

정수 처리기술 기준 도입을 앞둔 전국 정수장의 소독능 관리 현황 및 특색

Characteristics of Disinfection Performance in Water Treatment Plants with Introducing Treatment Technigue Requirement

염철민 · 조순행 · 정해웅* · 윤제용**

Cheolmin Yeom · Soonhaing Cho · Haewoong Jung* · Jeyong Yoon**

아주대학교 환경공학과 · 삼구화학공업(주)* · 서울대학교 응용화학부**

Dept. of Environmental Eng., Ajou University
Samgoo Chemical Industry Co., Ltd.*
School of Chemical Eng., Seoul National University**

Abstract

Disinfection process in water treatment plants (WTPs) is one of the most important step in order to inactivate waterborne disease. However, what is the necessary disinfection in WTPs was not properly established in Korea. This study was conducted to evaluate disinfection performance in nationwide water treatment plants (n=474). Disinfection requirement based on the SWTR (Surface Water Treatment Rule) of the U.S. (1-log *Giardia* removal) was chosen in estimating the compliance. The scope of unit process for evaluating disinfection performance includes postdisinfection process in clearwells, pipeline, and storage tank. The worst water quality condition in individual WTPs was applied for the disinfection performance evaluation. The major results are as follows.

First, it was appeared that 184 WTPs (39 %) provided insufficient disinfection performance. Disinfection performance was significantly improved during past 2 years. The ratio of the number of WTPs providing insufficient disinfection performance in 1999 and 2001 was 78 % and 41 %, respectively. One of major factors for this improvement was due to the improvement of T_{10}/T value in clearwell, as a result of modification of clearwell facility.

Second, if disinfection criteria is 3-log *Giardia* inactivation at worst water quality condition, then 19 % of all WTPs can not meet this disinfection criteria. And if disinfection criteria is strengthened to 4-log *Giardia* inactivation, then 58 % of all WTPs can not meet this disinfection criteria. Since disinfection criteria is decided by contamination level of *Giardia* in source water, it also needs the investigation of *Giardia* occurrence in source water.

Keywords : disinfection, inactivation, disinfection criteria, *Giardia*, T_{10}/T value

1. 서론

상수원 원수가 다양한 산업 및 상업활동에 의한 노출이 증가하는 반면, 시민들의 안전한 먹는 물에 대한 욕구는 크게 증가하고 있다. 1998년 정수

처리수에서 virus 검출에 대한 진위여부 논쟁도 중요하지만 정수장에서의 병원성 미생물 관리는 처리수에서 실제 virus가 검출되었는가 하는 문제에만 한정되는 것은 아니다. 이러한 문제는 국내 정수장 소독설비의 수준 및 운전관행과 더불어 논

의되어져야만 문제에 대한 이해는 물론 문제해결을 위한 장기적인 정책 비전과 대책을 세울 수 있다.

국내 정수장에서는 소독능을 만족하여야하는 법적 기준을 가지고 있지는 않다¹⁾. 물론 국내 정수장의 필요 소독능에 대한 기준도입이 2002년 초반으로 예정되어 있지만 현재로는 먹는 물 수질기준 중에서 미생물기준 (대장균과 일반세균)과 관망과 가정 수도수에서 잔류염소 기준만을 만족하면 법적인 문제는 존재하지 않는다. 소독공정을 강화하고 있는 세계적인 추세와 국내에서 제기되는 여러 가지 소독관련 문제제기와 사고로 미루어 볼 때 국내에 이에 합당한 새로운 규정이 필요하지 않는가 하는 제언은 꾸준히 제기되어 왔다¹⁻⁶⁾.

지난 2001년 5월 환경부는 지방 중소규모 정수장 처리수에서 virus가 검출되었다고 발표하였다. 계획된 조사대상 40 개소 정수장 중에서 조사를 마친 33 개소 정수장에서 5개의 정수 및 가정 급수에서 virus가 검출되었다⁷⁻⁸⁾. 이에 따라서 환경부는 전국적인 규모로 국내 정수장의 소독능에 관한 자료를 조사하였다. 이번 환경부 조사는 1999년에 정수장 필요 소독능을 전국적인 규모로 윤 등⁴⁾이 조사한 연구에 이어 두 번째이다.

본 연구는 환경부에서 수행한 전국 정수장의 소독능 평가자료를 이용하여 국내 정수장의 소독능 관리 현황과 특색을 파악하고자 하였다. 본 연구의 목적은 (1) 전국 정수장 소독능 관리 현황과 실태를 파악하고, (2) 1999년에 윤 등⁴⁾이 조사된 결과와 비교하여 2년 사이에 정수장 소독공정 시설 및 운전 개선 현황을 확인하며, (3) 정수장 처리기준 미달 정수장 특성을 분석하여 향후 정수장의 소독능 개선을 위한 자료로 이용함을 목적으로 한다.

2. 연구 방법

2.1 소독능 평가 조건 및 기준

본 연구는 환경부에서 2001년 5월 전국 중, 소규

모 정수장 512 개소를 대상으로 한 소독능 운영실태에 대한 일체 점검 결과를 바탕으로 수행되어졌다. 조사대상 512 개소 정수장 중에서 소독능 관련 자료의 확보가 가능하였던 474 개소 정수장만을 대상으로 하였다. 본 연구에서 채택한 소독능 평가 조건은 개별 정수장의 소독공정의 최악 조건 (최저 수온, 최고 pH)에서 이루어졌다⁹⁾.

미국의 지표수처리법에서는 정수공정에서 최소한 *Giardia* 3-log (99.9 %) 제거와 virus 4-log (99.99 %) 제거를 달성하도록 요구하고 있다. 또한 주 정부에서는 Table 1 에서 보여지는 바와 같이 원수특성이나 처리방식에 따라 *Giardia*나 virus의 제거목표를 연방정부의 기준보다 강화하기도 한다⁹⁾. 정수장이 정상적으로 운전되는 경우 침전·여과와 같은 정수공정도 병행성 미생물을 제거하는 것으로 알려져 있다. 표준정수처리 (Conventional Water Treatment) 공정에서 급속여과방식을 통하여 2.5-log *Giardia* 제거가 가능한 것으로 알려져 있으므로 정수장 소독공정에서 만족되어야 하는 log 제거율은 미국 지표수처리법의 *Giardia* 제거 기준인 3-log에서 2.5-log를 뺀 0.5-log이다. 그러나 이러한 경우는 여과공정이 잘 운영되는 경우에 해당되며 추가적인 안전 지수를 고려하여 본 연구에서 소독능 평가 기준은 소독공정에서 1-log *Giardia* 불활성화를 기준으로 하였다⁹⁾. *Giardia* 불활성화를 목표로 한 것은 *Giardia* 불활성화에 필요한 CT요구값이 virus 불활성화에 필요한 CT요구값보다는 훨씬 더 크기 때문이다.

2.2 소독능 계산

본 연구에서 소독능 계산은 정수장에서 정수지, 송수단계, 배수지의 세 단계로 구분하여 계산하였다¹⁰⁾. 각 단계에서의 이론적 체류시간을 Table 2에 제시된 방법으로 계산하였다. 그런데 주된 소독이 일어나는 정수지나 배수지의 경우 단락류 (short circuiting)나 사수부 (dead zone)가 존재하므로 이론적 체류시간을 실제 소독제 접촉시간으로 산정하지는 않는다. 실제 접촉시간은 추적자 실험을

Table 1. Recommended overall treatment criteria based on an estimate of the *Giardia* cyst concentration in the source water

cyst concentration/100L	<1	1-10	10-100
<i>Giardia</i> cyst removal	3-log	4-log	5-log
Virus removal	4-log	5-log	6-log

Table 2. Procedures to determine disinfection performance credit at water treatment plants

Procedure	Step	Formula for calculation (unit)
① Residence time	Clearwell	$\frac{\text{Volume of Clearwell (m}^3\text{)}}{\text{Daily average flow rate (m}^3\text{/day)}} \times 1440 \text{ (min)}$
	Pipeline	$\frac{\text{Volume of Pipeline (m}^3\text{)}}{\text{Daily average flow rate (m}^3\text{/day)}} \times 1440 \text{ (min)}$
	Storage tank	$\frac{\text{Volume of Storage tank (m}^3\text{)}}{\text{Daily average flow rate (m}^3\text{/day)}} \times 1440 \text{ (min)}$
② Required CT (CT _{req})		* Referring to "USEPA Guidance Manual"
③ Calculated CT (CT _{cal})	Clearwell	Residence time (min) × Residual chlorine conc. (mg/L) × T ₁₀ /T
	Pipeline	Residence time (min) × Residual chlorine conc. (mg/L)
	Storage tank	Residence time (min) × Residual chlorine conc. (mg/L) × T ₁₀ /T
④ CT _{cal} /CT _{req} in each step	Clearwell	$\frac{\text{Calculated CT value in Clearwell (CT}_{cal}\text{)}}{\text{Theoretical CT value (CT}_{req}\text{)}}$
	Pipeline	$\frac{\text{Calculated CT value in Pipeline (CT}_{cal}\text{)}}{\text{Theoretical CT value (CT}_{req}\text{)}}$
	Storage tank	$\frac{\text{Calculated CT value in Storage tank (CT}_{cal}\text{)}}{\text{Theoretical CT value (CT}_{req}\text{)}}$
⑤ Total CT _{cal} /CT _{req}		The sum of CT _{cal} /CT _{req}

통하여 추적자가 반응조 안에 90 % 이상 머물러 있는 시간 (T₁₀)을 사용하는 것을 원칙으로 하지만 정수장의 여건에 따라서 추적자 실험을 수행하지 못할 경우 도류벽 조건에 따라 실제 접촉시간을 정수지에서의 이론적 체류시간에 도류벽 지수값 (T₁₀/T)을 곱하여 계산하였다⁹⁾. 본 연구에서 이용된 도류벽 특성값 (T₁₀/T)은 정수지와 배수지에서는 0.1, 0.3, 0.5, 1.0중에서 하나를 적용하였고, 송수단계에서는 1.0을 적용하였다.

각 단계에서의 CT이론값 (CT_{req}로 표현)은 정수지 및 배수지 유출구에서의 유리잔류염소, 수온, pH, 탁도를 측정하여 미국 환경부의 Guidance Manual에서 구하였다⁹⁾. 단, 송수단계의 경우에는 송수관로 끝단에서 유출되는 유출수의 유리잔류염소, 수온, pH, 탁도를 측정하였고, 이때 끝단에서 측정이 불가능한 경우에는 가정수도꼭지 등에서 측정된 값을 CT계산에 사용하였다. 각 단계에서의 CT계산값 (CT_{cal}로 표현)은 계산된 실제 접촉시간에 유리잔류염소 농도를 곱하여 계산하였다. 각 단계별 불활성비는 CT계산값/CT이론값 (CT_{cal}/CT_{req})으로 계산하였고, 총 불활성비는 각

단계별 불활성비의 합으로써 계산하였다.

2.3 소독능 개선 현황 비교

소독능 개선 현황의 비교는 윤 등(1999)에 의한 조사⁴⁾와 본 연구에서의 조사에서 공통적으로 조사된 225 개소 정수장의 소독능을 분석하였다. Table 3은 소독능 개선 현황을 비교하기 위하여 윤 등(1999)에 의한 조사⁴⁾와 이번 조사의 연구방법론의 차이를 비교한 것이다. Table 3에서 보면 두 차례 조사에서 가장 큰 차이점은 소독능 평가 범위가 다르다는 점이다. 1999년 조사의 경우 정수지에서만 소독능이 평가되었고, 2001년 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 정수지와 송수관로, 그리고 배수지에서의 소독능의 합으로 평가되어졌다.

소독능 평가조건을 살펴보면 1999년 조사와 이번 조사 모두 개별 정수장마다의 연중 최악의 조건에서 소독능을 평가하였다. 다만 1999년 조사에서는 개별 정수장마다의 최악 조건을 최저 수온의 경우 각 정수장에서 해당되는 최저 수온을 0.5, 5, 10 °C 중에서 한 가지를 선택하도록 하여 소독능

Table 3. Comparison of the methodology for the disinfection performance evaluation between the year of 1999 and 2001

Year	Number of investigated WTPs	Number of WTPs commonly investigated	Unit Process scope for the evaluation	Criteria	Water Temp. (°C)	pH	T ₁₀ /T	Residual chlorine conc. (mg/L)
Yoon et al. (1999)	426	225	Clearwell	1-log <i>Giardia</i> removal	minimum water temp.	maximum pH	Choose the one among 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0	minimum residual chlorine conc.
This study (2001)	474	225	Clearwell + Pipeline + Storage tank	"	"	"	"	"

평가에 이용하였고, pH의 경우 pH 6.0에서 pH 8.5까지 0.5간격으로 여섯 단계로 구분하여 각 정수장에서 해당되는 최고 pH를 선택하여 소독능 평가에 이용하였다. 소독능 평가 기준은 1999년의 조사와 2001년의 조사에서 같은 *Giardia* 1-log 제거를 기준으로 하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 소독능 특성

① 전체 정수장의 소독능 특성

Fig. 1은 전체 정수장의 소독능 특성을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 보면 전체 조사대상 474 개소 정수장 중에서 39%에 해당하는 184 개소의 정수장에서 CT_{cal}/CT_{req} 값이 1보다 적은 소독능 불만족 정수장으로 나타났다.

Fig. 2는 소독능을 만족하지 못하는 정수장에서 달성하고 있는 소독능의 분포를 나타낸 것이다.

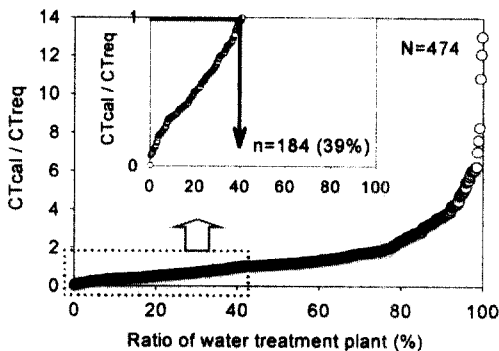


Fig. 1. Characteristics of disinfection performance of investigated 474 water treatment plants

CT_{cal}/CT_{req}값을 0.2 단위로 5 단계로 구분하였다. 소독능 불만족 정수장은 구간 별로 볼 때 CT_{cal}/CT_{req}값이 0.4-0.6 인 구간이 51 개소 (28%)로 가장 많았다.

② 수온에 따른 소독능 특성

Fig. 3은 전체 정수장과 소독능 불만족 정수장의 최저 수온 분포를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보면 최저 수온을 다섯 단계 (0.5 °C이하, 0.6-5 °C, 5-10 °C, 10-15 °C, 15 °C이상)로 구분하였다. Fig. 3에서 보면 각 최저 수온 구간별 분포하는 정수장의 수는 전체 정수장 및 소독능 불만족 정수장 중에서 공통적으로 수온 0.6-5 °C 구간에 각각 307 개소, 117 개소로 가장 많았고, 15 °C를 초과하는 정수장도 전체 정수장 중에서 5 개소가 있었다. 그러나 각 최저 수온 구간에 해당되는 정수장 수에 대한 소독능 불만족 정수장 수의 비율은 정수장의 분포수와는 달리 일반적으로 최저 수온이 낮

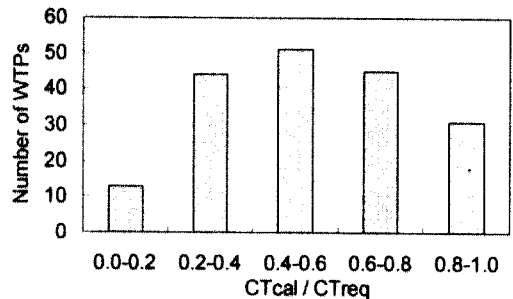


Fig. 2. Distribution of disinfection performance credit of water treatment plants which provide insufficient disinfection performance

을수록 소독능 불만족 비율이 높았다 (최저 수온 15 °C 제외).

③ pH에 따른 소독능 특성

Fig. 4는 전체 정수장과 소독능 불만족 정수장의 최고 pH 분포를 나타낸 것이다. 최고 pH를 다섯 단계 (pH 6.0-6.4, pH 6.5-6.9, pH 7.0-7.4, pH 7.5-7.9, pH 8.0 이상)로 구분하였다. Fig. 4에서 보면 각 최고 pH 구간별 분포하는 정수장의 수는 전체 정수장 및 소독능 불만족 정수장 중에서 공통적으로 pH 7.0-7.4 구간에 각각 242 개소, 88 개소로 가장 많았고, pH 8.0 이상인 정수장도 전체 정수장 중에서 28 개소가 있었다. 각 최고 pH 구간별 해당되는 정수장 수에 대한 소독능 불만족 정수장 수의 비율을 살펴보면 일반적으로 pH가 높을수록 소독능 불만족 비율이 약간 높은 것으로 나타났다 (pH 6.0-6.4 구간 제외).

④ 잔류염소농도에 따른 소독능 특성

Fig. 5는 전체 정수장과 소독능 불만족 정수장의 잔류염소농도 분포를 나타낸 것이다. 잔류염소농

도는 세 단계 (0.5 mg/L 미만, 0.5-1.0 mg/L, 1.0 mg/L 이상)로 구분하였다. 전체 정수장에서 현재 유지하고 있는 잔류염소농도는 0.5-1.0 mg/L의 범위가 259 개소 (55 %)로 가장 많았다. 잔류염소농도가 0.5 mg/L 미만인 정수장도 138 개소 (29 %)나 되었다.

소독능 불만족 정수장 ($CT_{cal}/CT_{req} < 1$)의 잔류염소농도별 정수장 분포수를 살펴보면 0.5-1.0 mg/L 범위의 잔류염소농도 구간에서 98 개소로 가장 많은 것으로 나타났다. 그러나 각 잔류염소농도 구간에 속하는 정수장 분포수에 대한 비율면에서 살펴보면 일반적으로 잔류염소농도가 낮을수록 소독능 불만족 비율이 높았다. 또한 잔류염소농도가 1.0 mg/L 이상인 범위에서도 소독능을 만족하지 못하는 비율이 16 % (77 개소 중 12 개소)로 파악되었다.

⑤ 도류벽 지수에 따른 소독능 특성

Fig. 6은 전체 정수장과 소독능 불만족 정수장의 정수지내 도류벽 지수에 따른 분포를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 보면 전체 정수장 중에서 도류

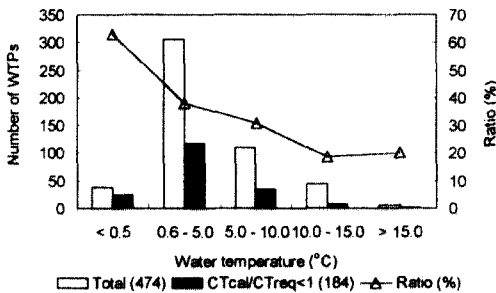


Fig. 3. Distribution of the water temperature of water treatment plants

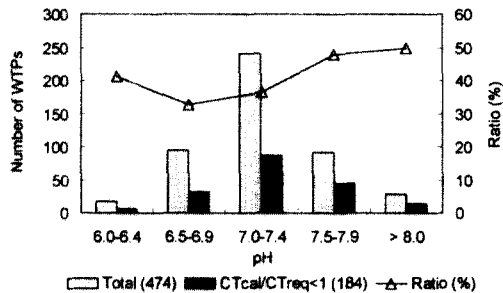


Fig. 4. Distribution of pH of water treatment plants

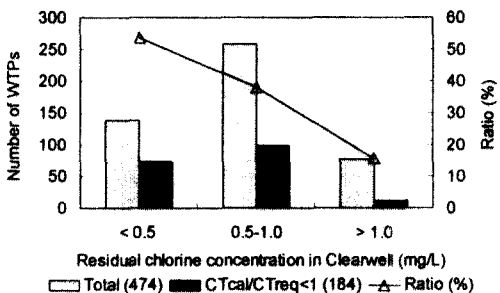


Fig. 5. Distribution of the residual chlorine concentration of water treatment plants

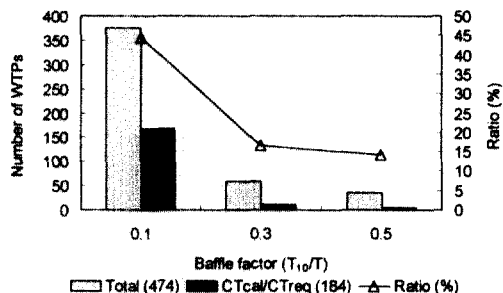


Fig. 6. Distribution of the baffle factor of the clearwell in water treatment plants

백 factor가 $T_{10}/T = 0.1$ 인 정수장이 377 개소 (80%)로 가장 많았고, 도류백 지수가 $T_{10}/T = 1$ 일로 보고한 정수장이 2 개소가 있었다. 각 도류백 지수별 소독능 불만족 비율을 살펴보면 $T_{10}/T = 0.1$ 인 정수장이 377 개소 중에서 168 개소 (45%)로 가장 높았고, $T_{10}/T = 0.3$ 과 $T_{10}/T = 0.5$ 인 정수장에서는 모두 15% 내외로 나타났다.

⑥ 시설규모에 따른 필요 소독능 특성

Fig. 7은 전체 정수장과 소독능 불만족 정수장의 정수시설 규모별 분포를 나타낸 것이다. 정수장의 시설규모는 세 단계로 구분하였는데 2,000톤/일 이하인 정수장을 소규모 정수장, 2,000-50,000톤/일 이하인 정수장을 중규모 정수장, 그리고 50,000톤/일 초과인 정수장을 대규모 정수장으로 구분하였다⁴⁾. 전체 정수장 중에서 소규모 정수장은 246 개소 (52%), 중규모 정수장은 206 개소 (43%), 그리고 대규모 정수장은 22 개소 (5%)로 50,000톤/일 이하의 중소규모 정수장이 대부분을 차지한다.

시설규모별 소독능 불만족 정수장은 소독능이 평가된 소규모 정수장 246 개소 중에서 82 개소 (33%), 중규모 정수장 206 개소 중에서 93 개소 (45%), 대규모 정수장 22 개소 중에서 9 개소 (41%)로 나타났다. 따라서 정수장 필요소독능 준수 정수장의 개소수면에서는 중, 소규모 정수장이 많은 것으로 나타났지만, 생산시설 용량에 따른 비율로는 특별한 차이가 없었다.

⑦ 정수방법별 소독능 특성

Fig. 8은 전체 정수장과 소독능 불만족 정수장의 정수방법별 분포를 나타낸 것이다. 전체 정수장에서 급속여과공정을 수행하는 정수장이 258 개

소 (54%)로 가장 많고, 완속여과공정을 수행하는 정수장은 155 개소 (33%)로 급속여과와 완속여과 공정을 갖는 정수장이 전체 정수장의 88%를 구성하였다. 급속여과공정과 완속여과공정을 동시에 응답한 정수장도 24 개소 (5%)로 나타났다. 여과 공정 없이 소독만을 수행하는 정수장이 9 개소 (2%)로 파악되었는데 상수 수원으로 지하수를 사용하는 정수장이 여기에 해당된다. 기타 정수방법으로는 간이정수시설, 고속여과와 완속여과를 동시에 응답한 정수장, 급속여과후 이온교환이나 활성탄 여과를 수행하는 정수장 등이 있는 것으로 나타났다.

소독능 불만족 정수장의 정수방법별 분포를 살펴보면 전체 정수장에서 가장 많이 적용하고 있는 급속여과와 완속여과 공정에서 각각 97 개소 (41%), 64 개소 (38%)로 나타나 정수방법에 따른 소독능 불만족 비율은 40% 내외로 정수방법에 따라 뚜렷한 차이가 없었다.

3.2 소독능 개선 현황

Table 4는 소독능 개선 현황을 알아보기 위해 전국 474 개소 정수장을 대상으로 한 본 연구의 연구결과와 윤 등(1999)에 의해 수행되어진 연구결과⁴⁾에서 공통적으로 조사된 225 개소 정수장의 소독능을 비교한 것이다. Table 4에서 보면 1999년 조사의 경우 평균 소독능이 0.8이었던 것이 2001년 본 연구에서는 1.6으로 나타나 평균 소독능에 있어 두 배 정도의 향상을 이룬 것으로 나타났다. 소독능을 만족하지 못하는 정수장의 비율은 1999년에 78%이었던 것이 2001년에 수행되어진 본 연구에서는 41%로 나타나 2년 사이에 37%에 해당하는 정수장에서 소독능 향상을 이룬 것으로 파악되었다.

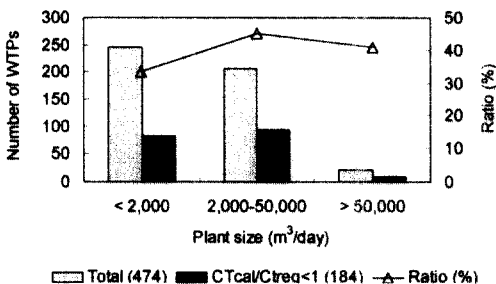


Fig. 7. Disinfection performance credit of water treatment plants as to the plant size

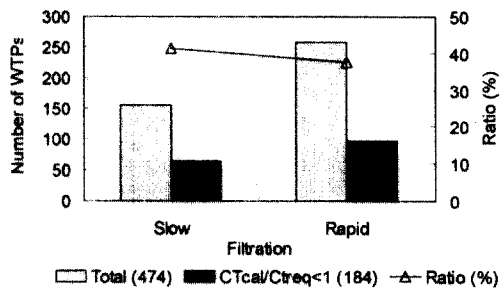


Fig. 8. Disinfection performance credit of water treatment plants as to the filtration process

Table 4. Summary of the disinfection performance for the studies of 1999 and 2001 (n = 225)

Year	Number of WTPs (CTcal/CTreq<1)	Ratio (%)	Average disinfection performance (CTcal/CTreq)
1999 (Yoon)	175	78	0.8 (0.01-11.73)
2001 (This study)	92	41	1.6 (0.03-14.03)

Table 5. Comparisons of disinfection performance evaluation between 1999 and 2001 (n=225)

Factor	1999			2001		
	Category	Number of WTPs	Ratio (%)	Category	Number of WTPs	Ratio (%)
Water Temp. (°C)	0.5	12	5	~0.5	12	5
	5	107	48	0.5~5	127	57
	10	106	47	5~10	68	30
	-	-	-	10~	18	8
pH	~6.0	5	2	~6.0	2	1
	6.5	22	10	6.0~6.5	16	7
	7.0	121	54	6.5~7.0	88	39
	7.5	77	34	7.0~7.5	74	33
	8.0	0	0	7.5~8.0	40	18
	8.5~	-	-	8.0~	5	2
T ₁₀ /T	0.1	206	92	0.1	181	81
	0.3	19	8	0.3	32	14
	0.5	0	0	0.5	12	5
Residual chlorine conc. (mg/L)	~ 0.5	28	12	~0.5	54	24
	0.5~1.0	98	44	0.5~1.0	127	56
	1.0~	99	44	1.0~	44	20

필요 소독능 산정에 가장 중요한 요소들은 수질의 고유한 특성인 온도를 제외하면 pH, 도류벽 지수, 염소 농도이다. 이 중 pH는 혼화 공정에 미치는 요소이므로 변화 폭에 제한이 주어지며 염소 농도 또한 높은 농도는 맛과 냄새로 해서 주입 농도가 제한된다. 1999년에 비하여 2001년의 소독능 향상에 기여한 원인을 파악하기 위해서 수온, pH, 도류벽지수(T₁₀/T), 잔류염소농도를 1999년 조사자료와 2001년 본 연구에서의 조사자료를 Table 5에 비교하였다.

Table 5에서 최저 수온을 비교하여 보면 전체적인 수온의 분포는 1999년과 2001년의 조사가 거의 비슷한 수준으로 나타났다. 최저 수온을 범위별로 살펴보면 1999년 조사에서는 최저 수온이 5 °C와 10 °C인 정수장이 95 %로 대부분을 차지하였고, 2001년 조사에서는 87 %의 정수장에서 최저 수온 0.5-10 °C 범위를 유지하였다. 특히 2001년 조사에

서는 최저 수온이 10 °C 이상인 곳도 18 개소 (8 %)가 있었고, 최저 수온의 최대값은 제주도에서 17 °C로 나타났다.

전체적인 pH의 분포는 1999년과 2001년의 조사가 거의 비슷한 수준이었다. 그렇지만 pH를 범위별로 살펴보면 약간의 차이가 발견되는데 1999년 조사에서는 pH 7.0과 pH 7.5인 정수장이 88 %로 대부분을 차지하였고 pH 8.0인 정수장은 없었다. 그러나 2001년 조사에서는 72 %의 정수장에서 pH 6.5-7.5 범위를 유지하였고, 1999년 조사결과와는 달리 pH 7.5를 초과하는 정수장도 20 %나 되었다.

Table 5에서 정수지내에서의 체류시간과 관련된 도류벽 지수인 T₁₀/T값을 비교하여 보면 1999년에는 T₁₀/T = 0.1인 정수장이 92 %로써 대부분을 차지하였고, T₁₀/T = 0.3인 정수장은 8 %에 불과하였으며, T₁₀/T = 0.5인 정수장은 한 곳도 없었다.

그러나 2001년에는 $T_{10}/T = 0.1$ 인 정수장이 81 %로 1999년보다 11 % 감소하였으며, $T_{10}/T = 0.3$ 인 정수장은 1999년보다 6 % 증가한 14 %로 나타났다. 특히 $T_{10}/T = 0.5$ 인 정수장은 1999년의 경우 한 곳도 없었던 것이 2001년에는 5 %에 해당하는 12 개소로 파악되었다. 이것은 지난 2년 동안 일부 정수장에서 도류벽의 설치 및 개선을 통하여 T_{10}/T 값이 향상되었음을 보여준다.

Table 5에서 잔류염소농도를 비교하여 보면 1999년 조사와 2001년 조사에 있어서 공통적으로 잔류염소농도가 0.5-1.0 mg/L 범위인 정수장이 가장 많은 것으로 나타났다. 그러나 잔류염소농도가 0.5 mg/L 미만인 정수장은 1999년 조사에서 12 % 이었던 것이 2001년 조사에서 24 %로 증가하였다. 1999년 조사에 있어서 잔류염소농도 1.0 mg/L 이상인 정수장이 44 %나 되는 것으로 나타났는데 이것은 당시의 조사에 있어서 잔류염소농도가 제시되지 않은 정수장에 대하여 잔류염소농도를 1.0 mg/L로 일률적으로 가정하였기 때문이다.

따라서 Table 5의 소독능 관련 자료의 비교를 통해 1999년의 소독능보다 2001년에 소독능이 크게 향상된 첫 번째 이유로는 T_{10}/T 값의 향상을 들 수 있다. 또 다른 이유로는 필요 소독능 산정에 고려한 정수공정의 범위가 서로 다르다는 점을 들 수 있는데 1999년에 수행된 소독능 조사는 정수장의 정수지에서만 달성하는 소독능이 조사된 것이었고, 2001년 본 연구에서 수행된 소독능 조사는 연구방법에서 이미 언급한 바와 같이 정수지와 송수단계, 그리고 배수지에서의 각각의 소독능의 합으로 조사되어졌다. 그러나 본 연구에서는 정수지에서만의 소독능 비교는 수행하지 않았고 이에 대한 비교연구가 향후 필요할 것으로 판단된다.

3.3 1999년과 2001년 조사 모두 필요 소독능 미비 정수장의 특징

Table 4에서 소독능을 만족하지 못하는 정수장

이 1999년에 175 개소, 2001년에 92 개소로 파악된 점은 이미 언급하였다. 이중에서 두 차례의 조사에서 동시에 소독능을 불만족하는 정수장은 75 개소로 파악되었다. 이와 같은 소독능 미비 정수장의 특징 또는 소독능 불만족에 영향을 미친 요인을 파악하여 보았다.

Table 6은 두 차례의 조사에서 동시에 소독능 불만족으로 나타난 75개 정수장에 대해서 수온, pH, 잔류염소농도의 평균값과 T_{10}/T 값에 따른 정수장 수를 나타낸 것이다. Table 6에서 보면 pH는 7.2로 동일하게 나타났으며, 잔류염소농도는 1999년에 0.7 mg/L, 2001년에 0.6 mg/L로 비슷한 수준이었다. 그러나 수온의 경우 1999년에 평균 6.8 °C로 2001년에 평균 5.2 °C보다 약간 높은 것으로 나타났다. 정수지에서의 실제 접촉시간에 영향을 주는 도류벽 지수 T_{10}/T 값을 보면 $T_{10}/T = 0.1$ 인 정수장이 1999년과 2001년에 모두 90 % 이상으로 파악되었다. $T_{10}/T = 0.1$ 인 경우는 정수지내에 도류벽이 설치되어있지 않다는 것을 의미한다. 따라서 도류벽이 설치되어 있지 않은 점이 정수지에서의 실제 접촉시간을 짧게 하고, 따라서 정수장에서의 소독능을 낮게 평가되게 한 주된 요인이 된 것으로 판단된다. 또한 Table 6에서 보면 $T_{10}/T = 0.1$ 인 정수장이 1999년에 92 %에서 2001년에 96 %로 증가하였고, $T_{10}/T = 0.3$ 인 정수장이 1999년에 8 %에서 2001년에 3 %로 감소하였다. 그러나 최근 정수지 구조개선을 위한 정수장마다의 노력에도 불구하고 이러한 현상이 보여지는 것은 1999년 당시에 정수장 운영자가 정수지 구조에 대한 정확한 파악과 이해가 부족하였기 때문인 것으로 판단된다.

3.4 다양한 소독기준 적용시의 국내 정수장의 소독능 준수 수준

Table 7은 조사대상 474 개소 정수장에서 현재 유지하고 있는 소독능 수준으로 다양한 소독기준을 적용하였을 경우에 소독능 준수 수준이 어느

Table 6. Average value of water quality data (n=75)

Year	Water Temp. (°C)	pH	Residual chlorine conc. (mg/L)	T_{10}/T		
				0.1	0.3	0.5
1999	6.8	7.2	0.7	69 (92%)	6 (8%)	-
2001	5.2	7.2	0.6	72 (96%)	2 (3%)	1 (1%)

정도인지를 나타낸 것이다. 소독능 평가기준으로 쓰는 소독공정에서 0.5-log, 1.0-log, 1.5-log *Giardia* 제거를 적용하여 보았다. Table 7에서 보면 국내 정수장에 현재에는 없는 소독에 대한 기준이 *Giardia* 3-log 제거로 도입될 경우 소독공정에서는 0.5-log *Giardia* 제거를 만족하여야 하며, 이때에 현재의 소독능 수준으로 조사대상 474 개소 정수장 중에서 19 %가 필요 소독능 기준에 미달하는 것으로 나타났다. 만약 Table 1의 설명에서와 같이 원수에서의 *Giardia* 분포수준에 따라 소독기준이 4-log *Giardia* 제거로 강화된다면 소독공정에서는 1.5-log *Giardia* 제거를 만족하여야 하며, 이때에는 58 %가 필요 소독능 기준에 미달하는 것으로 나타났다. 이것은 국내 정수장에서 현재 유지하고 있는 소독능을 앞으로 도입될 소독기준에 대비하여 더욱 개선해야할 필요성이 있음을 말해준다.

3.5 소독능 관리에 대한 제언

① 필요 소독능 기준 적용의 타당성 검토

본 연구에서는 필요 소독능 기준을 *Giardia* 1-log 제거로 일괄적으로 적용하여 소독능 만족 여부를 파악하였다. 그러나 원수의 오염수준에 따라 필요 소독능 기준을 달리 적용할 필요가 있다. 국내 상수원수의 오염수준을 고려하지 않고 외국의 기준을 그대로 따르거나 또는 소독능 기준을 일괄적으로 적용한다면 원수의 오염수준이 낮은 지역에서는 실제적으로 유지되고 있는 소독능이 과소평가 되어질 우려가 있으며, 또는 오염이 심한 지역은 충분하지 않은 소독공정을 운영하고는 있지만 수질 기준을 만족하게 된다. 부분적이기는 하지만 국내 상수원수에서 *Giardia*의 분포에 대한 연구는 김 등¹¹⁾과 이 등¹²⁾에 의하여 수행되어진 바 있다. 김 등¹¹⁾은 ASTM 방법¹³⁾을 이용하여 한강과 금강 수계에서 *Giardia*의 존재를 확인하였는데 이들의

연구에 의하면 *Giardia* 검출을 최대 200 cysts/100 L 까지 보고하였다. 한편, 이 등¹²⁾의 연구에서는 EPA 1623 방법¹⁴⁾을 이용하여 한강수계에서 *Giardia*의 분포 농도를 최대 9.7 cysts/10 L의 농도로 검출되었다고 발표하였다. 이와 같은 연구 결과로 볼 때 본 연구에서 필요 소독능 기준으로 선택한 *Giardia* 1-log 제거 기준은 미약할 수 있다 (Table 1). 따라서 국내 정수장에서 소독기준의 도입에 앞서 상수원수의 오염수준 즉 *Giardia* 분포의 전국적인 연구조사를 바탕으로 국내 실정에 적합한 Table 1과 같은 소독기준을 설정하여야 할 것으로 판단된다.

② 정수장 운영자의 전문적인 교육

소독능 평가에 이용된 개별 정수장의 최악의 조건 (최저 수온, 최고 pH, 잔류염소농도)에서의 CT 요구값이 미국 환경부의 Guidance Manual⁹⁾에서 제시되어진 값을 잘못선택하는 경우가 확인되었다. 이러한 현상이 나타난 것은 소독능 관리에 대한 전문성의 결여로 보여지며, 따라서 정수장 운영자에 대한 전문적인 교육이 필요한 것으로 판단된다.

③ 소독능 평가항목의 추가

474 개소 정수장을 대상으로 한 본 연구에서는 상수원의 원수로 이용되고 있는 수원에 대한 항목과 정수장에서 사용되고 있는 소독제의 종류에 대한 항목이 없다. 따라서 본 연구에서는 원수의 특성과 소독제의 종류에 다른 소독능 현황의 파악은 불가능하였다. 특히 정수장의 소독능 평가에 이용되는 CT요구값은 사용되고 있는 소독제에 따라 다르기 때문에 소독능 평가에서 상수원의 수원과 사용되고 있는 소독제의 종류에 대한 항목의 추가가 요구되어진다.

Table 7. Level of meeting disinfection performance of WTPs in Korea when various disinfection performance criteria is applied (n =474)

Category	Disinfection performance criteria		
	0.5-log <i>Giardia</i> removal	1-log <i>Giardia</i> removal	1.5-log <i>Giardia</i> removal
Number of WTPs which provide insufficient disinfection performance	91 (19%)	184 (39%)	274 (58%)
Average disinfection performance (CTcal/CTreq)	3.3±3.4 (0.0~28.1)	1.6±1.7 (0.0~14.0)	1.2±1.3 (0.0~10.5)

4. 결 론

국내 474개소 정수장을 대상으로 한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 소독능이 평가된 474 개소의 정수장 중에서 해당 정수장의 최악의 수질 기준을 적용했을 경우 소독능을 만족하지 못하는 정수장은 184 개소 (39 %)로 나타났다. 1999년의 소독능 조사와 2001년 본 연구에서 공통적으로 조사된 225개소의 정수장의 소독능을 비교해 본 결과 소독능 불만족 비율이 1999년에 78 %에서 2001년에 41 %로 나타나 지난 2년 동안에 조사된 정수장의 37 %가 소독능 향상을 이룬 것으로 파악되었다.

둘째 2년사이의 향상된 소독능 주된 요인 중의 하나로 도류벽 지수(T_{10}/T)의 향상으로 나타났다. 그룹에도 불구하고 조사대상 정수장의 80 %인 377개소가 정수지에 도류벽이 설치되어 있지 않았고 이중 168개소가 소독능 기준을 만족하지 못하였다. 따라서 정수지의 개량을 통하여 정수지의 도류벽 지수를 향상시키면 많은 소독능 불만족 정수장의 소독능 기준을 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

셋째, 최악의 수질 (pH 8, 0.5°C)에서 현재 정수장 소독 수준은 19 %가 소독기준에 위반되는 것으로 나타났으며, 만약 소독기준이 4-log *Giardia* 제거로 강화된다면 이때에는 58 %가 소독기준에 위반되는 것으로 나타났다. 이것은 국내 정수장에서 현재 유지하고 있는 소독능을 앞으로 도입될 소독기준에 대비하여 더욱 개선해야할 필요성이 있음을 말해준다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 정수처리기준 설정을 위한 연구와 교육부 BK 21 지원사업의 도움으로 진행되었으며, 연구비 지원과 자료협조에 감사드립니다.

참고문헌

1. 윤제용, 변석중, 이상덕, 석관수, CT값에 의한 정수장의 소독능 평가, *한국수질보전학회지*, 제 14권, 제 4호, 413-423 (1998).
2. 김상종, The Usefulness of Cell Culture - PCR Method in Determination of Viral Contamination Level in Water, *한국미생물학회 추계학술회* (1997).
3. 윤제용, 변석중, 전염소 투입 및 정수지 구조가 정수장 총 소독능에서 갖는 중요성 평가, *한국물환경학회지*, 제 17권, 제 3호, 327-337 (2001)
4. 윤제용, 변석중, 조순행, 국내 정수장 소독공정 설계 및 운전특성 파악, *한국물환경학회지*, 제 17권, 제 3호, 417-428 (2001).
5. 수도연구회, 정수장 최적화를 위한 미국의 노력과 우리나라의 실정, *대한상하수도학회지*, 제 13권, 제 1호, 28-39 (1999).
6. 정현미, 윤제용, 미국 음용수의 미생물학적 기준에 관한 고찰, *한국수질보전학회지*, 제 10권, 제 1호, 62-71 (1994).
7. 환경부, 국내 정수장 소독능 실태에 관한 발표자료 (2001).
8. 환경부, 수돗물 수질관리 강화 종합대책 (2001).
9. USEPA, *Guidance Manual for Compliance with the Filtration and Disinfection Requirement for Public Water Systems Using Surface Water Sources* (1991).
10. 환경부, 정수장 일체점검 교육교재 (2001).
11. 김혜선, 윤제용, 염철민, 국내 상수원수 및 하수에서 *Cryptosporidium*과 *Giardia* 포낭 검출, *한국물환경학회지*, 제 16권, 제 5호, 585-594 (2000).
12. 이목영, 김도연, 조은주, 이의광, 오세종, 이채근, 하영철, 1623 방법에 의한 서울시 상수도 계통의 지아디아 및 크립토스포리디움 검출, *한국물환경학회지*, 제 16권, 제 5호, 595-608 (2000).
13. AWWA, *Standard method for the examination of water and wastewater*, 19 Ed., 9.110-9.117 (1995).
14. USEPA, Method 1623 : *Cryptosporidium* and *Giardia* in water by filtration/IMS/FA, EPA 821-R-97-023 (1999).