

# 嫌氣性 消化에 대한 活性炭의 影響

## Effects of Powdered Activated Carbon on Anaerobic Digestion

金 承 炫  
Kim, Seung Hyun

### Summary

Importance of anaerobic digestion as an energy generating device has been increased as fuel shortage becomes serious. Several modification methods on the conventional digesters including Powdered Activated Carbon (PAC) addition and two-phase digestion were studied to enhance the gas production.

This study investigated the effects of PAC on anaerobic digestion of chicken manure in terms of gas production and sludge stabilization. As a first experiment, an optimum PAC dose for efficient gas production was determined in a batch test. In semi-continuous experiments, an optimum Sludge Retention Time (SRT) at that PAC concentration and an overall substrate utilization rate coefficient were investigated. A portion of gas increased by PAC addition was estimated using a substrate utilization rate coefficient of microorganisms attached on PAC. This test was performed in batch experiments using acetic acid as a substrate.

The digesters for all experiments were kept  $35 \pm 1^\circ\text{C}$  in a heated water bath. Mixing was performed manually once a day and the produced gas was collected for daily reading.

The following conclusions were made for this study.

1. Optimum PAC concentration was 5% total solids, where gas production rate was increased by 20 percents.
2. Optimum SRT was 7.5 days.
3. Substrate utilization rate coefficient of microorganisms attached on PAC was about twice as much as that of suspended ones.

---

키워드 : 嫌氣性消化, 메탄가스發生率, 스러지滯留時間, 活性炭濃度, 암모니아성窒素濃度, 最適滯留時間, 微生物의 最大 比增殖 速度, 擴散係數.

I. 緒 論

가축 糞尿의 嫌氣性 消化는 약 30년 前부터 연구되었고<sup>1)</sup> 기술적인 어려움과 많은 設備 費用 때문에 처음에는 糞水特性을 개선하여 처리할 가축 糞尿의 量을 줄이는 廢棄物 處理 目的에 限制的으로 사용되었다. 그러나, 가축 糞尿를 嫌氣性 消化시킬 경우 냄새와 病菌이 除去되며 消化槽 슬러지는 土壤의 物理的, 化學的 性質을 改善하고, 發生하는 메탄가스로 많은 양의 化石 燃料을 代替할 수 있으므로<sup>2, 3)</sup> 가축 糞尿의 嫌氣性 消化에 대한 관심이 커져서 이에 대한 연구가 많이 進行되고 있다.

지금까지 사용되고 있는 嫌氣性 消化槽는 낮은 有機物 負荷率과 긴 滯留時間을 採擇하고 있기 때문에 이로 인한 消化槽容積의 증가로 設備 및 運轉 費用이 비싼 短點이 있다. 따라서 經濟的인 消化槽 設備 및 運轉을 위하여, 높은 有機物 負荷를 짧은 滯留時間 동안에 處理하는 技術의 改發이 요구되고 있으며 이를 위하여 2段階 消化<sup>4)</sup> 活性炭 注入<sup>2)</sup> 등이 연구되고 있다.

본 연구에서는 3段階의 실험을 수행하는데, 첫째 실험에서는 鷄糞의 嫌氣性 消化에서 여러 가지 농도의 活性炭을 注入하여, 가스 發生을 增進시키는데 適切한 活性炭의 濃度와 이때의 가스 生産能力을 결정하고, 둘째 실험에서는 消化槽 滯留時間을 變化시켜 活性炭을 넣을 때의 最適 滯留 時間과 전체 基質 利用 速度 常數를 결정하며, 셋째 실험에서는 서로 다른 粒徑의 活性炭에 微生物을 附着시킨 후 이것을 醋酸을 基質로 하여 回分 培養시켜 活性炭에 附着된 微生物에 의한 基質 利用 速度 常數를 구하여 活性炭이 가스 發生量 增加에 끼치는 影響을 조사하였다. 醋酸을 基質로 사용한 이유는 대부분의 메탄가스가 醋酸으로부터 發生하기 때문이다.

II. 文獻研究

1. 嫌氣性 消化의 過程

嫌氣性 消化는 여러 종류의 嫌氣性 細菌을 이용하여 廢水를 處理하며, 副産物로 메탄(CH<sub>4</sub>)을 얻는 과정이다. 嫌氣性 細菌은 酸素가 供給되지 않은 상태에서 有機物을 分解하여 cell mass를 增加시키고 有機酸, 메탄 및 이산화탄소 등을 生産한다. 嫌氣性 細菌은 heterotrophic으로 炭素原과 電子供與體가 有機物이고, 化合物의 酸化 還元 反應으로 부터 에너지를 얻기 때문에 chemo organo trophic에 속한다.<sup>5)</sup>

炭水化合物, 蛋白質 그리고 脂肪 등의 高分子 化合物의 分解로 가스를 生産하는 과정은 Fig. 1과 같이 3段階가 있으며 각 段階別로 보면

첫째, cellulase, amylase, protease, lipase 등의 酵素에 의해서 高分子 化合物이 glucose, glycerol, long chain fatty acid, peptide, amino acid 등의 水溶性인 低分子 物質로 變化한다.

둘째, 첫째과정의 生成物이 有機酸菌에 의해 C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub> fatty acid, aldehyde, alcohol, 이산화탄소, 수소 등의 더욱 작은 分子의 物質로 分解된다. 이러한 物質들의 成分比는 Fig. 2에 있으며,<sup>6)</sup> 이때 關與하는 有機酸菌의 屬은 clostridium, Bacillus 그리고 propionic bacterium 등이다.<sup>7)</sup>

셋째, 두번째 과정의 生成物의 Methano bacterium, Methano bacillus, Methano coccus,

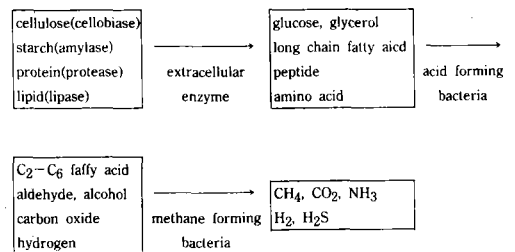


Fig. 1. 嫌氣性 消化의 생화학적 반응 단계.

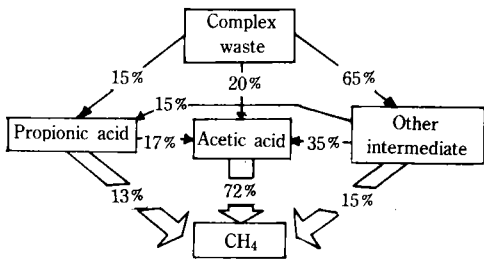


Fig. 2. 嫌氣性 消化에서 메탄생성 경로.

Methano sarcina, Methanospirillum 등의 메탄균에 의해 메탄, 이산화탄소 등의 最終 產物로 變化한다.<sup>7, 8)</sup> 이러한 과정에서 가장 잘 分解되는 것은 炭水化合物이고, 다음이 蛋白質, 脂肪의 순서이다.<sup>32)</sup>

위의 세 과정중 消化槽 滯留時間이 크면 첫 段階가 rate limiting step이지만, 체류시간이 작을 경우(35°C에서 10일) 세 階 단계가 rate limiting step이다.<sup>9, 10, 11)</sup>

## 2. 嫌氣性 消化에 影響을 주는 要因

### 가. 溫度

溫度는 嫌氣性 消化에서 매우 중요하며, 0~60°C에서는 嫌氣性 消化가 가능한 것으로 알려져 있다. 最適 溫度는 中溫(mesophilic)일 경우 30~40°C, 高溫(thermophilic)일 경우 50~60°C이며, 高溫은 中溫에 비해 빠른 反應速度, 粘性 減少로 인한 消化槽 슬러지의 奪水特性 改善, 그리고 病菌 및 寄生蟲 알의 驅除 効率 增大 등의 長點이 있으나 加熱을 필요로 하고, 環境 變化에 더 敏感한 短點이 있다. 消化槽 溫度의 選擇은 氣候를 포함한 여러가지 條件에 의해서 결정해야 한다.<sup>12, 13)</sup>

### 나. pH

消化槽 內的 pH는 有機酸 濃度, 알칼리도, 그리고 발생하는 가스의 이산화탄소 濃도와 密接한 관계가 있다. 適當한 pH의 범위는 6.8~7.5이며, pH가 6.2이하로 떨어지면 메탄균의 활동이 급격히 低下된다. 그 이유는 pH가 낮아지면 이

온화하지 않은 有機酸의 濃度가 커지고, 微生物의 細胞壁은 이온화된 有機酸보다 이온화하지 않은 有機酸을 더 잘 通過시키므로 이것이 細胞內에 많이 吸收되고, 세포內에서 이온화하여 생성된 水素 이온이 세포內의 酵素活動을 억제하기 때문인 것으로 알려져 있다.<sup>14, 15)</sup>

### 다. 毒性物質

칼슘, 나트륨, 칼륨, 마그네슘 등의 輕金屬 이온과 암모니아, 有機酸, 黃 등은 微生物의 營養物質로 필요한 것이지만, 一定濃度 이상에서는 毒性을 나타낸다. 重金屬 이온의 濃度는 낮기 때문에 鷄糞의 消化에서는 문제되지 않고, 주요 毒性 物質은 암모니아이다. 그러나 高濃度에 適應이 된 嫌氣性 細菌은 5,000~8,000 mgN/l의 암모늄 이온 濃度에서도 活動이 가능한 것으로 알려져 있다.<sup>8, 16)</sup>

### 라. 攪拌

攪拌은 微生物과 基質을 계속적으로 接觸시키고, 毒性物質의 濃度를 最小限으로 줄이며, 消化槽 內容物의 濃度를 均一하게 하여 消化槽의 有效 容積을 增大시킨다.<sup>17)</sup> 嫌氣性 消化에서는 발생한 氣泡의 上昇과 可熱로 인한 對流에 의해 약간의 自然적 攪拌이 이루어 지지만 機械式, 가스 循環式, 펌프 循環式 등의 強制 攪拌 方法이 사용되기도 한다. 機械式은 프로펠러 등을 이용하여 攪拌 시키는 것이며, 가스 循環式은 발생한 가스를 다시 消化槽로 보내서 消化槽 바닥으로부터 上昇시켜 內容物을 循環시키는 방법이다. 펌프 循環式은 加壓 펌프를 이용하여 消化槽 內容物을 噴射시켜 攪拌하는 방법이다. 이 중에서 機械式, 가스 循環式이 널리 쓰이고, 펌프 循環式은 보조적으로 사용되고 있다.<sup>32)</sup>

## 3. 嫌氣性 消化와 活性炭

嫌氣性 細菌은 原始 大氣 時代부터 存在하던 것이지만, 嫌氣性 消化가 인류에게 알려진 것은 1776년 이태리의 Volta가 시궁창 또는 湖沼에서 植物性 有機物이 腐敗할 때, 可燃性 가스가 발

생하는 것을 발견한 것이 기록상 최초이고, 이 가스가 매탄임을 증명한 것은 1804년 Dalton에 의해서이다. 嫌氣性 消化가 처음 사용된 것은 약 100년 전부터 이고, 이때는 廢水의 냄새와 슬러지 量을 줄이기 위해서였고, 沈澱과 消化의 두가지 목적에 사용되었다.

1904년 영국의 Travis와 독일의 Imhoff에 의해서 沈澱池를 抱舍한 消化槽가 改發되었고, 1910년대에는 이것이 많이 사용되었다. 그러나 이때의 消化槽는 單純히 슬러지를 일시 貯藏하는 정도였고, 可熱, 攪拌 等은 1950年代 부터 사용되었다.<sup>18)</sup>

한편 嫌氣性 消化槽에 活性炭을 注入하여 냄새除去와 슬러지의 奪水 效率 增大 및 가스發生量을 增加시키는 연구가 進行되었다. 1935년 Rudolfs와 Trubnick은 嫌氣性 消化槽에 活性炭을 넣은 결과 從前의 2~3배의 가스가 발생했다고 한다.<sup>19)</sup> 또, Statham<sup>20)</sup>은 活性炭을 넣은 결과 微生物과 그 酵素의 活動이 매우 增加하여 消化槽 滯留時間을 줄일 수 있고, 消化槽의 溫度가 上昇하며, VS(Volatile Solids) 分解 促進, scum 減少, 沈澱 促進, 슬러지 부피 減少, 슬러지의 奪水 效果 增進 등의 長點이 있으며, 가스는 活性炭을 넣기前의 약 2배가 발생했다고 한다.

1976년, Adams<sup>21)</sup>는 都市下水를 이용한 嫌氣性 消化槽의 回分實驗에서 TS(Total Solids)의 5%로 活性炭을 添加한 결과 20일後에 活性炭을 넣지않은 것의 5배나 되는 가스를 얻은바 있고, Spencer<sup>19)</sup>와 Mc Conville<sup>22)</sup> 등도 TS의 5%로 活性炭을 넣은 TS 3~4%의 슬러지를 滯留時間 7~10일에 處理하는 嫌氣性 消化에서 가스 發生量이 20~50% 增加한다고 보고한 바 있다.

이러한 연구 결과 活性炭이 嫌氣性 消化를 促進시키는 理由가 몇가지 提案되었는데, 그것은<sup>19)</sup> 첫째, 活性炭은 넓은 表面積으로 因하여 嫌氣性 反應이 일어날 場所를 提供하고, 둘째, 活性炭은 嫌氣性 反應을 阻害하는 毒性物質을 吸收하며, 셋째, 알칼리성 活性炭은 緩衝作用을

하여 消化槽 内部가 酸性化 하는 것을 防止하고, 넷째, 活性炭이 嫌氣性 反應에 필요한 微量元素를 提供한다는 것 등이다.

또, 活性炭은 物質을 選擇의으로 吸收하는 性質이 있으므로 活性炭 周邊은 微生物에 대해서 獨特한 環境條件을 提供하여 微生物의 成長速度 및 가스 發生 速度가 빨라질 것으로 생각할 수 있다.<sup>23)</sup> 특히 活性炭이 없을 경우 scum으로 분리되어 잘 분해되지 않는 脂肪을 活性炭이 吸着하여 分解를 促進시키는 것으로 알려져 있다.<sup>22)</sup>

### III. 實驗 材料 및 方法

#### 1. 實驗 材料 및 測定 方法

鷄糞은 서울 近郊에 있는 養鷄場에서 採取해 왔고, 이것을 물로 稀釋시켜서 基質로 사용했으며 그 특성은 Table-1에 있다. 식중 슬러지는 서울시 終末處理場의 嫌氣性 消化槽에서 採取한 것을 鷄糞에 20일간 適應시킨 후 사용했다. 活性炭은 榻榻米를 原料로 한 PAC(Powdered Activated Carbon)와 GAC(Granular Activated Carbon)를 사용했다.

pH, 알칼리도, 窒素濃度, VS 등은 Standard Methods<sup>24)</sup>에 의해 測定했고, 醋酸濃度 및 가스의 成分은 가스 크로마토 그라프(Varian Aerograph 920)로 分析했다.

사용된 實驗裝置는 Fig. 3과 같이 밀폐된 유리병을 消化槽로 사용했으며, 아크릴 통을 가스 포집조로 사용했다. 포집조에는 소금으로 포화된 5% 黃酸溶液을 넣어서 포집된 가스가 溶解되지 않도록 했다.

消化槽 溫度는 35±1°C로 유지했으며, 가스 發生量 測定과 人爲的 攪拌은 매일 한번씩 실시했다.

#### 2. 回分實驗

2ℓ들이 유리병 5개에, 鷄糞에 20일간 적용된

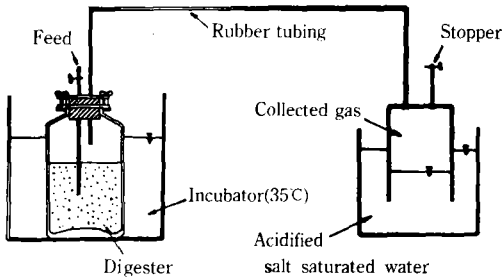


Fig. 3. 實驗裝置.

5,000 mg/ℓ의 植種 슬러지 500ml씩 넣고 0.5ℓ 여기에 鷄糞과 물을 넣어 TS 10°F인 혼합액 1ℓ씩을 만든 후 PAC를 TS의 0, 1.5, 5, 10, 20%씩添加하여 消化시켰다.

消化槽는 하루 가스 발생량이 0.1ℓ이하로 될 때까지 運轉하였다.

### 3. 半連續 實驗

2ℓ들이 유리병 5개에 植種 슬러지를 包含한 混合液을 1ℓ씩 넣은 후 각 消化槽 内容물을 매일 50, 100, 150, 175, 200 ml씩 PAC를 添加한 10% 鷄糞 混合액으로 교환한다. 이때, PAC 주입량을 回分 實驗 結果 最適 濃度로 결정된 TS의 5%이다. 3×SRT(Sludge Retention Time) 후 定常 狀態에서 pH, 알칼리도, VS, 窒素濃度, 가스 成分 그리고 가스發生率을 測定한다.

### 4. 醋酸을 基質로 사용한 回分 實驗

半連續 實驗에서 消化槽 內的 TS는 10%이고, PAC는 TS의 5%이므로 5g이다. 球形活性炭 内部에서 基質의 濃度 勾配가 있을 때의 反應 速度와 濃度 勾配가 없을 때의 反應 速度의 比  $\eta$  (효율상수)를 0.75로 假定하여 3가지 粒徑의 球形 GAC를 6.7g씩 준비한다. 이때 6.7g에 입자가 각각 313, 187, 94개씩이었고 이것을 消化槽 溶液에 20일간 접촉시켜서 GAC에 媒단균이 포함된 浮游物질을 附着시킨다.<sup>25)</sup>

半連續 實驗에서 얻은 消化槽 溶液을 圓心 分離하여 抽出한 液體에 基質로서 醋酸을 5,000

mg/ℓ 정도 되도록 넣고, NaOH로 pH를 조정하여 본 실험의 消化槽 溶液으로 사용한다. 이 용액의 초산 농도는 5,810 mg/ℓ, 암모니아성 窒素濃度 1,750 mg/ℓ, pH는 7.5, 알칼리도는 15,500 mg/ℓ이었다.

이 溶液을 3개의 2ℓ들이 유리병에 각각 1ℓ씩 넣고, 여기에 위의 GAC를 넣은 후 消化시킨다. 하루 가스 발생량이 0.05ℓ이하로 됐을 때까지 運轉하였고, 最大 가스 發生率 및 그때의 基質 濃度를 구하여 活性炭에 附着된 微生物에 의한 基質 利用 速度 常數를 계산했다.

## IV. 結果 및 考察

### 1. 回分 實驗

PAC注入 濃度別 가스 發生量은 Fig. 4와 같이 34일간 測定하였다. PAC의 濃度가 TS의 20% 일때 累積 가스 발생량이 가장 많았지만, 효율은 PAC농도가 TS의 5%일때 가장 좋은 것으로 나타났다. 각 消化槽의 最大 가스 발생율은 運轉 시작후 약 7일째 있었고, PAC濃度가 增加함에 따라 2.8, 3.1, 3.4, 3.7, 3.9 ℓ-gas/ℓ-liquid/day로 증가했으며, PAC농도가 TS의 5%일 때의 가스 발생율은 PAC를 넣지 않을 때에 비해 20%정도 증가하였다. 最適 PAC濃度와 가스 발생 증가는 都市下水에 대한 Mc Conville<sup>22)</sup> 등의 연

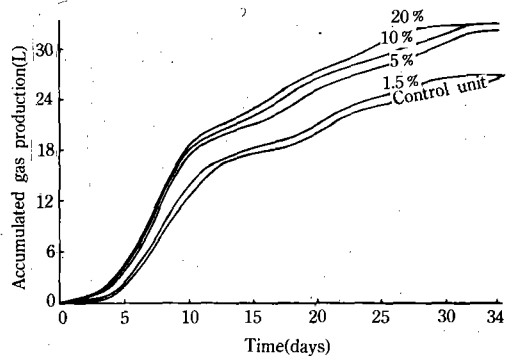


Fig. 4. PAC주입농도별 가스발생량.

Table-1. 회분 실험 결과.

PAC conc.(% · TS)	0	1.5	5	10	20
Influent					
pH	7.61	7.66	7.68	7.70	7.74
VS(%)	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37
TS(%)	10.9	11.05	11.4	11.9	12.9
* Alkalinity(mg CaCO <sub>3</sub> /ℓ)	14,684	14,824	14,000	13,675	14,769
NH <sub>4</sub> -N(mg/ℓ)	3267	3267	3267	3267	3267
organic-N(mg/ℓ)	1668	1668	1668	1668	1668
Effluent					
pH	8.16	8.00	8.12	8.12	8.07
VS(%)	4.24	4.43	3.99	3.88	3.88
TS(%)	8.37	8.63	8.58	8.89	9.94
Alkalinity(mg CaCO <sub>3</sub> /ℓ)	15,176	16,900	16,957	17,887	16,700
NH <sub>4</sub> -N(mg/ℓ)	3,549	3,831	4,220	4,350	4,081
Accumulated gas production(ℓ)	27.2	26.9	30.5	32.5	32.6
Maximum gas production rate(ℓ-gas/ ℓ-liquid/day)	2.8	3.1	3.4	3.7	3.9

\*활성탄을 넣지 않은 상태의 알칼리도.

구결과와 一致하였다.

PAC濃도에 比例해서 가스 發生率이 增加하지 않고, 一定한 濃度 이상에서는 가스 發生率 增加가 鈍化되는 이유로 Mc Conville<sup>23)</sup>은 一定한 濃度 이상에서는 單位 PAC농도당의 基質 濃도가 너무 작아져서 注入效果가 增加하지 않기 때문으로 説明했다.

알칼리도는 消化後 증가하였으며(Table-1) PAC를 넣은 消化槽의 알칼리도가 PAC를 넣지 않은 것보다 더 많이 增加하였다. 이 경우 PAC자체의 알칼리도가 無視할 수 있을 정도로 判明되었다. (Table-2) 따라서 PAC가 직접 알칼리도를 증대시킨 것이 아니라 有機物 分解를 促進시켜 附隨적으로 알칼리도를 증대시키는 것으로 볼 수 있다. 이에 따라서 암모니아성 窒素의 濃度も 增加하였다. (Table-1) PAC가 TS의 20%일 때 알칼리도, 窒素濃度, TS減少 등이 10%일 때보다 적는데 그 이유는 실험적 誤差인지, PAC濃도가 너무 높은 때문인지 알

Table-2. 활성탄 자체의 알칼리도.

PAC Conc.(mg/ℓ)	1,500	5,000	10,000	20,000
Total Alk. (mg/CaCO <sub>3</sub> /ℓ)	13.5	50.7	98.0	210.7

수 없었다.

## 2. 半連續 實驗

### 가. SRT變化에 따른 pH變化

半連續 實驗의 결과는 Table-3에 있는데 그중 SRT와 pH의 관계를 圖視하면 Fig. 5가 된다. SRT가 20일 일때는 pH가 7.70이었고, SRT 減少에 따라 메탄菌의 消失 등으로 인한 VA(Volatile Acids)의 蓄積으로 pH가 감소하지만 SRT가 5일에서는 pH는 7.46으로 높은 편이었으며 소화의 阻害要因은 되지 않았다. 이것은 Hindin<sup>26)</sup> 등의 PAC를 넣지 않은 都市下水에 대한 실험 결과(Fig. 6)에 比해 높은 값인데 그 이유는 鷄糞의 암모니아성 窒素 濃度(Fig. 7)가 都市

Table-3. 반연속 실험 결과.

Parameter	SRT(days)	5	5.7	6.7	10	20
pH		7.46	7.50	7.52	7.60	7.70
Alkalinity(mg CaCO <sub>3</sub> /ℓ)		9,234	10,348	11,144	11,542	14,328
NH <sub>4</sub> -N(mg-N/ℓ)		1,347	1,356	1,389	1,613	1,696
VS reduction(%)		43.7	45.7	46.6	52.6	53.2
gas production rate(ℓ-gas/ℓ-liquid/day)		2.1	2.1	2.3	2.1	1.3

◦ influent의 organic-N : 1,966 mg/ℓ

◦ influent의 NH<sub>3</sub>-N : 1,015 mg/ℓ

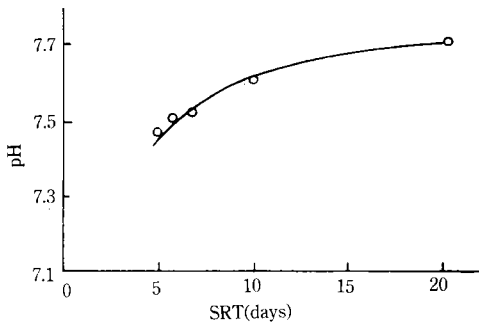


Fig. 5. SRT변화에 따른 pH변화.

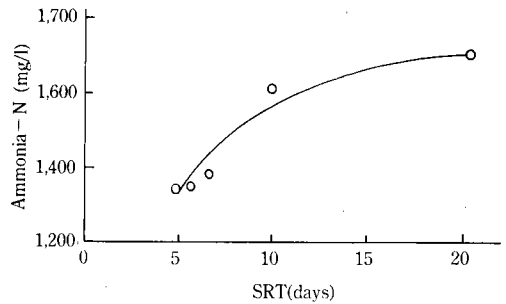


Fig. 7. SRT변화에 따른 암모니아성 질소 농도.

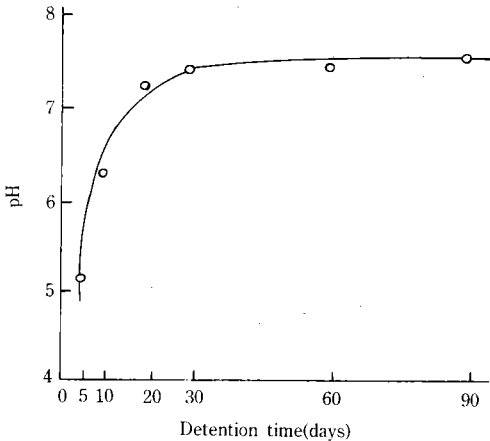


Fig. 6. 도시하수에서의 SRT와 pH의 관계(26).

것으로 생각되므로 이로 인한 알칼리도(Fig. 9)의 증가로 소화槽의 酸性化를 防止했기 때문에 생각된다.

Fig. 7, Fig. 8과 같이 SRT 減少에 따라 암모니아성 窒素의 濃度가 減少되는 이유로는 有機物의 不完全한 分解 때문에 생각할 수 있다.<sup>26)</sup>

나. SRT 變化에 따른 VS 減少率 變化

有機物 分解 效果는 VS 減少率로 나타낼 수 있으며, Fig. 10에 있다. SRT가 20일에서 5일로 減少함에 따라 VS 減少率은 54%에서 44%로 감소했다. 도시하수의 경우 SRT 5일에서의 VS 減少率 13%와 비교하면,<sup>26)</sup> PAC를 注入함으로써 SRT 감소에 따른 VS 減少率의 急激한 下落을 막을 수 있다는 것을 알 수 있다. 즉, PAC주입은 SRT를 효과적으로 줄이는 방법이 될 수 있다.

下水(Fig. 8)보다 높고, 또 PAC를 넣을 경우 짧은 SRT에서도 窒素 化合物의 分解가 促進될

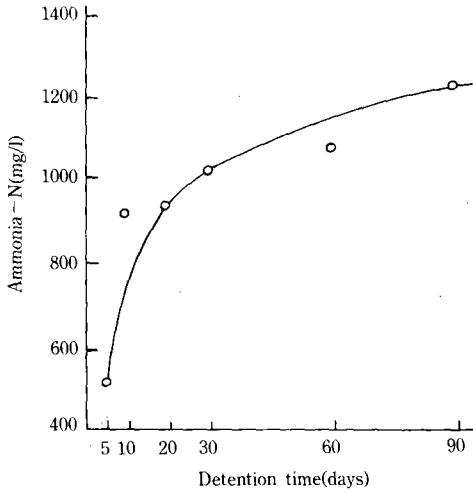


Fig. 8. 도시하수에서의 SRT와 암모니아성 질소 농도의 관계(26).

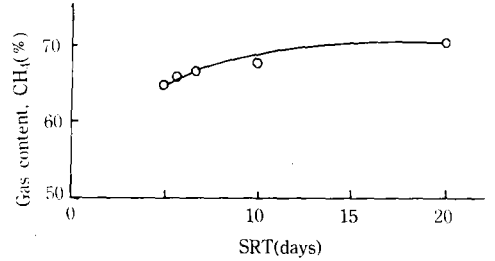


Fig. 11. SRT변화에 따른 메탄함량 변화.

SRT가 감소함에 따라 洗淨效果의 增加로 메탄균의 活動 및 增殖이 抑制되기 때문에 생각할 수 있다. 活性炭을 넣지 않은 都市下水의 경우 SRT 5일에서 메탄 발생이 없는<sup>26)</sup> 것과 이 결과를 比較하면 PAC를 注入함으로써 짧은 SRT에서도 메탄 발생이 可能함을 알 수 있다. 그러므로 이것은 嫌氣性 消化槽에 PAC를 注入 하여 SRT를 効果적으로 줄일 수 있음을 나타낸다.

라. SRT변화에 따른 가스 發生率 變化

定常狀態 이후의 평균 가스 發生율과 SRT의 관계는 Fig. 12와 같다. 최대 가스 發生율은 SRT가 6.7일에서 이지만 Fig. 10에서 알 수 있듯이 VS減少率은 SRT가 10일 일때에 比해서 12% 정도 낮은 값이므로, 廢棄物 處理 效率이 낮은 뿐 아니라 가스 生産능력이 있는 基質을 浪費하게 된다. 따라서 주어진 基質에 대해서 최대의 가스를 최소의 시간 동안에 얻는, 즉 최대의 가스 生産性を 얻는 SRT의 결정이 필요하다.

CFSTR(Continuous Flow Stirred Tank Reactor)에서 微生物에 대한 質量 保存式은 다음과

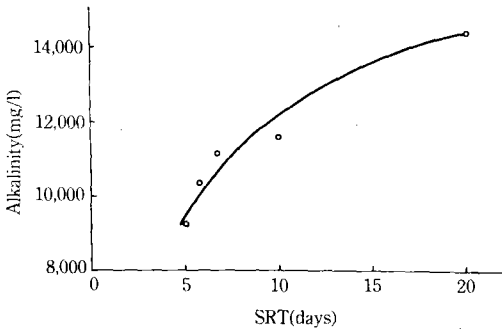


Fig. 9. SRT변화에 따른 알칼리도 변화.

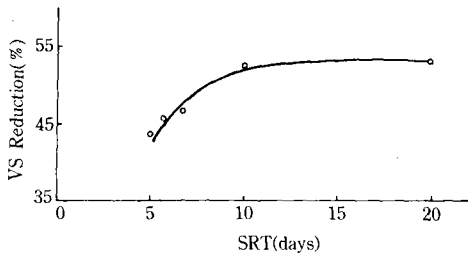


Fig. 10. SRT변화에 따른 VS감소율 변화.

다. SRT 變化에 따른 메탄 含量 變化

발생한 가스의 메탄 含量은 Fig. 11과 같이 SRT감소에 따라 71~65%로 變化하였다. 이는

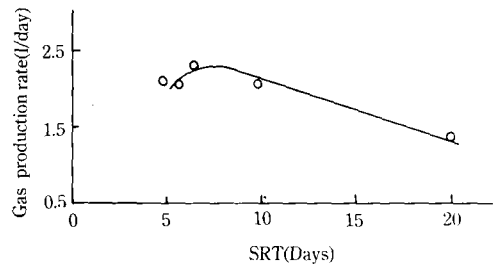


Fig. 12. SRT변화에 따른 가스발생율 변화.



같다.<sup>27)</sup>

$$\frac{dx}{dt} \cdot V = FX_0 - FX + V(r'_g) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 V는 소화槽 부피(m<sup>3</sup>), F는 流量(m<sup>3</sup>/day), X<sub>0</sub>는 流入水의 微生物 濃度(mg/l), X는 流出水의 微生物 濃度(mg/l), r'<sub>g</sub>는 微生物의 純 生長率(mg/l/day)이다. 定常狀態에서  $\frac{dx}{dt} = 0$  이고, X<sub>0</sub>=0으로 볼 수 있으므로, r'<sub>g</sub>=r<sub>g</sub>-r<sub>d</sub>로 놓으면 (1)식은

$$FX = V(r_g - r_d) \dots\dots\dots (2)$$

로 된다. 여기서 r<sub>g</sub>는 미생물의 總 生長率(mg/l/day), r<sub>d</sub>는 미생물의 廢死率(mg/l/day)이다. (2)식을 Monod equation을 사용하여 정리하면,

$$\frac{F}{V} = \frac{\mu_{max} \cdot S}{K_s + S} - K_d \dots\dots\dots (3)$$

이 되며, μ<sub>max</sub>는 최대 比增殖 速度(day<sup>-1</sup>), K<sub>s</sub>는 half saturation velocity(l-gas/l-liquid), K<sub>d</sub>는 미생물의 廢死率 常數(day<sup>-1</sup>), S는 基質 濃度이나, 여기서는 殘留 가스 生産 能力(remaining gas production potential)을 나타내며 回分 實驗결과(Table-1) 최대 가스 生産능력 S<sub>0</sub>는 30.5 l-gas/l-liquid이었다.

(3)식에서  $\frac{F}{V} = D$ 로 SRT의 逆數이며, S에 대해서 정리하면

$$S = \frac{K_s(D + K_d)}{\mu_{max} - K_d - D} \dots\dots\dots (4)$$

로 된다. Fig. 12에서 D와 S의 값들을 (4)식에 代入하여 K<sub>d</sub>=0.025/day, K<sub>s</sub>=25.333 l-gas/l-liquid, μ<sub>max</sub>=0.467/day를 얻었다. 이 값들을 (4)식에 代入하면

$$S = \frac{25.333(D + 0.025)}{0.442 - D} \dots\dots\dots (5)$$

이 되고 (5)식을 圖視하면, Fig. 13의 曲線 S가

된다.<sup>28)</sup>

(5)식의 (μ<sub>max</sub>-K<sub>d</sub>)는 0.442/day로 Fig. 13에서 구한 0.233/day보다 큰 값인데, 이것은 半連續 實驗을 CFSTR로 假定했으므로 실제 實驗에서 사용 가능한 基質의 濃도가 CFSTR에서 보다 적기 때문인 것으로 생각되며, K<sub>s</sub>값도 같은 이유로 실제보다 크게 나왔다고 볼 수 있다.

또 基質이 消化되어 氣로 變하는데 이때 生成된 氣를 基質의 濃度로 환산하여 G로 표시하면,

$$G = 30.5 - S \dots\dots\dots (6)$$

이 되고, Fig. 13의 곡선 G가 된다. 氣의 生産성은 G와 D의 乘數로

$$P = G \times D \dots\dots\dots (7)$$

이 되며 Fig. 13의 P曲線이다. 최대의 生産성은  $\frac{dP}{dD} = 0$ 일때이며, D=0.136day<sup>-1</sup>, 즉 SRT를 7.5일로 하였을 때이다. 이때의 氣 生成 速度는 2.34 l-gas/l-liquid/day이었다.

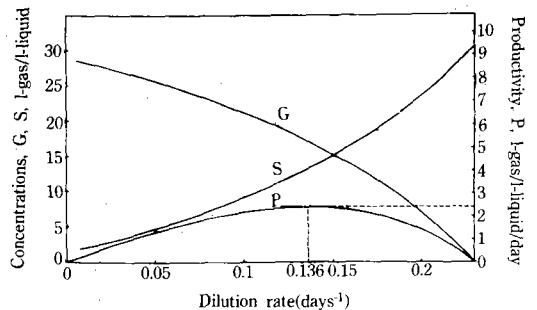


Fig. 13. SRT변화에 따른 잔류 기질농도, 소비된 기질농도, 생성성변화.

마. 全體 基質 利用 速度 常數, K<sub>1</sub>  
 消化槽 內의 微生物은 Fig. 14와 같이 PAC 附近에 모여 있는 것과 浮遊狀態로 존재하는 것이 있다. 그런데, 活性炭은 物질을 選擇적으로 吸收하는 성질이 있기 때문에 活性炭 周邊은

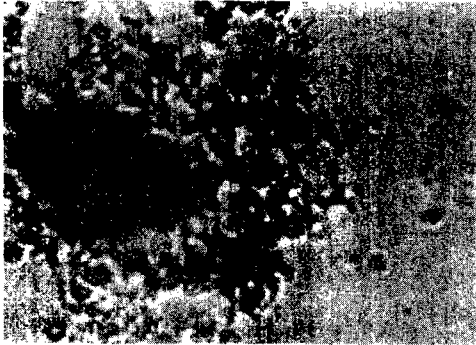


Fig. 14. PAC주변에 미생물이 모여있는 모습 (11.5×10<sup>3</sup>배 확대).

微生物에 對해서 獨特한 環境條件을 提供하여 浮游狀態와 附着狀態의 微生物은 그 生長速度가 다르고, 基質 利用 速度 常數도 다를 것으로 생각된다.<sup>23)</sup>

이 두 基質 利用 速度를 區分하지 않은 全體 基質 利用 速度 常數 K<sub>1</sub>은 基質에 관한 질량 보존 방정식

$$\frac{ds}{dt} \cdot V = FS_0 - FS - K_1SV \dots\dots\dots (8)$$

로부터 구할 수 있다. 여기서 基質 利用 速度는 基質濃度에 對한 一次 反應으로 假定했다.<sup>17)</sup> 定常狀態에서  $\frac{ds}{dt} = 0$ 이므로 (8)식은

$$\frac{S_0 - S}{S} = K_1\theta \dots\dots\dots (9)$$

로 쓸 수 있으며, 이때  $\theta = \frac{V}{F}$  (消化槽 滯留時間)이다.

(9)식을  $\frac{S_0 - S}{S}$  와  $\theta$ 축에 圖視하면 Fig. 15가 되며, 그 기울기가 全體 基質 利用 速度 常數 K<sub>1</sub>이고, 그 값은 0.353/day이다.

### 3. 醋酸을 基質로 사용한 回分實驗

이 실험에서는 活性炭에 附着된 微生物에 依한 基質 利用 速度 常數 K<sub>2</sub>를 구한다. Fig. 16에서

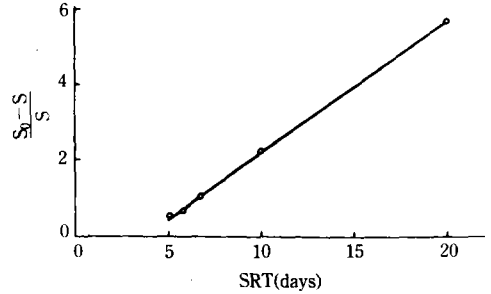


Fig. 15. 전체 기질 이용 속도 상수 결정.

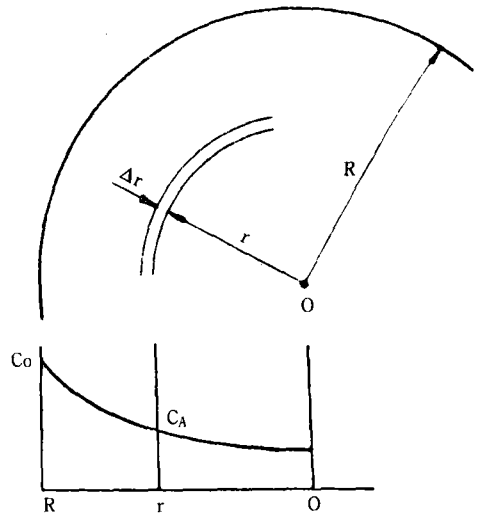


Fig. 16. GAC 내부의 기질농도 변화.

球形 活性炭 内部의 微細體積에 對한 基質의 질량 보존식은

$$\begin{aligned} \frac{dC_A}{dt} \cdot 4\pi r^2 dr = De \frac{dC_A}{dr} \cdot 4\pi r^2 \Big|_{r+\Delta r} \\ - De \frac{dC_A}{dr} \cdot 4\pi r^2 \Big|_r - K_2 C_A \cdot 4\pi r^2 \Delta r \dots\dots (10) \end{aligned}$$

이 된다. (29, 30). 여기서 C<sub>A</sub>는 기질의 농도 (l-gas/l-liquid), r은 활성탄 중심으로부터의 거리 (m), De는 實質 擴散 係數 (m<sup>2</sup>/day)를 나타낸다.

(10)식에서 De를 r에 대한 常數로 보면, 定

常狀態에서는  $\frac{dC_A}{dt} = 0$ 이므로,

$$\frac{dC_A}{dr} \cdot r^2 \Big|_{r+\Delta r} - \frac{dC_A}{dr} \cdot r^2 \Big|_r - \frac{K_2}{De} C_A r^2 = 0 \quad (11)$$

로 쓸 수 있고, 極限을 取하면,

$$r \frac{d^2 C_A}{dr^2} + 2 \frac{dC_A}{dr} - \frac{K_2}{De} C_A \cdot r = 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

이 되고, 이 식을 境界條件

조건1:  $r=R \rightarrow C_A=C_0$

조건2:  $r=0 \rightarrow \frac{dC_A}{dr} = 0$

을 이용하여 풀면,

$$C_A = C_0 \frac{R \sinh mr}{r \sinh mR} \quad \dots\dots\dots (13)$$

이 된다. 이때 R은 活性炭의 半徑(m),  $m = \sqrt{\frac{K_2}{De}}$  이다. 效率常數  $\eta$ 를

$$\eta = \frac{\int_0^{V_p} r_A(C_A) dV_p}{V_p r_A(C_0)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

로 定義하고, 여기서 (13) 식을 代入하면, 球形에서는

$$\eta = \frac{3}{\phi} \left( \coth \phi - \frac{1}{\phi} \right) \quad \dots\dots\dots (15)$$

이 된다. 여기서  $V_p$ 는 活性炭의 부피( $m^3$ ),  $r_A(C_A)$ 는 濃度  $C_A$ 에서의 反應速度( $l\text{-gas}/l\text{-liquid}/\text{day}$ ),  $r_A(C_0)$ 는 濃도  $C_0$ 에서의 反應속도( $l\text{-gas}/l\text{-liquid}/\text{day}$ ),  $\phi$ 는  $m \times R$ 이다.

(14) 식을 變形하면

$$r_{A, \text{obs}} = \eta K_2 C_0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

이 된다. 이때,  $r_{A, \text{obs}}$ 는 糞보기 基質 利用 速度이며, 실험으로부터 구한다.<sup>31)</sup> 식(15), (16) 으로부터

$$\frac{(r_{A, \text{obs}})_1}{(r_{A, \text{obs}})_2} \times \frac{C_{0,2}}{C_{0,1}} = \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\phi_2^2 (\phi_1 \coth \phi_1 - 1)}{\phi_1^2 (\phi_2 \coth \phi_2 - 1)} \quad (17)$$

을 얻을 수 있으며, subscript는 各 消化槽를 나타낸다. (17)식에서,  $a_{12} = \frac{\phi_1}{\phi_2}$  라 하면,

$$\frac{(r_{A, \text{obs}})_1}{(r_{A, \text{obs}})_2} \times \frac{C_{0,2}}{C_{0,1}} = \frac{(a_{12} \phi_2 \coth a_{12} \phi_2 - 1)}{a_{12}^2 (\phi_2^2 \coth \phi_2 - 1)} \quad (18)$$

이 되며,  $a_{12} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^{1/3}$  이고, N은 各 消化槽에 들어있는 GAC의 갯수이다. Fig. 17~19로부터 Table-4를 구할 수 있고, 이 값들을 이용하여 시행착오법으로 (18)식을 풀면,  $\phi_1 = 3.2$ ,  $\phi_2 = 3.8$ ,  $\phi_3 = 4.8$ 을 얻고, 이 값들을 (15)식에 代入하여

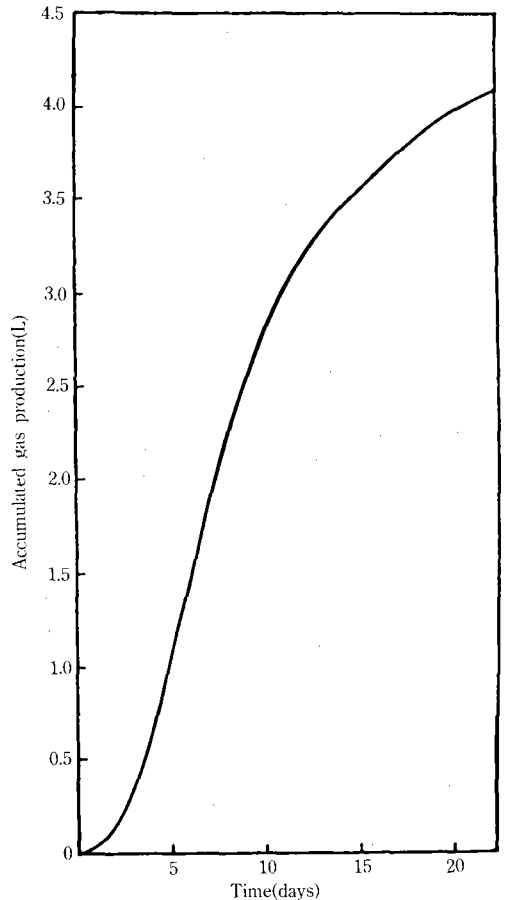


Fig. 17. 초산을 기질로 사용한 회분 실험 결과 (Digester No. 1).

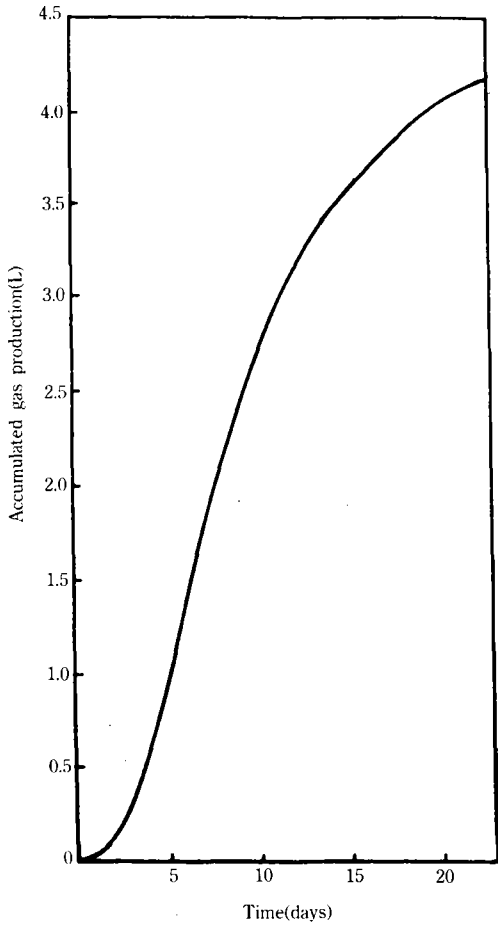


Fig. 18. 초산을 기질로 사용한 회분실험 결과 (Digester No. 2).

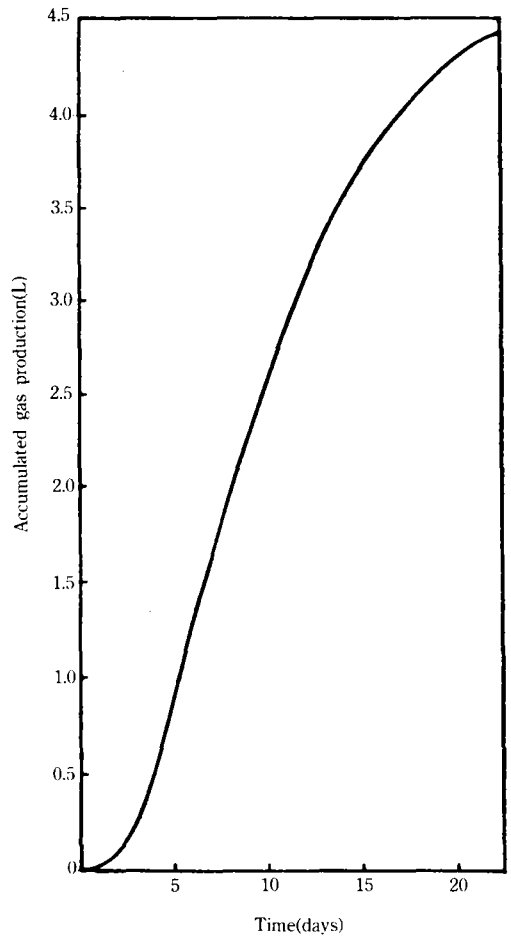


Fig. 19. 초산을 기질로 사용한 회분실험 결과 (Digester No. 3).

Table-4. 황성탄 입경별 가스 발생을 및 기질 농도.

Digester No.	1	2	3
Number of GAC(in 6.7g)	313	187	94
$r_A$ , obs( $\ell$ -gas/ $\ell$ -liquid/day)	0.43	0.41	0.39
Substrate Conc.( $\ell$ -gas/ $\ell$ -liquid)	2.86	3.03	3.36

$\tau_1=0.648$ ,  $\eta_2=0.583$ ,  $\eta_3=0.495$ 를 얻는다. 이 값들을 (16)식에 대입하여 平均값을 구하면,  $K_2=0.231/day$ 이다.

浮遊狀態의 微生物만에 의한 基質 利用 速度

常數  $K_3$ 는 全體 基質 利用 速度 常數  $K_1$ 에서 PAC에 附着된 微生物에 의한 基質 利用 速度 常數  $K_2$ 를 빼면 되므로

$$K_3 = K_1 - K_2 \dots\dots\dots (19)$$

에서 求할 수 있고,  $K_3=0.122/day$ 이다.

그런데, 실험에서는  $\eta=0.75$ 로 假定했으므로, 실제  $K_2$  값은 위에서 구한 값보다 클 것으로 생각되고, 따라서 PAC에 附着된 微生物에 의한 基質 利用 速度는 浮遊狀態로 존재하는 것의 약 2倍인 것을 알 수 있다.

## V. 結 論

本實驗條件에서 다음의結論을 얻을 수 있다.

1. 鷄糞의 嫌氣性 消化를 促進시키는 데 適切한 PAC의 濃度는 TS의 5%이며, 이때 가스 발생량은 PAC를 넣지 않을 때에 비해 약 20% 증가했다.

2. 嫌氣性 消化에서 SRT는 PAC를 適切하게 添加함으로써 效果的으로 減少시킬 수 있으며, 最適 滯留時間은 7.5日이었다. 이때의 가스 發生率은 2.34 l-gas/l-liquid/day이었다.

3. PAC가 TS의 5%일 때 PAC에 附着된 微生物에 依한 基質 利用 速度는 浮遊狀態의 微生物에 依한 基質 利用 速度의 若 2倍임을 알 수 있었다.

## 參 考 文 獻

1. Hart, S. A. "Digestion Tests of Livestock Wastes", JWPCF, Vol. 35, PP. 748-757, June 1963.
2. Laak, R. "Cattle, Swine and Chicken Manure Challenges Waste Disposal Methods", Water and Sewage Work, Vol. 117, PP. 134-139, 1970.
3. Landsburg, H. H., Schurr, S. H., Energy in the United States : Source, Uses and Policy Issues, Random House, New York, N. Y. 1968.
4. Ghosh, S., Klass, D. L. "Two-Phase Anaerobic Digestion", Process Biochemistry, April, PP. 15-24, 1978.
5. Stainer, Adelberg, Ingraham, The Microbial World, 4th ed., Chap. 2, 24, Prentice-Hall, 1976.
6. Jeris, J. S., McCarty, P. L. "The Biochemistry of Methane Fermentation Using C<sup>14</sup> Tracers", JWPCF, Vol. 37, PP. 178-192, February 1965.
7. Chynoweth, D. P., Ghosh, S., Paker, M. L. "Anaerobic Processes", JWPCF, Vol. 51, No. 6, PP. 1200-1209, 1979.
8. Zeikus, J. G. "The Biology of Methanogenic Bacteria", Bacteriological Reviews, Vol. 41, No. 2, PP. 514-541, June 1977.
9. Taylor, G. T. "The Formation of Methane by Bacteria", Process Biochemistry, PP. 29-31, October 1975.
10. Pfeffer, J. T. "Anaerobic Digestion Process", Proceedings of the First International Symposium on Anaerobic Digestion, University College, Cardiff, Wales, PP. 15-33, September 1979.
11. Pfeffer, J. T. "Increased Loadings on Digesters with Recycle of Digested Solids, JWPCF, Vol. 40, PP. 1920-1933, 1968.
12. Pfeffer, J. T. "Temperature Effects on Anaerobic Fermentation of Domestic Refuse", Biotechnology and Bioengineering, Vol. 16, PP. 771-789, 1974.
13. Maly, J., Fadrus, H. "Influence of Temperature on Anaerobic Digestion", JWPCF, Vol. 43, PP. 641-650, April 1971.
14. Schroeder, E. D., Water and Wastewater Treatment, 1st ed., Chap. 10, McGraw Hill, 1977.
15. Van Velsen, A. F. M., Lettinga, G. "Effects of Feed Composition on Digester Performance", Proceedings of the First International Symposium of Anaerobic Digestion, University College, Cardiff, Wales, PP. 113-130, September 1979.
16. Albertson, O. E. "Ammonia Nitrogen and the Anaerobic Environment, JWPCF, Vol. 33, No. 9, PP. 978-995, September 1961.
17. Sawyer, C. N., Grumbling J. S. "Fundamental

- Considerations in High Rate Digestion", S. E. Division of ASCE, PP. 49-63, March 1960.
18. Metcalf, Eddy, Wastewater Engineering, 2nd ed., Chap. 11, McGraw Hill New York, 1979.
  19. Spencer, R. R. "Enhancement of Methane Production in Anaerobic Digestion of Sewage Sludges", Biotechnology and Bioengineering Symposium No. 8, PP. 257-268, 1978.
  20. Statham, N. "Methods of Sewage Disposal", U. S. Patent 2, 058, 286, November, 1936.
  21. Adams, A. D. "Activated Carbon, Old Solution to Old Problems", Water and Sewage Works, PP. 46-48, August 1975.
  22. McConville, T., Maier, W. J. "Use of Powdered Activated Carbon to Enhance Methane Production in Sludge Digestion", Biotechnology and Bioengineering Symposium No. 8, PP. 345-359, 1978.
  23. Bitton, G., Marshall, K. C., Adsorption of Microorganisms to Surfaces, Chap. 2, John Wiley and Sons, 1980.
  24. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 15th ed., Amer. Pub. Health Assn., New York, 1981.
  25. Karube, Kuriyama, Matsunaga, Suzuki "Methane Production from Wastewaters by Immobilized Methanogenic Bacteria", Biotechnology and Bioengineering, Vol. 112, PP. 847-857, 1980.
  26. Hindin, E., Dunstan, G. H. "Effects of Detention Time on Anaerobic Digestion", JWPCF, Vol. 32, PP. 930-938, September 1960.
  27. Bailey, J. E., D. F. Ollis, Biochemical Engineering Fundamentals, Chap. 9, 1st ed., McGraw Hill, N. Y. 1977.
  28. Lawrence, A. W., McCarty, P. L. "Kinetics of Methane Fermentation in Anaerobic Treatment", JWPCF, Vol. 41, PP. R1-R17, February 1969.
  29. Levenspiel, O., Chemical Reaction Engineering, 2nd ed., Chap. 14, McGraw Hill, New York, 1972.
  30. Bishop, K. B., Froment, G. F., Chemical Reactor Analysis and Design, Chap. 3, John Wiley and Sons, 1979.
  31. Bird, Stewart, Lightfoot, Transport Phenomena, Chap. 17, John Wiley and Sons, 1960.
  32. EPA, Technology and Transfer, Process Design Manual for Sludge and Disposal, Chap. 6, September 1979.