한국분무공학회지 제28권 제1호(2023)
http://dx.doi.org/10.15435/JILASSKR.2023.28.1.43

물분사 폐열회수 보일러의 효용성에 대한 실험적 검증

신재훈* · 박태준* · 조현석** · 유준상** · 문석수† · 이창언†

Experimental Validation on Performance of Waste-heat-recovery Boiler with Water Injection

Jaehun Shin, Taejoon Park, Hyunseok Cho, Junsang Yoo, Seoksu Moon, and Changeon Lee

Key Words: Waste-heat-recovery boiler(폐열회수 보일러), Water injection(물분사), Thermal efficiency(열효율), NOx (질소산화물), CO(일산화탄소)

Abstract

The waste-heat-recovery boiler with water spray (HR-B/WS) applies the heat exchange between the inlet air and exhaust gas with the water spray into the inlet air. The evaporation of water in the inlet air promotes heat recovery from the exhaust gas so that thermal efficiency can be improved by the enhanced condensing effect. The NOx emission can also be reduced by lowering the flame temperature due to the dilution effect of the water. In this study, the validity of this concept is examined by the practical boiler test performed with a 24 kW condensing boiler under the full load condition according to the water injection amount. The theoretical amount of water injection is calculated under the assumption of full evaporation of the sprayed water, which is calculated as 50 g/min. Since the injected water cannot evaporate fully in the actual system, the maximum water spray amount is set as 100 g/min. The results showed that the water injection can increase the thermal efficiency up to 95.59% and reduce NOx and CO emissions simultaneously to 8.9 ppm and 35 ppm at 0% of O_2. Although the heat energy loss increased due to the unevaporated water, the increase in water injection amount caused higher thermal efficiency due to the increased amount of the evaporated water.

기호설명

h : 엔탈피, kJ/kg
β : 열교환기 성능지수
T : 온도, K
$\dot{m}$: 질량 유량, kg/s
ω : 절대 습도
$\dot{Q}$: 열 전달량, kJ/s

(Received: 16 Feb 2023, Received in revised form: 3 Mar 2023, Accepted: 6 Mar 2023)
*인하대학교 대학원 기계공학과
**인하대학교 수소기반 기계시스템 연구단
†책임저자, 인하대학교
E-mail: ss.moon@inha.ac.kr, chelee@inha.ac.kr
TEL : (032)860-7378 FAX : (032)868-1716

1. 서 론

지구온난화 문제와 대기환경 오염 문제 해결을 위해 보일러의 효율 상승 및 유해 배출물 저감을 위한 연구들이 진행되고 있다. 이에 따라 다양한 보일러 시스템들이 개발되었는데, 그 대표적인 예로 콘덴싱 보일러가 있다. 콘덴싱 보일러는 현열 열교환기와 더불어 잠열 열교환기가 있어 배기가스 내 수증기의 응축열을 추가로 회수함으로써 열효율을 높이는 방식을 이용한다. 그러나 가스 연료를 이용하는 콘덴싱 보일러의 특성 상, 열효율을 높이려면 공기비를 1에 가깝게 유지해야 하는 반면,

미세먼지 원인 물질인 질소산화물(Nitrogen oxides, NOx) 배출량을 저감하기 위해서는 1보다 높은 공기비 조건에서 운전해야 한다[1]. 이러한 이유로 보일러의 열효율과 NOx 배출량 간에는 trade-off 관계가 있다. 산업용 보일러의 경우 배기가스 후처리 장치인 선택적 환원촉매(Selective catalytic reaction (SCR)) 등을 이용하여 NOx 배출량을 저감하나, 가정용 보일러의 경우 그 크기와 비용을 고려하면 배기가스 후처리 장치를 설치하는 것이 곤란하다. 따라서 현재 직면한 환경 문제에 더욱 적극적으로 대응하기 위해서는 콘덴싱 보일러의 효율을 극대화함과 동시에 NOx를 저감할 수 있는 혁신적인 보일러 기술의 개발이 요구되고 있다.

이를 구현하기 위해 가습연소 보일러가 제안되었다[2]. 이전 연구에서는 공기 유로와 배기가스 유로에 물을 분사하여 공기를 가습시킴과 동시에 배기가스의 수증기 분율을 증가시킴으로써 콘덴싱 효과를 높이는 방법을 제안하였다[3,4]. 그러나 해당 방식의 경우는 배기가스로부터의 폐열을 적극적으로 회수하지는 못하기 때문에 효율 상승의 기대효과가 크지 않다. 따라서 가습연소 보일러에 폐열회수 기능을 추가하는 가습연소 폐열회수(HR-B/WS)의 개념이 최근 도입되었다. 이는 공기 유로에 물을 분사하여 공기를 포화상태에 가깝게 만들고, 공기와 배기가스 간의 열교환을 통해 폐열을 회수하는 방식이다. 이때 폐열회수 열교환기에 분사된 물의 증발 잠열을 이용하여 배기가스의 온도를 획기적으로 떨어뜨리고 배기가스 내 수증기의 이슬점 온도 상승에 의한 콘덴싱 효과를 극대화함으로써 보다 높은 열효율을 기대할 수 있다. 또한 공기 내 증가된 수증기 함량이 연소온도를 낮추어 연소 시 생성되는 NOx 저감 효과도 기대할 수 있다. 이러한 개념에 입각하여 이전 연구에서 열역학 이론에 기반하여 물분사량에 따른 가습연소 폐열회수 보일러의 이슬점 온도, 배기가스 온도, 열효율의 변화를 해석하였으며, 이를 통해 공기에 물을 분사하는 양이 많아질수록 열효율이 증가하고 NOx 배출량이 줄어드는 것을 확인한 바 있다[5-7].

위에 제시한 선행연구들을 통해 물분사를 이용한 가습연소 폐열회수 보일러의 개념이 도입되었으나, 이를 실제 보일러 시스템에 구현하여 효과를 검증하는 연구는 아직 초기 단계이다. 따라서 본 연구에서는 24 kW급 상용 보일러에 폐열회수 열교환기 및 물분사를 적용하여 가습연소 폐열회수 보일러의 물분사 효과를 실험적으로 확인하고자 한다. 이를 위해 물분사 유량을 제어할 수 있는 인젝터를 사용하여 물분사 유량에 따른 열효율과 NOx 및 CO 배출량을 측정하였으며, 결과를 토대로 가습연소 폐열회수 보일러에 있어서의 물분사 효과 및 관련 메커니즘을 고찰하였다.

2. 가습연소 폐열회수 보일러의 개요

Figure 1은 가습연소 폐열회수 보일러의 개략도를 나타낸다. 가습연소 폐열회수 보일러는 기본 보일러 BBS (Basic boiler system)와 폐열회수 열교환기 HRS (Heat recovery system), 그리고 응축수 수조 WRS (Water recirculation system)로 구성되어 있다. 먼저 BBS는 공기와 연료가 혼합되어 연소되는 보일러 시스템으로 버너와 메인 열교환기로 구성된다. HRS는 공기와 배기가스 간 열교환이 이루어지는 비접촉식 대향류 열교환기로 물분사 노즐이 공기 유로에 설치되어 있다. WRS는 응축수 순환 저장조로 버너와 폐열회수 열교환기에서 응축된 응축수를 한데 모아 순환 펌프를 이용하여 공기에 다시 분사시키는 역할을 한다. 개략도 내의 T는 온도를 의미하며 여러 밑첨자들과 함께 표기된다. 밑 첨자 A는 공기, X는 열교환기, G는 배기 가스, i는 입구, o는 출구를 의미한다.

작동 유체의 흐름에 대해 설명하면, 공기는 배기가스와 열교환 후 온도가 초기온도 T_{AXi}에서 T_{AXo}로 상승한다. 이때 물은 흡입 공기 내에 분사되며, 이를 통해 공기의 상대습도를 증가시킨다. 승온 및 가습된 공기는 연료와 혼합된 후 연소실에서 연소되며, 연소 이후 생성된 배기가스는 폐열회수 열교환기에서 공기와 열교환을 한 후 최종적으로 외부에 배출된다. 이때 배기가스의 온도는

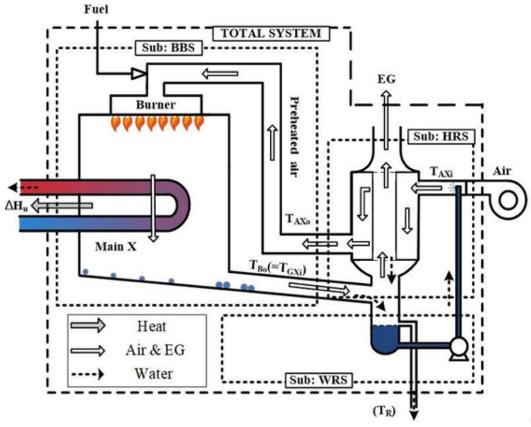

Fig. 1 Schematic diagram of waste-heat-recovery boiler with water spray[2]

T_{GXi}에서 T_{GXo}로 감소하게 되며, 배기가스에 포함된 수증기의 일부는 연소실과 폐열회수 열교환기에서 응축되어 수조에 저장된다. 수조에 저장된 응축수 중 일부는 펌프를 통해 재순환되어 다시 공기에 분사되고, 나머지는 외부로 배출된다. 그러나 응축수는 배기가스로 인해 산성을 띄고 이물질 등이 포함되어 있어 물분사 장치에 부식 등의 문제를 일으킬 우려가 있다. 따라서 본 연구에서는 응축수를 순환시키지 않고 외부로 배출하였으며, 흡입공기에 분사되는 물은 외부로부터 공급하였다.

3. 이론 물분사량 계산

가습연소 폐열회수 보일러의 실험에 앞서 적정물분사량을 계산할 필요가 있다. 물분사량이 적으면 흡입공기가 포화되지 않아 가습연소의 효과가 저감되는 반면, 물분사량이 과도하면 분사된 물의 일부가 증발되지 않고 응축수조로 배출되어 물소비량의 증가 및 보일러 효율의 저하를 초래한다. 따라서, 적정 물분사량을 사전에 파악하는 것은 가습연소 폐열회수 보일러의 구현에 있어 매우 중요하다. 본 장에서는 가습연소 폐열회수 보일러의 물분사량 계산법에 대해 설명하고자 한다.

먼저 보일러는 정상 상태로 작동하여 공기와 배기가스 유량이 시간에 따라 일정하고 외부로의 일은 없는 것으로 가정하였다. 또한 공기와 수증기에 대한 개방시스템에서의 질량 및 에너지 보존방정식을 적용하였으며, 분사된 물은 열교환기에서 완전히 증발한다고 가정하였다.

공기와 수증기의 에너지 보존방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$\dot{m}_A h_{AXi} + \dot{m}_{inj} h_{inj} + \dot{m}_A w_{AXi} h_{VAXi} + \dot{Q} = \dot{m}_A h_{AXo} + \dot{m}_A w_{AXo} h_{VAXo} \quad (1)$$

여기서 $\dot{m}$ 은 질량유량, h는 비엔탈피(specific enthalpy), w는 공기의 절대습도를 의미한다. 밑 첨자 A는 공기, X는 열교환기, inj는 분사수, V는 수증기를 뜻하며, i는 열교환기의 입구, o는 열교환기의 출구를 의미한다. $\dot{Q}$ 은 배기가스에서 공기로 전달되는 시간 당 열 에너지를 나타낸다.

또한 분사수의 완전 증발을 가정한 공기 내 수증기와 분사수의 질량 보존방정식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_{VAXi} + \dot{m}_{inj} = \dot{m}_{VAXo} \quad (2)$$

제시된 에너지 및 질량보존식의 입력변수는 흡입공기의 유량($\dot{m}_A$), 온도(T_{AXi}), 상대습도(γ_{AXi})이며, 포함하는 미지수는 3개 ($\dot{m}_{inj}$, T_{AXo}, $\dot{Q}$)이다. 따라서 주어진 두 개의 방정식을 통해 적정 물분사량($\dot{m}_{inj}$)을 구하기 위해서는 추가적인 관계식이 필요하며, 이를 위해 식 (3)에 정의된 열교환기 성능지수(β)를 추가적인 입력변수로 도입하였다[2].

$$\beta = \frac{T_{AXo} - T_{AXi}}{T_{GXi} - T_{AXi}} \quad (3)$$

β는 폐열회수 열교환기의 열교환 성능에 관련된 입력변수로서, 해석 시 그 값을 임의로 지정하거나 실험적으로 측정된 T_{AXo}를 통해 역으로 얻어낼 수 있다. 본 연구에서는 일반적으로 구현가능한 열교환기의 성능 범주에 있고, 또한 가습연소 폐열회수 보일러의 기존 해석연구에서 충분한 효율상승 효과를 나타냈던 $\beta = 0.85$를 가정하여 적정 물분사량을 산출하였다.

식 (1)-(3)을 이용하여 24 kW급 가정용 콘덴싱 보일러의 전부하 조건에 있어, 열교환기 출구 공기의 상대습도 100%를 만족하는 이론 물분사량 ($\dot{m}_{inj}$)은 대략 50 g/min으로 계산되었다[9].

마지막으로 물 분사량에 따른 보일러의 열효율을 해석할 필요가 있는데 최종적은 보일러의 열효율 공식은 식 (4)와 같이 서술될 수 있다.

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_{in}} = \frac{Q_{HHV} + Q_{AXi} + Q_{inj} - Q_{UW} - Q_{GXo}}{Q_{HHV}} \quad (4)$$

여기서 Q_{HHV}는 연료의 고위발열량, Q_{AXi}은 공기의 열에너지, Q_{inj}는 분사되는 물의 열에너지, Q_{UW}는 미증발수의 열에너지, Q_{GXo}는 최종적으로 배출되는 배기가스의 열에너지를 의미한다. 분사되는 물의 양이 많아질수록 Q_{inj}가 커지고 물의 증발 잠열로 인해 배기가스의 온도가 감소하여 Q_{GXo}가 낮아져 전체적인 열효율의 증가로 이어진다. 다만 미증발수의 양이 많아지면 Q_{UW}의 크기가 커져 열효율 저하로 이어지기에 분사되는 물의 증발량을 최대한 늘리는 것이 중요하다고 할 수 있다.

4. 실험방법 및 조건

Figure 2는 실험에 적용된 가습연소 폐열회수 보일러의 개략도를 나타내며, 이는 24 kW급 콘덴싱 보일러에 폐열회수 열교환기를 설치하여 구현한 것이다. 보일러 상부에는 흡입공기와 배기가 대향류로 접촉하도록 되어

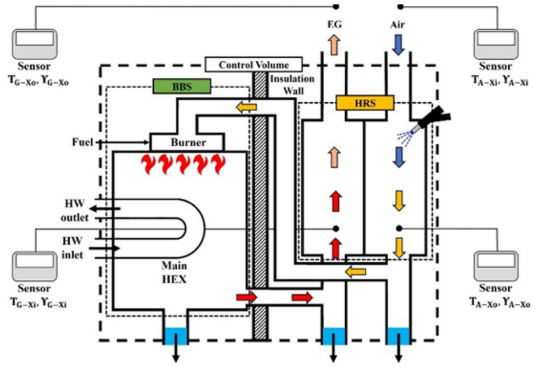

Fig. 2 Schematic diagram of applied waste-heat-recovery boiler with heat exchanger

Table 1. Experimental conditions

1. Boiler	
Boiler type	Domestic condensing boiler
Operating load condition	24 kW
Fuel type	Natural Gas (NG)
Excess Air ratio	1.3
Ambient temperature / relative humidity	20°C / 60%
Hot water inlet-outlet temperature	70°C-50°C
2. Water injection	
Injector type	Gasoline PFI injector
Injection frequency	200 Hz
Injection pressure	3 bar
Injection temperature	22°C
Injection rate	0, 50, 75, 100 g/min

있으며, 공기유로에 물분사용 인젝터가 설치되어 있다. 공기는 상부에서 흡입되어 물분사에 의해 가습되고 배기가스와의 열교환을 통해 승온된다. 연료의 연소 후 생성되는 배기가스는 공기와 열교환 후 온도가 낮아진 상태로 최종적으로 배출되며, 배기가스 내에 포함되어 있는 수증기가 응축하며 방출하는 응축열은 공기로 회수된다.

Table 1은 실험에 사용된 보일러와 물분사 장치 및 실험 조건을 나타낸다. 보일러는 폐열회수 열교환기를 장착한 24 kW급 가정용 콘덴싱 보일러를 사용하였으며, 사용연료는 도시가스, 부하 조건은 24 kW 전부하 조건, 공기비(당량비의 역수)는 1.3의 조건에서 실험을 진행하였다. 이는 NOx와 효율 간 trade-off 관계를 고려하여 NOx 배출량의 환경 기준을 만족하기 위해 실제 보일러에 적용되는 공기비 조건이다. 또한 공기와 배기가스의 입출구에서 온도와 습도를 측정하였으며 주변 공기온도와 상대습도는 20°C, 60%로 항온, 항습 조건에서 실험을 실시하였다. 공급수-환수 온도 조건은 70°C-50°C 조건으로 설정하였으며, 물분사 장치로는 미립화 성능이 우수하고 고주파 펄스분사를 통한 유량조절이 용이한 포트분사식(port fuel injection (PFI)) 가솔린 엔진용 인젝터를 이용하였다.

3장에서 설명한 바와 같이 분사되는 물의 완전 증발을 가정한 이론 물분사 유량은 50 g/min으로 계산되었으나, 실제 시스템에선 분사되는 물의 완전 증발이 어려운 바, 물을 50 g/min 이상으로 분사해줄 필요가 있다. 따라서 물분사 유량은 50, 75, 100 g/min으로 설정하였으며, 실험 시 증발하지 않은 물의 질량을 측정하여 증발량 및 증발율을 평가하였다. 또한 물분사 효과의 검토를 위해 미분사 조건인 0 g/min을 추가하였고, 초당 분사 횟수는 고주파 분사인 200 Hz로 고정하였다. 분사되는 물의 온도는 상온조건인 22°C로 일정하며, 분사압은 직수압과 동일한 3 bar로 고정하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 열효율 측정 결과

Figure 3은 물분사 유량 조건 별로 측정된 열효율과 NOx, CO 배출량을 나타낸다. 가정용 보일러의 배기 배출물의 측정 기준은 연료가 완전히 연소함을 가정하여 배기가스 내 산소 농도가 0%일 때를 기준으로 삼기 때문에 NOx와 CO의 배출량을 배기가스 내 산소 농도가 0%일 때의 값으로 환산한 결과로 나타내었다. Fig. 3에 나타난 바와 같이, 미분사 조건으로부터 물분사 유량이 증가함에 따라, 열효율이 91.15%부터 최대 95.59%까지 점진적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 물의 분사량이 증가함에 따라 물의 증발 잠열로 인해 폐열회수량이 증가하게 되고 배기가스의 온도가 낮아져 이것이 효율 상승으로 이어진 것으로 판단된다.

5.2 배기 배출물 특성 분석 결과

Figure 3에 나타난 바와 같이, 미분사 조건의 NOx 배출량은 28.7 ppm이나 물분사 유량이 최대인 100 g/min 조건에서는 NOx배출량이 8.9 ppm으로 측정되어, 미분사 조건 대비 69% 감소하였다. 이는 흡입공기 내의 물

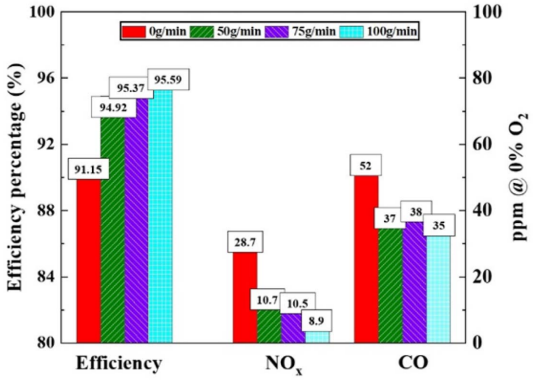

Fig. 3 Effect of water injection amount on boiler efficiency, and NOx and CO emissions

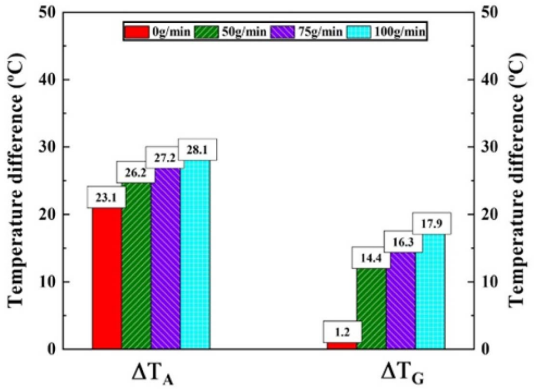

Fig. 5 Effect of water injection amount on temperature difference of air and exhaust gas across the heat exchanger

함유량이 증가하여 연소실 내 화염온도가 낮아진 것에 기인한다고 판단된다.

CO 배출량 또한 미분사 조건의 52 ppm 대비 최소 35 ppm까지 감소하여, 미분사 조건 대비 최대 33%의 감소율을 보였다. 이는 CO분자가 H_2O 분자와 반응해 CO_2 분자를 형성하는 수성 가스 전이 반응 (water-gas shift reaction)에 인한 것으로 판단되나[10-11], 이에 관해서는 향후 추가적인 연구가 필요하다.

5.3 물 분사 효과 분석 결과

Figure 4는 실험 시 측정된 물 증발량($\dot{m}_{eva}$)과 열교환기 출구에서 측정된 공기의 상대습도(γ_{AXo})를 나타낸다. 물분사 유량이 50 g/min에서 100 g/min으로 증가함에 따라 물 증발량은 30 g/min에서 36 g/min로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 물 증발량의 증가로 인해 열

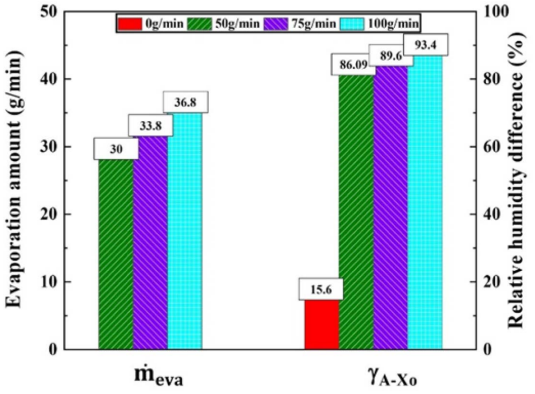

Fig. 4 Effect of water injection amount on water evaporation amount and relative humidity of air at the heat exchanger outlet

교환기 출구의 공기 상대 습도도 15.6%에서 93.4%까지 포화 상태에 가까이 증가한 것으로 확인되었다.

Figure 5는 열교환기 입출구에서 측정된 공기 및 배기가스의 온도차 (ΔT_A, ΔT_G)를 나타낸다. Fig. 5를 통해 물분사 유량의 증가에 따라 공기의 온도 차가 23.1°C에서 28.1°C까지 증가하고, 배기가스 온도 차가 1.2°C에서 17.9°C까지 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는 분사된 물의 증발 잠열에 의한 폐열회수량 증가와 배기가스 내 수증기 분율 증가에 따른 수증기 응축량의 증가에 의한 것으로 판단된다. 이는 결과적으로 보일러 외부로 버려지는 총 열량을 감소시켜 효율을 상승시킨 것으로 보인다.

다만 현재의 물 증발량이 약 30~40 g/min로서 분사된 물의 유량대비 상대적으로 적은 바, 증발하지 않은 물이 폐열을 흡수하여 외부로 방출되면서 일부 열효율의 저하가 있을 것으로 판단된다. 그러나 증발하지 않은 물에 의한 효율 저하량에 비해 물이 증발함으로써 회수되는 폐열량이 커짐에 따른 효율 증가량이 더 크기 때문에 분사량에 따라 열효율이 증가한 것으로 보이며 향후 물 증발성능을 개선한다면 효율의 상승 효과는 더욱 커질 것으로 예상된다.

5.4 정리 및 고찰

이상의 결과를 통해, 가습연소 폐열회수 보일러의 열효율과 배기 배출물 측면에서의 물분사 효과를 실험적으로 확인하였다. 문헌의 해석결과에서 예측한 바와 같이, 폐열회수 보일러에 있어서의 물분사는 보일러 효율 상승 및 배기배출물 저감을 동시에 달성할 수 있는 가능성을 나타내었다.

향후의 연구에서는 본 연구에서 얻은 실험결과에 관련한 열역학 기반의 이론해석을 수행하여, 물분사에 의한 화염온도, 연소특성, 폐열회수량, 미증발수에 의한 열손실량 등, 열효율 및 배기성능을 결정짓는 내부 물리인자들의 거동을 상세하게 살펴보고자 한다. 이를 통해 보일러 성능의 개선인자를 명확히 하고, 이를 보다 개선시킬 수 있는 방안을 모색할 예정이다. 추가로 물분사의 미립화 및 증발성능을 개선시켜 물 소비량을 최소화하고 보일러의 효율을 보다 개선시키는 연구도 병행하여 진행할 예정이다.

6. 결 론

본 연구에서는 24 kW급 가정용 콘덴싱 보일러를 대상으로, 가습연소를 적용하는 폐열회수 보일러 있어서의 물분사 효과를 살펴보았다. 보일러 작동 조건에서의 이론 물분사 유량을 계산하고, 이를 기준점으로 물분사 유량에 따른 가습연소 폐열회수 보일러의 효율 및 배기 특성 변화를 살펴보았다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 물분사 유량이 증가함에 따라 물 증발량이 증가하고, 열교환기 출구의 배기온도가 감소하는 경향을 확인하였다. 이는 물의 증발잠열과 배기가스 내의 수증기 응축에 의한 폐열회수 효과로서 보일러의 열효율 증가로 이어졌다.

(2) 물 증발량이 증가함에 따라 열교환기 출구 공기의 상대습도가 증가함을 확인하였다. 공기 내 증가한 수증기 분율로 인해 연소온도가 감소하고, 이것이 NOx 배출량의 감소로 이어진 것으로 판단된다. 또한 물 증발량이 증가함에 따라 CO 배출량 역시 감소하였는데, 이는 CO와 H_2O의 수성 가스 전이 반응 (water-gas shift)에 의한 것으로 판단된다.

(3) 물분사 유량을 50 g/min에서 100 g/min로 100%증가시킨 것에 비해, 물 증발량의 증가폭은 약 20% 정도로 크지 않았다. 향후 물분사의 미립화 및 증발성능이 개선된다면, 보다 큰 효율상승 효과를 얻을 수 있을 것이라 기대된다.

후 기

본 논문은 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(과제번호: 20010957).

참고문헌

(1) B. Yu, S.M. Kum, C.E. Lee and S. Lee, “Effects of exhaust gas recirculation on the thermal efficiency and combustion characteristics for premixed combustion system”, Energy, Vol. 49, 2013, pp. 375~383.

(2) 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.

(3) J. Kuck, “Efficiency of vapour-pump-equipped condensing boilers,” Applied Thermal Engineering, Vol. 16, 1996, pp. 233~244.

(4) M. Wei, L. Fu, S. Zhang and X. Zhao, “Experimental investigation on vapor-pump equipped gas boiler for flue gas heat recovery”, Applied Thermal Engineering, Vol. 147, 2019, pp. 371~379.

(5) 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.

(6) D. H. Kim, T. J. Park, C. E. Lee, “Heat recoveryboilers with water spray: Part II: Parametric analysis and optimization of design specifications”, Thermal Science and Engineering Progress, Vol. 19, 2020, pp. 100643.

(7) C. E. Lee, D. H. Kim and S. M. Kum, “Thermodynamic analysis method to determine design specifications for heat recovery boilers with water spray”, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 44, No. 9, pp. 535~545.

(8) M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner and M. B. Bailey, “Principles of engineering thermodynamics”, Global Edition, Wiley, 2018.

(9) J. Shin and S. Moon. “Establishing the models for optimized design of water injection in boilers with waste-heat-recovery system”, Journal of ILASS-Korea Vol. 26, No. 2, 2021, pp. 96~103.

(10) K. Murat, A. Cakmak and H. Ozcan, “Emissions analysis of an SI engine with humidified air induction”, Energy Procedia, Vol. 147, 2018, pp. 235~241.

(11) S. Panagiotis and K. Gunugunuri, “Water gas shift reaction: research developments and applications”, Elsevier, 2015.