

# 적외선 가열로에서 가열되는 유리 패널의 온도분포 해석

이공훈<sup>†</sup> · 김옥중\* · 하수석\* · 강새별\*\* · 이준식\*\*\*

## Analysis of Temperature Distribution of the Glass Panel in the Infrared Heating Chamber

Ko ng Hoon Lee, Oo k Joo ng K im, Su seok H a, Sae By ul Kan g and Joon Sik L e e

**Key Words:** Infrared radiant heating (적외선 복사가열), Glass panel (유리 패널), Reflectivity (반사율), View factor (형상계수)

### Abstract

Analysis has been carried out to investigate the temperature variation and the uniformity of the temperature distribution of the glass panel by infrared radiant heating. Halogen lamps are used to heat the panel and located near the top and bottom of the rectangular chamber. The thermal energy is transferred only by radiation and the radiation exchange occurs only on the solid surfaces and is considered by using the view factor. The results show that the uniformity of the temperature distribution of the panel is improved but the time for heating increases as the wall reflectivity is large. The temperature difference reaches a maximum in the early stage of the heating process and then decreases until it reaches the uniform steady-state value.

### 기호설명

$A_i$	표면적 ( $m^2$ )
$A$	표면적의 행렬
$c_p$	유리의 비열 ( $J/kgK$ )
$E_i$	표면에서 방사되는 복사열유속 ( $W/m^2$ )
$F_{ij}$	형상계수 (view factor)
$F$	형상계수의 행렬
$G_i$	복사의 입사 (irradiation, $W/m^2$ )
$I$	단위 행렬

$J_i$	복사의 출사 (radiosity, $W/m^2$ )
$J$	출사의 행렬
$q_i$	열전달률 (heat transfer rate, W)
$q$	열전달률 벡터
$T$	온도 (temperature, $^{\circ}C$ 또는 K)
$T$	온도 벡터
$V$	부피 ( $m^3$ )
$\epsilon$	벽방사율
$\rho$	유리의 밀도 ( $kg/m^3$ )
$\rho_i$	벽반사율

### 1. 서 론

LCD (Liquid Crystal Display) 또는 PDP (Plasma Display Panel)와 같은 평판 디스플레이 장치 (FPD, Flat Panel Display)의 제조 공정에서 유리 패널은 화질 및 수명 향상을 위한 코팅 또는 표면 처리, 전극과 격벽 형성 등을 위하여 건조, 소

<sup>†</sup> 한국기계연구원 열유체공정기술연구부

E-mail : konghoon@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7291 FAX : (042)868-7335

\* 한국기계연구원 열유체공정기술연구부

\*\* 현대자동차 남양연구소

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

성 등 여러 단계의 열처리 과정을 거치게 된다. 평판 디스플레이 장치는 CRT (Cathode Ray Tube) 보다 표시 성능이 떨어지고 가격이 높다는 단점이 있으나 얇은 두께, 상대적으로 가벼운 무게, 낮은 소비전력의 장점이 있으며, LCD와 PDP는 성능면에서도 CRT와 거의 동등한 수준을 실현하고 있어 CRT를 대체할 단계에 이르러 있다.<sup>(1)</sup>

PDP 제조 공정에서는 LCD에 비하여 상대적으로 고온인 소성, 배기, 봉착 등의 열처리 공정이 필요하고 따라서 열처리와 관련된 공정 개선의 요구가 더 크다. 현재 제품 생산에 적용되고 있는 대류 열전달을 이용한 열처리는 안정적이거나 소요되는 공정시간이 길어서 생산성 향상을 위해서는 열처리에 필요한 공정시간을 줄이는 것이 중요한 과제가 되고 있다.<sup>(2)</sup>

열처리 시간을 줄이기 위한 방법으로 반도체 웨이퍼 제조 공정의 RTP (Rapid Thermal Processing)와 같이 적외선 복사 가열을 이용하여 유리 패널을 가열하는 공정에 관한 연구가 진행되어 오고 있다.<sup>(2-4)</sup> PDP 제조 공정에서 유리의 급속 가열과 관련하여 해결해야 할 가장 시급한 문제는 온도 편차에 따른 불균일한 온도 분포에 기인하여 형성되는 불균일한 열응력으로 인한 유리의 파손으로 유리 패널을 균일하게 가열하는 것이 해결책이라 할 수 있다. 이외에 균일 가열은 PDP 배기/봉착 공정에서 패널의 격벽 등에 내포되어 있는 불순가스의 방출 및 봉착 성능 향상을 위해서도 필요하다.

유리와 같이 복사에 반투명<sup>(5)</sup>(semitransparent)한 물체를 복사 열원으로 가열할 때에는 불투명(opaque)한 물체를 가열할 때와는 다른 열전달 현상이 발생한다. 즉, 열원으로부터 유리에 입사하는 복사에너지의 일부는 표면에서 흡수 및 반사되고, 다른 일부는 유리 내부에서 흡수되며 나머지는 유리를 투과한다.<sup>(5-7)</sup> 일례로 Soda-lime 유리는  $5 \mu\text{m}$  이하의 파장에서는 복사에 대하여 반투명하고 그 이상의 파장에서는 불투명한 특성을 가진다.<sup>(8)</sup> 따라서 복사열원의 파장별 방사 특성에 따라 유리의 가열 특성이 달라진다. 본 연구에서는 시스템의 크기에 비하여 유리의 두께가 얇고 유리 패널에 설치되는 격벽 등으로 패널의 중간면에서는 복사에너지가 차단되는 것을 감안하여 유리 패널을 불투명한 매질로 가정하였다.

본 연구는 한국기계연구원에서 개발 중인

PDP 진공 봉착로에서 PDP의 봉착, 배기를 위한 가열 및 온도 측정 방법을 개발하기 위한 연구의 계속으로<sup>(3,4)</sup> 적외선 복사 가열을 이용한 유리 패널의 가열 특성과 시간에 따른 온도분포의 변화를 파악하기 위한 것이다. 본 연구에서는 모델로 벽면의 반사율을 파라미터로 해석을 수행하여 반사율의 변화가 온도분포에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

## 2. 해석 방법

### 2.1 모델로의 구성

모델로는 Fig. 1과 같은 형태로 벽두께 20 mm, 크기  $340 \text{ mm} \times 340 \text{ mm} \times 340 \text{ mm}$ 이고, 유리 패널은 로의 중앙에 설치되어 있다. 유리 패널은 크기  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ , 두께 2.8 mm의 평판유리 두장으로 구성된다.

유리의 가열을 위하여 로의 상단과 하단에 유효 가열 길이가 300 mm인 할로젠 램프(halogen lamp)가 균일 간격으로 각각 6개씩 대칭으로 설치되어 있는데 램프 중심이 벽으로부터 40mm 거리에 떨어져 있다.

### 2.2 복사열전달 해석

본 연구에서 고려한 모델로의 해석에서는 진공 봉착로를 가정하여 램프, 로 벽, 유리 패널 사이의 열전달은 복사에 의해서만 이루어지는 것으로 가정하였다. 해석을 위하여 모든 벽면을 확산반사면(diffuse surface)로 가정하고, 모든 벽면의 분

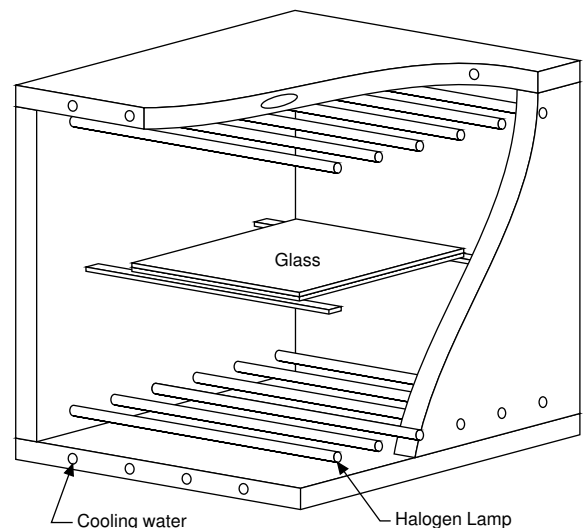


Fig. 1 Schematic of the model furnace

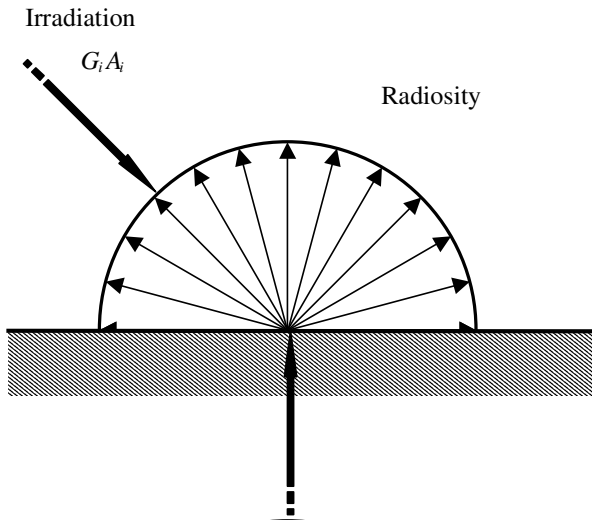


Fig. 2 Energy balance on the solid surface

광 흡수율과 방사율 등이 표면 조도와 방사의 파장에 무관한 회표면 (gray surface)으로 가정하였다. 이러한 확산 회표면의 가정 하에서는 형상계수, 출사 및 조사를 사용하여 복사열전달을 계산할 수 있다. 형상계수  $F_{ij}$  는  $i$  면에서 방사되는 복사에너지 중  $j$  면에 의하여 차단되는 비율로 정의되며 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.<sup>(6)</sup>

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (1)$$

식 (1)은 표면의 복사강도가 확산적으로 방사하고 입사하는 복사강도에 대하여 확산적으로 반사하며 또한 표면에서 균일하게 출사되는 면에 대해서 사용할 수 있다. 이러한 형상계수를 바탕으로 하여 표면에서의 출사 (radiosity,  $J_i$ )와 입사 (irradiation,  $G_i$ )를 정의할 수 있다. Fig. 2를 참고하여 각 표면에서 에너지 균형을 사용하여 식을 정리하면 다음과 같다.<sup>(6)</sup>

$$q_i + G_i A_i - J_i A_i = 0 \quad (2)$$

$i$  면에서의 출사는 방사되는 복사에너지와  $i$  면으로의 입사 중 반사되는 값의 합이 되며 다음과 같이 표현된다.

$$J_i A_i = E_i A_i + \rho_i G_i A_i \quad (3)$$

또한  $i$  면에 들어오는 입사는 다른 면에서의 출사에 형상계수 즉,  $i$  면으로 향하는 비율을 곱한 값들의 합이 된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$G_i A_i = \sum_{j=1}^N F_{ji} J_j A_j = A_i \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j \quad (4)$$

계산의 편리함을 위하여 위의 식들을 모두 벡터 형식으로 정리하면 아래와 같은 벡터식으로 표현되고 계산을 수행할 때 모든 변수를 벡터 및 행렬로 정의하였다.<sup>(9)</sup>

$$\mathbf{q}_{\text{rad}} = \text{diag}(\mathbf{A})\mathbf{J} - \text{diag}(\mathbf{A})\mathbf{G} \quad (5)$$

$$\text{diag}(\mathbf{A})\mathbf{J} = \text{diag}(\mathbf{A})\mathbf{E} - \mathbf{F}\text{diag}(\mathbf{A})\mathbf{J} \quad (6)$$

$$\text{diag}(\mathbf{A})\mathbf{G} = \mathbf{F}\text{diag}(\mathbf{A})\mathbf{J} \quad (7)$$

위의 식들을 정리하여 열전달을  $\mathbf{q}$ 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\mathbf{q}_{\text{rad}} = (\mathbf{I} - \mathbf{F})[\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \text{diag}(\epsilon))\mathbf{F}]^{-1} \text{diag}(\mathbf{A}\epsilon)\sigma\mathbf{T}^4 \quad (8)$$

이 식을 이용하면 각 면 사이의 형상계수와 온도, 그리고 방사율을 이용하여 참여 매체가 없을 때 확산 회표면에 대한 복사열유속을 손쉽게 구할 수 있다.

유리 패널의 전도 열전달을 고려한 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\rho c_p V \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{q}_{\text{cond}} - \mathbf{q}_{\text{rad}}) \quad (9)$$

이 식을 유한체적법 (Finite volume method)을 이용하여 이산화하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{T}^n = \mathbf{T}^{n-1} + \text{diag}(\mathbf{C})[\mathbf{K}\mathbf{T}^{n-1} - \mathbf{B}(\mathbf{T}^{n-1})^4] \quad (10)$$

여기에서  $\mathbf{C}$ 는 시간간격 ( $\Delta t$ ), 밀도, 비열, 계산을 위한 검사체적으로 이루어진 대각행렬이고,  $\mathbf{K}$ 는 열전도율과 전도열전달이 일어나는 방향에 대한 단면적, 격자 사이의 거리로 이루어진 행렬이다.  $\mathbf{B}$ 는 식 (8)을 간단히 표현한  $\mathbf{q}_{\text{rad}} = \mathbf{B}\mathbf{T}^4$ 로부터 얻을 수 있다.

$$\mathbf{B} = (\mathbf{I} - \mathbf{F})[\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \text{diag}(\epsilon))\mathbf{F}]^{-1} \text{diag}(\mathbf{A}\epsilon)\sigma \quad (9)$$

### 2.3 해석방법

모델에 사용된 유리는 200mm × 200mm 크기의 규산소다유리 (Soda-lime glass)로 이 유리에 대하여 열 및 복사 물성치들이 온도 변화에 대하여 일정하다고 가정하여 상온의 값을 기준으로 사용하였다. 그리하여 해석에는 밀도 2500 kg/m<sup>3</sup>, 열전도율 1.4 W/mK, 표면 방사율 0.9의 일정한 값들을 사용하였다.<sup>(8,10)</sup> 비열은 온도에 대한 변화가

상대적으로 커서 200°C를 기준으로하여 1035 J/kgK를 사용하였다.<sup>(11)</sup>

형상계수의 간편한 계산을 위하여 할로겐램프는 Fig. 1과 같은 원통형이 아닌 가는 띠 형태로 가정하였다. 이러한 가정 하에 평행한 두 평면 사이, 두 수직면 사이의 형상계수를 구하는 해석적 방법<sup>(12)</sup>을 사용하여 형상계수를 구하였다.

계산을 위하여 유리를 40 × 40의 격자로 나누고 각각의 격자 셀에 대하여 할로겐 램프와 벽면에 대한 형상계수를 구하고 시간에 대하여 5초 간격으로 계산을 수행하였다.

### 3. 결과 및 토의

Fig. 3은 벽 반사율에 따른 패널 중심점의 시간에 따른 온도변화를 나타낸다. 적외선 온도계를 이용하여 측정된 결과<sup>(13)</sup>를 함께 비교하여 나타내었는데 실험과 해석의 조건을 정확하게 일치시키는 것은 어렵지만 벽 반사율이 높은 경우와 낮은 경우의 측정값은 각각 벽 반사율이 0.88과 0.8인 경우와 근사적으로 일치하는 것을 볼 수 있다. 그리고 모델로의 벽 반사율이 높은 경우에는 정상상태의 온도까지 유리 패널이 가열되는 시간이 상대적으로 길어진다는 것을 알 수 있다. 반대로 벽 반사율이 낮은 경우에는 온도가 빠르게 상승하고 따라서 정상상태의 온도에 이르는 시간이 짧아진다.

Fig. 4는 패널 가장자리의 모서리 온도를 나타낸 것인데, Fig. 7에서 볼 수 있듯이 중심점의 온도가 패널의 최대 온도이고 가장자리 모서리의

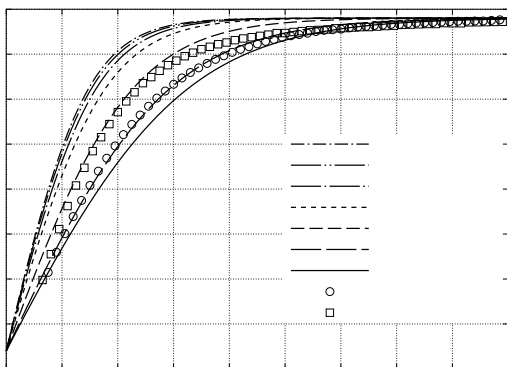


Fig. 3 Temperature variation at the center of the panel with the wall reflectivity

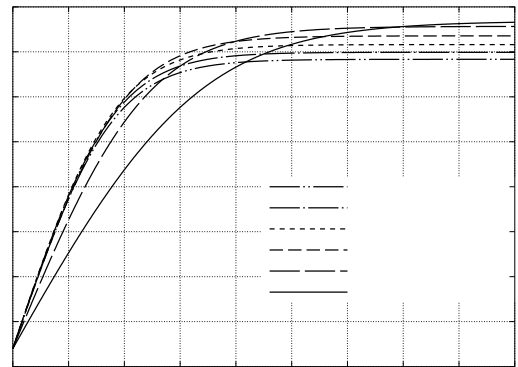


Fig. 4 Temperature variation at the corner of the panel with the wall reflectivity

온도는 최소가 되므로 Fig. 4는 유리 패널의 최소 온도의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 벽 반사율이 높은 경우에는 정상상태의 온도에 이르는 시간이 길어지나 더 높은 온도까지 모서리가 가열되어 중심점의 최대 온도와의 차이가 작다. 벽 반사율이 증가하면 정상상태에 빠른 시간 내에 도달하지만 정상상태의 온도가 감소하여 중심점 온도와의 차이 또한 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 모델로의 벽 반사율이 0.88일 때 중심점에 대한 온도차를 적외선 온도계로 측정된 결과<sup>(13)</sup>와 비교한 것이다. 중심점과의 온도차는 유리 패널의 온도분포의 균일성을 판단하는 척도가 되므로 본 연구에서 중요한 파라미터이다. 측정값의 측정오차를 고려할 때 측정값의 온도차가 해석결과의 범위 내에 있으므로 비교적 잘 일치한다고 볼 수 있다. 그리고 적외선 온도계를 이용한 측정은 모델로 하단 벽에 설치된 가시창을

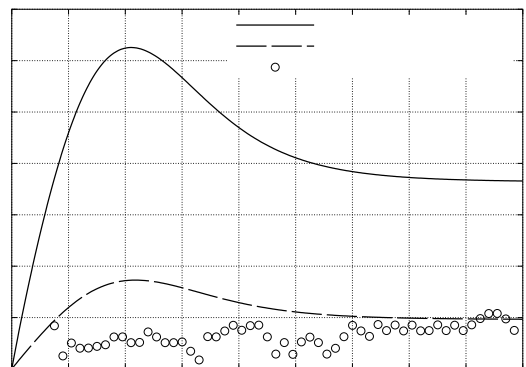
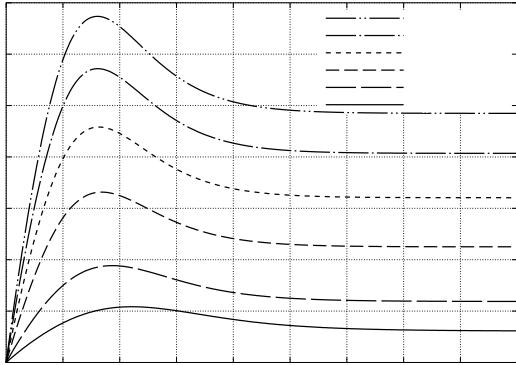


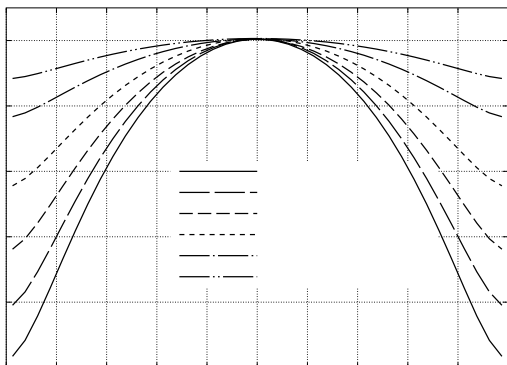
Fig. 5 Temperature difference for a high reflectivity



**Fig. 6** Variation of the maximum temperature difference occurred in the panel

통하여 이루어지고, 실험에 사용한 모델로의 가시창의 위치가 유리패널의 중심점과 모서리에서 (5cm, 5cm)의 위치에 설치되어 있어서 그 위치의 온도차를 비교하였다. 가장자리 모서리의 온도는 측정 위치의 온도보다 낮기 때문에 중심점과의 온도차도 더 크게 나타난다. 그리고 시간에 따른 온도차의 변화는 가열 초기에 420 초까지 빠르게 증가한 후 서서히 감소하며 정상상태에 이르렀을 거의 변화가 없다. Fig. 5의 경우에는 유리 패널에 발생하는 최대 온도차는 420 초에서 12.5°C이고 정상상태에서 약 7.3°C를 유지한다.

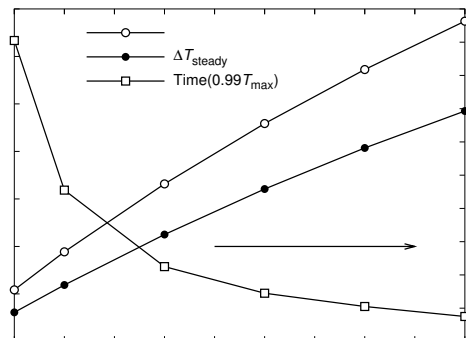
Fig. 6은 서로 다른 벽 반사율에 대하여 유리 패널 내에 발생하는 최대 온도차의 시간에 따른 변화를 나타낸다. Fig. 5에서 설명한 바와 같이 초기에 온도차의 최대값이 나타나고 그 후에 감소하여 일정한 값으로 유지된다. 반사율의 감소



**Fig. 7** Temperature distribution along the diagonal of the panel at the steady state

에 따라서 온도차의 최대값의 크기가 증가하고 초기에 최대값에 이르는 시간이 짧아지는 것을 볼 수 있다. 벽 반사율이 0.0인 경우에 320 초가 경과하였을 때 온도차의 최대값이 발생하고 크기는 67.4°C이다. Fig. 7은 정상상태의 한 시점 (2400초)에서 유리 패널의 대각선 방향으로의 온도 분포를 벽 반사율의 변화에 따라 도시한 것이다. 이 그림에서 모서리와 중심점 사이의 온도차가 가장 크고 벽 반사율이 감소하면 그 온도차가 증가하는 것을 분명하게 볼 수 있다.

Fig. 8은 모델로에 대한 해석 결과를 요약하여 나타낸 것으로 모델로의 벽 반사율에 따른 유리 패널의 온도차와 가열시간을 도시한 것이다. Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 가열 초기에 발생하는 패널의 최대 온도차 ( $\Delta T_{max}$ )와 정상상태의 온도차 ( $\Delta T_{steady}$ )는 벽 반사율이 클 때 큰 값을 가지고, 벽 반사율이 감소함에 따라 온도차가 증가하는 것을 다시 한번 확인할 수 있다. 벽 반사율이 큰 경우에는 램프에서 방사되는 복사에너지를 벽에서 반사시키고, 램프에서 직접 유리 패널에 이르는 복사에너지와 함께 반사된 복사에너지가 유리 패널의 가열에 사용되고 특히 반사된 에너지는 유리 패널의 온도분포의 균일성을 향상시키는데 기여한다. 반사율이 낮으면 이는 벽면의 방사율 또는 흡수율이 크다는 것을 의미하므로 램프에서 방사되어 벽면에 이르는 복사에너지를 반사하기보다는 벽에서 흡수하는 양이 증가하게 되고 따라서 벽면을 통한 열손실이 증가한다. 그러므로 유리 패널을 같은 온도로 가열하기 위해서는 벽 반사율이 낮을 때 벽면을 통한



**Fig. 8** Temperature difference and heating time with the wall reflectivity

에너지의 손실분을 보충하기 위하여 더 많은 전기에너지를 램프에 투입하여야 하므로 전기에너지의 소비량이 증가한다. 이 경우에 램프에서 방사되는 복사에너지의 단위면적당 크기가 반사율이 높은 경우보다 더 크기 때문에 특히 복사형상계수가 큰 유리 패널 중심부의 온도가 급속하게 상승하게 되고, 패널의 가장자리에는 복사형상계수가 작고 벽면 반사율이 낮아서 충분한 에너지가 전달되지 못하므로 중심부와 온도차가 커지게 된다. 결국 유리 패널의 급속 가열을 위해서는 벽 반사율을 낮춰야 하는데 이를 위해서는 온도 분포의 균일성을 어느 정도 희생하고 또한 많은 전기에너지를 투입하여야 한다.

#### 4. 결 론

적외선 복사 가열을 이용한 유리 패널의 가열 특성과 시간에 따른 온도분포의 변화를 파악하기 위한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 벽 반사율이 증가하면 유리 패널의 온도 분포의 균일성은 향상되나 정상상태에 이르는 시간이 길어진다.

- 패널에 발생하는 최대 온도차는 가열 초기에 발생하고 이후에는 감소하여 일정한 값에 이르게 된다.

- 반사율이 낮은 경우에는 벽면을 통한 열손실이 증가하므로 패널을 같은 온도로 가열하기 위해서는 더 많은 에너지를 투입하여야 한다.

#### 후 기

본 연구는 산업기술연구회 지원으로 수행된 “PDP 양산기술 개발 사업” 과제의 일부임을 밝히며 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) *FPD Technology Outlook*, 2001, Electric Journal, Tokyo.
- (2) 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, pp. 2303-2314.

- (3) Kim, O. J., Lee, K. H., Hong, Y.-J., and Park, Y.-S., 2002, “Analysis of Infrared Heating System for Glass Panel Using RADCAD™,” *Proceedings of the KAMES 2002 Joint Symposium B*, pp. 1441-1446.
- (4) Kim, O. J., Hong, Y. J., and Park, Y. S., 2001, “Analysis of Heating System for PDP Panel Using RADCAD™,” *Proceedings of the KSME 2001 Spring Annual Conference*, pp. 453-458.
- (5) Viskanta, R. and Anderson, E. E., 1975, "Heat Transfer in Semitransparent Solids," *Advances in Heat Transfer*, Academic Press, New York, Vol. 11, pp. 318-441.
- (6) Modest, M. F., 1993, *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York.
- (7) Lee, K. H. and Viskanta, R., 1999, "Transient Conductive-Radiative Cooling of an Optical Quality Glass Disk," *International Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 2083-2096.
- (8) Rubin, M., 1985, "Optical Properties of Soda Lime Glasses," *Solar Energy Materials*, Vol. 12, pp. 275-288.
- (9) Kang, S. B., 2003, "Development of an Effective Radiative Transfer Model for Specular Surfaces and Its Applications to Optimization of Rapid Thermal Processing," Ph. D. thesis, Seoul National University.
- (10) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th ed., John Wiley & Sons, New York.
- (11) Sharp, D. E. and Ginter, L. B., 1951, "Effect of Composition and Temperature on the Specific Heat of Glass," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 34, pp. 260-271.
- (12) Howell, J. R., 1982, *A Catalog of Radiation Configuration Factors*, McGraw-Hill, New York.
- (13) Lee, K. H., Ha, S. and Kim, O. J., 2003, "Temperature Distribution of a Glass Plate Heated in the Infrared Heating Furnace," *Proceedings of the SAREK 2003 Summer Annual Conference*, pp. 1321-1326.