



Walking Beam형 열연 재가열로의 3차원 수치해석

Three Dimensional Numerical Analysis of the Walking Beam Type of a Hot Roll Reheat Furnace

김종규¹⁾, 허강열²⁾, 김일태³⁾

J. K. Kim, G. Y. Huh and I. T. Kim

Abstract

Three dimensional numerical analysis for the turbulent reactive flow and radiative heat transfer in the walking beam type of a reheat furnace in POSCO has been carried out by the industrial code FLUENT. Computations are based on the conservation equations of mass, momentum, energy and species with the $\kappa-\epsilon$ turbulence model and mixture fraction/PDF(Probability Density Function) approach for the combustion rate. Radiative heat transfer is computed by the discrete ordinates radiation model in combination with the weighted-sum-of-gray-gas model for the absorption coefficient of gas medium. The predicted temperature distribution in the reheat furnace and energy flow fractions are in reasonable agreement with the measurement data.

1. 서론

열연 재가열로는 주어진 압연부하에서 압연공정을 수행하기 위해 압연공정 전에 피가열체를 가열하는 과정으로서 제품의 품질, 원가절감 및 환경오염에 지대한 영향을 미치는 고가의 설비이다. 가열로에서 균일하게 피가열체를 가열함으로써 열연제품이 원하는 두께와 폭으로 압연되어 고객의 요구 조건을 수용할 수 있게 된다. 또한 에너지 효율과 대기오염 측면에서 재가열로의 최적 설계 및 운전 조건을 결정하기 위해서는 가열로 내의 복잡한 열유동 현상에 대한 정량적인 이해가 반드시 전제되어야 한다.

일반적으로 산업용 가열로에서 열전달 해석을 위해 사용되는 모델로서는 국부적인 열유속 분포를 고려하지 않고 총열전달율을 계산하는 stirred vessel(영차원) 모델 및 유체의 흐름방향으로의 국부적인 열유속 계산을 수행할 수 있는 plug flow(1차원) 모델이 있으며 영차원 해석 방법이 실제 산업체 현장에서 조업 기준 설정 및 열정산 등에 많이 활용되고 있다. 최근에는 2차원 및 3차원상에서 열유속의 분포를 예측할 수 있는 전산유체 해법에 기초한 다차원적 해석 모델(multi-dimensional model)에 관해 활발한 연구가 이루어지고 있다[1]. 외국의 연구소, 로제작회사 등에서는 독자적인 가열로 3차원 해석 프로그램을 개발하거나 상용 소프트웨어를 이용하여 가열로내의 유동 및 열전달 현상을 해석하고 있다. 일본의 Chugairo사에서는 최근 STAR-CD를 이용하여 재생버너 시스템을 이용한 walking beam형 가열로의 해석결과를 발표한 바 있으며[2] 일본 NKK에서도 FLUENT를 이용하여 재가열로를 해석한 바 있다[3]. 미국의 Babcock & Wilcox에서는 일련의 연구를 통해 개발된 FURMO라는 가열로 해석 프로그램을 활용하고 있으며[4], 네덜란드의 International Flame Research Foundation 등에서도 중점 연구사업의 하나로 독자적인 가열로 해석 소프트웨어의 개발 연구에 주력하고 있다[5, 6]. 국내의 경우에는 가열로 3차원 형상 내에서의 유동, 연소, 열전달의 복합 현상에 대한 실제적인 해석 결과가 아직 발표된 바가 없으며 대부분 단순 난류 유동이 이루어지고 있다. 연소, 복사 열전달 등의 각각의 단일 현상에 대한 해석 방법과 단순 형상에 대한 기초적인 해석 결과들이 독립적인 연구들에 의해 발표되고 있다.

본 논문에서는 상용 코드인 FLUENT[7]를 이용하여 가열로내의 유동, 연소 및 복사열전달에 관한 3차원 수치해석을 하였으며 계산 결과를 가열로내에 상부 및 하부에 설치된 열전대에서 측정된 값과 비교하였으며 전체적인 에너지 흐름에 대해서도 비교하였다.

2. 난류 연소 및 복사열전달 모델

2.1 혼합분율/확률밀도함수 모델[8]

대부분 난류화산화염에서 화학반응은 혼합물보다 훨씬 커서 반응물질이 혼합되는 순간 반응이 완료된다고 가정할 수 있다. 즉, 반응시간이 혼합시간에 비해 무시할 정도로 작으므로 난류화염에 무한반응속도

1) 포항공과대학교 기계공학과 대학원

2) 포항공과대학교 기계공학과 (790-784, 경북 포항시 남구 효자동 산 31, TEL. 0562-279-2177)

3) 포항제철(POSCO)

가정(infinitely fast chemistry)을 적용할 수 있다. 이러한 가정으로 인해 순간 화학종의 농도와 온도가 그 순간의 보른스칼라의 함수로서 주어지며 혼합분율의 전달방정식의 해를 구하는 혼합분율/확률밀도함수 모델을 이용할 수 있다. 혼합분율 f 는 다음과 같이 정의된다.

$$f = \frac{Z_k - Z_{k0}}{Z_{kf} - Z_{k0}} \quad (1)$$

여기서 Z_k 는 요소(element) k 에 대한 요소질량분율(element mass fraction), Z_{k0} 는 oxidizer stream에서의 요소 k 에 대한 질량분율 그리고 Z_{kf} 는 fuel stream에서의 요소 k 에 대한 질량분율을 나타낸다.

평균혼합분율과 혼합분율변동량에 대한 보른식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho \bar{f})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \bar{f}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_i} \frac{\partial \bar{f}_i}{\partial x_i} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \overline{f^2})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \overline{f^2}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_i} \frac{\partial \overline{f^2}}{\partial x_i} \right] + C_\epsilon \mu_t \left(\frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \right)^2 - C_d \rho \frac{k}{\epsilon} \overline{f^2} \quad (3)$$

여기서 상수값은 다음과 같다.

$$\sigma_i = 0.7, \quad C_\epsilon = 2.86, \quad C_d = 2.0$$

화학반응에 미치는 난류변동의 영향을 고려하기 위해 보른스칼라에 대한 확률밀도함수를 도입함으로써 이러한 난류변동과 화학반응과의 상관관계를 해결한다. 확률밀도함수 p 는 다음과 같이 정의된다.

$$p(f) \Delta f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i \quad (4)$$

f 는 f 와 $f+\Delta f$ 사이에 존재하는 순간값이고, T 는 시간 그리고 τ_i 는 Δf 구간 내에 f 가 머무르는 시간을 의미한다. 각 종의 물분율 및 온도 ϕ 와 유체 밀도 ρ 의 시간평균치는 다음과 같이 주어진다.

$$\overline{\phi}_i = \int_0^1 p(f) \phi_i(f) df \quad (5)$$

$$\frac{1}{\rho} = \int_0^1 \frac{p(f)}{\rho(f)} df \quad (6)$$

확률밀도함수는 β 함수로 가정하였다.

$$p(f) = \frac{f^{\alpha-1} (1-f)^{\beta-1}}{\int_0^1 f^{\alpha-1} (1-f)^{\beta-1} df} \quad (7)$$

$$\alpha = \bar{f} \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^2} - 1 \right], \quad \beta = (1-\bar{f}) \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^2} - 1 \right] \quad (8)$$

2.2 Discrete Ordinates 복사 모델[9]

Discrete ordinates 복사 모델은 다음과 같은 radiation transfer equation을 cartesian 좌표계에 고정된 s 벡터 방향에 일치하는 유한개의 discrete solid angle에 대해 radiation intensity의 해를 구하는 방법이다.

$$\frac{d(I s_i)}{d x_i} + (a + \sigma_s) I(r, s) = a n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r, s') \phi(s, s') d\mathcal{Q} \quad (9)$$

여기서 r 은 위치벡터, s 는 방향벡터, s' 는 산란방향벡터, s_i 은 path length, a 는 흡수율계수, n 은 refractive index, σ_s 는 산란계수, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수($5.672 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$), I 는 복사강도, T 는 온도, ϕ 는 상태함수 그리고 \mathcal{Q} 는 입체각을 나타낸다. 본 계산에서는 4×4 의 천장각과 방위각을 등분한 격자를 사용하였다.

3. 재가열로 구조

Fig. 1은 본 논문에서 계산한 포항제철 2열연공장의 walking beam형 재가열로를 나타내고 있다. 전체적으로 길이 x 폭 y 높이가 $36 \times 10.7 \times 5.2$ m이고 상부에는 각 예열대, 균열대, 가열대별로 축류식 버너가 8개씩, 하부에는 side식 버너가 8개씩 설치되어 있다. 축류식 버너는 노퍽방향의 분위기 온도 분포를 균일하게 할 수 있어 소재 길이 방향의 온도를 균일하게 확보할 수 있으며 연소가스의 흐름이 양호하고 연소 부하 조절의 범위를 크게 할 수 있다. 그러나 예열대와 가열대 상부와 가열대와 균열대 상부의 버너설치를 위한 nose부 공간이 필요하고 노체가 복잡하게 되어 설비비가 증가하는 경향이 있다. Side식 버너는 노장 방향의 온도분포를 균일하게 할 수 있으며 노벽에 버너를 설치하므로 nose부가 필요없게 되어 노체가 간단하고 설



비투자비가 축류식에 비해 적으나 버너의 분류 방향과 노내 연소가스의 흐름 방향이 직교하여 통풍 장애와 편류가 발생하고 저부하시 버너화염의 부상 및 연소가스 온도의 불균일 분포로 인해 연소 부하 조절 범위가 좁다. 본 가열로는 이러한 축류와 side 방식의 조합형으로 상부대는 축류식의 장점을 이용하여 소재 온도 분포를 균일하게 하고 노내 가스의 흐름을 원활하게 하며 연소제어 범위를 향상시키고, 하부대에서는 skid beam 때문에 side식을 채택하여 노구조의 단순화로 설비투자 경제성을 향상시키는 특징을 가지고 있다. 가열로는 화염의 영향 및 특성을 고려하여 예열대, 가열대 그리고 균열대로 3개의 zone으로 분할하고 각각의 길이는 15.5, 10.5 그리고 8.8 m이다. 폐가스의 현열을 이용할 수 있도록 폐가스가 소재장입구측으로 배출되도록 하며 상부로 폐가스를 배출하는 uptake형식을 취하고 있다.

4. 경계조건 및 계산결과

Fig. 2는 격자 개수 약 343,000개의 가열로 계산 격자를 나타낸다. 25개의 버너에서의 연료와 스윙유동이 있는 공기를 입구경계조건으로 처리하였다. 연료는 Table 1에 주어진 혼합가스를 사용하였으며 저위발열량은 0°C 1기압에서 2800 Kcal/m³이며 연료입구온도는 273K이다. 공기는 체적분율로 21%의 O₂와 79%의 N₂를 적용하였고 당량비는 1.1이며 공기입구온도는 782K이다. 연료와 공기의 입구 속도 조건은 Table 2에 있는 바와 같이 각 대별의 유량에 맞추도록 하였다. 폐가스가 recuperator로 나가는 출구는 압력 경계 조건으로 대기압보다 20 Pa 높게 적용하였으며 이는 현장에서 로내의 압력을 제어하기 위한 조건을 반영한 것이다. 가열로의 대칭면에서 대칭경계조건을 적용함으로써 전체 격자 수를 반으로 줄였다. 피가열체에 대한 경계조건은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 피가열체를 장입하여 측정된 온도값을 경계조건으로 적용하였으며 Fig. 4에서 주어진 유효방사율(effective emissivity)을 피가열체 표면에 적용하였다. 이 유효방사율은 승온실험을 통하여 열유속량이 비슷한 지역별로 9개로 구분한 것으로서 상부대에서 피가열체표면이 가열로내에서 가열됨과 동시에 산화됨으로써 출구쪽으로 갈수록 흑체에 가까워지고 하부대에서는 피가열체를 지지하는 skid beam과 walking beam 그리고 skid beam과 walking beam을 지지하는 기둥 등에 의해서 낮은 유효방사율을 가지게 된다.

본 계산은 실제 현장의 정상상태 운전을 모사하기 위해 위의 경계조건을 적용하여 계산을 수행하였다. 계산결과를 고찰해 보면, 먼저 Fig. 5과 6은 상부대와 하부대에 설치한 열전대 위치에서 계산값과 측정값을 비교한 것이다. Fig. 1에서 상부대에 설치한 열전대는 각 대 별로 가열로 내의 피가열체 장입측이 가까운 곳에 대칭면에 2개가 설치되어 있고 2개는 가열로 대칭면에서 2.48 m에 떨어진 곳에 설치되어 있다. 또한 하부대에 설치된 열전대는 바닥에서 1.5 m 높이에 가열로측 벽에 설치되어 있다. 설치된 총 열전대의 갯수는 21개이고 모든 열전대는 가열로 내부로 30 cm 정도 삽입되어 이 지점의 온도값을 운전중에 계속해서 측정한다. 계산한 온도는 상부대와 하부대 모두 예열대에서 측정된 온도보다 높게 나타나는데 이는 경계조건을 적용하는데 있어서 불명순실열과 예열대 입구에서 피가열체 장입을 위해 장입문을 개방함으로써 발생하는 방염순실열을 고려하지 못하여 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 가열로내의 전체적인 에너지 흐름을 나타내고 있는데 계산값과 측정값을 비교하였다. 투입되는 열량은 연료 연소열이 46,501 kW(전체투입열량의 84%)이고 연소공기현열은 8,829 kW(전체투입열량의 16%)이다. 피가열체에 전달되는 열량은 예측된 값이 20,868 kW(전체투입열량의 37.7%)으로 측정값인 23,183 kW(전체투입열량의 41.9%)보다 낮게 나타난다. 그리고 복사열전달에 의해 전달되는 열량이 94.1%로 예측되어 대류에 의한 열전달보다 복사에 의한 열전달이 훨씬 지배적임을 알 수 있다. Fig. 8은 가열로길이 방향으로 피가열체에 전달되는 열량을 나타내고 Table 3은 각 대별로 피가열체에 전달되는 열량을 나타낸다. 전체적으로 보면 상부대에서 피가열체에 전달되는 열량은 전체 피가열체의 받는 열량의 69.6%이고 하부대에서는 30.4%이다. 이는 하부대에서 skid beam과 각종 지지물이 있으므로 화염에서의 복사열전달이 상부대보다 활발하지 못하기 때문이다. 예열대와 가열대에서 피가열체에 전달되는 열량은 전체의 93.2%이고 균열대에서는 6.8%로 거의 전달되는 열량이 없고 피가열체가 수결(피가열체의 내부로 열량이 들어가는 피가열체의 내부 온도가 전체적으로 상승하는 상태)을 유지한다. 이는 Table 2에서 예열대와 가열대에 공급되는 열량이 전체의 86.8%인 것을 보면 잘 알 수 있고 이러한 경향은 가열로의 일반적인 전열특성을 나타내고 있다.

Fig. 9는 가열로 대칭면에서 1.783m 떨어진 상부버너의 중심단면에서의 온도분포를 나타낸다. 예열대에서 dam의 영향으로 dam 근처에서 온도변화가 크게 나타난다. Fig. 10에서는 하부대 버너의 중심 단면에서의 온도분포를 나타내고 있다. 13개의 버너에서 나오는 연료와 공기에 의해 형성된 화염과 온도분포는 각 대별로의 연료유량에 따라 차이가 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 현재 POSCO 2열연에서 운전 중인 walking beam형 재가열로에 대한 정상상태의 3차원 모사계산을 수행하였다. 가열로 내부에 설치된 18개의 열전대에서 측정된 값과 계산된 값들이 비교적 잘 일치하고 있으며 출구에서의 방열손실을 고려하지 않음으로써 출구 상하부 온도를 높게 예측하고 있다. 가열로내의 에너지흐름에 대해서도 측정값과 계산값을 비교하였으며 연소 폐가스와 피가열체가 흡수하는 열량이 측정치와 유사한 값들을 보이고 있다. 또한 가열로 내의 3차원 열유동 분포 결과로부터 각 예열대, 가열대 그리고 균열대에서의 전열 특성에 대한 예측을 수행하였다.

6. 참고문헌

[1] Viskanta, R. and Menguc, M. P., "Radiation Heat Transfer in Combustion Systems", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 13, pp. 97-160, 1987
 [2] Masao Uede, Toshio and Morihiko Imada, "Computational Simulation of Regenerative Burners System And Its Application to Walking Beam Furnace for Rolling Mill", Proceedings to Walking Beam Furnace for Rolling Mill", Proceedings of the 3rd KSME-JSME, Thermal Engineering Conference, Oct. 20-23, 1996, Kyungju, Korea
 [3] C. Zhang, T. Ishii, and S. Sugaiyama, "Numerical Modeling of The Thermal Performance of Regenerative Slab Reheat Furnaces", Numerical Heat Transfer, Part A, 32 : 613 - 631, 1997
 [4] W. A. Fiveland and R. A. Wessel, "FURMO : A Numerical Model for Predicting Performance of Three-Dimensional Pulverized-Fuel Fired Furnace", Jt. AIAA/ASME Thermophysics and Heat Transfer Conference, Boston, Massachusetts, ASME Paper No. 86-H-T-35(June, 1986)
 [5] Lallemand N. and Weber R., "Influence of the choice of radiation models on the predictions of temperature and nitrogen oxides in mathematical modelling of large scale natural gas and oil flames", Progress Report no 1, agreement no 17 872, period 1st June 1993-1st February 1994
 [6] Lallemand N. and Weber R., "Influence of the choice of radiation models on the predictions of temperature and nitrogen oxides in mathematical modelling of large scale natural gas and oil flames, Progress Report no 2, agreement, 1995
 [7] FLUENT 5 User's Guide, July 1998
 [8] Williams, F. A., "Combustion Theory," Redwood City, CA ; Benjamin-cummings Publishing Co., 1985
 [9] Michael, F. M., "Radiative Heat Transfer," International Editions McGraw-Hill Publishing Co., 1993

Table 1 혼합가스의 조성(체적분율 : %)

H ₂	N ₂	O ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO ₂
32.94	23.84	0.41	12.17	15.39	1.11	0.23	10.9

Table 2 각 대별 공급열량

구분		예열대	가열대	균열대	합계
상부대	공급열량(kW)	12,090	7,115	2,651	21,856
하부대	공급열량(kW)	11,858	9,300	3,488	24,646
합계	공급열량(kW)	23,948	16,415	6,139	46,502
	전체연료연소열에 대한 비율(%)	51.5	35.3	13.2	100

Table 3 각대별 피가열체의 전열량

구분		예열대	가열대	균열대	합계
상부대	전열량(kW)	4,110	2,644	511	7,264
하부대	전열량(kW)	1,711	1,260	198	3,170
합계	전열량(kW)	5,821	3,904	709	10,434
	전체전열량에 대한 비율(%)	55.8	37.4	6.8	100

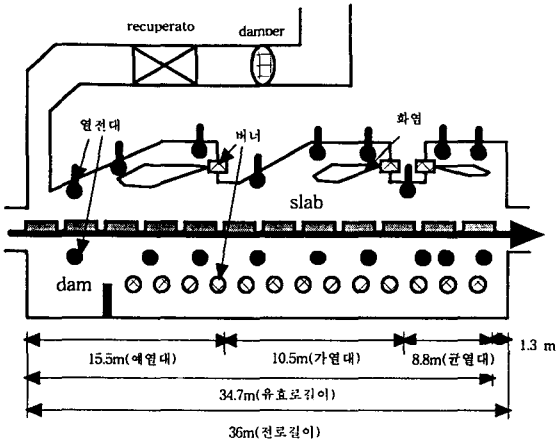


Fig. 1 Reheating furnace at POSCO

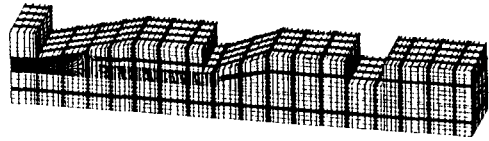


Fig. 2 Computational grid

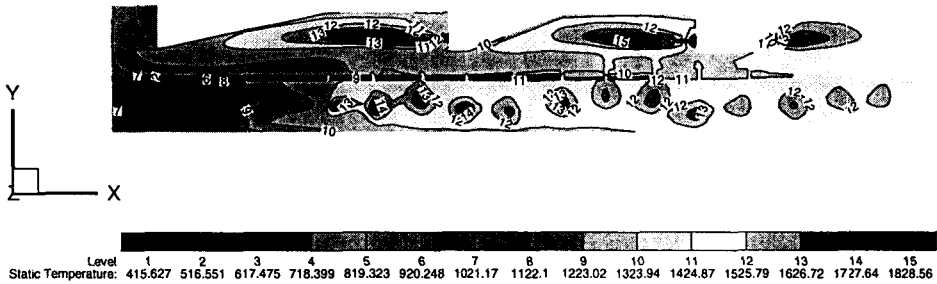


Fig. 9 Temperature distribution on a vertical plane through a upper burner

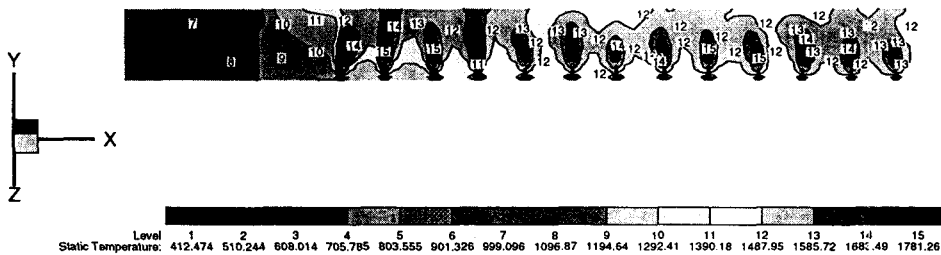


Fig. 10 Temperature distribution on a horizontal plane through lower burners

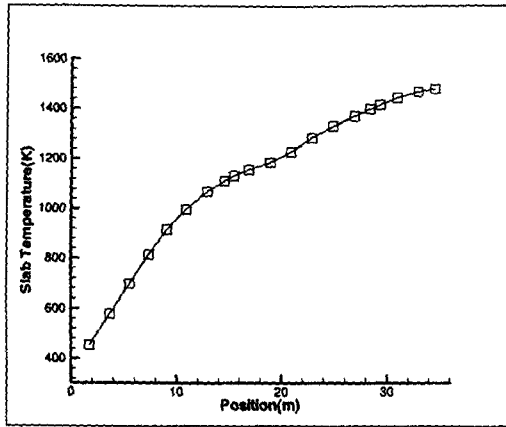


Fig. 3 Measured slab temperature distribution used as the boundary condition

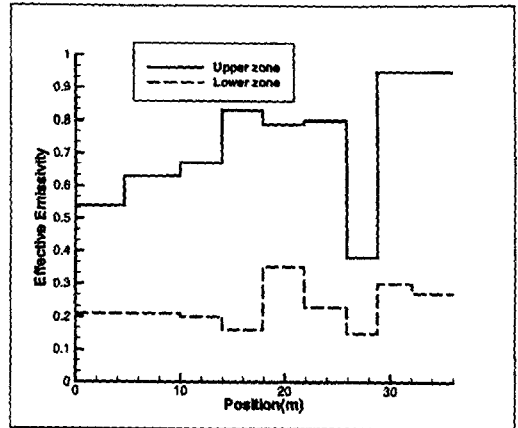


Fig. 4 Effective emissivities of the slab used as the boundary condition

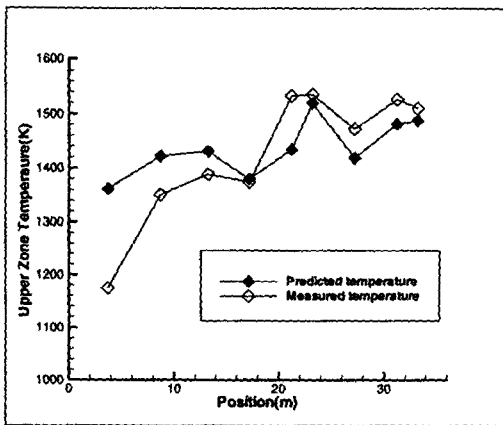


Fig. 5 Comparison of measured and predicted temperature in the upper zone

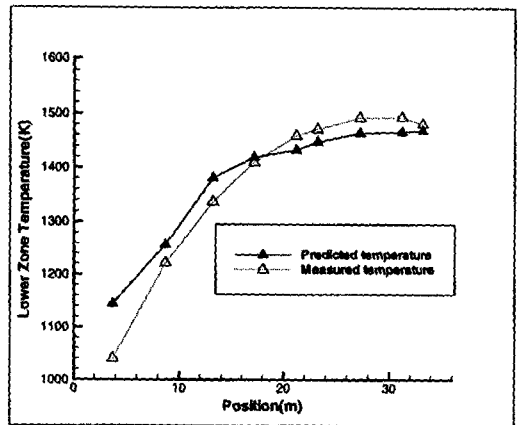


Fig. 6 Comparison of measured and predicted temperature in the lower zone

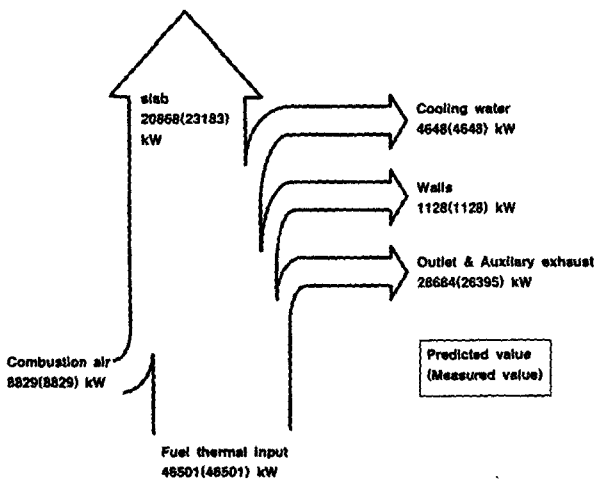


Fig. 7 Energy flow diagram

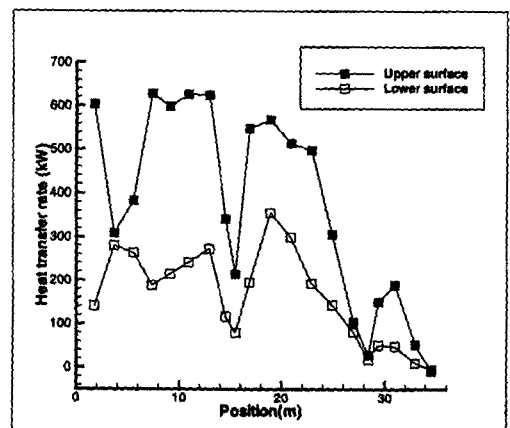


Fig. 8 Predicted heat transfer rate on the slab surface