

부유성 미생물을 이용한 생물처리법의 최적 설계

이 정 수

우석대학교 토목공학과

(1999년 12월 3일 접수, 2000년 3월 15일 채택)

The Optimum Design of Suspended Growth Systems

Jeoung-Su Lee

Department of Civil Engineering, Woosuk University

ABSTRACT

The purpose of this study is to examine the basis of design condition of existing treatment processes, namely, Extended Aeration Process, Conventional Activated Process, High Rate Aeration Process and Modified Aeration Process, by clarifying the correlations of influent wastewater concentration, hydraulic retention time, food-to-microorganism ratio and sedimentation of sludge, as well as to ascertain the feasibility of design, regardless of the existing design condition. In particular, this study made a priority investigation of hydraulic retention time and sludge sedimentation, because sludge sedimentation is the main factor¹⁾ which determines the operating conditions of existing treatment processes. Therefore, it is generally known that in case exceeds the sphere of design presented for each treatment, sludge bulking may occur. The results of Lesperance's test¹⁾, which formed the basis of design, showed the sphere of loading without security of sludge sedimentation, as in Fig. 1. The reason for sludge bulking in a certain condition, as above, is due to failure in application of optimum loading corresponding to each retention time by employing a few operating condition, which proved to be consecutively workable after years of trials and failures by Lesperance, for test conditions. However, the result of this test showed that in case of proper maintenance of loading, sludge sedimentation can be ensured under 120 SVI. Therefore, this study suggested hydraulic retention time and its corresponding optimum loading, and identified the hydraulic retention time as a determinant of sludge sedimentation. And, on the basis of these findings, this study suggested the feasibility of UHR(Ultra High Rate), a new operating process, exceeding several times the applicable loading value of High Rate Aeration Process under one

hour retention time which has not yet applied to the existing treatment processes.

Key Words : Hydraulic Retention Time, Sludge Volume Index, Food-to-Microorganism Ratio, Influent Wastewater Concentration

요 약 문

본 연구는 유입수의 농도, 수리학적 체류시간 및 F/M비와 슬러지 침전성과의 상관관계를 새롭게 명확히 밝혀 기존에 제시된 각 처리법 즉 장기포기법, 재래식 활성슬러지법, 고율 활성슬러지법 및 수정포기법의 설계조건이 도출된 원인을 밝히고 동시에 이들 기 제시된 설계조건에 관계없이 설계가 가능함을 확인하기 위한 연구이다. 본 실험은 특히 체류시간과 미생물의 침강성을 중심으로 고찰되었는데, 이는 슬러지의 침강성이 기존 각 처리법의 운전조건을 결정하는 주인자¹⁾이기 때문이다. 따라서 각각의 처리법에 대해 제시된 설계범위를 벗어날 경우 슬러지는 팽화하는 것으로 알려져 있으며, 설계의 기초를 제공한 Lesperance¹⁾의 실험결과에서도 침강성이 확보되지 않는 부하범위가 발생하는 것으로 나타났다. 위와 같이 일정 조건에서 슬러지가 팽화하는 원인은 Lesperance가 이전 다년간의 실패와 시도로 밝혀진 연속운전이 가능한 것으로 밝혀진 몇몇의 운전조건을 실험조건으로 채용함에 따라 각각의 체류시간에 해당하는 최적의 부하가 적용되지 않았기 때문이다. 하지만 본 실험결과 부하를 적절히 유지할 경우, F/M비 6.3 kg-BOD/kg-MLSS · day 이하, HRT 0.67hr 이하의 조건에서 슬러지의 침강성이 SVI치 120 이하로 확보될 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 체류시간과 그에 해당하는 최적 부하를 제시하였으며, 체류시간이 미생물의 침강성에 결정적 영향인자임을 밝히고, 아울러 본 실험결과를 근거로 이제까지 알려진 처리법에서는 적용된 바 없는 1시간 이하의 체류시간에서 고율 활성슬러지법의 적용 부하치를 수 배 증가하는 새로운 운전법(UHR : Ultra high rate)도 가능함을 제시하였다.

주제어 : 수리학적 체류시간, 슬러지 용적지수, 먹이/미생물 비, 유입수농도

1. 서 론

활성슬러지법은 이미 50년 이상의 기술적 진보를 거쳐 발전되어 왔으며, 운전의 주핵심은 유기물의 제거와 침강성이다. 특히 슬러지의 침강성은 설계의 핵심이지만 침강성의 악화 원인, 즉 팽화의 발생기구의 해명 및 제어방법의 개발은 완전히 해결되지 않고 있다. 일반적으로 알려진 팽화, 즉 SVI의 결정인자는 F/M비^{2,3)}, 유입수의 성분과 조성^{2,4,5)}, 용존산소농도⁴⁾, 처리수온^{2,4,6)}, 포기조의 pH^{2,4)}, N, P를 주체로 하는 영양물질의 균형^{2,4)}, 독성물질의 유입⁷⁾, 포기조의 혼합특성^{9~11)}, 슬러지일령(SRT)^{11,12)} 및 *Thiothrix*, *Beggiatoa*, *Sphaerotilus* 등 세균성 영향⁷⁾ 등을 들 수 있으나 주로 F/M비를 주 영향인자

로 고려하고 있다. 따라서 F/M비는 설계의 기본 요소로 활성슬러지법의 운전조건을 파악하기 위해 Lesperance¹⁾는 일반 도시하수를 처리할 경우 F/M비와 SVI의 관계를 Fig. 1과 같이 제시하였다. 그림에서 F/M비 0.1과 1.0 kg-BOD/kg-MLSS · day 부근의 슬러지 침강성이 나쁘기 때문에 처리공법은 이 부하조건을 피하여 장기포기법, 재래식 활성슬러지법, High-rate으로 구분 채용하고 있다. 하지만 그림에서 부하의 증가에 따라 침강성이 개선과 악화를 반복하며, 斷續구간 없이 파형을 이루고 연속적으로 변화되는 것은 다소 의문이 따른다. 따라서 본 연구의 목적은 Lesperance¹⁾ 실험결과의 불합리성을 밝히고, 이제까지의 설계 부하조건이 아닌 부하조건, 즉 상기의 부하 1.0 kg-BOD/kg-MLSS · day

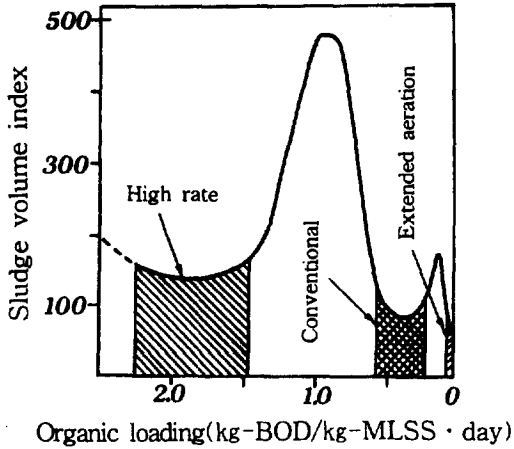


Fig. 1. Relationship between BOD loading and SVI.

나 설계조건에 없는 HRT에서도 완벽한 설계가 가능함을 밝혀, 활성슬러지법의 설계나 운전에 새로이 접근하고자 함에 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 실험을 위한 장치는 완전혼합형 연속반응기로 아크릴을 이용하여 4개조를 제작하였다. 이중 초기 실험에 사용된 반응기 2개조의 생물반응조 용적은 13.6ℓ, 침전지 용적은 4.1ℓ(표면적 : 127.5 cm²)로 Fig. 2(a)와 같고, 후기 실험에 사용된 2개조는 수리학적 체류시간을 1시간 이하로 조절하였으므로 침전지의 체류시간을 확보하기 위해 침전지 용적을 8ℓ(표면적 : 372 cm²)로 하고 생물반응조의 용적은 초기 반응기와 동일하게 제작하였으며, Fig. 2(b)와 같다. 4개조 모두 기타 주요 구성요소는 산기식 포기장치, feed tank와 tank 내 교반기 및 일정수준 유지를 위한 가온기였으며, 그 외 장기간 산기식 포기를 실시할 경우 포기조 내 밀도가 큰 미생물 덩어리가 형성되어 슬러지의 침전성을 변화시킬 수 있는데, 이러한 문제를 배제하여 균일한 슬러지 밀도를 유지할 목적으로 circulation pump를 설치하였다.

한편 일반적 실험장치의 경우, 침전지의 하부에 설치된 1개의 유출입구를 통하여 슬러지의 유입과

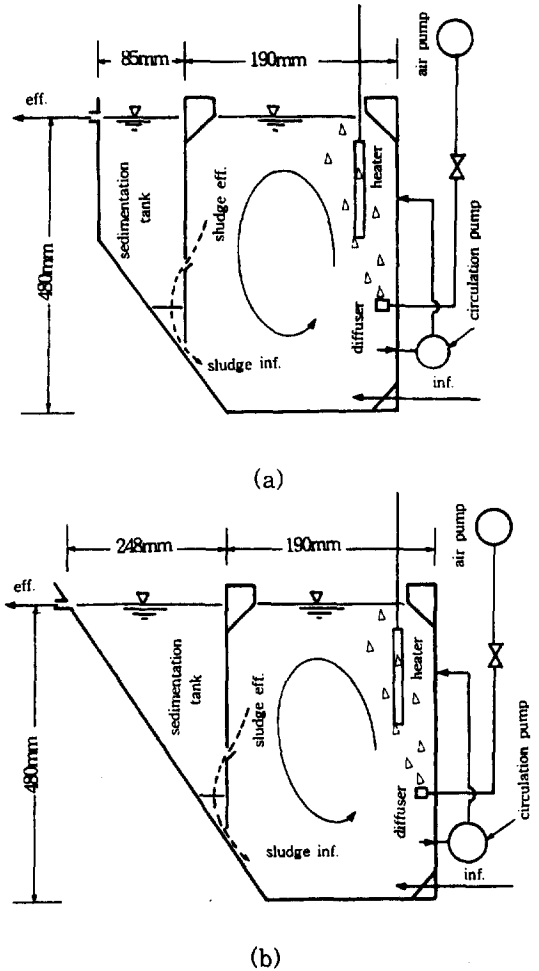


Fig. 2. Schematic diagram of reactor.

반송이 동시에 이루어지도록 설계됨으로 침전조에는 침전된 슬러지 층이 형성되고 이층은 여과막으로 작용하여 SS의 자유로운 유출을 방해할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 실제 처리장의 원형침전지와 같은 기능을 갖도록 침전지 내에 슬러지의 유입구와 반송구를 별도로 설계하여 SS가 침전 슬러지 층의 방해없이 자유롭게 유출되도록 하였다.

2.2. 사용시료

실험은 특정의 실험 폐수를 사용하지 않고 Table 1과 같은 조성을 가진 합성폐수를 이용하였다. 이는 본 실험과 같이 미생물의 처리특성이나 경향을 파악하는데, 균질의 유입수가 필수적으로 요구되기 때문이다. 본 합성폐수 원액의 BOD₅농도는 112,000

mg/ℓ이며, 반응기 주입시 수도수를 이용하여 실험 조건에 따라 약 250~2,000배 희석하여 사용하였다.

2.3. 실험방법

실험의 주 변화인자는 체류시간과 부하였으며, 주 측정인자는 SVI치였다. 체류시간의 경우 전체 실험에 채용된 범위는 12시간에서 0.67시간이었으며, 부하의 경우 0.08에서 6.45 kg-BOD₅/kg-MLSS·day였다. 각각의 실험은 먼저 체류시간을 일정하게 고정하고, 유입수 농도를 변화시켰으며 각 조건에서 SVI치를 측정하였다. 전체 실험에서 유입수 농도의 변화폭은 50~450mg/ℓ였고, 그 외에 일반적 실험 조건은 각각의 실험조건에 관계없이 온도 28±0.2℃, DO 2.0±0.3mg/ℓ였으며, 미생물농도 약 2,500 mg/ℓ로 일정하게 유지하였다. 한편 포기조의 미생물농도를 일정하게 유지하기 위해 농도 과다시 timer가 부착된 정량펌프를 이용하여 일일 6회 이상 수시로 인출하였으며, 빈부하로 인한 농도 감소 시 회분식 반응기에서 본 실험에 이용된 합성하수를 이용하여 별도로 순양된 미생물을 일일 2회 정도 보충하였다. 이때 최대 보충량은 포기조 내 미생물량의 약 1/30로 반응기의 처리특성에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

또한 사용된 미생물은 전주하수처리장의 반송슬러지를 이용하였으며, 실험전 각 조건별로 10일정도 순양하였다. 실험기간 내내 각각의 체류시간에 대해 반응기는 2조를 이용하였는데, 확인실험을 제외하면 1조는 부하감소, 다른 한 조는 부하증가에 이용하였다.

한편 본 실험은 슬러지 침강성에 따른 설계범위 또는 설계요령에 관한 내용으로 주 측정 대상은 슬

러지의 침강성 변화였고 조건변화시 유입수농도로 약 50mg/ℓ씩 변화시켜 그 변화폭이 크지 않아 슬러지 침강성 측정은 침강성이 안정되는 4~5일 정도의 간격으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 체류시간 및 부하변화에 따른 침강성의 변화

Table 2는 각각의 체류시간에서 유입수의 농도와 슬러지의 침강성, 즉 SVI치를 측정한 결과이며, Fig. 3은 Table 2을 도식한 것이다. 그림의 결과에 따르면 각각의 체류시간별로 슬러지의 침강성은 부하의 증감에 따라 상승하는 포물선형을 보이는데, 이러한 결과는 Fig. 1의 Lesperance¹⁾ 실험결과와는 매우 다른 것이었다. 관련하여 Lesperance¹⁾는 "활성슬러지법을 성공적으로 운전하기 위해서는 슬러지의 물리적 특성, 즉 SVI를 일정치 이하로 유지하는 것이 필요하고 이를 위해 각 운전조건에 맞는 최적의 F/M비를 유지하는 것이다. 하지만 정확한 최적점은 아직 알려져 있지 않고, 오늘날 수행될 수 있는 최선은 가능한 한 가깝게 최적점에 접근하는 것이다"라고 보고하였으며, 실험에서 적용한 부하는 많은 연구자들의 다년간의 실패와 시도로 얻어진 연속운전이 가능한 몇몇 결과를 이용함으로써 각각의 체류시간에 해당하는 최적의 F/M비를 유지하지 못했던 것으로 판단된다. 따라서 이러한 실험과정에서 부하 1.0 kg-BOD/kg-MLSS·day 부근에서 슬러지가 팽화한 것으로 판단되는데, 본 실험에서는 상기 부하에서 슬러지의 침강성은 양호하게 나타났으며, F/M비와 체류시간이 적절하게 유지한다면 어느 부하에서도 슬러지는 팽화하지 않을 것으로 판단된다. 이러한 사실을 재차 확인하기 위해 실험을 실시하였다. Fig. 4는 Fig. 3에서 각각의 체류시간에서 최저 SVI치를 나타내는 부하와 체류시간의 관계를 도식한 것이다. Fig. 3에서 팽화가 가장 우려되는 부하는 2.2와 4.0 kg-BOD/kg-MLSS·day으로 이 부하에서 최저의 SVI치를 나타내기 위한 체류시간은 Fig. 4에서 각각 1.3hr, 0.8hr로 나타났다. 이

Table 1. Composition of synthetic wastewater

Composition	Concentration(g/ℓ)
Skim milk	100.0
(NH ₂) ₂ CO	10.0
NaCl	3.0
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	10.0
KCl	1.4
CaCl ₂ ·2H ₂ O	1.4
MgSO ₄ ·7H ₂ O	1.0

Table 2. Condition and result of experiment

Influent wastewater concentration mg/ℓ	Hydraulic retention time											
	12hr		6hr		3hr		2hr		1hr		0.67hr	
	F/M	SVI	F/M	SVI	F/M	SVI	F/M	SVI	F/M	SVI	F/M	SVI
50			0.08	76								
100	0.08	62	0.16	65	0.32	162						
150			0.24	72	0.48	124	0.72	194				
200	0.16	142	0.32	104	0.64	98	0.96	137	1.92	195		
250	0.20	201	0.40	136			1.20	107	2.40	130	3.60	297
300			0.48	179	0.96	109	1.44	102	2.88	111	4.32	147
350									3.36	126	5.04	122
400			0.64	242	1.28	171	1.92	134	3.84	195	5.76	118
450					1.44	230	2.16	168			6.48	135

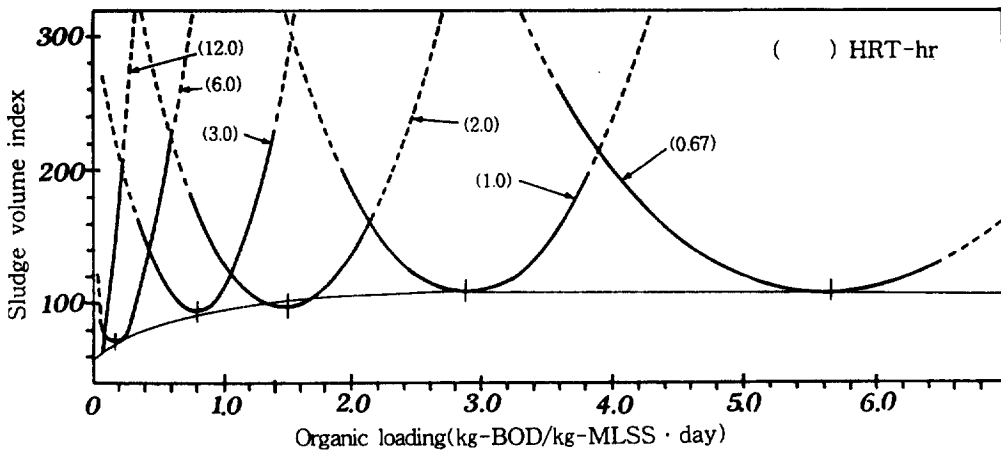


Fig. 3. The correlation of HRT, SVI and loading.

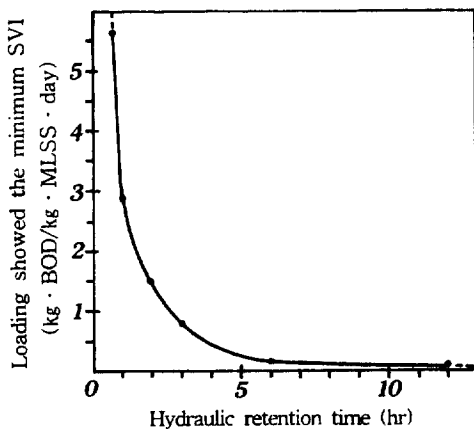


Fig. 4. Relationship between a HRT and the loading showed the minimum SVI.

들 체류시간을 식 (1)에 대입하여 구한 유입수농도 300 및 333mg/ℓ를 적용하여 실험을 실시하였는데, 실험결과는 Table 3과 같이 SVI치는 각각 102와 117로 나타나 Fig. 3의 예상치와 거의 같았다. 이상의 결과로 볼 때 HRT를 조정할 경우 어떤 부하 조건에서도 미생물의 침강성은 적정하게 유지할 수 있으며, HRT는 가장 기본적으로 미생물의 침강성을 좌우하는 인자임을 알 수 있었다.

상기에서 HRT가 슬러지의 침전성에 영향을 미치는 원인은 용집관련물질로 알려진 PHB(Poly-β-Hydroxy Butyric Acid),¹⁴⁾ 기타 세포의 고분자물질(extracellular polymer),¹⁶⁾ 즉 다당류(polysaccharides), 핵산(nucleic acids) 및 polypeptide 등의 분비속도와 이들 물질의 생산을 자극하는 유기

Table 3. Experimental result at BOD loading 2.2 and 4.0 kg-BOD/kg-MLSS · d

F/M kg-BOD ₅ /kg -MLSS · d	HRT hr	Inf. wastewater concentration mg/ℓ	MLSS mg/ℓ	SVI
2.2	1.3	300	2,500	102
4.0	0.8	333	2,500	117

산 등이 HRT변화에 따라 회석 또는 농축되기 때문으로 판단된다. 즉 HRT가 증가하면 자극물질은 감소하고 이에 따라 점액물질의 양은 감소한다. 반대로 HRT가 증가하면 자극물질은 증가하고 점액물질이 증가한다. 한편 각각의 HRT에서 부하의 증감에 따라 슬러지가 팽화하는 원인은 저부하시 상기와 같은 점액물질의 부족에 따른 것¹⁶⁾이며, 고부하시 팽화의 원인은 瀧口¹⁵⁾이 “활성슬러지 중에 점성물질이 많아지면 슬러지가 팽화한다”고 보고한 바와 같이 점성물질의 과잉에 따른 것이다. 따라서 슬러지의 팽화는 응집관련물질의 과부족상태에서 발생한다.

$$F/M = \frac{Q S_i}{XV} \quad V = \frac{Q}{24} \times HRT \text{이므로}$$

$$F/M = \frac{Q S_i}{X \times \frac{Q}{24} \times HRT} = \frac{S_i}{X \times HRT/24} \quad (1)$$

여기서 Q : 유입 폐수량 (m³/day)
 S_i : 유입수 농도 (mg/l)
 X : 미생물 농도 (mg/l)
 HRT : 수리학적 체류시간 (hr)

3.2. 미생물농도나 유입수농도에 따른 슬러지의 침강성변화

식 (1)에서 F/M비, HRT, 유입수농도 및 미생물 농도는 상호 연관되는데, 몇 개의 인자가 고정되더라도 나머지 인자를 적절히 조정한다면 어떠한 조건에서도 슬러지의 침강성을 적절하게 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 예를 들어 유입수 농도 200mg/ℓ 인 폐수를 체류시간 1시간으로 운전하고자할 경우, 최적의 F/M비는 3.0 정도이므로 식 (1)에서 미생물농도는 1,600mg/ℓ로 유지되어야함을 알 수 있다. 이와 같은 현상을 파악하기 위해 실험을 실시하

Table 4. Experimental result at BOD loading 0.92, 1.5 and 3.0 kg/kg · d

F/M kg-BOD ₅ /kg -MLSS · d	HRT hr	Inf. wastewater concentration mg/ℓ	MLSS mg/ℓ	SVI
0.92	3.0	400	3,500	116
1.50	2.0	100	800	87
3.0	1.0	200	1,600	98

였는데, 실험조건 및 결과는 Table 4와 같다. Fig. 3에서 미생물농도를 2,500mg/ℓ로 유지하고 HRT와 유입수농도를 각각 1hr, 200mg/ℓ, 2hr, 100mg/ℓ, 3hr, 400mg/ℓ로 할 경우, SVI치는 각각 150, 280, 225가 예상된다. 하지만 Table 4와 같은 조건으로 실험한 결과 SVI치는 98, 87, 116으로 나타나 HRT에 따른 최적의 F/M비가 존재함을 확인할 수 있었다.

따라서 기존 처리법에서 미생물의 농도를 처리방법에 따라 다르게 유지되어야하는 것도 이러한 원리에 따르는 것으로 판단되는데, 歐洲식 고율 활성슬러지법의 대표적 연구로 알려진, 또한 연구 결과가 비교적 세밀히 표현된 von der Emde¹³⁾의 연구결과는 본 논리를 재차 입증하고 있다. Table 5는 von der Emde¹³⁾의 실험결과인데, 본 조건을 식 (1)에 대입하여 미생물농도를 계산하면 HRT 0.7, 0.9, 0.8에 대해 각각 11,451, 9,200, 9,718mg/ℓ로 나타나 농도의 차이는 von der Emde의 적용치와 9~14%에 불과하였다. 한편 기존의 modified aeration법에서 미생물농도를 400~800mg/ℓ 정도로 매우 낮게 유지해야 하는 원인도 동일한 논리에 의한다.

3.3. 활성슬러지법의 새로운 설계요령 및 변법

3.3.1. 새로운 설계요령

기존의 설계법은 주로 F/M비나 고행물 체류시간(SRT)에 의거하여 기 제시된 설계조건을 충족시키도록 하는 방법을 채택하였으나, 3.1, 3.2항에서 밝힌 바와 같이 새로운 설계법은 각 처리방법별로 제시된 설계조건과 관계없이 최적의 침강성이 유지되도록 설계가 가능하다. Fig. 5는 Fig. 3과 4를 근거

Table 5. Experimental result of von der Emde¹³⁾

HRT hr	F/M kg/kg · d	Volumetric loading kg/m ³ · d	MLSS mg/ℓ	SVI mg/g	Inf. wastewater concentration mg/ℓ (BOD)	Eff. wastewater concentration mg/ℓ (BOD)
0.7	0.50	4.89	10,200	73	167	21
0.9	1.00	7.90	7,900	50	345	27
0.8	1.17	10.30	8,800	50	379	53

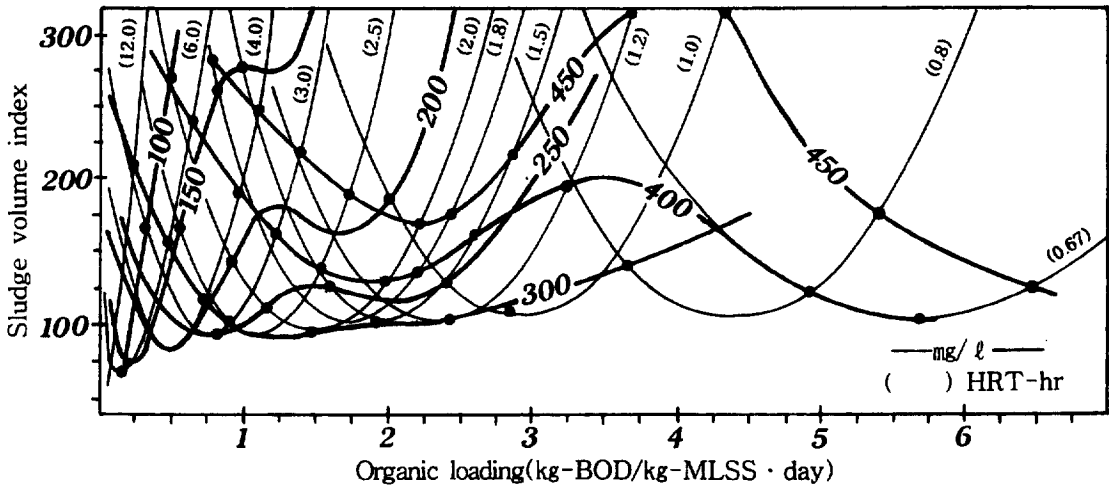


Fig. 5. The ideal correlation of HRT, SVI, loading and influent wastewater concentration.

로 가상선을 삽입하여 작성한 농도, 체류시간, 부하 및 SVI치의 상호관계를 나타낸 것이다. 그림에 표시된 점들은 각각의 농도선과 각 체류시간별로 나타나는 포물선과의 교차점을 나타내고 있는데, 점이 포물선의 좌측에 나타날 경우는 부하가 부족한 경우이다. 이 경우 미생물의 농도를 저하시킴으로써 최적의 SVI치를 나타내는 최적의 F/M비를 유지할 수 있다. 반면 점이 포물선의 우측에 나타날 경우는 미생물의 농도를 증가시킴으로써 최적의 F/M비로 조절할 수 있다. 따라서 기존의 각 처리방법 설계조건에 관계없이 본 그림을 이용하여 각 체류시간별로 적용 가능한 유입수 농도나 미생물농도를 파악함으로써 활성슬러지의 설계가 가능하다. 또한 설계에는 식 (1)을 이용할 수도 있다. 이 경우 식 (1)의 변수, 즉 F/M비, HRT, 유입수농도, 미생물농도 중 어느 것을 먼저 임의로 결정하여도 가능한데, 일반적으로 폐수의 유입농도를 조절하기란 매우 곤란하므로 먼저 폐수의 농도를 결정한다. 다음 처리수질을 고려

하여 적당한 HRT를 결정한 후 Fig. 4로부터 최적의 F/M비를 결정하거나, 반대로 적당한 F/M비를 결정한 후 최적의 HRT를 결정하여 식 (1)에 대입하면 최적 운전을 위한 미생물농도를 결정할 수 있다. 다만 폐수의 종류에 따라 처리특성, 특히 침강성이 달라질 수 있으므로 어느 경우든 결정된 미생물농도 범위를 중심으로 미생물농도를 증감시켜 미생물농도별 침강성을 파악하여 각 폐수에 대한 최적의 미생물농도를 실제 설계에 적용하면 된다. 참고로 농도 200mg/ℓ인 경우 Lesperance의 실험과 유사한 곡선을 얻을 수 있었다. 이는 Lesperance가 농도 200mg/ℓ 정도가 되는 도시하수를 농도 조정없이 HRT만을 단축시켜 실험하였음을 입증하고 있다.

3.3.2. 새로운 변법 제시

폐수처리는 크게 질적개념과 양적개념으로 구분하여 생각할 수 있다. Fig. 3과 4에서 알 수 있듯이

체류시간을 1~0.67hr 정도로 단축시킬 경우 고율 활성슬러지법에 비해 약 3.5배의 부하에서도 미생물의 침강성을 확보할 수 있는데, 이러한 방법(이하 UHR : Ultra high rate로 칭함)을 이용할 경우 처리속도나 처리량을 대폭 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다. 특히 UHR의 경우 적용 부하범위가 타 공법에 비해 매우 큼으로 팽화에 대한 안전성도 타 공법에 비해 클 것으로 사료되며 새만금과 같은 대규모 사업에 대비하여 지속적 연구가 요구된다 하겠다.

4. 결 론

실험 결과 HRT는 가장 기본적으로 미생물의 침강성을 좌우하는 인자임을 알 수 있었으며, HRT의 대소에 관계없이 일정 HRT에 해당하는 최적의 F/M비를 유지할 경우, 어떠한 유입수 농도나 부하 조건에서도 미생물이 팽화하지 않았다. 또한 부하와 유입수농도 및 HRT와 SVI와의 상관관계를 보다 명확히 밝힐 수 있었다. 따라서 활성슬러지법의 설계에 있어 기존의 설계조건에 관계없이 설계가 가능하게 되었으며, 운전시 변화하는 운전조건에 맞게 미생물농도를 수시로 조절함으로써 팽화의 위험성에 보다 빠르게 대응할 수 있게 되었다. 또한 실험 결과에 따르면 이제까지 알려진 처리법에 적용되지 않았던 1시간 이하의 체류시간에서 고율 활성슬러지법의 적용 부하치를 수 배 증가하는 새로운 운전법(UHR : Ultra high rate)도 가능함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Lesperance, T. W., "A generalized approach to...: Part II. Developing the process," *Water Works and Waste-engineering*, **2**(5), 52~55(1965).
2. Genetelli, E. J. and Heukelekian, H., "The influence of loading & chemical composition of substrate on the performance of activated sludge," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **36**(5), 643~649(1964).
3. Ganczarczyk, J., "Variation in the activated sludge volume index," *Water Research*, **4**(1), 69~78(1970).
4. Pipes, W. O., *Advances in Applied Microbiology*, Academic Press, Vol. 8, pp. 77~103(1966).
5. Pasveer, A., "A case of filamentous activated sludge," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **41**(7), 1340~1352(1969).
6. Benedick, P. and Farkas, P., *International Symposium on Water Pollution Control in Cold Climates Held at the University of Alaska*, July 22~24(1970).
7. Farquhar, G. J. and Boyle, W. C., "Control of *Thiothrix* in activated sludge," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **44**(1), 14~24(1972).
8. Chudoba, J., Grau, P., Ottova, V. and Madera, V., "Control of activated sludge filamentous bulking: Part I, Effect of the hydraulic regime or degree of mixing in an aeration tank," *Water Research*, **7**(8), 1163~1182(1973).
9. Chudoba, J., Grau, P. and Ottova, V., "Control of activated sludge filamentous bulking: Part II, Selection of microorganisms by means of a selector," *Water Research*, **7**(10), 1389~1406(1973).
10. Chudoba, J., Blaha, J. and Madera, V., "Control of activated sludge filamentous bulking: Part III, Effect of sludge loading," *Water Research*, **8**(4), 231~237(1974).
11. Jenkins, D. and Garrison, W. E., "Control of activated sludge by mean cell residence time," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **40**(11), 1905~1919(1968).
12. Sherrard, J. H. and Schroeder, E. D., "Relationship between the observed cell yield coefficient and mean cell residence time in the completely mixed activated sludge process," *Water Research*, **6**(9), 1039~1049(1972).

13. Von der Emde, W., *Advances in Biological Waste Treatment*, Pergamon Press, pp. 299~317(1963).
14. Tenney, M. W. and Stumm, W., "Chemical flocculation of microorganisms and biological waste treatment," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **40**, 1370(1965).
15. 瀧口, "Studies on Mucilage in Act. Sludge (II): On Correlation between Viscosity of the Mucilage and Settling Characteristics of Act. Sludge," *J. Ferment Technol.*, **46**, 497(1968).
16. Granville, H. Sewell., *Introduction to environmental microbiology*, Prentice-Hall, p. 268(1974).