



잉여 슬러지의 마이크로웨이브 가온과 MAP 결정화를 이용한 인산염 회수

Recovery of phosphorus from waste activated sludge by microwave heating and MAP crystallization

안조환

Johwan Ahn

(주)한경이앤씨, 경기도 광명시 하안로 108, 14319

Hankyung E&C Co., Ltd., 108, Haan-ro, Gwangmyeong-si, Gyeonggi-do, 14319, Korea

pp. 243-250

pp. 251-258

pp. 259-268

pp. 269-279

pp. 281-289

pp. 291-297

pp. 299-309

pp. 311-319

ABSTRACT

Phosphorus is a vital resource for sustaining agriculture and nutrition, but a limited non-renewable resource. Thus, the recovery of phosphorus from waste activated sludge(WAS) was attempted by microwave heating and magnesium ammonium phosphate(MAP) crystallization. Polyphosphate-accumulating organisms(PAOs) in WAS release phosphate from the cell when they are exposed to high temperature environments. Microwave heating caused phosphorus and ammonia to release from WAS. The amount was increased with increasing temperature, showing that 88.5% of polyphosphate present in the cells were released in the form of phosphate at 80°C. A similar result was also observed in the release of ammonia. On the other hand, both phosphorus and ammonia were crystallized with magnesium, and then was harvested as MAP. Phosphorus recovery rate reached almost 97.8%, but the ammonia was about 13.4%. These results clearly indicate that phosphorus could be recovered from WAS using a physiological trait of PAOs. Heavy metal analyses also show that the MAP crystal is useful and safe as a phosphorus fertilizer.

Key words: Magnesium ammonium phosphate(MAP), Microwave heating, Phosphorus recovery, Polyphosphate-accumulating organisms(PAOs), Waste activated sludge(WAS)

주제어: 인산암모늄마그네슘, 마이크로웨이브 가온, 인 회수, 폴리인산 축적 미생물, 폐활성슬러지

1. 서론

인은 생명활동에 반드시 필요한 물질로 유전물질인 DNA와 RNA, 세포막을 구성하는 인지질, 세포 내 신호전달에 관계하는 인산화단백질 등을 구성한다. 이러한 인은 주로 인광석에서 얻어지는데 고갈이 예상되는 자원으로 식량생산을 위한 농업용 비료의 원료로 가장 많이 사용되고 있다 (Jasinski, 2015). 농업용 비료의 수요는 인구와 밀접한 관계를 가진다. 세계 인

구는 2015년 기준으로 약 74억 명이에 이르며, 2030년에는 약 86억 명으로 예측되어 식량 생산에 필요한 인 소비량도 함께 증가할 것으로 예상된다 (UN, 2017). 이에 선진국에서는 자원 회수 및 재활용을 통해 공급의 어려움이 예상되는 고갈 자원에 대응하고, 더 나아가 이를 경제 활성화에 활용하고 있다.

EU는 2010년 6월에 중장기적 성장전략인 Europe 2020에서 2020년까지 달성할 목표로 고용, 연구개발, 기후-에너지, 교육 및 빈곤대책 5개 분야를 설정하고, 각각의 목표를 달성하기 위한 중점과제 7개를 선정하였다. 이중에서 지속 가능형 성장에 관한 주요 과제로 자원 이

Received 24 May 2019, revised 31 July 2019, accepted 7 August 2019.

*Corresponding author: Johwan Ahn (E-mail: johwahn@gmail.com)

용의 고효율화(Resource efficient Europe)를 채택하고, 이를 구체적으로 실현하기 위한 방안으로 직선형 경제에서 순환형 경제로의 전환을 진행하고 있다 (MacArthur et al., 2015). 이에 스위스와 독일 등은 하수처리장 슬러지 및 식육가공 폐기물 등에서의 인 회수를 의무화하고 있다.

국내에서도 이와 같은 세계적 추세에 따라 하수처리장의 인 회수 의무화가 추진될 것으로 예측된다. 그러나 이를 구체적으로 실현하기에는 국내 하수처리장의 운전 여건이 어려운 실정이다. 서울특별시를 비롯한 광역도시의 대규모 하수처리장을 제외하고는 혐기성 소화조가 설치되어 있지 않거나 설치되어 있어도 다양한 이유로 운전하지 않는 하수처리장이 많다. 더욱이 혐기성 소화조가 정상적으로 가동되는 하수처리장에서도 감량화가 잘 이루어지는 생 슬러지만 투입하고, 소화율이 낮고 인 함량이 높아 반류수의 수질을 악화시키는 잉여 슬러지는 탈수하여 직매립하는 경우가 많아 귀중한 인 자원이 폐기되고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 폴리인산 축적 미생물이 온도가 높은 환경에 노출되면 세포 내 폴리인산을 방출하는 생리학적 특징을 이용하여 잉여 슬러지에서 인산염(PO_4^{3-}) 방출 및 회수를 시도하였다.

폴리인산 축적 미생물은 혐기조와 호기조로 구성된 생물학적 인 제거 공정에서 우점화 한다. 이와 같이 복합 생태계에서 이들 미생물이 우점화할 수 있는 것은 혐기성 조건에서 유기산을 섭취하여 PHA(Polyhydroxyalkanoate)로 축적하고, 호기성 조건에서 이를 이용하여 성장할 수 있기 때문이다 (Seviour et al., 2003). 혐기성 조건에서 이들 미생물은 탄소원 섭취 및 축적에 필요한 에너지를 얻기 위해 세포 내에 축적하고 있던 폴리인산을 인산염으로 분해하여 세포 밖으로 배출한다. 더욱이 이들 미생물은 $60^{\circ}C$ 부근의 고온 환경에 노출되면 탄소의 흐름과는 관계없이 세포 내 폴리인산 일부를 인산염으로 분해하여 나머지 폴리인산과 함께 방출하는 생리학적 특징을 가지고 있다 (Kuroda et al., 2002). 이와 같은 현상이 왜 일어나는지는 정확히 알 수 없지만 엔지니어링 측면에서 이를 잘 활용하면 잉여 슬러지에서 손쉽게 인을 방출시켜 회수할 수 있다.

이를 위해 짧은 시간에 잉여 슬러지를 가온할 수 있는 마이크로웨이브 가온시설과 방출된 인산염을 MAP(Magnesium ammonium phosphate) 결정체로 회수할 수 있는 결정화 장치를 하수처리장에 설치하여 운전하였고, 그 결과를 토대로 잉여 슬러지에서 방출시킨 인산염의 회수 가능성을 평가하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 인산염의 방출 및 회수

마이크로웨이브를 이용한 잉여 슬러지 가온이 인산염 방출에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 Fig. 1에 나타난 것과 같이 1 kw의 마그네트론 4개가 장착된 장방형의 마이크로웨이브 잉여 슬러지 가온장치와 MAP 결정화 장치를 광주광역시 광주하수처리장에 설치하여 3주간 운전하였다. 마이크로웨이브를 이용한 잉여 슬러지의 가온은 $60^{\circ}C$ 과 $70^{\circ}C$, $80^{\circ}C$ 의 온도조건에서 1주일씩 회분식으로 운전하였다. 이때 가온장치로 유입되는 잉여 슬러지의 성상은 부유성 고형물의 평균농도가 7.5 g-MLSS/L 이었고, 인의 평균함량은 5.2% 이었다. 마이크로웨이브 가온장치는 잉여 슬러지를 가온하는 동안 설정온도에 도달하면 운전이 중단되고, 잉여 슬러지는 고형물 분리조로 배출되었다.

고형물 분리조에서 고액 분리된 인산염 방출액은 혐기성 소화액의 탈리여액과 함께 1:15의 비율로 혼합되어 MAP 결정화 반응조로 유입되었고, 혼합액 내 고농도의 인산염은 아래와 같이 MAP 결정화 반응을 걸쳐 MAP 결정체로 회수되었다. MAP 결정화 반응조가 운전되는 동안 pH 조건은 8.5, 인산염과 마그네슘의 몰 비율(P/M)은 1/1.2로 유지되었다. 생성된 MAP 결정체는 액체 사이클론을 통해 정기적으로 회수되었다.

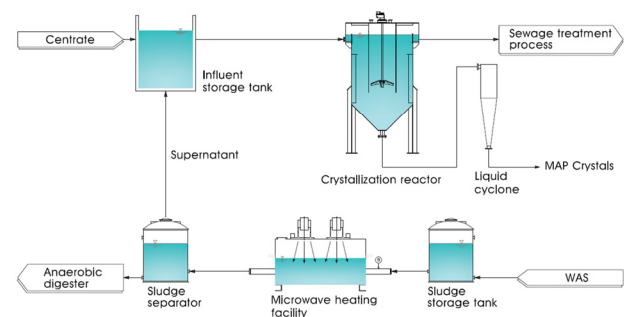
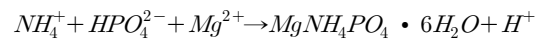


Fig. 1. Schematic diagram of phosphorus release and recovery system.

2.2 물리·화학적 분석

잉여 슬러지의 부유성 고형물 농도 및 인 함량을 비롯해 혐기성 소화 슬러지 탈리여액과 잉여 슬러지 인산염 방출액의 인산염 및 암모니아 농도는 standard



method (APHA et al., 1989)에 따라 분석하였다. 잉여 슬러지를 마이크로웨이브로 가열하여 인산염을 방출시키는 과정과 MAP 결정화 과정에서 채취한 샘플은 원심분리기로 부유성 고형물을 분리하고, 이때 얻은 상등액을 GF/C(Whatman)로 여과하여 인산염 농도는 아스코르빈산법, 암모니아 농도는 네슬러법으로 분석하였다.

또한 MAP 결정화 과정에서 회수한 결정체의 조성 성분 및 중금속 함량은 농촌진흥청 고시 제2016-27호 비료의 품질검사방법 및 시료채취기준에 따라 분석하였다. 또한 이들 결정체가 MAP 결정체인지를 확인하기 위해 X선 회절분석기(X-ray diffractometer) (X'pertpro, Malvern Panalytical)를 이용하여 정성분석도 실시하였다.

3. 결 과

3.1 잉여 슬러지 가온과 인산염 방출

폴리인산 축적 미생물은 고온에 노출되면 세포 내 폴리인산을 분해하여 인산염으로 배출하는 생리학적 특징을 가지고 있어 적절한 방법으로 가온하는 것만으로도 세포를 파괴하지 않고 잉여 슬러지에서 인산염을 방출시킬 수 있다. 이에 생물학적 고도처리 공정의 잉여 슬러지에서 인산염을 배출시켜 MAP 결정체로 회수할 수 있도록 마이크로웨이브를 이용하여 다양한 온도에서 잉여 슬러지의 인산염 방출 실험을 실시하였다.

가온조건에 따라 얼마나 많은 인산염이 방출되었는

지를 Fig. 2(a)에 나타내었는데 마이크로웨이브로 잉여 슬러지를 가온하는 동안 상당량의 인산염 방출이 관찰되었다. 인산염 방출은 온도가 높을수록 증가하여 온도와 밀접한 관계를 갖지만 일정 온도 이상에서는 인산염 방출이 크게 증가하지 않았다. 다양한 온도 조건에서 잉여 슬러지를 가온하는 동안 증가한 인산염 농도를 Table 1에 나타낸 것과 같이 가온온도가 60°C에서 70°C로 증가할 때 인산염 농도가 약 41.4 mg/L 나 크게 증가한 반면 70°C에서 80°C로 증가할 때 약 0.8 mg/L만 증가해 유의미한 증가가 관찰되지 않았다. 각각의 온도에서 잉여 슬러지가 세포 내에 폴리인산 형태로 가지고 있는 인 대비 배출한 인의 비율을 표준 활성 슬러지 인 함량을 2.5%로 기준하여 계산하면 각각 65.1, 85.4와 85.8%에 이르는 것으로 나타났다. 더욱이 폴리인산 축적 미생물은 인산염 외에 폴리인산 과립의 형태로도 일부 배출하는 것으로 알려져 있어 이 과정에서 방출되는 인은 더욱 많았을 것으로 추측된다 (Kuroda et al., 2002). 따라서 마이크로웨이브로 잉여 슬러지를 가온하는 동안 폴리인산 축적 미생물 세포 내에 축적된 폴리인산 과립은 70°C 전후에서 대부분 방출되었을 것으로 생각된다.

한편 Fig. 2(c)에 나타낸 것과 같이 마이크로웨이브 가온장치로 잉여 슬러지를 가온하면 pH가 6.5에서 6.2로 약간 떨어지는 것으로 나타났는데 그 변화는 잉여 슬러지의 가온 온도와는 관계없이 일정한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 폴리인산 축적 미생물이 가온과정에서 세포 내에 축적되어 있던 폴리인산을 인산염으로 분해하여 방출할 때 수소이온도 함께 배출

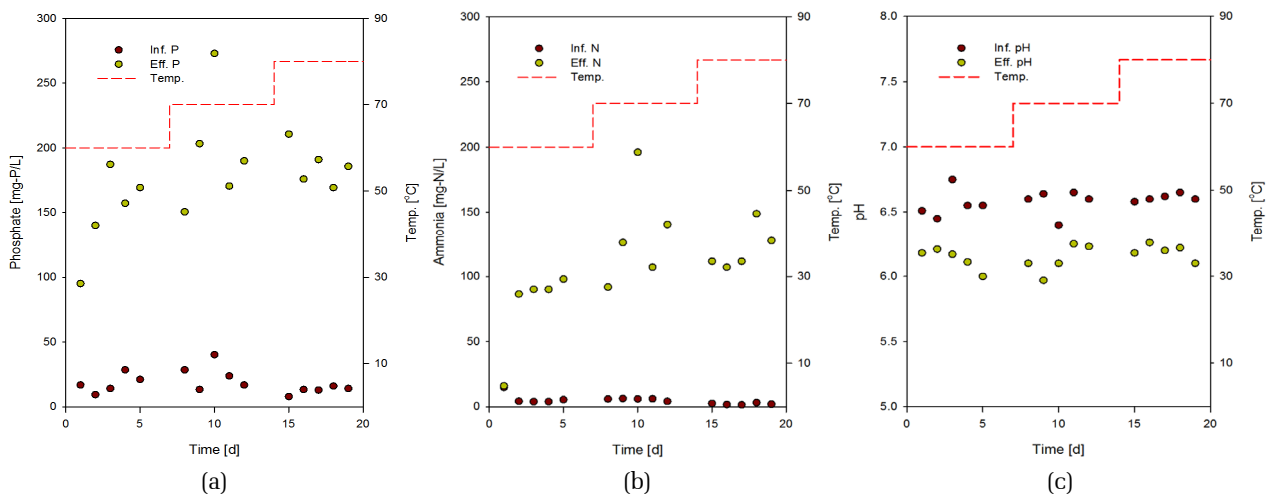


Fig. 2. Behaviour of (a) phosphorus, (b) ammonium nitrogen and (c) pH on waste activated sludge by microwave heating.

되기 때문에 생각된다 (Bond et al., 1997). 이와 같이 70°C 전후의 낮은 온도로 잉여 슬러지를 가온하여 인을 회수하고 혐기성 소화조에 유입시켜 처리할 수 있다면 MAP 결정체에 의해 배관이나 열교환기가 폐쇄되는 스케일 등의 문제점을 크게 완화시킬 수 있고, 총인 제거시설이나 반류수 처리시설의약품비도 크게 절약할 수 있어 하수처리장 운영비 절감에 기여할 것으로 기대된다 (Hagino et al., 2014).

Table 1. Changes in nutrient concentrations under various temperature environments during microwave heating [Unit : mg/L]

	Temp. (°C)		
	60	70	80
Phosphorus (Δ P)	131.8	172.9	173.7
Ammonium nitrogen (Δ N)	69.8	126.8	119.4

3.2 암모니아의 거동

마이크로웨이브로 잉여 슬러지를 가온하는 동안 인산염과 함께 방출되는 암모니아의 농도도 Fig. 2(b)에 나타내었는데 온도가 증가할수록 증가하여 인산염과 비슷한 경향을 나타내었다. Table 1에 나타낸 것과 같이 가온온도가 60°C에서 70°C도 증가할 때 암모니아 농도가 57 mg-N/L나 증가하였지만 70°C에서 80°C로 증가할 때 약간의 농도가 감소하여 유의미한 농도의 증가나 감소는 관찰되지 않았다.

지금까지 알려진 폴리인산 축적 미생물의 생리학적 특징에 기초하면 이들 미생물이 호기성 조건에서 인산염을 폴리인산으로 세포 내에 축적할 때 Mg^{2+} 나 K^+ 와 같은 중금속 이온을 대사하지만 암모니아는 대사하지 않는다. 이는 인산염을 세포 내에 폴리인산으로 축적하면 이들이 음으로 강하게 하전 되므로 이들의 안정화를 위해서는 Mg^{2+} 와 같은 중금속 이온의 대사가 필요하기 때문이다 (Seviour et al., 2003). 따라서 마이크로웨이브로 잉여 슬러지를 가온하는 동안 폴리인산 축적 미생물이 폴리인산을 인산염으로 배출하는 과정에서 이들 중금속 이온을 함께 배출하지만 암모니아는 방출하지 않는다. 그럼에도 불구하고 인산염이 방출되는 동안 암모니아 방출도 함께 관찰된 것은 활성 슬러지의 플록을 형성하는 세포외고분자물질에 흡착되어 있던 암모니아나 단백질과 같은 유기질소가 분해되면서 마이크로웨이브 가온과정에서 방출되었

기 때문에 생각된다 (Seviour et al., 2010).

마이크로웨이브는 다양한 환경 분야에서 널리 사용된다. 혐기성 소화시설의 전처리 시설로 사용되기도 하는데 잉여 슬러지의 플록이나 미생물 세포를 파괴하거나 가용화하여 혐기성 소화 효율을 크게 높인다 (Yu et al., 2010). 이 과정에서 용존성 탄소원 이외에도 단백질과 다당류의 농도도 크게 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 마이크로웨이브로 잉여 슬러지를 조사(Irradiation)하는 과정에서 인산염과 함께 암모니아가 방출되는 것은 온도 상승에 의한 가온효과 이외에도 온도 비의존성 효과(Athermal effect)도 크게 작용했기 때문에 생각된다 (Eskicioglu et al., 2007; Lin et al., 2009). 지금까지 마이크로웨이브 조사에 의한 잉여 슬러지의 분해과정은 분자 수준의 가열에 의한 것이 주로 알려져 왔지만 근래에는 마이크로웨이브와 물질과의 화학적 반응 그리고 미생물 세포와의 생물학적 반응 등에 의한 온도 비의존성 효과도 알려지기 시작했다 (Pomerai et al., 2003). 따라서 마이크로웨이브를 이용해 잉여 슬러지를 가온하는 동안 온도가 증가할수록 암모니아 농도가 증가한 것은 마이크로웨이브 조사시간의 증가와 함께 온도 비의존성 효과가 있었기 때문에 생각된다.

3.3 영양물질의 회수

마이크로웨이브로 잉여 슬러지를 가온하여 방출시킨 인산염은 다양한 방법으로 회수할 수 있다. 이 중에서 MAP 결정화법은 암모니아도 함께 회수할 수 있어 비료원료로 사용할 경우, 비료의 가치를 크게 높여주는 장점을 가지고 있다. 이에 잉여 슬러지에서 방출시킨 인산염을 마그네슘과 결정화 반응시켜 MAP 결정체로 회수해 인 자원의 회수 및 재이용에 대한 가능성을 평가하였다.

이를 위해 마이크로웨이브로 잉여 슬러지를 가온하여 얻은 인산염 방출액과 혐기성 소화액의 탈리여액을 혼합하여 MAP 결정화 반응기에 유입시켜 인산염을 회수하였다. 그 결과를 Fig. 3에 나타내었는데 유입수의 인산염 평균농도는 약 170.1 mg-P/L이고 유출수는 평균 3.7 mg-P/L로 약 97.8%의 높은 회수율을 얻을 수 있었다. 따라서 하수처리장 반류수에 포함된 고농도의 인산염과 함께 마이크로웨이브 가온법으로 잉여 슬러지에서 방출시킨 인산염도 MAP 결정화법으로 효



을 높게 회수할 수 있음이 확인되었다.

반면에 암모니아는 유입수의 평균농도가 433.5 mg-N/L이고 처리수는 375.6 mg-N/L로 약 13.4%의 제거율에 지나지 않았다. 이는 인산염을 회수할 때 함께 결정화되는 이론적 암모니아 회수량의 77.1%에 지나지 않은 낮은 제거율이다(PO_4^{3-} -P 31 g당 NH_4^+ -N 14 g). 이와 같이 낮은 암모니아 회수율이 관찰된 것은 결정화 과정에서 암모니아가 관여하지 않는 HAP(Apatite) 혹은 MPP(Magnesium potassium phosphate)와 같은 결정체가 함께 형성되었기 때문으로 추측된다.

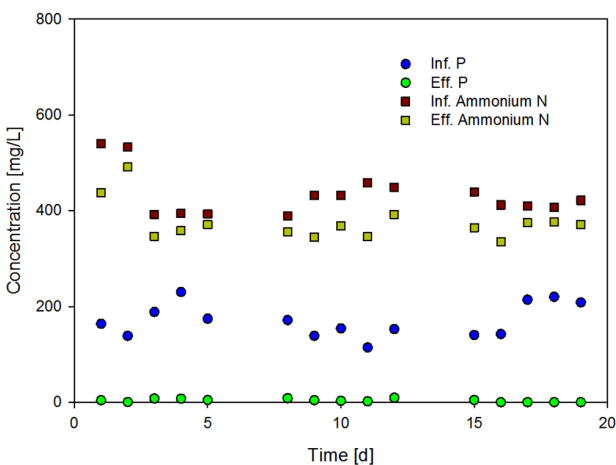


Fig. 3. Nutrient recovery from a mixture of digested sludge centrate and phosphorus solution obtained from waste activated sludge by microwave heating.

한편 마이크로웨이브로 잉여 슬러지를 가온하여 방출시킨 인산염 방출액과 탈리여액의 혼합액에서 회수한 결정체를 정성분석을 실시한 결과, XRD 스펙트럼을 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 MAP 결정체로 확인되었다. 이에 본 연구에서 회수한 MAP 결정체는 작물재배를 위한 비료나 비료원료로 그 가치가 충분할 것으로 생각된다. 더욱이 MAP 결정체는 완효성으로 인산염이 작물의 요구량에 대응하여 서서히 용출되는 특징을 가지고 있어 물에 쉽게 녹아 비점오염원으로 작용하는 수용성 인산비료와 비교해 시비량을 크게 줄일 수 있어 경제적이고 친환경적인 것으로 알려져 있다 (Gaterell et al., 2000). 따라서 잉여 슬러지와 함께 버려지는 인 자원의 순환형 재활용 측면 이외에도 인구증가에 따른 농업용인 수요의 증가와 가까운 미래로 예견되는 고품질 인광석의 고갈에 따른 인 자원의 수요 및 공급의 불균형에 대한 능동적인 대처도 함께 기대된다.

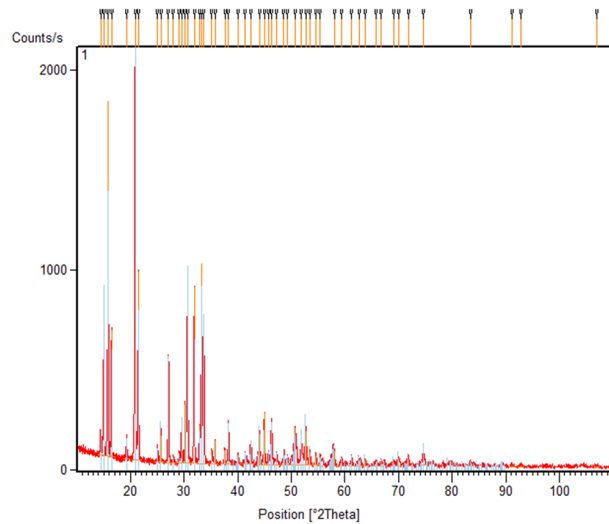


Fig. 4. XRD spectrum of MAP crystals (Ref. 01-077-2303).

3.4 MAP 결정체 구성과 중금속 함량

MAP 결정체는 완효성 비료로 사용되는 물질로 산성 조건에서 녹는 성질을 가지고 있다. 이에 잉여 슬러지의 인산염 방출액과 혐기성 소화 슬러지의 탈리여액에서 회수된 MAP 결정체에는 인산염과 암모니아가 어떠한 형태로 존재하는지, 이들 물질의 함량은 얼마나 되는지 그리고 비료성분으로서의 가치에 큰 영향을 미치는 중금속의 종류와 함량은 얼마나 되는지를 알아보기 위해 인산과 질소 그리고 중금속을 분석하였다.

회수한 MAP 결정체의 인산화합물 구성은 전인산 중에서 수용성 인산은 1.2%에 지나지 않지만 가용성 인산은 26.3%, 구용성 인산은 25.9%로 나타나 물에 쉽게 녹는 수용성 인산 보다는 구연산에 녹는 구용성 인산이 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 과린산석회와 같이 수용성 인산질 비료는 물에 잘 녹아 효과가 빠르지만 인산이 철이나 알루미늄과 반응하여 금속 화합물을 형성하기 때문에 우리나라처럼 산성인 흙 조건에서는 효과가 떨어지는 것으로 알려져 있다. 반면에 용성인비와 같은 구용성 인산비료는 작물의 뿌리에서 나오는 산에만 녹아 흡수되므로 금속물질에 고정되는 양이 적어 시비효과가 큰 것으로 알려져 있다 (Degryse et al., 2017).

한편 중금속 농도는 Table 2에 나타낸 것과 같이 Zn 농도가 가장 높고, 다음으로 Cu, Cr, Ni 순으로 높았다. 이들 중금속 농도는 유기질 비료의 중금속 허용기

- pp. 243-250
- pp. 251-258
- pp. 259-268
- pp. 269-279
- pp. 281-289
- pp. 291-297
- pp. 299-309
- pp. 311-319

준보다 크게 낮은 것으로 나타났다. 따라서 마이크로웨이브 가온법을 이용하여 잉여 슬러지에서 방출시킨 인산염 방출액과 혐기성 소화 슬러지의 탈리여액에서 회수한 MAP 결정체는 중금속 제거를 위한 정제과정이나 그 밖의 다른 가공과정 없이 비료원료나 비료로 충분히 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 그럼에도 불구하고 농촌진흥청 비료 공정규격설정 및 지정에는 읍면단위 농어촌지역 마을하수 슬러지만 비료원료로 사용할 수 있도록 고시되어 있어 공공하수처리장에서 발생하는 슬러지에서 인산염을 추출하여 얻은 MAP 결정체를 비료 혹은 비료원료로 사용하기는 현실적으로 곤란한 실정이다 (MAFRA, 2018). 이에 대해 보완이 이루어진다면 아직 시작 단계인 고갈자원의 회수 및 재이용이 크게 활성화 될 것으로 생각된다.

Table 2. Heavy metal contents in MAP

Metals	Content	Standards*
	[mg/kg]	[mg/kg]
As	-	20
Cd	-	2
Hg	-	1
Pb	-	50
Cr	7.4	10
Cu	8.3	120
Ni	2.6	20
Zn	145.0	400

*Korean standards for heavy metal in organic fertilizer

4. 결 론

본 연구에서는 혐기성 소화 슬러지의 탈리여액에 포함된 인산염과 마이크로웨이브를 이용하여 잉여 슬러지에서 방출시킨 인산염을 MAP 결정체로 회수하는 인 회수 시스템을 운전하였고, 그 결과를 토대로 잉여 슬러지에서 인 회수에 관한 가능성을 평가하였다. 이를 위해 마이크로웨이브 가온시설을 이용한 다양한 온도 조건에서의 인산염 방출과 인 회수 시스템을 이용한 MAP 결정화 실험 등을 실시하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

마이크로웨이브를 이용하여 잉여 슬러지를 가온할 때 배출되는 인산염은 온도가 증가할수록 증가하여 70°C 전후에서 가장 많이 방출되었고, 그 이상의 온도에서는 유의미한 인산염 방출의 증가는 없었다.

암모니아도 인산염과 유사하게 온도가 증가할수록 방출량이 증가하였고, 70°C 보다 높은 온도에서는 더 이상 증가하지 않았다.

마이크로웨이브로 잉여 슬러지를 가온하여 방출시킨 인산염과 혐기성 소화 슬러지의 탈리여액에 포함된 인산염의 회수율은 97.8%에 이르렀고, 이때 회수한 인 결정체는 MAP 결정체로 확인되었다.

회수한 MAP 결정체의 인산화합물 구성은 전인산 중에서 가용성 인산은 26.3%, 구용성 인산은 25.9%로 나타나 물에 쉽게 녹는 수용성 인산 보다는 구연산에 녹는 구용성 인산이 대부분을 차지하였다.

중금속은 Zn과 Cu, Ni가 검출되었지만 그 함량은 유기성 비료의 기준보다 낮아 비료 혹은 비료원료의 가치가 충분히 입증되었다.

사 사

본 연구는 중소기업기술혁신개발사업(S2313682)의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

- American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation. (1989). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 17th Edn., USA.
- Bond, P., Keller, J., and Blackall L. (1997). Anaerobic phosphate release from activated sludge with enhanced biological phosphorus removal, A possible mechanism of intracellular pH control, *Biotechnol. Bioeng.*, 63(5), 507-515.
- Degryse, F., Baird, R., da Silva, R., and McLaughlin, M. (2017). Dissolution rate and agronomic effectiveness of struvite fertilizers—effect of soil pH, granulation and base excess, *Plant Soil*, 410, 139-152.
- Eskicioglu, C., Terzian, N., Kennedy, K., Droste, R., and Hamoda, M. (2007). Athermal microwave effects for enhancing digestibility of waste activated sludge, *Water Res.*, 41, 2457-2466.
- Gaterell, M., Gay, R., Wilson, R., Gochin, R., and Lester, J. (2000). An economic and environmental evaluation of the opportunities for substituting phosphorus recovered from wastewater treatment works in existing



- UK fertiliser markers, *Environ. Technol.*, 21, 1067-1084.
- Hagino, T., Koga, D., and Tsukui, R. (2014). Phosphorus recovery from sewage and high efficiency sludge dewatering -Toward the development of a self-supporting phosphorus recovery process-, *Ebara Eng. Rev.*, 243, 9-14.
- Jasinski, S. (2015). 2013 *Mineral yearbook: phosphate rock[Advanced release]*, U.S. Geological Survey, Reston, 56.1-56.4.
- Kuroda, A., Takiguchi, N., Gotanda, T., Nomura, K., Kato, J., Ikeda, T., and Ohtake, H. (2002). A simple method to release polyphosphate from activated sludge for phosphorus reuse and recycling, *Biotechnol. Bioeng.*, 78, 333-338.
- Lin, L., Yuan, S., Chen, J., Xu, Z., and Lu, X. (2009). Removal of ammonia nitrogen in wastewater by microwave radiation, *J. Hazard. Mater.*, 161, 1063-1068.
- MacArthur D., Zumwinkel, K., Stuchtey, M., and van Houten, F. (2015). *Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe*. Ellen Macharthur Foundation, Cowes, 46-52.
- Pomerai, D., Smith, B., Dawe, A., North, K., Smith, T., Archer, D., Duce, I., Jones, D., and Candido, E. (2003). Microwave radiation can alter protein conformation without bulk heating, *FEBS Lett.*, 543, 93-97.
- Seviour, R., Mino, T., and Onuki, M. (2003). The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems, *FEMS Microbiol. Rev.*, 27, 99-127.
- Seviour, T., Donose, B., Pijuan, M., and Yuan, Z. (2010). Purification and conformational analysis of a key exopolysaccharide component of mixed culture aerobic sludge granules, *Environ. Sci. Technol.*, 44, 4729-4734.
- United Nations. (2017). *World population prospects: The 2017 revision*. United Nations, New York, 23-28.
- Yu, Q., Yi, H., Zhong, L., Hua, L., Lia, L., Chena, L., Hong, X., Ren, Z., and Liang, L. (2010). Physical and chemical properties of waste-activated sludge after microwave treatment, *Water Res.*, 44, 2841-2849.

pp. 243-250

pp. 251-258

pp. 259-268

pp. 269-279

pp. 281-289

pp. 291-297

pp. 299-309

pp. 311-319