



## 열전달 해석에서 핀 형상 단순화 모델의 계산 효율성 연구

이용재<sup>a</sup>, 김동민<sup>b</sup>, 박재현<sup>c,\*</sup>

### An Investigation of the Computational Efficiency of Simplified Models of Pin Geometry in Heat Transfer Analysis

Yongjae Lee<sup>a</sup>, Dongmin Kim<sup>b</sup>, Jaehyun Park<sup>c,\*</sup><sup>a</sup> Daegyeong Technology Application Division, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)<sup>b</sup> Department of Mechanical Design Engineering, Tech University of Korea<sup>c</sup> Industrial Transformation Technology Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 15 October 2025  
Revised 5 November 2025  
Accepted 6 November 2025

##### Keywords:

Geometry simplification  
Computational efficiency  
Natural convection  
Heat transfer  
Computational fluid dynamics (CFD)

#### ABSTRACT

In this study, we evaluated the effects of simplifying the geometry of simulated pins inside a baking chamber in a numerical analysis of heat transfer dynamics. Under identical boundary conditions and pin layouts, the average temperature on the top surface of a glass panel was 402.3426 K with a truncated cone-shaped pin and 402.3113 K with a cylinder-shaped pin, with a difference of 0.0313 K. The peak-to-valley temperature difference ( $\Delta T$ ) was 7.8501 K and 8.0164 K respectively, which differed by 0.1663 K (~2.12%). In contrast, the computational efficiency of the simulation improved considerably, with the number of cells reduced by 60.8% and the time required to obtain a solution shortened by 66.7%. These results indicate that using simplified models (e.g., cylindrical pins) can reduce computational costs substantially without sacrificing accuracy for global measures such as the overall distribution and uniformity of temperature in a given space.

## 1. 서론

열전달 해석은 기계, 항공우주, 전자, 반도체 등 다양한 산업 분야에서 필수적인 도구로 자리매김해 왔다. 실제 산업 현장에서 사용되는 장비들은 공정 조건 변화에 따라 복잡한 열적 거동을 보인다. 이로 인한 국소 과열과 열응력, 열 변형 등은 장비 수명과 생산성에 직접적인 영향을 미친다<sup>[1-4]</sup>. 따라서 장비 설계와 공정 운영 단계에서 정밀한 열적 거동 분석은 제품 신뢰성과 공정 효율을 확보하기 위한 필수 요소이다.

형상 단순화는 Computational Fluid Dynamics (CFD)와 같은

수치해석에서 계산 비용을 낮추고 수치 안정성을 높이기 위한 실 무적 기법으로 널리 활용된다. 복잡한 형상을 유지할 경우 격자 수가 급증해 수렴성이 악화되고, 최적화와 같은 시뮬레이션 계산 시간과 비용이 급격히 증가한다. 반대로, 불필요한 세부 형상을 제거하거나 등가 모델로 치환하여 단순화하면 격자 규모와 해석 시간이 줄고, 격자 품질도 개선되어 계산 효율 측면에서 이점을 얻을 수 있다<sup>[5-7]</sup>. 하지만, 형상 단순화는 본질적으로 정확도와 비용의 절충을 수반하므로, 전역 지표의 일관성을 유지하면서 국부 지표의 왜곡 여부를 확인하는 등의 검증이 필요하다<sup>[8,9]</sup>.

원활한 수치해석을 위한 형상 단순화 연구는 다양하게 수행되고

\* Corresponding author. Tel.: +82-41-5898-286

E-mail address: jh8145@kitech.re.kr (Jaehyun Park).

있다. Xu et al.<sup>[10]</sup>은 실제 건물 외풍 문제에서 정밀 형상과 단순 형상을 동일 조건으로 비교해, 위치 별 풍속 및 압력 차이가 평가 지표에 유의미한 영향을 줄 수 있음을 보였다. Halim et al.<sup>[11]</sup>은 wire-wrapped 연료 다발에 대해 상세 모델과 감축 모델을 실험과 대조하여, 정확도와 계산비의 절충 및 각 모델의 유효 범위를 도출하였다. Zhang et al.<sup>[12]</sup>은 복잡한 디퓨저를 출구에서의 유량과 제트의 운동량이 같도록 형상을 단순화한 대체 모델로 치환하여 예측 결과를 실험과 정합시키며, 복잡한 형상을 그대로 모델링할 때의 수렴성 저하와 계산량 부담을 완화하는 방법을 제시하였다. Danglade et al.<sup>[13]</sup>은 대규모 설계 단계의 CAD에서 CAE 준비 과정에서 단순화가 결과와 비용에 미치는 영향을 사전 예측하는 AI 기반 프레임워크를 제안하여, 단순화 시나리오의 정량적 선택 근거를 마련하였다. Li & Gao<sup>[14]</sup>는 3D 형상 요소 역제가 국부적 응답에 오차를 유발함을 지적하고, 결과에서 원인을 분석하는 사후 오차 추정을 통해 단순화가 허용될 수 있는 범위를 수치로 제시하였다. 이와 같이 형상 단순화의 효과를 비교 및 분석한 연구들은 축적되어 왔지만, 단순화 수준에 따라 격자를 어떻게 선정할 것인지 제시한 사례는 부족하다.

본 연구의 목적은 Bake chamber에서 Proximity pin의 형상 단순화가 Glass Panel 온도 분포 등의 전역 지표를 기준 수준으로 유지하면서 계산 효율성을 얼마나 개선하는지를 정량 검증하는 데 있다. 이를 위해 실제 형상을 반영한 원뿔대 Pin과 더 단순화된 원기둥 Pin 형상을 적용하여 동일 조건에서 비교하고, Pin과 Glass Panel 접촉부 평균 Heat flux의 이론식 계산 값을 기반으로 실용적인 격자를 선택한 뒤, 형상 단순화가 해석 결과와 총 계산 비용에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 수치해석 방법론

### 2.1 형상 모델링 및 단순화

본 연구에서 사용된 Bake chamber 모델은 Photoresist 코팅 공정을 위한 Heater, Proximity Pin, Glass Panel로 구성된다. Heater는 Glass Panel 표면에 코팅된 Photoresist 내 Solvent를 증발시키기 위해 사용되며, PID 제어 알고리즘을 통해 온도를 제어한다. Proximity Pin은 Heater와 Glass Panel 사이에 배치되어 Heater와 Glass Panel의 직접적인 접촉을 방지하며, Heater의 국소적 고온으로 인해 Glass Panel에 발생할 수 있는 열적 변형을 최소화한다. Glass Panel은 Photoresist가 코팅되는 기관 역할을 한다. Bake chamber의 형상과 주요 구성 요소는 Fig. 1과 같다.

원활한 해석과 형상 단순화에 따른 결과를 비교하기 위해 Proximity Pin의 형상을 SpaceClaim을 사용하여 단순화하였다. 기존 형상은 실제 구조적 디테일이 포함되어 있어 격자 생성 시

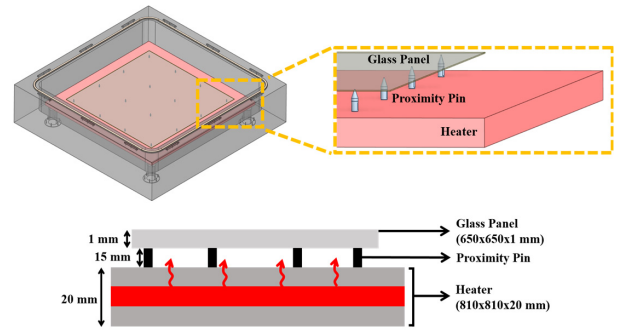


Fig. 1 Geometry and main components of the bake chamber

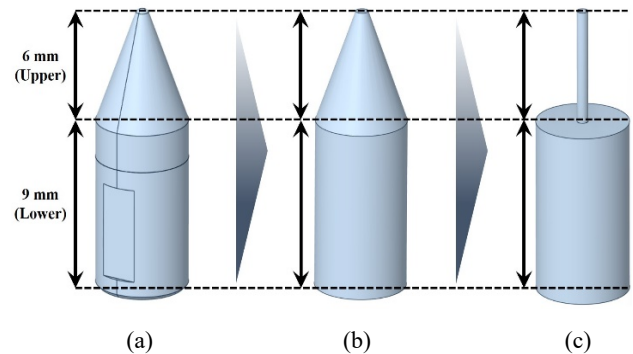


Fig. 2 Proximity pin geometries: (a) baseline detailed pin; (b) simplified I (truncated cone); (c) simplified II (cylinder)

불필요하게 많은 Cell 수를 요구하고, 계산 비용이 증가하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 형상 기반 계산 효율을 고려하여 두 단계의 단순화를 수행하였다. 단순화된 형상은 Fig. 2와 같다.

첫 번째 단순화 형상은 원기둥과 원뿔대를 결합한 형상으로 실제 형상의 특징을 유지하면서도 기하학적 복잡도를 줄였다. 하부 원기둥은 높이 9 mm, 직경 5 mm이고, 상부 원뿔대는 높이 6 mm, 하부 직경 5 mm, 상부 직경 0.6 mm이다. 두 번째 단순화 형상은 원기둥과 원기둥을 결합한 형상으로 원뿔대의 경사면을 제거해 직선 형상으로 단순화하였다. 하부 원기둥은 높이 9 mm, 직경 5 mm이고, 상부 원기둥은 높이 6 mm, 직경 0.6 mm이다. 상부 원기둥의 직경은 실제 원뿔 형상의 끝단에서 Glass Panel과 접촉하는 유효 면적을 기준으로 결정하였다. 이는 열전달 경로에서 주요한 열저항이 접촉부에서 지배되기 때문이며, 실제 접촉부 직경(약 0.6 mm)을 등가 조건으로 반영하였다. 단순화로 인해 외부 측면적은 약 23% 감소하였으나, 자연대류에서의 대류계수와 온도 차를 고려한 열손실 변화량은 최대 약 0.09 W로 미미하다. 따라서 단순화 형상에서도 실제 시스템의 열전달 거동을 충분히 근사할 수 있다. 또한 수치해석의 효율성을 높이기 위해 열전달에 기여하지 않는 불필요한 구조들은 단순화하여 제거하였다. 제거된 영역은 Chamber 상면의 패킹용 고무가 삽입되는 얇은 홈, Pin과 Heater 등을 체결하기 위한 볼트 삽입부 등으로 실제 공정에서 공기 유동이나 열전달 경로에 관여가

크지 않은 부분들이다. 이러한 부위들은 온도 구배 형성에 미치는 영향이 미미하므로 제거에 따른 해석 결과의 정확도에는 큰 차이가 없으며 계산 효율 향상에 기여할 수 있다.

## 2.2 기존 이론 모델

각 Pin 적용 모델에 대한 격자 선정 기준을 설정하기 위해, 원뿔 대 Pin과 Glass Panel 접촉부에서의 Heat flux를 격자 선정 기준으로 정의하였다. 선정 기준인 접촉부 Heat flux를 얻기 위해 Pin 내부 전도 저항을 계산하고 이를 바탕으로 전도 기반 Heat flux를 계산한 뒤, Pin 외벽의 자연대류 열전달계수를 추정하고 Fin equation을 적용하여 최종 Heat flux를 산출하였다. Pin은 총 16 개이며 위치에 따라 값이 상이하므로, 모서리 4개, 사이드 8개, 중앙 4개로 구분하여 각 부분의 평균 Heat flux를 산출하고, Pin 개수 비율을 가중치로 적용해 전체 평균을 계산하였다.

먼저, Pin의 축 방향 전도 저항인  $R_{pin}$ 은 원기둥과 원뿔대를 구분하여 계산하였다. 원기둥의 전도 저항은 단면적과 길이에 따라 산정하였으며, 원뿔대는 반경이 변하는 기하학적 특성을 고려하여 적분식으로 표현하였다. 이는 식 (1)과 같다. 다음으로, 전도에 의해 전달되는 열량  $q$ 는 Pin과 접하는 Heater의 온도  $T_b$ 와 끝단 온도  $T_t$ 의 차이를 이용하여 나타냈다. 이는 식 (2)와 같다<sup>[15]</sup>.

$$R_{Pin} = R_{cylinder} + R_{cone} = \frac{L_1}{kA_1} + \int_0^{L_2} \frac{dx}{kA_2(x)} \quad (1)$$

$$q = \frac{T_b - T_t}{R_{Pin}}, \quad \dot{q} = \frac{q}{A_{end}} \quad (2)$$

식 (1)에서  $k$ 는 열전도도,  $L_1, L_2$ 는 각각 원기둥의 높이, 원뿔대의 높이이다. 또한  $A_1$ 과  $A_2$ 는 단면적을 나타낸다. 그리고 식 (2)의  $A_{end}$ 는 끝단면의 면적을 의미한다.

Pin 외벽의 자연대류 열전달은 벽면 Heat flux와 유체 중심 온도 차를 기반으로 하는 Churchill-Chu 관계식을 적용하였다. 해당 관계식은 수직 평판 조건에서 층류와 난류 영역 모두에 적용 가능한 경험식으로, Rayleigh Number ( $Ra_L$ )와 Prandtl Number (Pr)를 통해 평균 Nusselt Number ( $Nu_L$ )를 산정하고, 이를 이용하여 평균 대류 열전달 계수  $\bar{h}$ 를 계산하였다. 이는 식 (3), (4), (5), (6)과 같다<sup>[16]</sup>.

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (3)$$

$$Ra_L = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha} \quad (4)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (5)$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L k}{L} \quad (6)$$

식 (4)에서  $g$ 는 중력가속도,  $\beta$ 는 체적열팽창계수,  $\Delta T$ 는 Pin의 외벽과 주변 유체 온도 차를 나타내며,  $L$ 은 특성길이를 나타낸다. 또한, 식 (5)의  $\nu$ 는 동점성계수이고  $\alpha$ 는 열확산율을 나타낸다.

마지막으로, 자연대류를 포함한 Pin의 Heat flux 산정을 위해 Fin equation을 적용하였다. Pin은 균일 단면을 갖는 이상화된 구조로 가정하였으며, 온도 분포는 축 방향으로만 변화하는 것으로 단순화하였다. Fin equation에 포함되는 특성 매개변수 은 단위 길이당 열손실의 크기를 나타내며, 무차원 길이  $\xi$ 는 Pin 전체 길이에 걸쳐 대류 효과가 얼마나 지배적인지를 평가하는 무차원 수이다. 이들은 내부 전도와 외벽 대류의 상대적 영향을 정량적으로 나타내는 주요 변수로 각각 식 (7), (8)과 같다<sup>[15]</sup>.

$$m = \sqrt{\frac{hP}{kA_{pin}}} \quad (7)$$

$$\xi = mL \quad (8)$$

여기서  $h$ 는 대류 열전달 계수이고,  $P$ 는 Pin의 둘레,  $A_{pin}$ 은 Pin의 단면적,  $k$ 는 열전도도를 나타내고  $L$ 은 특성길이를 나타낸다.

Pin의 실제 Heat flux는 대류가 고려되지 않은 기준 Heat flux ( $\dot{q}^0$ )에 축방향 온도 분포에 따른 감소율 계수  $\Phi$ 를 반영하여 근사적으로 표현된다. Pin의 실제 Heat flux와 감소율 계수는 식 (9), (10)과 같다.

$$\dot{q}(h) \approx \dot{q}^0 (1 - \Phi\xi^2) \quad (9)$$

$$\Phi = \frac{\frac{\theta_L}{2} + \frac{\theta_0 - \theta_L}{6}}{\theta_0 - \theta_L} \quad (10)$$

식 (10)에서  $\theta_0$ 는 기저부 초과온도,  $\theta_L$ 는 끝단의 초과온도를 나타낸다.

## 2.3 격자 생성 및 분석

해석에 적용할 격자를 생성하기 위해 Fluent Meshing을 사용하였다. Bake chamber는 대면적 구조를 가지므로, 계산 효율성을 확보하기 위해 Cell 수를 줄이는 것이 필요하다. 이에 따라 계산

Table 1 Mesh set-up parameters

Label	Truncated cone pin applied geometry				Cylinder pin applied geometry			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Glass (bodysize, mm)	2.8	2.4	2.0	1.8	2.8	2.3	2.0	1.7
Glass side (proximity, mm)	Min 0.14 Max 0.28	Min 0.115 Max 0.23	Min 0.10 Max 0.20	Min 0.09 Max 0.18	Min 0.14 Max 0.28	Min 0.115 Max 0.23	Min 0.10 Max 0.20	Min 0.09 Max 0.18
Pin top (facesize, mm)	0.35	0.29	0.25	0.225	0.14	0.12	0.10	0.08
Pin bottom (facesize, mm)	0.85	0.69	0.60	0.54	0.85	0.69	0.60	0.54
Cell count	4,091,737	5,913,137	8,142,735	10,410,497	4,077,529	6,064,953	8,162,740	10,389,722

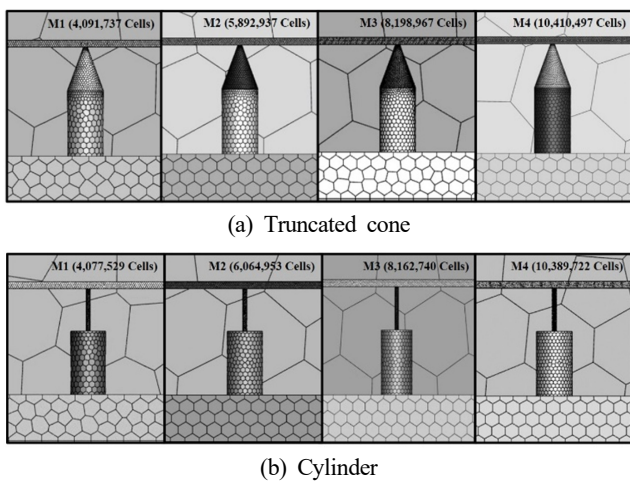


Fig. 3 Mesh resolution levels (M1-M4) for simplified proximity pin models

효율성과 해석 안정성을 높이기 위해 다면체(polyhedra) 격자를 사용하였다. Polyhedra 격자는 사면체(tetrahedral) 격자 대비 동일 수준의 형상 해석에 필요한 Cell 수를 줄일 수 있어 계산 자원을 절감할 수 있으며, 평균적으로 낮은 skewness와 우수한 orthogonal quality를 제공하여 수치적 수렴성을 향상시킨다. 또한 Polyhedra 격자는 다수의 인접 Cell을 가지므로 gradient 계산이 용이하고, 수많은 면을 통한 질량 교환으로 수치 확산(numerical diffusion)을 줄일 수 있어 보다 정확한 해를 적은 Cell 수로 얻을 수 있다<sup>[7]</sup>.

원뿔대 Pin과 원기둥 Pin, 두 가지 형상에 따른 결과를 비교하기 위해 각 Pin에 대해 격자를 생성하였다. 열전달 해석은 격자 크기와 개수에 따라 해석 결과가 차이 날 수 있다. 일반적으로 Cell 개수가 많아질수록 결과 정확도는 향상되지만, 격자 생성 시간과 Iteration 시간 등이 증가하여 계산 비용 측면에서 비효율적이다. 따라서 신뢰성 있는 결과를 확보하기 위해 서로 다른 격자 수에서 산출된 값을 이론적 Heat flux와 비교하였다. 격자는 약 400만개, 600만개, 800만개, 1000만개의 네 가지 격자를 생성하였으며, Proximity Pin 상부와 Glass Panel 접촉부의 평균 Heat flux를

비교하였다. 격자 생성 파라미터는 Table 1에 나타냈으며, 각 Pin의 격자 형상은 Fig. 3과 같다.

### 2.4 수치해석 모델 및 지배방정식

수치해석은 상용 Computational Fluid Dynamics (CFD) 코드인 ANSYS Fluent 2024 R2를 활용하였다. 본 연구에서는 Pin 형상 단순화에 따른 Hot plate에 의한 Glass Panel의 온도 분포 변화를 분석하는 것을 주요 목적으로 하였다. 따라서 실제 Bake 공정의 진공 환경을 직접 모사하지 않고 대기압 조건에서 Hot plate로부터 Glass Panel로 전달되는 열전달 특성과 온도 분포를 중심으로 해석을 수행하였다. Bake chamber 모델은 대기압 조건에서 외부 강제 대류가 작용하지 않는 자연대류 환경을 가정하였다. Chamber 내부 유동의 특성을 판단하기 위해 앞서 정의한 Rayleigh Number( $Ra_L$ )를 사용하였다.  $Ra_L$ 는 온도차로 인한 밀도 변화가 부력으로 작용하여 유동을 발생시키는 경향을 정량화하는 무차원수로 정의된다. 온도 차( $\Delta T$ )는 Heater 온도 130°C와 주변 공기 온도 23°C의 차이인 107 K를 사용하였으며 특성길이(L)은 유동 구간에 따라 Heater와 Glass Panel 사이 거리 15 mm와 Glass Panel과 Chamber 상부 벽 사이 거리 120 mm를 각각 사용하였다. 유체는 대기압의 공기로 가정하였으며 23°C에서의 공기 물성치인 밀도( $\rho$ ) 1.184 kg/m<sup>3</sup>, 점성계수( $\mu$ ) 1.85×10<sup>-5</sup> Pa·s, 열전도율( $k$ ) 0.0262 W/m·K, 비열( $C_p$ ) 1007 J/kg·K, 체적열팽창계수( $\beta$ ) 3.38×10<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>를 적용하였다. 또한, 동점성계수( $\nu$ )와 열확산율( $\alpha$ )은 공기 물성치를 기반으로 계산하였다. 공기의 물성은 온도에 따라 변하지만 23°C 조건은  $Ra_L$ 를 보수적으로 산정할 때 가장 큰 값을 나타내므로 계산에서는 이를 기준 조건으로 설정하였다.

수평 평판계에서 임계 값은 1,708이며, 이를 기준으로 전도 지배와 대류 지배를 판별할 수 있다. 계산 결과, Heater와 Glass Panel 사이 구간에서의  $Ra_L$ 는 약 3.49×10<sup>4</sup>, Glass Panel과 Chamber 상부 벽 사이 구간에서는 7.79×10<sup>6</sup>으로 산출되었다. 두 값 모두 임계 값을 상회하여 온도 차로 인한 부력 효과로 유체가 상승 및

하강을 반복하며 형성하는 순환 구조인 자연대류 셀의 형성이 예상되지만, 난류 전이 기준인  $10^7$ 에는 미치지 못하므로 Laminar 자연대류 모델을 적용하였다.

해석에 사용된 지배방정식은 Fluent에 내장된 비압축성 유동 방정식으로, 연속방정식, 운동 방정식 그리고 에너지 방정식을 포함한다. 이는 각각 식 (11), (12), (13)과 같이 표현된다<sup>[18]</sup>.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (11)$$

$$\rho(\vec{u} \cdot \nabla \vec{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g} \quad (12)$$

$$\rho C_p(\vec{u} \cdot \nabla T) = k \nabla^2 T + \dot{q}_{rad} \quad (13)$$

여기서  $\vec{u}$ 는 속도 벡터,  $\rho$ 는 밀도,  $p$ 는 압력,  $\mu$ 는 점성계수,  $\vec{g}$ 는 중력가속도,  $C_p$ 는 정압 비열,  $k$ 는 열전도율,  $\dot{q}_{rad}$ 는 복사 열원항을 의미한다. 또한, Heater와 Glass Panel 사이의 온도 차가 상대적으로 크기 때문에 밀도는 Incompressible ideal Gas 모델을 적용하여 이상기체 상태방정식을 기반으로 온도 의존성을 직접 반영하였으며, 중력항을 포함시켜 부력 효과를 고려하였다. 계산 알고리즘은 속도와 압력 연성을 안정적으로 처리하기 위해 SIMPLEC 알고리즘을 적용하였다. 해당 해석 모델은 Ra가  $10^4 \sim 10^6$  범위에 해당 하는 Laminar 자연대류로, 유속이 낮고 부력항에 의해 속도와 압력장이 강하게 연계되는 특성을 가진다. 따라서, 압력보정식을 개선하여 수렴성을 높인 SIMPLEC 알고리즘을 적용함으로써 해의 안정성과 계산 효율성을 확보하였다. 또한, Residual은 연속방정식과 운동량 방정식에 대해  $1.0 \times 10^{-5}$ 까지 수렴 기준을 적용하였으며, 에너지 방정식은 보다 엄격한 조건으로  $1.0 \times 10^{-6}$ 까지 수렴하도록 설정하였다.

## 2.5 경계조건 및 물성치

본 CFD 해석에서는 Chamber 내부가 대기압 조건을 유지한다고 가정하였다. 이에 따라 Chamber 네 모서리에 위치한 네 개의 Outlet에 Pressure Outlet 경계 조건을 적용하고, 압력을 0으로 설정하여 내부 압력이 상승할 경우 유체가 배출구를 통해 외부로 빠져나가도록 하였다. Heater의 외부 표면에는  $130^\circ\text{C}$  등은 조건을 부여하여 Glass Panel을 가열하도록 하였으며, Chamber 외벽에는 단열(adiabatic) 조건을 적용하여 외부로 열 손실이 발생하지 않도록 설정하였다. 초기 Chamber 내부온도는 클린룸 환경을 고려하여  $23^\circ\text{C}$ 로 설정하였다<sup>[19]</sup>.

Heater와 Chamber는 Aluminum(Al) 재질을 적용하였으며, Glass Panel은 Borosilicate, Proximity Pin의 하부는 Al, 상부는

Table 2 Material properties

Properties	Air	Vespel	Al	Borosilicate (glass panel)
Density (kg/m <sup>3</sup> )	Ideal gas	1430	2719	2230
Specific heat (J/kg·K)	1005	1000	871	830
Thermal conductivity (W/m·K)	0.026	0.35	202.4	1.2
Internal emissivity	-	0.9	0.9	0.88
Viscosity (kg/m·s)	$1.18E^{-5}$	-	-	-

Vespel 재질을 적용하였다. 주요 구성요소와 Pin의 구성은 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 제시하였다. 내부 표면의 흑색 코팅을 고려하여 S2S 복사 모델 계산을 위한 Internal Emissivity를 각 구성요소에 부여하였다. 또한 Bake chamber 내부를 공기로 설정하고 가득 찬 상태로 가정하였다. 세부 물성치는 Table 2와 같다.

## 3. 단순화 모델 검증 및 열전달 해석 결과

### 3.1 단순화 모델의 타당성 및 효율성 검증

본 연구에서의 격자 선택의 기준은 원뿔대 Pin 적용 모델에 대해 전도와 대류를 고려하여 산정한 이론 Heat flux 값이다. 계산 결과, 원뿔대 Pin과 Glass Panel 접촉부에서의 평균 Heat flux는  $6,559 \text{ W/m}^2$ 으로 산출되었다.

원뿔대 Pin 적용 모델의 각 격자별 수치해석을 통해 도출된 평균 Heat flux는 M1에서 M4 순서대로,  $7,274 \text{ W/m}^2$ ,  $6,901 \text{ W/m}^2$ ,  $6,622 \text{ W/m}^2$ ,  $6,534 \text{ W/m}^2$  이다. 이론 값 대비 절대 상대 오차는 순서대로 10.9%, 5.2%, 0.96%, 0.38%이다. 이론 값과의 일치도가 가장 높은 격자는 M4로 확인되었으며, 이에 따라 원뿔대 모델의 최종 격자는 M4 격자로 선정하였다.

원기둥 Pin 적용 모델의 격자별 수치해석을 통해 도출된 접촉부 평균 Heat flux는 M1에서 M4 순서대로  $6,556 \text{ W/m}^2$ ,  $6,404 \text{ W/m}^2$ ,  $6,121 \text{ W/m}^2$ ,  $6,194 \text{ W/m}^2$  이다. 이론 값 대비 절대 상대 오차는 순서대로 0.05%, 2.36%, 6.66%, 5.56%이다. 이론 값과 가장 일치하는 격자는 M1 격자로 확인되었으며, 이에 따라 원기둥 모델의 최종 격자는 M1 격자로 선정하였다. 선정 결과는 이론 값과의 정합성을 최우선 기준으로 하였으며, 해당 결과는 Fig. 4와 같다.

Table 3은 원뿔대 Pin 모델과 원기둥 Pin 모델의 계산 효율성을 비교한 결과이다. 격자 Cell 수는 원뿔대 Pin 모델이 10,410,497

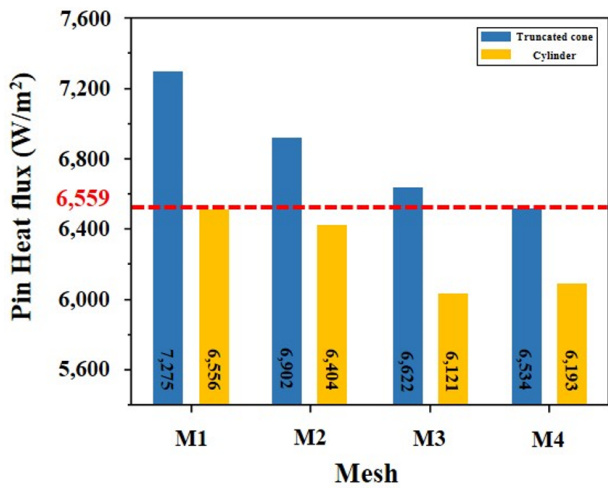


Fig. 4 Comparison of pin heat flux across mesh resolution levels (M1-M4) with the theoretical value

Table 3 Computational efficiency of each pin model

Category	Truncated cone pin	Cylinder pin	Efficiency (relative to truncated cone)
Cell count	10,410,497	4,077,529	60.8 % reduction
1,000 iteration time	~ 120 min	~ 40 min	66.7 % reduction
Mesh generation time	~ 40 min	~ 10 min	87.5 % reduction

개 대비 원기둥 Pin 모델 4,077,529개로 약 60.8 % 절감되었다. 이는 원기둥 Pin 모델이 기하학적으로 단순하여 미세 형상으로 인한 불필요한 국부 격자 세분이 줄고, 이에 따라 좋은 품질의 격자를 더 적은 수로 구성할 수 있기 때문이다.

계산 시간에서도 뚜렷하게 차이가 났다. 동일한 조건에서 1,000 Iteration 기준, 원뿔대 Pin 모델은 약 120분이 소요되는 반면, 원기둥 Pin 모델은 약 40분으로 66.7% 단축되어, 약 3배 빠름을 확인할 수 있었다. 또한, 격자 생성 시간 역시 원뿔대 Pin 모델이 약 40분, 원기둥 Pin 모델이 약 10분으로 약 75% 단축되는 결과를 보여 격자 생성 시간이 약 8배 빨랐다. 형상 단순화는 동일 정확도 수준을 유지하면서, Cell 수와 계산 시간 그리고 격자 생성 시간을 크게 줄일 수 있었다. 또한, 원기둥 Pin 모델은 해석 결과가 원뿔대 Pin 모델과 거의 차이를 보이지 않으므로, 계산 자원을 절감하여 계산 효율성 측면에서 우수함을 확인할 수 있었다.

### 3.2 단순화 모델이 적용된 Bake chamber 해석 결과

원뿔대 Pin 모델과 원기둥 Pin 모델의 열전달 해석 결과를 비교하여 형상 단순화가 해석 결과 미치는 영향을 평가하였다.

Fig. 5는 Glass Panel 상면의 위치별 온도 분포를 나타낸다. 두

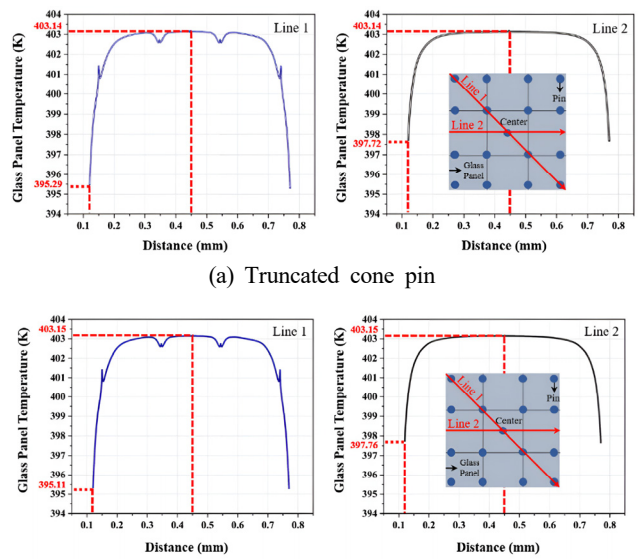
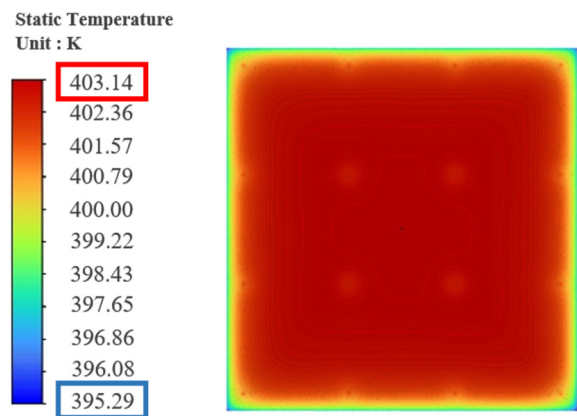
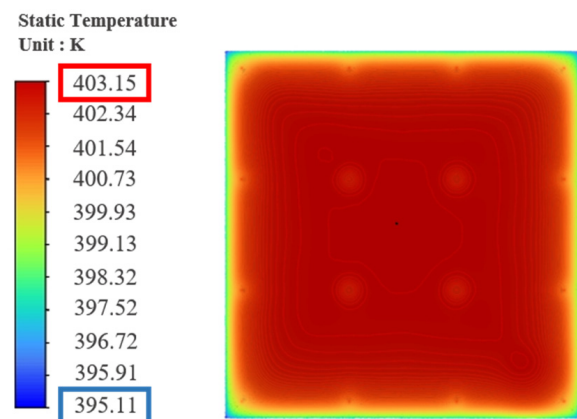


Fig. 5 Glass Surface temperature profile (Line 1, 2)



(a) Truncated cone pin



(b) Cylinder pin

Fig. 6 Glass top surface temperature contour

모델 모두 중심부에서 온도가 가장 높고 모서리로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. 정량적으로는 모서리 부근과 사이드 부근의 온도 차가 원뿔대 모델이 2.4 K, 원기둥 모델이 2.6 K로 유사하였다.

이는 모서리 하부에 배치된 Outlet의 영향과, 모서리가 열 확산 경로상 가장 먼 위치에 놓여 열 저항이 상대적으로 크기 때문으로 판단된다. 전체적으로 두 모델의 온도 분포 곡선은 거의 중첩되며, 전역적 온도장 관점에서 Pin 형상 단순화의 영향은 미미함을 확인하였다.

Fig. 6은 Glass Panel 상면의 온도 컨투어를 비교한 결과이다. 원뿔대 Pin 모델과 원기둥 Pin 모델의 최대 온도는 각각 403.1416 K, 403.1461 K로 0.0045 K의 차이를 보였고, 최소 온도는 각각 395.2915 K, 395.1297 K로 0.1618 K의 차이를 보였다. 또한, 최대온도와 최소온도 차는 각각 7.8501 K, 8.0164 K로 원뿔대 Pin 모델 대비 원기둥 Pin 모델에서 0.1663 K로 약 2.12 % 증가하였다. 그리고 Glass Panel 상면의 평균 온도는 각각 402.3426 K, 402.3113 K로 0.0313 K 차이를 보여 거의 동일하였다. 온도 컨투어 또한 전체적인 온도 분포 패턴이 유사함을 확인할 수 있어, Pin 단순화에 의한 해석 결과 차이는 거의 없는 것으로 판단된다.

두 모델의 Glass Panel 상면 온도장과 온도 분포는 거의 동일하다. 이는 경계조건과 Pin 배치가 같으며, Glass Panel 내부 전도와 약한 유동의 순환이 주로 온도장을 형성하기 때문에 국부적인 Pin 형상 차이의 영향은 제한적이다. 따라서 열전달에 따른 전역 온도 분포 등과 같은 평가 및 분석에는 단순화된 모델을 사용해도 무리가 없을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 Bake chamber 내부의 Pin 형상 단순화가 열전달 해석의 정확도와 계산 효율성에 미치는 영향을 정량 평가하였다.

원뿔대 Pin과 원기둥 Pin이 적용된 모델의 Glass Panel 상면 평균 온도는 각각 402.3426 K와 402.3113 K로 0.0313 K 차이를 보여 거의 동일했으며, 상면의 최대와 최소 온도의 차는 각각 7.8501 K, 8.0164 K로 0.1663 K 차이 수준이었다. 반면, 계산 효율은 크게 향상되어 Cell 수 약 60.8% 절감, 해석 시간 약 66.7% 단축, 격자 생성 시간 약 75% 단축할 수 있었다.

이러한 결과는 전역 온도 분포, 균일성 평가 등과 같은 거시적 지표를 목적으로 할 때, 원기둥 Pin과 같은 단순화 모델을 적용해도 정확도 손실 없이 비용을 절감할 수 있음을 확인하였다. 특히 계산 자원이 제한된 환경에서는 단순화 모델이 해석 가능성을 높이고 실질적인 대안이 될 수 있다. 다만 형상에 민감한 국부적 지표가 핵심인 경우에는 상세 형상에 대한 해석을 병행하여 추가 검증이 하는 것이 필요하다. 향후에는 실제 장비의 온도 분포를 실측하여 해석 결과와 정량 비교를 수행하여 단순화 모델의 신뢰성을 검증하고, 과도 해석과 실험 기반 검증을 통해 적용 범위를 더욱 정교화 할 예정이다.

#### 후 기

이 연구는 2025년 산업통상자원부의 ‘FOWLP/PLP를 위한 대형기판용 Plasma 전처리 기반 PR Coating 장비 개발’ 사업의 지원을 받아 수행되었음. (No. 20023103, PKM25110)

#### References

- [1] Szczepankowski, A., Przysowa, R., 2022, Thermal Degradation of Turbine Components in a Military Turbofan, *Eng. Fail. Anal.*, 134 106088, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106088>.
- [2] Li, Y., Yu, M., Bai, Y., Hou, Z., Wu, W., 2021, A Review of Thermal Error Modeling Methods for Machine Tools, *Appl. Sci.*, 11:11 5216, <https://doi.org/10.3390/app11115216>.
- [3] Ettahri, O., Oukaira, A., Ali, M., Hassan, A., Nabavi, M., Savaria, Y., Lakhssassi, A., 2020, A Real-Time Thermal Monitoring System Intended for Embedded Sensors Interfaces, *Sensors*, 20:19 5657, <https://doi.org/10.3390/s20195657>.
- [4] Muneeshwaran, M., Wang, C. -C., 2020, Thermal Design Aspects for Improving Temperature Homogeneity of Silicon Wafer During Thermal Processing in Microlithography, *Appl. Therm. Eng.*, 171 115118, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115118>.
- [5] Bin, Z., Yannan, D., Weiping, O., Xiaoying, T., Xiaolong, X., 2019, Research on Finite Element Optimal Analysis Method, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 310:4 042021, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/310/4/042021>.
- [6] Yondo, R., Bobrowski, K., Andrés, E., Valero, E., 2018, A Review of Surrogate Modeling Techniques for Aerodynamic Analysis and Optimization: Current Limitations and Future Challenges in Industry, *Advances in Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control in Engineering and Sciences*, 48 19-33, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-89988-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89988-6_2).
- [7] Lintermann, A., Schröder, W., 2020, Lattice-Boltzmann Simulations for Complex Geometries on High-Performance Computers, *CEAS Aeronaut. J.*, 11 745-766, <https://doi.org/10.1007/s13272-020-00450-1>.
- [8] Villi, G., De Carli, M., 2014, Detailing the Effects of Geometry Approximation and Grid Simplification on the Capability of a CFD Model to Address the Benchmark Test Case for Flow Around a Computer Simulated Person, *Build. Simul.*, 7 35-55,

<https://doi.org/10.1007/s12273-013-0103-1>.

[9] Bużantowicz, W., Walencykowska, M., 2025, Impact of 3D Model Simplifications on the Determination of Numerical Accuracy of the Radar Cross-Section in Aerial Target Recognition Issues, *IET Radar, Sonar & Navigation*, 19:1 e70003, <https://doi.org/10.1049/rsn2.70003>.

[10] Xu, F., Yang, J., Zhu, X., 2020, A Comparative Study on the Difference of CFD Simulations Based on a Simplified Geometry and a More Refined BIM Based Geometry, *AIP Advances*, 10 125318, <https://doi.org/10.1063/5.0031907>.

[11] Halim, O., Galleni, F., Forgione, N., Di Piazza, I., Pucciarelli, A., 2025, A Comparative Analysis of Detailed and Reduced CFD Approaches to Model Wire-Wrapped Fuel Bundles for LMFBRs Applications, *Annals of Nuclear Energy*, 211 110937, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110937>.

[12] Zhang, T. T., Lee, K., Chen, Q. Y., 2009, A Simplified Approach to Describe Complex Diffusers in Displacement Ventilation for CFD Simulations, *Indoor Air*, 19:3 255-267, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2009.00590.x>.

[13] Danglade, F., Pernot, J. -P., Véron, P., Fine, L., 2017, A Priori Evaluation of Simulation Models Preparation Processes Using Artificial Intelligence Techniques, *Comput. Ind.*, 91 45-61, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.06.001>.

[14] Li, M., Gao, S., 2011, Estimating Defeaturing-Induced Engineering Analysis Errors for Arbitrary 3D Features, *Computer-Aided Design*, 43:12 1587-1597, <https://doi.org/10.1016/j.cad.2011.08.006>.

[15] Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., 2017, *Incropera's Principles of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA.


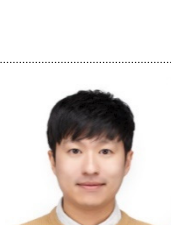
[16] Churchill, S. W., Chu, H. H. S., 1975, Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 18:11 1323-1329, [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(75\)90243-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90243-4).

[17] Sosnowski, M., Krzywanski, J., Grabowska, K., Gnatowska, R., 2018, Polyhedral Meshing in Numerical Analysis of Conjugate Heat Transfer, *EPJ Web of Conferences*, 180 02096, <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818002096>.

[18] Ansys, Inc, 2024, viewed 18 November 2025, *Fluent Theory Guide (Release 2024 R2)*, <[https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu\\_th/flu\\_th.html](https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th.html)>.

[19] Tsao, J. -M., Hu, S. -C., Chan, D. Y. -L., Hsu, R. T. -C., Lee, J.

C. -C., 2008, Saving Energy in the Make-Up Air Unit (MAU) for Semiconductor Clean Rooms in Subtropical Areas, *Energy Build.*, 40:8 1387-1393, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.12.005>.

	<p><b>Yongjae Lee</b>                      Researcher at the Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). His research interests include Simulation-based Optimization and Digital Twins.                      E-mail: <a href="mailto:yoj94@kitech.re.kr">yoj94@kitech.re.kr</a></p>
	<p><b>Dongmin Kim</b>                      Assistant Professor in the Department of Mechanical Design Engineering, Tech University of Korea (TU Korea). His research interests include Machining and Digital Transformation in Manufacturing.                      E-mail: <a href="mailto:dkim0707@tukorea.ac.kr">dkim0707@tukorea.ac.kr</a></p>
	<p><b>Jaehyun Park</b>                      Senior Researcher at the Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). His research interests include Precision Engineering, Piezo-flexure Stages, and Semiconductor Equipment.                      E-mail: <a href="mailto:jh8145@kitech.re.kr">jh8145@kitech.re.kr</a></p>