

상수도관 부식방지를 위한 CCPP(Calcium Carbonate Precipitation Potential) 산정 프로그램 개발

황병기^{1*}

Development of CCPP(Calcium Carbonate Precipitation Potential) calculating program for corrosion control of drinking water distribution system

Byung-Gi Hwang^{1*}

요약 본 연구에서는 상수도관의 부식방지를 위해 관망 내부에서 탄산칼슘의 침전 및 용해 여부를 판단할 수 있는 지표인 CCPP를 산정할 수 있는 프로그램을 개발하였다. CCPP 산정은 9단계 절차를 통하여 이루어지며, 평형상태의 pH를 가정하고 결정 식의 왼쪽 항의 합과 오른쪽 항의 합이 오차의 범위에서 유사한 값을 주도록 반복계산을 수행하고, 다음 단계에서 초기 및 평형상태의 알칼리도를 대입하여 CCPP를 구한다. 프로그램 개발은 계산을 위해 포트란 언어를, 결과 값을 그래프로 표현하여 쉽게 판단할 수 있도록 비주얼베이직 언어를 사용하였다. 개발된 프로그램을 적용하여 한강 수계 Y정수사업소의 수질을 평가한 결과, 탄산칼슘의 불포화 상태가 심한 수질로 판명되어 부식성이 높은 것으로 평가되었다.

Abstract In this study, we developed the CCPP calculating program, which is a kind of index and can determine whether calcium carbonate would precipitate or not in pipe line of water distribution system. Through 9 complicated procedures, CCPP can be calculated. Assuming pH of equilibrium as a first trial, compare the right-hand-side result with left-hand-side result. If the percentage difference between the two results is less than a prescribed tolerance, the initial assumption for the assumed equilibrium pH is adequate. If the difference is too large, make a different assumption and repeat until a result within the prescribed tolerance is achieved. Plugging the intermediate results into the final equation, we could compute the CCPP. Using Fortran and Visual Basic languages, we developed the program. As a result of application of the program, the water quality of intaking water of Han River is highly corrosive by the index of CCPP

Key Words : corrosive, CCPP, index, equilibrium

1. 서론

물의 침식성은 상수도관내에서 탄산칼슘의 침전 및 용해 가능 여부를 나타내는 지표로서 탄산칼슘 포화지수를 이용하여 나타낼 수 있으며, 대표적으로 잘 알려져 있는 지수는 LI (Langlier Index), CCPP(Calcium Carbonate Precipitation Potential, 탄산칼슘침전능)가 있다.[1, 2, 3, 4] 이중 LI는 탄산칼슘(CaCO_3 , Calcium Carbonate)에 대하여 포화 (= 0), 불포화 (< 0), 과포화 (> 0)를 판단하는

반면, CCPP는 탄산칼슘으로 포화되는 데 필요한 탄산칼슘의 양을 정량적으로 계산해 줄 수 있다. CCPP 지수를 이용할 경우 정수장 내의 정수처리 과정에서 소석회($\text{Ca}(\text{OH})_2$), 소다회(Na_2CO_3), 탄산가스(CO_2) 등 알칼리제(부식억제제)를 정량적으로 주입하여 CCPP 조건을 유지함으로써 수질의 부식성을 감소시킬 수 있다. 이렇게 조절된 최종 정수는 상수도관으로 유입되어 포화도 이상으로 생성된 탄산칼슘(CaCO_3)의 확산에 의해 관 내벽에 얇은 탄산칼슘(CaCO_3) 피막을 형성하게 된다.[1, 5, 6, 7]

CCPP 지수에 영향을 미치는 수질인자는 pH, 수온, 알칼리도, 칼슘경도, TDS(Total Dissolved Solids, 총용존고형물)이며, 이 중 pH와 알칼리도가 가장 중요한 역할을

¹상명대학교 토목환경공학부

*교신저자: Byung-Gi Hwang(bh4a@smu.ac.kr)

한다. pH는 수소이온 농도를 그 역수의 상용대수로서 나타내는 값으로, 여기서 H^+ 는 금속부식시 전자를 받는 주 성분이며, pH 4 이하에서는 피막이 용해되어 수소발생형 부식이 발생되며, 일반적으로 pH 4 ~ 10의 범위에서는 수중의 칼슘 및 마그네슘과 같은 2가의 양이온이 알칼리도와 반응하여 수산화물을 형성하고, 이것이 관 표면에 피막을 형성하여 관 부식속도를 지연시키는 역할을 하게 된다. 알칼리도는 주요 구성성분으로 HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^- 이며, pH가 9.5 이상이면 CO_3^{2-} 로, pH가 8.3 이하이면 HCO_3^- 로 존재하며, 수중에서 다른 양이온과 반응하여 보호피막을 생성한다. 수중에서 pH가 높으면 부식성을 감소시켜 시멘트몰타라이닝 닥타일관의 경우 시멘트몰타라이닝의 중성화가 완화되어 수명을 연장시킬 수 있으며, 금속관중의 경우 금속용출량이 감소되어 부식이 완화된다.[2, 5, 6, 7]

탄산칼슘에 의한 상수도관의 방식 피막 형성 조건은 수중에서 탄산칼슘이 4 ~ 10mg/L as $CaCO_3$ 로 어느 정도 과포화되어야 하며, Ca^{2+} 과 알칼리도의 값은 약 40mg/L as $CaCO_3$ 이상 존재하여야 하고, 여기서 알칼리도($Cl^- + SO_4^{2-}$)의 비는 5:1 정도가 되어야 한다. 또한 pH는 6.8 ~ 7.3의 범위가 적절하나, 낮은 알칼리도를 함유하는 수질은 pH가 8.0이상 유지되어야 부식에 대처할 수 있다.[2, 8, 9]

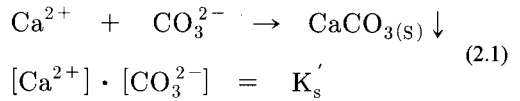
따라서 본 연구에서는 상수도관의 부식방지를 위해 탄산칼슘의 포화 상태를 판별할 수 있는 지표로서 CCPP를 산정하는 프로그램을 개발하고, 이 프로그램을 한강 수계 Y정수장의 상수원수 수질에 적용하여 개발된 CCPP 프로그램의 유용성을 평가하고자 하였다.

II. 연구내용 및 방법

2.1 탄산칼슘 평형이론

칼슘 이온은 약한 탄산염착물인 $CaCO_3^0$ 및 $CaHCO_3^+$ 등과 약한 수산화착물인 $CaOH^+$ 및 용해성이 극히 약한 $CaCO_{3(s)}$ 을 형성한다. 순수한 탄산칼슘은 두 가지 상이한 결정 형태인 방해석(Calcite)과 산석(Aragonite)으로 존재한다. 물 속에서 $CaCO_3$ 평형에 관여하는 기본 성분은 H_2O , CO_2 , H_2CO_3 , OH^- , H^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Ca^{2+} 등이며, 물의 안정도에 기여하는 성분은 알칼리도와 속도상수, 산도, 이온강도

등이다. $CaCO_3$ 의 침전 반응은 (2.1)식과 같다.



탄산칼슘($CaCO_3$)의 피막형성 조건은 Ca^{2+} 과 CO_3^{2-} 농도의 적이 용해도적을 초과해야 하며, 이 조건을 만족하는 물은 방식성의 $CaCO_3$ 가 침전할 수 있다. 반면에 Ca^{2+} 과 CO_3^{2-} 농도의 적이 용해도적 보다 작으면 $CaCO_3$ 가 불포화 상태가 되어 탄산칼슘 피막(scaled thin film)이 용해되어 부식이 진행된다. Ca^{2+} 과 CO_3^{2-} 농도의 적이 용해도적과 같으면 포화 상태가 되어 용해도 침전도 일어나지 않는다.[10]

상수도관의 부식방지를 위해서는 pH와 알칼리도의 조절에 의한 물의 안정화와 탄산칼슘의 침전이 되어야만 한다. 그림 1은 물의 안정화 및 탄산칼슘 침전조건을 나타낸 것으로 불포화의 경우 Lime($Ca(OH)_2$) 및 이산화탄소(CO_2)과 같은 알칼리제(부식억제제)를 첨가하여 Ca^{2+} 와 CO_3^{2-} 농도를 증가시키면 상태①(불포화)에서 상태②(포화)로 변화시킬 수 있다. 상태②에서는 과포화의 정도가 클수록 침전이 빨라지게 되어 보다 많은 탄산칼슘($CaCO_3$)침전이 이루어진다. 상수도관에서 탄산칼슘 피막 형성에 의한 부식 방지에 이용되는 범위는 상태 ②와 상태③ 사이의 탄산칼슘 농도이다.[10]

CCPP 지수는 이론상으로 과포화된 물로부터 침전하거나 불포화된 물로부터 용해될 수 있는 $CaCO_3$ 의 정량적인 값을 의미한다. 양(+)의 값은 과포화된 물로서 평형에 도달하여 침전되는 $CaCO_3$, 음(-)의 값은 물이 포화되는데 필요한 $CaCO_3$ 의 양을 나타낸다. CCPP 지수 조절에 의해 양(+)의 값을 유지하게 되면 상수도관 내벽에 $CaCO_3$ 피막을 형성하여 물과의 직접적인 접촉을 차단함으로써 부식을 방지하게 된다.[8]

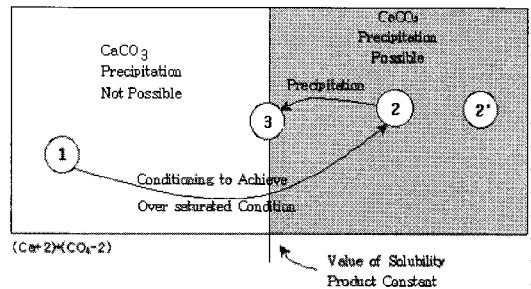


그림 1. 탄산칼슘 침전 이론에 관한 모식도[10]

2.2 탄산칼슘 침전능 계산

탄산칼슘침전능(CCPP, Calcium Carbonate Precipitation Potential)은 이론적으로 과포화된 물에서 침전될 수 있는지, 혹은 불포화된 물로부터 용해될 수 있는 탄산칼슘 (CaCO₃)의 정량적인 값을 나타내는 것이다. Merrill 등[9, 10]에 의해 계산방법이 논리적으로 설명되었으며, Rossum and Merrill[8]에 의하여 아래와 같은 9단계의 수치적인 계산방법이 제시되었다.

1 단계 : pH를 측정하여 물의 [H⁺]이온농도를 얻는다. 표 1의 식 B를 이용하여 pfm을 구한 후 (2.2)식과 같이 [H⁺]_i을 구한다.

$$[H^+]_i = 10^{(pfm - pH)} \quad (2.2)$$

2단계 : 평형상수 K₁' , K₂' , K_w' , K_s' 의 값을 (2.3)~(2.6)의 식과 같이 구한다. 해리상수의 대수치 pK₁, pK₂, pK_w, pK_s와 단원자가 활동도계수 pfm는 표 1의 식 E, F, G, H에 의해서 구한다.

$$K_1' = 10^{(2pfm - pK_1)} \quad (2.3)$$

$$K_2' = 10^{(4pfm - pK_2)} \quad (2.4)$$

$$K_w' = 10^{(2pfm - pK_w)} \quad (2.5)$$

$$K_s' = 10^{(8pfm - pK_s)} \quad (2.6)$$

3단계 : 매개변수 p, s, t를 구하기 위해 1, 2 단계에서 구한 값을 (2.7)~(2.9)식에 대입한다.

표 1. 평형상수 및 활동도계수 계산

Equation	Formula	Temperature Range(°K)
A1	$I^* = 1/2 \sum [X_i] Z_i^2$	
A2	$I = 1.6 \times 10^{-5} C$	
A3	$I = TDS/40,000$	
B	$pfm = (A \frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0.3I)$	
C	$A = 1.82 \times 10^6 (ET)^{-1.5}$	
D	$E = \frac{60,954}{T + 116} - 68.937$	
E	$pK_1 = 356.3094 + 0.06091964T - 21,834.37/T - 126.8339 \log_{10} T + 1,684,915/T^2$	273-373
F	$pK_2 = 107.8871 + 0.03252849T - 5,151.79/T - 38.92561 \log_{10} T + 563,713.9/T^2$	273-373
G	$pK_w = 4,471/T + 0.01706T - 6.0875$	273-333
H	$pK_{sc} = 171.9065 + 0.077993T - 2,839.319/T - 71.595 \log_{10} T$	273-363

여기서, I* = 이온강도,
 [X_i] = i 이온의 농도 gr-mol/L,
 Z_i = i의 이온수,
 C = 전기전도도 umho/cm,
 TDS = 총용존고형물 gr-mol/L,
 pY = 임의수 Y에 대한 -log₁₀,
 fm = 일가이온의 활동도계수,
 pfm = -logfm
 E = 유전상수,
 T = 절대온도(섭씨온도 + 273),
 K₁ = 탄산의 1차 해리 상수,
 K₂ = 탄산의 2차 해리상수,
 K_w = 물의 해리 상수,
 K_{sc} = Calcite의 용해도 상수

$$p = \frac{2[H^+]_i + K_1'}{K_1'} \quad (2.7)$$

$$s = [H^+]_i - \frac{K_w'}{[H^+]_i} \quad (2.8)$$

$$t = \frac{2K_2' + [H^+]_i}{[H^+]_i} \quad (2.9)$$

4단계 : 초기 알칼리도 Alk_i 와 p, s, t 를 다음 식에 대입하여 초기 산도 Acy_i 를 (2.10)식과 같이 구한다.

$$Acy_i = [(Alk_i + s)/t]p + s \quad (2.10)$$

1단계에서 4단계까지 구한 값을 가지고 평형상태의 pH값을 가정하여 왼쪽 항의 합인 LHS와 오른쪽 항의 합인 RHS이 같게 즉, LHS=RHS가 될 때까지 5단계부터 7단계 과정을 반복수행 한다.

5단계 : pH_{eq} 조건을 만족시키는 pH값을 구하기 위해 예측되는 pH값을 가정하여 (2.11)식에 대입하여 $[H^+]_{eq}$ 을 구한다.

$$[H^+]_{eq} = 10^{pH_{eq} - p} \quad (2.11)$$

6단계 : 평형상태에서의 매개변수 $p_{eq}, s_{eq}, r_{eq}, t_{eq}$ 을 (2.12)~(2.15)식과 같이 계산한다.

$$p_{eq} = (2[H^+]_{eq} + K_1')/K_1' \quad (2.12)$$

$$r_{eq} = ([H^+]_{eq} + 2K_2')/K_2' \quad (2.13)$$

$$s_{eq} = [H^+]_{eq} - K_w'/[H^+]_{eq} \quad (2.14)$$

$$t_{eq} = (2K_2' + [H^+]_{eq})/[H^+]_{eq} \quad (2.15)$$

7단계 : 위에서 구한 각 인자를 식의 왼쪽 항과 오른쪽 항에 대입하여 계산한 결과가 허용오차범위내로 될 때까지 pH_{eq} 값을 변화시키면서 5~7단계까지 (2.16), (2.17)식에 의해 시행오차법으로 반복 계산한다.

$$LHS = 2[Ca^{2+}]_i - Alk_i \quad (2.16)$$

$$RHS = 2K_s' r_{eq} p_{eq} / [t_{eq}(Acy_i - s_{eq})] - [t_{eq}(Acy_i - s_{eq})/p_{eq}] + s_{eq} \quad (2.17)$$

8단계 : 평형상태의 알칼리도 Alk_{eq} 을 (2.18)식과 같이 구한다.

$$Alk_{eq} = (t_{eq}/p_{eq}) \cdot (Acy_i - s_{eq}) - s_{eq} \quad (2.18)$$

9단계 : 8단계 식에서 구한 Alk_{eq} 와 Alk_i 값을 대입하여 CCPP값을 (2.19)식에 의해 구한다.

$$CCPP = 50,000(Alk_i - Alk_{eq}) \quad (2.19)$$

III. 결과 및 고찰

3.1 단계별 프로그램 적용 방법

산정 조건은 온도=섭씨2.5℃, pH=6.8, Ca^{2+} =18mg/L as $CaCO_3$, 알칼리도=24mg/L as $CaCO_3$, 전기전도도=174μmhos/cm을 프로그램에 입력하였다.

그림 2에서 보듯이 1단계에서 이온강도 I는 0.0028 gr·mol/L, 활동도계수 γ_{fm} 는 0.0242, 수소이온농도 $[H^+]_i$ 는 0.168E-6 mol/L을 산정하였고, 2단계에서 탄산에 대한 1차 및 2차 해리상수는 각각 0.425E-6, 0.464E-10, 물의 해리상수는 0.499E-14, 방해석의 용해도 상수는 0.517E-8을 구하였으며, 3단계에서 중간 매개변수 p, s, t 에 대해서는 각각 0.179E+1, 0.138E-06, 0.109E+1을 얻었으며, 4단계에서 초기 산도는 0.858E-3 eq/L를 구하였다.

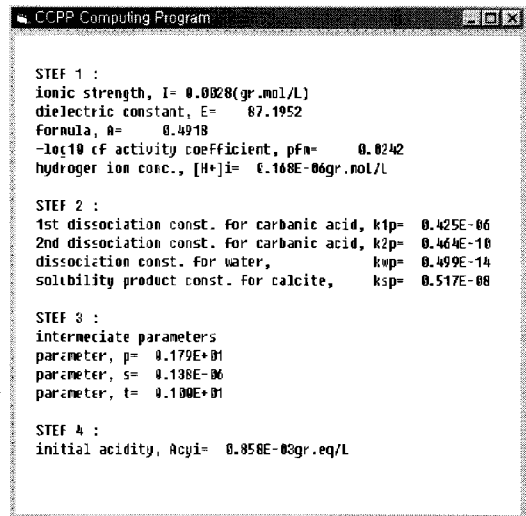


그림 2. CCPP 산정절차(1)

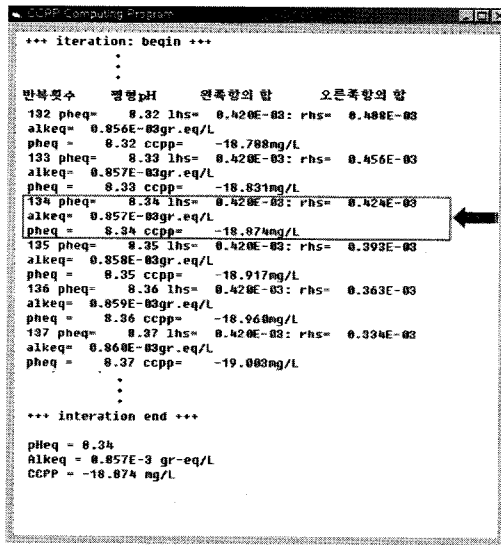


그림 3. CCPP 산정절차(2)

5단계에서 pH_{eq} 를 구하기 위해 pH를 7.01로 가정하고, 6단계에서 p_{eq} , r_{eq} , s_{eq} , t_{eq} 을 구하고 이 값을 대입하였고, 7단계에서 왼쪽 항의 합 LHS는 $0.420E-3$, 오른쪽 항의 합 RHS는 $0.381E-1$ 로 산정되어 오차범위에 들지 못하므로, pH를 0.01씩 증가시키면서 LHS, RHS 차이가 ($< 10^{-3}$)이 될 때까지 반복 계산을 수행한 결과, 그림 3에서와 같이 132번째부터 137번째가 조건을 모두 만족시키고 있으나, 그 중 오차가 가장 적은 (그림에서

화살표로 표시) 134번째를 채택하였다. 따라서, 평형상태에서 pH는 8.34, 알칼리도는 $0.857E-3$ eq/L, 탄산칼슘 포화지수 CCPP는 -18.874 mg/L로 상수 원수의 수질은 불포화 상태인 것으로 산정되었다.

3.2 프로그램을 이용한 CCPP 산정

본 개발 프로그램을 이용하여 CCPP 산정을 위해 한강 수계 Y정수장의 상수 원수의 수질자료[11] 중에서 필요한 자료를 표 2에 나타내었다. 온도, pH, 칼슘이온 농도, 알칼리도, 전기전도도 등을 입력하여 프로그램을 사용하여 겨울, 봄/가을, 여름의 최저 및 최고 조건에 대하여 CCPP 지수를 산정하여 표 3에 정리하였다. 표에서는 단계별 중간 산정 값을 나타내었으며, 산정 결과는 9단계에서 CCPP로 나타내었다. 최종적으로 산정된 한강 수계의 겨울, 봄/가을, 여름의 CCPP 값은 각각 $-18.87 \sim -3.68$, $-16.26 \sim -14.60$, $-13.25 \sim -12.98$ mg/L로 나타나 불포화 상태가 심한 수질로 판단되었다.

표 2. CCPP 입력자료

	온도		pH		Ca ²⁺		알칼리도		전기 전도도	
	최저	최고	최저	최고	최저	최고	최저	최고	최저	최고
겨울	1.2	4.4	6.8	7.7	18	23	24	37	174	198
봄/가을	18	18	6.9	7.1	19	21	26	39	168	177
여름	23	25.5	6.9	7.1	15	19	19	34	165	182

표 3. CCPP 산정결과

단계	항목	겨울		봄/가을		여름	
		최저	최고	최저	최고	최저	최고
1	p _f m	0.0242	0.0259	0.0243	0.0251	0.0244	0.0257
	[H ⁺] (mol/l)	0.168E-06	0.212E-07	0.133E-06	0.842E-07	0.133E-06	0.843E-07
2	K ₁	0.425E-06	0.428E-06	0.425E-06	0.427E-06	0.425E-06	0.428E-06
	K ₂	0.464E-10	0.471E-10	0.465E-10	0.468E-10	0.465E-10	0.471E-10
	K _w	0.499E-14	0.503E-14	0.500E-14	0.501E-14	0.500E-14	0.503E-14
	K _s	0.517E-08	0.533E-08	0.519E-08	0.526E-08	0.519E-08	0.532E-08
3	p	0.179E+01	0.110E+01	0.163E+01	0.139E+01	0.163E+01	0.139E+01
	s	0.138E-06	-0.216E-06	0.956E-07	0.246E-07	0.956E-07	0.246E-07
	t	0.1E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
4	Acy ₁ (eq/l)	0.858E-03	0.809E-03	0.845E-03	0.109E-02	0.634E-03	0.947E-03
5	pH _{eq}	8.34	8.40	8.35	8.22	8.57	8.33
6	P _{eq}	0.148E+01	0.147E+01	0.147E+01	0.147E+01	0.147E+01	0.147E+01
	r _{eq}	0.218E+04	0.215E+04	0.217E+04	0.216E+04	0.217E+04	0.215E+04
	s _{eq}	0.515E-07	0.517E-07	0.515E-07	0.516E-07	0.515E-07	0.517E-07
7	LHS	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
	RHS	0.420E-03	0.410E-03	0.430E-03	0.270E-03	0.370E-03	0.280E-03
8	Alk _{eq}	0.424E-03	0.389E-03	0.428E-03	0.286E-03	0.363E-03	0.265E-03
	Alk _{ca}	0.857E-03	0.814E-03	0.845E-03	0.107E-02	0.650E-03	0.945E-03
9	CCPP(mg/l)	-18.87	-3.68	-16.26	-14.60	-12.98	-13.25

4. 결론

본 연구에서는 상수도관의 부식방지를 위하여 수질의 탄산칼슘 포화 및 불포화 상태를 판단할 수 있는 CCPP를 산정할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 단계별 주요 절차를 정리하면 다음과 같다.

1. 산정방법은 수소이온농도, 평형상수, 매개변수, 일가 이온의 초기 활동도계수를 순차적으로 계산하고, 평형조건에 해당하는 pH를 가정하고, 이 조건에 맞는 수소이온농도를 계산하며, 가정된 평형상태에 대하여 매개변수를 구하고, 이 값들을 대입하여 왼쪽 항의 합과 오른쪽 항의 합을 구하여 그 차이가 오차 범위 내에 있으면 평형 알칼리도를 구한 뒤 CCPP를 구하게 된다.
2. 중간 과정에서 왼쪽 및 오른쪽 항의 값의 차이가 오차 범위 보다 크면 반복 시산을 하게 되는 데 오차 범위에 들 때까지 500회 이내에서 pH를 0.01씩 증가시키면서 구하며, 포트란과 비주얼베이직 언어를 사용하여 계산과정을 프로그래밍하였다.
3. 개발 프로그램을 적용하여 산정한 결과 한강 수계 Y정수사업소의 원수 수질은 전 계절에 걸쳐 불포화 상태이며, 포화 상태로 변화시키기 위해서는 상당한 양의 탄산칼슘을 첨가하여야 하는 것으로 나타났다.
4. CCPP는 LI 등 수질의 부식성을 판단하는 지수와 달리 포화 상태로 수질을 변화시키기 위해 필요한 탄산칼슘의 양을 정량적으로 계산할 수 있는 장점이 있어 산정절차가 다른 지수에 비하여 까다롭더라도 지수를 산정하는 것은 의미가 있는 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] 광필재, 김선일, 우달식, 남상호, “물의 침식성이 수도관 부식에 미치는 영향”, 대한상수도학회지, 13(10), pp.134-139, 1999.

[2] 광필재, “수질특성이 상수도관의 내부부식에 미치는 영향”, 건국대학교 박사학위논문, 2002.

[3] 박주혁, 이재식, 황병기, 우달식, 박영복, “RTW 모델과 LPLWIN 모델을 이용한 상수 원수 수질의 부식지수 평가”, 2005년도 공동 한국물환경학회, 대한상수도학회 추계 학술발표회, pp.115, 2005.

[4] 박주혁, 황병기, 우달식, 박영복, “상수도 관로 부식지수 평가 프로그램 개발”, 2006년도 공동 한국물환

경학회, 대한상수도학회 추계 학술발표회, pp.748-752, 2006.

[5] 이재인, 김도환, 이지형, 김동윤, 홍순현, 신판세, “수도관 내부부식방지를 위한 CCPP 조절시 정수공정내에서의 수질변화”, 대한환경공학회지, 27(4), pp.362-368, 2005.

[6] 임진경, “CCPP 조절에 의한 수도관의 부식제어”, 부산대학교 석사학위논문, 1999.

[7] 박종일, “모형관과 현장관에서 CCPP에 의한 부식경향에 관한 연구”, 부산대학교 석사학위논문, 1999.

[8] Rossum, J.R. and Merrill, D.T., “An evaluation of the calcium carbonate saturation indexes”, J. of AWWA, 75(1), pp.95-100, 1983.

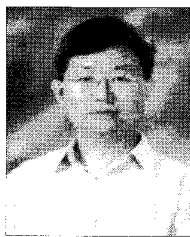
[9] Merrill, D.T. et. al., “Suggested methods for calculating and interpreting calcium carbonate saturation indexes”, J. of AWWA, 82(1), pp.71-77, 1990.

[10] Merrill, D.T. and Sanks, R.L., “Corrosion control by deposition of CaCO₃ film : Part 1, A practical approach for plant operators”, J. of AWWA, 69(11), pp.592-599, 1977.

[11] 환경부, “상수도관로의 부식 및 노후도 예측모델 개발”, 2002.

황 병 기(Byung-Gi Hwang)

[정회원]



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

<관심분야>

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