

# LCD 패널 세척공정에서 원적외선 히터에 의한 유리기판 승온시간 예측

김 윤 호, 지 태 호\*, 김 서 영\*\*, 리 광 훈

서울시립대학교 기계정보공학과, \*한국과학기술원 기계공학과, \*\*한국과학기술연구원 열유동제어연구센터

## Prediction of Heat-Up Time of the Glass Plate by IR Heaters in an LCD-Panel Cleaning Process

Yun Ho Kim, Tae Ho Ji\*, Seo Young Kim\*\*, Gwang Hoon Rhee

Dept. of Mechanical & Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

\*\*Thermal/Flow Control Research Center, Korea Institute of Science & Technology, Seoul 130-650, Korea

(Received April 7, 2006; revision received May 23, 2006)

**ABSTRACT:** The prediction of heat-up time of an LCD glass plate in LCD glass pre-treatment process has been implemented in the present study. Firstly, the analytical solution for one-dimensional radiation heat transfer from IR heaters to a LCD glass plate is obtained. When the surface temperature of the IR heaters is set at 473 K, the heat-up time of LCD glass to averaged temperature of 383 K is 28 seconds. In addition, a three dimensional full CFD analysis using STAR-CD is implemented in an effort to consider the effect of 3-D heat loss through the furnace walls. From the results of the 3-D CFD analysis, the heat-up time increases up to 32.5 seconds under the same conditions. When the IR heater temperature increases up to 573 K, the heat-up time decreases to 12 seconds for the one-dimensional analytical solution and to 13.5 seconds for the 3-D CFD analysis, respectively.

**Key words:** LCD glass plate(LCD 유리기판), IR(원적외선), Heat-up time(승온시간), Radiation heat transfer(복사 열전달), Numerical analysis(전산해석)

### 기 호 설 명

<p><math>A</math> : 면적 [<math>m^2</math>]  <math>b</math> : 단열재 두께 [m]  <math>C_p</math> : 비열 [<math>J/kg \cdot K</math>]  <math>d</math> : 유리기판 폭 [m]  <math>F</math> : 형상계수</p>	<p><math>g</math> : 중력가속도 [<math>m/s^2</math>]  <math>H</math> : 특성길이 [m]  <math>\bar{h}</math> : 평균 대류 열전달계수 [<math>W/m^2 \cdot K</math>]  <math>k</math> : 열전도계수 [<math>W/m \cdot K</math>]  <math>L</math> : IR 히터와 유리기판 사이 거리 [m]  <math>m</math> : 질량 [kg]  <math>q</math> : 열전달률 [W]  <math>R</math> : 열저항 [<math>m^2 \cdot K/W</math>]  <math>T</math> : 온도 [K]  <math>t</math> : 승온시간 [s]  <math>T_f</math> : 막온도(film temperature) [K]</p>
---	---

† Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5683; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: seoykim@kist.re.kr

- V : 부피 [m<sup>3</sup>]
- w : 길이 [m]
- x, y, z : 좌표 [m]

**그리스 문자**

- $\alpha$  : 열확산율 [m<sup>2</sup>/s]
- $\beta$  : 체적 열팽창계수 [K<sup>-1</sup>]
- $\lambda$  : 파장 [ $\mu$ m]
- $\epsilon$  : 방사율
- $\nu$  : 동점성계수 [m<sup>2</sup>/s]
- $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]
- $\sigma$  : Stefan-Boltzmann 상수 [W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>]

**상첨자**

- r : 복사

**하첨자**

- 1 : 상부 IR 히터
- 2 : LCD 유리기판
- 3 : 하부 IR 히터
- a : 입·출구
- b : 단열재(Glass Wool)
- s : 표면
- $\infty$  : 외부공기

**1. 서 론**

VDT(Visual Display Terminal)는 뛰어난 정보 전달 능력을 바탕으로 컴퓨터, TV 등 기계와 인간을 연결해 주는 가장 중요한 하드웨어 중에 하나로서 그 활용성과 시장성은 날로 커지고 있다.<sup>(1)</sup> VDT는 일반적으로 CRT(Cathode Ray Tube)와 FPD(Flat Panel Display)로 나눌 수 있다. 또한 FPD는 LCD(Liquid Crystal Display)와 PDP(Plasma Display Panel)가 현재 가장 큰 시장을 형성하고 있으며 점차적으로 CRT를 대체하고 있는 추세이다.

LCD의 역사는 1888년 라이니츠가 액정상을 발견하면서부터 시작되었으며, 현재와 같은 개념의 디스플레이가 개발된 것은 1968년 미국의 RCA사가 액정을 디스플레이에 적용하면서부터이다.<sup>(2)</sup>

이러한 LCD는 초거시계나 전자계산기 등 소형 디스플레이에 적용되기 시작하였으며, 현재 LCD의 구성부품 중의 하나인 유리기판은 7세대(1,870×2,200 mm) 라인으로까지 그 생산성이 급격히 상승하고 있다.

LCD에 대한 연구는 액정모드의 종류에 따른 특성,<sup>(2,3)</sup> 시야각(view angle) 특성, 그리고 응답속도 향상기술에 대한 연구<sup>(4)</sup>와 LCD를 구성하고 있는 주변재료 및 부품의 개발에 대한 연구,<sup>(5)</sup> 그리고 LCD의 제작공정에 대한 연구가 광범위하게 수행되어 오고 있다.<sup>(6,7)</sup> 또한 기존의 VDT 시장의 주류를 이루고 있던 CRT와의 성능비교에 대한 연구가 수행되었다.<sup>(1,8-9)</sup>

LCD는 구동방식에 따라 PM(Passive Matrix)과 AM(Active Matrix)으로 구분되어지며, AM-LCD는 단자의 수에 따라 세부 분류가 가능하나 현재 가장 널리 이용되고 있는 방식은 3단 소자인 박막 트랜지스터(Thin Film Transistor)를 이용한 TFT-LCD이다. TFT-LCD의 제조공정은 크게 TFT 공정, Cell 공정, 그리고 Module 공정으로 나누어지며, 본 연구에서는 Cell 공정의 첫 단계인 세척공정에서, 세척 후 유리기판을 건조시키는 단계에 초점을 맞춘다. Fig. 1은 실제 현장에서 세척공정에 사용되는 장비의 전체적인 형상을 나타내며, 물세척과 건조공정을 모두 포함하는 장비이다. 또한 Fig. 2는 세척공정 중 건조공정에서의 가열로(heating furnace) 내부에 위치되는 IR(원적외선) 히터와 유리기판의 개략도를 도시하였다.

유리기판을 건조시키는 방법으로서 유리기판 상·하에서 IR 히터로 등온으로 열이 공급되면, 유



Fig. 1 Picture of an actual heating furnace.

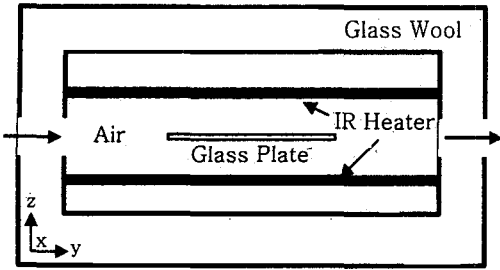


Fig. 2 Schematic of a heating furnace.

리기판은 복사 열전달로서 승온된다. 본 연구에서는 유리기판이 일정 온도(383 K)까지 승온되는 시간을 예측하기 위해 우선적으로 1차원 모델링을 통해 해석해를 도출한다. 또한 3차원 모델링을 통해 전산해석을 수행하여 1차원 해석해와 비교·검증함으로써 유리기판이 일정 온도까지 도달하는 데 걸리는 시간과, 일정 온도에서 유리기판의 온도분포를 분석한다. 3차원 전산해석을 위해 상용 열·유체 해석 프로그램인 STAR-CD를 사용하였다.

2. 1차원 해석해

2.1 해석방법

본 연구에서는 가열로 내에서 유리기판의 승온 시간을 예측하기 위해 우선적으로 Fig. 3과 같이 가열로 내부를 1차원으로 모델링하여 해석해를 도출하였다. 가열로 내에서 등온으로 유지되는 IR 히터로부터 복사에 의해 유리기판이 가열된다고 할 때, 1차원 열전달식으로부터 승온시간이 예측된다. 이때 복사 열전달 이외의 대류와 전도에 의한 열전달 효과는 무시하였다.

가열로 내에서는 Fig. 3과 같이 1과 3면에 위치한 IR 히터로부터 중앙면에 놓인 유리기판으로 복사 열전달이 이루어진다. 따라서 형상계수(view factor)를 고려한 2표면 밀폐공간에서의 평행평판

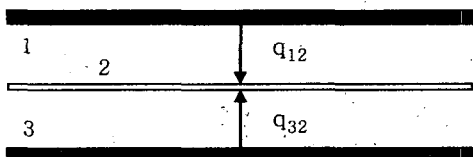


Fig. 3 Model for 1-D analysis.

사이의 복사열은 식(1)과 같으며, 유리는 적외선 영역에서 비투과성<sup>(10)</sup>이기 때문에 투과율은 0이다.

$$q = q_{12} + q_{32}$$

$$q_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{(1 - \epsilon_2)/\epsilon_2 A_2 + 1/A_1 F_{12}} \quad (1)$$

$$q_{32} = \frac{\sigma(T_3^4 - T_2^4)}{(1 - \epsilon_2)/\epsilon_2 A_2 + 1/A_3 F_{32}}$$

여기서,  $A_1 = A_2 = A_3 = A$ ,  $F_{12} = F_{32}$ ,  $T_1 = T_3$ , 그리고  $A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$ 인 관계가 성립한다. 또한 IR 히터는  $\epsilon_1 = 1$ ,  $\epsilon_3 = 1$ 로 가정하였으며, 중심선이 수직으로 연결되고 평행하게 배열된 평판에서의 형상계수상관식은 다음과 같다.<sup>(10)</sup>

$$F_{21} = \frac{[(W_1 + W_2)^2 + 4]^{1/2} - [(W_2 - W_1)^2 + 4]^{1/2}}{2W_1} \quad (2)$$

여기서,  $W_1 = w_1/L$ ,  $W_2 = w_2/L$ 이다.

식(1)에 의해 결정되는 복사열이 유리기판으로 전달되면 유리기판의 온도는 다음 식(3)에 따라 상승하게 된다. 따라서 식(3)의 양변을 적분하여 시간과 온도에 대한 식(4)를 얻음으로써 유리기판의 승온시간을 예측할 수 있다.

$$m_2 C_p \frac{dT}{dt} = q$$

$$m_2 C_p \frac{dT}{dt} = \frac{2\sigma(T_1^4 - T^4)}{1/A_2 F_{21} + (1 - \epsilon_2)/\epsilon_2 A_2} \quad (3)$$

$$dt = \frac{mC_p [1/A_2 F_{21} + (1 - \epsilon_2)/\epsilon_2 A_2]}{2\sigma} \times \frac{dT}{(T_1^4 - T^4)}$$

$$t = \left\{ \frac{m_2 C_p 1 / (A_2 F_{21} + (1 - \epsilon_2)/\epsilon_2 A_2)}{2\sigma} \right\} \left[ \frac{2 \arctan\left(\frac{T_2}{T_\infty}\right) - \log(T_\infty - T_2) + \log(T_\infty + T_2)}{4T_\infty^3} \right]_{T=T_1}^{T=T_2} \quad (4)$$

2.2 해석결과

식(4)에 Table 1의 물성치와 형상계수값을 대

Table 1 Material properties of LCD glass plate and view factor

Area ( $A_2$ )	Volume ( $V_2$ )	Density ( $\rho_2$ )	Specific heat ( $C_p$ )	Emissivity ( $\epsilon_2$ )	View factor ( $F_{21}$ )
$470 \times 10^{-6}$	$470 \times 10^{-9}$	2500	750	0.9 <sup>(11)</sup>	0.8993

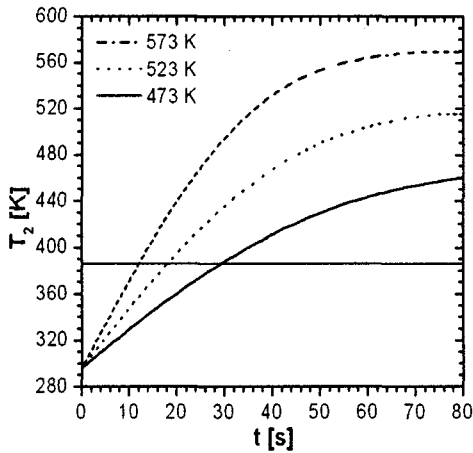


Fig. 4 1-D analysis for heat-up time of LCD glass plate.

입한다. 또한 IR 히터의 표면온도( $T_1 = T_3$ )가 각각 473 K, 523 K, 그리고 573 K인 조건에서 유리기관의 초기 온도값이 296 K, 유리기관과 IR 히터 간의 거리( $L$ )가 0.05 m일 때 유리기관의 승온시간을 Fig. 4에 도시하였다.

Fig. 4로부터 LCD 유리기관의 표면온도가 383 K에 도달하는 시간은 IR 히터의 표면온도가 473 K일 때 약 28초, 523 K일 때 약 17.5초, 그리고 573 K일 때는 약 12초가 소요되고 있음을 알 수 있다. 즉, IR 히터의 표면온도가 상승하면 신속한 승온을 구현할 수 있다. 또한 각각의 IR 히터 표면온도조건에서 유리기관의 온도 상승폭은 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 경향성을 보이고 있다.

### 3. 3차원 전산해석해

1차원 해석해로 예측된 유리기관의 승온시간은 가열로 내부 및 외부에 존재하는 전도와 대류에 의한 열손실을 고려하지 않았기 때문에 실제 승온시간은 지연될 수 있다. 또한 표면들 사이에서의 복사 열전달에서는 형상계수에 따라 열전달률

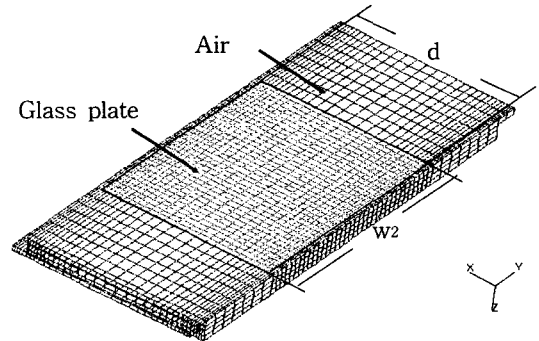


Fig. 5 Grid structure of the heating furnace for numerical analysis.

이 달라지므로 3차원에 대한 형상계수를 고려한 해석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 열손실과 형상계수의 영향을 고려하여 유리기관의 승온시간을 예측하기 위해 상용 열·유체 프로그램인 STAR-CD를 사용하여 3차원 비정상 전산해석을 수행하였다.

#### 3.1 지배방정식 및 전산해석방법

일반적인 직각 좌표계에서의 비압축성, 비정상 온도장을 해석하기 위한 지배방정식은 식(5)와 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \nabla^2 T + \nabla \cdot q^r \quad (5)$$

여기서 각각의 물성치는 상수로서 일정하다고 가정하였으며, 본 연구에서는 가열로 내부의 유동장은 고려하지 않았다. 또한 복사 열전달률  $\nabla \cdot q^r$ 은 식(6)과 같으며,  $\lambda$ 는 빛의 파장을 나타낸다.

$$\nabla \cdot q^r = \int_0^\infty \nabla \cdot q_\lambda^r d\lambda \quad (6)$$

Fig. 2에 도시된 가열로의 전체 크기는  $500 \times$

Table 2 Thermal resistance and emissivity for 3-D simulation

Thermal resistance ( $R$ )		Emissivity ( $\epsilon$ )	
Inlet/outlet ( $T_s=373$ K)	Glass wool ( $T_s=303$ K)	Glass plate	Glass wool
0.072	1.487	0.9	0.95 <sup>(10)</sup>

1,000×400 mm이며, 유리기관의 크기는 370×470×0.7 mm, 상·하 공기층의 전체 두께는 250 mm, IR 히터는 400×900×25 mm의 크기로 상·하에서 등으로 열을 공급한다. 또한 단열층(Glass Wool)은 50 mm의 두께로서 공기층과 IR 히터를 둘러싸고 있다. 본 연구에서는 가열로의 상·하 대칭성을 고려하여 Fig. 5와 같이 전체 형상을 1/2로 모델링하였으며, IR 히터의 상부에 위치하는 공기층과 전체 단열층은 격자구성에 포함시키지 않았다. 그러나 측면 단열층은 경계조건에서 열저항값으로 적용하여 단열재에 의한 효과를 고려하였다.

본 연구에 적용된 전산해석방법에 대한 간략한 설명을 하면, 에너지방정식에 대한 차별화는 유한 체적법을, 복사 열전달을 해석하기 위한 모델로서 discrete beam method<sup>(12)</sup>를 적용하였다. 확산항 처리는 2차 정확도인 중앙차분도식(Central Differencing Scheme)을, 시간적분은 2차 정확도인 Crank-Nicolson 방법을 사용하였다. 전산해석을 위한 격자구성은 Fig. 5와 같이  $x$ 축상으로 유리기관과 단열재 사이의 공기층 거리가 상대적으로 짧고, 유리기관의 중앙부보다는 공기층과 접하는 면에서의 온도변화가 심하므로 비균일 Hexahedron 격자계를 사용하였다. 해석모델의 격자의 존성을 제거하기 위한 사전해석을 바탕으로 본 연구에서는 격자수를 약 5,000개로 구성하였으며, 0.5초의 시간간격으로 80초까지 전산해석을 수행하였다. 시간간격을 1/2, 1/4로 줄여 비교할 때 그 차이는 무시할 만하였다.

### 3.2 경계조건

경계조건으로서 가열로의 상·하 대칭성에 대한 Symmetric 조건을 해당 단면에 적용하였고, 유리기관이 유·출입하는 공기 단면과 측면 단열재와 외부공기와 접촉면에 대해서는 자연대류 열손실 조건을 열저항값으로 적용하였다. 대류 열전달값을 계산하는데 사용한 평균 Nusselt 수는 식(7)과 같다.<sup>(10)</sup>

$$\overline{Nu}_H = 0.68 + \frac{0.670 Ra_H^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (7)$$

$$Ra_H = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)H^3}{\nu\alpha}$$

여기서,  $H$ 는 형상의 특성길이로서 단열재에서는 0.05 m, 입·출구에서는 0.01 m를 적용하였다. 또한 공기의 모든 물성값들은 막온도(film temperature)  $T_f = (T_s + T_\infty)/2$ 에서의 값이며, 단열재에서는 300 K, 입·출구에서는 350 K를 적용하였다. 따라서 각각의 열저항값은 식(8)에 의해 결정된다.

$$R_a = \frac{1}{h_a} + \frac{b}{k_b} \quad (8)$$

$$R_b = \frac{1}{h_b}$$

IR 히터의 표면온도는 1-D 해석과 마찬가지로 각각 473 K, 523 K, 그리고 573 K로 일정하게 유지시켰으며 흑체로 가정하였다. 또한 유리기관의 투과율은 0이며 Table 2는 전산해석에 적용된 각각의 열저항값과 방사율을 나타낸다.

### 3.3 전산해석결과

Fig. 6은 IR 히터의 표면온도가 473 K일 때 유리기관의 승온시간을 1차원 해석해와 3차원 전산해석결과로 비교하여 나타낸 것이다. 이때 유리기관의 전산해석결과 온도값은 유리기관의 표면에서 면적 평균된 값이다. 그래프로부터 3차원 전산해석결과 유리기관의 표면온도가 평균 383 K까지 도달하는 데 걸리는 시간은 약 32.5초로서, 1차원 해석해와 비교했을 약 4.5초 정도의 승온시간 지연효과가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 시간에 따른 유리기관의 온도 상승폭도 1차원 해석해에 비해 3차원 전산해석결과에서 좀더 완만함을 확인할 수 있다. 이는 가열로 내에서 유리기관이 복사 열전달에 의해 승온될 때 전도와

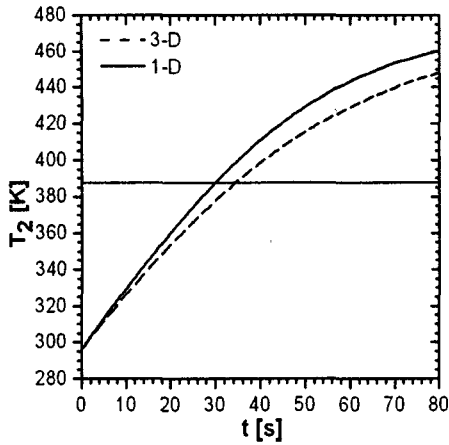


Fig. 6 Comparison of heat-up time between 1-D analytical solution and 3-D simulation.

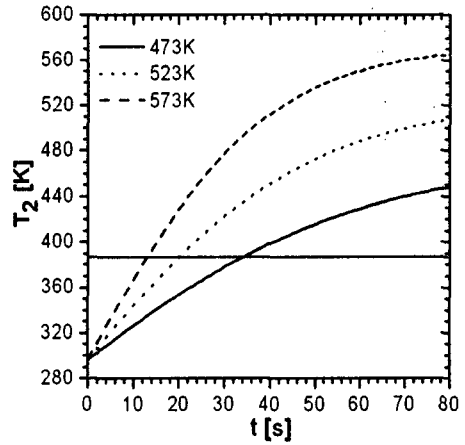


Fig. 7 3-D CFD simulation for heat-up time of LCD glass plate.

외부공기에 의한 대류 열전달 손실효과가 상당한 비중을 차지하고 있음을 보여주고 있다. 또한 3차원에 따른 형상계수의 영향으로 IR 히터에서 공급되는 모든 열이 유리기판으로 전달되지 않기 때문에 승온시간은 지연되는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 IR 히터의 표면온도 변화에 따른 유리기판의 승온시간을 도시한 것이다. 유리기판 표면온도가 383 K까지 도달하는 시간은, IR 히터의 표면온도가 473 K일 때 약 32.5초, 523 K일 때 약 19.5초, 그리고 573 K일 때는 약 13.5초가 소요되는 것으로 해석되었으며, 전체적으로 1차원 해석해와 비교했을 때 약 11~13%의 승온시간 지연 효과가 나타났다.

Fig. 8은 IR 히터의 온도조건에 따른 유리기판 표면에서의 온도분포를, Fig. 9는 IR 히터의 온도

가 523 K일 때 시간에 따른 유리기판의 표면온도 분포를 나타낸다. 또한 Fig. 10은 유리기판의 표면에서 각각의 IR 히터의 온도조건에 따라 유리기판의 표면 평균 온도가 383 K에 도달했을 때 유리기판의 폭( $d$ ) 방향으로의 온도분포를 비교한 것이다. 여기서  $x$ 축은 계산격자점의 번호를 나타낸다. 그림과 그래프로부터 각각의 IR 히터의 온도조건에서 유리기판의 온도분포는 양 끝단에서 중앙까지 계속 증가하지 않고 양 끝단 안에서 감소하였다가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 유리기판이 복사열전달에 의해 승온될 때  $x$ 축 상에서 유리기판과 단열재와의 거리가 짧기 때문에(15 mm) 나타나는 현상으로서, 벽면 반사에 의해 유리 기판의 양 끝단에서 온도가 상승하는 것으로 판단된다. 또한 유리기판과 단열재 사이의

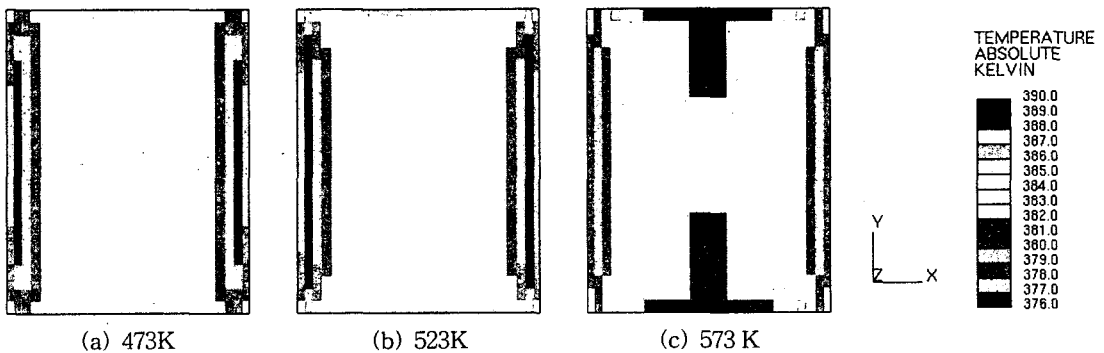


Fig. 8 Temperature distribution in surface of LCD glass plate with IR heaters temperature.

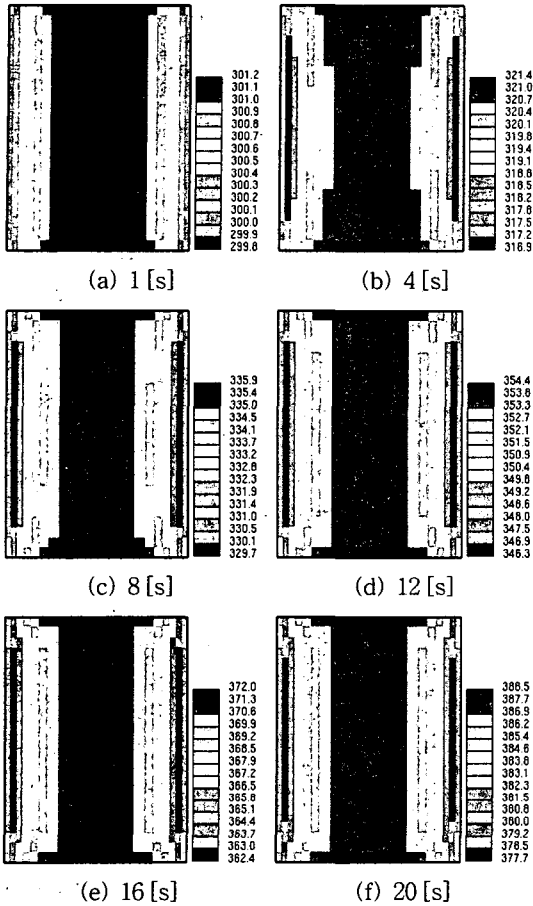


Fig. 9 Temperature distribution in surface of LCD glass with time when IR heaters temperature is 523 K.

거리를 증가시켜 벽면 반사에 의한 효과를 감소시키자 유리기판 양 끝단에서의 온도 상승효과가 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 유리기판을 안정적으로 건조시키기 위해서는 유리기판과 단열재 사이에 충분한 공간을 확보하는 것이 필요하다.

IR 히터의 온도가 상승할수록 Fig. 4와 Fig. 7로부터 유리기판의 승온시간은 단축됨을 알 수 있다. 그러나 Fig. 10을 살펴보면 IR 히터의 온도가 473 K일 때 유리기판 온도의 최대값과 최소값의 차이는 약 8.1 K, 523 K일 때 9.5 K, 그리고 573 K일 때에는 11.3 K로서 IR 히터의 온도가 상승할수록 유리기판에서의 온도편차 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 유리기판의 신속한 승온효과를 얻기 위해서 IR 히터의 표면온도를 증

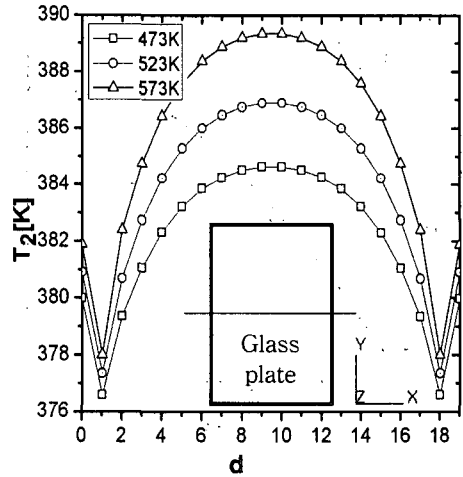


Fig. 10 Comparison of wall temperature distribution on glass plate with IR heaters temperature.

가시킬 때 그에 따른 유리기판의 안정적 건조를 위해서는 유리기판과 단열재 사이에 충분한 공간을 확보함과 동시에, 유리기판 측면부에 위치하는 IR 히터의 표면온도를 상승시켜야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 LCD 세척공정 중 유리기판의 건조과정에서 가열로 내의 IR 히터에 의한 유리기판의 승온시간을 예측하기 위해 1차원 해석의 도출 및 3차원 전산해석을 수행하였다.

1차원 해석결과 IR 히터 온도가 473 K일 때 복사 열전달에 의해 유리기판의 표면온도가 383 K까지 상승하는 데 걸리는 시간은 약 28초로 해석되었으며, 3차원 전산해석결과는 약 32.5초였다. 이러한 승온시간 지연은 1차원 해석모델에서 전도와 외부공기에 의한 열손실과 3차원에서의 형상계수의 영향을 고려하지 않았기 때문이며 승온시간 지연율은 각각의 IR 히터의 온도에서 약 11~13%로 해석되었다. 또한 3차원 전산해석결과 IR 히터의 표면온도가 상승함에 따라 유리기판의 승온시간은 단축되지만 유리기판에서의 온도편차가 커지는 경향성이 나타났다. 따라서 유리기판의 안정적 건조를 위해서는 유리기판과 단열재 사이에 충분한 공간을 확보함과 동시에, 유리기판 측면부

에 위치하는 IR 히터의 표면온도를 상승시켜야 할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 (주)지디머신즈의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Chen, M. T. and Lin, C. C., 2004, Comparison of TFT-LCD and CRT on visual recognition and subjective preference, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 34, No. 3, pp. 167-174.
2. Kim, J. H. and Lee, S. H., 2003, Principles and technical review for LCD, *Optical Science and Technology*, Vol. 7, No. 4, pp. 7-14.
3. Yoon, S. H., Jung, J. S., Lee, C. S., Yoon, I. T. and Won, T., 2002, Multi-dimensional dynamic simulation of chiral nematic LCDs, *Current Applied Physics*, Vol. 2, No. 3, pp. 253-255.
4. Lee, S. D. and Yu, C. J., 2002, Technology of FPD and recent progress technology for LCD, *J. of Electrical and Electronic Materials*, Vol. 15, No. 12, pp. 23-29.
5. Jin, S. H., Choi, H. J., Hong, S. K. and Gal, Y. S., 2001, Polymeric materials for liquid crystal display, *Polymeric Science and Technology*, Vol. 12, No. 3, pp. 377-387.
6. Kim, Y. J., Han, S. H., Hwang, W. and Hwang, Y. S., 2003, Development of a large-area, multi-helicon rectangular plasma source for TFT-LCD processing, *Thin Solid Films*, Vol. 435, No. 1, pp. 270-274.
7. Veriansyah, B., Park, T. J., Lim, J. S. and Lee, Y. W., 2005, Supercritical water oxidation of wastewater from LCD manufacturing process: Kinetic and formation of chromium oxide nanoparticles, *J. of Supercritical Fluids*, Vol. 34, No. 1, pp. 51-61.
8. Menozzi, M., Napflin, U. and Krueger, H., 1999, CRT versus LCD: A pilot study on visual performance and suitability of two display technologies for use in office work, *Displays*, Vol. 20, No. 1, pp. 3-10.
9. Menozzi, M., Lang, F., Napflin, U., Zeller, C. and Krueger, H., 2001, CRT versus LCD: Effects of refresh rate, display technology and background luminance in visual performance, *Displays*, Vol. 22, No. 3, pp. 79-85.
10. Frank, P. I. and David, P. D., 2002, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
11. Ha, M. Y., Lee, K. H., Bae, M. G., Cho, J. R., Lee, H. S. and Choi, J. H., 2002, Analysis of heat transfer in the rapid thermal processing of the plasma display panel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 11, pp. 2303-2314.
12. Modest, M. F., 1993, *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, Highstown, NJ.