

## 펄스 UV 램프를 이용한 미생물 소독 및 2-MIB 제거 특성

### Characteristics of Disinfection and Removal of 2-MIB Using Pulse UV Lamp

안영석 · 양동진\* · 채선하\*\* · 임재림\*\* · 이경혁\*\*†

Young-Seog Ahn · Dong-Jin Yang\* · Seon-Ha Chae\*\* · Jae-Lim Lim\*\* · Kyung-Hyuk Lee\*\*†

한국수자원공사 전남지역본부 · \*그린엔텍(주) · \*\*한국수자원공사 수자원연구원

(2008년 12월 29일 접수 ; 2009년 2월 11일 수정; 2009년 2월 12일 채택)

#### Abstract

The characteristics of disinfection and organic removal were investigated with pulse UV lamp in this study. The intensity and emission wavelength of pulse UV Lamp were compared with low pressure UV lamp. The emission spectrum range of pulse UV lamp was between 200 and 400 nm while the emission spectrum of low pressure UV lamp was only single wavelength of 254nm.

3 Log inactivation rate of *B. subtilis* spore by pulse UV and low pressure UV irradiation was determined as 44.71 mJ/cm<sup>2</sup> and 57.7mJ/cm<sup>2</sup>, respectively. This results implied that wide range of emission spectrum is more effective compared to single wavelength emission at 254nm. 500ng/L of initial 2-MIB concentration was investigated on the removal efficiency by UV only and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process. The removal efficiency of UV only process achieved approximately 80% at 8,600 mJ/cm<sup>2</sup> dose. 2-MIB removal rate of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (5 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) process was 25 times increased compared to UV only process. DOC removal efficiency for the water treatment plant effluent was examined. The removal efficiency of DOC by UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> was no more than 20%. Removal efficiency of THMFP(Trihalomethane Formation Potential), one of the chlorination disinfection by-products, is determined on the UV irradiation and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process. Maximum removal efficiency of THMFP was approximately 23%. This result indicates that more stable chemical structures of NOM(Natural Organic Matter) than low molecule compounds such as 2-MIB, hydrogen peroxide and other pollutants affect low removal efficiency for UV photolysis. Consequently, pulse UV lamp is more efficient compared to low pressure lamp in terms of disinfection due to it's broad wavelength emission of UV. Additional effect of pulse UV is to take place the reactions of both direct photolysis to remove micro organics and disinfection simultaneously. It is also expected that hydrogen peroxide enable to enhance the oxidation efficiency on the pulse UV irradiation due to formation of OH radical.

**Key Words** : Pulse UV, Disinfection, 2-MIB

**주제어** : 펄스 자외선, 소독, 2-MIB

## 1. 서론

오존 및 UV 소독은 바이러스, 박테리아, 원생동물 등에 대해 효율적이고 신뢰할 수 있는 방법으로, 2003년 미국 환경보호청(US-EPA)에 의해 *Cryptosporidium* 및 *Giardia* 소독의 최적방법(BAT)으로 인정되었다(US-EPA, 2004). 반면 현재 우리나라 상수도분야에서 오존의 경우 고도처리 공정으로 도입된 곳이 있으나, 국내 법규상 세부적인 소독능에 대한 기준이 미흡하여 UV 소독공정은 도입된 곳이 없는 실정이다.

UV 소독공정은 원생동물의 불활성화를 위해 적용할 수 있는 처리공정으로서 막여과, 오존공정과 비교하여 가장 경제적이며, 부지면적을 최소화 할 수 있는 공정으로 평가 받고 있다. 따라서 UV 소독공정의 국내 정수처리 적용에 대한 검토가 시급한 실정이며, 향후 실제 적용을 위한 충분한 연구가 필요한 실정이다. 일반적으로 수처리에 적용될 수 있는 UV 종류에는 저압램프, 중압램프, 펄스 램프가 있으며, 특히 저압램프 및 중압 램프의 경우 현장 적용 실적이 많고 효율평가 등에 대한 연구도 많이 진행되어 왔다(Malley, 1996).

반면 펄스 UV 램프는 강한 에너지를 방출하기위해 일반 220V의 전압을 받아 Power Supply에서 출력 에너지를 저장하였다가 순간 방출하여 상대적으로 높은 에너지가 순간 방출되는 원리를 이용하고 있다. 따라서 Power supply에 출력에너지를 저장하는 시간과 방출하는 시간의 간격이 수십~수백  $\mu$ s 단위로 상당히 짧은 시간동안 에너지의 저장과 방출이 반복된다. 이 램프는 Xenon이나 Krypton 기체가 충전 되어 있어 램프 내에서 UV의 재흡수 현상이 없고 앞서 언급한 바와 같이 에너지의 저장과 방출의 반복으로 인해 짧은 시간동안 순간적으로 고출력의 UV를 발생시키기 때문에 200~320nm의 빛을 충분히 낼 뿐만 아니라 에너지 측면에서도 계속해서 높은 전력을 공급해야하는 연속방전 램프들에 비해 효율이 훨씬 높고 유효투과 거리도 긴 장점이 있다. 하지만 최근 개발된 Pulse 방식의 고출력 UV 램프는 현재 연구 개발 단계이며, 이에 대한 효율평가는 전무한 실정인어서 원생동물에 대한 효율평가가 필요하다. 또한 기존의 저압 및 중압 UV 램프에서 제어가 불가능한 유기물의 분해 등의 부수적인 효과도 기대 할 수 있어 향후 UV 소독 공정에서 각광받을 기술 중의 하나로 예상되고 있다(양 and 박, 2006).

본 연구에서는 Pulse 방식의 UV 램프를 이용하여 저압 UV 램프와 비교하여 램프의 강도, 미생물의 소독 효율 그리고 맛, 냄새 유발 유기물질의 저감 효과를 평가하고 추가적으로 기존의 UV 조사공정에 과산화수소를 첨가하여 효율을 향상 시킬 수 있는 방법들을 평가하였다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1. 원수특성

일반적으로 자외선 소독 공정은 정수장 여과수를 대상으로 적용된다. 따라서 본 연구에서는 대청댐 원수를 이용하여 혼화-응집-여과-오존-활성탄공정으로 처리하는 수자원 연구원 상하수도 연구교육센터 내에 운영 중인 실증플랜트(2,000천톤/일 규모)의 여과수를 이용하였으며 원수특성은 Table. 1.과 같다.

Table. 1. Water quality for filtered water

Parameter	Value
Turbidity(NTU)	0.05
pH	7.14
Temperature(°C)	25.2
Alkalinity(mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	49

### 2.2. 실험장치 및 방법

펄스 UV 램프는  $\mu$ s 단위로 펄스 파장이 방출되도록 G사에서 자체 제작한 램프 및 Power supply를 이용하였다. 대상 시료에 정확한 자외선 조사량을 평가하기 위하여 반응기는 Fig. 1.에서와 같이 제작되었다. 자외선 램프와 대상 시료의 조사 강도를 일정하게 유지하기 위하여 램프와 수직으로 경통을 설치하여, 램프에서 발생된 자외선 에너지가 경통을 따라 수직으로 대상 시료에 조사되도록 설치하였다. 시료 조사 전에 램프의 정확한 강도를 측정하기 위하여 시료가 위치할 지점에서 자외선 파장의 각 파장별 자외선 강도를 측정할 수 있는 자외선 강도계(USB4000, Ocean Optics Spectrometer)를 이용하여 측정하였다. 대상 시료는 시료의 투과 깊이가 길어질 수록 에너지 전달 강도가 달라지므로 가능한 시료의 수심을 낮게 유지하면서, 경통을 통과하는 빛이 시료 전체에 조사되도록 Pyrex 재질의 100mL 용량의 Petridish를 사용하였다. 조사 시간동안 시료의 완전한 혼합을 위하여 Magnetic bar를 이용하여 시료를 교반하였다.

시료 채취는 동일한 강도의 자외선이 조사되는 일정 시간마다 채취하여 미생물 및 분석 대상 물질의 분석에 이용하였다.

### 2.3. 분석방법

소독 효율을 측정하기 위하여 사용된 지표 미생물은 자외선에 상대적으로 저항성이 큰 *Bacillus subtilis* spore를 이용하였다. 이들의 배양 및 분석 방법은 미국 EPA에서 제시한 방법

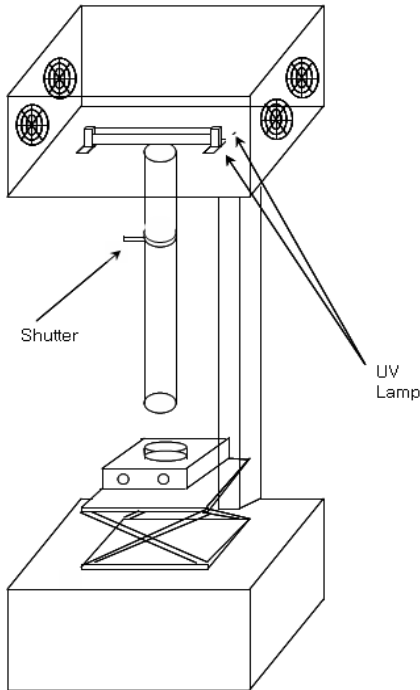


Fig. 1. Pulse UV Irradiation Device

에 비해 *Bacillus subtilis* spore 배양 시 기존의 Nutrient agar 의 농도를 10배 희석하여 사용하는 방법으로 수정하여 이용하였다(Cho et al., 2003). 이는 정수에서 대표적인 소독 부산물의 분석을 위하여 THMFP(Trihalomethane Formation Potential)을 정량 분석하였다. 대상 시료에 대해 염소 요구량을 측정한 후 염소 요구량의 1.5배에 해당하는 염소를 주입 한 후 25°C에서 7일간 암소에서 배양한 후 THMs를 측정하였다. THM분석은 Purge & Trap 전처리 장치를 이용하여 농축 한 후 GC(Gas Chromatography) FID 검출기를 이용하여 측정 하였다.

시료의 총 용존 유기물(Dissolved Organic Carbon)은 염소 산화방식의 유기탄소 분석 측정기(Shimadzu사 TOCV-CPH)를 이용하여 측정하였다.

맛, 냄새 물질로 알려진 물질 중 일반적으로 정수 처리 공정에서 처리가 어려운 2-MIB를 선정하여 제거 효율을 평가하였다. 이때 시료에 존재하는 2-MIB의 농도는 약 500ng/L가 되도록 하였으며, 정량적 분석은 SPME(Solid Phase Micro Extraction)법을 이용하여 GC/MS를 이용하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 자외선 강도 측정

일반적으로 사용되는 저압 자외선 램프의 경우 254nm

의 단파장만 방출되거나 펄스방식의 자외선 램프는 200nm - 400nm 영역의 자외선 에너지를 고르게 방출하게 된다. 본 연구에서는 강도계의 특성상 220- 400nm의 UV-C 영역에 해당하는 자외선 강도를 저압 수은 램프 및 펄스 UV 램프에 대해 측정 하였다. 측정 방법은 Fig. 1.에 언급한 자외선 조사장치를 이용하여 램프의 종류를 각각 저압, 펄스 램프로 운전했을 때 램프 거리별로 강도 및 파장을 분석하였다. 또한 램프와 강도계 사이를 공기 또는 물을 채운 후 각 조건별 자외선 조사 강도 및 파장을 비교 분석하였다.

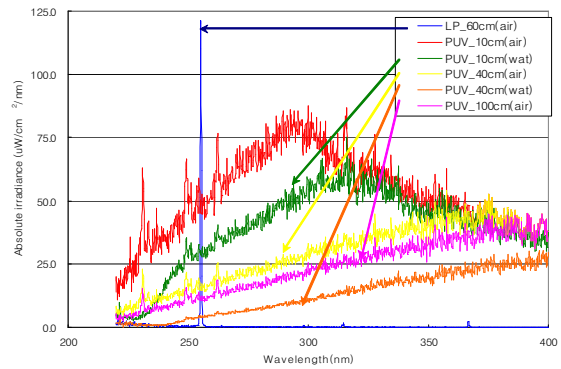


Fig.2. Comparison of UV Intensity spectrum for Low Pressure UV and Pulse UV Lamp

Fig. 2.에 나타난 바와 같이 저압 UV Lamp의 경우 알려진 바와 같이 254nm의 단일 파장만을 방출 하는 것을 볼 수 있었으며, 펄스 방식의 UV Lamp의 경우 다양한 파장의 자외선이 고루 방출됨을 알 수 있었다. 또한 측정 위치와 램프의 위치를 달리 하면서 강도 측정한 결과 자외선 에너지가 공기 또는 증류수를 통과하는 경우 거리가 증가함에 따라 에너지가 감소하는 경향을 나타내었다. 거리별 UV 에너지 강도에 대하여 일반 저압램프와 비교하여 다음 Fig. 3.에 나타내었다.

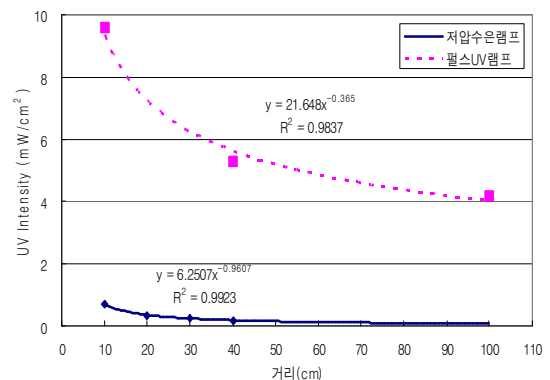


Fig. 3. UV Intensity with Regards to the Irradiation Distances.

앞선 결과에 근거하여 저압 수은 램프와 펄스 UV 램프의 강도를 비교해 보면 펄스 UV램프의 강도는 약 13.9 - 40배 가량 높은 자외선 에너지 강도를 방출 하는 것을 알 수 있었다. 또한 두 종류의 램프 모두 거리가 증가함에 따라 지수적으로 자외선 에너지 강도가 감소하는 것을 알 수 있었다.

### 3.2. B.subtilis 포자의 소독 효율 평가

B.subtilis 포자에 대한 UV 소독 효율의 정량적 평가는 다음과 같이 일반 소독공정에 적용되는 Chick-Watson식을 적용할 수 있으며 본 실험결과와 같이 미생물의 특성상 지체시간(Lag time)이 있는 경우 지체시간( $T_{lag}$ )을 고려한 다음의 Delayed Chick-Watson반응식을 이용할 수 있다. (이 등, 2004)

$$\text{Log}(N/N_0) = -k(IT - IT_{lag})$$

여기서 N은 미생물의 개수를 나타내며 k는 반응속도 상수, I는 자외선의 강도를 나타낸다. T는 접촉시간이며  $T_{lag}$ 는 Lag Time이다. I, T, N,  $N_0$ 값은 실험적으로 결정된 값이므로 시간별 미생물의 농도를 대입하면 미지의 변수 k값과  $T_{lag}$  값이 남는데 이를 Least Square Method를 이용하여 수치 해석적 방법으로 결정할 수 있다.

본 연구에서 사용된 펄스 UV 램프와 저압 UV 램프의 조사 강도는 각각  $9.58 \text{ mW/cm}^2$ ,  $0.14 \text{ mW/cm}^2$  인 조건에서 실험을 수행 하였다.

Fig. 4.에는 이러한 방법으로 계산된 펄스 UV와 저압 UV 램프에 의한 B. subtilis 포자의 불활성화 속도, k 값은  $5.6 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$  로 나타났으며 Lag time은 9.3 초로 나타났다. 즉 B. subtilis 포자의 3Log 불활성화를 위해 필요한 펄스 UV 조사량은  $44.71 \text{ mJ/cm}^2$  으로 계산되었다. 또한 저압 UV 램프의 경우 Fig. 4.에 나타난 바와 같이 불활성화 속도 및 지체시간은 각각  $1.6 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ , 29초로 나타났다. 따라서 B.subtilis 포자의 3 Log 불활성화를 위해 필요한 UV 조사량은  $57.7 \text{ mJ/cm}^2$ 으로 계산 되었다. 펄스 UV 조사와 저압 UV 조사에 대한 B.subtilis 포자의 불활성화율을 비교해 보면 펄스 UV에 대한 불활성화 속도가 다소 빠르고 지체 시간의 경우도 펄스 UV 램프의 경우 더 짧게 나타나는 것을 확인 하였다. 이러한 이유는 254nm의 단일 파장만 조사되는 저압 램프에 비해서 불활성화 효율에 더 높은 영향을 줄 수 있는 260nm부근의 파장도 다량 방출되기 때문으로 사료 된다. 결국 B.subtilis 포자의 불활성화의 경우 3 Log를 기준으로 볼 때 동일한 자외선 조사량( $\text{mJ/cm}^2$ )이 조사될 경우 1.3배 높은 효율을 나타내는 것으로 계산되었다. 따라서 동일한 에너지가 조사되더라도 254 nm의 단일 파장의

자외선보다 200-400 nm의 다파장의 자외선이 미생물의 불활성화에 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

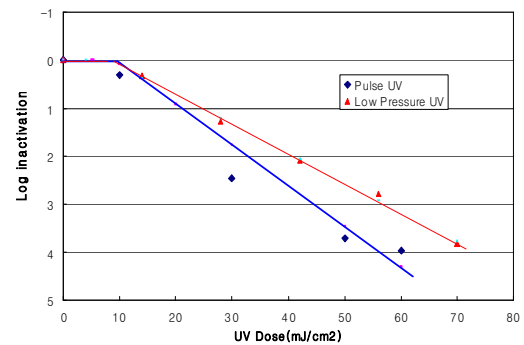


Fig. 4. Comparison of Inactivation Rate of B.subtilis Spore by Pulse UV and Low Pressure UV Irradiation.

### 3.3. 2-MIB 분해 특성

정수에서 대표적인 맛,냄새 물질로 알려진 Geosmin과 2-MIB중에서 일반적인 고도처리 공정(오존,활성탄)에서 상대적으로 제거가 어려운 2-MIB를 목표물질로 선정 하였다. 2-MIB의 자외선에 의한 조사는 자외선 에너지에 의한 직접적인 광분해와 자외선 조사 시 과산화수소가 존재할 경우 자외선에너지에 의해 과산화수소가 분해되면서 생성되는 OH라디칼과 2-MIB의 반응에 의한 분해 효과를 기대 할 수 있다.

이렇게 자외선에 의한 직접 반응과 과산화수소가 분해되어 생성된 OH라디칼에 의한 분해 속도를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{d[2MIB]}{dt} = k_{UV, MIB} + k_{OH} \cdot \cdot MIB \quad (1)$$

본 연구에서는 자외선 에너지 단독 공정에 의한 2-MIB의 분해 효과와 자외선과 과산화수소의 혼합공정에서 2-MIB 분해 효율을 비교 평가 하였다. Fig. 5.와 같이 자외선 단독 공정의 경우 펄스 UV 램프를 2-MIB의 농도가 약 500 ng/L인 정수장 여과수에서 조사할 경우  $8,600 \text{ mJ/cm}^2$  에너지 조사에서 80%정도 제거 되었으며, 약  $26,000 \text{ mJ/cm}^2$  이상의 에너지 조사에서 500ng/L의 2-MIB가 완전히 분해 됨을 알 수 있었다. 또한 펄스 UV 단독 공정에서 과산화수소의 농도를 각각 1,3,5 mg/L주입한 후 자외선 에너지를 조사했을 때 2-MIB의 제거 효율을 평가하였다. 초기 과산화수소 주입량이 증가할 수 록 2-MIB의 제거 속도가 증가함을 볼 수 있었다.

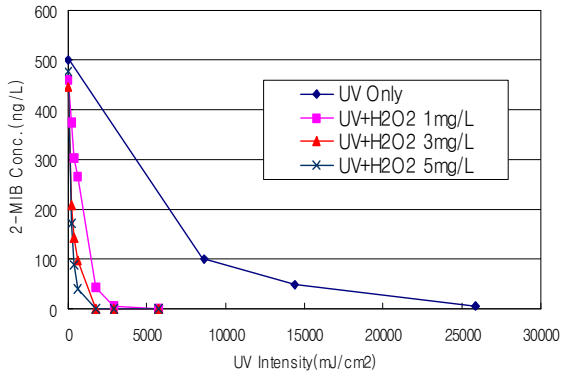


Fig. 5. 2-MIB Degradation by pulse UV/H<sup>2</sup>O<sub>2</sub> process

2-MIB의 제거속도를 결정하기 위해 1차 반응 속도식 으로부터 제거 속도를 계산하였다. Fig. 6.에 나타난 바와 같이 제거 속도를 정량적으로 평가한 결과 UV 단독 공정과 과산화수소를 첨가(1mg/L)했을 때 상승 효과는 8.8배가 되는 것을 알 수 있었다. 과산화수소의 주입 농도 5mg/L의 경우와 비교하면 과산화수소 주입에 의한 상승효과는 25배 정도가 되는 것으로 계산되었다. 앞서 제시한 식(1)에서 본 실험 조건에서 UV 단독에 의한 2-MIB 분해속도인  $k_{UV,MIB}$ 의 값은  $1.6 \times 10^3 \text{ sec}^{-1}$ 로 계산되었다. 따라서 과산화수소 1,3,5 mg/L 주입 시  $k_{OH,MIB}$ 의 값은 각각  $1.25 \times 10^2 \text{ sec}^{-1}$ ,  $2.32 \times 10^2 \text{ sec}^{-1}$ ,  $3.855 \times 10^2 \text{ sec}^{-1}$ 로 계산되었으며 Fig. 6.에 나타난 바와 같이 과산화수소의 주입농도와  $k_{OH,MIB}$ 의 속도는 비례적으로 증가하였다.

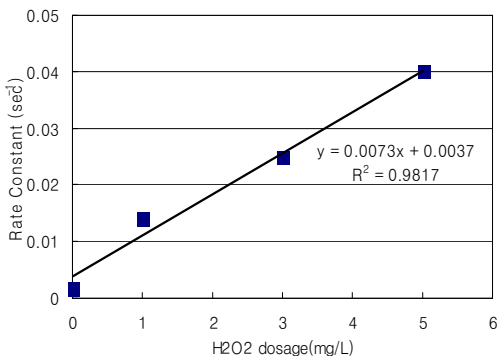


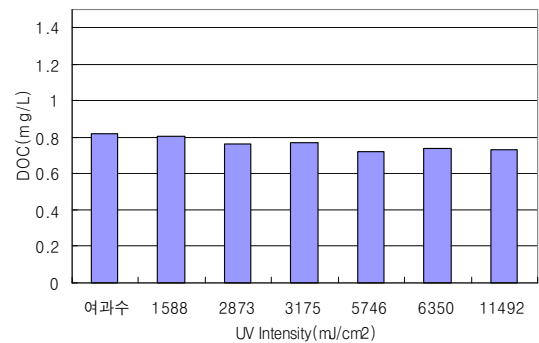
Fig. 6. Comparison of Reaction Rate of 2-MIB by Pulse UV Only and Pulse UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Process.

이렇게 과산화수소에 의한 상승효과가 높은 이유는 UV에너지가 과산화수소를 분해하여 강한 산화제인 OH라디칼을 생성시켜 UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 공정에서 2-MIB는 UV에너지에 의한

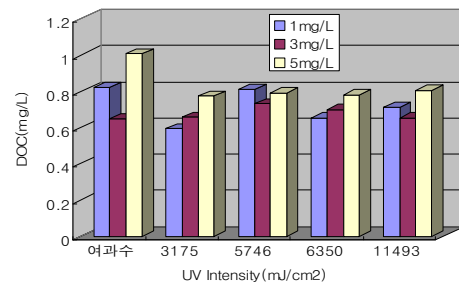
직접 분해와 동시에 식(1)에서 언급한 OH라디칼에 의한 간접 분해 반응이 동시에 일어나게 된다. 따라서 과산화수소 주입 시 2-MIB의 제거 효율이 상승되는 것으로 판단된다. 이와 유사한 연구를 조사해 보면 K, Linden et al.(2004)에 의해 수행된 연구에서 저압, 중압, 펄스 UV를 이용하여 대표적 농약류 인 Atrazine에 대한 분해 효율 평가에서 동일한 에너지 조사량에서 펄스 UV 램프에 의한 처리 효율이 제일 높게 나타났으며, 과산화수소 첨가 시 전체적으로 제거 효율이 상승하는 것으로 나타났다.<sup>4)</sup> 이는 본 연구에서 제시된 2-MIB의 제거 효율과 유사한 양상을 나타내는 것으로서, 펄스 UV 램프의 다파장의 방출로 인해 제일 높은 처리 효율을 보이는 것으로 판단된다.

### 3.4. 유기물(DOC)제거 효과

앞의 결과들을 바탕으로 펄스UV 조사의 경우 기존 저압 UV 램프에 비해 다양한 파장과 높은 에너지가 조사되므로 여과수에 존재하는 자연 유기물질(NOM)을 광분해하여 무기물화시킬 수 있을 것으로 예상되었다. Fig. 7.에는 DOC제거를 위하여 펄스 UV를 조사했을 경우, 펄스 UV 조사와 동시에 과산화수소 각각 1, 3, 5 mg/L를 추가 했을 경우 DOC의 제거 효율을 평가 하였다.



a) Pulse UV



b) Pulse UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Fig. 7. Removal Efficiency of DOC by Pulse UV and Pulse UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Irradiation.

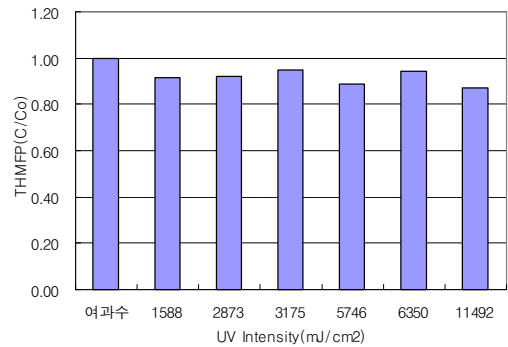
실험 결과에서 나타난 바와 같이 UV 조사량이 증가함에 따라 DOC의 제거율은 큰 변동이 없음을 알 수 있었다. UV 조사와 동시에 과산화수소 주입 시 발생하는 OH라디칼의 산화로 인해 추가적인 DOC의 제거율을 예상하여, Fig. 7. b)에 나타난 바와 같이 과산화수소의 농도를 1mg - 3mg/L 까지 증가 시켜도 약 20%내외의 제거율을 나타내었다. 따라서 UV 단독 공정이나 UV/과산화수소 공정에 의한 여과수의 DOC제거는 큰 효율이 없음을 알 수 있었다. 이는 UV 에너지나 OH 라디칼이 DOC와 반응하나 완전 무기물화(물과 이산화탄소)하지 못하고 DOC의 성상을 일부 산화시켜 DOC 농도 자체에는 큰 영향을 주지 않은 것으로 판단된다. Malley et al.(1995)등에 의하면 저압 UV 램프를 이용하여 여과수를 대상으로 200mJ/cm<sup>2</sup>의 에너지를 조사했을 때 AOC(Assimilable Organic Carbon)의 농도 변화가 없음을 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 현재까지 알려진 AOC 농도의 변화 평가에 적용된 200mJ/cm<sup>2</sup>의 에너지 이상으로 약 11.500mJ/cm<sup>2</sup>의 에너지를 조사하였으나, DOC 농도에는 큰 변화가 없는 것을 확인하였다.

### 3.5. 소독 부산물 생성능 제거 효과

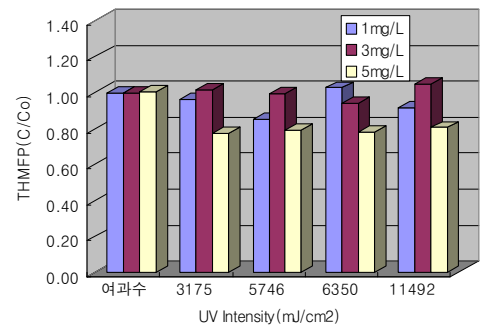
여과수에서 염소 소독부산물의 하나인 THM 생성능 (THMFP: Trihalomethane Formation Potential)의 UV에 의한 제거 효율을 평가 하였다. Linden et. al.(2004)에 의해 수행된 THMFP의 제거능 평가는 저압, 중압, 펄스UV 조사별 THMFP 제거 효율을 비교하였다. 조사량 4,935-5,244mJ/cm<sup>2</sup>에서 저압, 중압, 펄스 UV 조사 시 THMFP의 제거 효율은 각각 6-10% 범위 이내로 낮은 제거 효율을 나타내었다. 또한 제거 효율을 상승시키기 위해 과산화수소 100mg/L 주입시 THMFP의 제거 효율은 모든 종류의 램프에서 약 22-50%의 제거 범위를 나타내었다. 이때 램프별 제거 효율은 저압 램프의 경우 46%, 중압 램프의 경우 22-50%, 그리고 펄스 UV램프의 경우 33-44%로 나타나 다파장 자외선의 조사가 반드시 유기물 제거에 상승 효과를 미칠 수 있는 것은 아닌 것으로 나타났다.

본 연구에서도 Fig. 8.에서 나타난 바와 같이 펄스 UV 단독 조사의 경우 11,492mJ/cm<sup>2</sup>의 에너지 조사 범위까지 THMFP의 큰 제거 효율이 나타나지 않았다.

추가적으로 펄스 UV 조사와 함께 과산화수소의 농도를 1mg/L, 3mg/L, 5mg/L까지 동시에 주입 한 경우 Fig. 8. b)에서 볼 수 있듯이 THMFP의 제거 효율은 최대 약 23%로 펄스 UV 단독 공정에 비해 제거 효율은 다소 향상이 되었으나 높은 제거 효율을 나타나지 않은 것으로 관찰 되었다. 따라서 THMFP 역시 앞서 나타난 DOC제거 효율과 마찬가지로



a) Pulse UV



b) Pulse UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Fig. 8. Removal Efficiency of THMFP by Pulse UV and Pulse UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Irradiation.

지로 과산화수소의 첨가에 따라 약간의 제거 효율은 증가하였으나 크게 증가되지 않은 것으로 관찰되었다. THMFP 역시 DOC와 마찬가지로 시료에 조사된 UV 에너지와 과산화수소의 분해로 생성된 OH라디칼이 자연 유기물과 반응하나 완전히 산화 시키지 못하고 부분 산화되는 것으로 판단된다.

## 4. 결론

펄스 UV방식의 자외선 램프를 이용하여 강도 측정, 미생물 불활성화율, 맛냄새 물질 제거 효율, 유기물 제거율, 그리고 소독 부산물 제거 효율을 평가하였다. 또한 저압 자외선 램프와 비교 평가를 통하여 다음의 결론을 도출 하였다.

1. 펄스 UV 조사에 의한 *B.subtilis* 포자의 불활성화율을 조사하였다. 펄스 UV 조사에 의한 3 Log 불활성화에 필요한 조사량은 44.71mJ/cm<sup>2</sup>으로 계산되었으며, 저압 램프의 경우 57.7mJ/cm<sup>2</sup>의 에너지가 필요한 것으로 나타났다. 따라서 동일한 에너지일 경우 펄스 램프에서 방출되는 다양한 파장의 에너지가 저압 램프의 단파장보다 소독에 더 효과적

임을 알 수 있었다. 동일한 에너지 조사 시 펄스 램프의 에너지 효율은 저압 램프에 비해서 1.3배 높은 것으로 나타났다.

2. 대표적인 맛, 냄새 물질인 2-MIB의 초기농도가 약 500ng/L일 때 펄스 UV 램프에 의한 제거 효율을 저압 램프와 비교해 보고, 과산화수소 주입 시 UV 단독 조사 공정에 비해 상승 효과정도를 평가 하였다. 2-MIB의 펄스 UV 단독조사 시 약 8,600mJ/cm<sup>2</sup>의 조사량에서 약 80%의 제거 효율을 나타내었으나, 저압 램프에 의한 제거 효율은 전혀 나타나지 않았다. 펄스 UV 공정에 과산화수소를 1mg/L 첨가했을 때 상승효과는 8.8배가 되는 것을 알 수 있었다. 과산화수소의 주입 농도 5mg/L의 경우와 비교 하면 과산화수소 주입에 의한 상승효과는 25배 정도가 되는 것으로 계산되었다.

3. 여과수를 대상으로 유기물 제거 효율을 평가하기 위하여 DOC(Dissolved Organic Carbon) 농도를 자외선 조사 정도에 따라 평가하고, 과산화수소 주입량에 대한 상승효과를 평가 하였다. UV 단독 조사의 경우에 비하여 과산화수소 병용 주입의 경우 모두 초기 DOC 농도에 비해 최대 20% 정도의 저감 효과가 있었으나, 맛, 냄새 물질과 같이 큰 제거 효율을 보이지 않았다. 이는 맛, 냄새 물질에 비해 상대적으로 높은 DOC 농도에 의한 영향과 맛, 냄새 물질에 비해 안정정인 구조로 유지되고 있는 DOC물질의 구성 특성 때문으로 판단된다.

4. 펄스 UV에 의한 소독 부산물 생성능의 제어 효과를 살펴보기 위해 여과수의 THMFP(Trihalomethane Formation Potential)의 농도를 자외선 조사 정도 및 과산화수소 첨가량에 따라 비교 평가하였다. DOC제거 효율과 마찬가지로 THMFP의 최대 제거량은 최대 23% 정도로 나타났다.

실험결과로부터 다양한 파장이 방출되는 펄스 UV 램프는 단일 파장이 방출되는 저압 램프에 비해 소독 효율 측면에서 더 효과적인 것으로 나타났다. 저압 램프에 의해 제거가 어려운 2-MIB 역시 동일 에너지에서 펄스 UV의 처리 효율이

더 높은 것을 알 수 있었고, 또한 이러한 고출력, 다파장을 방출하는 펄스 UV램프의 특성에 의해 맛, 냄새 물질과 같은 유기물의 경우 과산화수소의 주입 시 제거 효율의 높은 상승 효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

## 사 사

본 연구는 환경부의 "차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)으로 지원받은 과제이며, 이에 감사사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 양동진, 박순호, UV를 기반으로 한 수처리 기술 동향(上), **첨단환경기술**, 8, 108-115(2006).
2. 이경혁, 채선하, 임재림, 최재현, 안효원, "정수 처리를 위한 *Bacillus subtilis* Spore의 자외선 소독 특성 평가," **대한환경공학회지**, 26(12), 1389-1394(2004).
3. 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. Microbiol.**, 37(10), 2134-2156(2003).
4. Karl G. Linden, Charles M. Sharpless, Susan Ansrew, Khalil Atasi, Vinod Korategere, Mihaela Stefan, and Mel Suffet., **Innovative UV Technologies to Oxidize Organics and Organoleptic Chemicals**, AWWARF(2004).
5. Malley, J. P., **Ultraviolet light disinfection technology in drinking water application an Overview**, EPA 881-R-96-002(1996).
6. U.S. EPA, **Ultraviolet Disinfection Guidance Manual**, EPA 815-D-03-007(2004).