

ASM No. 2d를 이용한 생물학적 질소, 인 제거 공정의

최적 설계 및 운전인자 고찰

Optimal Design and Process Parameters of Biological Nutrient Removal Processes using Activated Sludge Model No.2d

안호철*, 박명균**, 유희찬***, 김대성****, 안원식*****, 허용록*

Ho Chul Ahn, Myung Gyun Park, Hee Chan Yoo, Dae sung Kim, Won Sik Ahn, Yong Rok Heo

요 지

생물학적 질소, 인 제거 공정(이하 BNR)의 운전에 있어서 최적 유입수의 C/N(COD/TKN)비, SRT 및 온도의 범위 및 정량적 수치 등은 유기물 뿐 만 아니라 질소, 인의 처리 효율에 있어서 매우 중요하다. 특히, 외국과 다른 저농도 유기물 특성을 보이는 국내 하수에 대해서는 BNR 공정의 선택과 설계 및 운전인자의 선별이 무엇보다도 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 IAWQ에서 제시한 ASM No.2d를 기초로 하여 만들어진 전산모형인 Envirosim사의 Biowin 프로그램을 시뮬레이션 도구로 활용하여, 국내 하수에 비교적 적용하기 용이한 A2/O 공정과 MUCT 공정에 대한 유기물, 질소 및 인처리 효율을 비교하고 유입수의 C/N와 SRT 및 온도에 따른 질소, 인 처리 특성과 유출수의 거동 등을 파악하였다. 시뮬레이션 결과, 국내 하수에서는 A2/O 보다는 MUCT 공정이 질소, 인 처리효율이 더 크게 나타났다. 온도와 SRT가 일정한 상태에서 C/N비는 7이상에서 TKN과 TP제거효율이 양호하게 나타났고, 온도와 C/N비를 일정한 조건에서는 SRT가 7일을 넘어서면 효율이 급격히 낮아지는 현상을 관찰할 수 있었다. 온도조건 실험에서는 20℃ 이하, 특히 국내 하수처리장에 BNR 적용시 설계조건인 13℃에 근접해서는 TKN의 제거효율은 급격히 떨어지는 반면에 인 제거효율이 상승하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : BNR, 저농도 하수, ASM No.2d, C/N비, 온도, SRT

1. 서 론

우리나라에서 하수처리장의 생물학적 질소, 인 제거공정(Biological Nutrient Removal : 이하 BNR)공정이 도입되고 설계에 반영되어 온지도 20년이 다 되어 가고 있다. 이제는 국내 거의 모든 하수처리장에서 BOD, SS의 제거 뿐만이 아니라 N, P와 같은 영양물질에 대해서도 각처리장 별로 자체 기준을 가지고 설계에 반영하고 있는 실정이다. 이에 국내에 적용되는 많은 BNR 공법 중 국내 하수 성상과 실정에 가장 적합한 공정은 A2/O 공법을 변형한 MUCT 공법이나 이와 유사한 것으로 보고하고 있다.¹⁾

한편, BNR 공정의 운전에 있어서 유입수의 C/N(COD/TKN)비, SRT 및 온도의 범위 및 정량적 수치들은 유기물 뿐만 아니라 질소, 인 처리 효율에 있어서 매우 중요하다. 특히 국내와 같이 외국과 다른 저농도 유기물 특성을 보이는 하수에 대해서는 BNR 공정의 선택과 설계 및 운전인자의

* 수원대학교 토목공학과 석사과정 : beatrandom@hotmail.com

** ETS(이티에스) 부사장 : mgpark08@empas.com

*** ETS(이티에스) 대표이사 : yhc5503@hanmail.net

**** 수원대학교 토목공학과 박사과정 : kdkd0711@paran.com

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

* 대우건설기술연구원 선임연구원 : rocky@dwconst.co.kr

선택이 무엇보다도 중요한 역할을 한다. 하지만, 신설 하수 처리장의 경우 계획하는 하수와 동일한 조건의 하수를 구하기 어렵고, 짧은 설계기간동안 하수 처리장 조건 및 계절조건에 적합한 온도특성을 충분히 고려한 실험을 수행하기는 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 전산 모형을 이용하여 BNR 공법들의 처리장 설계와 운전시 근거자료로 활용할 수 있도록 하기 위하여 유입수의 하수성상과 설계인자 및 운전인자들에 따른 처리효과들을 정립하였다.

2. 실험 방법

2.1 IAWQ의 Activated Sludge Model NO.2d

시뮬레이션에 이용된 활성슬러지모델인 ASM NO.2d는 생물반응조에서 유기물의 가수분해 및 혐기와 호기성분해, 질소의 질산화 및 탈질, 탈질 가능한 인제거 미생물 및 인의 생물학적 섭취등이 포함된 반응식을 포함한 모델링을 할 수 있는 Monod식 형태의 21개의 동력학적 반응식으로 구성된다. 사용된 전산프로그램은 캐나다 Envirosim사의 Biowin 2.1로 이 ASM NO.2d를 사용자가 편리하게끔 공정 선택과 인자변환 및 이에 대한 설계 및 반응조 거동 등을 알아볼 수 있는 프로그램이다.

한편, 고도처리가 수행되는 생물반응조에서 유기물, 질소 및 인의 거동을 예측하기 위해서는 예상되는 반응계수들의 수치화는 물론 변수들의 도출과 선정 그리고 대상하수의 성상별 분류가 우선적으로 분석되어야 한다. 하수내 COD는 크게 용존성물질과 입자성물질로 나누며 이중 용존성물질은 생물학적으로 분해가 쉬운 유기물(Readily Biodegradable Substrate, S_F)과 유기산(Volatile Acids, S_A)으로 나누며, 입자성물질은 입자성 난분해 유기물(Inert Non-biodegradable Organics, X_I) 및 입자성으로 분해가 느린 유기물(Slowly biodegradable Substrate, X_S)과 불활성 미생분해 유기물(Soluble Non-biodegradable Organics, S_I)등으로 나누었다. 또한 질소성분은 암모니아성 질소와 질산성질소로 나누고 인성분은 인산염 형태로 존재한다. 입자성 물질중에는 무산소와 호기성 반응조에서 생물반응에 관여하는 타가영양미생물(Heterotrophs)과 인축적 미생물(Phosphorus Accumulating Organism) 및 자가영양미생물(Autotrophs)등²⁾도 포함되며 이들이 반응조에서 Monod식을 기본으로 한 생물동역학적 반응에 의해 유기물 분해와 질소, 인 섭취 반응에 의한 미생물의 증식을 가져오며 이것들은 수치적으로 해석된다.

2.2 유입수 분석

본 연구에서 대상으로 하는 하수는 경기도 H하수처리장의 1차 침전지 유출수를 직접 채수하여 변질을 막기 위하여 4°C 이하의 냉장상태를 유지하면서 하수분석을 실시하였다. Soluble COD와 NH_4-N 은 GF/C filter로 여과 후 측정하였다. 시뮬레이션을 위한 유입하수성상중 COD는 respirometer를 이용한 OUR test 및 batch실험을 통하여 구하였고 용존성 유기물 측정을 위해 호기조회분식 반응조와 무산소회분식반응조를 사용하였다.

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 하수의 원활한 혼합을 위하여 Agitator를 이용하여 30rpm을 유지하였다. 이때 이용한 슬러지는 ORP는 0.5ppm 이하로 하고 이때 초기 슬러지 농도는 2,370mgMLSS/L, 1,820mgVSS/L였다. 무산소조건에서는 KNO_3 를 이용하여 NO_3-N 농도가 탈질반응으로 90~140분동

안 섭취된 용해성 유기물을 측정하였다. 이때 초기 유기물/ 미생물농도비 즉 SCOD/VSS는 1.15 ~ 1.89 SCOD/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.

2.3 시뮬레이션

실제 하수를 이용하여 하수의 정상분석과 동력학적 계수등의 결과를 이용하여 비교적 국내 하수에 적용하기 용이한 A2/O공정과 MUCT공정에 대한 시뮬레이션을 캐나다 Envirosim사의 Biowin v2.1을 이용하여 실시하였다. 이 프로그램은 유입하수성분의 변화와 반응에 미치는 변수조건의 입력이 자유로우며 각 반응조별 설계조건과 반응조건들이 상세하게 수치화될 수 있는 장점이 있다. 입력조건은 2개 공정 모두 비교적 질소, 인 처리효율이 양호한 결과가 예측되는 COD/TKN 비와 평균 운전범위인 온도와 SRT를 중심(*)으로 낮은 위와 아래 값을 선택하여 Table 2와 같이 운전범위를 정하였다.

Table 1. 시뮬레이션 실험조건

항목	A2/O	MUCT	비고
Case I	6(I-1)	6(I-4)	온도와 SRT는 *를 기준
	8(I-2)*	8(I-5)*	
	10(I-3)	10(I-6)	
Case II	10(II-1)	10(II-4)	COD/TKN와 SRT는 *를 기준
	15(II-2)*	15(II-5)*	
	20(II-3)	20(II-6)	
Case III	5(III-1)	5(III-4)	COD/TKN와 온도는 *를 기준
	7(III-2)*	7(III-5)*	
	10(III-3)	10(III-6)	

3. 실험 결과

3.1 기본하수성상

ASM NO.2d의 시뮬레이션 A2/O와 MUCT공법의 대상하수에 대한 각 성분농도를 분석하였다. 대상하수의 유기물농도는 TCOD로 87 ~ 234mg/L(평균 171mg/L), SCOD는 54 ~ 132mg/L(평균 75mg/L), BOD는 65 ~ 115mg/L(평균 84mg/L)를 나타냈으며, TKN은 19 ~ 31mg/L(평균 25.7mg/L), NH_4-N 는 14 ~ 25mg/L(평균 19.5mg/L)이고, T-P는 3.2 ~ 5.5mg/L(평균 4.2mg/L), PO_4-P 는 1.6 ~ 3.5mg/L(평균 2.7mg/L)로 매우 넓은 범위를 보이고 있다. 하수의 평균농도를 기준으로 COD/TKN 비는 6.7, COD/TP비는 41를 나타내고 있다. 이는 대상하수가 외국의 경우와는 다른 저농도 하수임을 보여준다.

3.2 각 공정에 따른 실험 조건별 결과

3.2.1 Case I (COD/TKN비의 변화)

외국에서 실용화된 생물학적 질소, 인 처리공법들은 그 나라의 하수특성에 맞고 유입 BOD 100mg/L 이상의 하수에 적합하도록 설계되어 있어 우리나라의 하수특성인 저농도 하수에서는 좋은 효율을 보여주지 못하고 있다. Fig. 1과 2에서 보는 바와 같이 COD/TKN 비가 8이상에서는

A2/O 공법과 MUCT공법 모두 TCOD, TKN 및 TP 효율이 커지는 것을 관찰할 수 있으며 특히 A2/O 공법이 MUCT보다 상대적으로 유입수의 COD/TKN비에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 특히, COD/TKN비가 낮은 저농도 하수에서 극히 낮은 TP 처리 효율을 보여주고 있는데 이는 반송슬러지내 질산성 질소가 혐기조로 유입되는 과정에서 탈질 미생물의 유기물 선분해 반응으로 인분해 미생물의 인 방출이 저해되기 때문이며, 이를 보완하여 반송슬러지를 무산소조에서 탈질산화 후 혐기조로 재반송하는 MUCT공정이 A2/O보다 우수한 결과를 보였다.

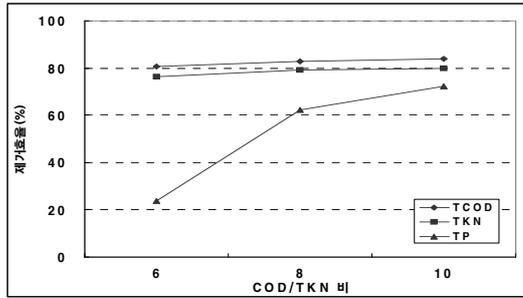


Fig. 1 A2/O 공정

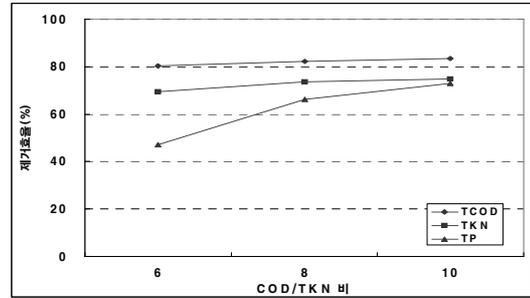


Fig. 2 MUCT 공정

3.2.2 Case II (온도의 변화)

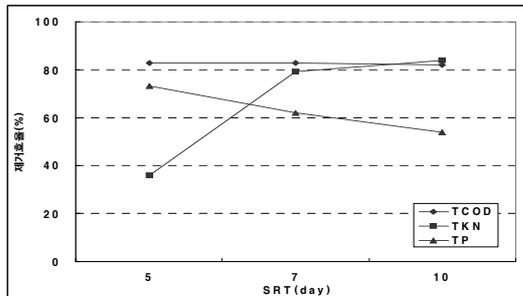


Fig. 3 A2/O 공정

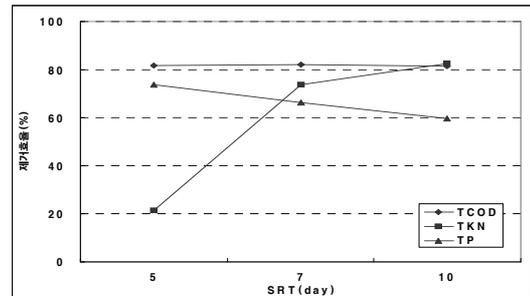


Fig. 4 MUCT 공정

우리나라와 같이 사계절이 뚜렷하여 계절간 온도차가 심한 경우 그에 따른 수처리 효율은 많은 차이를 나타낸다. 특히 질산화 미생물은 다른 여타 미생물들보다 온도에 민감한데 실제 van't Hoff-Arrhenius법칙에 따라 10°C에서 20°C로 상승하면 미생물의 성장속도가 2배 이상 증가하는 것을 알 수 있다(WPCF., 1983). 본 모사에서 온도가 따라서 TKN처리 효율이 10°C에서는 극히 낮은 값을 보여주고 있는 것이다. 실제 겨울철 하수처리시 질소의 처리는 거의 불가능하므로 이를 위한 다른 대안이 요구된다. 반면 인처리 효율은 온도가 낮아짐에 따라 효율이 증가함을 볼 수 있는데 Randall(1992)등은 하수온도 10°C에서도 인 제거 효율은 크게 영향받지 않는다고 했고 Sell,R,L(1981) 등은 실험실규모의 batch 실험을 통해 5°C에서 인 제거량이 15°C보다 오히려 40%나 크게 나타남을 보였다. 이는 높은 세포생산량을 가진 성장속도 느린 Psychrophilic bacteria가 낮은 온도에서 증가하기 때문이다.

3.2.3 Case III (SRT)

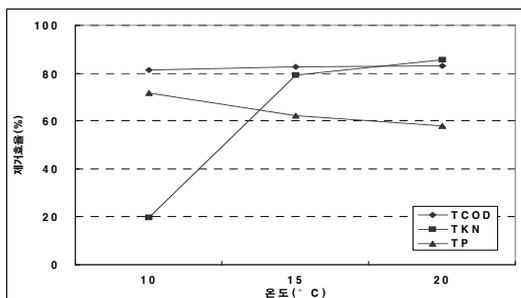


Fig. 5 A2/O 공정

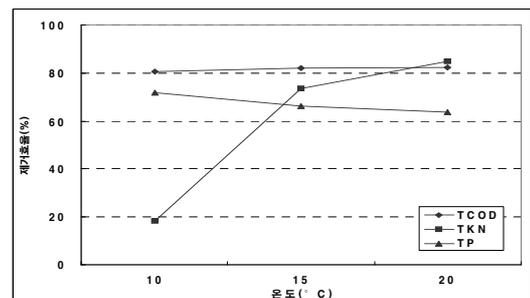


Fig. 6 MUCT 공정

인의 최종 제거 경로는 잉여슬러지이므로 인제거시 SRT는 매우 중요하다. Wentzel(1991)등은 효과적인 인 제거를 위해서는 SRT가 4~5일은 유지되어야 한다고 제안하고 있다. 하지만 실험결과에서도 알 수 있듯이 질소제거를 위해서는 SRT를 길게 할수록 처리효율이 좋아짐을 알 수 있다. 따라서 질소 인 동시 제거를 위해서는 적절한 SRT를 유지하는 것이 중요한데 본 연구에서 질소는 SRT 5일에서 평균 28.7%의 제거효율을, 인은 SRT 10일에서 평균 56.9%의 제거 효율을 나타냈다. 따라서 질소와 인 동시 제거 시 최적 SRT는 6~7일이 적당함을 알 수 있다.(Fig.5~6)

4. 결론

ASM No.2d를 기초로 하여 만들어진 전산모형인 Envirosim사의 Biowin 프로그램을 시뮬레이션 도구로 활용하여, 국내 하수에 비교적 적용하기 용이한 A2/O 공정과 MUCT 공정에 대한 유기물, 질소 및 인처리 효율을 비교하고 유입수의 C/N와 SRT 및 온도에 따른 질소, 인 처리 특성과 유출수의 거동 등을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 컴퓨터 simulation을 이용한 모델링으로 짧은 시간에 생물학적 반응기의 최적 운전 조건을 도출 할 수 있었으며 반응조의 미생물의 성장조건 및 환경인자(SRT, 온도, pH)등의 변화를 간단히 설계에 반영할 수 있어 향후 고도처리 공정의 적합한 설계, 운전 및 수질 예측에 효과적이다.

2) 우리나라 하수 특성인 저농도 하수(COD/TKN 비 = 6)일 때 MUCT 공정을 기준으로 질소는 47.14%, 인은 69.57%를 나타내 높은 영양염류 제거 효율을 얻기 위해서는 질산성 질소 제거 미생물의 선 유기물 분해 반응에 의한 인 제거 미생물의 유기물 부족현상을 해결하거나 국내하수 성상에 맞는 공법 개발 및 보완이 시급하다.

3) 온도 변화에 따른 BNR공정의 처리 효율에서 질소 제거 미생물은 10°C 이하에서 19.65%, 18.21%의 낮은 효율을 나타내 저온에서의 질소처리에 또 다른 대안이 필요했던 반면 인제거 미생물은 낮은 온도에서 높은 효율을 나타내 높은 세포생산량을 가진 성장속도 느린 Psychrophilic bacteria가 낮은 온도에서 증가함을 증명했다. 따라서 온도 변화에 따른 영양염류의 계절별 제거 기준을 따로 마련하여 하수처리장 설계 및 운전 시 적극 반영하여야 한다.

4) 본 연구에서는 질소와 인 동시제거 적정 SRT가 6~7일로 나타났고 공정별, 하수 특성별 최적 SRT값의 결정은 BNR공정의 처리 효율을 극대화 할 수 있음을 보였다.

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. Henze, M. (1992). "Characterization of wastewater for modeling of activated sludge processes", *Wat. Sci. Tech*, Vol. 25, No.6 pp.1-15.
3. 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).
4. 윤석표, "Activated Sludge No.2를 이용한 하수의 생물학적 질소, 인 제거 공정의 처리성 평가", *대한환경공학회지*, Vol.21, No.4, pp 609-616(1999).
5. 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)