

嫌氣性消化의 動力學 : 高負荷時의 溫度影響

Kinetics of Anaerobic Digestion : Temperature Effects on Highly Loaded Digesters

張	德*
Chang,	Duk
鄭 泰	鶴**
Chung, Tai	Hak

Abstract

Anaerobic digestion at the temperature of 35–55 °C was conducted using an artificial sludge of uniform composition. The hydraulic retention time of 5 days was chosen because the temperature effect was effectively shown at a high loading. Inhibition of the methane fermentation decreased as the temperature increased. Acid fermentation was prevalent at the mesophilic and intermediate temperatures, while active methane fermentation took place at 55°C. Temperature not only affects activity of the microorganisms, but also affects physical and chemical properties of the sludge. Digestion inhibition was much reduced when the feed sludge was diluted, and active methane fermentation was possible at all temperatures. The digestion efficiency was governed by the organic loading rate as well as the hydraulic loading rate. No reduction of the digestion efficiency at 40–45 °C, which had been referred to a critical temperature range, was observed. The digestion efficiency increased monotonically from mesophilic to thermophilic range. Improved settling properties of digested sludge was also recorded at higher temperatures.

要 旨

嫌氣性消化에 미치는 溫度的 影響을 가장 효과적으로 파악할 수 있는 滯留時間 5日에서 人工슬러지를 대상으로 35~55 °C의 消化實驗을 행하였다. 消化溫度增加에 따라 메탄醱酵의 阻害가 감소하여, 中溫 및 中間領域의 溫度에서는 酸醱酵가 우세하였으나 55°C에서는 활발한 메탄醱酵가 이루어졌다. 溫度的 變化는 微生物活性뿐 아니라 슬러지의 物理, 化學의 特性에도 影響을 미친다고 추정된다. 또한 流入 슬러지의 稀釋에 의하여 消化阻害가 크게 감소하여 모든 溫度에서 활발한 메탄醱酵가 가능하였다. 消化效率은 水理學的 負荷量外에 有機物負荷量에도 지배받음을 알 수 있었다. 消化效率의 급격한 阻害가 발생된다고 보고된 40~45 °C에서도 뚜렷한 阻害는 없었다. 한편 消化溫度增加에 따라 消化슬러지의 沈降特性도 향상되었다.

* 正會員 · 建國大學校 工科大学 助教授, 環境工學科

** 正會員 · 서울大學校 工科大学 副教授, 土木工學科

1. 序 論

嫌氣性消化工程은 下水슬러지, 糞尿 및 기타 高濃度 有機性廢棄物의 處理에 광범위하게 이용되어 왔는데, 에너지 不足現象이 가속화되고 있는 최근에 이르러서는 廢棄物로 부터 有用한 에너지源인 메탄가스를 回收할 수 있다는 점에서 더욱 주목을 받고 있다.

이러한 嫌氣性消化에 관한 研究는 이미 1920年代부터 광범위하게 수행되어 왔으나 현재에 이르기까지 많은 研究와 適用에도 불구하고 嫌氣性消化工程에 대한 主要影響因子에 있어 아직도 體系的인 研究資料가 好氣性工程에 비하여 크게 부족한 실정이다. 主要影響因子中 가장 基本的인 것이라 할 수 있는 溫度에 대한 면에서도 충분한 研究가 되어 온 것으로 흔히 인식되고 있으나, 현재까지 주로 適用된 것은 中溫消化法이었기 때문에 研究도 中溫領域에서 집중적으로 행하여져 왔고, 高溫을 포함하는 領域에서는 아직도 여러 사항에 대하여 상충되는 결과를 얻고 있다. 따라서 보다 合理的인 設計와 運轉 또는 새로운 工程開發 등을 위하여는 溫度影響 등에 관한 基礎的이고도 體系的인 研究가 절실히 요구되고 있는 실정이다.

嫌氣性消化에 있어 主要한 因子인 溫度의 影響에 대한 研究는, 國內에서는 최근에 糞尿를 대상으로 한 崔等⁽¹⁾과 人工슬러지를 대상으로 한 張 및 鄭^(2, 3)의 研究와 葡萄糖을 대상으로 한 張 및 金⁽⁴⁾의 研究가 발표된 外에는 中溫과 高溫領域에 걸친 溫度影響에 대한 資料가 거의 없는 상태에 있으나, 國外에서는 이미 1930年代에 Fair 와 Moore^(5, 6, 7)에 의하여 低溫에서 高溫領域에 걸쳐 본격적으로 研究되어, 各 溫度別 所要消化時間에 대한 결과가 溫度影響에 대한 古典的이고도 代表的인 研究로 인식되어 현재에 이르기까지 대부분의 研究者들에 의하여 인용되고 있다. 그러나 이 研究는 連續運轉이 아닌 回分(batch)實驗結果로서 初期微生物 및 有機物濃度, 初期設定溫度下에서의 微生物의 適應差異, 回分期間 등이 實驗結果를 지배하게 되므로 현실적인 連續運轉에 그대로 이용할 수 없다. 또한 40℃ 부근에서의 가스發生量의 증가가 다른 溫度領域에 비하여 그리 높지 않았다는 이유로 이 溫度를 critical temperature 로 규정함으로써 高溫消

化를 기피하는 하나의 원인이 되고 있다. 그 후 Malý 와 Fadrus⁽⁸⁾가 다시 30℃ 및 50℃에서의 回分實驗을 행하여 高溫에서의 有機物 分解速度가 빠르나 最終가스發生量은 中溫과 高溫에서 차이가 거의 없다고 발표하였는데 이는 高溫에서의 가스發生이 많았던 Fair 와 Moore⁽⁵⁾의 研究結果와는 상반되는 것이다. 한편 連續運轉實驗에 의한 溫度影響研究는 Pfeffer⁽⁹⁾에 의하여 都市쓰레기를 대상으로 본격적으로 행하여 졌는데, 55℃에서의 가스發生量이 35℃의 約 2倍에 이른다는 등의 高溫消化의 長點을 크게 부각시킨 이 研究는 현재에 이르기까지 이 分野의 代表的인 研究로 흔히 인용되고 있으나, pH를 調節하고 稀釋을 하는 等人爲的인 여러 操作을 함으로써 일반적으로 통용될 수 있는 比較研究라고 보기는 어렵다.

그 外 Therkelsen 과 Carlson⁽¹⁰⁾, 古屋等⁽¹¹⁾, 藤田⁽¹²⁾, Chin과 Wong⁽¹³⁾, Hashimoto⁽¹⁴⁾ 등 여러 研究者들이 實際 特定廢棄物의 連續處理에 있어서의 溫度影響을 研究하였는데, 다양한 滯留時間을 대상으로 하지 못하였고 특히 消化效率이 극히 低下되는 짧은 滯留時間에서의 研究가 거의 없었으며 基質自體의 濃도가 수시로 변화되고 각 研究의 主目的에 따른 限界性이 존재하여 精確한 溫度에 따른 影響을 비교하기가 곤란하다고 할 수 있다. 단지 대부분 研究 공통적인 結論은 高溫에서는 中溫에서보다 짧은 滯留時間으로도 正常的인 消化가 가능하였다는 점이었다. 즉 이제까지의 溫度影響에 관한 研究들은 各 研究의 限界性이 존재하고 가스發生量이나 슬러지脫水性 등의 여러 사항에 대하여 상이한 결과를 얻고 있기 때문에, 어떠한 공통적인 實用的結論에 도달하기 위하여는 보다 體系的인 研究가 요구되고 있는 실정이다.

한편 單편적인 研究로서, Garber等⁽¹⁵⁾은 35℃ 및 49℃에서 滯留時間 20日로 운전되고 있는 實際消化槽의 運轉結果를 分析하여 高溫에서 消化슬러지의 脫水性이 향상되고 病原菌의 除去率이 높아짐을 보고하였는데 이는 高溫에서 脫水性이 惡化되는 결과를 얻은 Fischer 와 Green⁽¹⁶⁾, 古屋等⁽¹¹⁾의 研究와는 상반되는 것이다. 또한 최근에 Rimkus等⁽¹⁷⁾은 約 1年이라는 長期間에 걸쳐 實際消化槽를 中溫에서 高溫으로 轉換시켜 滯留時間을 반으로 줄이는 데 성공하였고, Torpey等⁽¹⁸⁾은 實際處理場

에서 中溫과 高溫消化槽를 直列로 연결시킨 새로운 工程을 도입하여 有機物除去效率의 향상과 消化슬러지의 最終處分量과 腐敗性的 감소를 도모하였다. 이상의 實際處理場을 대상으로 하는 근간의 研究의 공통점은 溫도의 影響에 관한 광범위하고도 體系的인 一貫性있는 研究의 뒷받침 없이 주로 經驗에 의존하여 이루어졌다는 점이다.

嫌氣性消化 研究時 적용된 滯留時間과 基質에 따라 有機物除去效率, 가스發生量 등은 크게 달라질 수 있고 酸生成과 메탄生成反應의 均衡이 必須要件인 嫌氣性消化過程을 보다 깊이 이해하기 위하여는, 組成이 均一한 基質을 이용하여 여러 수준의 滯留時間下에서의 消化特性을 綜合分析하여야 溫度等 各種因子의 影響을 객관적으로 일반화할 수 있다. 따라서 溫度影響研究에 있어 이제까지의 각기 다른 목적을 위하여 선택된 서로 다른 基質, 임의의 滯留時間 및 溫度範圍 등에 따른 단편적인 研究를 보완하여 一貫性있는 結論을 얻기 위한 體系的인 研究가 절실히 요구되고 있다. 이와 같은 研究의 일환으로 本 研究와 동일한 基質을 이용하여 水理學的 滯留時間 2~40일로 中溫과 高溫消化를 비교한 既存研究³⁾에서, 消化溫度 55℃에서는 5일을 경계로, 35℃에서는 10일을 경계로 하여 除去效率의 급격한 변화가 발생하여 55℃에서는 滯留時間 3~5일, 35℃에서는 滯留時間 5~10일에서 正常消化와 消化沮害를 구분하는 限界點이 존재한다고 추정할 수 있었다. 溫도의 影響은 이러한 限界點 근처에서 가장 효과적으로 파악할 수 있을 것이다.

따라서 本 研究에서는, 高溫影響에 대한 體系的인 이고 綜合的인 基礎資料를 얻기 위하여, 基質의 均一성을 유지할 수 있는 人工슬러지(artificial sludge)를 이용, 中溫에서는 消化沮害가 매우 크고 高溫에서는 正常消化가 가능한 滯留時間 5일을 대상으로 35, 40, 42.5, 45, 50 및 55℃에서의 溫度影響을 基質濃度の 變化效果와 함께 研究하여 溫度에 따른 消化特性의 差異點을 뚜렷이 규명하고자 한다.

2. 實驗材料 및 方法

本 研究에 이용된 嫌氣性消化槽는 完全密閉 및 開放이 용이하도록 설계된 有效容量 4ℓ의 타원형 바닥의 아크릴製 圓形反應槽로서, 混合은 자석교반

기를 이용하였으며 양호한 混合을 위하여 約 300~500rpm으로 운전하였다. 溫度調節은 反應槽外部에 加熱밴드를 설치하고 比例制御式 溫度調節器로 수행되었으며 溫度調節의 偏差는 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以下이었다. 發生가스量的 測定과 가스組成分析을 위한 가스收集은 平衡錘(counterweight)가 설치된 아크릴製의 浮上式 원통을 이용하였다.

이제까지의 消化에 관한 많은 研究는 濃度變化가 심한 實際슬러지를 基質로 이용하여 運轉條件變化에 따른 消化의 차이점을 명백히 비교하기가 곤란하였다. 本 研究에서는 이러한 短點을 보완하기 위하여 下水處理場의 實際슬러지 대신, 많은 沈澱性 有機固形物을 포함하면서도 組成이 均一한 人工基質(人工슬러지)을 사용하였다. 人工基質의 組成은 表 1 과 같은데, 下水슬러지特性和 유사한 人工基質을 제조하기 위하여 Therkelsen 과 Carlson¹⁰⁾이 이용한 組成을 참고로 하였다. 主된 沈澱性 有機物資源인 固體狀의 飼料(dog food: Purina社 製品, 商品名: Dog Chow)는 乾燥 및 破碎하여 標準체 #20(0.84 mm)을 통과시킨 후 사용하였으며, 알카리도를 보충하기 위하여 NaHCO_3 및 MgCO_3 를 이용하였고 모든 첨가물은 急速混和機로 水道水와 完全혼합한 후 투입되었다. 또한 基質溫도와 消化溫度 차이에 의하여 발생할 수 있는, 生物學的 反應에 의하지 않은 가스(non-biogas)의 발생을 방지하기 위하여 基質은 各 實驗時의 設定溫度부근으로 加溫된 후 투입되었다. 이러한 人工슬러지의 pH는 平均 8.1, 알카리도는 CaCO_3 로서 5,530 mg/ℓ, 揮發酸濃度は 醋酸으로서 360 mg/ℓ, COD 38,350 mg/ℓ, TS 36,400 mg/ℓ, VS는 30,300 mg/ℓ (TS의 83%)이었다. 또한 流入슬러지의 基質濃度效果 實驗을 위하여는 별도의 基質을 제조하였는데, 원래의 基質을 1/2로 稀釋하여 사용하였다.

表 1. 人工슬러지의 組成

成 分	濃度(g/ℓ)
Dog Food	30.0
Paper	2.5
Soap	1.0
Corn Oil	1.5
NaHCO_3	2.9
MgCO_3	1.8

消化槽運轉中の測定項目은 pH, 알카리度(pH 4.5 까지), 揮發酸濃度, 가스發生量(가스溫度 20℃ 基準), 가스組成(CO₂ %), COD, TS, VS, 沈降容積(settled volume : SV), 遠心分離容積(centrifuged volume : 2,000 rpm, 3 min) 等이고 이 中 揮發酸은 蒸溜後 適定法(direct distillation method)으로, 가스組成은 Orsat 法으로 分析하였으며, 모든 分析은 美國公衆 保健協會의 標準試驗法(Standard Methods)⁽¹⁹⁾에 따라 行하였다.

初期運轉時에는 中浪川 下水終末處理場의 消化 슬러지를 植種物質로 이용하였고 中溫에서 6個月 間에 걸쳐 人工슬러지에 적용시킨 후 35℃ 부터의 本實驗을 시작하였다. 한편 40℃ 以上の 消化實驗은, 그 以下の 溫度下에서 正常狀態를 유지하는 消化槽에서 負荷를 중단하고 溫度增加率 1℃/日로 溫度를 상승시킨 후 設定溫度에 도달되면 다시 負荷를 증가시키는 轉換方法⁽²⁰⁾을 利用하여 수행하였다. 水理學的 滯留時間은 既存研究⁽³⁾에서 中溫消化와 高溫消化의 차이점이 가장 明確히 나타난 5日로 設定하였고 슬러지의 流入·流出은 1日 1回 半連續式(semicontinuous operation)으로 行하였다. 이와 같이 슬러지의 流入·流出을 一定時間間隔으로 行하였기 때문에, 流入·流出外의 시간은 사실상 回分反應期間이라고 볼 수 있는데 數個月間의 運轉後에는 슬러지投入後 一定時間에서의 流出消化슬러지 性狀이나 가스發生量面에서 測定日에 관계없이 一定水準을 유지하였다. 따라서 本 研究에서는 半連續式 運轉(1日 1回 流入·流出)을 行한 다른 研究들^(1, 9, 11, 12, 14)에서와 같이 基質 流入·流出直前의 狀態를 측정하여 定常狀態結果로 취급하였다. 各 溫度別로 定常狀態에 도달되는 時間은 1個月以內이었으나 충분한 定常狀態가 확인될 때까지 3個月以上 운전하였고, 35, 42.5℃의 경우 재확인하여 거의 동일한 結果를 얻었다.

3. 結果 및 討論

3. 1. 高濃度슬러지의 消化

消化溫度 35~55℃ 범위에서 水理學的 滯留時間 5日, 有機物負荷 COD 基準 7.7 g/l·d(VS 基準 6.1g/l·d)로 表 1에 제시한 人工슬러지를 대상으로 한 消化에 있어서, 各 消化溫度別 定常狀態下에서 消化슬러지의 pH, 알카리度, 揮發酸濃度는 그림 1과

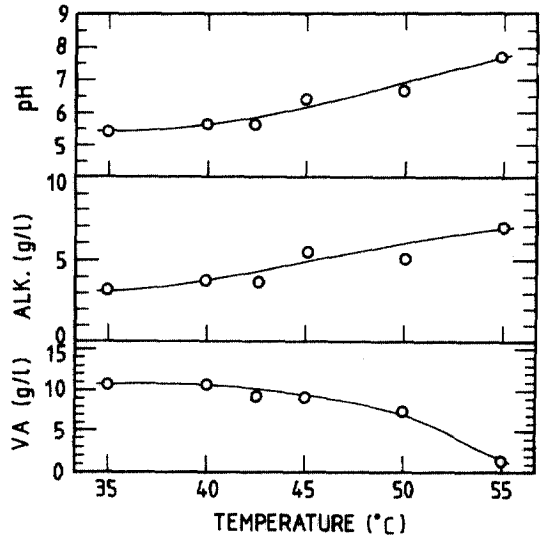


그림 1. 消化슬러지의 pH, 알카리度, 揮發酸濃度

같다. 消化溫도의 증가와 함께 pH와 알카리度は 증가하였고 揮發酸濃度は 감소하였는데, 50℃ 以下에서 揮發酸濃度は pH와 알카리度に 비하여 그 변화가 크지 않았다. pH面에서 消化溫度 45℃ 以上에서는 메탄生成菌의 成長에 큰 阻害를 초래하지 않는다고 보고된 pH 6.5를 상회하고 있으나 揮發酸濃度は 50℃에서도 매우 높은 수준을 유지하고 있어, 55℃를 제한 溫度에서는 메탄醱酵가 상당히 阻害받는 酸醱酵狀態라고 판단된다. 溫도의 증가에 따라 pH와 알카리度가 揮發酸濃도와 달리 크게 증가하는 것은, 溫도의 증가에 따라 메탄生成菌의 活性이 증가할 뿐 아니라 發生炭酸가스의 溶解度가 감소하는 동시에 蛋白質分解速度의 증가⁽⁸⁾로 얻어지는 암모니아의 重炭酸鹽生成이 증가하는 등 溶存物質의 化學的 平衡變化가 發生하는 데 기인하는 것이라고 추정된다. Andrews⁽²¹⁾의 理論에 따르면 同一한 揮發酸濃度에서는 pH의 증가에 따라 非이온化揮發酸濃도가 상대적으로 작아지기 때문에, pH增加의 面에서만 보다더도 溫度가 증가할 수록 消化阻害程度가 감소하며 특히 阻害程度가 큰 경우에 溫度가 높을 수록 상대적으로 阻害衝擊을 덜 받게 됨을 알 수 있다.

그림 2는 COD 및 VS의 除去效率를 나타낸 것으로, 50℃ 以下에서는 완만하게 증가하나 50℃ 以上에서는 급격한 증가를 보이고 있다. 일반적으로

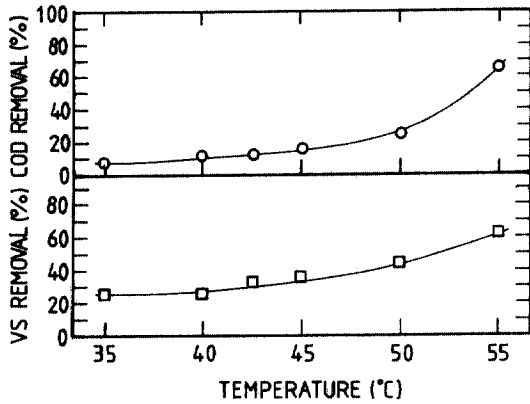


그림 2. COD 및 VS 除去效率

表 2. VA/Alk. 比 및 UVA 計算值

項 目	溫 度(°C)					
	35	40	42.5	45	50	55
VA/Alk.比	3.36	2.79	2.63	1.67	1.75	0.17
UVA(mg/l as HA _e)	1,900	1,220	1,170	210	130	1.6

VA/Alk.比(揮發酸濃度/알칼리도比)가 0.8 以上인 경우 메탄生成이 중지되고⁽²⁾ 非이온化揮發酸(unionized volatile acids : UVA)이 30~60 mg/l 以上이면 메탄生成菌에 큰 阻害를 나타낸다고 알려져 있다⁽²⁾. 本 研究에서의 各 消化溫度別 VA/Alk. 比와 非이온化揮發酸濃度の 計算值를 알아보면 表 2와 같은데, 50 °C 以下에서의 消化狀態는 크게 阻害를 받고 있으나 消化溫도의 증가에 따라 그 阻害程度가 상대적으로 감소하여 55 °C에서는 정상적인 메탄發酵가 가능함을 명확히 알 수 있다.

한편 各 消化溫度別 反應에 의한 有機物의 變化率(r) 즉 反應速度는 消化槽를 完全混合 連續流型이라고 가정하고 有機物濃도를 COD 로 표시하는 경우 그림 3과 같다. 消化溫度가 증가할수록 反應速度가 증가하나 50 °C 以下에서는 완만한 증가를 보였으나 55 °C에서는 크게 증가하였다. 즉 高溫 특히 55 °C에서는 높은 反應速度를 유지할 수 있어 高溫消化의 중요한 長點이 뚜렷하게 나타났다. 55 °C에서의 COD 除去速度는 35 °C에 비하여 約 8~9 배에 달하였다. 이러한 차이는 滯留時間이 짧은 高負荷時에만 가능하다⁽³⁾.

한편 却 溫度別 發生가스中の CO₂ 組成과 가스發

生量을 그림 4 및 그림 5와 같다. 消化溫度 50 °C 以下에서는 CO₂ 組成이 55 % 以上을 유지하였으나 55 °C에서는 정상적인 消化時 값인 35 %로 감소하였다. 投入COD 當 全體가스發生量도 溫度增加에 따라 증가하였으나 55 °C와 그 以下 溫度가 매우 큰 차이를 보였고, 投入VS 當 가스發生量도 이와 동일한 경향을 보였다. 55 °C에서의 가스發生量은 35 °C에 비하여 約 16 배에 달하였다. Pfeffer⁽⁹⁾는 滯留時

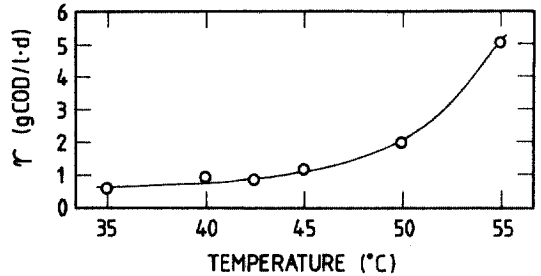


그림 3. 反應速度

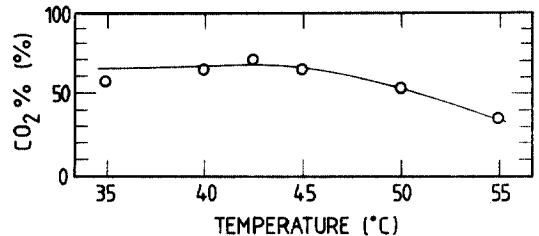


그림 4. 發生가스中の CO₂ 組成

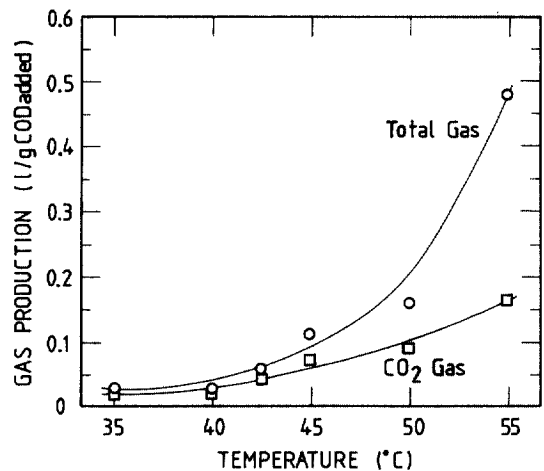


그림 5. 投入COD 當 가스發生量

間 4 日에서 55℃의 경우 35℃의 約 2 倍의 가스發生量 증가를 확인하였으나 35℃에서의 消化沮害를 방지하기 위한 中和操作을 행하여 精確한 비교는 불가능하다. 全體가스와 炭酸가스의 차이를 메탄가스로 간주할 경우 50℃以上의 경우에만 활발한 메탄醱酵가 進行된다고 할 수 있고 中溫 및 中間溫度에서의 메탄醱酵는 경미함을 알 수 있다.

한편 各 溫度의 定常狀態下에서 流入슬러지 投入直後부터 다음 投入前까지의 回分反應期間동안의 1 日累積가스發生量을 비교하면 그림 6 과 같다. 그림에서의 기울기 즉 가스發生速度는 총괄적인 消化反應速度에 비례하므로 消化溫度 50℃ 以下에서는 回分期間中의 反應速度가 溫度상승에 따라 완만한 증가를 나타내나 55℃에서는 兪동하게 커짐을 알 수 있다. 또한 시간에 따른 基質濃度차이로 反應速度는 모든 溫度에서 초기에 크고 후기에는 감소하였다. 이러한 효과는 특히 35~42.5℃에서 두드러지는데 35℃와 40℃에서는 基質投入 約 8~

12 時間以後, 42.5℃에서는 約 12~18 時間以後에는 거의 가스發生量變化가 없었으므로 외관상 反應速度가 0 에 가까운 것으로 나타나고 있다. 酸生成菌이 揮發酸의 蓄積, 낮은 pH에 의하여 큰 沮害를 받지 않는다고 할 경우, 이는 활발한 酸醱酵時 發生되는 水素와 炭酸가스의 反應을 통하여 메탄가스가 생성됨으로써 야기되는 體積減少와 酸醱酵로 얻어지는 가스發生量이 動的平衡을 이룸으로써 外관상 quasi-steady state를 보이는 것으로 생각된다.

以上の 結果로부터, 재확인되지 않은 45, 50℃의 경우 계속적인 研究以前에는 pseudo-steady state 일 가능성을 완전히 배제할 수는 없으나, 35~55℃ 범위에서 溫度증가에 따라 消化效率이 향상되어 酸醱酵가 우세한 상태에서 메탄醱酵가 우세한 상태로 변화됨을 알 수 있다. 55℃에서의 消化는 沮害를 거의 받지 않아 高負荷에도 불구하고 正常消化가 가능하여 高溫菌의 反應速度가 中溫菌에 비하여 매우 빠름을 입증하는 것이다. 한편 Golueke⁽²⁴⁾, Malina⁽²⁵⁾, Pfeffer⁽⁹⁾ 등을 비롯한 여러 研究者들에 의하여 40~45℃에서는 消化의 급격한 沮害가 발생된다고 보고되었는데, 本 研究에서는 이 溫度領域에서 他 溫度에 비하여 뚜렷한 沮害의 증가는 없었다.

各 定常狀態下에서의 沈降容積과 遠心分離容積을 측정한 결과는 그림 7 과 같다. 消化溫度에 따른 沈降容積의 변화는 消化沮害가 큰 50℃ 以下에서는 投入슬러지만의 沈降容積인 33% 를 상회하였으며, 正常消化가 가능한 55℃에서는 급격히 감소하였다. 遠心分離容積도 溫度증가에 따라 감소하였다. 또한 消化슬러지의 沈降도 消化溫度의 증가에 따라 兪

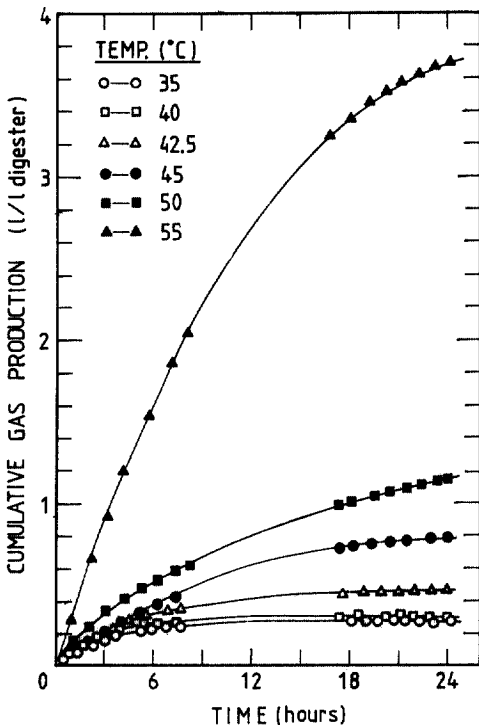


그림 6. 回分反應期間동안의 累積가스發生量

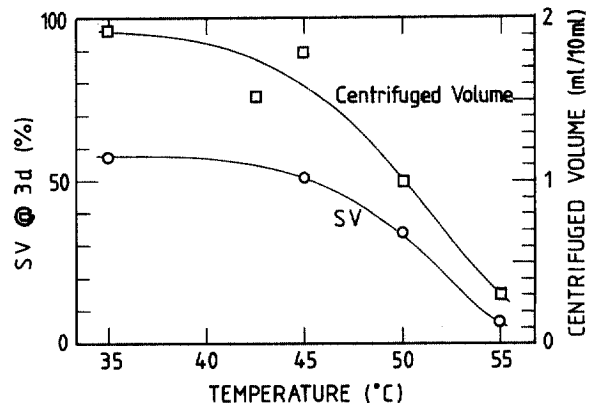


그림 7. 消化슬러지의 沈降容積 및 遠心分離容積

등히 빨라져, 沈降初期의 直線的 變化區間으로 부터 구한 상대적인 初期沈降速度는 55℃의 경우와 35℃의 약 12배에 달하였다. 이러한 현상은 高温에서 粘性物質의 발생이 감소하고 微細粒子的 含量이 상대적으로 적어지기⁽¹⁵⁾ 때문이라고 추측되며 또한 凝集性的의 증가나 沈澱性固形物의 液化率이 증가함도 가능한 이유라고 생각된다. 한편 35~42.5℃에서는 酸鹼도가 우세하여 消化슬러지의 惡臭가 매우 심하였으나 45℃에서는 상당히 감소하였고 50℃以上에서는 惡臭가 거의 없었다.

3.2 稀釋슬러지의 消化

消化溫度 35~55℃ 범위에서 表 1에 제시한 人工슬러지를 대상으로 한 滯留時間 5日의 消化에서는 55℃를 제외하고는 모든 溫度에서 매우 큰 消化阻害現象이 발생하였는데, 同一滯留時間에서도 基質濃도를 감소시키는 경우 揮發酸濃도의 저하로 消化阻害가 감소되리라 예상되었다. 따라서 원래 농도의 人工슬러지를 1/2로 稀釋하여 有機物負荷 COD 基準 3.9 g/l·d(VS 基準 3.1 g/l·d)의 조건하에서 별도의 消化槽를 이용하여 동일한 實驗을 행하여 基質濃도效果를 알아 보았다. 이러한 稀釋슬러지消化時 各 消化溫度別 定常狀態에서의 消化슬러지의 pH, 알칼리度, 揮發酸濃度는 그림 8과 같다. 예상한 대로 消化溫度가 증가함에 따라, pH, 알칼리度는 증가하였고 揮發酸濃度는 감소하였다. COD 및 VS 除去效率은 表 3에서와 같고 COD를

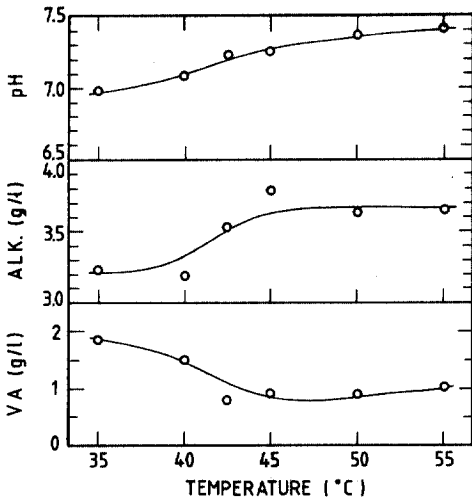


그림 8. 稀釋슬러지消化時 消化슬러지의 pH, 알칼리度, 揮發酸濃度

表 3. 稀釋슬러지消化時 有機物除去效率, CO₂ 가스組成 및 VA/Alk. 比, UVA 計算值

項 目	溫 度(°C)					
	35	40	42.5	45	50	55
COD 除去效率(%)	49	59	60	58	59	61
VS 除去效率(%)	53	57	56	54	59	61
CO ₂ %(%)	36	34	33	35	35	35
VA/Alk. 比	0.57	0.47	0.22	0.23	0.25	0.29
UVA(mg/l as HA _c)	11.1	7.14	2.70	2.92	2.37	2.47

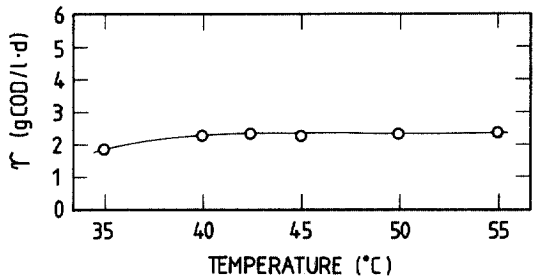


그림 9. 稀釋슬러지消化時 反應速度

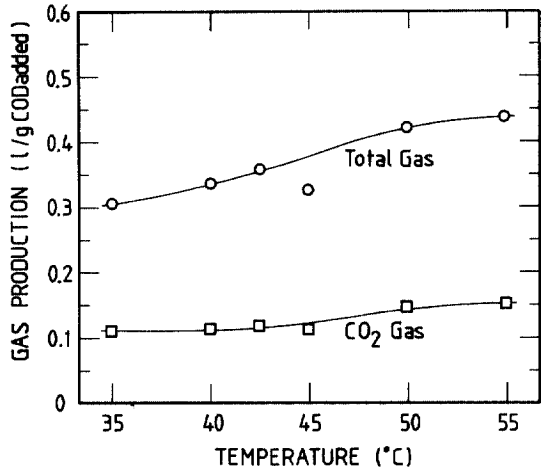


그림 10. 稀釋슬러지消化時 投入COD當 가스發生量

기준으로 한 反應速度는 그림 9와 같은데 溫度 증가에 따라 증가하는 경향이 있었으나 큰 변화는 없었다. 消化의 阻害程度를 판단하기 위하여 VA/Alk. 比 및 非이온化揮發酸濃도를 계산하면 表 3에서와 같은데 稀釋슬러지의 消化時에는, 消化의 阻害가 거의 없었다고 판단된다. 한편 가스發生量도 그림 10에서와 같이 消化溫度가 증가함에 따라 증가하였으며, 表 3에서와 같이 發生가스中の CO₂

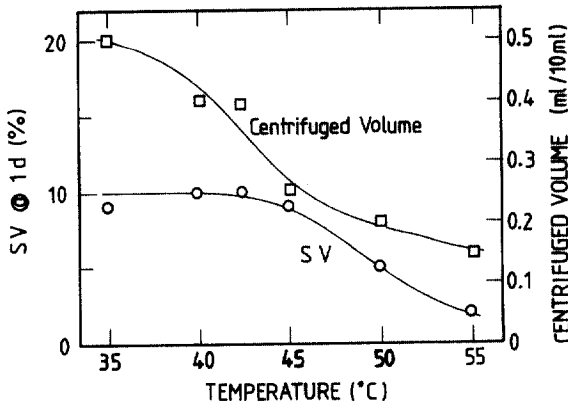


그림 11. 稀釋슬러지消化時 消化슬러지의 沈降容積 및 遠心分離容積

組成은 約 35%로 거의 유사하였다.

以上的 결과를 평가할 때, 高濃度슬러지의 消化時 滯留時間 5日에서는 55°C를 제외하고는 모두 消化狀態가 매우 악화하였음에 반하여, 稀釋슬러지의 消化時에는 35~55°C에 걸쳐 그와 같이 큰 消化阻害는 발생하지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 同一滯留時間에서의 차이점은 有機物負荷의 차이에 기인하는 것으로, 消化阻害現象은 여러가지 要因中 水理學的 負荷量外에 有機物負荷量에도 지배를 받으며, 消化阻害時 流入슬러지를 稀釋시킴으로써 阻害現象을 감소시킬 수 있음을 보여주는 것이다. 稀釋슬러지의 消化時에도 40~45°C에서의 급격한 消化阻害現象은 발생하지 않았다.

한편 消化溫度에 따른 消化슬러지의 沈降特性을 알아보면 그림 11에서와 같은데, 消化溫度의 증가에 따라 沈降容積, 遠心分離容積이 감소하여 高溫에서의 體積基準 消化슬러지發生量이 감소함을 알 수 있어, 高濃度슬러지의 消化에서와 마찬가지로 高溫消化는 消化슬러지의 濃縮 및 最終處分時 유리하다고 판단된다.

4. 結 論

嫌氣性消化에 미치는 溫度影響을 體系의으로 比較研究하여 보다 一貫性있는 基礎資料를 얻기 위하여, 基質의 均一性이 유지될 수 있는 人工슬러지를 이용하여, 溫度의 影響을 가장 효과적으로 파악할 수 있는 滯留時間 5日을 대상으로 35°C에서 55°C의 溫度範圍에서 消化特性을 비교한 결과, 다음

과 같은 結論을 얻었다.

1. 高濃度슬러지의 消化時, 溫度가 증가함에 따라 消化效率이 향상되어 酸酳酶가 우세한 상태에서 澱粉酶가 우세한 상태로 변화될 수 있었는데, 50°C까지는 溫度增加에 따라 消化效率이 완만하게 증가하였고 55°C에서 消化效率이 급속히 개선되었다.

2. 溫度의 變化는 微生物의 活性뿐 아니라 pH, 알칼리度 等 슬러지의 化學的 特性에 영향을 미쳐 溫度增加에 따른 消化阻害減少에 큰 역할을 한다고 추정된다.

3. 消化阻害가 심한 消化溫度에서도 流入슬러지의 稀釋에 의하여 正常的인 消化가 가능하여 消化阻害現象은 水理學的 負荷量外에 有機物負荷量에도 지배받음을 알 수 있었다.

4. 消化溫度 40~45°C에서 消化效率의 급격한 阻害가 발생한다는 既存의 여러 報告와는 달리 高濃度슬러지의 경우에도 他溫度에 비하여 뚜렷한 阻害現象이 나타나지 않았다.

5. 消化溫度의 증가에 따라 沈降特性이 향상되어 消化슬러지의 濃縮 및 最終處分에 있어 高溫消化가 유리함을 알 수 있었다.

謝 辭

本 研究는 1986~88年度 文教部研究費 支援에 의하여 一部 수행되었으므로 이에 謝意를 表한다.

參 考 文 獻

1. 崔義昭, 李柄憲, 李燦基, "糞尿處理: 嫌氣性消化의 溫度影響," 大韓土木學會論文集, 第2卷, 第3號, pp. 23~32 (1982)
2. 張 德, 鄭泰鶴, "嫌氣性消化槽의 高溫에로의 轉換," 大韓土木學會論文集, 第6卷, 第4號, pp. 21~28 (1986)
3. 張 德, 鄭泰鶴, "嫌氣性消化의 動力學: 中溫 및 高溫嫌氣性消化의 比較研究" 大韓土木學會論文集, 第7卷, 第3號, pp. 1~11 (1987)
4. 張 德, 金都美, "中溫 및 高溫嫌氣性處理의 動力學的 比較研究," 大韓上下水道學會誌, 第1卷, 第1號, pp. 93~98 (1987)
5. Fair, G. M., and Moore, E. W., "Heat and Energy Relations in the Digestion of Sewage Solids III. Effect of Temperature of Incubation upon the Course of Digestion," *Sewage Works Jour.* Vol. 4, No. 4

- pp. 589~600 (1932)
6. Fair, G. M., and Moore, E. W., "Time and Rate of Sludge Digestion, and Their Variation with Temperature," *Sewage Works Jour.*, Vol 6, No. 1, pp. 3~13 (1934)
 7. Fair, G. M., and Moore, E. W., "Observations on the Digestion of a Sewage Sludge over a Wide Range of Temperature," *Sewage Works Jour.*, Vol. 9, No. 1, pp. 3~5 (1937)
 8. Malý, J., and Fadrus, H., "Influence of Temperature on Anaerobic Digestion," *Jour. Water Pollut. Control Fed.* Vol. 43, No. 4, pp. 641~650 (1971)
 9. Pfeffer, J. T., "Temperature Effects on Anaerobic Fermentation of Domestic Refuse," *Biotech. & Bioeng.*, Vol. 16, pp. 771~787 (1974)
 10. Therkelsen, H. H., and Carlson, D. A., "Thermophilic Anaerobic Digestion of a Strong Complex Substrate," *Jour. Water Pollut. Control Fed.*, Vol. 51, No. 7, pp. 1949~1964 (1979)
 11. 古屋昇, 宋永旭, 船山聖二, 林 攻, "下水汚泥の高温嫌気性消化," *日本下水道協会誌*, 第16巻, 第183號, pp. 36~45 (1979)
 12. 藤田正憲, "省資源・省エネルギーかちみたメタン醱酵について—メタン醱酵による家畜ふん尿の再資源化—水処理技術," 第21巻, 第4號, pp. 13~32 (1980)
 13. Chin, K. K., and Wong, K. K., "Thermophilic Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent," *Water Research*, Vol. 17, No. 9, pp. 993~995 (1983)
 14. Hashimoto, A. G., "Conversion of Straw-Manure Mixtures to Methane at Mesophilic and Thermophilic Temperatures," *Biotech. & Bioeng.*, Vol. 25, pp. 185~200 (1983)
 15. Garber, W. F., Ohara, G. T., Colbaugh, J. E., and Raksit, S. K., "Thermophilic Digestion at the Hyperion Treatment Plant," *Jour. Water Pollut. Control Fed.*, Vol. 47, No. 5, pp. 950~961 (1975)
 16. Fischer, A. J., and Green, R. A., "Plant Scale Tests on Thermophilic Digestion," *Sewage Works Jour.*, Vol. 7, p. 718 (1945)
 17. Rimkus, R. R., Ryan, J. M., and Cook, E. J., "Full-Scale Thermophilic Digestion at the West-Southwest Sewage Treatment Works, Chicago, Illinois," *Jour. Water Pollut. Control Fed.*, Vol. 54, No. 11, pp. 1447~1457 (1982)
 18. Torpey, W. N., Andrews, J., and Basilico, J. V., "Effects of Multiple Digestion on Sludge," *Jour. Water Pollut. Control Fed.*, Vol. 56, No. 1, pp. 62~68 (1984)
 19. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 16th ed, American Public Health Asso. (1985)
 20. Chung, T. H., and Chang, D., "Start-Up of Thermophilic Digestion," in *Proceedings of 3rd WPCF/JSWA Joint Technical Seminar on Sewage Treatment Technology*, Tokyo, Japan, pp. 345~370 (1988)
 21. Andrews, J. F., "Dynamic Model of the Anaerobic Digestion Process," *Jour. San. Eng. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engr.*, Vol. 95, No. SA1, pp. 95~116 (1969)
 22. *MOP 16: Anaerobic Sludge Digestion*, Water Pollut. Control Fed, Washington, p. 14 (1968)
 23. Kroeker, E. J., Schulte, D. D., Sparling, A. B., and Lapp, H. M., "Anaerobic Treatment Process Stability," *Jour. Water Pollut. Control Fed.*, Vol. 51, No. 4, pp. 718~727 (1979)
 24. Golueke, G. C., "Temperature Effects on Anaerobic Digestion of Raw Sewage Sludge," *Sewage & Ind. Wastes*, Vol. 30, No. 10, pp. 1225~1232 (1958)
 25. Malina, J. F., "Thermal Effects on Completely Mixed Anaerobic Digester," *Water & Sewage Works*, Vol. 11, p. 52 (1964)

(接受: 1988. 8. 19)