

# 미소 챔버 내 복사열전달을 수반한 열유동 해석

이 형 식, 도 기 정, 이 상 호\*

프리즘(주) 기술연구소, 프리즘(주) 기술연구소, 원광대학교 기계자동차공학부\*

## Thermal analysis inside a small chamber including radiation

Hyung-Sik Lee, Gi-Jung Do, Sang-Ho Lee\*

### ABSTRACT:

In this study, numerical modeling was performed to analyze air flow including radiation heat transfer inside a small chamber. Characteristics of heat transfer between source plate and target through glass are investigated for various surface temperature of heat source plate with buoyancy effect due to gravity force. Conduction heat transfer through the glass is considered and heat source plate is assumed to be a black body. Target surface temperature is largely affected by the radiation heat transfer. It can also be seen that as the source temperature increases target surface is dominated by radiation rather than convective heat transfer by air.

**Key words:** Conjugate heat transfer(복합 열전달), Steady state(정상 상태), Radiation(복사), Small chamber(미소체적), Source(열원), Turbulent flow(난류 유동), Gravity(중력)

### 기 호 설 명

- $g$  : 중력가속도 [m/s<sup>2</sup>]
- $p$  : 압력 [Pa]
- $u_i$  : 속도 성분 [m/s]  $i=1,2,3$
- $h$  : 엔탈피 [J/kg]

- $\tau_{ij}$  : 점성 전단 응력 텐서 [N/m<sup>2</sup>]
- $\tau_{ij}^R$  : Reynolds 응력 텐서 [N/m<sup>2</sup>]

### 그리스 문자

- $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]
- $\kappa$  : 난류운동에너지 [J/kg]
- $\varepsilon$  : 소산율 [J/kg-s]

### 1. 서 론

유리에 대한 열가공은 각종 전자 소자의 생산 공정에서 결정 성장을 위하여 널리 이용되고 있으며 이를 구현하는 다수의 장치가 개발되어 연구 및 양산용으로 사용되고 있다. 일반적으로 기체가 유입되는 분위기에서 공정이 이루어지고 온도도 중요한 공정 파라미터이므로 워크피스 주변의 유동장 및 열전달 특성은 전자 부품의 품질 및 수율에 큰 영향을 미치게 된다. 특히 고온의 가공환경에서 복사에 의한 열전달특성 및 이에 따른 유체유동의 영향은 전체 시스템의 온도분포에 결정적인 역할을 하게 되며 유리를 통한 복사

†Corresponding author  
Tel.: +82-63-850-6683; fax: +82-63-850-6691  
E-mail address: lsheagle@wonkwang.ac.kr

열전달과 관련된 특성에 대한 분석이 필요하다.<sup>(1-5)</sup>

본 연구에서는 유리제조 설비의 열처리공에서 사용되는 미소챔버내 간단한 구성시스템에 대하여 먼저 복사열전달을 고려하지 않은 경우에 대하여 열유동해석을 수행하고 대상체 및 주변 공기에 대한 유동장 특성을 평가하였으며, 다양한 발열체 온도에 대하여 대류 및 복사열전달을 고려한 열유동해석을 수행하여 대상체의 온도 결과를 비교 평가하였다. 해석 모델은 기본적으로 구성품을 형성하는 각 부품의 열전도와 유체의 밀도차이에 기인하는 주위 공기의 대류열전달을 포함하는 정상상태 압축성 난류 외부 유동 해석으로 가정하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 해석 모델

Fig. 1은 고온으로 유지되는 열원(source), 유리(glass) 및 대상체(target)로 구성되는 3D 해석 모델을 나타낸다. 열원과 유리와의 거리는 마주보는 면과 면 기준으로 5 mm 이격되어 있으며, 유리와 대상체 사이의 거리는 10 mm로 설정되어 있다. Table 1에서는 해석에 사용된 각 구성품의 제원과 재질을 정리하여 나타낸다. 여기에서 열원과 대상체는 모두 stainless steel 재질이며 복사열전달과 관련하여 흑체(black body)로 가정하였다.

Table 1 Specification of componets used in the analysis

name	size (w*h*d, mm)	material
source	3 x 6 x 5	stainless steel
glass	2 x 30 x 20	glass
target	3 x 3 x 3	stainless steel

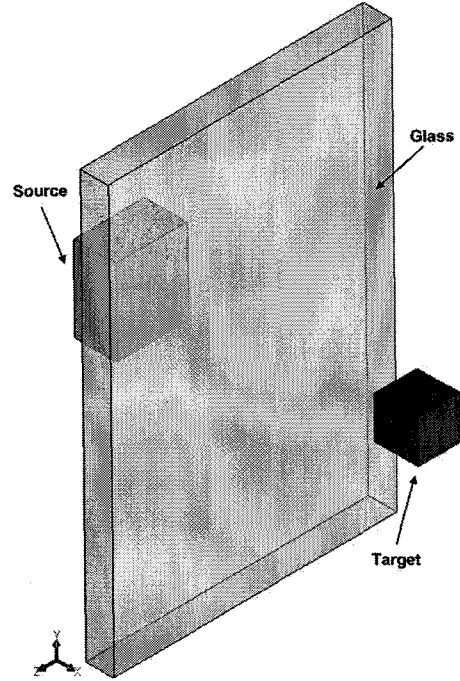


Fig. 1 3D geometry for the analysis

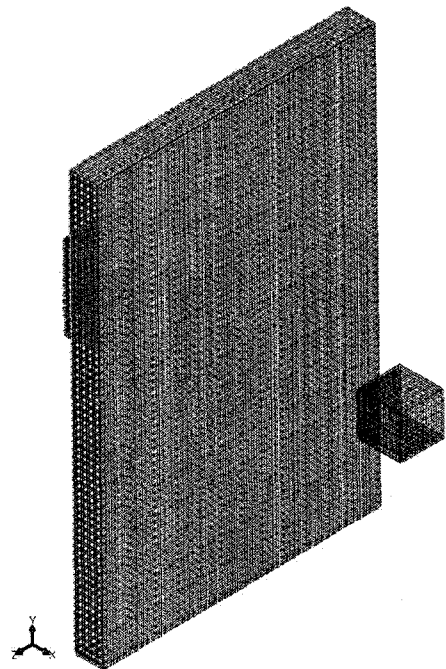


Fig. 2 Computational grids for solid components

Fig. 2는 해석에 사용된 계산격자 중에서 고체 영역에 대한 격자를 도시한 것이며, 전체적으로 유체 및 고체 부분에 약 240,000개의 격자가 사용되었다.

## 2.2 지배 방정식 및 경계 조건

기체 유동은 정상 상태의 난류 유동으로서 지배방정식은 다음의 식(1), (2) 및 (3)으로 표시되는 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지 방정식과 식(4)와 (5)로 기술되는 난류운동에너지 소산을 방정식 등으로 구성된다. 또한 난류 모델로서 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다.

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

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad i=1,2,3 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \rho \epsilon + S_i u_i + Q_H \quad (3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2}$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + S_\epsilon \quad (5)$$

경계 조건과 관련하여, 주변 온도 20°C의 환경 복사를 고려하였고 고체의 열전도, 중력을 고려한 유체의 대류열전달 및 열원 및 대상체 표면에 대해서는 흑체 조건<sup>(6)</sup>을 사용하였다. 또한 유리에 대해서는 열전도 및 유체와의 대류열전달을 고려

하되, 복사와 관련하여 투과율 1을 가정하였다. 해석의 종류는 발열체 체적원 온도가 각각 300, 500, 700, 900°C일 때 case 1~4로 구분하였고, 또한 현재 해석 모델에서 복사열전달의 고려 유무에 따른 차이점을 확인하기 위하여 발열체 온도 500°C의 경우에는 복사열전달을 고려하지 않은 열유동해석을 case 5로 설정하여 수행하고 그 결과를 case 2와 비교하였다.

Table 2는 발열체 및 대상체를 구성하는 stainless steel과 격벽 역할을 하는 glass의 25°C에서의 비열 및 열전도도를 나타내며, 실제 해석에서는 각각의 물성에 대하여 온도 의존 데이터를 사용하였다.

Table 2 Material properties of solids at 25°C

material	specific heat (J/kg°C)	thermal conductivity (W/m°C)
stainless steel	550	19.8
glass	670	1.05

## 2.3 수치 해석 기법

본 연구에서는 열유동 해석을 수행하기 위하여 상용 CFD 코드인 EFD.Lab<sup>(7)</sup>을 이용하였다. 이와 함께 방정식내 대류항의 계산을 위하여 상류차분 도식(upwind difference scheme)을 사용하였다. 수렴조건은 각 셀에 대한 운동량유수의 합 및 연속방정식의 유수의 합이 모두  $10^{-3}$  이하로 되도록 선정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 발열체의 온도가 500°C인 경우로서 복사열전달을 고려하지 않은 case 5에 대한 온도 분포를 나타낸다. 대상체의 평균 온도는 20.4°C로 계산되었으며, 인접한 유체의 정상 상태 온도와 거의 동일함을 알 수 있다.

Fig. 4부터 Fig. 7은 모두 복사열전달을 고려한 해석 결과로서 각각 case 1부터 case 4까지 온도 분포를 도시한다. Fig. 4는 발열체 온도가 300°C



Fig. 3 Air temperature distribution for 500°C source without thermal radiation (case 5)

인 case 1의 해석 결과로서 대상체 평균 온도는 약 21.7°C로 계산되었고 Fig. 3과 비교하여 약 1.3°C 더 높은 온도이다. 발열체의 온도가 200°C 더 높지만 복사열전달을 고려하지 않은 case 5의 결과와 비교할 때, 현재 해석 모델과 같이 고온 발

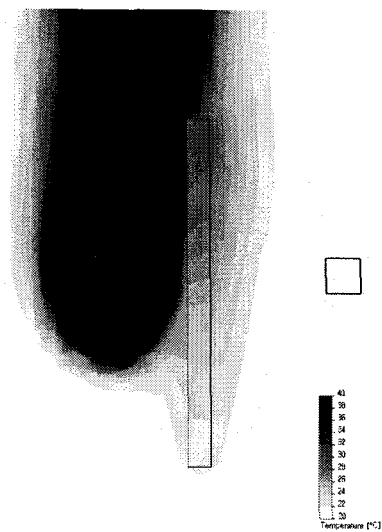


Fig. 4 Air temperature distribution for 300°C source with thermal radiation (case 1)



Fig. 5 Air temperature distribution for 500°C source with thermal radiation (case 2)

열체와 대상체의 거리가 근접한 경우 복사열전달에 대한 신중한 검토가 필요함을 알 수 있다. 또한 해석 모델에서 발열체의 온도가 상승할 수록 전체 열유동 현상에 있어서 복사열전달이 차지하는 비중은 더욱 커질 것이라는 사실을 예상할 수 있다.

Fig. 5는 500°C의 발열체에 대한 해석 결과로서 복사열전달을 포함한 경우의 온도 분포를 나타낸다. 대상체의 평균 온도는 약 25.1°C로 계산되었으며 이는 Fig. 3과 비교할 때 약 4.7°C 더 높은 값으로 복사열전달 현상이 확연히 발생하고 있다.

특히 발열체 및 그 주변 유체와 유리의 온도 분포는 case 2와 case 5의 경우에 상당히 유사한 반면, 대상체의 온도 분포는 상당한 차이가 발생하고 있다. Fig. 6은 발열체의 온도가 500°C인 case 2에 대한 해석 결과로서 해석 모델 주변의 속도 분포를 벡터로 도시한 것이다. -Y 방향의 중력을 고려할 때, 자연 대류에 의한 속도 분포가 확연하며, 최고 유속은 약 0.5 m/s로 발열체 상부에서 발생하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 case 3과 case 4에 대한 것으로 발열체의 온도가 700°C 및 900°C일 때의 온도 분포를 나타낸다. Fig. 7에서 대상체의 평균 온도는 약 31.7°C로 계산되었으며 발열체 온도가 500°C인 case 2 결과와 비교하여 약 6.6°C 더 높게 얻어졌다. 또한 Fig. 8에서 대상체의 평균 온도는 약 42.8°C

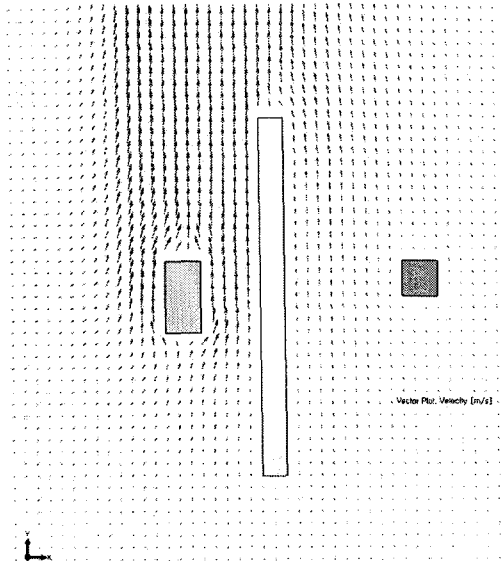


Fig. 6 Velocity distribution (case 2)

로 계산되었는데 이는 case 2 결과보다 약 17.7°C 더 높으며 복사 발열체의 선형적인 온도 증가에 대하여 대상체 평균 온도는 비례적으로 상승하지 않음을 알 수 있다. 중앙에 격벽 형태로 존재하는 유리는 실제적으로는 반투과성 매질이며 일반적인 조사(irradiation)에 대하여 반사, 흡수 및 투과되는 복잡한 프로세스가 발생한다. 본 해석 모델에서는 유리에 대하여 투과율 1을 가정



Fig. 7 Air temperature distribution for 700°C source with thermal radiation (case 3)



Fig. 8 Air temperature distribution for 900°C source with thermal radiation (case 4)

하였으며 인접하는 유체와의 대류 및 전도만을 고려하였다.

#### 4. 결론

대기 중에서 고온으로 유지되는 발열체 및 이에 인접한 대상체를 포함하는 모델에 대하여 열복사를 고려한 열유동해석을 수행하였으며, 발열체 온도 변화에 따른 대상체의 온도 변화를 수치해석적으로 계산하였다. 발열체와 대상체는 stainless steel 재질을 사용하였으며, 열복사와 관련하여 흑체로 가정하였다. 발열체 온도가 500°C 인 경우에는 복사를 고려하지 않은 해석 결과와 비교할 때 약 4.7°C의 온도 차이가 발생하였으며 이는 현재 해석 모델과 같이 고온 발열체와 대상체가 수 mm 거리로 인접한 경우, 열복사 프로세스를 무시할 수 없음을 확인하였다. 또한 300°C부터 900°C까지의 다양한 발열체 온도에 대하여 대상체 평균 온도를 계산한 결과 900°C 발열체 온도 조건에서 대상체 평균 온도는 약 42.3°C까지 상승함을 확인하였다. 이와 같은 결과는 고온 열원이 적용되는 각종 설비 및 장치에서 근접한 대상체의 열적 특성을 파악하고자 할 때, 열복사에 의한 영향을 신중히 검토할 필요가 있음을 보여주는 일례이며, 추후에는 투과율 1을 가정한 유리와 같이, 실제적인 비투과성 재질이 포함된 열유