

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 16, No. 1: March 2020 pp. 1-8

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2020.16.1.001>

나노펄스 플라즈마를 이용한 탈황 시스템의 H₂O 및 NH₃, 펄스 인가전압에 따른 입자변환 분석

김 영 훈^{1),2)} · 신 동 호^{1),2)} · 이 건 희¹⁾ · 홍 기 정¹⁾ · 김 학 준¹⁾ · 김 용 진¹⁾ ·

한 방 우^{1),*} · 황 정 호²⁾

¹⁾한국기계연구원 환경시스템연구본부

²⁾연세대학교 기계공학부

(2020년 2월 23일 투고, 2020년 2월 28일 수정, 2020년 3월 2일 게재확정)

The effect of H₂O, NH₃ and applied voltage to the particle conversion in the desulfurization system using a nano-pulse plasma

Younghun Kim^{1),2)} · Dongho Shin^{1),2)} · Gunhee Lee¹⁾ · Keejung Hong¹⁾ · Hak-Joon Kim¹⁾ · Yong-Jin Kim¹⁾ ·

Bangwoo Han^{1),*} · Jungho Hwang²⁾

¹⁾*Environmental System Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials*

²⁾*Mechanical Engineering, Yonsei University*

(Received Feb 23 2020; Revised Feb 28 2020; Accepted Mar 02 2020)

Abstract

Nano-pulse plasma technology has great potential as the process simplicity, high efficiency and low energy consumption for SO₂ removal. The research on the gas-to-particle conversion is required to achieve higher efficiency of SO₂ gas removal. Thus, we studied the effect of the relative humidity, NH₃ concentration and applied voltage of the nano-pulse plasma system in the gas to particle conversion of SO₂. The particles from the conversions were increased from 10 to 100 nm in diameter as relative humidity, NH₃ concentration, applied voltage increases. With these results, nano-pulse plasma system can be used to more efficient removal of SO₂ gas by controlling above parameters.

Keywords: pulse plasma, SO₂, NH₃, relative humidity, gas to particle conversion

*Corresponding author.

Tel : +82-42-868-7068, Fax : +82-42-868-7284

Email : bhan@kimm.re.kr

1. 서론

세계적으로 미세먼지의 관심이 증가함에 따라 국제 암 연구기구에서 미세먼지를 1급 발암 물질로 분류하고 있다 (Brunekreef et al., 2009). 이에 따라 국내에서도 국민건강을 위해 다양한 정책과 미세먼지 저감 대책을 실시하고 있다. 특히 정부는 2019년 11월 미세먼지관리 종합계획을 발표 하면서 국내 배출원 집중 감축 및 미세먼지, CO₂ 저감 신산업을 추진 계획 중이다. 그 중 노후 석탄화력발전 9기 처리 등 기존 석탄 화력발전소의 미세먼지 배출 저감 방안 계획을 발표하였다.

일반적으로 대규모 소각장 및 연소설비에서는 다량의 황산화물(SO_x)과 질소산화물(NO_x)이 방출된다. SO_x와 NO_x는 대기 중에서 광화학반응을 통해 NH₃와 반응하여 입자상물질로 전환되는 미세먼지 전구물질로 알려져 있다. 연소시설에서 SO_x와 NO_x를 처리하는 시설은 선택적 촉매환원법(Selective catalytic reduction: SCR)으로 질소산화물을 처리하고 전기집진기로 입자상물질을 처리한 뒤, 배연탈황법(Flue gas desulfurization: FGD)으로 황산화물을 처리하는 구조로 되어있다. 현재 황산화물 및 질소산화물 처리와 관련하여 SCR, FGD 시스템이 대부분 사용되고 있지만 폐수와 슬러지 발생 효율 및 경제성 저하 문제로 설치비가 저렴하고 높은 처리효율을 얻을 수 있는 기술 개발이 필요한 실정이다 (Chang et al., 1989; Chun et al., 1993; Han et al., 2011).

산업시설에서 배출되는 유해가스 처리기술 중 플라즈마를 이용한 기술은 지난 20년 간 세계적으로 수많은 기초 및 응용 연구가 수행되어 왔으나, 대부분의 분야에서 추가적인 실험과 연구가 부족한 단계라고 평가되고 있다. 특히 황산화물과 질소산화물을 산화시키는 공정으로 펄스 플라즈마 또는 DBD (Dielectric Barrier Discharge)방식의 플라즈마와 함께 전자빔, UV, 방사선 등이 사용되는 연구가 진행되어 왔으나(Christensen et al., 1992; Shin et al., 1999; Chang et al., 2000; Kim et al., 2018), 산화과정에서 생성되는 입자의 변환특성에 대한 정밀한 분석이 부족한 실정이다(Guo et al., 2005, Kim et al., 2005).

본 연구에서는 펄스 전기방전의 미소 나노 펄스 동작 제어를 통해 균일한 나노 펄스를 구현하였고, SO₂가스가 NH₃와 반응하여 입자로 변환되는 특성을 파악하였다. 실험을 통하여 입자 생성에 있어 NH₃의 농도 및 나노펄스 플라즈마 인가전압, 습도에 의한 효과를 보고자 하였다.

SO₂와 NH₃ 가스의 반응을 통해 SO₂ 저감 효율을 향상시키고, 생성된 입자를 Scanning Mobility Particle Sizer와 Optical Particle Counter를 통해 측정하였다.

2. 연구방법

그림 1은 나노펄스 플라즈마를 이용하여 SO₂를 처리하는 시스템의 개략도이다. 펄스 플라즈마 반응기는 stainless-steel 재질의 직경 100 mm 및 길이 1 m의 원통형 구조로 제작되었다. 방전극은 반응기의 중심점을 지나고 있고, 부도체의 재질로 된 고정 모듈에 반응기 윗부분과 아랫부분에 장착 되었으며, 직경 300 μm의 텅스텐 와이어를 사용하였다. 덕트 내부에 흐르는 공기의 유량은 시스템의 끝단에 송풍 팬 (MODEL-KJB3-2600, KIJEON, Korea)을 이용하여 100 m³/h로 발생시켰다. 시스템 전단에서 SO₂, NH₃ 가스를 각각 1% 가스 실린더에서 공급하였고, 가스 레귤레이터, Mass flow meter (TN-2901NE, TN-2921V, smtek, Korea)와 Digital flow controller (DFC-5000S, smtek, Korea)를 이용하여 가스의 유량을 제어하였다. 나노펄스를 발생시키기 위해 최대 30 kV, 1000 Hz의 펄스 주파수, 최소 100 ns의 펄스 상승시간의 사양을 가진 고전압 나노펄스 발생장치(에스에이치, Korea)를 사용하였다. 가스 측정 장비로는 FT-IR 방식의 가스 계측기 (I-4001, Midac corporation, USA)를 사용하여 SO₂, NH₃ 가스의 농도변화를 확인하였다. 입자 측정 장비로는 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS, 3081, 3776, TSI Inc., USA)와 Optical Particle Counter (OPC, Model 1.109, GRIMM Aerosol Technik Co., Germany)를 사용하였다. 또한 입자 샘플링 손실을 최대한 줄이기 위하여 각 입자 측정 장비의 등속흡인 조건을 충족시켰다. 이를 이용하여 반응에 의해 생성되는 입자상 물질을 수 나노미터부터 수십 마이크로미터 영역에 대한 개수농도를 측정하였다. 시스템 내부의 온도와 습도는 Testo (Testo 480, Testo Inc., Germany)를 사용하여 측정하였다. 오실로스코프 (MDO3000, Tektronix, USA)는 반응기에서 펄스 인가 전 후의 전압, 상승시간, 펄스폭, 주파수 값을 측정하였다. 펄스폭과 주파수는 각각 213 ns, 1 kHz 조건에서 실험을 진행하였다.

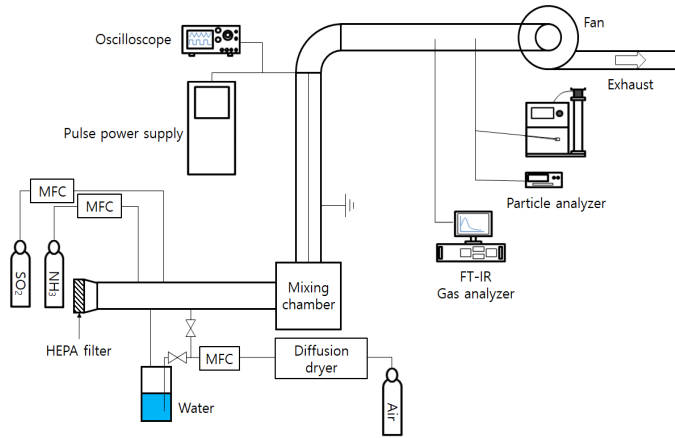
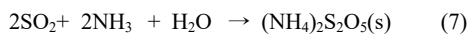
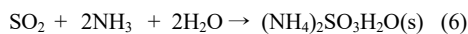
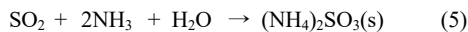
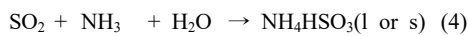
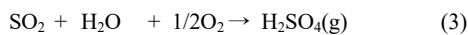
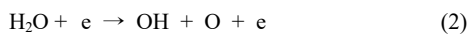
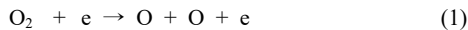


Fig. 1. Schematic of experimental setup for SO₂ and NH₃ reaction.

3. 결과 및 고찰

실험은 나노펄스 플라즈마 반응기 전단에 SO₂, NH₃ 가스를 주입 한 뒤 고전압 발생장치로 나노펄스전압을 인가하여 반응기 후단의 가스 저감 및 입자 생성에 대해 알아보고자 하였다. SO₂ 가스가 입자화되기 위한 반응식으로는 아래와 같다(Christensen et al., 1992; Hirota et al., 1993; Qi and Wang, 2017).



식 (1)과 (2)와 같이 반응기에 주입된 가스 중에 H₂O와 O₂가스는 전자와 나노초 수준의 상승시간을 가진 펄스의 충돌로 O와 OH 라디칼을 생성하고, 식(3)과 같이 SO₂와 반응하여 H₂SO₄(g)로 산화한다. 산화된 H₂SO₄(g)가 NH₃와 결합하면서 식 (4)~(7)과 같이 염의 형태로 생성된다. 식 (4), (5)반응의 경우 식 (6), (7)에 비해 상대적으로 낮은 에너지 준위에서 반응이 일어

나게 된다. 이와 같이 여러 가지의 반응이 존재하고 가스의 온도, 압력 및 water vapor의 조건에 따라 생성물의 종류가 다양하다.

그림 2는 SO₂ 25 ppm, 상대습도 70% 조건에서 NH₃ 농도에 따른 SO₂ 농도와 반응비를 나타내고 있다. 반응비는 아래와 같이 정의하였다.

$$\text{Reaction ratio} = \frac{\text{NH}_{3,0} - \text{NH}_3}{\text{SO}_{2,0} - \text{SO}_2} \quad (8)$$

NH_{3,0} : NH₃ concentration before the reaction (ppm)

SO_{2,0} : SO₂ concentration before the reaction(ppm)

NH₃ : NH₃ concentration after the reaction (ppm)

SO₂ : SO₂ concentration after the reaction (ppm)

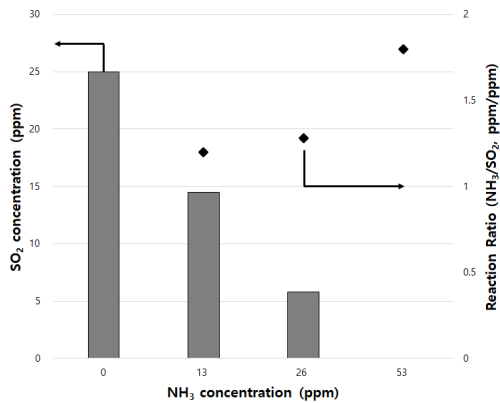


Fig. 2. SO₂ concentration and reaction ratio changes in NH₃ concentrations in condition of RH 70% and pulse 0 kV.

SO₂ 농도는 25 ppm에서 NH₃ 농도를 증가시키기에 따라 약 14, 6, 0 ppm으로 감소하였다. 또한 반응비는 NH₃의 농도에 따라 약 1.2에서 1.8으로 증가하였다. 단순히 SO₂에 NH₃의 농도를 증가시키기에 따라 SO₂ 농도 감소량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 식 (4), (5), (6), (7)에서 본 것과 같이 감소한 SO₂는 NH₃와 반응하여 생성물로 변환되고, 해당 생성물은 황산암모늄이라고 판단된다. 농도가 증가함에 따라 SO₂와 NH₃의 반응비가 증가하는 것은 NH₃의 과주입 조건에서 식 (5)에 의한 1:2 반응이 증가한 것으로 보여진다. 이를 통해 펄스 인가전압 0 kV 조건은 낮은 에너지 준위에서 반응을 나타내는 식 (4), (5)에 의해 NH₄HSO₃와 (NH₄)₂SO₃가 주로 생성되며, NH₃농도가 증가됨에 따라 (NH₄)₂SO₃의 생성이 증가되었다고 판단된다.

그림 3은 그림 2와 동일한 실험 조건에서 입자의 농도를 측정하여 입자 크기에 따른 분포를 나타내고 있다. 6-200 nm 입자는 SMPS로 측정하였고, 200 nm 이상의 입자는 OPC로 측정하였다. NH₃ 0 ppm 조건에서 측정된 입자는 대기진의 입자이다. 약 200 nm 이하 입자는 NH₃ 농도에 따른 영향 없이 대기 수준의 농도와 유사한 것을 확인할 수 있다. 하지만 약 200 nm 이상 입자는 NH₃ 농도가 13 ppm 까지는 입자가 생성이 되지 않았지만, 26 ppm 이상에서는 NH₃ 농도가 증가할수록 생성되는 입자의 농도가 증가하는 것을 확인할 수

있다. 이를 통해 SO₂와 NH₃의 반응으로 생성된 고체의 입자상물질은 100 nm 이상의 크기 형태로 생성되었다고 판단하였다.

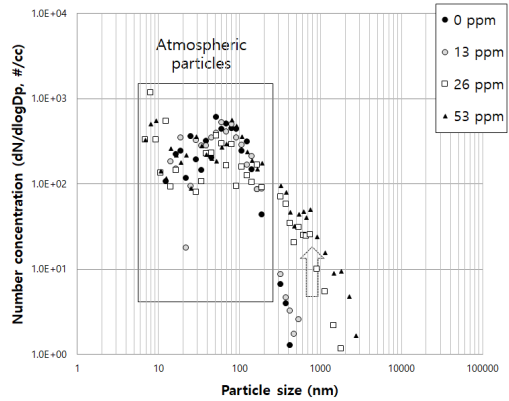


Fig. 3. Number concentration according to particle sizes measured by a SMPS and an OPC for NH₃ concentration from 0 to 53 ppm in condition of SO₂ 25 ppm and RH 70%.

그림 4는 SO₂ 25 ppm, 상대습도 70%, NH₃ 53 ppm 조건에서 나노펄스 인가전압에 따른 입자 분포를 나타내고 있다. 해당 반응기에서 5-7 kV까지는 입자농도가 서서히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 입자생성 및 성장이 활발히 이루어지지 않는 것으로 판단되고, 9 kV 이상 인가 시 약 10 nm와 100 nm의 입자가 활발히 생성 및 성장되는 분포를 확인할 수 있었다. 반응식 (1)과 (2)에 의해 나노펄스가 -OH 라디칼 및 -O 라디칼을 생성하고, 이를 통해 SO₂가 산화되어 H₂SO₄가 생성된다. H₂SO₄는 homogeneous nucleation 또는 NH₃와 반응하여 sulfate aerosol과 황산암모늄 입자로 생성된다. 그림 3을 통해 펄스 미인가시 NH₃ 농도가 증가함에 따라 약 200 nm 이상의 황산암모늄 형태의 입자가 생성되는 것을 확인하였다. 여기에 펄스를 9 kV 이상으로 인가 시 모든 입경대의 입자가 급격히 증가하여 10 kV 인가 시 10 nm 입자의 경우 약 100배 이상 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

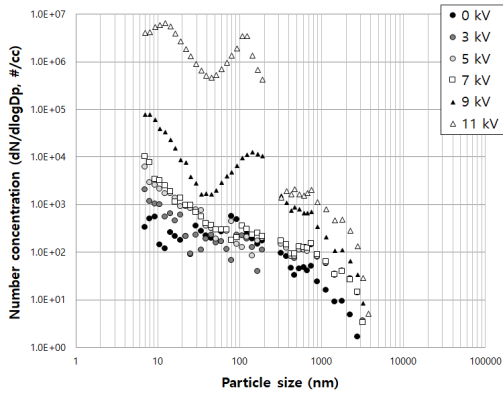


Fig. 4. Number concentration according to particle sizes measured by a SMPS and an OPC for applied voltages from 0 to 10 kV in condition of SO₂ 25 ppm, NH₃ 53 ppm and RH 70%.

그림 5는 SO₂ 25 ppm 및 습도 70%, 펄스 10 kV 조건에서 NH₃ 농도에 따른 SO₂ 농도 및 반응비를 나타내고 있다. SO₂ 가스의 초기 농도는 25 ppm에서 펄스 10 kV 인가 시 SO₂의 농도는 변화가 없었다. 펄스 10 kV 유지한 후 NH₃ 농도를 증가시키에 따라 SO₂의 농도는 16, 8, 0 ppm 수준으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 반응비는 NH₃의 농도가 증가함에 따라 1.4에서 1.7까지 증가하였다. 그림 2와 비교하였을 때 NH₃ 농도 13, 26 ppm조건에서 반응비가 증가한 것은 펄스 에너지로 인해 높은 에너지 준위에서 일어나는 식 (5)와 (6)의 반응이 증가한 것으로 판단된다. 이로 인해 SO₂와 NH₃의 1:2 반응이 증가함에 따라 SO₂의 감소량이 미세하게 감소한 것으로 보여진다.

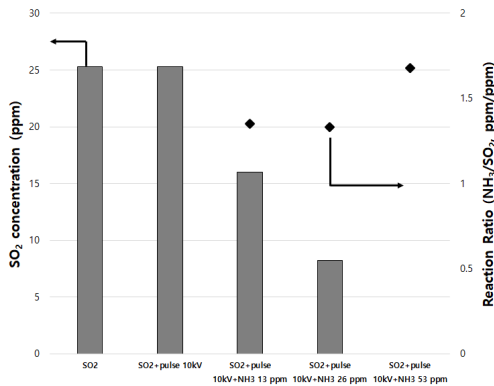


Fig. 5. SO₂ concentration and reaction ratio according to NH₃ concentrations in condition of applied voltage 10 kV and RH 70%.

그림 6은 SO₂ 25 ppm, 펄스 10 kV 조건에서 NH₃ 농도에 따른 입자 농도의 변화를 나타내고 있다. SO₂에 10 kV 인가한 조건에서 NH₃를 공급하지 않아도 입자가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 아래의 반응에 의해 생성된 입자로 판단된다(Kim et al., 1998; Young et al., 2008).

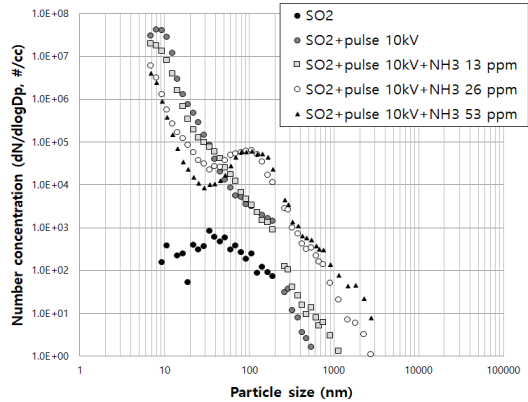
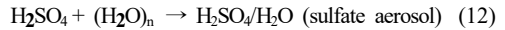
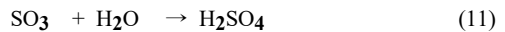
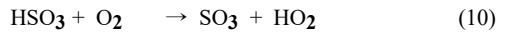
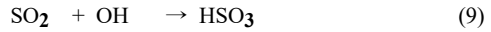
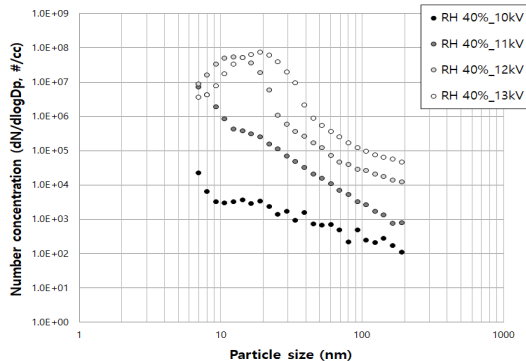


Fig. 6. Number concentration according to particle sizes measured by a SMPS and an OPC for NH₃ concentration in condition of voltage 10 kV applied, SO₂ 25 ppm and RH 70%.

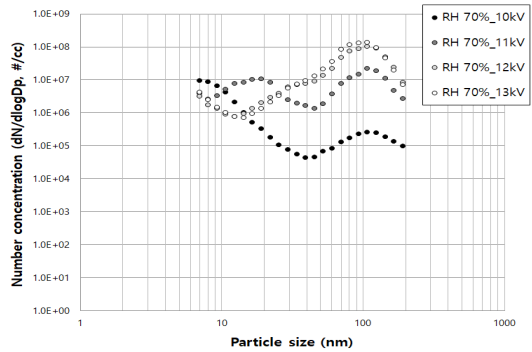
나노펄스에 의해 OH 라디칼이 생성되고, 이는 SO₂를 산화시켜 가스 상의 H₂SO₄를 생성한다. 이때 수분에 의해 binary homogeneous nucleation이 일어나고, sulfate aerosol이 생성된다. NH₃ 농도를 증가시킬 경우 약 10 nm대 입자는 감소하는 동시에 약 100 nm 크기의 입자는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 핵화를 통해 생성된 sulfate aerosol과 NH₃가 반응할 경우 황산암모늄을 생성하는 동시에 입자 성장이 이루어지고, 가스 상태의 H₂SO₄와 NH₃가 반응할 경우 입자가 homogeneous nucleation을 통해 생성된다고 판단된다. 또한 그림 4의 9 kV, 10 kV 조건에서 생성된 약 10 nm 모드의 입자의 경우 SO₂와 NH₃ 반응으로 생성된 입자

가 아닌 SO₂와 수분의 핵화로 생성된 sulfate aerosol이고, 약 100 nm모드의 입자의 경우 sulfate aerosol과 NH₃의 반응에 의해 성장된 염이라 판단할 수 있다.

그림 7은 상대습도가 40, 70% 조건에서 SO₂ 25 ppm, NH₃ 26 ppm 주입 후 펄스 인가전압에 따른 입자 농도분포를 200 nm 이하 입자에 대해 나타내고 있다. 상대습도 40, 70% 조건 모두에서 인가전압에 따라 개수농도가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 상대습도 40% 조건에서 20 nm 이하 입자들은 인가전압이 증가할수록 모드 입경이 커지는 것을 확인 할 수 있다. 10, 11 kV에서는 측정 영역을 벗어난 범위에서 입자 성장이 이루어지고 있고, 12, 13 kV 에서는 약 11, 20 nm로 모드 입경이 커지는 것을 확인하였다. 70% 조건에서는 40%와 달리 두 개의 모드입경을 확인 할 수 있다. 10 kV 에서는 약 7 nm, 100 nm 의 bi-modal 형태를 띠고 있다. 11 kV에서는 10 kV에서 모드입경이 7 nm인 입자가 20 nm로 성장이 이루어지고, 100 nm 입자의 경우 입자생성이 보다 활발하게 이루어진 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 저수분의 조건에서 펄스는 sulfate aerosol의 성장을 촉진시키며, 특히 펄스 10 kV 인가할시 습도 70% 조건에서는 습도 40% 조건보다 활발한 sulfate aerosol의 성장을 보여준다. 또한 습도 70% 조건에서 펄스의 인가전압을 증가시킬수록 100 nm 입자가 급격하게 증가하는 것으로 보아, 황산암모늄 입자를 보다 많이 생성시키는 역할을 할 수 있다고 판단된다. 이에 수분은 펄스가 인가되는 조건에서 황산암모늄 염 형태의 입자생성 및 성장에 중요한 역할을 한다고 여겨진다.



(a)



(b)

Fig. 7. Number concentration according to particle sizes measured by a SMPS for applied voltages in condition of SO₂ 25 ppm and NH₃ 26 ppm. Here, relative humidity is 40% (a) and RH 70% (b).

그림 8은 앞선 실험들 중 상대습도 70% 조건에서 SO₂ 25 ppm에 NH₃ 투입 및 펄스 10 kV를 인가했을 때의 부피농도 변화를 나타내고 있다. pulse 미인가시 SO₂와 NH₃가 반응하여 생성되는 입자는 주로 고체상의 황산암모늄이며, 해당 입자의 크기는 약 1 μm대 입자라는 것을 확인할 수 있었다. 또한 펄스 10 kV 인가 조건에서 10 nm 크기인 sulfate aerosol이 NH₃ 단독 조건보다 약 10,000배 생성되고, 입자 성장 또한 활발하게 일어나 1 μm 크기의 입자가 약 10배 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 펄스플라즈마는 SO₂를 입자화하는 동시에 성장시키는 측면에서 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

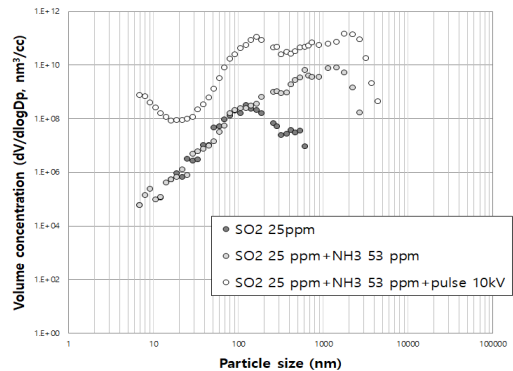


Fig. 8. Volume concentration according to particle sizes measured by a SMPS and an OPC for NH₃ concentration and applied voltage in condition of SO₂ 25 ppm and RH 70%.

4. 결론

SO₂ 가스를 저감시키기 위해서는 NH₃와 SO₂의 농도비가 주요 역할을 하였고, 펄스 플라즈마 인가전압에 의해 SO₂ 가스가 입자로 전환 및 성장하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 입자의 생성측면에서 나노펄스는 인가전압을 증가시킴에 따라 입자의 생성 및 성장이 촉진되며, SO₂와 H₂O, 펄스에 의한 반응으로 생성된 입자는 상대적으로 작은 약 10 nm 입경의 입자를 생성하고, SO₂와 NH₃, H₂O의 반응으로 생성된 입자는 상대적으로 큰 약 100 nm 이상 크기의 입자로 성장된다는 것을 확인할 수 있었다. 이에 해당 시스템에서 나노펄스는 SO₂와 H₂O와 반응하여 sulfate aerosol 생성을 촉진시키고, SO₂와 NH₃, H₂O에 의해 생성되는 황산암모늄 입자로 성장시키는 역할을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 NH₃ 가스농도 및 나노펄스 플라즈마의 인가전압, 습도에 의해 SO₂ 가스의 저감 및 입자화되는 것을 확인하였다. 해당 반응들로 생성되는 입자들은 작은 입자 영역에 속하는 약 10 nm와 100 nm 로써, 확산에 의한 포집효율이 높은 영역이다. 추가 연구를 통해 산업의 탈황 시설에 적용할 경우, 미세먼지 전구물질인 SO₂를 대기 중에 배출되기 이전에 입자화함과 동시에 포집을 함으로써 미세먼지 저감에 효과적인 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 환경부 환경산업선진화기술개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. (grant no. 2017000110002)

References

- Brunekreef, B., Beelen, R., Hoek, G., Schouten, L., Bausch-Goldbohm, S., Fischer, P., Armstrong, B., Hughes, E., Jerrett, M., and Brandt, P. (2009). Effects of long-term exposure to traffic-related air pollution on respiratory and cardiovascular mortality in the Netherlands: the NLCS-AIR study, Research Report Health Effect Institute, 139, 5-71.
- Chang, H.S., and Choi, Y.R. (2000). Particulate conversion of SO₂ by NH₃ injection in a pulsed corona aerosol reactor, *Aerosol Science and Technology*, 32(4), 268-283.
- Chang, J.S. (1989). The role of H₂O and NH₃ on the formation of NH₄NO₃ aerosol particles and De-NOx under the corona discharge treatment of combustion flue gases, *Journal of Aerosol Science*, 20(8), 1087-1090.
- Christensen, P.S., Madsen, N.M., and Livbjerg, H. (1992). The formation of aerosols from SO₂ and NH₃ in humid air, *Journal of Aerosol Science*, 23(1), 261-264.
- Chun, M.Y., Lee, Y.J., and Kim, H.K. (1993). A study on equilibrium of NH₄NO₃(s) - HNO₃(g) - NH₃(g) in urban atmosphere, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 9(2), 154-159.
- Guo, Y., Liu, Z., Huang, Z., Liu, Q., and Guo, S. (2005). Reaction behavior of sulfur dioxide with ammonia, *Industrial and Engineering Chemical Research*, 44, 9989-9995.
- Han, B., Kim, H.J., and Kim, Y.J. (2011). The experimental study on removal of sulfur dioxide and nitrogen oxide using a nano-pulse corona discharger at different temperatures, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(4), 387-394.
- Hirota, K., Niina, T., Anwar, E., Namba, H., Tokunaga, O., and Tabata, Y. (1993). Reactions of sulfur dioxide with ammonia, *Environmental Science*, 6(2), 143-150.

- Kim, K.M., Seo, H.S., Park, J.H., Kim, T.H., Lee, J.H., and Son, Y.S. (2018). A study on additives for improvement of SO₂ removal process using an electron beam, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 772-779.
- Kim, S.M., Kim, D.J., and Kim, K.S. (2005). Efficient desulfurization and denitrification by low temperature plasma process, *Korean Chemical Engineering Research*, 43(1), 129-135.
- Kim, T.O., Ishida, T., Adachi, M., Okuyama, K., and Seinfeld, J.H. (1998). Nanometer-sized particle formation from NH₃/SO₂/H₂O/Air mixtures by ionizing irradiation, *Aerosol Science and Technology*, 29(2), 111-125.
- Qi, G., and Wang, S. (2017). Thermodynamic modeling of NH₃-CO₂-SO₂-K₂SO₄-H₂O system for combined CO₂ and SO₂ capture using aqueous NH₃, *Applied Energy*, 191, 549-558.
- Shin, D.H., Woo, J.K., Kim, S.G., Baek, H.C., Park, Y.S., and Cho, J.G. (1999). A study on the reaction characteristics of desulfurization and denitrification in nonthermal plasma conditions, *Journal of Energy Engineering*, 8(1), 150-158.
- Young, L.H., Benson, D.R., Kameel, F.R., Pierce, J.R., Junninen, H., Kulmala, M., and Lee, S.H. (2008). Laboratory studies of H₂SO₄/H₂O binary homogeneous nucleation from the SO₂+OH reaction: evaluation of the experimental setup and preliminary results, *Atmospheric Chemistry Physics*, 8, 4997-5016.