

방전플라스마에 의한 NO_x, SO_x 분해시 메탄첨가의 영향

강현춘[†] · 우인성^{*} · 강안수^{**}

제주산업정보대학 환경공학과 · ^{*}인천대학교 안전공학과 · ^{**}명지대학교 화학공학과
(1999. 7. 26. 접수 / 2000. 3. 8. 채택)

Effect of CH₄ Addition in Case of Decomposition of NO_x, SO_x by Discharge Plasma

Hyun-Choon Kang[†] · In-Sung Woo^{*} · An-Soo Kang^{**}

Department of Environmental Engineering, cheju College to Technology

[†]Department of Safety Engineering, Incheon University · ^{**}Department of Chemical Engineering, Myongji University

(Received July 26, 1999 / Accepted March 8, 2000)

Abstract : For hazardous air pollutants(HAP) such as NO, NO₂ and SO₂ decomposition efficiency, power consumption, and applied voltage were investigated by SPCP(Surface induced discharge Plasma Chemical Processing) reactor to obtain optimum process variables and maximum decomposition efficiencies. Decomposition efficiency of HAP with various electric frequencies(5~50 kHz), flow rates(100~1,000 mL/min), initial concentrations(100~1,000 ppm) and additive(CH₄) were measured and the products were analyzed with FT-IR. Experimental results showed that for the frequency of 10 kHz, the highest decomposition efficiency of 94.3 % for NO, 84.7 % for NO₂ and 99 % for SO₂ were observed at the power consumptions of 19.8, 20 and 19W, respectively, and that decomposition efficiency decreased with increasing frequency above 20 kHz. And decomposition efficiency per unit power were 5.21 %/W for SO₂, 4.76 %/W for NO and 4.24 %/W for NO₂, and the highest decomposition efficiency was observed with SO₂. Decomposition efficiency was increased with increasing residence times and with decreasing initial concentration of pollutants. When the additive of CH₄ was used, decomposition efficiency was increased with increasing CH₄ content, and NO, NO₂ and SO₂ were almost completely decomposed with the efficiency of 99 %, 98 % and 99 %, respectively and therefore CH₄ was a good additive material. The optimum power for the maximum decomposition efficiency were 7.5 W for SO₂, 9.5 W for NO and 15.5 W for NO₂, respectively. Optimum power with the maximum decomposition efficiency were 9.5 W at 1,000 ppm of NO, 7~8 W at 100~500 ppm of NO and 15.5 W at all concentration range of NO₂ and 11.5 W at 1,000 ppm, 4.9 W at 500 ppm, 3.7 W at 100~300 ppm of SO₂ and power efficiency was best in these case.

1. 서 론

도시화, 공업화 등 산업의 발달로 인한 환경오염현상이 날로 심화되고 있고 이러한 환경오염에 영향을 미치는 대기오염 물질은 자동차, 항공기, 선박, 화력발전소, 화학공업 및 대규모 산업설비 등의 다양한 분야에서 발생하고 있으며, 이

들로부터 배출되는 질소화합물(NO_x), 황산화물(SO_x) 및 휘발성 유기화합물(volatile organic compound, VOC) 등이 날로 증가하여 지구 환경파괴에 심각한 영향을 미치고 있다^{1,2)}.

이러한 환경오염문제를 해결하기 위하여 국내 외에서 활발한 연구가 진행되고 있는 기술이 비열플라스마(non-thermal plasma) 기술이다. 저온 플라스마(low-temperature plasma) 또는 비평형 플라스마(non-equilibrium plasma)라고도 불리는 이

[†]To whom correspondence should be addressed.
hckang_env@jeju.ac.kr

기술은 반응하는 동안 대부분 에너지가 전자에 집중되어 이온이나 중성입자보다 온도가 극히 높게 되고, 이 전자가 기준가스 입자와 충돌하여 생성된 라디칼이 대상물질을 분해하는 방식으로 X선 발생을 동반하여 많은 문제점을 안고 있는 전자빔 조사(electron beam irradiation)기술보다 각광 받는 기술이다.

비평형 플라스마에 의한 유해가스의 제거기술은 방전 반응기에 따라 4가지로 분류될 수 있는데 연면방전(SPCP, Surface discharge induced Plasma Chemical Process), 펄스방전(PPCP, Pulse corona induced Plasma Chemical Process), 부분방전(Partial discharge in ferroelectric pellet layer) 및 무성방전(Silent corona dielectric barrier discharge) 등으로 나눌 수 있다.

SPCP방식은 원통형 또는 평판형 유전체의 상하면에 코일형 방전전극(discharge electrode)과 면상 접지전극(base electrode)을 설치하고 수 kHz에서 수십 kHz의 고전압을 인가하여 강력한 연면플라스마를 발생시 유해물질을 분해하는 방식으로, Masuda³⁾는 연면방전방식에 의해 NO_x와 SO_x를 분해하여 90 % 이상의 분해율을 나타냈으며, Oda 등⁴⁾은 cylindrical ceramic-based(92 % alumina) reactor에서 CFC-113과 CFC-22 등을 분해하여 CFC-22는 1,000 ppm의 초기농도, 9 초의 체류시간, 4 kV의 전압 및 10 kHz의 주파수에서 최대 90 %의 분해율을 보였다고 보고하였다.

펄스방전 방식은 wire-cylinder나 wire-plate 방식의 코로나 방전용 전극에 10~500 ns의 펄스 고전압을 인가하여 전극 공간 내에 스트리머 코로나를 발생시켜 대상물질을 분해하는 방식으로 Xiyao 등^{5,6)}은 저온, 상압하에서 NO_x의 경우에 90 %⁵⁾, SO₂의 경우에 99.3 %⁶⁾의 분해율을 얻었으며, Takahashi 등⁷⁾은 1,000 ppm의 초기농도, 4.36 초의 체류시간, 19 kV의 전압에서 CFC-113을 분해하여 최고 99 %의 분해율을 나타내었다고 보고하였다.

부분방전 방식은 전극공간에 강유전체 pellet을 충전하여 그 양끝전극에 주로 상용 주파수인 50~60 Hz의 고전압을 인가하여 pellet 근방에 높은 전계를 형성하여 대상물질을 분해하는 방식으로 Obama 등⁸⁾은 N₂와 건조공기를 기준가스로 사용하여 5 W의 전력파 100 ppm의 초기농도에서 NO_x를 분해하여 80~90 %의 분해율을 나

타냈으며, 무성방전은 두 전극간에 절연벽을 설치하고 양전극에 수 kHz 정도의 저주파 전압을 인가하여 두 전극사이에 에너지효율이 큰 저온 플라스마를 생성하여 대상물질을 분해하는 방식으로 Harano 등⁹⁾은 co-axial과 cylindrical tube로 구성된 dielectric barrier방전에 의해 500 mL/min의 유량, 107 ppm의 초기농도, N₂ gas flow 5 L/min에서 NO를 분해하여 높은 분해효율을 보였다고 보고하였다.

첨가물질에 관한 최근의 연구로는 Mizuno 등¹⁰⁾이 배기가스 정화효율을 높이기 위한 실험을 하여 과산화수소(H₂O₂)가 상당한 첨가효과를 보였고 60 %의 NO_x를 제거하는데 소모된 에너지는 10 J/L라고 보고하였으며 Veldhuizen¹¹⁾은 펄스와 dielectric radical shower의 combined system에서 NO_x와 SO₂제거실험을 한 결과, 300 ppm의 초기농도에서 NH₃를 첨가하여 80 %의 NO_x와 95 %의 SO₂를 제거하였다고 보고하였다.

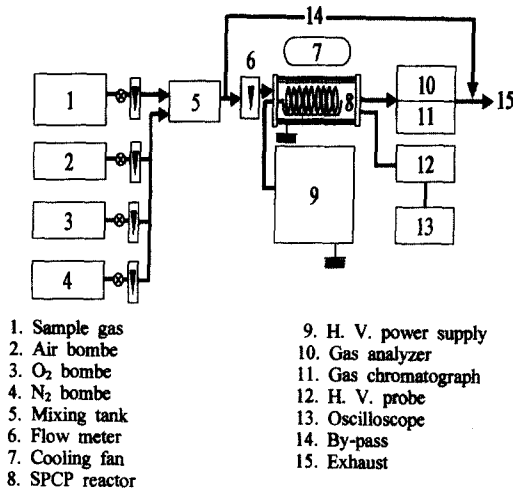
이상과 같은 플라스마 방전에 대한 여러 가지 연구가 진행되었으나 주파수, 유량 및 농도 등 여러 변수들의 영향을 체계적으로 연구한 결과는 없었으며 특히, 메탄을 첨가물질로 하여 구체적으로 연구한 논문은 아직 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 대기환경 오염의 주원인으로 알려진 일산화질소, 이산화질소, 이산화황을 주파수, 유량, 농도 및 첨가물질(CH₄)에 대하여 특수 설계된 플라스마 연면방전 반응기를 이용하여 분해효율을 구하고, 생성물의 분석을 통하여 최적의 공정변수와 최고의 분해효율을 얻고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

플라스마 방전에 의한 유해가스를 분해하기 위한 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 시료가스(NO_x, SO₂)와 기준가스는 유량계를 통하여 혼합탱크로 도입되어 혼합된 다음 반응기로 주입된다. 이 때 모든 가스의 수송은 내부식성이 좋은 직경 10 mm의 테프론관을 이용하였다. 반응기는 코일형 연면방전 반응기를 이용하였고 발열반응에 의한 반응기의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 냉각 팬을 설치하였다.

방전에 필요한 전력은 고전압전원공급장치(SIS electronics co. SHP6501)를 사용하여 5, 10, 20 및 50 kHz의 주파수와 0~12 kV의 전압범위



- 1. Sample gas
- 2. Air bombe
- 3. O₂ bombe
- 4. N₂ bombe
- 5. Mixing tank
- 6. Flow meter
- 7. Cooling fan
- 8. SPCP reactor
- 9. H. V. power supply
- 10. Gas analyzer
- 11. Gas chromatograph
- 12. H. V. probe
- 13. Oscilloscope
- 14. By-pass
- 15. Exhaust

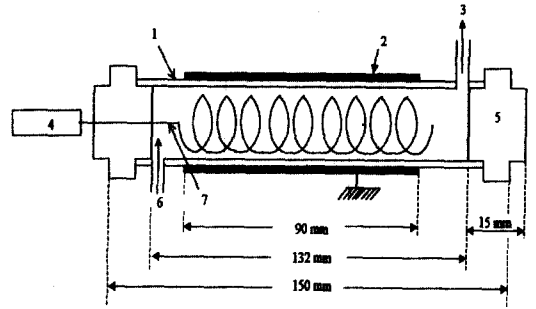
Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

에서 실험하였다. 분해가스는 NO_x, SO_x 분석기(Ecom-AC, Germany)를 사용하여 NO, NO₂ 및 SO₂를 분석하였다.

시료가스의 분해시 전압과 주파수는 고전압을 직접 측정할 수 없기 때문에 1000 : 1로 전압과 전류를 희석하기 위하여 감쇠기(PR30 AC/DC, England)를 사용하였고, 오실로스코프(Hewlett Packard model 54601A, 500 MHz)와 기록계를 사용하여 측정 확인하였다. 최종생성물의 분해는 FT-IR (Nicolet, Magna-IR 560)을 사용하여 분석하였고, 가스용 특수 셀은 직경 10 cm Pyrex 가스 셀을 이용하였다.

NO_x/SO_x 분석기는 화학발광법(chemiluminescence)을 이용하여 측정하였다. 화학발광법은 NO가스를 예로 들면, NO와 O₃와의 반응에 의하여 전자강도가 분석기에 들어오는 NO 농도에 비례하는 것에 기초한 것이다.

코일형 연면방전 반응기의 상세도는 Fig. 2에 나타내었다. SPCP반응기는 절연 지지체로서 열적으로 안정하고 연면방전이 잘되는¹²⁾ 석영관과 테플론 stopper를 사용하였고 방전전극의 전극재료는 열적으로 안정하고 내구성이 높은 직경 1, 2 및 3 mm의 고순도 텅스텐 전극(순도 99.9%)을 기준전극으로 하였으나, 구리와 알루미늄도 전극재료로 사용하였다. 원통형 석영관 반응기는 내경이 13 mm이고 굵기가 1 mm이며 길이는 110 mm이었다. 방전전극은 반응기 내부에 텅스텐선으로 7회 나선형으로 감아서 전극으로 사용



- 1. Quartz(Di : 13 mm, Do : 15 mm)
- 2. Aluminum
- 3. Sample gas out
- 4. High voltage power supply
- 5. Teflon stopper
- 6. Sample gas in
- 7. Tungsten(9 mm)

Fig. 2. Schematic diagram of discharge plasma reactor

하였다. 접지전극(ground electrode)은 석영관의 표면에 알루미늄 호일을 싸서 고전압발생기의 접지에 연결하였다. 플라즈마를 발생시키기 위하여 방전전극을 고압측에 연결하고 알루미늄 호일을 접지측에 연결하였다. 또한 플라즈마 발생시 생성되는 열을 충분히 방열시키기 위하여 냉각 팬으로 냉각시켰다.

본 실험에 사용된 표준 시료가스는 1,500 ppm NO(N₂ base 99.95%), 1,500 ppm NO₂(N₂ base, 99.95%) 및 1,500 ppm SO₂(N₂ base, 99.95%)를 사용하여 실험하였다. 시료가스의 유량은 N₂, 시료가스 및 첨가 가스(CH₄)를 실험조건에 따라 유량계에 부착된 조절밸브로 조절하면서 혼합탱크에서 혼합하였으며 혼합한 가스는 유량계를 사용하여 100, 200, 500, 800 및 1,000 mL/min로 유량을 변화시키면서 반응기에 주입하였고, 이때 가스 분석기로 NO_x와 SO_x의 농도를 측정하였다. 가스의 농도는 순도 99.95%의 N₂ 가스와 표준시료가스를 혼합하여 초기농도 100, 300, 500 및 1,000 ppm으로 하여 정상상태가 되도록 3~5분간 유지시킨 후 분해하였다.

실험은 상온, 대기압하에서 하였으며 시료가스가 누출되는 것을 방지하기 위하여 테플론으로 연면방전 반응기를 밀봉하였으며 초기농도는 정상상태에 도달한 후 분석기로 확인한 후 분해하였다. 입력전력은 오실로스코프와 기록계로 파형을 관찰하면서 전압과 전류를 상승시켜 반응기내에서 플라즈마가 확실하게 발생하는 최저전력부터 증가시키면서 실험을 하였다. 입력전력을 일정하게 유지시킨 후에 반응기를 통과한

시료가스 속에 있는 NO, NO₂ 및 SO₂의 농도가 거의 변화되지 않을 때의 측정값을 기록하였다.

실험변수는 표준가스의 유량과 농도, 주파수 변화 및 첨가물질(CH₄) 등을 변화시켰고, 이들 실험변수의 기준값은 시료가스 300 ppm의 농도, 10 kHz의 주파수, 200 mL/min의 유량, W을 전극재질, 1 mm의 전극극기, 7 회의 감은횟수 및 기준가스를 N₂로 하였다. 이들 실험변수 중 기준값을 고정하고 한 개의 변수만을 변화시키면서 실험을 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3은 연면방전 반응기의 주파수를 5, 10, 20 및 50 kHz로 변화시켰을 때 방전전력에 대한 NO 가스의 분해제거율을 나타낸 것으로 이 때 300 ppm의 초기농도, 200 mL/min의 유량 및 기준가스는 N₂를 이용하였다. 이 경우 방전전력이 커질수록 분해율이 증가하였고 본 실험범위 내에서는 10 kHz와 19.8 W에서 94.3 %의 최대의 분해율을 나타냈으며 방전출력이 커질수록 전류가 증가하여 분해율이 처음에는 지수함수적으로 급속히 증가하다가 18~20 W의 높은 방전출력 범위에서는 서서히 증가하는 것을 알 수 있었다. 주파수에 따른 분해율을 비교할 때 10 kHz에서 20 kHz, 50 kHz로 주파수가 증가함에 따라 분해율

이 감소하였으며 10 kHz에서 5 kHz로 주파수가 감소함에 따라 또한 분해율이 감소하였다. 결과적으로 10 kHz를 분기점으로 고주파수 범위에서는 주파수가 작아질수록, 저주파수 범위에서는 주파수가 커질수록 분해율이 높아짐을 알 수 있었으며 10 kHz가 최적주파수임을 확인할 수 있었다.

이것은 5 kHz의 저주파수 범위에서는 방전효율이 낮기 때문이고, 20 kHz 이상에서는 고전압에서 주파수가 커질수록 기준가스인 부도체의 전도성이 증가하여 연면을 따라 전류가 channeling 현상과 같이 일부분으로만 흐르기 때문에 고주파 영역에서는 방전효율이 감소한다. 또한 PPCP 반응기를 이용하여 NO_x의 분해제거 실험에서 고주파에서 상대적으로 많이 발생한 라디칼 자체가 다시 재결합하기 때문이라고 Mizuno 등¹⁰⁾이 설명하였다. 최대분해율의 최고점이 생기는 것은 inductive reactance XL과 capacitive reactance XC가 동일하게되는 공진현상을 이루어 전류가 최대로 흐르기 때문에 운동량이 증가하여 분해율이 커진다¹³⁾.

본 연구에서 주파수의 변화는 10 kHz와 18~20 W의 높은 전력값에서 높은 분해율을 보였기 때문에 이후의 실험은 모든 전력 범위에서 안정된 분해율을 갖는 10 kHz를 기준 주파수로 하여 실험하였다.

Fig. 4는 NO₂ 가스의 체류시간을 1.05~10.5

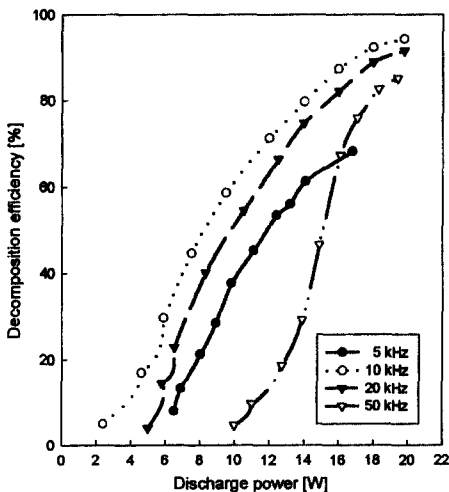


Fig. 3. Effect of electric frequency on decomposition efficiency of NO (N₂ base, C_{NO}⁰: 300 ppm, flow rate: 200 mL/min, discharge electrode: W)

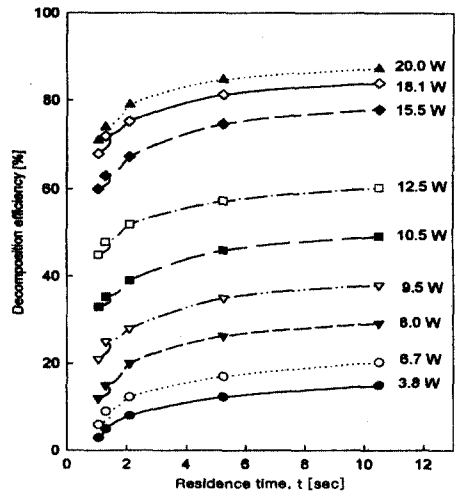


Fig. 4. Effect of residence time on decomposition efficiency of NO₂ (C_{NO₂}⁰: 300 ppm, frequency: 10 kHz, base gas: N₂, discharge electrode: W)

초로 변화시켰을 때 방전전력에 대한 NO₂ 가스의 분해제거율을 나타낸 것으로 이 때 주파수는 10 kHz, 초기농도는 300 ppm이었고 기준가스는 N₂이었다. NO₂가스의 체류시간이 길어질수록, 즉 유량이 작아질수록 분해율이 높게 나타났으며 이는 유량이 작을수록 반응기를 통과하는 체류시간이 증가하여 기준가스와 충돌할 수 있는 충돌주파수(ν_c)가 증가되어 반응에 필요한 에너지가 커지므로 라디칼이 많이 생성되어 NO₂ 가스와 반응하여 분해율이 높게 나타나는 것으로 사료된다^{14~16}).

Fig. 5는 NO₂ 가스의 초기농도를 100, 300, 500 및 1,000 ppm으로 변화시켰을 때 방전전력에 대한 NO₂가스의 분해 제거율을 나타낸 것으로 이 때 주파수는 10 kHz, 유량은 200 mL/min이었고 기준가스는 N₂이었다. 초기농도가 작을수록 분해율이 높게 나타났으며 이것은 초기농도가 작을수록 NO₂ 분자가 분해하는데 필요한 에너지가 커지기 때문이라고 사료된다. 이것은 기준가스와 충돌하여 생성된 N·, O· 및 OH· 라디칼이 NO₂분자와 반응하거나 자유전자가 직접 NO₂와 충돌하여 반응할 수 있는 확률이 커지므로 분해율이 높게 나타나는 것으로 사료된다^{14,16}).

실제 배기가스의 경우와 비교하기 위하여 산소와 공기기준가스 일 때를 실험한 결과 산소의 양이 많을수록 분해가 잘되는 것을 알 수 있었다.¹⁷⁾

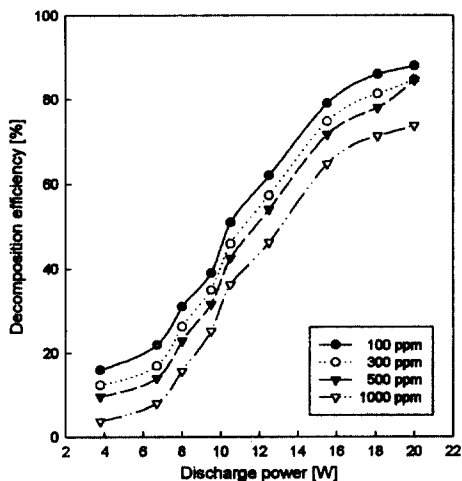


Fig. 5. Effect of initial concentration of NO₂ on decomposition efficiency (flow rate : 200 mL/min, frequency : 10 kHz, base gas : N₂, discharge electrode : W)

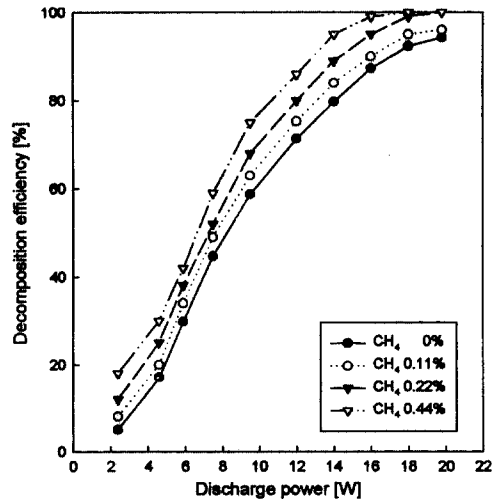


Fig. 6. Effect of additive CH₄ decomposition efficiency of NO (C_{NO}⁰ : 300 ppm, flow rate : 200 mL/min, frequency : 10 kHz, base gas : N₂, discharge electrode : W)

Fig. 6은 분해율을 높이기 위하여 메탄을 0.11, 0.22 및 0.44 vol. %로 첨가하면서 NO 가스의 분해 제거율을 구한 것으로 이 때 주파수는 10 kHz, 유량은 200 mL/min, 기준가스는 N₂ 이었고 초기농도는 300 ppm이었다. 메탄을 첨가한 양이 커질수록 분해제거율이 증가하여 16~20 W의 높은 전력에서는 99 %의 분해율을 얻을 수 있었다. 이것은 메탄분자가 CH₃· 라디칼과 H· 라디칼로 분해되면서 이 때 생성된 H· 라디칼과 NO분자와 반응하여 생성된 O· 라디칼이 반응하여 NO의 산화에 필요한 OH· 라디칼을 생성하므로 탄화수소의 농도가 커질수록 분해제거율이 증가한다고 사료된다^{10,18)}.

Fig. 7은 메탄을 0.11, 0.22 및 0.44 vol. %로 첨가하면서 NO₂ 가스의 분해제거율을 구한 것으로 이 때 주파수는 10 kHz, 유량은 200 mL/min, 기준가스는 N₂이었고 초기농도는 300 ppm이었다. 메탄을 첨가한 양이 많아질수록 분해제거율이 증가하여 20 W의 높은 전력에서는 98 %의 분해율을 얻을 수 있었으나 NO에 비교하여 전력이 많이 소모되었다. 이것은 메탄분자가 CH₃· 라디칼과 H· 라디칼로 분해되면서 이 때 생성된 H· 라디칼과 NO₂분자와 반응하여 생성된 O· 라디칼이 반응하여 NO₂의 산화에 필요한 OH· 라디칼을 생성하므로 탄화수소의 농도가 커질수록 분해제거율이 증가한다고 사료된다^{10,18)}.

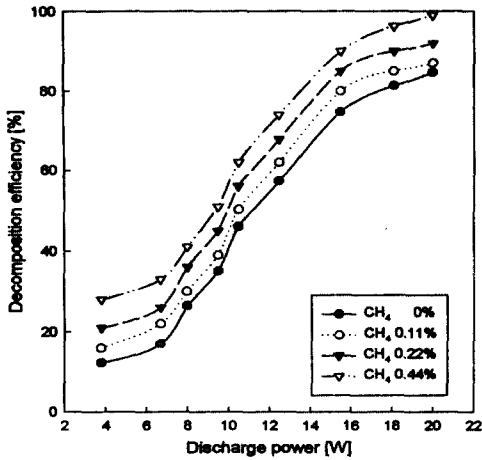


Fig. 7. Effect of additive CH₄ decomposition efficiency of NO₂ (C_{NO₂}⁰: 300 ppm, flow rate: 200 mL/min, frequency: 10 kHz, base gas: N₂, discharge electrode: W)

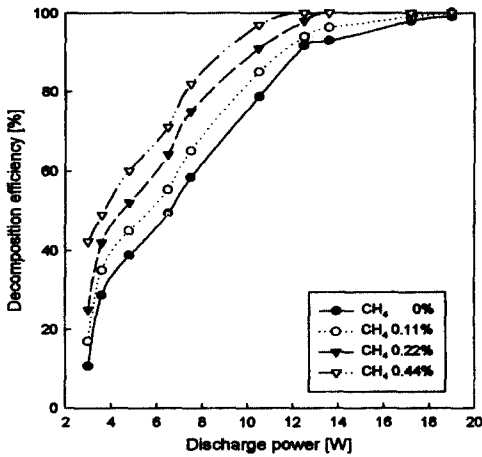


Fig. 8. Effect of additive CH₄ decomposition efficiency of SO₂ (C_{SO₂}⁰: 300 ppm, flow rate: 200 mL/min, frequency: 10 kHz, base gas: N₂, discharge electrode: W)

Fig. 8은 메탄을 0.11, 0.22 및 0.44 vol. %로 첨가하면서 SO₂가스의 분해제거율을 구한 것으로 이 때 주파수는 10 kHz, 유량은 200 mL/min, 기준가스는 N₂ 이었고 초기농도는 300 ppm이었다. 메탄을 첨가한 양이 커질수록 분해제거율이 증가하여 12~20 W의 높은 전력에서는 99%의 분해율을 얻을 수 있었다. 이것은 메탄분자가 CH₃·라디칼과 H·라디칼로 분해되면서 이 때 생성된 H·라디칼과 SO₂분자와 반응하여 생성된 O·라디칼이 반응하여 SO₂의 산화에 필요한 O

H·라디칼을 생성하므로 탄화수소의 농도가 커질수록 분해제거율이 증가한다고 사료된다^{10,18}.

Fig. 9는 기준가스로 N₂를 이용하여 가스의 초기농도가 500 ppm인 NO 가스에 첨가가스로 0.14% 메탄을 유량 200 mL/min로 플라스마 반응기에 주입하여 주파수 10 kHz로 방전시 방전 후의 FT-IR 흡수 스펙트럼을 나타낸 것이다. 여기서 O₃와 CO는 관측할 수 없었고, CO₂ 피크가 나타나 것은 메탄의 플라스마 방전에너지에 의한 생성물로 보여지며 부산물로 N₂와 NO₂가 다량으로 관측되었다. 이것은 Kanazawa¹⁹의 FT-IR 흡수 스펙트럼 결과와 일치하고 있었다.

Fig. 10은 전력효율을 평가하기 위하여 농도변

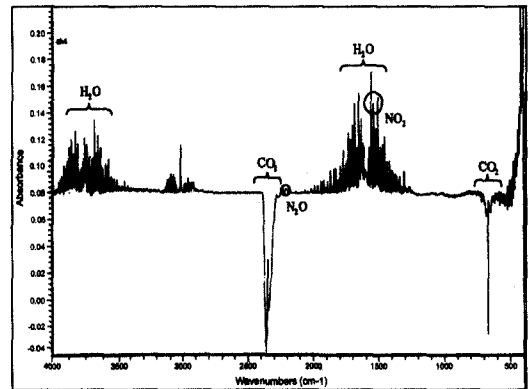


Fig. 9. Typical FR-IR spectrum for treatment of NO, N₂ and CH₄(10 kHz, NO: flow rate: 200 mL/min, C_{NO}⁰: 500 ppm)

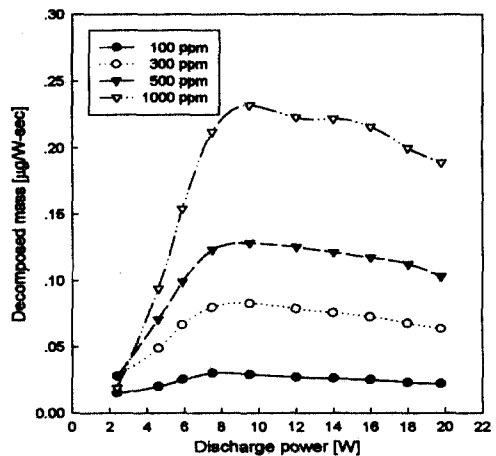


Fig. 10. Decomposed mass of NO per unit power and second (flow rate: 200 mL/min, frequency: 10 kHz, base gas: N₂, discharge electrode: W)

화에 따른 단위시간(sec), 단위전력(W)당 NO의 분해량(μg)을 나타낸 것으로 방전전력이 증가하면 단위전력당, 단위시간당 NO의 분해율은 초기에는 증가하나 최대분해값에 도달한 후 감소하며 최대분해값에 도달하는 분해량은 NO가스의 초기농도가 작을수록 낮아지는 것을 알 수 있었다. Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 NO의 초기농도 1,000 ppm에서 9.5 W, 100~500 ppm의 경우 7~8 W에서 최대분해값을 갖고 있으므로 이 때 전력효율이 제일 좋은 것을 알 수 있었다. 최고점 전의 영역은 분해에 필요한 에너지를 갖는 전자를 충분히 생성할 수 없는 영역이고, 최고점 후의 영역은 방전전력이 과잉으로 공급되어 필요없이 소비되어지는 전력이 많은 영역으로 생각되어진다²⁰⁾.

4. 결 론

본 연구에서는 특수 설계된 연면방전 전극을 통하여 방전시켜 발생하는 플라즈마에 의하여 NO, NO₂ 및 SO₂ 등 유해가스를 주파수, 체류시간, 농도등을 변화시켜 분해제거실험을 하였고 메탄을 첨가물질로 하여 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유해가스의 분해실험에서 10 kHz의 주파수, 200ml/min와 19.8, 20.0 및 19.0 W의 소비전력에서 NO, NO₂ 및 SO₂의 최대 분해율은 각각 94.3, 84.7 및 99.0 %이었으며 20 kHz 이상의 고전압에서 주파수가 커질수록 기준가스의 전도성이 증가하여 연면을 따라 전류가 부분적으로 흐르기 때문에 분해율이 감소하였다. 결과적으로 단위전력당 분해율은 SO₂ 5.21 %/W, NO 4.76 %/W 및 NO₂ 4.235 %/W로 나타났다.

2. 연면 반응기에서 유해물질의 체류시간이 길수록, 그리고 초기농도가 작을수록 충돌주파수가 커져서 분해율은 증가하였다.

3. 첨가물질의 영향 실험에서는 메탄을 첨가할수록 분해율은 증가하였고, NO, NO₂ 및 SO₂에서 분해율은 각각 99, 98 및 99 %로 거의 완전히 분해할 수 있었으며 따라서 메탄이 매우 우수한 첨가물질임을 확인 할 수 있었다..

4. 각 유해가스의 최대 분해율을 나타내는 최대 출력값, 즉 단위전력, 단위시간당 분해량의 최적 에너지는 NO의 경우 초기농도 1,000 ppm

에서 9.5 W, 100~500 ppm에서 7~8 W의 최적 출력값 및 최대분해율을 나타내었고, 이 때 전력효율이 제일 좋은 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) W. L. Greer, "SOx/NOx Control Compliance with Environmental Regulation", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 25, No. 3, pp. 475~485, 1989.
- 2) A. T. McQueen, S. J. Bortz, M. S. Hatch, and R. L. Leonard, "Cement Kiln NOx Control", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 31, No. 1, pp. 36~44, 1995.
- 3) S. Masuda, "Non-Equilibrium Plasma Chemical Process PPCP and SPCP for control of NOx, SOx and other gaseous pollutants", Proc. 4th Int. Conf. on Electrostatic Precipitation, pp. 615~623. 1990.
- 4) T. Oda, T. Takahashi, H. Motohasi, and S. Masuda, "Decomposition of Fluorocarbon Gaseous Contaminants by Surface Discharge Induced Plasma Chemical Processing(SPCP) by Using Cylindrical Ceramic Reactor", 靜電氣學會講演論文集, 15a, C1, pp. 1~4, 1990.
- 5) B. Xiyao, Y. Chengwu, L. Henguan, Z. Zhitao, and B. Mindong, "Experiment on Decomposition of SO₂ by Plasma at Low Temperature and Normal Pressure", 靜電氣學會講演論文集, 22a, C6, pp. 507~510, 1992.
- 6) B. Xiyao, B. Mindong, Y. Chengwu, Z. Zhitao, and Z. Yanling, "Experiment on Plasma in Low Temperature and Normal Pressure Decomposing NOx", 靜電氣學會講演論文集, 22a, C5, pp. 503~506, 1992.
- 7) R. Takahashi, Y. Kamase, and K. Yamamoto, "Decomposition of Chloro fluorocarbon Gas by a Pulsed Corona Discharge", 靜電氣學會講演論文集, 3a, C11, pp. 371~374, 1993.
- 8) S. Obama, E. Suzuki, K. Okazaki, and A. Mizuno, "Removal of NOx with the partial discharge", 靜電氣學會論文集, 15a, C3, pp. 9~12, 1989.
- 9) A. Harano, T. Nakamura, H. Ohneda, and T. Takarada, "NO reduction by Dielectric Barrier Discharge Reactor consist of Co-axial and Cylindrical Tubes", 靜電氣學會論文集, 16p, B4, pp. 231~232. 1997.
- 10) A. Mizuno, H. H. Kim, K. Shimizu, S. Tanaka, and T. Yamamoto, "Experimental Approach to

- Enhance Efficiency of Non-Thermal Plasma in Flue Gas Cleaning”, Proc. of NEDO Symp. on Non-Thermal Discharge Plasma Technology for Air Pollution Control, pp. 1~10, 1997.
- 11) E. M. van Veldhuizen, “SO₂ and NO_x removal using transient atmospheric discharge”, Proc. of NEDO Symp. on Non-Thermal Discharge Plasma Technology for Air Pollution Control, pp. 65~83, 1997.
 - 12) 日本電氣學會 放電ハンドブック出版委員會編, “放電ハンドブック”, 靜電氣學會, 東京, 1973.
 - 13) 이상범, 신인철, “기초전자공학실험”, 연학사, 서울, 1991.
 - 14) T. Oda, T. Takahashi, R. Watanabe, and S. Kohzuma, “Decomposition of Dilute Trichloroethylene by Non-Thermal Plasma-Frequnc Dependence and Environmental Effect”, Proc. of NEDO Symp. on Non-Thermal Discharge Plasma Technology for Air Pollution Control, pp. 49~57, 1997.
 - 15) T. Oda, T. Takahashi, R. Yamashita, and T. Ohno, “Non-Thermal Plasma for VOCs Decomposition and NO_x Removal in Flue Gas”, Proc. of NEDO Symp. on Non-Thermal Discharge Plasma Technology for Air Pollution Control, pp. 1~14, 1996.
 - 16) T. Oda, T. Takahashi, N. Hiroshi, and S. Masuda, “Decomposition of Fluorocarbon Gaseous Contaminants by Surface Discharge Induced Plasma C Chemical Processing(SPCP) by Using Cylindrical Ceramic Reactor”, 靜電氣學會講演論文集, 29a, C1, pp. 1~4, 1991.
 - 17) 강현춘, “방전 플라스마에 의한 유해가스의 분해”, 명지대학교 박사학위논문, pp. 48~50, 1998.
 - 18) S. Masuda, S. Hosogawa, X. Tu, and Z. Wang, “Novel plasma chemical technologies-PPCP and SPCP for control of gaseous pollutants and air toxics” J. Electrostatics., Vol. 34, pp. 415~438, 1994.
 - 19) S. Kanazawa, J. S. Chang, G. F. Round, G. Sheng, T. Ohkubo, Y. Nomoto, and T. Adachi, “Removal of NO_x from Flue gas by Corona Discharge Activated Methane Radical Showers”, J. of Electrostatics, Vol. 40, 651~656, 1997.
 - 20) 우인성, 황명환, S. Yamaguma, Decomposition of Hazardous Gaseous Substances by Discharge Plasma”, 한국산업안전학회지, Vol. 11, No. 4, 79~83, 1996.