# 플라즈마를 이용한 FGR 기반 저 NOx 연소 타당성 연구

김관태* · 이대훈* · 차민석* · 길상인* · 윤진한* · 김동현** · 송영훈*†

# Feasibility Study of Low NOx Combustion based on FGR using Plasma Reformer

Kwan-Tae Kim, Dae Hoon Lee, Min Suk Cha, Sang-In Keel, Jin-Han Yun, Dong Hyun Kim and Young-Hoon Song

## ABSTRACT

A combined hydrogen generator of plasma and catalytic reformer was developed, and was applied to stabilize unstable flame of 200,000 Kcal/hr LPG combustor. The role of the plasma reformer was 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 was enough 100 lpm 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 was added into the fuel supplied to the combustor. Test results showed that the addition of 25 % hydrogen and 30 % FGR rate lead to simultaneous decrease of CO and NOx emissions. The technique developed in the present study showed good potential to replace $NH_3$ SCR technique, especially in the small-scale combustor applications.

**Key Words** : Reforming, Hydrogen, SCR, FGR, NOx

## 1. 서 론

발전소 및 중화학 공장에 설치된 대형 연소기기로부터 배출되는 NOx를 저감시키는 대표적인 방법 가운데 하나는 암모니아를 환원제로 하는 SCR (Selective Catalytic Reduction, 선택적 환원법) 공정을 들 수 있다. 이 공정은 NOx 저감율이 80%이상으로 높기 때문에 배출규제가 강화될수록 산업현장에 적용하는 사례가 증가되고 있으며, 최근에는 소형 열병합 발전기 또는 트럭 엔진과 같이 출력이 1,000 kW 이하인 비교적 작은 규모의 연소기기에도 암모니아 SCR 기술의 적용이 검토되고 있을 정도로 보급이 확대되고 있다[1-4]. 일반적으로 암모니아 SCR 공정을 적용할 때 발생되는 문제점으로는 암모니아와 같은 유독물질의 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 연소기기가 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 발생되기 때문에 높은 탈질율을 얻기가 어렵다는데 있다. 따라서 FGR 기술을 활용함에도 불구하고 불안정한 연소현상을 억제할 수 있다면 즉, NOx를 저감하면서도 CO 및 미연탄화수소의 발생을 억제할 수

* 한국기계연구원
** 한국전력공사 전력연구원
† 연락저자, yhsong@kimm.re.kr

있다면 높은 경제성 및 탈질율을 갖춘 저 NOx 기술을 개발할 수 있다.

수소를 탄화수소에 혼합하여 연료로 활용할 경우 화염의 안정화에 도움이 되어 NOx, CO 및 미연탄화수소의 발생을 동시에 억제할 수 있다는 연구가 최근 발표된 바 있다[5-7]. 본 연구에서 활용된 수소발생기술은 촉매반응을 기반으로 하는 수증기 개질기술인데, 본 개질기술은 운전부하의 변동이 비교적 적은 대형 화학공장에서 지난 수십 년간 사용되어온 기술이어서 부하변동이 잦은 중소형 연소기기에 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 부분산화, 수증기 개질, 그리고 auto-thermal 반응을 고온의 플라즈마를 통해 달성하는 기술은 촉매를 이용하는 기술에 비해 운전시 소요되는 전력비용이 높은 단점에도 불구하고 중소형 연소기기에 수소를 공급하는 기술로서 많은 장점이 있다[8-11]. 즉, 플라즈마 개질기술은 연소기의 부하변동에 대한 빠른 적응성, 개질기 부피의 소형화, 반응의 부산물로 생성되는 고체상 탄소로 인한 반응기 내구성 저하의 우려가 없다는 장점이 있다[12, 13]. 이와 같은 플라즈마 개질기술의 장점이 규명된 연구는 주로 실험실 규모로 수행된 연구결과를 바탕으로 둔 것으로 본 기술이 실용화되기 위해서는 실용화된 연소기기 규모에서 이러한 기술들이 실증될 필요가 있다.

본 연구는 이상과 같은 기술개발의 배경 하에서 수행되었으며, 본 연구의 목표는 통상적인 실험실 규모의 연소기 보다 큰 200,000 kcal/hr급 연소기에서 소요되는 플라즈마 개질기를 개발하는 데 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[13].

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 기초실험용 연소장치

본 연구에서는 200,000 kcal/hr급 연소기 실험에 앞서 소규모의 연소기를 이용하여 수소첨가로 인한 화염안정화 실험을 수행하였다. Fig. 1은 소규모 연소장치의 구성도이다. 연료로는 고순도 LPG(프로판 99.5%)를 사용하였으며 산화제로는 압축공기 그리고 첨가제로서 수소를 사용하였다.

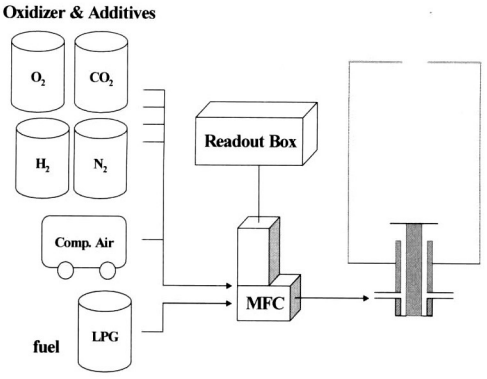


Fig. 1 Schematic diagram of a bluff body type premixed burner

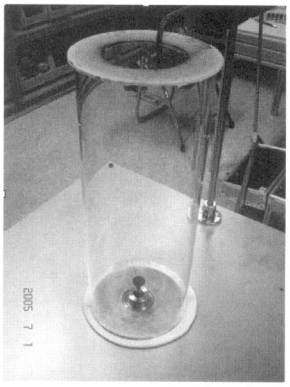

Fig. 2 Burner nozzle

대부분의 실험에서 사용된 연료량은 2ℓpm이며 공기와 연소가스(이산화탄소 86%+질소14%) 그리고 수소량을 실험인자로 사용하였다.

실험에 사용된 연소기는 연료와 산화제가 미리 섞여 공급되는 예 혼합형으로서 내경이 8mm이며 외경이 18mm인 환형관에 의해 분사된다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 노즐의 중앙에 화염의 안정화를 위하여 직경이 20mm인 원판형 안정판(bluff-body)이 노즐의 끝에 부착되어 있다.

연소기의 외부에는 외기(공기)의 유입을 차단하기 위하여 내경이 150mm이고 길이가 400mm인 석영관이 설치되어 있으며 이 관의 끝에는 역류하는 공기의 유입을 차단하기 위하여 세라믹 paper가 덮여 있다.

### 2.2 실증실험용 연소장치

Fig. 3 및 4는 본 연구에서 사용된 200,000 kcal/hr급 연소성능시험로 및 100 lpm급 수소발생장치 사진과 그에 대한 개략도로 수소-탄화수

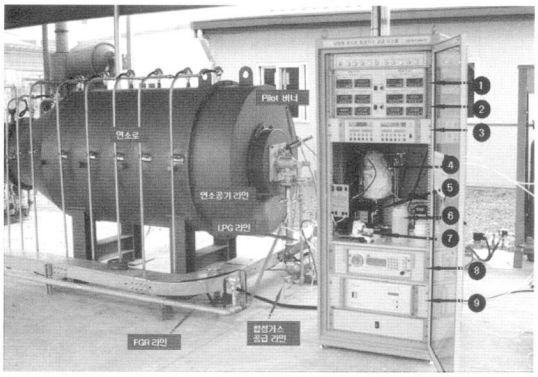


Fig. 3 200,000kcal/hr combustor and reformer ①~③ : flow & temp. controller, ④ : reformer, ⑤~⑦ : water supplier, ⑧ : gas analyzer, ⑨ : power supply

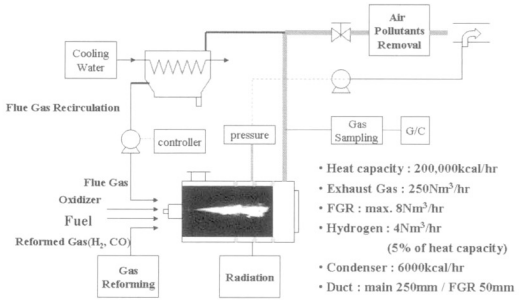


Fig. 4 Schematics of test apparatus

소 연소 및 FGR 기술을 활용한 청정연소 실증 실험을 수행하였다. 수소 발생장치는 연소로와 동일한 연료를 사용하는 것이 바람직하기 때문에 본 실험에서 사용된 수소 발생장치는 연소기와 동일하게 LPG 연료를 사용하였다. 연료로 사용한 LPG와 첨가제로 사용된 수소는 정밀하고 안정된 공급을 위하여 질량유량계(MFC, Mass Flow Controller)를 사용하여 공급하였으며, 연소용 공기는 ball flow meter를 사용하여 조절하였다. 연소로 후단에는 보일러가 설치되어 있으며, 보일러 후단에는 FGR을 위한 밸브가 설치되어 있다.

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[12, 13], 100 lpm 규모의 수소발생장치는 Fig. 5와 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 Fig. 5와 같이 플라즈마 및 촉매 반응기를 동시에 사용한 이유는 수소발생기를 작동시킬 때 Fig. 6에서 볼 수 있는 예와 같이 플라즈마를 이용할 경우 수소가 발생될 수 있는 온도에 도달하는 기동 (start-up) 시간을 줄여줄 수 있기 때문이었다. 즉, 본 연구에서 사용된 수소 발생기는 기동 시 플라즈마 반응기를 작동시킨 다음, 이후 촉매반응기의 온도가 수소를 발생하는 온도에 도달하면 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

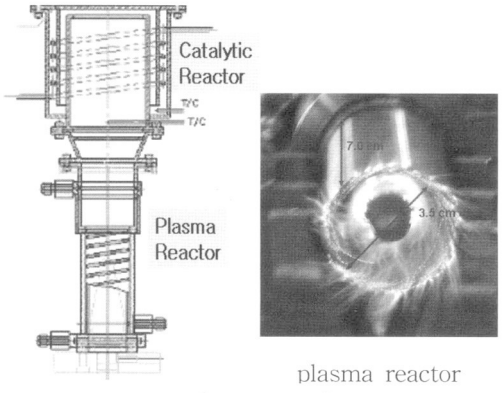


Fig. 5 Combined reformer of plasma and catalytic reactors.

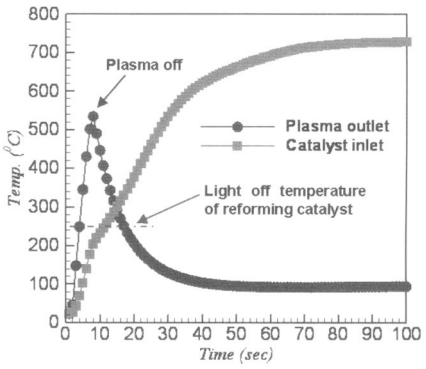


Fig. 6 Comparison of start-up time of plasma and catalytic reformer

약 2 시간이 소요됐기 때문에 이와 같은 일반적인 수소발생기만으로는 부하변동이 있는 연소기에의 적용이 어려울 것으로 판단되었다.

한편, 본 연구에서 수행하고자 했던 주된 실험내용을 살펴보면 우선 NOx가 수십에서 수백 ppm 수준으로 발생하는 연소분위기에서 연소가스 재순환율(Flue Gas Recirculation ratio, FGR 율(%))을 조절하여 NOx의 발생을 억제한 후, 이 때 상대적으로 증가하게 되는 CO농도를 줄이기 위해 수소를 첨가하고 화염을 안정화시키는 내용이 핵심이다. 따라서 본 실험에서는 FGR 율(%)에 대한 연소특성을 두가지 경우에 대해 비교하였으며, 수소 첨가에 따른 영향은 네가지 경우로 구분하여 비교하였다. 그리고 이 때 연료(LPG + 수소)와 연소용 공기(fresh air + FGR량)의 합은 부피기준으로 항상 일정한 값을 유지하도록 하였다. 또한 실험 중 로 내압은 -20mmAq, 열 교환기의 후단온도는 180°C 상태에서 운전하였으며, 파이롯트 버너의 가스량(3.5lpm)과 공기량(35lpm)은 일정하게 유지하였다.

그리고 발생가스의 농도계측은 Green Line 사의 가스분석기(모델: MK2)와 mesa electronics 사의 제품을 사용하였으며 NOx의 경우 실험의 신뢰성을 높이기 위해 NOx Analyzer(모델: Signal Ins. 4000 VM)를 동시에 사용하였다. 또한 시료가스의 응축에 따른 계측치의 불확실성을 줄이기 위해 계측기로 유입되는 시료를 2단의 응축시스템을 거쳐 수분을 처리한 후 농도를 계측하였다.

## 3. 실험 결과 및 토의

### 3.1 기초실험용 연소장치

#### 3.1.1 미량의 수소 첨가가 화염의 안정화에 미치는 영향

본 실험에서는 연소기에 공급되는 공기량을 증가시켜 인위적으로 화염을 불안정한 조건으로 변화시켜 주었고, 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.

Fig. 7은 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. 다양한 연료량 조건에서 수소의 첨가가 화염의 안정화에 미치는

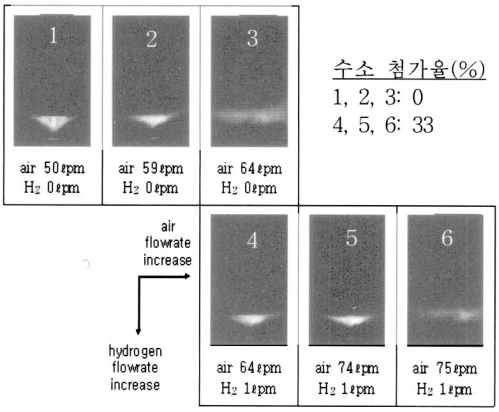


**Fig. 7 Direct visualization for the analysis of hydrogen effect on flame stability**

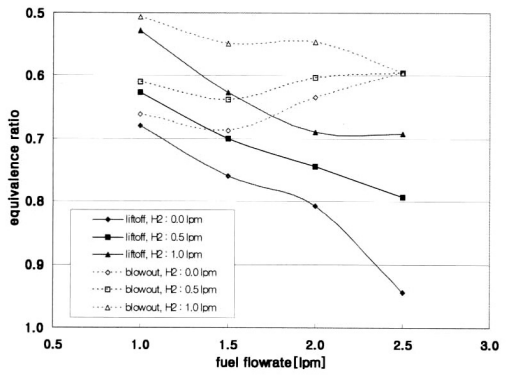


**Fig. 8 Blowout and liftoff conditions**

영향을 보기 위해 Fig. 8에 나타낸 바와 같은 화염의 부상(liftoff)과 소염에 대한 조사를 실시하였다. 수소량 0ℓpm, 0.5ℓpm 그리고 1.0ℓpm의 세 가지 상태에서, 그리고 연료량은 1ℓpm에서 2.5ℓpm까지 0.5ℓpm씩 변화시키면서 화염의 부상과 소염이 나타나는 공기량을 조사하였다.

저 연료량 조건에서는 노즐에서 분사되는 유체의 속도가 낮기 때문에 0.53~0.68 사이의 공기과잉율이 높은 당량비 조건에서 부상이 일어났으며 여기서 공기량을 조금 더 증가시키면 화염이 실화되었다. 그러나 고 연료량 조건에서는 노즐 분사속도가 빨라져 당량비 0.7~0.95의 낮은 공기과잉 상태에서 부상이 나타났다. 그러나 저 연료량 조건과는 달리 부상이 일어난 후에도 많은 양의 공기가 추가적으로 공급되어야만 실화가 발생하였다.

수소를 첨가함에 따라서 화염의 부상이 일어나는 공기량은 수소가 첨가되지 않았을 때에 비하여 훨씬 많았으며 실화가 이루어지는 공기량도 많이 증가하는 것을 위의 결과로부터 알 수 있다. 수소의 첨가로 인하여 연소장에서 유동속도에 대한 반응속도가 빨라져서 화염의 부상이나 실화가 공기의 유속이 빨라지는 영역으로 이동하게 된다. 즉, 소량의 수소 혼합에도 불구하고 운전영역(연료공급)의 확대, 공기 공급영역의 확대 등 실질적인 화염의 안정화 효과가 쉽게 관찰된다. 특히 1ℓpm의 수소를 첨가한 경우에는 연료로 사용된 LPG 가연한계인 당량 비 0.5까지도 화염이 형성될 수 있음을 실험으로부터 확인하였다.

### 3.1.2 미량의 수소 첨가가 공해물질 생성에 미치는 영향

당량비(공기량)와 첨가 수소량을 변화인자로 하여 측정한 NOx와 CO값을 Fig. 9에 나타내었다. 당량비 0.9(과잉공기 11.1%)에서 당량비 0.8(과잉공기 25%)까지는 CO가 거의 발생하지 않다가 더 많은 공기가 공급됨에 따라서 CO가 급상승하였으며 반면에 NOx는 공기의 유량이 증가함에 따라서 농도가 감소하는 CO와는 반대의 현상을 나타냈다.

공기량이 과잉으로 공급되는 경우 연소장의 온도저하로 인하여 산소의 과잉율이 증가함에도 불구하고 일산화탄소는 급증하게 된다. 또한 반응온도와 밀접한 질소산화물의 생성농도는 공기량이 많아짐에 따라 감소하게 된다.

수소의 공급량에 따른 차이에서는 수소첨가가 없는 경우에 비해 수소를 첨가함에 따라 미세한 NOx 증가와 더불어 CO의 감소가 관찰되었다.

동일 당량 비 조건에서 수소의 첨가가 연소온도의 증가로 인하여 미세한 질소산화물 발생량 증가로 이어지는 것으로 사료된다. 그러나 증가폭이 작게는 1내지 2ppm에서부터 많게는 20ppm에 불과하며 공기량의 변화에 따른 효과를 함께 고려할 때 미량의 수소 첨가가 질소산화물의 발생에 많은 영향을 직접적으로 미친다고 결론짓기는 어려웠다.

수소의 첨가가 일산화탄소의 발생에 미치는 효과는 확실하게 관찰되었다. 특히 공기의 과잉으로 인한 연소불안정 영역에서의 효과는 더욱 크게 나타났다. 당량비 0.8까지의 영역에서는 수소의 첨가가 일산화탄소의 발생 억제에 미치는 효과가 명확히 구분되지 않았다. 공기를 좀 더 공급하는 당량비 0.75에서부터는 공기과잉에 따른 연소온도 저하로 인하여 일산화탄소가 급증했다. 당량비 0.75에서는 수소를 1lpm 첨가한 경우 일산화탄소의 발생을 약 100ppm 정도 줄일 수 있으며 당량비 0.65에서는 약 250ppm의 일산화탄소가 감소되었다. 앞서 화염안정화에서 확인된 바와 같이 화염의 부상과 실화영역에서 나타나는 일산화탄소의 급증이 소량의 수소첨가로 인하여 안정화되는 현상이 일산화탄소의 발생억제 현상을 잘 설명해 주었다.

Fig. 10은 과잉공기 대신에 연소가스(실제로는 질소와 이산화탄소의 혼합가스)량을 변화시키며 측정한 결과이다. 앞서의 결과와 마찬가지로 저유량 재순환에서는 NOx의 감소 효과가 확인되었으나 유량이 증가함에 따라서 연소상태가 빠르게 악화되었다. 그러나 수소를 1ℓpm 정도 혼합한 경우 일산화탄소의 발생이 재순환가스량 5ℓpm까지도 확대 되었으며 질소산화물도 상당히 감소시킴을 알 수 있었다.

이러한 결과는 연소가스의 재순환과 미량의 수소 혼합을 이용할 경우 화염대의 안정화는 물론

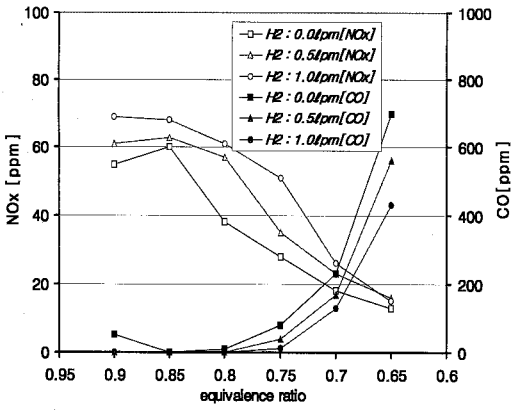


Fig. 9 Combustion characteristics with the variations of equivalence and hydrogen

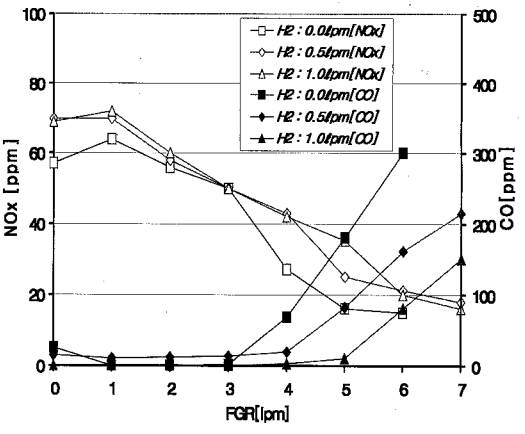


Fig. 10 Combustion characteristics with the variations of FGR and hydrogen

운전영역의 확대, NOx와 CO의 동시감소 등 복합적 효과가 거둘 수 있음을 의미하였다.

### 3.2 실증실험용 연소장치

200,000 kcal/hr급 연소로에 수소를 첨가하여 운전된 FGR 기술의 성능은 Fig. 11 및 12를 통해 살펴볼 수 있다.

Fig. 11은 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, Fig. 12는 이와 같은 실험결과를 보여주고 있다.

그림에서 볼 수 있듯이 FGR 율이 30 %에 이를 경우 정상적인 연소상태라고 할 수 없는 조건 즉, 6 %에 이르는 높은 CO 배출 농도가 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, Fig. 12의 실험조건의 경우 워낙 높은 FGR 율로 인해 여전히 높은 CO 농도가 측정되었다. 본 연구에서는 FGR 이외에 NOx를 저감하기 위한 다른 기술적 시도는 하지 않았는데, 높은 FGR 조건에서도 안정적인 화염을 발생할 수 있는 기술이 병행하여 적용될 경우 본 연구에서 사용된 수소양보다 적은 양으로도 양호한 탈질 성능을 얻을 수 있을 것으로 기대되고 있다.

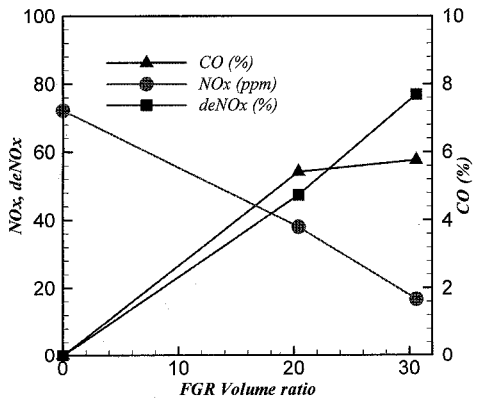


Fig. 11 De-NOx efficiency and CO emission along with FGR ratio

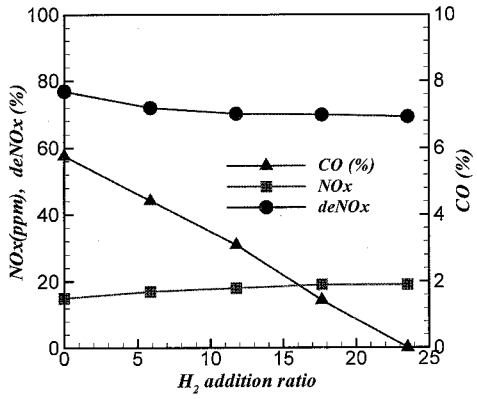


Fig. 12 De-NOx efficiency and CO emission along with $H_2$ addition

다음은 본 연구에서 사용한 FGR율(%)과 수소첨가율을 나타내고 있다.

$$\text{FGR 율(\%)} = \{\text{FGR 양}/(\text{흡입공기량} + \text{FGR 양})\} \times 100$$

$$\text{수소 첨가 율(\%)} = \{\text{수소 양}/(\text{LPG 양} + \text{수소 양})\} \times 100$$

## 4. 결론

현재 산업현장에서 80% 수준의 높은 탈질율을 얻기 위해 활용되고 있는 암모니아 SCR 설비기술을 대체하기 위한 기술로서 수소를 이용한 FGR 기술의 타당성 검토가 기초실험용 반응기와 200,000 kcal/hr급 실증연소기를 활용하여 수행되었다.

### 기초실험 결과:

미량의 수소 혼합이 화염의 안정화에 미치는 영향에 대한 기초 실험 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 연료-공기 연소에서 미량의 수소 혼합은 수소의 빠른 연소속도에 의한 화염의 뜨임과 실화를 방지함으로써 넓은 공기비 영역에서 안정된 운전이 가능하도록 한다.

2) 소량의 수소혼합이 질소산화물의 발생을 유발할 수 있다는 현상은 관찰되지 않았다. 또한 공기 과잉영역에서 과잉공기로 인한 연소온도의 저하로 유발되는 일산화탄소의 발생을 수소의 첨가로 인하여 억제할 수 있다.

3) 연소장에 있어서 화염안정화와 더불어 질소산화물과 일산화탄소의 효율적인 발생억제는 수소의 혼합과 배가스 재순환의 동시적용이 효과적인 것으로 실험 결과 확인되었다.

**실증실험 결과:**

1) 플라즈마 및 촉매 반응기의 결합으로 100 lpm급의 수소 발생기를 제작할 수 있었다.
2) 전력비용이 최소화되면서도 빠른 기동시간을 갖춘 수소 발생기가 필요함을 알 수 있었다.
3) 200,000 kcal/hr급 연소로에 수소첨가 및 FGR 기술을 적용하여 70 % 수준의 탈질성능을 확인할 수 있었으며, 이 경우 가장 우려되어온 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] B.M. Penetrante, R.M. Brusasco, B.T. Merritt, W.J. Pitz, G.E. Vogtlin, M.C. Kung, H.H. Kung, C.Z. Wan and K.E. Voss, "Plasma-assisted catalytic reduction of $NO_x$," Plasma Exhaust Aftertreatment(SP-1395), 982508, 57-66.

[2]T. Hammer & S. Broeer, "Plasma enhanced selective catalytic reduction of $NO_x$ for Diesel Cars," Plasma Exhaust Aftertreatment (SP-1395), 982428, 7-12.

[3] S. Broeer, T. Hammer, "Selective catalytic reduction of $NO_x$ by combining a non-thermal plasma and a $V_2O_5$-$WO_3$/$TiO_2$ catalyst," Applied Catalysis B : Environ.l 28, 2000, 101-111.

[4] T. Hammer, T. Kishimoto, H. Miessner and R. Rudolph, "Plasma enhanced selective catalytic reduction : kinetics of $NO_x$-removal and byproduct formation," 1999, SAE 1999-01-3632.

[5] 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.

[6] A. Naidja, C.R. Krishna, T. Butcher, D. Mahajan, "Cool flame partial oxidation and its role in combustion and reforming of fuels for fuel cell systems," Progress in Energy and Combustion Science 29, 2003, 155-191.

[7] S.O. Akansu, Z. Dulger, N. Kahraman, T.N. Veziroglu, "Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures," Int. J. Hydrogen Energy, 29, 2004, 1527-1539.

[8] B. Pietruszka and M. Heintze, "Methane conversion at low temperature: the combined application of catalysis and non-equilibrium plasma," Catalysis Today, 90 2004, 151-158.

[9] L. Bromberg, D.R. Cohn, A. Rabinovich, N. Alexeev, "Plasma catalytic reforming of methane," Int. J. Hydrogen Energy, 24, 1999, 1131-1137.

[10] I. Rusu, J.M. Cormier, "On a possible mechanism of the methane steam reforming in a gliding arc reactor," Chemical Engineering Journal, 91 2003, 23-31.

[11] Y.H. Song, "Types of plasma generation techniques for pollutant gases," Invited lectures in 7th Asia Pacific Conference on Plasma Sciemce and Technology, June 29~July 2, 2004, Fukuoka, Japan.

[12] 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," proceedings of 31th combustion symposium, Heidelberg, 2006.

[13] 송영훈, 차민석, 김관태, 이대훈, "플라즈마/화염을 이용한 부분산화연구," 춘계연소학회 논문집, 2005, 277 - 282.