

## Gas Removal Characteristics of Air Clean System Applying a Magnetic Field

申 修 沈\* · 文 在 德†

(Soo-Youn Shin · Jae-Duk Moon)

**Abstract** - Gas removal characteristics of an air clean system, consisted of a filter and a nonthermal discharge plasma reactor with a magnetic field, have been investigated with emphasis on the enhancing gas removal efficiency of the applied magnetic field. It is found that the magnetic field influenced significantly to the corona discharge characteristics, decreasing the corona onset voltage and increasing the corona current. As a result, the proposed air clean system with the magnetic field showed the higher removal efficiency of the gas (e.g., trimethylamine) than that of without the magnetic field. This would be because the magnetic field applied to the discharge plasma reactor of the air clean system can elevate the corona characteristics, and activate the generation of ozone, thus the removal efficiency of the gas was concurrently enhanced. This reveals that the proposed air clean system with the magnetic field could be used as an effective means of removal an indoor pollutant gas.

**Key Words** : Air clean system; Corona discharge; Plasma reactor; Magnetic field; Ozone generation; Room air; Pollutant gas removal.

### 1. 서 론

최근 도심의 대기오염이 심각해지고, 냉난방된 실내 주거 공간내에서의 생활이 많아짐에 따라 실내 공기 오염에 대한 관심이 크게 증가되고 있으며, 이에 따라 실내 공기정화에 대한 관심도 많이 높아지고 있다. 실내 공기의 오염원으로는 담배연기, 자동차 배진, 알레르겐(Allergen) 등과 같은 입자상 물질과, 실내의 가구나 벽에서 발생하는 휘발성 유기 화학 물질(VOCs), 음식물 냄새, 자동차 및 공장등의 산업체로부터의 배기 가스상 유해 물질(NOx, SOx)등이 있으며[1, 2], 이들은 폐나 기관지 등에 흡인되어 암을 유발시키는 물질로 알려져 있다[3].

입자상 물질을 제거하기 위해서는 주로 전기집진기나 필터가 많이 사용되고 있다. 전기집진장치인 경우는 고집진율은 얻어지나, 고가이며, 오존이 방출되는 문제점이 있다[4]. 부직포를 사용하는 필터의 경우 압력손실의 증가 때문에 충분한 집진율을 얻을 수 없는 문제점이 있다. 한편, 부직포에 정전기를 띄게 한 정전부직포를 사용함으로써 기계적 입자 제거방식에 정전기적 집진방식이 더해짐으로 해서 집진효율이 향상될 수 있게 된다.

가스상 물질은 주로 활성탄이나 촉매등과 같은 흡착성이 있는 물질을 이용하여 제거하고 있으며, 흡착면적을 증가시키는 것이 효율 향상의 수단이 되고 있다. 최근에 들어 코

로나 방전 현상을 이용한 비열 방전 플라즈마를 이용하여 가스상 물질을 제거하는 기술이 각광을 받아 많은 연구가 이루어지고 있다[5-10]. 비열 방전 플라즈마에는 급준 펄스 전원을 적용한 펄스 코로나 방전 방식과[2, 6], 유전체 장벽을 적용한 장벽방전(barrier discharge, 또는 silent discharge) 방식[5, 7], 유전체 연면방전(surface discharge)을 이용한 방식[5, 8], 강유전체 층을 이용한 유전체구 층방전(ferroelectric pellet packed bed discharge)[5, 9] 방식 등이 주로 많이 사용된다.

비열 방전 플라즈마(nonthermal discharge plasma)의 전기물리화학적 작용(electrophysicochemical reaction)[5]을 이용하여 가스상 물질을 제거하는 효과적인 기술중의 하나로 펄스 코로나 방전을 이용하는 방법이 많이 이용되고 있다[2, 5, 6]. 즉, 급준 펄스전압을 인가함으로써 플라즈마중의 전자만 순시적으로 가속시켜 대기중의 유해가스를 직접분해 제거(electrophysical reaction)[5]하거나, 산소나 물분자와 충돌 반응시켜 활성종(radical, 주로 ozone)을 발생시키고 이 활성종들이 유해 가스상 물질들과 반응하여 유해 가스를 산화 제거(electrochemical reaction)[5, 6]하는 방법이다. 한편, 비열 방전 플라즈마에 자계를 중첩시켜 코로나 방전을 활성화 시킴으로 가스상 유해 물질을 효과적으로 제거할 수 있음이 학술적으로 보고된 바 있다[10].

본 연구에서는, 실내 공기중의 가스상 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있는 펄스 코로나 방전 플라즈마 반응기와 영구자석을 결합시켜 실 적용 가능한 공기청정장치를 제안하고, 자계의 인가 여부가 실내 유해 가스의 제거능력에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였다.

\* 正 會 員 : 慶 北 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

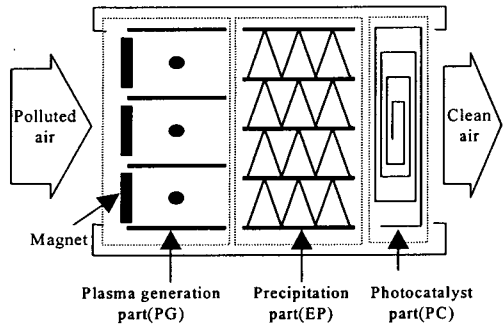
† 교신저자, 正 會 員 : 慶 北 大 電 子 電 氣 컴퓨터學部 敎 授 · 工 博

E-mail : jdmoon@knu.ac.kr

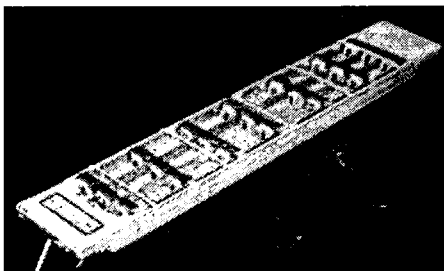
接受日字 : 2007年 2月 26日

最終完了 : 2007年 3月 26日

2. 실험장치 및 방법



(a) Schematic diagram of the proposed air clean system



(b) Photograph of proposed air clean system

그림 1 자계 결합된 공기청정장치 개략도 및 사진

Fig. 1 Schematic diagram and photo of the proposed air clean system with a magnetic field.



그림 2 공기청정장치에 적용된 자석 사진

Fig. 2 Photograph of the magnet used in the air clean system.

그림 1은 본 연구에 사용된 방전 플라즈마 반응기와 자석이 조합된 공기청정장치의 개략도 및 사진을 나타낸 것으로, 방전 플라즈마부(PG), 전기집진부(EP), 광촉매부(PC) 그리고, 자계부(PM)로 구성되어 있다. 자계부으로는 영구자석을 사용하였고, 전계방향과 직각이 되도록 일정 간격으로 설치하였다. PG는 선대 평판형으로, 방전선은 직경 스테인리스선(직경 0.1mm, 길이 300mm)을, 접지전극(폭 12mm, 길이 300mm)으로는 스테인리스 평판을 사용하였고, 전극간의 방전간격은 12.5mm로 고정하였다. EP는 스크롤(scroll) 구조로 되어 있으며, 접지전극으로는 알루미늄 평판(Al plate, 폭 12mm, 길이 300mm)을 사용하였고, 고전압 전극은 PET 피복된 알루미늄 평판으로 구성하였다. PC는 산화티탄(TiO<sub>2</sub>)

로 피복된 알루미늄 판 스크롤 구조(폭 80mm, 길이 300mm)로 되어 있으며, 이를 인입 가스의 인입방향과 평행하게 설치하였다.

그림 2는 본 연구에 사용된 자석의 사진을 나타낸 것으로, 자석의 크기는 폭이 5, 10, 15mm에 길이가 75mm인 3종류의 자석을 사용하였으며, 각 자석의 표면장력은 3.6kG인 것을 사용하였다. 자계를 전계방향과 수직으로 형성하기 위하여 자석을 가공하여 설치하였으며, 방전전극과 자석사이에 절연체를 삽입하여 고전압 절연을 유지하였다.

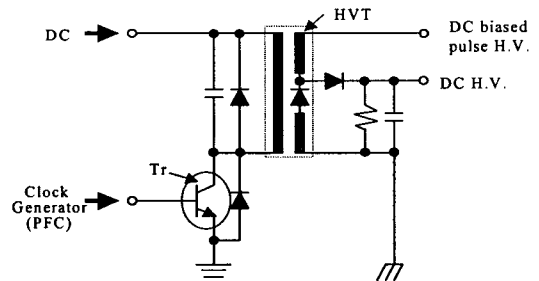


그림 3 고전압 전원 회로 개략도

Fig. 3 Circuit of high voltage DC and pulse power.

그림 3은 고전압 발생부의 개략도를 나타낸 것이다. 펄스 전압은 펄스 형성회로(PFC)와 반도체 소자(Tr), 고전압용 승압 변압기(HVT)로 구성되어 있고, 고전압 펄스 전압을 다이오드 정류하여 직류화하였고, 직류전압과 중첩된 펄스 전압을 얻었다. 출력 펄스전압은 6.5kV이며, 3.25kV의 직류 전압이 중첩되어 있고, 펄스 주파수는 18kHz 이다. 직류 전압이 중첩된 펄스전압은 플라즈마 발생부에 인가하고, 직류 전압은 전기집진부에 인가하였다.

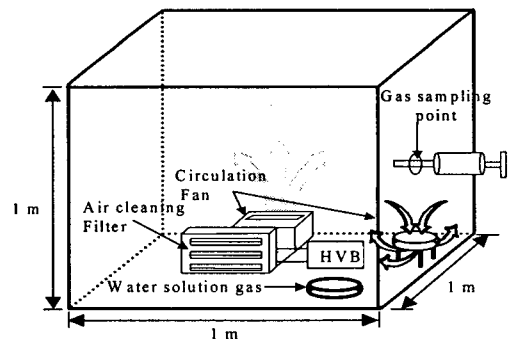


그림 4 제안한 공기청정장치의 가스제거 성능 시험장치

Fig. 4 Experiment chamber setup for the gas removal of the proposed system.

그림 4는 제안한 공기청정장치의 가스제거 성능을 측정하기 위한 시험장치의 개략도이다. 적정 용기내(용적 1m<sup>3</sup>)에 순환용 팬과 제안한 공기청정장치가 들어가 있으며, 생선 부패취인 트리메틸아민(trimethylamine, TMA, (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>N) 수용액 30%를 시험 챔버내에 휘발시켜 유해 냄새원으로 사용하였다. 시험 밀폐 공간내의 냄새 농도 측정은 검지관인 가스텍(gastech 180L)을 사용하였다.

### 3. 결과 및 검토

그림 5는 자계 인가 유무에 따른 I-V 특성으로, 자계를 인가한 경우가 인가하지 않은 경우보다 10% 정도 더 많은 코로나 방전전류가 흐름을 보여준다. 전계에 자계가 수직으로 인가되면, 이 전자계중에서 이동하는 전자는 식 (1)처럼 Lorentz 힘을 받게 된다[11]. 여기서  $F$ 는 Lorentz 힘,  $e$ 는 전자,  $E$ 는 전계[V/m],  $V$ 는 속도[m/s],  $B$ 는 자계[wb/m<sup>2</sup>]를 나타낸다.

$$\vec{F} = e [\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}] \quad (1)$$

수식에 나타나는 것처럼, 코로나 방전에 의해 생성된 전자들은 인가 전계와 또 외부 자계에 의해, 회전 운동을 하게 된다. 따라서 전자들의 상대적 이동 거리가 증가되고, 따라서 충돌전리 계수가 증가하여 따라서 방전 전류도 증가하게 되는 것으로 사료된다[11].

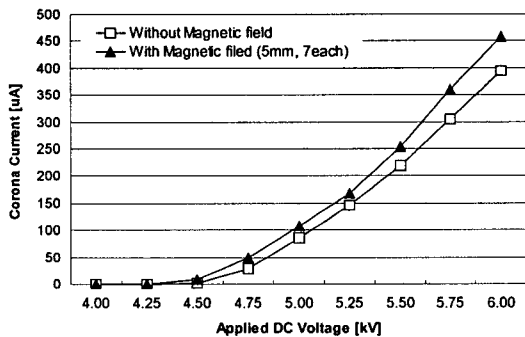


그림 5 자계 인가 유무에 따른 코로나 전류-전압 특성.  
Fig. 5 I-V characteristics with and without magnetic field.

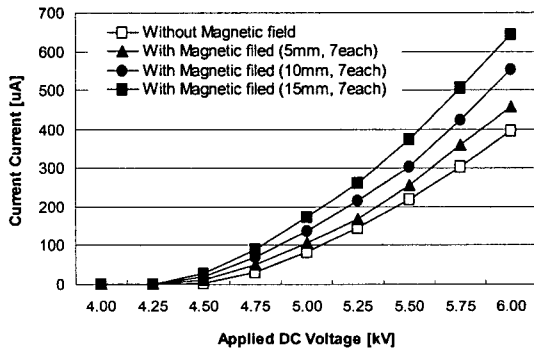


그림 6 자석 두께에 따른 전압-전류 특성  
Fig. 6 V-I characteristics at the different magnet thicknesses.

그림 6은 자석의 수와 두께를 변화하여 자계를 가변시켰을 때의 I-V 특성을 나타낸 것으로, 자계가 증가할수록 코로나 방전전류도 증가함을 보여준다. 이것은 자계가 증가할수록 방전공간에서의 전자 이동 거리가 회전운동으로 말미

아마 상대적으로 증가하고, 따라서 전자의 충돌 횟수가 상대적으로 증가하기 때문인 것[10, 11]으로 생각된다. 특히, 15mm폭의 자석을 적용한 경우, 전체 유효 방전전극 길이의 1/3정도를 자석의 두께로 막았기 때문에 상대적으로 방전전극의 폭이 크게 감소되었지만, 코로나 방전전류는 1.5배 정도로 증가한 것으로 보아, 자계가 전류의 증가에 매우 큰 영향을 미침을 보여준다.

그림 7은 자석간 거리별( $d$ ) 자속밀도를 측정한 것으로, 자석간 거리가 멀어질수록 자속밀도는 지수 함수적으로 감소함을 보여준다. 15mm폭 자석을 7개를 적용한 경우, 전극간 자속밀도가 약 110G/mm로 5mm폭 자석 7개를 연결했을 때의 81G/mm보다 약 1.5배로 증가함을 보여준다. 이것은 방전 전류의 증가비와 유사한 것으로 자계의 세기가 증가할수록 방전전류도 비례하여 증가한다는 것을 실험적으로 확인해 줌을 알 수 있다.

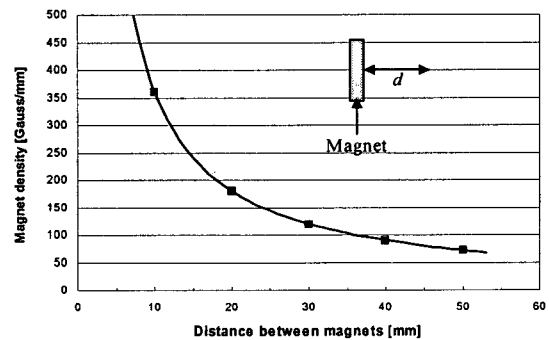


그림 7 자석간 거리별 공간 자계 밀도 분포  
Fig. 7 Magnet density distribution in the space between the magnets.

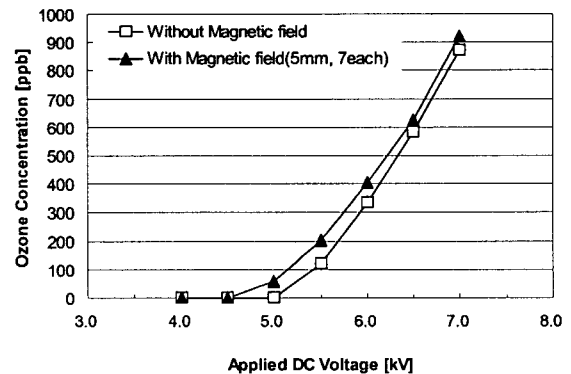


그림 8 자계 인가 유무에 따른 인가전압-오존발생 특성  
Fig. 8 Ozone generation characteristics as a function of applied voltage with and without the magnetic field.

그림 8은 자계 유무에 따른 오존 발생량을 나타낸 것으로, 자계를 인가한 경우가 인가하지 않은 경우보다 코로나 개시 전압이 0.5kV 정도 낮아지며, 오존발생량도 5~20% 증가하는 것을 보여준다.

식 (2)는 공기중에서의 코로나 방전에 의해 생성되는 오존량을 방전 함수들로 나타낸 것이다. 여기서  $I_C$ 는 코로나

방전 전류,  $n_e$ 는 방전 공간의 전자밀도,  $O$ 는 산소원자,  $O_3$ 은 오존분자이다.

$$I_C \propto n_e, n_e \propto O, O \propto O_3 \quad (2)$$

식 (2)에서 코로나 방전에 의해 이온(정 및 부이온과 전자)이 발생되고, 이들 이온중에서 에너지가 가장 큰 활성전자가 공기중의 산소분자를 해리하여 산소원자를 생성시키고, 이 산소원자가 산소분자와 결합하여 오존을 발생시키나, 결국 발생 오존량은 코로나 방전전류에 비례하게 됨을 나타낸다. 이때 강한 전계에 의해 코로나 방전이 발생하고 있는 선대 평판 전극간에 외부 자계를 인가하면, 전계에 따라 이동하고 있는 활성전자가 자계의 영향을 받아 Lorentz 힘[11]이 작용하게 되어, 활성전자의 이동 경로(회전하게 됨)가 상대적으로 증가하게 된다. 이는 결국 코로나 방전을 활성화하게 되고, 따라서 방전전류도 증가되게 되고, 결과적으로는 오존의 발생량이 증가하게 됨을 그림 8은 나타낸다[10, 11].

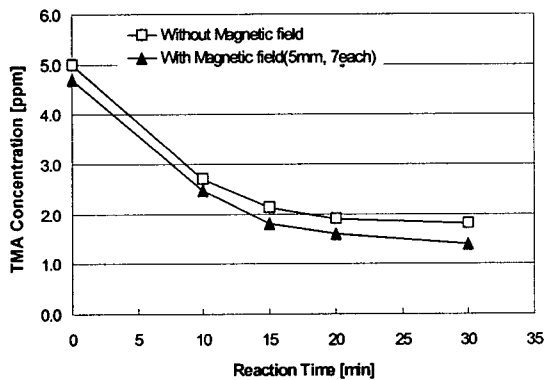


그림 9 자계 인가 유무에 따른 트리메틸아민 제거 특성  
Fig. 9 TMA removal characteristics of the proposed system with and without the magnetic field.

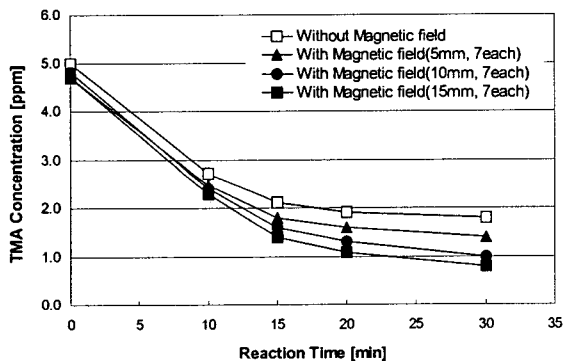


그림 10 자계변화 및 경과시간에 따른 트리메틸아민 제거 특성  
Fig. 10 TMA removal characteristics as a function of the time and magnetic field intensity.

그림 9는 제안한 공기청정장치의 자계 인가 유무에 따른 생성부패취인 트리메틸아민 제거특성을 나타낸 것으로, 자계를 인가한 것이 인가하지 않은 것보다 제거효율이 10% 정도 증가됨을 보여준다. 이것은 자계인가로 말미암아 방전의 활성화로 냄새를 제거하는 활성종과 오존의 발생량이 증가하기 때문에 냄새 제거능력도 향상되어 나타난 것으로 사료된다.

그림 10은 자석 두께에 변화에 따른 트리메틸아민 제거 특성을 나타낸 것으로, 자석의 두께가 증가할수록 제거효율이 증가함을 보여준다. 15mm폭의 자석을 적용한 경우의 효율이 약 83%로 자계를 인가하지 않은 경우보다 약 20%정도 성능이 증가하는 것을 보여준다.

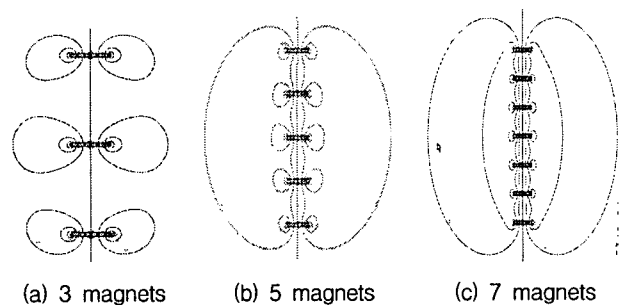


그림 11 자석 개수에 따른 자계 세기와 분포 해석 결과  
Fig. 11 Simulation results of the magnetic field intensity and distribution for various magnet numbers.

그림 11은 자석 개수의 증가에 따른 인가 자계의 세기와 분포를 해석 프로그램으로 해석한 결과로서, 실제 공기청정장치에 자석을 3개, 5개, 7개를 장착했을 때, 정전 필터의 방전공간상에 나타나는 자계 분포와 그 크기를 나타낸 것이다. 자석의 개수가 증가할수록 방전 공간내에서의 자력선 분포가 커지며, 자속 크기(밀도)도 증가함을 보여준다. 이 해석 결과는 자석의 수가 많을 때(7개 장착)가 자속 세기(밀도) 및 분포 영역이 크게 나타났으며, 따라서 방전에 미치는 영향도 크게 나타나는 실험한 결과를 뒷받침하는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

펄스 방전 플라즈마와 광촉매가 결합된 공기청정장치의 성능 향상을 위해 자계를 전계와 수직으로 인가하여 코로나 방전 특성 향상, 냄새 및 입자 제거 효율 개선 가능성을 실험적으로 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 자계 인가는 코로나 방전의 특성에 큰 영향을 미쳤으며, 방전 개시전압을 감소시키고 코로나 방전전류를 증가시켰으며, 표면 자속 3kG, 15mm폭의 자석 7개를 적용한 경우, 유효 방전 면적이 1/3정도 감소됨에도 불구하고, 방전 전류는 약 1.5배로 코로나 전류가 크게 증가됨을 보여주었다.
- (2) 자계를 인가한 경우, 트리메틸아민 제거효율이 약 20% 증가하였으며, 이는 자계의 인가에 따라 코로나 방전이 활성화되고, 따라서 냄새 제거 인자인 오존 및 활성종의 발생량이 증가하였기 때문인 것으로 생각된다.

이상의 결과는 자계인가가 제안한 공기청정장치의 방전 특성을 활성화하며, 이의 결과 유해 가스 제거에도 매우 유효함을 보여주는 실험 결과로 간주된다.

**참 고 문 헌**

[1] S. Yao, M. Okumoto, T. Yashima, J. Shimogami, K. Madokoro, E. Suzuki, Diesel particulate matter and NOx removals using a pulsed corona surface discharge, *AIChE Journal*, 50, 3 (2004) 715-721

[2] N. Goodman and J. F. Hughes, The effect of discharge on dust mite and cat allergens, *Journal of Electrostatics*, 60 (2004) 69-91

[3] M.-E. Parent, M.-C. Rousseau, P. Boffetta, A. Cohen, J. Siemiatycki, Exposure to Diesel and Gasoline Engine Emissions and the Risk of Lung Cancer, *American Journal of Epidemiology* 165, 1 (2007) 53-62

[4] U. Kogelschatz, *Ozone generation and dust collection in electrical discharge for environmental purposes: Fundamentals and Applications*, edited by E. M. van Veldhuizen, Nova Science Pub, Inc., New York 11743 (2000).

[5] NATO Advanced Research Workshop on Non-thermal Plasma Techniques for Pollution Control, Cambridge University, England U.K. (Sept 21-25, 1992) 1-8.

[6] G. Sathiamoorthy, S. Kalyana, W. C. Finney, R. J. Clark, B. R. Locke, Chemical reaction kinetics and reactor modeling of NOx removal in a pulsed streamer corona discharge reactor, *Ind. Eng. Chem., Res.* 38 (5) (1999) 1944-1855.

[7] K. Takaki, M. Shimizu, S. Mukaigawa, T. Fujiwara, Effect of electrode shape in dielectric barrier discharge plasma reactor for NOx removal, *IEEE Trans. on PS*, 32, 1 (2004) 32-38

[8] T. Oda, R. Yamashita, I. Haga, T. Takahashi and S. Masuda, Decomposition of gaseous organic contaminants by surface discharge induced plasma chemical processing- SPCP, *IEEE Trans. IA*, 32, 1 (1996) 118-123.

[9] K. Takaki, K. Urashima, J.-S. Chang, Ferro-electric pellet shape effect on C2F6 removal by a packed-bed-type nonthermal plasma reactor, *IEEE Trans. on PS*, 32, 6 (2004) 2175-2183

[10] 이근택, 금상택, 문재덕, 전자계상의 전원장치변화에 따른 비열방전 플라즈마의 SO<sub>2</sub>와 CO가스 제거 특성, *대한전기학회지*, 48C, 3, 9 (1999) 215-220

[11] W. H. Hayt, *Engineering Electromagnetics*, (1983) 295-298

**저 자 소 개**



**신수연 (申修沆)**

1967년 12월 24일생. 1992년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 (공석). 2002년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 LG전자 연구소 책임연구원.

Tel : 055-260-3860  
E-mail : syshinlsl@lge.com



**문재덕 (文在德)**

1946년 7월 25일생. 1970년 경북대 사대 과학교육과(물리전공) 졸업. 1975년 동 대학원 전자공학과 졸업(공석). 1982년 일본 동경대학 대학원 전기공학전문과정(공박). 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수.

Tel : 053-950-5601  
Fax : 053-950-5508  
E-mail : jdmoon@knu.ac.kr