

저 NOx 연소를 위한 플라즈마 개질기

김관태 · 이대훈 · 차민석 · 길상인 · 윤진한 · 송영훈*

Plasma Reformer for Low NOx Combustion

Kwan-Tae Kim, Dae Hoon Lee, Min Suk Cha, Sang-In Keel, Jin-Han Yoon
and Young-Hoon Song*

ABSTRACT

A combined hydrogen generator of plasma and catalytic reformers has been developed, and has been applied to stabilize unstable flame of 200,000 Kcal/hr LPG combustor. The role of the plasma reformer is to generate hydrogen in a short period and to heat-up the catalytic reformer during the start-up time. After the start-up period, the catalytic reformer generates hydrogen through steam reforming with oxygen (SRO) reactions. The maximum capacity of the hydrogen generator is 100 lpm that is sufficient to be used to stabilize the flame of the present combustor. In order to reduce NOx and CO emissions simultaneously, 1) FGR (Flue Gas Recirculation) technique has been adopted and 2) the hydrogen has been added into the fuel supplied to the combustor. Test results shows that 25 % addition of hydrogen and 30 % FGR rate lead to simultaneous decrease of CO and NOx emissions. The technique proposed in the present study shows good potential to replace NH₃ SCR technique, especially in the case of small-scale combustor applications.

Key Words : Refroming, Hydrogen, LPG, NOx

서 론

발전소 및 중화학 공장에 설치된 대형 연소기 기로부터 배출되는 NOx를 저감시키는 대표적인 방법 가운데 하나로 암모니아를 환원제로 하는 SCR (Selective Catalytic Reduction, 선택적 환원법) 공정을 들 수 있다. 본 공정은 NOx 저감율이 80 % 이상으로 높기 때문에 배출규제가 강화될수록 산업 현장에 적용하는 사례가 증가되고 있으며, 최근에는 소형 열병합 발전기 또는 트럭 엔진과 같이 출력이 1,000 kW 이하인 비교적 작은 규모의 연소기기에 암모니아 SCR 기술의 적용이 검토되고 있을 정도로 보급이 확대되고 있다. 일반적으로 암모니아 SCR 공정을 적용할

때 발생하는 문제점으로는 암모니아와 같은 유독 물질의 저장 및 수송문제를 들 수 있으며, 이를 피하고자 환원제로서 요소 또는 암모니아수를 이용할 경우에도 기화 및 분해 설비가 별도로 필요하기 때문에 부대설비를 위한 공간이 필요하게 된다. 따라서 현재 강화되는 환경규제에 의해 다양한 규모의 적용처에 암모니아 SCR 설비의 적용이 고려되고는 있으나, 본 설비는 연소기가 소형화될수록 경제성이 떨어지는 현상을 피하기가 어렵다는 평가를 받고 있다.

한편, 암모니아 SCR과 같은 후처리(after-treatment) 설비기술과는 달리 부대설비가 상대적으로 적게 들고 운전비용이 저렴한 저 NOx 연소기술로는 전통적으로 배가스 재순환기술(FGR Flue Gas Recirculation)이 활용되어 왔다. 본 기술의 가장 큰 약점은 NOx 저감율이 높아질수록 연소가 불안정해져서 또 다른 공해물질인 CO 또는 미연탄화수소가 발생된다는 데 있

*

** 한국기계연구원

† 연락처. vhsong@kimm.re.kr

어 높은 탈질율을 얻기가 어렵다는데 있다. 따라서 FGR 기술을 활용함에도 불구하고 불안정한 연소현상을 억제할 수 있다면 즉, NO_x를 저감하면서도 CO 및 미연탄화수소의 발생을 억제할 수 있다면 높은 경제성 및 탈질율을 갖춘 저 NO_x 기술을 개발할 수 있다.

수소를 탄화수소에 혼합하여 연료로 활용할 경우 화염의 안정화에 도움이 되어 NO_x, CO 및 미연탄화수소의 발생을 동시에 억제할 수 있다는 연구가 최근 발표된 바 있다 [1]. 본 연구에서 활용된 수소발생기술은 촉매반응을 기반으로 하는 수증기 개질기술이었는데, 본 개질기술은 운전부하의 변동이 비교적 적은 대형 화학공장에서 지난 수십 년간 사용되어온 기술이어서 부하변동이 잦은 중소형 연소기에 적합한 수소발생기술이라고 할 수 없다. 따라서 수소를 활용하여 FGR 기술을 개선하는 기술개발의 관건은 수소발생기가 연소기의 운전 조건에 부합한 형태 즉, 빠른 부하변동이 가능한 수소 발생기의 개발에 달려있다고 할 수 있다.

탄화수소로부터 수소를 얻기 위해 사용되는 화학반응인 1) 부분산화, 2) 수증기 개질, 그리고 3) auto-thermal 반응을 고온의 플라즈마를 통해 달성하는 기술은 촉매를 이용하는 기술에 비해 운전 시 소요되는 전력비용이 높은 단점에도 불구하고 중소형 연소기에 수소를 공급하는 기술로서 많은 장점이 있다. 즉, 플라즈마 개질기술은 1) 연소기의 부하변동에 대한 빠른 적응성, 2) 개질기 부피의 소형화, 3) 반응의 부산물로 생성되는 고체상 탄소로 인한 반응기 내구성 저하의 우려가 없다는 장점이 밝혀져 있다 [2,3]. 이와 같은 플라즈마 개질기술의 장점이 규명된 연구는 주로 실험실 규모로 수행된 연구결과를 바탕으로 둔 것으로 본 기술이 실용화되기 위해서는 실용화된 연소기 규모에서 기술이 실증될 필요가 있다.

본 연구는 이상과 같은 기술개발의 배경 하에서 수행되었으며, 본 연구의 목표는 통상적인 실험실 규모의 연소기보다 큰 200,000 kcal/hr급 연소기에서 소요되는 플라즈마 개질기를 개발하는데 있다. 200,000 kcal/hr급 연소기에서 FGR을 운영하는데 소요되는 수소의 양은 사전에 수행된 기초실험을 통해 약 100 lpm으로 추정되었으며, 이에 따라 본 연구의 핵심은 종래 10 lpm 규모로 발생되었던 수소발생량을 10 배 증가시키는 기술을 개발하는데 있다[3].

2. 실험장치 및 방법

그림 1 및 2는 본 연구에서 사용된 200,000 kcal/hr급 연소기 및 100 lpm급 수소발생장치 사

진과 개략도로, 본 연소기는 LPG를 연료로 사용하고 있다. 본 연소로 후단에는 보일러가 설치되어 있으며, 보일러 후단에는 FGR을 위한 밸브가 설치되어 있다. 한편, 수소 발생기는 연소로와 동일한 연료를 사용하는 것이 바람직하기 때문에 본 실험에서 사용된 수소 발생기는 연소기와 동일하게 LPG 연료를 사용하였다.

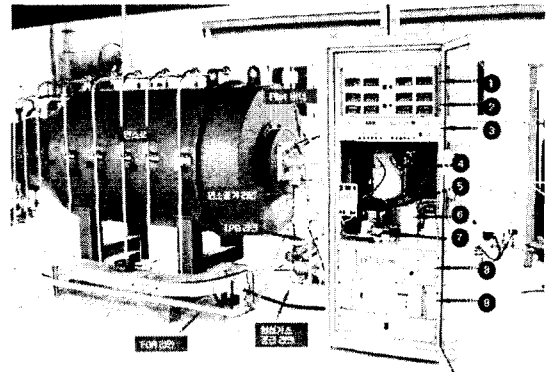


Fig. 1 200,000 kcal/hr combustor and reformer
 ① ~ ③ : flow & temp. controller, ④ : reformer, ⑤ ~ ⑦ : water supplier, ⑧ : gas analyzer, ⑨ : power supply

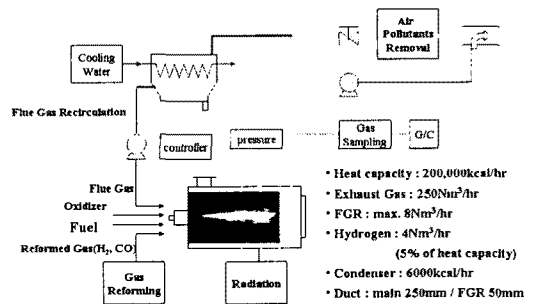


Fig. 2 Schematics of test apparatus

수소 발생량이 10 lpm 규모인 수소발생장치는 여러 문헌에 소개된 바와 같이 3,000 K의 온도를 갖는 회전 아크 플라즈마 발생기를 단독으로 사용하여 수소발생 반응을 일으키나 [2,3], 100 lpm 규모의 수소발생장치는 그림 3과 같이 플라즈마 반응기 및 촉매 반응기가 직렬로 놓여있는 반응기를 사용하였다. 본 실험에서는 수증기 개질반응을 사용하였는데, 본 반응은 플라즈마 또는 촉매 반응기 단독으로도 반응이 일어날 수 있다. 한편, 본 연구에서 그림 3과 같이 플라즈마 및 촉매 반응기를 동시에 사용한 이유는 수소발생기를 작동시킬 때 그림 4에서 볼 수 있는 예와 같이 플라즈마를 이용할 경우 수소가 발생할 수 있

는 온도에 따라 다른 기동 (start-up) 시간을 줄여줄 수 있기 때문이었다. 즉, 본 연구에서 사용된 수소 발생기는 기동 시 플라즈마 반응기를 작동시킨 다음, 이후 촉매반응기의 온도가 수소를 발생시키는 온도에 다다르면 플라즈마 반응기에 공급되는 전원공급을 중지시켜 촉매반응기로만 수소를 발생시키고 있다. 이에 따라 대부분의 운전 시간동안 플라즈마 반응에 소요되는 전력은 필요하지 않았다. 본 연구에 앞서 시중에서 구매한 10 lpm급 촉매 반응기를 장착한 수소 발생기는 안정적으로 수증기 개질 반응이 일어나는데 약 2 시간이 소요했기 때문에 이와 같은 일반적인 수소발생기만으로는 부하변동이 있는 연소기에의 적용이 어려울 것으로 판단되었다.

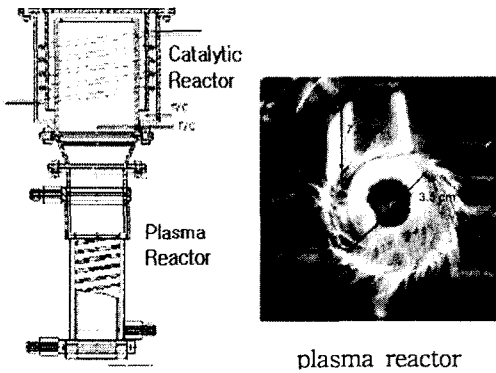


Fig. 3 Combined reformer of plasma and catalytic reactors.

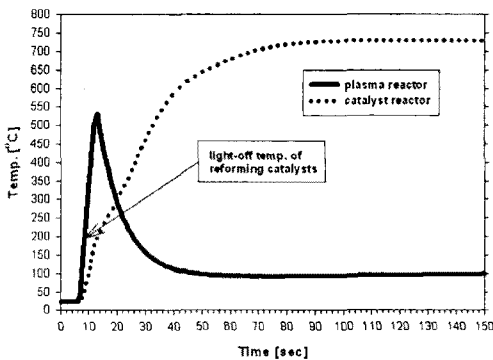


Fig. 4 Comparison of start-up time of plasma and catalytic reformer

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 200,000 kcal/hr급 연소기 실험

에 앞서 소규모의 연소기를 이용하여 수소첨가로 인한 화염안정화 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 연소기에 공급되는 공기량을 증가시켜 인위적으로 화염을 불안정한 조건으로 변화시켜주었고, 이와 같은 조건에서 수소를 첨가시켜 안정된 화염으로 다시 복귀시키는 과정을 반복하였다. 본 실험을 통해 화염의 안정화에 소요되는 수소의 양을 평가하였으며, 이를 토대로 200,000 kcal/hr급 연소기 실험에 소요되는 수소의 양을 추정하였다. 그림 6은 수소첨가에 따른 화염 안정화를 보여주는 사진으로 그림에서 보듯이 공기 공급량의 증가로 인해 불안정해진 화염이 수소의 첨가로 인해 안정화되는 현상을 볼 수 있었다. 이상과 같은 실험을 통해 수소첨가의 가시적인 효과가 나타나기 시작하는 조건은 공급된 연료의 10 - 15 % 수준임을 알 수 있었다.

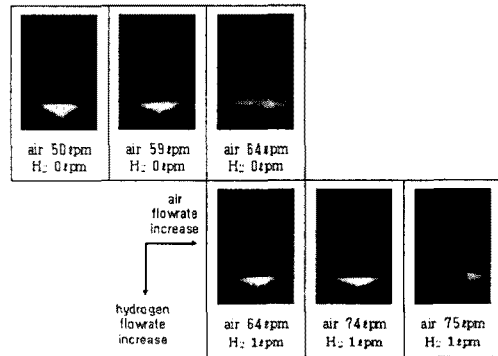


Fig. 6 Direct visualization for the analysis of hydrogen effect on flame stability

200,000 kcal/hr급 연소기에 수소를 첨가하여 운전된 FGR 기술의 성능은 그림 7 및 8을 통해 살펴볼 수 있다. 그림 7은 FGR 율을 증가시킬 경우 연소로 후단에서 측정된 NOx 및 CO 값을 나타낸 그림으로, FGR 율이 30 %에 이를 경우 80 %에 육박하는 탈질율이 나타나지만 CO 배출도 함께 증가하는 현상을 보여주고 있다. 본 실험에서는 FGR 율이 30 %인 조건에서 첨가되는 수소의 양을 증가시켜가며 탈질율 및 CO 농도를 측정하였는데, 그림 8은 이와 같은 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 EGR 율이 30 %에 이를 경우 정상적인 연소상태라고 할 수 없는 조건 즉, 6 %에 이르는 높은 CO 배출농도가 수소첨가로 인해 급격히 감소되고 있음을 알 수 있었다. 200,000 kcal/hr급 실험에서는 앞서 소개된 소형 연소기 실험결과와 마찬가지로 10 % 이상의 수소가 연료에 첨가될 경우 화염의 안정화가 뚜렷하였으나, 그림 8의 실험조건인 경우 워낙 높은 FGR 율로 인해 여전히 높은 CO

배출농도가 측정되었다. 본 연구에서는 저 NOx를 위한 연소기 기술에 대해서는 별도의 노력을 하지 않았는데, 높은 FGR 조건에서도 안정적인 화염을 발생시킬 수 있는 기술이 병행하여 적용될 경우 본 연구에서 사용된 수소양보다 적은 양으로도 탈질 성능을 얻을 수 있을 것으로 기대되고 있다.

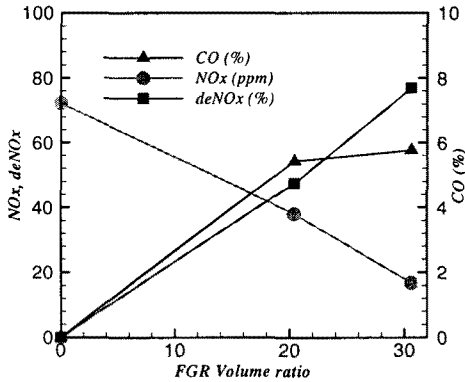


Fig. 7 De-NOx efficiency and CO emission along with FGR ratio

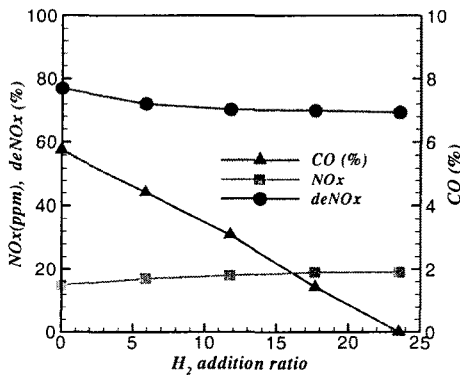


Fig. 8 De-NOx efficiency and CO emission along with H₂ addition

4. 결 론

현재 산업에서 80 % 수준의 높은 탈질율을 얻기 위해 활용되고 있는 암모니아 SCR 설비기술을 대체하기 위한 기술로서 수소를 이용한 FGR 기술의 타당성 검토가 200,000 kcal/hr급 연소기를 활용하여 수행되었다. 연구결과 1) 100 lpm

의 수소를 발생시킬 수 있으며, 2) 전력비용이 최소화되면서도 빠른 기동시간을 갖춘 수소 발생기가 필요함을 알 수 있었다. 이에 따라 본 연구에서는 플라즈마 및 촉매 반응기가 복합된 수소 발생기가 개발되었다. 200,000 kcal/hr급 연소소에 수소첨가 및 FGR 기술을 적용하여 70 % 수준의 탈질성능을 확인할 수 있었으며, 이 경우 가장 우려되었던 CO 배출이 수소첨가로 인해 억제될 수 있음을 알 수 있었다. 현 단계에서 본 연구에서 개발된 기술의 엄밀한 경제성 평가는 어려우나, 설비의 규모 및 해당 기술을 운전하기 위해 추가로 소요되는 에너지를 고려할 경우 본 연구에서 사용된 탈질기술은 기존의 암모니아 SCR 기술을 대체할 수 있는 잠재력이 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 전력기반조성사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) T.D. Andrea, P.F. Henshaw, D.S.-K Ting, "The addition of hydrogen to a gasoline-fuelled SI engine", *Int. J. Hydrogen Energy*, 29, 2004, 1541-1552
- (2) D.H. Lee, K.T. Kim, M.S. Cha, Y.H. Song, "Optimization Scheme of a Rotating Gliding Arc Reactor for Partial Oxidation of Methane", *proceeding of the combustion institute*, 31, 2007, 3343-3351
- (3) 송영훈, 차민석, 김관태, 이대훈, "플라즈마/화염을 이용한 부분산화연구", 2005, 춘계연소학회 논문집, 277 - 282