

PDP 제조 공정시 유리의 열충격 파손 예측

김재현[#], 최병익^{*}, 이학주^{*}

Prediction of thermal shock failure of glass during PDP manufacturing process

Jae Hyun Kim[#], Byung Ik Choi^{*} and Hak Joo Lee^{*}

ABSTRACT

There is an increasing need for large flat panel display devices. PDP (Plasma Display Panel) is one of the most promising candidates for this need. Thermal shock failure of PDP glass during manufacturing process is a critical issue in PDP industry since it is closely related to the product yield and the production speed. In this study, thermal shock resistance of PDP glass is measured by water quenching test and an analysis scheme is described for estimating transient temperature and stress distributions during thermal shock. Based on the experimental data and the analysis results, a simple procedure for predicting the thermal shock failure of PDP glass is proposed. The fast cooling process for heated glass plates can accelerate the speed of PDP production, but often leads to thermal shock failure of the glass plates. Therefore, a design guideline for preventing the failure is presented from a viewpoint of high speed PDP manufacturing process. This design guideline can be used for PDP process design and thermal-shock failure prevention.

Key Words : PDP (플라즈마 디스플레이 패널), Thermal shock (열충격), Failure (파손), Thermal stress (열응력), Critical temperature difference (임계 온도 차이), Thermal shock resistance (열충격 저항성)

기호설명

F = Cumulative failure probability

σ_u = Weibull threshold stress

σ_0 = Weibull characteristic stress

m = Weibull modulus

S = Strength of PDP glass

A = Surface area of glass specimen

α_{exp} = Coefficient of thermal expansion

E, ν = Elastic modulus, Poisson's ratio

k = Heat conductivity

α = Thermal diffusivity

h = Heat transfer coefficient

β_{ij} = Thermal modulus

θ = Non-dimensional temperature

ζ = Non-dimensional time

η = Non-dimensional distance

μ = Dynamic viscosity

Re = Reynolds number

Nu = Nusselt number

Pt = Prandtl number

Bi = Biot number

[#] 접수일 : 2003 년 7 월 28 일; 게재승인일 : 2003 년 11 월 14 일
교신저자, 한국기계연구원 구조연구부 마이크로응용역학그룹

^{*} Email jaehkim@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7550
한국기계연구원 구조연구부 마이크로응용역학그룹

1. 서론

정보기술의 발전과 함께, 시각적으로 대량의 정보를 전달하는 디스플레이 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 디스플레이 기술의 주된 이슈는 보다 큰 화면을 가지면서, 가볍고, 적은 공간을 차지하는 기술을 개발하는 것이다. 이에 덧붙여서 고화질화와 고휘도화, 저가격화에 대한 요구도 높아지고 있다. 기존의 CRT (Cathode Ray Tube) 기술로는 이러한 요구 조건을 만족시키는 데에 한계에 부딪히고 있으며, LCD (Liquid Crystal Display), ELD (Electro-Luminescent Display), PDP (Plasma Display Panel) 등과 같은 기술이 그 대안으로 제시되고 있다.¹

PDP 기술은 1964 년 미국의 Illinois 대학에서 처음 발명된 이후로 1990 년대에 급격히 발전하였으며, 현재까지의 여러 디스플레이 기술 중에서 매우 유망한 기술의 하나로 평가되고 있다. PDP 는 두 장의 유리판 사이에 격벽과 전극, 형광체 등을 형성하고, 반응 기체를 그 안에 채운 후에 봉착한 구조로 이루어져 있다. 전극에 전압을 가하여 반응 기체를 플라즈마로 만들고 이 플라즈마가 방출하는 자외선이 PDP 의 형광체를 자극하여 가시광선을 방출하는 원리이다.^{1,2}

PDP 기술의 상업화를 위하여 고효율화, 고화질화, 저전력화, 저가격화와 관련된 여러 가지 기술 개발이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 PDP 의 저가격화에 장애 요인이 되고 있는 유리판의 고온/냉각 공정을 해석하고, 열충격 파손을 예측하고 방지할 수 있는 설계 기법을 제안한다. PDP 제조 공정상 격벽 및 형광체, 전극, 유전체 등의 생성을 위해서는 소성 공정을 거쳐야 하고, 전면과 배면 유리판을 접합하고, 방전가스를 주입하기 위하여 봉착 및 배기 공정을 거쳐야 한다. 이러한 소성 및 봉착, 배기 등은 고온에서 이루어지는 공정이며, 많은 공정시간이 요구된다. 공정시간을 단축하기 위하여 고온으로 가열된 유리판을 급속히 냉각하는 경우에, 유리판에 열충격 파손이 발생하는 사례가 많다. 열충격 파손을 피하기 위하여 천천히 유리판을 냉각시키는 경우에는 공정시간이 길어져서 PDP 제조 단가를 높이는 요인이 된다.²

열충격시험을 통하여 PDP 유리의 열충격 임계온도를 측정하고, 열충격시의 열응력을 해석하여

열충격 파손 강도를 도출한다. 열충격 파손 강도를 토대로, 유리판의 가열 및 냉각이 수반되는 PDP 공정에서 열충격 파손을 예측한다. 또한 열충격 파손을 방지하면서 동시에 공정 시간을 단축하는 데에 적용될 수 있는 공정 설계 방법을 제시한다.

2. 취성 재료의 열충격 파손 이론

2.1 열충격 시의 열응력

열응력은 온도변화에 따라 팽창 또는 수축하는 재료의 물성과 적절한 구속 조건의 결합에 따라 구조물 내에 발생하는 응력을 나타낸다. 온도에 따른 팽창 특성, 즉 열팽창계수가 다른 두 재료가 서로 접합되어 하나의 구조물을 이룰 때에, 구조물의 온도가 변화함에 따라 열팽창계수 차이에 따른 응력이 발생한다. 이러한 응력이 열응력의 대표적인 예가 된다. 한편 구조물이 하나의 재료로 구성되어 있는 경우에도, 구조물 내에 존재하는 온도 구배 (temperature gradient)에 따라 열응력이 발생할 수 있다. 열응력은 구조물을 구성하는 재료들의 열팽창계수, 탄성계수 등의 물성과 구조물의 형상, 구조물에 가해진 구속 조건, 구조물 내의 온도 분포에 따라 크게 달라지므로, 열응력을 평가하기 위해서는 이에 대한 적절한 고려가 필요하다.

한편, 열충격은 구조물 내에 온도 분포가 발생하고, 이것이 시간에 따라 급격히 변화하면서 응력을 유발하는 현상이다. 아주 짧은 시간 동안에 급격히 변화하는 온도 변화를 고려하려면, 동적 열탄성 (dynamic thermoelastic) 문제를 다루어야 한다. 그러나, 본 연구에서 다루고 있는 PDP 공정의 열충격은 시간에 따른 변형률의 변화가 비교적 작은 경우이므로, 동적 열탄성 문제가 아닌 준정적 (quasi static) 열탄성 문제로 근사화하는 방법을 사용한다.⁵ 따라서 4 장에서 자세히 기술된 바와 같이 동적 관성 영향 (dynamic inertia effect)에 의한 충격보다는 온도 구배에 의해 발생한 준정적 응력에 의한 파손을 다루게 된다.

2.2 취성 재료의 파손

유리와 세라믹 등과 같은 취성 재료는 상온에서 파손될 때에 소성 변형을 거의 동반하지 않는다. 따라서, 재료 내의 결함에 저항하는 특성인 파

괴인성치 (toughness)가 연성 (ductile) 재료에 비하여 비교적 작고, 결함의 분포 및 크기, 형상에 따라 파손 양상이 크게 달라지는 거동을 보인다. 취성 재료의 강도는 연성 재료에 비하여 그 편차가 매우 커서 수 백 %에 달하는 경우도 많기 때문에 강도의 평균값으로 재료의 특성을 나타내는 것이 적절하지 못하다. 따라서 같은 조건으로 반복적으로 재료의 강도를 측정하여 응력에 따른 누적 파괴 확률(cumulative fracture probability)을 구하고 아래와 같은 Weibull 분포를 이용하여 이를 표현하는 방식을 자주 사용한다.³

$$F = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m\right\} \quad (1)$$

여기서, σ_u 는 임계 응력(threshold stress)으로서, 이 응력보다 큰 응력이 가해져야 파단이 일어난다. (대부분의 경우 0 으로 가정하여 Weibull 분포를 구한다.) m 은 Weibull 계수(modulus), σ_0 는 재료의 특성 응력(characteristic stress), F 는 파손 확률을 나타낸다.

취성 재료의 강도는 재료 내의 결함 크기 및 빈도 분포에 크게 의존하므로, 응력이 가해지는 재료의 부피 또는 면적에 따라 강도가 변화하는 특성을 보인다. 즉, 같은 재료라도 시편의 크기에 따라 강도가 달라지며 큰 시편이 작은 시편보다 작은 강도를 보이게 된다. 열충격과 같이 재료의 표면에 최대응력이 발생하는 경우에는 재료의 표면에 존재하는 결함 분포에 크게 의존하고, 재료의 강도는 Weibull 이론에 근거하여, 다음과 같은 관계식으로 표현된다.³

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{1/m} \quad (2)$$

여기서, S 와 A 는 재료의 강도와 사용된 시편의 특성 면적 (characteristic area)을 나타내고, 아래 첨자는 크기가 다른 시편에 대한 인덱스이다.

2.3 열충격 파손 이론

열충격에 의한 파손은 재료의 파손 이론과 열충격에 의해 발생한 응력의 해석을 통해 평가된다.

즉, 열충격을 통해 재료에 발생한 응력을 해석하고, 이를 재료의 강도 또는 Weibull 파손 분포와 비교하여 파손을 예측하는 것이다. 열충격 저항성을 나타내는 매개변수로서 임계 온도 차이 (critical temperature difference)를 사용하는 경우가 많으며, 임계 온도 차이를 재료의 강도와 연관시키는 방법이 사용된다. 이외에도 임계 온도 차이를 재료의 파괴에너지 및 결함의 크기와 연관시키는 방법도 제시되고 있지만, 결함의 크기와 분포를 정량적으로 측정하는 것이 쉽지 않기 때문에 그다지 현실적인 방법은 아닌 것으로 판단된다.^{4,6} 본 연구에서는 실험을 통하여 균열이 발생하기 시작하는 임계 온도 차이를 구하고, 이 온도 차이에 해당하는 열탄성문제를 해석하여 발생하는 최대 응력을 계산한다. 이 최대 응력을 재료의 특성치, 즉 열충격 파손 강도로 정의하고, 이를 PDP 공정 중에 발생하는 열충격 파손을 예측/방지하는 데에 적용한다.

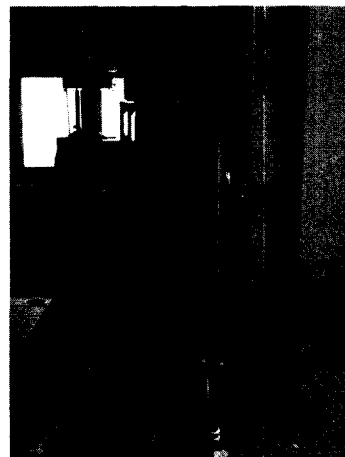


Fig. 1 Photograph of thermal shock tester

3. 열충격 시험

3.1 시험 장치 구성

PDP 유리의 열충격 저항성을 측정하기 위하여, Fig. 1과 같은 열충격저항성 시험기를 제작하였다. 열충격저항성 시험기를 이용하여 열 챔버 속에서 일정 온도로 균일하게 가열된 유리판을 물 속으로 자유낙하시키고 균열발생 여부를 확인하였다. 열 챔버는 열풍 순환 방식으로서 상단부에서 가열된

공기를 하단부쪽으로 순환시키는 방식으로 제작하였다. 작동온도는 상온에서 400℃까지의 범위이고, 챔버내의 온도편차는 ±1℃이다. 가열된 유리판을 물속으로 낙하시키기 위해서, 볼 스크류 (ball screw)와 핸들 (handle)을 부착하였다. 볼 스크류의 나사산에 유리판을 묶고 있는 철사가 결리고, 볼 스크류가 회전함에 따라 이 철사가 이동하도록 되어있다. 챔버의 하단면 중심부에는 수조 (water reservoir)로 통하는 공간이 만들어져 있으며 가열된 유리판이 이 공간을 통하여 물 속으로 떨어지도록 되어있다.

3.2 시편 사양 및 열충격 시험 결과

열충격시험에 사용한 유리시편의 크기는 130 mm x 130 mm x 2.8 mm 이며, 열충격시험 후 균열이 발생된 유리시편사진은 Fig. 2 에 나타나 있다. 본 연구에서는 2 종류의 PDP 유리 (국내산 PDP 유리와 일본산 PDP 유리)를 선택하여, 온도 별로 5 개의 시편을 실험하였다. 사용된 PDP 유리의 물성은 Table 1 에 제시되었다. 탄성계수와 열팽창계수는 각각 Nanoindenter 와 Dilatometer 를 이용하여 측정하였으며, 다른 물성치는 soda lime 유리의 전형적인 값을 사용하였다.² 열충격실험을 통하여 유리시편에 균열이 발생되기 시작하는 임계온도차이 (critical temperature difference)를 결정하였으며, 국내산 PDP 유리는 133℃, 일본산 PDP 유리는 113℃ 였다. 균열 발생 여부를 판단하는 것은 다소 모호한 점이 있기 때문에, 본 연구에서는 육안으로 1 cm 이상의 크기를 가지는 균열이 발생하기 시작하는 점을 기준으로 임계온도차이를 결정하였다.

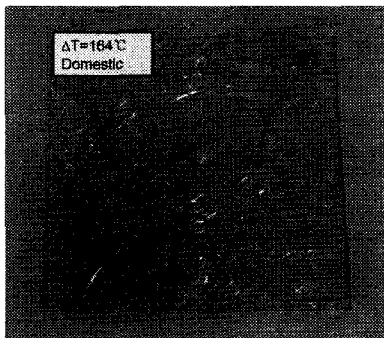


Fig. 2 Photograph of domestic glass specimen after thermal-shock

Table 1 Material properties of PDP glass

	E*	v**	α _{exp} *	k**	α**
	(GPa)		(ppm/°C)	(W/mK)	(m ² /s)
Domestic glass	77.3	0.17	10.4	0.97	0.44e-6
Japanese glass	81.5	0.17	9.84	0.97	0.44e-6

* E and α_{exp} are measured values.

** v, k and α are conventional values for soda lime glass

4. 열충격시의 열전달 및 응력 해석

고온으로 가열된 유리가 상온의 물 속에 급냉되는 경우에 일어나는 열탄성 (thermoelasticity) 문제를 해석한다. 온도장과 탄성장이 결합된 (coupled) 열탄성 문제의 지배방정식은 다음과 같다.⁷

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{T \beta_{ij}}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - W$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[C_{ijkl} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] = -X_i + \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + \frac{\partial \beta_{ij} T}{\partial x_j} \tag{3}$$

여기서 k_{ij} 는 열전도계수 (heat conduction coefficient), T 는 현재 온도, ρ 는 밀도, C_v 는 단위질량당 열용량 (heat capacity), β_{ij} 는 열계수 (thermal modulus), W 는 단위 시간 단위 부피당 열발생량 (heat generation), C_{ijkl} 은 탄성계수 (elastic modulus), X_i 는 단위 부피당 체적력 (body force), u_i 는 변위 성분, x_i 직교좌표 성분이다.

이와 같이 두 개의 미분방정식이 결합된 형태를 해결하는 것은 쉽지 않은 일이므로, 다음과 같은 두 가지 가정을 통하여 단순화한다. 먼저 시간에 따른 온도장의 변화가 시간에 따른 변형률의 변화보다 비교적 작아서 그에 따른 관성영향 (inertia effect)을 무시할 수 있다고 가정한다. (본 연구에서 다루고 있는 PDP 공정에서는, 시간에 따른 유리의 온도변화량이 유리 내부에서의 탄성파의 속도에 비교하여 매우 작으므로 이러한 가정은 타

당하다.) 또한, 두 개의 미분방정식이 결합되게 하는 항은 그 크기가 다른 항들에 비하여 작아 무시할 수 있다고 가정한다. (PDP 공정에서는, 발생하는 온도 분포가 변형에 의해 받는 영향이 매우 작으므로 이러한 가정은 유효하다.)

이제 재료의 탄성계수와 열계수를 등방성으로 가정하고, 체적력과 열생성이 없는 경우를 생각하면, 2 개의 독립적인 미분방정식으로 이루어진 다음과 같은 준정적 열탄성 지배 방정식을 얻을 수 있다.

$$k \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

$$G \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + (\lambda + G) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j \partial x_i} = \beta \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (5)$$

여기서 $\beta = \alpha_{exp} E / (1 - 2\nu)$, $2G = E / (1 + \nu)$, $\lambda = E\nu / \{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\}$ 이고, α_{exp} 는 열팽창계수, E 와 ν 는 각각 영계수와 포와송 비이다.

4.1 해석을 위한 모델 형상

유리의 열충격 시험을 모사하기 위하여 Fig. 3 과 같은 1 차원 모델을 설정하였다. 초기 조건($t = 0$ sec)으로는, 일정 온도로 균일하게 가열된 유리판을 설정한다. 유리판이 자유 낙하를 통하여 물속으로 들어가면, 시간이 지남에 따라 물에 의한 대류 열전달을 통해서 유리의 온도가 내려가게 된다. 이 때의 대류 열전달계수는 유리 시편의 크기와 유리 시편의 자유낙하속도 등을 이용하여, 물속에서의 강제 대류 과정으로 모사하여 결정한다.

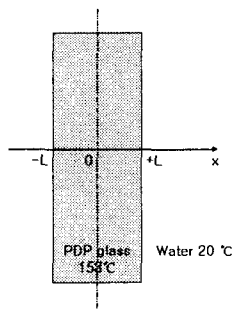


Fig. 3 Schematic of an analysis model for heat transfer during thermal shock

4.2 대류 열전달계수의 결정

대류 열전달계수를 결정하기 위해서, 유리판이 물 속으로 낙하할 때에 발생하는 유동 특성을 파악해야 한다. 우선 레이놀즈 수 (Reynolds number) 는 다음과 같이 정의된다.⁸

$$Re_y = \frac{\rho V y}{\mu} \quad (6)$$

여기서 ρ 는 밀도, V 는 유리판이 물속으로 떨어지는 속도, y 는 중력방향으로의 변위, μ 는 물의 동적 점성 (dynamic viscosity)이다. 유리판이 낙하하는 거리가 0.58 m 일 때 (열충격 실험 조건인), 유리판이 물에 닿는 순간의 속도는 3.4 m/sec 이다. 20 °C에서 물의 점성은 참고문헌⁸ 으로부터 구할 수 있고, ($\mu/\rho = 1.022 \times 10^{-6} m^2/sec$) 유리판의 한 모서리의 길이는 0.13 m 이므로, 최대 레이놀즈 수는 432,500 이다. 임계 레이놀즈 수가 50,000 에서 100,000 의 범위에 있다고 볼 때, 현재의 상황은 유리판의 일부는 층류 (laminar flow)가 또 다른 일부는 난류 (turbulent flow)가 생기는 상황으로 볼 수 있다. 여기서는 20 °C의 물을 기준으로 물성치를 계산하였지만, 물과 유리판의 온도 평균값을 이용하여 물의 물성을 취하여도 큰 차이는 없다.

이제 물의 열전달계수를 결정하는 예로서, 국내산 PDP 유리의 임계 온도 조건에 해당하는 물의 대류 열전달계수를 결정하는 과정을 기술한다. 앞서 제시한 바와 같이 국내산 PDP 유리의 임계 온도 차이는 133 °C (유리판 온도 153 °C, 물 온도 20 °C)이다. 유리가 낙하하여 물속에 들어가는 과정을 외부 강제 대류 (external forced convection)로 모델링하고, Nusselt 수를 결정하기 위하여, 다음과 같은 식을 적용한다.⁸

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{hY}}{k} = 0.664 Re_y^{1/2} Pr^{1/3} \quad (7)$$

여기서 \overline{Nu} 는 유리판 위에서 y 방향(중력방향)으로의 Nusselt 수의 평균값이고, \overline{h} 는 유리판 위에서 열전달계수의 평균값이다. 이식은 레이놀즈 수가 1,000-500,000 인 경우에 유효한 식이므로 본 상황에 적용이 가능하다. 20 °C 물의 Prandtl 수는 7.14 이므로, $\overline{Nu} = 841$ 이고, 20 °C 물의 열전도계

수 0.5976 W/mK 를 대입하면, $\bar{h} = 3866W/m^2K$ 를 얻을 수 있다.

4.3 열충격시의 열전달 해석

열전달 해석을 위하여, 위의 식 (4)를 무차원화 하고, 유리판의 두께 방향만의 변화만 고려하면, 다음과 같은 1 차원 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \zeta} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} \quad (8)$$

여기서 $\theta = (T - T_w)/(T_o - T_w)$, $\eta = x/L$, $\zeta = \alpha t/L^2$, T_w 는 물의 온도, T_o 는 유리판의 초기 온도, $\alpha = k/(\rho C_p)$, L 은 유리판 두께의 절반을 나타낸다. 초기 조건으로 유리판의 온도가 균일하게 T_o 인 상태를 설정하였다. 경계 조건으로는 유리판의 중심부 ($x=0$)에서 온도 구배가 0 이라는 조건과 유리판의 표면 ($x=\pm L$)에서의 열전달량은 물에서의 열대류량과 같다는 조건을 사용하였다. 초기 조건과 경계 조건은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \theta &= 1, \text{ at } \zeta = 0, \\ \frac{\partial \theta}{\partial \eta} &= 0, \text{ at } \eta = 0, \\ -\frac{\partial \theta}{\partial \eta} &= Bi\theta, \text{ at } \eta = \pm 1, \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $Bi = hL/k$ 이고, h 는 대류시의 열전달 계수이다. 식 (8)와 같은 1 차원 Fourier 방정식의 해는 다음과 같은 형태로 주어진다.

$$\begin{aligned} \theta(\zeta, \eta) &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\lambda_n^2 \zeta) \cos(\lambda_n \eta) \quad (10) \\ A_n &= \frac{2 \sin \lambda_n}{(\lambda_n + \sin \lambda_n \cos \lambda_n)} \end{aligned}$$

여기서, λ_n 은 $\cot \lambda = \lambda / Bi$ 의 근이다. 얻어진 Fourier 방정식의 해를 이용하여, 153 ℃로 가열된 국내산 PDP 유리가 20 ℃의 물에 급냉될 때의 시간에 따른 온도 변화를 구하면 Fig. 4 와 같다. (국내산 PDP 유리의 임계 온도 차이에 해당함) 그래프의 x 좌표는 유리판의 두께 방향 좌표를 나타낸다. 같은 방법으로 일본산 PDP 유리에 대해서도

유사한 그래프를 얻을 수 있다.

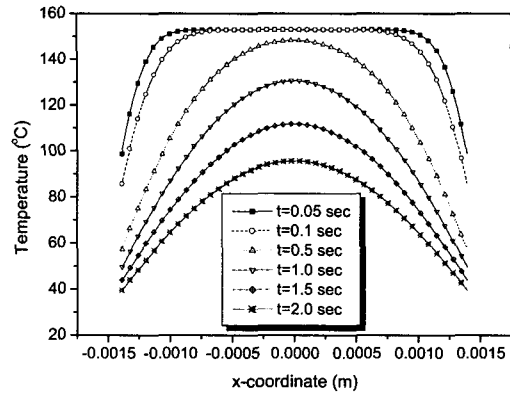


Fig. 4 Temperature distribution of glass during thermal shock (domestic PDP glass, $\Delta T = 133$ ℃)

4.4 열응력 해석 및 열충격 강도 도출

열응력 해석을 위하여는 식 (5)의 해를 구해야 한다. 유리판은, 두께 방향으로 유한하지만 평면 방향으로 무한하다고 가정하여 1 차원 문제로 단순화하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$(1-\nu) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = (1+\nu) \alpha_{exp} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (11)$$

이제 두께 방향으로 평면 응력 (plane stress) 상태를 가정하고, Duhamel-Neumann 법칙을 이용하면 유리판에 발생하는 응력은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = -\frac{E}{1-\nu} \alpha_{exp} (T - T_{ref}) \quad (12)$$

여기서 T_{ref} 는 두께방향으로의 힘 평형 조건으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$T_{ref} = \int_{x=-L}^{x=L} T dx / (2L) \quad (13)$$

국내산 PDP 유리의 임계 열충격 조건에서 발생하는 시간에 따른 열응력 변화는 Fig. 5 와 같이 얻을 수 있고, 나타난 최대응력으로부터 유리의 재료 물성치인 열충격 강도를 결정한다. 국내산 PDP 유리의 열충격 강도는 29.0 MPa 이고, 일본산 PDP 유리는 24.6 MPa 임을 얻을 수 있다.

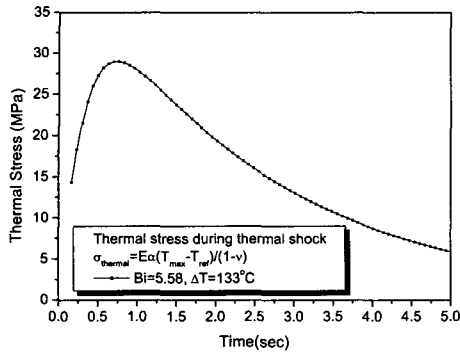


Fig. 5 History of thermal stress during thermal shock (domestic PDP glass)

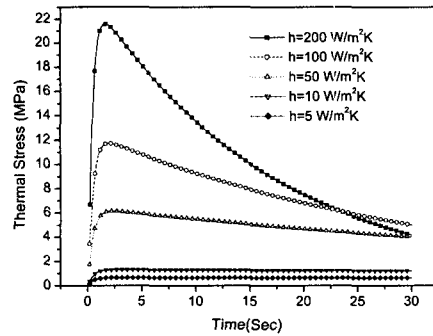


Fig. 6 Effect of heat transfer coefficient on the history of thermal stress (domestic PDP glass)

5. PDP 공정시의 열충격 예측 및 파손 방지

5.1 PDP 제조 공정시의 열충격 예측

PDP 제조 공정 시에 발생하는 열충격은 여러 가지 종류가 있다. 소성 또는 배기/봉착 공정 중에 고온으로 가열된 유리판이 상온의 공기에 노출되면서 발생하는 열충격, 고온의 유리판을 이송/조작하는 과정 중에서 차가운 물체와 접촉함으로써 발생하는 열충격 등이 있다. 여기서는 소성 공정 중에 고온으로 가열된 60 인치 PDP 유리가 상온의 공기에 노출됨으로써 발생하는 열충격을 다룬다. 전도나 복사에 의한 열전달은 비교적 작다고 가정하고, 공기와와의 대류 열전달만을 고려한다.

공기의 대류 열전달계수는 물의 대류 열전달계수보다 매우 작으므로, 소성 공정 중에 발생하는 열충격은, 앞서 기술한 열충격실험에서 보다 작다. 공기의 대류 열전달계수는 유속, 온도, 습도, PDP 유리가 소성로에 장착된 형상 등에 따라 다양하게 변화할 수 있으며 보통 5 에서 200 W/m^2K 의 범위에 있다.

앞서 기술된 방법을 이용하여, 공기의 대류 열전달계수에 따라 발생된 열응력의 시간 변화를 해석하면 Fig. 6 과 같은 결과를 얻는다. 여기서, 소성 공정의 온도는 580°C로, 공기의 온도는 20°C로 (유리와 공기의 온도차이는 560°C) 가정하였고, 공기의 대류 열전달계수 범위 5 - 200 W/m^2K 에서 계산을 수행하였다. 계산된 열응력을 앞 절의 열충격 실험 및 해석에서 얻어진 열충격 강도와 비교함으로써 열충격 파손을 예측할 수 있다.

5.2 PDP 공정에서 열충격 파손 방지 설계

PDP 공정 중에 발생하는 열충격 파손은 5.1 절과 같이 열충격에 의한 열응력을 예측한 후(Fig. 6 참조)에, 4.4 절에서 얻어진 유리의 열충격 강도와 비교함으로써 평가할 수 있다. 유리와 같이 Weibull 분포를 가지는 재료의 파손 강도는 시편의 크기에 크게 의존한다. 열충격실험에서 사용된 유리 시편의 크기와 실제 공정에서 사용된 유리판의 크기 사이의 비율을 이용하여, 실제 공정에서의 파손 조건을 결정해야 한다.

앞서 얻어진 열충격 강도로부터, 크기 영향 (size effect)을 고려한 실제 PDP 유리의 열충격 강도를 계산하기 위하여 식 (2)를 이용한다. 계산에 필요한 Weibull 계수 m 은 유리의 경우 보통 5 에서 10 사이의 값을 가지며 다수의 파괴강도실험을 통해서 결정된다.^{2,5} 여기서는 일본산 및 국내산 유리에 대하여 동일하게 $m = 7.5$ 를 가정한다. 열충격시편의 면적은 130 mm x 130 mm 이고, 60 인치 PDP 유리의 면적은 1219 mm x 914 mm 이므로, 60 인치 국내산 PDP 유리의 강도는 16.6 MPa, 60 인치 일본산 PDP 유리의 강도는 14.1 MPa 이다.

이제 Fig. 7 을 이용하여 열충격 파손을 방지할 수 있는 소성 공정 조건을 선정할 수 있다. 실제 공정에서는 앞서 제시한 단순화된 열응력 해석 모델보다는 복잡한 현상이 일어나므로, 이에 대한 대비책으로 적절한 안전계수 (safety factor)를 도입한다. 여기서는 공정 조건 선정의 예를 보이기 위하여 유리판의 안전계수를 2 로 가정한다. 이제, 유리판에 발생하는 최대 열응력을 유리의 강도로 나눈 비가 1/2 보다 작아지도록 공정을 설계해야

한다. 즉, Fig. 7 에서 볼 수 있듯이, 국내산 PDP 유리의 경우에는 $69 W/m^2K$, 일본산 PDP 유리는 $58 W/m^2K$ 보다 작은 열전달계수가 나타나도록 공기의 유속이나 유리판을 소성로에 장착하는 방식을 설계하여야 한다. 열전달계수가 너무 작은 경우에는, 유리판의 냉각속도가 느려져서, PDP 제조 시간이 길어지고, 생산 단가가 높아지게 된다. 열충격 파손이 일어나지 않는 범위 내에서 가능한 큰 열전달계수가 생기도록, 공정 및 공정 장비를 설계하는 것이 유리하다.

제시된 열충격 파손 방지 설계 방법을 검증하고, 소성, 배기/봉착 등과 같은 고온공정의 설계에 이용하기 위해서는 PDP 제조 현장에서 발견되는 열충격 파손 사례에 대한 정확한 분석과 이에 근거한 적절한 안전계수의 선정, 크기 영향의 평가 등과 같은 작업이 필요하다. PDP 제조 현장에서 발생하는 열충격 파손 사례는 제조 업체 내에서 기밀 사항으로 분류되어 외부로 공개되지 않는 부분이다. PDP 제조 업체에서는 본 연구에서 제시된 해석 및 설계 방법에 따라 자체적으로 수집한 열충격 파손 사례를 분석하고, PDP 제조 공정 개선에 이용할 수 있을 것이다.

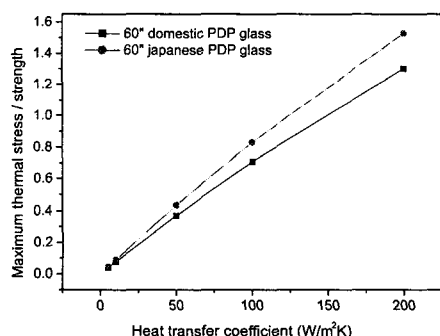


Fig. 7 Effect of heat transfer coefficient on the ratio of maximum thermal stress to strength

6. 결론

PDP 제조 공정 중에는 소성, 배기, 봉착과 같은 고온 공정이 포함된다. 이러한 고온 공정 거친 유리판은 적절한 속도로 냉각되어야 한다. 너무 빠른 속도로 냉각되는 경우에는 열충격에 의한 열응력으로 유리판이 파손되는 문제가 발생하고, 너무 느린 속도로 냉각되는 경우에는 PDP 제조 시

간이 길어져서 제조단가를 상승시키는 요인이 된다. 본 연구에서는 고온으로 가열된 유리판이 냉각될 때에 발생하는 열충격을 평가하기 위하여, 열충격시험을 통한 유리판의 열충격저항성 측정, 열충격에 의해 발생한 열응력 해석, 그리고, 이에 근거한 열충격을 고려한 PDP 제조 공정의 설계 방법을 제시하였다. PDP 공정 해석의 예로서 PDP 유리의 소성 공정에 대하여 열응력 해석을 수행하여, 공기의 대류 열전달계수 변화에 따른 열응력의 시간 변화를 얻었다. 이 결과를 토대로, 유리판이 파손되지 않는 범위 내에서 최대 냉각 속도를 얻을 수 있는 조건을 선정하는 방법을 제시하였다.

후 기

본 연구는 산업기술연구회의 PDP 핵심 기반기술 개발사업의 지원을 통하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. 2000 신기술동향조사 보고서, 플라즈마 디스플레이 패널, 특허청, 2000.
2. PDP 핵심 기반기술 개발사업, 산업기술연구회, 2003.
3. Smet, J. de and Bach, P. W., "Weakest-link failure predictions for ceramics III: Uniaxial and biaxial bend tests on alumina," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 10, pp. 101-107, 1992.
4. Smetana, W. and Reicher, R., "Preventing failure of soda lime cover glasses by design optimization," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 7, pp. 87-99, 2000.
5. Peitl, O. and Zanotto, E. D., "Thermal shock properties of chemically toughened borosilicate glass," *Journal of Non-Crystalline Solids* Vol. 247, pp. 39-49, 1999.
6. Boccaccini, A. R., "Predicting the thermal shock resistance of fiber reinforced brittle matrix composites," *Scripta Materialia* Vol. 38, pp. 1211-1217, 1998.
7. Lau, J. H., *Thermal stress and strain in microelectronics packaging*, Van Nostrand Reinhold, 1993.
8. Mills, A. F., *Heat transfer*, Richard D. IRWIN, INC, 1992.