머플 가열로에서의 대면적 유리기판의 가열공정에 대한 열적 연구

김 동 현,¹ 손 기 현,² 허 남 건,² 김 병 국,³ 김 형 준,³ 박 승 호^{*1}

¹홍익대학교 기계시스템디자인공학과

²서강대학교 기계공학과

³(주) 비아트론

HEAT-TREATMENT OF LARGE-SCALE GLASS BACKPLANES IN A MUFFLE FURNACE

D.H. Kim,¹ G. Son,² N. Hur,² B.K. Kim,³ H.J. Kim,³ and S.H. Park^{*1}

¹Dept. of Mechanical and System Design Engineering, Hongik Univ.

²Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

³Viatron Technologies, Suwon Industrial Complex

Current display manufacturing processes apply thermal treatment of glass backplanes widely for hydrogen degassing, crystallization of thin-films, tempering, forming, and precompaction. Estimation of the characteristics of transient heating stages and thermal non-uniformities on a single glass substrate or in a stack of glasses are extremely helpful to understand non-homogeneity of mechanical and electronic features of nano/micro structures of end products. Based on simple heat transfer models and using an electric muffle furnace, temperature variations in a glass stack were predicted and measured for glass backplanes of $1.5 \times 1.85 \text{ m}^2$ in size and 0.7 mm in thickness. Except for the period of putting glass backplanes into the furnace, thermal radiation was the major heating mechanism for the treatment and theoretical predictions agreed well to the experimental temperatures on the backplanes. Using the theoretical model, thermal fields for a glass stack of glass-size, $2.2 \times 2.5 \text{ m}^2$, and of the number of sheets, 1 to 12, were calculated for practical design and manufacturing of the muffle furnace for large-scale displays, e.g. up to 8th generation.

Key Words : 열처리 (Thermal Treatment), 유리기판 (Glass Substrate), 대면적 디스플레이 (Large-Scale Display)

1. 서 론

중요한 고부가가치 산업의 하나로 인식되고 있는 디스플레이, 태양전지, 광섬유분야에서 유리의 활용도가 높아짐에 따라, 그 가치를 더욱 인정받게 되었다. 동시에 유리기판이 그 적용분야에 따른 열 및 기계적 특성을 보유하도록 엄격한 열처리 공정의 개발의 필요성이 제기되고 있다.

디스플레이 제작공정에서 적용되고 있는 일반적인 열처리 과정은 탈수소 (hydrogen-degassing), 비정질 실리콘 박막의 결

정화 (crystallization of amorphous silicon thin-film), 유리기판의 강화 (tempering), 성형 (forming), 사전 압밀화 (precompaction) 등을 들 수 있다. 탈수소 공정[1-3]은 박막증착 공정이후 잔류 수소의 제거를 위한 공정이고, 비정질 실리콘 결정화 공정은 [4-6] 고상결정화 (solid-phase crystallization, SPC) 또는 금속유도 결정화 (metal-induced crystallization, MIC)과정에서 비정질 실리콘의 결정화를 촉진하는 공정이다. 이와 같은 공정은 온도가 600 K에서 1000 K인 가열로 내에서 수분 또는 수습시간의 유리기판 가열을 요구한다. 또한 태양전지제작을 위한 Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) 박막증착시에는 중요한 화학반응을 유도하기 위하여 600 K 이상에서 열처리 공정이 활용되고 있다 [7,8].

유리기판의 강화공정은 유리표면의 강도를 높이는 동시에 인장강도의 증가와 미세균열의 억제에 의하여 적용되고 있는

Received: October 22, 2012, Revised: October 23, 2012,
Accepted: October 25, 2012.

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

DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.4.016

© KSCFE 2012

Fig. 1 Schematic diagram of an electric muffle furnace for thermal treatment of glass backplanes in a stack

공정이다[9,10]. 다른 하나의 중요한 열처리 공정은 사전압밀화 공정으로 디스플레이 제작공정에서 매우 중요하다. 이는 유리기판이 디스플레이 제작공정을 거치는 동안에 가열/냉각의 반복에 따른 유리기판의 팽창/수축에 의하여 발생하는 비가역적 변형량을 최소화하는데 필요하다. 즉, 디스플레이 제작공정 투입이전에 고온의 열처리 공정을 통하여 유리기판의 밀도를 증가시켜서, 차후의 열처리 공정에서는 더 이상 기판의 변형이 없도록 하는 사전 열처리공정이다.

위에서 설명한 바와 같이 오래 전부터 다양한 분야에서 유리의 열처리공정이 널리 활용되고 있지만, 이에 대한 체계적인 연구가 매우 부족한 실정이다.

Buonanno 등[12]은 자동차 앞유리 제작을 위하여 유리기판의 고온성형(hot forming)에 대한 이론 및 실험적 연구를 수행하였다. 800 K의 가열로에서 실험한 결과는 이론적 예측과 약 50 K의 차이를 나타내었고, 정성적으로는 이론과 실험결과가 잘 일치하였다. Kitamura와 Pilon[13]은 673 K에서 탈수소공정에 대한 이론적 연구를 일차원 열 및 물질전달 모델과 사용하여 수행하였다.

앞서 언급한 바와 같이, 디스플레이 공정에서 요구되는 열처리 공정에 대한 연구는 거의 찾아볼 수 없을 뿐만 아니라, 대면적 기판인 8세대 기판에 대한 연구는 이제 시작인 상태에 있다. 따라서, 본 연구에서는 두께 0.7 mm인 유리기판의 6세대 ($1.5 \times 1.85 \text{ m}^2$)부터 8세대 ($2.2 \times 2.5 \text{ m}^2$) 크기의 기판에 대한 가열공정 해석을 수행하고자 한다.

2. 실험과 해석 모델

2.1 머플 가열로

대면적 유리기판을 공정온도 조건 하에서 열처리하기 위해 Fig. 1과 같은 6세대 기판용 머플 전기가열로 (electric muffle furnace)를 설계하여 제작하였다. 단열처리된 가열로의 외벽은 전기적으로 가열되고, 그 열에 의하여 머플케이싱이 공정온도로 유지되게 된다. 유리기판은 로봇팔에 의하여 그 머플케이싱 안으로 적절하게 투입된다. 표면이 산화처리된 스테인레스

강(SUS 310)으로 제작된 머플케이싱은 케이싱내의 온도를 균일하고 일정하게 할 뿐만 아니라, 공정 중 발생할 수 있는 오염원으로부터 유리기판을 보호한다. 머플케이싱과 유리투입구의 크기는 각각 $1600(\text{W}) \times 2060(\text{L}) \times 560(\text{H}) \text{ mm}^3$, $1560(\text{W}) \times 520(\text{H}) \text{ mm}^2$ 이다.

본 연구에서 머플케이싱 내의 온도는 350°C 로 유지되도록 제어하였으며, 유리기판은 Corning Lotus[14]를 사용하였다. 머플의 온도는 16지점에서, 유리기판의 온도는 10지점에서 K-형 열전대로 측정하였다.

2.2 복사 모델

일반적으로 가열로의 온도는 매우 높기에, 가열현상에 대한 주된 전달 기구는 복사열전달이다. 따라서, 복사열전달 현상을 모델링하기 위하여, 머플케이싱, 분위기 가스, 유리기판에 대한 복사 특성이 필요하게 된다.

산화처리된 SUS 310의 방사율은 $0.9\text{--}0.96$ [15]의 범위에 있으므로, 본 해석에서는 0.9를 사용하였고, 표면은 확산표면(diffuse surface)로 가정하였다. 머플케이싱 내의 분위기가스는 주로 공기, 아르곤 또는 질소를 사용하는데, 이는 단위자 분자 또는 비극성 물질로, 일반적인 복사열전달에는 거의 참여하지 않는다.

유리기판은 머플케이싱에서 방사되는 에너지의 일부를 파장에 따라 반사, 흡수, 투과하기에 복사열전달 해석에서는 유리기판의 복사특성이 필수적이다. 가열로내의 복사열전달 해석을 효율적으로 수행하기 위하여 가열로내의 복사특성은 확산적이라 가정하였다. 비록 유리기판의 복사특성은 비확산적(specular)이지만, 머플표면에서의 복사특성이 확산적이고 또한 공동내에서의 복사는 확산적이라 가정할 수 있기 때문이다.

따라서, 유리기판의 전체 반구 복사물성치(total hemispherical radiation property)는 방향적(directional), 스펙트랄(spectral) 물성치를 반구의 입체각으로 그리고 전 파장에 걸쳐 적분을 통하여 구할 수 있다. 공기 중에 놓인 단일 유리기판에 대한 방향적 스펙트랄 반사율, ρ' , 과 투과율, τ' , 은 전달행렬법(transfer matrix method)[17]로부터 구하기 위하여 다음과 같은 formalism을 사용하면,

$$M = \begin{vmatrix} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_s d_s \cos \theta'\right) & \frac{i}{n_s} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_s d_s \cos \theta'\right) \\ i n_s \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_s d_s \cos \theta'\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_s d_s \cos \theta'\right) \end{vmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{vmatrix}$$

$$\theta' = \sin^{-1}\left(\frac{n_a}{n_s} \sin \theta'_0\right) \quad (2)$$

Fig. 2. Schematics for the calculation of view factors between sub-surfaces in the muffle furnace: (a) on perpendicular planes and (b) on parallel planes

$$\rho' = \left[\frac{(m_{11} + m_{12}n_a)n_a - (m_{21} + m_{22}n_a)}{(m_{11} + m_{12}n_a)n_a + (m_{21} + m_{22}n_a)} \right]^2 \quad (3)$$

$$\tau' = \left[\frac{2n_a}{(m_{11} + m_{12}n_a)n_a + (m_{21} + m_{22}n_a)} \right]^2 \quad (4)$$

가 되고, 여기서 n, λ, d, θ' 은 각각 복소굴절율, 파장, 두께, 입사각을 나타낸다. 하첨자 a 와 s 는 각각 공기와 유리기판을 의미한다. 그리고 흡수율, α' ,은 $1 - \rho' - \tau'$ 이다. 유리기판에 대한 굴절율은 참고 문헌[3, 17]에서 제시된 일반적인 값을 사용하였다.

유리기판 사이 또는 유리기판과 머플케이싱과의 복사열교환은 복사형상인자, F_{1-2} 로 계산할 수 있는데, 이를 Fig. 2에서 간략히 설명하고 있다. Fig. 2(a)의 있는 수직면사이에서는

$$2A_1F_{1-2} = f(X_2, Y_3) - f(X_1, Y_3) - f(X_2, Y_2) + f(X_1, Y_2) - (f(X_2, Y_3 - Y_1) - f(X_1, Y_3 - Y_1) - f(X_2, Y_2 - Y_1) + f(X_1, Y_2 - Y_1)) \quad (5)$$

$$f(X, Y) = \frac{1}{\pi X} \left\{ X \tan^{-1} \frac{1}{X} + Y \tan^{-1} \frac{1}{Y} - \sqrt{X^2 + Y^2} \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right\}$$

Fig. 3. Sub-surfaces on the muffle and glass backplanes, which were used for the calculation of view factors and thermal field

$$+ \frac{1}{4} \ln \left(\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2} \right) \cdot \left[\frac{X^2(1+X^2+Y^2)}{(1+X^2)(X^2+Y^2)} \right]^{X^2} \cdot \left[\frac{Y^2(1+X^2+Y^2)}{(1+Y^2)(X^2+Y^2)} \right]^{Y^2} \quad (6)$$

$$X = x/y, \quad Y = y/c \quad (7)$$

이고, Fig. 2(b)의 수평면사이에서는

$$4A_1F_{1-2} = f(X_3, Y_3) - f(X_3, Y_2) - f(X_2, Y_3) + f(X_2, Y_2) - (f(X_3, Y_3 - Y_1) - f(X_3, Y_2 - Y_1) - f(X_2, Y_3 - Y_1) + f(X_2, Y_2 - Y_1)) \quad (8)$$

$$f(X, Y) = \frac{2}{\pi XY} \left\{ \ln \left[\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2} \right] + X \sqrt{1+Y^2} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} + Y \sqrt{1+X^2} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} - X \tan^{-1} X - Y \tan^{-1} Y \right\} \quad (9)$$

$$X = x/c, \quad Y = y/c \quad (10)$$

이고, 여기서 A 는 각각의 작은 면의 면적이고, 이는 임의의 작은 면 사이에 적용될 수 있다.

Fig. 3은 머플케이싱과 유리기판의 작은 면사이에서의 열 복사열전달을 계산하기 위한 개략도를 나타낸다. 여기서는 3장의 유리기판이 나타나있으나, 시뮬레이션에서는 1장에서 12장까지의 유리기판을 적층할 수 있는 구조로 계획하였다. 실험적으로는 머플케이싱의 각각의 부분이 일정한 균일 온도로 유지되도록 제어되었다.

각각의 작은 면 사이에서의 복사교환은 확산적이라 가정할 경우, 작은 면 i 를 떠나는 출사 (radiosity)는

$$q_i^{+ \text{ or } -} = \epsilon_i \sigma T_i^4 + \frac{1}{A_i} \left(\sum_{j=1}^N \gamma_j A_j F_{j-i} q_j^{+ \text{ or } -} \right) \quad (11)$$

$$\gamma_j = \begin{cases} \tau_j : \text{if superscripts of } q_i \text{ and } q_j \text{ are the same} \\ \rho_j : \text{if superscripts of } q_i \text{ and } q_j \text{ are opposite} \end{cases}$$

이고, 여기서 상첨자 + 와 - 는 출사의 방향을 의미한다.

2.3 열전달 모델

일반적으로 열처리로내 온도는 상당히 높고, 공정시간이 상당히 길기 때문에, 복사현상이 열전달 현상의 주된 전달기구가 되고, 대류열전달 및 전도열전달의 영향은 상대적으로 작게 된다. 특히, 유리기판의 두께가 기판의 길이에 비하여 매우 작으므로 열전도는 무시할 수 있게 된다. 유리가 열처리로에 투입된 직후, 또는 투입구가 열린 상태로 있을 경우에, 자연대류를 고려하기 위하여 아래와 같은 자연대류 상관식을 사용하여 대류열전달 계수를 구하였다. 두 평행판 사이에서의 Nusselt수와 Rayleigh수[18]는

$$Nu = 0.168 \left(Ra \frac{b}{L} \right)^{0.3362} \quad (12)$$

$$Ra = \frac{g\beta(\Delta T)b^3}{\alpha\nu} \quad (13)$$

이고, 여기서 b , L , g , β , ΔT , α , ν , k 는 각각 기판 간격, 기판 길이, 중력가속도, 온도차, 열확산계수, 동점성계수 및 열전도율을 의미한다. 본 연구에서 사용한 공기의 물성치는 참고문헌[19]로부터 구하였다.

유리기판이 가열로에 투입된 후, 유리기판의 온도를 예측하기 위하여, 아래와 같이 복사열전달과 대류열전달을 포함하는 간단한 열전달 방정식을 유도하였다.

$$m_i c_{p,i} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^N A_j F_{j-i} q_j^{+ \text{ or } -} - (q_i^{+} + q_i^{-}) A_i + 2hA_i (T_i - T_{i,nb}) \quad (14)$$

Table 1 Temperature dependent properties of glass used in this study[14]

Temperature [K]	Specific heat [J/kgK]	Density [kg/m ³]
296.15	872	2520
373.15	944	
473.15	1021	
573.15	1080	
673.15	1120	
873.15	1143

Fig. 4. Total hemispherical radiation properties of a glass substrate of 0.7 mm in thickness with respect to radiation source temperatures

여기서, m_i , $c_{p,i}$, T_i 는 각각 작은 면 i 의 질량, 비열, 온도를 의미하고, 대류열전달 계수 h 는 식 (12)로부터 구할 수 있다. 온도 $T_{i,nb}$ 는 i 면 주위의 작은 면의 평균온도를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 유리의 중요한 물성치는 Table 1에 제시하였고, 시간에 대하여는 Crank-Nicolson법과 복사에 의한 온도 비선형성을 고려하여 반복법을 적용하여 수치해석하였다.

3. 결과와 토론

식 (3)과 (4)로부터 구한 방향적 스펙트랄 반사율, ρ' 과 투과율, τ' 과 Planck 분포를 통하여 두께 0.7 mm인 유리기판의 전체 반구 복사물성치를 Fig. 4에 나타내었고, 이를 다음과 같은 다항식으로 곡선접합하였다.

$$\alpha(T) = 0.97947 - 1.4391 \times 10^{-4} T - 5.7194 \times 10^{-7} T^2 + 2.2752 \times 10^{-10} T^3 \quad (15)$$

$$\tau(T) = -0.3628 + 1.1498 \times 10^{-4} T + 6.0994 \times 10^{-7} T^2 - 2.4 \times 10^{-10} T^3 \quad (16)$$

$$\rho(T) = 0.05681 + 2.8929 \times 10^{-5} T - 3.8025 \times 10^{-8} T^2 + 1.2481 \times 10^{-11} T^3 \quad (17)$$

여기서, T 는 복사에너지를 방사하는 표면의 온도이고 단위는 K이다.

유리기판의 전반적인 반사율은 약 10% 정도이고, 유리기판에 입사하는 복사에너지를 방출하는 표면온도 (source temperature)에 따라 크게 변하지 않고 있다. 그러나, 흡수율과 투과율은 표면온도에 따라 크게 달라짐을 보이고 있다. 방사 표면온도가 낮을 경우에는 방사에너지의 파장이 길게 되고,

Fig. 5. Experimental temperature variations on the muffle furnace for thermal treatment of the 6th Gen. glassbackplanes

이에 따라 유리기관이 많은 에너지를 흡수할 수 있게 되지만, 온도가 높은 경우에는 방사에너지의 과장이 짧게 되어 유리기관이 적게 흡수함을 알 수 있다. 따라서, 가열초기에는 유리기관 자체의 온도가 낮으므로 유리와 유리사이의 복사열전달량은 흑체사이의 복사열전달에 가깝게 되지만, 시간이 지나서 유리기관의 온도가 머플 케이싱의 온도에 근접하게 되면 유리와 유리사이의 복사열 흡수량은 점차 줄어들게 된다.

본 연구에서 유도한 해석모델인 식 (14)를 평가하기 위하여 6세대 유리기관 ($1.5 \times 1.85 \text{ m}^2$)을 가열할 수 있는 머플가열로를 제작하였다. 제작된 가열로는 유리기관이 투입되기 전에 623 K로 예열되었고, 아래서부터 유리기관이 하나씩 투입됨과 동시에 머플케이싱 표면의 16지점과 유리기관의 10지점에서의 온도변화를 측정하였다.

유리기관을 가열하는 공정은 기관투입단계(I), 공정온도에 도달하는데까지의 비정상가열 단계(II), 공정온도에서의 정상가열단계(III)로 나눌 수 있다. 기관 투입단계 I에서는 3장의 유리기관이 순차적으로 투입되고 유리기관 투입구가 개방되기 때문에, 머플케이싱 표면온도가 공정온도보다 급격히 낮아질 수 있고, 이에 대한 측정값을 Fig. 5에 표시하였다. 비정상가열 단계 II에서는 유리기관이 투입된후, 유리기관 투입구가 닫히고, 외부 전력이 적절히 증가되면서 머플케이싱의 온도가 공정온도에 접근하게 된다. 그리고 정상가열단계 III에서는 머플케이싱과 유리기관의 온도가 공정온도로 설정된 가열시간 동안 유지된 후, 최종적으로는 냉각공정을 거치게 된다. 본 연구에서는 가열공정만 해석대상으로 하였다.

Fig. 6은 첫 번째 유리기관이 투입된 후 10초, 30초, 50초, 100초대에서의 유리기관의 온도분포를 실험과 식 (14)를 활용한 예측값과 비교하였다. 실험결과와 예측값은 비교적 잘 일치하였고, 이를 통하여 이론적 해석모델의 신뢰성을 확보할 수 있었다. 본 연구에서 가장 중요한 결과 중의 하나는 가열

Fig. 6. Comparisons of experimental and theoretical temperature distributions on the 6th Gen. glass backplane, firstly loaded into the muffle at various times prior to the loading of the second backplane. Inset shows the 2-D comparisons

공정 중 유리기관의 온도불균일성에 대한 평가자료 도출이다. 유리기관이 투입 후 가열과정에서의 최저온도는 투입구와 가장 가까운 부분에서 측정되었고, 최대온도는 투입구에서 가장 먼 쪽의 모서리부분에서 측정되었다. 그렇지만 상대적인 온도차는 그리 크지 않음을 확인하였다.

최근의 보고[20-21]에 따르면, 전 세계의 디스플레이 산업은 8세대급 유리기관의 공정개발과 동시에 생산성확보에 심혈을 기울이고 있다고 한다. 따라서, 본 연구에서는 6세대 기관에서 검증된 이론적 모델을 8세대 유리기관의 가열공정에 적용하고자 한다. 이는 실제로 8세대급 가열로제작에 앞서서 이론적 해석을 통하여 공정중 유리기관의 온도불균일을 예측함으로써, 가열로의 규모를 산정할 수 있게 한다.

본 해석에서는 유리기관의 크기를 $2.2 \times 2.5 \text{ m}^2$ 로 하였고, 다수의 유리기관이 동시에 가열로에 투입된다고 가정하였고, 또한 투입구의 영향을 고려하지 않았다.

Fig. 7은 유리기관이 4장, 6장, 12장이 각각 동시에 투입될 경우에 대한 각각의 기관내의 최고온도와 최저온도차이를 나타낸다. 기관수와 관계없이 안쪽 유리기관에서의 온도차가 바깥쪽 기관에서의 온도차보다 상대적으로 큼을 알 수 있다. 바깥쪽 유리기관은 전체적으로 머플케이싱으로부터 직접 복사열을 흡수하기에 온도 불균일성이 작게 되지만, 안쪽 기관의 가운데부분은 바깥쪽 기관을 통하여 간접적으로 가열되고 가장자리 부분은 머플케이싱으로부터 직접 가열되기 때문에 안쪽기관의 온도 균일성이 크게 된다.

동시에 투입되는 유리기관의 수가 증가할수록 온도 불균일성도 증가하는데, 기관수가 4장인 경우의 최대온도차는 100 K를 조금 넘지만, 12장인 경우는 200 K에 근접하게 된다.

일반적인 유리기관의 열처리온도는 유리의 연화점 (softening point) 보다는 매우 낮지만, 열처리 공정시 야기된

(a)

(b)

(c)

Fig. 7. Thermal non-uniformities (maximum temperature differences) in a glass of the 8th Gen. during the heating process from room temperature to 623K in a muffle furnace: (a) 4glasses, (b) 6glasses, and (c) 12 glasses in a stack

불균일 온도분포는 기판 내부에 미세한 잔류응력을 유발하게 하고, 이는 측정이 어려울 정도의 미세한 변형을 야기할 가능성이 있다. 그러나, 디스플레이 공정과 같은 정밀도가 매우 높은 공정에서는 잔류응력 또는 미세변형이 후속공정에 막대

(a)

(b)

Fig. 8. Thermal non-uniformities (maximum temperature differences) in a stack of the 8th Gen. glasses during the heating process from room temperature to 623K in a muffle furnace, (a) without and (b) with using a setter

한 영향을 끼치므로, 다른 공정보다는 엄격한 균일온도조건을 요구한다.

Fig. 8은 열처리 공정중 발생할 수 있는 최대온도차의 변화를 나타낸다. 최대 온도차는 안쪽 기판의 가운데 지점과 바깥쪽 기판의 모서리지점의 온도차로 기판의 장수에 따라 크게 증가함을 보인다. Fig. 8(a)와 (b)는 기판만을 가열하는 공정과 quartz 세터와 함께 기판을 가열하는 공정에서의 최대온도차를 비교하고 있고, 세터를 사용한 경우가 가열시간이 훨씬 길게 될 것을 알 수 있다. 일반적인 공정에서는 유리기판의 변형억제와 오염 및 손상방지를 위하여 세터를 사용하지만, 가열공정에서는 세터의 두께가 5 mm 이상 되기에 이에 따라 기판가열속도가 매우 느려지게 되므로 세터를 사용하지 않은 경우가 많다.

Fig. 9에서는 유리기판이 상온에서 투입된 후 공정온도에 도달하는때까지 발생하는 최대온도차와 그때까지 걸리는 시간을 비교하였다. 공정온도의 상승에 따라 최대온도차는 기판

Fig. 9 (a) Variations of maximum temperature differences in glass and in stack and (b) heating delays with respect to furnace target temperatures for various number of glass backplanes in a stack

의 매수가 작을 경우에는 일정온도차에 도달하지만, 매수가 클 경우에는 선형적으로 증가함을 보이고 있다. 기판의 최대 온도차가 공정온도의 증가에 따라 증가하는 반면에, 최대온도까지 걸리는 시간은 오히려 크게 줄어들고 있음을 Fig. 9(b)에서 확인할 수 있다. 일반적인 전도 및 대류 열전달의 경우에는 가열량이 온도차에 비례하므로, 온도차가 클수록 공정온도에 도달하는 데까지의 가열시간이 증가하게 된다. 그러나, 복사열전달의 경우는 가열량이 온도 4제곱의 차이에 비례하므로, 온도차가 클수록 그리고 높은 공정온도일수록 가열량이 증가하게 되어 오히려 가열시간이 감소하게 되기 때문이다.

3. 결 론

본 연구에서는 간단한 복사열전달 모델과 자연대류 상관식을 활용하여 디스플레이용 대면적 유리기판의 가열과정을 예측하였고, 이를 6세대 유리기판의 가열공정 실험결과와 비교

하였다. 유리기판의 투입시에는 자연대류의 영향으로 간단한 해석모델이 실험치와 약간의 거리가 있었지만, 전반적으로 잘 일치함을 확인하였다.

이론적인 해석 모델을 활용하여, 8세대 유리기판이 12장까지 동시에 투입될 경우에 대한 가열과정을 시뮬레이션하였다. 유리의 장수가 증가할수록 최대온도차는 증가하였고, 공정온도에 도달하는 시간도 역시 증가하였다. 세터를 사용할 경우에는 세터의 열용량의 증가에 따라 가열시간은 상당히 증가하였으나, 최고온도차는 세터를 사용하지 않은 경우와 크게 차이가 나지 않았다.

공정온도의 증가에 따라 최고온도차는 증가하였으나, 공정온도에 도달하는 시간은 오히려 감소함을 확인하였다. 이는 주된 열전달 기구가 복사열전달이기에 전달되는 열량은 온도의 4제곱의 차에 비례하기 때문이었다.

후 기

본 논문은 한국연구재단지정 다중현상 CFD 연구센터의 지원(No. 2009-0083510)으로 수행되었고, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 2009, Ohdaira, K., Shiba, K., Takemoto, H., Fujiwara, T., Endo, Y., Nishizaki, S., Jang, Y.R., Matsumura, H., "Precursor Cat-CVD a-Si films for the formation of high-quality poly-Si films on glass substrates by flash lamp annealing," *Thin Solid Films*, Vol.517, pp.3472-3475.
- [2] 2003, Pecora, A., Mariucci, L., Piperno, S., Fortunato, G., "Lateral Growth Control by Thickness Spatial Modulation of Amorphous Silicon Film," *Thin Solid Films*, Vol.427, pp.314-318.
- [3] 2011, Kim, D.H., Hong, W.E., Ro, J.S., Lee, S.H., Lee, C.H., Park, S.H., "In-situ Observation of Phase Transformation in Amorphous Silicon During Joule-Heating Induced Crystallization Process," *Thin Solid Films*, Vol.519, pp.5516-5522.
- [4] 2003, Kim, B.D., Jung, H., Kim, G.B., Joo, S.K., "Solid Phase Crystallization of Amorphous Silicon on Glass by Thin Film Heater for Thin Film Transistor(TFT) Application," *Journal of Microelectronics*, Vol.34, pp.767-771.
- [5] 1996, Lee, S.W., Joo, S.K., "Low Temperature Poly Si Thin Film Transistor Fabrication by Metal Induced Lateral Crystallization," *IEEE Electron Device Letters*, pp.160-162.

- [6] 2012, Kim, D.H., Kim, B.K., Kim, H.J, Park, S.H., "Crystallization of Amorphous Silicon Thin-Film on Glass Substrate Preheated at 650°C Using Xe Arc Flash of 400 μ s," *Thin Solid Films*, Vol.520, pp.6581-6588.
- [7] 2001, Probst, V., Stetter, W., Reidl, W., Vogt, H., Wendl, M., Calwer, H., Zweigart, S., Ufert, K.-D., Freienstein, B., Cerva, H., Karg, F.H., "Rapid CIS-Process for High Efficiency PV-Modules: Development towards Large Area Processing," *Thin Solid Films*, Vol.387, pp.262-267.
- [8] 2003, Brummer, A., Honkimaki, V., Berwian, P., Probst, V., Palm, J., Hock, R., "Formation of Cu(In,Ga)Se₂ by the Annealing of Stacked Elemental Layers-Analysis by in situ High Energy Powder Diffraction," *Thin Solid Films*, Vol.437, pp.297-307.
- [9] 2004, Bernard, F., Daudeville, L., Gy, R., "Load Bearing Capacity of Connections in Tempered Gglass Structures," *Structural Engineering International*, Vol.2(2004), pp.107-110.
- [10] 2005, Veer, F., Zuidema, J., Bos, F.P., "The Strength and Failure of Glass in Bending," *Glass Processing Days*, pp.1-3.
- [11] 1997, Bocko, P.L., Lapp, J.C., Nelson, J.W., Schad, C.K., "Method for Low Temperature Precompaction of Glass," United States Patent, 5597395.
- [12] 2005, Buonanno, G., Dell'Isola, M., Frattolillo, A., Giovinco, G., "Thermal Analysis of a Glass Bending Process," Vol.25, pp.2108-2121.
- [13] 2009, Kitamura, R., Pilon, L., "Radiative Heat Transfer in Enhanced Hydrogen Outgassing of Glass," *Int. J., Hydrogen Energy*, Vol.34, pp.6690-6704.
- [14] Corning Display Technologies, NY 14831 United States, <http://www.corning.com>.
- [15] 2003, Modest, M.F., Radiative Heat Transfer, 2nd Ed., Academic Press, San Diego CA.
- [16] 2006, Pedrotti, F.L., Pedrotti, L.S., Pedrotti, L.M., Introduction to Optics, 3rd Ed., Prentice Hall, NJ.
- [17] 1998, Palik, E.D., Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press, San Diego CA.
- [18] 2007, Manca, O., Nardini, S., "Experimental Investigation on Natural Convection in Horizontal Channels with the Upper Wall at Uniform Heat Flux," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.50, pp.1075-1086.
- [19] 2004, Bejan, A., Convective Heat Transfer, 3rd Ed., John Wiley&Sons, NewYork, NY.
- [20] 2005, Hsieh, D., "LCD Demand, Panels, Substrates All Move From Large to Larger, Display Search," www.displaysearch.com, pp.29-34.
- [21] 2012, Annis C., "Top 10 LCD manufacturing trends of 2012," Display Search Monitor, Display Search.