

## 코로나 방전에 대한 자계의 영향

(The effect of magnet fields on the corona discharge)

박재윤\* · 정장근\*\* · 김익균\*\*\*

(Jae-yoon Park · Jang-gun Jung · Ick-kewn Kim)

### 요 약

본 논문에서는 침대평판 전극구조를 구성하여 침전극에 직류 정·부 고전압을 인가한 경우 전계와 자계가 직각방향으로 형성되도록 하고 자계가 코로나 방전현상에 미치는 영향을 측정하고 분석하였다.

정의 고전압을 인가한 경우 자계인가에 의해 방전코로나 영역이 확장되고 이때 흐르는 코로나전류가 감소하였고, 절연파괴전압은 증가되었다. 그러나 부의 고전압을 인가한 경우는 방전코로나 영역이 오히려 축소되고 흐르는 전류가 증가되었으며 절연파괴전압은 감소되었다. 이는 전자계가 동시에 존재하는 영역에서 코로나방전에 의해 생성된 전하들의 로렌쯔력에 의한 사이크로트론 운동 때문인 것으로 생각된다.

### Abstract

In this paper, the effect of magnetic field on corona discharge phenomena was experimentally investigated in the needle-plate electrode geometry. Needle-plate geometry discharge system with magnetic field at a right angle to the electric field was made. The corona discharge characteristics with magnetic field were investigated and compared with the corona characteristics without magnetic field in atmospheric pressure.

As a result, in case of positive DC corona discharge with magnetic field, corona discharge zone was significantly wider, corona current was lower, and breakdown voltage was higher than those without magnetic field. However, in case of negative DC corona discharge with magnetic field, corona current was slightly higher and breakdown voltage was lower than those without magnetic field. It is thought that this result is due to cyclotron motion of charged particles such as electron and ion by magnetic field.

### 1. 서 론

오늘날 세계가 당면하고 있는 심각한 대기환경문제는 산성비(acid rain), 지구 온난화(global warming), 오

존층 파괴(ozone layer depletion), 그리고 스모그(smog) 등이 있다. 비열플라즈마(nonthermal plasma) 기술은 이들 문제에 대한 해결 방안으로 최근 선진각국에서 활발히 연구가 진행되어 크게 발전해 왔으며 다양한 형태의 플라즈마반응기(plasma reactor)가 대기오염 물질의 처리를 위해 개발되었고 기존의 것도 그 성능이 개선되었다[1-2]. 대기오염의 주된 물질은 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 탄소산화물(COx) 및

\* 정회원 : 경남대학교 전기공학과 교수  
 \*\* 정회원 : 경남대학교 전기공학과 박사 과정  
 \*\*\* 정회원 : 경남대학교 전기공학과 석사  
 접수일자 : 2001년 02월 06일

분진 등이 있고, 이들은 화석연료의 다량 사용으로 인해 날로 증가되고 있다. 질소산화물은 화력발전소와 같은 고정발생원, 자동차와 같은 이동발생원으로부터, 연소과정의 고온에 의해 공기중의 질소( $N_2$ )와 산소( $O_2$ )가 반응하여 생성되고, 배기가스의 약 95[%] 정도가 NO이며 반응성이 낮기 때문에 제거가 상당히 어렵다. NO는 대기 중 배출되면 대기 중의  $O_3$ ,  $O_2$ , 수분 등에 의하여  $NO_2$ ,  $NO_3$ ,  $N_2O_4$ ,  $N_2O_5$  등으로 산화되고, 이들 중의 대부분은  $NO_2$ 이다. 또한 이들은 공기 중에 에어로졸 상태로 녹아서 산성비가 되거나 태양광선에 의하여 광화학 스모그를 형성하여 미연소 탄화수소(HC)가 존재할 경우 태양광선 중 자외선에 의해 광화학반응이 일어나 2차 오염물질인 산화물을 생성시킨다[3]. 지금까지 질소산화물 제거기술로는 공기/연료의 혼합비 조성방법, 수세법, 알카리흡수법, 액상환원법 등의 습식법, 그리고 접촉환원법, 무촉매 환원법 등의 건식법이 화력발전소와 같은 대형 고정 발생원의 배기가스 정화장치에 이용되어 왔다. 또한 전기방전기술을 이용하는 방법은 반응기의 전극 형태와 전원의 종류에 따라 여러 가지로 분류되고 다양한 오염가스의 처리에 적용될 수 있으며, 특히 공존하는 여러 가지 오염물질의 동시제거특성이 우수하다. 반응기 전극구조는 강한 전계를 발생시켜 코로나 방전 발생을 용이하게 하기 위해 작은 직경의 방전선, 바늘 혹은 날카롭게 처리된 금속 전극을 사용하며, 전원은 직류, 교류 및 펄스전원이 사용된다. 방전의 형태로는 코로나 방전, 부분방전, 펄스 스트리머방전, 연면방전 및 무성방전 등이 있다[4-7].

또한 대기오염 가스의 처리를 하기 위하여 전기방전을 위해 인가된 전계와 직각방향으로 자계를 인가한 형태의 코로나방전플라즈마 반응기에서 NOx 제거 특성에 관한 연구가 진행되어 왔으며, 이때 정의 직류고전압을 인가한 경우 NOx 제거효율이 자계를 인가하지 않은 반응기의 제거율보다 10~20[%] 상승되는 것으로 나타났다[8-9].

본 연구에서는 코로나방전플라즈마 반응기에서 자계인가에 의한 NOx 제거율 상승의 원인을 근본적으로 분석하기 위하여 침-평판형 전극구조의 코로나방전 장치를 제작하고 자계인가의 유무에 따른 코로나 방전전류, 코로나의 형태 및 절연과피 특성을 측정하고, 코로나 방전에 미치는 자계의 영향을 분석하고 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

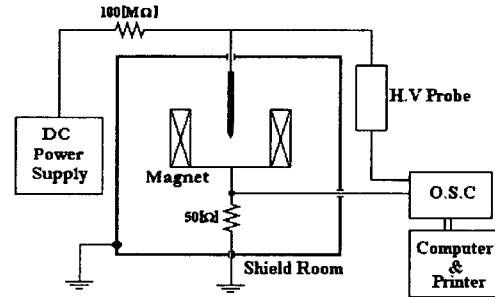


그림 1. 실험장치  
Fig. 1. Experimental setup

본 실험에 사용한 실험장치의 개략도는 그림 1에 나타내었다. 코로나발생 및 측정의 용이성을 고려하여 침대평판형으로 전극시스템을 구성하였다.

전압원은 일본 Pulse사가 제작한 직류전원장치 ( $\pm DC 100[kV]$ ,  $5[mA]$ )이고,  $100[M\Omega]$ 의 전류제한 저항을 거쳐 방전전극 상단의 침전극에 연결되어 있고 대향전극인 평판전극은  $40 \times 50[mm]$ 의 동판을 사용하였으며 접지 되어 있다.

침전극은 직경 $1[mm]$ , 길이 $90[mm]$ 의 스테인레스 재질의 침을 사용하였다. 자계는 전계방향과 직각방향으로 인가하였으며, 이때 사용된 자석은 잔류자속 밀도(Br)이  $1[Tesla]$ , 표면에서의 최대자속밀도가  $5000[Gauss]$ 인 Samarium-Cobalt 재료로 만들어진  $50 \times 50 \times 25[mm]$ 의 영구자석을 사용하였다. 자속밀도 측정은 Gauss/Tesla Meter(F. W 4048)의 Probe를 사용하여 위치별 자속밀도를 측정하였다.

반응기내의 자속밀도분포는 자석개수가 1, 2, 3개로 증가함에 따라 반응기 내부 중심의 자속밀도는 0.31, 0.42, 0.46으로 증가하였으며, 자석과 평행한 공간선상에서는 자속밀도가 같으며, 반응기 중심으로 갈수록 자속밀도가 감소하는 것으로 나타났다.

인가전압의 측정은 고전압 Probe를 사용하여 디지털 전압계로 측정하였으며 코로나 전류펄스의 측정은 대향전극인 평판전극에 저항 $50[\Omega]$ 을 연결하여 미

국 Lecroy LC334 500[MHz] 오실로스코프 시스템으로 측정 분석하였다.

코로나 펄스를 측정할 때 외부노이즈의 영향을 배제하기 위해 140×140×180[cm]의 Shield Room내에 방전기구를 설치하였고, 내부의 상대습도는 실리카겔(Silicagel)을 사용하여 42[%]로 일정하게 유지시켰다.

### 2.2 실험방법

침전극과 평판전극간 간극을 20[mm]로 일정하게 유지하고 정·부극성 직류고전압을 인가하고 최초 코로나가 발생한후 1[kV]씩 전압을 상승시키며 코로나 펄스파형과 전압상승에 따른 코로나 펄스의 성장 과정을 측정하여 그 특성을 비교하였다. 또한 인가전압에 따른 I-V 특성을 측정하고 분석하였다. 코로나 성장과정을 규명하기 위해 침전극 선단에 나타나는 미세한 불꽃을 카메라로 촬영하여 전압에 따른 코로나의 성장과정을 측정하였으며, 전극간 간격을 5, 10, 15[mm]로 변화시키며 절연파괴 특성을 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 정코로나 발광 특성

그림 2는 Shield room 내에서 카메라를 사용하여 자계의 인가시와 비인가시에 침전극선단에 나타나는 코로나광을 촬영한 사진이다. 최대자속밀도는 5000[Gauss]이며, 카메라 노출시간은 5초로하고 정극성 직류고전압을 12, 14, 16, 18[kV]로 상승시킬 때 코로나 성장 과정을 촬영하였다.

그림 2와 같이 자계를 인가하지 않은 경우는 침전극 끝단에서 스트리머 코로나가 접지된 평판전극으로 직선상으로 진행되며 인가전압의 증가에 따라 이런 현상이 더욱 현저하게 나타났다. 그러나 자계가 인가된 경우 스트리머 코로나가 평판전극을 향해 직진하지 않고 넓은 영역으로 확장됨을 볼 수 있다.

평행평판형 전극구조에서 전계와 직교하게 자계가 인가된 경우 전하의 운동궤적은 그림 3과 같다. 전계  $E$ 와 자계  $B$ 가 존재하는 가스 중에서 전자가 매초  $v_m$  회씩 가스분자와 충돌해서 그 운동량을 잃어버린다고 하면 이때의 전자의 운동방정식은 다음 식과 같이 Langevin equation으로 표현되기 때문이라고 생각된다.

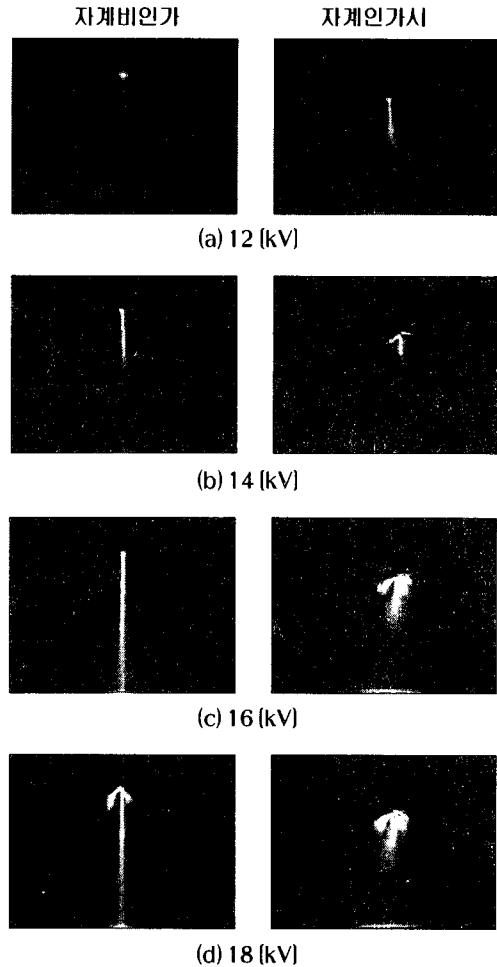


그림 2. 인가전압에 따른 코로나의 발광현상  
Fig. 2. Positive Corona Light with and without magnetic field

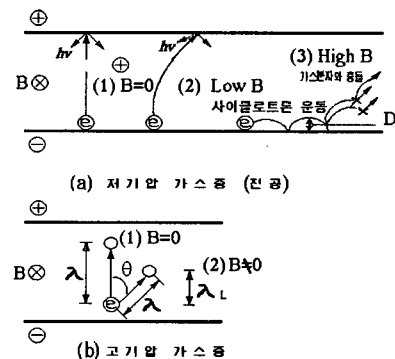


그림 3. 평판 겹에서 자계가 인가된 경우 전자의 운동  
Fig. 3. Electron motion in plate-plate electrode system with magnetic field

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) - m\vec{v}\nu_m \quad (1)$$

여기서,  $m$ 은 전자의 질량,  $\vec{v}$ 는 전자의 운동속도,  $\nu_m$ 을 운동량 변환 충돌주파수라고 한다. 식 1에서  $\nu_m=0$ 일 때가 진공 중에 있어서 전자의 운동량방정식이다. 평행평판형 전극구조에서 전계와 직교하게 자계가 가해질 때의 전자의 운동궤적은 그림 3과 같다. 저압 가스 중에서  $\vec{B}$ 가 작을 때는 그림(a)에서와 같이 음극을 출발한 전자는 가스분자와 충돌하지 않고 양극에 도달하지만  $\vec{B}$ 가 크게 되면 (3)과 같이 사이클로트론 운동을 한다. 또한 사이클로트론 운동이 계속되면 잔류 가스분자와의 충돌전리를 일으키기 때문에 충돌전리 작용이 나타난다. 한편 고기압 가스 중에서는 사이클로트론 운동이 완결되기 전에 그림(b)와 같이 가스분자와 충돌하기 때문에  $\vec{B}$ 가 크게 되면 될수록 평균자유행정중에 전계방향으로 이동하는 거리가 짧게 된다. 전자가 전계로부터 얻는 에너지의 관점에서 보면  $\vec{B}$ 의 인가는 가스압을 상승시키는 것과 같은 효과가 있다. 즉, 플라즈마 밀도를 향상시키는 효과를 얻을 수 있다. 그러므로, 유해가

스의 제거를 위한 플라즈마 반응기에 자계를 응용하면 넓은 영역에 플라즈마를 발생시킬 수 있으므로 제거효율을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.2 부코로나 발광 현상

그림 4는 전극간극 20[mm]에서 부극성 직류고전압을 인가한 경우 자계인가시와 비인가시에 침전극 선단에 나타나는 코로나 광을 촬영한 사진이다.

그림에서와 같이 그 진전과정이 정극성 코로나와는 달리 진전 및 크기가 매우 적으며 전압상승에 따라 광의 밝기만 미세하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 자계인가시나 비인가시 모두 전압상승에 따라 코로나가 현저히 성장되지 않고 브러시상태에서 불꽃으로 바로 옮겨가며 광은 자계를 인가하지 않았을 때가 조금 더 큰 것으로 나타났다. 이는 자계에 의해 전자에 작용하는 로렌즈력에 의해 전자는 사이클로트론운동을 하지만 그 반경이 매우 작아 전자가 공간으로 확산될 수 없고 오히려 침전극 주위에 집중되기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.3 절연파괴 특성

그림 5는 정극성 직류 고전압을 인가한 경우 전극간극의 변화(5, 10, 15, 20[mm])에 따른 자계인가시와 자계비인가시의 절연파괴전압을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전극간극이 넓어짐에 따라 파괴전압이 높아졌으며 자계를 인가했을 때가 자계를 인가하지 않았을 때 보다 파괴전압이 약 1[kV]정도 높았다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 자계의 영향으로 전하가 라모어반경을 갖고 사이클로트론 운동을 함으로써 전계방향의 실질적인 이동거리가 짧고 한곳에 전계가 집중되지 않기 때문인 것으로 생각된다. 그림 6은 전극간극 20[mm]에서 자속밀도 변화에 따른 절연파괴전압을 나타내었다. 그림에서처럼 자속밀도가 0.31[T]에서 0.46[T]로 증가했을 때 절연파괴전압이 0.6[kV] 증가하였다.

플라즈마 반응기에서 유해가스 처리를 위해 전자의 에너지는 매우 중요하며 전자의 에너지가 클수록 유해가스 제거효율은 증가된다. 따라서 자계를 인가함으로써 동일한 반응기, 동일한 조건에서 자계를 인가하지 않은 경우보다 더욱 큰 전계를 인가할 수 있으므로 유해가스 제거효율을 향상시킬 수 있을 것으로 예측된다.

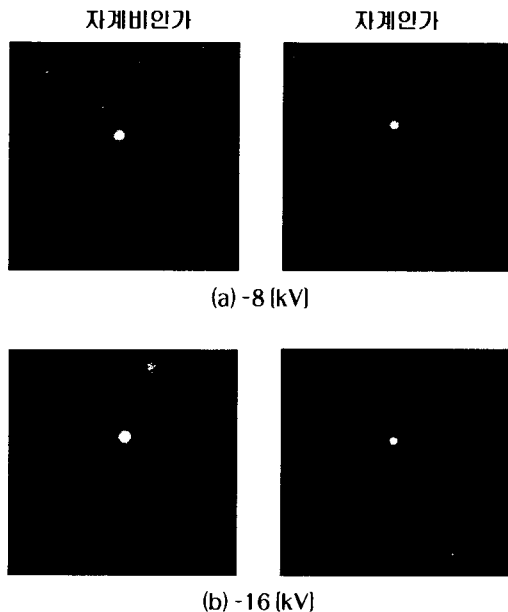


그림 4. 인가전압에 따른 코로나의 광  
Fig. 4. Negative Corona Light with and without magnetic field

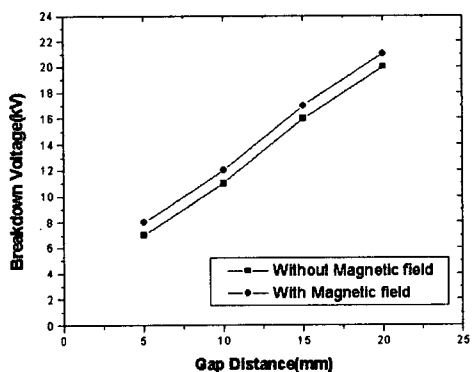


그림 5. 전극간극에 따른 절연파괴전압  
Fig. 5. Breakdown voltage vs Gap distance

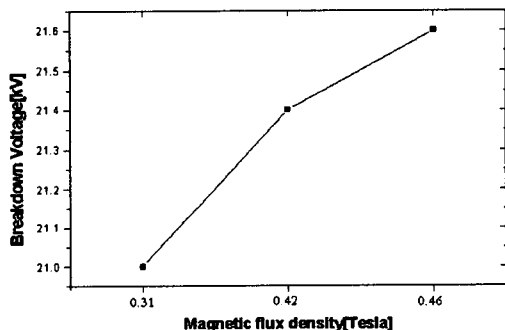


그림 6. 자속밀도에 따른 절연파괴전압  
Fig. 6. Breakdown voltage vs Magnetic flux density

그림 7은 부극성 직류 고전압을 인가한 경우 전극 간극 변화(5, 10, 15, 20 [mm])에 따른 자계인가시와 자계비인가시의 절연파괴전압을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전극간극이 증가함에 따라 절연파괴전압이 선형적으로 증가하며 전극간극이 넓어질수록 자계를 인가하지 않았을 때의 절연파괴전압이 점점 높아지는 것으로 나타났다. 이는 앞절에서 설명된 바와 같이 부극성에서는 공간으로 확장되지 못한 전자에 의한 전계집중에 의해서 절연파괴전압이 낮아지는 것으로 사료된다.

### 3.4 I-V 특성

그림 8의 (a)와 (b)는 전극간격 20[mm]일 때 직류 정·부극성을 인가하여 자계인가시와 자계비인가시의 방전전류를 나타낸 것으로, 정극성일 경우에는 그림 8(a)와 같이 자계비인가시의 전류값이 자계인가시에 비해 높은 것으로 나타났으며, 부극성의 경우는

그림 (b)와 같이 그와 반대로 자계인가시에 전류값이 더 높은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 코로나가 성장할수록 더욱 명확하게 나타났다.

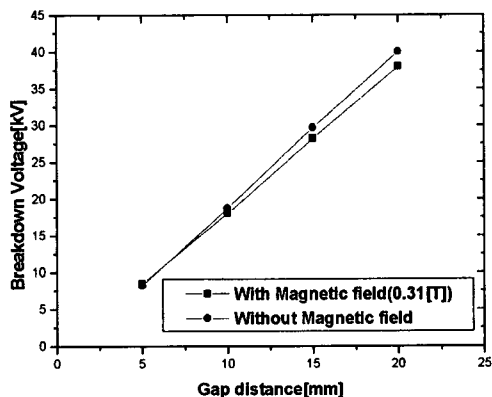
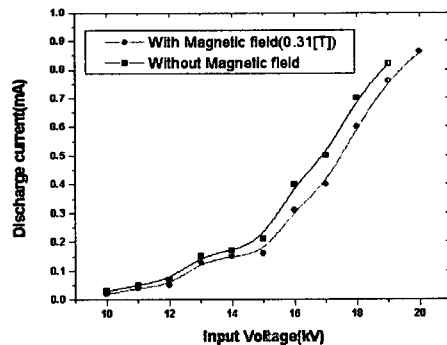
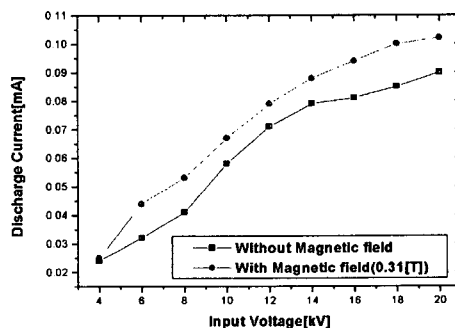


그림 7. 전극간극에 따른 절연파괴전압  
Fig. 7. Breakdown voltage vs Gap distance



(a) Positive DC voltage



(b) Negative DC voltage

그림 8. I-V 특성  
Fig. 8. I-V Characteristics

## 코로나 방전에 대한 자계의 영향

이는 앞절의 코로나광에서 나타난 것과 같이 정극성 직류코로나의 하전입자는 (+)이온과 전자의 수가 거의 같아서 질량이 무거운 이온의 라모아반경이 커서 코로나 영역이 확장되어 전계집중현상이 나타나지 않지만, 부극성 직류코로나의 하전입자는 부 침전극에서 다량 방출된 전자이므로 자계가 인가된 경우 이온보다 라모아반경이 작아 공간으로 확장되지 못하고 좁은 통로를 형성하여 전계를 집중시키기 때문인 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

침대평판형 전극구조에서 자계를 전계와 직각방향으로 인가했을 때와 자계를 인가하지 않았을 경우의 정·부극성 직류코로나방전 현상을 실험한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 절연과피전압은 침전극에 정극성 직류고전압을 인가한 경우 자계인가시가 비인가시보다 높았으며 부극성 직류고전압을 인가한 경우는 자계를 인가하지 않았을 때가 높게 나타났다.

(2) 코로나전류는 정극성 전압을 인가한 경우 자계인가시가 비인가시의 전류보다 작게 나타났으며 부극성 전압을 인가했을 때는 자계비인가시가 인가시보다 높았다.

(3) 코로나방전 영역은 정극성 일 때 자계를 인가하였을 때가 비인가시보다 넓게 확장되었으며 부극성 일 때는 자계인가시와 비인가시 모두 브러시 상태에서 스트리머 상태로 진전하지 않고 바로 절연과피로 이어졌다.

위와 같은 실험결과로부터 플라즈마반응기에서 환경오염가스의 처리를 위한 자계를 인가하면 플라즈마영역의 확장으로 인하여 제거효율을 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 1998년도 경남대학교 학술연구조성비 지원에 의해 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) J. S. Chang, "Energetic electron induced plasma processes for reduction of acid and greenhouse gases in combustion flue gas", Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control Part A, Springer-Verlag Pub.Co., pp.1-32, 1993.
- (2) 水野 彰, "放電プラズ마による排氣ガス淨化技術の研究開發", Sut Bulletin, No.5, pp.29-34, 1993.
- (3) 최의소, 조광명, 환경공학, 청문각, pp.315~369, 1993.
- (4) A. Chakrabarti, A. Mizuno, K. Shimizu, T. Matsuoka and S. Furuta, "Gas cleaning with semi-wet type plasma reactor", IEEE transactions on industry application. VOL. 31, NO.3, pp.500-505, 1994.
- (5) G. J. Pietsch, D. Braun, and V. I. Gibalov, "Modeling of dielectric barrier discharges", Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control Part A, Springer-Verlag Pub.Co., pp.279-286, 1993.
- (6) Kazuo Shimizu, Hiroyuki Sone, Akira Mizuno, "Effect of water on NOx removal using pulsed discharge plasma", 靜電氣學會講演論文集, pp.355-358, 1993.
- (7) J. S. Chang et al, The effect of ammonia mixing concentration on the reduction of NOx in a combustion flue gas by superimposing surface/silent discharge plasma reactor, 放電プラズ마によるガス狀 環境汚染物質の處理技術に關する總合的研究 pp.59~68, 1994.
- (8) 박재윤, 김건호, 고희석 "펄스 스트리머 방전을 이용한 NOx 제거", 전기전자재료학회, Vol 10, NO 8, pp.807-812, 1997.
- (9) Jae-yoon. Park, Geon-ho. Kim, Jong-dal. Kim "NOx Removal Using DC Corona Discharge with Magnetic Field", Combust. Sci. and Tech., Vol.133, pp.65-77, 1998.

## ◇ 저자소개 ◇

### 박 재 윤 (朴在潤)

1986년 경남대학교 전기공학과 졸업. 1991년 인하대학교 졸업(석사, 박사). 1996년 7월~1997년 6월 캐나다 McMaster Postdoc. 1998년~현재 경남대학교 교수.

### 정 장 근 (鄭章根)

1997년 경남대학교 전기공학과 졸업. 1999년 경남대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 경남대학교 전기공학과 박사과정.

### 김 의 균 (金益均)

1998년 경남대학교 전기공학과 졸업. 2000년 경남대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 시험기술연구실 위촉연구원.