

덕트 버너 추가에 따른 수직형 HRSG 내 화염 복사 열전달의 영향에 관한 연구

김대희* · 김승진* · 최상민*[†] · 이봉재* · 김진일**

* KAIST 기계공학과, ** 두산중공업(주) 기술연구원

Effect of Flame Radiative Heat Transfer in Horizontal-Type HRSG with Duct Burner

Daehee Kim*, Seungjin Kim*, Sangmin Choi*[†], Bong Jae Lee* and Jinil Kim**

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science & Technology

** R&D Institute, Doosan Heavy Industries & Construction

(Received October 11, 2012 ; Revised November 12, 2012 ; Accepted November 16, 2012)

Key Words: Duct Burner(덕트 버너), Heat Recovery Steam Generator(배열회수 보일러), Flame Radiative Heat Transfer(화염 복사 열전달), Heat Exchanger(열교환기)

초록: 본 연구에서는 덕트 버너를 추가적으로 사용하는 수직형 배열회수 보일러(HRSG)에서 발생하게 되는 화염에 의한 전열면으로의 화염 복사 열전달에 의한 영향을 살펴보기 위한 해석 기법을 마련하였다. 덕트 버너 화염과 전열면은 가상의 평면으로 가정하였고, 화염 온도, 면적 및 방사율 입력정보는 간략화 하였다. 덕트버너 설치 위치 및 연료를 달리한 3 가지 해석 case 가 고려되었으며 계산된 화염 복사 열전달률과 열유속은 삼원자 가스 복사 및 대류 열전달과 비교되었다. 모든 해석 case 에서 삼원자 가스 복사 열전달에 의한 영향은 미미하였고, 전열면에서 대류 열전달 대비 화염 복사 열전달률은 8~41%인 것으로 나타났다. 이 연구에서 얻은 중요한 사실은 화염 복사가 집중되는 전열면의 중앙부분에서 국부적인 열유속은 화염 복사에 의해 완전히 지배된다는 것이다.

Abstract: A method was developed for analyzing the radiation heat transfer from the duct burner flame to the heat exchanger in a heat recovery steam generator (HRSG) in order to supplement the existing thermal design process. The burner flame and the heat exchanger were considered to be imaginary planes, and the flame temperature, surface, and emissivity were simplified using an engineering approach. Three analysis cases in which the duct burner position and fuel were changed were considered. The calculated flame radiative heat transfer and local flux on the heating surface were compared with those of 3-atomic gas radiation and convection. In all analysis cases, heat transfer by 3-atomic gas radiation was very small. The ratio of the flame radiative heat transfer to the convection heat transfer on the heating surface was estimated to be as high as 8–41%. Moreover, the local heat flux on the heating surface centerline was dominated by flame radiative heat flux.

- 기호설명 -

a : 화염온도 보정계수
 A_f : 화염 표면적 (m^2)
 A_w : 전열면 면적 (m^2)
 F : view factor
 h_{conv} : 대류 열전달 계수 (W/m^2K)

$h_{rad,g}$: 가스 복사 열전달 계수 (W/m^2K)
 h_s : 물, 증기의 대류 열전달 계수 (W/m^2K)
 ΔH : 엔탈피 변화량 (kW)
 L : 화염의 유효층 두께 (m)
 T_{ad} : 단열 화염 온도 (K)
 T_f : 화염 온도 (K)
 $T_{g,out}$: 가스 출구 온도(K)
 T_w : 벽면 온도 (K)
 L : 화염의 유효층 두께 (m)

[†] Corresponding Author, smchoi@kaist.ac.kr

- Q_b : 덕트버너를 통한 입열량 (W)
- Q_{conv} : 대류 열전달량 (W)
- $Q'_{rad,f}$: 초기 가정된 화염복사 열전달량 (W)
- $Q_{rad,f}$: 계산된 화염복사 열전달량 (W)
- $Q_{rad,g}$: 가스복사 열전달량 (W)
- Q_s : 전열관을 통한 증기로의 열전달량 (W)
- r_{hole} : 덕트버너 연료노즐 반지름 (m)
- R_f : 화염 단면적 반지름 (m)
- U : 총괄 열전달계수 (W/m^2K)
- $Y_{F,stoic}$: 이론 연료 질량 비율

그리스 문자

- α : 흡수계수
- σ : Stefan-Boltzmann 상수 (W/m^2K^4)
- ϵ_f : 화염의 방출률
- ϵ_g : 가스의 방출률
- ϵ_w : 벽면의 방출률

1. 서론

전 세계적인 전력수요 증가에 따라 효율이 높은 복합사이클 발전플랜트의 수요가 증가하고 있는 한편, 최근에는 고온의 증기 생산과 하절기의 효율감소 및 최대 전기 수요를 보완하기 위해 Fig. 1 과 같이 가스터빈과 배열회수 보일러 (HRSG) 사이에 후연소 시스템, 즉 덕트 버너를 추가 설치한다.⁽¹⁾ 이 덕트 버너는 경우에 따라 전열관군 사이에 설치되기도 한다. 덕트 버너는 사용연료, HRSG 내 유동 특성, 가스터빈 부하 등을 감안하여 필요로 하는 설계값을 만족하도록 그 종류 및 설치 위치가 정해지게 되고, 이를 통해 각 운전 조건 상황에서 추가적인 전력을 공급할 수 있게 된다.

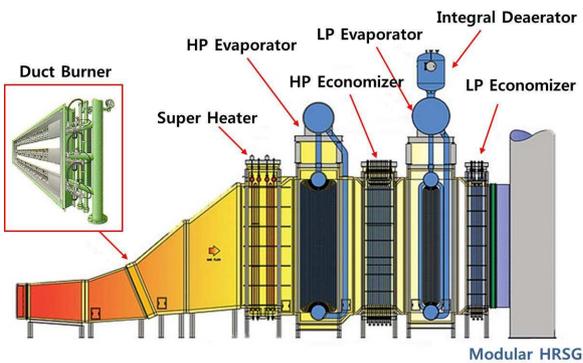


Fig. 1 Schematic diagram of HRSG with duct burner

하지만, 덕트 버너를 통한 추가 연소로 인해 높아진 배가스의 온도로 대류 열전달 정도가 변하게 되고, 또한 발생한 화염으로부터의 복사 열전달에 의해 추가적인 열이 전열면으로 공급될 것이다. 특히, 이 화염 복사 열전달은 기존(덕트 버너 미설치시) HRSG 성능 해석 시와는 다른 열전달 특성으로 인해 실제 열설계 시 고려되지 않고 있거나, 단순 인자로 고려되고 있다. 전열관 내 증기 온도의 과다 상승이나 국부적인 전열관의 파손 문제 등은 이러한 화염 복사 열전달을 열설계에 적절히 고려하지 못한 결과라고 예상된다.

HRSG 덕트 버너에 대한 학술적 문헌은 많지 않으며, 대부분 덕트 버너의 최적 설계를 위한 상용 CFD 연구가 주를 이루고 있다.⁽²⁻⁷⁾ Catalano 등^(2,3)은 덕트 버너 확산 모델 및 예혼합 모델에 대한 실험 및 수치적 해석을 통해 최적 설계 단계를 제안하였다. Koza⁽⁴⁾는 가스터빈 부하변동에 따른 덕트 버너 설계인자의 영향을 확인하였고, Giuliano 등⁽⁵⁾은 온도 및 유동장에 대한 해석을 통해 덕트 버너 재료의 냉각 효과를 위한 새로운 구조를 제안하였다. 또한 최근에는 덕트 버너 형상 변화에 따른 CO 및 NOx 저감에 관한 연구가 진행된 바 있다.^(6,7) 이처럼, 대부분의 연구는 덕트 버너 형상 및 운전 방식 등에 대한 최적 설계에 대한 내용으로써, 덕트 버너 설치에 따른 복사 열전달 특성 및 영향에 대한 연구는 거의 미비한 실정이다. HRSG 덕트 버너를 통한 추가적인 화염 복사 열전달 특성에 대한 정보는 HRSG 열설계 및 성능 예측을 위해 꼭 필요하며, 이를 통해 전열관 내 증기 온도의 과다 상승이나 국부적인 전열관의 파손 문제 등을 해결할 수 있다.

그래서 본 연구는 적절한 단순화와 가정을 통한 공학적 복사 열전달 해석 기법을 마련하여 덕트 버너 화염으로부터 관심 전열면으로의 복사 열전달 정도를 계산한 후 기존 열설계 방법에 따라 계산된 대류 열전달 및 가스 복사 열전달과 비교하여 그 상대적인 영향을 평가하고자 한다.

2. 해석 방법

2.1 접근 방법

본 연구에서 마련된 화염 복사 열전달 해석 기법의 전반적인 계산 절차는 Fig. 2 와 같다. 기존의 열설계의 경우 덕트 버너를 통해 공급되는 열이 모두 가스 현열 증가에 사용되어 이 가스가 전열면을 통과하면서 대류 열전달과 3 원자 가스 복사

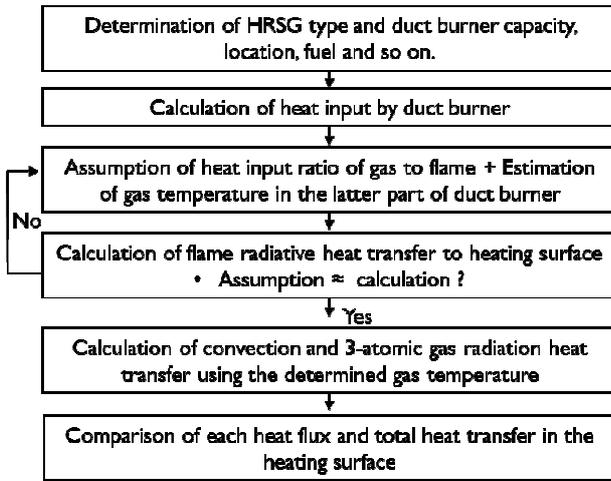


Fig. 2 Analysis of flowchart of flame radiative heat transfer on the heating surface

열전달로 열을 공급한다고 보았다. 하지만 실제 발광 화염으로부터 전열면으로 직접적인 복사 열전달이 발생할 것이다. 이 추가적인 화염 복사 열전달로 인해 실제 후단 가스 온도는 줄어들 것이고 대류 열전달에 영향을 미치게 되므로 이 후단 가스 온도값 또한 화염 복사 열전달 못지 않게 중요한 인자이다. 이를 보완하기 위해 덕트 버너를 통해 공급되는 입열량이 발광 화염 복사 열전달과 가스 현열 증가로 나누어 공급된다고 보고 그 비율을 초기 가정하였고, 그 비율에 따른 후단의 가스 온도 값을 열물질 정산을 통해 산정하였다. 이는 다음 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta H = Q_b - Q'_{rad,f} \quad (1)$$

식 (1)은 덕트 버너 입열량의 흐름을 나타내는 열평형식으로서, 덕트버너를 통과하는 가스의 엔탈피 변화량 ΔH 는 덕트버너를 통한 입열량 Q_b 에서 초기 화염 복사 열전달로 공급된다고 가정한 열량값 $Q'_{rad,f}$ 을 뺀 값으로 이를 통해 후단 가스 온도를 구할 수 있다. 본 연구에서 $Q'_{rad,f}$ 은 Q_b 의 0~30% 값으로 고려되었다.

$Q'_{rad,f}$ 의 값에 따라 정해지는 후단 가스온도와 화염 온도를 바탕으로 화염 복사 열전달량 $Q_{rad,f}$ 을 계산하여 초기 가정된 값 $Q'_{rad,f}$ 과의 평가(계산된 값이 초기 가정값을 넘지 않게 선정)를 통해 그 적절한 복사 열전달값 및 덕트 버너 후단 가스 온도를 구하였다. 최종적으로 산정된 후단 가스 온도 값으로 전열면에서의 3 원자 가스 복사 열전달과 대류 열전달을 계산하여 화염 복사 열전달과

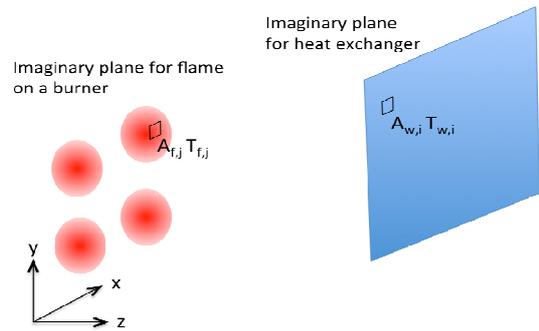


Fig. 3 Simplified diagram of flame and heat exchange for the calculation of radiative heat transfer

의 비교를 통해 그 상대적인 영향을 평가하였다. 이는 다음 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$Q_{rad,f} + Q_{conv} = Q_s, \quad (2)$$

where $Q_{conv} = UA\Delta T, U = \frac{1}{1/h_g + 1/h_s}$

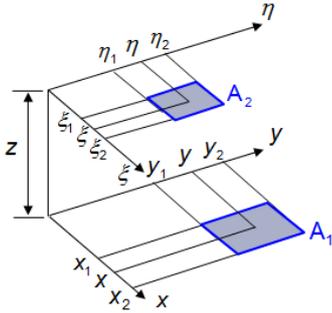
$$h_g = K(h_{conv} + h_{rad,g})$$

식 (2)는 관심 전열면에서의 열평형식을 나타낸 것으로, $Q_{rad,f}, Q_{conv}, Q_s$ 는 각각 계산된 화염 복사 열전달량, 대류 열전달량, 전열관을 통한 내부 물 및 증기로의 열전달량을 의미한다.

2.2 화염 복사 열전달 계산

화염과 전열관 사이의 복사 열전달 정도를 정확히 예측하기란 매우 어려운 문제이다. 빛이 매개체에서 이동하면서, 빛은 흡수, 산란, 방사 현상을 통해 그 강도가 작아지거나 커지게 된다. 본 연구에서는 방사, 흡수 및 산란 효과를 포함하는 복잡한 복사 열전달 방정식을 직접 풀기보다는 적절한 가정을 통해 복사 열전달 현상을 간략화하여 공학적 측면에서 접근하고자 Fig. 3 과 같이 화염과 전열관을 가상의 평면으로 가정하고 평균 화염 온도, 평면 투영 면적, 방사율 및 전열관의 선형적 온도 분포, 투영면적 등을 고려하였다. 즉, 화염에서 전열면의 흰 튜브로의 복사 열전달 현상을 표면적 현상(surface to surface)으로 보고 접근하였다. 또한, 화염과 전열면의 면적을 유한한 크기로 나누어 그 열유속을 계산함으로써, 전열면의 국부 표면 과열 현상에 대한 평가가 가능하도록 하였다.

본 연구에서 가정된 화염과 전열관 두 평면은 불투명, diffuse, gray 표면으로 가정되었다. 화염과 전열관의 방사율을 각각 ϵ_f 와 ϵ_w , 평행한 두



$$F_{1-2} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^2 (-1)^{(i+j+k+l)} G(x_i, y_j, \eta_k, \xi_l, z)$$

$$G = \frac{1}{2\pi} \left[\begin{aligned} & (y-\eta) \left[(x-\xi)^2 + z^2 \right]^{1/2} \tan^{-1} \left\{ \frac{y-\eta}{\left[(x-\xi)^2 + z^2 \right]^{1/2}} \right\} \\ & + (x-\xi) \left[(y-\eta)^2 + z^2 \right]^{1/2} \tan^{-1} \left\{ \frac{x-\xi}{\left[(y-\eta)^2 + z^2 \right]^{1/2}} \right\} \\ & - \frac{z^2}{2} \ln \left[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2 \right] \end{aligned} \right]$$

Fig. 4 View factor for two parallel planes⁽⁹⁾

미소 면적 요소를 각각 $A_{f,j}$, $A_{w,i}$ 라 하면, 모든 화염면적에 의한 복사 열전달 중 전열관의 i 번째 면적 요소에 도달하는 양은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁹⁾

$$Q_{rad,i} = \sum_j A_{f,j} F_{ji} (J_{ji}(T_{f,j}) - J_i(T_{w,i})) \quad (3)$$

여기서, J 는 radiosity로서 표면에서 일어나는 방사와 반사의 합으로 나타낸다. 위 식은 thermal resistive network⁽⁸⁾을 이용하면 식 (4)와 같은 형태로 변경하여 나타낼 수 있다.

$$Q_{rad,i} = \sum_j \frac{\sigma(T_{f,j}^4 - T_{w,i}^4)}{\frac{1-\varepsilon_f}{A_{f,i}\varepsilon_f} + \frac{1}{A_{f,i}F_{ji}} + \frac{1-\varepsilon_w}{A_{w,i}\varepsilon_w}} \quad (4)$$

따라서 화염과 전열관의 온도와 면적 및 방사율 등의 정보를 알고 있으면, 평행하고 유한한 면적을 가진 두 평면에서의 view factor⁽⁹⁾를 계산하여 전열관면에서 화염에 의한 복사 열전달 분포를 구할 수 있다. 화염 복사 열전달 계산은 MATLAB 코드를 기본으로 하였으며, 고려한 view factor 계산 방식은 Fig. 4와 같다.

본 연구에서 화염의 온도 및 면적의 결정은 복사 열전달량을 결정짓는 아주 중요한 인자이다.

Table 1 Definition of duct burner flame

Flame temp. (K)	- Mean: $T_f = a(T_{ad} + T_{g,out}) / 2$ ⁽¹⁰⁾ - Max: $T_f = T_{ad}$
Flame area (m ²)	$A_f = \pi R_f^2$ where, $R_f = 1.11r_{hole} / Y_{F,stoic}$ ⁽¹¹⁾
Flame emissivity	$\varepsilon_f = 1 - e^{-\alpha L}$ ⁽¹²⁾ where, $\alpha = 0.8(oil)$ ⁽¹⁰⁾ $= 0.25(natural\ gas)$ ⁽¹⁰⁾

실제 사용 연료 및 덕트 버너 타입에 따라 그 화염의 형상 및 위치, 온도가 달라지게 되고, 같은 타입이라 할지라도 공급되는 유량, 가이드 베인 각도 및 스웰의 강도에 따른 그 유동 및 연소 특성이 달라져 화염의 온도 및 면적의 명확한 정의는 매우 어려운 것이다. 본 연구에서는 적절한 가정을 통해 이러한 문제를 단순화시키고 case 별 해석을 실시하고자 하였다. 계산을 위해 사용된 화염 관련 입력값의 정의는 Table 1과 같다. 화염 온도 T_f 는 고려된 덕트 버너 연료와 주위 가스 조성에 따른 단열화염 온도값 T_{ad} 과 출구 가스 온도 $T_{g,out}$ 의 평균값에 화염온도 보정계수 a 를 곱하여 사용하였다.⁽¹⁰⁾ 또한 발생 가능한 고온의 화염 온도의 경우를 고려하여 화염온도를 단열화염온도로 가정한 경우도 계산에 추가하였다. 화염 면적은 제트 확산화염의 정의⁽¹¹⁾를 통해 단순화된 평면 투영 화염의 반지름을 가정하였고, 이 값을 실제 화염의 이미지 및 덕트 버너 형상 등을 고려하여 보정하여 계산의 입력값으로 사용하였다. 발광 화염의 방사율은 화염의 유효층 두께 L 과 흡수계수 α 로 정의하였으며, 고려된 연료에 따라 달리 적용하였다.^(10,12)

2.3 해석 조건

본 연구에서는 두산중공업의 한 수평형 HRSG에서 가스터빈 load가 100%인 경우 중 덕트 버너 열공급량이 가장 많은 경우를 바탕으로 기준 Case (Case 1: Inside & gas)를 정했으며, 덕트 버너 설치 위치 및 덕트 버너 연료를 바꾼 경우를 고려하여 해석하였다. 고려된 해석 Case는 Fig. 5와 같다. 해석 Case 1과 2의 경우는 전체적인 형상 및 치수는 동일하고 공급되는 덕트 버너 연료의 정상만 바꾼 경우로, 천연가스 연료의 경우 CH₄, 오일의 경우는 C₁₂H₂₃을 주성분으로 고려하였으며 덕트버

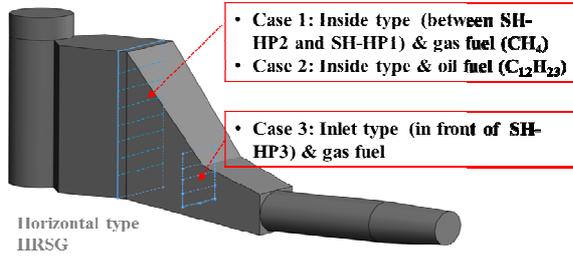


Fig. 5 Analysis cases

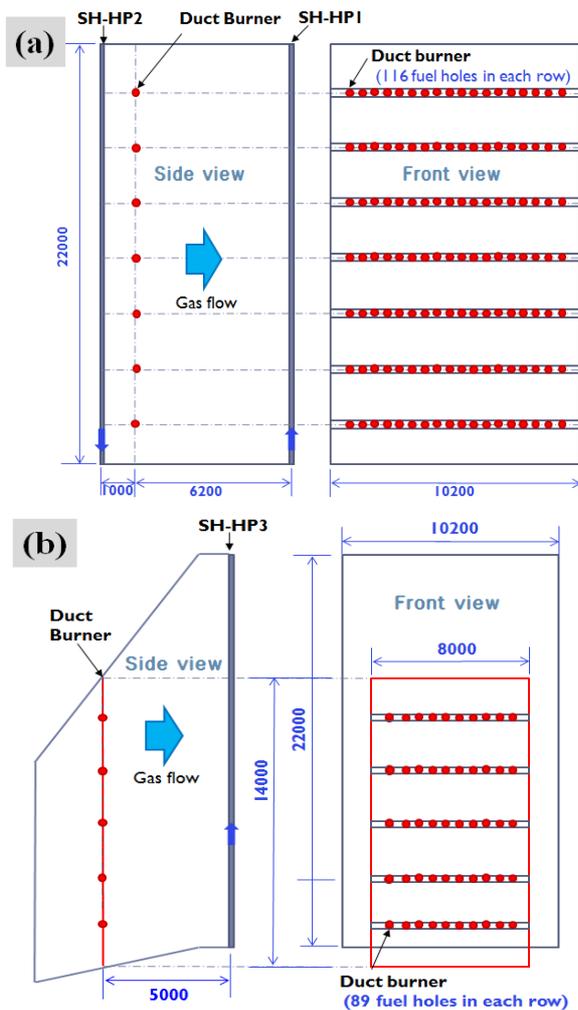


Fig. 6 Position and dimension of duct burners in the HRSG [unit: mm]: (a) Inside type; and (b) Inlet type

너를 통한 열공급량은 동일하게 하였다. 해석 Case 3의 경우는 기준 Case에서 덕트 버너 설치 위치만 바꾼 경우로, 덕트 버너 설치 위치 및 개수, 가스 및 전열관 온도 분포 등을 수정하였다. 세부적인 형상 및 덕트버너 설치 위치는 Fig. 6에 나타나 있다. 본 연구에서는 화염 온도가 평균값인 경우와 최고값인 경우로 고려되어 총 6 Case의 해석이 행하여 졌다.

Table 2 Input values

	Case 1		Case 2		Case 3	
	Mean T _f	Max T _f	Mean T _f	Max T _f	Mean T _f	Max T _f
T _{g,out} (K)	900	890	900	885	972	962
T _f (K)	1440	1880	1515	2100	1484	1880
R _f (m)	0.11	0.11	0.11	0.11	0.14	0.14
ε _f	0.5	0.5	0.7	0.7	0.5	0.5
T _w (K)	698~814	698~814	698~814	698~814	776~935	776~935
ε _w ⁽¹²⁾	0.8					
h _{conv} (W/m ² K)	41.8	41.8	41.8	41.8	40.6	40.6

2.4 입력 정보

앞서 설명한 것과 같이 평균 화염 온도 및 최고 화염 온도를 고려한 경우, 각각 3 가지 해석 Case 씩 총 6 Case의 입력 정보가 Table 2에 나와 있다. 덕트 버너 후단 가스 온도는 Fig. 2에 나와 있는 접근 방법에 따라 결정되었으며, 화염 관련 정보는 Table 1의 정의에 따라 정하여 졌다. 전열면의 온도는 대상 케이스의 설계값에 기초하여 적용하였다. 화염 복사 열전달과의 비교를 위한 관심 전열면의 대류 열전달 계산을 위한 계수값은 관군의 배열을 고려한 관계식을 통해 구하였다.⁽¹³⁾ 또한 가스 복사 열전달은 삼원자 가스만을 고려하였으며, 계산을 위한 삼원자 가스의 방사율은 복사 열전달 교재⁽⁸⁾를 참고하였다. 가스 복사 열전달은 다음과 같은 Hottel 식⁽¹³⁾을 사용하였다.

$$Q_{rad,g} = \frac{\epsilon_w + 1}{2} \sigma \epsilon_g (T_g^4 - T_w^4) \tag{5}$$

위 식은 밀폐된 공간(enclosure)에 있는 가스의 경우 적용되는 식이다. 본 연구에서는 가스와 전열면과의 가스 복사 열전달을 고려하는 것이므로, 가스 복사 열전달값은 식 (5)로 계산된 값에서 실제 전열면적을 고려하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염 복사 열유속 분포

Fig. 7는 본 연구에서 고려한 덕트버너 연료 및 설치 위치를 달리한 3 가지 해석 case에 대하여 화염 온도의 값을 달리하여 계산되어진 관심 전열면에서의 화염 복사 열유속 분포를 보여준다. Fig. 7(a), (b) 두 그림의 비교에서 알 수 있듯이 전열

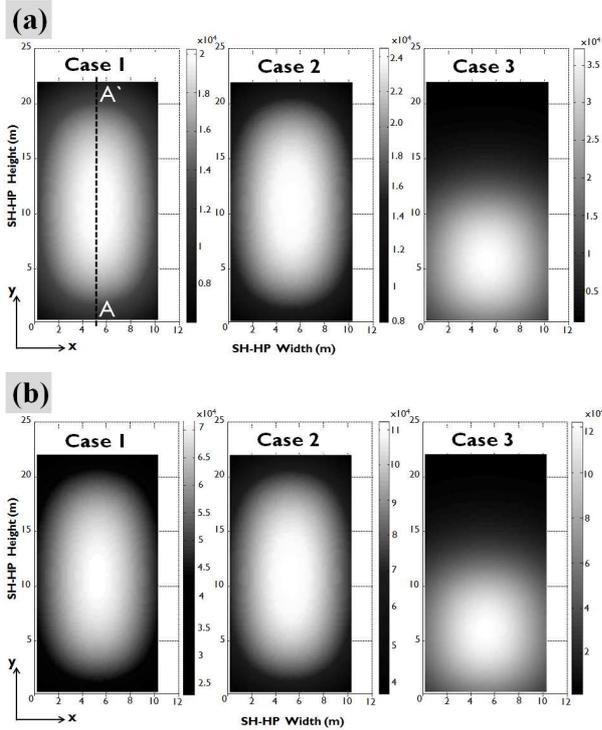


Fig. 7 Calculated flame radiative heat flux on the superheater surface [color bar unit: W/m²]: (a) Mean T_f case; and (b) Max T_f case

면에서의 화염 복사 열유속의 분포 양상은 고려된 화염 온도 값에 상관없이 거의 동일하게 나타남을 확인할 수 있다. 즉, 최대 화염 온도를 고려한 경우가 국소 열유속이 더 높게 나타날 뿐 그 분포 양상은 동일하다. 우선, 천연 가스를 연료로 사용하고 덕트 버너가 SH-HP2 전열관과 SH-HP1 전열관 사이에 설치된 Inside type 인 case 1의 경우 그 열유속이 센터 부분에 집중되어 나타남을 확인할 수 있다. 이는 덕트 버너 설치면과 전열면이 평행하므로 인해 나타나는 결과이다. 이러한 열유속 분포 양상은 연료만 바꾼 case 2에서도 동일하게 나타남을 알 수 있다. 하지만 덕트 버너 설치 위치를 바꾼 case 1의 경우에는 Fig. 7의 Case 3에서 나타나듯이 화염 복사 열유속이 전열면 하부 영역에 집중됨을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 6-(b)에서 보여 지듯이 덕트버너 설치면이 전열면과 특정 기울기를 가지고 하부에 설치됨으로 인해 view factor 값이 달라진 결과로 볼 수 있다.

3.2 전열면의 열전달률

관심 전열면(Case 1, 2: SH-HP2, Case 3: SH-HP3)에서의 열전달률을 비교하기 위해 우선 3.1 장에서 계산된 화염 복사 열유속을 전체 전열면에 대하여 적분하여 화염 복사 열전달률을 계산하였다.

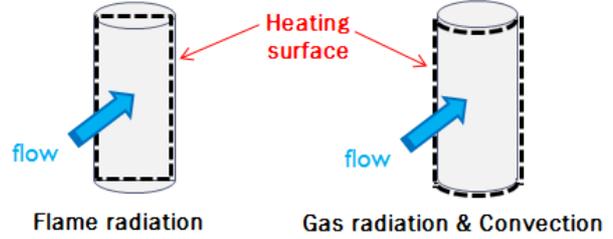


Fig. 8 Schematic diagram for the different heating surface area between flame radiation and gas radiation and convection

또한 화염 복사 열전달률과의 비교를 위해 삼원자 가스 복사 및 대류 열전달률을 계산하였다. 우선 전체 각 열전달률 계산시 삼원자 가스 복사 및 대류 열전달의 경우는 전열면의 면적을 본 연구에서 화염 복사 열전달 계산을 위해 고려한 평면 면적이 아닌 실제 흰 튜브 전열 면적값을 고려하여 계상하였다. Fig. 8에 나와 있듯이 화염 복사 열전달의 경우 계산시 평면에 투영된 전열면의 면적이 필요하므로, 본 연구에서 고려된 면적값을 그대로 사용하면 된다. 하지만 삼원자 가스 복사 및 대류 열전달의 경우는 실제 배가스가 흰 튜브의 겉표면적을 지나가면서 열전달이 일어나므로 실제 흰 튜브의 전열 면적값, 즉 실제 열설계시 고려되는 면적값을 사용하였다.

계산된 화염 복사 열전달, 삼원자 가스(H₂O, CO₂) 복사 열전달 및 대류 열전달값을 Fig. 9에 나타내었다. 우선, 화염 복사 열전달을 살펴보면 평균 화염 온도를 고려한 경우는 3.4~4.1 MW의 값을 가지고 최고 화염 온도를 가정한 경우는 10.1~15.8 MW의 값으로 열유속 분포 양상은 동일하지만 고려된 화염 온도가 높아 열전달률이 높게 나타남을 알 수 있다. 각 Case 별 비교에서는 Inside type 이고 디젤 오일을 사용하는 Case의 경우가 가장 큰 화염 복사 열전달률 값을 가짐을 볼 수 있다. 이는 이 Case에서 고려한 디젤오일의 화염 방사율 및 단열화염 온도값이 천연 가스 연료보다 상대적으로 높기 때문이다. 덕트 버너 설치 위치만 바꾼 Case 3의 경우도 기준 Case보다 열전달률이 약간 높게 나옴을 알 수 있다. 대류 열전달의 경우, Inlet type 인 Case 3의 경우가 앞단에 설치된 덕트버너에 의해 가스 온도가 상대적으로 높아져 그 값이 높게 나옴을 알 수 있다. 삼원자 가스 복사 열전달값은 모든 경우에 아주 낮게 나타남을 확인할 수 있다.

계산된 값을 바탕으로 대류 열전달 대비 화염 및 삼원자 가스 복사 열전달률의 비를 Table 3과 같이 살펴 보았다. 우선 표에서 알 수 있듯이 모

Table 3 Ratio of radiation heat transfer to convection heat transfer

		Case 1	Case 2	Case 3
$Q_{rad,f} / Q_{conv} (%)$	Mean T_f	8	10	8
	Max. T_f	25	41	23
$Q_{rad,g} / Q_{conv} (%)$	Mean T_f	1.8	1.8	1.4
	Max. T_f			

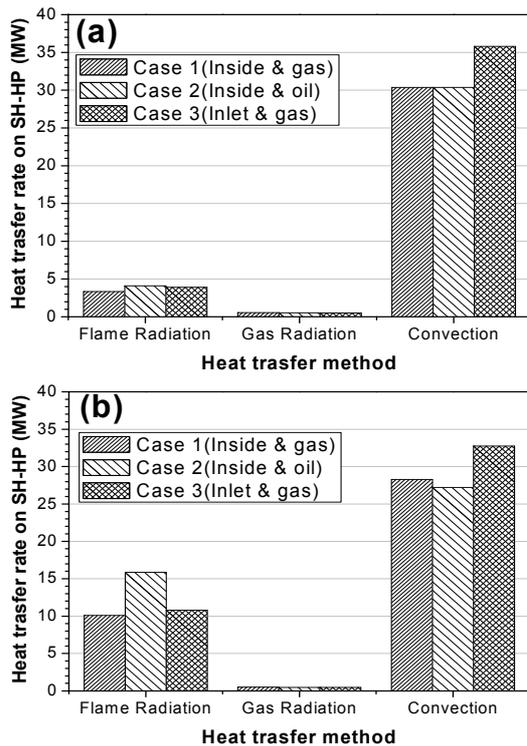


Fig. 9 Comparison of each heat transfer rate with respect to analysis cases: (a) Mean T_f case; (b) Max T_f case

든 경우, 삼원자 가스 복사 열전달에 의한 영향은 대류 열전달률에 비해 약 1.8% 이하로 매우 작음을 확인할 수 있다. 특히, 덕트버너 설치 위치를 앞단으로 옮겨 가스온도가 높아진 case 3의 경우도 대류열전달 대비 상대적인 그 영향은 작음을 확인할 수 있다. 이를 통해 실제 열설계 과정 중에 삼원자 가스 복사 열전달의 영향은 크지 않음을 파악할 수 있다. 화염 복사 열전달은 평균 화염 온도를 고려한 경우는, 대류 열전달률의 약 8~11% 정도, 최고화염 온도를 가정한 경우는 23~41% 정도의 값을 보였다. 이를 통해 덕트 버너 발광 화염에 의한 전열면으로의 복사 열전달이 전체 열전달률에 영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있다. 비록 화염 복사 열전달 계산을 위한 접근 방법에 많은 가정과 단순화가 사용되었지만,

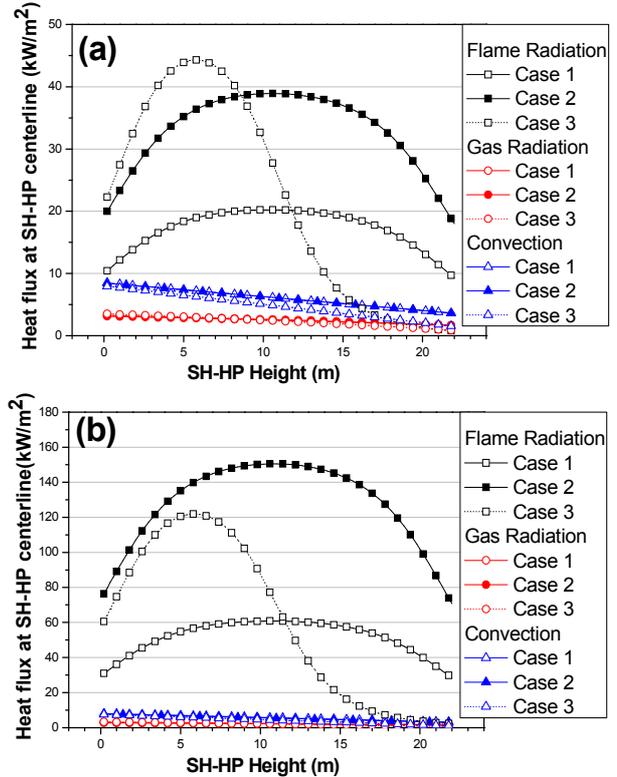


Fig. 10 Comparison of each heat flux with respect to analysis cases; (a) Mean T_f case, (b) Max T_f case

이 결과는 화염 복사 열전달이 덕트 버너를 가지는 HRSG 열설계에서 꼭 고려되어야 할 요소임을 암시한다.

3.3 전열면의 열유속

전열면에서의 국부적인 열유속 분포를 살펴보기 위하여 화염 복사 열유속이 크게 나타나는 전열면 센터라인(Fig. 7-(a)의 AA' 참조)에서의 y 축에 따른 삼원자 가스 복사 및 대류 열유속을 계산하였고, 화염 복사 열유속과 함께 Fig. 10에 나타내었다. 앞선 화염 복사 열유속 분포에서 보았듯이 Inside type 인 Case 1, 2의 경우에는 화염 복사 열유속이 전열면 중앙 부근에서 크게 나타나고, 상대적으로 열유속 강도는 오일 연료를 사용하는 Case 2가 더 높게 나타남을 알 수 있다. 반면, 덕트 버너 설치 위치가 다른 Case 3의 경우에는 전열면 하부에서 열유속이 크게 집중됨을 알 수 있다. 전열면에서의 삼원자 가스 복사 및 대류 열유속은 전열관의 온도가 관내부 물의 흐름을 고려하여 하부에서 상부로 선형적으로 증가한다고 가정하였으므로, 이에 맞게 상부로 갈수록 그 열유속 값이 선형적으로 줄어들음을 확인할 수 있다.

열전달 방식별 열유속의 상대적인 크기와 전체 총괄 열유속을 살펴보면, 모든 경우에 화염복사 열유속이 다른 열유속에 비해 아주 커서 전열면에서의 열유속을 지배함을 Fig. 10 을 통해 확인할 수 있다. 최대 화염 복사열유속이 나타나는 지점에서의 국부적인 열유속 비교를 살펴보면, 화염 복사열유속 대비 대류 열유속의 비가 16~30% (평균화염온도 case), 4~9% (최대화염온도 case)로 나타난다. 이는 앞서 보여진 전체 열전달률 비교에서 대류 열전달이 전체 열전달을 지배하고 화염 복사 열전달률이 대류 열전달 대비 8~10% (평균화염온도 case), 23~41% (최대화염온도 case)로 영향을 미친것과는 다른 양상이다. 즉, 전체 열전달률에서는 대류 열전달에 의해 가장 큰 영향을 받지만, 화염 복사가 집중되는 전열면의 중앙부분의 국부적인 열유속은 화염 복사에 의해 전체 열유속이 지배됨을 확인할 수 있다.

전체 열전달률 비교를 통해 화염 복사 열전달의 영향 정도와 그 중요성을 파악할 수 있었다면, 열유속 비교에서는 전열면에서 중앙부분에서의 국부적인 열유속이 화염 복사열유속에 의해 지배됨을 알 수 있었다. 이러한 사실은 실제 발생하는 전열관의 파손 문제와 밀접한 관련이 있으므로 열설계시 중요하게 고려되어야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 덕트 버너를 사용하는 HRSG 에서 직접적인 화염 복사 열전달에 의한 영향을 평가하기 위한 해석 기법을 마련하였다. 이를 통해 기존 열설계시 고려된 대류 열전달 대비 화염 복사 열전달에 의한 영향을 평가하였고 그 결론은 다음과 같다.

(1) 모든 해석 Case 에서 삼원자 가스 복사 열전달에 의한 영향은 미비하였다.

(2) 전열면에서 대류 열전달 대비 화염 복사 열전달률은 비교적 크게 나타났고, 이를 통해 화염 복사 열전달에 의한 전열관으로의 직접 열전달도 열설계시 추가적으로 고려해야 할 요소임을 확인할 수 있었다.

(3) 화염복사가 집중되는 전열면의 중앙부분에서 국부적인 열유속은 화염 복사 열유속에 의해 지배되었으며, 그 열유속 집중 영역은 덕트 버너 설치 위치에 따라 다르게 나타났다. 이는 전열관의 가열 및 파손 문제와 밀접한 관련이 있으므로 중요하게 고려되어야 할 요소이다.

(4) 향후, 화염 온도 및 열유속 측정 등을 통한 실험 데이터가 확보된다면 본 해석 기법의 가정으로 인한 불확실성을 보완할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 두산 중공업 기술연구원과 한국과학기술원 가치제조 기계사업단(BK21)의 지원을 받아 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Baukal, C. E., 2004, *Industrial Burners Handbook*, CRC Press.
- (2) Catalano, L. A., Dadone, A., Manodoro, D. and Saponaro, A., 2001, "Development and Optimization of High-Performing Duct-Burners for Combined-Cycle Plants," *56° Congresso Nazionale ATI*, pp. 1~11.
- (3) Catalano, L. A., Dadone, A. and Manodoro, D., 2006, "Efficient Design Optimization of Duct-Burners for Combined-Cycle and Cogenerative Plants," *Engineering Optimization*, Vol. 38, No. 7, pp. 801~820.
- (4) Koza, J. F., 2006, "Designing Duct Burners for Variable GT Loads," *Power*, Vol. 150, No. 4, pp. 60~63.
- (5) Giuliano, C., Salvatore, C., Massimo, A. and Giuseppe, P., 2008, "Reacting Flows in Post-Combustion Burners of a Heat Recovery Steam Generator," *5th European Thermal-Sciences Conference*, Netherlands.
- (6) Lezsovits, F., Konczol, S. and Sztanko, K., 2010, "CO Emission Reduction of a HRSG Duct Burner," *Thermal Science*, Vol. 14, No. 3, pp. 845~854.
- (7) Cuciumita, C., Barbu, E., Ionescu, S., Prisecaru, T., Vilag, V. and Vilcu, C., 2009, "The Numerical and Experimental Comparison of the NO Emissions for Two Types of Natural Gas Burners," *Proceedings of the International Conference on Energy and Environment Technologies and Equipment*, Vol. 31, pp. 27~30.
- (8) Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L. and Lavine, A. S., 2007, *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- (9) Sigel, R. and Howell, J., 2002, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Taylor & Francis, New York.
- (10) Korea Institute of Energy & Resources, 1984, *Boiler Thermal Design Manual*, 1984.
- (11) Turns, S. R., 2006, *An Introduction to Combustion*, McGraw-Hill International Editions.
- (12) Baso, P., Kefa, C. and Jestin, L., 1999, *Boiler and Burner*, Springer.
- (13) Holman, J. P., 1997, *Heat Transfer*, McGraw-Hill.