

대전지역 상수도 물의 계절변화에 따른 물리화학적 불균질

이현구 · 이찬희 · 서호택

Physicochemical Heterogeneity of the Supply Water Quality depending on Seasonal Changes in the Taejon Area, Korea

Hyun Koo Lee, Chan Hee Lee, Ho Taek Suh

ABSTRACT: This study was undertaken to provide a drinking water quality on the basis of physicochemical properties. In this study, the 25 samples of supply waters of the Taejon area were sampled twice (February and August in 1999). Hydrochemistry of the supply water belongs to the $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ type, whereas the supply water was characterized by the relatively significant enrichment of Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- ions and heavy metals compared to the original water from the Daecheong lake. Generally, the supply water has a mean values for 10.7 °C of temperature, 6.86 of pH, -12 mV of Eh, 88 $\mu\text{S}/\text{cm}$ of EC and 70.379 mg/l of TDS in February, whereas the waters of the same sites in August are a slightly high temperature (26.1°C), TDS (78.069 mg/l) and extremely high EC (442 $\mu\text{S}/\text{cm}$) value. These values are similar with physicochemical properties of the original lake water depending on the seasonal differences. Results of speciation calculation indicate that potentially toxic ions might exist mainly in the forms of free metal (Cu^{2+} or Zn^{2+}) and a small amount of CO_3^{2-} and OH^- in the supply water. The water seemed to be in equilibrium with kaolinite field of the normal stability diagrams for the natural water. Based on enrichment parameter of the supply water normalized by original lake water composition, the average value of those parameter can be calculated with nearly 1.00, but the those values for Cu+Zn possible source of decrepit pipe lines are 126.75 in February and 115.63 in August samples. The parameter values varied with sampling sites, however, do not exceed by chemistry of drinking water standard. Solid compounds remained on the membrane filter papers after filtration are adhered to pale yellow or yellowish brown colored dissolved solids and precipitates, which are coated by 0.02 to 0.35 mm thick per 500 ml with colloidal particles of about 1 to 2 μm size. The particles are mainly Fe-Cu-Zn compounds and partly detected to Mn and Pb.

Key words: Taejon area, supply water, physicochemical property, seasonal difference
주요어 : 대전지역, 상수도 물, 물리화학적 특성, 계절적 차이

서 언

물은 생명의 근원으로서 인류의 모든 활동을 뒷받침해주는 기본 자원임에도 불구하고 손쉽게 값싸게 얻을 수 있다는 종래의 인식으로 인하여 물의 가치와 필요성을 잊고 지내는 것이 현실이다. 이제는 전국 대부분의 하천과 호수에서 간단한 여과과정만 거치고 마실 수 있는 1급수의 물은 거의 찾아 볼 수 없으며, 상수

원으로 이용되고 있는 대형 호수마저도 3~5급수의 수질을 보이는 곳이 많다. 최근에는 생활용수와 음용수로 이용하기 위하여 물을 여과 또는 정수하여 공급하기 시작하였으나, 상수원과 공급망의 오염에 관한 불신이 고조됨에 따라 수도물이 음용수로서의 기능을 다하지 못하고 있는 것도 사실이다.

1989년에는 수도권의 상수도 물에서 중금속이 검출되어 충격을 주었으며, 1991년도에는 페놀에 오염된 수도물 파동이, 1993년에는 먹는 물의 기준치를 상회하는 대장균과 일만세균이 검출되기도 하였고, 1991년과 1995년에는 발암물질이 다량 검출되는 지경에 이르

* 충남대학교 지질학과 (Department of Geology, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea), E-mail: phklee@cnu.ac.kr

렸다. 또한 1993년에는 소위 약수터로 불리는 지하수에서도 전염성 세균이 발견되는 등, 음용수로 이용되고 있는 전국의 상수도 물, 지하수 및 약수에서 각종 중금속, 세균, 발암물질, 유기화합물들이 때와 장소를 불문하고 많은 사회적 문제로 대두되었다. 최근에는 국산은 물론 수입품 생수에서조차 많은 문제점들이 발생하고 있다 (김상중, 1995). 따라서 모든 종류의 음용수에 대하여 안심하고 마시기가 두렵고, 별도의 처리과정을 거치지 않고는 각종 용수 및 실험용으로도 사용하기 어려운 것이 현실이다.

한편 대부분의 상수도 물은 전달되는 동안 여러 단계의 저장고와 관망을 거치면서 관의 부식, 이물질의 유입, 흡착성 미생물의 성장 또는 관리소홀로 인하여 여러 종류의 오염요소들이 생성될 수 있다 (이중형, 1996). 일반적인 수질특성은 물의 물리적, 화학적 및

생물학적 성질에 따라 결정된다 (박석기 등, 1996). 이 연구는 대청호의 원수를 음용수로 공급받고 있는 대전지역의 상수도 물을 대상으로 물리화학적 변화와 용존이온의 거동 및 부화를 고찰한 것이다. 이 결과는 자연수의 정량분석 및 음용수 또는 생활용수로 지표수가 채수되어 시설정수장과 배관망을 통하여 공급되는 동안 건축물의 노후도와 배관재질에 따라 발생할 수 있는 상수도 물의 물리화학적 변화를 규명하는 자료로 이용될 것이다.

시료 및 분석

대전지역의 모든 상수도는 대청댐의 호수를 원수로 사용하고 있다. 대청호의 추동취수탑에서 취수된 물은 도수터널을 거쳐 송촌정수장과 월평정수장으로 운반된

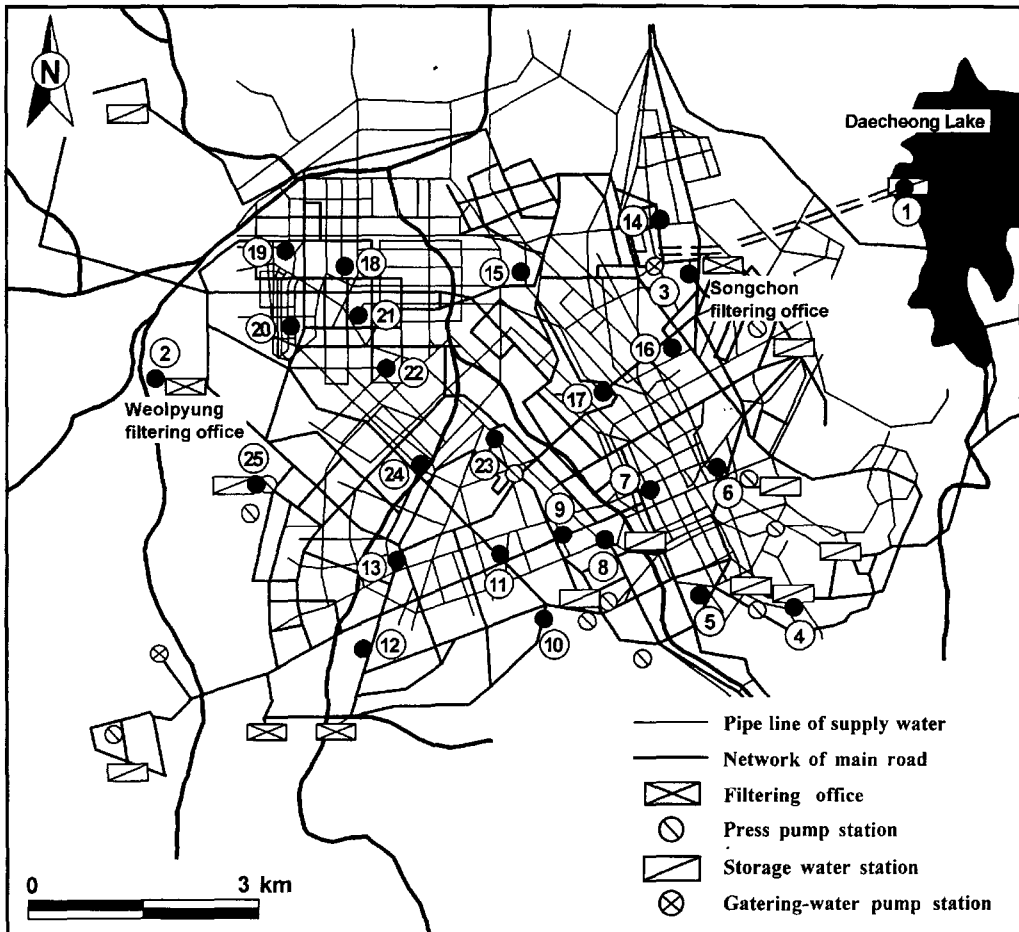


Fig. 1. Sampling sites of the supply water in the Taejon area, Korea.

다. 운반된 원수는 여과와 침전의 정수과정 및 살균을 거친 다음 송수관을 통하여 대전시 전역에 공급된다. 이 연구에서는 대전지역의 대표적인 공공건축물과 대단위 아파트에 공급되는 상수도 물을 대상으로 시료위치를 선택하였다 (Fig. 1). 또한 대청호의 취수탑에서도 원수를 채수하였다. 시료는 1999년도 2월에 25개소에서 채취하였으며, 일부시료 (11개소)에 관하여는 동일 장소에서 8월에 다시 채취하여 각각의 수질을 비교 분석하였다.

대전지역의 상수도 물은 동부지역의 송촌정수장과 서부지역의 월평정수장에서 공급되는 송수관이 있으나, 서로 연결되어 있어 상호 보상작용을 할 수 있도록 설계되어 있다. 또한 각각의 대형건물에는 대부분 별도의 저장고가 있다. 일반적으로 송수관 및 배수관으로 가장 많이 사용되는 재질은 주철관이나 콘크리트, 플라스틱 또는 강철관 등이다. 급수관으로는 동관, 연관 및 스테인레스 스틸 (stainless steel)이 사용된다 (이종형, 1996). 대전 시내 배수관은 주로 주철관이며 급수관은 동관과 스테인레스 스틸이다. 시료의 채취위치는 건축연대와 배관재질을 고려하여 선정하였으나, 오래된 건물의 대부분은 최초 건축이래 수시로 증개축이 있었으며, 그때마다 재질이 다른 관이 사용되어 특별한 의미를 부여하기는 어려운 실정이다.

연구대상 시료의 온도 (°C), 수소이온농도 (pH), 산화-환원전위 (Eh; mV)와 전기전도도 (EC, electrical conductivity; $\mu\text{S}/\text{cm}$)는 시료채취와 동시에 측정하였다. 측정은 완충용액 (pH=4, 7, 10)으로 보정하여, HANNA 사의 pH-Eh 및 EC 측정기를 이용하였다. 모든 시료들은 0.45 μm 공극의 질산염 섬유소 여과지 (cellulose nitrate filter)를 이용한 수동펌프로 부유물을 완전히 제거하고 음이온 및 양이온 측정시료로 나누어 채수하였다. 화학분석에 필요한 시료는 합성수지 (polypropylene) 병에 담아 분석까지 냉장 보관하였다. 양이온 측정시료는 용기에 금속이온이 흡착되는 것을 방지하기 위하여 6N의 질산 (HNO_3)을 1 ml 정도 투여하여 산도를 유지하였다.

이 연구에서 분석된 물 시료의 용존 양이온은 충남대학교 공동실험실습관에 설치된 ICP-MS (Perkin-Elmer, Model; ELAN 6000)으로 실시하였으며, 일부 농도가 높은 주성분 이온은 희석하여 분석하였다. 용존 음이온은 WATERS 사의 IC (Model; WA/2690)로 분석하였다. 분석에서는 표준시료, 공시료 및 중복시료를 이용하여 분석치의 신뢰도와 재현성을 검증하였다 (Ramsey *et al.*, 1987). 또한 Skoog *et al.* (1998) 및

권수한 등 (1999)이 제시한 방법에 따라, 각각의 기기에 관하여 필자들이 구한 대표적인 원소의 검출한계와 검량선은 아주 우수한 결과를 얻었다 (이찬희 등, 2000). 이 연구도 이를 계통화하기 위하여 수행한 것이다.

용존 고형물의 총량 (TDS; total dissolved solids)은 분석된 이온을 합산한 것이며, HCO_3^- 값은 0.05M의 HCl로 적정한 것이다. 한편 분석시료의 여과과정에서 생성된 침전물과 부유물의 산출상태 및 화학조성을 규명하기 위하여 전자현미경을 이용하였다. 분석시료는 탄소와 금으로 이중 피복한 것을 이용하였으며, 분석기기는 LINK 사의 에너지 분산형 X-선 분석기 (EDXA, PV 9100/60)가 장착된 Shimadzu 사의 ISI-SX-40 이다.

결과 및 고찰

물리화학적 조성변화

이 연구를 위하여 채수한 시료의 현장측정 결과는 Table 1과 같이, 한 시료 (No. 12)를 제외한 모든 시료는 일반적인 음용수의 수질기준을 만족한다. 12번은 다른 시료와는 달리 현저히 다른 수질특성을 보이고 있어 이후의 모든 통계와 그림에서 제외하였다. 1999년 2월에 채취한 상수도 물의 온도는 6.2~20.3 (평균 10.7) °C, pH는 6.60~7.09 (평균 6.86), Eh는 -24~2 (평균 -12) mV, EC는 82~94 (평균 88) $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이다. 그러나 8월의 상수도 물은 온도가 24.4~26.8 (평균 26.1) °C, pH는 5.94~6.95 (평균 6.59), Eh는 -24~33 (평균 -4) mV, EC는 433~447 (평균 442) $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이다. 특히 8월 시료에서 높은 EC 값을 갖는 것은, 후술하는 바와 같이 일부 원소의 함량이 높아진데 원인이 있으며, 수온상승과 이에 따른 미생물의 개체수 증가도 기여하였을 것으로 해석된다.

용존 음이온의 평균함량을 보면, 2월의 상수도 물 ($\text{HCO}_3^- = 26.252$, $\text{NO}_3^- = 5.417$, $\text{SO}_4^{2-} = 10.895$, $\text{Cl}^- = 7.147$ 및 $\text{F}^- = 0.597 \text{ mg/l}$)은 8월의 시료 ($\text{HCO}_3^- = 34.669$, $\text{NO}_3^- = 5.204$, $\text{SO}_4^{2-} = 6.798$, $\text{Cl}^- = 12.369$ 및 $\text{F}^- = 0.346 \text{ mg/l}$)에 비하여 HCO_3^- 와 Cl^- 의 함량이 월등히 낮았다 (Table 1). 모든 시료에서 Br^- , NO_2^- 및 PO_4^{2-} 는 검출한계 미만이었다. 이들은 또한 대청호의 원수에 비하여 HCO_3^- 는 감소하였으나 Cl^- 은 증가하였다. 특히 Cl^- 은 원수에 비하여 수돗물에서 1.4~2.1배 증가한 것으로 보아 정수 및 살균 처리과정에서 다소 부화된 것으로 보인다.

Table 1. Selected physical properties and anion constituents of the supply water in the Taejeon area.

Sample Localities	Sample Number	T (°C)	pH	Eh (mV)	EC (µS/cm)	HCO ₃ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	Br (mg/l)	Cl (mg/l)	F (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	Hard* (mg/l)	TDS** (mg/l)
Water-tower of the Daechong Lake	990223-01	5.7	6.92	-15	82	33,561	nd	5,513	nd	10,221	nd	5,493	0.951	3,219	30,368	73,206
	990825-01	26.0	7.40	-48	410	43,019	nd	4,958	nd	7,258	nd	5,970	0.336	1,721	27,384	78,051
Weolpyung Filtration Office	990223-02	9.8	6.96	-17	83	27,459	nd	5,349	nd	8,023	nd	7,464	0.362	2,716	32,431	76,752
	990825-02	26.1	6.76	-12	413	35,697	nd	4,723	nd	6,870	nd	11,199	0.337	1,667	27,839	67,401
Songchon Filtration Office	990825-03	24.1	6.65	-7	394	33,561	nd	4,716	nd	7,132	nd	11,742	0.334	1,669	28,205	75,558
Panamdong Jugong Apartment	990223-04	6.7	6.84	-11	93	22,883	nd	5,387	nd	13,916	nd	5,955	0.892	3,730	33,223	68,985
	990825-04	26.8	6.51	1	440	35,087	nd	4,820	nd	5,459	nd	11,806	0.340	1,712	28,393	75,727
Indong Hyundai Apartment	990223-05	7.1	6.72	-4	92	24,408	nd	5,425	nd	14,292	nd	6,001	0.844	3,685	33,223	69,912
Woosong Art Center	990223-06	8.4	6.76	-8	94	23,798	nd	5,566	nd	15,633	nd	6,338	0.864	3,527	32,009	72,315
	990825-06	24.9	6.85	-18	447	36,612	nd	5,353	nd	7,142	nd	12,241	0.339	1,481	27,848	80,331
Taejeon Station	990223-07	8.0	6.65	0	93	25,323	nd	5,454	nd	14,543	nd	6,264	0.864	3,713	32,901	72,133
Junggu Office of the Taejeon city	990223-08	6.7	6.60	2	88	23,798	nd	5,653	nd	12,305	nd	7,588	0.806	3,567	31,357	68,110
Provincial Office of the Chungnam	990223-09	16.1	6.71	-4	86	30,510	nd	5,428	nd	10,136	nd	7,559	0.589	3,242	31,642	73,350
Hospital of Chungnam National Univ	990223-10	21.8	7.08	-24	85	30,510	nd	5,633	nd	8,050	nd	8,134	0.372	3,253	30,841	70,738
	990825-10	26.7	6.32	10	445	30,510	nd	4,972	nd	5,566	nd	12,428	0.348	1,748	27,710	71,770
Oryudong Samsong Apartment	990223-11	8.0	6.93	-16	83	28,985	nd	5,210	nd	7,513	nd	7,516	0.363	2,769	30,124	68,292
Yucheondong Suburb Bus Terminal	990223-12	13.9	6.98	-18	291	111,362	nd	28,945	nd	33,678	nd	23,234	0.382	19,438	113,077	264,709
	990825-12	19.4	5.78	42	1320	118,989	nd	37,156	nd	32,684	nd	29,621	0.337	11,883	97,722	281,744
Taepyeongdong Sambu Apartment	990223-13	11.8	7.01	-20	82	27,764	nd	2,706	nd	4,235	nd	3,795	0.645	3,171	28,636	78,551
	990825-13	26.3	5.94	33	445	36,612	nd	4,776	nd	5,451	nd	12,540	0.335	1,840	29,672	79,938
Beobdong Green Town Apartment	990223-14	9.1	6.90	-14	93	23,493	nd	5,565	nd	14,578	nd	6,464	0.801	3,582	33,174	69,939
Ojeongdong Shindonga Apartment	990223-15	9.9	6.84	-11	91	25,934	nd	5,735	nd	14,145	nd	7,052	0.800	3,135	31,435	74,426
	990825-15	26.3	6.85	-19	442	36,002	nd	5,301	nd	7,676	nd	12,445	0.335	1,716	28,800	82,078
Yongjeondong Express Bus Terminal	990223-16	7.5	6.74	-5	89	22,883	nd	5,465	nd	11,399	nd	7,495	0.809	3,120	30,387	66,781
Hongdodong Hongdo Apartment	990223-17	7.1	6.78	-7	91	24,408	nd	5,566	nd	15,014	nd	6,072	0.853	3,195	31,601	71,183
	990825-17	24.4	6.71	-10	433	35,087	nd	5,668	nd	7,594	nd	11,975	0.349	1,753	27,753	78,749
Governmental Complex of the Taejeon	990223-18	20.3	6.72	-4	87	24,408	nd	5,845	nd	12,369	nd	7,816	0.398	2,968	31,680	70,382
Weolpyungdong Mueunghwa Apartment	990825-18	26.8	6.95	-24	445	33,561	nd	5,001	nd	7,846	nd	12,530	0.377	1,804	29,136	78,203
Weolpyungdong Hyangchon Apartment	990223-19	11.6	7.02	-20	86	28,985	nd	5,602	nd	9,514	nd	8,000	0.373	2,947	30,979	72,345
Court Administration of the Taejeon	990223-20	7.8	7.09	-24	85	28,069	nd	5,699	nd	8,654	nd	8,225	0.378	2,872	30,110	68,607
	990825-21	26.3	6.83	-10	441	33,866	nd	5,633	nd	10,201	nd	7,863	0.366	2,868	31,316	69,753
Tanbangdong Hanyang Apartment	990223-22	8.9	6.92	-15	87	26,544	nd	5,529	nd	8,263	nd	8,201	0.444	2,810	29,941	68,265
Jungchondong Jugong Apartment	990223-23	6.2	7.02	-20	84	27,459	nd	5,559	nd	7,930	nd	7,900	0.362	2,803	30,277	67,987
Seobu Police Office of the Taejeon	990223-24	7.5	6.94	-16	83	25,934	nd	5,520	nd	8,017	nd	7,814	0.366	2,825	30,481	66,574
Naedong Lotte Apartment	990223-25	11.7	6.89	-13	84	28,069	nd	5,520	nd	8,091	nd	8,001	0.361	2,784	30,210	69,330

nd=not detected, * =hardness (mg/l as CaCO₃), ** =calculated total dissolved solids

Table 2. Selected cation constituents of the supply water in the Taejeon area.

Sample Number	Al (µg/l)	As (µg/l)	Ba (µg/l)	Ca (mg/l)	Cd (µg/l)	Co (µg/l)	Cr (µg/l)	Cu (µg/l)	Fe (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (µg/l)	Na (mg/l)	Ni (µg/l)	Pb (µg/l)	Rb (µg/l)	Se (µg/l)	Sr (µg/l)	U (µg/l)	Zn (µg/l)
990223-01	14.64	0.63	15.95	7.734	nd	0.17	1.17	2.75	0.053	1.531	2.691	6.05	2.863	0.07	nd	1.44	0.50	72.00	3.99	1.80
990825-01	28.23	0.99	17.85	7.977	0.01	0.06	1.56	1.82	0.068	1.754	1.815	7.65	3.928	0.85	0.54	1.99	0.20	75.61	0.11	2.02
990223-02	14.91	0.45	15.13	9.279	nd	0.18	0.68	18.27	0.066	1.622	2.252	1.33	3.119	0.16	0.03	1.24	0.60	61.18	4.70	18.47
990825-02	84.41	0.44	18.21	8.128	0.01	0.05	1.32	0.90	0.033	1.770	1.834	1.89	4.173	0.16	0.12	2.05	0.44	78.38	0.01	1.19
990825-03	68.84	0.40	18.63	8.258	0.02	0.05	1.45	2.00	0.046	1.780	1.844	2.59	4.161	0.37	0.55	2.04	0.04	78.74	0.02	5.01
990223-04	23.32	0.48	16.12	8.917	nd	0.18	1.02	3.55	0.069	1.538	2.666	1.33	2.793	0.03	nd	1.52	0.59	73.77	7.26	96.52
990825-04	50.79	0.39	18.56	8.369	0.01	0.06	1.42	1.53	0.066	1.786	1.822	2.02	4.120	0.32	0.52	2.19	0.43	79.44	0.02	70.98
990223-05	20.26	0.37	16.28	8.904	nd	0.20	0.90	1.15	0.061	1.539	2.674	1.18	2.816	nd	nd	1.48	0.59	74.44	3.56	96.01
990223-06	11.43	0.45	15.28	9.015	nd	0.21	0.58	0.85	0.075	1.757	2.310	1.69	2.812	0.12	nd	1.84	0.59	64.21	8.26	393.72
990825-06	22.95	0.45	16.93	8.161	0.02	0.09	1.23	0.51	0.088	2.024	1.816	12.33	4.198	0.40	1.13	3.01	0.34	77.75	0.01	505.04
990223-07	21.94	0.34	16.36	8.744	nd	0.18	0.98	6.77	0.044	1.506	2.693	0.91	2.824	0.01	nd	1.43	0.69	73.63	6.70	10.70
990223-08	38.29	0.53	16.25	8.118	nd	0.17	0.98	1.15	0.046	1.473	2.698	3.14	2.822	0.01	nd	1.40	0.62	71.19	4.13	8.47
990223-09	3.75	0.26	15.79	8.283	nd	0.21	0.89	1.85	0.083	1.530	2.667	5.67	2.910	0.03	nd	1.43	0.60	71.40	4.56	34.31
990223-10	14.24	0.37	17.83	7.920	nd	0.16	0.99	181.79	0.046	1.553	2.693	1.85	4.150	0.34	0.94	2.26	0.45	78.74	7.26	26.56
990825-10	49.45	0.60	22.99	8.099	0.01	0.05	1.36	14.98	0.047	1.808	1.820	1.44	2.793	0.03	nd	1.52	0.59	73.77	0.02	8.55
990223-11	9.37	0.35	15.08	8.220	nd	0.17	0.81	3.04	0.064	1.608	2.335	2.19	3.081	0.02	nd	1.32	0.67	63.11	3.85	6.09
990223-12	1.92	0.71	77.83	32.247	nd	0.59	4.90	5.99	0.101	3.063	7.917	7.08	11.326	nd	nd	1.83	1.04	249.89	3.85	14.73
990825-12	1.43	0.58	73.18	31.189	0.01	0.10	5.74	5.52	0.119	3.617	4.817	10.74	14.255	0.34	0.42	2.67	0.73	233.65	1.36	9.23
990223-13	2.06	0.34	15.18	7.736	nd	0.24	1.12	3.07	0.132	1.579	2.755	7.93	2.901	0.20	nd	1.62	0.75	74.51	4.84	710.11
990825-13	29.02	0.40	19.79	8.738	0.01	0.09	1.29	2.65	0.071	1.964	1.909	8.65	4.298	0.49	0.20	2.54	0.41	83.37	0.02	210.88
990223-14	24.22	0.42	16.30	8.909	nd	0.19	0.88	1.40	0.044	1.547	2.659	2.58	2.879	0.04	nd	1.47	0.58	72.29	4.41	202.83
990223-15	17.89	0.37	15.45	8.812	nd	0.20	0.59	0.57	0.044	1.565	2.294	2.15	2.910	0.11	nd	1.32	0.52	63.34	6.98	561.19
990825-15	45.43	0.46	18.67	8.473	0.02	0.07	1.31	1.51	0.068	1.883	1.858	5.97	4.320	0.42	1.64	2.31	0.46	80.56	0.03	729.89
990223-16	20.53	0.50	15.38	8.409	nd	0.19	0.69	0.69	0.036	1.515	2.284	1.96	2.907	0.07	nd	1.24	0.57	62.61	5.13	10.45
990223-17	28.55	0.58	15.53	8.893	nd	0.20	0.73	0.65	0.078	1.545	2.285	2.29	2.851	0.12	nd	1.30	0.61	63.76	4.84	5.36
990825-17	64.68	0.41	18.08	8.141	0.01	0.13	1.41	1.39	0.048	1.914	1.805	3.28	4.135	0.76	0.40	2.49	0.42	77.29	0.02	23.07
990223-18	4.60	0.29	20.31	8.703	nd	0.18	0.82	1180.60	0.039	1.747	2.420	1.60	2.933	4.76	0.01	1.97	0.57	66.71	5.55	24.04
990825-18	49.02	0.39	23.54	8.612	0.01	0.05	1.34	119.05	0.046	1.945	1.855	1.71	4.270	0.58	0.59	2.57	0.51	80.85	0.01	9.74
990223-19	9.57	0.32	20.47	8.377	nd	0.17	0.86	50.06	0.067	1.675	2.448	1.59	3.031	0.36	0.03	1.66	0.67	67.15	3.71	739.27
990223-20	11.92	0.33	15.46	8.080	nd	0.16	0.83	17.57	0.037	1.605	2.417	1.90	2.964	0.23	nd	1.47	0.54	65.66	5.27	13.10
990223-21	8.19	0.34	15.31	8.597	nd	0.18	0.82	441.50	0.043	1.609	2.396	2.04	3.022	0.41	nd	1.37	0.67	65.35	6.69	16.03
990825-21	44.21	0.39	18.69	8.427	0.01	0.05	1.37	114.55	0.046	1.830	1.857	2.19	4.176	0.85	0.53	2.26	0.50	81.10	0.01	26.23
990223-22	7.29	1.44	15.40	8.075	nd	0.17	0.88	7.63	0.079	1.636	2.379	1.26	3.036	0.19	0.02	1.45	0.65	65.05	2.56	664.44
990223-23	10.76	0.37	15.52	8.229	nd	0.17	0.88	5.34	0.056	1.603	2.367	2.10	3.086	0.18	nd	1.33	0.58	64.20	5.13	20.02
990223-24	10.92	0.39	15.51	8.294	nd	0.17	0.89	3.58	0.042	1.617	2.377	1.87	3.108	0.06	nd	1.32	0.63	64.53	3.56	60.23
990223-25	9.97	0.29	18.77	8.299	nd	0.18	0.80	9.86	0.042	1.662	2.308	1.65	3.089	0.16	0.04	1.39	0.69	62.71	2.28	478.89

nd=not detected

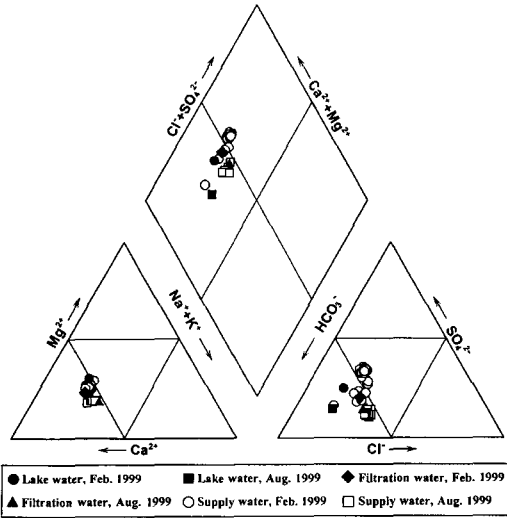


Fig. 2. The trilinear diagram showing some major chemical compositions of the supply water.

주성분 양이온의 평균함량은 2월의 상수도 물 ($Ca^{2+}=8.455$, $K^+=1.592$, $Mg^{2+}=2.483$, $Na^+=2.997$, $SiO_2=3.172$ mg/l)이 8월의 물 ($Ca^{2+}=8.376$, $K^+=1.894$, $Mg^{2+}=1.845$, $Na^+=4.040$, $SiO_2=1.731$ mg/l)에 비하여 Ca^{2+} , Mg^{2+} 및 SiO_2 의 함량은 다소 높으나, K^+ 와 Na^+ 는 8월 시료에서 월등히 높은 값을 갖는다 (Table 2). 이들을 계절에 따라 대청호의 원수와 비교하면 Mg^{2+} 와 SiO_2 의 함량을 제외한 모든 원소가 상수도 물에서 높은 함량을 보이는 것이다.

대표적인 양이온과 음이온을 선택하여, 연구대상 시료의 화학적 유형과 진화경향을 알아보려고 Piper (1944)의 삼각도에 표시하였다 (Fig. 2). 상수도 물의 양이온 특성은 Ca^{2+} 영역에 속하나, 대청호의 원수에서 $Na^+ + K^+$ 가 조금 부화되어 있고 Mg^{2+} 는 다소 결핍된 것을 볼 수 있다. 호수의 음이온 함량은 HCO_3^- 형에 속하나 상수도 물에서는 $HCO_3^- - SO_4^{2-}$ 영역에 걸쳐 분포하며 Cl^- 이 다소 부화되어 있다. 이는 8월의 시료에서 더욱 명확한 경향을 보였다. 따라서 상수도 물의 수질유형은 $Ca^{2+} - HCO_3^-$ 형에서 $Ca^{2+} - (HCO_3^- + SO_4^{2-})$ 형으로 진화하고 있음을 보여주나 조성변화가 거의 없이 밀집 분포한다.

수리지구화학적 특성

측정된 모든 자료를 검토한 결과, 상수도 물은 대청호의 원수에 비하여 Eh 및 EC는 다소 높으나 pH는

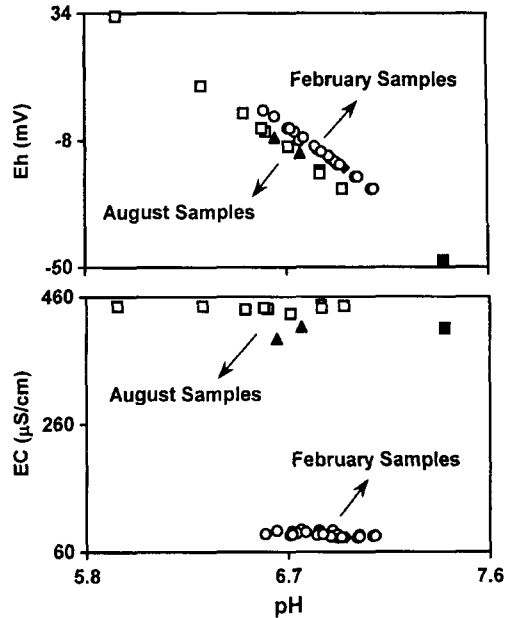


Fig. 3. Plots of Eh and EC against pH. Symbols are the same as those of Fig. 2.

조금 낮다. 또한 Eh와 pH는 서로 명확한 부의 상관도를 가지나, EC는 계절에 따라 차이가 심하여 특히 8월시료에서 아주 높은 값을 보였다. 그러나 pH의 변화와는 무관함을 나타내었다 (Fig. 3). 여기에서는 물의 화학적 특성을 파악할 수 있으며 배관망의 재질에 영향을 받을 수 있는 용존이온들의 함량을 지표로 수리지구화학적 특성을 검토하였다. 연구시료에서도 TDS가 증가함에 따라 음이온 총량도 증가하였으나, TDS와 양이온 총량 및 $Cu + Fe + Zn$ 의 함량은 뚜렷한 경향이 없었다 (Fig. 4). 그러나 전반적으로 2월시료에 비하여 8월시료에서 음이온 함량과 함께 TDS가 높음을 나타내었다.

EC는 계절적 차이가 심하기는 하나 TDS와 양의 상관도를 갖는다. 모든 상수도 물의 주성분 원소 함량은 거의 비슷하나 호수보다는 다소 높다. 특히 8월시료에서 HCO_3^- , Cl^- , Na^+ , K^+ 의 함량이 높고 2월시료에서는 SO_4^{2-} 가 높으나, 다른 원소들의 함량은 계절적 차이가 거의 없는 것으로 보인다 (Fig. 5). 또한 HCO_3^- 를 제외한 모든 원소가 대청호 물보다 수돗물에서 높은 함량을 갖는다. 이와 같이 상수도 물에서 이온총량이 증가하는 것은 이차적인 부화작용의 결과로 판단되며, 양이온보다는 음이온이 더욱 많은 영향을 받는 것으로 해석된다. 주성분 원소의 함량과 pH는 특별한 상관성을 갖지 않았으나 (Fig. 6), $Na + K$ 의 함량은

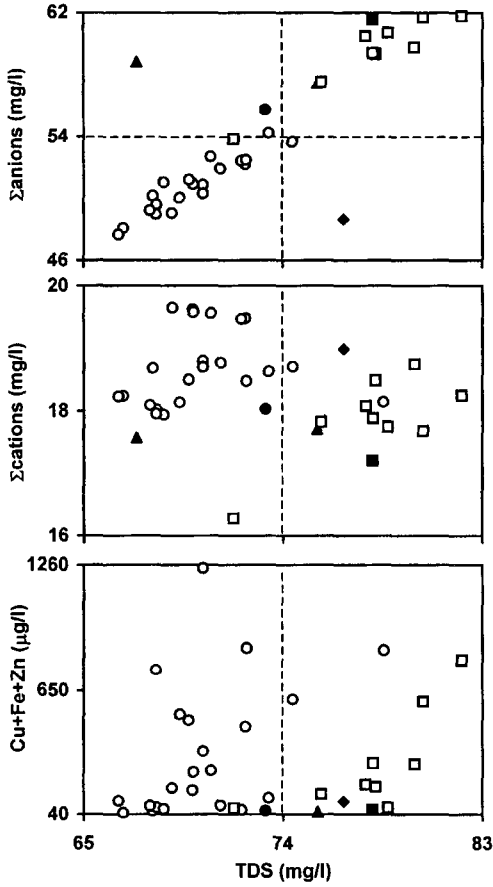


Fig. 4. Plots of total anion, total cation and Cu+Fe+Zn against TDS. Symbols are the same as those of Fig. 2.

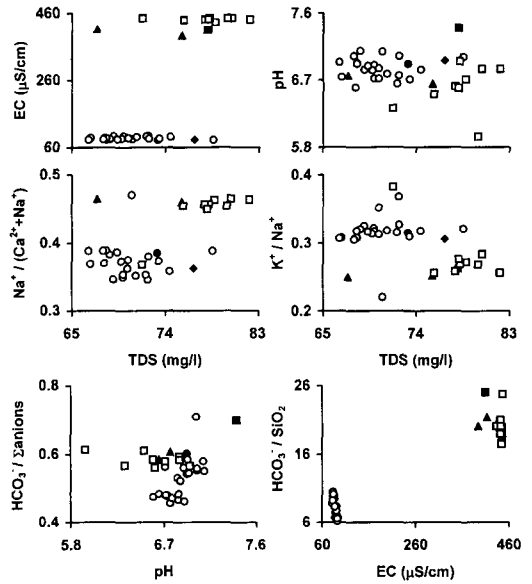


Fig. 5. Plots of EC, pH, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$, K^+ / Na^+ versus TDS, $\text{HCO}_3^- / \Sigma\text{anions}$ versus pH and $\text{HCO}_3^- / \text{SiO}_2$ against EC. Symbols are the same as those of Fig. 2.

여름철 시료에서 부화되어 있다.

대청호의 원수와 비교할 때, SO_4^{2-} 의 함량은 상수도 물에서 높으나 Fe의 함량은 오히려 수돗물에서 낮았다. 또한 Fe의 함량변화에 따른 SO_4^{2-} , Cu^{2+} 및 Zn^{2+} 의 거동은 아무런 경향이 없으나, 특정 시료에서 다소 부화된 특징이 있다 (Table 3). 일반적인 지표수의 화학적 진화경향과는 달리 상수도 물의 화학조성이 거의 변화하지 않고 EC의 계절적 양극화 현상과 함께 일부 원소의 계절적 함량차이가 뚜렷하다 (Fig. 7). 특히

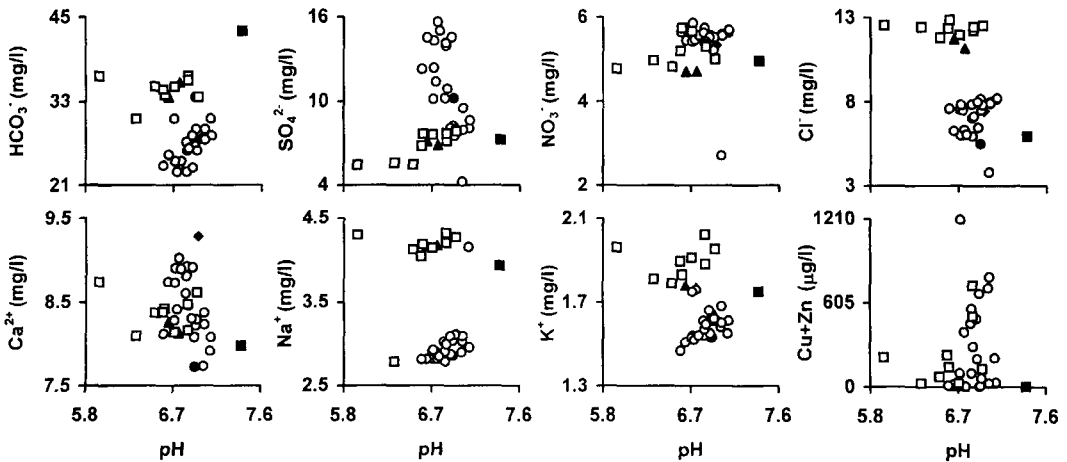


Fig. 6. Plots showing relationships among various chemical species against pH. Symbols are the same as those of Fig. 2.

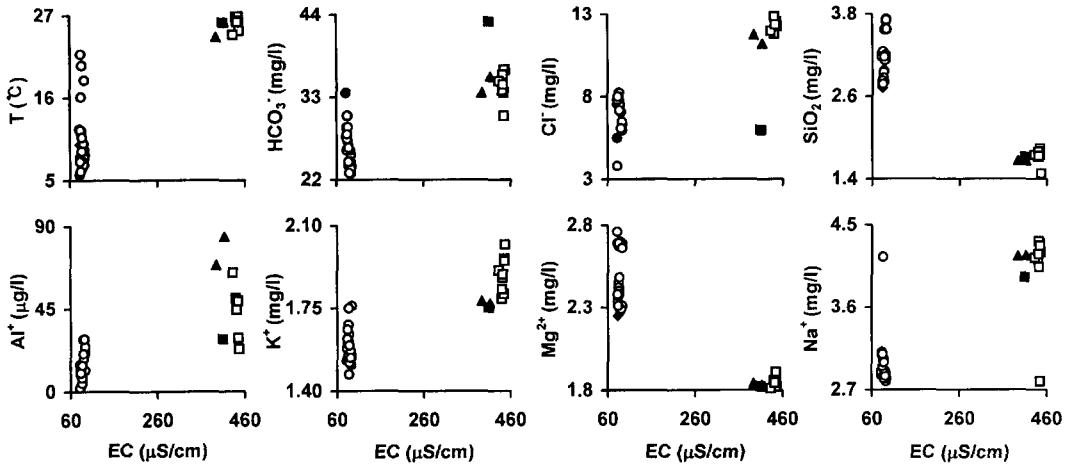


Fig. 7. Plots showing relationships among various chemical species against EC. Symbols are the same as those of Fig. 2.

EC가 높은 8월시료에서 HCO_3^- , Cl^- , Al, K, Na의 함량이 높고 Si와 Mg의 함량이 낮았으나, 각각의 시료에서 일정한 경향은 볼 수 없었다. 이는 계절적 조성차이가 있는 원수가 채수된 이후에 정수장을 거쳐 상수도로 공급되면서 자연적인 반응이 차단된 채 운반되기 때문일 것으로 판단된다. 그러나 Cu+Zn은 원수에 비하여 상당히 증가하였다.

연구대상 시료에서 침전광물 및 용존이온의 안정도와 상호반응을 알아보고자 WATEQ4F를 이용하여 열역학적 함수들을 도출하였다 (Nordstrom and Munoz, 1986; Drever, 1988). 각각의 자료에서 계산된 함수를 CaO, K_2O , MgO 및 Na_2O 와 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 계의 열역학적 안정영역 (Helgeson, 1969; Nesbitt, 1977)에, 연구시료의 안정범위를 도시하여 보았다. 이 시료들은 채취위치 및 계절에 따라 큰 차이 없이 일반적인 지표수 및 지하수와 비슷한 고령석 (kaolinite)의 안정영역에 포함되었다 (유재영 등, 1994).

일부시료에서 검출된 독성원소의 종을 확인하고자 WATEQ4F (Ball and Nordstrom, 1992)를 이용하여 이들의 용존상태를 추정하였다. 각 시료에서 모든 중금속은 금속이온 단독 (Cu^{2+} , Zn^{2+} 및 Sr^{2+})으로 존재하나, 일부 시료에서는 CO_3^- 및 OH기의 복합음이온을 형성할 수 있을 것으로 나타났다. 대부분의 시료에서 Al은 보통 $\text{Al}(\text{OH})_2$ 와 $\text{Al}(\text{OH})_4$ 로 산출될 것으로 추정되며, 황과 탄산이온은 각각 HCO_3^- 와 H_2CO_3^* 및 SO_4^{2-} 와 HSO_4^{2-} 가 비슷한 함량으로 존재할 것이 예상되나 pH가 낮고 중금속의 함량이 높을수록 HCO_3^- 와 SO_4^{2-} 가 우세하게 나타났다. 우라늄의 함량은 높지 않

으나 2월의 상수도 물에서는 대부분은 $\text{U}(\text{OH})_2$ 및 $\text{U}(\text{OH})_4$ 로 존재할 것으로 예측되었다.

원소의 부화와 결핍 및 여과효과

상수도 물에 함유된 대부분의 이온들은 음용수의 수질기준을 초과하지는 않으나, 대청호의 원수와 비교할 때 다소 부화된 특성을 갖는다. 특히 주성분 이온 중에서 HCO_3^- , F, Mg^{2+} , Mn 및 SiO_2 만이 호수에서 약간 높을 뿐이고, 모든 주성분 이온들은 상수도 물에서 부화되어 있다. 상수도 물의 미량원소 평균함량을 보면 대청호의 원수에 비하여 Cu와 Zn이 부화되어 있다. 또한 2월 시료에서는 비교적 높은 함량의 U이, 8월의 시료에서는 Al과 Sr이 검출되었다 (Table 3).

이를 명확히 규명하고자 분석된 모든 상수도 물을 대청호 원수의 조성으로 표준화하여 각각의 부화와 결핍에 대한 계수를 구하였다. 따라서 1 이상인 경우는 부화로 이하는 결핍으로 나눌 수 있다. 12번 시료를 제외한 2월과 8월의 상수도 물에 용존된 이온의 평균 부화 및 결핍 계수는 Table 3과 같다. 이를 요약하면 주성분 음이온=0.90과 1.06, 주성분 양이온=1.04와 0.99, 독성 양이온 (Cu+Fe+Zn)=6.06과 4.14 및 용존이온의 총량=0.96과 1.05 이다. 모든 시료에서 일반적인 음용수의 수질기준을 초과하는 경우는 없었으나, 거의 모든 성분이 수돗물에서 조금씩 부화되어 있다. 특히 Cu+Zn의 함량 (2월시료=126.75 및 8월시료=115.63)이 월등히 높은 것은 아래의 설명과 같이 배수 및 급수관의 재질에 의한 영향일 것으로 판단된다.

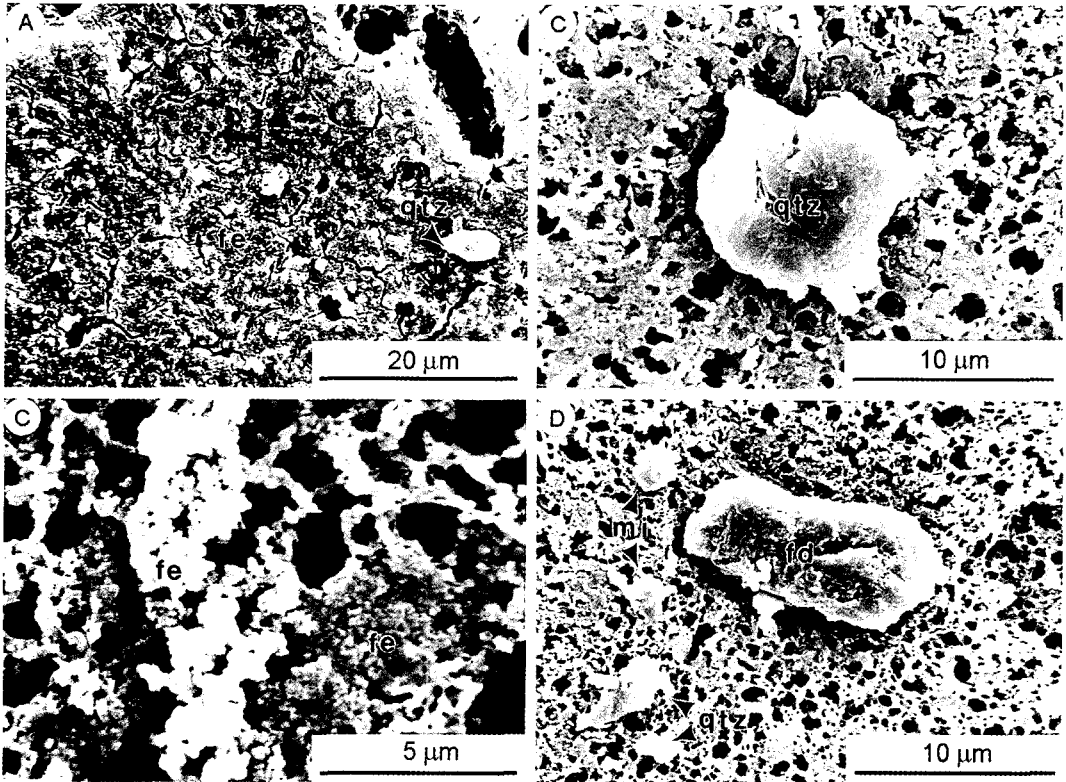


Fig. 8. SEM micrographs of the metal compounds and minerals remained on the membranes after filtration. A=irregular shaped colloidal particles of the Cu-Fe-Zn compounds (fe) and quartz (qtz). B=colloidal Cu-Fe-Zn compounds and irregular shaped quartz grain. C=colloidal groundmass and tiny globular aggregates (fe) of the Cu-Fe-Mn-Pb-Zn compounds. D=colloidal groundmass of Cu-Fe-Zn compounds and tiny particle of K-feldspar (fd), quartz and mica (mi) grains.

대부분의 일반시민은 상수도 물을 생활용수와 음용수로 이용하고 있다. 그러나 이차적인 재처리과정을 거치지 않고 직접 마시는 경우는 거의 없을 것이다. 이는 오랜 습관일수도 있으나 상수도 물의 품질을 확신하지 못하기 때문인 경우도 있을 것이다. 한편 모든 물의 화학분석에서는, 앞에서 언급한 바와 같이, 정해진 방법에 의하여 여과하고 분석의 전처리과정을 거친다. 따라서 일부 상수도 물을 대상으로 특정원소에 관한 여과효과를 살펴보았다. 이 연구에서 분석된 모든 시료들은 0.45 μm 공극의 질산염 침유소 여과지를 이용하여 부유물을 완전히 제거한 것이다. 이 여과지를 건조하면 회백색, 담황색 또는 적갈색의 부유물과 침전물이 흡착되어 있는 것을 쉽게 발견할 수 있다. 이 침전물들의 색도는 여과한 물의 양에 따라 조금 다르기는 하나 채수장소에 따라 큰 차이를 갖는다. 이는 상수관망의 재질, 노후도 및 미생물에 영향을 받는 것으로 판단된다. 그러나 거의 모든 상수도 물에서 2~3분 정도만 흘려보내면 색도가 높은 부유물은 거의 제거되었다.

이를 관찰하기 위하여 주사전자현미경을 이용하였다. 일반적으로 500 ml의 상수도 물을 여과하였을 때 0.02~0.35 mm 두께의 침전물이 생성되었다. 장소에 따라 1 mm 이상의 침전물이 쌓이는 경우도 있으나 (12번 시료), 대부분은 0.20 mm 미만의 두께를 갖는다. 이들을 상세히 관찰하면 1~2 μm 정도의 콜로이드상 비정질 입자가 서로 흡착되어 있는 것을 볼 수 있다 (Fig. 8). 일부 시료에서는 5~10 μm 정도의 철화합물과 석영, 장석 및 운모류와 같은 규산염 광물도 입자상태로 관찰된다. 광물을 제외한 모든 화합물들의 전체적인 조성은 Cu-Fe-Zn의 복합화합물이나, 부분적으로 Mn 및 Pb가 검출되기도 한다 (Fig. 9). 그러나 시료에 따라 약간의 차이가 있을 뿐 모든 건물에서 거의 동일한 산출상태와 화학조성을 보였다.

오염도 평가

앞에서 검토한 바와 같이, 연구대상 건물의 수도물

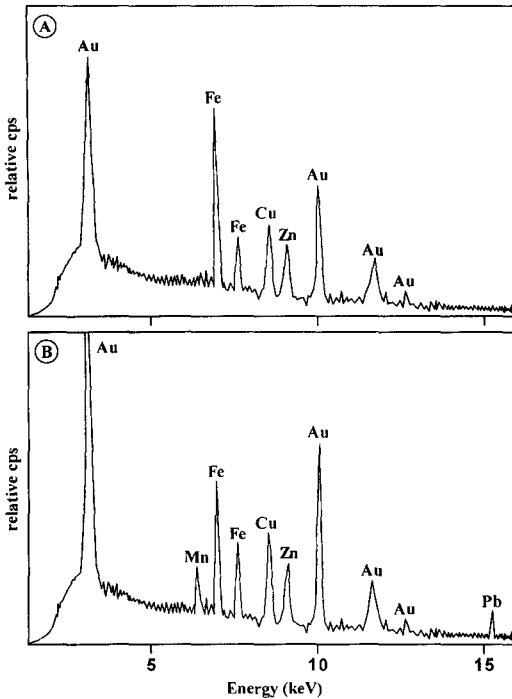


Fig. 9. Results of EDX analysis for the solid compounds remained on the membranes after filtration. A=the composition of colloidal particles shown in Fig. 8A, B=the composition of colloidal particles shown in Fig. 8C. The Au peaks are the results of coating effects.

에 관한 물리화학적 요소들 중에 pH, Eh 및 EC는 일반적인 지표수와 거의 비슷한 특성과 상관도를 갖는다. 상관분석과 회귀분석을 실시한 결과, 주성분 양이온과 음이온도 거의 동일한 거동특성을 보이나 함량변화가 크지 않아 특별한 의미는 없는 것으로 나타났다. 이를 대상으로 물의 화학적 성분변화를 표현할 수 있는 여러 도표에 표시하여 보았으나 (Stiff, 1951; Hem, 1985), 일반적인 지표수 및 지하수의 경우와는 달리 거의 동일한 특성을 보였다 (Fig. 10). 계절에 따른 11개 지점의 중복시료는 평균치를 이용한 것이다. 그러나 일부시료 (No. 12)에서는 모든 물리적 특성 및 양이온과 음이온의 함량이 아주 높아 음용수의 수질기준을 초과하는 것이다. 이는 송수관의 파손에 따른 오염수의 유입 또는 관의 부식등과 같은 이차적인 오염의 영향일 것으로 추정된다.

대부분의 상수도 물에서는 여과에 따라 Cu-Fe-Zn 화합물이 제거되는 것으로 나타났다. 특히 Fe의 함량은 원수인 대청호의 물에 비하여 모든 상수도 물에서 낮은 함량을 갖는 것으로 보아 탁월한 여과효과를 보

였다. 그러나 여과된 물을 분석하면 여전히 높은 함량의 Cu와 Zn이 검출되는 지역이 많다. 시료번호 4, 6, 13, 14, 15, 19, 22 및 25에서는 Zn의 함량이 202.83~739.27 $\mu\text{g/l}$ 로서 비교적 높았다. 또한 10, 18 및 21번 시료에서는 Cu의 함량이 114.55~1,180.60 $\mu\text{g/l}$ 의 범위로서 최근에 건축한 건물의 수도물에서 높은 특징이 있었다. 그러나 양자의 함량에는 특별한 상관관계가 없는 것으로 보아 건축물의 배관재질과 상태에 따라 다양한 특징을 갖는 것으로 판단된다.

연구시료의 수질을 국내외에 알려진 음용수의 수질 기준으로 표준화 할 때, 한 시료를 제외한 모든 물들은 비교적 양호한 상태이다. 이와 같이 중금속의 함량이 음용수의 허용 한계치 보다는 낮으나, 거의 모든 시민들은 여과과정을 거치지 않은 수도물을 음용수로 이용하는 것이 현실이다. 대부분 지역의 상수도 물에서는 수도꼭지를 돌림과 동시에 많은 양의 녹물이 배출되는 경향을 볼 수 있었다. 이는 상수관망의 재질에 영향을 받은 것으로서 노후된 건물일수록 장시간의 배출이 필요하다. 따라서 수도물은 국민의 식수원으로서 생수 및 지하수와 함께 철저한 관리와 보호가 있어야 할 것이며 각 기관으로 분산되어 있는 관리체계를 정비하여야 할 것이다. 또한 음용수의 종류에 따라 수질 오염의 기준치를 차별적으로 적용할 수 있는 제도적 장치가 필요할 것이다.

결 언

1. 대전지역에서 1999년 2월에 채취한 상수도 물은 온도=10.7°C, pH=6.86, Eh=-12 mV, EC=88 $\mu\text{S/cm}$, TDS=70.379 mg/l로서 일반적인 음용수의 기준을 만족한다. 이는 일부 동일지역에서 채취한 8월의 상수도 물 (온도=26.1°C, pH=6.59, Eh=-4 mV, EC=442 $\mu\text{S/cm}$, TDS=78.069 mg/l)과는 약간 다르다. 특히 겨울철 시료보다 여름시료에서 pH는 낮으나 TDS는 높고, EC는 보통 5배 정도나 높다.

2. 이 상수도 물의 전반적인 특성은 $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 형에 속하나, 호수에 비하여 Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- 및 중금속의 함량이 높다. 그러나 계절에 따라 대청호의 원수와는 거의 비슷한 물리화학적 특성을 보인다. 지구화학적 모델링을 통하여 규명된 상수도 물에 함유된 잠재적 독성원소들은 대부분 단독 양이온 (Cu^{2+} 또는 Zn^{2+})으로 존재하나 일부는 CO_3^- 또는 OH^- 상태의 복합음이온으로 존재한다. 이들은 또한 일반적인 지표수와 비슷한 고령석의 안정영역에 포함되었다.

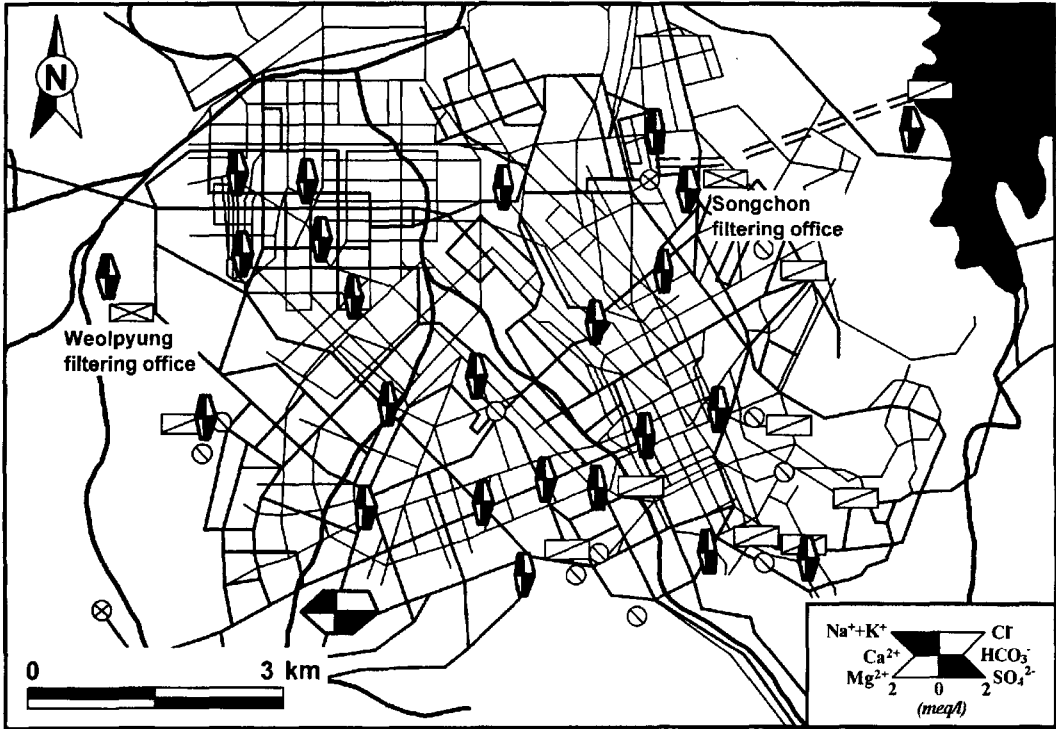


Fig. 10. Stiff's patterns for major chemical compositions of the supply water in the Taejon area. Sample locations are the same as those of Fig. 1.

3. 대청호의 물로 표준화한 상수도 물의 평균 계수 값은 모두 1.00에 근접하나 Cl⁻는 여름철 시료에서 두 배나 증가하였다. 상수도 관에서 기원한 것으로 추정되는 Cu+Zn의 평균 부화지수는 2월시료에서 126.75이며 8월시료에서 115.63로서 아주 높다. 그러나 양자는 특별한 관계가 없으며, 시료채취 위치에 따라 다양한 함량 차이를 보인다.

4. 상수도 물의 분석을 위한 여과지에는 담황색 또는 적갈색의 부유물과 침전물이 흡착되었다. 대부분은 1~2 μm 정도의 콜로이드상 입자로 수돗물 500 ml 당 0.02~0.35 mm 정도 피복되어 있으며 전체적인 조성은 Cu-Fe-Zn 화합물이나, 부분적으로 Mn 및 Pb가 검출되기도 한다. 이들은 양적인 차이만 있을 뿐 모든 시료에서 거의 동일한 산출상태와 화학조성을 갖는다.

사 사

이 연구는 1999년도 한국과학재단에서 지원한 특성 확장려사업 (고가특수연구기기)에 의하여 이루어 졌음을 밝히며 이에 감사한다. 시료처리와 분석을 도와준

강선희 학사계도 사의를 표한다.

참고문헌

권수한, 권영순, 김영상, 박기채, 윤영자, 차기원, 최희선 (1999) 기기분석의 원리. 자유아카데미, p. 1-21.
 김상중 (1995) 한국 수질오염의 원인과 개선방안. 한국정책학회, 환경·자원정책론, 박영사, p. 175-215.
 박석기, 안승구, 임석원 (1996) 해설 먹는 물의 수질관리-약수, 생수, 먹는 물 및 먹는 샘물. 동화기술, p. 63-98, p. 147-194.
 유재영, 최인규, 김형수 (1994) 춘천지역의 기반암 종류에 따른 지표수의 지구화학적 특성. 지질학회지, 30권, p. 307-324.
 이종형 (1996) 최신 상수도공학. 구미서관, 192p.
 이찬희, 이현구, 이종창 (2000) 충남대학교 대덕캠퍼스내 상수도 물의 수리지구화학적 특성. 자원환경지질, 33권, p. 181-193.
 Ball, J.W. and Nordstrom, D.K. (1992) User manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace and redox elements in natural waters. USGS, Open File Report, 91-183, 189p.
 Drever, J.I. (1988) The geochemistry of natural waters. 2nd ed., Prentice-Hall, New Jersey, 438p.
 Helgeson, H.C. (1969) Thermodynamics of hydrothermal system at elevated temperatures and pressures.

- Amer. Jour. Sci., v. 267, p. 729-804.
- Hem, J.D. (1985) Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 3rd ed., U.S. Geol. Survey, Water-Supply Paper, 2254.
- Nesbitt, H.W. (1977) Estimation of the thermodynamic properties of Na-, Ca-, and Mg- beidellites. *Can. Miner.*, v. 15, p. 22-30.
- Nordstrom, D.K. and Munoz, J.L. (1986) *Geochemical thermodynamics*. Blackwell Sci. Publ. Co., 477p.
- Piper, A.M. (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Trans. Amer. Geophy. Union*, v. 25, p. 914-923.
- Ramsey, M.H., Thompson, M. and Banerjee, E.K. (1987) Realistic assessment of analytical data quality from inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. *Anal. Proc.*, v. 24, p. 260-265.
- Skoog, D.A., Holler, F.J. and Nieman, T.A. (1998) *Principles of instrumental analysis*. 5th ed., Harcourt Brace and Co., 752p.
- Stiff, H.A.Jr. (1951) The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Jour. Petrol. Tech.*, v. 3, p. 15-17.

2000년 8월 16일 원고접수, 2000년 12월 1일 게재승인.