한국표면공학회지
J. Kor. Inst. Surf. Eng.
Vol. 46, No. 4, 2013.
http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2013.46.4.162

<연구논문>

OLED 소자 제조를 위한 주울 가열 봉지 공정 시 도전층 구조에 따르는 열분포

장인구[a], 노재상[b*]

[a]㈜엔씰텍, [b]홍익대학교 공과대학 신소재 공학과

Temperature Distribution According to the Structure of a Conductive Layer during Joule-heating Induced Encapsulation for Fabrication of OLED Devices

Ingoo Jang[a], Jae-Sang Ro[b*]

[a]EnSilTech Corporation, Seoul 153-773, Korea
[b]Department of Materials Science and Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received August 20, 2013 ; revised August 25, 2013 ; accepted August 27, 2013)

Abstract

Encapsulation is required since organic materials used in OLED devices are fragile to water vapor and oxygen. Laser sealing method is currently used where IR laser is scanned along the glass-frit coated lines. Laser method is, however, not suitable to encapsulating large-sized glass substrate due to the nature of sequential scanning. In this work we propose a new method of encapsulation using Joule heating. Conductive layer is patterned along the sealing lines on which the glass frit is screen printed and sintered. Electric field is then applied to the conductive layer resulting in bonding both the panel glass and the encapsulation glass by melting glass-frit. In order to obtain uniform bonding the temperature of a conductive layer having a shape of closed loop should be uniform. In this work we conducted simulation for heat distribution according to the structure of a conductive layer used as a Joule-heat source. Uniform temperature was obtained with an error of 5% by optimizing the structure of a conductive layer. Based on the results of thermal simulations we concluded that Joule-heating induced encapsulation would be a good candidate for encapsulation method especially for large area glass substrate.

Keywords: Encapsulation, OLED, Joule-heating

1. 서 론

최근 AMLCD를 대체할 차세대 평판 디스플레이로서 주목을 받고 있는 AMOLED의 경우 소형 패널을 사용한 스마트폰을 중심으로 시장 진입에 성공하였다. AMOLED는 투명 유리 기판 위에 형성된 TFT-backplane으로부터 전류를 공급받은 유기막이 자체 발광하는 소자이다. AMOLED 소자 제조에서 가장 중요한 핵심 기술들로는 poly-Si을 기반으로 하는 TFT-backplane 형성 기술, OLED 유기물 재료 합성 기술, 화소 형성을 위한 RGB 패터닝 기술, 그리고 외부의 수분과 산소로부터 유기막을 보호하는 봉지 기술 등이 있다[1]. AMOLED 소자를 구성하는 유기물의 경우 수분과 산소에 매우 취약한 특성을 가지고 있어 소자 상층이 외부의 습기나 산소에 노출되면 발광 영역이 축소되는 pixel-shrinkage 현상 또는 발광영역 내에 dark-spot 즉 비발광 영역이 생성된다[2,3]. 그림 1[4]은 봉지가 불완전한 경우 AMOLED 소자 제작 후 일정 시간 경과 후 발광 영역 변화를 나타낸 그림이다.

*Corresponding author. E-mail : jsang@hongik.ac.kr

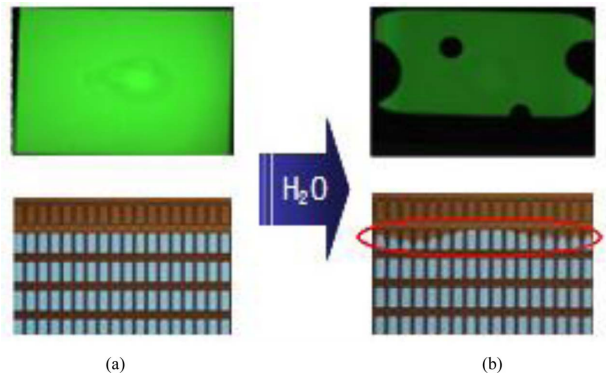


Fig. 1. Degradation of OLED cell due to permeation of molecules such as O_2 and H_2O. (a) Immediately after fabrication, (b) After a long time.

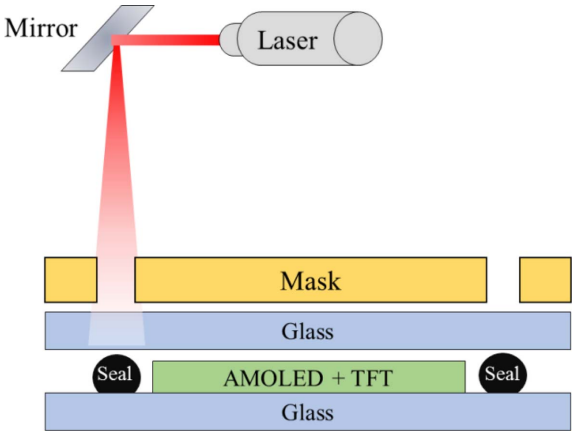


Fig. 2. Schematics of Laser sealing method. IR Laser having a shape of spot beam is scanned sequentially on the encapsulation glass substrate.

AMOLED 양산 제품에 현재 사용되는 봉지 방법인 laser sealing 방식[5-7]의 경우 패널 위에 봉지용 유리 기판을 덮고 laser 로 테두리를 용융접합하여 봉지한다. 이때 봉지용 유리기판에 비교적 용융점이 낮은 frit seal재를 용접 재료로 각 cell의 테두리에 printing 후 소성하여 준비된다. TFT-backplane 및 유기막 증착 공정을 마친 하판 유리 기판은 진공 챔버 내에서 봉지용 유리 기판과 마주보게 하여 정렬한 후 테두리를 epoxy sealing 및 UV 경화 처리를 수행한 후 진공 챔버 밖으로 꺼내어 laser sealing system으로 이동된다. laser sealing 봉지 방법은 그림 2에 예시한 바와 같이 spot beam 형태의 laser 를 cell의 외각을 scan하는 방식으로 frit seal 재가 용융 및 응고 과정을 거쳐 상하 유리 기판을 접합하는 기술이다. laser를 사용한 봉지 기술의 경우 spot-beam을 scan하는 방식에 의하여 frit seal 재를 국부적으로 용융접합하기 때문에 처음 조사가 시작된 부분과 마지막 조사가 완료되는 부분 사이에 시간 차이를 가지게 된다. 상기 시간 차이가 일정 이상이 될 경우 유리 특성변화, 강도, 열팽창 등의 차이로 접합부에 microcrack이 발생되는 문제점이 있다. 이러한 이유로 14" 이상의 중대형 패널은 제조가 어렵고, 패널 사이즈가 커질수록 제조시간이 오래 걸려서 생산성이 떨어지는 단점이 있다.

또한 laser sealing 방법은 봉지하고자 하는 유리기판 상에 기 형성된 소자의 열적 손상을 줄이기 위하여 mask를 사용하는데 mask와 glass 기판의 scratch를 줄이기 위해서 일정거리 이상을 이격하여 가공을 하고 있다. 그러나 그림 3에서 보는 바와 같이 대면적 AMOLED 봉지를 위한 마스크 사용 시 마스크 자체가 중력에 의하여 처지는 현상이 발생하게 된다. 이는 봉합하고자 하는 유리 기판과의 정확한 정렬에 영향을 미쳐서 불량이 발생하는 요인으로 작용될 수 있다.

본 연구에서는 상기의 문제점을 해결하고자 대면적 적용이 가능하며 기판 전체에 걸쳐 한번에 접합이 가능한 봉지 방법으로 주울 가열 방식의 신 공정 봉지 방법인 주울 가열을 이용한 봉지 공정 기술을 제안하고 본 기술의 적용 가능성에 대하여 연구를 진행하였다. 본 연구에서 제안하는 주울 가열 봉지 공정은 그림 4에서 보는 바와 같이 봉지용 유리 기판 상에 Mo와 같은 도전층을 증착 및 패터닝 후 oxide 보호막을 형성한다. 각 cell의 외각과 동일한 형태로 패터닝된 도전층 위에 glass frit을 screen printing 한 후에 소성을 실시한다. TFT backplane 및 유기막이 증착된 유리 기판과 봉지용 glass를 합착한 후 도전층에 펄스 전계를 인가하면 도전층이 형성된 곳에서만 선택 발열이 일어나 상하 유리 기판이 접합하게 된다. 주울 가열을 사용

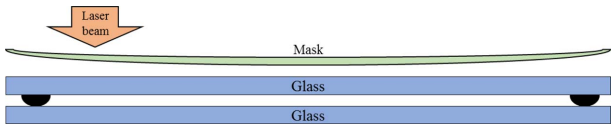


Fig. 3. Bending problem of mask as the glass size increases when using Laser sealing method.

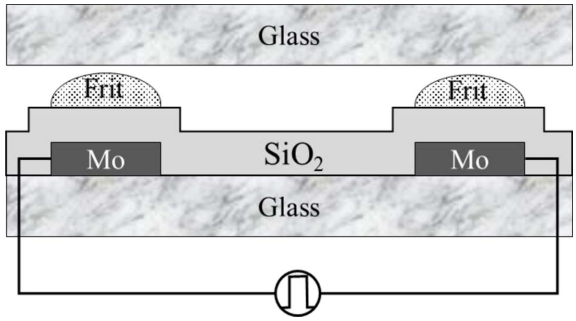


Fig. 4. Schematic diagram of Joule-heating induced cell sealing proposed in this work.

한 급속 가열 공정의 경우 도전층의 종류 및 두께, 인가전압 및 인가 시간의 크기, 전극 형성 기술 등의 공정 인자가 최적화 되어야 한다. 이때 가장 중요한 인자는 glass frit 하단에 위치한 패턴된 도전층의 균일한 발열이다. 본 연구에서는 전산 모사한 결과를 바탕으로 폐곡선으로 이루어진 최적화된 도전층 구조를 도출하였으며 이를 바탕으로 주울 가열 봉지 공정의 적용 가능성을 제안하고자 한다.

2. 도전층 열분포에 관한 전산 모사

그림 4와 같은 구조에서 주울 가열 중 도전층 및 유리기판 내의 열 분포를 전산 모사하기 위하여 glass 위에 Mo 패턴을 형성하는 형태로 단순화 하여 시뮬레이션을 진행하였다. 본 연구에서는 Abaqus[8]를 열분석 프로그램으로 사용하였으며 표 1에 나타낸 바와 같이 온도에 따른 각 재료의 물성을 적용하였다[9,10]. 주울 가열 공정 중 전계 인가 시간이 ms 단위로 매우 짧기 때문에 air 쪽의 대류 및 복사에 의한 열 손실은 미미할 것으로 판단된다. 때문에 유리기판을 통하여 대부분의 열에너지가 소모되는 것으로 단순화하여 Abaqus 열분석 프로그램 사용 시 열전도만을 고려하였다[11].

3. 실험 결과 및 고찰

봉지 라인을 따라서 형성된 발열 도전층은 저항과 전류에 의하여 발열량이 결정된다. 도전층 발열 시 인가 시간에 따라 열확산이 발생한다. Frit 방향으로 전도되는 열확산은 glass frit을 용융시켜 접합을 이루는 반면 측면 방향의 열확산은 봉지 라인에 근접하게 위치하고 있는 active layer에 열손상을 유발시킬 수 있다. 특히 OLED 소자의 발광층으로 쓰이는 유기막의 경우 온도에 매우 취약한 특성을 보이기 때문에 측면 방향의 열확산량을 제어하여 최적화하는 공정 변수의 도출이 필수적이다. 도선이 동일한 면저항을 가지고 동일한 폭으로 무한한 길이를 가지는 경우 도선의 길이 방향에 수직한 단면 열 분포는 어느 곳에서나 동일한 분포를 가지게 된다. 봉지 공정의 특성상 이러한 형태를 가정할 수 있으며 이에 근거하여 2차원으로 단면에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 점을 감안하여 도전층으로 쓰이는 0.2 μm 두께의 Mo의 폭을 1 mm로 설정하고 길이를 10cm로 설정한 도선에 길이 방향으로 300 V의 펄스 전압을 100 ms 인가하였을 때 길이방향 단면의 온도 분포에 관한 전산 모사 결과가 그림 5에 나타나 있다. Active layer가 봉지 라인으로부터 약 1 mm 정도에 위치하고 있다고 가정하면 전산 모사 결과 그 위치에서의 최대 온도는 80ºC 정도로 펄스 전계 인가가 끝난 1초 후에 최대 온도를 보이고 있다. OLED 소자의 유기막은 약 100ºC 이상에서 열화가 시작되기 때문에 본 전산 모사 결과로부터 펄스 전계 인가 시간은 100 ms 이내로 정하는 것이 유기막의 열화를 방지할 수 있는 조건이라는 것이 밝혀졌다.

그림 6에 나타낸 바와 같이 프릿을 따라 사각 폐곡선 형태로 형성된 도선의 주울 가열 시 발열 시뮬레이션을 수행하였다. 사각 폐곡선 형태로 형성된 발열 도선은 직선부와 코너부로 사각형을 이루게 되며 주울 가열을 수행하기 위해서 사각 폐곡선으로 전류가 유입되고 방출되는 전류 입출부가 필요하다. 입출부를 형성한 폐곡선 형상의 도선에서 전류는 입부, 직선부, 곡선부, 직선부를 거쳐 다시 곡선부, 직선부를 통과한 후 출부로 빠져나간다. 직선부 에서의 열분포는 직선부의 길이가 일정 이상일 경우 직선부 내에서는 균일한 온도 분포를 가진다. 발열의 크기를 정하는 인자는 power density (W/cm^2)이기 때문에 셀의 크기가 증가함에 따라 인가 전압은 증가하지만 동일한 power density를 맞추는 조건이면 동일한 폭에서의 결과는 동일하게

Table 1. Temperature dependent properties of materials used in this study for simulating the encapsulation process using Joule heating

Glass[9]			Mo[10,11]		
T [K]	K [W/mK]	C_P [J/kgK]	T [K]	K [W/mK]	C_P [J/kgK]
296.15	0.89	740	300	144	285
323.15	0.95	780	1574	94	318
373.15	1.03	850	2018	78	440
473.15	1.14	950			
573.15	1.2	1030			
673.15	1.29	1090			
873.15	1.45	1210			

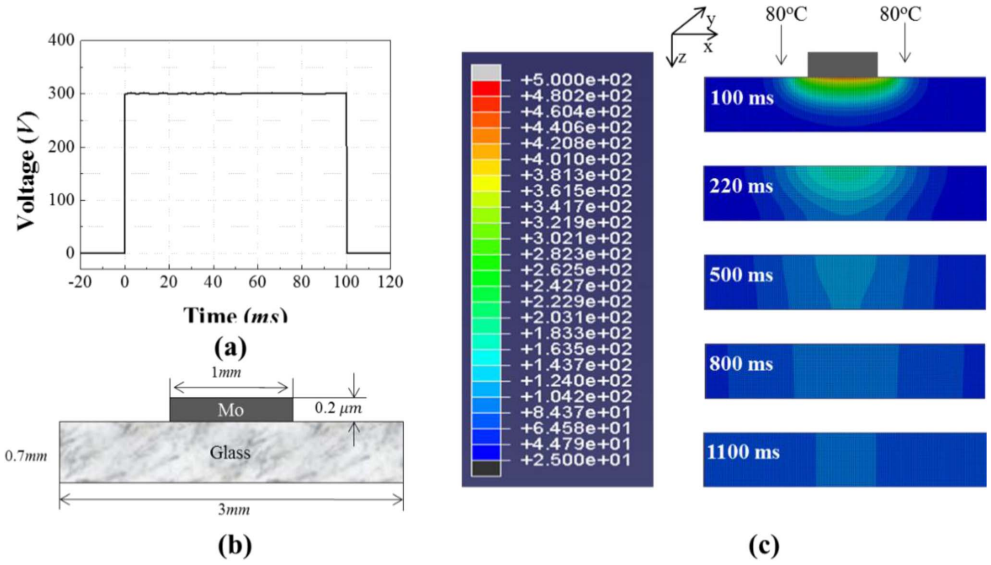


Fig. 5. Two dimensional thermal simulation in order to check thermal degradation of organic layers located near conductor lines. (a) Pulse voltage of 300 V is applied to a Mo layer for a period of 100 ms, (b) Cross sectional view of the sample, and (c) Simulated temperature profiles as function of time.

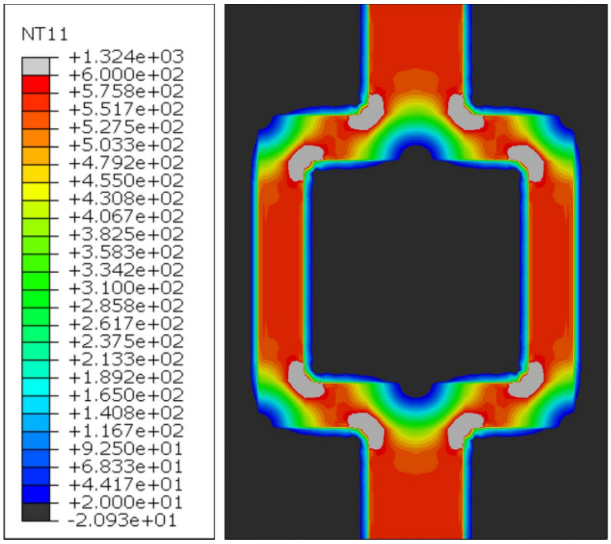
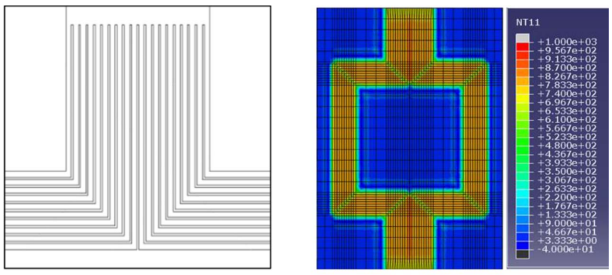


Fig. 6. Temperature distribution along the closed loop according to numerical simulation using Abaqus program.

나타난다는 사실을 근거로 시뮬레이션의 편의를 위하여 가로, 세로 및 폭을 5 mm, 5 mm 및 1 mm로 설정한 폐곡선 형태의 발열 도전층을 디자인 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6에 나타난 색상은 110 V-100 ms의 조건으로 입출부에 전압을 인가하였을 때 형성되는 온도 분포이다. 상기 발열 루프에서 프릿이 형성된 부분의 온도가 600°C까지 가열될 때 입출부 및 코너에서 약 1300°C가 넘는 온도까지 가열되는 영역과 100°C까지도 발열되지 않는 영역이 존재한다. 이는 전계 인가 시 전자의 흐름을 결정하는 저항이 면저항 뿐 아니라 전위의 형성 거리에 따라 결정되는 현상에 기인한다. 예를 들어 그림 6의 구조에서 보면 입출부 및 폐곡선에 각각 4개 도합 8개의 코너 부분이 있는데 전자는 코너 부분을 통과 시 바깥쪽 보다는 안쪽으로 통과하게 된다. 안쪽의 경우가 바깥쪽에 비하여 거리가 짧기에 저항이 작기 때문이다. 그러므로 안쪽 및 바깥쪽의 전류 밀도의 차이로 인하여 균일한 온도 분포를 가지는 것이 불가능하다. 이에 반하여 직선부에서는 같은 길이를 가지고 있기 때문에 균일한 저항을 가지게 되고 균일한 전류가 발생하며 그 결과 균일한 온도 분포를 보인다. 고온으로 발열된 부분은 도전층 및 기판 손상이 발생하여 공정이 불가능할 정도의 온도까지 가열되는 반면 저온 영역의 경우 glass frit의 접합이 일어나지 않기 때문에 그림 6의 디자인으로 형성된 발열루프로는 주울 가열 봉지 공정의 수행이 불가능하다는 것을 알 수 있다.

그림 6의 도전층 디자인에서 나타난 문제점은 일정한 폭을 가진 도전층이 직선 형태를 가진다면 문제가 없지만 폐곡선 형태의 OLED cell에서 반드시 코너 부분을 가질 수 밖에 없기 때문에 생기는 현상에 기인한다. 이를 개선하기 위하여 그림 7(a)에 나타난 바와 같이 1 mm 폭의 도전층을 분할하여 여러 개의 배선으로 형성하였다. 배선은 총 10개로 분할하였으며 각 배선의 폭은 80 μm이며 20 μm 간격으로 배치되어 있다. 이와 같이 배선을 분할할 경우 입출부에서 분할된 도전층은 직선이기 때문에 각 도선의 저항이 일정하다면 병렬회로를 구성하게 되고 동일한 양의 전류가 다수로 분할된 도전층을 따라 흐르게 된다. 그 후 전류는 강제로 분할된 배

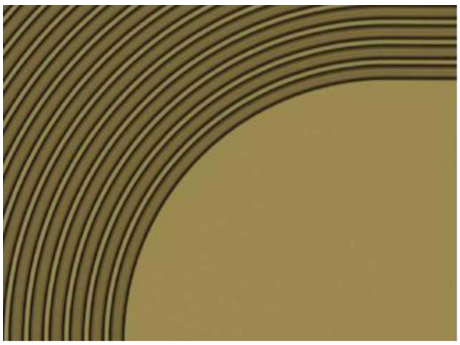


(a) (b)

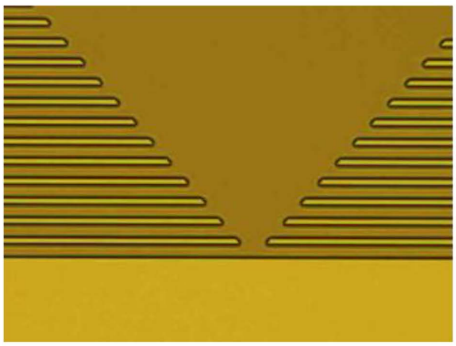
Fig. 7. (a) Patterned shape of a conductive layer by dividing blanket line to multiple lines (b) Temperature distribution along the closed loop according to the line structure shown in (a).

선을 따라 흐를 수 밖에 없기 때문에 동일한 전류량이 폐곡선을 따라 흐르게 된다. 또한 분할된 배선 사이의 비어있는 부분은 배선이 형성된 도전층에서 발생하는 열의 측면 확산에 의하여 온도가 올라가게 된다. 상기에 기술된 배선 구조를 가지고 110 V-100 ms 전압을 인가하였을 때의 전산 모사 결과가 그림 7(b)에 나타나 있다. 전산 모사 결과 온도의 균일성이 그림 6의 결과와 비교하여 획기적으로 개선 된 것을 볼 수 있다. 각 개별 도선의 경우 원래의 도선과 동일한 곡선형태를 가지지만 열분포가 개선된 것은 도선의 폭 감소에 의한 거리차이 감소와 열확산 증가에 있다. 즉 도선의 폭과 열확산 거리를 결정하는 시간에 따라 균일한 또는 불균일한 온도분포가 형성될 지가 결정된다고 볼 수 있으며 약 100 ms의 인가시간에서는 약 80 um 폭의 도선의 경우 곡선을 이루더라도 균일하게 발열한다는 것을 알 수 있다. 그러나 또 다시 코너 부분에서의 온도가 약 150°C 정도 낮은 것이 관찰된다. 이는 꺾이는 부분에 있는 도선의 단면적이 직선부에 비하여 1.4배 정도 넓어서 power density가 달라지기 때문에 발생한다.

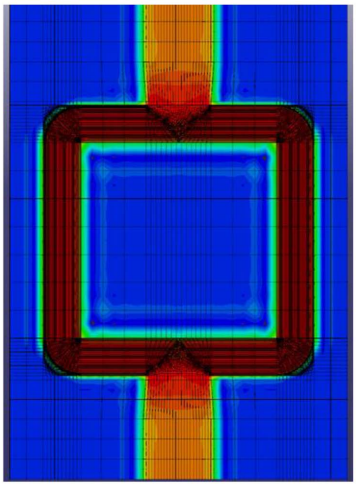
그림 7의 구조에서 나타난 문제점을 해결하기 위하여 입출부와 코너 부분에서 꺾이는 부분의 발열 루프를 다시 디자인 하였다. 우선 코너 부분의 배선 단면적을 균일하게 하기 위하여 둥글게 수정하였다. 그림 8(a)에서 보는 바와 같이 둥근 코너의 경우 단면적이 일정해 지면서 균일한 발열이 발생하고 그에 따른 균일한 온도 분포를 가지게 된다. 그러나 입출부의 경우 코너와 같이 둥근 형태의 조절이 불가능하다. 이를 해결하기 위하여 그림 8(b)에 나타난 바와 같이 입출부의 경우 분할하지 않고 분할의 시작점을 역삼각형 형태로 형성함으로써 발열의 균일성을 꾀하였다. 직선 부분의 경우 분할 배선으로 나누어지면 분할된 각각의 배선은 거의 동



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. (a) Pattern morphology of a conductive layer around the corner, (b) Pattern morphology of a conductive layer at input location, (c) Simulation result of thermal distribution.

일한 길이를 가지기 때문에 동일한 저항을 가진다. 분할된 배선이 각각 독립된 동일한 저항이고 입출부의 저항에 비하여 매우 크다면 그 시작점의 형태 및 분할 배선의 위치와 크게 관계 없이 분할의 시작점과 끝점에서의 전류량은 동일해진다. 이를 이용하여 분할의 시작점을 역삼각형 형태로 형성하면 입출부 내에서의 온도 분포를 비교적 균일하게 형

성 할 수 있다. 3중점 내 온도분포는 3각형 형태의 입출부의 크기를 조절하여 직선부와 입출부의 온도를 동일하게 형성되도록 맞출 수 있다. 직선부의 온도를 동일하게 가열한다고 가정한 상태에서 입출부의 크기가 커지면 power density가 내려가면서 입출부내 온도가 내려가며 반대의 경우에는 올라간다. 직선부와 입출부의 온도 균일성은 여러번의 시뮬레이션을 통한 시행 착오를 통하여 약 55°의 각도를 이룰 때 동일해진다는 것을 확인하였다. 이렇게 디자인된 발열 루프는 그림 8(c)에 나타난 전선모사 결과 입출부에서 최대 5%(~33°C)의 온도 편차가 나타나며 직선부와 곡선부에서는 1%이내의 균일한 온도 분포를 보인다. 실제 AMOLED cell의 가로 및 세로는 전산 모사에 사용한 5 mm보다 길기 때문에 도전층의 두께 편차에 의한 면저항의 차이가 미소하다면 오히려 균일한 발열을 이루는 직선부가 늘어나기 때문에 더욱 균일한 온도 분포를 보일 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 봉지 라인을 따라 패턴된 도전층에 전계를 인가하여 발생하는 주울열을 이용하여 glass frit을 용융 및 응고 시키는 방법을 통하여 봉지 공정을 수행하는 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 사각형의 모양으로 이루어진 cell의 가장 자리를 따라 형성된 폐곡선 도전층의 구조에 의하여 열분포가 패턴의 형태에 따라 민감하게 변화하는 것을 전산 모사를 통하여 알 수 있었다. 폐곡선 상에서 입출부나 코너부에서 최대 및 최소 온도 차이가 1000°C가 넘는 것을 확인하였다. 이는 전계 인가 시 전류가 짧은 경로에 집중되는 것에 기인한다. 열분포의 균일도를 향상하기 위하여 Mo 도전층을 여러 개의 배선으로 분할하는 방법 및 입출부와 코너 부분의 형상을 최적화 함으로써 입출부에서 최대 5% (~33°C)의 온도 편차가 나타나며 직선부와 곡선부에서는 1% 이내의 균일한 균일한 발열을 얻을 수 있었다.

References

1. J. J. Lih, C. F. Sung, C. H. Li, T. H. Hsiao, H. H. Lee, SID Symp. Dig. Tech., 35 (2004) 1504.
2. S. F. Lim, L. Ke, W. Wang, S. J. Chua, Appl. Phys. Lett., 78 (2001) 2116.
3. M. Kawaharada, M. Ooishi, T. Saito, E. Hasegawa, Synthetic Met., 91 (1997) 113.
4. LG Chem. Ltd. http://www.rnd.lgchem.co.kr/kor/rnd/rdc_crdAM02.asp.
5. J. Lawrence, L. Li, J. T. Spencer, Opt. Laser Technol., 30 (1998) 205.
6. J. Lawrence, L. Li, J. T. Spencer, Opt. Laser Technol., 30 (1998) 215.
7. J. Lawrence, M. J. J. Schmidt, L. Li, R. E. Edwards, A. W. Gale, Opt. Laser Technol., 34 (2002).
8. ABAQUS 6.10, www.simulia.com.
9. The REMBAR Company Inc., http://www.rembar.com/default.htm Dobbs Ferry.
10. Samsung Corning Precision Glass Inc, www.samsungscp.co.kr.
11. D. H. Kim, S. Park, W. E. Hong, J. K. Chung, J. S. Ro, S. H. Lee, Transactions of the KSME B, 33 (2009) 797.