

국내정수장의 잔류염소농도에 대한 조사연구

Statistical Analysis of Chlorine Residual in Korean Drinking Water

손진식 · 강효순*

Jinsik Sohn · Hyosoon Kang*

국민대학교 건설시스템공학과

(2006년 2월 6일 논문 접수; 2006년 3월 28일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Maintaining adequate chlorine residual is crucial in water treatment facilities. Treatment technique, newly promulgated regulation, requires sufficient disinfection in order to control more resistant microorganisms such as Viruses and Giardia lamblia. Each water treatment plant should report various water qualities including chlorine residual and disinfection by-products, thus plenty of data has been generated. Even though statistical analysis using these data are forced to investigate the status and effect of water qualities in water facilities very few researches have been performed in Korea. This study performed statistical analysis of chlorine residual during three years in Korean drinking water. The average chlorine residual concentrations were 0.701mg/L, 0.738mg/L, 0.763mg/L in 2002, 2003, 2004, respectively. Monthly variations of chlorine residual was not significant. ANOVA result showed that yearly variance of chlorine residual is different in only less than 5000m³/day of water treatment capacity. The statistical analysis can help government to establish new regulation with scientific basis.

Key words: chlorine residual, statistical analysis, ANOVA

주제어: 잔류염소, 통계분석, 분산분석법

1. 연구배경

국내에는 600개에 가까운 많은 정수장이 있으며, 병원성 미생물의 제어와 관망에서의 미생물 재번식을 억제하기 위하여 대부분 염소를 소독제로 사용하고 있다. 상수관망에서의 잔류염소는 건강상의 위해를 방지하기 위하여 일정농도를 초과하지 않도록 하는

동시에 미생물 재번식을 제어하기 위하여 일정농도 이상을 유지하도록 하고 있다. 이러한 이유로 미국의 경우 최고허용농도(maximum residual disinfectant level, MRDL)를 4.0mg/L로 규정하고 있고, 정수장 유출수에 대하여 0.2mg/L 이상, 관망에서는 검출 가능한 수준(detectable)을 최소한 유지하도록 하고 있다(USEPA, 1998). 국내 수질기준에도 관망내 잔류염소 농도는 0.2mg/L에서 4.0mg/L 범위로 유지하도록

*Corresponding author Tel: +82-2-910-5060, FAX: +82-2-910-8597, E-mail: kkang7942@hanmail.net (Kang, H.S.)

하고 있다(환경부, 2002a).

잔류염소농도는 바이러스와 지아디아 등 소독에 내성이 강한 병원성 미생물로부터 안전한 먹는물을 생산하기 위하여 환경부가 제정·공포한 정수처리에 관한 기준(환경부, 2002b)으로 더욱 중요시되고 있다. 정수처리기준에 의하면 정수장은 병원성미생물인 바이러스는 $4\log(99.99\%)$, 지아디아 포낭은 $3\log(99.9\%)$ 를 제거 또는 불활성화하도록 하고 있다. 적절한 여과공정을 수행하고 있는 정수장의 경우 소독 공정에서 달성해야 하는 목표값은 상기의 제거율보다는 작은 값이다. 예를 들어 급속여과방식을 채택하고 있는 경우 소독공정에서 바이러스는 $2\log(99\%)$, 지아디아는 $0.5\log(68.38\%)$ 이다. 바이러스에 대한 규정은 2002년 8월 1일부터 적용하였으며, 지아디아 포낭에 대한 처리는 규정공포 후 약 2년간의 유예기간을 두어 2004년 7월 1일부터 시행하고 있다.

정수처리기준의 시행으로 정수장에서는 소독능의 확보와 이에 따른 적정 잔류염소의 유지가 더욱 중요시되고 있으며, 잔류염소로 인한 맛과 냄새의 문제 또한 정수장 운영자에게 점차 중요한 과제로 대두되고 있는 실정이다. 또한 새로운 제도의 도입은 수도시설의 운영과 수질관리에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 최근 수돗물 수질에 대한 사회적 관심의 증대로 인하여 국내 수도시설의 수질자료는 환경부와 수도사업자의 홈페이지 등을 통하여 대부분 공개되고 있는 실정이다. 이러한 수질자료들은 단순히 수질기준의 만족여부를 검토하고 점검하는 수준에서 제시되고 있을 뿐이며, 이들 자료를 정리·분석한 연구는 소독능과 소독부산물 생성에 대해 발표된 소수의 연구결과를 제외하고는 매우 부족한 실정이다(윤제용 등 2001, Yoon et. al., 2001). 즉, 막대한 비용과 노력을 들여 구축된 data를 단순한 자료(data)로서만 활용하고 있을 뿐, 자료의 가공과 해석을 통한 유용한 정보(information) 제공의 역할을 하는데는 한계를 갖고 있다.

본 연구는 이러한 배경하에서 전국 정수장 유출수의 잔류염소 농도에 대한 분포조사와 통계학적인 분석을 수행하고자 한다. 본 연구는 국내 정수장에서의 잔류염소농도에 대한 기본적인 지식과 정수처리기준의 시행으로 인한 잔류염소농도에 미치는 영향을 분석함으로써 향후 수질기준의 개정과 수돗물 수질관리

에 도움을 줄 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 Database 구축

국내정수장의 잔류염소농도를 조사하기 위하여 환경부 홈페이지 사이버정수장에서의 자료를 사용하였다. 자료정리 당시 자료수합이 이루어지지 않은 2005년도 자료는 각 정수장의 홈페이지에서 자료를 수합하였다. 잔류염소농도는 관망에서의 자료가 바람직하지만 조사 자료를 구축하기 어려울 뿐만 아니라, 각각의 수도사업자의 관망여건과 관망내에서의 체류시간이 다르므로 자료취합과 분석에 한계가 있어 정수장 유출수의 잔류염소 자료를 사용하였다. database의 구축에서 환경부와 각 정수장의 홈페이지에서의 수질 자료는 자료를 추출하기 매우 어려운 구조로 되어 있어 대부분의 경우 수작업에 의해 database를 구축하였다. database 구축과 통계적 분석은 상용 프로그램인 Microsoft사의 EXCEL 프로그램을 이용하였다.

기간은 2002년 7월부터 2005년 6월까지 3개년에 걸친 월별 잔류염소자료를 취합·정리하여 database화 하였다. 기간은 년 단위로 구분하는 것이 일반적으로 채택하는 접근방법이나 정수처리기준에 의한 영향을 고찰하고 최근의 자료까지 취합하기 위하여 매년 7월부터 익년 6월까지를 1년 기간으로 하여 구분하였다. 본 논문에서는 편의상 2002년 7월부터 2003년 6월까지를 2002년으로, 2003년 7월부터 2004년 6월까지를 2003년으로, 2004년 7월부터 2005년 6월을 2004년으로 표기하고자 한다. 자료는 정수장 543개소에 대하여 조사하였으나 일부 월별 자료가 누락된 경우에는 해당 정수장의 1년간 자료를 삭제하였다. 일부 자료에서는 잔류염소가 매우 낮은 농도로 나타나거나, 4mg/L 이상의 매우 높은 농도로 기재되어 있는 경우가 다수 있었다. 이러한 이상(異狀) data가 발생하는 원인은 측정이 잘못되거나 단순한 기재상의 착오, 또는 실제 이러한 결과가 나타날 수 있는 등 다양한 원인이 있기 때문에 이상 data의 처리에는 주의를 요한다. 앞에서 언급한 바와 같이 국내 수질기준상 잔류염소는 0.2mg/L에서 4mg/L을 유지토록 하고 있으므로 대부분의 정수장에서는 이러한 수질기준을 만족할 것으로 판단된다. 따라서 이상 data가 나타

Table 1. Summary of database

Year	Duration	No. of cases	Source	Note
2002	2002. 7-2003. 6	543	www.me.go.kr	monthly monitoring data at
2003	2003. 7-2004. 6	543	www.me.go.kr	water treatment effluent
2004	2004. 7-2005. 6	543	www.me.go.kr and individual WTP homepage	

Table 2. Percent of applicable data in statistical analysis

Year	No. of cases	No. of applicable cases	Percent of applicable cases (%)	No. of data	No. of applicable data	Percent of applicable data (%)
2002	543	317	58.4	6178	3804	61.5
2003	543	292	53.8	6115	3504	57.3
2004	543	279	51.4	5837	3348	57.4

나는 경우 해당 정수장의 다른 측정치를 참조하여 기재착오라고 확연히 판단되는 경우에는 이를 수정하여 사용하였고, 대부분의 경우는 정수장의 해당 연도의 자료를 삭제하여 사용하지 않았다. 이상 data 처리와 누락된 자료항목을 고려하여 database를 구축한 결과 원 data의 약 50% 정도만이 이용 가능하였다. Database에 대한 기본적 사항은 **Table 1**과 **Table 2**에 정리하였다.

2.2 접근방법

구축된 Database는 년도별, 시설규모별, 월별로 잔류염소농도를 구분하여 각각에 대한 평균, 표준편차, 중간값, 범위 등 기술적 통계자료(descriptive statistics)를 사용하여 분석하고 필요한 경우 그래프로 나타내었다. 시설규모는 정수처리기준의 여과시설 구분기준을 적용하여 5천톤/일 미만, 5천톤/일 이상 5만톤/일 미만, 5만톤/일 이상 10만톤/일 미만, 10만톤/일 이상의 4단계로 구분하였다. 잔류염소 농도에 대한 년도별, 월별, 시설규모별 영향을 규명하기 위해서 추론적 통계방법의 하나인 분산분석(ANalysis Of VAriance: ANOVA)을 수행하였다.

분산분석은 평균값을 기초로 하여 여러 집단을 비교하고, 이들 집단간에 차이점이 있는지 가설 검증을 통해서 상관관계를 파악하는 통계분석 기법이다. 변수의 종류에 따라 일원실험설계법, 일원블록실험설계법, 그리고 다원실험설계법 등으로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 일원실험설계법을 사용하여 두개이상의 모집단 잔류염소 평균의 변화가 통계적으로 유의한지를 검증하였다. 분산분석에서 F-분포의 검정통

계량(F ratio)은 처리제곱평균(Mean Square: MSt)을 오차제곱평균(Mean Square Error: MSE)로 나눈 값으로, F ratio가 기각치보다 작은 값을 갖게 되면 귀무가설을 채택하게 된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기술적 통계분석(Descriptive Statistical Analysis)

구축된 database에 대하여 우선적으로 평균, 중간값, 10분위수, 90분위수, 표준편차, 범위 등 여러 가지 통계량을 사용하여 잔류염소농도에 대한 기술적 통계분석을 수행하였다. **Table 3**에 통계량에 대한 자료를 정리하였으며, **Fig. 1**은 2004년 월별 잔류염소농도의 년 평균치에 대한 누적분포를 나타낸 것이다. 정수장 유출수에 대한 평균농도는 2002년 0.701mg/L, 2003년 0.738mg/L, 2004년 0.763mg/L로 점차 높아지는 경향을 나타내고 있다. 3개년 모두 표준편차는 0.34mg/L 정도로 분산의 정도는 유사한 것으로 나타났다. 다만 이 경우 사용된 정수장의 일부가 년도에 따라 다르기 때문에 엄밀하게 년도에 따라 증가한다는 결론을 내리기는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 3개년에 걸쳐서 동일한 정수장을 대상으로 별도의 database를 구성하여 년도별 잔류염소농도 변화에 대한 추론통계학적 접근을 수행하였으며, 이 결과는 뒤에서 다루고자 한다.

3.2 시설규모별 잔류염소 변화

시설규모와 잔류염소농도와는 특별한 상관관계는

Table 3. A summary of statistics in chlorine residual

Year	No. of date	Mean (mg/L)	S. D. (mg/L)	Range (mg/L)	10th % (mg/L)	50th % (mg/L)	90th % (mg/L)
2002	3804	0.701	0.344	0.1-2.36	0.20	0.70	1.06
2003	3504	0.738	0.324	0.2-2.5	0.30	0.70	1.02
2004	3348	0.763	0.340	0.1-2.5	0.1	0.75	1.10

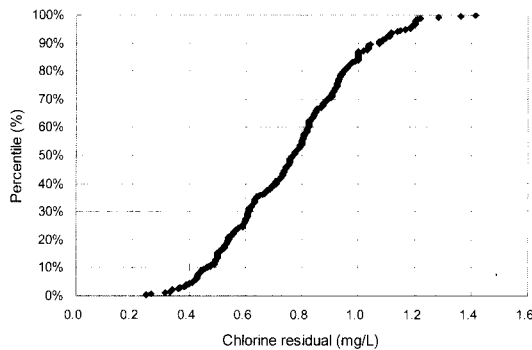


Fig. 1. Cumulative distribution of chlorine residual based on annual average in Korean drinking water (2004).

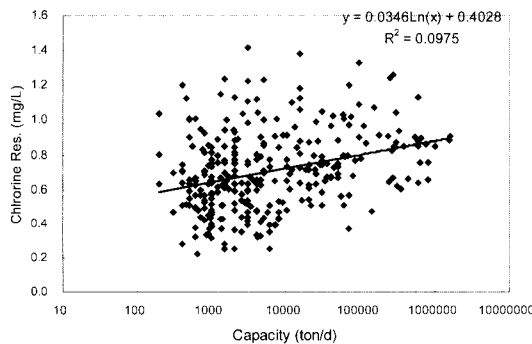


Fig. 2. Annual average chlorine residual distribution with water treatment capacity (2002).

나타나지 않았다(Fig. 2). 그러나 시설용량이 작은 경우 잔류염소 농도가 넓게 분포하고 있는 반면, 시설용량이 커질수록 잔류염소 농도가 0.6mg/L에서 1.0mg/L 수준으로 좁혀져 가고 있음을 알 수 있다. 시설용량이 작은 경우에 잔류염소 농도의 변동이 큰 것은 관망에서의 체류시간이 짧아 낮은 농도에서도 적정 잔류염소를 유지할 수 있거나, 시설 현대화 미비로 적정 잔류염소 농도 유지가 어렵거나, 또는 수질측정이나 자료관리상의 결함 등 다양한 원인을 추론할 수 있으나 본 연구자료로서는 이에 대한 판단을 내릴 수는 없다. 향후 추가적 연구를 통한 원인분석

이 필요하다 할 것이다.

Table 4는 정수장 시설규모를 4단계로 나누어 분석한 결과를 정리한 것이다. 시설규모가 커짐에 따라 잔류염소의 평균치가 높아지고 있으며, 반면에 표준편차는 작아지고 있음을 보여주고 있다. 이러한 사실은 시설규모가 큰 정수장일수록 유출수의 잔류염소농도를 높게 유지하고, 정수장별 잔류염소 농도의 변동은 적은 것을 의미한다.

정수장 시설규모별 분산분석을 수행한 결과를 Table 5에 나타내었다. 분산분석 결과 2002, 2003, 2004년의 3개년 모두 F비가 유의수준 5%에서의 기각치(2.636)보다 크게 나타나, 시설규모에 따라 정수장 유출수의 잔류염소농도는 유의수준 5%에서 차이가 난다고 할 수 있다. 또한 년도에 따라서 F비가 작아지고 있어 점차 시설규모별로 년도별 잔류염소농도 차이가 적어지고 있음을 알 수 있다.

3.3 월별 잔류염소 변화

Table 6은 월별 평균값과 표준편차를 정리한 것이며, Fig. 3은 월별 잔류염소 농도(평균치)의 변화를 도시한 것이다. 계절별 또는 월별로 잔류염소의 농도가 변화할 것으로 예상하였으나, 분석결과 월별 잔류염소 농도변화는 적게 나타났으며, 다만 앞서 언급한 바와 같이 년도에 따라 잔류염소 농도가 높아지는 경향을 보이고 있다. 연도에 따라 잔류염소농도가 높아지는 것은 상수처리에 있어 미생물제어의 중요성이 강조되고 있으며, 정수처리기준이 확대 적용됨에 따라 적정 소독능을 확보하기 위한 염소농도의 증가에 기인한다고 할 수 있다.

잔류염소의 월별 영향을 파악하기 위하여 분산분석을 수행한 결과 3개년 모두 F값이 기각치(1.79) 보다 적게 나타나 유의수준 5%에서 월별 잔류염소 농도차이는 통계적인 유의성을 발견할 수 없었다(Table 7).

Table 4. Descriptive statistics of classified groups based on water treatment capacities

Year	classification	No. of cases	No. of data	Mean (mg/L)	S. D. (mg/L)
2002	less than 5,000m ³ /d	182	2184	0.653	0.361
	5000-50000m ³ /d	81	972	0.715	0.326
	50000-100000m ³ /d	21	252	0.831	0.296
	greater than 100000m ³ /d	33	396	0.850	0.236
2003	less than 5,000m ³ /d	160	1920	0.700	0.338
	5000-50000m ³ /d	80	960	0.760	0.323
	50000-100000m ³ /d	23	276	0.841	0.293
	greater than 100000m ³ /d	29	348	0.803	0.212
2004	less than 5,000m ³ /d	153	1836	0.737	0.385
	5000-50000m ³ /d	69	828	0.755	0.311
	50000-100000m ³ /d	21	252	0.841	0.246
	greater than 100000m ³ /d	36	432	0.847	0.183

Table 5. ANOVA with classified groups based on water treatment capacities

Year	F ratio	P value	Note
2002	10.63	1.12x10 ⁻⁶	significance level is 0.05 (5%)
2003	5.22	0.00159	
2004	3.24	0.0225	

3.4 년도별 잔류염소 농도변화에 대한 추론적 통계분석

앞서의 분석에 사용된 database는 대상정수장이 년도별로 조금씩 상이한 경우가 있어, 시설규모에 따른 년도별 변화를 분석하기에는 한계가 있었다. 따라서 3개년에 걸쳐 동일한 정수장을 대상으로 새로운 database를 구축하여 년도별 잔류염소 농도의 변화를 분석하였다. 잔류염소농도는 월별 변화가 크지 않게 나타났으므로, 각 정수장의 년평균 농도를 사용하였다.

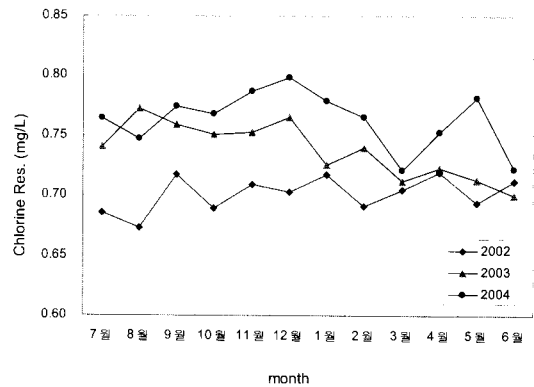


Fig. 3. Monthly variation of chlorine residual based on average values.

분산분석결과 정수장 잔류염소의 연평균 농도는 년도별로 차이를 보이고 있으나 유의수준 5%에서 통계적으로 유의하다고 볼 수 없다. 시설용량 5천톤/일 미만의 정수장의 경우에 연도별

Table 6. A summary of statistics of monthly chlorine residual

Year		7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월	4월	5월	6월
2002	No. of data	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317
	Mean	0.686	0.673	0.717	0.689	0.709	0.703	0.717	0.691	0.705	0.719	0.693	0.712
	S.D.	0.366	0.342	0.417	0.346	0.333	0.318	0.336	0.317	0.351	0.319	0.340	0.324
2003	No. of data	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292
	Mean	0.741	0.773	0.759	0.751	0.753	0.765	0.725	0.740	0.712	0.723	0.713	0.700
	S.D.	0.344	0.335	0.334	0.334	0.316	0.367	0.317	0.305	0.285	0.328	0.281	0.317
2004	No. of data	279	279	279	279	279	279	279	279	279	279	279	279
	Mean	0.764	0.748	0.774	0.767	0.787	0.799	0.779	0.765	0.721	0.752	0.782	0.722
	S.D.	0.358	0.349	0.348	0.357	0.387	0.333	0.354	0.340	0.301	0.339	0.293	0.304

Table 7. ANOVA Table with monthly variation

Year	F ratio	P value	Note
2002	0.569	0.855	significance level is 0.05 (5%)
2003	1.492	0.127	
2004	1.410	0.160	

로 뚜렷한 잔류염소의 변화가 관찰되고 있으며, 나머지 시설용량 범위에서는 통계적으로 유의한 결과를 보여주지 못하고 있다. 따라서 정수처리기준의 시행으로 시설규모 5천톤/일 미만의 소규모 정수장에서는 잔류염소 농도가 년도별로 증가하는 있음이 관찰되었으며, 중대규모 정수장에서의 잔류염소 농도변화는 미미하다고 판단된다(**Table 8**).

4. 결 론

본 연구는 그 동안 보고되었던 많은 자료를 종합적으로 정리하여 통계학적 분석을 시도한 것이다. 2002년 7월부터 2005년 7월까지 3개년간 전국 정수장 유출수의 잔류염소농도에 대한 자료를 취합하여 database를 구축하였으며, 이를 이용하여 연도별, 시설규모별, 월별 잔류염소 농도변화를 고찰하였다. 본 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 국내 정수장 유출수에 대한 잔류염소의 평균농도는 2002년 0.701mg/L, 2003년 0.738mg/L, 2004년 0.763mg/L로 점차 높아지는 경향을 나타내고 있다. 3개년 모두 표준편차는 0.34mg/L 정도로 분산의 정도는 유사한 것으로 나타났다.

2) 시설규모와 잔류염소농도와는 특별한 상관관계는 나타나지 않았다. 시설용량이 작은 경우 잔류염소농도의 변동폭이 크고, 시설용량이 커질수록 잔류염소농도의 변동폭이 좁혀졌다.

3) 정수장 시설규모별 분산분석을 수행한 결과 2002, 2003, 2004년의 3개년 모두 F값이 유의수준 5%에서 유의하게 나타나 시설규모별로 정수장 유출수의 잔류염소농도는 차이가 난다고 할 수 있다.

4) 월별 잔류염소 농도변화는 적으며, 분산분석 결과에서도 유의수준 5%에서 월별 잔류염소 농도변화가 통계적으로 유의하다고 볼 수 없다.

5) 년도별 잔류염소 농도변화는 유의수준 5%에서 통계적으로 유의하다고 볼 수 없다. 시설규모별로 보면 시설용량 5천톤/일 미만의 정수장의 경우에 년도별로 뚜렷한 잔류염소의 변화가 관찰되고 있으며, 나머지 시설용량 범위에서는 통계적으로 유의한 결과를 보여주지 못하고 있다.

본 연구를 수행함에 있어 자료의 수집과 정리과정에서 많은 어려움이 있었다. 수질관련자료를 국가적

Table 8. Variance analysis of chlorine residual with annual variation

	year	No. of data	Mean (mg/L)	S.D. (mg/L)	F ratio	P value
total	2002	137	0.735	0.215	2.625	0.074
	2003	137	0.754	0.214		
	2004	137	0.793	0.220		
less than 5,000m ³ /d	2002	66	0.679	0.192	5.574	0.0044
	2003	66	0.740	0.233		
	2004	66	0.807	0.234		
5,000-50,000m ³ /d	2002	35	0.737	0.245	0.031	0.969
	2003	35	0.737	0.214		
	2004	35	0.725	0.210		
50,000-100,000m ³ /d	2002	11	0.796	0.211	0.057	0.945
	2003	11	0.781	0.214		
	2004	11	0.813	0.242		
greater than 100,000m ³ /d	2002	25	0.852	0.188	0.560	0.574
	2003	25	0.804	0.154		
	2004	25	0.845	0.169		

차원에서 database화하여 제공할 필요가 있으며, 자료의 오기와 착오를 최소화하여 자료의 신뢰성 제고를 도모할 필요가 있다. 본 연구는 국내에서 매우 제한적으로 수행되어 오고 있는 수질자료 분석을 보다 광범위하게 통계학적 기법을 이용하여 수행하였다는 데 의의가 있으며, 향후 수질기준의 개정과 수도물 수질 관리에 도움이 되기를 기대한다. 관망수질관리에서 중요시되고 있는 소독부산물에 대한 분석은 후속 논문에서 다루고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국민대학교 2005년 교내연구비지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 윤제용, 변석종, 조순행 (2001) 국내정수장 소독공정 설계 및 운전특성 파악, *물환경학회지*, 17(3), pp. 417-428.
2. 환경부 (2002a) 먹는물 수질기준, 환경부령제 122호.
3. 환경부 (2002b) 정수처리에 관한 기준, 환경부고시 제 2002-106호.
4. Yoon, J., Choi, Y., Cho, S., and Lee, D. (2001) Low trihalomethane formation in Korean drinking water, *The Science of the total environment*, 302, pp. 157-166.
5. USEPA (1998) National Primary Drinking Water Regulations: Disinfectants and Disinfection Byproducts; Final Rule, 40, CFR part 9, pp. 141-142.