

## 상수 원수 수질의 탄산칼슘 포화지수 평가

황병기<sup>1\*</sup>

### Evaluation of Calcium Carbonate Saturation Indices in Water

Byung-Gi Hwang<sup>1\*</sup>

**요약** 국내 수질의 부식성을 파악하기 위해 RTW 모델과 LPLWIN 모델을 이용하여 탄산칼슘포화지수를 포함한 다양한 지수를 산정하는 절차를 연구하였다. RTW 모델을 이용하여 LI, RI, AI 를 산정할 수 있었고, LPLWIN 모델을 이용하여 LI, LR, CCPP를 산정하였다. 한강 수계와 낙동강 수계를 취수원으로 하는 수돗물 자료를 적용하여 지수 값에 근거하여 부식성 여부를 판단하였다. 산정결과에 의하면, 낙동강 수계는 한강수계보다 부식성이 양호한 수질인 것으로 나타났다. 겨울철이 여름철에 비하여 부식성이 큰 것으로 나타나, 온도가 증가 할수록 부식성은 감소하는 것으로 조사되었다.

**Abstract** In order to examine the corrosiveness of tap water, we studied methods calculating various indices including calcium carbonate saturation indices, using RTW model and LPLWIN model. Indices such as LI, RI and AI could be computed using the RTW model, whereas the LPLWIN model could find indices as LI, LR and CCPP. With water quality data obtained from tap water of Han River and Nak-Dong River watersheds, based on the indices found from the models, the water quality of the Nak-Dong River is better than that of Han River in the point of resisting corrosiveness. Further, the water quality of winter is highly corrosive than that of summer, as long as the temperature rises up, the corrosiveness is reduced.

**Key Words** : LI, CCPP, corrosive, RTW model, LPLWIN model

### 1. 서론

국내의 상수원은 경도 및 알칼리도가 낮은 연수로 관체 내면의 보호막을 형성시키지 못하는 특성이 있다. 그리고 수처리 과정에서 전염소·후염소 처리, 황산이온을 함유한 응집제 등의 사용함에 따라 수질특성으로 인해 관체의 부식이 촉진될 수 있는 잠재성을 내포하고 있다 [1,4]. 수돗물의 부식성이란 상수도관망 내 관체나 시설물의 부식을 촉진시키는 수질을 뜻한다. 하천수의 경우 일반적으로 알칼리도, 칼슘, 마그네슘, 등의 농도가 높은 반면에 호소수의 경우 그렇지 않은 것이 일반적[6]이다.

부식성 수질을 제어 하는 데 선행되어야 할 것은 부식성 수질의 평가이다. 부식성 수질의 평가는 부식성 지수인 LI (Langelier Index)[5,8], CCPP(Calcium Carbonate Precipitation Potential)[2,14] 등을 이용하는 방법과

Marble Test[13] 등 탄산칼슘포화도 실험을 이용하는 방법이 있다.

국내의 수돗물의 부식성을 LI, CCPP, Larson's Ratio(LR)에 의하여 평가한 결과, 부식성이 매우 큰 것으로 나타났다. LI와 CCPP는 호소 수계로부터 취수한 수돗물의 부식성이 큰 것으로 나타났으며, LR은 낙동강 수계의 하천수가 다른 지역보다 다소 크게 나타났다. 탄산칼슘포화지수 LI, CCPP의 관점에서는 호소수가 하천수 보다는 부식성이 크나, LR의 경우 하천수와 호소수의 차이가 없었다[4].

수질의 부식성 정도를 파악하기 위하여 단일 지수에 의하여 판단하지 않고, 탄산칼슘포화지수를 포함한 다양한 지수를 산정하여 종합적으로 평가하여야 한다. 본 연구에서는 지수를 산정하기 위하여 개발된 모델 중에서 미국의 AWWA에서 개발된 RTW 모델[10]과 프랑스에서 개발된 LPLWIN 모델[11]를 이용하여 부식지수를 산정하였으며, 두 모델의 계산방식을 비교하여 국내 실정에 맞는 프로그램 개발을 위한 자료를 제시하고자 하였다.

<sup>1</sup>상명대학교 토목환경공학부

\*교신저자: 황병기(bh4a@smu.ac.kr)

## II. 연구내용 및 방법

한강수계를 상수원으로 사용하는 정수사업소의 원수 수질특성은 크게 나누어 호소수의 특성을 보이는 팔당댐과 한강 하천수의 특성을 보이는 잠실수증보로 나눌 수 있으며, 팔당댐의 취수원은 경기도 및 서울시 일부정수사업소로 송수되고, 잠실수증보는 서울시의 자체 취수원으로 활용되고 있다.

낙동강수계의 상수원은 오염의 정도에 따라 구분하면 대구광역시의 취수원(매곡, 두류), 낙동강과 금호강이 합류하는 지점 하류에 위치한 중류지점 취수원인 칠서 및 하류지점의 부산광역시 취수원인 물금 및 매리 취수원으로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 한강수계인 Y-정수사업소와, 낙동강수계인 D시의 M-정수사업소 수돗물의 분석결과를 가지고 RTW 모델[10]과 LPLWIN 모델[11]에 입력하여 상수원 수 수질의 부식지수를 평가하였다.

### 2.1 부식성 지수에 대한 이론적 고찰

미국 등 국내외적으로 수돗물에 의한 상수도관의 부식 평가방법은 일반적으로 부식성 지수를 이용한다. 부식성 지수를 이용하여 부식의 발생여부를 예측하고 부식성 수질 조절에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이러한 부식성 지수들은 각종 수질화학 인자들에 따른 관계가 있으며, 이러한 수질화학 인자들은 정수 처리 공정에서 사용하는

약품에 의해 달라진다. LI, LR, Aggressiveness Index(AI), Ryznar stability Index(RI)[4,7]지수의 정의 및 부식평가 기준 등을 표 1에 정리하여 나타내었다.

LI는 수돗물에서 탄산칼슘의 포화상태(포화, 불포화, 과포화)를 나타내는 지수로서, 1936년 Langelier는 수돗물의 수질특성인 pH, 총알칼리도, 칼슘이온농도, 전기전도도 등에 따라 표현되는 LI에 의해 수돗물의 부식정도를 결정하고 부식정도 조절할 수 있다고 발표하였다. [3] LI값과 물의 부식성과의 상관관계의 경우 LI값이 양수(+) 일 때는 탄산칼슘이 포화되어 배관 표면에 막을 형성하게 되어 부식성이 없다는 것을 표시하며, 0일 때는 탄산칼슘이 물속에서 포화용액을 형성함을 나타낸다.

RI에서 pHs는 탄산칼슘으로 포화 되었을 때의 pH값을 말하고, pH는 측정된 pH값을 나타낸다. RI값이 5.5이하일 경우에는 스케일 형성이 많아 부식성이 없다는 것을 표시하고, 8.5이상일 경우에는 부식성이 매우 크다는 것을 의미한다. 5.5 와 6.2 사이는 스케일이 형성됨을 말하고, 6.2에서 6.8사이는 스케일 약간 형성, 6.8에서 8.5사이는 부식성 수질임을 의미한다.

AI은 표 1의 식으로 표현되며, AI값이 10이하일 경우에는 높은 부식성을 나타내고, 12이상일 경우는 부식성이 없다는 것을 나타낸다.

위에서와 같이 각각의 부식성 지수들은 물속에서 pH 및 경도, 이온성분들에 관한 함수이다. 다시 말해 수중의 경도, 알칼리도, 염소(Cl<sup>-</sup>) 및 황산이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 중탄산이온

표 1. 부식지수 및 지수별 특성

Indexes	Equation	Characteristics
Langelier saturation index(LI)	$LI = pH - pH_s$	LI>0 supersaturated LI=0 saturated LI<0 undersaturated
Ryznar stability index(RI)	$RI = 2pH_s - pH$	RSI<5.5 high scale formed 5.5<RSI<6.2 scale formed 6.2<RSI<6.8 low scale formed 6.8<RSI<8.5 corrosive 8.5<RSI high corrosive
Aggressive index(AI)	$\log(Alk^*[H^+])$	AI<10 highly corrosive AI=10~12 moderately corrosive AI>12 non corrosive
Driving force index(DFI)	$\frac{[Ca^{2+}] \times [CO_3^{2-}]}{K'_s \times 10^{10}}$	DFI<1 supersaturated DFI=1 saturated DFI>1 undersaturated
CaCO <sub>3</sub> precipitation potential(CCPP)	$CCPP = 50000 (Alk_{-1} - Alk_{eq})$	CCPP>0 supersaturated CCPP=0 saturated CCPP<0 undersaturated
Larson's Ratio (LR)	$\frac{[Cl^-] + [SO_4^{2-}]}{[HCO_3^-]}$	LR > 0.7 corrosive LR < 0.7 non corrosive

(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)들에 따라 부식성 지수가 달라진다.

Rossum and Merrill[12]은 pH의 변화에 부식지수는 상관관계가 있는 것으로 보고하였다. 보고 자료에 의하면, Calcium (50 mg/L as CaCO<sub>3</sub>)과 Alkalinity (50 mg/L as CaCO<sub>3</sub>)를 함유한 원수에서 pH의 변화에 따른 부식지수의 변화를 그림 1에 나타내었다. 다른 지수는 앞 절에서 설명하였으며, LI<sub>n</sub>은 LI를 보완한 것으로 Snoeyink and Jenkins[15]에 의해 제시되었다.

그림 1에서, LI, RI, AI는 pH의 증가에 따라 직선적으로 증가하는 것으로 나타났으나, Driving Force Index(DFI), Momentary Index(ME), LI<sub>n</sub>, CCPP는 pH의 증가에 따라 곡선의 형태로 pH 10 이하에서는 증가하였으나, 그 이후는 pH 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. pH 9 - 10 범위에서 지수 값들의 차이가 가장 큰 것으로 나타났[12].

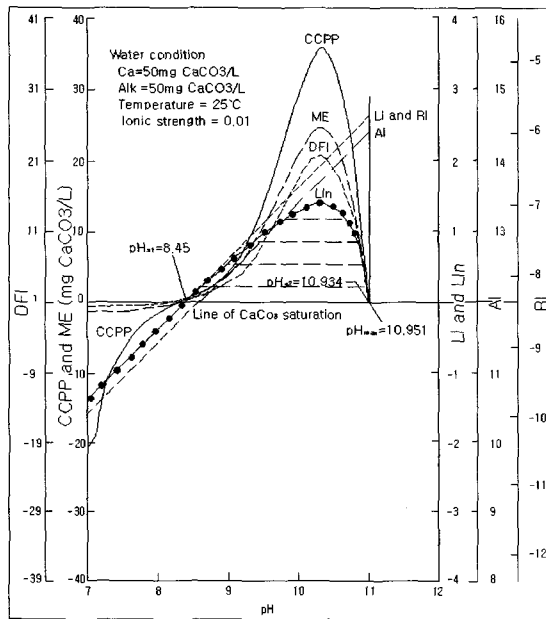


그림 1. pH와 탄산칼슘 포화지수와와의 관계 [Rossum and Merrill(1983)에서 인용]

### 2.2 RTW 모델을 이용한 부식지수 산정

RTW(Rothberg, Tamburini and Winsor) 모델[10]은 Microsoft Office Excel spreadsheet를 기초로 하여 pH나 전기전도도, TDS(Total Dissolved Solids), 알칼리도 그리고 칼슘농도 등의 부식성 수질인자들을 입력하여 부식지수인 LI, RI, AI와 DIC(Dissolved Inorganic Carbon), Precipitation Potential of copper, Iron, aluminum solids 등

을 쉽고 빠르게 계산해 낼 수 있는 프로그램이다. RTW 모델을 이용하여 한강수계와 낙동강수계의 수돗물 분석 결과를 평가하는 과정을 그림 2에 나타내었다.

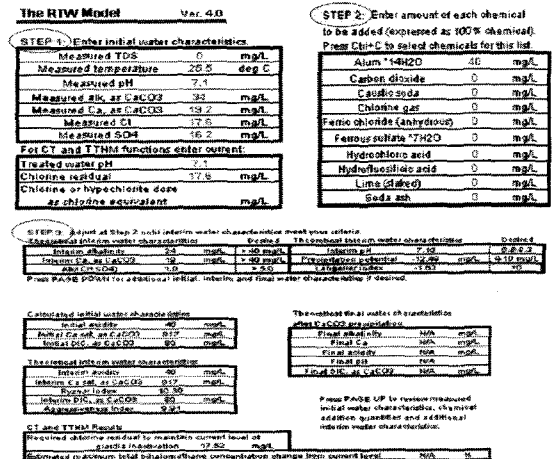


그림 2. RTW모델을 이용한 부식지수 산정 절차

단계 1: 수돗물의 초기 분석결과를 입력하는 단계로서 그림 2에서 보는바와 같이 측정된 TDS값, 온도(°C), pH, alkalinity (mg/L as CaCO<sub>3</sub>), Ca(mg/L as CaCO<sub>3</sub>), Cl, SO<sub>4</sub>의 농도가 입력이 되며, TTHM(Total Trihalomethane)의 적용을 위해 잔류염소농도와 hypochlorite(연소산염) as chlorine equivalent의 농도도 입력할 수 있다.

단계 2: Aluminum부터 Magnesium hydroxide까지 더해지는 농도의 유무에 따라 Yes/No 를 입력하게 되면, 그림에서 단계 2과정과 같이 나타나게 되어 농도를 입력할 수 있게 된다. 본 연구에서는 더해지는 농도가 없는 것으로 가정하여 한강수계와 낙동강수계의 순수 결과값만 가지고 부식지수를 계산하였다.

단계 3: 단계 1과 2에서 입력되어진 농도를 가지고 부식지수(CCP, LI, RI, AI)가 자동적으로 계산되어지는 단계이며 그 이외에도 Alk(Cl+SO<sub>4</sub>)와 Initial acidity, Initial DIC의 농도도 계산 할 수 있다.

### 2.3 LPLWIN 모델에 대한 부식지수 산정

LPLWIN 모델(version 3.12)[11]은 부식성 수질이나 상수도 관로 내에서 형성되는 스케일 형성을 쉽고 빠르게 계산해 낼 수 있다. 이 프로그램은 Legrand and Leroy[13]의 방법을 사용하고 있으며, pH나 free CO<sub>2</sub>, TH 등을 평가할 수 있다. 또한 부식이 일어나는 기본적인 원리인 총 음이온과 양이온에 대해서도 평가가 가능하며, 부식지수 계산으로는 LR와 RI, LI등을 계산할 수 있다. 입력 자료

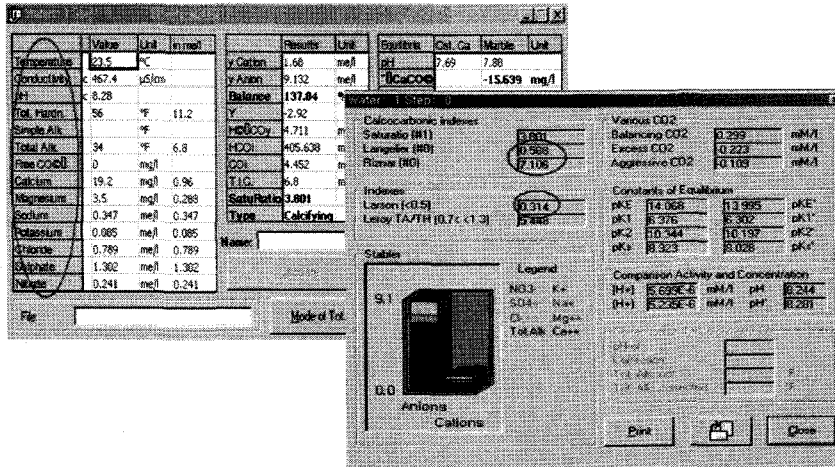


그림 3. LPLWIN모형을 이용한 부식지수 산정 절차

는 온도, 전기전도도, pH, 경도, 알칼리도, CO<sub>2</sub>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 등이며, 본 모델을 사용한 평가 절차를 그림 3에 나타내었다.

### III. 결과 및 고찰

본 연구에서는 한강 수계 Y-정수사업소와 낙동강 수계의 M-정수사업소의 수돗물 분석 결과[3]을 표 2에 정리하였으며, 이를 이용하여 수질의 부식성을 평가하였다.

표 2. 한강 및 낙동강 수계의 수돗물 분석자료

		겨울	봄/가을	여름
pH	한강	6.8~7.7	6.9~7.1	6.9~7.1
	낙동강	7.0~7.3	7.0~7.4	7.0~7.4
수온	한강	1.2~4.4	15~18	23~25.5
	낙동강	6~8	10~18	18~24
알칼리도	한강	24~37	26~39	19.5~34
	낙동강	29.5~34	26~39	19.5~34
경도	한강	25~66	47~59	41~56
	낙동강	80~88	62~74	47~72
Ca <sup>2+</sup>	한강	18~23	19~21	15.2~19.2
	낙동강	32~35	24.4~30	18.8~28.8
Mg <sup>2+</sup>	한강	3.5~3.9	2.9~3.1	2.9~3.5
	낙동강	-	-	-
Cl <sup>-</sup>	한강	16.2~17.8	15.2~17.5	12.8~17.6
	낙동강	17.8~23	11~20	14~18
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	한강	19.8~21.6	14.8~17.2	14.8~16.2
	낙동강	30~34.5	22~28	24~26
Cond.	한강	174~198	168~177	165~182
	낙동강	164~167	154.2~171.4	162.3~177.1

단위 : Temp(°C); Cond.(us/cm); Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, 알칼리도, 경도(mg/L as CaCO<sub>3</sub>) SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>(mg/L)

### 3.1 RTW 모델 적용 결과

한강 및 낙동강 수계의 봄/가을, 여름, 겨울철의 수질 자료를 가지고 RTW모형을 이용하여 부식지수를 계산하였다. 모델을 적용하여 구한 값을 선행연구[3,4]의 값과 비교하여 표 3에 나타내었다.

표 3. RTW 모델을 이용한 부식지수 산정 결과

수계	지수	구분	계절		
			봄/가을	여름	겨울
한강	LI	본연구	-1.8~-1.3	-1.9~-1.5	-2.1~-0.9
		선행연구	-1.7~-1.4	-1.7~-1.4	-2.1~-1.1
	RI	본연구	10.4~11.1	10.4~11.3	10.2~11.7
		선행연구	-	-	-
AI	본연구	9.6~10.0	9.4~9.9	9.4~10.6	
	선행연구	-	-	-	
낙동강	LI	본연구	-1.6~-1.0	-1.7~-0.9	-1.9~-1.1
		선행연구	-1.5~-1.1	-1.5~-1.1	-1.5~-1.3
	RI	본연구	9.8~11.0	10.0~10.4	10.2~10.8
		선행연구	-	-	-
	AI	본연구	9.8~10.5	9.6~10.4	10.0~10.4
		선행연구	-	-	-

한강 수계에서 LI는 봄/가을, 여름, 겨울에 대하여 본 연구에서 각각 -1.8~-1.3, -1.9~-1.5, -2.1~-0.9로 계산되었으며, 선행연구[4]에서 각각 -1.7~-1.4, -1.7~-1.4, -2.1~-1.1로 나타나 산정 값이 차이가 없는 것으로 나타났다. 낙동강 수계에 대하여도 본 연구의 계산값은 선행연구의 값과 차이가

거의 없는 것으로 나타났다.

RI 및 AI 값은 한강 수계의 경우 RI는 봄/가을, 여름, 겨울에 10.4 ~ 11.1, 10.4 ~ 11.3, 10.2 ~ 11.7로 각각 산정되어 모두 기준치인 8.5보다 높아 강한 부식성 수질로 나타났으며, AI는 9.6 ~ 10.0, 9.4 ~ 9.9, 9.4 ~ 10.6로 대부분 기준치인 10이하로 나타나 강한 부식성 수질로 산정되었다. 낙동강 수계의 경우 RI는 9.8 ~ 11.0, 10.0 ~ 10.4, 10.2 ~ 10.8로 산정되어 한강 수계보다 다소 낮은 경향을 나타내었으며, AI는 9.8 ~ 10.5, 9.6 ~ 10.4, 10.0 ~ 10.4로 산정되어 한강 수계보다 다소 높게 산정되었다.

한강수계 및 낙동강수계의 하천수를 취수원으로 하는 정수사업소에서 생산된 수도물의 가장 큰 수질차이는 황산이온의 농도와 경도 및 칼슘농도로 나타났다. 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 [14].

### 3.2 LPLWIN 모델 적용 결과

온도, 전기전도도, pH, 경도, 알칼리도 등 부식성 수질 인자들을 모델에 입력하여 하천수계별 LI, LR, CAPP의 계산 결과를 표 4에 나타내었다.

표 4. LPLWIN 모델을 이용한 부식지수 산정 결과

수계	지수	구분	계절		
			봄/가을	여름	겨울
한강	LI	본연구	-1.8~-1.3	-1.9~-1.5	-2.1~-0.9
		선행연구	-1.7~-1.4	-1.7~-1.4	-2.1~-1.1
	LR	본연구	0.9~1.2	0.9~1.4	1.1~1.5
		선행연구	0.8~0.9	0.7~0.9	0.9~1.0
	CAPP	본연구	-18.9~-13.6	-16.3~-14.6	-13.2~-12.9
		선행연구	-	-	-
낙동강	LI	본연구	-1.6~-1.0	-1.7~-0.9	-1.9~-1.1
		선행연구	-1.5~-1.1	-1.5~-1.1	-1.5~-1.3
	LR	본연구	1.2~1.3	1.3~1.9	1.4~1.9
		선행연구	0.9~1.2	0.9~1.1	0.7~1.5
	CAPP	본연구	-14.8~-7.7	-12.8~-6.9	-10.3~-6.3
		선행연구	-	-	-

한강 수계에서 LI는 봄/가을, 여름, 겨울에 대하여 본 연구에서 각각 -1.8 ~ -1.3, -1.9 ~ -1.5,

-2.1 ~ -0.9로 계산되었으며, 선행연구에서 각각 -1.7 ~ -1.4, -1.7 ~ -1.4, -2.1 ~ -1.1로 나타나 본 연구와 선행연구에서 구한 값에 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 낙동강 수계에 대하여도 본 연구의 계산 값은 선행연구의 값과 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

LR은 황산이온과 염소이온 농도의 합과 중탄산칼슘 농도와의 비로서 부식촉진 인자인 황산이온 농도가 높으면 지수가 커지는 경향을 나타낸다. 한강 수계의 경우 봄/가을, 여름, 겨울에 본 연구에서 0.9 ~ 1.2, 0.9 ~ 1.4, 1.1 ~ 1.5로 각각 산정되었으며, 선행연구에서 0.8 ~ 0.9, 0.7 ~ 0.9, 0.9 ~ 1.0으로 산정되어 값의 차이는 크지 않았으나, 본 연구의 결과 값이 선행연구 결과 값보다 다소 높은 경향을 보이는 것으로 나타났다. 낙동강 수계의 경우 1.2 ~ 1.3, 1.3 ~ 1.9, 1.4 ~ 1.9으로 산정되어 한강 수계에 비하여 모든 계절에 걸쳐 다소 높은 것으로 산정되어 낙동강 수계가 한강 수계보다 부식성이 높은 수질로 나타났다.

CAPP는 선행연구와 비교할 수 없어 본 연구에서 구한 값을 제시하였으며, 봄/가을, 여름, 겨울에 대하여 한강 수계의 경우 각각 -18.9 ~ -13.6, -16.3 ~ -14.6, -13.2 ~ -12.9이었으며, 낙동강 수계의 경우 각각 -14.8 ~ -7.7, -12.8 ~ -6.9, -10.3 ~ -6.3로 나타나 한강 수계가 낙동강 수계보다 불포화 정도가 심한 수질로 평가되었다.

LI의 경우 RTW모델과 LPLWIN모델에서 모두 구할 수 있으므로 그 결과를 비교 할 수 있었다. 두 모델에서 서로 상이한 결과를 나타냈는데, 이는 RTW모델에서 Lime, hydrochloric, acid 등의 농도가 LPLWIN 모델에서는 Potassium, Sodium 등의 농도가 고려되지 않아 부식지수의 값이 차이가 나는 것으로 사료된다.

## 4. 결론

RTW모델과 LPLWIN모델을 이용하여 한강 수계 및 낙동강 수계의 수질을 부식지수에 근거하여 평가하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. RTW 모델에서는 LI, RI, AI를 계산할 수 있었고, 대표 지수인 LI는 한강 수계의 경우 봄/가을, 여름, 겨울에 각각 -1.8 ~ -1.3, -1.9 ~ -1.5, -2.1 ~ -0.9로, 낙동강 수계의 경우 -1.6 ~ -1.0, -1.7 ~ -0.9, -1.9 ~ -1.1로 산정되어 모두 부식성의 수질로 나타

났다.

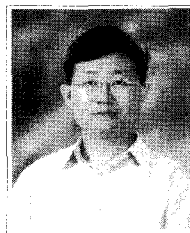
2. LPLWIN 모델에서는 LI, LR, CCPP의 계산이 가능하였는데, CCPP는 탄산칼슘침전능을 표시하는 지표로서 다른 지표와 다르게 부식지수로 인한 수질의 평가뿐만 아니라, 불포화 상태의 수질의 경우 포화 상태의 수질로 변화시키기 위하여 필요한 탄산칼슘의 양을 정량적으로 산출할 수 있다.
3. CCPP 산정결과, 한강 수계는 봄/가을, 여름, 겨울의 경우 각각 -18.9~-13.6, -16.3~-14.6, -13.2~-12.9이었으며, 낙동강 수계의 경우 각각 -14.8~-7.7, -12.8~-6.9, -10.3~-6.3로 나타나 한강 수계가 낙동강 수계보다 불포화 정도가 심한 수질로 평가되었다.
4. 한강 및 낙동강 수계 수돗물의 가장 큰 수질차이는 황산이온의 농도와 경도 및 칼슘농도로 나타났다. 따라서, 부식지수 계산 결과에서도 낙동강수계가 한강수계보다 부식성에 양호한 것으로 나타났다.
5. 한강 수계와 낙동강 수계 모두 겨울철의 수질이 봄/가을, 여름철의 수질 보다 부식성이 큰 것으로 나타났다. 여름철보다 겨울철에 부식성이 더 큰 것으로 계산되어, 온도가 증가할수록 부식성은 감소하는 것으로 나타났다.

### 참고문헌

- [1] 광필재, 김선일, 우달식, 남상호, “물의 침식성이 수도관 부식에 미치는 영향”, 상하수도학회지, 13(10), pp.134-139, 1999.
- [2] 이재인, 김도환, 이지형, 김동윤, 홍순현, 신판세, “수도관 내부부식방지를 위한 CCPP 조절시 정수공정내에서의 수질변화”, 대한환경공학회지 27(4), pp.362-368, 2005.
- [3] 환경부, “상수도관로의 부식 및 노후도 예측모델 개발”, 2002.
- [4] 광필재, “상수도에서 내부부식에 관한 수질의 영향”, 건국대학교 박사학위논문, 2002.
- [5] 박영복, 공성호, “상수도관 부식방지를 위한 탄산칼슘 포화지수(LI) 인자 제어에 관한 연구”, J. Korean Ind. Eng. Chem, 16(3), 2005.

- [6] 이현구, 이찬희, 서호택, “대전지역 상수도 물의 계절 변화에 따른 물리화학적 불균일”, 지질학회지, 33(6), pp.505-517, 2000.
- [7] Ryznar, J.W., "A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water", J. AWWA, 36(4), 1944.
- [8] Langelier, W. F., "Chemical equilibria in water treatment", J. AWWA, 38(2), 1946.
- [9] Legrand, L. and Leroy, P., "Prevention of corrosion and scaling in water supply systems", 1994.
- [10] AWWA, RTW user's guide, 1999.
- [11] CIFEC, LPLWIN program 3.12 version Manual, 2003
- [12] Roussum, J.R. and Merrill, D.T., "An evaluation of the calcium carbonate saturation indexes", J. of AWWA, pp.95-100, 1983.
- [13] Degremont, "Basic physical-chemical process in water treatment", Water Treatment Handbook Sixth Ed., pp. 261-275, 1991.
- [14] EPA, "Lead and copper rule guidance manual", 1992.
- [15] Snoeyink, V.L. and Jenkins, D., "Water Chemistry", John Wiley and Sons, New York, 1980.

### 황 병 기(Byung-Gi Hwang)



- 1987년 2월 : 한양대학교 토목공학과 (학사)
- 1990년 5월 : (미)Virginia Tech. (석사)
- 1995년 5월 : (미)U. of Virginia (박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 상명대학교 토목환경공학부 (부교수)

<관심분야>

수질관리모델링, 수질영향평가, 상수도(관부식모델링), 하수도(LI 및 누수 분석)