

368.6[nm]를 최대방사 파장으로 포함한 자외선램프에 의한 대장균(E.coli)의 불활성화에 관한 연구

(A Study on Inactivation of E.coli through 368.6[nm] UV Irradiation Lamp)

장인성* · 이주훈 · 이진우**

(In-Soung Chang · Ju-Hun Lee · Chin-Woo Yi)

요 약

수처리 살균에 이용되는 자외선 소독은 기존 염소소독법의 문제점인 소독부산물 생성이 없어 실질적인 대안으로 널리 수행되고 있다. 본 연구에서는 368.6[nm] 자외선을 이용하여 소독에 대해 저항성이 강한 대장균(E.coli)의 불활성화 특성을 파악하고자 하였다. 실험에 사용한 자외선 소독 장비는 368.6[nm]의 파장을 방사하는 자외선 램프를 사용하여 제작하였으며 소독 반응조에서 시간에 따른 사멸 특성을 살펴보았다. 자외선으로 60분간 대장균을 조사하였을 때 초기 30분간은 자외선에 큰 영향을 받지 않았지만 30분 이후에 대장균이 점차적으로 사멸되어 60분이 경과하였을 때 83.3[%]의 사멸률을 보여서 일반적인 자외선 램프보다 살균효율이 미약한 것을 확인할 수 있었다. 또한 동력학적 접근방법으로 구한 비활성화율 계수 k값은 $0.00868[\text{cm}^2/(\text{mW} \cdot \text{s})]$ 로 나타났다.

Abstract

Disinfection using UV irradiation has been considered to an alternative for chlorination because it does not suffer from disinfection byproducts problem. The aim of this study was to verify if UV irradiation with 368.6[nm] wavelength has a potential to be used a efficient disinfection. UV irradiation was given for 60 minutes to E. coli. which was used as a model microorganism. Remarkable decrease in number of microorganism was not observed for initial 30 minutes, however, 83.3[%] of disinfection efficiency was achieved after 60 minutes of irradiation. Inactivation constant, k was determined to $0.00868[\text{cm}^2/(\text{mW} \cdot \text{s})]$ using kinetic approach.

Key Words : Disinfection, UV-A, E.coli

* 주저자 : 호서대학교 환경공학과 교수

** 교신저자 : 호서대학교 전기공학과 교수

Tel : 041-540-5655, Fax : 041-540-5693

E-mail : light@hoseo.ac.kr

접수일자 : 2008년 8월 12일

1차심사 : 2008년 8월 19일, 2차심사 : 2008년 12월 22일

3차심사 : 2009년 1월 5일

심사완료 : 2009년 7월 6일

1. 서 론

20세기 이후 먹는 물의 생산에 널리 이용되어 왔던 염소 소독은 강력한 살균력으로 인해 수인성 병원균을 사멸시키는데 효과적이었다. 또한 염소의 잔류성으로 인해 배수관망에서 미생물에 대한 안정성

을 유지할 수 있는 장점이 있다. 그러나 염소소독은 자연 상태에서 물속에 존재하는 휴믹산(humic acid)과 펠빅산(fulvic acid)과 같은 자연 유기물(NOM, Natural Organic Matter) 혹은 인위적으로 오염된 유기물질들과 반응하여 발암물질이거나 발암성이 의심되는 소독 부산물인 THMs(trihalomethane) 등을 생성시키는 문제점이 있다[1]. 따라서 염소 소독과 같은 화학적 처리 방법을 대신하여 자외선에 의한 살균이나 오존에 의한 화학적 처리 기술이 염소 소독의 대안으로 수행되고 있다.

그러나 오존은 잔류성이 없어 보조 소독제를 투입해야 하는 단점과 발암 물질인 브롬산염(bromate)이 생성되는 것으로 알려져 있어 이에 대한 연구가 진행되고 있다[2]. 이에 반해 자외선에 의한 살균 처리는 병원성 미생물을 살균시킬 뿐 아니라 유해한 부산물의 생성이 없어 1990년대 후반 들어서 급속히 관심이 증가되고 있는 소독 기술이다. 즉, 자외선을 이용한 소독법이 정수 처리에 있어서 염소 소독법을 대체하거나 보완할 수 있는 중요한 기술로 주목받고 있는 실정이다. 특히, 자외선에 의한 살균처리는 Cryptosporidium과 Giardia과 같은 병원성 원생동물을 비활성화 시키는데 걸리는 시간이 염소나 오존에 비해 단축될 수 있고 지속적이라는 점을 고려해 본다면 경제성이 있는 처리법으로 인정 받고 있다[3]. 자외선에 의한 살균처리는 염소나 오존 등 화학적 처리와 달리 온도에 크게 영향을 받지 않으며 소독 부산물을 발생시키지 않는 장점을 가지고 있어 정수 처리에서 그 사용이 증가하고 있다.

자외선에 의한 미생물의 불활성화는 미생물 내부의 RNA나 DNA의 광반응에 의한 손상 때문이다. 즉, 미생물의 외형이나 내부 충전물(내부기관)을 파괴시키는 전통적인 화학처리 방법이 아니라 미생물의 생식이나 기타 신진 대사를 조절하는데 밀접한 관계가 있는 DNA에 직접 작용함으로써 외견상으로는 미생물의 처리 유무를 파악할 수는 없다[4-5].

자외선에 의한 살균 처리는 저압 자외선램프(LP-UV, low pressure UV Lamp)와 중압 자외선램프(MP-UV, medium pressure UV lamp)로 분류된다. 저압자외선램프는 파장영역 253.7[nm]에서 설계 출력 85[%]의 자외선 방사량을 가지고 있고 중압자

외선램프는 200[nm]에서 700[nm]의 다양한 파장영역을 가지고 있다. 일반적으로 100~400[nm] 파장범위에 있는 자외선 전자스펙트럼 영역 중에서 살균 파장영역은 200~300[nm]으로 가장 살균력이 강한 파장은 260[nm]부근에서 발생한다[6]. 미생물의 불활성화에 사용되는 빛의 파장은 200~280[nm](UV-C)으로 살균선이라고 불리며, DNA와 단백질이 잘 흡수하는 파장이다. 특히, 253.7[nm]의 경우 DNA가 가장 잘 흡수하는 파장으로 살균력이 뛰어나 고도산화공정에서 사용되고 있다. 또한 자외선 파장 368.6[nm] 파장 범위에 있는 UV-A는 광촉매(TiO₂), photo-fenton과 같은 고도산화공정에서 널리 사용되고 있다[7].

위에서 언급한 바와 같이 368.6[nm]의 파장은 살균을 목적으로 사용되지 않는 것이 일반적이거나, 일부에서 368.6[nm]의 자외선을 살균용으로 사용할 수 있다는 주장이 제기되고 있어, 본 연구에서는 368.6[nm]에서 최대파장을 가지고 있는 자외선을 발생시켜 대장균 살균을 통해 어느 정도의 살균 처리 효과가 보장되는지 알아보았다.

2. 실험 방법

2.1 자외선 발생 장치

본 연구에서 사용한 램프의 방사 스펙트럼을 그림 1에 나타내었다. 실험에 사용한 자외선 램프는 253.7[nm]의 자외선 파장을 형광체를 사용하여 긴 파장의 자외선으로 변환하여 방사하는 메카니즘을 사용한 램프로서 방사의 최대치가 368.6[nm] 부근인 램프를 사용하였다. 자외선 장치를 장착한 소독 반응기는 직경이 50[mm]이고 높이가 350[mm]인 원형 유리관 내부에 UV 램프를 부착시켰다. 자외선이 외부에 노출되는 것을 방지하기 위해 알루미늄 포일을 이용하여 자외선 노출을 차단하였다. 또한, 미생물이 들어있는 시료의 용량은 300[ml]으로 하였다(그림 2). 자외선 조사 강도 (I)는 UV radiometer UM-10 (Minolta, Japan)를 사용하여 측정하였다.

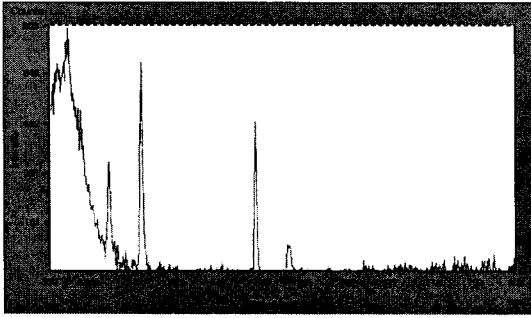


그림 1. 램프의 방사 스펙트럼
Fig. 1. A radiation spectrum of the UV lamp

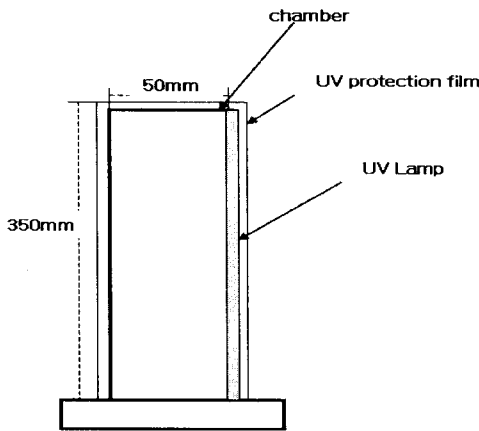


그림 2. 자외선 방사 소독기의 구성도
Fig. 2. Schematic of the UV irradiation chamber

2.2 대장균(E.coli)사멸 실험

일반적으로 대장균은 병원성 미생물에 비해 물속에서 오래 생존하며 소독에 대한 저항력이 강하고, 검출하기 쉬우며 검사 방법도 비교적 간단하기 때문에 대장균의 사멸률을 통하여 병원성 미생물에 의한 오염가능성을 쉽게 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 살균 대상이 되는 미생물을 대장균으로 선정하였다.

한국 중균협회(Korean Culture Center of Microorganism, KCCM)로부터 분양받은 ATCC 8739로 대장균 균주를 121[°C]에서 15분간 멸균된 Nutrient broth(DIFCO, USA) 용액에 접종한 후 32[°C]에서 24시간동안 배양하였다. 배양된 액체 배지는 대장균

의 농도가 높아 멸균된 생리 식염수(NaCl 0.85[%])를 이용하여 농도가 10^6 [CFU/ml]로 유지되도록 희석하였다. 희석된 시료를 원형 유리관 반응기에 주입한 후에 자외선을 조사하였다. 살균 실험은 1시간 동안 수행되었으며 10분마다 반응기 내의 용액을 1 [ml] 분취하여 Compact dry(Nisuu, Japan) 배지에 접종시켰다. 접종된 배지는 32[°C]에서 24시간동안 인큐베이터에서 배양하였고, 24시간 후에 배지 위에 생성된 집락을 계수하여 균체수를 파악하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시간에 따른 대장균 사멸률

그림 3은 자외선 조사 시간에 따른 대장균의 균체수 변화를 나타내었다. 자외선을 조사하지 않는 대조군(control)은 1시간이 경과하여도 균체수가 큰 폭으로 감소하지 않았다. 초기 균체수가 1.50×10^6 [CFU/ml]에서 1시간 경과 후에는 1.13×10^6 [CFU/ml]로 감소하였다. 이는 미생물의 먹이가 제한되어 있는 조건에서 균체수의 자연적인 감소로 볼 수 있다.

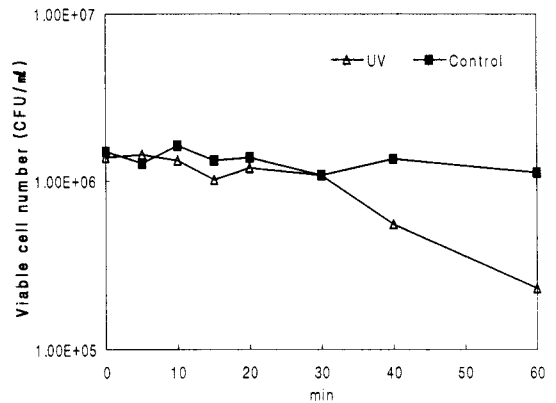


그림 3. 자외선 조사시간에 따른 대장균의 불활성
Fig. 3. Inactivation of E.coli by UV irradiation according to time

반면에 자외선을 조사한 경우는 균체수가 감소하였다. 초기 균체수는 1.38×10^6 [CFU/ml]이었다. 자외선 조사 후 30분이 경과한 후에는 1.09×10^6 [CFU/ml]로 감소하였고, 1시간이 경과한 후에는 0.23×10^6

[CFU/ml]로 감소하여 전체적으로 83.3[%]의 균체수 감소를 보였다. 특이한 점은 자외선 조사 후 30분이 경과할 때까지 큰 변화가 없다가 이후 급격한 균체수의 감소를 보인다는 점이다. 이는 염소를 이용한 소독 공정에서 발생하는 전형적인 지체 현상과 유사하다. 염소소독일 경우에는 수중에 존재하는 다양한 환원성 물질과 염소가 결합함에 따라 미생물 비활성화의 지체현상이 발생한다. 그러나 자외선 조사를 이용한 소독 공정에서는 화학반응이 수반되는 소독이 아니므로 이러한 지체현상이 염소소독의 그것과는 다른 메카니즘일 것으로 생각된다.

3.2 대장균 사멸에 따른 동력학적 고찰

본 연구에서 사용된 자외선 368.6[nm]의 소독 특성을 동력학적 관점(kinetic approach)에서 관찰하였다. 즉, 자외선 조사량에 따른 대장균의 비활성화 계수, k를 다음과 같은 방법으로 구하였다. 미생물 균체수의 소멸 속도는 자외선의 강도 (I)와 잔존하는 미생물 균체수(N)에 비례하고 전형적인 1차 반응(1st order reaction)에 따른다고 가정하면 다음 식 (1)을 얻을 수 있다.

$$\frac{dN}{dt} = -k \cdot I \cdot N \quad (1)$$

위의 식 (1)을 이항하고 정리한 후 적분하면 다음 식 (2)와 같이 임의의 시간 t에서 존재하는 미생물 균체수 N_t 에 관한 식을 얻는다. 즉, 식 (2)는 자외선 소독 시 시간에 따른 미생물의 균체수 변화를 표현하는 관계식이다[8].

$$N_t = N_0 \cdot e^{-k \cdot I \cdot t} \quad (2)$$

여기서,

N_t = 임의의 시간 t에서 존재하는 총 균체수,
 N_0 = 자외선 조사 전 존재하는 총 균체수 (time=0),
 k = 비활성화율 계수, [cm²]/([mW · s]),
 I = 용액에서의 평균 자외선조사 강도, [mW]/[cm²]
 t = 노출시간, s

식 (2)의 양변에 로그를 취하고 정리하면 다음 식 (3)과 같이 된다.

$$-\ln(N_t/N_0) = k \cdot I \cdot t \quad (3)$$

식 (3)에서 나타난 바와 같이 x축은 자외선 조사량과 조사시간을 곱한 $I \cdot t$ ([mW · sec]/[cm²]) 값으로, y축은 비활성화된 균체수비, $-\ln(N_t/N_0)$ 로 하여 데이터를 도식하여 그림 4의 그래프를 얻은 후에 직선의 기울기로부터 자외선 조사에 따른 대장균의 비활성화 계수, k 값을 구할 수 있다. 자외선 평균조사 강도, I는 2.521[mW]/[cm²] 로 측정되었고 이를 이용하여 그림 4의 기울기를 구한 결과 비활성화율 계수, k는 0.00868[cm²]/([mW · s])로 나타났다.

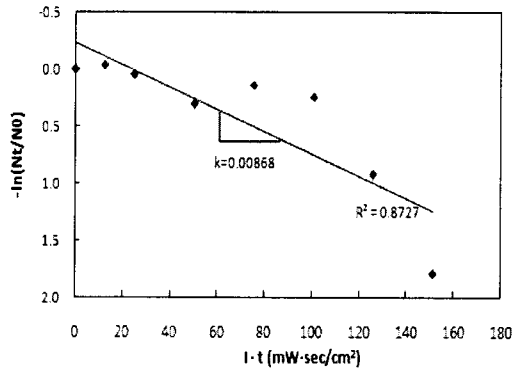


그림 4. 자외선 평균조사 강도와 시간의 곱의 함수로 나타난 대장균의 불활성화

Fig. 4. Inactivation of E.coli as a function of I · t (UV dose)

4. 결 론

본 연구에서는 368.6[nm] 파장의 자외선을 사용하여 수처리 살균 공정에 응용하고자 대장균의 불활성화 특성을 파악하였다. 초기균체수가 1.38×10^6 [CFU/ml]이었을 때 30분 동안은 대장균 사멸률의 큰 변화가 없었으나 1시간이 경과한 후 0.23×10^6 [CFU/ml]로 감소하여 전체적으로 83.3[%]의 사멸률을 나타내었다. 또한 자외선 368.6[nm]의 소독 특성을 동력학적 관점에서 관찰하여 자외선 조사량에 따른 대장균의 비활성화율 계수, k를 구한 결과, 자외선

조사량에 따른 대장균 비활성화 계수는 $0.00868 \text{ [cm]} / (\text{[mW} \cdot \text{s]})$ 로 나타났다. 기존의 소독 공정에서 널리 사용되고 있는 240[nm] 파장을 가지는 자외선 보다는 소독효율이 현저히 떨어지는 것으로 나타났다.

이 논문은 2008년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임(20080006).

References

- [1] 이석현, “수처리를 위한 자외선소독기술의 현황과 전망”, 한국물환경학회(2002).
- [2] 조민, 김지연, 윤재용, “UV조사(Ultraviolet Irradiation)에 의한 미생물의 불활성화”, 첨단 환경기술, 제 12권 제2호 통권 129호, pp 5-18, 2004.
- [3] 김윤희, 이철희, 이순화, “Ozone과 UV를 이용한 cryptosporidium의 불활성화 효과”, 대한환경공학회지, pp. 31-39, 2007.
- [4] USEPA, “Alternative disinfectants and oxidants Guidance manual”, 1999.
- [5] Paul A. Rochelle, Steve J. Upton, Beth A, “The response of cryptosporidium parvum to UV light”, TRENDS in Parasitology Vol. 21, No. 2, 2005.
- [6] 이진영, 김영태, 이태제, “국내하수처리장 자외선소독조 운영실태 및 기술동향”, 유체기계저널 제8권 제6호, pp. 82-89, 2005.
- [7] USEPA, “Ultraviolet disinfection guidance manual”, 2003.
- [8] Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering - Treatment and Reuse 4th. 2004, McGraw-Hill H. E.

◆ 저자소개 ◆

장인성 (張仁星)

1964년생. 1990년 서울대학교 공업화학과 졸업. 1992년 서울대학교 대학원 공업화학과 졸업(석사). 1996년 서울대학교 대학원 공업화학과 졸업(박사). 1996~1997년 한화그룹종합연구소 근무. 1997년~현재 호서대학교 환경공학과 교수.

이주훈 (李柱勳)

1982년 11월생. 2005년 호서대학교 환경공학과 졸업. 2007년 2월 호서대학교 대학원 환경공학과 졸업(석사). 2007 현재 호서대학교 BK21 융합대학원 반도체디스플레이공학과 박사과정.

이진우 (李鎭雨)

1961년 2월 4일생. 1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1984년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990년 3월~1994년 2월 (주)세명백트론 연구실장. 1994년 3월~현재 호서대학교 전기공학과 교수.