

# Package 수관 보일러의 연소실 설계에 관한 연구 Study on Furnace Design for Packaged Water-Tube Boilers

인 종 수\*  
Jong-Soo In

### <Abstract>

A computer simulation program for the design of furnace within packaged water-tube boilers is developed and the developed computer program is successfully applied to design the furnace for packaged water-tube boiler. The model by experiment and the model by Hottel are used to predict the exit gas temperature of furnace. The result by two models is discussed and is shown that in the case of constant cross section in furnace, the result is same but in changing the configuration of cross section, the difference by two models is not small.

**Key words : package boiler, furnace design, radiation, furnace exit temperature**

## 1. 서론

보일러는 연료를 연소시켜서 이때 발생하는 열로 물을 가열하여 증기 또는 온수를 만들고 이것을 필요한 곳에 공급하는 장치이다. 보일러는 본체의 재질, 구조, 물순환법, 사용열원, 유체의 종류, 그리고 증발량에 따라 여러 가지로 분류되며 수관보일러(water-tube boiler)는 고압, 대용량의 증기를 얻기 위하여 비교적 지름이 작은 드럼과 이드럼밖에 설치된 많은 가는 수관으로 구성되어 있고 수관내의 보일러수가 수관 외부의 고온가스로부터 열을 받아서 증발한다<sup>1)</sup>. 증발량 30 t/h 정도 이하의 중소형 수관 보일러는

증기드럼(steam drum)에 평행한 수평연도를 채용하여 높이와 폭을 일정하게 하고 앞쪽에서 안까지의 길이를 변화시켜서 용량을 증감하도록 하는 데, 이것을 Package 수관보일러(Packged water-tube boiler)라고 한다<sup>2)</sup>. 수관보일러의 설계는 크게 열설계 및 강도설계로 구분되며 열설계는 전열면 배치, 물의 교환, 화로용적 결정등이 포함된다<sup>3)</sup>. 화로용적을 결정하기 위한 연소실 설계는 보일러 설계의 기본이라 할 수 있다. 연소실 설계를 위해서는 연소실내의 연소계산, 연소가스와 화로벽면사이의 전열해석이 필요하며 보일러의 전열은 주로 복사에 의해 행해지고 있다<sup>3)4)</sup>.

\*정회원, 대천대학 기계자동차학부 전임강사 · 공학석사  
KAIST 卒業  
355-830, 보령시 주포면 관산리  
E-mail ijs6011@dcc.ac.kr

Full-time Instructor, Dept. of Mechanical Automotibe  
Eng. Daecheon College, M.Eng.  
Graduate from KAIST  
Jupomyun, Boryungsi, Chungnam, 355-830, Korea

현재 대부분의 package 수관보일러의 설계 및 생산은 중소기업에 의해 수행되고 있는 실정이다. 연소계산은 그동안 많은 연구를 통하여 쉽게 전산화가 가능하지만 연소실내의 전열현상은 그복잡성으로 인하여 해석프로그램의 개발은 많은 비용이 요구되며 해석시간이 많이 소요되고, 해석방법 또한 전문적인 지식을 필요로 한다.

중소기업의 특성상 상기의 이유로 전열해석은 실험 Data를 근거로 한 핸드북<sup>5)6)</sup>등을 이용한 수계산으로 행하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 이러한 현실을 고려하여 사용방법이 비교적 간단하고 개발비용이 많이 소요되지 않는 Package 수관 보일러의 연소실 설계를 위한 프로그램 개발에 대하여 논의하고자 하며 개발된 프로그램을 이용하여 용량 7 t/h, 압력 9 kgf/cm<sup>2</sup>의 보일러 연소실을 예로 들어 연소실 설계를 행한 결과를 보여주고자 한다.

또한, 전열 해석방법 중 복사에 의한 전열계산 모델로서 기존의 실험 Data에 의한 방법 및 Box Type의 연소실에 적합한 Hottel에 의해 개발된 복사전열 계산 모델<sup>7)</sup>을 사용하는 방법에 대하여 논의하고, 개발된 프로그램을 이용하여 연소실 단면형상이 변화하지 않고 연소실 깊이만 변화할 경우, 연소실 단면형상이 변화할 경우, 연소실 입열량이 변화할 경우에 대하여 그결과를 검토하고 연소실 설계를 의한 전열해석 방법에 대하여 논의하고자 한다.

## 2. 계산 방법

### 2.1 연소실의 개략도

본 연구에서 고려하고 있는 연소실 개략도는 Fig.1과 같으며, 물 및 증기의 순환경로는 급수 펌프를 지난 물은 절탄기를 지나 증기드럼(steam drum)에 공급되고 이물은 강수관(down comer)을 따라 내려와서 물드럼(water drum)에 공급된다. 물드럼에 공급된 물은 상승관(rizer tube)을 타고 상승하는 동안에 화로벽면으로부터 열전달을 받아 물은 일부 증발하게 되며 물-증기 혼합 유체가 된다. 이 혼합 유체는 다시 증기드럼에 유입되며 증기드럼에서 이 혼합 유체는 증기분리기(steam seperator)에 의하여 물과 증기로 구분되어 발생된 증기는 증기드럼을 과열기로 공급된다. 그리고 물은 다시

강수관을 통하여 재순환한다.

상승관에 열을 공급하기 위하여 연소실 앞면에 버너가 설치되어 있으며 이버너에 공기 및 연료를 공급하여 연소실(furnace)내에서 연소시키면 연소된 연소가스는 수벽(water wall)에 열을 전달하고 연소실을 빠져나가며 이때 연소가스의 온도를 화로출구가스 온도라고 한다.

연소실을 나온 연소가스는 과열기(super heater), 절탄기(economizer), 공기에열기(gas air heater)를 지나 보일러 굴뚝(stack)을 통하여 대기로 배출되는 데 이연소가스 온도를 보일러 출구가스 온도라고 한다.

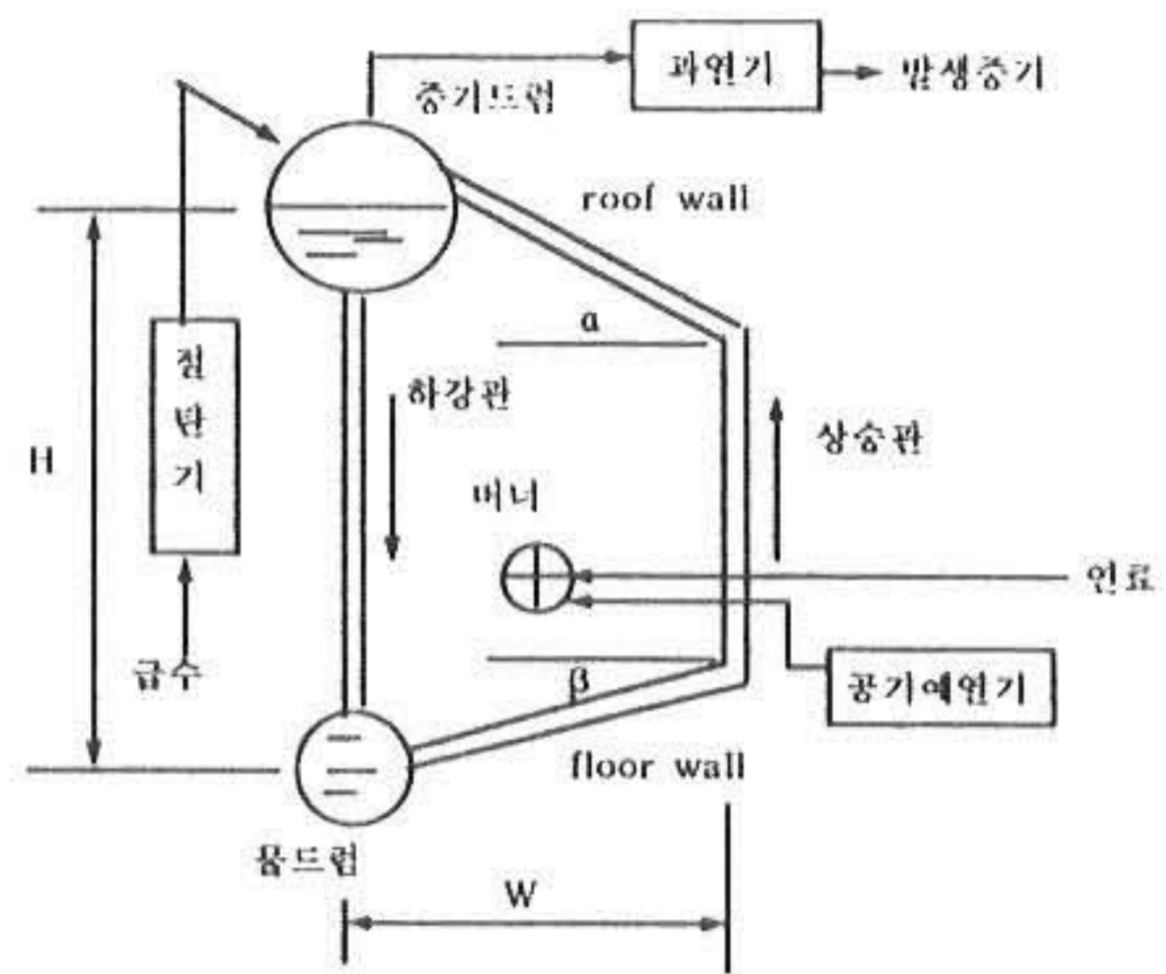


Fig.1 The cross section of furnace

본 연구에서는 연소실 내에서의 열전달을 계산하기 위하여 다음과 같이 가정하였다.

- i) 연소실 주위의 수관벽의 온도를 일정하다고 가정하였다.
- ii) 수관벽이 받는 열유속(heat flux)는 균일하다고 가정하였다.

### 2.2 계산방법의 개략

Fig.2에 연소실 설계 흐름도가 표시되어 있다. 계산 순서를 설명하면 다음과 같다.

- (1) 필요 증기량(kg/h) 및 증기 압력(kgf/cm<sup>2</sup>), 보일러 효율등 보일러 설계 조건을 입력한다.
- (2) 연료의 성분 및 발열량, 공기과잉율, 대기온도등 연료 조건을 입력한다.
- (3) 연료조건으로부터 필요공기량,연소가스량, 연소가스성분을 계산한다<sup>8)</sup>.
- (4) 화로설계 조건 다음과 같이 계산한다.

(1) 및 (2)의 조건으로부터 필요연료량을 계산한다.

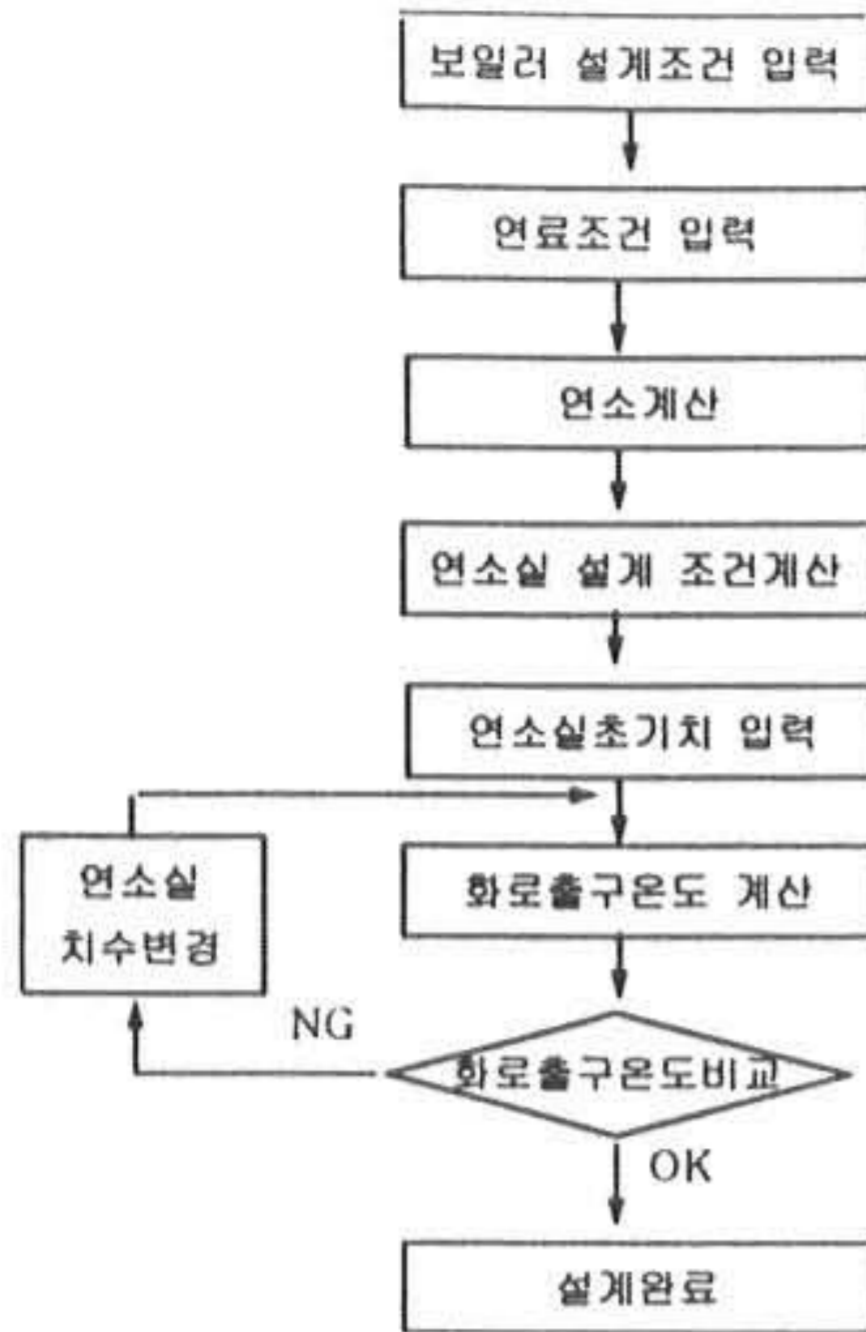


Fig.2 Furnace design flow

$$G_f = \frac{G_s (h_g - h_f)}{\eta_B \times B_f} \quad (1)$$

여기서,

- $G_f$  : 필요 연료량(kg/h)
- $G_s$  : 필요 증기량(kg/h)
- $h_g$  : 필요 증기 엔탈피(kcal/kg)
- $h_f$  : 급수 엔탈피(kcal/kg)
- $\eta_B$  : 보일러 효율
- $B_f$  : 연료 저위 발열량(kcal/kg)

연소실에서 발생한 연소가스량은 다음과 같이 계산된다.

$$C = C_f \times G_f \quad (2)$$

여기서,

- $C$  : 연소가스량(kg/h)
- $C_f$  : 연료 1 kg당 연소가스량(kg/kg-f)

화로출구가스 온도는 다음과 같이 계산된다.

$$t_g = \frac{B_f G_f + h_a G_a - Q_s}{C \times C_{pg}} \quad (3)$$

$$Q_s = G_s (h_g - h_f)$$

여기서,

- $t_g$  : 필요 화로출구 온도(°C)
- $h_a$  : 버너유입 공기엔탈피(kcal/kg)
- $G_a$  : 필요 공기량(kg/h)
- $C_{pg}$  : 연소가스 비열(kcal/kg-°C)

(5) Fig.1에서 증기드럼과 물드럼사이의 높이 H(m),연소실 폭 W(m), 상부튜브 각도(roop wall slop)  $\alpha$ ,하부튜브 각도(floor wall slop)  $\beta$  를 입력한다.

(6) 연소실내 연소가스와 연소실 수벽사이의 전 열계산에 의한 화로출구온도를 계산한다.

(7) (4) 및 (6)에서 계산한 화로출구온도가 같을 때까지 (5)의 연소실 치수를 변경하여 반복 계산한다.

### 2.3 화로출구 온도 계산

본 연구에서는 화로출구 온도 계산에 있어서 일정한 단면에서 실험한 실험값에 의한 방법과 간단한 Hottel의 복사전열 모델에 대하여 적용하였다.

#### (1) 실험값에 의한 방법

복사에 의한 연소가스와 연소실 수벽에서의 복사전열계산식은 다음과 같이 표시된다.

$$Q_r = h_r A_e \left( \left( \frac{t_g + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_s + 273}{100} \right)^4 \right) \quad (4)$$

여기서,

- $Q_r$  : 복사전열량(kcal/h)
- $A_e$  : 유효전열면적(m<sup>2</sup>)
- $t_s$  : 수벽온도(°C)
- $h_r$  : 복사전열 계수(Kcal/m<sup>2</sup>-h-k<sup>4</sup>)

$h_r$  은 실험적으로 정해지는 전열계수로 일정단면 형상에서 다음과 같이 결정된다.

$$h_r = \frac{Q_r}{A_e \left( \left( \frac{t_g + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_s + 273}{100} \right)^4 \right)} \quad (5)$$

이를 다음과 같은 함수로 표시할 수 있다.

$$h_r = f \left( \frac{Q_i}{A_e}, t_a \right) \quad (6)$$

여기서,

- $Q_i$  : 연소실 입열량(Kcal/h)

$A_c$  : 단열 화벽면적( $m^2$ )

$t_a$  : 공기온도( $^{\circ}C$ )

복사전열량은 다음과 같이 연소가스와 물-증기와의 열평형으로부터 계산할 수도 있다.

$$Q_r = G_f B_f + h_a G_a - t_g C_{pg} C \quad (7)$$

실험값에 의한 화로출구 온도 계산 흐름도가 Fig.3에 표시되어 있다.

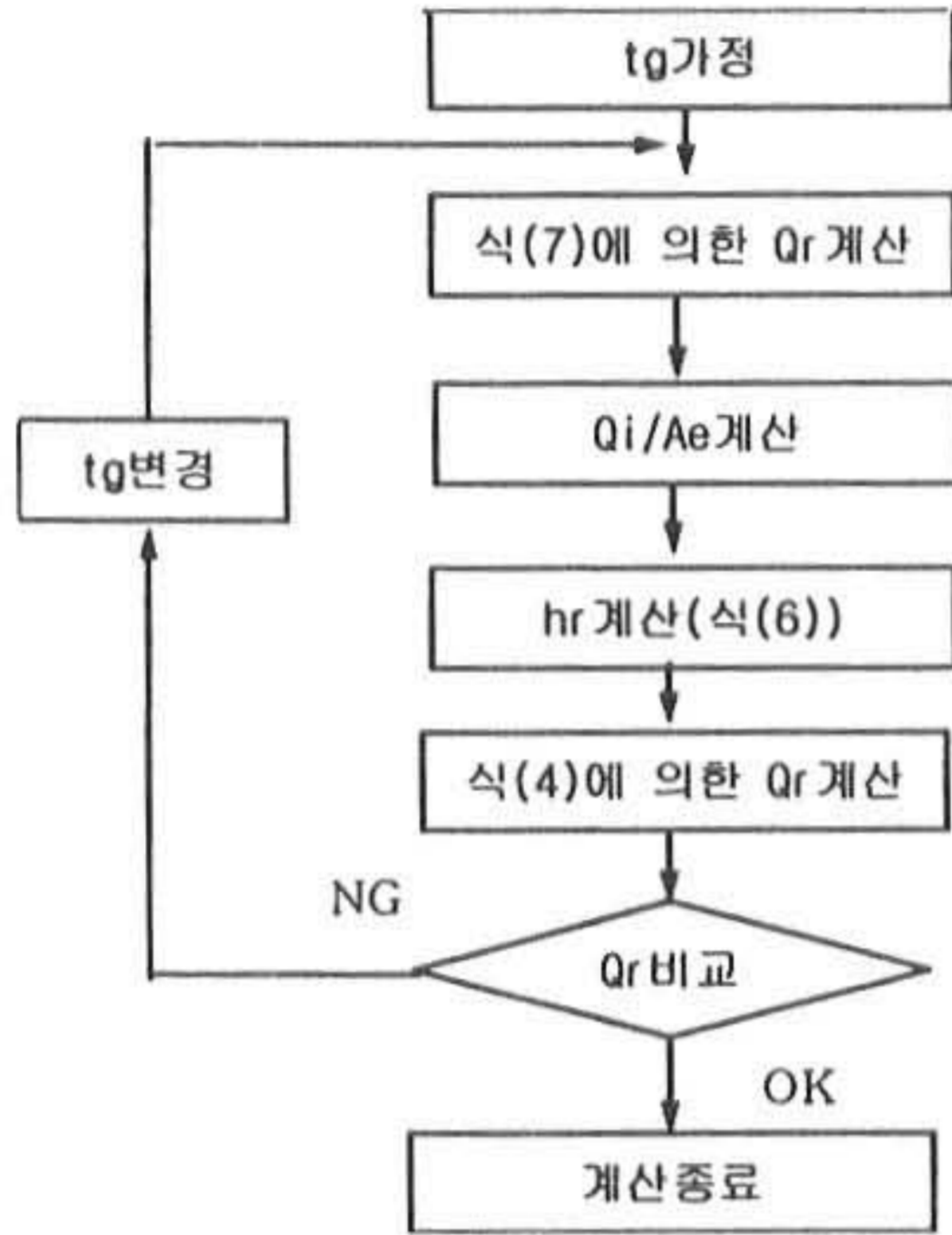


Fig.3 Furnace exit temperature calculation by experimental model

$h_c$  : 대류전열계수( $kcal/m^2-h-^{\circ}C$ )

연소가스의 흡수율  $\epsilon$ 는 wide band model을 사용하면 계산할 수 있다<sup>10)</sup>. 간단한 Hottel 모델에 의한 화로출구 온도 계산 흐름도가 Fig.4에 표시되어 있다.

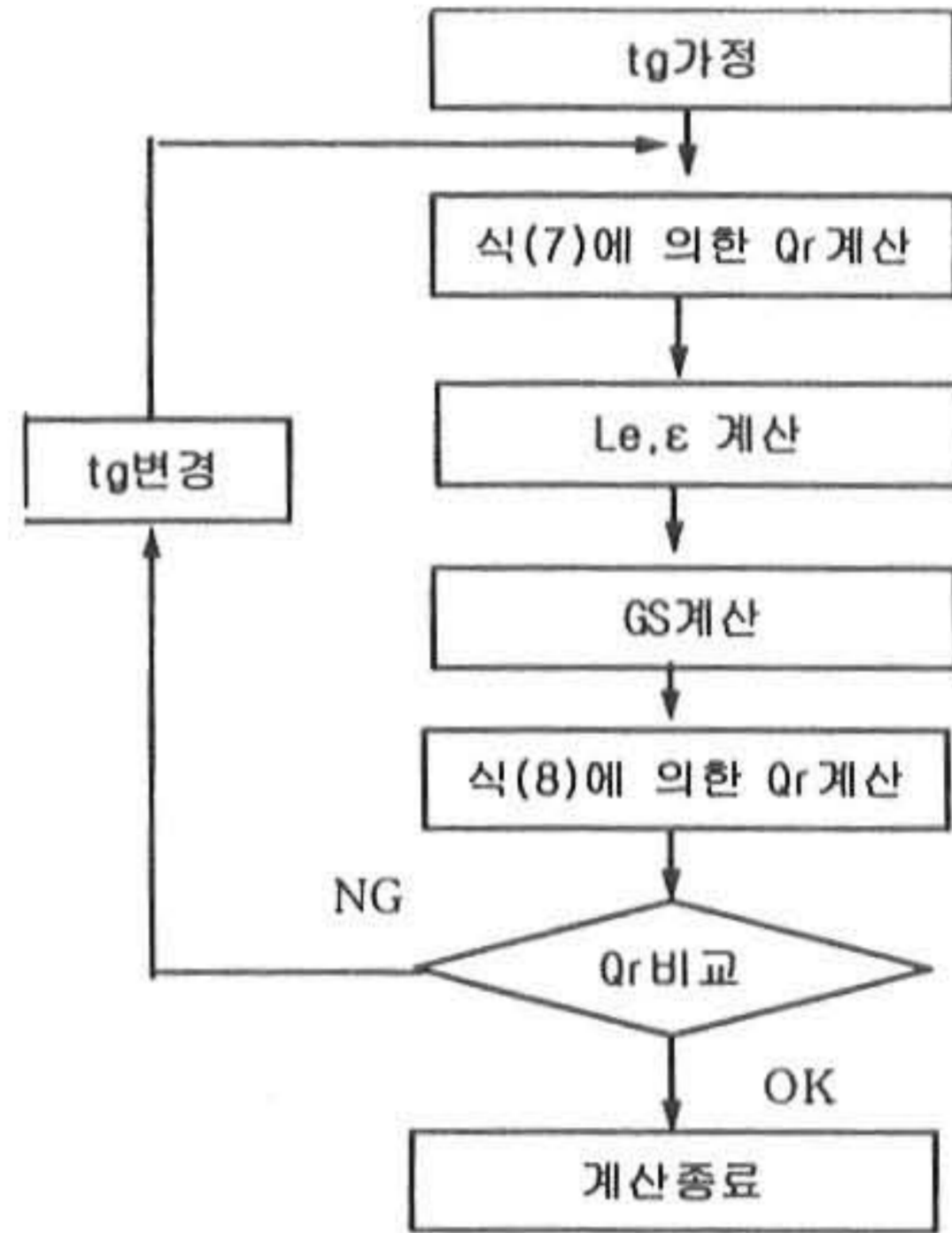


Fig.4 Furnace exit temperature calculation by Hottel model

(2) 간단한 Hottel 모델에 의한 방법

간단한 Hottel 모델에 의한 연소실내 복사 전열량은 다음과 같이 계산할 수 있다<sup>9)</sup>.

$$Q_r = GS \cdot \sigma (t_g + 273)^4 - (t_s + 273)^4 + h_c \times A_e \quad (8)$$

$$GS = \frac{(A_e + A_c)}{\frac{1}{C\epsilon_s} + \frac{1}{\epsilon(t_g, L_e)} - \frac{1}{a_{GS}} + \frac{1/a_{GS} - 1}{C\epsilon_s + (1-C)\epsilon_r}}$$

$$C = \frac{A_e}{A_e + A_c}$$

$$a_{GS} = \frac{\epsilon(t_g, L_e)}{(2 - \epsilon(t_g, 2L_e))\epsilon(t_g, L_e)}$$

여기서,  $L_e = 0.9 \times 4 \times \text{노내체적} / (A_e + A_c)$

$\epsilon$  : 연소가스 흡수율

$\sigma$  : Stefan-Boltzmann constant  
( $5.67 \times 10^{-8} W/m^2-K^4$ )

3. 계산 결과 및 고찰

전 절에서 설명된 연소실을 설계하기 위하여 전산 프로그램을 개발하였으며, 개발된 프로그램을 사용하여 용량 5 t/h 압력 9 kgf/Cm<sup>2</sup> 인 수관 보일러에 적용하였다. 그 결과가 표.1에 표시되어 있다. 표 1에 보는 바와 같이 설계값에서는 실험값에 의한 화로출구 가스온도와 Hottel 방법에 의한 화로출구 가스온도는 거의 일치함을 알 수 있다. 다음에 연소실 길이의 변화, 연소실 단면형상변화, 연소실 입열량 변화에 대하여 검토하였다.

3.1 연소실 길이변화에 대한 고찰

연소실 길이변화에 대하여 검토하기 위하여 본 연구에서 개발한 프로그램을 사용하여 연소

Table.1 Result of furnace design

보일러 설계 조건	증기발생량	7 t/h
	증기압력	9 kgf/cm <sup>2</sup>
	과열기출구온도	200 ℃
	절탄기입구온도	20 ℃
연료 조건	연료조건	oil
	저위발열량	8000 Kcal/kg
	공기과잉율	1.05
	대기온도	15 ℃
	연료 성분	H 0.85 C 0.12 S 0.03
연소실 치수	높이(H)	3 m
	폭(W)	4 m
	깊이(L)	2.75 m
	roof angle	15 °
	floor angle	10 °
연소실 설계 조건	절탄기출구온도	150 ℃
	공기에열기출구온도	220 ℃
	화로출구온도	845 ℃
실험식에 의한값	화로출구온도	843 ℃
	화로벽열유속	74,266 kcal/m <sup>2</sup> -h
Hottel model	화로출구온도	840 ℃
	화로벽열유속	75,706 kcal/m <sup>2</sup> -h

실 깊이를 2 m에서 6m까지 변화하면서 계산하였다. 연소실 길이 변화에 의한 연소실체적에 대한 화로출구 가스온도의 계산값이 Fig.5에 표시되어 있다. 그림에서 보는 바와같이 체적이 작은영역에서는 실험에 의한 모델을 사용한 경우

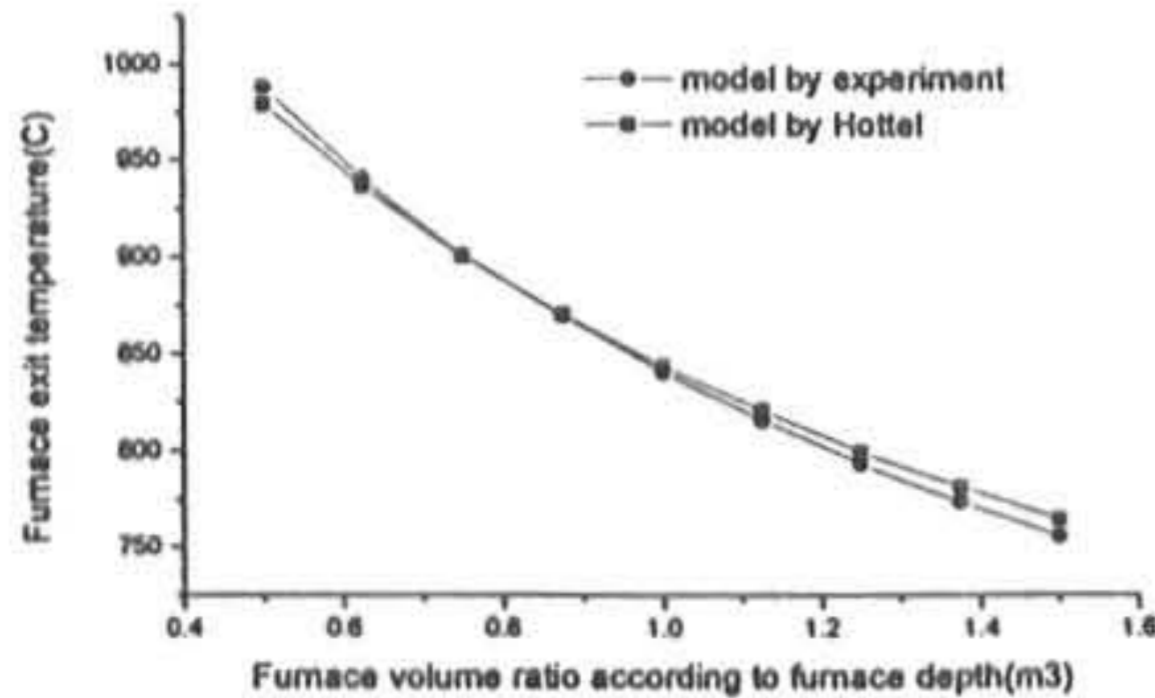


Fig.5 Furnace exit temperature according to furnace depth

우가 Hottel의 모델을 사용한 경우보다 화로 출구가스 온도가 높고 체적이 큰 곳에서는 그 반대의 영향이 나타남을 알 수 있다. 그러나 그값의 차이는 크지 않음을 알 수 있다. Fig.6에 화로 출구가스 온도에 대한 화로벽에서의 흡수 열유속이 표시되어 있는데 그차가 크지 않음을 알 수 있다.

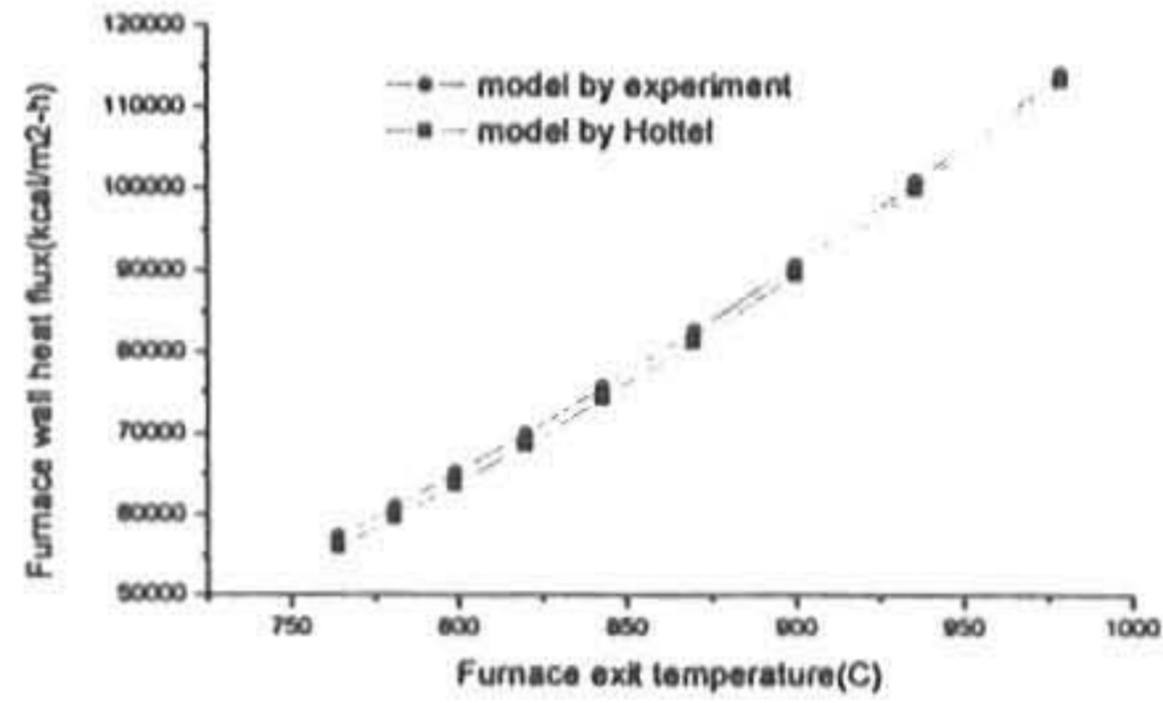


Fig.6 Furnace wall heat flux according to furnace depth

### 3.2 연소실 단면 변화에 대한 고찰

연소실 단면 형상변화에 대하여 검토하기 위하여 본 연구에서 개발한 프로그램을 사용하여 Fig.1의 roof wall slop의 각도를 0도에서 45도 까지 변화하면서 계산하였다. 연소실 형상 변화에 의한 연소실체적에 대한 화로출구 가스 온도의 계산값이 Fig.7에 표시되어 있다. 그림에서 보는 바와같이 체적이 작은영역에서는 실험에 의한 모델을 사용한 경우가 Hottel의 모델을 사용한 경우보다 화로 출구가스 온도가 높고 체적이 큰 곳에서는 그 반대의 영향이 나타

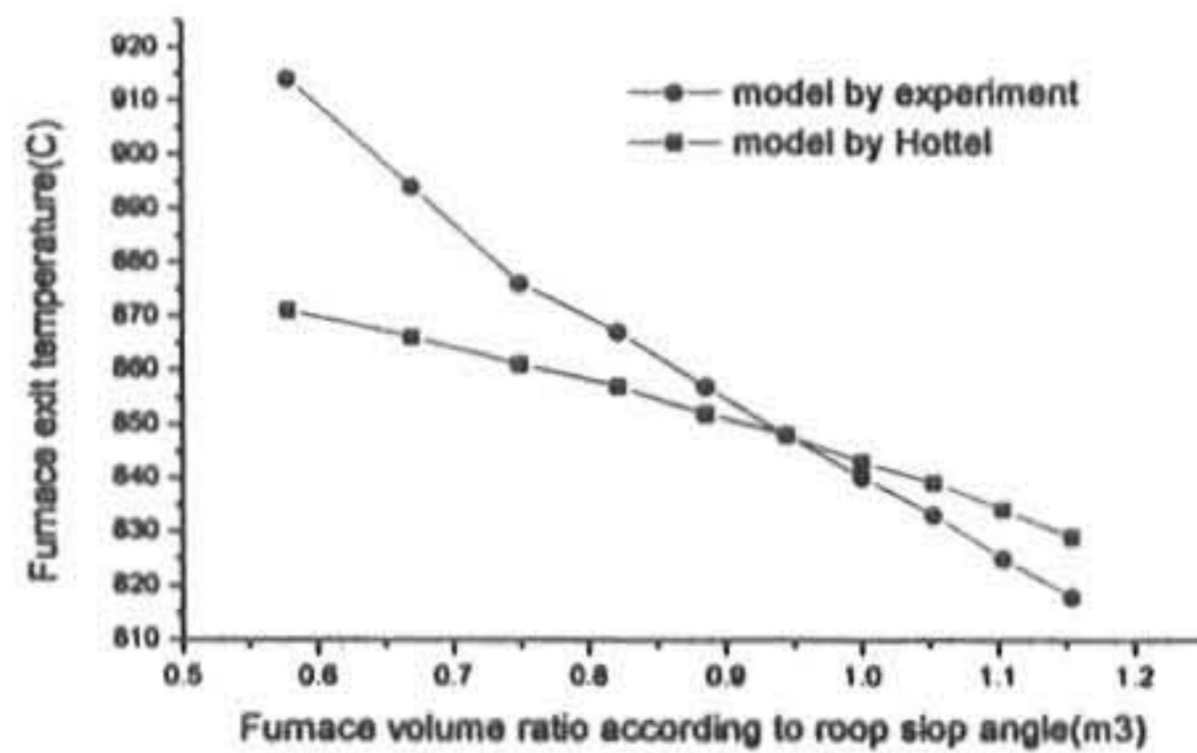


Fig.7 Furnace exit temperature according to roof angle

남을 알 수 있다. 이는 식(6)에서 보는 바와 같이 실험에 의한 화로 출구가스 온도 계산식에서는 단면의 형상이 고려되어 있지 않기 때문이라고 생각된다. Fig.1에서 보는 바와 같이 roof wall angle 이 0도에서 45도로 변화할 경우 단면적이 감소한다. 따라서 연소실 체적이 감소한다 그러나 체적감소에 비해서 유효전열면적은 커진다. roof wall angle이 증가하는 경우 체적이 감소하나 유효전열면적이 증가하기 때문에 식(6)에서 복사전열계수는 감소한다. 따라서 흡수 전열량이 작아지기 때문에 화로 출구 온도가 상승한다.

roof wall angle이 감소하는 경우 체적이 상승하지만 유효전열면적이 작아지기 때문에 식(6)에서 복사전열계수는 커지고 연소실내 전열량이 증가하여 화로 출구가스 온도는 낮아진다. Fig.8에 화로 출구가스 온도에 대한 화로벽 흡

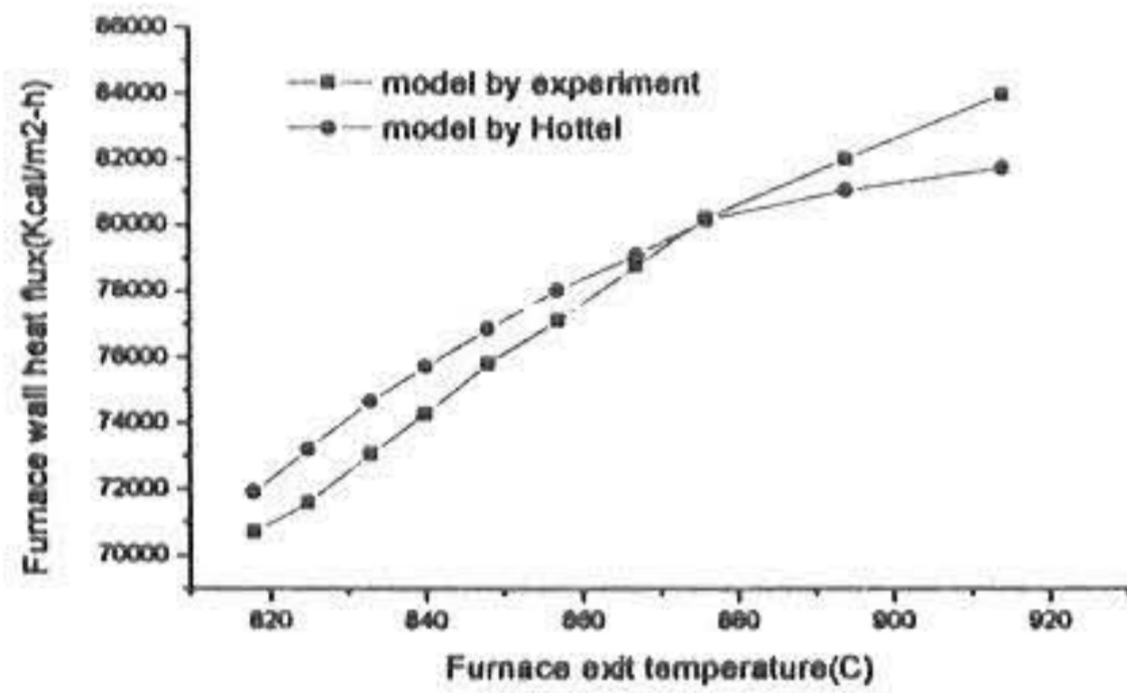


Fig.8 Furnace wall heat flux according to roof angle

수 열 유속에 대한 그림이 표시되어 있다. 이 상에서 보는 바와 같은 이유 때문에 온도가 높은 영역에서는 실험에 의한 모델이 Hottel에 의한 모델보다 열유속이 낮고 낮은 온도에서는 열유속이 높게 나타남을 알 수 있다.

### 3.3 연소실 입열량에 대한 고찰

연소실 입열량 변화에 대하여 검토하기 위하여 본 연구에서 개발한 프로그램을 사용하여 증기발생량을 2 t/h에서 7 t/h까지 변화하면서 계산하였다. 연소실 입열량 변화에 의한 화로 출구 가스온도의 계산값이 Fig.9에 표시되어 있다. 그림에서 보는 바와같이 입열량이 작은영역

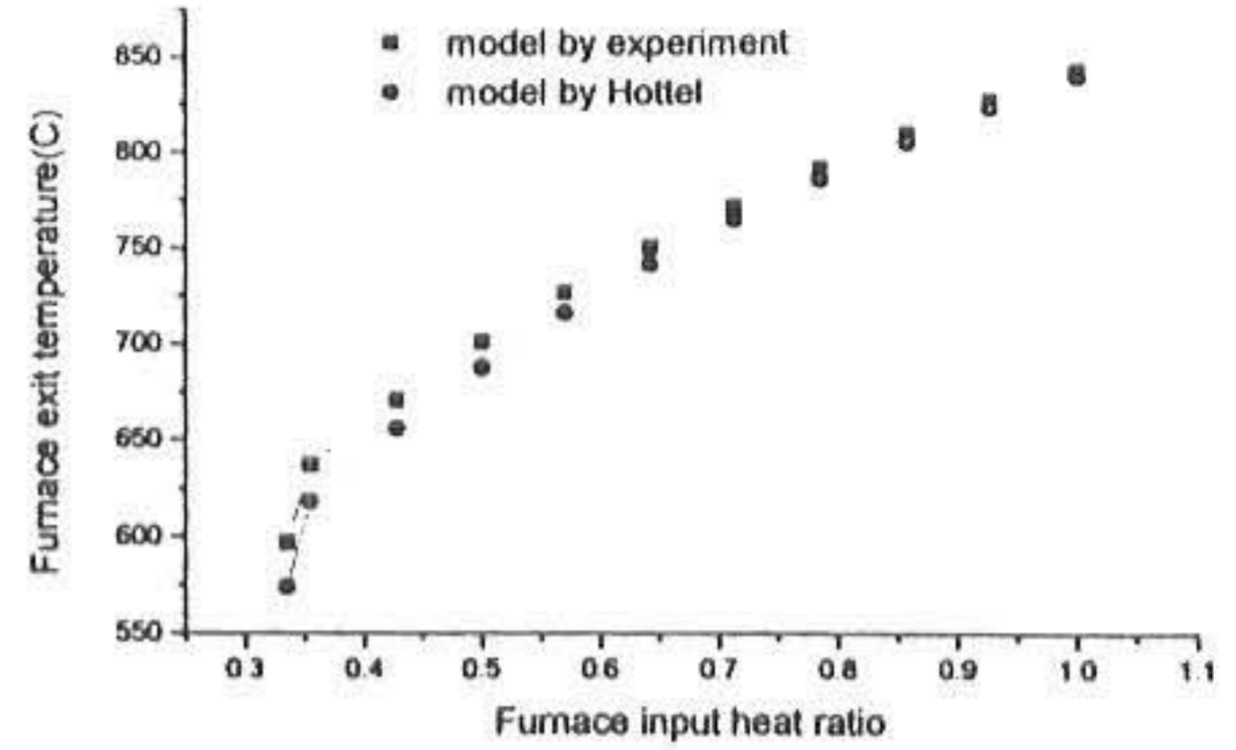


Fig.9 Furnace exit temperature according to furnace input heat

에서는 실험에 의한 모델을 사용한 경우가 Hottel의 모델을 사용한 경우보다 화로 출구가스 온도가 높고 알 수 있다. 이는 입열량이 낮은 곳에서는 상대적으로 대류전열량이 증가하기 때문이다. 즉 식(8)에서 Hottel에 의한 모델에서는 대류전열이 고려되나 실험에 의한 모

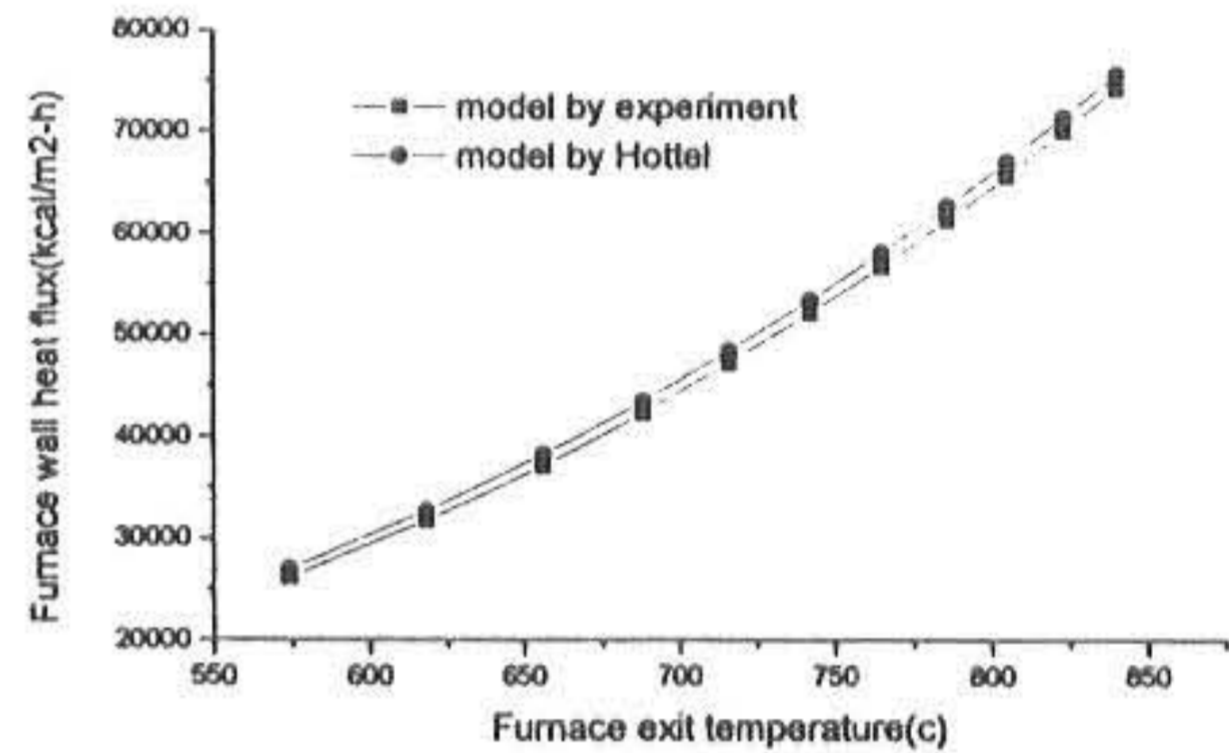


Fig.10 Furnace wall heat flux according to furnace input heat

델에서는 대류영향이 고려되어 있지 않기 때문으로 생각된다. Fig.10에 화로출구 가스온도에 따른 화로 벽 열유속이 표시되어 있는데 두 모델의 차이는 거의 없다. 이는 대류에 의한 영향이 있지만 그리 크지 않기 때문이라고 생각된다.

### 4. 결론

본 연구에서는 Package 보일러 연소실 설계를 위한 프로그램 개발을 하였으며 특히 화로 출구 가스온도를 예측하기 위하여 전열계산 모

델로 실험에 의한 모델 및 Hottel에 의한 모델을 사용하였다. 본 프로그램을 이용하여 연소실을 설계하는 것이 가능함을 보여주고 있고 특히 화로 출구가스 온도예측 결과는 다음과 같은 결론을 보여주고 있다.

- (1) 연소실 단면이 일정한 경우 실험에 의한 모델과 Hottel에 의한 모델이 거의 동일한 결과를 보여준다.
- (2) 연소실 단면이 변화할 경우 두 모델의 계산 결과가 차이를 보이는 데 그이유는 실험에 의한 모델은 화로 단면에 의한 영향이 고려되지 않고 Hottel에 의한 모델은 연소실 단면에 의한 영향이 고려되어 있기 때문이다. 따라서 실험에 의한 모델은 그사용이 연소실 단면이 일정한 경우에 한정되어서 사용이 가능하고 Hottel에 의한 모델은 단면이 변화하는 곳에서도 사용이 가능함을 알 수 있었다.
- (3) 화로의 입열량에 대한 계산결과는 입열량이 작을 경우 차이가 발생하지만 그차이는 크지 않음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 權純錫,보일러 및 증기터빈, 東明社, 서울, pp.14-38 (1998)
2. 徐正閔·崔國光,蒸氣原動機,螢雪出版社, 서울, pp.56-62(1981)
3. 인종수,보일러 로내에서 화염으로부터의 열 유속 측정에 관한 연구,M.S.Thesis,한국과학기술원, pp.1-2(1986)
4. Khalil,E.E. · Trulove,J.S.,The Calculation of Radiative Heat Transfer,J.Heat and Mass Trans.,4,pp 353-386(1977)
- 5.日本機械學會,傳熱工學資料,pp.231-252 (1975)
- 6.日本機械學會,JSME Combustion Handbook , pp 209-222(1995)
- 7.Donald,Q.K., PROCESS HEAT TRANSFER, MaGRAW-HILL,TOKYO, pp. 674-714 (1950)
8. 水谷幸夫,燃焼工學,森北,pp.38-43(1977)
9. 한국과학기술원 기계공학과,보일러 및 가열로의 열설계, 산학협동 공개강좌(제5차),p.III-17 (1998)
10. Michael F.Modest,Radiative Heat transfer, McGraw-Hill, Singapore, pp.619-629 (1993)

(1998년 8월15일 접수, 1998년 10월15일 채택)