

Separation of Inorganic Sludge and MAP from Municipal Wastewater Sludge Using Hydrocyclone

습식 사이클론을 이용한 하수슬러지내 무기성분 및 MAP 분리

Dong-Woo Lee¹ · Kang-Hyeong Bae¹ · Kun-Sang Cho¹ · Sung-Hong Kim^{2*}

이동우¹ · 배강형¹ · 조건상¹ · 김성홍^{2*}

¹뉴엔텍(주) 환경기술연구소 · ²조선대학교 토목공학과

Abstract : The performance of inorganic sludge separation system is evaluated. Anaerobic digester effluent sludge is used for feed sludge of this system and hydrocyclone is used for inorganic sludge separation. For phosphorus removal and recovery $MgCl_2$ is pumped into MAP growth tank, a component of inorganic sludge separation system. Using this system inorganic sludge which contained less than 40 % of organic matter can be discharged stably and the maximum amount of separated inorganic sludge is 13.4 % of influent sludge based on dry solid. The amount of phosphorus recovered as MAP(as P) is 16.7 % to influent T-P.

Key words : norganic sludge separation, hydrocyclone, MAP recovery

주제어 : 무기슬러지 분리, 습식 사이클론, MAP 회수

1. 서론

하수처리장에서 발생하는 하수슬러지는 유기물 함량에 따라 유기성 슬러지와 무기성 슬러지로 구별되며, 유기물 함량이 40 % 이하인 경우 무기성 슬러지로 분류되며 별도의 처리(대표적으로 고화처리) 없이 함수율만 85 % 이하로 조정하면 직매립이 가능한 장점이 있다. 그러나, 하수처리장에서 발생하는 하수슬러지의 유기물 함량은 50 ~ 80 % 수준으로 직매립하기에는 유기물 함량이 높고, 대체연료로 활용되기에는 발열량이 낮은 경우가 많아 고화처리 후 매립하는 방안이 증가하고 있는 실정이지만 고화처리에 높은 비용이 소요되고 폐기물의 부피와 중량이 증가하는 단점이

있어 이를 대체할 수 있는 효율적인 처리방안 개발이 요구된다.

슬러지 감량 기술로 널리 적용되어 있는 혐기성 소화는 슬러지 감량과 동시에 유용한 에너지 자원인 바이오가스를 생산할 수 있는 장점이 있으나, 슬러지 감량효율에 한계가 있고 고농도의 반류수가 발생하는 단점을 지니고 있다. 특히, 인의 경우 수처리 과정에서 농축된 인이 혐기소화 과정에서 고농도로 방출되는 단점이 있어 수처리시설의 유입부하를 10 % 이상 증가시켜 수처리기능 악화를 유발하고 있어 별도의 반류수 처리시설 도입이 증가하고 있는 추세이다.

따라서, 본 연구에서는 하수슬러지에서 직매립이 가능한 무기성 슬러지를 별도로 배출시킬 수 있는 방안과 MAP 반응을 통해 반류수에 함유된 인을 저감시키고 동시에 유용자원인 인을 회수하는 방안에 대해 연구를 수행하였다.

MAP 생성기술은 폐수를 이송하는 파이프와 펌프 내에 스트루바이트(Struvite, magnesium ammonium phosphate hexahydrate, $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$, MAP)의 침전이 확인된 것에서 유래한다(Rawn 등, 1939). 스트루바이트의 침전 문제는 밀폐된 폐수관리에서 재순환에 심각한 방해물이 되었다(Safley 등, 1982). 그래서 스트루바이트에 대한 많은 연구가 폐수로부터 재회수, 재이용하는 침전보다는 형성된 스트루바이트를 어떻게 제거하고 방지하느냐 하는데 초점이 맞추어졌으나 현재는 인의 재회수에 대한 방안으로 활발히 연구가 진행되고 있다. 연구사례로 이태리에 대규모 스트루바이트 결정화 시설이 하수 슬러지의 혐기성 상등액으로부터 인산을 제거하기 위하여 건립되었으며(Battistioni 등, 2001), fluidized bed 반응조에서 모래알을 핵으로 이용하여 스트루바이트를 침전시켰다. REM-NUT[®] process(Liberti 등, 2001)은 선택적 이온교환에 의하여 하수로부터 인산과 ammonium 이온의 동시제거가 가능하였고, 스트루바이트의 형성으로 화학적 침전에 의한 회수가 가능하였다.

본 연구에서는 $MgCl_2$ 수용액 주입에 따른 MAP 생성을 유도함과 동시에 습식 사이클론을 이용하여 MAP를 포함한 슬러지내 무기성분을 별도로 분리코자 하였다. 습식 사이클론은 가장 일반적인 산업용 습식 분리장치로서 기계적 구동부분이 전혀 없는 침전형 분별기로 사이클론의 분리효율은 형상과 매우 밀접한 관계를 가지고 있다(Kawatra 등, 1996). 일차 슬러지에 습식 사이클론을 적용하는 경우 슬러지 농도 1%에서는 75 μm 그리트를 95% 제거할 수 있으나 농도가 3%인 경우 제거할 수 있는 입자의 크기는 210 μm 로 증가한다. 그러나, 소화슬러지는 점성이 낮고 섬유성 물질을 적게 함유하므로 3~4%의 농도에서도 75 μm 보다 큰 입자가 제거될 수 있는 것으로 알려져 있다(Metcalf & Eddy, 2005).

습식 사이클론은 유체의 흐름을 통해 분리효율이 결정되므로 정확한 수리학적 유동을 분석하여 최적의 효율을 갖는 방안을 도출하여야 하는데 최근에는 수학적 접근인 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 사이클론 해석에 대한 많은 연구가 수행되었다(Olson 등, 2004; Yang 등, 2007). Ju 등(2003)은 상용 CFD프로그램인 CFX-4.3을 사용하여 CFD해석결과와 실험값을 비교한 결과 약 8%의 오차로 습식 사이클론의 설계 및 검증 방법으로 CFD해석이 유용하게 사용될 수 있다고 판단하였으며, Lee and Bang(2009)은 상용 CFD 중 Fluent 6.3.26을 사용하여 Lab scale 장치의 실험값과 비교한 결과 CFD의 입자추적모의 결과는 실측값보다 낮으나, 수면적 부하율 증가에 대한 처리효율 감소 경향은 유사하여 사이클론 설계 이전 구조변화에 따른 효율예측을 평가하는데 CFD모의 기법이 활용될 수 있다고 판단하였다. 본 연구에서는 CFD해석기법을 사용한 모래입자 입경별 분리효율 모의를 통해 실험에 사용된 습식 사이클론의 기본적 성능을 평가하였으며, 이를 통해 향후 실규모로 확장 적용시 사이클론 설계 및 선정에 위한 기초자료가 될 수 있도록 하였다.

2. 실험 재료 및 방법

실험에 사용된 슬러지는 경기도 소재 N물체 생센터 혐기성 소화슬러지를 사용하였으며 슬러지 성상은 다음의 표와 같다.

Table 1. Feed sludge characteristics

Item	Unit	Value range	Average
pH	-	7.24 ~ 8.18	7.69
Temp.	℃	26.5 ~ 30.5	28.3
TS	%	2.03 ~ 2.61	2.29
VS	%	1.16 ~ 1.65	1.42
T-N	mg/L	1103.2 ~ 1573.8	1347.8
NH ₄ -N	mg/L	728.7 ~ 1026.5	831.9
T-P	mg/L	168.8 ~ 430.7	280.9
PO ₄ -P	mg/L	19.0 ~ 38.4	25.4

실험에 사용된 무기슬러지 분리장치는 가용화 설비를 겸비한 5 m³ 규모의 파일럿 호기성 소화 장치 전단에 설치하였으며 설비 개요는 다음 표 및 그림과 같다.

Table 2. Pilot plant configuration

Item	Volume(m ³)
Feed tank	5.0
MAP growth tank	0.33
Aerobic digester	5.0

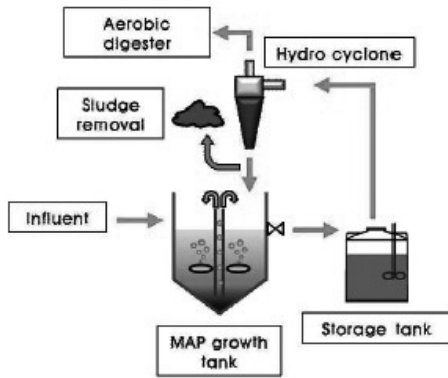


Fig. 1. Pilot plant layout

유입 슬러지는 1시간 주기로 유입 저류조(feed tank)에서 MAP 성장조로 공급되고 MAP 성장조에서 유출된 슬러지는 MAP 저류조로 이송된다. MAP 저류조 슬러지는 습식 사이클론을 거쳐 무기성 슬러지는 습식 사이클론 하부(Apex)에서 분리 배출되고, 무기성분이 제거된 슬러지

는 후속 공정인 호기성 소화조로 공급되어 슬러지 감량이 진행되도록 공정을 구성하였다. 습식 사이클론 펌프는 MAP 저류조에 설치된 레벨 스위치와 연동되어 일정수위에 도달하면 자동으로 운전되며 분리된 무기성 슬러지는 MAP 성장조에 축적되도록 하였다. 무기슬러지 인발은 VS 함량이 40 % 이하가 될 수 있도록 인발주기를 조정하며 간헐적으로 수행되었다. 산기방식에 의한 교반이 수행된 MAP 성장조의 하부에 비중이 큰 무기성분의 침적이 일부 발생하는 것이 관찰되어 무기슬러지 인발시에는 습식 사이클론 펌프를 MAP 성장조 하부로 연결시켜 침적된 무기성분이 인발될 수 있도록 하였다. 습식 사이클론 하부를 통해 무기슬러지 인발이 진행되는 동안에는 습식 사이클론을 거친 상부 월류 슬러지는 다시 MAP 성장조로 순환시켰으며 목표한 습식 사이클론 하부 인발량에 도달되면 다시 정상적인 자동운전 조건으로 전환시켰다.

파일럿 시설에 적용된 습식 사이클론은 내경 96 mm, 높이 630 mm이고, 습식 사이클론에서의 압력손실은 2 kg/cm²을 적용하였으며 이때 습식 사이클론 처리유량은 평균 3.9 m³/hr로 운전되었다. MAP 성장조에는 유입 PO₄-P 대비 몰비 2 ~ 4배의 MgCl₂를 주입하여 MAP 반응을 통한 인제거를 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

1) CFD 해석을 통한 습식 사이클론 분리능력 평가

습식 사이클론의 제작을 위한 방법으로 상용 CFD 프로그램인 ANSYS fluent v.13.0 을 이용한 전산유체해석을 수행하였다. 습식 사이클론의 형상은 보다 효율적인 것으로 평가된 경사면 접선공급(Ramped)방식으로 모래 입자(비중 2,645 kg/m³)에 대하여 1 ~ 500 μm의 입자사이즈 중 10개에 대해 고품질을 유입 시킨 후 정상상태 모의를 수행하였다. 습식 사이클론의 형태는 2가지 유입부 면적 및 유입후 습식 사이클

론의 실린더까지의 유하거리가 틀린 것이 특징으로 Fig. 2와 같으며, 해석조건은 Table 3에 나타내었다.

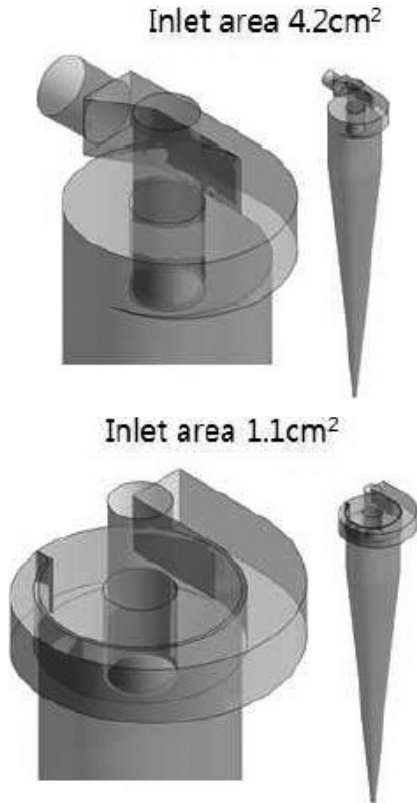


Fig. 2. Geometry of hydrocyclone

Table 3. Conditions of hydrocyclone simulation

Item	No.1	No.2	No.3
Inlet flow(m ³ /hr)	4.8	7.2	3.9
Inlet area(cm ²)	4.2		1.1
Viscosity(kg/m · s)	0.005		
Particle density(kg/m ³)	2,645		

No.1과 No.2의 경우 유입유량이 증가함에 따라 사이클론내부의 속도가 전체적으로 증가하는 형태를 띄며, 유입부의 속도와 상부유출구의 속도가 비슷한 형태를 나타내었다. 하지만 No.3에서는 고유속 구간이 사이클론 실린더 외벽면에 집중되었으며, 상부유출속도는 2.1 m/s로 상대적으로 낮게 나타났다(Fig.3).

모래 제거율 모의결과는 Fig. 4에 제시하였다. 동일한 유입면적의 No.1과 No.2의 모래제거율은 100 μm에서 각각 59.6 %, 77.6 %로 유입유량이 증가함에 따라 사이클론내부의 유속증가로 인해 제거율이 소폭 상승하였다. 이에 반해 유입부 면적을 1.1 cm²으로 줄인 No.3의 경우 유입유량을 3.9 m³/hr으로 줄였음에도 불구하고 30 μm에서 제거효율이 58.02 %, 50 μm에서 77.16 % 및 80 μm에서 91.25 %로 모래제거효율이 급격히 증가되었다. No.1, No.2를 이용한 실제 운전결과 분리슬러지의 유기성분함량이 50 %이상으로 본래 의도한 40 %이하를 만족시킬 수 없었으며 본 논문에 제시된 실험결과는 No.3을 이용하여 실험한 결과이다.

2) 인발조건에 따른 슬러지 분리특성 평가
운전 기간 동안의 유입 슬러지 및 MAP 성상조 내부의 TS 농도 변화와 시기별 무기슬러지 인

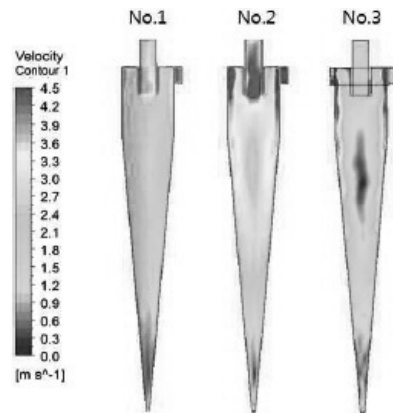


Fig. 3. Velocity contour in cyclone

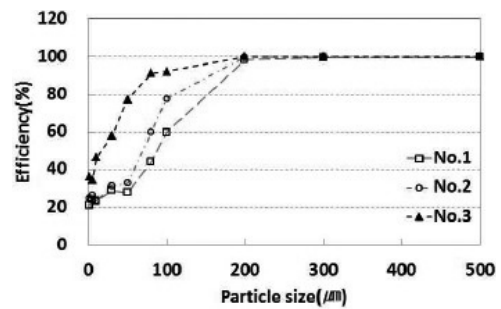


Fig. 4. Removal rate vs particle size

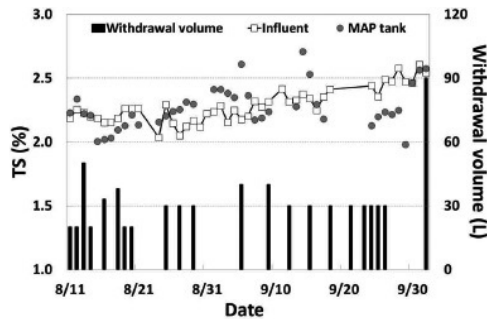


Fig. 5. TS variation during experiment

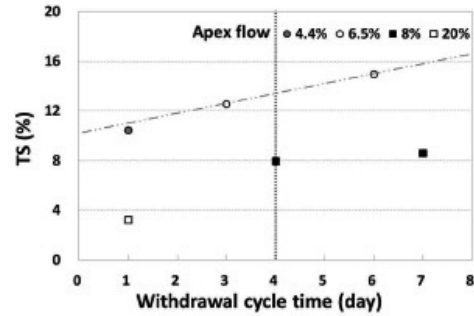


Fig. 6. TS vs withdrawal cycle time

Table 4. Withdrawal conditions and separated sludge characteristics

Withdrawal condition		Separated sludge		Date ³⁾
Cycle(d) ¹⁾	Apex flow(%) ²⁾	TS(%)	VS/TS(%)	
1	19.7	3.23	57.5	8.11 ~ 8.14
	4.4	10.45	42.5	9.24 ~ 9.26
3	6.5	12.58	39.5	9.12,9.15,9.18
4	8.2	7.97	42.2	9.9
5	6.4	14.96	36.5	10.2
7	7.8	8.59	36.9	9.5

- 1) Time interval of withdrawal
- 2) Ratio apex outflow to inflow of cyclone
- 3) Date when withdrawal was conducted

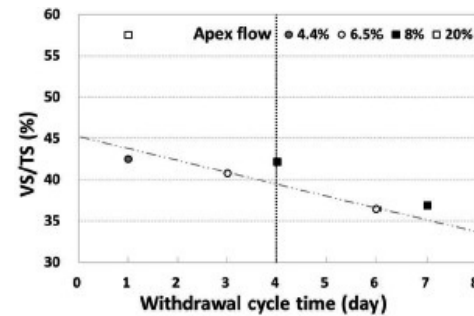


Fig. 7. VS/TS vs withdrawal cycle time

Table 5. Daily averaged values of influent and separated sludge

Period	Flow(L/d)	Influent sludge			Separated sludge			Ratio of sludge separated ¹⁾ (%)
		Flow(L/d)	TS(kg/d)	VS/TS(%)	Flow(L/d)	TS(kg/d)	VS/TS(%)	
I	8.11 ~ 8.20	597	13.2	62.4	29.1	0.82	58.3	6.2
II	8.24 ~ 8.30	519	11.1	60.5	12.9	0.42	57.7	3.8
III	8.31 ~ 9.9	520	11.7	61.7	8.0	0.66	39.5	5.6
IV	9.10 ~ 9.18	504	11.8	62.6	11.3	1.42	39.6	12.0
V	9.24 ~ 10.2	760	18.9	62.3	20.0	2.54	38.9	13.4

- 1) Ratio of separated sludge mass to influent sludge mass based on dry solid

발량을 Fig. 5에 제시하였다. 유입 슬러지의 TS 농도는 2.03 ~ 2.61 %(평균 2.29 %)로 유입되었고, MAP 성장조 내부의 TS 농도는 1.98 ~ 2.71 %(평균 2.27 %)로 유지되었다.

무기슬러지 인발조건에 따른 분리슬러지 성상은 Table 4에서 보듯이 무기슬러지 인발주기와 사이클론 하부 유출유량(Apex flow) 비율에 따라 큰 차이를 보였다. 인발주기가 길어질수록 그리고 사이클론 하부 유출유량 비율이 작아질수록 분리슬러지의 TS 농도는 증가하고 유기물

함량은 감소하는 경향을 보였으며(Fig. 6, Fig. 7), 인발주기를 4일 이상으로 하고 습식 사이클론 유입량 대비 습식 사이클론 하부 유출유량 비율을 6.5 % 이하로 유지할 경우 유기물 함량 40 % 이하의 무기슬러지를 안정적으로 배출할 수 있었다.

운전기간별 일평균 유입량 및 동기간 평균 슬러지 인발량을 Table 5에 제시하였다. 무기슬러지 분리장치의 인발조건에 따라 분리되는 슬러지의 VS 함량이 달라졌으며 운전 최적화를 통해

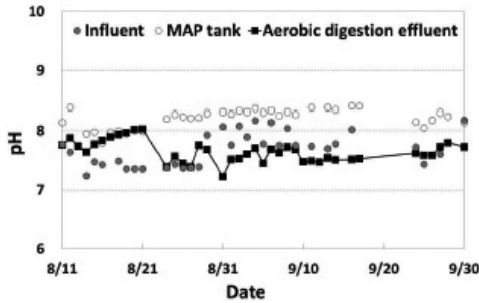


Fig. 8. Variation of pH

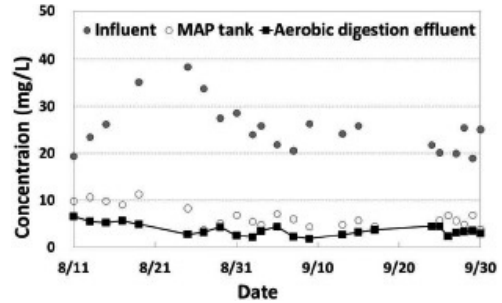


Fig. 9. Variation of $PO_4\text{-P}$

운전기간 III 에서부터는 VS 함량 40 % 이하인 무기성 슬러지를 분리 배출할 수 있었으며, 분리량은 운전기간 V에서 유입 고형물량(TS) 대비 최대 13.4 % 인발이 가능하였다.

3) $MgCl_2$ 투입에 따른 인제거 특성 평가

유입슬러지와 MAP 성장조의 pH 변화를 Fig. 8에 제시하였다. 유입 슬러지의 평균 pH가 7.7 인데 반해 MAP 성장조의 pH는 평균 8.2로 상승하였는데 이는 MAP 성장조에서 수행된 포기로 인해 과포화된 CO_2 성분이 탈기되면서 pH 상승을 유발시킨 것으로 판단된다. 이를 통해 별도의 알칼리제 주입 없이도 MAP 생성에 유리한 pH 조건이 형성될 수 있었다.

인제거를 위해 MAP 성장조에 $MgCl_2$ 를 주입하였으며 실험결과를 Fig. 9에 제시하였다. $MgCl_2$ 는 8월 11일 ~ 8월 25일 기간에는 유입 $PO_4\text{-P}$ 대비 2몰을 주입하였고, 8월 26일 ~ 10월 2일 기간에는 4몰을 주입하여 주입률에 따른 처리효율 변화를 확인하였다. $MgCl_2$ 2몰 주입시 MAP 성장조 $PO_4\text{-P}$ 농도는 9.87 mg/L로 65.4 %의 제거율을 보였으며, $MgCl_2$ 4몰 주입시 MAP 성장조 $PO_4\text{-P}$ 농도는 5.45 mg/L로 77.7 %의 제거율을 보였다. MAP 성장조 후단에 설치된 호기소화조는 포기 영역과 비포기 영역으로 분리되어있고, 비포기 영역으로 슬러지 반송이 이루어지도록 구성되어 있어 생물학적 인제거 반응을 통한 추가적인 인제거가 가능하다. 따라서, 후속 공정인 호기소화조를 거친 슬러지의 $PO_4\text{-P}$ 농도는 2몰 및 4몰 주입률에

서 각각 5.1 mg/L, 3.2 mg/L로 감소하였으며 전체적인 $PO_4\text{-P}$ 제거율은 각각 82 % 및 87 %로 증가하였다.

4) 분리 슬러지내 MAP 성분 평가

분리 슬러지에 함유된 MAP 성분을 확인하기 위해 분리 슬러지에 대한 용출실험을 수행하였다. 실험에 사용된 분리 슬러지의 성상을 Table 6에 제시하였다. 용출실험은 분리 슬러지를 100배 희석한 후 황산(0.25 %)을 주입하여 시간에 따른 농도 변화를 분석하는 방식으로 수행되었다. 실험조건은 Table 7과 같고 실험 결과는 Fig. 10에 제시하였다.

실험결과에서 보듯이 황산 주입량이 많을수록 용출속도가 빨라지는 것을 알 수 있으며, 황산 40 mL 주입한 Test #3의 경우 반응시간 30분 이내에 용출이 완료되었다. Test #3에서의 평균 $PO_4\text{-P}$ 및 $NH_4\text{-N}$ 농도는 각각 24.5 mg/L, 15.8 mg/L였으며, 초기 농도를 뺀 순수 용출농도는 $PO_4\text{-P}$ 24.4 mg/L, $NH_4\text{-N}$ 10.7 mg/L가 된다. 용출된 인과 질소의 비를 몰비로 환산하면 P:N이 1.03:1.0이 되어 MAP의 이론적 몰비 1:1과 일치하였다. 따라서, 용출된 인 성분은 대부분 MAP 성분이 용출된 것으로 추정될 수 있다.

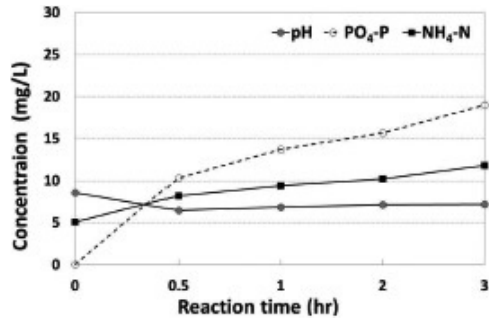
용출 가능한 성분으로 금속이온과 반응한 다양한 형태의 결합물이 존재할 수 있으나 분리된 슬러지에 함유된 성분이 대부분 MAP 성분인 점으로 볼 때, 습식 사이클론으로 분리될 수 있는 형태는 결정 생성 및 성장을 통해 입자화된 MAP 성분이 주를 이루는 것으로 판단된다.

Table 6. Characteristics of separated sludge

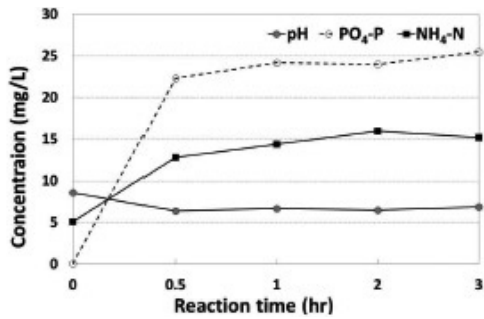
TS(%)	VS(%)	NH ₄ -N(mg/L)	PO ₄ -P(mg/L)
10.48	4.38	510	5.8

Table 7. Extract test condition

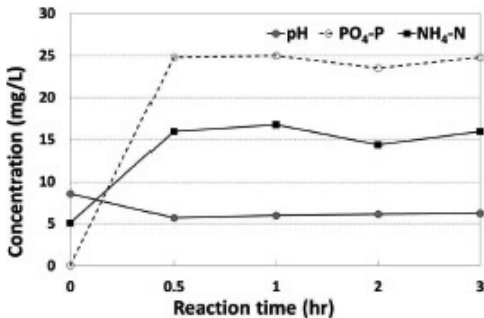
Item	Test #1	Test #2	Test #3
Dilution ratio	1/100	1/100	1/100
Diluted volume(L)	1	1	1
H ₂ SO ₄ (0.25 %) dose (mL)	20	30	40



(a) H₂SO₄(0.25 %) dose: 20 mL



(b) H₂SO₄(0.25 %) dose: 30 mL



(c) H₂SO₄(0.25 %) dose: 40 mL

Fig. 10. Release of PO₄-P and NH₄-N from inorganic sludge

반응시간 0.5시간 이후 용출이 완료된 것으로 판단되는 Test #3에서의 PO₄-P 평균값 24.5 mg/L를 최대 용출농도로 설정하여 희석배수를 곱하면 분리슬러지에 함유된 용출가능한 인의 양은 2,450 mg/L로 산출되며, 상기 검토에서 보듯이 대부분 MAP 성분으로 추정된다. 운전 기간 V에서의 일평균 분리슬러지 인발유량(20 L/d)은 유입유량(760 L/d) 대비 2.6 %이므로 (Table 5참조) 단위 유입유량(1 L) 기준 분리 배출된 MAP 양은 63.7 mgP가 된다. 따라서, 운전기간 V에서의 평균 유입 T-P 381 mg/L 대비 16.7 %의 인성분이 MAP로 회수될 수 있는 것으로 평가된다. MAP 생성이 PO₄-P와의 결합을 통해서만 생성될 수 있다는 점과 유입 PO₄-P가 유입 T-P 대비 평균 9.0 %인데 반해 16.7 %가 회수된 점을 고려할 때 혐기성 소화슬러지에 이미 상당량의 MAP 성분이 존재하고 있는 것으로 추정할 수 있다.

본 연구에서 확인된 MAP 생성, 분리 기술과 용출 방법을 활용하면 고농도 하수 슬러지에서 MAP 성분을 선택적으로 회수할 수 있는 실용화된 기술의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

무기슬러지 분리장치 최적화 연구를 수행한 결과, 안정적인 무기슬러지 배출을 위해서는 무기슬러지 인발주기와 습식 사이클론의 하부유량 제어가 매우 중요한 운전인자로 평가되었고, 인발주기를 4일 이상으로 하고 습식 사이클론 처리량 대비 하부유량 비율을 6.5 % 이하로 유지할 경우 유기물 함량 40 % 이하의 무기슬러지를 안정적으로 배출할 수 있었으며, 무기슬러지 분리량은 최적 운전조건에서 유입 고형물량(TS) 대비 13.4 %(건량 기준) 인발이 가능하였다.

무기슬러지 분리장치 구성요소인 MAP 성장조에 MgCl₂를 투입한 결과, 유입 PO₄-P 대비 2몰 주입시 MAP 성장조에서의 평균 PO₄-P는 9.87 mg/L로 65.4 %의 제거율을 보였고, 4몰

주입시 5.45 mg/L로 처리되어 77.7 %의 제거율을 보였다.

습식 사이클론으로 분리된 무기슬러지에 함유된 MAP 성분은 2,450 mg-P/L였으며, 평균 유입 T-P 381 mg/L 대비 16.7 %의 인성분을 MAP 형태로 회수할 수 있었다.

사 사

본 연구는 차세대에코이노베이션 기술개발사업(405-112-046)으로 진행되었습니다.

참고문헌

- Battistioni P. (2001) The use of organic fraction of municipal solid waste hydrolysis products for biological nutrient removal in wastewater treatment plants, *Water Research*, 33(1), pp.214-222.
- Ju J.I., Choi Y.S., Lee Y.K., Kim T.H., and Kim S.Y. (2003) Numerical study of turbulent flow in a hydrocyclone, *Journal of Fluid Machinery*, 6(2), pp.34-40.
- Kawatra S.K., Bakshi A.K. and Rusesky M.T. (1996) The effect of slurry viscosity on hydrocyclone classification, *Int. J. Miner. Process*, 48, pp. 39-50.
- Lee J.H. and Bang K.W. (2009) Analysis of particle trap efficiency for hydrocyclone using computational fluid dynamics, *Journal of Fluid Machinery*, 9(1), pp.65-72.
- Liberti L., D. Petruzzelli and L. de Florio. (2001) REM NUT ion exchange plus struvite precipitation process. Proceedings of the 2nd International Conference on Phosphorus Recovery for Recycling from Sewage and Animal wastes, *Noordwijkerhout, Holland*, pp.12-14.
- Metcalf & Eddy. (2005) *Wastewater Engineering*, pp.1484-1485, McGraw-Hill, New York.
- Olson T.J., Ommen R.Van. (2004) Optimizing hydrocyclone design using advanced CFD model Original Research Article, *Minerals Engineering*, 17(5), pp.713-720.
- Rawn A.M., Banta A.P. and Pomeroy R. (1939) Multiple-stage sewage sludge digestion, *Transactions of ASCE*, 105, pp.93-132.
- Safley L.M., Barker J.C., Robarge W.P. and Westerman P.W. (1982) Salt deposition in flush recycle systems, *ASAE Paper 82-4533*, pp.14-17.
- Yang Q., Lv W.j., Ma L. and Wang H.l. (2013) CFD study on separation enhancement of mini-hydrocyclone by particulate arrangement, *Separation and Purification Technology*, 102, pp.15-25.