

## 알칼리-오존 동시 전처리된 잉여슬러지로부터 결정화를 이용한 고품질 외부탄소원 회수

### Recovery of high quality external carbon sources using crystallization from pretreated excess activated sludge by alkali and ozone

서인석\* · 김홍석 · 김병균 · 김연권

In S. Seo\* · Hong S. Kim · Byung G. Kim · Youn K. Kim

한국수자원공사 수자원연구원 상하수도연구소

(2008년 9월 29일 접수; 2008년 11월 17일 수정; 2008년 11월 28일 채택)

#### Abstract

In this research, recovery of high quality organics from excess activated sludge and its potential as a external carbon sources for BNR process was studied.

By simultaneous treatment of alkali and ozone, TSS concentration was reduced by 32%, and RBDCOD fraction was increased by 76.2%, and major constitute of produced organic were acetic acid and propionic acid. Also, nitrogen and phosphorus were greatly solubilized. However, because acid-hydrolyzable phosphorus(AHP) was major part of solubilized phosphorus,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{PO}_4^{3-}\text{P}$  concentration were insufficient for effective formation of crystal like as MAP(Magnesium Ammonium Phosphate) and hydroxyapatite. By placing BPR reactor before alkali-ozone treatment reactor,  $\text{PO}_4^{3-}\text{P}$  concentration in pretreated sludge was increased by 1.8 times, and improved potential of phosphorus recovery by crystallization. In experiment of crystallization, hydroxyapatite formation was more easily applied than MAP. By hydroxyapatite formation, SCOD/ $\text{PO}_4^{3-}\text{P}$  ratio was greatly increased from 32.7 at control to 141.9 at  $\text{Ca}^{2+}/\text{PO}_4^{3-}\text{P}$  mole ratio of 2.4.

The results based on this study indicated that the proposed system configuration has potential to reduce the excess sludge production, to recover phosphorus in usable forms as well as utilize organics as a external carbon source in BNR process.

**Key words** : sludge pre-treatment, alkali-ozone, AHP, crystallization, external carbon source

**주 제 어** : 슬러지전처리, 알칼리-오존, AHP, 결정화, 외부탄소원

#### 1. 서론

국내 하수처리장은 2000년 172개소에서 2006년 말 기준 328개소로 약 90% 증가하였으며 시설용량도 2000년 15,038,000 $\text{m}^3$ /일에서 2006년 22,568,000 $\text{m}^3$ /일로 33% 용량이 증가하여 개소 수 측면에서나 용량 측면에서도 비약

적인 성장세를 보였다. 이러한 하수처리 시설용량 증대에 따라 슬러지 발생량도 지속적으로 증가하는 추세로 2006년 말 기준 전국에 가동 중인 하수처리장(328개소)에서 1일 평균 7,446톤/일의 하수슬러지가 발생하였으며, 하수종말처리시설 신·증설 등으로 2011년(473개소)에는 1일 약 9,554톤에 이를 것으로 전망되고 있으며, 하수슬러지 처분은 런던

\*Corresponding author Tel: +82-42-870-7550, E-mail: seois@kwwater.or.kr(Seo, I.S.)

협약과 관련하여 시급한 문제로 정부에서는 2011년 말까지 하수슬러지의 해양배출율을 0%로 줄이는 정책을 추진 중으로, 이에 따라 재활용 및 소각 등의 하수슬러지처분방법의 비율이 증가될 것으로 예상된다(환경부, 2007).

현재 하수슬러지와 관련한 연구는 활발하게 이루어지고 있으며, 주로 하수슬러지로부터 메탄이나 수소 등 에너지를 생산하는 기술이나, 슬러지를 물리화학적으로 처리하여 유기물을 용해시킨 후 하수처리장에 외부탄소원으로 재활용하는 연구가 꾸준히 수행되고 있다.

최근 하수처리는 재이용과 연계되어 보다 낮은 방류수 수질을 요구하고 있으며, 이로 인해 고도처리(Biological nutrient removal, BNR)는 우선적으로 고려되는 기술이며, 이러한 생물학적 고도처리에 있어서 탄소원의 활용문제는 처리효율을 좌우하는 가장 중요한 인자라고 할 수 있다. 특히, 우리나라와 같이 C/N비가 낮은 경우에 있어서는 중요성이 더욱 크다. 많은 연구자들에 의해 BNR 공정의 설계 및 운영에 있어서 C/N비 및 C/P비의 중요성에 대해서는 이미 보편화되었으며, 유기물이 부족한 하수처리장에서 유기물을 추가 보충하여 C/N비 및 C/P비를 증가시킬 수 있는 가장 손쉬운 방법으로 메탄올, 에탄올 및 글루코스를 이용하는 방법을 활용하고 있으며, 1차 및 2차 침전슬러지를 가수분해하거나 혹은 산업폐수중 생물학적으로 분해가 쉬운 유기물을 많이 포함하고 있는 폐수를 활용하고 있다(Choi et al., 1996; Kampasa et al., 2007).

메탄올과 같은 외부탄소원의 공급에 있어서 가장 중요한 문제는 과도한 비용이 소요된다는 점이며, 이러한 이유로 과도한 추가비용 없이 사용할 수 있는 외부탄소원의 확보방안에 대한 연구가 수행되고 있으며, 하수슬러지로부터 외부탄소원의 생산에 대한 연구는 최근 런던협약으로 인한 슬러지 처리 문제에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

하수슬러지의 감량화를 위한 전처리 과정에서 외부탄소원 생산가능성은 많은 연구자들에 의해 시도되었다(Liu and Tay, 2001; Wei et al., 2003; Muller et al., 2000b; Weemaes et al., 2000). 또한 슬러지 감량화와 외부탄소원 생산, 두가지 목적을 위하여 하수처리공정의 반송슬러지에 직접 적용하는 사례도 많이 있고, 최근들어 슬러지 전처리 기술은 하수고도처리공정과 결합하여 일체형 기술로 개발되고 있는 추세이다(Cui, R. and Jahng, D. J., 2004; Boehler and Siegrist, 2004; He et al., 2006).

그러나 슬러지 감량화를 위한 전처리 과정에서 생산되는 유기물은 고도처리 공정에 외부탄소원으로 이용할 수 있

나, 이때 용출된 질소 및 인이 부가적으로 하수처리공정에 부하로 작용하며, 특히 인이 반응조내에 축적되는 심각한 문제점을 가지고 있다. 따라서, 슬러지 전처리과정에서 생산된 유기물을 효과적으로 활용하기 위해서는 질소나 인을 제거한 후 고품질 유기물만을 고도처리공정의 외부탄소원으로 공급하여야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 기존에 축산, 분뇨처리나 혐기성소화 후처리로 주로 적용되는 struvite 등 결정화의 기술검토가 시도되고 있으나 (Saktaywin et al., 2005; Pastor et al., 2008), 전처리에 의한 감량화나 유기물 생산잠재성은 큰 반면 용출된 인 성분이 용존성으로는 존재하나  $PO_4^{3-}-P$  형태가 아닌 acid-hydrolyzable phosphorus(AHP) 형태로 상당부분 존재하여 고품질의 유기물을 획득하기 위한 결정화방법인 magnesium-ammonium-phosphate(MAP)이나 기타 화학적 처리에 있어서 장애요인으로 보고되고 있다 (Saktaywin, 2005).

따라서, 본 연구에서는 알칼리와 오존 동시처리방법에 의한 전처리과정에서 생산되는 유기물을 BNR공정에서 외부탄소원으로서의 활용성을 극대화 하기위해 결정화 기술을 적용하여 고품질 유기물의 회수 가능성을 검토하여 슬러지전처리 기술이 슬러지감량 뿐만 아니라 질소 및 인제거효율도 향상시킬 수 있는 고도처리공정개발에 기초자료로 활용코자 하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

본 연구는 오수를 처리하기 위해 설치된  $5m^3/일$  규모의 pilot scale MBR(Membrane Bio-reactor) 공정인 KSMBR 공정과 연계하여 슬러지전처리 실험장치가 연속식(continuous)으로 운영되었다. 대상 슬러지의 기초 성상은 Table 1과 같다.

전처리 조건은 사전연구를 통하여 결정되었으며, 알칼리 처리를 위한 NaOH 투입은 pH 10.5로 자동조절 되도록 하였으며, 동시에 오존발생기(오조니아 LAB 2B; 4~10  $gO_3/hr$ )를 이용하여 오존을 0.285  $gO_3/gTSS$  수준으로 투입하였으며, 접촉시간은 3시간 이었다.

또한, 전처리 후 고품질의 외부탄소원을 회수하기 위해 struvite 및 hydroxyapatite의 적용성을 평가하기 위해 자-테스터를 이용하였으며, 조건은 전처리액에  $Ca^{2+}$  또는  $Mg^{2+}$ 을 투입 후 150 rpm 에서 5분동안 교반 후 30분 침전시킨 후 질소 및 인 농도 등을 분석하였다.

Table 1. Characteristics of waste sludge used in this research

Unit : mg/L

Parameters	TSS	VSS	SCOD	TCOD	TN	STN	$NH_3-N$	$NO_3-N$	TP	STP	$PO_4-P$
Concentration	10,103	9,495	13.8	10,855	550	11.7	0.34	9.83	263.5	0.13	0.10

\* SCOD, STN and STP : Soluble COD, Soluble Total Nitrogen and Soluble Total Phosphorus

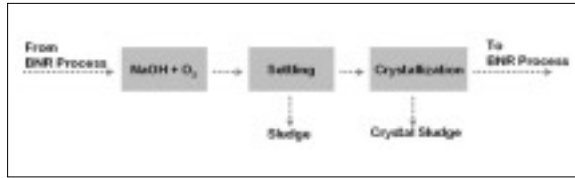


Fig. 1. Schematics of sludge pre-treatment and organics recovery.

하수슬러지의 전처리방법에 따른 분석을 위해 전처리 전 후의 pH, TSS, VSS, TCOD<sub>cr</sub>, SCOD<sub>cr</sub>, TN, STN(Soluble Total Nitrogen), NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, TP, PO<sub>4</sub>-P 등을 Standard Methods(2005)에 준하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 감량화 효율 및 유기물 농도 변화

슬러지 전처리실험은 MLSS 농도가 약 10,000 mg/L 로 운영되는 KSMBR공법의 멤브레인을 침지한 호기성 반응조에서 슬러지를 연속적으로 슬러지전처리 공정에 공급함에 의해 수행되었다. 슬러지 감량화 공정별 SS 농도 변화 및 감량화율을 분석한 결과, 슬러지 감량화율(TSS기준)은 32 % 로 나타났으며, 전처리 전후의 SCOD의 농도는 각각 13.8 mg/L 및 2850 mg/L 이었다. 전처리 후에는 세포벽의 파괴에 의해 세포내에 있던 질소 및 인도 용출되므로, 가용화되는 SCOD와 용출되는 질소 및 인 농도를 상호 비교하여 보았다. 용출되는 용존 질소(Soluble Total Nitrogen, STN)당 SCOD 생성량 및 용존 인(Soluble Total Phosphorus, STP)당 SCOD 생성량은 각각 11.7 mgSCOD/mgSTN, 20.7 mgSCOD/mgSTP이었다.

#### 3.2. 질소(Nitrogen) 및 인(Phosphorus) 성분 변화

슬러지 감량화 공정별 질소성분 농도 변화 및 인성분 농도 변화를 분석한 결과 알칼리 및 오존처리에 의해 슬러지의 세

포벽이 파괴되어 유기물뿐만 아니라 질소 및 인 농도도 증가하는 것으로 나타났다.

특히, 질소의 경우는 암모니아성 질소 및 질산성 질소의 농도 증가에 비해 Soluble Total Nitrogen(STN)의 농도가 매우 높게 증가함을 보인다. 질소와 유사하게 인의 경우도 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도의 증가보다는 Soluble Total Phosphorus(STP)의 농도가 매우 높게 증가함을 보인다.

최근 감량화과정에서 회수된 유기물을 하수 고도처리공정에 외부탄소원으로 활용하는 하수고도처리공법 개발이 활발하게 진행되고 있으나, 본 연구의 연구결과를 근간으로 판단할 때, 세포벽 파괴로 생성하는 STN의 상당부분은 유기 질소인 것으로 추정되며, 이것이 하수 고도처리공정으로 재유입되면, 가수분해를 통해 암모니아성 질소로 전환되어 질산화-탈질산화 반응을 거쳐 대기 중으로 배출되어 탈질반응에서 일정부분 유기물의 손실은 있어도 공정내 질소의 축적은 없을 것으로 판단되나, 인 성분은 슬러지의 폐기만으로 공정에서 제거되므로 고농도의 STP가 하수 고도처리공정에 재 유입되면 공정 내에 축적될 것으로 판단된다. 이는 다른 연구자들이 지적한 문제점과도 동일한 결과이다(Nishimura, 2001).

따라서 슬러지 감량화 과정에서 생산된 유기물을 BNR 공정에 외부탄소원으로 효과적으로 활용하기 위해서는 질소 및 인의 농도를 최대한 낮추어 고품질의 유기물을 회수해야 하는 기술적인 문제를 가지고 있다. 최근들어, 이러한 기술적인 문제를 해결하기 위해 몇몇 연구자들은 결정화 기술을 접목시키고 있으며, 이에 대한 성공가능성도 제기되고 있다(Saktaywin 등, 2005). 그러나, 결정화에 의한 질소 및 인 제거에 있어서는 또 다른 기술적인 해결점이 있어야 한다. 이것은 감량화 과정에서 생산된 가용화액에 포함된 질소 및 인 중 용존성인 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 및 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도가 높아야 한다는 점이다. 이러한 측면에서 본 연구결과를 검토하면 알칼리+오존 동시처리에 의해 생산된 가용화액에는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 및 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도가 상대적으로 낮아 MAP이나 apatite 등의 결정화 기술 적용에 있어서 효율성이 떨어지는 것으로 판단된다.

이에, 본 연구에서는 결정화 기술의 도입에 있어서 전제조건인 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 및 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도의 상대비율을 높이기 위해 가용액중의 질소 및 인의 존재형태를 분석하여 이에 대한 해결책을 제시할 필요가 있어 후속 연구를 수행하였다. 우선적으로 Standard methods의 측정방법에 따라 STP를 정밀하게 분석하였다. 인 성상의 분류 및 분석방법을 Fig. 2에 나타내었다. 여과된 시료내의 인 분율을 측정하면 dissolved reactive phosphorus(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P), dissolved acid-hydrolyzable phosphorus(AHP), dissolved organic phosphorus로 구성되어 있다.

슬러지 감량화 후 용출되는 인 분율을 조사해 보기 위해 알

Table 2. Results of simultaneous pre-treatment by alkali and ozone Unit : mg/L

Parameters	Excess sludge	Alkaline + Ozone
TSS	10,103	6,875
VSS	9,495	6,580
TCOD	10,855	9,602
SCOD	13.8	2,850
T-N	550	-
STN	11.7	254
NH <sub>4</sub> -N	0.34	21.1
NO <sub>3</sub> -N	9.83	22.1
T-P	263.5	-
STP	0.13	137.2
PO <sub>4</sub> -P	0.10	73.8
Remarks	SCOD Solubilization(%)=26.1, TSSReduction(%) = 32	

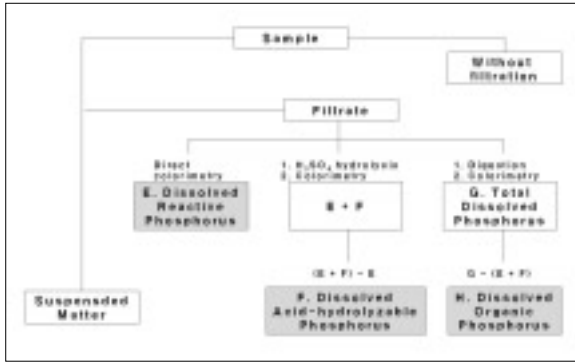


Fig. 2. Step for analysis of phosphorus fraction(Standard methods, 2005).

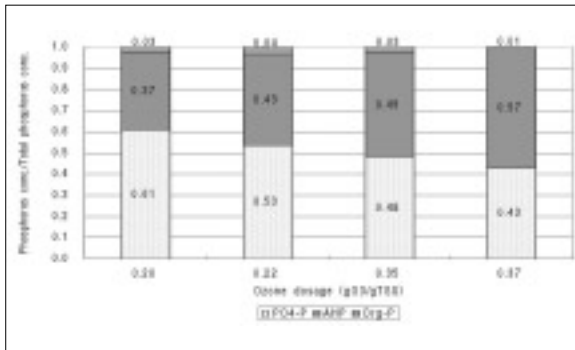


Fig. 3. Effect of ozone concentration on phosphate fraction.

칼리+오존 동시처리 공정에서 오존농도를 달리하면서 용출 인 분율의 변화를 조사하여 Fig. 3에 나타내었다. 오존 주입 농도가 0.2g O<sub>3</sub>/gTSS에서 0.37g O<sub>3</sub>/gTSS로 증가할수록 dissolved reactive phosphorus(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P) 분율은 0.61에서 0.43으로 오히려 반대로 감소하며, dissolved acid-hydrolyzable phosphorus(AHP) 분율은 0.37에서 0.57로 증가함을 보인다. 즉, 오존농도가 증가함에 따라 감량화율은

Table 3. Experimental results on effect of phosphorus release reactor

Parameters	Alkali+Ozone		Phosphorus release reactor + (Alkali+Ozone)		
	Excess sludge	Alkaline+Ozone	Excess sludge	P release	reactorAlkaline+Ozone
TSS	10,103	6,875	9,900	10,784	8,661
VSS	9,495	6,580	9,000	10,034	7,506
TCOD	10,855	9,602	12,137	11,807	11,180
SCOD	13.8	2,850	30.3	606.3	3,548
T-N	550		562		
STN	11.7	254	6.0	41.7	302
NH <sub>4</sub> -N	0.34	21.1	0.19	0	26.1
NO <sub>3</sub> -N	9.83	22.1	5.00	1.3	16.8
T-P	263.5		278.7		
STP	0.13	137.2	0.0	85.3	176.7
PO <sub>4</sub> -P	0.10	73.8	0.0	83.3	131.3
AHP	0.03	46.65	0.0	4.92	44.96
Remarks	SCOD Solubilization(%) = 26.1		SCOD Solubilization(%) = 29		

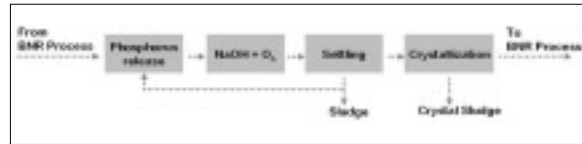


Fig. 4. Schematics of newly proposed sludge pre-treatment methods in this research.

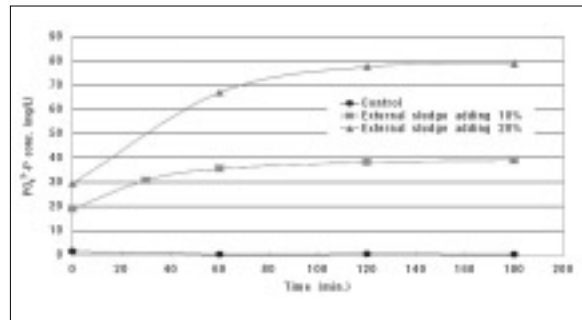


Fig. 5. Effect of addition of external sludge on phosphorus release in phosphorus release reactor.

증가하나 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P는 오히려 감소하여 Struvite나 Hydroxyapatite의 생성에 의한 질소 및 인의 원천적인 제거에는 불리한 것으로 나타났다. 이는 하수 고도처리공정에서 폐기되는 슬러지는 인을 과잉 함유하고 있는 인축적 미생물(PAOs)이 다량 함유되어 있으므로, 오존을 이용하여 세포벽을 파괴시 AHP가 다량 발생하는 것으로 발표한 Saktaywin 등(2005)의 결과에서와 유사한 경향을 나타내었다.

### 3.3. 결정화(Crystallization)와 결합한 슬러지 전처리 개선공정

상기에서도 언급하였듯이, 슬러지 감량화 과정에서 생산된 유기물을 BNR 공정에 외부탄소원으로 효과적으로 활용하기 위해서는 질소 및 인의 농도를 최대한 낮추어 고품질의 유기물

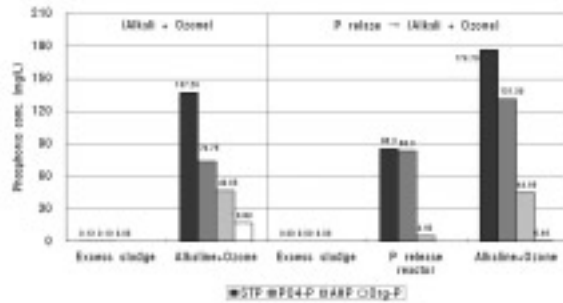


Fig. 6. Variation of phosphorus concentration (Alkali + ozone(left), P release + alkali + ozone(right)).

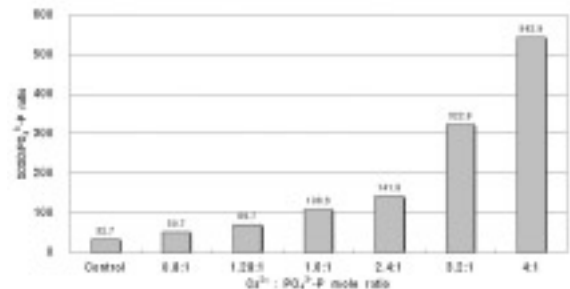


Fig. 8. Effect of Ca<sup>2+</sup> mole ratio on C/P ratio.

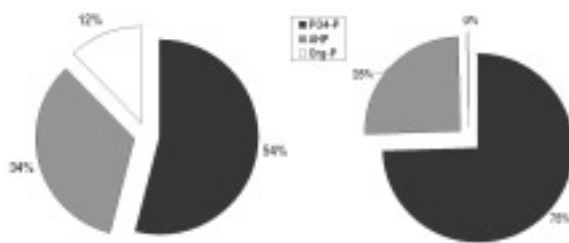


Fig. 7. Phosphorus fraction on sludge pre-treatment(Alkali + ozone(left), P release + alkali + ozone(right)).

을 회수해야 하나, 생산된 가용화액에는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 및 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도가 상대적으로 낮아 MAP이나 Hydroxyapatite 등의 결정화 기술 적용에 있어서 효율성이 떨어지기 때문에 본 연구에서는 인의 분율을 높일 수 있는 방법으로 생물학적인 인 방출조를 슬러지 전처리방조 전단에 설치하여 효율성을 평가하였다(Fig. 4).

실험에 있어서 Alkali+오존 접촉조 후단에 배치된 침전조 하부에서 침전된 슬러지 중 일부를 인 용출시 필요한 외부탄소원으로 폐슬러지 유량을 기준으로 20% 까지 재순환시켜 가능성을 검토하였다. 검토결과, 외부탄소원을 주입하지 않은 경우에는 인의 방출이 일어나지 않은 반면, 10% 공급한 경우에는 3시간동안에 약 40 mg/L 까지 방출이 일어났으며, 20%를 공급한 경우에는 약 80 mg/L 까지 인의 방출이 일어났으며, 방출을 위한 시간은 약 2시간정도면 원활하게 이루어짐을 확인하고 인 방출조를 배치한 슬러지전처리 공정에 대한 평가를 수행하였다(Fig. 5).

알칼리+오존 동시처리 공정과 인 방출조(Phosphorus releases reactor)를 추가한 공정의 비교평가 결과는 Table 3에 나타내었다. 침전조에서 전처리된 슬러지를 반송시킴에 의해서 오존+알칼리에 의한 효율이 감소하는 것으로 나타났으나, 이는 슬러지가 최종적으로 폐기하는 슬러지가 감소되는 것을 고려하면 큰 차이는 없는 것으로 판단된다.

인 방출조의 설치에 따른 효율평가 결과, 질소성분 변화는 크지 않은 반면, 예상대로 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도가 73.7 mg/L에서 131.3 mg/L로 약 1.8배 증가하는 것으로 나타났다. 또한 인

성분의 분율을 비교 평가한 결과, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 분율이 0.54에서 0.74로 크게 증가하였으며, AHP 분율은 0.34에서 0.25, Org-P 분율은 0.12에서 0.01로 감소하였다. 이는 인방출조의 유무에 상관없이 최종적으로 AHP 농도는 거의 유사하고 인방출조의 설치로 인하여 생물학적인 인 방출이 유도됨으로서 인방출조에서 soluble TP의 대부분이 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P임에서 알 수 있듯이 인의 생물학적 release 기작이 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 증가에 결정적으로 작용했다는 것으로 알 수 있다.

이상의 결과를 종합해볼 때, 인 방출조의 추가로 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 형태는 크게 증가하여 Hydroxyapatite(Ca<sub>5</sub>(OH)(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>)의 적용에 있어서는 효율적으로 인을 제거할 수 있고, 또한, 결정화 물질의 재활용가능성도 클 것으로 판단된다. 그러나, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 형태는 상대적으로 낮아 MAP(Magnesium Ammonium Phosphate)형성에는 제약조건이 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 상대적으로 효율성이 우수한 hydroxyapatite의 생성을 batch test로 수행하였다(Fig. 8). 인방출조를 추가로 설치한 슬러지전처리방법에 의해 회수한 가용화액의 초기 COD/PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P(C/P)비는 33:1이었으나, hydroxyapatite생성에 대해 Ca<sup>2+</sup>/PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 주입몰비가 2.4에서 C/P비가 141.9까지 크게 증가하였으며, 4인 경우에는 542.9까지 증가하여 hydroxyapatite의 형성 후 고품질의 유기물을 회수할 수 있음을 알 수 있다.

슬러지전처리 과정에서 생산된 유기물을 외부탄소원으로의 활용성 가능성을 평가하기 위해 NUR(Nitrate Uptake Rate) 측정법에 의한 RBCOD(readily biodegradable COD) 분율 분석, 유기물, 질소의 각 성분을 GC와 HPLC를 이용한 기기분석 및 탈질율을 측정된 결과, Soluble COD 중 RBCOD fraction은 71.5%이었으며, SDNR은 6.0mgNO<sub>3</sub>-N/g MLVSS · hr로 나타나 도시하수의 전형적인 탈질율인 1~2.6mgNO<sub>3</sub>-N/g MLVSS · hr 보다 크게 높은 탈질율을 얻었으며, 당초 MBR공정의 포기조에서 슬러지를 인출하여 실험하였기 때문에 초기 SCOD는 대부분 난분해성 유기물만 존재한 것을 감안하면 기기분석 결과에서 아세트산 650 mg/L, 프로피오닉산 220 mg/L로 분석된 결과는 용해된 유기물의 상당량이 미생물이 섭취하기 용이한 고품질로 나타나

BNR 공정에서 탈질 및 인방출 기작에 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

1. MLSS 농도가 약 10,000 mg/L 인 활성슬러지에 pH 10.5, 오존 주입농도 0.285g O<sub>3</sub>/gTSS 로 전처리한 결과, 감량화율(TSS기준)은 32% 이었으며, 전리 후의 SCOD의 농도는 2,850 mg/L 이었다.
2. 기존 오존+알칼리 슬러지 전처리공정에 인 방출조를 추가배치 함으로서 생물학적 인방출기작에 의해 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 용출농도가 약 1.8배 증가되었으며, hydroxyapatite 결정화 실험결과, Ca<sup>2+</sup>/PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 주입몰비가 2.4 에서 SCOD/PO<sub>4</sub>-P 비가 141.9, 주입몰비가 4 인 경우에는 542.9 까지 증가하여 hydroxyapatite의 형성 후 고품질의 유기물을 회수 할 수 있음을 알 수 있다.
3. 가용화액의 RBCOD fraction은 Soluble COD 중 71.5% 이었으며, 아세트산이 650 mg/L, 프로피오닉산이 220 mg/L 이었으며, SDNR은 6.0 mgNO<sub>3</sub>-N/g MLVSS · hr 로 용해된 유기물은 미생물이 섭취하기 용이한 것으로 나타났다.
4. 인방출조와 알칼리+오존 동시처리에 의한 슬러지 전처리공정에 후속으로 hydroxyapatite를 이용한 결정화를 적용함으로서 슬러지감량화 뿐만 아니라 C/P비 낮은 고품질의 유기물을 회수할 수 있어 BNR 공정에 외부탄소원으로 질소 및 인제거에 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.



#### 참고문헌

1. 환경부(2007) *하수슬러지 관리계획 수립지침*
2. Choi, E., Lee, H.S., Lee, J.W., Oa, S.W.(1996) Another carbon source for BNR system, *Water Sci. Technol.*, **34** (1-2), pp. 363-369.
3. P. Kampasa, S.A. Parsonsa, P. Pearceb, S. Ledouxb, P. Valec, J. Churchleyc, E. Cartmell(2007) Mechanical sludge disintegration for the production of carbon source for biological nutrient removal, *Water Research*, **41**, pp. 1734-1742
4. Liu, Y., Tay, J.H.(2001) Strategy for minimization of excess sludge production from the activated sludge process, *Biotechnol. Adv.* **19**(2), 97-107.
5. Wei, Y., Van Houten, R.T., Borger, A.R., Eikelbloom, D.H., Fan, Y.(2003) Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment, *Water Research*, **37**(18), pp. 4453-4467.
6. Muller, J.(2000b) Pretreatment processes for the recycling and reuse of sewage sludge, *Water Sci. Technol.* **42** (9), pp. 167-174.
7. Weemaes, M., Grootaerd, H., Simoens, F., Verstraete, W.(2000) Anaerobic digestion of ozonized biosolids, *Water Research*, **34** (8), pp. 2330-2336.
8. Boehler, M., Siegrist, H.(2004) Partial ozonation of activated sludge to reduce excess sludge, improve denitrification and control scumming and bulking, *Water Sci. Technol.* **49** (10), pp. 41-49.
9. Sheng-bing He, Gang Xue, Bao-zhen Wang(2006) Activated sludge ozonation to reduce sludge production in membrane bioreactor(MBR), *J. of Hazardous Materials*, **B135**, pp. 406-411.
10. W. Saktaywin, H. Tsuno, H. Nagare, T. Soyama, J. Weerapakkaroorn(2005) Advanced sewage treatment process with excess sludge reduction and phosphorus recovery, *Water Research*, **39**, pp. 902-910
11. L. Pastor, N. Marti, A. Bouzas, A. Seco(2008) Sewage sludge management for phosphorus recovery as struvite in EBPR wastewater treatment plants, *Bioresource Technology*, **99**, pp. 4817-4824
12. Park, K.Y., Lee, J.W., Ahn, K.H., Maeng, S.K., Hwang, J.H., Song, K.G.(2004) Ozone disintegration of excess biomass and application to nitrogen removal, *Water Environ. Res.* **76** (2), pp. 162-167.
13. Nishimura, F., Katoh, G., Fujiwara, T.(2001) Improvement and reduction of activated sludge by ozonation and its application to wastewater treatment, *Proceedings of 15th Ozone World Congress*, I, London
14. Cui, R., Jahng, D. J. (2004) Nitrogen control in AO process with recirculation of solubilized excess sludge, *Water Research*, **38**, pp. 1159-1172
15. APHA(2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. In: 21th ed. American Public Health association, American Water Works Association and Water Environment Federation, Washington, DC, USA.