

Ultra High Rate(UHR)법의 처리특성 및 설계에 관한 연구

이 정 수

우석대학교 토목공학과

(2000년 6월 27일 접수, 2000년 10월 25일 채택)

A Study on Treatment Characteristics and Design of Ultra High Rate Method

Jeoung-Su Lee

Department of Civil Engineering, Woosuk University

ABSTRACT

For the treatment of wastewater being discharged in large quantities as in these modern times, qualitative and quantitative concepts should be introduced in consideration of the recycling. In view of a qualitative concept, high rate aeration process is known as the most effective process up to now. However, Lee¹⁾ suggested UHR process showing the superiority over high rate process in treatment rate and quantity. Therefore, this study was performed to investigate the basic sphere of design and treatment quality, such as applicable BOD₅-loading and influent wastewater concentration of UHR process, based on Lee's suggestions¹⁾. Consequently, this process showed applicable BOD₅-loading of 2.2~7.0 kg-BOD₅/kg-MLSS · day, exceeding three times or more of high rate process with maximum applicable loading of 2.25 kg-BOD₅/kg-MLSS · day. Meanwhile, with the range of influent wastewater concentration from 200 to 450 mg/L, it showed the treatment rate from 94.7 to 97.3%, it indicated very good condition. In view of quantitative concept of treatment, UHR process is considered an epoch-making treatment process being superior to existing ones.

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

요 약 문

현대와 같이 대량의 폐수가 유출되는 시점에서 처리는 재이용을 고려한 질적 개념과 양적 개념을 고려해야 한다. 양적 개념을 고려할 경우, 고율법(high rate aeration)은 현재까지 알려진 공법 중 가장 효과적인 공법으로 알려져 있으나, 이¹⁾는 처리량이나 처리속도 면에서 고율법을 능가하는 UHR(ultra high rate) 공법을 제시한 바 있다. 따라서 본 연구는 이미 이¹⁾가 밝힌 UHR법의 적용부하, 적용농도 등 기초적 설계범위 및 처리특성을 밝히기 위해 실행되었다. 실험 결과 본법의 적용 가능부하는 2.2~7.0 kg-BOD₅/kg-MLSS·day로 고율법의 최대 적용부하인 2.25 kg-BOD₅/kg-MLSS·day를 3배 이상 초과하였다. 또한 유입수 농도 200에서 450 mg/L범위에서 처리율은 94.7~97.3%로 매우 양호한 결과를 보였다. 따라서 처리의 양적 개념에서 볼 때 기존의 어떤 처리법보다 UHR법은 매우 획기적인 처리법으로 고려된다.

주제어 : 수리학적 체류시간, 슬러지 용적지수, 먹이/미생물 비, 유입수 농도

1. 서 론

활성슬러지법 운전의 주 핵심은 유기물의 제거와 침전성이고, 이 중 특히 부유성 미생물을 이용하는 공법에서 슬러지의 침전성은 설계에 있어 가장 먼저 고려되어야 하는 인자²⁾이다. 하지만 슬러지 팽화의 원인은 F/M비,^{3,4)} 유입수의 성분과 조성,^{3,5,6)} 용존 산소농도,⁷⁾ 처리수온,^{3,5,7)} 포기조의 pH,^{3,5)} N, P를 주체로 하는 영양물질의 균형,^{3,5)} 독성물질의 유입,⁸⁾ 포기조의 혼합특성,^{9~11)} 및 슬러지일령(SRT)^{12,13)}이나 *Thiothrix*, *Beggiatoa*, *Sphaerotilus* 등 세균성 영향⁸⁾ 등 매우 다양하고 복잡하여 영향요인을 명확하게 밝히거나 이해하기가 곤란하나, 주원인은 F/M비라고 고려되어 왔다. 따라서 Lesperance²⁾는 F/M비와 SVI의 관계를 Fig. 1과 같이 제시하고 침전성이 확보되는 부하범위에 대해 각각 high rate, conventional, extended aeration 등의 변법이 가능함을 제시하였다. 하지만 이¹⁾는 Lesperance 실험의 불합리성을 밝히고 HRT와 F/M비, 유입수 농도 및 SVI의 상관성을 Fig. 2와 같이 새로이 제시하였다. 이 실험에서 각각의 체류시간에 해당하는 최적의 F/M비를 유지할 경우 슬러지의 침전성을 확보할 수 있으며, 분산성장으로 침전성 확보가 불가능한 것으로 알려진 부하범위²⁾에서도, 즉 기존의 고율 활성슬러지법 보다 3배 이상의 고부하로 운전하여도 슬러지의 침전성이 확보됨을 보고하고, 이를 UHR

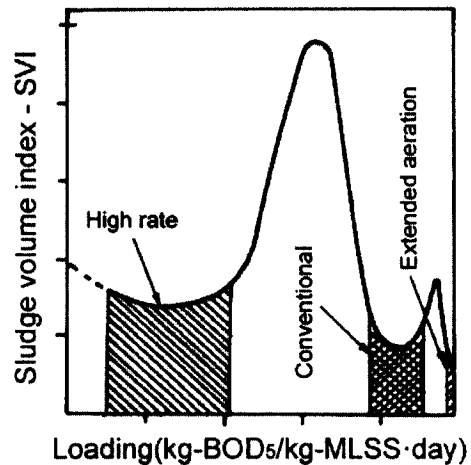


Fig. 1. Lesperance's experimental result regarding the correlation between BOD loading and SVI.

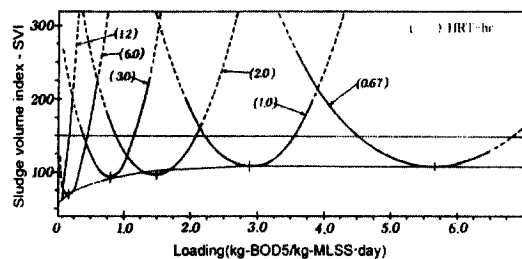


Fig. 2. Lee's experimental result regarding the correlation between BOD loading and SVI.

(ultra high rate)로 칭하여 새로운 변법으로 제시하였다. 본법은 활성슬러지법의 새로운 변법으로 1시간 이하의 체류시간에서 고율법의 최대 적용가능 부하를 수배 증가하는 처리법으로 고려된다. 따라서 본 연구의 목적은 UHR의 처리성능을 구체적으로 파악하여 본법의 현장성을 높이기 위한 기초 실험으로 기초적 이론과 설계 및 운전조건 등을 제시하고자 함에 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 실험을 위한 장치는 완전혼합형 연속반응기로 아르킬을 이용하여 2개조 제작하였다. 반응기의 생물반응조 용적은 13.6 L, 침전지 용적은 8 L(표면적 : 372 cm²)였다. 기타 구성요소는 산기식 포기장치, feed tank 및 일정수준 유지를 위한 가온기, 장기간 운전으로 형성되는 포기조내 밀도가 큰 미생물 덩어리의 분해 목적을 가진 순환펌프였으며 개략도를 Fig. 3에 나타내었다.

한편 일반적 실험장치의 경우, 침전지의 하부에 설치된 1개의 유출입구를 통하여 슬러지의 유입과 반송이 동시에 이루어지도록 설계되므로 실험조건에 따라서는 두꺼운 슬러지 층이 침전지에 형성되고 이 층이 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 실패수를 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 BOD₅는 112,000 mg/L이며, 반응기 주입시 수도수를 이용하여 희석 사용하였다.

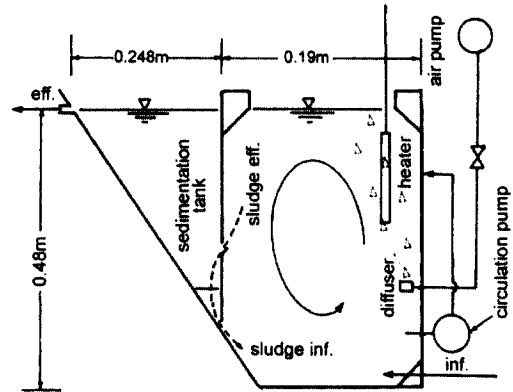


Fig. 3. Schematic diagram of reactor.

Table 1. Composition of synthetic wastewater

Composition	Concentration (g/L)
Skim milk	100.0
Urea, (NH ₂) ₂ CO	10.0
Sodium chloride, NaCl	3.0
Sodium phosphate dibasic, Na ₂ HPO ₄ · 12H ₂ O	10.0
Potassium chloride, KCl	1.4
Calcium chloride, CaCl ₂ · 2H ₂ O	1.4
Magnesium sulfate, MgSO ₄ · 7H ₂ O	1.0

2.3. 실험방법

실험의 주 변화인자는 체류시간과 부하였으며, 실험은 체류시간을 고정 한 후 2개 반응조를 이용하여 1조는 폐수의 유입농도를 증가시키고, 다른 한 조는 감소시키는 방법으로 폐수 유입농도를 변화시켜, 각각의 조건에서 유출수의 수질, SVI값 및 SS 등을 측정하였다. 전체 실험에 채용된 체류시간 범위는 1시간에서 0.67시간이었으며, 폐수 유입농도는 200에서 450 mg/L로 F/M비로 산정하면 1.92에서 6.45 kg-BOD₅/kg-MLSS · day에 해당한다. 그 외에 일반적 실험조건은 각각의 실험조건에 관계없이 온도 28±0.2℃, DO 2.0±0.3 mg/L였으며, 미생물 농도는 약 2,500 mg/L로 일정하게 유지하였는데, 미생물 농도를 일정하게 유지하기 위해서는 timer가 부착된 정량펌프를 이용하였다. 또한 사용된 미생물은 전주하수처리장의 반송슬러지를 이용하였으며, 실험전 각 조건별로 10일 정도 순양하였다. 한편 본 실험은 조건 변화시 유입수 농도로 약 50 mg/L씩

변화시켜 그 변화폭이 크지 않아 슬러지 침전성 및 처리수가 안정되는 4~5일 정도의 간격으로 실험 및 조건 변화를 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 체류시간 및 부하변화시 슬러지의 침전성

Fig. 4는 체류시간을 각각 1 hr, 0.83 hr(50 min), 0.67 hr(40 min)로 고정하고 유입수의 농도를 200에서 450 mg/L 범위에서 증감시킬 경우, 슬러지의 침전성을 나타낸 것이다. 슬러지 침전성은 각각의 체류시간에서 F/M비에 따라 달라지는데,¹⁾ 체류시간 1 hr, 0.83 hr, 0.67 hr에 대해 최저 SVI 값을 보이는 최적 F/M비는 대략 2.9, 4.0, 5.7 kg-BOD₅/kg-MLSS · day로 나타났다. 운전가능 SVI의 최대값을 150으로 할 경우 상기 체류시간 범위에서 적용가능 부하는 2.2~7.0 kg-BOD₅/kg-MLSS · day로 나타났는데, 실험을 실시하지는 않았으나 체류시간을 0.67 hr 미만으로 단축시킬 경우 적용가능 부하 역시 다소 상승할 것으로 사료된다. 상기 적용부하의 최대치 7.0 kg-BOD₅/kg-MLSS · day는 고율법의 적용 최대부하인 2.25 kg-BOD₅/kg-MLSS · day에 비해 약 3배에 해당하는 부하로, Lesperance²⁾가 분류한 Fig. 5의 dispersed growth 구간에 해당한다. Lesperance는 본 구간에 대해 "고율법 이상의 부하에 해당하는 본 부하구간에서 미생물은 분산성장하며, 과잉의 용해성 유기물질에 대해 미생물은 먹이를 섭취하지만 플러를 형성하지 않는다. 즉 본 구간에서 유기물은 미생물에 의해 즉시 이용되지만, 미생물은 극단적으로 높은 에너지 수준에서 운전되므로 플러형성 능력이 감소하여 침전성을 확보할 수 없어 유출수로부터 미생물의 분리가 불가능하다"라고 설명하였다. 하지만 Lesperance가 슬러지의 침전성을 확보하지 못한 원인은 최적의 F/M비를 유지하지 못했기 때문이다.

3.2. 슬러지 침전성에 대한 HRT의 영향

상기 3.1항에서 HRT가 슬러지의 침전성에 영향

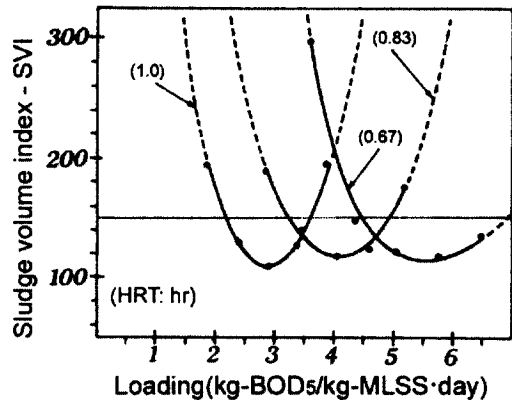


Fig. 4. Relationship between SVI and BOD loading.

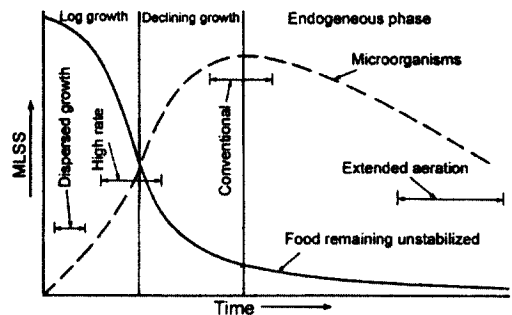


Fig. 5. Lesperance's ideal growth curve(continuous operation).

을 미치는 원인은 다음과 같다. 일부 세균은 유기물을 분해하는 과정에서 각종의 유기산¹⁵⁾과 응집관련 물질로 알려진 세포의 고분자물질(extracellular polymer), 즉 다당류(polysaccharides), 핵산(nucleic acids) 및 polypeptide를 생산한다.¹⁶⁾ 이들 물질은 세포벽의 표면을 둘러싸서 표면이 점성을 나타내는 점질층(slime layer)을 형성하기도 하고, 구조가 보다 명확한 캡슐(capsule)을 형성¹⁷⁾하기도 한다. 또한 먹이의 부족시 재흡수하는 경향이 있다.¹⁸⁾ 한편 미생물은 유해한 환경 요인에 대한 방어기구로 점질층을 형성한다.¹⁸⁾ 그 예로 탄화수소의 분해과정에서 생성되는 지방산의 영향을 들 수 있다. 즉 일부 미생물이 탄화수소를 분해하는 동안 생성된 지방산의 축적은 그 미생물이 더 이상 탄화수소를 기질로 이용하지 못하도록 하는 부정적 영향¹⁸⁾을 미친다. 즉 미생물은 유해한 환경에서 생존을 위해 점액질을 분비하여 표면을 코팅한다. 일정 HRT에서 유입수

농도를 단계적으로 증가시키면 유기산과 같은 중간 생성물의 농도가 높아지면서 pH는 하강한다. 이 경우 미생물은 유기산의 농도 증가와 같이 유해한 환경 요인에 대한 방어기구로 점액층을 형성한다. 이와 같이 세균은 박테리아성 점액물질을 분비하는데, 이 물질의 농도와 미생물 플럭 형성능력의 정도 사이에는 양론적 관계가 존재한다.¹⁶⁾ 즉 점액물질의 양이 너무 적거나 많으면 플럭 형성능력은 크게 저하된다. Fig. 2와 4에서 각각의 SVI곡선이 포물선을 그리는 것은 이와 같은 원인이다. 따라서 슬러지의 침전성이 적절히 유지되기 위해서는 점액물질의 양이 최적을 유지해야 한다. 한편 이들 점액물질은 대부분 소수성물질로 HRT의 변화 즉 회석율의 변화가 점액물질의 양에 직접 영향을 주지는 않는다. 하지만 부하가 일정할 경우 HRT가 감소하면, 즉 유입농도가 감소하면 유기산과 같이 미생물에게 유해한 물질은 회석되고, 미생물에게 가해지는 자극은 감소한다. 따라서 미생물의 점액물질 생산량은 감소한다. 반대로 HRT가 증가하면 유해물질은 농축되고, 미생물의 점액물질 생산량은 증가한다. 즉 점액물질은 HRT의 변화(회석율의 변화)에 간접적인 영향을 받는다. 따라서 HRT의 감소에 따라 미생물의 점액물질 생산량을 안정하게 유지시키기 위해서는 회석율에 비례하는 부하의 증가가 요구된다. 본 실험에서 Fig. 2, 4와 같이 HRT가 감소할 경우 최적 F/M비가 증가하는 것은 이와 같은 원인이다. 하지만 HRT의 감소에 대한 부하의 증가율은 일정하지 않은데, 이는 미생물상의 변화에 따른 것으로 판단된다. 즉 일부 부하구간에서 부하가 증가하면 반응조내의 종조성은 Fig. 6과 같이 a → b로 변화¹⁹⁾하기 때문이다. 결과적으로 하등한 세균의 증가는 분해속도를 증가시켜 유기물의 요구량이 증가한다.

3.3. UHR의 적용 유입수 농도 범위

일정 체류시간으로 운전할 경우, 최적 F/M비를 유지하기 위해서는 식 (1)에서 알 수 있듯이 유입수 농도나 미생물 농도를 조절함으로써 가능하다. 일반적으로 현장에서 유입수 농도와 미생물 농도 중 후자의 조절이 편리하므로 저농도 폐수가 유입될 경우, 미생물 농도를 감소시키고, 고농도 폐수에 대해

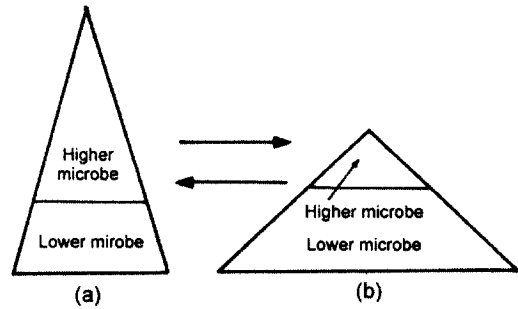


Fig. 6. The ideal exemplification of organism pyramid.

서는 미생물 농도를 증가시켜 F/M비의 조절이 가능한데, 이러한 현상은 이미 이¹¹⁾가 실험적으로 밝힌 바 있다. 따라서 별도의 확인 실험은 실시하지 않고 이론적으로 고찰하였다. 본 항에서 적용 유입수 농도를 정하기 위해 미생물 농도는 Table 2¹⁴⁾와 같이 최대와 최소 미생물 농도를 적용하는 고율법 및 수정포기법(modified aeration)의 적용 평균치 즉 최대 7,000 mg/L, 최소 350 mg/L로 결정하였으며, 식 (1)을 이용한 유입수 농도 산정 결과는 Table 3에 나타내었는데, 적용가능 농도는 42에서 1,114 mg/L로 나타났다.

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

$$F/M = \frac{S_i \times 24}{X \times HRT} \tag{1}$$

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

3.4. 기타 처리특성

Table 4와 Fig. 7은 UHR법에 의한 처리결과를 나타낸 것으로 전 실험조건에서 유출수의 수질은 S-BOD로 최소 5.6 mg/L, 최대 23.8 mg/L로 나타났으며, 처리효율은 일정 체류시간에서 부하의 증가에 따라 약간씩 감소하지만 최소 94.7%, 최대 97.3%로 나타나 양호한 결과를 보였다. SS의 경우 전 실험 조건에서 최소 20.1 mg/L에서 최대 87.8 mg/L로

Table 2. The design factors of activated sludge processes

Process	θ_c (day)	F/M (kg-BOD ₅ /kg-MLSS · day)	Volumetric loading (kg-BOD ₅ /m ³ · day)	MLSS (mg/L)	V/Q (h)
High rate	5~10	0.4~1.5	1.6~1.6	4,000~6,000	2~4
Modified aeration	0.2~0.5	1.5~5.0	1.2~2.4	200~500	1.5~3

Table 3. The range of applicable influent wastewater concentration

V/Q (hr)	F/M(optimum) (kg-BOD ₅ /kg-MLSS · day)	MLSS(min) (mg/L)	MLSS(max) (mg/L)	Wastewater conc.(min) (mg/L)	Wastewater conc.(max) (mg/L)
1.0	2.9	350	7,000	42	846
0.67	5.7	350	7,000	56	1,114

Table 4. The treatment characteristics of UHR

Influent wastewater concentration (mg/L)	Hydraulic retention time											
	1.0 hr				0.83 hr				0.67 hr			
	F/M ratio	SS (mg/L)	Eff. S-BOD/T-BOD (mg/L)	Removal rate S-BOD/T-BOD (%)	F/M ratio	SS (mg/L)	Eff. S-BOD/T-BOD (mg/L)	Removal rate S-BOD/T-BOD (%)	F/M ratio	SS (mg/L)	Eff. S-BOD/T-BOD (mg/L)	Removal rate S-BOD/T-BOD (%)
200	1.92	41.9	5.6/9.2	97.2/95.4								
250	2.4	29.0	7.7/12.5	96.9/95.0	2.89	59.4	7.2/12.2	97.1/95.1	3.58	87.8	9.0/14.8	96.4/94.1
300	2.88	29.3	8.2/14.5	97.3/95.2	3.47	48.8	11.3/18.9	96.2/93.7	4.29	74.1	10.9/21.3	96.4/92.9
350					4.05	39.5	11.1/19.6	96.8/94.4	5.01	71.7	13.7/25.2	96.1/92.8
400	3.84	20.1	11.8/16.3	97.1/95.9	4.63	37.5	14.0/22.3	96.5/94.4	5.73	62.1	19.6/32.9	95.1/91.8
450					5.20	29.3	19.2/25.5	95.7/94.3	6.45	57.7	23.8/36.2	94.7/92.0

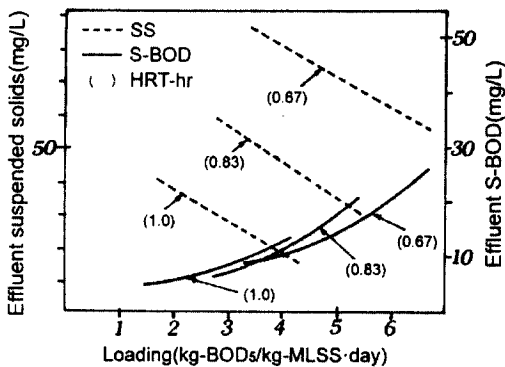


Fig. 7. The treatment characteristics of UHR.

나타났는데, 일정 체류시간에서 부하의 증가에 따라 감소하였다. 이는 일정 HRT에서 부하가 상승하면 점액물질의 분비량이 증가하여 SS의 제거량이 상승하기 때문이다. 하지만 체류시간 감소시 SS발생량은 증가하는데, 이러한 현상의 일부 원인은 체류시

간이 단축될 경우 침전지의 표면적부하가 상승하기 때문이다. 실험조건에서 침전지 표면적부하의 변화 폭은 8.57~12.8 m³/m² · day이었다. 또한 T-BOD의 경우, 최소 9.2 mg/L, 최대 36.2 mg/L로 나타났으나 침전지 표면적부하 변화에 따른 SS발생량의 영향이 크므로 T-BOD의 변화 경향이 큰 의미를 가지지는 못하지만 참고로 나타내었다.

4. 결 론

활성슬러지의 새로운 변법으로 제시된 UHR(ultra high rate)법에 대한 실험결과 본법은 1시간 이하의 체류시간에서 2.2~7.0 kg-BOD₅/kg-MLSS · day의 부하 적용이 가능하였으며, 적용부하의 최대치는 고율법의 최대 적용부하인 2.25 kg-BOD₅/kg-MLSS · day¹⁾에 비해 약 3배에 해당한다. 또한 유입

수 농도 200에서 450 mg/L 범위에서 처리율은 94.7~97.3%로 매우 양호한 결과를 보였다. 따라서 처리의 양적 개념에서 볼 때 기존의 어떤 처리법보다 UHR법은 매우 획기적인 처리법으로 고려된다. 한편 본 논문은 HRT가 슬러지의 침전성에 미치는 영향을 완벽하게 파악하였으며 동시에 기존에 제시된 설계조건에 관계없이 활성슬러지법의 설계가 가능함을 제시하였다.

사 사

이 연구는 우석대학교 학술연구비에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 이정수, "부유성 미생물을 이용한 생물처리법의 최적 설계," *대한환경공학회지*, **22**(6), 1011~1019(2000).
- Lesperance, T. W., "A generalized approach to...: Part II. Developing the process," *Water Works and Waste-engineering*, **2**(5), 52~55(1965).
- 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).
- Ganczarczyk, J., "Variation in the activated sludge volume index," *Water Res.*, **4**(1), 69~78(1970).
- Pipes, W. O., *Advances in Applied Microbiology*, Academic Press, pp. 77~103(1966).
- Pasveer, A., "A case of filamentous activated sludge," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **41**(7), 1340~1352(1969).
- Benedick, P. and Farkas, P., *International Symposium on Water Pollution Control in Cold Climates Held at the University of Alaska*, June, pp. 22~24(1970).
- Farquhar, G. J. and Boyle, W. C., "Control of *Thiothrix* in activated sludge," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **44**(1), 14~24(1972).
- 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 Res.*, **7**(8), 1163~1182(1973).
- Chudoba, J., Grau, P. and Ottova, V., "Control of activated sludge filamentous bulking: Part II, Selection of microorganisms by means of a selector," *Water Res.*, **7**(10), 1389~1406(1973).
- Chudoba, J., Blaha, J., and Madera, V., "Control of activated sludge filamentous bulking: Part III, Effect of sludge loading," *Water Res.*, **8**(4), 231~237(1974).
- 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).
- 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 Res.*, **6**(9), 1039~1049(1972).
- 양상현, *상하수도공학, 동화기술*, p. 465(1996).
- Lim Daniel, *Microbiology*, WCB/McGraw-Hill, New York, p. 433(1998).
- Granville, H. S., *Introduction to environmental microbiology*, Prentice-Hall, pp. 267~269(1974).
- Lim Daniel, *Microbiology*, WCB/McGraw-Hill, New York, pp. 61~62(1998).
- Atlas, R. M. and Bartha, R., *Microbial Ecology, Fundamental and Application*, Benjamin/Cummings Science Publishing, Menlo park, California, pp. 61~65(1997).
- 이정수, "표준 및 간헐포기식 활성슬러지법의 처리특성에 관한 연구(I)," *대한환경공학회지*, **20**(9), 1267~1278(1998).