

무산소조 NO_3^- -N 농도 변화에 따른 DNPAOs에 의한 인 제거

김 흥 태 · 김 경 호
경북대학교 건설공학부 토목공학전공
(2007년 8월 20일 접수; 2007년 11월 1일 채택)

The Removal of the Phosphorus by DNPAOs According to the Loading of the Influent NO_3^- -N in Anoxic Zone

Hong-Tae Kim and Kyeong-Ho Kim

Department of Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

(Manuscript received 20 August, 2007; accepted 1 November, 2007)

This study was conducted to investigate the ratios of phosphorus release to COD uptake, phosphorus release to nitrate removal, and phosphorus uptake to phosphorus release by DNPAOs(denitrifying phosphate accumulating organisms). In case I~IV, influent 1 were fed with synthetic wastewater with influent 2 NO_3^- -N injection to anoxic zone and the case V were fed with municipal wastewater with side stream oxic zone instead of influent 2 NO_3^- -N injection. As a result, the ratio of phosphorus release to carbon uptake was increased in accordance with nitrate supply. The DNPAOs simultaneously took up phosphate and removed nitrate from the anoxic reactor. In case I~IV, with above 20 mg/L of sufficient NO_3^- -N supply, phosphate was taken up excessively by the DNPAOs in anoxic condition. The large amount of both uptake and release of phosphorus occurred above 20 mg/L of nitrate supply, achieving the ratio of phosphorus uptake to phosphorus release to be 1.05.

In case V, phosphate luxury uptake was not occurred in system due to 6.98 mg/L of insufficient NO_3^- -N supply and the ratio of phosphorus uptake to phosphorus release was 0.98. Consequently, if nitrate as the electron acceptor was sufficient in anoxic zone, the ratio was found to be high.

Key Words : DNPAOs, Nitrate, Phosphorus, Release, Uptake

1. 서 론

BNR(biological nutrient removal)을 효과적으로 수행하기 위해서는 많은 양의 탄소원이 요구되는데, 주로 혼기조에서의 인방출과 무산소조에서의 탈질소화를 수행하기 위해 이용된다. Randall¹⁾은 만족할 만한 BNR 처리결과를 가지기 위해서 유입수의 COD/TN과 COD/TP비가 각각 6, 40 이상이 되어야 한다고 하였는데, 어떤 폐수에 TN 30 mg/L, TP 5 mg/L이 들어있다고 가정한다면 BNR을 수행하기 위해 요구되는 COD 농도는 380 mg/L이 된다. 그러므로 유입수의 COD가 제한되는 경우, 일반적으로 무산소조에서 탈질미생물이 이용할 탄소원이 부족

해 탈질소화 효율이 떨어지게 된다.

한편, Zhi-rong Hu와 M.C. Wentzel²⁾에 따르면 인축적 미생물(PAOs)중에 무산소조에서 탈질소화를 일으킬 수 있는 탈질인축적 미생물(DNPAOs)이 존재한다고 보고하였다. 즉, 체내의 PHA(Polyhydroxyalkanoate)를 탄소원으로하여 O_2 뿐만 아니라 NO_3^- -N을 전자수용체로 이용하여 인섭취와 탈질소화도 같이 수행할 수 있다고 하였다(Vlekke³⁾; Kerrn Jesperson and Henze⁴⁾; Kuba 등⁵⁾). 따라서, 생물학적 인제거에 관여하는 미생물은 전자수용체로 O_2 와 NO_3^- 중 하나를 이용할 수 있는 DNPAOs(denitrifying PAOs)와 단지 O_2 만을 이용할 수 있는 APAOs(aerobic PAOs)으로 분류할 수 있으며⁴⁾, Kuba 등⁵⁾은 무산소 조건에서의 DNPAOs는 호기성 조건에서의 APAOs와 마찬가지로 내부 PHA와 glycogen을 이용한 생물학적 물질대사를 수행할 수 있으며 다만 DNPAOs는 O_2 대신 NO_3^- -N을 전자수용체로 사용한

Corresponding Author : Kyeong-Ho Kim, Department of Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

Phone: +82-53-950-4769

E-mail: gizmo99@nate.com

다고 하였다. 또한 Murnleitner 등⁶⁾은 NO_3^- -N을 전자수용체로 사용할 경우, 산소에 비해 에너지 생산량이 낮기 때문에, DNPAOs는 PAOs보다 낮은 세포생산량을 가진다고 하였다.

한편, DNPAOs가 질산염을 이용하여 인을 섭취한다는 것은 외부탄소원이 아닌 내부에 저장된 PHA를 가지고 인과 질소를 동시에 제거할 수 있다는 뜻이 된다. 이는 도시 하·폐수가 질소와 인제거를 위해 유입 유기탄소원이 부족할 경우 많은 매력을 가진다. 따라서 이 DNPAOs를 생물학적 영양소처리공정에 도입함으로서 외부 유기탄소원의 절감을 가져올 수 있고, 슬러지 생산량과 산소요구량을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다(Ahn 등⁷⁾). 또한, 탈질소화에 요구되는 탄소율을 줄일 수 있어 저농도 유입수의 BNR공정에 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

Zhi-rong Hu²⁾는 이러한 DNPAOs가 공정내에서 거동을 하는데 있어서 가장 중요한 영향인자는 무산소조로 유입되는 NO_3^- -N 부하량이라고 하였다. 이에 본 연구는 협기-무산소 공정에 기존 문헌에서 제시한 DNPAOs의 거동에 가장 큰 영향인자인 무산소조 유입되는 NO_3^- -N의 부하량의 산정을 위하여 외부에서 인위적으로 NO_3^- -N을 주입하여 NO_3^- -N 부하량에 따른 인방출량과 COD 섭취량, 인섭취량과 NO_3^- -N 제거량, 인방출량대 인섭취량을 조사하여, DNPAOs의 거동에 최적인 NO_3^- -N 부하량을 산정한 다음, 외부 NO_3^- -N 주입 없이 내부의 호기조의 배치만으로도 DNPAOs의 거동에 필요한 전자수용체인 NO_3^- -N의 확보 가능성을 확인하고 나아가 외부 NO_3^- -N 주입 없이 실제 공정의 최적화에 목적을 두고 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치

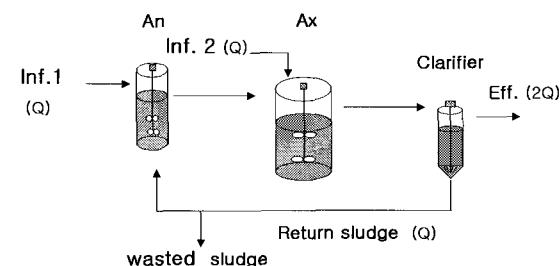
본 연구의 사용된 실험장치는 Fig. 1에 나타나 있다. DNPAOs의 성장의 영향인자인 NO_3^- -N의 주입을 위해 Inf. 2를 가진 case I~IV 실험에 사용된 반응조는 협기-무산소 및 침전지로 구성되어 있으며, 유입수는 두 부분으로 분리하여 주입하였는데, Inf. 1에는 협기조에서의 DNPAOs의 인 방출을 수행하기 위해 COD, NH_3 -N, PO_4 -P, alkalinity 등의 성분으로 이루어져 있으며, Inf. 2는 무산소조로의 전자수용체를 공급하여 인섭취 및 탈질소화의 유도를 위하여 KNO_3 를 이용하여 제조하였으며 각 case에 따라 유입 NO_3^- -N 양을 다르게 하였다. 또한, 각 반응조는 외부 산소가 유입되어 전자수용체로 이용되는 것을 방지하기 위하여 덮개로 밀폐하였다. case

V에 사용된 실험장치는 Fig. 1 (b)에 나타내었는데, 전체 반응조는 main stream에 협기-무산소-침전지로 구성되어 있으며, case I~IV 실험에서 무산소조의 전자 수용체를 공급하기 위하여 인위적인 NO_3^- -N을 주입한 Inf. 2를 대신하여 side stream에 호기조를 두었으며, Inf. 1을 합성폐수가 아닌 대도시 종말처리장의 실제 하수를 유입수로 주입하여 실험을 실시하였다.

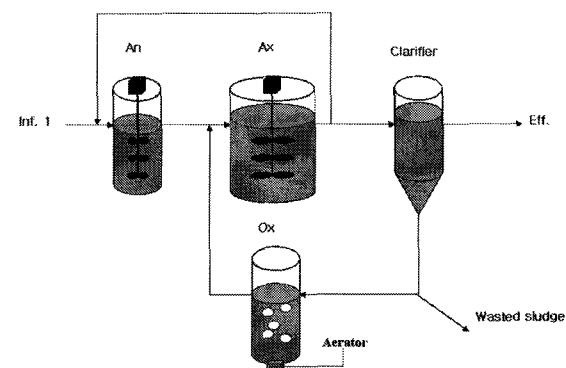
case I~IV 실험에 사용된 반응기의 유효용량은 협기조 1.5 L, 무산소조 3 L이며 case V에 사용된 반응기의 유효용량은 협기조 1.5 L, 무산소조 5 L, 호기조 2 L로 재질은 아크릴 수지로 제작되었다. 침전지는 유리로 제작되었으며 유효용량은 2 L로 침전지에서 미생물의 침전과 반응으로 인한 실현오차를 줄이고자 저속 교반 모터로 교반시켰고 항상 유리측 벽을 깨끗한 상태로 유지하였다. 본 연구에 사용된 실험장치의 재원은 Table 1에 나타나 있다.

2.2. 실험방법

실험에 사용된 미생물은 대도시 하수종말처리장에서 채취하여 약 한 달간의 적응 기간을 거쳐 실험을 수행하였으며, DNPAOs의 성장조건이 전자수용체로서 O_2 와 NO_3^- 가 동시에 존재하거나 둘 중 하나



(a) Lab. scale reactor of case I~IV



(b) Lab. scale reactor of case V

Fig. 1. Schematic Diagram of the Laboratory Scale Reactor.

무산소조 NO_3^- -N 농도 변화에 따른 DNPAOs에 의한 인 제거

Table 1. Description of Experimental apparatus

Items	Description	
	case I~IV	case V
Anaerobic Reactor	Cylindrical Acrylic Plastic Effective Volume : 1.5 L	Cylindrical Acrylic Plastic Effective Volume : 1.5 L
Anoxic Reactor	Cylindrical Acrylic Plastic Effective Volume : 3 L	Cylindrical Acrylic Plastic Effective Volume : 5 L
Oxic Reactor	.	Cylindrical Acrylic Plastic Effective Volume : 2 L
Clarifier	Round Glass Cylinder Effective Volume : 2 L	
Mixer	AC110 3.0W 60Hz 36 R · P · M CW	
Pump	Cole-Parmer, NO.7553-77, (6~600rpm)	

만 존재하여도 충분히 정상상태에 도달할 수 있으며 동시에 존재할 경우 O_2 의 사용을 우선하기 때문에 적응기간 동안 협기조 및 무산소조 둘 다 밀폐하여 O_2 의 영향을 최소화하였다. case I~IV 실험에서 MLSS농도는 협기조와 무산소조 모두 3500 mg/L로, case V에서는 평균 2600 mg/L로 유지하였다. 각 case 별 NO_3^- -N농도 변화와 무산소조에서 NO_3^- -N 부하량에 대한 운전특성이 Table 2에 나타나 있다.

case I~IV 실험에서 유입유량은 협기조와 무산소조로 각각 12 L/day로 전체 24 L/day, 슬러지 반송은 MLSS유지를 위해 침전지에서 협기조로 외부반송(12 L/day)시켰다. case V 실험에 주입된 유입수 Inf. 1은 case I~IV의 Inf. 2를 없애고 전량 협기조로 24 L/day 유입시켰으며, 외부반송은 무산소조로 NO_3^- -N을 유입시키기 위하여 침전지에서 호기조를 거쳐 무산소조로 24 L/day, 내부반송은 공정의 MLSS 유지와 협기조에서 NO_3^- -N에 의한 인 방출 저해현상을 감소시키기 위하여 무산소조에서 협기조로 24 L/day를 시켰다. DO의 영향을 최소화하기 위해 반응기 전체와 유입수 저류조도 밀폐하였다. pH는 7~7.5로 중성을 유지하였으며, 20°C로 일정하

게 운전하였다. 유입수는 저류조를 설치하고, 교반모터를 이용하여 항상 균일한 농도를 유지하였으며, 반응조 내부로의 공급은 Masterflex Pump를 이용하였는데, 각 case 별 유입수의 성상은 Table 3에 나타나 있는데, case I~IV 실험에 주입된 Inf. 1에는 glucose, NH_4Cl , KH_2PO_4 를 이용하여 COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도를 일정하게 조정하였으며, Inf. 2에는 NO_3^- -N 농도를 맞추기 위하여, KNO_3 를 이용하여 주입되는 NO_3^- -N의 농도의 변화를 주었다. 그 외, 미생물 성장에 필요한 기타 미량원소는 Table 3에 나타나있듯이 Inf. 1에 혼합 주입하고, 알칼리도로서 NaHCO_3 를 이용하여 pH를 조절하였다. case V 실험은 합성폐수가 아닌 대도시 하수종말처리장의 1차 침전지를 거친 물을 취수하여 masterflex pump를 통하여 일정량 주입하였으며, Inf. 2 대신 호기조를 두어 실험을 실시하였다.

case I~IV 실험에 주입된 유입수 Inf. 1은 일정농도로 유지하였으며 Inf. 2의 유입 NO_3^- -N 농도변화에 따라 전체를 4개의 case로 분류하여 운전하였다. 전체 case에 걸쳐 Inf. 1에서는 COD, P, $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 농도를 각각 300, 6, 20 mg/L로 유지하였으나, Inf. 2의 경우, 유입 NO_3^- -N 양에 따른 인섭취 및 탈질소화율

Table 2. The Characteristics of Operating Condition

Case	Inf.1			An	Inf.2	Ax	NO_3^- -N loading rate (g NO_3^- / gTSS)
	COD (mg/L)	P (mg/L)	$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/L)				
Case I					10		0.011
Case II					15		0.017
Case III	300	6	20	3500	20	3500	0.022
Case IV					30		0.034
Case V	125	2~3	20~25	2645	6.98	2655	0.013

Table 3. Characteristics of Influent Synthetic wastewater

Parameter		Concentration	Note
case I~IV	Inf.1	Glucose	300 mg/L as COD
		NH ₄ Cl	20 mg/L as NH ₃ -N
		KH ₂ PO ₄	6 mg/L as PO ₄ -P
		MgSO ₄ · 7H ₂ O	1.8 g/12L
		CaCl ₂ · 2H ₂ O	0.24 g/12L
		NaCl	0.6 g/12L
		FeCl ₃ · 6H ₂ O	Variable
		MnSO ₄ · H ₂ O	Variable
case V	Inf.1	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	Variable
		NaHCO ₃	5 g/12 L
		COD	125 mg/L
		S-P	2~3 mg/L
		NH ₃ -N	20~25 mg/L

의 변화를 측정하기 위해 case I, II, III, IV에서 NO₃⁻-N농도를 각각 10, 15, 20, 30 mg/L로 주입하였다. 그리고 DNPAOs에 의한 무산소내에서의 정학한 NO₃⁻-N제거량과 협기조에서의 유입 NO₃⁻-N영향을 최소화하기 위해 Inf. 1와 Inf. 2는 협기조(An)와 무산소조(Ax)에 각각 분리, 주입되었다.

case V 실험에 주입된 유입수 Inf. 1은 대도시 하수종말처리장의 1차 침전지를 지난 물을 주입하였으며, case I~IV 실험에서 사용된 Inf. 2를 대신에 호기조를 두어 무산소조로 NO₃⁻-N을 공급하여 실험을 하였다.

수질 분석은 Standard Methods (APHA, 1995)에 준하여 실시한 후, 실험 항목에 대한 각각의 반응조에 대한 물질수지를 세워 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 인위적인 유입 NO₃⁻-N 부하량의 변동과 side stream에 호기조를 두어 외부 NO₃⁻-N의 주입없이 실험을 실시하여 협기조에서의 인방출량 및 COD소모량, 무산소조에서의 인섭취량 및 NO₃⁻-N 제거량, 그리고 인방출량대 인섭취량의 비를 분석하였다. 각 반응조는 DNPAOs 분석에 대한 주요한

방해요인인 산소유입을 차단하기 위하여 완전 밀폐하였으며, 분석에 있어서 산소의 영향은 고려되지 않았다.

3.1. 협기조에서 COD제거와 인방출

본 공정에서 인제거에 관여하는 미생물은 대부분 DNPAOs이므로 협기조에서 일어나는 인방출도 DNPAOs에 의해 일어난 것이다. 그러나, 협기조에서의 COD 제거는 DNPAOs뿐만 아니라 GAOs(glycogen accumulation organisms)를 포함한 협기성 미생물에 의한 것으로 사료되는데, 이러한 미생물은 인방출없이 COD를 제거한다. 따라서, 협기조에서는 이러한 미생물들이 공존하고 있다고 가정하고, 만일 협기성 미생물이 우세할 경우 협기조에서는 인방출 없이 COD 제거가 일어날 것이고, DNPAOs가 우세할 경우 인방출과 COD 제거가 동시에 나타날 것이다.

Table 4에서는 협기조에서의 인방출량과 COD소모량을 나타내었다. case I, II, III, IV, V에서 인방출량은 각각 129, 372, 399, 375, 94 mg/d로 나타났다. 본 연구에 있어서 COD 섭취량은 case I, II, III, IV, V에서 각각 1715, 1701, 1546, 1395 1314 mgCOD/d로 나타났다. 이러한 결과로 미루어보아 case I과

Table 4. P release and COD uptake at anaerobic reactor

case	P release(mg/d)				COD consumed(mg/d)				P release/COD consumed (mg/mg)
	In	Out	Release Amount	In	Out	Removed Amount			
case I	148.32	277.68	129.36	3601.44	1885.68	1715.76			0.08
case II	115.80	487.44	371.64	3403.20	1701.60	1701.60			0.22
case III	75.96	474.48	398.52	3356.40	1810.80	1545.60			0.26
case IV	74.76	450.24	375.48	3384.12	1989.36	1394.76			0.27
case V	72	165.6	93.6	3442.5	2128.4	1314.1			0.07

Table 5. The amount of NO_3^- -N removal and P uptake in anoxic reactor

case	NO_3^- -N (mg/d)				P (mg/d)			P uptake/ NO_3^- -N removed
	In	Out	Removed Amount	In	Out	Uptake Amount		
case I	144.84	11.52	133.32	277.68	234.00	43.68	0.33	
case II	186.24	6.84	179.40	487.44	154.08	333.36	1.86	
case III	238.92	12.24	226.68	474.48	27.00	447.48	1.97	
case IV	368.28	151.2	217.08	450.24	21.60	428.64	1.97	
case V	173.0	90.0	83.0	166.5	46.8	119.7	1.44	

case V의 경우 NO_3^- -N의 공급량 부족으로 인하여 DNPAOs보다는 협기성 미생물이 우월하였던 것으로 판단되며, case II는 DNPAOs와 협기성 미생물에 의한 COD 제거가 동시에 일어나며, NO_3^- -N 공급이 충분한 case III, IV에서는 DNPAOs가 미생물군을 지배하였던 것으로 사료된다.

그러나, Table 5에는 DNPAOs에 의한 인 방출에 따른 COD 섭취량은 분명히 비례관계에 있었다. COD 섭취량과 인방출량과의 관계는 MLSS에 대한 인함량 또는 유입수의 인농도에 따라 가변적이며, DNPAOs이외의 미생물에 의한 COD 소모 등 많은 변수가 있다. 그러나, Dold 등⁸⁾은 COD 소모당 인방출비가 0.02~0.89의 넓은 범위를 가진다고 하였으며, 이 중 Smolders 등⁹⁾은 0.28을 제시하였다. 본 연구에 있어서 나타난 COD 소모량에 따른 인방출량의 비는 각각 0.08, 0.22, 0.26, 0.27, 0.07이었다. 즉, NO_3^- -N 공급이 충분해서 DNPAOs가 우월한 case III, IV에서는 DNPAOs에 의한 인 방출/COD 소모비는 약 0.27을 유지하였다. 이는 Dold 등⁸⁾이 나타낸 범위 내에 있으며, 특히 smolders 등⁹⁾이 제안한 0.28의 값과 유사한 것으로 나타났다.

그리고, 유입 인에 대한 인방출량의 비도 case I과 V를 제외한 case II, III, IV에서 각각 3.2, 5.2, 5.0으로 매우 높은 값을 나타내고 있어 인 방출이 활발하게 일어난 것으로 판단된다.

3.2. 무산소조에서의 DNPAOs에 의한 인섭취

무산소조에서 DNPAOs에 의한 NO_3^- -N 제거량과 인 섭취량을 측정하였다. 무산소조는 밀폐되어 산소가 유입되지 않았으므로, 인 섭취에 필요한 전자수용체는 대부분 NO_3^- 가 사용되었다고 가정하였다. 각 case별 NO_3^- -N 제거량과 인 섭취량을 Table 5에 나타내었으며, 그 상관관계는 Fig. 2에 나타내었다.

유입 NO_3^- -N 농도가 10, 15, 20, 30 mg/L인 case I~IV에서의 NO_3^- -N의 유출수 농도는 각각 0.33, 0.39, 0.4, 4.6 mg/L였고, 제거량은 각각 133, 179, 227, 217 mg/d이었는데, case I~III에서는 유입 NO_3^- -N 농도에 따라 증가하다가 case III 이후 일정

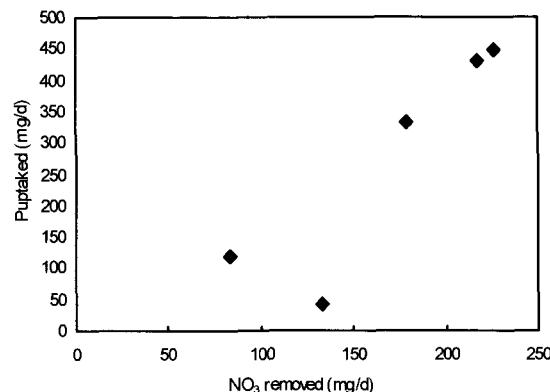


Fig. 2. The relationship between NO_3^- -N removal and P uptake.

하게 유지되었다. 즉, 합성폐수를 사용한 case I~IV 까지의 실험결과에 따르면 무산소조에서 인섭취를 위해 요구되는 NO_3^- -N 양은 약 220 mg/d이었으나, case I, II는 NO_3^- -N 제거량에 비해 공급량이 부족하였던 것으로 판단된다. 한편, 인 섭취량도 NO_3^- -N 제거량과 마찬가지로 44, 333, 447, 429 mg/d로 case III까지는 증가하다가 그 이후에는 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 즉, Fig. 2에서 나타난 것과 같이 NO_3^- -N 제거와 인 섭취는 일정한 비를 형성하고 있는데, 이는 무산소 조건에서 PAOs가 인 섭취 시 NO_3^- -N을 전자수용체로 이용하였기 때문으로 판단되며, 결과적으로, 인 섭취량이 증가할수록, 소모되는 NO_3^- -N량이 증가하였다. Fig. 3에는 인 섭취량과 소모되는 NO_3^- -N 양과의 비를 도시하였는데, Ahn 등⁷⁾은 NO_3^- -N 1 mg 제거당 2.2 mg의 인 방출이 일어난다고 제시하였으나, 본 연구에서는 NO_3^- -N 공급량이 부족하였던 case I을 제외한, case II~IV에서 NO_3^- -N 제거에 대한 인 섭취율은 1.86~1.97 mg P_{uptaked}/mg NO_3^- -N_{removed}, 평균 1.93으로 유입 NO_3^- 양에는 관계없이 거의 일정하게 나타났다. 따라서, DNPAOs는 1 mg의 NO_3^- -N을 탈질소화에 의해 제거할 때 약 1.93 mg의 인을 섭취하는 것으로 판단된다. 이는 Ahn 등⁷⁾의 연구결과보다 약간 낮게 나타났다.

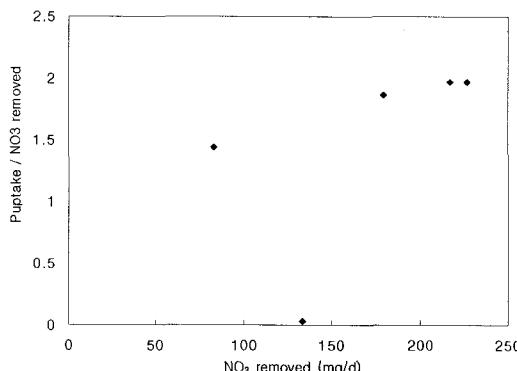


Fig. 3. The relationship between P uptake/NO₃⁻-N removal and NO₃⁻-N removed.

으나, DNPAOs에 의한 인 섭취와 NO₃⁻-N 제거와는 일정한 비율을 가지고 있으며, 그 비도 약 2.0 내외인 점이 유사한 것으로 판단된다. 한편, case I과 case V의 경우, 공정으로 공급되는 NO₃⁻-N 량이 너무 낮아서 전자수용체가 부족한 상태, 즉, 협기상태에서 운전되었기 때문에, DNPAOs가 활동할 수 있는 적합한 환경이 조성되지 않아 인 방출 및 섭취량이 모두 부족하였던 것으로 판단된다.

3.3. DNPAOs에 의한 인섭취 대 인방출 비

협기조에서의 인방출은 DNPAOs에 의한 것으로 간주되나, 무산소조에서의 인섭취는 DNPAOs뿐만 아니라, 탈질미생물, GAOs 등과 같은 미생물의 성장에 필요한 섭취량까지 포함한다. 본 논문에서는 미생물 성장을 위해 COD 1 mg 제거당 인 0.01 mg이 제거된다고 가정하고, 이를 고려한 인섭취와 인방출의 비를 Table 6에 나타내었다.

Fig. 4에는 각 case별 반응단계에 따른 P uptake/P release 비율을 나타내었는데, 인 섭취량은 세포 합성을 위한 인 소모량을 제외한 DNPAOs에 의해서 발생한 값이다. Fig. 4에서 case I, II, III, IV, V에서, P uptake/P release 비는 각각 0.09, 0.81, 1.05,

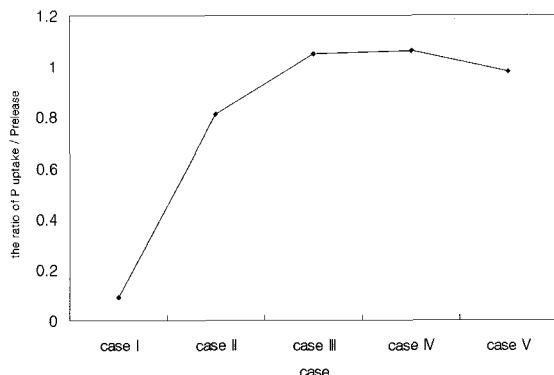


Fig. 4. The ratio of P uptake / P release in case I ~ IV.

1.06, 0.98로 나타났는데, 인방출량과 섭취량은 운전 조건에 따라 특정의 값을 가지지만, 전자수용체인 NO₃⁻ 량이 제한되면 이 비율도 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, NO₃⁻-N 공급이 충분한 case III, IV에서는 최대 비율을 나타내었는데, 약 1.05의 비율로 인 섭취가 일어나고 있었다. 즉, NO₃⁻-N 유입이 많은 경우, DNPAOs에 의한 과잉인섭취가 일어나고 있음을 보여주는 것이며, 세포합성에 의한 인 소모량까지 고려하면 인 제거효율은 더 증가할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 협기-무산소 공정에서 유입 NO₃⁻-N 량의 10, 15, 20, 30 mg/L로 변화 주었을 때와 외부 NO₃⁻-N의 주입대신 side stream에 호기조를 두어 실시한 실험을 하였을 때, DNPAOs에 의한 P_{release}/COD_{consumed}, P_{uptake}/NO₃⁻ removal와 P_{uptake}/P_{release}의 비율을 조사하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) case I~IV에서 DNPAOs에 의한 협기조에서의 P release/COD consumed의 비는 NO₃⁻-N 양이 충분할 경우 최대 0.27이며, 유입 NO₃⁻-N 양이 적

Table 6. The ratio of P uptake / P release

items	P released (mg/d)	net P uptaked (mg/d)	net COD consumed (mg/d)	P consumed by the growth of microbes (mg/d)	net P uptaked by DNPAO (mg/d)	P _{uptake} /P _{release} by DNPAO
case I	129.4	43.7	3147.1	31.5	12.2	0.09
case II	371.6	333.4	3108.0	31.1	302.3	0.81
case III	398.5	447.5	3025.2	30.3	417.2	1.05
case IV	375.5	428.6	3129.6	31.3	397.3	1.06
case V	93.6	129.9	2764.3	37.8 (include Ox removed)	92.1	0.98

을수록 감소하였다. 이는 유입 NO_3^- -N 양이 많을수록 슬러지 내의 DNPAOs의 활동이 높아지기 때문이며, COD 소모당 인방출 능력은 PAOs와 유사한 것으로 나타났다. 한편, 실폐수를 적용한 case V에서는 0.07로 호기조에서 무산소조로의 NO_3^- -N 양의 부족으로 인하여 혼기조내에서 DNPAOs의 활동보다 혼기성 미생물에 의한 COD 소모가 우세한 것으로 판단된다.

2) case I~IV에서 DNPAOs에 의한 P uptake/ NO_3^- -N removal은 전자수용체가 부족한 것으로 판단되는 case I을 제외한 나머지 경우 거의 일정한 비율을 가지는 것으로 나타났다. 즉, 무산소조에서 NO_3^- -N 제거량이 증가함에 따라 인섭취율도 증가하였는데, 그 범위는 1.86~1.97이었으며, 평균 1.93으로 나타났으며, 실폐수를 적용한 case V는 1.44의 값을 보이고 있다.

3) case I~IV에서 DNPAOs에 의한 P uptake/P release 비는 NO_3^- -N 공급이 충분한 case III, IV에서는 약 1.05의 비율로 인섭취가 일어나는 것으로 나타났으며, 외부 NO_3^- -N 공급없이 side stream에 호기조를 두어 NO_3^- -N 공급한 case V에서는 0.98로 무산소조로의 NO_3^- -N 공급이 부족으로 DNPAOs에 의한 과잉인섭취현상이 일어나지 않은 것으로 나타났다. 따라서, 외부 NO_3^- -N 공급없이 DNPAOs에 의한 인 제거 효율을 높이기 위해서는 호기조로의 유입수의 분할유입이나 반송량의 증가등의 공정 개선을 통하여 무산소조로의 NO_3^- -N 공급량을 증가가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) Randall C. W., Pattarkine V. M., McClintock S. A., 1992, Nitrification kinetics in single-sludge biological nutrient removal activated sludge systems, *Water Sci. Tech.*, 25, 195~214.
- 2) Zhi-rong Hu, Wentzel M. C., Ekama G. A., 2002, Anoxic growth of phosphate - accumulating organisms(PAOs) in biological nutrient removal activated sludge systems, *Wat. Res.*, 36, 4927~4937.
- 3) Vlakke G. J. F. M., Comeau Y., Oldham W. K., 1988, Biological phosphorus removal from wastewater with oxygen and nitrate in sequencing batch reactor, *Environ. Technol. Lett.*, 9, 791~796.
- 4) Kerr-Jepersen J. P., Henze M., 1993, Biological phosphorus uptake under anoxic and oxic conditions, *Wat. Res.*, 24, 617~624.
- 5) Kuba T., van Loosdrecht M. C. M., Brandse F. A., Heijnen J. J., 1997, Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT type wastewater treatment plants, *Wat. Res.*, 31, 777~786.
- 6) Murnleitner E., Kuba T., van Loosdrecht M. C. M., Heijnen J. J., 1997, An integrated metabolic model for the aerobic and denitrifying biological phosphorus removal, *Biotechnol. Bioeng.*, 54, 434~450.
- 7) Ahn J. W., Daidou T., Tsuneda S., Hirata A., 2001, Metabolic behavior of denitrifying phosphate-accumulating organisms under nitrate and nitrite electron acceptor conditions, *J. Biosci. Bioeng.*, 92, 442~446.
- 8) Copp J. B., Dold P. L., 1999, Influence of influent phosphorus concentration on an excess biological phosphorus removal sequencing batch reactor, *Wat. Res.(submitted)*.
- 9) Smolders G. J. F., van der Meij J., van Loosdrecht M. C. M., Heijnen J. J., 1994, Stoichiometric model of the aerobic metabolism of the biological phosphorous removal process, *Biotechnol. Bioeng.*, 44, 837~848.