

## 혐기성소화의 산발효과정에 있어서 동역학정수의 온도의존성

차기철<sup>†</sup> · 정태영 · 유익근\* · 김동진\*\*

연세대학교 환경공학부, 환경과학기술연구소 · \*울산대학교 생명화학공학과 · \*\*한림대학교 환경시스템공학과

(2007년 1월 22일 접수, 2007년 7월 16일 채택)

### Temperature Dependence of the Kinetic Constants in Acidogenesis Process of Anaerobic Digestion

Gi-Cheol Cha<sup>†</sup> · Tae Young Jeong · Ik-Keun Yoo\* · Dong-Jin Kim\*\*

Department of Environmental Engineering, YIEST, Yonsei University

\*School of Chemical Engineering & Bioengineering, University of Ulsan

\*\*Department of Environmental System Engineering, Hallym University

**ABSTRACT** : Temperature dependence of kinetic constants in the anaerobic acidogenesis was investigated using anaerobic chemostat-type reactor. Glucose was used as a substrate in this experiment. Temperature ranging from 15 to 30°C were studied. The saturation constant( $k_s$ ) and growth yield( $Y$ ) decreased with increasing temperature, while the maximum specific substrate utilization rate( $U_{max}$ ) increased. A temperature correction factor( $Q_{10}$ ) values of the substrate utilization rate and bacteria growth rate were the range from 1.3 to 2.2 and 1.5 to 2.2, respectively. The growth yield( $Y$ ) for the acidogenesis process was less sensitive to temperature changes than the maximum specific substrate utilization rate( $U_{max}$ ). The simulation model of the relationship between the substrate and sludge retention time(SRT) at the temperature range of 20 to 30°C is obtained as the following ;  $1/SRT = \{(6.53) \cdot (1.038)^{T-20} \cdot (S/X)\} / \{(1.38) \cdot (0.983)^{T-20} + (S/X)\}$ .

**Key Words** : Acidogenesis Process, Kinetic Constant, Temperature Dependence, Simulation Model

**요약** : 용해성 glucose를 기질로 하여 혐기성 산발효조에서 동역학정수에 대한 온도의존성을 검토하였다. 온도범위는 15°C에서 30°C이며, 포화정수( $k_s$ )와 증식수율( $Y$ )은 온도의 상승에 따라 감소하였지만, 최대비기질소비속도( $U_{max}$ )는 증가하였다. 기질소비속도와 균체 증식속도의 온도보정인자( $Q_{10}$ ) 값은 각각 1.3에서 2.2, 1.5에서 2.2의 범위를 보였다. 최대비기질소비속도( $U_{max}$ )가 증식수율( $Y$ ) 보다 온도의 변화에 대하여 더 민감하였다. 20°C에서 30°C까지의 온도영역에서 체류시간과 기질농도의 관계에 대한 시뮬레이션 모델은  $1/SRT = \{(6.53) \cdot (1.038)^{T-20} \cdot (S/X)\} / \{(1.38) \cdot (0.983)^{T-20} + (S/X)\}$ 이다.

**주제어** : 산발효과정, 동역학정수, 온도의존성, 시뮬레이션 모델

## 1. 서론

수질오염을 발생시키는 오염원의 종류에는 생활하수, 산업폐수, 농축산폐수 등이 있으며, 기존의 하·폐수처리 방식은 생활하수와 산업폐수의 발생량 억제에 집중되고, 상대적으로 발생량이 적은 고농도 유기성폐수에 대한 관심은 소극적이었다. 주정폐수와 같은 고농도 유기성폐수는 적은 발생량에도 불구하고 수질오염에 심각한 영향을 미치기 때문에 이와 같은 폐수의 효율적 처리가 요구되고 있는 실정이다. 이러한 고농도 유기성 폐수는 1차적으로 혐기성소화를 거치고 2차적으로 호기성으로 처리하는 것이 일반적인 처리공정으로서 특히, 혐기성소화법은 메탄가스를 발생시키기 때문에 장래 에너지고갈에 대비한 대체에너지를 획득하는 처리방법으로서 이미 선진 국가에서는 국가정책으로 추진되어 왔다.

그러나, 혐기성소화공정은 주위 환경조건에 매우 민감하고, 장시간의 체류시간이 필요하며, 유지관리가 쉽지 않은 것이 단점으로 지적되고 있다. 특히, 혐기성생물반응에 있어서 온도의 변화는 반응속도에 큰 영향을 미치고 있다.

혐기성소화공정은 산발효과정과 메탄발효과정으로 구성되어 있으며,<sup>1)</sup> 산발효과정은 메탄생성의 효율을 좌우 할 수 있는 전단계로서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 이와 같이 산발효에 관한 기초적인 연구는 매우 중요하며, 메탄생성 효율의 향상을 위해서는 더 많은 산발효에 관한 지견이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 산발효에 관한 연구의 일환으로 동역학적 특성을 검토하기로 하였으며, 특히 산발효과정에서 온도변화와 HRT(Hydraulic Retention Time)에 따른 세균의 증식과 기질소비의 관계를 동역학적으로 해석하고, 동역학정수의 온도의존성에 관하여 기초적인 자료를 획득하는 것을 목적으로 본 연구를 수행하였다.

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: gccha@yonsei.ac.kr  
Tel: 033-760-2450

Fax: 033-763-5224

## 2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치 및 방법

본 연구에서의 반응조는 아크릴로 제작하였고, 혐기적 환경을 조성하기 위하여 완전 밀폐형의 원기동형으로 하였으며, 발생한 소화가스를 순환시켜 반응조내를 혼합 교반시킴과 동시에 발생하는 흡인력에 의해 혼합액을 연속적으로 유출시키는 혐기성 chemostat-type 반응조로서 Fig. 1에 장치를 나타냈다. 기질은 약 3℃ 정도로 유지되는 냉각 Tank에서 유입되도록 하였으며, 발생하는 가스는 수중에 용해되지 않도록 황산산성의 포화식염수(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2%vol)에 의한 수상치환법을 이용하여 수집하였다.

본 실험에 이용한 식종슬러지는 하수종말처리장의 하수슬러지 소화조에서 채취한 소화슬러지에 용해성 glucose를 8시간 간격으로 유입과 유출을 반복하여 3개월 이상 적응시킨 것을 이용하였으며, 각 HRT조건의 반응조에서 Feeding펌프를 이용하여 기질이 연속적으로 유입되도록 하였다. 기질은 인공합성기질로서 탄소원과 질소원으로는 각각 용해성 glucose, NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>를 이용하였으며, 기타 무기 영양염을 첨가하였다(Table 1). 실험조건은 30℃에서 5℃ 간격으로 15℃까지 1주일에 1℃씩 변화시켰으며, 각 온도조건에서는 1.0일, 0.5일, 0.25일의 HRT를 설정함으로써 체류시간의 조절에 의해 산발효조의 역할을 하도록 하였다(Table 2). 각 온도조건의 실험에 대하여 정상상태의 확인을 위해 가스 생성량, 가스조성, 휘발성지방산, 탄수화물, SS(suspended solid)등에 관하여 1주일에 2회 측정하였다(Table 3). 측정치의 변동범위가 평균치의 10% 이하로 되면, 정상상태가 되었다고 간주하여 정상상태에 있어서 5회 측정의 실험치를 평균하여 각 실험 온도에서의 대표치로 하였다.

2.2. 분석방법

각 수질항목은 반응조내 혼합액을 12,000 rpm에서 10분간 원심분리시킨 후 상등액에 대하여 분석을 하였다. MLVSS(mixed liquor volatile suspended solid)는 하수도시험법,<sup>2)</sup> 탄수화물은 Anthron법<sup>3)</sup>에 의해 측정하였다.

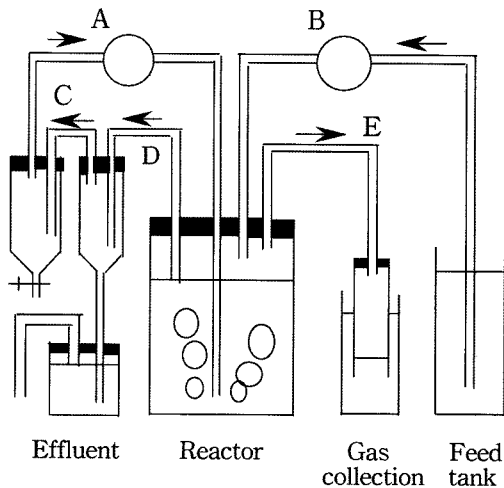


Fig. 1. Experimental apparatus; Vacuum pump(A), Feeding pump(B), Gas(C,E), Gas + Mixed liquor(D).

3. 결과 및 고찰

3.1. 동역학정수

일반적으로 제한기질농도와 비기질소비속도와의 관계는 Monod형 동역학식<sup>4)</sup>에 의해 표현되고 있지만, 본 연구에서는 동역학정수를 결정하기 위해 Contois형<sup>5)</sup> 동역학 식 (1)과 식 (2), (3)을 이용하였다.

$$v = \{u_{max} \cdot (S/X)\} / \{K_s v + (S/X)\} \tag{1}$$

$$v = \{(1/Y) \cdot D + k_d/Y\} \tag{2}$$

$$\mu_{max} = (Y \cdot v_{max}) - k_d \tag{3}$$

식 (1)을 Lineweaver-Berk형으로 전환하여 각 조건에서의 1/v와 X/S에 대하여 plot한 것을 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 2에 의해 본 연구의 data는 Monod형 보다 Contois형 동역학식에 적합한 것을 알 수 있다. 이러한 plot과 식 (2), (3)에 의해 얻어진 동역학정수를 Table 4에 나타냈다.

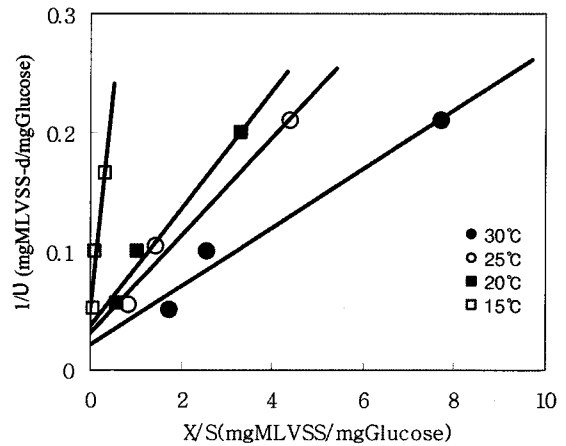


Fig. 2. Relationship between 1/v and X/S.

Table 1. Composition of the synthetic substrate

Components	Concentration(mg/L)
Glucose	9,135
NH <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub>	4,500
NaHCO <sub>3</sub>	1,800
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	100
MnSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	13
CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.12
MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	80
FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	20
CuSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	5

Table 2. Experimental conditions

HRT(d)	0.25	0.5	1.0
Liquid volume(L)	0.8	1.6	1.0
Influent substrate(l/d)	3.2	3.2	1.0
Temperature(℃)	30 → 25 → 20 → 15		

**Table 3.** Experimental results under steady state condition

Temp. (°C)	HRT (d)	Eff. glucose (mg/L)	Gas production rate(mL/L-d)	Gas composition(%)			T-VFA (mg/L)	SS (mg/L)	VSS
				H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>			
30	1.0	245.4	3110.8	30.3	65.6	1.3	4108.5	2005.4	1890.2
	0.5	684.7	3850.5	33.4	64.2	0.4	3004.3	1912.4	1765.7
	0.25	950.3	2915.6	34.5	64.0	0.3	2345.6	1808.3	1653.5
25	1.0	422.7	4254.4	34.5	62.4	1.3	3495.4	1980.4	1862.7
	0.5	1160.9	3485.2	35.2	63.8	0.1	3012.7	1745.4	1671.5
	0.25	1805.2	2750.9	34.6	63.2	0.1	2412.7	1624.5	1576.4
20	1.0	524.8	4016.8	35.6	61.8	0.5	2605.8	1904.7	1745.8
	0.5	1482.6	3005.6	36.2	62.4	0.06	1305.2	1712.8	1553.4
	0.25	2490.3	2158.4	29.1	69.2	0.06	912.9	1594.3	1490.2
15	1.0	2992.1	1828.7	27.6	69.9	0.3	1274.4	1198.4	1020.6
	0.5	5505.6	1256.4	28.9	67.4	0.06	269.2	943.3	752.9
	0.25	6790.4	550.7	20.1	73.7	0.06	250.7	603.4	488.3

**Table 4.** Kinetic constants

Temp. (°C)	$v_{max}^a$	$K_s v^b$	$\mu_{max}$ (1/d)	$Y^c$	$k_d$ (1/d)
30	49.8	1.24	9.9	0.198	-0.082
25	32.6	1.34	7.0	0.216	0.033
20	27.8	1.38	6.3	0.235	0.218
15	23.0	8.45	4.8	0.224	0.267

<sup>a)</sup> mgGlucose/mgMLVSS-d, <sup>b)</sup> mgGlucose/L, <sup>c)</sup> mgMLVSS/mgGlucose

최대비기질소비속도( $v_{max}$ )와 최대비증식속도( $\mu_{max}$ )는 각각 23.0~49.8(mgGlucose/mg MLVSS-d), 4.8~9.9(1/d)을 나타내어 온도가 낮을수록 감소하였으며, 미생물 반응이 온도의 영향을 받아 활성이 저하되고 있는 것을 알 수 있다. 한편, 본 연구의 온도영역(15°C에서 30°C)보다 높은 온도인 35°C<sup>6)</sup>와 55°C<sup>7)</sup>의 조건에서  $v_{max}$ 는 각각 66.2, 61.8이라고 보고되고 있는데, 본 연구에서의  $v_{max}$ 보다 큰 값이므로 30°C 보다는 35°C와 55°C에서 혐기성 미생물 반응이 더 활발한 것을 나타내고 있다.

**3.2. 동역학정수의 온도의존성**

미생물의 생물화확반응을 이용하는 생물반응조는 온도의 영향을 받는다. 생물처리공정에 있어서의 온도의 영향에 관해서는 많은 관계식이 실험적으로 얻어져 있지만, 일반적으로 Streeter-Phelps식<sup>8)</sup>으로 구할 수 있다.

$$K_{T2} / K_{T1} = \theta^{\Delta T} \tag{4}$$

$K_s v$ 와 온도와의 관계는 Arrhenius식으로 표현되고,<sup>9)</sup>  $v_{max}$  및  $K_s v$ 와 온도는 지수관계라는 것<sup>10)</sup>을 이용하여  $v_{max}$  및  $K_s v$ 에 대한 온도의 영향과 증식수율( $Y$ ) 및 온도와의 관계를 식(4)에 의해 나타내면, 다음식으로 표현할 수 있다.

$$(v_{max})_{T2} = (v_{max})_{T1} \cdot \theta v^{\Delta T} \tag{5}$$

$$(K_s v)_{T2} = (K_s v)_{T1} \cdot \theta_k^{\Delta T} \tag{6}$$

$$(Y)_{T2} = (Y)_{T1} \cdot \theta_Y^{\Delta T} \tag{7}$$

본 연구에서 얻어진  $v_{max}$ ,  $K_s v$ ,  $Y$ 값의 온도에 대한 대수 형태를 Fig. 3에 나타냈다. 전 온도영역(15°C에서 30°C)에 있어서의  $v_{max}$ ,  $K_s v$  및 온도와 관계는 Streeter-Phelps식으로 표현 가능한 것을 알 수 있으며,  $Y$ 와 온도와의 관계는 20°C에서 30°C의 온도영역에서 Streeter-Phelps식으로 나타낼 수 있는 것을 알 수 있다. Fig. 3의 plot에 의해 얻어진  $\theta_v$ ,  $\theta_k$ ,  $\theta_Y$ 는 각각 1.050, 0.983, 0.989이며,  $\theta$ 값이 1에 가까울수록 반응속도에 미치는 온도의 영향이 적은 것을 고려한다면 동역학정수의 온도의존성은  $v_{max} > K_s v > Y$ 의 순서를 나타내고 있다. 이것은 산발효조에 있어서  $Y$ 가  $v_{max}$ 보다 온도변화에 대하여 덜 민감한 것을 시사하고 있다. 한편, 이러한 계수를 20°C를 기준으로 하여 식(5)~(7)에 대입하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$(v_{max})_T = 27.8 \cdot (1.050)^{(T-20)} \tag{8}$$

$$(K_s v)_T = 1.38 \cdot (0.983)^{(T-20)} \tag{9}$$

$$(Y)_T = 0.235 \cdot (0.989)^{(T-20)} \tag{10}$$

**3.3. 반응속도의 온도의존성**

일반적으로 화학반응속도는 온도가 상승해도 반응물이나 촉매가 변질되지 않는 단순한 반응이기 때문에 온도의 상승에 따라 증가하며, Arrhenius는 화학반응에 있어서 반응속도 상수에 미치는 온도의 영향은 식(11)로 설명하는 것을 제안하였다.<sup>11)</sup>

$$d \ln K / dt = E / RT^2 \tag{11}$$

식(11)을 적분하면 식(12)와 같이 된다.

$$\ln K = -(E/R) \cdot (1/T) + \text{Const.} \tag{12}$$

실험 데이터를 식(12)에 의해 plot하면 유용하며 특정한 반응의 활성화 에너지를 결정할 수 있다. 그러나, 생물반응조내에서는 활성화에너지가 어떤 반응에 관계하는지에 관하여는 확인이 어려우며, 화학반응속도와 생물반응속도를 동일

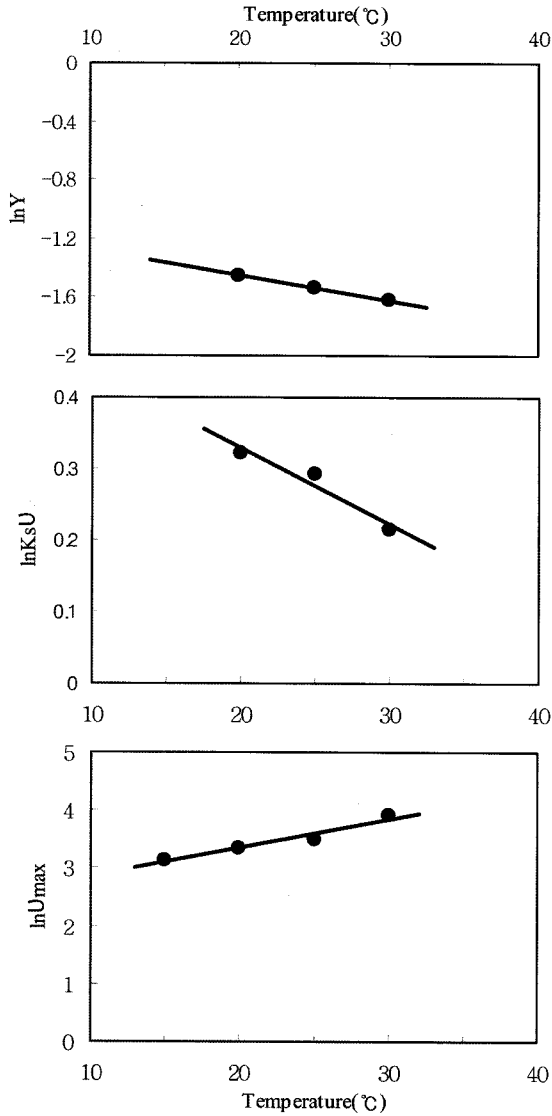


Fig. 3. Temperature dependence of the kinetic constants.

하게 볼 수 없지만, Topiwala 등<sup>12)</sup>은 제한된 범위에서는 세균증식의 온도의존성을 Arrhenius식으로 표현 가능한 것을 보고하고 있으며, 또한 Arrhenius식을 수정하면 특정의 세균<sup>13)</sup> 및 특정의 온도범위<sup>14,15)</sup>에서 온도의존성을 나타낼 수 있다는 보고와 생물학적처리공정에 있어서 (E/R) · (1/T)의 양은 일정하다고 생각되는 보고<sup>11)</sup> 등에 근거하여 본 연구에서는 반응조내의 기질소비와 균체증식에 대한 온도의존성을 설명하기 위해 활성화에너지를 온도의존계수로 나타내어 식 (12)를 식 (13)과 같이 표현함으로써 검토하였다.

$$\text{반응속도} = (\text{Const.}) \cdot e^{(-U/T)} \quad (13)$$

$$\ln(\text{반응속도}) = -U \cdot (1/T) + \text{Const.} \quad (14)$$

식 (14)를 이용하여 각 HRT에 있어서의 기질소비속도와 균체증식속도의 대수를 (1/T)에 대하여 plot한 것으로부터 얻어진 각 HRT에서의 온도의존계수(U)를 Table 5에 나타냈다.

Table 5. Temperature dependence coefficient(U)

Reaction rate	HRT(day)		
	0.25	0.5	1
SUR <sup>a)</sup>	6,582	4,588	2,019
BGR <sup>b)</sup>	6,662	4,734	3,437

a) Substrate Utilization Rate, b) Bacteria Growth Rate

15℃에서 30℃의 온도범위에서는 기질소비속도와 균체증식속도는 각각 2,019~6,852, 3,437~6,662를 나타내어 HRT가 짧을수록 온도의존성이 큰 값을 보이고 있다.

또한, 각 반응조내의 반응속도는 온도조건에 의해서만 결정되는 것이 아니며, 온도에 의해서 변화하는 조내 기질농도 및 균체농도 등에 의해서도 영향을 받기 때문에 전체적인 반응속도를 대상으로 하여 온도에 의해 결정되는 총괄적인 환경조건의 영향을 온도보정인자인 Q<sub>10</sub>값에 의해 알 수 있는데,<sup>10)</sup> 본 연구의 동역학정수를 이용하여 10℃의 온도차이에 대한 Q<sub>10</sub>값을 식 (15)를 이용하여 구하였다.

$$Q_{10} = \frac{(T + 10^\circ\text{C} \text{ 조건에서의 반응속도})}{(T^\circ\text{C} \text{ 조건에서의 반응속도})} \quad (15)$$

식 (12)를 식 (15)에 대입하면, 식 (16)과 같이 된다.

$$Q_{10} = \frac{\{A \cdot e^{(-E/RT)}\}}{[A \cdot e^{(-E/R \cdot (T+10))}]} \quad (16)$$

$$= e^{E/R \cdot \{(1/T) - (1/T+10)\}} \quad (17)$$

$$= e^{U \cdot \{(1/T) - (1/T+10)\}} \quad (18)$$

식 (18)을 이용하여 얻어진 기질소비속도와 균체증식속도의 Q<sub>10</sub>값을 Table 6에 나타냈다. 기질소비속도에 대한 Q<sub>10</sub>값은 20℃에서 30℃, 15℃에서 25℃의 온도변화에 대해 1.3~2.2의 동일한 값을 보이고 있으며, 세균증식속도에 대한 Q<sub>10</sub>값은 1.5~2.2의 값을 나타내고 있다. 또한, 10℃변화에 대해서도 다른 온도영역에 대한 Q<sub>10</sub>값의 차이는 없었다. Dinopoulou 등<sup>16)</sup>은 HRT 0.33일에서의 Q<sub>10</sub>값은 본 연구의 값보다 작은 1.29라고 보고하였는데, 이러한 차이는 이용한 기질이 다르기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 온도가 T<sub>1</sub>에서 T<sub>2</sub>까지의 변화에 따른 비기질소비속도(v)의 변화를 해석하기 위해 식 (1)을 이용하여 동일한 (S/X)조건에 있어서의 비기질소비속도(v)의 비를 구하면 다음식이 얻어진다.

Table 6. Q<sub>10</sub> values

Reaction rate	Temp. range(°C)	HRT(day)		
		0.25	0.5	1
SUR <sup>a)</sup>	20 → 30	2.2	1.7	1.3
	15 → 25	2.2	1.7	1.2
BGR <sup>b)</sup>	20 → 30	2.1	1.7	1.5
	15 → 25	2.2	1.7	1.5

a) Substrate Utilization Rate, b) Bacteria Growth Rate

**Table 7.** Temperature sensitivity model equation

$\Delta T(^{\circ}C)$	Model equation	$\Theta_{vk}$		Model type	Ref.
		S=0	S= $\infty$		
30 $\rightarrow$ 25	$[1.53\{(1.34 + S/X) \cdot (1.24 + S/X)^{-1}\}]^{0.2}$	1.106	1.089	IVb	
30 $\rightarrow$ 20	$[1.79\{(1.38 + S/X) \cdot (1.24 + S/X)^{-1}\}]^{0.1}$	1.071	1.060	IVb	
30 $\rightarrow$ 15	$[2.17\{(8.45 + S/X) \cdot (1.24 + S/X)^{-1}\}]^{0.07}$	1.208	1.056	IVb	This study
25 $\rightarrow$ 20	$[1.17\{(1.38 + S/X) \cdot (1.34 + S/X)^{-1}\}]^{0.2}$	1.038	1.032	III	
25 $\rightarrow$ 15	$[1.42\{(8.45 + S/X) \cdot (1.34 + S/X)^{-1}\}]^{0.1}$	1.245	1.036	IVb	
20 $\rightarrow$ 15	$[1.21\{(8.45 + S/X) \cdot (1.38 + S/X)^{-1}\}]^{0.2}$	1.493	1.039	IVb	
30 $\rightarrow$ 25	$[1.11\{(233 + S) \cdot (214 + S)^{-1}\}]^{0.2}$	1.039	1.021	IVb	17) <sup>a)</sup>
30 $\rightarrow$ 20	$[2.93\{(419 + S) \cdot (166 + S)^{-1}\}]^{0.07}$	1.143	1.075	IVb	
30 $\rightarrow$ 10	$[3.02\{(43.6 + S) \cdot (60.0 + S)^{-1}\}]^{0.05}$	1.040	1.057	IVa	18) <sup>b)</sup>
20 $\rightarrow$ 10	$[5.7\{(43.6 + S) \cdot (72.5 + S)^{-1}\}]^{0.1}$	1.131	1.190	IVa	

<sup>a)</sup> Substrate : Acetate+Propionate+Butyrate, Methanogenesis process, <sup>b)</sup> Substrate : Methanol, Denitrification

$$\frac{v_{T2}}{v_{T1}} = \frac{\{(v_{max})_{T2} / (v_{max})_{T1}\} \cdot \{(K_s v)_{T1} + (S/X) / (K_s v)_{T2} + (S/X)\}}{(19)$$

$\Theta_{vk}^{\Delta T} = v_{T2} / v_{T1}$ 으로 가정하여 식(19)를 Streeter-Phelps식의 형식으로 나타내면 다음식과 같다.

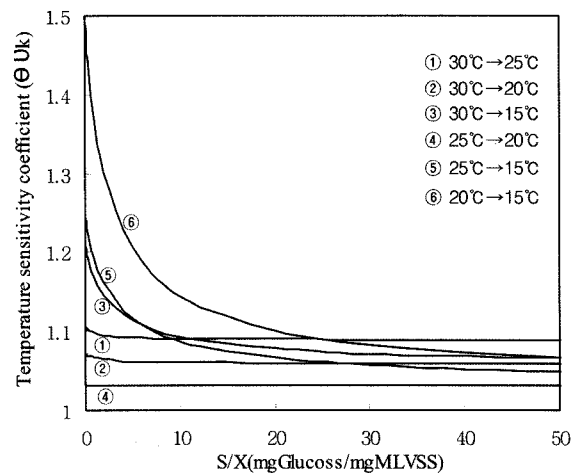
$$\Theta_{vk} = [(v_{max}^2 / v_{max}^1) \cdot \{(K_s^1 v) + (S/X)\} / \{(K_s^2 v) + (S/X)\}]^{1/\Delta T} \quad (20)$$

상기식에서  $T_2 > T_1$ 이며, 식 (20)과 Streeter-Phelps식을 비교하면 비기질소비속도의  $\Theta_{vk}$ 는  $v_{max}$ 와  $K_s v$ 에 대한  $\Theta_{vk}$ 로 간주될 수 있지만, 식 (20)에 의하면  $\Theta_{vk}$ 값은 S/X 및  $\Delta T$ 에 의해 변화한다. Benedict 등<sup>17)</sup>은 식 (20)과 관련한 온도민감 Model을 제안하였는데, 이러한 Model중  $K_s^1 v$ 과  $K_s^2 v$ 값을 동일하게 볼 수 있는 III형과  $K_s^1 v$ 값이  $K_s^2 v$ 보다 큰 형태의 Model식인 IVb형을 이용하였으며, 본 연구의 비기질소비속도에 대한 온도민감 Model식을 Table 7에 나타냈다. 본 연구의 Model식과의 비교를 위해 Lin<sup>18)</sup>의 메탄발효조에 관한 연구결과와 Stensel 등<sup>19)</sup>의 탈질화과정에 관한 연구결과로부터 얻어진 Model식을 같이 나타냈다. Fig. 4에는 Model식에 의한  $\Theta_{vk}$ 의 변화를 나타냈다. 20 $^{\circ}C$ 에서 15 $^{\circ}C$ 의  $\Theta_{vk}$ 가 낮은 S/X값에서 가장 큰 폭으로 급격히 감소하였으며, 30 $^{\circ}C$ 에서 15 $^{\circ}C$  및 25 $^{\circ}C$ 에서 15 $^{\circ}C$ 의  $\Theta_{vk}$ 는 거의 동일한 형태의 감소 변화를 보였다. 한편, 30 $^{\circ}C$ 에서 25 $^{\circ}C$ , 30 $^{\circ}C$ 에서 20 $^{\circ}C$  및 25 $^{\circ}C$ 에서 20 $^{\circ}C$ 의  $\Theta_{vk}$ 는 급격히 변화하는 양상은 볼 수 없는데, 이것은 유출수 기질농도와 균체농도의 변화에 관계없이 온도의 변화에 대한 민감성이 약하다는 것을 시사하고 있다. Table 4에 나타낸 메탄발효과정<sup>18)</sup>에서의  $\Theta_{vk}$ 도 본 연구의 산발효과정에서의와 같은 변화를 보였지만, 탈질화과정<sup>19)</sup>에서는 유출수 기질농도가 증가할수록  $\Theta_{vk}$ 가 증가하는 경향을 보였다.

**3.4. Simulation Model**

반응조의 정상상태하에서 SRT와 기질농도와의 관계는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.<sup>9)</sup>

$$1/SRT = Y \cdot \{v_{max} \cdot (S/X)\} / \{K_s v + (S/X)\} - k_d \quad (21)$$



**Fig. 4.** Temperature sensitivity response model in the acidogenesis process.

식 (8)~(10)을 식 (21)에 대입하면 온도변화에 대한 반응조 내의 체류시간과 기질농도와의 관계는 식 (22)와 같이 된다.

$$1/SRT = \frac{\{(6.53) \cdot (1.038)^{T-20} \cdot (S/X)\}}{\{(1.38) \cdot (0.983)^{T-20} + (S/X)\}} \quad (22)$$

식 (22)에서  $k_d$ 값은 무시될 정도의 낮은 값으로서 적용하지 않았다. 식 (22)를 이용하여 simulation에 의해 얻어진 기질분해율을 Fig. 5에 나타냈는데, Y값의 적용 온도범위가 20 $^{\circ}C$ 에서 30 $^{\circ}C$ 까지이며, 20 $^{\circ}C$ 를 기준으로 한 data를 적용하였기 때문에 15 $^{\circ}C$ 에서의 simulation적용은 배제하였다. 또한, Fig. 6에는 실질적으로 측정된 기질분해율을 나타내어 simulation치와의 차이를 검토하였다.

HRT 1일의 반응조에서 simulation치와 실측치의 기질제거율은 20 $^{\circ}C$  이상의 온도영역에서는 거의 일치하고 있으며, 온도의 영향을 거의 받지 않고 94.3% 이상을 보이고 있지만, HRT 0.25일의 반응조에서는 simulation치와 실측치는 온도가 낮을수록 차이를 보이고 있는데, 이것은 온도가 낮고, HRT가 짧을수록 기질분해에 대한 실질적인 분석을 통한 해석과 동역학적 해석은 차이가 있음을 시사하고 있으며, 이에 따라

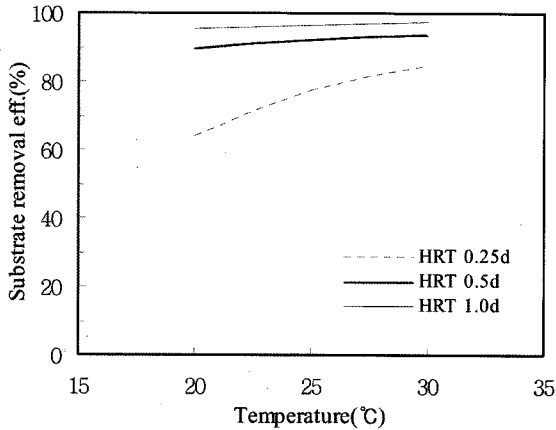


Fig. 5. Simulation value of substrate removal efficiency.

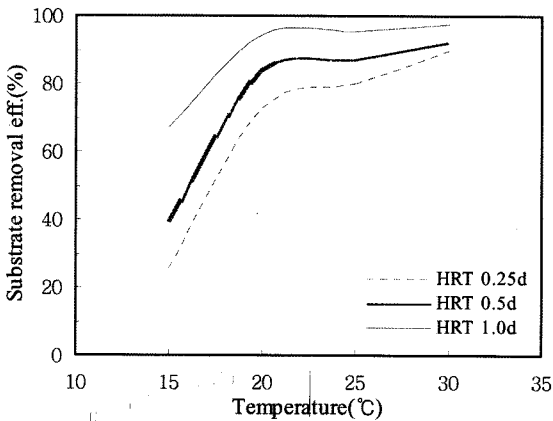


Fig. 6. Measured value of substrate removal efficiency.

simulation model을 이용한 예측과 실측은 일치하지 않는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

용해성 glucose를 이용하여 혐기성 산발효조에서의 기질 분해에 대한 동역학적 정수의 온도의존성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 15°C에서 30°C까지의 온도범위에서는  $v_{max}$ 가 23.0~49.8 (mgGlucose/mgMLVSS-d),  $\mu_{max}$ 는 4.8~9.9(1/d), Y는 0.198~0.235(mg MLVSS/mgGlucose)의 값을 나타냈다.
- 2) 동역학정수의 온도의존성은 Streeter-Phelps 식으로 잘 표현 되었으며, 온도의존성은  $v_{max} > K_s v > Y$ 의 순서를 보였다.
- 3) 기질소비속도와 세균증식속도에 대한  $Q_{10}$ 값은 1.3~2.2 및 1.5~2.2의 값을 나타냈다.
- 4)  $v_{max}$  및  $K_s v$ 와 관련한  $\theta_{ok}$ 는 낮은 S/X값에서 감소하는 경향을 보였으며, 20°C에서 15°C의 온도변화에서 가장 큰  $\theta_{ok}$  값의 감소를 보였다.
- 5) 20°C와 30°C의 온도영역에서 기질분해에 대한 simulation model은  $1/SRT = \{(6.53) \cdot (1.038)^{T-20} \cdot (S/X)\} / \{(1.38) \cdot (0.983)^{T-20} + (S/X)\}$ 의 식이 얻어졌다.

6) 낮은 온도와 HRT가 짧은 반응조에서의 기질 분해에 대한 실질적인 분석을 통한 해석과 동역학적 해석은 차이가 있으며, simulation model을 이용한 예측과 실측은 일치하지 않았다.

#### 기호설명

- $v$  : 비기질소비속도(mgGlucose/mgMLVSS/d)
- $v_{max}$  : 최대비기질소비속도(mgGlucose/mgMLVSS/d)
- S : 유출기질농도(mgGlucose/L)
- X : 조내 미생물농도(mgMLVSS/L)
- $K_s v$  : 포화정수
- Y : 수율계수(mgMLVSS/mgGlucose)
- D : 희석율(1/HRT, 1/d)
- $k_d$  : 자기분해계수(1/d)
- $\mu_{max}$  : 최대비증식속도(1/d)
- $K_{T1}$  : 온도  $T_1$ 에 있어서의 반응속도정수
- $K_{T2}$  : 온도  $T_2$ 에 있어서의 반응속도정수
- $\theta$  : 온도계수
- $(v_{max})_{T2}$  : 온도  $T_2$ 에 있어서의  $v_{max}$
- $(v_{max})_{T1}$  : 온도  $T_1$ 에 있어서의  $v_{max}$
- $(K_s v)_{T2}$  : 온도  $T_2$ 에 있어서의  $K_s v$
- $(K_s v)_{T1}$  : 온도  $T_1$ 에 있어서의  $K_s v$
- $\theta_v$  :  $v_{max}$ 에 대한 온도계수
- $\theta_k$  :  $K_s v$ 에 대한 온도계수
- $(Y)_{T2}$  : 온도  $T_2$ 에 있어서의 Y
- $(Y)_{T1}$  : 온도  $T_1$ 에 있어서의 Y
- $\theta_Y$  : 증식수율에 대한 온도계수
- K : 반응속도계수
- R : 기체상수
- E : 활성화에너지
- T : 절대온도
- U : 온도의존계수
- $\theta_{ok}$  :  $\Delta T$ 에 대한 비기질소비속도의 온도민감계수
- $v_{max}^1, v_{max}^2$  : 온도  $T_1, T_2$ 에 있어서의  $v_{max}$  값
- $K_s^1 v, K_s^2 v$  : 온도  $T_1, T_2$ 에 있어서의  $K_s v$  값

#### 사사

이 논문은 2005년도 연세대학교 학술연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임.

#### 참고문헌

1. Hughes, D. E., Stafford, D. A., Wheatley, B. I., Baader, W., Lettinga, G., Nyns, E. J., Verstraete, W., and Wentworth, R. L., Anaerobic Digestion, Elsevier Biomedical Press, New York, pp. 3~13(1981).
2. 日本下水道協會, 下水道試驗法(1985).
3. 微生物研究法懇談會編, 微生物學實驗法, 講談社, 日本,

- pp. 264~265(1990).
4. Monod, J., "The growth of bacterial cultures," *Annual Rev. of Microbiol.*, **3**, 371(1949).
  5. Contois, D. E., "Kinetics of bacterial growth, relationship between population density and specific growth rate of continuous culture," *J. of Gen. Microbiol.*, **21**, 40(1959).
  6. Noike, T., Endo, G., Chang, J. E., Yaguchi, J. I. and Matsumoto, J. I., "Characteristics of carbohydrate degradation and the rate-limiting step in anaerobic digestion," *Biotech. and Bioengin.*, **27**, 1482~1489(1985).
  7. 遠藤銀朗, "嫌氣性消化の酸生成相に関する研究," 東北大學大學院博士學位論文(1980).
  8. Benedict, A. H. and Carlson, D. A., "The real nature of the Streeter-Phelps temperature coefficient," *Water Sew. Works.*, **117**, 54~57(1970).
  9. Lawrence, A. W. and McCarty, P. L., "Kinetics of methane fermentation in anaerobic treatment," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **41**(2), R1~R7(1969).
  10. Novak, J. T., "Temperature substrate interactions in biological treatment," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **46**(8), 1984~1995(1974).
  11. Benefield, L. D. and Randall, C. W., *Biological Process Design for Wastewater Treatment*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., USA, pp. 11~13(1980).
  12. Topiwala, H. and Sinclair, C. G., "Temperature relationship in continuous culture," *Biotechnol. Bioeng.*, **13**, 795~813(1971).
  13. Esner, A. A., Roels, J. A., and Kossen, N. W. F., "The influence of temperature on the maximum specific growth rate of *Klebsiella pneumoniae*," *Biotechnol. Bioeng.*, **23**, 1401~1405(1981).
  14. Mohr, P. W. and Krawiec, S., "Temperature characteristics and arrhenius plots for normal psychrophiles, mesophiles and thermophiles," *J. of Gen. Microbiol.*, **121**, 311~317(1980).
  15. Ratkowsky, D. A., Lowry, R. K., McMeekin, T. A., Stokes, A. N., and Chandler, R. E., "Model for bacterial culture growth rate throughout the entire biokinetic temperature range," *J. of Bacteriol.*, **154**, 1222~1226(1982).
  16. Dinopoulou, G., Rudd, T., and John, N. L., "Anaerobic acidogenesis of a complex wastewater : I. The influence of operational parameters on reactor performance," *Biotechnol. Bioeng.*, **31**, 958~968(1987).
  17. Benedict, A. H. and Carlson, D. A., "Rational assessment of the Streeter-Phelps temperature coefficient," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **46**(7), 1993~1999(1974).
  18. Lin, C. Y., "Effects of substrate loading rate and temperature on methanogenesis process in anaerobic digestion," Doctor Degree Dissertation, Tohoku University, Japan(1986).
  19. Stensel, H. D. and Loehr, R. C., "Biological kinetics of suspended growth denitrification," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **45**, 249(1973).