

국내 정수장의 소독부산물 생성 특성

Characteristics of Disinfection By-Products Formation in Korea

김진근^{1,*} · 정상기² · 신창수² · 조혁진²

Kim, Jinkeun^{1,*} · Jeong, Sanggi² · Shin, Changsoo² · Cho, Hyukjin²

1 한국수자원공사 수자원교육원

2 한국수자원공사 수도관리처

(2005년 1월 12일 논문 접수: 2005년 6월 8일 최종 수정논문 채택)

Abstract

The characteristics of disinfection by-products (DBPs) formation at 28 water treatment plants in Korea were investigated. Investigated species of DBPs were trihalomethanes (THMs), haloacetic acids (HAAs) and chloral hydrate (CH). The maximum concentration of THMs was 84.1 μ g/L, minimum and the averages were 6.9 μ g/L and 27.8 μ g/L, respectively; the maximum concentration of HAA₅ was 90.8 μ g/L, minimum and the averages were 3.8 μ g/L and 26.7 μ g/L, respectively; while the maximum concentration of CH was 29.5 μ g/L, minimum and the averages were 0.5 μ g/L and 7.4 μ g/L, respectively. On the other hand, DBPs levels during summer months, when the water temperature was near 25°C, were nearly twice as great as DBPs levels during the winter season. The ratio of THMs/HAA₅ was 1.07, and HAA₅ and THMs were the dominant species of DBPs in the Kum-Sumjin river and Nakdong river, respectively.

Key words: Disinfection by-products (DBPs), Trihalomethanes, Haloacetic Acids, Chloralhydrate

주제어: 소독부산물, 트리할로메탄, 할로아세트에시드, 클로랄하이드레이트

1. 서론

안전한 수돗물의 가장 중요한 조건중의 하나는 병원성 미생물로부터의 안전이다. 과학의 발전과 더불어 수도분야의 종사자들은 병원성 미생물로부터 안전한 수돗물을 만들기 위하여 많은 노력을 해왔다. 이러한 노력의 일환으로 1908년 미국 시카고 주의

Bubbly Creek에서 최초의 염소소독이 실시되었으며, 10년 후인 1918년에는 미국내 약 1,000여 개소의 도시에서 염소소독이 실시되었다(Haas, 1999). 국내의 경우는 관련법(수도시설의 청소 및 위생관리등에 관한 규칙)에 수돗물에서는 잔류염소가 항상 0.2mg/L 이상 유지되도록 규정하고 있어, 국내의 정수장은 모두 염소계의 수처리제(액화염소, 차아염소산나트륨 등)를 이용하여 염소소독을 실시하고 있다.

*Corresponding author Tel: +82-42-860-0239, FAX: +82-42-860-0248, E-mail: kjinkeun@kowaco.or.kr (Kim, J.K.)

염소 등의 소독제는 수중의 미생물과 반응하여 병원성 미생물의 사멸 혹은 불활성화라는 긍정적인 효과를 주는 반면, 수중의 다른 물질과 반응하여 인체에 유해한 물질을 포함하는 소독부산물(DBPs, Disinfection by-products)을 생성한다. 대표적인 소독부산물은 트리할로메탄(THMs, Trihalomethanes)과 할로아세트산(HAAs, Haloacetic acids)이다. 브롬의 농도가 낮은 원수를 염소소독하는 경우 발생가능한 대부분의 소독부산물은 THMs의 경우는 클로로포름, HAAs의 경우는 디클로로아세트산과 트리클로로아세트산이다. 그러나 브롬의 농도가 높을 경우에는 브롬이온과 관련된 소독부산물인 브로모디클로로메탄, 브로모디클로로아세트산의 농도가 다른 소독부산물에 비하여 상대적으로 증가할 수 있다(Singer 등, 1999). 소독부산물은 일반적으로 정수장내에서 전염소 처리와 후염소 처리를 통해 1차 생성되고, 관말 지점까지의 긴 체류시간 동안 수중의 잔류염소와 지속적인 반응으로 2차 소독부산물이 생성되면서 전체농도가 증가하게 된다.

총트리할로메탄(TTHMs, Total Trihalomethanes)은 클로로포름(CHCl_3), 브로모포름(CHBr_3), 브로모디클로로메탄(CHBrCl_2), 디브로모클로로메탄(CHBr_2Cl)의 합으로 표현된다. THMs 발생의 역사는 염소소독의 역사와 같다고 볼 수 있으나 분석기술의 발전과 더불어 1970년대 초반부터 수돗물에서 검출된 것으로 보고되었다(Singer, 1999). 이후 1974년부터 미국환경청(EPA) 주관으로 소독부산물에 대한 많은 연구가 수행되었다. 특히 미국에서 염소소독을 실시하는 79개 정수장을 대상으로 1975년부터 실시된 NORS(National Organics Reconnaissance Survey) 조사결과 79개 모든 정수장에서 일정농도의 THMs가 검출되었으며, 이중 가장 많이 검출된 것은 클로로포름이었다. 당시 검출된 클로로포름의 평균농도는 $21\mu\text{g/L}$ (THMs의 75%), 브로모디클로로메탄은 $6\mu\text{g/L}$ (THMs의 21%), 브로모디클로로메탄은 $1.2\mu\text{g/L}$ (THMs의 4%)가 검출되었으며 브로모포름은 검출한계 미만으로 측정되었다. 그러나 이러한 THMs의 종류별 발생농도비율은 원수수질에 따라 다른 양상을 보이기도 하였다(Singer, 1999). THMs의 경우 1976년 미국국립암연구소에서 클로로포름을 잠재적인 발암물질(suspected human carcinogen)로 분류

Table 1. 할로아세트산의 분류

구분	분자식	비고
Chloroacetic Acid	$\text{ClCH}_2\text{CO}_2\text{H}$	HAA ₁
Dichloroacetic Acid	$\text{Cl}_2\text{CHCO}_2\text{H}$	HAA ₂ , HAA ₃
Trichloroacetic Acid	$\text{Cl}_3\text{CCO}_2\text{H}$	HAA ₄ , HAA ₅
Bromoacetic Acid	$\text{BrCH}_2\text{CO}_2\text{H}$	HAA ₆
Dibromoacetic Acid	$\text{Br}_2\text{CHCO}_2\text{H}$	HAA ₇
Tribromoacetic Acid	$\text{Br}_3\text{CCO}_2\text{H}$	
Bromochloroacetic Acid	$\text{BrClCHCO}_2\text{H}$	
Bromodichloroacetic Acid	$\text{BrCl}_2\text{CCO}_2\text{H}$	
Dibromochloroacetic Acid	$\text{Br}_2\text{ClCCO}_2\text{H}$	

하였고, 미국환경청에서는 1979년 TTHMs에 대한 수질기준을 $100\mu\text{g/L}$ 로 제정하였으며, 이후 $80\mu\text{g/L}$ 로 강화하였다. THMs는 염소소독후 발견되는 총 소독부산물의 약 20%(중량기준)에 해당하는 것으로 알려져 있다(Weinberg, 1999).

HAAs는 Table 1에 나타난 바와 같이 모두 9종류가 발생가능하며, 미국에서는 이중 클로로아세트산, 디클로로아세트산, 트리클로로아세트산, 브로모아세트산과 디브로모아세트산의 5가지의 합(HAA₅)을 법적으로 규제하고 있으며, 국내에서는 디클로로아세트산과 트리클로로아세트산의 2가지 합(HAA₂)을 법적인 기준농도로 설정하여 운영하고 있다. THMs와 HAAs 외에도 할로아세토니트릴(HANs, Haloacetonitriles)과 클로랄하이드레이트(CH, Chloral hydrate) 등의 소독부산물이 생성될 수도 있다. 1970년대 초에 THMs가 발견된 이후 1970년대말 HAAs가 발견되었으며, 이어서 1980년대 초에 HANs도 발견되었다(Singer, 1999). Stevens 등(1990)은 수돗물에서 염소소독으로 인해 196종의 소독부산물이 발생하는 것을 확인하였다.

미국의 경우 TTHMs에 대한 수질기준이 1979년 제정된 이후 지속적인 시설개선을 통해 THMs의 발생농도를 낮추어가고 있다. 이는 염소투입지점의 변경, 염소주입률의 변경, 소독제의 변경 등을 통해서 이루어지고 있으며 최근에는 소독부산물의 발생을 근원적으로 방지하기 위하여 소독부산물 발생의 주요 원인이 되는 전구물질의 제거를 위하여 많은 노력을 하고 있다. 이러한 노력의 일환으로 강화응집(Enhanced Coagulation), 분말활성탄 흡착 등의 방법이 많이 사용되고 있다.

Table 2. 미국의 소독부산물 기준

소독부산물	MCLG($\mu\text{g/L}$)	MCL($\mu\text{g/L}$)	발생경로
Bromate	0	10	오존 산화부산물
Total Trihalomethanes (TTHMs)	N/A	80	염소 및 클로라민 소독 부산물
Bromodichloromethane	0	TTHMs 참조	
Bromoform	0		
Chloroform	N/A		
Dibromochloromethane	60		
Haloacetic Acids(HAA ₅)	N/A	60	염소 및 클로라민 소독 부산물
Dichloroacetic Acid	0	HAA ₅ 참조	
Trichloroacetic Acid	300		
Chlorite	800	1,000	이산화염소 소독부산물

일반적으로 소독부산물 생성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 소독제의 주입률 및 접촉시간, pH, 수온, 브롬의 농도, 전구물질의 농도 등이다. 소독부산물의 경우 대부분 접촉시간이 증가될수록 발생농도가 증가한다. THMs의 경우는 시간의 경과와 함께 지속적으로 증가하나, HAA₅의 경우에는 급배수관망에서 생물 분해에 의해 오히려 시간이 지날수록 감소할 수도 있다(Singer 등, 1999). 한편 대부분의 소독부산물 농도는 pH가 상승함에 따라 감소하나 THMs의 경우는 pH가 상승할수록 증가한다. 계절적 특성도 소독부산물 발생농도에 영향을 줄 수 있는데 이는 소독부산물 발생농도에 영향을 미치는 수온, pH 및 전구물질의 농도가 계절적인 영향을 받기 때문이다. 일반적으로 소독부산물의 농도는 하절기에 가장 높으며, 동절기의 발생농도는 지역적으로 차이는 있으나 보통 하절기 발생농도의 약 50%이다(Kawamura, 2000).

미국에서 35개 정수장을 대상으로 측정한 결과에 의하면 중량기준으로 소독부산물중 가장 높은 비중을 차지하는 것은 THMs이다. 다음으로는 HAA₅이었으며, 미국에서 규제하는 5가지 HAA₅의 합이 평균값은 THMs의 약 절반정도로 조사되었다. 조사대상 대부분 지역에서 THMs의 농도가 HAA₅의 농도보다 높았으나, 특정 지역에서는 HAA₅의 농도가 THMs의 농도보다 높게 검출되기도 하였다. HAA₅는 일반적으로 THMs보다 반응속도가 빠르고 일부 HAA₅의 경우 높은 pH에서 분해되며, 잔류염소가 없어질 경우 생물 분해가 되기도 한다. 미국에서 THMs과 HAA₅의 전국 평균 비는 1.45:1이다. 일반적으로 THMs과

HAA₅의 분율을 결정짓는 가장 중요한 요소 중의 하나는 pH이다. 일반적으로 pH가 상승하면 THMs은 증가하고 HAA₅는 감소하는 것으로 알려져있다(Singer, 1999).

한편, 미국의 소독부산물에 대한 최대오염허용농도목표치(MCLG, Maximum Contaminant Level Goal) 및 최대오염허용농도(MCL, Maximum Contaminant Level)는 Table 2에 나타내었다. 이중 염소소독과 관련된 규제항목은 트리할로메탄과 할로아세틱에시드류이다(USEPA, 2004). 소독부산물의 일부는 발암성 물질로 분류가 되며, 주요 소독부산물의 발암성 정도는 Table 3에 나타내었다. 미국의 경우 발암성이 높은 물질에 대해서는 MCLG를 설정하여 보다 체계적으로 관리하는 것을 알 수 있다(Clark 등, 2001).

국내는 현재 55항목에 대해 법적 수질기준이 설정되어 있으며, 이중 소독부산물과 관련된 항목은 총 7항목이다. 국내에서는 1989년 금강수계 정수장에서의 THMs발생 보도 이후 THMs에 대한 법적수질기준이 100 $\mu\text{g/L}$ 로 1990년 설정된 이후, 2003. 1. 1일부터는 클로랄하이드레이트 등 5개 항목이 추가되어 현재는 총 7개의 소독부산물에 대한 농도를 법적 수돗물 수질기준으로 규제하고 있다. 수돗물에서의 소독부산물과 관련된 한국, 미국 및 일본의 수질기준현황은 Table 4에 나타내었다. 일본의 경우는 총트리할로메탄과 이를 구성하는 4개의 개별 트리할로메탄에 대하여 수질기준이 설정되어 있다(일본수도협회, 2004). 일본의 수돗물 수질에 관한 기준에는 수질기준항목과 수질기준을 보완하는 항목으로서 쾌적수질

Table 3. 주요 소독부산물의 발암성

소독부산물	분류
Bromate	B2
Bromodichloromethane	B2
Bromoform	B2
Chloroform	B2
Dibromochloromethane	C
Dichloroacetic Acid	B2
Trichloroacetic Acid	C
Chlorite	D
Chloral Hydrate	C
Dibromoacetonitrile	C
Dichloroacetonitrile	C

범례) B-가능성 높은 발암물질(probable human carcinogen; 역학조사 결과 제한된 증거가 있는 경우는 B1, 동물실험결과와 확실한 증거가 있는 경우는 B2로 세분함), C-가능성 있는 발암물질(possible human carcinogen; 동물실험결과와 제한된 증거가 있고 사람에게 대해서는 증거가 없거나 불충분할 경우), D-분류불가(발암성에 대한 증거가 없거나 불충분할 경우)

항목 및 감시항목이 있다. 이중 수질기준항목은 법적 수질기준으로 모든 정수장에서 준수하여야 할 기준이다. 소독부산물과 관련된 항목중 트리할로메탄과 관련된 5가지 항목은 수질기준항목에 있으며, 디클로로아세트에시드, 트리클로로아세트에시드, 디클로로아세토니트릴 등은 감시항목에 포함되어 있다(일본수도협회, 1998). 한편, 한국의 THMs와 HAAs에 관한

수질기준은 월별 1회 이상의 측정에서 초과하여서는 안되는 값을 기준값으로 하나 미국의 경우는 매분기마다 최소 4개의 시료를 채수하여 분석하고 각 4분기 평균의 가동평균(running average)으로 판단한다(Kawamura, 2000).

본 논문의 목적은 국내 정수장에서 생성되는 소독부산물의 수계별 발생특성, 계절적 발생특성과 정수장별 THMs과 HAAs의 발생비를 규명하는 것이다.

2. 실험방법

2.1. 조사방법

국내 정수장에서 발생하는 소독부산물의 농도 특성을 조사하기 위해서는 국내에서 운영중인 전체 정수장에 대해 소독부산물 발생현황을 분석하는 것이 가장 좋은 방법이나, 현실적인 여건상 전국에 산재한 일정규모 이상의 28개 광역상수도 정수장(한강수계 9개소, 금강·섬진강수계 9개소, 낙동강수계 10개소)을 대상으로 분석을 실시하였다. 분석항목은 국내의 대표적 소독부산물이라고 할 수 있는 트리할로메탄, 할로아세트에시드 및 클로랄하이드레이트였다. 자료 분석 대상기간은 2003년도 1년이었으며, 측정 주기는 월 1회였다. 시료의 채취는 정수장내 정수지와 최장 관말 수도꼭지에서 동시에 실시하여 정수장에서의 소독부산물 발생현황과 급배수 관로내에서의

Table 4. 소독부산물 관련 국내외 수질기준현황

항목	수질기준($\mu\text{g/L}$)			국내기준 설정년도
	한국	미국	일본	
총트리할로메탄 ¹⁾	100	80	100	1990년
클로로포름	80	-	60	2000년
브로모디클로로메탄	-	-	30	-
디브로모클로로메탄	-	-	100	-
브로모포름	-	-	90	-
할로아세트에시드 ²⁾	100	60	-	2003년 ³⁾
클로랄하이드레이트	30	-	-	"
디브로모아세토니트릴	100	-	-	"
디클로로아세토니트릴	90	-	-	"
트라클로로아세토니트릴	4	-	-	"

주 1) 총트리할로메탄은 클로로포름, 브로모디클로로메탄, 디브로모클로로메탄, 브로모포름의 합이다.

2) 할로아세트에시드의 경우 미국은 5가지의 합인 HAA₅로 규제하며, 한국은 2가지의 합인 HAA₂로 규제한다.

3) 할로아세트에시드, 클로랄하이드레이트, 디브로모아세토니트릴, 디클로로아세토니트릴 및 트리클로로아세토니트릴에 관한 법적 기준은 시설용량이 1일 100,000톤 이상인 정수장은 2003년 1월 1일부터, 시설용량이 1일 100,000톤 미만인 정수장은 2004년 7월 1일부터 시행한다.

Table 5. 소독부산물 측정방법 및 분석기기 현황

분석항목	분석방법	분석기기명
THMs	EPA 502.2	Varian star3800GC/saturn2200MS
HAAs	EPA 552.2	Varian star3800, ECD
CH	EPA 551.1	Varian star3800, ECD

체류시간 증가에 따른 소독부산물 농도의 증가현황을 동시에 비교분석하였다.

2.2. 분석방법

측정방법 및 분석기기 현황은 **Table 5**와 같다. 수질측정의 경우 분석자료의 신뢰성을 높이기 위하여 정부로부터 공인 받은 4개의 먹는물검사기관에서 시료를 취합하여 실시하였다.

THMs는 GC/MS(Saturn 2200, Varian, USA)를 이용하여 분석하였다. Split ratio는 20:1이었으며, 사용된 칼럼은 CP-624(60m × 0.25mm I.D.)이고 오븐 온도는 35°C에서 2분 경과후 6°C/min의 증가율로 200°C까지 증가시켜 2분간 유지하였다. Flow rate는 분당 0.9mL로 하였다. MS는 Ion Trap을 사용하여 EI모드에서 Range 40-200으로, 온도조건은 Trap 140°C, Manifold 50°C, Transferline 160°C로 설정하여 분석하였다. HAAs는 Rtx-1701(30m × 0.32mm I.D.) 칼럼을 이용하였으며, 오븐 온도는 60°C에서 4°C/min의 증가율로 150°C까지 증가시켰으며, 150°C에서 8°C/min의 증가율로 280°C까지 증가시켰다. Detector 온도는 280°C로서 ECD가 사용되었으며, Flow rate는 분당 1.7mL로 유지되었다. 한편, CH는 Rtx-1(30m × 0.32mm I.D.) 칼럼을 이용하여 분석하였고 오븐 온도는 40°C에서 4분간 유지후 10°C/min의 증가율로 180°C까지 증가시켰으며 Injector 온도는 200°C, Detector 온도는 290°C로 ECD를 사용하였다. 칼럼 Flow rate는 1.9mL/min로 유지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 수계별 THMs 발생현황

조사대상 28개 정수장에 대한 수계별 THMs 발생현황은 **Table 6**에 나타내었다. THMs의 평균발생량은 수계별로 큰 차이를 나타내지 않았다. 평균 검출

Table 6. 수계별 THMs 발생현황

수계	THMs 농도(ug/L)		
	최대	최소	평균
한강	84.1	6.9	27.6
금강 · 섬진강	72.1	11.0	26.0
낙동강	65.7	12.6	29.2

농도는 모든 수계에서 30µg/L 미만으로 법적 수질기준인 100µg/L과 비교하여 낮은 값으로 나타났다. 그러나 특정시기에는 법적수질기준의 약 84%까지 검출되는 것으로 나타나, THMs의 검출농도가 높은 정수장에서는 소독부산물의 발생농도를 저감시키기 위한 지속적인 노력이 필요하다.

한편 정수장별 THMs 발생현황은 **Fig. 1**에 나타내었다. **Fig. 1**는 정수장별 소독부산물의 발생농도 범위를 표시하고 있으며 상단의 점은 조사대상 기간인 2003년 중 최대값, 하단의 점은 최소값, 그리고 중간점의 점은 평균값을 나타낸다. 조사대상 28개 정수장에 대한 정수장별 평균검출농도가 40µg/L 이상인 정수장은 한강수계의 경우는 1개소, 금강 · 섬진강수계는 1개소이며, 낙동강수계는 2개소로 조사되었다. 특히 한강수계의 경우, 한강분류에서 취수하는 E정수장에서 THMs 발생량이 특정시기에 다소 높은 값을 보였으며, 금강 · 섬진강수계의 경우는 금강하류에서 취수하는 M정수장의 경우도 높게 나타났다. 이는 소독부산물의 발생농도와 원수의 수질변화간에 매우 밀접한 관계가 있다는 것을 나타낸다.

Fig. 2는 한강수계 9개 정수장의 THMs 월별 발생

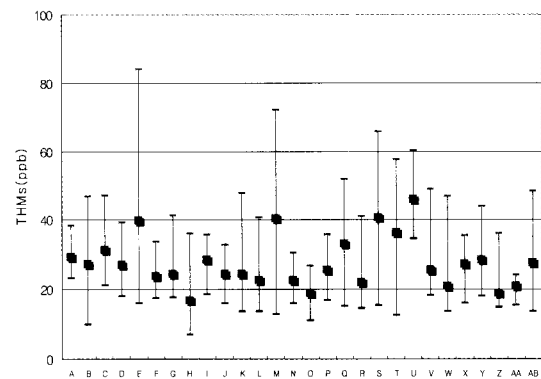


Fig. 1. 국내 정수장의 THMs 발생현황.

*범례: 한강수계정수장(A-I), 금강 · 섬진강수계정수장(J-R), 낙동강수계정수장(S-AB)

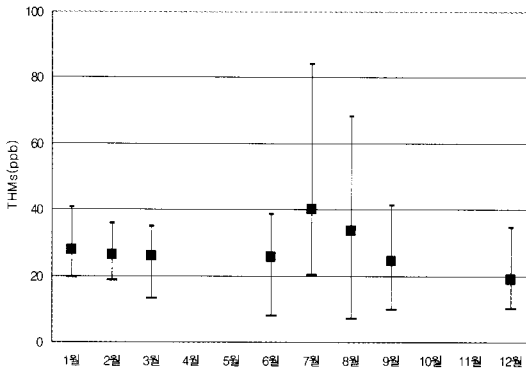


Fig. 2. 한강수계의 2003년 월별 THMs 발생현황(4, 5, 10, 11월은 측정되지 않음).

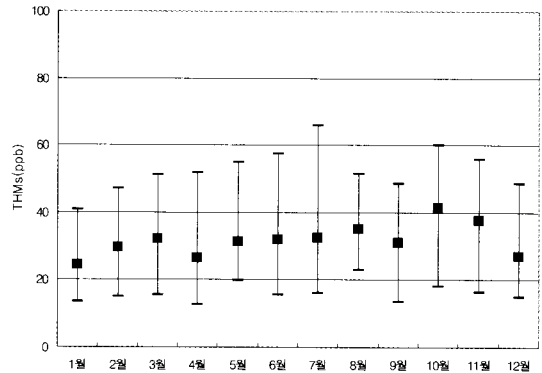


Fig. 4. 낙동강수계의 2003년 월별 THMs 발생현황.

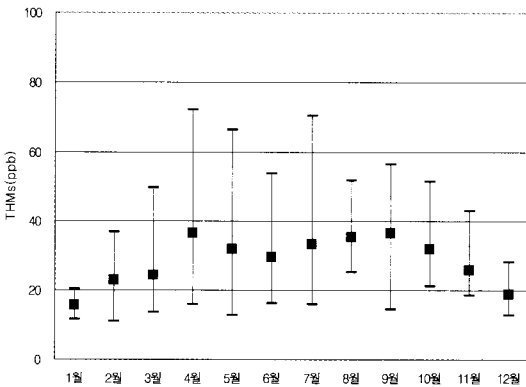


Fig. 3. 금강·섬진강수계의 2003년 월별 THMs 발생현황.

현황을 최대, 평균, 최소값의 분포로 나타낸 것이다. 계절별로는 동절기와 봄에 낮은 농도를 보였으며, 하절기(7월)에 가장 높은 농도를 나타내었다. 가장 높은 최대농도는 7월의 84.1 $\mu\text{g/L}$ 이었으며, 가장 낮은 최대농도값은 12월의 34.5 $\mu\text{g/L}$ 로 조사되어 동절기의 발생농도는 하절기의 41%로 조사되었다.

Fig. 3은 금강·섬진강수계 9개 정수장의 THMs 월별 발생현황을 나타낸다. 4월의 경우 3월에 비하여 급격히 상승하여 연중 가장 높은 값을 나타냈는데, 이는 하천을 상수원으로 하는 경우 봄철 갈수기에 유기오염물질 유입으로 인한 암모니아성 질소 농도의 상승 등에 기인한 것으로 추정된다. 원수중에 암모니아성 질소가 높을 경우는 암모니아성 질소 제거를 위하여 과량의 염소주입을 이용한 파과점염소처리를 실시하며, 이 경우 소독부산물의 농도가 높아질 수 있다.

호소수를 상수원으로 하는 경우는 상수원에서의 전도 현상 및 조류의 발생 등에 기인하는 것으로 생각된다. 가장 높은 최대농도는 4월의 72.1 $\mu\text{g/L}$ 이었으며, 가장 낮은 최대농도는 1월의 20.3 $\mu\text{g/L}$ 로 나타나, 겨울철의 발생농도는 봄과 여름철 발생농도의 약 28%로 조사되었다. 금강·섬진강수계의 경우 동절기에는 전반적으로 낮은 소독부산물 농도를 나타내나 원수의 수질이 악화되는 봄철에 소독부산물의 농도가 급증하는 것으로 조사되어 특히 봄과 여름에 소독부산물 제거를 위한 대책이 더 필요하다.

Fig. 4는 낙동강수계 9개 정수장의 THMs 월별 발생현황을 나타낸다. 한강수계와 동일하게 7월에 가장 높은 값을 나타내었으며, 동절기에는 발생농도가 줄어들었다. 가장 높은 최대농도는 7월의 65.7 $\mu\text{g/L}$ 이었으며, 가장 낮은 최대농도는 1월의 40.8 $\mu\text{g/L}$ 로 조사되어 다른 수계에 비하여 상대적으로 하절기와 동절기의 발생농도 값에 차이가 적었다. 낙동강수계의 최대 발생농도는 다른 수계보다 낮았으나 전반적으로 최대발생농도는 연중 40 $\mu\text{g/L}$ 이상으로 수계중에서 가장 높았다.

계절별 THMs의 발생현황을 수계별로 고찰한 결과 공통적으로 봄이나 여름의 발생농도가 겨울철에 비하여 높았으며, 이는 다른 연구결과와도 유사하다(Kawamura, 2000). 따라서 겨울철보다는 봄철이나 여름철에 THMs의 발생농도를 저감시키기 위한 대책이 더 필요한 실정이다. 소독부산물의 농도를 낮추기 위해서는 전구물질인 NOM의 제거율을 높여 대응하는 방안, 염소투입지점을 변경하는 방안, 발생된 소독부산물을 흡착제거하는 방안 등이 있으며 발생된

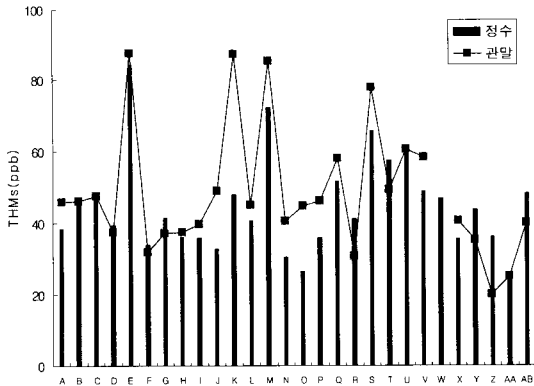


Fig. 5. 정수장과 관말 수도꼭지에서의 THMs 발생현황(최대발생농도 기준이며 M,W는 관말에서 측정되지 않음).

소독부산물을 제거하기 위해서는 활성탄흡착공정이 매우 유용하게 사용될 수 있다(Singer 등, 1999).

Fig. 5는 정수장에서 채수한 시료와 최종 관말 수도꼭지에서 채수한 시료의 THMs에 대한 연중 최대발생농도를 비교한 것이다. 9개 정수장은 수도꼭지에서의 THMs 농도가 정수장에서의 THMs 농도보다 낮았으나, 대부분은 수도꼭지에서의 검출농도가 높았으며, 특히 K 정수장의 경우는 수도꼭지에서의 THMs 농도가 정수장에서의 검출농도보다 최대 83% 증가한 것으로 조사되었다. 따라서 최종 관말의 수도꼭지에서 소독부산물에 대한 수질기준을 준수하기 위해서는 정수장에서의 소독부산물 농도가 법적 수질기준보다 훨씬 낮은 수준으로 유지관리 되어야 한다. 한편, 관말에서의 소독부산물농도 증가 정도는 관내 체류시간 등 지리적 요인에 따라 달라질 수 있으므로 정수장간에 획일적인 비교는 어려운 실정이다.

3.2. HAA₅ 발생현황

수계별 HAA₅ 발생현황은 Table 7과 같으며, Fig. 6는 조사대상 28개 정수장에 대한 HAA₅의 최대, 평균, 최소값의 분포를 나타내고 있다. 모든 수계에서 HAA₅의 평균발생량은 30 μ g/L 미만으로 나타났다. 최대 발생농도의 경우도 모두 법적 수질기준보다 낮은 농도를 나타냈다. 한강수계의 경우는 전반적으로 다른 수계의 정수장에 비해 낮은 농도로 검출되었으나, 다른 수계의 경우 특정시기에 매우 높은 값을 나타내어 소독부산물 발생 농도 저감을 위한 대책이 필요하다. 특히 금강수계의 M정수장과 낙동강수계의

Table 7. 수계별 HAA₅ 발생현황

수계	HAA ₅ 농도(μ g/L)		
	최대	최소	평균
한강	56.8	8.1	26.3
금강 · 섬진강	88.2	3.8	27.4
낙동강	90.8	4.1	26.3

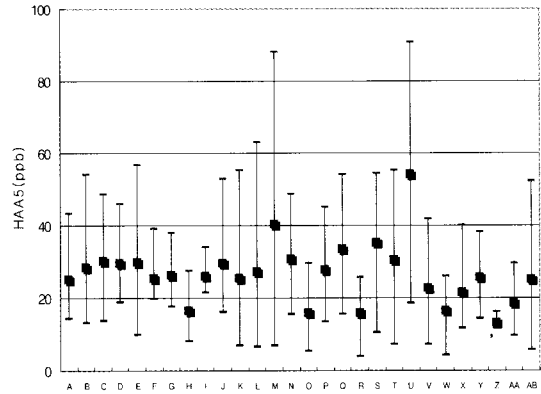


Fig. 6. 국내 정수장의 HAA₅ 발생현황.

*범례: 한강수계정수장(A-I), 금강 · 섬진강수계정수장(J-R), 낙동강수계정수장(S-AA)

U정수장은 검출농도가 다른 정수장에 비하여 매우 높은 것으로 조사되었으며, 이를 개선하기 위한 종합적인 대책이 요구된다. M정수장의 경우는 THMs의 농도도 매우 높은 것으로 조사되어 전반적으로 소독부산물의 농도가 높은 것으로 판명되었다. 이에 대한 정수처리 대책으로 2003년 하반기에 M정수장은 기존의 모래 여과지를 입상활성탄 여과지로 교체하였으며, 이후 매우 낮은 농도의 소독부산물이 검출되고 있다(강병수 등, 2004).

Fig. 7은 한강수계 9개 정수장의 HAA₅ 월별 발생현황을 최대, 평균, 최소값의 분포로 나타낸 것이다. 그래프상에서 상단의 값은 최고값, 하단의 값은 최소값을 나타내며 중간의 값은 평균값을 나타낸다. 계절별로는 하절기(7월)에 가장 높은 농도를 나타내었다. 가장 높은 최대농도는 7월의 56.8 μ g/L이었으며, 가장 낮은 최대농도값은 2월의 36.6 μ g/L로 조사되어 전반적으로 하절기의 발생농도가 동절기 보다 높은 것으로 조사되었다. 한편, Fig. 8은 금강 · 섬진강수계 9개 정수장의 HAA₅ 월별 발생현황을 나타낸다. THMs의 경우와 마찬가지로 4월의 경우 3월에 비하여 급격히

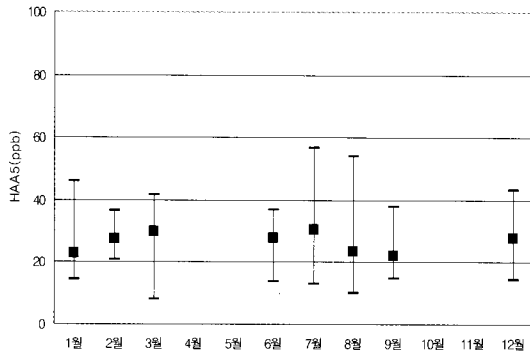


Fig. 7. 한강수계의 2003년 월별 HAA₅ 발생현황(4, 5, 10, 11월은 측정되지 않음).

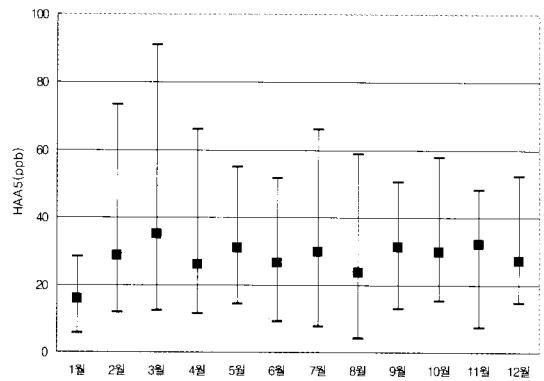


Fig. 9. 낙동강수계의 2003년 월별 HAA₅ 발생현황.

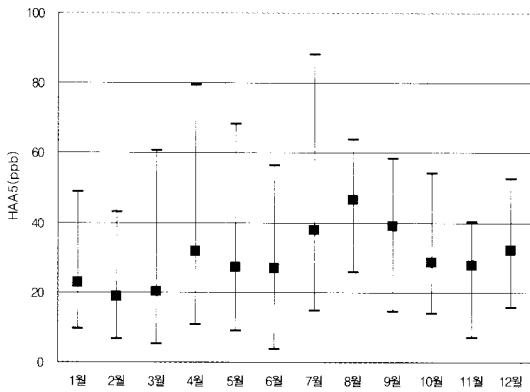


Fig. 8. 금강·섬진강수계의 2003년 월별 HAA₅ 발생현황.

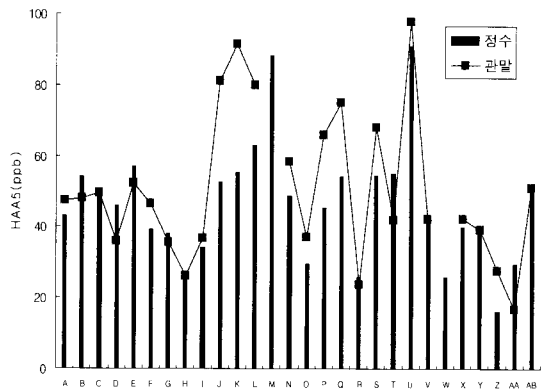


Fig. 10. 정수장과 관말 수도꼭지 HAA₅ 발생현황(최대발생농도 기준이며 M, W는 관말에서 측정되지 않음).

상승하였는데, 이는 원수중에 존재하는 암모니아성질소 등의 물질을 제거하기 위한 파괴점염소처리 등에 기인하는 것으로 생각된다. THMs의 가장 높은 최대 농도는 4월에 발생하는데 비하여 HAA₅는 7월에 발생하는 것으로 조사되어 THMs와 HAA₅의 발생농도 경향이 전반적으로는 유사하나 일치하지는 않는 것으로 조사되었다.

Fig. 9는 낙동강수계 9개 정수장의 HAA₅ 월별 발생현황을 나타낸다. 낙동강수계의 경우는 2월과 3월에 특히 높은 농도를 나타내었는데 이는 U정수장에서 발생한 것으로 원수의 수질특성에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 10은 정수장 시료와 최장 관말 시료수의 년중 HAA₅ 최대 농도값을 비교한 것이다. 관말에서의 HAA₅는 정수장 시료수와 비교하여 최대 73% 증가하는 것으로 조사되었다. 따라서 HAA₅의 경우에도

THMs의 경우와 마찬가지로 관말 수도꼭지에서 수질 기준을 준수하기 위해서는 정수장에서 법적 수질기준보다 훨씬 낮은 농도로 소독부산물 농도를 관리하여야 한다.

3.3. CH 발생현황

Table 8은 수계별 정수장의 CH 발생현황이며, Fig. 11은 국내정수장에서 발생한 CH의 최대, 평균, 최소 농도현황이다. 평균농도는 10 μ g/L 이하로 법적 수질기준의 30% 미만으로 검출되었으나, 금강·섬진강수계 M정수장의 최대 발생농도값은 거의 법적 수질기준(30 μ g/L)에 육박하는 것으로 조사되었다. 다행히 2003년말부터 M정수장은 기존 여과지를 활성탄여과지로 교체하여 2004년부터는 CH의 검출농도가 매우 낮아진 것으로 조사되었다.

Fig. 12은 월별 CH의 최대, 평균, 최소 발생농도현

Table 8. 수계별 CH 발생현황

수계	CH 농도($\mu\text{g/L}$)		
	최대	최소	평균
한강	21.2	2.7	9.5
금강·섬진강	29.5	1.5	6.0
낙동강	20.1	0.5	6.7

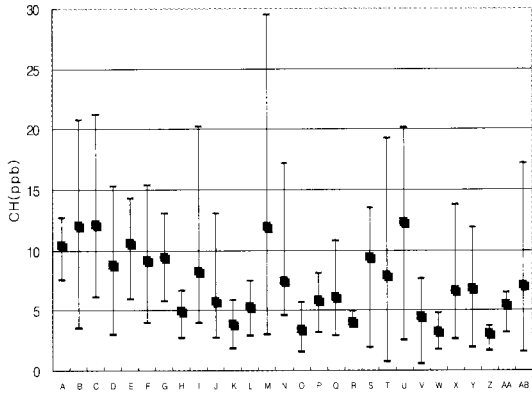


Fig. 11. 국내 정수장의 CH 발생현황.
*범례: 한강수계정수장(A-I), 금강·섬진강수계정수장(J-R), 낙동강수계정수장(S-AB)

황을 나타낸다. 4월에 M정수장에서 최대 농도를 나타냈는데 이는 금강하류에 위치한 M정수장의 특성상 봄에 암모니아성 질소가 높아 염소투입률이 높아짐으로써 생기는 현상이라고 생각된다. CH의 월별 발생현황도 THMs나 HAA₅의 경우와 유사하게 봄과 여름철의 발생량이 겨울철에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 이는 CH의 경우에도 발생농도가 원수의 수질 변화와 수온 등의 물리화학적 요소에 의해 많은 영향을 받는 것을 의미하는 것으로 판단된다.

한편 Fig. 13은 정수장과 관말수도꼭지에서 채취한 시료에 대한 CH의 년중 최대발생농도에 대한 분석 자료이다. 6개소에서는 관말에서의 농도가 수도꼭지에서의 농도보다 낮게 검출되었지만 O정수장의 경우는 146% 증가되는 값을 보이기도 하였다. 관말에서의 증가율은 급배수관망에서의 관로 조건에 따라 많은 변화를 나타내는 것으로 조사되었다.

3.4. THMs와 HAA₅의 발생비

Fig. 14는 조사대상 28 정수장의 정수지에서 채수한 시료를 대상으로 분석한 THMs와 HAA₅의 발생비

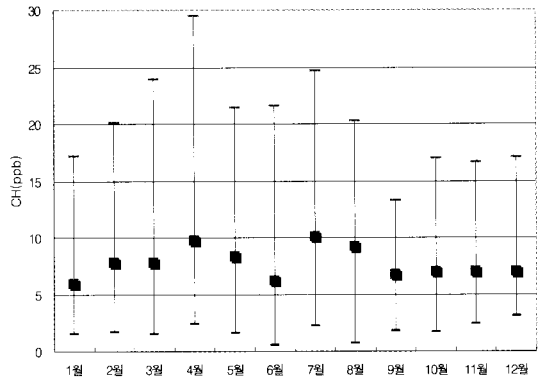


Fig. 12. 2003년 월별 CH 발생현황.

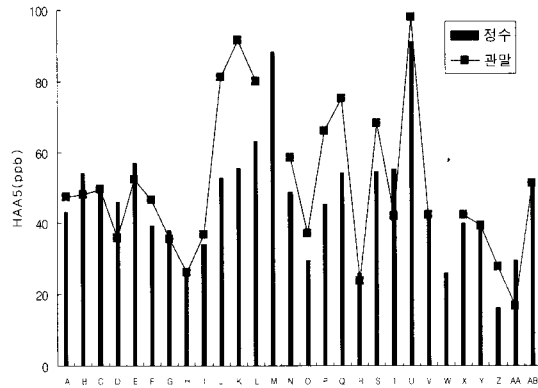


Fig. 13. 정수장과 관말 수도꼭지 CH 발생현황(최대발생농도 기준이며 M, W는 관말에서 측정되지 않음).

율(평균농도기준)을 나타낸다. 12개소는 HAA₅의 발생농도가 THMs의 발생농도 보다 높은 것으로 조사되었으며, 16개소는 THMs 발생농도가 HAA₅의 발생농도보다 상대적으로 높은 것으로 조사되었다. 금강·섬진강수계는 상대적으로 HAA₅의 발생량이 THMs보다 높은 것으로 조사되었으며, 낙동강수계의 경우는 반대의 현상이 나타났다. 전체적으로는 THMs/HAA₅의 비율이 1.07로서 THMs의 발생량이 HAA₅의 발생량보다 다소 높은 것으로 나타났으나 큰 차이는 없는 것으로 조사되었다.

미국의 경우는 THMs 발생농도가 HAA₅의 발생농도보다 약 1.45배 높게 검출된 것으로 보고되었으나 (Singer, 1999), 국내의 경우는 미국의 경우보다 낮은 1.07로 조사되었는데 이는 원수의 pH 및 유기물 특성 등을 포함하는 수질특성에 기인하는 것으로 생각된다. 미국의 경우는 원수수질특성상 경도가 높아 많

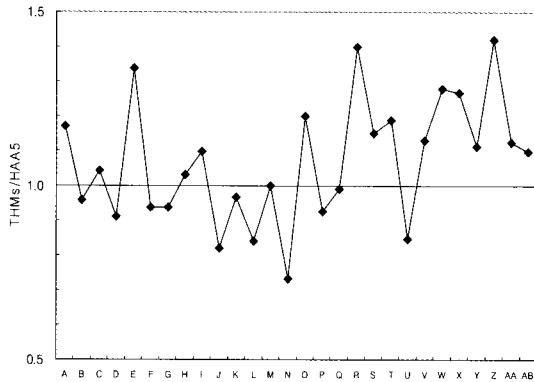


Fig. 14. 정수장별 THMs/HAA₅ 발생농도 비율(평균농도기준).

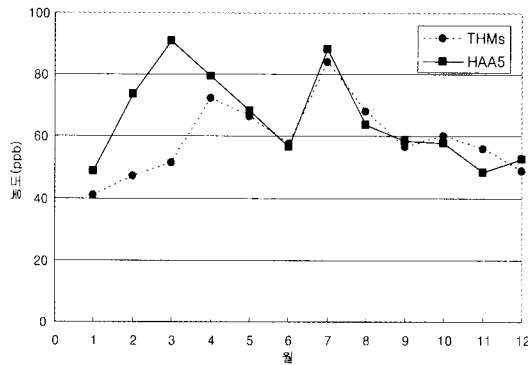


Fig. 15. 2003년 월별 THMs와 HAA₅의 최대 발생농도 비교.

은 정수장에서 연수화공정을 도입하고 있으며, 이 경우 정수의 pH가 대부분 7.5를 초과한다. 한편 국내의 경우는 조사 대상 28개 전정수장에서 연평균 정수 pH는 7.5 이하로 조사되었으며, 특히 낙동강수계의 경우는 연평균 pH가 6.8~7.1로 대부분의 경우 약산성을 나타내었다. 따라서 이러한 원수의 pH 특성이 미국과 다른 결과를 나타내는 요인중의 하나라고 생각된다. 또한, 최근의 연구결과(Kim 등, 2005; 오희경 등, 2003)에 의하면 NOM의 구성 특성이 소독부산물의 형성에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 조사되었다. THMFPP는 소수성 NOM의 비율이 높은 곳에서 보다 많이 생성되었으며 HAAFP의 경우는 친수성 NOM의 비율이 높을 경우 상대적으로 생성률이 큰 것으로 조사되었다. 따라서 수계별로 원수의 NOM 구성비율과 THMs/HAA₅와의 발생비에는 깊은 상관관계가 있을 것으로 생각되며, 이를 규명하기 위한 보다 많은 연구가 필요하다.

Fig. 15는 28개 조사대상 정수장의 월별 THMs과 HAA₅의 최대 발생농도를 나타낸다. 전체적인 추이를 고려할 경우는 비슷한 발생양상을 나타내나, 2~3월 사이에는 다른 양상을 나타내고 있다. 이는 해당수계의 원수수질에 기인하는 것으로 생각된다.

4. 결 론

전국의 28개 정수장을 대상으로 대표적인 소독부산물인 THMs, HAA₅ 및 CH에 대한 발생특성을 조사하였으며, 주요사항은 아래와 같다.

1. THMs의 발생농도는 최대 84.1 μ g/L, 최소 6.9 μ g/L였으며, 평균 농도는 27.8 μ g/L로 조사되었다. 평균발생농도는 수계별로는 큰 차이를 보이지 않았으나 한강수계의 일부 정수장에서 특정시기에 높은 수치를 나타내기도 하였다. 계절적으로는 동절기의 THMs 발생농도가 하절기 발생농도의 약 48.5%에 해당되어 하절기에 상대적으로 소독부산물 제어를 위해 많은 노력이 요구된다.

2. HAA₅의 발생농도는 최대 90.8 μ g/L, 최소 3.8 μ g/L였으며, 평균 농도는 26.7 μ g/L로 조사되었다. 수계별로는 금강하류와 낙동강수계에서 취수하는 정수장에서 다른 수계보다 상대적으로 높게 검출되었다. 계절적으로는 동절기의 HAA₅ 발생농도가 하절기 발생농도의 약 55%에 해당되어 THMs와 마찬가지로 하절기에 상대적으로 소독부산물 제어를 위한 많은 노력이 요구된다.

3. CH의 발생농도는 최대 29.5 μ g/L, 최소 0.5 μ g/L였으며, 평균 농도는 7.4 μ g/L로 조사되었다. 수계별로는 금강하류에서 취수하는 정수장에서 상대적으로 다른 수계보다 높게 검출되었다.

4. 소독부산물의 농도는 일반적으로 관내 체류시간 증가와 더불어 상승하는 경우가 많으므로, 수도꼭지에서 소독부산물과 관련된 수질기준을 충족시키기 위해서는 정수장에서 법적 수질기준보다 훨씬 낮은 수준으로 소독부산물 농도를 유지하여야 한다.

5. THMs/HAA₅의 비율은 1.07로 조사되었으며, 이는 미국의 경우보다 다소 낮다. 이러한 차이는 NOM의 특성, 원수의 pH 등을 포함한 수질특성에 기인하는 것으로 생각되며 보다 정확한 원인규명을

위해서는 보다 깊이 있는 연구가 요구된다.

참고문헌

- 강병수, 장기환, 강필구, 조주영, 유정희 (2004) 실공정에서의 GAC F/A 운영 효과 분석, *대한환경공학회 2004 춘계 학술연구발표회*, pp. 769.
- 오회경, 김현철, 구윤희, 유명진, 박현, 장현성 (2003) 정수장에서 NOM 특성화 및 소독부산물 생성능 평가, *대한환경공학회지*, 25(10), pp. 1252-1257.
- Clark, R. and Boutin, B. (2001) *Controlling Disinfection By-Products and Microbial Contaminants in Drinking Water*, USEPA, Ohio, pp. 1-1 ~ 3-26.
- Haas, C. (1999) Disinfection, In *Water Quality and Treatment*, pp. 14.1-14.3.
- Kawamura, S. (2000) *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities*, 2nd Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, pp. 543-552.
- Kim, H. Lee, S. Byun, S. and Yu, M. (2005) Application of the improved rapid mixing for enhanced removal of dissolved organic matter and the DBPFPs control, In *Proceedings of IWA Particle Separation 2005*, Seoul, pp. 175-182.
- Singer, P. and Reckhow, D. (1999) Chemical Oxidation, In *Water Quality and Treatment*, pp. 12.29-12.46
- Singer, P. (1999) *Formation and Control of Disinfection By-Products in Drinking Water*, AWWA, pp. 1-48.
- USEPA (2004) www.epa.gov/safewater/mcl.html
- Weinberg, H. (1999) Disinfection by-products in drinking water: The analytical challenge, *Analytical Chemistry* (71), pp. 801A-808A.
- 日本水道協會 (1998) *水道維持管理指針*, pp. 1305-1309.
- 日本水道協會 (2004) *水道法關係法令集*, pp. 125-126.