

# 환원제로 우레아를 사용하는 SNCR 공정에서 첨가제 적용에 따른 탈질효율 향상 연구

유경선\*, 박성우  
광운대학교 환경공학과

## Improvement of DeNO<sub>x</sub> efficiency of SNCR Process with Chemical Additives in Urea Solution

Kyung Seun Yoo\*, Sung Woo Park

Department of Environmental Engineering, Kwangwoon university

**요 약** 염색 산업에서 발생하는 염색폐수는 적절한 처리가 필요한 유해 폐수로 분류된다. 파이롯트 규모의 선택적 무촉매 환원반응 (SNCR) 실험 장치에서 염색폐수를 연소 배가스에 포함된 질소산화물을 효과적으로 저감할 수 있는 첨가제로 사용하는 연구를 수행하였다. 염색 산업에서 배출되는 염색폐수는 환원제의 첨가제로 사용되기 위해서는 표준화된 제제 형태이어야 하며 이를 위해 여러 단계의 정제과정을 거쳤다. 엄격하게 처리되어야 할 염색폐수는 적어도 유용성 면에서 약 87%의 NO 저감 효율을 보일 정도로 만족할 만한 효율을 보이나, CO 제거에서는 거의 효과가 없는 것으로 나타났다. 첨가제 첨가 효과는 750 - 1150°C 구간에서 처음에는 온도가 증가함에 NO 제거 효율이 증가하다가 그 다음에는 감소하는 형태를 보인다. 최적의 온도조건에서 최대의 NO 제거 효율은 87% 이었다. 염색폐수에 포함된 약 1000ppm의 Na 화합물의 영향으로 NO 저감 효율 면에서 약 10%의 효율 향상이 있었으며, 이와 더불어 첨가제를 첨가하지 않은 경우에 비해 N<sub>2</sub>O 저감 효율과 SNCR 반응의 반응온도 확장 면에서 뚜렷한 효율 증진을 얻을 수 있었다.

**Abstract** Dye waste water generated in the dye industry is categorized as hazardous waste water that requires appropriate treatment. The pilot scale experimental trials were carried out using dye waste water as an effective additive for the selective non-catalytic reduction (SNCR) of NO<sub>x</sub> in combustion flue gases. The additives were waste liquor obtained from the dye industry and several purification steps were taken to make a standardized reagents. The dye waste water was shown to possess valuable SNCR qualities (at least 87% NO<sub>x</sub> reduction efficiency) considering its availability as a waste product, which has to be strictly treated, and have little effects on CO removal. The results indicated that the NO removal efficiency increased first and then decreased with increasing temperature within 750-1150°C. The maximum NO reduction efficiency was approximately 87% at the optimal reaction temperature. A more than 10% increase in NO reduction was achieved in the presence of 1000 ppm Na-additives (dye waste water) compared to that without additives. The Na-based additives have also a significant promoting effect on N<sub>2</sub>O reduction and within the SNCR temperature window.

**Keywords** : Additives, NO reduction, Reducing agent, SNCR, Temperature window

### 1. 서론

NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 등과 같은

질소산화물(통상적으로 NO<sub>x</sub>)은 석탄 화력발전소, 산업용 보일러 등의 연소과정에서 발생하는 일차오염물질로 대기 중으로 배출되어 초미세먼지로 전환되고 산성비,

본 논문은 환경부 미래유망녹색환경기술 산업화 촉진사업(중소기업 우수기술 육성 실증화)의 지원에 의해 이루어졌고 이 논문은 2010년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

\*Corresponding Author : Kyung Seun Yoo(Kwangwoon Univ.)

Tel: +82-10-3491-5191 email: yooks@kw.ac.kr

Received July 31, 2017

Revised October 10, 2017

Accepted October 13, 2017

Published October 31, 2017

광화학 스모그 등을 유발한다.

질소산화물을 제거하는 기술은 저NOx 버너, 다단 연소, 배가스 재순환과 같은 연소기술 개선방법과 연소 후 배가스 처리기술로 구분된다. 연소기술 개선의 경우 저감효율이 높지 않아 배출허용기준 준수를 위하여 선택적 촉매환원법(SCR)과 선택적 무촉매환원법(SNCR)과 같은 배가스 처리 기술을 주로 사용하고 있다.

SCR공정은 300-450℃ 온도구간에서 Pt-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> 촉매를 활용하며 90% 이상의 제거효율을 얻을 수 있다. 그러나 촉매의 비용이 높고 반응조건에 따른 비활성화 문제로 질소산화물의 저감원단위는 비교적 높다. SNCR 공정은 SCR공정에 비하여 초기 설치비가 저렴하고 별도의 설치부지가 필요 없어 적용성은 우수하지만 효율이 높지 않다는 단점이 존재한다. 반응온도 850-1100℃ 범위에서 40-70% 수준의 탈질효율을 나타낸다[1,2].

SNCR공정은 좁은 반응온도 구간 이상의 온도영역에서는 투입된 환원제(요소수, 암모니아수)의 산화반응으로 NOx 생성이 증가하며 낮은 온도구간에서는 환원제가 효율적으로 반응하지 못하고 암모니아 유출이 발생하게 된다. SNCR 공정의 좁은 운전온도 영역과 낮은 탈질 효율을 개선하기 위하여 다양한 첨가제 주입을 통한 탈질 효율 향상과 반응온도 영역의 확장을 탐색하였다[3,4]. 대표적으로 연구되고 있는 첨가제로는 CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 등 가스류[5], 알칸족의 액상물질[6], 알코올계[7] 등이 있으며 첨가제의 첨가로 인해 약 100℃ 내외의 반응온도 확장이 가능함을 보고하였다. Zamansky 등[8]과 Niu 등[9]은 요소용액 환원제에 작은 양의 Na 화합물을 첨가제로 사용함으로써 상당한 수준의 NO 저감 효율과 확장된 반응온도영역을 얻었음을 보고하였다.

최근 환원제 및 첨가제에 대한 연구로는 왕겨, 톱밥, 목탄, 녹나무 잎 등을 이용하여 바이오매스 연소시스템에서 Na 성분에 대한 효과를 평가하였다[10]. 또한 첨가제로 hydrazine hydrate을 활용하여 650oC 영역의 낮은 온도에서 질소산화물 저감 효과를 평가한 결과가 보고된 바 있으며[11] 하수슬러지를 활용하여 시멘트제조시설에서의 질소산화물 제거에 관한 공정연구[12]도 보고되었다.

본 연구에서는 염색 산업에서 발생하는 염색폐수를 활용하여 요소용액을 제조하였으며 염색폐수 첨가에 따른 질소산화물 저감 효과 개선과 조업온도의 확장 가능성을 평가하고자 하였다.

## 2. 본론

### 2.1 실험장치 및 방법

#### 2.1.1 실험장치

본 연구에서 pilot scale 연소로와 NOx 환원제 분사노즐이 장착된 반응기의 개략도는 Fig 1에 도시하였다.

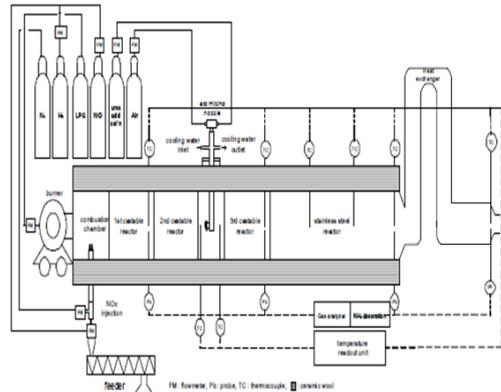


Fig. 1. Pilot scale SNCR experimental facility.

반응기 전단에 가스버너를 설치하여 반응기의 온도를 올리고, 반응기 중단부분에는 환원제 주입이 가능한 이류체노즐을 설치하여 개량된 요소용액을 분무하였다. 반응된 배출가스 성분분석을 위하여 반응기 출구 영역에 시료채취구와 열전대를 축 방향으로 설치하였다. 반응기의 재질은 연소로부터 고온영역이 유지되는 구간은 특수 내화물(Castabel:HSC 18)을 이용하여 두께 0.05m, 내경 0.22m, 길이 0.5m의 반응로 3개를 제작하여 연결하여 사용하였고 반응기 후단의 낮은 온도구간은 내경 0.2m, 길이 1m인 스테인레스(SS 304)반응기 2개를 제작하여 연결하여 사용하였다. 반응기 단열은 단열재(Kumkang Korea Chemical Co. Ltd)를 사용하여 0.15m 두께로 보온하였다.

본 연구에 사용된 가스버너(MAXI 16 : 수국광주열기 기주식회사)는 발열량을 38,700~137,500 kcal/hr사이에서 조절할 수 있는 것으로 구성하였다. SNCR공정에서 환원제와 연소 배가스의 혼합은 NOx 저감효율에 큰 영향을 미치므로 환원용액이 반응구간 전체에 고르게 분사될 수 있어야 한다. 이를 위하여 본 장치에서는 이류체 광각분사노즐(Setup No. 26B, Spraying Systems Co. Korea)을 설치하였다. 이 노즐은 노즐팁의 직경이 1.016mm인 6개의 홀로 구성되어 있고 분사각도가 70°

인 광각분사 노즐이다. 노즐은 로내에서 연소가스와 혼합이 용이하도록 로내의 중심에서 연소가스의 흐름과 반대로 위치시키고 요소용액의 온도상승에 의한 기화를 막기 위하여 노즐까지 유입되는 가스와 환원제 투입라인을 수냉관으로 제작하였다.

연소영역의 온도는 R-type 열전대를 이용하여 측정하며 그 외의 영역은 K-type 열전대를 축 방향으로 0.5m 간격으로 설치하여 측정하였다. 가스버너만을 이용할 경우 초기 NOx 농도가 10~80ppm으로 낮게 생성되기 때문에 순수한 NO 가스를 반응기 내부로 추가 투입하여 전체 농도가 400~500ppm이 되도록 조정하였다.

### 2.1.2 실험방법

SNCR 공정을 운전하기 위하여 가스버너를 이용하여 원하는 반응온도가 정상상태에 이르면 NO gas를 주입하고, 냉동기를 이용하여 배가스 내의 수분을 제거한 후 비분산적외선(NDIR) 방식의 NOx/CO, N<sub>2</sub>O/CO 분석기(ZKJ3, Fuji Electric System Co., Ltd)와 CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 분석기(VIA-300, MEXA-201, Horiba Co)를 이용하여 초기 농도를 측정한다. 배가스 농도가 정상상태에 이르면 이류체 노즐을 이용하여 환원제를 분사하고 출구 배가스 농도를 측정하여 저감효율을 계산하였다.

## 3. 결론

### 3.1 실험결과

#### 3.1.1 반응기내 반경방향에 대한 속도와 온도구배

요소용액 주입에 의한 배가스의 NOx 저감실험을 위하여 제작된 연소 반응시스템은 축 방향과 반경방향에 대하여 온도분포와 속도분포를 갖게 된다. 반응기 내의 온도와 속도 분포는 반응기의 크기가 클수록 커지며 질소산화물 저감효율에 큰 영향을 준다. 본 연구에 사용된 파일럿 규모 반응기의 반경방향에 따른 온도와 속도 구배 측정결과를 Fig 2에 도시하였다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 반경방향의 온도구배와 속도구배는 큰 차이를 보이지 않고 있으며 유체흐름이 난류에 가까운 것을 확인할 수 있다. 고온 영역의 유체 흐름특성을 파악하기 위하여 상온에서 air velocity meter를 이용하여 선속도를 측정하고 970℃로 환산한 평균유속은 6.3m/s로 확인되었다. 레이놀즈 수를 환산해

보면 약 8,000 수준으로 계산되며 난류영역에 진입해있는 것을 확인할 수 있다.

노즐분사위치부터 시료채취구까지 2.8m이므로 평균 체류시간은 약 0.44sec가 된다. Østberg 등[14,15]은 산소 존재 하에서 NO 제거 반응시간은 매우 빠르며 950℃에서 약 0.1sec 미만인 것으로 보고하였다. Lodder 등[13]의 1MJ의 오일 보일러에서는 0.43sec, Østberg 등[14]의 천연가스 버너 시스템의 경우 0.1sec 영역에서 반응성을 평가하였으며 이를 기반으로 본 반응기의 체류시간은 반응특성을 평가함에 있어 충분한 체류시간을 확보하였음을 확인할 수 있었다.

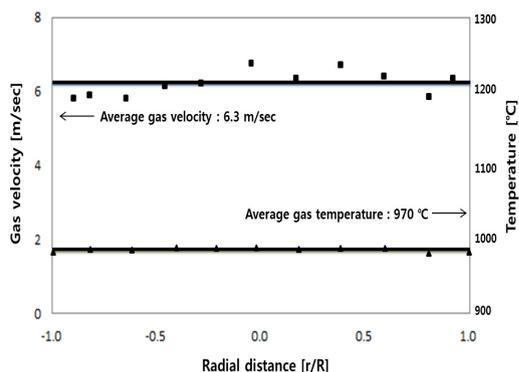


Fig. 2. Velocity and temperature gradient with radial direction at the nozzle position.

고온 영역에서 분무된 요소용액은 분무와 동시에 순간적으로 NCO, NH<sub>2</sub> 라디칼을 생성하여 NO와 0.1초 이내에 반응하기 때문에 반응온도가 감소하는 영역의 온도 변화 대신 주입온도를 반응 온도로 설정하였다.

#### 3.1.2 첨가제 첨가에 따른 탈질 특성 변화

본 실험에서 사용한 첨가제는 염색시설에서 발생하는 폐액을 적절한 전처리 공정을 거쳐 제조하였으며 첨가제를 포함한 환원제 용액의 조성은 염색폐액으로부터 얻은 첨가제 50wt%, 요소 5wt%, 물 45wt%로 구성하였다.

Figure 3은 상기의 조성을 가진 환원제 용액을 파일럿 규모의 탈질 실험 장치에 NSR = 2.0 조건에서 분사하였을 때 반응온도에 따른 NO 제거 특성을 나타낸 결과이다.

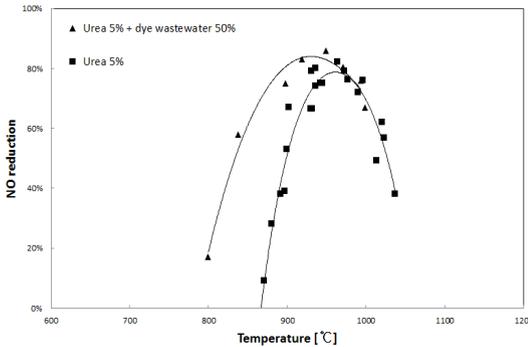


Fig. 3. NO reduction with operating temperature in SNCR reaction using reducing agents containing additives.

그림에서 기본적으로 요소용액을 주 환원제로 사용하는 경우 특정온도에서 최대 피크를 보인 후 양방향 즉 온도의 감소 또는 증가에 따라 급격하게 효율이 감소하는 전형적인 포물선형의 추세를 보인다. 이는 최적온도 영역을 기점으로 환원제의 NO 환원반응 속도보다 환원제의 산화속도가 급격하게 증가하기 때문이다.

요소용액만을 사용한 경우 약 975°C에서 약 77%의 NO 제거효율을 보이며, 요소용액에 첨가제로서 염색폐액을 주입한 경우는 950°C 부근에서 약 87%의 NO 제거효율을 보였다. 고온 영역에서는 첨가제 주입에 따른 변화가 크게 나타나지 않고 있음을 확인할 수 있다.

첨가제를 활용하는 경우 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 일정 효율을 나타내는 반응온도 구간의 확대가 일어나기 때문에 온도 변화가 큰 반응기에 적용할 경우 보다 안정적인 SNCR 공정 운영이 가능할 것으로 판단된다. 예로서, 소각로의 경우 유입되는 폐기물 종류가 매우 다양하고 이로 인해 투입되는 폐기물의 발열량 또한 운전 시간에 따라 변동 폭이 증가하게 된다. 따라서 소각로에서 발생하는 질소산화물 저감을 위하여 첨가제가 적용된 요소용액의 선택적 무촉매 환원 공정을 적용하면 보다 효율적일 것이라 예상할 수 있다. 그림에 도시한 바와 같이 요소용액에 첨가제로서 염색폐액을 주입하면 50% NO 제거효율을 얻을 수 있는 반응온도 구간을 850~1030°C로 확대할 수 있어 보다 안정적인 운전과 높은 제거효율을 기대할 수 있다.

Figure 4는 첨가제가 포함된 환원제 용액과 첨가제가 포함되지 않은 환원제 용액을 탈질 실험 장치에 분사하였을 때 반응온도에 따른 CO 생성 특성을 나타낸 그림이다. 실험을 진행할 때 NSR 조건은 2.0이다.

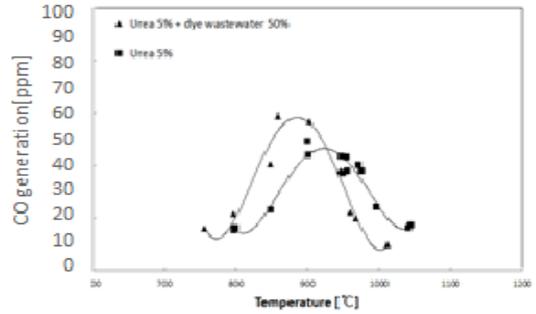


Fig. 4. CO generation with operating temperature in SNCR reaction using reducing agents containing additives.

그림에서 요소용액만을 사용한 경우 약 925°C에서 최대 약 50ppm의 CO가 생성되었으며 온도가 증가 또는 감소됨에 따라 CO 생성량 또한 감소하는 경향을 보인다. 요소용액에 첨가제를 주입한 경우 발생페턴은 유사하였으나 CO 농도가 가장 높은 발생온도가 880°C로 확인되었으며 첨가제가 존재하지 않는 경우보다 45°C 감소하였다. 생성된 CO 농도는 약 57ppm으로 첨가제 주입으로 인하여 생성량은 약 14% 증가하였다.

Figure 5는 첨가제가 포함된 환원제 용액과 첨가제가 포함되지 않은 환원제 용액을 탈질반응장치에 주입하였을 때 반응온도에 따른 N<sub>2</sub>O 생성 특성을 나타낸 결과이다. 실험을 진행할 때 NSR 조건은 2.0이며 그림에 나타난 온도에 따른 N<sub>2</sub>O 생성 경향은 Figure 3의 NO 저감 특성과 매우 유사하였다. 즉 특정온도에서 최대 피크를 보인 후 양방향 온도의 감소 또는 증가에 따라 급격하게 N<sub>2</sub>O 생성이 감소하는 전형적인 포물선형의 추세를 보인다.

N<sub>2</sub>O는 화석연료 연소과정 중에 발생하는 질소산화물 중의 하나로서 온실가스지수가 높아 최근에는 N<sub>2</sub>O 저감 기술개발을 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 요소용액만을 사용한 경우 965°C 근처에서 약 100ppm의 N<sub>2</sub>O가 생성되었으며, 요소용액에 첨가제로서 염색폐액을 주입한 경우 915°C 부근에서 약 80ppm의 N<sub>2</sub>O가 생성되었다. 첨가제를 주입함에 따라 N<sub>2</sub>O 생성량이 약 20% 감소하였으며 N<sub>2</sub>O 최대 생성온도는 약 50°C 감소하였다.

본 실험에서 얻은 결과인 첨가제 주입에 따른 NO 제거효율의 증가와 N<sub>2</sub>O 생성량 감소에 대한 이유는 첨가제 내에 존재하는 Na 성분에 기인한 것으로 판단되며 이전 연구자들의 결과와 부합하였다. [8,16]

고온영역에서 요소만 존재할 경우 온도가 증가하면서 그림 5와 같이 요소와 OH 라디칼이 반응하여

NH<sub>2</sub>, NCO 라디칼을 생성하고 NO와 반응하여 N<sub>2</sub>로 환원된다.

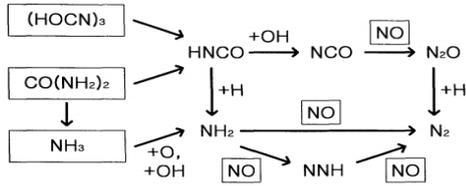
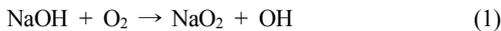
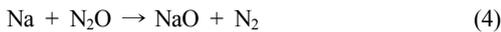


Fig. 5. NO reduction route in NO<sub>x</sub> reduction mechanism

Zamansky 등[8]과 Ayoub 등[16]에 의하면 Na가 첨가된 화합물인 경우 식 (1), (2)와 같이 연쇄 반응으로 생성된 OH 라디칼이 저온 영역에서 생성된다고 보고하였다. 이로 인하여 더 낮은 온도 영역에서 NO 저감 반응이 촉진되고 온도창은 더 낮은 쪽으로 이동함을 알 수 있다.



또한 NaOH의 첨가는 N<sub>2</sub>O의 제거효율도 증가시킨다.



요소분해 반응의 일부분인 식 (3)은 N<sub>2</sub>O 생성의 주된 반응으로 생성되어진 N<sub>2</sub>O는 NaOH 첨가로 인해 생성된 Na와 식 (4)와 같이 반응하여 N<sub>2</sub>O 생성이 억제된다.

위 내용을 확인하기 위하여 실험에 사용한 염색폐액의 조성을 분석하여 표1에 정리하였다.

Table 1. Composition of dye waste water(mg/L).

Ca	K	Na	Cl	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	COD <sub>cr</sub>	TN	SS
16	35	1,078	592	40	547	71	967	49	27

폐액 중 Na 성분은 1,078mg/kg으로 확인되어 앞서 서술한 Na 성분에 의한 효과가 가능함을 확인할 수 있었다. 성분 분석결과에서 볼 수 있는 바와 같이 유기성물질의 농도는 COD로서 967ppm으로 확인되었다. 대부분의 유기물질은 고온에서 산화되어 CO<sub>2</sub>로 전환되지만 일부 불완전 연소되어 CO 농도 증가의 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

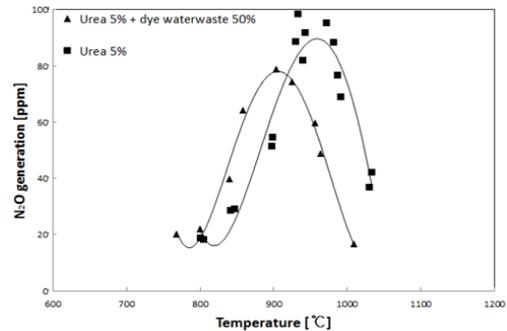


Fig. 6. N<sub>2</sub>O generation with operating temperature in SNCR reaction using reducing agents containing additives

### 3.2 결론

요소용액 및 첨가제 주입에 의한 NO<sub>x</sub> 저감 실험을 위하여 파일럿 규모 흐름반응기를 제작하였다. 제작된 연소 반응기의 평균 체류시간과 레이놀즈 수는 각각 0.44초와 8,000수준으로 반응실험이 타당하게 진행될 수 있음을 확인하였으며 다음의 결론을 도출하였다.

1. 요소용액에 첨가제로 염색폐액을 주입한 경우는 950°C 부근에서 약 87%의 NO 제거효율을 보이며 50% 이상의 효율을 보이는 온도구간이 80°C 가량 확대되었다.
2. 첨가제 주입으로 최대의 CO 농도 발생온도는 약 45°C 감소하였으며 생성농도는 14% 증가하였다.
3. 염색폐액을 주입함으로써 N<sub>2</sub>O 최대 생성온도를 50°C 가량 낮추었으며 N<sub>2</sub>O 생성농도 또한 20% 감소하였다.
4. 염색폐액의 성분분석을 통하여 반응기작에 영향을 주는 Na 성분이 1,000ppm 가량 존재함을 확인하였다.
5. 위 결과를 기반으로 염색폐수를 활용하여 대기 중으로 배출되는 질소산화물을 효과적으로 저감할 수 있음을 확인하였으며 소각로와 같이 부하변동이 크게 나타나는 시설에 효과적임을 추정할 수 있었다.

### References

[1] J. B. Lee, S. D. Kim, "Kinetics of NO<sub>x</sub> reduction by urea solution in a pilot-scale reactor", J. Chem. Eng.

- Japan, vol. 29, pp. 620-626, 1996.  
DOI: <https://doi.org/10.1252/jcei.29.620>
- [2] J. H. Kim, B. H. Kim, J. W. Park, S. M. Lee, "Reaction Characteristic by Injection of Promoters in Selective Non-Catalytic Reduction(SNCR)", Journal of Korea Society of Waste management, vol. 21, no. 6, pp. 523-533, 2004.
- [3] I. H. Jung, N. S. Roh, K. H. Kim, S. S. Kim, S. K. Lee, D. C. Kim, D. H. Shin, "Atomizing and DeNOx Behaviors of an Injector for the SNCR Reducing Agent", Journal of Korean Society of Environmental Engineers, vol. 23, no. 9, pp. 1431-1440, 2001.
- [4] S. M. Lee, K. N. Park, T. H. Kwak, J. W. Park, S. Makin, B. H. Kim, "The Improvement of Denitrofication by Using Sodium Salts in the SNCR Process", Korean Chem Eng, vol. 43, no. 2, pp. 324-329, 2005.
- [5] Gasnot, L., Dao, D.Q., Pauwels, J. F. 2012. Experimental and kinetic study of the effect of additives on the ammonia based SNCR process in low temperature conditions. Energy Fuels 26, 2, pp. 837-284.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/ef300310c>
- [6] M. Yayyeb Javed, W. Nimmo, Asif Mahmood, Naseem Irfan, "Effect of oxygenated liquid additives on the urea based SNCR process", Journal of Environmental Management, vol. 90, 3, pp. 429-343, 5 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.05.021>
- [7] Sang Wook Bae, Seon Ah Roh, Sang Done Kim, "NO removal by reducing agents and additives in the selective non-catalytic reduction (SNCR) process", Chemosphere, vol. 65, pp. 170-175, 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.02.040>
- [8] Vladimir M. Zamansky, Vitali V. Lissianski, Peter M. Maly, Loc Ho, Darwin Rusli, William C. Gardner, JR, "Reaction of Sodium Speies in the Promoted SNCR Process", Combustion and Flame, vol. 117, pp. 821-831, 1999.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(98\)00127-8](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(98)00127-8)
- [9] Shengli Niu, Kuihua Han, Chunmei Lu, "An experimental study on the effect of operation parameters and sodium additive on the NOOUT process", Process Safety and Environmental Protection, vol. 89, pp. 121-126, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.01.001>
- [10] Ping Lu, Jiangtao Hao, Wei Yu, Xiuming Zhu, Xin Dai, "Effects of water vapor and Na/K additives on NO reduction through advanced biomass reburning", Fuel, vol. 170, pp. 60-66, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.12.037>
- [11] H. Chen, D.Z. Chen, S. Fan, L. Hong, D. Wang, "SNCR De-NO within a moderate temperature range using urea-spiked hydrazine hydrate as reductant", Chemosphere, vol. 161, pp. 208-218, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.07.010>
- [12] Ping Fang, Zi-Jun Tang, Jian-Hang Huang, Chao-Ping Cen, Zhi-Xiong Tang, Xiong-Bo Chen, "Using sewage sludge as a denitration agent and secondary fuel in a cement plant: A case study", Fuel Processing Technology, vol. 137, pp. 1-7, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.03.014>
- [13] P. Lodder, J. B. Lefer, "Effect of natural gas, C2H6 and CO on the homogeneous gas phase reduction of NOx by NH3", The Chemical Engineering Journal, vol. 30, pp. 161-167, 1985.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0300-9467\(85\)80026-5](https://doi.org/10.1016/0300-9467(85)80026-5)
- [14] M. Ostberg, K. Dam-Johansen, J. E. Johansson, "Influence of the SNCR process", Chemical Engineering Science, vol. 52, no. 15, pp. 2511-2525, 1997.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(97\)00069-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(97)00069-9)
- [15] M. Ostberg, K. Dam-Johansen, "Empirical modeling of the Selective Non-Catalytic Reduction of NO : comparison with large-scale experiments and detailed kinetic modeling, Chemical Engineering Science, vol. 49, 12, pp. 1879-1904, 1994.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(94\)80074-X](https://doi.org/10.1016/0009-2509(94)80074-X)
- [16] Muhammad Ayoub, Muhammad Faisal Irfan, Kyung-Seun Yoo, "Surfactants as additives for NO reduction during SNCR process with urea solution as reducing agent", Energy Conversion and Management, vol. 52, no. 3, pp. 3083-308, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.04.010>

**유 경 선(Kyung-Seon Yoo)**

[정회원]



- 1996년 2월 : 한국과학기술원 화학공학과 박사
- 1996년 1월 ~ 1996년 7월 : 포스 코기술개발주식회사 주임 연구원
- 1996년 7월 ~ 1999년 2월 : 포항산업과학연구원 선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 환경공학과 교수

<관심분야>  
환경, 화공

**박 성 우(Seong-Woo Park)**

[정회원]



- 2013년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 학부생

<관심분야>  
환경, 화공