

論 文

間接 포기식 流動床의 運轉條件 변화에 따른 處理 特性에 관한 연구
—오니전환율 및 산소이용속도를 중심으로—

A Study on the Wastewater Treatment Characteristics according to Operating Condition of the Indirectly Aerated Fluidized Bed

이 정 수*

Lee, Jeoung-Su

Abstract

The characteristics of wastewater treatment according to operating condition of indirectly aerated fluidized bed filled with sand media were studied experimentally, and the obtained results were as follows;

1. During be operated under the BOD loading rate, 4.5kg-BOD/m³.day, effluent SS according to the increase of recirculation velocities was gradually decreased.
2. According to the increase of media concentration, sludge conversion rate was gradually increased.
3. Under the same BOD loading rate, according to the increase of recirculation velocities, F/M ratio was gradually increased, however, sludge conversion rate was greatly decreased. On the other hand, influent BOD concentration has not an important effect.
4. Under the constant recirculation velocities, according to the increase of BOD loading rate, sludge conversion rate was gradually increased.
5. Under the same BOD loading rate, according to the increase of recirculation velocities, oxygen consumption rate of microorgnism was gradually increased.

1. 서 론

현대는 대량생산, 대량소비의 시대로 가정하 수, 공장폐수 할것없이 하수량은 나날이 증가 하고 있다. 하지만 기존의 처리법인 표준 활성 슬러지법은 부지 소요가 커 새로운 처리장의

건설을 위한 부지의 확보가 어렵고, 잉여 슬러 지의 발생량이 많아 이들 슬러지의 처리, 처분 에 많은 경비가 소요되는 경제적 단점을 가지 고 있다.

따라서 이러한 문제점에 대처하기 위해 고농 도의 미생물 확보가 가능하고, 미생물의 활성 을 높일 수 있는 처리 공법에 많은 연구가 집 중되고 있는데, 유동상 역시 이러한 문제점을 해결할 수 있는 한가지 대안으로 활발히 연구

*우석대학교 토목공학과 교수

가 진행되고 있다.

본법은 고정미생물막을 이용하는 공법의 안정성과 운전의 편의성 및 부유미생물을 이용하는 공법의 처리 효율성을 동시에 가지며, 1) 부하변동에 강하고, 상의 폐색현상이나 역세척의 문제가 발생하지 않는 효과적 방법으로 알려져 있다. 또한 설치 면적이 기존의 표준 활성 슬러지법에 비해 1/5정도로 대단히 작고, 실험실 차원의 연구에 따르면 낮은 농도(대략 BOD 200mg/l 이하)의 폐수처리시 침전지의 소거도 가능하다. 2)

본법에 의한 폐수 처리시 영향을 미치는 주요 인자는 온도, 용존산소, 미생물 농도와 막 두께, 부하율, 배수의 종류, pH, media 충전량, media의 종류 및 크기, 순환유속, 반응기의 형태 등을 들 수 있는데, 본 연구에서는 이들 인자중 처리 수질에 가장 큰 영향을 미치는 media 충전량, 적용 부하 및 유입수 농도를 주요 실험인자로 하여 이들 조건을 변화시킬 때 오히려 전환율 및 산소이용속도를 중심으로 유동상의 처리 특성을 규명하여 유동상의 현상 적용성을 높이고자 한다.

2. 이 론

2.1 입자의 유동

반응기내에서 충전입자의 유동현상은 수류의 상승유속과 밀접한 관례를 가지는데 반응기의 설계는 충전입자의 최소유동속도 이상 율류속도 이하의 범위에서 이루어져야 한다. 하지만 단독입자가 아닌 다수입자의 유동현상을 직접 규명하는 것은 어려운 문제이므로 일반적으로 먼저 단독입자에 대해 실험적으로 정의하고 여기에 아래와 같은 몇몇의 가정하에 다수입자에 대한 개정계수를 적용함으로써 규명할 수 있다. 2)

- ① 유체흐름은 1차원의 수직흐름이다.
- ② 반응기내에서는 비압축성의 균등분산이 이루어진다.
- ③ 반응기의 벽마찰은 입자직경에 비해 반응기의 직경이 월등히 크기 때문에 무시될 수

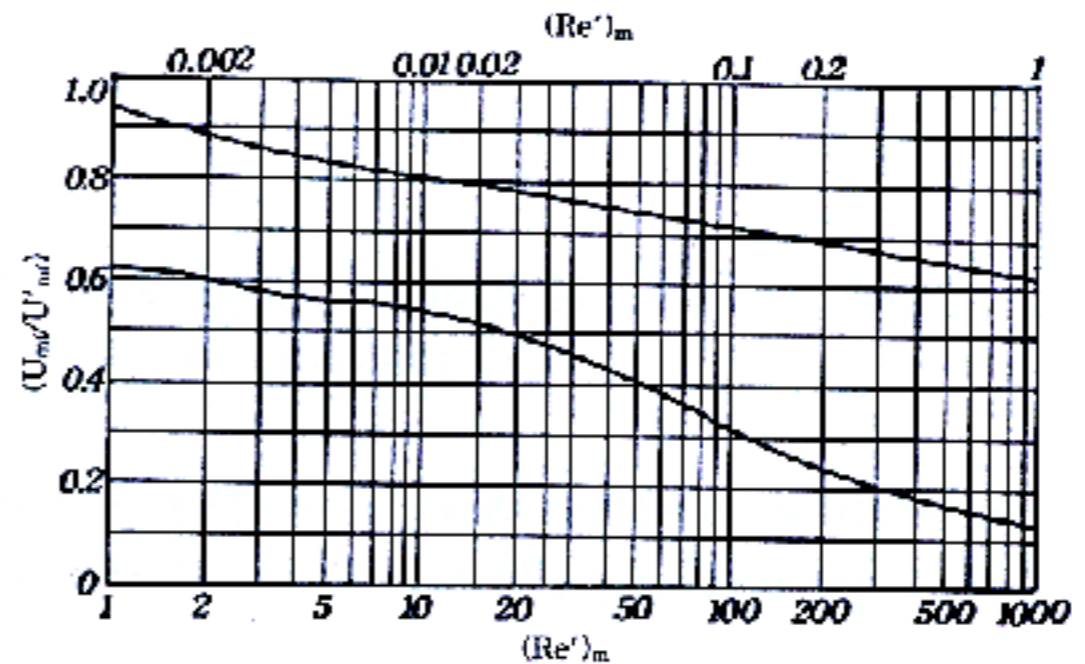


그림 1. A correction factor for U_{mf}
(assuming that C_m is 10^{-3})

있다.

- ④ 입자의 형태는 구형이다.

한편 최소 유동화 유속(U_{mf})의 추정³⁾은 다음 식 (1)로 표현된다.

$$(U_{mf}) = C_m \cdot g \cdot d_s^2(\rho_s - \rho) / m \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 최소 유동화 유속(U_{mf})을 구하는 수순은 다음과 같다.

- ① C_m 을 0.001이라고 가정하고 식(1)로 부터 일단의 U_{mf} 를 구한다.
- ② U_{mf} 에 상응하는 $(Re')_m (= ds \cdot U_{mf} \cdot \rho / \mu)$ 를 계산하고
- ③ $(Re')_m$ 에 대한 보정계수(U_{mf}/U_{mf}')를 그림 (1)로 부터 구한다.
- ④ 마지막으로 $U_{mf} = U_{mf}'(U_{mf}/U_{mf}')$ 의 관계식으로 부터 U_{mf} 를 구한다.

2.2 생물량 농도

생물량 농도는 상의 높이에 따라 약간씩 증가하므로 상, 중, 하의 시료를 약 140-150ml 정도 채취하여 다음 식 (2)로 각각의 농도를 측정 후 산술 평균하였다.

$$\text{미생물 농도(mg/l)} = \frac{(\text{용기} + \text{건조시료}) - (\text{용기} + \text{작열시료})}{V} \times 100 \quad (2)$$

여기서, V : 시료 채취량(L³)

건조시료: 105°C dry oven에서 건조

작열시료: 550°C 회화로에서 삭열

2.3 F / M ratio

유동상에 공급되는 유기물부하량 과 보유 미생물량의 비 즉 F/M비는 다음 식으로 표현된다.

$$F/M \text{ ratio} = \frac{\text{일당 BOD 부하} - \text{kg}}{\text{반응조내 미생물량} - \text{kg}} = \frac{S_0 \times Q}{V \times X} \quad (3)$$

여기서 S_0 : 유입수의 농도(mg/l)

Q : 유입 폐수량(l/day)

V : 반응조 용적(l)

X : 반응조내 미생물 농도(mg/l)

2.4 오니 전환율

폐수 처리에 있어 오니의 발생량은 처리능력과 함께 중요한자인데 발생폐기물의 처분과 관련되기 때문이다. 오니의 전환율은 일반적으로 조내의 미생물 증가량과 배출오니량을 제거 BOD량으로 나누어 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\text{오니 전환율} = \frac{(\text{조내 미생물 증가량} + \text{배출 오니량})(\text{kg-SS/day})}{\text{제거 BOD량}(\text{kg-BOD/day})} \quad (4)$$

2.4 산소 이용속도

오니의 산소 이용속도는 오니를 구성하는 미생물의 종류, 미생물막의 두께, 교반의 정도에 따라 다르게 나타날 것으로 판단되는데 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$Q_o = Qr(C_1 - C_2) / Xt \quad (5)$$

여기서 Qr : 순환 유량(m³/d)

C_1 및 C_2 : 포기조의 유출수 및 유입수의 DO농도(mg/l)

Xt : 반응기내 총 미생물량(kg)

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

본 실험을 위한 실험장치는 아크릴 원통을

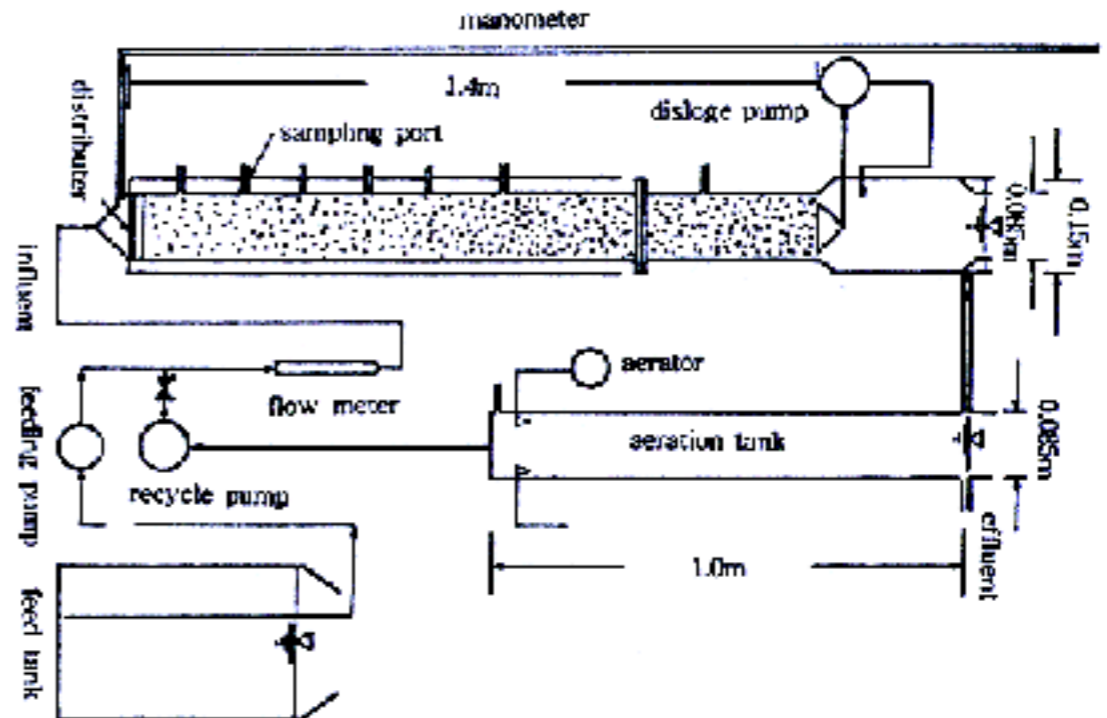


그림 2. 실험 장치

이용하여 제작하였다. 이 반응기의 반응조용적은 7.94l였으며, 반응기의 주요 구성요소는 주 반응기, 분산장치, 포기조 및 feed tank이며 반응기의 일반적 형태는 그림 2와 같다.

그외 부속장치로는 상의 높이를 일정하게 유지시키기 위한 상부 확대부와 탈리장치와 시료 채취구, 일정 수온유지를 위한 수중히터, 유량계 및 각각의 pump, 상하단의 분산판 및 분산을 돕기위한 입경 0.2~1cm 정도의 분산용 잔자갈, 분산판 상부를 청소하기 위한 직경 4mm, 길이 2m 정도의 철사(청소시에만 상내 삽입) 등이있다.

3.2 사용 시료 및 충전재

실험에 사용된 합성폐수의 조성은 표 1에 나타내었는데 이 합성폐수 원액의 BOD₅는 112,000mg/l이고 반응기 주입시 수도수를 이용 희석하여 적정농도가 되도록 하였으며 충전재는 0.6~0.42mm의 입경 범위를 갖는 모래

표 1. 합성 폐수의 조성표

Composition	Concentration (g/l)
Skim milk	100.0
Urea, (NH ₂) ₂ CO	10.0
Sodium Chloride, NaCl	3.0
Sodium phosphate, Na ₂ PO 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

를 이용하였다. 모래의 평균직경은 0.531mm 였으며 공극은 0.42였다.

3.3 실험방법

실험은 크게 A, B 2단계로 구분하여 실시하였으며 적용부하, 순환유량 및 media충전량을 제외한 일반적 실험 조건은 반응 온도 $28 \pm 0.5^\circ\text{C}$, pH 6.5 ~ 7.5로 일정하게 유지시켰다. 한편 적용 최대유속 및 최소유속은 식 (1) 및 참고문헌 1)과 2)에의거 0.047m/sec 및 0.0027m/sec였으나 예비 실험 후 0.0103~0.0235m/sec을 적용하였으며, 사용된 미생물은 C시 하수처리장의 반송슬리지를 이용하였고 실험은 반응기내에서 완전한 상을 형성시킨 후 20일 이상 충분한 순양기간을 거친 후 실시하였다.

1. 실험 A

실험 A는 실험 B에 앞서 실시된 예비 실험으로 반응기의 최적 media충전량을 결정하기 위해 BOD부하율 $4.5\text{kg-BOD}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ 에서 수리학적 체류시간 32분, 폐수 주입량 및 주입농도는 0.25l/min 및 100mg/l인 실험조건에서 순환유량은 5l/min로 고정하고, media 충전량은 15, 16, 17, 18, 19%로 단계별로 변화시키면서 각각의 조건 변화에 따른 반응기내 미생물의 농도, 유출수의 SS농도 및 처리수의 수질을 측정하였으며 경향파악을 위해 21.6% 즉 329.4 kg/m³의 충전조건에서 동일 조건의 실험을 실시하였다.

2. 실험 B

실험 B에서는 실험 A에서 밝혀진 최적의 media충전 조건에서 BOD부하율을 $4.5\text{kg-BOD}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$, 수리학적 체류시간은 각각 32, 64, 160, 320분으로 즉 폐수 주입량 및 주입농도를 0.25l/min, 0.125l/min, 0.063l/min, 0.03l/min 및 100mg/l, 200mg/l, 500mg/l, 1000mg/l로 변화시켰으며, 순환유량은 3.5~8l/min로 실험조건을 변화시켜 최적 순환유량, 유출수의 BOD 및 SS, 미생물의 농도 등을 측정하였다. 이후 최적 순환유량 조건

에서 부하율을 2.25, 6.8, 9, 11.3kg-BOD/m³·d로 변화시키고 이때 폐수 주입량을 0.25l/min으로 고정 하였다. 따라서 각 조건별로 폐수 주입농도는 50mg/l, 100mg/l, 150mg/l, 200mg/l, 250mg/l이었다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 최적 media충전량

순환유속 5l/min 즉 상승유속 1.47cm/sec에서 media충전량의 변화에 따른 처리율, 미생물량 및 유출SS농도의 변화를 그림 3에 나타내었다. 그림에 따르면 충전량의 변화에 따라 처리율, 미생물량 및 유출SS농도 역시 변화를 보이는데 미생물량의 경우 media 충전량이 많아짐에 따라 bioparticles의 사이를 통과하는 실제 상승유속이 커져 상을 팽창시켜 보유 가능한 미생물 농도를 감소시키고, 충전량이 적어진 경우는 미생물의 부착에 제공되는 비표면적의 절대량이 감소함에 따라 보유 가능한 미생물 농도가 감소하는데 실험결과 최적의 media충전량은 17%이고 이때 미생물 농도는 약 7,100 정도였다. 처리를 역시 17%에서 최대치 94.5%을 보였으며 유출수의 SS발생량은 충전량의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

한편 상기에서 유출수의 SS발생량은 반응기 청소시 배니량을 무시한 것으로 청소시 배니량

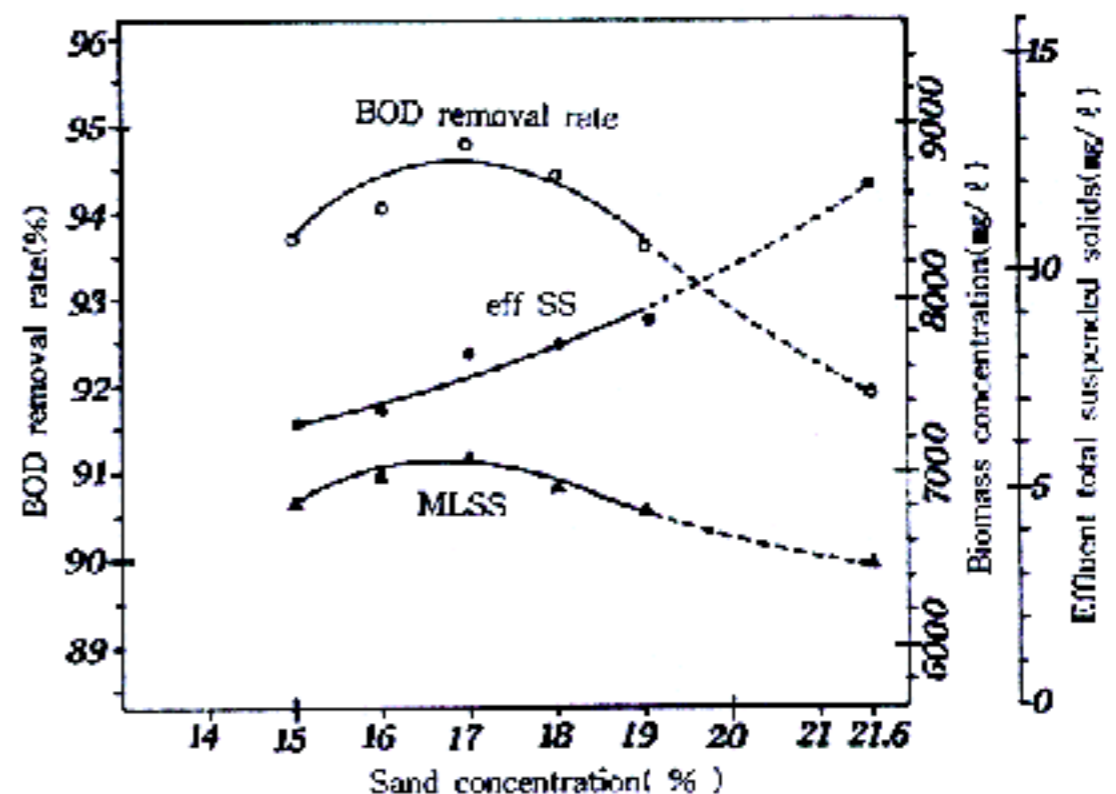


그림 3. media충전량에 따른 처리율, 미생물량 및 유출SS농도의 변화

은 본항 및 이후의 실험에서 실험조건에 크게 관계 없이 일 평균 6.413mg/day(전 실험 기간 중 최대 621mg/day의 편차를 보임) 발생하였는데 이는 주로 distributor, 분산용 사갈, 각종의 연결관의 청소시 발생하며 또한 연결관 내의 미생물 부착으로 서서히 순환 pump의 효율이 저하하는데 청소시 효율의 회복으로 인하여 상승한 상의 일부가 제거되는 과정에서 발생한다. 이와같은 미생물 제거 작업은 실험실적 규모의 반응기에서는 불가피한 것이 있다.

4.2 순환유량, 유입수농도 및 부하변동에 따른 영향

1. 순환유량 및 유입수의 농도 변화에 따른 처리효율 및 유출수의 SS농도의 변화

순환유량 및 유입수의 농도 변화에 따른 처리효율 및 유출수의 SS농도의 변화를 파악하기 위해 반응기에 media를 17%충전하고 유입수의 농도와 순환유량을 단계적으로 증가시켰다.

반응기가 최대의 처리효율을 나타내기 위해서는 미생물량과 산소 공급량과의 balance가 중요하다. 즉 적정 순환유량 이하에서는 미생물 농도는 높아지나 산소량이 부족하게 되고, 과잉 순환시는 공급 산소량은 증가하나 미생물 농도는 감소하여 처리율이 떨어지게 되는데 그 결과는 그림 4와 같다.

그림에 따르면 최적의 순환유량은 약 1.35l/min이었으며 이때 각 농도별 처리효율은 약 98.3%~95%이었다. 각 농도별 유출수 SS농도는 순환유량의 증가에 따라 감소하였는데 최대 80mg/l에서 최소 5mg/l를 보여 주었다.

한편 처리수의 수질기준이 BOD: 20mg/l, SS: 20mg/l이라하면 BOD부하율 4.5kg-BOD/m³·d인 실험조건에서 유입수농도가 100, 200mg/l인 경우 청소시 배너량을 무시하면 대부분 침전지의 소거가 가능하지만 유입수농도가 500mg/l이상인 경우 침전지의 소거는 불가능한 것으로 나타났으며 청소시 배너량을 감안하면 일반적인 경우(유입수농도 100mg/l정도)에서도 침전지의 소거는 불가능한 것으로 나타났다.

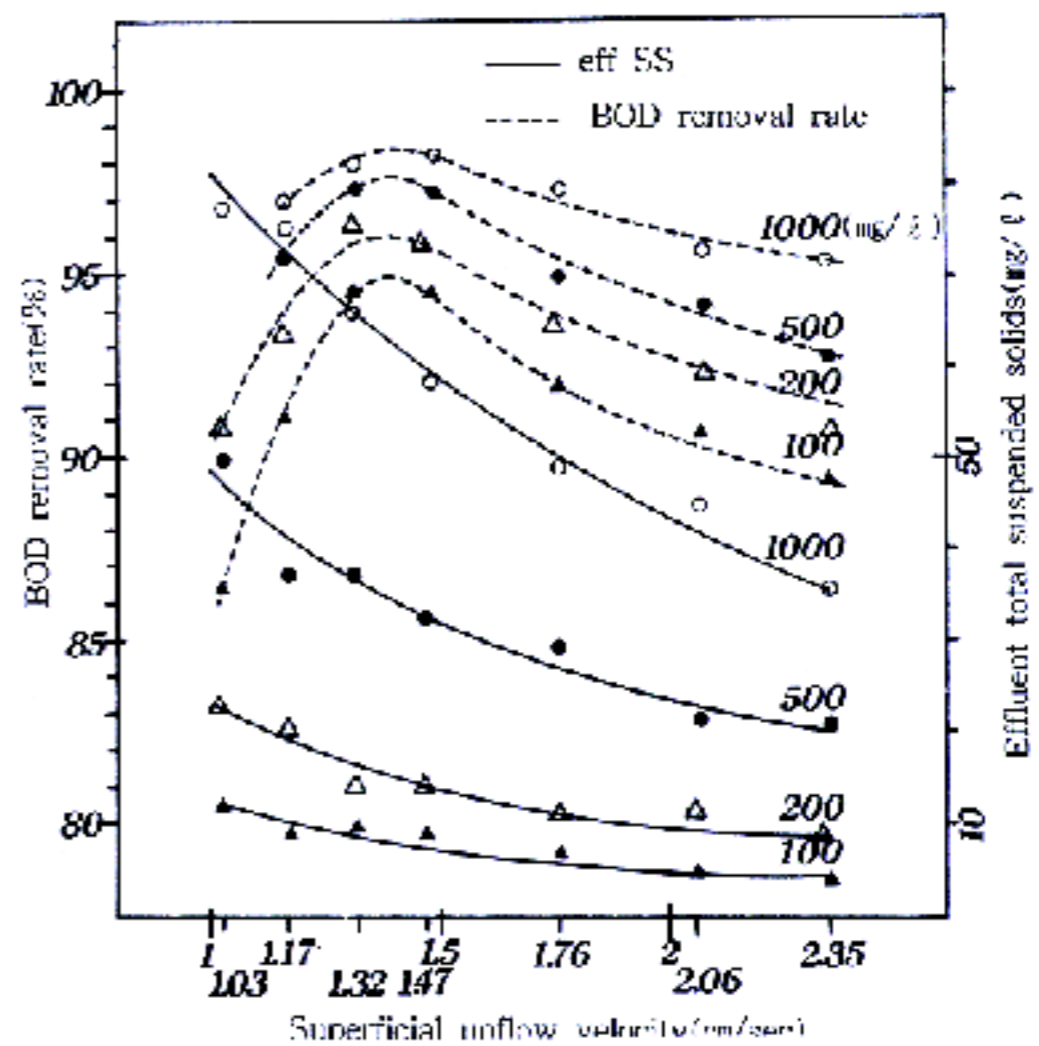


그림 4. 순환유량 및 유입수의 농도 변화에 따른 처리효율 및 유출수의 SS농도의 변화

반면 최적 순환유량은 일정 조건에서 이들 균형을 나타내는 유일한 point로, 상당 기간의 순양을 통한 미생물군의 적응 즉 종조성의 변화에 따른 산소 섭취능력의 변화에 따라 다소 달라질 수 있으나, 본 연구에서 이러한 장기적 변화는 무시하였다.

2. 부하변동에 따른 처리효율, SS농도 및 미생물농도의 변화

부하변동에 따른 처리효율, SS농도 및 미생물농도의 변화를 파악하기 위해 최적 순환유속 1.35cm/sec 및 최적 media충전조건 17%에서 폐수 주입량을 0.25l/min으로 고정하고 부하율을 2.25, 6.8, 9, 11.3kg-BOD/m³·d로 변화시켜 유출수의 BOD, SS, DO, 유입수의 DO 및 미생물의 농도 등을 측정하였다.

실험결과는 그림 5에 나타내었는데 그림에 따르면 4.5kg-BOD/m³·d의 부하율일때 처리효율은 95.4%로 최대치를 보였으며 상기부하를 중심으로 부하율의 증감에 따라 처리율은 89%까지 감소하였다. 한편 유출수의 SS농도는 부하의 증가에 따라 꾸준히 증가하여 2.8mg/l에서 약 30mg/l까지 증가하였으며 미생물의 농도는 부하변동에 관계없이 7,830mg/l

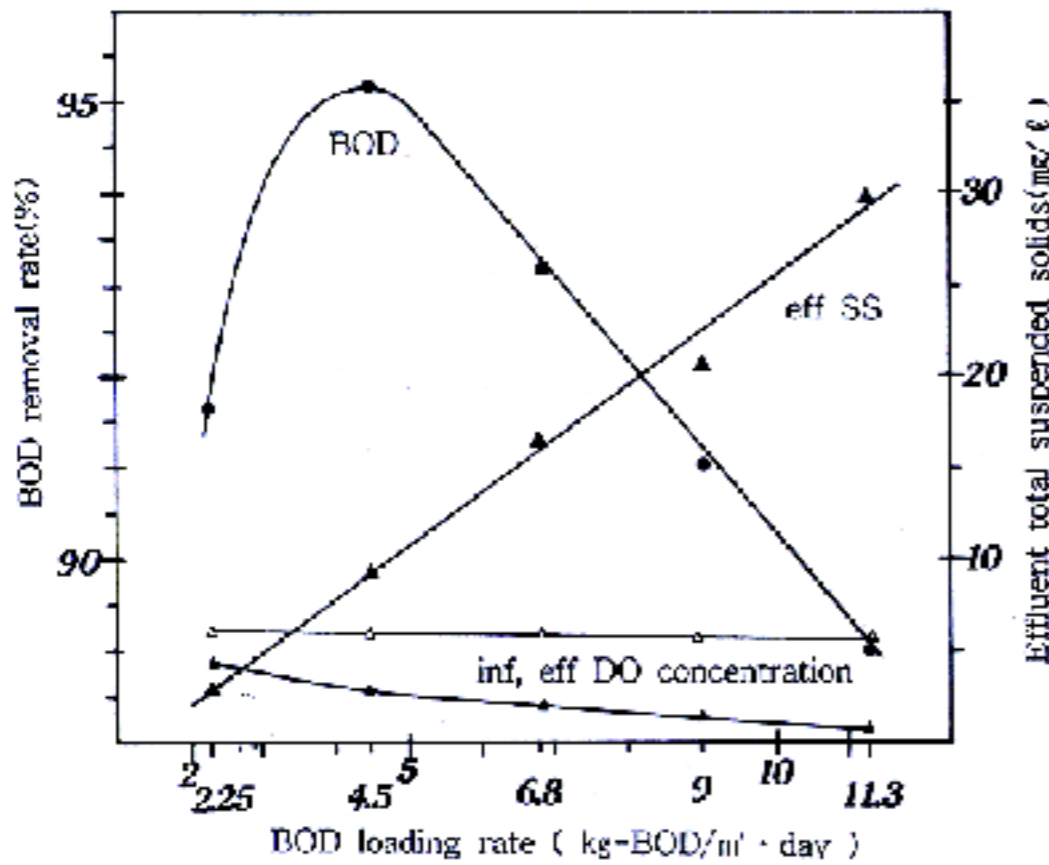


그림 5. 부하변동에 따른 처리효율, SS 및 DO농도의 변화

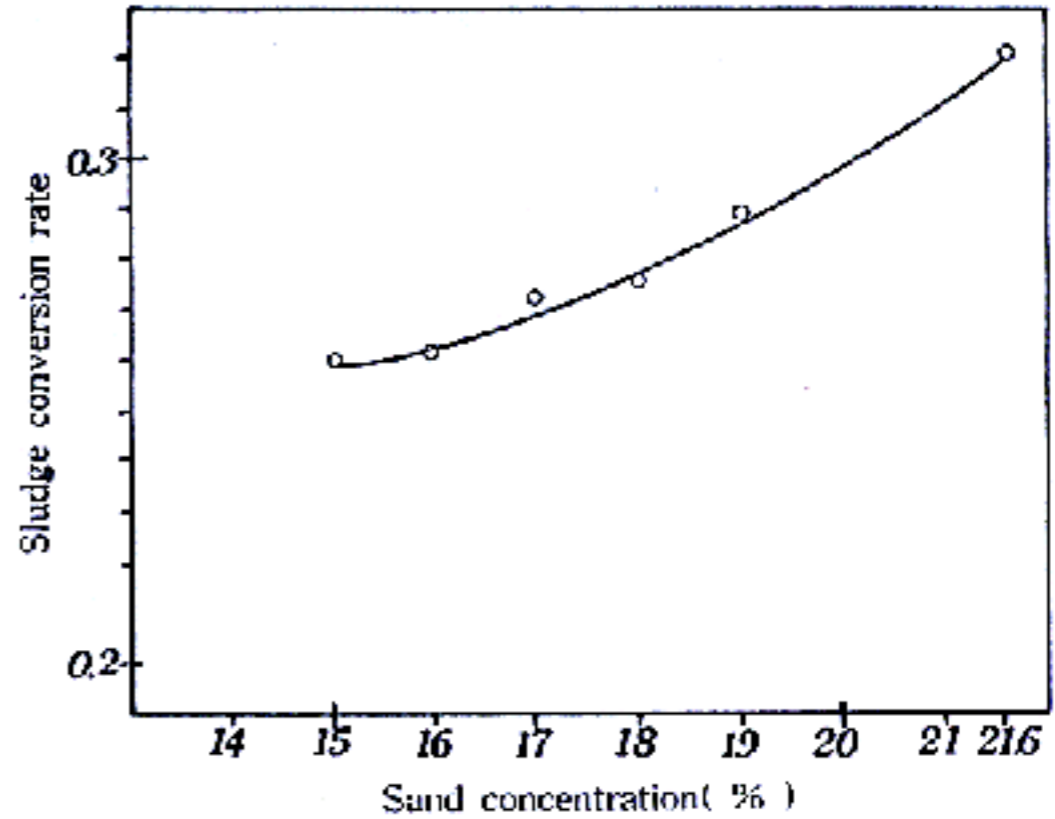


그림 6. Media충전량과 오니전환율과의 관계

성도로 일정하였다.

4.3 실험 조건별 오니전환율

실험 조건별 오니전환율을 구하기위해 4.3항에서는 실험 조건별 유출수의 SS농도와 청소시 배니량 및 실험 조건별 처리수 일당 유출량 (l/day)을 감안하였는데 청소시 배니량은 최대 621mg/l의 편차를 보였으나 실험 조건변화에 따라 일관된 변화양상을 보이지 않아 일 평균치인 6.413mg/l를 이용하였다.

1. Media충전량의 변화에 따른 오니전환율의 변화

Media충전량의 변화에 따른 오니전환율의 변화를 파악하기위해 실험 B와 같이 순환유속 5l/min, BOD부하율 4.5kg-BOD/m³·d 및 폐수 주입량 0.25l/min의 일정 조건에서 media충전량을 반응기 용적에 대해 15%에서 21.6%까지 변화시켰다. 산출 과정에서 식4의 (조내 미생물 증가량 + 배출 오니량)은 그림 3의 sand 충전 조건별 유출수 SS농도에 $(6.413\text{mg/l}) / (0.25\text{l/min} \times 60\text{min/hr} \times 24\text{hr/day}) = 17.81\text{mg/l}$ 를 가한량으로 결과는 그림6에서 알 수 있듯이 충전량의 증가에 따라 0.26에서 0.32까지 증가하였으며 증가의 원인은 충전량을 증가시킬 경우 bioparticle의 막 두

께가 전체적으로 얇아져 산소의 확산, 기질의 확산 및 조내 미생물 전체량의 감소에 따른 F/M비의 증가 등으로 증식조건이 호전되었기 때문으로 판단된다.

2. 순환유량 및 유입수의 농도 변화에 따른 오니전환율의 변화

순환유량 및 유입수의 농도 변화에 따른 오니전환율을 그림 4와 식 4를 이용하여 파악하는데 그 결과는 그림 7과 같다. 그림에 따르면 오니전환율은 소전에 따라 0.19에서 0.34까지 크게 변화하였는데 유입수의 농도 변화에 따른

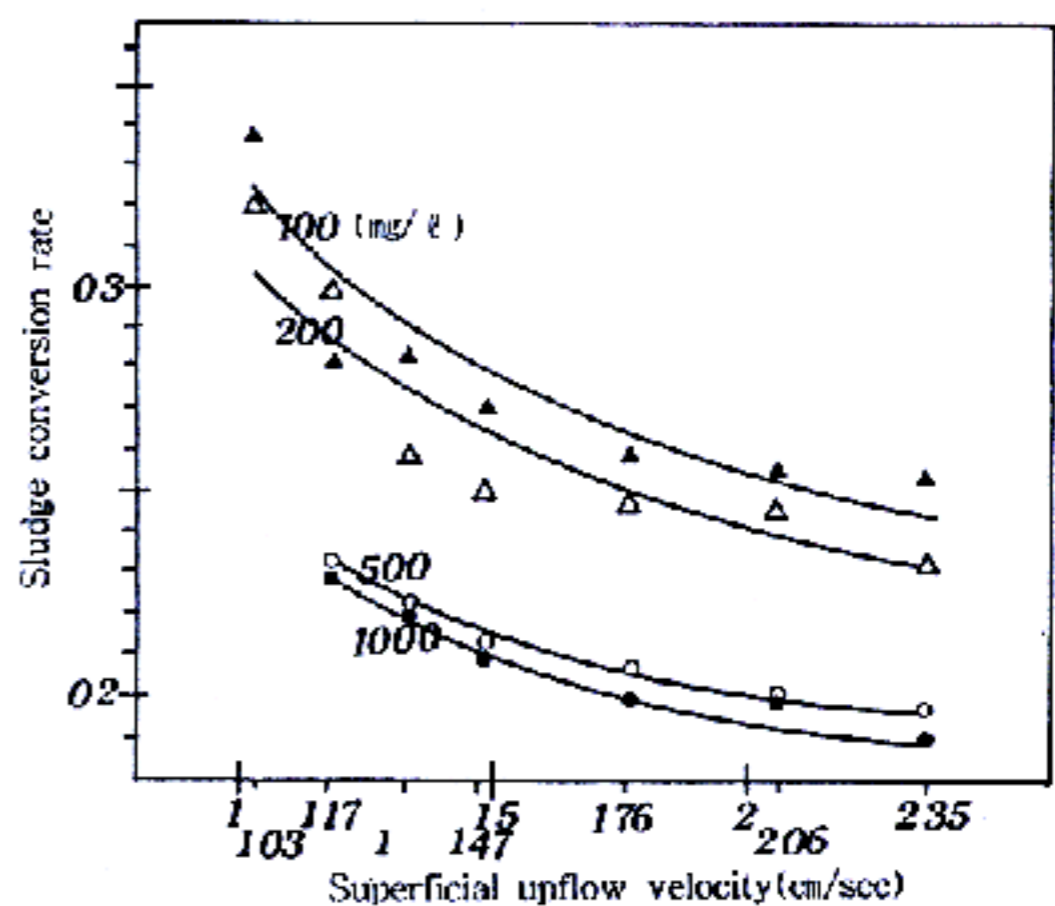


그림 7. 순환유량 및 유입수의 농도와 오니전환율과의 관계

변화는 유입수의 농도 감소에 따라 미미한 증가를 보였으나 순환유속의 변화에는 예민하게 변화하여 일반적인 예상 즉 순환유속을 증가시켜 bioparticle의 막 두께를 얇게 운전할 경우 산소의 확산, 기질의 확산 및 조내 미생물 전체량의 감소에 따른 F/M비의 증가 등으로 증식율이 증가하여 결과적으로 오니진환율이 증가할 것이라는 예상(그림 6 참조)과는 다른 결과로 타 조건의 변화에 비해 순환유속이 오니진환율에 커다란 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

4.4 실험 조건별 산소이용율의 변화

1. 순환유속의 변화에 따른 산소이용율의 변화

순환유속의 변화에 따른 산소이용율의 변화를 파악하기 위해 최적조건에서 즉 media충전량 17%인 조건에서 부하량을 4.5kg-BOD/m³·d로 고정하고 순환유속을 변화시켜 산소이용량/미생물량 및 산소이용량/기질제거량을 그림 8 (순환유속의 변화에 따른 유출입수의 DO농도) 그림 4 및 식 (5)을 이용 산출하였다.

산출 결과는 그림 9에 나타내었다. 산소이용량/미생물량은 순환유속의 증가에 따라 0.2에서 0.56으로 증가하였는데 이는 미생물이 점진적으로 고농도의 산소에 적응하는 과정에서 종조성이 변화했기 때문으로 판단되며, 산소이용

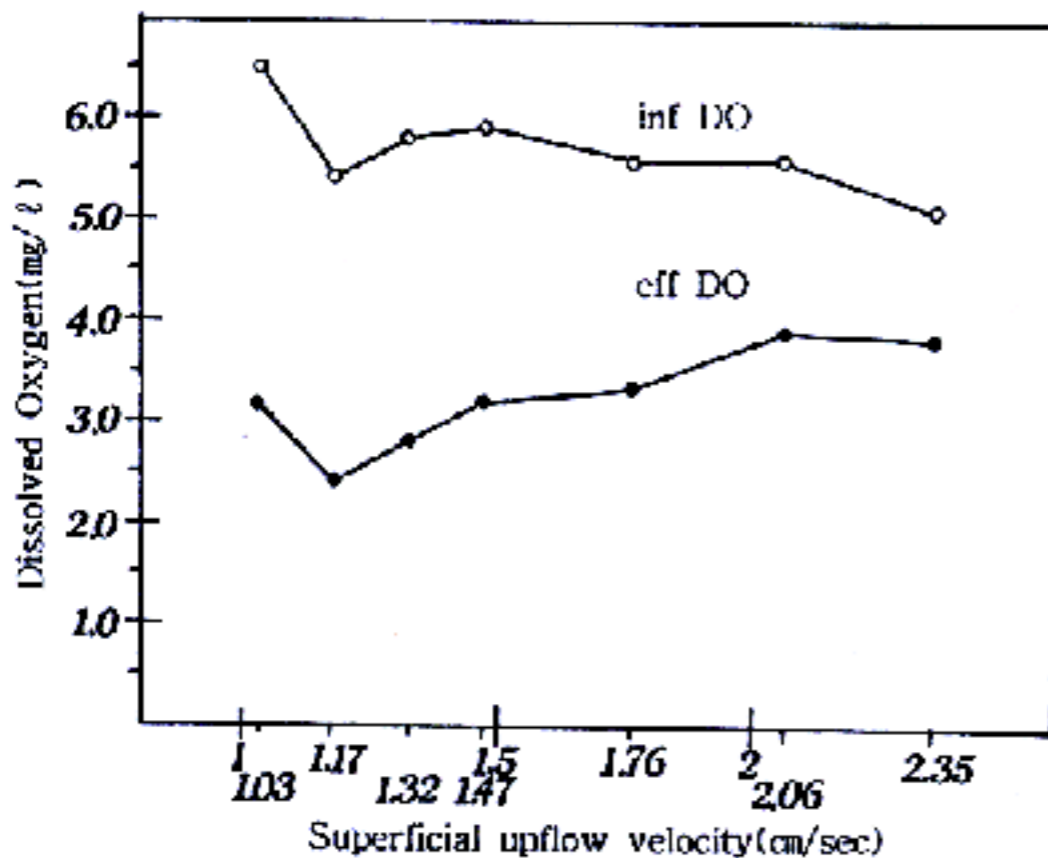


그림 8. 순환유속의 변화에 따른 유출입수의 DO농도

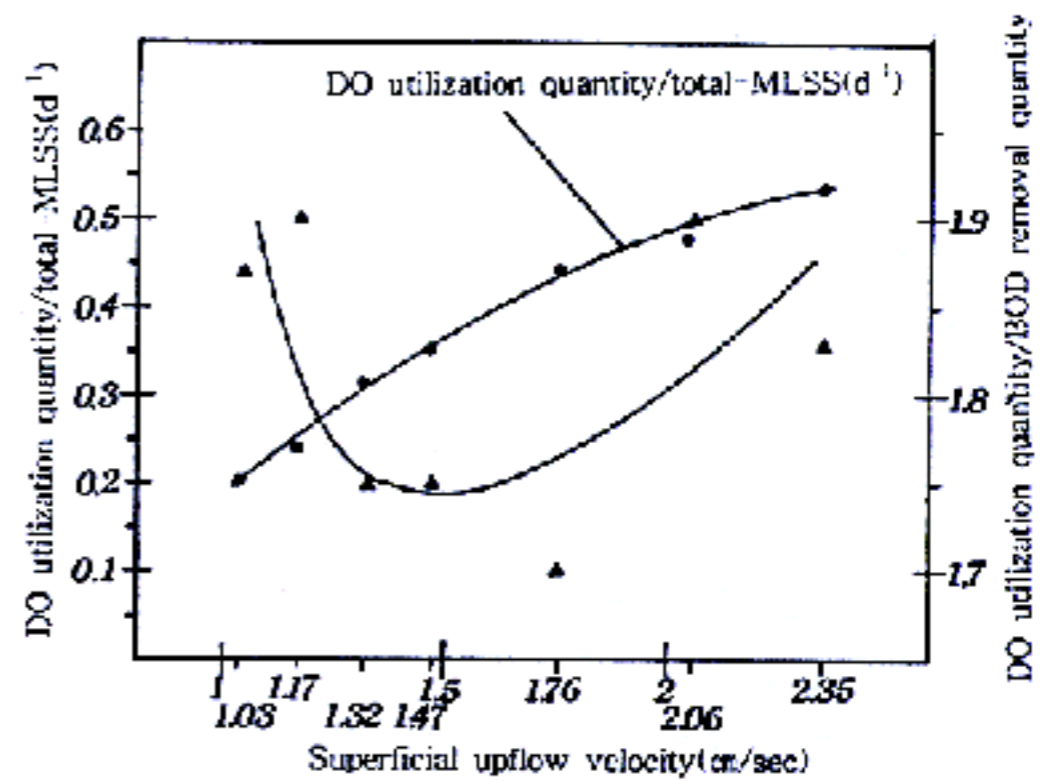


그림 9. 순환유속과 산소이용속도와의 관계

량/기질제거량은 실험결과의 분산도가 커 정확한 경향을 단언할 수 없으나 실험의 결과는 순환유속 1.47cm/sec정도에서 가장 낮은 값 1.75정도를 보여 주었다.

2. 부하변동에 따른 산소이용속도의 변화

부하변동에 따른 산소이용속도의 변화를 파악하기 위해 최적조건에서 부하율을 2.25에서 11.3kg-BOD/m³·d까지 증가시켰는데 그 결과는 그림 10과 같다. 그림에 따르면 부하의 증가에 따라 산소이용량/기질제거량은 0.76에서 0.4까지 감소하였는데 이는 계속적인 산소 부족현상에 기인한 미생물의 종조성 변화에 따른 것으로 판단된다.

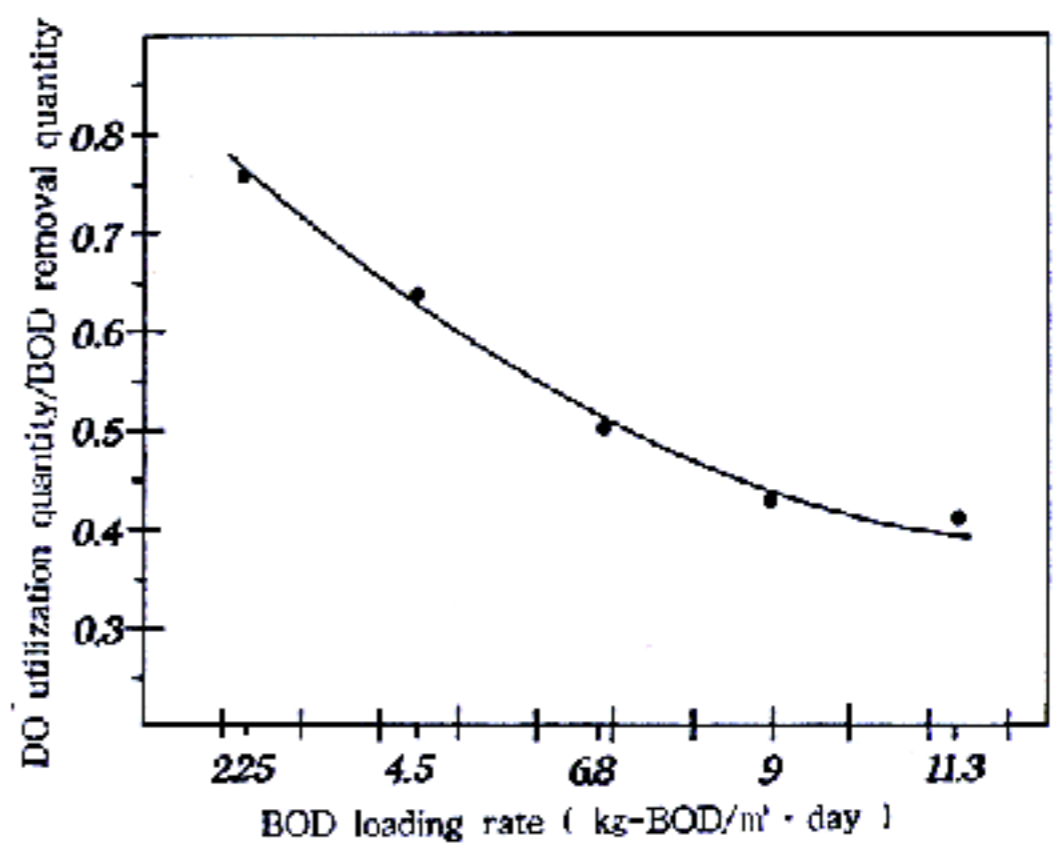


그림 10. 부하변동과 산소이용속도와의 관계

5. 결 론

간접포기식 유동상에서 오니전환율과 산소이용율을 중심으로한 본 실험의 결과 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. SS발생량은 순환유량의 증가에 따라 감소함을 보여 주었다.
2. Media충전량을 증가시킬 경우 오니전환율은 증가한다.
3. 동일부하일 경우 순환유량의 증가에 따라 반응기내 미생물량의 감소로 F/M비는 증가하나 F/M비의 증가와 관계없이 오니전환율은 크게 감소하며 유입수의 농도 변화는 오니전환율에 별다른 영향을 미치지 않았다.
4. 수질기준을 BOD: 20mg/l, SS: 20mg/l로 할 경우 BOD부하율 4.5kg-BOD/m³·d인 조건에서 청소시 배수량을 감안하면 알려진 바와는 달리 일반적인 경우에서도(유입수농도

100mg/l 이상) 침전지의 소거는 불가능한 것으로 나타났다.

5. 동일부하일 경우 산소이용량/미생물량은 순환유속의 증가에 따라 증가하였다.
6. 부하의 증가에 따라 산소이용량/기질제거량은 감소하였는데 이는 지속적인 산소 부족현상에 기인한 미생물의 종조성 변화에 따른 것으로 판단된다.

참고문헌

1. C. S. Theodore: "Fluidized Bed for Biological Wastewater Treatment", J The Environmental Engineering Division, pp.227~241. 1980.
2. 이정수, 김환기: "간접 포기식 유동상법에 의한 폐수처리 특성에 관한 실험적 연구", 대한 토목학회 논문집, 제14권, 제2호, p.367~378, 1994.
3. J. F. Richardson and W. N. Zaki: Transactions Chap. 11, International Textbook Co., Scranton, Pa., 1966.