

국내 하수에 적합한 BNR 공정 시뮬레이션을 위한 최적 동력학적 계수 산출

The Analysis of Kinetic Parameters for BNR Process Simulation in Domestic Wastewater

김대성*, 박명균**, 안호철***, 안원식****, 이의신*****

Dae Sung Kim, Myung Gyun, Park, Hee Chan Yoo, Ho Chul Ahn, Won Sik Ahn, Eui Sin Lee

요 지

외국에서 ASM 모델의 BNR 적용 연구결과를 국내 하수에 적용하기에는 하수농도, 온도, 슬러지농도 등이 국내와는 달라 적용상 무리가 있다. 본 연구에서 BNR 시뮬레이션을 위한 입력 자료로 활용되는 인자들은 IAWPRC task group에서 제안하는 값들을 사용하되 국내 하수성상에서 필요로 하는 인자들은 직접 실험을 통하여 부분적으로 구해냄으로써 모델 시뮬레이션의 신뢰도를 높이고자 하였다. F/M비의 변화량과 1/SRT과의 관계로부터, 종속영양미생물 생산계수 Y_H 값을 구한 결과, 0.40mg VSS/mg COD였다. 이것을 ASM No.2d에 적용하기 위하여 mg cell COD formed/mg COD oxidized 단위로 환산한 결과 0.58을 나타냈다. H 하수처리장의 1차 침전지 하수를 이용하여 호기성상태에서 OUR Test를 통한 미생물에 의한 유기물 섭취시 산소섭취율 변화를 측정하였다. 호기성상태와 무산소상태에서 구한 쉽게 분해되는 용존성유기물(Ss)값을 비교해보면 각각 35.5mg/L와 39.9mg/L로 약간의 차이는 있으나 유사한 값을 보여주고 있다. 시뮬레이션을 위한 동력학적 계수 중 무산소 상태에서 종속영양미생물의 $\mu_{max,H}$ 는 $3.56d^{-1}$ 로 나타났고, 호기성상태에서는 구하면 $\mu_{max,H}$ 는 $4.2d^{-1}$ 로 산출되었다. 종속영양미생물의 사멸계수 b_H 를 구하기 위한 실험에서 초기 OUR의 10%이내가 될 때까지 걸린 시간은 7일정도가 걸렸으며, 사멸률 b_H 는 $0.043hr^{-1}$ 로 나타났다. 독립영양미생물의 최대비성장률 $\mu_{max,A}$ 는 최대암모니아 섭취율을 이용하여 구한 결과 $0.65d^{-1}$ 로 나타났다.

핵심용어 : 국내하수, BNR(Biological Nutrient Removal), 시뮬레이션, 동력학적계수

1. 서 론

국내 하, 폐수 처리장에서 질소, 인에 대한 수질규제가 강화되면서 기존 및 증설 처리장에 질소, 인 고도처리기술들이 활발히 적용되고 있다. 국내에 적용되는 많은 공법은 A2/O 공법을 이용한 여러 방법들이 국내 하수성상과 실정에 적합하게 개발되어 변형 적용되고 있다. 그러나 이들 공법들을 처리장 설계나 운전에 사용하기 위해서는 유입수의 하수성상, 설계 인자나 운전인자들에 따른 효과를 사전에 정립해 놓아야 한다.

ASM No.2 모델을 BNR 운전에 적용하여 질소, 인 제거 특성과 유출수를 예측한 사례가 있다.³⁾ 그러나 외국에서 ASM 모델의 BNR 적용 연구 결과를 국내 하수에 적용하기에는 여러 가지로 무리가 있다. 이는 하수농도, 온도, 슬러지 농도 등이 국내와는 다르기 때문이다. 그리고 국내에서 지금까지 연구결과를 보면 BNR공정의 설계 및 운전시 활성슬러지 모델에 대한 국부적인 공정비교에 그쳐 모델 적용결과를 신설되거나 증설되는 하수 처리장의 BNR공정 선택과 설계 및 운전시에 활용하

* 수원대학교 토목공학과 박사과정 : kdkd0711@paran.com

** ETS(이티에스) 부사장 : mgpark08@empal.com

*** 수원대학교 토목공학과 석사과정 : beatrandom@hotmail.com

**** 수원대학교 토목공학과 교수 : wsan@suwon.ac.kr

***** 대우건설기술연구원 환경연구팀장 : euisin@dwconst.co.kr

기에는 어려움이 많이 있다. 따라서 본연구에서는 설계 및 운전에 필요한 동력학적 계수와 생물반응 계수들을 IAWQ Task Group이 제안한 값들을 사용하되 국내하수성상에서 변화와 확인이 필요로 하는 인자들을 직접 실험을 통하여 부분적으로 구해내어 BNR공정 선정과 운전에 활용하도록 하였다.

2. 실험 방법

2.1 IAWQ의 Activated Sludge Model NO.2d

ASM No.2는 생물학적인 인제거를 추가시켜 ASM No.1을 확장시킨 모델로 가수분해, 종속영양 미생물, 독립영양미생물, 인축적 미생물과 관련이 있고 ASM No.2d는 탈질가능한 인미생물(Phosphorus Accumulating Organisms: 이하 PAOs)을 추가한 것으로 ASM No.2는 호기성상태에서 PAOs가 성장하는 반면에 ASM No.2D는 탈질반응시 PAOs를 취급한다.

2.2 유입수의 성상 및 동력학적 계수

2.2.1 유입수의 성상

본 연구에서 대상으로 하는 하수는 경기도 H하수처리장의 1차 침전지 유출수를 직접 채수하여 변질을 막기 위하여 4℃ 이하의 냉장상태를 유지하면서 하수분석을 실시하였다. Soluble COD와 NH₄-N은 GF/C filter로 여과 후 측정하였고, 기타 모든 분석방법은 Standard method(1992)에 의거하였다. 시플레이션을 위한 유입하수성상중 COD는 respirometer를 이용한 OUR test 및 batch실험을 통하여 구하였다. 호기조 회분식 반응조는 무산소조와 온도는 동일하나 ORP는 1mg/L이상, DO는 2mg/L이상을 유지하였으며 활성슬러지는 실제 BNR 플랜트의 호기조에서 활성슬러지를 1L 채취하여 4L 반응조에 주입하여 초기 슬러지 농도를 측정된 2,230mgMLSS/L, 1,750mgVSS/L였다. 온도는 용기안에 반응조를 넣고 온도조절기를 이용하여 18°C± 2.0에 맞추어 실험하였다.

무산소조는 용량 4L로 슬러지는 1L정도를 채우고 실제 BNR로 운전중인 플랜트내의 무산소조에서 활성슬러지를 1L 채취하여 무산소 회분식조에 충전하였으며, DO는 “0”에 가까운 수치를 유지하였다. 또한 슬러지와 하수와의 원활한 혼합을 위하여 Agitator를 이용하여 30rpm을 유지하였다. 이 때 이용한 슬러지는 ORP는 0.5ppm 이하로 하고 이때 초기 슬러지 농도는 2,370mgMLSS/L, 1,820mgVSS/L였다. 무산소조건에서는 KNO₃를 이용하여 NO₃-N농도가 탈질반응으로 90~140분동안 섭취된 용해성 유기물을 측정하였다. 이때 초기 유기물/ 미생물농도비 즉 SCOD/VSS는 1.15~1.89SCOD/mgVSS/L. 단, 계수 추정에 필요한 하수는 실제 하수처리장의 1차 침전지 유출수를 이용하였고 F/M비 증가를 종속영양미생물의 성장계수(Y_H)등을 측정하기 위한 유기물 농도 변화가 요구되는 경우 처리장 액상 분뇨를 이용, 혼합하여 사용하였다.

2.2.2 동력학적 계수

ASM No.2d의 입력자료 중 하수의 특성이 적용되어 성장하는 미생물의 동력학적 계수인 Y_H, Y_A, μ_{max,H}, μ_{max,A} 등을 실험과 기존 문헌을 이용하여 구하였다. 우선 종속영양미생물의 Y_H를 구하기 위하여 활성슬러지 시스템의 슬러지 체류시간(SRT(θ_c), Solid Retention Time)과 미생물에 따른 기질이이용률(q)와의 관계로부터 구한다.⁴⁾

$$\frac{1}{\theta_c} = Y_H q - k_d \dots\dots\dots (1)$$

여기서 θ_c는 SRT, q는 기질/미생물비(F/M비, kgCOD/MLVSS.day), k_d는 사멸계수(decay rate, day⁻¹)이다. 한편 종속영양미생물의 최대비성장률인 μ_{max,H}는 Ekama등(13)이 제시한 다음 식 (2)에 의하여 구할 수 있다.

$$\mu_{\max,H} = K_{ms} \times Y_H \dots\dots\dots (2)$$

여기서 $\mu_{\max,H}$ 는 종속영양미생물의 최대비성장률(mg activeVSS/mg activeVSS/d), K_{ms} 는 최대기질 이용율(mgCODutilized/mg, activeVSS/d)이다.⁵⁾ 한편, K_{ms} 는 무산소상태에서 최대비성장상태하에서 생분해성 유기물 이용률을 나타내며 최대비성장률 $\mu_{\max,H}$ 는

$$\mu_{\max,H} = \left(\frac{Y_H}{(1-f_{cv} \cdot Y_H)} \right) \cdot OUR_{\max} \cdot 24 \cdot \frac{V_{ww} + V_{ml}}{f_{av} \cdot X_v \cdot V_{ml}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{dO}{dt} = 1.42 \times b_H \times X_t \dots\dots\dots (4)$$

여기서 f_{cv} 는 슬러지의 COD/VSS 비(=1.48mgCOD/mgVSS), V_{ww} 는 하수의 부피, V_{ml} 는 혼합액의 부피, f_{av} 는 MLVSS중 활성부분(the active fraction)를 가르킨다. X_v 는 회분식실험에 사용된 미생물의 MLVSS농도(mgVSS/L)이다. dO/dt 는 산소이용율(mgO₂/L)이고 1.42는 oxygen equivalent(mgO₂/mgVSS)⁵⁾ b_H 는 자산화율(decay rate, hr⁻¹).

독립영양미생물의 최대 비성장률($\mu_{\max,A}$)은 질산성 질소 농도의 증가하는 양상을 추적한 후 최대 암모니아성 섭취율(maximum ammonia uptake, AUR_{\max})로서 추정이 가능하다. 따라서 암모니아성 질소의 산소섭취속도인 $OUR_{\max,A}$ 는 암모니아 섭취율, AUR_{\max} 에 4.57배의 당량으로 계산되므로 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$OUR_{\max,A} = 4.57 \times AUR_{\max} \dots\dots\dots (5)$$

4.57은 consumption of oxygen per gram of NH₄-N oxidation(g O₂/g NH₄-H) 즉 암모니아성 질소 1g 산화에 필요한 산소요구량이 4.57g을 의미하는 것으로 이를 식에 적용한 것이다. 한편, $OUR_{\max,A}$ 와 $\mu_{\max,A}$ 와의 관계는 다음 식 (6)에 의하여 구할 수 있다.

$$\mu_{\max,A} = \frac{OUR_{\max,A}}{f_{xba}X} \cdot \frac{Y_A}{4.57 - Y_A} \dots\dots\dots (6)$$

식 (6)에서 f_{xba} 는 독립영양 미생물의 active fraction(=0.054)⁴⁾이고 Y_A 는 독립영양미생물의 생산계수(=0.24)⁴⁾이고 X 는 미생물농도(mgVSS/L)를 가르킨다.

2.3 하수의 동력학적 계수 측정용 Respirator

프로그램에 동력학적 계수나 양론 계수에 대한 입력 자료를 구하기 위하여 산소 섭취를 측정용 반응기(OUR reactor)를 이용한 실험을 수행하였다. 계수 추정에 필요한 하수는 실제 하수처리장의 1차 침전지하수를 이용하였고 유기물 농도 변화가 요구되는 실험에서는 처리장 액상 분뇨를 이용하여 혼합하여 사용하였다. 반응조 용량은 5L로 하였고 반응조 온도는 20℃±1로 유지하였고 초기 주입한 슬러지는 BNR 공정으로 운전한지 1년 정도 된 실플랜트의 호기조에서 SRT 10~12day의 슬러지를 채취하여 침전슬러지 1L를 반응조에 접종하였다. 주입한 후 하수를 주입하면서 정상상태의 유기물 섭취가 이루어지는 상태까지 기다렸다. 종속영양미생물의 동력학적 계수 측정시에 독립영양 미생물의 활성을 억제하기 위해 50ppm의 thiourea를 주입하였다. 슬러지와 하수의 반응을 촉진시키기 위하여 DO 공급과 함께 교반을 실시하였고 DO가 더 이상 올라가지 않을 때를 기준으로 dO/dt 를 감소율을 10분간격으로 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1. 동력학적계수 도출

ASM No.2d에 시뮬레이션을 위한 하수성상을 위하여 우선적으로 동력학적계수인 Y_H , Y_A , $\mu_{max,H}$, $\mu_{max,A}$ 등을 구하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 F/M비를 0.44, 0.58, 0.71, 0.85kg COD/kgVSS.d로 변화시키면서 이에 따라 SRT를 2,4,6,8,10d와의 관계로부터 구한 결과, 종속영양 미생물 생산계수 Y_H 값이 0.40mg VSS/mg COD였다. 이것을 ASM No.2d에 적용하기 위하여 mg cell COD formed/mg COD oxidized 단위로 환산하기 위하여 활성슬러지로부터 COD/VSS인 f_{cv} 를 측정된 결과, 1.45를 나타내었다. 이 수치는 기존실험값⁵⁾과 비교하여 볼 때 유사한 값을 나타내었다. 따라서 구하고자 하는 cell COD formed/mg COD oxidized 수치는 0.58을 나타냈다 이 값은 하수를 대상으로 한 기존 문헌의 수치인 0.45~0.68 cell COD formed/mg COD oxidized에 비하면 그 범위 안에 존재하는 것을 알 수 있다.

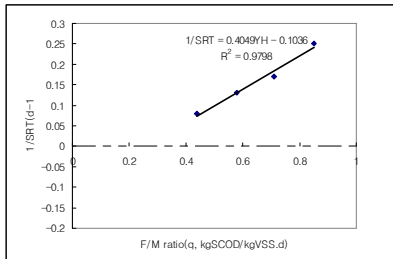


Fig. 1 1/SRT와 F/M비

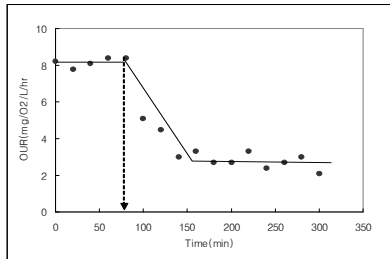


Fig. 2 OUR 변화

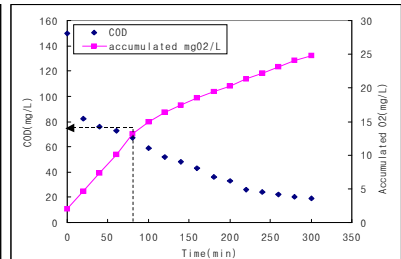


Fig. 3 COD변화와 산소섭취량

3.1.1 호기성상태에서 Ss 도출

F/M비(kg BOD/kg MLVSS.d)는 0.24정도에서 5시간 동안 20분간격으로 OUR Fig. 2와 Fig. 3으로부터 초기 약 80분 동안 높은 OUR을 유지하고 있고 초기부터 이 시간까지 소모된 유기물량이 유입하수의 가수분해로부터 생긴 RBCOD량으로 미생물에 의한 소모반응에 기인하는 것을 알 수 있다. 80분을 지나서 OUR이 급격히 감소하다가 150분을 지나서는 일정한 OUR값을 지니게 되는데, 이때는 RBCOD가 거의 없는 상태에서 입자성 기질에 의한 가수분해로부터 생겨나는 RBCOD의 소모현상이 나타난다.

3.1.2 무산소상태에서 Ss 도출

무산소조건에서 NUR 실험을 수행하기 위하여 무산소 회분식조의 탈질미생물을 충분히 적응시킨 후 KNO₃용액을 이용하여 알고 있는 농도를 만들어 실험을 수행하였다. 실험시간은 유기물의 성상에 따른 소모양상이 충분히 나타내도록 하기 위하여 5시간 이상 실험을 행하였다. Fig. 4는 시간에 따른 무산소상태에서 NO₃-N의 흡수율, 즉 탈질효과를 관찰한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 탈질반응시작 후 80분 가까이하는 하수내 RBCOD의 소모에 따른 탈질속도가 빠르게 나타났으나, 80분 이후부터는 RBCOD의 소진으로 상대적으로 탈질속도가 느리게 나타나고 있음을 알 수 있다.

이상과 같이 호기성상태와 무산소 상태에서 구한 Ss값을 비교해 보면 각각 35.5mg/L와 39.9mg/L로 약간의 차이는 있으나 유사한 값을 보여주고 있다. 또한 전체 COD량을 기준으로하면 호기 상태에서의 Ss는 35.5/170 = 21.1%, 호기성 상태를 기준으로 39.7/170 = 23.4%로 각각 나타났으며 이는 기존 연구자들의 결과인 20~23%와 비교해 볼때 매우 유사한 값을 보이고 있음을 알 수 있다.⁴⁾

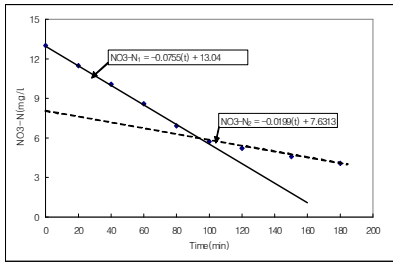


Fig. 4 NO₃-N 흡수량

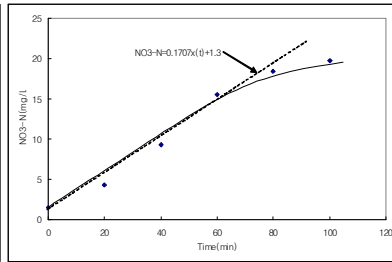


Fig. 5 NO₃-N 생성률

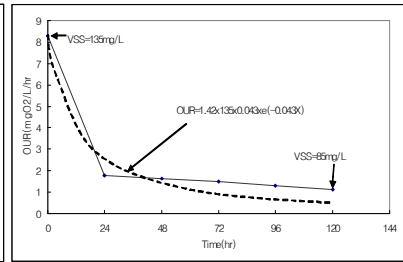


Fig. 6 OUR과 미생물자산화

3.1.3 기타 동력학적 계수도출 실험

시뮬레이션을 위한 동력학적계수중 무산소상태에서 종속영양미생물의 $\mu_{max,H}$ 는 식 (7)에 의하여 구할 수 있다.

$$\mu_{max,H} = \frac{2.86}{1 - f_{cv} Y_H} \frac{\Delta NO_3 (V_{uw} + V_{ml})}{\Delta t f_{av} X_v V_{ml}} \dots\dots\dots (7)$$

위 식을 계산하면 $\mu_{max,H} = 3.56^{-1} (= 0.14hr^{-1})$, 호기성상태의 OUR을 이용하면 다음과 같이 식 (3)을 이용하여 계산하면 $\mu_{max,H} = 4.2d^{-1} (= 0.175hr^{-1})$ 이다. f_{av} 는 기존 문헌을 이용하였다.⁽⁵⁾ 종속영양미생물의 사멸계수 b_H 를 구하기 위하여 식 (8)를 이용한다.

$$\frac{dO}{dt} = 1.42 \times b_H \times X_O \times e^{-b_H t} \dots\dots\dots (8)$$

이로부터 구한 사멸률 b_H 는 $0.043hr^{-1}$ 로 나타났고 이는 기존 도시하수를 대상으로 구한 실험치와 비교할 때 유사한 값을 유지하였다.⁽⁶⁾ 독립영양미생물의 최대비성장률 $\mu_{max,A}$ 는 최대암모니아 섭취률을 이용하여 식(5)을 이용하여 다음과 같이 구한다. 여기서 시간에 따른 질산성질소의 농도변화에서 선형구간을 취하여 이 구간에서 $AUR_{max,A}$ 를 구한다. NH₄-N는 NH₄Cl를 이용하였고 NH₄-N량으로 20mg/L를 호기성회분식조에 주입하여 시간에 따른 NO₃-N 생성량으로 관찰하였다. 그 실험결과는 다음 Fig. 5와 같다.

Fig. 6에서 f_{ba} 는 독립영양 미생물의 active fraction(=0.054)이고 Y_A 는 독립영양미생물의 생산계수(=0.24)이고 X 는 미생물농도(mgVSS/L)를 가르킨다. 이 값은 독립영양미생물의 최대비성장계수는 기존 실험치와 비교하여 다소 낮은 값을 보이고 있다.⁽⁶⁾

4. 결론

- 1) 종속영양미생물 생산계수 Y_H 값이 0.40mg VSS/mg COD였다. 이것을 ASM No.2d에 적용하기 위하여 mg cell COD formed/mg COD oxidized 단위로 환산하기 위하여 활성슬러지로부터 COD/VSS인 f_{cv} 를 측정한 결과, 1.45를 나타내었다. 구하고자 하는 cell COD formed/mg COD oxidized 수치는 0.58을 나타냈다
- 2) 호기성 상태에서 유입원수의 Ss를 구한 결과 35.5 mg/L를 나타내었고, 무산소상태에서 Ss값을 다음과 같이 구한 결과, Ss는 39.9 mg/L로 호기성상태와 무산소상태에서 구한 Ss값을 비교해 보면 각각 35.5mg/L와 39.9mg/L로 약간의 차이는 있으나 유사한 값을 보여주고 있다. 전체 COD량을 기준으로하면 호기성상태에서의 Ss는 $35.5/170 = 21.1\%$, 호기성상태를 기준으로는 $39.7/170 = 23.4\%$ 로 각각 나타났으며 이는 기존 연구자들의 결과인 20~23%와 유사하다는

것을 알 수 있다.

3) 사멸률 b_H 는 0.043hr^{-1} 로 나타났고 이는 기존 도시하수를 대상으로 구한 실험치와 비교시 유사한 값을 보여주고 있다. $\mu_{\max,A}$ 는 0.65d^{-1} 로 나타났다.

이상과 같이 본 연구에서는 국내 하수에 적합한 BNR공정 시뮬레이션을 위한 동력학적계수가 산출되어 현재 및 향후 국내 하수 처리장에 BNR 공정 적용시 설계 및 운전인자로 활용할 수 있는 기초 자료로 제공될 것이다.

감사의 글

본 논문은 대우건설기술연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Park, M.G. et al., "Characteristics of biological nutrient removal by endogenous nitrate respiration(ENR) mechanism from low strength wastewater, Ph.D. Dissertation, KAIST, Korea,(2001)
2. Mogens Henze, Willi Gujer, Takahashi Mino, Tomonori Matsuo, Mark C. Wentzel, Gerrit v. R. Marais and Mark C. M. Van Loosdrecht, "Activated Sludge Model No. 2D, *Wat. Sci. Tech* Vol. 39, No.1 pp 165-182 (1999).
3. 윤석표, "Activated Sludge No.2를 이용한 하수의 생물학적 질소인 제거 공정의 처리성 평가", *대한환경공학회지*, Vol.21, No.4, pp 609-616(1999).
4. Henze. M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M.C., and Marais, G. v. R., "Wastewater and Biomass Characterization for the Activated Sludge Model No.2 : Biological Phosphorus Removal." *Wat. Sci. Tech.*,31(2), 13-23(1995)
5. Ekama, G. A, Dold. P. L. and Marais. G. V.R., "Proceeding for determining influent COD fraction and the maximum specific growth rate of heterotrophs in activated sludge systems." *Wat. Sci. Tech.*, 18. 91-114(1986).
6. 양창환, 원성연, 박승국, 이상일, "IAWQ 수정모델을 이용한 간헐폭기 활성슬러지 시스템에서 질소 처리시 영향인자 예측", *대한환경공학회지*, Vol.21, No.3, pp.443-452(1999).