

2계면 플라즈마 방전시스템(DBD System)의 특징 및 소독제로서 방전수의 사용가능성에 대한 연구

Study on the Characteristics of Dielectric Barrier Discharging System and Usability as a Disinfectant

류승민^{1,*} · 박희경¹ · 이봉주²

Seungmin Ryu^{1,*} · Heekyung Park¹ · Bongju Lee²

1 한국과학기술원 건설 및 환경공학과

2 한국기초과학지원연구원

(2004년 7월 16일 접수; 2004년 7월 30일 최종수정논문 채택)

Abstract

Innovated technique to inactivate microorganisms has been developed. This technique uses plasma discharge in 2-phase (Air-Water). Dielectric Barrier (two phase) Discharging system is able to produce new oxidants for microorganisms. Products from discharging are HNO_2 , NO_2^- , HNO_3 , NO_3^- and ozone but many other radicals can be generated as well. DBD water has low concentration of ozone (about 0.5mg/L), NO_2^- , NO_3^- (about 10mg-N/L, 20mg-N/L respectively) and lots of H^+ . These products play an important role in oxidation. Oxidation power by KI titration methods is approximately equivalent to 50mg- O_3 /L. Surprisingly stored DBD water could oxidize KI and maintain stable pH (about pH3) even after several days. Stored DBD water for 5 days has also more than 4log disinfection power to E. coli. However, DBD water cannot be used for drinking water directly due to it's toxicity. Additional process to neutralize pH and decrease toxicity must be applied.

Key words: Dielectric Barrier Discharge, Ozone, Disinfection, Nitrite, Toxicity

주제어: 2계면 플라즈마 방전, 오존, 살균, 아질산염, 독성

1. 서 론

국가가 선진화되면서 국민들의 수질에 대한 관심이 날로 높아지고 있다. 하지만 수돗물에 대한 불신 역시 점점 커져서 장(2002)의 발표에 의하면 수돗물

을 직접 섭취하는 국민은 1.3%에 불과하다는 조사결과가 있었다. 이는 상수관망의 노후화로 인한 급수단계의 불신도 있지만(박, 1998) 날로 오염되어가고 있는 상수원 자체에 대한 우려도 한 몫을 담당하고 있다. 산업화가 가속화 되면서 독성이 강한 공장폐수와 난분해성 유기물, 농약 등으로 인한 상수원의 오염은

*Corresponding author Tel: +82-42-869-5660, FAX : +82-42-862-8932, E-mail: sault@kaist.ac.kr (Ryu, S.M.)

정수장의 고도처리를 요구하고 있다. 고도처리의 방법으로는 오존, 자외선, 맴브레인 등이 있지만 최근에는 AOP에 대한 연구가 가장 활발히 진행되고 있다 (V. Camel, 1998). 하지만 국내의 정수장은 아직 염소소독 위주의 살균을 실시하고 있으며 소규모 정수장의 경우 소독설비가 없는 곳도 많이 있다(환경부, 2002 상수도 통계). 염소소독은 THM 등의 소독부산물 발생으로 현재는 다른 대체소독제로의 전환을 모색하고 있다(오, 2001). 대체소독제로 사용이 가능한 오존은 살균 이외에도 난분해성 유기물의 분해, 색도 및 탁도의 제거 등 많은 장점을 가지고 있다(Bruno Langlais, 1991). 따라서 최근에는 정수장 뿐 아니라 하수처리장의 방류수 소독에도 오존처리공정에 대한 연구가 진행되고 있다(Pei Xu, 2002). 수중에서 오존의 반응은 크게 두 가지로 요약될 수 있는데 물오존의 직접적인 반응과 OH라디칼에 의한 반응이 그것이다. 물오존에 의한 반응은 미생물의 살균 등에 이용되는데 특히 *Giardia*나 *Cryptosporidium*과 같은 포낭형성 미생물의 살균에 효과적으로 알려져 있다 (Robert M. Clark, 2002). OH라디칼에 의한 반응은 다양한 AOP 공정에 응용된다(Idil Arslan Alaton, 2002). 오존은 수중에서 약 20-30분이면 그 농도가 반으로 감소하게 되고 이러한 이유 때문에 오존살균 장치는 현장에서 발생된 오존기체를 이용할 수밖에 없다. 또한 고농도의 오존기체를 생성하기 위해서는 주입기체의 전처리가 필요하다. 따라서 오존발생장치, 폐가스 처리장치, 기체전처리 장치 등 부가적인 설비 및 오존기체생성에 대한 유지비 때문에 경제적인 단점을 가지고 있다. 이렇듯 정수장의 대표적인 소독제로 사용되는 염소 및 오존은 소독부산물 발생과 짧은 반감기의 단점 때문에 사용에 제약이 많이 따른다. 이러한 약점을 극복하면서 강력한 살균능을 지닌 대체소독제의 개발이 시급한 이유가 바로 이것이다.

대기에서 자연적으로 생성되는 방전현상인 번개는 다양한 산화제를 생성한다. 번개에서 생성 가능한 성분은 NO, NO₂, O₃, OH[·] 등을 들 수 있다. 이 성분은 비가 내릴 때 H₂O와 반응하여 HNO₂, HNO₃ 등의 물질을 만들고 이것이 이온화 되어 NO₂⁻, NO₃⁻ 등의 이온성분을 생성한다(J. Pinart, 1995).

본 방전시스템은 DBD(Dielectric Barrier Discharge)

법을 통해 반응조로 유입되는 공기를 플라즈마 방전을 통해 NO_x, O₃ 기체 등을 생성시키고 이것이 수중에 용존 되어 NO₂⁻, NO₃⁻, O₃, OH radical 등으로 변하여 소독능 또는 산화력을 지니는 방전수를 생산하게 된다. 본 연구에서 2계면 플라즈마 방전시스템은 DBD 시스템으로, DBD 시스템에서 생산된 물은 방전수로 칭하기로 한다.

본 연구에서는 특별한 부가장치를 필요로 하지 않는 2계면 플라즈마 방전시스템을 개발하여 방전수를 생산하고 이의 소독제로서의 사용가능성을 오존수의 성능과 비교하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 실험장치

플라즈마는 물질의 제4상태로 전자, 음이온, 양이온 등이 결합된 가스의 방전상태를 말한다. 본 2계면 플라즈마 방전시스템(DBD 시스템)에서는 대기 중에 번개가 칠 때 질소성분 및 오존성분이 만들어지는 것과 유사한 현상을 관찰할 수 있다. Fig. 1. a)는 2계면 대기압 플라즈마 방전시스템의 모식도이다. 본 장치는 한국기초과학지원연구소의 이봉주 박사팀이 개발하였다.

20°C 2L의 탈이온수는 펌프에 의해서 순환되고 공기는 순환되는 물에 이끌려 자연스럽게 유입된다. 공기층의 두께는 방전이 가장 양호하게 생성되는 5mm를 유지하며 20kV, 1.7kHz 교류 사인파의 플라즈마 방전에 의해 NO, NO₂, O₃ 등이 생성되고, 이 성분이 플라즈마의 압력에 의해 수체에 용존 되면서 HNO₂, HNO₃, O₃, OH[·] 등을 생성하고 이를 방전수로 칭한다.

방전수와와 비교실험을 위해 전형적인 오존 용존 시스템을 제작하여 실험에 적용하였다. 방전수와 생산량을 동일하게 하기 위해 15분간 2L의 탈이온수에 폭기된 오존수를 사용하였다. Fig. 1. b)와 같이 순산소가 2ppm의 유량으로 코로나 발생장치에 유입되면 44g/m³의 오존이 발생되어 20°C, 2L의 탈이온수에서 교반에 의해 용존 되어 오존수를 만든다. 폐가스는 4% KI solution에 용존 되어 폐기되었다.

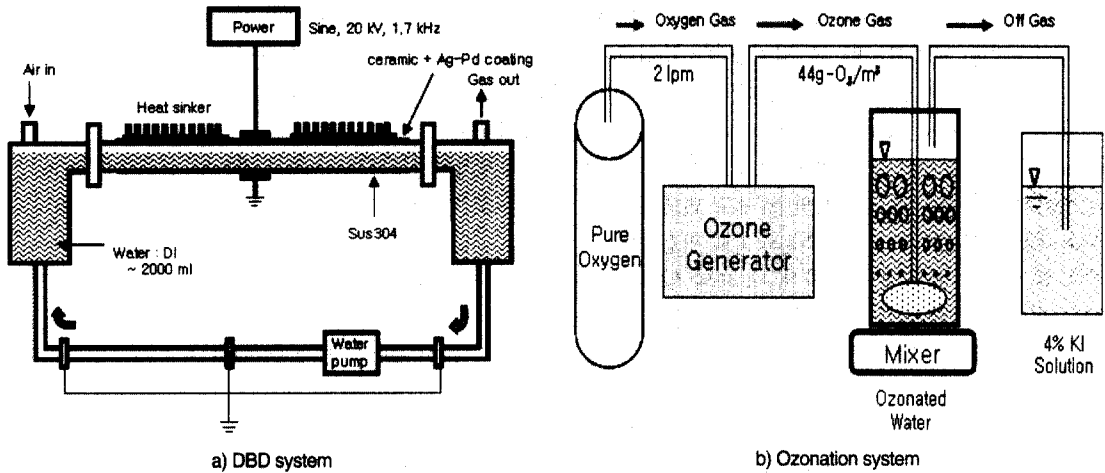


Fig. 1. Apparatus of experimental systems.

2.2 방전수에 대한 이론적 고찰

습기가 없는 대기에서의 방전은 아래와 같은 성분을 발생시킴이 알려져 있다(J. Pinart, 1995).

- $N_2 \rightarrow 2N$ (1)
- $O_3 \rightarrow 2O$ (2)
- $O_2 + O \rightarrow O_3$ (3)
- $N + O \rightarrow NO$ (4)
- $N + O_2 \rightarrow NO_2$ (5)

방전에 의해 생성된 위 성분들은 고온·고압의 플라즈마에 의해 시스템 내의 2L 탈이온수에 용존 되고 H₂O에 의해서 아래와 같은 성분 변화를 일으킨다.

- $NO_2 + NO + H_2O \rightarrow 2HNO_2$ (6)
- $2NO_2 + H_2O \rightarrow HNO_2 + HNO_3$ (7)
- $O_3(gas) \rightarrow O_3(aq)$ (8)
- $H_2O \rightarrow H \cdot + OH \cdot$ (9)

위 성분 중 HNO₂, HNO₃, O₃는 수중에서 Fig. 2와 같은 화학적 변화를 거쳐 새로운 생성물을 만든다.

HNO₂와 HNO₃는 ①, ②와 같이 이온화과정을 통해 nitrite, nitrate로 환원되면서 수소를 발생시킨다. nitrite는 ③에서 산성조건하에서 nitrate로 변하고 이 과정은 ④에서 오존에 의해서 가속화 된다. 이 반응

Table 1. Characteristics of contrastive samples

	DBD water	DBD water	Ozonated water
pH	3.5	7.2	7.5
NO ₂ -N (mg/L)	14	0	0
NO ₃ -N (mg/L)	10	23	0
O ₃ (mg/L)	0.3	0.25	5

역시 수소를 발생시키는 환원반응이다. nitrite는 ⑤와 같이 NO를 생성하고 이는 ⑥에서 오존에 의해 NO₂로, ⑦에서 NO₂로 변한다(Alexandre Samouilov, 1998; Matthew J. Moorcroft, 2001).

2.3. 실험방법

2.3.1. 방전수 성분분석

DBD 시스템에서 생성되는 방전수의 성분분석을 위해 pH, ORP, NO₂⁻, NO₃⁻, O₃(aq)의 농도가 측정되었다. Orion model 720A pHmeter로 pH와 ORP를 측정하였고, NO₂⁻, NO₃⁻ 등의 음이온은 DX-120 Ion chromatography가 농도측정에 사용되었다. 용존 오존 농도측정은 Agilent 9453 UV spectrophotometer를 이용하여 indigo colorimetric method로 측정하였다.

2.3.2. 방전수 산화력 평가

방전수의 산화력을 평가하기 위해 KI titration method와 E-coli 1093에 대한 살균능이 측정되었다.

KI titration method는 오존이나 염소의 농도를 측정하는데 사용되는 방법이지만 본 실험에서는 iodide의 쉽게 산화되는 성질을 이용하여 산화력 평가를 하였다. Iodide는 ozone, iodate, nitrous oxide, bromate, hypochlorite, chlorine 등에 의해 쉽게 산화되는 물질로 산화되면 무색에서 노란색의 액체로 변색이 된다 (Yuko Kitamaki, 2003). 이를 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 로 적정하여 무색이 될 때까지 사용된 티오황산나트륨의 양을 측정하면 방전수의 산화력을 평가할 수 있게 된다. 대장균에 대한 살균능 평가를 위해 시스템 내에서의 대장균의 살균능과 시스템 외에서의 살균능을 각각 평가하였다. DBD 시스템 내에서는 산화력을 보이는 방전수 뿐만 아니라 고온 고압의 플라즈마가 발생하므로 플라즈마에 의한 살균 역시 진행될 것으로 사료된다. 배양된 대장균을 2L의 DBD 시스템에 주입하여 15분간 방전시킨 후 대장균의 사멸율을 MPN법으로 측정하였다. 시스템 외에서의 살균능 평가에서는 배양된 대장균을 15분간 방전시켜서 생산된 2L의 방전수에 접종하여 15분 후의 대장균의 사멸율을 측정하였다 (Lenore S. Clescerl, 1998).

2.3.3. 방전수 독성평가 및 음용적합성 평가

방전수가 염소나 오존에 대한 대체소독제로 사용될 수 있을지 여부를 판단하기 위해 방전수의 독성평가 및 음용적합성 평가를 실시하였다. 독성평가는 LUMISTox를 이용하여 환경독성평가를 실시하였다. Luminescent bacteria test는 형광박테리아를 이용하여 독성평가를 하는 방법으로 샘플 내에서 박테리아의 발광 정도가 저해를 받는 양을 측정한다. 대조군을

세 개로 두어 pH3.5의 방전수와 pH7.2 방전수 그리고 pH7.5의 오존수를 사용하였다. pH7.2의 방전수는 pH3.5의 방전수에 NaOH를 첨가하여 제조하였다 (Table 1).

음용적합성평가는 15분간 방전한 방전수를 평가기관에 의뢰하여 44개 항목에 대한 평가를 실시하였다.

3. 연구결과

3.2. 방전수에 대한 실험적 연구

3.2.1. 방전수 특성

Table 2는 15분간 방전시킨 방전수와 15분간 용존시킨 오존수를 10회 반복 측정하여 특성을 비교한 데이터이다. DBD 시스템에서 15분간 방전시켜 생성된 방전수는 pH가 2~3 정도를 유지하고 ORP는 500~600mV를 나타내었고 이는 약 5일이 경과한 후에도 같은 값을 보이고 있었다. Ozone 농도는 약 0.3~0.5mg/L로 저농도의 오존을 발생시켰다. NO_2^- -N, NO_3^- -N의 농도는 각각 10~20mg/L, 20~30mg/L 정도로 나타났으며 이는 시간이 지남에 따라 변화하였다. 본 실험에서 오존수는 중성 pH와 높은 ORP값을 보였고(900~1000mV), 오존의 농도는 20mg/L 정도가 균일하게 측정되었다. 또한 오존의 반감기는 약 40분 정도로 나타났다.

방전수의 특성 중에서 주목할 점은 pH가 낮다는 점이다. 따라서 방전시간에 따른 pH의 변화를 관찰하였다. Fig. 3에 나타나듯이 pH는 방전시간에 직접적인 관련이 있으며 일정시간이 경과한 후에는 더 이상의 pH 변화가 없었다.

3.2.2. 방전수 산화력 평가

Fig. 4는 방전시간에 따른 방전수의 KI에 대한 산

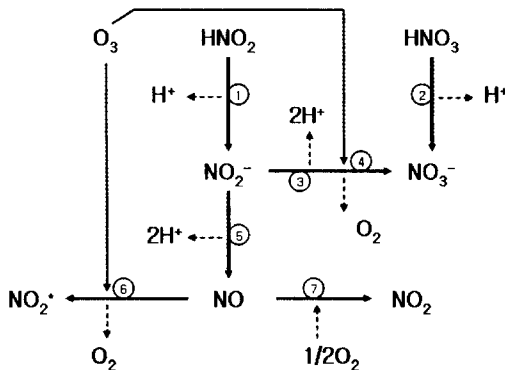


Fig. 2. Behaviors of HNO_2 , HNO_3 and O_3 in DBD water.

Table 2. Characteristic comparisons of Ozonated water & DBD water after 15minutes diffusion or discharge respectively

	Ozonated water	DBD water
pH	6.6	2.7
ORP (mV)	978	567
NO_2^- -N (mg/L)	-	14.8
NO_3^- -N (mg/L)	-	21.1
O_3 (mg/L)	20mg/L	0.42

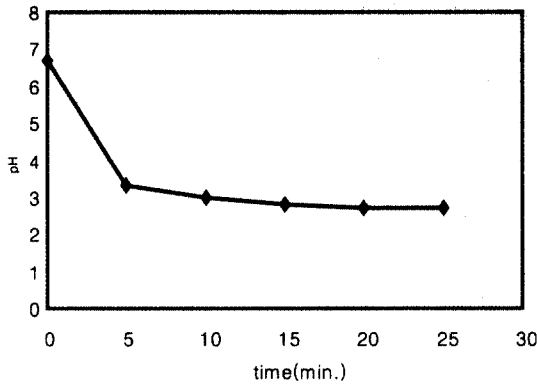


Fig. 3. Changes of pH with discharging time.

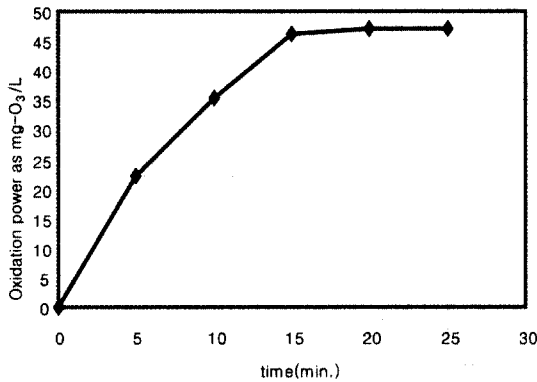


Fig. 4. Changes of oxidation power as mg-O₂/L with discharging time.

화력을 나타낸 그래프이다. 15분간의 방전 이후 KI에 대한 산화력이 최고에 이르렀고 이후에는 방전시간에 관계없이 산화력이 더 이상 증가하지 않았다. 이는 Fig. 4에 제시된 pH의 변화와 관련이 있는데 pH 역시 일정시간이 경과한 후에 감소량이 둔화되었다.

Fig. 5는 15분간 방전시킨 방전수를 밀폐용기에 담아두고 시간의 흐름에 따라 산화력에 어떻게 변화하는지를 확인한 실험결과이다. 염소와 오존의 경우를 예로 들어보면, 염소는 잔류염소가 존재하기 때문에 소독제로 널리 사용된다. 하지만 오존은 짧은 반감기에 의해 잔류소독제로의 사용은 불가능하다. 본 실험에서는 방전상태가 좋아서 최고 75mg-O₃/L에 해당하는 KI에 대한 산화력을 보였고, 5일이 경과한 후에도 산화력의 감소 폭이 10%를 넘지 않았다. 이와 같이 Iodide에 대하여 지속적인 산화능을 보이는 이유는

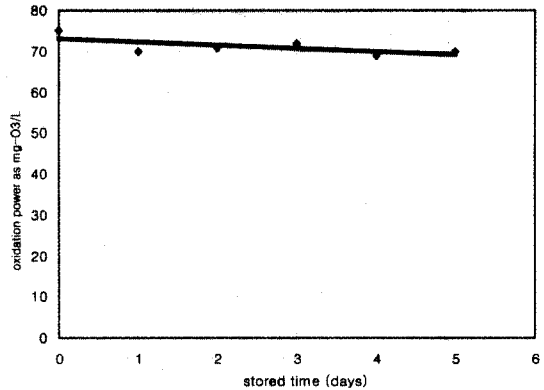


Fig. 5. Residual oxidation power of DBD water with stored time.

Table 3. Comparison of disinfection rate of E. coli in Ozonated water and DBD water by direct treatment

Reaction time	Ozonation system	DBD system
15minute	more than 99.999%	99.997%

pH가 낮을 때 NO₂에서 발생하는 NO의 역할일 것으로 판단되고 이에 대한 보완실험이 진행 중에 있다.

3.2.3. 방전수의 대장균 살균능 평가

3.2.3.1. DBD시스템 및 오존시스템에서 직접 살균처리

Table 3은 실험실에서 배양된 E. coli 1093에 대한 살균능을 비교한 실험결과이다. 오존가스가 용존되고 있는 시스템에 대장균을 주입하여 15분간 반응시킨 결과 약 5log 이상의 살균능이 있음을 확인하였고, DBD 시스템에 대장균을 주입하여 15분간 방전시킨 후 사멸율을 확인하였더니 4~5log의 살균능을 보였다. 방전수에서 대장균의 사멸이유로는 오존, 산성조건에서의 아질산염, 고온·고압의 플라즈마 등을 그 이유로 들 수 있으나 각각의 성분이 대장균의 사멸에 기여하는 정도는 확인하지 않았다.

3.2.3.2. 저장된 방전수에 살균처리

방전수의 특성 중에서 고무적인 것은 살균력의 지속성에 있다고 할 수 있다. 이를 위해 방전수를 1일부터 5일까지 밀폐용기에 저장해 놓고 저장기간에 따른 살균능을 확인하였다. 반응은 100ml 비이커에 대장균

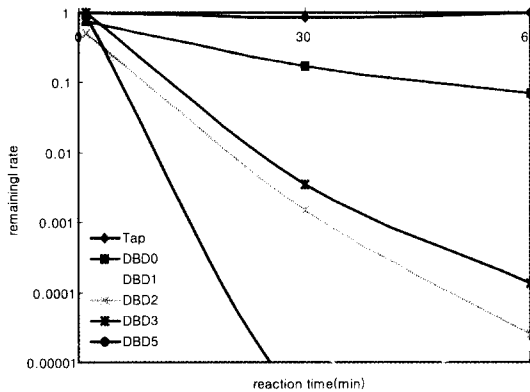


Fig. 6. Changes of disinfection rate of *E. coli* in tap and DBD water with contact time.

*Tap: Tap water controlled to pH3, DBD0: DBD water drained directly after discharging, DBD1: DBD water drained 1days after discharging, DBD2: DBD water drained 2days after discharging, DBD3: DBD water drained 3days after discharging, DBD5: DBD water drained 5days after discharging.

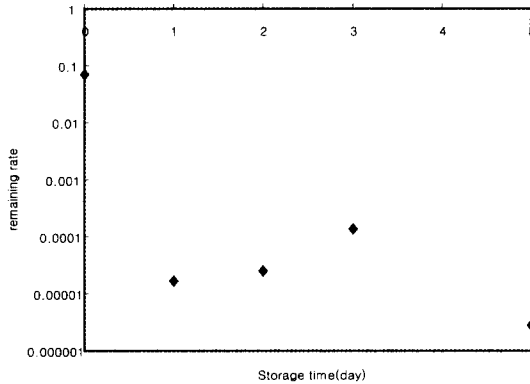


Fig. 7. Disinfection rate of *E. coli* in stored DBD water for different days.

*contact time: 60min.

을 집중하여 60분간 반응을 시켰다. 그 결과 Fig. 6에서 알 수 있듯이 pH3으로 조절된 수돗물에서의 대장균 사멸은 볼 수 없었으나 방전수에서는 방전수와의 접촉시간이 증가 할수록 대장균의 사멸율이 지속적으로 증가하였고, 저장기간이 각각 0, 1, 2, 3, 5일인 방전수를 60분간 미생물과 접촉시켰을 때 대장균의 사멸율은 저장기간에 관계없이 약 5log 정도의 살균력을 유지하였다(Fig. 7).

Table 4. The results of toxicity test for ozonated water and DBD waters

대조군	DBD water	DBD water	Ozonated water
pH	3.5	7.2	7.5
G level	Inhibition	Inhibition	Inhibition
Control G1			
Control G1			
G1	99.96		96.44
G1	99.96	99.89	98.32
Control G2			
Control G2			
G16	6.90	-2.59	1.92
G16	5.19	-5.26	3.68
G8	12.35	1.82	5.29
G8	13.17	2.54	5.78
G4	23.81	19.30	17.74
G4	24.13	18.14	21.13
G2	43.32	58.74	25.52
G2	44.66	24.81	24.81

3.4. 방전수 독성평가 및 음용적합성 평가

3.4.1. 방전수 독성평가

위의 Table 4의 결과는 회석배수에 따른 미생물의 독성을 나타낸다. 즉 G1, 다시 말하면 80%의 방전수 또는 오존수에 대해서 99.96, 99.89, 97.37% 정도의 독성을 각각 나타내고 있으며 G2, 즉 2배로 회석한 샘플에서는 43.99, 41.78, 25.17%의 형광박테리아가 독성에 의해 발광을 멈추었다. 회석을 할 경우 독성은 점차 낮아진다. pH3.5의 방전수는 약 6배 정도 회석을 하면 20% 정도의 환경독성을 보이고 pH7.2의 방전수는 2배 회석만 해도 20% 정도의 환경독성을 나타낸다. 오존수의 경우는 3~4배 정도 회석을 하면 환경독성을 20%까지 낮출 수 있다. 다시 말해서 방전수를 회석을 하지 않고 사용할 경우 환경에 대한 독성은 피할 수 없으며 EC50(50%의 저해를 받는 농도)의 환경독성 수준을 얻기 위해서는 약 2배 정도 회석을 한 경우 사용이 가능하다.

3.4.2. 방전수 음용적합성 평가

Table 5는 방전수를 대상으로 수질을 분석한 결과이다. 동, pH, 질산성질소가 기준치를 초과하였다. 질산성 질소는 대기중의 NO, NO₂와 물이 결합하여 H⁺와 NO₃⁻를 생성하고 이는 pH를 낮추고 동시에

Table 5. The results of suitability test as a drinking water for DBD water

Items	Criteria	Results	Items	Criteria	Results
Total Colony Counts	100CFU/ml	0	Benzene	0.01mg/l	ND
Total Coliforms	ND/50ml	ND	Toluene	0.7mg/l	ND
Pb	0.05mg/l	ND	Ethyle Benzene	0.3mg/l	ND
F	1.5mg/l	ND	Xylene	0.5mg/l	ND
As	0.05mg/l	ND	1.1 Dichloroethylene	0.03mg/l	ND
Se	0.01mg/l	ND	Carbon tetrachloride	0.002mg/l	ND
Hg	0.001mg/l	ND	Hardness	300mg/l	56mg/l
CN	0.01mg/l	ND	Consumption of KMnO4	10mg/l	6.8mg/l
Cr ⁶⁺	0.05mg/l	ND	Odor	ND	suitable
NH ₃ -N	0.5mg/l	0.10mg/l	Taste	ND	suitable
NO ₃ -N	10mg/l	35.8mg/l	Cu	1mg/l	0.312mg/L
Cd	0.01mg/l	ND	Color	5	1
Phenol	0.005mg/l	ND	ABS	0.5mmg/l	ND
Diazinon	0.02mg/l	ND	pH	5.8~8.5	2.7
Parathion	0.06mg/l	ND	Zn	1mg/l	0.760mg/l
Malathion	0.25mg/l	ND	Cl-	250mg/l	12mg/l
Fenitrothion	0.04mg/l	ND	Total Solds	500mg/l	311mg/l
Carbaryl	0.07mg/l	ND	Fe	0.3mg/l	ND
1.1.1-Trichloroethane	0.1mg/l	ND	Mn	0.3mg/l	ND
PCE	0.01mg/l	ND	Turbidity	0.5NTU	0.31
TCE	0.03mg/l	ND	SO ₄ ²⁻	200mg/l	9mg/l
Dichloromethane	0.02mg/l	ND	Al	0.2mg/l	ND

NO₃를 생성하게 된다. 따라서 생성된 방전수를 직접 음용수로 사용할 수는 없으며, 적절한 회석이나 방전수의 환원을 위한 추가적인 처리가 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

방전수는 2계면 플라즈마 방전시스템에서 생산된 대체소독제로 염소 및 오존의 소독제로서의 단점을 극복할 수 있는 대안으로 개발되었다. 공기가 방전시스템 내로 유입되면 플라즈마 방전에 의해 NO, NO₂, O₃ 등이 생성되고, 이 성분들이 물과 접촉하여 살균력을 지니는 방전수를 생성한다. 방전수의 특성은 아래와 같이 정리할 수 있다.

1) 15분간 방전한 방전수는 pH2~3, ORP 500~600mV, 10~20mg NO₂-N/L, 20~30mg NO₃-N/L의 특성을 갖는다.

2) 15분간 방전한 방전수의 KI에 대한 산화력은 오존농도로 환산했을 때, 약 47mg-O₃/L의 산화력을 보이고 수일간 이 산화력은 지속된다.

3) 15분간 방전시스템 내에 주입된 대장균은 4log 이상의 살균능을 보이고 이 방전수를 5일간 저장시킨 경우에도 역시 4log 이상의 살균능을 지속적으로 보인다.

4) 방전수의 독성은 2배 이상의 회석으로 EC50를 만족시킬 수 있으며, 아질산염 및 산성조건 등 먹는 물 수질기준의 불만족을 해결하기 위해 5배 이상의 회석 및 NaOH 첨가 등의 후속조치가 필요하다.

결론적으로 방전수를 소독제로 직접 사용하는 데는 독성 및 유해성, 그리고 질산염 등의 생성 때문에 불가능하며 적절한 회석 및 NaOH 첨가 등의 후속조치가 필요할 것으로 생각된다. 방전수는 HNO₂, O₃ 이외에도 규명되지 않은 많은 라디칼 등의 물질을 함유하고 있으며, 이들이 미생물의 살균 및 오염물질의 분해에 기여할 것으로 생각된다. 이에 대한 후속 연구가 진행 중에 있다.

사 사

본 연구는 차세대 핵심화경기술개발사업(Eco-

Technopia21)의 지원에 의해 수행되었다.

참고문헌

- 박노석, 주대성, 박희경 (1998) 배·급수 관망내에서 상수 오염에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **20**, pp. 1095-1101.
- 오현제, 왕창근, 강준원 등 (2001) 오존/AOP 및 활성탄 조합 정수공정의 최적화 및 자동제어시스템 개발, G-7 프로젝트, 환경부.
- 장재연 (2002) 수돗물에 대한 신뢰도, 서울시 수질평가위원회 심포지엄.
- 환경부 (2002) 상수도 통계.
- Alexandre Samouilov, Periannan Kuppasamy, Jay L. Zweier (1998) Evaluation of the Magnitude and Rate of Nitric Oxide Production from Nitrite in Biological Systems, *Archives Of Biochemistry and Biophysics*, **357**, pp. 1-7.
- Bruno Langlais, David A. Reckhow, Deborah R. Brink (1991) *Ozone in Water Treatment*, Lewis Publishers, Washington, D.C.
- Idil Arslan Alaton, Isil Akmehmet Balcioglu, Detlef W. Bahnemann (2002) Advanced oxidation of a reactive dyebath effluent: Comparison of O₃, H₂O₂/UV-C and TiO₂/UV-A processes, *Water Research*, **36**, pp. 1143-1154.
- J. Pinart et. al. (1996) Quantitative study of the formation of inorganic chemical species following corona discharge-I. Production of HNO₂ and HNO₃ in a composition-controlled, humid atmosphere, *Atmospheric environment*, **30**, pp. 129-132.
- Lenore S. Clescerl et. al. (1998) *Standard methods*. 20th edition. APHA, Washington, D.C.
- Matthew J. Moorcroft, James Davis, Richard G. Compton (2001) Detection and determination of nitrate and nitrite: a review, *Talanta*, **54**, pp. 785-803.
- Pei Xu, Marie-Laure Janexb et. al. (2002) Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design, *Water Research*, **36**, pp. 1043-1055.
- Robert M. Clark, Mano Sivagenesan, Eugene W. Rice, Jimmy Chen (2002) Development of a Ct equation for the inactivation of Cryptosporidium oocysts with ozone, *Water Research*, **36**(12), pp. 3141-3149.
- V. Camel, A. Bermond (1998) The use of ozone and associated oxidation processes in drinking water treatment, *Water Research*, **32**, pp. 3208-3222.
- Yuko Kitamaki, Ji-Ye Jin, Toyohide Takeuchi (2003) Determination of inorganic anions via postcolumn reaction with iodide in ion chromatography, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, **30**, pp. 1751-1757.