

플라즈마 배연탈질에서 NO_x 저감에 관한 반응제 특성 연구

백현창* · 신대현 · 우제경 · 김상국 · 김동찬 · 박영성*

한국에너지기술연구소 에너지환경연구부
*대전대학교 환경공학과

(1999년 3월 21일 접수, 2000년 10월 27일 채택)

A Study on Reaction Characteristics for NO_x Reduction in Flue Gas Denitrification using Plasma

Hyun Chang Baek* · Dae Hyun Shin · Je Kyung Woo · Sang Guk Kim ·
Dong Chan Kim · Yeong Seong Park*

Energy and Environment Research Department, Korea Institute of Energy Research
**Department of Environmental Engineering, Taejon University*

ABSTRACT

This study was carried out to investigate the reaction characteristics of NO_x with reagents to grope the power consumption rate reduction and NO_x removal rate improvement for the non-thermal plasma denitrification process. The experiments were performed using the real flue gas and wire-plate type plasma reactor, and the flow rate of real flue gas is 20 Nm³/hr. Paraffinic and olefinic hydrocarbons and ammonia were used as reagents.

Olefinic hydrocarbon oxidizes NO more actively than paraffinic hydrocarbon under the non-thermal plasma conditions, resulting in the generation of large amount of NO₂ and a very small amount of CO. When the initial NO_x concentration increases, oxidation rate of NO decreases and the consumption rate of olefinic hydrocarbon increases significantly. On the other hand, NH₃ did not promote reduction reaction with NO under non-thermal plasma conditions, however, there was a tendency that the NH₃ was effective to remove the NO₂ oxidized by olefinic hydrocarbon.

Key Words : Denitrification, Non-thermal Plasma, Hydrocarbon, Ammonia, Real Flue Gas

요약문

본 연구는 저온 플라즈마 탈질 기술의 전력소모량 절감과 처리율 향상을 모색하고자 저온 플라즈마 조건에서 NOx와 반응제의 반응 특성을 고찰하였다. 실험은 20 Nm³/hr의 실제 배가스와 wire-plate type 플라즈마 반응기를 이용하여 진행되었으며, 반응제로는 파라핀계와 올레핀계 탄화수소 및 NH₃를 사용하였다.

저온 플라즈마 조건에서 올레핀계 탄화수소는 파라핀계 탄화수소에 비하여 NO의 산화에 탁월한 효과를 보여 다량의 NO₂를 생성할 뿐만 아니라 미량의 CO도 생성하였다. 또한 NOx의 초기농도가 높아지면 NO의 산화율은 감소할 뿐만 아니라 올레핀계 탄화수소의 소모량도 두드러진 증가를 보였다. 한편 NH₃은 저온 플라즈마 조건에서 NO와의 환원반응이 촉진되지 않았지만 올레핀계 탄화수소에 의하여 산화된 NO₂의 제거에는 효과적인 경향을 보였다.

주제어 : 탈질, 저온 플라즈마, 탄화수소, 암모니아, 실제 배가스

1. 서론

저온 플라즈마를 이용한 유해 배가스 처리기술은 1980년대부터 미국, 이태리, 일본 등을 중심으로 본격적으로 연구되기 시작한 기술로, 기존의 유해 배가스 처리기술에 비하여 상대적으로 짧은 연구개발 기간을 갖고 있지만 배가스 중의 NOx, SOx, VOC, 그리고 H₂S 등의 다양한 가스상 오염물질의 제거에 적용할 수 있을 뿐만 아니라 탈황과 탈질을 동시에 이룰 수 있고, 초기 투자비가 저렴하며, 배출원 규모에 상관없이 적용할 수 있는 기술로 평가되고 있다.¹⁾ 따라서 국내에서도 기존 배가스 처리기술들의 기술적, 경제적 및 환경적 문제점들에 대한 보완의 필요성이 대두되고 있을 뿐만 아니라 대기배출허용 기준을 연차적으로 강화하고 기존의 농도규제방식을 총량규제방식으로 전환할 추세이기 때문에 1990년대부터 활발한 연구가 진행되고 있다.

그러나 이 기술의 여러 장점과 활발한 연구에도 불구하고 저온 플라즈마 유해 배가스 처리기술은 높은 전력 소모로 인하여 기존의 배가스 처리기술에 비해 상대적으로 높은 운전비가 소요되고 있어 이 기술의 실용화를 앞당기기 위해서는 전력소모량을 절감할 수 있는 기술의 개발이 요구되고 있다. 따라서 전력소모량을 절감하고 처리율을 높이기 위한 다양한 기술들이 전세계적으로 활발히 연구되고 있으며,²⁻⁵⁾ 그 중 하나가 반응제 개발 연구이다.^{6,7)}

플라즈마 조건에서 NOx는 연소 배가스의 O₂, H₂O, 그리고 N₂ 등의 성분들로부터 생성된 O, OH, HO₂, N 및 O₃ 등의 다양한 원자 및 라디칼들과의 화학반응에 의하여 제거되는 원리이지만 연소 배가스로부터 생성된 라디칼들과 NOx의 화학반응만으로 높은 처리율을 얻기 위해서는 많은 전력이 소모되기 때문에 인위적으로 플라즈마 반응기에 탄화수소와 NH₃ 등의 반응제를 첨가하여 NOx의 화학반응을 촉진시켜 전력소모량을 절감하고 처리율을 높이려는 노력이 진행되고 있다. 특히, 이러한 반응제 개발 연구는 연구 수행이 용이하고 신속하며, 저렴한 연구비가 소요될 것으로 판단되기 때문에 단기적으로는 전력소모량 절감과 처리율 향상의 효과를 기대할 수 있을 것으로 보인다.

따라서 본 연구에서는 반응제 개발 연구를 통하여 경제적이고 효율적인 저온 플라즈마 탈질 기술의 적용 가능성을 제시하고자 실제 배가스를 이용해서 저온 플라즈마 조건에서 반응제(NH₃, 탄화수소)와 NOx의 반응 특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 실험장치는 20 Nm³/hr의 연소배출가스를 받

생시킴을 위한 연소설비와 플라즈마 전력공급장치, 플라즈마 반응기 및 가스분석 시스템으로 구성되었다. 전력공급장치의 최대인가전압과 최대인가전력량은 각각 25 kV와 5 kW이나 실제 인가된 최대전력량은 240 W이고, pulse generator는 Thyatron switch방식이다. 플라즈마 반응기는 wire-plate type이고 가스농도는 Green Line MK2 Gas Analyzer로 측정하였다. Table 1과 Fig. 1은 각각 본 실험장치의 사양과 공정도를 나타낸 것이다.

2.2. 실험방법

실험용 연소로에서 경유를 연소시켜 발생시킨 20 Nm³/hr의 연소배출가스량은 플라즈마 반응기 앞에서 연소배출가스의 O₂와 CO 성분의 측정을 통해서 공기비(m)을 산출한 후 액체 연료에 있어서 사용되고 있는 Rosin 근사식을 적용하여 측정하였으며, 연소배출가스의 H₂O농도는 경유의 원소분석에 의해서 산출된 H의 함량분율을 근거로 계산된 H₂O의 이론적인 발생량과 산출된 연소배출가스의 부피분율로 계산하였고, 약 11.4%이다. Fig. 1에 보인 바와 같이 실험용 연소로에서 발생된 연소배출가스는 수냉식 열교환기를 통과하면서 150℃ 내·외로 온도가 조절된 후 플라즈마 반응기 앞에서 주입된 반응

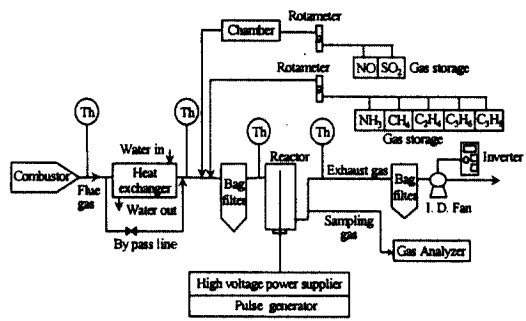


Fig. 1. Schematic diagram of BSU-20 experimental apparatus.

제와 함께 플라즈마 반응기를 통과하여 처리된 다음 I. D. fan에 의하여 밖으로 배출되도록 하였다. 또한 inverter에 의해서 I. D. fan의 회전력을 조절하여 안정한 연소상태가 유지될 수 있도록 연소로내의 압력을 조절하였다.

연소로에서 발생하는 연소배출가스는 NOx의 농도가 낮기 때문에 NO가스를 별도로 공급하여 NO의 초기농도를 조절하였다. 또한 NOx의 제거반응에 필요한 반응제로는 NH₃, CH₄, C₂H₄, C₃H₆, 그리고 C₃H₈ 등을 사용하였으며, 연소배출가스 중에 함유된 분진과 플라즈마 반응기에서 생성된 고체생성물을 제거하기 위하여 플라즈마 반응기 전·후에 각각 여과 집진기를 설치하였다.

Table 1. Specification of BSU-20 experimental apparatus

Experimental apparatus		Specification	
Flue gas generator	Burner	20,000 kcal/hr	
	Combustor	∅350 × 950 L	
	Heat exchanger		
Plasma generator and reactor	Power supplier	25 kV, 5 kW	
	Pulse generator	Type	Thyatron switch
		Pulse rising time	2 nS/kV
		Pulse voltage	25 kV
		Frequency	10~1,000 Hz
	Plasma reactor	Type	Wire-plate
		Size	298W × 80T × 1200L
Material		SUS304, Teflon	
	Distance between plate and wire	25 mm	
Flue gas analyzer		Green Line MK2 Gas Analyzer	
Incidental equipment	I. D. fan	0.5 HP	
	Fabric filters	Filter area 0.64 m ²	

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 탈질에 대한 탄화수소의 영향

Fig. 2는 저온 플라즈마 조건에서 NO_x처리에 대한 C₂H₄의 영향을 나타낸 것이다. 연소 배출가스의 조성은 O₂ 7.4%, CO₂ 10.0%이고, 온도는 152°C이다. 또한 NO_x, NO 및 NO₂의 초기농도는 각각 358, 354 및 4 ppm이며, 7.3 Wh/m³의 전력이 공급되었다.

그림에서 보듯이, C₂H₄ 주입농도가 증가할수록 NO는 급격한 농도 감소를 보이고 있는 반면에 NO₂는 급격한 농도 증가를 나타내고 있다. 따라서 저온 플라즈마 조건에서 C₂H₄는 NO의 산화반응을 촉진시켜 다량의 NO₂를 생성함을 알 수 있다. 현재까지 C₂H₄에 의한 NO의 구체적인 산화반응 과정은 규명되지 않았지만 저온 플라즈마 조건에서 C₂H₄에 의하여 NO의 산화반응이 촉진되는 것은 다량의 OH radical의 생성 때문인 것으로 알려져 있다.⁷⁾

Fig. 3은 저온 플라즈마 조건에서 NO의 초기농도에 따른 NO의 산화율과 C₂H₄ 주입량의 변화를 측정 한 결과이다. 연소배출가스의 온도는 150°C이고, 조성은 O₂ 7.2%, CO₂ 10.2%이며, NO의 초기농도는 각각 178, 333 및 613 ppm이고, 전력은 7.6 Wh/m³가 공급되었다.

이 측정결과에서 보듯이, C₂H₄의 주입농도가 증가할수록 NO의 산화율은 증가하고 있으며, NO의 초기농도가 증가할수록 NO의 산화율은 감소하고 C₂H₄의 주입농도는 0.1%, 0.3%, 및 0.9%로 급격히 증가하고 있다. 또한 초기 NO 농도의 증가에 따라서 제거되는 NO의 절대적인 양의 차이는 NO의 산화율의 차이에 비하여 작음을 보였다. 즉 NO의 초기농도가 증가할수록 NO의 산화반응은 둔화됨을 짐작할 수 있다.

Fig. 4는 4가지 탄화수소별로 농도 변화에 따른 NO의 농도를 측정하여 산화반응 효과를 비교한 것이다. 연소배출가스의 온도는 155°C이고 조성은 O₂ 7.2%, CO₂ 10.2%이며, NO의 초기농도는 약 330 ppm이다. 공급된 전력은 7.2 Wh/m³이다.

이 그림에서 보듯이, 메탄과 프로판의 NO산화율이 20% 내외로 낮은 반면, 에틸렌과 프로필렌의 경

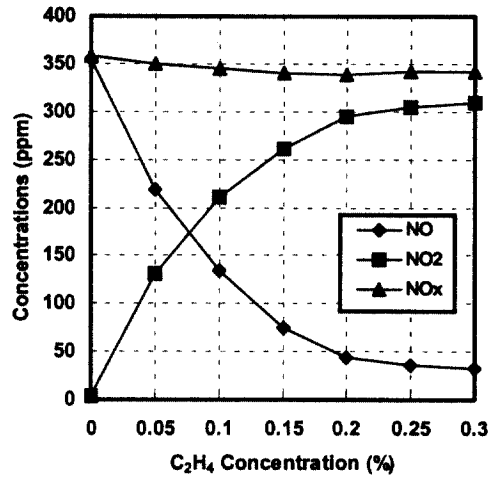


Fig. 2. Effect of the concentration of C₂H₄ on NO oxidation at applied power 7.3 Wh/m³.

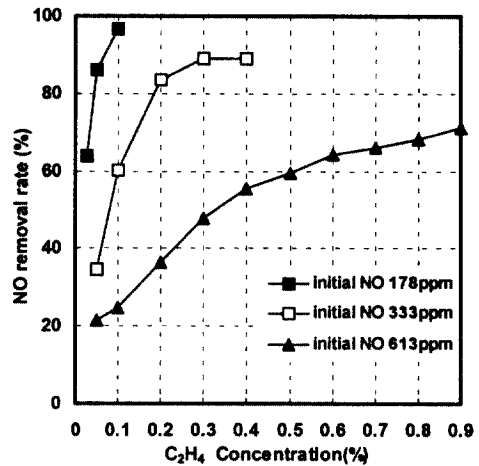


Fig. 3. Effect of C₂H₄ concentration on NO removal rate for various initial NO concentration at applied power 7.6 Wh/m³.

우는 주입농도 0.3%에서 90% 정도의 높은 산화율을 볼 수 있다. 탄화수소에 따라서 NO산화성능에 큰 차이를 보이는 것은 파라핀계 포화탄화수소와 올레핀계 불포화탄화수소의 반응성에 기인된 것으로 보인다. 즉, σ(시그마)결합만 가지고 있는 포화탄화수소에 비해 σ결합과 π(파이)결합을 가지고 있는 불포화탄화수소의 경우에는 π전자가 탄소주위에 넓게 퍼져 있어 외부의 영향을 쉽게 받아 다른 원자나 분자의 접근과 공격이 수월해 커다란 반응성을

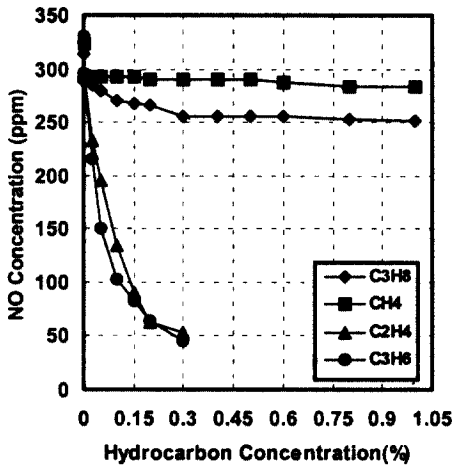


Fig. 4. Effect of hydrocarbons on oxidation of NO at applied power 7.2 Wh/m³.

갖게 되므로써⁸⁾ 다량의 OH radical이 생성되면서 NO의 산화반응이 촉진된 것으로 보인다. 파라핀계 탄화수소에 의하여 NO의 산화반응을 촉진시키기 위해서는 Mizuno 등⁶⁾의 연구결과에서와 같이 파라핀계 탄화수소의 반응성을 촉진할만한 충분한 전력의 공급이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 올레핀계 탄화수소인 에틸렌과 프로필렌의 농도 증가에 따른 NO의 산화와 CO의 발생량을 측정하여 비교한 것이다. 연소배출가스의 온도는 160℃이고, 조성은 O₂ 6.3%, CO₂ 10.9%이며 NO의 초기농도는 357 ppm이다. 그리고 6.4 Wh/m³의 전력이 공급되었다.

이 그림에서 보듯이, 에틸렌, 프로필렌의 주입농도가 증가할수록 NO의 농도는 감소하고 CO의 발생량은 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 프로필렌이 에틸렌에 비하여 0.2% 이하의 주입농도에서는 NO제거가 월등할 뿐만 아니라 CO발생도 적게 나타나고 있어 탄화수소를 이용한 NO의 산화반응에는 프로필렌을 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

현재까지 저온 플라즈마 조건에서 탄화수소에 의한 NO의 산화반응에 대한 구체적인 반응 메커니즘은 알려져 있지 않으나 본 연구에서 NO는 올레핀계 탄화수소에 의해서 NO₂로 산화되고 부가적으로 CO도 발생함을 알 수 있었다. 저온 플라즈마 기술을 이용한 NO_x의 제거반응을 보면, NO는 NO₂로 산화되고 산화된 NO₂는 다시 HNO₃로 제거되거나 NH₃와의 반응으로 NH₄NO₃ 또는 N₂ 형태로 제거되는 것

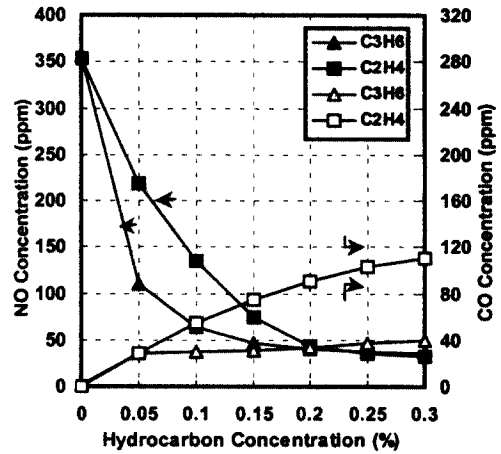


Fig. 5. Comparison of effect of C₂H₄ and C₃H₆ on NO oxidation and CO formation at applied power 6.4 Wh/m³.

으로 알려져 있다.⁹⁻¹¹⁾ 이러한 NO_x의 제거과정에서 올레핀계 탄화수소의 주입으로 NO의 산화 및 분해 반응 과정을 촉진시켜 NO_x의 처리율이 향상되고 전력소모량이 절감될 수 있음이 Mizuno 등⁶⁾와 Vogtlin 등⁷⁾의 연구에서 입증되었고, 본 연구에서도 유사한 결과를 보였다.

하지만 주입되는 올레핀계 탄화수소의 농도가 고농도일 뿐만 아니라 고농도의 NO_x를 처리할수록 올레핀계 탄화수소의 주입량은 급격히 증가함을 보이고 있어 다량의 미반응 올레핀계 탄화수소의 배출 가능성이 우려되고 있다. 따라서 실제 공정에 올레핀계 탄화수소 주입 기술을 적용하기 위해서는 미반응 올레핀계 탄화수소의 배출가능성에 대한 검증을 통하여 최적 주입량의 도출을 위한 연구가 향후 수행되어야 하겠다.

3.2. 탈질에 대한 암모니아의 영향

Fig. 6은 저온 플라즈마 조건에서 NO_x의 제거에 미치는 NH₃ 주입량의 영향을 나타낸 것이다. 연소배출가스의 조성은 O₂ 7.3%, CO₂ 10.1%이고, 온도는 158℃이다. 또한 NO와 NO₂의 초기농도는 각각 333, 0 ppm이며, 7.4 Wh/m³의 전력이 공급되었다.

이 그림에서 보듯이, NH₃를 주입하지 않았을 경우에 NO의 농도는 미미한 감소를 보이고 있고 NO₂

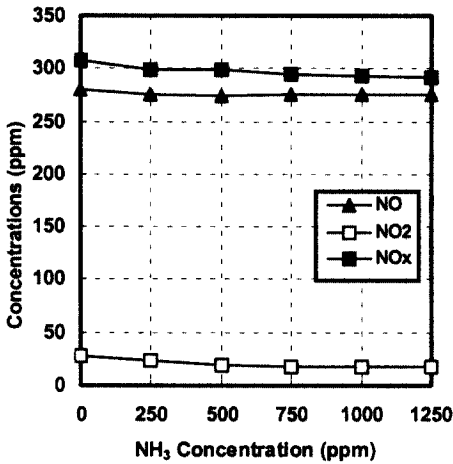


Fig. 6. Effect of NH₃ injection on NO removal at applied power 7.4 Wh/m³.

의 농도는 증가하고 있으며, NH₃의 주입농도를 증가할수록 NO의 농도감소는 나타나지 않는 반면 NO₂의 농도는 미미한 감소 경향을 보이고 있다. 즉 저온 플라즈마 조건에서 NO의 제거와 함께 NO₂의 생성을 확인할 수 있었고, 또한 NH₃의 주입에 의한 NO₂의 제거도 가능함을 알 수 있었다. 그러나 NH₃의 주입에 의한 NO의 제거가 잘 일어나지 않아 NO_x의 처리율은 매우 낮게 나타났다. Ohkubo 등¹²⁾의 연구에서 코로나 방전을 이용하여 NO_x를 처리할 경우에 NH₃주입은 NO_x 처리율 향상에 기여하는 것으로 나타났고, Zhou 등¹¹⁾과 Tokunaga 등¹³⁾의 연구에서도 NO는 저온 플라즈마 조건에서 NH₃로부터 생성된 NH₂ radical과의 환원반응에 의하여 효과적으로 제거되는 것으로 알려져 있으나 본 실험에서는 NH₃의 N-H bond를 해리하기 위한 단위 가스량당 인가된 전력량이 적음으로 인하여 NO의 환원반응에 참여하는 NH₂ radical이 충분하게 생성되지 못했을 뿐만 아니라 배가스의 체류시간도 짧았기 때문에 낮은 NO_x처리율을 보인 것으로 판단된다.

3.3. NO_x처리에 대한 C₂H₄와 NH₃의 동시 주입의 영향

저온 플라즈마 조건에서 올레핀계 탄화수소를 주입하므로써 NO가 NO₂로 대부분 산화됨을 앞의 측정결과에서 확인하였다. 그러나 올레핀계 탄화수소

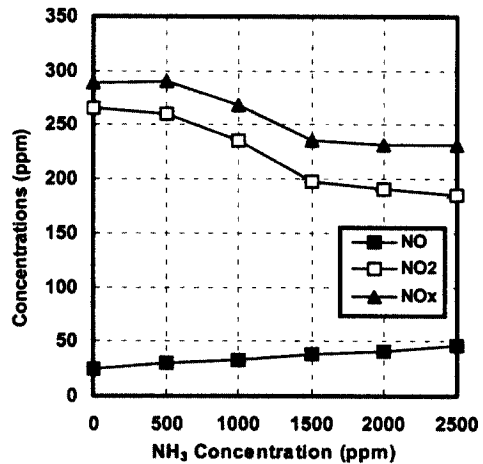


Fig. 7. Effect of NH₃ injection with C₂H₄ 0.3% injection on removal of NO₂ at applied power 7.0 Wh/m³.

를 주입하는 기술을 적용한 저온 플라즈마 탈질 기술이 다른 배연가스 처리기술과의 경쟁력을 높이고, 상용화를 실현하기 위해서는 생성된 NO₂를 제거할 수 있는 방안이 강구되어야 하겠고, 따라서 본 연구에서는 그 방안의 일환으로 C₂H₄와 NH₃의 동시 주입을 모색하였다.

Fig. 7은 플라즈마 반응기에 C₂H₄와 NH₃를 동시에 주입하였을 때 NO, NO₂, 그리고 NO_x의 농도변화를 나타낸 것이다. 연소배출가스의 온도는 155°C이고, 조성은 O₂ 7.0%, CO₂ 10.4%, SO₂ 569 ppm이며, NO, NO₂, 그리고 NO_x의 초기농도는 각각 347, 0, 347 ppm이다. C₂H₄의 주입농도는 0.3%로 하였고 전력공급량은 7.0 Wh/m³이다.

이 측정결과에서 보듯이, 플라즈마 조건에서 C₂H₄ 주입으로 대부분의 NO가 NO₂로 산화됨으로써 초기치를 기준으로 NO의 농도는 급격히 감소한 반면에 NO₂의 농도는 급격히 증가하였고, NH₃의 주입농도가 증가할수록 NO의 미미한 농도 증가에 비해 NO₂ 농도는 다소 커다란 감소 경향을 보이고 있는데, 이는 NH₃와의 열화학 반응과 NH₂ radical과의 환원반응 때문으로 볼 수 있다. 따라서 플라즈마 반응기에 C₂H₄와 NH₃의 동시 주입으로 NO₂의 제거를 촉진시킴으로써 NO_x처리율의 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 7.2 Wh/m³의 전력이 공급된 플라즈마 반응기에 C₂H₄를 0.3% 주입하여 NO를 NO₂로 산

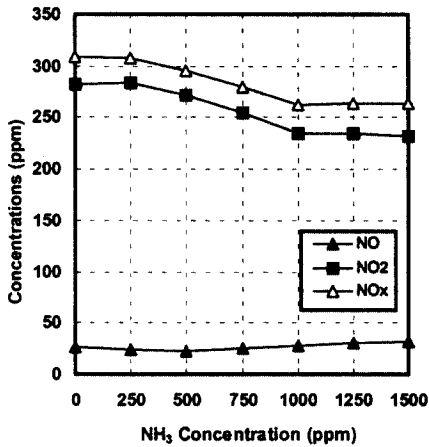


Fig. 8. Effect of NH₃ injection on removal of NO₂ in without-plasma conditions.

화시킨 다음 플라즈마 반응기를 빠져나온 연소배출 가스에 NH₃의 주입농도를 변화시키면서 비플라즈마 조건에서의 NO, NO₂, 그리고 NOx의 농도변화를 측정된 결과이다. NH₃의 주입지점은 플라즈마 반응기 후단의 여과 집진기앞이 되도록 함으로써 bag filter를 설치하지 않은 여과 집진기가 반응 chamber의 기능을 갖도록 하였다. 플라즈마 반응기를 빠져나온 연소배출가스의 온도는 155℃이고, 조성은 O₂ 7.0%, CO₂ 10.4%이며, NO, NO₂, 그리고 NOx의 초기농도는 각각 25, 285, 310 ppm이다.

그림에서 보듯이, NH₃의 주입농도가 증가할수록 NO₂의 농도는 Fig. 7의 경우와 같이 감소하는 경향을 나타내고 있어 비플라즈마 조건에서도 NH₃주입에 의해서 NO₂의 제거가 가능함을 확인할 수 있었다.

그러나 Fig. 7과 8의 경우 모두에서 낮은 NOx제거율을 보였기 때문에 NOx제거율을 높이기 위한 방안이 모색되어야 하는데, Fig. 7의 경우에는 전력공급량을 높여줌으로써, Fig. 8의 경우에는 플라즈마 반응기 다음에 wet scrubbing 기술을 적용하여 NO₂의 제거를 촉진시킴으로써 NOx제거율을 높일 수 있을 것으로 판단되며, 향후에 두 경우에 대한 지속적인 연구를 통한 경제성 평가에 의하여 최적 공정의 구성이 이루어져야 하겠다.

4. 결 론

본 연구는 경제적이고 효율적인 저온 플라즈마 탈질 기술의 적용 가능성을 제시하고자 20 Nm³/hr의 연소배출가스를 이용해서 저온 플라즈마 조건에서 NOx와 반응제의 반응 특성 연구를 수행하였으며, 실험결과에서 밝혀진 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 플라즈마 반응기에 올레핀계 탄화수소를 주입할 경우 NO는 NO₂로 산화되고, 일산화탄소가 (CO) 생성되는데, 그 구체적인 반응 메카니즘은 아직 규명되지 않았다. 또한 NO의 산화반응에는 CH₄, C₃H₈ 등의 파라핀계 탄화수소보다 C₂H₄, C₃H₆ 등의 올레핀계 탄화수소가 월등한 효과를 보였다. 하지만 전력 공급량을 높일 경우 파라핀계 탄화수소로도 NO의 산화반응을 촉진시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 플라즈마 조건에서 NOx의 초기농도가 증가할수록 NO의 산화율이 감소할 뿐만 아니라 C₂H₄의 주입량도 급격한 증가를 보이고 있고, 제거되는 NO의 절대적인 양의 차이도 NO의 산화율의 차이에 비하여 작게 나타나고 있어 NO의 산화반응이 둔화됨을 알 수 있다.
- 3) 플라즈마 조건에서 NH₃의 주입으로 NO의 환원반응은 본 실험장치의 제약으로 인하여 충분한 전력이 공급되지 못한 관계로 촉진되지 않았으나 올레핀계 탄화수소에 의하여 생성된 NO₂의 제거에 효과적인 경향을 보였다. 또한 이러한 NO₂는 비플라즈마 조건에서도 NH₃에 의하여 제거가 가능함을 확인할 수 있었다. 하지만 NH₃에 의한 NO환원반응의 촉진 효과가 여러 연구 결과에서 입증되었기 때문에 전력 공급량을 높일 경우 NH₃에 의한 NO제거는 상승될 것으로 판단된다.
- 4) 올레핀계 탄화수소 주입에 의한 탈질 공정은 산화반응에 의해 생성된 NO₂를 NH₃의 주입에 의해 NH₄NO₃의 형태로 회수하거나 wet scrubbing에 의해서 HNO₃으로 회수할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Association of Mechanical Industries, Japan Research Institute of Energy Engineering, "Report on novel dry DeNOx/DeSOx technology for cleaning combustion gases from utility thermal power plant boilers," *NATO ASI Series*, **G34(B)**, 131~137(1993).
2. 송영훈, 최연석, 김한석 외, "저온 플라즈마 탈황탈질 공정의 운전전력 절감을 위한 실험연구," *한국대기보전학회지*, **12(4)**, 487~494(1996).
3. 한국에너지기술연구소, 연소가스 중의 대기오염물질 저감기술 개발, pp. 476~534(1996).
4. Masuda, S., "Destruction of gaseous pollutants and air toxics by surface discharge induced plasma chemical process (SPCP) and pulse corona induced plasma chemical process (PPCP)," *NATO ASI Series*, **G34(B)**, 199~209(1993).
5. Chang, J. S., Lawless, P., and Yamamoto, T., "Corona discharge process," *IEEE Transaction on Industry Applications*, **19(6)**, 1152~1166(1991).
6. Mizuno, A., Charkrabarti, A., and Okazaki, K., "Application of corona technology in the reduction of greenhouse gases and other gaseous pollutants," *NATO ASI Series*, **G34(B)**, 165~185(1993).
7. Vogtlin G. E. and Penetrante, B. M., "Pulsed corona discharge for removal of NOx from flue gas," *NATO ASI Series*, **G34(B)**, 187~198(1993).
8. 권동숙, 노봉오, 박영배, 서기림, 유의경, 이종건, 조성동, 차진순, 함희석, 허태경 공역, 유기화학, 4판, 자유아카데미, 서울, pp. 43~80 (1992).
9. Amirov, R., Asinovsky, E., and Samoilov, I., "Removal of SO₂ and NOx from flue gases by gas discharge," *Perspectives in Energy*, **1**, 435~448(1991).
10. Dinelli, G., Civitano, L., and Rea, M., "Industrial experiments on pulse corona simultaneous removal of NOx and SO₂ from flue gas," *IEEE Transactions on Industry Applications*, **26**, 535~541(1990).
11. Zhou, Q., Yao, S. C., Russell, A., and Boyle, J., "Flue Gas NOx Reduction Using Ammonia Radical Injection," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **42(9)**, 1193~1197(1992).
12. Ohkubo, T., Kanazawa, S., Nomoto, Y., Chang, J. S., and Adachi, T., "NOx Removal by a Pipe with Nozzle-Plate Electrode Corona Discharge System," *IEEE Transaction on Industry Applications*, **30(4)**, 856~861 (1994).
13. Tokunaga, O., Namba, H., and Hirota K., "Experiments on Chemical Reactions in Electron-Beam-Induced NOx/SO₂ removal," *NATO ASI Series*, **G34(B)**, 55~69(1993).