

〈 論 文 〉

回轉媒體를 이용한 완전혼합 활성슬리지 공법의
Kinetic Constant의 算定
(Estimation of Kinetic Constant in Moving Media Complete
Mixing Activated Sludge Reactor)

金 弘 泰*
KIM Hong Tae

Abstract □ This study was carried out to obtain Kinetic constant of Moving Media Complete Mixing Activated Sludge (MMCMAS) for the wastewater treatment.

A laboratory MMCMAS reactor was operated at the organic loading rate of 2.5gBOD₅/m³/d, 48gBOD₅/m³/d kinetic constant of MMCMAS reactor was estimated as follows:

Items	Low Organic Loading Rate	High Organic Loading Rate
K _m (/hr)	3.75~8	8.57~12.5
K _s (/hr)	0.007~0.03	0.09
K _d (/hr)	1.73~3.68	3.84~5.75
Y(VSS/BOD ₅)	0.46	0.46

요 지 : 하수와 우유를 섞은 합성폐수를 처리하기 위해 회전매체를 이용한 완전혼합활성슬리지 공법의 kinetic constant 값을 算定한 결과, K_m(유기물제거속도) 값은 저부하의 경우는 3.75~8/hr, 고부하인 경우는 8.57~12.5/hr이며, K_s 값은 저부하인 경우 0.007~0.03/hr, 고부하인 경우는 0.09/hr로, K_d(내호흡계수) 값은 저부하인 경우 1.73~3.68/hr, 고부하인 경우는 3.84~5.75/hr로 나타났으며, Y 값은 0.46gVSS/gBOD₅로 算定되었다.

1. 서 론

廢水處理에 사용되는 대부분의 fixed biofilm reactor가 biofilm의 적절한 두께를 유지하기가 어렵다. 微生物이 脫離가 일어날 때까지 성장하기 때문에, 媒體가 폐쇄되어 유출수질이 불량해진다.

沈澱形 회전매체를 가진 반응조는, 媒體가 회전하면서 생기는 물과의 剪斷力으로 얇은 生物膜을 유지함으로써, 두꺼운 生物膜의 脫離로 인한 유출

수질의 변동을 방지하고, 生物膜을 有效두께로 유지하게 되고, 또한 曝氣槽 바닥에서 올라오는 공기와 媒體가 회전함으로써 반응조내의 完全혼합을 이루는 동시에, 회전매체표면의 유속이 빠르게 되어 基質 이동이 증가하여 基質 除去率이 커진다.

본 연구는 이러한 強點을 가진 回轉媒體를 이용한 完全混合活性슬리지(Moving Media Complete Mixing Activated Sludge:MMCMAS) 工法의 下·廢水處理에의 有機物除去를 면밀히 조사하기 위하여 kinetic constant 값을 算定하였다.

* 경북대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

2. 生物膜 工法の 反應理論

微生物 성장에 관한 數學的 Model은, 1950년대 Novic과 Szilard⁽¹⁾, Monod⁽²⁾등에 의해서 微生物의 연속 배양에 관한 이론이 정립된 이래 광범위한 분야에서 여러 사람들에 의해 많은 연구와 발전이 이루어지고 있다.

微生物 성장에 관한 數學的 Model중 가장 기본적인 요소는, 微生物 성장을, 基質과 微生物 成長速度와의 관계, 基質 제거시 微生物 생성량에 관한 것이라 할수 있다.

일반적으로 代數成長段階의 微生物의 성장은, Herbert 等⁽³⁾에 의하여 다음과 같이 1차 반응에 따른다고 가정되어 왔다.

$$\frac{dM}{dt} = \mu \cdot M \quad (1)$$

M: 미생물 농도 (mass/volume)

t: 시간

μ : 比成長 速度 (specific growth rate 1/time)

한편 微生物의 減少率도 1차 반응에 따른다고 가정되어, 실제 微生物의 減少率을 고려한 微生物의 성장(net growth)은 Lawrence 와 McCarty⁽⁴⁾, Shea 等⁽⁵⁾, Agardy⁽⁶⁾ 및 Andrews⁽⁷⁾에 의해서 다음과 같이 표현되어 왔다.

$$\frac{dM}{dt} = (\mu - K_d) \cdot M \quad (2)$$

K_d : 미생물 감소계수 (decay rate of microorganism, 1/time)

또한, 好氣性 廢水處理工法에서 有機物質 利用率 (rate of waste utilization) 과 微生物 성장에 대한 표현^(7,8,9,10)은 다음과 같이 발달되어 왔다.

$$\left(\frac{dM}{dt}\right) = Y \cdot \left(\frac{dF}{dt}\right) - K_d \cdot M \quad (3)$$

$\left(\frac{dM}{dt}\right)$: 반응조내의 전체 微生物의 純 變化率 (mass/volume-time)

$\left(\frac{dF}{dt}\right)$: 유기물 농도의 變化率 (mass/volume-time)

M: 微生物의 농도 (mass/volume)

Y: 微生物의 성장계수 (growth yield coefficient)

$\left(\frac{dF}{dt}\right)$ 는 반응조내의 폐수 농도에 영향을 받는다는 사실을 Monod가 밝혔는데, 微生物의 성장을 제한할 수 있는 營養素(nutrient)의 농도와 微生物의 성장과의 관계식을 다음과 같이 표현하였다.

$$\left(\frac{dF}{dt}\right) = \frac{K_m \cdot F_c \cdot M}{K_s + F_c} \quad (4)$$

K_m : 유기물 제거속도 (mass/time/mass of active microorganism)

K_s : $(dF/dt)/M$ 이 $0.5K_m$ 일 때의 유기물 농도 (mass/volume) 혹은 half-velocity coefficient

F_c : 유기물 농도 (mass/volume)

식 (3)과 식 (4)를 조합하면

$$\left(\frac{dM}{dt}\right) = \frac{Y \cdot K_m \cdot F_c \cdot M}{K_s + F_c} - K_d \cdot M \quad (5)$$

식 (5)를 微生物 단위중량당 성장으로 표현하면, $(dM/dt)/M$ 은 식 (1)의 μ 와 같다.

μ 는 연속적으로 유입·유출되고 完全混合 單一反應槽의 경우, 流體 滯留時間의 역수와 같다.

$$\left(\frac{dM}{dt}\right)/M = \frac{Y \cdot K_m \cdot F_c}{K_s + F_c} - K_d \quad (6)$$

日當 생산되는 μ (미생물)를 $(dM/dt)/M$ 이라고 하면, SRT(Solids Retention Time)는 다음과 같다.

$$SRT = \frac{M_t}{(dM/dt) \cdot t} = \frac{1}{\mu} \quad (7)$$

M_t : 반응조내에 살아 있는 Total Microbes (mass)

$(dM/dt) \cdot t$: 매일 유출되는 살아 있는 微生物量 (mass/time)

= 폐기되는 微生物量 + 유출수로 흘러나가는 微生物量.

廢水 處理效率, $E(\%)$ 는

$$E = \frac{(F_i - F_e)}{F_i} \times 100 \quad (8)$$

F_i : 유입폐수의 농도 (mass/volume)

F_e : 유출폐수의 농도 (mass/volume)

SRT가 減少하면 비성장 속도가 증가하지만 어느한계를 넘어서면 반응조내의 微生物은 유출되고, 유입수의 농도와 유출수가 같아질 때 효율은 Zero가 되며 운전은 실패하게 된다.

먹이가 제한되지 않았을 때 SRT의 최소값을 θ_c^m 이라 표시하며 다음과 같은 식이 성립된다⁽¹⁰⁾.

$$(\theta_c^m)^{-1} = \frac{Y \cdot K_m \cdot F_i}{K_s + F_i} - K_d \quad (9)$$

Bacterial washout time(when $F_e = F_i$):

$$[\theta_c^m]_{lim} = 1 / (Y \cdot K_m - K_d) \quad (10)$$

Limit SRT

3. 實 驗

회전매체를 이용한 완전혼합 활성슬러지 공법의 실험실 반응조의 構造 및 主要諸元은 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 材質은 아크릴수지가 사용되었는데, 가로 13.7cm, 세로 26cm, 높이 37.5cm로 장방형으로 제작되었다. 반응조 하부에 산기관이 설치되어 공기가 공급되는데, 이는 반응조내의 용존산소 농도를 유지하고 반응조내의 完全混合을 유지하기 위함이다. 또한 상승하는 공기방울이 회전매체에 附着된 生物膜에 직접 영향을 미치지 못하도록 정류판을 설치하였으며, 반응조 바닥에 경사를 두어 반응조 하부에 슬러지가 침적되지 않도록 하였다. 회전매체가 장치된 축에는 체인을 감아 구동모터에 연결시켜 회전시키는데, 구동모터는 감속장치가 연결되어 있어 回轉速度를 조절할 수 있도록 하였다.

실험실 반응조는 항온실내에 설치하여 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 운전하였으며, 廢水의 주입은 Masterflex펌프를 이용하여 연속적으로 정량주입하였다. 실험에 사용된 유입 폐수는 Table 2에 나타나 있는데, 하

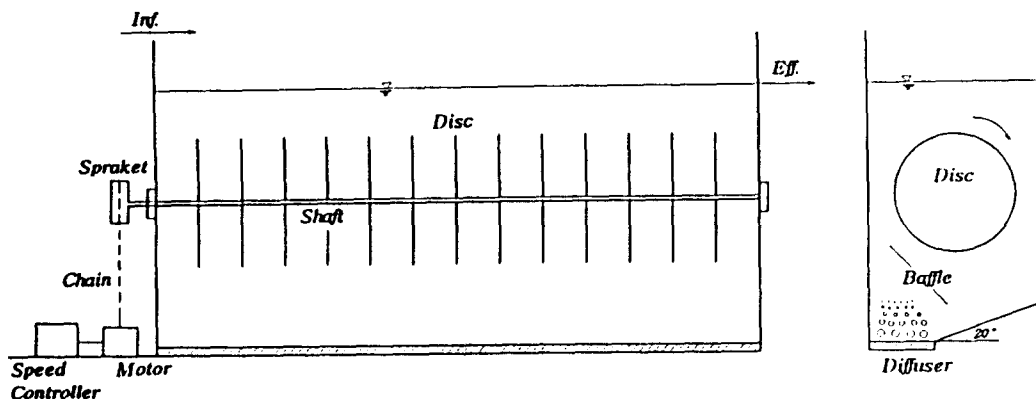


Fig. 1 Schematic Diagram of the Laboratory Scale MMCMA Reactor.

Table 1. Description of MMCMA S Reactor.

Items	Description
Number of Moving Media(EA)	13
Moving Media Diameter(cm)	12
Moving Media Thickness(mm)	1.3
Moving Media Spacing(cm)	1.5
Moving Media Surface Area(m ²)	0.29
Moving Media Material	Acryl
Shaft Diameter(cm)	1.9
Effective Volume(L)	4.69
$\frac{\text{Reactor Volume}}{\text{Media Surface Area}}$ (L/m ²)	15.6
Submerged Area(%)	100
rpm	5~30

수를 약 30~60분간 침전시킨 상정수에 탈지분유를 적당량 주입하여 사용하였다. 유입수의 BOD농도는 평균 148mg/L이었다. 필요한 營養素注入과 營養鹽類의 제거효율을 조사하기 위하여, NH₄Cl과 KH₂PO₄를 적당량 주입하였는데, 流入廢水の

BOD:N:P의 비는 약 148:27:5였다. 또한 반응조내의 pH를 중성으로 유지하기 위하여, 유입폐수에 NaHCO₃가 적당량 첨가되었다.

Table 3은 본 工法의 運轉條件을 나타내었는데 有機物 負荷率은 약 2.5gBOD₅/m²·d로부터 시작하여, 약 48gBOD₅/m²·d까지 증가시켜 운전하였으며, 負荷率에 따라서 回轉速度를 5~30rpm으로 조절하였는데, 회전매체에 부착된 미생물이 脫離되는 상태를 경험적으로 관찰하면서 有機物 負荷率이 증가됨에 따라 回轉速度를 증가시켰다.

본 工法에 사용된 微生物은, 도시 下水處理場의 返送슬러지를 채취하여 사용하였다. 처음에는 植種된 微生物의 환경조건에 대한 적응과 植種된 微生物을 회전매체에 附着시키기 위해, 낮은 수리학적 부하에서 RBC(Rotating Biological Contactor) System으로 운전하다가, 회전매체에 微生物이 완전히 附着되었을 때, 침적시켜 실험조건에 맞는 負荷로 운전하였다.

모든 수질분석은 Standard Methods⁽¹¹⁾에 의하여 분석하였다.

Table 2. Characteristics of Synthetic Wastewater.(mg/L)

Hydraulic Loading (L/m ² /d)	Moving Media rpm	pH	TCOD	SCOD	TBOD	SBOD	TSS	VSS	TKN	T-P
17	10	7.0	300.0	199.0	156.0	134.0	65.7	51.9	25.0	2.0
34	5	7.0	362.0	283.0	207.0	170.0	53.0	43.5	26.0	1.94
	10	7.0	295.0	199.0	136.0	134.0	65.7	51.9	25.8	2.18
68	7.5	7.0	292.0	165.0	170.0	88.0	104.0	72.0	26.0	2.8
	10	7.0	292.0	165.0	170.0	88.0	104.0	72.0	26.0	2.8
122	10	7.0	234.3	132.6	149.0	95.1	66.5	51.0	25.6	5.85
	15	7.0	238.3	132.6	135.5	95.1	66.5	51.0	26.7	5.47
	20	7.0	238.3	132.6	135.5	95.1	66.5	51.0	26.7	5.47
169	15	7.0	196.5	137.0	87.6	47.0	82.9	64.2	27.2	6.9
	20	7.0	231.6	151.3	139.7	103.2	63.5	50.5	23.0	7.25
	25	7.0	265.9	180.5	161.2	117.5	42.7	35.0	26.1	6.0
225	25	7.0	248.6	172.5	155.3	110.6	54.0	42.7	07.7	7.90
340	20	7.0	240.8	142.2	134.5	63.8	145.7	78.8	31.6	5.0
	25	7.0	258.0	165.2	145.3	76.7	121.0	78.0	30.6	6.0
	30	7.0	224.5	97.2	132.2	74.5	101.7	78.0	26.7	5.1

Table 3. Operating Conditions of MMCMA S

Hydraulic Loading (L/m ² /d)	BOD Loading Rate (gBOD/m ² /d)	Moving Media rpm	Inf BOD (mg/L)	Q (L/d)	HRT (hrs)
17	2.6	10	156	5.0	22.7
34	4.7	5	136	10.1	11.1
	7.2	10	207	10.2	11.1
68	11.7	7.5	170	20.3	5.5
	11.5	10	170	19.9	5.7
122	18.0	10	149	35.4	3.2
	16.9	15	136.6	36.3	3.1
	16.6	20	136.6	35.7	3.2
169	14.8	15	87.6	49.6	2.3
	23.7	20	139.7	49.8	2.3
	27.1	25	161.2	49.3	2.3
225	39.4	25	155.3	74.6	1.5
340	44.2	20	134.5	96.5	1.2
	48.2	25	145.3	97.4	1.2
	43.8	30	132.2	97.5	1.2

4. Kinetic Constant 의 算定

(1) 유기물 제거속도

회전매체를 이용한 완전혼합 활성슬러지 工法에 대한 有機物 除去效率을 보다 면밀히 검토하기 위하여 metabolism factor(k_m)를 구하였다. Table 4의 본 연구결과를 이용하여 McKinney⁽¹²⁾의 完全混合活性슬러지에 대한 數學的 解法인 식 (11)을 이용하여 K_m값을 구하면 Fig. 2와 같다.

$$F = \frac{F_i}{K_m \cdot t + 1} \tag{11}$$

- F_i: 유입폐수의 BOD(mg/L)
- F: 처리수의 용해성 BOD
- K_m: 유기물질 제거속도 (/hr)
- t: 포기시간 (hr)

전체적으로 3.75~12.5/hr의 범위로 나타났는데, 저부하(수리학적부하: 17~169L/m²/d)의 경우는 3.75~8/hr, 고부하(수리학적부하: 255~

340 L/m²/d)인 경우는 8.57~12.5/hr 의 범위로 나타났다.

참고적으로 도시하수의 K_m은 15/hr⁽¹³⁾으로 알려져 있으며, 完全混合活性슬러지法을 이용하여 우유폐수를 처리한 경우의 K_m값은 6.2/hr로 나타났다. 固定層 活性슬러지法⁽¹⁴⁾에서 최고 13.3/hr였으며, 半固定層 活性슬러지法⁽¹⁵⁾의 경우는 8.0/hr 정도로 나타났다.

(2) 細胞增殖係數와 內呼吸係數

微生物에 공급된 먹이의 일부분은 微生物의 세포질을 형성하는데 필요한 에너지로 이용되며, 나머지는 세포질을 형성한다.

McKinney⁽¹²⁾는 活性슬러지를 active, endogenous 및 inert organic 부분으로 구분하여 나타내었는데, 數學的으로 아래와 같이 제의하고 있다.

$$M_t = M_o + M_e + M_i + M_{ii} \tag{12}$$

- M_t: MLSS (mg/L)
- M_o: Active microbial mass(mg/L, VSS)

Table 4. Operating Results of MMCMA Reactor

Hydraulic Loading (L/m ² /d)	BOD ₅ Loading (g/m ² /d)	Moving Media rpm	Inf. BOD ₅ (mg/L)	HRT (hrs)	SRT (days)	pH	DO (mg/L)	F/M	MLSS	MLVSS	Effluent (mg/L)							
											TCOD	SCOD	TBOD	SBOD	TSS	VSS	TKN	TP
17	2.63	10	156	22.7	—	7.0	9.0	—	—	—	22.5	9.0	6.9	1.0	35.9	22.0	22.4	1.5
34	4.67	5	136	11.1	—	7.2	8.0	—	—	—	124.4	24.2	20.2	2.3	48.0	39.0	2.7	19.6
	7.15	10	207	11.1	—	7.2	8.5	—	—	—	141.7	72.1	27.8	6.2	123.0	105.0	6.17	2.01
68	11.74	7.5	170	5.54	—	7.2	8.4	—	843	653	136.0	32.0	100.0	11.0	95.0	67.0	7.84	2.3
	11.51	10	170	5.66	—	7.2	7.8	—	839	673	94.0	24.0	38.0	5.8	35.0	31.0	5.8	3.2
122	17.95	10	149	3.18	4.17	7.0	8.1	0.39	3410	2853	141.0	24.0	66.0	5.8	103.0	67.0	7.3	5.66
	16.87	15	137	2.10	3.21	7.4	8.0	0.60	2345	1766	139.0	39.0	24.0	4.6	47.0	40.0	6.4	5.4
	16.59	20	137	3.15	2.56	7.2	7.65	0.50	2592	2064	132.0	53.0	87.5	7.1	62.3	56.1	11.4	4.93
169	14.79	15	88	2.27	3.96	7.0	7.6	0.38	3230	2449	81.7	23.7	40.3	4.1	51.5	40.5	7.19	5.71
	23.67	20	140	2.26	4.71	7.3	8.35	0.55	3199	2711	84.0	32.7	25.2	3.8	56.0	43.0	13.3	6.72
	27.09	25	161	2.28	8.21	7.2	6.6	0.49	4008	3487	87.7	30.9	17.4	3.6	42.0	31.3	11.1	5.27
255	39.4	25	155	1.51	4.33	7.3	5.65	0.61	4838	4083	129.0	45.7	39.7	7.4	73.8	64.1	156.6	5.29
340	44.2	20	135	1.17	1.03	7.2	3.8	0.79	6061	3494	554.0	100.8	177.7	28.2	375.0	237.0	40.2	6.04
	48.2	25	145	1.16	2.08	7.3	3.9	0.75	5212	4023	186.0	68.1	63.2	9.7	93.0	66.0	26.5	5.70
	43.8	30	132	1.16	2.13	7.2	3.8	0.77	4766	3554	216.4	82.6	85.3	16.2	183.0	143.0	25.2	5.05

Note) : Optimum rpm at the Operating Hydraulic Loading.

F/M : kgBOD/kgMLSS/d

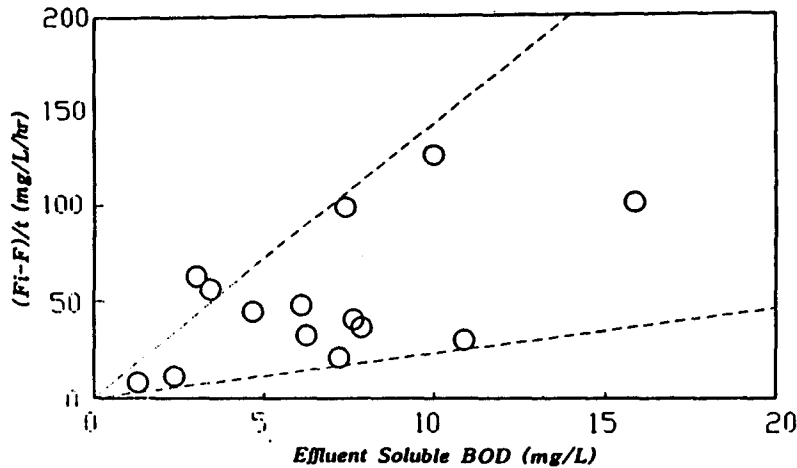


Fig 2. Evaluation of Metabolism Factor, K_m

M_e : Endogenous respiration mass (mg/L, VSS)

$$M_e = K_e \cdot F / (K_e + 1/t_e) \tag{13}$$

$$= Y \cdot (F_i - F) (t_e/t) / (1 + K_e \cdot t_e) \tag{14}$$

M_i : Influent non-biodegradable organic matter (mg/L)

K_e : 세포합성 계수 (/hr)

M_{ii} : Inert inorganic matter (mg/L)

K_e : 내 호흡 계수 (/hr)

M_a 는 아래와 같이 계산된다.

t_e : 슬러지 체류시간 (hr)

M_e 는 아래와 같이 계산된다.

$$M_s = 0.2 \cdot K_d \cdot M_a \cdot T, \quad (15)$$

M_v 는 $M_s + M_e$ 이므로

$$M_v = K_d \cdot F(1 + 0.2K_d \cdot t_s) / (K_d + 1/t_s) \quad (16)$$

로 표시되며

$$M_i = \text{Inf } M_i(t_s/t)$$

$M_{ii} = \text{Inf } M_{ii}(t_s/t)$ 로 표시된다.

微生物의 세포증식계수 Y 값은, 活性슬러지工法의 物質收支로부터 유도한 다음의 식 (17)을 이용하여 구할수 있는데 그 결과는 Fig. 3과 같다.

$$\frac{1}{\text{SRT}} = Y(F/M)_{\text{rem}} - K_d \quad (17)$$

$$= Y \frac{F_i - F}{M} \cdot \frac{1}{t} - K_d$$

F_i : 유입수의 유기물 농도 (mg/L)

F : 처리수의 유기물 농도 (mg/L)

M : MLSS (mg/L)

$(F/M)_{\text{rem}}$: (food to microorganism)_(removed)

K_d : Cell decay coefficient (day⁻¹)

t : HRT (Hydraulic Retention Time)

그림에서 기울기는 Y값이고, 절편은 K_d 값을 나타낸다. BOD₅를 기준으로 하는 경우 Y 값은 0.

46gVSS/gBOD₅으로 나타났으며, K_d 값은 0.065/hr였다. 일반적으로 Y는 0.4 ~ 0.8gVSS/gBOD₅, K_d (Cell decay coefficient/day)는 0.004 ~ 0.075/hr의 값을 갖는데, 처리방법, 有機物質 제거효율, SRT, 廢水의 특성 등에 따라 변화한다.⁽¹⁶⁾

Kornegay와 Andrews⁽¹⁷⁾는 회전드럼이 附着된 固定 生物膜 反應槽를 이용하여 基質 농도가 27 ~ 440mg glucose/L인 廢水를 처리한 결과, 세포증식계수(Y)는 0.26kg VSS/kg glucose_{rem}으로 나타났다.

참고적으로 関⁽¹⁸⁾은 Aeration-Only CMAS System으로 우유폐수와 phenol이 함유된 폐수를 처리하였는데, Y는 0.5 ~ 0.6의 범위로 K_d 는 0.0025 ~ 0.003/hr의 범위로 나타났다. 林⁽¹⁹⁾의 glutamic acid 폐수의 경우, Y는 0.769, K_d 는 0.003/hr로 나타났다.

내호흡계수(K_e)는 McKinney의 數學的인 해법인 아래의 식 (18)을 이용하여 산정할수 있는데, Table 4의 운전 결과를 이용하여 구한 결과가 Table 5에 요약되어 있다.

$$\frac{F_i - F}{M_v} = \frac{t}{t_s} \cdot \frac{1}{Y} + \frac{K_e \cdot t}{Y} \left[1 - \alpha \cdot Y \frac{F_i - F}{M_v} \frac{t_s}{t} \right] \quad (18)$$

$\alpha = \text{NBD organic fraction in cell (0.2)}$

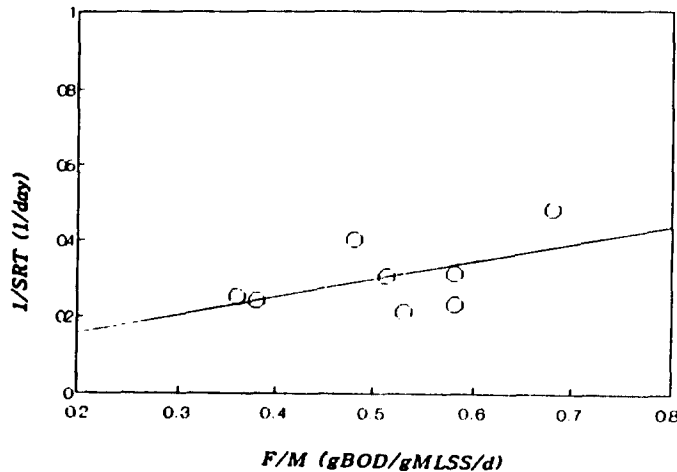


Fig 3. F/M vs. 1/SRT

Table 5. Endogenous Factor (K_e)

H.L.R (L/m ² /d)	K_e /hr
68	0.007
122	0.01
169	0.03
255	0.09

수리학적 부하가 증가할수록 K_e 값도 증가하고 있는데, 이는 McKinney가 제안한 K_e 는 M_0 에 의한 내호흡율이므로 負荷率이 크면 微生物中 M_0 부분이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

한편 세포합성계수인 K_e 값은 $Y \cdot K_m$ 으로 表示될 수 있는데 수리학적 부하가 저부하(수리학적부하: 17~169L/m²/d)인 경우 1.73~3.68/hr, 고부하(수리학적부하: 255~340L/m²/d)인 경우에는 3.84~5.75/hr의 범위로 나타났다.

5. 結 論

회전매체를 가진 완전혼합 활성슬러지 공법으로 하수에 우유를 섞은 합성폐수를 처리했을때의 kinetic constant 값은 다음과 같다.

유기물 제거속도, K_m 값은 전체적으로 3.75~12.5/hr의 범위로 나타났는데, 저부하(수리학적부하: 17~169L/m²/d)의 경우는 3.75~8/hr, 고부하(수리학적부하: 255~340L/m²/d)인 경우는 8.57~12.5/hr의 범위였다.

세포중식계수, Y 값은 0.46 gVSS/gBOD₅ 이며 내호흡계수 K_e 는 저부하(수리학적부하: 17~169L/m²/d)인 경우는 0.007~0.03/hr, 고부하(수리학적부하: 255~340L/m²/d)인 경우는 0.09/hr로 나타났다.

세포합성계수 K_e 값은 저부하(수리학적부하: 17~169L/m²/d)인 경우 1.73~3.68/hr, 고부하(수리학적부하: 255~340L/m²/d)인 경우는 3.84~5.75/hr로 算定되었다.

참 고 문 헌

1. Novick, A. and Szilard, L., "Experiments with

the Chemostat on Spontaneous Mutations of Bacteria," *Proc. Nat'l Acad. Sci.*, Vol. 36, 708 (1950).

2. Monod, J., "La Technique De Culture Continue Theorie et Applications", *Annls. Inst. Pasteur*, Vol. 79, 390 (1950).
3. Herbert, D., "Multistage Continuous Culture", In *Continuous Cultivation of Microorganisms 2nd Symposium*, Academic Press, Prague (1964).
4. Lawrence, A. W. and McCarty, P. L., "A Unified Basis for Biological Design and Operation", *J.E.E.D., ASCE*, Vol. 96, No. SA3, pp. 757-778 (1970).
5. Shea, T. G. *et al.*, "Kinetics of Hydrogen Assimilation in the Methane Fermentation", *Water Res.*, Vol. 2, pp. 833-848 (1968).
6. Agardy, F. J. *et al.*, "Kinetics and Activity Parameters of Anaerobic Fermentation System", *S.E.R.L. Report 63-2*, Univ. of California, Berkeley (1963).
7. Andrews, J. F. *et al.*, "Kinetics and Characteristics of Multistage Methane Fermentation", *S.E.R.L. Report 64-11*, Univ. of California Berkeley (1964).
8. Heukelekian, H. *et al.*, "Factors Affecting the Quantity of Sludge Production in the Activated Sludge Process", *Sewage and Indust. Wastes*, 23 (1951).
9. Eckenfelder, W. W. and Weston, R. F., "Kinetics of Biological Oxidation", in *Biological Treat. of Sewage and Indust. Wastes, Vol. 1*, Reinhold Publishing Co., New York, N. Y. (1956).
10. Speece, R. E. and McCarty, P. L., "Nutrients Requirements and Biological Solids Accumulation in Anaerobic Digestion", *Proc. of 1st Internat'l Conf. on Water Pollut. Res.*, London (1962).
11. AWWA, APHA, WPCF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th Ed. (1989).
12. McKinney, R. E., "Mathematics of Complete Mixing Activated Sludge", *SED, ASCE*, pp. 87-

- 113 (1969).
13. Benedek, P. and Farkas, P., "The Influence of Temp. on Reactions of the Activated Sludge Process", No. 16100, EXH 11/71 (1971).
 14. Choi, E., *A fixed-Media Complete Mixing Activated Sludges*, Ph.D.Dissertation, Univ. of Kansas, Lawrence(1973).
 15. 한용전, 반고정막 활성슬러지공법에 의한 폐수처리, 고려대학교 석사학위논문 (1975).
 16. Tchobanoglous, G. *et al.*, *Solid Wastes*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y. (1977).
 17. Kornegay, B. H. and Andrews, J. F., "Kinetics of Fixed-Film Biological Reactors," *JWPCF*, Vol. 40, R460-R468 (1968).
 18. 민경석, 저온에서의 활성슬러지의 성장에 관한 연구, 고려대학교 박사학위논문 (1984).
 19. Lim, J. M., *Comparison of Mathematical Models in an Activated Sludge Process*, MS Thesis, Korea Univ. (1976).

〈접수 : 93.7.27〉