

UV 불활성화 효과에 의거한 *E.coli*, RNA 및 DNA 박테리오파지의 대체 지표 미생물로서의 적용성 검토

Applicability Investigation of *E.coli*, RNA and DNA Bacteriophages for Possible Indicator Microorganisms Based on the Inactivation Effectiveness by UV

김일호[†] · 와히드 마피아 · 타나카 히로아키
Il-Ho Kim[†] · Marfiah AB Wahid · Hiroaki Tanaka

교토대학 대학원 공학연구과 부속 유역권 종합환경질 연구센터

Research Center for Environmental Quality Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University

(2010년 8월 24일 접수, 2010년 11월 26일 채택)

Abstract : This study compared UV and UV/H₂O₂ inactivation of *E.coli*, a possible indicator microorganism for fecal contamination of water, and QB phage, an indicator for pathogenic viruses. UV inactivation of QB, T4 and lambda phages in actual secondary effluent was investigated, too. As a result, similar inactivation efficiency between QB phage and *E.coli* was observed during UV treatment, while QB phage showed higher resistance to UV/H₂O₂ than *E.coli*. QB phage resistance to UV or UV/H₂O₂ does not reflect those of all pathogenic viruses. However, the result tells that the use of *E.coli* inactivation efficiency in evaluating microbiological safety of water could not always ensure the sufficient safety from pathogenic viruses. Meanwhile, QB phage showed less resistance to UV than T4 and lambda phages, indicating that the use of QB phage as an indicator virus may bring insufficient disinfection effectiveness by causing the introduction of lower UV dose than required. Consequently, it can be thought that T4 or lambda phages would be more desirable indicators in ensuring the sufficient disinfection effectiveness for various pathogenic viruses.

Key Words : Pathogen, *E.coli*, Bacteriophage, UV, Water Reuse

요약 : 본 연구는 유효한 분변오염의 지표 미생물로서 제안되고 있는 *E.coli*와, 병원성 바이러스에 대한 지표 미생물로 추천되는 QB 파지의 UV 및 UV/H₂O₂에 대한 내성을 비교하였다. 이 결과에 의거, 병원성 바이러스 관리를 위한 *E.coli* 규제의 유효성을 고찰하였다. 또한, 병원성 바이러스에 대한 대체 지표 미생물로서, QB 파지, T4 및 lambda 파지의 실제 하수 2차 처리 수중에서의 UV 불활성화를 비교하였다. 실험결과, QB 파지와 *E.coli*는 UV에 대해 거의 동등한 내성을 보였으나, UV/H₂O₂ 공정에 대해서는 *E.coli*보다 QB 파지가 더 높은 내성을 보였다. 이로부터, QB 파지가 모든 병원성 바이러스의 UV 또는 UV/H₂O₂에 대한 내성을 대표한다고 할 수는 없을지라도, 지표 미생물로서 *E.coli*의 불활성화 효과에만 의존하는 것은, 소독공정에 따라서는 바이러스류에 대해 충분한 소독효과를 얻지 못할 수도 있음을 알 수 있었다. 한편, T4 및 lambda 등 DNA 파지와 불활성화를 비교하였을 경우, QB 파지가 UV에 대해 더 낮은 내성을 보였다. 따라서, 불활성화에 대한 지표 바이러스로서 QB 파지의 이용은 낮은 UV 조사량의 도입에 의해 결과적으로 불충분한 소독효과를 초래할 수도 있을 것 같다. 이 결과는, 병원성 바이러스류에 대해 보다 충분한 불활성화를 달성하기 위해서는 RNA 파지인 QB보다 T4 및 lambda 등 DNA 파지가 지표 바이러스로서 보다 유효할 수 있음을 보여준다.

주제어 : 병원성 미생물, 대장균, 박테리오파지, 자외선, 하수 재이용

1. 서론

최근 환경중에 존재하는 바이러스나 원생동물류에 의한 수역의 감염이 문제화되고 있다. 지금까지 상수도 및 하수도 분야에서 염소처리를 중심으로 한 소독방법의 도입에 의해 수역의 감염 위험성은 크게 낮아져 연구의 관심밖에 있었다. 그러나, 최근의 연구들은 enteroviruses, human adenoviruses, *cryptosporidium*과 같은 다양한 종류의 병원성 미생물이 저농도이기는 하지만, 환경중에 어느 정도 존재하고 있음을 보여준다.¹⁻⁴⁾ 병원성 미생물에 의한 사람이나 동물의 감염은, 피감염체내에서의 증식에 의해 보다 높은 부하의 병원성 미생물의 외부 배출을 초래하게 된다. 이러한 부하를 받는 하수처리장에서 병원성 미생물을 충분히 제거하지 못하는 경우에는 처리수의 방류수역에의 부하증가를 유

발함으로써, 결과적으로 수역의 감염문제 뿐만 아니라 수역 인근으로의 감염확대 문제를 발생시킬 수도 있다. 한편, 하수처리수는 도시의 대체 수자원으로도 주목받고 있어, 병원성 미생물에 대한 안전성 확보 측면에서 재이용 용도별로 대장균군수 및 잔류염소농도의 목표수질이 설정되어 있다. 그러나, 하수 재이용시 병원성 바이러스에 대해서는 수질기준이나 처리법에 대한 가이드라인이 설정되어있지 않아 안전성 확보를 위한 대응방법이 요구되고 있다. 현재 이용되고 있는 지표 미생물중 하나인 분변오염의 지표 미생물(대장균군)이 수중 병원성 바이러스의 존재량과 크게 상관성이 없는 것으로 알려져,^{5,6)} 바이러스의 감염 리스크를 정확히 평가하는 것은 불가능하다. 따라서, 감염 리스크가 있는 바이러스, 세균 및 원생동물들의 각각에 대한 적절한 지표 미생물을 선택하여 이용하는 방안에 대한 검토도 필요

[†] Corresponding author E-mail: jinker123@gmail.com Tel: +81-77-527-6329 Fax: +81-77-524-9869

하다. 이상적인 지표 미생물로서 갖추어야 할 필요조건은 병원성 미생물과 같이 보편적으로 존재할 것, 존재량이 병원성 미생물과 거의 유사하거나 그 이상일 것, 비감염성 또는 감염성이 낮을 것, 그리고 환경조건이나 수처리에 대한 내성이 병원성 미생물과 동일한 정도 또는 그보다 높을 것 등이 있다.⁷⁾

본 연구에서는 바이러스에 대한 지표 미생물로서 이용성이 높은 것으로 알려져 있는 QB 파지(RNA 바이러스)의 UV 및 UV/H₂O₂ 소독에 대한 내성을 실제 하수 2차 처리수를 이용하여 검토하였다. 또한, QB 파지의 내성을, 유효한 분변오염의 지표 미생물로서 제안되고 있는 *E.coli*의 내성과 비교함으로써, 병원성 미생물에 의한 감염 리스크의 관리를 위한 *E.coli*의 이용에 대한 유효성을 검토하였다. 마지막으로, 바이러스에 대한 지표 미생물로서 DNA 바이러스인 T4 및 lambda 등의 박테리오파지의 UV 내성을 *E.coli* 및 QB 파지와 비교, 검토하여, 수처리 측면에서 지표 미생물의 이용가능성을 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1. 대상 미생물의 선정 및 준비

본 연구에서는 지표 세균으로서의 *E.coli*와, QB, T4 및 lambda 등 세 종류의 박테리오파지 등 총 네 종류의 미생물을 선정하였다. 분변오염의 지표 미생물로서 대장균군이 이용되고 있으나, 유럽이나 미국 등지에서는 이미 *E.coli*를 채용하고 있는 경우가 많으며, 일본에서도 기존의 대장균군에서 대장균으로 기준을 변경하고자 하는 움직임이 있다.⁸⁾ 일반적으로, *E.coli*는 인간의 분변중에 존재하는 대장균군의 약 11%를 차지하는 것으로 알려져 있으며,⁹⁾ 과거와 달리 현재는 그 측정법이 일반화되면서 대장균군보다 유효한 지표 미생물로서 제안되어 왔다.

한편, 박테리오파지의 경우, 하수나 슬러지중에서 증식할 수 있어서 수중의 병원성 바이러스의 존재량과의 차이가 발생할 가능성이 있다는 점 등 지표 미생물로서 요구되는 조건을 만족하지 못하는 항목이 존재한다. 현재, Adenovirus, Human poliovirus와 Torque teno virus 등 역시 지표 바이러스의 후보들로서 주목을 받고 있지만, 여전히 박테리오파지의 지표 바이러스로서의 이용성에 대해서도 그 유효성이 검토되고 있으며,^{10,11)} 박테리오파지중 QB 파지가 지표 바이러스로서 가장 많이 연구되고 있다. QB 파지는 single-stranded RNA (ss-RNA)로 구성되며, RNA 파지에 속한다. FRNA 파지는 지표 미생물에 요구되는 수질평가 및 모니터링 항목을 만족하는 것으로 기존 연구자들에 의해 보고된 바 있다.¹²⁾ 이와 같은 FRNA 파지의 대표적인 바이러스로서 본 연구에서는 QB 파지를 선정하였다. Lambda 파지 및 T4 파지는 double-stranded DNA (ds-DNA) 박테리오파지로서, *E.coli*를 감염시키는 DNA 바이러스이다. Lambda 파지는 *Caudovirales*과에 속하며, envelop를 갖지 않고, 두부는

Table 1. Suppliers of each microorganism

균주 항목	구입/제공처
O K12 A/λ(F ⁺) Qβ, lambda 파지	National Institute of Technology and Evaluation의 Biological Resource Center (일본)
T4 파지	동경대학교 (일본)

Table 2. Preparation of tested water for *E.coli* inactivation experiment

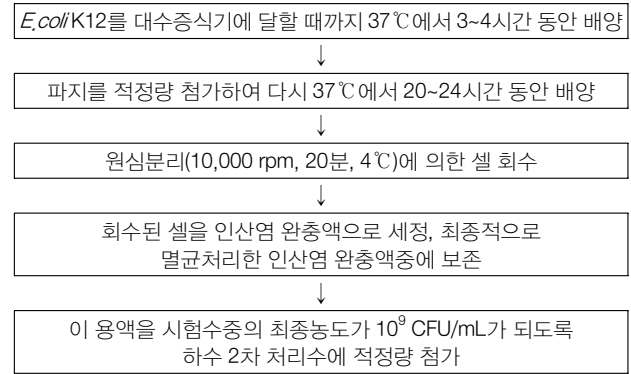
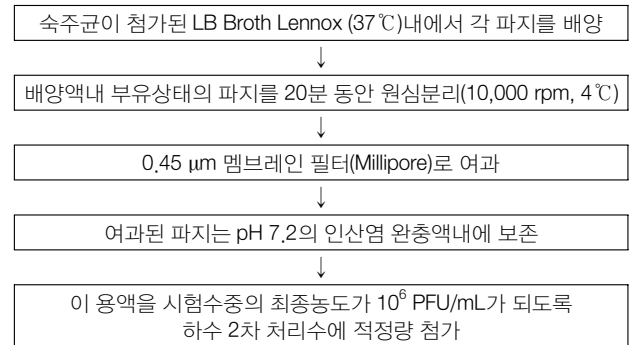


Table 3. Preparation of tested water for each phage inactivation experiment



정이십면체이며, 꼬리부는 대칭의 나선형으로 이루어져 있다. T4 파지 역시 *Caudovirales*과에 속하며, 두부는 정이십면체 구조이고, 꼬리부 역시 대칭의 나선형으로 이루어져 있어, 외관상 lambda 파지와 유사한 형태를 하고 있다. 본 실험에서 이용한 QB, lambda 및 T4 파지의 숙주균으로는 *E.coli* K12 A/λ(F⁺)을 이용하였으며, 각 균주의 구입 및 제공처는 Table 1에 제시한 바와 같다. Table 2와 3에는 각 불활성화 실험을 위한 시험수의 준비과정을 제시한다.

2.2. 불활성화 실험

본 실험을 위한 시험수로는 6.2에서 6.5의 pH와 2 NTU 이하의 탁도를 갖는 하수 2차 처리수를 이용하였으며, SS 성분에 의한 소독효과의 저하를 억제하기 위해, 하수 2차 처리수를 간이 사여과장치로 여과한 후, 실험에 이용하였다. 이 하수 2차 처리수의 용존유기탄소(DOC) 농도와 UV₂₅₄는 각각 4~5 mg/L와 0.056~0.070/cm였다. 인산염 완충액내에 존재하는 각 미생물을 미리 준비한 일정량의 하수 2차 처리수에 첨가함으로써 불활성화 실험을 개시하였다. 시험수

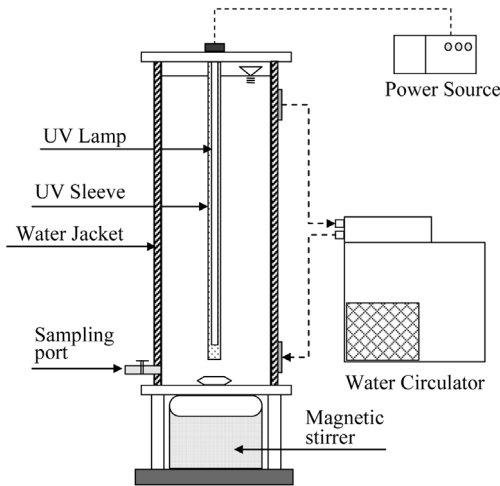


Fig. 1. Schematic diagram of reactor.

중의 각 파지 및 *E. coli*의 초기농도는 각각 10^6 PFU/mL과 10^9 CFU/mL로 조정하였다. 모든 실험은 1.7 L의 유효용량을 갖는 실험실 규모의 원통형 회분식 반응조를 이용하여 진행되었다(Fig. 1).

매 실험시의 시험수의 온도는 냉각수 순환장치를 이용하여 반응조 외부에 냉각수를 흘려보냄으로써 20°C로 유지하였다. 실험에 이용된 UV 램프(Iwasaki Electric Co., Ltd, Japan)는 254 nm 파장을 방출하는 저압 수은램프이며, 제조사에 의해 제공된 UV 조사강도는 0.640 mW/cm^2 이다. 각 불활성화 실험은 15분 동안 진행되었으며, UV 램프의 안정화를 위해 각 실험전 5분 이상 UV 램프를 켜놓은 상태로 유지한 다음, UV 램프를 반응조에 장착시키는 방식으로 불활성화 실험을 수행하였다. 또한, *E. coli* 및 QB 파지의 불활성화 실험시에는 UV 처리 뿐만 아니라 UV/H₂O₂ 처리에 대한 내성을 확인하기 위하여, 시험수에 H₂O₂를 첨가하여 시험수중의 초기 H₂O₂ 농도가 각각 2, 4, 6 mg/L가 되도록 하였다.

2.3. 대상 미생물의 분석

*E. coli*는 평판배양법에 의해 측정하였으며, 측정용 배지로는 특정효소기질 한천배지 「닛스이」(Nissui Pharmaceutical Co., Ltd, Japan)를 사용하였다. 평판배양법은 시료와 혼합한 배지를 petri dish상에서 배양하는 방법으로, 37°C에서 20±2시간 동안 배양한 후 형성된 colony수를 계수하여 CFU (Colony Forming Unit) /mL로써 농도를 계산하였다. 특정효소기질 한천배지를 이용한 *E. coli*의 측정시에는, 대장균이 특이적으로 보유하는 β-D-glucuronidase의 효소에 의해 청색의 colony가 형성된다.

박테리오파지의 배양 및 분석은 대장균 파지측정법¹³⁾ 및 上條¹⁴⁾의 방법을 참고하였다. 먼저, 초순수 1 L당 LB Broth Lenox 20 g을 용해시켜, 고압증기 멸균처리한 것을 배양액으로 이용하였다. 이 배양액에 *E. coli* K12를 첨가하여 대수 증식기에 달할 때 까지 37°C에서 3~4시간 동안 배양하였다. 그 후, 각각의 파지를 첨가하여 다시 37°C에서 20~24시간

Table 4. Composition of overlay agar medium

	상층배지		하층배지	
	g/1,000 mL-Milli-Q			
LB Broth Base	20		20	
Bacto Agar	8		11	
CaCl ₂ ·2H ₂ O	1		1	

배양한 후, 유리섬유여지(GF/C, Whatman), 0.45 μm 공극의 멤브레인 필터(Advantec)로 여과하여 고농도의 파지 원액을 준비하였다. 각 파지의 농도측정에는 중층 한천배지법을 이용하였다.^{14,15)} 먼저, 준비한 고농도의 파지 원액을 9 mL씩 멸균처리한 시험관에 분주하여, 이를 희석액으로 이용하였다. 중층 한천배지의 조성을 Table 4에 제시한다. 멸균처리한 하층 한천배지를 petri dish상에 고형화시킨 후, 30~300 정도의 plaque수가 되도록 희석한 시료를 1 mL 첨가하였다. 멸균처리한 상층배지에는 *E. coli* K12를 첨가한 다음, 시료를 중층하였다. 37°C에서 20~24시간 배양한 후 형성된 plaque수를 계수하여 30~300의 범위에 들어가는 plaque수에 희석배율을 곱하여 PFU (Plaque Forming Unit) /mL를 단위로 하는 파지농도를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. UV 및 UV/H₂O₂에 의한 *E. coli*의 불활성화

분변에 의한 오염을 보다 정확하게 예측할 수 있는 지표 미생물로서 제안되고 있는 *E. coli*의 UV 및 UV/H₂O₂에 의한 불활성화를 검토하였다. Fig. 2는 UV조사량에 따른 하수 2차 처리수중 *E. coli*의 log불활성화를 보여준다. Log 불활성화값은 2회 평균치로 나타내었다. UV를 단독으로 이용하였을 경우, 77 mJ/cm²에서 평균 3.4 log, 230 mJ/cm²에서 평균 6 log의 불활성화가 얻어진 것을 알 수 있다. 현재, 일본의 하수도 유지관리지침¹⁶⁾에서는 하수 2차 처리수중 대장균군의 1 log, 2 log, 3 log를 위해 각각 150~200 mJ/cm², 200~300 mJ/cm², 300~500 mJ/cm²의 UV 조사량의 도입이 권장되고 있다. 다른 수질특성 때문에 UV 조사량의 절대적인 비교는 다소 무리가 있지만, 상기의 결과를 비교

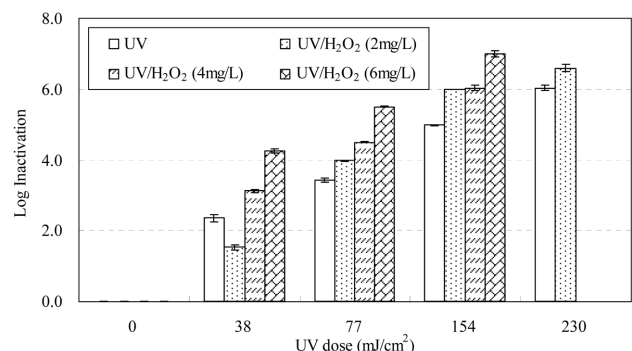


Fig. 2. Log inactivation of *E. coli* in secondary effluent by UV and UV/H₂O₂.

하면 *E.coli*의 불활성화에는 대장균군의 경우보다 훨씬 낮은 UV 조사량이 요구될 것으로 추정할 수 있다.

UV/H₂O₂ 처리는 의약품과 같은 미량오염물질의 높은 제거능 때문에 최근 그 적용이 주목을 받고 있으며, 미량물질의 제거와 동시에 소독효과도 달성할 수 있는 공정으로 여겨지고 있다. 여기서는 하수 2차 처리수를 대상으로 한 소독효과에 대해 UV 단독처리수와 비교, 검토를 행하였다. Fig. 2에서 볼 수 있는 바와같이, UV 소독시 H₂O₂의 초기농도를 2 mg/L에서 4 mg/L, 6 mg/L로 증가시킴에 따라 *E.coli*의 불활성화율도 개선되는 것으로 나타났다. *E.coli*의 불활성화에 관한 기존 연구¹⁷⁾에서도, UV/TiO₂ 공정 동안 생성된 OH 라디칼이 *E.coli*의 불활성화에 큰 역할을 한 것으로 보고한 바 있다. 본 실험에서는 OH 라디칼 생성을 목적으로 한 H₂O₂의 첨가에 의해 154 mJ/cm²의 UV 조사량에서 6~7 log의 불활성화가 얻어져, H₂O₂ 첨가가 *E.coli* 소독에의 필요 UV 조사량의 감소를 가져올 수 있음을 알 수 있다.

전체적으로 UV 조사량의 증가에 따라 불활성화 속도가 감소, 즉 낮은 UV 조사량에서는 *E.coli*의 불활성화 속도가 증가하다가 높은 조사량에서는 감소하는 경향을 보였다. 이는 UV 조사량에 대한 의존성 때문이라고 판단되며, 실제로 동일한 조사량에 대해서도 다양한 log 불활성화율이 얻어지는 경우가 있다. 이러한 UV 조사량에 대한 의존성이 발생하는 원인으로는, 대상 미생물이 수중에서 응집되어 있거나 현탁물질에 부착함으로써, 대상 미생물이 UV 조사로부터 보호되기 때문으로 생각된다. 다른 이유로는 대상 미생물의 생리학적 상태와 관련되어 있을 수도 있다. UV 조사량이 낮은 경우에는 세포내에서 유전자의 손상을 회복할 수 있는 기작이 존재할 수도 있다.¹⁸⁾ 그러나, 조사량에 대한 의존성이 어떠한 원인에 의해 발생하는지를 명확히 이해하는 것도 UV의 실 적용을 위한 중요 자료이기는 하지만, 실제 UV 조사량에 대한 의존성이 존재하는 경우, UV 소독장치의 설계시 낮은 조사량에서 장시간 조사를 행하거나 또는 보다 높은 조사강도를 갖는 UV 램프를 이용하여 단 시간에 조사를 행하는 방법을 이용하는 것이 바람직하다.

3.2. UV 및 UV/H₂O₂에 의한 Q β 파지의 불활성화

바이러스 오염의 지표 미생물로 파지의 이용이 제안된 이래,¹⁹⁾ 그 유효성에 대해 논란이 있어왔다. 예를 들면, enteric virus(장관계 바이러스)가 매우 낮은 농도로 존재하는 곳에서도 상당수의 파지가 존재할 수 있기 때문에 파지를 지표 바이러스 미생물로 이용하기에는 적절치 않다는 의견도 있었다.²⁰⁾ 그러나, 파지는 장관계 바이러스와 유사한 거동을 보이며, 환경적 스트레스에도 강하여 하수처리의 효율성을 더 정확하게 평가하는데 이용될 수 있는 것으로 보고된 바 있다.¹⁹⁾ 본 연구에서는 UV 및 UV/H₂O₂ 처리에 대한 실험 하수 2차 처리수중의 Q β 파지의 불활성화율을 검토하였다. UV 단독처리의 경우, 77 mJ/cm²에서 평균 3.3 log, 230 mJ/cm²에서 평균 5.7 log의 불활성화가 얻어져, 3.1에

서 제시한 *E.coli*의 불활성화 결과와 비교시 UV에 대하여 거의 동등한 내성을 보임을 알 수 있다. 한편, UV와 H₂O₂를 병용한 경우, 2 mg/L, 4 mg/L의 저농도 조건에서는 UV 단독처리와 비교시 다소 저하된 불활성화를 보이는 등 OH 라디칼이 Q β 파지의 불활성화에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이는 저농도의 H₂O₂ 조건에서 생성된 소량의 OH 라디칼이 *E.coli*의 세포막에 쉽게 손상을 가하는 경우와는 달리, Q β 파지의 단단한 구조의 capsid의 파괴에는 충분하지 못했기 때문으로 생각된다. 이 외에도 시험수중의 유기물 및 스캐빈저의 농도 등 수질인자 역시 UV 처리시 H₂O₂의 첨가효과가 나타나지 못한 원인으로 예상될 수 있다. 한편, 6 mg/L일 경우 UV 단독처리에 비해 불활성화가 월등히 개선되었다. OH 라디칼의 Q β 파지 불활성화에의 기여는 UV/TiO₂ 공정을 이용한 실험으로 증명된 바 있다.²¹⁾ UV/TiO₂ 공정동안 Q β 파지의 RNA농도의 감소가 관찰되었으며, 이는 UV/TiO₂ 공정동안 생성된 OH 라디칼이 Q β 파지의 핵산을 손상시켰기 때문으로 보고하였다. 본 연구에서의 결과로부터도 역시 OH 라디칼에 의한 Q β 파지의 불활성화 개선이라고 예상되나, 향후, UV/H₂O₂ 공정 동안 OH 라디칼의 생성과 Q β 파지의 불활성화와의 관계에 대해 추가적인 검토가 필요할 것이다. *E.coli*는 UV/H₂O₂ 공정동안, 154 mJ/cm²의 UV 조사량에서 6~7 log의 불활성화가 얻어진 반면, 동일한 조사량에서 Q β 파지는 4.1~5.7 log의 불활성화가 얻어졌다. 이는 *E.coli*보다 Q β 파지가 UV/H₂O₂ 공정에 더 내성을 갖는다는 것을 보여준다. 일반적으로 OH 라디칼은 주로 세포막 또는 세포벽을 파괴함으로써 세균이나 바이러스류를 사멸시키며,²²⁾ OH 라디칼에 의한 *E.coli*의 불활성화는 염소, 오존 등과 같은 산화제에 비해 수천배 빠른 것으로 예측되고 있다.²³⁾ 이에 반해, Q β 파지와 동일한 RNA 바이러스계에 속하는 MS2 파지의 OH 라디칼에 의한 불활성화는 capsid의 단백질 변성에 의해 유도되며, 이 capsid는 매우 단순하고 견고한 구조로 되어 있어 높은 산화력을 요구하는 것으로 알려져 있다.²⁴⁾ OH 라디칼에 대한 이러한 파지들의 내성에 있어서의 차이는 아직까지 명확하게 설명되어 있지 않으나, 유사한 구조를 갖는 Q β 파지와 MS2 파지의 경우, OH 라디칼에 대한 내성 역시 유사할 것으로 예상된다. 결과적으로, 바이러스의 불

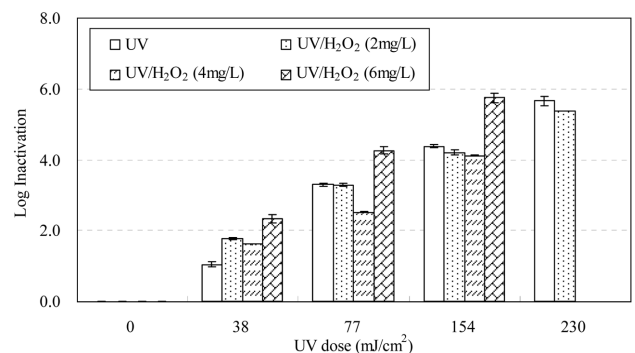


Fig. 3. Log inactivation of Q β phage in secondary effluent by UV and UV/H₂O₂.

활성화까지 고려할 경우, 지표 미생물로서 *E. coli*에만 의존하는 것은 충분한 소독효과를 얻을 수 없다는 것을 알 수 있다.

현재, 수중에는 병원성 바이러스로서 Adenovirus, Norovirus 등 다양한 바이러스가 존재하고 있으나, QB 파지 또는 *E. coli*에 대해 일정한 불활성화를 달성하는 것이 수중의 병원성 바이러스에 의한 감염리스크를 충분히 억제시켜 줄 수 있는지에 대해서는 명확히 단언할 수 없다. 경우에 따라서는 수 종류의 대표적인 병원성 바이러스를 선별, 직접적으로 소독효과를 평가해야 할 필요도 있을 것이다. 그러나, Norovirus와 같이 세포배양법에 의한 검출이 불가능한 바이러스도 존재하며, 또한, 최근 PCR (Polymerase chain reaction)법에 의한 검출에 대한 연구가 활발하기는 하나, 대상 바이러스의 활성도를 확인할 수 없다는 측면은 향후 해결해 나가야 할 과제들 중 하나이다. 따라서, 현 단계에서는 QB 파지 또는 *E. coli*와 같은 지표 미생물에 의한 수중의 병원성 미생물의 관리가 이루어져야 할 것이다. 또한, 현재 하수처리수에 있어서의 규제항목이 대장균균이기는 하나, 보다 정확도가 높은 지표 미생물로서 *E. coli*가 적용될 경우 및 바이러스에 대한 지표로서 QB 파지를 적용한다고 하였을 경우, UV 또는 UV/H₂O₂에 의한 이들의 불활성화 효과에 대해서는 본 검토결과로부터 어느 정도 예상가능할 것이다.

3.3. UV에 대한 대상 지표 미생물의 불활성화 비교

바이러스는 세균이나 원충류에 비해 소독제에 대한 내성이 강하다. 따라서, 분변으로 오염된 물의 소독은 소독제에 대한 내성이 높은 바이러스에 대한 불활성화의 달성을 기준으로 행해져야 한다. 본 연구에서 바이러스에 대한 지표 미생물로서 DNA 바이러스인 T4 및 lambda 박테리오파지의 이용가능성을 불활성화 효과 측면에서 *E. coli* 및 QB 파지와 비교, 검토하였다. Fig. 4에는 UV에 의한 각 대상 미생물의 불활성화 속도를 제시하였다. 각 미생물은 UV 조사량에 대해 직선적으로 불활성화가 진행되는 것을 Fig. 4로부터 알 수 있다. 또한, 각 직선의 기울기로부터 *E. coli*의 불활성화가 가장 빠르게 일어나는 것을 볼 수 있다. 따라서, *E. coli*의 규제만을 통해서 바이러스의 리스크 저감을 기대하기는 어려울 것으로 예상된다. QB 파지와 같은 RNA 파지는 자연환경수중에서 제한적으로 증식하기 때문에, 병원성 바이러스의 환경중에서의 거동을 감시하는 지표로서 이용될 수 있는 것으로 보고된 바 있다.⁸⁾ 그러나, 불활성화 측면에서 T4 및 lambda 등 DNA 파지와 비교하였을 경우, QB 파지가 UV에 대해 더 낮은 내성을 보이는 것으로 본 검토에서는 나타났다. 이는 QB 파지를 지표 바이러스로 이용하였을 경우, 타 바이러스의 충분한 불활성화에 요구되는 실제 UV 조사량에 비해 낮은 조사량의 도입을 요구함으로써, 결과적으로 불충분한 소독효과를 초래할 수도 있음을 의미한다. 그러나, 이는 UV에 대해 내성이 높은 T4 및 lambda 등의 DNA 파지가 지표 바이러스로서 전적으로

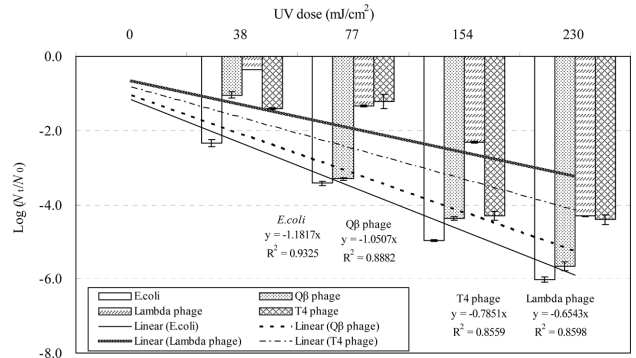


Fig. 4. Inactivation rate of each microorganism by UV.

적합하다는 것을 의미하지는 않는다. 병원성 바이러스의 지표는 실제 병원성 바이러스와 유사한 정도 또는 높은 정도의 내성을 갖는 것이 가장 바람직한 것이며, 따라서 먼저, 각 병원성 바이러스의 UV에 대한 내성을 검토할 필요가 있다. 그러나, Norovirus와 같이 병원성 바이러스에 따라서는 직접적으로 UV 내성을 검토하는 것이 어려운 경우가 많다. 이러한 문제에 대한 해결책으로써, 각 병원성 바이러스의 구조적인 특징 등으로부터 이론적으로 자외선에 대한 내성을 예측하는 등의 방법이 제안될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 UV 및 UV/H₂O₂에 대한 QB 파지의 내성을, 유효한 분변오염의 지표 미생물로서 제안되고 있는 *E. coli*의 내성과 비교함으로써, 병원성 바이러스의 관리에 있어서의 *E. coli* 규제의 유효성을 고찰하였다. 또한, 병원성 바이러스에 대한 대체 지표 미생물로서 QB 파지, T4 및 lambda 파지의 실제 하수 2차 처리수중에서의 UV 내성을 비교, 검토하였다. QB 파지가 모든 병원성 바이러스의 UV 또는 UV/H₂O₂에 대한 내성을 대표한다고 할 수 없을 것이다. 그러나, 이 연구결과로부터 지표 미생물로서 *E. coli*의 불활성화 효과에만 의존하는 것은, 소독공정에 따라서는 병원성 바이러스에 대한 충분한 소독효과를 얻지 못할 가능성도 있음을 알 수 있었다. 이는 역시 물의 안전성 평가시, 세균류 뿐만 아니라 병원성 바이러스의 존재 및 불활성화 등을 고려하여 적절한 지표 미생물이 선정되어야 할 필요가 있다는 것을 의미하기도 한다. 불활성화 측면에서는, 지표 바이러스로서 QB 파지의 이용은 낮은 UV 조사량의 도입에 의해 결과적으로 불충분한 소독효과를 초래할 수도 있을 것으로 판단되었다. 그러나, 병원성 바이러스의 리스크 관리를 위해서는 각 병원성 바이러스의 UV에 대한 내성을 검토할 필요가 있다. 내성 검토가 어려운 경우에는 각 병원성 바이러스의 구조적인 특징 등으로부터 이론적으로 자외선에 대한 내성을 예측하는 등의 방법을 통해, 지표 미생물의 선정 또는 소독제의 적정량 등이 결정되어야 할 것이다.

KSEE

참고문헌

1. Miura, T., Masago, Y., Chan, Y. M., Imai, T. and Omura, T., "Detection of bacteria and enteric viruses from river and estuarine sediment," *J. Water Environ. Technol.*, **7**, 307~315 (2009).
2. Suzuki, Y. and Suwa, M., "Control and management of pathogens discharged to environment," *Modern Media*, **52**, 352~358(2006).
3. Albert, B., "Human enteric viruses in the water environment: a minireview," *Internatl. Microbiol.*, **1**, 191~196(1998).
4. Skrabber, S., Ogorzaly, L., Helmi, K., Maul, A., Hoffmann, L., Cauchie, H. M. and Gantzer C., "Occurrence and persistence of enteroviruses, noroviruses and F-specific RNA phages in natural wastewater biofilms," *Water Res.*, **43**, 4780~4789(2009).
5. Jeanette, A. T., Charles, N. H., Joseph, J., Kelley, R. and Charles, P. G., "Inactivation of Feline Calicivirus and Adenovirus Type 40 by UV Radiation," *Appl. Environ. Microbiol.*, **69**, 577~582(2003).
6. Implementing the BEACH Act of 2000, U.S.EPA(2006).
7. Water sanitation and health, Microbiological aspects (as of 2010/7/14), WHO, http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/dwqtraining/en/index.html
8. Kamiko, N. and Ohgaki, S., "Multiplication characteristics of FRNA phage and utilization as an indicator for pathogenic virus," *J. Japan Soc. Water Environ.*, **16**, 723~731 (1993).
9. Tchobanoglous, G., *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* Metcalf and Eddy, Mc-Graw Hill, International Edition(2003).
10. Jothikumar, N., Cromeans, T. L., Hill, V. R., Lu, X., Sobsey, M. D. and Erdman, D. D., "Quantitative Real-Time PCR Assays for Detection of Human Adenoviruses and Identification of Serotypes 40 and 41," *Appl. Environ. Microbiol.*, **71**, 3131~3136(2005).
11. McQuaig, S. M., Scott, T. M., Lukasik, J. O., Paul, J. H. and Harwood, V. J., "Quantification of Human Polyomaviruses JC Virus and BK Virus by TaqMan Quantitative PCR and Comparison to Other Water Quality Indicators in Water and Fecal Samples," *Appl. Environ. Microbiol.*, **75**, 3379~3388(2009).
12. Costán-Longares, A., Montemayor, M., Payán, A., Méndez, J., Jofre, J., Mujeriego, R. and Lucena, F., "Microbial indicators and pathogens: removal, relationships and predictive capabilities in water reclamation facilities," *Water Res.*, **42**, 4439~4448(2008).
13. 大瀧雅寛, 大腸菌フェージ測定法, 東大都市工版
14. 上條繪美子, "下水処理水のオゾン消毒における大腸菌フェージの不活化速度," 東京大學新領域創成科學研究科環境工學專攻修士論文(2004).
15. Haveelar, A. H., "F-specific RNA bacteriophage as model viruses in UV disinfection of wastewater," *Water Sci. Technol.*, **24**, 347~352(1991).
16. 하수도 유지관리지침, 일본하수도협회(2003).
17. Cho, M., Chung, H., Choi, W. and Yoon, J., "Linear correlation between inactivation of *E. coli* and OH radical concentration in TiO₂ photocatalytic disinfection," *Water Res.*, **38**, 1069~1077(2004).
18. 자외선조사 -물의 소독에의 적용성-, 기보당출판(2008).
19. Kott, Y., Ari, B. H. and Buras, N., "The fate of viruese in a marine environment", In *Advances in Water Pollution Research: Proc. 4th Int. Conf. Prague.*, Pergamon Press, Oxford(1969).
20. Metcalf, T. G., Vaughn, J. M. and Stiles, W. C., "The occurrence of human viruses and coliphages in marine waters and shellfish," *FAO Tech. Conf. Marine Pollution and its Effects on Living Resources and Fishing*, FAO, Rome(1970).
21. Lee, S., Nakamura, M. and Ohgaki, S., "Inactivation of phage QB by 254 nm UV light and titanium dioxide photocatalyst," *J. Environ. Sci. Health, Part A*, **33**, 1643~1655 (1998).
22. Watts, R. J., Kong, S., Orr, M. P., Glenn, C. M. and Henry, B. H., "Photocatalytic inactivation of coliform bacteria and viruses in secondary wastewater," *Water Res.*, **29**, 95~100 (1995).
23. Cho, M., Chung, H., Choi, W. and Yoon J., "Linear correlation between inactivation of *E. coli* and OH radical concentration in TiO₂ photocatalytic disinfection," *Water Res.*, **38**, 1069~1077(2004).
24. Gehringer, P., Eschweiler, H., Leth, H., Pribil, W., Pflieger, S., Cabaj, A., Haider, T. and Sommer, R., "Bacteriophages as viral indicators for radiation processing of water: a chemical approach," *Appl. Radiat. Isot.*, **58**, 651~656(2003).