

자외선을 이용한 물 처리 시스템

UV Irradiation for Water Disinfection

채창훈 (Changhoon Chai)

강원대학교 동물생명과학대학 동물응용과학부

Department of Applied Animal Science, Kangwon National University

1. 서론

신체구성 성분 중 가장 큰 비중을 차지하는(신체 중량대비 약 60%) 물은(Kenefick, Chevront, Montain, Carter, & Sawka, 2012) 음용수, 신선식품 및 가공식품을 통해 섭취되고, 신선, 가공식품 및 식품가공시설의 세척 및 수세에 기본적으로 사용된다. 따라서 물의 미생물적 안전성은 식품위생 및 공공위생을 결정짓는다(EHEDG, 2007). 그러나 물은 취수과정 중 환경에 존재하는 미생물에 의해 불가피하게 오염된다. 따라서 물에 존재하는 미생물 제거, 불활성화, 파괴 처리는 공공위생과 식품전반의 미생물 안전성을 증진시키는 핵심요소이다(WHO, 2011).

음용수 및 식품은 전통적으로 가열에 의해 살균 처리되었다. 아마도 가열조리는 식품성분을 섭취에 유리한 구조로 변화시키고 동시에 식품 오염균을 제어하는 대표적 가열처리일 것이다. 미생물이 고온에 노출되면 미생물 구성 성분이 물리적, 화학적으로 변화하며, 이에 따라 미생물이 사멸 또는 불활성화 된다. 물에 오염되어 존재하는 오염균 역시 가열처리에 의해 효과적으로 불활성화 및 살균될 수 있다. 그러나 물 가열에 소요되는 에너지의 양과 물 가열 및 냉각에 소요되는 시간을 고려할 경우, 가열처리는 음용수 및 식품용수 처리에 적용되기에 경제적, 생산효율적 측면에서 적합하지 않다. 물의 미생물 안전성 향상을 위해 적용될 수 있는 비가열 처리기법으로는 화학적 소독제 첨가, 침전제를 이용한 응집 및 침전, 필터를 이용한 여과, 오존처리 및 자외선 조사 등을 꼽을 수 있다(NWRI, 2012; Pizzi, 2011; WHO, 2011). 수돗물로 사용되는 상수의 경우 일반적으로 염소 소독제 첨가, 응집 및 침전, 여과 및 오존처리 등의 일련의 처리과정을 통해 물의 미생물 안전성을 기하고 있다(Pizzi, 2011). 상수처리 시설에서 적용되는 일련의 비가열 처리는 물의 미생물 안전성을 보장하고 대량의 물 처리에 효율적인 반면, 대규모의 처리시설 구축을 요구함에 따라 소규모의 정수가 필요한 농가 또는 식품가공장에 사용되는 용수처리에 적용되기 어렵다(Stein, Achari, Langford, Dore, Haider, Zhang, et al., 2017). 다만 최소의 처리시설 구축을 필요로 하는 화학적 소독제 처리기법이 농가 및 식품산업시설 등에서 사용되는 소규모 급수시설에서 폭넓게 적용되고 있다(Dore, Singh,

*Corresponding author: Changhoon Chai
Department of Applied Animal Science, Kangwon National University,
Chuncheon 24341, Republic of Korea
Tel: +82-33-250-8641
Fax: +82-33-259-5574
Email: chchai@kangwon.ac.kr

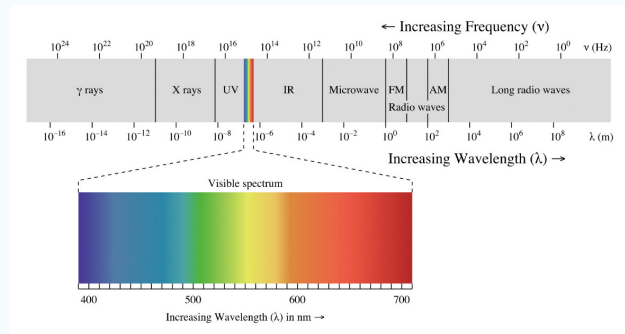
Khaleghi-Moghadam, & Achari, 2013). 살균효율 및 안전성, 경제성에 따라 화학적 소독제로써 염소계 소독제가 일반적으로 물 처리에 사용되고 있다. 그러나 염소계 화학물질은 우수한 살균효율을 나타내는 반면, 물에 첨가할 경우 물에 존재하는 유기물과 화학적으로 반응하여 트리할로메탄(클로로포름, 브로모다이클로로메탄, 다이클로로브로모메탄, 다이브로모클로로메탄, 클로로다이브로모메탄, 브로모포름 등)과 같은 독성물질을 형성함(Aieta & Berg, 1986)에 따라 화학적 소독제 처리기법을 대체할 수 있는 물 처리기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

다양한 형태의 비가열 처리기법 중 자외선 살균은 트리할로메탄과 같은 독성물질을 생성하지 않고 오염균을 효율적으로 제어하는 등 화학적 안전성과 미생물적 안전성을 동시에 꾀할 수 있음에 따라 자외선 조사를 이용한 물 처리기법에 대한 연구, 개발 및 적용이 활발하게 이루어지고 있다(NWRI, 2012; Song, Mohseni, & Taghipour, 2016). 현재 물 처리를 위한 다양한 형태의 자외선 살균기법이 개발되어 소규모의 정수 및 급수를 요구하는 식품가공장 및 급식시설 등에 보급되어 사용되고 있고, 최근 자외선 살균기법은 소규모 급수처리 시설 적용을 넘어 대규모의 상수처리시설에 적용되고 있다(Dotson, Rodriguez, & Linden, 2012). 더욱이 기존의 수은 및 할로젠 자외선 램프에 비해 에너지 효율이 뛰어나고, 현재까지 긴 수명을 나타내는 자외선 다이오드의 개발, 상용화 및 보급에 따라 향후 자외선 조사기법을 이용한 다양한 살균기법 개발이 기대된다(Song, Mohseni, & Taghipour, 2016). 본 글에서는 자외선 살균의 원리와 자외선 살균시스템의 구조 및 설계에 대해 논의함으로써 향후 식품 특히 식품용수의 미생물적 안전성 증진 기법 개발에 이바지하고자 한다.

2. 자외선 살균의 원리

자외선은 전자기파 스펙트럼의 보라색에 인접한, 가시광선과는 달리 육안으로 보이지 않는 약 10~400

그림 1. 전자기파 스펙트럼



(출처: 위키피디아 커먼스)

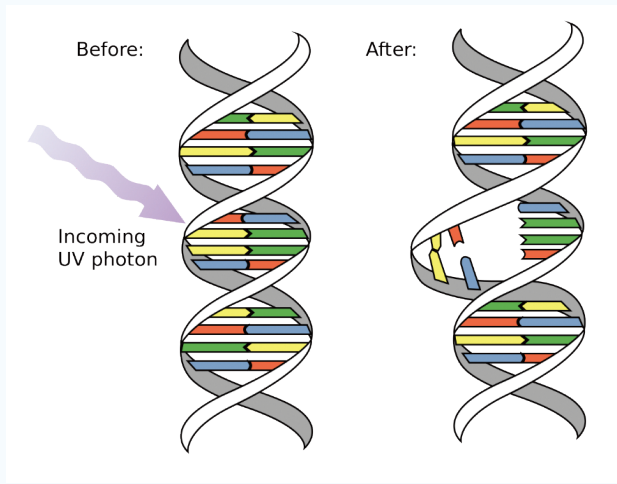
nm의 파장을 나타내는 전자기파이다(그림 1). 자외선은 파장에 따라 자외선 A(파장; $\lambda=315\sim400$ nm), 자외선 B($\lambda=280\sim315$ nm), 자외선 C($\lambda=100\sim280$ nm), 극자외선($\lambda=10\sim121$ nm)으로 구분된다. 자외선은 가시광선($\lambda=400\sim700$ nm)보다 짧고 엑스선($\lambda=0.01\sim10$ nm) 및 감마선($\lambda<0.01$ nm)보다 긴 파장을 나타내기 때문에 플랑크-아인슈타인 공식(공식 1)에 따라, 자외선 광자의 에너지는 가시광선의 에너지보다 높고 엑스선 및 감마선의 것보다 낮게 나타난다.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{공식 1})$$

- E : 광자의 에너지(unit: joule; J)
- h : 플랑크 상수(6.626×10^{-34} J · s)
- c : 빛의 속도(2.998×10^8 m/s)
- λ : 전자기파의 파장(unit: m)

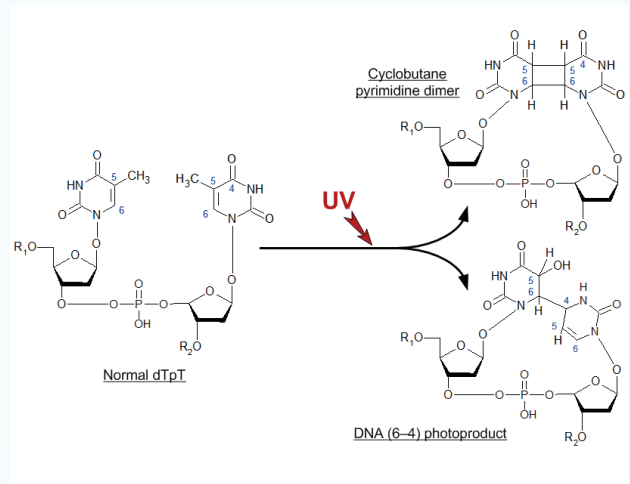
빛(가시광선)과 같은 전자기파가 물질에 조사되면, 물질에 도달한 전자기파의 광자가 물질에 흡수되어 피조사된 물질의 에너지 준위가 상승한다. 감마선의 경우 높은 에너지 준위를 가지고 있기 때문에, 피조사 물질의 화학적 결합을 파괴한다(da Silva Aquino, 2012). 그리고 감마선은 자외선 및 가시광선과는 달리 높은 물질투과성을 나타낸다(da Silva Aquino, 2012; Kim, Ham, Lee, Kim, Ha, & Jo, 2010). 따

그림 2. 자외선 조사에 따른 DNA 구조 변화



(출처: 위키피디아 커먼스)

그림 3. 자외선 조사에 따른 pyrimidine dimer 형성 과정



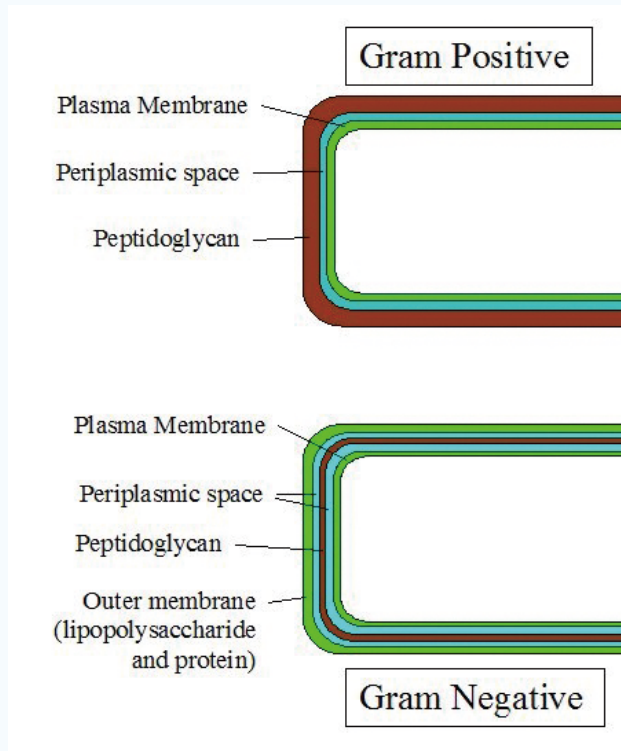
라서 감마선은 식품 및 의료기기 멸균에 적용되기도 한다 (Kim, Ham, Lee, Kim, Ha, & Jo, 2010). 그럼에도 불구하고 감마선 조사는 방사선 물질사용이 불가피하여 고가의 시설을 요구하며, 작업자 안전에 문제를 일으킬 수 있는바 식품 및 물 처리에서 쉽게 적용되지 못한다. 자외선은 비록 감마선 및 엑스선에 비해 높은 광 에너지를 가지고 있지 않지만 유기물질, 특히 탄화수소에 작용하여 라디칼 형성을 유도하여 유기물의 물리적, 화학적 구조변화를 유도한다(Nikogosyan & Görner, 1992). 자외선을 미생물에 조사하면, 미생물 구성성분, 특히 미생물 DNA를 구성하는 pyrimidine (cytosine;C, thymine; T)에 작용하여, pyrimidine 이 위치한 DNA의 이중나선구조가 상실되고, 나아가 인접한 pyrimidine 간 화학적 결합에 따라 pyrimidine dimer가 형성된다(Goto, Bazar, Kovacs, Kunisada, Morita, Kizaki, et al., 2015; Yokoyama & Mizutani, 2014)(그림 2, 3). 결과적으로 자외선에 피조사된 미생물은 DNA의 물리적, 화학적 구조적 특성을 상실함에 따라 생장을 위한 대사산물을 생성하지 못하고, DNA를 증폭하지 못하여 사멸에 이르게 된다. 일반적으로 물 그리고 식품 및 표면살균을 위해 자외선 C를 사용하고 있으며, 자외선 A 및 자외선 B는 건조표면

살균에 효과적이다. 파장이 짧은 자외선 C의 광 에너지 준위가 자외선 B 및 자외선 C보다 높다. 자외선 A, 자외선 B 및 자외선 C 모두 건조표면 살균에 효과적이지만, 비건조 물질에 적용할 경우 물 분자와 자외선의 반응에 따라 자외선 살균효과가 감소됨에 따라 광 에너지 준위가 높은 자외선 C를 물 또는 액상식품 살균에 적용하고 있다.

3. 박테리아 구조에 따른 자외선 감수성

미생물 DNA와 구성성분은 세포막 및 세포벽에 의해 외부환경과 구분되어 존재한다. 미생물, 특히 박테리아는 세포질을 둘러싸고 있는 이중지질막(세포막)과 세포막 외부에 펩티도글리칸 그리고/또는 지질층으로 구성된 세포벽을 가지고 있으며, 세포벽의 화학적, 구조적 특징에 따라 그람양성균과 그람음성균으로 구분된다. 그람양성균은 그람음성균에 비해 두껍고 치밀한 펩티도글리칸 층을 가지고 있는 반면, 그람음성균은 세포막 외부에 얇은 펩티도글리칸 층과 지질층을 가지고 있다. 또한 그람음성균은 그람양성균에 비해 넓은 주변세포질 공간 층을 가지고 있어 전반적으로 그람양성균의 세포막 및 세포벽이 그람음성균에 비해 치밀한 구조를 나타

그림 4. 그람양성균 및 그람음성균의 세포막 및 세포벽 구조



(출처: 위키피디아 커먼스)

내는 것으로 알려져 있다(그림 4).

연구에 따르면, 두껍고 치밀한 구조의 펩티도글리칸 층을 가지고 있는 그람양성균이 그람음성균에 비해 열, 플라즈마 등 외부 자극에 대하여 더 내성을 나타내는 것으로 알려져 있다(Jay, Loessner, & Golden, 2005; Mai-Prochnow, Clauson, Hong, & Murphy, 2016). 미생물 DNA는 세포막으로 둘러싸인 세포질 내부에 존재하고 있고, 자외선은 감마선 또는 엑스선과는 달리 물질 투과성이 뛰어나지 않음에 따라 자외선 살균은 미생물 세포의 세포막 및 세포벽의 구조에 영향을 받을 것으로 판단된다. 비록 그람양성 및 그람음성균의 자외선 감수성에 대한 직접적 연구가 검색되지 않았으나, 독립적으로 연구되어 보고된 논문에 의하면, 그람음성균인 *E. coli*를 1 log/mL 수준으로 감소시키기 위해 약 5 mJ/cm² 수준의 자외선 조사가 요구되었으나(Hijnen, Beerendonk, & Medema, 2006), 그람양성

균인 *Bacillus subtilis*를 동일수준으로 감소시키기 위해 약 9 mJ/cm² 수준의 자외선 조사가 요구되는 것으로 보고된바 있다(Hanlin, Lombardi, & Slepecky, 1985). 그리고 세포벽의 구조가 더 치밀한 *B. subtilis* spore를 동일수준으로 감소시키기 위해 약 56 mJ/cm² 수준의 자외선 조사가 요구된다. 본 저자의 연구경험에 의하면, 앞서 보고된 연구와 마찬가지로 그람음성균인 *E. coli*보다 그람양성균인 *Listeria monocytogenes*가 자외선에 내성을 나타내는 것으로 관찰된바 있다(data not shown). 자외선 살균효율이 미생물의 종류에 따라 변화될 수 있음에 따라 물과 같은 액상시료 살균을 위해 자외선 시스템을 설계할 때 주 오염 미생물을 파악하여, 자외선 조사량 및 조사시간 등 자외선 살균조건을 설정하는 것이 바람직하다.

4. 자외선을 이용한 물 처리 시스템

자외선 살균은 화학물질 소비 또는 인체에 해로운 부산물 생성 없이 대상 미생물을 제어함에 따라 음용을 위한 지하수 및 상수, 식품 등 생산에 사용되는 공정수 및 세척수 살균뿐만 아니라, 수영장 용수 재사용을 위한 살균, 오수 및 폐수 살균에 범용적으로 사용되고 있다. 물 처리를 위한 자외선 살균 시스템은 크게 자외선 램프가 설치된 자외선 조사부와 물의 연속적 이송 및 자외선이 자외선 살균반응이 이루어지는 반응조로 구성되어 있으며, 자외선 살균 시스템 운용은 피조사 대상의 자외선 감수성과 피조사체의 자외선 노출시간 등을 고려하여 설계되어야 한다.

자외선의 낮은 입자 투과력에 따라 미생물 안전성에 대한 보장이 필요한 상수 및 유기물이 다량 함유된 오수 및 폐수처리를 목적으로 자외선 살균을 적용하는 경우 물에 포함된 입자 제거를 위한 필터링 처리 후 자외선을 조사하는 것이 일반적이다. 음용수 또는 식품용수 사용을 위한 소규모의 지하수 처리의 경우 저농도의 유기입자가 존재함에 따라 막 여과, 역삼투압, 한외여과 등 필터링 과정이 생략될 수 있다. 본 글에서는 식품용

수 처리를 위한 자외선 살균 시스템에 대한 이해를 돕고자 자외선 광원 및 광량 결정, 반응조 및 공정설계에 대해 논의한다.

4.1. 자외선 광원

자외선 살균 시스템은 경제성과 살균효율에 따라 자외선 C 램프 또는 다이오드를 기반으로 설계된다. 자외선 C 광원으로는 저압-저강도 자외선 램프, 저압-고강도 자외선 램프, 중압-고강도 자외선 램프 및 자외선 발광 다이오드를 꼽을 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 자외선, 특히 자외선 C는 낮은 물질 투과성을 나타내고, 일반 유리를 통과하지 못하는 특성을 가지고 있음에 따라 자외선 조사부를 석영유리로 감싼 형태로 제작해야 한다. 다만 최근 개발되어 시판 중인 자외선 발광 다이오드의 경우 다이오드와 배선부분의 접합 상태에 따라서 직접 적용이 가능한 구조를 가지기도 한다. 다음은 각 자외선 C 광원에 대한 설명이다.

1) 저압-저강도 자외선 램프

수은입자는 전자와의 전기적 반응, 즉 방전현상에 따라 자외선을 방출한다. 형광등 형태의 자외선 램프는 수은과 전자에 의한 방전현상을 이용한 램프로써 램프에 충전된 수은증기의 압력에 따라 저압 또는 중압 자외선 램프로 구분할 수 있다. 그 중 저압-저강도 자외선 램프는 약 250~270 nm의 자외선을 방출하고, 특히 살균 효율이 우수한 260 nm와 근접한 253.7 nm에서 약 85% 정도의 광선을 출력함에 따라 살균에 가장 많이 사용되는 자외선 램프이다. 저압-저강도 자외선 램프는 일반적으로 형광등보다 지름이 작으며, 약 30~600 W의 출력을 나타낸다. 램프 표면온도 약 40°C, 내부 압력 0.007 mmHg에서 최적으로 작동하는 것으로 알려져 있다(장인성 & 김준영, 2005).

2) 저압-고강도 자외선 램프

수은 대신 수은-인듐 아말감 증기가 약 0.001~0.01 mmHg의 압력으로 충전된 저압-고강도 자외선 램프는 저압-저강도 자외선 램프보다 약 2~4배 높은 출력을 나타낸다. 높은 출력을 나타내는 만큼 높은 살균효율을 나타내며, 오염수준이 높은 오·폐수 처리에 주로 사용된다. 그러나 저압-저강도 자외선 램프에 비해 전력소모가 많다(장인성 & 김준영, 2005).

3) 중압-고강도 자외선 램프

자외선 살균 시스템의 응용 및 적용이 확대됨에 따라 다양한 자외선 램프가 개발되고 있다. 중압-고강도 자외선 램프는 수은을 고압($10^2 \sim 10^4$ mmHg)으로 충전한 자외선 램프로써 저압 자외선 램프와 달리 다파장(185~600 nm)의 전자기파를 방전한다. 저압 자외선 램프에 비하여 아주 높은 출력(1~12 kW)을 나타내는 반면, 살균에 효과적인 260 nm 파장의 자외선은 약 7~15% 정도만 방출한다. 또한 중압-고강도 자외선 램프는 수명이 짧고 에너지 손실이 큰 단점을 나타낸다.

4) 자외선 발광 다이오드

발광 다이오드는 전류를 가했을 때 빛을 발하는 반도체 소자이다. 발광 다이오드는 전기적으로 상이한 반도체가 접합된 구조로 이루어져 있으며, 전류를 가하면 반도체 접합 부분에서 에너지 준위차가 발생하고, 그 결과 빛 즉 전자기파를 방출한다. 전류 공급에 의해 발생하는 반도체 접합부분의 에너지 준위차가 크면 장파장의 전자기파를 그렇지 않으면 단파장의 전자기파를 발생시킨다. 자외선 발광 다이오드는 주로 알루미늄-질화갈륨 복합체로 구성되어 있는 것으로 알려져 있다(Nishida, Kobayashi, & Ban, 2002). 자외선 발광 다이오드는 기존 전구형태의 램프에 비해 크기가 작으며, 수명이 길고 에너지 효율이 높다. 또한 전구형태의 기존 자외선 램프의 석영관은 파손되기 쉽고, 파손에 따라 수은 등 중금속이 피조사체에 전이될 수 있는 반면, 자외선 발광 다

이오드는 파손 및 증금속 오염에 대한 문제가 없음을 따라 기존 자외선 램프를 대체할 것으로 기대된다. 그러나 자외선 발광 다이오드의 높은 단가는 보급의 걸림돌로 작용하고 있다.

4.2. 반응조

자외선은 DNA을 변형시킴에 따라 자외선이 외부로 방출되어 작업자에게 위해를 가지지 않도록 자외선 반응조를 설계해야 한다. 또한 물 처리에 적용되는 자외선 살균 시스템의 경우 자외선 램프 또는 자외선 발광 다이오드 작동을 위해 설치된 배선으로부터 전기가 누전되지 않도록 해야 한다(AWWARF, 2012). 반응조는 부식에 내성을 띄는 재질을 이용하는 것이 바람직하고, 반사도가 뛰어난 소재를 사용할 경우 자외선 살균효과를 향상시킬 수 있다. 스테인리스 강 또는 알루미늄 합금의 경우 물리적, 화학적, 전기화학적으로 표면을 거울상으로 가공할 수 있음에 따라 자외선 살균 시스템의 반응조의 소재로 사용할 경우 우수한 살균효과를 나타낼 수 있다. 그리고 램프 교체 및 반응조 세척이 용이한 구조로 반응조를 설계하는 것이 운영에 효과적이다.

4.3. 자외선 살균공정

자외선 노출에 따른 미생물 살균효과는 자외선 조사량에 의해 결정된다. 자외선 램프 및 자외선 발광 다이오드의 조사 에너지는 단위면적(cm²) 당 Watts로 표현하며(W/cm²), 자외선 조사량은 조사 에너지에 시간(초; *t*)의 곱으로써 단위면적당 에너지 총량(J/cm²)로 나타낼 수 있다. 저압-저강도 자외선 C 램프의 경우 약 30~150 μW/cm²를 나타내며, 자외선 발광 다이오드의 경우 3~300 mW/cm²를 나타내는 것으로 알려져 있다. 앞서 언급한 바와 같이 미생물은 종류에 따라 자외선에 대해 다른 감수성을 나타내며, 미생물 살균에 요구되는 자외선 C 조사량은 표 1과 같다(Hijnen, Beerendonk,

표 1. 미생물 살균에 요구되는 자외선 조사량 (Hijnen, Beerendonk, & Medema, 2006)

미생물	요구 조사량(mJ/cm ²)		
	1 log/mL 감소	2 log/mL 감소	4 log/mL 감소
<i>E. coli</i>	5	9	18
<i>E. coli</i> O157	5	9	19
<i>Salmonella</i> spp.	6	12	51
<i>Clostridium perfringens</i>	45	95	N.A.
<i>Bacillus subtilis</i> spores	56	111	222
<i>Streptococcus faecalis</i>	9	16	30
<i>Campylobacter jejuni</i>	3	7	14
<i>Shigella dysenteriae</i>	3	5	11
<i>Vibrio cholerae</i>	2	4	9

& Medema, 2006). 물, 특히 유기물이 적게 오염된 지하수를 자외선을 이용하여 처리할 경우, 자외선 조사에 따른 미생물 저하효과를 (공식 2)를 이용하여 예측할 수 있다.

$$\log N_t - \log N_0 = -k \cdot D = -k \cdot I \cdot t \quad (\text{공식 2})$$

- N_0 : 자외선 조사 전 물에 존재하는 미생물의 생균수
- N_t : 자외선 조사(시간; t) 후 물에 존재하는 미생물의 생균수
- k : 자외선 조사에 따른 미생물 살균계수; 미생물 1 log/mL 감소에 요구되는 자외선 조사량의 역수 (cm²/mW · s)
- D : 시간, t , 동안 조사된 총 자외선 조사량 (mJ/cm²)
- I : 물에 도달하는 자외선 조사 강도 (mW/cm²)
- t : 자외선 조사 시간 (sec)

비록 자외선 조사에 따른 미생물 살균효과를 (공식 2)를 이용하여 예측할 수 있으나, 자외선이 물에 도달할 때 그리고 물을 통과할 때 나타나는 자외선 굴절, 간섭, 및 분산 효과에 따라 실질적인 실험 수행 시 상이한 결

과를 나타낼 수 있다. 특히 미생물의 수가 증가할 경우 미생물 입자에 의한 자외선 간섭효과가 발생한다. 따라서 실질적인 실험결과에 근거하여 자외선 살균공정을 설계하는 것이 바람직하다.

감사의 글

이 논문은 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2016R1A2B1012571).

참고문헌

1. Aieta EM, Berg JD. 1986. A review of chlorine dioxide in drinking water treatment. *Journal-American Water Works Association* 78(6):62-72.
2. AWWARF (American Water Works Association Research Foundation). 2012. Ultraviolet disinfection guidelines for drinking water and water reuse (3rd ed.). Fountain Valley, California: National Water Research Institute.
3. da Silva Aquino KA. 2012. Sterilization by gamma irradiation. In F. Adrovic (Ed.), *Gamma radiation*, (pp. 171-206). Rikeka, Croatia: InTech.
4. Dore MH, Singh RG, Khaleghi-Moghadam A, Achari G. 2013. Cost differentials and scale for newer water treatment technologies. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering* 5(2):100-109.
5. Dotson AD, Rodriguez CE, Linden KG. 2012. UV disinfection implementation status in US water treatment plants. *Journal-American Water Works Association* 104(5):E318-E324.
6. EHEDG (Process Water Subgroup of the European Hygienic Engineering & Design Group). 2007. Safe and hygienic water treatment in food factories. *Trends in Food Science & Technology* 18:S93-S98.
7. Goto N, Bazar G, Kovacs Z, Kunisada M, Morita H, Kizaki S, Sugiyama H, Tsenkova R, Nishigori C. 2015. Detection of UV-induced cyclobutane pyrimidine dimers by near-infrared spectroscopy and aquaphotomics. *Scientific Reports* 5:11808.
8. Hanlin JH, Lombardi SJ, Slepecky RA. 1985. Heat and UV light resistance of vegetative cells and spores of *Bacillus subtilis* Rec-mutants. *Journal of Bacteriology* 163(2):774-777.
9. Hijnen WAM, Beerendonk EF, Medema GJ. 2006. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: A review. *Water Research* 40(1), 3-22.
10. Jay JM, Loessner MJ, Golden DA. 2005. Food protection with high temperatures, and characteristics of thermophilic microorganisms. In D. R. Heldman (Ed.), *Morden food microbiology* 7th ed. pp. 415-441. New York: Springer Science and Business Media.
11. Kenefick RW, Chevront SN, Montain SJ, Carter R, Sawka MN. 2012. Human water and electrolyte balance. In *Present knowledge in nutrition*. pp. 493-505. Wiley-Blackwell.
12. Kim HJ, Ham JS, Lee JW, Kim K, Ha SD, Jo C. 2010. Effects of gamma and electron beam irradiation on the

- survival of pathogens inoculated into sliced and pizza cheeses. *Radiation Physics and Chemistry* 79(6):731-734.
13. Mai-Prochnow A, Clauson M, Hong J, Murphy AB. 2016. Gram positive and Gram negative bacteria differ in their sensitivity to cold plasma. *Scientific Reports* 6:38610.
 14. Nikogosyan DN, Görner H. 1992. Photolysis of aromatic amino acids in aqueous solution by nanosecond 248 and 193 nm laser light. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 13(3):219-234.
 15. Nishida T, Kobayashi N, Ban T. 2002. GaN-free transparent ultraviolet light-emitting diodes. *Applied Physics Letters* 82(1):1-3.
 16. NWRI (National Water Research Institute). 2012. Ultraviolet disinfection: guidelines for drinking water and water reuse. Fountain Valley, CA: National Water Research Institute.
 17. Pizzi NG. 2011. *Water treatment* (4th ed.). Denver, CO: American Water Works Association.
 18. Song K, Mohseni M, Taghipour F. 2016. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review. *Water Research* 94:341-349.
 19. Stein D, Achari G, Langford CH, Dore MH I, Haider H, Zhang K, Sadiq R. 2017. Performance management of small water treatment plant operations: A decision support system. *Water and Environment Journal* 31(3):330-344.
 20. WHO (World Health Organization). 2011. *Guidelines for drinking-water quality*. 4th ed. Geneva: World Health Organization.
 21. Yokoyama H, Mizutani R. 2014. Structural biology of DNA (6-4) photoproducts formed by ultraviolet radiation and interactions with their binding proteins. *Int J Mol Sci* 15(11):20321-20338.
 22. 장인성, 김준영. 2005. 자외선을 이용한 수(水) 처리 살균기술. *조명·전기설비* 19(5):14-21.