

사여과수에 존재하는 우점세균의 중압 자외선 램프 소독능 Disinfection Efficiency of Medium Pressure UV Lamp on Major Bacteria in Sand Filtered Water

안승구 · 양윤용*[†]
Seoungkoo Ahn · Yoonyong Yang*[†]

서울시립대학교 환경공학부 · *한국생명공학연구원 국가생명연구자원정보센터
Department of Environmental Engineering, University of Seoul

*Korean Bioinformation Center, Korea Research Institute of Bioscience & Biotechnology

(2010년 10월 18일 접수, 2010년 12월 27일 채택)

Abstract : Isolated the heterotrophic aerobic bacteria in sandfiltered water on NA and TSBA solid medium, selected 8 dominant species and identified by Sherlock System. Each samples are irradiated 0, 5, 16, 40 and 60 mJ/cm² using on CBD (Collimated Beam Device) Medium Pressure UV lamp after these identified bacterium did liquid culture how to make 10⁶~10⁷ cells/mL suspended in dilution water. Then cultured bacteria are estimated inactivation rate on plate media. Identified Gram positive group are *Bacillus Subtilis*, *Bacillus megaterium*, *Rhodococcus erythropolis* and *Microbacterium laevaniformans*; Gram negative group are *Pseudomonas vesicularis*, *Pseudomonas pseudoflava*, *Alcaligenes paradoxus* and *Zooglea ramigera*. These isolation of bacterium are more stronger reference strain and high resistance of MP UV irradiation, Besides Gram negative bacterium are more sensitive Gram positive bacterium on MP UV dose. Now we are estimating to 60~100 mJ/cm² MP UV dose for efficient disinfection in water treatment plant.

Key Words : Heterotrophic Bacteria, Medium Pressure UV Lamp, Gram Positive, Water Treatment Plant, Disinfection

요약 : 상수공급계 모래여과수에 존재하는 종속영양 호기성 세균을 NA 및 TSBA 고체배지로 분리하고 균체의 형태 및 색체로 구분 정량하여 우점종 8종을 선정, 정제하고 Sherlock System으로 동정하였다. 이들 각 종류의 세균에 대하여 액체배양 후 세정하여 10⁶~10⁷ cells/mL 증류수 현탁액을 조제하여 CBD 중압 자외선 램프로 0, 5, 16, 40, 60 mJ/cm² 조사량으로 조사한 후 희석, 평판배지에 접종 배양하여 생존 세균농도를 정량하여 불활성화율을 평가하였다. Gram 양성균으로 *Bacillus subtilis*, *Bacillus megaterium*, *Rhodococcus erythropolis*, *Microbacterium laevaniformans* 등이 Gram 음성균으로 *Pseudomonas pseudoflava*, *Pseudomonas vesicularis*, *Alcaligenes paradoxus*, *Zooglea ramigera* 등이 동정되었다. 분리된 세균종들은 중압 자외선 조사에 높은 저항성을 나타내었으며, 표준균주보다 강하였다. 또한 Gram 양성세균이 Gram 음성세균에 비해 월등히 강한 내성을 나타내었다. 중압 자외선 램프를 상수처리장의 소독목적으로 도입할 경우 60~100 mJ/cm²의 조사량으로 높여 조사하여야 할 것으로 판단된다.

주제어 : 종속영양 호기성세균, 중압 자외선 램프, Gram 양성, 상수처리장, 소독

1. 서론

1902년 염소소독법이 수돗물 병원성 미생물 소독에 도입된 이후로 이질, 콜레라, 장티푸스 등 수인성 전염병 확산 방지에 크게 공헌하였고 잔류효과가 높아 상수공급 계열에서 일어날 수 있는 후오염을 방지할 수 있어 오랫동안 선호하였다. 그러나 근년에 와서 수중에 존재하는 NOM (Natural Organic Material) 및 오염된 유기물과 반응하여 인체에 유해한 THM(Trihalomethane), HAAs(Haloacetic acids) 등 소독부산물(DBP, Disinfection Byproduct)이 생성되고 새롭게 발견되고 있는 병원체인 virus, 원생동물 등의 내성이 보고되고 있으며 이취미 물질이 생성되는 문제점들이 제기되고 있다.^{1,2)}

최근 과학문명의 발달에 의해 생활수준이 크게 향상되었고 건강에 대한 관심도도 크게 높아져 수돗물의 수질에 대

한 개선이 요구되어졌다. 이에 부응하기 위하여 소독방법 개선에 대한 연구도 활발해져 O₃, ClO₂ 등 새로운 소독제 도입 등에 대한 연구 실용화 방안도 크게 부각되었으나, 소독부산물이 생성되지 않고 새롭게 발견되는 많은 병원성 미생물에 대한 소독효과도 높은 자외선(UV, Ultraviolet)소독법에 대한 관심이 크게 높아지고 있다.³⁾

자외선 소독법은 1910년 프랑스 Marselie 지역 상수처리장에 최초 도입된 이래 1985년 기준 유럽각국은 400여 정수장에 2000년도 기준 미국은 2,000여 정수장에서 설치, 운영되고 있다.⁴⁾

상수소독에 도입되고 있는 자외선 램프는 2종류로 구분할 수 있는데 저압고출력 자외선 램프(Hg 압력 0.76 torr) 및 중압고출력 자외선 램프(Hg 압력 300~30,000 torr)가 있다. 현 상수처리장에서 가장 많이 도입하고 있는 저압 자외선 램프는 UV 조사 후 불활성화된 미생물의 암회복(Dark

[†] Corresponding author E-mail: tazmenia@kribb.re.kr Tel: 042-879-8546 Fax: 042-879-8519

repair) 및 광회복(Photoreactivation)율이 높은 단점이 있는 것으로 연구되고 있다. 반면 200~300 nm 범위의 자외선을 방출하는 중압 자외선 램프는 DNA, 단백질 등 세포구성물질에 고루 흡광되어 불활성화된 미생물의 암, 광회복율이 낮은 것으로 보고되고 있다.^{5,14)}

또한, 현 자외선에 의한 소독능은 저압 자외선 조사에 의한 효율이나 오랫동안 균주수집 보관소에서 계대배양되고 있는 표준균주를 이용하여 평가되고 있다.¹²⁾ 하지만 자연계에 존재하는 야생균주(Wild Strain)를 대상으로 한 중압 자외선 램프 소독효율에 대한 조사보고는 많지 않다.⁶⁾

따라서, 본 연구에서는 먼저 정수처리장 사여과수에 존재하는 종속영양 호기성 세균종을 대상으로 하여, 우점세균을 분리 및 동정한 후 중압 자외선 램프에 의한 불활성화를 검토하였다.

2. 실험재료 및 방법

본 연구는 2008년 6~10월중 서울시 상수공급계열인 G정수장 모래여과수를 15일 간격으로 10회 채수하여 세균을 분리하고 우점도 및 검출빈도가 높은 세균종을 선정하였다. 순수배양을 거친 이들 세균종을 동정하였고, 각 종에 대하여 중압 자외선 램프에서 발생하는 자외선을 조사하여 불활성화를 조사하였다.

2.1. 세균의 분리

수계에 존재하는 세균종에는 독립영양, 종속영양 호기성, 종속영양 혐기성 세균종 등이 존재할 수 있으나 우점도, 병원성, 수질에 미치는 영향 등을 고려하여 종속영양 호기성 세균종들을 연구대상으로 하였다. 이들 세균종을 분리하기 위하여 Table 1에 종합한 바와 같이 NA (Nutrient agar) 및 TSBA (Trypticase soybean broth agar)의 2종 고체배지를 이용하였다. 이를 통해 제조한 고체평판배지에 0.5 mL의 시료를 접종, 삼각병으로 무균도말하여 28~30°C로 3일간 배양하였다. 이로부터 형성된 균체(colony)는 형태, 색상 등을 토대로 검출빈도등이 높은 종을 순수분리하여 2°C 이하의 항온항습실에 보관하였다.⁷⁾

Table 1. Composition of medium used for bacteria isolation and culture (unit : g/L)

	Medium	NA	TSBA
Chemicals			
Agar		15.0	15.0
Beef extract		3.0	
Peptone		5.0	
Pancreatic digest of casein			17.0
Enz. digest of soybean meal			3.0
Glucose			2.5
NaCl			5.0
K ₂ HPO ₄			2.5

2.2. 세균의 동정

순수분리된 각 세균은 Sherlock System (More database version 3.9, GC-6890, Agilent, USA)을 이용하여 동정하였다. 이 동정체계는 세균의 세포벽 및 세포막을 구성하는 지방산 구성특성을 분석하여 동정하는 방법으로 종래 사용하였던 생리적 특성을 조사하여 동정하는 방법에 비하여 간편하며, 정확도가 높은 방법으로 알려져 있다.⁶⁾ 아울러 동정된 각 세균종의 특성은 문헌 *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*을 검색하여 확인하였다.⁸⁾

2.2.1. 시료의 준비

본 실험을 통해 동정한 박테리아 중 정수처리장에서 검출빈도와 우점도가 높은 8종의 종속영양 호기성 세균을 선정하였다.¹²⁾ 각 선정된 세균종은 분리된 배지의 액체배지에 접종하고 30°C, 120 RPM, 2일 동안 교반배양하여 5,000 g 10분간 원심분리하여 회수하고 멸균증류수에 현탁시켜 3회 세정하고 동정에 사용하였다.

2.2.2. 전처리 및 동정

Cell wall lipid analysis을 위해 Table 2에 종합한 바와 같은 4종의 시약을 준비하였으며 분리정제한 세균 40~60 mg을 시험관에 취하여 시액 1을 1 mL 가하고 10초 동안 진탕, 100°C 30분 동안 가열하여 가수분해하였다. 이어 시액 2를 2 mL 가하고 10초 동안 진탕, 80°C 10분간 열처리하여 Methyl화하였다. 다음으로 시액 3을 1.25 mL 가한 후 10분 교반하여 정제 추출하였다. 최종적으로 시액 4를 가하여 세정하고 상정액을 GC에 주입하였다. 상기에 명시한 전처리 과정을 Fig. 1에 종합하였다. 이로부터 Sherlock System 동정 결과를 판독하여 서로 다른 두종 이상이 동정되었을 경우 어느 한 종의 동정일치도가 0.5 이상이거나 1순위 종과 2순위 종의 동정일치도가 0.1 이상의 차이가 날 경우에 한해서 해당 미생물의 종명을 판정하였다.

2.3. 자외선의 조사

분리, 동정한 8종 세균을 액체배양하여 세정하고 자외선을 조사하여 생존 세균농도를 정량하여 불활성화율을 평가하였다.

Table 2. Chemical composition of pretreatment reagents

Reagents	Chemicals	Contents
Reagent 1 (Saponification)	Sodium hydroxide	45 g
	Methanol	150 mL
	D.W.	150 mL
Reagent 2 (Methylation)	6N HCl	325 mL
	Methanol	275 mL
Reagent 3 (Extraction Solvent)	Hexane	200 mL
	MTBE (Methyl Tert Butyl Ether)	200 mL
Reagent 4 (Base Wash)	Sodium hydroxide	10.8 g
	D.W.	900 mL

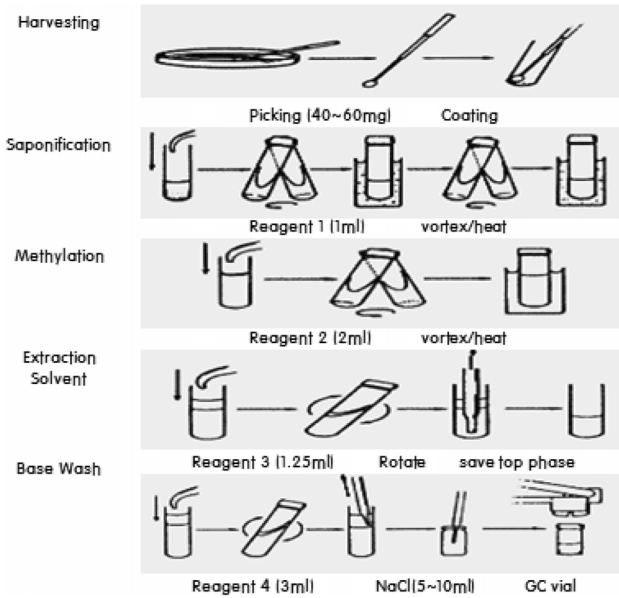


Fig. 1. Schematic diagram of pretreatment procedure.

Table 3. Culture conditions of each bacterium

Species	Liquid culture condition	Solid culture condition
<i>B. subtilis</i>	35°C, TSB, 24 hr, 120 rpm	35°C, NA, 24hr
<i>B. megaterium</i>	35°C, TSB, 24 hr, 120 rpm	35°C, NA, 24hr
<i>R. erythropolis</i>	35°C, TSB, 36 hr, 120 rpm	35°C, NA, 36hr
<i>M. laevaniformans</i>	35°C, TSB, 36 hr, 120 rpm	28°C, NA, 36hr
<i>P. vesicularis</i>	35°C, TSB, 24 hr, 120 rpm	35°C, TSBA, 36hr
<i>P. pseudoflava</i>	35°C, TSB, 24 hr, 120 rpm	35°C, NA, 24hr
<i>A. paradoxus</i>	28°C, TSB, 36 hr, 120 rpm	28°C, TSBA, 36hr
<i>Z. ramigera</i>	35°C, TSB, 36 hr, 120 rpm	35°C, TSBA, 36hr

2.3.1. 시험수 조제

분리, 동정한 8종 세균을 Table 3에 종합한 바와 같이 최적조건에서 액체배양한 후 5,000 g, 10분 원심분리하여 회수하고 멸균증류수로 3회 세정하여 시료로 사용하였다. 정제 세정한 각 세균종을 증류수로 희석하여 고체배지에 접종하여 농도를 구하였다. 이 시료를 재 희석하여 $10^6 \sim 10^7$ cells/mL되게 하여 자외선 조사 실험에 사용하였다.

2.3.2. 자외선 램프의 조사강도 결정

시료에 자외선을 조사하는 장치는 Fig. 2에 도시한 바와 같은 CBD (Colimated Beam Device) (Rayox®, Advanced Oxidation System Calgon, USA)장치를 사용하였으며 시료 중 세균에 도달하는 조사량을 보정하기 위한 Factor를 산정하기 위한 광도측정에는 UV용 광도계(Internation light IL 1400, detector No. Sel 240, USA)를 사용하였다. 이때 조사량 계산은 IUVA (International Ultraviolet Association)에서 제공하는 워크시트를 이용하였다.⁹⁾ 이때 시료부 중앙부와 외곽부에 도달하는 조사량의 차이를 보정하기 위해 중심부로부터 상하좌우로 0.5 cm 간격으로 광도를 측정하여 0.903 Petridish Factor를, 200~300 nm 파장대의 각 Lamp flux와

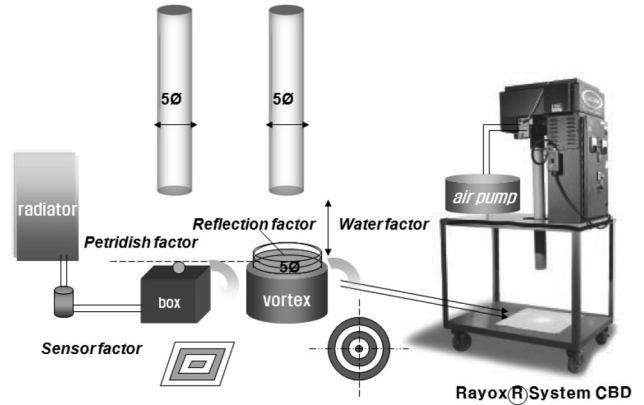


Fig. 2. Apparatus and Preparation for MP UV irradiation.

Germical Factor를 보정하여 1.194 Sensor Factor를 구하였다. 또한 다음 식 (1), (2)로부터 0.901 Water Factor 및 0.9986의 Divergence Factor를 구하였다.⁹⁾

$$\text{Water Factor} = \frac{1 - 10^{-al}}{al \ln(10)} \quad (1)$$

a : Absorption coefficient (cm^{-1}), l =water path length (cm)

$$\text{Divergence Factor} = \frac{L}{L+l} \quad (2)$$

L : Distance from UV lamp to the water surface (cm)

GF X WF X DF값과 200~300 nm 파장별 Lamp flux의 곱에서 1,000을 나누어 0.6893의 Weighed Factor를 계산하였다. 이들 값들과 시료의 중앙부 광도인 0.355 mW/cm^2 에 곱하여 시료중 미생물에 도달하는 조사강도 0.256 mW/cm^2 값을 구하였다. 자외선 조사량은 이 조사강도와 조사시간의 곱에 의해 산정되었다.

2.3.3. 중압 자외선 조사실험

시료부 petridish에 $10^6 \sim 10^7$ cells/mL 세균현탁액 10 mL를 가하고, 200 RPM으로 교반하여 중압 자외선 램프로 0, 5, 16, 40, 60 mJ/cm^2 광량을 각각 조사하였다. 그런 다음 조사하지 않은 시료 및 조사한 시료를 10배씩 단계별로 희석하였다. 이때 각 단계별로 3개의 고체배지에 접종, 배양하고 각 형성된 군체(colony)수를 평균계수하여 소독능을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 분리 및 동정

군체의 형태 및 색상으로 보아 G상수처리장 모래여과수에서 분리된 중속영양 호기성 세균종은 약 30여종으로 조

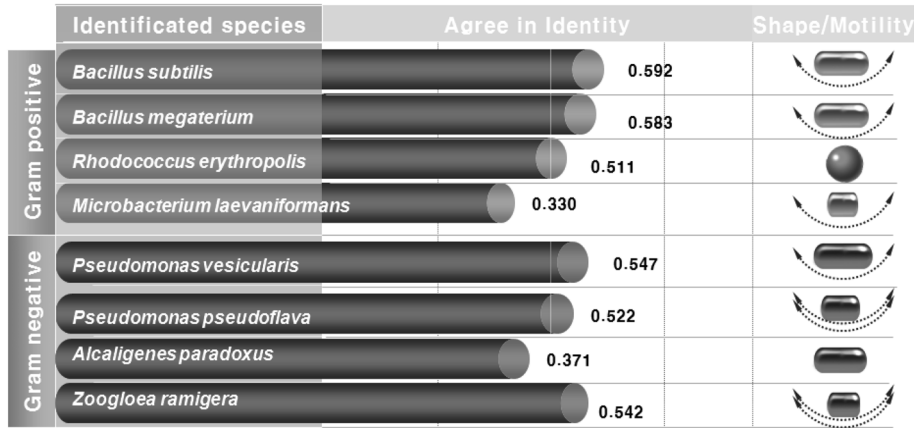


Fig. 3. Genetics relation and characteristics of identified bacteria.

사되었으며, 이 중 우점도와 분리빈도가 높은 8종을 선별하였다.^{6,12)} 8종의 균체색상은 흰색 1종, 희고거친 색상 1종, 레몬색상 4종, 노란색상 1종, 분홍색상 1종이었으며, 각각 순수분리하여 동정 및 중압 자외선 램프 소독력 실험에 도입하였다.⁸⁾ 동정결과는 다음 Fig. 3에 종합한 바와 같다. Gram 양성균으로 *Bacillus Subtilis*는 대표적인 소독능 지표세균으로 긴 간상균 형태이며 GC Ratio 41.5~47.5%, *Bacillus megaterium*은 역시 긴 간상균으로 GC Ratio 37.3%, *Rhodococcus erythropolis*는 구균이며 GC Ratio 67~71%, *Microbacterium laevaniformans*는 짧은 간균이며 73%로 조사되었다. 또한 Gram 음성균으로 *Pseudomonas vesicularis*는 복막염을 유발하는 긴 간상균 형태이고 GC Ratio 65.8%, *Pseudomonas pseudoflava*는 짧은 간상균이며 GC Ratio 66.5~68.0%, *Alcaligenes paradoxus*는 긴 간상균이며 GC Ratio 66.8~69.4%, *Zoogloea ramigera*의 경우 미생물 팽화를 유발하는 짧은 간상균이고 GC Ratio 65.3%였다. *B. megaterium* 및 *B. subtilis*의 GC분율은 낮았고 *R. erythropolis* 및 *A. paradoxus* 두 종은 비운동성이었다.

3.2. Gram 양성세균의 소독

모래여과수에서 분리한 세균에 중압 자외선 램프에서 방출되는 자외선을 조사하여 소독, 불활성화율을 조사한 자료를 회귀분석하면 다음 Fig. 4, Fig. 5에 도식한 바와 같다. 5 mJ/cm²의 낮은 조사량으로 조사한 경우 2 log 내외의 소독력을 나타내나 높은 조사량을 조사한 경우 상대적으로 강한 저항성을 나타내는 것으로 분석된다. 이러한 현상은 표준균주를 대상으로 한 실험결과와 다소 차이가 난다. 자외선이 미생물에 소독효과를 나타내는 기전은 DNA에 흡수되어 DNA 사슬의 인접한 Thymine 이량체를 형성함으로써 유전자를 복제 발현하는 mRNA의 합성을 방해하여 유전자 복제를 저해하고 세포막을 파괴하여 물질투과성을 방해하며, 또 효소계열에 작용하여 물질대사 기능을 파괴함으로써 불활성화 되는 것으로 알려져 있다.¹¹⁾ Gram 양성세균의 경우 세포벽의 peptidoglycan층이 Gram 음성세균에 비하여 두껍고 외곽구조도 견고한 유기물로 구성되어 있으므로 높

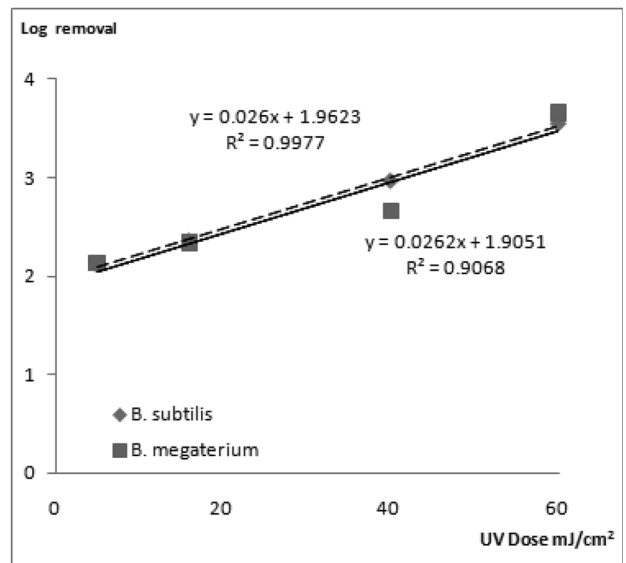


Fig. 4. MP UV fluence-response curves for *B. subtilis* and *B. megaterium* inactivation.

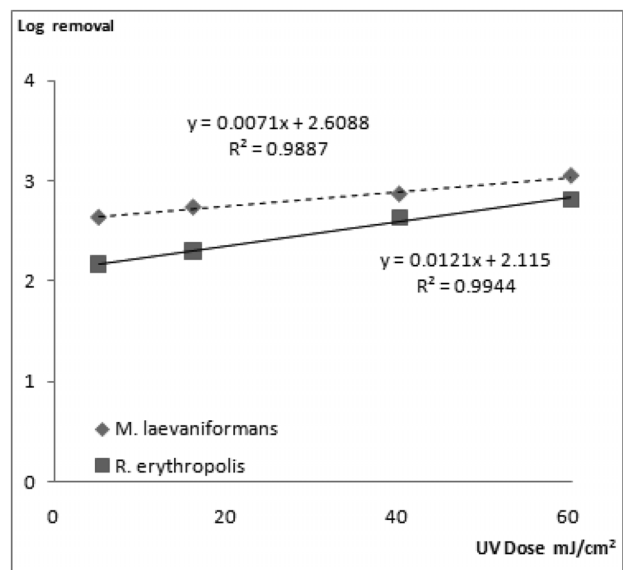


Fig. 5. MP UV fluence-response curves for *M. laevaniformans* and *R. erythropolis* inactivation.

은 자외선 차단효과를 나타내기 때문으로 생각된다. 또한 주로 200~300 nm의 영역의 파장을 지닌 중압 자외선 램프는 저압 자외선 램프에 비해 DNA 흡수파장인 254 nm 조사량이 낮게 방출되는데도 그 원인이 있는 것으로 사료된다. 한편, Fig. 4와 Fig. 5에 도식화된 그래프의 R²값과 반응식으로부터 그람양성 야생균주 4종을 3 log 제거하는데 40~70 mJ/cm²의 중압 자외선 조사량이 필요한 것으로 분석되며, 이결과는 기존의 보고 자료와 유사하였다.¹²⁾

3.3. Gram 음성세균의 소독

본 연구에서 조사한 Gram 음성세균종의 중압 자외선 램프에 의한 소독효과 조사자료를 회귀분석한 결과는 다음

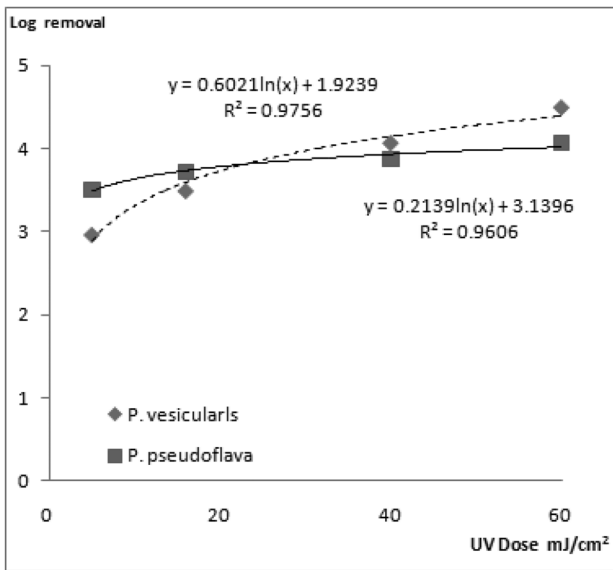


Fig. 6. MP UV fluence-response curves for *P. vesicularis* and *P. pseudoflava* inactivation.

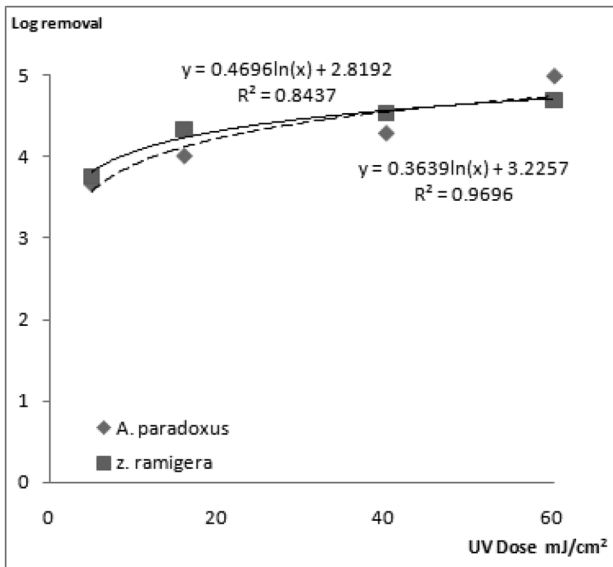


Fig. 7. MP UV fluence-response curves for *A. paradoxus* and *Z. ramigera* inactivation.

Fig. 6, Fig. 7에 종합한 바와 같다. 5 mJ/cm²의 낮은 조사량으로 3.0~3.8 log의 높은 소독력을 나타내며 60 mJ/cm²의 높은 조사량으로 조사하여도 4.0~5.0 log의 불활성화율을 나타내어 1 log 정도의 증가에 그친다. 대체적으로 Gram 음성세균은 중압 자외선 조사에 감수성이 높은 것으로 보여지며,¹⁵⁾ 조사강도를 높였을 때 효과는 미미하다고 해석할 수 있을 것 같다. 이러한 결과는 Gram 음성세균의 세포벽이 얇아 자외선 투과율이 높아 DNA 및 효소불활성화 반응이 낮은 조사량에서 종결되는 것으로 결론지을 수 있을 것 같다. 일반적으로 야생종이 표준균주에 비하여 자외선 감수성이 낮은 것으로 보고되고 있으나, Gram 음성세균의 경우 그 차이가 비교적 큰 것으로 판단된다. 한편, Fig. 6과 Fig. 7에 도식화된 그래프의 R²값과 반응식으로부터 야생균주 4종 전부 5 mJ/cm²의 조사량에서 3 log 이상의 불활성화가 얻어졌고, 4 log 제거에 10~50 mJ/cm²의 조사량이 필요한 것으로 나타났다. 이 결과는 기존 조사연구 자료와 거의 일치한다.¹²⁾ 또한 0~5 mJ/cm²의 조사량에서 급격히 불활성화가 진행되고, 그 이후는 서서히 진행되는 결과가 얻어졌는데, 이로부터 양성세균, 음성세균 모두에 대해 5 mJ/cm² 이하의 낮은 조사량에서의 불활성화 검토가 필요하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구결과를 종합하면 중압 자외선 램프의 세균 소독능은 저압 자외선 램프에 비하여 낮고, 야생종에 대한 소독효과가 표준균주에 대한 소독효과보다 낮으며, Gram 양성세균의 소독효과는 음성세균의 소독효과보다 크게 낮은 것으로 나타났다.¹⁴⁾ 저압 고풍력 자외선 램프의 경우 virus, 세균, 원생동물들의 각각 2 log, 4 log, 3 log 제거에 필요한 조사량인 40 mJ/cm²의 자외선 소독공정을 도입하는 상수처리장 운전지표로 권장하나, 중압 자외선 램프를 도입할 경우 유해 야생균주의 3 log 제거에 필요한 70 mJ/cm² 내외로 조사량을 상향조정하여 운전하여야 할 것으로 여겨진다.¹³⁾

사 사

본 연구는 2007년도 서울시립대학교 연구비 지원에 의해 이루어 졌으며, 이에 감사드립니다.

KSEE

참고문헌

1. 장현성, 이도원, 김창모, 이인숙, 박현, “서울시 수돗물에서의 소독부산물 분포특성,” *J. Ins. Industrial Technol.*, **12**, 97~102(2004).
2. Chang, E. E. and Chiang, P. C., “Characteristics of organic

- precursors and their relationship with disinfection by-products," *Chemosphere*, **44**, 1231~1236(2001).
3. Wolte, R. L., "Ultraviolet disinfection of portable water," *Environ. Sci. Technol.*, **24**(6), 768~773(1990).
 4. Henry, V., Helbronner, A., Recklinghausen, M., "Nouvelles recherches sur la sterilization de grandes quantites d'eau par les rayons ultraviolets," *Comp. Rend. Acad. Sci.*, **151**, 677~680(1910).
 5. Harris, G. D., Adams, V. D. Sorensen, D. L. and Curtis, M. S., "Ultraviolet inactivation of selected bacteria and virus with photoreactivation of the bacteria," *Water Res.*, **21**(6), 687~692(1987).
 6. 안승구, 김종문, "저압 및 중압 UV시스템 비교평가 연구," 서울특별시 상수도연구원(2006).
 7. Ranold M., Atlas, "Handbook of microbial media," CRC press(2000).
 8. John, G. Holtetal, "Bergey's manual of systematic bacteriology," williams and wilkins, Baltionore USA, 1-4, (2005).
 9. <http://www.iuva.org>
 10. Zuzana Bohrerova, Hilla Shemer, Robert Lantis, Christopher A. Impellitteri, Karl G. Linden, "Comparative disinfection efficiency of pulsed and continuous-wave UV irradiation technologies," *Water Res.*, **40**(4), 721~727(2006).
 11. Masschelein, W. J., "Ultraviolet Light in Water and Waste-water Sanitation," LEWIS PUBLISHERS(2002).
 12. Hijnen, W. A. M., Beerendonk, E. F. and Medema, G. J., "Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water; A review," *Water Res.*, **40**, 3~22(2006).
 13. Kruithof, J. C., Van der Leer, R. C., Hijnen, W. A. M., "Practical experiences with UV disinfection in The Netherlands," *J. Water SRT-Aqua*, **41**(2), 88~94(1992).
 14. Zimmer, J. L., Slawson, R. M. and Huck, P. M., "Inactivation and potential repair of *Cryptosporidium parvum* following low- and medium-pressure ultraviolet irradiation," *Water Res.*, **37**, 3517~3523(2003).
 15. Oguma, K., Katayama, H. and Ohgaki, S., "Photoreactivation of *Escherichia coli* after low- or medium-pressure UV disinfection determined by an endonuclease sensitive site assay," *Appl. Environ. Microbiol.*, **68**, 6029~6035(2002).