



# 하수처리공정에서 이산화탄소를 이용한 스트러바이트 제어에 관한 연구

## A study of struvite control using CO<sub>2</sub> in sewage treatment process

한금석<sup>1,2\*</sup>·홍성호<sup>2</sup>·최영준<sup>1</sup>

Keumseok Han<sup>1,2\*</sup>·Seongho Hong<sup>2</sup>·Youngiune Choi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>서울물연구원, <sup>2</sup>송실대학교 화학공학과

<sup>1</sup>Seoul Water Institute, <sup>2</sup>Department of chemical engineering, Soongsil University

pp. 211-220

pp. 221-233

pp. 235-242

pp. 243-251

pp. 253-259

pp. 261-268

pp. 269-277

pp. 279-289

### ABSTRACT

Sludge transporting pipes in wastewater treatment plant are easy to be clogged with struvite when the digested sludge and dehydrated filtrate are transported through the pipes, which lowers the efficiency of sludge treatment system in a WWTP. pH is one of the most important factors in struvite formation, and carbon dioxide separated from biogas can be used to control pH and struvite formation. By controlling pH, the amount of dehydrating agent can be reduced by about 10%, which saves the budget for facility maintenance. As CO<sub>2</sub> is reused and dehydrating chemicals are saved, the approach can contribute to global warming gas reduction.

**Key words:** CO<sub>2</sub>, Dehydrating agents, Pipeline, pH control, Struvite

**주제어:** 이산화탄소, 탈수약품, 배관, pH 조절, 스트러바이트

## 1. 서 론

환경부는 2030년까지 공공하수처리시설 에너지 자립율 50% 달성을 목표로 혐기성 소화조 효율 개선 사업을 2005년부터 추진해오고 있다. 이에 따라 공공하수처리시설 내의 하수슬러지 처리공정 중 바이오가스 생산이 가능한 혐기성 소화공정의 중요성이 높아졌다. 또한, 환경부는 공공하수처리시설 에너지자립화 사업으로 혐기성소화조의 기존 시설 효율개선 사업과 혐기성 소화조 증설 등을 추진하고 있다 (Ministry of Environment, 2010).

혐기성 소화의 효율 개선의 목적은 바이오가스 생산성 향상과 더불어 슬러지 내의 유기물을 최소화하여 슬러지 발생량을 저감하는 것이다. 혐기성소화공

정에서 발생하는 소화슬러지는 슬러지 이송배관을 따라 슬러지 저류조를 거쳐 탈수시설인 원심탈수기 등으로 슬러지를 탈수하여 함수율이 78%내외인 탈수 케익으로 배출하여 육상처리하고 있다. 혐기성 소화 슬러지 이송과정에서 이송배관 내부에 스케일 생성으로 완전히 막히는 현상이 발생한다. 이로 인해 슬러지 이송속도가 저하되어 슬러지 이송량 감소로 효율이 떨어지고, 청소 등 유지관리비용이 늘어날 수 있다. 따라서 슬러지 이송배관 스케일 생성을 억제하여 슬러지 처리효율 개선이 필요하며, 이에 대한 해결방안을 마련해야 한다.

하수처리시설의 공정 배관 막힘의 원인인 스케일의 주요 성분은 스트러바이트(NH<sub>4</sub>MgPO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O)이며, 잉여슬러지의 질소, 인 성분과 생슬러지의 모래성분(Ca, Mg, K) 등의 화학반응에 의해 생성된다. 특히 분뇨, 음식물 등 고농도 폐수가 혐기성 소화를 거친 후에 많

Received 20 March 2018, revised 17 April 2018, accepted 24 April 2018

\*Corresponding author: Keumseok Han (E-mail: hayuu@seoul.go.kr)

이 발생되고 있는 것으로 나타났다 (Karakashev et al., 2008). 스트러바이트는 크게 결정의 핵생성(Crystals birth) 단계와 결정화 성장(Development of crystal until equilibrium) 단계로 거쳐 생성된다 (Kim et al., 2008). 결정의 핵생성 단계는 Fig. 1과 Fig. 2에서 보는 바와 같이 1차 핵생성과 2차 핵생성으로 구분된다. 1차 핵생성은 용액에 녹아 있는 용질 입자들 간의 응집으로 결정핵을 생성하는 단계로, 균일 및 불균일 핵생성으로 구분된다 (Kim et al., 2008). 균일 핵생성은 불순물 또는 이질 입자에 의해 결정화가 유도되는 현상으로 종자(Seed) 물질로써 촉매효과에 의해 핵생성에 필요한 반응 에너지를 감소시킴으로써 핵생성속도가 빠르게 촉진한다. 2차 핵생성은 자기 촉매반응에 의해 일어나며, 동질의 종자결정물질이 존재하여 결정핵이 생성되는 과정이다 (Kim et al., 2008). 스트러바이트 생성에 따르면 화학적 영향인자인 pH, 온도, 생성혼합비를 제외한 다른 영향인자를 살펴본 결과, 배관 재질과 배관 굴곡에 따라 스트러바이트 생성이

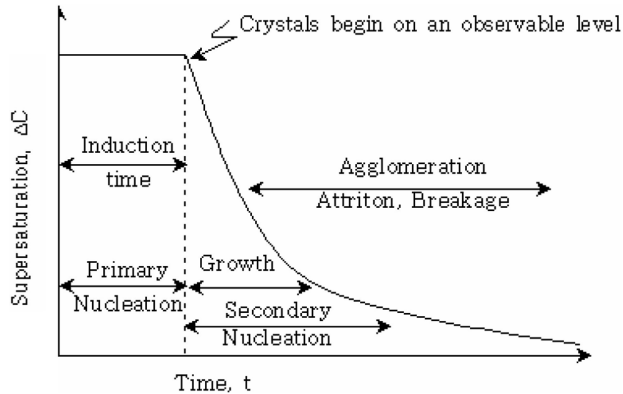


Fig. 1. Struvite crystallization process (Kim et al., 2008).

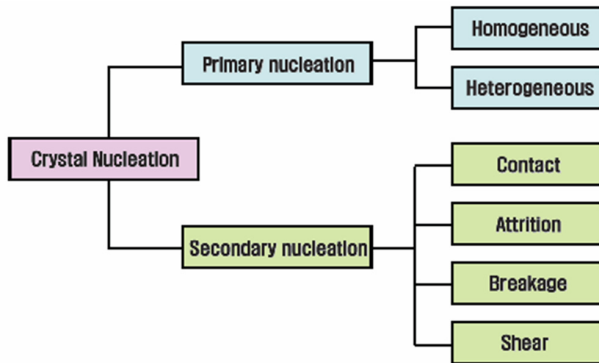


Fig. 2. Classification of crystallization nucleation generation (Kim, 2007).

영향을 받는 것으로 나타났다 (James and Simon, 2002). 스트러바이트 생성속도는 금속 파이프, PVC 파이프, 아크릴 파이프 순으로 생성이 느리며, 아크릴 파이프는 경우 생성이 되지 않는 것으로 나타났으나 (James and Simon, 2002), 실질적으로 아크릴 표면 상태에 따라 영향을 받는 것을 확인한 바 있다. 스트러바이트 생성은 배관 내의 표면 거칠기에 따라 영향을 받으며, James and Simon (2002)의 연구에 따르면 표면 거칠기는 결정핵 지점(Site)로 작용하여 스트러바이트가 생성되는 것으로 보고되었다.

S시 공공하수처리시설에서 배관 막힘의 원인 물질인 스트러바이트 생성에 관해 조사한 결과, 혐기성 소화슬러지의 이송시 배관 내부, 펌프나 배관 접합부에서 스트러바이트가 많이 발생하는 것으로 나타났다. 특히 원심탈수기 탈수여액 배관 접합부가 스트러바이트 생성 결정핵으로 스트러바이트가 생성되며, 주기적으로 탈수여액 배관이 막히는 것으로 나타났다. 현재 하수처리시설에서 혐기성 소화 후 슬러지 이송배관 등의 막힘 문제는 현장에서 주기적인 배관 청소 및 교체를 하거나, 철염계 약품을 사용하여 해결해오고 있다. Mulder et al. (2017)의 연구에서 활성슬러지 말단 및 소화조 후단에 FeCl<sub>3</sub>를 주입하여 인산염 부하를 줄임과 동시에 스트러바이트 스케일을 방지하였다.

Fig. 3은 공공하수처리시설의 스트러바이트 생성에 의한 소화슬러지 배관, 탈수여액 배관 막힘과 배관 청소 후 사진이다. 보는 바와 같이 돌덩어리처럼 뭉쳐졌으며, 배관을 주기적으로 청소해도 잔류되는 스트러바이트 존재로 인해 다시 결정핵으로 작용하여 스트러바이트가 생성되는 것으로 사료된다. 이는 Kazi (2012)의 연구에서 하수처리시설 소화슬러지 배관에서 스트러바이트가 생성되어 배관이 막히는 사례와 동일하다. 스트러바이트 생성은 화학적, 물리적 또는 생물학적 방법으로 개선 될 수 있다. 스트러바이트 형성은 화학 평형을 기반으로 하기 때문에 제어 방법은 다른 인산염 함유 염을 형성하거나 pH를 낮추는 것에 기반을 두고 있다 (James and Simon, 2002). 파이프의 기존 스케일을 줄이거나 멤브레인의 오염을 줄이기 위해 산 세척(빙초산 또는 황산)을 사용하는 사례가 보고되었다 (Choo and Lee, 1996; Williams, 1999). 스트러바이트 생성을 억제하기 위해 염화제이철을 사용하는 것이 가장 보편적인 방법이다 (WEF, 1991). 스트러바이트 생성 억제 중 화학약품 사용없이 pH 낮추기



Fig. 3. Field struvite generation piping appearance.

위한 방법으로 이산화탄소를 사용하는 것이다 (Radev et al., 2011). 다른 연구에서는 이산화탄소를 탈기시커 스트러바이트를 생성하는 방안 연구가 많이 진행되었다 (Saidou et. al, 2009).

다양한 방법 중에 경제성 및 환경적인 측면을 고려할 때 하수처리시설에서 발생하는 이산화탄소를 활용하는 방안이 연구되어야 한다. 본 연구에서는 하수처리시설에서 발생하는 소화가스 중 이산화탄소를 활용한 실험 결과 및 현장 적용 시스템을 제안하고자 한다.

## 2. 실험 대상 및 방법

스트러바이트 생성 조절 실험을 위해 1 M  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ,  $K_2HPO_4$ ,  $NH_4Cl$  및  $NaOH$ (pH 조절)를 제조하였다. pH 조절을 위해 이산화탄소 가스를 사용하였다. 1 M  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ,  $K_2HPO_4$ ,  $NH_4Cl$ 를 각각 10 mL씩 비이커에 넣은 후  $NaOH$ , 이산화탄소를 주입하여 pH 조절하였다.

또한 혐기성 소화 후에 발생하는 소화슬러지 및 원심 탈수기에서 발생하는 탈수여액을 대상으로 하여 배관 막힘 제어 평가 실험을 수행하였다. 실험은 600 mL 비이커에 시료 200 mL를 넣은 후 이산화탄소 가스를 0.5 L/min 주입하여 반응시간에 따른 pH를 측정하였다. Fig. 4는 스트러바이트 생성 제어 실험장치 모식도를 나타냈으며, 이산화탄소, 교반기, pH meter로 구성하였다.

하수처리시설의 소화슬러지 및 탈수여액 시료를 대상으로 실험을 수행한 후 인(T-P)의 농도를 측정하기 위해 ICP/AES(ACTIVA, JOBIN YVON HORIBA, France)를 사용하여 분석하였다. S, J 하수처리시설에서 생성된 스트러바이트 표면 구조를 SEM(JEM-3010, JEOL사,

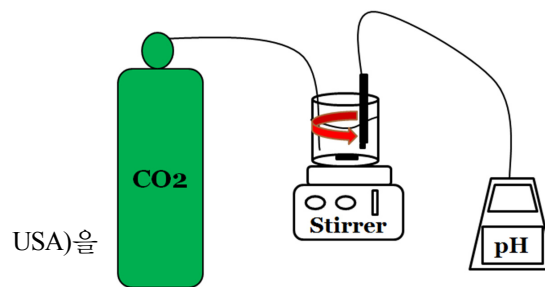


Fig. 4. Experimental apparatus diagram.

활용하여 결정 구조를 분석하였다. 총인은 소화슬러지 및 탈수여액에 질산과 염산 1:1로 주입하여 마이크웨이브로 전처리를 한 후 분석을 하였으며, 결정표면은 하수처리시설의 스트러바이트를 배관에서 채취하여 일정 배율로 표면을 분석하였다.

이산화탄소 주입에 따른 추가적인 효과를 알아보기 위해 탈수약품(응집제) 주입률 실험을 수행하였다. 실험은 자테스트기를 이용하여 0.2% 유기응집제를 제조한다. 소화슬러지 500 mL 비이커에 200 mL를 넣는다. 적정한 탈수약품(응집제)을 넣고 200 rpm, 1분 교반 후 50 rpm, 30초 교반한다. 실험이 끝나면 여과장치를 이용하여 고형물과 탈수여액을 분리하여 여액이 빠져나오는 시간 및 여과량을 체크하여 주입량 산출식에 의해 결정하였다. 실험은 온도별, pH에 따라 응집제 주입을 산정실험을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 스트러바이트 생성에 대한 pH 제어 실험 결과

Table 1은 스트러바이트 생성 실험 pH 조건을 나타낸

pp. 211-220

pp. 221-233

pp. 235-242

pp. 243-251

pp. 253-259

pp. 261-268

pp. 269-277

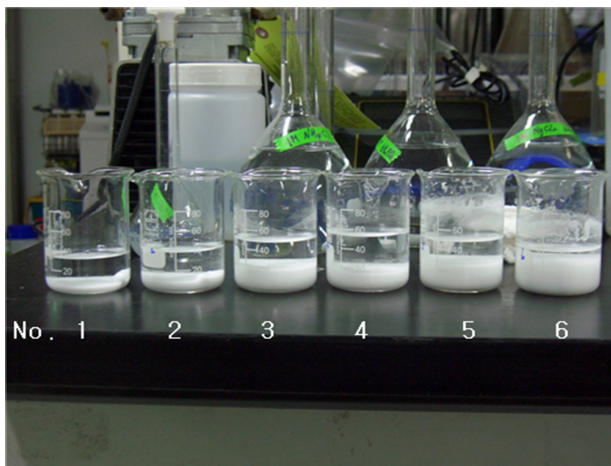
pp. 279-289

것으로 1 M  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ,  $K_2HPO_4$ ,  $NH_4Cl$ 를 각각 10 mL씩 비이커에 넣은 후 NaOH, 단독주입, NaOH와 이산화탄소를 순차적으로 주입하여 pH를 조절로 스트러바이트 생성을 조절하였다. 그 결과 Fig. 5에 스트러바이트 생성량 변화를 나타낸 것이다. pH에 따른 생성량(건중량)을 측정은 건조기(Dry Oven)를 이용하여 시료를 건조하여 무게를 측정하였다.

Fig. 6은 pH 변화에 따른 상징액의 마그네슘과 인 농도 변화를 나타내었다. pH가 높을수록 상징액에 존재하는 마그네슘과 인의 농도가 낮았다. pH 9.68일 때 상징액의 마그네슘과 인 농도가 가장 낮은 것으로 나타나 스트러바이트 등 결정 생성이 잘 된 것으로 판단된다. Fig. 7는 pH 따른 스트러바이트 등 결정 생성량을 나타내었다. pH가 상승할수록 결정 생성량은 증가되다가 pH 8.5일 때 가장 많이 생성됨을 확인하였다. Fig. 6에서도 인 농도가 pH 8.5일 때 가장 낮았으며, 이후에는 다시 증가하는 경향을 보였다. 그러나 마그네슘은 pH 증가에 따라 잔류되는 농도가 계속 낮아지는 경향을 보였다. 이는 스트러바이트 이외의

**Table 1.** Struvite produce test according to pH control

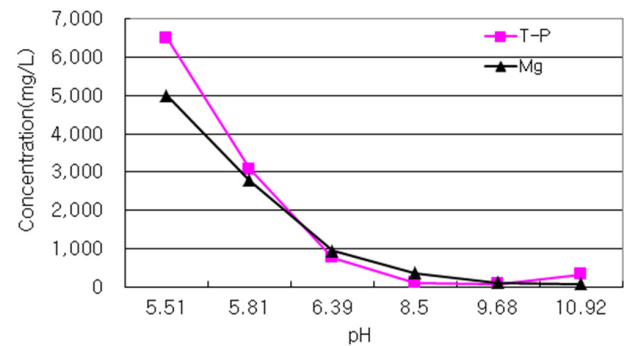
Test No.	NaOH injection(pH control)	pH
1	0 mL	5.51
2	5 mL	5.81
3	15 mL	9.68
4	20 mL	10.92
5	15mL + CO <sub>2</sub> injection	8.50
6	10mL + CO <sub>2</sub> injection	6.39



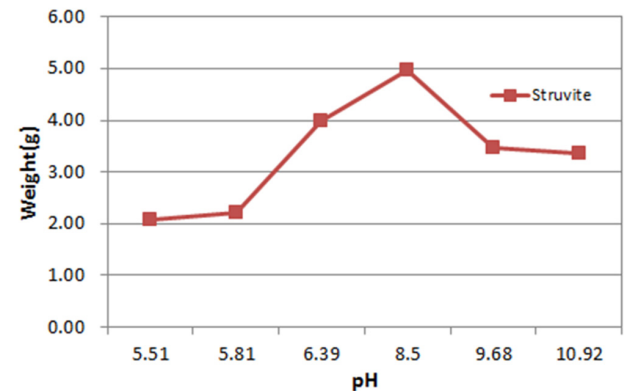
**Fig. 5.** Changes in struvite production (Test No. 1 ~ 6).

newberyite, 염화칼륨 등 결정물질이 생성되어 나타나는 현상으로 판단된다 (Berrin et al., 2018). 스트러바이트 생성 pH 영향을 평가한 결과, pH 8.5~10에서 스트러바이트 등 결정물질이 잘 생성됨을 확인하여, 본 실험과 문헌이 일치하는 결과를 얻었다 (Marti et al., 2008).

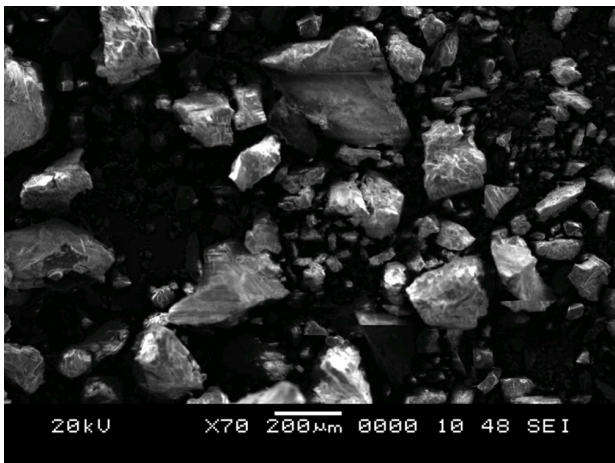
Fig. 8은 S, J 하수처리시설에서 발생된 스트러바이트의 SEM 사진을 나타내었다. S, J 하수처리시설에서 발생한 스트러바이트와 Michael et al. (2010) 연구에서의 제조한 스트러바이트 SEM 사진은 차이가 나는 것으로 나타났다. Michael et al. (2010) 연구의 결정모양은 별집 구조처럼 보였으나, S, J 하수처리시설에서 생성된 스트러바이트는 결정모양이 달랐다. Micael et al. (2010)의 연구는 Mg : P 몰비가 1 : 1 반응하여 스트러바이트 생성한 것이며, S, J 하수처리시설에서 발생한 스트러바이트는 스트러바이트 이외의 다양한 불순물이 포함되어 장기간에 걸쳐 생성된 것이다.



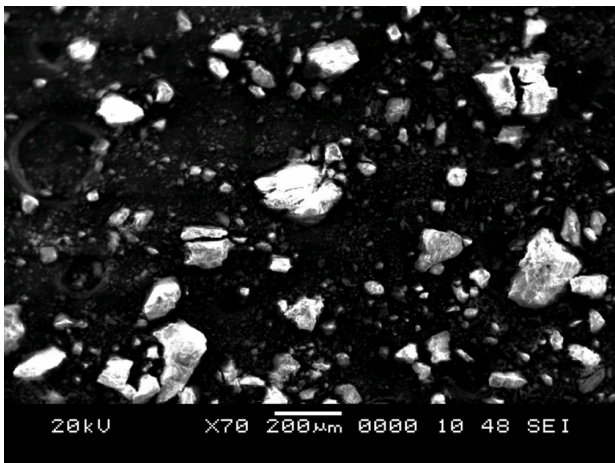
**Fig. 6.** Changes of Mg and T-P in the supernatant according to pH.



**Fig. 7.** Changes of the struvite produced amount according to pH.



(a) S WWTP Struvite



(b) J WWTP Struvite

Fig. 8. Site produced struvite SEM pictures.

### 3.2 이산화탄소를 활용한 스트러바이트 생성 억제 실험 결과

본 실험은 소화슬러지에 이산화탄소 주입에 따른 pH 제어 가능성을 평가하기 위해 S시 S 및 J 하수처리시설의 소화슬러지, S, N, J 하수처리시설의 원심탈수여액을 대상으로 하여 시료 200 mL에 이산화탄소 0.5 L/min 주입한 후 시간에 따른 pH 변화 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 9에서 보면 소화슬러지를 단순히 교반만 하는 경우에는 pH 변화가 거의 없거나 미미한 상승을 보였다. 그러나 이산화탄소를 소화슬러지에 주입함에 따라 pH가 하강되고, 이산화탄소 주입 6분 경과시 pH 1이상 떨어지는 것을 확인하였다.

Fig. 9와 10에서 소화슬러지보다 탈수 여액의 pH가

높았으며, 이산화탄소 주입에 따른 pH 하강 효과는 탈수여액에서 더 큰 것으로 나타났다. 이는 탈수여액이 총고형물(TS) 함량이 낮아 이산화탄소 용해속도가 소화슬러지보다 빠르기 때문이다. 결과적으로 이산화탄소 주입으로 pH를 낮춤으로 스트러바이트 생성억제 효과가 있을 것으로 판단된다.

하수처리시설에서 이산화탄소 투입한 후 슬러지나 탈수여액에 pH 하강 효과가 크고, 이산화탄소 용해가 지속성이 길수록 슬러지나 탈수여액 이송배관 내에서 스트러바이트 생성을 억제할 수 있을 것으로 판단되어 실험한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 교반은 마그네틱바로 하였으며, 처음부터 8분까지 이산화탄소를 공급하다가 8분 이후부터 이산화탄소 주입을 중단하였다. 실제 pH 7.5 인 소화슬러지가 이산화탄소 주입에 의해 pH 6.6 까지 감소가 되었으며, 이후 공급을 중단한 후 18분 지난 경우에 pH 6.9 까지 상승한 것으로

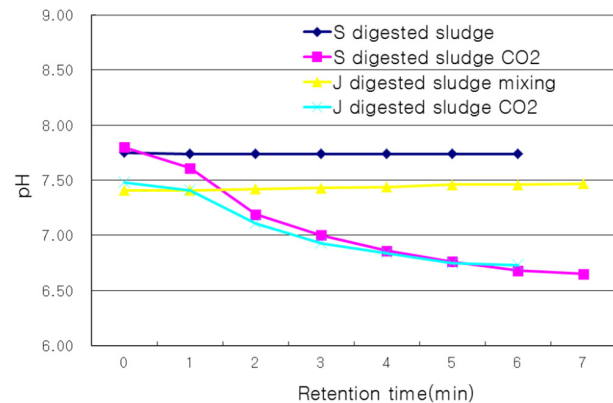


Fig. 9. pH change according to CO<sub>2</sub> injection (digestion sludge).

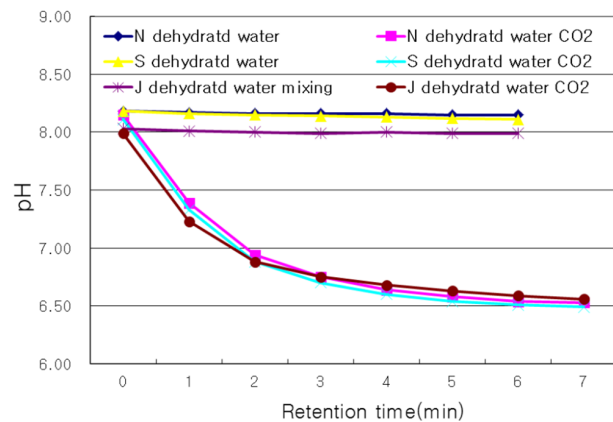


Fig. 10. pH change according to CO<sub>2</sub> injection (centrifugal dehydration filtrate).

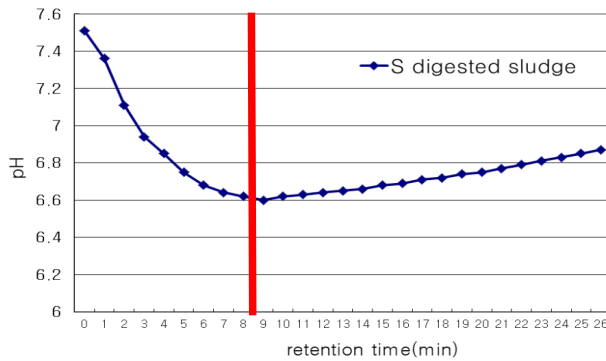


Fig. 11. pH change according to CO<sub>2</sub> injection and no-injection.

나타났다. 따라서 이산화탄소를 소화슬러지 이송배관에 주입한 후 이산화탄소가 용해 및 잔류성 있으므로 pH 제어가 가능할 것으로 사료된다.

Diyan (2015) 의 연구에서는 이산화탄소를 탈기시켜 pH를 상승시켜 스트러바이트를 생성시켰으나, 본 연구에서는 pH를 하강시켜 스트러바이트 생성을 억제하는 것으로 이산화탄소 주입 및 제거를 통해 스트러바이트 생성 및 억제가 가능하다.

이산화탄소는 물속에서 평형을 이룰 때 pH 5.6까지 떨어지므로, 하수처리시설에서 스트러바이트 생성억제를 pH 제어로 하기 위해 이산화탄소 활용이 적절한 것으로 판단된다. 하수슬러지 혐기성 소화시 발생하는 소화가스 성분에는 메탄이 60~70%, 이산화탄소가 30~40% 포함되어 있어, 이를 분리정제하여 메탄가스는 차량연료, 도시가스 등 대체에너지원으로 사용하고, 버려지는 이산화탄소를 포집해서 하수처리시설 내에서 스트러바이트 생성 억제를 위해 사용할 수 있다. 이는 기후변화에 따른 온실가스 감량에도 도움이 될 것으로 판단된다.

### 3.3 이산화탄소 주입에 따른 탈수시 탈수약품 주입률 변화실험 결과

이산화탄소 주입에 따른 추가적인 효과를 알아보기 위해 원심탈수기 폴리머 주입률 실험을 수행하였다. 실험은 온도 및 이산화탄소 주입에 따른 pH 제어 및 폴리머(유기응집제) 주입률 변화를 알아보기 위해 소화슬러지를 대상으로 하여 수행하였다. 소화슬러지의 pH 7.59, 총고형물(TS) 3.5%, 휘발성유기물 45.7%이었다. 폴리머 주입률 평가 실험에서 일정 pH(실험 1, 2, 3) 조건에서 온도가 높을수록 폴리머 주입률이 낮아졌으며,

Table 2. Polymer injection ratio results according to temperature and pH control

Test	Temp. (°C)	pH	injection ratio	비고
1	46	7.59	0.86	
2	33	7.59	1.00	
3	9	7.59	1.14	
4	33	6.92	0.91	pH control of CO <sub>2</sub> injection

이는 온도 상승에 따른 폴리머의 용해율이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 일정 온도(실험 2, 4)조건에서 pH가 낮아짐으로 인해 폴리머 주입률이 낮아져 응집제 사용량 약 10% 절감효과를 가져왔다(Table 2). 하수슬러지 탈수시 사용되는 폴리머는 양이온계 유기응집제이며, 폴리머 특성상 pH가 낮을수록 응집효율이 좋아, 적은 양의 폴리머 주입으로 응집이 잘 되는 것으로 확인하였다.

### 3.4 현장 적용가능한 스트러바이트 생성 제어 시스템 제안

스트러바이트 생성 제어방안 실험결과를 바탕으로 현장에서 적용가능한 스트러바이트 생성 제어 시스템을 제안하고자 한다. Fig. 12은 이산화탄소를 이용한 스트러바이트 현장 제어 방안 모식도이다. 혐기성 소화 후 발생하는 소화슬러지 및 탈수여액 이송배관에 이산화탄소를 주입하여 pH 낮춤으로 이송배관에 스트러바이트 등 스케일 생성을 억제하는 것이다.

본 공정은 소화슬러지 이송배관에 이산화탄소를 주입을 위한 주입부, 소화저류조에서 잔류되는 가스를 배출하는 배출부로 구성된다. 본 연구에서 제안하는 시스템 원리는 소화가스 정제 후 버려지는 이산화탄소를 포집하여, 이를 혐기성소화조에서 나오는 소화슬러지 이송배관에 이산화탄소 적절량을 투입하여 스트러바이트 생성 억제하여 배관 막힘을 제어할 수 있다. 또한 이산화탄소가 소화슬러지에 용해 후 잔류되는 이산화탄소는 슬러지 저류조에 배출구를 설치하여 다시 이산화탄소 저장조 이송배관으로 재순환하거나, 포기조 및 약취처리시스템에 유입하여 처리하여 배출한다. 적정 pH를 유지하기 위해 슬러지 저류조 전단이나, 탈수기 유입 전단에 pH 센서를 설치 측정하여 적절 pH 조절을 통한 이산화탄소 주입량을 자동으로 조절할 수 있는 시스템이다. 제어 시스템은 pH 센서의

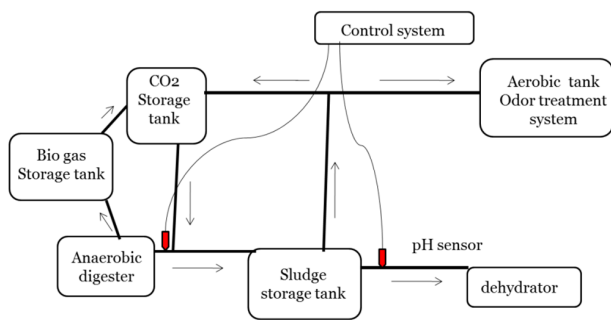


Fig. 12. Suggested field-based system of struvite control using CO<sub>2</sub>.

측정값에 따라 이산화탄소 저장조에 저장되어 있는 이산화탄소를 배관에 공급하는 양을 자동으로 조절하는 역할을 한다. 이산화탄소 저장조와 pH 센서를 연동하여 측정된 혐기성 소화조와 슬러지 저류조 각각의 슬러지 배출구의 pH 값이 7이상이면 이산화탄소 저장조에 저장되어 있는 이산화탄소의 공급하는 양을 늘려 pH를 낮추도록 한다. 이산화탄소를 활용하는 이유는 혐기성 소화 후 발생하는 바이오가스 중에 이산화탄소가 30~40% 포함되어 있으므로, 소화가스를 분리 정제하여 메탄 순도를 높인 후 연료 등으로 사용하고, 버려지는 이산화탄소를 활용하기 위함이다.

또한 하수처리시설에서 버려지는 이산화탄소를 활용하여 pH 제어를 통해 소화슬러지 및 탈수여액 이송 배관 막힘 해결과 슬러지 탈수시 사용되는 탈수약품량 절감이 가능할 것으로 판단된다. 일부 하수처리시설에서 스트러바이트 생성 억제를 위해 슬러지 저류조에 철염계통의 무기응집제를 사용하고 있다. 이때 사용되는 응집제 구매비 및 슬러지 발생량의 증가에 따른 처리비용이 추가적으로 발생된다.

따라서 소화가스 정제 후 버려지는 이산화탄소를 포집하여 활용할 경우 슬러지 이송 배관 막힘 해결 및 이에 따른 철염계 응집제 약품 미사용, 탈수슬러지 함수율 개선 등 다양한 효과가 있을 것으로 판단된다. 또한 경제성 이외에도 이산화탄소를 버리지 않고, 따로 포집하여 하수처리시설 내에서 사용한다면 온실가스 저감 및 이산화탄소 배출거래제 등에 기후환경 변화에 대응하는 유익한 방법으로 판단된다.

## 4. 결 론

하수처리공정 중 슬러지 이송배관 배관막힘 해결하

기 위한 pH 제어로 이산화탄소를 활용하였다. 이 실험결과를 바탕으로 스트러바이트 생성을 제어하기 위한 현장 적용가능한 시스템을 제안하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 하수처리시설에서 발생하는 스트러바이트는 소화슬러지 이송배관 및 원심 탈수여액 이송배관에서 주로 발생되며, 소화가스 중 이산화탄소를 이용한 pH 제어로 스트러바이트 생성을 억제할 수 있으므로 현장에서 이산화탄소를 활용하여 스트러바이트 생성 제어가 가능할 것으로 판단된다.

2) 이산화탄소를 이용하면 pH 제어도 가능하고, 현장에서 탈수약품인 유기응집제 사용량을 10% 줄일 수 있는 긍정적인 결과를 얻을 수 있다.

3) 하수처리시설에서 발생하는 소화가스 중 메탄과 이산화탄소를 분리정제한 후 메탄가스는 연료 등으로 활용하고, 현재 버려지고 있는 이산화탄소를 포집하여 하수처리시설에서 다시 사용하는 시스템을 적용한다면 기후변화 대응에도 유익한 것으로 판단된다.

## 사 사

본 논문은 서울물연구원 지원으로 진행되었으며, 도와주신 모든 분들께 감사드립니다.

## References

- Berrin, T., Griffin L. and Oscar, M. (2018). Struvite formation and decomposition characteristics for ammonia and phosphorus recovery: A review of magnesium-ammonia-phosphate interactions, *Chemosphere*, 194, 504-514.
- Choo, K.H. and Lee, C.H. (1996). Membrane fouling mechanisms in the membrane coupled anaerobic bioreactor, *Water Res.*, 30, 1771-1780.
- James, D.D. and Simon, A.P. (2002). Struvite formation, control and recovery, *Water Res.*, 36, 3925-3940.
- Karakashev, D., Schmidt, J.E. and Angelidaki, I. (2008). Innovative process scheme for removal of organic matter, phosphorus and nitrogen from pig manure, *Water Res.*, 42, 4083-4090.
- Kazi, P.F. (2012). Assessing Struvite Formation Potential at Wastewater Treatment Plants, *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, 3(6), 548-552.
- Kim, J.H., Kim, K.Y., Kim, D.K., Park, H.S., Lee, S.C., and

- Lee, S.I. (2008). Effect of Struvite Crystallization Kinetics ; Seed Material, Seed Particle Size,  $G \cdot t$  Value, Korean J. Environ. Eng., 207-212.
- Kim, W.S. (2007). Crystallization Technology Research Group, Crystallization Separation Technology Group, <https://www.cheric.org/files/research/ip/g200701/g200701-101.pdf> (March 20, 2018).
- Marti, N., Bouzas, A., Seco, A., and Ferr, J. (2008). Struvite precipitation assessment in anaerobic digestion process, Chem. Eng. J., 141, 67-74.
- Michael, S.M., James, A.I., Jessica, G.D., and Ron, E.S. (2010). Macroscopic and microscopic variations in recovered magnesium phosphate materials: Implications for phosphorus removal processes and product re-use, Bioresour. Technol., 101, 877-885.
- Ministry of Environment. (2010). '09 Sewage Disposal Facility Operation and Management Survey Results, 1-18.
- Mulder, M., Appeldoorn, K., Weij, P., and Van Kempen, R. (2017). "Full Scale Optimisation of Sludge Dewatering and Phosphate Removal at Harnaschpolder wwtp (The Hague, NL)", *IWA Specialist Conference On Sludge Management sludge Tech 2017*, 9-13 July, 2017, London, United Kingdom, International Water Association.
- Radev, D., Peeva, G., and Nenov, V. (2015). pH Control during the Struvite Precipitation Process of Wastewaters, J. Water Resour. Prot., 1399-1408.
- Saidou, H., Korchef, A., Ben Moussa, S., and Ben Amor, M. (2009). Struvite precipitation by the dissolved CO<sub>2</sub> degasification technique: Impact of the airflow rate and pH, Chemosphere, 74, 338-343.
- WEF. (1991). Design of municipal wastewater treatment plants, Volume II. Alexandria, VA, Water Environ. Fed. Am. Soc. Civ. Eng., 1092-100.
- Williams, S. (1999). Struvite precipitation in the sludge stream at Slough wastewater treatment plant and opportunities for phosphorus recovery, Environ. Technol., 20, 743-748.