

# 탄화수소 가스 첨가가 PPCP 장치에 의한 NOx 및 SOx 저감에 미치는 영향

## Effect of Adding Hydrocarbon Gases for Reduction of NOx and SOx Using PPCP

김 홍 석\*, 강 형 수\*\*, 정 태 용\*\*\*  
Hong Suk Kim, Hyungsoo Kang, Taeyong Chung

### ABSTRACT

To decrease NOx and SOx using PPCP(Pulse-induced Plasma Chemical Process), this study is tried to obtain the relations and the basic data under the various conditions such as the initial concentrations of NOx and SOx, the additional amount of hydrocarbon gases, the concentration of oxygen and input power etc. Especially, this study is focused on the effects of the additional hydrocarbon gases on the decrease of NOx and SOx.

주요기술용어 : PPCP(Pulse-induced Plasma Chemical Process), Plasma(플라즈마), Corona(코로나), Nano-second pulse generation(나노초 펄스 발생)

### 1. 서 론

산업 기술의 발달로 인한 각종 유해성 물질의 배출량 증가로 지구 환경 오염 문제는 매우 심각한 실정이며, 따라서 공해 제거에 관한 연구의 중요성이 절실히 요구되고 있다. 특히, 현재 급속하게 발달한 산업들 중에서 자동차 분야가 가장 급성장을 이루어지면서 디젤기관에서 NOx, SOx 등 유해 가스 및 입자상 물질이 대기 오염 문제를 발생시키는 주된 주범이 되고 있다. 따라서 디젤기관의

배출물을 억제하기 위하여 기관 개량, 후처리 장치 등 여러 연구가 진행 중에 있으며, 후처리 기술 중 플라즈마는 디젤기관에서 배출되는 유해가스를 동시에 저감시킬 수 있는 신기술이다. 그 결과 실제 차량에 적용되어 실용화 단계에 있는 방법도 있다. 이러한 유해 배출 가스를 제거하기 위하여 종래에 사용되던 장치들은 크기에 비해 효율성이 떨어지는 단점이 있으며, 점점 강화되고 있는 환경기준을 만족시키기 위해서는 새로운 기술을 이용한 제거 장치의 개발이 지속적으로 요구되고 있다.

이와 같은 요구에 의해 최근 개발된 새로운 공해 제거 시스템이 저온 플라즈마 발생 장치인 PPCP(pulse-induced plasma chemical process)이다.

\* 정회원, 제주산업정보대학 자동차과

\*\* 정회원, 전주공업대학 기계과

\*\*\* 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부

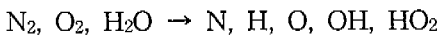
본 연구는 연소에 의해 생성되는 유해 물질 중 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub>를 저온 플라즈마 장치에 의해 제거하는데 중점을 두었다.

또한 저온 플라즈마 장치에 의해 유해 물질을 제거할 때 제거 효율을 증대시키기 위한 첨가제로 NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 등을 이용하는 것으로 보고되고 있다<sup>1,2,3</sup>). 이들 중 NH<sub>3</sub>는 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 제거에 크게 영향을 주나<sup>1,2</sup>) 유독 물질로 그 취급에 세심하게 주의해야 한다. 그러나 탄화수소 가스는 유독 물질이 아니면서 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 제거에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나<sup>3</sup>), 이에 대한 구체적인 자료는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 연소에 의해 생성된 유해 물질 중 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>를 PPCP 장치에 의해 제거할 때 유해 가스 농도, 탄화수소 가스(CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)의 첨가량, 공급 전력 등의 인자가 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>의 저감 효율에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하여, NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 저감을 위한 최적의 PPCP 시스템 개발에 기여함을 목적으로 한다.

## 2. 플라즈마를 이용한 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 저감 원리

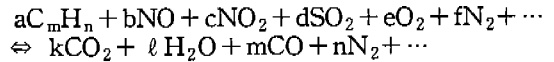
저온 플라즈마를 이용한 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 처리 과정은 다음과 같이 진행된다. PPCP 방전은 고에너지를 가진 활성 자유 전자를 생성하는데 이는 가스 분자를 분리시켜 다음과 같은 활성 자유기를 형성한다.



위와 같이 발생한 활성 자유기는 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub>와 산화 반응하여 산으로 되거나 NO<sub>x</sub>를 단원자 분자인 N<sub>2</sub>와 O<sub>2</sub>로 환원시킨다.

또한, 탄화수소 가스(C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>)를 첨가하는 경우에는 탄화수소 가스에서 생성된 라디칼이 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 등과 반응하여 다른 화합물을 형성하는데, 이것은 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 및 탄화수소 가스의 농도, 시료 가스 유량, 산소 농도, 입

력 전력 등의 변화에 따라 무수히 많은 반응식이 생기기 때문에 특정한 반응식을 결정하는 것은 곤란하다. 그러나 일반적인 식은 다음과 같다.



화학 결합은 분자의 안정성을 결정하는 중요한 요소이며, 탄소-탄소 결합 중에서 에틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)은 이중 결합으로 단일 결합인 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)보다 결합 길이는 짧고, 결합 엔탈피는 커서 플라즈마에 의한 전자 충격으로 분자간의 절단이 어려우나 이중 결합에 포함된 π-결합이 부가 반응을 활발하게 일으켜 분해 가능한 어떤 중간체를 만들게 되고<sup>4</sup>), 또한 이중 결합이 깨지면서 산화 반응을 일으켜 반응성이 큰 케톤(ketones), 알데히드(aldehydes), 카르복실산(carboxylic acids) 등으로 분해되어<sup>5</sup>) 오염 물질과 반응하므로써 유해 성분인 질소산화물이나 황산화물의 농도를 저감시키는 것으로 생각한다.

## 3. 실험 장치

본 실험 장치는 펄스 파워 시스템을 이용한 직류 고전압 승압 장치와 고전압 펄스 발생기, 반응기, 혼합 가스 공급 장치 등으로 구성되어 있으며, Photo. 1은 고전압 승압 장치, 펄스 발생기와 반응기가 조합된 실험 장치에 대한 사진이다.

### 3.1 전원 승압 장치

본 실험에서 사용한 전원은 AC 220V로 특별히 제작한 변압기를 사용하여 20kV까지 승압 할 수 있으며, 변압기의 입력측에 슬라이더를 사용하여 입력 전압을 0~220V까지 가변함으로써 출력측의 전압을 0~20kV까지 가변할 수 있도록 하였다.

### 3.2 고전압 펄스 발생기

전자식 펄스 발생기를 사용하여 펄스를 발생시키고 최대 전류 500A, 최대 전압 16kV, 최대 주파수 50kHz인 사이러트론을 사용하여 펄스를 증폭시킨 다음 반응기에 공급하였다.

### 3.3 반응기

본 실험 장치에 부착된 파이프-와이어형 반응기는 안지름 28mm의 스테인리스 강 파이프를 (+)극으로 하고, 그 중앙에 내식성이 좋은 지름 0.3mm 크롬-코발트 와이어를 설치하여 (-)극으로 하였다. 인가 펄스의 상승 시간이 80ns이며, 펄스의 길이가 15 $\mu$ s 정도이다. 반응기의 모양은 U자형이고 이 중 반응 구간의 길이는 100cm이다.

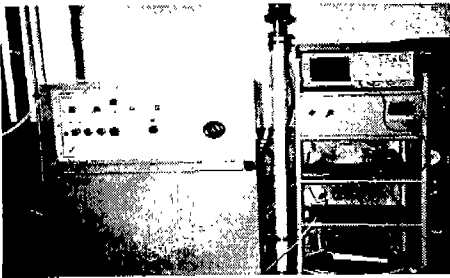


Photo.1 Power supply, pulse generator and reactor

### 3.4 시료 가스 공급 장치

본 실험에서는 실제 연소 가스를 사용하지 않고 유해 성분인 NO 및 SO<sub>2</sub>를 공기에 희석하여 인공적으로 유해 배기 가스를 조성한 후 반응기에 공급하였다. 실험에 사용된 가스는 유해 가스로서 제거 대상인 NO 및 SO<sub>2</sub>와 산소 농도 조절을 위한 N<sub>2</sub> 그리고 첨가 가스인 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>이다. 농도 조절을 쉽게 하기 위하여 각각의 가스 레귤레이터에 유량계를 설치하였고, 전체 유량계로 반응기 공급 유량을 측정하였으며 유량 조절을 위해 바이 패스 밸브를 설치하였다. 전체 유

량 제어를 위해 압축기로 공기를 공급하였으며, 동시에 가스와의 혼합도 원활하게 하였다.

### 3.5 측정 장비

반응기 전후의 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>2</sub> 농도를 측정하기 위해서 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 분석기(Sensonic-5100, SAUTER MESS-UND REGELTECHNIK, Austria)를 사용하였다. 이 분석기는 전기 화학식 센서를 사용하며, 측정 범위가 NO : 0~1000ppm, NO<sub>2</sub> : 0~100ppm, NO<sub>x</sub> : 0~1100ppm, SO<sub>2</sub> : 0~2000ppm, O<sub>2</sub> : 0~20.95%이고, 분해능은 1ppm이다.

탄화수소 가스를 측정하기 위한 HC 분석기(모델 CHC-100, CROWCON, British)는 비분산 적외선 분석 방법(NDIR)을 이용하여 측정하는 것으로, 측정 범위는 0~10,000ppm이고 분해능이 10ppm이다.

펄스 발생기로부터의 정확한 전압 파형을 관찰하기 위하여 1GHz의 밴드폭, 4GS/s의 채취율, 1ns/div~1000s/div의 타임베이스가 가능한 오실로스코프(TDS 784A, Tektronix, U.S.A)를 사용하였다. 전압을 측정하기 위해 반응기 직전에 40kV까지 측정이 가능한 1000/1 고전압 프로브(P6015A, Tektronix, U.S.A)를 사용하였다.

가스 농도 조절을 쉽게 하기 위하여 각각의 가스 용기에 최대 측정 범위가 1 l/min인 유량계를 설치하였고, 공기와 혼합후의 전체 유량 측정을 위해 최대 측정 범위가 25 l/min인 유량계를 사용하였다.

## 4. 실험 방법

실험에 사용된 시료 가스는 반응기 내를 흐르는 전체 유량 조절을 위한 공기 압축기에 의해 공급되는 공기를 기본 가스로 하고, 여기에 저감 대상의 유해 가스인 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>, 산소 농도 조절을 위한 N<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>와

SOx 저감 효율을 높이기 위한 첨가 가스인 탄화수소 가스를 공급하였다. 실험 변수로는 NOx와 SOx 농도, 반응기 내로 흐르는 가스 유량, 시료 가스 중의 산소 농도, 탄화수소 가스 첨가량, 공급 전력 등이 있다. 이들 중의 한가지씩만을 변화시키면서 NOx 및 SOx의 저감에 대한 실험을 하여 저감 효율을 높이는 최적 조건을 찾는데 주안점을 두고 실험을 하였다. 특히 탄화수소 가스 첨가가 저온 플라즈마 장치에서 NOx와 SOx 저감 효과에 미치는 영향에 초점을 맞추어 실험하였다.

데이터의 취득은 시료 가스내의 NOx와 SOx 농도, 산소 농도, 시료 가스 유량, 탄화수소 가스의 첨가량 및 시료 가스 온도가 일정하게 유지될 때 플라즈마 발생 장치에서의 입력 전압과 주파수를 조정하여 공급 전력을 맞춘 후 1분 뒤에 반응기를 통과한 후의 배출 가스 내의 NOx와 SOx를 3분간 측정하였다. 측정이 끝나면 가스 분석기를 2분간 신선한 공기로 퍼징(purging)하여 가스 분석기의 측정 정확도가 떨어지지 않도록 하였다. 한가지의 실험 변수에 대한 실험이 끝나면 다른 실험 변수를 변화시키면서 동일한 방법으로 실험을 하였다.

본 연구에서는 먼저 저온 플라즈마 장치에서 NOx 및 SOx 저감을 촉진시키기 위해 첨가한 탄화수소 가스 중 저감 효과가 큰 탄화수소 가스를 찾기 위하여 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>을 교대로 교환하면서 실험을 하였다.

## 5. 실험 결과 및 고찰

### 5.1 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 첨가량 변화에 따른 NOx 및 SOx의 저감 효과

Fig. 1은 유량 10 l/min, 산소 농도 10%, 전압 13.2kV, 주파수 200Hz, 시료 가스 온도 100℃로 일정하게 하고, NOx와 SOx 농도가 각각 200ppm일 때 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 첨

가량이 NOx 및 SOx 저감에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이때 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 첨가량은 50ppm 간격으로 400ppm까지 첨가하였다.

첨가된 탄화수소 가스 종류에 따른 저감률을 보면, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>의 경우 첨가량이 400ppm일 때 NOx 저감률 약 38.2%, SOx 저감률이 약 39.6%로 가장 높았으며, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 첨가량이 400ppm인 경우에는 NOx 저감률이 약 14.6%, SOx 저감률이 약 16%로 나타났다. 또한 CH<sub>4</sub> 첨가량이 400ppm인 경우에 NOx 저감률이 약 10.4%, SOx 저감률이 약 11.5%로 나타났다.

탄화수소 가스를 첨가하지 않은 경우와 NOx, SOx 농도의 2배인 400ppm을 첨가한 경우의 저감률의 차이는 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 첨가시 NOx 저감률이 약 29.8%, SOx 저감률은 약 30.3%로 상승하였으며, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>을 첨가한 경우에 대해서는 NOx 저감률의 증가는 약 4.3%, SOx 저감률의 증가는 약 8.9%로 나타났다. 또한 CH<sub>4</sub>를 첨가한 경우에는 NOx, SOx 저감률의 차이가 약 1% 정도로 거의 변화가 없었다. 결국 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>는 첨가량을 증가시킬수록 NOx와 SOx의 저감률이 거의 직선적으로 급격히 증가하였고 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>은 약간 증가하였으며 CH<sub>4</sub>를 첨가한 경우는 NOx 및 SOx 저감에 거의 변화가 없었다.

Fig. 2는 Fig. 1과 같은 조건에서 NOx와 SOx 농도가 각각 Fig. 1의 2배인 400ppm일 때 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 첨가량이 NOx 및 SOx 저감에 미치는 영향을 나타낸 것이다. CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 첨가량은 100ppm 간격으로 800ppm까지 첨가하였다.

각각의 저감률을 보면 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 첨가량이 800ppm인 경우에 NOx 저감률은 약 27.7%, SOx 저감률은 약 29%로 가장 높았으며, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 첨가량이 800ppm인 경우에는 NOx 저감률이 약 9%, SOx 저감률이 약 9.1%로 나타났다. 또한 CH<sub>4</sub> 첨가의 경우에 대해서는

CH<sub>4</sub>를 800ppm 첨가한 경우에 NO<sub>x</sub> 저감률이 약 4.7%, SO<sub>x</sub> 저감률이 약 6.5%를 나타냈다.

탄화수소 가스를 첨가하지 않은 경우와 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 농도의 2배인 800ppm을 첨가한 경우의 저감률의 증가는 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>를 첨가한 경우 NO<sub>x</sub> 저감률은 약 23.1%, SO<sub>x</sub> 저감률 약 22.2%로 나타났으며, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>을 첨가한 경우에 대해서는 NO<sub>x</sub>에서는 약 4.2%, SO<sub>x</sub>에서는 약 2.4%가 증가되었다. 또한 CH<sub>4</sub>를 첨가한 경우에는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 저감률의 차이가 약 1% 정도로 거의 변화가 없었다. Fig. 1의 경우와 마찬가지로 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>를 첨가하였을 경우는 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 저감률이 거의 비슷하게 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>에 첨가량이 증가함에 따라 증가하였으나, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>과 CH<sub>4</sub>를 첨가하였을 경우에는 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 저감률에 변화가 거의 없었다.

Fig. 3은 유량이 15 l/min, 입력 전압이 13.2kV, 입력 주파수가 200Hz, 산소 농도가 10%, 시료 가스 온도가 100°C, NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>의 초기 농도가 각각 200ppm일 때 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>를 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 농도의 2배인 400ppm까지 50ppm 간격으로 첨가하였을 경우 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 첨가량의 변화가 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub>의 저감에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

각각의 저감률을 보면, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 첨가량이 400ppm일 때 NO<sub>x</sub>는 약 33.8%, SO<sub>x</sub>는 약 35.9%의 저감률을 나타냈으며, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 첨가량이 400ppm인 경우 NO<sub>x</sub> 저감률이 약 7.9%, SO<sub>x</sub> 저감률이 약 12.4%를 나타냈다. 또한 CH<sub>4</sub>를 400ppm 첨가한 경우에 대해서는 NO<sub>x</sub>는 약 6.7%, SO<sub>x</sub>는 약 8.8%의 저감률을 나타냈다. 유량이 10 l/min인 Fig. 1과 비교하면 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 첨가량이 400ppm일 때 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 저감률이 각각 4.4%와 3.7% 정도 떨어지는데, 이는 유량이 많을수록 반응기 내를 통과하는 속도가 빨라 플라즈마에 의한 반응 시간이 짧기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 Fig. 1~3으로부터 유량이 작을수록, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 첨가량이 많을수록 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 저감률이 증가하였고, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 첨가량이 같을 때 SO<sub>x</sub> 저감률이 NO<sub>x</sub> 저감률보다 약간 높게 나타나고 있다.

Fig. 4와 5는 유량 10 l/min, 전압 13.2kV, 주파수 200Hz, 시료 가스 온도가 100°C로 일정하게 유지하고, NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 농도가 각각 200ppm일 때 산소 농도를 각각 5%와 15%로 하여 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 첨가량을 50ppm 간격으로 400ppm까지 첨가해 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 첨가량이 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 저감에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

Fig. 4는 산소 농도가 5%이고 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 첨가량이 400ppm일 때 NO<sub>x</sub>는 약 33.2%, SO<sub>x</sub>는 약 36.2%의 저감률을 보였고, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 첨가량이 400ppm일 때에는 약 13.2%와 15.4%, CH<sub>4</sub> 400ppm 첨가시는 약 8.2%와 8.7% 정도의 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>의 저감률을 보였다.

Fig. 5는 산소 농도가 15%이고 탄화수소 가스 첨가량이 400ppm일 때 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>의 저감률은 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 첨가의 경우 약 50.5%와 53.2%, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 첨가시는 약 23%와 23.7%, CH<sub>4</sub> 첨가시는 약 16%와 17% 정도의 저감률을 보였다.

여기서 산소 농도 조건이 5%, 10% 및 15% (Fig. 4, Fig. 1, Fig. 5)의 경우를 비교해 보면, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>를 첨가하지 않은 경우와 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 농도의 2배를 첨가한 경우에 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>의 저감률 차이는 각각 산소 농도가 5%일 경우 약 26.5%와 28.8%, 산소 농도가 10%일 때는 약 28.8%와 30.3%이고, 산소 농도가 15%일 경우에는 약 35%와 28.8%를 보여 시료 가스 중의 산소 농도가 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>의 저감률에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다. 이것은 음의 코로나에서는 코로나를 안정하게 유지하기 위하여 음전기 가스가 필요한데, 바로 산소가 음전기 가스이므로 산소 농도가 높을수록 안정된 코로나를 얻을 수

있으므로 저감률이 높아지는 것으로 판단된다.

결국 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 첨가량이 증가할수록, 산소 농도가 클수록 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 저감률이 증가하였다.

## 5.2 반응기 공급 전력 변화에 따른 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub>의 저감 효과

Fig. 6은 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 농도가 각각 200ppm, 유량 10 l/min, 산소 농도 10%일 때 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>를 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 농도와 같은 200ppm을 첨가하고, 저온 플라즈마 장치의 입력 전압과 주파수를 동시에 증가시켜 공급 전력을 56.2, 87.7, 125.5, 168, 219W로 변화시켜 가면서 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 첨가량과 공급 전력의 변화가 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 저감에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

각 첨가 가스의 종류에 따른 저감률은 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>를 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 농도와 같은 200ppm을 첨가하고, 전력을 219W 공급했을 때 NO<sub>x</sub> 저감률은 약 32.9%, SO<sub>x</sub> 저감률은 약 39.1%로 나타났으며, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>을 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 농도를 200ppm 첨가한 경우에는 NO<sub>x</sub> 저감률이 약 19.6%, SO<sub>x</sub> 저감률이 약 25.9%로 나타났다. 또한 CH<sub>4</sub>를 첨가한 경우에는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 저감률이 각각 약 15.6%, 약 18%이었다. 첨가한 탄화수소의 종류에 관계없이 공급 전력이 증가할수록 저감률이 거의 직선적으로 증가하였는데, 공급 전력을 56.2W에서 219W까지 증가한 경우 탄화수소 가스 중 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>를 첨가했을 때 NO<sub>x</sub> 저감률은 약 7.2%에서 약 32.9%로 SO<sub>x</sub> 저감률은 약 9.9%에서 약 39.1%로 저감률의 증가가 각각 약 25.7%, 약 29.2%로 가장 컸다. C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, CH<sub>4</sub>의 경우도 공급 전력이 증가할수록 저감률이 거의 직선적으로 증가하였지만 이것은 단지 공급전력의 증가에 의한 영향이라고 판단된다.

Fig. 7은 Fig. 6과 같은 조건에서 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>을 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 농도의 2배인

400ppm을 첨가하여 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 첨가와 공급 전력의 변화가 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 저감에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>를 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 농도의 2배인 400ppm을 첨가하고, 공급 전력을 56.2W에서 219W까지 증가시켰을 때 NO<sub>x</sub> 저감률은 약 13%에서 약 58%로, SO<sub>x</sub> 저감률은 약 15.2%에서 약 59.5%로 거의 직선적으로 증가하였으며, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>을 첨가한 경우에는 NO<sub>x</sub> 저감률이 약 8.3%에서 약 24.4%로, SO<sub>x</sub> 저감률은 약 9%에서 약 28.1%로 증가하였다. 또한 CH<sub>4</sub>를 첨가한 경우에는 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 저감률이 각각 약 4.4%에서 약 15.7%로, 약 6.2%에서 약 19.6%로 증가하였다. 동일 조건에서 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>를 첨가한 경우가 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>의 저감률 모두 가장 크게 나타났다. Fig. 6과 7을 비교해 보면 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 첨가량이 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 농도의 1배일 때보다는 2배일 때, 공급 전력이 증가할수록 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub>의 저감률이 모두 증가하였다.

이상의 실험 결과에서 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>의 첨가가 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 저감률에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 판명되었다.

그러므로 저온 플라즈마 장치에서 연소 유해 배출 가스인 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 저감률을 증가시키기 위한 첨가제로 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>를 첨가시키는 것은 매우 효과적이라고 생각된다.

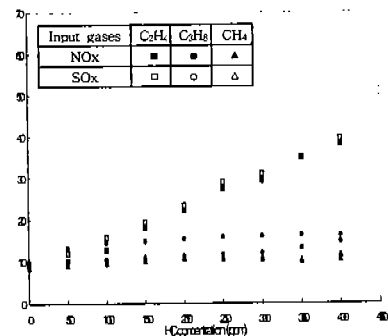


Fig. 1 Effect of hydrocarbon concentration on reduction rate of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub>

(NO<sub>x</sub>=200ppm, SO<sub>x</sub>=200ppm, Input voltage=13.2kV, Input frequency=200Hz, Q=10 l/min, O<sub>2</sub>=10%)

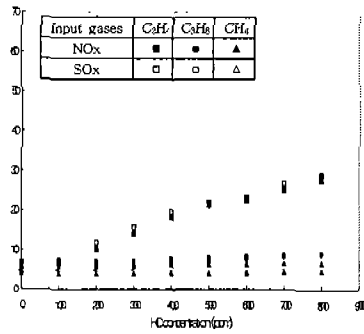


Fig. 2 Effect of hydrocarbon concentration on reduction rate of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> (NO<sub>x</sub>=400ppm, SO<sub>x</sub>=400ppm, Input voltage=13.2kV, Input frequency=200Hz, Q=10 l/min, O<sub>2</sub>=10%)

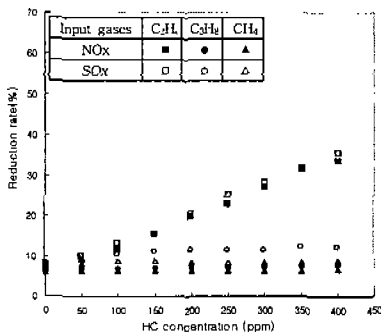


Fig. 3 Effect of hydrocarbon concentration on reduction rate of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> (NO<sub>x</sub>=200ppm, SO<sub>x</sub>=200ppm, Input voltage=13.2kV, Input frequency=200Hz, Q=15 l/min, O<sub>2</sub>=10%)

## 6. 결 론

저온 플라즈마 장치를 이용하여 연소 배출 가스 속에 함유된 유해 물질인 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub>를 저감할 때 탄화수소 가스인 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 첨가가 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 저감에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.

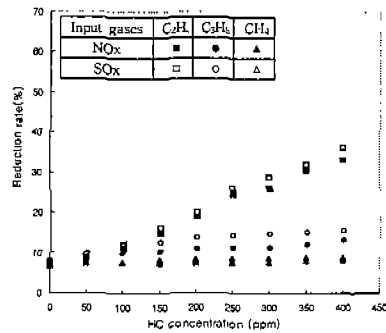


Fig. 4 Effect of hydrocarbon concentration on reduction rate of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> (NO<sub>x</sub>=200ppm, SO<sub>x</sub>=200ppm, Input voltage=13.2kV, Input frequency=200Hz, Q=10 l/min, O<sub>2</sub>=5%)

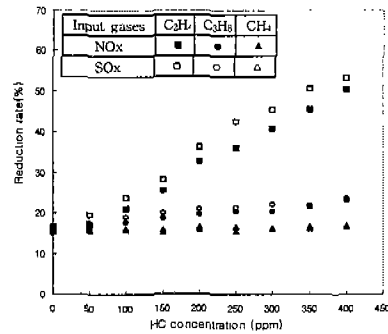


Fig. 5 Effect of hydrocarbon concentration on reduction rate of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> (NO<sub>x</sub>=200ppm, SO<sub>x</sub>=200ppm, Input voltage=13.2kV, Input frequency=200Hz, Q=10 l/min, O<sub>2</sub>=15%)

본 실험에서 이루어진 실험 변수의 실험 범위는 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 농도 200ppm과 400ppm, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 첨가량 0~800ppm, 유량 10, 15 l/min, 산소 농도 5, 10, 15%, 공급전력 56.2~219W이다. 이와 같은 실험 범위에서 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시료 가스 속에 유해 성분인 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>가 같은 농도로 있는 경우에는 동일 운

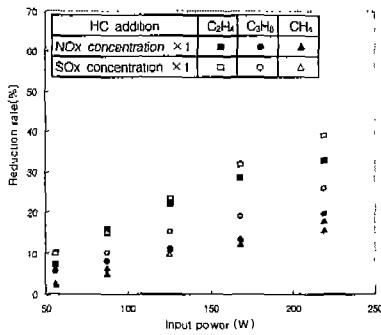


Fig. 6 Effect of input power and hydrocarbon addition on reduction rate of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> (NO<sub>x</sub>=200ppm, SO<sub>x</sub>=200ppm, Q=10 l/min, O<sub>2</sub>=10%)

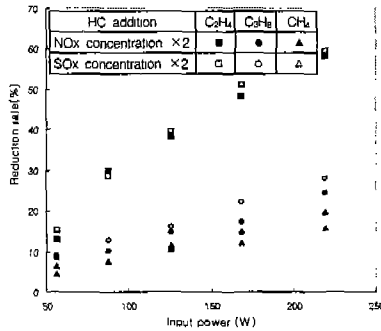


Fig. 7 Effect of input power and hydrocarbon addition on reduction rate of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> (NO<sub>x</sub>=200ppm, SO<sub>x</sub>=200ppm, Q=10 l/min, O<sub>2</sub>=10%)

전 조건에서 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 및 CH<sub>4</sub>의 순서로 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 저감에 미치는 영향이 크게 나타났지만, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>과 CH<sub>4</sub>는 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>에 비해 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 동시 저감에 미치는 영향이 아주 미미하였다. 따라서 저온 플라즈마 장치에서 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 중 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>의 첨가가 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 저감률에 가장 크게 영향을 미쳤다.

(2) NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 초기 농도가 낮을수록, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 첨가량이 많을수록, 시료 가스의 유량이 적을수록, 산소 농도가 높을수록, 공급 전력이 높을수록 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>의 저감률이 거의

비슷하게 증가하였으며, 이것은 반응기 내에서 이온화가 잘 이루어지고, NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub>와 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>의 라디칼 반응이 활성화되기 때문에 저감률이 높아지는 것으로 생각된다.

(3) 본 실험이 이루어진 범위 내에서 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 초기 농도 각각 200ppm, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 첨가량 400ppm, 유량 10 l/min, 산소 농도 10%, 공급 전력 219W일 때 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 저감률이 각각 약 58%, 약 59.5%로 가장 높게 나타났다.

### 참고 문헌

1. 허문희, "저온 플라즈마 장치에서 NH<sub>3</sub> 첨가가 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 저감 효과에 미치는 실험적 연구", 국민대학교 대학원, 공학박사, 1997.
2. G. M. Dinelli, L. Civitano, and M. Rea, "Industrial Experiments on pulse Corona Simultaneous Removal of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> from flue gas" IEEE Transactions on industry Applications Vol. 26, NO. 3, pp. 535-541, 1990.
3. A. Mizuno, A. Chakrabarti, and K. Okazaki, "Application of Corona technology in the reduction of Greenhouse Gases and Other Gaseous Pollutants", Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control, NATO ASI Series G, Ecological Sciences, Vol. 34, Part B, pp. 165-185, 1993.
4. 김창배 외 1인 공역, "유기화학", 수서원, pp. 224-261, 1996.
5. R. J. Fessenden, J.S. Fessenden, "Organic Chemistry", Willard Grant Press Boston, Massachusetts, pp. 412-417, 1995.