



저품위 석탄의 원지반에서의 생물학적 메탄가스 생산에 관한 기초연구

왕페이, 전지영, 임학상, 윤석표[†]

세명대학교 바이오환경공학과

(2015년 8월 19일 접수, 2015년 8월 31일 수정, 2015년 9월 7일 채택)

Basic Study on the in-situ Biogenic Methane Generation from Low Grade Coal Bed

Fei Wang, Ji-Young Jeon, Hak-Sang Lim, Seok-Pyo Yoon[†]

Department of Environmental Engineering, Semyung University

ABSTRACT

In the present work, a basic study on the in-situ biogenic methane generation from low grade coal bed was conducted. Lignite from Indonesia was used as a sample feedstock. A series of BMP (Biochemical Methane Potential) tests were carried out under the different experimental conditions. Although nutrients and anaerobic digester sludge were added to the coal, the produced amount of methane was limited. Both temperature control and particle size reduction showed little effect on the increase of methane potential. When rice straw was added to lignite as an external carbon source, methane yield of 94.4~110.4 mL/g VS was obtained after 60 days of BMP test. The calorific value of lignite after BMP test decreased (4.5~12.1 %) as increasing the content of rice straw (12.5~50 wt % of lignite), implying that anaerobic digestion of rice straw led to partial degradation of lignite. Therefore, rice straw could be used as an external carbon source for the start-up of in-situ biogas generation from low grade coal bed.

Keywords : biogenic methane generation, lignite, BMP test, rice straw

[†]Corresponding author(yoonsp@semyung.ac.kr)

초 록

원지반에서의 저품위 석탄층의 생물학적 메탄 생산을 위한 기초연구를 수행하였다. 인도네시아산 갈탄을 시료로 이용하였으며, 조건을 달리하여 BMP(Biochemical Methane Potential) 실험을 수행하였다. 갈탄에 영양물질과 혐기성 슬러지만 제공한 경우, 온도(23, 30℃)나 석탄의 입자크기는 메탄가스 생산에 영향을 주지 않았다. 이는 가용한 용해성 유기물질이 낮기 때문이다. 외부탄소원으로 벚짚을 갈탄에 첨가한 후 BMP 실험을 수행하였으며, 60일간의 BMP 실험 후 벚짚 첨가에 의한 메탄가스 발생량은 94.4~110.4 mL/g VS이었다. BMP 실험 후 갈탄의 발열량은 벚짚 첨가량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 이는 벚짚의 혐기성 분해와 함께 갈탄의 분해가 이루어졌음을 의미한다. 따라서 원지반에서의 저품위 석탄층의 생물학적 메탄 생산의 초기 운전 시에 벚짚을 탄소원으로 사용할 수 있다.

주제어 : 생물학적 메탄 생성, 갈탄, BMP test, 벚짚

1. 서론

저품위 석탄의 매장량은 고품위 석탄보다 다소 많은 4,800억 톤에 달하고, 현재의 채굴량을 감안할 때 아역청탄은 295년, 갈탄은 196년 동안 사용이 가능하므로 효율적인 이용 기술 개발 시 막대한 활용 잠재력이 기대된다¹⁾. 하지만 막대한 매장량에도 불구하고 저품위 석탄은 열량이 낮고, 수분 함량이 30~70 %로 높고 산소 관능기가 다수 함유된 탄화수소를 많이 가지고 있고, 높은 화학 반응성 때문에 수분의 흡탈착에 의한 자연발화 위험성이 높아 저장 및 이송이 불가능한 단점이 있다. 따라서 수분을 효과적으로 제어 하면서 다양한 제품으로 전환할 수 있는 기술 개발이 무엇보다 중요하다.

생물학적 혹은 화학적 반응에 의해 석탄에서 메탄가스가 생성되는 것은 널리 알려진 사실이며²⁻⁹⁾, 다만 종류에 따라 메탄가스의 생성량은 편차가 크다. Jones *et al.*은 120 mL 배양병에 석탄과 영양물질, 미생물을 넣고 실험한 결과 60 $\mu\text{mol/g}$ 의 메탄이 발생하였음을 보고하였다²⁾. Gallagher *et al.*은 산화된 석탄은 산화되지 않은 석탄 보다 메탄이 50~100 $\mu\text{mol/g}$ 작게 발생되었다고 보고하였다⁴⁾. 하지만, 앞서 Jones *et al.*의 메탄 발생량과 비교할 때 Gallagher *et al.*의 보고 값은 높은 편이며, 따라서 석탄 종류에 따

라서 메탄 발생량의 편차가 큰 것을 알 수 있다. Opara *et al.*은 지표면 부근이나 석탄 폐광산 등의 부지에서 석탄으로부터 메탄을 생성시키는 상황을 가정하여 메탄을 생성하는 실험 연구를 하고, 이로부터 연간 발생 가능한 메탄생성량을 추정하였다⁵⁾. 석탄에서 바이오가스를 얻기 위한 전처리에 관한 연구로는 진균류를 이용하거나⁶⁾, 과망간산칼륨과 같은 산화제를 이용하여 생물학적으로 가용한 용해성 유기물질을 얻는 연구⁹⁾ 등이 진행되었다.

하지만 저자 등이 문헌연구에서 조사된 결과를 토대로 원지반 석탄층에서의 메탄생성을 가정하여 직경 20 cm, 유효높이 55 cm 크기의 칼럼에 석탄을 채우고, 영양물질과 미생물을 주입한 후 메탄 발생을 관찰한 결과 1년이 지나도록 유의미한 메탄의 발생을 관찰하지 못하였으며, 또한 배양병을 이용한 기초 실험에서도 사용한 석탄에서의 메탄 생성량은 미미하였다. 이에 본 연구에서는 원지반 (in-situ) 저품위 석탄층에서 미생물을 이용하여 메탄가스를 생산하기 위한 기초연구를 실시하였다. 이를 위해 인도네시아산 갈탄을 이용하여, 다양한 조건에서 BMP(Biochemical Methane Potential) test를 실시하여 혐기성 환경에서 석탄으로부터 메탄을 생성하는데 유리한 환경을 도출하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료

석탄은 인도네시아산 갈탄을 이용하였다. 실험에 사용된 벚짚은 자체 수분을 줄이기 위해 풍건하여 건조한 후 시료의 크기는 5 mm이하의 작고 균일한 크기로 절단하였다.

석탄과 벚짚은 3성분 분석과 원소분석, 발열량 분석을 실시하였다. 원소분석은 Elementar사의 vario MICRO cube 모델을 사용하였으며, 발열량 분석은 Parr 6100 Calorimeter를 사용하였다.

실험에 사용된 혐기성 미생물은 C시 소재의 맥주공장에서 채취한 슬러지를 가정용 믹서에 갈아서 사용하였다. 갈탄을 막자사발로 파쇄하여 일정한 크기의 시료를 사용하였다.

2.2 BMP test 실험

혐기성 미생물이 이용할 영양물질의 공급을 위하여 Shelton and Tiedje의 방법에 따라 영양배지를 조절하였다¹⁰⁾. 배지는 산소를 제거하기 위해 고압멸균기를 이용하여 10분 동안 가압멸균시킨 후, 상온에서 냉각시키면서 외부의 산소 유입을 막기 위해 질소가스를 주입함으로써 혐기성 상태가 되도록 하였다.

100 mL 혹은 250 mL(벚짚 첨가실험의 경우) serum bottle에 제조된 미생물 배지 50 mL 혹은 130 mL(벚짚 첨가실험의 경우)을 넣고 질소가스로 치환시킨 후, 배지부피의 10 %에 해당하는 식중 소화슬러지를 주입하였다. 시료의 양은 가수분해 및 산 생성 미생물에 의한 급격한 초기 유기산의 축적으로 인해 메탄생성이 저해되지 않는 범위에서 예비 실험에 기초해 결정하였다.

이 과정에서 질소가스로 충전하고, 1N-NaOH와 1N-HCl을 이용하여 pH 6.8~7.2로 조정 후, 산 생성에 따른 pH 저하를 억제하기 위해 알칼리 물질인 중탄산염(NaHCO₃)을 1.2 g/L 주입하고 실리콘 마개로 밀봉한 후 질소로 치환시켰다. serum bottle의 내부온도가 23 °C 혹은 30 °C가 되었을 때를 실험 시작시간으로 하여 가스가 더 이상 발생하지 않을 때까지 진행하였다.

2.3 가스 및 배양액 농도 측정

BMP test에서 발생한 가스는 유리 시린지를 이용하여 매일 부피를 측정하였으며, 측정하기 전에 bottle을 흔들어 액체에 포함된 가스를 모두 상부 공간으로 배출되도록 한 후 분석을 실시하였다. 가스의 농도는 Gas Chromatography(GC-6890N, Agilent technologies, USA) 열전도도 검출기(TCD)를 이용하여 CH₄, CO₂ 농도를 분석하였다.

실험 중 배양액을 일부 시료 채취하여 유기산 농도를 HPLC로 측정하였으며(Waters 1525 Binary HPLC pump, Waters 2487 Dual λ absorbance detector, Aminex HPX-87H 칼럼, UV 210 nm), 실험 종료 후 배양액을 여과하여 COD 농도를 측정하였다¹¹⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1 시료의 물리화학적 특성

실험에 사용된 갈탄과 벚짚의 물리화학적 특성을 [Table 1]에 나타내었다. 3성분 분석에 의하면 갈탄은 수분함량이 31.3 %로 높은 편이며, 가연분 함량은 58.6 % 수준이었다. 가연분에 대한 원소 분석 결과에 의하면 탄소가 58.2 %, 수소가 4.1 %이며, 황 함량이 1.56 %의 값을 보였다.

반면 메탄 생성환경을 조성하기 위해 추가로 넣어준 벚짚의 경우에는 3성분에서 가연분의 함량이 84.7 %로 높고, 수분함량도 5.7 %로 낮아 생분해될 수 있는 가연분 함량이 높음을 볼 수 있고, 원소분석에 있어서도 탄소가 40.6 %, 수소가 5.9 %이었으며, 황 성분이 2.65 %의 값을 보였다. 특히 C/H 비에서 석탄이 14.3인 반면, 벚짚의 경우 6.86으로 낮아서 메탄 생성 시 필요한 수소의 확보 측면에서도 벚짚의 원소 조성이 유리함을 볼 수 있다.

벚짚이 혐기성 상태에서 분해되는 과정에서 갈탄의 분해도 추가적으로 이루어졌는지 확인하기 위해 BMP 실험이 끝난 후 갈탄을 채취하여 105 °C에서 4시간 건조 후 고위발열량을 측정하여 비교하였다.

[Table 1] Physicochemical Characteristics of Sample

item		lignite (%)	rice straw (%)
3 component	water (%)	31.33	5.69
	ash (%)	10.08	9.60
	volatile (%)	58.59	84.71
Element analysis (volatile weight base)	C (%)	58.24	40.59
	H (%)	4.07	5.92
	O (%)	35.00	49.71
	N (%)	1.13	1.13
	S (%)	1.56	2.65
Higher heat value (wet base)	kcal/kg	4925	3801

3.2 23 °C에서의 석탄의 BMP 실험 결과

석탄이 지중에 묻혀있는 환경을 고려하여 23 °C 온도에서 입자 크기를 달리하여 BMP 실험을 40일간 실시하였다(건조한 석탄 6 g, 영양물질 배양액 50 mL, 식중용 슬러지 5 mL 사용, vial 크기 100 mL). 경과일수에 따른 HPLC를 이용한 배양액 내 휘발성 지방산 분석 결과는 [Table 2]와 같다. 표에서 blank는 기타 조건은 같고, 석탄이 첨가되지 않은 경우를 말한다. [Table 3]에서는 가스발생량과 조성분석 결과를

나타내었다. 혐기성 가스는 초기에만 약간 생성되고, 이후에는 거의 가스 발생량이 없었으며, 배양액 내의 휘발성 지방산 농도도 초산의 경우 입자크기가 작은 0.075~0.15 mm의 경우를 제외하고는 초기에만 검출되었고, 이후에는 검출되지 않았다. 프로피온산의 경우 반대로 입자크기가 큰 2~5 mm에서 농도가 높았고, 검출되는 횟수도 많았으나, 메탄의 혐기성 발효를 유도할 정도로 높은 수치는 보이지 않았다.

[Table 2] Change of Volatile Fatty Acids Concentration

time (day)	blank	acetic acid concentration (mg/L)			propionic acid concentration (mg/L)		
		size of lignite (mm)			size of lignite (mm)		
		2~5	0.5~2	0.075~0.15	2~5	0.5~2	0.075~0.15
4	8.56	18.51	0	24.60	8.93	0	0
8	0	17.67	28.74	48.69	15.32	10.80	0
12	0	0	0	42.93	0	0	0
16	0	0	0	34.20	0	0	0
20	0	0	0	30.19	0	0	0
24	0	0	0	31.22	13.31	0	0
28	0	0	0	21.47	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	7.51	0	0

[Table 3] Biogas Generation and Concentration Incubated at 23 °C

item	time (day)	blank	size of coal (mm)		
			2~5	0.5~2	0.075~0.15
gas generation (mL)	2	1.8	8.2	8.9	2.1
	23	-	1.2	0.1	0.1
	32	-	-	-	-
CH ₄ (%)	2	0.9	1.5	1.5	0.5
	23	0.5	1.2	1.2	0.8
	32	0.4	0.4	0.5	-
CO ₂ (%)	2	1.0	7.3	7.1	2.3
	23	2.9	2.1	2.1	2.5
	32	3.8	2.2	3.1	2.3

이후 다시 90일간 건조하지 않은 석탄 6 g을 시료로 하여 동일한 배양액 조건에서 혐기성 분해를 관찰하였으나 바이오가스의 발생은 초기에 6.2~7.0 mL 발생한 이후에는 전혀 없었으며, 90일 이후에 배양액을 분석한 결과 [Table 4]와 같은 결과를 얻었다. 석탄 입자 크기가 작아질수록 반비례하여 COD 값이 다소 증가하는 경향을 보이고는 있으나, 석탄이 들어가지 않은 blank와 비교할 때 절대적인 COD 값의 증가는 크지 않음을 볼 수 있다.

3.3 30 °C에서의 석탄의 BMP 실험 결과

지중온도를 고려했을 때는 23 °C에서의 운전이 현실적이지만, 메탄가스의 생산량이 너무 낮은 관계로 30 °C에서 BMP 실험을 실시하였다. 아울러 석탄에는 가용한 탄소원이 많지 않은 것을

감안하여 별도로 Yeast extract를 소량(0.1g) 넣은 것을 함께 비교하였다. 30 °C에서의 실험 결과는 [Table 5]와 같다.

온도를 30 °C로 높여서 운전했음에도 바이오 가스 발생량의 증가는 관찰되지 않았으며, 단지 Yeast extract를 첨가한 경우에만 초기에 가스 발생량이 증가하고, 메탄가스의 조성도 다소 높아진 것을 확인할 수 있었다. 따라서 가용한 탄소원이 없는 상태에서는 온도 증가가 바이오 가스 생산량 증가에 영향을 주지 않음을 확인할 수 있었다.

3.4 볏짚을 탄소보조원으로 한 경우의 석탄에서의 BMP 실험 결과

미생물이 가용한 유기물질이 낮은 환경에서는 미생물에 의한 메탄 생성이 불리하므로, 이를 해

[Table 4] pH and COD Concentration of Bioassay Medium after 90 Day

item	blank	size of coal (mm)			paper
		2~5	0.5~2	0.075~0.15	
pH	7.2	6.3	6.4	6.8	6.2
COD (mg/L)	181.4	194.3	210.0	267.1	396.4
COD increase rate compared with blank	-	7.1 %	15.8 %	47.2 %	118.5 %

[Table 5] Biogas Generation and Concentration Incubated at 30 °C

item	time (day)	blank	size of coal (mm)			
			2~5	0.5~2	0.075~0.15	0.075~0.15 (yeast extract addition)
gas generation (mL)	15	2.7	0.7	0.2	1.3	8.8
	30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	75	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CH4 (%)	15	2.6	1.2	1.2	1.0	4.3
	30	1.2	1.1	1.3	1.2	1.4
	45	1.3	1.1	1.1	1.5	1.1
	60	1.0	1.6	2.3	3.8	1.5
	75	1.0	1.1	1.0	1.4	1.3
CO2 (%)	15	2.0	2.7	3.1	2.3	4.3
	30	2.1	2.2	3.7	2.1	2.6
	45	3.8	1.8	1.8	1.9	2.2
	60	3.5	4.7	8.0	8.0	4.1
	75	2.9	3.3	2.0	3.8	5.2

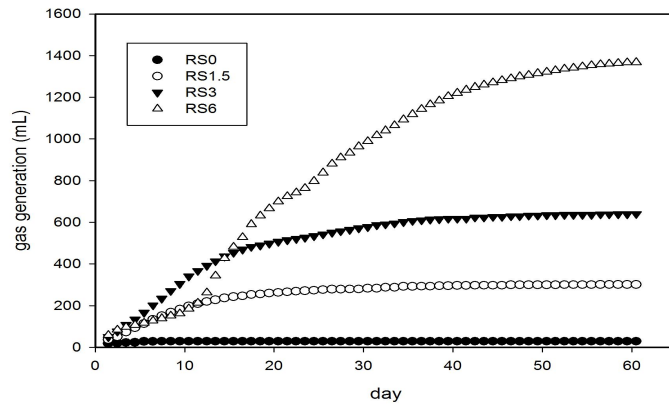
결하기 위해 탄소원으로 농촌 지역에서 쉽게 구할 수 있는 Cellulose가 많이 함유된 볏짚을 이용하는 방안을 고려하였다. 앞서 갈탄에 대한 BMP 실험과 동일하나 추가적으로 볏짚을 넣었으며, 볏짚을 추가할 경우 가스생성량이 클 것을 감안하여 실험 vial의 크기를 250 mL로 하였으며, 이에 따라 넣어준 석탄(12 g), 영양물질(130 mL), 식중 슬러지의 양(13 mL)도 앞서 실험보다는 증가되었다. 추가한 볏짚의 양은 0, 1.5, 3, 6 g으로 달리하였다.

60일간 누적한 가스 발생량은 [Fig. 1]과 같다. 석탄 12 g에 첨가된 볏짚의 양이 각각 0, 1.5, 3, 6 g이므로 볏짚을 첨가하지 않은 RS0의 누적 가스발생량(29.2 mL)을 각각의 누적 가스 발생량에서 빼면 볏짚에 의한 바이오 가스 발생량 기여분으로 볼 수 있는데, 볏짚 1 g당의 바이오 가스 발생량은 RS1.5, RS3, RS6이 각각 181.2, 203.7, 223.1 mL로 볏짚 첨가량이 클수록 단위 중량당 바이오 가스 발생량이 증가하는 추세를 보였다.

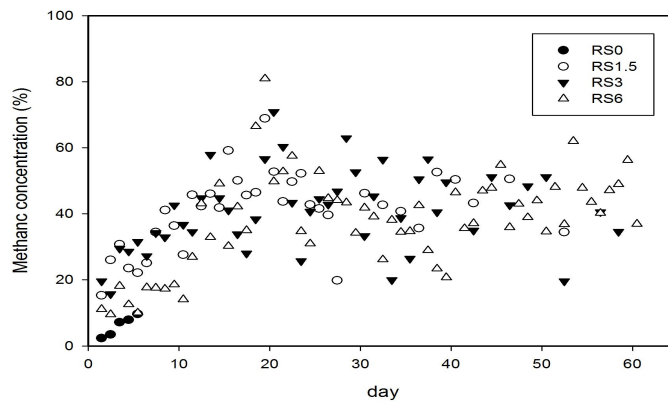
메탄가스 농도는 초기 약 15일간 메탄 생성 미

생물이 성장하는 동안 점차적으로 증가하는 추세를 보였으며 이후는 30~60 % 농도 범위를 보였다([Fig. 2]). 볏짚을 첨가하지 않은 RS0의 경우 평균 메탄 농도가 6.1 %로 낮았던 반면, 볏짚을 각각 1.5 g, 3 g, 6 g 주입한 경우 평균 메탄 농도는 RS1.5 = 40.8 %, RS3 = 40.6 %, RS6 = 37.7 %로서 대체로 40 % 전후의 메탄 농도를 보였으며, 바이오 가스 발생 기간이 가장 길었던 RS6의 경우가 RS1.5와 RS3에 비하여 약간 낮은 메탄가스 농도를 보였다.

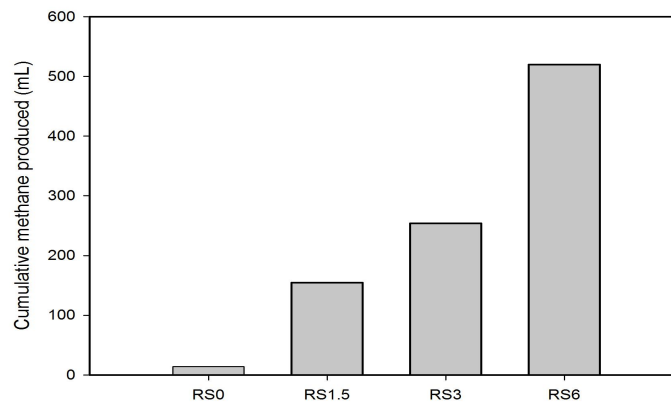
가스 발생량에 메탄가스의 농도를 곱하여 구한 실제 메탄가스 발생량을 비교하면 [Fig. 3]과 같다. 볏짚이 안 들어간 RS0의 메탄가스 발생량을 RS1.5, RS3, RS6의 값에서 빼고, 가연분 1 g 기준으로 환산하면 RS1.5 = 110.4 mL CH₄/g VS, RS3 = 94.4 mL CH₄/g VS, RS6 = 99.5 mL CH₄/g VS의 값을 보여 유사한 값을 보였으나, RS1.5의 경우가 가장 높은 메탄가스 발생량을 보였다. 이는 누적 가스발생량에서는 RS6이 가장 높은 수치를 보였으나, 메탄가스 농도가 RS1.5에 비하여 다소 낮았는데 기인한다.



[Fig. 1] Cumulative biogas generation with different rice straw addition



[Fig. 2] Change of methane concentration over time



[Fig. 3] Cumulative methane generation

2.5 볏짚 추가 BMP 실험 종료 후 배양액 물성 조사 결과

석탄에 볏짚을 추가하여 60일간 BMP 실험을 수행한 후 여과액의 특성을 비교하였다. 여과액의 pH는 [Table 6]과 같이 볏짚의 첨가량이 높을수록 낮아지는 경향을 보이고 있으나, 모두 중성의 pH 범위를 보여주어 배양액의 완충능은 충분한 것으로 보인다. 볏짚의 첨가량이 높을수록 생성되는 유기산 함량이 증가하여 pH가 낮아진 것으로 추정된다.

여과액의 COD 농도는 볏짚의 첨가량이 많을수록 COD가 높아져서 앞서의 유기산에 의해 pH가

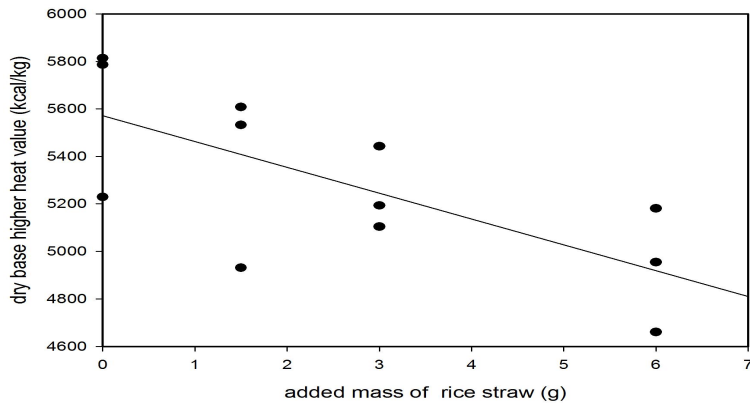
낮아지는 경향과 일치함을 보여준다.

한편, 볏짚을 넣지 않은 RSO의 경우에도 COD 값은 981.1 mg/L을 보여서 실험 과정에 미생물 식종을 위해 넣은 슬러지와 석탄 입자가 미세한 분말이 되면서 용해된 유기성분이 COD 농도로 작용한 것으로 보인다. BMP 실험 후 볏짚에 의해 추가적으로 생성된 COD 농도는 볏짚 1 g 기준으로 환산하면 176~267 mg/L이었다.

실험 종료 후 잔존하는 석탄 입자를 105 °C에서 4시간 건조 후 발열량계로 고위발열량을 측정한 결과는 [Table 6]과 [Fig. 4]와 같다. 석탄의 저위발열량은 볏짚 첨가량이 많을수록 감소

[Table 6] Characteristics of Medium and Lignite After 60 Day Incubation

		added rice straw			
		0	1.5 g	3 g	6 g
medium	pH	7.35	7.06	6.96	6.85
	COD (mg/L)	981.1	1298.1	1509.4	2581.1
	COD increase per g of rice straw (mg/L)	-	211.3	176.1	266.7
heat value of lignite after incubation	higher heat value (dry base, kcal/kg)	5609.5	5357.2	5246.4	4931.9
	heat value decrease (kcal/kg)	-	-252.3 (-4.5 %)	-363.1 (-6.5 %)	-677.6 (-12.1 %)
	heat value decrease per g of rice straw (kcal/kg)	-	-168.2	-121.0	-112.9



[Fig. 4] Higher heat value change of lignite with different rice straw mass after BMP test.

하는 경향을 보이고 있다. 이는 벗짚이 분해되면서 미생물에 의해 석탄의 일부 성분도 함께 분해가 된 결과로 보이며, 벗짚의 첨가는 석탄의 바이오가스를 촉진시키는 외부 조작 인자로 적용가능함을 보여준다.

4. 결론

본 연구는 저품위 석탄을 굴착하지 않은 원지반에서 미생물에 의한 혐기성 분해에 의해 바이오 가스를 생산함으로써 경제성이 낮은 석탄층에서 가스상의 에너지를 얻기 위한 기초 실험으로서 BMP 실험 방법을 이용하여 여러 조건에서 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 저품위 석탄에 영양물질과 미생물 슬러지를 넣고 혐기성 상태에서 관찰한 결과 메탄가스 발생량은 미미하였다. 이는 석탄에서 용해되어 나오는 유기물질의 양이 극소량이므로 미생물이 이용할 수 있는 탄소원이 부족하고, 아울러 메탄의 구성성분인 수소 성분도 부족한데서 기인하는 것으로 보인다.
2. 저품위 석탄 분해 시 메탄 생성을 위한 외부 탄소원으로 농촌 지역에서 손쉽게 구할 수 있는 벗짚을 추가하여 BMP 실험을 수행한 결과 벗짚 1 g당의 바이오 가스 발생량은 RS1.5, RS3, RS6이 각각 181.2, 203.7, 223.1 mL로 벗짚 첨가량이 클수록 단위 중량당 바이오 가스 발생량이 증가하는 추세를 보였다. 가스 발생량에 메탄가스의 농도를 곱하여 구한 실제 메탄가스 발생량을 비교하면 가연분 1 g 기준으로 환산하면 RS1.5 = 110.4 mL CH₄/g VS, RS3 = 94.4 mL CH₄/g VS, RS6 = 99.5 mL CH₄/g VS의 유사한 값을 보였다.
3. 60일간의 BMP 실험 종료 후 배양액을 분석한 결과 벗짚 첨가량이 클수록, pH는 중성 범위에서 낮아지는 경향을 보였으며, COD는 증가하는 경향을 보였다. 아울러 BMP 실험 후 갈탄을 건조하여 고위발열량을 측정된 결과, 벗짚 함량이

증가할수록 발열량이 감소하는 경향을 보였다. 이는 벗짚의 혐기성 분해시 석탄의 일부가 배양액으로 분해되어 나옴을 의미하며, 따라서 벗짚을 석탄의 혐기성 분해를 촉발시키기 위한 외부 탄소원으로 적용할 수 있음을 보여준다.

사 사

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20132020000170)

References

1. World Energy Resources, 2013 Survey, World Energy Council (2013).
2. Jones, E.J.P., Voytek, M.A., Corum, M.D., Orem, W.H., "Simulation of methane generation from nonproductive coal by addition of nutrients or a microbial consortium", Applied and Environmental Microbiology, 76(21), pp.7013~7022. (2010).
3. Jones, E.J.P., Voytek, M.A., Warwick, P.D., Corum, M.D., Cohn, A., Bunnell, J.E., Clark, A.C., Orem, W.H., "Bioassay for estimating the biogenic methane-generating potential of coal samples", International Journal of Coal Geology, 76, pp.138~150. (2008).
4. Gallagher, L.K., Glossner, A.W., Landkamer, L.L., Figueroa, L.A., Mandernack, K.W., Marr, J.M., "The effect of coal oxidation on methane production and microbial community structure in Powder River Basin coal", International Journal of Coal Geology, 115, pp.71~78. (2013).
5. Opara, A., Adams, D.J., Free, M.L., McLennan, J., and Hamilton, J., "Microbial production of

- methane and carbon dioxide from lignite, bituminous coal, and coal waste materials”, Applied and Environmental Microbiology, 96-97, pp. 1~8. (2012).
6. Haider, R., Ghauri, M.A., SanFilipo, J.R., Jones, E.J., Orem, W.H., Tatu, C.A., Akhtar, K., Akhtar, N., “Fungal degradation of coal as a pretreatment for methane production”, Fuel, 104, pp.717~725. (2013).
 7. Krüger, M., Beckmann, S., Engelen, B., Thielemann, T., Cramer, B., Schippers, A., and Cypionka, H., “Microbial methane formation from hard coal and timber in an abandoned coal mine”, Geomicrobiology Journal, 25, pp. 315~321. (2008).
 8. Harris, S.H., Smith, R.L., and Barker, C.E., “Microbial and chemical factors influencing methane production in laboratory incubations of low-rank subsurface coals”, International Journal of Coal Geology, 76, pp.46~51. (2008).
 9. Huang Z., Urynowicz, M.A., Colberg, P.J.S., “Bioassay of chemically treated subbituminous coal derivatives using Pseudomonas putida F1”, International Journal of Coal Geology, 115, pp.97~105. (2013).
 10. Shelton, D.R. and Tiedje, J.M., “General method for determining anaerobic biodegradation potential”, Appl Environ Microbiol, 47(4), pp.850~854. (1984).
 11. APHA, AWWA, and WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. (1998). 