

## 간접 포기식 유동상의 이상적 설계에 관한 연구

안 송 엽 · 김 환 홍 · 권 희 태  
원광대학교 토목환경공학과  
(1998년 12월 16일 접수)

### A Study on the Optimal Design in the Indirect Aerated Fluidized Bed

Song-Yeob Ahn, Hwan-Hong Kim, and Hee-Tae Kweon  
Dept. of Civil and Environment Engineering, Wonkwang Univ. Iksan  
(Manuscript received 16 December 1998)

Process intensification without any increase in bed requires the exploitation of fluid mechanical phenomena as the basis for elegant solutions to the process engineering problems which result from the need to retain and control the immobilized biomass, and for biomass recovery. The fluidized bed biological reactor provides a solution to these needs. The wastewater treatment characteristics of the fluidized bed was filled with sand media. Indirect aeration were studied experimentally.

The researcher was filled with sand particle size(0.60~0.42mm) in three reactors with different section area(A)/height(H), in the state BOD loading  $4.5 \text{ kg} \cdot \text{BOD}_5 / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ , and under the fixed state of hydraulic retention time for around 32 minutes.

Key words : hydraulic retention time, fluidized bed, area/height(A/H)

#### 1. 서 론

유동상법은 부차미생물을 이용하는 안정성과 부유미생물을 이용하는 처리 효율성을 동시에 가지며, 부하변동에 강하고, 상의 폐쇄현상이나 역세척의 문제가 발생하지 않는 효과적인 방법으로 널리 알려져 있다. 실험실 연구에 의하면, 대략  $\text{BOD } 200 \text{ mg} / \text{l}$  이하의 낮은 농도의 폐수를 처리할 때에 영향을 미치는 주요 영향인자로는 온도, 용존산소, 미생물 농도와 막두께, 폐수량, 폐수의 종류, pH, media충전량, media의 종류 및 크기, 순환유속, 반응기의 형태 등을 들 수 있다. 따라서 현장조건에 맞는 유동상을 설계하기 위해선 반응기의 형태, media의 크기, 충전량, 폐수의 유입농도 및 순환유량의 결정이 매우 중요하다. 즉 반응기의 형태, media의 크기 및 충전량은 반응기의 미생물 보유량을 결정짓는 인자이고, 순환유량은 그 대소에 따라 미생물 대사에 요구되는 산소 공급량을 결정하는 주요 영향인자이다.

미국에서는 주로 질소제거를 위한 연구와 Ecolotrol社에 의한 반응기의 개발<sup>1)</sup>과 함께 활기를 띠기 시작하였다.

외국의 연구 동향을 살펴 보면, 최초로 순산소를 산소원으로 하는 유동상 반응기를 이용하여 유기탄소원과 질소제거를 시도<sup>2)</sup>하였으며, 유동상의 실용 설계를 위한 각종 영향인자에 대한 연구<sup>3)</sup>를 이론적으로 고찰하였다.

그 후 유동상 내의 bioparticles의 성장화 현상과 이

론적 최적 성장 등이 실험 및 이론으로 고찰<sup>3,4)</sup>되었다.

최근 이(1994)는 모래를 media로 충전한 간접포기식 유동상을 이용한 저농도 폐수에 대한 실험에서 media의 최적충전량, 최적순환유량 및 최적조건에서의 특성에 관한 연구를 하였다. 안과 이<sup>5)</sup>는 온도와 pH에 의한 영향 실험을 실시하였다.

따라서 본 연구에서는 이들 영향인자를 중심으로 기존의 이론과 실험을 통하여 현장에 적용할 수 있는 방안을 규명 제시하고자 한다.

#### 2. 재료 및 방법

##### 2.1 실험장치와 재료

본 연구를 위한 실험장치는 아크릴 원통을 이용하여 용적이 각각 8 l 인 반응기를 3개 제작하였는데, 각 반응기의 주요 구성요소는 주반응기, 분산장치, 포기조 및 feed tank이며 각 반응기의 구체적 제원은 Table 2.1과 같고 일반적 형태는 Fig 2.1와 같다.

그의 부속장치로 Fig 2.2와 같은 상의 높이를 일정하게 유지시키기 위한 상부 확대부와 탈리장치, 시료채취구, 일정한 수온을 유지하기 위한 수중히터, 유량계 및 펌프 등이다.

유동상을 운전하면, bioparticles의 크기가 커짐에 따라 유동상 높이는 높아지게 되는데, 이때 강제로 상고를 일정높이 이하로 유지하지 않으면 bioparticle의 유실은

Table 2.1 유동상의 제원

구분	상고	단면적	직경	반응기 용적
1	208cm	38.5cm <sup>2</sup>	7cm	8 l
2	159cm	50.27cm <sup>2</sup>	8cm	8 l
3	71cm	113.1cm <sup>2</sup>	12cm	8 l

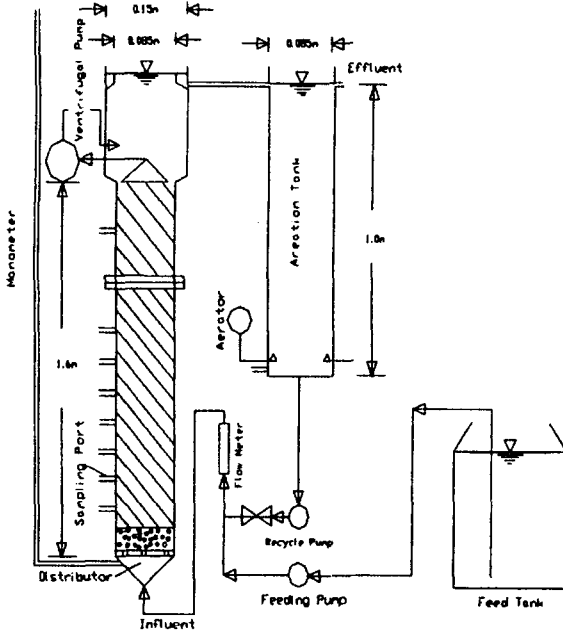


Fig. 2.1 유동상 반응기의 개략도.

물론 처리효율의 감소 및 시스템의 운전에 어려움이 생긴다.

이와 같은 장애를 피하기 위하여, 본 연구에서는 Fig 2.2와 같은 원추형흡입구와 원심력펌프 및 토출구를 이용한 생물막 분리장치를 설치하여 운영했다.

본 장치의 운전조건 및 특징은 흡입 및 토출 유량은 유동상 상승유량과 같거나 약간 크게 운전하여, 흡입구 이상으로 bioparticle이 높이 상승하지않고, 전량이 흡입구에서 흡입되도록 하였다.

토출구는 확대부의 가장자리에 설치하여, 수류의 회전을 일으켜 분리된 슬러지의 침전을 막고 동시에 모래 입자가 유동상내로의 쉽게 재충전되도록 한다. 또한 흡입구 외측에는 정류벽을 설치하여, 상부의 회전력이 하부의 유동상에 전달되지 않도록 한다. 생물막 분리를 행하는 원심력 펌프의 양정은 순환 펌프의 揚程이던 된다.

실험에 사용한 합성폐수의 조성은 Table 2.2에 나타내었는데, 이 합성폐수 원액의 BOD<sub>5</sub>는 112,000mg/l, COD<sub>cr</sub>는 130,000mg/l이었으며, 반응기에 주입시킬 때 550배 희석하여 BOD<sub>5</sub>를 약 200mg/l, COD<sub>cr</sub>는 235mg/l로 되도록 하였으며, 유입 폐수의 pH는 7.2정도이었다.

실험에 사용한 충전재의 특성은 Table 2.3에 나타내

Table 2.2 합성폐수의 조성

구 성 물	농 도(g/l)
Skim milk	100.0
Urea, (NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO	10.0
Sodium Chloride, NaCl	10.0
Sodium phosphate, Na <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> · 12H <sub>2</sub> O	3.0
Potassium Chloride, KCl	1.4
Calcium Chloride, CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	1.4
Magnesium Sulfate, MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	1.0

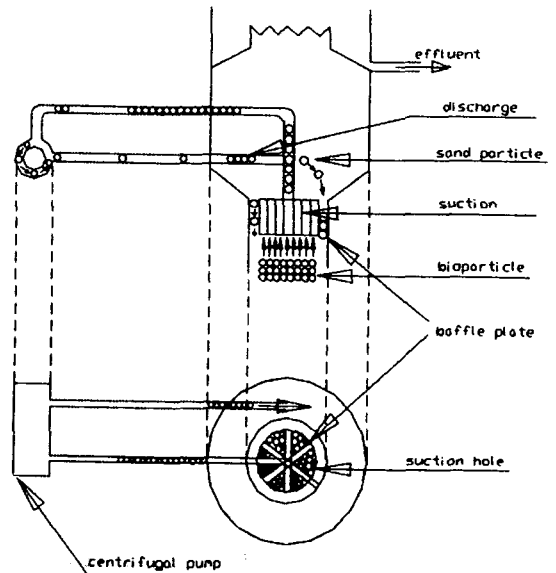


Fig. 2.2 상의 높이를 일정하게 유지시키는 장치의 개략도.

었는데, 충전재는 0.6~0.42 mm의 입경 범위를 갖는 모래를 이용하였다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 수처리실험

#### 1) 실험 A

실험 A에서는 본 실험인 실험 B에 앞서 실시된 예비 실험으로 반응기 형태별 최적 media의 입경 및 충전량을 알아보기 위해, BOD용적부하 4.5kg/m<sup>3</sup>·day, 수리학적 체류시간 32분, 유입폐수량 0.25 l/min, 유입폐수농도 200mg/l, 평균입경이 0.43, 0.53, 0.62인 모래 media를 단계적으로 반응조의 15, 16, 17, 18, 19%로 충전량을 변화시키에 따른 미생물의 농도, 유출수의

Table 2.3 충전재의 특성

Properties	sand		
Specific gravity(g/cm <sup>3</sup> )	2.65	2.65	2.65
Main diameter(mm)	0.43	0.53	0.62
Voidage	0.42	0.42	0.42
Number of particles (number/cm <sup>3</sup> )	7,423	7,398	7,226
Terminal setting velocity (cm/sec)	8.8	8.6	8.3
Minimum fluidization velocity(cm/sec)	0.28	0.27	0.26
Reynolds number for terminal setting velocity	49.7	48.4	46.8

SS 농도, 유입·유출수의 BOD, DO, 잉여슬러지량, TS, SS 등을 Standrad Methods<sup>6)</sup>로 측정하여 미생물을 최대로 보유할 수 있는 media 충전량을 최적조건으로 결정하였다.

2) 실험 B

실험 B에서는 실험 A에서 밝혀진 최적 media의 크기 및 충전량으로 고정하고, 최대의 BOD제거율을 나타낼 수 있는 순환유량을 규명하기 위해, 순환유량을 변화시켜가며 유입수와 유출수의 BOD<sub>5</sub> 및 DO, 미생물의 농도 등을 측정하였다.

3) 실험 C

실험 C에서는 설계에 필요한 매개변수를 구하기 위해 실험 A, B에서 밝혀진 media의 최적크기 및 충전량, 최적의 순환유량으로 고정하고, 유입폐수의 BOD농도와 유입폐수량을 변화시키면서, 유출수의 SS농도, 유입·유출수 DO농도, 미생물의 농도 등을 측정하였다.

실험은 유입폐수량(수리학적 체류시간 또는 슬러지 체류시간)을 변화시킨후 정상상태가 되었을 때 측정하였다. 유동상의 정상상태는 유출수의 수질, 포기조와 반응조의 산소섭취율 및 MLSS을 매일 측정하여, 유출수 BOD가 ±2%, SS는 9.5mg/l 정도 일정해졌을때 달성된 것으로 보았으며, 정상상태를 유지하기 위하여 하루 동안에 증가된 MLSS를 반응조 상부에서 탈리시켜 유출시켰으며, SS 농도는 상, 중, 하 시료채취구에서 약 100ml씩 채취하여 측정후 산술평균한 값을 채택하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 media의 충전량 및 유기물 제거 특성

media의 충전량을 찾아내기 위해 순환유량을 고정시키고 모래 media의 충전량을 변화시켜가며 실험하였으

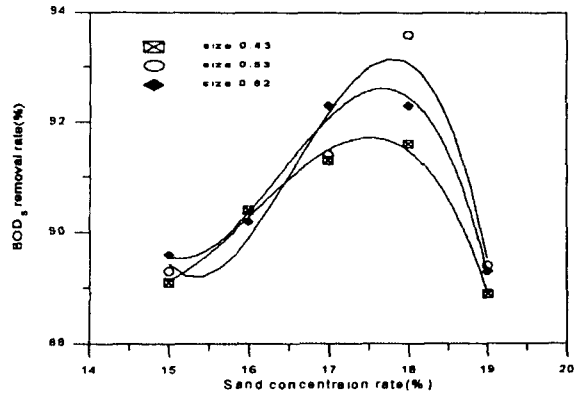


Fig. 3.1 media의 충전량 변화에 따른 BOD<sub>5</sub> 제거율.

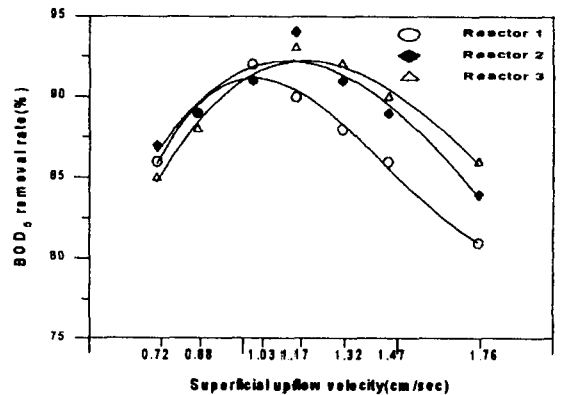


Fig. 3.2 순환유속의 변화에 따른 유입·유출수의 BOD<sub>5</sub> 제거.

며, 결과는 Fig 3.1과 같다.

Fig 3.1은 모래 media 충전량 변화에 따른 BOD<sub>5</sub>제거율을 나타냈으며, 평균입경이 0.43일 때는 모래 media 충전량이 18%에서 91.6%의 제거율을 나타내고 있으며, 평균입경이 0.53일 때는 18%에서 93.6%의 제거율, 평균입경이 0.62일 때는 17%와 18%에서 92.3%의 제거율을 보이고 있다.

3.2 반응기 형태별 순환유속의 변화에 따른 BOD<sub>5</sub> 제거율

이 연구에서는 반응기의 형태를 각 반응기의 단면적(A) 및 반응기의 상높이(H)의 비 즉 A/H비로 나타내었는데 최적의 media 충전량은 A/H비에 관계없이 18%로 일정하였으며, 순환유속의 변화에 따른 BOD<sub>5</sub> 제거효율의 단계를 Fig 3.2, Fig 3.3에 나타내었다. 순환유속이 낮은 경우 보유 미생물 농도는 커질 수 있으나 상대적으로 미생물 막두께는 두꺼워져 기질이나 산소의 접촉을 방해할 수 있고, 특히 bioparticles의 합체 현상이 발생하기 시작하고 미생물의 처리효율 및 운전성을 저하시켜 원만한 유동상태를 얻기 어렵다. 한편 A/H비에 관계없이 충전량 18%에서 최대의 처리율을 보이는 것

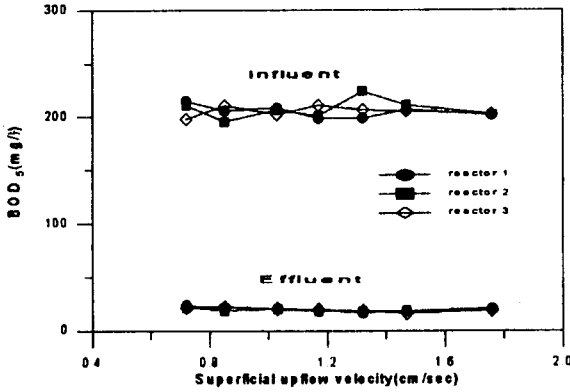


Fig. 3.3 순환유속의 변화에 따른 각 반응기의 BOD<sub>5</sub> 제거율.

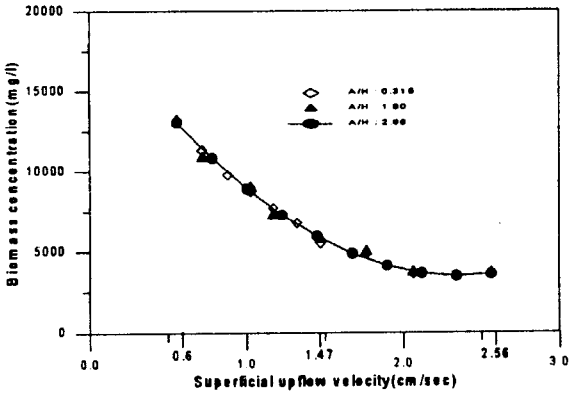


Fig. 3.4 순환유속의 변화에 따른 미생물 농도의 변화.

은 media 충전량이 많아짐에 따라 bioparticles의 사이를 통과하는 실제 순환유속이 커져 상을 팽창시켜 보유 가능한 미생물 농도를 감소시키고, 충전량이 적어질 경우에 미생물의 부착에 제공되는 비표면적의 절대량이 감소함에 따라 보유가능한 미생물 농도가 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.3 A/H비의 순환유속·유량 변화에 따른 미생물 농도의 변화

반응기가 최대의 처리효율을 나타내기 위해서는 미생물량과 산소 공급량과의 balance가 중요하다. 즉 적정 순환유량 이하에서는 미생물 농도는 높아지나 산소량이 부족하게 되고, 과잉 순환시키면 공급 산소량은 증가하나 미생물 농도는 감소하여 처리율이 떨어지게 된다.

따라서 최적 순환유량은 일정조건에서 이들 균형을 나타내는 유일한 point로, 상당 기간의 순양을 통한 미생물군의 적응 즉 종조성의 변화에 따른 산소 섭취능력의 변화가 다소 달라질 수 있다.

한편 각기 다른 A/H비를 가진 반응기에 있어 Fig. 3.4에 순환유속의 변화에 따른 미생물 농도의 변화를, Fig 3.5에 순환유량의 변화에 따른 반응기내 총미생물

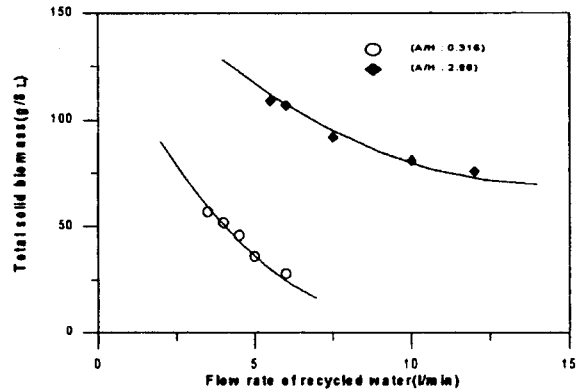


Fig. 3.5 순환유량의 변화에 따른 총미생물량의 변화.

량의 변화를 도시하였다. Fig 3.4에서 알 수 있듯이 A/H비의 차에 따른 미생물의 농도변화는 나타나지 않았으며 순환유속의 변화에 따라 크게 영향을 받았다.

순환유속이 낮을수록 미생물의 농도변화가 컸으며, Fig 3.5에 의하면 A/H비가 다를 때 순환유량의 변화에 따른 반응기내의 총미생물량이 큰 차이를 보여줄 수 있다. 이러한 차이는 포기장치 기능이나 산소원의 종류에 따라 잠재적 처리능력의 차이를 나타내는 것으로 예를 들면 다음과 같다. 순환유량이 5 l/min으로 동일한 경우, 총미생물량은 A/H비 0.316일 때 3500mg/8l에 비해 A/H비 2.96일 때 11,300mg/8l로 약 3배의 보유량을 가지며 이는 곧 3배의 부하를 가할 수 있음의 의미한다.

단, 반응기 내의 미생물 농도는床높이별로 다른데 이는 단위용적당 충전 media의 갯수 및 생물막 두께의 차이에 따른 것으로 반응기의 scale up시 고려되어야 할 중요 설계인자인데 현재 국외에서 운전되고 있는 유동상의 실제 높이 5m이상의 반응기를 제작하여야 하나 실험실 조건상 제작이 못하였으며 따라서 이 연구에서 상 높이별 미생물 농도의 변화는 무시하였다.

### 3.4 BOD부하에 따른 유출수의 수질

BOD부하는 생물학적 폐수처리에 있어서 처리 수질에 큰 영향을 주는 BOD부하를 수질기준에 비교하여 보면, 유동상에 적용 가능한 최대 부하 범위를 결정하기 위해 실험하였다.

Fig 3.6에는 BOD 및 SS의 농도변화를 도시하였다. 최적처리 조건인 18%의 media 충전량과 1.32cm/sec의 상승유속에서 용적부하를 2.0, 4.5, 6.0, 7.5kg-BOD/m<sup>3</sup>·d으로 변동시켜가며 용적부하의 증가에 따른 미생물 활성 변화를 파악하였고, 또한 용적부하내에서의 DO농도 및 BOD농도를 실측하였다.

Fig 3.6에 의하면 BOD 용적부하 2.0~7.5kg-BOD/m<sup>3</sup>·d의 범위에서 유출수의 BOD 농도가 4.1~17.6mg/l, SS 농도는 2.7~19.4mg/l로 나타나고 있다.

F/M비는 용적부하 범위내에서 0.25~0.95kg-

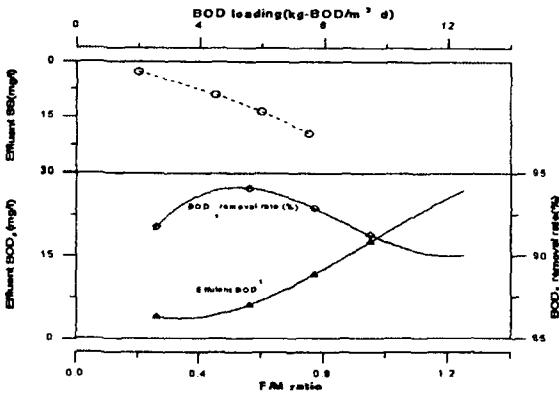


Fig. 3.6 BOD 부하율에 대한 SS의 변화와 F/M비에 대한 BOD 제거율간의 관계.

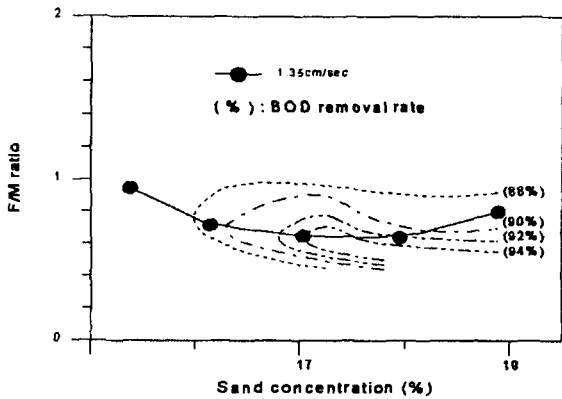


Fig. 3.7 모래 충전량과 F/M비에 대한 BOD 제거율.

BOD/kg·MLVSS·d인 것으로 일반적인 활성슬러지에 비해 2배정도로 크게 할 수 있다. 또한 용적 부하 4.5kg-BOD/m<sup>3</sup>·d에서 실험한 것은 유출수의 DO 농도는 약 2~3.5mg/l이었으며, 유동상내의 DO농도가 4mg/l 이하에서 미생물에 의한 유기물 제거가 저하됨을 알 수 있었다. 유출수의 DO농도는 BOD 부하를 증가시킬수록 저하하고, 처리효율도 조금씩 저하됨을 보여주었다.

### 3.5 Media 충전량과 순환유속에 대한 F/M비

Fig 3.7은 media 충전량과 순환유속에 대한 F/M비의 관계를 도식한 것인데, 88%, 90%, 92%, 94%의 처리효율을 얻기 위해서는 순환유량이나 media 충전량에 관계없이 F/M비는 각각 0.95, 0.87, 0.73 및 0.64이하가 되어야 함을 보여주고 있다. 위와 같은 결과는 활성슬러지법의 F/M비 0.2~0.6kg-BOD/kg-MLVSS-d의 상한치를 상회하는 값이고 특히 간접포기식 유동상의 적용 가능한 최대 BOD부하율은 8kg-BOD/m<sup>3</sup>·d로 나타나 활성 슬러지법의 적용 가능한 최대치 0.6에 비해 우수함을 보여준다.

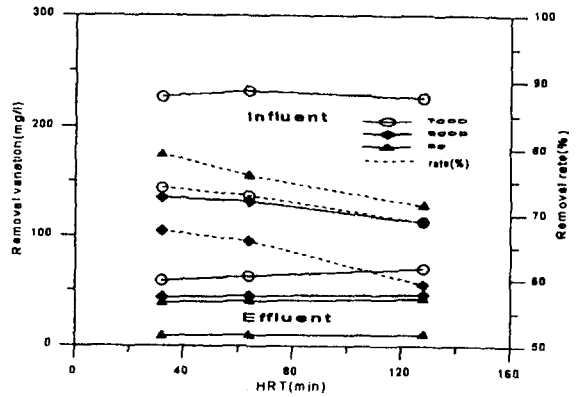


Fig. 3.8 반응조의 수리학적 체류시간의 변화에 따른 SS와 COD 제거율 관계.

### 3.6 수리학적 체류시간의 변화에 따른 COD 제거율과 SS의 관계

유동상의 수리학적 체류시간이 짧음에도 불구하고 슬러지의 침전성이 좋은 것은 슬러지가 반응조에서 충분히 안정화되었기 때문이다.

Fig 3.8은 반응조의 수리학적 체류시간의 변화에 따른 COD 제거율과 SS 농도 관계를 나타낸다.

유동상의 수리학적 체류시간(Tc)을 32, 64, 128min으로 단계적인 변화를 시켜가며 실험하였을때 Total Chemical Oxygen Demand(TCOD)와 Soluble Chemical Oxygen Demand(SCOD)의 제거율은 점차적으로 감소함을 알 수 있었으며, 유출수 SS농도는 수리학적 체류시간의 변화에 따라 최소 8mg/l에서 최대 11mg/l의 범위를 알 수 있었다.

## 4. 결 론

유동상은 반응기 형태의 변화에 따라 설계인자 및 운전 효율이 크게 변화하는데, 효율적 운전을 위해서는 영향인자 간의 상호관계를 파악하는 것이 대단히 중요한 문제이며, 실험을 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 각 반응기의 형태, 즉 A/H비에 관계없이 최대의 처리효율을 보이는 media충전량은 18%이었다.
- 2) 미생물막의 형성은 상승유속의 영향이 큰 것으로 나타났으며 최적의 상승유속은 1.17cm/sec~1.32cm/sec로 나타났다. 1.17cm/sec이하의 낮은 상승유속에서는 처리효율을 저하시킬 수 있는 bioparticles의 합체현상이 발생함을 알 수 있었다.
- 3) A/H비에 따라 최대 처리효율은 94~92%로 나타나므로, A/H비가 처리율에 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.
- 4) 각기 다른 A/H비를 가진 반응기에 있어 걸보기 상승유속의 변화에 따른 미생물의 농도 변화는 없었다.
- 5) 순환유량이 동일한 경우, 총미생물량은 A/H비가 0.316일 때에 비해 A/H비가 2.96일 때에 최대 약 3배의 보유량을 나타내므로, A/H비가 부하량 결정에 주요인자임을 알 수 있다.

6) Bioparticles의 합체현상으로 인한 처리율의 감소를 막을 수 있는 최소유량은 A/H비가 2.96일 때에 3.7 l/min, A/H비 1.6일 때에 2.8 l/min, A/H비 0.316일 때에 1.2 l/min정도인 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 원광대학교 교내연구비에 의하여 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Jeris, J. S., Beer, C., and Muller, J. A., 1974 "High Rate Biological Denitrification Using a Granular Fluided Bed," Journal of the Water Pollution Control Federation, Vol. 46, p. 2118~2128.
- 2) Theodore, C. Stathis, 1980. "Fluided Bed For Bio-

logical Wastewater Treatment" Journal of the Environment Engineering Division, pp. 227~241.

- 3) Shieh, W. K., Sutton, P. M., 1981. "Predicting reactor Biomass concentration In a fluidized Bed System," J. WPCF, Volume 53 Number 11, November.
- 4) Andrews, G., Trapasso, R., 1985. "The Optimal design of fluidized bed bioreactor," J. WPCE Volume 57 Number 2. February.
- 5) 安松燁, 李釘守, 1997. 간접 포기식 유동상이 처리 특성에 관한 연구-pH와 온도 영향을 중심으로 대한토목공학회지 제 17권 제 II-3호, pp. 261-268.
- 6) APHA, AWWA and WEF, 1992 "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater," 18th. Ed., Washington, D.C., USA..