

혐기성 미생물부식에 의해 생성되는 철화합물 추정식 개발

The Development of Estimation Model for Iron Compound Originated from Anaerobic Microbial Corrosion

전석준

Seok-Jun Jeon

대한주택공사 토목설계처

Division of Civil Engineering, Korea National Housing Cooperation

Abstract

In this study, estimation model for iron compound originated from upflow anaerobic fixed bed reactor, which treats sewage domestic wastewater, was developed. The estimation model was formulated by a mathematical expression which was based on the mass balance. Below the HRT of 60 minute, sulfide concentration combining with iron FeS_2 is the highest because the maximum sulfate consumption rate V_{maxS} and half-saturation constant of sulfate K_{ms} exert an important effect on the estimation model as temperature was increased. But increment of FeS_2 concentration is weakened above the HRT of 60 minutes and represent the lowest value at the HRT of 108 minutes. It implies that liquid phase distribution ratio of sulfide α_r becomes lower as temperature was increased. While phosphorus concentration combining with iron $Fe_3(PO_4)_3$ is increased as HRT and temperature are increased, which is affected by phosphorus removal rate constant k_p . As the result of estimating the iron concentrations of corrosion by the model, the concentration of iron corrosion is higher than any other at the HRT of 108 minute and 20°C. The predicted values were compared with measured ones at different HRT(13.5, 27, 54, 108 min) and temperature(20, 25, 30°C). The experimental data could be fitted with the simulated curves. Therefore, the mathematical expression could be applicable to design full-scale wastewater treatment plants.

Keywords : Iron Corrosion, Sulfate Reducing Bacteria(SRB), Upflow Anaerobic Fixed Bed Reactors(UAFBR)

1. 서 론

황산염 환원세균(SRB)에 의해 발생하는 철 부식의 특징은 중성의 혐기성조건에서 발생한다는 것이다. Gaines는 최초로 점토성 토양과 오염수역과 같은 혐기성 환경에 설치된 강관의 광범위한

부식에 미생물이 관여함을 제시하였다.¹⁾ 그러나 현재의 전형적인 혐기성 부식기구에는 Kuhr와 Vlugt에 의하여 제시되었다.²⁾ 그들은 또한 SRB의 관련을 명확하게 밝혔으며, 음극분극이 SRB가 생산하는 수소의 신진대사에 의한 산화로 인하여 발생한다고 제안하였다. 이 이론을 뒷받침해주는 실

협자료를 Booth와 Tiller, Iversion이 제시하였으며, 이 실험은 일주일 동안 낮은 용존철 농도의 배지에서 회분식 배양을 통해 수행되었다.^{3,4)}

Ishveral은 SRB외에 황화철막도 공식(pitting)의 초기형성에 중요한 역할을 함을 증명하였다.⁵⁾ 최근 Hardy와 Bown은 해양종 *Desulfovibrio*에 의한 음극수소의 산화로 말미암아 연강실험시료의 연속적인 분극화가 발생됨을 밝혀냈다.⁶⁾ Lee와 Characklis는 실험용 철판이 충전된 폐쇄형 연속 유입 반응조를 이용한 제1철의 유무에 따른 부식을 실험 결과, 황화철막이 철판면에 피복된 뒤 SRB 미생물막이 형성될 경우 부식이 가능하며, 철이온이 존재하지 않을때 SRB만으로 부식이 촉진되지 않음을 실험결과로 제시하였다.⁷⁾ Costello는 회분반응조에서 *Desulfovibrio desulfurican*이 황화수소를 발생하여 황화수소가 직접적으로 양극을 분극화한다고 주장하였다.⁸⁾

철의 부식을 이용하여 폐수내 존재하는 인을 응집제거하려는 노력으로는 西口 猛등이 회전원판조(RBC)에 철접촉재를 사용하여 탈인처리를 행한 실험을 통해 부식을 이용한 인제거 가능성을 최초로 제시하였으며,⁹⁾ 접촉폭기공정의 폭기조에 철접촉재를 설치한 후 산소농담전지를 형성시켜 철을 용출시키기도 하였다.^{10,11,12)} 국내에서는 김이 연속회분식공법의 반응조에 철접촉재를 투입하여 질소와 인을 동시에 처리하였다.¹³⁾ 그러나 호기성 상태서는 산화철(Fe_2O_3)등 부식산물등이 철판면에 부착하여 철의 용출속도를 저하하기 때문에 지속적인 인의 제거를 위하여 정기적인 세척공정이 필요하다는 단점이 있다. 한편 정과 전은 혐기성 조건에서 미생물부식에 의하여 생성된 철염을 인제거에 이용하였고, 철접촉재를 충전한 혐기

조와 무산소/폭기조공정을 개발하여 80%이상의 지속적인 인제거 효과를 얻었다.^{14,15)} 또한 온도와 수리학적 체류시간이 혐기성부식에 미치는 영향과 함께 부식관련 미생물인 황산염환원박테리아의 계수 및 반응부산물의 정성적 분석이 수행되었다.¹⁶⁾

본 연구에서는 생물학적 고도처리공정에 도입할 경우 철염 공급장치기능을 발휘하는 혐기조에서 발생하는 철농도 예측이 가능한 추정식을 개발하여 실측치와 비교 평가하고 실제 고도처리시설의 설계시 반영코자 한다.

2. 실험재료 및 방법

본 연구에서 실험실 규모의 상향류식 혐기성 고정여상 반응조를 Fig. 1과 같이 구성하였으며, 특성은 Table 1과 같다. 반응조는 내경 4cm, 높이 30cm의 아크릴 재질의 실린더로서 내부에 철재 육각형 너트(M6)를 규칙적으로 쌓아서 충전시켰다.

Table 1. Characteristics of the UAFBR

Item	Size
Height	30cm
Inside Diameter	4cm
Media depth	22cm
Effective volume	0.34L
Void volume	0.19L
Packing volume	0.15L
Porosity	0.56
Surface area of the iron media	669cm ²

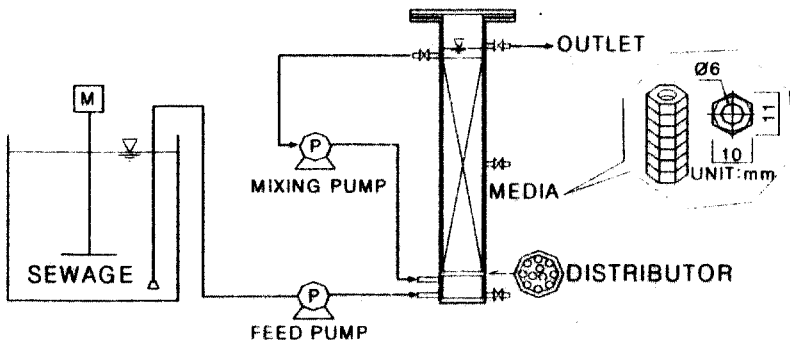


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

혐기조의 식종슬러지로는 서울 D단지 아파트 오수처리장의 슬러지저장조내의 슬러지를 사용하였으며, 사용폐수는 오수처리장의 유입오수로 침사조의 조목스크린을 거친 오수를 채취하여 2mm 스크린으로 걸러서 반응조 유입기질로 이용하였다. 원수는 농도변화폭을 최대한 줄이기 위하여 매주 월요일과 목요일 2회에 걸쳐 오전 8시에서 9시 사이에 채취하여 실험실로 운반하여 4℃에서 보관한 후 매일의 소모량을 상온으로 맞추어 공급하였다. 반응조운영에 사용한 오수의 특성은 Table 2와 같다.

Table 2. Characteristics of the sewage used in the study

Item	Concentration
COD	252 ~ 479mg/L
S S	42 ~ 103mg/L
TKN	52 ~ 65mg/L
T-P	8.8 ~ 17.2mg/L
Sulfate	23 ~ 36mg/L(as SO ₄ ²⁻)
pH	7.16 ~ 7.38
Alkalinity	140 ~ 156mg/L(as CaCO ₃)

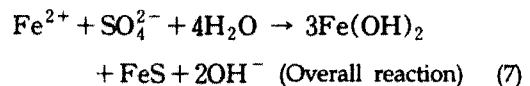
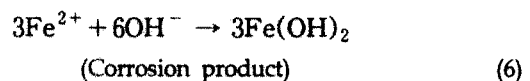
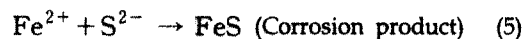
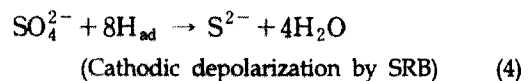
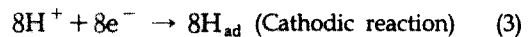
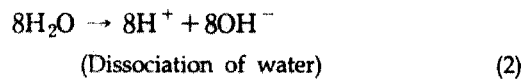
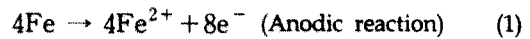
혐기조 유출수의 철농도가 정상상태에 도달한 후에 부착미생물에 의한 황산염의 최대황산염 소비속도 V_{max} , 황산염의 반포화상수 K_{ms} , 정인산염의 감소속도상수 k_p 등 철의 용출특성을 파악하기 위하여 여과원수를 이용하여 반응조 온도변화별로 20℃, 25℃, 30℃에 대하여 각각 회분식 실험을 실시하였다. 회분식 실험기간 동안 유입펌프는 멈추고 순환펌프만을 가동하여 시간 변화별로 수질을 분석하였다.

연속식 실험은 반응조의 HRT가 13.5, 27, 54, 108 분이 되도록 오수를 각각 20, 10, 5, 2.5 L/day씩 공급하였으며, 이 때의 HRT는 액상부피(유효부피-철접촉재가 차지하는 용적)를 토대로 계산하였다. 또한 철부식에 미치는 온도의 영향을 고찰하기 위하여 각 HRT마다 온도를 20℃, 25℃, 30℃로 변화시켜 운영하였다. 수질분석항목으로는 T-P, PO₄-P, Sulfate, Total-iron으로 Spectrophotometer(HACH사, R2010)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 분석방법

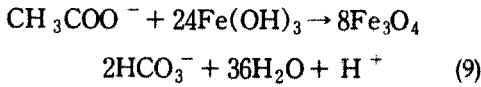
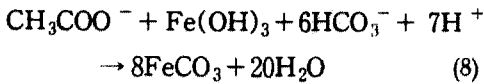
3.1 혐기성미생물부식에 의하여 생성되는 최종 철화합물

매설관과 해양구조물의 경우 일반적인 호기성 조건하에서 발생하는 부식보다 몇배 더 큰 부식이 발생된다고 보고되고 있다. 그 이유는 황화물을 발생할 수 있는 능력을 지닌 SRB때문이라고 인정되고 있다. SRB가 황산염의 이화적 환원(dissimilary reduction)을 위해 그들의 효소 hydrogenase를 경유하여 금속표면으로부터 수소를 제거하는 능력을 이용하여 지하설관에서 자주 관찰되는 공식(pitting corrosion)에 관여하며 그 반응식을 나타내면 식(1)에서부터 식(7)과 같다.¹⁾

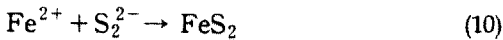


한편 호기성 영역에서의 철은 3가 이온으로 존재하여 FePO₄, Fe(OH)₃, Fe₂O₃가 주종을 이룬다. 이들 물질들은 무산소·혐기성 영역으로 이동되면서 전자수용체로 사용되어 유기탄소의 산화가 발생되고 이산화탄소와 철2가 이온으로 변환된다. 철2가 이온은 결국 FeCO₃, FeS₂, Fe₃(PO₄)₂, Fe₃O₄로 전환되어 침전된다.¹⁸⁾

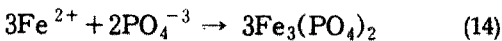
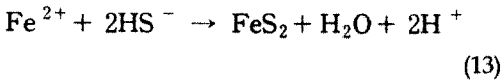
호기성 영역에서 생성된 Fe₂O₃와 Fe(OH)₃는 혐기성 영역에서 Fe³⁺를 전자공여체로 이용하는 *Desulfuromas Acetoxidants*에 의하여 8FeCO₃, 8Fe₃O₄으로 전환된다.¹⁹⁾



FeS₂ 와 FeCO₃의 평형은 아래의 반응에 지배를 받는다.



식 (10)과 식(11)의 평형상수 K₀는 각각 10⁻²⁶ 10⁴⁴로 FeS₂의 형성이 지배적이다. 또한 FeCO₃는 완충성이 큰 경우에만 존재하게 되며 Fe₃O₄는 pe가 낮고 pH가 높은 환경에서 생성되는 물질이다. 따라서 혐기조에 존재하는 철화합물로는 FeS₂ 및 Fe₂(PO₄)₃ 형태가 대부분이라 할 수 있고 그 반응식은 아래와 같다.¹⁷⁾



3.2 예측식개발을 위한 가정 및 기본식

혐기조로부터 발생하는 철화합물 농도를 추정하기 위하여 아래와 같은 가정을 제시하였다.

첫째 혐기조에서 발생하는 황화수소 가스 중 철2가이온과 반응 하지 않는 부분은 대기로 방출된다.

둘째 혐기성 환경에서 철화합물의 형태는 FeS₂와 Fe₃(PO₄)₂이다.

셋째 혐기조에서 발생하는 황화수소의 발생기원은 황산염의 환원으로부터 생성되는 황화물로 가정한다.

연속흐름반응조는 완전혼합 연속흐름반응조라고도 하며 전 시스템을 통한 특성치가 시간에 따라 변하지 않는 정상상태의 조건아래에서 운영된다. 즉 조내에서 농도경사가 0이며 유입물질은 반응조 전체에 즉시 균일하게 퍼진다. 결과적으로 반응조 밖으로 유출되는 물질의 농도는 반응조내

의 모든 지점에서의 농도와 같다. 그러므로 반응기내에서의 반응물 A에 대한 질량 변화율의 물질수지식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.¹⁸⁾

$$\frac{dC_A}{dt} V = Q C_{A1} - Q C_A + r_A V \quad (15)$$

여기서, C_A : 반응조내 물질 A의 농도 (mg/L)
V : 반응조 용량 (L)
Q : 유량 (L/day)
C_{A1} : 물질의 유입농도 (mg/L)
r_A : 물질A의 반응속도 (mg/L)

3.3 FeS₂ 농도 추정

내생 성장으로 생산하는 기질이 없는 비성장 박테리아(nongrowing bacterial suspension)의 경우 기질소비속도는 다음과 같다.¹⁹⁾

$$\frac{dS}{dt} = \frac{-V_{max} S}{K_m + S} \quad (16)$$

여기서, dS/dt : 기질소비속도 (mg/L · min)
V_{max} : 최대기질소비속도 (mg/L · min)
K_m : 기질의 반포화상수 (mg/L)
S : 기질농도 (mg/L)
t : 시간 (min)

본 연구에서는 SRB의 전자수용체인 황산염의 소비속도 r_s를 구하기 위하여 식 (16)을 변형하면 식 (17)과 같다.

$$r_s = \frac{dS_s}{dt} = -\frac{V_{max} S_s}{K_{ms} + S_s} \quad (17)$$

여기서, dS_s/dt : 황산염 소비속도 (mg/L · min)
S_s : 황산염농도 (mg/L)
V_{max} : 최대황산염 소비 속도 (mg/L · min)
K_{ms} : 황산염의 반포화상수 (mg/L)

식 (15) 질량수지식에서 C_{A1}, C_A 대신 유입수의 황산염 농도 S_i, 유출수의 황산염 농도 S_A를 대입하여 정리하면 식 (18)과 같다.

$$\frac{dS_A}{dt} V = Q S_1 - Q S_A + V \frac{-V_{max} S_A}{K_{ms} + S_A} \quad (18)$$

양변을 V로 나누어 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dS_A}{dt} = \frac{S_1}{\theta} - \frac{S_A}{\theta} - \frac{V_{max} S_A}{K_{ms} + S_A} \quad (19)$$

여기서, θ : 수리학적 체류시간 (hr^{-1})

정상상태로 가정하면 $\frac{dS_A}{dt} = 0$ 이므로 S_A 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$S_A = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4 K_{ms} S_1}}{2} \quad (20)$$

여기서, $B : K_{ms} + \theta V_{max} - S_1$
 V_{max} 와 K_{ms} 는 식 (21)을 도식화하여 y절편과 직선의 기울기로부터 구할 수 있다.²²⁾

$$\frac{t}{S_0 - S} = \frac{K_m}{V_{max}} \ln \frac{S_0/S}{S_0 - S} + \frac{1}{V_{max}} \quad (21)$$

Fig. 2에는 식(21)을 이용하여 25℃에서 실시한 회분식 실험결과를 토대로 V_{max} 와 K_{ms} 를 구하기 위하여 X축에 $\ln(S_0/S)/(S_0-S)$ 그리고 Y축에 $t/(S_0-S)$ 가 도시되었다. 이 그림으로부터 $1/V_{max}$

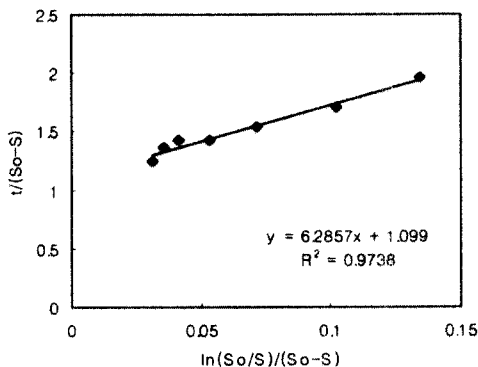


Fig. 2. The relationship between V_{max} and K_{ms}

는 y축의 절편이 1.099이므로 V_{max} 는 $0.91mg/L \cdot min$ 이고 직선의 기울기 K_{ms}/V_{max} 가 6.28이므로 K_{ms} 는 $5.72mg/L$ 로 산정되었다.

마찬가지 방법으로 20, 30℃의 운영조건에서 V_{max} 는 2.08, $10.6mg/L \cdot min$, K_{ms} 는 0.5, $1.88mg/L$ 로 각각 산정되었다.¹⁶⁾

식 (20)으로부터 HRT변화에 따른 혐기조의 황산염 환원량과 황화물의 발생량의 추정이 가능하다. 즉 황산염의 환원으로 부터 발생하는 황화물 중 일부는 황화수소로 대기중에 방출되고 나머지는 용존황화물로 반응조내에 잔존하여 제1철과 반응하게 된다. 따라서 2가 철은 반응조 내 수중에 존재하는 황이온과 결합하며 이 때 2가 철이온과 황이온은 물비에 의하여 반응하므로 이를 고려하면 황화철농도는 식 (22)와 같이 추정가능하다.

$$HI = 0.27(1 - \alpha_T) \left(S_1 - \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4 K_{ms} S_1}}{2} \right) \quad (22)$$

여기서, HI : 유출수의 황화철 농도 (mg/L)

α_T : 온도별 황화수소의 대기분포율

0.27: 2가 철이온과 황이온의 물결합비

대기와 액상중의 황화물 분율을 고려하여 황화물 농도의 온도별 α_T 는 30, 25, 20℃에서 각각 0.368, 0.412, 0.459로서 수중에 잔존하여 제1철이온과 결합반응에 관여하는 황화물의 농도는 Fig. 3과 같다. 그림에서 HRT가 60분이하에서는 온도가 증가할수록 K_{ms} 와 V_{max} 의 영향이 크게 작용하여 30℃로 운영한 조건에서 철과 반응하는 황화물의 농도가 가장 크게 나타났으나, HRT가 60분이후에는 그 농도가 크게 둔화되어 HRT 120분에서는 가장 작은 값을 나타낸다. 이는 온도가 증가할수록 α_T 가 작아지기 때문이라 할 수 있다.

3.4 $Fe_3(PO_4)_2$ 농도 추정

오수 중 용존성의 정인산염은 혐기조를 통과하면서 용출된 2가 철과 반응하여 감소하는 경향을 나타내며 혐기성 조건하에서는 $Fe_3(PO_4)_2$ 형태로만 변화가 가능하다. 식 (15) 질량수지식에서 C_{Al} , C_A 대신 유입수의 정인산염 농도 P_{Al} , 유출수의 정인산염 농도 P_A 를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

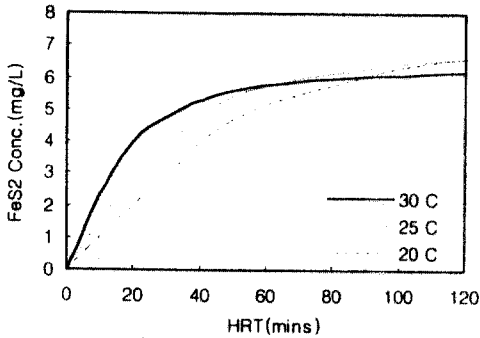


Fig. 3. Simulated value of produced FeS₂

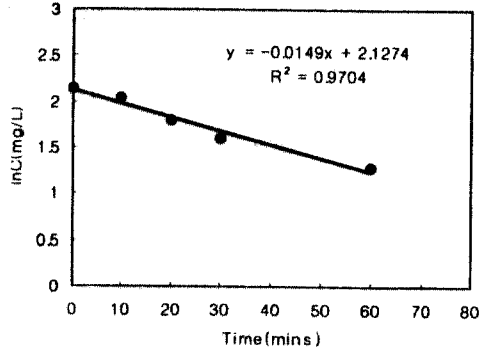


Fig. 4. The relationship between lnC and time

$$\frac{dP_A}{dt} V = Q P_{A1} - Q P_A + r_A V \quad (23)$$

여기서, 정인산염의 소모반응을 1차반응이라 가정하고($r_A = -kP_A$), 양변을 V로 나누어 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dP_A}{dt} = \frac{P_{A1}}{\theta} - \frac{P_A}{\theta} - k P_A \quad (24)$$

정상상태에서 $\frac{dP_A}{dt} = 0$ 이므로 식 (24)로부터 유출수의 정인산염 농도 P_A 는 식 (25)와 같다.

$$P_A = \frac{P_{A1}}{1 + k\theta} \quad (25)$$

여기서, P_{A1} : 유출수중 정인산염 농도(mg/L)
 P_A : 유입수중 정인산염 농도(mg/L)
 k : 반응속도상수 (hr^{-1})

Fig. 4는 식(25)를 이용하여 25℃에서 실시한 회분식 실험결과를 토대로 정인산염의 제거속도상수 k_p 를 구하기 위하여 그려졌으며, k_p 는 직선의 기울기로부터 구할 수 있다. 따라서 k_p 는 $0.0149min^{-1}$ 이다.

마찬가지방법으로 20, 30℃의 운영조건에서 k_p 는 0.0126, 0.0162mg/L로 각각 산정되었다.¹⁶⁾ 소모된 정인산염과 제1철의 결합으로 발생하는 $Fe_3(PO_4)_2$ 의 생성농도는 정인산염과 제1철염의 몰결합비를 고려하면 식 (26)과 같다.

$$PI = 0.83 P_{A1} \left(\frac{k\theta}{1 + k\theta} \right) \quad (26)$$

여기서, PI : 유출수의 $Fe_3(PO_4)_2$ 생성농도 (mg/L)

유입수의 정인산염 농도에서 식(25)의 P_A 를 뺀 값으로부터 $Fe_3(PO_4)_2$ 의 생성량을 추정가능하며, Fig. 5와 같다. k_p 값이 온도증가에 따라 증가하기 때문에 철과 결합하는 인의 농도가 증가함을 알 수 있다.

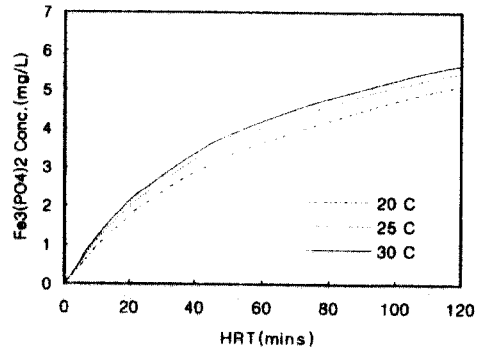


Fig. 5. Simulated concentration of produced $Fe_3(PO_4)_2$

3.4 예측식 평가

식 (22)와 식 (26)을 조합하여 혐기조에서 생성되는 총 철부식농도는 식 (27)과 같다.

$$TI = 0.27(1 - \alpha_T) \left(S_1 - \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4 K_m S_1}}{2} \right) + 0.83 P_{A1} \left(\frac{k\theta}{1 + k\theta} \right) \quad (27)$$

여기서, TI : 철부식농도(mg/L)

온도와 HRT별 혐기조 유출수의 실측 총 철농도와 식 (2-35)로부터 구한 예측 철농도를 Fig. 4에 나타냈다. 실측값은 모든 운영조건에서 1.8~9.8 mg/L로 예측값 2.25~10.27 mg/L 값과 잘 일치한다. 철의 부식농도는 온도와 관계없이 HRT가 증가함에 따라 증가하는 추세로 나타났다.

HRT가 70분 이하에서는 30°C 조건에서 철부식농도가 가장 크게 나타났으며, 그 원인으로는 온도가 높을수록 SRB의 활성이 증가하여 황산염 환원량이 늘어나게 되어 부식에 영향을 크게 미친 것으로 보여진다. 그러나 HRT가 증가함에 따라 SRB가 소모하는 황산염의 농도차이가 발생하지 않고, 황산염 환원에 의하여 발생하는 황화물의 액상분포율이 온도감소에 따라 높아짐에 따라 HRT 108분, 온도 20°C로 운영한 조건에서 철의 부식농도가 가장 높게 나타났다.

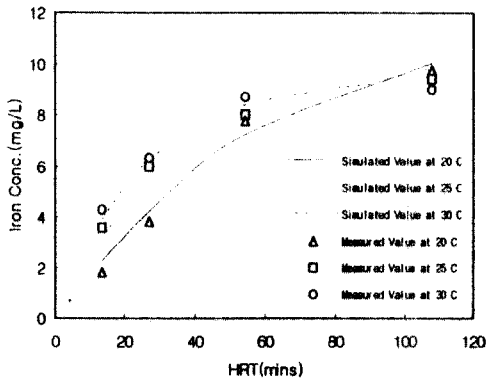


Fig. 6. Comparison of simulated values with measured values

4. 결론

본 연구에서는 철접촉재를 증진한 상향류식 혐기성여상 반응조에서 오수를 통과시켰을 때 발생하는 철부식량 예측 및 실험을 통한 검증이 수행되었으며, 이를 통해서 다음과 결론을 내릴 수 있다.

개발된 예측식에서는 철의 최종화합물로 $Fe_3(PO_4)_2$ 와 FeS_2 로 가정하여 각각의 물질에 대한 식을 유도하여 합산함으로써 HRT와 온도변화에 따른 최종부식량을 추정할 수 있었다.

HRT가 60분이하에서는 온도가 증가할수록 SRB의 최대황산염 소비속도 V_{max} 와 반포화상수 K_{ms}

의 영향이 크게 작용하여 온도가 증가할수록 철과 반응하는 황화물의 농도 즉 FeS_2 의 농도가 가장 크게 나타났으나, HRT가 60분이후에는 그 농도가 크게 둔화되어 HRT 120분에서는 가장 작은 값을 나타낸다. 이는 온도가 증가할수록 황화물 대기분포율 α_1 가 작아지기 때문이라 할 수 있다. 반면, $Fe_3(PO_4)_3$ 의 생성 인자인 k_p 값은 온도증가에 따라 증가하기 때문에 철과 결합하는 인의 농도는 온도와 HRT가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 예측식을 이용하여 HRT와 온도별 철부식농도를 추정된 결과 20°C, HRT 108분의 조건에서 최대의 철부식농도를 추정할 수 있었다. 또한 철부식 농도 추정식과 실측자료를 비교한 결과, 유사한 경향을 보임에 따라 실제 오수처리장 설치시 설계자료로 이용가능하리라 기대된다.

참고 문헌

- Hamilton, W.A. Sulfate Reducing Bacteria and Anaerobic Corrosion, *Ann. Rev. Microbiol.*, Vol. 39, No. 2, 195-217 (1985).
- Scott, J. F. D., What Progress in the Understanding of Microbially Induced Corrosion Has Been Made in the Last 25 Years?, A Personal Viewpoint, *Corrosion Science*, Vol. 35, 667-673 (1993).
- Booth, G.H. and Tiller, A. K., Corrosion of Mild Steel by Sulfate Reducing Bacteria - An Alternative Mechanism, *Corrosion Science*, Vol. 8, 583-600 (1968).
- Iverson, W.P., Direct Evidence for the Cathodic Depolarization Theory of Bacterial Corrosion, *Science*, Vol. 151, 986-988 (1966).
- Ishveral, P., Hydrogen Metabolism in Sulfate Reducing Bacteria and its Role in Anaerobic Corrosion, *Biofouling*, Vol. 1, 27-47 (1988).
- Hardy, J. A. and Bown, J.L., The Corrosion of Mild Steel by Biogenic Sulfide Films Exposed to Air, *Corrosion*, Vol. 40, 650-654 (1984).
- Lee, W. and Characklis, W.G., Corrosion of Mild Steel under Anaerobic Biofilm, *Corrosion*, Vol. 49, No. 3, 186-199 (1993).
- Costello, J.A., Cathodic Depolarization by Sulfate-Reducing Bacteria, *Appl. Environ.*

- Microbiol., Vol. 33, 1162-1169 (1977).
9. 西口 猛, 高橋 強, 治田 伸介, 鐵接觸材を用いたリン除去技術[I] - 回轉圓板方式, *用水と廢水*, Vol. 31, No. 11, 3-10 (1989).
 10. 西口 猛, 高橋 強, 治田 伸介, 鐵接觸材を用いたリン除去技術[II] - 接觸曝氣方式, *用水と廢水*, Vol. 31, No. 11, 11-18 (1989).
 11. 西口 猛, 高橋 強, 治田 伸介, 鐵接觸材を用いたリン除去技術[III] - 回分式間歇曝氣方式による窒素・リン同時除去法, *用水と廢水*, Vol. 31, No. 12, 25-33 (1989).
 12. Haruta, S., Takakasi, T., and Nishiguchi, T., Basic Studies on Phosphorus Removal by the Contact Aeration Process Using Iron Contactors, *Water Sci. Technol.*, Vol.23, 641-650 (1991).
 13. 김한수, 철접촉재를 이용한 영양염류제거에 관한 실험적연구, *연세대 석사학위논문* (1995).
 14. Y.K. Choung and S.J. Jeon, Phosphorus removal in domestic wastewater using Upflow Anaerobic Fixed Beds Packed with Iron Contactors", *Water Sci. Technol.*, Vol. 41, No. 1, 641-650 (2000).
 15. 정연규, 전석준, 혐기성 미생물 부식을 이용한 가정오수내의 인제거, *대한토목학회 논문집*, Vol. 19, No. 2-4, 515-521 (1999).
 16. 정연규, 전석준, 혐기성 미생물 부식에 미치는 HRT와 온도의 영향, *대한환경공학회지*, Vol. 23, No. 12, 2087-2095 (2001).
 17. Nealson, K. H. and Saffarini, D. A., Iron and Manganese in anaerobic Respiration, *Annu. Rev. Microbiol.*, Vol. 48, 311-331 (1994).
 18. Roden, E.E. and Lovely, D.R., Dissimilatory Fe(III) Reduction by the Marine Microorganism, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol. 59, 734-742 (1993).
 19. Marcus, P. and Oudar, J. *Corrosion Mechanisms in Theory and Practice*, Marcel Dekker, Inc., New York (1995).
 20. George, T. and Edward, D.S., *Water Quality*, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts (1985).
 21. Joseph A. and William G. Simultaneous Estimation of V_{max} , K_{max} , and the Endogenous Substrate Production from Substrate Depletion Data, *Microb. Ecol.*, Vol. 10, 165-178 (1984).
 22. Cypionka, H., Widdel, F., and Pfennig, N., Survival of Sulfate-Reducing Bacteria after Oxygen Stress, and Growth in Sulfate Free Oxygen-Sulfide Gradients, *FEM Microbial Ecol.*, Vol. 31, 39-45 (1985).