

열전달 이론을 응용하는 Chef 되기

업소용 소형 화덕장치를 이용한 피자 굽기 문제



담당 교수 : 나양 교수님

202010710 김동규

202214139 최건

202214113 류남환

❶ 역할 분담

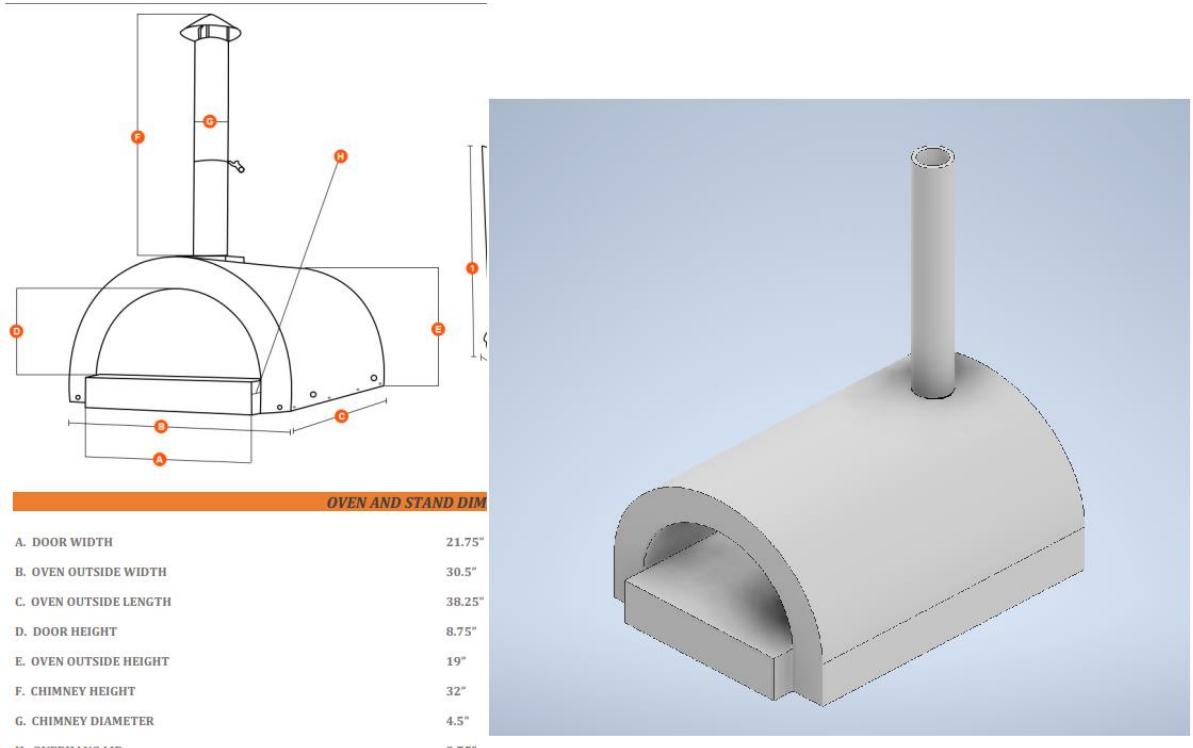
김동규 : 인벤터 모델링, 열전달 모드 토의, 모델링 개선방안 토의, 참고문헌(논문) 조사 및 재료 물성치 확인

최건 : ANSYS 프로그래밍 구동 및 해석, 열전달 모드 토의, 모델링 개선방안 토의, 대류 열 전달 계수 계산

류남환 : 보고서 작성, 열전달 모드 토의, 모델링 개선방안 토의

(1) 피자 업소용 소형 화덕장치의 개략도

기존 피자 화덕장치의 크기 및 배치는 아래 그림과 같다. 피자의 조리 면적의 크기는 30" L x 26.5"W x 13"H이다. 운영 온도는 최대 90°F(482°C), 평균 작동 온도 800°F(427°C)로 가정한다. 아래 이미지는 화덕장치의 개략도를 바탕으로 인벤터를 사용하여 모델링한 결과이다.



1) INFORNINO, "피자화덕장치", <https://www.ilfornino.com/f-series-mini-professional-stainless-steel-wood-fired-pizza-oven-with-stand/> (2025/05/25)

<화덕장치 개략도>

<모델링 이미지>

(2) 피자의 조리 목표

기존의 피자 화덕 장치는 단열효과가 떨어져 외부로 열 손실이 많이 발생하는 문제가 있다. 이로 인해 화덕 내부의 온도가 일정하게 유지되지 않아 피자의 조리가 고르지 않게 된다. 이를 해결하기 위해, 화덕 구조를 개선하여 단열효과를 높이고 외부로 열 손실이 빠져나가는 것을 최소화하는 것을 목표로 한다. 화덕 내부 온도를 안정적으로 유지하여 조리 과정 내내

일정한 온도를 유지하고, 피자의 모든 부분이 고르게 익도록 하여, 피자가 균일하고 완벽하게 조리되도록 하는 것이 조리 목표이다.

(3) 열전달 측면에서 고려사항

피자 화덕 장치에서 열전달 메커니즘을 효과적으로 이해하고 최적화하기 위해서 다음과 같은 사항을 고려하였다.

피자와 오븐 바닥이 맞닿는 부분에서는 전도열 전달만 일어난다고 가정한다. 또한 피자 내부에서도 전도열 전달이 발생한다. 전도열전달은 Fourier의 법칙을 따른다.

$$Q = -kA \frac{dT}{dx}$$

화덕 내부의 공기가 순환하면서 대류열이 피자의 측면과 윗면을 고르게 가열한다. 이때 대류 열전달은 뉴턴의 냉각법칙을 따른다.

$$Q = hA\Delta T$$

Reynolds 수 (Re)와 Prandtl 수 (Pr)는 다음과 같이 계산된다.

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (\text{여기서 } v=20.57 \text{ m/s})$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k}$$

대류 열전달 계수 h 는 Nusselt 수를 통해 계산된다.

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^{0.3}$$

따라서 대류 열전달 계수 h 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h = \frac{Nu_D k}{D}$$

이므로 $h = 105.7 \frac{W}{m^2 K}$ 이다.

화덕 내부의 뜨거운 표면에서 방사되는 복사열이 피자의 전체 표면을 고르게 익힌다. 복사 열전달은 스텝판-볼츠만 법칙으로 설명된다.

$$Q = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_\infty^4)$$

T_s 는 피자 표면 온도, T_∞ 는 내부 온도이며, ϵ (철의 방사율)=0.2라고 가정한다.

그리고 열을 효과적으로 전달하기 위해서 내부 열생성율이 고려된다. 이를 계산하기 위해 1kg의 나무가 연소할 때 20,000kJ의 열량을 발생하고 1시간 동안 1kg의 나무가 연소된다고 가정한다. 열 생성율은 오븐 내부 부피로 나누어 계산할 수 있다.

$$q''' = \frac{\text{총 열량}}{\text{오븐 내부 부피}} = \frac{20,000 \text{ kJ}}{1 \text{ hour} \times \text{오븐 부피}}$$

따라서 열 생성율 = $32,819.24 \frac{W}{m^3}$ 이다.

화덕장치의 두께를 5.5인치로 증가시키면서, 열전달 계수 h 값에 변동이 있었다.

동일한 계산과정을 거쳐 h 값을 161.28로 변경하는 것으로 토의했다.

(4) 요리 재료의 물성치

아래는 피자를 만드는데 사용되는 재료의 물성치를 표로 나타낸 것이다.

Table 2. Summary of Parameters Used in the Simulation for Two Baking Processes

| Total pizza height, m | $L = 0.014$ | |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Latent heat of vaporisation, J/kg | $L_v = 2256.9 \times 10^3$ | |
| | Crust | Tomato Paste |
| Height, m | $L_p = 0.01$ | $L_t = 0.002$ |
| Initial moisture content, db | $m_{po} = 0.47$ to 0.55 | $m_{t0} = 3.73$ |
| Density, kg/m ³ | $\rho_p = 862$ | $\rho_t = 1073$ |
| Specific heat, J/(kg K) | $c_{pp} = 3770$ | $c_{pt} = 2930$ |
| Thermal diffusivity, m ² /s | $\alpha_p = 0.128 \times 10^{-6}$ | $\alpha_t = 1.737 \times 10^{-7}$ |
| Thermal conductivity, W/(m K) | $K_p = 0.416$ | $K_t = 0.546$ |
| | | Cheese (Mozzarella) |

2) C.Dumas & G.S. Mittal (2002) HEAT AND MASS TRANSFER PROPERTIES OF PIZZA DURING BAKING, international Journal of Food Properties,

(5) 피자의 조리방법

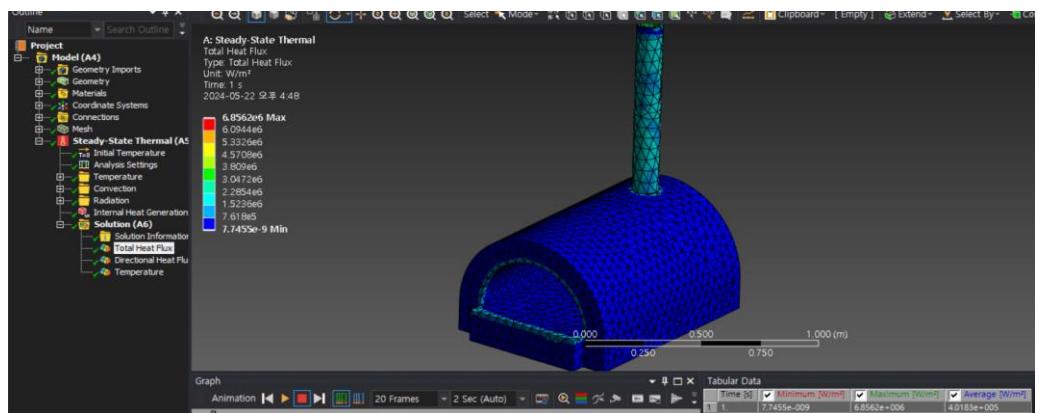
우리가 선택한 장치는 화덕 기계장치로 고온과 짧은 조리 시간이 특징이다. 먼저 화덕 내부를 20~25분 예열하여 화덕 내부 전체가 균일하게 고온에 도달하도록 한다. 그 후, 피자를 오븐 바닥에 직접 넣어 열전달 메커니즘을 통해 빠르게 익혀준다. 그리고 피자를 굽는 동안 피자를 회전하거나 이동시켜 특정 부분이 과도하게 익거나 덜 익는 것을 방지한다.

(6) 기존의 조리방법과의 차별성

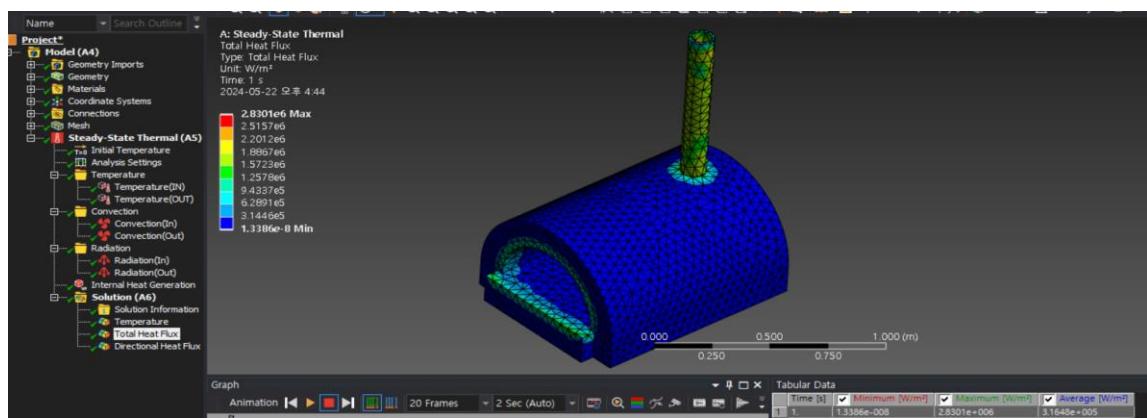
개선된 피자 화덕 장치는 기존 화덕에 비해 단열효과와 열 분포의 균일성이 크게 향상되었다. 이를 통해 외부로의 열 손실이 최소화되고, 내부 온도가 더 안정적으로 유지되어 피자가 고르게 익을 수 있습니다. 또한, 열이 피자 표면에 균일하게 전달되며, 열전달 성능의 향상으로 조리 시간이 단축되고 에너지 효율이 증가하였다. 이로써, 피자가 균일하고 빠르게 익어 전체적인 조리 품질이 향상되었다.

(7) 장치 개선을 위한 제안

화덕의 열전달 효율성을 향상시키기 위해서는 단열 성능을 개선하고 외부로의 열유속을 낮춰야 한다. 이를 위해 밑면의 단면적을 확장하고 둑근 부분의 두께를 증가하는 것을 개선 방안으로 삼았다. 밑면의 단면적을 확장하면 구조의 강도가 증가하여 고온 환경에서의 변형이나 손상을 줄일 수 있다. 또한 열 관성이 증가하여 오븐의 온도가 더 안정적으로 유지될 수 있다. 둑근 부분의 두께를 증가시키면 열 저장 용량이 증가하여 열이 더 균일하게 분포될 수 있게 하고 내구성과 열 보유 시간이 증가하여 연료의 효율을 높일 수 있다. 구체적으로, 밑면의 단면적 가로 25in, 세로 40in, 뒷판두께 2in로 변경, 반원두께 5.5in로 변경하였다. 아래 자료는 Ansys를 통해 개선된 설계의 열전달 성능과 단열 성능을 시뮬레이션으로 검증한 결과로, 기존 제품에 비해 외부로의 열 유속이 감소하여 단열효과가 증가한 모습을 보여준다.



<기존 제품>



<개선된 제품>

(8) 참고문헌

- 2) INFORNINO, "피자화덕장치", <https://www.ilfornino.com/f-series-mini-professional-stainless-steel-wood-fired-pizza-oven-with-stand/> (2025/05/25)
- 2) C.Dumas & G.S. Mittal (2002) HEAT AND MASS TRANSFER PROPERTIES OF PIZZA DURING BAKING, international Journal of Food Properties