

가축분뇨 내 대장균 제거와 부유물질 저감 효율 향상을 통한 추비 생산용 미세기포 부상분리와 마이크로 필터 연계 시스템 개발

장재경^{1*}, 이동관¹, 백이¹, 이태석¹, 임류갑¹, 김태영²
¹국립농업과학기술원 농업공학부 에너지환경공학과, ²조선대학교 환경공학과

Development of integrated microbubble and microfilter system for liquid fertilizer production by removing total coliform and improving reduction of suspended solid in livestock manure

Jae Kyung Jang^{1*}, Donggwan Lee¹, Yee Paek¹, Taeseok Lee¹,
Ryu Gap Lim¹, Taeyoung Kim²

¹Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences
²Department of Environmental Engineering, Chosun University

요약 가축분뇨는 고액분리 후 액상 가축분뇨를 호기생물반응조에서 충분히 부숙시켜 화학비료를 대체한 유기질비료(액비)로 이용하고 있다. 그러나 액비는 작물 생장 중인 여름철에는 토양 살포가 제한되기 때문에 액비 처분 문제가 반복 발생되고 있다. 액비를 추비(웃거름)로 이용하기 위해서는 액비 내 슬러지 저감, 병원성 미생물에 대한 안정성 문제가 확보되어야 한다. 본 연구에서는 가축분뇨 액비의 추비 이용을 위해 부유물질(SS) 제거와 살균 효과가 있다고 알려져 있는 마이크로버블 장치(FeMgO 촉매 삽입)의 액비 내 부유물질과 대장균의 저감효과를 알아보고 마이크로 필터 장치를 연계한 시스템의 부유물질 제거 효율 향상 여부를 확인하였다. 마이크로버블 장치의 부상분리 과정을 거치면서 액비 내 부유물질은 57.9% 제거되었으며, 대장균군은 검출되지 않았다(16,200 MPN/100mL → 0 MPN/100mL). 마이크로 버블 장치와 마이크로 필터 연계 시스템의 수리학적 체류시간 최적화를 통해 액비 내 부유물질 제거 효율은 수리학적 체류시간이 0.1h 조건에서 92.9%까지 향상된 것을 확인하였다. 같은 조건에서 처리수의 성상을 확인한 결과 유기오염물질은 64.5%(TCOD), 70.1%(SCOD) 제거되었으며 인산염인(PO₄-P)과 총질소(TN)의 농도도 각각 54.9%와 51.5%까지 감소되었다. 이러한 연계 시스템으로부터 처리된 유출수는 기존 액비의 조성보다 부유물질 및 오염물질 농도 감소, 대장균군이 포함되지 않아 추비로 직접 이용이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract Livestock manure is used as an organic fertilizer to replace chemical fertilizers after sufficient fermentation in an aerobic bioreactor. On the other hand, liquid manure disposal problems occur repeatedly because soil spraying is restricted during the summer when the crops are growing. To use liquid fertilizer (LF) as an additional nutrient source for crops, it is necessary to reduce the amount of suspended solids (SS) in the liquid fertilizer and secure stability problems against pathogenic microorganisms. This study examined the effects of the simultaneous SS removal and E.coli sterilization in the LF using the microbubble (MB) generator (FeMgO catalyst insertion). The remaining SS were further removed using the integrated microbubble and microfilter system. During the floating process in the MB device, the SS were removed by 57.9%, and the coliform group was not detected (16,200→0 MPN/100 mL). By optimizing the HRT of the integrated system, the removal efficiency of the SS was improved by 92.9% under the 0.1h of HRT condition. After checking the properties of the treated LF, 64.5%, 70.1%, 54.9%, and 51.5% of the TCOD, SCOD, PO₄-P, and TN, respectively, were removed. The treated effluent from such an integrated system has a lower SS content than that of the existing LF and does not contain coliforms; therefore, it can be used directly as an additional fertilizer.

Keywords : Microbubble, Micro-Filter, Suspended Solid, Livestock Manure, Total Coliform

본 논문은 농촌진흥청 국립농업과학기술원 농업과학기술 연구개발사업(세부과제명: 가축 액상 분뇨 마이크로버블과 촉매 적용 가축분뇨 부하 저감 기술 개발, 세부과제번호: PJ01427501)의 지원에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Jae Kyung Jang(National Institute of Agricultural Sciences)

email: jkjang1052@korea.kr

Received October 7, 2020

Revised December 9, 2020

Accepted February 5, 2021

Published February 28, 2021

1. 서론

우리나라 가축사육 두수의 지속적인 증가에 따라 가축 분뇨 발생량도 함께 증가 추세에 있다. 가축분뇨 발생량은 우리나라 전체 농경지에 사용할 수 있는 액비 양보다 더 많이 발생되고 있어, 환경적으로 안정되고, 경제적인 가축분뇨 처리가 요구되고 있다[1]. 가축분뇨는 고농도의 유기물(>30,000mg COD/L), 질소(>3,000mg TN/L), 인(>200mg TP/L)을 함유하고 있어 처리되지 않았을 때 토양, 하천, 지하수 등에 환경적 부하가 커질 수 있는 대표적인 고농도 유기성 농업부산물이다[2-4]. 그러나 자원화 측면에서는 잠재성이 높은 농축산부산물이기도 하다[5,6].

우리나라 하루 가축분뇨 발생량은 18만톤(2018년 기준)이 넘으며 이 중 53%는 돼지를 사육하는 축산농가에서 발생된다. 돼지 한 마리 당 약 5.1kg/d의 분뇨 발생되며 2,000두 돼지를 사육하는 축산농가에서 하루 약 11톤이 넘는 분뇨가 발생하는 것으로 보고되고 있다[7]. 가축분뇨 대부분(약 89% 이상)은 퇴·액비화로 자원화되고 있고 있는데[6], 고액분리 후 고형분은 퇴비로 이용되고, 액비는 호기생물반응조에서 최소 30일에서 60~70일 이상 부숙시켜 토양에 살포되고 있다. 그러나 경작지에 작물이 있는 여름에는 액비를 살포하지 못해 하루 100m³의 가축분뇨를 처리하는 대부분 자원화시설은 장기간 저장을 위해 10,000m³ 이상의 액비저장 공간을 확보하고 있다. 그럼에도 불구하고 액비 저장 부족 현상으로 저장 공간 확보의 어려움을 겪고 있다. 따라서 연중 액비 이용이 가능한 대안이 필요하다[2].

이러한 요구에 따라 여름철 액비 처분을 위한 방법으로 추비(작물이 자랄 때 필요한 영양분 공급용)로의 이용이 시도되고 있다. 그러나 액비에 포함된 입자상 물질(부유물질)에 의해 노즐 막힘 현상과 입자들이 토양에 유입되었을 때는 물투수성이 나빠지는 문제가 있다. 또한 액비에 병원성 미생물 포함 가능성에 대한 우려로 수확기 작물에는 식품안전성 이유로 추비로 사용하는데 제한이 되어왔다. 따라서 병원성 미생물에 대한 문제와 부유물질 저감으로 액비를 추비로 이용할 수 있는 기술개발이 필요하다.

지금까지 가축분뇨 액비 내 부유물질을 제거하기 위해 막 분리 등을 적용한 부유물질을 제거하는 기술들이 소개되고 있지만, 고농도의 부유물질을 함유한 액비를 직접 이용하기에는 멤브레인 파울링 등에 의한 분리막의 잦은 교체 문제로 고비용의 유지관리비가 발생하게 된다.

최근 마이크로버블을 이용한 기술이 폐수처리에 이용되고 있는데, 마이크로버블은 산소, 공기, 오존과 함께 50 μm 이하로 미세 기포화되어 유기물질들도 산화 처리가 가능한 결과가 발표되었다[8]. 마이크로 크기의 기포는 부력이 작아 물속에 체류하는 시간이 길어져 수중 용존산소 농도를 높이게 되고, 표면적이 커서 폐수처리 효과가 있는 것으로 알려져 있다[8-12]. 마이크로버블 발생은 가압용해방식으로 고압펌프를 사용하기 때문에 펌프동력이 필요(5ton/d용량(2.2kW), 12시간 사용시 약 33,000원/월)하나 저비용으로 다양한 분야에 다양한 목적으로 이용되고 있다. 장 등(2015) 마이크로버블 기술을 통해 가축분뇨 내 부유물질을 50%가량 제거하였다[13]. 또한 마이크로버블과 촉매를 함께 이용하여 반응시간을 증가시키면 총화학적산소요구량(TCOD), 암모니아성 질소(NH₃-N), 인산염 인(PO₄-P) 및 슬러지 동시 저감 가능성이 있는 연구 결과가 발표되었다[8,14]. 또한, 마이크로버블 장치는 살균효과가 있는 것으로 밝혀지고 있는데, 이 등(2011)과 김 등(2014)은 마이크로 크기 버블로 파괴되는 과정에서 생성되는 하이드록실(OH) 라디칼에 의한 산화작용을 이용하여 수처리, 어업, 농업분야 등 다양한 분야에서 응용할 수 있다고 하였다[15-19]. 하이드록실 라디칼은 거의 모든 오염물질의 살균, 소독에 관여하여 화학적으로 분해하고 제거할 수 있는 가장 강력한 효과를 발휘하면서도 인체에 독성이 없는 것으로 알려져 있다[20,21]. 분뇨처리를 위한 MBR공정에서 마이크로버블을 적용하여 유기물 산화에 대한 연구결과가 발표되었으나[22] 이러한 마이크로버블 장치는 부유물질 제거와 살균을 동시에 할 수 있는 가능성이 있지만, 현재까지 알려진 문헌에서는 액비 이용 사례가 거의 없다.

따라서 본 연구는 액비의 추비로의 이용을 위하여 마이크로버블을 이용 액비 내 부유물질과 대장균군의 저감 효과를 알아보고, 마이크로버블 장치와 마이크로 필터 연계 처리수의 환경오염 물질저감을 통해 추비로서의 이용 가능성을 알아보았다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 반응 시스템 구성 및 운전

가축분뇨 액비 내 부유물질과 대장균군을 저감하기 위한 마이크로버블 장치와 마이크로 필터를 연계한 시스템은 저류조, 미세버블발생기, 미세버블 부상 분리조, 마이크로 필터조로 구성하였다(Fig. 1). 저류조의 액비는 분

당 2,000mL의 공기와 함께 마이크로버블 발생기를 통해 부상분리조로 유입, 부상분리에 의해 고액이 분리되도록 하였다. 부상분리조 하단에는 촉매가 충전되어 있으며 하단으로 유입된 액비는 촉매층을 거치면서 산화반응을 하게 된다. 이 액비는 저류조로 보내지고 다시 부상분리조로 유입, 순환처리 되도록 하였다. 일반적으로 촉매는 고온 또는 고압에서 반응하는 것이 많은데, 본 연구에서 사용한 Fe/MgO 촉매(Vatican-B1300, Coxs사, Seoul, Korea)는 산화제(O₂, O₃, Air, H₂O₂)와 반응하여 OH라디칼이 생성되어 상온, 상압에서 오염물질 처리가 가능한 것으로 알려져 있다[23]. 촉매는 13mm 구형으로 70L 부피에 20kg을 부상분리조에 충전하여 촉매 산화 반응과 부상 분리가 동시에 이루어지도록 하였다. 부상분리조에서 1차 산화반응과 부상분리로 처리된 액비는 마이크로 필터조로 이송하여 2차 부유물질을 제거하였다. 마이크로 필터조에 사용한 필터(10 micron, water quality association)는 내경(ID) 380mm, 외경(OD) 630mm이며, 길이(length)는 2,400mm인 마이크로 필터(WPS 360, AquaMAX 360 prefilter)를 사용하였다. 필터 공극은 5 μ m로 최대 온도 60 $^{\circ}$ C까지는 운전이 가능한 필터를 사용하였다. 마이크로 필터조는 마이크로필터를 장착한 상태에서 630mL 용량의 챔버로 액비 정량 펌프(323pump, Watson- Marlow, Korea)를 이용하여 유속을 변화시키면서 부유물질 제거 효과를 확인하였다. 이때 체류 시간(Hydraulic retention time, HRT)을 630mL 용량의 챔버를 채우는데 1시간이 소요되는 유속(10.5mL/min)을 기준($\times 1$)(HRT=1h)으로 $\times 3$ (HRT=0.33h), $\times 5$ (HRT=0.2h) 그리고 $\times 10$ 배(HRT=0.1h)로 증가시키면서 부유물질 저감효과를 측정하였다.

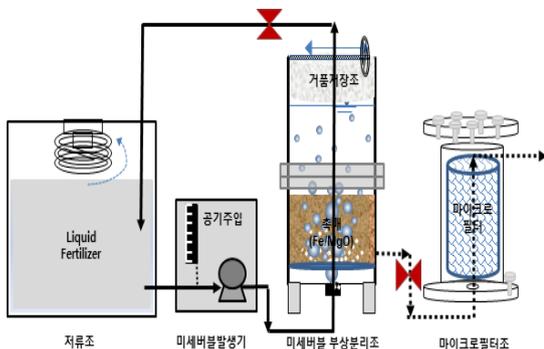


Fig. 1. Schematics diagram of microbubble flotation and micro-size filter fused system.

2.2 총대장균군 검출

대장균군은 가축분뇨 원액과 액비를 각각 이용하여 미세기포 부상분리조에서 2, 4시간 반응 후 대장균군 변화를 알아보았다. 대장균군 검사는 가축분뇨 원액은 IDEXX사의 Colilert kit를 이용하여 총대장균군 정성, 정량 분석하였으며, 액비는 전문분석 기관에 의뢰한 것으로 평판 집락법을 이용하여 대장균군을 검출하였다. Coli-ert Kit를 이용한 정성분석과 정량분석은 35 $^{\circ}$ C에서 24시간 동안 배양 후 색의 변화로 확인하며, 노란색은 총대장균군이 양성, 무색은 음성으로 판독하는 것이다. 시료는 각각 1,500배와 500배로 희석하여 총대장균군을 분석하였으며, 액비를 이용한 평판 집락법은 희석없이 원액을 이용하였다.

2.3 분석

실험에 이용한 가축분뇨 액비는 D시 공동자원화 시설에서 채수한 것으로 사용하기 전 250 μ m 체거름망(Sieve)을 사용하여 헝잡물을 제거한 후 사용하였다. 공동자원화 시설에서 생산된 액비의 성분을 조사하기 위하여 pH, SS, TCOD, SCOD, TN, 그리고 PO₄-P 총 6항목을 분석하였다. pH 분석은 pH 미터기(Orion™ 3 star, Thermo Scientific™ Instrument Inc., MA, USA)를 이용하였다. 부유물질(SS)은 GF/C filter를 105 $^{\circ}$ C에서 2시간 건조한 후 사용하였으며, 여과 전, 후의 무게 차로 측정하였다. 화학적산소 요구량(COD)은 HACH kit (3~1,500mg/L)를 사용하여 TCOD와 SCOD로 구분하여 분석하였다. SCOD는 PVDF 재질이 충전된 멤브레인 필터(0.45 μ m, GD/X membrane filter, Whatman, England)로 필터 후 사용하였다. 암모니아성 질소는 HACH kit(Nessler method, 0.02~2.5mg/L, NH₃-N)으로 분석하였으며, 인산염 인은 HACH kit(PhosVer 3 Phosphate reagent 0~3.5mg/L, PO₄³⁻)를 이용하여 분석하였다. TCOD, SCOD, NH₃-N, PO₄-P 항목 분석 모두 UV-흡광광도계(DR 5000, UV/VIS spectrophotometer, Loveland, CO, USA)를 이용하였다. 각 분석은 분석키트 측정 범위에 들어가도록 희석하여 3배수로 분석하여 평균값으로 나타냈다.

3. 연구결과

3.1 액비 성상 조사

실험에 사용한 가축분뇨 액비는 D시 소재 가축분뇨 공동자원화시설에서 3회 채수하여 성상을 분석하였다. 이 공동자원화시설에서 생산되는 가축분뇨 원수의 평균 BOD, TCOD, TN, TP 농도는 각각 10,600.0mg/L, 9,320.0mg/L, 6,308.0 mg/L, 그리고 215.2mg/L로 나타났다. 탁 등(2015) 연구결과에서 공동처리장에서 생산된 액비의 COD, TOC, BOD 농도와 당진의 액비 성분과 유사하였다[24]. 이 처리장은 고액분리 후 호기 생물 반응을 거쳐 액비를 생산하는데 생산된 액비의 TCOD는 $3,133.3 \pm 28.9$ mg/L에서 $3,383.3 \pm 62.9$ mg/L이었으며, SCOD $2,600.0 \pm 0.0$ mg/L에서 $3,066.7 \pm 28.9$ mg/L, SS $1,777.8 \pm 192.5$ mg/L에서 $21,111.1 \pm 509.2$ mg/L, TN $1,100.0 \pm 100.0$ mg/L에서 $1,233.3 \pm 115.5$ mg/L, PO₄-P 85.4 ± 0.3 mg/L에서 275.2 ± 0.3 mg/L로 나타났다. SS와 PO₄-P는 각각 3배, 12배까지 차이가 있었다.

정 등(2014)의 국내 가축분뇨 처리시설 형태별 특성 조사 분석에 따르면 우리나라 가축분뇨 원수의 농도는 BOD 수준 30,000mg/L 이상 되는 경우가 흔한 것으로 나타났다고 발표하였다[6]. 그러나 황보 등(2010)은 돼지 성장 단계별 분뇨 특성을 분석한 결과 평균 뇨의 BOD와 COD_{Mn}는 7,364mg/L와 7,149mg/L이었다고 발표하여 가축분뇨 원수의 유기물 농도는 수천~수만으로 차이가 컸다. 이것은 생물반응을 거친 액비의 경우에서도 마찬가지로 나타났다고 발표하였다[25]. 정 등(2014)은 논산지역 액비 성분을 분석한 결과, 질소 0.04~0.41%, 인산 0.03~0.19%, 칼륨 0.13~0.52%으로 수백~수천mg/L 차이가 있었다. 이러한 차이는 년도별, 월별 분석 결과에서도 나타났다[26]. 액비 비료 검정 규격 기준에는 질소(N), 인산(P), 칼륨(K) 성분 함으로 0.3% 이상으로 되어 있어, 생산된 액비 내 N, P, K 농도의 함은 액비 기준에 맞지도 품질에는 차이가 있을 것으로 나타났다.

3.2 미세기포 부상분리와 마이크로필터에 의한 부유물질(SS) 저감 효과

가축분뇨 액비에 포함된 높은 농도의 SS를 제거하기 위하여 미세기포 부상분리와 마이크로필터를 적용하여 제거율을 알아보았다. 가축분뇨 공동자원화 시설에서 채취한 액비는 실험실에서 250 μ m 체거름망으로 거른 후에 사용하였다. 이렇게 거른 액비의 부유물질(SS)은 21,111.1 \pm 509.2 mg/L로 매우 높은 것으로 나타났다. 이를 미세기포 부상분리 시스템에서 6시간 반응 후 SS 농도는 21,111.1 \pm 509.2mg/L에서 8,888.9 \pm 509.2mg/L

으로 입자상물질이 약 57.9% 제거되었다. 1차로 부상분리를 통해 SS를 제거한 후 2차로 마이크로 필터를 적용하여 SS 제거 정도를 확인하였다.

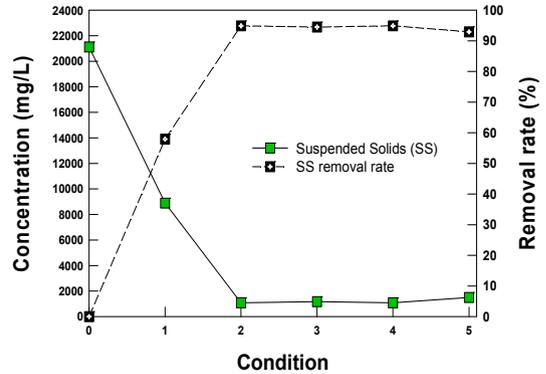


Fig. 2. SS Changes under different conditions. Conditions: (0) Liquid fertilizer effluent (1) after microbubble/catalyst system (2) after filter at $\times 1$ (5rpm), (3) after filter at $\times 3$ (15rpm), (4) after filter at $\times 5$ (25rpm), (5) after filter at $\times 10$ (50rpm).

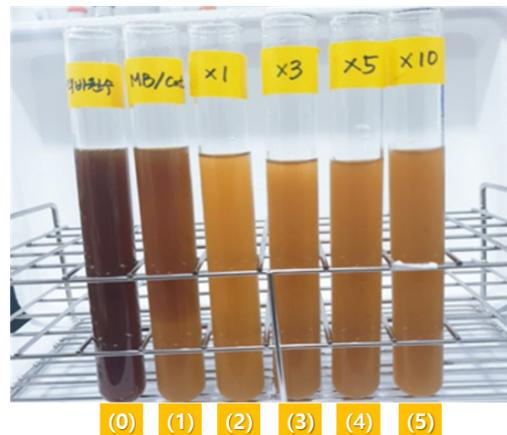


Fig. 3. Color changes under different conditions. Conditions: (0) Liquid fertilizer effluent (1) after applying of microbubble flotation (2) after filter at $\times 1$ (5 rpm), (3) after filter at $\times 3$ (15 rpm), (4) after filter at $\times 5$ (25 rpm), (5) after filter at $\times 10$ (50 rpm).

이것은 체류시간(HRT)을 1h에서 0.33h, 0.2h, 0.1h로 변화시켜 반응기 용량 대비 10배까지 증가시키면서 실험하였다. Fig. 2의 x축에 (2)~(5)에 나타난 것과 같이 5배 유속으로 공급하였을 때, SS가 94.9%까지 제거되었으며, 10배 유속으로 증가시켰을 때도 92.9%까지 SS가

제거되는 것이 확인되었다. 이 밖에 Fig. 3과 같이 액비 원액과 마이크로 필터 처리한 유출수의 색이 짙은 갈색에서 옅은 갈색으로 변화하는 색도변화 또한 감지할 수 있었다. 이러한 결과로부터 공동처리장에서 생물반응을 거쳐 생산된 액비는 고농도의 SS 유발물질을 함유하고 있으며, 이 입자들의 크기는 대부분 5 μ m 이상인 것으로 유추할 수 있었다. 따라서 미세기포 부상분리와 마이크로 필터를 거친 처리 수에 남아있는 SS의 입자는 5 μ m보다 작은 입자로 추비로 사용 시 문제가 되었던 노즐 막힘 현상을 감소시킬 수 있을 것으로 기대할 수 있으며, 토양 살포시 물 빠짐이 나빠지는 현상의 개선 효과도 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 미세기포 부상분리법 적용 전·후 대장균 검출

가축분뇨 원액과 액비를 각각 미세기포 부상분리 반응 후 대장균 검출 여부를 확인하였다. 가축분뇨 원액을 미세기포 부상분리 반응 전·후 대장균 검출 여부를 Colilert 키트를 이용하여 정성분석과 정량분석을 통해서 알아보았으며, 액비는 평판 집락법을 이용하였다. Colilert 키트는 수질 내 총대장균군을 검사하는 키트로 대장균군이 Colilert 키트내에서 자라면 β -D- galactosidase는 ortho-nitrophenyl β -D-galactosidase 발색 기질을 분해하여 무색에서 노란색으로 변하게 되는데, 대부분의 비대장균군은 이 효소를 가지고 있지 않아 발색 반응을 일으키지 않는다고 한다. 소수의 비대장균군의 경우 이 효소를 가지고 있을 수 있으나 키트 내에 함유된 특수성분에 의해 억제되어, 교차 반응을 일으키지 않아 오차가 적은 것으로 알려져 있다. 정성분석 결과, 가축분뇨 원액에서는 노란색으로 변색되어 총대장균군이 포함된 것으로 나타났지만 미세기포 부상분리 반응을 2시간 및 4시간 실시한 샘플에서는 총대장균군이 검출되지 않았다. 정성적으로 대장균군이 포함되지 않은 것을 확인한 후 정량분석을 진행하였다. 정량분석 결과 가축분뇨 원액에서는 노란색으로 변색되어 대장균이 포함된 것으로 나타났으며, 미세기포 부상분리 반응을 거친 후에는 대장균이 검출되지 않는 것으로 나타났다(Fig. 4). MPN법으로 계산한 결과, 가축분뇨 원액에는 총대장균군이 16,200 MPN/100 mL가 검출되었으나 미세기포 부상분리 반응을 거친 후에는 0 MPN/100 mL이었다. 또한 액비를 이용하여 반응전·후의 대장균군을 알아본 결과, 액비 원액에서는 1130 CFU/100mL가 검출되었으나 미세기포 부상분리 반응을 거친 후에는 대장균군은 검출되지 않았다. 이 등(2011)은 마이크로버블의 살균효과를 채소 세척에

이용하였으며, 김 등(2014)은 오존 마이크로버블을 식물 병원균 살균에 이용한 것과 같이 미세기포 부상분리 반응에 의해 병원성 미생물이 사멸하였다고 발표하였다 [15,16]. 이러한 결과로 액비를 추비로 이용시 병원성 미생물 포함에 대한 우려는 없을 것으로 판단된다.

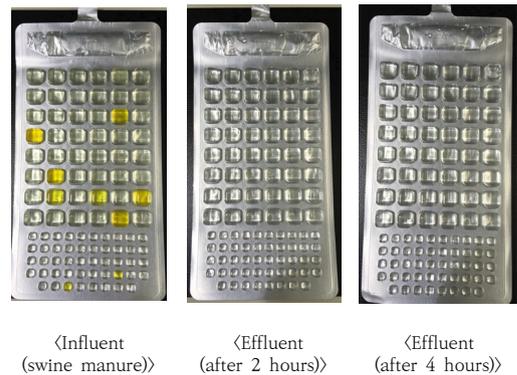


Fig. 4. Qualitative analysis using Quanti-tray for determination of Total Coliforms inclusion.

3.4 유기오염물질과 영양염류 저감 효과

미세기포 부상분리와 마이크로 필터 과정을 거치면서 가축분뇨 액비의 수질 향상 여부를 알아보기 위하여 유기 오염물질(TCOD, SCOD) 및 영양염류(질소, 인) 농도 변화를 알아보았다.

3.4.1 유기오염물질 저감 효과

Fig. 5에 나타낸 것과 같이 유기오염물질의 농도는 미세기포 부상분리 과정에서 TCOD 51.2%와 SCOD 43%가 감소되었다(Condition "1"). 미세기포 부상분리 과정을 거친 후 마이크로 필터내 체류시간(h)을 1, 0.33, 0.2, 0.1h로 변화시키면서 유기오염물질의 농도 변화를 측정하였다. 체류시간(h)은 마이크로필터조 용량[m³]을 액비 유입 속도F[m³/h]로 나눈 T[h]=VR/F로 계산하였다. 마이크로 필터조의 처리 유속을 필터조 용량 대비 5배까지는 증가하였다. 미세버블 부상분리를 거친 후 마이크로 필터조 용량의 10배 공급 유속에서도 액비(Condition "0") 대비 TCOD 64.5%, SCOD는 70.2%가 제거되는 것으로 나타났다.

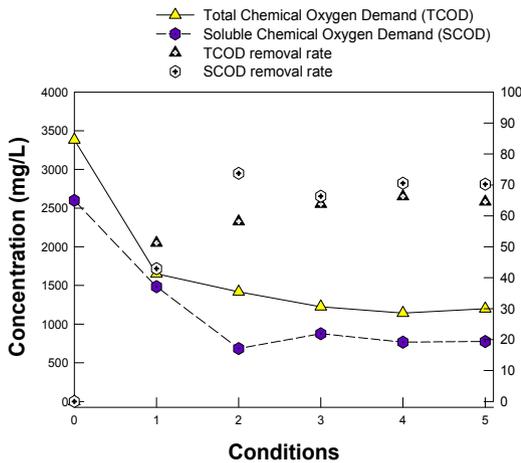


Fig. 5. COD concentration changes under different conditions. Conditions: (0) Liquid fertilizer effluent (1) after applying of microbubble flotation (2) after filter at $\times 1$ (HRT 1h), (3) after filter at $\times 3$ (HRT 0.33h), (4) after filter at $\times 5$ (HRT 0.2h), (5) after filter at $\times 10$ (HRT 0.1h).

3.4.2 영양염류 저감 효과

Fig. 6에 나타낸 것과 같이 미세기포 부상분리조를 거치면서 액비 내 인산염인($PO_4\text{-P}$)과 총질소(TN)의 제거율은 각각 21.1%와 48.5%가 제거되었다(Condition "1"). TN의 제거율이 부상분리 과정으로만 높게 나타난 것은 마이크로버블 발생기를 6시간 가동하는 과정에서 반응조의 온도가 상승하게 되면서 용액 속에 녹아있는 질소화합물이 이온 형태로 존재하는 암모니움(NH_4^+) 보다 free 암모니아(NH_3)로 전환되는 비율이 높아지게 되고 마이크로버블에 의해 가스 형태로 NH_3 가 공기 중으로 탈기되어 제거된 것으로 판단된다.

미세기포 부상분리를 거친 후 마이크로필터조에서 체류시간(h)에 따른 영양염류(질소, 인)의 저감 효과를 확인하였다. 체류시간(h)이 0.33(용량 대비 3배 유속)일 때 인산염인($PO_4\text{-P}$)과 총질소(TN)은 각각 최대 60.0%와 51.5%로 나타났다. 이 결과 Fig. 6에 나타난 것과 같이 총질소(TN)는 대부분 미세기포 부상분리조에서 제거되는 것으로 나타났다. 그러나 인산염인($PO_4\text{-P}$)의 경우 부상분리조에서 보다 마이크로 필터과정에서 제거율이 높은 것으로 나타났는데, 이것은 인산염인은 부유물질 제거 시 함께 제거 된것으로 판단된다. 마이크로 필터 과정에서의 영양염류 처리 효과는 크지 않았다.

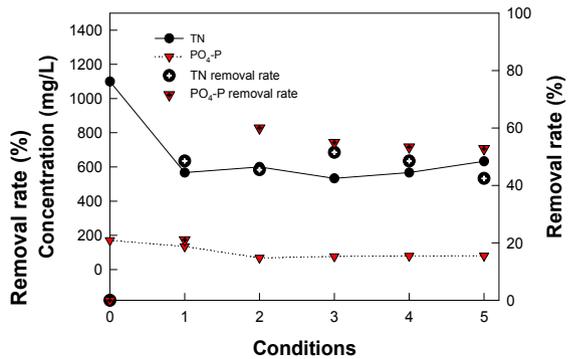


Fig. 6. $PO_4\text{-P}$ and $NH_3\text{-N}$ concentration changes under different conditions. Conditions: (0) Liquid fertilizer effluent (1) after applying of microbubble flotation (2) after filter at $\times 1$ (HRT 1h), (3) after filter at $\times 3$ (HRT 0.33h), (4) after filter at $\times 5$ (HRT 0.2h), (5) after filter at $\times 10$ (HRT 0.1h).

4. 결론

본 연구는 공동자원화시설에서 생산되는 액비를 연중 활용할 수 있는 기술로 미세기포 부상처리와 마이크로 필터를 연계하여 액비 내 부유물질(슬러지) 저감, 대장균을 동시에 제거하여 액비의 추비 이용에 대한 안정성 확보를 위한 연구 결과이다. 미세기포 부상분리 반응 후 SS 유발물질의 57.9%가 제거되고, 이후 마이크로필터를 연계하여 수리학적 체류시간을 최적화한 결과 0.2h(5배 유속 공급)일 때 SS는 최대 94.9%까지 감소된 것을 확인하였다. 또한, 미세기포 부상분리 반응시킨 후 액비를 이용한 결과 대장균은 불검출로 판정되었으며, 가축분뇨 원액을 이용하였을때도 미세기포 부상분리 반응시킨 후 총대장균군이 16,200 MPN/100mL에서 0 MPN/100mL으로 검출되지 않았다. 따라서 이 실험에서 사용한 미세기포 부상분리법으로 가축분뇨 원액과 액비 모두 병원성 미생물이 검출되지 않아 추비로 이용하더라도 병원성 미생물에 의한 문제 발생우려는 없을 것으로 판단되었다. 이 밖에 액비 살포시 환경부하 측면에서 문제가 되는 유기오염물질과 영양염류(질소, 인)의 농도 또한 감소시켰다. 이때 TCOD는 65.5%, SCOD는 70.1% 감소되었으며, 인산염인($PO_4\text{-P}$)과 총질소(TN) 농도는 각각 최대 54.9%와 51.5%까지 제거할 수 있었다. 대부분 액비는 기비(작물이 없이 경운과정에서 주는 밀거름)로 사용되

어 왔으며, 추비로는 병원성 미생물 등 우려로 그 이용이 제한적이었다. 마이크로버블과 마이크로필터 연계 시스템 개발을 통해 현재 공동자원화시설에서 저장되어 있는 액비의 추비로의 이용을 확대할 수 있으며, 가뭄시 점적 관수 수목 물주머니 등으로 그 활용을 확대하여 여름철 액비 저장 공간 부족문제를 해결할 수 있을 것으로 판단 된다.

References

- [1] E. S. Lee, C. S. Choi, "Technical trend and developmental direction of biological phosphate removal", *Korean Industrial Chemistry News*, Vol.14, No.5, pp.30-37, 2011.
- [2] M-S. Kim, D-H. Kwak, "Effect of livestock liquid manure released at a rice field on quality of soil and water in the saemangeum watershed", *J. Korean Soc. water wastewater*, Vol.30, No.1, pp.19-31, 2016.
DOI : <https://doi.org/10.11001/iksww.2016.30.1.019>
- [3] W-C. Park, M-A. Lee, I-W. Sung, "Phosphorus removal from advanced wastewater treatment process using PAC", *J. Korea Soc. Environ. Eng.*, Vol.36, No.2, pp.96-102, 2014.
DOI : <https://doi.org/10.4491/ksee.2014.36.2.96>
- [4] M-K. Kim, S-I. Kwon, S-S. Kang, G-B. Jung, S-C. Hong, M-J. Cha, K-H. So, "Minimizing nutrient loading from SCB treated paddy rice fields through water management", *Korean J. Soil Sci. Fert.* Vol.45, No.5, pp.671-675, 2012.
DOI : <https://doi.org/10.7745/kjssf.2012.45.5.671>
- [5] J. K. Jang, Y. J. Jin, S. Kang, T. Kim, Y. Paek, J. H. Sung, Y. H. Kim, "Simultaneous Removal of Organic Pollutants, Nitrogen, and Phosphorus from Livestock Wastewater by microbubble-Oxygen in a Single Reactor", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol.39, No.11, pp.599-606, 2017.
DOI : <https://doi.org/10.4491/ksee.2017.39.11.599>
- [6] K-H. Jeong, J-K. Kim, M.A. Khan, D-W. Han, J-H. Kwag, "A study on the characteristics of livestock manure treatment facility in Korea", *J. of Korea*, Vol.22, No.4, pp.28-44, 2014.
DOI : <https://doi.org/10.17137/korrae.2014.22.4.028>
- [7] Ministry of environment (Korea) home page,
- [8] A. Agarwal, W. J. Ng, Y. Liu, "Principle and applications of microbubbles and nanobubble technology for water treatment", *Chemosphere*, Vol.84, No.9, pp.1175-1180, 2011.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.054>
- [9] D-H. Cho, D-E. Kim, J-W. Park, G-C. Sung, Y-S. Kwon, "A study on the behavior micro-nano bubble for concentration oxygen stabilization techniques", *Proceeding of The Korea Institute of Electrical Engineers*, pp.1329-1330, 2010.
- [10] H-S. Cha, "Present state and future prospect for microbubble technology", *Bulletin of Food Technology*, Vol.22, No.3, pp.544-552, 2009.
- [11] M. Takahashi, K. Chiba, P. Li, "Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus", *J. Phys. Chem. B.*, Vol.111, No.6, pp.1343-1347, 2007.
DOI : <https://doi.org/10.1021/jp0669254>
- [12] J. Lim, H. Kim, D. Park, Y. Cho, S. Song, S. Park, J. Kim, "Characteristic of Mixing and DO Concentration Distribution in Aeration Tank by Microbubble Supply", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.17, No.5, pp.251-259, 2016.
DOI : <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.5.251>
- [13] J. K. Jang, M. Y. Kim, J. H. Sung, I. S. Chang, T. Y. Kim, H. W. Kim, Y. H. Kim, "Effect of the application of microbubbles and/or catalyst on the sludge reduction and organic matter of livestock wastewater", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol.37, No.10, pp.558-562, 2015.
DOI : <https://doi.org/10.4491/ksee.2015.37.10.558>
- [14] S. H. Lee, K. J. Jung, J. H. Kwon, S. H. Lee, "Effect of microbubble ozonation process on performance of biological reactor system for excess sludge solubilisation", *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol.33, No.2, pp.113-119, 2011.
DOI : <https://doi.org/10.4491/ksee.2011.33.2.113>
- [15] W. J. Lee, C. H. Lee, J. Y. Yoo, K. Y. Kim, K. I. Jang, "Sterilization efficacy of washing method using based on microbubbles and electrolyzed water on various vegetables", *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.*, Vol.40, No.6, pp.912-917, 2011.
DOI : <https://doi.org/10.3746/jkfn.2011.40.6.912>
- [16] C. S. Kim, S. Y. Yu, G. I. Lee, S. H. Kim, J. W. Lee, J. K. Song, "Sterilizing effect of plant pathogenic fungi using ozone microbubble", *Producted Horticulture and Plant Factory*, Vol.23, No.3, pp.250-255, 2014.
DOI : <https://doi.org/10.12791/ksbec.2014.23.3.250>
- [17] X. Xiong, B. Wang, W. Zhu, K. Tian, H. Zhang, "A Review on Ultrasonic Catalytic Microbubbles Ozonation Processes: Properties, Hydroxyl Radicals Generation Pathway and Potential in Application", *Catalysts*, Vol.9, No.1, 10, 2019.
DOI : <https://doi.org/10.3390/catal9010010>
- [18] T. Azuma, K. Otomo, M. Kunitou, M. Shimizu, K. Hosomaru, S. Mikata, Y. Mino, T. Hayashi, "Removal of pharmaceuticals in water by introduction of ozonated microbubbles", *Separation and Purification Technology*, Vol.212, pp.483-489, 2019.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.059>
- [19] L. Jothinathan, Q. Q. Cai, S. L. Ong, J.Y. Hu, "Organics removal in high strength petrochemical wastewater with combined microbubble-catalytic ozonation process", *Chemosphere*, 127980, 2020.

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127980>

- [20] A. Agarwal, W. J. Ng, Y. Liu, "Principle and applications of microbubbles and nanobubble technology for water treatment", *Chemosphere*, Vol.84, No.9, pp.1175-1180, 2011.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.054>
- [21] H. S. Cha, "Present state and future prospect for microbubble technology", *Bulletin of Food Technology*, Vol.22, No.3, pp.544-552, 2009.
- [22] J. Y. Lim, J. H. Kim, "Application of Microbubble in MBR Process for Night Soil Treatment", *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, Vol.25, No.1, pp.93-101, 2017.
DOI : <https://doi.org/10.17137/korrae.2017.25.1.93>
- [23] S. Cho, "Low temperature activation of benzylic C-H bonds with heterogeneous Fe/MgO catalyst under atmospheric molecular oxygen" Kyung-Hee University, Seoul, Korea, pp. 67-71, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2004.03.008>
- [24] B. Y. Tak, B. S. Tak, Y. J. Kim, Y. J. Park, Y. H. Yoon, "Optimization of color and COD removal from livestock wastewater by electrocoagulation process: Application of Box-Behnken Design(BBD)", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.28, No.25, pp.307-315, Aug. 2015.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.008>
- [25] J. Hwangbo, E.C. Hong, H. D. Park, D. W. Kim, S. B. Cho, "The study on the amount and major compositions of excreta from swine", *Journal of animal Science and Technology*, Vol.52, No.4. pp.319-328, 2010.
DOI : <https://doi.org/10.5187/jast.2010.52.4.319>
- [26] D. H. Jeong, Y. Lee, C. Lee, S. A. Choi, M. Kim, Y. Lee, M. Kim, S. Yu, "Environmental impact of livestock manure and organic fertilizer use on the masan stream watershed", *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol.23, No.2, pp.75-87, 2014.
DOI : <https://doi.org/10.14249/eia.2014.23.2.75>

장 재 경(Jae Kyung Jang) [정회원]



- 2006년 2월 : 이화여자대학교 환경공학과(공학박사)
- 2008년 11월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 농업연구사

<관심분야>

바이오에너지, 생물전기화학전지

이 동 관(Dongwan Lee) [정회원]



- 2019년 2월 : 전북대학교 환경공학과(공학석사)
- 2019년 1월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 전문연구원

<관심분야>

수처리, 바이오에너지

백 이(Yee Paek) [정회원]

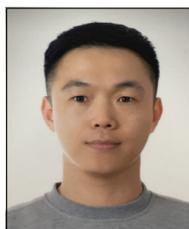


- 1997년 2월 : 경상대학교 농기계공학과(공학박사)
- 2000년 6월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 농업연구사

<관심분야>

바이오매스, 지열, 신재생에너지

이 태 석(Taeseok Lee) [정회원]



- 2012년 2월 : 서울대학교 지역시스템공학과(공학석사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 농업연구사

<관심분야>

농업시설, 농업에너지

임 류 갑(Ryugap Lim)

[정회원]



- 2015년 2월 : 성균관대학교 바이오메카트로닉스과(공학석사)
- 2020년 1월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 책임연구원

<관심분야>

농업시설, 신재생에너지

김 태 영(Taeyoung Kim)

[정회원]



- 2016년 8월 : 광주과학기술원 지구환경공학과(공학박사)
- 2020년 9월 ~ 현재 : 조선대학교 환경공학과 조교수

<관심분야>

수처리, 환경에너지