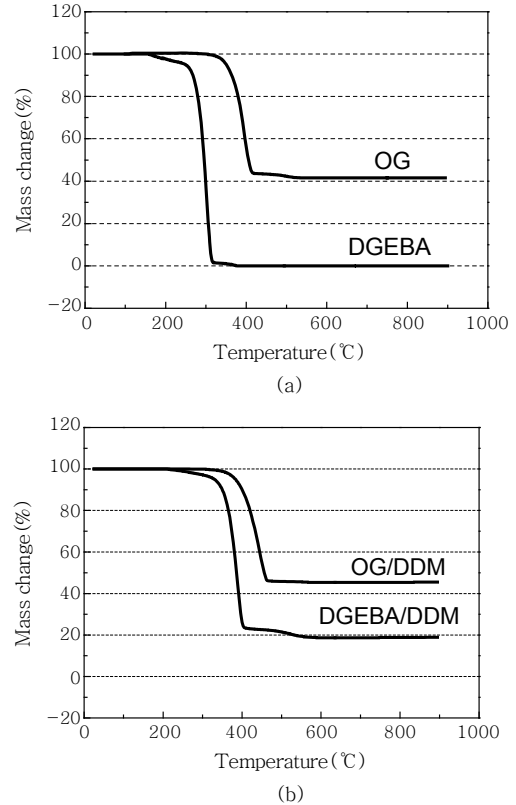
**Table 1. Representative Mechanical Properties and Glass Transition Temperatures ( $T_g$ ) of DGEBA/DDM and OG/DDM at Stoichiometric Ratio<sup>25</sup>**

	DGEBA/DDM	OG/DDM
$E$ (GPa)	~2	~1.2
$K_{1C}$ (MPa · m <sup>1/2</sup> )	~0.8	~0.5
$T_g$ (°C)	~160	No $T_g$

평탄막에 있어서 열 안정성이 중요한 이유는 다음과 같다. 첫 번째, 평탄막은 폴리이미드 배향막 경화(~220 °C)나 실리콘 증착(~350 °C) 등의 고온 공정을 견뎌야 한다. 최근에는 저온 실리콘 증착(~200 °C)이 개발되고 있으나 아직은 비정질 실리콘 박막의 경우 250 °C 이상에서 증착된 실리콘 소자가 안정된 특성을 보이므로 해당 증착 온도에서 안정해야 플렉시블 디스플레이에 사용될 수 있을 것이라고 생각한다. 두 번째, 평탄막은 디스플레이로 제작되면 구동시 발생하는 열과 가해지는 전압에 의한 누적 피로를 견딜 수 있어야 한다. 즉, 일정한 열/전압이 지속적으로 가해지더라도 평탄막의 기계적/절연 물성이 일정해야 한다. 얇은 필름의 기계적 물성은 고분자 가교 밀도가 높아서 유리 전이 온도가 높은 경우가 안정할 것으로 예상되는데, DGEBA/DDM는 당량비(2 : 1)로 반응할 때 가교 밀도와 유리 전이 온도가 가장 높다는 것은 이미 잘 알려진 사실이며 OG/DDM도 당량비에서 유리 전이 현상이 일어나지 않을 만큼 가교 밀도가 높아진다는 것을 본 저자의 다른 연구에서<sup>25</sup> 보고한 바 있다(Table 1에는 당량비에서의 DGEBA/DDM과 OG/DDM의 기계적 물성과 유리 전이 온도를 정리하였다). 그러므로 이후 모든 평탄막 필름의 제작은 당량비로 제작되었다. 한편, 절연 특성과 관련된 물질의 평가는 본 연구 뒷부분에서 따로 진행하였다.

DGEBA와 OG의 TGA 결과를 Figure 1에 나타내었다. 우선 순수한 물질의 경우(Figure 1(a)) OG가 DGEBA 보다 50~100 °C 정도 분해 온도가 높는데 이는 실세스퀴옥산 코어의 영향으로 생각된다. 한편, 이 물질들을 DDM과 당량 비율(에폭시기 : 아민기 = 2 : 1)로 반응/경화시켜 만든 필름의 경우(Figure 1(b))는 열 안정성이 순수한 물질 만큼은 차이가 나지 않는데 이 결과는 필름의 경우 가교 반응이 진행되어 생긴 망상 구조 자체가 열 안정성을 갖기 때문이다. 구체적으로는 일단 200 °C 약간 넘는 온도까지 안정된 것으로 보이나 300 °C까지 안정하다고 보기는 어려운 것 같다. 그러나 실세스퀴옥산으로 인해 OG/DDM가 DGEBA/DDM보다 안정한 것은 쉽게 알 수 있다.

**평탄막 필름 제작 및 표면 거칠기 측정.** 평탄막 필름은 미리 준비한 DGEBA/DDM과 OG/DDM 용액(total 10 wt% in THF)을 스프레이코터를 이용하여 SS 기판 위에 코팅한 후 열 경화를 하여 얻었다. 용제로 사용한 THF는 끓는 점이 66 °C 정도로 증발이 다소 빠르나 DGEBA나 OG가 액상 물질이라 SS 기판 위에 코팅막을 형성하는데에는 문제가 없었다. 또, 코팅 물질과 코팅 표면이 화학적으로 친밀하지 않은 경우는 adhesion promoter를 흔히 사용하지만 에폭시 계열인 위의 두 물질은 이를 따로 필요로 하지는 않았다. 평탄막의 표면 거칠기는 AFM으로 측정하였으며 두께는 직접 측정하는 것이 불가능하여 별도의 실리콘 웨이퍼에 같은 방법으로 필름을 코팅한



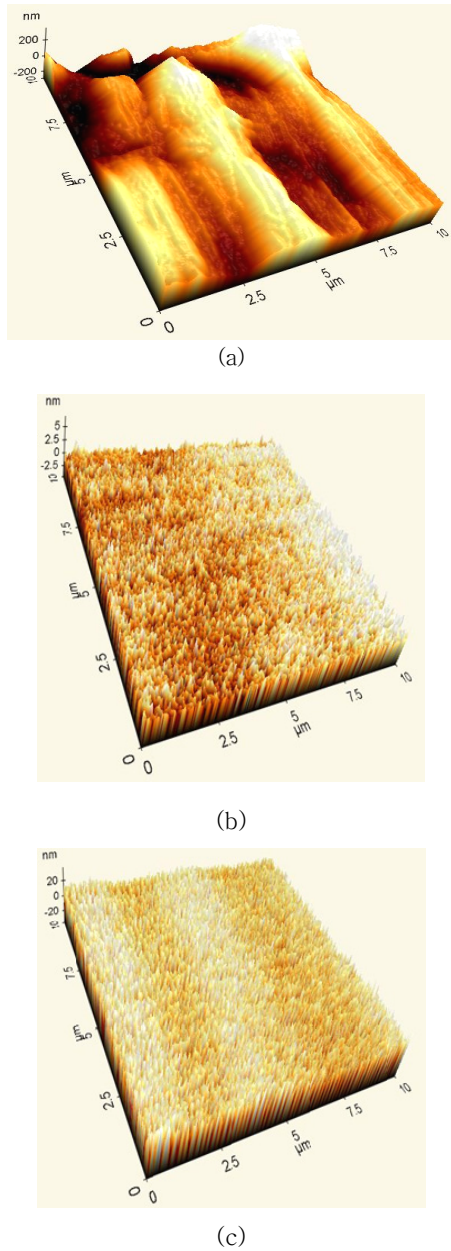
**Figure 1.** TGA results of various materials ( $N_2/10$  °C/min). (a) OG and DGEBA and (b) DGEBA/DDM and OG/DDM at stoichiometric ratio.

후 ellipsometry를 이용하여 측정하였다.

이 실험에서 파악하고자 하는 것은 순수한 DGEBA/DDM와 OG/DDM 평탄막의 표면 거칠기 값과 이를 얻기 위한 필름의 최소한의 두께이다. 만약 필름이 너무 얇다면 거친 SS 밑면의 울퉁불퉁한 모양이 코팅막으로 전사되어 남아있기 때문에 물질 본연의 평탄한 표면이 얻어지지 않는다. 그러므로 좋은 평탄막 표면을 얻기 위해서는 최소한의 필름 두께를 가져야 한다.

이런 맥락에서 필름의 두께와 표면 거칠기를 연관지어 보면 필름 두께가 1  $\mu$ m를 넘어갈 때 비로소 표면 거칠기의 제곱평균(root mean square)값이 밑면의 영향을 받지 않고 DGEBA/DDM이나 OG/DDM 모두 약 1~2 nm에 수렴하는 것을 알 수 있었다. 이 값은 문헌 값들과 비교해 보면 SS 기판 표면을 직접 화학-기계적 연마(CMP)에 의해 평탄화한 값들보다는<sup>6-11</sup> 작은 값이며 spin-on-glass 물질들로 코팅한 값들과는<sup>6,7</sup> 비슷한 값이다. 그렇다면 DGEBA/DDM이나 OG/DDM 필름의 표면 평탄 성질은 양호하며 필름 위에 소자를 형성하는데 문제가 없다고 생각할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 이후의 절연 특성 평가 실험에서 약 1.5  $\mu$ m 두께의 평탄막을 사용하였다. Figure 2와 Table 2에는 SS 기판 코팅 전과 후의 표면 AFM 이미지와 거칠기 값들을 정리하였다.

**평탄막 필름의 정전 용량/절연 특성 평가.** 일단 DGEBA/DDM과 OG/DDM 필름의 열 안정성과 표면 거칠기 특성이 파악되었으므로 다음으로는 이 필름들의 절연 특성을 평가하였다. 일반적인 디스플레이 구조에서는 유리 기판 위에 메탈 배선이 형성되므로 SS 기판



**Figure 2.** AFM images of various surfaces. (a) Bare stainless steel(SS 304), (b) DGEBA/DDM film(1.5  $\mu\text{m}$ ), and (c) OG/DDM film(1.5  $\mu\text{m}$ ).

**Table 2. Surface Roughness Values of Various Surfaces**

	Peak to valley (nm)	$R_{ms}$ (nm)
Bare SS	$539 \pm 150$	$100 \pm 52$
DGEBA/DDM	$8.7 \pm 3.0$	$0.86 \pm 0.20$
OG/DDM	$16.3 \pm 2.0$	$1.58 \pm 0.20$

\* Numbers are the average values of at least 5 measurements.

의 경우는 평탄막 바로 위에 금속 배선이 형성될 것이다. 이 때, 유리 기판은 부도체이지만 SS 기판은 도체이므로 SS 기판의 평탄막은 전기 절연막으로서의 역할도 해야 한다.

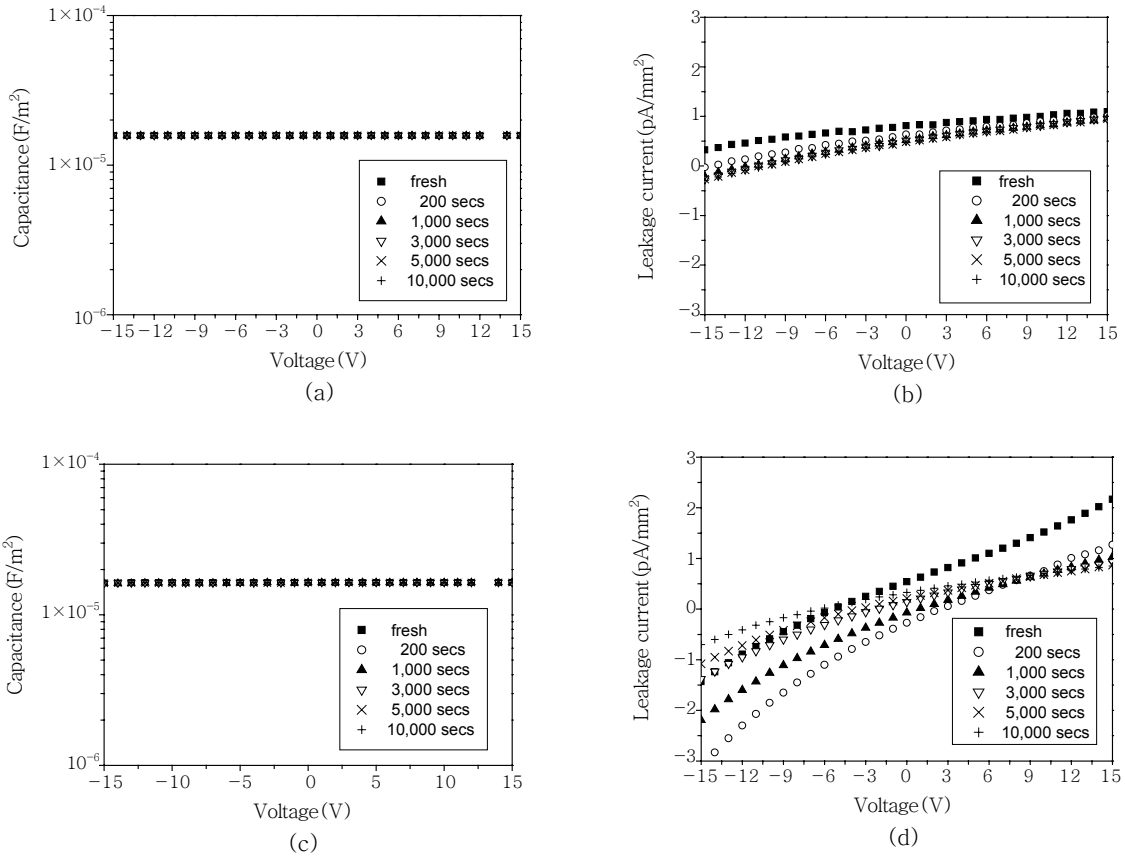
만약 코팅된 SS 기판이 디스플레이로 제작된다면 평탄막은 주로

전압과 열에 의한 스트레스를 받게 된다. 일반적인 LCD나 OLED 디스플레이의 경우는 약 10~20 V의 전압이 메탈 배선에 항상 걸리게 된다. 또 디스플레이 기판은 회로나 백라이트에서 발생하는 열로 인해 온도가 많이 상승(50~70  $^{\circ}\text{C}$ )하게 된다. 본 연구에서는 이런 전압과 온도 스트레스에 대한 물질의 안정성을 효과적으로 평가하기 위하여 가혹 조건에서 물질의 절연 특성 변화를 조사하였다. 즉, 전압은 100 V, 온도는 100  $^{\circ}\text{C}$ 의 외부 스트레스를 일정시간 평탄막에 가한 뒤 물질의 특성이 어떻게 변하는 가를 조사하였다. 각 측정은 전압/열이 가해지기 전의 순수한 필름에서 시작하여 100 V/100  $^{\circ}\text{C}$ 의 스트레스를 최대 10000초까지 시간을 변화시켜 가며 동시에 가한 후 -15~+15 V의 전압으로 평탄막의 정전 용량 및 전류 흐름의 변화를 측정하였다. 그 결과를 Figure 3에 정리하였다.

이 결과에서 볼 수 있듯이 DGEBA/DDM이나 OG/DDM 모두 열과 전압에 대해서 안정한 물성을 보이고 있다. 정전 용량의 경우 두 필름 모두 1.5~2  $\text{F}/\text{m}^2$  정도의 값을 보이고 있으며 10000초의 스트레스에도 불구하고 값의 변화가 거의 없다. 이 정전 용량으로부터 유전 상수를 구하면(식 1) DGEBA/DDM은 약 3.7, OG/DDM은 약 3.9 정도가 나온다. DGEBA/DDM의 경우 문헌 보고 값인 3.5 보다 약간 크지만 실험에 사용한 크롬 단자의 크기가 2 mm의 작은 원모양이므로 fringe effect를 고려할 때 3.5와 크게 다르지 않을 것으로 생각된다. OG/DDM의 경우도 fringe effect를 감안하면 3.5 정도라고 생각되며 실리카의 유전상수가 3.8~4인 것을 감안하면 3.5는 타당한 값으로 보인다. 그러나 일부 실세스퀴옥산 필름들이 내부 공동을 포함할 때 유전상수가 3 이하로 떨어지는 경우와 비교한다면,<sup>23</sup> OG/DDM의 경우는 자연적인 내부 공동은 발생하지 않은 것으로 생각된다. 한편, 테스트 전압 전 영역에서의 전류의 흐름은 두 필름 모두 수 pA로, 이 값은 전류가 거의 흐르지 않는다고 볼 수 있는 수치이다. 참고로 본 논문에는 포함시키지 않았으나 저자들은 평탄막 재료로서 광범위하게 연구되고 있는 benzocyclobutene(BCB) (Dow Chemical 판매)을 별도의 연구에서 평가하였는데 그 결과를 DGEBA와 OG와 비교했을 때 정전 용량 및 절연 특성 모두 위의 가혹 조건에서 비슷한 성능을 나타내었다. 즉, DGEBA와 OG도 상당히 좋은 전기적 특성을 가지고 있다고 하겠다. 단, BCB는 2.6 정도의 유전 상수를 가지고 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>28,29</sup>

## 결론

본 연구에서는 SS 기판용 평탄막으로서의 에폭시 레진의 가능성을 연구한 첫 결과를 보고하였다. PCB 기판 등에 이미 절연 재료로 사용되고 있는 DGEBA 및 이와 구조적 유사성을 가진 OG는 좋은 표면을 갖는 수  $\mu\text{m}$ 의 필름 형성이 용이하며 열과 전압의 외부 스트레스에도 안정한 전기적 특성을 갖고 있다는 것을 알 수 있었다. 필름의 열 안정성은 이후의 연구에서 더욱 개선할 부분으로 실세스퀴옥산과 같은 무기 물질을 첨가하는 것만으로는 열 안정성의 향상이 제한되므로 고분자 주사슬의 구조 자체를 재설계할 것이다. 그리고 이때에는 열 안정성 뿐 아니라 코팅성이나 전기적 특성 등 다양한 요소들도 함께 고려될 것이다. 한편, 실세스퀴옥산과의 복합화는 열안정성 향상에 도움이 되지만 보다 근본적인 목적은 열적/기계적



**Figure 3.** Electrical properties of planarization films. (a) Capacitance of DGEBA/DDM, (b) leakage current of DGEBA/DDM, (c) capacitance of OG/DDM, and (d) leakage current of OG/DDM.

안정성을 제공하면서 porogen 등을 이용하여 유전상수를 낮출 수 있는 시스템을 제공하는 것으로 이 점은 후속 연구에서 다루어질 것이다. 마지막으로 고려할 점은 재료의 가격인 측면이다. 비록 연구에서 다루기는 힘든 요소이나 현재 평판막으로 사용되는 BCB 등의 재료들이 비싼 가격으로 인해 대량으로 적용되기 힘든 것을 볼 때 초기 재료 개발단계에서부터 이를 고려하는 것이 마땅하다.

**감사의 글 :** 본 연구에 관해 저자 최지원은 경기도에서 지원한 지역협력연구센터(GRRC) 사업의 지원을 받았고, 저자 홍용택과 정승준은 서울대학교 신입교수 연구정착금에 의한 연구비의 지원을 받았습니다.

**참 고 문 헌**

1. D. M. Mofatt, *MRS Bulletin*, **21**, 31 (1996).
2. G. Gustafsson, Y. Cao, G. M. Treacy, F. Klavetter, N. Colaneri, and A. J. Heeger, *Nature*, **357**, 477 (1992).
3. A. J. Heeger and J. Long Jr., *Opt. Photon. News*, **7**, 23 (1996).
4. G. Gu, P. E. Burrows, S. Venkatesh, and S. R. Forrest, *Opt. Lett.*, **22**, 172 (1992).
5. P. M. Smith, P. G. Carey, and T. W. Sigmon, *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 342 (1997).

6. M. Wu, X. Bo, J. C. Sturm, and S. Wagner, *IEEE T. Electron. Dev.*, **49**, 1993 (2002).
7. M. Wu, K. Pangal, J. C. Sturm, and S. Wagner, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2244 (1999).
8. T. Serikawa and F. Omata, *IEEE Electr. Device L.*, **20**, 574 (1999).
9. R. S. Howell, M. Stewart, S. V. Karnik, S. K. Saha, and M. Hatalis, *IEEE Electr. Device L.*, **21**, 70 (2000).
10. T. Afentakis, M. Gatalis, A. T. Voutsas, and J. Hartzell, *IEEE T. Electron. Dev.*, **53**, 815 (2006).
11. C. C. Wu, S. D. Theiss, G. Gu, M. H. Lu, J. C. Sturm, S. Wagner, and S. R. Forrest, *IEEE Electr. Device L.*, **18**, 609 (1997).
12. D. Jin, J. Jeong, H. Shin, M. Kim, T. Ahn, S. Kwon, J. Kwack, T. Kim, Y. Mo, and H. Chung, *SID 06 DIGEST*, 1855 (2006).
13. J. Cheon, J. Choi, J. Hun, and J. Jang, *IEEE T. Electron. Dev.*, **53**, 1273 (2006).
14. A. Chwang, R. Hewitt, K. Urbanik, J. Silvernail, K. Rajan, and M. Hack, *SID 06 DIGEST*, 1858 (2006).
15. J. Chang, J. Wu, C. Huang, Y. Chen, L. Wang, Y. Luo, I. Peng, T. Wong, M. Wang, and J. Chang, *Euro Display*, 133 (2005).

16. F. Templier, B. Aventurier, M. Moreau, A. Mortillaro, R. Templier, and A. Passero, *EuroDisplay*, 414 (2005).
17. S. D. Theiss and S. Wagner, *IEEE Electr. Device L.*, **17**, 578 (1996).
18. Z. Suo, E. Y. Ma, H. Gleskova, and S. Wagner, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 1177 (1999).
19. T. Chang, P. Liu, T. Tasi, F. Yeh, T. Tseng, M. Tsai, B. Chen, Y. Yang, and S. Sze, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, 3143 (2001).
20. C. Maddalon, K. Barla, E. Denis, E. Lous, E. Perrin, S. Lis, C. Lair, and E. Dehan, *Microelectron. Eng.*, **50**, 33 (2000).
21. T. Chang, T. Chang, P. Liu, T. Chang, and F. Yeh, *Thin Solids Films*, **498**, 70 (2006).
22. P. Liu, T. Chang, M. Huang, Y. Yang, Y. Mor, M. S. Tsai, H. Chung, J. Hou, and S. M. Sze, *J. Electrochem. Soc.*, **147**, 4313 (2000).
23. H. Lee, C. L. Soles, D. W. Liu, B. J. Bauer, E. K. Lin, and W. L. Wu, *J. Appl. Phys.*, **95**, 2355 (2004).
24. A. Sellinger and R. M. Laine, *Chem. Mater.*, **8**, 1592 (1996).
25. J. Choi, J. Harcup, A. F. Yee, Q. Zhu, and R. M. Laine, *J. Am. Chem. Soc.*, **123**, 11420 (2001).
26. A. Boudefel and P. Gonon, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **17**, 205 (2006).
27. L. Zong, S. Zhou, N. Sgriccia, and M. C. Hawley, *Polym. Eng. Sci.*, **45**, 1576 (2005).
28. R. Schwodiauer, G. S. Neugschwandtner, S. Bauer-Gogonea, and S. Bauer, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 3998 (1999).
29. R. Schwodiauer, G. S. Neugschwandtner, S. Bauer-Gogonea, and S. Bauer, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2612 (2000).