

돈분 슬러리의 저장형태 및 온도에 따른 가용화 특성

박우균 · 전항배¹ · 박노백* · 홍승길

농촌진흥청 국립농업과학원, ¹충북대학교 환경공학과

Solubilization Characteristics of Piggery Slurry by Different Storage type and Temperature Conditions

Woo-kyun Park, Hang-Bae Jun¹, Noh-Back Park*, and Seung-gil Hong(National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, ¹Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University)

Received: 29 November 2010 / Accepted: 23 December 2010

© The Korean Society of Environmental Agriculture

Abstract: The current study investigated the fate of organic matter in piggery slurry under two different store systems(closed store system and open store system) in association with different temperature. Thirty days after storing in both systems at 20°C, it was observed that the content of organic matter remained in piggery slurry with closed store system was twice more than that with open store system implying more efficient degradation of organic matter with open store system. Temperature also influenced on the organic matter degradation in piggery slurry as shown decline in TS and VS contents as the temperature increased. With store at 35°C, 29% of initial organic matter was reduced while there was only 23% reduction of organic matter at 20°C. There was no difference in the type of organic fatty acids(VFAs) produced under the range of temperature(20, 35°C) simulating summer condition. Increases in organic fatty acids contents with hydrolysis and acid producing microbial was observed from 15 days after initiating store of the piggery slurry and the total organic acid amount produced 30 days after store was 2,829 mg-COD/L and 9,123 mg-COD/L at 20°C and 35°C, respectively. These corresponded to 5.4% and 17.4% of the initial organic matter contents in piggery slurry, respectively.

Key Words: Pig slurry, Storage condition, Solubilization, Volatile fatty acid(VFAs)

서론

가축분뇨의 성상은 사육농가에서 발생하는 분뇨의 취급방법에 따라 크게 달라지며 성분과 발생량에 직접적인 영향을 미치게 된다. 특히 축사의 종류 및 구조, 사료의 종류와 양, 급수량, 돼지의 체중, 축사내 분뇨수거 및 전처리 공정에 의해 매우 다양하게 발생된다(Zhang and Felma, 1997; USEPA, 1997). 이 중 돈사구조는 형태에 따라 분뇨 분리형과 미분리형으로 구분되고, 분리형에는 인력 수거식, belt 식, scraper 식과 미분리형에는 슬러리 돈사와 미분리형 scraper 등으로 분류된다. 슬러리형 돈사는 양돈농가에서 사육경영상 유지관리가 용이하여 선호하고 있으나, 유기성 폐기물의 해양투기 금지 등에 의하여 돈분슬러리의 처리가 큰 문제로 대두되고 있다. 슬러리 형태의 돈분뇨는 일반적으로 유기물 함량이 높고, 수분함량 및 생분해율이 높아 혐기성 처리에 적합한 조건을 가지고 있어 유기물 감량에 따른 처리비용 절감, 폐자원의 대체에너지 이용, 농경지의 액비 활용시 악취 저감, 세균성 미생물 감소 측면에서 혐기성 소화기술을 이용한 돈분슬러리 처리가 적절한 방법으로 보고되고 있다(Park et al., 2010).

슬러리 돈사에서 배출되는 돈분의 경우 바닥에 설치된 저장조(pit area)에 저류되는데 저장조의 크기에 따라 짧게는 7일에서 6개월까지 체류되어진다. 저장기간 중 분뇨는 혐기상태가 유지되어 가축분뇨 처리시설로 유입되는 분뇨의 성상은 발생 시점과 차이가 발생되며, 저장기간이 길어질수록 저장조에서 발효가 진행되어 고액분리에 어려움이 있는 것으로 알려져 있다. 슬러리 돈사의 경우 피트상에 저류되어 있는 기

*교신저자(Corresponding author): N. B. Park
Tel: +82-31-290-0233 Fax Fax: +82-31-290-0206
E-mail: pnb502@korea.kr

간 동안 또는 외부로 배출된 후에도 저류조에 저장과정 중에 스킴 등의 발생으로 산소공급이 차단되어지기가 쉽다. 저류조에 저장된 돈분 슬러리의 윗부분은 별도의 산소공급 없이도 약간의 산소공급이 이루어지지만 아랫부분은 산소공급에 제한을 받게 되거나 산소의 부족상태로 저류하게 된다. 또한 우리나라의 계절적 특성상 하절기의 외부온도에 의해 돈분 슬러리의 저류조 내부온도가 상승하게 되고 이에 따라 돈분 내 미생물들의 활동이 극대화 되면서 이용 가능한 유기물이 분해되어 온실가스(CH₄, CO₂)를 배출하게 된다(Husted, 1993). 저장조에 저류된 돈분 슬러리의 가수분해의 영향은 돈분내 침강성 고형물과 콜로이드성 물질 등 고형물 입자의 비표면적, 크기와 같은 물리학적 특성과 화학적 조성(탄수화물, 단백질, 지질) 및 가수분해 효소의 유용성에 의해 영향을 받는다고 하였다(Pavlostathis and Giraldo-Gomez, 1991). 또한 가수분해 단계에서 가장 중요한 영향인자는 SRT(solid retention time)와 온도이고, 생물학적으로 분해 가능한 유기성 고형물의 가수분해 속도는 일정한 온도와 pH에서 1차 반응속도를 따르는 것으로 알려져 있다(Mata-Alvarez et al., 2000; Mahmoud et al., 2004). 그러나 중온(0~35°C) 이하 범위에서 온도가 유기성 고형물의 가수분해 속도에 미치는 영향은 거의 없고, 낮은 가수분해 속도는 부유성 유기물의 축적을 야기하며 메탄생성 잠재량이 감소한다고 하였다(Breure and Van Andel, 1984). 한편 가수분해 및 산생성 반응의 최종 산물인 아세테이트(acetate)는 질소처리 공정의 탈질반응을 위한 우수한 유기탄소원으로 알려져 있다(Metcalf and Eddy, 2004). 따라서 산생성 반응조를 이용한 유기산의 생산과 이를 영양염류 제거공정의 외부탄소원으로 활용하여 질소와 인 제거 효율을 향상시키고자 하는 노력은 최근까지도 진행되고 있다(Elefsiniotis et al., 2004; Elefsiniotis and Wareham, 2007). 그러나 기존 연구들은 돈분 슬러리 처리시 혐기성 반응조에서의 질소의 환원경로와 혐기성반응(산생성, 메탄생성)에 대한 효율향상과 저해영향 등에 초점(Park et al., 2008)이 맞추어져 있는 반면 돈분 슬러리의 저장에 따른 유기물의 손실 등으로 인한 바이오가스 회수 및 처리효율에 대한 연구는 미비한 실정이다. 돈분 슬러리 처리 시스템을 설계하기 위해서는 슬러리의 입자상 물질의 분포가 중요하고, 저장기간이 길어지면 저장기간 중에 가수분해가 진행되어 생물학적 이용 가능한 유기물이 감소하기 때문에 돈사의 구조 및 돼지 사육형태, 계절 등 돈분슬러리 성상과 특성을 고려한 운전이 이루어져야 소화효율이 증대되는 것으로 알려져 있다(Park et al., 2010).

따라서 본 연구에서는 돈분 슬러리의 저장 특성이 혐기소화 효율에 미치는 영향을 관찰하기 위해 돈분 슬러리의 저장 형태, 계절별 성상변화 및 저장온도 등에 따른 가용화 특성 및 유기물의 거동을 분석하였다.

재료 및 방법

공시원수

본 실험에 사용된 기질인 돈분 슬러리는 저장방법 및 온

도에 따른 성상변화를 방지하기 위해 경기도 R 축산연구소 (Fig. 1)에서 채취하였고, 돈분 슬러리 내 헝잡물 및 모래 등을 제거하기 위해 2 mm 체(sieve)로 거른 후 사용하였다. 유입된 돈분의 평균 TS 농도는 18 %, COD_{Cr}은 약 60,000 mg/L 이었으며, 기타 원수성상은 Table 1과 같다.

회분식 실험장치

가축분뇨의 저장방법에 따른 영향을 관찰하기 위하여 축산농가에서 가축분뇨를 저장하는 저장조의 형태를 모사하여 공기와 접촉이 용이한 open system과 공기 접촉이 차단된 closed system을 구성하여 회분식 실험을 수행하였다(Fig. 2). 두 반응조의 제원은 같고 closed system의 상부에 마개를 설치하여 외부공기와 차단하였으며, 운영기간 30일 동안 5일 간격으로 시료를 분석하였다. 온도조건은 실제 축산농가에서 돈분 슬러리의 저장과정에서 발생하는 계절별 저장조의 온도 영향을 고려하여 계절적 온도 특성을 기준으로 0, 4, 20, 35°C로 설정하여 운전하였다. 실험에 사용된 반응조의 용량은 1,000 mL, 유효용량은 700 mL로 운전하였으며, 배양기는 온도 조절(-10~+50°C)이 가능한 국내 H사에서 제작된 실험

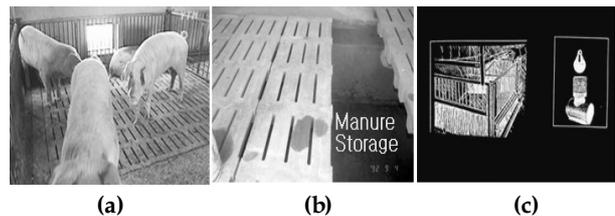


Fig. 1. Structure floor of slurry pig barn (a) ; pig barn, b) manure storage, c) slurry outflow controller).

Table 1. Composition of the pig slurry

Parameter	Concentration(average)
pH	7.2~7.8
Alkalinity(as CaCO ₃ , mg/L)	5,888~15,772
TS(total solid, %)	18
TCOD(mg/L)	60,000
SCOD(mg/L)	30,600
NH ₄ ⁺ -N(%)	0.17

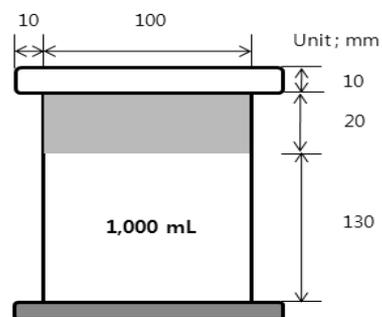


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 2. Operating parameter for batch anaerobic digestion

	Parameter	Conditions
Batch test	Storage type	Open, closed system
	Storage temp.(°C)	0, 4, 20, 35
	Reactor volume (L)	1
	Working volume (L)	0.7
	Operation time (day)	30

용 배양기(HB-101M4)를 사용하였고, 기타 조건은 Table 2와 같다.

분석방법

가수분해 및 산생성 효율을 평가하기 위해 TS(total solid)와 $TCOD_{Cr}$, $SCOD_{Cr}$, 알칼리도 등 standard methods (APHA, 1998)에 준하여 측정하였다. 암모니아성 질소는 Nessler법(NH_4^+ -N Distillation method, Hach, USA)을 이용하여 측정하였으며, pH는 pH meter(Orion 420A+, Thermo)를 이용하여 측정하였다. 유기산 분석은 300 mm × 8 mm(i.d) sus-316 재질의 유기산 전용 칼럼이 장착된 액체크로마토그래피(Waters, YoungLin Instrument Co.)를 이용하였으며, 분석을 위한 용리액(eluent)은 0.1% H_3PO_4 를 사용하였고, 유속은 1.5 mL/min으로 고정하여 분석하였다.

결과 및 고찰

돈분의 저장형태에 따른 유기물 및 pH 거동

돈분 슬러리의 pH는 6.6 ± 0.1 로 고정하고 돈분저장조의 형태와 저장온도를 달리 하였을 때 돈분 슬러리의 성장변화를 조사하였다. 돈분 슬러리 시료는 공기와 쉽게 접촉이 가능하도록 제작된 open system과 공기의 접촉을 차단시킨 closed system에서 30일간 저장 후 pH 변화를 조사하였다 (Fig. 3a).

pH 변화는 저장온도 4°C에서 저장 후 10일경에 open system과 closed system에서 조사한 결과 두 조건에서 약 pH 7.1이었고, 저장 후 30일에는 두 조건에서 pH 6.9로 큰 차이를 보이지 않았다. 반면, 저장온도 20°C 조건에서 open system의 경우 저장 후 10일경 pH는 7.0, 30일경 pH 8.29로 저장기간이 길어질수록 계속 증가하는 경향을 보였으나, closed system의 경우 초기 10일까지는 증가하는 경향을 보이다가 저장 후 10일에 pH 7.8을 기점으로 점차적으로 감소하는 경향을 보였으며, 저장 후 30일에는 pH 7.5로 open system과 closed system에서 차이를 나타내었다. 이는 운전기간 중 미생물에 의해 유기물질의 분해가 일어나면서 CO_2 가 발생되어 수증의 pH에 영향을 미치게 되는데, open system에서는 발생된 CO_2 가 돈분 슬러리에 용해되지 못하고 대기 중으로 방출되기 때문이다. 그러나 closed system에서는 돈분 슬러리에 용해되어 있던 용존산소에 의해서 초

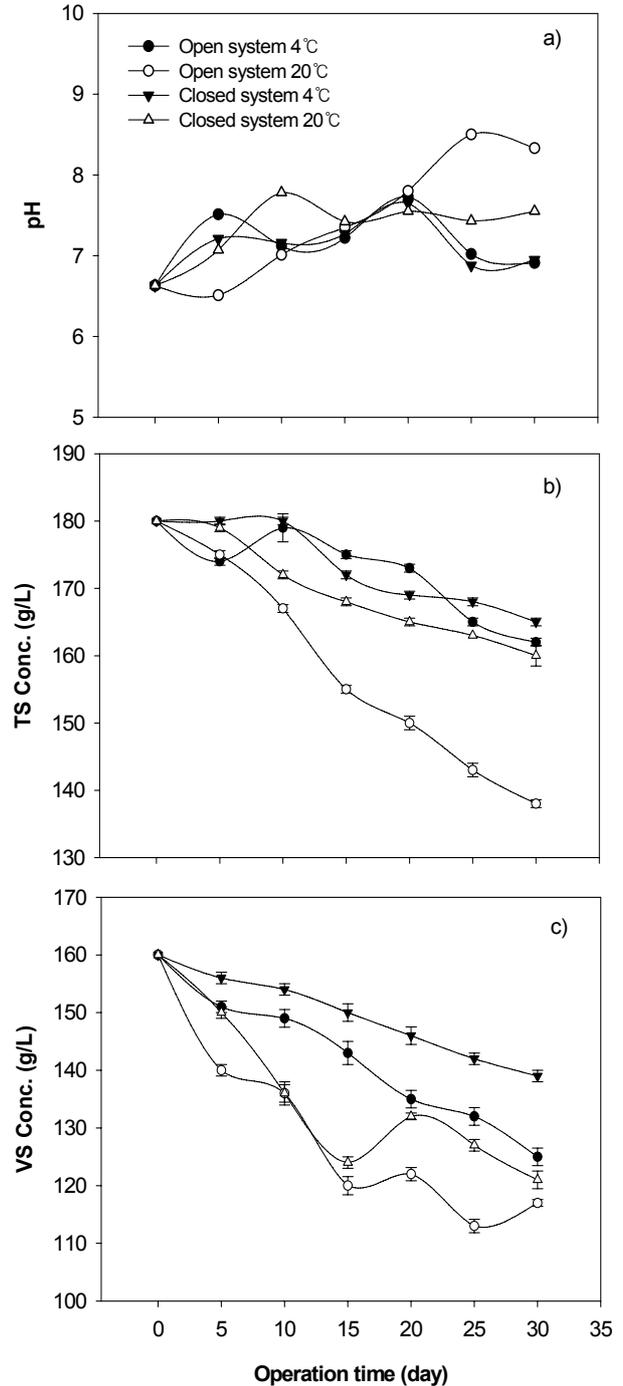


Fig. 3. Variation of TS and VS concentration of pig slurry during storage at different storage types.

기에는 약간 증가하는 경향을 보였으나, 호기성 미생물에 의해 용존산소의 소비 후 미생물 활동 저하에 의해 pH의 변화가 미미한 것으로 판단된다.

가축분뇨의 저장형태에 따른 TS와 VS의 변화를 Fig. 3(b, c)에 나타내었다. TS의 성장변화를 보면 저장기간 5일까지는 초기 TS농도 180 g/L에서 closed system의 농도변화는 거의 없었고 open system에서 4°C 174 g/L, 20°C 175 g/L로 감소하였다. closed system에서 30일 동안 돈분을 저장

하였을 때 TS 농도는 저장 온도에 영향을 거의 받지 않고 약 8~11% 정도의 TS 농도가 감소되는 것으로 나타났다. 이는 반응조 내부에 남아있는 공기와 슬러리내 용해되어 있는 산소에 의한 미생물의 반응으로 감소된 것으로 판단된다. open system의 경우 closed system보다 유기물의 감소가 증가하였고, 온도에 대한 영향도 관찰되었다. 20°C open system에서 초기 180 g/L의 TS 농도는 운전기간 동안 계속 감소되어 30일 후 138 g/L로 약 23%정도 감소되어, 반응조 형태에 따라 약 2배 정도의 TS 농도 감소의 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

VS의 성장변화에서도 저장기간 5일까지는 VS 160 g/L에서 140~156 g/L로 시간이 경과 할수록 감소하였는데, open system과 closed system을 비교해 보면 open system에서는 VS농도가 140~151 g/L인 반면 closed system에서는 151~156 g/L로 open system의 VS 농도가 낮게 나타났다. 또한 30일에는 open system과 closed system에서 116~138 g/L로 두 처리 모두 감소하는 경향을 보였다. 온도에 따른 영향은 4°C보다 20°C에서 VS 농도 감소율이 컸으며, 최종 VS 농도기준으로 4°C open system과 20°C closed system의 농도는 비슷하였다. 상기 실험에서 TS 제거율보다 VS의 제거율이 더 클 것으로 예상되었으나 open system의 최종 VS 제거율은 약 28%로 나타났는데, 이는 TS 중의 입자성 고형물의 가수분해로 인해 용존성 물질로 전환된 것으로 판단된다. 저장방법 및 온도에 따른 유기물의 제거 거동은 open system에서 활발히 진행되었는데 돈분 슬러리 내에 존재하는 미생물이 저장조 상부의 공기와 접촉하여 호기성 박테리아의 산화반응과 반응조 하부의 혐기성 반응에 의한 분해작용에 의하여 유기물의 감소가 진행된 것으로 판단된다.

돈분슬러리의 저장온도에 따른 유기물 및 pH 거동

본 실험에서는 돈분 슬러리의 발생에서부터 혐기성 소화조에 유입되기 까지 저류방법에 따라 산소공급 차단에 따른 영향과 저장온도 조건에 의한 돈분 슬러리의 변화 특성을 pH를 중심으로 조사하였다(Fig. 4a). 저장온도에 따른 pH 변화는 저장온도가 높을수록, 저장기간이 늘어날수록 pH도 높은 값을 나타내었는데, open system에서 0°C로 저장할 경우에는 25일에 pH 7.90, 4°C에서는 20일에 pH 7.73, 20°C에서는 25일에 pH 8.50, 35°C에서는 30일에 pH 9.13이였으며, closed system에서는 0°C로 저장할 경우에는 15일에 pH 7.93, 4°C에서는 20일에 pH 7.65, 20°C에서는 10일에 pH 7.78, 35°C에서는 25일에 pH 8.25이였으며, 그 이후에는 다시 낮아지는 경향을 보였다. Dreier(1963)의 호기성 소화에 의한 pH와 알칼리도의 변화에서 운전초기의 pH 변화와 유사한 결과를 보였는데, 이는 일정 양의 산소를 계속적으로 공급하였기 때문이며, 저장 슬러리에서 하절기 BOD₅의 40% 감소, 동절기에는 약간의 변화만이 일어났다는 Williams와 Evans(1981)의 보고와 유사하였다.

저장온도 0°C에서의 유기물의 거동은 저장기간에 따라 큰

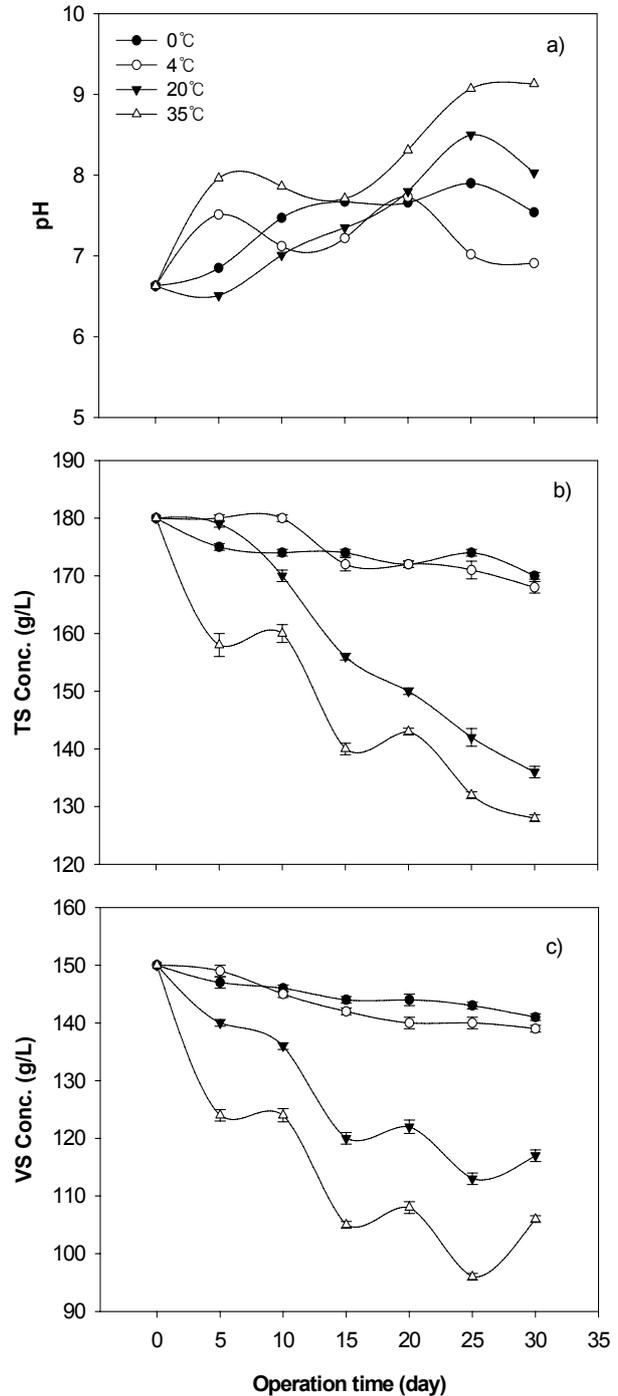


Fig. 4. Variation of pH, TS and VS concentration of pig slurry during storage temperature.

변화가 없었으며, 저장온도 4°C의 경우 저장기간 30일 후 TS 농도는 약 167 g/L, VS 138 g/L로 약 7% 정도의 유기물이 오차범위 내에서 감소되는 것으로 나타나 낮은 온도에서의 유기물의 성장변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 저장온도가 증가할수록 유기물 농도가 뚜렷하게 감소하였는데, 저장온도 20°C에서 30일 저류하였을 때 TS 농도는 135 g/L로 약 25% 정도 감소하였고 이때 VS 농도는 116 g/L로 비

슷한 범위 내에서 감소하였다. 또한 저장온도 35°C에서 TS 128 g/L로 약 29%의 유기물 농도가 감소하여 저장온도 증가할수록 저장조 내의 손실되는 유기물의 양은 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 4b,c). Patni 등(1995)은 우분슬러리 저장조의 온도가 14~23°C까지 외부온도에 따라 변화하였고 이때 1.06~1.34 L/m³/day 가스가 발생한다고 하였다. 이는 우분 및 돈분 내 다양한 종류의 혐기성박테리아가 장기간 저장조에 체류하면서 독성물질(Ammonia, H₂S) 등에 순응하면서 온도가 증가할수록 증식되어 바이오가스를 생산한 것으로 판단된다.

돈분슬러리의 저장온도에 따른 유기산 생성특성

유기성 폐기물로부터 혐기성 소화기술을 이용하여 에너지를 회수하기 위해서는 각 공정에서 여러 단계의 반응이 유도되어 최적의 조건이 유지되어야 한다. 그러나 혐기성공정내에서의 최적화 연구는 활발히 진행되어 왔지만 유입원수의 관리 측면에서는 거의 연구가 진행되지 않고 있는 실정이다. 따라서 온도 및 저장방법에 따른 유기물 분해특성의 실험결과에 따라 온도에 의해 가장 유기물 분해율이 높은 20, 35°C open system에서 돈분배수의 저장 기간에 따른 유기산 생성특성을 관찰하였다.

Fig. 5는 1000 mL 시료병에 돈분슬러리 700 mL을 주입하여 20, 35°C에서 반응시키면서 반응시간에 따라 시료를 채취하여 유기산(COD) 농도를 측정하였다. 반응시간 30일 후 생성된 총유기산 농도는 20°C에서 2829.4 mg-COD/L, 30°C에서는 9123.4 mg-COD/L로 실측된 반응초기 돈분의 COD 농도 기준으로 계산된 유기산 전환율은 각각 5.4, 17.4%이었다. 또한 반응시간 후(30일) 온도조건(20, 35°C)에서 제거된 COD 농도는 각각 20.6, 30.1%로 35°C 조건에서 유기산 전환율 및 제거된 COD의 농도도 높은 것으로 나타났다. 단순계산에 의하면 반응시간 후 제거된 COD 농도 중 유기산으로 전환된 부분을 제외한 나머지 부분은 돈분내 포함된 미생물의 세포합성에 의해 소모되고 일부는 메탄과 이산화탄소 형태로 대기 중으로 배출된 것으로 판단된다. 20°C 조건에서 생성된 유기산 중 아세트산과 프로피온산, 뷰티르산의 비중이 높게 나타났으며, 반응시간이 증가할수록 아세트산의 농도가 일정하게 유지되었다. 30°C 조건에서도 20°C와 비슷한 유기산들이 생성되는 것으로 나타났지만 뷰티르산의 농도가 반응시간 20일부터 급격하게 생성되었다. 본 실험의 결과로 볼 때 돈분내 포함된 다양한 가수분해 및 산생성 미생물의 우세하고 반응시간 15일 이후부터 유기산의 전환이 증대되는 것으로 나타났고, 생성된 유기산으로부터 메탄생성균의 기질 이용으로 저장기간에 따라 유기물의 손실량은 더욱 증가될 가능성이 있을 것으로 판단된다. 기존의 산생성 공정의 반응에 있어 수리학적체류시간(HRT)이 중요한 영향인자인데, Elefsiniotis 등(1994)은 6~12일의 HRT 범위에서 체류시간이 증가함에 따라 유기산이 생성되지만 이후 메탄생성균이 활동을 시작하여 유기산이 소모된다고 하였다. 따라서 돈분슬러리를 효과적으로 관리하여 혐기소화 공정내에

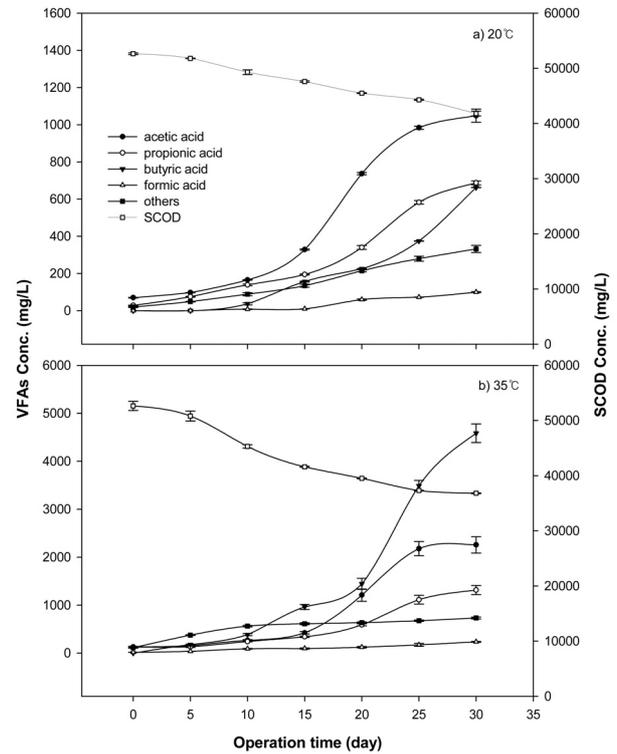


Fig. 5. Variation of VFA production of pig slurry during storage at different temperature.

서 바이오에너지인 메탄가스 효율을 증대시키기 위해서는 농장내 돈분슬러리의 저장기간을 최소로 유지하고, 특히 하절기 외부온도 상승시 저장기간을 더욱 단축시켜 유지해야 유기물의 손실을 줄일 수 있으며, 저장시 배출되는 온실가스도 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

요약

본 연구에서는 돈분 슬러리의 저장형태 및 온도에 따른 유기물의 거동을 관찰하였는데, closed system과 open system의 저장형태에 따른 유기물 농도는 20°C에서 30일 저장 후 약 2배 정도의 차이를 보였다. 또한 온도에 의한 유기물 농도의 거동은 온도가 증가할수록 TS 및 VS 농도가 감소하였고, 20°C 약 23%, 35°C 약 29% 정도가 감소되는 것으로 나타났다. 하절기 외부온도 특성을 반영한 온도조건(20, 35°C) 및 저장기간 따른 생성된 유기산 종류는 비슷하였고, 저장기간 15일 이후부터 돈분내 포함된 가수분해 및 산생성 미생물의 성장이 증대되어 유기산의 생성이 증가하였다. 반응시간 30일 후 생성된 총유기산 농도는 20°C에서 2,829 mg-COD/L이었으며, 30°C에서는 9,123 mg-COD/L로 초기 유기물농도 대비 각각 5.4, 17.4%의 유기산 전환율을 나타내었다. 따라서 돈분슬러리의 저장기간이 길어질수록 외부 온도에 따라 가수분해 및 산생성 반응으로 유기산이 생성되고, 메탄생성균의 기질이용으로 유기물의 손실이 발생하여 온실가스 배출도 증가할 것으로 예상된다.

참고문헌

- APHA, 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed., Washington, D.C.
- Breure, A.M. and Van Andel, J.G., 1984. Hydrolysis and acidification fermentation of a protein gelatin in an anaerobic continuous culture, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 20(1), 40-45.
- Dreier, D.E., 1963. Aerobic digestion of solid, *proceedings of the 18th annual Purdue Industrial waste conference.*
- Elefsiniotis, P. and Oldhan, W.K., 1994. The effect of operation parameter on the acid-phase anaerobic fermentation in the biological phosphorus removal process, *Proc. ASCE. Natl. Conf. Environ. Eng.* 325-330.
- Elefsiniotis, P. and Wareham, D.G., 2007. Utilization patterns of volatile fatty acids in the denitrification reaction, *Enzyme and Microbial Tech.* 41, 92-97.
- Elefsiniotis, P., Wareham, D.G. and Smith, M.O., 2004. Use of volatile fatty acids an acid-phase digester for denitrification, *J. of Biotechnol.* 114, 289-297.
- Husted, S., 1993. An open chamber technique for determination of methane emission from stored livestock manure, *Atmospheric Environment*, 27A, 1635-1642.
- Mahmoud, N., Zeeman, G., Gijzen, H. and Lettinga, G., 2004. Anaerobic stabilization and conversion of biopolymers in primary sludge-effect of temperature and sludge retention time, *Wat. Res.* 38, 983-991.
- Mata-Alvarez, J., Mace, S. and Llabres, P., 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes, An overview of research achievements and perspectives, *Biores. Technol.* 74, 3-16.
- Metcalf and Eddy, 2004. Wastewater engineering: Treatment and reuse, *Fourth Edition*, Mcgraw-Hill Inc.
- Park, S.M., Park, N.B., Seo, T.K. and Jun, H.B., 2008. Effects of denitrification on acid production in a two-phase anaerobic digestion process, *J. KSEE.* 30(6), 628-636.
- Park, W.K., Jun, H.B., Kwon, S.I., Chea, K.J. and Park, N.B., 2010. Optimum recovery of biogas from pig slurry with different compositions, *Korean J. Environ. Agric.* 29(2), 197-205.
- Patni, N.K., Jackson, H., Masse, D.I., Wolynetz, M.S. and Kinsman, R., 1995. Greenhouse gas release from stored dairy cattle manure slurry, In *proceedings 7th International Symposium on Agricultural and Food Processing Wastes*, 261-271.
- Pavlostathis, S.G. and Giraldo-Gomez, E., 1991. Kinetics of anaerobic treatment, *Wat. Sci. Tech.*, 24(8), 35-59.
- USEPA, 1997. A manual for developing biogas systems at commercial farms in the united states, *Ag STAR Handbook*, EPA-430-B-97-015, *US Environmental Protection Agency, Atmospheric Pollution Prevention Division*, Washington, D. C.
- Williams, A.G. and Evals, M.R., 1981. Storage of piggery slurry, *Agricultural waste*, 3, 311-321.
- Zhang, R. and Felmann, D.J., 1997. Animal manure management-agriculture scoping syudy, The EPRI Agricultural technology Alliance-Electric Power Research Institute, C109139.