

로울러 킬른 내의 이동현상에 관한 전산모사

이성철, 김병수

한양대학교 화학공학과, CPRC, 서울, 133-791
(1999년 3월 30일 접수)

A computer simulation of transport phenomena in a roller kiln

Sung-Chul Yi and Byong-Su Kim

Department of Chemical Engineering, Hanyang University, CPRC, Seoul 133-791, Korea
(Received March 30, 1999)

요 약 로울러 킬른 내의 이동 현상에 대하여 전산모사를 수행하였다. 소결 공정에서 중요한 요소인 로울러 킬른 내의 온도분포와 속도장을 구하기 위하여 유한요소법을 이용하여 에너지 보존식과 운동량 보존식을 풀었다. 로울러 킬른 내에 세라믹 원료가 없을 경우에, 벽면의 열원으로부터 유입되는 공기로 빠르게 열전달이 이루어지게 되며 공기는 이 열의 대부분을 로울러 킬른 밖으로 전달하는 것을 알 수 있었다. 세라믹 원료가 있을 경우에, 세라믹 원료는 벽면으로부터 열을 받아 온도가 상승하게 되나 상대적으로 차가운 공기의 유동 때문에 인하여 공기로 많은 열을 빼앗기게 되는 것을 알 수 있었다. 자연대류에 의한 열전달로 인하여 소성대인 영역 5에서 세라믹 원료의 바닥과 윗면에서 온도 차이가 255 K 정도 생겼다. 마지막으로 복사 열전달을 고려하였을 경우에 세라믹 원료 표면에서의 복사 열전달로 인하여 전도와 자연대류만 고려하였을 때보다 온도 차이가 45 K 정도 더 생겼다.

Abstract A computer simulation was conducted for heat and momentum transfer in a roller kiln. Time-averaged Navier-Stokes equation conjugated with energy balance equation was numerically solved to predict the temperature distribution and fluid flow field in the roller kiln. A computer simulation was performed for a roller kiln for three cases. Firstly, when there are no ceramic materials in the roller kiln, the effect of natural convection was studied on the temperature distribution and fluid flow field. From the result, it was observed that air takes the heat of wall away from the roller kiln by natural convection and the heat was not transferred effectively. Secondly, with ceramic materials temperature difference of ceramic material from the bottom to the top of a ceramic material was about 255 K in 5th zone and this is because the heat is transferred from the surface of a ceramic material to flowing air with relatively low temperature. Finally, we considered effect of radiation heat transfer. Temperature difference of ceramic material in 5th zone was about 300 K, due to radiation heat transfer on the ceramic material surfaces.

1. 서 론

지금 세계는 고도의 기술을 요하는 'New Ceramics'의 물결이 크게 일고 있다. 세라믹은 작게는 소형정밀기계 부품으로부터 열기관, 열 소모 미세 전자 제품, 절삭기, 초전도체, 세라믹 우기, 생체 세라믹 및 광전자 장치 등 광범위한 용도로 사용될 수 있는 다양한 기능을 지니고 있으므로 세라믹 소재의 활용 용도가 매우 넓다. 그러므로 우수한 성능을 가진 세라믹의 생산은 고부가가치를 창출할 수 있을 뿐만 아니라, 공업적 및 실생활적인 면

에 있어서 커다란 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

과거에는 세라믹 생산 시 소결 공정에 있어서 공정 설계나 조업을 현장 엔지니어의 실전 경험을 바탕으로 한 단순한 수학적 상관관계와 소규모 물리학적 모형에 의하여 행하여 왔다. 이러한 엔지니어의 현장 경험을 바탕으로 한 제한적인 공정 설계 및 조업 등은 오늘날 재료 및 에너지 단가 상승과 엄격한 제품 관리, 그리고 제품·공정의 안정성 등 여러 가지 문제에 있어서 적절한 대처 방안을 제시하기가 힘들다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 이미 선진국에서는 일련의 공정들에 대하여

컴퓨터를 이용한 공정 최적화 기법 등이 사용되어 생산성 향상을 꾀하고 있다.

현실적으로 우리 나라는 위에 언급한 문제점을 그대로 안고 있으며 컴퓨터를 이용한 공정 설계 및 조업은 아직 미약한 단계라고 할 수 있다. 로울러 킬른은 세라믹 등의 원료의 열처리를 위하여 설계된 노(furnace)의 일종으로 연속적으로 조업을 할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서 관심이 있는 현상은 로울러 킬른 내부에서의 온도분포와 유동장, 그리고 세라믹 원료의 온도분포이다.

본 연구는 세 경우에 대하여 연구를 진행하였다. 첫 번째로 세라믹 원료가 없을 때의 로울러 킬른 내의 열전달 메카니즘에 대해 알아보았고, 두 번째 세라믹 원료가 로울러 킬른 내에 있을 때 온도분포와 유동장이 어떻게 달라지는지 알아보았다. 마지막으로 복사 열전달 현상을 고려하여 로울러 킬른을 해석하였다.

2. 전산모사

2.1. 대상 시스템

Fig. 1은 box type 로울러 킬른에 대한 개략적인 모습을 보인 것이다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 로울러 킬른의 길이는 4.6 m이고 내부 높이는 0.136 m이다. 로울러 킬른 내부는 내화 벽돌로 되어 있으며, 벽면 위 아래로 각각 6개의 열원이 있다. 이 열원은 세라믹 원료가 각 영역을 지나면서 영역 사이의 갑작스러운 온도 변화로 인하여 세라믹 원료가 깨지는 것을 막기 위하여 영역 1에서 5까지 서서히 가열되도록 설계되어 있다. 로울러 킬른 밑 부분에 로울러가 있어 세라믹 원료가 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하여 각 영역을 통과하면서 연속적으로 소결 공정이 이루어지게 된다[1].

2.2. 가정

대상 시스템에 대하여 다음과 같은 가정을 적용하였다.

- i) 유동은 2차원 정상 상태, 난류 유동이다.
- ii) 유체는 공기이며 비압축성이다.
- iii) 운동량 보존식의 부력항에 나타나는 밀도를 제외한 모든 물성치는 일정하다고 보고, 부력항에 대해서는 Boussinesq 근사를 적용한다.
- iv) 유체가 공기이므로 복사 열전달에 대하여 참여하지 않는다[2].
- v) 모든 벽면은 회색체(gray body)로 간주하며, 복사능(emissivity)과 흡수능(absorptivity)은 방향에 의존하지 않는다.
- vi) 대기에 노출된 유입구와 유출구는 복사 열전달에 대하여 가상적인 흑체면이다.
- vii) 로울러에 의한 세라믹 원료의 이동 속도는 6.9×10^{-5} m/s로 매우 작기 때문에 이동속도로 인한 영향을 무시한다.

2.3. 지배 방정식과 격자망 설계

로울러 킬른 내의 온도분포와 유동장 그리고 세라믹 원료의 온도분포는 다음의 연속 방정식, 운동량 보존식, 에너지 보존식에 의하여 지배된다. 본 연구의 대상 시스템인 로울러 킬른은 강제대류 없이, 가열되는 벽면과 공기의 온도차이로 인하여 유발되는 자연대류에 의해서 유동이 생성된다. 자연대류에 의한 유동이 난류이므로 로울러 킬른 내의 유동을 난류모델을 사용하여 구하여야 한다. 사용된 난류 모델은 1974년 Launder-Spalding이 제안한 표준 k-ε 모델이다[3, 4]. 본 연구의 가정을 기초로 벡터 형태로 표시한 연속 방정식, 운동량 보존식, 에너지 보존식, 그리고 표준 k-ε 모델에 대한 난류 운동에너지 방정식을 풀었다. 또한 복사를 고려했을 때에는 복사 열교환 방정식과 에너지 보존식을 사용하여 해석하였다.

연속 방정식:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

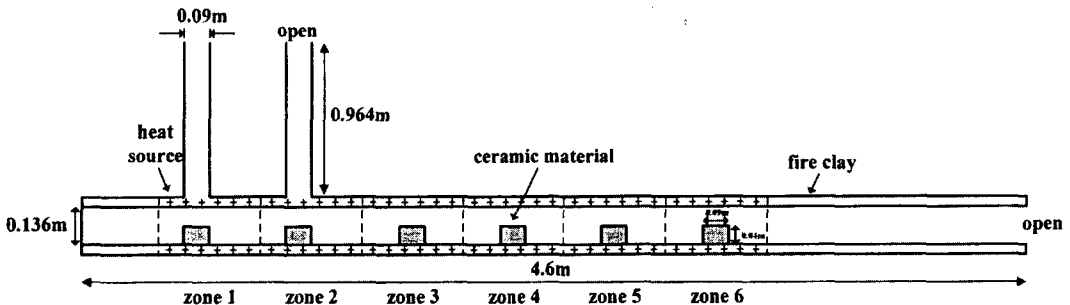


Fig. 1. Schematic diagram of a ceramic roller kiln.

운동량 보존식:

$$\rho_0 \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} - \rho_0 \mathbf{g} \beta_T (T - T_0) \quad (2)$$

에너지 보존식:

$$\rho_0 c_p \mathbf{u} \nabla T = k \nabla^2 T \quad (3)$$

난류 운동에너지 방정식:

운동에너지(kinetic energy)

$$\rho_0 \mathbf{u} \nabla k = \nabla \mu_0 + \frac{\mu}{\alpha_k} \nabla^2 k + \mu_i \Phi + \mu_g \frac{\beta_T}{\alpha} \nabla T - \rho_0 \epsilon \quad (4)$$

운동에너지 소산율(dissipation of kinetic energy)

$$\rho_0 \mathbf{u} \nabla \epsilon = \nabla \mu_\epsilon + \frac{\mu_\epsilon}{\sigma_\epsilon} \nabla^2 \epsilon + c_1 \frac{\epsilon}{k} \mu_i \Phi + c_1(1 - c_3) \frac{\epsilon}{k} \mathbf{g} \frac{\mu_i}{\alpha} \beta_T \nabla T - \rho_0 c_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

Pr가 0.71인 경우 Rayleigh number가 10^6 이상이면 유동은 난류가 된다. Rayleigh number는 식(6)와 같으며, 본 연구에서 값은 7.098×10^7 이다. 유동이 난류이므로 벽면에 생기는 열경계층과 속도경계층을 정확히 해석하기 위하여 벽면에 많은 격자를 넣어야 하며 경계층 안에 벽면으로부터 첫 번째 격자점이 있어야 한다. 자연 대류 층류 유동에 대하여 경계층 두께 δ 를 구하는 식을 1966년에 Gill[5]이 발표하였으며 식(7)와 같다. 본 연구에서 경계층 두께는 1.48 mm이었다.

$$Ra = \frac{\rho^2 c_p g \beta_T L^3}{\mu k} \quad (6)$$

$$\delta \approx \frac{L}{Ra^{0.25}} \quad (7)$$

또한, 영역 1~6까지 매우 높은 온도로 가열이 되고 있으므로 가열되고 있는 벽면과 단열인 벽면 사이에 격자를 충분히 넣어주어 갑작스런 온도변화로 인한 수치적인 오차를 줄였다.

위와 같은 기본 격자망 설계 개념을 갖고 158×40의 격자망을 구성하였고, 이를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2를 보면 로울러 킬른 벽면과 세라믹 원료 표면에 격자



Fig. 2. Grid system in the roller kiln.

를 촘촘하게 넣은 것을 볼 수 있다.

이 모든 격자망설계와 계산은 상용 소프트웨어인 FIDAP 7.0을 사용하였다.

2.4. 경계 및 초기 조건

2.4.1. 경계 조건

벽면 및 유입구: 온도에 대한 경계 조건을 Table 1에 나타내었다. 벽면은 Table 1에 나타난 온도로 유지되며, 실제적으로 로울러 킬른의 오른쪽으로 열린 부분(Fig. 1 참조)에서 대기 중의 공기가 로울러 킬른 내로 유입되므로 유입구로 생각하며 그 때의 온도를 대기 온도 300 K로 고정하였다. 그리고 킬른 내의 벽 부분과 세라믹 원료의 표면에서는 벽법칙(law of the wall)을 적용하였다.

유출구: 왼쪽 위의 두 개의 열린 부분에서 실제적으로 공기가 유출되므로 유출구라고 생각하고 Neumann 경계 조건을 이용하였다.

2.4.2. 초기 조건

로울러 킬른 벽면에 매우 높은 온도의 경계 조건이 설정되어 있으므로 처음부터 이 경계조건을 가지고 해를

Table 1
Boundary conditions for temperature in 1st~6th zones

Zone	Temperature	Remark
Zone 1	525 K	
Zone 2	755 K	
Zone 3	1075 K	
Zone 4	1575 K	Sintering zone
Zone 5	1675 K	Sintering zone
Zone 6	1525 K	
Inlet	300 K	

Table 2
System parameters

Parameter	Air (300 K)	Aluminium oxide	Fire clay
Density (kg/m ³)	1.1769		
Specific heat (J/kg-K)	1.0063×10^3		
Viscosity (kg/m-s)	1.8464×10^{-5}		
Thermal conductivity (W/m-K)	2.6240×10^{-2}	39.0	1.13 (373 K)
Volume expansion coefficient (K ⁻¹)	3.3329×10^{-3}		
Thermal diffusivity coefficient (m ² /s)	2.2156×10^{-5}		
Emmissivity	1.00	0.31 (777 K)	0.75 (1273 K)

구하면 발산하기 쉽다. 따라서 최종 해를 얻기 위한 중간 단계가 필요하게 된다. 낮은 온도 경계 조건을 주어 해를 구한 다음 이 결과를 다음 해석의 초기 조건으로 사용하여 최종적인 결과를 얻는 방식으로 시스템을 해석하였다.

시스템의 수렴성을 좋게 하기 위하여 k 와 ϵ 의 초기 조건을 0.005로 주었다.

2.5. 시스템 파라미터

로울러 킬른의 각 벽면은 내화 벽들로 되어 있으며, 세라믹 원료는 산화 알루미늄, 그리고 유체는 공기이다. Table 2에 시스템 특성인자를 정리해 놓았다[2, 6]. 모두 SI 단위이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 세라믹 원료가 없을 때 로울러 킬른 해석

Fig. 3에 세라믹 원료가 없을 때 로울러 킬른 내의 온도분포를 나타내었다. 대기 중의 차가운 공기(300 K)가 로울러 킬른 내로 유입되어 온도가 높은 벽면으로부터 공기 중으로 열전달이 매우 빠르게 일어남을 볼 수 있다. 유입구를 통하여 로울러 킬른 내로 들어온 공기는

영역 6에서부터 가열되어 5개의 영역을 더 지나면서 점점 더 벽면으로부터 많은 열을 받게 되어 유출구를 통하여 빠져나가게 된다.

중요한 현상은 벽면으로부터의 열이 킬른 중심(y 방향으로)으로 제대로 전달이 안되며 공기가 대부분의 벽면의 열을 가지고 로울러 킬른을 빠져나간다는 것이다. 따라서 세라믹 원료가 있을 때 자연대류로 인하여 세라믹 원료 표면에서 공기로의 열전달이 매우 빠르게 일어날 것으로 예상된다.

Fig. 4는 로울러 킬른 중심($y = 6.8$ cm)에서의 온도분포를 x 축을 따라서 나타낸 그림이다. Fig. 3에서도 알 수 있었던듯이 공기가 가열 영역을 지나기 전까지는 300 K로 유입되다가 가열 영역을 지나면서 벽면으로부터 열전달을 받아 온도가 높아지는 것을 볼 수 있다.

로울러 킬른의 왼쪽 부분이 막혀 있으므로 유동의 정체 구간이 생기게 된다. 이 정체구간은 유동이 지배적인 다른 영역보다 자연대류에 의한 열전달 효과가 미약하므로 영역 1에서 525 K로 가열되는 열을 보존할 수 있으므로 다른 영역보다 온도가 높게 유지되는 것을 알 수 있다.

3.2. 세라믹 원료가 있을 때 로울러 킬른 해석

Fig. 5에 세라믹 원료가 있을 때 로울러 킬른의 온도분포를 나타내었다. 세라믹 원료가 없을 때의 경우에서 예상했던 것처럼 세라믹 원료 표면으로부터 공기로의

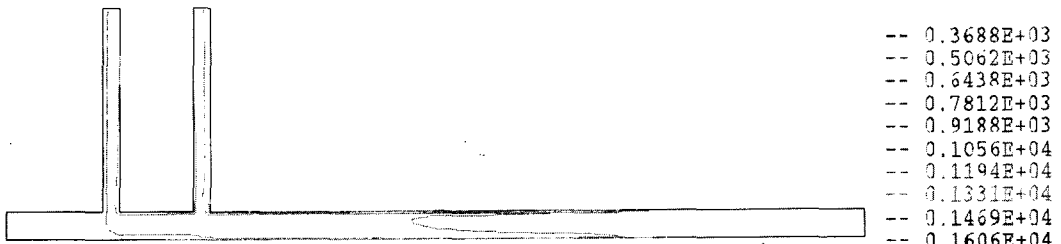


Fig. 3. Temperature distribution in the roller kiln - case 1.

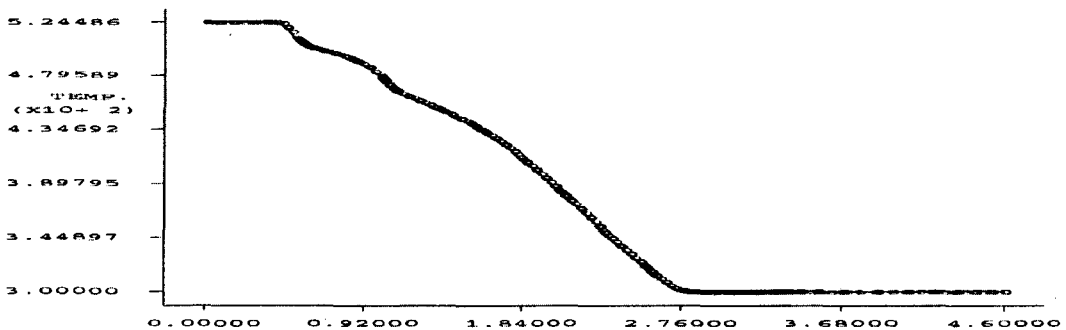


Fig. 4. Temperature distribution along the x axis at $y = 0.068$ m - case 1.

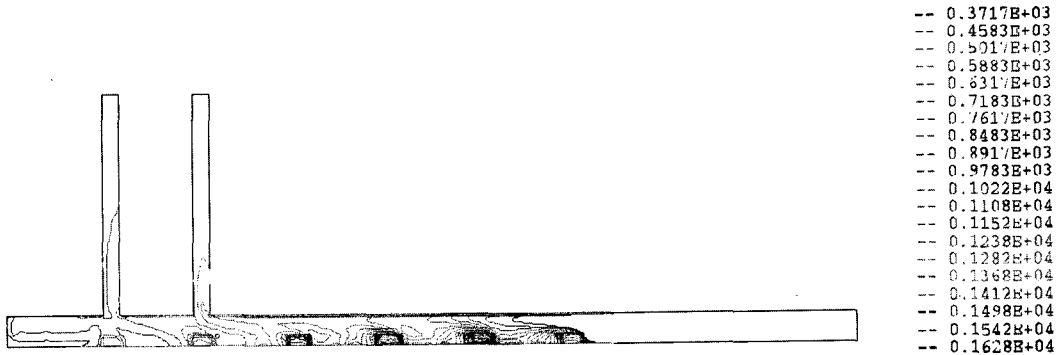


Fig. 5. Temperature distribution in the roller kiln - case 2.

열전달로 인하여 세라믹 원료의 온도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 영역 1과 2는 벽면의 온도와 거의 비슷하게 세라믹 원료의 온도가 상승되는 것을 알 수 있다. 그러나 영역 3부터 세라믹 원료 내에 온도분포가 생기며 영역 5에서 온도 구배가 가장 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 상대적으로 차가운 공기가 오른쪽 유입구로부터 유입되어 영역 3에서 6까지는 온도가 높은 세라믹 원료

표면에서 공기로 열전달이 빠르게 이루어져 세라믹 원료의 온도 상승을 공기가 억제하게되지만 열을 뺀 공기의 온도가 꾸준히 상승되므로 영역 2와 1에 공기가 도달하게 되면 공기의 온도가 벽면에서의 온도와 거의 비슷하게 된다. 따라서 공기가 더 이상 벽면으로부터 세라믹 원료로 전도에 의한 세라믹 원료의 온도 상승을 억제하지 못하게 된다.

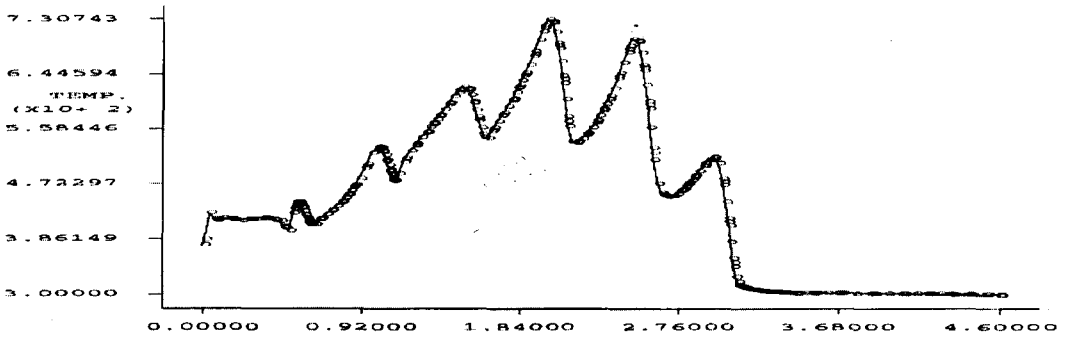


Fig. 6. Temperature distribution along the x axis at y = 0.068 m - case 2.

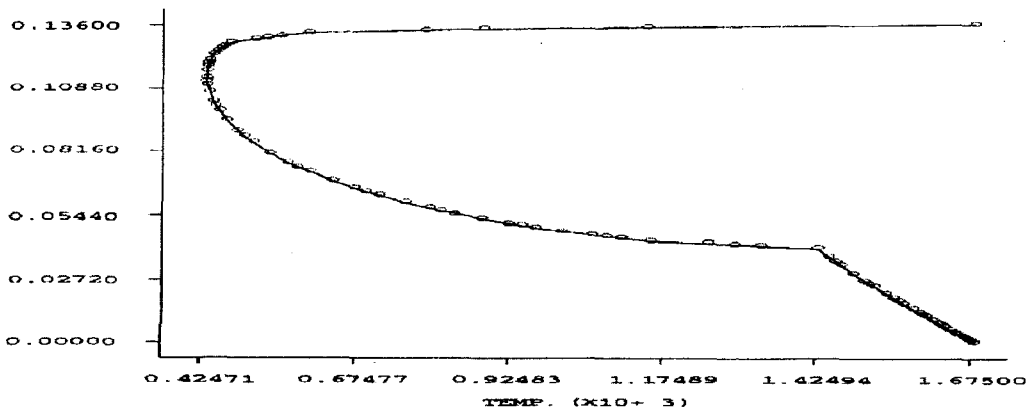


Fig. 7. Temperature distribution along the y axis at x = 2.565 - case 2.

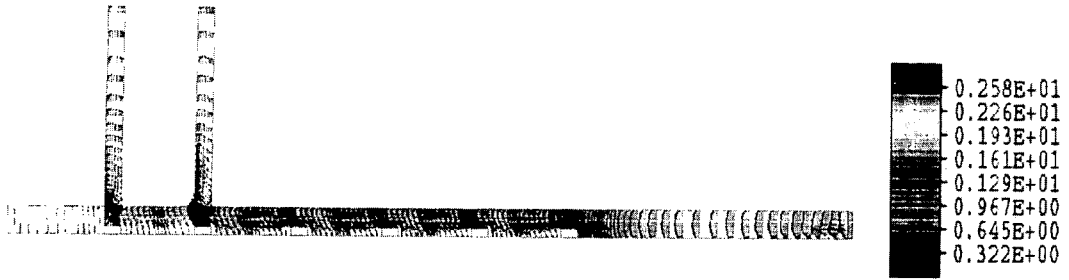


Fig. 8. Velocity field in the roller kiln - case 2.

Fig. 6은 로울러 킬른 중심($y = 6.8 \text{ cm}$)에서의 온도분포를 x 축을 따라서 나타낸 그림이다. 세라믹 원료는 자연대류에 의하여 크게 온도가 낮아지며 그 영향은 벽면의 온도가 높을수록 커지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 소성대인 영역 5에서의 세라믹 원료를 중심($x = 2.565 \text{ m}$)으로 하여 y 축을 따라서 온도분포를 나타낸 것이다. 벽면 위 아래로 1675 K로 가열되고 있음에도 불구하고 자연대류의 영향으로 세라믹 원료 위쪽 표면의 온도가 약 1420 K로 낮아지며 세라믹 원료 바닥과 윗면이 255 K의 온도 차이가 생긴다. 그리고 세라믹 원료 표면과 벽면을 벗어나면서 온도가 매우 빠르게 낮아지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 자연대류로 생긴 유동장을 보여준 그림이다. 유입된 공기가 영역 6으로 갈수록 점점 발달하는 모습을 볼 수 있다. 벽면 근처와 세라믹 원료 표면에 경계층이 생기는 것을 볼 수 있으며 최고 속도는 영역 2에서 오른쪽 유출구 쪽으로 2.900 m/s이고 유동의 평균 속도는 약 1.096 m/s이다. 부력의 영향으로 유동이 전반적으로 위쪽 벽면으로 치우치게 되는 것을 볼 수 있다.

3.3. 복사 열전달을 고려하였을 때 로울러 킬른 해석

3.3.1. 세라믹 원료의 열전도도가 39.0(W/m-K)일 때

Fig. 9는 복사 열전달을 고려하였을 때 로울러 킬른의 온도분포를 보인 것이다. 전도와 자연대류만을 고려했을 때와는 달리 단열인 벽면으로 고온의 열경계층이 생성되는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 복사 열전달 현상이 해석 영역의 온도를 전체적으로 균일하게 만들려는 특성에 의해 생기는 것이다.

Fig. 10은 로울러 킬른 중심($y = 6.8 \text{ cm}$)에서의 온도분포를 x 축을 따라서 나타낸 그림이다. Fig. 10과 Fig. 6을 비교해 보면 복사 열전달 특성을 확연하게 구분할 수 있다. 먼저 세라믹 원료 표면의 복사 열전달로 인하여 로울러 킬른 내의 전반적인 온도 감소가 일어난 것을 볼 수 있다. Fig. 6과 달리 각 가열 영역마다 온도의 상승 폭과 감소 폭도 크지 않으며 전반적으로 로울러 킬른 내의 온도가 비슷한 것을 볼 수 있다.

Fig. 11은 소성대인 영역 5에서의 세라믹 원료를 중심($x = 2.565 \text{ m}$)으로 하여 y 축을 따라서 온도분포를 나타낸 것이다. 세라믹 원료 윗면의 온도가 1375 K로 전도와 자연대류만을 고려했을 때보다 45 K가 더 감소하였으며 바닥과는 약 300 K의 온도 차이가 난다. 또한 전도와 자연대류만 고려했을 때보다 벽면과 세라믹 원료 표면에서 더 빠르게 열전달이 진행되어 전체 온도분포가 고르게 나타남을 볼 수 있다.

복사에 의한 열전달을 고려하였을 때 온도가 더 하락

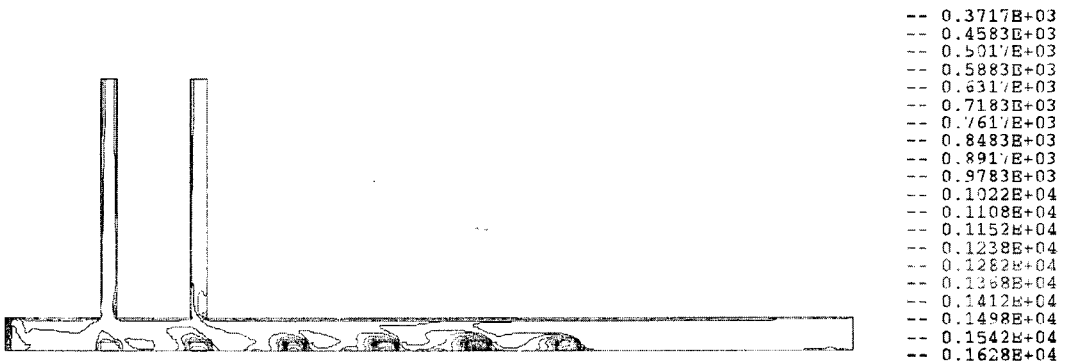


Fig. 9. Temperature distribution in the roller kiln - case 3.

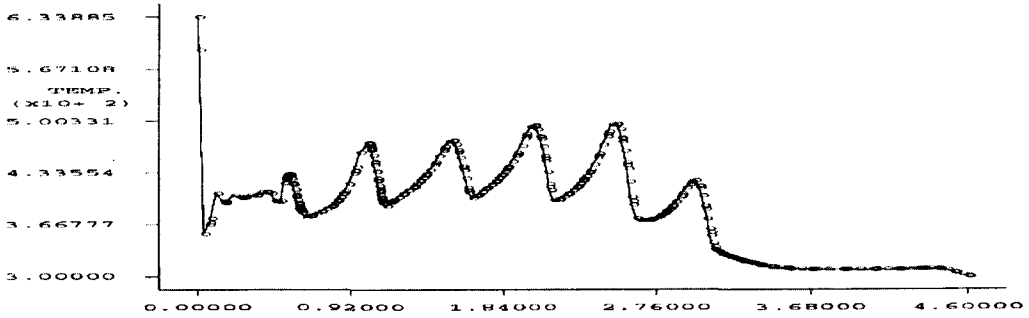


Fig. 10. Temperature distribution along the x axis at y=0.068 m - case 3.

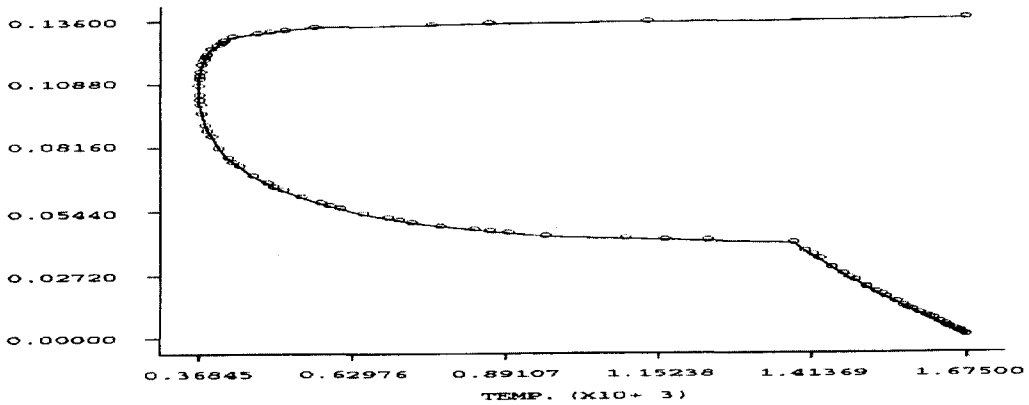


Fig. 11. Temperature distribution along the y axis at x=2.565 - case 3.

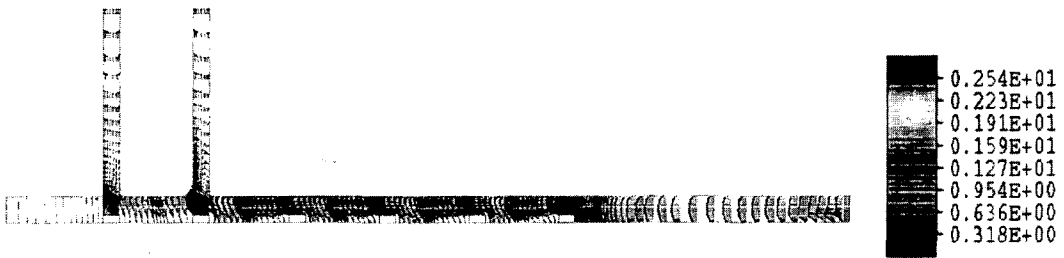


Fig. 12. Velocity field in a roller kiln - case 3.

하는 이유는 다음과 같다. 본 연구의 경우 세라믹 원료의 열전도도가 높으므로 벽면에서 고체로의 열전달은 복사보다 전도가 더 지배적인 메커니즘이 되어 윗 벽면에서의 복사 열전달 효과는 그리 크지 않다. 대신 세라믹 원료 표면의 온도가 높아 복사 표면이 되므로 복사 표면으로부터 그 표면을 제외한 나머지 벽면으로 복사 열이 전달되므로 결국 세라믹 원료의 온도가 하락하게 되는 것이다.

Fig. 12는 유동장을 보인 것이다. 유체가 공기이므로 복사 열전달에 직접 참여하지 않으므로 복사 열전달로 인한 유동장의 변화는 거의 없다. 최고 속도는 영역 2에

서 오른쪽 유출구 쪽으로 2.861 m/s이고 유동의 평균 속도는 약 1.094 m/s로 전도와 자연대류를 고려하였을 때와 큰 차이가 없다.

3.3.2. 세라믹 원료의 열전도도가 3.9(W/m-K)일 때

Fig. 13은 세라믹 원료의 열전도도가 낮을 때의 소성대인 영역 5에서 세라믹 원료의 온도 분포를 나타낸 것이다. 위의 세라믹 원료는 복사 열전달을 고려하지 않은 것이고 밑의 것은 복사 열전달을 고려한 것이다. 복사 열전달을 고려하지 않을 경우 세라믹 원료의 표면 온도가 약 800 K이고 고려한 경우가 1100 K로 복사를 고려

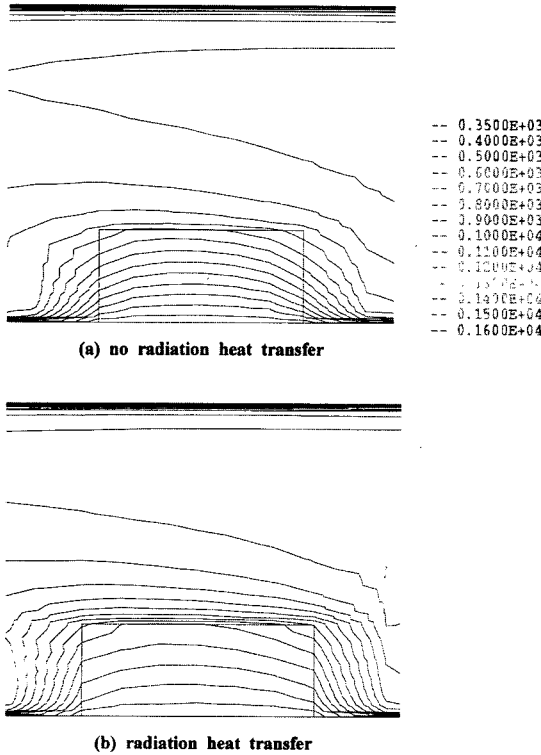


Fig. 13. Temperature distribution of 5th ceramic material for thermal conductivity 3.9 (W/m-K).

하였을 경우가 약 300 K 정도 더 높다. 복사 열전달을 고려하지 않은 경우는 세라믹 원료가 벽면으로부터 전도에 의한 열전달로 인하여 온도가 상승하나 세라믹 원료의 열전도도가 낮고 자연대류에 의한 공기로의 열전달로 인하여 세라믹 원료의 온도 상승이 크게 억제되고 있음을 보인다. 반면에 복사 열전달을 고려한 경우 벽면 위의 열원으로부터 세라믹 원료가 복사 열전달에 의해 복사를 고려하지 않을 경우보다 온도가 상승되고 있음을 보여준다.

4. 결 론

세라믹 로울러 킬른에 대하여 세 가지 경우로 나누어 전산모사를 수행하였다:

- 1) 로울러 킬른 내에 세라믹 원료가 없을 때 벽면으로부터 열전달로 인하여 유입구 쪽의 공기가 유입되어 자연대류가 생성되어 공기가 유출구로 빠져나가면서 벽면으로부터의 열을 거의 뺏어 갖고 나가는 것을 알 수 있었다.
- 2) 세라믹 원료가 있을 때, 아래 벽면으로부터 세라믹 원료로 전도에 의하여 열이 전달되지만 영역 3부터 6가

지는 자연대류로 인하여 공기가 세라믹 원료 표면의 열을 뺏어 가므로 세라믹 원료 내의 온도차가 크게 났다.

3) 복사에 의한 열전달을 고려한 경우, 세라믹 원료 표면으로부터 벽면으로 복사 열전달로 인하여 세라믹 원료 표면의 온도가 더 낮아지는 것을 알 수 있었다. 세라믹 원료의 열전도도가 39.0(W/m-K)인 경우 세라믹 원료의 온도를 상승시키는 주 열전달 메커니즘은 전도이므로 위 쪽 벽면으로부터의 복사 열전달 효과가 작다. 따라서 실제 조업시 위 쪽 벽면의 열원은 세라믹 원료의 온도 상승에 크게 기여하지 못하고 있음을 알 수 있었다. 반면에 세라믹 원료의 열전도도가 3.9(W/m-K)인 경우에는 위 쪽 벽면에서 복사 열전달로 인한 세라믹 원료의 온도 상승 효과가 매우 크다는 것을 알 수 있었으며 세라믹 원료의 온도를 상승시키는 메커니즘은 전도와 복사 열전달임을 알 수 있었다.

본 연구를 통하여 얻어진 로울러 킬른의 전체 온도분포는 로울러 킬른의 최적 조업에 기본방향을 제시해 줄 수 있다. 또한, 세라믹 원료의 온도분포는 소결 공정의 적정 온도를 찾기 위하여 열응력 해석 시에 경계조건으로 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 세라믹공정 연구센터의 지원(과제번호: 97K-0603-03-04-3)에 의하여 연구되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

사용기호

- c_n : concentration (mass fraction) of chemical species n
- c_p : specific heat at constant pressure
- d_{ij} : shear-rate (deformation) tensor
- e : emissivity
- f_i : body force vector
- g : gravitational vector
- H : heat generation
- k, k_{ij} : thermal conductivity
- k : turbulent kinetic energy
- p : fluid pressure
- q, q_i : heat flux
- q_a : prescribed heat flux
- q_c : convective heat flux
- q_r : radiative heat flux

R_n : chemical reaction rate of chemical species n
 S : Stefan-Boltzmann constant
 T : temperature
 t : time
 \mathbf{u} : fluid velocity vector
 x_i : Cartesian coordinates

그리스 문자

α_n : mass molecular diffusivity
 β_T : volume expansion coefficients
 δ_{ij} : Kronecker delta
 ϵ : dissipation rate of turbulent kinetic energy
 ϵ_{ij} : shear-rate (deformation) tensor
 μ : dynamic viscosity
 ρ : density
 σ_{ij} : stress tensor

τ_{ij} : deviatoric part of the stress tensor
 Φ : $2\epsilon_{ij}\epsilon_{ij}$ ($0.5d_{ij}d_{ij}$); viscosity dissipation is $\mu\Phi$

참고 문헌

- [1] Anon: CFI/Berichte der DKG, 68 (1991) 1.
- [2] R. Welty, James, E. Wicks, Charles and E. Wilson, Robert, Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer, 3rd Ed. (John Wiley & Sons, Inc., 1983).
- [3] B.E. Launder and D.B. Spalding, Comp. Meths. Appl. Mech. Eng. 3 (1974) 269.
- [4] J.L. Lumley and H. Tennekes, A First Course in Turbulence, The MIT Press (1972).
- [5] A.E. Gill, J. Fluid Mechanics, 26 (1966) 515.
- [6] R.H. Perry, Perry's Chemical Engineering Handbook, McGraw Hill (1984).