

# 자외선·오존 살균 소독장치 제작을 위한 체시물레이션 및 대장균 제거 특성

論 文  
54P-4-6

## Hydraulic Simulation and Removal Characteristics of Escherichia Coli for Producing of Ultraviolet rays · Ozone Sterilization Apparatus

黃仁 娥<sup>†</sup>·李賢 洙<sup>\*</sup>·朴在 潤<sup>\*\*</sup>  
(In-Ah Hwang · Hyun-Soo Lee · Jae-Yoon Park)

**Abstract** - The simulation of hydraulic pressure distribution of discharge tube with globular beads and the removal characteristics of Escherichia coli by the discharge tube with globular beads were estimated. The removal characteristic of Escherichia coli was related to the input voltage because the electric field is increased according to input voltage. As the passing amount of test water in discharge tube is increased, the removal ratio of Escherichia coli was increased because passing numbers of electric field section is increased.

**Key Words** : hydraulic pressure, discharge tube, globular beads, Escherichia coli, electric field

### 1. 서 론

우리나라의 상수도 보급정책은 도시중심으로 추진되어 광역시 상수도 보급률은 98.5 % 수준으로 향상되었으나 농어촌과 먼지역의 상수도 보급률은 31.1 % 수준에 불과하여 이러한 지역에서는 간이상수도를 이용하고 있다. 2002년 말 현재 전국에 11,030개소의 간이상수도과 기타 소규모 급수시설 10,647개소 등을 포함하며 소규모 급수시설을 이용하고 있는 인구는 우리나라 인구의 10 %에 이르고 있다.

간이상수도란 100인 이상 2,500인 이내의 수급인들에게 정수를 공급하는 일반수도로써 1일 공급량이 20톤 이상 500톤 미만이며 시장, 군수, 구청장이 설치 운영하고 있으나 80년대 이전에 설치한 시설이 전체의 72 %로 대부분 노후화 되어 시설 개량이 필요하나 예산의 부족으로 인하여 적극적인 개선이 안 되고 있다. 또한 이와 같은 간이상수도에 사용되고 있는 저수조는 단수 등에 대비하여 예비수량을 확보하고 시간대별로 변하는 용수의 사용에 안정적 공급을 위하여 설치되고 있으나 저수조의 구조 및 재질불량, 청소 등의 관리소홀로 간이상수도의 수질을 떨어뜨리는 요인이 되고 있어 농어촌지역 주민들의 건강을 해치고 있다. 이러한 문제로 인하여 수조시설의 청소 및 위생관리 등에 관한 규칙을 제정하여 저수조 등 옥내급수시설에 대한 효율적 관리 및 시설개선을 유도하고 있다[1-2].

따라서 간이상수도 상수원 및 수조 중에 존재할 수 있는

미량의 유해물질 종류가 많아지고 농도 또한 높아질 우려가 있으며 최근 바이러스를 비롯한 병원성 미생물 관리강화의 필요성과 더불어 병원성 미생물의 소독 시 생성되는 물속의 유기물질과 소독약품의 염소성분이 결합하여 트리할로메탄 (THM : Trihalomethane) 등 소독부산물인 먹는 물의 새로운 유해물질로 부각되고 있다. 이에 따라 본 연구는 정수처리과정 중 염소소독을 배제한 자외선·오존살균 소독장치를 이용하고 여과 및 소독처리를 강화하여 일반오염물질인 대장균군수 5,000 mg/L이하, 염소이온 250 mg/L이하, 일반세균 1 ml 중 100 CFU이하, 수소이온농도 5.8~8.5 pH 중 먹는 물 기준에 가장 엄격하고 자주 문제가 되는 대장균군수를 5,000 mg/L이하에 적합하도록 상수원 및 수조에 존재하는 대장균을 제거하기 위한 장치 시물레이션을 실행하였고 이 결과를 바탕으로 자외선·오존살균 소독장치를 개발하여 대장균 (Escherichia coli) 제거특성에 대한 연구를 하였다[3-11].

### 2. 시물레이션

#### 2.1 셀 분할 시물레이션

그림 1은 최적의 반응기 제작에 있어 반응기 내의 유체에 대한 시물레이션 형상 분할 기법을 나타내었다. 형상의 설계는 보통 삼각형의 셀과 사각형의 셀로 나뉘며 각각의 형상조건에서 장단점은 모두 있다.

삼각형의 경우는 사각형 셀의 둔각 부분 해석보다 유리한 조건을 갖고 있다. 왜냐 하면 그림 1과 같이 삼각형 셀의 경우는 3면으로 구성되어 미소 구간까지 삼각형의 형태로 자를 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 방전관 제작을 위한 시물레이션 전처리 과정에서 해석 영역은 삼각형의 분할 기법을 이용하여 수방전 구간의 구조물이 서로 접하는 곳에서 해석상 수렴 정도의 정확성을 위하여 세밀하게 셀을 분해하여 시물레이션 하였다[4].

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 韓國原子力研究所 先任研究員

E-mail: iahwang@kaeri.re.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 馬山大學 컴퓨터電氣工學部 教授

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 慶南大學校 電氣工學科 教授

接受日字 : 2005년 10월 18일

最終完了 : 2005년 11월 4일

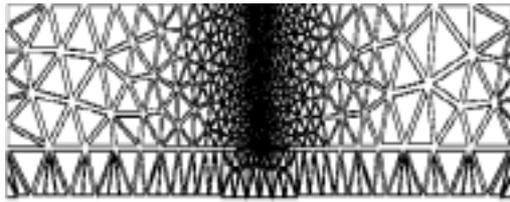


그림 1 셀 분포의 시뮬레이션  
Fig. 1 Simulation of cell distribution.

2.2 유체분포 시뮬레이션

전압인가에 따른 반응기 내의 유체압력분포 변화를 알아보기 위하여 유체압력분포에 대한 시뮬레이션을 하였다. 반응기 내의 일정한 유체압력은 방전상태를 안정적으로 유지시키기 위해 중요하다. 그림 2 (a), (b), (c)는 유체 유출입 장치 내에서 인가전력에 따른 1500 ℓ/min의 유체압력분포 변화를 나타낸 것이다.

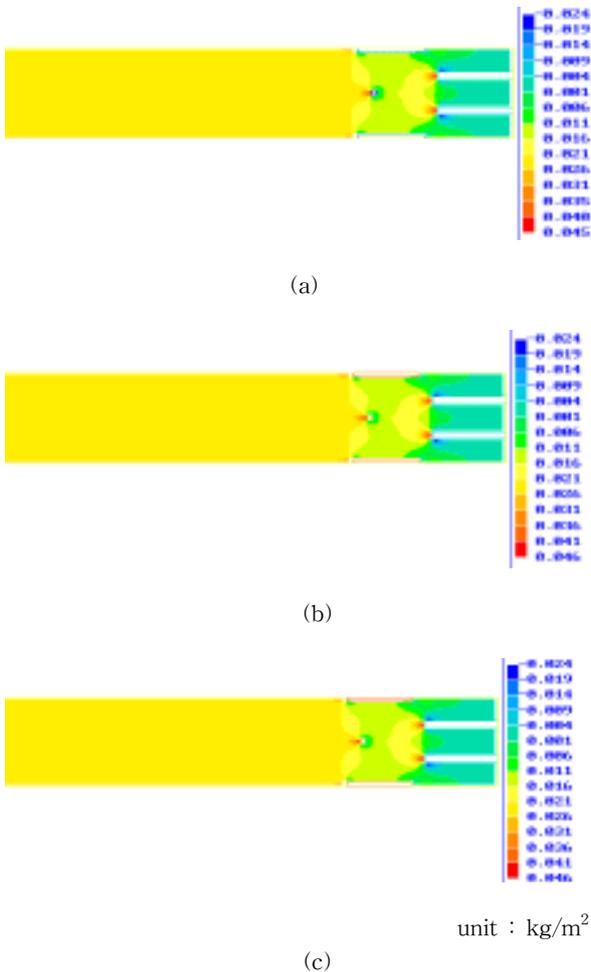


그림 2 전력과 유량 1500 ℓ/min에 대한 압력분포  
(a) 0 W (b) AC power 10 W (c) DC power 10 W  
Fig. 2 Pressure distribution on power and flow amount 1500 ℓ/min  
(a) 0 W (b) AC power 10 W (c) DC power 10 W

그림 2의 좌측으로부터 유체가 유입되며, 중앙의 원형 흰색 선전극, 선전극 상·하측면의 흰색 직사각형은 평판 전극이다. 우측 흰색블록 상·하의 짙은색 사각형태는 촉매 설치부를 의미하고, 이 촉매설치로 인하여 유체의 출입이 장치 내의 반응기에서 20 %정도 유체의 흐름을 막을 것으로 가정하여 이것을 흰색블록으로 설정하였다.

최대 유량 1500 ℓ/min, 출구 압력이 0 kg/m<sup>2</sup>일 때 전력에 따른 유체유출입 장치의 유입부에서 압력의 변화는 거의 없었고, 평판 전극의 양쪽 끝단 부분에서 압력이 약간 낮아졌다. 전극사이의 주 방전 영역에서 압력은 유체유입부의 초기 압력 0.026 kg/m<sup>2</sup>보다 낮은 0.016 kg/m<sup>2</sup>이었으나 전력이 인가되어도 유체의 압력분포에는 변화가 없으므로 방전 영역의 방전상태에는 영향을 주지 않을 것으로 판단되었다.

따라서, 방전 영역의 신뢰도 측면에서 방전 영역 내의 압력분포를 균일하게 하는 것이 좋으므로 평판 전극을 유입부 쪽으로 2 mm정도 이동시키거나 선전극을 유체출구 쪽으로 2 mm정도 이동시키면 더욱 균일한 압력분포로 인하여 안정된 방전이 유지될 것으로 사료되었다.

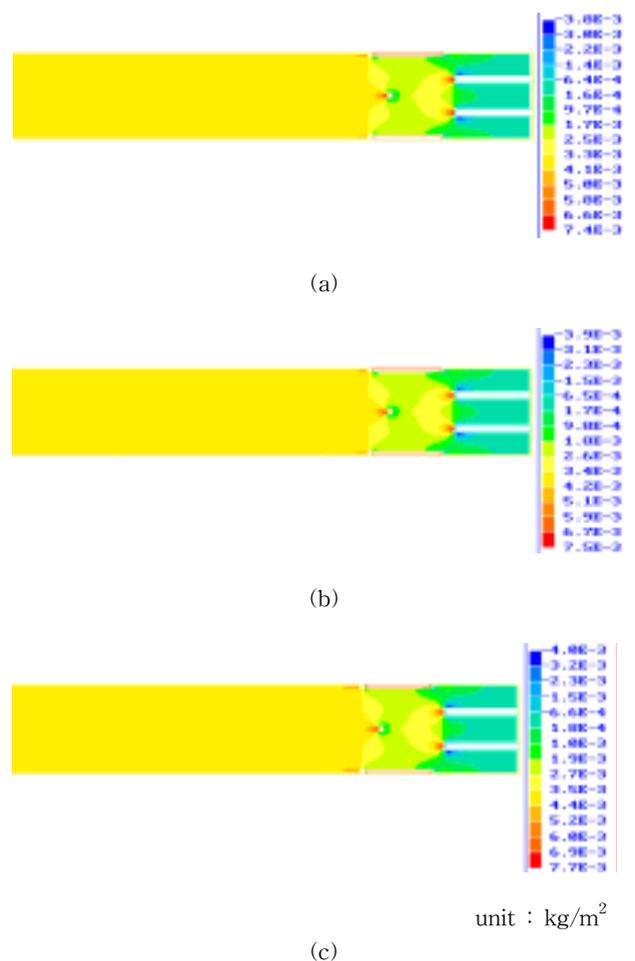


그림 3 전력과 유량 700 ℓ/min에 대한 압력분포  
(a) 0 W (b) AC power 5 W (c) DC power 10 W  
Fig. 3 Pressure distribution on power and flow amount 700 ℓ/min.  
(a) 0 W (b) AC power 5 W (c) DC power 10 W

그림 3은 유량이 700 ℓ/min일 때 전력에 대한 유체압력 분포를 나타낸 것이다. 유량이 1500 ℓ/min에서 700 ℓ/min으로 약 60 % 감량하였을 경우에도 전극 사이의 주 방전 영역에서 압력은 유체 유입부의 초기 압력 0.0041 kg/m<sup>2</sup>보다 낮은 0.0025 kg/m<sup>2</sup>이었다. 그러나 방전 영역에서 유체압력 분포 변화는 인가전력에 따라 변화가 없으므로 방전상태에는 영향을 주지 않을 것으로 판단되었다.

따라서 방전의 신뢰도 측면에서 방전 영역 내의 압력분포를 일정하게 하는 것이 좋다. 그러므로 평판 전극을 유체 유입부 쪽으로 2 mm 정도 이동시키거나 선전극을 유체 출구 쪽으로 2 mm 정도 이동하면 더욱 균일한 압력분포를 나타낼 것으로 판단되었다.

### 3. 실험장치 및 방법

그림 4, 그림 5, 그림 6의 실험 장치는 각각 방전관이 부착된 수조, 파이렉스 유리 방전관, 방전관의 외함이며 방전관의 구조는 파이렉스 유리로 제작된 원통형 방전관(내경:∅ 50 mm, 길이:500 mm)으로서 방전관 내부에는 구형 유전체(직경:∅ 5.0 mm, SiO<sub>2</sub>, c<sub>5</sub>)가 놓여지며, 이 방전관의 외부와 중심부에 전극이 설치되어져 있다.

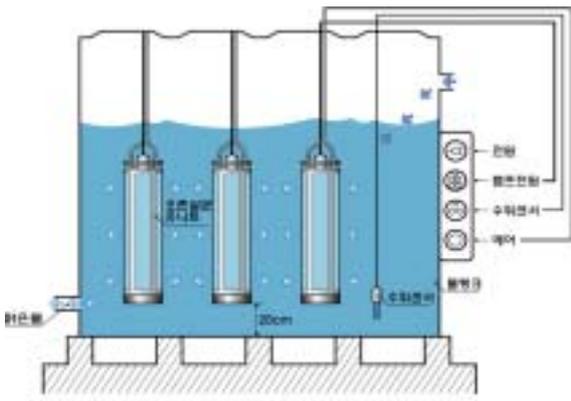


그림 4 방전관이 부착된 수조

Fig. 4 Water tank attached discharge tube



그림 5 파이렉스 유리 방전관

Fig. 5 Pyrex glass discharge tube



그림 6 방전관의 외함

Fig. 6 Case of discharge tube.

그리고 두 전극 사이에 20 kHz, 6~12 kV의 교류 전압이 인가되는 동안 방전관을 통과한 시험수 2 ℓ에 존재하는 대장균의 제거 특성을 조사하였으며, 시험수는 수(水)펌프에 의해 순환되도록 제작하였다. 시험수는 일반 지하수에 초기 대장균수를 1 ml당 약 5,000개의 개체가 존재하도록 물과 세균의 농도비를 조절하여 제조하였고, 이를 이용하여 실험하였다. 그리고 대장균의 제거 특성을 알기 위하여 시험용 대장균 배양지인 3M Petrifilm(Coliform Count Plate, 3M Co., USA)을 사용하였다. 그리고 방전관은 물의 흐름과 균일한 수중 전계 분포를 고려하여 동축 실린더형을 사용하였다. 수(水)중의 전극은 수중 방전시 전극 재료의 수소 이온화 경향을 고려하여 백금선을 사용하였으며, 실험에 사용한 전원은 최대 정격 전력 150 W, 주파수 20 kHz, 최대 출력 전압 20 kV의 전원을 사용하였다. 이외에 처리 시간에 대한 인가전압, 수(水)유량 그리고 구형 유전체의 크기 등을 파라미터로 하여 실험하였으며 모든 실험은 10회씩 반복하였다[11].

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 유량과 전압에 대한 대장균 제거 특성

그림 7은 전압 6~12 kV, 유량 1, 2, 3 ℓ/min, 전극 간격 25 mm, 구형 유전체의 직경이 5.0 mm일 때, 시간 경과에 대한 수중 대장균 제거특성을 나타낸 것이다. 실험 결과 전압이 높을수록, 물의 유량이 많을수록 제거율이 좋은 것으로 나타났다. 이는 전압이 상승하면 수중 전계가 동시에 상승하기 때문에 제거율이 높아진 것이고, 유량에 대해서는 펌프의 회전수가 높을수록 시험수가 빨리 순환되어 단위 시간당 방전관 통과 횟수가 증가되어 유량이 증가하기 때문이다. 따라서 수중 대장균이 고전계 영역과 접촉할 확률이 높아지기 때문에 수중 대장균의 제거율이 좋아지는 것으로 사료된다. 그러나 시험수의 유량 2 ℓ/min, 전압 12 kV인 경우가 유량 3 ℓ/min, 전압 6 kV인 경우보다 제거특성이 좋게 나온 것은 어느 일정 이상의 유량이 되면 상대적으로 유량보다는 전압의 영향을 더 받기 때문으로 사료된다.

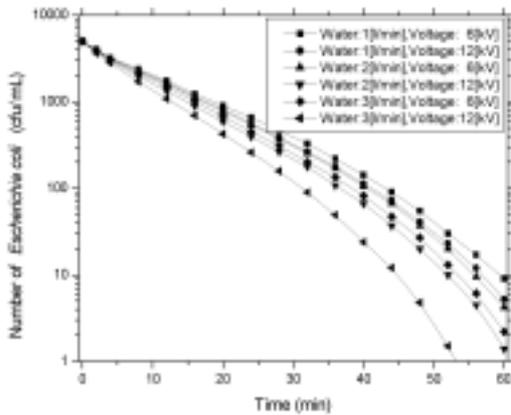


그림 7 전압과 유량에 따른 대장균 제거특성  
 Fig. 7 Removal characteristics of Escherichia coli to voltage and flow ratio.

그림 8은 전압 12 kV, 유량 1~5 l/min, 전극 간격 25 mm, 구형 유전체의 직경이 5.0 mm일 때, 유량에 대한 수중 대장균 제거특성을 나타낸 것이다. 유량이 증가할수록 수중 대장균의 제거율은 점차적으로 상승하는 경향을 보였으나 유량을 지속적으로 증가시켜도 비례적인 대장균의 제거 특성은 나타나지 않았다.

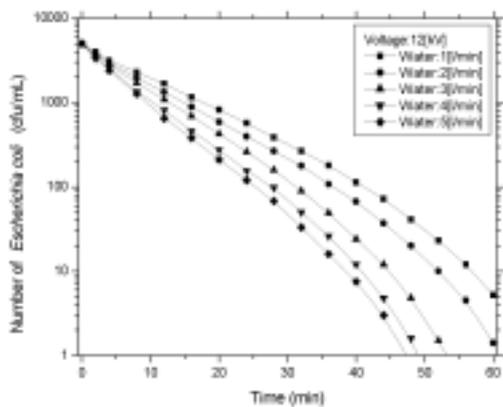


그림 8 유량에 따른 대장균 제거특성  
 Fig. 8 Removal characteristics of Escherichia coli to flow ratio.

#### 4.2 구형 유전체에 대한 대장균 제거 특성

그림 9는 전압 12 kV, 유량 3 l/min, 전극 간격 25 mm, 구형 유전체의 직경이 2.0 mm, 3.5 mm, 5.0 mm일 때, 시간 경과에 대한 수중 대장균 제거 특성을 나타낸 것이다. 구형 유전체의 크기가 클수록 수중의 대장균 제거 특성이 좋은 것으로 나타났다. 그러나 방전관의 전극 사이 거리가 제한적이므로 방전관의 내부 직경과 인가 전원의 전압을 고려해야 할 필요가 있다. 본 실험 조건에서 대장균이 완전 제거될 때까지의 처리 시간을 살펴보면, 구형 유전체의 직경이 5.0 mm인 경우가 직경이 2 mm일 때 보다 약 10분 정도 대장균의 제거 시간

이 단축되는 결과를 알 수 있었다. 이것은 유전체의 직경이 클수록 전계세기는 직경이 작은 경우 보다 전계세기가 높게 나타나기 때문이다.

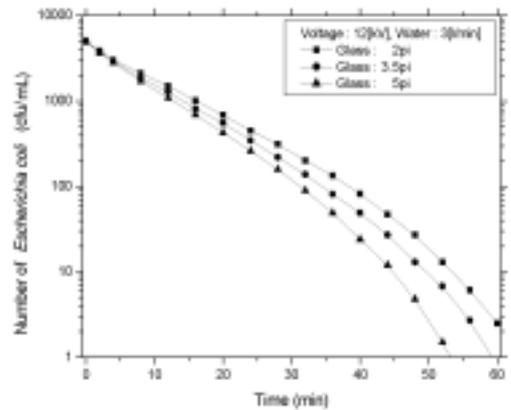


그림 9 구형유전체의 크기에 따른 대장균 제거특성  
 Fig. 9 Removal characteristics of Escherichia coli to globular dielectric size.

그림 10은 전압 12 kV, 유량 3 l/min, 전극 간격 25 mm의 조건에서 직경 5.0 mm인 구형 유전체의 사용 유무에 대한 수중 대장균 제거 특성을 나타낸 것이다. 실험 결과 세균이 완전히 제거되는 시간을 비교하면 직경 5.0 mm의 구형 유전체를 사용한 경우는 약 50분 정도 소요되었으나, 구형 유전체를 사용하지 않은 경우는 약 80분 정도의 시간이 소요되었다. 이것은 유전체를 사용 할 경우 유전체의 형상과 물성에 따라 강한 유전분극이 발생하기 때문으로 사료된다.

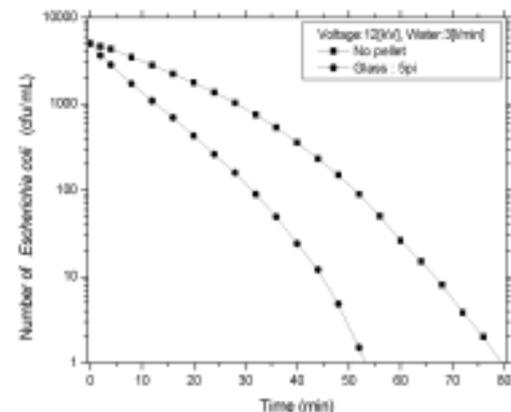


그림 10 구형 유전체의 유무에 따른 대장균 제거특성  
 Fig. 10 Removal characteristics of Escherichia coli to existence of globular dielectric

#### 5. 결 론

유체시물레이션 결과 방전의 신뢰도 측면에서 방전 영역 내의 압력분포를 일정하게 하는 것이 좋으므로 평판 전극을 유체 유입부 쪽으로 2 mm 정도 이동시키거나 선전극을 유체 출구 쪽으로 2 mm 정도 이동하면 더욱 안정된 압력분포를 나타내는 것으로 판단되었다.

실험 결과 구형 유전체(SiO<sub>2</sub>)를 갖는 수방전관을 이용한 수중 대장균의 제거 특성에 있어 전압의 영향은 전압이 높을수록 전계가 비례적으로 증가하여 수중 대장균의 제거 특성이 우수하게 나타났다. 그리고 유량의 영향은 시험수를 순환시키므로써 단위 시간당 시험수의 방전관 통과 횟수를 증가시키면 유량이 증가하므로 수중 대장균이 고전계 영역 즉, 구형 유전체 사이 접합부 부근의 전계 집중 현상에 의해 고전계와 접촉할 기회가 높아지기 때문에 수중 대장균의 제거율이 높아졌다. 또한, 구형 유전체의 직경이 2.0 mm, 3.5 mm, 5.0 mm인 경우 반응 시간에 대한 수중 대장균 제거 특성을 측정된 결과 유전체의 직경이 큰 경우가 직경이 작은 유전체의 경우 보다 전계 강도가 높게 나타나기 때문에 수중 대장균의 제거시간이 단축됨을 알 수 있었다. 그리고 방전관내에 유전체를 사용하는 경우가 유전체를 사용하지 않는 경우 보다 대장균 제거에 소요되는 시간이 단축됨을 알 수 있었다.

**감사의 글**

본 연구는 2005학년도 경남대학교 학술논문 게재 연구비 지원으로 이루어졌음.

**참 고 문 헌**

[1] 환경백서, 환경부, 2004.  
 [2] 환경부, 하수처리현황, 2002  
 [3] AWWA, "An AWWA Survey of Inorganic Contaminants in Water Supplies", JAWWA, vol.77, no. 5, pp. 67-72, 1985.  
 [4] Chung, S., and Gu, R., "Two-dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir", J. Hydr. Eng., vol. 124, no. 7, pp. 704-711, 1998.  
 [5] Haug, R. T., "Sludge Processing to optimize digestibility and energy production", JWPCF., 49, pp.1713-1721, 1983.  
 [6] Hongde, Z. and Daniel, W. S., "Ozone mass transfer in water and wastewater treatment: Experimental observations using a 2D laser particle dynamics analyzer", Water Res., vol. 34, no. 3, pp. 909-921, 2000.  
 [7] Li, X. Z. and Zhang, M., "Decolorization and biodegradability of dyeing wastewater treated by a TiO<sub>2</sub> sensitized photo-oxidation process", Water Sci. Technol., vol. 34, no. 9, pp. 49-55, 1996.  
 [8] Chiu, Y. C., Chang., C. N., Lin, J. G., and Huang, S. J., "Alkaline and Ultrasonic Pretreatment of Sludge before Anaerobic Digestion", Water Sci, Technol., 36, pp.155-162, 1997.  
 [9] Ogata, A., Shintani, N., Mizuno, K., Kushima, S., and Yamamoto, T., "Decomposition of Ozone Using a Nonthermal Plasma Reactor Packed with Ferroelectric Pellets", IEEE Trans. Ind. Appl., 35(4) pp.753-759, 1999

[10] APHA AWWA, and WEF., "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater", 18th. ed., Washington D.C., USA, 1993.  
 [11] Mizuno, A., "Industrial Application of Non-thermal Discharge Plasma in Environmental Technologies", 12th Int. symp. High Voltage Eng., pp.48-55, 2001.

**저 자 소 개**



**황 인 아(黃仁娥)**

1987년 충남대학교 계산통계학과 졸업.  
1999년 대전대학교 대학원 컴퓨터통신공학과 졸업(석사). 1987년 5월 ~ 2005년 현재 한국원자력연구소 선임연구원  
Tel: 042-868-2093, Fax : 042-861-9315

E-mail: iahwang@kaeri.re.kr



**이 현 수(李賢洙)**

1984년 명지대학교 전기공학과 졸업.  
1986년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 전북대학교대학원 전기공학과(박사), 일본 나고야대학 공동연구원, 한국전기안전공사 연구원, 1993년 3월 ~ 2005년 현재 마산대학 컴퓨터전기공학부 교수

Tel: 055-230-1327, Fax: 055-230-1325

E-mail : hslee@masan.ac.kr



**박 재 운(朴在潤)**

1986년 2월 경남대학교 전기공학과 졸업,  
1991년 9월 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1995년 캐나다 McMaster University 응용물리학과 Post-Doc, 1992년 3월~ 2005년 현재 경남대학교 전기공학과 교수, Journal of Advanced Oxidation Technology Edit Board. 관심분야는 유전재료, 플라즈마 응용, 수소발생 분야임.

Tel : 055-249-2636, FAX : 055-249-2839

E-mail : jypark@kyungnam.ac.kr