

복합촉매를 이용한 플라즈마 반응에 의한  
유해가스의 제거에 관한 연구

A study of decomposition of harmful gases  
using Composite catalyst by Photocatalytic  
plasma reactions

김 관 중\* · 우 인 성\* · 박 화 용\* · 이 흥 주\*

\*인천대학교 안전공학과

**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, NO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub> etc. with the plasma which is generated by the discharging of the specially designed and manufactured TiO<sub>2</sub> catalysis reactor and SPCP reactor.

**1. 서 론**

산업발달로 화석에너지의사용이 급격히 증가하면서 대기오염 물질들이 다량 배출되어 대기오염문제가 심각하게 대두되고 있다. 이에 따라 세계 각 국의 환경규제는 날로 강화되고 있어 이에 대응하는 환경관련 기술 및 기계의 수요가 전 세계적으로 증가하고 있다. 화력발전소와 자동차에서 주로 배출되는 가스는 질소산화물(NO<sub>x</sub>)과 황산화물(SO<sub>x</sub>)은 산성비의 주요 원인이다. 석탄, 오일 및 천연가스와 같은 화석연료를 연소하였을 때 발생하는 많은 양의 이산화탄소는 온실효과를 만드는 주요 요인이다.

---

\* 인천대학교 안전공학과

프레온 및 할로젠과 같은 휘발성 유기화합물(volatile organic compound, VOC)은 에어컨디션, 냉장고 및 에어로졸과 같은 산업제품들에 널리 사용되었고, 이와 같은 VOC는 오존층을 파괴하고 지구 온난화를 유도하는 화학물질로 기여한다. 또한 자동차 및 트럭에서 배출되는 매연 입자들과 탄화수소는 스모그 오염의 주된 범인이다. 이러한 대기오염 물질들의 일부를 취급할 수 있는 방법들이 존재하지만 비용, 에너지 수급 및 부산물 등에 의해 많은 제약을 받고 있다. 따라서 대기환경오염의 주원인으로 알려진 일산화질소(NO), 이산화질소(NO<sub>2</sub>), 이산화황(SO<sub>2</sub>) 등을 산화티탄(TiO<sub>2</sub>) +산화구리(CuO)촉매 반응기(catalysis reactor)와 연면반전 반응기(SPCP reactor)를 방전시켜 발생하는 Plasma를 이용하여 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 유해가스를 분해 제거 하고자 하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 촉매

촉매란 화학반응 중에 소모되지 않는 물질을 첨가해 반응속도를 변화시키는 작용으로 자기 자신은 변화하지 않으면서 다른 물질의 화학반응을 촉진시키거나 지연시키는 물질을 말한다. 촉매는 평형에 영향을 미치지 않고 다만 반응속도만을 변화시키는 물질이다. 또한 자신은 반응에 참여하지만 생성되거나 소멸되지 않는 특징을 갖는다. 예를 들면  $A + B \rightarrow C + D$  로 표시되는 반응식으로 간단히 설명하자면, 화살표를 기준하여 왼쪽의 항 A, B는 반응물을 의미하며 오른쪽 C, D는 생성물을 의미한다. 이 반응식의 평형식은

$$K = \frac{[C][D]}{[A][B]}$$

K:평형상수,  $K > 1$  정반응,  $K = 1$  : 평형상태,

$K < 1$  역반응 [A],[B] : 반응물의 농도(mole), [C],[D] : 생성물의 농도(mole)

이 평형상수는 온도에 의존하며 반응온도에 따라 달라진다. 촉매를 사용하면 매우 낮은 온도에서 반응을 생성물 쪽으로 진행시킬 수 있기 때문이다. 100℃의 열만으로도 우리가 원하는 물건을 1,000개 이상을 만들어 낼 수 있다. 적은 에너지와 시간으로 우리가 원하는 생성물을 얻게 할 수 있는 것이 촉매이다.

현재 우리들이 행하는 대부분의 화학반응은 촉매를 사용함으로써 반응을 조절할 수 있고, Fig. 1에서 나타난 바와 같이 경우에 따라서는 반응을 느리게 하는 경우도 있다. 촉매는 반응물에서 생성물로 넘어가는 활성화 에너지를 낮춤으로써 이러한 현상을 가능하게 한다.

공기 중이나 물중에 있는 유기물(또는 오염물)은 일반적인 조건에서는 분해되기가 매우 어렵다. 분해가 되어 우리에게 해가 없는 물질로 변하기 위해서는 매우 긴 시간이 소요된다. 예를 들면 우리가 쓰레기를 매립할 경우 땅속에서 그 물질이 변하여 무

해한 물질(화석화)로 변하는데 필요한 시간은 그 종류에 따라 짧게는 일주일 길게는 100년 또는 그이상이 필요하다. 물질을 분해하는데 소요되는 시간은 너무 길기 때문이다.

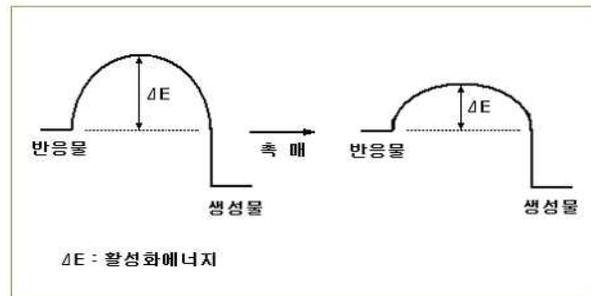


Fig. 1 Energy of Revitalization

우리가 생활하는 공간에 있는 유해물 역시 분해하는데 너무 많은 시간이 필요하다. 그러면 우리가 이러한 오염물을 빨리 그리고 효과적으로 제거하는 방법으로 촉매를 적용하여 제거할 수 있다.

## 2.2. 산화티탄(Titanium oxide, TiO<sub>2</sub>)의 생성원리와 특성

### 2.2.1 산화티탄(Titanium oxide, TiO<sub>2</sub>)의 생성원리

산화티탄은 빛이 닿으면 마이너스 전기를 띠는 전자와 플러스 전기를 띠는 미세구멍(정공)을 만든다. 이 전자와 정공은 매우 강한 환원력과 산화력을 갖고 있어 대기중의 물과 산소로부터 수산화기(OH<sup>-</sup>)와 과산화소이온(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)생성과정과 같이 활성산소인 수산화기(OH)와 과산화소이온(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)을 생성한다.

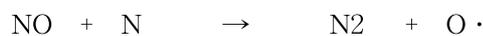
생성된 수산화기와 과산화소이온이 강력한 산화, 환원력을 갖고 있어 살균, 유기물분해 등에 작용한다.

생성된 수산화기와 과산화소이온의 일부는 과산화수소로 변하여 산화에 참여하기도 한다. 전자와 정공에서의 반응식은 다음과 같다.



이에 따라 NO의 분해반응은 다음과 같이 표현할 수 있다.

가. 라디칼 N 에 의한 NO의 환원반응



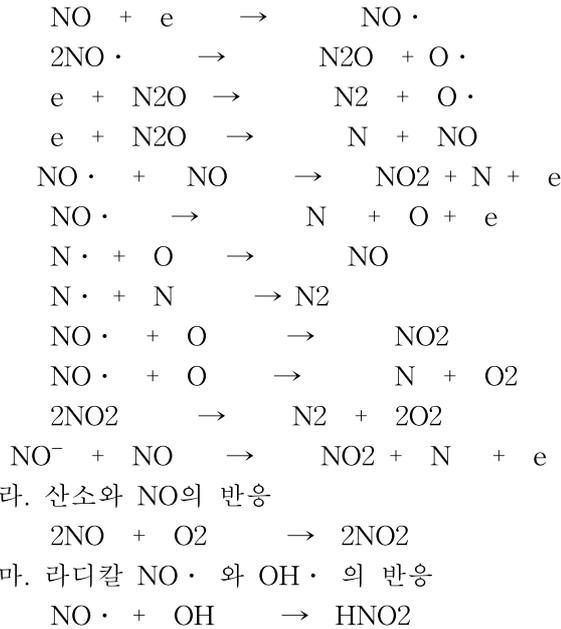
이 반응은 매우 빠른 반응이며, 가스온도에 거의 무관 하다.

나. 라디칼 O 에 의한 NO의 산화반응



다. 자유전자와 NO의 반응 및 부반응

Breault와 McLarnon<sup>14)</sup>은 자유전자 및 라디칼 반응에 의하여 다음 반응을 제안하였다.



### 2.2.2 산화티탄(Titanium oxide, TiO<sub>2</sub>)의 특성

화학식은 TiO<sub>2</sub>이고 화학식량은 79.9이다, 산화티탄, 티탄산무수물 티타니아라고도 한다. 녹는점은 1,825℃, 분해온도는 3,000℃ 이상이며 비중은 4.17이다. 티탄의 산화물 중 가장 안정하다. 티탄의 수산화화물을 강열(強熱)하면 얻어지는 무색분말이며, 천연적으로는 금홍석(金紅石; rutile)브루카이트, 아나타제 등 각각 결정구조가 다른 광물로써 산출된다.

결정구조가 다른 3종류의 변형이 존재하며 광물로서는 금홍석(루틸; 정방정계), 예추석(아나타제; 정방정계), 판티탄석(브루카이트; 사방정계)이 알려져 있다. 티탄철석의 주성분이기도 하다. 비중은 아나타제형(型) 3.84, 루틸형 4.26, 브루카이트형 4.17이다. 티타니아는 양쪽성산화물로서, 가열된 진한황산에 녹아 황산티탄(IV) Ti(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>가 된다. 냉수, 온수, 진한염산, 진한아세트산에는 잘 녹지 않는다. 수산화티탄(IV)을 4가의 티탄염수용액 속에서 가열시켜 얻는다. 티탄(IV)염수용액에 암모니아를 첨가하면 얻어지는 콜로이드상 침전은 수산화화물 TiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O인데, 티탄산이라고도 하며 염산이나 약한산에도 녹는다. 은폐력(피복력)이 큰 백색안료로 널리 쓰이고, 티타니아자기(磁器)·금속티탄의 제조원료, 금속제품의 연마제, 의약품 계통에서는 보호제나 자외선방지제로 쓰이고 있다.

천연으로는 브루카이트, 예추석(銳錐石), 판(板)티탄석, 일메나이트(티탄철석) 등의 광물로서 존재한다. 티탄과 산소의 화합물, 티탄의 산화수에 따라 산화티탄(II), 산화티탄(III), 산화티탄(IV)등 구조가 다른 3종의 산화물이 알려져 있는데, 고온에서 안정한 형을 루틸형, 저온에서 안정한 형을 예추형, 중간 온도에서 안정한 형을 브루카이

트형이라고 하며, 루틸형은 각종 무기산, 유기산, 알칼리, 가스 등에 침식되지 않으며, 열에 대해서도 1,800℃까지 용해하지 않는다. 금속티탄을 공기 속에서 강열하면 생기는데, 공업적으로는 일메 나이트 등의 광물을 분쇄·건조시켜 진한 황산을 가하고, 여과액에 최 부스러기를 가하여 위에 뜬 액체를 냉각시킨 후 물을 가해서 침전시켜 800~900℃에서 배소하여 얻는다.

이산화티타늄 광촉매는 n형 반도체로서 자외선(400nm)을 받으면 전자(Electron), 전공대(Electron Hole)가 형성되어 강한 산화력을 가진 하이드록시 라디칼(-OH)과 슈퍼옥사이드를 생성한다. 이 하이드록시 라디칼과 슈퍼옥사이드가 유기 화합물을 산화 분해하여 물과 탄산가스로 변화시킨다. 이런 원리로 공기 중의 오염물질을 산화, 분해하여 무해한 물과 탄산가스로 변화시키고 수중의 오염 물질인 유기화합물을 분해하여 물과 탄산가스로 변화시키게 된다. 또한 세균도 유기 화합물이므로 광촉매의 강한 산화작용에 의해 산화분해 되어 살균된다.

### 2.3. Plasma의 정의 및 성질

#### 2.3.1. Plasma

Plasma라는 말은 Langmuir에 의해 처음 사용되었으며 정의되었다. 전기적인 방전으로 인해 생성된 전하를 띤 양이온과 전자들의 집단이 혼재하고 있는 상태를 Plasma라고 한다.

Plasma란 소의 ‘제4의 물질상태’라고 알려져 있으며 우주의 99%가 Plasma 상태로 이루어져 있다.

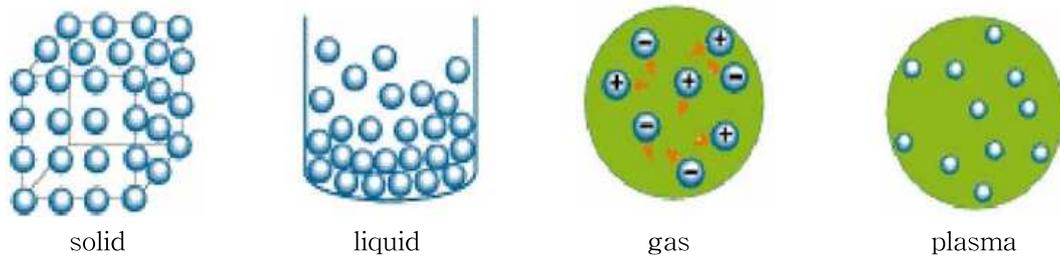


Photo. 4. Plasma of creation process

위에서 Photo. 4. 에서 보는바와 같이 물질 중 가장 낮은 에너지 상태로 이루어져 있다. 이것이 열(에너지)을 받아서 차츰 액체로 되고 그 다음에는 기체로 전이를 일으킨다. 이 기체에 더욱 에너지를 가하면, 중성 입자에서 전자가 방출되어 이온으로 되고, 이온과 전자가 혼재된 상태로 된다. 이 상태가 Plasma이다. 기체에서 Plasma로의 변화는 상변화 그 자체는 아니다. 그러나 기체와 Plasma는 갖고 있는 에너지에 큰 차이가 있고, 상이 다르다는 유사한 부분이 있다.

일반적으로 Plasma는 평형 플라즈마(equilibrium plasma)와 비 평형 플라즈마(non equilibrium plasma)의 두 유형으로 분류된다. 평형플라즈마는 열 플라즈마(thermal

plasma)라고 불리기도 한다. 열 플라즈마란 열평형상태에 있는 Plasma를 말하지만 엄밀히 물리적으로 정의된 열평형을 의미하는 것이 아니고, 국소열평형(local thermal equilibrium)상태의 Plasma, 즉 계 전체가 열평형상태가 아니어도, 그 부분 부분이 열평형 상태 사이라고 간주할 수 있는 Plasma를 말한다. 비 평형 Plasma는 비열플라즈마 또는 저온플라즈마라고 불리기도 하며 전자와 다른 입자들 간의 열적 평형이 이루어지지 않는 경우를 말한다. 플라즈마는 온도에 따라 초고온플라즈마( $10^8$  K, 이상), 열플라즈마(약  $10^4$  K), 저온플라즈마(전자의 온도  $10^4$  K, 이온 및 중성자 온도 300 ~ 500 K)로 나눌 수 있고, 전리도에 따라 완전 전리 Plasma, 부분 전리 Plasma, 약 전리 Plasma로 나눌 수 있다.

Plasma 공정은 플라즈마가 갖는 화학적, 교활성, 고열원, 도전성, 전자파 방출 등의 특징을 이용하여 금속이나 세라믹 나노 분말 또는 막의 기상에서의 고속증착(CVD), 플라즈마 용사에 의한 금속이나 세라믹의 후막 고속 형성, 금속의 제련, 용접, 절단, 방전가공 등의 Plasma 가공, 플라즈마 소결, ICP 분석에 응용되어 사용되고 있으며 최근에는 Plasma가 갖고 있는 극도로 빠른 반응속도와 고온의 열원을 이용하여 유해폐기물 처리 분야에 활발히 적용되고 있다.

#### 2.3.4. Plasma의 성질

제 4의 물질이라 불려지는 Plasma는 여러 분야에서 연구·응용되고 있다. 이러한 연구와 응용을 위해서는 Plasma의 성질, 거동을 명확히 파악할 필요가 있다.<sup>30)</sup>

Plasma는 온도에 의한 물질 분류법에 따르면, 고체, 액체, 기체에 이어서 제 4의 물질이라고 말한다. 수소를 예로 들면, 절대 영도 부근에서 수소는 고체의 상태로 있다. 온도를 차차 올리면 약 14K에서 액체로 되고, 또, 20.2K에서 비점에 달하여 기화한다. 상온 상압의 수소는 중성의 기체이고, 도전성을 가지지 않지만, 이것을 수만 K 정도로 가열하면, 수소 분자는 해리를 거쳐 전리를 일으킨다. 이 때,  $x_e = 1$ 인 경우를 완전전리 Plasma라고 한다. 온도가 수십만 K로 되면, 최종적으로 수소는 전도성을 가진 완전전리 Plasma로 된다.

Plasma 상태를 특징짓는 양으로는 전리도  $x_e$  외에, 데바의 길이  $\lambda_D$ , Plasma 진동수  $\omega_p$ , Plasma 파라미터  $ND$ , 온도  $T$ , 밀도  $n$ , 충돌 주파수 등이 이용된다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1. 실험장치

본 실험은 2가지 형태로 구분하여 분해실험을 하였다. 즉, 산화티탄(Titanium oxide,  $TiO_2$ )의 촉매 반응기(catalysis reactor)를 첨가하지 않은 상태에서의 유해가스 분해실험을 먼저 하였으며, 그 가스분해제거 분석결과를 가지고 산화티탄 촉매 반응기(catalysis reactor)를 첨가하여 분해실험을 하였을 때의 유해가스 분해제거율을 비교분석 하였다.

### 3.1.1. Plasma에 의한 분해실험 장치

Plasma 방전에 의한 유해가스를 분해하기 위한 장치의 개략 도를 Fig. 3에 나타내었다. 시료가스(NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>)와 기준가스는 유량계를 통하여 mixing tank로 도입되어 혼합된 다음 reactor로 주입된다. 이 때 모든 가스의 수송은 내부식성이 좋은 직경 10mm의 테프론 관을 이용하였다. 반응기는 코일형 SPCP reactor를 이용하였고 발열 reactor에 의한 reactor의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 냉각 팬을 설치하였다. 방전에 필요한 전력은 High Voltage Power Supply(SIS electronics co, SHP6501)를 사용하여 5, 10, 20 및 50kHz의 주파수와 0 ~ 12KV의 전압범위에서 실험하였다. 분해가스는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>분석기(Ecom-AC, Germany)를 사용하여 NO, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> 및 SO<sub>2</sub>를 사용하여 분석하였다. 시료가스의 분해 시 전압과 주파수는 고전압을 직접 측정할 수 없기 때문에 (chemiluminescence)을 이용하여 측정 하였다. 화학발광법은 NO가스를 예로 들면, NO와 O<sub>3</sub>와의 반응에 의하여 전자로 여기된 NO<sub>2</sub>가 기저(basis)상태의 NO<sub>2</sub>로 되면서 발광하는 590~2,500μm의 발광 강도가 분석기에 들어오는 NO 농도에 비례하는 것에 기초한 것이다.

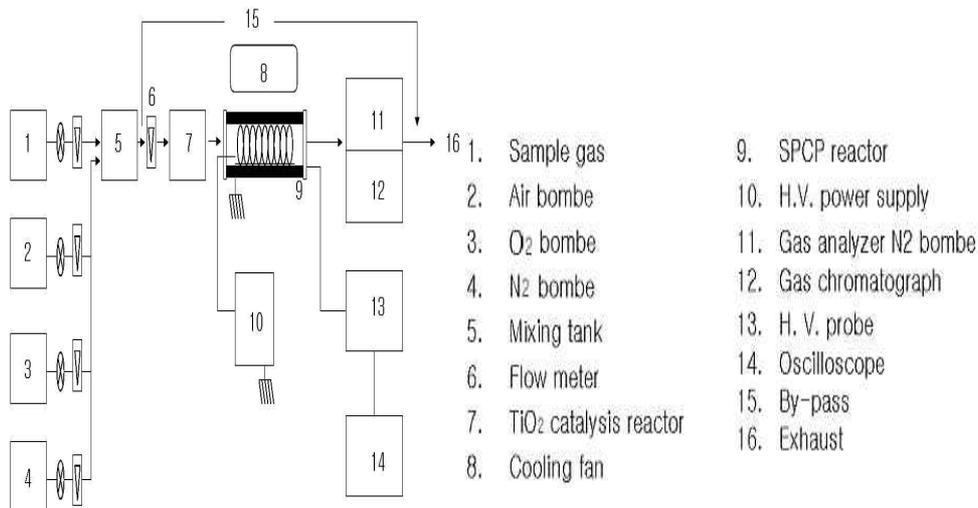


Fig.3. Schematic diagram of experimental apparatus



Photo. 5. Mixing tank

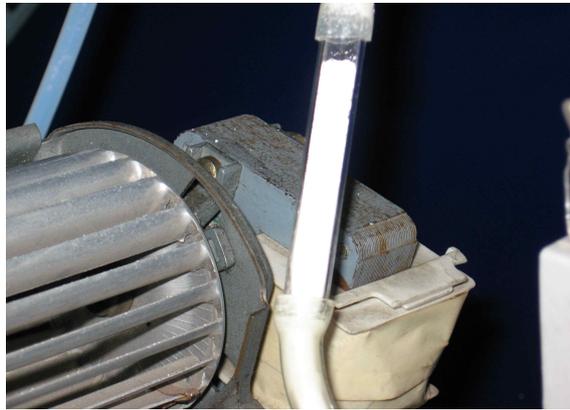


Photo. 6. Titanium oxide(TiO<sub>2</sub>) catalysis ReactorC

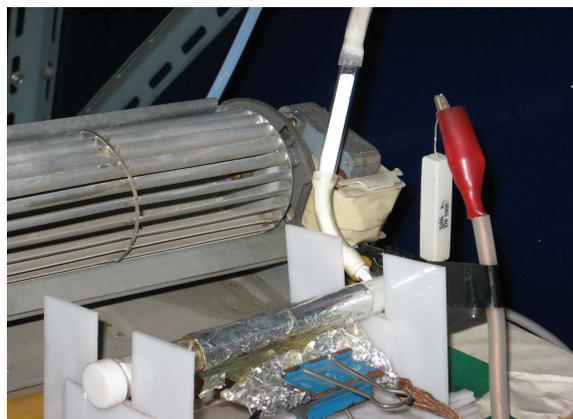


Photo. 7. SPCP Reactor

### 3.1.2. TiO<sub>2</sub> Catalysis Reactor 와 SPCP Reactor

코일형 SPCP reactor의 상세도는 Fig. 4.에서 나타내었다. SPCP reactor는 절연 지체로서 열적으로 안정하고 연면방전이 잘되는 석영관과 Teflon stopper를 사용하였고 방전전극의 전극재료는 열적으로 안정하고 내구성이 높은 직경 1, 2, 및 3mm의 고순도 텅스텐 전극(순도 99.9%)을 기준전극으로 하였으나, 구리와 알루미늄도 전극재료로 사용하였다. 원통형 석영관 reactor는 내경이 13mm이고 굵기가 1mm이며 길이는 110mm이었다. 방전전극은 reactor 내부에 텅스텐 선, 구리 선 및 알루미늄 선으로 7, 9, 및 11회 나선형으로 감아서 전극으로 사용하였다. 접지전극(ground electrode)은 석영관의 표면에 알루미늄 호일을 싸서 고전압발생기의 접지에 연결하였다. Plasma를 발생시키기 위하여 방전전극을 고압 측에 연결하고 알루미늄 호일을 접지 측에 연결하였다. 또한 Plasma를 발생 시 생성되는 열을 충분히 방열시키기 위하여 냉각 팬으로 냉각시켰다. 그리고 산화티탄(TiO<sub>2</sub>) catalysis reactor는 SPCP reactor와 같은 부피의 reactor에 산화티탄(TiO<sub>2</sub>) catalysis를 축진시켜 사용하였다.

## 3.2 실험방법

### 3.2.1. NO 분해실험

본 실험에 사용된 표준시료 가스는 1,500ppm NO (N<sub>2</sub> base 99.95%) 시료가스의 유량은 N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, 공기를 실험조건에 따라 유량계에 부착된 조절밸브로 조절하면서 혼합탱크에서 혼합하였으며 혼합 한 가스는 유량계를 사용하여 100, 200, 300 및 1,000ml/min로 유량을 변화시키면서 reactor에 주입하였고, 이 때 가스 분석기로 NO<sub>x</sub>의 농도를 측정 하였다. 가스의 농도는 순도 99.95%의 N<sub>2</sub>가스와 표준시료가스를 혼합하여 초기 농도 100, 200, 300ppm으로 하여 정상상태가 되도록 3~5분간 유지시킨 후 분해하였다. 실험은 상온, 대기압 하에서 하였으며 시료가스가 누출되는 것을 방지하기 위하여 테프론으로 SPCP reactor를 밀봉하였으며 초기농도는 정상상태에 도달한 후 분석기로 확인한 후 분해하였다. 입력전력은 Oscilloscope와 기록계로 파형을 관찰하면서 전압과 전류를 상승시켜 반응기내에서 Plasma가 확실하게 발생하는 최저 전력부터 증가시키면서 실험을 하였다. 입력전력을 일정하게 유지시킨 후에 reactor를 통과한 시료 가스 속에 있는 NO 농도가 거의 변화되지 않을 때의 측정값을 기록하였다.

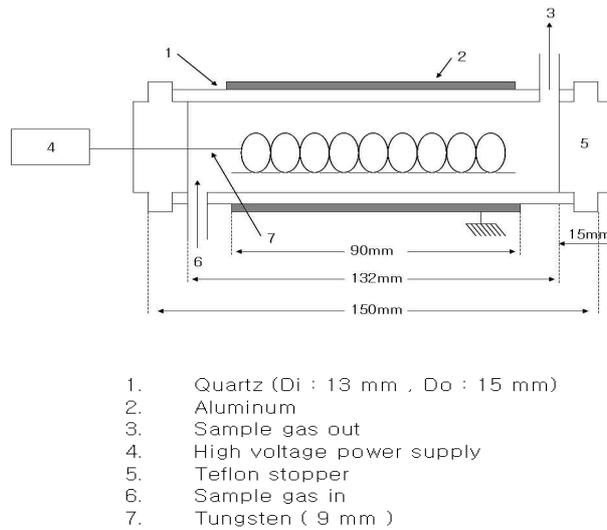


Fig. 5. NO decomposition experiment

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 촉매에 따른 분해율

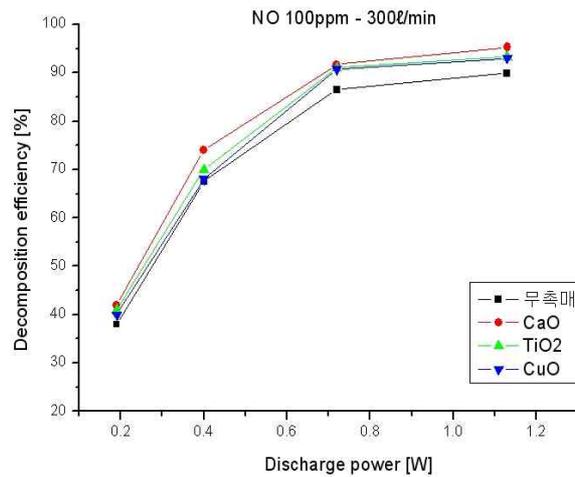


Fig. 6. Decrease of NO by TiO<sub>2</sub> , CaO, CuO catalysis plasma reactor

Fig. 6은 무촉매, CaO, TiO<sub>2</sub>, CuO 촉매에 의한 NO의 분해제거능력에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 실험은 NO 100ppm과 N<sub>2</sub>를 300l/min의 유량을 흘렸을 때, 각 촉매에 의한 NO의 분해율을 나타낸 그림이다. 실험결과는 무촉매, CaO, TiO<sub>2</sub>, CuO를 첨가하였을 때 NO의 분해제거율은 각각 85%, 96%, 93%, 92%로 CaO촉매가 플라즈마 반응시 95%의 분해율로 가장 높은 분해율을 보인다는 것을 알 수 있었다.

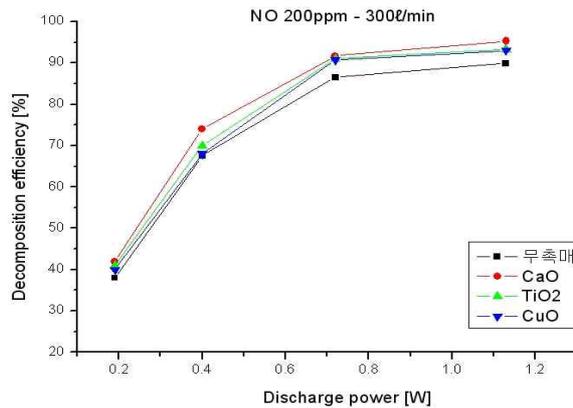


Fig. 7. Decrease of NO by TiO<sub>2</sub>, CaO, CuO catalysis

Fig. 7은 무촉매, CaO, TiO<sub>2</sub>, CuO 촉매에 의한 NO의 분해제거능력에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 실험은 NO 200ppm과 N<sub>2</sub>를 300l/min의 유량을 흘렸을 때, 각 촉매에 의한 NO의 분해율을 나타낸 그림이다.

실험결과는 무촉매, CaO, TiO<sub>2</sub>, CuO를 첨가하였을 때 NO의 분해제거율은 각각 85%, 95%, 91%, 90%로 CaO촉매가 플라즈마 반응시 95%의 분해율로 가장 높은 분해율을 보인다는 것을 알 수 있었다.

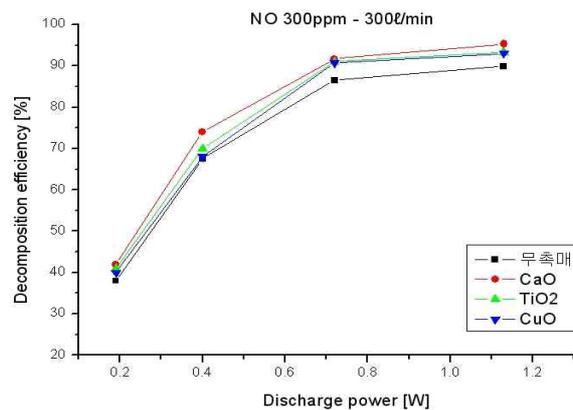


Fig. 8. Decrease of NO by TiO<sub>2</sub>, CaO, CuO catalysis

Fig. 8은 무촉매, CaO, TiO<sub>2</sub>, CuO 촉매에 의한 NO의 분해제거능력에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 실험은 NO 300ppm과 N<sub>2</sub>를 300l/min의 유량을 흘렸을 때, 각 촉매에 의한 NO의 분해율을 나타낸 그림이다.

실험결과는 무촉매, CaO, TiO<sub>2</sub>, CuO를 첨가하였을 때 NO의 분해제거율은 각각 88%, 96%, 93%, 92%로 CaO촉매가 플라즈마 반응시 96%의 분해율로 가장 높은 분해율을 보인다는 것을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 광분해 반응의 촉매로 널리 이용되고 있는 TiO<sub>2</sub>와 CaO, TiO<sub>2</sub>, CuO 촉매를 이용하여 NO 제거 분해율에 영향을 평가하였다. 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CaO, TiO<sub>2</sub>, CuO catalysis reactor에 의한 유해가스의 분해제거율은 CaO촉매가 NO 농도 200ppm, 주파수 10kHz NO 96.5%의 분해율로 가장 높았다.
2. CaO, TiO<sub>2</sub>, CuO catalysis reactor 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 20kHz이상의 고전압에서 주파수가 커질수록 기준가스의 전도성이 증가하여 연면을 따라 전류가 부분적으로 흐르기 때문에 분해제거율이 감소하였다.

## 6. 참 고 문 헌

- [1] 국립환경과학원 대기오염물질 배출용어정의, 2007.
- [2] Ogata azushi etal., 酸化チタン 촉매を用いるアブズマ駆動觸媒反應によるベンゼン分解の最適化, 2004. 11. 30
- [3] 角田 和彦, 清水 孝太進郎, 柱 進司, 水野 璋, “パルス放電プラズマによるディーゼル排ガス中のNOx除去”, 静電気 學會講演論文集, 97, 16p B5, pp. 233~236, 1997.
- [4] M. Okumoto, Z. Su, S. Katsura, and A. Mizune, “Dilution effect with inert gas in direct methanol synthesis from methane using non-thermal plasma”, 静電気 學會講演論文集, 15a, B8, pp. 25~28, 1997.
- [5] A. Ogata, K. Yamanouchi, and K. Mizuno, “Decomposition of Benzene using Alumina-Hybrid Plasma Reactor,” Proc. of NEDO Sump. on Non-Thermal Discharge Plasma Technology for Air Pollution control, pp. 95~99, 1997.
- [6] T. Morikami, M. Yumoto, and T. Sakai, “Effect of Vibrational Excitation on NO Decomposition in N<sub>2</sub> Glow Discharge”, Proc. of NEDO Symp. on Non-Thermal Discharge Plasma Technology for Air Pollution Control, pp. 132~137, 1997.
- [7] E. M. van Veldhuizen, “SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> removal using transient atmospheric discharge”, Proc. of NEDO Symp. on Non-Thermal Discharge Plasma

- Technology for Air Pollution Control, pp. 65~83, 1997.
- [8] T. takahashi, K. Tada, and T. Oda, "Atmospheric Pressure Dicharge Plasma Decomposition for Gaseous Air Contaminants-Trichloroethylene", 靜電氣學會講演論文集, 15a, B4, pp. 11~14, 1997.
- [9] S. Kanazawa, J. S. Chang, G. F. Round, G. Sheng, T. Ohkubo, Y. Nomoto, and T. Adachi, "Reduction of NOx from Combustion Flue Gases Radical Shower Techniques", Proc. of NEDO Symp. on Non-Thermal Discharge Plasma Technology. for Air Pollution Control, pp. 44~52, 1996.
- [10] K. Fujii, M. Higashi, and N. Suzuki, "Simutaneous removal of NOx, COx, SOx and soot in diesel engine exhaust", NATO ASI Series, G34, Prat B, pp. 257~280, 1993.