

가축분뇨와 간척지 사료작물의 메탄발생량

*허 남효¹⁾, 이 승헌²⁾, 김 병기³⁾

Biochemical Methane Potential of Animal Manure and Cultivated Forage Crops at the Reclaimed Tideland

*Namhyo Heo, Seungheon Lee, Byeongki Kim

Key words : Anaerobic digestion(혐기성소화), Biodegradability(생분해도), BMP(메탄발생량), Biogas(바이오가스), 메탄(Methane), Animal manure(가축분뇨), Forage crops(사료작물)

Abstract : Anaerobic biodegradability(AB), which can be determined with the ultimate methane yield by the decomposition of organic materials, is one of the important parameters for the design and the operation of anaerobic digestion plant. In this study, Biochemical Methane Potential(BMP) test has been carried out to evaluate the methane yield of animal manures, such as pig and cattle slurries, and different forage crops cultivated at the reclaimed tideland, such as maize, sorghum, barley, rye, Italian ryegrass(IRG), rape, rush and sludge produced from slaughterhouse wastewater treatment plant(SWTP). In the ultimate methane yield of animal manure, that of pig slurry(no used a EM) was 407 mlCH₄/gVS_{fed} higher than 242 mlCH₄/gVS_{fed} of cattle slurry. The ultimate methane yield of spike-crop rye was 442.36 mlCH₄/gVS_{fed} the highest among different forage crops, the other showed the value above a methane yield of 300mlCH₄/gVS_{fed}. The forage crop could be used as a good substrate to improve the methane production in anaerobic co-digestion together with animal manure.

subscrip

AB : anaerobic biodegradability
BMP : biochemical methane potential
IRG : Italian ryegrass
TMY : theoretical methane yield
UMY : ultimate methane yield
SWTP : slaughterhouse wastewater treatment plant

1. 서론

2000년대 접어들어 고유가 상황과 온실가스에 의한 지구온난화가 가시화 되면서 재생 가능한 에너지 개발과 자원의 효과적인 이용을 통한 자원순환사회 구축, 나아가 환경적으로 건전한 사회구현이라는 목표를 실현시키기 위하여 최근에 선진국을 중심으로 환경과 에너지 문제를 농업에서 해결하고자 하는 노력이 진행 중이다. 그 노력의 일환으로 농축산바이오매스로부터 바이오가스 회수를 위한 생산시설 확대 및 바이오가스의 다각적인 활용 계획을 포함하고 있다.

농축산바이오매스는 농업과 축산업 과정에서 발생하는 부산물과 부산물의 유기체를 의미하며,

곡물, 식물, 농작물, 가축분뇨, 농공산업폐기물, 식품폐기물과 각종 농산부산물을 포함한다. 혐기성소화 기술은 EU와 일본 등의 온실가스 1차 감축 의무 대상국에서 상당히 있는 Biotechnology로 인정받고 있으며, 농축산바이오매스를 혐기성소화시 지구온난화가스 발생을 최소화하는 환경적 기능, 메탄가스와 같은 에너지 생산기능, 소화부산물의 농지환원을 통한 자원순환 기능을 동시에 달성할 수 있는 장점을 가진다.

본 연구에서는 농축산바이오매스의 일부인 가축분뇨와 간척지에서 재배한 다양한 조사료 작물을 대상으로 BMP test를 통해 메탄가스 발생과 생분해도를 조사하여 바이오가스화 가능성을 평가하고자 하였다.

-
- 1) 한국농촌공사 농어촌연구원 농촌자연환경연구소
E-mail : bionhhheo@ekr.or.kr
Tel : (031)400-1825 Fax : (031)400-1889
 - 2) 한국농촌공사 농어촌연구원 농촌자연환경연구소
E-mail : shyi@ekr.or.kr
Tel : (031)400-1800 Fax : (031)400-1889
 - 3) 한국농촌공사 농어촌연구원 농촌자연환경연구소
E-mail : kimbk@ekr.or.kr
Tel : (031)400-1710 Fax : (031)400-1889

2. 재료 및 방법

2.1 실험재료

2.1.1 가축분뇨

본 연구에 사용된 가축분뇨는 발생조건이 각각 다른 양돈농가와 한우농가에서 수거하였다. 돈분(pig slurry)은 일반농장과 미생물 활성제(EM, effective microorganism)를 사용하는 양돈농가에서 수집하였고, 우분(cattle slurry)은 배합사료와 함께 조사료로 초지류와 볏짚은 활용하는 각 한우농가에서 수거하였다.

한우농가의 경우 소의 생리적 특성 때문에 배합사료와 조사료를 60:40 비율로 혼합하여 먹이를 급여하는 것으로 조사되었다.

2.1.2 사료작물

일반적으로 조사료 작물은 동계와 하계작물로 구분되며, 본 연구대상 시료는 화용 간척지 조사료 시험포로부터 수집하였다. 본 연구에서는 청보리, 호밀, 유채, IRG의 동계작물과 사료용 옥수수, 수수, 갈대의 하계작물을 시료로 활용하였다. 청보리와 호밀은 총체(whole-crops)와 이삭(spike)을 분리하여 각 2개의 시료로 구분하여 연구를 수행하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 BMP test

수거된 시료는 dry oven의 50°C 조건에서 건조하였고, 분쇄기를 이용하여 입경 2mm 이하로 파쇄 후 기질로 활용하였으며, 식중 소화균은 도시하수처리장 소화조로부터 채취하였다. 시료의 메탄가스 발생량과 생분해도를 평가하기 위하여 Owen 등⁽¹⁾과 Shelton과 Tiedje⁽²⁾에 의해 제안된 BMP test 방법을 이용하였다.

250ml 용량의 Erlenmyer flask에 식중균 200ml와 각 연구대상 각 시료량 2gVS/L 주입한 식중 혼합액(bioassay)과 식중균 분해에 의해 발생하는 메탄가스 발생량을 보정하기 위한 control 배양액(control bioassay) 1개를 준비하였으며, 식중 혼합액은 일 3회 수(hand)작업에 의해 간헐적으로 혼합하면서 35°C의 일정온도 유지가 가능한 incubator에서 약 80일 동안 배양하였다.

각 식중 혼합액으로부터 발생하는 바이오가스량을 측정하기 위하여 10ml 유리주사기를 이용하였고, 바이오가스의 메탄함량은 TCD가 장착된 GC에 의해 정성분석 하였다. 발생 바이오가스는 온도에 따른 부피팽창을 고려하여 표준상태(0°C, 1atm)의 dry gas 부피로 환산하였다.

2.2.2 생분해도 평가

혐기성 생분해도는 처리대상 물질을 구성하는 총 고형물(total solid, TS) 중 소화균에 의해 분해되는 유기물량의 정도를 의미하며, 시료의 총 휘발성유기물(total volatile solid, TVS) 중 생분해성 유기물(biodegradable volatile solid, BVS)의 비를 측정함으로써 알 수 있다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 혐기성소화에서 시료의 TVS

(BVS+NBVS)중 BVS 부분이 바이오가스로 분해되기 때문에 실제 메탄발생량을 측정함으로써 BVS 비율을 평가할 수 있으며, BVS 분해에 따른 메탄생성 속도는 소화조 설계시 반응조 형태나 규모를 결정하는 중요한 인자로 고려되고 있다⁽³⁾.

생분해도(anaerobic biodegradability, AB)는 식(1)에 나타낸 바와 같이, 이론적 메탄 발생량(theoretical methane yield, TMY)에 대한 BMP test에서 얻어진 실제 메탄발생량(ultimate methane yield, UMY)의 백분율로 나타내며^{(4),(5)}, 이때 평가된 생분해도는 시료의 BVS/TVS 비율로 나타낼 수 있다. 처리대상 시료의 유기성분이 완전하게 CH₄와 CO₂로 분해된다고 가정 할 경우, 이론적 메탄수율은 시료의 TVS를 구성하는 원소조성에 근거하여 식(2)의 화학양론식으로부터 계산할 수 있다⁽⁶⁾.

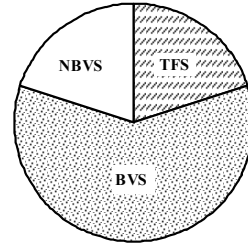
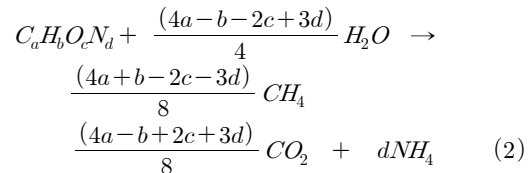


Fig. 1 Solid fraction of organic material (TS = TVS + TFS, TVS = BVS + NBVS)

$$\text{Biodegradability}(\%) = \left(\frac{\text{UMY}}{\text{TMY}} \right) \times 100 \quad (1)$$



3. 연구결과 및 고찰

3.1 원소조성과 C/N비

가축분뇨의 C/N비는 우분의 경우 돈분에 비하여 약 2배 이상의 높은 수치를 나타냈으며, 돈분의 높은 탄소(C)함량에도 불구하고 낮은 C/N비를 나타내는 것은 우분에 비하여 상대적으로 질소(N)함량이 월등히 높기 때문이다. 곡류 사료작물인 호밀과 청보리의 C/N비는 이삭시료(Rye 1, Barley 1)에 비하여 총체시료(Rye 2, Barley 2)에서 높은 값을 나타내었고, 특히 호밀의 총체시료는 낮은 질소함량으로 인해 이삭시료에 비하여 2배 높게 조사되었다. 목초지류 조사료의 C/N비는 10~20 범위를 나타내었고, IRG 시료는 다른 시료에 비하여 낮은 질소함량으로 인해 가장 높은 19.4인 반면, 수수의 경우 높은 질소함량으로 인해 상대적으로 가장 낮은 10.89 값을 나타내었다. 도축폐수처리장의 슬러지는 연구시료 중 가장 높은 질소함량을 유지하면서 5.76의 낮은 C/N비 값을 나타내었다. 이는 도축량의 약 80% 정도

가 돈육이기 때문이며, 도축과정에서 발생하는 분뇨, 피, 세척폐수 등의 부산물에 단백질 성분이 다량 함유하고 있기 때문으로 판단된다.

Table 1 Elemental composition and C/N ratio

Sample	Element (wt% VS)				C/N	
	C	H	O	N		
Manure	Pig 1	62.80	10.34	20.15	5.54	11.34
	Pig 2	56.95	8.89	24.72	6.95	8.20
	Cat. 1	50.58	7.67	39.16	2.26	22.35
	Cat. 2	50.47	7.56	40.00	1.72	29.43
Forage crops	Rye 1	48.61	7.73	40.88	2.58	18.84
	Rye 2	49.52	7.60	41.36	1.36	36.41
	Barley 1	47.02	7.77	42.71	2.37	19.87
	Barley 2	47.18	7.58	43.05	2.01	23.46
	Maize	49.26	7.55	39.07	3.94	12.50
	Sorghum	49.52	7.64	38.05	4.55	10.89
	IRG	48.38	7.50	41.38	2.50	19.37
	Rape	48.75	7.64	38.87	3.96	12.31
	Rush	49.57	7.44	39.41	3.27	15.16
Organic waste	SSWTP	51.23	8.66	30.19	8.89	5.76
※ Remarks · Pig 1: No used a EM, · Pig 2: Used a EM · Cat. 1: Supply a rice straw as forage crops · Cat. 2: Supply the grass as forage crops · Rye 1: Spike-crops rye · Rye 2: Whole-crops rye · Barley 1: Spike-crops barley · Barley 2: Whole-crops barley · SSWTP: Sludge produced form SWTP						

3.2 바이오가스 발생량

3.2.1 가축분뇨와 도축폐수슬러지

돈분과 우분 그리고 도축폐수슬러지의 메탄발생량을 Fig. 2에 나타내었다. 메탄가스 발생량은 배양 15일까지 꾸준한 증가를 보이다 이후 완만한 증가 추세를 보여주고 있다. 가축분뇨의 메탄가스 발생량은 우분에 비하여 돈분에서 월등하게 높음을 알 수 있다. Pig 1의 가스 발생량은 Pig 2에 비하여 약 2배 높은 406mLCH₄/gVS였으며, Pig 2의 낮은 가스 발생량은 돈분에 미생물 활성제(EM) 주입으로 인해 생분해성 유기성분이 다량 분해되었기 때문으로 판단된다. 한편, 우분의 경우 조사료 종류에 따라 메탄가스 발생량은 상당한 차이를 나타내었다. 목초지류를 조사료로 이용한 우분(Cat. 2)의 가스 발생량은 볏짚을 조사료로 활용한 우분(Cat. 1)에 비하여 약 1.5배 높은 240mLCH₄/gVS 나타내었는데 이는 볏짚에 비하여 초지류에 cellulose 함량과 휘발성 고형물량이 높기 때문으로 추정된다.

한편, 활성슬러지공법으로 운영 중인 도축폐수처리장의 잉여슬러지 메탄가스 발생량은 Heo 등⁽⁷⁾의 연구에서 제시한 도시하수처리장의 잉여슬러지의 메탄가스 발생량(165mLCH₄/gVS)보다 약 1.5배 높은 254mLCH₄/gVS를 나타내었다.

3.2.2 호밀과 청보리

국내의 대표적인 곡물 사료작물인 호밀과 청보리의 이삭 및 총체 시료의 메탄가스 발생량을 Fig. 3에서 보여주고 있다. 메탄가스 발생은 배

양 초기 7일동안 급속하게 증가하였고 이후 배양 30일까지 꾸준하게 증가한 이후 생산량이 현저하게 감소하는 추이를 보였다. 메탄가스 발생량은 이삭과 총체시료에서 호밀시료에서 높게 나타내었다. 호밀 이삭시료의 메탄가스 발생량은 청보리 이삭시료보다 높으며, 호밀 총체시료에 비하여 1.2배 높은 442mLCH₄/gVS를 보였다. 청보리의 이삭과 총체시료의 가스 발생량 차이는 근소한 반면, 호밀의 경우 상당한 차이를 나타내는데 이는 호밀대가 lignocellulose complex 물질로 구성되어 있기 때문으로 사료된다.

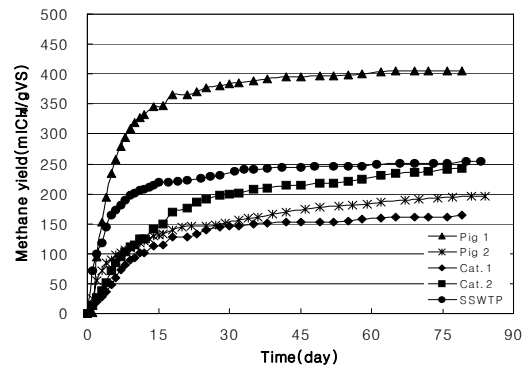


Fig. 2 Methane yields of animal manure and sludge of SWTP

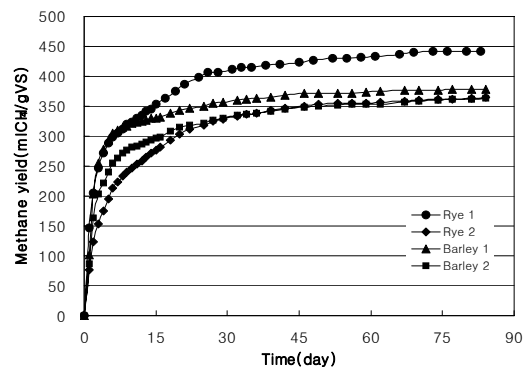


Fig. 3 Methane yields of rye and barley

3.2.3 사료작물

간척지에서 수거한 사료작물의 메탄가스 발생량을 Fig. 4에 제시하였다. 메탄가스 발생은 배양 초기 5일동안 급속하게 증가하였고 이후 배양 20일까지 꾸준하게 증가한 이후 생산량이 현저하게 감소하는 추이를 보였다. 사료작물 중 옥수수의 가스발생량은 379mLCH₄/gVS로 가장 높았으며, 수수와 IRG 또한 350mLCH₄/gVS 이상의 높은 가스 발생을 나타내었다. 유채의 가스 발생량은 사료작물보다 다소 낮은 314mLCH₄/gVS였고, 갈대의 경우 하수처리장 슬러지보다 월등히 높은 306mLCH₄/gVS의 가스 발생량을 나타내어 에너지 작물로서 효율 가치가 상당히 높으며, 향후 활용 방안에 대한 적극적인 검토가 필요 할 것으로 판단된다.

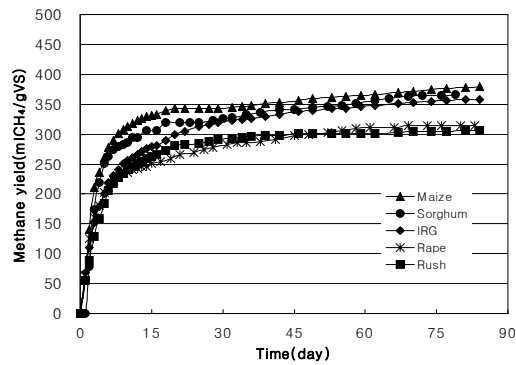


Fig. 4 Methane yields of forage crops

3.3 생분해도 평가

연구대상 시료의 원소조성에 의해 산정된 이론 메탄발생량(TMY)과 실제 메탄발생량(UMY)에 기초하여 산정된 생분해도(AB)를 Table 2에 정리하였다. 생분해도 평가 결과, 가축분뇨와 도축폐수슬러지의 생분해도는 사료작물에 비하여 상당히 낮음을 확인 할 수 있었다.

Table 2 Biodegradability of the samples

Sample	Methane yield		AB (%)	
	TMY (mLCH ₄ /gVS)	UMY (mLCH ₄ /gVS)		
Manure	Pig 1	771.91	406.95	52.59
	Pig 2	652.17	196.67	30.16
	Cat. 1	536.27	163.90	30.56
	Cat. 2	532.35	242.00	45.46
Forage crops	Rye 1	511.54	442.36	86.48
	Rye 2	521.97	364.38	69.81
	Barley 1	492.83	378.96	76.89
	Barley 2	489.86	362.70	74.04
	Maize	510.80	379.03	74.20
	Sorghum	515.52	366.31	71.06
	IRG	501.81	358.42	71.43
	Rape	509.12	314.23	61.72
Rush	513.34	306.59	59.72	
Organic waste	SSWTP	561.75	253.63	45.15

Pig 1의 경우 높은 메탄가스 생산량에도 불구하고 53%의 다소 낮은 생분해도를 나타내었고, Cat. 2의 생분해도는 45% 였다. 호밀이삭(Rye 1)의 생분해도는 사료작물 중 가장 높은 86.48% 였고, 보리이삭(Barley 1) 또한 약 77%의 높은 생분해성 유기물(BVS)함량을 나타내었다. 주요 사료작물인 사료용 옥수수, 수수, IRG는 71~74% 범위의 생분해도를 나타내어 다량의 생분해성 유기물을 함유하고 있음을 알 수 있으며, 유체와 갈대의 경우 사료작물에 비하여 다소 낮은 60% 범위로 조사되었다. 도축폐수슬러지는 도시하수처리장의 잉여슬러지 생분해도(30%)⁽⁹⁾보다 약 1.5배 높은 45%를 나타내어 효율가치가 높음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구의 가축분뇨와 간척지 사료작물의 메탄가스 발생량을 평가하기 위하여 BMP test를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 가축분뇨 중 돈분(Pig 1)의 경우 우분에 비하여 낮은 C/N비에도 불구하고 407mLCH₄/gVS의 높은 메탄가스 발생과 더불어 53%의 생분해도를 나타내어 가축분뇨 혐기성소화에 있어 우분보다 돈분이 유리할 것으로 판단된다.

2. 도축폐수슬러지의 C/N비는 우분에 비하여 약 4배 낮음에도 불구하고 우분보다 높은 메탄가스 발생 254mLCH₄/gVS와 45%의 생분해도를 나타내어 혐기성소화 기질로써 효율가치가 높음을 알 수 있었다.

3. 간척지에서 재배된 사료작물(호밀, 청보리, 사료용 옥수수, 수수, IRG)은 360~442mLCH₄/gVS의 높은 메탄가스 발생량과 70% 이상의 생분해도 특성을 나타내어 혐기성소화에 있어 양질의 기질로 사용 할 수 있으며, 특히 돈분과 함께 사료작물을 혼합기질로 사용시 C/N비 증가와 더불어 메탄가스 생산량 증가에 상당히 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Owen, W. P., Stuckey, D. C., Healy, J. B., Young, L. Y. and McCarty, P. L., 1979. "Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity", Wat. Res., Vol. 13, pp. 485-492.
- [2] Shelton, D. R. and Tiedje, J. M., 1984. "General method for determining anaerobic biodegradation potential", Appl. Environ. Microbiol., Vol. 47, pp. 850-857.
- [3] Heo, N. H., 2004, High-rate anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge for the recovery of biogas, Ph. D. thesis, Chungnam National University.
- [4] Cho, J. K., Park, S. C. and Chang, H. N., 1995. "Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food waste", Bioresource Technology, Vol. 52, pp. 245-253.
- [5] Penaud, V., Delgenes, J. P. and Moletta, R., 1999. "Thermo-chemical pretreatment of a microbial biomass: influence of sodium hydroxide addition on solubilization and anaerobic biodegradability", Enzyme and Microbial Technology, Vol. 25, pp. 258-263.
- [6] Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S., 1993. Integrated Solid Waste Management -Engineering Principles and Management Issues, McGraw-Hill, New York, 679-683.
- [7] Heo, N. H., Park, S. C., Lee, J. S. and Kang, H., 2003. "Solubilization of waste activated sludge by alkaline pretreatment and biochemical methane potential(BMP) tests for anaerobic co-digestion of municipal organic waste", Wat. Sci. and Tech., Vol. 48, No. 8, pp. 211-219.