

TiO₂ 촉매를 이용한 플라즈마반응에 의한 NO_x의 분해

박성국 · 우인성* · 황명환**

인천대학교 안전공학과 대학원 · *인천대학교 안전공학과

(2008. 7. 21. 접수 / 2008. 9. 11. 채택)

Reduction and Decomposition of Hazardous NO_x by Discharge Plasma with TiO₂

Sung Gug Park · In Sung Woo* · Myung Whan Hwang**

Department of Safety Engineering, Graduate School of Incheon University

*Department of Safety Engineering, Incheon University

(Received July 21, 2008 / Accepted September 11, 2008)

Abstract : The objective of this study is to obtain the optimal process condition and the maximum decomposition efficiency by measuring the decomposition efficiency, electricity consumption, and voltage in accordance with the change of the process variables such as the frequency, maintaining time period, concentration, electrode material, thickness of the electrode, the number of windings of the electrode, and added materials etc. of the harmful atmospheric contamination gases such as NO, NO₂, and SO₂ etc. with the plasma which is generated by the discharging of the specially designed and manufactured TiO₂ catalysis reactor and SPCP reactor. The decomposition efficiency of the NO, the standard samples, is obtained with the plasma which is being generated by the discharge of the combination effect of the TiO₂ catalysis reactor and SPCP reactor with the variation of those process variables such as the frequency of the high voltage generator(5~50kHz), maintaining time of the harmful gases(1~10.5sec), initial concentration(100~1,000ppm), the material of the electrode(W, Cu, Al), the thickness of the electrode(1, 2, 3mm), the number of the windings of the electrode(7, 9, 11turns), basic gases(N₂, O₂, air), and the simulated gas(CO₂) and the resulting substances are analyzed by utilizing FT-IR & GC.

Key Words : plasma discharge, TiO₂ catalysis reactor, NO_x decomposition

1. 서론

산업발달로 화석에너지의 사용이 급격히 증가하면서 대기오염 물질들이 다량 배출되어 대기오염 문제가 심각하게 대두되고 화력발전소와 자동차에서 주로 배출되는 가스인 질소산화물(NO_x)과 황산화물(SO_x)은 산성비의 주요 원인이 되고 석탄, 오일 및 천연가스와 같은 화석연료를 연소 하였을 때 발생하는 많은 양의 이산화탄소는 온실효과를 만드는 주요 요인이다¹⁾. 프레온 및 할로젠과 같은 휘발성 유기화합물(volatile organic compound, VOC)은 에어컨디셔너, 냉장고 및 에어로졸과 같은 산업제품들에 널리 사용되며, 이와 같은 VOC는 오존층을 파괴하고 지구 온난화를 이끄는 화학물질로 기

여한다. 또한 자동차 및 트럭에서 배출되는 매연 입자들과 탄화수소는 스모그 오염의 주된 요인이다. 이러한 대기오염 물질들의 일부를 취급할 수 있는 방법들이 존재하지만 비용, 에너지 수급 및 부산물 등에 의해 많은 제약을 받고 있다. 플라즈마공법은 에너지 효율에서의 이점과 더불어 한 시스템 안에서 존재하는 대기오염 물질들을 동시에 제거할 수 있는 공법으로 알려져 있다^{2,5)}.

따라서 본 실험에서는 고전압을 이용하여 비열 플라즈마 상태에서 방전로에 NO_x 가스를 통과시켜 배기가스를 제거하는 것을 목적으로 하고 있으며, 나아가서는 실험을 통하여 나온 결과물을 NO_x 분해에 대한 최적조건에 대한 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치와 실험방법

2.1. 실험장치

* To whom correspondence should be addressed.
mhhwang@incheon.ac.kr

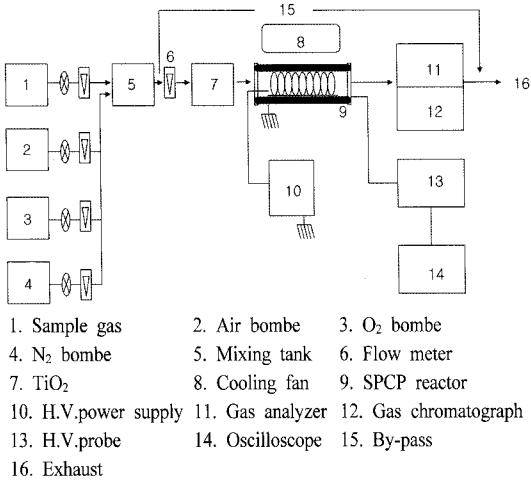


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

본 실험에서 플라즈마 방전에 의한 유해가스를 분해하기 위한 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다⁶⁾. 시료가스(NO_x)와 기준가스는 유량계를 통하여 Mixing tank로 도입되어 혼합된 다음 반응기로 주입된다. 이때 모든 가스의 수송은 내부식성이 좋은 직경 10mm의 테프론관을 이용하였다. 반응기에서는 코일형 연면방전반응기를 이용하였고 발열반응에 의한 반응기의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 냉각 팬을 설치하였다.

방전에 필요한 전력은 High Voltage Power Supply를 사용하였고, 분해가스는 연소분석기 Fig. 1을 사용하여 분석하였다.

2.2. 실험방법

본 실험에서 표준 시료가스는 1,500ppm의 NO를 사용하였다. 시료가스의 유량은 실험조건에 따라 유량계에 부착된 조절밸브로 조절하면서 혼합탱크에서 혼합하며, 혼합한 가스는 유량계를 사용하여 100, 200, 500, 800 및 1,000mL/min로 유량을 변화시키면서 반응기에 주입하고, 이 때 가스 분석기로 NO_x의 농도를 측정한다. 가스의 농도는 순도 99.95%의 N₂가스와 표준시료가스를 혼합하여 초기농도 100, 300, 500 및 1,000ppm으로 하여 정상상태가 되도록 3~5분간 유지시킨 후 분해한다. 실험은 상온, 대기압 하에서 하며 시료가스가 누출되는 것을 방지하기 위하여 테프론으로 연면방전 반응기를 밀봉하였고, 초기농도가 정상상태에 도달한 것을 분석기로 확인한 후 분해한다. 입력전력은 오실로스코프와 기록계로 파형을 관찰하면서 전압과 전류

를 상승시켜 반응기내에서 플라즈마가 확실하게 발생하는 최저 전력부터 증가 시키면서 실험을 한다. 입력전력을 일정하게 유지시킨 후에 반응기를 통과한 시료가스 속에 있는 NO 및 NO₂의 농도가 거의 변화되지 않을 때의 측정값을 기록한다.

실험변수는 표준가스의 유량과 농도, 주파수 변화 이외에 전극의 재질(W, Cu, Al), 전극의 굵기(1, 2, 3mm), 전극코일의 감은 횟수(7, 9, 11회), 기준가스(N₂, O₂, air), 첨가물질(CH₄, CO₂) 등을 변화시켰고, 이들 실험변수의 기준 값은 시료가스 300ppm의 농도, 10kHz의 주파수, 200mL/min의 유량, 1mm 굵기의 W전극, 감은횟수 7회 및 기준가스를 N₂로 하였다. 이들 실험변수 중 기준 값을 고정하고 한 개의 변수만을 변화시키면서 실험을 하였다. 또한 분해 제거율은 처음의 농도에서 분해후의 농도를 뺀 후 처음의 농도로 나누어 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

본 실험은 2가지 형태로 구분하여 NO가스의 분해실험을 하였다. 먼저 산화티탄 catalysis reactor를 사용하지 않은 상태에서 NO가스의 분해실험을 하였으며, 그 분석결과를 가지고 산화티탄 catalysis reactor를 SPCP reactor와 같이 사용하여 NO가스의 분해실험을 하였을 때의 분해제거효율을 비교분석하였다.

Fig. 2는 산화티탄(TiO₂) catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도와 200mL/min의 유량 그리고 N₂를 기준

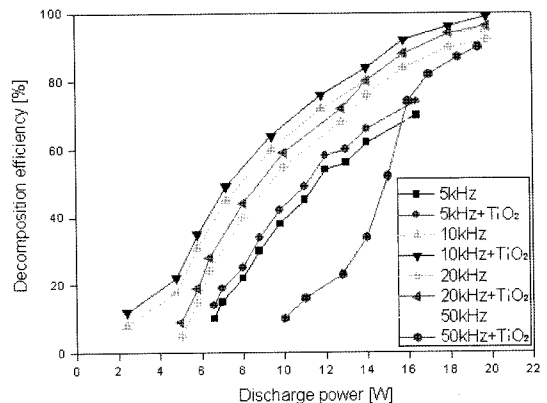


Fig. 2. Effect of frequency on decomposition efficiency of NO by SPCP reactor with/without TiO₂ catalysis (C_{NO}: 300ppm, flow rate: 200mL/min, base gas N₂, discharge electrode: W).

가스로 하여 실험을 하였다. 이때 주파수를 5, 10, 20, 50kHz로 변화시켰을 때 방전전력에 대한 NO 가스의 분해효율을 나타낸 것이다. 실험결과는 분해율의 변화가 방전전력이 커질수록 급격하게 증가하는 경향을 보였으며 주파수를 10kHz로 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다. 본 실험범위 내에서는 주파수 10kHz시 방전전력 19.8W에서 95.0%로 최대의 분해제거율을 나타냈으며, 산화티탄을 첨가하여 실험을 해본 결과에서도 주파수 10kHz와 방전전력 19.8W에서 98.0%인 최대의 가스분해제거율을 나타냈다. 방전출력이 커질수록 전류가 증가하여 분해효율이 처음에는 급속히 증가하다가 18~20W의 높은 방전출력 범위에서는 서서히 증가하는 것을 알 수 있었다. 20kHz 이상에서는 주파수가 증가함에 따라 분해제거율이 감소하는 것을 알 수 있었고, 5kHz의 저주파수에서는 분해제거율이 감소하였다. 결과적으로 10kHz를 분기점으로 저주파수 범위에서는 주파수가 커질수록, 고주파수 범위에서는 주파수가 작을수록 분해제거율이 커지는 것을 알 수 있었다.

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

Fig. 3은 300ppm의 초기농도와 10kHz의 주파수 그리고 N₂를 기준가스로 하여 체류시간을 1~10.5초로 변화시키면서 측정한 방전전력에 대한 NO가스의 분해제거율을 나타낸 것이다.

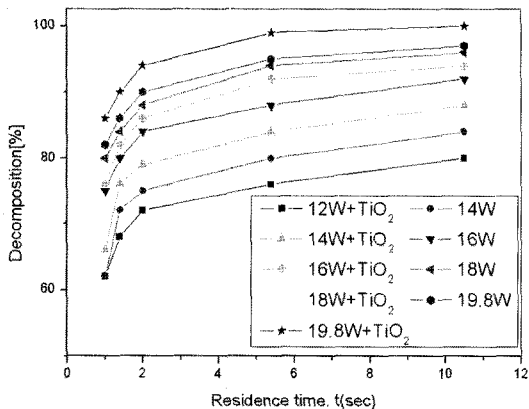


Fig. 3. Effect of residence time on decomposition efficiency of NO by SPCP reactor with/without TiO₂ catalysis (C_{NO}: 300ppm, frequency: 10kHz, base gas: N₂, discharge electrode: W).

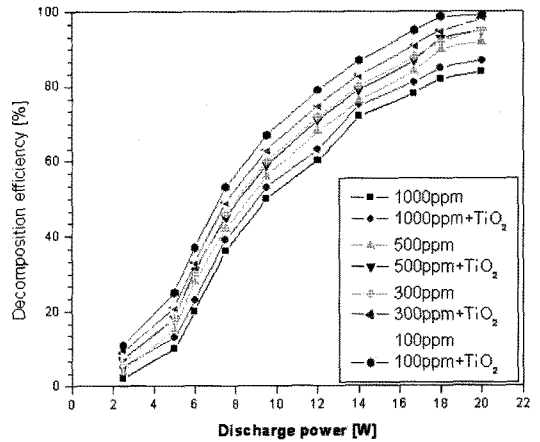


Fig. 4. Effect of initial concentration of NO decomposition efficiency by SPCP reactor with/without TiO₂ catalysis (flow rate: 200mL/min, frequency: 10kHz, base gas: N₂, discharge electrode: W).

NO 가스의 체류시간이 길수록 즉, 유량이 작을수록 분해제거율이 높게 나타났으며, 그리고 전 단계에 산화티탄을 첨가한 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다. 이는 유량이 작을수록 반응을 통과하는 체류시간이 증가하여 기준가스와 충돌할 수 있는 충돌주파수가 증가되어 반응에 필요한 에너지가 커지므로 라디칼이 많이 생성되어 NO가스와 반응하여 분해제거율이 높게 나타나는 것으로 사료되며, 펄스방전 Plasma에서 유량 150, 300, 및 840mL/min로 변화시켜 실험한 결과로 NO_x의 제거율은 입력전력과 체류시간에 의존한다는 연구결과와 일치하였다^{7,8)}.

Fig. 4는 200mL/min의 유량(flow rate), 10kHz의 주파수 그리고 N₂를 기준가스로 하여 실험을 하였다. 이때 초기농도를 100, 300, 500, 1,000ppm으로 변화시켰을 때 방전전력에 대한 NO가스의 분해제거율을 나타낸 것이다.

실험결과는 초기농도를 100ppm 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다.

초기농도가 작을수록 분해제거율이 높게 나타났으며 그리고 전 단계에 산화티탄 catalysis reactor를 첨가한 실험의 경우에는 분해효율이 조금씩 더 높게 나타났다. 이것은 초기농도가 작을수록 NO분자가 분해하는데 필요한 에너지가 커지기 때문이라고 사료된다. 이것은 기준가스와 충돌하여 생성된 N·, O· 및 OH· 라디칼이 NO분자와 반응하거나 자유전자가 직접 NO와 충돌하여 반응할 수 있는 확률이 커지므로 분해제거율이 높게 나타나는 것으로 사료 된다⁹⁾.

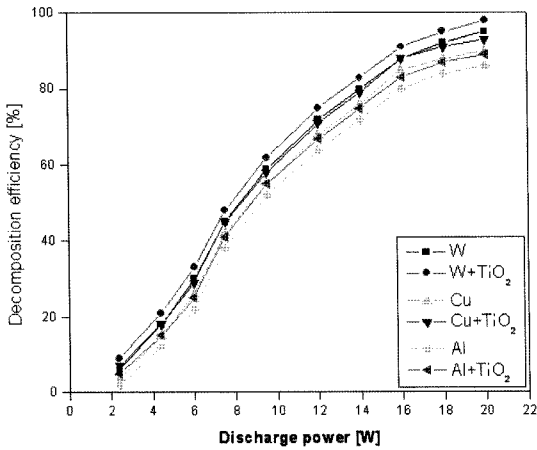


Fig. 5. Effect of electrode material on decomposition efficiency of NO by SPCP reactor with/without TiO₂ catalysis (C_{NO}: 300ppm, flow rate : 200mL/min, frequency : 10 kHz, base gas : N₂).

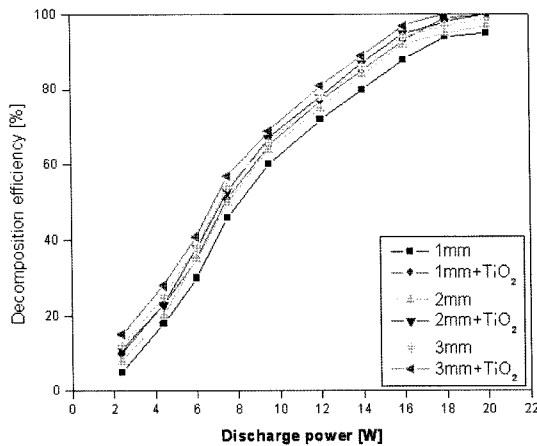


Fig. 6. Effect of electrode diameter on decomposition efficiency of NO by SPCP reactor with/without TiO₂ catalysis (C_{NO}: 300ppm, flow rate : 200mL/min, frequency : 10kHz, base gas : N₂, discharge electrode : W).

Fig. 5는 300ppm의 초기농도와 200mL/min의 유량, 10kHz의 주파수 그리고 N₂를 기준가스로 하여 실험을 하였다. 이때 전극재질을 텅스텐(W), 구리(Cu), 알루미늄(Al)을 사용하였을 때 방전전력에 대한 NO가스의 분해제거율을 나타낸 것이다.

실험결과는 전극재질을 텅스텐(W)으로 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다. 그리고 전 단계에 산화티탄 catalysis reactor를 첨가한 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다.

이것은 전극재질의 전기저항이 높을수록 전극의 온도가 높아지므로 이온방전 즉, Plasma가 발생하기 쉽고 용점이 낮을수록 전극의 오염도가 커져

서 다른 물질이 전극표면에 침적되어 전극의 성능이 저하되기 때문이다⁶⁾.

Fig. 6은 300ppm의 초기농도와 200mL/min의 유량, 10kHz의 주파수 그리고 N₂를 기준가스로 하여 텅스텐(W)전극의 굵기를 1, 2, 3mm로 변화시켰을 때 방전전력에 대한 NO가스의 분해제거율을 나타낸 것이다.

실험결과는 전극의 굵기를 3mm의 전극을 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 보였다. 그리고 전 단계에 산화티탄(TiO₂) catalysis reactor를 첨가한 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다.

이것은 전극의 굵기가 굵을수록 방전을 일으키는 방전 면적이 증가하여 분해제거율이 증가하는 것으로 사료 된다¹¹⁾.

Fig. 7은 300ppm의 초기농도와 200mL/min의 유량, 10kHz의 주파수 그리고 N₂를 기준가스로 하여 텅스텐(W)전극의 감은횟수를 7, 9, 11회로 변화시켰을 때 방전전력에 대한 NO가스의 분해제거율을 나타낸 것이다.

실험결과는 전극의 감은횟수를 11회 감았을 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다. 그리고 전 단계에 산화티탄 catalysis reactor를 첨가한 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다.

이것은 감은 횟수가 증가할수록 방전면적이 증가하고 코일 간격이 좁아져서 코일사이의 Plasma 밀도가 높아지므로 코일 사이를 통과하는 가스가 분해되기 쉽기 때문으로 사료된다¹²⁾.

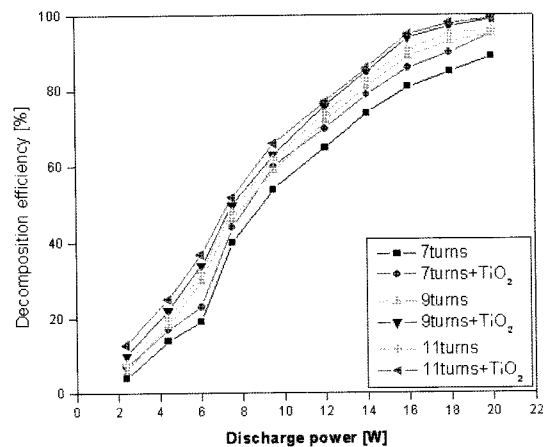


Fig. 7. Effect of number of electrode turn on decomposition efficiency of NO by SPCP reactor with/without TiO₂ catalysis (C_{NO}: 300ppm, flow rate : 200mL/min, frequency : 10kHz, base gas : N₂, discharge electrode : W).

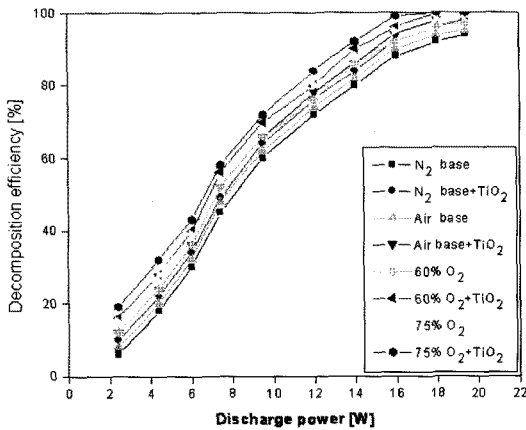


Fig. 8. Effect of base on decomposition efficiency of NO by SPCP reactor with/without TiO₂ catalysis (C_{NO} : 300 ppm, flow rate : 200mL/min, frequency : 10kHz, discharge electrode : W).

Fig. 8은 300ppm의 초기농도와 200mL/min의 유량, 10kHz의 주파수로 하고 텅스텐(W)전극에서 기준가스를 N₂, 공기, 60vol.% 산소와 75vol.% 산소로 변화시켰을 때 방전전력에 대한 NO가스의 분해제거율을 나타낸 것이다.

실험결과와 텅스텐(W)전극에서 75vol.% O₂일 때 가장 높은 분해제거율을 나타냈으며, 다음으로 60vol.% O₂, 공기 기준가스 및 N₂기준가스의 순서로 NO가스의 분해제거율이 감소하였다. 그리고 전 단계에 산화티탄 catalysis reactor를 첨가한 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다.

75, 60vol% O₂의 순서로 분해제거율이 감소하였는데 이것은 산소분자가 많이 존재할수록 산소분자가 Plasma로부터 에너지를 받아 자유전자로 분

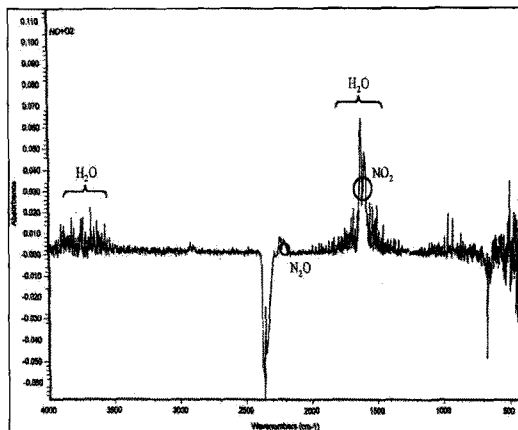


Fig. 9. Typical FT-IR spectrum for treatment of NO, and CO₂ (10kHz, NO : flow rate 200mL/min, C_{NO} : 500ppm).

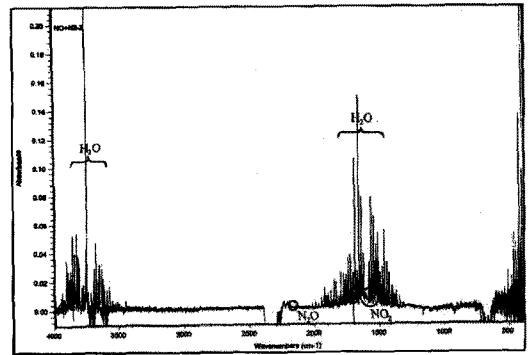


Fig. 10. Typical FT-IR spectrum for treatment of NO, and N₂ (10kHz, NO : flow rate 200mL/min, C_{NO} : 500ppm).

해되고 NO와 라디칼 화학반응을 일으키므로 분해 제거율이 증가하는 것으로 사료된다⁹⁾.

Fig. 9와 10은 기준가스로 N₂와 O₂를 사용하여 초기농도가 500ppm인 NO가스를 200mL/min의 유량으로 Plasma 방전에 의하여 90%의 분해제거율로 분해된 생성물의 FT-IR 흡수 스펙트럼이다.

1,600~1,500cm⁻¹에서 NO가스의 흡수 피크로서 두개의 신축진동이 나타났고, 2,178.4cm⁻¹에서는 N₂O, 1,696과 3,854cm⁻¹에서 H₂O(g)를 확인하였다. 여기서 NO 가스는 N₂O, NO₂ 및 수증기로 분해되는 것을 나타내고 있으며 N₂O와 NO₂O의 생성량은 N₂기준 가스보다 O₂기준가스일 때 훨씬 많은 양이 검출된 것을 나타내고 있다. 그러나 N₂와 O₂는 FT-IR의 특성상 확인할 수 없었다.

이것은 Fig. 8의 기준가스의 영향에서 알 수 있는 바와 같이 기준가스로 N₂가스보다 O₂가스가 분해제거율이 크고 O₂의 함량이 클수록 분해제거율이 높은 사실에서 알 수 있었다. 또한 O₂가스가 N₂가스보다 과량이기 때문에 Plasma 방전에 의하여 O· 라디칼이 과량으로 발생하여 NO· 라디칼과 산화 반응을 일으키고 NO· 라디칼 자체가 환원되어 N₂와 N₂O, N₂O로 반응하는 것으로 사료 된다.

Fig. 11은 산화티탄 catalysis reactor와 SPCP reactor를 이용하여 분해한 NO가스의 GC스펙트럼을 나타낸 것으로서 실험은 기준가스 N₂, 농도 500ppm의 NO 가스를 처리한 후 GC를 사용하여 분석하였다. 분석조건은 먼저 Injector에서는 온도를 150°C로 하였고 Injector volume은 100uL로 하였으며 둘째로 column에서는 temperature는 50°C isothermal로 하였으며 carrier gas flow는 30mL/min, Column Restek Shincarbon ST는(1/8inch ID × 2m Length)이었다. 그리고 Detector는 TCD(Thermal Conductivity Detector), Temperature는 150°C로 하였다.

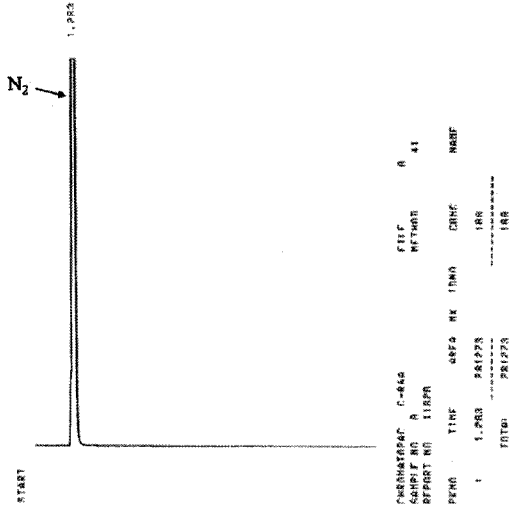


Fig. 11. Typical GC spectrum for treatment of NO gas treat by TiO₂ catalysis SPC reactor(10kHz, NO : flow rate 200 mL/min, C_{NO} : 500ppm).

그림에서 알 수 있는 바와 같이 유해가스인 NO 은 검출되지 않았으며 질소 가스만 검출 되었다. 이것은 NO가스가 완전히 분해제거 되었다는 것을 나타내는 것이다.

즉, 산화티탄 catalysis reactor를 첨가함으로써 효율이 더욱 좋아졌다는 것을 알 수 있는 결과이다.

Fig. 12는 300ppm의 초기농도와 200mL/min의 유량, 10kHz의 주파수 그리고 N₂, 공기를 기준가스로 하였을 때 연도가스의 모의가스로 조성을 맞추기 위하여 CO₂를 7.4, 13.6, 19.0, 23.8vol%로 첨가하면서 방전전력에 대한 NO가스의 분해제거율을 나타낸 것이다.

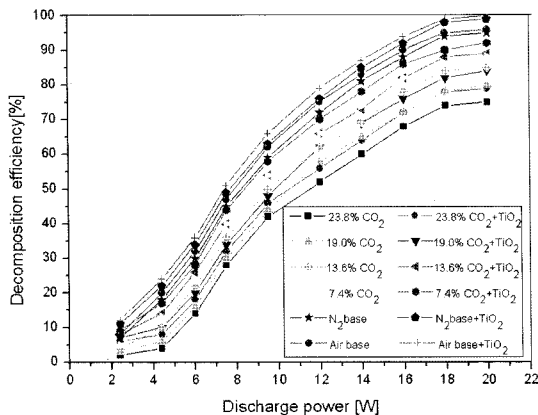


Fig. 12. Effect of simulated gas(CO₂) content on decomposition efficiency of NO by SPC reactor with/without TiO₂ catalysis(C_{NO} : 300ppm, flow rate : 200mL/min, frequency : 10kHz, discharge electrode : W).

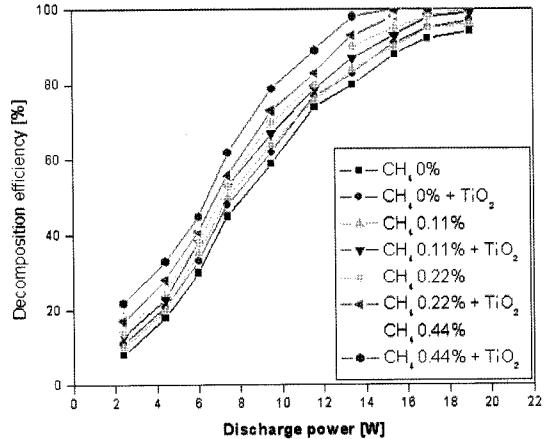


Fig. 13. Effect of additive CH₄ on decomposition efficiency of NO by SPC reactor with/without TiO₂ catalysis(C_{NO} : 300ppm, flow rate : 200mL/min, frequency : 10kHz, base gas : N₂, discharge electrode : W).

실험결과는 모의가스로 조성을 맞추기 위하여 CO₂를 23.8vol%로 첨가 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다. 그리고 산화티탄 catalysis reactor를 첨가함으로써 분해제거율이 더욱 좋아졌다는 것을 알 수 있는 결과이다. 그리고 CO₂를 첨가할수록 분해제거율이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이것은 CO₂의 반응식의 반응이 매우 느리다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 13은 300ppm의 초기농도와 200mL/min의 유량, 10kHz의 주파수 그리고 N₂를 기준가스로 하고 이때 분해제거율을 높이기 위하여 메탄(CH₄)을 0.00, 0.11, 0.22, 0.44vol.%로 첨가 하면서 방전전력에 대한 NO가스의 분해제거율을 나타낸 것이다.

실험결과는 메탄(CH₄)을 0.44vol.%로 첨가 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다.

메탄을 첨가한 양이 커질수록 분해제거율이 증가하여 15.4~19.0W의 높은 전력에서는 100%의 분해제거율을 얻을 수 있었다. 그리고 전 단계에 산화티탄(TiO₂) catalysis reactor를 첨가한 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다.

이것은 메탄분자가 CH₃· 라디칼과 H· 라디칼로 분해되면서 이 때 생성된 H· 라디칼과 O· 라디칼이 반응하여 NO의 산화에 필요한 OH· 라디칼을 생성하므로 탄화수소의 농도가 커질수록 분해제거율이 증가한다고 사료 된다.

4. 결론

본 실험은 2가지 형태로 구분하여 유해가스 분해

실험을 하였다. 먼저 산화티탄의 catalysis reactor를 첨가하지 않은 상태에서의 유해가스 분해제거 실험을 하였으며, 그 분석결과를 가지고 산화티탄 catalysis reactor와 SPCP reactor를 첨가하여 분해실험을 하였을 때의 가스 분해제거율을 비교분석 하였다. 특수 설계된 산화티탄 catalysis reactor와 SPCP reactor를 방전시켜 발생하는 Plasma에 의하여 NO의 유해가스를 주파수, 체류시간, 농도, 전극재질 및 첨가물질 등을 변화시켜 분해제거 실험을 수행하였으며 특히 산화티탄 catalysis reactor를 첨가한 실험 시 분해제거율이 5~15%씩 더 높게 나타났으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 산화티탄 catalysis reactor와 SPCP reactor에 의한 유해가스의 분해실험에서 10kHz의 주파수와 19.8, 20.0, 19.0 및 29.6W의 소비전력에서 최대 분해제거율은 각각 95.4, 85.7, 99.0 및 93.7%이었으며 20kHz 이상의 고전압에서 주파수가 커질수록 기준가스의 전도성이 증가하여 연면을 따라 전류가 부분적으로 흐르기 때문에 분해제거율이 감소하였다.

2) 산화티탄 catalysis reactor와 SPCP reactor 전극에 의한 분해제거율은 텅스텐 전극을 사용한 경우 가장 높은 분해제거율을 나타내었고, 구리, 알루미늄 전극의 순서로 분해제거율이 낮아졌으며, 방전 전극 굵기에 대한 영향은 전극의 굵기가 굵을수록 증가하였다.

3) 산화티탄 catalysis reactor와 SPCP reactor에 의한 유해가스의 분해제거율은 농도 300ppm, 주파수 10kHz, 분해전력 20W일 때, NO 98%로 SPCP reactor만 사용했을 때보다 5~15% 정도 높았다.

4) 실제 배기가스로 맞추기 위한 첨가물질의 영향은 메탄(CH₄)을 첨가할수록 분해제거율은 증가하였고, 산소의 농도를 추가할수록 증가하였으며, 이산화탄소의 농도가 증가할수록 분해제거율은 감소하였다.

감사의 글 : 본 연구는 2007년도 인천대학교 교내학술비 지원에 의한 것으로 감사드립니다.

참고문헌

1) 국립환경과학원 대기오염물질 배출용어 정의, 2007.

2) I.S. Woo, M.Y. Hwang, S. Yamaguma, "Decomposition of Hazardous gaseous Substances by Discharge Plasma", J. of the KIIS, Vol, 11, No. 4, pp. 79~83, 1996.

3) S.Masuda, "Destruction of Gaseous Pollutants and Air Toxics by Surface Discharge Induced Plasma Chemical Process(SPCP) and Pulse Corona Induced Plasma Chemical Process(PPCP)", Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control. NATOASI Series G. Ecologic Sciences. Vol. 34. pp. 1~105. Part B 1993.

4) J. Sidney Clements, Akira Mizuno, Wright C Finney, Robert F, Davis, "Combined Removal of SOX NOx and Fly ash from Simulated flue Gas using Pulsed Steamer Corona", IEEE Translation on industry Applications, Vol. 25, No. 1, pp. 62~69, 1989.

5) Senichi Masuda, Hidyuki Nakao, "Control of NOx by positive and negative Pulsed Corona Discharges", IEEE Transaction on Industry Application. Vol. 26, No. 2, pp. 374~383, 1990.

6) 강현춘, 방전 Plasma에 의한 유해가스의 분해, 명지대학교 박사학위논문, 1998.

7) T. Takahashi, K. Tada, and T. Oda, "Atmospheric Pressure Discharge Plasma Decomposition for Gaseous Air Contaminants-Trichloroethylene", 靜電氣學會講演論文集, 15a, B4, pp. 11~14, 1997.

8) K. Shimizu and T. Oda, "NOx Treatment Using Non-Thermal Plasma Catalyst and Addition of Hydrocarbons", Proc. of NEDO Symp. on Non-Thermal Discharge Plasma Technology for Air Pollution Control, pp. 122~131, 1997.

9) T. Kawasaki, S. Tanaka, T. Ohkubo, S. Akamine, S. Kanazawa, and Y. Nomoto, "The Effect of Sintering Temperature of BaTiO₃ Pellets on NOx Removal in a Packed-bed Plasma Reactor", 靜電氣學會講演論文集, 16a, B9, pp. 7~248, 1997.

10) G. E. Vogtlin and B. M. Penetrante, "Pulsed corona discharge for removal of NOx form flue gas", NATO ASI Series, G34, Part A, pp. 187~198, 1993.

11) 清水一男, 放電プラズマによる 窒素酸化物の除去, 豊橋技科大 석사학위논문, 1993.

12) T. Oda, T. Takahashi, R. Yamashita, and T. Ohno, "Non-Thermal Plasma for VOCs Decomposition and NOx Removal in Flue Gas", Proc. of Nedo Symp. on Non-Thermal Discharge Plasma Technology for Air Pollution Control, 1~14, 1996.