Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 24, No. 6, pp.701-708 (2008)

수돗물 수질에 따른 옥내급수관 부식에 미치는 영향분석

유순주† · 박수정 · 안경희 · 김현구 · 김창수 · 정일록 · 박영복*

국립환경과학원
*서울시 상수도연구원

The Corrosion Effect of the Water Pipelines in Buildings according to Drinking Water Quality

Soon-Ju Yu† · Su-Jeong Park · Kyung-Hee Ahn · Hyun-Gu Kim · Chang-Soo Kim · Il-Rock Jung · Young-Bok Park*

National Institute of Environmental Research
**Seoul Metropolitan Waterworks*
(Received 13 June 2008, Revised 17 September 2008, Accepted 14 October 2008)

Abstract

As a countermeasure for reduction of corrosion in the delivery and distribution pipes used for tap water, materials for the pipelines in-houses and the effect of water quality on corrosivity of water pipelines were investigated in the distribution system of Han river. As the corrosion index at 6 water purification facilities of Han river, average Langelier Saturation Index (LI) of raw and finished water were -1.0 and -1.4 respectively and average Larson Index (LR) were 9.5 and 9.9, respectively. And also corrosion potential showed corrosivity in finished water (-431~-462 mV) as well as raw water (-426~-447 mV). This results indicate that tap water quality of han river have corrosivity. To understand the corrosivity effect in pipe material used for premise distribution system, water quality of stagnant tap water and tap water were analyzed and the differences between them were calculated. The difference concentration of iron, copper and zinc were 12.9 μg/L , 31.0 μg/L and 45.0 μg/L respectively in galvanized steel pipe for use more than 15 years and showed highest concentration. As a result, the control to corrosivity in the water pipelines, corrosivity control treatment in the water purification system can be applied. In advance it is necessary to monitor corrosivity of water quality using corrosive index because corrosivity may differ from the seasonal and regional characteristics and water chemicals dosage. For the future the guideline for corrosion index have to be established.

keywords : Corrosion, Corrosion electronic potential, Drinking water quality, Langelier index, Larson index, Pipelines

1. 서 론

우리나라는 1980년대 중반까지 수돗물을 안정적으로 공급하는데 치중하였으나 1980년대 말부터 페놀, 트리할로메탄 등 각종 수질오염사고가 빈발하면서 수돗물의 수질기준을 1989년 27개 항목에서 2006년에 55개 항목으로 확대하는 등의 수돗물의 수질개선에 많은 노력을 기울여 왔다. 그러나 소비자의 먹는물 이용도 조사(환경부, 2006c)에 의하면 수돗물을 이용하는 비율이 2000년 61.6%에서 2005년에는 44.0%로 감소하고 있으며 식수로서 부적합한 사유로 막연한 불안감이나 냄새가 나거나 녹물 발생에 의한 심미적인 요인이 주요 원인으로 보고되고 있어 수돗물에 대한 신뢰도는 향상되지 못하고 있다.

실제 20년 이상된 노후배수관 및 급수관 비율은 각각 17.2%, 22.3%(환경부, 2006a)로 노후관의 부식에 의한 2차 오염이 수돗물의 수질을 저하시키는 요인이 될 수 있다. 옥내급수관의 부식에 따른 수질저하를 막기 위하여 수도법(환경부, 2006b)에서는 2006년 12월 말부터 해당 건축물의 옥내급수관의 정체수에 대하여 수질을 검사하여 검사결과에 따라 기준초과 시 세척, 갱생 또는 교체토록 의무화하였다. 그러나 물리적인 세척과 갱생 또는 교체와 같은 상수도관의 유지관리 방안은 상수도관의 문제에 대한 해결이라고 할 수 있으나 근본적인 상수도관의 부식억제를 위한 방안이라 할 수는 없다. 녹물방지를 위하여 사용하는 부식억제제는 수처리제의 기준과 규격(환경부, 2007)에서 적용범위를 급수관에서 수도관으로 확대하여 정수처리에서도 사용가능토록 하였으나 아직 급수관에서 주로 사용되는 것으로 실제 먹는물에 약품을 투입한다는 것에 대한 부정적인 시각 때문에 그 사용은 제한적이다. 이 같은 상수도관의 부식문제를 관리하기 위한 방안은 경제적 부담이 따르고 급수관이 아닌 송수관과 배수관에서의 상수도관의 부식은 여전히 남아 있어 수돗물 수질 악화 및 시설의 수명단축은 지속적으로 발생하게 된다. 따라서 상수도관의 부식에 따른 경제적 손실과 수질 악화를 최소화하기 위해서 정수처리 시 수질관리적 측면에서의 상수도관 부식억제 방안을

† To whom correspondence should be addressed.
ysu1221@me.go.kr

모색할 필요가 있다.

우리나라의 수질특성을 보면 상수원수 대부분은 하천이나 호소 등 지표수로 전체의 88%를 차지하고 있다. 이들 지표수 수질은 일부 석회암지질대를 제외하면 대부분 연수로 알칼리도가 낮고 pH가 낮아 침식성과 부식성을 띠고 있다. 곽필재 등(2001)은 LI를 기준으로 국내의 수돗물 수질이 모두 부식성이 높고 호소가 하천보다 부식성이 더 큰 것으로 보고하였고, LR은 낙동강수계에서 높다고 하였다. 국립환경과학원(2006)의 결과에서도 하천수와 호소수 수질은 부식성의 차이가 있고, 계절적으로 변화가 있으나, 대부분 부식성이 있는 것으로 보고하고 있다. 상수도의 부식방지를 위하여 수질관리적 측면에서 미국의 경우 2차 먹는물 수질기준(NSDWR)에 부식성기준을 “non-corrosivity”로 설정하였으며 정수장 수질을 pH 7.7~8.5, LI 값을 “0”에 가까운 양의 값으로 하는 프로그램을 승인했다(박영복과 공성호, 2005). 일본도 부식 관리를 위하여 수질관리목표에 LI를 -1.0~0, pH 7.5로 정하고 있다.

최근에 급수관의 내면부식에 미치는 주요 영향 평가에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며 수돗물에 대한 부식성 수질제어까지 하지 않더라도 기본적인 부식모니터링만이라도 실시하자는 의견도 제기되었다(곽필재와 이현동, 2003). 그러나 이를 위해서는 우선 국내에 적합한 부식도 평가항목과 기준을 설정하여야 한다. 우리나라는 주요 상수원인 하천과 호소의 수질은 수계별, 계절별 부식성지수가 다르게 나타나기 때문에 지속적인 부식지수별 부식성을 평가하고 이들 부식성 수질에 따른 금속성 재질인 상수도관의 2차오염 영향과 연계하여 검토하여 국내 수질특성을 반영한 부식성 지수를 정하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 한강수계를 대상으로 원수에서 수돗물까지의 부식성지수를 사용하여 부식성을 조사하고 상수도관 재질에 따른 부식에 의한 수돗물의 수질영향을 파악하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 한강수계 공급계통별 수질 및 부식도

2.1.1. 수질변화

한강수계 팔당과 한강을 취수원으로 하는 7개 정수장에서 원수, 정수 및 배수지수에 대하여 총 5회 시료를 채취하여 pH, 탁도, 잔류염소, 총유기탄소, 전기전도도, 경도, 알칼리도, 염소이온, 황산이온, 과망간산칼륨소비량을 분석하였다. 총유기탄소는 총유기탄소분석기(shimadzu TOC-VCPH)를 사용하였으며 알칼리도는 일본 상수시험방법(日本水道協會, 1995)에 준하였으며 이외 항목은 먹는물수질 공정시험법에 따라 분석하였다.

2.1.2. 부식도 조사

2.1.2.1. 부식성 지수

한강수계 7개 정수장에서 원수, 정수, 배수지수를 2007년 4월에서 10월까지 매월 1회 채취하여 탄산칼슘포화지수로 부식억제지수인 Langelier saturation index (LI) (Langelier, 1936), Ryzner saturation index (RI), Aggressiveness index (AI)와 부식촉진지수인 Larson ratio (LR)를 조사하였다. 각 지수의 산정은 Table 1과 같다. 각 지수는 칼슘이온을 이온크로마토그래피에 의하여 분석하여 Standard Method 2330B (AWWA, 2000)에 따라 적용하였다.

2.1.2.2. 부식전위

수돗물의 부식 현상과 부식성 여부를 파악하기 위해서 수도관 중 부식에 취약한 강관을 대상으로 한강 수계 원수와 수돗물을 대상으로 부식전위를 측정하여 비교하였다. 실험에 사용한 시편은 수도용 강관을 육면체 형태로 절단하여 약 1.5 cm^2 표면적을 갖는 한 면만 남기고 나머지는 에폭시수지로 마운팅하였다(Fig. 1). 마운팅한 시편은 습식연마하여 아세톤 용액 속에서 3분 동안 초음파 및 초순수로 세척하여 데시케이터에서 1시간 건조한 다음 실험에 사용하였다. 강관시편을 서울시 소재 6개 정수장의 원수와 수돗물에 50초간 침지시켜 부식전위를 측정하였다. 부식전위는 Solatron사의 Multistat 1480을 이용하여 작업전극은 강관시편이고 보조전극(counter electrode)은 탄소전극(graphite electrode), 기준전극(reference electrode)은 포화칼로멜전극(saturated calomel electrode)이다.

Table 1. Corrosion index

Index	Equation	Judgement
LI	LI = pHa-pHs	LSI > 0 : non corrosive LSI = 0 : equilibrium LSI < 0 : corrosive
RI	RSI = 2pHs-pH	RSI < 5.5 : high scale formed 5.5 < RSI < 6.2 : scale formed 6.2 < RSI < 6.8 : low scal formed 6.8 < RSI < 8.5 : corrosive 8.5 < RSI : high corrosive
AI	AI= pH + log(Ca)(alk)	AI > 12.0 : non corrosive AI 10.0~11.9 : corrosive AI < 10.0 : high corrosive
LR	LR=([Cl^-][SO_4^{2-}])/[HCO_3^-]	LR > 0.3 : corrosive LR < 0.3 : non corrosive

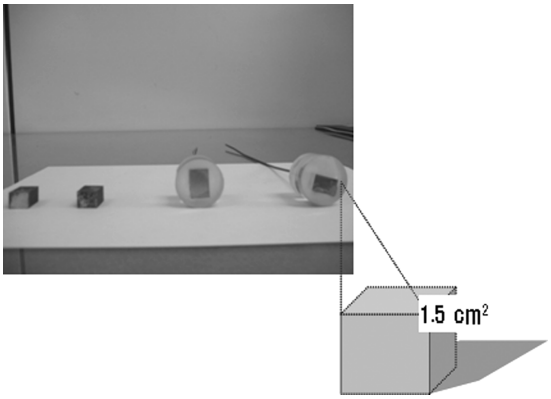


Fig. 1. The steel coupon used in the experiment.

2.2. 수도관에서 2차오염물질

원수에서부터 배수지까지 상수도관의 부식 영향을 조사하기 위해 2.1.1에서 채취한 원수, 정수 및 배수지수의 알루미늄, 철, 구리, 아연, 납, 니켈을 분석하였다. 옥내급수관 부식에 따른 수돗물의 수질 영향을 조사하기 위해서는 Table 2와 같이 7개 정수장의 배수지로부터 수돗물을 공급받는 가구, 1차(5월) 총29개, 2차(9월) 총27개 가구에 대하여 오후 수돗물과 오전 6시경 수돗물(정체수돗물) 각각 냉수를 채취하여 알루미늄, 철, 구리, 아연, 납, 니켈을 분석하였다. 아파트의 경우 옥내급수관 재질별 아연도강관(galvanized steel pipe, GSP), 동관(copper pipe, CP), 스테인리스강관(stainless steel pipe, SSP)으로 구분하였다. 금속분석은 ICP(Perkin Elmer Optima 5300DV)를 사용하였으며 표준물질은 ICP-MS multi standard solution(AccuStandard)으로 혼합용액을 조제하였다. 혼합용액 희석에는 초순수를 사용하였으며 용기는 polyethylene(PE) 재질을 사용하였다. ICP방법에 따른 검출하한을 산정하여 이 농도 이하는 불검출로 간주하였다. Al, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb의 검출한계는 각각 5, 0.5, 1, 1, 1, 1, 2 μg/L였다.

Table 2. The material types of premise distribution pipes

Code	Type	Material	1 st	2 nd
Total			29	27
1	Apartment	GSP	6	6
		CP	6	5
		SSP	2	2
2	Vila	-	12	11
3	Private	-	3	3

3. 결과 및 고찰

3.1. 한강수계 수질

3.1.1. 상수원수의 수질 변화

한강수계의 팔당호와 한강의 수질 차이는 크지 않았으며 계절에 따라 수질이 변화하고 있다. 계절별 농도 변화가 있는 항목은 전기전도도, pH, 알칼리도, 경도, 염소이온, 황산이온으로, 이 가운데 전기전도도, 알칼리도, 경도, 염소이온과 황산이온은 갈수기인 6월에 각각 171.4 μS/cm, 66.5 mg/L, 50.7 mg/L, 9.5 mg/L, 14.1 mg/L로 증가하여 하천유량이 적을 때 상대적으로 수질농도는 증가하고 있다. pH는 4월과 10월에 각각 7.9와 7.7로 높게 나타나고 있어 조류발생에 따른 영향으로 판단된다. 풍수기인 8월에 농도가 증가하는 항목은 탁도, 총유기탄소, 과망간산칼륨소비량, UV_{254}, 알루미늄, 철, 망간으로 각각 36.2 NTU, 2.3 mg/L, 7.9 mg/L, 0.062 cm^{-1}, 626.3 μg/L, 556.0 μg/L, 43.9 μg/L였으며 납은 검출한계(2 μg/L) 미만이었다. 반면에 구리와 아연의 농도는 계절별 차이가 크지 않았다.

이와 같이 수질항목간의 관련성을 살펴보기 위하여 SPSS 통계프로그램을 사용하여 항목간의 상관계수를 구한 결과 Table 3과 같다. 항목 간 통계적으로 유의하게 상관성이 높은 것은 대부분 탁도와 관계가 되는데 탁도가 증가하는 시기는 대부분 강우 시이며 이때 수질 변화가 크다. 강우 시에는 토양입자의 자체성분과 여기에 부착된 토양부식물과 유기물이 함유된 토사류가 유입되기 때문에 일부 항목은 농도가 증가하고, 일부 항목은 유량의 증가에 따라 희석되어 농도가 감소하기도 한다. 탁도와 정의 상관이 있는 항목은 대부분 0.01의 높은 유의수준으로 UV_{254}, 용존유기탄소, 알루미늄, 망간, 철, 납이었다. 난분해성물질 중 부식성 유기물의 지표인 UV_{254}와의 상관계수는 0.85로 매우 높고, 알루미늄, 철도 각각 0.93, 0.89로 높게 나타났다. 반면에 탁도와 경도, 알칼리도와의 상관계수는 각각 -0.53, -0.51로 약간 낮으나 0.01의 높은 유의수준으로 부의 상관성을 보이고 있다. 따라서 강우 시 유입되는 탁도는 현탁성 유기물질인 부식물질, 토양성분의 증가로 용존유기탄소, 알루미늄, 철 등의 농도는 증가하나, 수량 증가에 따라 희석되는 경도와 알칼리도에 관련되는 물질의 농도는 감소하는 것으로 나타나 원수의 수질은 계절에 따라 변화하고 있음을 알 수 있다.

3.1.2. 정수처리에 따른 수질변화

7개 정수장의 원수, 정수, 배수지수의 평균 수질농도는 Table 4와 같다. 조사대상 정수장의 정수 및 배수지수 수질은 모두 먹는물 수질기준을 만족하였다. 항목별 수질변화를 살펴보면 원수, 정수, 배수지수의 평균 pH는 각각 7.5, 7.2, 7.3으로 정수처리 후 낮아졌으나 큰 변화는 없었으며, 정수 및 배수지수의 범위가 6.6~7.6으로 곽필재 등(2002)의 국내 부식성 수질제어를 위한 pH의 범위 7.5~7.8에 비하여 다소 낮은 농도를 보이고 있다. 구리관 부식에 영향을 미치는 잔류염소의 경우 정수와 배수지에서 각각 0.70 mg/L, 0.53 mg/L이고, 그 범위는 0.3~1.0 mg/L이다. 전기전도도는 원수, 정수, 배수지수 각각 151.6, 159.7, 159.0 μS/cm로 정수처리 시 수처리제의 영향으로 약간 증가하고 있다. 경도는 각각 58.2, 57.8, 57.5 mg/L는 큰 변화가 없는 반면 알칼리도는 각각 42.3, 36.0, 35.9 mg/L로 응집제의 사용에 따라 원수에 비하여 정수에서 약 15%의 감소를 보이고 있다. 부식을 촉진하는 염소이온과 황산이온 농도를 살펴보면 염소이온의 경우 각각 8.3, 13.0, 13.2 mg/L로 정수처리 후 약

Table 3. The relationship coefficients between the parameter on water qualities of Han river

Item	Cond.	Turb.	UV_{254}	TOC	DOC	$KMnO_4$	Hard.	Alkal.	Al	Mn	Fe	Cu	Zn
Cond.	1.00												
Turb.	-0.46**	1.00											
UV_{254}	-0.52**	0.85**	1.00										
TOC	-0.26	0.50**	0.59**	1.00									
DOC	-0.44*	0.70**	0.69**	0.81**	1.00								
$KMnO_4$	-0.53**	0.53**	0.49**	0.46**	0.48**	1.00							
Hard.	0.59**	-0.53**	-0.46**	-0.49**	-0.57**	-0.40*	1.00						
Alkal.	0.55**	-0.51**	-0.49**	-0.54**	-0.58**	-0.42*	0.93**	1.00					
Al	-0.42*	0.93**	0.76**	0.32	0.56**	0.38*	-0.41*	-0.40*	1.00				
Mn	-0.12	0.69**	0.61**	0.16	0.26	0.21	-0.15	0.02	0.77**	1.00			
Fe	0.35*	0.89**	0.70**	0.20	0.46**	0.32	-0.31	-0.29	0.98**	0.83**	1.00		
Cu	0.24	0.07	0.01	0.23	0.09	-0.10	0.17	0.00	0.07	0.03	0.04	1.00	
Zn	0.07	0.15	0.08	0.15	0.02	-0.09	0.06	-0.05	0.22	0.16	0.20	0.53**	1.00
Pb	-0.27	0.67**	0.46**	015	0.35*	0.24	-0.27	-0.21	0.66**	0.54**	0.64**	0.11	0.18

※ ** : significance level 0.01(both), * : 0.05(both)

Table 4. Variation of average water quality in the distribution system of drinking water

Item	Unit	Raw water	Finished water	Distribution tank water	Standards
pH	-	7.5	7.2	7.3	5.8~8.5
Residual chlorine	mg/L	-	0.70	0.53	4.0
Conductivity	μS/cm	151.6	159.7	159.0	-
Hardness	mg/L	58.2	57.8	57.5	300
Alkalinity	mg/L	42.3	36.0	35.9	-
Chloride	mg/L	8.3	13.0	13.2	250
Sulfate	mg/L	11.6	11.6	11.6	200
Turbidity	NTU	13.3	0.17	0.20	1(0.5*)
Total organic carbon	mg/L	1.67	0.93	1.00	-
$KMnO_4$ demand	mg/L	5.9	1.5	1.6	10

* : tap water

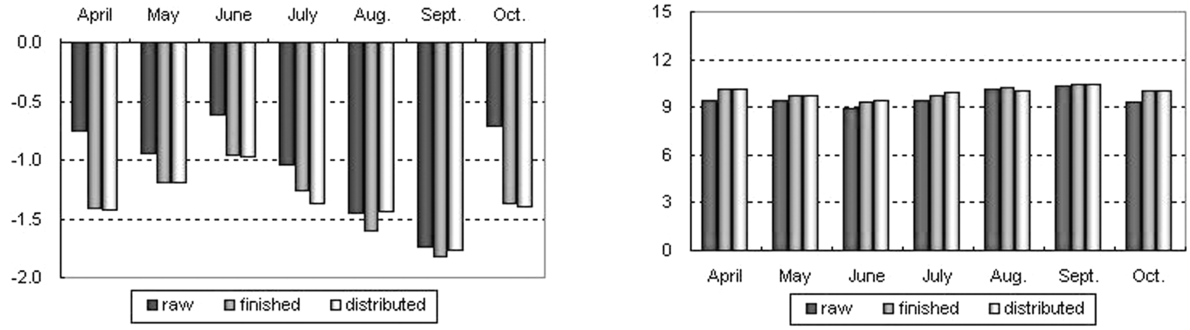
59%의 증가를 보여 전기전도도와 같이 수처리제의 영향을 보이고 있다. 황산이온은 평균 농도는 11.6 mg/L로 동일한 농도수준이며 곽필재 등(2001)이 조사한 한강 수계 수돗물 중 황산이온농도 범위(14.8~21.6 mg/L)보다 낮았다. 총유기탄소는 각각 1.67, 0.93, 1.0 mg/L로 일본 동경도(日本 東京道 水道局, 2007)에서 2004년 6월부터 "안전하고 맛있는 물"을 위한 수도꼭지 수질목표치 중 총유기탄소 기준인 1.0 mg/L를 만족하는 것으로 나타났다. 또한 미생물의 재성장이나 생물막에 영향을 미치는 영양분 인자인 TOC와 AOC 항목의 제한농도를 각각 2.4 mg/L, 50 μg/L로 하고 있는데(환경부, 1997) 이보다 충분히 낮은 농도범위를 보이고 있다. 상수도관 부식과 관련하여 정수처리 시 부식을 억제하는 알칼리도, 경도의 변화에 비하여 부식을 촉진하는 염소이온 농도의 증가 폭이 비교적 크게 나타났다.

3.2. 한강수계 부식도 평가

3.2.1. 부식성지수

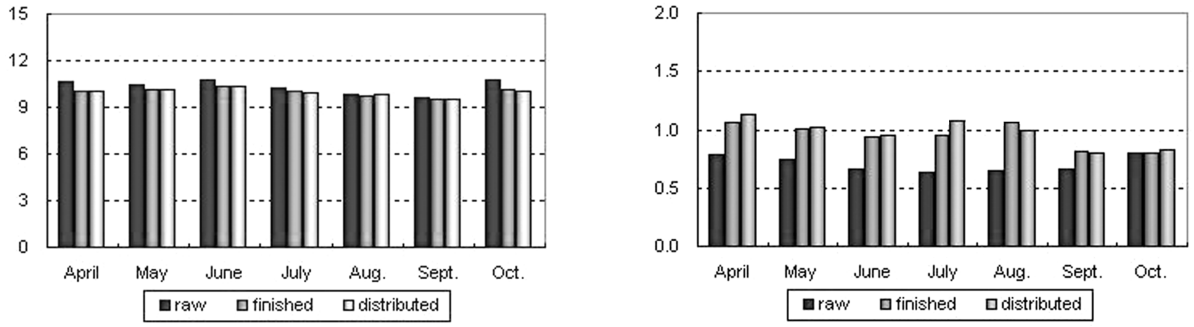
수돗물에서 탄산칼슘 평형에 관계되는 부식성지수의 기본 성분은 H_2O, CO_2, H_2CO_3, H^+, OH^-, HCO^3, CO_3^{2-}과 Ca^{2+} 등이며 이들과 관련되는 수질항목은 pH, 경도, 알칼리도 등이 있다. 수돗물에 탄산칼슘이 불포화되어 있으면 금속부식이 촉진되고 상수도관의 라이닝재료로 사용되고 있는 시멘트에 칼슘이온의 용출을 촉진시키고 시멘트를 중화시켜 내부금속의 부식을 야기하게 된다. 본 조사에서는 LI, RI와 AI를 중심으로 조사한 결과 한강수계 원수, 정수, 배수지수에 대하여 모든 시료에서 부식성의 수질을 보이고 있다. Table 5와 같이 LI, RI 및 AI 모두 정수처리 후 부식성이 증가하여 정수에서 평균 LI는 -1.4, RI는 10.0, AI는 10.0을 보이고 있다. Fig. 2와 3에서 보는 바와 같이 RI와 AI에 비하여 LI는 계절적인 변화와 정수처리에 따른 영향을 민감하게 보이고 있다. 곽필재 등(2001)은 한강 정수의 LI는 -2.1~1.1의 범위이고 본 조사 결과와 유사한 값을 보이고 있다. 정수처리 후 이들 지수 값이 증가하는 이유는 응집반응 시에 알칼리도 감소때문이며 정수에서 배수지까지의 부식성의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 계절별로 평균 부식지수의 변화는 정수의 LI가 가장 낮은 때는 6월이며 그 값은 -0.96이고, 가장 높을 때는 9월이며 그 값은 -1.82로(Fig. 2) 강우현상과 매우 밀접한 관련을 가지는데 이는 강우로 인한 고탁도시 알칼리도가 감소하였기 때문이다.

한편, 염소이온과 황산이온과 같은 반응성 음이온들은 금속을 부식시키고 양극에서 강산을 형성하며, 반면에 중탄산



(a) LI (b) RI

Fig. 2. The seasonal variation of LI and RI in the distribution system.



(a) AI (b) LR

Fig. 3. The seasonal variation of AI and LR in the distribution system.

Table 5. Average LI, RI, AI and LR in raw, finished and distributed water

Classification	LI	RI	AI	LR
Raw water	-1.0	9.6	10.3	0.7
Finished water	-1.4	10.0	10.0	1.0
Distributed water	-1.4	10.0	10.0	1.0

염과 같은 이온은 약산을 형성하고 보호스케일을 형성하여 침전한다. 이들 수질요인을 토대로 개발된 것이 LR이다. LR은 Table 5와 Fig. 3에서와 같이 대부분의 값이 부식성 기준인 0.3 이상이고 원수, 정수와 배수지수에서 평균값이 각각 0.7, 1.0, 1.0으로 원수 중 황산이온농도와 염소이온농도의 변화는 크지 않으나 정수처리 후에 증가하였다. 이는 폴리염화알루미늄과 같은 응집제와 염소 사용에 따른 것으로 사료된다.

결과적으로 이들 지수 가운데 탄산칼슘의 침전과 관련된 알칼리도, pH 등에 기초한 LI와 황산이온, 염소이온 및 알칼리도에 기초한 LR이 국내 수질 특성과 정수처리에 따른 부식성의 변화를 민감하게 보여주고 있다. 서규태 등(1998)은 서울시를 대상으로 한 경우 LR이 낮은 범위로 나타나 이온성 물질에 의한 부식영향은 무시될 수 있다고 하였으나 곽필재 등(2000)은 4대강 수계의 하천과 호소를 대상으로 한 부식성 평가에서는 부식억제인자인 탄산칼슘포화지수와 LR을 도입할 것을 제안하였다. 또한 곽필재와 이현동(2003)은 KWI(Korea water index)와 같이 부식억제인자와 부식촉진인자를 설정하여 수질항목 변화에 따라 사용할 수 있는 지수를 적용하였고 그 결과 부식억제인자에 속하는 LI와 부식촉진지수인 LR과 거의 유사한 값을 보이고 있다. 이와 같이 그간의 연구결과와 국내·외 보편적으로 사용되는 부식성지수를 고려한다면 LI와 LR을 적용하는 것이 국내 수질변동과 정수처리 영향을 반영할 수 있는 적합한 지수라 판단된다.

따라서 상수도 수질 및 상수도관에 따른 부식을 저감하기 위하여 적합한 수질제어 요인을 규명하기 위해서는 정수장별로 이들 지수를 중심으로 모니터링이 필수적이다. 부식성 지수를 모니터링할 수 있는 제도적인 방안으로 현재 50,000톤/일 이상 정수장 및 특·광역시의 정수장에 대하여 실시하는 먹는물 수질감시항목에 부식성지수를 추가하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

3.2.2. 부식전위

강관시편을 사용하여 원수의 부식전위를 측정한 결과, 그 범위는 각각 -426~-447 mV로 유사한 범위 내에 있었으며 수돗물의 부식전위는 원수보다 약간 높은 -431~-462 mV로 측정되었다(Fig. 4). 즉 강관에 대하여 원수와 수돗물의 부식전위 차이가 크게 나지 않아 수돗물의 부식성은 원수 특성 그대로 유지하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 한강수계 원수와 정수의 수질은 강관의 부식에 강하게 영향을 주고 있고 LI와 LR에서 부식성이 있음을 보여주는 결과와 일치한다.

3.3. 수도관 2차오염물질 평가

Table 6. Average water qualities in the distribution system of drinking water

Element	Unit	Raw water	Finished water	Distribution tank water	Standards
Aluminum	μg/L	238.8	54.4	55.0	0.2 mg/L
Manganese	μg/L	26.9	ND	ND	0.3 mg/L*
Iron	μg/L	229.8	ND	6.4	0.3 mg/L
Nickel	μg/L	ND	ND	ND	-
Copper	μg/L	2.4	0.7	3.2	1.0 mg/L
Zinc	μg/L	4.2	13.7	2.9	3.0 mg/L
Lead	μg/L	ND	ND	ND	0.05 mg/L*

*Mn 0.05 mg/L, Pb 0.01 mg/L, standard reinforcement for tap water 2011

3.3.1. 배수관에 의한 영향

공급계통별 2차 오염물질에 관한 평균 농도는 Table 6과 같다. 알루미늄은 원수 238.8 μg/L, 정수 54.4 μg/L, 배수지수 55.0 μg/L이고, 망간은 원수에서 26.9 μg/L였으나 정수와 배수지는 불검출이었다. 철은 원수 229.8 μg/L, 정수 불검출, 배수지수 6.4 μg/L로 배수지수에서 증가되었고 니켈과 납은 모두 불검출이었다. 구리는 각각 2.4, 0.7, 3.2 μg/L로 정수처리 후 감소되다가 배수지수에서 약간의 증가를 보였으며 아연은 각각 4.2, 13.7, 2.9 μg/L로 정수처리 후 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 정수처리 후 배수지에서 증가하는 항목은 알루미늄, 철, 구리이며 이 가운데 철은 수질기준 0.3 mg/L에 못 미치는 수준이기는 하나 가장 큰 증가를 보이고 있다. 서울시 수돗물평가위원회(2006)에서 조사한 2006년 서울시 6개 정수장의 원수와 정수, 직수와 물탱크수의 수질분석 결과에서도 정수 후 직수까지 즉 송수관과 배수관까지 아연과 철이 증가하였으며, 증가율은 아연이 2.5배, 철은 불검출에서 0.033 mg/L로 조사되었다. 상수도관의 총연장은 관망에 따라 배수관 49.2%, 급수관 45.0%, 송수관 4.6%, 도수관 1.2%를 차지하고 있는데 이들 수도관별로 송수관은 강관과 주철관이 각각 44.6%, 48.8%로 대부분을 차지하고 있으며 배수관은 주철관이 63.2%로 가장 많고 서울시의 경우 시멘트라이닝닥타일주철관이 주로 송수관과 배수관으로 사용되고 있다. 따라서 송·배수관이 대부분 강관과 주철관이기 때문에 수도관의 부식 영향으로 볼 수 있으며, 다른 항목에 비하여 철의 용출이 수질에 영향을 미치고 있다.

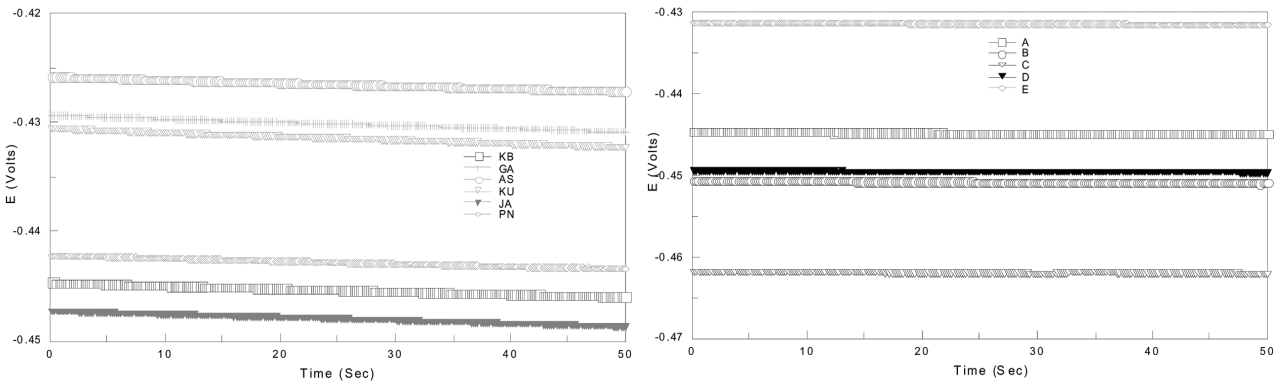
3.3.2. 옥내급수관에 의한 수질영향

급수관의 재질 가운데 스테인리스강관 32.9%, 합성수지관이 43.2%로 가장 많이 차지하고 있으며 1994년 이후 사용이 금지된 아연도강관도 아직까지 6.1%를 차지하고 있다(환경부, 2006a).

옥내급수관의 부식에 따른 수돗물의 금속성 수질은 황재운 등(2004)의 결과에서 저수조보다 옥내급수관을 통과하면서 증가한다고 하여 본 조사에서는 저수조를 별도로 구분하지 않고 수돗물과 이른 아침 채취한 수돗물(정체수돗물)의 금속성 수질을 조사하여 급수관의 수질영향으로 간주하였다.

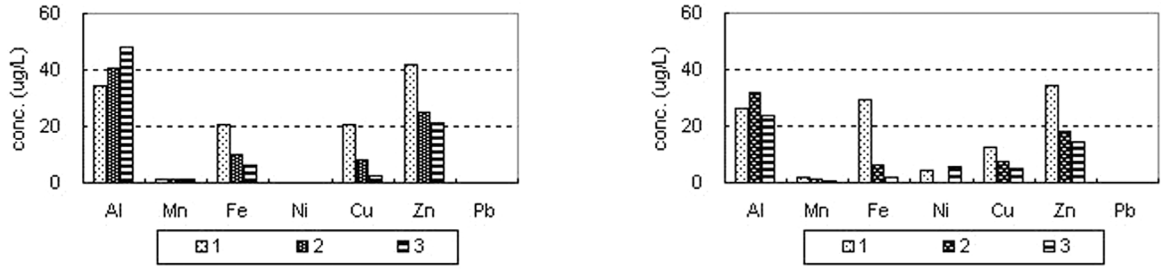
수돗물의 수질은 모두 먹는물 수질기준 이내였으며 옥내급수관을 아파트(1), 다세대(2), 단독주택(3)으로 구분하여 조사한 결과 수돗물의 평균 수질은 Fig. 5와 같다. 아파트에서 수돗물 중 철, 구리, 아연의 평균 농도범위는 각각 20.3~29.5 μg/L, 12.4~20.3 μg/L, 34.5~41.6 μg/L이고 단독 및 다세대 주택에서 수돗물 중 철, 구리, 아연의 농도인 1.6~9.7 μg/L, 2.2~8.2 μg/L, 14.3~24.9 μg/L였다. 아파트와 같은 대규모 공동주택의 금속성 수질농도가 모두 높은 것으로 조사되어 옥내급수관의 규모가 클수록 이들 금속성 배관에서의 부식이 수돗물의 수질에 영향을 미칠 가능성이 커지는 것을 알 수 있다.

아파트의 급수관 종류에 따라 수돗물의 금속 농도를 철, 구리의 농도로 비교하면 Table 7과 같다. 아연도강관은 대부분 1994년 이전에 사용된 것으로 아연도강관에서 철의 농도가 평균 53.9 μg/L로 가장 높고 범위도 2.6~180.9 μg/L



(a) Raw water (b) Tap water

Fig. 4. The variation of corrosion potentials in raw and tap water of Han river using steel coupon.



(a) 1st (b) 2nd

Fig. 5. The concentration of metal in tap water according to housing type.

Table 7. Metal concentration of tap water according to materials of distribution pipe in the apartments

(unit : μg/L)

Material	Fe	Cu	Zn
GSP	53.9 (2.6~180.9)	14.3 (2.3~58.2)	55.6 (11.2~141.3)
CP	11.1 (ND ~ 31.0)	20.0 (7.3~56.1)	31.9 (4.6~92.3)
SSP	15.1 (3.9~36.9)	10.8 (1.6~25.3)	28.3 (4.4~41.1)

로 큰 편차를 보이고 있다. 아연도강관에서 구리의 평균농도는 구리관의 평균농도 20.0 μg/L경우보다 낮은 14.3 μg/L이나, 아연의 평균농도는 가장 높은 55.6 μg/L이고 범위도 11.2~141.3 μg/L로 높았다. 반면에 구리관은 구리의 농도가 가장 높은 것으로 조사되었다.

옥내급수관 재질별 부식에 따른 영향을 파악하기 위하여 정체수돗물과 주간에 채취한 수돗물의 수질을 비교하였다. 정체수돗물의 수질은 먹는물 수질기준을 위협하는 수준은 아니었다. Table 8과 같이 아연도강관에서 정체수돗물의 철, 구리 및 아연 평균 농도는 수돗물보다 각각 12.9 μg/L, 31.0 μg/L 및 45.0 μg/L 높게 검출되었다. 아연도강관의 경우 부식이 진행되는 과정에서 철농도보다는 아연농도가 상대적으로 높고, 피복된 아연이 없어지면 부식이 심화되어 철 농도가 상대적으로 증가하는 것으로 보고(황재운 등, 2004)하고 있어 아연도강관의 부식생성물은 주로 철과 아연일 것으로 판단된다. 구리관은 대부분 1997년 이후 건축된 아파트에서 사용된 것으로 정체수돗물에서 아연 평균농도가 수돗물보다 60.2 μg/L로 높게 검출되어 구리보다 아연이 더 높게 검출되었다. 이는 동관의 경우 동관 자체의 부식영향보다 이음관의 이종부식과 연관이 있을 것으로 생각된다. 스테인리스강관은 정체수에서 니켈이 극미량 검출되었으나 대부분 다른 관에 비하여 주간 수돗물과 농도가 비슷한 것으로 조사되었다.

급수관 자재에 따른 수돗물의 수질과 정체수에서의 농도 증가요인을 분석하여 보면 수돗물 중 금속의 수질 농도는 옥내급수관 부식의 영향을 받으며, 정체수에서 농도 증가는 수도꼭지, 계량기 등의 개인 급수관 자재로부터 부식의 영향을 받는 것으로 판단된다. 노후화된 아연도강관의 경우는 철과 아연의 농도가 높게 발생되고, 옥내급수관 외에 수도용 자재에서는 아연의 영향이 클 것으로 판단된다. 특히,

Table 8. The difference of metal concentrations between tap water and stagnant tap water according to materials of distribution pipe in the apartments

(unit : μg/L)

Material	Δiron	Δnickel	Δcopper	Δzinc
GSP	12.9	1.5	31.0	45.0
CP	-4.7	-4.4	22.7	60.2
SSP	-9.3	2.1	13.8	17.8

수도자재에 많이 사용되는 청동 합금 재질의 제품은 아연이 주요 합금원소로 5~40%로 사용되기 때문에 자재의 부식에 따라 지속적으로 탈아연화하여 수돗물 중 아연의 농도를 증가시킨다. 아연은 먹는물 수질기준 중 심미적 영향물질로 그 기준이 3 mg/L로 검출되는 농도 수준은 이에 크게 못 미치나 자재의 파손 등의 원인이 될 수 있다. 또한 미국 EPA의 Safe Drinking Water Act(SDWA)은 1986년에 수도용 자재 또는 공공 물처리 시스템에서 0.2% 이상의 납을 함유하는 납 땜의 사용을 금지하였고 1996년에는 납이 8%이상 함유된 수도관과 청동제품의 사용을 금지하였다. 본 조사에서는 납 또는 다른 항목에 있어서도 검출되는 수준이 우려할 정도는 아니었지만 앞으로 수도관 자재의 부식에 따른 금속의 용출 연구가 확대되어 진행되어야 할 것으로 생각된다. 또한 수돗물의 부식성과 수도관의 부식에 대한 영향을 정량적으로 파악할 수 있는 연구도 앞으로 수행되어야 할 과제이다.

이현동 등(2001)이 아연도강관의 교체시기를 직관부만의 경우 14.1~16.1년, 나사부는 6.7~7.7년으로 예측하였으나 이 시기에서 교체하는 것은 경제적이고 현실적인 면에서 매우 어렵다. 따라서 아직까지 사용되는 20년 이상 경과된 아연도강관은 교체, 갱생과 같은 물리적방법이나 부식억제제 등 화학적 방법을 채택하지 않는 한 부식은 수돗물 수질에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 배·급수관의 부식을 억제하기 위해서는 정수장에서부터 부식저감을 위한 처리방법을 적용하는 방안이 필요하다고 생각된다.

4. 결 론

한강수계 정수장의 원수, 정수, 배수지수에 대하여 LI 등 부식성 지수를 조사한 결과 모든 시료에서 부식성의 수질을 보이고 있다. 원수와 정수의 평균 LI는 각각 -1.0, -1.4

로 부식성기준인 0 이하인 부식성 수질이었으며, 원수와 정수의 평균 LR은 각각 0.7, 1.0로 부식성 기준인 0.3이상을 보이고 있다. LI지수로 볼 때 계절적으로 하절기 강우시와 정수처리 후에 부식성이 증가하였고, LR지수로는 정수처리 후에 증가하는 것으로 나타났다.

상수도관에 따른 수돗물의 금속 농도를 보면 알루미늄, 철 및 구리는 송수관을 경과하면서 증가하였으며, 특히 철 농도는 수질기준 0.3 mg/L에 못 미치는 수준이나 증가의 폭이 다른 항목에 비하여 크게 나타났다. 그리고 옥내급수관 규모가 큰 아파트에서 수돗물 중 철, 구리, 아연의 평균농도 범위가 각각 20.3~29.5 μg/L, 12.4~20.3 μg/L, 34.5~41.6 μg/L로 단독 및 다세대 주택의 수돗물 수질에 비하여 높게 나타났다. 아파트의 옥내급수관 재질인 아연도강관, 동관, 스테인리스강관의 부식영향을 파악한 결과 1994년 이후 사용이 금지되어 노후화된 아연도강관에서 철과 아연의 평균농도는 각각 53.9 μg/L, 55.6 μg/L로 다른 급수관에서 수돗물 농도에 비하여 높고, 구리관은 구리의 농도가 가장 높은 것으로 조사되었다. 또한 아연도강관에서 정체수돗물의 철, 구리 및 아연의 평균농도는 수돗물보다 각각 12.9 μg/L, 31.0 μg/L 및 45.0 μg/L로 더 높게 검출되었고, 구리관에서는 아연의 평균농도가 60.2 μg/L로 가장 높게 검출되어 상수도관의 부식이 수돗물의 수질에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

따라서 수돗물에서 녹물 등 심미적 불쾌감을 일으키는 수도관의 부식을 저감하기 위하여 정수처리에서부터 수돗물의 부식성을 관리할 수 있는 방안이 필요하다. 이를 위해서는 우선 미국, 일본 등 상수도 선진국과 같이 부식성 지수를 수질관리항목으로 지정하여야 하며 부식성지수 중 LI와 LR이 계절적 요인과 정수처리에 따라 민감하게 반응하고 있어 이를 중심으로 관리하는 것이 바람직하다고 판단된다.

참고문헌

곽필재, 이현동, 정원식, 이희수, 김중훈, 김응석(2000). 상수도관로내 부식성 수질평가방법 개선에 관한 연구. *공동추계학술발표회 논문집*, 대한상하수도학회·한국물환경학회, pp. 233-236.

곽필재, 이현동, 남상호, 정원식(2001). 국내 수계별 수돗물의 부식성 및 금속용출 특성평가에 관한 연구. *대한환경공학회지*, **23**(7), pp. 1195-2001.

곽필재, 이현동, 남상호(2002). 부식성 수질제어를 위한 수처리 범위 결정에 관한 연구. *대한환경공학회지*, **24**(4), pp. 725-733.

곽필재, 이현동(2003). 상수도 관로에서 부식억제를 위한 수질모니터링 적용방안. *춘계학술발표회 논문집*, 대한환경공학회, pp. 11-18.

국립환경과학원(2006). 수돗물의 수질개선방안에 관한 연구(I).

박영복, 공성호(2005). 탄소강의 녹물저감에 대한 인산염 부식억제제와 석회수 효과 연구. *상하수도학회지*, **19**(2), pp. 228-237.

서규태, 정해룡, 이현동, 정원식, 지재성(1998). 배수시스템내 부식영향 수질인자의 변화특성. *대한환경공학회지*, **20**(8), pp. 1151-1160.

서울특별시 수돗물평가위원회(2006). http://water.seoul.go.kr.

이현동, 배철호, 박정훈, 정원식, 곽필재(2001). 수돗물의 수질특성이 옥내급수관의 부식속도에 미치는 영향 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **17**(5), pp. 627-635.

환경부(1997). 수돗물의 2차오염방지기술.

환경부(2006a). 상수도통계.

환경부(2006b). 수도법.

환경부(2006c). 먹는물수질관리지침.

환경부(2007). 수처리제의 기준과 규격 및 표시기준(환경부고시 제2007-92호).

황재운, 이현동, 곽필재, 주충남, 배철호, 김상진(2004). 건축물내 급수설비 현황과 수질변화 특성평가. *춘계학술발표회 논문집*, 대한환경공학회, pp. 1191-1198.

日本 東京道 水道局(2007). http://www.waterworks.metro.tokyo.jp.

日本水道協會(1995). 上水試驗方法.

AWWA (2000). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20. 2-30, APHA, Washington, D.C.

Langelier, W. F. (1936). The analytical controled anti-corrosion water treatment. *Jour. AWWA*, **28**(10), pp. 1500.