Journal of Korean Society of Water and Wastewater
Vol.25, No.5, pp.707-717, October, 2011

상하수도학회지, 논문
25권 5호, pp.707-717, 10월, 2011

음용수질의 안정성을 위한 부식지수제도의 도입

Introduction of Corrosion Index System for Stability of Drinking Water Quality

김영관[1*] · 김진근[2]

Kim, Yeong-Kwan[1*] · Kim, Jin-Keun[2]

1 강원대학교 환경공학과, 2 제주대학교 환경공학과

(2011년 4월 27일 접수 ; 2011년 10월 7일 수정 , 2011년 10월 12일 채택)

Abstract

Replacement of old water distribution pipes for protecting water quality induced by pipe corrosion requires enormous budget. Even after the replacement, however, corrosion can occur again at any times and, therefore, inhibitive measure of the corrosion will be not only economical but needed to diminish the consumers' distrust on tap water quality. In 2008, National Environmental Research Institute did a survey on 8 major drinking water source and proposed to establish the Langelier Saturation Index(LI) as a corrosion index in Drinking Water Quality Criteria. Among the water industries of Korea, K-Water is the only one that set up the level of pH over 7.0 and LI above −1.5 on yearly average basis. However, no systematic regulation including LI to inhibit the corrosive tendency has been established yet. In this paper, LI values out of 31 drinking water treatment plants were analyzed and two-stage control of LI value as a measure of corrosive tendency of water is proposed. Primarily, water treatment facilities may operate the system at a target LI value below −1.5. Following the investigation on the effect caused by adjusting the LI value on water quality and corrosiveness, it will be desirable to improve LI value below −1.0 in the long run. In addition to the LI, supplemental use of Larson's modified ratio (LMR) which incorporates hydraulic detention time will be necessary. Several methods to prove the inhibitive effect of improving the LI value on water quality have been also suggested.

Key words : drinking water, distribution pipe, corrosion, Langelier Index

주제어 : 음용수, 배관, 부식, 랑게리아 지수

1. 서 론

우리나라는 한강, 낙동강, 금강, 그리고 영산강의 4대강 수계의 하천을 비롯한 댐으로부터 원수를 취수하여 상수원수로 사용하고 있는데 일부 석회암지대를 제외하면 대부분이 연수(soft water)로서 부식성을 띄고 있다. 정부의 지속적인 수질개선 노력에도 불구하고 수도꼭지 수돗물에서의 냄새 및 녹물 발생으로 인하여 수돗물에 대한 불신은 해소되지 못하고 있는데 정수과정에서의 문제이기 보다 배급수관 내부에서 발생하는 부식으로 인하여 야기되는 불신이라고 할 수 있다. 옥내 급수관으로 수도용 동관이 주로 사용되는데 이 동관으로 부터 부식에 의해 용출되는 구리이온이

* Corresponding author Tel:+82-33-250-6353, Fax:+82-33-254-6357, E-mail: yeong@kangwon.ac.kr(Kim, Y.)

비누 등에 포함되어 있는 지방산과 반응하여 청수현상(green water)을 유발시킨다. 노후된 배수관과 급수관의 부식에 의한 2차 오염의 방지를 위해 수도관의 교체나 개량사업에 막대한 예산이 소요되며 관의 교체 후에 부식이 다시 발생할 수 있으므로 수도관 부식을 미리 방지하는 것이 경제적일 뿐만 아니라 수돗물에 대한 소비자의 불신을 해소하기 위하여 필요하다. 환경부에서는 급수용 방청제의 종류와 규격을 제시하고 있으나 그 제정기준이 모호하여 구체적인 검증을 받지 않은 방청제가 이용되고 있으며 이용되는 방청제의 약 90% 정도는 환경부기준 1종 1호 규격인 인산염계인 것으로 파악되고 있다 (2002, 우달식).

수도관의 부식에 영향을 미치는 인자에는 온도, pH, 칼슘, 경도, 알칼리도, 용존산소, 그리고 총용존고형물(TDS) 등이 있다 (Viessman and Hammer, 2004). 국내의 상수원은 일반적으로 경도(hardness) 및 알칼리도(alkalinity)가 낮은 특성을 나타내며 이러한 특성으로 관내부의 부식제어를 위한 보호막이 형성되지 못하기 때문에 별도의 부식성 제어가 필요하다. 최근 지자체에서는 노후 급배수관을 PVC, PE, STS 재질의 비부식성관으로 교체하고 있으나, 현실적으로 옥내배관의 교체가 어려운 실정으로 부식방지 또는 부식지연을 위한 부식성제어가 필요하다 (한국수자원공사, 2008). 한편, 정수과정에서 사용하는 염소화합물을 비롯하여 응집과정에서 투여되는 황산이온은 관내부의 부식성을 더욱 악화시킬 수 있다. 상수관망에서의 부식현상에 의한 수질사고는 처리된 정수의 부식성과 관재질의 특성에 따라 좌우되므로 수처리공정의 개선, 부식방지, 그리고 노후관 교체 및 관 재질의 변경을 통하여 어느 정도 예방할 수 있다. 이 중에서 부식방지를 위하여 크게 코팅, 부식방지제의 사용, 음극방식장치, 희생양극의 설치, 알칼리제에 의한 pH 조절과 같은 수단을 사용하고 있으며 최근 국내 아파트 단지에서 부식억제제의 사용은 매년 증가하고 있다. 일반적으로 국내 정수장에서는 고체상의 방청제를 저수조 전후에 설치한 후 물을 통과시켜 관내로 유입시키는 방법을 사용하고 있다. 그러나 고상 형태의 부식억제제를 사용할 경우, 수온이나 수량에 따라 녹는 양이 다르기 때문에 적절한 양의 잔류농도를 유지하기가 쉽지 않다 (우달식, 2002). 기준치를 초과할 경우에는 하수처리에도 어려움을 가중시킬 우려가 있는 바 아파트 단지 보다는 수처리 전문가가 근무하는 정수장에서의 수질관리를 통한 부식제어가 바람직한 방향이라고 할 수 있다.

정부의 수질개선 노력에도 불구하고 최종 생산품인 수도꼭지 수돗물 품질은 냄새와 녹물발생 등으로 인하여 여전히 불신을 받고 있다. 특히 20년 이상된 노후관 부식에 의한 녹물발생과 같은 2차 오염으로 수돗물 신뢰도의 저하에 대한 우려가 높은 현실이다 (한국수자원공사, 2008). 따라서 수도관 부식으로 인한 노후화를 지연시키고 먹는물 수질감시항목에 부식성지수를 설정하기 위한 노력이 진행되고 있다 (국립환경과학원, 2009).

본 연구에서는 먹는물 수질감시 항목에 부식성지수를 포함시키기 위한 노력의 일환으로 국내의 수질특성을 고려한 적절한 부식성지수의 권고기준을 마련하기 위한 기초자료로서 현재 사용되고 있는 부식성 지수와 한국수자원공사에서 관리하고 있는 정수장에서의 수질 및 부식성 자료를 토대로 권고기준을 제시하고자 하였다.

2. 국내외 부식성 제어관련 기준 및 기술

2.1 국외 기준현황

수돗물의 부식성은 부식성지수를 이용하여 평가할 수 있는데 부식성지수를 이용한 평가는 부식여부에 대한 자료만을 제공하며 부식되는 정도에 대한 정보는 제공하지 않으므로 부식의 예측보다는 부식현상의 발생 원인에 대한 이해를 돕기 위하여 사용되고 있다 (남상호, 2002). 현재까지 개발된 다양한 형태의 부식성지수는 다음 Table 1과 같은데 부식성지수와 수돗물의 부식성과의 상관관계가 명확하게 나타나지 않는 경우가 많이 있다.

수돗물의 부식성을 평가하는 지표 중에서 현재 가장 널리 보편적으로 사용되는 지수는 탄산칼슘의 포화상태를 표시하는 랑게리아 지수 (Langelier Saturation Index, LI) 인데 LI는 다음과 같은 한계를 지니고 있다. LI는 $CaCO_3$ 침전 여부에 대한 열역학적 driving force를 다루는 단순한 평형상태 지수로서 부식억제를 위한 $CaCO_3$ 피막형성을 위해서는 다음 2개의 반응이 동시에 일어나야 한다.

$$Fe = Fe^{2+} + 2e^-$$
$$HCO_3^- + OH^- = CO_3^{2-} + H_2O$$

만약 위 두 반응이 동시에 일어나지 않을 겨우 $CaCO_3$ 침전은 부식제어에 필요한 수준에 도달하지 못하게 된다. 그리고 랑게리아지수는 물의 pH를 주요 변수로 하여 $CaCO_3$ 피막 형성 여부에 대한 정보만을 제공할 뿐 형성되는 피막의 양에 대한 정보는 제공하지 못한다. 그리고 랑게리아 지수가 비부식성으로 평가될 경우에도 HCO_3^- 이온과 Ca^{2+} 이온의 농도가 OH^- 이온을 중화시킬 수 없을 정도로 낮을 경우 부식성을 나타낼 수 있다. 일반적으로 배급수관에서의 부식방지를 위해서 pHs 보다 0.2 ~ 1 정도 물의 pH를 높게 조절하는 것이 보편적이다.

1944년 Ryznar가 유리 튜브에 침전된 $CaCO_3$ 에 기초를

상하수도학회지, 논문
25권 5호, pp.707-717, 10월, 2011

Table 1. Corrosion index summary*

Indices	Form	Evaluation
Langelier Saturation Index (LI)	LI = pH - pHs	LI > 0 : $CaCO_3$의 과포화, 비부식성 LI = 0 : $CaCO_3$와 평형 LI < 0 : $CaCO_3$의 불포화, 부식성
Ryznar Stability Index (RSI)	RSI = 2pHs - pH	RSI < 5.5 : 스케일 형성이 많음 5.5 < RSI < 6.2 : 스케일 형성 가능성 6.2 < RSI < 6.8 : 적당한 수준 6.8 < RSI < 8.5 : 부식성 8.5 < RSI : 부식성 매우 큼
Larson's Ratio (LR)	$LR = \frac{[Cl^{-*}] + [SO_4^{-2}]}{[HCO_3^-]}$	LR > 0.4 : 부식성 LR < 0.4 : 비부식성
Calcium Carbonate Precipitation Potential (CCPP)	CCPP = 50000(Alk_i - Alk_{eq})	CCPP >0 : 탄산칼슘침전생성 CCPP <0: 탄산칼슘침전이 생성되지 않음
Driving Force Index (DFI)	$DFI = \frac{[Ca^{2+}][CO_3^{2-}]}{K_{so} \times 10^{10}}$	DFI <0 부식성
Aggressiveness Index (AI)	AI = pH + log(Ca)(Alk)	AI > 12.0 : 비부식성 AI 10.0 ~ 11.9 : 부식성 AI < 10.0 : 매우 부식성
Riddick Corrosion Index (RCI)	RCI = (75/Alk)×[(CO_2+ 0.5(Hard - Alk) + Cl^- +2NO_3^-]×[10/SiO_2]× [(DO+2)/DO_{sa+}]	RCI = 0-5 : 스케일형성 6-25 : 부식성 없음 26-50 : 약간 부식성 51-75 : 부식성 76-100 : 부식성 높음 101 이상 : 아주 높은 부식성

* 참고문헌 남상호 (2002) 에서 발췌.

두고 개발한 지수인 Ryznar Stability Index (RSI)는 랑게리아지수에서 계산된 pHs 값을 사용하며 랑게리아지수와 마찬가지로 물의 실제 pH, 칼슘, bicarbonate, TDS, 그리고 온도에 의해 결정되며 강관에서 부식속도와 피막형성에 관한 정보를 제공한다. Larson's Ratio (LR) 지수는 chloride와 sulfate의 부식성과 bicarbonate의 부식억제성에 대한 상대적 부식성을 고려하여 개발된 지표이다. 이 지수는 미국의 북동지역에서 구한 자료를 토대로 개발되었고, 경도가 높은 물에 비하여 연수에 적용 시 좋은 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다. LR 지수에 대하여 Imran 등 (2005)은 물의 온도(T)와 관내에서의 HRT(Hydraulic retention time)의 영향을 고려하여 다음과 같은 LMR (Larson's modified ratio) 지수를 제안하였다.

$$LMR = \frac{(Cl^- + SO_4^{2-} + Na^+)^{1/2}}{Alk}\left(\frac{T}{25}\right)HRT$$

부식을 억제하는 수단 중에서 최근의 경향은 수도관 재료의 교체 보다는 정수장에서 생산된 수질의 부식성을 낮추는 방식의 부식억제에 초점을 두고 있다. 수돗물의 부식성 여부를 예측하고 부식성도 조절할 수 있는 지표로서 미국, 유럽, 그리고 일본 등에서는 랑게리아 지수를 수도법에 반영하여 수돗물에서의 부식제어의 지표로 사용하고 있다. 보편적으로 pH, 알칼리도, 경도, chloride, sulfate 항목들을 부식과 관련된 주요 항목으로 분류하고 있는데 pH는 대부분 국가에서 6.5 이상 유지하도록 권고하고 있다. 부식지수 역시 각 국가 별로 범위를 정하여 권고하고 있다 (AWWARF, 1996). 네델란드에서는 부식성 수질제어기준으로 랑게리아 지수를 0.2 ~ 0.3 이상을 유지하도록 규정하고 있으며 독일도 랑게리아 지수를 0 이상으로 유지할 것을 권고하고 있고 프랑스의 경우 먹는물 법령 기준으로서 탄산칼슘의 포화상태를 유지하도록 권고하고 있다. 일본의 경우 국가수질관리 목표설정 항목에 부식성이 포함되어 있는데 랑게리아

Table 2. Control standard of corrosion for several countries (AWWARF, 1996)

Parameters affecting corrosion	Country[1]								
	N	DK	SF	S	NL	UK	US	CDN	G
pH	7.5 ~8.5	8.0	7~9	7.5~9	7.8 ~8.3	5.5 ~9.5	6.5 ~8.5	6.5 ~6.8	6.5 ~9.5
Alkalinity, mg/L (as $CaCO_3$)	12-20	>32	>12	>20	>40	>10			
Ca-Hardness, mg/L	15~25	20~200	20~30	20~60					
Chloride, mg/L	<100	<50	<100	<100			<250	<250	<250
Sulfate, mg/L	<100	<50		<100			<250	<250	<240
Copper, mg/L	<0.1			<0.05			<1.3	<1.0	≤3.0 H
Iron, mg/L	<0.1	0.05		0.05			<0.3	<0.3	≤0.2 A
Manganese, mg/L	0.05	0.02	0.1	0.02			0.05	0.05	≤0.05
Aluminum, mg/L	0.1	0.05	0.3	0.1			0.1	0.1	≤0.2 H
Langelier index (LI)					-0.2 ~0.3		0		0
Cadimum, mg/L	0.005 H	0.005 H	0.005 H	0.001 H	0.2 H	0.005 H	0.005 H	0.01 H	0.005 H
Lead, mg/L	0.05 H	0.05 H	0.05 H	0.01 H			0.015 H		0.04 H
Zinc, mg/L	1 H	5 H	1	0.3 T		5 H	5 A		5 A

[1] N=Norway, DK=Denmark, SF=Finland, S=Sweden, NL=Netherlands, UK=United Kingdom, US=United States, CDN=Canada, G=Germany, A = aesthetic, H = health, T = taste.

지수는 −1.0 이상 유지하도록 권고하고 있다. 국가별 수돗물 부식성 억제를 위한 수질 기준은 다음 Table 2와 같다.

미국의 경우, 관부식으로 인하여 발생되는 수도꼭지에서의 납과 구리 성분의 허용농도는 1991년 제정된 Lead and Copper Rule(LCR) 에 의하여 규제되고 있다 (US EPA, 1992). LCR에 의하면 모든 수도사업체는 수요자 가정에 공급되는 물에서 납과 구리 성분을 분석하여야 하는데 구리와 납의 규제치는 각각 1.3 mg/L 와 0.015 mg/L 로서 규제치를 초과하는 수돗물 시료가 10%를 초과할 경우 부식제어 및 원수의 처리공정을 검토하여야 한다. 그러나, 부식성에 대한 기준이 수돗물에서의 심미적 오염물질의 권고기준인 NSDWR (National Secondary Drinking Water Regulation) 에는 포함되어 있지 않다.

2.2 국외 기술동향

수돗물의 부식성은 수원(source)을 비롯하여 정수과정에서의 여러 가지 요인으로 인하여 그 형태가 다양하게 나타나고 있어 근본적인 예방을 하는 것은 현실적으로 매우 어려우며 부식성이 계절에 따라 변하므로 정수시설 현장에서 규칙적으로 계절에 따른 부식성의 변화를 모니터링하기 위하여 부식억제제의 사용이 보편화되고 있다. 문헌(AWWARF, 1993) 에 의하면 수돗물의 부식성은 수처리공정의 종류에 따라 차이가 나타나는데 예를 들어 소독이나 응집공정을 비롯하여 해수담수화 플랜트의 경우 부식에 미치는 영향이 다르게 나타나며 소독과정에서 사용되는 소독제의 종류에 따라서도 차이를 나타낸다. 납 또는 구리 수도관의 경우 chloramine에 비하여 chlorine의 부식성이 더 크며 pH 6 정도에서는 chlorine과 chloramine 모두 구리 부식을 촉진시키는 것으로 알려지고 있다 .

부식억제제를 사용하거나 부식성을 낮추기 위하여 pH 조절 또는 무기물을 첨가하는 조치들을 취하고 있는데 무기물로서는 그 성분에 따라 인산염계, 규산염계, 혼합염계열 약품이 사용되고 있다. 인산염을 사용할 경우 납의 용출을 20 ~ 90% 까지 억제를 할 수 있는 것으로 알려지고 있으나 (AWWARF, 2008) 인산염 계열의 부식억제제의 사용이 항상 만족스러운 결과를 초래하지는 않는다. 예를 들어 낮은 pH에서 많은 양의 응집제를 투여하는 enhanced coagulation 공정이 포함될 경우 약간의 pH 변화가 급수단계에서 부식을 촉진시킬 수 있으며 부식억제제를 사용할 경우 인산염과 같은 부식억제제는 응집과정에서 제거되기 때문에 이 경우 phosphate 계열 억제제의 사용은 바람직하지 않다. Orthophosphate와 polyphosphate

상하수도학회지, 논문
25권 5호, pp.707-717, 10월, 2011

를 혼합하여 사용하는 경우도 있으나 orthophosphate 만을 사용하는 것이 바람직하다는 연구결과 (Edwards, 2002) 에 따라 orthophosphate만의 사용이 권장되고 있다. 미국에서는 현재까지 진행된 급수관에서의 부식에 대한 많은 연구결과에 따라 부식제어를 위한 방안으로 몇가지 지침을 제시한 바 있다 (AWWARF, 2000). 지침을 요약하면, pH 조절을 위한 시설 설계, 급수과정에도 적절한 완충능력 (buffering capacity) 유지, 부식억제제 사용 중에는 사용하던 소독제나 응집제의 종류를 바꾸지 말 것, 그리고 부식억제제로 orthophosphate를 이용할 경우, 적절한 잔류량 유지 및 납과 구리 제어에 최적인 pH (7.3 ~ 7.8) 에서 부식억제제를 투여하도록 지침을 마련하고 있다. 한편, 규산염계열의 실리카는 지하수와 지표수에 자연적으로 존재하는 중요한 요소로서 용존 실리카의 농도가 높을수록 용출되는 철(Fe)이 증가하는데 철 농도는 부식성을 증가시키는 요소이므로 규산염계는 이러한 측면을 고려하여 제한적으로 사용되고 있다.

역삼투막방법을 이용하여 해수를 담수화시키는 Cyprus의 Dhekelia 담수화시설의 경우 (Marangou and Savvides, 2001), 운전 시작 후 1년이 조금 지나 물속에서 철 성분이 검출되었고 랑게리아 지수는 부식성을 나타내었다. 이 문제를 해결하기 위해 물의 pH를 7.0 ~8.0에서 EU 권고기준인 6.5 ~ 9.5로 조절하였고 pH를 증가시키기 위해서 석회와 이산화탄소의 주입량을 조절하였다. 그리고 물의 경도를 증가시키기 위한 수단으로 석회와 이산화탄소 외에 후처리 단계에서 magnesium sulfate를 첨가하였다. 물의 pH를 8.5 까지 증가시킨 결과 랑게리아지수는 0.0 ~ 0.5 정도 증가하여 지표상으로 부식성을 감소시켰다.

음용수 공급을 해수담수화에 의존하고 있는 아부다비시(City of Abu Dhabi)의 경우 역시, 담수화된 물은 이산화탄소와 산소의 농도가 높았고 pH가 5.5 ~ 6.0 수준의 강한 부식성을 나타내는 소위 "hungry water"에 해당되었다 (Shams El Din, 2009). 이 플랜트에서는 산도의 제거 및 pH 조절을 위해 synthetic dolomite ($CaCO_3 + MgCO_3$)를 사용하거나 또는 CO_2와 소석회를 함께 사용하였으며 경도와 알칼리도를 증가시키기 위하여 $CaCl_2$ 와 $NaHCO_3$ 등을 첨가하고 있다.

2.3 국내 기준현황

우리나라에서는 상수도관로의 부식과 관련하여 부식성을 평가할 수 있는 기준이나 모니터링 방법이 아직 적용되지 않고 다만 2007년 환경부의 "상수도시설기준 유지관리지침" 에 제시되어 있는 정도이다. 그러나 수도관 노후방지를 위해 관로에서의 부식성 관리의 필요성이 대두되면서 2008년 국립환경과학원에서 전국 8개 주요상수원을 대상으로 조사한 결과에 따라 먹는물 수질감시항목에 부식성지수로서 랑게리아 지수를 설정할 것을 제안하였고 부식성지수에 대한 모니터링 결과에 따라 부식성지수의 권고기준을 설정할 계획이다. 그리고 국립환경과학원에서는 정수장에서부터 수돗물의 부식성을 관리할 수 있도록 부식성지수인 랑게리아 지수를 먹는물수질감시항목에 포함하여 운영할 것을 환경부에 제안할 예정이다.

국내수도사업자 중에는 한국수자원공사가 유일하게 수도꼭지의 녹물발생을 비롯한 관부식으로 인한 수돗물의 오염을 제어하기 위하여 "정수처리시설 종합개선 계획" (한국수자원공사, 2008) 에서 년 평균 랑게리아지수를 −1.5 이상, 그리고 년 평균 pH는 7.0 이상을 목표로 하고 있으나 국가 차원의 랑게리아 지수를 비롯한 부식성 제도화는 현재까지 이루어지지 않고 있다. 부식과 밀접한 관계가 있는 pH에 대해서 미국을 비롯한 많은 유럽국가에서 6.5 ~ 8.5 범위를 유지할 것을 정하고 있는데 비하여 우리나라는 최저기준을 5.8로 정하고 있어 관내부식의 위험을 항상 내포하고 있다.

자료에 의하면 (박영복 등, 2005), 한강수계를 대상으로 LI 인자인 수온, pH, 총알칼리도, 칼슘이온, 그리고 전기전도도를 측정하여 LI 값을 산출한 결과, LI 지수는 −2.0 ~ −0.5 범위의 보통부식성을 나타내어 알칼리제의 투여가 필요한 것으로 나타났다. 그리고 중성수질 및 알칼리도 50 mg/L 이하에서는 HCO_3^-를 알칼리도로 대체할 수 있는 것으로 확인되었다. 조사기간 동안 칼슘농도는 대부분 20 mg/L 이하이었는데 이 값은 유럽에서 배관보호를 위해 권장하고 있는 칼슘농도에 비하여 낮은 수치에 해당된다.

2.4 국내 기술동향

정수장의 부식성을 개선하기 위한 노력으로 국내의 일부 정수장에서도 2007년부터 부식제어를 위한 공정이 적용되고 있다. 상수관로의 부식제어를 위해 pH와 알칼리도를 조절하기 위한 목적으로 소석회와 CO_2의 이용에 대한 파일롯트 규모의 연구가 수행되었는데 LI 지수를 0 ~ 0.5 범위로 설정할 경우, 소석회 농도는 16 mg/L 이상, pH는 7.5 ~ 7.8 사이로 유지하여야 하며 이 경우 알칼리도와 칼슘 경도는 각각 35와 45 mg/L 이상으로 유지할 수 있는 것으로 판단되었다 (이두진 등, 2008). 한편, 소석회와 이산화탄소를 주입하는 경우 탄산칼슘 침전물의 발생을 우려하여 최대 소석회 주입량으로 32 mg/L를 제시하고 있다 (손병용 등, 2008).

수도관에서의 금속용출에 미치는 수질인자의 영향에 대한 연구에서 이현동 등(2009)은 pH, 알칼리도, 경도가 증

가할수록 금속용출량은 감소한다는 기존의 결과들을 확인하였다. 그러나 실험이 한 가지 인자만을 대상으로 인자를 변화시키면서 진행된 관계로 각 인자들에 의한 독립적인 영향은 규명을 할 수 있었으나 여러 가지 인자들에 의한 상호작용(interaction effects)에 대해서는 규명하지 못하고 있다.

최근 수도용 동관의 부식억제방안 연구에 의하면 (안재환 등, 2010), 인산염 계열 부식억제제를 사용할 경우 동관의 부식억제가 가능하지만 황산이온이나 이산화염소와 같은 부식촉진인자가 존재할 경우 억제효과가 감소할 수 있다. 그리고 부식제어효과는 관종에 따라 차이가 있는데 아연도강관 및 탄소강관이 동관에 비하여 부식제어효과가 높으며 옥내급수관의 부식제어효과를 최대화하기 위해서는 정수장단계에서의 부식성 개선이 필요하다 (박주현 등, 2010).

현재, 정수사업소에서는 관로부식에 영향을 미치는 수질인자들에 대하여 대부분 분석을 하고 있으나 관로내의 수질에 대해서는 간헐적으로 채수하여 pH, 잔류염소, 그리고 일부 중금속을 분석하고 있는 실정이다. 랑게리아 지수 및 탄산칼슘침전능 (CCPP) 지수를 국내 정수에 이용하게 되면 부식성이 매우 크게 나타나게 되는 현상이 있는데 단순히 부식지수 값을 조절하기 위해 많은 약품을 투여할 경우 pH의 급상승과 같은 바람직하지 못한 현상이 발생할 수 있다.

3. 부식성 평가 지표 개선의 유·무형 효과

3.1 수돗물 수질에 대한 신뢰성 제고

환경부의 '수돗물 수질개선 종합대책'에 의하면 94년 4월 이전에 설치된 아연도 강관(옥내급수관의 53%)을 사용하는 주택의 63%가 녹물을 경험한 것으로 조사되었다. 이처럼 수돗물에 대한 불신은 정수시설에서의 기술적 문제이기보다는 정수장에서 처리된 깨끗한 처리수가 수도관을 통해 이송되는 과정에서 야기되는 2차 오염 때문이라고 할 수 있다. 따라서 수도관 부식이 방지될 경우 수돗물에 대한 불신이 해소되는 효과를 기대할 수 있다. 최근 정부의 수돗물 홍보로 인하여 국민들의 수돗물에 대한 신뢰도가 다소 개선되었으며 수돗물을 음용수로 사용하는 국민들도 조금 증가된 것으로 보도되고 있다. 2008년도 환경부 발표자료에 의하면 수돗물이 식수로 부적합한 이유로 녹물 12%, 냄새 20%로 조사된 바 있다. 수돗물의 녹물과 냄새는 관의 부식(화학적 부식, 생물학적 부식)과 직결된 문제점으로써 관부식을 제어할 경우 32%에 해당되는 불신을 크게 해소시킬 수 있을 것이다. 우리나라도 예외는 아니어서 생수시장이 매우 빨리 확장되고 있는 추세이지만 수돗물의 품질향상에 대한 지속적인 노력을 기울인다면 수돗물의 음용수로의 사용도 증가할 것이다.

수도관의 부식을 방치할 경우, 중금속의 용출을 비롯하여 미생물에 의한 부식현상(Microbiologically Induced Corrosion, MIC) 으로 인하여 수돗물이 음용수는 물론 가정에서 필요한 잡용수로서의 사용가치도 없게 될 우려가 있는데 이는 매우 심각한 사회적 문제를 야기시키게 된다. 상수관로의 부식제어를 위한 단계적인 투자가 이루어지지 않을 경우 향후 대대적인 관로교체가 불가피할 것이며 천문학적인 비용이 소요될 것이다. 따라서 수돗물 부식성 제어를 위한 국가적 차원에서의 모니터링과 관리가 필요할 것으로 판단된다.

3.2 수도관의 수명 연장 및 예산 절감

우리나라 수도관의 경년을 살펴보면 20년 이상 된 노후배수관 및 급수관 비율이 각각 17.2%와 22.3% 이며 (국립환경과학원, 2008) 2007년 기준 수자원공사에서 운영 관리하는 총 관로연장 중에서 20년 이상 경과된 관은 750km로 약 20%를 차지하고 있으며 2015년에는 37%에 육박할 것으로 예상되고 있다 (한국수자원공사, 2008).

정수장에서 부식조절을 하는 미국의 경우 경년 25~50년 이하가 18.1%, 50년 이상이 15.9%나 차지하고 있는데 (U.S. EPA, 2009) 우리나라도 정수장에서 부식조절을 함으로서 수도관의 수명을 연장할 수 있을 것이며, 이로 인한 막대한 노후관 교체경비를 절감할 수 있을 것이다. 수질조절에 의한 수도관의 부식방지는 부식이 이미 진행된 관에서도 그 효과가 있는 것으로 알려지고 있는데, 매설 경과년이 짧은 관에 비해 다소 많은 시간을 필요로 한다.

누수가 발생하는 가장 큰 원인은 관의 노후이며 전체 누수량의 73%를 차지하는데, 그로 인한 경제적 손실은 약 5,000억원에 달한다. 정부에서는 보다 위생적인 수돗물의 공급을 위하여 '물관리 종합대책(1996년)'에 의거 지방상수도 개량사업을 1997년부터 2011년까지 3조 8,319억원을 투자하여 노후관 42,757㎞를 개량할 계획인데 개량사업시행에 따른 교체비용과 시민들의 불편, 민원 등의 직·간접적 경제적 손실이 크게 발생하고 있다. 이러한 노후관 정비사업에 소요되는 예산을 대도시 및 중소도시, 광역상수도 등 전국을 대상으로 계산한다면 그 규모는 실로 막대하다.

2003년도 기준 노후관 및 부식으로 인한 손실액은 4,586억원에 달하며 16,220km 의 노후관 교체비용으로 2조 1,050억원이 소요되었다. 최근 국내연구에 의하면 (이두진 등, 2008), 모의관로를 이용한 부식제어실험에서 부식억제제로 소석회와 이산화탄소를 주입하였을 경우, 아연

상하수도학회지, 논문
25권 5호, pp.707-717, 10월, 2011

도강관은 20.9%, 강관은 22.5% 정도 부식속도가 지연되는 것으로 보고된 바 있다. 물론, 지연되는 부식속도 그 자체를 관의 노후화를 방지하는 유일한 인자로는 평가할 수 없으나 부식속도의 지연은 노후화를 지연시키는 요인이므로 수질조절에 의한 수도관의 부식방지 기술이 정수장에 도입 시 누수로 인한 손실감소나 노후관 개량비 절감액이 장기적으로는 수천억원에 달할 것으로 예상된다.

3.3 미생물 재성장 및 염소요구량 저감 효과

수도관내 미생물들은 생물막(biofilm)을 형성·서식하다가 소독능이 감소되면 재성장(regrowth)하여 미생물 부식을 야기시킨다. 미생물부식은 수도관내 수돗물이 정체된 상태로 탄소강이나 스텐레스강과 지속적으로 접촉하고 있을 때 나타나는 경우가 많다. 수도관내에서 부식생성물의 축적은 세균이나 기타 미생물의 은신처를 제공하는데 미생물들이 재성장하여 맛이나 냄새와 같은 심미적 수질오염을 일으킬 수 있다. 부식이 저감되면 부식생성물의 생성은 물론 미생물 재성장 저감효과와 염소요구량을 감소시키는 효과가 있다.

3.4 탄산가스(CO_2) 및 알칼리제 주입으로 인한 응집 효과 개선

여름철 상수원에서 발생하는 조류로 인해 pH가 9에서 10까지 상승하는 경우가 종종 있는데, 이로 인해 응집효율이 저하되고 침전이 정상적으로 이루어지지 않는다. 탄산가스 및 알칼리제 주입으로 최적의 응집을 위한 pH와 알칼리도 범위를 설정하여 조절할 수 있어 부식방지효과와 더불어 응집 효과의 개선을 기대할 수 있다.

3.5 수돗물의 부식성 제어에 의한 수질 변화

부식제어기술 적용 후 나타날 수 있는 현상들은 수질, 관재질, 수리학적 조건에 따라 좌우되는데 이중에서 심한 수질변화가 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 그러나 관내 수질의 변동은 단기간에 걸친 처리수의 수질변화 또는 큰 폭으로 나타나는 pH 변화로 인하여 야기되므로 수질의 pH와 알칼리도를 적절히 유지시켜줄 경우 부식억제제를 투여한다고 하여도 2차적인 문제점은 거의 나타나지 않는다. 다음 Table 3과 4는 미국의 정수시설에서 다양한 부식제어전략을 사용하기 전 · 후의 수질의 변화 및 효과를 보여주고 있다.

Table 3. 부식제어전략 사용 전 수질 특성 (AWWARF, 2000)

정수장	처리 전		부식제어전략
	pH	알칼리도(mg/L)	
Detroit, MI	7.2~7.6	53~81	인산(Phosphoric acid)과 함께 인산염(PO_4) 주입
Rochester, NY	7.4~7.8	60~65+규산염	pH 상승
Philadelphia, PA	8.1	48	pH 저감, 인산염주입
Boston, MA	9.0	12	pH 저감, 알칼리도 상승
Hartford, CT	8.3~8.6	9~12	pH 저감, 인산염주입
Springfield, NH	6.9~7.5	15~20	인산주석+수산화나트륨 이용 pH 8.7 상승, 인산이용 pH 7.5 하강
Bellingham, WA	7.1~7.4	19	소다회(Na_2CO_3)를 이용한 pH 상승

Table 4. 부식제어전략 사용 후 수질 특성변화 및 효과 (AWWARF, 2000)

정수장	처리 후			효과
	pH	알칼리도(mg/L)	인산염/규산염	
Detroit, MI	7.2	55~80	1.0(인)	납농도 저감
Rochester, NY	8.0~8.5	65	10~15(규)	부작용 없음
Philadelphia, PA	7.3~7.8	35	0.6~0.8	부작용 없음
Boston, MA	7.6~7.8	20~30	-	납농도 저감, 부작용 없음
Hartford, CT	7.2~7.5	10~15	0.2~1.0	납농도 저감
Springfield, NH	7.5	N/A	1~4.5	납농도 저감
Bellingham, WA	7.8~8.0	22~32		납농도 저감, 일반세균 저감

한편, 한국에서 방청제라고 불리는 부식억제제는 주로 아파트단지에서 많이 사용되고 있는데 방청제 판매업계에서는 대도시 아파트의 20 ~ 30% 정도가 사용하는 것으로 파악하고 있다. 방청제는 주로 1994년 이전에 설치된 아연도관을 사용한 아파트에서 많이 사용되며 인산염을 사용하는 현장에서 농도가 규정치인 10 mg/L를 초과하는 경우도 20% 정도 되는 것으로 알려지고 있다. 아직 방청제가 첨가된 수돗물의 장기음용으로 인한 인체위해성에 대해서는 알려진 자료가 없으나 동물대상 임상실험 결과 칼슘결핍, 신부전증, 혈관경화와 같은 부작용을 일으킬 수 있는 것으로 알려져 있다.

4. 국내실정에 적합한 부식성 지수 선정과 목표 설정

4.1 부식성 지수의 선정

현재까지 개발된 부식성 지수들은 모두 특정한 여건을 고려한 가정 하에서 개발되었으므로 하나의 지수만으로 부식성 여부를 평가할 경우 결과에 차이가 있을 수 있다. 예를 들어 이란의 Ham 정수시설에서의 부식평가 결과에 따르면 Ryznar stability index 는 Pockurius scaling index 와 높은 상관성을 보여준 반면 Langelier index 와는 차이를 나타내었다 (Davil et al., 2009). 부식성 평가를 위해서는 calcium carbonate의 용해도 외에 많은 수질특성이 고려되어야 한다. 물의 온도를 비롯하여 칼슘, 마그네슘, 알칼리도, 탄산염, CO_2, pH, 염화물, 황산염, 이온강도, 전기전도도, 총용존고형물, 완충능력, 인산염, 실리케이트, 그리고 DO 등이 포함되어야 하기 때문에 한 가지 부식성지수만으로 평가하기에는 다소 무리가 있다.

국내에서는 한강, 낙동강, 금강, 그리고 영산강의 4대강 수계로부터 대부분의 원수를 취수하고 있다. 일반적으로 하천수계 수돗물은 호소수계 수돗물에 비하여 부식촉진인자인 황산이온과 염소이온의 농도가 높은 반면 부식억제인자인 알칼리도와 경도가 낮은 특성을 나타내고 있다. 2008년도 자료에 의하면 (Table 5), 한국수자원공사에서 관리하고 있는 정수장 29개소에서의 평균 부식지수(LI)는 −0.64 ~ −2.91의 범위를 나타내고 있으며 년평균 −1.87로서 부식성이 있음을 보여주고 있다. 정수장 31개소 중에서 14개소는 강부식성, 14개소는 보통부식성, 그리고 3개소는 약부식성을 나타내고 있다.

Table 5의 자료의 정수장별 평균 LI 값을 정수장 원수의 알칼리도에 대하여 단순회귀분석을 한 결과는 다음과 같다.

$$LI = 0.0336(Alk) - 2.9585 \qquad (R^2 = 0.83)$$

위 식에 따르면 만약 LI 지수를 −1.0 이하의 약부식성 수준으로 유지하려고 할 때 필요한 알칼리도는 약 60 mg/L 정도가 필요하다. 그러나 이 회귀식은 단순한 경향을 보여줄 뿐이며 알칼리도와 pH의 영향에 대한 정확한 평가를 위해서는 계획된 실험의 수행이 필요하다. 회귀분석결과를 포함하여 Table 5의 자료에 의하면 국내 수돗물의 부식성은 알칼리도에 의하여 영향을 받는다고 할 수 있는데 이러한 결과는 일본 동경도 아사카 정수장의 수질자료의 분석결과에서와 유사하다. 그러므로 국내에 적합한 대표적 부식성지표로서는 알칼리도를 주된 부식인자에 포함시켜 개발된 calcium carbonate index인 랑게리아 지수를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

외국자료에 의하면 (Imran et al., 2005), 여러 부식지수들 사이에서 LI, CCPP (Calcium Carbonate Precipitation Potential), DFI(Driving Force Index), AI (Aggressiveness Index), RSI 사이의 상관관계가 0.8 이상으로 높게 나타났는데 지수의 보편성을 고려하여 우리나라에서도 LI를 대표 부식지수로 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 LI는 관에서의 물의 흐름상태를 반영하지 못하고 있는데 일반적으로 관내 체류시간이 길어질수록 철산화물이 더 많이 발생하게 된다. 그러므로 관내 물의 흐름 상태로서 체류시간을 반영하고 있는 Larson ‘s modified ratio (LMR)를 보조 부식지수로 사용할 필요가 있다고 판단된다. 특히 LMR은 수도꼭지 수돗물에서의 녹물발생에 대한 정성적 평가를 할 수 있는 지수이기 때문에 수돗물의 신뢰도 개선 차원에서 이 지수의 사용을 검토해 볼 필요가 있다. 따라서, 부식성을 평가할 수 있는 대표지수로서 LI를 그리고 보조지수로서 LMR의 사용을 제안하고자 한다.

대표 부식성 지수 : Langelier index (LI)
보조 부식성 지수 : Larson's modified ratio (LMR)

4.2 단계별 부식지수 개선목표 설정

정수시설에서의 수처리공정으로 인하여 야기되는 수질변화는 수돗물의 부식성 정도에 영향을 미치므로 부식성 감소를 위해서는 수질의 특성에 적절한 부식억제방법을 적용하여야 할 것이다. 물의 pH 와 알칼리도 조절을 위하여 NaOH 또는 $NaHCO_3$를 사용하기도 하나 대부분의 경우 외국에서도 소석회와 CO_2를 사용하여 부식억제를 하고 있다. 물의 pH 조절시에는 알칼리도와 CO_2 의 영향을 동시에 고려하여야 하며 특히 응집공정을 실시하는 정수장의 경우, 알칼리제와 CO_2의 투입 시 응집공정과 후단의 소독공정의 효율을 감안하여 투입량과 투입시점과 같은 운전인자를 결정하여야 한다.

상하수도학회지, 논문
25권 5호, pp.707-717, 10월, 2011

Table 5. 한국수자원공사 관리 정수장에서의 부식지수(LI) 현황 ('08년도)

정수장		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	년 평균
평균		-2.06	-2.04	-1.96	-1.87	-1.82	-1.81	-1.87	-1.90	-1.80	-1.71	-1.73	-1.80	-1.87
수도권	A	-1.68	-1.63	-1.28	-1.14	-1.15	-1.35	-1.50	-1.73	-1.28	-1.25	-1.33	-1.40	-1.39
	B	-1.75	-1.64	-1.13	-1.64	-1.15	-1.05	-1.74	-0.88	-1.10	-1.18	-1.30	-1.32	-1.32
	C	-1.50	-1.43	-1.38	-1.52	-1.45	-1.50	-1.64	-1.78	-1.43	-1.38	-1.50	-1.38	-1.49
	D	-1.78	-1.60	-1.48	-1.52	-1.33	-1.25	-1.48	-1.50	-1.15	-1.32	-1.43	-1.42	-1.44
	E	-1.64	-1.50	-1.28	-1.35	-1.53	-1.50	-1.60	-1.58	-1.28	-1.48	-1.50	-1.34	-1.46
	F	-1.50	-1.48	-1.40	-1.38	-1.40	-1.35	-1.56	-1.60	-1.30	-1.40	-1.38	-1.40	-1.43
	G	-1.55	-1.40	-1.48	-1.35	-1.20	-1.38	-1.44	-1.58	-1.16	-1.25	-1.43	-1.26	-1.37
강원권	A	-1.85	-1.90	-1.30	-1.15	-1.35	-1.08	-0.84	-0.78	-0.80	-0.86	-0.88	-1.02	-1.15
	B	-1.23	-1.43	-1.58	-0.92	-0.98	-1.33	-0.74	-1.28	-1.62	-0.75	-1.58	-1.82	-1.27
충청권	A	-1.70	-1.88	-1.70	-1.73	-1.58	-1.60	-1.58	-1.53	-1.78	-1.65	-1.55	-1.68	-1.66
	B	-1.88	-1.90	-1.92	-1.70	-1.60	-1.45	-1.40	-1.68	-1.73	-1.74	-1.68	-1.80	-1.71
	C	-2.30	-2.20	-1.95	-1.96	-1.88	-1.68	-1.60	-1.62	-1.60	-1.50	-1.60	-1.70	-1.80
	D	-1.72	-1.90	-1.90	-1.80	-1.75	-1.88	-1.93	-1.83	-1.60	-1.43	-1.48	-1.46	-1.72
	E	-0.80	-0.80	-0.80	-0.80	-0.70	-0.72	-0.80	-0.80	-0.98	-0.78	-0.70	-0.70	-0.78
	F	-2.33	-2.43	-2.40	-2.48	-2.40	-2.28	-2.20	-2.20	-2.12	-2.10	-2.10	-2.10	-2.26
전북권	A	-2.20	-2.33	-2.47	-2.40	-2.30	-2.08	-2.28	-2.20	-2.18	-2.00	-2.13	-2.38	-2.24
	B	-2.58	-2.47	-2.50	-2.30	-2.04	-2.15	-1.92	-2.18	-1.88	-1.90	-1.80	-2.00	-2.14
	C	-3.14	-3.30	-2.93	-2.68	-2.60	-2.68	-2.70	-2.65	-2.56	-2.65	-2.40	-2.54	-2.71
	D	-2.83	-2.80	-3.14	-2.65	-2.70	-2.54	-2.65	-2.58	-2.50	-2.38	-2.20	-2.36	-2.61
전남권	A	-2.82	-2.88	-2.83	-2.86	-2.63	-2.68	-2.73	-2.75	-2.68	-2.46	-2.48	-2.66	-2.70
	B	-2.63	-2.40	-2.62	-2.50	-2.50	-2.50	-2.63	-2.60	-2.62	-2.35	-2.35	-2.28	-2.50
	C	-2.83	-2.80	-2.73	-2.58	-2.52	-2.53	-2.56	-2.68	-2.68	-2.52	-2.55	-2.36	-2.61
경북권	A	-0.90	-0.93	-0.70	-0.58	-0.78	-0.83	-0.84	-1.20	-0.82	-0.73	-0.65	-0.74	-0.81
	B	-2.50	-2.47	-2.44	-2.30	-2.33	-2.43	-2.48	-2.40	-2.40	-2.25	-2.20	-2.43	-2.38
	C	-2.50	-2.48	-2.44	-2.30	-2.33	-2.43	-2.46	-2.40	-2.44	-2.33	-2.30	-2.48	-2.41
	D	-1.40	-1.31	-0.73	-0.74	-0.70	-0.58	-0.38	-0.93	-0.38	-0.09	-0.07	-0.39	-0.64
경남권	A	-1.58	-1.50	-1.44	-1.43	-1.53	-1.52	-1.58	-1.55	-1.40	-1.15	-1.00	-1.16	-1.40
	B	-2.60	-2.53	-2.53	-2.50	-2.50	-2.48	-2.66	-2.60	-2.53	-2.34	-2.48	-2.42	-2.51
	C	-2.32	-2.38	-2.35	-2.12	-2.03	-1.96	-2.25	-2.25	-2.02	-1.98	-1.83	-2.94	-2.12
	D	-2.92	-2.95	-2.95	-2.86	-2.78	-2.74	-2.80	-2.85	-2.88	-2.88	-2.95	-3.00	-2.88
	E	-2.90	-2.90	-2.93	-2.88	-2.78	-2.72	-2.90	-2.90	-3.00	-3.03	-3.00	-2.96	-2.91

부식성 개선을 위한 노력의 일환으로 한국수자원공사에서 Table 6과 같이 부식성지수 목표 달성을 위한 방안을 제시한 바 있는데 부식의 주요인자인 pH와 알칼리도를 고려한 방안이라고 판단된다. 액상소석회가 수처리제로 고시됨에 따라 액상소석회를 이용한 pH 및 알칼리도 제어는 효과적인 수단이라고 할 수 있으나 액상소석회 사용 시 나타날 수 있는 탁도 증가현상은 주의하여야 할 부분이다.

이미 앞에서 언급된 자료들을 종합할 때 수돗물의 부식성을 제어하기 위해서는 LI 기준으로 −1.0 이하를 유지하는 것이 바람직하다. 현재 한국수자원공사에서 관리하는 정수장의 경우 대부분이 −1.0 이하 기준을 초과하며 이 기준을 충족시키기 위해서는 수처리공정의 개선 등 운전 측면에서

Table 6. 원수의 특성을 고려한 단계별 LI 지수조절 방안

구 분	원수 pH<7.0			원수 pH≥7.0		
	알칼리도 (mg/L)			알칼리도 (mg/L)		
	10미만	10~20	20이상	10미만	10~20	20이상
LI <-2.5	(액상) 소석회 + 이산화탄소					
-2.5≤ LI <-2.0	(액상) 소석회+ 이산화탄소	(액상) 소석회+ 이산화탄소	알칼리제	(액상) 소석회+ 이산화탄소	알칼리제+ 이산화탄소	알칼리제
-2.0≤ LI <-1.5	알칼리제					

보완작업이 선행되어야 한다. 그러므로 Table 6에서 구분된 바와 같이 LI 지수 크기에 따라 수질개선목표를 2단계로 분류하여 1차적으로는 LI의 달성목표를 −1.5 이하로 설정하여 시설 및 운영을 개선하고, LI 개선이 수질 및 관부식에 미치는 영향을 조사한 후, 장기적으로 −1.0 이하로 까지 개선될 수 있도록 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

5. 부식성 제어효과의 검증 방안

국내에서 상수도관로의 부식 또는 노후화로 인하여 발생되는 문제점을 개선하기 위한 연구는 한국수자원공사와 한국건설기술연구원을 비롯하여 일부 학계에서 진행되고 있으나 체계적이고 장기간에 걸친 자료가 매우 부족한 실정이다. 관내부 부식의 원인이 되는 부식성수질의 제어에 대한 지침이나 기준이 마련되어 있지 않고 부식을 야기시키는 원인에 대한 분석이 충분히 수행되지 못하였다. 이러한 여건에서 상수관의 관리는 과학적인 근거보다는 경험에 의존하여 이루어지고 있는 실정이다.

수돗물의 부식성은 비교적 단순한 부식성지수를 이용하여 평가를 하고 있으나 원수의 수질특성을 비롯하여 수리학적 특성, 그리고 수처리공정에 따라 미생물에 의해 야기되는 부식, 즉 microbiologically induced corrosion (MIC)이 동시에 발생할 수 있기 때문에 부식성을 하나의 지수만으로 평가하기는 매우 어려운 것이 사실이다. 그러므로 부식성 평가는 단편적인 자료에 의한 평가보다는 장기간에 걸친 모니터링을 통해서 보다 정확한 평가가 수반되어야 한다. 부식성 제어효과의 검증방안으로 아래의 세 가지 단계별 방안을 제시하고자 한다.

5.1 민감도 분석 (Sensitivity analysis)

부식성을 제어하기 위한 pH와 알칼리도 조절을 위하여 수처리제를 사용할 경우 최적 운전 매뉴얼을 도출할 필요가 있다. 매뉴얼 도출의 첫 단계로서 사용방법의 다양화에 따른 pH와 알칼리도의 민감도를 분석할 수 있는 bench-scale 규모의 실험이 필요하다. 알칼리제의 사용방법에 대한 운전자료는 민감도분석을 통하여 도출이 가능하며 민감도 분석을 위한 실험은 통계적 기법인 반응표면방식(Response Surface Methodology, RSM)을 이용하여 수행할 수 있다.

그리고 지표수에는 일반적으로 질산염(nitrates)이 존재하는데 보편적으로 적용되는 정수공정으로는 제거가 되지 않는다. 질산염은 부식으로 인하여 발생된 녹(green rust)을 magnetite로 산화시키고 결국에는 질산화반응을 거치면서 관내의 산소를 소모시키게 된다. 따라서 민감도 분석을 위한 실험 수행 시 질산화에 의한 영향의 평가도 필요하다.

5.2 부식저감 효과의 정량화를 위한 coupon test

랑게리아지수는 수돗물의 부식성에 대한 지수로서 지수 그 자체가 실제로 관내부에서 발생되는 부식의 정량적인 척도가 되지는 못한다. 그러므로 랑게리아지수와 실제의 부식정도와의 상관관계를 규명함으로서 부식저감효과를 정량화할 수 있을 뿐만 아니라 랑게리아지수의 장기적인 달성목표를 현실적으로 설정할 수 있다. 이를 위해서는 부식속도를 정량화할 수 있도록 coupon을 장착시킨 모의관로 시험이 수행되어야 한다. 모의관로 시험은 민감도분석시험 결과에 따라 도출된 운전조건을 적용하여 부식성을 제어시킨 수돗물 시료를 이용하여 실시할 수 있다.

5.3 예비관로의 부설

우리나라의 경우, 관로정보에 대한 자료의 절대량이 부족하여 관로를 평가할 수 있는 여건이 되지 않고 있다. 장기적인 관점에서 가장 확실한 부식성제어효과의 검증방법은 수돗물이 오랜 기간 동안 공급되는 관 내부를 조사하는 것이다. 그러나 관 내부조사를 위해서는 일시적인 수돗물 공급의 중단과 같은 어려움이 수반되므로 부식성제어를 위한 공정이 이루어지는 정수시설에서 공급관로와 함께 분석을 위한 예비관로를 부설하고 이에 대한 실제 처리공정의 부식여부를 평가할 수 있는 모니터링을 실시하여야 한다.

상하수도학회지, 논문
25권 5호, pp.707-717, 10월, 2011

6. 결론 및 제언

본 연구에서는 국내 정수장에서의 수돗물의 부식성을 감소시킴으로써 수질의 안정성을 개선하기 위한 목적으로 사용할 수 있는 적절한 부식지수와 단계별 적용방안을 한국수자원공사에서 관리하는 정수장에서의 자료를 토대로 검토하였다. 대표 부식지수로는 랑게리아 지수(LI) 그리고 보조 지수로서 Larson's modified ratio (LMR)의 사용을 제안하였으며 LI의 개선목표를 1차적으로는 −1.5 이하로 설정하여 시설 및 운영을 개선하고, LI 개선이 수질 및 관부식에 미치는 영향을 조사한 후, 장기적으로 −1.0 이하로 까지 개선시키는 방안을 제시하였다. 그리고 부식성 평가 지표 개선 시 기대되는 유 · 무형 효과를 검토하였으며 부식성 제어 효과의 검증 방안도 열거하였다.

수돗물의 부식성을 개선하기 위해서는 우리나라도 외국의 사례에서와 같이 부식지수의 도입 및 관리를 제도화하여야 할 것이다. 그리고 부식성 수질을 개선하기 위한 방법으로 액상소석회를 사용할 경우 소석회사용에 따른 운전상의 문제점을 최소화시킬 수 있도록 설비시설을 보완하여야 할 필요가 있다.

참 고 문 헌

남상호 (2002) 국내 수돗물의 수질특성 및 방청제 관리 현황, Int. Workshop on Corrosion Inhibitor for Public Water Supply, Seoul, Korea, 13−37.

박영복, 공성호 (2005) 상수도관 부식방지를 위한 탄산칼슘 포화지수(LI) 인자제어에 관한 연구, J. Korean Ind. Chem., **16**(3), 372−378.

박주현, 이재웅, 김현구, 안경희, 이연희, 김태승 (2010) 수돗물 녹물저감을 위한 부식관리기법 적용성 연구, 한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동 춘계 학술발표회, 대전.

손변용, 변규식, 김영일, 이두진 (2008) 소석회와 CO_2를 이용한 상수관로의 부식제어(I) −소석회 주입공정의 최적운전인자 도출, 상하수도학회지, **22**(3), 373−378.

안재환, 이현동, 김석구, 곽필재, 이주연, 김지은 (2010) 수도용 동관의 부식 억제 방안 연구, 한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동 춘계학술발표회, 대전.

우달식 (2002) 수도용 방청제의 개발, Int. Workshop on Corrosion Inhibitor for Public Water Supply, Seoul, Korea, 183−233.

이두진, 김영일, 송영일, 박현아 (2008) 소석회와 CO_2를 이용한 상수관로의 부식제어(II) −관종별 부식특성 평가, 상하수도학회지, **22**(3), 379−388.

이현동, 곽필재, 이지은, 김영관 (2009) 상수도관망 시스템의 부식제어를 위한 수질모니터링, 상하수도학회지, **23**(1), 77−87.

국립환경과학원 보도자료 (2009) 수도관 노후방지 위해 부식성관리 필요.

한국수자원공사 (2008) *정수처리시설 종합개선 계획*

환경부 (2007) *상수도시설기준 유지관리지침.*

AWWARF (1993) Chloramine effects on distribution system materials, www. awwarf.org.

AWWARF (1996) Internal corrosion of water distribution systems, www. awwarf.org.

AWWARF (2000) Distribution system water quality changes following corrosion control strategies, www. awwarf.org.

AWWARF (2008) Distribution system corrosion and the lead and copper rule : An overview of AWWARF research, www. awwarf.org.

Davil, M.F., Mahvi, A. H., Norouzi, M, Mazloomi, S., Amarlui, A., Tardast, A., and Karamitabar, Y. (2009) Survey of corrosion and scaling potential produced water from Ilam Water Treatment Plant, World App. Sci. Journals, **7**, 1−6.

Edwards, M.A. (2002) US Perspective on corrosion inhibitor use in potable water supplies, International workshop on corrosion inhibitor for public water supply, Seoul, April..

Imran, S.A., Dietz, J.D., Mutoti, G., Taylor, J.S. and Randall, A.A. (2005) Modified Larsons ratio incorporating temperature, water age, and electroneutrality effects on red water release, J. Environmental Engineering, ASCE, Nov., 1514−1520.

Marangou, V.S. and Savvides, K. (2001) First desalination plant in Cyprus − product water aggresivity and corrosion control, Desalination, **138**, 251−258.

Melidis, P., Sanozidou, M., Mandusa, A., and Ouzounis, K. (2007) Corrosion control by using indirect methods, Desalination, **213**, 152−158.

Shams El Din, A.M. (2009) Three stages for combating the corrosion of steel pipes carrying desalinated potable water, Desalination, **238**, 166−173.

U.S. EPA (1992), Lead and copper rule guidance manual.

U.S. EPA (2009) Rehabilitation of Wastewater Collection and Water Distribution Systems, EPA/600/R−09/048.

Viessman, A.H. and Hammer, M.J. (2004) *Water Supply and Pollution Control*, 7th Edn., Prentice Hall, USA.