

# 유기성 폐기물 자원화의 생물공학적인 원리

〈상〉



김학성

(한국과학기술원 생물공학과 부교수)

## 목 차

### I. 서론

### II. Biomethanation

1. Biogeochemical cycle for carbon
2. Methane and Methanogenesis
3. Methane-producing Bacteria : Methanogenes
4. Biochemistry of CO<sub>2</sub> Reduction to CH<sub>4</sub>
5. Autotrophy in Methanogens
6. Acetate와 Methyl Compounds로 부터의 메탄 생성
7. Energetics of Methanogenesis
8. Anaerobic Digestion of Organic Carbon to Methane
9. Sulfate Inhibition of Methanogenesis
10. Stoichiometry of Methanogenesis

### III. Composting

1. Composting의 일반적 특징
2. Biochemical Reaction
3. Composting에 관련된 미생물
4. Environmental Requirements

### IV. 참고문헌

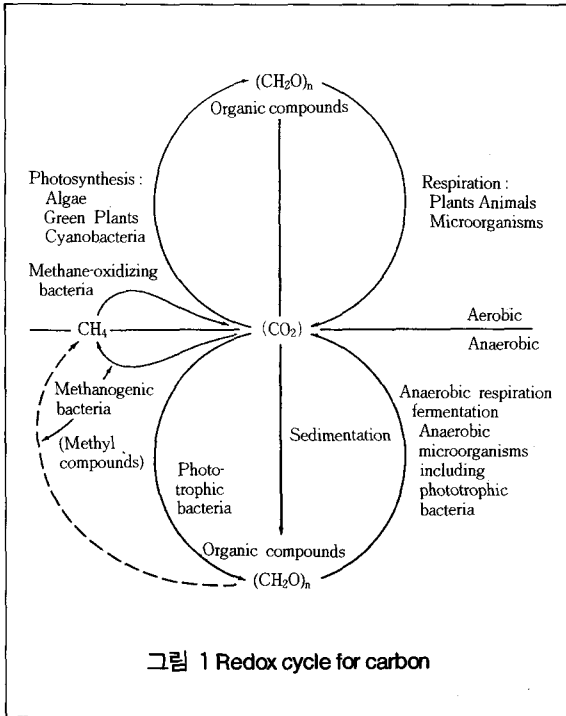
### I. 서론

유기성 폐기물을 생물학적으로 처리할 경우 극심한 환경오염을 예방할 수 있으며 더구나 이로 부터 효용성 있는 자원을 얻을 수 있다면 일석이조의 효과를 갖게 된다. 이런 측면에서 유기성 폐기물로부터 에너지를 얻을 수 있는 biomethanation과 biocomposting에 많은 관심이 고조되고 있다. 본 장에서는 biomethanation과 biocomposting에 관한 생물학적인 분석을 통해 대규모의 plant건설시 설계에 필요한 변수를 파악하고 또한 유기성 폐기물 자원화의 효율을 높일 수 있는 기본적인 원리를 설명하고자 한다.

### II. Biomethanation

#### 1. Biogeochemical Cycle for Carbon

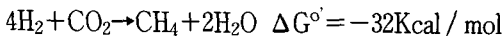
탄소순환은 모든 생물계에서 가장 중요한데 기본적인 탄소의 순환계는 그림 1과 같다. 탄소는 3종류의 산화된 형태로 존재하는데 가장 환원된 상태인 메탄(CH<sub>4</sub>), 그리고 일반적인 탄수화물 형태인 (CH<sub>2</sub>O)<sub>m</sub>



그리고 가장 산화된 형태인 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)가 있다. 이외에 일산화탄소(CO)가 미량으로 탄소순환에 관련되어 있다. 탄소순환에서 각 단계의 중요성을 인식할 수 있는 여러 탄소물질의 양과 체류시간은 표 1과 같다.

## 2. Methane and Methanogenesis

메탄은 전체 탄소순환에서 작은 부분을 차지하지만 혐기성 미생물 대사의 산물이기 때문에 유기성 폐기물의 자원화 뿐만 아니라 미생물학적인 차원에서도 매우 중요하다. 메탄은 고도로 선별된 methanogenic bacteria에 의하여 혐기조건에서 생성된다. 이 경우 이산화탄소가 혐기호흡에서 최종전자수용체로 작용하며 H<sub>2</sub>가 전자공여체로 이용된다. 전체적인 메탄생성 반응은 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다.



위 식에서 보듯이 이산화탄소를 환원시켜서 1mol의 메탄을 생성하는데 8개의 전자가 이동하게 된다. 이산화탄소 이외에 메탄올(CH<sub>3</sub>OH), formate(HCOO<sup>-</sup>), methylmercaptan(CH<sub>3</sub>SH), acetate(CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>), 그

환경관리인. 1992. 9

표 1. Carbon reservoirs and residence times

Component	Reservoir (grams)	Residence time (years)	Main removal process
Atmosphere:			
CH <sub>4</sub> (1.6 ppm*)	3.6×10 <sup>15</sup>	3.6	Photochemical oxidation in atmosphere
CO(0.1 ppm)	0.3×10 <sup>15</sup>	0.1	Photochemical oxidation in atmosphere
CO <sub>2</sub> (320 ppm)	670×10 <sup>15</sup>	4	Plant photosynthesis
Land:			
Living organic (mainly Plants)	500-800×10 <sup>15</sup>	16(plants)	Death grazing: predation
Dead organic	700-1200×10 <sup>15</sup>	40	Microbial decomposition to CO <sub>2</sub>
Oceans:			
Living organic	6.9×10 <sup>15</sup>	0.14	Death: grazing: predation
Dead organic	760×10 <sup>15</sup>	19	Microbial decomposition
Inorganic	40,000×10 <sup>15</sup>	100,000	Formation of carbonate rocks: CO <sub>2</sub> exchange with the atmosphere
Sediments and rocks	72,500,000×10 <sup>15</sup>	300×10 <sup>6</sup>	Weathering: fossil fuel burning

\*Parts per million μg gas / cm<sup>3</sup> of air.

리고 methylamines 등도 기질로 이용될 수 있다. 메탄 생성 미생물에 의해 메탄으로 전환되는 기질을 표 2에 나타냈다.

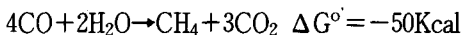
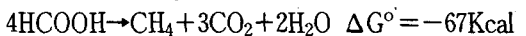
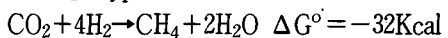
표 2. Substrates converted to methane by various methanogenic bacteria

CO<sub>2</sub>-type substrates: Carbon dioxide CO<sub>2</sub>, Formate HCOOH, Carbon monoxide CO  
 Methyl substrates: Methanol CH<sub>3</sub>OH, Methylamine CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub><sup>+</sup>, Dimethylamine (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>NH<sub>2</sub><sup>+</sup>, Trimethylamine (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>NH<sup>+</sup>  
 Acetoclastic substrate: Acetate CH<sub>3</sub>COOH

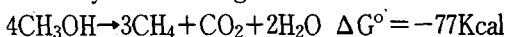
## 3. Methane-producing Bacteria: Methanogenes

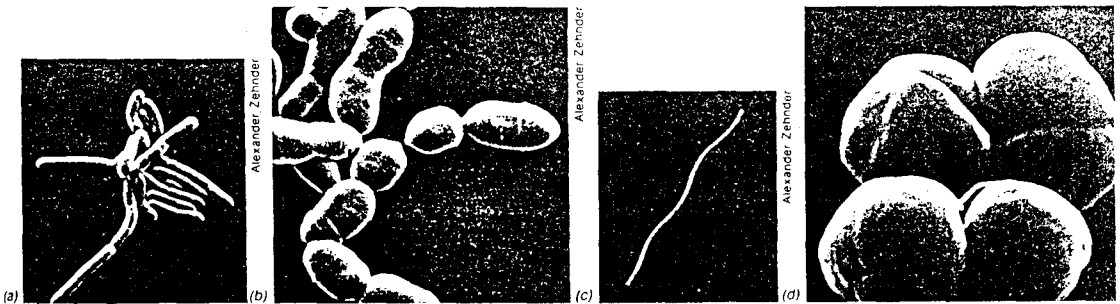
메탄 생성균은 혐기조건에서 여러 기질로부터 메탄을 생성하게 되는데 이때 각 기질에 따라 에너지가 생성되어 ATP합성에 이용되게 된다. 각 기질에 따른 전체적인 반응식은 다음과 같다.

a. CO<sub>2</sub>-type 기질



b. Methyl-Containing 기질

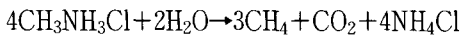




Scanning electron micrographs of whole cells of methanogenic bacteria, showing the considerable morphological diversity. (a) *Metbanobrevibacter ruminantium*. (b) *Metbanobacterium* strain AZ. (c) *Metbanospirillum bungatii*. (d) *Metbanosarcina barkeri*.

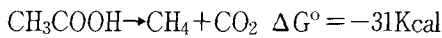


그림 2 Transmission electron micrographs of methanogenic bacteria. (a) *Metbanobrevibacter ruminantium*. (b) *Metbanosarcina barkeri*, showing the thick cell wall and the manner of cell segmentation and cross-wall formation.



$$\Delta G^\circ = -55\text{Kcal}$$

c. Acetoclastic기질



이 반응은 두 가지 종류의 미생물인 *Methanosarcina* 와 *Methanotrix*에 의해서만 일어나게 된다.

### 3.1. 메탄 생성균의 종류

형태학적인 측면에서 메탄 생성균을 분류하면 표 3 과 같고 각 군에 속하는 박테리아의 형태는 그림 2와 같다. 일반적으로 amino sugar와 peptide crosslinks를 포함하는 peptidoglycan과 비슷한 구조를 갖는 Pseudomurein이 *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter* 그리고 *Methanobacterium*에 존재하며 대부분의 다른 메탄 생성균은 단백질을 포함한 세포벽을 형성하고 있

배양측면에서 메탄생성균의 성장은 acetate와 여러 아미노산에 의해 촉진되며, 비타민으로 riboflavin, pantothenic acid, thiamin, biotin 그리고 p-aminobenzoate를 요구하는 것으로 알려져 있다. 질소원으로는 주로  $\text{NH}_4^+$ 를 이용하며 일부는 질소 고정을 하는 것으로 보고되고 있다. 금속이온으로 니켈이 모든 메탄생성균에 필요한데 이는 factor  $\text{F}_{430}$ 이라는 조효소에 꼭 필요하기 때문이다.

표 3. Characteristics of methanogenic bacteria

Genus	Morphology	Gram reaction	Number of species	Substrates for methanogenesis	DNA (mole % GC)
GROUP I					
Methanobacterium	Long rods	+ or	3	H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> , formate	33-50
Methanobrevibacter	Short rods	+	3	H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> , formate	27-32
GROUP II					
Methanobermus	Rods	+	2	H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub>	33
GROUP III					
Methanococcus	Irregular cocci	-	6	H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> , formate	31-540
GROUP IV					
Methanomicrobium	Short rods	-	2	H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> , formate	45-49
Methanogenium	Irregular cocci	-	4	H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> , formate	51-61
Methanospirillum	Spirilla	-	1	H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> , formate	46-50
GROUP V					
Methanosarcina	Large irregular cocci in packets	+	3	H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> , formate, methanol, methylamines acetate	41-43
Methanococoides	Irregular cocci	-	1	methanol, methylamines	42
Methanotrix	Long rods to filaments	-	2	Acetate	52

다. 메탄 생성균은 Gram 양성균과 음성균이 존재하기 때문에 염색방법으로 분류하기는 어려우며 주로 16S rRNA의 sequence를 비교하여 구분된다.

배양측면에서 메탄생성균의 성장은 acetate와 여러 아미노산에 의해 촉진되며, 비타민으로 riboflavin, pantothenic acid, thiamin, biotin 그리고 p-aminobenzoate를 요구하는 것으로 알려져 있다. 질소원으로는 주로 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>를 이용하며 일부는 질소 고정을 하는 것으로 보고되고 있다. 금속이온으로 니켈이 모든 메탄생성균에 필요한데 이는 factor F<sub>430</sub>이라는 조효소에 꼭 필요하기 때문이다. 철과 cobalt도 메탄생성균의 성장에 요구되는 금속들이다.

### 3.2. 메탄생성균의 coenzymes

다른 미생물에서는 발견되지 않고 메탄생성균에서만 나타나는 coenzyme의 구조는 그림 3과 같으며 각각의 특성은 다음과 같다.

#### a. Coenzyme F<sub>420</sub>

Flavin 계통의 조효소인 FMN의 유도체로서 coenzyme F<sub>420</sub>은 두개의 전자전달체로서 reduction potential이 -0.37 volts이고 혐기성 세균의 ferredoxin과 비슷

한 역할을 한다.

이 조효소는 hydrogenase, NADP<sup>+</sup> reductase 등과 작용하며 electron donor로서 이산화탄소의 환원에 관여한다. 산화된 형태의 F<sub>420</sub>은 420 nm에서 흡광도를 나타내며 blue green의 형광색을 발한다. F<sub>420</sub>이 나타내는 형광은 일차적으로 메탄생성균을 선별하는 지표가 된다.

#### b. Coenzyme F<sub>430</sub>

F<sub>430</sub>은 니켈을 포함하는 tetrapyrrole로서 430 nm에서 흡광도가 최대이며 형광을 발하지 않는다. Methyl reductase의 일부로서 메탄생성의 마지막 단계에 관계하는 조효소이다. 메탄생성균이 니켈 금속을 요구하는 것은 F<sub>430</sub>에 주로 필요하기 때문이다.

#### c. Methanofuran

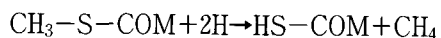
이산화탄소가 환원되는 첫 단계에 작용하는 조효소로서 phenol기와 2개의 glutamic acid가 포함되어 있고 예외적으로 dicarboxyl fatty acid를 포함하고 있다.

#### d. Methanopterin

Pterin 구조를 갖고 있으며 밝은 청색의 형광을 내며 342nm에서 최대 흡광도를 나타내기 때문에 F<sub>432</sub>라 불려졌다. Folic acid와 유사하며 이산화탄소가 메탄으로 환원되는 과정에서 C-1 carrier의 역할을 한다.

#### e. Coenzyme M(2-mercaptoethanesulfonic acid)

메탄 생성의 최종단계에서 methyl 기의 전달역할을 하며 메칠기는 methylreductase와 F<sub>430</sub>의 혼합체에 의해 메탄으로 환원된다.



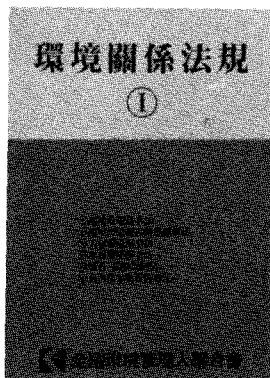
Rumen의 메탄생성균인 Methanobrevibacter ruminantium의 경우 Coenzyme M이 성장인자로 이용되는데 이것은 CoM이 비타민으로 작용되는 것을 의미한다. Coenzyme M은 유사물질인 bromoethanesulfonic acid (Br-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-SO<sub>3</sub>H)에 의해 methyl reductase의 역할이 저해를 받는데 10<sup>-6</sup> M에서 reductase의 역가가 50%로 감소하게 된다.

#### f. Component B

Methyl reductase에 의한 methanogenesis의 마지막 단계에서 electron donor로 작용하는 것으로 추측되는데 정확한 반응기작은 알려져 있지 않다. 구조는 비타민의 일종인 pantothenic acid와 유사하다.

(다음호에 계속)

본연합회에서는 수질, 대기환경보전법, 소음·진동규제법, 유해화학물질관리법의 시행령과 시행규칙이 개정됨에 따라 환경관계법규(Ⅰ)을 새로 발행했습니다.



◀ 환경관계법규(Ⅰ)  
 (4×6배판, 730쪽,  
 정가 15,000원)

서적명	정가	발행처
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 환경관계법규(Ⅰ)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• 환경정책기본법</li> <li>• 환경오염피해분쟁조정법</li> <li>• 소음·진동규제법</li> <li>• 수질환경보전법</li> <li>• 유해화학물질관리법</li> <li>• 대기환경보전법</li> </ul> </li> </ul>	15,000원	본 연합회
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 환경관계법규(Ⅱ)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• 폐기물관리법</li> <li>• 합성수지폐기물처리사업법</li> <li>• 오수·분뇨·축산폐수처리법률</li> <li>• 해양오염방지법</li> <li>• 오존층보호를 위한 법률</li> <li>• 환경범죄 특별 조치법</li> </ul> </li> </ul>	12,000원	〃
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대기오염, 소음·진동공정시험방법</li> <li>• 수질오염 공정시험방법</li> <li>• 폐기물 공정시험방법</li> <li>• 환경기술표준화</li> <li>• 폐수처리기술</li> <li>• 폐기물처리기술(이론)</li> <li>• 폐기물처리기술(문제집)</li> <li>• 환경기술사 문제 해설집</li> <li>• 폐기물처리기사 시험 문제집</li> </ul>	10,000원 8,000원 4,000원 5,000원 5,000원 12,000원 12,000원 12,000원 14,000원	〃 〃 〃 〃 환경관리연구소 〃 〃 〃 홍문관

※ 구입처 : 전국환경관리인연합회 ☎ 837-1964~5  
 환경관리연구소 ☎ 859-6333~5  
 홍문관 ☎ 718-9996~7

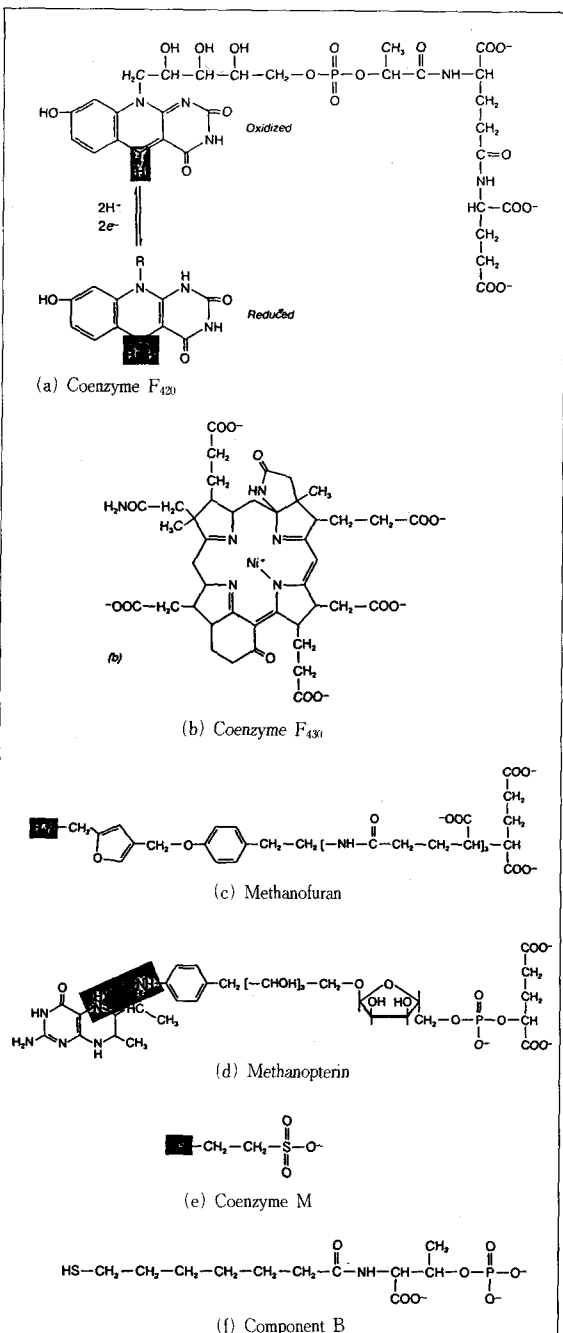


그림 3 Coenzymes unique to methanogenic bacteria. The atoms shaded in color are the sites of oxidation-reduction reactions(F<sub>420</sub>) or the position to which the C-1 moiety is attached during the reduction of CO<sub>2</sub> to CH<sub>4</sub>(methanofuran, methanopterin, and coenzyme M).