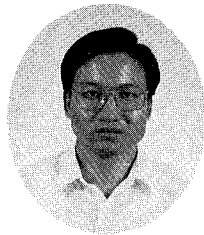


# 유기성폐기물 자원화의 생물공학적 원리

〈하〉



김화성

〈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

### 3. Composting

유기물이 생물학적으로 분해되고 안정화 되면서, 저장하거나 토지의 fertilizer로 이용될 수 있는 최종산물이 형성되는 것을 composting이라 한다. 이 경우 유기성 폐기물에 의한 환경오염을 예방하고 토지의 손실이나 훼손을 막을 수 있는 부식토로 이용할 수 있기 때문에 개발도상국에서 뿐만 아니라 유럽 등 선진국에서도 많은 연구가 진행되고 있다. Composting에 이용될 수 있는 폐기물로는 nightsoil, sludge, animal manures, agricultural residues, 그리고 municipal refuse 등이 있다.

Composting은 유기물이 분해되는 조건에 따라 호기 및 혐기성으로 나눌 수 있는데 일반적으로 폐수처리와 같이 호기 및 혐기성의 구분이 뚜렷한 것은 아니다. 호기성 composting은 산소존재하에서 유기물이 CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O로 분해되면서 열이 발생하는 것이며 혐기성 composting은 산소가 존재하지 않는 조건에서 유기물이 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, 그리고 여러 유기산으로 분해되는 것을 일컫는다. 호기성 composting은 진행속도가 빠르기 때문에 많은 양의 폐기물을 처리하는 경우

에 적합하며 혐기성 composting은 진행속도가 느리고 mercaptans이나 sulfides 등과 같은 중간대사산물로 인해 많은 악취를 발생시킨다. 혐기성 composting은 공정이 단순하기 때문에 개발도상국의 농촌지역에서 가정하수나 agricultural wastes를 처리하는데 많이 적용되고 있다.

### 3.1. Composting의 일반적 특징

Composting의 목적 및 장점은 다음과 같다.

- a. Waste stabilization : 유기성 폐기물이 무기물질로 전환되기 때문에 환경오염 문제를 예방할 수 있다.
- b. Pathogen inactivation : Composting이 진행되는 동안 발생하는 열에 의해 온도가 60°C 가까이 이르므로 병원성의 bacteria, virus와 helminthic ova 등을 inactivation시키는 효과가 있다. 그러므로, composting이 완료된 것들은 안전하게 fertilizer나 soil conditioner로 이용될 수 있다.
- c. Nutrient and land reclamation : 유기성 폐기물에 존재하는 N, P, K 등은 다른 물질과 결합되어 있는 상태이기 때문에 농작물 등이 쉽게 영양분으로 섭취할 수 없지만 composting이 진행되면 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>-</sup>로 전환되기 때문에 이용된다. 또한 fertilizer로 이용될 때 영양분의 손실이 적어서 경작지의 질을 높일 수 있다.
- d. Sludge drying : 일반적인 폐기성 유기물의 경우 약 80-95% 정도의 수분을 포함하고 있기 때문에 sludge collection, transportation 등에 많은 비용이 소모된다. Composting이 진행되는 동안 온도가 60°C 가까이 도달하므로 수분이 증발하여 다음 단계의 sludge이용이 용이해진다.

그러나, composting에 이용되는 유기물의 종류, 기후 및 지역에 따라서 composting이 많이 변하기 때문에 영양분의 함량이나 pathogen의 유무가 일정하지 않은 것이 가장 큰 단점이다.

### 3.2. Biochemical Reaction

Composting에 이용되는 유기성 폐기물의 조성이 매우 다르기 때문에 유기물질이 미생물에 의해 분해되는 과정도 다양한데 단백질이 분해되는 경로는 다음과 같다.

Proteins → peptides → amino acids → ammonium com-  
환경관리인, 1992.11

pounds → bacterial protoplasm and atmospheric nitrogen or ammonia

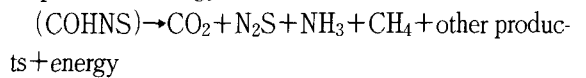
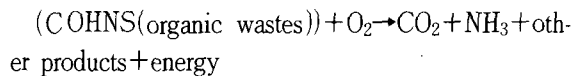
탄수화물계통이 분해되는 경우는 다음과 같다.

Carbohydrates → simple sugars → organic acids → CO<sub>2</sub> and bacterial protoplasm

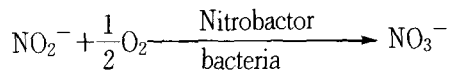
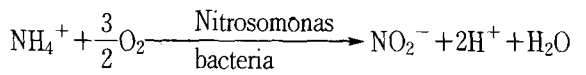
Composting이 일어나는 정확한 기작은 아직 자세히 밝혀지지 않았지만 composting이 진행되는 과정에서 온도가 변하는 정도에 따라 구분하면 다음과 같다

- a. Latent phase : 미생물이 유기성 폐기물의 새로운 환경에 적응하는 시기
- b. Growth phase : 미생물의 성장이 시작되면서 온도가 상승하고 mesophilic bacteria의 성장이 우세해지는 시기
- c. Therophilic phase : 온도가 최고치에 도달하며 유기물의 분해와 pathogen의 불활성화가 가장 활발하게 진행되는 시기

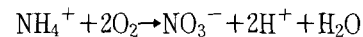
이 경우를 생물학적 반응식으로 표현하면 다음과 같다.



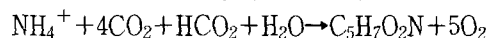
- d. Maturation phase : 온도가 mesophilic상태로 낮아지고 2차 발효가 시작되면서 nitrification이 진행되는 시기



윗 식을 같이 묶어서 정리하면 다음과 같다.



NH<sub>4</sub><sup>+</sup>는 미생물 성장의 질소원으로 이용되기 때문에 다음과 같은 반응식이 가능하다.



Nitrification과 cell synthesis를 같이 생각하면  

$$22NH_4^+ + 37O_2 + 4CO_2 + HCO_3^- \rightarrow 21NO_3^- + C_5H_7O_2N + 20H_2O + 42H^+$$

위에서 보듯이 nitrifying bacteria는 두 종류가 있어서 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>를 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>로 전환시키는 Nitrosomonas와 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>를 다시 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>로 변화시키는 Nitrobactor가 있는데

40°C 이상에서는 성장을 하지 못한다. 이 단계에서는 두번째와 세번째 consumer로 protozoa와 beetles 등이 있다.

호기조건에서의 composting은 분해속도가 빠르고 혐기성 조건에서의 composting에 비해 많은 열이 발생한다. 이때 산소의 역할은 최종전자수용체 뿐만 아니라 oxygenases의 기질로 작용한다. Oxygenases로 주로 포화탄화수소(saturated alkanes), 방향족 탄화수소(aromatic hydrocarbons), 그리고 halogenated hydrocarbons 등 미생물이 분해하기 어려운 화합물에 작용하는 효소인데 기질에 대한 특이성이 낮고 inducible하다. 반면에 혐기성 조건하에서의 composting은 적은 열의 방출로 유기물의 분해와 pathogen inactivation에 많은 시간이 소요된다.

Composting의 동력학적인 연구는 plant의 형태, 크기 및 detention time을 결정하는데 매우 중요한 역할을 하는데 호기성 composting에서 일어날 수 있는 rate-controlling steps은 다음과 같다.

- a. 미생물에 의한 extracellular hydrolytic enzymes의 분비 및 효소와 유기물과의 반응속도
- b. 큰 분자량의 유기물들이 효소에 의해 가용성의 작은 분자량으로 분해되는 속도
- c. 작은 분자량의 가용성 기질이 미생물로 전달되는 속도
- d. Composting piles사이로 전달되는 통기 속도
- f. 물에 녹은 산소가 미생물로 전달되는 속도
- g. 미생물 내에서 기질이 산소에 의해 산화되는 속도

실제로 composting plant를 설계하는 데는 다음과 같은 인자를 고려하게 된다. 즉, 유기성 폐기물의 형태와 양, 폐기물의 안정화 및 pathogen inactivation에 걸리는 시간, 숙성도, composting공정 형태, 그리고 plant의 위치 등이다. 실험실적으로 얻어진 결과와 이미 축적된 기술을 바탕으로 위의 열거한 사항들을 고려하면 효율이 높은 composting plant를 설계하는데 많은 도움이 된다.

### 3.3. Composting에 관련된 미생물

유기성 폐기물이 composting되는 경우 처음 단계는 mesophilic bacteria에 의해 분해가 진행되며 서서히 온

도가 상승함에 따라 호열성 미생물이 나타나게 된다. 온도가 65-70°C 정도 되면 대부분의 fungi, actinomycetes, bacteria는 죽게 되고 포자를 형성하는 bacteria가 주종을 이루고 마지막 단계에서는 actinomycetes가 composting pile을 흰색이나 회색으로 덮게 된다.

호열성 bacteria로는 대부분 *Bacillus*계통이며 단백질이나 탄수화물을 분해하는데 중요한 역할을 한다. 그리고 섬유소나 lignins 등은 fungi나 actinomycetes 등에 의해 대부분 분해된다. 중요한 actinomycetes로는 *Streptomyces*, *Thermoactinomyces*가 있고 fungi로는 *Aspergillus*가 대부분이다.

### 3.4. Environmental Requirements

Composting의 결과에 영향을 미치는 중요한 환경인자는 다음과 같다.

#### 3.4.1. Nutrient balance

영양소 중에 가장 중요한 것은 C/N비이고 다음에 phosphorus, sulfur, calcium 등이다. 일반적으로 유기물 중에 포함된 탄소의 20-40%가 미생물의 성장에

표5. C/N ratio of various wastes

Material	Nitrogen percentage of dry weight	C/N ratio
Nightsoil	5.5-6.5	6-10
Urine	15-18	0.8
Blood	10-14	3.0
Animal tankage	-	4.1
Cow manure	1.7	18
Poultry manure	6.3	15
Sheep manure	3.8	-
Pig manure	3.8	-
Horse manure	2.3	25
Raw sewage sludge	4-7	11
Digested sewage sludge	2-4	-
Activated sludge	5	6
Grass clippings	3-6	12-15
Nonlegume vegetable wastes	2.5-4	11-12
Mixed grasses	2.4	19
Potato tops	1.5	25
Straw, wheat	0.3-0.5	128-150
Straw, oats	1.1	48
Sawdust	0.1	200-500

From Golueke(1972); reproduced by permission of the JG Press

소모되고 나머지는 CO<sub>2</sub>로 전환된다. 형성된 biomass는 건조중량으로 탄소가 50% 그리고 질소가 5% 정도이기 때문에 C/N비는 25/1이 적당하다. 여러가지 폐기물에 있어서의 C/N비는 표 5와 같다. Composting을 시작하기 전에 폐기성 유기물의 C/N비를 적당히 25/1로 조절하여야 하는데 다음과 같은 요인으로 인해 어려움이 있다. 즉, 섬유소나 lignin 등에는 미생물에 의해 잘 분해되지 않는 부분이 많고, keratin 형태의 단백질도 분해되기 어렵다. 또한 질소고정화 bacteria인 *Azotobacter*가 존재하여 탄소의 함량을 분석하기가 어렵다.

탄소함량을 분석하는데는 2-10%의 오차한계 내에서 다음과 같은 관계식이 제안되었다.

$$\%C = \frac{100 - \text{percentage ash}}{1.8}$$

여기서 ash 함량은 500°C에서 1시간 태운 후에 남아 있는 양이다.

### 3.4.2. 수분함량

Composting에서 물은 영양분을 가용화 시키고 미생물을 이루는 중요한 요소이기 때문에 수분함량이 20% 이하가 되면 composting 자체가 많은 저해를 받게 된다. 반면에 수분함량이 너무 높으면 공기가 전달되는데 방해가 되고 영양분이 leaching되기 때문에 악영향을 미친다. 적당한 수분함량은 50-70%이며 미생물이 mesophilic과 thermophilic 성장을 하는 동안 적당한 수분함량이 계속 유지되어야 한다.

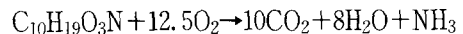
### 3.4.3. Aeration

호기적으로 composting을 진행시킬 경우 적당한 산소의 공급이 필요한데 이를 위해 mechanical 혹은 non-mechanical한 방법 등이 개발되었다. Non-mechanical한 방법의 경우 compost piles을 정기적으로 뒤집거나, perforated pipe를 삽입하는 것이며 mechanical 방법은 강제적으로 통풍시키는 것이다. 통기가 적당하지 않으면 혐기조건이 되어 composting 속도가 느리고 너무 많으면 열을 빼앗아 가기 때문에 온도가 낮아져 효

표 6. General chemical compositions of various organic materials (Haug, 1980)

Waste component	Typical chemical composition
Carbohydrate	(C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>x</sub>
Protein	C <sub>16</sub> H <sub>24</sub> O <sub>5</sub> N <sub>4</sub>
Fat and oil	C <sub>30</sub> H <sub>50</sub> O <sub>6</sub>
Sludge	
Primary	C <sub>22</sub> H <sub>30</sub> O <sub>10</sub> N
Combined	C <sub>10</sub> H <sub>19</sub> O <sub>3</sub> N
Refuse (total organic fraction)	C <sub>64</sub> H <sub>104</sub> O <sub>37</sub> N
	C <sub>99</sub> H <sub>148</sub> O <sub>59</sub> N
Wood	C <sub>295</sub> H <sub>420</sub> O <sub>186</sub> N
Grass	C <sub>23</sub> H <sub>38</sub> O <sub>17</sub> N
Garbage	C <sub>16</sub> H <sub>27</sub> O <sub>8</sub> N
Bacteria	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub> N
Fungi	C <sub>10</sub> H <sub>17</sub> O <sub>6</sub> N

율이 낮아진다. 적당한 산소공급은 폐기성 유기물이 산화될때의 반응식에 따라 조절될 수 있다. 일반적인 폐기성 유기물의 chemical composition은 표 6과 같다. 예를 들어 폐기성 유기물은 여러가지가 복합적으로 섞여 있기 때문에 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다.



### 3.4.4. 온도와 pH

온도는 composting이 진행됨에 따라 미생물의 분포가 틀리므로 mesophilic 혹은 thermophilic bacteria가 성장할 수 있도록 잘 조절하여야 하며 pH는 중성이 적당하다.

## 4. 참고문헌

1. E. J. Nyns : Biotechnology, Vol. 8, W. Schonborn ed. Verlag Chemie, 1986.
2. T. D. Brock and M. T. Madigan : Biology of Microorganisms, 5th ed., Prentice-Hall, 1988.
3. Chongrak Polprasert : Organic Waste Recycling, John Wiley & Sons, 1989. ◻

# 버리는데 연습없고 우리 국토 예비없다