

응축수 순환이 폐열회수 응축형 보일러 성능에 미치는 영향

금국빈* · 김수익* · 유병훈*** · 이창언**†

Effect of Waste Heat Recovery Condensing Boiler with Condensed Water Recirculation Function

Kuk Bin Keum*, Sooik Kim*, Chang Eon Lee**†

ABSTRACT

Recently, energy excessive consumption and environmental pollution are the social issued. The most efficient way to solve both energy excessive consumption and environmental pollution is existing combustion system improved. This study was part of the assume and commercial used existing waste heat recovery condensing boiler to low emission performance for exhaust gas recirculation(EGR) and thermal efficiency rise by applying the condensed water recirculation(CWR) conducted. The researchers applied the EGR and CWR develop a new concept for the condensed water recirculation waste heat recovery condensing boiler. Waste heat recovery condensing boiler applied to the condensed water recirculation thermal efficiency of the same conditions was increased by about 4.8~5.5% and pollution emission also decreased.

Key Words : Condensed water recirculation, Waste heat recovery condensing boiler

최근 산업발전으로 인해 환경오염 및 에너지에 대한 과소비 문제가 사회적으로 문제가 되고 있다. 우리나라 수도권의 년도 별 공해물질 배출량을 비교해보면 산업연소에서 CO배출량의 경우 2005년과 2011년을 비교해 보았을 때 약 9%의 증가수치를 보이고 있으며, NO_x와 CO₂ 등의 공해물질 또한 증감을 반복하고 있다[1]. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 우리나라는 저탄소 녹색성장 기본법을 시행하여 공해물질 배출 감소에 대한 규제를 강화하기 위해 노력하고 있다[2].

NO_x와 CO의 주된 발생원인인 연소시스템과 더불어 나날이 부각 되고 있는 에너지 과소비 문제 또한 해결방안이 필요한 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 가장 효율적인 방법은 기존 연소시스템의 개선, 즉 가정, 상업에서 사용되는 대표적인 연소시스템인 보일러의 저공해 성능과 열효율을 개선하는 것이다. 따라서 본 연구진은 일부 가정, 상업부분에서 사용되고있

는 보일러 중 폐열회수 응축형 보일러(Waste Heat Recovery Condensing Boiler, WHR CB)의 저공해 성능을 확보하고자 배기가스 재순환(Exhaust Gas Recirculation, EGR)기술과 열효율 상승을 위한 응축수 순환 기술(Condensed Water Recirculation, CWR-WHR CB)을 적용하여 새로운 개념의 응축수 순환 폐열회수 응축형 보일러(Condensed Water Recirculation Waste Heat Recovery Condensing Boiler, CWR-WHR CB)에 대한 연구를 수행하였다. 응축수 순환 기술과 배기가스 재순환 기술의 적용이 폐열회수 응축형 보일러에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해 열역학적 해석을 수행 하였다. 또한, 수정된 1차원 Premix code[3]인 CHEMKIN[4]을 이용한 수치해석을 통해 결과 값을 도출 하였다. 수치해석 시 사용된 전달 물성치는 Transport package[5]를 이용 하였으며, 연료가 메탄(CH₄)임을 고려하여 반응 기구는 GRI-v 3.0[6]을 사용 하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 해석하고자 하는 WHR CB와 CWR-WHR CB를 종합적으로 도시한 것이다. 그림에서 F는 연료, M은 혼합기, EG는 배기가스, A는 공기, RG는 배기가스 재순환 가스, CW는 응축수를 나타낸다. 또한 각각의 약자 뒤에 나오는 숫자 및 영어 소문자는 보일러 내의

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과

*** LG전자 L&E 연구센터 ES(연) 공조컴프팀

† 연락처, chelee@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7323 FAX : (032)-876-7838

위치를 나타낸다. WHR CB의 경우 본체부와 폐열회수 장치로 구성되어 있다. 본체는 연소기, 혼합기, 난방수용 열교환기로 이루어져 있으며, 폐열회수 장치의 경우 본체에서 배출되는 배기가스를 이용하여 흡입공기를 예열하는 폐열회수 열교환기를 내장하고 있다. CWR - WHR CB는 WHR CB에서 발생하는 배기가스를 재순환하고 폐열회수 장치에 응축수 순환장치를 추가하여 구성하였다. 응축수 순환이란 배기가스의 폐열을 회수하는 과정 중에 응축되는 응축수 중 일부를 흡입공기 측으로 순환시키는 것을 말한다. 순환된 응축수는 폐열에 의해 예열되어 기화함으로써 추가적으로 폐열을 회수한다. 배기가스 재순환 방식은 비교적 큰 비열을 갖는 화학종으로 구성된 배기가스를 연료 및 공기의 혼합기에 공급함으로써 화염의 온도를 낮추고 이를 이용하여 공해물질을 감소시키는 방안이다.

Table 1은 응축수 순환 기능과 배기가스 재순환 기능이 WHR CB에 미치는 영향을 알아보기 위한 변수를 도식한 것이다. 공기비(α)의 경우 배기가스 재순환 기능을 적용한 CWR WHR CB의 예상 운전 공기비인 1.1부터 WHR CB의 실제 운전 공기비인 1.4까지로 채택 하였으며, 폐열회수 열교환기 전단온도($TEG2$)는 실제 폐열회수 응축형 보일러의 열교환기 전단온도인 60°C 부터 상업용 보일러의 열교환기 전단온도인 200°C 까지로 정하였다. 폐열회수 열교환기 성능계수(β)는 0~100% 까지 적용이 가능하나 선행 열역학적 해석[7]을 통해 보일러 효율의 증가폭이 가장 크게 나타난 50~80% 구간으로 결정하였다. 예열공기의 상대습도(γ_{ap})의 경우 응축수 순환 기술의 적용 정도와 밀접한 관련이 있기 때문에 세부적인 해석을 위해 0~100% 전 구간으로 정하였으며,

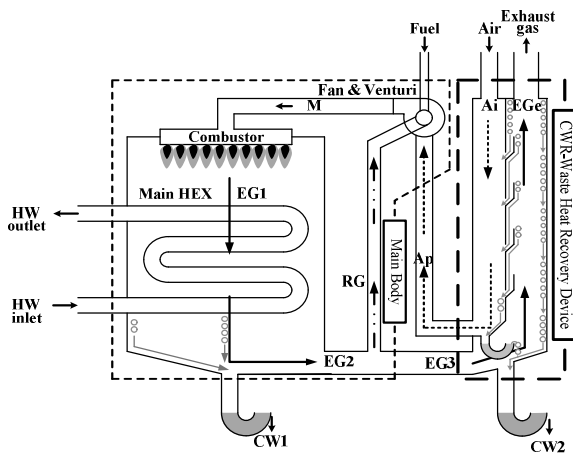


Fig. 1 Schematic diagram of boiler system

Table 1 Variable condition of boiler system

Condition	α	1.1~1.4
	$TEG2$	$60\sim 200^{\circ}\text{C}$
	β	50~80%
	γ_{ap}	0~100%
	Ω_{EGR}	0~20%

배기가스 재순환율(Ω_{EGR})은 0 ~ 20% 까지 5% 간격으로 증가시키며 열역학 적 해석 및 수치해석을 진행하였다.

Fig. 2는 공기비 및 폐열회수 열교환기의 전단 온도 변화에 따른 CWR - WHR CB(상대습도: 100%)와 WHR CB(상대습도:70%)의 열효율을 비교한 그래프이다. 그래프를 살펴보면 CWR-WHR CB와 WHR CB 모두 공기비가 1에 근접하거나 폐열회수 열교환기의 전단온도가 감소할수록 열효율이 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 또한, 기체상태의 수분(H_2O)이 액체 상태로 상변화 하면서 효율을 급격히 증가시키는 이슬점(Dew point)을 확인할 수 있는데 이는 폐열회수 열교환기의 전단온도가 이슬점보다 낮아지면서 배기가스 중의 수분이 응축하여 응축열을 방출하기 때문이다. 동일한 공기비에서 CWR-WHR CB와 WHR CB를 비교하였을 때 응축수 순환 기능이 적용된 CWR-WHR CB의 이슬점이 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 응축수 순환 기능에 의해 예열공기의 상대습도가 증가하기 때문이다. 이슬점의 상승은 폐열회수 열교환기의 전단 온도가 조금만 감소하여도 쉽게 응축수가 발생한다는 것을 의미한다.

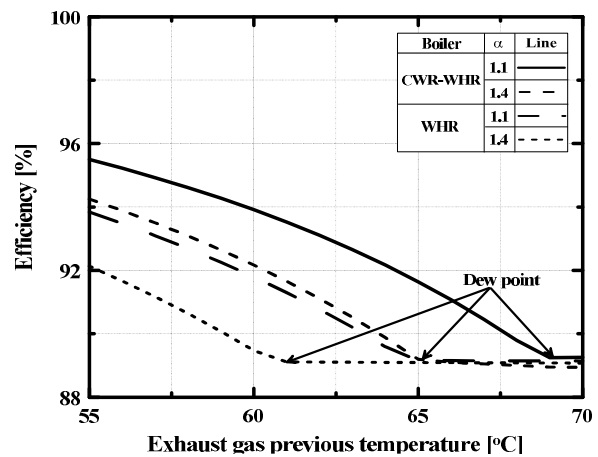


Fig. 2 Comparison of Thermal efficiency CWR-WHR CB and WHR CB according to Waste heat recovery previous temperature.

Fig. 3은 CHEMKIN을 이용한 수치해석 결과로 공기비 1.1에서 배기가스 재순환율 변화에 따른 NO의 몰분율(mole fraction) 변화를 나타내고 있다. 산화제로 사용되는 예열공기의 상대습도는 응축수 순환 기능에 의해 100%로 가정하여 초기 조건으로 사용하였다. 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 NO의 발생량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 배기가스 재순환율이 적용됨에 따라 비교적 큰 비열을 갖는 배기가스가 혼합기와 함께 화염에 유입되고, 이로 인해 화염의 최고 온도가 감소하기 때문에 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 배기가스 재순환율이 0%에서 20%로 증가함에 따라 NO의 몰분율은 각각 31.9ppm에서 3.85ppm으로 감소하였다.

Fig. 4는 수치해석을 통해 상대습도에 따른 NO의 몰분율 변화를 도시한 것이다. 공기비와 EGR율은 각각 1.1과 0%를 적용하였다. 수치해석 결과에 따르면 상대습도가 증가함에 따라 NO의 몰

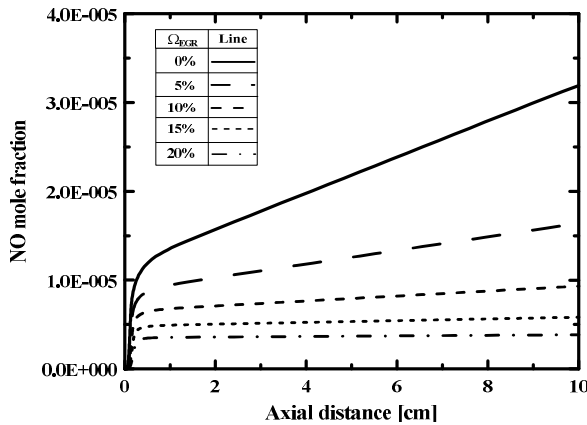


Fig. 3 Comparison fo NO mole fraction with various EGR ratios

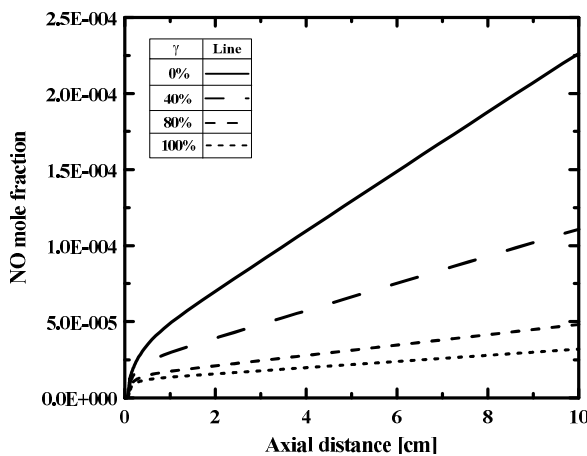


Fig. 4 Comparison of NO mole fraction with various Preheated air relative humidity

분율이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 예열 공기 상대습도가 증가하면 연소기로 투입되는 공기의 성분 중 비열이 높은 H_2O 의 몰수가 상승한다. 따라서 화염온도를 올리는데 있어 더 많은 열량을 필요로 하기 때문에 화염온도가 감소하게 되므로 NO 또한 감소하게 된다.

연구를 통해 응축수 순환기술과 배기가스 재순환 기술이 적용됨에 따라 폐열회수 응축형 보일러의 다음과 같은 사항이 개선되는 것을 확인하였다.

(1) 응축수 순환 기술의 적용으로 인해 예열공기의 상대습도가 증가하며, 이슬점의 상승으로 이어진다. 이슬점의 상승은 폐열회수 열교환기의 전단 온도가 조금만 감소하여도 쉽게 응축수가 발생한다는 것을 의미하므로 효율 상승에 영향을 미친다.

(2) 공해물질 배출 특성에 있어 응축수 순환 기술과 배기가스 재순환 기술은 화염온도 감소에 영향을 주며 그로인해 NO의 생성 또한 감소한다.

후 기

이 논문은 인하대학교 자동차동력계부품 지역 혁신센터의 지원에 의해 수행된 연구임을 알려드립니다.

참고 문헌

[1] Korea Ministry of Environment, Source of pollution, 2011

[2] Chung, Sch-Yong "Review of Basic Act on Low Carbon Green Growth from An International Law Perspective", Seoul International Law Journal. Vol.16, No.2, 2009

[3] Kee, R. J., Dixon-Lewis, G., Warnatz, G. J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., "A Fortran computer code package for the evaluation of gas-phase multi-component transport," 1994a

[4] Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., "Chemkin-II: A Fortran chemical kinetics package for the analysis of gas phase chemical kinetics," 1989

[5] Kee, R. J., Dixon-Lewis, G., Warnatz, G. J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., "A Fortran computer code package of the evaluation of gas-phase multi-component transport," 1994b

[6] Smith, G. P., Gordon, D. M., Frenklach M., Moriarty, N. W., Eiteneer, B, Goldenberg, M., Bowman, C. T., Hanson, R. K., Song, S., Gardiner, W. C., Jr., Lissianski, V. V. and Qin, Z.,

[7] B.H. Yu, Y.G. Kim, T.J. Park, C.E. Lee " Comparison of Performance of New-type and Old-type Boilers by Thermodynamic Analysis", Korea Soc. Mech. Eng, Symposium the autumn, 2014