Journal of Korean Society of Water and Wastewater
Vol.22. No6. pp. 665-672 December. 2008

22권 6호, pp. 665-672, 12월. 2008

고 품질 수돗물 생산을 위한 팔당 수질관리 방안

Management Plan for the Production of Safe and High Quality Drinking Water from the Paldang Lake

조덕희[1]*·김종수[1]·이우식[2]

Deok-Hee Cho[1]* · Jong-Soo Kim[1] · Woo-Sik Lee[2]

1 경기도보건환경연구원(경기개발연구원 팔당물환경센터), 2 경원대학교 환경생명공학과

(2008년 1월 8일 접수; 2008년 3월 7일 1차수정; 2008년 11월 5일 2차수정; 2008년 12월 3일 채택)

Abstract

It is necessary to implement the management plan for the production of safe and high quality drinking water from lake Paldang. To set up the plan, the water quality items such as BOD, T-P, SS and coliform were monitored for ten years, 1997~2006, and the influence of raw water quality on the drinking water treatment process and the treated water quality was also evaluated from 2004 to 2006.

In conclusion, water quality items such as turbidity(SS), T-P(eutrophication), pathogens(fecal coliforms, enterovirus, reovirus, giardia, cryptosporidium), DOC(precursor of disinfection by-products), and micro-pollutants(phthalates, VOCs, heavy metals) are should be managed to get safe and high quality drinking water from lake Paldang.

Key words : Paldang lake, management plan, water treatment, safe and high quality drinking water

주 제 어 : 팔당호, 관리방안, 정수처리, 깨끗하고 안전한 수돗물

1. 서 론

팔당호는 저수량에 비해 유역면적이 넓어 유기물, 영양염류, 유해화학물질, 바이러스 등 오염물질 유입과 수질오염사고로부터 노출되어 있어 관리의 어려움이 있다. 최근에는 팔당 상수원수 뿐만 아니라 수돗물에서도 미량유해화학물질의 검출이 보고되고 있으며, 또한 원수 중에서 검출되고 있는 일부 물질에 대한 내분비계 독성이 의심되면서 생태계 및 인체의 안정성에 대한 문제가 제기되고 있다(강, 2005; 정 등, 2004). 수돗물의 불신원인에 대한 시민여론 조사결과에서도 비록 검출한계 이내이나 미량으로 수중에 존재할 수 있는 유해물질에 대한 막연한 불신감 등으로 인해 수돗물 음용을 기피하는 것으로 나타났다.

팔당호는 국내 최대 규모의 광역상수원으로서 수도권 2,400만 주민이 한강 수자원에 의존하고 있으므로 수질관리는 국가적인 사명이다. 이를 성취하기위해서는 상수원을 오염시키는 다양한 오염원에 대한 근본적인 감소대책과 오염원을 차단하기 위한 강력한 감시프로그램을 동원해야 할 것이다. 그러나 팔당호 수질관리를 위해서 막대한 예산을 투입하여 BOD위주의 수질오염도 저감노력을 하였으나, 탁수(흙탕물) 및 부영양화현상이 발생하고 있어 정수처리 효율저하 및 처리비용이 증가되고, 수돗물에서 이·취미가 발생하

*Corresponding author Tel: +82-31-794-9661, FAX: +82-31-793-9674, E-mail: deokheec@kg21.net(Cho, D.H.)

고 있다.

따라서 팔당호의 수질현황을 조사하고, 원수수질에 따른 수돗물수질 그리고 원수 수질변화에 따른 정수처리비용을 검토하여 상수원으로서 팔당호 수질관리 인자를 도출함으로서 안전하고 깨끗한 수돗물생산을 위한 팔당호 수질관리 방안을 제시하고자 한다.

2. 연구 범위 및 방법

2.1. 연구 범위

본 연구의 공간적 범위는 팔당수계와 팔당댐 원수 및 하류 원수를 취수원으로 이용하는 경기도내 정수장을 대상으로 하였으며(Table 1), 정수처리와 수돗물에 영향을 미치는 수질인자를 도출하여 팔당 상수원 수질관리 방안을 모색하고자 팔당호를 대상으로 하였다. 분석 기준연도는 2006년으로 월간 및 연간 팔당수계 오염물질 현황분석과 원수 수질변화에 따른 정수처리비용을 분석하였다.

2.2. 연구 방법

수계별 팔당호 유입유량과 유량기여율은 국가 수자원관리 종합정보시스템(Wamis)의 자료와 수역별 수질/수량 관측망 운영 및 평가 자료(국립환경과학원, 2007)를 분석하여 2006년도 팔당호 유입유량 및 유량기여율을 산출하였다.

경기도내 정수장의 2004년부터 2006년간 정수처리현황(원수사용량, 정수생산량, 원 · 정수 수질, 정수처리비용 등) 및 상수도 통계자료를 분석하였으며, 시 · 군 정수장 및 가정수도꼭지 수질검사 자료, 팔당 상수원의 장관계바이러스 분포현황은 경기도보건환경연구원 자료 및 연구보고서를 활용하였다.

팔당호를 원수로 사용하는 2개 정수장을 대상으로 2007년 9월부터 10월까지 2개월 동안 정수처리장 원수 및 정수를 각각 5회 채수하여 원수 10건, 정수 10건 총 20건의 시료를 대상으로 탁도, 휘발성유기화학물질 등 43항목을 경기도보건환경연구원 및 한국과학기술연구원에서 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 팔당호 수질현황

팔당호 및 수계별 오염도를 수질환경기준과 비교해 본 결과, Table 2에서와 같이 2006년도 BOD는 북한강 Ⅰa, 남한강 Ⅰb, 경안천 Ⅳ등급으로 유입되어 팔당호 BOD는 Ⅰb등급 이었다. BOD부하율은 남한강 58.7%, 북한강 30.8%, 경안천 10.5%이었고, COD부하율은 남한강 59.3%, 북한강 35.4%, 경안천 5.3%로 조사되었다.

영양염류 중 총질소(T-N)는 호소기준으로 남한강, 북한강, 경안천 및 팔당호에서 Ⅵ등급이었고, 총인(T-P)은 북한강 Ⅲ, 남한강 Ⅳ, 경안천 Ⅵ등급 일 때, 팔당호는 Ⅳ등급으로 영양염류에 의한 오염도가 매우 심각한 수준이었다. 수계별 총질소 부하율은 남한강 58.7%, 북한강 33.7%, 경안천 7.6%, 총인 부하율은 남한강 54.6%, 북한강 28.5%, 경안천 16.9%로 경안천의 유량기여율(2.5%)보다 6배 이상의 총인을 유입시키고 있는 것으로 나타났다.

부유물질(SS)은 북한강, 남한강, 경안천 모두 수질이 악화되는 추세이며, 하천기준으로 모두 Ⅰa등급이었으나 호소기준으로 팔당호는 Ⅲ등급이었다.

총대장균군은 북한강 Ⅲ, 남한강 Ⅱ, 경안천 Ⅲ등급 초과일 때 팔당호는 Ⅲ등급이었으며, 이때 경안천의 부하율이 41.3%로 유량기여율보다 16배정도의 총대장균군을 유입시키는 것으로 조사되었다.

Table 1. Water treatment plants using Paldang reservoir & Han river water in Gyeonggi province (2006)

	Water treatment plant	Facility capacity (㎥/d)	Production (㎥/d)
Paldang	과천, 광주, 군포, 까치울, 광교, 파장, 연성, 안산, 비산, 포일, 청계통합, 용인, 청계 (13개)	1,621,400	1,002,876
Han River	토평, 고촌, 도곡, 복정, 하남 (5개)	533,000	383,018

Table 2. Pollutant loadingdose ratio & water quality in Paldang reservoir (2006)

Item	Bukhan river			Namhan river			Kyungan stream			Paldang	
	con.	grade	rate	con.	grade	rate	con.	grade	rate	con.	grade
BOD (㎎/L)	1.0	Ⅰa	30.8	1.8	Ⅰb	58.7	5.2	Ⅳ	10.5	1.2	Ⅰb
COD (㎎/L)	2.9	Ⅰb	35.4	3.6	Ⅱ	59.3	6.9	Ⅳ	5.3	3.3	Ⅱ
T-N (㎎/L)	1.876	Ⅵ	33.7	2.315	Ⅵ	58.7	6.574	Ⅵ	7.6	2.190	Ⅵ
T-P (㎎/L)	0.042	Ⅲ	28.5	0.061	Ⅳ	54.6	0.300	Ⅵ	16.9	0.055	Ⅳ
Chloropyll-a (㎎/㎥)	12.8	Ⅱ	34.5	24.9	Ⅳ	58.5	53.8	Ⅴ	6.4	18.1	Ⅲ
SS (㎎/L)	8.9	Ⅰa	42.4	8.1	Ⅰa	52.1	14.4	Ⅰa	5.5	11.1	Ⅰa
Total coliform group (MPN/100mL)	1,099	Ⅲ	22.4	951	Ⅱ	36.3	24,433	〉Ⅲ	41.3	1,236	Ⅲ

상하수도기술 논문
22권 6호, pp. 665-672, 12월. 2008

3.2. 원수수질에 따른 정수 수질

정수장에 유입되는 팔당댐 원수와 댐 하류의 평균 원수수질의 차이는 거의 없었으나, 암모니아성질소와 총대장균군은 댐 하류 원수가 높게 나타났다. 또한 탁도와 총대장균군은 7~10월에 높은 농도로 유입되었는데, 이는 장마철 집중강우에 의한 생활하수, 토양유실 등의 원인으로 판단된다.

팔당댐 원수(Table 3)와 댐 하류 원수를 처리한 정수(Table 4)의 수질 차이는 미미하였으며, 이는 표준정수처리공정으로 원수 수질변화에 큰 영향이 없이 먹는 물 수질기준에 적합하게 수돗물을 생산할 수 있었다. 그러나 정수처리공정(혼화 · 응집, 침전, 여과, 소독)의 처리효율 즉 정수처리장의 운전능력 등에 따라 다소 정수 수질차이가 발생할 수 있다.

월별 원수 탁도변화에 따른 정수 탁도변화는 특이한 상관성이 없었고, 댐 원수 및 댐 하류 원수의 탁도변화에 상관없이 모두 0.1NTU이하로 처리되었다. 원수의 유기물질(BOD) 변화에 따른 정수의 유기물질($KMnO_4$소비량)변화가 유사하게 나타났다.

팔당댐 원수를 처리한 정수의 THMs은 0.020~0.034mg/L, 댐 하류 0.025~0.045mg/L으로 댐 원수보다 댐 하류 원수로 정수처리 한 수돗물에서 THMs생성이 다소 높았다. THMs 등 소독부산물들은 대부분 고농도에서 발암성이나 돌연변이원성물질로 추정(Craun, 1991; Simpson and Hayes, 1998)되므로 수돗물에서의 생성량을 최소화해야 하며, 또한 급수과정에서 잔류염소와 잔류 용존유기물질과 반응하여 증가하므로 정수장에서의 농도뿐만 아니라 가정 수도꼭지에서의 농도도 중요하다(장 등, 2006; Cho et al., 2003). 경기도보건환경연구원(2006)에 의하면, 총배양성바이러스의 경우 댐 원수에서 0~113.49MPN/100L이 검출되었고, 댐 하류 원수에서는 0~88.98MPN/100L으로 댐 원수보다 낮게 검출되었다. 총배양성바이러스가 검출된 원수 중 enterovirus와 reovirus를 ICC-PCR법(integrated cell culture-PCR)으로 분석한 결과, 댐 원수 및 댐 하류 원수 모두에서

Table 3. Monthly variation of raw water quality in water treatment plant using Paldang reservoir & Han river water (2006)

Item		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Mean
Turbidity	Paldang	2.6	3.0	3.5	4.3	5.9	6.0	51.4	40.8	14.0	6.5	7.6	9.0	12.9
	Han river	2.7	3.9	4.6	5.5	6.8	8.4	55.3	43.1	16.6	9.8	10.3	10.0	14.8
BOD	Paldang	1.3	1.8	1.7	1.9	1.9	1.3	1.2	1.1	1.8	1.3	1.1	1.2	1.5
	Han river	1.6	1.7	1.7	2.0	2.0	1.6	1.5	1.5	1.7	1.4	1.2	1.0	1.6
COD	Paldang	2.5	3.1	3.0	3.1	3.3	2.7	3.7	2.8	3.2	3.1	2.8	2.4	3.0
	Han river	3.2	3.5	3.1	3.3	2.4	3.0	2.9	2.8	3.0	3.0	3.3	2.3	3.0
SS	Paldang	3.0	3.7	3.5	3.1	5.4	5.0	7.0	38.3	7.0	5.5	5.3	4.4	7.6
	Han river	2.0	6.2	4.9	6.2	9.1	7.0	8.5	16.6	9.0	7.7	12.5	4.8	7.9
MPN	Paldang	41	43	56	56	112	161	282	297	308	276	203	292	177
	Han river	283	170	173	173	253	324	2188	1294	867	710	429	315	598
NH_3-N	Paldang	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
	Han river	0.11	0.08	0.07	0.07	0.04	0.03	0.06	0.04	0.03	0.03	0.00	0.02	0.05
T-P	Paldang	0.037	0.041	0.022	0.017	0.029	0.049	0.029	0.040	0.069	0.050	0.037	0.044	0.038
	Han river	0.064	0.018	0.018	0.016	0.054	0.048	0.034	0.055	0.090	0.028	0.030	0.042	0.041
T-N	Paldang	3.104	3.005	2.472	4.005	3.541	4.416	2.084	3.208	3.089	3.758	3.070	3.070	3.235
	Han river	2.434	2.599	2.441	3.635	7.519	2.028	1.813	3.606	3.306	3.361	3.290	3.244	3.273

Table 4. Monthly variation of treated water quality in water treatment plant using Paldang reservoir & Han river water (2006)

Item		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Mean
Turbidity	Paldang	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.07
	Han river	0.07	0.10	0.09	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.08	0.08	0.06	0.07	0.07
Residual chlorine	Paldang	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
	Han river	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.7	0.9
Residual solid	Paldang	90	115	117	140	119	130	126	103	105	113	96	102	113
	Han river	119	126	161	166	146	155	139	111	104	143	144	144	138
$KMNO_4$ consump.	Paldang	1.1	1.3	1.6	1.6	1.3	1.4	1.4	1.2	1.3	1.2	1.1	1.1	1.3
	Han river	1.1	1.6	1.6	1.5	1.7	1.3	1.3	1.1	1.1	0.9	1.0	1.0	1.3
Hardness	Paldang	53	61	62	64	54	63	56	43	48	61	57	58	57
	Han river	68	68	69	63	56	53	49	44	44	61	69	62	59
THM	Paldang	0.020	0.024	0.026	0.027	0.029	0.027	0.031	0.034	0.033	0.027	0.021	0.022	0.027
	Han river	0.030	0.025	0.028	0.030	0.045	0.028	0.033	0.032	0.038	0.037	0.029	0.025	0.032
$CHCl_3$	Paldang	0.0141	0.0186	0.0202	0.0208	0.0226	0.0222	0.0276	0.0299	0.0278	0.0222	0.0180	0.0171	0.0218
	Han river	0.0099	0.0113	0.0128	0.0134	0.0199	0.0178	0.0201	0.0201	0.0209	0.0188	0.0196	0.0186	0.0169

Journal of Korean Society of Water and Wastewater
Vol.22. No6. pp. 665-672 December. 2008

enterovirus는 불검출, reovirus는 모든 시료에서 검출되었다. 총배양성바이러스 농도 100MPN/100L을 초과한 시료를 대상으로 바이러스 존재여부를 검사한 결과, 정수처리한 수돗물 중에서는 총배양성바이러스는 검출되지 않았다.

팔당호의 미량오염물질 오염도를 파악하기 위해서, 팔당호를 원수로 사용하는 2개 정수장을 대상으로 원수 10건, 정수 10건을 분석한 결과, 포름알데하이드는 팔당 2, 4단계 원수에서 각각 N.D~19.68, N.D~28.46㎍/L일 때, 정수에서 각각 4.62~20.83, 15.42~27.84㎍/L로 팔당 4단계 원 · 정수가 다소 높게 검출되었다(WHO 먹는 물 수질기준 900㎍/L). DBP(dibutyl phthalate)는 팔당 2, 4단계 원수에서 각각 0.64~1.25, 0.67~5.28㎍/L, 정수에서 각각 0.32~1.15, 0.32~0.76㎍/L이었으며 일본의 잠정 요 검토항목으로 수질기준은 200㎍/L이다. DEHP(bis- (2-ethylhexyl)phthalate)는 팔당 2, 4단계 원수에서 가각 0.89~2.57, 1.11~5.08㎍/L, 정수에서 각각 0.39~1.94, 0.19~0.73㎍/L가 검출되었으며 미국의 먹는 물 수질기준(AWWA, 1999)은 6㎍/L이다. Benzylbutyl phthalate는 팔당 2, 4단계 원 · 정수 모두 검출되지 않았으며, bis- (2-ethylhexyl)adiphate도 정량한계 미만으로 검출되었다. Antimony(Sb)는 팔당 2, 4단계 원수에서 각각 0.06~0.13, 0.08~0.13㎍/L, 정수에서 각각 0.09~0.14, 0.10~0.13㎍/L가 검출되었으며, barium, beryllium, nickel 등도 미량 검출되었다. 그러나 vinyl chloride, chloroethane은 팔당 2, 4단계 원수 및 정수 모두에서 검출되지 않았고, styrene의 경우 원 · 정수 모두 정량범위 이하로 검출되었다. 또한 페놀류 4종, 농약류 2종, benzo(a)pyrene, 1,4-dioxane은 팔당 2, 4단계 원수 및 정수에서 검출되지 않았다.

따라서 탁도 등 기존의 수질항목뿐만 아니라 수돗물 수질에 영향을 미칠 수 있는 용존유기물질, 바이러스 류, 프탈레이트 류, 중금속 류 등에 대한 지속적인 모니터링과 필요시 저감대책을 수립해야 한다.

3.3. 원수 수질변화에 따른 정수처리비용 분석

안전하고 깨끗한 수돗물생산을 위한 팔당호 수질관리 인자를 도출하고자 팔당호 원수 수질변화에 따른 정수처리에의 영향을 정수처리비용으로 검토하였다.

팔당댐 원수의 정수처리비용은 Fig. 1과 같이 정수생산 1 m^3당 14.75~27.40원(평균 20.43원)으로 원수 수질변화, 정수처리능력 등에 따라 최고 12.65원, 평균 6.97원의 차이가 있었으며, 댐 하류 원수는 16.56~31.24원(평균 23.85원)으로 조사되었다.

원수 수질변화에 따른 정수처리 비용변화에 미치는 영향으로, 응집제 사용비용은 주로 탁도(부유물질), 역세척비용은 조류와 수온, 배출수처리비용은 탁도와 조류의 영향이었고, 소독비용은 일부 유기물질과 원수 수질변화에 따른 정수처리공정의 운영상의 영향이었다. 따라서 정수처리공정에 미치는 영향을 고려한 팔당호 수질관리인자는 탁도와 부영양화(총인)이었다.

3.3.1. 탁도와 정수처리비용

탁도변화에 따른 정수처리 비용변화를 알아보기 위해서 응집제사용량, 역세척 횟수, 소독제사용량, 배출수처리비용을 검토하였다.

Fig. 2에서와 같이 탁도변화에 따른 응집제사용비용은 유사한 패턴을 나타내고 있다. 팔당댐 원수를 사용하는 정수장의 평균 유입탁도는 11.2NTU, 응집제사용비용은 정수생산 1톤당 평균 5.18원이었으며, 댐 하류 원수 탁도 12.9NTU, 응집제사용비용은 5.87원으로 정수장 유입 탁도와 정수생산 톤당 응집단가는 댐 하류 원수가 댐 원수 보다 약간 높았으나, 탁도 대비 응집단가는(평균 응집단가/평균 탁도) 팔당댐 0.464, 댐 하류 0.456으로 비슷하였다. 또한 정수처리(응집, 여과, 소독, 배출수처리) 비용변화는 원수수질 단일항목에 의한 영향도 있지만, 종합적인 원수 수질변화와 수질변화에 따른 정수처리공정의 운영방법에 따라서 영향을 받았다고 판단된다. 탁도변화에 따른 역세척비용은 음의 상관성을 보이고 있으며, 그 이유는 규조류 발생과 수온이 낮은 겨울철에는 물의 점도가 높으므로 역세저항이 높아 하절기 보다 역세주기가 짧고, 탁수의 응집침전 시 침강성이 향상되어 슬러지로 제거되므로 여과지 막힘 현상에는 영향이 미미한 것으로 판단된다.

탁도변화에 따른 소독제사용량이 변하는 것으로 나타났으며, 이는 탁도가 증가함에 따라 유입되는 각종 오염물질을

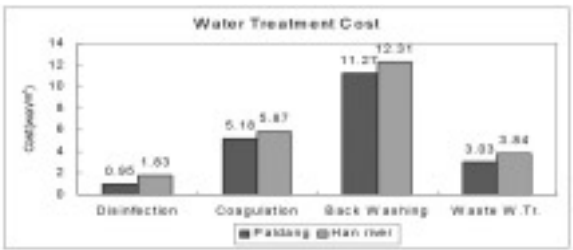

Fig. 1. Water treatment cost in water treatment plant using Paldang reservoir & Han river water (2006).

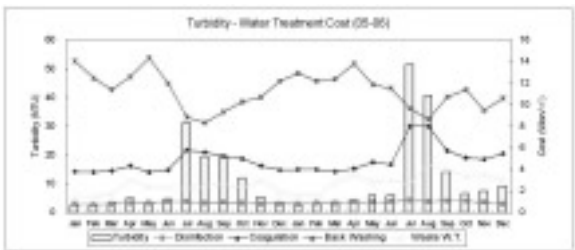

Fig. 2. Monthly variation of water treatment cost by the variation of turbidity.

상하수도기술 논문
22권 6호, pp. 665-672, 12월. 2008

산화분해 시키는데 소모되고 또한 정수장에서는 일정한 잔류염소를 유지시켜주기 위해서 염소투입량을 증가시킴으로서 소독제비용이 증가된 것으로 판단된다.

배출수처리 비용변화는 탁도변화와 유사한 패턴을 보이고 있는데, 그 이유는 장마철 고탁도 유입 시 슬러지 발생량 증가로 인한 처리비용이 증가하기 때문이었다.

탁수 유입에 따른 정수처리비용을 비교해 본 결과, 팔당댐 원수 및 댐 하류 원수를 취수하는 정수장 모두 응집제, 소독제, 배출수처리비용이 증가하였으나, 역세척비용은 다소 감소하였다.

3.3.2. BOD와 정수처리비용

팔당댐 원수를 처리하는 정수장별 평균 유입 BOD는 1.1~2.2mg/L(평균 1.5mg/L), 댐 하류 원수를 처리하는 정수장별 평균 유입 BOD는 0.9~2.6mg/L(평균 1.6mg/L)이었으며, 유기물질 농도변화에 따른 응집제 사용비용, 역세척비용은 상관성이 없었다(Fig. 3). 역세척비용의 월별 변화는 큰 차이가 없었으나 겨울~봄철기간이 하절기 보다 다소 증가하는 경향이 있는데 이는 유기물질보다는 조류에 의한 영향으로 판단된다. 또한, 소독제 사용비용, 배출수처리 비용변화는 상관성이 없었으며, 팔당댐 원수의 경우 유기물질 농도변화와 배출수처리 비용변화와는 다소 유사한 경향이 있었다.

BOD 등 유기물질 농도변화에 따른 정수처리비용과의 상관성은 거의 없었으며, 정수처리비용에 영향을 미치는 오염물질은 복합적으로 작용하므로 유기물질 단독항목만으로는 정수처리비용의 뚜렷한 차이를 알 수 없었다. 그러나 유기물질 중 입자성 유기물질에 의해서 응집비용, 배출수처리비용 등의 변화가 예상되고, 용존성 유기물질에 의해서는 소독제 사용비용에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.3.3. 부영양화와 정수처리비용

클로로필-a, 조류 개체수 변화에 따른 응집제사용량은 봄 · 가을에 부분적으로 상관관계가 있었으나, 장마철에는 조류의 성장조건(햇빛, 정체수역 등) 악화로 클로로필-a 농도나 조류 개체수는 급감하였으며, 탁수유입에 따른 응집제사용량의 증가로 인하여 일률적인 패턴은 나타나지 않았다(Fig. 4).

팔당댐 원수를 처리하는 정수장별 유입 클로로필-a 농도변화가 5.3~36.6mg/m³(평균 17.99mg/m³)일 때 역세척비용은 수돗물생산 1톤당 8.68~13.78원(평균 11.27원)이었고, 댐 하류 원수의 클로로필-a는 2.6~36.5mg/m³(평균 16.8mg/m³)일 때 8.43~14.78원(평균 12.31원)이었다.

역세척패턴을 보면 동절기 낮은 수온으로 인한 물의 점도가 높고, 봄과 겨울에 여과지 폐색을 일으키는 규조류가 발생하여 역세척횟수를 증가시켰으며, 봄 · 가을에는 조류의 번성으로 인한 여과지 막힘현상이 자주 발생하여 역세척주기를 짧게 한 것으로 판단된다. 클로로필-a, 조류 농도변화에 따른 배출수처리비용은 조류농도의 증가와 함께 증가되는 것으로 나타났으나, 배출수처리비용은 장마철 고탁수 유입에 의한 슬러지 처리비용 증가가 가장 컸다. 따라서 클로로필-a, 조류 유입농도 변화에 따른 봄 · 가을에는 역세척비용, 배출수처리비용이 증가하였으나 응집제, 소독약품 사용비용과는 상관성이 미미하였다.

3.4. 상수원으로서 팔당 수질관리 방안

원수 수질변화에 따른 수돗물 수질에 영향을 미치는 수질관리인자는 부영양화(총인)에 의한 맛 · 냄새, 용존유기물질에 의한 소독부산물, 분변성미생물, 프탈레이트 등 미량오염물질 등이며, 정수처리공정에 주 영향을 미치는 수질관리인자는 탁도와 부영양화(총인)이었다. 수돗물 수질은 원수수질 단일항목에 의한 영향도 있지만, 종합적인 원수 수질변화와 수질변화에 따른 정수처리공정의 운영방법에 따라서 영향을 받고 있었다.

3.4.1. 탁수

팔당호 탁수유입을 감소시키기 위해서는 탁수유출량이 많은 장마철(7~8월)의 탁수 기여율이 북한강 42.2%, 남한강 52.3%이었으므로 집중강우 시기에 북한강과 남한강의 탁수관리가 중요하며, 집중강우 직후 9월 북한강의 탁수기여율이 44.8%, 11월 강우의 영향으로 64.9%에서 12월 71.1%까지 높아졌으므로(Table 5) 집중강우 이후 북한강의 탁수 저감대책이 중요하다.

탁수발생의 원인은 장마철 집중호우와 표토 훼손지역에 의

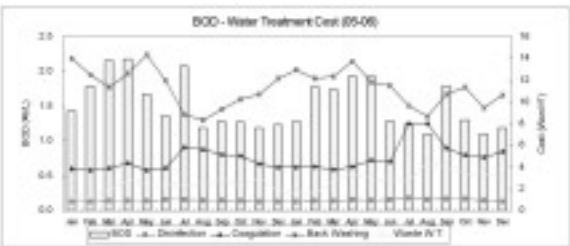

Fig. 3. Monthly variation of water treatment cost by the variation of BOD.

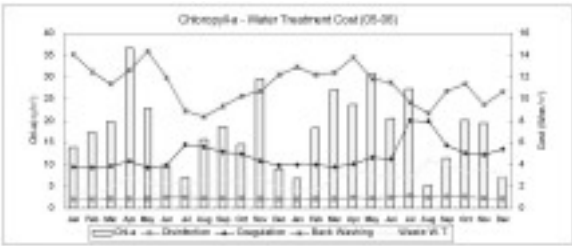

Fig. 4. Monthly variation of water treatment cost by the variation of eutrophication (chloropyll-a).

해 발생되며, 강우유출에 의한 토양침식과 유역의 비점오염원 유입과 같은 자연적인 현상과 유역에서의 대형 토목공사, 고랭지 채소밭 경작, 벌목과 같은 인위적인 요인에 의해서도 발생된다. 특히, 북한강 수역에서는 유역 내 경작지 비율이 높고 산재하고 있는 고랭지 채소밭은 경사가 크므로 토양침식이 매우 커서 강우 시 주요 탁도 배출원으로 지목되고 있다.

정수처리에 장애를 일으키는 탁도를 감소시키기 위해서는 발생 전 대책인 토지이용 목적별 관리방안을 마련하여 탁수발생을 사전에 억제하는 유역관리방안에 초점을 맞춰 관리하는 것이 가장 효율적인 방법이며, 탁수기여율이 높은 북한강과 남한강수계의 탁도를 감소시켜야한다(경기도보건환경연구원, 2000; 국립환경과학원, 2005).

3.4.2. 유기물질(BOD)

BOD 등 유기물질 농도변화에 따른 정수처리비용변화는 상관성이 거의 없었으며, 상수원으로서 팔당 BOD농도는 현재수준(Ⅰb)의 정도이면 정수처리에 악영향 없이 먹는 물 수질기준에 적합한 수돗물을 생산할 수 있다. 따라서 상수원으로서 팔당호 BOD는 현 상태 유지관리정책이 필요하다.

팔당호 BOD유입 부하율이 남한강 58.7%로 대부분이었고, 경안천은 유량기여율(2.5%)의 4배 정도인 10.5%이었다. 팔당호 BOD가 악화되는 시기인 3~5월(갈수기)의 기여율이 남한강 63.5%, 경안천 7.4%이었다(**Table 6**). 팔당호의 BOD 농도 상승영향은 유입유량과 오염기여율이 높은 남한강이었으며, 경안천은 상대적으로 유입유량은 적지만 유량대비 오염기여율이 높아 팔당호 BOD오염을 가중시키고 있다. 또한 2006년 수계별 BOD/COD부하율 비가 북한강 0.35, 남한강 0.45, 경안천 0.77이며, 갈수기(3~5월)평균 북한강 0.41, 남한강 0.53, 경안천 0.80으로 남 · 북한강에 비하여 경안천의 생물분해성 유기오염물질의 비가 높아 팔당호 수질에 악영향을 미치는 것으로 판단된다.

북한강의 주 오염원은 유원지, 음식점이며, 점오염원 보다는 강우에 의한 고랭지 농경지에서 토사 유출, 도로 등 비점오염원에 가장 크게 영향 받는 것으로 판단되며, 남한강은 생활하수 등 점오염원에 의한 BOD배출량 증가의 영향으로 판단된다. 경안천은 갈수기에 하수처리장 방류수, 생활하수, 공장폐수, 축산폐수, 대중음식점 산재 등 점오염원에서 방류되는 유량이 경안천 유량의 대부분을 차지함으로서 높아진 것으로 사료된다.

따라서 팔당호 BOD농도를 현 상태로 유지 또는 감소시키기 위해서는 남한강 및 경안천에서 유입되는 BOD부하량을 감소시켜야 한다. 또한 부영양화에 의한 조류 증식은 팔당호 BOD농도증가(팔당호 내생유기물질)에 일정량 영향을 미치고 있으므로, 팔당호 BOD저감을 위해서는 팔당호에의 총인 유입량을 저감시켜 조류증식을 감소시켜야 한다.

3.4.3. 부영양화

조류의 증식은 유기물증가, 냄새발생, 독소발생, 미관상 불쾌감 등의 피해를 초래하고, 호소의 수질을 악화시키며, 정수처리장애를 일으키므로 부영양화를 감소시켜야 한다.

팔당호의 2006년 총질소/총인비가 19~168(평균 40)로 부영양화를 방지하기 위해서는 조류발생 원인물질인 총인(T-P)농도를 감소시켜야 한다.

팔당호 부영양화가 발생했던 3월부터 7월까지 총인기여율이 북한강 28.2%, 남한강 56.1%, 경안천 15.7%, 10~11월에는 북한강 37.4%, 남한강 42.4%, 경안천 20.2%이었다

Table 5. Suspended particle loadingdose & ratio in Paldang reservoir (2006)

		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
SS (kg/d)	Bukhan rv.	9,460	14,577	17,771	37,548	68,810	125,252	1,311,743	1,166,971	111,709	40,053	79,232	80,877
	Namhan rv.	16,849	16,290	25,386	96,074	119,608	237,644	1,349,922	1,712,578	128,396	66,441	37,803	31,337
	Kyungan sr.	1,093	1,702	2,249	6,859	10,759	32,618	317,337	12,385	9,031	16,259	5,130	1,600
SS rate (%)	Bukhan rv.	34.5	44.8	39.1	26.7	34.5	31.7	44.0	40.4	44.8	32.6	64.9	71.1
	Namhan rv.	61.5	50.0	55.9	68.4	60.1	60.1	45.3	59.2	51.5	54.1	30.9	27.5
	Kyungan sr.	4.0	5.2	5.0	4.9	5.4	8.2	10.7	0.4	3.6	13.2	4.2	1.4
Paldang SS		2.4	1.9	6.1	6.8	7.1	6.5	35.6	30.2	13.9	7.6	9.3	6.0

Table 6. BOD loadingdose & ratio in Paldang reservoir (2006)

		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
BOD (kg/d)	Bukhan rv.	2,580	3,644	6,600	10,847	19,919	35,786	198,749	25,577	5,539	8,627	10,098	2,765
	Namhan rv.	3,965	6,109	12,693	39,356	32,133	80,048	265,894	35,573	56,095	22,446	8,592	4,352
	Kyungan sr.	1,822	1,021	1,922	4,307	2,861	12,189	39,667	1,885	1,264	4,201	2,497	2,640
BOD ratio (%)	Bukhan rv.	30.8	33.8	31.1	19.9	36.3	28.0	39.4	40.6	8.8	24.5	47.7	28.3
	Namhan rv.	47.4	56.7	59.8	72.2	58.5	62.5	52.7	56.4	89.2	63.6	40.6	44.6
	Kyungan sr.	21.8	9.5	9.1	7.9	5.2	9.5	7.9	3.0	2.0	11.9	11.8	27.1
Paldang BOD		0.8	1.3	1.5	1.8	1.9	1.4	1.1	0.7	0.9	1.1	0.9	0.7

상하수도기술 논문
22권 6호, pp. 665-672, 12월. 2008

(Table 7).

경안천은 오염원이 집중되어있는 중류지점에서 해빙기인 2~4월까지 농도증가와 갈수기로 인한 유량감소가 중첩되어 급격한 오염도 증가현상을 나타내고 있으며, 또한 생활계 및 축산계에 의한 점오염 배출부하량이 경안천 유량에 비해 크므로 하천 유량변화에 따른 오염도가 민감한 것으로 판단된다. 따라서 경안천은 갈수기에 하수처리장 방류수, 생활오수, 공장폐수, 축산폐수에 의한 점오염 배출부하량이 경안천 유량에 비해 크므로 하 · 폐수 처리효율을 향상시키고, 강우 시 비점오염물질 유입량이 증가하므로 안정된 처리를 해야 한다.

남한강은 경안천과는 반대로 우수기인 6~8월에 질소, 인 농도가 모두 높게 증가하고 있으며, 이는 이 지역이 하수와 축산폐수 공공처리율이 다른 지역에 비해 낮고 축산농가도 광범위하게 산재되어 있어, 우수기의 비점오염에 의한 인, 질소의 유출이 많이 일어나고 있으므로(경기도보건환경연구원, 2000), 하수, 축산폐수처리장 확충 및 처리효율을 높여야 한다.

북한강은 일정한 수질을 보여주고 있으나, 홍수기인 7월에 고랭지 밭의 토양유실로 증가하는 현상을 보이고 있다.

정수처리공정의 역세척 장애와 맛 · 냄새 등 수돗물 수질에 악영향을 미치는 팔당호 부영양화를 예방하기 위해서는 상수원 이용에 지장을 주는 조류발생 시기에 남한강의 총인기여율이 높았고, 또한 경안천의 총인기여율이 상대적으로 높았으므로, 남한강과 경안천에서의 팔당호 총인유입량을 감소시켜야 한다. 또한, 남한강, 경안천 유역에 산재되어 있는 개별 오수처리시설에 대해서 경기도가 2005년부터 시행하는 환경공영제[개인하수처리시설의 유지관리 문제점을 해결하기 위해서, 시설용량 4m³/일~200m³/일의 오수처리시설을 대상으로 유지관리를 전문기관에 위탁하게 하고, 이에 필요한 비용을 민 · 관이 공동으로 부담(민 40%, 관 60%)하는 제도]를 확대 실시하여 남한강과 경안천의 총인발생량을 감소시켜야 한다.

3.4.4. 분변오염물질

팔당호 총대장균군기여율은 북한강 22.4% 남한강 36.3%, 경안천 41.3%로 팔당호 총대장균군 유입유량대비 기여율이 16.5배인 경안천이 주 오염원으로 조사되었다. 따라서 경안천은 집중강우에 의한 하수처리량 증가에 따른 일시적 미처리된 하수의 방류, 하수처리장의 시설 개 · 보수관계로 부적정 처리, 비점오염원 등이 원인이었으므로, 소독공정의 강화 등 하수처리효율 증대, 집중강우 시 하수처리대책 등이 필요하다.

장관계바이러스는 자연환경에서 온도가 낮을 때 더 자주 나타나고 더 오래 살아남는다고 알려져 있고, 수온 10℃ 이하에서 주로 생존하므로 겨울철 바이러스 관리를 강화해야 한다.

탁도, 총대장균군, 분원성대장균군 등의 항목을 잘 관리한다고 할지라도 바이러스 오염을 배제할 수 없으므로, 상수원수에 대한 바이러스 오염실태를 주기적으로 조사하여 안전한 수돗물 생산에 만전을 기해야 한다고 판단된다.

3.4.5. 미량유해물질

유기물질을 나타내는 BOD관리도 중요하다고 할 수 있지만, 용존 유기물질(DOC), UV_{254}의 관리가 상대적으로 중요하므로 관리항목을 변경하거나 신설하여, 팔당 상수원의 용존 유기물질에 포함되어 있는 미량유기오염물질, THMs 등 소독부산물 전구물질량을 저감시켜야 한다.

내분비계 장애(의심)물질인 DBP, DEHP 등 프탈레이트류, antimony 등 중금속류, 포름알데하이드 등이 팔당호 및 일부 수돗물에서 검출되고 있으므로, 안전한 수돗물을 생산 · 공급하기 위해서는 팔당호의 미량유해물질 오염실태를 지속적으로 모니터링을 하고, 필요시 수계별 저감대책을 수립해야 한다.

4. 결 론

팔당호 수질오염도에 따른 정수처리 장해요인과 수돗물 수질에의 영향을 분석하여 상수원으로서 안전하고 깨끗한 수돗물 생산을 위한 팔당 수질관리 방안의 연구결과는 다음과 같다.

1. 표준정수처리는 팔당호 수질변화에 큰 영향이 없이 먹는 물 수질기준에 적합하게 수돗물을 생산할 수 있었으며, 정수처리공정의 처리효율 및 운전능력 등에 따라 다소 정수 수질차이가 발생할 수 있다.
2. 팔당호 오염물질과 정수처리비용과의 상관성을 분석해

Table 7. Total phosphorus loadingdose & ratio in Paldang reservoir (2006)

		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
T-P (kg/d)	Bukhan rv.	26	101	122	217	525	1,767	4,571	3,005	489	136	443	449
	Namhan rv.	258	397	308	718	1,178	1,151	15,135	9,706	1,060	189	430	296
	Kyungan sr.	157	195	167	201	127	458	2,797	162	89	132	113	116
T-P rate (%)	Bukhan rv.	5.9	14.6	20.4	19.1	28.7	52.3	20.3	23.3	29.9	29.7	45.0	52.2
	Namhan rv.	58.5	57.2	51.6	63.2	64.4	34.1	67.3	75.4	64.7	41.3	43.6	34.4
	Kyungan sr.	35.6	28.2	28.0	17.7	7.0	13.6	12.4	1.3	5.4	28.9	11.4	13.4
Paldang T-P		0.012	0.028	0.035	0.049	0.059	0.035	0.103	0.116	0.07	0.051	0.051	0.045
N / P ratio		168.2	91.8	63.0	46.8	43.4	61.8	24.5	18.6	27.4	34.1	37.7	44.1

본 결과, 탁수와 부영양화로 인한 조류발생이 정수처리 비용을 증가시키고 있었으나, BOD는 상관성이 매우 낮은 것으로 조사되었다.

3. 정수처리장애를 일으키는 탁수를 감소시키기 위해서는 발생 전 대책인 토지이용 목적별 관리방안을 마련하여 탁도 발생을 사전에 억제하여야 하며, 탁도 기여율이 높은 북한강과 남한강수계에 초점을 맞춰 관리하는 것이 필요하다.
4. 정수처리장애를 일으키며, 수돗물에서 맛과 냄새를 발생시키고, 팔당호 BOD농도를 일부 증가시키는 부영양화(조류)를 저감시키기 위해서는 남한강과 경안천 유역에서의 총인발생량을 감소시켜야 한다.
5. 상수원으로서 팔당호 BOD농도는 현재수준(Ⅰb 등급)이면 정수처리에 악영향 없이 먹는 물 수질기준에 적합한 수돗물을 생산할 수 있으며, 팔당호 BOD농도를 현 상태로 유지 또는 감소시키기 위해서는 남한강 및 경안천에서 유입되는 BOD부하량을 감소시켜야 한다.
6. 정수처리공정 및 급수과정에서 생성되는 THMs 등 소독부산물의 생성량을 최소화하기 위해서는 상수원에서 용존유기물질을 감소시켜야 한다. 그리고 수돗물의 미생물에 대한 안전성을 확보하기위해서 분원성대장균뿐만 아니라 장관계바이러스 및 원생동물의 관리가 필요하다.
7. 또한 내분비계 교란물질인 프탈레이트류 등 미량유해물질이 팔당 원수 및 일부 정수에서 미량 검출되고 있으므로, 팔당수계에 대한 미량유해물질의 지속적인 감시와 수돗물에 대한 국민의 불신을 해소하기 위해서 조사결과 및 안전성을 발표해야 하며, 필요시 저감대책을 수립해야 한다.

하천 등 수질관리인자로 국내에서 활용되며, 국민들이 상징적으로 수질오염정도를 인식하는 생물화학적산소요구량(Biochemical Oxygen Demand : BOD)은 유기성 오염물질의 양이 아니라 오염물질이 미생물에 의해 산화 · 분해되는데 소비되는 산소량이며, 유기물의 양이나 종류보다는 오히려 용존산소를 결핍시키는 잠재능력의 평가항목이다. 따라서 안전하고 깨끗한 수돗물 생산을 위한 팔당 수질관리정책은 BOD항목에서 유기성오염물질량을 나타내는 용존유기탄소(DOC)와 정수처리에 장해를 일으키고 수돗물 수질에 악영향을 미치는 탁도, 부영양화, 분변오염미생물, 미량유해물질 등으로 수질관리 방향을 전환하여 한다.

KSWW

감사의 글

본 연구는 경기개발연구원 팔당물환경센터의 2007년도 정책연구과제 "팔당 수질관리를 위한 기반조성 및 효과적인 도정지원에 관한 연구"의 일환으로 수행되었으며, 본 연구에 필요한 정수처리 자료 및 원 · 정수를 제공한 경기도 및 시 · 군 정수장에 감사드립니다.

참고문헌

1. 강준원 (2005) ***금수강산 21 총괄과제, 팔당 상수원 내 미량오염물질에 관한 연구***, 연세대학교
2. 경기도보건환경연구원 (2000) ***팔당 상류지역 수질오염원 관리방안***.
3. 경기도보건환경연구원 (2006) ***ICC-PCR을 이용한 경기도내 상수원의 장관계바이러스 분포조사 연구***.
4. 국립환경과학원 (2005) ***탁수로 인한 수중생태계 영향 조사 및 저감대책 제시 3차년 보고서***.
5. 국립환경과학원 한강물환경연구소 (2007) ***2006년도 한강수계 오염총량관리사업, 수역별 수질/수량 관측망 운영 및 평가***.
6. 장현성 등 (2006) 서울시 수돗물 배급수 계통에서 소독부산물 분포특성, ***Korea Chemistry Engineering Research***, **44**(2), 216-226.
7. 정연정 등 (2004) 팔당상수원내 내분비계장애물질의 모니터링 및 오존, UV, 오존/UV공정에 의한 제거효율 연구, ***상하수도학회 · 한국물환경학회 추계학술발표회 논문집***.
8. AWWA (1999) Water Quality & Treatment, fifth edition.
9. Cho, D.H., Kong, S.H. and Oh, S.G. (2003) Analysis of trihalomethanes in drinking water using headspace-SPME technique with gas chromatography, ***Water Research***, **37**, 402-408.
10. Craun, G.F. (1991) Epidemiological studies of organic micropollutants in drinking water, In : Hutzinger. O.(Ed.), Handbook of Environmental Chemistry, ***Water Pollution***, **5** (part A. Springer, Berlin), 1-44.
11. Simpson, K.L. and Hayes, K.P. (1998) Drinking water disinfection by-products : an Australian perspective, ***Water Research***, **32**, 1522-1528.