

## 가습연소 폐열회수 보일러의 물분사 설계모델 구축에 관한 연구

신재훈\* · 문석수†

### Establishing the Models for Optimized Design of Water Injection in Boilers with Waste-heat-recovery System

Jaehun Shin, Seoksu Moon

**Key Words:** Condensing boiler(응축형 보일러), Waste heat recovery(폐열 회수), Water injection(물 분사), Droplet evaporation(입자 증발)

#### Abstract

In order to improve the overall efficiency and meet the emission regulations of boiler systems, the heat exchanging methods between inlet air and exhaust gas have been used in boiler systems, named as the waste-heat-recovery condensing boiler. Recently, to further improve the overall efficiency and to reduce the NOx emission simultaneously, the concept of the water injection into the inlet air is introduced. This study suggests the models for the optimized design parameters of water injection for waste-heat-recovery condensing boilers and performs the analysis regarding the water injection amount and droplet sizes for the optimized water injection. At first, the required amount of the water injection was estimated based on the 1<sup>st</sup> law of thermodynamics under the assumption of complete evaporation of the injected water. The result showed that the higher the inlet air and exhaust gas temperature into the heat exchanger, the larger the amount of injected water is needed. Then two droplet evaporation models were proposed to analyze the required droplet size of water injection for full evaporation of injected water: one is the evaporation model of droplet in the inlet air and the other is that on the wall of heat exchanger. Based on the results of two models, the maximum allowable droplet sizes of water injection were estimated in various boiler operating conditions with respect to the residence time of the inlet air in the heat exchanger.

#### 기호설명

$h$  : 엔탈피, kJ/kg  
 $D$  : 확산 계수, m<sup>2</sup>/s  
 $A$  : 분무 입자 표면적, m<sup>2</sup>  
 $Y$  : 질량 분율  
 $t_{va}$  : 증발 시간

$d$  : 직경, m  
 $\beta$  : 열교환기 성능지수  
 $h_{fg}$  : 증발 잠열, kJ/kg  
 $\rho$  : 밀도, kg/m<sup>3</sup>  
 $\dot{m}$  : 질량 유량, kg/s  
 $\omega$  : 절대 습도  
 $v$  : 유속, m/

(Received: 7 Jun 2021, Received in revised form: 15 Jun 2021, Accepted: 16 Jun 2021)

\*인하대학교 대학원 기계공학과

†책임저자, 인하대학교

E-mail: ss.moon@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7378 FAX : (032)868-1716

#### 1. 서론

직면한 지구온난화 및 미세먼지 문제 해결을 위해 보일러 시스템의 효율 증대 및 배기가스 저감에 대한 사

회적 관심도가 증대되고 있다. 이에 따라 다양한 보일러 시스템이 제안되어 왔는데, 그 대표적인 예로 물과 배기가스의 열교환을 통해 배기가스 내 수증기를 응축시키고, 이를 통해 물의 증발잠열을 온수로 회수하여 최종효율을 증대시키는 콘덴싱 보일러 시스템을 들 수 있다<sup>(1)</sup>. 이러한 콘덴싱 보일러 기술은 기존 보일러의 효율을 대폭 증가시켰다. 그러나, 현재 직면한 환경문제에 보다 적극적으로 대응하기 위해서는 콘덴싱 보일러의 효율을 극대화하고, 동시에 미세먼지 원인물질도 저감시킬 수 있는 보다 혁신적인 보일러 기술의 개발이 요구되고 있다.

이를 구현하기 위해 최근 제안된 것이 가습연소 폐열회수 보일러이다<sup>(1)</sup>. 가습연소 폐열회수 보일러는 열교환기를 통해 배기가스의 열을 흡공기에 전달하고, 송온된 흡공기에 물을 분사함으로써 포화상태에 가까운 흡공기를 보일러 연소기에 공급하여 가습연소를 구현하는 방식이다. 이 방식은 종래의 콘덴싱 보일러와 유사하게 폐열회수를 통한 효율 증대를 꾀할 수 있으며, 추가로 가습연소를 통한 연소온도 저감을 통해 미세먼지 전구물질인 질소산화물(NOx)의 발생 저감도 기대할 수 있다<sup>(1)</sup>. 또한 배기가스 내의 수증기 물분율이 증가하여, 이슬점 온도 상승에 의한 콘덴싱 효과의 극대화를 꾀할 수 있다. Lee 등의 최근 연구에서는 이러한 가습연소 폐열회수 보일러의 개념을 소개하고, 열역학 이론식을 통해 물 분사량에 따른 보일러의 NOx 배출량 및 배기 가스 내 수증기의 이슬점 온도, 배기가스 온도 및 최종효율을 해석한 결과를 발표하였다<sup>(1-3)</sup>. 결과를 통해, 흡공기에 물을 분사하는 양이 많아질수록 NOx의 배출량이 감소하며 배기 가스 내의 이슬점 온도가 높아져 수증기 응축량이 많아지게 되어 전체적인 시스템의 효율이 증가함을 보였다. 이러한 가습연소 폐열회수 보일러의 도입은 기존의 여러 선행 연구결과를 바탕으로 이루어졌다. Pugh는 흡공기에 물을 분사함으로써 연소 후의 NOx와 일산화탄소(CO) 배출량이 감소하는 것을 보였다<sup>(4)</sup>. 한편 Kuck 등은 증기 펌프를 이용하여 배기 가스의 열을 흡공기에 전달함과 동시에 흡공기를 가습시키는 방법을 제안하고, 흡입공기의 습도가 높아짐에 따라 배기 가스의 이슬점 온도가 높아져 보일러의 효율이 높아짐을 보였다<sup>(5)</sup>.

최근 물분사를 이용한 가습연소 폐열회수 보일러의 개념이 도입되었지만, 물분사의 최적화에 관한 연구는 아직 미미한 실정이다. 열교환기를 장착한 폐열회수 보일러에 물분사를 적용하고 최적화하기 위해서는 열교환 조건에 있어서 분사되는 물의 유량, 분무의 입자크기, 분무형태와 흡기포트 형상 등 고려해야 할 사항이 많

며, 기존의 연구에서 이러한 부분을 체계적으로 조사한 예는 아직 없다. 만약 흡공기의 포화 수증기량 이상으로 물을 분사한다면, 증발하지 않은 물이 배기열을 흡수한 채 열교환기 밖으로 빠져나가 시스템의 전체효율을 떨어뜨리는 원인이 될 것이다. 따라서 보일러의 다양한 흡공기 및 배기가스 온도 조건에 있어, 열교환기 출구에서 흡공기의 상대습도를 100%로 만들기 위한 최적 물분사량을 평가하는 것이 중요하다. 또 한가지 중요한 특성은 분사된 물입자의 증발특성이다. 열교환기 출구에서 상대습도 100%를 구현하기 위한 물 분사량을 평가해 적용하더라도, 실제 분사된 물입자가 열교환기 내에서 완전증발을 하지 못한다면 원하는 보일러 성능을 얻어낼 수 없다. 따라서 주어진 배기가스와 흡공기의 열교환 조건에 있어 물의 완전증발을 이루기 위한 입자크기를 평가하는 것은 가습연소 폐열회수 보일러의 성능 구현에 매우 중요한 요소이다. 위의 인자들은 비단 보일러의 성능향상 뿐만 아니라, 물 분사 노즐의 유량 및 무화성설계에 있어서도 중요한 설계지표로서 활용될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 가습연소 폐열회수 보일러의 다양한 운전조건에 있어 요구되는 물 분사량 및 분사된 물의 완전증발을 위한 물분사 입자크기를 도출하여 가습연소 폐열회수 보일러의 물분사 최적화에 관련된 설계지표를 제시하고자 한다. 이러한 설계지표를 초기에 도출함에 있어, 복잡하고 3차원적인 유동 및 열전달 해석을 수행하는 것은 효율적이지 않은 바, 기존의 연구에서 검증된 간단한 열역학 및 입자증발 모델을 도입하고, 대상 폐열회수 보일러의 열교환 조건에 맞춘 모델의 입력변수 결정방법 및 각 모델 간의 연계 해석방법을 제시하였다. 보일러 운전조건에 따른 물분사량을 계산하기 위해서는 개방계(open system)에 대한 열역학1법칙을 적용하였다. 요구되는 물분사 입자크기를 산출하기 위해서는, 물입자가 열교환기 내 공기 중에 있는 경우와 벽면에 부착되어 있는 두 가지 경우를 상정하고, 각각의 경우에 대한 입자증발 모델을 적용하였다. 주어진 물분사 입자크기 및 흡배기 온도조건에 있어서의 입자증발 시간을 평가함으로써, 다양한 보일러 작동 및 열교환기 성능조건에 있어 허용가능한 물분사 입자크기를 산출하였다.

## 2. 가습연소 폐열회수 보일러의 개요

Fig. 1은 천연가스를 연료로 하는 가습연소 폐열회수

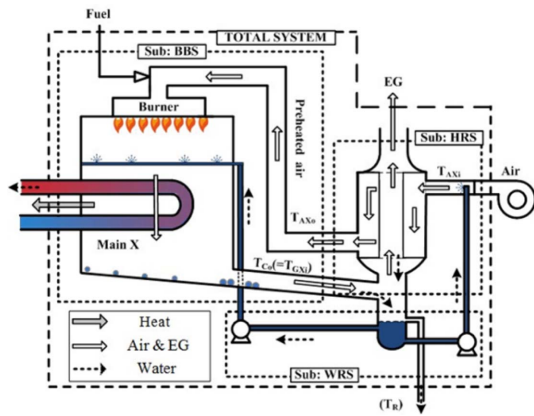


Fig. 1 Schematic diagram of the boiler system with the water spray in the heat exchanger<sup>(1)</sup>

보일러의 개략도를 나타내고 있다. 개략도에 있어 밑첨자 A는 흡공기, X는 열교환기, G는 배기 가스, i는 입구, o는 출구를 뜻한다. 또한 약어 HRS는 폐열회수 시스템(heat recovery system), BBS는 기본 보일러시스템(basic boiler system), WRS는 물순환시스템(water recirculation system), EG는 배기가스(exhaust gas)를 의미한다. 초기 온도  $T_{Ai}$ 를 가진 흡공기 내에 물분사가 이루어지며, 배기가스와 열교환을 한 후 흡공기의 온도는  $T_{Ao}$ 로 높아지고 수증기는 상대습도 100%인 포화상태가 된다. 열교환을 마친 흡공기가 연료와 혼합된 후 연소실 내에서 연소가 이루어지며, 온수와 열교환을 마친 연소가스는  $T_{GXo}$ 의 온도로 보일러를 빠져나온다. 보일러를 빠져나온 배기가스는 차가운 흡공기와 열교환을 한 후  $T_{GXo}$ 의 온도로 외부에 배출된다. 배기가스에 포함된 수증기의 일부는 응축되어 수조에 저장되며, 수조에 저장된 물의 일부는 펌프를 통해 물분사 노즐에 공급되고 나머지는 외부로 배출된다.

### 3. 물분사량 계산

본 장에서는 보일러의 다양한 운전조건에 있어서의 물분사량을 계산하기 위한 해석방법 및 결과에 대해서 소개한다. 보일러 운전조건에 따른 물분사량을 계산하기 위해서는 개방계에 대한 열역학1법칙의 식(에너지 보존식)을 이용하였다. 흡공기와 배기가스는 정상 상태로 작동하며 열역학 1법칙의 식에서 일은 없는 것으로 가정하였다. 수증기에 대한 질량보존식, 흡공기에 대한

에너지 보존식을 각각 적용하여, 다양한 운전 조건에 있어 열교환기 출구에서의 포화수증기량 및 흡공기 온도를 계산하고, 이를 통해 물분사량을 산출하였다.

#### 3.1 해석 개요

먼저 흡공기의 에너지 보존식은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>(6)</sup>.

$$\dot{m}_A h_{A1} + \dot{Q} + \dot{m}_w h_w + \dot{m}_A w_1 h_{v1} = \dot{m}_A h_{A2} + \dot{m}_A w_2 h_{v2} \quad (1)$$

여기서 밑첨자 A는 흡공기, w는 분사된 물, v는 수증기를 뜻하며, 1은 열교환기의 입구, 2는 열교환기의 출구를 뜻한다. 또한  $\dot{Q}$ 은 배기가스로부터 흡공기로 전달된 열전달율을 나타낸다. 이 식의 계산에 있어 흡공기의 질량유량, 초기 온도 및 상대습도, 분사되는 물의 온도는 입력조건으로 주어졌다(표 1 참조). 그러나 본 수식에 주어진  $\dot{Q}$ 은 열교환기의 성능에 관련된 인자로서 열교환기 형상과 유동조건을 고려한 복잡한 열전달 해석을 수행하지 않고는 그 값을 알아내기 힘들다. 따라서 열교환기 성능을 나타내기 위한 대안으로서 열교환기 성능지수( $\beta$ )를 식 (2)와 같이 정의하였다<sup>(1)</sup>.

$$\beta = \frac{T_{ATo} - T}{T_{GXo} - T_{AXi}} \quad (2)$$

기존 연구에서  $T_{GXo}$ 가 일정할 때,  $\beta$ 가 높아질수록 시스템의 전체 효율이 올라가는 것을 보인 바 있다<sup>(1)</sup>. 그러나  $\beta$ 의 정의로부터 실제 열교환 조건에 있어  $\beta$ 를 1에 가깝게 올리는 것은 물리적으로 불가능함을 알 수 있다. 배기가스의 열량이 전부 흡공기로 전달된다는 이상적인 상황을 가정한 예비 해석을 통해  $\beta$ 가 가질 수 있는 최대값은 0.85정도임을 확인하였으며, 이를 바탕으로  $\beta=0.85$ 에 해당하는  $T_{Ao}$  값을 산출하여 식 (1)의 계산에 적용하였다. 물론 실제 시스템에 있어  $\beta$ 와  $T_{Ao}$ 는 보다 이보다 낮은 값에서 결정될 것이 자명하나, 본 해석은 열교환 성능이 극대화된 조건을 상정하여 수행되었으며, 이는 물이 필요한 양보다 적게 분사되어 열교환기 출구에서 흡공기가 포화상태에 이르지 못하는 것을 미연에 방지하기 위함이다.

한편, 분사된 물의 완전증발을 가정한 수증기의 질량 보존식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_{v1} + \dot{m}_w = \dot{m}_{v2} \quad (3)$$

식 (3)은 초기 흡공기에 포함된 수증기의 유량과 분사된 물의 유량의 합은 열교환기 출구에서의 흡공기의 수

Table 1 Operating conditions of boiler system

	Temperature/ Relative Humidity	Flowrate
Air@heat exchanger inlet	-15~20°C ( $T_{AXi}$ )/ 0.5	0.009582 kg/s
Exhaust Gas@heat exchanger inlet	30~90°C ( $T_{GXi}$ )	0.009461 kg/s

증기 유량과 같다는 것을 의미한다.

제시한 식들을 이용하여 궁극적으로 구하고자 하는 것은 열교환 후 분사된 물이 완전증발함을 가정하였을 때, 흡공기 상대습도 100%를 만족시키는 물분사량  $\dot{m}_w$  이다.

3.2 계산 조건

Table 1은 열역학 해석에 적용한 흡공기와 배기가스의 초기온도 및 유량조건을 나타낸다. 이 조건들은 24 kW급 가정용 보일러의 통상적인 작동 조건을 참조하여 설정하였다<sup>(1)</sup>.

3.2 계산 결과

Fig. 2는 Table 1에 제시한 다양한 흡공기와 배기가스의 온도 조건에 대하여  $\dot{m}_w$ 을 계산한 결과를 나타낸다. 결과를 통해 24 kW급 가정용 보일러의 작동조건에 대한 필요 물분사량은 0.00016~0.005060 kg/s의 범위에 있음을 알 수 있다. 또한  $T_{AXi}$ 와  $T_{GXi}$ 가 커질수록  $\dot{m}_w$ 가 커지는 경향을 볼 수 있다. 이는  $T_{AXi}$ 와  $T_{GXi}$ 가 증가할수록 동일한  $\beta$ 조건에있어서  $T_{AXi}$ 가 증가하여 흡공기에 포함된 수증기의 포화증기압이 증가함에 기인한다. Fig. 2에 제시된 계산결과는 가습연소 폐열회수 보일러의 성능확보를 위한 물분사 노즐의 유량선정에 중요한 참고자료로서 활용될 수 있다.

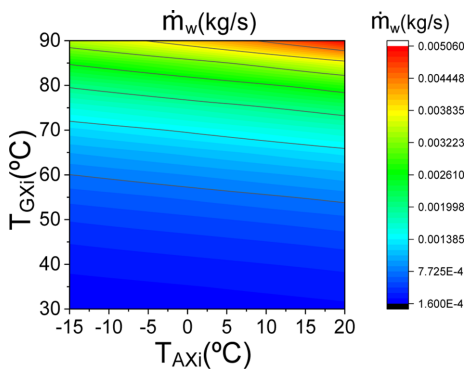


Fig. 2 Contour of  $\dot{m}_w$  as a function of  $T_{AXi}$  and  $T_{GXi}$

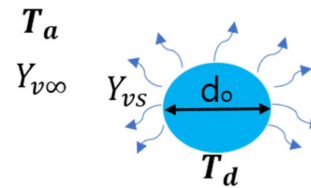


Fig. 3 Schematic diagram of the droplet evaporation model due to the difference between the mass fraction of water and ambient air

4. 물입자의 증발시간 해석

열교환기를 거친 후의 흡공기 온도를 구했다면 흡공기 온도 및 물분무 입자의 크기에 따른 입자증발 시간을 계산할 필요가 있다. 입자증발 시간의 계산은 크게 두 가지의 경우에 대하여 해석을 진행하였다.

4.1 공기 중에서의 물입자 증발

첫 번째로 분무 입자가 분사되어 열교환기 내부를 채공할 때 공기 중에서의 증발 시간을 계산하였다. 본 해석은 분무의 미립화 후 물입자의 크기가 매우 작아 물입자가 흡공기의 흐름에 편승하여 이동하는, 즉 물입자와 흡공기의 상대 속도가 0인 정지상태를 가정하여 이루어졌다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 물입자 표면의 수증기 질량분율( $Y_{vs}$ )과 주변 공기의 수증기 질량분율( $Y_{v\infty}$ )의 차이에 인한 질량확산을 고려한 모델을 해석에 적용하였다<sup>(7,8)</sup>.

물입자 직경( $d$ )에 있어 시간에 따른 물입자 질량( $m$ )의 변화율은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dm}{dt} = -\pi d^2 j \tag{4}$$

여기서  $j$ 는 단위 면적 당 수증기의 확산량이며, 식(5)와 같이 표현된다.

$$j = 2 \frac{\rho_g D}{d} \ln(1+B) \tag{5}$$

여기서  $\rho_g$ 와  $D$ 는 수증기의 밀도와 질량확산계수이며, 물입자 표면과 주변공기의 수증기량 비를 나타내는  $B$ 는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$B = \frac{Y_{vs} - Y_{v\infty}}{1 - Y_{vs}} \quad (6)$$

식 (4)에서  $m$ 을 물입자의 밀도( $\rho_l$ )와 체적( $\pi d^3/6$ )의 곱으로 나타내면 식 (4)를 식 (7)으로 바꾸어 나타낼 수 있다.

$$\frac{d(d^2)}{dt} = -\frac{\rho_g}{\rho_l} 8D \ln(1+B) \quad (7)$$

양변을 적분하여 시간에 관한 일차식을 만들면 식 (8) 같이 표현되며, 물입자의 지름( $d$ )이 0이 될 때의 시간을 증발시간( $t_{evap}$ )으로 정의하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d^2 = -\frac{\rho_g}{\rho_l} 8D \ln(1+B)t + d_o^2 \quad (8)$$

$$t_{evap} = \frac{d_o^2}{\frac{\rho_g}{\rho_l} 8D \ln(1+B)} \quad (9)$$

위 식들의 해석에 있어 물입자의 온도( $T_d$ )는 공급된 물의 온도인 20°C로 일정하다 가정하였다. 실제 상황에 있어서는, 물입자와 주변 공기와의 열교환에 의해 물입자의 온도가 공급온도보다 증가할 것이다. 그러나, 열교환기 내의 흡공기 온도와 물입자의 온도차이는 크지 않으며, 또한 물입자와 흡공기의 상대속도가 0인 상황에서의 열전달량은 크지 않은 바, 주변공기와의 열교환에 의한 물입자의 온도상승은 미미하다 가정하였다. 이는 물입자의 증발시간을 실제보다 길게 평가하고 완전증발에 요구되는 입자크기의 허용 최대값을 보다 엄격하게 제시할 것이나, 이는 보일러 성능 확보를 위한 설계인자를 도출하는데 있어 문제가 되지 않는다 판단하였다. 한편, 물입자를 둘러싼 흡공기의 온도( $T_d$ )는  $T_{AX}$ 와  $T_{AXo}$ 를 평균한 값으로 가정하였다.

Fig. 4는 흡공기 온도 및 물입자 크기에 따른 입자증발 시간의 변화를 나타내고 있다. 결과를 통해 입자의 증발시간은 주변공기의 온도가 높을수록, 그리고 입자크기가 작을수록 감소함을 알 수 있다. 또한 물입자의 크기가 충분히 작아지면 흡공기 온도가 입자증발 시간에 미치는 영향이 미미해지며, 이는 모든 보일러 작동조

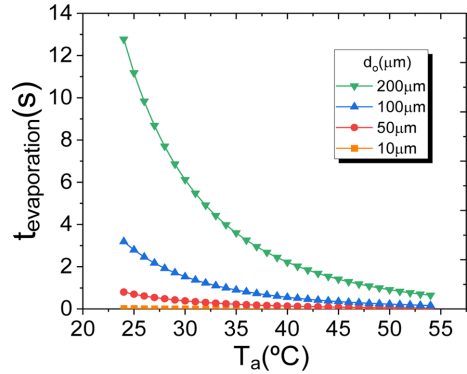


Fig. 4 Estimated evaporation time of water droplets in the air with different droplet sizes and surrounding air temperatures

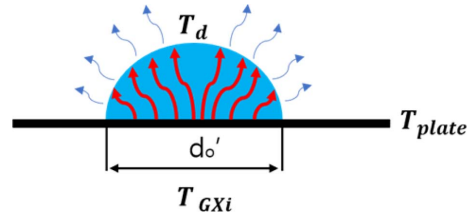


Fig. 5 Schematic diagram of the droplet evaporation model for the water droplets attached to the heat exchanger plate

건에 있어 충분히 짧은 입자증발시간을 일관성 있게 확보할 수 있음을 의미한다.

#### 4.2 벽면에 부착된 물입자의 증발

두 번째로 분사된 물입자가 열교환기 내부벽에 부착된 상태로 증발할 때의 입자증발 시간을 계산하였다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이 물입자는 반구의 형태로 벽면에 부착됨을 가정하였으며, 반구 형태를 지닌 물입자의 증발로 인해 단위 시간 당 잃어버리는 열에너지는 열교환기의 판을 통해 물입자에 전도되는 시간 당 열에너지의 양과 같다는 가정 하에 식 (10)을 적용하였다<sup>9)</sup>.

$$-\frac{d}{dt} \left\{ \rho_l(T_d) \frac{14}{23} \pi \left( \frac{d'}{2} \right) h_{fg}(T_d) \right\} = \pi \left( \frac{d'}{2} \right)^2 k \frac{T_{plate} - T_d}{\frac{d'}{2}} \quad (10)$$

여기서  $d'$ 은  $d$ 의 직경을 가진 구형의 물입자와 동일한 체적을 가지는 반구의 직경으로서, 이는 1.26d로 나타낼 수 있다.  $T_d$ 는 물입자의 온도,  $\rho_l(T_d)$ 은  $T_d$ 에서의 물의 밀도,  $T_{plate}$ 는 열교환기 벽면의 온도,  $h_{fg}(T_d)$ 는  $T_d$ 에서의 물

의 증발잠열,  $k$ 는 물의 열전도 계수를 뜻한다.

본 수식을 4.1절과 유사한 방식으로 정리하여 열교환기 벽면 위의 초기 물입자의 직경( $d_o$ )과 입자증발 시간에 대한 식 (11)을 유도해 낼 수 있다.

$$t_{evap} = \frac{\left(\frac{d_o'}{2}\right)^2 \rho_l h f_g(T_d)}{k(T_{plate} - T_d)} \quad (11)$$

위 식의 해석에 있어 물입자의 온도는 증발시간에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 실제 과정에 있어 물입자의 온도는 벽면으로부터의 열전도, 입자의 증발잠열, 흡공기와 대류열전달의 영향을 동시에 받게 된다. 일반적인 소형보일러에 있어 흡공기의 유속은 1 m/s 이하로 매우 느린 바, 대류열전달의 영향은 미미하다고 가정하였다. 한편, 벽면으로부터의 열전도 및 입자증발은 순차적으로 일어나는 것으로 가정하여, 벽면으로부터의 열전도가  $T_d$ 를 초기공급온도 20°C로부터  $T_{plate}$ 로 상승시키고, 그 후 입자의 증발에 의해 물입자의 온도가 다시 초기공급온도로 회귀하는 과정을 반복한다고 가정하였다. 즉, 식 (10)의 좌변의  $T_d$ 는  $T_{plate}$ 로, 우변의  $T_d$ 는 초기 공급온도로 설정하여 해석을 수행하였다. 또한, 일반적인 열교환기 벽면의 두께는 충분히 얇아 내부 열저항은 매우 작은 바,  $T_{plate}$ 는 배기가스 온도  $T_{GX}$ 와 동일한 것으로 가정하였다.

4.1절과 유사한 방식으로,  $T_{plate}(T_{GX})$ 의 온도범위 및 다양한 물입자의 직경(5~100  $\mu\text{m}$ )에 대하여 열교환기 벽면에 부착되어 있는 물입자의 증발시간을 해석하였다.

Fig. 6은 열교환기 벽면온도 및 물입자의 크기에 따른 입자 증발시간의 변화를 나타내고 있다. Fig. 4의 결과와 유사하게 입자의 증발시간은 열교환기 벽면의 온도

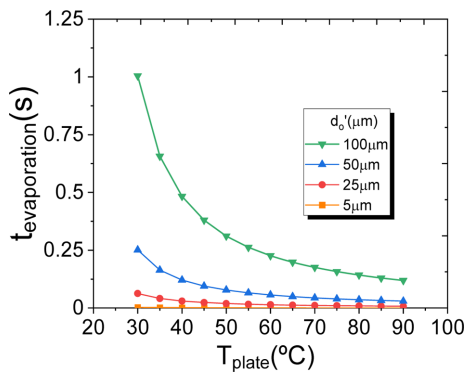


Fig. 6 Estimated evaporation time of water droplets on the heat exchanger plate with different droplet sizes and heat exchanger plate temperatures

가 높을수록, 그리고 입자크기가 작아질수록 감소하며, 물 입자의 크기가 충분히 작아지면 벽면온도가 입자증발 시간에 미치는 영향이 미미해지는 것을 알 수 있다.

### 5. 설계입자크기 해석

두 증발 모델을 이용한 해석결과를 바탕으로, 열교환기 내의 물입자 체류시간( $t_{travel}$ )에 따른 물입자의 완전증발을 위해 허용가능한 최대 물입자크기( $d_{o,max}$ )를 도출하였다. 여기서 물입자의 체류 시간은 열교환기의 전체 길이에서 흡공기의 유속을 나눈 값으로 물입자가 열교환기 내에서 체류하는 시간을 의미하며, 분사된 물입자가 열교환기 내에서 완전증발하기 위해서는  $t_{travel}$ 이  $t_{evap}$ 보다 길거나 같아야 한다. 보일러의 특정 운전조건에 있어서의  $d_{o,max}$ 는 4.1절과 4.2의 해석결과에 있어  $t_{travel}=t_{evap}$ 이 되는 입자크기를 추적하여 얻어낼 수 있다.

Fig. 7은 24 kW급 콘텐싱 보일러의 전부하 조건에 있어, 물입자의 체류시간에 따른  $d_{o,max}$ 의 변화를 물입자가 공기 중에 체류하는 경우와 벽면에 부착된 경우에 대해서 정리한 것이다. 전부하 조건에 있어서의 기존 실험결과를 토대로  $T_{AX}$ 는 0°C,  $T_{GX}$ 는 60°C를 상정하였으며,  $\beta$ 가 0.85인 조건에 대하여  $T_{AXo}$ 는 51°C이며, 이에 상응하는  $T_a$ 는 25.5°C이다.  $T_{plate}$ 는  $T_{GX}$ 와 동일한 60°C를 적용하였다.

본 해석결과를 통해 알 수 있듯이, 공기 중 보다 열교환기 벽면에서 입자가 증발할 때 같은 입자체류 시간에서의  $d_{o,max}$ 가 더 크다는 것을 알 수 있다. 이는 물입자

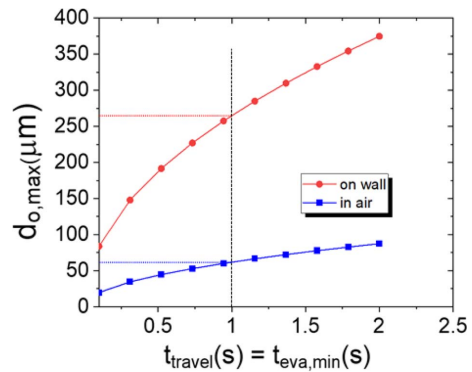


Fig. 7 Allowable maximum droplet sizes ( $d_{o,max}$ ) of two evaporation models under the full load condition of the 24 kW waste-heat-recovery boiler with different droplet travel times in the heat exchanger

가 벽면에 부착된 경우가 배기열을 직접적으로 입자의 증발에 활용할 수 있기 때문이라고 분석된다. 여기서 한 가지 유의할 점은, 물분사 노즐의 무화성능은 공기 중 증발 모델을 통해 얻어진  $d_{o,max}$  기준으로 설계되어야 한다는 것이며, 이는 이러한 접근법이 실제 시스템의 물분사 증발성능 확보에 유리하게 작용하기 때문이다. 이러한 기준을 적용하였을 때, 24 kW급 보일러의 물입자 체류시간이 1 s인 경우에 있어  $d_{o,max}$ 는 60 mm이며, 열교환기 내 물입자의 체류시간이 길수록  $d_{o,max}$ 가 증가함을 알 수 있다. 보일러의 흡기 및 배기온도 조건, 열교환기의 열교환 성능이 바뀌어도 4장~5장에서 제시된 해석방법을 적용하여 해당 조건에 있어서의  $d_{o,max}$ 를 동일한 방식으로 도출해 낼 수 있다.

## 6. 정리 및 향후계획

본 연구에서는 가습연소 폐열회수 보일러의 다양한 운전조건 및 열교환기의 성능조건에 있어서의 물분사 설계요건들을 체계적으로 해석할 수 있는 방법론 및 해석결과를 제시하였다. 해석방법론의 구축에 있어 기존 연구에서 잘 정의된 간략 모델들을 적용하였으나, 대상 폐열회수 보일러의 열교환 조건에 맞춘 모델의 입력변수 결정 방법 및 각 모델 간의 연계 해석방법을 독자적으로 제시한 것이 본 연구의 의의라 할 수 있다.

다만, 이론식들에 도입된 다양한 가정 및 식의 단순화에 의해서 발생하는 오차요인에 대해서는 향후 실험결과와의 비교해석을 통해 상세히 파악하고 보완해 나가야 할 필요가 있다. 본 연구에서 도출한 설계지표를 토대로 유량조건과 입자크기 조건을 만족하는 물분사 인젝터를 선정하여 가습연소 보일러시스템에 적용할 예정이다. 제시한 해석결과를 바탕으로 물분사가 이루어졌을 때, 열교환기 출구에서의 수증기가 실제로 포화상태에 이르는가 여부를 확인하여 해석모델 및 결과의 타당성을 검증할 계획이다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 가습연소 폐열회수 보일러의 다양한 운전조건 및 열교환 성능조건에 있어 요구되는 물분사량 및 분사된 물입자의 완전증발을 위한 임계 입자크기를 도출하고, 가습연소 폐열회수 보일러의 물분사 최적

화에 관련된 설계지표를 제시하고자 하였다. 이를 위해 열역학1법칙 및 입자증발 이론을 기반으로 하는 폐열회수 가습연소 보일러의 물분사 설계모델을 제시하였다. 본 연구를 통해 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 열교환기에 유입되는 흡 공기 및 배기가스의 온도가 증가할수록 분사되는 물의 완전증발을 가정한 물분사량이 증가한다.

(2) 분사된 물입자의 크기가 작을수록, 또한 흡 공기 및 배기가스의 온도가 증가할수록, 분사된 물입자의 증발시간이 감소하였다. 또한, 입자가 공기 중에 체류하는 경우보다 열교환기 벽면에 부착되어 있는 경우에 있어 입자의 증발시간이 대폭 단축됨을 확인하였다.

(3) 공기 중 및 벽면에서의 물입자 증발시간 해석결과를 이용하여, 물분사 인젝터에 허용가능한 최대 물입자 크기를 산출하였다. 24 kW급보일러의 전부하 및 열교환기 내 물입자의 체류시간이 1 s인 조건에 있어 허용가능한 최대 물입자크기는 60 mm 정도였으며, 물입자의 체류시간이 길수록 허용 최대입자크기는 증가하는 것을 확인하였다.

## 후 기

본 논문은 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가기관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(과제번호: 202010957).

## 참고문헌

- (1) C. E. Lee, B. J. Yu, D. H. Kim and S. H. Jang, "Analysis of the thermodynamic performance of a waste heat recovery boiler with additional water spray onto combustion air stream", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 135, 2018, pp. 197~205.
- (2) C. E. Lee and D. H. Kim, "Heat recovery boilers with water spray. Part I: Thermodynamic analysis validation and boiler practicality", *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 18, 2020, pp. 100491.
- (3) D. H. Kim, T. J. Park, C. E. Lee, "Heat recovery boilers with water spray: Part II: Parametric analysis and optimization of design specifications", *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 19, 2020, pp. 100643.
- (4) D. G. Pugh, P. J. Bowen, R. Marsh, A.P. Crayford, J.

- Runyon, S. Morris, A. Valera-Medina and A. Giles  
“Dissociative influence of H<sub>2</sub>O vapour/spray on lean  
blow off and NO<sub>x</sub> reduction of heavily carbonaceous  
syngas swirling flames”, *Combustion and Flame*, Vol.  
177, 2017, pp. 37~48.
- (5) J. Kuck, “Efficiency of vapour-pump-equipped con-  
densing boilers”, *Applied Thermal Engineering*, Vol.  
16, 1996, pp. 233~244.
- (6) M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner and M. B.  
Bailey, “Principles of Engineering Thermodynamics”,  
Global Edition, Wiley, 2018.
- (7) S. M. Frolov, F. S. Frolov and B. Basara, “Simple model  
of transient drop vaporization”, *Journal of Russian  
Laser Research Volume*, Vol. 27, 2006, pp. 562~574.
- (8) A. H. Lefevre and V. G. McDonell, “Atomization and  
Sprays” Taylor & Francis Group, LLC., 2017.
- (9) O. E. Ruiz and W. Z. Black, “Evaporation of water  
droplets placed on a heated horizontal surface”, *Journal  
of Heat Transfer*, Vol. 124, 2002, pp. 854~863.