

하수 중 인의 결합 특성 분석

최희정 · 이승목*

관동대학교 환경공학과

Analysis of Characteristics of Coupled Phosphorus in the Sewage

Hee-Jeong Choi · Seung-Mok Lee[†]

Department of Environmental Engineering, Kwandong University

(Received 20 November 2006, Accepted 14 December 2006)

Abstract

The present investigation deals to achieve an accurate determination of the phosphorous present in the wastewater samples using the membrane reactor. The study may enable to quantify the dissolved (DP) and adsorbed phosphorous (AP), also the adsorbed phosphorous categorically identified as inorganic coupled phosphorous (DRP) and organic coupled phosphorous (NRP). Moreover, the study has been conducted separately in anaerobic and aerobic chamber. The results obtained showed that dissolved phosphorous only can occur in anaerobic chamber with ca. 25%. The study conducted for adsorbed phosphorous showed that the DRP has the percent composition in anaerobic and aerobic chamber respectively 33% and 40% i.e., 7% more in aerobic chamber. The similar values obtained for NRP was found to be 42% and 60% i.e., 18% more in aerobic chamber. On the other hand while comparing the results for NRP and DRP, it has to be noted that NRP has 9% and 20% more percent composition than DRP respectively in anaerobic and aerobic chamber. Further, the adsorbed phase showed the species Al-P, Fe-P in the aerobic chamber with the quotient of 7.73 mg/g TS (total solid) whereas in the anaerobic chamber it showed the species Fe-P and Fe(OH)₃-P with the 7.16 mg/g TS.

keywords : Dissolved Phosphorus (DP), Dissolved Reactive Phosphorus (DRP), Mechanism, Non Reactive Phosphorus (NRP), P-Fraction

1. 서론

질소와 인은 부영양화의 원인으로 잘 알려져 있다. 정상적인 호수나 강, 바다에서는 미생물이 일정수준 이상으로 번식하지 않는다. 그러나 과량의 질소와 인이 유입되면 각종 미생물들이 폭발적으로 번식하여 물 속의 용존산소가 급격히 고갈되어 수중 생물이 집단적으로 폐사하게 되고, 결국 수중 생태계가 완전히 파괴되어 하천이 썩게 된다. 이러한 부영양화를 방지하기 위해서 강이나 하천 등지로 유입되는 여러 폐수 및 하수 내의 질소와 인을 제거해야 하는 것이 오늘날 하수처리의 중요한 과제이다(Günder, 2001).

인 미생물의 물질대사 교환과정을 통해서뿐만 아니라 침전반응을 통해서도 제거될 수 있다. 화학침전시 폐수 안에 용해되어있는 물질들은 (여기에서는 인) 화학반응을 통하여 응집제와 함께 비용해 물질(Ca-P, Fe-P등)로 전환되는데, 이렇게 형성된 비용해 물질들을 침강 또는 여과를 통한 물리적 방법으로 제거할 수 있다. 응집제 등이 수중입자들의 전하를 중화시키고 응결과정을 통하여 생성된 큰

플록들이 침강하는 침전과 응결과정은 동시에 일어날 수도 있다. 침전처리시 유기물질 제거 메커니즘은 유기성 콜로이드의 응결과 아울러 플록안의 현탁물질의 결합에 따라 결정된다(Arvin, 1995).

이러한 물리화학적 방법과는 다른 생물학적인 제거 방법 또한 하수처리에서 광범위하게 사용되고 있는데, 생물학적인 제거 공정은 PAO(Polyphosphate Accumulating Organism)라 불리는 미생물이 혐기 조건과 호기 조건에 번갈아가며 노출되면서 이루어진다(Sieker, 1999). 혐기 조건일 때 PAO들은 외부의 탄소원인 휘발성 지방산(VFA, Volatile Fatty Acids)을 흡수하여 PHA(Polyhydroxyalkanoates)의 형태로 저장을 한다. 이때 필요한 에너지를 충당하기 위해 PAO들은 미생물 내부에 있는 polyphosphate를 분해하게 되며, polyphosphate가 분해되면서 나온 ortho-phosphate는 미생물 외부로 배출되기 때문에 혐기 조건에서는 폐수 내의 인 농도가 증가하게 된다. 환경이 외부 탄소원이 없는 호기 조건으로 바뀌게 되면 PAO들은 혐기 조건에서 저장해두었던 PHA를 사용하여 성장 및 생존을 하게 되고 그와 동시에 혐기 조건에서 소모하였던 polyphosphate를 재합성하기 위해 외부로부터 인을 흡수하게 된다. 호기 조건이 되면 미생물이 성장을 하기 때문에 호기 조건에서 흡수하는 인의 양이 혐기 조건에서 방출했던 인의 양보다 많아지

* To whom correspondence should be addressed.
leesm@kd.ac.kr

게 된다(luxury uptake). 이렇게 성장하여 인을 흡수한 PAO 들을 폐수로부터 분리하면 폐수 내의 인이 제거되는 것이다(Günder, 2001; Sieker, 1999).

폐수 안의 인 제거는 여러가지 방법으로 활발히 연구되어 왔으나 각 폐수의 특성에 따른 인의 메커니즘 분석은 아직도 미흡한 상태이다. 본 연구에서는 인 제거를 위해서 하수에서 가장 많은 양을 차지하고 있는 생활하수 중의 인 메커니즘을 분석하고 생물학적으로 결합되어 있는 인과 물리화학적으로 결합되어 있는 인을 분석하여 생물학적으로 분해가 가능한 부분이 어느 정도 비율을 차지하고 있는지를 확인하여 보다 효율적인 인 제거를 하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료선정

실험을 위한 하수는 Berlin 북부의 종합 하수처리장인 Klaerwerk Ruhleben과 Berlin 남부의 하수처리장인 Klaerwerk Mariendorf의 시료를 이용하였다. 분석을 위한 batch-test는 Klaerwerk Ruhben 실험실과 베를린 공대 처리공학 실험실에서 실시하였다. HRT는 각 조 체적에 따라 결정하였으며, 여러 문헌들의(Xiaohu, 1992; Günder, 2001; Sieker, 1999) 실험결과 체적의 1/10이 가장 최적의 조건이라는 판단하에 1/10로 책정하였다. 접촉시간(contact time)이란 혐기조에서 호기조, 멤브레인조로 또는 호기조, 멤브레인 조에서 무산소조로 넘어가는 이행 과정의 접촉시간이며 HRT는 각 조에서 머문 시간을 말한다. 실험조의 운전방법, 체적, 접촉시간 그리고 체류시간은 Table 1에 정리하였다.

MBR-laboratory plant는 무산소(AX) 4개조와 호기조(AE) 3개 그리고 혐기조(AN) 1개로 구성되어 있으며 멤브레인조(AF)는 밖에 따로 설치하였다. 유입수는 먼저 혐기조를 거쳐 3개의 호기조를 통과하여 무산소조로 100% 이

송(R₁)이 되며 무산소조로 들어온 물은 마지막 4번째 무산소조에서 혐기조로 재반송(R₂)된다. 슬러지의 잉여 부분은 4번째 무산소조에서 멤브레인조를 거쳐 배출하여 인을 제거하게 된다. 멤브레인조에서 나온 슬러지는 다시 호기조로 재반송(R₃)하게 된다. 혐기조에서는 유입수와 함께 무산소조에서 반송슬러지가 유입되어 발효반응이 일어나면서 인이 세포 밖으로 방출되고 호기조에서는 암모니아를 질산성 질소로 산화시키는 질산화 과정이 일어나며, 동시에 BOD 제거와 함께 인을 세포 안에 흡수하여 무산소조에서 유입수 중의 용해성 유기물을 전자 공여체로 하여 호기조로부터 내부 반송된 혼합액의 질산성 질소를 탈질 시킨다(Sieker, 1999). 질산성 질소가 혐기조로 유입되면 인의 방출이 저하되므로 혐기조로 반송되는 슬러지 내의 질산성 질소함량을 최대한 낮추기 위해 무산소조를 4단계까지 설치하였다. Fig. 1에 MBR-laboratory plant를 도식화하였다.

2.2. 실험방법과 분석방법

혐기, 호기조에서 채취한 시료를 원심 분리를 통해 고체, 액체로 분리하여 인산과 연결된 고정물질의 선택적 추출을 여러 가지 용해용액 (BD (Bicarbonate-Dithionite-Extracts), NaOH and HCl)으로 처리하였다. 개개의 시료 추출방법은 추출용액, 추출단계의 수, 반응조건(pH, 시간, 온도)에 따라 결정하였고 추출물들은 DP (Dissolved Phosphorus), NRP (Non Reactive Phosphorus) 그리고 DRP (Dissolved Reactive Phosphorus)를 중심으로 분석하였다. 분석을 위한 시료는 아래와 같은 단계적인 방법으로 채취했다. 각 단계별 추출물은 Gonsiorczyk 등(1998)의 해석방법에 따라 분석하였다.

1단계: PS - fraction (Sample from sludge chamber)

25 mL의 시료를 슬러지 통에서 털어내어 0.2 μm 멤브레인 필터로 4 bar 압력하에 즉시 여과하였다. 20분 동안 가

Table 1. Operating parameters of the MBR-laboratory plant

Volume flow (net): 10 L/h
 Recirculation anoxic-anaerobic R₂: 10 L/h (100%)
 Recirculation aerobic-anoxic R₁: 10 L/h (100%)
 Sludge age: 15d

Reactor	Volume [L]	Contact time [h]	HRT [h]
Anaerobic	37	1.85	3.7
Aerobic (with Filter chamber)	41 (AE) 33 (AF)	1.4 (AE) 1.65 (AF)	7.4
Anoxic	99	1.76	9.9
Total	210	---	21

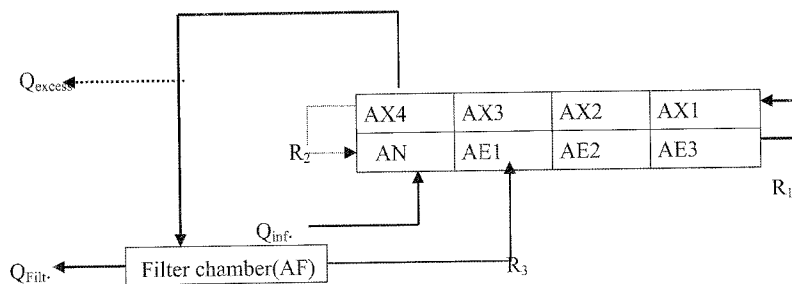


Fig. 1. Scheme of the MBR-laboratory plant.

압여과 한 후에 남은 Pellet을 필터에서 완전히 떼어내어 다음 단계를 위하여 따로 보관하였다. 가압여과를 한 여과수는 1단계 인의 농도를 측정하는데 사용하였다.

PS NRP }
 PS DRP } dissolved phosphorus

2단계: KW - fraction (distilled water fraction)

1단계에서 나온 Pellet에 25 mL 증류수를 넣고 30분 동안 자석 교반기로 완전히 교반을 한 다음 30분 동안 4,800 rpm의 속도로 원심분리하였다. 분리된 용액을 0.2 μm 멤브레인 필터로 여과하여 가볍게 흡착된 인과 유기 인 또는 복합 인을 측정하였다.

KW-NRP: loosely coupled or adsorbed org. phosphorus or poly-P

KW-DRP: loosely coupled or adsorbed phosphorus

3단계: BD-fraction (Bicarbonate-Dithionite-Extracts)

2단계에서 원심분리 후 남은 슬러지를 25 mL BD용액에 희석하여 40°C의 물에 교반하면서 증탕하여 완전히 용해시켰다. 시료를 차갑게 식힌 후에 35분 동안 4,800 rpm으로 원심 분리하여 용액은 따로 보관하고 슬러지를 25 mL 양의 0.1 M BD로 세척하여 다시 원심 분리 후 먼저 용액과 합한 총 용액을 0.2 μm 크기의 멤브레인 필터로 여과하였다. 여과한 25 mL 용액을 100 mL의 유리병에 넣고 1.25 mL 0.0025 M EDTA-용액과 섞은 후 10분 동안 공기를 주입하여 Sodium-Dithionite를 배출시킨 다음 Redox-sensitive 유기 인과 Fe-hydroxides와 Mn화합물로 주로 결합된 Redox-sensitive 인을 측정하였다.

BD-NRP: at 40°C dissolved cell phosphorus

BD-DRP: Redoxsensitive phosphorus: FePO₄(Al), Fe(OH)₃-P, Mn(OH)₄-P

4단계: NaOH-fraction

3단계에서 나온 슬러지를 25 mL 1 M NaOH-용액과 섞은 후에 25°C의 물에 교반하면서 증탕하여 20시간 동안 용해시켰다. 용해시킨 후에는 3단계와 같이 원심분리하고 세척하여 50 mL의 용액을 만들었으며 그 용액을 25%의 H₂SO₄로 pH를 6.8-7.5사이로 중성화시켰다. 1시간 후에 0.2 μm 크기의 멤브레인 필터로 여과하여 복합 인을 포함하여 미생물에 있는 인, 부식물과 결합된 인, 잔류 유기인의 양 그리고 주로 Al, Fe 등과 결합된 인, 기본적으로 용해되어 있는 무기인 결합물을 측정하였다.

NaOH-NRP: org. phosphorus or poly-P

NaOH-DRP: Al-and Fe-P, Al- and Fe-Hydroxide

5단계: HCl-fraction

남은 슬러지를 0.5 M HCl-용액에 20시간 동안 25°C 물에 교반하면서 증탕하여 용해시켰다. 그 다음 부분은 3단계와 같이 처리하였으며 50%의 NaOH용액으로 pH (6.8-7.5)를 중성화하여 HCl에 용해된 유기 인과 칼슘과 결합된

인을 측정하였다. 5단계에서 남은 찌거기는 25 mL의 증류수로 세척하여 총 인의 값을 검증하는데 사용하였다.

HCl-NRP: org. phosphorus or poly-P

HCl-DRP: Ca-P

채취한 시료는 여과하거나 여과하지 않은 상태에서 P_{total}, PO₄-P와 COD는 DIONEX사의 IC(Ion Chromatography) 분석하였으며 그 외에 TS, 강열감량과 강열잔류물은 DIN 38414(German institute for standardization) 규정에 따라 측정하였고, 용존 산소농도는 WTW(Wissenschaftlich Technische Werkstaetten)사의 OXI 340으로 측정하였으며, Bio-p에 주요한 영향인자인 pH와 온도는 WTW사의 pH 340/set와 SenTiX 41로 측정하였다.

2.3. 해석 방법

총인(total phosphorus, TP)은 용존형태의 인(dissolved phosphorus, DP)과 흡착된 형태의 인(adsorbed phosphorus, AP)으로 구분할 수 있다. 이중 AP는 다시 무기적으로 결합된 인을 의미하는 DRP(Dissolved Reactive Phosphorus)와 유기적으로 결합된 인을 의미하는 NRP(Non Reactive Phosphorus)로 구분할 수 있다. DP는 시료를 여과후 여과수를 분해하기 때문에 유기인 및 무기인의 형태 모두 존재하게 된다. DRP는 대부분 미생물에 의해 분해 가능한 무기형태의 정인산염(ortho-P)를 나타내지만 약간의 유기인을 포함할 수 있다. NRP는 TP-PO₄-P를 계산한 것으로 유기형태의 인과 다중인산염(poly-P)을 나타내며(Nuernberg et al., 1984), DOP(Dissolved Organic Phosphorus)는 DP-DRP를 나타낸다(Psenner et al., 1988).

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 실험조의 Single-fraction

인과 결합된 어떤 부분이 실험반응에 참여했는지 개개의 결합부분에 대해 조사를 해 본 결과 4단계의 추출물 실험 단계에서 결합된 인은 대부분 BD-fraction, NaOH-fraction 이었다. KW-fraction과 HCl-fraction은 모든 실험에서 인과의 결합성을 무시해도 좋을 만큼(0~4%) 미약하였다. 반면 BD-fraction, NaOH-fraction은 실험 조에서 인 결합 총량의 90~95%를 차지하였다. 자세한 실험 수치를 살펴보면, 혐기조에서 NaOH-DRP는 5.80 mg/gTS, BD-DRP는 8.54 mg/gTS로 측정되어 BD-DRP가 NaOH-DRP보다 많이 측정되었으나 호기조에서는 이와 반대로 NaOH-DRP는 9.2 mg/gTS, BD-DRP는 7.83 mg/gTS로 NaOH-DRP가 BD-DRP 보다 1.37 mg/gTS 더 많이 측정되었다. 이것은 혐기조에서는 수산화 철(Fe(OH)₃-P)과 수산화망간(Mn(OH)₃-P)에 흡착된 인이 호기조에서는 Al-Hydroxide, Fe-Hydroxide가 더 많이 존재함을 나타낸다.

Fig. 2에서는 혐기조와 호기조에서의 각 개개 추출물들의 결과를 보여주고 있는데 그림에서 보이는 것과 같이 KW-추출물과 HCl-추출물은 호기조와 혐기조에서 비슷하게 아

주 미량이 검출되었음을 알 수 있다. 반면 혐기조에서 NaOH-NRP는 13.30 mg/gTS를 호기조에서 20.63 mg/gTS가 측정되어 혐기조와 반대로 호기조에서 NaOH-NRP는 10.37 mg/gTS 증가를 나타냈다. 호기조에서 NRP는 BD-fraction보다 NaOH-fraction에서 더 많이 측정되었다.

3.2. 실험조의 인 결합의 분배

하수 안에 인이 어떤 형태로 결합되어 있는가를 좀더 구체적으로 알아보기 위해 결합 분배를 측정하였다. Fig. 3에서 Fe-P와 수산화 철(Fe(OH)₃)에 흡착된 인은 가장 많은 결합 부분을 차지하여 혐기조에서 7.16 mg/gTS, 호기조에서 7.73 mg/gTS가 측정되었다. 용해된 인은 호기조에서는 0.26 mg/gTS가 측정되었고 약하게 흡착된 인과 Ca-P 그리고 Mg-P는 소량이 측정되었다. Ca-P와 Mg-P는 폐수 중의 인을 제거하는데 상대적으로 중요한 결합 인자는 아닌 것으로 나타났으며, 이는 Carlsson 등(1977)의 결과와 일치하는 것으로 나타났다.

실험 결과 NRP는 혐기조에서는 17.8 mg/gTS, 호기조에서는 30.59 mg/gTS 측정되어 혐기조보다는 호기조에서 12.79 mg/L정도 더 많이 측정되었고, DRP는 혐기조에서 13.28 mg/gTS, 호기조에서 17.2 mg/gTS로 측정되어 이 또한 호기조에서 혐기조보다 3.92 mg/gTS 더 많이 측정되었다. DP를 제외하고는 혐기조나 호기조 모두 NRP가 DRP보다 더 많이 검출되었다. 용해된 인의 양은 주로 하수안의 poly-p의 내용물에 주로 결정된다. 혐기조보다 호기조에서 NRP의 양

이 많은 것은 혐기조에서 인이 방출되고 호기조에서 인이 세포 안으로 흡수되는 과정에서 나타난 현상이다.

3.3. 실험조의 Total-fraction

실험조의 혐기조와 호기조에서 총분배를 Fig. 4에 나타내었다. DP는 혐기조에서는 25%의 높은 양을 나타냈으나 호기조에서는 무시해도 좋을 만큼의 아주 적은 양이 측정되었다. NRP는 혐기조에서는 42%, 호기조에서는 60%로 측정되었으며, 호기조가 혐기조보다 18% 더 높게 측정되었음을 알 수 있다. DRP는 혐기조에서 33%, 호기조에서 40%가 측정되었으며, NRP와 마찬가지로 호기조에서 7%정도 더 많이 측정되었다. 혐기조 안에서 NRP는 DRP보다 9% 더 많이 측정되었으나 호기조에서는 NRP가 DRP보다 20% 정도 더 많이 측정되었다. 이는 Downes 등(1978)의 논문에서도 알 수 있듯이 호기조에서 용해된 인이 생물학적으로 결합된 인으로 흡수되면서 나타난 현상이라 생각된다.

3.4. 슬러지 안의 T- P(총인) 함유량

활동하는 바이오 매스가 batch reactor에 많으면 많을수록 더욱 많은 인이 생물학적으로 세포 안에 방출, 흡수된다 (Günder, 2001). 미생물은 SRT 내지는 plant 안의 슬러지의 농도에 따라 변동하게 되는데 그 미생물은 새롭게 형성되거나 배출된 잉여 슬러지 사이의 평형관계에 존재한다. 이러한 평가의 가장 좋은 방법은 증발잔류물과 강열감량의 측정인데(Seyfried et al., 1991) 일반적으로 증발잔류물은

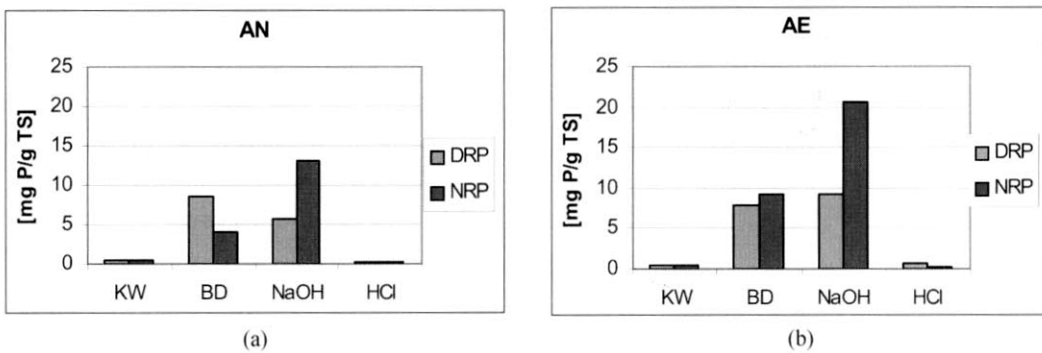


Fig. 2. Single fraction analysis in the laboratory plants AN (a) and AE (b).

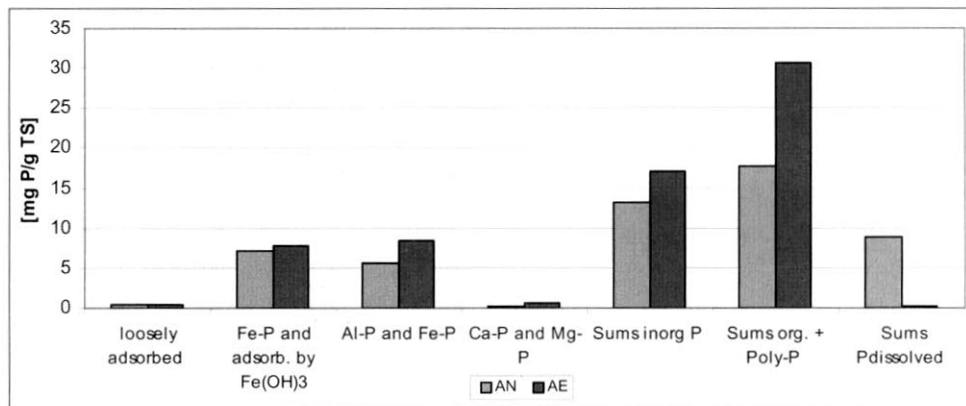


Fig. 3. P-coupled distribution analyzed by the laboratory plant.

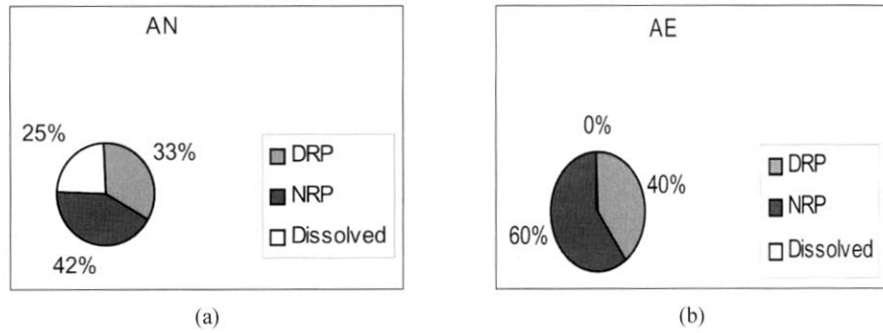


Fig. 4. Comparison of the sums distribution in anaerobic chamber (a) and in aerobic chamber (b) obtained for the laboratory plant.

무기물을, 강열감량은 유기물을 나타낸다. 이 실험에서 증발잔류물과 강열감량의 관계는 $R^2=0.9503$ 을 나타냈으며 이것은 전체 증발 잔류물이 증가함에 따라 유기물질의 양도 비례하여 증가하였음을 알 수 있다. 일반적으로 농축슬러지의 농도는 2~4% 정도이나 잉여 활성슬러지의 반송률, 슬러지 중의 유기물의 함유량에 따라 농축성은 달라진다. Seyfried 등(1991)과 Baumann 등(1993)은 여러 실험을 통해 슬러지 안에서의 인의 함유량이 TS의 평균 2~6% 일 때 생물학적 처리에 가장 좋은 조건임을 확인하였다. 이 실험에서 슬러지 안의 총 인의 함유량은 혐기조에서 1.68~2.98%까지 즉, 평균 2.3%를 나타내었으며 호기조에서는 2.69~3.76% 즉, 평균 3.28%로 측정되었다.

생물학적 인 제거 공정에 있어서 유입수의 성분 중 가장 중요한 것은 인과 COD이다. COD의 경우 대부분 유입되는 하수 내에 포함된 탄소원을 의미하는데, 이 COD의 양과 구성하고 있는 성분에 따라 생물학적 인 제거 공정은 많은 영향을 받는다. 높은 인 제거 효율을 얻기 위해서는 적절한 COD부하와 P/COD의 비율이 필요한데, 반응기 내의 MLSS에 따라 조금씩 다르지만 인 제거를 위한 적절한 COD 부하는 대략 400~600 mg/L 가량으로 알려져 있다 (Sieker, 1999; Xiaohu, 1992). 혐기 조건에서 COD의 양이 지나치게 적게 유입될 경우 PAO가 충분한 양의 PHA를 저장하지 못하게 되고 그에 따라 혐기 조건에서의 인 방출도 적어지게 된다. 그리고 PHA가 부족하기 때문에 호기 조건으로 넘어간 상황에서도 충분히 성장하지 못할뿐더러 방출된 인을 모두 재흡수하지 못해서 유출수 내부에 인이 남아있게 된다. 반대로 COD가 지나치게 많아지면 혐기 조건에서 유입된 COD가 모두 흡수되지 못한 채 폭기 단계로 넘어가게 되는 경우가 많다. 그렇게 되면 PAO가 아닌 다른 미생물이 호기조건의 산소와 혐기 단계에서 미처 처리되지 못하고 넘어온 COD를 이용해서 성장하게 되어 PAO의 성장에 방해가 된다. 지금까지 연구결과 P/COD가 대략 1/20~1/40 즉, 0.5~0.025정도로 유지하여야 유출수의 인의 양을 1 mg/L로 줄일 수 있다(Günder, 2001; Xiaohu, 1992). 본 실험에서 COD는 530~818 mg/L, Ptotal은 182~306 mg/L 그리고 P/COD는 0.22~0.35로 측정되었으며 또한 호기조에서 증발 잔류물 안의 인 함량이 혐기조보다 1~2% 더 많은 것을 확인할 수 있었다. 실험조의 증발 잔류물 중

의 인 함량의 측정 결과는 Table 2에 도표화시켰다.

Table 2. Sums of p-content in the biomass of laboratory plant

No	p-content in the active sludge [%]	
	AN	AE
Range	1.68~2.98	2.69~3.76
Average	2.3% (± 0.62)	3.28% (± 0.48)

Fig. 5의 총인과 증발잔류물(TS)의 관계에서 증발잔류물이 증가할수록 총인의 함량도 비례하여 증가함을 알 수 있었으며 실험결과 $R^2=0.8293$ 이었다.

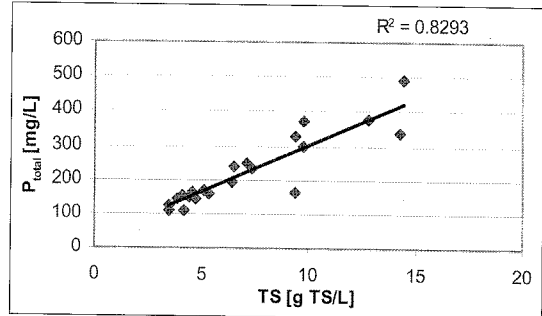


Fig. 5. Measurements of the Ptotal and TS in the laboratory plant.

4. 결론

베를린 북부 지역의 생활폐수를 가지고 인의 메커니즘을 분석한 이번 실험은 하수 중의 인 제거율의 정확한 분류를 알기 위해 슬러지 안에 존재하는 인의 화학적 생물학적 결합형태를 분석하였으며 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 용해된 인의 함량은 호기조에는 존재하지 않았으며 혐기조에서는 25%가 측정되었다.
- 2) 인의 결합 분류 실험에서는 가볍게 흡착된 인은 혐기조나 호기조에서 모두 소량이 측정되었다.
- 3) 그 반면에 혐기조에서는 Fe-P와 Fe(OH)₃에 흡착된 인은 7.16 mg/gTS, 호기조에서는 Al-P와 Fe-P가 7.73 mg/gTS로 측정됨으로써 하수가 호기상태일 경우 Al-P와 Fe-P가 가장 많이 존재하고 혐기상태일 경우 Fe-P와 Fe(OH)₃에

흡착된 인이 가장 많이 존재한다는 것을 알 수 있었다.

- 4) DRP는 호기조에서는 40%, 혐기조에서는 33%가 측정됨으로써 DRP는 호기조에서 혐기조보다 7% 더 많이 측정되었고, NRP는 호기조에서 60%의 많은 양이 측정된 반면 혐기조에서는 42%가 측정되어 이 또한 DRP와 마찬가지로 호기조에서 18% 더 많이 측정되었다.
- 5) 혐기조에서 증발잔류물 안의 인의 함량은 1.68~2.98%을 나타낸 반면 호기조에서는 2.69~3.76%가 측정됨으로써 호기조에서 증발잔류물 중의 인 함량이 혐기조보다 1~2% 더 많은 것을 확인할 수 있었다.
- 6) 전체 실험결과 생활 하수 안에는 가볍게 흡착된 인이나 Ca-P, Ma-P는 소량으로 존재하였으며 주로 Fe-P나 Al-P 그리고 Fe(OH)₃에 흡착된 인의 형태로 존재함을 알 수 있었다.

위의 실험결과 하수에서 인 제거시 Fe-P나 Al-P 그리고 Fe(OH)₃에 흡착된 인 제거에 주안점을 두어야 하며 각 폐수의 특성에 따른 흡착 매커니즘 분석이 요구된다.

사 사

이 논문은 베를린 공대 폐수처리공학 연구실과 Ruhleben 하수 처리장에서 공동 연구한 것을 2006학년도 관동대학교 교내 연구비 지원에 의하여 정리한 것으로 이에 감사 드리며, 특히 실험에 여러 가지로 도움을 아끼지 않은 베를린 공대 Kraume 교수께 감사드립니다.

참고문헌

Arvin, E., Observations Supporting Phosphate Removal by Biologically Mediated Chemical Precipitation-a Review, *Water Sci. Technology*, **15**, pp. 43-63 (1995).

- Baumann, P. and Krauth, K., Phosphatelimination unter Verwendung von Kalk-Nachfällung, Neutralisation mit Rauchgas-Forschungsgemeinschaft kalk and Moertel, **3** (1993).
- Carlsson, H., Aspergen, H., Lee, N. and Hilmer, A., Calcium Phosphate Precipitation in Biological Phosphorus Removal System, *Water Research.*, **31**(5), pp. 1047-1055 (1997).
- Downes, M. T. and Pael, H. W., Separation of Two Dissolved Reactive Phosphorus Fraction in Lake water, *J. Fish. Res. Board Can.*, **35**, pp. 1636-1639 (1978).
- Gonsiorczyk, T., Casper, P. and Koschel, R., Phosphorus Binding Forms in the Sediment of an Oligotrophic and an Eutrophic Hardwater Lake of the Baltic District (Germany), *Water Sci. Technol.*, **37**(3), pp. 51-58 (1998).
- Günder, B., *Das Membranbelebungsverfahren in der Kommunalen Abwasserbehandlung*, Expert Verlag, Berlin (2001).
- Nuernberg, G. and Peters, R. H., Biological Availability of Soluble Reactive Phosphorus in Anoxic and Oxidic Freshwaters, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **41**, pp. 757-765 (1984).
- Psenner, R. and Pucsko, R., Phosphorus Fractionation; Advantages and Limits of the Method for the Study of Sediment P Origins and Interactions, *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.*, **30**, pp. 43-59 (1988).
- Seyfried, C. F. and Hartwig, P., Neue Erkenntnisse zur Biologischen Stickstoff- und Phosphorelimination in Verschiedene Kläranlagen, *Veröffentlichung des Instituts fuer Stadtbauwesen der TU Braunschweig*, **50**, pp. 231-246 (1991).
- Sieker, C., Kombination der Denitrifikation und der Vermehrten Biologischen Phosphorelimination in einer Alternierend Betrieben Biofiltrationsanlage, *Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft TU Berlin*, **12**, pp. 1-139 (1999).
- Xiaohu, D., Biologische Phosphatelimination - Einflußparameter, Randbedingungen, Verfahrensoptimierung, *Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum*, **23**, pp. 34-76, 93-124 (1992).