



하수 처리 과정의 염소 소독에 대한 여러 박테리오파지들의 저항성 평가; 물 재이용 과정의 안전성 관리를 위한 바이러스 지표미생물의 개발 Inactivation of various bacteriophages in wastewater by chlorination; Development of more reliable bacteriophage indicator systems for water reuse

배경선·신귀암*

Kyung-Seon Bae·Gwy-Am Shin*

아주대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, School of Engineering, Ajou University, Gyeonggi, 443-749, Korea

ABSTRACT

There has been an accelerating increase in water reuse due to growing world population, rapid urbanization, and increasing scarcity of water resources. However, it is well recognized that water reuse practice is associated with many human health and ecological risks due to numerous chemicals and pathogenic microorganisms. Especially, the potential transmission of infectious disease by hundreds of pathogenic viruses in wastewater is one of the most serious human health risks associated with water reuse. In this study, we determined the response of different bacteriophages representing various bacteriophage groups to chlorination in real wastewater in order to identify a more reliable bacteriophage indicator system for chlorination in wastewater. Different bacteriophages were spiked into secondary effluents from wastewater plants from three different geographic areas, and then subjected to various doses of free chlorine and contact time at 5°C in a bench-scale batch disinfection system. The inactivation of ϕ X174 was relatively rapid and reached $\sim 4 \log_{10}$ with a CT value of 5 mg/L*min. On the other hand, the inactivation of bacteriophage PRD1 and MS2 were much slower than the one for ϕ X174 and only $\sim 1 \log_{10}$ inactivation was achieved by a CT value of 10 mg/L*min. Overall, the results of this study suggest that bacteriophage both MS2 and PRD1 could be a reliable indicator for human pathogenic viruses for chlorination in wastewater treatment processes and water reuse practice.

Key words: Bacteriophage, Chlorination, Water reuse, Waterborne virus.

주제어: 물 재이용, 바이러스, 박테리오파지, 염소 소독

1. 서 론

최근 전 세계적인 인구의 증가, 급속한 도시화 등으

로 인한 지속적인 수자원의 고갈로 하수와 폐수의 재이용이 많은 관심을 끌고 있다(WHO, 2010). UN의 예상에 의하면 2025년에는 세계인구의 3분의 2가 물 부족을 겪게 되며(UN, 2012), 그에 따라 물재이용 시장이 비약적으로 성장하여 2025년에는 전 세계적으로

Received 29 March 2016, revised 17 May 2016, accepted 30 May 2016

*Corresponding author: Gwy-Am Shin (E-mail: gwyam@ajou.ac.kr)

pp. 225-231

pp. 233-240

pp. 241-251

pp. 253-261

pp. 263-270

pp. 271-278

pp. 279-284

pp. 285-291

pp. 293-297

pp. 299-312

pp. 313-319

pp. 321-325

pp. 327-334

pp. 335-341

pp. 343-350

1220억 달러(약 1400조 원)의 시장으로 발전한다고 한다(GDI, 2010). 실제로 물재이용은 이미 세계 여러 나라에서 단순히 농업에 국한되지 않고 도시 지역, 산업체, 그리고 각종 환경/위락시설 등 광범위한 분야에서 이용되고 있다.

하지만 이러한 광범위한 물 재이용은 동시에 여러 가지 공중보건과 환경문제를 야기시킬 우려를 가지고 있는 것도 사실이다. 잘 알려져 있다시피 하수/폐수에는 수천가지의 유해한 화학 물질과 미생물들이 존재할 수 있으며, 특히 그 중에서도 100여 가지가 넘는 병원성 바이러스는 물재이용에서 가장 중요하고 심각한 문제 중 하나로 인식되고 있다(USEPA, 2004). 이들 바이러스 중에는 최근 한국에서도 많은 집단식중독 사고를 일으키고 있는 노로바이러스나 수구족병이나 뇌수막염을 일으키는 콕사키바이러스 등의 고 위험성 바이러스들도 포함되어 있다. 그러므로 광범위한 물재이용을 위해서는 하수/폐수처리 과정, 특히 병원성 바이러스 제거에 중요한 소독 과정에서 이들 병원성 바이러스들을 효과적으로 제거하고 또 그 제거된 정도를 검증하는 방법(지표미생물)의 개발이 시급하다 할 것이다.

하지만 현재의 하수 수질 기준은 대장균 등 박테리아들을 지표미생물로 쓰고 있어, 이들 지표미생물들보다 훨씬 높은 저항력을 가진 병원성 바이러스들에게는 적용하기 힘든 것이 사실이다(Sobsey et al., 1995). 실제로 병원성 바이러스들은 1차와 2차 하수 처리에서 대장균보다 현저히 적게 제거되며 특히 하수 처리의 대표적 소독제인 염소에 대해 대장균보다 훨씬 높은 저항력을 보임이 증명되었다(Sobsey, 1989). 그러므로 하수처리 과정에서 이들 병원성 바이러스에 적합한 지표미생물을 찾는 것이 절실히 필요하였으며 그 노력의 일환으로 대장균 등 장내박테리아에 감염하는 박테리오파지를 이용하는 것이 제안되었다(Tree et al., 2003; Duran et al., 2003; Sigmon et al., 2015). 먼저, Tree 등은 하수의 1차 처리수에서의 염소소독에서 박테리오파지 MS2가 기존의 지표미생물인 대장균이나 엔테로코커스, 그리고 병원성 바이러스인 폴리오바이러스보다 훨씬 높은 저항력을 보이는 것을 발견하고 박테리오파지 MS2를 하수 처리과정에서의 지표미생물로 쓸 것을 제안하였다(Tree et al., 2003). 또한 Duran 등은 하수의 2차 처리수에서의 염소소독에서 somatic 박테리오파지인 ϕ X174보다 F-specific 박테리오파지인 박테리오파지 MS2가 염소 소독에 상대적으로 더 강한 저항력을 보임을 발견하

고 하수처리과정의 염소소독에서는 somatic 박테리오파지인 ϕ X174보다 F-specific 박테리오파지인 MS2가 지표미생물로 더 적절함을 발견하였다(Duran et al., 2003). 이에 비해, 최근의 하수의 2차 처리수에서의 오존소독 연구에 의하면 somatic 박테리오파지인 PRD1이 F-specific 박테리오파지인 MS2 보다 더 강한 저항력을 보였으며 이들 저자들은 오존소독에서는 somatic 박테리오파지인 PRD1을 지표미생물로 쓸 것을 제안하였다(Sigmon et al., 2015)

이 연구에서는 최근에 바이러스 지표미생물로 새로이 관심을 받고 있는 박테리오파지 PRD1을 포함하여 이전 연구에서 병원성 바이러스의 지표 미생물로 제안된 박테리오파지들의 하수처리 과정의 대표적인 소독 과정인 염소소독에 대한 저항성을 지리적으로 다른 여러 지역에서 채집한 2차 처리수에서 함께 측정하였다. 이 연구는 지금까지 병원성 바이러스의 지표 미생물로 제안된 대표적인 박테리오파지들을 동일한 조건에서 직접 비교하는 첫 번째 연구이며, 이 연구에서 도출된 결과는 물 재이용 과정의 가장 심각한 문제 중 하나인 병원성 바이러스에 대한 최적의 지표미생물을 개발하는데 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 생각된다.

2. 재료와 방법

2.1 박테리오파지의 추출

Table 1은 이 연구에 사용된 박테리오파지의 특성을 나타낸다. 이들은 그 크기, 유전자 구성, 그리고 외벽의 여부 등에서 차이점을 보인다. 이전 연구에서 서술된 바와 같이(Shin et al, 2005) 이러한 박테리오파지들은 적절한 숙주(Table 1)에서 배양한 뒤 클로로포름을 이용하여 추출하였다. 간략히 설명하면, 우선 각각의 박테리오파지를 이중 한천층 플라크기법(double agar layer plaque technique) (Adams, 1959)으로 각각의 적절한 숙주에서 배양하였다. 다음으로 박테리오파지에 의해 숙주가 100% 분해가 일어난 용기들을 선택하여 그 용기에 소량의 완충용액을 첨가하여 상층의 한천층만을 끌어내었다. 다음에 새로운 박테리오파지가 들어있는 이 한천용액에 같은 분량의 클로로포름을 첨가하여 빠른 속도에서 잘 섞은 다음, 저온에서 원심분리(4000 g, 30 분)한 후 그 상층액만을 분리하였다. 분리된 박테리오파지는 다음 사용 시까지 -80°C 에 보관하였다.



Table 1. Characteristics of bacteriophages used in this study

박테리오파지	크기 (nm)	유전자 (kb)	숙주
φX174	25	Single-stranded DNA (5.3)	E. coli CN13
PRD1	63	Double-stranded DNA (14.7)	S. typhi LT2
MS2	27	Single-stranded RNA (3.6)	E. coli F _{amp}

Table 2. Characteristics of wastewater used in this study

하수처리장	pH (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (ppm)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
의왕	6.8	2.4	10.8	8.5	12.892	1.895
당진	7.03	1.0	6.5	0.5	6.255	0.31
원주	7.1	12.7	12.3	8.0	4.584	0.727

2.2 하수

Table 2는 이 연구에 사용된 하수의 물리적, 화학적 특성을 나타낸다. 염소 소독에 대한 박테리오파지의 저항성이 하수의 다양한 물리적, 화학적 특성에 따라 어떤 영향을 받는지를 알아보기 위해서 지리적으로 다양한 지역(의왕, 당진, 원주)에서 하수를 채취하였다. 연구에 사용된 하수는 각각의 하수처리장의 생물학적 처리과정을 거친 2차 처리수이다. Table 2에 나타난 수질 특성은 각각의 하수처리장에서 제공한 측정값이며 이들 하수처리장에서 pH, BOD, COD, SS를 수질환경보존법상에 규정된 수질오염공정시험법으로 측정하였으며, T-N과 T-P는 Hach시약을 이용해 각각 과황산염 온침법과 몰리브도바다닌산법으로 측정하였다. 암모니아성 질소의 농도는 의왕 4.6 ppm, 원주는 2.9 ppm이었다. 의왕은 주변의 가축분뇨 처리 시설의 영향으로 암모니아성 질소의 농도가 높게 나타난 것으로 보인다.

2.3 소독제의 생성과 농도측정

하수 처리 과정의 대표적인 화학적 소독제인 염소는 상업용 표백제(Clorax)를 희석하여 준비하였다. 즉, 매 실험 당일 표백제를 증류수로 희석하여 그 날 사용할 염소 농도로 맞추어 준비하였다. 실제 하수처리 과정에서 사용되는 다양한 염소농도를 반영하기 위해서 한 종류의 하수에 대해 여러 가지 염소농도를 적용하였다(Table 3). 잔류 염소의 농도는 N, N diethyl-p-phenylenediamine (DPD) 발색법(American Public Health Association, 1995)으로 측정하였다.

Table 3. Chlorine concentration used in this study

하수	실험차수	염소 농도(mg/L)		
		박테리오파지		
		MS2	PRD1	φX174
의왕	1	5	15	10
	2	15	10	6.1
	3	23.3	19.4	8
	4	19.4		15
당진	1	1	1	1
	2	2	2	2
	3	2	5	2
	4	5		5
원주	1	10	10	10
	2	5	5	5
	3	5	5	5

2.4 염소 소독 실험

염소 소독 실험은 우리 연구실에서 제작하여 이전 연구에 성공적으로 사용하였던 화학소독장치에서 실행하였다(Shin and Sobsey, 2008). 간단히 설명하면, 먼저 온도 조절이 가능한 수조 내에 설치된 유리관 속에 여러 지역에서 채집한 하수를 넣고 여기에 적절한 농도의 박테리오파지(~ 10⁶ Plaque Forming Unit(PFU)/mL)를 넣은 다음 충분히 섞어주었다. 다음에 위에서 언급한대로 미리 정해진 농도의 염소가 든 용액을 넣어 준 다음 미리 정해진 시간마다 소량의 시료를 채집하였다. 채집한 시료는 즉시 같은 분량의 sodium thiosulfate (0.1 M)와 섞어서 남아있는 잔류염소를 제거하였다. 채집된 시료는 실험을 시행한 그 날(24시간이내) 정량

pp. 225-231
pp. 233-240
pp. 241-251
pp. 253-261
pp. 263-270
pp. 271-278
pp. 279-284
pp. 285-291
pp. 293-297
pp. 299-312
pp. 313-319
pp. 321-325
pp. 327-334
pp. 335-341
pp. 343-350

하였다. 모든 실험은 하수처리의 최악 조건이라고 할 수 있는 5°C에서 실시하였다.

2.5 박테리오파지 정량과 Data 분석

박테리오파지는 위에서 언급한 이중 한천층 플라크 기법으로 정량하였다(Adams, 1959). 각각의 박테리오파지는 각각에 적절한 배지와 배양조건에서 배양하였으며, 그 최종정량은 플라크 형성 정도(PFU)/mL로 나타내었다.

각각의 박테리오파지의 염소에 대한 저항성을 정량적으로 계산하기 위하여 먼저 초기 박테리오파지농도(N_0)를 각각의 노출시간에서의 박테리오파지농도(N_t)와 비교하여 그 상대적 감소를 로그값으로 계산하였다($\log_{10}(N_t/N_0)$). 다음으로 각각의 실험에서 (실제 하수처리 과정에서의 상황을 반영하기 위하여) 서로 다른 염소농도를 사용하였기 때문에 그 효과를 표준화시키기 위하여 염소농도와 노출시간을 곱한 값인 CT값($\text{mg/L}\cdot\text{min}$)을 X축으로 하고, 위에서 구한($\log_{10}(N_t/N_0)$) 값을 Y축으로 하여 이들 간의 상관관계를 그래프로 그렸다. 이 연구에서는 각각의 실험에서 시간에 따른 염소 농도의 변화를 측정하였으며, Fig. 1은 그 한 예로 박테리오파지 MS2를 의왕 하수처리장에서 채집한 2차 처리수에서 5 mg/L의 초기 염소 농도로 30분간 처리할 때의 시간에 따른 염소 농도의 변화를 나타낸다. 이러한 시간에 따른 염소 농도를 바탕으로 특정한 노출시간에 실제로 박테리오파지의 소독에 이용된 정확한 염소의 양을 계산하여 보다 정확한 CT값을 계산할 수 있었다. 즉, Fig. 1에서 노출시간 1분일 때의 CT

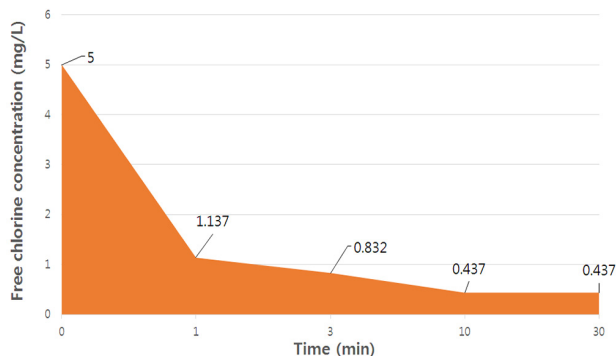


Fig. 1. Change of residual free chlorine concentration over time (in an experiment with 5 mg/L of initial free chlorine concentration and 30 minute contact time in a secondary effluent from Uiwang WWT)

값은 초기 염소농도와 1분에 측정된 농도의 평균값에 시간차인 1을 곱해 구했다. 노출 시간 3분일 때의 CT 값은 앞의 방법과 같이 1분과 3분에서의 염소 농도의 평균값과 시간차인 2를 곱해준 뒤 앞의 1분에서 계산한 값에 더해 주어 계산하였다. 나머지 시간에서도 같은 방법으로 계산하였다. 각각의 박테리오파지의 염소에 대한 저항성은 EXCEL 통계패키지의 단순 선형 회귀법으로 구하였고, 하수의 다양한 물리적, 화학적 요소가 염소 소독에 의한 박테리오파지의 불활성에 미치는 영향은 SAS 통계패키지의 복합 선형 회귀법으로 구하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2-4는 지리적으로 다양한 여러 지역의 하수처리장에서 채집한 2차 처리수에서 염소 소독 과정을 실시했을 때 여러 박테리오파지의 저항성을 측정된 것을 정리한 것이다. 재료와 방법에서 언급된 바와 같이 실제 하수처리 과정에서 사용되는 다양한 염소 농도를 반영하기 위해서 각각의 하수에 대해서 여러 염소 농도를 적용하였고, 그 효과를 표준화하기 위해서 미국 환경청 등에서 소독처리의 기준으로 사용하는 CT값($\text{mg/L}\cdot\text{min}$)을 X축으로 하고 불활성 정도($\log(N_t/N_0)$)를 Y축으로 하여 그래프를 그렸다. 이들 Figure에서 보는 바와 같이 이 세 지역 모두에서 박테리오파지 ϕ X174가 염소 소독에 대해 상대적으로 가장 낮은 저항성을 가지는 것으로 나타났다 - 즉, 박테리오파지 ϕ X174는 이 세 지역 모두에서 CT값 5 $\text{mg/L}\cdot\text{min}$ 으로 4 \log_{10} 이상의 불활성화가 이루어졌다. 이에 비하여 박테리오파지 MS2와 PRD1은 상대적으로 염소에 큰 저항성을 보였다 - 상대적으로 부유물질이 적은 당진의 경우를 제외하면 박테리오파지 PRD1은 CT값 10 $\text{mg/L}\cdot\text{min}$ 으로 박테리오파지 MS2는 CT값 10 $\text{mg/L}\cdot\text{min}$ 으로 약 1 \log_{10} 정도의 불활성화가 이루어졌다. 서론에서 언급된 바와 같이 somatic 박테리오파지 ϕ X174 비해서 F-specific 박테리오파지 MS2가 염소 소독에 더 강한 저항성을 보인다고 알려져 있는데 (Duran et al., 2003), 이 연구에서도 F-specific 박테리오파지인 MS2가 somatic 박테리오파지인 ϕ X174보다 하수처리 과정의 염소 소독에 더 큰 저항성을 보였다. 하지만 이 연구의 결과에서 한 가지 언급해야할 점은



somatic 박테리오파지의 염소 소독에 대한 저항성에도 큰 차이가 있으며 어떤 경우에는 somatic 박테리오파지도 (예, 박테리오파지 PRD1) F-specific 박테리오파지만큼 하수 처리의 염소 소독에 큰 저항성을 보인다는 것이다.

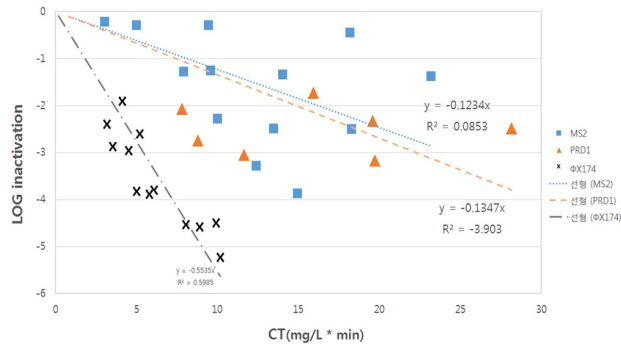


Fig. 2. Inactivation of bacteriophages in secondary effluent of a wastewater (from Uiwang WWT) by chlorine at 5°C.

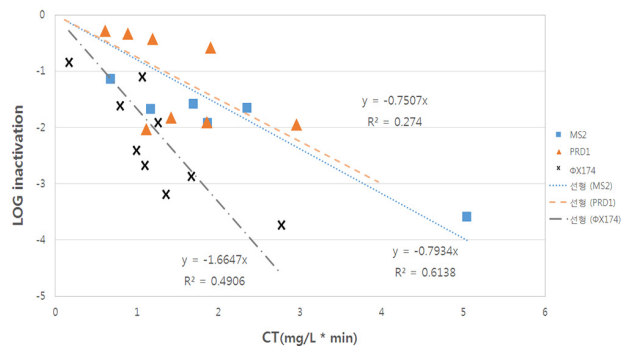


Fig. 3. Inactivation of bacteriophages in secondary effluent of a wastewater (from Dangjin WWT) by chlorine at 5°C.

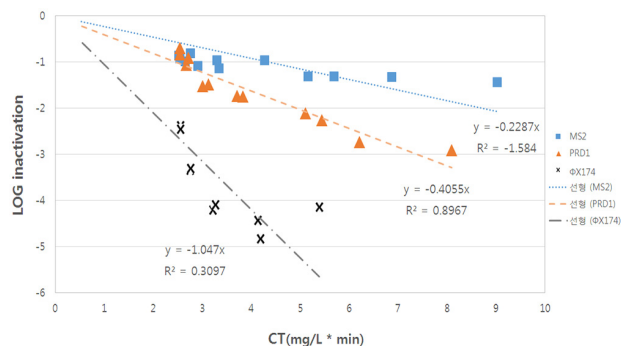


Fig. 4. Inactivation of bacteriophages in secondary effluent of a wastewater (from Wonjoo WWT) by chlorine at 5°C.

박테리오파지는 크게 박테리아의 세포벽의 임의의 장소를 통하여 침투하는 somatic 박테리오파지와 박테리아의 유전물질 교환에 중요한 역할을 하는 F-pili를 통하여 침투하는 F-specific 박테리오파지로 분류된다 (Sobsey et al, 1995). 앞의 서론에서 설명된 바와 같이 하수처리 과정에서 병원성 바이러스에 대한 지표미생물로 박테리오파지가 제안되고 있음에도 불구하고 실제 이들 박테리오파지의 염소소독에 대한 저항력에 관한 연구는 상당히 미약한 실정이다. 현재 알려진 박테리오파지의 완충용액에서의 염소소독에 대한 저항성에 관한 연구는 대부분 박테리오파지 MS2에 한정되어 있으며(Sobsey et al., 1988; Shin and Sobsey, 2008; Zou et al., 2015), 박테리오파지 ϕX174에 대한 일부 연구가 있을 뿐이다(Sobsey et al., 1988; Zuo et al., 2015). 더더군다나 이들 이전연구들은 각각 다른 pH, 온도, 이온농도에서 이루어져 서로간의 직접 비교가 어려운 실정이다. 실제로 이들 이전 연구에서 구한 CT값은 박테리오파지 MS2의 경우 0.24-15 mg/L*min, 박테리오파지 ϕX174의 경우에는 0.25-75 mg/L*min에 이르는 등 큰 차이를 보였다. 본 연구에서도 실제 하수에서의 염소소독에 앞서 예비실험으로 완충용액에서의 실험을 수행하였다. 완충용액으로서는 pH 7.2의 phosphate buffered saline(PBS)를 이용하였으며, 온도는 하수처리의 최악조건이라 할 수 있는 5°C를 사용하였다. 비록 이전 연구의 실험조건 중 본 연구의 실험조건과 일치하는 것이 없어 이전 연구와의 직접적인 비교는 불가능하지만, 본 연구의 예비실험에서 얻어진 박테리오파지 MS2와 ϕX174의 CT값은 이전 연구에서 구한 것들의 범위내에 있는 것으로 나타났다. 보다 중요한 것은 전반적으로 완충용액(PBS) 실험에서 구한 CT값은 실제 하수에서 구한 것보다 많이 낮았는데 이것은 Fig. 1의 시간에 따른 염소 농도 변화에서 보는 바와 같이 실제 하수에 있는 여러 가지 물질이 염소와 반응(소모)하여 같은 정도의 박테리오파지의 불활성화를 이루는데 훨씬 높은 CT값을 필요로 하기 때문이라고 생각된다.

또 한 가지 이 연구의 결과에서 반드시 언급해야 할 점은, Fig. 2-4에서 보는 바와 같이 각각의 박테리오파지의 염소에 대한 저항성을 CT값만으로는 정확히 예측할 수가 없다는 점이다. (Figure에서 단순 선형 회귀법으로 구한 직선의 R²값이 현저히 작다는 것에 주목해야 할 것이다). 원래 CT값이라는 개념은 미국

pp. 225-231
pp. 233-240
pp. 241-251
pp. 253-261
pp. 263-270
pp. 271-278
pp. 279-284
pp. 285-291
pp. 293-297
pp. 299-312
pp. 313-319
pp. 321-325
pp. 327-334
pp. 335-341
pp. 343-350

환경청 등에서 상수처리에서 먼저 도입된 것으로, 상수처리의 소독과정에서 소독제의 농도와 접촉시간을 곱한 값으로 이 값이 같으면 동일한 미생물에 대해서 동일한 소독능력을 가진다고 정의되었다. 이는 서로 다른 소독제 농도(1-5 mg/L)를 사용하는 상수처리장에서의 편의를 위해 만든 개념으로 상수처리에서는 대체로 잘 적용되는 것으로 알려져 있다. 하지만 상수처리에 비해 상대적으로 높은 소독제 농도(5-20 mg/L)를 사용하고 또한 상수에 비해 상대적으로 염소와 반응할 수 있는 많은 양의 불순물을 포함하고 있으며 시시각각으로 그 불순물의 종류와 농도가 달라지는 하수에서는 이 CT값을 이용하여 소독능력을 예측하는 것은 쉽지 않은 것으로 보인다. 즉, 이 연구에서 보는 바와 같이 하수처리에서는 비록 CT값은 같다고 하더라도 소독제의 농도가 높고 접촉시간이 짧은 경우가 소독제의 농도가 낮고 접촉시간이 긴 경우에 비해 일반적으로 높은 소독능력을 보이는 것으로 나타났다(실제로 복합 선형 회귀법에 의한 분석에서도 박테리오파지들의 불활성은 접촉시간(p값: 0.4485 (MS2), 0.0218 (PRD1), 0.0001 (ϕ X174))보다는 농도 (p값: 0.0112 (MS2), <0.0001 (PRD1), 0.0001 (ϕ X174))에 더 많이 의존하는 것으로 나타났다). 그러므로 현재 미국 환경청 등에서 소독처리의 기준으로 사용하는 CT 값이 실제로 하수 처리 과정의 염소 소독에 적용할 때는 세심한 주의가 요구된다고 할 수 있다.

하수의 여러 물리적, 화학적 요소가 염소소독에 의한 박테리오파지의 불활성에 미치는 영향을 복합 선형 회귀법으로 분석한 결과, 하수의 부유물질이 염소 소독에 의한 박테리오파지의 불활성에 상대적으로 큰 영향을 보이는 것으로 나타났으며(p값: 0.0272 (MS2), 0.0383 (PRD1), 0.0043 (ϕ X174)). 총질소(TN)가 다음으로 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다 (p값: 0.1193 (MS2), 0.0282 (PRD1), 0.2093 (ϕ X174)). 여기서 한 가지 언급해야 할 것은 일반적으로 수인성 병원균에 대한 염소소독의 효과는 pH에 의해 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있으나(Hass, 2000) 이 연구에서는 pH가 상대적으로 그 영향이 크지 않았다. 그 이유는 이 연구에 사용된 세 개의 하수의 pH가 거의 동일하였기 때문인 것으로 생각된다(6.8 (의왕), 7.03 (당진), 7.1 (원주)). 총질소는 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 그리고 질산성질소 같은 무기성 질소와 단백질 등의 유기성 질소로 이루어져 있는데 이들 거의 모두가 염

소와 반응하여 상대적으로 소독능력이 현저히 떨어지는 물질로 변환된다. 예를 들어 무기성 질소인 암모니아는 염소와 반응하여 모노클로라민(monochloramine)이나 디클로라민(dichloramine) 등을 생성하는데(Hass, 2000) 이들은 염소에 비해 수인성 병원성에 대해 현저히 낮은 소독 능력을 보인다(Sobsey, 1989). 마지막으로 이 연구에서는 부유물질이 하수에서의 염소 소독에 의한 박테리오파지의 불활성에 상대적으로 큰 영향을 보이는 것으로 나타났는데 이는 하수에 있는 입자상물질, 특히 유기물들이 염소와 반응하면서 소모되어 염소의 박테리오파지에 대한 소독 능력을 현저히 저하시킨 것으로 생각된다.

이 연구의 결과들을 종합해 보면 하수 처리 과정 중의 염소 소독에 대한 병원성 바이러스의 지표미생물로 박테리오파지 PRD1이나 박테리오파지 MS2가 적절한 것으로 보인다. 먼저 이들 박테리오파지들은 하수에서 병원성 바이러스에 비해 상대적으로 많은 수가 존재하며, 또한 그 정량법이 병원성 미생물에 비해 훨씬 쉽고, 간단하고 저렴하다(Sobsey et al, 1995). 무엇보다 이들 박테리오파지는 다른 박테리오파지보다 자연계에서 상대적으로 오래 생존할 수 있으며 이 연구에서 밝혀진 바와 같이 다른 박테리오파지에 비해 하수 처리 과정의 염소 소독에 상대적으로 큰 저항성을 보이기 때문이다. 이 중 박테리오파지 MS2는 최근 한국에서 많은 집단 식중독 사고를 일으키고 있는 노로바이러스나 뇌수막염을 일으키는 콕사키바이러스 등의 고 위험성 병원성 바이러스와 같은 물리적, 화학적, 그리고 형태적으로 비슷한 RNA 바이러스이므로 이러한 병원성 바이러스의 중요한 지표미생물로 쓰일 수 있을 것이며, 박테리오파지 PRD1은 자외선 소독에 유난히 저항성을 가져 향후 물을 통한 전염하는 주요 병원성 바이러스로 주의하여야 할 아데노바이러스 (Yates, 2006) 등과 물리적, 화학적 특성이 비슷한 DNA 바이러스이므로 그러한 병원성 바이러스의 중요한 지표미생물로 쓰일 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

이 연구에서는 현재 급속도로 성장하고 있는 물 재이용 산업의 효율적이고 안전한 관리를 위한 최적의 바이러스 지표미생물을 개발하기 위해서 물리적, 화학적, 그리고 형태적으로 특성이 다른 여러 가지 박테



리오파지를 선별하여 그들의 하수 처리 과정 중의 염소 소독 과정에 대한 저항성을 측정하였다. 이 연구에서 사용한 박테리오파지들은 하수 처리 과정의 염소 소독 과정에서 박테리아 지표미생물에 비해 상당한 저항성을 보였으며, 그 중에서도 박테리오파지 PRD1과 MS2가 하수처리의 염소 소독과정에 가장 큰 저항성을 보였다. 이들 박테리오파지들은 병원성바이러스에 비해 그 정량법이 훨씬 쉽고, 간단하고 저렴하며 또한 하수 처리 과정 중의 염소 소독 과정에 대한 강한 저항성을 보여 물 재이용 과정의 병원성바이러스의 지표미생물로 적절할 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 한국연구재단의 일반 연구자 지원사업(NRF-2013R1A1A2064741)의 지원을 받아 수행되었다.

References

- Adams M. (1959). *Bacteriophages*, Interscience Publishers Inc., New York.
- American Public Health Association. (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th Ed.*, American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation, Washington, D.C
- Durán. A. E., M. Muniesa, L. Mocé-Llivina, C. Campos, J. Jofre, F. Lucena (2003). Usefulness of different groups of bacteriophages as model micro-organisms for evaluating chlorination, *Journal of Applied Microbiology*, 95(1), 29-37
- Environmental Protection Agency (EPA). (2004). Guideline for Water Reuse, EPA/625/R-04/108
- Global Water Intelligence (2010). <http://www.globalwaterintel.com>
- Hass C. N. (2000). *Chemical disinfection In: Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water*, James Edzwald (ed), American Water Works Association, McGraw Hill, New York.
- Shin, G., K. G. Linden, and M. D. Sobsey. (2005). Low pressure ultraviolet inactivation of pathogenic viruses and bacteriophages, *Journal of Environmental Engineering and Science*, 4, S7-S11.
- Shin, G. and M. D. Sobsey. (2008). Inactivation of norovirus by chlorine disinfection of water, *Water Research*, 42(17), 4562-4568.
- Sigmon, C., Shin, G., Mieog, J., Linden K. G. (2015). Establishing surrogates - virus relationships for ozone disinfection of wastewater, *Environmental Engineering Science*, 32, 1-10.
- Sobsey M. D. (1989). Inactivation of Health-related Microorganisms in Water by Disinfection Processes, *Water Science and Technology*, 21(3), 179-195.
- Sobsey, M. D., D. A. Battigelli, T. R. Hanzel, and K. J. Schwab. (1995). Male-specific coliphages as indicators of viral contamination of drinking water
- Sobsey, M. D., Takashi, F., Shields, P. A. (1998). Inactivation of hepatitis A virus and model viruses in water by free chlorine and monochloramine, *Water Science and Technology*, 20 (11-12), 385-391.
- Tree, J. A., Adams, M. R., Lees, D. N. (2003). Chlorination of indicator bacteria and viruses in primary sewage effluent, *Applied and Environmental Microbiology*, 69(4), 20398-2043.
- United Nation (2012). <http://www.un.org/waterforlifedecade/scarcity.shtml>
- World Health Organization (WHO), Water Sanitation and Health (2010). http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/en/index.htm
- Yates, M., Malley, J., Rochelle, P. & Hoffman, R. (2006). Effect of adenovirus resistance on UV disinfection requirements: report on the state of adenovirus science, *J. Am. Water Assoc.*, 98(6), 93 - 106
- Zuo, X., Chu, X., Hu, J. (2015). Effect of water matrix on virus inactivation using common virucidal techniques for condensate urine disinfection, *Chemosphere*, 136, 118-124.

pp. 225-231

pp. 233-240

pp. 241-251

pp. 253-261

pp. 265-270

pp. 271-278

pp. 279-284

pp. 285-291

pp. 293-297

pp. 299-312

pp. 313-319

pp. 321-325

pp. 327-334

pp. 335-341

pp. 343-350