砂糖もろこしを用いた嫌気性メタン発酵工程での 動力学的相分離に関する研究

Kinetic Phase Separation in Anaerobic Methane Fermentation with Dry Sorghu

姜 浩¹、陳 昌淑¹、PETER WEILAND²

¹忠南大学校 環境工学科/〒305-764, 韓国大田市儒城区弓洞220番地

²Institute of Technology, Federal Research Center of Agriculture (FAL),
Bundesallee 50, D-38116, Germany

HO KANG¹, CHANG-SUK JIN¹, PETER WEILAND²

²Department of Environmental Engineering, Chungnam National University
/220, Kung-Dong, Yuseong-Ku, Taejon 305-764, Korea

²Institute of Technology, Federal Research Center of Agriculture (FAL),
Bundesallee 50, D-38116, German

Abstract

A comprehensive study was carried out to examine the possibilities of separating phases by rapid recycle of the leachate from the solid state acidification reactor to the methanation reactor at 55°C with dried sorghum feed.

As a control reactor of phase separation system, a plug flow reactor in which solids pass through the reactor and are wasted in the same sequence in which they enter, begin to fail at organic loading rates of greater than 4.0 TVS/l-d. The maximum methane production rate in this single stage plug flow reactor, approached 1.45 v/v-d and 83.1% TVS removal efficiency at a solid retention time of 68 days.

The production of 20% of the total system methane in the acidification reactor at organic rates of 30g TVS/l-d indicates that separation of phase was unsuccessfully by a rapid leachate removal. Even though the solids retention time was only 4.6 days, the methanogenes were percent in the acidification reactor to produce a significant quantity of methane. As organic loading rates increased (5g TVS/l-d to 30g TVS/l-d) the methane production rates of acidification reactor were suppressed from 0.82 v/v-d to 0.72 v/v-d, while the methane production rates of methanation reactor were increased from 0.88 v/v-d to 2.87 v/v-d. The TVS removal efficiencies decreased substantially from 82.1% to 28.8%, as the organic loading rates increased.

The average volatile fatty acids concentration of acidification reactor varied from 245 to 175 mg/l as acetic acid concentration. The half saturation velocity constant of Monod equation, K_s, for methanogenesis is likely much lower than the substrate concentrations achieved in these studies, approximately 200 mg/l as acetic acid.

Key words : kinetic phase separation, volatile fatty acid, leachate recycle rates, acidification, methanation

1. 緒言

現在、生分解性有機物含量が多い植物バイオマス及び各種農工産業の廃棄物を利用して大規模のメタン生成を工業化しようとする研究が進行しており、固形物含量が多い試料に関心が集中している。しかし、大部分の生分解性の有機性廃棄物は、溶解速度が速いという特性をもっている。例として、植物バイオマスである砂糖もろこしの場合、24時間内に総乾燥重量の12-15%が可溶性の有機物質に急速に溶解するため、反応槽内に十分な緩衝容量 (Buffering Capacity) が無い限り有機酸が急速に蓄積し、それに伴って pH が低くなり、メタン生成菌の成長を阻害し、結局反応槽はその機能を無くしてしまう^{1, 2)}。

従って、単一消化槽で、可溶性有機物を多量に含有している有機性の廃棄物を消化するときは、低い有機物負荷 (Organic Loading Rates, OLR) で運転しないと反応槽は定常状態を維持することが難しくなるので、最大 OLR で最高の有機物除去効率及びメタン生成を達成するためには、酸生成反応槽内に形成する高濃度の有機酸の流出液に対する適切な処置が必要である。即ち、酸生成反応槽では加水分解と酸生成反応が、メタン生成反応槽ではメタン生成反応が起きるように諸般の環境を整えて、酸生成菌とメタン生成菌を分離して運転する相分離システムを通じて、有機物の分解効率を極大化して最大のメタン生成反応を達成することである^{3, 4)}。

今まで、相分離を達成するために、固形物滞留時間 (SRT) 調整、pH 調整、酸化還元電位 (ORP) 調整、水素ガス分圧操作等の方法が導入されてきた^{5, 6)}が、相分離システムに影響する諸般の重要影響因子に対する知見及び動力学の解析等の体系的な研究の不足で、結果は期待通りではなかった。特に溶解速度が速い、高濃度の有機物を含有している固形の試料を消化するための相分離技術の開発が強く要求されている⁷⁾。そこで、本研究では、新しい動力学の相分離の概念を提案し、これを基に総固形物 (TS) 含量が10%以上の固体相の試料を消化処理するための最適消化システムを開発することを目的としている。

2. 動力学の相分離の基本概念

動力学の相分離の基本概念は、Monod の比増殖速度の理論に基づいている。メタン生成の前駆体の中で約72-75%が酢酸であるので、酢酸を基質濃度に表すとき、

Monod 式、 $\mu = \mu_{\max} (S / K_s + S)$ から、 $\mu_{\max}$ の1/2になる基質の濃度、即ち K_s (Half Velocity Constant) 以下では、メタン生成菌の増殖は大きく低下する⁸⁾。従って、酸生成反応槽で生成された揮発性脂肪酸 (VFA) をメタン生成反応槽で急速に循環させ、酸生成反応槽内の酢酸の濃度を K_s 値以下に維持しておけば、酸生成反応槽ではメタン生成菌が増殖できなくなり、メタン生成反応槽では酸生成菌の基質が不足して酸生成菌の増殖が大きく低下し、メタン生成菌だけが增えるので、相分離が達成できる。このとき、メタン生成反応槽でのメタン生成反応を通じて消化分解された処理水を、 K_s 値以下の状態でもう一度 酸生成反応槽に循環させ連続的に運転することで、さらに完全な相分離が出来る。以上のように、この相分離方法は Monod の比増殖速度の概念を利用したので、“動力学の相分離 (Kinetic Phase Separation)”と命名した。動力学の相分離システムは SRT を調整して相分離する動力学の調整とは異なる面がある。動力学の調整システムは 酸生成反応槽で短い SRT を維持するための固形物の継続的な流出により運転が難しくなるが、それに対して動力学の相分離システムでは高濃度の VFA を含んでいる流出液 だけを K_s 値以下に維持できるようにメタン生成反応槽に循環させるので、運転上大きな困難はない。

3. 材料及び方法

3. 1 実験装置

3. 1. 1 単一消化槽システム

3つの形態の単一消化槽 (Single Stage)、即ち CSTR (Continuously Stirred Tank Reactor)、SCFMR (Semi-Continuously Fed and Mixed Reactor) と Plug Flow Reactor を作製した。試料である砂糖もろこしを消化するのに反応槽内の TS 含量が10%を越えるので CSTR の使用は不可能であった⁹⁾が、予備実験の結果、SCFMR より Plug Flow Reactor の方が反応槽の効率が高く運転が容易であった。そこで、本研究では、Plug Flow Reactor を単一消化槽システムでの消化槽として使用した。なお、アクリル製円筒形の Plug Flow Reactor は内径13.2cm、高さ89cm、総有効容積12.2 l である。

3. 1. 2 動力学の相分離システム

酸生成反応槽としては、単一消化槽システムで使った Plug Flow Reactor を使用した。また、メタン生成反応を行うメタン生成反応槽は SRT 及び循環を考慮して、

酸生成反応槽の約 5 倍容量の Control Reactor（内径 22.5cm、高さ126cm、総有効容積50 l）を使った。Fig. 1 に 全体システムの模式図を示す。

3. 1. 3 消化槽の反応温度の制御

消化槽の反応温度は高温消化である55℃に設定した。これは、中温（35℃）消化よりも微生物の反応速度が速いので、嫌気性消化に影響を与える諸般因子を短い時間で得ることができるためである。30m³（3.5×3.5×2.5m）の大きさの Walk-in Chamber を設置して、加熱器 3 台と送風器を使用して温度が55℃に自動的に維持できるように温度制御装置（Thermostat Control Box）を設置した。

3. 2 実験方法

3. 2. 1 試料の準備及び初期運転

試料は組成が均一で生分解性有機物含量が高く、TS 濃度の調節が容易であるドイツ産の砂糖もろこしを用いた。試料は切断器を使用して粒子の長さが 5 cm 未満、直径が0.3cm 程度の大きさに切断して、容器に保管して使った。

初期運転のとき、植種菌（Inoculum）としては、T 市の下水終末処理場の中温嫌気性消化槽の汚泥（TS : 43, 333mg/l, VS : TS の47%）を用いた。段階的に温度を上げ、高温（55℃）嫌気性消化菌を用意した。なお、必要ときには栄養物質を注入し、また十分なアルカリ度を維持するために NaHCO₃ を必要量注入して pH を調節した。

Fig. 1 A schematic diagram of phase separation system.

3. 2. 2 溶解度実験

乾燥した 砂糖もろこしを消化反応槽に注入すると、有機物が水と加水分解反応する。溶液中にどれくらいの可溶性の有機物が溶出するのを調べるための溶解度実験 (Solubilization Test) は、砂糖もろこし200gを取り、水 5 lと混合した後、55℃の Walk-in Chamber で ミキサーを使って一定の攪拌速度を維持し、経時的に pH 及び COD を測定して可溶性の有機物の溶出速度を求めた。

3. 2. 3 最終生分解度の測定

砂糖もろこしの最終生分解度 (Ultimate Biodegradability) は、試料中 総揮発性固形物 (TVS) で表示できる総有機物の中で生分解が可能な有機物 (Biodegradable Volatile Solids, BVS) の比率を測定する方法である、Graphical Statistic Analysis 法、In Vitro Digestibility Test、Fiber Analysis 法 を用いて行った¹⁰⁾。

3. 3 消化槽の運転

3. 3. 1 単一消化槽システムの運転

単一消化槽の Plug Flow Reactor の運転は、Kang ら⁹⁾によって研究報告された結果を基礎にして行った。即ち、固形物が反応槽の上から下に通過する順番に従って除去され、固形物の Plug Flow が維持できるようにするために、0.59mm の大きさのナイロン網に、運転している OLR に適する試料 (3-5 cm の大きさに切断した砂糖もろこし) を入れ、紐を結び付け番号札を付けて 投入した。反応槽から流出する番号表示により、固形物の正確な SRT が求められるように運転した。反応槽上部に約 10cm 程度の高さの Hold Down Screen を設置して浮上する 固形物を遮断し、Biogas 及び流出液の流れを円滑にした。円滑な反応槽の運転のために流出液の再循環は上方向に、固形物は下方向にして、流出液と 固形物が緊密に接触できるようにした。これは反応槽上部に試料を注入することによって反応槽の上層部で 砂糖もろこしの加水分解及び溶解速度が速くなり、反応槽から生成する流出液を反応槽の下に再循環させることで、長い SRT の固形物と接触させて有機物の除去効率を高めるための流れである。

段階的に OLR を 5 g TVS/l-d から 30g-TV S/l-d まで増加させ、消化槽での Hydrolysis / Acidification 率及び流出液の急速循環が全体の消化システムに及ぼす主要な影響に対して考察した。

3. 3. 2 相分離システムの2段階消化運転

相分離システムでは、Plug Flow Reactor を用いて運転した酸生成反応槽で生成された有機酸をメタン生成反応槽に急速に循環させメタン生成を高めるために、酸生成反応槽内でのメタン生成菌の増殖が阻害される K_s 値を 200mg $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{l}$ 以下に設定した。流入した基質の約70%が酢酸に転換すると仮定すると、再循環量は次の式(3)によって求められる。

$$\begin{aligned} \diamond \text{ 生成した酢酸の濃度 (g HAc/l-d) } &= \\ & (1 \text{ g TVS/l-d}) \times (1.2 \text{ g COD/l-d}) \\ & \times (0.94 \text{ g HAc/g COD}) \times 0.7 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで反応槽の効率を考慮すると、

$$\begin{aligned} \diamond \text{ 1日に生成した酢酸の濃度 (g HAc/l-d) } &= \\ & \text{有機酸濃度 (g HAc/l-d)} \times \text{反応槽体積 (l)} \\ & \times \text{反応槽効率 (\%)} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \diamond \text{ 再循環量} &= \\ & 1 \text{ 日に生成した酢酸の濃度 (g HAc/l-d) /} \\ & 200 \text{ mg/l as } \text{CH}_3\text{COOH} \end{aligned} \quad (3)$$

4. 結果及び考察

4. 1 砂糖もろこしの特性

本実験で使用した試料はドイツ産砂糖もろこし (ZH 105) であり、砂糖もろこしの物理化学的特性を調べた結果、pH 6.3、TS 21.24%、VS 19.93%であった。T-COD は239g/kg、総炭素はTSの48%、TKN は1.16%、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は0.21%であり、C/N 比は37.5であった。また、乾燥物含量はTSの23.25%であった。灰分の含量は乾燥物の5.60%、繊維質は24.13%であった。溶解性炭水化物は37.13%、セルロース31.50%、ヘミセルロース26.72%、リグニンは4.56% を含有していた。最終生分解度を間接的に調べるための In-vitro Digestibility Test では乾燥物の約70%が48-96時間内に消化し、分解速度が速いことが明らかとなった。砂糖もろこしに含まれている元素は、P は0.21mg/kg TS、Ca は0.30mg/kg TS、Mg は0.23mg/kg TS、Mn は29mg/kg TS、Cu は5.4mg/kg TS、Pb は1.4mg/kg TS、Cd は0.45mg/kg TSであった。他の元素に比べて Mn の量が多く、Se は検出されなかった。微量元素はほとんど検出されなかったもので、微量元素の不足による増殖の阻害を避けるために15日に1回ずつ微量元素 (Fe : 10mg/l, Co : 0.1mg/l, Mo : 0.1mg/l, Ni : 0.1mg/l) を添加した。

4. 2 溶解度実験

砂糖もろこしのような生分解性の可溶性有機物を沢山含んでいる固体相試料を単一反応槽に投入したとき、反応槽内では直ちに可溶性有機物の加水分解／溶出反応が起き、溶解性有機物が大量に溶液中に溶出するので、反応槽のアルカリ度を消費して pH が低くなり、結局は酸生成の反応槽が定常状態にならない要因となる。従って試料中の有機物溶出の程度と速度を知ることが反応槽の設計に大変重要である。

砂糖もろこし 内の可溶性有機物の溶解度実験 結果を Table 1 に示す。S-COD の急な増加が12時間以内に起き、その後48時間まで徐々に増加してから安定した。これより、48時間以内に T-COD の27% が S-COD として溶出することから、短い時間内に大量の可溶性有機物が溶出していることが明らかとなった。pH は可溶性有機物の加水分解反応と酸生成反応によって48時間以内に4.0まで急激に低下した。従って、酸生成反応槽内に48時間以内の急な酸生成化に対する十分な緩衝能力がない場合は、OLR を減少する、または高濃度の有機酸流出液を処理できる2段階消化槽の設計を考慮しなければならない。

Table 1 Solubilization rate and pH variation after soaking sorghum with tap water at 55°C

Time (hr)	S-COD (mg/l)	pH
0	0	5.4
1	6	5.4
2	8.2	5.3
4	12.5	5.2
8	14.3	5.2
12	15.8	5.2
24	16.9	4.7
36	18.3	4.4
48	19.8	4
72	19.8	3.8
84	19.8	3.6
95	19.8	3.5
120	20	3.5
144	20	3.5

4. 3 最終生分解度実験

Graphical Statistic Analysis 法によって求めた砂糖もろこしの生分解度は87-96%であり、In-vitro Digestibility Test では70.0%、また Fiber Analysis 法では86.0%であった。この最終生分解度実験では、砂糖もろこしの可溶性有機物が非常に速く溶出するので、流出液の管理が必要であった。

最終生分解度の値は試料の TVS 中の BVS (Bio-degradable Volatile Solids) を表している。結局 BVS 部分だけを Biogas に分解するために1次分解速度恒数を求めたところ、 k は0.09-0.13 1/日であった。

4. 4 単一消化槽システムの性能

消化槽の有機物負荷率を3.0g TVS/l-d から4.0g TVS/l-d まで段階的に増加させて消化槽の効率に及ぼす因子の変化を調べた。OLR の増加に伴って TVS の除去効率が増加し、OLR が4.0g TVS/l-d のときは83.1%の TVS 除去率であった。これは SRT が39日から68日に増加したからである。Biogas 生成量は2.61 v/v-d であり、メタン生成量は1日で消化槽体積当たり1.45 v/v-d が生成され、Biogas の56%を占めていた。また、このときの消化槽内の TVS マスバランスを通じて得た TVS 密度は90g TVS/l-d であった。Jewell¹⁾による砂糖もろこし CSTR Mass Balance Model を通じて得た値と比較してみると、本研究では2%高い TVS 除去効率を示し、P/A 比は0.46、V/A 比は0.21であった。

4. 5 相分離システムの性能

4. 5. 1 Biogas 及びメタン生成に及ぼす OLR の影響

Table 2 に示したように、相分離システムでは有機物の負荷率が増加するに伴って Biogas とメタン生成量が増加した。これは相分離の可能性を示している。また、相分離システムの中でメタン反応が起きるメタン生成反応槽の体積は考慮しなかった。これは、メタン生成反応槽が接触反応槽の役割だけを果たし、大部分の相分離は酸生成反応槽で行われるので、酸生成反応槽の体積だけを基準にして評価した。Biogas 生成量は OLR が5 g TVS/l-d から30g TVS/l-d に増加するに伴って、1日で酸生成反応槽の体積当たり3.2 v/v-d から6.7 v/v-d に増加した。メタン生成量も Biogas 生成量と同様な様相を呈した。OLR が5 g TVS/l-d では1.7 v/v-d のメタンが生成したが、OLR が30g TVS/l-d では3.6 v/v-d のメタンが生成した。

Table 2 Average biogas and methane production as a function of OLR in kinetic phase separation system

OLR (g TVS/l-d)	Biogas production (v/v-d)	Methane production (v/v-d)
5	3.18	1.7
10	5.1	2.84
20	6.15	3.32
30	6.68	3.59

各々の OLR で流出液の循環を通じて相分離がどれくらい起きているのかは、全体システムのメタン生成量の中で酸生成反応槽とメタン生成反応槽で生成したメタン生成量を把握するとわかる。本実験では、酸生成反応槽

からのメタン生成量は OLR 5 g TVS/l-d のとき、全体システムの中の48%であり、OLR が30g TVS/l-d に増加すると酸生成反応槽のメタン生成量は20%まで抑制されて相分離が起きた。Table 3に要約したように酸生成とメタン生成の反応槽でのメタン生成はそれぞれ、OLR の増加に伴って酸生成では抑制されるが、メタン生成では増加して相分離が起きていた。最大の相分離は OLR が30g TVS/l-d のときであり、メタン生成反応槽で相分離システムのメタン生成量の80%が生成し、酸生成反応槽では20%が生成した。メタン含量も Fig. 2に示したようにメタン生成反応槽では OLR とは関係なく 56-58%を示したが、酸生成反応槽では OLR が増加するに伴って51%から32%まで下がり、OLR が増加するにつれてメタン含量は減少した。

Table 3 Average methane production as a function of OLR in kinetic phase separation system

OLR (g TVS/l-d)	Methane production (v/v-d)		
	Acidification reactor	Methanation reactor	Total
5	0.82	0.88	1.7
10	1.19	1.65	2.84
20	1.03	2.28	3.32
30	0.72	2.87	3.59

Fig. 2 Time-serial variations of methane content of biogas as a function of OLR in kinetic phase separation system.

Line is expressed as OLR.

Symbol: ■ Acidification reactor
□ Methanation reactor

4. 5. 2 有機物の除去に及ぼす OLR の影響

Fig. 3 に OLR による有機物の除去量の変化を示した。各々の OLR での反応槽運転時間は25日から35日であった。メタン生成率と同じように OLR が増加するにつれて有機物の除去量も増加し、特に OLR 5 g TVS/l-d から10g TVS/l-d までの TVS 除去量は、4.11g TVS/l-d から6.5g TVS/l-d に増加した。しかし、Fig. 4 に示したように OLR が増加するにつれて有機物の除去効率は減少するのが分かった。OLR が 5 g TVS/l-d から

30g TVS/l-d に増加すると TVS 除去効率は82%から29%に減少した。これは嫌気性消化システムでのメタン生成率と有機物除去効率との反比例関係から説明できる。最高のメタン生成率と最大の有機物除去効率は決して同時に達成できないということである。本実験でも OLR が30g TVS/l-d のとき3.6 Methane v/v-d で、最も高いメタン生成率を得たが、このときの TVS 除去効率は30%であった。

Fig. 3 Time-serial variations of TVS removal rate as a function of OLR in kinetic phase separation system.
Line is expressed as OLR.
Symbol: ■ Removal rate

Fig. 4 Time-serial variations of TVS removal efficiency of kinetic phase separation system at the different OLRs.
Line is expressed as OLR.
Symbol: ■ TVS Removal Efficiency

4. 5. 3 TVS 除去効率に及ぼす SRT の影響

酸生成反応槽内の TVS Mass Balance は Reactor の TS 含量と SRT を計算するのに大変重要な因子である。何故ならば、TVS 除去効率は反応槽の TS 含量と SRT によって左右されるからである。本実験では酸生成反応槽に投入した固形物が Plug Flow を維持しながら投入した順序で排出されるので、正確な SRT を求めることができる。OLR が増加するにつれて SRT は減少して、OLR が 5 g TVS/l-d のときの SRT は 57 日、10g

TVS/l-d のときは 22 日、20g TVS/l-d のときの SRT は 8.1 日、そして 30g TVS/l-d のときの SRT は 4.6 日まで下がった (Table 4)。Table 4 に示したように酸生成反応槽の STR が増加すればするほど、TVS 除去効率は増加するがメタン生成率は減少する欠点と、消化反応槽の容積を大きくしなければならないという欠点があった。比較的長い SRT を維持する高濃度嫌気性消化システムの性能を検討するためには、反応槽の運転時間を普通の 2 倍程度に設定する必要がある。

Table 4 Overall data summary for the phase separation system.

Items \ RUN No.		1	2	3	4
OLR, g TVS/ l-d		5	10	20	30
Recycle Rate (l/d)	(l-d)	49	76.8	94	101.5
	A.R.* Turn over/d	16.3	25.6	31.3	33.8
Removal Rate (g TVS/ l-day)	A.R.	2.23	3.08	3.21	3.11
	M.R.**	1.88	3.41	4.75	5.54
	Total	4.11	6.5	7.96	8.65
TVS Reduction (%)		82.1	65.0	39.8	28.8
SRT (day at A.R.)		57	22	8.1	4.6
pH	A.R.	7.88	7.8	7.63	7.53
	M.R.	8.13	7.98	7.77	7.53
VFA (mgHAc/ l)	A.R. Eff	347	285	275	200
	M.R. Eff	142	124	164	150
Total Alkalinity (mg/ l as CaCO ₃)	A.R.	2,000	2,769	1,359	1,243
	M.R.	1,247	1,214	1,493	1,305
Bicarbonate Alkalinity (mg/ l as CaCO ₃)	A.R.	1,793	2,393	1,170	1,030
	M.R.	1,039	966	1,116	1,053
Avg. CH ₄	A.R.	51	52	44	32
	M.R.	56	58	58	57
CH ₄ Productivity (V/V-d)	A.R.	0.82	1.19	1.03	0.72
	M.R.	0.88	1.65	2.29	2.87
	Total	1.7	2.84	3.32	3.59
Biogas Productivity (V/V-d)	A.R.	1.66	2.32	2.29	2.04
	M.R.	1.52	2.78	3.86	4.64
	Total	3.18	5.1	6.15	6.68

*A.R.: Acidification reactor

**M.R.: Methanation reactor

4. 5. 4 有機酸濃度に及ぼす OLR の影響

試料の投入による一時的な過負荷のために酸生成反応槽の pH が減少してから回復した (Fig. 5)。これは砂糖もろこしの可溶性有機物の溶出実験でも明らかになったように、24 時間内に T-COD の 27% が S-COD として溶出するので、酸生成の一時的な衝撃負荷は避けられない。しかし、溶出した流出液をメタン生成反応槽に急速に再循環させるので、メタン生成反応が活発に起きた。その結果、OH⁻イオンが生成され、緩衝能力があるメタン生成の流出液が酸生成に再循環され、酸生成反応槽の pH は 7 以上を維持した。

OLR の増加によって酸生成反応槽の酢酸の濃度を 200mg/l 以下に維持するために、Table 4 に示したように高い再循環を適用した。それぞれの OLR で CSTR Model 式によって TVS 除去効率を予測して、2. 3. 2. で提示した式により反応槽内の理論的な酢酸の濃度と実際の反応槽内の平均の酢酸の濃度を比較した結果、酸生成反応槽内の実際の酢酸濃度は、OLR 5、10、20g TVS/l-d では 245、207、220mg CH₃COOH/l であり、理論値 (180~200mg CH₃COOH/l) より高く、30g TVS/l-d では 175mg CH₃COOH/l で、理論値である 202mg CH₃COOH/l より低かった。

5. 結論

本研究は、メタン生成菌の基質である酢酸の濃度が Monod 式の K_s 値以下 (200mg CH₃COOH/l) に維持できるように、酸生成反応槽で生成された流出液をメタン生成反応槽に急速に再循環させ、酸生成反応槽では酸生成菌、メタン生成反応槽ではメタン生成菌だけが増殖できるようにする相分離を通じて、最大の有機物負荷で最高のメタン生成を達成することを目的に実験を行った。その研究結果は以下のように要約できる。

- 1) 試料として用いたドイツ産 砂糖もろこしの最終生分解度は 92% を越える非常に高い値を示した。
- 2) 砂糖もろこしの可溶性有機物の溶出実験では、48 時間内に T-COD の 27% が S-COD として溶出した。
- 3) 1 次分解速度恒数 k は 0.09-0.13 1/d であった。
- 4) 相分離システムの酸生成反応槽として最適である Plug Flow Reactor は、OLR が 4.0g TVS/l-d のとき、メタン生成量は 1.45 v/v-d であり、TVS 除去率は 83.1% であった。このような効率を達成するための重要因子は SRT であり、有機物負荷と TVS 除去効率との最適関係を維持するためには 68 日以上必要であることが明らかとなった。

Fig. 5 Time-series variations of pH in kinetic phase separation system during the operation period.

Symbol: ■ Acidification reactor
□ Methanation reactor

- 5) OLR30g TVS/l-d と SRT4.6日で最大の相分離が起きた。このとき酸生成反応槽では全体のメタン生成量の20%が生成された。
- 6) 相分離システムでは、OLR が5g TVS/l-d から30g TVS/l-d に増加するに伴って、酸生成反応槽のメタン生成率は0.82 v/v-d から0.72 v/v-d に抑制された。また、メタン生成反応槽では0.88 v/v-d から2.87 v/v-d に増加して、システムの全メタン生成率は3.18 v/v-d から6.68 v/v-d に増加した。
- 7) 有機物負荷率が増加するにつれて SRT は57日から4.6日に減少し、TVS 除去効率も82.1%から28.8%に減少した。
- 8) 酸生成反応槽の平均 VFA 濃度の範囲は、175-245mg CH₃COOH/l であり、メタン生成菌の増殖が抑制される Monod 式の K_s 値である200mg CH₃COOH/l に近い値を示した。

引用文献

- 1) W. J. Jewell, H. Kang, B. K. Richard and F. Herndon : Engineering design considerations for methane fermentation of energy crops, Annual Report Presented to GRI, Contract 123-8495-3348, GRI-87 / 0061, Vol. I and II (1987, 1988)
 - 2) H. Kang and W. P. Tritt : Bestimmung der abbaubarkeit und substratumsatzrraten von rinderpenseninhalte unter anaeroben bedingungen, Grundlagen der Land Technik, 40 (2), 50-53 (1990)
 - 3) F. G. Pohland and S. Ghosh : Developments in anaerobic stabilization of organic wastes : the two-phase concept, Envir. Letters, 1 (4), 255-266 (1971)
 - 4) S. Ghosh and D. L. Klass : Two-phase anaerobic digestion, process Biotechnology (1978)
 - 5) R. J. Zoetemyer : pH influence on acidogenic dissimilation of glucose in an anaerobic digester, Wat. Res. 16, 303-311 (1982)
 - 6) S. P. Spinivas, R. Govind and R. Mutharsan : Redox potential in anaerobic and microaerobic fermentation, Bioprocess Technology, 3 (1988)
 - 7) M. L. Massey and F. G. Pohland : Phase separation of anaerobic stabilization by kinetic controls, J. Water Pollut. Contr. Fed., 2204-2222 (1978)
 - 8) T. D. Hill : Implified monod kinetics of methane fermentation of animal wastes, Agricultural Wastes, 1, 1-16 (1983)
 - 9) H. Kang and W. J. Jewell : Anaerobic plug flow reactor performance, J. Korean Society of Environmental Eng., 12 (1), 55-64 (1990)
 - 10) Van Soest and Robertson : Fiber Analysis, Agricultural Extention Laboratory, Cornell University (1985)
- (受付 1998. 6. 4)
(受理 1999. 2. 18)