

배기가스 재순환 방식이 예혼합 연소시스템에 미치는 영향

유병훈* · 이승로** · 금성민*** · 이창언**†

The Effects of Exhaust Gas Recirculation on Premixed Combustion System

Byeonghun Yu*, Seungro Lee**, Sung-Min Kum***, Chang-Eon Lee**†

ABSTRACT

The premixed combustion system applying exhaust gas recirculation was investigated to achieve the low pollutant emission and the high thermal efficiency. In this study, it was studied the effects of EGR on the thermal efficiency, NO_x and CO emissions with various EGR ratios and equivalence ratios. As results, when equivalence ratio was increased, thermal efficiency increased and NO_x and CO concentration increased. When EGR was applied, NO_x and CO concentration decreased and thermal efficiency increased. Especially, in the case of 15% of EGR ratio at 0.85 of equivalence ratio, NO_x and CO concentration will be a smaller than these of a current operating condition of the boiler and thermal efficiency was about 1.7% higher.

Key Words : Exhaust gas recirculation, Equivalence ratio, NO_x and CO emissions, Thermal efficiency, Premixed combustion

최근까지도 꾸준히 이루어지고 있는 산업발전은 인간의 생활을 윤택하게 하는 등 많은 장점을 가져왔지만, 반면에 많은 문제점 또한 발생시켜 왔다. 특히 에너지 다소비 설비의 증가로 인한 에너지 과소비 문제와 배기가스 배출량 증가로 인한 환경오염 문제는 사회적으로 커다란 문제로 인식되고 있는 상황이다. 이러한 문제의 해결을 위해 신재생에너지 분야에 대한 연구가 활발하게 진행되고는 있지만, 우리나라 전체 에너지 사용량 중에서 신재생에너지가 차지하는 비율은 약 2.8%로, 실질적인 성과를 얻기 위해서는 좀 더 많은 연구가 필요한 상황이다. 따라서 가장 현실적인 해결방안은 기존의 화석연료를 사용하는 연소시스템의 개선을 통해 고효율 및 저공해 성능을 확보하는 것이라 할 수 있다.

기존의 일반적인 연소시스템은 고온에서 주로 발생하는 NO_x와 같은 공해물질 발생을 억제하고, 연료 성분의 충분한 연소를 위하여 당량비를 1.00보다 낮게 운전하고 있다. 하지만 연소시스템의 당량비가 1.00보다 낮게 운전된다면, 화염의 온도가 낮아져 연소시스템이 가질 수 있는 최대 효율은 한계를 갖게 된다. 반대로 연소시스템의

당량비를 1.00 근처로 운전한다면, 화염의 온도가 상승하여 시스템의 효율은 증가할 수 있지만, 공해물질의 발생은 증가하게 되는 단점을 갖게 된다. 이렇듯 연소시스템에서 효율과 공해물질 발생 간에는 당량비를 기준으로 Trade-off 관계를 보이게 된다. 따라서 연소시스템의 효율을 높인 상태에서 배출되는 공해물질은 줄일 수 있는 배기가스 재순환 방식(Exhaust gas recirculation)과 같은 저공해 연소기법의 도입이 필요하다. 배기가스 재순환 방식은 연소시스템에서 필연적으로 발생하는 배기가스를 그대로 이용한다는 장점을 가지고 있어 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 배기가스 재순환 방식에 대한 연구는 적용이 쉬운 수송기관용 엔진분야[1]에 국한되어 있고, 일부 연구자들에 의해 대용량 산업용 연소기에서 주로 사용되는 비예혼합 연소방식에 대한 연구[2]가 진행되고 있을 뿐, 가정용으로 많이 사용되는 소용량의 예혼합 연소시스템에 적용된 연구는 미비한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 예혼합 연소시스템의 고효율 및 저공해 성능 실현을 목적으로, 가정용 예혼합 방식의 응축형 보일러에 배기가스 재순환 방식을 적용하고, 당량비 및 배기가스 재순환율 변화에 따른 열효율과 공해물질 발생특성을 검토하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 1차원 수치해석 연구를 수행하여 공해물질의 발생특성을 예측해 보았으며, 실제 가정용 응축형 보일러를

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과

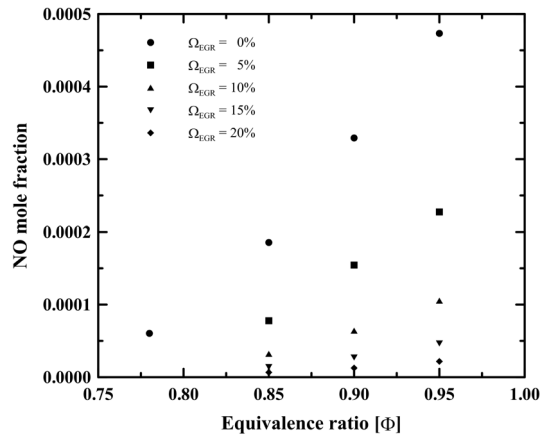
*** 한라대학교 기계자동차공학부

† 연락처자, chelee@inha.ac.kr

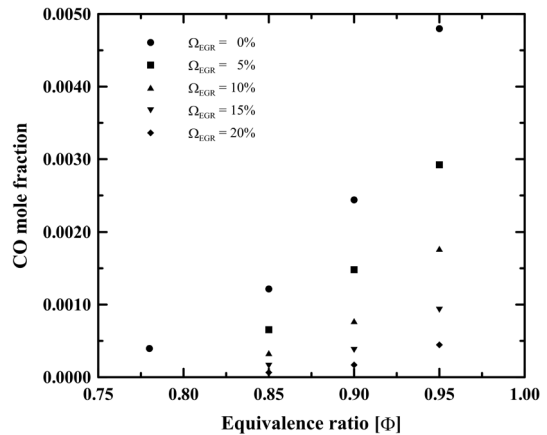
대상으로 실험적 연구를 진행하여 시스템의 열효율과 공해물질 배출농도를 확인하였다.

수치해석 연구는 1차원 PREMIX code[3]를 이용하였으며, 열역학적 물성치와 전달 물성치는 각각 Chemkin-II package와 Transport package를 사용하였다. 계산에 적용된 상세 반응기구는 보일러의 연료인 천연가스의 조성을 고려하여 C3 Full mechanism을 사용하였다. 실험에서 사용된 보일러는 실제 가정용으로 사용되고 있는 30,000 kcal/h 용량의 응축형 보일러를 사용하였다. 보일러에 공급되는 공기는 보일러에 설치된 송풍기를 통해 공급하였으며, 연료와 재순환용 배기가스의 공급은 송풍기의 전단에 설치된 벤츄리(Venturi)를 일부 개조하여 이용하였다. 보일러의 효율은 보일러에 공급되는 급수의 무게와 입·출구 온도를 측정하여 산출하였으며, 공해물질인 NO_x 와 CO의 측정은 연소가스 분석기(Testo340, TESTO)를 사용하여 보일러의 출구에서 측정하였다. 수치해석과 실험에서 당량비(Φ)는 보일러의 현재 운전조건인 0.78을 기준으로 0.95까지 변경시켜 보았으며, 각 당량비마다 배기가스 재순환율(Ω_{EGR})은 수치해석에서는 최대 20%, 실험에서는 15%까지 변화시켰다.

Fig. 1은 각 배기가스 재순환율별로 당량비 변화에 따라 수치 해석적으로 예측된 NO와 CO의 몰분율 변화를 도시한 그래프이다. 그래프에서 x-축은 당량비 변화를 나타내며, y-축은 NO와 CO의 몰분율 변화를 나타낸다. 우선 NO의 몰분율 변화를 살펴보면, 배기가스 재순환율이 일정한 경우 당량비가 0.95까지 증가함에 따라 NO의 몰분율은 화염의 온도 증가로 인해 증가하는 경향을 보였다. 또한 당량비가 일정한 경우 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 화염의 온도 감소로 인하여 NO의 몰분율도 감소하는 경향을 보였다. 특히 각 당량비에서 배기가스 재순환율을 20%까지 적용한다면, 약 95%의 NO 저감율을 보일 수 있음을 확인하였다. 다음으로 CO의 몰분율 변화를 살펴보면, 배기가스 재순환율이 일정한 경우, 당량비가 0.78에서 0.95까지 증가함에 따라 CO의 몰분율도 증가하는 경향을 보였다. 이는 당량비가 1.00 근처로 증가함에 따라 화염의 온도가 상승하고, 상대적으로 높은 연료의 농도로 인해 나타나는 결과이다. 또한 당량비가 일정한 경우 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 화염의 온도 감소로 인하여 CO의 몰분율도 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 1의 결과로 보았을 때, 예혼합 시스템의 열효율을 높이기 위해 당량비를 1.00 근처로 운전하더라도 배기가스 재순환 방식을 적용한다면, 현 운전조건보다 낮은 NO와 CO의 농도를 얻을 수 있어, 시스템의 고효율 및 저공해 성능 확보가 가능함을 예측할 수 있다.



(a) NO mole fraction



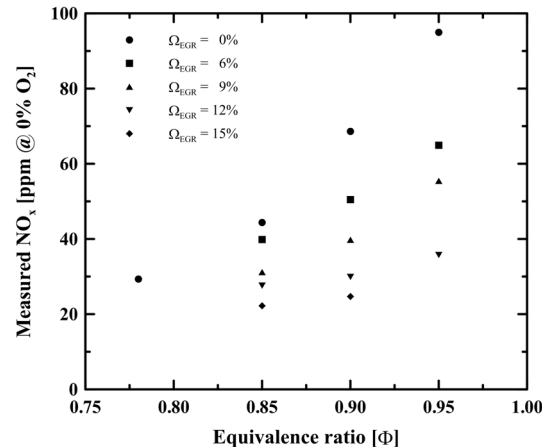
(b) CO mole fraction

Fig. 1 NO and CO mole fraction with various equivalence and EGR ratios

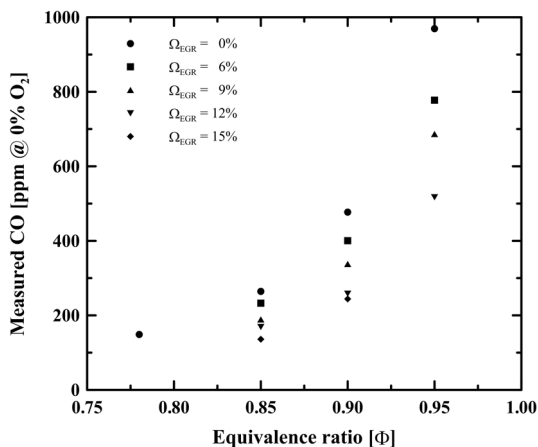
Fig. 2는 각 배기가스 재순환율별로 당량비 변화에 따라 실험적으로 측정된 NO_x 와 CO의 배출농도 변화를 도시한 그래프이다. 우선 NO_x 의 배출농도 경향을 살펴보면, 배기가스 재순환율이 일정한 경우 당량비가 현 보일러의 운전조건인 0.78에서 0.95까지 증가할수록 NO_x 의 배출농도는 화염의 온도 상승으로 인하여 점차 증가하는 경향을 보였다. 또한 당량비가 일정한 경우 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 화염의 온도가 감소하여 NO_x 의 배출농도도 감소하는 경향을 보였다. 다음으로 CO의 배출농도 변화를 살펴보면, 배기가스 재순환율이 일정한 경우 당량비가 0.95까지 증가함에 따라 CO의 배출농도는 증가하는 경향을 보였으며, 당량비가 일정한 경우 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 CO의 배출농도는 감소하는 경향을 보였다. 이렇듯 실험에서 측정된 NO_x 와 CO의 배출농도는 정성적으로 수치해

석에서 예측된 NO와 CO의 물분을 경향과 일치하는 경향을 보였으며, 정량적으로는 다소 차이를 보였다. 추후 배기가스 재순환 방식이 적용된 가정용 응축형 보일러의 최적화 작업이 진행된다면, 수치해석 결과와 비슷한 정도의 NO_x와 CO 저감율을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 3은 각 배기가스 재순환율별로 당량비 변화에 따른 보일러의 열효율을 측정된 결과이다. 그래프에서 보이듯이 배기가스 재순환율이 일정한 경우 당량비가 보일러의 현 운전조건인 0.78에서 0.95까지 증가함에 따라 화염의 온도 상승으로 인하여 시스템의 열효율도 증가하는 경향을 보였다. 또한 당량비가 일정한 경우 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 시스템의 열효율은 다소 증가하는 경향을 보였다. 이는 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 화염의 온도는 낮아지지만,



(a) NO_x concentration



(b) CO concentration

Fig. 2 NO_x and CO concentration with various equivalence and EGR ratios

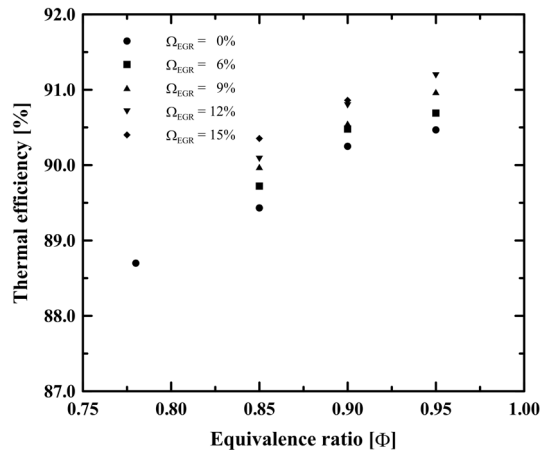


Fig. 3 Thermal efficiency with various equivalence and EGR ratios

혼합기의 유량 증가로 인해 화염의 길이가 증가하여 화염과 열교환기 사이의 거리가 감소하고, 열교환기 주위의 배기가스 유량 증가로 인해 열교환기와 배기가스의 열교환율이 증가하여 나타나는 결과로 사료된다. Fig. 2와 3의 결과를 종합적으로 검토한다면, 보일러의 당량비를 0.85로 운전하고 배기가스 재순환율을 15%로 적용한다면, 시스템의 열효율과 NO_x 및 CO의 배출농도는 각각 90.35%, 22ppm(@ 0% O₂), 136ppm(@ 0% O₂)을 얻을 수 있어 보일러와 같은 예혼합 연소 시스템의 고효율 및 저공해 성능을 동시에 확보할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 ㈜경동나비엔의 “초저부하 고온응축형 친환경 콘덴싱 가스보일러의 개발” 사업 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] V.S. Yadav, S.L. Soni and D. Sharma, “Performance and emission studies of direct injection C. K. engine in dual fuel mode (hydrogen-diesel) with EGR”, Int. J. Hydrog. Energy, Vol. 37, 2012, pp. 3807-3817.
- [2] W.D. Paepe, F. Delattin, S. Bram and J.D. Ruyck, “Discussion of the effects of recirculating exhaust air on performance and efficiency of a typical microturbine”, Energy, Vol. 45, 2012, pp. 456-463.
- [3] R.J. Kee, J.F. Grcar, M.D. Smooke and J.A. Miller, “A Fortran program for modeling steady laminar one-dimensional premixed flame”, SAND85-8240, 1994.