

페타이어 담체를 이용한 파일럿 규모 유동상 생물막 공정에서 하수의 인제거에 미치는 운전인자 영향

박윤지 · 안종화[†] · 이찬기

강원대학교 지구·환경공학부

Effect of Operating Parameters on the Phosphorus Removal of Municipal Wastewater in a Pilot-scale Moving Bed Biofilm Reactor with Waste-tire Media

Woon-Ji Park · Johng-Hwa Ahn[†] · Chan-Ki Lee

Division of Environmental and Geosystem Engineering, Kangwon National University

(Received 20 May 2008, Accepted 10 June 2008)

Abstract

This work experimentally determined the effect of operating parameters such as temperature and solid retention time (SRT) on the phosphorus removal of municipal wastewater with waste-tire media. The experiments were carried out in pilot-scale moving bed biofilm reactor filled at a 0.15 filling ratio with the media. Total phosphorus (TP) removal efficiency was 91±5, 75±16, and 59±14% at the temperature of 9~10, 10~20, and 20~26°C, respectively. TP removal efficiency was 71±17, 74±16, 74±16, and 68±18% at the SRT of 3.5~5, 5~10, 10~15, and 15~20 days, respectively. At the nitrate concentration of 1~3, 3~6, and 6~9 mg/L, TP removal efficiency was 82±9, 68±18, 47±7%, respectively. The concentration of total phosphorus in the effluent was 0.1~1.8 (0.8±0.4) mg/L regardless of operating conditions, which meets Korean phosphorus limit value, 2 mg/L, for discharge into receiving waters.

keywords : Media, Nitrate, Phosphorus, Solid retention time, Temperature, Tire

1. 서론

질소와 인이 호수나 하천 등 수중 생태계 파괴현상인 부영화의 주요 원인으로 알려진 이후 수계로부터 이들 영양물질을 제거하기 위한 다각적인 연구가 진행되고 있다. 우리나라의 경우 1996년부터 총질소와 총인인 방류수 기준을 명시하고 규제하고 있으며, 2008년 1월 이후부터는 동절기를 제외한 계절에 총질소는 20 mg/L이하, 총인은 2 mg/L이하로 방류수 수질기준을 한층 강화하고 있다(김영철, 2007; 환경부, 2007). 그러나 질소화합물의 경우 질소고정 미생물이나 자연현상 등에 의해 대기 중의 질소로부터 고정화될 수 있음이 밝혀지면서 인산염의 제거가 부영양화 방지에 더 효과적인 것으로 평가되고 있다. 이에 생물학적 방법으로 안정적이고 효과적인 인 제거를 이루고자 많은 연구가 진행되어 왔다(민경국 등, 2000; 전체욱 등, 2000).

강화되고 있는 수질기준을 만족하기 위해서는 유기물 처리만을 목적으로 설계된 공정을 영양염류 처리공정으로 전환하는 것이 시급한 과제이다. 우리나라의 경우 부지면적이 적어 공정설계 시 짧은 수리학적체류시간(hydraulic retention time, HRT)을 선호한다. 또한 유입부하량 변동이 심한 경

우에도 처리가 원활하게 이루어지는 공정이 바람직하다. 이러한 생물학적 처리공정으로는 부유성장 미생물만을 이용하는 단일슬러지공정보다는 부유성장 및 부착성장 미생물을 동시에 이용하는 담체 등을 이용하는 하이브리드(hybrid)형 공정이 바람직하다. 부착성장 미생물을 이용할 경우 충격부하에 강하며 HRT가 짧은 경우에도 안정적으로 처리가 가능하다는 장점이 있다(김영규와 조일형, 2006; 류홍덕과 이상일, 2006; 정용준과 민경석, 2003).

우리나라의 급속한 산업발전과 함께 자동차 문화는 수십 년 전부터 발전함에 따라 발생하는 페타이어 양이 지속적으로 증가하는 추세이다. 페타이어는 매립, 소각, 단순이용 등으로 처리하여 왔지만 여러 가지 문제점을 야기하고 있다. 페타이어 재활용은 유효자원의 재이용과 폐기물 발생의 최소화를 통해 사회·환경적 문제점을 해결할 수 있는 최상의 방법이다. 재활용촉진에관한법률에 따라 환경부는 페타이어 재활용 의무량을 산정·고시하여 부가가치가 높은 재활용 제품, 신제품 개발 등을 통해 페타이어를 자원으로 활용하도록 유도하고 있다(이용두와 고득영, 2007; 임광희 등, 2001). 이에 따라 수처리 산업에서는 경제적 측면을 고려하여 유동상 페타이어 담체를 개발하고 있다(정용준 등, 2004).

국내에는 사계절이 뚜렷하여 여름철과 겨울철의 온도가 20°C이상 차이가 나므로 인처리공정에서 가장 중요하게 고

[†] To whom correspondence should be addressed.
johngghwa@kangwon.ac.kr

려해야 할 인자 중 하나가 온도에 따른 제거효율 변화이다 (민경국 등, 2000). 온도가 생물학적 인제거에 미치는 영향에 대해서는 상반된 의견이 있다. 온도가 20~37°C에서 인 제거효율이 향상된다는 연구결과도 있고, 5~15°C의 낮은 온도에서 인 제거효율이 향상된다는 보고도 있다(허형우 등, 2003). Enhanced biological phosphorus removal (EBPR) 공정에서 온도 영향을 연구하기 시작한 것은 비교적 최근이며 더 많은 연구가 필요한 실정이다(Choi et al., 1998; Mamais and Jenkins, 1992; Randall et al., 1992). 따라서, 본 연구에서는 페타이어를 담체로 이용한 파일럿 규모의 유동상 생물막공정을 장기간 운전하여 온도, 고형물체류시간(solid retention time, SRT), 질산성질소(NO₃⁻-N) 등 영향인자에 따른 인제거 특성을 살펴보았다.

2. 연구방법

2.1. 하수 및 페타이어 담체

하수는 경기도내 한 하수종말처리장 1차 침전지 유출수를 실험에 사용하였고(Table 1), 담체는 페타이어를 사용하

Table 1. Characteristics of the municipal wastewater in the influent and effluent

Parameter	Concentration (mg/L)	
	Influent	Effluent
pH ^a	6.3~7.7 (6.8±0.2)	-
SS	32~753 (130±115)	3~35 (9±6)
COD _{Cr}	80~464 (194±95)	8~70 (25±14)
SCOD _{Cr}	27~120 (70±22)	4~32 (13±7)
BOD	48~342 (119±62)	3~42 (12±9)
SBOD	16~78 (41±13)	1~13 (4±2)
TKN	9~46 (25±6)	0.2~15 (4±4)
NH ₄ ⁺ -N	4~35 (20±7)	0.01~11 (3±3)
NO ₃ ⁻ -N	0.1~2.0 (0.4±0.4)	1~11 (2±4)
TP	1.1~8.4 (3.0±2.0)	0.1~1.8 (0.8±0.4)
PO ₄ -P	0.2~2.7 (1.4±0.5)	0.0~1.5 (0.5±0.4)
COD _{Cr} /TP	30~137 (69±21)	6~236 (47±41)
BOD/TP	18~86 (42±15)	1~63 (9±8)

^aNo nuit

였다. 기존 논문을 살펴보면 담체 충전율은 재질, 밀도, 크기 등을 고려하여 10~70% 범위를 사용하고 있지만(김미화 등, 2001; 김백민, 2005; 최두형과 김환기, 2000), 많은 미생물 유지를 위해 과도하게 담체를 충전하면 반응기 실 유효체적이 감소되어 HRT가 짧아져 유출수질이 악화될 수 있다. 따라서 페타이어 담체특성, 유동성, 유입부하 등을 고려한 기존문헌(환경관리공단, 2001)을 바탕으로 호기조내 담체 충전율을 15%로 하였다.

2.2. 실험장치

실험장치는 혐기조, 무산소조, 호기조로 구성되어 있는 파일럿 규모의 Anaerobic/Anoxic/Oxic(A²/O)공법에 호기조 유출수의 용존산소 농도를 저감시켜 무산소조로의 반송 시 탈질 효율을 증가하기 위한 산소저감조를 추가한 것이 특징이다(Fig. 1). 원수저장탱크와 침전조 용량을 제외한 반응조 총 용량은 63.7 m³이며, 호기조에는 산소 공급과 담체 유동을 위해 산기관(2.3 m³/min, 3,500 mm of water, 4.6 kW)과 수중믹서(600 rpm, 0.75 kW)를 설치하였고 원통형 배플(baffle)을 설치하여 담체의 유출을 방지하였다(박운지 등, 2008).

반응조는 약 370일간 유입 유량 230 m³/d로 운전하였으며, 내부반송율은 유입 유량의 200%로, 슬러지 반송율은 mixed-liquor suspended solid(MLSS) 농도를 2,000~3,000 mg/L 범위로 유지하기 위해 유입 유량의 50%로 운전하였다. 잉여슬러지는 1일 2회씩 주기적으로 폐기하였으며, SRT는 4~21일, 반응조 수온은 9~26°C로 운전하였다(박운지 등, 2008).

2.3. 분석방법

수질분석항목은 MLSS, mixed-liquor volatile suspended solid(MLVSS), 화학적 산소요구량(chemical oxygen demand, COD_{Cr}), 생화학적 산소요구량(biochemical oxygen demand, BOD), total Kjeldahl nitrogen(TKN), NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, 총인(total phosphorus, TP), PO₄-P 등으로 Standard Methods (APHA et al., 2005)와 수질오염 공정시험방법(환경부, 2004)에 준하여 분석하였다. 또한, 인제거 효율과 인자간의

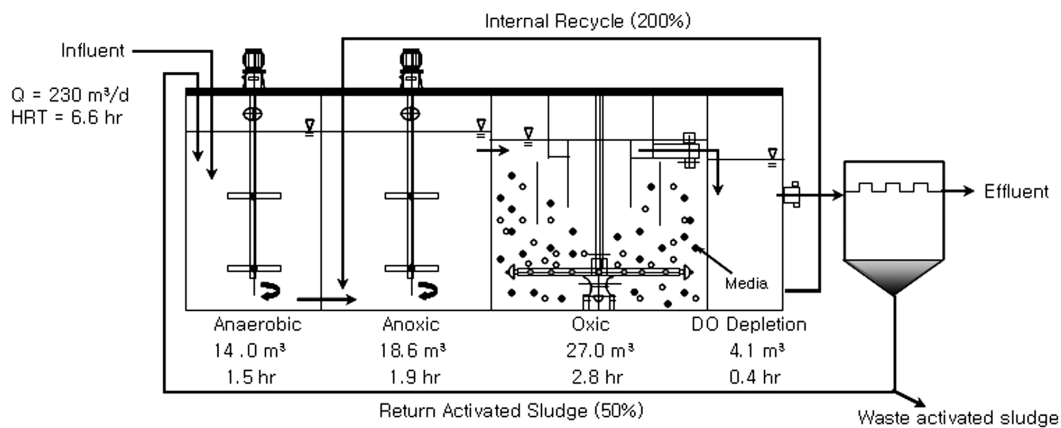


Fig. 1. Schematic diagram of the moving bed biofilm reactor.

상관관계를 분석하기 위해 통계프로그램 Minitab(Minitab Inc. Release 13)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 하수특성

파일럿 규모 반응조 운전 시 사용한 유입원수의 유기물 농도는 COD_{Cr}, BOD 경우 80~464(194±95) mg/L, 48~342(119±62) mg/L로 측정되었다(Table 1). 영양염류 농도 중 TP는 1.1~8.4(3.0±2.0) mg/L로 나타났다. 일반적으로 생물학적으로 분해가 용이한 하수의 COD_{Cr}/BOD 비가 2.0 이상이면 생물학적으로 산화되지 않는 유기물, 고분자화합물 등이 많이 포함되어 있다는 것을 의미하므로 생물학적 처리를 위해서는 폐수의 COD_{Cr}/BOD 비가 2.0 이하가 되어야 하며(Hao and Li, 1987), 도시하수의 COD_{Cr}/BOD 비는 1.9 정도이다(Eckenfelder and Ford, 1970). 본 실험에 사용한 유입수의 COD_{Cr}/BOD 비는 1.6±0.3으로 나타나 생물학적 처리가 용이함을 알 수 있다(박윤지 등, 2008). 유입수의 유기물과 인의 비가 높을수록 인제거효율이 높은 것으로 알려져 있는데(최용수 등, 1995), A²/O 공정으로 설계된 실처리장의 COD/TP 비와 BOD/TP 비의 범위는 34~43, 20~25로 제시되었다(고광백 등, 2004). 또한 유출수의 총인 농도를 1 mg/L 이하로 유지하기 위해서는 COD/TP, BOD/TP 비가 40이상(Randall et al., 1992), 20이상(Ekama et al., 1984)이어야 한다고 알려져 있다. 본 실험에 사용된 유입원수의 COD/TP 및 BOD/TP 비는 69±21 및 42±15로, 인제거를 위한 용이한 조건으로 나타났다. 본 연구에서의 COD/TP, BOD/TP 비는 기존문헌(고광백 등, 2004; 박종복과 최의소, 2003)에 제시된 값보다 다소 높게 나타났는데, 이러한 결과는 실제 처리시설로 유입되는 유입성상의 COD_{Cr} 및 TP 평균농도가 342±117 mg/L, 6.9±1.9 mg/L로 COD/TP 비가 50으로 높게 유지된 기존 논문(류홍덕과 이상일, 2006)과 유사하며, 최근 파일럿 규모의 A²/O공정에 의한 도시하수의 질소 및 인 제거를 연구한 논문(김영철, 2007)에서 BOD/TP 비가 30이상 유지되는 것과 유사한 것으로 최근에 분류식화 관거 정비가 잘 이루어져 유입하수내의 COD/TP, BOD/TP 비가 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

인제거에 적당한 pH의 범위는 6.6~7.4(Randall et al., 1992)로 제시하고 있는데 본 실험에 사용한 하수의 pH는 6.8±0.2로 적절한 것으로 생각된다. 따라서 본 실험에 사용한 하수내 유기물 농도, 인 농도, pH 등은 실험을 수행하는데 적합한 것으로 판단된다.

3.2. 인제거

3.2.1. 인제거효율

TP와 PO₄-P의 농도는 유입수에서 1.1~8.4(3.0±2.0) mg/L, 0.2~2.7(1.4±0.5) mg/L로 측정되었고, 유출수에서는 0.1~1.8(0.8±0.4) mg/L, 0.0~1.5(0.5±0.4) mg/L로 측정되었다(Table 1, Fig. 2). 환경부 하수도법(2007)에 따르면 2008년

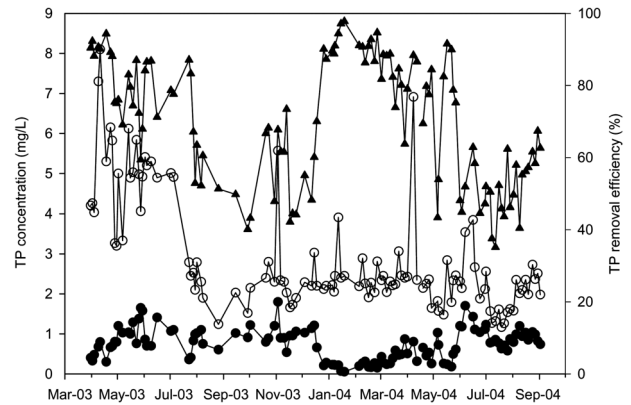


Fig. 2. Concentrations of total phosphorus in the influent (○) and effluent (●) and total phosphorus removal efficiency (▲).

1월 이후부터 동절기를 제외한 계절에 총인은 2 mg/L이하로 방류수 수질기준을 정하고 있는데, 본 연구에서는 그 기준을 만족함을 알 수 있다. 하지만 인제거효율은 35~98(70±17)%로 변동이 큰 것으로 나타났는데, 그 원인 중 하나는 인제거효율에 영향을 미치는 주요 인자인 BOD/TP 비가 일정하게 유지되지 않고 변하기 때문인 것으로 판단된다(Goto et al., 2002). 호기조내 담체에 부착된 미생물은 인제거 능력을 가지지 못하지만(Ouyang et al., 1999) 전체 공정에서 인제거효율은 기존논문(김영규와 조일형, 2006; 박태진 등, 2000)과 유사한 것으로 나타났다. 이는 호기조에 담체를 사용하는 경우 부유미생물만으로도 인제거가 가능하기 때문인 것으로 판단되며, 이러한 결과는 기존 문헌(김영규와 조일형, 2006; Ouyang et al., 1999)과도 일치하는 것으로 나타났다. 호기조에 담체를 사용한 경우가 담체를 사용하지 않은 경우보다 높은 인제거효율을 보고한 논문(박태진 등, 2000)도 있다.

3.2.2. 온도

페타이어 담체를 이용한 A²/O공정에서 하수처리 시 온도 범위가 9~10°C, 10~20°C, 20~26°C에서 인제거효율은 91±5%, 75±16%, 59±14%로 나타났다(Fig. 3). 이는 온도가 감소함에 따라 인제거효율이 증가하는 경향($p < 0.01$)을 보여주고 있으며, 온도가 20~26°C에서 9~10°C로 감소하였을 때 인제거효율은 30%이상 증가하였다. 또한 본 문헌에 구체적 자료는 제시하지 않았지만 15°C와 25°C에서 실험실 규모의 회분식 실험 결과 낮은 온도(15°C)에서 인제거효율이 높음을 알 수 있었다. 본 실험결과와 같이 실험규모의 반응조를 14°C와 22°C에서 운전한 결과 14°C에서 인제거효율이 높다는 보고(Ekama et al., 1984)와 14°C와 24°C에서 연구를 하여 14°C에서 인제거효율이 높음을 주장하는 보고(Siebritz, 1983)가 있다. 안승섭 등(2000)도 저온기일 때 인제거효율이 더 높은 것으로 보고하였다. 이는 인제거 미생물은 저온, 중온, 고온에 적응하는 등 매우 다양한 종으로 구성되어 있는데(Randall et al., 1992), 저온에서 잘 자라는 저온성 인제거미생물이 중온에서 잘 자라는 중온성

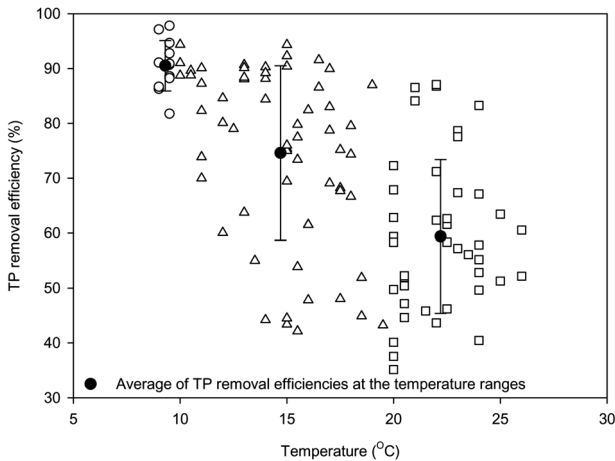


Fig. 3. Total phosphorus removal efficiency with the temperature of 9~10 (○), 10~20 (△), and 20~26 (□)°C.

인제거미생물보다 인제거에 효율적이기 때문인 것으로 추정된다.

이에 반해, 10~28°C 온도범위에서 인제거효율은 전 온도범위에서 일정하다는 보고(박정수 등, 2002) 등 온도가 인제거효율에 큰 영향을 미치지 않는다는 보고(Barnard, 1983; Choi et al., 1998; Florentz et al., 1987)도 있다. 또한 높은 온도에서 인제거가 높다고 보고한 논문(민경국 등, 2000; 허형우 등, 2003; Mamais and Jenkins, 1992; McClintock et al., 1993)도 다수 있어 아직까지 온도와 인제거효율과의 관계는 불명확하여 보다 심층적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

일반적으로 혐기조에서는 유기물이 혐기성 상태에서 인제거미생물 세포내에 흡수되며 필요 에너지를 얻기 위해 인을 방출하게 되므로 PO₄-P는 유입된 후 혐기조에서 증가하게 되고, 호기조에서는 혐기조에서 방출한 양 이상의 PO₄-P가 미생물 체내에 과잉으로 섭취되므로 감소하게 된다(Chuang and Ouyang, 2000). 본 실험에서도 온도에 관계없이 각 반응조에 따른 PO₄-P 농도변화는 혐기조에서 증가하고 호기조에서 감소하여 이론적인 인의 거동현상과 일치하는 것으로 나타났다(Fig. 4). 온도가 10°C이하로 낮아졌

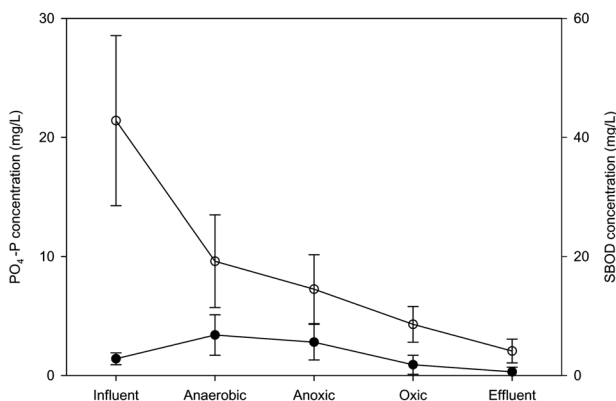


Fig. 4. Soluble biochemical oxygen demand (○) and phosphate (●) concentrations in the influent, anaerobic, anoxic, oxalic, and effluent zones.

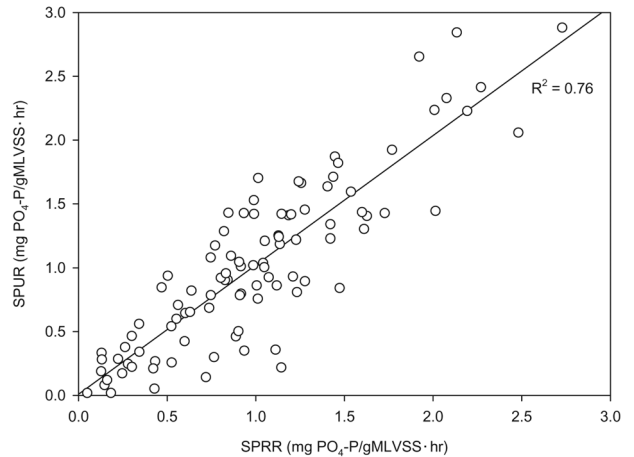


Fig. 5. Specific phosphate uptake rate in the oxic zone with specific phosphate release rate in the anaerobic zone.

을 때도 인의 방출과 섭취에는 큰 문제가 없는 것으로 나타났다.

온도 범위가 9~26°C에서 혐기조에서 인방출율(specific phosphate release rate, SPRR)과 호기조에서 인섭취율(specific phosphate uptake rate, SPUR) 모두 1.0±0.7 mg PO₄-P/g MLVSS · hr로 측정되었고, 기존 문헌(Helness and Odegaard, 1999; Pastorelli et al., 1999)에 보고된 바와 같이 혐기조에서 SPRR이 높을수록 호기조에서 SPUR이 높음을 알 수 있었다(Fig. 5). 이 수치는 기존 문헌(박정수 등, 2002; 정용준과 민경석, 2003; Choi et al., 1998)과 큰 차이는 보이지 않았다.

3.2.3. 고형물체류시간

페타이어 담체를 이용한 A²/O공정에서 하수처리 시 SRT가 3.5~5일, 5~10일, 10~15일, 15~20일에서 인제거효율은 71±17%, 74±16%, 74±16%, 68±18%(Fig. 6)로, SRT 변화에 따른 인제거효율 변화가 없었다($p>0.05$). 본 실험결과와 같이 SRT는 실질적으로 인 제거에 큰 영향을 미치지 않는다고 주장한 문헌(Barnard, 1983; Randall et al., 1992)이 있는 반면, Rodrigo 등(1996)은 SRT가 약 10일에서 인의 방출과 섭취가 잘 이루어진다고 보고하였으며, 5일 이하에서는 인제거가 잘 이루어지지 않는다고 하였다. SRT가 3~28일에서 20일 이상에서는 인의 제거효율이 급격히 떨어지는 경향을 보인 경우도 있다(김병균 등, 2003). US EPA(1987)에서는 SRT가 증가하면 슬러지의 증식이 낮아지게 되어 인제거효율이 저하하게 된다고 주장하였다. Wenzel 등(1991)의 연구에서는 내생분해율이 낮은 poly-p 박테리아는 SRT가 길수록 시스템 내에서 우점화되어 슬러지 내의 높은 인 함유량을 얻을 수 있어 인 제거효율이 향상된다고 주장하였으며, 신응배 등(2001)은 SRT 15, 20, 30일에서 SRT 20일에서 인제거 효율이 가장 높다고 발표하였다. 또한 인제거 미생물은 성장률이 낮아 SRT를 최소 며칠 이상 유지하여야 인제거율을 극대화할 수 있다는 보고(최용수 등, 1995)가 있으며, 온도가 10°C, SRT가 5일인 조건에서

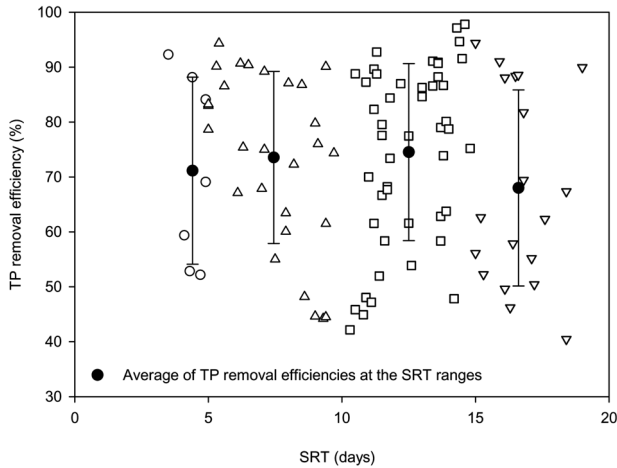


Fig. 6. Total phosphorus removal efficiency with the solid retention time of 3.5~5 (○), 5~10 (△), 10~15 (□), and 15~20 (▽) days.

는 생물학적 인제거가 불가능하다는 보고(McClintock et al., 1993)도 있다. 따라서 생물학적 하·폐수 처리공정에서 인제거와 SRT의 상관관계는 아직까지 논쟁중이라 할 수 있으며, SRT는 주로 잉여슬러지의 폐기에 의해 조절되고 이는 food/microorganism (F/M) 비, MLSS, HRT, biomass의 성장률과 사멸율 등의 여러 가지 인자와 관련되어 있어 인제거에 미치는 영향을 정확하게 판단하기 어려울 것으로 생각된다(신응배 등, 2001).

3.2.4. 질산성질소

페타이어 담체를 이용한 A²O공정에서 하수처리 시 최종 유출수의 NO₃⁻-N 농도가 1~3 mg/L, 3~6 mg/L, 6~9 mg/L에서 인제거효율은 82±9%, 68±18%, 47±7%로 나타났다(Fig. 7). 이는 최종유출수의 NO₃⁻-N 농도가 높을수록 인제거효율은 감소하는 경향(p<0.01)을 보여주고 있으며, NO₃⁻-N 농도가 0~3 mg/L에서 6~9 mg/L로 증가하였을 때 인제거효율은 약 35% 감소하였다. 이는 높은 농도의

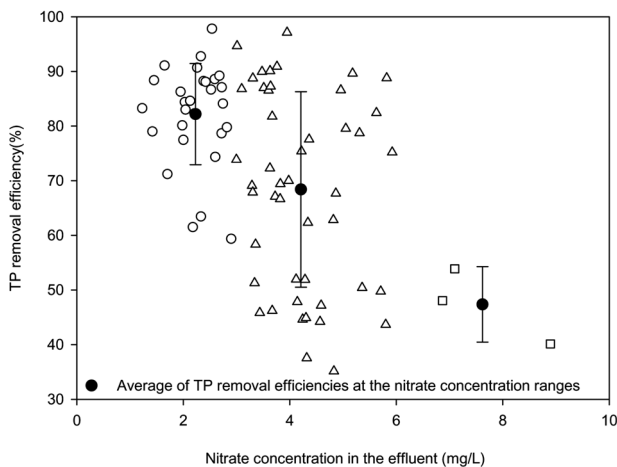


Fig. 7. Total phosphorus removal efficiency with the nitrate concentration of 1~3 (○), 3~6 (△), and 6~9 (□) mg/L in the effluent.

NO₃⁻-N을 가진 반송수는 인제거효율에 역효과를 나타낼 수 있다는 보고(고광백 등, 2004)와 유사한 결과이다.

4. 결론

온도 범위가 9~26°C에서 온도가 감소함에 따라 인제거 효율이 증가되는 것으로 조사되어 온도가 생물학적 처리공정의 인제거에 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 또한 최종유출수의 NO₃⁻-N 농도 범위가 1~9 mg/L에서 NO₃⁻-N 농도가 높을수록 인제거효율은 감소하는 경향을 보여 반송수가 인제거효율에 영향을 미침을 알 수 있었다. 이에 반해 SRT 범위가 3.5~20일에서 SRT와 인제거효율은 무관한 것으로 조사되었다. 이러한 운전조건에 관계없이 페타이어 담체를 이용한 A²O공정에서 하수처리 시 최종유출수의 총인 농도는 2 mg/L이하로 환경부 하수도법 기준에 적합한 것으로 나타났다.

사 사

본 논문은 포스코건설에서 발주한 연구과제를 바탕으로 작성하였으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

고광백, 김영관, 유주환, 임재명, 한무영, 문병현, 민경석, 안영호, 유규선, 이병현, 이상호, 이인형, 임봉수(2004). *폐수처리공학 II*, 동화기술.

김미화, 김영규, 박태주(2001). 기존 처리장의 BNR 공정으로 시설개조에 따른 유기물농도가 낮은 하수내 질소제거시 호기성 반응조의 NH₄⁺-N 최적 표면적 부하율과 매디아 층진율. *대한환경공학회지*, **23**(4), pp. 613-621.

김백민(2005). 장기 SRT로 운전될 때 매디아 형태에 따른 A²O 공정의 영양염류 제거연구. 석사학위논문, 창원대학교.

김병균, 서인석, 홍성택, 김도균, 천상욱(2003). KSDeNTM 공정에서 C/P비, SRT, 온도 및 질산염 농도가 인 제거에 미치는 영향. *상하수도학회지*, **17**(1), pp. 79-86.

김영규, 조일형(2006). 미생물 코팅 담체를 이용한 하수의 질소·인 제거에 관한 연구. *한국환경보건학회지*, **32**(1), pp. 27-35.

김영철(2007). 파이롯트 규모의 BNR공법에 의한 도시하수의 질소 및 인 제거. *상하수도학회지*, **21**(5), pp. 589-599.

류흥덕, 이상일(2006). 수리학적 체류시간에 따른 부유성장 미생물을 이용한 공정과 하이브리드 공정의 유기물, 질소 및 인 제거 특성 비교. *대한환경공학회지*, **28**(1), pp. 15-25.

민경국, 원성연, 박승국, 이상일(2000). 생물학적 인 방출시 유기물 및 슬러지 적용에 따른 온도의 영향. *대한환경공학회지*, **22**(7), pp. 1205-1212.

박윤지, 안종화, 이찬기(2008). 페타이어 담체를 이용한 파이롯트 규모 유동상 생물막 공정에서 하수의 질소제거에 미치는 온도 영향. *대한환경공학회지*, **30**(5), pp. 507-516.

박정수, 유대환, 최의소, 박종복(2002). 생물학적 영양소 제

- 거공정에서 PAO와 dPAO에 대한 온도 영향. *대한토목공학회지*, **22**(1-B), pp. 91-100.
- 박종복, 최의소(2003). 다단으로 구성된 하수고도처리공정에서 원수 분배율에 따른 질소·인 제거 특성. *대한환경공학회지*, **25**(5), pp. 624-631.
- 박태진, 이정민, 송경석, 조일형, 김영규, 정문호(2000). A₂O 공정에서의 섬모상 담체 사용 유무에 따른 하수의 질소·인 제거에 관한 연구. *한국환경위생학회지*, **26**(3), pp. 69-75.
- 신응배, 박주섭, 이두진, 주봉현(2001). 간헐폭기를 이용한 고도처리공정에서 SRT와 인제거의 상관관계. *대한환경공학회지*, **23**(2), pp. 251-260.
- 안승섭, 박노삼, 이수식, 이관영, 박상현(2000). 영양염류 제거를 위한 생물막 공정의 적용에 관한 연구. *한국환경과학회지*, **9**(5), pp. 415-422.
- 이용두, 고득영(2007). 페타이어 표면에 형성되는 Functional Group을 이용한 중금속 제거에 관한 연구. *대한환경공학회지*, **29**(3), pp. 357-364.
- 임광희, 정용준, 박이순, 민경석(2001). 폐수처리용 페타이어 담체의 제조 및 특성. *화학공학회지*, **39**(5), pp. 600-606.
- 전체욱, 이대성, 박종문(2000). 연속 회분식 반응기에서 활성 슬러지의 생물학적 인 제거 특성. *대한환경공학회지*, **22**(8), pp. 1535-1544.
- 정용준, 민경석(2003). 활성탄 표면개질 유동상 페타이어담체가 충전된 A²O공정의 하수처리 특성. *대한환경공학회지*, **25**(10), pp. 1299-1304.
- 정용준, 민경석, 임광희(2004). 천연 제올라이트가 함유된 유동상 페타이어담체의 질소 제거 효율 향상. *대한환경공학회지*, **26**(7), pp. 804-809.
- 최두형, 김환기(2000). 선회류 생물학적 유동상의 최적 미디어 충전량에 관한 연구. *대한환경공학회지*, **22**(2), pp. 331-340.
- 최용수, 신응배, 이영대(1995). 생물학적 신공정에 의한 유기물과 인 제거. *한국수질보전학회지*, **11**(3), pp. 201-210.
- 허형우, 신경숙, 박승국, 박종부, 최은주, 강호(2003). 혐기조의 인 방출 최적화를 위한 영향인자 평가. *대한환경공학회지*, **25**(11), pp. 1382-1387.
- 환경관리공단(2001). *페타이어담체(Bio-SAC)를 이용한 유동상 생물막법 영양염류 제거기술*. 환경기술검증보고서.
- 환경부(2004). *수질오염공정시험법*.
- 환경부(2007). *하수도법*.
- APHA, AWWA, WEF (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21th edition, Washington DC.
- Barnard, J. L. (1983). Design considerations regarding phosphate removal in activated sludge plants. *Water Sci. Technol.*, **15**(3-4), pp. 319-328.
- Choi, E. S., Rhu, D. W., Yun, Z. W. and Lee, E. S. (1998). Temperature effects on biological nutrient removal system with weak municipal wastewater. *Water Sci. Technol.*, **37**(9), pp. 219-222.
- Chuang, S. H. and Ouyang, C. F. (2000). The biomass fractions of heterotrophs and phosphate-accumulating organisms in a nitrogen and phosphorus removal system. *Water Res.*, **34**(8), pp. 2283-2290.
- Eckenfelder, W. W. Jr. and Ford, D. L. (1970). *Water Pollution Control*, Pemberton Press, New York.
- Ekama, G. A., Marais, G. v. R. and Siebritz, I. P. (1984). *Theory, design, & operation of nutrient removal activated sludge processes*. Water Research Commission, Pretoria, South Africa.
- Florentz, M., Caille, D., Bourdon, F. and Sibony, J. (1987). Biological phosphorus removal in France. *Water Sci. Technol.*, **19**(4), pp. 1171-1173.
- Goto, M., Kuribayashi, S., Nonaka, Y. and Yamazaki, M. (2002). Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus with A²O process using immobilized media. *Water Sci. Technol.*, **46**(11-12), pp. 113-119.
- Hao, O. J. and Li, C. T. (1987). Effect of slowly biodegradable organics on kinetic coefficients. *J. Environ. Eng.*, **113**(1), pp. 147-154.
- Helness, H. and Odegaard, H. (1999). Biological phosphorus removal in a sequencing batch moving bed biofilm reactor. *Water Sci. Technol.*, **40**(4-5), pp. 161-168.
- Mamais, D. and Jenkins, D. (1992). The effect of MCRT and temperature on enhanced biological phosphorus removal. *Water Sci. Technol.*, **26**(5-6), pp. 955-965.
- McClintock, S. A., Randall, C. W. and Pattarkine, V. M. (1993). Effects of temperature and mean cell residence time on biological nutrient removal processes. *Water Environ. Res.*, **60**(5), pp. 110-118.
- Ouyang, C. F., Chuang, S. H. and Su, J. L. (1999). Nitrogen and phosphorus removal in a combined activated sludge - RBC process. *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A)*, **23**(2), pp. 181-204.
- Pastorelli, G., Canziani, R., Pedrazzi, L. and Rozzi, A. (1999). Phosphorus and nitrogen removal in moving-bed sequencing batch biofilm reactors. *Water Sci. Technol.*, **40**(4-5), pp. 169-176.
- Randall, C. W., Barnard, J. L. and Stensel, H. D. (1992). *Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal*. Technomic Publishing Co., Inc., Pennsylvania, USA.
- Rodrigo, M. A., Seco, A., Penya-roja, J. M. and Ferrer, J. (1996). Influence of sludge age on enhanced P removal in biological systems. *Water Sci. Technol.*, **34**(1-2), pp. 41-48.
- Siebritz, I. P. (1983). Parametric model for biological excess phosphorus removal. *Water Sci. Technol.*, **15**(3/4), pp. 127-152.
- US EPA (1987). *Design manual: phosphorus removal*, EPA/625/1-87/001.
- Wenzel, M. C., Ekama, G. A. and Marais, G. v. R. (1991). Kinetics of nitrification denitrification biological excess phosphorus removal systems-a review. *Water Sci. Technol.*, **23**(4-6), pp. 555-565.