

콤팩트 온수 보일러 연소실의 열전달 특성

조정환* · 서태범** · 김육중*** · 김창주****

Heat Transfer in the Combustion Chamber for the Compact Hot-Water Boiler

Jung-Hwan Cho, Taebeom Seo, Wook-Jung Kim, Chang-Ju Kim

Key Words: Heat Transfer(열전달), Combustion Chamber(연소실), Hot Water Boiler(온수보일러)

Abstract

A mathematical model has been developed to describe the turbulent and reversed flow with convective heat transfer in a cylindrical combustion chamber. By using the mathematical model for high temperature flow enables the trends in overall heat transfer rates to be predicted. The model was applied to the design of the combustion chamber. The influences of the size of air inlet and inlet velocity were investigated for process optimization. Through modelling work it is found that the heat transfer rate to the chamber wall may be enhanced by adjusting the air flow and heat transfer pattern through selecting the air inlet condition. Internal plate has less influence to the heat transfer characteristics.

기호설명

A	: Van Driest 수	z	: 축방향
C ₁	: Eq. (5)의 상수	S	: 생성항
C ₂	: Eq. (5)의 상수	T	: 온도 (K)
C _D	: Eq. (2)의 상수	κ	: Eq. (5), (6)의 상수
C _μ	: Eq. (7)의 상수	μ	: 점성 계수 (kg/m s)
c _p	: 비열 (J/kgK)	ρ	: 밀도 (kg/m ³)
E	: Eq. (6)의 상수	σ	: 난류 prandtl 수
H	: 전엔탈피 (J/kg)	τ	: 전단 응력 (kg/ms ²)
k	: 난류 운동 에너지 (m ² /s ²)	eff	: 유효
P	: 압력 (Pa)	H	: 엔탈피
q"	: 열유속 (W/m ²)	l	: 층류
r	: 반경 방향	t	: 난류
θ	: 원심 방향	ε	: 소산률

1. 서론

* 인하대학교 기계공학과 대학원
 ** 인하대학교 기계공학과
 *** KIMM
 **** (주) 원공사

여러 가지 종류의 산업용 가열로, 보일러 및 가스 터빈 등의 설계를 위해서는 연료의 연소에 의해 발생하는 고온의 연소가스의 유동 및 열전

달 현상을 자세하게 이해해야 할 필요가 있다.

고온의 난류유동에 관한 시스템은 해석하기에 상당한 어려움이 있다. 또한 재순환류가 존재하고 복사열전달이 지배적인 연소실은 해석을 보다 더 복잡하게 한다. 재순환류가 있는 연소실에 대해 보고된 수치해석적 연구는 매우 적고, 이 중 난류유동과 연소, 복사열전달을 함께 다루는 연구는 거의 없는 실정이다. Elghobashi(1981)는 재순환류에 대한 수치해석 결과와 실험에 의해 측정된 속도, 온도분포 등을 비교하였지만 연소 모델을 고려하지는 않았다. El-Mahallawy(1977)는 원통형 연소실에서의 가스의 속도, 온도, 벽에서의 열유속을 측정하여 open tunnel형의 연소실보다 벽으로의 열유속과 연소효율이 더 높다는 결론을 얻었다. Gou & Lu(1993)는 2차원의 연소실에 대해 난류유동, 연소반응, 복사열전달에 관한 연구를 통해 재순환류의 생성에 의한 연소효율의 증대에 대한 연구를 행하였다.

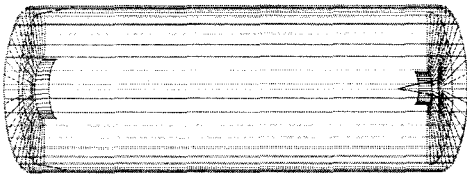


Fig. 1. Combustion chamber considered

본 연구에서 조사하고자 하는 Fig.1의 콤팩트 온수 보일러의 연소실에서는 두 개의 서로 다른 유동이 충돌하고, 또한 연소실 내에 설치한 재순환관에 의해 유동의 재순환이 일어나기 때문에 기존 보일러 연소실보다는 대류 열전달에 의한 영향이 지배적일 것으로 기대된다.

따라서 연소실 내의 복잡한 가스의 유동을 수치해석적으로 조사 연구하여 이러한 해석 결과를 기초로 본 연구의 목적인 연소실 내의 온도장 균일화, 연소실 내벽에서의 열전달계수 균일화, 2차 공기 유량의 최적화, 재순환관의 크기 및 간격의 설계 기술 등에 관한 연구를 수행하고자 한다.

2. CFD 모델링

본 해석의 지배 방정식인 연속 방정식, 운동량 보존식, 에너지 보존식, k-ε 난류 모델은 상용 코드인 phoenics(version 3.2)를 이용해서 풀었다.

난류운동에너지 k 와 소산률 ε 는 다음 방정식과 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \left(\rho u k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{k,eff}} \frac{\partial k}{\partial r} \right) \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\rho v k - \frac{1}{r} \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{k,eff}} \frac{\partial k}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho w k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{k,eff}} \frac{\partial k}{\partial x} \right) = S_k \quad (1)$$

$$S_k = G_k - C_D \rho \epsilon \quad (2)$$

$$G_k = \mu_i \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{v}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{r} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \left(\rho u \epsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\epsilon,eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right) \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\rho v \epsilon - \frac{1}{r} \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\epsilon,eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho w \epsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\epsilon,eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) = S_\epsilon \quad (4)$$

$$S_\epsilon = (C_1 G_k - C_2 \rho \epsilon) \epsilon / \rho \quad (5)$$

k-ε 난류모델에 사용된 유효점성계수 μ_{eff} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_{eff} = \mu_i + \mu_t \quad (6)$$

여기서 $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$ 이다.

연소실의 벽면에 대한 경계조건으로는 Wall function이 사용되었다. 벽으로부터의 거리가 Y_p 이고 벽면과 평행한 속도는 다음과 같다.

$$\frac{u_p}{\tau} \rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[\frac{E Y_p \rho (C_\mu^{1/2} k_p)^{1/2}}{\mu} \right] \quad (7)$$

마찬가지로 벽으로의 열유속 q_w'' 은

$$\frac{c_p (T_p - T_w)}{q_w / \rho} C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} = \frac{\sigma_H}{\kappa} \ln \left[\frac{E Y_p \rho (C_\mu^{1/2} k_p)^{1/2}}{\mu} \right] + P_j \quad (8)$$

와 같이 표현된다.

여기서 P_j 는 다음과 같이 정의된다.

$$P_j = \sigma_H \frac{\pi/4}{\sin(\pi/4)} \left(\frac{A}{\kappa} \right)^{1/2} \left[\frac{\sigma_{H,I} - 1}{\sigma_H} \right] \left[\frac{\sigma_H}{\sigma_{H,I}} \right]^{1/4} \quad (9)$$

버너 쪽의 입구에서는 실제 화염과 유사한 유동 특성을 나타내기 위해 포물선 형태의 속도와 온

도 분포가 일정하게 유지되고, 2차 공기 입구에서는 일정한 속도와 온도 분포를 가정하였다. 두 입구에서의 난류 운동에너지와 소산률은

$$k_m = 0.03u_m^2 \quad (10)$$

$$\varepsilon_m = k_m^{3/2} / 0.005R_0 \quad (11)$$

으로 주어졌다. 여기서 R_0 는 입구의 반경이다. 연소실 외벽은 2중으로 되어 있고 그 사이에 수관이 배치되어 있다. 연소실 출구에서 나오는 연소가스가 이 2중 벽을 통해 배출되며 수관의 물에 열을 전달하게 된다. 연소실 내부에서의 온도는 약 1000K ~ 1400K 정도로 예상되기 때문에 이를 기초로 외벽에서의 온도를 495K으로 일정한 온도가 유지된다고 가정하였다.

본 연구의 모델에 사용된 상수들의 값은 다음 Table. 1과 같다.

Table 1. Constants used for the turbulence model

C_μ	C_D	C_1	C_2	σ_k	σ_ε	σ_f	σ_H
0.09	1.0	1.44	1.92	1.0	1.22	0.7	0.7

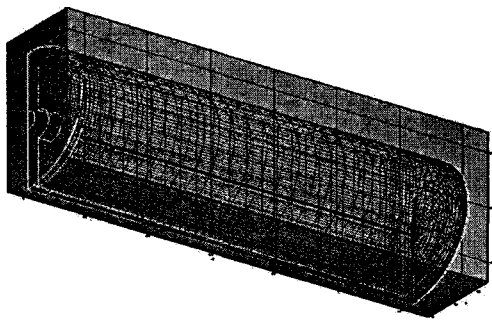


Fig. 2. Computational domain and grid system

Fig. 2에 나타난 바와 같이 $48 \times 50 \times 88$ (r × θ × z)의 불균일 격자계가 계산을 위해 사용되었다. 벽면 근처와 두 입구 영역에서는 속도구배가 매우 크므로 정확한 계산을 위해 세밀한 격자계를 사용하였다.

Table. 2는 계산에 사용된 공기의 상태를 나타

낸다.

Table. 2. Air inlet conditions

Items	velocity (m/s)	Inlet Temp. (K)
Inlet 1 - Air	5 m/s	300K
	8 m/s	300K
	11 m/s	300K
	13 m/s	300K
Inlet 2 - Air	11.2 m/s	1200K

3. 결과 및 검토

연소실에 대해 유동과 유체의 혼합, 그리고 열 전달에 대한 계산이 수행되었다. 이러한 결과를 통해 2차 공기 입구의 지름의 크기와 유량, 재순환관과 벽과의 간격이 전체 연소실에 미치는 영향에 대해 알아보려고 한다.

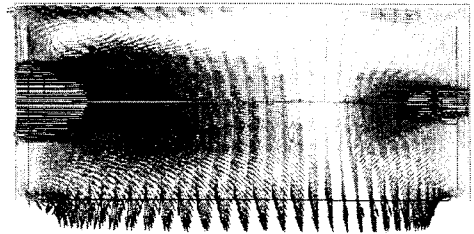
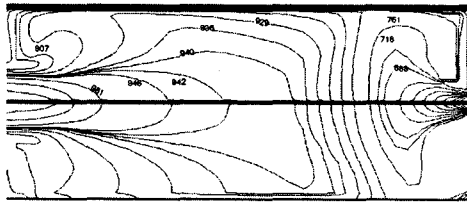
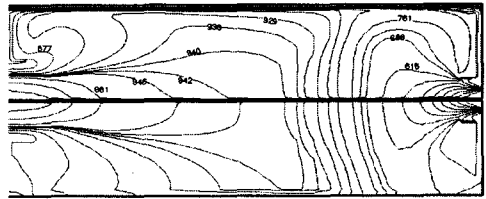


Fig. 3. Calculated velocity vectors in the combustion chamber

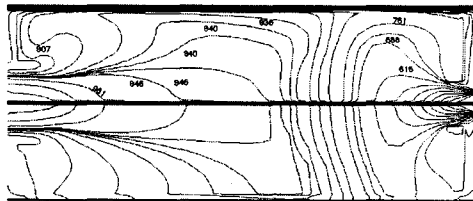
Fig. 3는 속도벡터를 나타낸다. 결과를 통해 연소실내에 상당히 큰 영역을 재순환류가 차지하고 있음을 알 수 있다. 또 버너 쪽 입구의 직경이 더 크기 때문에 보다 많은 유량으로 유입되어 축방향의 속도가 0에 가까운 부분이 2차공기 입구 쪽으로 치우쳐서 존재함을 확인할 수 있다. 재순환된 유동은 벽을 따라 밑부분의 출구로 빠져나간다. 그러나 고온 가스의 일부가 재순환 영역에 갇혀 두 유동이 더 잘 혼합되게 도와줌으로써 실제 연소반응시에 연료와 공기의 혼합을 촉진시키고 보다 빠른 연소반응을 일으키게 한다.



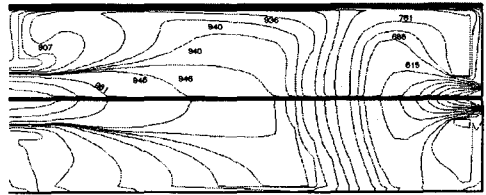
(a) $d/D = 0.136$



(a) 1cm



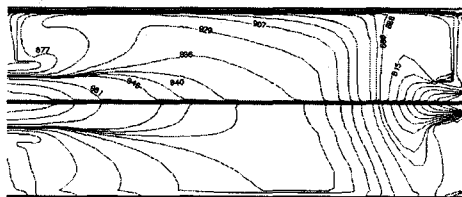
(b) $d/D = 0.200$



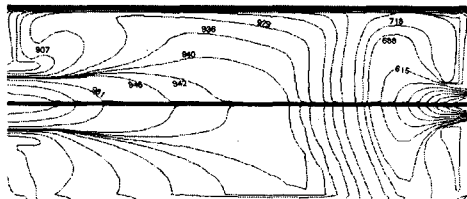
(b) 2cm

Fig. 4. Computed results of temperature distribution for the different inlet diameters

Fig. 6. Computed results of temperature distribution for the different plate distances



(a) $v = 5\text{m/s}$



(b) $v = 8\text{m/s}$

Fig. 5. Computed results of temperature distribution for the different inlet velocities

Fig. 4, 5, 6은 온도분포를 나타내는데 중심축 부근에서는 저온공기와와의 직접 접촉에 의해 급격한 온도변화를 보이고 중심을 벗어나 벽쪽으로 갈수록 온도변화의 폭이 작아진다. 또한 z 가 증가함에 따라 온도변화가 급격해 지고 두 유동이 충돌하는 지점의 왼쪽에서는 벽 쪽으로 갈수록 온도가 더 높아지는 것을 알 수 있다. 중심축을 기준으로 아래쪽은 출구의 영향을 받기 때문에 온도변화의 폭이 더 작음을 알 수 있다. 또한 z 가 0.5 부근에서는 고온 가스가 유입되기 때문에 거의 일정한 온도가 유지됨을 알 수 있다.

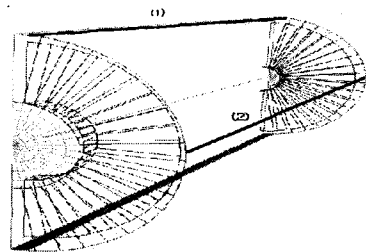
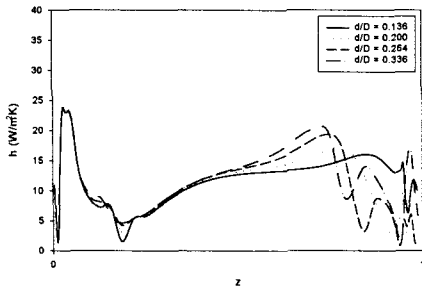
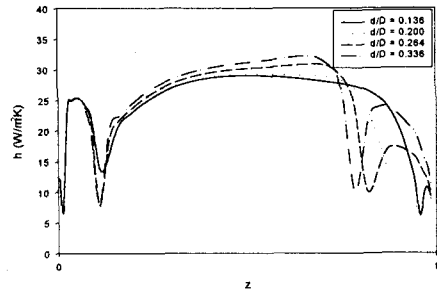


Fig. 7. Locations for calculating the heat transfer coefficients

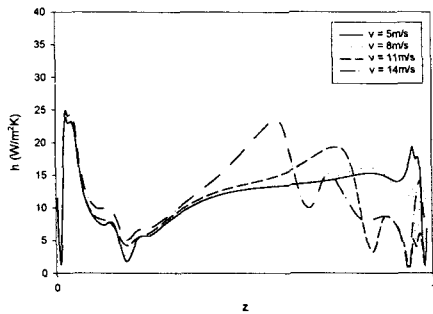


(a) Position 1

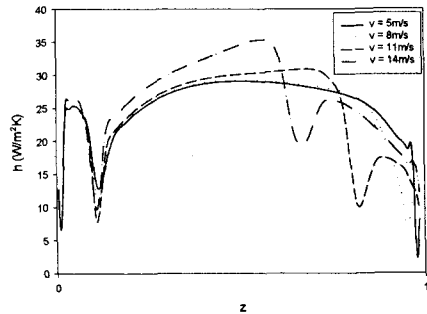


(b) Position 2

Fig. 8. Local heat transfer coefficient for different inlet diameters

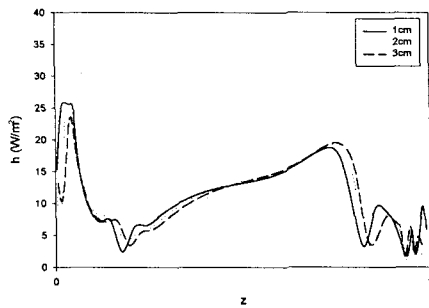


(a) Position 1

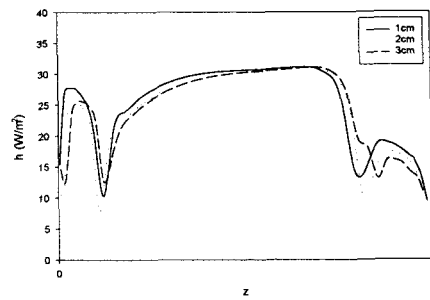


(b) Position 2

Fig. 9. Local heat transfer coefficient for different inlet velocities



(a) Position 1



(b) Position 2

Fig. 10. Local heat transfer coefficient for different plate distances

Fig. 8, 9, 10은 Fig. 7에 나타내어진 위치의 입구 반경변화, 입구 속도변화, 재순환판 간격 변화에 따른 연소실 벽에서의 열전달 계수를 그린 그래프이다. 고온의 가스가 재순환되어 고립되어 있는 영역에서 가장 높은 값을 가짐을 보인다. 열전달 계수의 감소는 상대적으로 온도차이가 큰 2차공기의 유입에 의해 온도구배가 급격히 커지기 때문이다. z 가 약 0.8인 영역에서 열전달 계수가 급격히 감소하는 것은 재순환류의 고립으로 유동의 흐름이 방해되기 때문에 벽 근처에서의 유동 속도가 낮아지기 때문으로 사료된다.

Fig. 11은 속도가 11m/s 일 때 2차 공기 입구 지름의 변화에 따른 전체 열유속인데 지름이 가장 작은 $d/D=0.138$ 일 때 가장 높은 값을 가진다. 이는 유입되는 유량이 적기 때문에 고온의 가스가 내부유동에 더 지배적인 영향을 미치기 때문인 것으로 볼 수 있으며, Fig. 12는 $d/D=0.264$ 일 때 입구 속도변화에 따른 전체 열유속을 나타내는데 공기의 속도가 5m/s, 8m/s 일 때 가장 높게 나오는 것으로 보아 온도가 다른 두 유동의 혼합에서 한 유동의 입구조건이 내부의 열전달과 유동의 혼합에 있어서 최적의 조건이 존재한다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 콤팩트 온수보일러의 연소실의 성능 최적화를 위한 형상과 조건을 찾기 위한 수치계산을 수행하여 입구의 유량 조건의 변화에 따라 두 유동의 혼합으로 인한 효과를 통해 연소실 벽으로의 열전달이 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

또한 중요한 형상 조건중의 하나로 여겨지던 재순환판과 연소실 벽과의 간격은 유동과 열전달 특성에 거의 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다. 전체적인 열전달의 경향이 입구의 속도와 지름에 영향을 받는다는 것을 받아 고온 가스의 유량에 비해 2차 공기의 유량이 적을수록 열전달이 증가한다는 것을 알 수 있지만 지금의 결과로는 2차 공기가 보일러의 완전연소에 어느 정도의 영향을 미치는지 추측할 수 없다는 한계가 있기

때문에 복사 열전달의 고려와 함께 연소반응이 포함된 수치 계산이 차후에 이루어져야 한다.

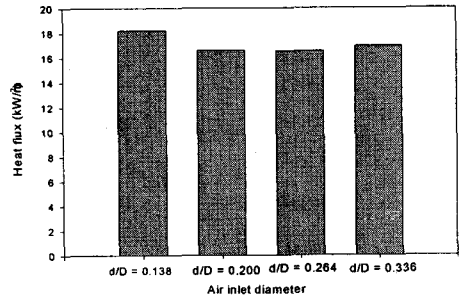


Fig. 11. Total heat flux for different inlet diameter

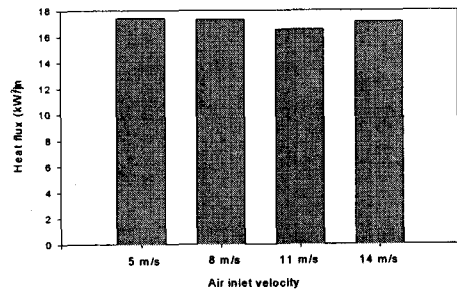


Fig. 12. Total heat flux for different inlet velocity

참고문헌

- (1) S. E. Elghobashi, G. S. Samuelsen, J. E. Wuerer & J. C. LaRue, 1981, *J. Fluids Eng.*, vol 103, pp 127~132
- (2) F. M. El-Mahallawy, K. H. Khalil & A. H. Abdel Hafiz, 1977, "Flow, Mixing and Heat Transfer in Furnaces", Pergamon Press, Oxford, England, pp 65~70
- (3) H. Gou & W. K. Lu, 1993, "Mathematical Modelling of Reversed Flow and Heat Transfer in the Combustion Chamber of the LB Furnace, Vol. 33, No. 11, pp. 1159-1167