

고전압 방전을 이용한 수질분석에 관한 특성

(A Characteristics on Water Quality Analysis Used the High-Voltage Discharge)

조국희* · 김영배 · 조문수

(Kook-Hee Cho · Young-Bae Kim · Moon-Soo Cho)

요 약

본 논문은 수질 오염 항목의 대표격인 대장균 제거를 위해 고전압 펄스 전원과 직류 전원을 비드(SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2)가 없는 방전관, 비드가 있는 방전관, 그리고 수중 방전관에 사용하였다. 실험 결과에 따르면 대장균 제거 특성은 입력 전압의 비에 따라 나타났는데, 이는 입력전압이 증가할 때 방전관내의 전계영역이 같이 증가하기 때문이다. 그리고 고전압 펄스 전원을 사용했을 때 지르코니아(ZrO_2) 비드 방전관이 다른 방전관들보다 우수하였으며, 직류전원을 사용한 수중 방전관이 고전압 펄스를 사용한 방전관들보다 수중 대장균 제거 특성이 우수한 결과를 보였다.

Abstract

In this research, we used discharge tube without dielectric bead or with dielectric beads(SiO_2 , Al_2O_3 , or ZrO_2), and discharge in water at High-voltage pulse · DC power supply for removal of Escherichia coli. At the result of experiments, the removal characteristics of Escherichia coli appeared relation ratio to input voltage. Because, the electric field of discharge tube is increased when input voltage is increased. And, discharge tube used dielectric bead(ZrO_2), the removal characteristics of Escherichia coli was better than cases of else. And discharge used DC Power, the removal characteristics of Escherichia coli was better than AC Pulse Power.

Key Words : High-voltage discharge, Dielectric bead, Escherichia coli, Water quantity

1. 서 론

최근에는 지구 온난화의 영향으로 고온 다습한 여름뿐만 아니라 겨울에도 이상 기후에 의해 우리 생활 주변의 물과 공기는 전염성이 강한 유해 세균을

내포하고 있다. 오염의 범위가 확대되면 집단 취락 시설에서 심각한 대장균이나 리스테리아 같은 유해 세균 감염이 발생된다. 이에 세계 각국에서는 자국의 환경보호를 위해 점차 강화된 환경규제와 행정 지도가 이루어지고 있을 뿐만 아니라, 환경 오염의 원인이 되는 오염 물질의 제거나 발생원의 저감을 위한 대책 마련에 막대한 재원을 사용하고 있다. 따라서 이러한 문제점을 일부나마 해결할 수 있도록 하는 것이 본 연구의 목적이다[1-3].

* 주저자 : 한국전기연구원 전기물리그룹 책임연구원

Tel : 055-280-1577, Fax : 055-280-1490

E-mail : khcho@keri.re.kr

접수일자 : 2004년 6월 1일

1차심사 : 2004년 6월 3일, 2차심사 : 2004년 6월 23일

심사완료 : 2004년 7월 8일

이에 본 연구는 고전압 펄스 전원과 직류 전원을 사용하여, 구형의 유전체 비드가 사용된 수중 방전 장치와 두 전극이 물에 잠기는 수중 방전 장치를 제시하여, 수중 세균 제거 특성을 조사 하였다. 이 수중 방전 장치를 이용할 경우, 수중 방전관 내의 구형 유전체 비드 상호간 혹은 방전관과 비드상호간의 유전 분극에 의한 고전계가 발생하고, 수방전 에너지에 의해 물이 산성의 이온화된 물질로 변화하는 물리적 현상이 야기 되었다. 이에 수질오염 측정의 대표적인 항목인 대장균(*Escherichia Coli*)을 대상으로 하여 다양한 파라메타에 따라 그 제거 특성을 조사하였다[4-7].

2. 실험

2.1 실험 장치

그림 1 (a), (b)는 실험 장치의 전체 구성 및 흐름을 나타낸 개략도이다. 그림 1 (a)에서 실험 장치의 각 구성을 살펴보면, 우선 1차측 입력전압을 조절시 방전관 두 전극사이의 2차측 출력 전압이 6~12[kV]

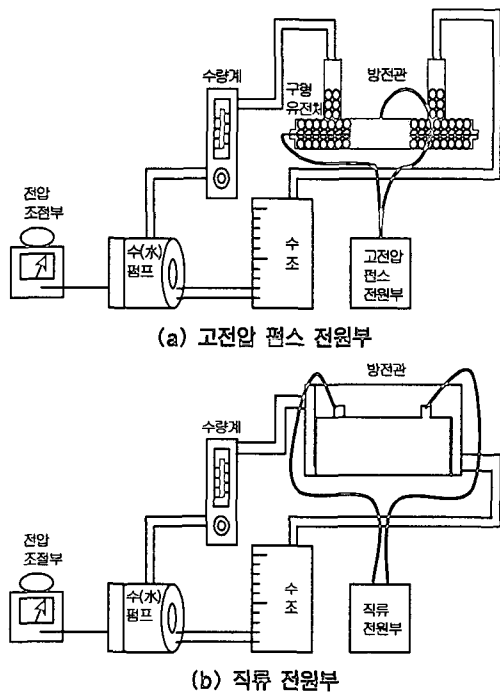


그림 1. 실험 장치의 개략도
Fig. 1. The experimental schematic

로 가변 할 수 있는 고전압 펄스 전원부, 일차측 입력 전압을 조절하여 수량을 1~7[l]까지 가변 할 수 있는 수(水)펌프, Pyrex로 제작된 수방전관, 수(水) 유량을 표시하는 수량계, 그리고 시험수를 담아주는 수조로 구성 되어 있다. 그리고 고전계 인가를 위한 고전압 전원 장치의 2차측의 출력 주파수는 약 14.5 [kHz]이고, 수방전관과 수(水)부하에 대해 최대 출력 전압이 약 15[kV]가 되도록 전원을 직접 제작 하였다. 그림 1 (b)에서 실험장치의 구성을 살펴보면, 그림 1 (a)에서 전원부와 방전관만 바뀐 것을 알 수 있다. 전원부는 2차측 출력 전압이 0~30[V], 출력 전류는 0~20[A]로 가변 할 수 있는 직류 전원부로 바뀌었으며 방전관은 전극이 수중에 잠기는 방전관으로 바뀌었다.

그림 2 (a), (b)는 본 실험에서 사용된 방전관의 구조를 나타낸 것이다. 그림 2 (a)는 고전압 펄스 전원에 사용된 방전관을 윗면 정면 측면으로 나타낸 것이다. 이 방전관은 수류의 흐름과 수중의 균일한 전계 분포를 고려하여 동축 실린더형 방전관(외경 : $\varnothing 24$ [mm], 내경 : $\varnothing 20$ [mm], 길이 264[mm])으로 두께는 2[mm]로 제작하였다. 각 방전관 내부에는 SiO_2 (이산

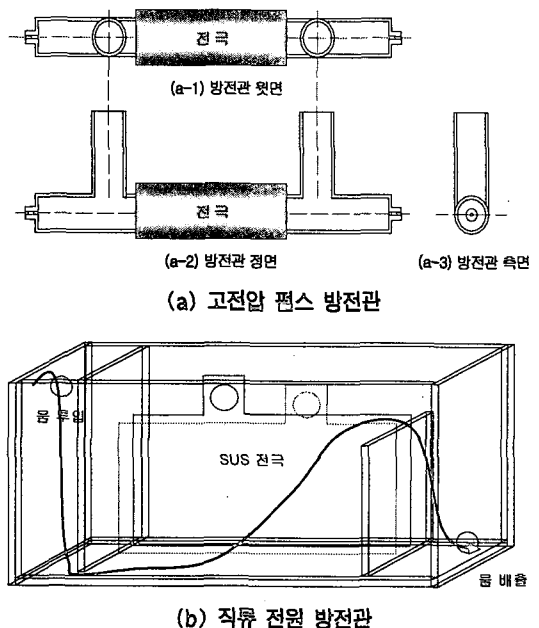


그림 2. 방전관 구조
Fig. 2. The structure of discharge tube

고전압 방전을 이용한 수질분석에 관한 특성

화규소), Al_2O_3 (알루미나), ZrO_2 (지르코니아)로 제작된 구형 유전체($\phi 4.0$ [mm]) 비드가 각각 충전되어 있고, 이 방전관의 내부 전극은 SUS304($\phi 1$ [mm])를 선(線)전극으로 방전관 내부 중심축과 동일한 방향으로 설치되어 있으며, 외부 전극은 동(銅)테이프로 전극을 구성하였다.

그림 2 (b)는 직류전원부의 방전관 구조이다. 외부는 투명 아크릴 3[mm]로 제작하였으며 전극은 SUS304를 사용하였다. 두 전극간 간격은 5[mm]이고, 방전관 전극은 200×100 [mm]이다. 방전관 전체 크기는 $236 \times 36 \times 153$ [mm]이다.

그림 3은 실험 장치의 실제 사진을 나타낸 것이다.

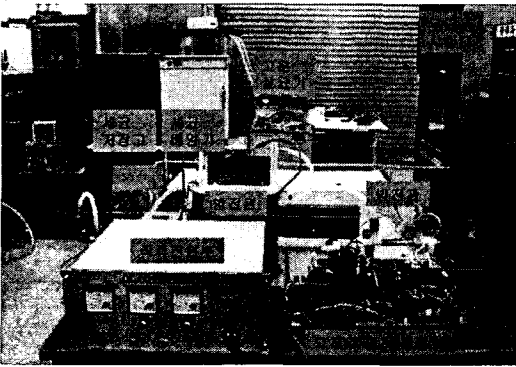
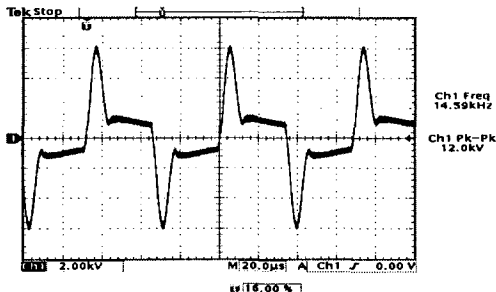


그림 3. 실험 장치 사진
Fig. 3. The photo of experimental apparatus

2.2 실험 파형

그림 4 (a)는 본 실험에 사용된 고전압 펄스 전압 파형을 측정된 것으로 인가전압은 12[kV], 주파수는



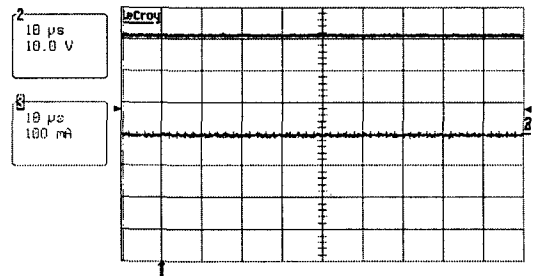
(a) 고전압 펄스 전압 파형

14.59[kHz]이다. 그림 4 (b)는 본 실험에 사용된 직류 전원 파형을 전극 간격이 10[mm]일때 측정된 것으로 30[V] 일때 수직 [mA]를 나타내고 있다. 전극 간격이 넓어질수록 같은 전압일때 전류가 떨어짐을 확인할 수 있는데, 이는 물의 저항 성분이 크기 때문에 방전 거리가 늘어나게 되면 인가전력은 물을 이온화시키기 보다는 상대적으로 물을 가열하는데 전력을 소비하게 되기 때문이다.

2.3 실험 방법

본 실험에서는 대장균을 적당 배지법으로 대장균을 증식 및 배양하여 $4 \sim 5$ [$^{\circ}C$]의 온도로 냉장 보관하면서 지속적으로 실험에 사용 하였다. 실험상의 시험수 수량은 2[l]이고, 이 시험수 내의 대장균이 200개체수가 유지되도록 배양된 대장균을 물속에 희석하여 사용하였다. 한편 시험수는 수(水)펌프에 의해 순환되도록 하였다.

실제 실험 결과를 분석하기 위해서 초기 대장균의 개체수를 확인하였으며, 초기 대장균의 개체수가 고전압 전원, 수유량, 구형 유전체의 종류에 대한 각각의 실험 조건에서 어느 정도 대장균의 개체수가 늘거나 줄어들었는지를 확인하였다. 여러 수증 세균 개체 측정 방법 중 본 실험과 같이 많은 결과 데이터의 상호 비교 처리를 필요로 하는 실험에 있어서는 시간적, 경제적인 측면을 고려해야 하므로, 국내외적으로 상용배지로 많이 사용되고 있는 3M Petrifilm (E.coli Count Plates, 3M Co. USA) 제품을 사용하였다.



(b) 직류 전원 파형

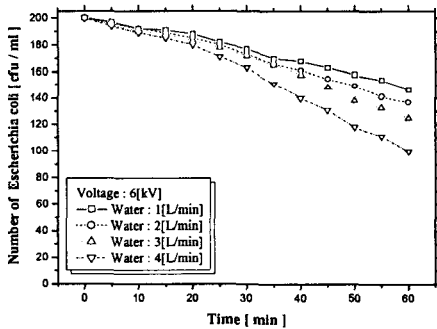
그림 4. 전원의 전압, 전류 파형

Fig. 4. Voltage and current wave of source

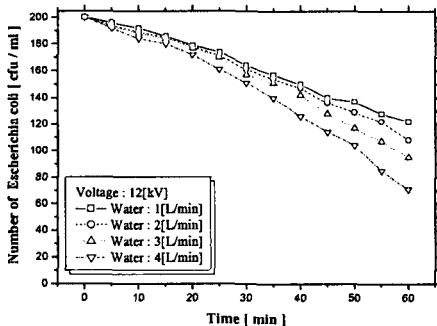
본 실험에서는 고압펄스를 사용하여 구형 유전체의 유무와 종류(SiO₂, Al₂O₃, ZrO₂), 인가전압(6~12[kV]), 수유량(1~4[ℓ/min]), 그리고 처리시간(5분단위로 60분간) 등의 다양한 변수에 대해 수중 대장균의 제거 특성 실험을 하였고, 또한 직류 전원을 사용하여 인가전압 DC 30[V], 수유량(1~4[ℓ/min]), 그리고 처리시간(1분단위로) 등의 다양한 변수에 대해 수중 대장균의 제거 특성 실험을 하였다. 그리고 본 실험 결과 그래프들은 각 실험 조건을 3회 이상 반복 실시하여 나온 결과 데이터의 상호 비교 및 분석을 통하여 작성 된 것이다.

3. 결과 및 고찰

실험에 사용한 고전압 펄스전원은 최대 정격 전력



(a) 방전관 인가 전압 6[kV]



(b) 방전관 인가 전압 12[kV]

그림 5. 인가 전압과 수량에 대한 대장균 제거 특성
Fig. 5. The removal characteristics of Escherichia coli on input voltage vs water quantity

150[W], 최대 출력 주파수 20[kHz], 최대 출력전압이 20[kV]인 전원을 사용하였는데, 인가전압이 6[kV]일 때의 소비전력은 약 12[W]로 측정되었고, 인가전압이 12[kV]에서는 소비전력이 약 20[W]로 측정되었다.

그림 5 (a), (b) 는 방전관 내부에 시험수만 존재하는 경우로 인가 전압이 6[kV], 12[kV]일 때, 수량 변화에 대한 시험수 내부의 대장균 제거 특성 결과를 나타낸 그래프이다. 실험 결과를 살펴보면, 수유량이 증가되면 시험수의 단위 시간당 방전관 내부 순환 횟수가 각각 수량에 비례하여 증가하게 되므로 방전관 내부에 형성되는 고전계 영역에 시험수 내부의 대장균이 접촉할 기회가 증가하게 되어, 그 결과 수중 대장균의 제거량이 더욱 증가됨을 알 수 있다.

한편 그림 5 (b)의 인가 전압이 12[kV]일 때를 살펴보면 반응기 내부에 시험수만 인가함에 있어서, 인가 전압이 6[kV]에서 12[kV]로 증가할 경우 시험수 중의 대장균 제거가 증가됨을 알 수 있다. 또한 수유량이 4[ℓ/min]일 때 대장균의 감소가 가장 크나 수 펌프의 가동시 필요한 소비전력과 수중 대장균의 제거율을 상호 고려할 경우, 실험에서 방전관의 수유량은 3[ℓ/min], 인가 전압은 12[kV] 정도로 유지하는 것이 전체적인 시스템 운영 측면에서 적절한 것으로 사료된다.

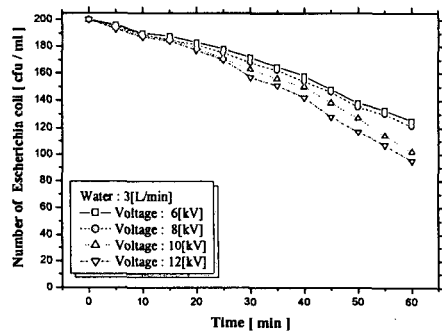
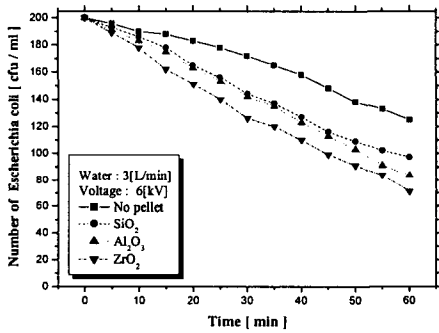


그림 6. 인가 전압에 대한 대장균 제거 특성
Fig. 6. The removal characteristics of Escherichia coli on input voltage

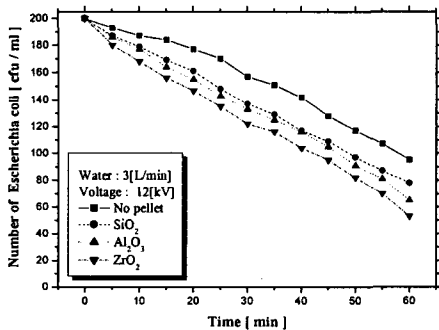
그림 6은 방전관 내부에 시험수만 존재하는 경우로 수유량이 3[ℓ/min]일때, 전압을 각각 6, 8, 10, 12[kV]로 인가한 후 시험관 내부의 대장균 제거 특성을 나타낸 그래프이다. 인가 전압이 일정하게

고전압 방전을 이용한 수질분석에 관한 특성

증가하면 시험수 내부의 대장균 제거량도 증가하는 경우를 보인다. 이는 대장균 같이 수[μm] 전후의 크기를 가진 세균에 수[V/ μm]의 전계가 인가되므로 세균의 세포막이 파괴되거나 쇼크에 의해 대부분 사멸하기 때문이다. 10[kV]에서 대장균 수가 급격히 사멸하는 것을 알 수 있으며 이는 인가 전압이 상승할수록 더 많은 대장균을 사멸시킬 수 있을 것으로 사료된다. 하지만 인가 전압의 상승은 전원장치의 절연내력과 변압기 자체의 출력 용량이 증가해야 한다는 문제점과 방전관 자체의 절연내력을 충분히 고려해야 하므로 낮은 전압으로 고효율의 수중 대장균의 제거 결과를 얻을 수 있는 시험 조건을 찾는 것이 필요하다. 그러므로 고효율의 수중 대장균 제거 특성을 찾기 위해 다양한 파라메타에 대한 실험이 반드시 필요하다.



(a) 방전관 인가 전압 6(kV)



(b) 방전관 인가 전압 12(kV)

그림 7. 방전관에 대한 수중 대장균 제거 특성
Fig. 7. The removal characteristic of Escherichia coli on discharge tube

그림 7 (a), (b)는 방전관에 각각의 구형 유전체 (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2)를 충전한 후, 수유량 3[l/min] 일때 전압을 각각 6, 12[kV]로 인가한 후 수중 대장균 제거 결과를 나타낸 그래프이다. 결과에서 보면 유전체 비드를 충전한 경우 방전관 내부에 비드를 충전하지 않은 경우보다 대장균 제거 효율이 상당히 향상된 것을 알 수 있었다. 그리고 충전된 유전체 중에서는 지르코니아(ZrO_2)가 가장 우수함을 알 수 있었다. 이는 최대 전계가 발생하기 위한 방전 조건을 만족하기 때문이다. 방전관 비유전율이 약 3.7이고 물의 비유전율이 약 80이라고 정의하면 유전체구의 비유전율은 앞의 두 물질에 대해 상대적인 비율이 같은 약 17.3일 경우와 약 1730의 비유전율을 가지는 경우에 최대 전계를 얻을 수 있는 특징이 있다. 다시 말해서 방전관(3.7) : 유전체구(17.3)=유전체구 (17.3) : 물(80) 또는 방전관(3.7) : 물(80)=물(80) : 유전체구 (1730) 의 비(比)로 각 물질의 상대적 비유전율이 비율이 일정 비례의 관계일 경우에 3중점에서 전기력 선속 밀도가 최대로 증가되고, 이때 최대 전계가 발생되기 때문이다.

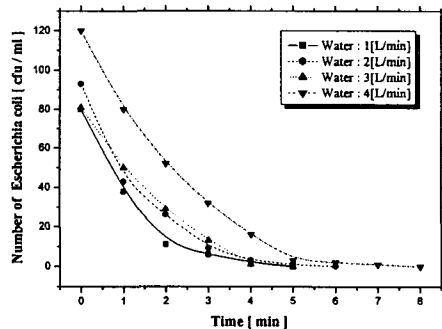


그림 8. DC 전원에서 수중대장균 제거 특성
Fig. 8. The removal characteristics of Escherichia coli on DC power supply

그림 8은 직류 전원에 수중 방전관을 사용하여 수중 대장균 제거 특성을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 나타나듯이 수량이 증가할수록 세균 수의 제거는 느려지는 경향을 나타낸다. 이 결과는 방전관에서 두 전극 사이를 지나가는 수량보다 두 전극 외부로 지나가는 수량이 증가하게 되어 나타난 현상이다.

두 전극이 모두 수중에 잠기는 수중 방전관은 그래프에서 나타나듯이 10분 이내에 수중 대장균이 모두 사멸하는 결과를 나타내었다. 이는 전극의 면적의 크기가 넓어서 방전관 내부의 고전계 영역과 시험수 내부의 대장균이 접촉할 기회가 증가하게 되었고, 수중에 잠긴 두 전극 중 양(+)의 전극에서 강한 산성수가 발생하여 그 결과 수중 대장균의 제거가 용이해지는 현상으로 사료된다.

그림 9는 수유량을 3[L/min], 직류 전원을 30[V]로 고정시키고 수중 대장균 균수를 변화하여 시간에 따른 제거특성을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 나타나듯이 수중 대장균 수는 5분 내에 약 90[%] 정도 사멸된 것을 알 수 있다. 또한 수중 대장균 균수의 증가는 처리 시간을 증가시킴을 알 수 있다. 이에 처리수 속의 대장균 수에 따라 처리 시간의 적절한 안배가 필요하다고 사료된다.

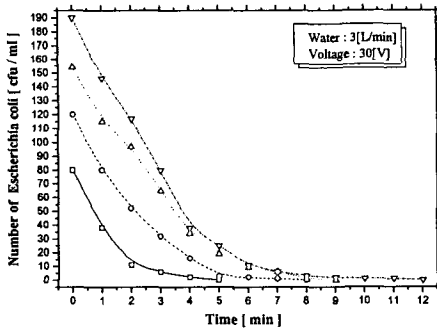


그림 9. DC 전원에서의 수중 대장균 제거 특성
Fig. 9. The removal characteristics of Escherichia coli on bacillus number at DC power supply

4. 결 론

고전압 펄스 전원을 사용한 유전체 비드를 충전하지 않은 방전관과 충전한 방전관의 수중 대장균 제거 특성을 살펴보면 비드를 충전한 방전관이 제거 효율이 높은 결과를 나타냈으며, 구형 유전체 비드(SiO₂, Al₂O₃, ZrO₂)를 충전한 경우에는 비유전율이 높은 ZrO₂ 비드를 충전한 방전관에서 높은 수중 대장균 제거 특성이 나타났다.

직류 전원을 사용한 두 전극이 모두 수중에 잠기

는 수중 방전관에서 수중 대장균 수는 5분 내에 약 90[%] 정도 사멸하는 결과를 나타내었다. 이는 전극의 면적의 크기가 넓어서 방전관 내부의 고전계 영역과 시험수 내부의 대장균이 접촉할 기회가 증가하게 되었고, 수중에 잠긴 두 전극 중 양(+)의 전극에서 강한 산성수가 발생하여 그 결과 수중 대장균의 제거가 용이해지는 현상으로 사료된다. 그리고 수중 대장균 제거 속도는 고전압 펄스 전원을 사용한 경우보다 직류 전원을 사용한 경우가 우수함을 알 수 있었다.

References

- (1) Y. V. Skvortsov, V. S. Komel'Kov, and N. M. Kuznetsov, "Expansion of a spark channel in a liquid," *Sov. Phys.-Tech. Phys.*, Vol. 5, pp.1100, 1961.
- (2) Yoshihiro Konishi, "A Novel Silent Discharge Type Ozonizer using Pulse Density Modulated High Frequency Inverter", *IEEE* pp. 764~772, 1999.
- (3) V. V. Vorob'ev, V. A. Kapitonov, E. p. Kruglyakov, and Y. A. Tsidulko, "Breakdown of water in a system with "diffusion" electrodes," *Sov. Phys.-Tech. Phys.*, Vol. 25, pp.598, 1980.
- (4) Moon Been Chang, "Experimental Study on Ozone Synthesis via Dielectric Barrier Discharges", *Ozone Science and Engineering*, Vol.19, pp.241~254, 1997.
- (5) F. B. A. Frungel, *High Speed Pulse Technology*. New York: Academic Press, vol III, 1976.
- (6) Kook-Hee Cho, "Improvement of Ozone Concentration and Efficiency by a Superposition - Silent in Discharge Ozonizer", *ICEE 2K, The International Conference on Electrical Engineering 2000*, pp. 228~231, July, 2000.
- (7) 조국희, "오존방전관 특성에 관한 연구", *대한 전기학회 고전압 및 방전응용기술 연구회 춘계학술대회 논문집*, O-2, pp. 8~10, 2001. 4. 27.

◆ 저자소개 ◆

조국희 (趙國熙)

1960년 1월 13일생. 1987년 숭실대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전기물리 연구그룹 책임연구원. 수질 연구 팀장.

김영배 (金永培)

1957년 2월 2일생. 1978년 부산공전 전기공학과 졸업. 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전기물리 연구 그룹 선임기술원.

조문수 (趙文秀)

1974년 5월 4일생. 2001년 경성대 전기전자공학전공 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전기물리 연구그룹 연구원.