

BaTiO₃-슬러지 Packed-bed형 반응기에서 NO_x제거에 미치는 슬러지의 영향

Effect of Sludge Pellets on NO_x Removal in BaTiO₃-sludge Packed-bed Reactor

박재윤, 송원섭, 고희석, 박상현

(Jae-Yoon Park, Won-Sun Song, Hee-Suk Gho, Sang-Hyun Park)

Abstract

In this paper, in order to investigate the catalytic effect of the sludge exhausted from waterworks on NO_x removal, we measure NO removal characteristics with and without sludge pellets in BaTiO₃-sludge packed-bed reactor of plate-plate geometry. NO initial concentration is 50ppm balanced with air and a gas flow rate is 5 l/min. Gas temperature is changed from 25 to 100°C to investigate the role of sludge pellet on removing active oxygen species and NO₂. BaTiO₃ pellets is filled for corona discharge at upstream of reactor and sludge pellets is filled for catalytic effect at downstream of reactor. The volume percent of sludge pellets to BaTiO₃ pellets is changed from 0% to 100% and AC voltage is supplied to the reactor for discharging simulated gases.

In the result, when sludge pellets is put at the downstream of plasma reactor, NO removal rate is slightly increased. However, NO₂ and O₃ as by-products during NO removal is significantly decreased from 51ppm without sludge pellets to 5ppm with sludge pellets and from 50ppm without sludge pellets to 0.004ppm with sludge pellets, respectively. Therefore, NO_x(NO+NO₂) removal rate is increased up to 93%. It is thought that sludge pellet maybe react with active oxygen species and NO₂ generated by corona discharge in surface of BaTiO₃ pellets, and then NO₂ and O₃ as by-products are considerably decreased. When we increase gas temperature from room temperature to 100°C, NO removal rate is decreased, while NO₂ concentration is independent on gas temperature.

These results suggest that the removal mechanism of active oxygen species and NO₂ in sludge pellet is not absorption, but chemical reaction. Therefore we expect that sludge pellets exhausted for waterworks could be used as catalyst for NO_x removal with high removal rate and low by-product.

Key Words : BaTiO₃, sludge, plasma reactor, De-NO_x, packed-bed type

1. 서론

화력발전소, 보일러, 제철소, 소각로 및 디젤엔진

경남대학교 전기전자공학부

(마산시 월영동 449번지,

Fax : 055-249-2839

E-mail : jypark@kyungnam.ac.kr)

2001년 5월 31일 접수, 2001년 7월 6일 1차심사완료

2001년 9월 11일 2차심사완료

등과 같은 화석연료를 사용하는 산업설비에서 배출되는 연소가스는 질소산화물(NO_x)과 황산화물(SO_x)이 다량 함유되어 있으며, 매년 그 배출량이 증가하고 있다. 질소산화물은 연소과정의 고온에 공기중의 질소(N₂)와 산소(O₂)가 반응하여 생성되고, 배기가스의 약 95% 정도가 NO_x이며 반응성이 낮기 때문에 제거가 상당히 어렵다.[1] NO_x는 대기중으로 배출되어 대기중의 O₃, O₂, 수분 등에 의하여

NO₂, NO₃, N₂O₄, N₂O₅ 등으로 산화되지만 대부분은 NO₂이다. 이들은 공기 중에서 에어로졸 상태가 되어 산성비의 원인이 된다. 황산화물은 대부분 연료중의 황(sulfur)이 연소시 공기중의 산소와 결합하여 생성되고 대기 중으로 배출된다. 황이 산화하면 SO₂로 되는데 이 SO₂는 공기 중에서 쉽게 SO₃로 산화하고 공기중 수분과 반응하여 미세한 황산방울(H₂SO₄)이 된다. 황산화물은 무색의 강한 자극성 기체이며 금속 및 재료의 부식, 식물, 동물, 인간 등에까지도 영향을 미친다. 비열플라즈마(Non-thermal plasma) 기술에 의해 연소가스를 처리하는 방법에는 전자빔조사(Electron beam irradiation)[2]에 의한 것과 전기적인 방전에 의한 것이 있다. 전자빔 조사에 의한 탈질(de-NOx), 탈황(de-SOx)법은 1980년 일본의 Kawamura[3]등에 의해 제안된 이래 상용화되어 실제 시스템에 사용되고 있다. 전자빔법은 X선의 발생을 동반하기 때문에 이에 대한 대책이 필요하고 가속장치 등에 높은 설비비가 소요되는 문제점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 전기적 기체방전 현상을 이용한 방전 플라즈마법이 제안되었고, 이들 방법에는 코로나 방전(Corona discharge)[4], 부분방전(Partial discharge in ferroelectric pellet layer)[5], 펄스스트리머 방전(Pulse streamer discharge)[6,7,8,9], 연면방전(Surface discharge) 및 무성방전(Silent discharge)[10]등이 있으며, 이러한 방법은 전자빔에 의한 방법보다는 효율이 낮은 것으로 알려져 있으나, 소용량으로 제작하기가 용이하고 최근 펄스기술의 발전으로 인하여 상당한 효율 개선을 보이고 있다.

또한 우리가 생활하는 거의 모든 곳에서 발생하는 슬러지(sludge)는 악취, 토양오염 등 많은 문제점을 가지고 있으며, 전 세계에서 하루 발생되는 슬러지의 양도 엄청난 양이다. 대부분의 폐기물은 매립 또는 소각에 의해 처리되고 있으나 슬러지의 경우 두 가지 방법 모두 심각한 문제점을 가지고 있어, 대체 처리방법의 개발이 시급한 실정이다. 지금까지 여러 곳에서 발생하는 슬러지를 처리(소각, 매립, 해양투기)하거나 재활용(퇴비화, 오일화, 시멘트제조, 토양처리, 소성기술 등)하기 위하여 여러 가지 방법들이 개발되어 왔으나, 재활용되는 양은 발생량의 단지 3.5% 밖에 되지 않는 실정이며, 아직까지 슬러지를 NO_x제거에 이용한 경우는 없다. 더불어 슬러지의 발생량은 수질오염기준의 강화, 하수 처리율의 증가, 상수원의 수질 악화 등으로 매년 증가할 것으로 예상되며, 슬러지는 납, 카

드뎀, 크롬, 수은 등 중금속을 포함하고 있어 땅에 함부로 묻거나 하천에 방류할 경우 환경을 크게 오염시키고, 인체에도 치명적일 수가 있다. 이러한 이유로 전 세계적으로 슬러지의 처리에 고심하고 있는 실정이다.[11-15]

본 연구에서는 이와 같이 문제가 많은 슬러지를 NO_x제거용 촉매재료로 재활용하기 위한 가능성을 실험하였다. 이를 위하여 수돗물 정수장에서 발생되는 슬러지를 사용하여 펠렛을 제작하고 BaTiO₃ 펠렛과 하이브리드 구조로 된 NO_x제거용 플라즈마 반응기를 제작하였고, specific energy, 전압인가 방법, 슬러지의 양, 가스온도 변화에 따른 NO_x제거 특성을 측정하고 슬러지 펠렛의 영향을 분석하였다.

2. 실험

본 실험에 사용한 실험장치의 구성도는 그림 1과 같다. 플라즈마 반응기는 내부의 방전상태를 관찰하기 쉬운 투명한 아크릴수지를 사용하여 만들었으며, 길이 170mm, 높이 30mm, 폭 45mm인 직사각형 구조이다. 전극은 직사각형의 길이방향 양변의 아크릴 평판표면에 구리박판을 부착한 평판대 평판 구조를 사용하였고, 그 내부에 유전체를 채웠다. 이러한 반응기의 형태를 packed-bed형이라 하며 그 구조를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 나타낸 바와 같이 반응기의 앞부분에는 전압이 인가될 때 강한 전계의 집중에 의해 접촉부에서 방전이 발생할 수 있도록 높은 유전율(비유전율 3000)을 갖는 강 유전체인 BaTiO₃ 펠렛을 채웠고, 반응기의 뒷부분에는 NO_x제거에 대한 촉매효과를 측정하기 위하여 슬러지 펠렛을 채웠다. 슬러지 펠렛은 수돗물 정수장의 정수과정에서 발생하는 슬러지를 평균지름이 3mm인 다공성이 큰 펠렛모양으로 만들고 다른 특별한 조치를 취하지 않고 단순히 건조하여 사용하였으며 그 성분을 표 1에 나타내었다. 표에서 보는바와 같이 슬러지는 금속산화물 및 금속분자와 주로 조류인 유기화합물로 구성되어 있으며, 전체적으로는 제올라이트의 구성성과 유사한 것으로 나타났다. 인가되는 전압은 네온트랜스를 사용하여 주파수가 60Hz인 AC고전압을 인가하였고, 가스의 유량은 MFC(Mass Flow Controller)를 사용하여 조절하였다. 총 혼합가스의 유량은 5 l/min이고, 실험을 위한 NO 초기농도는 농도가 2000ppm인 NO가스에 공기를 사용하여

50ppm로 희석하여 실험하였다. 실험 전·후의 NO 및 NO₂가스의 농도는 초정밀 가스분석기인 Green Line MK2를 사용하여 측정하였고, 부산물인 오존 농도측정에는 OZONE ANALYZER Model 8810을 사용하였다. 또한 가스온도의 영향을 측정하기 위해 반응기를 FORCED CONVECTION OVEN Model FO-600M속에 넣어 가스온도를 50, 75, 100°C로 변화시키며 NO_x제거율을 측정하였다. 또한 가스가 반응기를 통과한 후 발생하는 부산물을 분석하기 위하여 반응기의 후단에서 채취한 처리 후의 가스에 대한 FTIR를 측정하고 분석하였다.

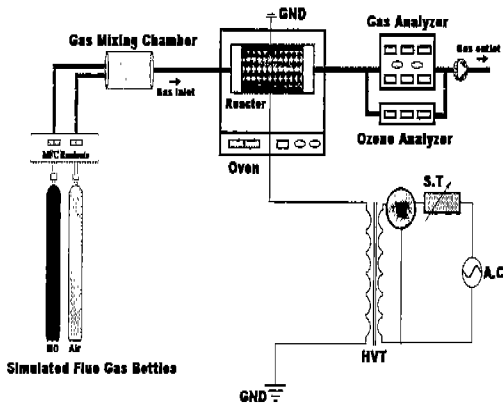


그림 1. 실험장치 구성도.
Fig. 1. Construction diagram of experimental apparatus.

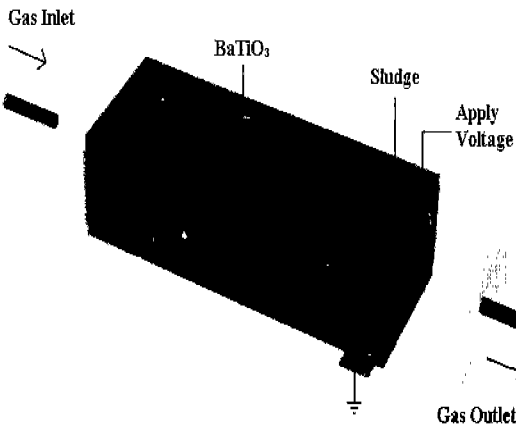


그림 2. 플라즈마 반응기.
Fig. 2. plasma reactor.

표 1. 슬러지의 구성성분.

Table 1. components of sludge.

Material	Quantity	Material	Quantity
Al ₂ O ₃	39.793[%]	P ₂ O ₅	2.731[%]
SiO ₂	39.905[%]	K ₂ O	2.205[%]
Fe ₂ O ₃	7.427[%]	CaO	1.104[%]
SO ₃	3.12[%]	MgO	1.071[%]
Cl	0.747[%]	MnO	0.461[%]
Na ₂ O	0.692[%]	Br	0.103[%]
Zn	0.136[mg/l]	Cu	0.029[mg/l]
Cr	0.028[mg/l]	etc	Organic compound

3. 결과 및 고찰

3.1 슬러지 펠렛의 영향

그림 2에 나타난 플라즈마 반응기에 주파수가 60Hz인 AC고전압을 인가하였다. BaTiO₃영역에서는 강유전체인 BaTiO₃ 펠렛 사이의 접촉부에서 강한 전계의 집중이 생겨 연면방전이 발생하며 인가 전압이 증가하면 그 방전 플라즈마 영역이 전 BaTiO₃영역으로 확대되었다. 그러나 슬러지 펠렛 영역에서는 이러한 전면적인 방전현상은 나타나지 않았으나 9kV이상에서는 국부적인 코로나 방전이 관찰되었다. NO_x제거에 미치는 BaTiO₃와 슬러지의 영향을 측정하기 위하여 처리가스가 주입되는 반응기 앞부분에 BaTiO₃(50%)를 채우고, 반응기의 뒷부분에 슬러지(50%)를 채운 경우와 반응기의 앞부분에 BaTiO₃(50%)만 채운 두 경우에 대하여 NO의 초기농도는 50ppm, 가스유량은 5 l/min으로 일정하게 유지하고, 상온에서 주입되는 Specific Energy(SPE)의 변화에 따른 NO와 NO₂의 농도변화를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 두 경우 SPE의 증가에 따른 NO농도의 감소량은 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 그러나 NO의 제거 중에 발생하는 부산물인 NO₂는 슬러지를 채운 반응기의 경우가 매우 작게 나타났다. 강 유전체인 BaTiO₃ 펠렛의 표면에서는 강한 전계집중에 의해 코로나방전이 발생되어 공기중 산소로부터 O, O₃등이 발생되고 이 활성산소에 의해 NO가 이 영역을 통과할 때 거의 NO₂로 산화되지만[12], 슬러지의 영역은

코로나방전이 일어나지 않으므로 NO산화에는 큰 효과가 없기 때문이라 사료된다. 또한 BaTiO₃만 사용한 경우는 최대 NO₂생성량이 51ppm이었지만, 슬러지(50%)를 함께 사용한 경우는 최대 NO₂생성량이 5ppm으로 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 BaTiO₃펠렛의 후단에 슬러지를 채운 경우는 BaTiO₃의 영역에서 방전에 의해 생성된 O, O₃ 등 활성산소가 슬러지 펠렛중의 금속성분 혹은 유기화합물과 반응하여 금속산화물 혹은 다른 산화물로 변화되기 때문에 NO₂와 O₃의 생성량이 감소하거나 혹은 먼저 활성산소(O, O₃)에 의해 NO가 NO₂로 산화되고 NO₂가 슬러지 펠렛에서 환원분해되기 때문인 것으로 사료된다.

그림 4는 NO제거실험 과정에서 부산물로 생성된 O₃생성량을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 BaTiO₃만 사용한 경우는 O₃가 최대 50ppm까지 생성되었지만, 슬러지를 함께 사용한 경우는 O₃가 약 0.004ppm이 생성된 것을 알 수 있다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 BaTiO₃의 방전에 의해 공기중의 산소로부터 생성된 O, O₃가 반응기 후단의 슬러지에 의해 흡착되거나 금속성분 혹은 유기 화합물과 반응하기 때문에 O₃생성량이 감소되는 것으로 사료된다. 또한 슬러지에 전압을 인가할 때 슬러지와 활성산소간의 반응에 어떤 영향을 미치는가를 조사하기 위하여 BaTiO₃에만 전압을 인가한 경우와 BaTiO₃(50%)와 슬러지(50%)에 동시에 전압을 인가한 경우의 NO_x제거특성을 측정하고 분석하였다.

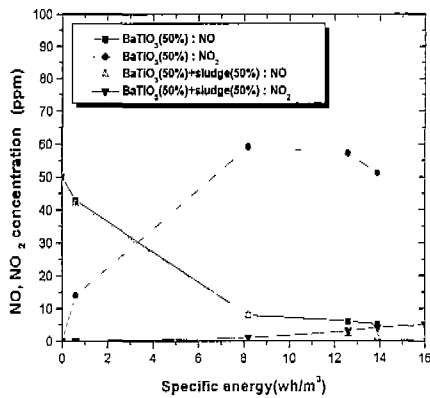


그림 3. Specific energy 따른 NO, NO₂농도.

Fig. 3. NO, NO₂ concentration vs specific energy.

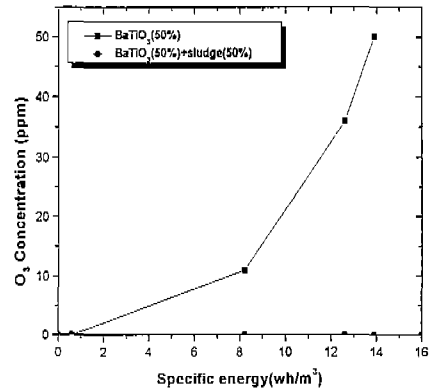


그림 4. Specific energy에 따른 O₃농도.

Fig. 4. O₃ concentration vs specific energy.

그림 5는 반응기 앞부분에 BaTiO₃(50%)를 채우고, 반응기의 뒷부분에 슬러지(50%)를 채운 반응기에서 슬러지 펠렛에 전압인가의 유·무에 따른 NO, NO₂농도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 BaTiO₃에만 전압을 인가한 경우와 BaTiO₃와 슬러지에 동시에 전압을 인가한 경우 NO농도변화는 거의 같은 것으로 나타났다. 이것은 NO는 BaTiO₃에 의해 NO₂로 산화된다는 것을 나타내며, 그림 3에서도 나타낸 것과 같이 슬러지에 인가된 전압은 NO제거에는 큰 효과가 없는 것을 나타내고 있다. 또한 그림에서 BaTiO₃에만 전압을 인가한 경우는 NO₂생성량이 10ppm이지만, 두 펠렛에 동시에 전압을 인가한 경우는 5ppm인 것을 알 수 있다. 이것은 슬러지 펠렛에 전압이 인가되면 강력한 전기방전은 발생되지 않지만 약한 전계가 O, O₃ 등 활성산소의 슬러지 펠렛에서 흡착효과 및 화학반응을 증가시키거나 NO₂가 슬러지와 반응하여 환원되는 것에 기여하기 때문인 것으로 사료된다.

그림 6은 위의 두 경우의 NO_x제거율을 나타낸 그림이다. BaTiO₃에만 전압을 인가한 경우보다 BaTiO₃와 슬러지에 전압을 동시에 인가한 경우가 NO_x제거율이 좋은 것을 알 수 있다. 이것은 NO제거율이 거의 같지만 BaTiO₃와 슬러지에 동시에 전압을 인가한 경우가 NO₂생성량이 약간 적기 때문인 것으로 사료된다. 이때 O₃생성량은 0.004ppm이 하인 것으로 나타났다.

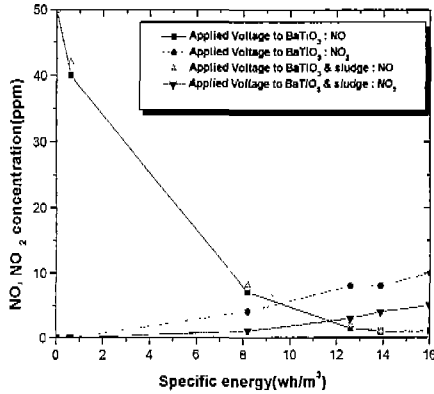


그림 5. Specific energy에 따른 NO, NO₂농도.
Fig. 5. NO, NO₂ concentration vs specific energy.

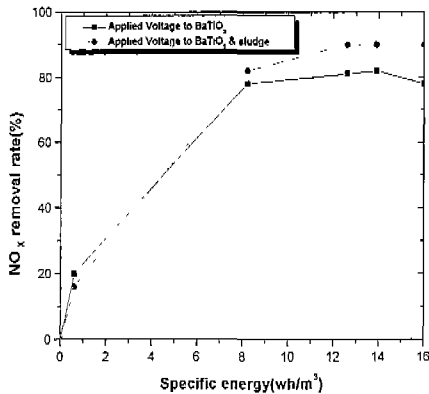


그림 6. Specific energy에 따른 NO_x제거율.
Fig. 6. NO_x removal rate vs specific energy.

그림 7은 반응기에 채운 BaTiO₃에 대한 슬러지의 체적비의 변화에 따른 NO_x(NO+NO₂)제거율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 슬러지의 양이 증가할수록 NO_x제거율은 약간 증가하였고 100% 슬러지 펠릿을 사용한 경우는 NO_x제거가 거의 일어나지 않았다. 이것은 슬러지 펠릿만을 사용한 경우 코로나방전에 의해 NO제거의 역할을 하는 BaTiO₃가 없어 NO가 NO₂로 산화되지 않기 때문인 것으로 사료된다. BaTiO₃만 사용한 경우는 주입되는 NO가 대부분 BaTiO₃의 코로나방전에 의해 NO₂로 산화되므로 실제로 NO_x제거는 매우 적은 것으로 사료된다. 따라서 BaTiO₃ 후단에 슬러지를 함께 사용한 경우는 후단의 슬러지가 O, O₃

등의 활성산소와 반응하거나 산화된 NO₂가 슬러지에 의해 환원되기 때문인 것으로 사료된다. BaTiO₃양이 증가하고 슬러지의 양이 감소하면 NO 제거는 잘 되지만 부산물로 NO₂가 다량으로 발생되어 NO_x제거율이 감소되고, 역으로 슬러지의 상대적인 양이 증가되면 NO₂의 발생량은 감소되지만 NO제거율이 감소하여 전체 NO_x제거율은 매우 낮다. 따라서 높은 NO_x제거율을 얻기 위해서는 적당한 비율을 선정해야 하며 본 실험에서는 슬러지의 양이 50-50%인 경우가 적당한 것으로 나타났다.

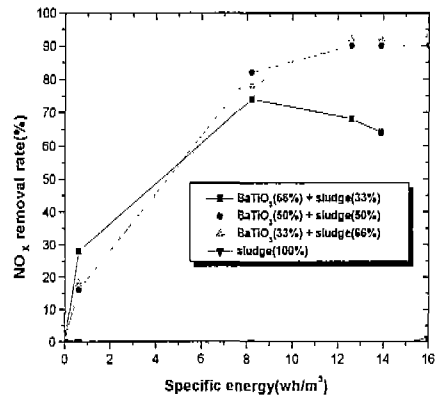


그림 7. Sludge의 양에 따른 NO_x제거율.
Fig. 7. NO_x removal rate as function of sludge volume.

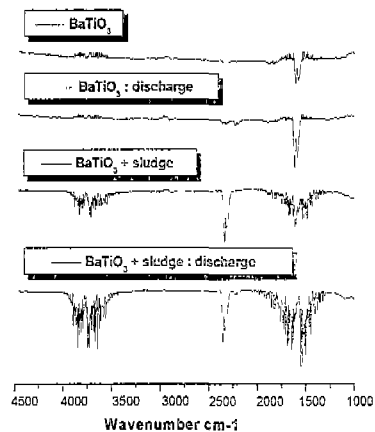


그림 8. FTIR 스펙트럼.
Fig. 8. FTIR spectra.

그림 8은 반응기 후단에서 측정된 반응 전후의 부산물을 분석하기 위하여 측정된 FTIR 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 것과 같이 전압이 인가된 BaTiO₃를 통과한 가스에서 NO₂ 피크가 증가되는 것을 알 수 있다. 그러나 슬러지 펠렛을 통과한 가스에서는 NO₂ 피크가 감소되고 CO₂와 수분 피크가 새롭게 나타나는 것을 볼 수 있지만 다른 부산물은 발견되지 않고 있다. 이때 발생된 CO₂는 활성산소 혹은 NO₂가 유기화합물과 반응하여 발생하는 것으로 사료된다.

3.2 가스온도의 영향

그림 9는 슬러지의 NO_x제거 메카니즘을 측정하기 위하여 가스온도의 변화에 따른 NO와 NO₂의 농도변화를 나타낸 그림이다. 초기농도, 유량 그리고 인가전압을 각각 50ppm, 5 l/min, 8kV로 일정하게 유지한 뒤, 가스온도를 상온에서부터 100°C까지 변화시키면서 NO_x제거율을 측정하였다. 그림에서와 같이 가스온도가 증가할수록 NO₂농도는 큰 변화가 없이 거의 일정하나, NO농도는 온도가 증가할수록 조금씩 증가하고 60 °C 이상에서는 증가비율이 커지는 것을 알 수 있으며, 이때 O₃는 거의 발생되지 않았다. 이것은 온도가 60 °C 이상부터 BaTiO₃의 유전율이 급속히 변화되고 이로 인하여 BaTiO₃의 방전상태가 변화되기 때문인 것으로 사료된다. BaTiO₃의 유리전이온도는 120 °C부근이며 가스온도가 60 °C이지만 방전이 발생하는 BaTiO₃ 펠렛의 접촉부의 온도는 방전에너지에 의해 120 °C 이상 상승되는 것으로 추정된다. 온도상승에도 불구하고 NO₂농도가 일정한 것으로 보아 가스온도는 슬러지가 활성산소 혹은 NO₂와의 반응에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 나타낸다.

그림 10은 가스온도의 변화에 따른 NO_x(NO+NO₂) 제거율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 상온에서 NO_x제거율이 90%이고 온도가 증가할수록 제거율은 조금씩 감소하여 100 °C에서는 54%임을 알 수 있다. 이것은 그림 8에서와 같이, 온도가 증가할수록 NO₂농도는 일정하지만 NO의 제거량이 점차 감소하기 때문이라 사료된다. 일반적으로 온도증가에 따라 탈착현상이 발생하므로 흡착량이 감소되지만 본 실험에서는 NO₂농도가 온도증가와 무관한 것으로 나타났다. 따라서 슬러지 펠렛의 첨가에 의한 NO_x제거 현상은 슬러지가 활성산소나 NO₂를 흡착하기 때문이라기 보다는 슬러지 펠렛과 활성산소 혹은 NO₂사이의 화학반응에 의한 것으로 사료된다.

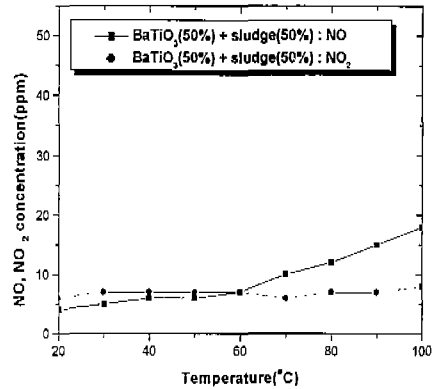


그림 9. 온도에 따른 NO, NO₂농도.

Fig. 9. NO, NO₂ concentration vs gas temperature.

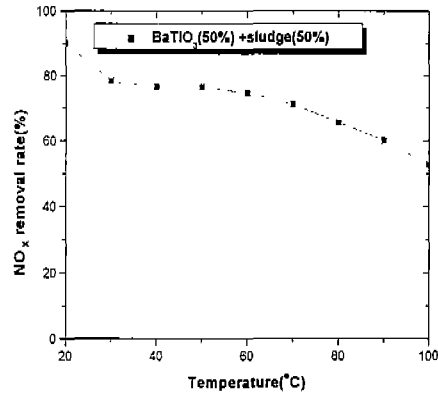


그림 10. 온도에 따른 NO_x제거율.

Fig. 10. NO_x removal rate vs gas temperature.

4. 결론

BaTiO₃-슬러지 하이브리드 packed bed형 플라즈마 반응기에서 NO_x제거특성 및 부산물(NO₂, O₃)생성특성을 측정하고 NO_x제거에 미치는 슬러지 펠렛의 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) BaTiO₃(50%)만 사용한 경우는 NO가 NO₂로 산화되어 실질적인 NO_x는 거의 제거되지 않았다. 그러나 BaTiO₃(50%)와 슬러지(50%)를 함께 사용한 경우는 NO₂, O₃등과 같은 부산물 생성량이 95%이

상 감소하여 NO_x제거율이 80~90%로 크게 향상되었으며, BaTiO₃ 펠릿에 대한 슬러지 펠릿의 양이 증가할수록 NO_x제거율은 증가하였다. 이는 슬러지가 활성산소와 반응하여 NO₂생성을 감소시키거나 NO의 산화반응에 의해 생성된 NO₂가 슬러지 표면에서 환원반응이 일어나기 때문인 것으로 사료된다.

2) BaTiO₃에만 전압을 인가한 경우보다 BaTiO₃와 슬러지에 동시에 전압을 인가한 경우가 NO_x제거율이 약 10%증가하였고 부산물(NO₂, O₃)의 생성량은 감소하였다. 이것은 슬러지 펠릿에 전압이 인가되면 슬러지가 활성산소 및 NO₂와의 화학반응이 더욱 촉진되기 때문인 것으로 사료된다.

3) 온도의 증가에 따라 부산물인 NO₂농도는 변화가 없었지만 60 °C이상에서는 NO의 제거량이 감소하여 전체적인 NO_x(NO+NO₂)제거율이 감소하였다. 이는 BaTiO₃-슬러지 하이브리드형 반응기에서 NO_x제거 메커니즘은 슬러지가 활성산소나 NO₂를 흡착하는 것이 아니라 슬러지와 이들 사이의 화학반응에 의해 제거되는 것으로 사료된다.

따라서 정수장 슬러지는 위의 실험결과와 같이 우수한 NO_x제거용 촉매로서 재활용하여 사용이 가능함을 알 수 있고 이로 인하여 현재 사용중인 고가의 촉매를 대체할 수 있음을 알 수 있었으며, 추가적인 신뢰성과 내구성 검정이 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 2000년도 한국과학재단 목적기초 연구비(과제번호 : 2000-2-30400-010-3)지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

[1] 장철현, 신남철, 유해가스 처리공학, 동화기술 1995.
 [2] S. Pekarek, J. Rosenkranz, and H. Lonekova, "Generation of electron beam for technological processes", Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control Part A, Springer-Verlag Pub. Co., pp. 34 5-389, 1993.
 [3] K. Kawamura, S. Aoki, H. Kimura, K.

Adachi, T. Katayama, K. Kengaku and Y. Sawada, "Electron beam dry flue gas treatment process", Environ. Sci. & Tech., 14, pp. 288-293, 1980.
 [4] 清水一男 外1人, "濕式プラズマガス處理", 放電プラズマによるガス狀 環境汚染物質の處理技術に關する總合的研究, pp. 69-78, 1994.
 [5] Akira Mizuno, Yoshifumi Yamazaki, Hiroshilto, and Hiroshi Yoshida, "Ac energized ferroelectric pellet bed gas cleaner", IEEE Trans. on IAS, Vol. 28, No. 3, pp. 535-540, 1992.
 [6] Kazuo Shimizu, Hiroyuki Sone, Akira Mizuno, "Effect of water on NOx removal using pulsed discharge plasma", 靜電氣學會講演論文集, pp. 355-358, 1993.
 [7] 고희석, 박재운, 김건호, "펄스 스트리머 방전을 이용한 NOx 제거", 전기전자재료학회논문지, 10권 8호, pp. 807-812, 1997.
 [8] 박재운, "코로나 방전 시스템을 이용한 연소가스중의 NOx, SO₂제거", 전기전자재료학회논문지, 10권 8호, pp. 830-835, 1997.
 [9] 박재운, 이재동, 고용술, 한상보, 박상현, 이덕출, "자계가 인가된 원통형 플라즈마 반응기에서 질소산화물(NOx)의 제거특성", 전기전자재료학회논문지, 12권 2호, pp. 188-192, 1999.
 [10] J. S. Chang et al, "The effect of ammonia mixing concentration on the reduction of NOx in a combustion flue gas by superimposing surface/silent discharge plasma reactor", 放電プラズ마によるガス狀 環境汚染物質の處理技術に關する總合的研究, pp. 59-68, 1994.
 [11] 장철현, 신남철, "유해가스처리공학", 동화기술, 1995.
 [12] 이용두 외 3명, "슬러지 처리공학", 동화기술, pp.15-18, 1998.
 [13] STANLEY E. MANAHAN, "환경화학", 자유아카데미, 1999.
 [14] 이양규, "상하수도공학", 보문당, pp. 503-541, 1996.
 [15] Shigeru Futamura, Aihua Zhang and Toshiaki Yamamoto, "Behavior of N₂ Nitrogen Oxides in Nonthermal Plasma Chemical Processing of Hazardous Air Pollutants", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 6, Nov./Dec. 2000.