

Bacillus Subtilis Spores 불활성화 실험을 통한 오존, UV 공정의 소독 특성 평가

정연정 · 오병수 · 강준원[†]

연세대학교 환경공학부

Evaluation of Disinfection Characteristics of Ozone, UV Processes for Bacillus Subtilis Spores Inactivation

Yeon Jung Jung · Byung Soo Oh · Joon-Wun Kang[†]

Department of Environmental Engineering, Yonsei University, YIEST

(Received 25 April 2006, Accepted 13 June 2006)

Abstract

Ozone/UV combined process is an effective technique to enhance generation of OH radical which is non-selective and powerful oxidant. The objective of this study is to evaluate the inactivation rates of *B. subtilis* spores by three candidate processes (ozone alone, UV alone, ozone/UV combined processes) at 4 and 20°C and to investigate the effects of OH radical on inactivation of *B. subtilis* spores. On the UV alone process, required UV dosages for lag phase and 3-log inactivation of *B. subtilis* spores were determined as 8.9 mJ/cm² and 47 mJ/cm². However, the inactivation of *B. subtilis* spores didn't occurred beyond 4.5-log inactivation despite increasing UV dose. The inactivation of *B. subtilis* spores by ozone alone and ozone/UV combined process was investigated with ozone CT (Concentration of disinfectant × Contact time) concept. As a result, inactivation of *B. subtilis* spores by ozone/UV combined process was faster than by ozone alone, and especially CT_{lag} value which was required ozone CT value for lag phase was reduced in ozone/UV combined process. Inactivation of *B. subtilis* spores in the presence and absence of *t*-BuOH, OH radical scavenger, was investigated to evaluate effects of OH radical formed during ozone/UV combined process. We found that OH radical plays important roles on inactivation of *B. subtilis* spores.

keywords : *B. subtilis* spore, CT, Inactivation, OH radical, Ozone, UV

1. 서론

최근 들어 음용수에서 감염성 미생물에 의한 사고가 발생되면서 미국 및 유럽 등 세계 각국에서 이들 감염성 미생물을 제거하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 인체에 기생하는 병원성 원생동물의 경우, 물을 매개로 하여 전염되는데 최근 국내외 수계 환경에서 *Giardia lamblia* 및 *Cryptosporidium parvum*의 검출이 빈번히 보고되고 있다(김 등, 2000; 이 등, 2000; Fayer, 2004). 이러한 바이러스나 원생동물은 일반세균에 비해 최소 감염 농도가 낮아서 이들 미생물이 함유된 물을 섭취하였을 경우 낮은 농도로도 인체를 감염시켜 발열 및 설사 등 질병을 일으키며 특히, 이들 미생물에 의한 감염은 면역체계가 약한 어린이나 환자들을 사망에 이르게 하는 치명적인 결과를 초래할 수 있다(정, 2002). 더욱이 이들 원생동물의 인체감염에 대한 치료제가 개발되지 않은 상황이어서 정수처리 공정에서 적절한 처리가 필수적이다. 일반적으로 정수처리는 응집, 침전, 여과, 염소 소독 과정으로 실시되고 있는데 세균에 비해

크기가 큰 원생동물은 여과지에서 비교적 제거율이 높으나, 우리나라와 같이 여과처리를 하는 미국 정수장 처리수에서 *Cryptosporidium* oocyst, *Giardia* cyst의 검출이 보고된 바 있어(LeChevallier et al., 1995), 일반적인 정수처리 방법으로는 이들 원생동물을 안정적으로 제거하는데 한계가 있다. 또한 *Cryptosporidium* sp. 등 원생동물은 기존 정수처리과정에서 미생물 제어 목적으로 널리 사용되는 염소에 대해 강한 내성을 지니고 있고, 이들을 불활성화 시키기 위해 다량의 염소를 주입할 경우 HAAs, THMs 등 염소소독 부산물 생성의 우려가 있어 염소 소독 공정을 대체할 수 있는 정수 처리 공정에 대한 연구가 필요하다. 현재 미국 EPA는 지표수 처리 규정(LT2ESWTR: Long Term 2 Surface Water Treatment Rule)에서 *Cryptosporidium*의 검출 농도에 따라 각기 다른 불활성화율을 만족하도록 제시하고 있으며, 규정을 만족하기 위해 UV, 오존, 이산화염소 및 막여과 등 추가공정의 필요성을 언급하고 있다(US EPA, 2005).

본 연구에 적용된 오존/UV 공정은 오존과 UV의 각 단위공정을 조합한 기술로서 오존을 광분해하여 높은 산화력을 지닌 OH 라디칼을 높게 생성하며, 오존 산화 및 UV 조사에 의한 소독 효과와 유기물 제어를 동시에 수행할 수

[†] To whom correspondence should be addressed.
jwk@yonsei.ac.kr

있는 공정이다(강, 1999).

따라서 본 연구에서는 지표 미생물을 이용하여 오존/UV 혼합 공정, 오존 단독 및 UV 단독 공정 등 세 후보 공정들의 미생물 불활성화율을 비교 평가하였으며, 특히 오존/UV 혼합 공정에서 발생하는 OH 라디칼이 미생물 불활성화에 미치는 영향을 파악하였다. 또한 여름철 및 겨울철이 존재하는 국내 수 환경을 고려하여 20°C와 4°C에서 각 공정 별 미생물 불활성화 효율을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. *B. subtilis* spores의 배양 및 분석

현재 *Cryptosporidium* oocyst 및 *Giardia* cyst 등 원생동물을 분석하기 위해 PCR 기법, 탈포낭법, 감염시험법 및 생체 염색법 등 다양한 분석 기법이 개발되었다(Fricker et al., 1998; Jakubowski et al., 1996). 그러나 이러한 분석 기법들은 숙련된 분석 기술이 요구되고 분석에 비용이 많이 드는 단점이 있어 실 정수장에서 원생동물의 불활성화를 평가하는데 어려움이 있다(Fricker et al., 1998). 반면, Facile 등(2000)은 *B. subtilis* spores가 *Cryptosporidium* oocyst와 같이 단백질로 구성된 외벽이 세포를 둘러싸고 있어 오존 및 염소와 같은 소독제에 대한 내성이 크기 때문에 일정한 지체기를 지난 후 불활성화 되는 특징이 있으며 소독제에 대하여 *Cryptosporidium* oocyst와 유사한 소독능(CT value)을 가지고 있음을 보고하였고, Barbeau 등은 *B. subtilis* spores의 불활성화를 위한 염소 CT 값이 *Giardia* cysts와 유사하며, 온도 및 수질의 특성에 큰 영향을 받지 않아 정수처리 공정에서 *Giardia* cyst 등 원생동물의 평가 지표로 사용할 수 있음을 제시한 바 있다. 또한, *B. subtilis* spores는 *Cryptosporidium* oocyst 및 *Giardia* cysts에 비해 배양과 분석이 용이한 장점이 있어 *Cyprosporidium* oocyst 같은 원생동물에 대한 소독제의 소독 효과 평가 시 대체 미생물(surrogate microorganism)로 사용되었다(Cho et al., 2003; Larson et al., 2003). 따라서 본 연구에서는 *B. subtilis* spores (ATCC 6633)를 대상 평가 미생물로 선정하여 각 후보 공정별 불활성화율을 비교 평가하였다.

B. subtilis spores의 배양 및 정량은 Cho 등(2003)이 제시한 방법을 사용하였다. 멸균한 영양액배지(nutrient broth)에 접종시켜 24시간 동안 배양된 *B. subtilis*를 1/10로 희석한 영양평판배지(nutrient agar plate)에 접종시킨 후 37°C incubator에서 5일간 배양하여 5일간 spore를 형성시켰다. spore가 형성된 평판배지에 1 mM phosphate buffered saline (PBS, pH 7.2) 5 mL을 주입한 다음 긁어내어 균주를 회수한 후 50 kHz로 10 분 동안 초음파 분해하였다. 이 후 4500 ×g에서 10분간 원심 분리하여 상등액은 버리고, 증류수 10 mL을 넣어 3번 세척하였다. 이렇게 하여 얻은 pellet은 1 mM PBS에 현탁시켜 실험에 사용될 때까지 4°C 암실에 보관하였다. 현탁 용액은 살아있는 미생물을 멸균하기 위해서 불활성화 실험 직전에 80°C에서 10분 동안 열처리한 후 50 kHz로 10분간 초음파 분해하였다. 생

성된 *B. subtilis* spores의 농도는 영양평판배지에 접종시켜 37°C에서 24시간 배양한 후 평판배양법을 이용하여 측정하였다. 현탁 용액에 생성된 spores의 농도는 약 6×10^7 CFU/mL이었으며, 불활성화 실험 시 증류수 50 mL에 초기 농도가 약 6×10^5 CFU/mL이 되도록 주입하였다.

2.2. 오존/UV 장치를 이용한 *B. subtilis* spores 불활성화율 측정

본 연구에서는 오존 단독, UV 단독 및 오존/UV 혼합공정을 적용하여 *B. subtilis* spores의 불활성화율을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 장치를 구성하였다. Black box 안에 50 mL 석영관 반응기와 UV lamp (Voltarc UV LUX, 254 nm)를 설치하여 세 공정이 모두 같은 반응기에서 진행될 수 있도록 구성하였다. 또한, 세 공정에서 동일한 UV intensity가 조사되도록 하기 위하여 석영관이 놓인 위치에 UVX-25 radiometer (UVP Inc.)를 설치하여 UV intensity를 측정한다 다음, 0.1 mW/cm²의 intensity로 UV가 조사되도록 lamp를 고정하였다. 오존 단독 및 오존/UV 혼합 공정 적용 시에는 약 50 mg/L로 농축된 오존수를 초기 오존 농도가 2 mg/L이 되도록 반응기에 주입하였고, 반응 후 잔류되는 오존은 본 연구실에서 고안된 연속 측정 장치를 이용하여 indigo method로 연속 측정하였다(Hoigne et al., 1981). 또한, 오존 Quenching reagent인 0.01 N Na₂S₂O₃가 들어있는 tube에 1 mL씩 시료를 채취하였다. 오존 공정의 경우, 온도에 의해 영향을 받기 때문에 겨울철 및 여름철에 소독 효과를 평가하기 위해 대상 원수의 온도가 4°C, 20°C에서 수행하였고, pH는 7.2로 고정하였다. 또한, 10 mM의 tertiary-butylalcohol(*t*-BuOH)을 주입하여 오존/UV 공정에서 오존 분해 시 생성되는 OH 라디칼이 *B. subtilis* spores 불활성화에 미치는 영향을 평가하였다.

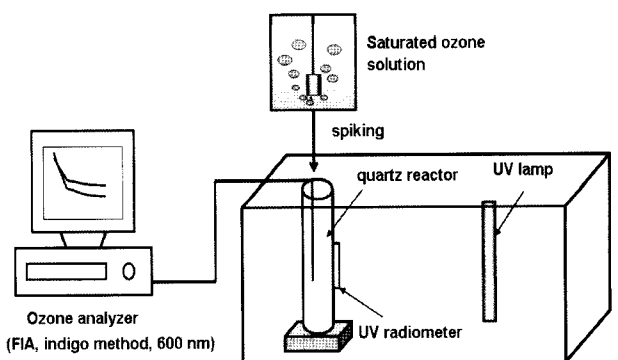


Fig. 1. Schematic diagram of ozone, UV processes.

3. 결과 및 고찰

3.1. UV 조사에 의한 *B. subtilis* spores 불활성화

Fig. 2에 UV 조사에 의한 *B. subtilis* spores의 불활성화율을 나타내었다. *B. subtilis* spores는 일반적으로 spores를 구성하고 있는 단백질에 의해 소독제에 대한 내성을 나타내며(Foegeding, 1985; Young et al., 2004), 대부분의 미생

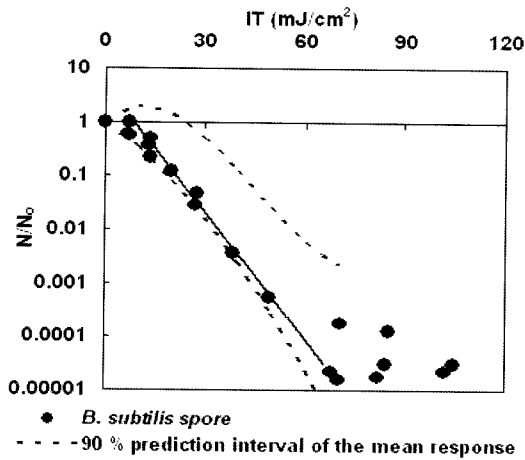


Fig. 2. Inactivation of *B. subtilis* spores by UV irradiation.
UV intensity: 0.1 mW/cm² pH 7.2, Temp. 20°C.

물의 경우 역시 불활성화에 일정한 지체기(lag phase)를 가진 후 의사일차반응 속도로 불활성화 되는 것으로 알려져 있다(Larson et al., 2003). 따라서 지체기를 고려하여 미생물 불활성화율을 개량적으로 평가하기 위해 다음과 같은 반응식을 이용하였다(Mysore et al., 2001; 이 등, 2004).

$$N/N_0 = \exp(-k(IT - IT_{lag})) \quad (1)$$

여기서 N , N_0 는 각각 미생물의 반응 전 후 농도(CFU/mL)를 나타내며, k 는 미생물 불활성화 속도, I 는 UV intensity로 N , N_0 , I , T 값을 식에 대입하여 k 값을 구한 후 직선을 연장시켜 X 절편(T_{lag} 값)을 구하였다. 또한 USEPA는 여러 연구 자료들을 종합하여 UV dose에 따른 *B. subtilis* spores의 불활성화율을 평가 시 참고자료로서 사용할 수 있도록 다음과 같은 식으로 90% 예측 구간을 제시하였는데(USEPA, 2003), 본 실험결과를 USEPA에서 제시한 *B. subtilis* spores의 불활성화율과 비교해 볼 때 전반적으로 본 연구 결과는 약 90% 신뢰 수준 범위에 포함되었다.

본 연구 결과, 불활성화 속도는 0.182 (min⁻¹)로 계산되었고, 지체 기간 동안 요구되는 UV 조사량인 IT_{lag} 는 약 8.9 mJ/cm²로 계산되었다. 즉, 이는 *B. subtilis* spores는 약 8.9 mJ/cm²의 에너지가 가해질 동안에는 불활성화되지 않으나 그 이상의 에너지가 가해질 때부터 불활성화되기 시작한다는 것으로 이는 UV 조사에 의해 *B. subtilis* spores를 불활성화시킬 경우 최소한 8.9 mJ/cm² 이상의 에너지가 필요함을 의미한다. 일반적으로 정수처리 공정에서의 원생동물 불활성화 목표기준인 3-log (99.9%) 이상 불활성화를 달성하기 위해서는 약 47 mJ/cm² 이상의 에너지로 조사해야 할 것으로 계산되었다. 또한, *B. subtilis* spores가 약 4.5 log 불활성화된 이후 UV 조사량이 증가하더라도 더 이상 *B. subtilis* spores가 불활성화 되지 않는 Tailing 현상이 관찰되었다. 아직까지 구체적으로 Tailing 현상에 관한 불활성화 메커니즘이 명확히 밝혀진 바는 없으나, Parker 등은 높은 UV 조사량에서는 불활성화 된 미생물 입자들이 UV 빛을 산란시켜 미생물의 불활성화를 방해하며, 하수 방류수에

서는 약 2 log 불활성화가 진행된 이후부터도 Tailing 현상이 일어날 수 있다고 보고하였다. 따라서 미생물 소독을 목적으로 UV 조사를 사용할 때 이러한 Tailing 현상을 방지하기 위한 방법을 고려해야 할 것으로 사료된다.

3.2. 오존 CT 값에 의한 ozone 단독 및 ozone/UV 공정 비교

일반적으로 적정 미생물의 사멸을 위해서 소독제와 소독제의 미생물 접촉에 필요한 시간에 대한 규정을 마련하고 있으며, 이를 소독제의 농도와 미생물의 소독제 접촉 시간을 곱한 개념인 CT 값으로서 규제하고 있다. 따라서 오존 CT 값으로서 오존 공정과 오존/UV 혼합 공정에서의 *B. subtilis* spores의 불활성화 정도를 비교하였다. 오존단독 및 오존/UV 혼합공정에서는 *B. subtilis* spores의 불활성화 정도를 개량적으로 평가하기 위해서 Delayed Chick-watson model 식 (1)을 이용하였다(Rennecker et al., 1999). Delayed Chick watson model은 CT 개념을 잘 따르기 때문에 실제 공정에 적용이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 모델에 사용된 CT 값은 FIA로 측정된 잔류 오존 농도와 접촉 시간 사이의 적분값으로 계산하였다.

$$\frac{N}{N_0} = \begin{cases} 1 & \text{if } CT \leq CT_{lag} \\ \exp[-k(CT - CT_{lag})] & \text{if } CT > CT_{lag} \end{cases} \quad (2)$$

- N_0 : 초기 미생물의 농도 (CFU/mL)
- N : 소독 처리 후 미생물의 농도 (CFU/mL)
- C : 소독제의 농도 (mg/L)
- T : 미생물과 소독제의 접촉시간 (min)
- T_{lag} : 지체기 동안 소독제와의 접촉시간 (min)
- k : 불활성화 속도 상수 (Lmg⁻¹min⁻¹)

Fig. 3에 두 공정별 4°C 및 20°C에서의 *B. subtilis* spores의 불활성화율을 나타내었다. 우선 오존 단독 공정과 오존/UV 혼합 공정을 오존 CT값에 따라 비교한 결과, 오존/UV 혼합 공정의 경우, 지체기 동안 소모된 CT값(CT_{lag})이 20°C에서 0.51 mg/L-min, 4°C에서 1.01 mg/L-min으로 나타났으며, 오존 단독 공정에서는 각각 1.24 mg/L-min(20°C), 1.76 mg/L-min(4°C)으로 계산되어, 오존/UV 혼합 공정을 적용하였을 때 오존 단독 공정에 비해 지체기 동안 소모되는 CT값(CT_{lag} 값)이 감소되는 것으로 관찰되었다. 또한, 오존/UV 혼합 공정의 경우, 오존 단독 공정과 비교하여 보았을 때, *B. subtilis* spores를 3-log 불활성화 시키는데 요구되는 CT 값을 수온이 20°C인 경우 27%, 4°C인 경우 최대 40%까지 감소시켜, 오존/UV 혼합 공정이 오존 단독 공정에 비해 수온의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 미생물의 경우 수온의 영향을 크게 받아 온도가 낮아질수록 지체기가 증가하며, 미생물의 불활성화률이 감소하는 것으로 알려져 있다(Larson et al., 2003). 따라서 겨울철이 존재하는 국내 수 환경에서 오존/UV 혼합 공정은 오존 단독 공정에 비해 미생물의 소독 효율을 향상시키는데 유용할 것으로 사료된다.

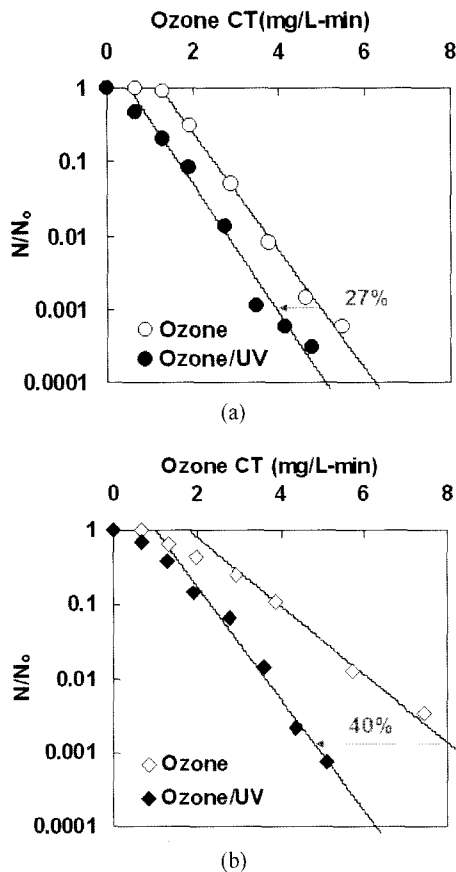


Fig. 3. Comparison of *B. subtilis* spores inactivation between ozone, ozone/UV process by CT value: (a) Temp. 20°C, (b) Temp. 4°C, ozone dose: 2 mg/L, UV intensity: 0.1 mW/cm², pH 7.2.

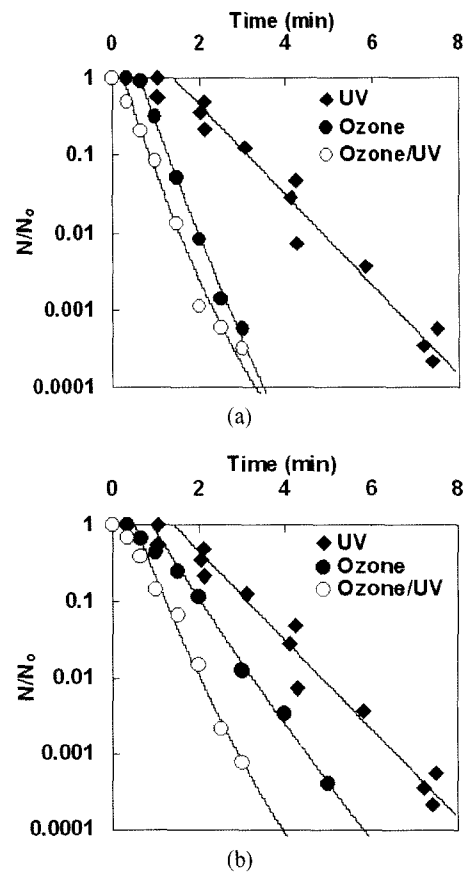


Fig. 4. Comparison of *B. subtilis* spores inactivation among ozone, UV and ozone/UV processes: (a) Temp. 20°C, (b) Temp. 4°C, ozone dose: 2 mg/L, UV intensity: 0.1 mW/cm², pH 7.2.

3.3. 세 공정 별 *B. subtilis* spores 불활성화율 비교

오존 단독 및 UV 단독 공정과 오존/UV 혼합 공정이 *B. subtilis* spores의 불활성화에 미치는 영향을 비교하기 위해 접촉 시간에 따른 불활성화율을 비교하였다(Fig. 4). 각 공정별 *B. subtilis* spores를 3-log 불활성화 시키는데 소요되는 시간을 살펴보면 수온이 20°C인 경우, UV 단독 공정에서는 0.1 mW/cm²의 intensity로 UV를 조사하였을 때, 약 7분의 조사 시간이, 오존 단독 공정 및 오존/UV 혼합 공정에서는 각각 2분 30초 및 2분의 반응 시간이 소요되었다. 4°C에서는 UV 조사 시 7분, 오존 및 오존/UV 혼합 공정에서는 각각 4분 30초 및 3분의 반응 시간이 소요되었다. 본 결과를 종합하여 보았을 때, 그림에서와 같이 불활성화 속도 역시 오존/UV 혼합공정 > 오존단독 공정 > UV 단독 조사 순으로 오존/UV 혼합 공정이 가장 빠르게 나타났다. 또한, 오존 및 UV 단독 공정에서 각각의 불활성화 효율 합하여 오존/UV 혼합 공정과 비교하였다. 그 결과, 오존/UV 혼합 공정에서 두 단독 공정보다 *B. subtilis* spores가 더 빠르게 불활성화되어 반응 시간을 단축시키는 것으로 나타났다.

3.4. OH 라디칼의 영향

t-BuOH은 OH 라디칼의 scavenger로 알려진 물질로서 과량의 *t*-BuOH이 존재할 경우, OH 라디칼과 빠르게 반응하

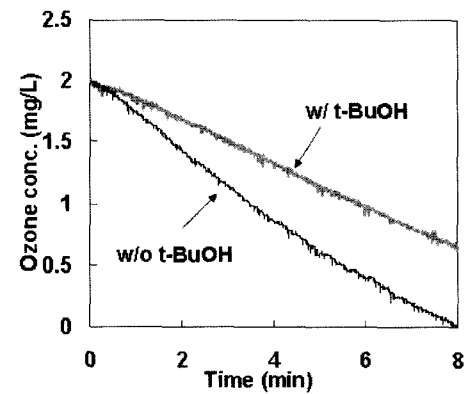


Fig. 5. Decomposition of ozone by Ozone/UV process in presence and absence of *t*-BuOH: ozone dose: 2 mg/L, UV intensity: 0.1 mW/cm², [*t*-BuOH]₀: 10 mM, Temp. 20°C, pH 7.2.

여 OH 라디칼의 생성을 억제한다(Stachelln et al., 1985). 따라서 OH 라디칼이 *B. subtilis* spores의 불활성화에 미치는 영향을 간접적으로 평가하기 위하여 10 mM *t*-BuOH을 주입한 후 불활성화 실험을 수행하였다. Fig. 5는 오존/UV 혼합 공정 적용 시 *t*-BuOH 첨가 유무에 따른 오존 분해곡선을 나타낸 그래프이다. 그림에서와 같이 *t*-BuOH을 주입하였을 경우 상대적으로 오존 분해 속도가 느려졌으며, 이러한 결과는 오존이 분해되면서 생성되는 OH 라디칼과 과

량의 *t*-BuOH이 빠르게 반응하여 OH 라디칼의 생성을 억제시킴으로써 OH 라디칼에 의한 오존 분해를 방해하였기 때문에 설명할 수 있다.

Fig. 6은 *t*-BuOH 주입 유무에 따른 *B. subtilis* spores의 불활성화율을 오존 CT로 비교한 그래프이다. 3-log (99.9%) 불활성화를 수행하기 위해 요구되는 오존 CT 값이 *t*-BuOH이 존재할 경우 5.02 mg/L-min인 것에 반해 *t*-BuOH을 주입하지 않은 조건에서는 3.94 mg/L-min으로 *t*-BuOH이 존재하는 조건에 비해 적게 나타났다. 앞서 말한 바와 같이 *t*-BuOH이 존재할 경우 OH 라디칼의 생성이 억제되며 따라서 이러한 결과는 OH 라디칼이 *B. subtilis* spores를 더 빠르게 불활성화 시키는 데 중요한 역할을 함을 간접적으로 나타낸 결과이다. 특히, Delayed Chick-watson 모델에 유추하여 CT_{lag} 값을 계산한 결과, *t*-BuOH이 존재하는 조건과 그렇지 않은 조건에서 각각 1.01 mg/L-min, 0.51 mg/L-min로 OH 라디칼은 소독제를 주입한 후 반응 초기에 지체기를 감소시킨다는 것을 알 수 있었다. 이는 또한, 동일한 제거율 (log reduction)을 목표로 할 때, 상대적으로 적은 양의 오존 CT가 필요함을 의미한다. 오존/UV 혼합 공정의 경우 UV 조사에 의해 오존이 빠르게 분해되면서 오존 단독 공정에 비해 상대적으로 많은 양의 OH 라디칼을 생성시킬 수 있다는 장점이 있다. 따라서 오존 단독 공정에 비해 OH 라디칼의 생성 효율이 높은 오존/UV 혼합 공정은 *B. subtilis* spores를 불활성화 시키는 데 시너지 효과를 나타낼 수 있을 것으로 사료된다.

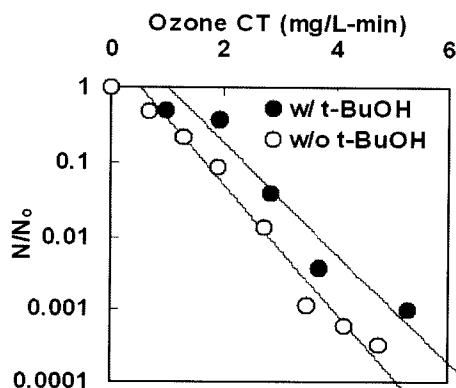


Fig. 6. Inactivation of *B. subtilis* spores by Ozone/UV process in presence and absence of *t*-BuOH; ozone dose: 2 mg/L, UV intensity: 0.1 mW/cm², [*t*-BuOH]: 10 mM Temp. 20°C, pH 7.2.

4. 결론

본 연구에서는 지표 미생물로 사용되는 *B. subtilis* spores를 이용하여 오존/UV 혼합 공정과 오존 단독 및 UV 단독 공정에서의 미생물 불활성화율을 비교 평가하고, 중간 생성물로 생성되는 OH 라디칼이 미생물 불활성화에 미치는 영향을 관찰하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) UV 조사에 의한 *B. subtilis* spores 불활성화 평가결과, 불활성화 속도는 0.182 (min⁻¹), 지체 기간 동안 요구되

는 UV 조사량인 IT_{lag}는 약 8.9 mJ/cm²로 나타났으며, 일반 정수처리 시 불활성화 목표치인 3-log 불활성화를 위한 IT 값은 47 mJ/cm²였다. 또한 4.5-log 불활성화 이후 더 이상 불활성화가 일어나지 않는 Tailing 현상이 관찰되었다. 본 실험결과는 USEPA에서 제시한 *B. subtilis* spores의 불활성화율과 비교하여 약 90% 신뢰 수준 범위에 포함되었다.

- 2) 오존 단독 공정과 오존/UV 혼합 공정을 오존 CT값에 따라 비교한 결과, 오존/UV 혼합 공정의 경우, 지체기 동안 소모된 CT값 (CT_{lag})이 20°C에서 0.51 mg/L-min, 4°C에서 1.01 mg/L-min으로 나타났으며, 오존 단독 공정에서는 각각 1.24 mg/L-min (20°C), 1.76 mg/L-min (4°C)으로 계산되어, 오존/UV 혼합 공정을 적용하였을 때 오존 단독 공정에 비해 지체기 동안 소모되는 CT값 (CT_{lag} 값)을 감소시키는 것으로 관찰되었다. 또한 오존/UV 혼합 공정이 오존 단독 공정에 비해 수온의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다.
- 3) 접촉 시간에 따른 세 공정 별 *B. subtilis* spores의 불활성화율을 비교한 결과, 오존/UV 혼합공정 > 오존단독공정 > UV 단독 조사 순으로 오존/UV 혼합 공정에서 *B. subtilis* spores가 가장 빠르게 불활성화되어 반응 시간을 단축시키는 것으로 나타났다.
- 4) 오존/UV 혼합 공정에서 생성되는 OH라디칼이 *B. subtilis* spores의 불활성화에 미치는 영향을 살펴보기 위해 OH 라디칼 scavenger 인 *t*-BuOH의 첨가 유무에 따른 *B. subtilis* spores의 불활성화를 관찰한 결과, *t*-BuOH을 첨가하지 않은 경우 첨가한 조건에 비해 지체기 (lag phase)가 감소하였다. 이러한 결과로 상대적으로 OH 라디칼의 생성효율이 높은 오존/UV 혼합 공정을 사용할 경우 각 단일 공정에 비해 시너지 효과를 기대할 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10250-0)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 강준원, 고도산화기술(AOT: Advanced oxidation technology)의 수 처리 응용, *대한화학회지*, **39**(6), pp. 35-42 (1999).
- 김혜선, 윤제용, 염철민, 국내 상수원수 및 하수에서 *Cryptosporidium*과 *Giardia* 포낭 검출, *한국물환경학회지*, **16**(5), pp. 585-594 (2000).
- 이경철, 채선하, 임재림, 최재현, 안효원, 정수 처리를 위한 *Bacillus subtilis* spores의 자외선 소독 특성 평가, *대한환경공학회지*, **26**(12), pp. 1389-1394 (2004).
- 이목영, 김도영, 조은주, 이의광, 오세종, 이채근, 하영철, 1623방법에 의한 서울시 상수도계통의 지아디아 및 크립토스포리디움 검출, *한국물환경학회지*, **16**(5), pp. 595-608 (2000).

- 정현미, 수돗물의 미생물 관리, 모니터링인가, 처리인가, *한국물환경학회지*, **18**(3), pp. 229-235 (2002).
- Barbeau, B., Boulos, L., Desjardins, R., Coallier, J. and Prévost, M., Examining the Use of Aerobic Spore-forming Bacteria to Assess the Efficiency of Chlorination, *Water Res.*, **33**(13), pp. 2941-2948 (1999).
- Cho, M., Chung, H. M. and Yoon, J. Y., Quantative Evaluation of the Synergistic Sequential Inactivation of *Bacillus Subtilis* Spores with Ozone Followed by Chlorine, *Appl. Environ. Micro.*, **37**(10), pp. 2134-2138 (2003).
- Facile, N., Barbeau, B., Prévost, M. and Koudjonou, B., Evaluating Bacterial Aerobic Spores as a Surrogate for *Giardia* and *Cryptosporidium* Inactivation by Ozone, *Water Res.*, **34**(12), pp. 3238-3246 (2000).
- Fayer, R., *Cryptosporidium*: A water-borne Zoonotic Parasite, *Veterinary Parasitology*, **126**(1/2), pp. 37-56 (2004).
- Foegeding, P. M., Ozone Inactivation of *Bacillus* and *Clostridium* Spores and the Importance of the Spores Coat to Resistance, *Food Micro.*, **2**, pp. 123-134 (1985).
- Fricke, C. and Clancy, J., Crypro's Protocol Prospects, *Water Quality international.*, **5-6**, pp. 11-14 (1998).
- Hoigne, J. and Bader, H., Determination of Ozone in Water by the Indigo Method, *Water Res.*, **15**(4), pp. 449-456 (1981).
- Jakubowski, W., Boutros, S., Fayer, R., Ghiorse, W., Lechevallier, M., Rose, J., Schaub, S., Singh, A. and Stewart, M., Environmental Methods for *Cryptosporidium*, *J. Am. Water Works Assn.*, **88**, pp. 107-121 (1996).
- Larson, M. A. and Mariñas, B. J., Inactivation of *Bacillus Subtilis* Spores with Ozone and Monochloramine, *Water Res.*, **37**, pp. 833-844 (2003).
- Lechevallier, M. W. and Norton, W. D., *Giardia* and *Cryptosporidium* in Raw and Finished Water, *J. Am. Water Works Assn.*, **87**(9), pp. 54-60 (1995).
- Mysore, C., Benoit, B., Joan, R., Debra, H. and Michele, P., A Bench-scale Study to Evaluate the Impact of Water Quality Parameters on the Inactivation of Microbes in Water Treatment, *In proceedings of the AWWA ACE*, Washington, D.C. pp. 1-14 (2001).
- Parker, J. A. and Darby, J. L., Particle-associated Coliform in Secondary Effluents: Shielding from Ultraviolet Light Disinfection, *Wat. Environ. Res.*, **67**(7), pp. 1065-1075 (1995).
- Rennecker, J. L., Marinas, B. J., Rice, E. W. and Owens, J. H., Inactivation of *Cryptosporidium Parvum* Oocysts with Ozone, *Water Res.*, **31**(11), pp. 2481-2488 (1999).
- Stahelln, J. and Hoigne, J., Decomposition of Ozone in Water in the Presence of Organic Solutes Acting as Promoters and Inhibitors of Radical Chain Reactions, *Environ. Sci. Technol.*, **19**(12), pp. 1206-1213 (1985).
- USEPA, National Primary Drinking Water Regulations: Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule, [EPA-HQ-OW-2002-0039], pp. 83-87 (2005).
- USEPA, Ultraviolet Disinfection Guidance Manual, EPA 815-D-03-007, pp. 338-339 (2003).
- Young, S. B. and Setlow, P., Mechanisms of *Bacillus Subtilis* Spores Resistance to and Killing by Aqueous Ozone, *J. Appl. Micro.*, **96**, pp. 1133-1142 (2004).