Korean Journal of Environmental Agriculture

Korean J Environ Agric. 2017;36(1):29-35. Korean
Published online 2017 March 21. https://doi.org/10.5338/KJEA.2017.36.1.03

Online ISSN: 2233-4173
Print ISSN: 1225-3537

Research Article

Open Access

거대억새(*Miscanthus sacchariflorus*)의 혐기소화를 위한 메탄생산 퍼텐셜 분석

유정숙[1], 김창현[2], 윤영만[1*]

[1]한경대학교 바이오가스연구센터, [2]한경대학교 농업생명과학대학 동물생명환경과학과

Biochemical Methane Potential Analysis for Anaerobic Digestion of Giant Miscanthus (*Miscanthus sacchariflorus*)

Jung-Suk Yoo[1], Chang-Hyun Kim[2] and Young-Man Yoon[1*] ([1]Biogas Research Center, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea, [2]Department of Animal Life & Environmental Science, College of Agriculture and Life Science, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea)

Received: 5 February 2017 / Revised: 3 March 2017 / Accepted: 14 March 2017

ORCID

Jung-Suk Yoo
http://orcid.org/0000-0001-6806-3591

Young-Man Yoon
http://orcid.org/0000-0001-9294-8277

Abstract

BACKGROUND: This study was carried out to assess a biochemical methane potential of giant miscanthus (*Miscanthus sacchariflorus*) which was a promising candidate energy crop due to a high biomass productivity, in order to utilize as a feedstock for the biogas production.

METHODS AND RESULTS: Giant miscanthus was sampled the elapsing drying time of 6 months after harvesting. TS (Total Solid) and VS (Volatile Solid) contents were 94.7 and 90.8%. And CP (Crude Protein), EE (Ether Extracts), and CF (Crude Fiber) contents of giant miscanthus were 1.4, 0.46, and 46.12%, respectively. In the organic composition of giant miscanthus, the NDF (Neutral Detergent Fiber) representing cellulose, lignin, and hemicellulose contents showed 86.88%, and the ADF (Acid Detergent Fiber) representing cellulose and lignin contents was 62.91%. Elemental composition of giant miscanthus showed 47.75%, 6.44%, 41.00%, and 0.28% for C, H, O, and N, respectively, and then, theoretical methane potential was obtained to 0.502 Nm^3 kg^{-1}-VS_{added}. Biochemical methane potential was assessed as the range of 0.154～0.241 Nm^3 kg^{-1}-VS_{added} resulting the lower organic biodegradability of 30.7～48.0%.

CONCLUSION: Therefore the development of pre-treatment technology of the giant miscanthus was needed for the improvement of anaerobic digestability.

Key words: Anaerobic digestion, Biochemical methane potential, Biogas, Energy crop, Giant miscanthus

*Corresponding author: Young-Man Yoon
Phone: +82-31-670-5665; Fax: +82-31-670-5666;
E-mail: yyman@hknu.ac.kr

서 론

기후변화와 화석연료 고갈에 대한 대응으로 바이오에너지에 대한 관심이 증가하고 있다. 바이오에너지는 폐기물계(가축분뇨, 음식물쓰레기 등), 미이용계(짚, 왕겨 등), 자원식물계 (대두, 유채 등) 바이오매스로부터 직접연소, 열화학적, 생물학적 과정을 통해 변환된다. 최근에는 바이오에너지의 원료물질인 바이오매스 자원의 확보를 위해 경제성과 생산성이 우수한 바이오에너지 작물로 거대억새에 대한 연구가 진행되고 있다.

억새는 화본과(*Poaceae*)에 속하는 C4광합성 경로를 가지는 영년생 식물로서 억새속(*Miscanthus*)에는 참억새(*Miscanthus sinensis*), 물억새(*Miscanthus sacchariflorus*) 등 17개 종

(Species)이 있는 것으로 알려져 있다(Shamima *et al.*, 2009). 주로 바이오에너지 작물로 이용되는 억새종은 한국 등 동아시아가 원산지인 참억새와 물억새 그리고 3배체 억새 (*Miscanthus×Giganteous*)등으로 보고(Lewandowski *et al.*, 2000)되고 있다. 특히 국내에 자생하는 물억새 (*Miscanthus sacchariflorus*)는 건물수량이 약 ha당 20~40톤 정도로 매우 높으며, 척박한 토양에서도 높은 생산성을 유지한다(Speller, 1993; Lewandowski *et al.*, 2000; Moon *et al.*, 2010). 이러한 장점으로 농촌진흥청에서는 바이오에너지 작물로 자연에 서식하는 물억새 탐색을 통해 6.4 kg m^{-2}의 우수한 건물수량을 나타내는 거대억새 1호(Moon *et al.*, 2014)를 개발하고 유전자원을 확보한 바 있다. 이와 함께 거대억새 대량증식법 (Moon *et al.*, 2013)을 개발하여 보급하고 있다. 거대억새는 우리나라뿐만이 아니라 미국과 유럽에서도 바이오에너지 작물로 주목받고 있다. Bonin *et al.* (2014)은 미국에서 거대억새의 서식분포를 조사하고, 거대억새 바이오매스 재배 방안을 연구한 바 있으며, Brosse *et al.* (2012)와 Cortés and Bridgwater (2015)도 유럽에서 자생하는 거대억새의 종류와 바이오매스 구성성분 결과를 종합하고 바이오에탄올 생산, 열분해(Pyrolysis), 가스화(Gasification) 및 액화(Liquefaction)를 통한 다양한 에너지화 기술의 적용성을 연구하였다.

거대억새는 리그닌(Lignin)을 함유하는 섬유질계 바이오매스로서 화학적, 생물적 가수분해에 분해 저항성을 지닌다. 따라서 거대억새는 바이오에탄올 생산이나 유용물질을 추출하는 생물정제(Biorefinery) 기술적용을 위해서 물리, 화학, 생물학적 전처리 기술이 필수적이다(Pu *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2009). 지금까지 거대억새의 에너지화 연구는 열분해 기술을 적용한 바이오촤(Bio-char)(Gaunt and Lehmann, 2008), 바이오오일(Bio-oil)(Siedlecki *et al.*, 2011), 합성가스(Syngas)(Raffelt *et al.*, 2006) 생산 기술에 관한 연구가 주를 이루고 있다. 그러나 이러한 열분해 기술들은 바이오에너지의 생산과정에서 과도한 에너지를 필요로 하고, 고가의 바이오에너지 생산 설비를 요구하고 있어 아직까지 상용화에는 어려움이 있는 실정이다. 따라서 근래 국외에서는 거대억새의 혐기소화를 통한 바이오가스화 기술의 타당성이 연구된 바 있다(Alaru *et al.*, 2011; Kazimierowicz and Dzienis, 2015). 그러나 국내의 경우 거대억새 1호(Moon *et al.*, 2014)와 같은 우수한 에너지 작물의 개발에도 불구하고 다양한 에너지화 기술의 적용이 이루어지지 못하고 있다. 특히 국내 농업부문에서 바이오가스 생산을 위한 투입기질이 가축분뇨에 국한되어 있는 상황에서 바이오가스 생산 증대를 위한 바이오에너지 작물의 이용 확대가 요구되고 있으나 국내 생산 거대억새에 대한 혐기소화 기술의 적용성은 아직까지 평가된 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 거대억새의 바이오가스화 기술의 적용성을 평가하기 위하여 기질과 접종액의 비율(Substrate/Inoculum)을 달리하여 거대억새의 혐기소화 특성과 메탄생산퍼텐셜을 분석하였다.

재료 및 방법

시험재료

거대억새(*Miscanthus sacchariflorus*)는 전라북도 익산시 용안면 금강하구에 위치한 농촌진흥청 거대억새 재배 지구에서 재배되었으며, 2015년 2월에 수확한 거대억새는 그늘에서 풍건 후 약 6개월간 저장창고에 저장하였다. 본 연구에서는 저장 중인 거대억새를 채취하여, 60℃ 열풍 건조 후 Hammer mill을 이용하여 1 mm 크기로 분쇄 후 시험에 공시하였다.

이론적 메탄생산퍼텐셜 분석(Theoretical Methane Potential; B_{th})

이론적 메탄생산퍼텐셜은 공시시료의 원소분석 결과를 바탕으로 Boyle (1976)의 유기물 분해 반응식 (Eq. 1)을 이용하여 화학양론적으로 산출하였다. 이론적 메탄생산퍼텐셜은 표준상태(0℃, 1atm)에서 투입 VS 함량을 기준으로 단위 유기물당 전환되는 메탄가스의 양($Nm^3\ kg^{-1}VS_{added}$)으로 나타내었다.

$$C_aH_bO_cN_dS_e + (a-\frac{b}{4}-\frac{c}{2}+\frac{3d}{4}+\frac{e}{2})H_2O \rightarrow \quad \text{(Eq. 1)}$$
$$(\frac{a}{2}+\frac{b}{8}-\frac{c}{4}-\frac{3d}{8}-\frac{e}{4})CH_4$$
$$+(\frac{a}{2}-\frac{b}{8}+\frac{c}{4}+\frac{3d}{8}+\frac{e}{4})CO_2 + dNH_3 + eH_2S$$

메탄생산퍼텐셜 시험(Biochemical Methane Potential assay; BMP assay)

메탄생산퍼텐셜 시험에 사용한 접종액(Inoculum; I)은 한경대학교 바이오가스연구센터에서 운영하는 5 ton day^{-1} 규모의 수평형 혐기소화조(안성 일죽 소재)에서 채취하였다. 채취한 혐기소화액은 38℃ 항온 배양기에서 배양하여 소화액 중의 이분해성의 유기물과 잔여가스를 충분히 제거하여 접종액으로 이용하였다.

Table 1. Chemical characteristics of inoculum

Parameters	pH	TS[a)]	VS[b)]	COD_{Cr}[c)]	T-N[d)]	NH_4^+-N[e)]	VFAs[f)]	Alkalinity
	-	---------------------------- mg L^{-1} ----------------------------						mg-$CaCO_3$ L^{-1}
Inoculum	8.58	15,360	7,800	12,300	3,592	1,593	223	13,696

a) Total Solid, b) Volatile Solid, c) Chemical Oxygen Demand, d) Total Nitrogen, e) Ammonium Nitrogen, f) Volatile Fatty Acids.

투입기질(Substrate; S)은 기질의 휘발성 고형물(Volatile Solid; VS) 함량과 접종액(Inoculum; I)의 휘발성 고형물 함량의 비율(S/I ratio)을 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0이 되도록 조절하였으며, S/I 비율을 달리하는 반응기 각각의 휘발성고형물 함량은 2%로 맞추었다. 메탄생산퍼텐셜의 측정을 위한 회분식 혐기반응기는 160 mL serum bottle을 이용하여 3반복으로 준비하였으며, serum bottle에 기질과 접종액의 S/I 비율별 혼합액 80 mL를 분주하였다. Serum bottle은 완전 밀폐시켜 중온(38℃) 조건에서 100일간 배양하였다. 또한 바탕시험을 위하여 접종액만을 투입한 3반복의 회분식 혐기반응기를 시료와 동일한 조건에서 운영하였다. 시험에 사용한 접종액의 성상은 Table 1과 같다. 회분식 혐기반응기의 바이오가스 발생량 측정은 2% 황산에 resazurin 0.1%를 함유하는 수주차식 가스량 측정기를 사용하였으며(Williams *et al.*, 1996; Beuvink *et al.*, 1992), 발생 바이오가스는 Eq. 2과 같이 온도와 수분을 보정하여 표준상태(0℃, 1기압)에서의 건조가스 부피로 환산하여 누적 메탄생산곡선을 구하였다. Eq. 2에서 $V_{dry\ gas}$는 표준상태(0℃, 1기압)에서의 건조 가스의 부피, T는 반응기의 운전온도, $V_{wet\ gas\ at\ T℃}$는 반응기 운전온도(38℃)에서의 습윤 가스의 부피, P는 가스의 부피측정 당시의 대기압, P_T는 T℃에서의 포화수증기압(mmHg)이며, 본 연구에서는 P를 760 mmHg로 간주하고 P_T는 38℃서의 포화수증기압으로 계산하였다.

$$V_{dry\ gas} = V_{wet\ gas\ at\ T\ ^{o}C} \times \frac{273}{(273+T)} \times \frac{(P-P_T)}{760} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

메탄생산퍼텐셜 산출을 위한 누적 메탄생산곡선은 Modified ompertz model (Eq. 3)을 이용하여 SigmaPlot (SigmaPlot Version 10.0, Systat Software Inc., San Jose, Califonia, USA)으로 해석하였으며(Lay *et al.*, 1998), Modified Gompertz model에서 M은 누적 메탄생산량(mL), t는 혐기배양기간(days), P는 최종메탄생산량 (mL), e는 exp (1), R_m은 최대메탄생산속도(mL day^{-1}), λ는 지체성장시간(Lag growth phase time; days)을 나타낸다.

$$M = P \times \exp[-\exp\frac{R_m}{P}(\lambda - t)e + 1] \qquad \text{(Eq. 3)}$$

시험분석(Analysis)

바이오가스의 성분 분석은 TCD (Thermal Conductivity Detector)가 장착된 Gas Chromatography (Clarus 680, PerkinElmer, Waktham, Massachusetts, USA)를 이용하였다. 컬럼은 HayesepQ packed column (3 mm×3 m, 80~100 mesh size)을 이용하였으며, 고순도 아르곤(Ar) 가스를 이동상으로 사용하여 flow 30 mL min^{-1}의 운전 상태에서 주입부(Injector) 온도 150℃, 컬럼부 (Column oven) 90℃, 검출부(Detector) 150℃에서 분석하였다(Sorensen *et al.*, 1991). 거대억새의 조단백(Crude Protein; CP), 조지방(Ether Extracts; EE), 조섬유(Crude Fiber; CF) 함량은 AOAC (1995)에 준하여 3반복으로 분석하였고, 중성세제 불용성 섬유 NDF(Neutral Detergent Fiber)와 산성세제 불용성 섬유 ADF(Acid Detergent Fiber)의 함량은 Van Soest *et al.* (1991)에 따라 분석하였다. 총고형물(Total Solid; TS), 휘발성 고형물(Volatile Solid; VS), 화학적산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD), 암모니아태 질소(NH_4^+-N), 총질소(Total Nitrogen; TN), 알칼리도(Alkalinity), 휘발성지방산(Volatile Fatty Acid; VFA) 등은 표준분석법(APHA, 1998)에 따라 3반복으로 수행하였다. 전원소 항목(C, H, O, N, S)은 원소분석기(EA1108, Thermo Finnigan LLC, San Jose, Califonia, USA)를 이용하여 분석하였으며, 고위발열량(Higher Heating Value; HHV)은 105℃에서 24시간 건조한 후 Bomb 열량계(model 6400, Parr Instrument Company, Moline, Illinois, USA)를 이용하여 산소압력 30 atm, 질소압력 5 atm, 재킷(Jacket) 온도 30℃ 조건에서 측정하였다.

결과 및 고찰

거대억새(*Miscanthus sacchariflorus*) 성분분석

거대억새의 화학적 조성과 조성분 함량은 Table 2과 Table 3에 나타내었다. 거대억새의 총고형물(TS) 함량은 94.7%, 휘발성고형물(VS) 함량은 90.8%로 나타났으며, 총질소(TN)와 암모니아성 질소(NH_4^+-N) 함량은 각각 2,119, 115 mg kg^{-1}로 나타났다. 또한 거대억새 중 조단백(CP), 조지방(EE), 그리고 조섬유(CF) 함량은 1.4%, 0.46%, 46.12%로 나타났다. 셀룰로오스, 리그닌, 헤미셀룰로오스의 함량을 나타내는 중성세제 불용성 섬유(NDF)는 86.88%였으며, 셀룰로오스와 리그닌의 함량을 나타내는 산성세제 불용성 섬유(ADF)는 62.91%였다. Oh *et al.* (2013)은 거대억새의 사료가치 연구에서 수확시기별로 거대억새의 조성분을 분석한 바 있으며, 조단백 함량은 4.15～7.40%, 조지방 함량은 1.00～1.30%, 조섬유 함량은 35.95～41.10%를 보인다고 보고한 바 있다. 또한 중성세제 불용성 섬유 함량은 73.07～76.60%, 산

Table 2. Chemical composition of *Miscanthus sacchariflorus*

Parameters	pH	TS[a)]	VS[b)]	T-N[c)]	NH_4^+-N[d)]
	-	---------------- mg kg^{-1} (w/w, in dry weight) ----------------			
Miscanthus sacchariflorus	5.54	946,797	908,400	2,119	115

a) Total Solid, b) Volatile Solid, c) Total Nitrogen, d) Ammonium Nitrogen.

Table 3. Organic composition of *Miscanthus sacchariflorus*

Parameters	Crude protein	Ether extracts	Crude fiber	Ash	NDF[a)]	ADF[b)]
	-------------------- mg kg^{-1} (w/w, in dry weight) -----------------------					
Miscanthus sacchariflorus	14,000	4,600	461,200	38,400	868,800	629,100

a) Neutral Detergent Fiber, b) Acid Detergent Fiber.

Table 4. Elemental composition and theoretical methane potential of *Miscanthus sacchariflorus*

Parameters	Elemental composition					Ash	B_{th}[a)]	HHV[b)]	LHV[c)]
	C	H	O	N	S				
	----------------- % (w/w) ------------------						Nm^3-CH_4 kg^{-1}-VS_{added}	kcal kg^{-1}	kcal kg^{-1}
Miscanthus sacchariflorus	47.8	6.5	41.0	0.3	0.02	4.5	0.502	4,530	4,130

a) Theoretical Methane Potential, b) Higher Heating Value, c) Lower Heating Value.

성세제 불용성 섬유 함량은 42.24～50.20%의 범위를 보고하였다. 본 연구의 결과는 수확시기별로 거대억새의 조성분 함량을 분석한 Oh *et al.* (2013)의 결과와 비교하여 조단백과 조지방의 함량이 낮게 평가되었고, 조섬유, 중성세제 불용성 섬유, 산성세제 불용성 섬유와 같은 섬유질의 함량은 높게 평가된 것으로 나타났다. 본 연구결과에서 상대적으로 이분해성의 유기물인 조단백과 조지방의 함량이 낮고, 분해저항성을 지니는 섬유질의 함량이 높게 평가된 것은 연구에 사용한 거대억새가 수확 후 약 6개월간의 풍건 및 저장 기간을 거치면서 상대적으로 이분해성의 유기물이 분해되는 것으로 생각된다. 이는 Cho *et al.* (2012)가 완숙기가 지난 거대억새의 조성분을 분석한 결과에서 조단백 1.44%, 조지방 0.42%, 조섬유 46.49%로 보고하고 있어 본 연구와 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 거대억새의 조성분 함량은 수확시기에 따라서도 차이를 보이지만 오히려 수확 후 저장기간 및 저장방법에 따라서 조단백과 조지방 함량이 상대적으로 큰 차이를 나타내는 것으로 나타났다.

이론적 메탄생산퍼텐셜

거대억새를 구성하는 원소분석결과는 Table 4와 같다. 거대억새의 탄소함량은 47.75%로 나타났으며, 수소, 산소, 질소가 각각 6.44, 41.00, 0.28%로 나타났다. 거대억새의 원소분석 결과로부터 Boyle (1976)의 혐기적 메탄생산 반응식(Eq. 1)을 이용하여 계산한 거대억새의 이론적 메탄생산퍼텐셜은 0.502 Nm^3 kg^{-1}-VS_{added}로 산출되었다. 이때 거대억새를 연소시켜 얻은 고위발열량(HHV)과 저위발열량(LHV)은 각각 4,530, 4,130 kcal kg^{-1}으로 나타났다. 고위발열량이란 Bomb 열량계를 이용하여 측정된 총발열에너지를 나타내며, 저위발열량이란 연소과정에서 발생하는 수분의 잠열을 제외한 열량으로서 연소시 회수 이용이 가능한 발열에너지를 나타낸다.

본 연구에서는 거대억새를 이용하여 바이오가스화를 통해 얻을 수 있는 에너지와 직접연소시 얻을 수 있는 에너지량을 비교하기 위하여 이론적 메탄생산퍼텐셜(0.502 Nm^3 kg^{-1}-VS_{added})을 기초로 발열에너지를 산출하였다. 메탄(CH_4)의 연소시 총발열량을 나타내는 고위발열량(HHV)은 9,500 kcal Nm^{-3}이다. 따라서 거대억새의 이론적 메탄생산퍼텐셜을 발열에너지로 환산하면 약 4,576 kcal kg^{-1} (9,500 kcal Nm^{-3}×0.502 Nm^3 kg^{-1}-VS_{added}×908,400 %-VS÷946,797 %-TS)으로 나타났다. 따라서 거대억새의 이론적 메탄생산퍼텐셜에 대한 고위발열량(4,576 kcal kg^{-1})은 거대억새 측정발열량 4,530 kcal kg^{-1}과 비슷한 수치를 나타내었다.

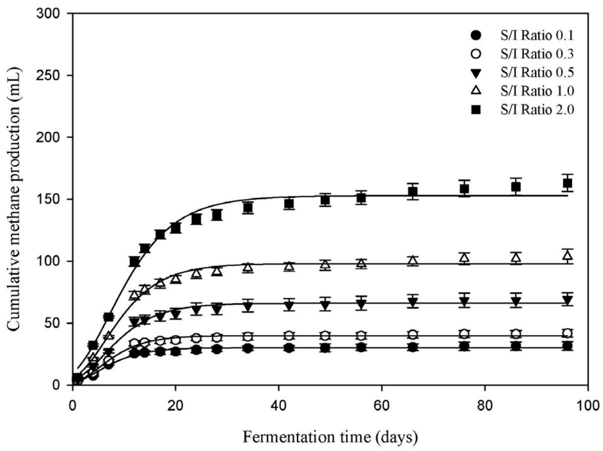

Fig. 1. Cumulative methane production curve of *Miscanthus sacchariflorus* in the different S/I ratio.

메탄생산퍼텐셜

거대억새의 혐기소화 특성을 파악하기 위하여 기질과 접종액의 비율(S/I)을 달리하여 메탄생산퍼텐셜을 측정한 결과 누적 메탄생산곡선은 Fig. 1과 같으며, 누적 메탄생산곡선으로부터 산출한 메탄생산퍼텐셜은 Fig. 2와 같다. 누적 메탄생산곡선(Fig. 1)은 S/I 비율이 증가할수록 반응기별 메탄생산량은 증가하는 경향을 보였다. 그러나 VS당 메탄생산량(Fig.

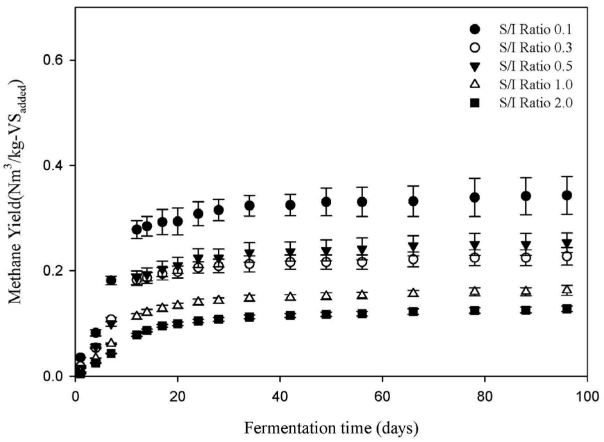

Fig. 2. Cumulative methane yield of *Miscanthus sacchariflorus* with different S/I ratio.

2)은 S/I비율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 최종 메탄생산퍼텐셜(Ultimate Methane Potential, Bu)은 이론적 메탄생산퍼텐셜인 0.502 Nm^3/kg-VS_{added} 보다 낮게 나타났으며, S/I 비율 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0에서 각각 0.328, 0.218, 0.241, 0.154, 0.120 Nm^3/kg-VS_{added}이었다. Raposo *et al.*, (2008)는 해바라기 기름 찌끼를 대상으로 S/I 비율별 최종 메탄생산퍼텐셜을 분석한 결과 S/I 비율이 0.33에서 2.0으로 증가할 때, 최종 메탄생산퍼텐셜은 0.227 Nm^3 kg^{-1}-VS_{added}에서 0.107 Nm^3 kg^{-1}-VS_{added}로 감소하는 결과를 보고한 바 있으며, Kim *et al.* (2012)은 양돈분뇨의 S/I 비율이 0.1에서 0.5로 증가할수록 최종 메탄생산퍼텐셜이 0.64에서 0.40 Nm^3 kg^{-1}-VS_{added}으로 감소하는 결과를 보고한바 있어 본 연구의 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 특히 Kim *et al.* (2012)은 S/I 비율 0.5에서 측정한 최종메탄생산퍼텐셜이 의미있는 결과를 보인다고 하였으며, Chynoweth *et al.* (1993)도 초본류(Herbaceous)에서 0.5～1.0의 S/I 비율이 가장 적절한 최종 메탄생산퍼텐셜을 보고하고 있다. 따라서 거대억새의 최종 메탄생산퍼텐셜은 0.154 (S/I 비율 1.0)에서 0.241 (S/I 비율 0.5) Nm^3 kg^{-1}-VS_{added} 범위가 적절한 것으로 판단된다. 이때 S/I 비율 1.0과 0.5에서 얻은 최종 메탄생산퍼텐셜은 거대억새의 이론적 메탄생산퍼텐셜 대비 약 30.7% (1,405 kcal kg^{-1}) 과 48.0% (2.196 kcal kg^{-1})의 회수율을 나타내고 있다. 따라서 거대억새의 혐기소화를 통해 회수가능한 에너지는 직접연소를 통해 얻을 수 있는 발열에너지(4,530 kcal kg^{-1})보다 매우 낮은 것으로 나타났다.

Table 5는 Gompertz model (Lay *et al.*, 1998)을 이용하여 거대억새의 누적 메탄생산곡선을 해석한 결과이다. 메탄생산량(P)은 S/I비율이 0.1에서 2.0으로 증가함에 따라 30.09 mL에서 152.74 mL로 증가하였으며, 최대메탄생산속도(R_m)은 2.37mL day^{-1}에서 8.14 mL day^{-1}로 증가하였다. 지체성장시간 (λ)은 S/I 비율 2.0에서 0.20 days로 가장 짧게 나타났다.

본 연구에서 최종 메탄생산퍼텐셜은 S/I 비율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 거대억새의 일반성상(Table 3)에서 보면 섬유질의 함량이 높고 그 중에서도 리그닌, 셀룰로오스 등이 포함하는 ADF의 함량이 높아 혐기미생물에 의한 유기물 분해가 원활하지 못했던 것으로 판단된다. Di Girolamo *et al.* (2013)는 셀룰로오스나 리그닌 등의 물질들에 의해 혐기소화 내의 가수분해 속도가 저해되어 낮은 바이오가스를 생산한다고 보고한 바 있다. 이러한 이유로 리그노셀룰로오스계 바이오매스를 혐기소화 하는 경우 기질의 가수분해 용이성을 위해 적절한 전처리가 요구되기도 한다. Zheng *et al.* (2009)는 옥수수대(Corn stover)를 알칼리(NaOH) 용액으로 전처리 한 후 혐기소화 시 메탄생산량이 162-211 NmL g-VS^{-1}로 무처리구보다 최대 73.4% 더 높게 나타났고, Di Girolamo *et al.* (2013)는 증기(steam) 전처리 시 무처리구에 비해 평균 12% 더 높은 메탄생산량을 보였다고 보고한 바 있다. 또한 거대억새와 유사한 유기물 조성을 보이는 짚류(Cereal straw)는 90℃에서 30 min간 전처리 후 40% 더 높은 메탄생산량을 보였으며(Menardo *et al.* 2012), 200℃에서 10 min간 전처리 시 메탄생산량이 20% 더 증가하였다는 보고(Chandra *et al.*, 2012)도 있다. 또한 다년생 호밀(*Lolium perenne*)을 5% NaOH를 첨가하여 100℃에서 처리 후 무처리구보다 39% 더 높은 메탄생산량을 보였고 (Xie *et al.*, 2011), 기장(*Panicum virgatum*)을 7% NaOH를 첨가하여 121℃에서 15 min간 전처리구가 무처리

Table 5. Parameters obtained by model optimization from the cumulative methane production of *Miscanthus sacchariflorus* with different S/I ratios

Parameters	S/I ratio[a]	$P^{b)}$ (mL)	$R_m^{c)}$ (mL day^{-1})	$\lambda^{d)}$ (days)	$B_u^{e)}$ ($Nm^3 kg^{-1} VS_{added}$)	$B_u/B_{th}^{f)}$
Miscanthus sacchariflorus	0.1	30.086	2.374	0.290	0.328	0.653
	0.3	39.832	3.135	0.664	0.218	0.434
	0.5	65.993	4.347	0.493	0.241	0.480
	1.0	97.959	6.218	0.572	0.154	0.307
	2.0	152.737	8.142	0.203	0.120	0.239

a) Substrate to Inoculum ratio, b) Methane Production Potential, c) Maximum Specific Methane Production rate, d) Lag phase time, e) Ultimate Methane Potential, f) Anaerobic biodegradability.

구에 비해 24% 더 높은 메탄생산량을 보였다(Frigon *et al.*, 2012)는 보고도 있다. 또한 Uellendahl *et al.* (2008)은 다년생 에너지 작물의 혐기소화에서 습식산화(Wet Oxidation) 전처리가 바이오가스 생산량을 크게 증가시켜 바이오가스 플랜트의 경제성을 향상시킨다고 보고한 바 있다. 따라서 리그노셀룰로오스계 바이오매스인 거대억새를 혐기소화의 기질로 이용하는 경우 적절한 전처리 과정이 동반된다면 메탄생산 효율과 함께 바이오가스화 시설의 경제성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

본 연구는 거대억새를 이용한 바이오가스화 기술 적용성을 평가하기 위하여 기질과 접종액의 비율을 달리하여 거대억새의 메탄생산퍼텐셜을 분석하였다. 거대억새의 CP, EE, CF 함량은 1.4%, 0.46%, 46.12%이었으며, NDF 함량은 86.88%, ADF 함량은 62.91%로 나타났다. 또한 거대억새의 TS 함량은 94.7%, VS 함량은 90.8%이었으며, TN과 NH_4^+-N 함량은 2,119, 115 mg kg^{-1}이었다. 거대억새의 구성 원소함량은 C 47.75%, H 6.44%, O 41.00%, N 0.28%이었으며, 이론적 메탄생산퍼텐셜은 0.502 Nm^3 kg^{-1}-VS_{added}로 평가되었다. 거대억새의 최종 메탄생산퍼텐셜 (B_u)은 0.154 (S/I 비율 1.0)에서 0.241 (S/I 비율 0.5) Nm^3 kg^{-1}-VS_{added} 범위로 타나났으며, 이때 유기물 분해율(B_u/B_{th})은 30.7～48.0%의 범위를 보였다.

따라서 거대억새를 바이오가스 생산을 위한 혐기소화의 기질로 활용하고자하는 경우 혐기소화 효율 향상을 위한 유기물 가용화 기술의 적용이 요구되었다.

Acknowledgment

This work was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (IPET) through Agri-Bio industry Technology Development Program, funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs(MAFRA)(Project No. 314010-04-2-HD040).

References

Alaru, M., Olt, J., Kukk, L., Luna-delRisco, M., Lauk, R., & Noormets, M. (2011). Methane yield of different energy crops grown in Estonian conditions. Agronomy Research Biosystem Engineering, Special Issue 1, 13-22.

Beuvink, J. M. W., Spoelstra, S. F., & Hogendorp, R. J. (1992). An automated method for measuring time-c ourse of gas production of feed-stuffs incubated with buffered rumen fluid. Netherlands Journal of Agricultural Science, 40, 401-401.

Bonin, C. L., Heaton, E. A., & Barb, J. (2014). Miscanthus sacchariflorus-biofuel parent or new weed?. GCB Bioenergy, 6(6), 629-636.

Boyle, W. C. (1976). Energy recovery from sanitary landfills-a review. Microbial Energy Conversion (eds. Schlegel, H. G., and Barnea, J.). pp. 119-138. Pergamon Press, Oxford, UK.

Brosse, N., Dufour, A., Meng, X., Sun, Q., & Ragauskas, A. (2012). Miscanthus: a fast-growing crop for biofuels and chemicals production. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 6(5), 580-598.

Chandra, R., Takeuchi, H., Hasegawa, T., & Kumar, R. (2012). Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments. Energy, 43(1), 273-282.

Cho, S. B., Mbiriri, D. T., Oh, S. J., Lee, A., Yang, J. H., Ryu, C. H., Park, C. M., Moon, Y. H., Chae, J. I., & Choi, N. J. (2012). Effect of mature Miscanthus sacchariflorus var. No. 1 on in vitro rumen fermentation characteristics and its dry matter digestibility. Journal of The Korean Society of Grassland and Forage Science, 32(2), 165-174.

Chynoweth, D. P., Turick, C. E., Owens, J. M., Jerger, D. E., & Peck, M. W. (1993). Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. Biomass and bioenergy, 5(1), 95-111.

Cortés, A. M., & Bridgwater, A. V. (2015). Kinetic study of the pyrolysis of miscanthus and its acid hydrolysis residue by thermogravimetric analysis. Fuel Processing Technology, 138-193.

Di Girolamo, G., Grigatti, M., Barbanti, L., & Angelidaki, I. (2013). Effects of hydrothermal pre-treatments on Giant reed (Arundo donax) methane yield. Bioresource technology, 147-159.

Frigon, J. C., Mehta, P., & Guiot, S. R. (2012). Impact of mechanical, chemical and enzymatic pre-treatments on the methane yield from the anaerobic digestion of switchgrass. Biomass and Bioenergy, 36, 1-11.

Gaunt, J. L., & Lehmann, J. (2008). Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production. Environmental Science &Technology, 42(11), 4152-4158.

Kazimierowicz, J., & Dzienis, L. (2015). Giant Miscanthus as a substrate for biogas production. Journal of Ecological Engineering, 16(4), 139-142.

Kim, S. H., Kim, H., Oh, S. Y., Kim, C. H., & Yoon, Y. M. (2012). Effect of substrate to inoculum ratio on biochemical methane potential in the thermal pretreatment of piggery sludge. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer, 45(4), 532-539.

Lay, J. J., Li, Y. Y., & Noike, T. (1998). Developments of bacterial population and methanogenic activity in a laboratory-scale landfill bioreactor. Water research, 32(12), 3673-3679.

Lewandowski, I., Clifton-Brown, J. C., Scurlock, J. M. O., & Huisman, W. (2000). Miscanthus: European experience with a novel energy crop. Biomass and Bioenergy, 19(4), 209-227.

Menardo, S., Airoldi, G., &Balsari, P. (2012). The effect of particle size and thermal pre-treatment on the methane yield of four agricultural by-products. Bioresource technology, 104, 708-714.

Moon, Y. H., Koo, B. C., Seo, S. J., Park, S. T., Cha, Y. R., Ahn, S. H., Kim, C. W., & Lee, Y. H. (2014). Miscanthus plant named Geodae-Uksae 1. Korean Patent 10-1444203-0000.

Moon, Y. H., Koo, B. C., Park, S. T., Cha, Y.R., Ahn, S. H., & Seo, S. J. (2013). Method for mass production of miscanthus seedling. Korean Patent 10-1093016-0000.

Moon, Y. H., Koo, B. C., Choi, Y. H., Ahn, S. H., Bark, S. T., Cha, Y. L., An, G. H., Kim, K., & Suh, S. J. (2010). Development of “Miscanthus” the promising bioenergy crop. Korean Journal of Weed Science, 30(4), 330-339.

Oh, S. J., Song, W. S., Kim, M. S., Choi, S. L., Lee, S. R., Kim, E. S., Kim, Y. S., & Choi, N. J. (2013). Effect of different parts and growing stages of Miscanthus sacchariflorus as a non-food resource that does not contribute towards climate change on metabolic availability in ruminants. Korean Journal of Organic Agriculture, 21(3), 437-450.

Park, C. H., Kim, Y. G., Kim, K. H., Alam, I., Lee, H. J., Sharmin, S. A., Lee, K. W., & Lee, B. H. (2009). Effect of plant growth regulators on callus induction and plant regeneration from mature seed culture of Miscanthus sinensis. Journal of The Korean Society of Grassland and Forage Science, 29(4), 291-298.

Park, C. H., Kim, Y. G., Kim, K. H., Alam, I., Lee, H. J., Sharmin, S. A., Lee, K. W., & Lee, B. H. (2009). Effect of plant growth regulators on callus induction and plant regeneration from mature seed culture of Miscanthus sinensis. Journal of The Korean Society of Grassland and Forage Science, 29(4), 291-298.

Pu, Y., Zhang, D., Singh, P. M., & Ragauskas, A. J. (2008). The new forestry biofuels sector. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2(1), 58-73.

Raffelt, K., Henrich, E., Koegel, A., Stahl, R., Steinhardt, J., & Weirich, F. (2006). The BTL2 process of biomass utilization entrained-flow gasification of pyrolyzed biomass slurries. Applied biochemistry and biotechnology, 129(1-3), 153-164.

Raposo, F., Borja, R., Rincon, B., &Jimenez, A. M. (2008). Assessment of process control parameters in the biochemical methane potential of sunflower oil cake. Biomass and Bioenergy, 32(12), 1235-1244.

Siedlecki, M., De Jong, W., & Verkooijen, A. H. (2011). Fluidized bed gasification as a mature and reliable technology for the production of bio-syngas and applied in the production of liquid transportation fuels—a review. Energies, 4(3), 389-434.

Sørensen, A. H., Winther-Nielsen, M., &Ahring, B. K. (1991). Kinetics of lactate, acetate and propionate in unadapted and lactate-adapted thermophilic, anaerobic sewage sludge: the influence of sludge adaptation for start-up of thermophilic UASB-reactors. Applied microbiology and biotechnology, 34(6), 823-827.

Speller, C. S. (1993). The potential for growing biomass crops for fuel on surplus land in the UK. Outlook on Agriculture, 22(1), 23-29.

Uellendahl, H., Wang, G., Møller, H. B., Jørgensen, U., Skiadas, I. V., Gavala, H. N., &Ahring, B. K. (2008). Energy balance and cost-benefit analysis of biogas production from perennial energy crops pretreated by wet oxidation. Water science and technology, 58(9), 1841-1847.

Van Soest, P. J. & Robertson, J. B. (1985). Analysis of forage and fibrous feeds. A laboratory manual for Animal Science No. 613, Department of Animal science, Cornell University, Ithaca, New York.

Willems, A., Amat-Marco, M., &Collins, M. D. (1996). Phylogenetic analysis of Butyrivibrio strains reveals three distinct groups of species within the Clostridium subphylum of the gram-positive bacteria. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 46(1), 195-199.

Xie, S., Frost, J. P., Lawlor, P. G., Wu, G., &Zhan, X. (2011). Effects of thermo-chemical pre-treatment of grass silage on methane production by anaerobic digestion. Bioresource technology, 102(19), 8748-8755.

Zhao, X., Cheng, K., &Liu, D. (2009). Organosolv pretreatment of lignocellulosic biomass for enzymatic hydrolysis. Applied microbiology and biotechnology, 82(5), 815.

Zheng, M., Li, X., Li, L., Yang, X., & He, Y. (2009). Enhancing anaerobic biogasification of corn stover through wet state NaOH pretreatment. Bioresource Technology, 100(21), 5140-5145.