

## 생물질에너거리용에서 저온메탄발효기술의 발전동향

문 혜 경

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《풍력과 조수력, 생물질과 태양에너지에 의한 전력생산을 늘이며 자연에너지의 리용범위를 계속 확대하여야 합니다.》

세계적으로 경제가 급속히 발전하고있는 오늘 에너지자원이 매우 빠른 속도로 소비되고있으며 그 요구량도 계속 증대되고있다. 매장량이 제한되어있는 원유나 석탄과 같은 화석에너지자원이 계속 줄어드는것과 관련하여 많은 나라들에서는 에너지에 대한 수요를 보장하기 위하여 생물질에너지의 개발과 리용에 힘을 집중하고있다.[1, 6, 7, 9, 10]

생물질에너지는 태양에너지를 화학에너지형식으로 생물질안에 저축시켜놓은 에너지의 한 형태이다. 생물질에너지는 주로 식물의 빛합성작용에 의하여 얻어진다. 이러한 생물질에너지는 그 어디에나 널리 분포되어있으며 생산량이 많고 재생가능하면서도 그 리용이 안전하다. 생물질의 생산과정에 흡수되는 CO<sub>2</sub>의 량은 그것이 연소되는 과정에 배출되는 CO<sub>2</sub>량과 같으며 SO<sub>2</sub>배출이 거의 없으므로 생물질에너지는 생태환경을 파괴시키지 않으면서도 재생시킬수 있는 에너지원천으로 된다. 생물질에너지는 고체, 액체, 기체상태의 연료로 거듭 가공하여 변화시킬수 있으며 저장과 수송에 편리하다.

최근에 생물질에너지는 석탄, 기름, 천연가스 다음가는 제4위의 에너지원으로 되고있다. 생물질에너지는 주로 생물디젤유와 같은 직접적인 연소나 메탄가스생성과 같은 생화학적변화, 식물성기름과 같은 새로운 물질의 합성 등에 리용된다.

자료에 의하면 어느 한 나라에서는 생물질에너지를 리용하여 전기를 생산하고있는데 생물질에너지발전능력이 1만MW를 초과한다.[14] 이것은 당시 이 나라에서 소비하는 재생에너지자원의 50.4%에 해당한것으로서 기타 41.9%는 수력발전에 의한것이고 나머지는 태양에너지와 풍력에너지에 의한것이다.

이러한 생물질에너지의 리용에서 가장 주목되는것은 메탄가스의 개발리용이다.[2, 8, 15] 메탄가스는 농축산폐설물과 가정에서 생기는 동식물성폐설물을 리용하여 얻을수 있으므로 그 원천이 풍부하며 생산비와 운영비가 적게 들기때문에 주요생물질에너지자원으로 되고있다.

메탄가스는 유기물질이 혐기적조건에서 미생물에 의해 발효되면서 생성되는 가스로서 그 주요성분은 메탄(CH<sub>4</sub>)과 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)이고 그밖에 적은 량의 수소(H<sub>2</sub>)와 질소(N<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 류화수소(H<sub>2</sub>S), 암모니아(NH<sub>3</sub>) 등이 들어있다. 보통 메탄가스속의 메탄함량은 50~70%, 이산화탄소의 함량은 30~40%이고 기타 성분들의 함량은 매우 적다.[5, 7]

메탄가스속의 주요가연성성분은 메탄이며 메탄가스의 발열량은 21 000~25 000kJ/m<sup>3</sup>로서 이것은 0.69m<sup>3</sup>의 천연가스가 연소될 때 나오는 열량에 해당된다.

메탄가스를 생산하는 메탄발효는 발효온도와 원료투입방식 등에 따라 몇가지로 구분할수 있다. 일반적으로 발효온도에 따라서는 12~30℃에서의 저온발효, 32~38℃에서의 중온발효, 52~58℃에서의 고온발효로 나눈다.

한편 메탄발효공정은 리용범위에 따라 가정용, 대형 및 중형메탄발효공정으로 나눈다.

가정용메탄발효공정은 주로 아시아에서 널리 쓰이고있는데 중국의 수압식메탄발효탱크와 인디아의 띄우개식메탄발효탱크가 그 전형적인 실례이다. 대형 및 중형메탄발효공정에서는 주로 농업폐설물, 공업폐수, 도시유기폐설물, 감탕 등 생물질폐설물을 처리하여 메탄가스를 얻는데 도이칠란드, 단마르크, 오스트리아와 같은 나라들에서는 이러한 대형 및 중형메탄발효를 위하여 메탄발효설비와 그 조립기술을 표준화, 계열화, 공업화하고있다.[3-5] 도이칠란드에서는 이러한 대상이 1990년에 100개였던것이 2007년에는 3 750개(농업폐설물을 처리하여 메탄가스를 생산하는 대상은 약 2 700개)로 늘어났다.

메탄발효의 주원료는 사람과 집짐승의 배설물, 오수 등이다.

현재 메탄발효기술은 여러가지 기술을 결합한 생태농업응용형식으로 발전하고있다. 여기서 중요한것은 작물재배, 양어, 메탄발효 등이 유기적으로 결합되어있어 물질의 순환과 에네르기의 계단식리용이 보장되고있는것이다.

메탄발효기술은 유기폐설물의 매몰량과 연소량을 줄이고 그것이 에네르기순환체계에 들어가도록 하는 방향으로 발전하고있다.

흐름공정은 대체로 4단계 즉 전처리, 혐기적분해, 가스정화 및 회수, 발효잔여물처리로 되어있는데 이와 같은 방법으로 1t의 유기폐설물로부터 생산할수 있는 메탄가스량은  $100 \sim 200\text{m}^3$  정도이다. 그런데 이러한 메탄발효는 초기발효시동시간이 느리고 가스생성량이 적은것을 비롯하여 실전에서 여러가지 문제들이 제기되고있다. 그 주되는 원인은 메탄생성세균이 엄격한 혐기성세균인것과 관련되어있다. 그러므로 메탄생성세균이 유기질분해균의 작용에 의하여 생성된 발효산물을 기질로 하여 메탄가스를 생성하는 단계는 메탄발효과정의 률속단계라고 말할수 있다. 이로부터 세계적으로 가스생성시간을 단축하고 가스생성능력을 높이는데 효과적인 균종을 찾기 위한 연구가 활발히 진행되고있다.

메탄생성세균은 유기질분해미생물의 작용에 의하여 고분자유기물질이 저분자유기물질로 전환된 다음에야 그것을 기질로 하여 메탄을 생성한다. 그러므로 유기질분해미생물에 대한 연구는 메탄발효시동시간을 줄이는데서 매우 중요하다.

최근 어느 한 나라에서는 섬유소분해균과 리그닌분해균 등으로 구성된 생물복합균제를 개발하였는데 이 생물복합균제를 곡짚에 전처리[16, 17]하여 발효탱크에 넣으면 메탄발효시동시간을 줄이고 가스생성량을 늘일수 있다. 현재 이 복합균제의 연간생산량은 1 200t이라고 한다.

한 연구자는 섬유소에 대한 전처리를 진행하여 섬유소의 전환효율을 높였다. 섬유소에 대한 물리화학적인 전처리방법은 현재 비교적 많이 리용되고있는 기술이지만 요구되는 부지면적이 넓고 에네르기소모가 많은 결함을 가지고있다. 또한 화학적인 전처리과정에 환경오염물질이 배출되고 잔여물질들이 다음단계의 발효미생물들의 생장에 나쁜 영향을 주게 된다. 그러므로 주로 생물효소제제나 섬유소분해효소를 생성하는 미생물균그루로 전처리를 진행하는 생물학적전처리방법으로 유기질분해에서 현저한 효과를 보고있다.[16]

메탄발효기술에서 가장 절실하게 나서는 문제는 또한 온도가 낮은 겨울철에 메탄발효효과를 높이는것이다. 이 문제를 해결하기 위하여 많은 연구들이 진행되고있는데 그중 제일 광범하게 리용되는 방법이 외부적으로 메탄발효계의 온도를 보장하는 방법이다.

우선 박막온실을 지어 메탄발효탱크의 온도를 높여주는 방법이 있다.[11] 이 방법에서는 큰 박막온실안에 메탄발효탱크를 만들고 거기서 남새를 재배하면서 태양에네르기를 리용하여 발효탱크의 온도를 높여 메탄가스를 생산한다. 이 기술을 리용하면 발효탱크온도를 대기온도에 비하여 보통  $6 \sim 15^\circ\text{C}$ , 최대로  $20^\circ\text{C}$  이상 높일수 있는데 이때 메탄발효탱크의 온도는  $12^\circ\text{C}$  이상 된다. 이러한 온도에서는 겨울철메탄발효를 정상적으로 보장할수 있다.

다음으로 불을 때서 발효탱크의 온도를 높여준다. 이 방법에서는 메탄발효탱크의 둘레에 고리모양 또는 반원모양으로 톱밥이나 농작물곡짚을 일정한 비율의 물과 혼합하여 채워넣고 한겨울동안 불을 때서 온도를 높여주는데 에너거리를 절약하면서도 온도를 높일수 있는 효과적인 방법이지만 많은 량의 곡짚을 소비하고 환경을 세계 오염시키는 결함을 가지고있다.

다음으로 부엌에서 방안을 통하여 나가는 더운 연기가 발효탱크의 온도를 높이도록 하는 방법이 있다. 이 방법은 대형 및 중형메탄발효공정에는 도입하기 어려운 결함을 가지고있다.

다음으로 단열재료보온법이 있다. 이 방법은 현재 평지대에서 많이 리용되고있는데 땅 바닥에 닿는 메탄탱크의 면을 단열재료로 보온하여 탱크와 땅의 열전도통로를 차단한다. 결국 땅이 얼면서 메탄가스탱크의 온도가 내려가는것을 방지하고 메탄가스탱크안의 열이 경계면에 있는 땅층으로 전도되는것을 차단하여 탱크안의 온도를 유지한다. 이 기술을 도입하면 원료액의 온도가 내려가는 속도를 늦출수 있으며 겨울철에 정상적인 메탄발효를 담보할수 있다.

다음으로 메탄발효탱크겉면에 짚이나 마른 풀 같은것을 덮어 보온하는 방법이 있다. 이 방법은 덮는 재료로 곡짚이나 마른풀, 거름, 흙 같은것을 두텁게 덮어 보온하는 방법인데 이것은 일정한 보온효과는 가지고있지만 가정용메탄발효탱크에서만 리용할수 있는 제한성을 가지고있다.

다음으로 메탄발효탱크주변에 고리모양으로 도랑을 파서 보온하는 방법이 있다. 메탄발효탱크주변에 고리모양으로 도랑을 파고 도랑안에 두엄을 쌓아놓아 발효될 때 나오는 열을 리용하여 보온하는 방식으로 거름이 썩을 때 나오는 발효열을 효과적으로 리용할수 있지만 발효탱크주변환경을 일정하게 오염시킬수 있는 결함을 가지고있다.

다음으로 곡짚폐기물을 연소시키는 방법이 있다. 이 방법은 오래전부터 리용되어온 방법의 하나로서 메탄발효계의 온도를 일정하게 높일수 있지만 열리용효율이 낮고 주위환경에 2차오염을 산생시킬수 있는 제한성을 가지고있다.

다음으로 비닐박막으로 메탄발효장치의 옷면을 덮고 박막우에 항시적으로 마른풀을 쌓아놓아 온도를 보장하는 방법이 있는데 이것은 효과가 뚜렷하지 못하다.

또한 더운물보이자로 메탄발효탱크를 가열하는 방법이 있다. 석탄을 때서 물을 가열할 때 나오는 증기를 리용하여 메탄가스탱크내부온도를 높이는 방법으로서 메탄발효탱크의 온도를 높이는 목적은 달성할수 있지만 많은 량의 석탄이 요구되는 결함을 가지고있다.

이외에도 태양에너거리를 리용하는 방법을 비롯하여 여러가지가 있는데 우리 나라에서도 겨울철에 메탄발효탱크의 온도를 자연열로 높이기 위한 연구들이 진행되었다.

그중 한가지 방법을 보면 발효탱크에 들어가는 원료의 농도를 액상지하식발효탱크에서보다 3배정도 더 높이고 발효탱크를 땅에서 1m정도 띄워 설치한 다음 여름에는 탱크겉면에 피치를 발라 발효액의 온도를 높이고 겨울에는 탱크둘레에 1.0~1.5m 두께로 두엄을 쌓아 여기서 생기는 발효열로 탱크안의 온도를 30℃이상 높이는것이다.[1]

이상에서 본바와 같이 저온에서의 메탄발효효과를 높이기 위하여 발효탱크의 온도를 높이는 많은 물리적방법들이 연구개발되었지만 어느 방법이나 원가와 로력이 많이 들고 환경오염을 일으킬수 있는 제한성을 가지고있다.

이로부터 원가를 적게 들이면서도 환경오염을 일으키지 않으며 낮은 온도에서도 메탄발효계를 활성화시킬수 있는 새로운 방법으로서 저온메탄발효미생물을 리용하는 생물학적방법에 연구의 초점이 집중되고있다.[16, 18, 19]

저온메탄발효는 비교적 낮은 온도에서 진행되는 메탄발효로서 일반적으로 15℃정도까지 발효가 진행되고 10℃아래의 온도에서는 발효균무리의 정상생리활성이 억제되어 메탄

가스생성이 거의 불가능한것으로 되어있다. 이로부터 오래전부터 온도가 낮은 겨울철에 메탄발효를 정상적으로 진행하여 메탄가스를 생산하기 위한 연구가 진행되었는데 특히 저온 발효미생물을 리용한 메탄발효에 대한 연구가 심화되었다.

세계적으로 저온메탄생성고세균에 대한 연구는 비교적 일찌기 진행되었다. 1992년에 호랭성메탄생성고세균 *Methanococcoides burtonii*가 발견된 때로부터 지금까지 많은 저온성메탄생성고세균들과 혐기성균들이 순수분리되었으며 그것들의 물질대사특성과 분자적물림새가 연구되었다.[7, 14, 15, 19]

저온메탄세균들의 분리원은 주로 북극이나 남극, 바다밑 침적물, 영구동토대, 진펄땅들인데 분리된 저온균들가운데서 저온적응성이 높은 균그루들을 생산에 널리 리용하고있다.[14]

어느 한 연구자는 저온조건에서 섬유소분해복합균계 H11와 CBC를 분리하였는데 이 미생물들은 섬유소를 분해하여 메탄을 생성하는 동시에 pH를 7.0~7.5로 조절할수 있다.[1] 이 두종의 복합균계는 호기성균, 통성혐기성균과 절대혐기성균들로 구성되어있는데 호기성균은 절대혐기성균에 대하여 혐기적환경을 마련해주어 절대혐기성균이 안전하게 성장할수 있게 해준다고 보고있다. 연구자료에 의하면 10~20℃사이의 온도범위에서 시험을 진행한 결과 2개의 복합균계가 낮은 온도범위에서 견딜성이 높았으며 30~40℃의 높은 구간에서도 섬유소를 효과적으로 분해하였다. 이러한 균그루들은 보통환경속에서도 계속 성장할수 있다.

또 다른 연구자는 4가지 균종의 발효액을 해당한 비율로 복합하여 만든 메탄발효복합균계[15]를 제조하고 그 기술을 특허로 제기하였다. 이 복합균계에서 두 종류는 유기질분해균이고 나머지 두 종류는 메탄생성세균이다. 유기질분해균중 하나는 섬유소를 분해하여 두당류와 단당류를 만들고 다른 하나는 만들어진 당을 리용하여 H<sub>2</sub>과 CO<sub>2</sub>, 젖산, 초산, 버터산, 에타놀과 부타놀 등의 물질을 만든다. 이 발효산물을 생장기질로 하여 나머지 두 종류의 메탄생성세균이 메탄가스를 생성하는것으로 본다.

최근에는 3~5℃에서 생육하는 호랭성미생물을 분리하여 메탄가스생산에 적용함으로써 가스생산성을 28% 높였으며[13] 10~15℃의 저온에서 순화시킨 오니를 리용하여 하루메탄가스생산량을 0.2m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)이상, 최대로 0.3~0.5m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)까지 높였다.[12, 18]

이처럼 오늘날 에네르기분야에서 생물질에네르기자원을 적극적으로 개발리용하기 위한 연구가 활발히 진행되고있고 특히 메탄가스생산효과를 높이기 위한 연구에서 커다란 전진이 이룩되고있다.

## 참고문헌

- [1] 전명일; 메탄가스생산리용을 이렇게 하였다, 농업출판사, 16~17, 주제88(1999).
- [2] Rimika Kapoor et al.; Applied Energy, 208, 1379, 2017.
- [3] Dingnan Lu et al.; Biomass and Bioenergy, 127, 105266, 2019.
- [4] J. R. Adhikari et al.; Renewable Energy, 143, 1406, 2019.
- [5] Ahrumi Park et al.; Separation and Purification Technology, 183, 358, 2017.
- [6] Li Yue et al.; Applied Energy, 240, 120, 2019.
- [7] Xingyao Meng et al.; Bioresource Technology, 241, 1050, 2017.
- [8] S. Singh et al.; Energy Conversion and Management, 37, 4, 417, 1996.
- [9] F. Authors et al.; Water Research, 163, 114851, 2019.
- [10] 高星爱 等; 中国沼气, 32, 3, 14, 2014.
- [11] 吴德让 等; 农业工程学报, 10, 1, 137, 1994.

- [12] 丁福贵 等; 中国沼气, **32**, 2, 36, 2014.
- [13] 代欢 等; 可再生能源, **32**, 3, 354, 2014.
- [14] 张无敌 等; 新能源, **1**, 2, 2000.
- [15] 王彦杰 等; 发明专利, **7**, 3, 2011.
- [16] 张宝心 等; 可再生能源, **31**, 1, 57, 2013.
- [17] 石卫国; 农业工程学报, **22**, 1, 93, 2006.
- [18] 李静 等; 安徽农业科学, **37**, 27, 12894, 2009.
- [19] 赵忠宝 等; 太阳能杂志, **17**, 35, 2011.

주체109(2020)년 4월 5일 원고접수

## **Developmental Tendency of Low-Temperature Methane Fermentation Technology for Biomass Energy Usage**

*Mun Hye Gyong*

With the increase of energy consumption and wastes generation due to human activities, methane fermentation, a technology which turns wastes into biogas, is receiving more and more attention in the world. However, low temperature leads to low activity and growth rate of methanogens, and consequently to low CH<sub>4</sub> production rate. So new strategies to increase the CH<sub>4</sub> production at low temperature are needed.

**Keywords:** methane fermentation, biomass energy, microorganism