

가스터빈 연소기에서 희석제에 의한 배기 배출물 및 연소특성에 대한 실험적 연구

주성필* · 윤지수* · 김정진* · 오재요* · 윤영빈**

Experimental Study on Emission and Combustion Characteristics on the Effect of Dilution in a Gas Turbine Combustor

Seongpil Joo*, Jisu Yoon*, Jeongjim Kim*, Jaeyo Oh*, Youngbin Yoon**

화석연료를 이용한 발전방법은 효율 및 배기 배출물 규제 때문에 점점 가스화발전방식으로 전환되고 있다. 이중 복합화력 발전은 스팀터빈 및 가스터빈 발전방식을 사용하기 때문에 일반적인 보일러 발전효율에 비하여 약 10%정도 효율이 좋으며, 가스화과정에서 탄소와 질소를 제거하여 연소기로 공급이 되기 때문에 질소산화물 및 이산화탄소 배출량이 적어 환경규제에 이점이 있다. 또한 50kW급 보일러 발전소 건설의 경우 46개월 정도 걸리는데 반에 복합 화력발전소는 30개월 정도 걸려 건설 시간 및 비용을 절감할 수 있다.

이러한 추세에 발맞추기 위하여 한국에서도 태안에 300MW급 복합 화력발전소를 건설중에 있다. 가스화를 거친 결과물인 수소와 일산화탄소를 이용하여 가스터빈을 구동하게 되는데, 수소의 빠른 연소속도 때문에 발생할 수 있는 역화현상을 막고자 부분 예혼합 연소기를 채택하여 사용한다. 또한 여전히 문제가 되는 NO_x 배출물을 낮추고자 수증기, 질소 등의 희석제가 사용된다. 한국전력 연구원의 Lee등은 질소, 이산화탄소, 수증기 희석을 합성가스 연소에 대하여 수행을 하였고, reduction rate 계산을 통하여 수증기가 희석율이 NO_x 저감에 제일 효율적이라는 논문을 발표하였다. 또한 서울대학교의 Hwang등은 합성가스 난류 확산화염에서 EINO_x가 화염의 체류시간과 직접적인 연관성이 있다는 보고를 하였다. 본 연구에서는 질소희석을 연료가 공급되는 라인과 공기가 공급되는 라인에 공급하여 각각 실험에 대한 연소특성과 배기배출물의 특성을 알아보려고 하였다.

희석제에 대한 연소 특성 및 배기배출물(NO_x 및 CO)를 파악하기 위하여 모델가스터빈 연소기를 제작하였다. 연소기 노즐을 기준으로 총길이

1410mm이며, 노즐은 GE energy의 7EA 노즐을 1/3 축소 제작하여 장착하였다. 이 노즐은 혼합 길이가 매우 짧아 화염은 부분 예혼합 화염을 형성하며 연료와 연소용 공기가 스윌러를 거쳐 앵커링된다. 연료는 합성가스를 모사하기 위하여 수소와 일산화탄소가 사용되었으며, 희석제는 질소가 사용되었다. 연소용 공기 및 연료는 static mixer가 장착된 공급시스템(MFC)을 통하여 공급이 되며, 압축기에서 고온의 공기를 모사하기 위하여 에어히터를 장착하여 공기의 온도를 약 500℃정도까지 높여 공급할 수 있게 장치를 구성하였다. 배기 배출물은 화학반응이 최종적으로 마무리되는 연소기 최 후단에서 측정을 하였으며, TESTO 350K모델을 사용하여 NO_x, CO, O₂ 등을 측정하였다.

연료 조성은 수소, 일산화탄소를 몰분율 기준으로 1:3비율로 공급하였고, 연소용 공기를 변화시켜가며 당량비를 0.4부터 1.0까지 변화시켜 연료 희박 조건에 대한 특성을 파악하고자 하였다. 또한 질소 희석제를 공급되는 연료량에 대하여 0%부터 200%까지 변화시켜가며 실험을 수행하였고, 온도는 상온(300K)과 실 가스터빈 압축기의 출구온도인 600K에 대하여 실험을 수행하였다. 또한 연료라인에 희석되는 특성과 공기라인에 희석되는 특성을 파악하기 위하여 두 라인에 따로 공급될 수 있게 장치 구성을 하였다. 또한 연소 특성을 파악하기 위하여 4개의 K-type 열전대를 설치하였으며 11개의 동압센서를 설치하여 연소시 발생하는 연소압을 측정하고자 하였다. 화염 이미지를 취득하기 위하여 PI-MAX Gen 2 16 bit ICCD 카메라를 이용하였고, 화염의 OH 자발광을 측정하기 위하여 307.1±15nm 밴드패스 필터를 설치하여 화염의 특징을 파악하고자 하였다.

질소희석의 위치 변화에 따른 배기배출물의 특성은 Fig. 1과 같다. 당량비 0.9 기준에 대한 배기 배출물은 공기라인에 대한 희석보다 연료라인에 대한 희석이 NO_x 저감에 더 유리한 것으로 파악이 되었다. 이는 유입공기가 300K, 600K로

* 서울대학교 기계항공공학부

† 연락저자, ybyoon@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1904 FAX : (02)872-8032

두 같은 경향을 보였다. 이는 화염의 온도와 관련이 있는 것으로 파악이 되는데, NO_x는 화염의 온도와 매우 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서 발생되는 NO_x의 경우 연료에 질소분자가 포함되어 있지 않고, 탄화수소계열의 연료를 사용하지 않기 때문에 발생되는 대부분의 NO_x는 Thermal NO_x로 가정할 수 있다. 즉, 화염의 온도와 NO_x의 배출물은 정비례하는 성향을 갖는 Zeldovich 메카니즘을 따르는데 이때 연료라인에서 공급되는 질소가 반응영역인 화염에 체류하는 농도가 크기 때문에 반응온도를 낮추는데 큰 영향을 미친다. 이는 마찬가지로 Fig. 1에서 확인할 수 있는데 희석율이 커질수록 NO_x의 배출량이 줄어드는 특성으로부터 확인을 할 수 있다.

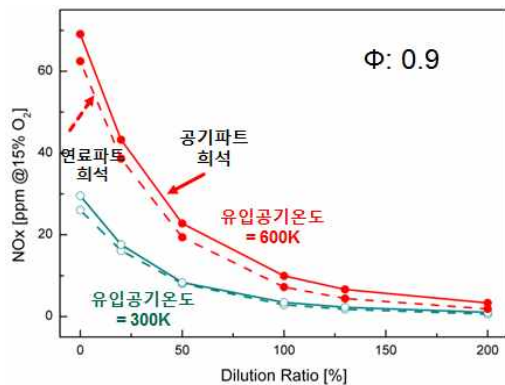


Fig. 1 NO_x emission with respect to dilution ratio at equivalence ratio(Φ) 0.9.

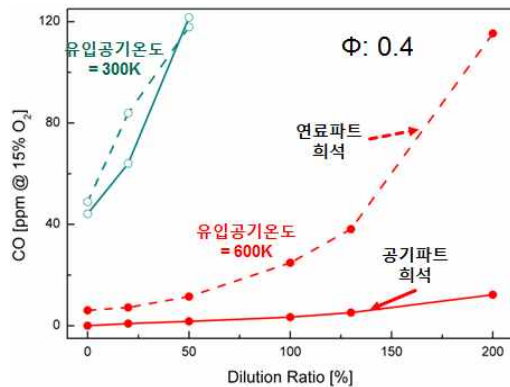


Fig. 2 CO emission with respect to dilution ratio at equivalence ratio(Φ) 0.4.

Fig. 2는 당량비 0.4에서 희석제의 유입량에 대한 CO배출물의 경향성을 보여준다. 유입구 공기가 300K일 경우 희석제가 50%를 넘어가면서 화염이 불안정하게 연소하여 CO 배출이 급격하게 늘어나는 것을 확인하였다. 이는 수소 및 일산화

탄소의 희박한계와 가까워져 화염이 강하게 떨리며 이에 따른 연료-공기 혼합물이 제대로 연소하지 않고 연료상으로 존재하는 일산화탄소가 그대로 연소기 후단으로 빠져나가기 때문에 발생하는 현상이다. 공기온도가 600K일 경우 연소용 공기의 온도가 매우 높아 희박한계가 더욱 낮아지면서 비교적 연소가 잘 이루어지는 것을 확인하였다.

하지만 연료라인에 대한 희석에서 급격한 CO 발생을 보이는 것은 NO_x 배출 특성에서도 보이는 것처럼 화염의 온도를 낮추는데 결정적인 역할을 하기 때문에 연소되지 못한 일산화탄소가 빠져나가기 때문에 이러한 경향을 보인다. 또한 GE 7EA 노즐의 경우 공기가 공급되는 홀보다 연료가 공급되는 홀이 더 작기 때문에 희석제가 많아질 경우 연료-희석제의 모멘텀이 급격하게 커지기 때문에 화염의 안정성에 악영향을 미친다. 그렇기 때문에 NO_x 배출과는 반대로 CO 배출을 저감하는데 있어서는 공기라인에 희석제를 주입하는 것이 더 유리하다고 판단할 수 있다.

후 기

본 연구는 서울대학교 IAAT와 연계된 교육과학기술부의 중견연구자지원사업(2010-0015100)과 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(201195101001C)결과이며 이에 감사드립니다. 또한 국토 해양부의 「날다 프로젝트」로 지원되었습니다.

참고 문헌

- [1] Lee M. C., Seo S. B., Yoon J., Kim M., Yoon Y., 2012, "Experimental study on the effect of N₂, CO₂, and steam dilution on the combustion performance of H₂ and CO synthetic gas in an industrial gas turbine", *Fuel*, Vol. 102, pp. 431~438
- [2] Fackler, K. B., Karalus, M. F., Novosselov, I. V., Kramlich, J. C., Malte, P. C., 2011, "Experimental and Numerical Study of NO_x Formation From the Lean Premixed Combustion of CH₄ Mixed with CO₂ and N₂", *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 133, 121502-1.
- [3] Hwang J., Sohn K., Nicolas B., Yoon Y., 2013, "NO_x Scaling of Syngas H₂/CO Turbulent Non-Premixed Jet Flames", *Combustion Science and Technology*, Vol. 185, pp. 1715-1734.