

## FPD 공정을 위한 램프하우스 열전달 특성 연구

김태안\* , 서원호\*\* , 김준현\*\*\* , 김윤제\*\*\*

\*성균관대원, \*\*LG전자, \*\*\*성균관대 기계공학부

### 초록

With the help of the development of digital-multimedia in the middle of 1990' s, FDP(Flat Panel Display) had attracted considerable attention. Collimation proximity exposure system that transfers the pattern on wafer or glass exactly using mask and light with appropriate wavelength is core process in semiconductor and liquid display element. The performances of resolution required in precision exposure system are evaluated by resolving power, depth of focus and storage area. Most of development has targeted on these three factors. The optical design including lamp house has played an important role on the performance of exposure process. In this study, we evaluate the cooling system, concerning on exposure device with mercury lamp among the kernel equipment for the production of LCD, to prevent the instability of lighting due to long term accumulation of excessive heating inside the lamp house. Numerical analysis is conducted on full-scale model. The characteristics of three-dimensional flow, pressure and temperature distribution on exposure system are graphically depicted to estimate the whole cooling system for lamp house and to establish the design criteria.

### 1. 서론

디스플레이 시장에서 2000 년까지 주류를 형성하고 있던 것은 CRT(Cathode Ray Tube)였으나, 정보통신과 인터넷의 발달로 디스플레이의 휴대성, 저소비전력화, 경량화, 평면화의 요구에 따라 FPD(Flat Panel Display)에 대한 관심이 높아지면서 LCD(Liquid Crystal Display)로의 대체가 급속하게 이루어지고 있다. 현재 FPD 제조 공정 중 포토라인에 있어서 패턴의 고정세화, 고화질화에 영향을 주는 노광 시스템 개발에 역점을 두고 있다. 특히, 평행광 근접 노광 시스템은 웨이퍼 및 글라스기판 위에 에칭 공정의 방어막 역할을 하는 유기물이 갖는 적절한 파장의 빛과 마스크를 이용하여, 정확한 위치에 정확한 크기로 전사하는 노광 공정에 사용하는 장치로서 대표적으로 LCD, PDP(Plasma Display Panel), ELD(Electroluminescent Display), FED(Field Emission Display) 등 액정표시소자 및 반도체 제조의 핵심장치라 할 수 있다. 평행광 근접 노광 시스템에서 요구되는 능력으로는 해상력, 초점심도, 노광면적 등이 있다. 노광기술은 위의 세 가지 조건을 높이는 방향으로 발전해 왔으며, 그 핵심 부분인 램프하우스를 포함하는 광학 설계 분야이다. 화면의 대형화에 따른 고조도화, 광 유효면적 증가, tact 시간 감소 등의 기술적 과제를 해결하기 위해 램프의 용량을 키워왔다. 램프의 경우, 일반적으로 Fig. 1 에

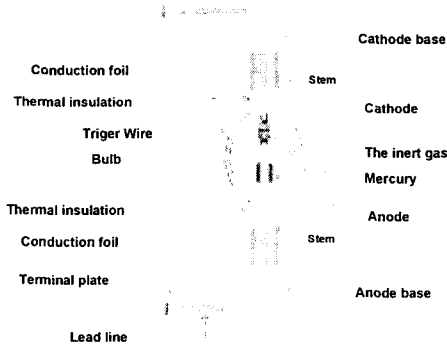


Fig. 1 Schematic diagram of the mercury lamp.

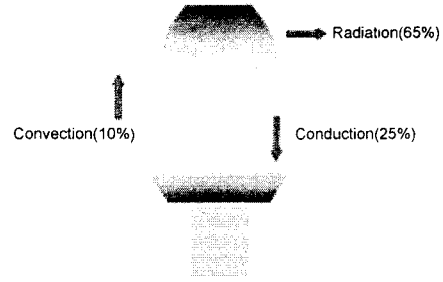


Fig. 2 Principle of heat transfer factors

도시한 것과 같은 초고압 수은램프를 사용한다. 이러한 초고압 수은램프는 램프하우스 내의 과도한 열의 축적 및 과냉각이 발생할 경우 점등성이 불안정하게 되며, 또한 재 점등을 하는데 10 분 이상의 긴 시간이 소요되는 특징을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 초고압 수은램프의 사용 용량에 따른 발열조건 및 냉각조건을 차이를 감안하고 램프하우스 내의 효율적인 온도관리를 위하여 냉각공기, 램프하우스의 체적에 따른 배기량, 램프 발열량 변화에 따른 열유동 저항 등의 해석을 통해 최적의 램프하우스 설계 변수를 고찰하고자 한다. 또한 램프하우스 내의 방열효과를 검증하기 위해 배기팬의 용량을 변경하여 램프하우스 내부 유동 특성을 분석한 후 램프하우스 내의 최적 냉각 조건을 찾고자 하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 지배방정식

램프하우스 내의 정상상태 3 차원 열유동 특성을 수치적으로 고찰하기 위한 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \nu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2)$$

에너지방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h_i) = \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + S_h \quad (3)$$

여기서  $S_h$ 는 생성항을 나타낸다.

Figure 2 는 램프 주변의 열전달 원리를 나타낸 것이다. 대류와 전도보다 복사가 더 큰 영향을 주는 것을 볼 수 있다. 또한 복사된 광원을 지나는 매질의 특성에 따라 열전달 분포가

달라지는데 크기는 매질의 투광성에 의해 분류된다. 따라서 본 연구에서는 렌즈의 투광성에 대한 효과를 모사하기 위해 구분종좌표법(Discrete Ordinates Method)을 도입하였다[1].

흡수 및 복사 매질에 대한 복사열전달 방정식은 다음과 같다.

복사열전달 방정식:

$$(\Omega \cdot g \nabla) I_{\lambda}(r, \Omega) = \kappa_{\lambda} \{n^2 I_{b\lambda}[T(r)] - I_{\lambda}(r, \Omega)\} \quad (4)$$

여기서  $I_{\lambda}(r, \Omega)$  는 임의의 위치  $r$  에서 방향  $\Omega$  의 함수인 분광 복사강도,  $I_{b\lambda}T(r)$  은 Planck 함수로 주어지는 흑체의 분광 복사강도를 나타낸다. 식 (4)는 구분종좌표법에 의해 다음과 같이 변환된다.

$$I_{\lambda,p}^{m,l} = \frac{\xi^{m,l} a I_{\lambda,w}^{m,l} + \eta^{m,l} b I_{\lambda,s}^{m,l} + c n_{\lambda}^2 I_{b\lambda,p}}{\xi^{m,l} a + \eta^{m,l} b + c} \quad (5)$$

여기서  $a, b, c$  는 기하학적 형상과 흡수계수의 함수로 구성되는데 흡수계수가 온도변화에 무관하다면 크기가 일정한 상수가 된다.  $w, s$  는 검사체적의 경계면,  $p$  는 검사체적의 중심을 나타내고  $\xi^{m,l}, \eta^{m,l}$  는 구분종좌표를 나타낸다. 식 (5)에서 검사체적의 중심에서 복사강도  $I_{\lambda,p}^{m,l}$  를 검사체적 경계면의 값들로부터 보간하여 결정하기 위해 차분법이 사용되며 이를 바탕으로 positive scheme 을 사용하였다.

## 2.2 해석모델

Figure 3 은 해석모델에 대한 개략도를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 두 가지 형태에 대해 해석을 수행하였다. 첫 번째는 기본적인 노광기 형태로 하부에는 램프 및 타원경이 있고 그 아래에는 공랭식 냉각시스템으로 구성되어 있다. 상부에는 타원경으로부터 균일한 조도를 내보내기 위한 반사경이 설치되어 있다. 주 냉각시스템은 상부에 배기 팬과 반사경 및 타원경에 직접 분사될 수 있도록 각각 1 개와 3 개의 냉각 팬이 설치되어 있으며, 하부 플레이트에는 배기 팬에 의해 외부공기를 흡입하기 위한 세 개의 흡입구가 있다. 타원경과 상부 반사경에는 과도한 열 축적을 막기 위해 적외선이 투과되도록 콜드 반사경 코팅을 하였다. 램프하우스 외부는 알루미늄으로 둘러싸여 있다. 두 번째는 복사열에 의한 외부 열전달 효과를 줄이고 타원경의 대류열전달 효과를 높이기 위해 원통형으로 타원경을 둘러싸는 차단벽(Fig. 3 의 맨 좌측의 타원경 하단의 파란색 부분)을 설치한 형태이다. 이러한 차단벽은 타원경의 상부와 3 cm 의 간격을 두어 유동이 집중되도록 설계한 것이다.

격자계는 배기 팬의 출구부분, 램프, 타원경 및 반사경을 정렬격자계를 이용하여 생성하였으며, 내부격자계는 비정렬 격자를 이용하여 격자수를 줄일 수 있도록 하였다. 전체 격자수는 950,000 개를 사용하였다.

수치영역의 입구에 사용된 압력경계조건은 대기압으로 설정하였으며, 상부와 타원경 및 반사경 주위의 입출구는 유량조건을 주고 흡기구는 압력조건을 주어 배기 팬에 의한 압력차에 의해 외부

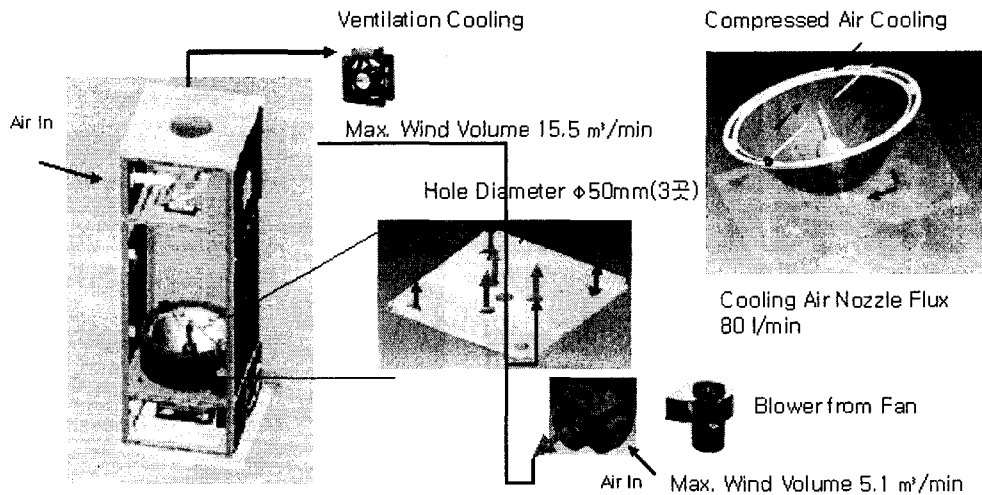


Fig. 3 Schematic diagram of the lamp house.

공기가 흡입될 수 있도록 하였다. 상부 흡입 팬 유량은 상용 배기 팬을 사용하였으며 최대 풍량은 15.5 CMM 기준으로 선정, 램프 냉각을 위한 압출공기를 노즐을 통해 강제 유입하는 조건을 주었다. 타원경 냉각방식은 타원경 하부에  $\phi 50$  mm의 냉각홀 3곳을 이용하여 블로워에서 유입되는 공기를 강제로 주입하여 냉각하는 방식이다. 최대 유량은 5.5 CMM 이며, 일부는 콜드 반사경을 냉각시키는데 사용되는데 최대 유량은 1.5 CMM 으로 하였다. 램프하우스 외벽은 알루미늄으로 되어 있으며, 벽면 조건은 일반적인 비코팅 알루미늄 물성치를 이용하여 열 흡입, 반사, 재복사(전방사) 조건을 주어 수치해석을 수행하였다[2]. 반사경, 타원경, 램프는 반투과성으로 표면 코팅이 되어 있는 콜드 반사경으로 반사경 자외선은 반사(90% 이상)를 하지만 적외선은 반사경 뒷면으로 통과시키는 특성을 갖는다. 복사열의 대부분이 적외선에 의존하므로 램프에서 발광하는 파장대의 빛은 적외선에 한정하여 해석을 수행하였다. 반사경 및 타원경은 반투명도로 가정하였으며, 확산분율은 0.01로 직진성을 갖도록 하였다. 외부공기의 온도는 300K, 밀도는  $1.225 \text{ kg/m}^3$  이고 타원경 및 반사경은 90% 이상의 적외선 투과율을 갖는 것으로 가정하였다[3].

### 3. 결과 및 고찰

Figure 4 는 냉각팬의 유량( $Q_c$ )을 5.5 CMM 으로 고정시키고 배기팬의 유량( $Q_e$ )을 13.3~20 CMM 까지 변화시켜 가면서 해석한 결과를 나타낸 것이다. 유량 변화에 따른 램프 하우스 내부의 온도변화에 대한 해석결과를 볼 때, 배기팬의 유량이 증가함에 따라 냉각성능은 향상되지만, 램프 주위의 유동은 크게 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이는 램프하우스 내에서는 대류에 의한 열전달이 상대적으로 복사열전달보다 작고 공기가 복사열전달에 크게 영향을 주지 못하기 때문이다. 따라서 램프 내부 냉각성능은 일정유량 이상에서는 큰 의미가 없는 것으로 판단된다.

Figure 5 는 냉각팬과 배기팬의 유량을 각각 5.5 CMM, 15 CMM 으로 고정시키고 차단벽의 유·무에 따른 램프하우스 주변의 온도변화와 차단벽과 타원경 사이의 속도벡터를 나타낸 것이다. 차단벽이 있는 경우, 노광기 외벽의 온도가 차단벽이 없는 경우에 비해 더 낮은 것을 알 수 있다.

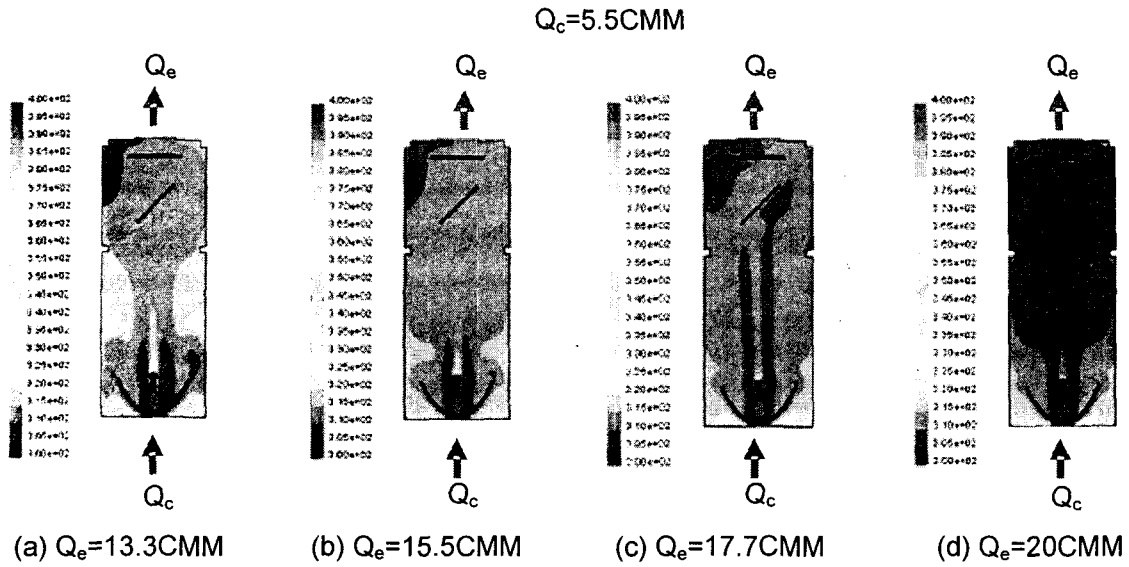


Fig. 4 Temperature distribution with various flow rates of exhaust fan.

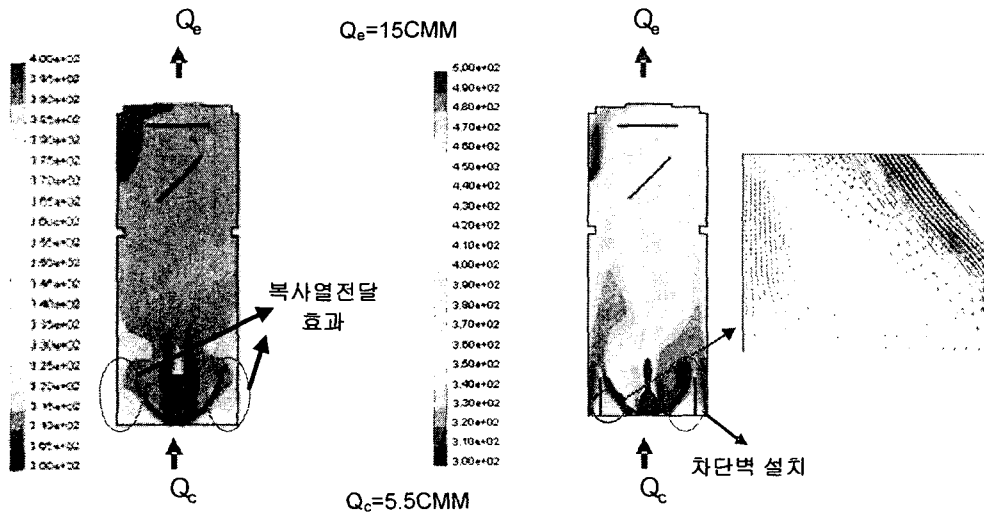


Fig. 5 Temperature distribution with or without fence.

이는 타원 하부의 냉각팬에 의해 흡입된 공기가 타원경의 냉각에만 관여하여 우수한 대류 열전달 효과를 나타내었기 때문이다. 또한 복사열전달 측면의 경우, 타원경을 통해 분산되는 적외선이 노광기 외벽에 도달하기 전에 차단벽에 흡수되었기 때문이다. 또한 차단벽과 타원경 사이에서 고온영역이 발생한 것을 볼 수 있다. 이는 유동이 타원경의 표면을 따라 흐르게 되고 차단벽 아래쪽에 발생한 와류로 인한 사공간(dead space)이 형성되어 열이 축적되기 때문이다(Fig. 5 참조). 또한 복사에 의해 가열된 차단벽에 의한 열전달 효과가 중첩되기 때문이다. 이러한 사공간은 차단벽과 타원경 사이의 속도벡터를 살펴보면 잘 알 수 있다.

Figure 6(a)와 (b)는 차단벽이 있는 경우, 배기팬 유량을 15 CMM 으로 일정하게 하고 냉각팬의 유량을 변화시켜 가면서 해석한 결과이다. 냉각팬의 유량이 작을수록 램프하우스 전체의 냉각성능이 우수한 것을 볼 수 있다. 하지만 램프 주변이 과냉각되어 수은 램프에 좋지 않은 영향을 미칠 것으로 판단된다. Fig. 6(c)와 (d)의 경우를 살펴보면 배기팬의 유량이 증가할수록 전체적인 냉각성능이 우수한 것을 볼 수 있다. 하지만 램프 주변이 Fig. 6(a)와 같이 과냉각된

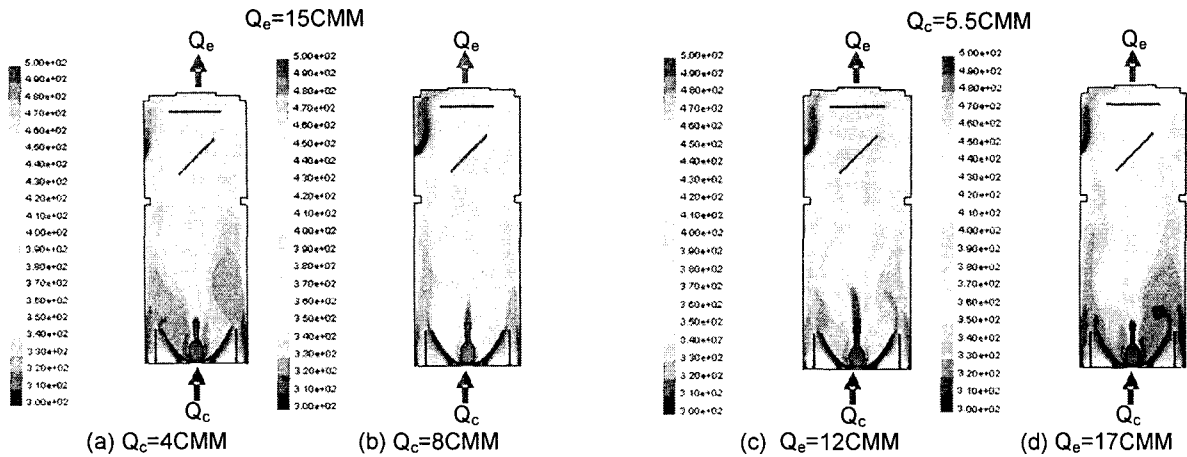


Fig. 6 Temperature distribution with various flow rates of cooling fan and exhaust fan.

것을 알 수 있다. 따라서 냉각시스템의 운전조건을 선정할 때는 배기팬과 냉각팬과의 상관관계에 따라 유량을 선정하여 램프하우스 전체의 냉각성능과 램프주변의 적절한 온도를 유지할 수 있도록 하여야 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 기존의 램프하우스 내 냉각시스템을 평가하고 보다 개선된 냉각시스템을 개발하기 위해 노광기 내의 냉각시스템을 수치적으로 해석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유량증가는 기존 냉각시스템의 냉각성능에 큰 영향을 미치지 못하였으며, 냉각시스템의 운전 조건을 선정할 때, 배기팬과 냉각팬의 유량조건에 따라 균일한 열유동 분포를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
- (2) 램프하우스 내의 열전달은 복사 및 대류열전달에 영향을 받으나 상대적으로 복사에 의한 열전달 효과가 큰 것을 알 수 있다.
- (3) 차단벽의 도입으로 인해 내부 열을 방출하지 못하는 고온영역을 확인할 수 있었으며, 대류열전달에 의한 냉각성능을 볼 때, 배기팬의 유량이 15.5 CMM 이상인 운전조건은 오히려 국부적인 유동 고립현상을 초래하였다.

#### 참고문헌

- [1] Gardon, R., "A review of radiant heat transfer in glass," J. American Society, Vol. 44, pp. 305-312, 1961.
- [2] Mann, D., Field, R. E. and Viskanta, R., "Determination of specific heat and true thermal conductivity of glass from dynamic temperature data," Wärme-und stoffübertragung, Vol. 27, pp. 225-231, 1992.
- [3] 김윤제, 서원호, "평판 디스플레이 제조 공정용 램프하우스 내의 열유동 특성에 관한 수치적 연구," 성균관대학교 석사학위 청구논문, 2005.