

생물학적 인 방출시 유기물 및 질산염에 대한 영향

민경국 · 원성연 · 이상일

충북대학교 환경공학과

(1999년 8월 4일 접수, 1999년 10월 8일 채택)

The Effect of Substrates and Nitrate on Biological Phosphorus Release

Kyung-Kook Min · Seung-Yeon Weon · Sang-Il Lee

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

ABSTRACT

In this study, effects of substrates and nitrate on biological phosphorus release in EBPR(enhanced biological phosphorus removal) process were examined using batch test apparatus at anaerobic conditions. The sludge used in this experiments was taken from SBR(sequencing batch reactor) treating swine wastewater at aeration period.

Phosphorus release rates obtained with substrates of FSW(fermented swine wastewater), acetate, propionate, domestic wastewater and methanol were 6.19, 5.99, 1.52, 1.2 and 1.03 mgP/gVSS · hr, respectively. Those observed with acetate and FSW were 4~5 times greater than those with propionate, methanol and domestic wastewater. Therefore phosphorus release rates were significantly affected by type of substrate added at anaerobic condition.

Phosphorus release was greatly affected by concentration of nitrate in anoxic condition. Comparing to acetate, propionate and FSW, phosphorus release was observed after almost completely depletion of nitrate concentration with methanol and domestic wastewater added as substrate. In the cases supplied with acetate, propionate and FSW, phosphorus release rates were less influenced by a nitrate concentration than those with methanol and domestic wastewater.

요 약 문

본 연구에서는 EBPR(enhanced biological phosphorus removal) 공정에서 인 방출에 대한 유기물 및 질산염의 영향을 혐기성 조건에서 회분식 실험으로 관찰하였다. 본 실험에서 사용한 슬러지는 축산폐수를 처리하기 위한 SBR(sequencing batch reactor) 공정의 호기성 상태에서 채취하였다.

유기물인 FSW(fermented swine wastewater), acetate, propionate, 도시하수 및 methanol의 인 방출 속도는 각각 6.19, 5.99, 1.52, 1.2 및 1.03 mgP/gVSS · hr이었다. Acetate 및 FSW의 인 방출 속도는 propionate, methanol 및 도시하수보다 4~5배 더 크게 관찰되었다. 따라서 혐기성 조건에서 인 방출 속도는 주입되는 유기물의 종류에 많은 영향을 받는다.

혐기성 조건에서 인 방출은 질산염의 농도에 의해 커다란 영향을 받았다. Acetate, propionate 및 FSW와 비교하여, 유기물로서 주입된 methanol 및 도시하수인 경우 인 방출은 질산염이 거의 완전히 제거된 후 관찰되었다. Acetate, propionate 및 FSW가 주입된 경우의 인 방출 속도는 methanol 및 도시하수가 주입되었을 때보다 질산염의 영향을 더 적게 받았다.

주제어 : 생물학적 인 방출, 인 방출 속도, 질산염

1. 서 론

축산폐수 및 산업폐수 중 유기물, 질소 및 인을 고 농도로 함유하고 있는 경우는 생물학적 처리시 인의 처리에 많은 어려움이 있는 실정이다. 이는 인 제거 시 유기물 및 질산염 등이 영향을 주기 때문이며 이들 영향 인자에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 이들 영향 인자들 중에서 유기물의 영향은 인 제거 미생물에 의한 인 방출이 일어나는 혐기성 단계에서 인 제거 미생물의 세포내로 유기물의 흡수 및 저장되는 기작이 유기물 종류에 따라 다르며, 이에 따른 인의 방출 속도도 다르게 나타난다. 인 방출이 쉽게 진행되기 위해 외부 유기탄소원으로 acetate를 주입한 경우에는 인 제거 미생물이 세포 내로 흡수한 acetate를 acetyl-CoA로 만들어 PHB (poly- β -hydroxyl butyrate)로 전환시키며 이때 세포내 인을 세포 외로 방출한다.¹⁻³⁾ 이때 사용되는 에너지는 세포 내의 poly-P 분해에 의해 공급받는다. 하지만, SCFAs(short chain fatty acids) 이외의 유기물은 acetate와 다른 기작인 임의성 타가영양 미생물들이 SCFAs로 전환하면 이를 인 제거 미생물이 섭취하는 것으로 알려지고 있다.⁴⁾ 혐기성 조건하의 인 방출에 있어서 환원력의 생성을 위해 제공되는 전자

의 생성은 glucose인 경우 TCA 순환에 의해 이루어진다고 제안했다.²⁾ 그 밖의 유기물에서는 인 방출 기작이 환원력에 이용되는 전자들의 발생에 의해서 다르다고 제안했다.⁵⁾

몇몇 연구자들에 의해 질산염이 존재할 때 생물학적 인 제거의 억제에 대한 연구가 보고되었다.⁷⁻¹³⁾ EBPR(enhanced biological phosphorus removal) 시스템에서 질산염 영향에 대해서는 아직 일치하지 않고 있지만, 혐기성 반응조에서는 질산염의 유입이 인 제거 공정에 결정적인 역할을 한다고 받아들여지고 있다. Hanscoet와 Florentz¹⁴⁾는 SCFAs가 주입되고 질산염이 존재하는 anoxic 조건에서 초기 질산염 농도가 높음에 따라 인의 방출 속도는 작아져서 전체적인 인의 방출량이 감소함을 관찰하였다. 이와 같이 초기 질산염의 농도가 높음에 따라 인 방출의 감소는 탈질산화 미생물에 의해 소비되는 유기물량이 많아져서 인 제거 미생물들이 인 방출을 위해 유기물을 이용하지 못했기 때문이라고 설명하였다. Gerber 등¹⁵⁾은 질산염과 12가지 유기물을 각각 주입하여 인 방출을 관찰하는 회분식 실험을 하였다. 12가지 유기물 중 3가지인 acetate, propionate 및 formate는 질산염이 존재시 인의 방출이 일어났다. 특히, acetate 및 propionate는 초기에 인의 방출

이 빠르게 일어남과 동시에, 질산염과 유기물이 빠르게 소비되었다. Acetate, propionate 및 formate를 제외한 다른 유기물들은 질산염이 소비될 때까지 인의 방출이 일어나지 않았고 완전한 탈질산화가 이루어진 후, 각각 유기물 종류에 따라 서로 다른 속도로 인 방출이 이루어졌다. 또한, 유기물인 acetate가 완전히 소모된 후 질산염이 존재할 때는 인의 섭취가 느린 속도로 일어남을 관찰하였다. 따라서, Gerber 등¹⁵⁾은 초기에 빠른 인의 방출은 혐기성 조건의 존재보다는 오히려 유기물의 특성에 의존한다고 결론내렸다.

본 연구에서는 혐기성 조건에서 acetate, propionate 및 methanol을 주입하여 각각 유기물의 인 방출 속도를 정량적으로 산출하고 질산염의 영향을 관찰하여 아직까지 미흡한 유기물에 대한 연구 결과를 보충하였다. 또한, 일반 하수 처리장에서 처리되고 있는 도시하수를 주입하여 인 방출 속도 및 질산염의 영향을 관찰하고 이를 SCFAs와 상호 비교함과 동시에 인 제거를 위한 실제 처리 공정의 운영시 기초 자료를 제공하고자 하였다. 그리고 FSW (fermented swine wastewater)를 주입하여 인 방출 속도를 정량적으로 산출하고 질산염의 영향을 관찰하여 SCFAs와 상호 비교함으로써 유기물이 부족한 영양염류 처리 공정의 인 처리시 외부 탄소원의 대체 가능성을 검토하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 연구에서 사용한 슬러지는 운영 방식이 fill (0.1hr)-aerobic(13hr)-anaerobic(7hr)-aerobic (3hr)-settle(0.83hr)-draw(0.07hr)인 SBR 공정에서 채취하였다. 이때, SBR 공정의 슬러지 일령(SRT)은 20일, 수리학적 체류시간(HRT)은 48시간으로 운영하였다. 유입수는 양돈분을 일정량 희석하여 1일 침전시킨 후 상등수를 TCOD_{Cr} 3,000 mg/L이 되도록 재희석 후 이용하였다. SBR 운영시 인 제거 미생물의 배양 및 탈질산화를 유도하기 위해 비폭기 단계가 시작되는 시점에서 외부 탄소원으로

양돈폐수를 주입하여 운영하였다. 이때 주입량은 주입후 반응조내의 TCOD_{Cr} 농도가 300 mg/L가 되게 하였다. 반응조 혼합을 위하여 교반판(paddle)을 설치하였으며, 폭기 및 비폭기 시간은 시간제어기(time controller)를 공기공급장치(air blower)에 부착하여 조절하였다.

인 방출시 유기물의 영향과 질산염의 영향을 관찰하기 위한 회분식 실험에서 유기물인 acetate (CH₃COO⁻), propionate(CH₃CH₂COO⁻) 및 methanol(CH₃OH)은 COD_{Cr} 농도 10,000 mg/L인 stock solution을 제조하여 이용하였고, FSW는 양돈 폐수를 10일간 혐기성 발효시킨 후 원심 분리하여 상등수를 이용하였다. 도시하수는 C시 하수처리장의 유입수를 1~2시간 침전시켜 침전성 고형 물질을 제거시킨 후 상등수를 이용하였다. 이때, 도시하수 원수의 TCOD_{Cr} 및 SCOD_{Cr} 농도는 각각 171.2 및 67 mg/L이었고 T-P 및 TKN 농도는 각각 4.2 및 37.8 mg/L이었다.

2.2. 실험방법

본 연구에 이용한 반응조는 5개의 회분식 반응조 (Fig. 1)로 용량은 각각 700 mL이었다. 각각의 반응조는 혐기성 조건을 유지시켜 주기 위하여 완전히 밀폐한 상태에서 질소 가스를 주입하여 산소가 녹아 들어가지 못하도록 하였다. 또한 magnetic stirrer를 이용하여 반응조 내의 교반이 원활하도록 하였다. 이용된 슬러지는 SBR 공정의 첫 번째 폭기 단계의 마지막 시간에 채취하여 5시간 폭기시켜 잔류 유기물의 영향을 최대한 줄였으며, 유기물로 도시하수를 주입한 반응조에는 슬러지를 농축시켜 100 mL 주입하였고 나머지 4개의 반응조에는 슬러지를 각각 500 mL씩 주입하였다. 이때 반응조의

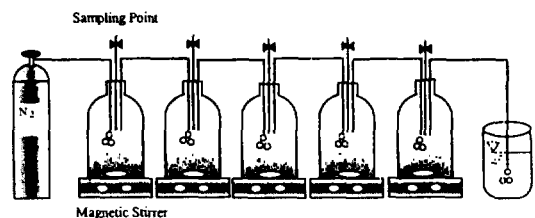


Fig. 1. Experimental apparatus for phosphorus release.

MLVSS 농도는 3000~4000 mg/L이었다. 또한 회분식 실험에 이용한 슬러지에 존재하는 인 제거 미생물의 세포 내에는 인이 다량 함유되어 있었다. 이용한 각각 반응조에는 외부 탄소원인 acetate, propionate, methanol, FSW 및 도시하수를 주입하였다. 이때 acetate, propionate, methanol 및 FSW는 반응조내에 SCOD_{Cr} 농도 300 mg/L가 되도록 주입하였고 도시하수인 경우에는 도시하수 원수를 400 mL 주입하여 초기 반응조내의 TCOD_{Cr} 농도가 137 mg/L이었다. 또한 도시하수인 경우에는 KNO₃를 이용하여 초기 반응조 내의 질산염 농도를 약 16 mgNO₃⁻-N/L가 되도록 하여 다른 유기물과 초기 총질산염을 동일하게 하였다. 본 실험은 상온(23℃)에서 행하였으며 주입한 유기물의 pH는 중성으로 맞추었다.

이상의 실험에서 시료 채취는 유기물을 주입 후 일정 시간 간격으로 채취하여 0.45 μm membrane filter로 여과하여 filtrate를 이용하여 SCOD_{Cr} (5220-COD-C & D, HACH), PO₄³⁻-P(4500-P-E), NO₂⁻-N, NO₃⁻-N을 측정하였다. 그 밖의 측정 항목은 MLSS, MLVSS, TCOD_{Cr}(5220-COD-C & D, HACH) 등이었다. 위의 측정 항목들은 모두 Standard Methods(1992)와 HACH DR-4000U에 의거하여 측정하였으며, 질산염은 UV spectrophotometer(HACH DR-4000U)와 Ion Chromatography를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 인 방출시 유기물의 영향

유기물의 영향을 관찰하기 위해 혐기성 조건에서 시간에 따른 인의 농도 변화를 관찰하였다. Acetate 및 FSW를 주입하였을 경우에는 초기 인 방출이 다른 유기물들을 주입했을 때와 비교하여 매우 빠르게 진행되었다(Fig. 2). FSW는 양돈폐수가 발효되어 생성된 휘발성 지방산으로 acetate가 가장 많고 propionate, butyrate, 각종 alcohol 및 glycerol 등이 상당량 들어 있다.¹⁶⁾ 따라서 FSW를 주입했을 경우, 초기 0.5시간 동안 인 방출은 인 제거 미생물

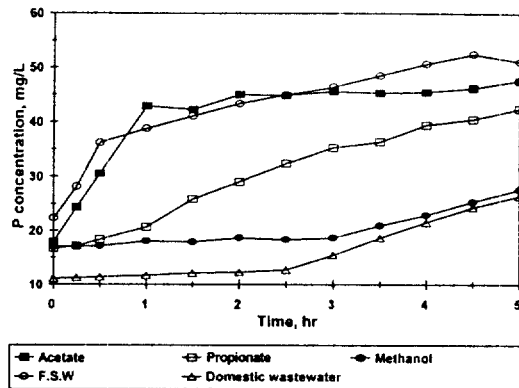


Fig. 2. The effect of substrates on phosphorus release under anaerobic condition (FSW : Fermented Swine Wastewater).

에 의해 쉽게 이용되는 acetate 성분에 의해 이루어진 것으로 사료되므로 acetate를 주입했을 때와 비슷한 경향을 나타냈으며, 그후 인 방출은 propionate를 주입했을 경우와 비슷한 인 방출 속도를 나타내고 있어 propionate와 같은 성분에 의해 이루어진 것으로 사료된다. 주입된 유기물이 propionate인 경우에는 실험을 실시한 전체 시간(5 hr)에 걸쳐서 거의 일정한 방출 속도를 나타냈다. Methanol 및 도시하수가 주입된 경우에는 초기에는 일정한 시간이 경과한 후부터 인의 방출이 이루어졌다. 이들 각각 주입된 유기물 종류에 따라 단위 미생물 무게당 인 방출 속도를 나타내면 Table 1과 같다. Acetate 및 FSW인 경우에는 초기 인의 방출이 잘 일어났을 때의 기울기를 가지고 인 방출 속도를 구했으며 이때의 속도는 acetate 및 FSW인 경우, 각각 5.99 및 6.19 mgP/gVSS · hr이었다. Iwema와 Meunier¹⁷⁾가 질산염이 없는 순혐기성 조건에서 acetic acid를 주입하여 인 방출 속도를 구한 값은 9.6 mgP/gMLSS · hr이었으며, 질산염을 5~25 mgN/L로 변화시키면서 인 방출 속도를 구한 값은 7.2~11.7 mgP/gMLSS · hr이었다. 본 실험에서 구한 값이 Iwema와 Meunier¹⁷⁾이 구한 값보다 작게 관찰되었는데, 이는 실험 조건(유기물, 온도 및 pH 등), 공정 운영 조건 및 슬러지에 존재하는 인 제거 미생물 종 및 양의 차이에 의해 기인된 것으로 사료된다. 본 연구에서 FSW의 인 방출 속도는

Table 1. Phosphorus release rates and NO_x-N denitrification rates on substrates

Substrates	PO ₄ ³⁻ -P release rates (mgP/gVSS · hr)	Denitrification rates (mgNO _x -N/gVSS · hr)
Acetate	5.99	9.21
Propionate	1.52	5.14
Methanol	1.03	1.41
FSW*	6.19	11.80
Domestic Wastewater	1.20	2.09

*FSW: Fermented Swine Wastewater

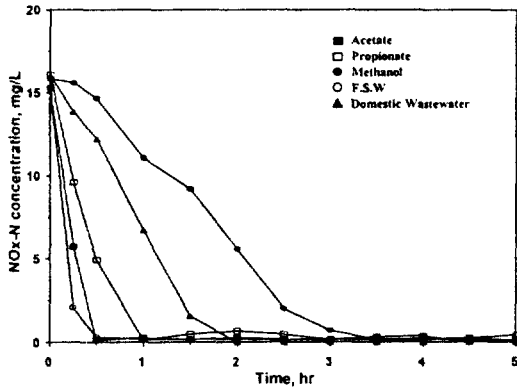


Fig. 3. NO_x-N concentrations on substrates under anaerobic conditions (FSW : Fermented Swine Wastewater).

acetate와 비교하여 조금 크게 관찰되었으므로 유기물이 부족한 영양염류 처리 공정에서 외부 탄소원으로 FSW를 적당량 주입하여 인 처리 효율을 증진시킬 수 있을 것으로 사료된다. Methanol 및 도시하수인 경우에는 일정 시간후 인의 방출이 일어났을 때의 기울기를 가지고 속도를 구한 값은 각각 1.03 및 1.2 mgP/gVSS · hr이었다. Propionate인 경우에는 전체적으로 인의 방출이 일어났을 때 속도는 1.52 mgP/gVSS · hr이었다. Acetate 및 FSW인 경우가 propionate, methanol 및 도시하수와 비교하여 인의 방출 속도가 매우 크다는 것은 SCFAs들 중에서 탄소 원자수가 적을수록 인 제거 미생물에게 쉽게 이용되어 인의 방출이 잘 일어난다는 사실과 부합한다.⁶⁾

유기물 종류별 시간에 따른 총질산염(질산염 및

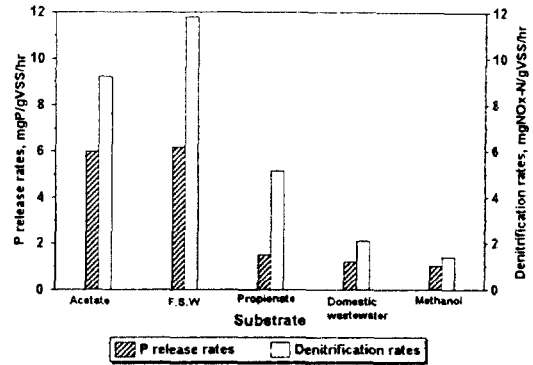


Fig. 4. Phosphorus release rates and NO_x-N denitrification rates on substrates (FSW : Fermented Swine Wastewater).

아질산염)의 농도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 초기 총질산염의 농도는 약 16 mg/L로 총질산염 중 아질산염의 농도는 매우 적었으며 대부분이 질산염의 농도였다. 시간에 따른 총질산염의 농도는 탈질 산화에 의해 감소되었으며 FSW, acetate, propionate, 도시하수 및 methanol의 탈질산화 속도는 각각 11.80, 9.21, 5.14, 2.09 및 1.41 mgNO_x-N/gVSS · hr 이었다. Acetate 및 FSW가 propionate, methanol 및 도시하수에 비해 탈질율이 매우 높았으며 FSW인 경우가 acetate 및 methanol보다 탈질율이 높은 것은 Lee¹⁶⁾ 및 박승국¹⁸⁾의 결과와 일치한다.

이상의 실험한 결과를 가지고 유기물 종류별 인의 방출 속도와 질산염의 탈질율을 계산하여 Fig. 4와 Table 1에 나타내었다. 유기물 종류별 인의 방출 속도 및 총질산염의 탈질율은 FSW인 경우가 가장 빠르며 acetate, propionate, 도시하수 및 methanol 순으로 속도가 작아졌다. 따라서 유기물 종류별 인의 방출 속도 및 총질산염의 탈질율을 상대적으로 비교해볼 때 인 방출 속도가 큰 것이 총질산염의 탈질율도 크게 관찰되었다. 또한 인 방출은 유기물 종류에 따라 큰 차이를 보이므로 인 방출을 위해서는 유기물의 특성이 중요함을 알 수 있었다.

3.2. 유기물 종류별 인 방출시 질산염의 영향

질산염의 영향을 관찰하기 위해 유기물의 종류별 인 및 총질산염의 농도 변화를 상호 비교하여 관찰

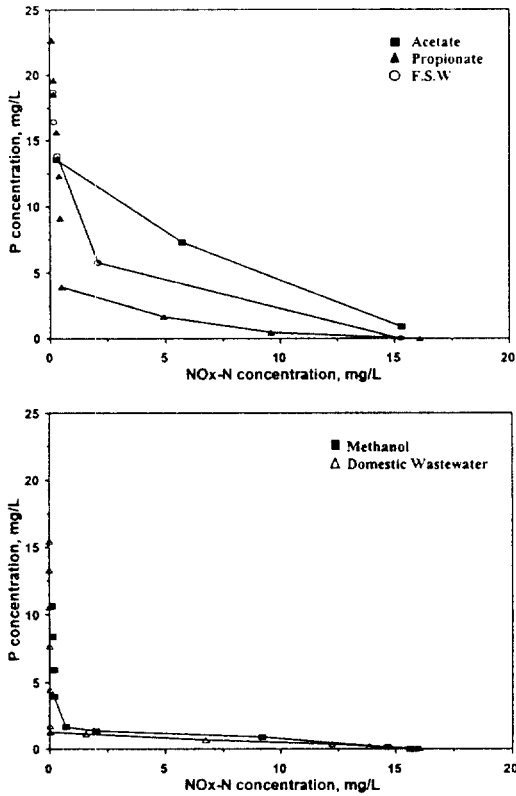


Fig. 5. Phosphorus release concentrations on NO_x-N concentrations (FSW : Fermented Swine Wastewater).

하였다. 이때 총질산염 중에는 아질산염의 농도는 매우 적고 대부분이 질산염이었다. Fig. 5는 유기물 종류별 총질산염의 농도에 대한 인 농도 변화를 보여주고 있다. Acetate, propionate 및 FSW가 주입된 경우(Fig. 5, top)는 총질산염이 존재하는 anoxic 조건에서도 인 방출이 잘 일어났으며, methanol 및 도시하수가 주입된 경우(Fig. 5, bottom)는 총질산염이 존재할때는 인의 방출이 거의 일어나지 않았으나 총질산염이 제거된 후 인 방출이 잘 일어나는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서, acetate, propionate 및 FSW는 총질산염의 영향을 methanol 및 도시하수보다 적게 받음을 알 수 있었다. Acetate인 경우에는 Iwema와 Meunier¹⁷⁾가 인 제거 미생물들은 탈질산화 미생물들과 잘 경쟁한다고 제안한 것과 부합된다. 또한, methanol인 경우에는 Malnou 등¹⁹⁾이 회분식 실험에서 anoxic 조건에서 유기물로 methanol을 주입되었을 때 탈질산화가 완전히 이루어

질 때까지는 인의 방출이 일어나지 않다가 완전히 탈질산화가 이루어진 후 인의 방출이 일어난 결과와 일치한다.

Osborn와 Nicolls⁷⁾는 도시하수를 가지고 EBPR pilot plant의 혐기성 반응조에 질산염(90 mgNO₃⁻-N/L)을 주입하여 질산염의 영향을 연구했을 때, 혐기성 반응조에서 질산염이 존재하는 동안은 인의 섭취가 일어났으며 질산염이 완전히 탈질산화된 후 인 방출이 일어남을 관찰하였다. 이는 본 연구에서 도시하수를 유기물로 주입하였을 때 총질산염 존재하에서 인 방출이 일어나지 않은 것과는 일치하지만 인의 섭취는 일어나지 않았다. 이는 총질산염의 농도가 약 16 mgNO_x⁻-N/L로 질산염의 농도가 낮았기 때문인 것으로 사료된다.

이상의 결과에 의하면 유기물로서 acetate 및 propionate를 이용할 경우는 인 처리 공정을 운영할 때 순혐기 공정이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 인 처리 효율은 큰 차이가 없을 것으로 생각되며 순혐기조의 수리학적 체류시간(HRT)이 methanol 및 도시하수보다 짧아도 될 것으로 사료된다. 하지만 유기물로서 methanol 및 도시하수를 이용할 경우는 순혐기 공정의 유·무가 인 처리 효율에 큰 영향을 줄 것으로 사료된다.

4. 결 론

혐기성 조건에서 인의 방출에 있어서 유기물 및 질산염에 대한 영향을 연구한 결과, 유기물로서 FSW, acetate, propionate, 도시하수 및 methanol을 주입하였을 때 인 방출 속도는 각각 6.19, 5.99, 1.52, 1.2 및 1.03 mgP/gVSS · hr로서 acetate 및 FSW를 주입했을 경우가 propionate, methanol 및 도시하수를 주입했을 경우보다 매우 컸다. 이는 SCFAs들 중에서도 탄소 원자수가 적은 유기물일수록 인의 방출이 잘 이루어졌으며 유기물 종류에 따라 인 방출 경향이 큰 차이를 보임을 알 수 있었다. 또한, FSW 및 acetate를 주입했을 경우의 인 방출 속도는 비슷하고 질산염의 영향이 거의 없으므로 유기물이 부족한 영양염류 처리 공정에 외부 탄소원으로 FSW를 주입해서 인의 방출을 유도함과 동시에

인 처리율을 높일 수 있을 것이다.

인 방출시 질산염의 영향은 유기물로서 acetate, propionate 및 FSW와 같은 SCFAs가 methanol 및 도시하수와 같은 유기물보다 질산염의 영향을 더 적게 받았다. 따라서 본 연구의 유기물 종류별 인 방출 속도 및 질산염의 영향에 대한 연구 결과를 가지고 인 처리를 위한 실제 처리 공정을 운영시 혐기조의 수리학적 체류시간(HRT)를 결정하는데 기초 자료가 될 것이다.

참 고 문 헌

1. Comeau, Y., Hall, K. J., Hancock, R. E. W. and Oldham, W. K., "Biochemical Model for Enhanced Biological Phosphorus Removal," *Water Research*, **20**(12), 1511~1521(1986).
2. Wentzel, M. C., Lotter, L. H., Lowenthal, R. E., and Marais, G. v. R., "Metabolic Behaviour of Acinetobacter spp. in Enhanced Biological Phosphorus Removal - A Biochemical Model," *Wat. S.A.*, **12**, 208~224(1986).
3. Mino, T., Arun, V., Tsuzuki, Y., and Matsuo, T., "Effect of Phosphorus Accumulation on Acetate Metabolism in the Biological Phosphorus Removal Process," *Biological Phosphate Removal from Wastewater (Advances in Water Pollution Control 4)*, Ramadori, R. (Ed.), Pergamon Press, Oxford, pp. 27~38(1987).
4. Rensink, J. H., "Biologische Defosfatering en Processbepalende Factoren," *Presented at NVA Symposium*, 14 Oct., Amersfoort, Netherlands(1981).
5. Siebritz, I. P., Ekama, G. A. and Marais, G. v. R., "A Parametric Model for Biological Excess Phosphorus Removal," *Wat. Sci. Tech.*, **15**, 127~152(1983).
6. Abu-ghararah, Z. H. and Randall, C. W., "The Effect of Organic Compounds on Biological Phosphorus Removal," *Wat. Sci. Tech.*, **23**, 585~594(1991).
7. Osborn, D. W. and Nicolls, H. A., "Optimisation of the Activated Sludge Process for the Biological Removal of Phosphorus," *Prog. Wat. Tech.*, **10**(1), 261~277(1978).
8. Simpkins, M. J. and McLaren, A. R., "Consistent Biological Phosphate and Nitrate Removal in an Activated Sludge Plant," *Prog. Wat. Tech.*, **10**(5), 413~422(1978).
9. Faup, G. M., Malnou, D., and Meganck, M., "La Dephosphatation Biologique: des Resultats Prometteurs," *L'eau, l'Industrie, Les Nuisances*, **73**, 21~27(1983).
10. Menar, A. B. and Jenkins, D., "Fate of Phosphorus in Waste Treatment Process: the Enhanced Removal of Phosphate by Activated Sludge," *In Proc. 24th Ind. Waste Treatment Conference*, Purdue University, Lafayette, Indiana, USA(1969).
11. Barnard, J. L., "A Review of Biological Phosphorus Removal in the Activated Sludge Process," *Wat. S.A.*, **2**(3)(1976).
12. Venter, S. L., Halliday, J., and Pitman, A. R., "Optimisation of the Johannesburg Olifantvlei Extended Aeration Plant for Phosphorus Removal," *Prog. Wat. Tech.*, **10**(1), 279~292(1978).
13. Rensink, J. H., Donker H. J. G. W., and de Vries H. P., "Biological P-Removal in Domestic Wastewater by the Activated Sludge Process," *Proc. of the 5th Env. Sewage and Refuse Symp.*, Munchen, pp. 487~502(1981).
14. Hanscoet, M. C. and Florentz, M., "Influence of Nitrates on Biological Phosphorus Removal from Wastewater," *Wat. S. A.*, **11**, 1~8(1985).
15. Gerber, A., Mostert, E. S., Winter, C. T.,

- and de Villiers R. H., "The Effect of Acetate and Other Short-chain Carbon Compounds on the Kinetics of Biological Nutrient Removal." *Wat. S.A.*, **12**, 7~12 (1986).
16. Lee, S. I., Denitrification with Wastewater Organics, M. S. Thesis, University of Florida, Gainesville, Fla., pp. 59~87(1984).
17. Iwema, A. and Meunier, A., "Influence of Nitrate on Acetic Acid Induced Biological Phosphate Removal." *Wat. Sci. Tech.*, **17**(11), 289~294(1985).
18. 박승국, 탈질반응의 열역학적 해석 및 전자공여체의 영향, 충북대학교 석사학위 논문(1994).
19. Malnou, D., Meganck, M., Faup, G. M., and du Rostu, M., "Biological phosphorus removal: study of the main parameters." *Wat. Sci. Tech.*, **16**(10), 173~185 (1984).