

제철소용가열로내전열과유동장의3차원비정상해석

한상현[†] · 강상훈* · 김창영** · 김만영*** · 백승욱****

3D Unsteady Numerical Analysis of a Slab Heater for Steel Mill Company

Sang Heon Han, Sang Hun Kang, Chang Young Kim, Man Young Kim, and Seung Wook Baek

Abstract

Numerical analysis code has been developed for investigating the combustion characteristics in a slab heater of a steel mill company. Unsteady full 3-Dimensional behaviour can be predicted with the code. Premixed flame model is adopted for combustion phenomena. And eddy dissipation model is used for turbulent flow and non gray FVM method for radiation. Slab movement can be fully traced from entrance into heater until it's exit and computation is performed during that period. Code was validated by comparing the calculation results with experimental ones for the bench scale heater.

Key Words : Numerical , Slab-Heater, Unsteady

1. 서 론

열연강관은 자동차, 건설, 조선, 파이프, 산업기계 등 산업 전 분야에 없어서는 안 될 중요한 소재로 쓰인다. 이러한 열연강관은 철판, slab, 피철과 같은 반제품을 열간 압연하여 만들어진다. 이때 반제품을 열간 압연하기에 적당한 온도인 섭씨 1100 도에서 1300도까지 높이기 위해서 가열로(Reheat furnace)가 사용된다. 이러한 열연강관의 생산성 및 품질 향상을 위해서는 가열로 내의 유동, 온도 및 조성 분포뿐만 아니라 피가열체의 추출온도를 정확하게 예측하는 것이 매우 중요하다. 또한 가열로의 작동에 사용되는 에너지는 생산량의 1톤 당 약 0.233~2.33 GJ 정도의 에너지로

서, 철강 생산에 있어서 철광석을 용융하는데 사용되는 에너지 다음으로 가장 많은 양이다. 뿐만 아니라 제강산업에서 발생하는 총 NOx 양의 3분의 1이 이 과정에서 생성된다고 알려져 있다. 따라서 이러한 가열로 운전조건의 최적화를 위한 해석은 철강생산의 비용절감, 생산성 향상 및 공해 물질배출의 저감을 위해서 반드시 필요하다고 할 수 있다.

제품의 생산성 및 품질의 개선을 위해서는 피가열체의 추출온도 뿐만 아니라 가열로 내부 온도를 정확하게 예측할 필요가 있다. 또한 기체온도에 매우 민감하게 반응하는 NOx 발생의 저감을 위해서도 가열로 내부현상의 대한 예측은 필수적이다. 그러나 Slab의 효율적인 가열을 위해 기존의 많은 가열로들이 복잡한 형상으로 이루어져 있고, 버너 및 피가열체의 높은 온도로 인하여 복사열전달에 의한 영향 또한 매우 중요하기 때문에 이러한 현상을 수치적으로 해석하기 위해서는 난류 및 복사해석에 관한 정확한 모델이 수반되어야 한다. 뿐만 아니라 가열로의 최적 운전을 위해서는 노의 형상 및 운용조건에 따라 노 내부의 유동 및 온도가 어떻게 변화하는지 살펴

† 한국과학기술원 항공우주공학 전공
E-mail : shhan1@kaist.ac.kr
TEL : (042) 869-3714 FAX : (042) 869-5754

* 한국과학기술원 항공우주공학 전공

** 포항산업과학연구원 에너지연구팀

*** 전북대학교 기계항공우주공학부

**** 한국과학기술원 항공우주공학과

불 필요가 있다.

2. 이론 해석

2.1 지배방정식

로 내의 화학반응 유동장을 해석하기 위해서는 연소기 내부의 유체의 난류 유동, 화학반응 및 복사열전달 현상 등에 대한 지배방정식을 동시에 해석해야 한다. 이 때, 화학반응 유동장을 지배하는 지배방정식은 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식 및 각 화학종의 보존 방정식으로 구성되며 이들을 텐서 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i u_k} \right) \right] \quad (1)$$

한편, 화학반응 및 복사열전달이 존재하는 경우의 에너지 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k h) &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_r}{Pr_T} \right) \frac{\partial h}{\partial x_k} \right] \\ &+ H_{fv} \dot{\omega}_{fv} - \nabla \cdot q^R \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서,

$$h = \sum_k Y_k h_k = \sum_k Y_k \int_{T_{ref}}^T C_{P,k}(T) dT \quad (3)$$

로서 엔탈피를 나타내며, $C_{P,k}$ 는 각 화학종들의 정압비열로서 JANAF 테이블에 주어진 값을 1차식으로 근사하여 사용하였다. 또한, 위의 에너지 방정식에서 우변 둘째 항은 연소에 의한 생성항이며 셋째 항은 복사열전달에 의한 에너지 소멸을 나타내는 생성항이다. 한편, 화학종의 보존방정식은 다음과 같다. 즉,

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k Y_i) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_r}{Sc_T} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_k} \right] + \dot{\omega}_i \quad (4)$$

여기에서 Y_i 와 $\dot{\omega}_i$ 는 고려하고 있는 각 화학종의 질량분율 및 생성률을 나타낸다. 본 계산에서 사용된 Pr_T 와 Sc_T 는 각각 1이다.

한편, 난류해석을 위하여 다음과 같은 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 적용하였다. 즉,

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k k) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_r}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + P_T - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_r}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} P_T - C_2 \frac{\rho}{\epsilon} \quad (6)$$

여기에서 P_T 는 난류생성항이다. 한편 난류점성 계수 μ_r 는 다음과 같이 주어진다. 즉,

$$\mu_r = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

하지만 위 난류모델은 완전 난류영역에서만 사용할 수 있으며 벽면 부근에서는 잘 알려진 벽함수를 사용한다. 한편, 이 난류 모델에 사용된 모델 상수는 각각 다음과 같다.

$$C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.3, \quad C_\epsilon = 1.0 \quad (8)$$

2.2 연소 모델

난류 화염의 수학적 모델링은 유동과 화학 반응 간의 상호작용뿐만 아니라 난류 유동과 화학 반응 기구에도 연관된 문제이다. Magnussen and Hjertager (1977)가 eddy dissipation model을 발표하기 전까지 난류 화염의 해석은 크게 두 가지의 부류의 방법으로 해석되어 왔는데 첫째는, 난류와 화학 반응 간의 상호 작용의 결과로 나타나는 비균질성 효과를 고려하여 혼합비의 통계학적 교란에 기초한 모델이고 둘째는, 예혼합 화염에서의 반응률을 모델링한 eddy-break-up 모델의 두 가지 형태였으나 예 혼합 화염과 확산 화염의 경우에 모두 적용하기에는 일반적이지 못하였다. 확산 화염에서 화학 반응은 매우 빠르기 때문에 각각 다른 eddy 들 내부의 연료와 산소가 혼합되는 시간에 의하여 결정된다는 가정 그리고, 연료의 농도가 산소의 농도보다 높은 지역에서의 지배 인자는 산소라는 개념에 예 혼합 난류 화염에서 뜨거운 생성물을 가지고 있는 eddy의 효과를 고려하여 생성물의 농도가 최소인 경우를 추가한 것이 eddy dissipation model이다 (Magnussen and Hjertager, 1977). 수소의 연소는 확산 화염과 부분적인 예 혼합 화염이 혼합되어 난류에 의하여 영향을 받는 연소 형태를 가지므로 eddy dissipation model의 적용이 적절하다

고 판단된다.

eddy dissipation model에서 반응물은 turbulence time scale (ε/k)과 연료, 산화제 및 생성물 중 가장 작은 농도를 가지는 화학종의 농도에 비례하는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$R_{fu} = \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left\{ a Y_{fu}, a \frac{Y_{ox}}{s_1}, b \frac{Y_p}{1+s_1} \right\} \quad (9)$$

여기서, s_1 은 연료에 대한 산소의 stoichiometric mass 수소의 경우는

$$s_1 = \frac{0.5W_{ox}}{W_{fu}} \quad (10)$$

이다. 그리고 반응 모델에서 사용한 empirical constants는 $a=4, b=2$ 이다. (Yamamoto et al., 1998).

2.3 복사열전달 모델

에너지 방정식의 복사생성항 $-\nabla \cdot q^R$ 은 단위체적당 순 복사열손실에 해당하는 것으로서 다음과 같이 주어진다. 즉,

$$-\nabla \cdot q^R = -\kappa_a (4\pi I_b - \int_{4\pi} I d\Omega) \quad (11)$$

여기에서 매질의 복사강도 I 를 구하기 위하여 임의의 위치 \vec{r} 에서 경로 \vec{s} 를 따라 흡수, 방사 및 산란하는 매질의 복사에너지의 보존식, 즉 다음과 같은 복사전달방정식을 해석한다.

$$\frac{dI}{ds} = -(x_a + \sigma_s)I + x_a I_b + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I^m \Phi^{m \rightarrow m} d\Omega \quad (12)$$

윗 식 우변 첫째항은 흡수 및 산란에 의한 복사강도의 감소, 둘째 항과 셋째 항은 각각 방사 및 산란에 의한 복사에너지의 증가를 나타낸다. 한편, 본 연구에서는 실제의 흡수계수를 크기가 다른 몇 개의 구간으로 나누어 넓은 파장역 모델에

서 계산된 실제의 기체 방사율과 비슷해지도록 온도의 함수로 표현되는 가중치를 최적화된 회체 가스가중합산모델(WSGGM)을 적용하여 다음과 같이 가중치와 흡수계수를 구한다. 즉,

$$\varepsilon = \sum_{k=1}^K \omega_{\varepsilon,k}(T) [1 - \exp(-x_{a,k}PS)] \quad (13)$$

여기에서, $\omega_{\varepsilon,k}$ 와 $x_{a,k}$ 는 기체 온도 T 에 대한 k 번째 회체 가스의 가중치 및 흡수계수를 나타내며, P 와 S 는 각각 흡수기체들의 분압의 합과 광선의 이동거리를 나타내는데, 가중치는

$$\sum_{k=1}^K \omega_{\varepsilon,k}(T) = 1, \quad \omega_{\varepsilon,k} = \sum_{j=0}^J b_{\varepsilon,k,j} T^{j-1} \quad (14)$$

로 구한다. 여기에서 $b_{\varepsilon,k,j}$ 는 다항식의 계수로서 Smith 등의 값을 적용한다.

한편, 이와 같은 각 흡수계수와 가중치를 이용하면 산란이 없는 경우 회체일 때의 방정식 (12) 및 복사생성항 (11)은 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$\frac{dI_k(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = -x_{a,k} I_k(\vec{r}, \vec{s}) + x_{a,k} \omega_k I_b(\vec{r}) \quad (15)$$

$$-\nabla \cdot q^R = -\sum_{m=1}^M \left[x_{a,i} \left(4\pi \omega_k I_b - \sum_{m=1}^M I_k^m \Delta \Omega^m \right) \right] \quad (16)$$

3. 수치해석

지배방정식의 수치해석은 FEM, FDM, FVM 등으로 구별할 수 있는데, 본 연구에서는 유동과 연소 현상에 쉽게 적용할 수 있는 FVM을 이용한다. 속도 성분과 종속변수들의 배열을 위한 격자계는 비 엇갈림 격자계(collocated grid)를 이용하며 Cartesian 속도성분인 u, v 를 사용한다. 비 엇갈림 격자계를 사용하여 발생하는 압력진동 문제는 모멘텀 보간법(momentum interpolation method)을 채택하여 해결하였다(Majumdar, 1988). 계산의 알고리즘은 SIMPLE를 이용하였다(Ferziger and Peric, 1996).

유한체적법을 식 (1)에 대하여 적용하면,

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \int_S \rho \phi \vec{U} \cdot \vec{n} dS = \int_V \rho_g \text{grad} \phi \cdot \vec{n} dS + \int_V S_\phi dV \quad (18)$$

ϕ 는 종속변수, Γ_ϕ 는 확산계수, S_ϕ 는 생성항, S 는 면적, V 는 제어체적을 나타낸다. Figure 1에서 보는바와 같이 면 "e"에서의 질량 유속은 아래와 같이 비 직교좌표계에 대한 관계식을 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_e = \int_{S_e} \rho \bar{U} \cdot \bar{n} dS \approx (\rho \bar{U} \cdot \bar{n})_e S_e = \rho_e (S^x u + S^y v)_e \quad (19)$$

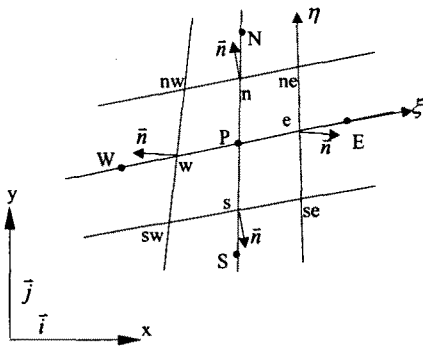


Figure 1. Schematic of a typical control volume and notation used.

입의 종속변수에 대한 대류유속은,

$$F_e^c = \int_{S_e} \rho \phi \bar{U} \cdot \bar{n} dS \approx \dot{m}_e \phi_e \quad (20)$$

그리고 확산유속은 다음과 같이 표현된다.

$$F_e^d = \int_{S_e} \Gamma \text{grad} \phi \cdot \bar{n} dS \approx (\Gamma \text{grad} \phi \cdot \bar{n})_e S_e \quad (21)$$

많은 연구자들이 비 직교좌표계에서 위와 같은 유한체적법을 이용하여 유동장을 계산하여 그 정확도와 효율을 검증하였다 (Ferziger and Peric, 1996; Braaten and Shyy, 1986; Karki and Patankar, 1988). 본 연구에서는 Ferziger and Peric (1996)이 제시한 SIMPLE 방법을 주로 채택하여 프로그램화 하였다. 최종 차분식은 다음과 같은 단순식으로 표현된다.

$$A_P^\phi \phi_P = A_E^\phi \phi_E + A_W^\phi \phi_W + A_N^\phi \phi_N + A_S^\phi \phi_S + b_\phi \quad (22)$$

그러나 비 엇갈림 격자계는 압력과 속도해에 있어서 심각한 비 물리적인 진동 현상을 초래할 수 있다. 이를 해결하기 위하여 모멘트보간법을 적용한 압력방정식을 이용한다.

속도, 압력의 변동항은 다음과 같으며

$$u^m = u^{m*} + u', \quad p^m = p^{m*} + p' \quad (23)$$

이때 m 과 m^* 은 반복계산의 순서를 나타낸다. 이 관계식을 이용하여 압력방정식으로부터 구한 압력변동 항으로부터 속도와 압력, 밀도를 보정할 수 있다

4. 결과 및 고찰

4.1 실험로의 적용

기본 유동장 및 복사를 포함한 본 프로그램의 종합적인 검증을 위해서 개발된 프로그램을 이용하여 실험로를 이용한 실험결과와 비교하여 보았다. 이 때 실험로의 형상은 아래와 같다.

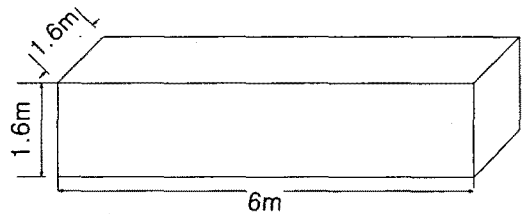


Figure 2. 실험로의 형상

실제 실험로는 이보다 좀더 복잡한 형상을 하고 있으나 실제 가열로에서 수십개의 버너를 고려하기 위해서는 버너형상의 간략화가 필수적이므로 이와 같이 근사화 하였다.

이러한 실험로형상을 가지고 slab을 고려하지 않을 경우에 실험로 내부의 난류 연소현상을 정상 조건 (steady condition)으로 풀어보았다. 이때 벽면 조건과 복사열전달의 효과를 변화시키면서 수행한 결과가 물리적으로 타당한 결과를 보여주고 있는지를 검토하였다. 이때 연료는 메탄을 사용하였고 excess air는 1.3으로 두었으며 inlet 속도를 1m/s로 고정하였다.

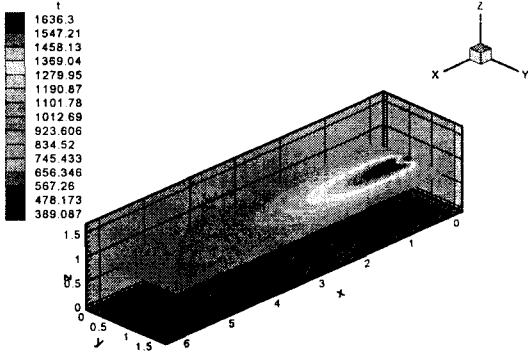


Figure 3. 벽면 온도를 1000 K로 고정시킨 경우의 온도분포 (Without Radiation)

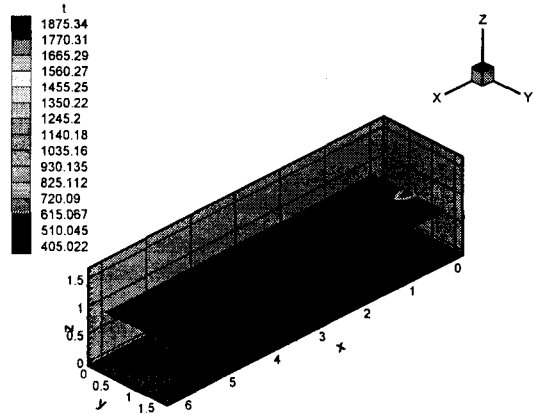


Figure 5. 벽면을 Adiabatic wall로 둔 경우의 온도분포 (Without Radiation)

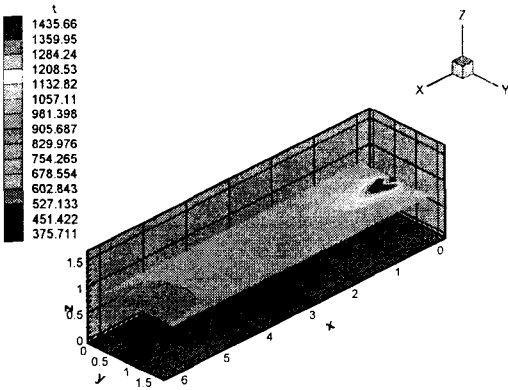


Figure 4. 벽면 온도를 1000 K로 고정시킨 경우의 온도분포 (With Radiation)

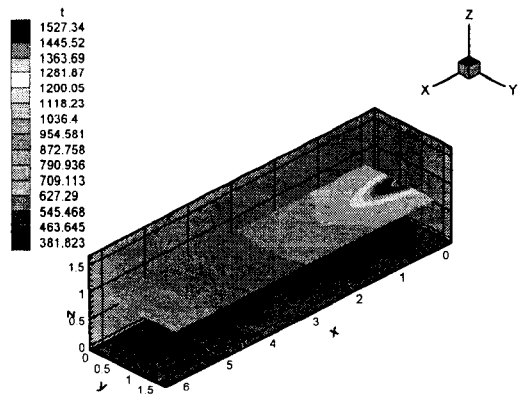


Figure 6. 벽면을 Adiabatic wall로 둔 경우의 온도분포 (With Radiation)

이상의 그림들에서 살펴볼 수 있듯이 복사효과를 고려한 경우에는 복사에 의한 열손실 때문에 화염온도가 낮아지는 현상을 보이고 있으며 특히 벽면이 단열조건인 경우에는 복사효과를 반드시 고려하여야만 올바른 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 기존의 많은 실험 및 계산결과와 그 경향이 일치하는 것으로 본 연구를 통하여 개발된 프로그램이 물리적으로 타당한 결과를 보여 주고 있는 것을 알 수 있다.

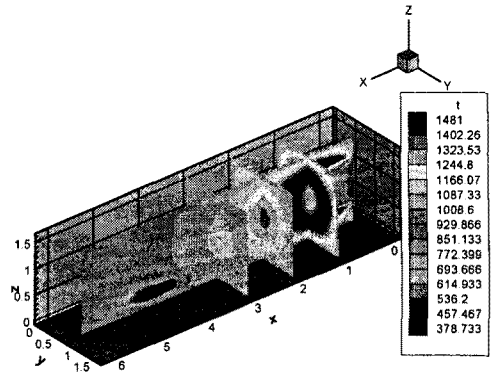
4.2 프로그램의 병렬화

현장가열로에서 발생하는 현상들은 실험로에서의 현상보다 훨씬 복잡하고 다양하게 나타난다. 실험로에 사용하는 버너가 현장가열로에서는 30~40여개가 동원되며 수십여개의 slab을 가열한다. 또한 현장가열로 내부에는 이러한 slab의 지지 및 이동을 위하여 수십여개의 skid post 및 skid beam이 존재하여 열유동의 변화에 영향을 줄 뿐만 아니라 각각의 버너들은 연료 및 산화제의 분사 조건이 각각 다르며 분사각 또한 다양하게 변화한다.

현장가열로에서의 현상들은 이렇게 복잡다단한 영향들을 고려해야하며 그 스케일 또한 실험로와 비교할 수 없을 정도로 방대하다. 이렇게 방대하고 복잡한 현상들을 1대의 컴퓨터를 이용하여 수치해석을 하기 위해서는 엄청난 시간과 더불어 엄청난 메모리 사용이 불가피하다. 이를 보다 효율적으로 해결하기 위해서 프로그램의 병렬화는 필수적이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구를 통하여 개발된 난류유동장해석 프로그램은 신속한 계산을 위해 병렬화 되었다.

프로그램의 병렬화에서 중요한 것은 계산속도의 향상과 계산결과의 정확도이다. 아무리 계산속도가 개선되었다하더라도 정확도가 떨어진다면 그 결과는 신뢰할 수 없게된다.

따라서 계산결과의 정확도 검증을 위해서 Figure 7 에는 일반프로그램과 병렬프로그램을 이용하여 실험로에서의 현상을 해석하고 계산결과를 비교하였다.

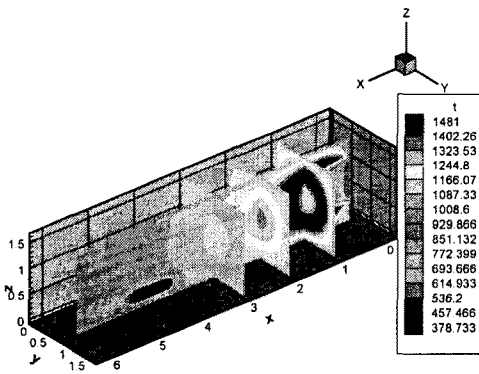


(b) 병렬프로그램 (10대 사용)

Figure 7. 일반프로그램과 병렬프로그램의 계

그림에서 살펴볼 수 있듯이 프로그램을 병렬화하여도 계산결과의 정확도에는 거의 영향이 없는 것을 알 수 있다.

병렬프로그램이 일반프로그램에 비해 정확도가 떨어지지 않는다하더라도 계산속도가 향상되지 않으면 아무런 의미가 없다. 병렬프로그램은 주어진 계산 영역을 컴퓨터 개수만큼 분할하여 계산하기 때문에 이때 계산속도는 프로그램이 적용되는 도메인의 형상에 많은 영향을 받는다. 계산 영역의 형상이 특이하여 각 컴퓨터 노드간의 통신량이 지나치게 많으면 계산속도가 별로 향상되지 않지만이 통신량이 최소화되는 형상일수록 계산속도의 향상정도는 높아지게 된다.



(a) 일반프로그램

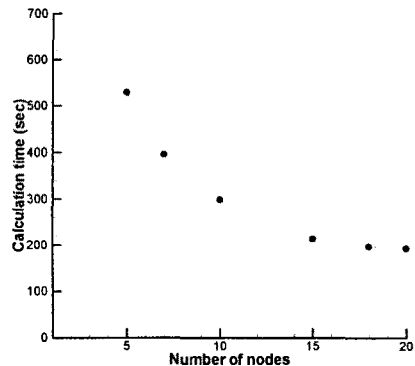


Figure 8. 병렬 컴퓨터의 개수에 따른 계산시간의 단축

Figure 8. 은 이러한 병렬화를 통하여 프로그램 수행속도가 얼마나 개선되는 지를 나타내었다. 본 연구의 최종목표가 현장가열로의 복잡한 단한 현상을 해석하는 것이니만큼 아래의 계산속도의 향상은 그 현상을 현장가열로의 현상으로 하였을 때의 계산속도의 향상을 나타낸 것이다.

병렬계산의 특성상 계산에 이용되는 컴퓨터의 개수가 계산속도와 정비례하여 나타나는 것은 아니다. 컴퓨터의 갯수가 많을 수록 각 컴퓨터간에 필요한 통신량 또한 많아지기 때문이다. 따라서 통상적인 경우 컴퓨터 10대 가량 연결하여 계산하는 것이 효율이 가장 좋게 나타나게 된다. 그러나 본 연구를 통하여 개발한 프로그램은 약 컴퓨터 15대를 이용하여 계산한 경우까지 계산속도가 지속적으로 감소하고 있어 병렬화의 완성도가 매우 높다는 것을 알 수 있다. 이 그림에서 컴퓨터 5대 이하를 이용한 계산속도를 도시하지 않은 이유는 현장가열로 현상 해석의 계산량이 지나치게 방대하여 최소한 4대 이상의 컴퓨터 (4* (CPU 1 Giga, Memory 512 Mega))를 이용하지 않으면 메모리 부족으로 계산자체가 불가능하기 때문이다. 그러나 본 프로그램의 실험로 적용을 통한 결과로는 3개의 컴퓨터를 이용했을 때 계산속도가 1대의 경우보다 약 2배 이상의 계산속도를 보였다.

3.3 현장가열로 계산 결과

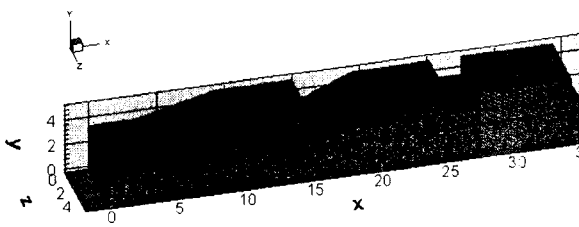


Figure 9. 기본격자계의 구성

본 격자계에는 상세하게 드러나고 있지는 않지만 본 가열로의 외형 및 내부는 매우 복잡한 형상과 여러 구조물로 이루어져 있다. 40여개의 버너가 상부 하부에 위치하고 있으며 30여개의 slab이 skid beam 과 skid post에 지지되어 위치하고 있다.

본 가열로의 외형을 본다면 격자계는 multi block 타입으로 구성할 수도 있다. 그러나 가열

로 내부의 각종 구조물을 고려한다면 multi block 타입의 격자계는 계산 구조를 매우 복잡하게 만들게 된다. 가열로 내부의 수많은 구조물들은 skid post등과 같이 그 내부를 풀 필요가 없는 영역도 있고 Slab 과 같이 에너지 방정식만 해석해야하는 영역도 존재한다. 이러한 부분들을 모두 block으로 나누게 된다면 이 가열로 해석을 위해 수십에서 수백 개의 block으로 나눠서 접근해야한다. Multi block을 통한 접근방법은 복잡한 외형의 격자계를 단순하게 만들 수 있는 장점이 있지만 계산속도 및 수렴성이 나빠지는 결과를 낳게 된다. 따라서 본 경우와 같이 복잡한 내부 구조와 더불어 그 현상 자체도 복합적으로 일어나는 문제를 해결하고자 할 때에는 multi block을 통한 접근방법에 매우 부적합하다고 할 수 있다. 따라서 본 프로그램은 이 현상을 one block의 격자계를 이용하여 접근하였다.

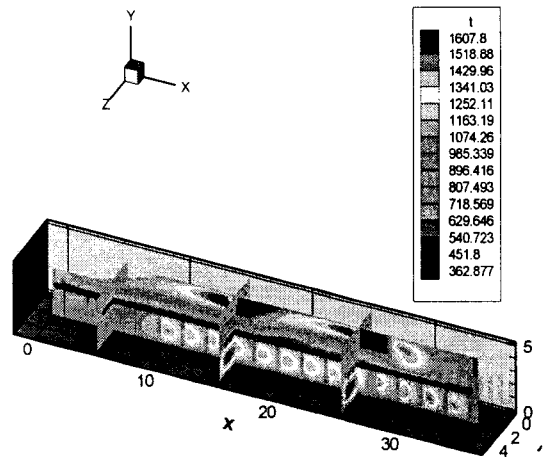


Figure 10. 실제 가열로 내부의 Temperature contour

Figure 10 은 실제 가열로 내부의 온도 분포를 나타내고 있다. Top burner 및 side burner에서 화염이 분출되고 여러 개의 slab가 가열되고 있는 모습이 잘 나타나고 있다. 그러나 계산에 사용된 조건이 실제 현장가열로에 적용되는 조건과 다르므로 그림에서 나타난 현상이 실제 현상과 다를 수 있다. 올바른 조건을 입력하여 프로그램을 수행시키는 것은 사용자의 몫이라 할 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통하여 가열로 내 비정상 3차원 전열과 유동장 해석을 위한 전산 CODE 개발을 완료하였다. 그리고 개발된 CODE는 기존의 계산 결과 및 실험결과와 비교함으로써 검증하였으며 물리적으로 타당한 결과를 갖는지 여부도 고찰하였다.

본 프로그램의 현장가열로 적용을 원활하게 하기 위해서는 계산속도 향상이 필수적이며 이를 위해 프로그램의 병렬화를 수행 완료하였다.

이렇게 검증되고 성능이 향상된 프로그램을 어느 한 가지의 문제뿐만 아니라 다양한 문제에 적용이 가능하도록 벽면 조건, 버너조건 등을 자유로이 선택할 수 있게 하였다.

따라서 본 연구를 통하여 개발된 프로그램은 검증되고 일반화되어 있을 뿐만 아니라 계산속도 또한 매우 향상되어있기 때문에 현장가열로에 적용이 가능할 뿐만 아니라 격자계 및 입력조건을 다르게 한다면 여러 다른 연소현상의 해석에도 적용이 가능할 것이다.

참고문헌

1. Baek, S. W., Kim, M. Y. and Kim, J. S., "Nonorthogonal Finite-Volume Solutions of Radiative Heat Transfer in a Three-Dimensional Enclosure," *Numerical Heat Transfer, Part B*, vol. 34, no. 4, pp. 419-437, 1998
2. Braaten, M., and Shyy, W., "A Study of Recirculating Flow Computation Using Body-Fitted Coordinates : Consistency Aspects and Mesh Skewness," *Numerical Heat Transfer*, vol. 9, pp. 559-574 (1986)
3. Carlson, B. G., and Lathrop, K. D., 1968, "Transport Theory-the Method of Discrete Ordinates in Computing Methods in Reactor Physics," Greenspan, H., Kelber, C. N., and Okrent, D. ed., Gordon & Breach Science Publishers, New York, pp. 165-266.
4. Chai, J. C., Lee, H. S., and Patankar, S. V., 1994, "Finite-Volume Method for Radiation Heat Transfer in Cylindrical Enclosures with the Finite-Volume Method," *AIAA Journal of Thermophysics Heat Transfer*, vol. 6, No. 4, pp. 605-611.
5. Choi, C. E. and Baek, S. W., "Numerical

Analysis of a Spray Combustion with Nongray Radiation Using Weighted Sum of Gray Gases Model," *Combust. Sci. and Tech.*, vol. 115, pp. 297-315, 1996

6. Chui, E. H., Hughes, P. M. J., and Raithby, G. D., 1993, "Implementation of Finite Volume Method for Calculating Radiative Transfer in a Pulverized Fuel Flame," *Combustion Science and Technology*, vol. 92, pp. 225-242.
7. Chui, E. H., and Hughes, P. M. J., 1996, "Validation of NOx and NOx Precursor Predictions in Coal Flames," *Combustion Science and Technology*, vol. 119, pp. 51-75.
8. Ferziger, J. H. and Peric, M., Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, (1996)
- Gran, I. R., Mellen, M. C., and Magnussen, B. F., "Numerical Simulation of Local Extinction Effects in Turbulent Combustor Flows of Methane and Air," " *Twenty-fifth Symposium (international) on Combustion*, pp. 1283-1291 (1994)
9. Karki, K. C., and Patankar, S. V., "Pressure Based Calculation Procedure for Viscous Flows at All Speeds in Arbitrary Configuration," *AIAA J.*, Vol. 27, No. 9, pp. 1167-1174 (1989)
10. Kim, T. K., Menart, J. A., and Lee, H. S., 1991, "Nongray Radiative Gas Analyses Using the S-N Discrete Ordinates Method," *ASME Journal of Heat Transfer*, vol. 113, pp. 946-952.
11. Modest, M. F., 1991, "The Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model for Arbitrary Solution Methods in Radiative Transfer," *ASME Journal of Heat Transfer*, vol. 113, pp. 650-656
12. Modest, M. F., 1993, *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, Inc. New York.
- Peric, M., A Finite Volume Method for the Prediction of Three Dimensional Fluid Flow in Complex Ducts, Ph. D dissertation, Imperial College (1985)
13. Smith, T. F., Shen, Z. F., and Friedman, J. N., 1982, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model," *J. Heat Transfer*, vol. 104, pp. 602-608.