

상향류 인 결정화공정을 이용한 슬러지 발효 유출수로 부터의 영양소 회수

안 영 호

영남대학교 공과대학 건설환경공학부

(2006년 4월 17일 접수, 2006년 8월 31일 채택)

Nutrient Recovery from Sludge Fermentation Effluent in Upflow Phosphate Crystallization Process

Young-Ho Ahn

School of Civil and Environmental Engineering, Yeungnam University

ABSTRACT : The nutrient recovery in phosphate crystallization process was investigated by using laboratory scale upflow reactors, adopting sequencing batch type configuration. The industrial waste lime was used as potential cation source with magnesium salt(MgCl₂) as control. The research was focused on its successful application in a novel integrated sludge treatment process, which is comprised of a high performance fermenter followed by a crystallization reactor. In the struvite precipitation test using synthetic wastewater first, which has the similar characteristics with the real fermentation effluent, the considerable nutrient removal(about 60%) in both ammonia and phosphate was observed within 0.5~1 hr of retention time. The results also revealed that a minor amount(<5%) of ammonia stripping naturally occurred due to the alkaline(pH 9) characteristic in feed substrate. Stripping of CO₂ by air did not increase the struvite precipitation rate but it led to increased ammonia removal. In the second experiment using the fermentation effluent, the optimal dosage of magnesium salt for struvite precipitation was 0.86 g Mg g⁻¹ P, similar to the mass ratio of the struvite. The optimal dosage of waste lime was 0.3 g L⁻¹, resulting in 80% of NH₄-N and 41% of PO₄-P removal, at about 3 hrs of retention time. In the microscopic analysis, amorphous crystals were mainly observed in the settled solids with waste lime but prism-like crystals were observed with magnesium salt. Based on mass balance analysis for an integrated sludge treatment process(fermenter followed by crystallization reactor) for full-scale application(treatment capacity Q=158,880 m³ d⁻¹), nutrient recycle loading from the crystallization reactor effluent to the main liquid stream would be significantly reduced(0.13 g N and 0.19 g P per m³ of wastewater, respectively). The results of the experiment reveal therefore that the reuse of waste lime, already an industrial waste, in a nutrient recovery system has various advantages such as higher economical benefits and sustainable treatment of the industrial waste.

Key Words : Crystallization, Fermentation Effluent, Hydroxyapatite, Phosphate, Struvite, Waste Lime

요약 : 연속 회분식 방식의 실험실 규모 상향류 반응조를 사용하여 인 결정화공정을 이용한 영양물질 회수에 대한 연구를 수행하였다. 양이온 공급원으로서 산업폐기물인 폐석회와 마그네슘염을 이용하여 그 운전특성을 비교하였다. 이 연구는 고성능 발효조와 인 결정화 반응조로 구성된 새로운 통합 슬러지 처리 공정에 있어서 인 결정화공정의 성공적인 적용성 평가에 초점을 두고 있다. 발효조 유출수와 유사한 특성으로 제조된 합성폐수를 이용한 첫 번째 struvite 결정화 실험에서 반응은 0.5~1 hrs 사이의 반응시간에서 빠르게 진행되었는데, 그 동안 상당량(약 60% 이상)의 암모니아와 인이 제거되었다. 알칼리성 조건이라는 기질의 고유특성으로 인하여 암모니아 탈기 현상이 다소 발생하였으나 그 정도는 미미한 것(<5%)으로 나타났다. 또한 공기주입에 의한 이산화탄소 탈기조건을 추가적으로 제공하였을 때 struvite 형성속도의 향상은 일어나지 않았다. 실험수로서 발효조 유출수를 사용한 두 번째 실험에서 struvite 결정화를 위한 마그네슘염의 최적주입량은 struvite형성질량비와 유사한 0.86 g Mg g⁻¹ P이었다. 반면에 폐석회의 최적주입량은 0.3 g L⁻¹으로 다소 높게 나타났으며, 약 3시간의 반응시간 조건에서 NH₄-N과 PO₄-P의 제거효율은 각각 80%와 41%로 나타났다. 각 실험에서 침전 물을 현미경으로 분석한 결과 마그네슘염을 사용한 경우 프리즘과 같은 결정체가 관찰된 반면 폐석회를 사용한 경우는 비결정질의 결정체가 주로 관찰되었다. 하수처리용량 158,880 m³ d⁻¹의 실규모 처리시설의 경우를 대상으로 한 통합 슬러지처리시스템의 물질수지 분석결과 결정화 반응조 유출수로 부터의 반응되는 영양물질의 재순환 부하(각각 하수 1 m³ 당 0.13 g N와 0.19 g P)는 매우 낮게 유지되는 것으로 나타났다. 그러므로 이미 산업폐기물 형태로 존재하는 폐석회를 본 연구에서와 같이 통합 슬러지 처리시스템의 영양물질 회수 공정에서 재이용하는 것은 높은 환경적 및 경제적 이익과 동시에 산업폐기물의 지속발전적 처리/처분이라는 다양한 장점을 가질 것이다.

주제어 : 결정화, 발효조 유출수, 하이드록시아파타이트, 인산염, 스트루바이트, 폐석회

1. 서 론

수자원으로 도시하수 처리수를 배출함에 따라 발생할 수

있는 부영양화 현상을 줄이기 위하여 우리나라는 1990년 이후 대부분의 도시하수처리시설을 생물학적 영양물질 제거 공정(BNR)으로 설계 또는 개선하고 있다. 열악한 하수관거 체계로 인하여 우리나라의 도시하수는 일반적으로 저농도(42~97 mg BOD L⁻¹)의 수질특성을 가지고 있다.¹⁾ 더욱이 영양물질(특히 P)제거와 관련하여 매우 중요한 쉽게 분해가

† Corresponding author
E-mail: yhahn@yu.ac.kr
Tel: 053-810-3511

Fax: 053-814-2410

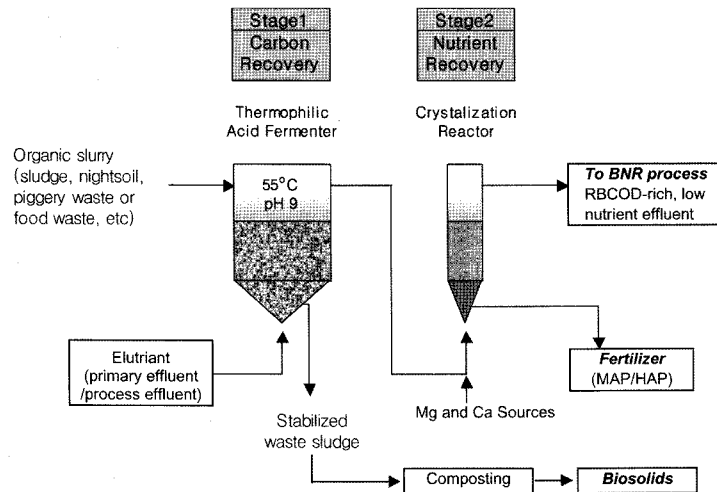


Fig. 1. Integrated sludge treatment process.²⁾

능한 유기물질(RBCOD)의 함량 역시 매우 낮고, 이러한 하수의 특성은 BNR공정의 저조한 운전성능으로 연결된다. 유입하수내 RBCOD와 같은 유기물의 함량을 증가시키기 위하여 우리나라의 최근 연구경향은 주로 하수슬러지, 음식물 쓰레기, 축산폐기물, 분뇨 및 정화조폐액 등과 같은 유기성 폐기물에서 탄소원(유기산)의 회수를 증진으로 집중되고 있다.²⁾ 그러나 유기성 폐기물로부터 유기산을 회수하는 공정에 있어서 영양물질(질소와 인)은 불가피하게 생성되는 반응부산물로 이는 공정의 적용에 있어 상당한 단점으로 인식된다.^{3,4)} 뿐만 아니라 암석권(lithosphere)에서 11번째로 풍부한 원소에 해당하는 인(P)은 그 산업적 수요의 증가로 인하여 점차적으로 고갈되고 있는 자원으로⁵⁾ 환경오염의 제어와 자원의 보전이란 측면에서 혐기성 소화조 상정액과 같이 인의 함량이 높은 폐수로부터 재생 가능한 자원의 회수가 강조되고 있다.^{6,7)}

최근 유기산을 생산하는 슬러지 발효공정에 있어서의 다양한 단점을 극복하기 위한 새로운 통합 슬러지 처리 시스템이 Fig. 1과 같이 제안되었다.²⁾ 높은 유기산 회수를 위한 상항류 세정 슬러지 발효조의 후단에 연결된 영양소 회수를 위한 결정화 반응조로 구성되는 이 공정은 고온도(55°C)과 알칼리성(pH 9) 운전조건의 적용으로 높은 가수분해/산 생성반응과 비병원성 안정화 폐슬러지의 생산 뿐만 아니라 후속하는 인 결정화 반응조에 최적의 운전조건을 제공하는 추가적인 운전특성을 가지고 있다. 그러나 통합 슬러지 처리 시스템의 성공적인 운전을 위해서는 알칼리와 금속양이온(Mg, Ca 등)의 적절한 공급원이 필요하며, 이러한 점들은 궁극적으로 운영비용의 증가를 초래할 것이다.

폐석회는 주로 화학물질, 시멘트 및 화학비료 제조산업에서 생산되는 주요 산업폐기물이다. 우리나라에서는 연간 총 180,000 ton 이상의 폐석회가 생산되는데, 이중 95% 정도가 NaCl과 CaCO₃를 이용한 소다재(Soda Ash, Na₂CO₃)생산시설인 화학물질 제조공장에서 그 부산물로 발생된다. 이러한 산업폐기물을 매립보조제나 농업적 용도로 사용할 경우 자연환경에 대한 부정적인 영향은 미미한 것으로 보고된 바 있

다.⁸⁾ Table 1은 이러한 폐석회의 주요 성분을 농업용 기능성 석회비료와 비교하여 나타낸 것이다. 폐석회는 미량의 알루미늄(Al), 철(Fe) 성분뿐만 아니라 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg)과 같은 풍부한 금속 양이온(건조시 약 60% 정도)을 포함하고 있다. 이러한 특성은 고성능의 발효조를 위해 적당한 알칼리 원 뿐만 아니라 결정화 공정을 위해서도 유용한 금속 양이온 공급원으로 사용될 수 있을 것이다. 화학적 이론에 따르면 다음과 같은 세 종류의 화학적 인 결정물을 예측할 수 있다.⁹⁾

- Metal phosphates(usually, Fe or Al)
- Struvite(magnesium ammonium phosphate-MAP, MgNH₄PO₄·6H₂O or magnesium potassium phosphate, MgKPO₄·6H₂O)
- Calcium phosphates(most likely hydroxyapatite-HAP, Ca₅(PO₄)₃OH)

본 연구에서는 인 결정화 공정에서 잠재적인 금속양이온 공급원으로서 폐석회의 적용 가능성을 마그네슘염의 경우와 비교하여 실험실 규모의 회분식 반응조를 이용하여 조사하였다. 대상기질로는 도시하수슬러지를 처리하는 고성능 발효

Table 1. Properties of waste lime and lime fertilizer in Korea

Items	Waste lime(%)*	Lime fertilizer for agricultural uses(%)
CaCO ₃	40.2	2.84
CaO	18.2	66.14
CaCl ₂	9.7	-
CaSO ₄	5.8	0.17
MgO	7.7	2.67
Fe ₂ O ₃	2.0	1.20
Al ₂ O ₃	3.8	0.56
NaCl	6.0	-
SiO ₂	6.7	1.32
Others	-	25.10

Note: based on dry weight; * water content, 40%

조의 유출수를 기준으로 제조된 합성폐수와 실제의 발효 유출수를 사용하였다. 또한, 현장규모에 있어서 통합 슬러지 처리시스템의 적용에 대한 사전예비평가가 전체 시스템의 물질수지에 의해 수행되었다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 회분식 반응조

연속 회분식 반응조 형상을 한 4개의 상향류 결정화 반응조가 실험실내 상온의 온도조건하에서 운전되었다. 반응조의 유효용적은 1.5 L(내경 62 mm, 높이 0.52 m)로 혼합은 반응조 상단부분에서 바닥부분으로 액체를 반송하므로써 이루어졌는데 이때 상향유속은 1 L min⁻¹로 설정하였다. 55℃와 pH 9의 운전조건으로 운전되는 도시하수슬러지를 처리용 고성능 발효조의 유출수를 기준으로 제조된 합성폐수와 함께 실제의 발효 유출수를 유입기질로 사용하였다. 실험실 규모 발효조가 운전되는 동안 유출수는 별도의 저장탱크에 모아 두고 본 실험에서 기질로 이용하였다. 고성능 슬러지 발효조의 상세한 운전특성은 앞선 연구결과를 참조하기 바란다.¹⁰⁾ Table 2에서 보여주는 것처럼 이 실험은 크게 3종류의 운전조건으로 계획되었다. 폐석회의 경우와 비교하기 위하여 마그네슘염(MgCl₂ · 6H₂O 형태)을 이용한 대조실험을 추가하였다. 각 실험에서 금속양이온의 투여량은 화학적 인산염 결정화반응의 반응양론식에 준하여 결정하였다. 또한 반응동안 공기주입 탈기의 영향을 평가하기 위해 실험 S-1의 경우에만 공기를 주입하였는데, 이는 암모니아 탈기공정의 설계권장기준¹¹⁾에 준하였다.

2.2. 분석방법

질소, 인 및 고형물 등의 분석은 Standard Methods¹²⁾에 준하여 수행하였다. 모든 시료는 0.45 μm 여과지(Micron Separations, Inc.)로 전처리한 후 분석하였다. 모든 반응조의 pH와 상향 유속은 실험이 진행되는 동안 연속적으로 모니터링 되었다. 결정화 반응조로 부터 생성된 결정물은 현미경 분석(Olympus BX60F5, Japan)에 의해 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 합성폐수를 사용한 결정화

Table 2. Characteristics of synthetic wastewater and sludge fermentation effluent

Test No.	pH	COD (mg L ⁻¹)	SS (mg L ⁻¹)	NH ₄ -N (mg L ⁻¹)	PO ₄ -P (mg L ⁻¹)	Remarks	
Synthetic wastewater	S-1	9.0	-	-	105	30	MgCl ₂ , Air*
Fermentation effluent	F-1	8.9	1,650	450	62	25	MgCl ₂
	F-2	9.0	1,970	520	88	20	Waste lime

Note) * air flowrate was 0.05 L min⁻¹ L⁻¹.

먼저 결정화 반응조에서 영양물질 회수 가능성을 조사하기 위해서 발효조 유출수와 비슷한 특성을 지니는 합성폐수를 준비하여 실험하였다. 이때 금속 양이온 공급원으로 마그네슘염과 공기를 공급하여 그 영향을 조사하였으며, 이러한 조건에서의 운전결과를 폭기 등 추가적인 조건을 가하지 않은 단순한 저류조(대조 반응조로서 control)에서의 거동과 비교하였다. Fig. 2는 그 실험결과를 보여주고 있는데, 회분식 실험을 하는 동안 폭기하지 않은 다른 경우는 pH가 초기 9.0에서 8.8으로 떨어진데 반하여 폭기를 시킨 경우의 반응조는 오히려 pH가 9.0에서 pH 9.4까지 증가하였다. pH의 증가는 공기폭기의 결과로 이는 암모니아 탈기 공정의 일반적인 특성이다. Fig. 2에서 y축 Ci/Co는 시간 i에서의 유출농도와 유입농도의 비율을 나타낸다. 회분식 운전기간동안 대조 반응조의 경우는 자연적 저감에 의한 암모니아와 인의 농도감소가 조금(<5%) 관찰되었다. 또한 폭기시킨 경우는 상당한 암모니아 제거가 관찰된 반면 인산염의 제거는 거의 대조 반응조의 경우와 유사한 경향을 보여 공기폭기의 경우 암모니아 탈기에 의한 질소제거를 유도할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 마그네슘염을 주입한 반응조에서는 암모니아와 인산염 모두 0.5~1시간 내에 상당한 제거율(약 60%)을 보였다. 종합적으로 볼 때 이러한 실험결과는 알칼리성(pH 9)을 띤 유입기질의 특성으로 인하여 자연적인 암모니아 탈기가 미량 일어날 수 있고, 또한 공기폭기에 의한 CO₂ 탈기는 궁극적으로 struvite 결정화 반응속도를 향상시키지는 못하나 암모니아 제거율을 높이는 데 효과를 보이는 것으로 나타났다. 즉, 기존에 연구된 대부분의 인 결정화 공정에서는 pH 조건을 높여주기 위해 공기폭기를 포함하는데,^{6,7,13,15)} 본 실험에서와 같이 고성능 발효 유출수를 모사한 인 결정화 공정에서는 공기폭기의 필요성이 없다는 것을 의미한다.

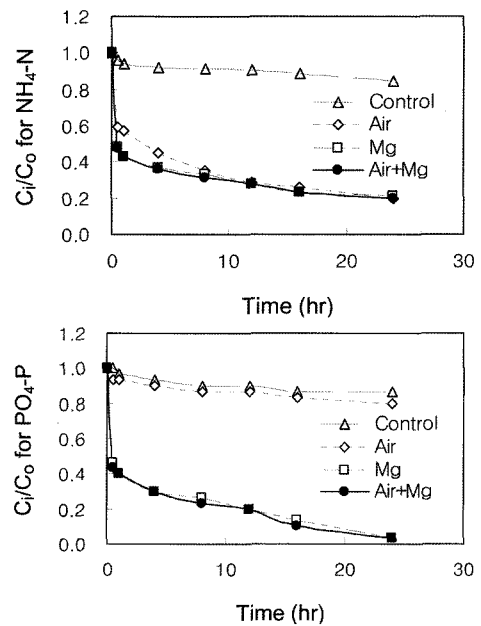


Fig. 2. Nutrient removal from synthetic wastewater. (Test No.S-1, Chemical dosage, 0.05 g Mg L⁻¹, air flowrate 0.05 L min⁻¹ L⁻¹).

3.2. 발효조 유출수를 이용한 결정화

고성능 발효 유출수를 모사한 합성폐수를 대상으로 한 실험에서의 긍정적인 결과에 따라 두 번째 실험에서는 실제 하수슬러지를 대상으로 한 실험실 규모의 고성능 발효조 유출수를 기질로 사용하였으나 이 실험에서 공기폭기의 불필요성으로 인하여 공기는 주입하지 않았다. 또한 금속양이온 공급원으로서 마그네슘염과 폐석회를 투입량은 기질에 포함된 인산염의 농도와 화학반응양론에 바탕을 두고 선정하였다. 그 결과 인 침전물의 질량비(struvite의 경우 약 0.8 g Mg g⁻¹ P, hydroxyapatite의 경우 약 2.1 g Ca g⁻¹ P)에 근거하여 마그네슘염과 폐석회의 투입량은 각각 0.86~3.25 g Mg g⁻¹ P와 0.3~1.2 g L⁻¹로 약 1~4배의 범위로 설정하였다.

Fig. 3은 마그네슘염을 사용한 회분식 실험결과를 나타낸다. 이 경우 회분식 실험기간동안 모든 반응조내의 pH는 9.0에서 8.5로 점차 감소하였다. 그러나 앞선 합성폐수를 이용한 실험결과와 비교하여 이 실험에서는 다소 낮은 암모니아 제거율을 보여 주었는데, 명확하게 알 수는 없지만 아마도 그 이유는 실험수의 기질특성에 따른 것으로 판단된다. 또한 마그네슘 투입량이 양론식의 1배에서 4배까지 높아질수록 암모니아 제거율도 비교적 높아지는 경향을 보이지만 그 영향은 다소 낮은 것으로 나타났다. 반응은 대체로 3시간 안에 완료되었으며, 이 시간이후에는 미량의 인산염 제거가 추가적으로 발생하였다. 실험결과 struvite 결정을 위한 마그네슘염의 적정 투입량은 struvite의 질량비와 유사한 0.86 g Mg g⁻¹ P이며, 이 공정의 체류시간은 약 3시간으로 짧게 유지할 수 있음을 의미한다.

Fig. 4에서 보이는 것처럼 폐석회를 이용한 실험 역시 결정화 반응은 약 3시간 안에 대부분 종료되었다. 그러나 마그네슘염을 사용했을 때와는 반대로 본 실험에서는 모든 반응조의 pH가 약 9.1~9.2로 약간 증가하였을 뿐만 아니라 더 높은 암모니아 제거율을 보였다. 특히 폐석회 투여량 범위 내에서 암모니아 제거율은 차이가 발견되지 않았지만 인산염의 경우는 약간의 차이를 보였다. 즉, 본 실험결과는 마그네슘염을 이용한 실험에서와 같이 양론식 이상 과잉의 금속양이온을 공급할 필요는 없다는 것을 보여준다. 대부분의 반응이 종료되는 3시간의 반응시간에서 NH₄-N과 PO₄-P의 제거효율은 각각 80%와 41%정도였으며, 최적의 폐석회 투입량은 0.3 g L⁻¹로 나타났다. 또한 10시간의 반응시간에서는 이보다 조금 더 높은 제거율(85% N제거와 50% P제거)을 보였다. 마그네슘염을 이용한 앞선 실험에서는 폐석회를 이용한 실험에서 보다 인산염 제거율은 다소 높게(50~60%) 나타난 반면에 암모니아 제거율은 약간 낮게(27~35%) 나타났다. 폐석회를 이용한 실험에서 높은 암모니아 제거율을 초래하는 주된 요인을 명확하게 설명할 수는 없다. 그러나 폐석회의 고유특성이 아마도 이러한 긍정적인 결과의 잠재적 이유가 될 것이다. 대표적인 실험결과는 Table 3에 요약되어 있다. 침전고형물 생산량은 각각 MgCl₂ 주입당 6.2 g TS g⁻¹ 그리고 폐석회 주입당 0.7 g TS g⁻¹로 나타났다. 일반적으로 struvite(MAP) 결정화공정의 화학산물로는 프리즘과

같은 결정물(prism-like crystals)이 생성되는 반면에 hydroxyapatite(HAP) 결정화과정에서는 무정형 결정물(amorphous crystals)이 주로 발생하는 것으로 알려져 있다.^{13,14)} 현미경 분석결과 마그네슘염과 폐석회를 이용한 두 실험에서는 각각 상이한 특성의 결정화 반응이 주로 발생하였음을 알 수 있었다. Fig. 5에 나타난 것처럼 본 실험에서는 폐석회를 이

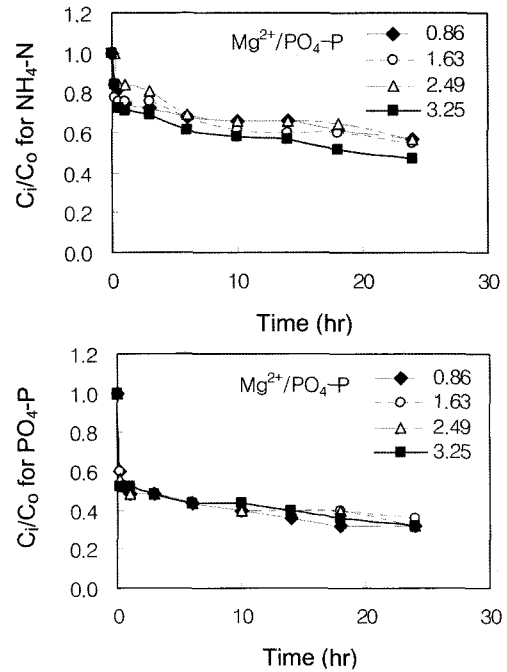


Fig. 3. Nutrient removal from sludge fermentation effluent by using MgCl₂(Test No.F-1).

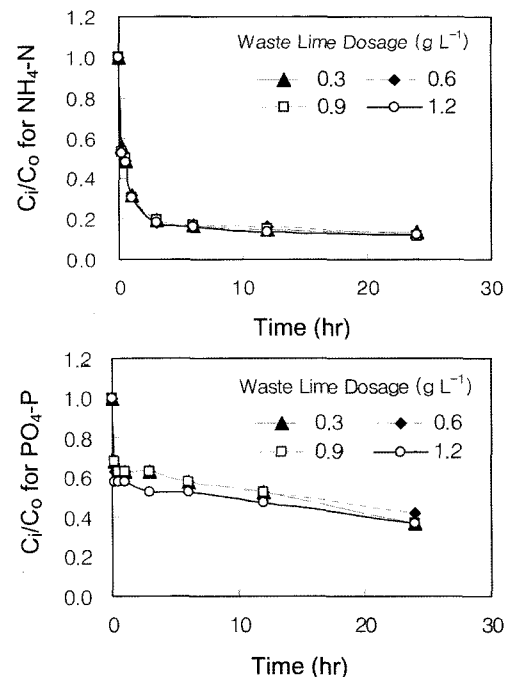


Fig. 4. Nutrient removal from sludge fermentation effluent by using waste lime(Test No.F-2).

Table 3. Comparative nutrient removal at HRT = 3 hrs

	Chemical addition		NH ₄ -N removal		PO ₄ -P removal		Sludge production
	Type	g Cation g ⁻¹ PO ₄ -P influent	(g N g ⁻¹ cation add)	(%)	(g P g ⁻¹ cation add)	(%)	(g TS g ⁻¹ chemical)
Synthetic wastewater	Mg salts	1.59	1.38	63	0.44	70	n.a.
Sludge fermentation effluent	Mg salts	0.86	0.95	30	0.68	50	6.2
	Waste lime	4.75	0.82	80	0.11	41	0.7

Note) n.a., not available

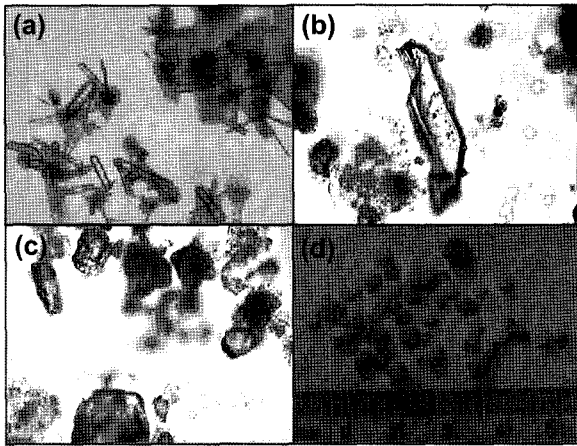


Fig. 5. Pictures of crystals from sludge fermentation effluent using MgCl₂(a, x50), waste lime(b, c, x100) and artificial synthetic pellets(d, x10).

용한 결정화 반응의 경우 무정형 결정물이 주로 관찰되었으나, 마그네슘염을 이용한 결정화 반응에서는 프리즘과 같은 결정물이 관찰되었다. 더욱이 반응조의 장기적인 운영에 따라 화학적으로 응결입자들은 점점 더 크게 성장할 수 있는데,^{9,15)} Fig. 5(d)에는 그 예로서 인공합성된 입상화 결정산물을 보여주고 있다.

3.3. 통합 슬러지 처리 공정에서의 물질수지

본 실험은 비록 실험실 규모하에서 이루어진 것이지만 본 실험 결과를 이용하여 실규모 적용에서의 운영상의 경제적 이익을 개략적으로 추정할 수 있다. 본 실험 결과를 기준으로 수행한 실규모 도시하수처리장(처리용량 158,880 m³ d⁻¹)의 물질수지 평가예를 Fig. 6에 나타내었다. 도시 하수처리장의 운전특성과 발생된 하수슬러지 발효조의 운전특성은 선

행연구결과¹⁰⁾에 상세히 설명되어 있다. 주어진 현장조건하에서의 물질수지결과 결정화 반응조 유출수로부터 수처리 계통(생물학적 영양물질 제거 공정)으로 반송되는 영양물질 부하는 하수 1 m³ 당 각각 0.13 g N(0.026 kg N m⁻³ of sludge)와 0.19 g P(0.041 kg P m⁻³ of sludge)로 매우 낮게 평가되었다. 즉 이 공정의 적용에 의해 수처리 계통의 생물학적 영양소 제거공정의 운전에 미치는 슬러지 처리계통의 영향을 매우 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이때 결정화 반응의 유효 부산물로 생산되는 화학적 부산물은 폐석회 1 kg 주입당 0.7 kg TS이 될 것이며 높은 안정성으로 인해 비료나 토지개량제로 직접적인 활용이 가능할 것이다. 그러므로 이미 산업폐기물 형태로 존재하는 폐석회를 본 연구에서와 같이 통합 슬러지 처리시스템의 영양물질 회수 공정에서 재이용하는 것은 높은 환경적 및 경제적 이익과 동시에 산업폐기물의 지속발전적 처리/처분이라는 추가적인 장점을 가질 것이다.

일반적으로, HAP와 같은 인산칼슘은 산업에서 사용되는 원료와 동일한 성분과 구조를 가진 화학물이기 때문에 산업적 재이용에 있어서 선호하는 형태로, 특히 하폐수로부터 인산칼슘 형태의 인산염 회수의 필요성과 그 가능성이 강조되고 있다.⁹⁾ 본 실험에서 처럼 영양소 회수를 위한 유동상 형태의 반응조 설계는 결정화된 입자의 점진적인 성장으로 자체 입상화가 가능하도록 계획되어야 한다. 이 경우 주요한 공정상의 문제점은 높은 pH 조건의 필요성과 입상화를 유도하기 위한 근원체(seed)의 적합성 등이다. 그러나 Fig. 1에서 제안하고 있는 통합 슬러지처리 시스템에서 폐석회의 재이용은 일반적인 슬러지 발효조가 안고 있는 다양한 문제점을 모두 극복할 뿐만 아니라 지속가능한 인산염 회수공정을 위한 대안이 될 수 있을 것이다. 그러므로 장래에 보다 더 체계적인 파이럿 혹은 실규모의 연구가 필요할 것이다.

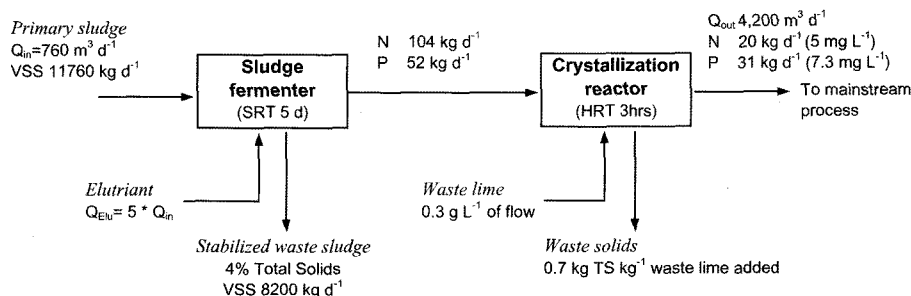


Fig. 6. Mass balance of nutrient in integrated sludge treatment process.

4. 결론

본 연구에서는 인 결정화 공정에서의 금속양이온 공급원으로 폐석회의 적용가능성을 슬러지 발효 유출수를 대상으로 실험실 규모의 회분식 반응조를 사용하여 조사하였다. 산업 폐기물인 폐석회는 미량의 Al과 Fe 뿐만 아니라 Ca과 Mg 같은 풍부한 양이온을 포함하고 있으므로 금속인산염광물, struvite와 인산칼슘 같은 화학적 결정물의 형성을 기대할 수 있다. 도시 하수슬러지를 처리하는 고성능 발효조(운전조건: 55°C, pH 9)의 유출수를 기준으로 제조된 합성폐수와 실제의 발효 유출수가 대상 기질로 사용되었다. 이 실험에서 결정화 반응은 0.5~3 hrs의 반응시간에서 대부분 종료되었다. 고성능 발효조 유출수의 고유한 알칼리성(pH 9) 특성은 자연적인 미량의 암모니아 탈기현상을 초래하였으나 결정화 반응을 위해서는 적절한 것으로 나타났다. 또한 공기폭기에 의한 이산화탄소 탈기공정의 적용은 결정화 반응속도를 향상시키지는 못하였다. 폐석회의 적정투입량은 0.3 g L⁻¹로, 3 hrs의 반응시간에서 NH₄-N과 PO₄-P의 제거효율은 각각 80%와 41%로 나타났다. 현미경 분석 결과 마그네슘염을 사용한 경우 프리즘 같은 결정체가 관찰된 반면 폐석회를 사용한 경우는 비결정질의 결정체가 주종으로 관찰되었다. 하수처리용량 158,880 m³ d⁻¹의 실규모 처리시설의 경우를 대상으로 물 질수지 분석결과 결정화 반응조 유출수로 부터의 반송되는 영양물질의 부하는 각각 하수 1 m³ 당 0.13 g N과 0.19 g P로 매우 낮게 나타났다. 이미 산업폐기물 형태로 존재하는 폐석회를 본 연구에서와 같이 통합 슬러지 처리시스템의 영양물질 회수 공정에서 재이용하는 것은 높은 환경적 및 경제적 이익과 동시에 산업폐기물의 지속발전적 처리/처분이라는 다양한 장점을 가질 것이다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, “하수도시설의 유지관리 개선방안에 관한 연구,” KICT 90-EC-111(1991).
2. Ahn, Y. H. and Choi, H. C., “Municipal sludge treatment and disposal in South Korea: status and a new sustainable approach,” *Water Sci. Technol.*, **50**(9), 245~253(2004).
3. Banister, S. S. and Pretorius, W. A., “Optimization of

- primary sludge acidogenic fermentation for biological nutrient removal,” *Water SA*, **24**(1), 35~41(1998).
4. Banister, S. S., Pitman, A. R., and Pretorius, W. A., “The solubilisation of N and P during primary sludge acid fermentation and precipitation of the resultant P,” *Water SA*, **24**(4), 337~342(1998).
5. Steen, I., “Phosphorus availability in the 21st century: management of a non-renewable resource,” *Phosphorus & Potassium*, 217(1998).
6. Battistoni, P., De Angelis, A., Prisciandaro, M., Boccardo, R., and Bolzonella, D., “P removal from anaerobic supernatants by struvite crystallization: long term validation and process modelling,” *Water Res.*, **36**, 1927~1938(2002).
7. Celen, I. and Türker, M., “Recovery of ammonia as struvite from anaerobic digester effluent,” *Environ. Technol.*, **22**(11), 1245~1253(2001).
8. 강병희, 이송, 배재호, 김진한, 김지형, 이용빈, 이태수, 폐석회를 이용한 매립성토제의 개발 및 사용에 따른 환경영향평가에 관한 연구, 동양화학공업(2000).
9. Velsami-Jones, E., “Phosphorus in wastewaters: is there a potential for recovery as calcium phosphate?,” *Chimica Oggi(Chemistry Today)*, **5**, 52~55(2002).
10. Ahn, Y. H. and Speece, R. E., “Elutriated acid fermentation of municipal primary sludge,” *Water Res.*, **40**(11), 2210~2220.
11. US EPA, Wastewater Technology Fact Sheet: Ammonia Stripping, EPA 832-F-00-019(2000).
12. APHA, AWWA and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th Ed., Washington D.C., USA(1995).
13. Doyle, J. D. and Parsons, S. A., “Struvite formation, control and recovery,” *Water Res.*, **36**, 3925~3940(2002).
14. Nriagu, J. O. and Moore, P. B., *Phosphate Minerals*, Springer-verlag(1983).
15. Moriyama, K., Kojima, T., Minawa, Y., Matsumoto, S., and Nakamachi, K., “Development of artificial seed crystal for crystallization of calcium phosphate,” *Environ. Technol.*, **22**(11), 1245~1253(2001).