

대면적 유기EL 양산 장비 개발을 위한 증착 공정 모델링

이응기[†]

[†]공주대학교 기계자동차공학부

Evaporation Process Modeling for Large OLED Mass-fabrication System

Eung Ki Lee[†]

[†]Kongju National University, Division of Mechanical & Automotive Engineering

ABSTRACT

In order to design an OLED(Organic Luminescent Emitting Device) evaporation system, geometric simulation of film thickness distribution profile is required. For the OLED evaporation process, thin film thickness uniformity is of great practical importance. In this paper, a geometric modeling algorithm is introduced for process simulation of the OLED evaporating process. The physical fact of the evaporating process is modeled mathematically. Based on the developed method, the thickness of the thin-film layer can be successfully controlled.

Key Words : OLED(Organic Luminescent Emitting Device), evaporation, thin film, modeling

1. 서 론

최근 정보화 사회로의 움직임이 더욱 가속화되고 있으며 이에 따라 정보 디스플레이의 중요성이 점점 증대하고 있다. 정보 디스플레이는 CRT로부터 평판 디스플레이(FPD; Flat Panel Display)로 점차 옮겨가는 추세이며, 유기EL(유기EL; Organic Luminescent Emitting Device) 디스플레이는 저전압 구동, 자기 발광, 경량 박형, 광시야각, 그리고 빠른 응답 속도 등의 장점 때문에 세계적으로 많은 연구 및 개발이 진행되고 있다[1, 2].

유기EL의 제품 경쟁력 확보를 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 제조 장비의 개발을 위한 연구가 다각도로 이루어지고 있다. 제품 경쟁력 확보를 위하여 생산성을 향상시키기 위한 노력들이 경주되고 있으며, 이에 따라 모기판(mother glass)의 크기가 점점 확대되어 가는 추세이다. 현재 세계적으로 3세대(Generation) 기판을 이용하는 양산이 이루어지고 있으며, 4세대 이상의 기판을 향한 기술의 개발에 박차를 가하고 있다. 유기EL 제품의 확고한 경쟁력 확보를 위하여 보다 대

형 기판을 이용한 생산 기술 확보가 요구되는 시점이다.

유기EL 디스플레이는 유기물 박막에 음극과 양극을 통하여 주입된 전자와 정공이 여기자를 형성하고 형성된 여기자로부터 특정한 파장의 빛이 발생하는 현상을 이용하는 것으로 일반적으로 다층 박막으로 구성되어 있으며, 이러한 박막층들은 진공 증착법에 의하여 형성된다[3, 4]. 일반적으로 저항 가열 방식의 증발원을 이용하여 증착하는데, 증착 공정 조건 중에서 박막 두께 분포의 균일도가 기본적으로 확보되어야 한다. 기판의 크기가 확대됨에 따라 박막 균일도는 점점 더 중요한 공정 요건이 되어가고 있다. 이를 위하여 박막(thin-film)의 두께를 예측하고 이를 반영한 증착 공정 설비의 설계 기술 개발이 요구된다.

증착 공정은 증발원의 재료가 가열, 증발되어 응축성막되는 공정으로, 증발 입자의 방향 분포는 증발원(evaporation cell)에 주로 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Fig. 1)[5].

저분자 유기EL 디스플레이에 사용되는 소자는 일반적으로 양극(anode), 정공 주입층(HIL), 정공 수송층(HTL), 전자 차폐층(EBL), 발광층(EML), 전자 수송층(ETL), 전자 주입층(EIL) 그리고 음극(cathode) 등으로 구성되어 있으며 이러한 박막 층들은 일반적으로 진공

[†]E-mail : eklee@kongju.ac.kr

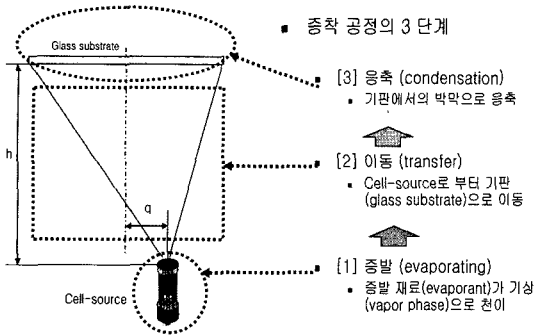


Fig. 1. Evaporation process with a point cell-source.

증착법에 의하여 형성된다. 이러한 유기 박막의 증착 공정에 적용되는 증발원으로서 저항 가열 방식의 증발원이 이용되는데, 구조가 간단하고 막 두께 균일도 확보가 용이한 점 증발원(point cell-source)이 현재 주로 적용되고 있다(Fig. 1).

유기 EL 소자의 제작을 위하여 저항 가열식 증착 공정 조건 중에서 박막 두께의 분포(evaporation thickness profile)가 균일하여야 한다. 두께 균일도의 불균일은 화소(pixel)에 따른 휘도, 색도 등의 성능의 차이의 원인이 될 수 있다. 또한, 생산성의 향상을 위하여 기판(mother glass)의 크기가 점점 확대되어가는 추세이다. 기판의 크기가 확대됨에 따라 유기 박막의 균일도는 점점 더 중요한 공정 요건이 되어가고 있다.

본 연구는 대면적 증착 시스템 설계를 위하여 증착 공정의 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 증착 공정 모델을 개발한다. 증착 공정을 컴퓨터 시뮬레이션으로 대체함으로써, 단시간에 최적 공정 조건을 확립할 수 있도록 한다. 본 연구를 통하여 유기EL 양산을 위한 증착 공정의 최적 조건을 선정함으로써 생산비 절감 및 생산성 향상을 기대할 수 있으며, 생산 설비 설계 및 납기의 혁신적인 단축이 기대되며, 보다 빠른 납기로 인하여 제품 개발 및 생산 경쟁력에서 우위를 확보할 수 있게 된다.

2. 증발원 방사 분포

증발원(cell-source)으로부터 증발하는 입자는 증발원의 온도에 상응하는 역학적 에너지를 가지고 증발한다 [6]. 증착 공정에서의 박막 두께 분포의 모델링을 위하여 증발되는 입자의 방향 분포를 파악하는 것이 무엇보다 중요하다.

점증발원의 방사분포 모델링에 관한 많은 연구가 이루어졌으며, 이상적인 점증발원으로서 밀폐된 공간에

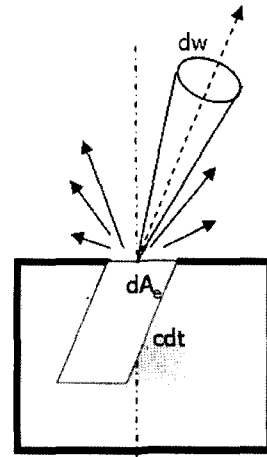


Fig. 2. Effusion modeling of ideal point cell-source.

극히 적은 구멍이 있는 형태의 증발원(Fig. 2)에서 미세한 구멍 dA_e 를 통하여 증발 입자가 방출되는 경우 dt 시간 동안 면적 dA_e 를 통하여 기울어진 체적 내의 입자 분율은 식(1)과 같다[7, 8].

$$c dt \cos\phi dA_e \frac{1}{V} \tag{1}$$

방향에 따른 입자 분율로부터 방사 각도에 따른 증발 입자의 분포는 고체각(solid angle) ω 에 대하여 식(2)와 같이 계산된다.

$$dM_e(\phi) = M_e \cos\phi \frac{d\omega}{\pi} \tag{2}$$

증발 입자의 분포는 실험으로부터 진공 증착 공정에서 점증발원의 증발 현상은 cosine 함수의 n제곱으로 표현할 수 있음이 알려져 있다[5]. 방사 각도에 대한 증발 입자의 분포(m_a)는 증발원의 수직 방향의 입자 분포 m_0 에 를 기준으로 방향각(angle, α)에 대하여 식(3)과 같이 표현될 수 있다(Fig. 3).

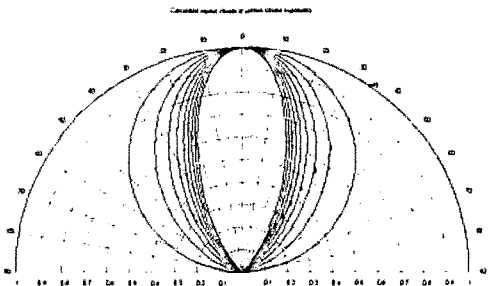


Fig. 3. The effusion distribution profiles of the various evaporation sources.

$$m\alpha = m_0 \cos^n \alpha \tag{3}$$

3. 박막 두께 모델링

3.1. 유기EL 증착 시스템

유기EL 증착 공정에서 주로 채택되는 회전 증착 공정 시스템은 (Fig. 4)에서 도시된 것과 같은 구조를 갖는다.

박막 균일도 분포에 대한 해석을 위하여 공간에 위치한 미소 면적 dA 를 가정한다. 이 미소 면적에 응축되는 성막량을 계산하기 위하여 (Fig. 4)의 증착 시스템을 (Fig. 5)와 같이 기하학적으로 나타낼 수 있다.

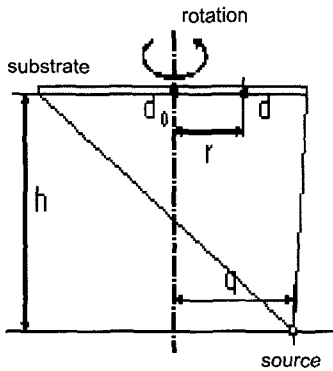


Fig. 4. Evaporation equipment.

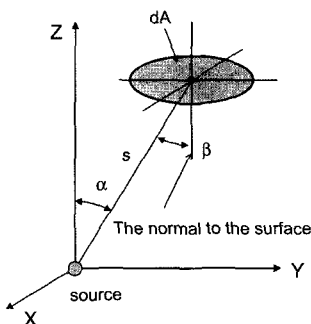


Fig. 5. Geometrical representation of evaporation equipment.

3.2. 박막 두께 분포 모델링

박막 균일도 분포에 대한 해석을 위하여 공간에 위치한 미소 면적 dA 를 가정한다. 이 미소 면적에 응축되는 성막량을 계산하기 위하여 증착 시스템을 (Fig. 5)와 같이 기하학적으로 나타낼 수 있다.

공간에서 임의의 위치와 방향을 갖는 미소 면적 dA 에 대한 고체각(ω)은 식(4)와 같이 계산된다.

$$d\omega = \frac{\cos\beta dA}{s^2} \tag{4}$$

각 β 는 기관(substrate)의 중심과 미소 체적의 법선 방향(normal direction)과의 각도이고, s 는 미소 체적과 증발원과의 거리이다. 미소 체적의 자세는 각도 α , β 와 거리 s 로 정의될 수 있다.

증발 입자가 고체각(ω)의 방향에서 미소 체적 dA 에 형성되는 박막 두께의 계산을 위하여 질량, 밀도, 체적 그리고 박막 두께의 관계는 개념적으로 식(5)와 같이 표현될 수 있다.

$$dm = \rho dV = \rho d \tag{5}$$

dA 를 치환함으로써 식(6)과 같은 미소 체적에서의 박막 두께 계산식을 얻게 된다.

$$d = \frac{m(\omega)d\omega}{\rho dA} = \frac{m(\omega)\cos\beta}{\rho s^2} \tag{6}$$

기관 중심에서의 박막 두께는 기관의 회전 증착 공정 중에 두께가 변하지 않는 위치이므로 이 위치에서의 박막 두께를 이용하여 다른 위치에서 박막 두께를 표현함으로써 식(7)과 같이 박막 두께 분포를 무차원화할 수 있다.

$$\frac{d}{d_0} = \left(\frac{s_0}{s}\right)^2 \left(\frac{\cos^n \alpha \cos \beta}{\cos^n \alpha_0 \cos \beta_0}\right) \tag{7}$$

반경 r 의 크기를 갖는 기관이 회전하는 증착 시스템에서 기관의 회전 중심으로부터 바깥쪽으로 위치한 증발원의 거리를 q 로 표현하였다. 증발원으로부터 기관의 거리는 h 로 나타낸다. 회전 증착 공정에서 무차원화된 박막 두께 분포를 해석적으로 계산할 수 있다. 식(7)의 $\cos\alpha$ 와 $\cos\beta$ 는 Fig. 4와 Fig. 5의 기하학적 관계로부터 식(8)과 같이 r , h , 그리고 q 로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \cos\alpha &= \cos\beta = \frac{h}{s} \\ &= \frac{h}{r^2 - 2rq\cos\phi + q^2 + h^2} \\ &= \frac{1}{\left[\left(\frac{r}{h}\right)^2 - 2\left(\frac{r}{h}\right)\left(\frac{q}{h}\right)\cos\phi + \left(\frac{q}{h}\right) + 1\right]^{\frac{1}{2}}} \end{aligned} \tag{8}$$

식(7)은 증착 공정에서 증발원으로부터 방출된 입자가 평면 기관 위에 증착되는 박막 두께 분포를 표현하고 있는 계산식으로 기관의 회전이 반영되지 않은 결과이다. 회전 증착 공정에서의 박막 두께 분포를 표현하기 위하여 식(7)을 기관 회전 방향으로 적분함으로써 증착 공정의 기관 회전을 반영하는 식 (9)와 같이 표현

이 가능하게 된다.

$$\frac{D}{D_0} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{d}{d_0} d\phi \tag{9}$$

$$= \left[1 + \left(\frac{q}{h} \right)^2 \right]^{\frac{n+3}{2}} \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{d\phi}{\left[\left(\frac{r}{h} \right)^2 - 2 \left(\frac{r}{h} \right) \left(\frac{q}{h} \right) \cos\phi + \left(\frac{q}{h} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{n+3}{2}}}$$

박막 두께 예측 모델의 검증을 위하여 증착 공정이 수행되었으며, 그 결과 최대 4.7% 이내의 오차로 박막 두께 분포 예측이 가능함을 확인하였다(Table 1).

Table 1. Prediction errors of thickness profile model

No.	Simulated Thickness (Å)	Experimented Thickness (Å)	Difference (%)
1	2132.7	2061	-3.48%
2	3214.4	3299	2.56%
3	4601.8	4827	4.66%
4	6085.3	6120	0.57%
5	7228.8	7108	-1.70%
6	7573.0	7573	0.00%
7	7228.8	7230	0.02%
8	6085.3	6284	3.16%
9	4601.8	4817	4.47%
10	3214.4	3217	0.08%
11	2132.7	2068	-3.13%

3.3. 증발원 방사 특성

회전 증착 공정의 결과 형성되는 박막 두께 분포는 회전축을 기준으로 축대칭 형상을 가지며, 기판과 증발

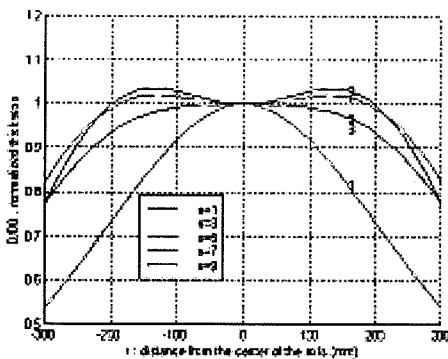


Fig. 6. Film thickness distribution profile as function of various cosine exponents n.

원의 상대 위치의 관계인 (r/h), 그리고 증발원의 방사 분포를 표현하는 n 값의 함수로 표현됨을 알 수 있다. (Fig. 6).

박막 두께 분포를 계산하기 위하여, 증발원의 방사 특성을 표현하는 지수 값인 n 값의 추정을 위한 과정이 요구된다. 본 연구에서는 증발원을 사용한 공정 실험으로부터 측정된 성막량으로부터 역으로 n 값을 추정하는 과정을 적용한다.

방향각(α)에 대한 박막 두께(t)의 분포를 증발원 방사 특성 식인 식(10)의 코사인 함수로 근사시킴으로써 지수 n 값을 추정할 수 있다.

$$t = \cos^n(\alpha) \tag{10}$$

증착 공정 실험으로부터 측정된 박막 두께 데이터에 대한 코사인 함수의 근사를 위하여, 본 연구에서는 최소 자승법(Least Square Method)을 이용하여 근사 오차를 최소화 한다. 본 연구에서는 삼각함수에 지수가 결합되어 있는 코사인 함수에 로그(logarithm)를 적용함으로써 최소 자승법의 적용이 용이한 식(11)의 형태를 사용한다.

$$Y_i = \ln t_i, X_i = \ln \cos \alpha_i \tag{11}$$

식(11)을 이용하여 오차 제곱의 합을 식(12)의 오차 함수로 정의할 수 있다.

$$E = \sum_{i=1}^n (n \ln \cos \alpha_i - \ln t_i)^2 \tag{12}$$

$$= \sum_{i=1}^n (nX_i - Y_i)^2$$

오차를 최소화하기 위하여 식(13)과 같이 오차 함수를 편미분하여 n 값을 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial E}{\partial n} = \sum_{i=1}^n 2X_i(nX_i - Y_i) = 0 \tag{13}$$

최소 자승법으로 측정된 박막 두께분포로부터 방사 분포 특성 값인 n을 추정할 수 있다(Fig. 7).

추정된 n 값으로부터 목표 사양(specification)을 만족하는 증발원 위치를 선정한다. (Fig. 8)에 도시된 바와 같이 탐색(search) 기법을 적용하여 최적의 증발원 위치를 선정한다. 각종 공정 조건을 반영하여 증발원의 위치를 선정하게 된다.

본 연구에서 사용된 일자형 증발원(Fig. 8)의 방사 분포 특성 값이 n 값을 계산하기 위하여, 증발원의 증착 실험을 수행하였으며 그 결과 Fig. 7과 같은 박막

두께 분포를 측정할 수 있었다. 측정된 박막 두께 분포 (Fig. 7)을 식(13)에 대입함으로써 n 값을 계산하였다. 증착 공정 실험에 사용된 증발원의 추정된 n 값은 4.7 이었다. 유추된 n 값을 이용하여 증발원의 방사 특성을 예측하고, 대면적 유기EL 생산을 위한 최적의 증발원

위치를 탐색 기법을 사용하여 선정하였다(Fig. 9). 선정된 위치에 증발원을 설치하여 증착 공정 실험을 수행 하였으며, 그 결과 측정된 두께 분포 및 균일도가 (Table 2)에 나타나 있다. 일반적인 유기EL 증착 공정 사양인 5%를 충분히 만족하는 증착 공정 성능을 보여 주고 있음을 확인할 수 있다.

다른 형태의 증발원으로서 스모(sumo) 형상의 증발원(Fig. 10)에 대한 증착 실험을 수행하였다. 증발원의

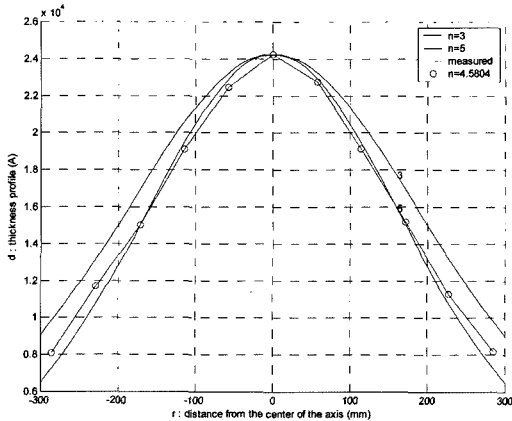


Fig. 7. Fitting of the effusion distribution profile.

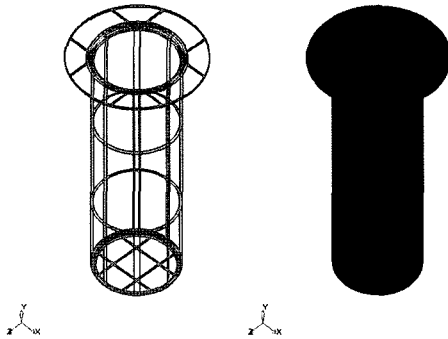


Fig. 8. Straight-shape Crucible.

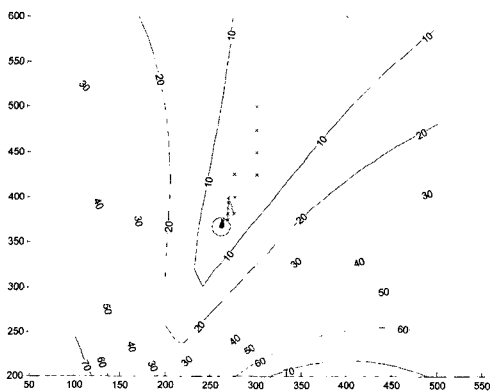


Fig. 9. Searching the optimum cell-source position.

Table 2. Thickness and uniformity of straight-shape cell

# of Cell	Cell #1	Cell #2	Cell #3
1	4721	2888	3842
2	4863	3020	4036
3	4952	3080	4133
4	4985	3091	4135
5	5060	3122	4170
6	4988	3099	4131
7	4958	3054	4088
8	4853	2999	3888
9	4755	2929	3852
Average (Å)	4968	3078	4115
Uniformity (±%)	3.466	3.894	4.094

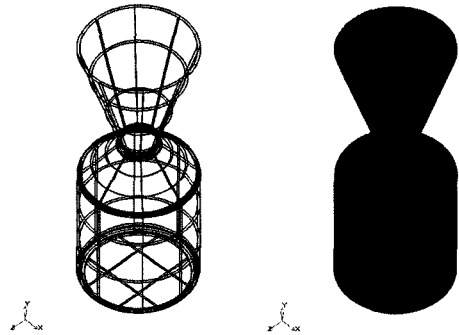


Fig 10. Sumo-shape Crucible.

Table 3. Thickness and uniformity of SUMO-cell

# of Cell	Cell #1	Cell #2	Cell #3
1	9392	9340	9471
2	9895	9871	9953
3	9622	9412	9378
Average (Å)	9636	9541	9601
Uniformity (±%)	2.61	2.76	2.48

방사 분포 특성값 n 을 식(13)으로 구한 결과 $n=3.31$ 로 계산되었다. 스모 셀을 사용한 증착 공정에서의 박막 두께 및 균일도는 Table 3에 도시되어 있으며, 3% 미만의 박막 두께 균일도를 보임으로써 대면적 유기EL 양산을 위한 증착 공정 사양을 충분히 만족함으로 보여 주고 있다.

4. 결 론

본 연구에서 저항 가열 방식의 증착 공정의 물리적 현상을 표현할 수 있는 공정에 대한 형상 모델링을 수행하였다. 개발된 형상 모델링을 이용함으로써 증착 공정을 컴퓨터 시뮬레이션으로 대체할 수 있도록 함으로써, 단시간에 최적 공정 조건을 확립할 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션으로 박막 두께 분포를 예측하였으며, 각종 공정 조건을 만족하는 증발원의 최적 위치를 선정하였다. 증착공정 결과로부터 대면적 유기EL 공정 사양을 만족하고 있음을 확인하였다.

납기의 혁신적인 단축이 기대되며, 보다 빠른 납기로 인하여 제품 개발 및 생산 경쟁력에서의 우위 확보를 기대할 수 있다.

참고문헌

1. 이준신, 김도영, 평판 디스플레이 공학, 홍릉과학출판사, pp.159-161, 2005.
2. Heon Lee, Sunghoon Hong, Kiyeon Yang, Kyungwoo Choi, 'Fabrication of nano-sized resist patterns on flexible plastic film using thermal curing nano-imprint lithography', Microelectronic Engineering Vol. 83, pp. 323-327, 2006.
3. Sang Chul Lim, Seong Hyun Kim, Hye Yong Chu, Jung Hun Lee, Jeong-Ik Lee, Ji Young Oh, Dojin Kim, Taehyoung Zyung, 'New method of driving OLED with an OTFT', Synththic Metals, vol. 151, pp.197-201, 2005.
4. Maissel Glang, Handbook of the Thin Film Technology, McGraw-Hill, USA, pp.1-55, 1970.
5. Donald L. Smith, Thin-Film Deposition, McGraw-Hill, USA, p.94-99, 1997.
6. H. K. Pulker, Coating on Glass, Elsevier Science Publishing Co., New York, USA, 1987.
7. A. MacLeod, thin Film Optical Filters, Adam Hilger Ltd., London (1969).
8. K. H. Behrmdt, R. E. Thun, Physics of Thin Films, Vol. 3, Academic Press, New York, 1966.
9. M. Ohring, The material science of thin film, Academic press, USA, 1992.