

돈분 슬러리 성상에 따른 최적 바이오가스 회수

박우균 · 전항배¹ · 권순익 · 채규정² · 박노백*

농촌진흥청 국립농업과학원, ¹충북대학교 환경공학과, ²코오롱건설 기술연구소
(2010년 5월 25일 접수, 2010년 6월 20일 수리)

Optimum Recovery of Biogas from Pig Slurry with Different Compositions

Woo-Kyun Park, Hang-Bae Jun¹, Soon-Ik Kwon, Kyu-Jung Chae² and Noh-Back Park^{*}(National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, ¹Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, ²Kolon Engineering and Construction Co., Ltd)

This study was conducted to investigate the optimum conditions for efficient methane production through anaerobic digestion of pig waste slurry. The examined parameters were organic matter content of the pig slurry, the ratio of seed sludge to pig slurry, and stirring intensity of the digestion reactor. The effects of types of slurry produced from different purpose-based pigs fed with different feeds were also tested. The methane concentration in the produced biogas was 45% when the ratio of seed sludge to pig slurry was 50% and total solid (TS) concentration was 1%, and it increased in proportional to TS concentration increases from 3 to 7%. At 3 and 5% of TS concentration, increasing mixing velocity from 80 to 160 rpm resulted in higher biogas production amount. However, mixing amount of seed sludge did not cause any significant effect on biogas production. Overall, the most efficient biogas production was achieved at 3-5% TS concentration in combination with 50% seed sludge inoculation and mixing velocity at 120 rpm. Among pig slurry types, gestating sow waste slurry showed the highest biogas production probably due to higher the degradation rate than other types of pig waste slurry being affected by the feeds components.

Key Words: Anaerobic digestion, Biogas recovery, Pig slurry, Mixing velocity

서론

돈분폐수는 유기물과 고형물의 농도가 매우 높아 환경오염 부하량이 크기 때문에 적정 처리를 목적으로 연구되어 왔지만, 최근 유가급등과 이산화탄소 배출 급증으로 대체에너지에 대한 관심이 고조되면서 돈분폐수로부터 에너지를 회수하는데 관심이 집중되고 있다(Park et al., 2009).

단일 혐기성 처리공정에서는 산생성단계보다 가수분해 및 산생성 속도가 메탄생성 속도보다 빠르기 때문에 혐기성 반응조내 유기산이 축적되어 pH가 낮아져 저해가 발생하게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 Ghosh 등(1975)은 bench 규모의 상(phase)분리된 2상 소화공정을 중온에서 운전한 결과 기존의 단일 혐기성 반응기에 비하여 우수함을 입증하

였고, Raynal 등(1998)은 식물성 고형폐기물을 처리하는데 있어 여러 개의 산생성 반응조와 1개의 메탄생성 중온 소화조를 조합한 상 분리된 시스템을 이용하여 유기물 부하율(OLR) 4.0 g/L·day 부근에서 약 87% 이상의 높은 유기물 제거율을 달성하였다. 한편, 상 분리된 소화공정에서 메탄생성 슬러지의 낮은 침전성 문제를 극복하기 위하여 메탄생성 공정에 생물막을 이용하기도 하였는데, Oliva 등(1990)은 주정공장 폐수처리를 위해 유동상 공정을 이용하였고, Ince (1998)는 상향류식 혐기여상(anaerobic filter)을 메탄생성 반응조에 적용하기도 하였다. 이렇게 돈분 폐수의 혐기성 소화 시스템을 설계하기 위해서는 메탄 발생속도 및 발생량에 대한 돈분 슬러리의 조성 및 영향을 잘 이해하여야 하며, 이를 기초하여 발효조 및 가스포집조의 용량을 결정하게 된다. 또한 혐기성 소화의 성공적인 운전을 위해서는 혐기성 소화처리를 위한 초기운전이나 운전의 실패로 인한 재운전의 경우 빠른 시간 안에 운전의 안정화가 필요하지만, 소화조의 초기 식종슬러지의 적정 식종 비율에 대한 연구는 미흡한 실정

*연락처:

Tel: +82-31-290-0233 Fax: +80-31-290-0206
E-mail: pnb502@korea.kr

이고, 돈분 슬러리를 대상으로 한 혐기성 소화효율 향상과 경제적인 에너지 사용 측면에서의 소화액 적정 교반강도에 대한 검토가 필요하지만 연구는 많이 이루어지지 않았다. 특히 돈분 슬러리는 축사의 구조 및 돼지의 사육형태, 계절 등에 따라 성상의 변동이 크고, 돈분의 저장기간이나 방법에 따라 유기물의 분해정도가 달라져 혐기성 소화처리에는 돈분 슬러리의 성상과 특성을 고려한 운전이 이루어져야 소화효율이 증대되는 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 회분식 실험을 이용한 BMP(bio-methane potential) 실험 시 유기물 농도 및 식종슬러지의 혼합비율과 반응기의 교반강도에 따른 바이오가스 발생 거동을 파악하고, 돼지 사육특성에 따라 배출되는 분뇨의 메탄가스 발생 특성을 관찰하고자 하였다.

재료 및 방법

실험장치 및 방법

본 연구에서는 세럼병(serum bottle, Schott Co., GL45)을 이용하여 회분식 실험을 수행하였다. 세럼병의 크기는 내경 6.0 cm, 높이 14 cm의 유효용량은 250 mL이었다(Fig. 1). 반응기에는 가스발생량을 측정하기 위해 실리콘 마개를 설치하였고, 내경 3 mm, 길이 7 cm 정도의 실리콘 튜브를 삽입하여, 발생되는 가스를 채집할 수 있도록 하였다. 반응기 내 혼합을 위하여 자석식 교반기(IKA WORKS, INC.)를 설치하였고, 소화 온도를 유기하기 위해 수욕조(water bath) 내에 가온기와 온도센서를 이용하여 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 를 유지하였다.

돈분 슬러리의 혐기성 소화특성을 평가하기 위하여 총 고형물 농도(TS ; Total Solid), 교반강도, 돼지의 성장 단계별 사료 종류에 따른 실험을 수행하였다. TS 농도는 1, 3, 5, 7%로 설정하였고, 교반강도는 자석교반막대(magnetic stirrer)를 이용하여 교반속도를 80, 120, 160 rpm으로 조절하였는데, 화학적 폐수처리에서 사용되는 급속교반과 완속교반의 교반속도 범위로 운전한 Jeong 등(1996)의 방법에 돈분 슬

러리의 고형물 농도를 고려하여 강, 중, 하로 구분하여 속도를 설정하였다. 식종 슬러지에서 발생하는 가스량을 보정하기 위해서 기질을 첨가하지 않은 식종 슬러지만을 첨가한 공시료(blank)를 동일한 조건에서 실험하였다. 산소에 의한 저해와 외부 미생물에 의한 영향을 최소화하기 위하여 사용된 실험장치는 가온, 가압상태(120°C)에서 20분간 멸균한 다음 상온에서 식힌 후 사용하였다. 실험에 이용된 돈분폐수는 실험의 특성에 따라 적절한 TS 함량 조절을 위하여 수돗물을 이용하여 희석하였고, 기질과 식종 슬러지를 주입한 후에는 반응기의 수위를 일정하게 유지하기 위하여 공기를 탈기시킨 후 수돗물을 채워 사용하였다. 또한 기질인 돈분과 식종 슬러지를 투입한 후 일정량으로 수돗물을 채워 돈분 슬러리 형태로 만든 후 잔류 용존산소를 제거하기 위해 질소가스를 약 10분간 세정(flushing) 시킨 후 밀봉하였고, 기타 회분식 실험의 조건은 Table 1에 나타내었다.

원수성상

본 실험에 사용된 식종슬러지(seed sludge)는 충남 C시에 소재한 C환경사업소 하수처리장의 혐기성 소화 슬러리를 이용하였고, 기질인 돈분 슬러리는 저장방법 및 온도에 따른 성상변화를 방지하기 위해 경기도 R 축산연구소에서 채취한 돈분을 수거하여 2 mm 체(sieve)를 이용하여 모래 및 협잡물을 제거한 후 사용하였다. 또한 돈분폐수는 돼지 사육 및 성장특성에 따라 자돈(체중 20~30 kg 정도)분, 육성비육돈(체중 60~90 kg 정도)분, 분만돈(체중 100~150 kg 정도)분을 각각 채취하여 공시재료로 사용하여 실험하였다. 식종슬러지의 TS 함량은 8.5%, 돈분의 TS는 14.7~24.0%였고, 실험에 사용된 돈분폐수의 성상은 Table 2와 각 돈분의 유기물을 조절하였을 때의 고형물 농도는 Table 3과 같다.

분석방법

혐기소화 효율을 평가하기 위한 원소분석은 EA 1110 원소분석기(CE instruments, Milano, Italy)를 이용하여 분석하

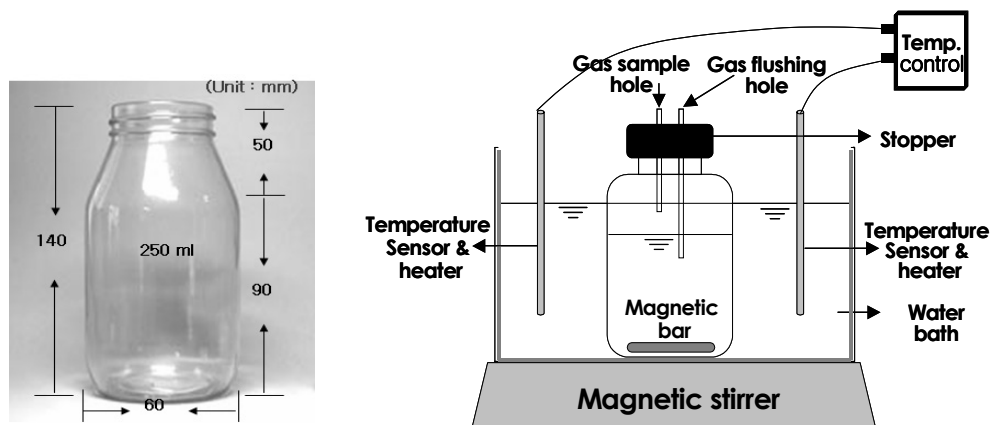


Fig. 1. Schematic diagram of lab scale experimental set-up (left : size of serum bottle, right : experimental apparatus).

Table 1. Operating parameter for batch anaerobic digestion

Parameter	Values
Digestion temperature (°C)	35
Volume of serum bottle (mL)	350
Working volume (mL)	200
Raw wastewater (g · VS/L)	5.7, 19.5, 34.2, 49.3
Operation time (day)	30 ~ 50
Mixing velocity (rpm)	80, 120, 160

Table 2. Composition of the pig slurry

Parameter	Piglet	Growing pig	Gestating sow
pH	6.0~7.4	7.2~7.8	7.3~7.9
Alkalinity (as CaCO ₃ , mg/L)	4,896~9,448	5,888~15,772	4,896~17,866
TS (Total Solid, %)	24	14.7	21.8
TCOD (mg/L)	42,400	49,900	50,000
SCOD (mg/L)	30,700	30,600	27,800
NH ₄ ⁺ -N (%)	0.18	0.17	0.14

Table 3. Volatile solids concentration of the pig slurry in the anaerobic digestion process

Parameter	TS 1%	TS 3%	TS 5%	TS 7%
Piglet (g/L)	8.13	24.0	39.8	56.2
Growing pig (g/L)	7.3	22.5	36.7	52.2
Gestating sow (g/L)	6.67	22.2	33.2	49.3

였고, 발생 가스 성분은 가스 검지관(GASTEX)과 Hayesep Q(80/100 mesh)가 충전된 100 cm × 2 mm(i.d) 스테인레스강 재질 컬럼의 열전도 검출기(Thermal Conductivity Detector, TCD)가 장착된 가스 크로마토그래피(Varian CP-3800, USA)를 이용하였다. 분석을 위한 운반가스는 초순도 헬륨을 이용하였고, 유속은 15 L/min으로 고정하였다. 암모니아성 질소는 Nessler법(NH₄⁺-N Distillation method, Hach, USA)을 이용하여 측정하였으며, COD_C은 closed reflux 및 colorimetric method를 이용하여 측정하였다. 총질소 및 알칼리도, 휘발성고형물 등의 기타 분석항목은 Standard methods(1995)에 준하여 측정하였다. 통계분석은 처리 평균간 상호 비교를 위하여 Duncan의 다중검정(Duncan's Multiple Range Test ; DMRT) 방법을 이용하였다.

결과 및 고찰

유기물 함량에 따른 바이오가스 발생 특성

돈분 슬러리의 유기물 함량(TS)은 축사의 구조, 농가 운영 방법, 계절적 특성에 따라 3~12% 정도의 차이를 나타내는 것으로 알려져 있다(Park et al., 2000; USEPA, 1997). 또한 이들의 연구는 시멘트형 슬러리 돈사에서 배출되는 기질을 대상으로 한 생물학적 영양염류 제거 등이 주 연구 대상

이었으나, 돈사폐수가 함유하고 있는 높은 유기물로 인해 생물학적 영양염류 제거 전에 전처리 개념으로 혐기성 공정을 이용한 메탄회수 등이 제안되어 연구되고 있다(Park et al., 2009; Won et al., 2009).

따라서 본 연구에서는 혐기성 소화공정에서 안정적인 바이오가스 생산 및 최적 운전조건 설정을 위하여 돈분 슬러리에 대한 생분해도 실험을 실시하였다. 적정 유기물 부하량 설정을 위하여 돈분폐수를 2 mm 체로 걸러 폐수내 존재하는 입자성 물질을 일정하게 조절하였고, 수돗물을 이용하여 TS 농도를 1, 3, 5, 7%로 희석하였으며 별도의 pH 조절은 하지 않았다.

Fig. 2에 유기물 농도별 바이오가스 발생량 분포를 나타내었다. 혐기성 소화 온도를 35°C에서 유기물 함량별 바이오가스 누적 발생량은 투입된 유기물량의 차이로 인해 TS 농도 7%가 가장 높게 나타났다. 투입된 유기물 농도를 휘발성고형물(VS) 기준으로 환산하였을 때, TS 농도 1, 3, 5, 7%에서 가스발생량은 357, 480, 457, 459 mL/g · VS_{added}로 나타났다. 또한 누적가스 peak 발생량은 TS 1%의 경우 운전기간 약 10일 경이었고, 유기물 농도가 증가할수록 TS 농도 3%일 때 15일, TS 5%와 7%인 경우에는 약 30일 이후에 나타났다. 이는 유기물 부하량이 높을수록 반응조내 체류시간을 길게 유지하여야 하고, 또한 반응조내 식중슬러지의 농도가 혐기소화 속도에 미치는 영향이 큰 것으로 알려져 있는데, 혐기

소화시 최대 sludge 주입농도는 약 10~12%로 보고되고 있다(WPCF, 1977). 돈분 슬러리와 같이 유기물 함량이 높을 경우에는 반응조내 적절한 혼합에 어려움이 야기되므로 돈분 슬러리의 혐기성 처리를 위한 적정 유기물 농도는 3~5% 정도로 판단된다. 유기물 농도별 가스발생량에 대한 통계분석 결과(Table 4), 운전기간 10일경에 분석된 가스발생량은 각 처리 조건별 차이가 인정되었고, 운전기간 30일과 50일의 경우 TS 농도 3%와 5%의 두 조건에서 차이가 인정되었으나, 다른 조건에서는 5% 수준의 유의성이 인정되는 것으로 나타났다. 운전기간 10일경에는 TS 농도에 따라 가스 발생량에 차이를 나타내었으나, TS 5%와 7%의 두 조건에 대해서는 유의성이 인정되지 않았다. 이 후 운전기간이 늘어날수록 유기물 함량에 따른 가스발생량은 TS 3%와 5%의 조건에서 차이가 없었고, TS 1% 조건에서는 현저히 낮았으며, TS 7% 조건에서는 유의성 있게 증가하였다.

Fig. 3은 혐기소화공정에서 발생하는 가스의 구성성분을 나타낸 것이다. 반응조내 메탄가스 거동은 유기물 농도가 낮은 TS 함량 1%와 3%에서는 운전초기 82%와 72%로 초기 메탄가스 함량이 높은 수준으로 발생되었으며, 운전기간이 증가할수록 이산화탄소 발생량이 증가되고, 메탄가스 발생은

감소하는 경향을 나타내었다. TS 농도 5, 7% 수준에서는 운전초기 72%에서 운전기간이 증가할수록 메탄가스 함량이 증대되고, 이산화탄소 농도는 감소하는 경향을 나타내었다. 바이오가스내 포함되어 있는 이산화탄소와 메탄가스의 구성비는 혐기성 소화공정의 운전지표이고, 이산화탄소는 주로 외부 환경의 영향을 적게 받는 발효균에 의하여 생성되어, 반응조내 이상상태가 발생할 경우 메탄함량이 감소하고, 상대적으로 이산화탄소의 비율이 증가하게 된다(McCarty, 1964). 본 연구에서도 유기물 함량이 높을수록 운전초기 이산화탄소 농도가 증가되었으나 이후 감소하였고, 문헌상으로 소화조가 정상상태(steady state)에 도달하였을 때 약 55~75% 정도의 메탄가스가 발생하는 것으로 보고되고 있다(Raynal et al., 1978; McCarty, 1964). Won 등(2009)은 돈분폐수를 이용하여 UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) 반응조를 운전한 결과 정상상태 일 때 바이오가스내 메탄가스 함량은 73.3~77.9% 이었고, Park 등(2009)은 TPAD (Two Phase Anaerobic Digestion) 공정에서 75% 이상의 메탄가스 함량을 보여 본 연구의 결과와 유사하였다. Table 5는 운전조건별 가스분석에 대한 통계분석을 실시하였고, 운전기간 10일과 15일에 분석된 이산화탄소, 메탄가스 농도는 TS 농도 3, 5, 7%에서 처리간의 차이가 없었으며, TS 1% 처리와는 5% 수준에서 유의성이 인정되었다.

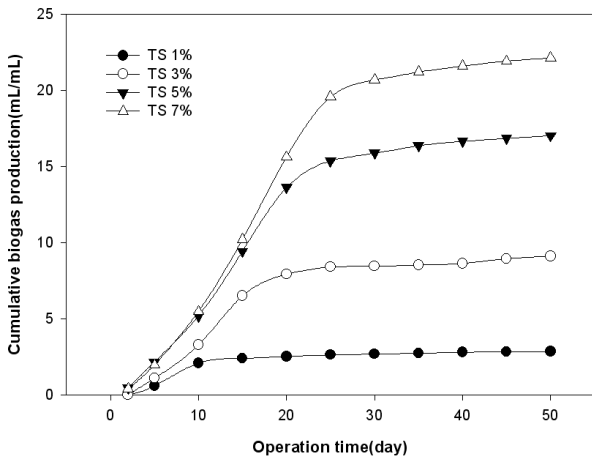


Fig. 2. Concentration of organic matter due to the change of biogas production.

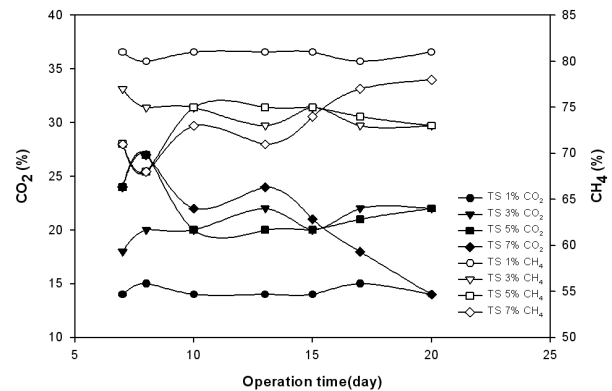


Fig. 3. Methane and carbon dioxide content according to organic loading rate at batch anaerobic reactors.

Table 4. Comparison of cumulative gas production according to different organic matter content of pig manure (unit; ml/ ml)

Operation time	10th day	30th day	50th day
TS 1%	2.08 c ^{b)}	2.67 c	2.84 c
TS 3%	5.28 b	14.8 b	15.6 b
TS 5%	5.43 a	15.9 b	17.03 b
TS 7%	5.47 a	20.8 a	22.13 a

^{b)} Duncan Multiple Range Test (DMRT) 5%

식종슬러리(seed sludge)의 혼합비율과 교반강도에 따른 혐기소화 효율의 영향

혐기소화 반응시 소화 슬러지와 폐수와의 교반속도는 같은 물질이라도 고형물의 농도에 따라 달라지므로 적정 혼합속도의 선택이 중요하다. 혐기성 소화과정에서 반응조내의 적절한 혼합은 유입되는 돈분 슬러리와 미생물과의 접촉을 원활하게 하고 반응조 내부의 균일한 온도를 유지시키며, 스크럼(scum) 생성을 방지하며 고형물의 침전으로 인한 사영역(dead space) 형성을 방지할 수 있다(Henze and Harrenmoes, 1983). 따라서 본 연구에서는 혐기성 소화 과정에서 유기물 부하 및 식종슬러지의 식종 비율과 반응조의 교반강도가 바이오가스내 메탄가스 함량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실험을 수행하였다. 식종 슬러지의 TS 농도는 84,900

mg/L 이었고, TS 대비 VS의 비는 41% 이었다. 또한 실험에 사용된 돈분 슬러리의 TS는 14.7 %이고, 이때 TS/VS의 비는 72% 정도였다. 돈분 슬러리는 별도의 전처리를 하지 않았으며 반응조의 식종슬러지의 식종비율은 반응조 용적의 25, 50, 75%로 조절하였고 투입된 돈분슬러리의 유기물(TS) 농도는 1, 3, 5, 7%로 주입하였다. 반응조내의 교반은 자석 교반기를 이용하여 80, 120, 160 rpm으로 조절하여 바이오 가스 발생량을 평가하였다.

Fig. 4는 식종 슬러지를 25~75% 까지 집중한 소화실험에서 교반기의 혼합강도와 돈분 슬러리의 유기물농도에 따른 가스발생량을 나타낸 것이다. 식종 슬러지의 비율을 25%로 투입하였을 때(Fig. 4a), 운전기간 중 발생된 총 누적가스 발생량은 동일한 고형물농도에서 혼합속도에 대한 차이가 없는

Table 5. Comparison of gas content according to different organic matter of pig manure in the anaerobic digestion

	10th day		15th day		20th day	
	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)
TS 1%	14 b [‡]	81 a	14 b	81 a	14 c	81 a
TS 3%	20 a	75 b	20 a	75 b	22 a	73 b
TS 5%	20 a	75 b	20 a	75 b	22 a	73 b
TS 7%	22 a	73 b	21 a	74 b	20 b	75 b

[‡]DMRT 5%

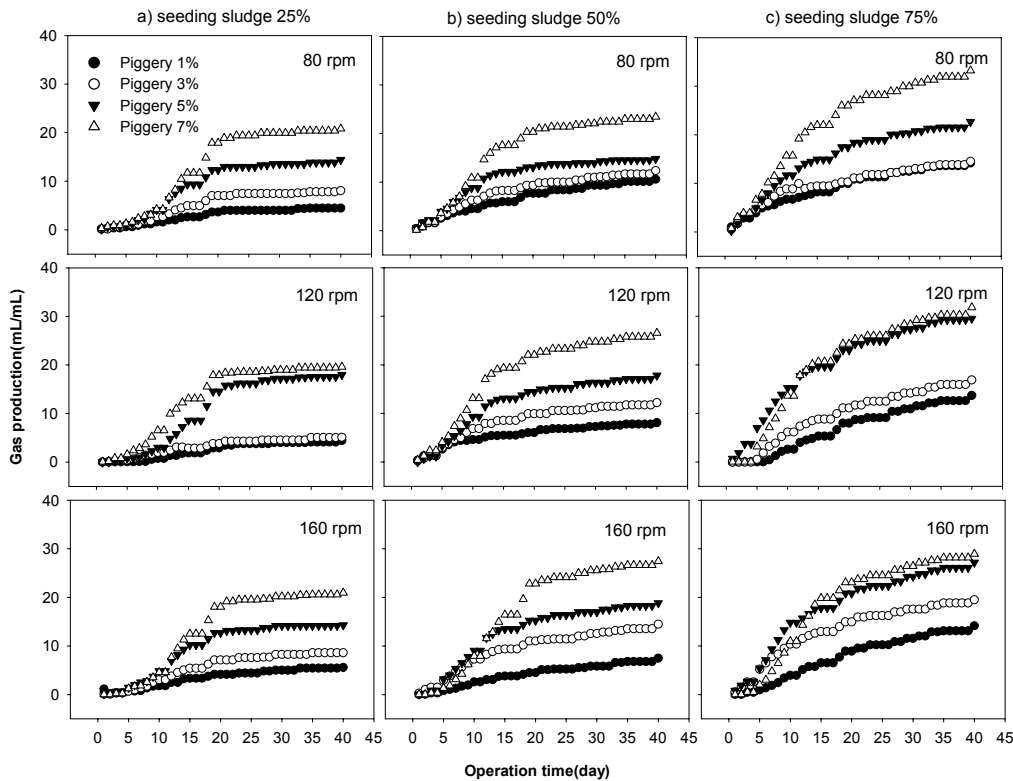


Fig. 4. Cumulative biogas production according to mixing velocity at a) 25%, b) 50%, c) 75% of seeding ratios.

것으로 나타났는데, Karim 등(2005)은 TS 5% 슬러리 분뇨를 가스에 의한 교반방식을 도입하여 실험하였을 때, 낮은 고형물 농도에서는 혼합강도에 따른 차이가 없다고 하였으나, 10%와 15%의 고농도 슬러리 분뇨에서 반응조의 혼합강도에 따라 약 10~30%의 가스발생량이 증가되는 것으로 보고되고 있다.

식중 슬러지를 50% 접종하였을 때(Fig. 4b) 고형물 농도(1, 3, 5%)에 따른 가스발생량의 결과 소화액 혼합속도에 따른 영향은 큰 차이가 없었다. 그러나 고형물 농도를 7%로 운전하였을 경우 혼합속도를 증가할수록 총 누적가스 발생량은 증가되는 경향을 나타내었다. 총 누적 가스발생량은 소화액 혼합강도 80 rpm에서 23.4 mL/mL로 운전기간 5일부터 15일 사이 부근에서 정상상태에 도달하였고, 가장 많은 가스 발생량을 나타내었다. 소화액의 혼합속도가 120 rpm에서 총 누적가스 발생량은 26.6 mL/mL이었고, 160 rpm에서는 27.4 mL/mL로 식중슬러지의 양을 증가시킬수록 교반강도의 영향이 크게 작용하는 것으로 나타났다. Fig. 4(c)는 식중슬러지의 비율을 75%로 하였을 때 바이오가스 발생량을 나타낸 것이다. TS 농도 1%에서 반응조내 교반강도를 80, 120, 160 rpm으로 증가하면서 운전하였을 때 총 누적 바이오가스 발생량은 각각 14.2, 13.7, 14.1 mL/mL로 교반강도에 따른 영향은 거의 나타나지 않았다. 그러나 TS 농도 7%, 교반강도가 80 rpm 일 때 바이오가스 발생량은 33.19 mL/mL로 유기물 농도가 증가할수록 바이오가스 발생량도 증가하는 경향을 나타내었다. 즉, 바이오가스의 총 누적발생량은 유기물농도가 낮은 1%에서 혼합강도에 따른 가스발생량의 영향은 미비하였으나, 식중슬러지의 투입량이 바이오가스 발생량을 증대시키는 것으로 나타났다. 그러나 TS 농도 3, 5%에서는 투입되는 식중슬러지의 양보다 교반강도가 바이오가스 발생량 증대에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 TS 농도 7%에서는 식중슬러지 및 반응조의 교반강도에 따른 가스발생량에 차이가 없는 것으로 나타났는데, 이는 반응

조내 유기물 농도는 증가하였으나 반응을 위한 적절한 혼합을 위해서는 교반강도를 크게 유지되어야 할 것으로 판단된다. Vesilind 등(1981)은 TS 농도 10%에서 혼합이 어려워져 사영역(dead space)이 발생하기 쉽다고 보고하였는데, 본 연구에서도 유사한 경향을 나타내었다.

Table 6은 식중슬러지 비율 50%에서 TS 농도와 교반강도에 따른 바이오가스 발생량을 통계 분석한 결과이다. 각 운전기간(10, 20, 30, 40day)에 따른 TS 농도와 식중슬러지의 혼합비율 및 교반강도(mixing velocity)에 따른 가스발생량은 운전조건에 따라서 5% 수준의 유의성이 인정되는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 식중슬러지의 식중비율과 소화액의 교반강도 및 유기물 농도에 따른 바이오가스내 메탄가스 함량을 나타내었다. 유기물 농도가 낮고(TS 3% 이하), 식중슬러지의 비율 25%의 낮은 수준에서는 메탄가스 함량이 50% 이하로 낮게 나타났다. 그러나 식중슬러지 75%를 식중한 반응기에서의 메탄가스 발생량은 교반강도 및 유기물 농도의 영향과 관계 없이 메탄가스 함량이 60% 이상 발생되었다.

유기물 농도가 증가할수록 80 rpm보다 120 rpm으로 교반강도를 증가하였을 때 메탄가스 함량도 증가하였으나, 160 rpm에서는 유기물 농도가 증가할수록 메탄가스 발생량은 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 또한 식중비율 75%에서는 유기물 농도 및 혼합강도에 따른 메탄가스 발생량(70.7~88.7%)의 차이는 없었으며, 식중비율 25%에서 혼합강도를 160 rpm으로 운전하였을 경우 메탄가스 함량이 낮게 유지되었다. 이는 유기물 및 고형물 농도가 증가하였을 경우 식중슬러지와 기질의 접촉을 원활하게 유지하여 반응속도를 증대해야 하는데, Fig. 5(c)의 경우 투입되는 고형물 및 식중액에 비해 교반강도가 부족하여 메탄가스 함량이 낮은 것으로 판단된다. 일반적으로 교반속도가 너무 큰 경우에는 강한 전단력으로 에너지의 과소비가 예상되고, 너무 느린 경우 기질과 미생물간의 접촉 효율이 낮아져 반응조 하부에 고형물의 침

Table 6. Comparison of cumulative biogas production between organic matter content and mixing velocity at 50% of seeding ratios(units ; mL/ mL)

		10th day	20th day	30th day	40th day
80 rpm	TS 1%	4.5 g ^b	7.7 j	9.4 g	10.6 f
	TS 3%	6.3 f	9.3 I	11.0 f	12.4 e
	TS 5%	8.8 c	13.1 f	13.9 d	14.8 d
	TS 7%	10.9 b	20.3 c	22.0 b	23.4 b
120 rpm	TS 1%	4.6 g	6.0 k	7.3 h	8.1 g
	TS 3%	6.9 ef	9.9 h	11.1 f	12.2 e
	TS 5%	9.3 c	14.4 e	16.4 c	17.8 c
	TS 7%	13.1 a	22.0 b	24.7 a	26.6 a
160 rpm	TS 1%	2.6 h	4.5 l	5.8 I	7.5 g
	TS 3%	7.3 de	11.0 g	12.5 e	14.5 d
	TS 5%	9.1 c	15.2 d	17.0 c	18.8 c
	TS 7%	7.9 d	22.8 a	25.6 a	27.4 a

^b DMRT 5%

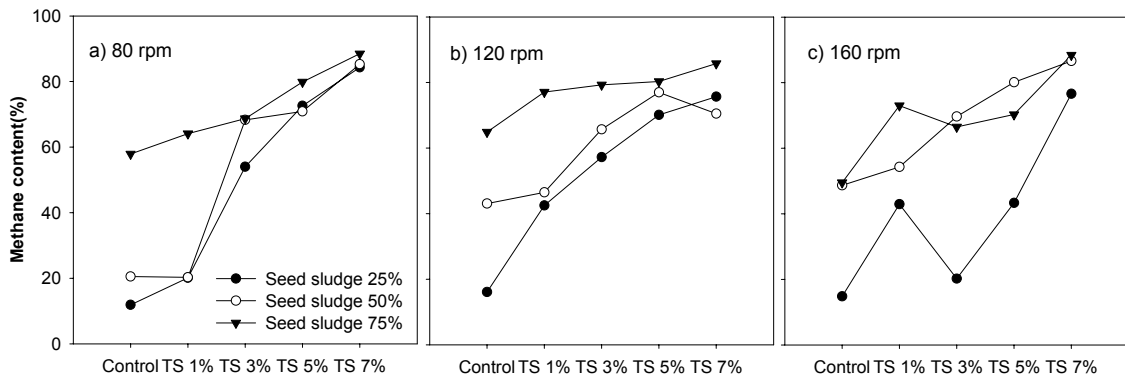


Fig. 5. Methane content according to seeding ratios and mixing velocity.

Table 7. Chemical composition of pig manure

Classification	Elemental composition(%)					C/N ratio
	C	H	O	N	S	
Piglet manure	39.41	4.83	44.0	3.28	0.32	12.0
Growing pig manure	41.95	6.64	42.8	2.8	0.19	15.0
Gestating sow manure	40.15	6.54	34.1	2.32	0.2	17.3

전을 방지할 정도의 적절한 교반이 요구된다. 그러나 돈분 슬러리의 고형물 농도에 따라 동일한 회전속도에서는 반응조내 교반상태가 달라지게된다. 따라서 혐기소화 공정의 진단을 위한 회분식 실험시 메탄가스 회수를 위한 최적의 식중슬러지의 혼합비율 및 교반강도는 유기물 농도(TS) 3~5%, 식중슬러지 비율 50% 및 교반강도 120 rpm에서 운전하는 것이 적정할 것으로 판단된다.

돈분 기질 종류 및 성상에 따른 바이오가스 발생 특성

혐기성소화를 통한 바이오가스 생산은 원수의 구성성분에 따라 상이하고, 또한 사료의 종류와 전처리 방법 등에 많은 영향을 받을 수 있다(McCarty, 1964). 돼지의 성장특성을 살펴보면, 성장 생리상 발육 초기인 체중 30 kg부터 골격과 근체중이 증가되는 시기이기 때문에 고열량의 고단백질의 사료가 요구되고, 이 후 50 kg 이후에는 돼지 체중내 지방축적이 이루어지기 때문에 저열량의 저단백질 사료가 요구되어지는 것으로 알려져 있어, 돼지의 성별 및 유전적 개량 정도에 따라 성장속도가 다르며, 이에 따른 사료의 급여체제로 달리해야 하는 것으로 알려져 있다(NIAS, 2007). 따라서 돼지의 성장특성에 따라 주입되는 사료의 조성이 달라지기 때문에 배출되는 분뇨의 성상도 상이하며, 이에 따른 혐기소화공정에서 바이오가스 발생특성도 영향이 미칠 것으로 예상된다.

Table 7은 자돈(piglet), 육성비육돈(Growing pig), 분만돈(Gestating sow) 분뇨의 화학적 원소조성을 분석한 결과이다. 3가지 돈분의 원소분석 결과 탄소 및 질소 등의 구성성분이 약간씩 상이하였는데 자돈분뇨의 경우 육성비육돈분과 분만돈분 보다 질소의 성분이 높게 나타났으며, 다른 성분

들은 비교적 비슷한 분포를 나타내었다. 혐기성소화 공정에서 혐기성 세균에 요구되는 영양물질은 질소와 인 및 무기이온 등으로 영양물질의 소요량은 대부분이 세포합성에 이용되며, 질소농도가 지나치게 높으면 암모니아성 질소에 의한 독성이 야기될 수 있어 바이오가스 생산을 위한 최적 C/N 비율이 12~30 정도로 보고되고 있다(Cho et al., 1993). 실험에 사용된 원수의 C/N비를 분석한 결과 자돈분이 12.0, 육성비육돈분이 15.0, 분만돈분이 17.3으로 나타나 바이오가스 생산을 위한 C/N비는 적정한 것으로 나타났다.

Table 7의 원소분석 결과를 바탕으로 돈분 종류별 이론적 메탄가스 발생량을 산출하기 위해 화학 양론식(식 1)을 이용하였다. 이 때 메탄가스 1 mol의 부피는 0°C, 22.4 L 이며, 휘발성고형물(VS) 1 g당 이론적 메탄가스 발생량은 Table 8과 같다. 식 (1)에 의해 계산된 자돈분뇨, 육성비육돈분뇨, 분만돈분뇨의 이론적 메탄가스 발생량은 359, 435, 509 mL/g·VS_{added}로 나타났고, 실제 분뇨를 이용한 회분식 실험결과도 분만돈분뇨, 육성비육돈분뇨, 자돈분뇨 순으로 메탄가스가 발생되었고, 사육되는 돼지의 급여 사료특성이 잘 반영된 것으로 판단된다.

$$C_nH_aO_bN_cS_d + (n - \frac{a}{4} - \frac{b}{2} + 7\frac{c}{4} + \frac{d}{2})H_2O \rightarrow (\frac{n}{2} - \frac{a}{8} + \frac{b}{4} - 5\frac{c}{8} + \frac{d}{4})CO_2 + (\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - 3\frac{c}{8} - \frac{d}{4})CH_4 \tag{1}$$

Fig. 6은 돈분뇨 종류에 따른 바이오가스 발생 특성을 나

Table 8. Comparison of methane yield between stoichiometric and actual methane production of pig manure

Classification	Theoretical methane production (mL · CH ₄ /g · VS)	Actual methane production (mL · CH ₄ /g · VS)
Piglet manure	359	308
Growing pig manure	435	320
Gestating sow manure	509	387

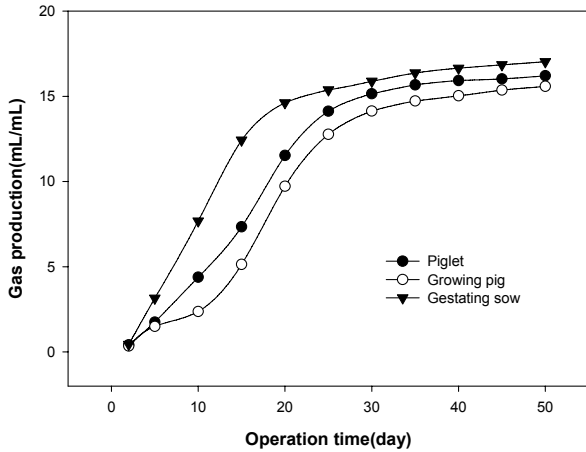


Fig. 6. Cumulative biogas production according to pig manure sources.

타내었다. 돈분뇨의 종류는 사육형태 및 사료의 특성이 다른 육성비육돈(Growing pig), 자돈(piglet), 분만돈(Gestating sow)의 분뇨를 각각 수거하고 고형물의 조성을 일정하게 유지하기 위해 2 mm 체(sieve)로 거른 후 실험에 사용하였다. 돈분 종류별 바이오가스 발생 특성을 분석하기 위하여 물리적 외부 특성(seed sludge, mixing velocity)을 상기 실험을 통해 결정된 TS 농도 5%, 교반강도는 120 rpm으로 고정하여 실험을 수행하였다. 돈분뇨 종류별 가스발생량은 육성비육돈과 자돈 분뇨의 경우 운전초기 누적 가스발생량의 증가는 비교적 느린 경향을 나타내었고, 운전기간 동안(50일) 발생된 총 누적 가스발생량은 자돈분의 경우 16 mL/mL이었고, 운전기간 25일 경에 peak 점(14 mL/mL)을 나타내었다. 육성비육돈분의 경우 운전기간 25일에 12.5 mL/mL의 peak 점을 나타내었고, 총 누적가스 발생량은 15.5 mL/mL를 나타내었다. 분만돈분의 경우는 총 누적가스 발생량이 17 mL/mL이었고, 바이오가스의 peak 발생량은 자돈 및 육성비육돈분에 비하여 빠른 20일 경(14 mL/mL)에 나타났다. 따라서 돈분 성장별 화학적 원소분석 결과(Table 7)와 같이 돼지의 사육 형태에 따른 투입되는 사료의 급여 특성에 따라 돈사에서 배출되는 폐수의 성상이 상이하였고, 단백질 함량 및 C/N 비가 높은 분만돈분의 메탄가스 발생 속도 및 누적 가스 발생량이 가장 높은 것으로 나타났다.

요 약

돈분 슬러리를 이용한 혐기성 소화과정에서 유기물 농도 및 식중슬러지의 식중비율, 소화조의 혼합강도 등의 최적 실험조건을 도출하고, 돼지의 성장에 따른 사료 급여 특성과 분뇨의 성상이 바이오가스 발생에 미치는 영향을 관찰하였다. 식중슬러지 비율 50%와 TS 농도 1% 수준에서 메탄함량은 45%이었고, 유기물 함량이 3~7 %로 증가할수록 메탄가스 함량도 증가되었다. 반응조의 혼합강도에 따른 총 누적가스 발생량은 식중슬러지의 식중비율에 따른 영향은 관찰되지 않았고, TS 농도 3%와 5%에서 혼합강도를 증가시켰을 때(80 → 160 rpm) 바이오가스 발생량도 증가되었다. 돈분폐수의 혐기소화 실험시 바이오가스를 회수하고자 하는 최적의 운전 조건은 투입되는 TS 농도 3~5% 정도의 유기물 농도와 50% 수준의 식중슬러지의 식중비율 그리고 반응조의 적절한 교반 강도(120 rpm) 따라 결정될 수 있다.

돈분뇨 종류에 따른 가스발생량은 분만돈 분뇨의 바이오 가스 발생량이 높았고, gas 발생의 peak(20일)도 짧게 나타나 분해율이 가장 좋은 것으로 나타났다. 돼지의 사육 및 소비 형태에 따라 돼지의 사육 환경이 변화되며, 투입되는 사료의 급여 특성도 달라져 바이오가스 발생 특성도 차이가 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

- Park, N.B., Park, S.M., Choi, W.Y. and Jun, H.B., 2009. Methane production and nitrogen removal from piggery wastewater in the TPAD coupled with BNR process, *J. of Korean Soc. Wat. Qual.* 25(1), 18-25.
- Ghosh, S., Conrad, J.R. and Klass, D.L., 1975. Anaerobic acidogenesis of waste water sludge, *J. of WPCF*, 47(1), 1126-1140.
- Raynal, J., Delgen, J.P. and Moletta, R., 1998. Two-phase anaerobic digestion of solid waste by a multiple liquefaction reactors process, *Bioresource Technology*, 65(1-2), 97-103.
- Oliva, E., Jacquot, J.C. and Prevot, C., 1990. Treatment for wastewater at the El Aguila brewery

- methanization in fluidized bed reactor, *Wat. Sci. Tech.*, 22, 486-490.
- Ince, O., 1998. Performance of a 2-phase anaerobic digestion system when treating dairy wastewater, *Wat. Res.*, 32, 2707-2713.
- Jeong, B.G., Lee, H.M., Youn, J.H., Chung, H.S. and Yang, B.S., 1996. Mixing effect on organic removal efficiency in treating low-strength wastewater using a modified anaerobic filter reactor, *J. of Kor. Enviro. Sci. Soc.*, 5(4), 513-524.
- APHA, 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, *American Public Health Association*, Washington, D.C.
- Won, C.H., Kwon, J.H. and Rim, J.M., 2009. Effect of ammonia nitrogen loading rate on the anaerobic digestion of slurry-typed swine wastewater, *J. of KORRA*, 17(1), 49-57.
- WPCF, 1977. Wastewater treatment plant design, WPCF Manual of Practice 8, *Water Pollution Control Federation*, Washington, D.C.
- McCarty, P.L., 1964. Anaerobic waste treatment fundamentals, Part 1 : Chemistry and Microbiology, *Public Works, Sept*, 107-112.
- Henze, M. and Harrenmoes, P., 1983. Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors literature reviews, *Wat. Sci. Tech.*, 15, 1-101.
- Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, K.T. and Al-Dahhan, M.H., 2005. Anaerobic digestion of animal waste : Effect of mode of mixing, *Wat. Res.*, 39, 3579-3606.
- Vesilind, P.A. and Richard, A.H., 1981. Effect of feed rate on air classifier performance, *Resources and Conservation*, 6(3-4), 211-221.
- NIAS, 2007. Korean feeding standard for swine, *National Institute of Animal Science, RDA*, Korea.
- Cho, J.K., Lee, J.S., Park, S.C. and Son, J.E., 1993. Evaluation of biochemical methane potential of typical korean food waste, *J. of Kor. Solid. Wastes. Engin. Soc.*, 10(2), 211-217.
- Park, S.K., Choi, J.G. and Chung, Y.J., 2000. A practical study on the solid-liquid separation of the wastewater from slurry feedlot, *J. of KOWREC*, 8(2), 60-70.
- 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.