

소독부산물 최소화를 위한 운영조건 연구

Operating Conditions for Minimization of DBPs (Disinfection by-Products) in Drinking Water Supply System

신형순* · 최필권 · 김종수 · 최일우 · 김상훈 · 김태현 ·
이경희 · 이수문 · 장은아 · 정연훈 · 김주열

Hyung-Soon Shin* · Phil-Kweon Choi · Jong-Su Kim · Ill-Woo Choi · Sang-Hoon Kim · Tae-Hyun Kim ·
Kyung-Hee Lee · Soo-Moon Lee · Eun-Ah Jang · Yeon-Hoon Jung · Jung-Yeol Kim

경기도 보건환경연구원

(2005년 2월 21일 논문 접수; 2005년 5월 25일 최종 수정논문 채택)

Abstract

This study was carried out to propose the managerial improvement of the purification plants and the distribution facilities which can minimize the formation of disinfection by-products in drinking water distribution system. The disinfection by-products were highly created in the water treatment plant that the organic matters were high and the chlorine dosage was excessive. The concentration of DBPs was shown the highest value in August and the lowest value in December, because of temperature and pre-chlorine dosage effect. From the result of tracer test, the travel time from the treatment plant to the end of pipeline was around 3-4 days in summer, 5-6 days in winter, respectively, and the DBPs concentration of the reservoir(end of pipe) was 2-3 times higher than that of the beginning point. The improvement of the chlorination process and structural reformation of distribution facility was demanded to minimize the DBPs increase from purification plant to the end of pipe.

Key words: DBPs(disinfection by-products), tracer test, travel time, water distribution system

주제어: 소독부산물, 추적자실험, 도달시간, 배수계통

1. 서 론

수돗물의 염소소독은 원수 내 암모니아성 질소 및 여러 유기·무기물을 산화분해 시킬 뿐만 아니라 정

수가 배·급수계통을 통해 가정까지 공급되는 과정에서 수인성 질병의 원인이 될 수 있는 세균 및 병원성 미생물을 사멸시키기 위해 이용되는 가장 보편적인 소독방식이다. 그러나 단점으로 여러 유기 오염물과 유리염소가 반응하여 유해한 소독부산물(DBPs:

*Corresponding author Tel: +82-31-250-2599, FAX : +82-31-250-2652, E-mail: shinhs04@kg21.net (Shin, H.S.)

disinfection by products)이 생성된다는 점이다. Table 1은 현재 각국에서 규제하고 있는 소독부산물의 종류 및 규제기준을 나타내었다. 우리나라는 2004년 7월부터 먹는물 수질기준에 소독부산물 항목을 8가지로 확대하였을 뿐만 아니라, 시설용량 10만m³/d 미만의 정수장까지 소독부산물 기준을 준수하도록 하고 있다.

소독부산물의 전구물질인 천연유기물질(NOM: natural organic matters)은 부식질(humic substance)과 조류의 세포외 효소 등으로 구성되는데, 기존의 표준 정수법에서는 거의 제거되지 않는 것으로 알려져 있다(Chang et al., 2001). 근래 상수원 수질이 지속적으로 위협받고 있는 현실에서 NOM 증가에 따라 소독부산물이 다량 발생할 우려가 있다. 또한, 병원성 미생물에 대한 우려 때문에 *Virus*(02.8)와 *Giardia*(04.7)에 대한 제거기준이 각각 4-log(99.99%)와 3-log(99.9%)로 강화되면서 과(過)염소투입에 따른 소독부산물 증가 역시 우려되고 있는 실정이다. 즉, 상수도 사업자는 강화된 소독규정을 준수하여야 하는 한편 소독부산물을 기준 이내로 유지해야 하는 어려움을 겪고 있는 것이다. 본 연구원에서 정기적으로 경기도내 수돗물에 대한 소독부산물 실험을 실시한 결과 일부항목에서 정수장보다 직결급수전 및 대규모 공동주택의 저수조에서 상당량 증가하여 공급되고 있음을 알 수 있었다.

따라서 본 연구의 목적은 다음과 같다. 첫째, 경기

도내 정수장의 염소투입 현황과 정수장 및 배수계통에서 소독부산물 발생현황을 파악하여 증감하는 정도 및 빈도를 파악하고 그 원인을 규명하고자 하였다. 둘째, 정수장에서 공급한 정수가 배수지 및 가정의 수도꼭지까지 도달하는 시간을 파악한 후 도달시간에 따른 소독부산물의 거동을 조사하고자 하였다.

이상의 결과를 토대로 소독부산물을 최소화하기 위해 정수장 운영의 적정방안과 배·급수시설의 관리 개선 방향을 모색하여 국민에게 신뢰받는 수돗물 공급의 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 도내 정수장 소독현황 파악 실험

경기도내 24개 지역을 선정하여 정수장, 직결급수전(수도꼭지)과 저수조에 대하여 잔류염소 및 소독부산물의 발생 경향을 파악하고자 하였다. 정수장에서 공급되는 관망을 따라 직결급수전과 저수조를 수 개 선정하여 정수장에서 공급한 물이 수도꼭지와 저수조에서 어떠한 거동을 보이는지 조사하였다. 이때 각 지역의 시료 채취는 동일날짜에 실시하여 결과의 연계성을 유지하고자 하였으나 배수계통에 도달하는 시간은 고려하지 못하였다.

2.2. 잔류염소농도별 소독부산물 발생

1개 정수장의 동일 여과수를 대상으로 잔류염소농

Table 1. Classification of DBPs and drinking water regulations

DBP Class	Individual DBPs	Structure	Standards (µg/L)			
			KOR.	USA	JAP.	WHO
THMs (Trihalomethanes)	Chloroform	CHCl ₃	0		60	200
	Bromodichloromethane	CHCl ₂ Br	100	-	30	60
	Dibromochloromethane	CHClBr ₂		80	100	100
	Bromoform	CHBr ₃			9	100
HAAs (Haloaceticacids)	Dichloroacetic acid	CHCl ₂ COOH	100	60	(40)	50 ^(P)
	Trichloroacetic acid	CCl ₃ COOH			(300)	100 ^(P)
HANs (Haloacetonitriles)	Trichloroacetonitrile	CCl ₃ C≡N	4	-	-	1 ^(P)
	Dichloroacetonitrile	CHCl ₂ C≡N	90	-	(80)	90 ^(P)
	Dibromoacetonitrile	CHBr ₂ C≡N	100	-	-	100 ^(P)
Other DBPs	Chloral Hydrate	CCl ₃ CH(OH) ₂	30	-	(30)	10 ^(P)
	1,2-Dibromo-3-chloropropane	C ₃ H ₅ Br ₂ Cl	3	-	-	1 ^(P)

*(): Supervisory items, P: Provisional guideline value

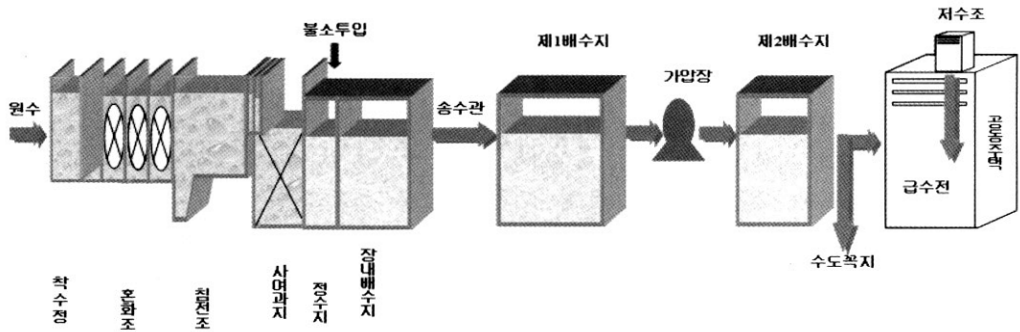


Fig. 1. Schematic diagram of treatment process and distribution system.

도 별 시간에 따른 소독부산물의 증감을 비교하고자 잔류염소농도를 각각 0.6, 1.0, 1.8mg/L로 구분하여 11일 동안 실험하였다. 여과수의 특성은 pH 7.6, TOC 1.18mg/L, 탁도는 0.19NTU이었고, 실험은 20°C 항온실에서 수행하여 온도의 영향을 배제하고자 하였다.

2.3. 추적자실험 및 배·급수계통별 소독부산물 조사

실험을 수행한 정수장 및 배급수계통의 모식도는 Fig. 1과 같다. 정수처리는 표준정수법이고, 최원격 배수관망을 선정하여 급수말단까지 도달하는 시간을 확인하고자 하였다. 배수관망은 크게 제1배수지, 가압장, 제2배수지로 구성되어 있으며 제2배수지에서 급수말단인 직결급수전으로, 공동주택의 경우 저수조를 통과 후 가정의 수도꼭지로 공급되게 된다. 추적자 실험은 step-input 방식으로 NaF를 분말상태로 정수지에 투입하여 장내배수지 유출수 농도가 1.2 mg/L as F⁻이 되도록 공급한 후 배수계통을 따라 불소 농도를 측정하여 도달시간을 확인하였다. 추적자실험은 계절변화에 따른 차이점을 조사하고자 6월부터 12월까지 2개월 간격으로 4회 실시하였다.

2.4. 시료 채취 및 분석방법

유리잔류염소와 불소 등은 현장에서 실측하였고, 그 외의 소독부산물은 현장에서 보존한 후 실험실에서 분석하였다. 시료보존방법은 용량 300mL의 BOD 병에 HAAs(haloaceticacids)는 NH₄Cl 소량, THMs(trihalomethanes)과 HANs(haloacetonitriles), CH

Table 2. Analytical methods

Item	Method
THMs	먹는물수질공정시험방법
HAAs	EPA 552.3
HANs, CH	EPA 551
Free chlorine residual	DPD colorimetric
Fluoride	SPANDS
TOC	UV-Persulfate oxidation
Other item	먹는물수질공정시험방법

(chloral Hydrate)는 (1+10) H₃PO₄와 2% 아비산나트륨 용액을 각각 1mL씩 첨가하여 유리잔류염소를 제거하고 소독부산물을 고정하였다. 각 항목의 분석 방법은 Table 2에 나타난 것과 같으며 특히 HAAs, HANs, CH 분석은 MTBE(methyl tertiary butyl ether)를 이용하여 액체-액체추출법을 이용하므로 Internal standard와 대체표준물을 첨가하여 내부표정과 회수율을 확인하였다.

3. 결 과

3.1. 도내 정수장 소독현황

Fig. 2(a)는 경기도 내 24개 정수장에서 송수하는 유리잔류염소 농도가 높은 순으로 내림차순으로 나타난 것으로 각 정수장 별 급수전과 저수조 통과 후의 유리잔류염소를 동시에 표시하였다. 15개 정수장(65%)은 유리잔류염소 농도를 0.8-1.2mg/L로 유지하였으며, 1.3-2.1, 0.5-0.8mg/L로 유지하는 곳은 각각 5곳, 4곳으로 나타나 상당수 정수장은 1.0 ± 0.2 mg/L로 유지하는 것으로 파악되었다. 또한 대부분

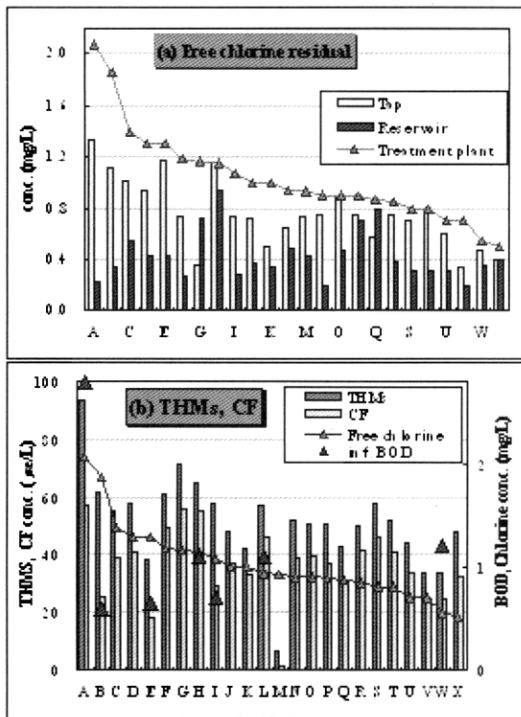


Fig. 2. Variation of free chlorine residual in the distribution system and THMs, chloroform in the water treatment plants.

지역에서 유리잔류염소는 정수장>직결급수전>저수조 순으로 높게 유지되어 관 말단으로 갈수록 소모됨을 알 수 있었다. 이는 관망에서 정수내의 유기물, 관벽의 생물막 등과 지속적으로 반응하며 감소하는 것으로 사료된다. 주목할 점은 저수조에서의 잔류염소는 정수장의 잔류염소와는 관계없이 0.2-0.5mg/L로 유지되었는데, 이는 각 정수장에서 관말의 유리잔류염소를 0.2mg/L 이상 유지하기 위해 경험적으로 잔류염소농도를 정하기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 배수관망이 복잡하고 긴 지역일수록 관말의 잔류염소를 만족시키기 위해 정수장에서 고농도를 주입하게 되고 이런 지역일수록 정수장 인근 지역에서의 염소냄새 민원이 발생할 우려가 있으므로 유의해야 할 것이다.

Fig. 2(b)는 유리잔류염소가 높은 순으로 배열한 정수장에서 THMs과 chloroform(이하 CF)의 농도를 나타낸 것으로 THMs과 CF의 생성은 염소주입농도와 원수수질이 지배적임을 예측할 수 있다. 즉, THMs이 가장 높게 발생한 A정수장의 경우 수질기

준인 100µg/L에 육박하는 94µg/L이 생성되었는데 잔류염소가 비슷한 B정수장과 비교해보면 잔류염소는 2.1과 1.9mg/L로 거의 차이가 없지만 THMs 생성은 A정수장이 1.5배 더 높았다. 이는 유입원수의 BOD가 2.8과 0.6mg/L로 A정수장의 원수 수질이 불량하여 동일한 염소주입조건에서 더 높은 THMs이 생성된 것으로 사료된다.

Fig. 3은 24개 지역별 정수장, 수도꼭지, 저수조의 소독부산물을 나타낸 것이다. Fig. 3(a), (b)는 THMs와 CF를 나타낸 것으로 24개 지역 중 각각 17, 18개 지역에서 정수장보다 수도꼭지 또는 저수조에서 더 높게 검출되었다. THMs의 경우 평균적인 농도는 40-70µg/L로 수질기준의 1/2 이상으로 높게 검출되어 THMs 저감대책을 수립해야 할 것으로 사료된다. HAAs는 D, G, I 세 지역에서 42-47µg/L로 기준의 1/2 수준으로 높게 나타났고, 나머지 지역은 1/3 수준이었으며 22개 지역에서 정수장보다 배수관망에서 더 증가하여 공급되고 있었다. CH, TCAN(trichloroacetonitrile), DCAN(dichloroacetonitrile) 경우는 모든 지역에서 정수장보다 배수구역에서 더 높게 공급되고 있었고, CH는 5개 지역에서 10µg/L 이상(기준의 1/3)으로 검출되었으며, TCAN과 DCAN은 수질기준의 1/4, 1/15로 우려할 만한 수준은 아닌 것으로 파악되었다.

3.2. 잔류염소농도별 소독부산물 발생

Fig. 4는 동일 여과수를 대상으로 잔류염소 농도를 각각 0.6, 1.0, 1.8mg/L로 달리하여 시간변화에 따른 소독부산물의 거동을 나타낸 것이다. 세 조건의 최대 농도를 비교해 볼 경우 모든 항목에 대하여 1.8mg/L로 주입한 경우가 0.6 및 1.0mg/L로 주입한 경우보다 2-3배 더 높게 검출되어 동일한 수질에서도 염소를 높게 투입할수록 소독부산물이 높게 생성되는 결과를 얻었다. 잔류염소를 0.6, 1.0mg/L로 주입한 경우에는 2-3일, 1.8mg/L로 주입한 경우 6일 정도에 잔류염소가 소모되었으며, HANs를 제외한 대부분의 소독부산물은 잔류염소가 0.2mg/L 이상 유지되는 한 지속적으로 증가하였다. 유리잔류염소를 1.8mg/L로 주입한 경우 소독 직 후와 시간 경과 후 최대농도를 비교해보면 THMs과 CF는 6배, HAAs는 3배, HANs는 5배, CH는 18배 증가하는 것으로 나타나 잔류염소

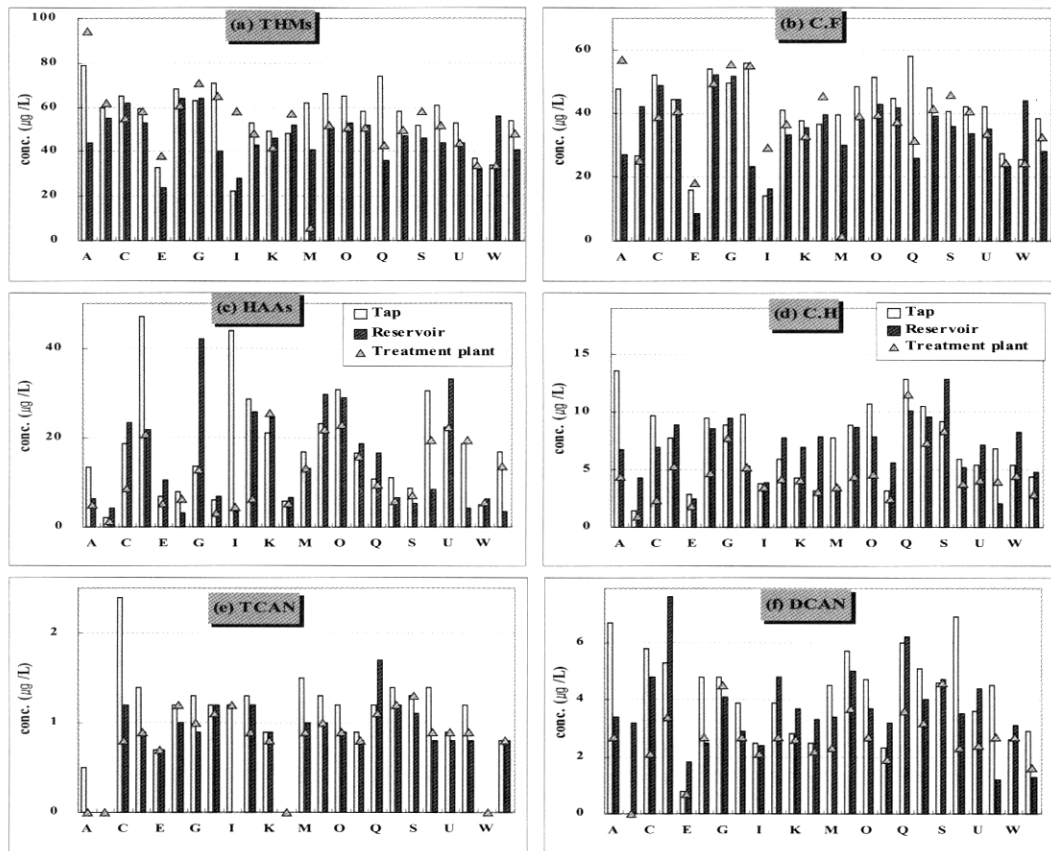


Fig. 3. Changes of various DBPs in drinking water supply system; water treatment plant, tap, reservoir, respectively.

와 전구물질이 존재하면 지속적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 정수장에서는 관말의 유리잔류염소농도를 만족 위해 과염소투입을 지양하고 배수관망의 중간지점에서 염소재투입을 고려해야 할 것이다. 염소재투입은 소독부산물 최소화 및 소독제량 절감효과가 있다는 여러 연구자들이 주장과 일치한다(윤재홍 등 1998, 주대성 등 1998). 또한, 실제 정수장에서 공급한 수도물이 얼마 만에 수요자에게 공급되는지를 파악해야하고, 소독능을 유지하면서 소독부산물이 최소화되는 조건을 연구해야 한다.

3.3. 추적자실험 결과 및 배·급수계통에서의 소독부산물 발생 특성

Table 3은 불소를 이용한 추적자 실험 결과이다. 제2배수지에 도달하는 시간은 6월과 10월은 2.2일, 여름인 8월은 1.2일, 12월은 3.5일이 소요되어 계절

별 사용수량에 따라 도달시간에 차이가 발생하였다. 또한 체류시간의 대부분은 관로보다는 정수장내 배수지와 배수구역내 배수지에서 소요되는 것으로 조사되었다. 제2배수지까지의 도달시간은 현장에서 실측할 수 있었으나 제2배수지 내에서의 체류시간 및 그 이후의 저수조에 대한 도달시간은 실측이 불가능하였다. 배수지의 경우 유량조정용량, 비상시 대응용량 및 소화용수량을 고려하여 계획 1일최대급수량의 0.5-1.5일로 설치되어 있으나 실제 현장을 실측한 결과 설계한 것보다 훨씬 긴 체류시간동안 정체하는 것으로 파악되었다. 그 원인은 배수지 운영상 고수위(HWL)는 4.5m, 저수위(LWL)는 2.5m를 기준으로 간헐적으로 펌핑을 하고 또한, 지(池)내 중앙에 1개의 도류벽만 설치되어 있어 단락류(short circuiting)와 dead space가 발생하여 이런 결과가 나온 것으로 사료된다. 따라서 제2배수지에서 최소 1-2일간 체류한다

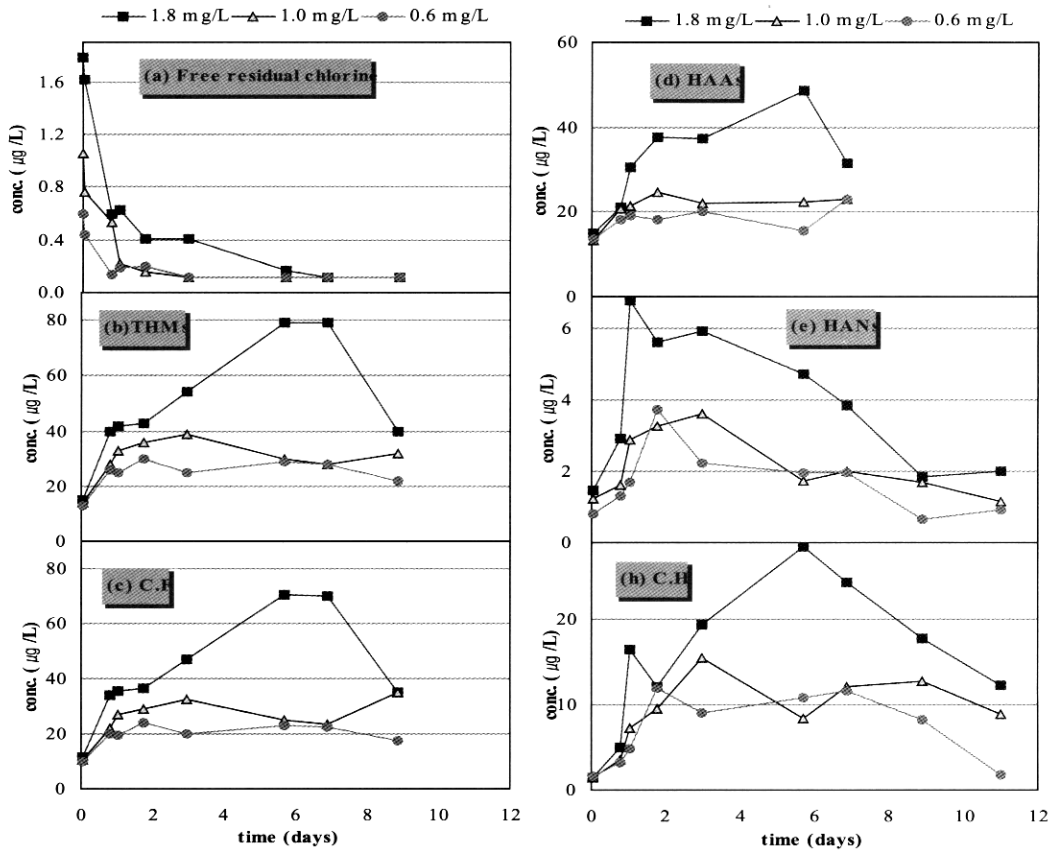


Fig. 4. Effect of free chlorine residual on DBPs concentration according to retention time.

Table 3. The travel time of water supply system according to change of the season (unit : days)

	1st distribute tank	2nd distribute tank	Reservoir (estimated)
June	0.34	2.2	4-5
August	0.52	1.2	3-4
October	0.33	2.2	4-5
December	1.10	3.5	5-6

고 가정하였다. 1999년 '건축법' 개정으로 지하저수조 설치 의무조항이 삭제되었으나, 기존에 설치된 대부분의 공동주택은 지하저수조 및 옥상 저수조를 설치하여 운영되고 있다. 서울시 수도기술연구소(1997)에서 수돗물이 저수조에 체류하는 시간을 실측한 결과 1일 이내로 운영되는 곳은 21%에 불과하였고, 1-2일 사이는 44%, 2-5일로 급수되는 곳도 35%에 해당하여 일본의 0.5일에 비하여 장기간 체류함을 알

수 있다. 따라서 본 실험에서 제2배수지와 저수조에서 체류하는 시간을 각각 1-2일, 1일로 가정할 경우 실제 도민이 음용하는 물은 정수장에서 생산된 지 상당한 시간이 경과한 물이다.

Fig. 5는 도달시간에 따른 소독부산물의 증감을 파악한 6월의 결과이다. 그래프에서 세로영역으로 표시한 것은 정수장, 제2배수지, 저수조에서의 소독부산물을 나타낸 것이다. 제2배수지와 급수말단인 저수조에 도달하는 2.2일과 5일에 대부분의 소독부산물이 증가하였음을 알 수 있다. THMs의 경우 정수장에서 18µg/L이었으나 제2배수지와 저수조에서는 47, 53µg/L로 각각 2.6배, 2.9배 증가하여 공급되고 있었다. CF 역시 3.0배와 3.5배 더 높게 공급되고 있었고, HAAs와 CH는 저수조에서 각각 3.2배와 6.8배 더 증가하여 공급되고 있었다. 즉, 정수장에서 송수할 때에는 수질기준보다 훨씬 낮은 농도로 공급하였

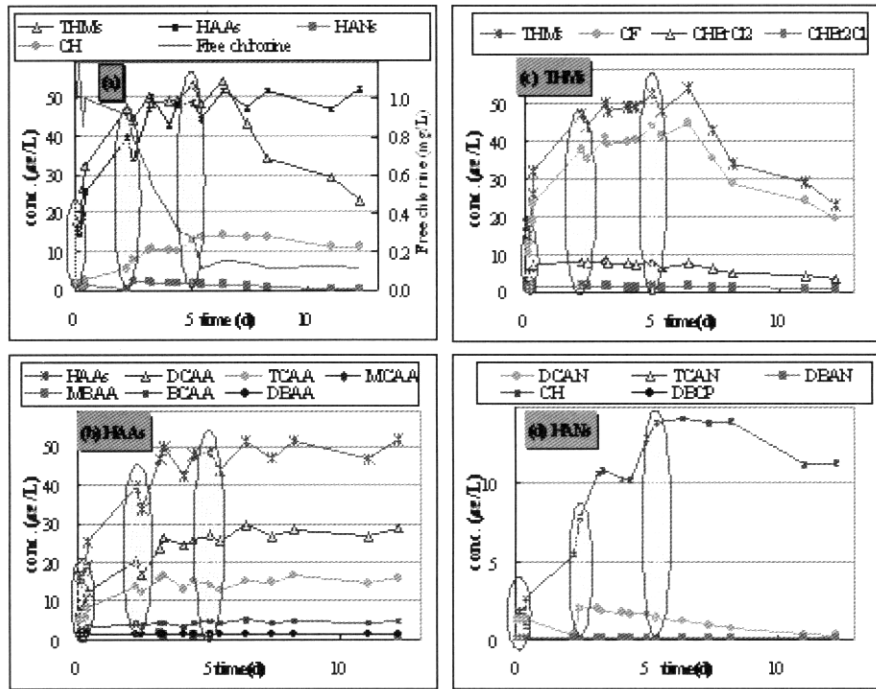


Fig. 5. Effect of the travel time on the DBPs concentration in distribution system:(a) various DBPs, (b) HAAs, (c) THMs, and (d) HANs.

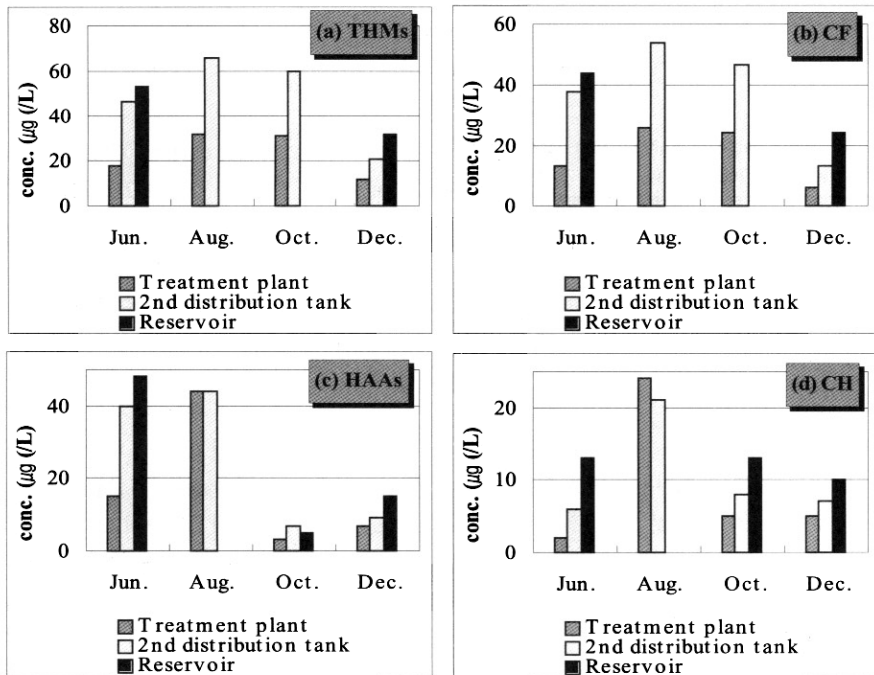


Fig. 6. Summary of the DBPs concentration according to the travel time in distribution system.

으나 배·급수시설을 거치는 과정에서 수질기준의 1/2정도까지 증가되어 급수전으로 공급되고 있었다.

Fig. 6은 도달시간에 따른 소독부산물의 증감을 6월 포함 4회 실시한 실험결과를 요약한 것이다. THMs와 CF는 농도간 차이는 있으나 4회 모두 정수장보다 2-3배 더 높은 농도로 급수되고 있음을 알 수 있다. HAAs와 CH 역시 8월 결과를 제외하고 정수장보다 2배 이상 증가하여 공급되고 있었다. 흥미로운 사실은 4회 모두 여과지 유출수의 TOC는 $1.00 \pm 0.15\text{mg/L}$ 로 거의 일정하였고 잔류염소농도 역시 $1.0 \pm 0.2\text{mg/L}$ 로 일정하였음에도 각 항목별로 8월이 가장 높고, 12월이 가장 낮은 것은 온도의 영향과 전염소주입량 때문인 것으로 사료된다. 이상의 Fig. 5-6의 결과로부터 소독부산물은 잔류염소가 유지되는 한 급수말단까지 지속적으로 2-3배 증가하여 공급됨을 알 수 있었다. 따라서 정수장에서 수질기준 준수뿐만 아니라 배·급수계통에서 장기간 체류하지 않도록 시설 개선을 모색해야 될 것으로 사료된다.

4. 결 론

경기도내 정수장의 염소투입 현황과 정수장 및 배수계통에서 소독부산물 발생현황을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 원수수질이 불량하고 염소투입이 과다한 정수장일수록 소독부산물이 높게 생성되었다. 따라서 정수장에서는 원수 내 전구물질 저감 방안을 모색하고, 여과지 유출수의 전구물질을 모니터링 해야 할 것이다. 또한, 과염소투입을 지양하고 배수관망에서 염소재투입을 모색해야 할 것이다.

2. 소독부산물 각 항목별로 8월이 가장 높고, 12월이 가장 낮은 것은 온도 및 전염소주입량 때문인 것으로 사료된다.

3. 추적자실험 결과 정수장에서 공급한 정수가 관

말(管末) 저수조에 도달하는 시간은 짧게는 3-4일, 길게는 5-6일이 소요되었으며, 대부분의 소독부산물이 정수장보다 2-3배 증가하여 수질기준의 1/2수준으로 급수되고 있었다.

4. 최종 급수구역까지의 도달시간을 최소화하기 위해 시설 및 관리 개선이 요구된다.

(1) 배수관망은 block system으로 배치하여 특정구역의 도달시간이 지나치게 길지 않도록 해야 할 것이다.

(2) 배수지 유입·유출부에 정류벽을 설치하고 수개의 도류벽을 설치하여 plug flow가 되도록 하고, 조를 수 개로 분리하여 월별 사용수량에 따라 사용하지 않는 조는 예비지로 운영하는 등 체류시간 단축방안을 모색해야 할 것이다.

(3) 공동주택 저수조의 경우 저층주택은 직결급수로 급수하고, 고층주택은 저수조 용량을 12시간 이하로 유지할 수 있는 방법을 모색해야 할 것이다.

참고문헌

- 서울시 수도기술연구소 (1997) 저수조 실태조사 및 개선방안 연구.
- 윤계홍, 오정수, 최영송 (1998) 배수관망의 잔류염소 평활화를 위한 최적 재염소 처리, *상하수도학회지*, **12**(2), pp. 90-98.
- 주대성, 박노석, 박희경, 오정우 (1998) 상수관망내 잔류염소농도 분포 예측, *상하수도학회지*, **12**(3), 118-124.
- 환경부 (2002) 먹는물수질공정시험방법, 환경부고시 제 2002-91호.
- Chang, E.E., Chiang, P.C., Ko, Y.W., and Lan, W.H. (2001) Characteristics of organic precursors and their relationship with disinfection by-products, *Chemosphere*, **44**, pp. 1231-1236.
- US. EPA (2003), Determination of haloacetic acids and dalapon in drinking water by liquid-liquid microextraction, derivatization, and gas chromatography with electron capture detection.