Research Paper

A Prediction on the Improvement of Disinfection Efficiency and Optimal Operation of Residual Chlorine in Water Distribution Line by Application of UV Process in I WTP

Jong-Il Park[†] · Young Lee · Keon-Hoi Kim · Tae-Hoon Lee · Cheol-Jong Park · Jeong-Hee Yoo

K-water (Korea Water Resources Corporation) Northwest Gyeonggi Office

(Received September 20, 2019; Revised October 28, 2019; Accepted October 29, 2019)

Objectives : In this study, disinfection efficiency improvement and optimal operation of residual chlorine were analyzed when apply UV (Ultraviolet) process in I WTP (Water Treatment Plant).

Methods : Inactivation ratios of virus and *Giardia* were calculated by “Disinfection efficiency calculation program” which was made by Ministry of Environment. Water quality factors (residual chlorine, temperature, etc) were measured and saved by auto measuring instruments. Residual chlorine in clean water reservoir was calculated for satisfy the inactivation ratio of *Giardia* over 1.1 at worst case of water quality condition in winter season. Residual chlorine in distribution reservoir was simulated by EPANET2.0. UV dose validation test of UV facilities in I WTP was conducted by HDR | HydroQual according to UVDGM (Ultraviolet Disinfection Guidance Manual) 2006 of US EPA (United States Environmental Protection Agency). Inactivation ratio of *Giardia* by application of UV disinfection and optimal concentration of residual chlorine in clean water reservoir for optimal operation of water distribution line were calculated. Economical efficiency was compared by price unit of chlorine sole disinfection and UV combined disinfection.

Results and Discussion : In order to satisfy the inactivation ratio of *Giardia* over 1.1 by chlorine sole disinfection, residual chlorine in clean water reservoir should be operated within 0.73-1.59 mg/L. In this case, residual chlorine of distribution reservoir at the end of water distribution line was 0.63-1.42 mg/L. If UV process of I WTP was applied to disinfection, validation dose (VD) would be estimated 21.3 mJ/cm² when operating 1 section per reactor at 100% ballistic power level. Which value corresponded to inactivation ratio of *Giardia* 1.936 and *Cryptosporidium* 1.775. Through this, it would be possible to secure effective disinfection of *Giardia* and *Cryptosporidium*, and reduce post chlorine injection. In application of UV disinfection, residual chlorine in clean water reservoir could be operated within 0.59-0.65 mg/L (residual chlorine in distribution reservoir at the end of distribution line would be 0.5 mg/L level). By the result of economical efficiency analysis, when water production is 190,000-250,000 m³/d, UV combined disinfection would be saved the price unit within 0.02-0.85 KRW/m³ comparing with chlorine (NaOCl) sole disinfection.

Conclusions : If UV process in I WTP was applied to disinfection, it would be possible to secure high disinfection efficiency and optimal operation of residual chlorine in clean water reservoir and distribution line. Through this, it would be expected to economize chemical costs and decrease the concentration of disinfection byproducts. In addition, UV has high disinfection effect against *Giardia* and *Cryptosporidium*, it would be expected to effectively complement the chlorine sole disinfection.

Key Words : UV, Disinfection, UV Disinfection, Advanced Water Treatment, Residual Chlorine in Distribution Line

[†] Corresponding author E-mail: styner15@kwater.or.kr Tel: 031-930-1271 Fax: 031-930-1291

연구논문

I 정수장의 UV 공정 적용을 통한 소독능 제고 및 관망 잔류염소 적정 운영 효과 예측

박종일^{*} · 이 영 · 김건희 · 이태훈 · 박철중 · 유정희

한국수자원공사 경기서북권지사

목적: 본 연구에서는 I정수장에 고도공정으로 도입된 UV 공정을 활용한 소독능 제고 및 관망 잔류염소 적정 운영 효과를 분석하였다.

방법: Virus 및 *Giardia* 불활성화비 계산은 환경부에서 개발한 “소독능 계산 프로그램”을 활용하였으며, 수질인자(잔류염소, 수온 등)는 자동측정기로 측정 및 저장하였다. 동절기 최악 수질 조건 시 용수생산량별 *Giardia* 불활성화비 1.1 이상 만족을 위한 정수지 잔류염소 농도를 산정하고, EPANET2.0을 통해 해당 조건에서의 공급과정 잔류염소 농도를 모의하였다. I정수장 UV 설비의 UV 조사량 인증 시험은 UVDGM 2006에 의거하여 HDR | HydroQual에서 수행하였다. UV 소독 적용시의 *Giardia* 불활성화비를 도출한 후, 공급과정 잔류염소 적정 운영을 위한 정수지 잔류염소 농도를 산정하였다. 염소 단독 소독과 UV 병행 소독 시의약품비 및 전력비를 통해 원단위를 산출하여 경제성을 비교하였다.

결과 및 토의: I정수장에서 염소 단독 소독으로 동절기시 *Giardia* 불활성화비 1.1 이상 달성을 위해서는 정수지 잔류염소 농도를 0.73-1.59 mg/L로 운영하여야 하는 것으로 산정되었다. 이 경우 관말 배수지 잔류염소 농도는 0.63-1.42 mg/L로 나타났다. I정수장의 UV 설비를 소독에 적용할 경우, 반응조당 1개 섹션을 가동전력 100%로 운영 시 인증조사량(VD)은 21.3 mJ/cm²로 도출되었다. 이는 *Giardia* 불활성화비 1.936, *Cryptosporidium* 불활성화비 1.775에 해당하는 값이었다. 이를 통하여 UV 소독으로 *Giardia* 및 *Cryptosporidium*의 안정적인 소독이 가능할 것으로 사료되었다. 또한 UV 소독 적용 시 정수지 잔류염소는 0.59-0.65 mg/L(관말 배수지 잔류염소 농도 0.5 mg/L 유지 수준)로 운영할 수 있다고 산정되었다. 경제성 분석 결과, 용수생산량 190,000-250,000 m³/일인 경우 UV 소독을 병행하면 NaOCl 단독 소독 대비 원단위를 0.02-0.85 원/m³ 절감할 수 있을 것으로 예상되었다.

결론: I정수장 UV 공정 적용 시 높은 소독 효율 확보와 정수지 및 관망 잔류염소 농도의 적정 운영이 가능할 것으로 판단되었다. 이를 통하여 약품비의 절감은 물론 소독부산물 발생 농도 저감이 예상되었다. 또한, UV의 *Giardia* 및 *Cryptosporidium*에 대한 소독효과가 높아 기존의 염소소독을 효과적으로 보완할 수 있을 것으로 기대되었다.

주제어: 자외선, 소독, 자외선 소독, 고도정수처리, 관망 잔류염소

1. 서론

정수처리 공정 중 소독(disinfection)은 소독제 주입이나 자외선 조사 등의 방법으로 수중의 병원성 미생물을 불활성화하는 공정으로, 수도법 시행규칙의 정수처리기준에 따라 Virus, *Giardia*, *Cryptosporidium* oocysts의 기준 제거율을 달성할 수 있어야 한다. 화학물질을 사용한 소독의 경우, 소독제의 농도(C)와 접촉시간(T)을 곱한 소독접촉시간(CT_{계산값})을 미생물에 대해 요구되는 CT값(CT_{요구값})으로 나

눈 값인 불활성화비로 소독능 만족 여부를 판단한다. 현재 국내에서 Virus와 *Giardia*는 불활성화비가 1.0 이상일 때, *Cryptosporidium* oocysts는 여과수 탁도가 매월 측정된 시료 수의 95% 이상이 0.3 NTU(완속여과 시 0.5 NTU) 이하이고, 각각의 시료 측정값이 1 NTU 이하를 준수한 경우에 법적기준을 만족한 것으로 판단한다.

염소는 측정 및 제어가 용이하고 배수계통에 소독효과가 잔류할 수 있으며 경제성이 우수한 장점이 있어 국내 대부분의 정수장에서 소독제로 적용하고 있다. 그러나 수중의

Fig. 1. Schematic diagram of I WTP.

자연유기물질(Natural organic matter, NOM)과 반응하여 소독부산물(THMs 등)을 발생시킬 수 있으며¹⁾ 수온 저하 및 pH 상승 시 소독효과가 감소하여(CT_{요구값} 상승) 동절기 소독능 확보에 불리한 단점이 있다. 특히, 염소에 강한 내성을 지니고 있는 *Giardia*와 *Cryptosporidium* oocysts가 국내의 다양한 상수원수 수계에서 검출된 사례^{2,3)}가 보고된 바 있어 UV (Ultraviolet)나 오존 등을 활용하여 염소 소독을 보완할 필요가 있다고 판단된다.

UV는 100~400 nm의 파장을 갖는 광선으로, 253.7 nm의 자외선이 bacteria나 virus의 핵산에 흡수되면 화학반응을 일으켜 핵산의 회복기능을 상실시킴으로써 소독효과를 나타낸다. UV 소독은 온도와 pH에 영향을 받지 않고 소독부산물을 발생시키지 않는 장점이 있다. 2000년대에 국내·외에서 UV의 *Giardia*^{4,5)}, *Cryptosporidium*^{6,7)}, *Bacillus*⁸⁾, 대장균⁹⁾ 등 다양한 미생물에 대한 소독효과, UV와 타 소독제의 성능 비교분석¹⁰⁻¹²⁾, UV 반응조 최적화¹³⁾ 등의 연구가 진행되었다. 해당 연구결과를 통해 UV를 통한 효과적인 소독이 가능함을 알 수 있었으며, 국외에서는 상·하수처리에 적용하고 있다.^{14,15)}

현재 국내 하수처리의 경우 UV를 비롯하여 오존 및 전기분해 등 다양한 소독공정을 적용하고 있으나, 상수처리에서는 고도공정으로 오존이 도입된 정수장 중 일부가 오존 소독을 병행할 뿐 UV 소독은 적용 사례가 없다. 향후 내염소성 병원성 미생물에 대한 효율적 대응, 소독부산물 발생 저감 등을 위해서는 정수장에서의 UV 소독 적용을 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 조류에 의한 맛·냄새 물질(Geosmin, 2-MIB) 대응을 위해 UV/H₂O₂-AOP (산화)와 GAC F/A (여과·흡착) 고도정수처리 공정들을 도입·운영 중인 I정수장의 정수지용량 부족으로 인해 동절기 염소 처리공정의 소독능이 저하되는 문제를 해결하기 위하여 UV 공정의 소독능 제고 및 관망 잔류염소 적정 운영 효과를 분석하였다.

2. 시설 현황 및 연구 방법

2.1. 시설 현황

2.1.1. 정수장 시설 현황

G시에 위치한 I정수장은 PI취수장을 취수원으로 하며, 시설용량은 250,000 m³/일이다(1단계 150,000 m³/일, 2단계 100,000 m³/일). 고도정수처리 공정으로 산화공정인 UV/H₂O₂-AOP (Advanced Oxidation Process)와 여과·흡착 공정인 GAC F/A (Granular Activated Carbon Filtraion/Adsorption)가 적용되었다. 해당 공정은 현재 1단계에 도입되었으며, 2022년에 2단계까지 도입을 완료할 예정이다. Fig. 1은 I정수장의 정수처리 공정도이다.

약품 혼화 이후 1단계와 2단계가 분리되어 정수처리가 이루어진다. 1단계는 응집·침전 후 고도정수처리 공정인 UV 산화(평상시) 또는 UV/H₂O₂-AOP (맛·냄새 물질 유입시)와 GAC 여과·흡착 처리(상시)가 이루어진다. 2단계는 응집·침전 후 표준정수처리 공정인 안트라사이트-모래의 2중층 여과가 이루어진다. 각 단계의 통합 여과수는 혼합된 후 후염소 주입을 거쳐 정수지로 유입된다. 고농도 맛·냄새 물질 유입 시 또는 UV 소독 적용 시에는 1단계(고도정수처리 공정)만 운영하며, 2022년 이후에는 전체 생산량에 대하여 고도정수처리 공정을 적용할 예정이다.

2.1.2. 고도처리 설비 현황

UV 반응조는 2기가 설치되어 있으며, 각 반응조는 6개의 섹션으로 구성되어 있다. UV 램프는 저압고출력(LPHO) 타입으로 1개 섹션 당 16개(반응조당 총 96개)가 설치되어 있다. UV 가동전력 범위는 30-100%로 탄력적인 운영이 가능하다. AOP 반응을 위한 H₂O₂는 튼트펌프로 주입되며 저장탱크 용량은 총 80 m³이다.

GAC는 석탄계로, 유효경 1.1 mm이며, F/A지의 포설심도는 1.7 m, EBCT (Empty Bed Contact Time)는 14.6분으로 총 8개지가 설치되어 있다.

Table 1. Detailed information on advanced treatment facilities in I WTP.

	Classification	Contents
UV Reactor	Specification of reactor	B 1.876 m × L 8.230 m × H 1.994 m
	Quantity	2 ea
	UV contact volume	14.1 m ³ /reactor
	Flow per reactor	78,750 m ³ /day/reactor
UV Lamp	Input power per lamp	1.0 kW (@253.7 nm)
	Lamp type	Low-Pressure High-Output
	Number of lamps	96 ea per Reactor (16 ea/section × 6 section)
	Power level	30% to 100%
H ₂ O ₂ Injection and Storage	Pump type	Tube Pump
	Pump capacity	1,000 mL/min/ea × 3 ea
	Storage tank	10 m ³ /ea × 2 ea, 30 m ³ /ea × 2 ea
GAC F/A	Effective diameter	1.1 mm
	Depth of GAC	1.7 m
	Specification of basin	B 4.85 m × L 11.5 m × 2 cells (111.55 m ² /ea)
	Quantity	8 ea

Table 2. Detailed information on disinfection facilities in I WTP.

	Classification	Contents
Chlorine Injection (~2021)	Pre (mid) chlorine injector	40 kg/h/ea × 1 ea
	Post chlorine injector	20 kg/h/ea × 1 ea
	Carburetor	120 kg/h/ea × 1 ea
	Ejector	3 inch/ea × 3 ea
NaOCl Injection (2021 ~)	Type	Hybrid
	NaOCl Generator	250 kg/day/ea × 1 ea
	NaOCl Concentration	12% (as free residual chlorine)
	NaCl Storage Tank	15 m ³ /ea × 2 ea
	NaOCl Storage Tank	35 m ³ /ea × 2 ea
Clean Water Reservoir	Specification of Reservoir	B 24.6 m × L 39.6 m × H 4.0 m
	Quantity	4 ea
	Total Volume	15,587 m ³

UV/H₂O₂-AOP 설비 현황은 **Table 1**에 나타내었다.

향후 2단계 고도공정 도입 시 UV 반응조 2기와 H₂O₂ 주입 펌프 및 저장 탱크, F/A지 6개지가 증설될 예정이다.

2.1.3. 소독공정 현황

현재 I정수장에서는 소독제로 액체염소를 사용 중이며, 2021년 이후에는 차아염소산나트륨(NaOCl)으로 대체할 예정이다. 액체염소의 최대 주입량은 전(중)염소 40 kg/h, 후염소 20 kg/h이다. 장래 설치할 대체소독설비는 현장에서 제조한 NaOCl과 시판 NaOCl을 상황에 따라 선택하여 사용할 수 있도록 구성된 hybrid 타입이며, NaOCl의 유효염

소 농도는 12%를 표준으로 한다. 각 정수지에는 3개의 도류벽이 설치되어 있으며, 장폭비 환산계수는 0.63이다. 정수지 총 용적은 15,587 m³으로, 시설용량 기준 1.6시간 분이다. 현재 정수지 용량 부족으로(상수도 시설기준 2시간 분 이상 권장) 동절기 수온 저하 및 pH 상승 시 소독능 확보가 어려운 실정이다. 소독공정 현황을 **Table 2**에 나타내었다.

2.1.4. 공급계통 및 배수지 현황

I정수장에서 생산된 정수는 2개 계통의 4개 배수지를 통해 G시 일원에 공급된다. 각 계통별로 2개의 배수지에 용

Table 3. Detailed information on distribution reservoir in water distribution line of I WTP.

Distribution Line	Distribution Reservoir	Specification (B × L × H × ea)	Total Volume (m ³)	Distance from I WTP (m)
I-Line	I-J DR	27 m × 90 m × 5.2 m × 2	50,000	6,074
	I-H DR	35 m × 35 m × 4.0 m × 2	10,000	9,385
	N-H DR	35 m × 35 m × 4.0 m × 3	15,000	3,098
N-Line	N-N DR	25 m × 20 m × 4.0 m × 2	11,000	3,655
		30 m × 25 m × 4.7 m × 2

Fig. 2. Water distribution line diagram of I WTP.

수를 공급하며, 총 관로연장은 16 km이다. I정수장의 공급 계통 및 배수지 현황을 Fig. 2 및 Table 3에 나타내었다.

2.2. 연구방법

2.2.1. 정수 수질 및 소독능 계산

소독능 계산에 필요한 수질 인자는 정수의 수온, 잔류염소 농도, pH 및 여과수 탁도이며, Table 4의 수질자동측정기에서 측정된 시간데이터를 활용하였다. Virus 및 *Giardia* 불활성화비 계산은 환경부에서 개발한 “소독능 계산 프로그램”을 활용하였다.

2.2.2. 용수생산량별 소독능 확보를 위한 정수지 잔류염소 농도 산정

동절기 최악 수질 조건 시 용수생산량별 *Giardia* 불활성화비 1.1(법적 기준 및 여유율 10% 감안) 이상 만족을 위한 정수지 유출 잔류염소 농도를 산정하였다. 수온은 최근 5년간 최저 수온인 1.9℃를 적용하였으며, pH는 액체염소 사용 시 최근 5년간 최고값인 7.8을 적용하였다. NaOCl 사용 시에는 NaOCl 주입에 따른 pH 변화 시험 결과에 따라(Table 5), 약품에 의하여 pH가 상승(전염소 주입률 2.5 mg/L 및 후염소 주입률 0.81-1.61 mg/L 고려 시, pH 상승값 0.23-0.3)함을 고려하여 8.03-8.10을 적용하였다. 정수지 수위는 만수위의

Table 4. Detailed information on water quality measuring instruments.

Factor	Instrument
Temperature	YOKOGAWA YTA110
Residual Chlorine	HACH CL-17
pH	YOKOGAWA PH-400G
Turbidity	DKK TUF-1600

80%인 3.2 m, 용수생산량은 150,000-250,000 m³/일(이용률 기준 60-100%), 정수지 통과유량은 시간최대유량(시간평균 유량×1.19)을 적용하였다.

2.2.3. 공급과정 잔류염소 농도 예측

수체 감소반응은 잔류염소가 수중의 피산화물과 반응하는 것으로 1차, 2차, n차 등으로 표현될 수 있으며, 적합한 모델을 구하기 위한 연구들이 수행되었다.¹⁴⁻¹⁶⁾ 본 연구에서는 계절별 수온 특성을 반영하기 위하여 bottle test를 통해 수온별 수체 감소계수(kb)를 도출하고, Arrhenius equation을 통하여 수온 변화와 kb와의 상관관계식을 유도하였다.

초음파 세척-건조-냉각시킨 100 mL 분해병에 수돗물을 가득 담은 후 냉장고 및 BOD 배양기에 넣고 시간 경과에 따른 잔류염소 감소 경향을 분석하였다. 겨울, 봄·가을, 여름의 계절별 수온 특성을 반영하기 위하여 온도를 각각 5℃, 15℃, 25℃로 설정하였다. 잔류염소 농도는 DPD법의 Pocket Colorimeter II (HACH Co.)로 측정하였다.

관벽 감소반응은 잔류염소가 관벽의 생물막 등과 반응하는 것으로 관의 재질 및 관경 등에 영향을 받는다. 관벽 감소계수(kw)의 도출 및 적용을 통하여 관망 수질 예측 결과를 보정함으로써 신뢰도를 제고할 수 있으며, 도출방법은 informal adjustment, heuristic method, systematic analysis method 등이 있다.¹⁷⁾ 본 연구에서는 kb를 결정한 후 예측치(모델링 데이터)와 실측치와의 비교를 통해 kw를 결정하

Table 5. NaOCl injection as residual chlorine vs pH increase.

NaOCl injection as Residual chlorine (mg/L)	0	0.60	1.80	2.40	3.31	4.11
pH increase	0	0.10	0.15	0.18	0.23	0.30

Fig. 3. Overview of UV dose validation protocol.¹⁸⁾

는 systematic analysis method를 적용하였다.

공급과정 배수지별 잔류염소 농도는 EPANET2.0 프로그램을 활용하여 모의하였다. 잔류염소 농도 예측을 위한 kb와 kw는 실험에서 도출된 결과값을, 반응차수는 1차 반응을 적용하였다. 정수생산량은 150,000-250,000 m³/일로 적용하였으며, 배수지별 유량은 최근 5년간의 배수지 유량비를 감안하여 적용하였다.

2.2.4. UV 소독능 분석

I정수장의 UV 설비는 Trojan에서 제조하였으며, UV 반응조의 조사량 인증 시험은 USEPA의 Ultraviolet disinfection guidance manual (UVDGM 2006)에 의거하여, 북미지역의 인증기관인 HDR | HydroQual에서 수행하였다.

UV의 소독능 계산을 위한 인정조사량(VD, Validation Dose)은 동등제거조사량(RED, Reduction Equivalent Dose)과 보정인자(VF, Validation Factor)를 통해 산출된다.¹⁸⁾ 종합적인 절차는 Fig. 3에 나타내었다.

RED는 Collimated beam test (평형조사시험)를 통해 도출된 자외선조사량과 불활성화율의 관계식과 Full scale reactor test (실규모 반응기 시험) 시의 미생물 불활성화율을 분석하여 산정한다. 실규모 반응기 운영 시 RED는 운영인자(유량, UVT, 출력 등)에 따라 결정된다.

VF는 RED 보정인자(B_{RED})와 성능평가 불확실성인자(U_{val})를 통하여 계산한다. U_{val}은 평형조사시험 안전인자(UDR), 강도계 안전인자(US) 목표치 안전인자(USP), 내삽 안전인자

(UIN) 등으로 구성된다.

VD는 RED/VF로 계산한다.

본 연구에서는 HDR | HydroQual에서 작성한 I정수장 UV 설비의 조사량 인증 시험을 통해 도출된 RED, VF, VD를 적용하여 소독능을 분석하였다. RED 도출을 위한 Full scale reactor test 조건은 가동 섹션 2-6개, 가동전력 20-100%, 통과유량 10,200-127,350 m³/일, UVT 54.9-85.9%이며, UVT는 Lignin sulfonate를 이용하여 조정하였다. 시험을 위한 지표미생물은 MS2와 T1을 사용하였다.¹⁹⁾

2.2.5. 소독 방법별 경제성 비교 분석

UV 소독의 적용 타당성을 분석하기 위하여 동절기 염소(액체염소, NaOCl) 단독 소독과 UV 병행 소독의 경제성을 비교하였다. 후염소 주입률은 염소 단독 소독 시 *Giardia* 불활성화비 1.1 이상, UV 병행 소독 시 관말 배수지 잔류염소 농도 0.5 mg/L 확보가 가능한 수준을 기준으로 하였다. UV 가동은 안정적인 *Giardia* 불활성화비 확보가 가능한 수준(반응조당 1개 섹션 가동, 가동전력 100%)을 기준으로 하였다. 약품 및 전력 단가는 2019년도 단가를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 정수 수질 및 지아디아 불활성화비 분석 결과

매년 동절기 시(12월-3월) 수온 저하와 pH 상승으로 소

Fig. 4. Water quality and inactivation ratio of *Giardia* (2015-2019).

Fig. 5. Water quality and *Giardia* inactivation ratio in winter (2015-2019).

독능은 감소한다. virus의 경우 염소에 대한 소독효과가 높아 동절기시 불활성화비 10 이상을 달성할 수 있으나, *Giardia*는 2 이하 수준이다. 최근 5년간의 정수 수질 및 *Giardia* 불활성화비를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 5는 동절기시 정수 수질 및 *Giardia* 불활성화비이다. 동절기 시 수온은 최저 1.9°C까지 감소하며, pH는 7.2-7.8 수준이다. 동절기 *Giardia* 불활성화비 확보를 위하여 수온 및 pH를 고려하여 잔류염소 농도를 0.6-1.2 mg/L로 운영하였으며, 정수지 수위는 3.0 m 이상을 유지하여 접촉시간을 확보하고자 하였다. 이를 통하여 최근 5년간 *Giardia* 불활성화비는 1.0 이상을 만족할 수 있었다. 그러나 정수지 수위 감소(2.0 m 이하)로 인해 접촉시간이 짧아져 *Giardia* 불활성

화비가 급감한 사례가 있었다(2018.01.31. - 2018.02.03.). 해당 시기의 정수장 이용률은 60% 수준이었음을 감안할 때, 향후 용수생산량 증가 시 정수지 고수위 운영으로도 충분한 접촉시간 확보가 어려워 *Giardia* 불활성화비의 법적기준(1.0 이상) 달성이 어려울 것으로 판단된다.

정수장 및 공급과정(배수지, 관망 수용가) 잔류염소 농도 및 수온측정 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 배수지 잔류염소는 수질자동측정값을, 관망 수용가 잔류염소는 G시 상하수도사업소의 수도꼭지 수질검사 결과를 활용하였다.

동절기에는 소독능 확보, 하절기에는 공급과정 미생물 번식 방지를 위해 잔류염소 농도를 상향 운영하였다. 배수지 잔류염소 농도의 경우 자체 기준(0.4 mg/L 이상)을 상

Table 6. Bulk decay coefficient and correlation by water temperature.

Water temperature (°C)	kb (day ⁻¹)	R ²
5	-0.2715	0.9138
15	-0.4216	0.9492
25	-0.7506	0.9862

Table 7. Actual vs simulated residual chlorine by kb.

DR	Concentration of residual chlorine						
	Actual measurement	kw = 0.0	kw = -0.1	kw = -0.2	kw = -0.3	kw = -0.4	kw = -0.5
I-J	0.82	0.89	0.86	0.85	0.83	0.82	0.81
I-I	0.70	0.87	0.82	0.77	0.74	0.71	0.69
N-H	0.80	0.90	0.86	0.83	0.82	0.79	0.77
N-N	0.78	0.88	0.85	0.80	0.80	0.77	0.75

Table 8. Water supply of distribution reservoir by water production (m³/day).

I WTP water product	150,000	180,000	210,000	250,000
I-J DR water supply	87,000	104,000	121,400	145,000
I-I DR water supply	27,000	32,000	37,100	44,000
N-H DR water supply	22,000	27,000	31,400	37,000
N-N DR water supply	14,000	17,000	20,100	24,000

시 만족할 수 있었으며, 도달시간 및 수용가 용수 사용량의 차이로 인해 N-N 배수지의 잔류염소 농도가 I-J 배수지 대비 낮은 수준이었다. 관말 수용가의 잔류염소 농도 역시 법적 기준(0.1 mg/L 이상)을 상시 만족하고 있으며, 동절기 잔류염소가 하절기 대비 높은 수준임을 확인할 수 있었다.

3.2. 용수생산량별 소독능 확보를 위한 정수지 잔류염소 농도 산정

용수생산량별 소독능 확보를 위한 정수지 유출 잔류염소 농도 산정 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 잔류염소 농도는 용수생산량이 증가함에 따라 상승하며, NaOCl 적용 시 pH의 상승으로 액체염소 대비 0.07-0.26 mg/L의 농도 상향이 필요하다. 액체염소 적용 시 200,000 m³/일 이상, NaOCl 적용 시 190,000 m³/일 이상의 용수생산 시 정수지 잔류염소 농도를 K-water 자체 기준인 1.0 mg/L을 초과하여 운영하여야 한다.

3.3. 공급과정 잔류염소 농도 예측 결과

I정수장 수돗물의 수온별 수체 감소계수(kb) 도출을 위한 bottle test 결과를 Fig. 8에, 수온별 수체 감소계수(kb) 및 상관계수(R²)를 Table 6에 나타내었다. 잔류염소는 수체 내 피산화물과의 반응을 통해 1차, 2차, n차 등으로 표현될 수 있으며¹⁴⁻¹⁶⁾, 본 연구에서는 1차 반응에 따라 감소하는 것으로 판단된다. 또한 수온이 높을수록 잔류염소 감소 속도

는 빨라짐을 확인할 수 있었다.

온도 변화에 따른 kb의 증감은 Arrhenius equation을 통하여 적절하게 예측할 수 있다.²⁰⁾ Arrhenius equation을 이용하여 수온과 kb의 상관관계를 도출한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

연구 결과, 다음과 같은 상관관계식 (1)을 유도할 수 있었으며(R²=0.9909), 이 식을 적용하여 최저 수온(1.9°C)의 kb를 -0.222 day⁻¹로 도출하였다.

$$kb = -e^{(-4.214 \times \frac{1000}{T} + 13.825)} \quad (1)$$

where, kb : bulk decay coefficient (day⁻¹),

T : temperature (K)

Systematic method에 의한 kw 도출을 위해, I-J 배수지의 잔류염소 실측값과 EPANET2.0을 이용한 모의 결과를 비교하였다. 실측 조건은 정수지 유출 잔류염소 농도 0.91 mg/L, 수온 2.7°C, kb -0.2323 day⁻¹이었으며, 비교 결과 kw는 -0.4 m/day로 적용할 때 실측값과의 오차가 가장 적었음을 확인할 수 있었다(Table 7).

EPANET2.0을 이용한 동절기 배수지 잔류염소 농도를 모의하였다. 용수생산량에 따른 배수지별 공급유량은 Table 8에 나타내었다.

EPANET2.0을 이용한 배수지 잔류염소 농도 모의 결과를

Fig. 6. Residual chlorine of I WTP and distribution line (2017-2019).

Fig. 7. Residual chlorine in clean water reservoir by water production for satisfying disinfection efficiency.

Fig. 8. Chlorine decay at different temperatures.

Fig. 10에 나타내었다.

용수생산량 증가 시 소독능 확보를 위한 염소 주입률 상승 및 배수지 도달시간 감소로 배수지 잔류염소 농도가 상

승함을 확인할 수 있었다. 특히, NaOCl 적용 시 액체염소 대비 잔류염소 농도가 0.05-0.24 mg/L 상승할 것으로 산정된다. 소독능 확보를 위한 염소 주입률 상향 시, 약품의 고

Table 9. Residual chlorine in distribution reservoir by chlorine sole disinfection.

Disinfection chemicals	Water supply (m ³ /day)	Concentration of residual chlorine				
		I WTP	I-Line		N-Line	
			I-J DR	I-H DR	N-H DR	N-N DR
Liquid chlorine	150,000	0.73	0.67	0.57	0.63	0.63
	180,000	0.91	0.83	0.73	0.81	0.78
	210,000	1.09	1.01	0.91	0.98	0.95
	250,000	1.33	1.25	1.13	1.23	1.20
NaOCl	150,000	0.80	0.72	0.63	0.69	0.69
	180,000	0.99	0.91	0.80	0.87	0.85
	210,000	1.19	1.11	0.98	1.09	1.04
	250,000	1.59	1.49	1.36	1.46	1.42

Fig. 9. Correlation between bulk decay coefficients (kb) and temperatures by Arrhenius equation.

농도 주입으로 약품비가 상승함은 물론 소독부산물 농도 상승. 염소 냄새에 의한 민원 발생 등이 예상된다. 용수생 산량에 따른 배수지별 공급과정 잔류염소 농도 예측 결과는 Table 9와 같다.

3.4. UV 소독능 분석 결과

I정수장의 UV 공정은 여과공정 전단에 위치하므로, UV를 통한 *Giardia*의 목표 불활성화비는 3.0 log를 적용하여야 한다. US EPA의 UVDGM 2006¹⁸⁾ 및 국내 환경부 고시 등에 *Giardia* 불활성화비 3.0 log 달성을 위한 UV 조사량은 11.0 mJ/cm²로 제시되어 있다.

HDR | HydroQual에서 수행한 I정수장 UV 설비의 UV

Fig. 10. Simulation results of residual chlorine in distribution reservoir by chlorine sole disinfection.

Table 10. Factors of RED calculation.

Factor	Contents (unit)
LI	Log inactivation of biological challenge surrogates (-)
Q	Flow rate (mgd)
UVA	Water absorbance at UV 254 nm (cm ⁻¹)
S	Duty sensor intensity (mW/cm ²)
S ₀	Duty sensor intensity at 100% Lamp power setting (mW/cm ²)
M	Number of lampsection in operation (-)
D ₁₀	UV sensitivity of the target pathogen (mJ/cm ² /log inactivation)
a~m	Model coefficients obtained by fitting the equation to the validation data

조사량 인증 시험을 통해 다음의 RED 산정 공식 (2)가 도출되었으며¹⁹⁾, 항목별 내용은 **Table 10**에 나타내었다.

$$RED = LI \times D_{10} = 10^a \times Q^{b+c \times UVA} \times UVA^f \times UVA \times \left(\frac{S}{S_0}\right)^{g+h \times UVA+i \times UVA^2} \times M^j \times D_{10}^m \quad (2)$$

I정수장의 RED 계산 시 적용값은 유량 19.8 mgd (75,000 m³/일), UVA 0.0329 cm⁻¹ (UVT 92.7%), 램프 수명 후 출력비 86%, 석영관 fouling 후 투과비 95%, 1개 섹션(lamp 16개) 가동, 적용 미생물의 UV 민감도 20 mJ/cm²/log inactivation (MS2)이다. 해당 조건에서 RED는 41.8 mJ/cm²로 산정된다. 적용 유량은 설비 이용률 100% 기준임을 감안할 경우, 실공정 운영시의 RED는 41.8 mJ/cm² 이상일 것으로 예상된다.

$$RED = 10^a \times 19.8^{b+c \times 0.0329} \times 0.0329^f \times 0.0329 \times (0.86 \times 0.95)^{g+h \times 0.0329+i \times 0.0329^2} \times 1^j \times 20^m = 41.8(mJ/cm^2)$$

VF 산정 시 B_{RED}는 UVDGM에 제시된 바에 따라 1.77 (*Giardia* 목표 제거율 3.0 log, UVT 92.7%, Challenge microorganism인 MS2의 UV sensitivity 20 mJ/cm²/log I 적용 시), U_{val}은 10.7을 적용하였다. 이에 따라 VF는 1.96으로 산정되었다.

$$VF = B_{RED} \times \left(1 + \frac{U_{val}}{100}\right) = 1.77 \times \left(1 + \frac{10.7}{100}\right) = 1.96$$

RED와 VF를 통해 VD는 21.3 mJ/cm²로 도출되었으며, 이는 *Giardia* 불활성화비(3.0 log 제거 기준) 1.936, *Cryptosporidium* 불활성화비(3.0 log 제거 기준) 1.775에 해당한다. 이를 통해 UV 반응조 전체 6개 섹션 중 1개 섹션 가동(가동전력 100%)으로 *Giardia* 및 *Cryptosporidium*을 3.0 log 이상 충분히 불활성화

할 수 있다고 판단된다.

$$VD = \frac{RED}{VF} = \frac{41.8}{1.96} = 21.3(mJ/cm^2)$$

현재 RED와 VF 계산을 위한 적용 인자(a~m, U_{val})는 제조사(Trojan)의 영업 비밀에 해당되어 외부에 공개되지 않고 있다. 그러나 UV 소독 적용을 위해서는 RED 및 VF의 실시간 계산이 필요하므로, I정수장 2단계 고도정수처리 공정 도입시 해당 값의 자동계산 및 표출 프로그램을 정수장 제어 시스템에 탑재할 예정이다.

US EPA의 정수처리 소독 기준은 Long term 2 enhanced surface water treatment rule (LT2ESWTR)에 따라 *Cryptosporidium* 검출 농도 0.01 oocysts/L 이하 시 목표 제거율 2.0 log, 0.01 oocysts/L 초과 시 목표 제거율 3.0 log를 적용한다.²¹⁾ 최근 국내 상수원수 중 *Cryptosporidium* oocysts 검출 농도가 한강 수계에서 6.6 oocysts/L²⁾, 금강수계에서 2.5 oocysts/L²⁾, 낙동강수계에서 8.0 oocysts/L³⁾까지 검출된 사례가 있음을 고려할 때, *Cryptosporidium* 목표 제거율을 현재의 2.0 log에서 3.0 log로 강화할 필요가 있다고 판단된다. *Cryptosporidium*의 강한 염소 내성을 고려하면, UV나 오존 등을 활용한 보완이 필요하며, I정수장은 UV 설비의 소독 적용으로 기준을 충족할 수 있을 것으로 사료된다.

I정수장의 UV의 소독만으로 *Giardia* 불활성화비의 법적 기준을 만족할 수 있을 경우, 정수지 잔류염소는 관망 잔류염소 유지 수준으로 감소하여 운영할 수 있다.

말단 배수지 잔류염소 농도 0.5 mg/L 확보를 위한 정수지 잔류염소 농도를 산정하기 위하여 EPANET2.0으로 모의한 결과를 **Fig. 11**에 나타내었다.

I정수장의 최장 관말 배수지인 I-I 배수지의 잔류염소 농도 0.5 mg/L 이상 유지를 위한 정수지 잔류염소 산정 결과는 **Table 11**과 같다. I정수장의 잔류염소 농도는 0.59-0.65 mg/L로, 액체염소 적용 시 대비 0.08-0.74 mg/L, NaOCl 적용 시 대비 0.15-1.00 mg/L 감소시킬 수 있다. 이를 통해

Table 11. Residual chlorine in distribution reservoir by UV combined disinfection (UV+NaOCl).

Water supply (m ³ /day)	Concentration of residual chlorine				
	I WTP	I-Line		N-Line	
		I-J DR	I-H DR	N-H DR	N-N DR
150,000	0.65	0.58	0.51	0.56	0.55
180,000	0.63	0.58	0.51	0.56	0.55
210,000	0.61	0.56	0.51	0.56	0.53
250,000	0.59	0.55	0.50	0.54	0.53

Table 12. Comparative condition of economical efficiency.

Classification	Liquid Chlorine	Liquid Chlorine + UV	NaOCl	NaOCl + UV
Chlorine Injection (mg/L)	0.74-1.34	0.60-0.66	0.81-1.61	0.60-0.66
Unit cost of chlorine agent (KRW/kg)	546	176	546	176
Number of UV lamp operation (ea)	-	32-64	-	32-64
Input power for UV Lamp (kW)	-	32-64	-	32-64
Unit cost of electric power (KRW/kW)	-	103.32	-	103.32

Fig. 11. Simulation results of residual chlorine in distribution reservoir by UV combined disinfection (UV+NaOCl).

용수생산량 증가에 따른 체류시간 감소를 고려한 잔류염소 농도 관리가 가능할 수 있으며, 후염소 주입률 감소를 통한 소독부산물 발생 저감도 기대할 수 있다.

3.5. 소독 방법별 경제성 비교 분석 결과

정수지 유출 잔류염소 농도확보를 위한 후염소 주입률은 상황별 정수지 잔류염소 농도와 정수지 접촉시간, 수체감소를 고려하여 다음의 식 (3)에 따라 계산하였다.

$$Cl_i = \frac{Cl_o}{e^{-kbt}} \quad (3)$$

where, Cl_i : injection of post chlorine,

Cl_o : residual chlorine at clean water reservoir,

t : contact time (day)

후염소 주입률 계산 시, kb 는 -0.222 /day, t 계산을 위한 정수지 수위는 3.2 m를 적용하였다. 상황별 후염소 주입률을 Fig. 12에 나타내었다.

경제성 비교 분석 조건을 Table 12에 나타내었다.

UV 소독 시 UV 반응조 당 1개 섹션(lamp 16개)을 가동하며, 출력은 100%로 적용하였다. UV 반응조 가동 대수는 반응조 설계 통과유량(75,000 m³/일)을 고려하여 결정하였다. 경제성 검토를 위한 약품 및 전력비 단가는 2019년도 현재 단가를 기준으로 하였다.

소독 방법별 원단위 분석 결과를 Fig. 13에 나타내었다.

약품 단가는 액체염소가 NaOCl 대비 3.1배 이상이나, 유효염소 농도의 차이(액체염소 99.5% 이상, NaOCl 12% 수준)로 인해 NaOCl의 약품비가 더 높게 산정된다. 원단위는 액체염소 단독 소독이 가장 저렴하나, I정수장에서는 소독제를 NaOCl로 대체할 예정이므로 2021년 이후 액체염소는 사용할 수 없다.

소독제로 NaOCl을 사용하는 경우, 용수생산량 190,000-250,000 m³/일일 때 UV 병행 소독 시가 NaOCl 단독 소독 시 보다 원단위를 0.02-0.85 원/m³ 절감할 수 있을 것으로 산정된다. 또한 UV 병행 소독 시, 후염소 주입률을 0.60-0.66 mg/L로 낮춰서 운영해도 *Giardia* 불활성화비는 2.4-2.8을 확보할 수 있으며, *Cryptosporidium* 역시 3.0 log 제거(원수에서 0.01

Fig. 12. Injection of post chlorine by disinfection type and water production.

Fig. 13. Price unit by disinfection type and water production.

oocysts/L 초과 검출 시 US EPA의 정수처리기준)가 가능하다.

현재 UV 설비 현황 및 증설계획, 대체 소독제 도입 계획 등 고려 시, NaOCl 도입 전 용수생산량 150,000 m³/일 수준 시에는 액체염소 단독 소독이, UV 설비 증설 및 NaOCl 도입 이후에는 UV 병행 소독이 적합하다고 판단된다. 향후, VD (RED, VF 포함) 계산 프로그램의 정수장 제어 시스템 탑재 후, 반응조 통과유량 및 UVT에 따라 UV 가동전력을 탄력적으로 운영할 경우 UV 설비 운영에 따른 전력비를 감소할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

I정수장의 UV 소독공정 적용을 통한 소독능 제고 및 관망 잔류염소 적정 운영을 목표로 한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) I정수장에서 동절기시 *Giardia* 불활성화비 1.1 이상을

만족하기 위한 정수지 잔류염소 농도는 액체염소 적용 시 0.73-1.33 mg/L, NaOCl 적용 시 0.80-1.59 mg/L로 산정되었다. 대체 소독제로 적용 예정인 NaOCl의 경우, pH 상승에 의해 액체염소 대비 0.07-0.026 mg/L의 농도 상향이 필요하다.

- 2) 동절기 공급과정 잔류염소 농도 모의 결과, 관말 배수지에서의 잔류염소 농도는 0.63-1.42 mg/L로 나타났다. 이는 K-water 자체 기준 대비 1.5-3.5배 수준으로 약품비 상승, 소독부산물 농도 상승, 염소 냄새 민원 발생 등을 야기할 수 있다.
- 3) I정수장 UV 설비의 UV 조사량 인증시험 결과, 반응조당 1개 섹션을 가동전력 100%로 운영 시 인증 조사량(VD)은 21.3 mJ/cm²로 도출되었다. 이에 따라 UV 소독만으로 법적기준 만족이 가능함을 알 수 있다.
- 4) UV 소독 적용 시 정수지 잔류염소는 관망 잔류염소 유지 수준으로 감소하여 운영할 수 있다. 말단 배수지

잔류염소 농도 0.5 mg/L 확보를 위한 정수지 잔류염소 농도는 0.59-0.65 mg/L로, 염소 단독 소독 보다 0.08-1.00 mg/L 감소시킬 수 있다.

- 5) 소독 방법별 경제성 비교 분석 결과, UV 설비 증설 및 대체 소독제 도입 이후 UV 병행 소독 적용 시 NaOCl 단독 소독 보다 원단위를 0.02-0.85 원/m³ 절감할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 후염소 주입률을 감소하여 운영해도 *Giardia* 불활성화비의 안정적인 확보가 가능하며, *Cryptosporidium* 역시 미국 EPA의 정수처리기준을 만족할 수 있다. 향후 UV 가동전력을 탄력적으로 운영할 경우 UV 설비 운영에 따른 전력비 감소가 가능할 것으로 예상된다.

References

1. K. C. Lee, B. C. Gegal, I. H. Choi, W. T. Lee, Formation characteristics and control of disinfection byproducts in a drinking water treatment plant using lake water, J. Korean Soc. Environ. Eng., 37(5), 269-276(2015).
2. H. S. Kim, J. Y. Yoon, C. M. Yeom, Detection of *Cryptosporidium* oocysts and *Giardia* cysts from the raw water of drinking water and the effluent of wastewater treatment plant, J. Korean Soc. Water Environ., 16(5), 585-594(2000).
3. Y.-H. Kim, S.-H. Lee, C.-H. Lee, Characteristics of Occurrence of *Cryptosporidium* and *Giardia* in the Nakdong River, J. Korean Soc. Environ. Eng., 28(8), 843-851(2006).
4. S. A. Craik, G. R. Finch, J. R. Bolton, M. Belosevie, Inactivation of *Giardia muris* cysts using medium pressure ultraviolet radiation in filtered drinking water, Water Res., 34(18), 4325-4332(2000).
5. A. T. Cambell, P. Wallis, The effect of UV irradiation on human derived *Giardia lamblia* cysts, Water. Res., 36(4), 963-969(2002).
6. S. A. Craik, D. Weldon, G. R. Finch, J. R. Bolton, M. Belosevie, Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts using medium-and low-pressure ultraviolet radiation, Water Res., 35(6), 1387-1398(2001).
7. G.-A. Shin, K. G. Linden, M. J. Arrowood, M. D. Sobsey, Low-Pressure UV Inactivation and DNA Repair Potential of *Cryptosporidium parvum* Oocysts, Appl. Environ. Microbiol., 67(7), 3029-3032(2001).
8. K.-H. Lee, S.-H. Chae, J.-L. Lim, J.-H. Choi, H.-W. Ahn, Evaluation of Ultraviolet disinfection on *Bacillus subtilis* spore for drinking water treatment, J. Korean Soc. Environ. Eng., 26(12), 1389-1394(2004).
9. C. G. Yoon, K.-W. Jung, J.-H. Ham, J.-H. Jeon, Feasibility study of UV-disinfection for water reuse of effluent from wastewater treatment plant, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 45(2), 126-137(2003).
10. Y.-H. Kim, C.-H. Lee, S.-H. Lee, Inactivation Effect of *Cryptosporidium* by ozone and UV, J. Korean Soc. Environ. Eng., 29(1), 31-39(2007).
11. S.-H. Byun, M.-Y. Lee, E.-J. Cho, T.-H. Yoon, T.-H. Kim, S.-H. Han, Inactivation of infectious *Cryptosporidium parvum* by various disinfectants, J. Korean Soc. Environ. Eng., 29(5), 533-539(2007).
12. Y. J. Jeong, Evaluation of the sequential and combined disinfection process using ozone and UV: A study on the inactivation of indicator microorganism, Yonsei University, 27-63(2006).
13. P. D. Swaim, S. B. Jeffcoat, J. A. Roberson, S. Via, G. Pihera, W. D. Bellamy, Application of the proposed UVDGM requirements to an existing UV disinfection installation, J. Am. Water Works Ass., 96(10), 83-96(2004).
14. J. J. Vasconcelos, L. A. Rossman, W. M. Grayman, P. F. Boulous, R. M. Clark, Kinetics of chlorine decay, J. Am. Water Works Ass., 89(7), 54-65(1997).
15. F. Hua, J. R. West, R. A. Barker, C. F. Forster, Modeling of chlorine decay in municipal water supplies, Water Res., 33(12), 2735-2746(1999).
16. J. C. Powell, J. R. West, N. B. Hallam, C. F. Foster, J. Simms, Performance of various kinetic models for chlorine decay, J. Water Resour. Plan. Manag., 126(1), 13-20(2000).
17. J. J. Vasconcelos, P. F. Boulous, Characterization and Modeling of Chlorine Decay in Distribution Systems, AWWA Research Foundation and American Water Works Association, USA(1996).
18. USEPA, Ultraviolet disinfection guidance manual (UVDGM) for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule, USEPA(2006).
19. O. K. Scheible, C. Shen, J. G. Cleary, Validation report Trojan technologies UVFlex™ Disinfection system for the Eastern Treatment Plant Melbourne, Australia (confidential), HDR | HydroQual(2012).
20. J. C. Powell, N. B. Hallam, J. R. West, C. F. Foster, J. Simms, Factors which control bulk chlorine decay rates, Water res., 34(1), 117-126(2000).
21. USEPA, Long term 2 enhanced surface water treatment rule, USEPA(2006).