

유기EL 디스플레이의 진공 성막 공정의 최적화에 관한 연구

이 음 기[†]

[†]공주대학교 기계자동차공학부

Study on Optimization of the Vacuum Evaporation Process for OLED (Organic Electro-luminescent Emitting Display)

Eung Ki Lee[†]

[†]Division of mechanical engineering and automotive engineering, Kongju National University

ABSTRACT

In OLED vacuum evaporation process, the essential requirements include good uniformity of the film thickness over a glass substrate. And, it is commercially significant to improve the consuming efficiency of material of the evaporant which is deposited on the substrate because of high price of organic materials. In this paper, to achieve the better thickness uniformity and the better organic material consuming rate, a process optimization algorithm was developed by understanding vacuum evaporation process parameters that affect the material consuming efficiency and the uniformity of film thickness. Based on the method developed in this study, the vacuum evaporation process of OLED was successfully controlled. The developed method allowed the manufacture of high quality OLED displays with cheaper fabrication cost.

Key Words : OLED (organic electro-luminescent emitting display), vacuum evaporation, thin film, thickness uniformity, efficiency

1. 서 론

평판 디스플레이(FPD; flat panel display) 중 유기EL 디스플레이는 저전압 구동, 자기 발광, 경량 박형, 광시야각, 그리고 빠른 응답 등의 장점으로 차세대 디스플레이로 각광받고 있다. 유기EL의 발광 원리는 유기물 박막에 음극과 양극을 통하여 주입된 전자와 정공이 여기자를 형성하고, 형성된 여기자로부터 빛이 발생하는 현상을 이용하는 것이다. 저분자 유기EL 디스플레이의 소자는 다층의 유기막으로 구성되며, 이러한 박막층(thin-film layers)들은 일반적으로 진공 성막 공정(vacuum evaporation process)에 의하여 형성된다[1, 2].

유기EL의 제품 경쟁력 확보를 위하여 생산성을 향상시키기 위한 노력들이 경주되고 있으며, 기판(glass substrate)의 크기가 점점 확대되어가는 추세이다. 기판 크기가 확대됨에 따라 유기박막의 균일도는 점점 더

중요한 공정 요건(process specification)이 되어가고 있다. 두께 균일도의 불균일은 화소(pixel)에 따른 휘도, 색도 등 성능 차이의 원인이 된다. 유기EL의 양산을 위하여 고려하여야 하는 다른 공정 조건 중 하나는 재료 소비율(material consuming rate)이다. 유기 재료의 가격이 매우 고가이기 때문에 성막 공정에서 사용되는 재료의 소비량을 줄이는 것이 생산비를 낮추는데 직접적인 영향을 준다.

일반적으로 증발원을 기판에 가까이 위치시킬수록 재료 소비량이 줄어들게 된다. 그러나, 박막의 두께 균일도 측면에서는 증발원이 기판으로부터 멀어질수록 바람직하다. 이와 같이 재료 소비량과 두께 균일도는 서로 상충되는 증착 조건을 요구하므로, 주어진 두께 균일도를 만족시키면서 재료의 소비율을 최소화할 것이 요구된다. 주어진 두께 균일도를 만족시키면서 재료의 소비율을 최소화할 수 있는 성막 공정 최적화 방안을 본 연구를 통하여 제시하고자 한다.

[†]E-mail : ekllee@kongju.ac.kr

2. 성막 공정 모델링

2.1. 증착 시스템의 기하학적 표현

유기EL 진공 성막 공정은 증발원(cell source)에서 가열된 고상 또는 액상의 유기재료가 보다 낮은 온도의 기판(substrate)의 위에 응축되어 유기 박막이 성막된다(Fig. 1)[3].

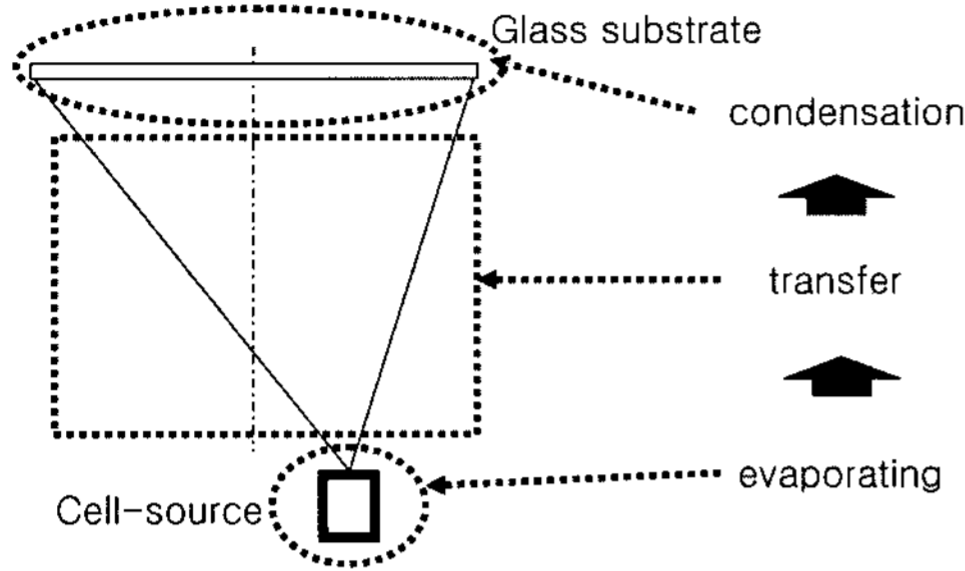


Fig. 1. Vacuum evaporation process with a point cell-source.

진공 성막 공정은 증발원에 놓여 있는 재료가 가열되어 증발원으로부터 입자가 증발된다. 증발원에 대한 박막 균일도 해석을 위한 연구가 이루어졌으며, 증발된 유기 재료의 방사 특성은 일반적으로 식(1)과 같이 표현될 수 있다[4].

$$d = \frac{m(\omega) \cos^n \alpha \cos \alpha}{\rho s^2} \quad (1)$$

유기EL 성막 공정에서 주로 적용되는 회전 성막 공정 시스템은 Fig. 2에서 도시된 것과 같은 구조를 갖는

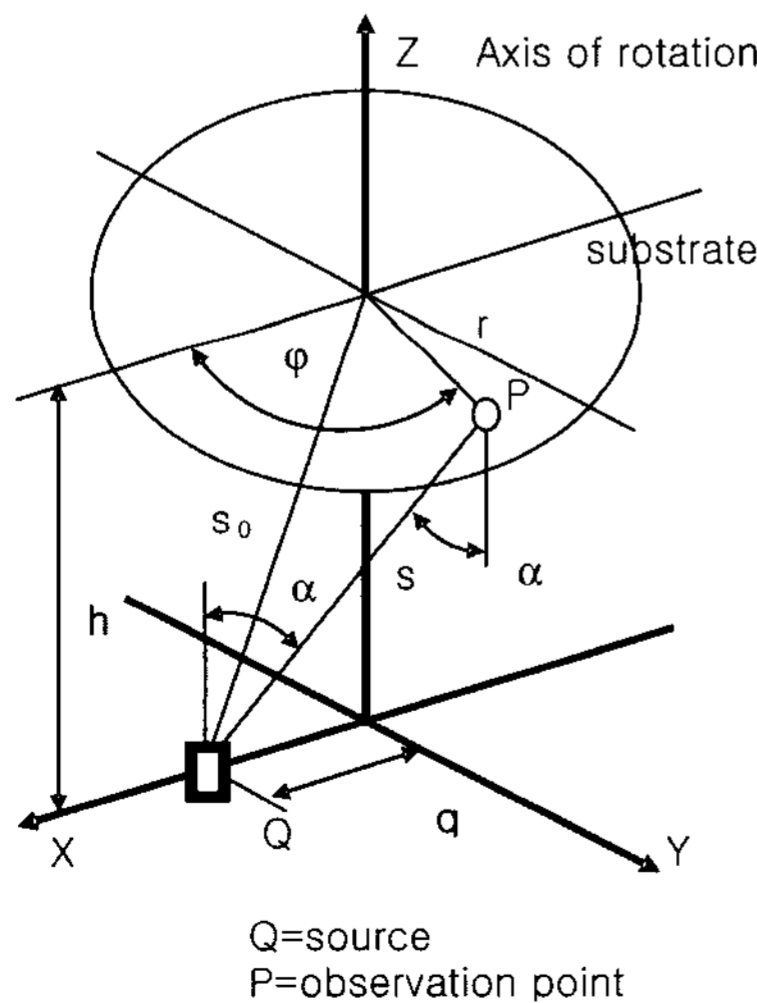


Fig. 2. Geometrical representation of an evaporation equipment.

다. 기술적으로는 증착 시스템 내부에 장치되어 있는 기판 홀더가 기판을 회전시키는 구조이다.

Fig. 2에서 각 α 는 기판의 법선 방향(normal direction)이고, s 는 미소 체적과 증발원과의 거리이다. 박막 두께 분포 모델링에서 반경 r 의 크기를 갖는 기판이 회전하는 성막 시스템을 가정하였으며, 기판의 회전 중심으로부터 바깥쪽으로 증발원의 위치를 q 로 표현하였다. 증발원과 기판의 거리는 h 로 나타낸다.

Fig. 3의 기하학적 관계로부터 회전 성막 공정에 대한 무차원화된 박막 두께 분포를 식(2)와 같이 해석적으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{D}{D_0} &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{d}{d_0} d\phi \quad (2) \\ &= \left[1 + \left(\frac{q}{h} \right)^2 \right]^{\frac{n+3}{2}} \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{d\phi}{\left[\left(\frac{r}{h} \right)^2 - 2 \left(\frac{r}{h} \right) \left(\frac{q}{h} \right) \cos \phi + \left(\frac{q}{h} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{n+3}{2}}} \end{aligned}$$

식(2)는 기판의 회전 방향으로 적분함으로써 성막 공정의 기판 회전을 반영하고 있다. 회전 성막 공정에 의하여 형성되는 박막 두께 분포는 회전축을 기준으로 축대칭 형상을 가지며, 기판과 증발원의 상대 위치의 관계인 (r/h) , 그리고 증발원으로부터의 증발 유기 재료의 방사 분포를 표현하는 n 값의 함수로 표현됨을 식(2)로부터 확인할 수 있다.

2.2. 박막 두께 분포 모델링

식(2)의 전개를 위하여 본 연구에서는 새로운 변수 a , b 및 k 를 도입하였다. (식 3)

$$\begin{aligned} k &= \left[1 + \left(\frac{q}{h} \right)^2 \right]^{\frac{n+3}{2}}, \\ a &= \left(\frac{r}{h} \right)^2 + \left(\frac{q}{h} \right)^2 + 1, \quad b = 2 \left(\frac{r}{h} \right) \left(\frac{q}{h} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

식(3)을 식(2)에 대입함으로써 식(4)와 같이 간략화된 형태로 정리할 수 있다.

$$\frac{D}{D_0} = k \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{d\phi}{[a - b \cos \phi]^{\frac{n+3}{2}}} \quad (4)$$

식(4)에서 지수 $(n+3)/2$ 이 포함됨으로 인하여, 적분의 해석적인 계산은 지수가 정수가 되는 경우로 국한된다. n 이 홀수인 경우 즉, $n=1, 3, 5, \dots$ 인 경우 해석

적인 해를 구할 수 있다. n 값의 변화에 따라 계산된 적분 결과 중 일부는 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 n=1, \quad \frac{D}{D_0} &= k \frac{a}{(a^2 - b^2)^{3/2}} \\
 n=3, \quad \frac{D}{D_0} &= k \frac{2a^2 + b^2}{2(a^2 - b^2)^{5/2}} \\
 n=5, \quad \frac{D}{D_0} &= k \frac{2a^3 + 3ab^2}{2(a^2 - b^2)^{7/2}} \\
 n=7, \quad \frac{D}{D_0} &= k \frac{8a^4 + 24a^2b^2 + 3b^4}{8(a^2 - b^2)^{9/2}} \\
 n=9, \quad \frac{D}{D_0} &= k \frac{8a^5 + 40a^2b^2 + 15b^4}{8(a^2 - b^2)^{11/2}} \quad (5)
 \end{aligned}$$

증발원의 방사 분포를 나타내는 대표값인 지수, n 값은 증발원으로부터 각 방향의 방사량을 반영하는 것으로서 증발원에 따라 1~6범위의 n 값을 갖는다[5].

식(4)의 적분을 해석적으로 수행하기 위하여 n 값이 홀수(odd integer)일 것이 요구되나, 실제의 증발원의 n 값은 실수(real number)이다. 지수의 값이 실수인 경우에 대하여 적분을 수행할 것이 요구된다. 본 연구에서는 수치해석 기법 중 사다리꼴 공식(trapezoidal rule)을 사용하여 식(4)의 적분을 수행하였다. 사다리꼴 공식은 주어진 함수 f(x)를 적분구간 [a, b]에 대하여 여러 부분구간들로 나눈 후, 각 부분에 대한 사다리꼴 면적의 합을 식(6)과 같이 계산함으로써 근사해를 구한다.

$$\begin{aligned}
 J &= \int_a^b f(x) dx \quad (6) \\
 &\approx \frac{(b-a)}{n} \left[\frac{1}{2} f(a) + f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_{n-1}) + \frac{1}{2} f(b) \right] = \tilde{J}
 \end{aligned}$$

사다리꼴 공식의 오차는 식(7)과 같다. 식(7)로부터 주어진 적분 구간에 대하여 부분 구간의 수를 증가시킴으로써 계산 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 10E-10 이하의 오차를 갖도록 수치해석을 수행함으로써 계산의 정확도를 확보하였다.

$$\epsilon = \tilde{J} - J \propto \frac{(b-a)^3}{12n^2} \quad (7)$$

임의의 증발원에 대하여 방사 분포를 표현하는 지수인 n 값이 실수의 값을 가질 때, n 값에 따른 박막 두께 분포 변화가 Fig. 3에 도시되어 있다.

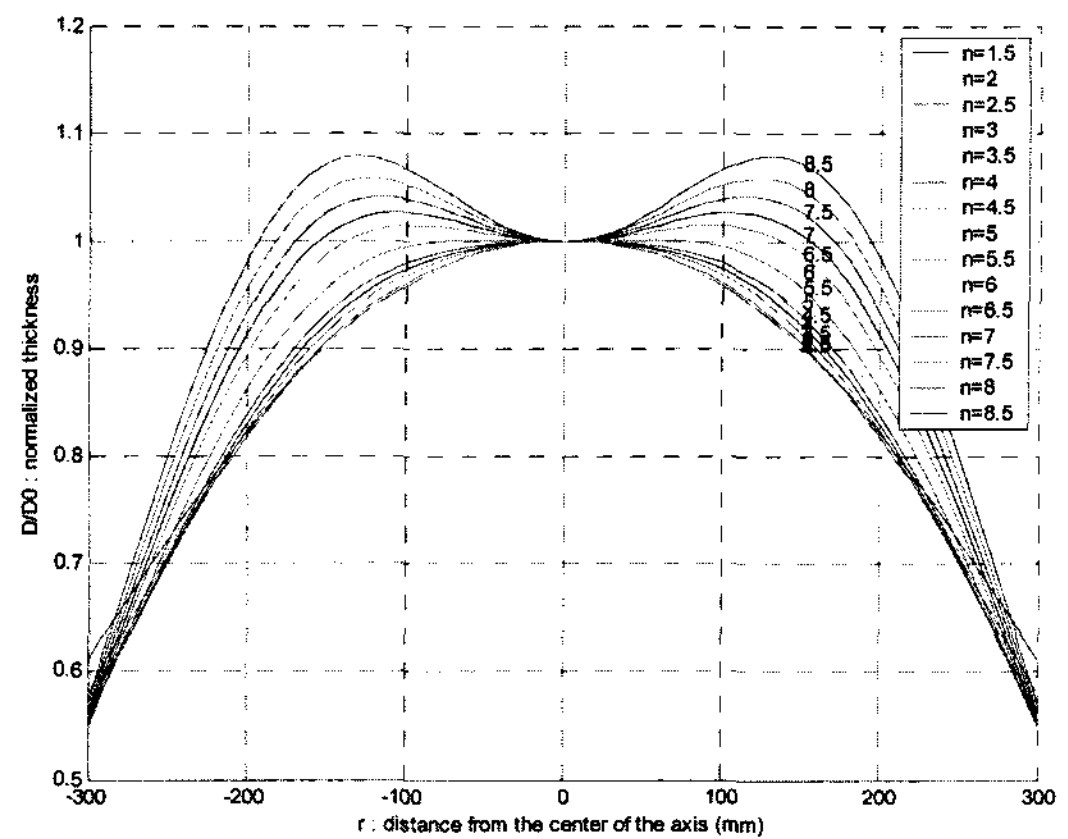


Fig. 3. Numerically calculated thickness distribution profiles as a function of real-number exponents n.

3. 증발원 방사 특성

3.1. 코사인 함수의 근사

진공 성막 공정에서 증발원의 방사 특성은 코사인 함수의 n 제곱으로 표현 할 수 있음이 알려져 있다. 이를 위하여 증발원의 방사 특성을 표현하는 지수 값인 n 값을 추정하여야 한다. 본 연구에서는 성막 공정 실험으로부터 n 값을 추정하였다. 증발원을 기관 중심의 아래에 위치하도록 장착하고 성막하여 기관 전영역에서의 박막 두께를 측정한다. 측정된 박막 두께를 방향 각(α)에 대한 박막 두께(t)의 분포로 표현되는 식(10)으로 근사시킴으로써 지수 n 값을 추정할 수 있다.

$$t = \cos^n(\alpha) \quad (8)$$

근사화 과정은 성막 실험으로부터 측정된 데이터 (α₁, t₁), (α₂, t₂), ..., (α_n, t_n)이 주어졌을 때 데이터를 근사화하고자 하는 함수, 즉, 식(8) 과의 오차가 최소화 되도록 지수 n을 정의하는 과정이다. 본 연구에서는 최소 자승법(Least Square Method)을 이용하여 근사 오차를 최소화 하였다. 식(8)에 로그(logarithm)를 적용함으로써 최소 자승법의 적용이 용이한 식(9)의 형태로 변형할 수 있다.

$$\ln t = n \ln \cos \alpha \quad (9)$$

식(9)를 이용하여 오차의 제곱의 합을 오차 함수 식(10)을 정의할 수 있다.

$$E = \sum_{i=1}^n (n \ln \cos \alpha_i - \ln t_i)^2 \quad (10)$$

오차를 최소화하기 위하여 n으로 오차 함수를 편미분하고, 편미분을 0으로 함으로써 n 값을 계산할 수 있다. (식 11)

$$\frac{\partial E}{\partial n} = 0 \Rightarrow n = \frac{\sum_{i=1}^n \ln t_i}{\sum_{i=1}^n \ln \cos \alpha_i} \quad (11)$$

3.2. 증발원 방사 특성 분석 실험

Fig. 4는 증발원 방사 특성 분석을 위하여 기관에 성막된 박막의 두께 분포를 측정된 결과이다. 실험에 사용된 공정 조건은 증발원을 기관의 중앙에 위치시키고 (q=0), 기관과 증발원과의 거리(h)는 480 mm로 하였다.

증발원의 방사 특성은 일반적으로 축대칭 형상이므로, 박막 두께는 축대칭 형상을 갖는 것이 타당하다. 그러나, 실제로는 정확한 축대칭이 아닌 경우가 대부분이다. 비대칭이 발생하는 원인은 증발원의 열원인 히터 간격의 불균일이나, 유기 재료의 비대칭 충전 등에 기

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
7732	9494	10910	11850	11300	10842	9244	7758
B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
9895	12310	13690	14860	14980	13720	11750	9458
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
12370	14970	17450	18450	18140	17520	14740	11710
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
14670	17460	19950	21160	21480	19490	17210	12780
E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
15540	18490	21970	23820	23680	22120	18700	14560
F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
15910	19710	22220	24220	23950	21940	19450	14840
G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
15540	19120	21980	23570	23300	21450	19200	14460
H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
14550	17360	19990	21430	21340	19560	16440	12970
I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8
11930	14900	17080	18080	18410	16900	14550	11100
J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8
9733	11610	13750	14850	15260	13420	11550	8755
K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
7373	8714	10110	10920	10830	9980	8642	7168

Fig. 4. Measured thickness profile (unit : A)

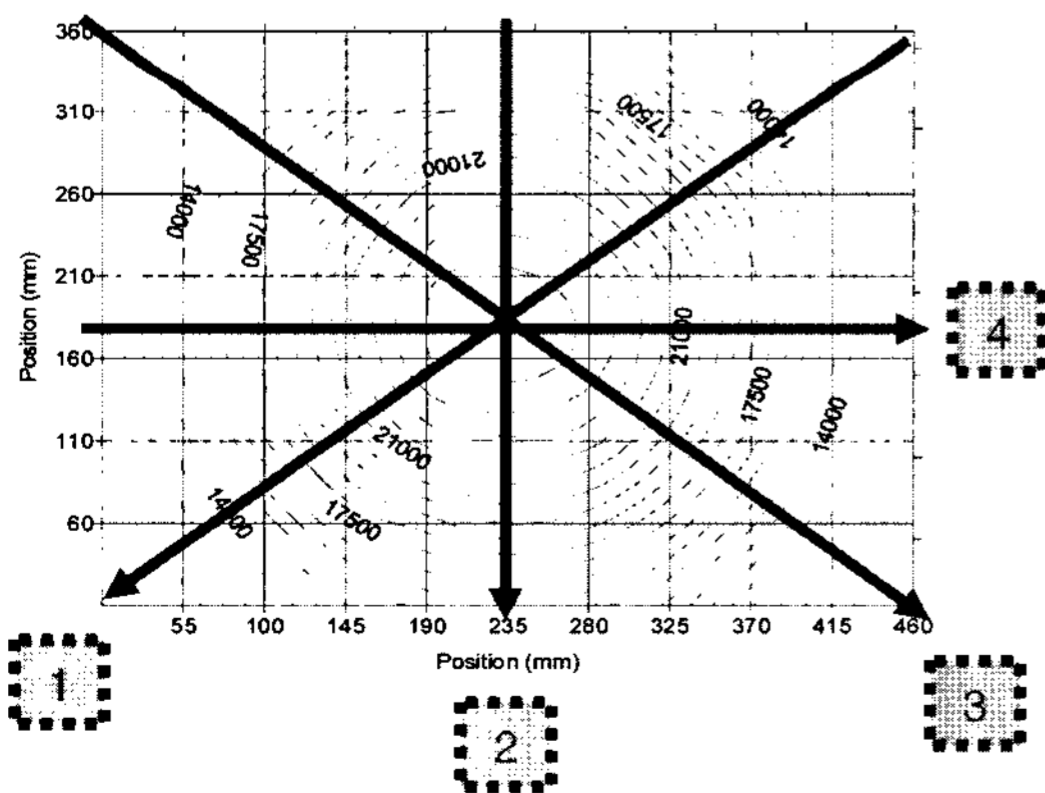


Fig. 5. Four cosine fitting directions.

인한다.

비축대칭 형상의 성막 두께 분포로부터 n값을 구하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 5과 같이 4방향을 따라 n값을 각각 계산하고, 산술평균을 함으로써 증발원의 n값을 추정하였다. Fig. 5에 도시된 바와 같이 1에서 4까지의 각 방향을 따라 코사인 함수의 근사를 시행한다.

Fig. 6은 4개의 방향 중 방향3을 따라 코사인 근사를 수행한 결과이며, n=4.5804로 계산되었다. Fig. 6에 육안으로 근사 정도를 파악할 수 있도록, n=4와 n=5의 그래프를 함께 도시하였다. 계산된 n=4.5804의 선도는 n=4과 5의 사이에 위치함을 육안으로 확인할 수 있다. 근사 과정을 Fig. 5의 각 방향(1, 2, 3, 4)에 적용한 결과는 Table 1과 같다.

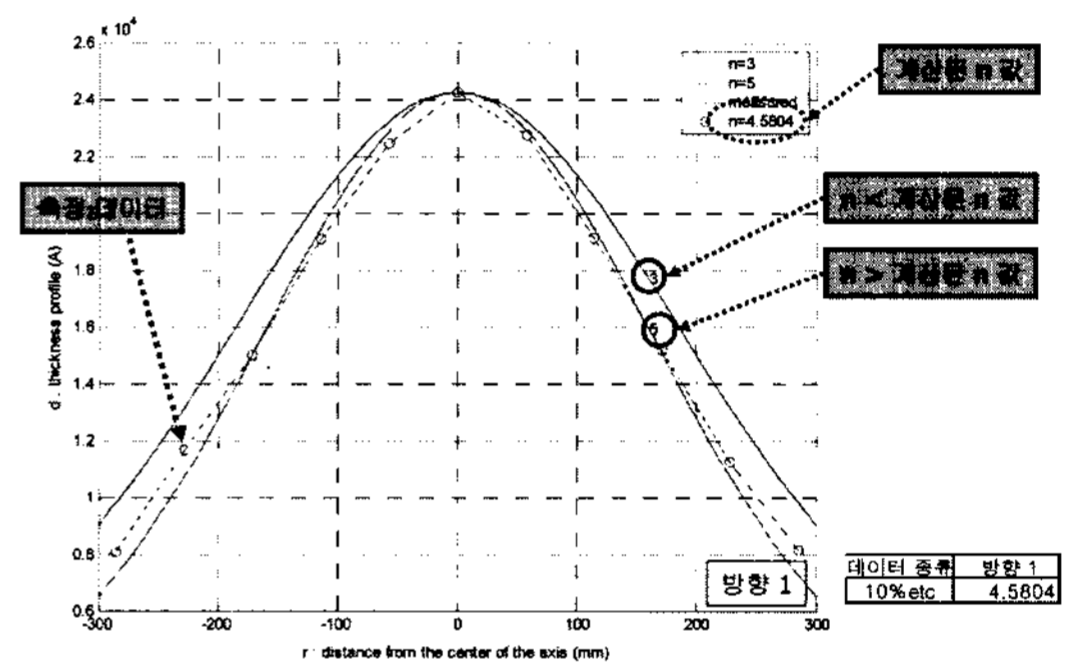


Fig. 6. Cosine fitting of the effusion profile.

Table 1. Fitted n-values

Direction no.	n
1	4.9213
2	5.9493
3	4.5804
4	5.6010

4. 진공 성막 공정의 최적화

4.1. 재료 소비율 (material consuming rate)

유기EL 디스플레이의 재료는 단위 무게(g)당 가격이 수~수십 만원에 이른다. 유기 재료가 고가이므로 재료 소비율은 제품 생산 단가와 직결된다. 재료 소비율은 증발된 재료 중 기관에 성막된 재료의 양을 계산하는 것이다. (식 12)

$$\eta = \frac{m}{M} = \frac{\rho v}{\rho V} = \frac{v}{V} (\times 100\%) \quad (12)$$

M은 증발원에서 증발된 총 무게, m은 기판에 성막된 무게이다. 식(12)의 무게 비에서 밀도(density)를 상쇄하여 부피의 비로 대신할 수 있다. V는 무한 크기 기판에 성막된 박막의 부피이며, 기판 위에 성막된 유기 재료의 부피는 유한한 크기에 기판에서의 성막량 v로 표현한다. (식 13)

$$M = \rho V = \rho \int_0^{\infty} \int_{2\pi} \frac{D}{D_0} d\phi dr$$

$$m = \rho v = \rho \int_0^r \int_{2\pi} \frac{D}{D_0} d\phi dr \tag{13}$$

부피로 재료 소비율을 표현함으로써 막밀도와 같은 박막의 물리적 특성을 배제하고 산술적으로 재료 소비율을 계산할 수 있다. 계산된 재료 소비율의 분포가 Fig. 7에 도시되어 있다. 가로 축은 기판의 회전축과 증발원과의 거리(q), 세로 축은 기판과 증발원의 거리(h)이다. 증발원이 기판으로부터 멀어질수록 그리고 기판 회전 중심에서 멀어질수록 재료 소비율이 감소함을 알 수 있다.

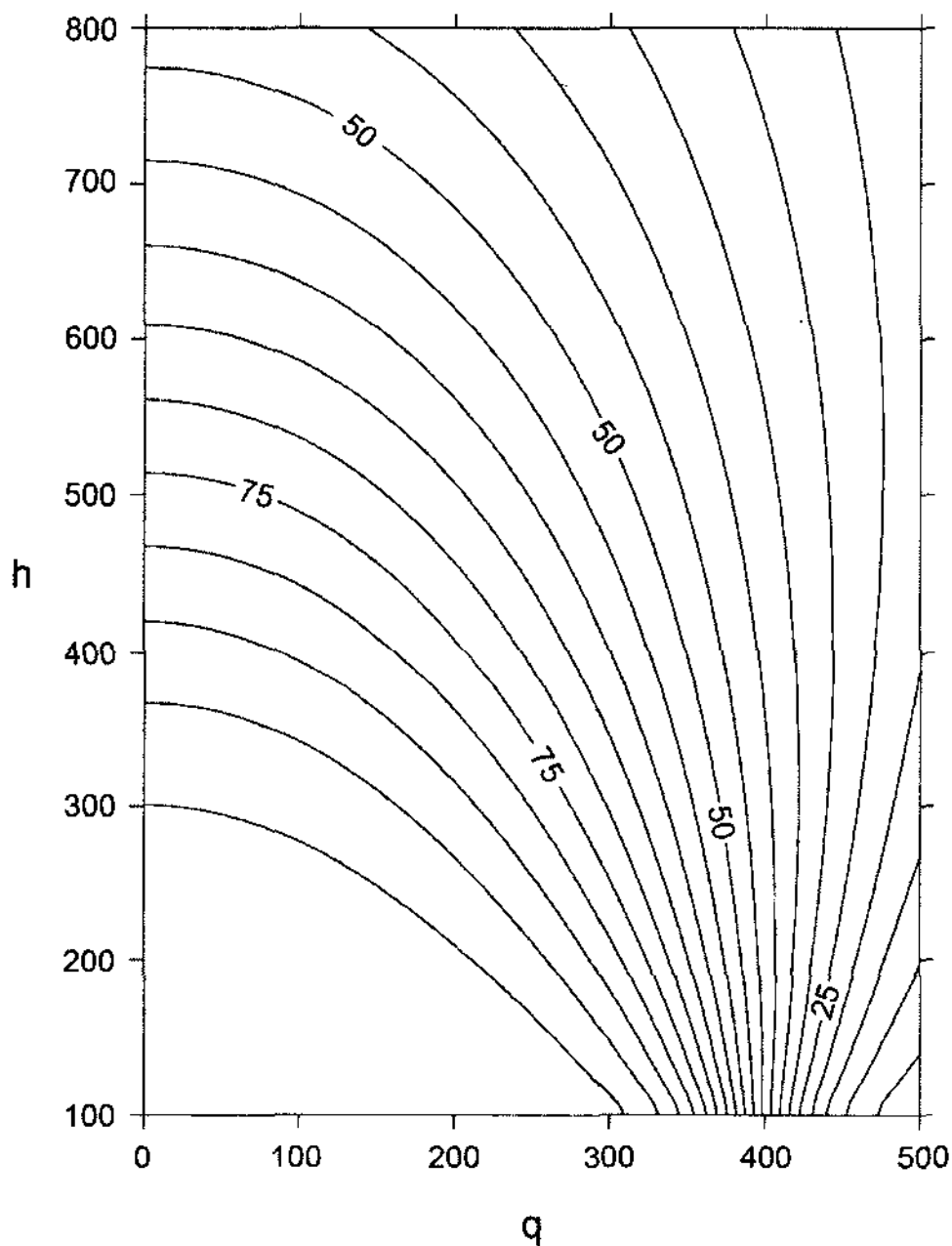


Fig. 7. Material consuming rate as a function of h, q.

4.2. 박막 균일도

유기EL 디스플레이의 유기막 균일도는 식(12)와 같이 표현되는 min-max법이 주로 사용된다. Fig. 8은 증발원 위치에 따른 균일도 분포이다.

$$\pm \text{uniformity} = \frac{\max - \min}{\max + \min} \times 100(\%) \tag{14}$$

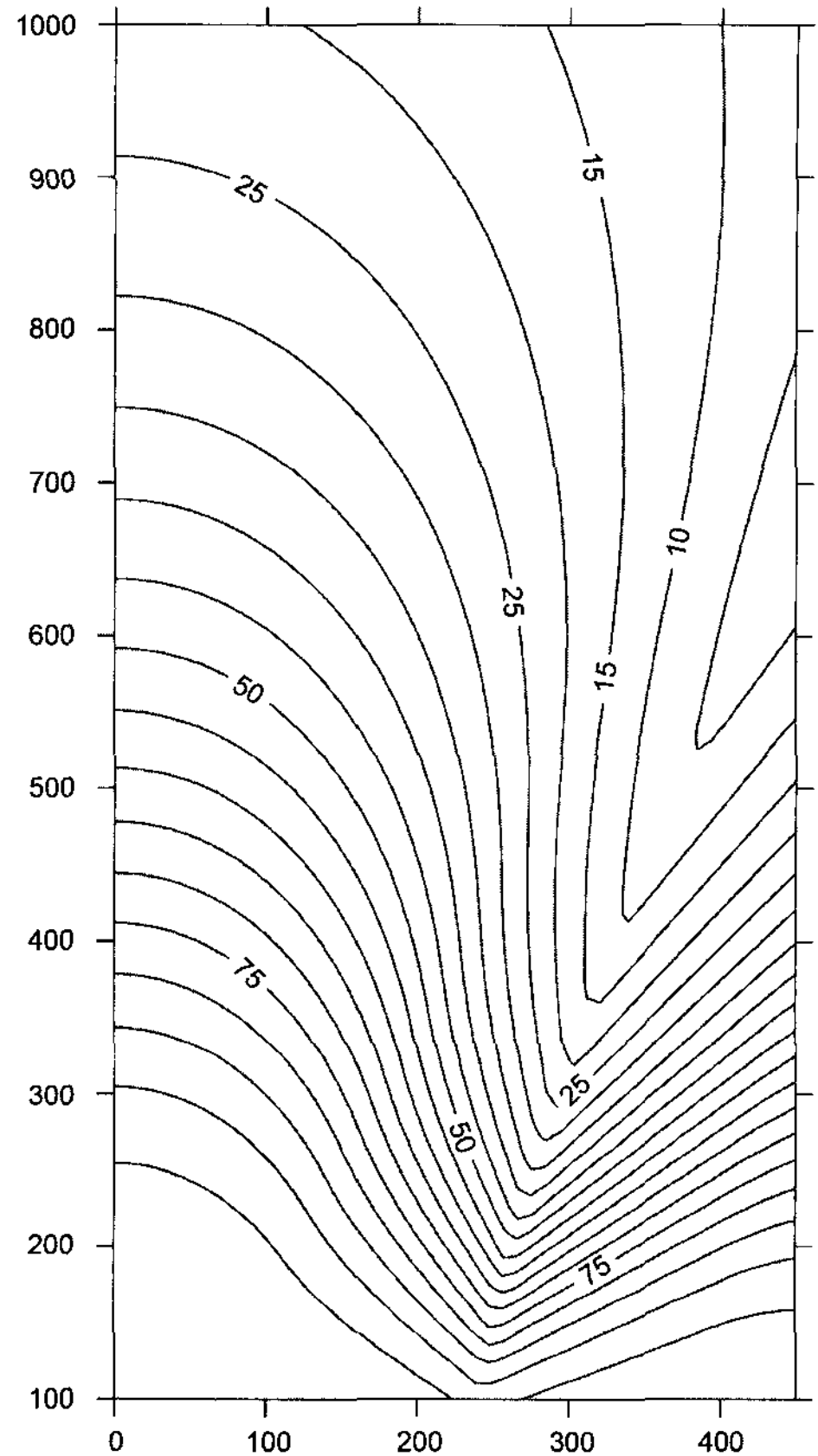


Fig. 8. Film thickness uniformity as a function of h, q.

4.3. 탐색 기법을 이용한 최적화

최적 성막 공정을 위하여 공정 사양을 만족하는 증발원 위치를 선정하여야 한다. 진공 챔버 내에서 h 및 q를 변화시키면서 증발원 위치에 대한 박막 균일도와 재료 소비율의 변화 양상으로부터 공정의 안정성을 고려한 증발원의 위치를 결정하는 과정이 성막 시스템 설계의 주요 단계가 된다.

코사인함수 근사 기법에서 유추된 n 값을 고려하여 목표 사양을 만족하는 증발원의 최적화 위치를 선정한다. 본 연구과제에서는 증발원의 최적 위치 선정 방안으로 탐색 기법(exploratory method)을 적용하였다. 증발원의 장착 가능 영역 내에서 증발원의 위치 변수 h와 q의 변화에 따른 박막 균일도와 재료 소비율을 계산함으로써 최적 위치를 선정하게 된다.

본 연구에서는 탐색 기법 중 축소 기법(shrink strategy)

를 사용하였다. 전 지역에 걸쳐 탐사점들을 선정하여 적합한 점을 선택하고, 이 점을 중심으로 하여, 탐사 구간을 축소시킨다. 이 축소지역에서 적합한 점들을 선택함으로써 원하는 축소공간을 얻을 때까지 이 과정을 반복한다.

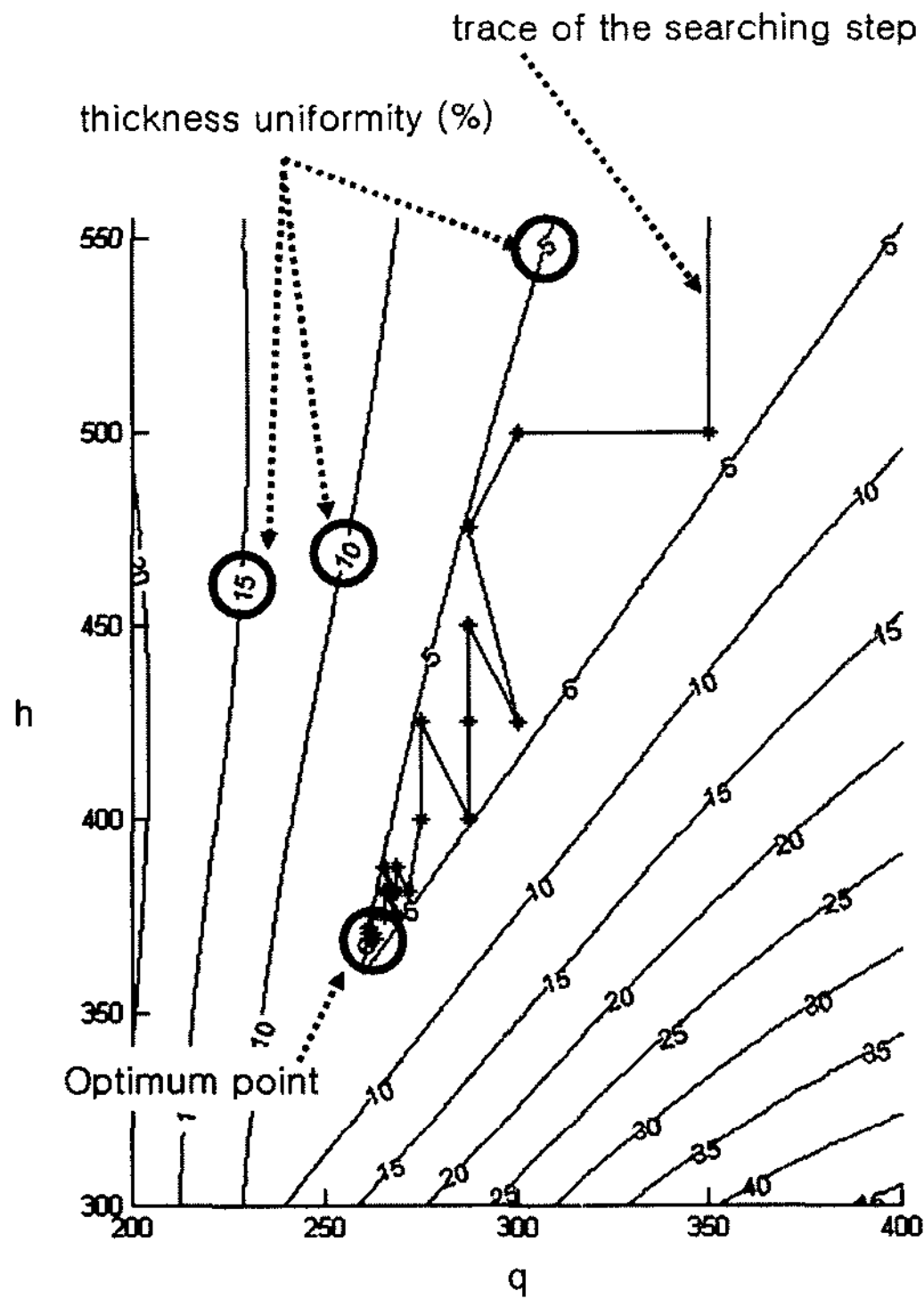


Fig. 9. Searching the optimum position.

탐사기법으로부터 선정된 증발원의 위치는 $h=370$ mm, $q=260$ mm이며, 이 위치에 증발원이 장착되었을 때 예측되는 박막 두께 균일도는 4.97% 이다(Fig. 9).

5. 결 론

유기EL 디스플레이 생산 공정 중 유기막의 진공 성막 공정에 대한 최적화 연구를 수행하였다. 실제 성막 공정에 적용할 수 있도록, 증발원의 방사 특성을 컴퓨터 시뮬레이션에 반영하기 위한 코사인 함수의 근사 기법을 적용하였으며, 다양한 종류의 증발원에 대하여 개발된 알고리즘을 적용할 수 있음을 확인하였다. 개발된 알고리즘을 적용함으로써, 유기EL 디스플레이 성막 공정의 주요 사양인 박막 두께 균일도와 재료 소비효율을 고려한 증발원의 최적 위치를 선정하였다.

개발된 최적화 알고리즘은 상용(commercial) 유기EL 디스플레이 성막 시스템의 설계에 적용되었으며, 제품 경쟁력이 있는 유기EL 디스플레이 생산을 기대할 수 있다.

참고문헌

1. 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.
2. 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', *Synthetic Metals*, vol. 151, pp.197-201, 2005.
3. Milton S. Hess and John F. Milkosky, 'Vapor deposition of platinum using cw laser energy', *J. Appl. Phys.*, Vol. 43, No. 11, pp. 4680-4683, 1972.
4. 이응기, "대면적 유기EL 양산 장비 개발을 위한 증착 공정 모델링," *반도체및디스플레이장비학회지*, 제5권, 제4호, pp. 29-34, 2006.
5. H. K. Pulker, *Coating on Glass*, Elsevier Science Publishing Co., New York, USA, 1987.