

상수도관망 시스템의 부식제어를 위한 수질모니터링

Water Quality Monitoring for Corrosion Control in Waterworks System

이현동^{1,2*}, 곽필재¹, 이지은², 김영관³

Hyun-Dong Lee^{1,2*}, Phill-Jae Kwak¹, Ji-Eun Lee², Yeong-Kwan Kim³, Myung-Ho Han⁴, Young-Suk Park⁵

1 한국건설기술연구원 첨단환경연구실, 2 과학기술연합대학원대학교 수자원환경공학과, 3 강원대학교 환경공학과

(2008년 4월 23일 접수 ; 2008년 7월 10일 1차수정; 2009년 1월 22일 2차수정 ; 2009년 2월 13일 채택)

Abstract

In existing systems, the best method inhibiting corrosion control in water distribution systems is to reduce water corrosiveness. Water corrosion can be decreased by controlling water quality through simple water treatment in treatment plants. On this research, we study the characteristics of tap water qualities in domestic areas, assessment of corrosive water quality and the method of water quality monitoring. This review presents the method of water quality monitoring which is the most applicable.

Monitoring for corrosion control in waterworks system is the most proper method; It can prevent serious accidents economically and reduce civil appeals.

Surely we should assess corrosive water quality in tap water, and introduce water treatment methods to control corrosive water quality before monitoring for corrosion. According to a lot of researches, it has been proved that simple water treatments can reduce the pipe corrosion. In this review we should indicate that we do not control of the corrosive water quality due to domestic conditions, we should monitor the water quality basically. Therefore, we recognize how the existing water quality can cause problems on pipeline corrosion, how to deal with it. Then it will be possible to apply water quality monitoring for corrosion control in water distribution system. Monitoring for corrosion control can be expressed by LI index, it is already known in literatures. This review presents more simple method than existing methods than existing ones we expect to apply these methods to SCADA in the future.

Key word. : Corrosion control, Water distribution system, Waterworks, Corrosive water quality

주제어 : 부식조절, 관망시스템, 상수도, 부식성 수질

1. 서론

상수도시스템은 취수장, 정수사업소, 상수도관로, 배수지 및 가압장 등 여러 가지 시설물이 종합적으로 구성된 매우

복잡한 시스템이다. 정수사업소에서 여러 가지 처리방법을 적용하여 깨끗하고 안전한 물을 생산한다고 할지라도, 이 물이 상수도시스템내의 시설물을 경유하는 동안 수질의 변화는 필연적으로 발생하게 된다(곽 등 2002 ; 곽 등 2001

* Corresponding author Tel:+82-33-250-6241, Fax:+82-33-244-6239, E-mail:hyukjae68@hotmail.com(Kwon, H.J.)

; 서규태 등 1998 ; 이현동 등 2001).

대표적인 수질변화의 사례로는 부식성수질에 의한 배급 수관의 부식으로 발생하는 금속물질의 용출, 잔류염소의 감소 등이 있으며, 내면에 시멘트모르타 라이닝이 된 관체를 새로이 매설한 경우, 일정기간 급격한 pH의 상승이 유발되었다는 보고도 있다(Leory, P. et al 1996 ; Pisigan, R. A. 1992).

기존 시설에서 경제적으로 상수도관로의 부식을 억제하기 위한 가장 기본적인 방법은 수돗물의 부식성(Corrosivity)을 감소시키는 것이다. 수돗물의 부식성은 정수사업소에서 간단한 수처리를 통해 수질을 조절함으로써 저감시킬 수 있다(곽 등 2002 ; 곽 등 2001 ; 서규태 등 1998 ; Hyun-Dong Lee 2001 ; Boissonneault, P. 1994).

수돗물의 부식성이란 상수도시스템 내 시설물의 부식을 촉진시키는 수질을 뜻한다. 국내에서 1983년 이전에 배수관으로 사용되었던 회주철관(Cast Iron Pipe, CIP)의 경우, 그 내면은 부식성수질에 의해 관체의 내면 부식이 촉진되어 부식생성물이 축적되고 결과적으로 통수단면적이 감소하거나 녹물이 발생하는 문제를 야기시켰다. 그리고 현재 주로 배수관으로 이용되는 시멘트모르타 라이닝(Cement Mortar Lining, CML)된 닥타일주철관(Ductile Cast Iron Pipe, DCIP)은 CML이 부식성 수질에 의해 중성화되어 모래화 현상이 발생하고 있다(Leory, P. et al 1996 ; Pisigan, R. A. 1992). 과거 급수관으로 사용되었던 아연도강관(Galvanized Steel Pipe)이나 동관(Copper Pipe), 스테인레스강관(Stainless Steel Pipe) 등도 부식성수질에 의해 금속물질이 용출되고 있다(Edwards, M., et al 1994 ; Ferguson, J.F 1993).

EPA에서는 1991년 "Lead and Copper Rule Guidance Manual"을 발표하여 정수사업소 및 상수도관로에서 수질을 모니터링하고, 수처리를 통한 부식억제방법의 기틀을 제시한 바 있다(Leory, P. et al 1996 ; Pisigan, R. A. 1992 ; EPA 1992 ; Ferguson, J.F. 1993 ; Pisigan, R.A. 1985 ; Schock, M.R. 1990; Tseng, T. 2000; EPA 2000). 이를 통해 관련 지자체 및 수도사업소에서는 이 기준을 맞추기 위하여 여러 가지 기술을 개발하고 적용하여 왔다. 그리고 유럽, 일본 등에서도 상수도관로의 부식억제를 위한 지침이 설정되어 수행되고 있다. 그러나 국내에서는 상수도관로의 부식과 관련하여 부식성수질을 평가하거나 모니터링하는 방법이 아직까지 적용되고 있지 않고, 단지 상수도시설기준의 유지관리지침(환경부 2007)에 제시되어 있을 뿐이다(환경부 2007).

현재 정수처리 분야에서는 안전하고 깨끗한 고품질의 정수를 생산하기 위한 연구와 그 기술에 대해 적용을 하고 있으나, 부식억제에 대한 수처리의 분야의 연구는 많은 진행이 있었으나 수처리 현장에서의 적용은 미미한 상태이다.

본 연구에서는 국내 수돗물의 수질특성과 부식성수질의 평가 및 수질모니터링 방법을 고찰하고 향후 적용가능성이 매우 높은 수질모니터링 방법에 대해 제시하였다.

2. 부식영향 수질특성과 모니터링 방법

2.1 국내 정수의 수질 특성

국내의 대표적인 상수원수는 한강, 낙동강, 금강, 영산강의 4대강 수계를 대상으로 하고 있다. Table 1~Table 3은 대표적인 하천수계인 한강과 낙동강 그리고 호소수계인 영

Table 1. Characteristic of water qualities for Han river (Y WTP)

	Corrosion acceleration WQ		Corrosion inhibition WQ		Corrosion index		Etc.	
	SO ₄ ²⁻	19.8~21.6	Alkalinity	24~37	LI	-2.1~-1.1	pH	6.8~7.7
winter	Cl ⁻	16.2~17.8	Hardness	52~66	LR	0.9~1.0	Free Cl ₂	0.5~0.84
	DO	14.2~14.9	Ca ²⁺	18~23	-	-	Temp.	1.2~4.4
	Cond.	174~198	Mg ²⁺	3.5~3.9	CCPP	-3.9~-3.42	TOC	2.1~2.4
	SO ₄ ²⁻	14.8~17.2	Alkalinity	26~39	LI	-1.7~-1.4	pH	6.9~7.1
spring autumn	Cl ⁻	15.2~17.5	Hardness	47~59	LR	0.8~0.9	Free Cl ₂	0.62~0.91
	DO	9.4~11.3	Ca ²⁺	19~21	-	-	Temp.	15~18
	Cond.	168~177	Mg ²⁺	2.9~3.1	CCPP	-3.25~-2.94	TOC	0.7~2.3
	SO ₄ ²⁻	14.8~16.2	Alkalinity	19.5~34	LI	-1.7~-1.4	pH	6.9~7.1
summer	Cl ⁻	12.8~17.6	Hardness	41~56	LR	0.7~0.9	Free Cl ₂	0.55~0.83
	DO	8.4~9.6	Ca ²⁺	15.2~19.2	-	-	Temp.	23~25.5
	Cond.	165~182	Mg ²⁺	2.9~3.5	CCPP	-3.30~-2.76	TOC	1.2~2.3

* LI < 0, CCPP < 0, LR > 0.7 : 부식성

* [SO₄²⁻, Cl⁻, DO, TOC, KMnO₄, Free Cl₂ (mg/L)], [Alkalinity, Hardness, Ca²⁺, Mg²⁺ (mg/L as CaCO₃)], [Temp (°C)], [Conductivity (μΩ/cm)]

산강 수계의 동북호를 상수원으로 하는 정수처리장에서 생산된 수돗물의 수질을 분석한 것이다.

한강수계 및 낙동강수계의 하천수를 취수원으로 하는 정수사업소에서 생산된 수돗물의 가장 큰 수질차이는 황산이온의 농도와 경도 및 칼슘농도이다. 이들 수질성분이 낙동강수계의 경우 한강수계보다 약 30% 이상 높았는데, 황산이온은 부식을 촉진시키는 수질인자로, 경도 및 칼슘은 탄산염의 박막(Carbonate thin film)형성으로 부식을 억제시키는 인자로 작용한다고 알려져 있다(곽 등 2002 ; 곽 등 2001 ; 서규태 등 1998). 낙동강수계의 수돗물은 황산이온과 경도 및 칼슘이 한강수계의 수돗물에 비하여 높기 때문에, 관로의 내면부식의 측면에서 보면 이 두 가지 인자가 서로 다른 작용을 해서 서로 그 영향력이 상쇄될 것으로 추측되나 실험을 통한 검증이 필요할 것으로 판단된다.

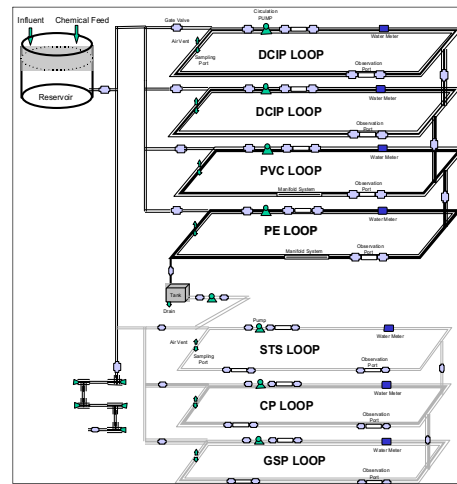


Fig. 1. Schematic diagram of pilot plant(SDLS).

Table 2. Characteristics of water qualities for Nakdong river (M WTP)

	Corrosion acceleration WQ		Corrosion inhibition WQ		Corrosion index		Etc.	
winter	SO ₄ ²⁻	30~34.5	Alkalinity	29.5~34	LI	-1.3~-1.5	pH	7.0~7.3
	Cl ⁻	17.8~23	Hardness	80~88	LR	0.7~1.5	Free Cl ₂	0.2~0.6
	DO	14.2~14.9	Ca ²⁺	32~35	-	-	Temp.	6~8
	Cond.	164~167	Mg ²⁺	-	CCPP	-2.64~-2.39	TOC	-
spring autumn	SO ₄ ²⁻	22~28	Alkalinity	26~39	LI	-1.1~-1.5	pH	7.0~7.4
	Cl ⁻	11~20	Hardness	62~74	LR	0.9~1.2	Free Cl ₂	0.4~1.0
	DO	9.4~11.3	Ca ²⁺	24.4~30	-	-	Temp.	10~18
	Cond.	154.2~171.4	Mg ²⁺	-	CCPP	-2.94~-2.19	TOC	-
summer	SO ₄ ²⁻	24~26	Alkalinity	19.5~34	LI	-1.1~-1.5	pH	7.0~7.4
	Cl ⁻	14~18	Hardness	47~72	LR	0.9~1.1	Free Cl ₂	0.8~1.1
	DO	8.4~9.6	Ca ²⁺	18.8~28.8	-	-	Temp.	18~24
	Cond.	162.3~177.1	Mg ²⁺	-	CCPP	-3.15~-2.01	TOC	-

* LI < 0, CCPP < 0, LR > 0.7 : 부식성

* [SO₄²⁻, Cl⁻, DO, TOC, KMnO₄, Free Cl₂ (mg/L)], [Alkalinity, Hardness, Ca²⁺, Mg²⁺ (mg/L as CaCO₃)], [Temp (°C)], [Conductivity (μΩ/cm)]

Table 3. Characteristics of water qualities for Lake (Y WTP)

	Corrosion acceleration WQ		Corrosion inhibition WQ		Corrosion index		Etc.	
winter	SO ₄ ²⁻	8~10	Alkalinity	16~26	LI	-2.8~-2.2	pH	6.6~7.0
	Cl ⁻	6~7	Hardness	19~24	LR	0.5~0.8	Free Cl ₂	-
	DO	7.9~10.8	Ca ²⁺	8~10	-	-	Temp.	5~11.9
	TDS	54~78	Mg ²⁺	-	CCPP	-5.83~-4.90	TOC	2.15~2.79
spring autumn	SO ₄ ²⁻	4~10	Alkalinity	15~22	LI	-2.3~-2.9	pH	6.2~7.0
	Cl ⁻	7~10	Hardness	21~29	LR	0.6~1.1	Free Cl ₂	-
	DO	7.5~13.4	Ca ²⁺	8.5~12	-	-	Temp.	8.2~26.2
	TDS	40~74	Mg ²⁺	-	CCPP	-5.36~-3.60	TOC	2.61~4.89
summer	SO ₄ ²⁻	4~10	Alkalinity	17~22	LI	-2.5~-2.8	pH	6.3~6.6
	Cl ⁻	7~10	Hardness	20~26	LR	0.6~0.9	Free Cl ₂	-
	DO	7.6~11.4	Ca ²⁺	8.2~11	-	-	Temp.	19.1~22.4
	TDS	54~93	Mg ²⁺	-	CCPP	-4.70~-4.01	TOC	2.12~2.73

* LI < 0, CCPP < 0, LR > 0.7 : 부식성

* [SO₄²⁻, Cl⁻, DO, TOC, KMnO₄, Free Cl₂ (mg/L)], [Alkalinity, Hardness, Ca²⁺, Mg²⁺ (mg/L as CaCO₃)], [Temp (°C)], [Conductivity (μΩ/cm)]

2. 2 모니터링 인자의 설정

2. 2. 1 연구방법

수질특성이 상수도관망의 부식에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Fig. 1의 장치를 이용하여 Table 4의 운전조건에서 Table 1~Table 3의 자료를 근거로 시험수를 다양하게 제조하여 실험하였다. Table 5는 시험에 이용한 시험수의 수질범위를 나타낸 것이다.

2. 2. 2 관체의 금속용출에 미치는 수질인자의 영향
본 실험결과, 이미 많은 논문에 알려진 바와 같이 pH, 알칼리도 및 칼슘과 경도가 증가함에 따라 금속용출량은 감소하

는 경향이 있었다(곽 등 2001, Ferguson, J.F. 1993). 각 조건에서 금속용출량의 감소경향은 Fig. 2~Fig. 4와 같다. pH 7.5 이상에서 pH에 대한 금속용출량의 회귀식은 다음과 같다.

$$\text{Iron release} = -0.097 \times \text{pH} + 8.77 \quad (R^2 = 0.24) \quad (\text{식 1})$$

$$\text{Zinc release} = -1.409 \times \text{pH} + 11.64 \quad (R^2 = 0.75) \quad (\text{식 2})$$

$$\text{Copper release} = -0.093 \times \text{pH} + 0.842 \quad (R^2 = 0.16) \quad (\text{식 3})$$

Table 4. Loops status of pilot plant

Pipe	Dia (mm)	Leng. (m)	Velocity (m/sec)	Flowrate (m ³ /min)	Loop (EA)	Pump (L/hr)	Flowratemeter (m ³ /hr)	Exam.
DCIP	100	24	0.83	0.39	1	19,000	6~180	2
DCIP, PVC, PE	80	15	1.12	0.34	4	19,000	4~120	2
CP, STS304, GSP	50	13.6	2.12	0.25	3	16,000	2~50	4
Reservoir	- Raw water : FRP, 0.6ton × 2EA - Intermediate : FRP, 0.2ton × 1EA							
W.Q. Adj. Reactor	Material : STS 316 Property : Water temp. control(0 ~ 35°C) Chemical dosage(Pump 4 Ea) Inflow control(Solenoid valve), Outflow control(Flowrate control valve)							

* DCIP : Ductile Cast Iron Pipe , PVC : Polyvinyl Chloride, PE : Polyethylene, CP : Copper Pipe, STS304 : :Stainless Steel Scrap grade 304 steel pipe, GSP : Galvanized Steel Pipe

Table 5. Characteristic properties of tested water

Water quality factor	Range
pH	6.5 ~ 8.0
Water temp(°C)	15 ~ 23
Alkalinity(mg/L as CaCO ₃)	15 ~ 80
Hardness(mg/L as CaCO ₃)	30 ~ 78
Calcium(mg/L as CaCO ₃)	10 ~ 45
Sulfate(mg/L)	12 ~ 45
Chloride(mg/L)	10 ~ 35
Conductivity(μhoms/cm)	80 ~ 230
Chlorine residuals(mg/L)	0.05 ~ 0.4
LI	-2.74 ~ 0.18
CCPP	-4.77 ~ 5.43
LR	1.15 ~ 0.83

* LI < 0, CCPP < 0, LR > 0.4 : corrosive , (LI : Langelier Index, CCPP : Calcium Carbonate Precipitation Potential, LR: Larson Ratio)

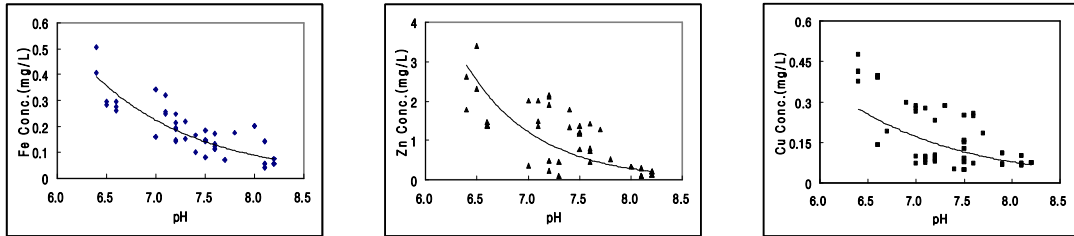


Fig. 2. Effects of pH adjustment

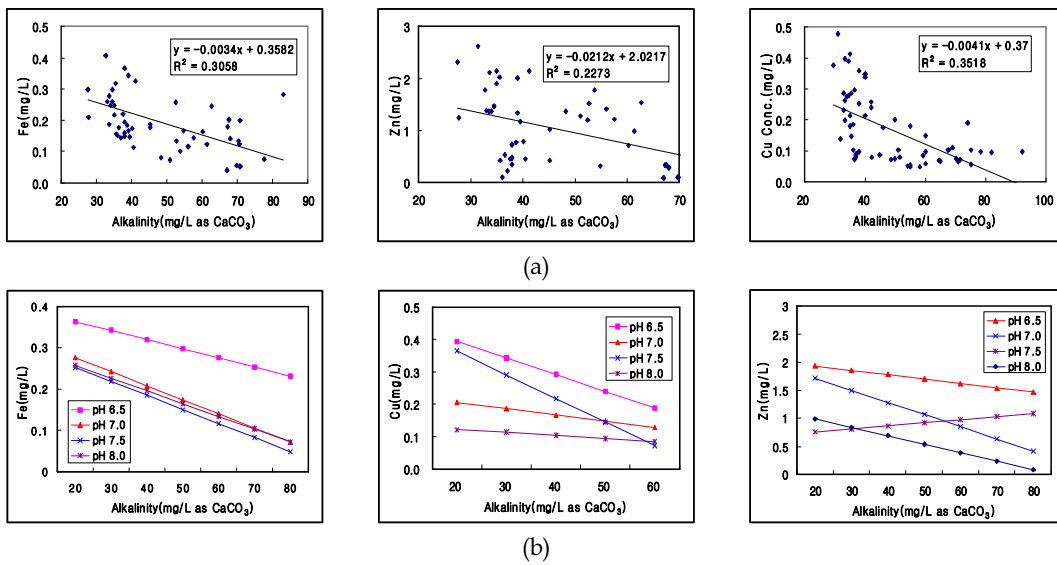


Fig. 3. Effects of alkalinity

Table 6. Comparison of coefficient of determination(R²)(effect of alkalinity)

pH range	Fe	Zn	Cu
pH 6.5 ~ 8.0	0.3058	0.2273	0.3518
pH 6.5	0.2506	0.1113	0.3485
pH 7.0	0.3037	0.1167	0.1827
pH 7.5	0.2060	0.0181	0.5039
pH 8.0	0.2855	0.3527	0.1689

Table 7. Comparison of coefficient of determination(R²)(effect of calcium)

pH range	Fe	Zn	Cu
pH 6.5 ~ 8.0	0.1159	0.0507	0.3281
pH 6.5	0.1819	0.1221	0.4606
pH 7.0	0.0046	0.1565	0.1173
pH 7.5	0.1971	0.1390	0.3528
pH 8.0	0.0022	0.0130	0.4727

Fig. 3~Fig. 4는 알칼리도 및 칼슘농도와 pH의 동시영향을 전체 pH 범위에서 도기한 것(a)과 각 pH 범위 별로 회귀식으로 도기한 것(b)이다. pH가 증가함에 따라 알칼리도 및

칼슘농도의 금속용출량 억제력은 대체적으로 감소되었다. 각 pH 범위에 따른 회귀식의 결정계수(R²)는 Table 6과 Table 7과 같다.

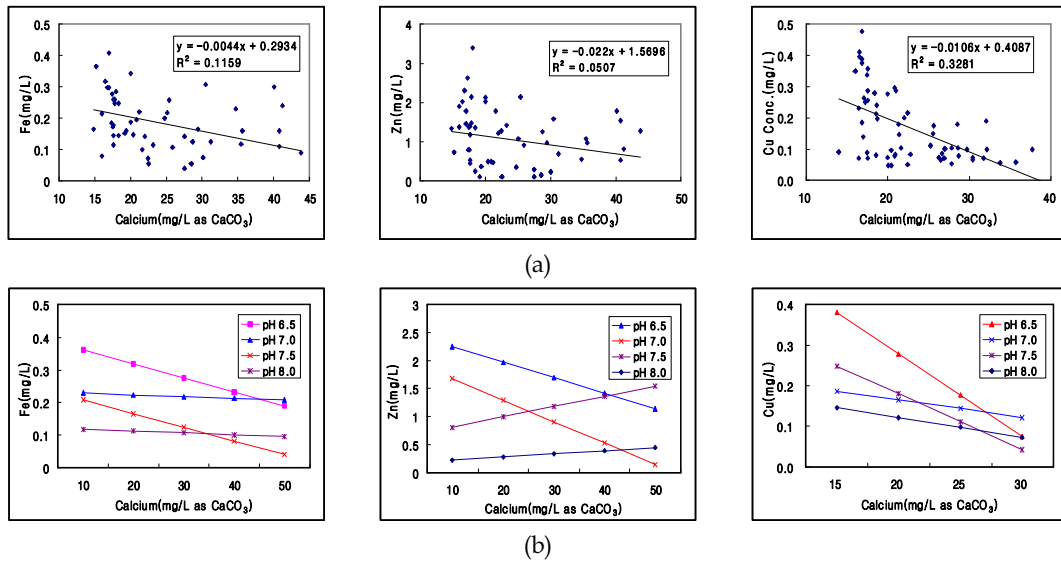


Fig. 4. Effects of calcium

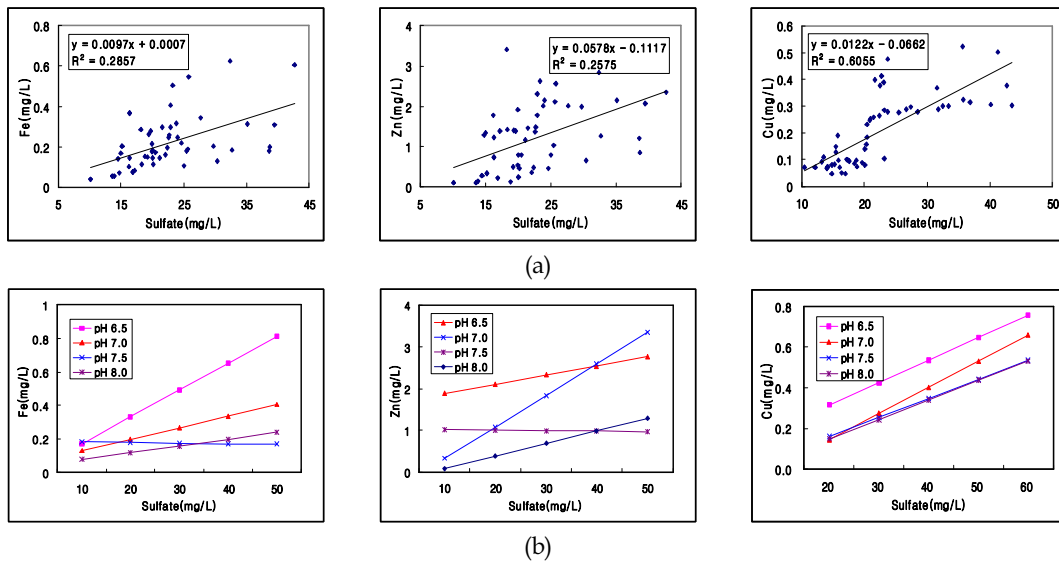


Fig. 5. Effects of sulfate.

Fig. 5~Fig. 7은 황산이온, 염소이온 및 잔류염소의 영향을 전체 pH 범위에서 도시한 것(a)과 각 pH 범위 별로 회귀식으로 도시한 것(b)이다. 황산이온은 농도가 증가함에 따라 금속용출량이 증가하는 경향이 있었고, pH가 증가함에 따라 대체적으로

황산이온의 영향력은 감소되었다. 염소이온은 농도에 증가함에 따라 pH에 따라 철과 이연농도의 감소 및 증가의 경향이 달랐으나 구리의 농도는 염소이온이 증가함에 따라 증가하였다. 잔류염소의 농도도 관중에 따라 증가 및 감소의 경향이 달랐다.

Table 8. Comparison of coefficient of determination(R^2)(effect of sulfate)

pH range	Fe	Zn	Cu
pH 6.5 ~ 8.0	0.2857	0.2575	0.6055
pH 6.5	0.6665	0.0569	0.4847
pH 7.0	0.3744	0.3445	0.7456
pH 7.5	0.0012	0.0005	0.6428
pH 8.0	0.2521	0.8348	0.9242

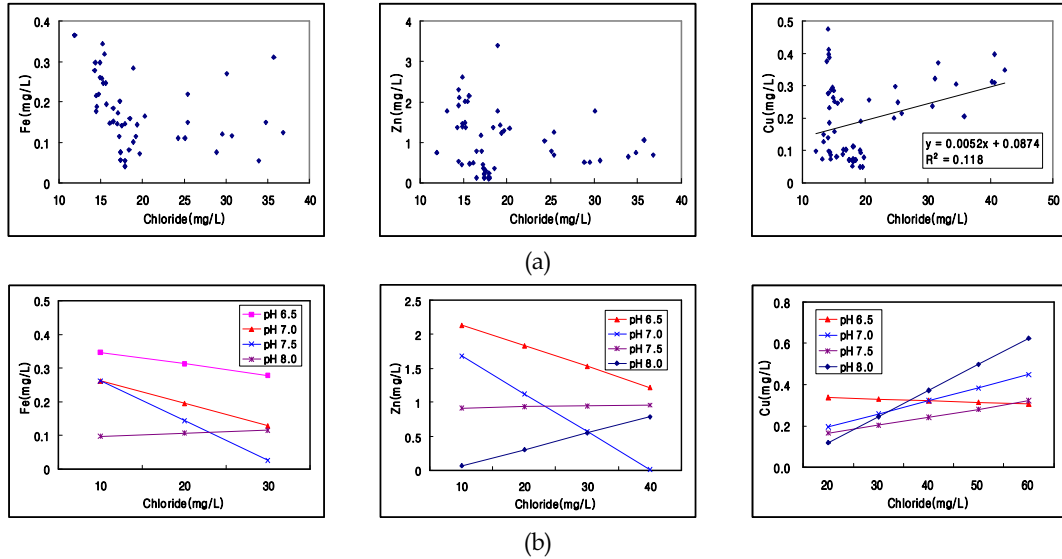


Fig. 6. Effects of chloride.

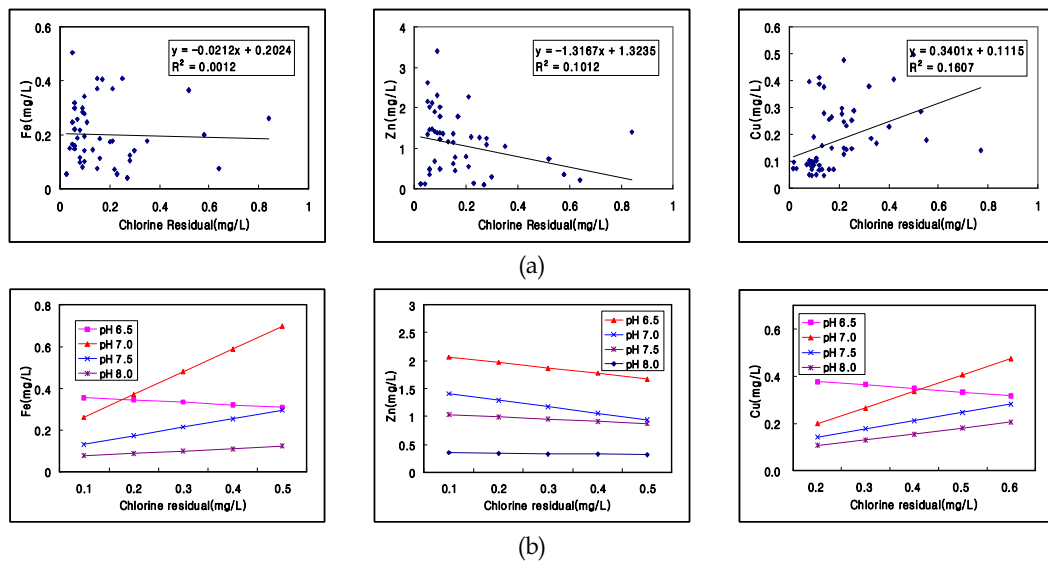


Fig. 7. Effects of chlorine residual

Table 9. Comparison of coefficient of determination(R2) (effect of chlorine residual)

pH range	Fe	Zn	Cu
pH 6.5 ~ 8.0	0.0012	0.1012	0.1607
pH 6.5	0.1275	0.1096	0.0907
pH 7.0	0.5213	0.0100	0.5114
pH 7.5	0.5429	0.0203	0.3945
pH 8.0	0.1733	0.0049	0.4119

2. 2. 3 수질모니터링 인자의 설정
상수도관로의 부식에 영향을 미치는 수질인자 중 pH, 알칼리도, 칼슘 및 경도는 그 값이 증가함에 따라 부식이 억제

되며, 전기전도도, 잔류염소, 염소이온, 황산이온, 수온은 그 값이 증가함에 따라 부식이 촉진된다고 알려져 있다(서규태 등 1998 ; Pisigan, R.A. 1990). 현재 정수사업소에서는

Table 10. Water quality monitoring factor

Treatment method	Water Treatment Plant	Water Distribution System
Ca(OH) ₂ , Ca(OH) ₂ +CO ₂	pH, Alkalinity, Hardness, Calcium	pH, Alkalinity, Hardness, Calcium
Inhibitors	pH, Alkalinity, Hardness, Calcium, phosphate, silicate	pH, phosphate, silicate
No control	pH, Alkalinity, Hardness, Calcium	pH, sulfate, chloride

Table 11. Classification of water qualities

	Factor
Corrosion inhibition W.Q.	pH, Alkalinity, Hardness, Calcium
Corrosion acceleration W.Q.	Conductivity, Chlorine residual, Chloride, Sulfate, Water temperature
Others	TOC, THM

상기 항목에 대하여 대부분(칼슘 제외) 분석을 하고 있으나 관로내의 수질에 대해서는 간헐적 채수 또는 소비자 민원에 의해 pH, 잔류염소, 중금속중 일부 항목을 분석하고 있는 실정이다. 사실상 관로 내 수질에 대하여 상기 수질인자를 모두 분석하고 모니터링을 하는 것은 경제적인 낭비를 초래할 뿐만 아니라 비효율적이다. 그리고 본 연구의 결과에 의하면 상기 수질인자는 관 중에 따라 매우 다른 양상을 나타내므로 수질을 모니터링하는 데 매우 신중을 기해야 한다. 상수도관망의 부식억제를 위한 수질모니터링을 최적화하기 위해서는 관로 내에서 수질의 특성변화가 큰 항목만을 측정하고, 이를 기반으로 개발된 단순화된 지표로 즉각적으로 평가하는 것이 필요하다.

정수사업소와 상수도관로 내에서 부식억제를 위한 각 처리 방법별 수질모니터링 항목은 Table 10과 같다. 특히, 정수 처리하는 경우에 응집 시 Alum(Al₂(SO₄)₃)을 사용할 경우에는 반드시 sulfate의 항목을 모니터링하여야 한다.

정수사업소에서 부식성 수질제어(pH, 알칼리도 및 칼슘 정도의 조절)를 하지 않는 상태에서 부식억제를 위한 모니터링 인자는 적어도 pH와 수처리 과정 중 큰 차이가 발생할 수 있는 수질인자(pH, 알칼리도 및 칼슘정도)는 포함시켜야 한다.

2. 3 Korea Water Index(KWI)의 적용

2. 3. 1 KWI의 개요

KWI는 부식성 제어를 위한 최적수질을 가정하고 현재 수질과 비교함으로써 상대적 수질 특성의 차이를 무차원화시킨 것으로, 본 모델의 설정을 위한 가정은 다음과 같다.

- ① 수질의 물리·화학적 특성은 배제한다.
- ② 각 수질인자가 부식에 미치는 영향이 동일하다.

KWI는 부식성 평가가 수질내의 부식억제인자의 함유량이 많으면 부식성이 적고 함유량이 적으면 부식성이 커지며, 부식촉진인자의 함유량이 많으면 부식성이 크고 함유량이 적

으면 부식성이 작아진다는 일반적인 사실에 근거한 것이다.

관체 내에서 각 수질인자가 부식에 미치는 영향이 동일하지는 않아서 이에 대한 가중치를 설정하여야 하지만, 현재 인자별로 정량적으로 어느 정도로 영향을 미치는지에 대한 연구결과는 미미한 실정이다. 그래서 본 모델은 수도물의 부식성 경향과 정도를 상대적으로 비교하기 위하여 각 수질인자가 부식에 미치는 영향은 동일 하다고 간주하였다. 또한 KWI 모델은 부식성 수질제어를 위한 수처리 후 수질의 부식성 변화를 쉽게 분석할 수 있다.

수질인자의 값이 증가함에 따라 부식이 억제되는 수질인자를 "부식억제수질인자"로 설정하였고, 수질인자의 값이 증가함에 따라 부식이 촉진되는 수질인자를 "부식촉진수질인자"로 설정하였다. 각 수질인자의 항목은 Table 11과 같다.

최적 수질과 현재 수질과의 수질의 비의 합을 전체의 수질 항목 수로 나누어 지표로 하였다. 단 수질인자의 비교는 부식억제수질인자는 "최적수질에 대한 실측수질의 비"로 부식촉진수질인자는 "실측수질에 대한 최적수질의 비"로 설정하였다.

$$KWI = \frac{\sum_{i=1}^{n1} W_{qin_i}/W_{qo_i} + \sum_{i=1}^{n2} W_{qo_i}/W_{qac_i}}{n1 + n2} \quad (1)$$

- 여기서, KWI : Korea Water Index
 W_{qo} : 부식억제를 위한 최적 수질,
 W_{qin} : 실측한 부식억제수질
 W_{qac} : 실측한 부식촉진수질
 n1 : 부식억제수질의 항목수
 n2 : 부식촉진수질의 항목수
 KWI < 1 : 부식성
 KWI = 1 : 평형
 KWI > 1 : 비부식성

W_{q0}는 최적수질은 부식성 수질제어를 위한 최적 수질의 범위는 이미 유럽 등 여러 나라에서 지침으로 설정되어 있기 때문에 (1) 지침의 수치를 이용하거나, (2) 시료를 채취하여 부식성 수질제어를 위한 수처리 후 증가되는 수질변화량을 W_{qin}에 더하여 결정할 수 있다(예: Marble Test 등).

상기 모델의 장점은 복잡한 계산이 필요 없으며, 항목의 추가/제거가 용이하여 상수도관로 내에서 수질항목의 변화에 대해 매우 간단하게 사용할 수 있다

2.3.2. KWI에 의한 적용성 평가

기존 LI, CCPP 등 탄산칼슘의 침전능에 기반을 한 부식성 평가모델의 가장 큰 문제점은 그 평가결과만으로는 부식에 대한 어떤 정보도 얻을 수가 없다는 것이다. 본 모델도 부식 상태에 대한 정보는 얻을 수 없으나 부식성 수질제어를 위한 정량적인 근거는 제시할 수 있다.

LI, CCPP 등으로 국내 정수에 적용하여 부식성을 평가하면 부식성이 매우 크게 평가되고, 그 지수를 이용하여 정수 처리에 적용하고자 하면 지나치게 부식성이 크게 계산되어 지고 이 값이 비부식성으로 조절하기 위해서는 약품주입량이 많아지기 때문에 pH의 급상승 및 사고발생이 우려된다. 하지만 본 KWI 모델은 적용 가능한 수질범위를 책정할 수

있어 정수처리 시 발생하는 사고를 최소화할 수 있다.

KWI 모델로 Table 1~Table 3의 봄과 가을의 자료를 적용하여 국내 수계별 수돗물의 부식성을 평가한 결과는 Fig. 8~Fig. 10과 같다. Fig. 8은 모델 전체를 적용하여 나타낸 그림이며, Fig. 9와 Fig. 10은 본 모델의 성분 중 부식억제인자와 부식촉진인자를 구분하여 나타낸 그림이다.

통합한 KWI 모델에 의하여 국내 수계별 수돗물의 부식성을 평가한 결과, 낙동강수계인 B시의 H 정수사업소의 수돗물이 부식성이 가장 큰 것으로 평가되었으며, 한강수계(S시, Y 정수사업소), 낙동강수계(D시, M 정수사업소), 호수수계(K시, Y 정수사업소)의 순서로 부식성이 큰 것으로 평가되었지만, 부식억제인자와 부식촉진인자의 함유량이 한강수계나 낙동강수계보다 모두 낮은 호수수계의 경우 최저치와 최고치의 폭이 매우 컸다. 전체적인 부식성 평가 결과가 통합한 KWI 모델과 LI나 CCPP로 수돗물의 부식성 평가한 결과에 차이가 있는 이유는 LI나 CCPP는 탄산칼슘포화에 기반을 둔 모델로 염소이온(Cl⁻)이나 황산이온(SO₄²⁻)의 영향이 고려되어 있지 않기 때문이다.

본 모델의 다양한 적용을 위하여 부식억제인자와 부식촉진인자를 구분하여 평가하였다. KWI 모델에 부식억제인자(pH, 알칼리도, 칼슘, 경도)만을 적용하여 부식성을 평가한

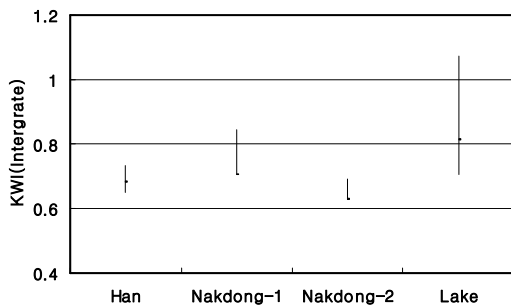


Fig. 8. Integrate evaluation.

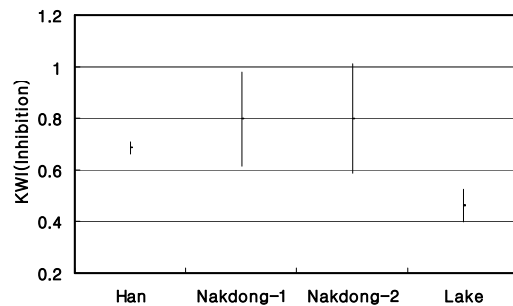


Fig. 9. Inhibition factor evaluation.

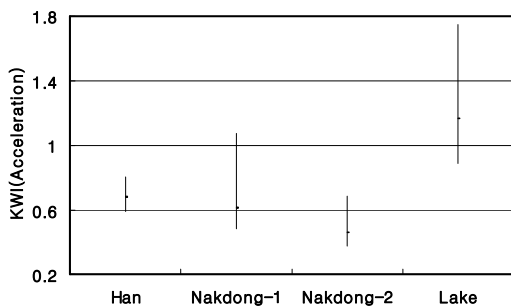


Fig. 10. Acceleration factor evaluation.

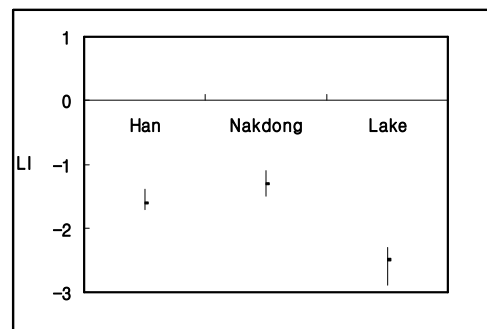


Fig. 11. Variation of LI

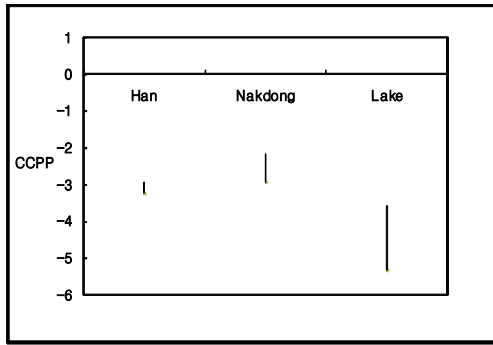


Fig. 12. Variation of CCPP

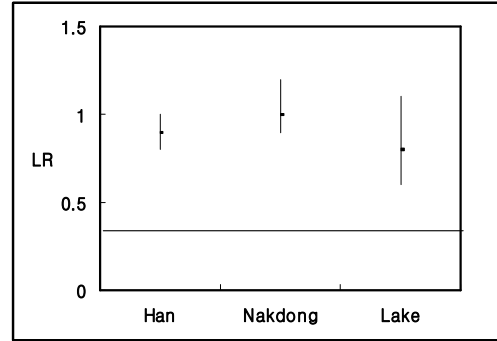


Fig. 13. Variation of LR

결과는 호소수계인 K시의 Y 정수사업소의 수돗물이 부식성이 가장 큰 것으로 평가되었으며, 낙동강수계와 한강수계는 최저치의 경우 비슷하게 평가되었지만, 낙동강수계의 경우 최저치와 최고치의 폭이 매우 컸다. Table 1~ Table 3의 봄과 가을의 자료를 적용하여 부식억제인자만을 적용한 수질비교모델은 Fig.11~ Fig. 12에서 나타난 것처럼 탄산칼슘포화도에 근거한 LI, CCPP와 비슷한 경향을 보여주었다.

KWI 모델에 부식촉진인자(sulfate, chloride, chlorine residual)만을 적용하여 부식성을 평가한 결과는 낙동강수계인 B시의 H 정수사업소의 수돗물이 부식성이 가장 큰 것으로 평가되었으며, 낙동강수계(D시, M 정수사업소)와 한강수계, 호소수계의 순서로 부식성이 평가되었다. 하지만 낙동강수계(D시, M 정수사업소)와 호소수계의 경우 최저치와 최고치의 폭이 매우 컸다. 부식촉진인자만을 적용한 수질비교모델은 기존의 Fig. 12과 같이 황산이온과 염소이온의 농도에 근거한 LR과 비슷한 경향을 보여주었다

즉, 본 KWI 모델의 조건을 변화시키면 기존 부식성 평가 모델인 LI나 CCPP, LR의 지수로 평가한 내용과 유사한 결과를 나타내었기 때문에 수질의 부식성 평가에 적용이 가능한 것으로 판단된다.

3. 결론

국내의 수돗물은 상수원과 처리방법(염소주입량, 응집제 종류 및 사용량)에 따라 부식성이 다르다. 대체적으로 국내 수돗물은 탄산칼슘의 침전이 발생하지 않아 부식성이 크며, 특히 알칼리도 및 칼슘경도가 낮은 호소수계를 상수원으로 하는 수돗물은 한강이나 낙동강 등을 상수원으로 하는 수돗물보다 부식성이 크다. 또한 황산이온과 염소이온의 성분이 상대적으로 많은 낙동강수계를 상수원으로 하는 수돗물은 다른 수계의 수돗물보다 부식성이 큰 것으로 판단된다.

본 연구결과 수질특성의 작은 차이도 관종별로 금속용출량에 미치는 영향이 있었다. 즉, 현재 상태의 수돗물은 상수원 및 지역에 매설된 관 중에 따라 장기적으로 부식특성이 다양하게 나타날 수 있음을 암시한다. 예를 들어 정수처리장을 떠난 물이 pH가 낮다면 시멘트모르타 라인링 닥타일주철관(CML-DCIP)을 통과하는 동안은 CML의 중성화에 의해 pH가 상승되고 알칼리성분이 용출될 수 있으며, 다시 이 물이 주철관을 통과하는 동안은 관체의 부식을 일으키게 된다. 만일 이 물의 염소이온과 황산이온의 함유량이 높다면 급수관을 통과하는 동안 관 종이 동관일 경우 부식이 촉진되며 상황에 따라 급속도로 부식이 진행될 수도 있다. 실제로 상수도 시스템 내에서 부식은 초기 수질특성과 관 중에 따라 매우 복잡하고 다르게 나타난다.

상수도시스템에서 부식모니터링은 경제적으로 큰 사고를 예방하고 민원을 줄일 수 있는 가장 좋은 방법이다. 물론, 부식모니터링에 앞서서 선행되어야 할 일은 수돗물의 부식성수질에 대한 평가와 부식성 수질제어를 위한 수처리 방법의 도입이다. 많은 연구결과에 의하면 부식 제어를 위한 간단한 수처리만으로 관체의 부식을 억제시킬 수 있음이 증명되었다.

본 연구에서 제시하고자 하는 바는 국내 여건상 부식성 수질제어는 하지 않더라도, 이를 위한 기본적인 모니터링만이라도 실시하자는 것이다. 그래서 현 상태의 수질이 관로의 부식에 어떤 문제를 일으킬 수 있고 어떤 대처를 하여야 하는지를 바로 인식해야만 향후, 부식성수질제어를 위한 수처리 및 발달된 모니터링 방안도 실행가능할 것이다.

부식성모니터링은 기존 알려진 LI 등의 지수로도 가능하며, 문헌에 이미 많이 알려져 있다. 본 연구에서는 기존 방법보다 간단한 방법을 제시하였고, 미래에는 이 방법을 SCADA를 적용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 광필재, 이현동, 남상호 (1997) 상수도관로의 부식방지를 위한 수돗물의 침식성 평가, *대한상하수도학회지*, **11**(1), 53~63.
2. 광필재, 이현동, 남상호, 정원식 (2001) 국내 수계별 수돗물의 부식성 및 금속용출 특성 평가에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **23**(7), 1195~1203.
3. 서규태, 정해룡, 이현동, 정원식, 지재성 (1998) 배수시스템내 부식영향 수질인자의 변화특성, *대한환경공학회지*, **20**(8), 1151~1160.
4. 이현동 외(2001) "상수도관로의 부식 및 노후도 예측 모델 개발 3차년도 보고서", 한국건설기술연구원.
5. Leroy, P., Schock, M. R., Wagner I., Holtschulte H., Cement-Based Materials (1996) Internal Corrosion of Water Distribution Systems, 2nd Ed. Edited by AWWARF, and DVGW-TZW.
6. Pisigan, R. A. (1992) Inadequacy of Using Recently Reported CaCO₃ Saturation Indices for water Corrosivity Evaluation, *AWWA WQTC Proc.*, pp. 711~721.
7. Boissonneault, P. (1994) Dissolved Inorganic Carbon - A Key to Corrosion Control in Low Alkalinity Waters, *AWWA WQTC Proc.*, pp. 1693~1710.
8. Edwards, M., et al (1994) Inorganic Anions and Copper Pitting, *Jour. Science and Engineering Corrosion*, **50**(5), .
9. Edwards, M., Reiber, S., Schecher, W. D. (1997) Control of Pb and Cu Corrosion By-Products Using CORRODE Software, *AWWARF*.
10. EPA (1992) Lead and Copper Rule Guidance Manual .
11. Ferguson, J. F., Korshin, G. V., Perry, S. A. (1993) Evaluation of Water Quality Effects on Corrosion of Copper and Lead-Tin Solder in Portland Water, *AWWA WQTC Proc.*, pp. 1481~1499.
12. Pisigan, R. A. and Singley, J. E. (1985) effect of Water Quality Parameters on the Corrosion of Galvanized Steel, *J. AWWA*, **77**(11), 76~82.
13. Schock, M. R. (1990) Internal Corrosion and Deposition Control in Water Quality and Treatment, *J. AWWA*, 999~1111.
14. Tseng, T., Segal, D., Edwards, M. (2000) Increasing Alkalinity to Reduce Turbidity, *J. AWWA*, **92**(6), 44~54.
15. EPA (1992) Lead and Copper Rule Guidance Manual, Vol. II, Corrosion Control Treatment .
16. 환경부 (2007) 상수도시설기준 유지관리지침.j