

국내 정수장 정수 수질자료의 특성분석 (1994년-1998년까지 5년간 자료를 중심으로)

윤 제 용 · 조 순 행* · 김 해 심*

서울대학교 응용화학부, *아주대학교 환경공학과

Investigating Water Quality Data of Finished Water in Domestic Water Treatment Plants (1994-1998)

Jeyong Yoon · Soonhaeng Cho* · Haeshim Kim*

School of Chemical Engineering, Seoul National University
Department of Environmental Engineering, Ajou University

Abstract

Water quality data from water treatment plants in Korea during 1994-1998 were investigated to find out the characteristics of their non compliance. The number of plants surveyed were approximately 600 and the number of samples were over 30,000. Ten parameters of water quality selected in this study and their non compliance % (inside parenthesis) were as follows: Heterotrophic plate count(0.14%), Total coliforms(0.08%), NH₃-N(0.29%), NO₃-N(0.14%), THMs(0.02%), Turbidity(0.11%), Residual chlorine(5.5%), KMnO₄ consumption(0.04%), Hardness(0.03%), pH(0.07%). These levels of non compliance were compared to those obtained from WIDB(Water Industry Database, 1996) of American Water Works Association.

This study strongly supported that small water plants (<10,000 tons/day) were more vulnerable in meeting the regulation criteria of many water quality parameters such as Heterotrophic plate count, Total coliforms, NO₃-N, THMs, Turbidity, Residual chlorine, KMnO₄ consumption, Hardness and pH. The NH₃-N concentration was especially high in winter and its violation was frequently found in the specific areas such as the downstream of major rivers. The average THMs concentration was surprisingly low, indicating 13μg/L which is 43% of US. Accordingly, these characteristics must be reflected in establishing the effective management of water quality policy of drinking water in Korea.

KEYWORDS : Dinking water, Water treatment plants, Waterquality, THMs, Ammonia

1. 서 론

정수장에서 보고하는 먹는물에 대한 수질검사 자료들은 수도물을 음용 목적으로 사용할 수 있다는 안전성의 지표로 사용된다. 따라서 먹는물 관련사건이 날 때마다 정수장에서 조사하여야 하는 수질항목들은 증가하여왔고 기준 또한 강화되어 왔다.

전국에는 776개의 정수장이 있고 매달 해당되는 시(상수도사업본부)와 도청(수질과)에 정수장 정수의 수질검사 결과를 보고하고 있으며, 이렇게 수집된 결과는 최종적으로 환경부에 보고된다. 이러한 수질 검사자료들은 먹는물 용도로 사용할 수 있는 수도물의 합격여부를 나타낼 뿐만 아니라 국내 먹는물 수질 문제를 경향적으로 파악할 수 있는 중요한 자료가 될 수 있다. 그러나 현재까지 수질검사 자료들이 법적, 행정적 기준 준수 이외에 활용되는 기회가 매우 제한적이었다. 따라서 본 연구는 지난 5년간(1994-1998)의 전국 정수장 정수의 수질 검사자료를 중심으로 국내 정수장 정수의 수질성격을 경향적으로 파악하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구의 분석대상이 되는 국내 정수장은 7개 도시 9개 도의 모든 지역에 소재하고 있는 776개 정수장 중에서 현재 폐지되거나 휴지 중이어서 수질검사결과를 환경부에 보고하지 않는 정수장을 제외한 593개소로 하였다. 국내 정수장의 정수의 수질항목은 45개의 월간 항목으로 매달 환경부에 보고하도록 되어 있다. 본 연구에서는 45개 항목 중 미생물에 관한 항목인 일반세균(Heterotrophic plate count)과 대장균군, 무기물질에 관한 항목 중에서 암모니아성질소와 질산성질소, 유기물질에 관한 항목 중에서는 대표적 소독부산물인 THMs(Trihalomethanes), 그리고 심미적 영향물질

에 관한 항목 중에서 탁도, 과망간산칼륨소비량, 경도, pH를 선정하였고, 수질기준에는 포함되어 있지 않으나 미생물기준과 관련성이 있는 잔류염소를 포함하였다. Table 1에 본 연구에서 선택한 10개 항목과 그 수질기준을 정리하였다.

Table 1 The selected water quality parameters

Class	Item
Microbes	Heterotrophic plate count(100cfu/ml) Total coliforms(50ml Non Detection)
Inorganics	NH ₃ -N(0.5mg/ℓ), NO ₃ -N(10mg/ℓ)
Organics	THMs(100μg/ℓ)
Aesthetics	Hardness(300mg/ℓ), KMnO ₄ consumption(10mg/ℓ) pH(5.8~8.5), Turbidity(1 NTU)
Others	Residual chlorine(0.2mg/ℓ)

본 연구에서는 국내 정수장 수질자료 특성을 미국의 수도협회(American Water Works Association)에서 제공하는 1996년 WIDB(Water Industry Database)의 수질자료와 비교하였다. 미국자료는 총 17개 항목으로 되어 있으며 본 연구의 수질 항목 자료와 비교할 수 있는 대장균군, THMs, 탁도, 잔류염소(유리염소, 결합염소), 경도, pH 만을 데이터 베이스화 하여 분석하였다. 미국 자료들은 각 항목들의 연간 평균값이어서 계절별, 월별 특성은 파악할 수 없었으며, 취수원 별로는 지표수 442개소와 지하수 532개소로 총 974개소의 정수장 자료가 있다.

3. 연구 결과

3.1 분석대상 정수장 특성

본 연구에서는 정수장의 특성을 규모별, 정수장의 취수원이 위치한 수계별, 정수장 원수 특성으로 나누어 살펴보았다. 조사된 593개 정수장의 규모별 내역은 조사대상 정수장의 414

개소(70%)가 1만톤/일 이하의 소규모 정수장이며, 1~10만톤/일인 정수장은 95개소(16%), 10만톤/일 이상은 36개소(6%), 기타(자료가 미비하여 알 수가 없었던 경우)가 48개소(8%)이다. 원수의 수계별 특성을 보면 4대강 지역의 지류천이 전체 593개 정수장 중 257개로 42%에 달했으며, 낙동강수계 112개(19%), 한강수계 86개(15%), 금강수계 39개(7%), 영산강수계 23개(4%), 섬진강수계 17개(3%), 기타가 59개(10%)를 구성하였다. 취수원별 특성은 소규모 정수장이 많은 관계로 복류수를 취수원으로 하는 정수장이 전체 593개 중 229개(38%)이었고, 2가지 종류의 취수원을 갖거나 용천수 같은 경우가 110개(19%), 지하수 66개(11%), 표류수 59개(10%), 호소수 76개(13%), 기타가 53개(9%)이었다.

3.2 개별 수질항목의 특성

본 연구에서 선정한 10가지 항목에 대해 각 항목별로 수질기준 위반 정도, 일부 항목에 대해서는 수질기준을 위반하지 않았더라도 검출된 특성, 평균 등을 살펴보고, 이러한 결과들과 정수장 규모별 특성, 시료가 분석된 계절별 특성, 그리고 수계 및 수원들간의 관련성을 검토하였다(Table 2).

(1) 일반세균

정수 목적의 가장 중요한 이유 중의 하나는 수돗물을 이용하는 시민들을 수인성 전염병으로부터 보호하는 것이다. 정수 중의 미생물의 지표로 사용되는 일반세균 수질기준은 100 cfu/ml를 초과하지 않도록 되어 있다(Table 1). 일반세균의 기준을 위반한 시료는 총 분석 보고된 시료 31,443개중에서 45개(0.14%)에

Table 2 The characteristics of finished water quality in Korea

Item	Non Compliance Samples(EA)	Detected Samples (EA)	Mean (mg/ℓ)	Plant size*	Season	Watershed
Heterotrophic plate count	45 (0.14%)	1,470 (4.3%)	-	High in small plants (100%)**	High in summer (a little)	NO
Total coliforms	28 (0.08%)	-	-	High in small plants (89%)	NO	NO
NH ₃ -N	98 (0.29%)	5,252 (15.4%)	-	NO	High in winter	Nakdong
NO ₃ -N	49 (0.14%)	-	2.01	High in small plants (92%)	NO	Nakdong
THMs	7 (0.02%)	-	13 (μg/ℓ)	High in small plants (71%)	High in summer (a little)	Others
Turbidity	35 (0.11%)	-	-	High in small plants (94%)	High in fall and winter	Nakdong
Residual chlorine	1,094 (5.5%)	-	0.64	High in small plants (81%)	High in spring and summer	Others
KMnO ₄ consumption	14 (0.04%)	-	1.6	High in small plants (85%)	NO	Nakdong
Hardness	10 (0.03%)	-	66	High in small plants (80%)	NO	NO
pH	24 (0.07%)	-	7.0	High in small plants (79%)	NO	NO

* as reference to 10,000 tons/day

** % of total non-compliance samples

해당된다. 정수된 물에서의 일반세균 기준을 초과하는 비율이 이렇게 적은 것은 이전의 연구와도 일치한다. 1995년에서 1998년까지 환경부에서 지자체 정수장을 대상으로 직접 실시한 수질검사에서도 총 시료수 282개중에서 일반세균 기준을 초과하는 경우는 없었다¹⁾.

일반세균의 기준을 위반한 정수장들이 상수원수를 의존하는 수계별 특성은 보이지 않으며 취수원은 전체 45개중 34개(76%)의 시료가 수질이 상대적으로 양호한 복류수와 지하수에서 검출된 것으로 원수 수질과의 관련성은 적다고 하겠다. 오히려 검출된 모든 정수장이 시설용량이 1만톤/일 이하로 소규모 정수장의 시료에서 주로 검출되었다. 즉 정수장 규모가 소규모이어서 체계적인 관리가 어려워 기준을 위반하게 되는 것으로 해석될 수 있다. 이러한 경향은 간이 상수도의 경우 더 관찰되는데 국내 간이상수도의 일반세균 수질기준 위반 비율(96년 & 97년)은 8.63%로 보고되어있다²⁾. 일반세균기준을 위반한 계절적 특성은 전체 기준 위반 시료수의 24개(53%)가 여름(6, 7, 8월)에 집중하고 있다.

일반세균의 기준은 100cfu/ml로 기준을 위반하지 않았더라도 검출되었다고 보고한 정수장의 특성을 살펴보는 것은 의미가 있다고 하겠다. Table 2에서 보면 기준을 위반하지 않았더라도 일반세균이 검출된 경우는 위반한 시료 0.14% 보다는 훨씬 많은 4.3%, 즉 총 시료 중에 1,470개가 검출되었다. 정수장 규모별 특성은 시설용량 1만톤/일 미만의 소규모 정수장이 1,147개(78%)로 기준초과 정수장의 특성과 같은 경향을 보였다. 일반세균 검출시료의 계절별 특성은 위반시료들이 여름철에 집중된 것과는 다르게 여름철의 시료가 전체 평균에 비하여 10% 증가하기는 하였으나 겨울철에도 검출되는 시료수가 100개 이상이 되어 일반적인 예상과는 다르게 겨울철에도 크게 감소하지 않음을 볼 수 있다.

(2) 대장균군

대장균군은 오랫동안 적합한 먹는물 수질지

표로서 인식되어 왔다. 일반세균은 보통 세균의 재성장과 관련된 지표로 정수장 수질 항목으로 적당한지 여부에 논란이 있어온 반면 대장균군의 존재는 병원성 미생물 사멸과 관련된 가장 중요한 항목이다.

국내 정수에서의 수질기준은 음성(불검출/50ml)이어야 하는데(Table 1), 대장균이 양성반응이 나온 경우는 1994년에서 1998년까지 총 34,134개 시료 중에서 28개(0.08%)이다. 대장균 위반 정수장들은 상수원수 수계와는 연관성이 없었으며 전체 시료 중의 62%가 복류수 또는 지하수를 이용하는 정수장에서 발생하였고, 규모별 특성을 보면 1만톤/일 이하의 소규모 정수장에서 28개 위반 시료 중에서 25개가 검출되어 위반시료의 89%가 소규모 정수장에 집중되어 있어 일반세균의 위반 또는 검출 특성과 매우 유사하다. 계절별 동향은 특별히 여름철에 집중되지는 않고 모든 계절에 고르게 나타나고 있다.

(3) 암모니아성 질소

현재 먹는물에서 잔류하는 정도의 암모니아성 질소는 건강의 직접적인 영향은 없으나, 분변성 오염의 지표로 사용되기 때문에 주목받는 수질 인자이다³⁾⁴⁾. 상수원수 중의 암모니아성 질소는 취수원 상류의 광범위한 도시인구의 존재, 농축산 활동의 활발함, 하수관망 및 하수처리장의 부실과 밀접하게 연관되어 있고, 계절적 특성으로는 겨울을 제외한 시기는 수계에서의 질산화작용으로 상수원수의 기준을 만족하는데 어려움이 없다. 이러한 상수원수에 존재하는 암모니아성 질소는 염소 소독을 하였을 경우에 맛과 냄새의 문제, 소독효능의 감소 등의 문제를 일으킬 수 있다. 그러나 적절하게 외부에서 주입한 암모니아와 염소를 반응시킴으로써 잔류염소를 유지하는 방법이 미국 등에서는 널리 소독부산물 제어와 배급수 관망에서의 미생물 관리, 염소계 맛과 냄새의 관리 등에 사용되고 있다.

암모니아성질소는 94년 1월 낙동강 먹는물 오염 사건으로 국민들에게 널리 알려진 수질항

목이다. 현재 정수장에서 암모니아 농도 검출에 사용되는 분석방법이 Phenate법으로 염소 주입된 물에서 클로로아민 농도와와의 구별이 되지 않는 관계로 환경부의 암모니아 농도를 전부 암모니아 농도로 볼 수는 없다⁵⁾. 따라서 본 연구에서는 염소소독의 특성과 암모니아의 간접적인 존재를 파악하는 제한적인 지표로 활용하고자 한다.

암모니아성질소의 전체 시료 34,134개중에서 수질기준인 0.5mg/l (Table 1)를 초과한 경우는 98개(0.29%)이며 암모니아성질소가 검출된 경우는 5,252개(15.4%)이다. 이 중에서 농도가 0.1mg/l 이하인 경우는 유기 암모니아가 일부 검출되었을 경우로 생각할 수 있으므로 실제적으로 정수처리 공정에 영향을 미칠 수 있는 0.1mg/l 이상의 농도인 시료는 5,252개중에서 726개(14%)의 시료이다. 이러한 암모니아 농도 위반이나 검출특성은 정수장 규모 및 취수원과 관련성이 없었다.

암모니아 농도 기준 위반 시료들의 수계별 동향은 낙동강에서 초과 시료 중 44개(46%), 영산강 및 섬진강이 16개(16%), 한탄강이 15개(15%), 그리고 기타의 경우가 23개(23%)가 검출되었다. 이는 암모니아의 경우 특정위치의 상수원수가 암모니아 기준 준수에 영향을 많이 미치고 있음을 알 수 있다.

암모니아 기준 위반 시료의 계절적인 특성도 뚜렷한데 Figure 1에서 보면 기준을 초과한 시료들의 70%가 겨울철에 나타났다. 이는 낮은 수온으로 인한 느린 질산화 반응이 주요 요인으로 추정되고 겨울철 갈수기의 오수와 폐수 오염의 부하 증가과도 관련이 있으리라고 생각된다. 겨울철 암모니아 기준 위반 시료의 증가 원인에 대한 보다 구체적인 연구의 필요성이 있다고 하겠다.

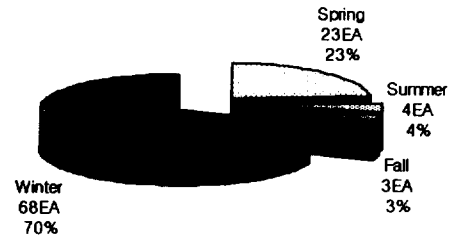


Fig. 1 The seasonal variations of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration

(4) 질산성 질소

수질항목 중 질산성질소는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 로 표시된다. 음용수에 질산성질소는 청색증과 관련이 있으며 지하수의 오염지표로 알려져 있다³⁾⁴⁾. 국내 상수원수의 대부분이 표류수에 의존하는 관계로 큰 문제로 보고된 적은 없다. 지역에 따라 농업활동이 활발한 지역의 지하수를 상수원수를 사용하는 소규모 정수장이 질산성 질소의 기준을 준수하지 못하는 것으로 알려져 왔다.

정수의 질산성 질소의 기준인 0.5mg/l (Table 1)를 초과한 경우는 0.14%(전체 13,134개중에서 49개)로 매우 낮은 편이며, 평균 농도는 약 2mg/l이다. 기준 초과 정수장(시료수 49개)을 규모별로 살펴보면 시설용량 1만톤/일 이하의 소규모 정수장이 45개(92%)에 달하였다. 따라서 규모가 작아 처리 기술이 미비하여 질산성 질소의 기준을 못 맞추고 있음을 알 수 있다. 수계와의 연관성은 낙동강수계가 33개(67%)이며, 취수원에 대해서는 복류 및 지하수가 45개(92%)에 해당하여 원수 수질에 따라 영향을 많이 받음을 알 수 있다. 지하수의 경우 질산성 질소에 오염이 된 경우는 특별한 질산성 질소 제거시설이 없는 경우는 지속적인 위반을 할 수밖에 없는데 동일 정수장의 기준 위반 회수가 대부분의 경우 1-3회에 머물러 있는 점은 질산성 질소 제거 공정이 잘 관리되고 있지 않아 기준을 초과한 것으로 해석될 수 있다.

(5) 총트리할로메탄 (THMs)

THMs은 국내 수질기준 중에서 소독부산물 관련 유일한 수질 항목이자 가장 중요한 항목이라 할 수 있다. 90년 먹는물에서 THMs 검출 파동이 있는 이후로 수질항목의 하나가 되었다. 국내 정수장 물에서의 THMs 검출되는 농도는 일부 연구자에 의해 개별적인 분석을 통해 알려지기는 했지만 시료 분석수는 수십-수백을 넘지는 못한다³⁾. 반면 본 연구에서 조사대상 시료의 수가 3만개의 시료수가 넘는다.

국내 정수장의 THMs 검출 특성을 보면 전체 34,134개중에서 THMs 수질기준인 $100\mu\text{g}/\ell$ (Table 1)를 초과한 시료수는 7개소 (0.02%)에 불과함을 알 수 있고, 평균은 $13\mu\text{g}/\ell$ 이다. THMs 기준초과 정수장 7개소의 규모별 특성을 보면 소규모인 1만톤/일이 5개 (71%)이었다. 또한 취수원별 특성은 5개 (71%)가 지하수를 사용하는 정수장 이었다. 지하수의 경우 유기물이 적고 염소 요구량도 상대적으로 적어 THMs 발생요인이 적다고 할 수 있다. 참고로 THMs 기준초과 시료들의 과망간산칼륨소비량은 평균 약 $0.7\text{mg}/\ell$ 로 유기물은 적음을 알 수 있다. 따라서 위와 같은 THMs 기준의 위반은 염소주입이 부적절하였거나 수질검사가 잘못 수행되었을 가능성을 배제할 수 없다.

미국의 Stage 1과 2 D/DBP 기준인 $80\mu\text{g}/\ell$ 과 $40\mu\text{g}/\ell$ ¹⁴⁾를 초과하는 시료는 전체 34,134개중에서 각각 120개(0.35%)와 1,877개(5.5%)이다. Stage 1 D/DBP 기준인 $80\mu\text{g}/\ell$ 를 초과하는 정수장의 수가 90개로 동일 정수장이 연속해서 높은 THMs농도가 검출되는 것이 아님을 알 수 있다. 미국의 Stage 1과 2 D/DBP 기준을 넘는 시료들의 정수장 규모별 특성을 보면 Figure 2과 같이 소규모인 1만톤/일이 62%로 많아 상대적으로 소규모 정수장의 소독부산물 관리에 어려움이 있음을 알 수 있다.

계절별 특성은 Figure 3과 같이 여름과 가을에 다른 계절보다 10%정도 많이 기준을 초과하고 있으며 이는 높은 온도가 높은 THMs

생성이 유리하다는 문헌상의 결과와 일치한다¹³⁾.

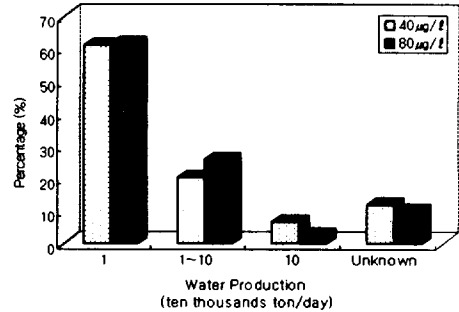


Fig. 2 The THMs formation characteristics according to water plant size

THMs 농도의 연차별 동향은 1995년도에 $12\mu\text{g}/\ell$ 에서 1998년 $18\mu\text{g}/\ell$ 로 적은 농도이기는 하지만 점차 상승하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 증가의 원인이 소독 공정의 강화 때문인지 아니면 원수 중의 유기물 오염원의 증가 때문인지 알 수는 없었다.

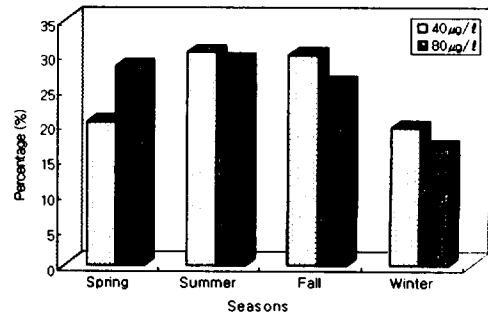


Fig. 3 The seasonal characteristics of THMs concentration

(6) 탁도

탁도는 점토, Silt, 콜로이드 입자, 플랑크톤과 미생물 같은 존재로 생긴다. 탁도는 먹는물의 색도, 맛, 냄새와 관련이 있으며, 특히 미생물학적 질에 영향을 주는데 탁도가 세균과 바이러스의 살균을 방해하고 세균 성장을 촉진시킬 수 있으며 염소 요구량을 증가시킨다³⁾⁴⁾. 탁

도 자료가 취합된 시기의 수질기준이 2도로 되어 있었으나, 1999년 7월 1일부터 1 NTU로 기준은 강화되었다. 2001년부터는 0.5 NTU로 더 강화될 예정이다. 탁도 수질검사 데이터를 보면 대부분 지역에서 거의 모든 데이터를 '적합' 또는 '부적합'이나 일정한 수치인 0, 1, 2로 보고하였기 정확한 탁도 수치를 알 수 없었다. 이러한 탁도 보고 방식은 탁도와 같은 중요한 수질 특성에 대한 정보가 유실되므로 보완할 필요성이 있다.

기준 초과 시료수는 전체 시료수(23,468개)의 35개(0.15%)이며, 특히 낙동강 수계인 경상남도가 23개(65%)이었다. 탁도 기준을 초과한 시료들을 계절별로 살펴보면 여름(6, 7, 8월)의 홍수기에 위반사례가 많을 것이라는 예상과는 달리 가을, 겨울(10월, 1월, 3월)에 약간 많았다. 그러나 데이터가 적어 통계적인 의미는 적다고 하겠다. 정수장 규모별로 보면 1만톤/일 미만의 정수장이 33개(94%)였고, 수계별로는 낙동강수계가 19개(54%)이었다. 취수원별로는 상대적으로 수질이 양호한 복류수가 24개(65%)로 이는 원수 수질보다는 소규모 정수장에 따른 처리공정의 미비로 탁도 제어에 어려움을 겪고 있음을 알 수 있다.

(7) 잔류염소

수질 관리기준으로서의 잔류염소 농도는 미생물의 재생장을 방지하기 위해 우리나라의 경우 유리잔류염소로 0.2mg/l 이상을 관망에서 유지하도록 규정하고 있다(Table 1). 따라서 본 연구의 데이터들도 모두 유리잔류염소로 추정된다. 잔류염소는 일 검사 항목에는 들어 있으나 월검사 항목에는 없어 정수장에서 환경부에 보고하지 않은 경우가 많아 다른 항목(34,134개)에 비해 19,726개(58%)의 시료만이 잔류염소농도 데이터가 있다. 잔류염소 농도 0.2mg/l를 준수하지 못한 시료는 다른 항목에 비해 많은 1,094개(5.5%)에 해당하였다. 특히 전라남도의 경우 전체시료 중 42%가 잔류염소 농도가 0.2mg/l 미만으로 기준에 미달했다.

0.2mg/l의 잔류염소농도를 맞추지 못한 정수장수는 위반 시료수 1,094개에 비해 221개소 뿐으로 특정 정수장에서 계속해서 맞추지 못하고 있음을 알 수 있고, 정수장 규모별로는 1만톤/일 미만의 소규모 정수장이 889개소(81%)를 차지하고 있다. 계절별로는 봄과 여름에 잔류염소농도를 맞추지 못하였다. 수계별로는 지역의 소규모 지천인 기타의 경우가 791개(73%)이고, 취수원별로는 호소수와 지하수가 많다. 배급수 과정에서 0.2mg/l 이상의 추가적인 염소 요구량이 있을 것으로 예상한다면 관망에서 0.2mg/l 이상의 잔류염소를 유지하지 못할 것으로 예상되는 0.4mg/l 이하의 시료수는 전체 시료수 19,726개 중 9,290개(42%)이다. 이와 같이 많은 시료들이 잔류염소 기준을 만족하는데 어려움이 있다면 국내 배수관망에서의 미생물제어에 문제가 있을 것으로 생각된다.

(8) 과망간산칼륨 소비량

과망간산칼륨 소비량이란 물 속의 용존 유기물 또는 무기물과 같은 피산화성 물질에 의해서 소비되는 과망간산칼륨의 양을 말하며 수질의 좋고 나쁨의 간접적인 지표가 될 수 있다. 피산화 물질은 주로 유기물이지만 원수의 특성에 따라 제 1철이온, 아황산이온 등과 같은 무기물이 되기도 한다³⁾⁴⁾.

과망간산칼륨의 수질기준인 10mg/l (Table 1)를 초과하는 시료는 전체 시료 34,134개중에서 14개로 0.04%이며, 평균농도는 1.6mg/l이었다. 위반 시료의 85%가 1만톤/일 이하의 소규모 정수장에서 발생하였다. 수질기준의 80%에 해당하는 과망간산칼륨 8mg/l를 초과한 경우의 시료수가 0.35%로 여전히 적었고 위반 시료수에 대한 정수장의 숫자가 약 45%에 달해 특정 정수장에서 계속 초과하였음을 알 수 있었다.

8mg/l를 초과한 시료의 정수장의 규모에서도 시설용량 1만톤/일의 정수장이 전체 시료 122개중 70개(57%)로 소규모 정수장의 처리기술의 미비에 의한 것임을 알 수 있다. 겨울

철에 검출 빈도수가 조금 많았는데 이는 겨울 철 갈수기로 인해 오염유기물질의 부하가 높기 때문이라 생각된다. 수계별, 취수원별 특성을 살펴보면 수계는 전체 122개 시료중 73개(60%)가 낙동강 수계였고, 취수원별로는 지천인 기타 39개(32%), 복류수 30개(25%), 표류수 21개(17%), 호소수 19개(15%) 순 이었다.

(9) 경 도

물의 경도는 비누와 반응할 때 물의 수용력 정도를 나타내는 지표이다. 물 속에 존재하는 여러 종류의 다양한 용존 금속이온에 의해 발생되며 가장 흔한 것으로 칼슘(Ca^{2+})과 마그네슘(Mg^{2+}) 양이온에 의한 것이다. 경도가 인체에 유해하다는 증거는 없으나 보통 100~300mg/l에서 소비자들은 맛을 느끼게 된다. 또 경도는 pH와 알칼리도 같은 다른 요소와의 상관관계에 따라 약 200mg/l 이상일 때는 배수관망에 스케일 축적을 야기할 수 있고, 약 100mg/l 미만의 연수는 파이프를 부식시킬 수 있다³⁾⁴⁾.

국내 정수장 경도는 전체시료 34,134개중에서 10개(0.03%)만이 기준인 300mg/l (Table 1)를 초과하고 있고 그 중 8개(80%)가 1만톤/일 미만인 정수장이었다. 경도의 전체 평균은 66mg/l이다. 수질 기준의 80%를 조금 넘는 250mg/l를 초과한 시료의 경우도 0.55%만이 초과하였다. 국내 경도 250mg/l를 초과하는 정수장의 시료 189개의 특성을 보면 각 지역마다 특정 정수장에서 초과하고 있으며 예상한 대로 지하수와 복류수를 원수로 취수하는 시설 용량 1만톤/일 미만인 소규모 정수장이 171개(90%)를 차지하고 있다. 전체 시료수 34,134개중에서 2개이상의 취수원을 가진 경우와 자료가 없는 경우 등을 제외하고 27,349개의 데이터를 취수원별로 나누어 평균을 살펴보면 지하수가 100mg/l이며 표류수는 68 mg/l로 예상대로 지하수가 높음을 알 수 있었다.

(10) 수소이온농도(pH)

먹는물의 pH 수질기준은 5.8~8.5 중성범위

에 있다(Table 1). 정수처리과정에서 pH의 조절은 소독 및 최적 응집조건을 찾는 데도 중요하다. 이밖에도 부적절한 pH 관리는 배수관망의 부식, 맛, 냄새의 문제 등을 야기할 수 있다³⁾⁴⁾. 배급수망의 부식을 막기 위해서 처리수의 pH를 7.5 이상으로 유지하기도 하지만 국내에서는 관망 부식관리를 위한 pH 조절을 하지는 않는다. pH 기준을 만족하지 못한 경우는 전체시료(34,005개)에서 24개(0.07%)만이 기준을 초과하였고 전체 평균은 7.0이었다. 기준을 위반한 24개 시료의 정수장을 살펴보면 특정 정수장에서 기준을 초과하거나 계절별, 수계별, 취수원별 특성을 나타내고 있지는 않았다. 정수장 규모별로는 79%인 19개의 시료가 시설용량 1만톤/일 미만인 정수장에서 검출되었다.

10개 수질항목의 수질기준 위반 특성을 요약하면 Table 2에서 보는 것처럼 규모가 작은 1만톤/일미만의 소규모 정수장들이 일반세균, 대장균군, 질산성질소, THMs, 탁도, 잔류염소 농도, 과망간산칼륨 소비량, 경도, pH와 같은 수질항목의 수질관리가 어려운 것을 알 수 있다. 이러한 수질항목들이 조사대상 정수장 중에서 1만톤/일 이하의 정수장의 비율을 크게 상회하는 것이기도 하다. 또한 수계 중에서는 낙동강 수계에 위치한 정수장들이 4가지 수질항목들($\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, 탁도, 과망간산칼륨 소비량)의 수질악화로 어려움을 겪고 있다. 취수원 별로는 상대적으로 수질이 양호한 복류수와 지하수가 많은데 이는 복류수와 지하수를 원수로 사용하는 정수장이 규모가 작은 정수장이기 때문이다.

3.3 수질항목간의 연관성

(1) 잔류염소와 소독관련 항목간의 연관성

국내 수질 항목 중 소독과 관련있는 대표적인 항목은 일반세균, 대장균군, 잔류염소 세가지를 들 수 있다. 잔류염소의 경우 염소의 소독능과 관련있는 pH, 물속 용존 유기물의 양인 과망간산칼륨 소비량을 추가로 비교 검토하였다.

일반세균의 기준위반과 부적절한 소독과의 관계를 살펴보기 위해서는 당시의 잔류염소 농도와 같이 살펴보았는데, 상당수의 정수장에서 잔류염소가 수질검사 항목이 아닌 관리항목이기 때문에 잔류염소 농도를 보고하지 않고 있었다. 일반세균 기준을 위반한 45개중에서 잔류염소 농도를 동시에 보고한 시료수는 8개 정도에 불과하였다. 이는 전체 시료에 대한 평균 잔류염소 보고율 58%에 비하여 매우 낮은 수치이다. 잔류염소 농도를 보고한 8개 시료 중에서도 잔류염소 농도를 보고한 곳은 5곳에 불과하고 나머지는 측정되지 않았다고 보고하였다. 잔류염소를 보고하지 않았거나 잔류염소가 측정되지 않은 정수장의 경우는 부적절한 소독을 가능성이 그렇지 않은 경우 보다 높다고 할 수 있다. 일부 시료(5개)이기는 하지만 잔류염소를 측정(0.2mg/l ~ 0.9mg/l)하여도 일반세균이 검출되었다는 보고는 일부 경우에 있어 현재 소독관행이 일반세균을 사멸시키는데 충분치 않음을 나타낼 수도 있다.

대장균군이 양성인 정수장의 잔류염소와의 관계는 일반세균 기준위반 정수장들과 마찬가지로 잔류염소 자료가 보고되어 있지 않아 파악이 어려웠고, pH와의 연관성은 염소 소독능의 급격한 차이를 보이는 pH 7.4 미만이나 이상의 시료에서 일반세균이 검출된 시료의 평행성이나 잔류염소 농도의 차이를 관찰할 수 없었다. 과망간산칼륨소비량 8mg/l를 초과하는 122개 시료들 중 잔류염소농도가 있는 70개 시료의 평균은 0.75mg/l로 전체 잔류염소의 평균인 0.64mg/l보다 과망간산칼륨의 소비가 커 용존유기물이 많은 경우 염소주입이 많았음을 알 수 있다.

(2) 미생물관련 항목간의 연관성

대장균과 일반세균은 먹는물의 미생물적 안정성의 지표로 한 항목이 검출될 때 다른 항목이 같이 검출되는 여부를 살펴보았다. 대장균 기준 위반 시료 28개중에서 24개의 시료가 일반세균이 검출되었다. 이중 9개의 시료는 대장균 기준과 일반세균기준을 동시에 위반한 시료

이다. 따라서 일반세균 위반을 하지 않았더라도 일반세균이 검출된 시료에 대장균 위반 시료가 대부분 포함되어 있음을 알 수 있다. 일반세균의 기준을 위반하지 않더라도 일반세균이 검출되는 경우 미생물 관리에 주의를 기울일 필요성이 있다고 하겠다.

3.4 국외 문헌 자료와의 비교

국외 문헌 자료로 미국 수도 협회가 제공하는 WIDB(Water Industry Database, 1996)를 사용하였다. 미국에서는 약 60,000여 개의 크고 작은 정수시설이 있고 280개의 대규모 정수장이 급수인구의 반을 담당하고 있다⁷⁾. 개별 수질 항목별로 비교한 결과는 Table 3과 같다. 국내 정수 중 대장균이 양성반응이 나오는 경우는 총 34134개 시료 중에서 28개 (0.08%)이나 미국의 경우 대장균 총 849개 시료 중에서 37개(4%)나 되어 대장균 양성반응의 검출률이 미국의 경우 50배나 더 많다.

Table 3 The comparison of water quality data between Korea and USA

Item	Non Compliance Samples (%)		Mean (mg/l)	
	Korea	USA	Korea	USA
Total coliforms	0.08	4	-	-
THMs	0.02	-	0.013	0.030
Turbidity	0.11	-	-	0.25
Residual chlorine	5.5	-	0.64	1.03* 1.59**
Hardness	0.03	-	66	137
pH	0.07	-	7.0	7.7

* Free chlorine

** Combined chlorine

THMs의 경우 국내 정수장의 전체 34,134 개중에서 THMs 수질기준인 $100\mu\text{g}/\ell$ 를 초과한 시료수는 7개에 불과하다. Table 4에서 보면 현재 미국의 Stage 1 D/DBP 기준($80\mu\text{g}/\ell$)을 적용하면 0.35%(120개)만이 기준을 초과하며 Stage 2 D/DBP 기준($40\mu\text{g}/\ell$)을 적용하면 5.5%(1877개)만이 기준을 초과한다¹⁶⁾. 반면 미국의 경우 Stage 1과 2 D/DBP 기준을 적용하였을 때 각각 2.45%, 34.9%가 초과하여 국내가 미국의 비해 그 위반 비율이 매우 낮음을 알 수 있다.

Table 4 The comparison of THMs formation of finished water between Korea and USA

Nation	Total Samples (EA)	Stage I Non Compliance Samples(%)	Stage II Non Compliance Samples(%)
Korea	34,134	0.35	5.5
USA	732	2.45	34.9

이런 경향은 Figure 4에서도 알 수 있는데 미국과 국내 THMs의 누적분포를 나타내고 있다. 같은 조건에서의 비교를 위해 국내자료는 1996년의 8월의 자료만을 나타내었고 점선은 미국의 Stage 1, 2 D/DBP 기준인 THMs 농도 80, $40\mu\text{g}/\ell$ 를 표시한 것이다. 현재 적용 중인 Stage 1을 적용하면 미국의 경우 5%정도가 문제시되고 국내는 거의 문제가 없는 것으로 나타났고 Stage 2의 경우 미국은 60%가 국내는 7%만이 문제시 될 것으로 생각된다. 평균을 보아도 미국이 $30\mu\text{g}/\ell$ 으로 국내 $13\mu\text{g}/\ell$ 보다 2배 이상 많이 나오고 있다. 이렇듯 우리나라가 미국보다 THMs가 작은 이유는 유기물의 양적인 차이, 유기물과 염소와의 반응 특성 차이, 낮은 염소 주입량, 짧은 접촉시간 등이 복합적인 작용하기 때문으로 최근의 연구에서 보고한 바 있다⁸⁾.

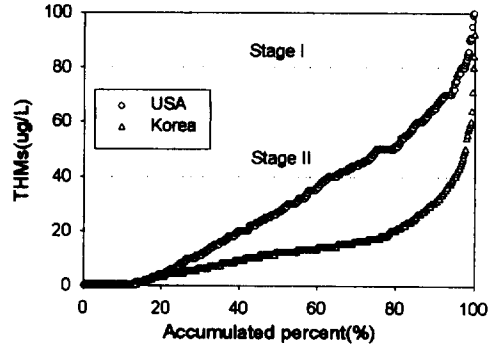


Fig. 4 Comparison of THMs of finished water between Korea and USA

미국의 탁도 기준은 0.5 NTU¹⁴⁾인 반면 국내의 경우 1 NTU이다. 위의 수질자료가 조사되던 시기는 “도”라는 단위를 사용하였으며 기준은 2도였다. 도와 NTU간의 상관성이 완전하지 않아 일괄적인 비교는 어렵지만 2도는 1 NTU 정도의 값을 갖는 것으로 알려져 있다. 미국은 위반 비율은 보고되고 있지 않으며 정수의 탁도가 0.25 NTU 정도로 낮은 반면 국내의 경우 위반 비율은 0.11%로 매우 낮으나 기준이 미국에 비하여 덜 엄격한 기준을 가진다. 평균값은 탁도 자료 보고방식의 미비로 계산할 수 없었다.

미국에서 수질관리에 있어 탁도에 대한 관심은 *Cryptosporidium*같은 미생물의 위협을 줄이는 방법이 탁도 규제라는 인식하에 지속적인 탁도 저감을 강조하고 있다. 강화된 지표수 처리법(IESWTR, Interim Enhanced Surface Water Treatment Rule)에 의하며 모든 개별 여과지(최소 4시간에 한번) 유출수의 95%가 0.3 NTU미만이고 어떠한 경우라도 1 NTU 초과할 수 없도록 하고 있다¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾.

잔류염소는 국내의 경우 그 평균이 유리잔류염소로 $0.64\text{mg}/\ell$ 인 반면 미국의 경우 $1.03\text{mg}/\ell$ 로 1.6배 많아 높은 염소주입에 의해 공정을 제어하거나 클로로아민 공정이 허용되기 때문으로 판단된다. 경도를 살펴보면 미국의 경

도는 그 평균이 137mg/ℓ로 국내 정수 66mg/ℓ보다 2배 이상 많이 나와 이미 많이 알려진 결과를 확인할 수 있었다. 미국 정수의 pH는 평균이 7.7로 관망에서의 부식방지를 위하여 전형적으로 배급수망에서 pH를 조정하는 것을 알 수 있으며 반면에 국내 정수의 pH는 평균 7.0이다.

3.5 본 연구의 한계

본 연구에 사용된 정수 수질자료는 시민이 각 가정에서 사용하는 먹는물의 수질 검사 자료가 아니다. 따라서 본 연구의 수질조사결과가 일반 시민들의 수돗물에 대한 수질로 인식될 수 없다. 특히 시민들의 민원중의 가장 많은 부분을 차지하는 녹물과 이물질 같은 것은 본 연구에서 다루지 않아 이러한 괴리감은 더하다고 하겠다. 시민들이 수돗물에 대한 일반적인 정서가 제도화된 수질검사에 반영하지 못하는 점은 장기적으로 수돗물의 불신을 해소하는 데 그 극복방안이 반드시 검토되어야 하겠다.

또한 미생물 수질검사의 자료에서 알 수 있듯이 전체 시료의 수에 비해서 대장균이나 일반세균의 기준을 위반하는 비율은 높지 않다. 이러한 미국의 정수 수질 자료와 비교하여도 분명하게 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 이러

한 미생물 기준 준수가 서울시 수돗물에서의 바이러스 검출을 둘러싼 논란의 해답을 주거나 국내 정수장 먹는물의 소독상태를 객관적으로 입증하지 못한다는 어려움이 있다. 최근의 연구에 의하면 국내 정수장의 소독능이 미국의 표류수 처리기준을 적용하였을 때 각 정수장별 연중 최소 온도와 최대 pH를 가정한 최악의 조건에서 설계체류시간으로 계산할 때 각각 43%(0.5 log *Giardia* 불활성화), 58%(1 log *Giardia* 불활성화)를 나타내어 소독능을 만족시키지 못하고 있음을 알 수 있다⁹⁾.

국내 병원성 미생물의 지표 미생물인 일반세균과 대장균은 선진국에서 최근에 문제가 되어 관심이 집중되고 있는 *Cryptosporidium*이나 *Giardia*같은 원생동물에 비하여 상대적으로 염소에 대한 저항성이 약하다. 또한 정수장의 소독능에 대한 규정이 없어 매우 자의적인 소독을 행하고 있는 정수장 현실이다¹⁰⁾. 끝으로 본 연구에서는 개개의 정수장 또는 수질검사기관이 행한 수질검사의 신뢰성에 대해서는 현재로서의 알 수 없으며 환경부에 보고되어 있는 자료만을 바탕으로 수행한 것임을 밝혀둔다. 따라서 향후 환경부에 취합되는 수질결과의 신뢰성에 대한 평가와 동시에 국내 먹는물에서의 수질특성이 분석될 필요성이 있다.

4. 결 론

1994년부터 1998년까지 지난 5년간 전국 정수장 593개 정수장에서 환경부에 보고하는 45개 수질항목 중에 선정한 10개 수질 항목을 조사한 특성은 다음과 같다. 개별 수질 항목의 분석 시료의 수는 34,134개였다.

1. 각각의 수질항목의 기준 위반 비율은 일반세균은 0.14%(45개), 대장균은 0.08%(28개), 암모니아성질소는 0.29%(98개), 질산성질소는 0.14%(49개), THMs는 0.02%(7개), 탁도는 0.11%(35개), 잔류염소는 5.5%(1,094개), 과망간산칼륨 소비량은 0.04%(14개), 경도는 0.03%(10개), pH는 0.07%(24개)였다.

2. 1만톤/일 미만의 소규모 정수장에서 위반 비율은 일반세균 100%, 대장균 89%, 질산성질소 92%, THMs 71%, 탁도 94%, 잔류염소 81%, 과망간산칼륨 소비량 85%, 경도 80%, pH 79%로 질산성 질소를 제외하고는 높아 수질관리에 어려움이 있음을 알 수 있다. 따라서 소규모 정수장의 정수장 수질개선을 위한 특별 대책이 필요하다고 하겠다.

3. 전국 정수장 정수에서의 THMs 평균농도는 $13\mu\text{g}/\ell$ 정도로 매우 나타났다. 현재의 수질 기준인 $100\mu\text{g}/\ell$ 를 위반하는 경우는 총 시료수 34,134개중에서 7개(0.02%)뿐 이었고, 미국의 Stage 1 D/DBP 기준인 $80\mu\text{g}/\ell$ 를 적용하면 120개(0.35%), Stage 2 D/DBP 기준인 $40\mu\text{g}/\ell$ 에는 1,877개(5.5%)만이 위반하였다. 이와 같은 수치는 미국의 Stage 1 기준 위반 비율 2.45%, Stage 2 기준 위반 비율 34.9%와 비교하면 매우 낮은 수치이다. 따라서 국내 D/DBP 정책에 이와 같은 낮은 검출 농도와 위반 비율 결과를 반영할 필요성이 있겠다.

4. 국내 정수장의 효율적인 수질관리를 위해서 일부 수질항목의 보고방식을 변경할 필요성이 있다. 적합/부적합 방식의 탁도의 보고방식은 통계적인 경향성있는 수질자료로 사용할 수 없으므로 실제 측정된 탁도 농도로 바꿀 필요성이 있다. 잔류염소의 농도 조사대상 시료의 약 42% 시료에서 보고되지 않고 있으므로 잔류염소의 보고를 의무화할 필요성이 있다.

5. 현재 정수장에서 수질자료를 환경부에 보고하는 방식은 문서상의 보고만을 한다. 이러한 문서자료는 수질자료의 통계적 파악을 위해 다시 많은 추가적인 작업을 한다. 따라서 앞으로는 정수장의 수질검사 결과를 시(상수도사업본부)와 도청(수질과)에서 환경부에 보고할 때부터 정수장 CODE를 사용하여 동일 프로그램으로 데이터 베이스화한 File을 E-Mail을 이용한 Network 구성하여 보고하도록 하여 수질관리 체계의 효율성을 기해야 하겠다.

감사의 글

본 연구는 G7 환경공학기술개발 사업 중 정수장 진단기술의 개발 사업과 BK21 Program 의 일환으로 수행되었으며 전국 정수장 자료를 흔쾌히 제공해주신 환경부 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. 임연택, 정현미, 박혜경, 김용석, 이종태, 김동빈, 박정환, 유재근, 주영수, 수질의 미생물학적 관리기법 연구, 국립환경연구원, NIER, NO. 98, 12-527 (1998).
2. 김준환, 김창수, 김정화, 김현구, 정동환, 최은숙, 임은숙, 김평청, 유재근, 먹는물 수질관리기법개발에 관한 연구(II), 국립환경연구원, NIER, NO. 98, 13-528 (1998).
3. 한무영 역, WHO 음용수 수질 가이드라인 (1999).
4. 박석기, 안승구, 엄석원 편저, 해설 먹는물 수질관리, 동화기술 (1996).
5. 윤제용, 이상덕, Phenate법으로 암모니아 분석시 염화아민의 방해작용에 관한 연구, 상하수도 학회지, 제 12권, 제 1호, 45-51 (1998).
6. 윤제용, 변석중, 금강지역 정수장 원수에서 Cl_2/NH_3 에 따른 THMs 및 TOXs 생성 특성에 관한 연구, 수질보전학회지, 제 14권, 제 4호, 521-528 (1998).
7. 최정진, 미국의 정수처리 현황과 운영관리, '99 서울상수도기술세미나, 3-22 (1999).
8. 최유식, 윤제용, 조순행, 유기물 발생지에 따른 소독부산물 생성특성에 대한 연구, '99추계환경공학회, 245-246 (1999).
9. 윤제용, 국내 정수장 소독설비 현황 및 운전 특성 파악, 대한 상하수도 학회 수도연구회 제2회 심포지움 (21세기를 맞이하는 수도의 발전방향), 141-162 (1999).
10. 윤제용, 석관수, CT값에의한 정수장의 소독능 평가, 수질보전학회지, 제 14권, 제

- 4호, 413-423 (1998).
11. 윤제용, 전국 정수장 정수 수질자료 특성 분석, 맑은 물 공급을 위한 수질관리 정책 그 과제와 방향을 진단한다, *생명의 물 살리기 운동 정책 심포지움* (1999).
 12. 윤제용, 음용수불신과 소독공정진단, 대한상하수도 학회 수도연구회 제 1회 심포지움 (깨끗하고 경제적인 수돗물 생산을 위한 정수장의 성능진단) (1998).
 13. Oliver, B., The Effect of Temperature, pH, and Bromide Concentration on the Trihalomethane Reaction of Chlorine with Aquatic Humic Material, *Water Chlorination : Environmental Impact and Health Effects*, Vol. 3 (R.Jolley, editor). Ann Arbor Sci. Publ., Ann Arbor, Mich (1980).
 14. Pontius, F. W., Complying with future regulations, *Journal of American Water Work Association*, Vol. 91, No. 3, 46-58 (1999).
 15. Regli, S., Odom, R., Cromwell, J., Lusic, M., and Blank, V., Benefit and Costs of the IESWTR, *Journal of American Water Work Association*, Vol. 91, No. 4, 148-158 (1999).
 16. Odom, R., Regli, S., and Messner, M., Benefit-cost analysis of the Stage 1 D/DBP Rule, *Journal of American Water Work Association*, Vol. 91, No. 4, 137-147 (1999).