

표면 살균을 위한 UV 기술의 적용

조 민* · 정우동 · 윤제용†

서울대학교 화학생물공학부 · *조지아공대 토목환경공학부

(2007년 6월 15일 접수, 2007년 9월 12일 채택)

Application of UV Technology for Surface Disinfection

Min Cho* · Woodong Jeong · Jeyong Yoon †

School of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University

*School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology

ABSTRACT : The control of pathogenic microorganisms is important issue in human environments, especially in surface area. However, surface disinfection has not been fully researched. In this study, the surface disinfection under UV irradiation was performed to investigate the quantitative kinetics for *Bacillus subtilis* spore inactivation in several experimental conditions, such as light intensity, temperature and surface roughness. This study reports that UV light would apparently inactivates the microorganisms and the required IT value for 2 log (99%) *Bacillus subtilis* spore inactivation was found to be 14.5 mJ/cm² in plain surface, as predicted by the Delayed Chick-Watson model. When UV was irradiated, there were no significant temperature effects. However, the experimental result shows that the more increased IT values are required at larger surface roughness.

Key Words : Surface Disinfection, UV Irradiation, Microbial inactivation, *Bacillus subtilis* spore

요약 : 전 세계적으로 병원성 미생물에 의한 오염과 감염 및 발병의 사례가 급증함에 따라 병원성 미생물을 효율적으로 제어하는 기술에 대한 관심이 매우 증가하고 있다. 병원성 미생물을 환경에서 제어하는 연구는 대다수 수처리 공정과 같이 물에서 이루어지는 소독과 관련되어 진행되어 왔고, 표면에서의 소독에 관련된 연구는 매우 부족하였다. 본 연구는 UV 소독 방법을 표면에 분포된 미생물의 불활성화에 대해서 적용하여 살펴보고, 소독 모델을 통해서 정량화하였다. 특히, 생물테러용 무기로 잘 알려진 탄저균(*Bacillus anthracis*)의 지표 미생물인 바실러스 포자(*Bacillus subtilis* spore)에 대해서 UV를 이용한 표면 소독시 매우 빠른 불활성화를 볼 수 있었으며, 2 log(99%) 불활성화를 위한 IT 값은 14.5 mJ/cm²으로 나타났다. UV에 의한 미생물 불활성화는 화학적 소독제의 경우와 달리 온도에 의한 영향은 나타나지 않았으나, 표면 거칠기(surface roughness)에 의한 뚜렷한 tailing off 현상이 나타났다.

주제어 : 표면 살균, UV 조사, 미생물 불활성화, 바실러스 포자

1. 서 론

최근 전세계적으로 병원에서의 미생물 감염(nosocomial infection), 대규모 식중독 발생, 음용수에서의 병원성 미생물에 의한 발병, 9.11 테러 이후의 탄저균(*Bacillus anthracis*) 테러 사건 등 수많은 종류의 미생물(세균, 바이러스, 원생동물)에 의한 감염 사고가 보고되고 있다.^{1~3)} 이로 인해 병원성 미생물에 의한 인간의 질병 발생 방지를 위한 다양한 연구가 지속적으로 이루어져 왔으나, 대부분의 연구는 수처리 공정에서의 미생물 제어에 국한되어 왔고,^{4~7)} 인간이 직·간접적으로 접촉하게 되는 표면에서의 미생물 불활성화에 관한 연구는 미비하였다.

탄저균 테러나 식중독 발병의 예에서 알 수 있듯이, 병원의 실내나 설비, 식품 가공 공장 또는 음식점 등의 식품 생산 시설(food processing), 생물학적 테러 제어(bioterrorism

control)등 인간이 생활을 통해 접촉할 수 있는 표면에서 병원성 미생물을 효과적으로 제어하지 못할 경우 개인의 건강뿐만 아니라 대중 보건에서 큰 문제가 될 수 있다.⁸⁾ 특히, 병원 폐기물과 같은 병원성 미생물에 노출된 물질의 경우, 표면 접촉에 의해 직접적인 감염이 야기될 수 있으며, 면역력이 약한 노·약자나 환자 또는 임산부에게는 더욱 치명적일 수 있다.⁹⁾ 이 외에도 표면에서 생성된 생물막(Biofilm) 등의 미생물 군체(microorganism aggregates)는 공기, 물, 또는 다른 표면으로 이동하여 간접적인 2차 오염을 야기시킬 수 있다.³⁾ 따라서 표면에서의 미생물을 효과적으로 제어하는 기술에 관한 관심이 급증하고 있다.

현재 대부분의 표면 살균(surface disinfection)은 염소계(chlorine species) 소독 용액, 이산화염소 용액, 오존 수용액을 표면에 뿌려서 미생물을 제어하는 방식으로 이루어져 왔다.^{10~13)} Foschino et al.¹³⁾은 이산화염소를 사용하여 stainless steel 표면을 소독하였을 때 2.8 mg/L의 소독제로 1분에 1 log(90%)의 *E. coli* 불활성화를 보고하였고, Greene et al.¹⁰⁾은 5 mg/L의 오존으로 우유 생산 라인의 *Pseudomonas fluorescens*와

† Corresponding author
E-mail: jeyong@snu.ac.kr
Tel: 02-880-8927

Fax: 02-876-8911

*Alcaligenes faecalis*를 효과적으로 제어한 것을 보고한 바 있다.

그러나 표면 살균을 위한 대표적인 소독제인 염소계 물질을 사용할 경우 *Listeria monocytogenes*나 *Bacillus spore*와 같이 염소계 소독제에 강한 내성을 지닌 미생물의 제어는 어려울 뿐만 아니라 고농도로 사용하여야 한다는 단점을 가지고 있다.^{5,14} 또한 화학적 소독제의 경우 미생물을 불활성화시킬 뿐만 아니라 표면 산화와 같은 손상을 입힐 수 있고, 대부분 수용액 형태로 사용하여야 하기 때문에 표면의 재질이나 특성 등에 따라 제한적으로 사용될 수 밖에 없다.

따라서 최근에는 화학적 소독제의 단점을 극복할 수 있으면서 표면에서 미생물을 효과적으로 제어할 수 있는 소독 기술로 UV 소독 기술에 대한 관심이 급증하고 있다. UV 소독은 편리하고 경제적이며 미생물 불활성화 이외에도 표면에 2차 손상을 거의 미치지 않기 때문에 새로운 표면 살균 기술로서 높은 가능성을 내포하고 있다.^{15,16} 또한, 기존의 화학적 소독제(특히, 염소계)에 내성을 가지고 있는 원생동물(*Cryptosporidium parvum*)이나 포자(*Bacillus anthracis* spore: 탄저균)에 효과적인 것으로 보고되고 있고, 식품 공정(food processing)이나 생물학적 테러 제어(Bioterrorism control) 부분에서도 관련 연구가 진행되고 있다.^{17,18} 그러나 기존의 UV 표면 살균 연구는 특정 조건에서 미생물의 불활성화만을 살펴보았을 뿐, 정량적 연구를 통한 표면 특성과 온도 등의 환경 변인에 따른 연구는 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 바실러스 포자(*Bacillus subtilis* spore)를 이용하여 UV 조사(UV irradiation) 조건에서 환경 및 표면 특성에 따른 미생물 불활성화를 정량적으로 살펴보았다. 바실러스 포자는 탄저균(*Bacillus anthracis* spore)의 지표 미생물(indicator microorganism)로 알려져 있는 미생물로서, UV를 포함한 대부분의 소독 방법에 대해서 강한 내성을 나타내고, 특히 포자(spore)를 형성하여 표면에서 안정적이고 손쉽게 제어 가능하기 때문에 표면 살균 연구에 효과적인 지표 미생물(surrogate microorganism)이다.^{14,17}

2. 재료 및 실험 방법

본 연구에 사용된 모든 시약은 초고순도 시약을 사용하였으며, 모든 용액은 Barnstead NANO pure system(Barnstead, USA)로 제조된 3차 초순수를 사용하였다. 실험에 사용된 유리 초차(Glassware)는 121°C에서 15분 동안 멸균(Autoclaving)한 후 사용하였다.

2.1. 미생물 배양 및 분석

본 연구에서는 바실러스 포자(*Bacillus subtilis* spore, ATCC 6633)를 사용하여 실험을 수행하였고, 본 연구진의 기존 연구에서와 같은 방법을 사용하여 배양하였다.⁵ 배양 방법은 다음과 같다. 영양 배지(Nutrient broth)에서 배양한 바실러스(*Bacillus subtilis*)를 1/10으로 영양 배지를 희석한 한천(agar)에 접종하고 spreading bar를 사용하여 배지 위에 고르게 편

후 배양하였다. 5~7일 동안 37°C의 배양기(incubator)에서 배양된 바실러스 포자를 수확(harvest)한 후 80°C에서 20분 동안 열처리를 하여 바실러스와 바실러스 포자를 구분하였다. 바실러스 포자의 비율은 99% 이상이었다. 초기 바실러스 포자의 농도와 실험 후 살아있는 바실러스 포자의 농도는 spreading plate method를 이용하여 분석하였다.^{5,14}

2.2. 실험 방법

표면 살균 실험에서 표면 거칠기(surface roughness)에 따른 영향을 배제하기 위하여 0.1 nm로 평평한 반도체 웨이퍼(semiconductor wafer)를 지표 표면으로 선정하였다. 3 cm × 3 cm의 반도체 웨이퍼 표면에 스프레이를 이용하여 10⁶ cfu/mL의 바실러스 포자를 0.1 mL 분포시킨 후 12시간 동안 클린 벤치에서 건조 한 후 실험에 사용하는 표면을 얻을 수 있었다.

UV에 의한 미생물 불활성화 실험은 바실러스 포자가 도달된 표면을 15 W의 저압 UV 램프(low pressure UV lamp: 253.7 nm, Philips, Netherlands) 4개가 설치된 collimated beam test 장치를 사용해 수행하였다. 빛 세기(light intensity)는 radiometer(UVX radiometer, UVP, USA)를 이용하여 측정하였고, 온도 조절을 위해 온도 조절용 챔버(thermostatic chamber)내에서 실험을 수행하였다. 실험은 20°C에서 수행되었고 빛 세기는 0.4 mW/cm²로 조절하였다. 실험에서 빛 세기는 collimated beam 장치에서 램프와 시편과의 거리를 변화시켜 0.2~1.6 mW/cm²로 조절하였으며, 온도에 따른 영향을 평가한 실험에서는 온도 조절용 챔버의 온도를 5, 15, 15, 20, 30°C로 조절하여 수행하였다.

물에서 UV 소독 실험은 본 연구진의 기존 연구에서와 같은 방법¹⁴으로, pyrex 반응기에 20 mM의 인산완충용액(phosphate buffer solution)이 포함된 30 mL의 용액에 바실러스 포자를 넣은 후 실험을 수행하였다.

UV에 의해 불활성화된 미생물의 광회복은 UV 소독 연구에 있어 가장 중요한 인자 중 하나이다. 본 연구에서 UV에 의해 3 log가 불활성화된 바실러스 포자의 광회복에 관한 컨트롤(control) 실험은, 형광등 및 암실 조건에서 6시간 동안 불활성화된 바실러스 포자를 방치한 후 바실러스 포자를 배양하는 방법으로 진행하였다.

표면 거칠기(surface roughness)에 의한 영향은 표면의 최대 수직 높낮이(maximum vertical distance)가 10 nm로 평평한 유리 시편에 페인트칠을 하여 다양한 표면 거칠기(10 nm, 100 nm, 1 μm, 3.1 μm, > 8.0 μm)를 가지는 시편(3 cm × 3 cm)을 얻었고, 각각의 시편에 바실러스 포자를 도달한 후 실험을 수행하였다. 실험에서 표면 거칠기는 Atomic force microscope(AFM, NS3A, Japan)에서 측정된 최대 수직 높낮이로 표현하였다. 이 외에도 일반적인 표면의 표면 거칠기를 살펴보기 위하여 그릇, 전자제품 표면, 장판, 벽지 등 다양한 표면에서 최대 수직 높낮이를 분석하였다. 실험에 사용된 다양한 표면의 각 분류별 최대 수직 높낮이의 오차는 10%를 넘지 않게 구분하였다.

각각의 실험 후 처리된 시편은 0.05%의 tween 20[®]이 포함된 20 mL의 용액에 담은 후 5분간의 vortex 과정을 통하여 표면에 붙어있는 바실러스 포자를 떨어뜨린 후, 원심분리 과정을 통하여 한차례 세척(washing) 하였고, 10배로 농축시킨 후 살아있는 바실러스 포자의 농도를 분석하였다. 표면에서 용액으로 회수된 바실러스 포자의 회수율은 99% 이상이었으며, 중간단계에 의한 바실러스 포자의 불활성화는 나타나지 않았다. 본 연구에서 각 실험은 3회 이상 반복 수행되었고, 90% 이상의 높은 재현성을 나타내었다.

2.3. 소독 모델

미생물 불활성화를 효과적이고 정량적으로 설명하기 위해서는 적절한 소독 모델을 이용한 해석이 필요하다. 본 연구진은 선행 연구를 통하여 먹는 물(drinking water)에서 소독 모델에 관한 다양한 연구를 진행시킨 바 있으며, 아래 식과 같은 Delayed Chick-Watson 모델을 UV 소독에 제안한 바 있다.¹⁴⁾

$$\log \frac{N}{N_0} = \begin{cases} 0 & \text{if } IT \leq IT_{lag} = \frac{1}{k} \log \left(\frac{N}{N_0} \right) \\ -k(IT - IT_{lag}) & \text{if } IT \geq IT_{lag} = \frac{1}{k} \log \left(\frac{N}{N_0} \right) \end{cases} \quad (1)$$

(N_0 = initial viable *B. subtilis* spores concentration(cfu/mL); N =remaining viable *B. subtilis* spores concentration at time t (cfu/mL); I =light intensity(mW/cm²); k =the inactivation rate constant(cm²/mJ); T =reaction time; IT_{lag} =x-axis intercept of the inactivation curve)

본 연구에서는 Delayed Chick-Watson 모델을 표면 살균을 위한 모델식으로써 적용 가능성을 확인하였고, 소독 모델을 통해 UV의 표면 살균 특성을 정량적으로 살펴보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1. UV 조사에 의한 표면에서 바실러스 포자의 불활성화

본 연구에서는 표면에서 UV 조사에 의한 바실러스 포자의 불활성화를 살펴보았으며, 그 결과를 Fig. 1(-●-)에 나타내었다. 실험에서 빛 세기와 온도는 0.3 mW/cm²와 20°C로 조절하였다. 또한 수처리 공정에서 결과와 비교하기 위하여 pH 7.1의 인산 완충 용액(phosphate buffer solution)에 바실러스 포자를 넣은 후 표면에서의 실험과 같은 빛 세기와 온도 조건에서 바실러스 포자의 불활성화(-○-)를 살펴보았다. 각각의 경우에서 빛이 조사되지 않았을 때 바실러스 포자의 불활성화는 나타나지 않았다.

Fig. 1에는 다음과 같은 세 가지의 명확한 사실이 잘 나타나 있다. 첫째, 약한 UV 빛(UV-C, 254 nm, 0.3 mW/cm²)이 조사되었음에도 불구하고 바실러스 포자는 49초에 2 log(99%)가 불활성화 되었고(-●-), 특히 76초 만에 4 log(99.99%)의 높은 불활성화를 확인할 수 있었다. Fig. 1과 같은 빠른 불

활성화는 표면 살균에 UV 기술을 적용함에 있어 큰 장점이 된다.

둘째, 용액 내에서 UV 조사에 의한 바실러스 포자의 불활성화는 기존 연구 결과와 거의 유사한 수준으로 나타났다.¹⁴⁾ 즉, 2 log의 바실러스 포자의 불활성화에 56초가 소요되었고, 표면 살균에서의 값에 비해 1.14배 큰 것으로 나타났다. 이러한 차이는 표면살균에 있어서는 UV가 직접 바실러스 포자에 조사되어 불활성화되는데 반해, 물에서의 불활성화는 UV 빛의 일부가 물에 의해 손실되었기 때문으로 추정된다. 이러한 가정을 확인하기 위하여 간단한 실험을 수행하였고, UV spectrophotometer를 이용하여 254 nm 빛의 투과도를 분석한 결과, 1 cm 두께의 인산 완충 용액을 통과할 때 약 3% 정도의 빛 손실을 확인할 수 있었다. 또한 물에서 미생물 불활성화의 경우, 반응 용액이 부피(volume) 단위로 존재하기 때문에 면적에 따른 빛 세기를 측정하는 기존의 방법을 적용할 경우 빛을 측정된 곳의 위치에 따라 일정 수준의 오차를 예상할 수 있다. 따라서 본 연구에서 용액(-○-)과 표면(-●-)에서 바실러스 포자는 거의 유사한 수준으로 불활성화 되는 것으로 볼 수 있다. 표면과 물에서 바실러스 포자의 불활성화가 거의 유사한 사실은 수처리 공정에서 연구된 다양한 미생물 불활성화 값들을 표면 살균에도 적용이 가능한 것을 나타내기 때문에 아주 중요한 의미를 가진다.

셋째, 물에서 UV 소독과 마찬가지로 표면에서 바실러스 포자의 불활성화 패턴에서도 뚜렷한 지체기(lag phase)를 확인할 수 있었다.^{14,15)} 일반적으로 UV에 의한 미생물 불활성화는 미생물 내부의 RNA나 DNA의 광반응에 의한 손상으로 설명된다. 즉 UV 빛이 미생물에 조사되었을 경우 피리미딘(DNA: 시토신과 티민, RNA: 시토신과 우라실) 분자들이 서로 이중결합을 형성하게 되고 그 결과 DNA 복제가 이루어지지 않아 증식과 같은 생명체로서의 기능이 정지되기 때문에 미생물 불활성화가 이루어지게 되는 것으로 알려져 있다.^{19,20)} 따라서, Fig. 1에 나타난 지체기는 이러한 불활성화가 이루어질 수준까지 이중결합이 형성되는데 소요되는 시간에 기인한 것으로 추정된다.

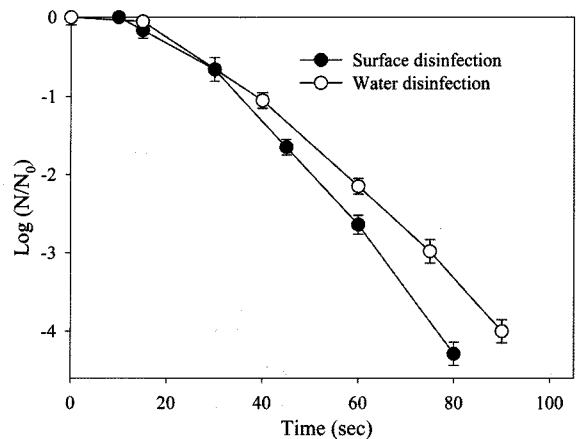


Fig. 1. Inactivation of *Bacillus subtilis* spores using UV irradiation in surface and water(light intensity: 0.3 mW/cm², 20°C).

UV 소독 연구에서 가장 중요한 관심사 중 하나는 미생물의 광회복 현상에 관한 것이다.¹⁵⁾ 미생물의 광회복은 UV 조사에 의해 DNA가 손상되어 일시적으로 불활성화된 미생물이 명(310~490 nm photo)나 암(dark) 조건에서 빛 에너지나 효소 등의 영향에 의해 DNA의 손상이 회복되는 것이다. 그러나 본 연구에서는 UV에 의해 3 log가 불활성화된 바실러스 포자를 6시간 동안 명/암 조건에 놓은 결과, 바실러스 포자의 불활성화 정도에 변화가 없어 photo-repair 또는 dark-repair가 일어나지 않는 것을 확인할 수 있었다(data not shown).

3.2. UV 빛 세기에 따른 바실러스 포자의 불활성화

Fig. 2는 다양한 빛 세기에서 표면에서 바실러스 포자의 불활성화를 나타낸 것이다. 빛 세기는 0.2~1.6 mW/cm²로 조절되었으며, 빛을 쬐지 않았을 때 미생물 불활성화는 나타나지 않았다. 빛 세기가 증가할수록 바실러스 포자의 불활성화 속도가 뚜렷하게 선형적으로 증가하였다. 예를 들어 0.2, 0.4, 0.8 mW/cm²의 빛 세기에서 바실러스 포자가 3 log(99.9%) 불활성화되는데 걸리는 시간은 각각 93, 47, 24초로, 빛 세기가 2배씩 증가할 때마다 불활성화에 소요되는 시간도 2배씩 감소하였다.

3.3. 소독 모델을 이용한 UV 표면 살균의 정량화

Fig. 2에 나타난 선형성은 UV에 의한 미생물 불활성화가 정량적으로 나타낼 수 있음을 의미한다. 본 연구에서는 식 (1)과 같은 Delayed Chick-Watson 모델을 사용하여 바실러스 포자의 불활성화를 나타내고자 하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 식 (1)의 소독 모델은 UV 빛의 조사량(빛 세기(I) × 반응 시간(T))과 미생물 불활성화가 비례한다는 가정에서 유도된 식이고, 지연기(lag phase)에 의한 영향을 실험적으로 고려한 것이다. Fig. 3의 결과는, Fig. 2에서 다양한 빛 세기에서 시간에 따른 바실러스 포자의 불활성화를 UV 빛의 조사량에 따른 결과로 나타낸 것이고, Fig. 3의 각주(footnote)는 소독 모델을 적용했을 때의 예측된 결과와 실험 결과와의 선형성을 통해 선택한 모델의 적절성을 살펴본 결

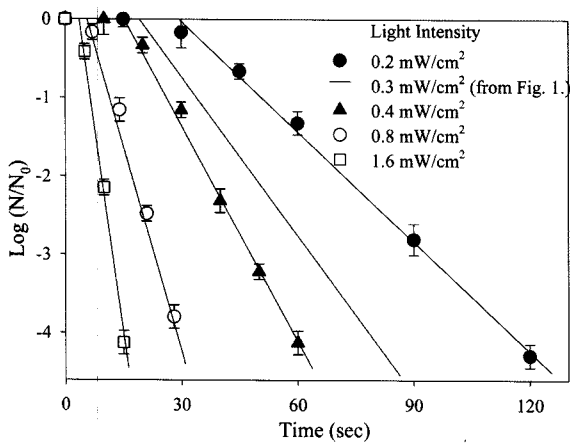


Fig. 2. Inactivation of *Bacillus subtilis* spores with UV irradiation in surface at 20°C.

과이다. Fig. 3의 높은 선형성(R²=0.98)은 Delayed Chick-Watson 모델이 UV를 이용한 표면 살균을 정량적으로 해석하고 적용하는데 효과적인 것을 의미한다. 또한 이와 같은 키네틱(kinetics) 결과로부터 표면에서 UV에 의한 바실러스 포자의 2 log(99%) 불활성화 소독능(IT)은 14.5 mJ/cm²인 것을 확인할 수 있다. 미생물 불활성화 수준을 소독 모델을 사용하여 효과적으로 정량화 할 수 있는 것은, 처리 수준의 결정이나 미생물 제어에 있어 아주 중요한 요소이다.

3.4. 표면 거칠기(surface roughness)에 따른 바실러스 포자의 불활성화 특성

UV는 100~400 nm 파장을 가지고 있는 빛으로 그 파장에 따라 UV-A, UV-B, UV-C 그리고 Vacuum UV로 나뉘게 되는데, 100~200 nm의 파장을 가지는 Vacuum UV는 짧은 파장으로 인해 투과성이 낮고 흡수성이 매우 높아 미생물 불활성화에는 거의 사용되지 않는다.¹⁵⁾ 또한 UV-A와 UV-B의 경우 이 파장의 빛을 DNA가 거의 흡수하지 못하기 때문에 직접적인 소독용으로는 사용될 수 없고 광촉매(TiO₂)와 같은 복합 공정을 통해 사용하게 된다.²¹⁾ 미생물 불활성화에 주로 사용되는 UV는 UV-C(200~280 nm)로, DNA와 단백질이 잘 흡수하는 파장이다. 본 연구에서 사용된 253.7 nm 파장의 UV의 경우 DNA가 가장 잘 흡수하는 파장으로, 경제적이고 유지 관리가 쉽다는 장점을 가지고 있다.

그러나, 이와 같이 미생물 불활성화에 주로 사용되는 UV-C 파장의 경우, 다른 긴 파장의 빛에 비해 굴절 등이 거의 일어나지 않는다. 따라서 UV-C 파장을 이용한 미생물 불활성화는 UV가 직접적으로 조사된 부분에서만 일어나게 된다. 이러한 사실을 확인하기 위하여 간단한 기초 실험을 수행하였다. 즉, 지표 표면의 한쪽 면에 바실러스 포자를 분포시키고, UV 빛이 조사되는 반대 방향으로 지표 표면을 뒤집은 후 Fig. 1과 같은 조건에서 10분 동안 UV를 조사하여 바실러스 포자의 불활성화를 살펴보았다. UV 빛이 조사되는 방향으로 지표 표면이 놓여 있었을 때, 6 log(99.9999%) 이상의 불활성화가 일어난 것에 반해, 반대 방향으로 지표 표면을

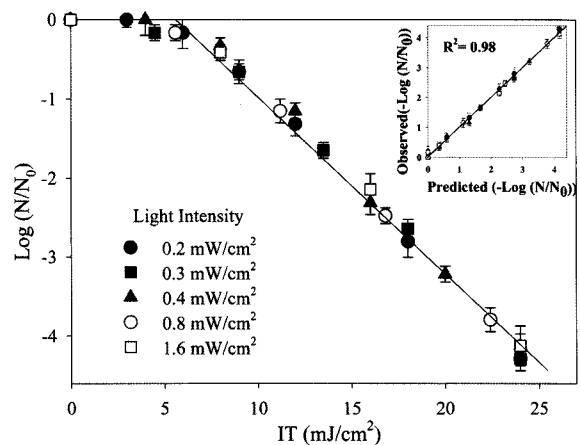


Fig. 3. Quantitative evaluation of UV disinfection from the Delayed Chick-Watson model prediction.

놓은 경우 바실러스 포자의 불활성화가 전혀 나타나지 않았다. 이러한 결과는 UV를 이용한 표면 살균에 있어서 빛의 직접적인 조사여부가 매우 중요한 요소임을 의미한다.

반도체 웨이퍼를 사용한 균일하고 평평한 지표 표면과 달리 대부분의 표면은 많은 굴곡을 가지고 있으며, 이는 나노미터 크기의 미생물이 표면에 놓인 위치에 따라 UV 빛이 잘 도달하기 어려운 사각지대에 놓여 있을 수도 있다. Fig. 2에 나타난 것처럼 미생물 불활성화는 UV 조사량에 따라 급격히 달라지게 되기 때문에 표면의 거칠기(surface roughness)는 UV에 의한 표면 살균에서 중요한 요소이다. 그릇, 전자제품 표면, 장판, 벽지 등 다양한 표면의 최대 수직 높낮이(maximum vertical distance)를 살펴본 결과 대부분의 표면이 수 나노미터에서 수 마이크로미터의 최대 수직 높낮이를 가지고 있는 것으로 나타났다. 다양한 표면 거칠기를 가지는 표면에서 바실러스 포자의 불활성화를 살펴보고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 실험에서 사용된 바실러스 포자의 크기는 수백 나노미터로 알려져 있다.²²⁾ Fig. 4를 보면, 바실러스 포자에 비해 표면의 굴곡이 작은 경우(0.1~100 nm) 바실러스 포자의 불활성화는 거의 차이를 보이지 않았다. 그러나 1 μm 이상의 표면 거칠기가 보이는 상황에서는 표면 거칠기가 클수록 불활성화 속도가 점차 느려지는 것을 확인할 수 있다. 표면 거칠기가 3.1 μm인 경우(-○-), 뚜렷한 지연기(tailing off)가 발견되었고, 이는 표면 굴곡에 의해 빛의 조사량이 감소하였기 때문으로 추정된다. 그러나 인간의 생활환경에 존재하는 많은 표면들이 수 마이크로미터 이하의 표면 거칠기를 가지고 있는 점을 고려한다면, Fig. 4에서 36 mJ/cm² 수준의 IT 값에서 99.9%(3 log) 이상의 미생물 불활성화 값을 얻을 수 있을 것으로 기대되며, 이러한 결과는 UV를 이용한 표면 살균의 큰 장점이 될 수 있다.

표면 거칠기가 8.0 μm 이상인 경우에는 보다 뚜렷한 tailing off가 나타났으며 2 log의 불활성화 이후 바실러스 포자가 더 이상 불활성화되지 않았다. 이것은 표면이 굴곡이 큰 경우, 조사된 UV 빛이 표면 굴곡 아래쪽에 있는 바실러스 포자에 거의 도달하지 못하기 때문으로 추정된다. 즉, 표면 거

칠기가 8.0 μm 이상인 표면에 바실러스 포자를 분포시켰을 때, 굴곡 윗 부분이나 평평한 표면에 분포된 바실러스 포자는 UV 빛에 의해 효과적으로 불활성화 되지만 빛이 도달하지 못하는 곳에 존재하는 바실러스 포자는 불활성화 되지 않기 때문에 Fig. 4와 같은 결과가 나타난 것으로 보인다. 이러한 결과는 UV 표면 살균의 실제 환경에의 적용에 있어서 명확한 한계를 나타내는 것이다.

표면 거칠기가 큰 표면 뿐만 아니라, 앞서 기초 실험에서 언급한 것처럼 UV가 조사되는 반대 방향의 표면 또한 UV를 사용하여 표면을 살균하는 것이 어렵기 때문에, UV 표면 살균은 표면 내부로 침투가 가능한 다른 소독 방법과 병행해서 수행되어야 보다 효과적일 수 있다.

3.5. 온도에 따른 바실러스 포자의 불활성화 특성

현재 대부분의 표면 살균은 염소계 소독제에 의해 수행되고 있고, 몇몇 경우 오존이나 이산화염소와 같은 강력한 소독제를 사용하고 있다. 기존 연구에 따르면 이와 같은 화학적 소독제의 경우 온도가 낮을수록 미생물 불활성화 속도가 늦춰지는 것으로 보고되고 있고, 이것은 낮은 온도에서 화학물질과 미생물의 반응성이 낮아지기 때문으로 설명된다.¹⁹⁾ 대부분의 표면은 다양한 온도에 노출되어 있기 때문에, 낮은 온도에서 반응성이 떨어지는 것은 실제 환경에의 적용에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 5, 10, 15, 20, 30°C에서 미생물 불활성화를 살펴보고 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 실험 결과 UV 램프의 빛 세기(light intensity)는 낮은 온도(5°C)에서 15% 낮은 출력을 보였다. 그러나, 식 (2)의 Delayed Chick-Watson 모델을 사용하여 바실러스 포자의 불활성화 키네틱(inactivation kinetics)을 정량화하였을 때(Fig. 5) 온도에 의한 영향은 나타나지 않았다. 즉, 온도에 상관없이, 3 log(99.9%)의 불활성화 IT 값은 19.2 mJ/cm²으로 일정하게 나타났다. 온도의 변인에 영향을 받지 않는다는 점은 실제 환경에의 적용시 소독 방법의 제어를 용이하게 하기 때문에, 이러한 결과는 UV 조사를 이용한 표면 살균에 있어 중대한 의미를 가진다.

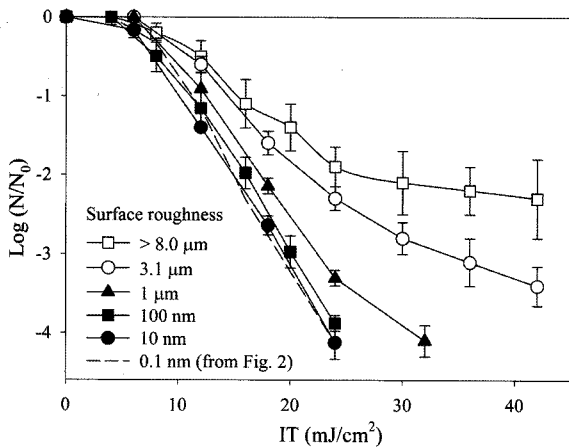


Fig. 4. The effect of surface roughness on UV disinfection (light intensity: 0.3 mW/cm², 20°C).

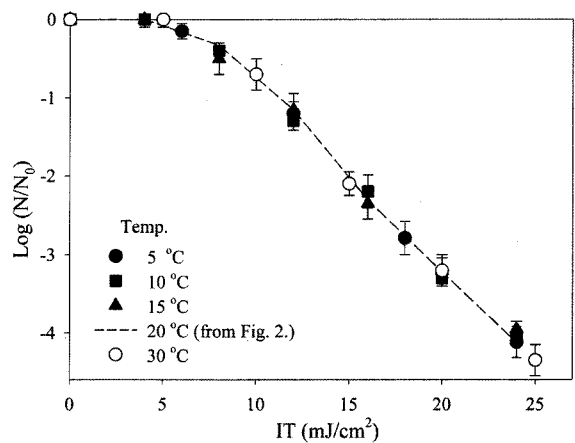


Fig. 5. The effect of temperature on UV disinfection (light intensity: 0.3 mW/cm²).

4. 결론

본 연구는 표면에서 다양한 표면 거칠기 및 온도 조건에서 UV에 의한 미생물 불활성화를 정량적으로 살펴보았다. 연구 결과, UV 조사에 의해 미생물이 아주 빠르게 불활성화되는 것을 알 수 있었다. 빛 세기가 증가할수록 선형적으로 빠른 바실러스 포자의 불활성화를 확인할 수 있었으며, 소독 모델을 이용해 효과적으로 바실러스 포자의 불활성화를 정량화할 수 있었다. 즉, 평평한 표면에서 18.5 mJ/cm²의 낮은 IT 값의 UV 빛이 조사되었을 때 3 log(99.9%)의 바실러스 포자의 불활성화를 얻을 수 있었다.

UV에 의한 표면 살균에서 온도에 의한 영향은 나타나지 않았으나, 표면 거칠기에 따른 뚜렷한 영향을 확인할 수 있었다. 실험 결과, 표면 거칠기가 클수록 바실러스 포자의 불활성화는 느리게 일어났지만 표면 거칠기가 큰 경우에도 대부분의 조건에서 36 mJ/cm² 수준의 IT 값에서 99.9%(3 log) 이상의 바실러스 포자의 불활성화가 나타났다. 그러나 표면 거칠기가 심한 경우나, UV 빛이 조사되기 어려운 상황에서는 일정 수준 이상의 미생물 불활성화를 기대하기 어렵다. 따라서 UV를 이용한 표면 살균은 이러한 단점을 해결할 수 있는 다른 화학적 소독제와 복합적으로 사용하여야 실제 환경에 보다 효과적으로 적용이 가능할 것이다.

참고문헌

1. Meakins, S. M., Adak, G. K., Lopman, B. A., and O'Brien S. J., "General outbreaks of infectious intestinal disease(IID) in hospitals, England and Wales, 1992-2000," *J. Hospital Infection*, **53**, 1~5(2003).
2. Makino, S. I., Kawamoto, K., Takeshi, K., Okada, Y., Yamasaki, M., Yamamoto, S., and Igimi, S., "An outbreak of food-borne listeriosis due to cheese in Japan, during 2001," *Int. J. Food Microbiol.*, **104**, 189~196 (2005).
3. Yildiz, F. H., "Processes controlling the transmission of bacterial pathogens in the environment," *Research in microbiology*, **158**, 195~202(2007).
4. Belosevic, M., Craik, S. A., Stafford, J. L., Neumann, N. F., Kruthof, J., and Smith, D. W., "Studies on the resistance/reactivation of *Giardia muris* cysts and *Cryptosporidium parvum* oocysts exposed to medium-pressure ultraviolet radiation," *FEMS Microbiol. Lett.*, **204**, 197~203(2001).
5. Cho, M., Chung, H., and Yoon, J., "Quantitative Evaluation of the synergistic Sequential inactivation of *Bacillus subtilis* spores with Ozone followed by Chlorine," *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 2134~2138(2003).
6. Cho, M., Lee, Y., Choi, W., Chung H., and Yoon, J., "Study on Fe(VI) species as a disinfectant: quantitative evaluation and modeling for inactivating *Escherichia coli*," *Water Res.*, **40**, 3580~3586(2006).
7. Pedazhur, R., Katzenelson, D., Barnea, N., Lev, O., Shuval, H. I., Fattal, B., and Ulitzur, S., "The efficacy of long-lasting residual drinking water disinfectants based on hydrogen peroxide and silver," *Water Sci. Technol.*, **42**, 293~298(2000).
8. Sternbach, G., "The history of anthrax," *J. Emergency Medicine*, **24**, 463~467(2003).
9. Jamieson, D. J., Ellis, J. E., Jernigan, D. B., and Treadwell, T. A., "Emerging infectious disease outbreaks: Old lessons and new challenges for obstetrician-gynecologists," *Am. J. Obstet. Gynecol.*, **197**, 1546~1555(2006).
10. Greene, A. K., Few, B. K., and Serafini, J. C., "A comparison of ozonation and chlorination for the disinfection of stainless steel surfaces," *J. Dairy Sci.*, **76**, 3617~3620(1993).
11. Ronner, A. B. and Wong, A. C. L., "Biofilm development and sanitizer inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella typhimurium* on stainless steel and buna-n rubber," *J. Food Protect.*, **56**, 750~758(1993).
12. Andrews, S., Pardoel, D., Harun, A., and Treloar, T., "Chlorine inactivation of fungal spores on cereal grains," *Int. J. Food Microbiol.*, **35**, 153~162(1997).
13. Foschino, R., Nervegna, I., Motta, A., and Galli, A., "Bactericidal activity of chlorine dioxide against *Escherichia coli* in water and on hard surfaces," *J. Food Prot.*, **62**, 668~672(1998).
14. Cho, M., Kim, J., and Yoon, J., "Investigating synergism during sequential inactivation of *Bacillus subtilis* spores with several disinfectants," *Water Res.*, **40**, 2911~2920(2006).
15. 조민, 김지연, 윤제용, "UV 조사(Ultraviolet Irradiation)에 의한 미생물의 불활성화," *첨단환경기술*, **2**, 5~18 (2004).
16. Masschelein, W. J., "Ultraviolet light in water and wastewater sanitation," LEWIS publishers(2002).
17. Cockell, C. S., Rettberg, P., Horneck, G., Wynn-Williams, D. D., Scherer, K., and Gugg-Helminger, A., "Influence of ice and snow covers on the UV exposure of terrestrial microbial communities: dosimetric studies," *J. photochem. Photobiol. B: Biol.*, **68**, 23~32(2002).
18. Rochelle, P. A., Upton, S. J., Montelone, B. A., and Woods, K., "The response of *Cryptosporidium parvum* to UV light," *TRENDS in Parasitology*, **21**, 81~87 (2005).
19. USEPA, "Alternative disinfectants and oxidants guidance manual,"(1999).
20. USEPA, "Ultraviolet disinfection guidance manual,"(2003).

21. Cho, M., Chung, H., Choi, W., and Yoon, J., "Different inactivation behaviors of MS-2 phage and Escherichia coli in TiO₂ photocatalytic disinfection," *Appl. Environ. Microbiol.*, **71**, 270~275(2005).
22. Sonenshein, A. L., Hoch, J. A., and Losick, R., "*Bacillus subtilis* and other gram positive bacteria," ASM, Washington, D. C.(1993).