

도자기 1차 소성로의 3차원 유동장 수치해석에 관한 연구

김성수 · 홍성선* · 박지영** · 오창섭**

한국도자기(주), *충북대학교, **한국에너지 기술 연구소

A Numerical Study of the 3-D Flow in the Primary Calcinator of Porcelain

Sung Soo Kim, Sung Sun Hong*, Ji Young Park** and Chang Sup Oh**

Han Kook Chinaware Co. Ltd., *Chungbuk National University, **Korea Institute of Energy Research

요 약

상용 code인 Fluent를 이용하여 도자기의 1차 소성로에 대해 온도장과 속도장을 계산하고 열효율을 산출하였다. 수치해석의 변수로는 배출구 및 도자기의 위치를 변화시켰으며, 수치해석 방법은 검사체에 기초한 유한차분방법 및 Upwind scheme과 SIMPLEX Algorithm을 사용하였고 난류모델로는 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 계산결과 출구 위치가 전체 소성로내 벡터유동의 양상을 크게 좌우하는 것으로 나타났으며, 전체 온도장에 대해서는 복사 영향으로 큰 차이를 보이지 않았으나 예열대 상부에 출구가 있는 경우와 비교할 때 예열대 또는 냉각대의 측면에 출구가 있는 경우에 그 영역의 온도가 다소 높게 나타났다. 소성품의 위치는 로내 유동장 및 온도 분포에 크게 영향을 끼치지 않으나 소성품 내 온도는 그 위치하는 영역의 온도 분포에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 예열대 상부에 출구가 있는 경우 열효율은 17%로 매우 저조하였고 출구에서의 가스온도는 약 1000 K로 매우 높았다.

Abstract—A numerical simulation on a primary calcinator of porcelain was performed with using Fluent to calculate the heat efficiency by studying velocity vector and temperature profile according to variables such as the location of outlet and porcelain. Control-Volume based Finite Difference Method and Up-wind scheme are used for discretization of differential equation. SIMPLEX Algorithm and standard k-ε turbulent model are selected to resolve the pressure-velocity coupling and the turbulent. The result of simulation showed that the whole velocity vector field in a calcinator was varied greatly according to the location of outlet. But the whole temperature profile at each zone was still high regardless of the location of outlet because of the radiation. But the temperature of a case with a outlet at sidepart of preheating or cooling zone was little high compared to the case with a outlet on the top of preheating zone. The velocity vector field and temperature profile in a calcinator were almost not affected by the location of porcelain, but the temperature inside a porcelain was much affected according to the place where it was located. The heat efficiency in a calcinator was 44.6% and the gas temperature in the outlet was about 1000 K.

1. 서 론

도자기의 품질고급화를 위해서는 재료선정 뿐만 아니라 분쇄, 혼합, 건조, 1차 소성, 2차 소성, 3차 소성 등 전 공정에 걸친 기술 개발이 이루어져야 할 것이다. 이들

공정중 특히 1차 소성 과정은 제품의 강도를 결정하는데 가장 중요한 역할을 하며 에너지 소모도 많은 공정이다¹⁾. 1차소성로의 온도는 Fig. 1과 같이 예열대, 소성대, 냉각대로 구분되어지는데 온도 분포가 원료의 특성에 맞지 않을 경우 균열, 편평도 결함 등이 발생할 정도

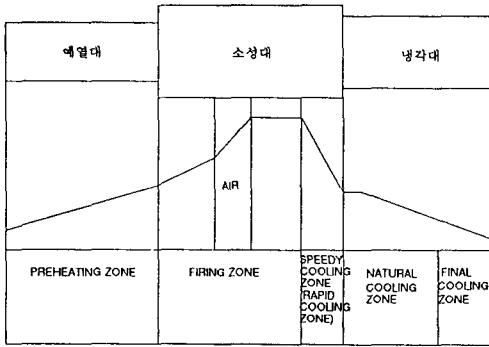


Fig. 1. Firing curve for the primary calcinator.

로 1차 소성로의 소성곡선은 소성되는 제품의 품질 특성을 결정하는 중요한 요소이다⁹⁾. 소성곡선은 송차시간 및 요구되는 제품의 품질수준, 그리고 원료의 특성에 따라 달라지므로 최적의 소성곡선은 각사에서 경험적으로 구하여 사용하고 있고 열효율은 10%대에 머물 정도로 극심한 에너지의 손실이 발생한다. 열손실의 주 원인이 배가스에 의한 것으로 알려져 있어 투입되는 열량이 공정에서 제대로 사용되지 못함을 알 수 있다⁹⁾. 따라서 원료와 여러가지 조업조건에 따른 로내 온도 및 속도분포를 파악하여 최적 소성곡선을 구하기 위한 시행착오를 줄이고 열효율을 향상시킬 필요가 있다.

본 연구는 배가스의 출구 위치와 소성품의 위치를 변화시켜 가며 소성로내 유동장 즉, 속도벡터장과 온도분포도에 미치는 영향을 살펴보고, 로내 열효율을 계산함으로써 1차 소성시 일어나는 최적의 소성범위와 열손실을 줄여 열효율을 올리기 위한 기초자료를 얻고자 하는데 그 목적이 있다.

2. 수학적 모델 및 해법

본 논문에서는 소성품이 매우 느린 속도로 통과하는 1차 소성로 내에서의 유동장 및 온도 분포를 알아보고자 한다. 소성로의 규모는 길이, 높이, 넓이의 순으로 예열대가 21 m, 2.4 m, 2.6 m, 소성대가 12.5 m, 2.5 m, 4 m, 냉각대가 21 m, 2.6 m, 2.4 m이다. 소성대 측면에 각각 5개씩 총 10개의 버너와 연료 및 공기 주입구가 있으며 예열대 상부에 출구가 설치되어 있다. Fig. 2에 1차 소성로의 개략도를 나타내었다⁹⁾. 본 수치해석에서는 이 대상의 크기를 그대로 사용하였으며 소성품의 이동 속도가 매우 느리므로 소성품 위치의 시간에 따른 변화가 없다고 가정하고 소성품 위치를 임의로 변화시켰다. 입구에서는 연료와 공기가 동시에 뿜어져 버너에 의해 태워짐으로써 공기, CO₂, H₂O로 구성된 가스가 주입된다

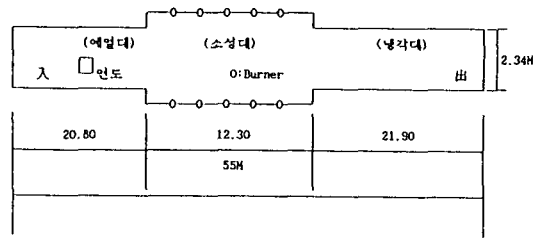


Fig. 2. The schematic diagram of the first calcinator of porcelain.

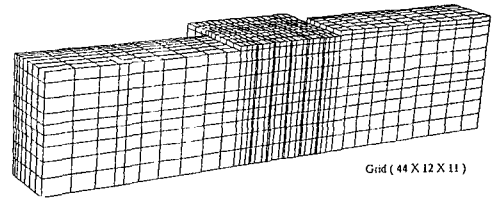


Fig. 3. The grid structure of the computational domain.

고 가정하였다. 로내에서 이들 가스의 화학종 계산은 하지 않았으며, 잉여공기를 고려하고 완전연소가 일어난다고 가정하면 O₂:N₂:CO₂:H₂O의 조성비는 0.043:0.743:0.095:0.119가 된다. 소성로의 길이 방향으로 양 측면이 서로 대칭조건을 가지므로 가운데를 대칭면으로 하여 한쪽 부분에 대해서만 로내 유동장 및 온도장을 계산하였다.

Fig. 3에 본 수치해석에서 사용한 1차 소성로의 계산 영역(55 m × 2.6 m × 2.0 m)에 대한 격자 구조(44 × 12 × 11)를 나타내었는데, y와 z 방향의 길이가 x 길이에 비해 그 비가 매우 작으므로 y, z 축은 각각 5배 확대하여 나타내었다.

2.1. 수치해석방법 및 지배방정식

프로그램으로는 검사체적에 기초한 유한차분방법(Control-Volume based Finite Difference Method)을 이용하는 상용 코드인 Fluent[®]를 사용하였다. 격자와 격자 사이 경계면에서의 일반종속변수 값의 profile 가정을 위해서는 Upwind scheme을 사용하였으며, 유동장 계산시 연속 방정식과 운동방정식을 연립하여 푸는 과정에서 발생하는 압력과 속도의 연계 문제는 SIMPLEC 알고리즘을 사용하여 해결하였다. 난류 모델로는 표준 k-ε 모델을 사용하여 운동방정식에서 유동장을 평균 취할 때 생기는 Reynolds stress($\overline{u'u'}$)를 해결하였다. 입구에서 1500 K의 공기가 주입된다고 가정하였는데, 이 때 유입 가스가 고온이므로 소성로내 열전달 방법은 주로 복사에 의하게 된다. 이에 복사 계산 모델로 노대 가스

의 흡수율과 벽면의 방사율이 모든 파장에 대해 일정한 값을 갖는 회체 복사를 가정하고 광선추적방법(ray-tracing technique)을 이용하는 DTRM(Discrete Transfer Radiation Model)을 사용하였다⁷⁾. 본 수치해석에서 소성로 내 유동장 및 온도장의 계산을 위해 사용된 식을 나타내면 다음과 같다. 여기에서 로내 유동은 정상상태를 가정하여 지배방정식의 비정상항을 생략하였다.

- Continuity eq.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

- Momentum transport eq.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + F_i$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

- Energy transport eq.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_c \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_h$$

- k-ε turbulence model

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 0.9, \quad \sigma_\epsilon = 1.22$$

- Radiation model(DTRM)

$$\frac{dl}{ds} = (\alpha_{abs} + \alpha_s)l + \frac{\alpha_{abs} \sigma T^4}{\pi}$$

각 식들의 기호에 대한 구체적인 설명은 기호 설명란에서 언급하였다.

2-2. 경계조건

소성로의 벽면에서는 정지 조건과 벽함수를 사용하여 자연대류를 가정한 열속(Heat Flux) 경계조건을 적

용하였다. 로 입구에서는 입구경계조건을 주었으며, 유입속도 6 m/s, 1500 K로 가스가 주입되고 난류강도는 10%를 주었다. 로 출구에서는 출구경계조건을 주었으며 유입된 모든 가스가 출구로 다 빠져나간다고 보았다.

로내 복사 계산시 α_{abs} 와 α_s 는 작동 유체가 공기, CO₂, H₂O의 복합가스인 점을 감안하여 0.3/m를 주었다. ε (emissivity)는 입구와 출구에서 1, 벽면에서는 0.6을 가정하였다.

소성품은 소성품들이 쌓여있는 사이사이의 기공들과 수분함유를 무시하고 전체를 하나의 커다란 블럭으로 처리하였으며, C_p는 도자기의 재료가 되는 규조토의 것으로 보아 C_p=880 J/kgK를 적용하였고, k=0.69 W/m°C를 주었다.

3. 수치해석 결과

먼저 1차 소성로 내에서의 기본 유동장을 살펴보기 위해 가스 유입 속도가 6 m/s일 때의 속도 벡터장을 나타내면 Fig. 4와 같다. 예열대, 소성대, 냉각대의 속도 벡터장을 한꺼번에 나타낼 경우 각 구간 사이의 속도 구배가 매우 크기 때문에 여기에서는 각 영역의 속도 벡터장을 따로 나타내었다. 각 영역의 평균 속도를 고려할 경우 소성대 > 예열대 > 냉각대 순으로 그 크기가 나타나는데 이것은 출구 위치가 예열대에 위치함으로써 소성대로 유입된 가스가 냉각대보다는 예열대쪽으로 치우쳐 흐르기 때문이다. 소성대에서 주입구 위치를 중심으로 유동이 상하 대칭을 보이며 재순환되고 있다. 소성대에 가까운 예열대, 냉각대에서는 소성대에서의 양분된 재순환 흐름에 영향을 받는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 5에 유입속도가 6 m/s이고, 출구가 로의 예열대 상부에 있을 경우 소성품의 위치에 따른 전체적인 속도 벡터장을 나타내었다. 속도 벡터장은 소성품의 위치에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났을 뿐 아니라 소성품이 존재하지 않는 경우와도 유사하게 나타났다. 즉, 소성대에서는 주입구 위치를 중심으로 양 방향으로 재순환 영역이 형성되며 출구쪽 즉 예열대 쪽으로 유동이 치우치고 냉각대는 거의 정체 영역을 보이고 있다.

Fig. 6에 Fig. 5의 각 경우에 대한 소성로 내 온도 분포도를 나타내었다. 각각의 경우를 비교해 본 결과 전체 온도분포에는 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타나 속도 벡터장과 마찬가지로 소성품의 위치가 로내 온도장에 크게 영향을 끼치지 않는 것으로 보인다.

Fig. 7에 Fig. 6의 각 경우에 대한 소성품에 대해 x방향 단면으로의 온도 분포도를 보였다. 계산 결과 소성품 내의

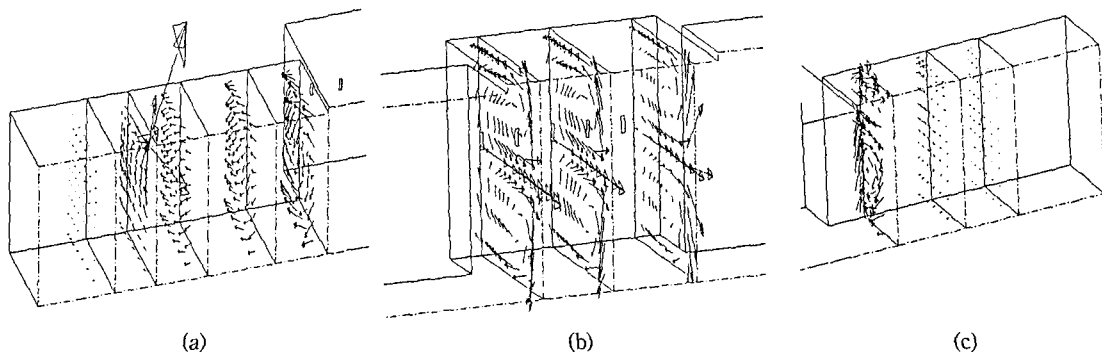
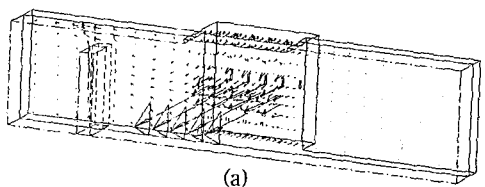
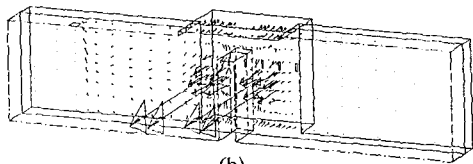


Fig. 4. The velocity vector profile at each zones of the first calcinator.

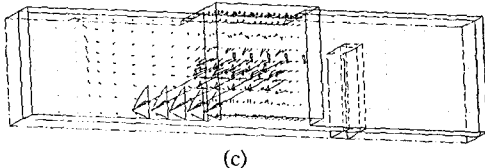
(a) Preheating zone: $U_{max}=2.353$ m/s, $U_{min}=3.253 \times 10^{-3}$ m/s. (b) Calcinating zone: $U_{max}=1.1605$ m/s, $U_{min}=6.5833 \times 10^{-2}$ m/s. (c) Cooling zone: $U_{max}=1.139 \times 10^{-1}$ m/s, $U_{min}=3.6914 \times 10^{-4}$ m/s.



(a)



(b)

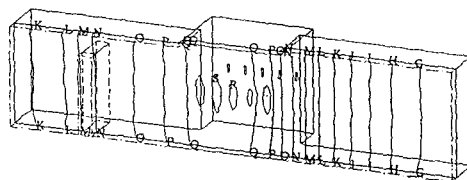


(c)

Fig. 5. The velocity vector profile of the first calcinator according to the location of block.

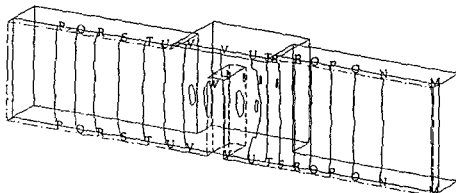
(a) at the preheating zone: $U_{max}=4.849$ m/s, $U_{min}=2.313 \times 10^{-5}$ m/s. (b) at the calcinating zone: $U_{max}=4.835$ m/s, $U_{min}=3.818 \times 10^{-5}$ m/s. (c) at the cooling zone: $U_{max}=4.8114$ m/s, $U_{min}=6.557 \times 10^{-6}$ m/s.

온도는 약 100°C의 차이를 두고 소성대 > 예열대 > 냉각대의 순으로 나타났는데 이는 Fig. 4의 속도장 분포와 일치하는 것으로서 유동장의 세기 및 그 양상이 소성품 내 온도 분포에 영향을 미치는 것으로 보인다. 소성대의 경우 상하 대칭으로 형성되는 재순환 영역 등 강한 대류가 소성대 온도 분포에 기여했을 것으로 보이며, 냉각대의 경우 거의 정체 영역으로 유동의 흐름이 나타나지 않는데도 높은 온도를 유지하는 것으로 보아 복사가 크



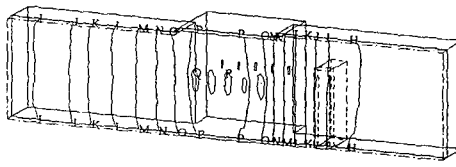
(a)

Temp (K)
S 1130
R 1100
Q 1080
O 1040
M 1000
K 958
I 917
G 875



(b)

Temp (K)
W 1130
V 1110
U 1080
T 1060
S 1030
Q 986
O 938
M 890



(c)

Temp (K)
R 1100
Q 1080
P 1060
O 1040
M 1000
K 958
I 917
H 896

Fig. 6. The temperature contour plots of the first calcinator according to the location of block.

(a) at the preheating zone, (b) at the calcinating zone, (c) at the cooling zone.

게 영향을 끼쳤을 것으로 판단된다. 예열대와 냉각대의 경우 소성품 위치에 따라 온도가 큰 차이를 보이지 않고 있으나 소성대에서는 주입구에서 멀어짐에 따라 소성품 내 온도가 약 10°C 간격으로 감소하고 있다. 이는 고온의 주입공기가 고르게 분포될 만한 공간 확보의 부족으로 인한 것으로 보인다.

Fig. 8에 소성로의 출구 위치가 로내 유동장 및 온도 분포에 미치는 영향을 알아보기 위해 소성품을 소성대

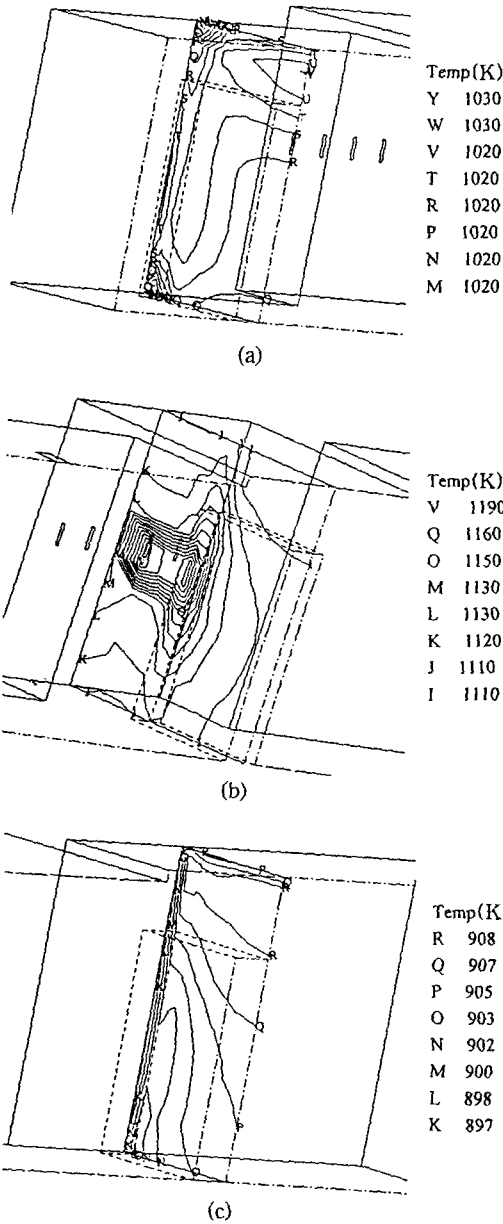


Fig. 7. The temperature contour plots on the block at each zone in the case of Fig. 6.
 (a) Preheating zone, (b) Calcinating zone, (c) Cooling zone.

에 위치시키고 출구 위치를 (a)예열대 좌측, (b)예열대 상부, (c)냉각대 우측으로 변화시킨 경우의 로내 등온도 선도를 나타내었다. 속도 벡터장은 예상했던 대로 출구가 있는 방향으로 유동이 크게 치우쳐 흐르고 그 반대 쪽은 거의 정체 영역을 이루는 양상을 보였으나, 전체

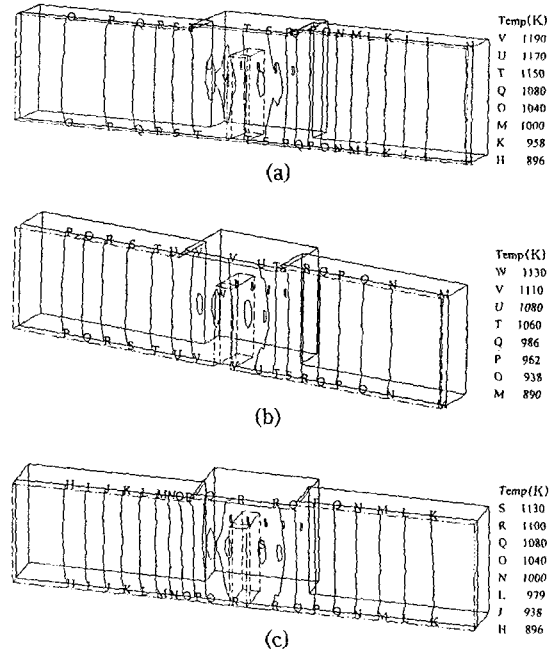


Fig. 8. The temperature contour plots of the first calcinator according to the location of outlet.
 (a) in the left side of a preheating zone. (b) in the top of a preheating zone. (c) in the right side of a cooling zone.

온도분포도에 있어서는 복사의 영향으로 인해 출구 위치에 관계없이 모든 경우에 각 영역에서 높은 온도를 나타내었다. 그러나 그림에서 보듯이 출구가 예열대 상부에 있을 경우 온도 분포도는 소성로를 중심으로 거의 대칭을 보이는 반면, 출구가 예열대 좌측과 냉각대 우측에 있는 경우는 출구가 있는 영역의 온도가 예열대 상부에 출구가 있는 경우와 비교하여 다소 상승하는 것으로 나타났다. 예열대와 냉각대의 경우 Fig. 1에서와 같은 온도 profile을 유도하기 위해 단열 조정 및 냉각공기 주입 등 부차적인 처리가 필요한데, 이런 점을 고려할 때 예열대와 냉각대의 온도가 고르게 분포되는 것이 2차 처리에 드는 비용을 줄이는데 유리할 것으로 여겨짐으로써 예열대 상부에 출구를 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

소성로 내에서의 열이용 정도를 알아보기 위해 열효율을 아래식과 같이 나타낼 수 있다. C_p 계산시 로내 가스 즉, O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O 의 조성비가 입구와 출구에서 같다고 가정하고 평균 C_p 를 계산하였다. 아울러 복사에 의한 상벽과 옆벽을 통한 열손실은 CO_2 , H_2O 로 이루어진 기체에 대해 grey gas를 가정하고 mean beam length를 계산하여 평균 복사열손실을 고려하였다. 뿐만 아니라 벽면에서 대류에 의한 열손실도 포함시켰다.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_m - \dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \int_{T_{atm}}^T C_p(T) dT$$

출구 위치가 예열대 상부에 존재하고 소성품을 소성대에 위치시킨 경우 로내 열효율을 계산하면 17%로 앞에서 언급한 낮은 열효율 값과 일치하는 경향을 보였다. 이러한 낮은 열효율은 상당량의 열이 현열로 배출되어 배출 온도가 약 1000 K로 매우 높게 나타났다.

본 연구에서는 실제 소성로에서와 같은 각 영역에서의 단열 처리 정도의 차이, 냉각대에서의 급냉 및 완냉을 위한 공기 주입 등을 고려하지 않았으므로 실제 사용에 적용하기에는 부적합할 것으로 보여지나 로 운전상의 변화 및 응용을 위한 기초 자료로서 가치가 있을 것으로 생각된다. 차후에 로내 연소 및 각 영역의 특성을 고려한 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

4. 결 론

도자기의 1차 소성로에 대해 기본 유동장과 소성품 및 출구 위치에 따른 속도 벡터장과 온도분포도의 수학적 모델과 수치해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 소성대에서는 연소용공기 주입으로 인해 혼합이 크게 발생하며 출구가 있는 영역으로 유동이 치우쳐 흐르는 반면 그 반대 영역은 거의 유동 흐름이 없는 정체 영역을 형성하는 것으로 나타났다.

2) 온도 분포도에 있어서는 예열대나 냉각대 측면에 출구가 위치하는 경우 유동의 치우침으로 인해 그 영역에서의 온도가 예열대 상부에 출구가 있을 때보다 크게 나타났는데 이 두 영역에서 온도 profile을 낮게 유지해야 함을 고려할 때 출구 위치는 예열대 상부가 바람직할 것으로 판단된다.

3) 소성품의 위치는 로내 유동장 및 온도 분포에 크게 영향을 끼치지 않는 반면 소성품 내 온도는 그 위치하는 영역의 온도 분포에 크게 영향을 받는 것으로 나타났는데 소성품 내 각 지점의 온도는 소성대에서 많게는 약 60°C 정도의 차이를 보였으나 각 영역에서 거의 균일한 분포를 갖는 것을 알 수 있었다.

4) 예열대 상부에 배출구가 위치하고 소성품이 소성대에 있는 경우의 열효율을 계산한 결과 유입된 열의 17%만이 소성시 이용되어 매우 저조한 열효율을 보였다.

사용기호

- u_i : Velocity in i direction, m/sec
- ρ : density, kg/m³
- τ_{ij} : Stress tensor
- P : Pressure
- g_i : Gravity acceleration in i direction, m/sec²
- F_i : External body force in i direction
- μ : Dynamic viscosity, kg/m · sec
- μ_t : Turbulent viscosity, kg/m · sec
- h : Enthalpy
- k_c : Mixture thermal conductivity
- T : Temperature, K
- S_n : Enthalpy source term
- k : Turbulent kinetic energy, m²/sec²
- ϵ : Turbulent kinetic energy dissipation rate, m²/sec³
- σ_x, σ_y : Prandtl numbers
- C_1, C_2, C_μ : Empirical constants
- G_k : Production of turbulent kinetic energy
- I : Radiant intensity
- α_{abs} : Absorption coefficient, m⁻¹
- α_s : Scattering coefficient, m⁻¹
- σ : Stefan Boltzman Constant (5.672 × 10⁻⁸ W/m²K⁴)

참고문헌

1. 李濬根 외 7인: 「세라믹 工學」, 半島出版社 (1991).
2. D.W. Richerson: Mordern Ceramic Engineering, Marcel Dekker, Inc. (1982).
3. C.H. Van Vlack: Elements of Materials Science and Engineering 4th E., Addison-Wesley Pub. Co. (1985).
4. W.D. Kingery, H.K. Bowen and D.R. Uhlmann: Introduction to Ceramics, 2nd Ed., John Wiley & Sons (1976).
5. 주식회사 삼현 허남석: "ROLLER KILN 관리 요령", 요업회보 18(4), (1993).
6. 한국도자기 주식회사: "中小企業에너지 管理診斷報告書", 에너지 관리공단, 中診 85-버-018號.
7. Fluent version 4.2, User's Manual, Fluent Inc.
8. Patankar, S.V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, New York (1980).
9. 「도자기」, 요업회보 19(4), 3-7 (1994).