

☒ 응용논문

연면방전에 의한 질소산화물의 분해시 전극  
공정변수에 대한 영향  
-Effect of Electrode Process Variables in case of  
Decomposition of NO<sub>x</sub> by SPCP-

안형환\*

An, Hyung Hwan

강현춘\*\*

Kang, Hyun Choon

Abstract

For hazardous air pollutants(HAP) such as NO and NO<sub>2</sub> 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), electrode materials(W, Cu, Al), electrode thickness(1, 2, 3 mm) and number of electrode windings(7, 9, 11) were measured.

Experimental results showed that for the frequency of 10 kHz, the highest decomposition efficiency of 94.3 % for NO and 84.7 % for NO<sub>2</sub> were observed at the power consumptions of 19.8 and 20W respectively and that decomposition efficiency decreased with increasing frequency above 20 kHz. Decomposition efficiency was increased with increasing residence times and with decreasing initial concentration of pollutants. Decomposition efficiency was increased with increasing thickness of discharge electrode and the highest decomposition efficiency was obtained for the electrode diameter of 3 mm in this experiment. As the electrode material, decomposition efficiency was in order : tungsten(W), copper(Cu), aluminum(Al).

\*충주대학교 안전공학과 · \*\*제주산업정보대학 환경공학과

## I. 서 론

고도의 경제성장과 인구의 도시집중화, 공업화의 추진으로 에너지의 개발과 대량이용을 초래하였고 자동차, 항공기, 선박, 화력발전소, 화학공업 및 대규모 산업설비 등으로부터 배출되는 질소화합물( $\text{NO}_x$ ), 황산화물( $\text{SO}_x$ ) 및 휘발성 유기화합물(volatile organic compound, VOC), 매연, 분진등이 날로 증가하여 심각한 대기오염문제를 야기시켜 국가적 또는 국제적인 지구 환경문제를 일으키고 있는 실정이다.[1,2]

황산화물과 함께 가장 중요한 대기오염물질의 하나로 인식되고 있는 질소산화물( $\text{NO}_x$ )은 일산화질소( $\text{NO}$ )와 이산화질소( $\text{NO}_2$ )로 고정오염원과 이동오염원에서 대량으로 배출되며 이를 제거하기위한 탈질기술로서 접촉환원법, 무촉매환원법, 전자선조사법, 산화흡수법등이 있으나 촉매활성저하, 탈질율감소, 방사선에 의한 안전성, 폐액처리 등의 문제점을 안고 있다.[3]

이러한 환경오염문제를 해결하기 위하여 국내외에서 활발한 연구가 진행되고 있는 기술이 비열플라스마(non-thermal plasma) 기술이다. 저온 플라스마(low-temperature plasma) 또는 비평형 플라스마(non-equilibrium plasma)라고도 불리는 이 기술은 반응하는 동안 대부분 에너지가 전자에 집중되어 이온이나 중성입자보다 온도가 극히 높게 되고, 이 전자가 기준가스 입자와 충돌하여 생성된 라디칼이 대상물질을 분해하는 방식으로서 X선 발생을 동반하여 많은 문제점을 안고 있는 전자빔조사(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 설치하여 수 kHz에서 수십 kHz의 고전압을 인가하여 강력한 연면 플라스마를 발생시 유해물질을 분해하는 방식으로 Oda와 Masuda 등[4, 5]은 트리클로로에틸렌, 아세톤, 이소프로필 알코올 등의 휘발성 유기화합물을 분해하여 90%이상의 분해율을 나타냈다고 보고하였다.

펄스방전 방식은 wire-cylinder나 wire-plate 방식의 corona 방전용 전극에 10~500 ns의 펄스 고전압을 인가하여 전극 공간내에 streamer corona를 발생시켜 대상물질을 분해하는 방식으로 Xiyao 등[6, 7]은 저온, 상압하에서  $\text{NO}_x$ 의 경우에 90 % [6],  $\text{SO}_2$ 의 경우에 99.3 % [7]의 분해율을 얻었다고 보고하였다.

부분방전 방식은 전극공간에 강유전체 pellet을 충전하여 그 양끝전극에 주로 상용주파수인 50~60 Hz의 고전압을 인가하여 pellet 근방에 높은 전계를 형성하여 대상물질을 분해하는 방식으로 Obama 등[8]은  $\text{N}_2$ 와 건조공기를 기준가스로 사용하여 5 W의 전력과 100 ppm의 초기농도에서  $\text{NO}_x$ 를 분해하여 80~90 %의 분해율을 나타냈다고 보고하였다.

무성방전은 두 전극간에 절연벽을 설치하고 양전극에 수 kHz 정도의 저주파 전압을 인가하여 두 전극사이에 에너지효율이 큰 저온플라스마를 생성하여 대상물질을 분해하는 방식으로 Harano 등[9]은 co-axial과 cylindrical tube로 구성된 dielectric barrier 방전에 의해 500 mL/min의 유량, 107 ppm의 초기농도, N<sub>2</sub> gas flow 5 L/min에서 NO를 분해하여 높은 분해효율을 보였다고 보고하였다.

이상과 같은 플라스마 방전에 대한 여러 가지 연구가 진행되었으나 주파수, 유량 및 농도 등 여러 변수들의 영향을 체계적으로 연구한 결과는 없었으며 특히, 전극의 재질, 굵기 및 감은 횟수에 대해서 구체적으로 연구한 논문은 아직 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 대기환경 오염의 주원인으로 알려진 일산화질소(NO), 이산화질소(NO<sub>2</sub>)등의 질소산화물(NO<sub>x</sub>)을 주파수, 유량, 농도, 전극의 재질(W, Cu, Al), 전극의 굵기(1, 2, 3 mm) 및 감은 횟수(7회, 9회, 11회)에 대하여 특수 설계된 플라스마 연면방전 반응기를 이용하여 분해효율을 구하고, 생성물의 분석을 통하여 최적의 공정변수와 최고의 분해효율을 얻고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

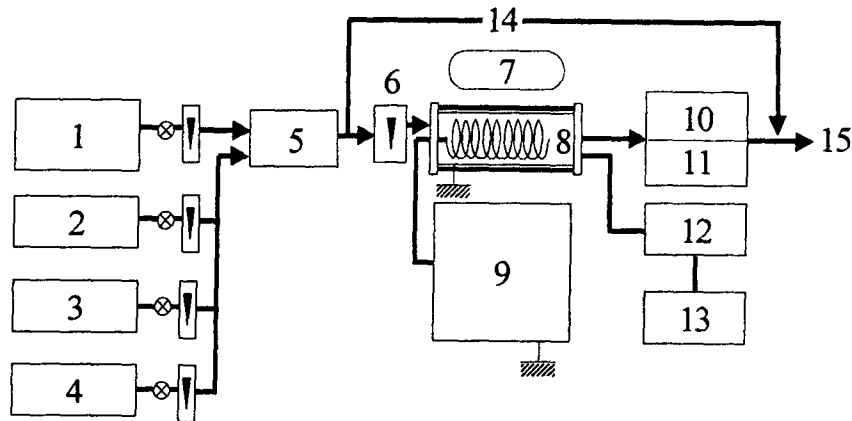
플라스마 방전에 의한 유해가스를 분해하기 위한 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 시료가스(NO, NO<sub>2</sub>)와 기준가스는 유량계를 통하여 mixing tank로 도입되어 혼합된 다음 반응기로 주입된다. 이 때 모든 가스의 수송은 내부식성이 좋은 직경 10 mm의 테프론관을 이용하였다. 반응기는 코일형 연면방전반응기를 이용하였고 열반응에 의한 반응기의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 냉각 팬을 설치하였다.

방전에 필요한 전력은 High Voltage Power Supply(SIS electronics co. SHP6501)를 사용하여 5, 10, 20 및 50 kHz의 주파수와 0~12 kV의 전압범위에서 실험하였다. 분해가스는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>분석기(Ecom-AC, Germany)를 사용하여 NO, NO<sub>2</sub>를 분석하였다.

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

NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 분석기는 화학발광법(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 590~2,500 nm의 발광 강도가 분석기에 들어오는 NO 농도에 비례하는 것에 기초한 것이다.

코일형 연면방전 반응기의 상세도는 Fig. 2에 나타내었다. SPCP반응기는 절연 지지체로서 열적으로 안정하고 연면방전이 잘되는[10] 석영관과 Teflon 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.



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

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

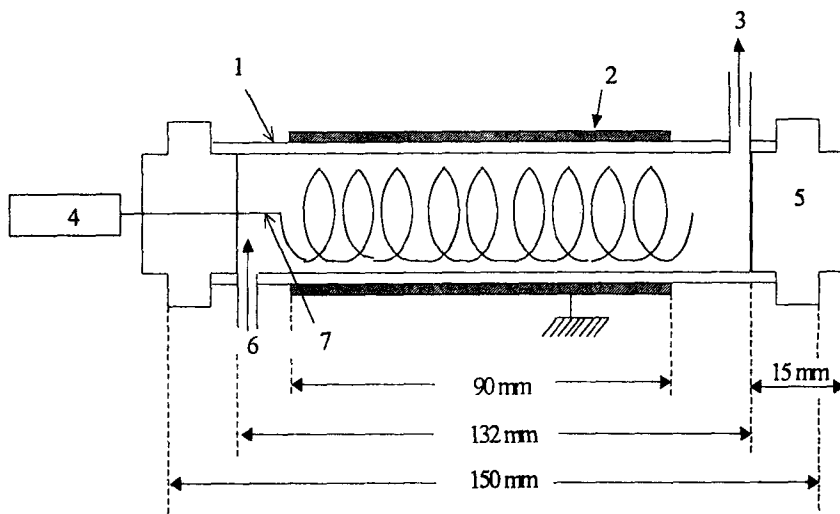
방전전극은 반응기 내부에 텅스텐선, 구리선 및 알루미늄선으로 7회 나선형으로 감아서 전극으로 사용하였다. 접지전극(ground electrode)은 석영관의 표면에 알루미늄 호일을 싸서 고전압발생기의 접지에 연결하였다. 플라즈마를 발생시키기 위하여 방전 전극을 고압측에 연결하고 알루미늄 호일을 접지측에 연결하였다. 또한 플라즈마를 발생시 생성되는 열을 충분히 방열시키기 위하여 냉각 팬으로 냉각시켰다.

본 실험에 사용된 표준 시료가스는 1,500 ppm NO(N<sub>2</sub> base 99.95 %)와 1,500 ppm NO<sub>2</sub>(N<sub>2</sub> base, 99.95 %)를 사용하여 실험하였다. 시료가스의 유량은 N<sub>2</sub>, 시료가스 및 첨가 가스(CH<sub>4</sub>)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, 이 때 가스 분석기로 NO와NO<sub>2</sub>의 농도를 측정하였다. 가스의 농도는 순도 99.95 %의 N<sub>2</sub> 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 데

프론으로 연면방전 반응기를 밀봉하였으며 초기농도는 정상상태에 도달한 후 분석기로 확인한 후 분해하였다. 입력전력은 오실로스코프와 기록계로 파형을 관찰하면서 전압과 전류를 상승시켜 반응기내에서 플라즈마가 확실하게 발생하는 최저 전력부터 증가시키면서 실험을 하였다. 입력전력을 일정하게 유지시킨 후에 반응기를 통과한 시료가스 속에 있는 NO, NO<sub>2</sub>의 농도가 거의 변화되지 않을 때의 측정값을 기록하였다.

실험변수는 표준가스의 유량과 농도, 주파수 변화 이외에 전극의 재질(W, Cu, Al), 전극의 굵기(1, 2, 3 mm), 첨가물질(CH<sub>4</sub>) 등을 변화시켰고, 이들 실험변수의 기준값은 시료가스 300 ppm의 농도, 10 kHz의 주파수, 200 mL/min의 유량, W을 전극재질, 1 mm의 전극굵기, 및 기준가스를 N<sub>2</sub>로 하였다. 이들 실험변수 중 기준값을 고정하고 한 개의 변수만을 변화시키면서 실험을 하였다



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

Fig. 2. Schematic diagram of discharge plasma reactor.

### 3. 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 N<sub>2</sub>를 이용하였다. 이 경우 방전전력이 커질수록 분해율이 증가하였고 본 실험범위 내에서는 10 kHz와 19.8 W에서 94.3 %의 최대의 분해율을 나타냈으며 방전출력이 커질수록 분해율이 처음에는 지수함수적으로 급속히 증가하다가 18~20 W의 높은 방전출력 범위에서는 서서히 증가하는 것을 알 수 있었다. 20 kHz 이상에서는 주파수가 증가함에 따라 분해율이 감소하는 것을 알 수 있었고 5 kHz의 저주파수에서는 분해율이 감소하였다. 이러한 현상은 주파수를 5~50 kHz까지 변화시켜 CFC-113(CF<sub>2</sub>ClCFCl<sub>2</sub>)를 분해 제거한 Oda 등[11,12]의 연구결과와 일치하였다.

그러나 5 kHz 이하의 저주파수 범위 즉, 50~800 Hz에서 NO의 분해의 연구[13], 60~400 Hz의 범위에서 NO<sub>x</sub>의 분해의 연구[14] 등의 저주파 영역에서의 연구결과는 주파수의 증가에 따라 분해율이 증가하였다. 결과적으로 10 kHz를 분기점으로 저주파수 범위에서는 주파수가 커질수록, 고주파수 범위에서는 주파수가 작을수록 분해율이 커지는 것을 알 수 있었다. 이것은 5 kHz의 저주파수 범위에서는 방전효율이 낮기 때문이고, 20 kHz 이상에서는 고전압에서 주파수가 커질수록 기준가스인 부도체의 전도성이 증가하여 연면을 따라 전류가 channeling현상과 같이 일부분으로만 흐르기 때문에 고주파영역에서는 방전효율이 감소한다. 또한, PPCP반응기를 이용하여 NO<sub>x</sub>의 분해제거실험에서 고주파에서 상대적으로 많이 발생한 라디칼 자체가 다시 재결합하기 때문이라고 Mizuno 등[15]이 설명하였다. 최대분해율의 최고점이 생기는 것은 inductive reactance X<sub>L</sub>과 capacitive reactance X<sub>C</sub>가 동일하게되는 공진현상을 이루어 전류가 최대로 흐르기 때문에 운동량이 증가하여 분해율이 커진다[16].

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 NO<sub>2</sub> 가스의 체류시간을 1.05~10.5 초로 변화시켰을 때 방전전력에 대한 NO<sub>2</sub> 가스의 분해제거율을 나타낸 것으로 이 때 주파수는 10 kHz, 초기농도는 300 ppm이었고 기준가스는 N<sub>2</sub>이었다. NO<sub>2</sub>가스의 체류시간이 길어질수록 즉, 유량이 작아질수록 분해율이 높게 나타났으며 이는 유량이 작을수록 반응기를 통과하는 체류시간이 증가하여 기준가스와 충돌할 수 있는 충돌주파수( $\nu_e$ )가 증가되어 반응에 필요한 에너지가 커지므로 라디칼이 많이 생성되어 NO<sub>2</sub> 가스와 반응하여 분해율이 높게 나타나는 것으로 사료되며[11,12,17] 펄스방전 플라즈마에서 유량 150, 300 및 840 L/min로 변화시켜 NO<sub>x</sub>의 제거율은 입력전력과 체류시간에 의존한다는 角田[18]의 연구결과와 일치하였다.

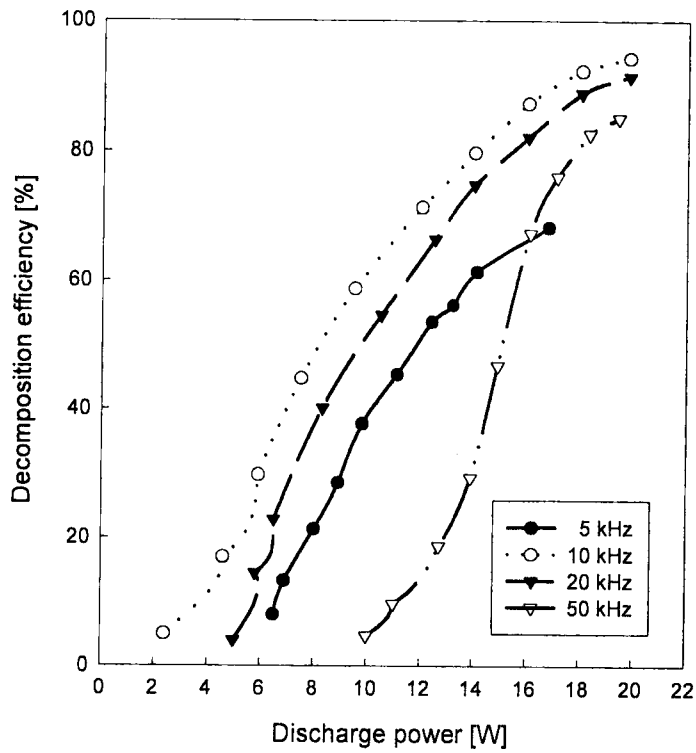


Fig. 3. Effect of electric frequency on decomposition efficiency of NO (N<sub>2</sub> base, C<sub>NO</sub><sup>0</sup> : 300 ppm, flow rate : 200 mL/min, discharge electrode : W).

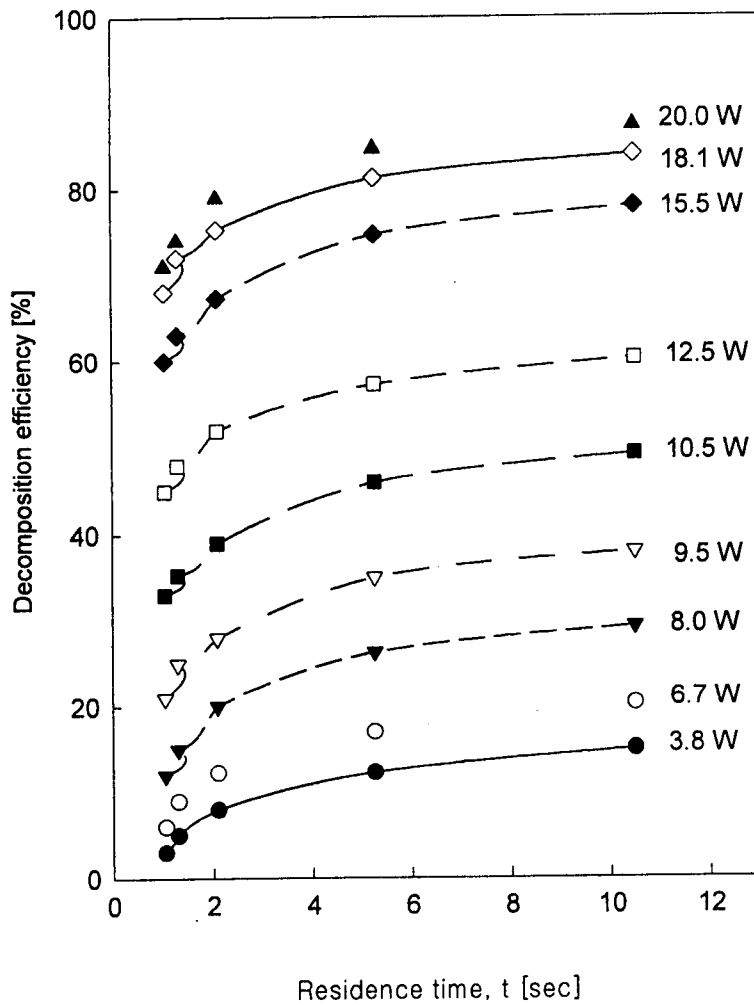


Fig. 4. Effect of residence time on decomposition efficiency of NO<sub>2</sub> (C<sup>0</sup><sub>NO<sub>2</sub></sub> : 300 ppm, frequency : 10 kHz , base gas : N<sub>2</sub> , discharge electrode : W ).

Fig. 5는 NO<sub>2</sub> 가스의 초기농도를 100, 300, 500 및 1,000 ppm으로 변화시켰을 때 방전전력에 대한 NO<sub>2</sub>가스의 분해 제거율을 나타낸 것으로 이 때 주파수는 10 kHz, 유량은 200 mL/min 이었고 기준가스는 N<sub>2</sub>이었다. 초기농도가 작을수록 분해율이 높게 나타났으며 이것은 초기농도가 작을수록 NO<sub>2</sub> 분자가 분해하는데 필요한 에너지가 커



지기 때문이라고 사료된다. 이것은 기준가스와 충돌하여 생성된  $N\cdot$ ,  $O\cdot$  및  $OH\cdot$  라디칼이  $NO_2$ 분자와 반응하거나 자유전자가 직접  $NO_2$ 와 충돌하여 반응할 수 있는 확률이 커지므로 분해율이 높게 나타나는 것으로 사료된다[11,17]. 이것은 펄스방전 플라즈마에서 초기농도 100, 150 및 200 ppm에서  $NO_x$ 의 제거를 연구한 角田 등[18]의 연구결과와 일치하였다.

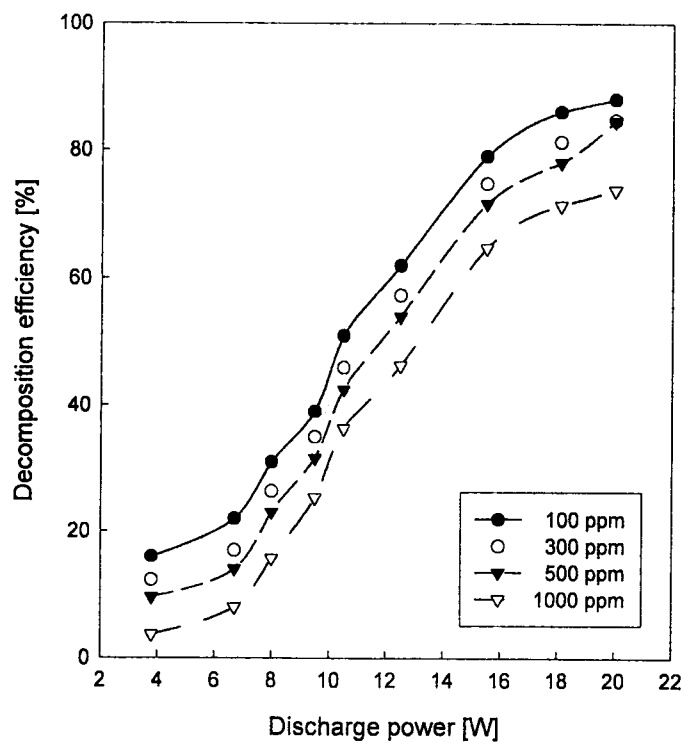


Fig. 5. Effect of initial concentration of  $NO_2$  on decomposition efficiency (flow rate : 200 mL/min, frequency : 10 kHz , base gas :  $N_2$  , discharge electrode : W ).

Fig. 6은  $NO$ 가스의 분해에서 분해전극의 재질을 텅스텐, 구리 및 알루미늄 을 사용 하였을 때 방전전력에 대한  $NO$ 가스의 분해 제거율을 나타낸 것으로 이 때 주파수는 10 kHz, 유량은 200 mL/min, 기준가스는  $N_2$  이었고 초기농도는 300 ppm이었다. 방

전전극으로 텅스텐 전극을 사용하였을 때 가장 높은 분해율을 나타냈으며 이것은 전극재질의 전기저항이 높을수록 전극의 온도가 높아지므로 이온방전 즉, 플라즈마가 발생하기 쉽고 용점이 낮을수록 전극의 오염도가 커져서 다른 물질이 전극표면에 침적되어 전극의 성능이 저하되기 때문이다. 실제로 상온과 2,000 K에서 전기저항을 비교하면 W ( $5.28, 58 \times 10^8 \Omega \cdot m$ ), Al( $2.65, 39 \times 10^8 \Omega \cdot m$ ) 및 Cu( $1.678, 33 \times 10^8 \Omega \cdot m$ )로 Cu와 Al의 결과가 일치하지 않았다. 그러나 연면방전에서 전극재료의 flash over 전압을 비교할 때 Cu와 Al은 각각 66.5 및 68 KV[10]로서 Al의 경우 더 많은 에너지가 필요하므로 분해율이 떨어진다. 방전전극 재질의 용점은 W( $3,407 \text{ }^\circ\text{C}$ ), Cu( $1,084.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 및 Al( $660.3 \text{ }^\circ\text{C}$ )로서 W는 용해되지 않기 때문에 전극표면적의 거칠기가 그대로 보존되어 전극표면에서 자유전자가 많이 발생하여 분해율이 증가하게 되며 용점이 낮을수록 오염도가 커져서 용점과 분해율이 완전히 일치하였다.

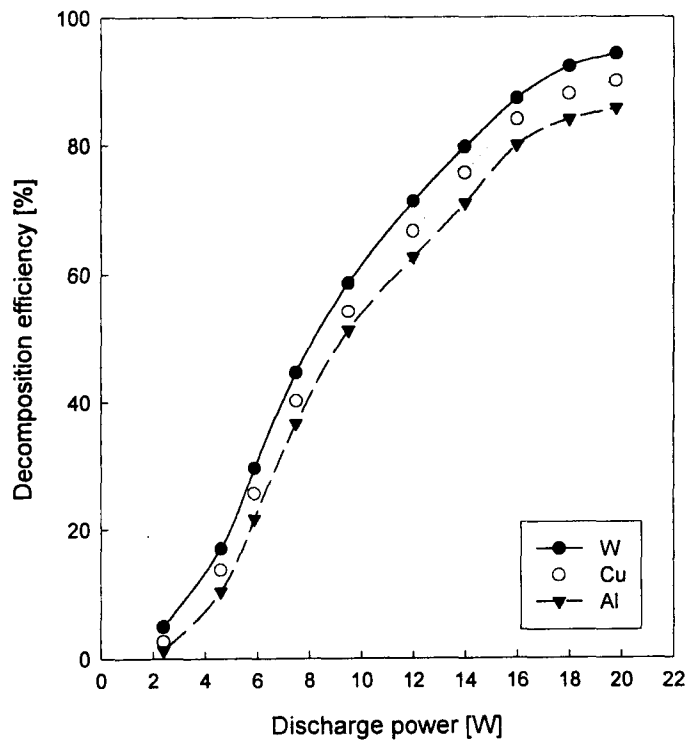


Fig. 6. Effect of electrode material on decomposition efficiency of NO ( $C_{NO}^0$  : 300 ppm, flow rate : 200 mL/min, frequency : 10 kHz, base gas  $N_2$  ).

Fig. 7은 텅스텐 전극에서 전극의 굵기를 1, 2 및 3 mm로 변화시켰을 때 방전전력에 대한 NO가스의 분해 제거율을 나타낸 것으로 이 때 주파수는 10 kHz, 유량은 200 mL/min, 기준가스는 N<sub>2</sub> 이었고 초기농도는 300 ppm이었다. 3 mm의 전극을 사용하였을 때 가장 높은 분해율을 보였으며 이것은 전극의 굵기가 굵을수록 방전을 일으키는 방전 면적이 증가하여 분해율이 증가하는 것으로 사료된다[10].

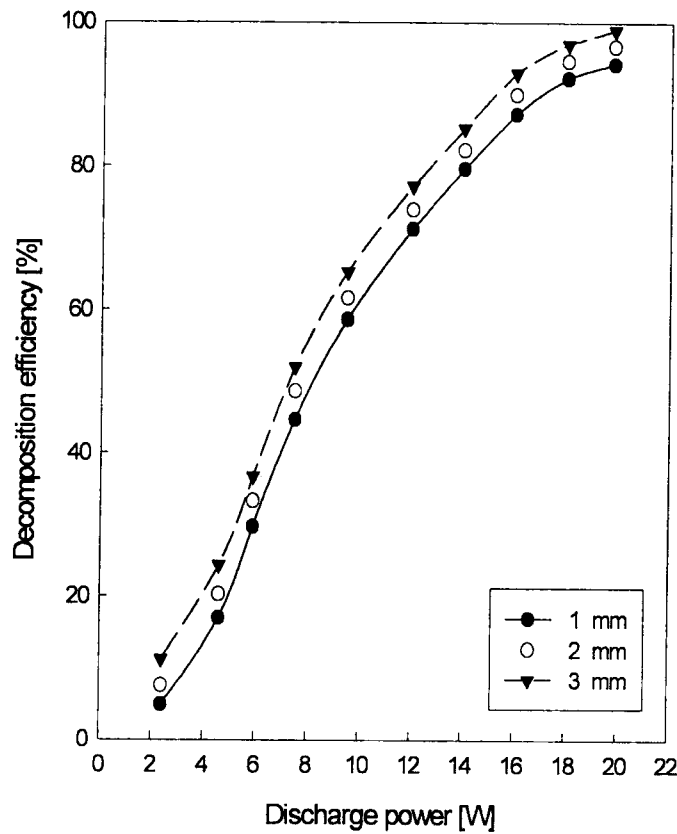


Fig. 7. Effect of thickness of electrode on decomposition efficiency of NO ( $C_{NO}^0$ : 1000 ppm, flow rate : 200 mL/min, frequency : 10 kHz, base gas : N<sub>2</sub> , discharge electrode : W).

Fig. 8은 텅스텐 전극에서 전극의 감은 횟수를 7, 9 및 11회로 변화시켰을 때 방전전력에 대한 NO<sub>2</sub>가스의 분해율을 나타낸 것이다. 실험결과 11회 감았을 때 가장 높

은 분해율을 나타내었다. 이것은 감은 횟수가 증가할수록 방전면적이 증가하고 코일 간격이 좁아져서 에너지가 증가하므로 코일의 주위에 플라즈마 방전 전력이 증가하기 때문으로 사료된다.

Fig. 9는 텅스텐 전극에서 기준가스를 N<sub>2</sub>, 공기, 60 vol. % O<sub>2</sub> 및 75 vol. % O<sub>2</sub>로 변화시켰을 때 방전전력에 대한 NO<sub>2</sub>가스의 분해 제거율을 나타낸 것으로 이때 실험조건은 주파수는 10 kHz, 유량은 200 mL/min 이었고 초기농도는 300 ppm 이었다. 실험 결과는 75 vol. % O<sub>2</sub>일 때 가장 높은 분해율을 나타냈으며, 다음으로 60 vol. % O<sub>2</sub>, 공기 기준가스 및 N<sub>2</sub> 기준가스의 순서로 NO<sub>2</sub>가스의 분해율이 감소하였다. 75, 60 및 21 vol. %(공기) O<sub>2</sub>의 순서로 분해율이 감소하였는 바 이것은 산소분자가 많이 존재할수록 산소분자가 플라즈마로부터

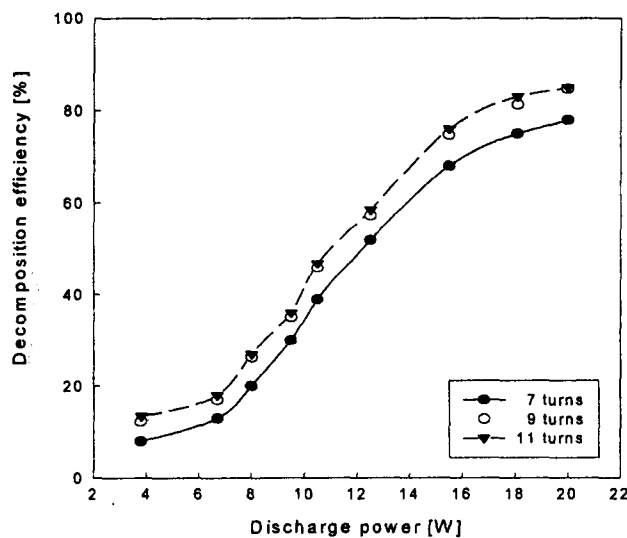


Fig. 8. Effect of number of turn on decomposition efficiency of NO<sub>2</sub> (C<sup>0</sup><sub>NO<sub>2</sub></sub> : 300 ppm, flow rate : 200 mL/min, frequency : 10 kHz, base gas N<sub>2</sub>, 분해율 : W ).

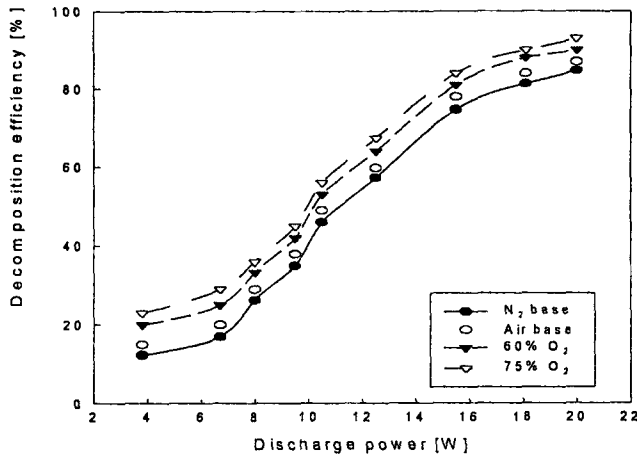


Fig. 9. Effect of base on decomposition efficiency of NO<sub>2</sub>  
 (C<sup>0</sup><sub>NO<sub>2</sub></sub> : 300 ppm, flow rate : 200 mL/min, frequency : 10 kHz,  
 discharge electrode : W).

고에너지를 받아 자유전자로 분해되고 NO<sub>2</sub>와 라디칼 화학반응을 일으키므로 분해율이 증가하는 것으로 사료된다.

Fig. 10은 기준가스로 N<sub>2</sub>를 사용하여 초기 농도가 500 ppm인 NO가스를 200 mL/min의 유량으로 플라즈마 방전에 의하여 90 %의 분해율로 분해된 생성물의 FT-IR 흡수 스펙트럼이다. 1,600~1,500 cm<sup>-1</sup>에서 NO가스의 흡수 피크로서 두개의 신축진동이 나타났고[19], 2,178.4 cm<sup>-1</sup>[20]에서는 N<sub>2</sub>O, 1,696과 3,854 cm<sup>-1</sup>에서 H<sub>2</sub>O(g)를 확인하였다. 여기서 NO 가스는 N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub> 및 수증기로 분해되는 것을 나타내고 있다. 그러나 N<sub>2</sub>는 FT-IR의 특성상 확인할 수 없었다.

Fig. 11는 전력효율을 평가하기 위하여 농도변화에 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. 11에서 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 생각되어진다.

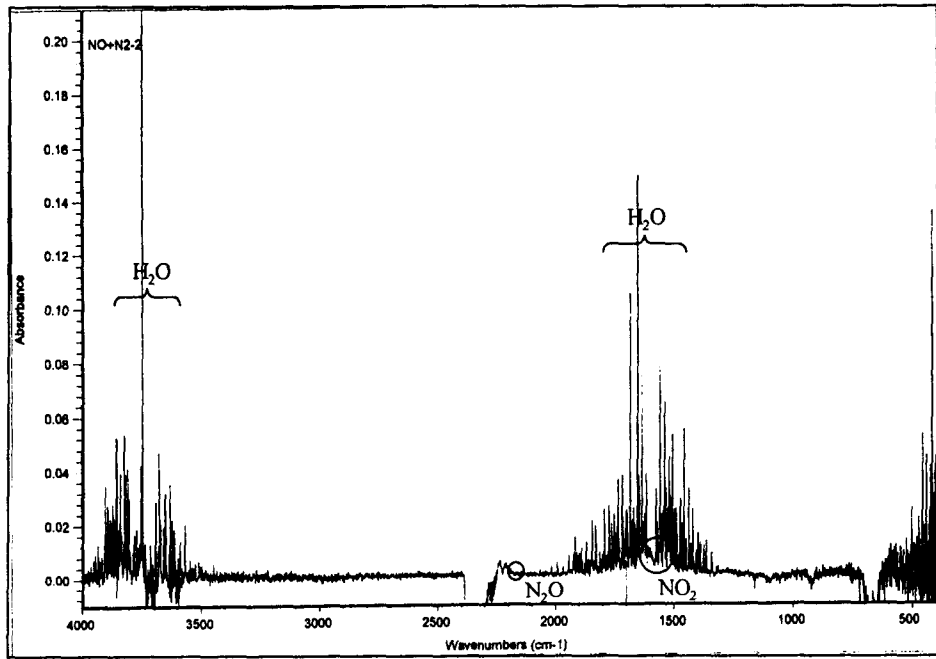


Fig. 10. Typical FT-IR spectrum for treatment of NO and N<sub>2</sub> (10 kHz, NO : flow rate 200 mL/min, C<sub>NO</sub><sup>0</sup> : 500 ppm).

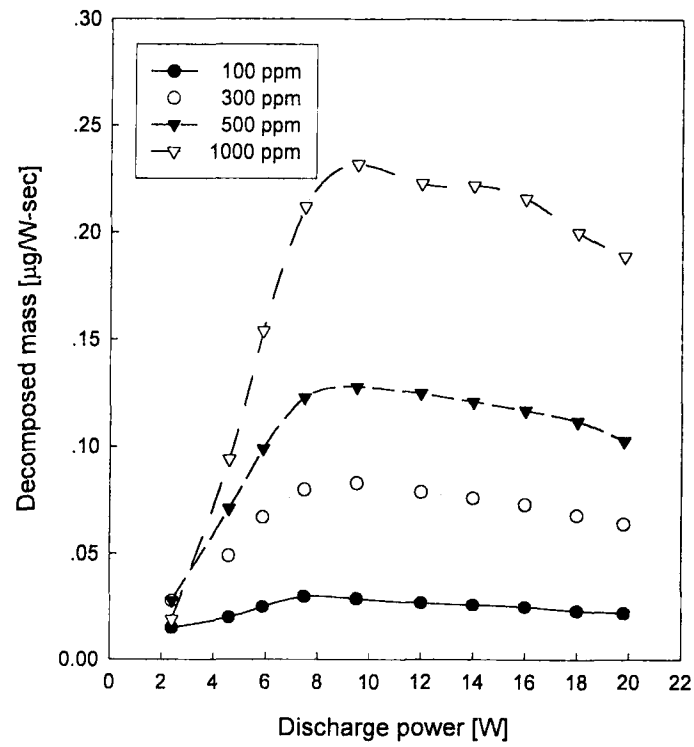


Fig. 11. Decomposed mass of NO per unit power and second (flow rate : 200 mL/min, frequency : 10 kHz, base gas :  $\text{N}_2$ , discharge electrode : W).

## 4. 결 론

본 연구에서는 특수 설계된 연면방전 전극을 통하여 방전시켜 발생하는 플라즈마에 의하여 NO와 NO<sub>2</sub> 등 유해 질소산화물을 주파수, 체류시간, 농도, 전극재질 및 감은횟수등을 변화시켜 분해제거실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유해가스의 분해실험에서 10 kHz의 주파수와 19.8 와 20.0 W의 소비전력에서 NO와 NO<sub>2</sub>의 최대 분해율은 각각 94.3, 84.7%이었으며 20 kHz이상의 고전압에서 주파수가 커질수록 기준가스의 전도성이 증가하여 연면을 따라 전류가 부분적으로 흐르기 때문에 분해율이 감소하였다.

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

3. 방전전극에 대한 영향은 전극의 굵기가 굵을수록 분해율이 증가하여 본 실험의 경우 3 mm의 전극을 사용하였을 때 가장 높은 분해율을 나타내었고, 전극의 재질은 전기저항과 용점에 밀접한 관계를 갖고 있었으며 텅스텐을 사용한 경우 가장 높은 분해율을 보였으며 구리, 알루미늄의 순으로 분해율이 낮아졌다.

4. 전극의 감은횟수에 대한 영향은 7회, 9회, 11회로 감은횟수가 많을수록 분해율이 증가하였으며 기준가스에 따른 분해실험에서는 기준가스 O<sub>2</sub>에서 가장 높은 분해율을 나타냈으며 air, N<sub>2</sub>순으로 분해율이 낮아졌다.

5. 본 실험장치에서는 각 유해가스의 최대 분해율을 나타내는 최대 출력값 즉, 단위 전력, 단위시간당 분해량의 최적 에너지는 NO의 경우 초기농도 1,000 ppm에서 9.5 W, 100~500 ppm에서 7~8 W이었다. 최고점 전의 영역은 분해에 필요한 에너지를 갖는 전자를 충분히 생성할 수 없는 영역이고, 최고점 후의 영역은 방전전력이 과잉으로 공급되어 필요없이 소비되어지는 전력이 많은 영역으로 생각되어진다.

## 참고문헌

- [1] W. L. Greer, "SO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> Control Compliance with Environmental Regulation", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 25(3), 475~485(1989).
- [2] A. T. McQueen, S. J. Bortz, M. S. Hatch, and R. L. Leonard, "Cement Kiln NO<sub>x</sub> Control", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 31(1) 36~44(1995).
- [3] 김동술, "대기오염방지공학", 신광출판사(1993)



- [4] T. Oda, A. Kumata, K. Tanaka, T. Takahashi and S. Masuda, "Low temperature atmospheric pressure discharge plasma processing for volatile organic compounds", *J. Electrostatics*, **35**, 93~101(1995).
- [5] T. Oda, R. Yamashita, T. Takahashi and S. Masuda, "Decomposition of Acetone and Isopropylalcohol by Surface Discharge Induced Plasma Chemical Processing (SPCP)", *靜電氣學會講演論文集*, 21a, C4, 107~110(1992)
- [6] B. Xiyao, Y. Chengwu, L. Henguan, Z. Zhitao, and B. Mindong, "Experiment on Decomposition of SO<sub>2</sub> by Plasma at Low Temperature and Normal Pressure", *靜電氣學會講演論文集*, 22a, C6, 507~510(1992).
- [7] B. Xiyao, B. Mindong, Y. Chengwu, Z. Zhitao, and Z. Yanling, "Experiment on Plasma in Low Temperature and Normal Pressure Decomposing NO<sub>x</sub>", *靜電氣學會講演論文集*, 22a, C5, 503~506(1992).
- [8] S. Obama, E. Suzuki, K. Okazaki, and A. Mizuno, "Removal of NO<sub>x</sub> with the partial discharge", *靜電氣學會論文集*, 15a, C3, 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, 231~232(1997).
- [10] 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).
- [11] 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*, 49~57(1997).
- [12] T. Oda, T. Takahashi, R. Yamashita, and T. Ohno, "Non-Thermal Plasma for VOCs Decomposition and NO<sub>x</sub> Removal in Flue Gas", *Proc. of NEDO Symp. on Non-Thermal Discharge Plasma Technology for Air Pollution Control*, 1~14(1996).
- [13] 伊藤 泰郎, "放電を利用した環境改善-放電發生法を中心として", *靜電氣學會誌*, 2(1), 2~4(1997).
- [14] 고희석, 박재윤, 김건호, "펄스 스트리머 방전을 이용한 NO<sub>x</sub> 제거", *전기전자재료학회지*, **10**(8), 807~812(1997).

- [15] 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, 1~10(1997).
- [16] 이상범, 신인철, "기초전자공학실험", 연학사, 서울(1991).
- [17] T. Oda, T. Takahashi, N. Hiroshi, 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, 29a, C1, 1~4(1991).
- [18] 角田 和彦, 清水 孝太郎, 桂 進司, 水野 彰, "パルス放電プラズマによるディーゼル排ガス中のNO<sub>x</sub>除去", 靜電氣學會講演論文集, 97, 16p B5, 233~236(1997).
- [19] 張香東, " 기기분석 ", 學文堂, 서울(1996).
- [20] C. J. Pouchert, "The Aldrich Library of FT-IR Spectra", 1st/ed., 3(vapor phase), Aldrich Chem. Co., (1988).

- ♣ 안형환 : 명지대학교 화학공학과를 졸업했으며, 동대학원 화학공학과에서 석사 및 박사학위를 취득하였다. 관심분야는 플라즈마를 이용한 자동차 배기가스 및 폐기물 처리 분야, 각종 건축물 내장재 및 생활용품의 연소시 발생하는 Toxic Gas 분석 평가분야등이다.
- ♣ 강현춘 : 경희대학교 화학공학과를 졸업했으며, 명지대학교 대학원 화학공학과 석사 및 박사학위를 취득하였다. 관심분야는 spcp방식에 방전 플라즈마에 의한 각종유해 물질 분해제거의 실용화등이다.