

博士學位論文

간접포기형 침지생물막여과(InSub)
시스템을 이용한 오수고도처리연구



濟州大學校 大學院

環境工學科

康 眞 榮

2006年 8月

간접포기형 침지생물막여과(InSub) 시스템을 이용한 오수고도처리연구

指導教授 許 木

康 眞 榮

이 論文을 環境工學 博士學位 論文으로 提出함

2006년 8月

康眞榮의 環境工學 博士學位 論文을 認准함



審査委員長 金 應 鎬

委 員 李 容 斗

委 員 金 富 吉

委 員 趙 恩 一

委 員 許 木



濟州大學校 大學院

2006年 8月

The Study for Advanced treatment of
Domestic wastewater on Indirectly Aerated
Submerged Biofiltration(InSub) System

Jin-Young Kang

(Supervised by Professor Mock Huh)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Doctor of Environmental Engineering

2006 . 8.

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Eung-Ho Kim, Prof. of Civ. Eng.

Thesis director, Yong-Doo Lee, Prof. of Env. Eng.

Thesis director, Bu-Gil Kim, Prof. of Civ. Eng

Thesis director, Eun-Il Cho, Prof. of Env. Eng.

Thesis director, Mock Huh Prof. of Env. Eng.

August. 2006

Department of Environmental Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

I. 서론	1
II. 간접포기형침지생물막여과(InSub) 장치를 이용한 오수고도처리 기초적 실험 연구	3
1. 서론	3
1) 연구배경 및 목적	3
2) 연구범위 및 내용	4
2. 재료 및 방법	6
1) 실험장치	6
2) 실험장치의 특징	8
3) 분석항목 및 방법	9
4) 유입 오수의 수질특성	10
5) 실험조건	11
3. 결과 및 고찰	14
1) 체류시간에 따른 변화	14
2) 내부관 공탐속도에 따른 변화	20
3) 충전율에 따른 변화	26
4) 미생물의 발생현황	32
4. 결론	36
III. InSub장치에서의 액의 순환속도 예측	38
1. 서론	38
1) 연구배경 및 목적	38
2) 연구내용 및 범위	39
2. 재료 및 방법	41
1) 실험장치	41

2) 분석방법	42
3. 결과 및 고찰	50
1) 내부관 공탐속도의 변화에 따른 영향	50
2) 단면적비의 변화에 따른 내부순환속도의 변화	60
3) 현장규모 InSub 장치에서의 내부순환속도	63
4. 결론	67
IV. 실험실규모 InSub system을 이용한 오수고도처리특성	69
1. 서론	69
1) 연구배경 및 목적	69
2) 연구내용 및 범위	70
2. 재료 및 방법	72
1) 실험장치	72
2) 운전조건	73
3) 분석항목 및 방법	75
3. 결과 및 고찰	77
1) 반응기별 수리학적 체류시간에 따른 영향	77
2) 내부반송에 따른 영향	83
4. 결론	90
V. 현장규모 InSub system을 이용한 오수고도처리특성	91
1. 서론	91
1) 연구배경 및 목적	91
2) 연구내용 및 범위	91
2. 재료 및 방법	93
1) 실험장치	93
2) 분석항목 및 방법	98
3) 운전조건 및 미생물 식종	98

3. 결과 및 고찰	101
1) 수리학적 체류시간에 따른 영향	101
2) 내부관 공탐속도 변화에 따른 영향	110
3) Pilot plant 운전 중 발생한 미생물 특성	115
4. 결론	117
VI. 종합 결론	119
VII. 참고문헌	121

Summary

The objective of this study carried out to develop InSub(Indirectly Aerated Submerged Biofiltration) system which is mixed the indirectly aerated reactor with submerged biofilm could resist against hydraulic shock load, packaged high-tech advanced treatment technology for domestic wastewater.

The result of this study were summarized as follow ;

1. It's confirmed that organic material, nitrogen and phosphorus could be removed simultaneously on InSub reactor. However, It's confirmed that system had to mix InSub with anoxic reactor to remove nitrogen oxide for high efficiency of nitrogen and phosphorus
2. Recirculated velocity and time of water were increased in the InSub reactor with increasing superficial velocity in an internal column and especially measured velocity in the lab. was higher than calculated velocity as superficial velocity was faster. Recirculated time of water was from 25.5 to 36.2sec as superficial velocity in an internal column was from 2.54 to 6.27m/min for InSub of pilot plant. Therefore it was considered that anoxic or anaerobic zone existed in InSub bottom
3. Optimum HRT of anoxic and InSub reactor was 4hr and 5hr, respectively. And it was considered that if internal return was carried, cycle of backwashing had to operate short for getting satisfactory quality of water and optimum internal return rate was 100%

4. It showed that optimum HRT and SV was 9hr and 3.82m/min in the pilot plant
5. The result with variety HRT and superficial velocity in an internal column was high treatment efficiency in spite of state without the internal return. therefore it confirmed that it was to be high efficiency advanced sewage treatment system when it combined the internal return.
6. After this study, it has to be carried out dynamics of denitrification and dephosphorization and variety of internal return to get high treatment efficiency for commercialization of InSub system.



I. 서론

우리나라 도시 오·폐수(Municipal wastewater)의 처리는 하수관거를 통하여 하수종말처리시설로 유입·처리되는 종말처리체계와, 발생원에 오수처리시설을 설치하여 하수종말처리시설과 동일한 수준인 BOD 20mg/L이하로 처리하는 개별처리체계로 대별할 수 있다. 우리나라는 1990년대 초 '맑은물 공급 종합대책'의 수립·추진과 더불어 하수종말처리시설 설치사업을 본격적으로 시작하여, 2000년말 현재에는 하수종말처리시설에 의한 하수도 보급률이 전국평균 70.5%에 이르고 있다. 그러나 농어촌 지역 등 건축물이 산재되어 있는 지역은 하수관거의 설치가 어려워 생활오수 등의 처리를 하수종말처리시설에만 전적으로 의존할 수 없는 실정이다. 따라서 하수종말처리시설이 설치되어 있지 않은 지역에 건축되는 건물에 대해서는 건축연면적 규모에 따라 오수처리시설의 설치를 의무화하여 오염원을 발생원에서 개별처리하도록 하고 있다. 그러나 최근 환경오염 현상의 악화에 따른 대응의 일환으로 국가 및 지역에서의 환경규제가 강화되어 처리수중의 N, P 등의 영양염류의 고도처리가 요구되게 되었다.

오·폐수의 고도처리기술은 처리의 목적에 따라 ①잔존 유기물의 제거를 주목적으로 한 것, ②영양염류의 제거를 주목적으로 한 것, ③재이용 등을 위해 무기염류의 제거를 주목적으로 한 것으로 분류할 수 있고, 또한 처리 방식에 따라서는 물리, 화학, 생물학적처리 및 이들의 조합방식으로 분류된다.

특히 생활오수는 유기물 농도가 비교적 낮고 용해성 유기성분이 많으므로 처리에 있어서 표준활성슬러지법을 응용하여 매질을 포기조에 직접 투입해서 접촉면적을 크게 한 생물학적 접촉산화법이 많이 적용하고 있다. 저농도 유기폐수나 오수를 처리하기 위하여 일반적으로 사용되는 접촉산화법은 표준활성슬러지법에 비하여 소요 부지면적이 적고 양호한 처리수를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 유기물 부하증가시 처리수의 유기물 농

도가 급격히 상승하며 낮은 농도의 처리수를 얻기에는 한계가 있다. 따라서 최근에는 활성슬러지 공법에 비하여 부하변동에 잘 적응하며, 소요 부지면적, 동력비가 절감되고, 낮은 농도의 처리수를 얻을 수 있는 생물막 여과(Biological Aerated Filter ; BAF)처리에 대한 관심이 증가하고 있다.

특히 매질을 이용한 생물막 여과는 Expanded Polystyrene(EPS) resin, 스티로폴 등이 매질을 이용한 여과장치의 장점과 미생물막법의 장점을 고루 갖추고 있는 것이 특징이다. 따라서 매질에 형성된 미생물막에 의하여 생물학적 산화가 이루어지며 매질과 생물막에 의하여 물리적 여과가 동시에 이루어진다.

반응조내의 미생물 농도는 매질의 표면에 미생물이 부착됨에 따라 높게 유지될 수 있으며, 적절한 역세에 의하여 미생물막의 과도한 성장, 매질의 폐색, 과도한 압력손실을 예방할 수 있다. 따라서 정상적으로 운전이 된다면 단일반응조 내에서 산화와 동시에 여과를 통하여 유기물과 부유물을 효과적으로 제거할 수 있으므로 침전조가 거의 필요하지 않게 되며, 전체적으로 처리시설의 설치면적과 동력소요를 적게 할 수 있다.

또한, 최근 환경규제의 강화에 따라 오·폐수 고도처리기술의 개발이 시급히 요구되고 있다. 특히, 제주지역에서는 계절적, 지역적 특성에 따라 불균일하게 배출되는 오·폐수를 효율적, 안정적으로 처리할 수 있는 기술의 보급이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 간접포기형이라는 특수반응조를 개발하고, 침지생물막을 이용하여 고농도 생물막을 형성시켜 충격부하에의 대응력을 갖도록 하여 Package화된 첨단 오·폐수정화기술로써 간접포기형침지생물막여과(이하 InSub ; Indirectly Aerated Submerged biofiltration)시스템을 개발하여 환경산업의 발전과 수질환경의 보전에 이바지함을 목적으로 한다.

II. 간접포기형침지생물막여과(InSub) 장치를 이용한 오수고도처리 기초적 실험 연구

1. 서론

1) 연구배경 및 목적

1976년 청계 하수처리장을 시발로 현재 유기물 처리공정의 80%이상을 차지하고 있는 활성슬러지법을 기초로 한 재래식 생물학적 처리공법은 우수한 유기물 처리효율과 저렴한 운전비용이라는 장점을 갖고 있지만 고도의 운전기술과 유지관리기술이 필요하고 슬러지 팽화가 자주 발생하며 부하변동에 대한 대처능력이 필요하다. 또한 잉여슬러지의 다량 발생과 질소, 인의 낮은 처리효율이 문제점으로 지적되고 있다. 더욱이 환경규제가 강화됨에 따라 이를 충족시키기 위해서는 처리장부지 확장의 문제가 생긴다. (오 등, 1989).

현재 선진국에서 상업적으로 실용화된 생물학적 질소·인 제거방법의 대부분은 포기조와 연속으로 접속시켜 유입하수의 유기물을 이용하여 혐기 및 무산소조를 운영하는 A2/O, Bardenpho, VIP, UCT 등과 2차침전지의 반송슬러지의 일부를 농축조와 같은 혐기조에 장시간 체류시켜 미생물의 cell분해에 의해 생성된 유기물을 탄소원으로 이용하는 Phostrip 등이 있다. 이러한 기술은 하수관거가 잘 정비된 선진국에서 개발된 기술이어서 국내와 같이 하수수집시스템이 합류식인 경우는 하수의 유기물의 양이 절대적으로 부족하여 질소와 인의 동시제거에는 적합하지 않다. 또한 국내에 이와 같은 시설이 설치되어진 경험이 부족하기 때문에 대규모 시설을 바로 건설하기에는 위험 부담이 매우 크다.

따라서, 하수처리장의 부지 축소와 처리수질의 안정, 영양염류의 제거를 위

해서는 반응조의 미생물 농도를 높이고, SRT를 증가시키는 기술이 필요하다. 이러한 필요에 의해 매질을 이용한 생물막 여과법의 관심이 증대되고 있다.(이 등, 1995)

최근의 생물막법은 Bio-technology의 활용에 의해 많은 기술개발이 이루어져 하천의 슬라임과는 다른 부착법이 채용되고 있다. 이와 비슷한 방법으로서 기존의 살수여상법(Trickling filter process), 회전원판법(Rotating biological contactor), 침지여상법(Submerged biofilter process)등이 있으며, 최근에는 고도처리나 상수처리에 적용하는 쪽으로 생물막 여과법이 개발되고 있다(김 등, 1992; Yuhei와 김, 1992).

특히 매질을 이용한 생물막 여과는 하나의 반응조내에서 미생물에 의한 생물학적 처리와 물리적 여과과정이 동시에 일어나므로써 후속시설을 절감할 수 있는 System으로 현탁식 생물학적 처리공법에서의 미생물보유량의 한계로 인한 유입부하에 대한 불안정, 양호한 침전을 위한 운전의 난이성, 높은 에너지 소비 등의 단점을 보완하기 위하여 개발되어 왔다. 최초의 상업적인 Full-scale biofilter system은 1982년 프랑스의 Soisson에서 시작되어 이후로 수많은 처리장들이 유럽, 일본, 북유럽에 설치, 운전중에 있으며, 국내에서 개발된 생물막 시스템으로는 최근, 입상황을 이용한 공법, 전탈질 생물여과를 이용한 공법, 부상식여체를 이용한 공법 등 몇몇 기업에서의 환경신기술이 제시되고 있으나 모두 상용화의 초보단계에 있는 최신 기술 개발과제의 하나이다(환경부, 2002).

본 연구에서는 국내실정에 맞는 오·폐수중의 유기물과 영양염류의 동시 제거와 더불어, 경제적이고, 안정적으로 유지관리 할 수 있는 InSub 장치를 개발하였다. 따라서 본 연구에서는 InSub 장치가 오·폐수를 대상으로 하여 유기물 및 질소와 인의 동시 제거가 가능한 고도정화장치로서 가능성이 있는지에 대하여 실험실적 모형장치를 제작·이용하여 기초적 설계인자에 대하여 실험을 수행하였다.

2) 연구범위 및 내용

실험에 사용된 시료는 시료의 성상이 균일하도록 하기 위해서 CH대학내 오수처리시설로 유입되는 오수를 14시에 채취하였으며, 운전변수로는 적정의 수리학적 체류시간과 내부관 공탑속도* 그리고 매디아의 충전율에 대하여 각각 실험을 수행하였다. 적정의 수리학적 체류시간의 산정을 위하여 반응기내의 체류시간을 7hr, 8hr, 9hr, 10hr하였으며, 적정의 공탑속도의 산정을 위해서 0.4, 0.8, 1.2m/min의 속도로 운전하였다. 그리고 적정의 충전율을 산정하기 위해서 충전율을 20, 30, 40%로 변화시키면서 실험을 수행하였다.



* 내부관 공탑속도(Superficial Velocity in an internal column ; 이하 SV로 표기) : 반응탑내에 충전된 물질이나 활성탄, 촉매 등의 내용물이 없는 공탑으로 간주하여 산출한 겉보기의 탑내평균속도로써, 내용물이 있는 탑내의 속도에는 속도분포가 각각 다르기 때문에 공탑속도는 실제 속도를 나타내는 것은 아니지만, 설계 계산 기타, 편의상의 기준으로서 사용한다. 단 공탑속도라고 말하는 경우는, 선속도 즉 공탑속도(m/s)=처리가스량(m³/s)/탑단면적(m²) 라고 말한다. 질량속도, 몰속도로 나타내는 경우에는 각각 공탑질량속도(kg/m²·h), 공탑몰속도(kg-mol/m²·h)라고 칭하여 구별한다. 본 연구에서 사용된 반응기는 이중관으로써 내부관과 외부관으로 나누어져 있으며 포기는 내부관내에 아무런 매체 또는 촉매가 없는 부분에서만 이루어졌다.

2. 재료 및 방법

1) 실험장치

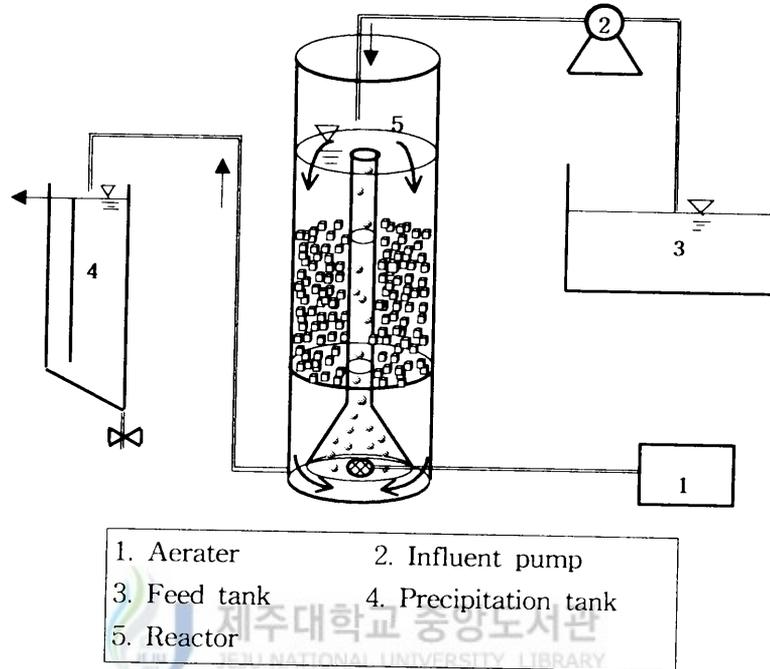


Fig. 1. Schematic flow diagram of reactor.

실험장치는 공기나 다른 기체 흐름에 의해 반응기내의 액체가 순환되는데, 이들 기체흐름은 기상과 액상간의 물질전달과 열전달과의 중요한 역할을 수행한다.

실험장치는 반응조 내의 흐름 특성에 따라 4부위로 나눌 수 있으며, 그 특성은 다음과 같다. 기체가 주입되고, 유체의 상승기류가 일어나는 부위를 “상승부(Riser)”라 하고, 유체의 하강흐름이 일어나는 부위를 ‘하강부(Downcomer)’라 한다. 바닥부(Base)는 실험장치의 설계에 그리 중요하지 않으나, 기체 체류량, 액상 순환속도 및 고체 입자의 흐름에 영향을 미친

다. 기체 분리기(Gas separator or head space)는 반응기의 윗부분으로 액체 순환과 기체의 분리가 일어난다.

실험장치에서의 내부순환은 상승부와 하강부간의 유체 평균밀도 차이에 의한 압력차(ΔP) 때문에 발생된다.

$$\Delta P = Hg(\rho_d - \rho_r) = H\rho g(\epsilon_{Gr} - \epsilon_{Gd}) \quad (1)$$

여기서, H : 상승부의 높이(m)

: 액상에서의 유체의 평균 밀도(kg/m³)

ρ_d : 하강부에서의 유체의 평균 밀도(kg/m³)

ρ_r : 상승부에서의 유체의 평균 밀도(kg/m³)

ϵ_{Gr} : 상승부에서의 기상 체류량

ϵ_{Gd} : 하강부에서의 기상 체류량

Fig. 1은 자체개발한 InSub장치의 모식도를 나타낸 것으로써 오·폐수 중의 유기물과 영양염류(N, P)의 동시제거, 충격부하에의 대응, 미생물군집의 다종(多種)·다량(多量)화, 저동력·고효율적 접촉과 역세척, 후침전지의 불필요 등을 이루고자 Airlift에 의한 물순환을 도모하는 간접포기형(Indirectly Aerated)반응조와 저비중·침지형 스폰지 매질을 이용하는 침지 생물막(Submerged biofiltration)을 결합시킨 공정으로 구성하였다.

InSub의 반응조는 외경 200mm, 내부관은 외경 50mm의 투명아크릴 원형관으로 제작되었으며, 내부관의 하부에는 송기공기와 반응조내 물의 흐름을 용이하게 하는 깔때기 구조로 제작되었다. 반응조의 실용적은 20ℓ 이고, 반응조 실용적의 일정분율(20v/v%, 30v/v%, 40v/v%)에 맞추어 각 실험기간동안 다공질의 에테르계 폴리우레탄 재질의 부상매질을 충전하였다.

본 연구에서 사용된 부상매질은 10mm인 정육면체이고, 기공이 95%이상 파괴되어 반응조에 충전되었을 때 미생물이 쉽게 부상매질의 안쪽으로 침투할 수 있으며, 매질 내부에 고정된 미생물에의 DO의 전달이 용이한 구조로 제작되었다. 또한 부상매질의 자체비중이 약 0.04이기 때문에 최초 충

전시에는 반응조의 상부로 부상되게 되므로 수면하 70mm의 지점에 상부분산판을 설치하고, 운전시간의 경과에 따라 매질에의 부착 및 충전 생물막의 증량에 따라 자연 침강되는 것을 지지하는 하부분산판을 설치하였다. Photo 1.에는 본 연구에서 사용되었던 충전매질에의 미생물 부착 전·후의 표면을 현미경(OLYMPUS, Model PH-2)으로 찍어서 나타낸 것이다. 사진에서 매질의 표면과 내부까지 생물막이 부착 형성되어 있음을 확인할 수 있었다.

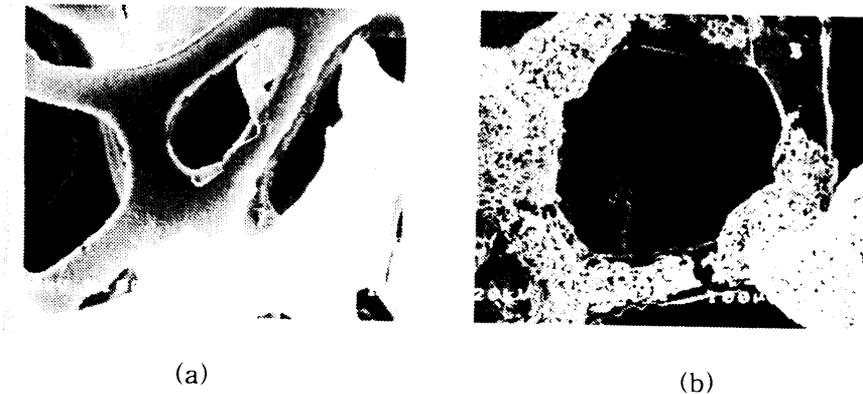


Photo 1. Photograph of media before(a) and after attaching(b) microbial.



2) 실험장치의 특징

InSub장치는 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

첫째, 오·폐수중의 유기물과 질소·인등의 산화분해를 위한 공기의 공급을 이중관(Column)구조의 반응조의 내부관으로 송입시켜서, 부상매질의 충전층을 확장된(Expanded)의 상태로 유지토록 하여 유입 오·폐수와 부착미생물의 접촉효율을 최대화하고,

둘째, 전체 물의 흐름을 층류(Laminar Flow)상태로 유지시켜서 부착미생물과의 접촉에 의한 생물학적 반응과 더불어 충전매질층에의 물리적 내부여과기능이 동시에 이루어지며,

셋째, 내부로 송기되는 공기의 양을 조절하여 반응조내 수중의 DO를 조절

합과 아울러 충전된 다공성 부상매질의 생물막을 보다 두껍게 형성시켜 매질 표면에서의 호기영역과 매질 심부에서의 혐기영역의 동시 조성을 효과적으로 하여 다양한 호기 및 혐기성 미생물의 서식환경을 가능하게 하고, 넷째, 반응조내 과잉 충전층에서의 과잉생성 생물체의 탈리는 일정 주기적으로 공기의 공급을 차단한 후, 부상된 매질에서의 약간의 물리적 충격만으로 이루어질 수 있어서 저동력형 역세척으로 자동화 할 수 있으며, 다섯째, 반응조내 과량의 미생물을 보유할 수 있어서 유입 오·폐수의 충격부하에의 완충능력이 탁월하며, 여섯째, 낮은 유기물부하(F/M)조건에서 미생물의 내생호흡(Endogeneous respiration) 등의 작용에 의해 폐슬러지의 발생을 탁월히 저감시킬 수 있으며, 일곱째, 충전 부상매질에 부착된 미생물을 특성화 또는 선별화 시킴으로써 특정 오염물질에의 효율을 강화시킬 수 있다.

3) 분석항목 및 방법

원수는 CH대학내 오수처리장에서 일정시간을 정하여 채취하였다. 각 운전 조건의 유입수와 처리수에 대하여 Table 1과 같이 12개 항목을 분석하였다. 여기서 BOD는 20℃에서 5일간의 BOD를 측정하였고, COD는 $K_2Cr_2O_7$ 에 의한 방법 및 산성 100℃에서 $KMnO_4$ 에 의한 방법을 사용하여 측정하였다. T-N과 T-P는 고압멸균기(Autoclave)를 이용하여 전처리 하였으며, NH_4^+-N , $NO_2^- -N$, $NO_3^- -N$ 은 GF/C여지로 여과후 분석하였다. 반응조내에 대해서 pH, ORP, 그리고 DO는 정기적으로 전극을 집어넣어 측정하였으며, 반응조내 MLSS는 여재에 부착되어 있는 슬러지량의 무게를 측정하였다. 이상의 항목에 대한 분석은 수질오염공정시험방법(1997) 및 Standard Method(1998)에 준하여 실시하였다.

Table 1. Analytical items and methods

Item	Analytical Methods
pH/ORP	Electrode Method(Istek 740 ; Korea)
DO	Electrode Method(Orion 810 ; USE)
TCOD _{cr}	Titrimetric Method(Open Reflux Method)
TCOD _{Mn}	Titrimetric Method(KMnO ₄ , Acidic)
TBOD	Winker Azide Modification Method(20°C, 5day)
TSS	Gravimetric Method(Dry oven, 105°C)
T-N	Spectrophotometric Method(K ₂ S ₂ O ₈ , 220nm)
NH ₄ ⁺ -N	Spectrophotometric Method(Indo-Phenol, 630nm)
NO ₂ ⁻ -N	Spectrophotometric Method(Diazo, 540nm)
NO ₃ ⁻ -N	Spectrophotometric Method (Cadmium Reduction Method, 630nm)
T-P	Spectrophotometric Method

4) 유입 오수의 수질특성

본 실험에 사용된 오수의 수질은 대학내 발생오수의 특성상 수질의 경시 변화가 큰 특징을 갖고 있으나, 이를 보다 완화시키기 위해서 주간 및 일간 변동이 적은 일정한 시기에 채수하여 유입원수로 사용하였다. Table. 2는 실험기간 동안의 유입수의 수질분석 결과를 나타내었다. 실험에 사용된 유입수의 수질은 BOD/T-N가 평균 1.99을 나타내고 NH₄⁺-N는 87.61~263.05mg/ℓ (175.33mg/ℓ)로 T-N의 약 56.7%를 차지하고 있는 것으로 보아, T-N 중 암모니아성질소와 유기질소가 대부분 차지하는 것을 알 수 있었다. 또한 T-P의 경우 8.58~16.91mg/ℓ (12.75mg/ℓ)로 BOD/T-P는 평균 27로 나타났다.

Table 2. Composition of the domestic wastewater used in this study

Item	Maxium	Minimum	Mean
TCOD _{cr} (mg/ℓ)	622.25	370.50	496.38
TCOD _{Mn} (mg/ℓ)	208.84	152.54	180.69
TBOD (mg/ℓ)	377.52	271.81	324.67
TSS (mg/ℓ)	176.65	82.00	129.32
T-N (mg/ℓ)	298.73	100.11	199.42
NH ₄ ⁺ -N(mg/ℓ)	263.05	87.61	175.33
NO ₂ ⁻ -N(mg/ℓ)	1.04	0.15	0.59
NO ₃ ⁻ -N(mg/ℓ)	0.14	0.00	0.07
T-P (mg/ℓ)	16.91	8.58	12.74
pH	8.9	8.14	8.52
BOD/T-N	1.26	2.72	1.99
BOD/T-P	22.33	31.68	27.00

5) 실험조건

실험장치는 온도조절이 가능한 항온실에 설치하여 20±2℃에서 운전하였으며, 유입수는 생폐수의 성상을 유지시키기 위해 4±1℃의 냉장고에 보관하고 순환펌프에 의해 내부순환을 하면서 유입되도록 하였다. 식중은 30일간 적용시킨 후 사용하였다. 그리고 유입튜브와 유출튜브내의 Scale 생성에 의한 유량변동을 방지하기 위해서 주기적으로 제거하였다.

실험은 다음과 같은 조건으로 진행하였으며, 각 운전 순서도를 Fig. 2에 나타내었다.

(1) 수리학적 체류시간의 변화

적정의 수리학적 체류시간을 산정하기 위해서 내부관 공탑속도를 1.2m/min으로 하고 여재의 충전율을 40%로 하여 수리학적체류시간을 6, 12, 18, 24hr로 하여 적정의 수리학적 체류시간을 산출하였다.

(2) 내부관 공탑속도 변화

내부관 공탑속도의 변화에 따라 반응조내의 폐수의 선속도가 달라지기 때문에 적정의 수리학적 체류시간 산정후 적정의 내부관 공탑속도를 산출해야 하는데, 위에서 산정된 적정의 수리학적 체류시간 18hr으로 하고, 여재의 충전율은 40%로 하여 내부관 공탑속도를 0.4, 0.8, 1.2m/min로 하여 적정의 내부관 공탑속도를 산출하였다.

(3) 반응조내 충전율의 변화

반응조내의 충전율에 따라 미생물의 농도를 비롯한 질화 탈질의 효율이 달라지기 때문에 적정의 충전율을 산출해야 하는데, 위에서 구한 적정의 수리학적 체류시간 18hr와 적정의 내부관 공탑속도 0.4m/min에서 충전율을 40, 30, 20%로 변화시켜 실험함으로써 적정의 충전율을 산출하였다.



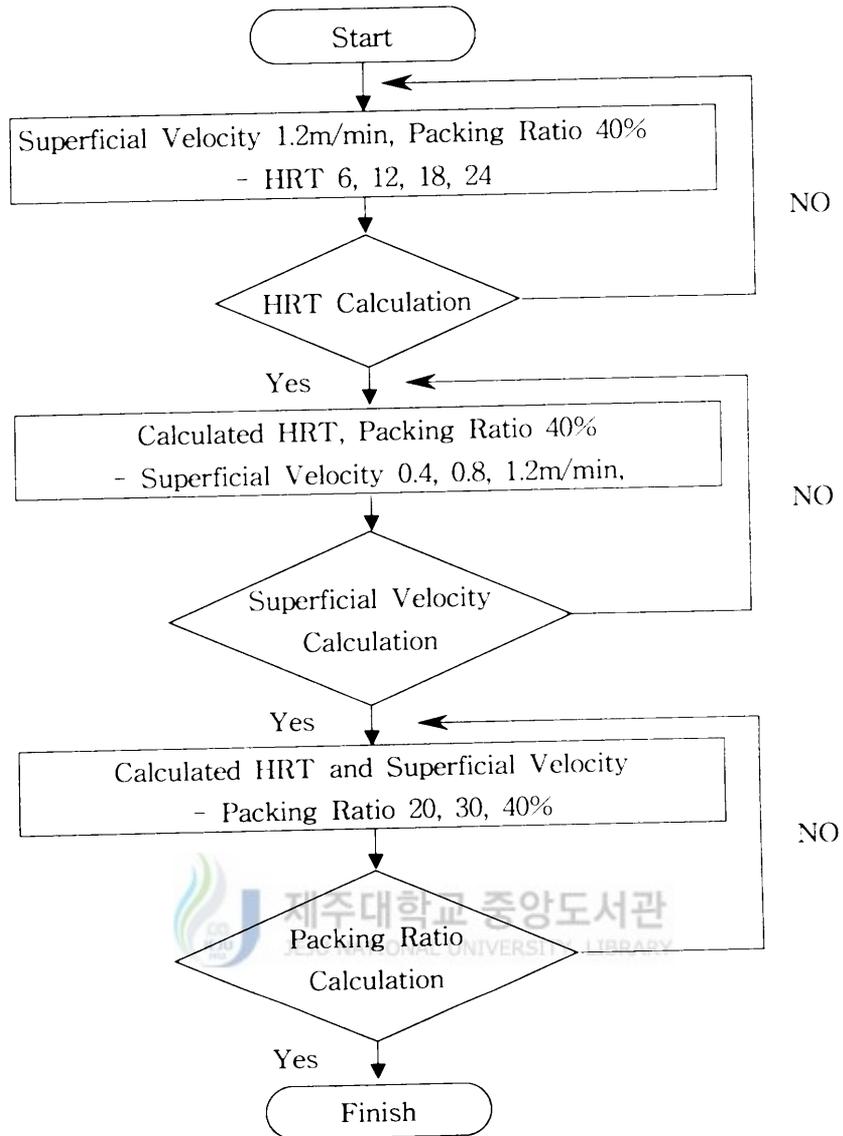


Fig. 2. Flow diagram for this experimental procedure.

3. 결과 및 고찰

1) 체류시간에 따른 변화

(1) 유기물 제거

본 실험에서는 우선적으로 침지반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 유기물 제거영향을 살펴보기 위해서 내부관 공탑속도를 1.2m/min으로 유지하고 media 충전율을 40%로 하여 HRT를 각각 6, 12, 18, 24hr로 하여 실험을 수행하였는데, HRT가 짧아짐에 따라 유입유량은 증가하고 수리학적 부하량도 높아졌다. Fig. 3~Fig. 5는 media에 미생물이 안정적으로 부착된 후 COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD₅의 평균 유입, 유출농도 및 제거효율을 나타내었다. 원수를 채취할 때 0.5mm의 체를 사용하여 SS를 제거하였기 때문에 COD, SS등의 농도가 비교적 일정하였다. 유입된 오수의 유기물농도는 COD_{Cr} 370.50~441.50mg/ℓ (395.35mg/ℓ), COD_{Mn} 152.54~208.84mg/ℓ (177.28mg/ℓ), BOD₅ 317.11~377.52mg/ℓ (339.38mg/ℓ)였으며, HRT 24시간으로 운전하였을 경우 10일만에 정상상태에 도달하였다. 이때의 유출수의 COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD₅의 평균 농도는 각각 74.26mg/ℓ, 18.34mg/ℓ, 16.55mg/ℓ로 나타났다. HRT 18hr일 경우에는 14일이 지나서야 정상상태에 도달하였는데, 이때의 유출수의 평균 농도는 각각 103.4mg/ℓ, 22.69mg/ℓ, 16.33mg/ℓ로 나타났으며, HRT 12hr와 6hr인 경우 실험개시 후 20일이 지나서야 정상상태에 도달하였는데, 이때의 유출수의 평균농도는 각각 104.5mg/ℓ, 37.98mg/ℓ, 30.20mg/ℓ와 134.29mg/ℓ, 38.91mg/ℓ, 31.71mg/ℓ로 나타났다. 유기물 제거 효율은 체류시간이 증가함에 따라 제거율이 90~95%까지 계속 상승하였는데 반응기로 유입된 유기물이 고정화된 미생물과의 충분한 접촉기회가 증가함에 따른 현상으로 사료된다.

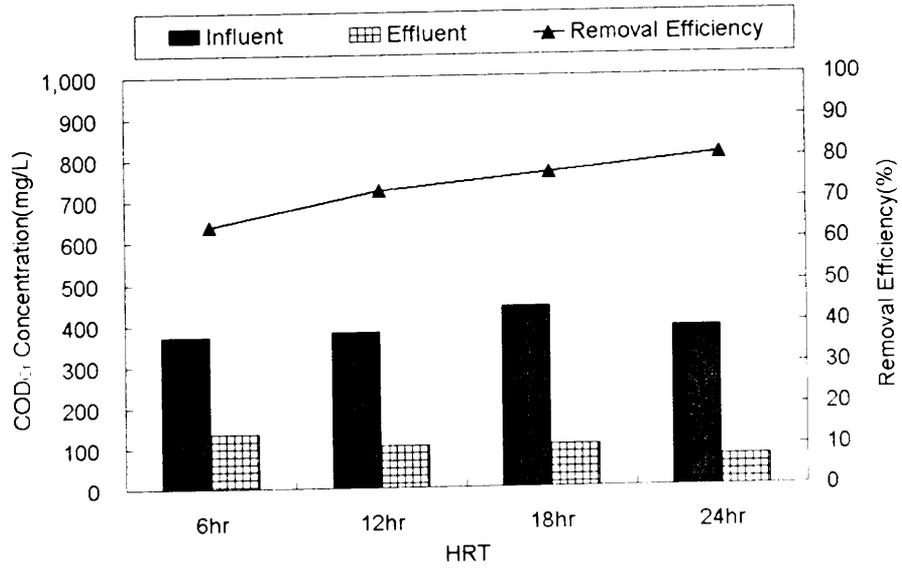


Fig. 3. Variation of COD_{Cr} concentration and removal efficiency with the HRT(Packing Ratio 40%, SV 1.20m/min).

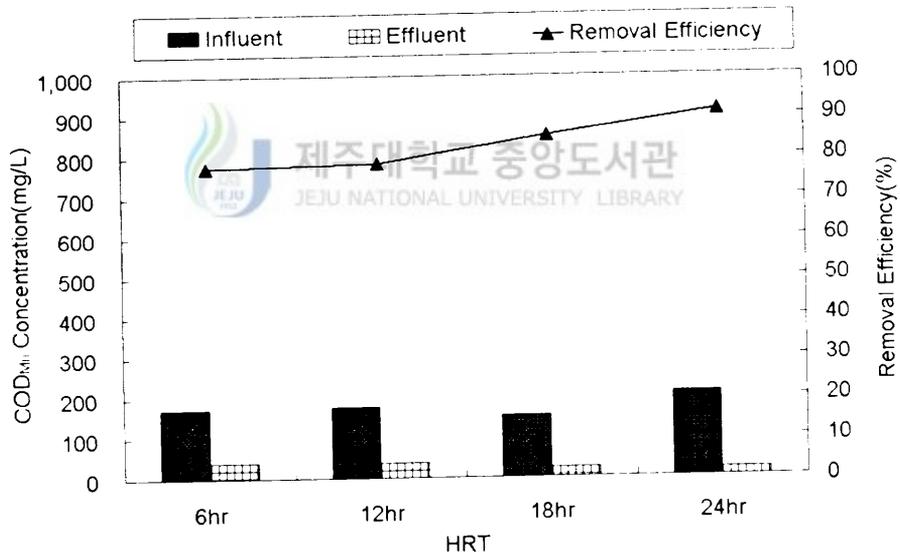


Fig. 4. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency with the HRT(Packing Ratio 40%, SV 1.20m/min).

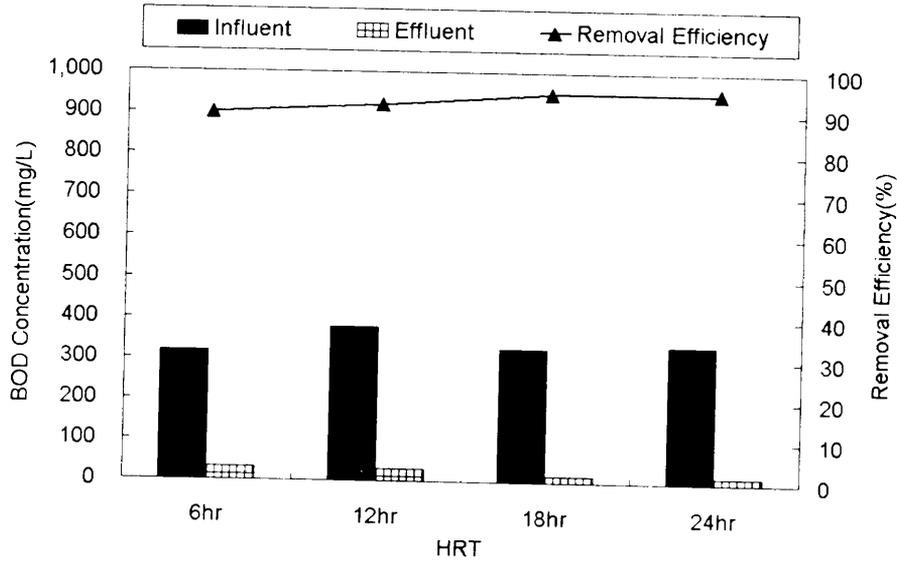


Fig. 5. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiency with the HRT(Packing Ratio 40%, SV 1.20m/min).

(2) 질소·인 제거

침지반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 질소의 제거영향을 살펴보기 위해서 내부관 공탑속도를 1.2m/min로 유지하고 Media 충전율을 40%로 하여 HRT를 각각 6, 12, 18, 24hr로 하여 실험을 수행하였는데, Fig. 6과 Fig. 7은 각 HRT별로 운전 개시 후 정상상태에 도달한 후 T-N과 NH₄⁺-N의 유입, 유출농도 및 제거효율을 나타내었다. Fig. 6과 Fig. 7에서 보여주는 바와 같이 암모니아의 질산화에는 HRT가 중요한 영향인자로 작용한다. 질소를 처리함에 있어서 생물학적으로 질소를 제거하는 경우, 하수중의 NH₄⁺-N가 호기성(Aerobic) 상태에서 미생물에 의해 생물학적으로 질산화(Nitrification) 되었다가 다시 무산소 상태에서 탈질화(Denitrification) 반응이 일어나 질소화합물이 N₂로 환원됨으로써 이루어진다. 본 실험에 사용된 침지반응장치는 이러한 질산화와 탈질화를 이룰 수 있도록 설계된 것으로써 상부 및 Media 표면에서는 질산화가

일어나고 하부 및 Media 내부에서는 탈질화가 일어날 수 있도록 설계하였다.

유입된 오수의 T-N 90.26~298.73mg/ℓ (175.15mg/ℓ), NH₄⁺-N 87.61~263.05mg/ℓ (163.25mg/ℓ)였으며, HRT 24시간으로 운전하였을 경우 10일 만에 정상상태에 도달하였다. 이때의 유출수의 T-N과 NH₄⁺-N의 평균 농도는 각각 143.01mg/ℓ, 96.26mg/ℓ로 나타났다. HRT 18hr일 경우에는 14일이 지나서야 정상상태에 도달하였는데, 이때의 유출수의 평균 농도는 각각 97.86mg/ℓ, 67.33mg/ℓ로 나타났으며, HRT 12hr와 6hr인 경우 실험개시 후 20일이 지나서야 정상상태에 도달하였는데, 이때의 유출수의 평균농도는 각각 127.98mg/ℓ, 94.97mg/ℓ와 83.27mg/ℓ, 54.74mg/ℓ로 나타났다. HRT를 비롯한 질소 제거 및 질산화에 있어서 영향인자로는 pH, 알카리도, 온도 등이 있겠으나 반응조내 많은 양의 질산화균을 유실(Washout)없이 확보할 수 있는 시스템의 안전성도 영향을 미칠 것으로 보이는데 이에는 사용하는 여재의 비표면적 등 물리적 특성이 중요하다고 사료된다.

암모니아성 질소의 경우 HRT 12hr까지 제거율이 크게 증가하지 않는 것은 HRT가 낮아질수록 유기물 용적부하가 커지므로 종속영양미생물이 생물막의 주종을 이루고 질산화균인 독립영양미생물의 증식이 억제되기 때문에 암모니아성 질소의 제거율이 낮아지고, HRT가 증가함에 따라 암모니아의 용적부하가 감소하고 질산화균이 질산화를 하기위한 충분한 반응시간이 확보되었기 때문이라 판단된다.

윤 등(1999)의 실험에서는 16~24hr에서 유기물, 질소 제거가 높다는 결과를 보였는데, 본 실험에서는 유기물, 질소 제거율이 24hr에 비해서 다소 낮지만 향후 건설시의 경제성 등을 고려하여 최대 HRT를 18hr로 제안하여 이 조건에서 유기물, 질소, 인의 동시 제거효율을 도출하고자 하였다.

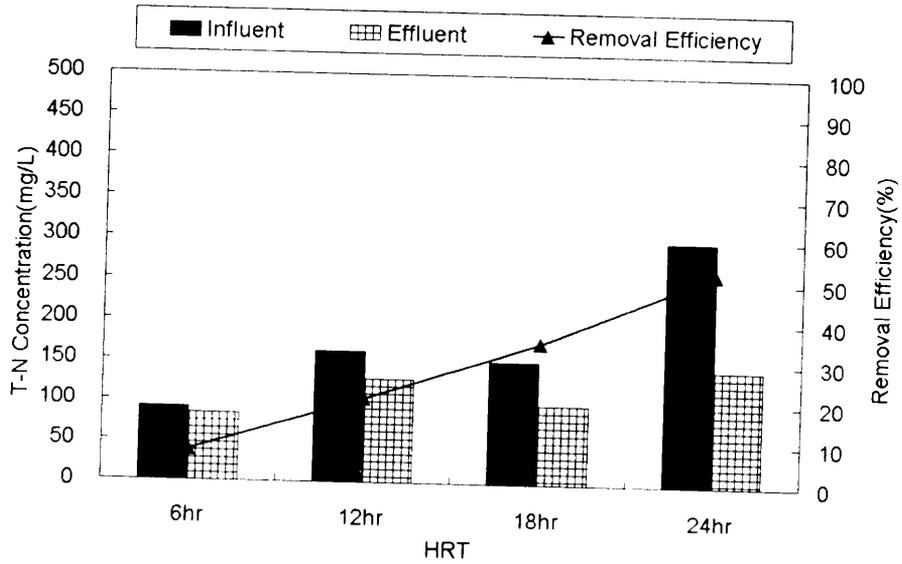


Fig. 6. Variation of T-N concentration and removal efficiency with the HRT(Packing Ratio 40%, SV 1.20m/min).

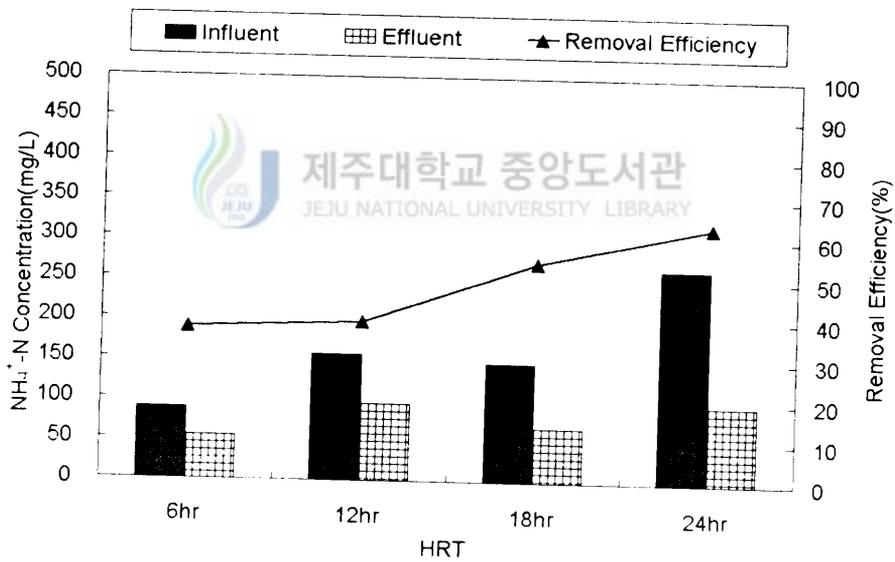


Fig. 7. Variation of NH₄⁺-N concentration and removal efficiency with the HRT(Packing Ratio 40%, SV 1.20m/min).

침지반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 인의 제거영향을 살펴보기 위해서 내부관 공탑속도를 1.2m/min로 유지하고 media 충전율을 40%로 하여 HRT를 각각 6, 12, 18, 24hr로 하여 실험을 수행하였는데, Fig. 8은 각 HRT별로 운전 개시후 정상상태에 도달한 후 T-P의 유입, 유출농도 및 제거효율을 나타내었다.

유입된 오수의 T-P 8.58~10.14mg/ℓ (9.31mg/ℓ)이었으며, HRT 24시간으로 운전하였을 경우 10일 만에 정상상태에 도달하였다. 이때의 유출수의 T-P의 평균 농도는 7.27mg/ℓ로 나타났으며, HRT 18hr일 경우에는 14일이 지나서야 정상상태에 도달하였는데, 이때의 유출수의 평균 농도는 8.64mg/ℓ이었으며, HRT 12hr와 6hr인 경우 실험개시 후 20일이 지나서야 정상상태에 도달하였는데, 이때의 유출수의 평균농도는 각각 7.60mg/ℓ와 5.71mg/ℓ로 나타났다.

생물학적으로 인을 제거하는 원리는 혐기과정에서 방출(phosphorus release)한 인을 호기과정에서 미생물 세포 내로 섭취(phosphorus uptake)하여 인을 잉여슬러지 형태로 배출시킴으로서 제거하게 된다.

인 방출 및 섭취에 관여하는 영향인자로는 유기물의 농도, DO 및 NO₃-N의 농도, pH, ORP(Oxidation Reduction Potential), 온도, SRT 등으로 알려져 있다. T-P의 제거효율은 HRT가 증가함에 따라 조금씩 증가하고 있지만 매우 낮은 제거효율을 나타내었다. 이는 질산화과정에서 생성되어 탈질을 통해 제거되지 못하고 반응조내 잔존하는 산화질소의 영향으로 인의 방출이 저해된 것으로 사료된다.(Vacher and Connell, 1967)

그러므로 인 제거의 방해요소인 산화질소를 제거하기 위해서는 HRT의 변화이외에도 생물학적 탈질을 선행시킬 수 있는 방안을 강구하여야 할 것으로 사료된다.

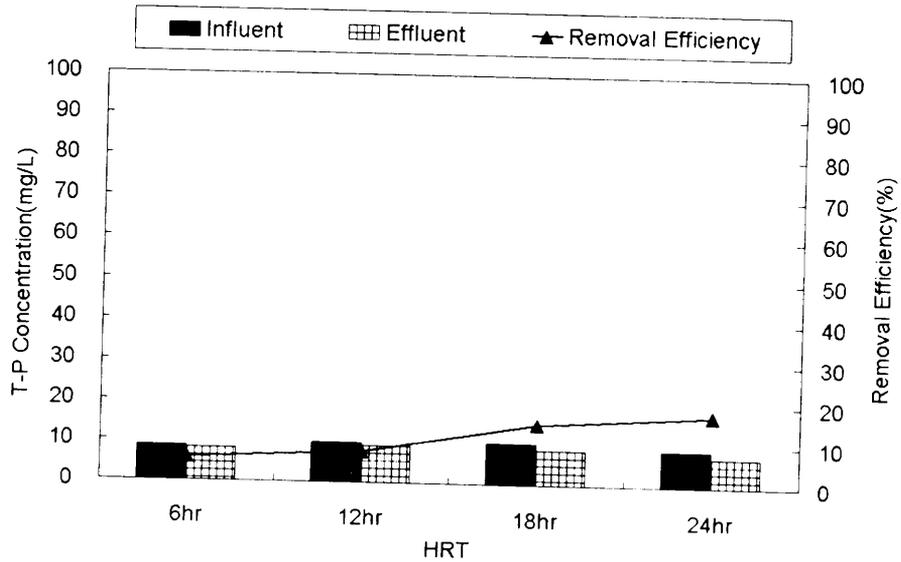


Fig. 8. Variation of T-P concentration and removal efficiency with the HRT(Packing Ratio 40%, SV 1.2m/min).

2) 내부관 공탑속도에 따른 변화

(1) 유기물 제거

본 실험에서는 우선적으로 침지반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 유기물 제거영향을 살펴보기 위해서 내부관 공탑속도를 1.2m/min로 유지하고 media 충전율을 40%로 하여 HRT를 각각 6, 12, 18, 24hr로 하여 실험을 수행하였는데, 적정 HRT를 18hr로 산정하였다. 이에 반응기내 유체의 흐름속도를 좌우하는 적정의 내부관 공탑속도를 산정하기 위해 HRT 18hr, 충전율 40%로 하여 내부관 공탑속도를 0.4, 0.8, 1.2m/min로 수행하였다. Fig. 9~Fig. 11은 media에 미생물이 안정적으로 부착된 후 COD_{Cr} , COD_{Mn} , BOD_5 의 평균 유입, 유출농도 및 제거 효율을 나타내었다.

유입된 오수의 유기물농도는 COD_{Cr} 441.50~617.50mg/ℓ (538.78mg/ℓ), COD_{Mn} 152.54~192.95mg/ℓ (175.70mg/ℓ), BOD_5 271.81~347.51 mg/ℓ

(315.27mg/ℓ)였으며, 내부관 공탐속도 1.2m/min로 운전하였을 경우 14일 만에 정상상태에 도달하였다. 이때의 유출수의 COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD₅의 평균 농도는 각각 103.40mg/ℓ, 22.69mg/ℓ, 16.33mg/ℓ로 나타났다. 내부관 공탐속도 0.4, 0.8m/min인 경우에도 약 14일만에 정상상태에 도달하였는데, 이때의 유출수의 평균 농도는 각각 93.50mg/ℓ, 26.32mg/ℓ, 17.74mg/ℓ와 52.25mg/ℓ, 85.29mg/ℓ, 15.61mg/ℓ로 나타났다. Fig. 9,~Fig. 11에서 알 수 있듯이 내부관 공탐속도의 변화에서 COD_{Cr}을 제외한 유기물의 제거에는 많은 차이를 나타내지 않고 있다. COD_{Cr}의 경우는 내부관 공탐속도에 따른 선속도의 증가로 인해 난분해성 유기물질을 분해하기 위한 접촉시간이 줄어든 것이 제거효율을 떨어뜨리는 결과를 나타내었지만, COD_{Mn}, BOD₅에 대해서는 선속도 증가에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타나 유기물 산화가 매우 빠르게 일어남을 보여주었다. 이러한 것은 질화 및 탈질에 관계하여 내부관 공탐속도가 0.4m/min인 경우가 유기물제거에 유리함을 보여주는 것으로 사료된다.

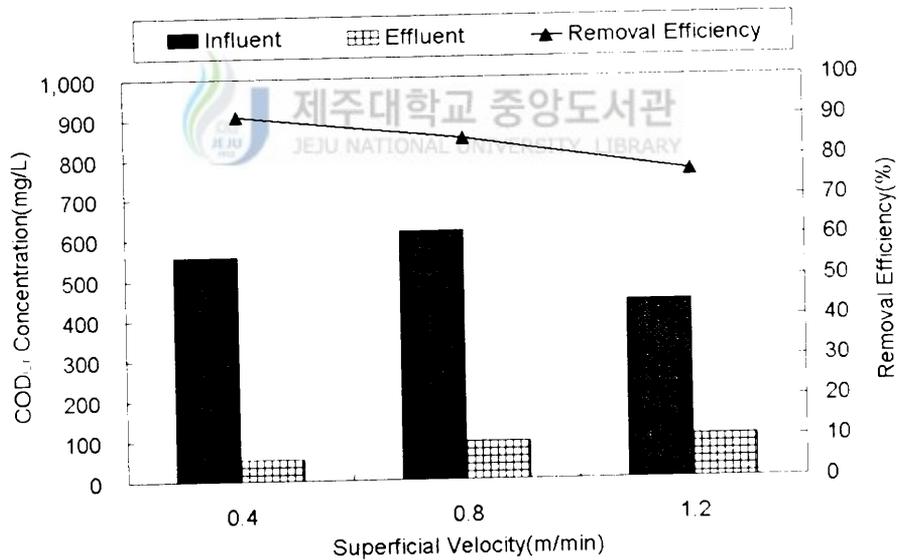


Fig. 9. Variation of COD_{Cr} concentration and removal efficiency with the SV(HRT 18hr, Packing Ratio 40%).

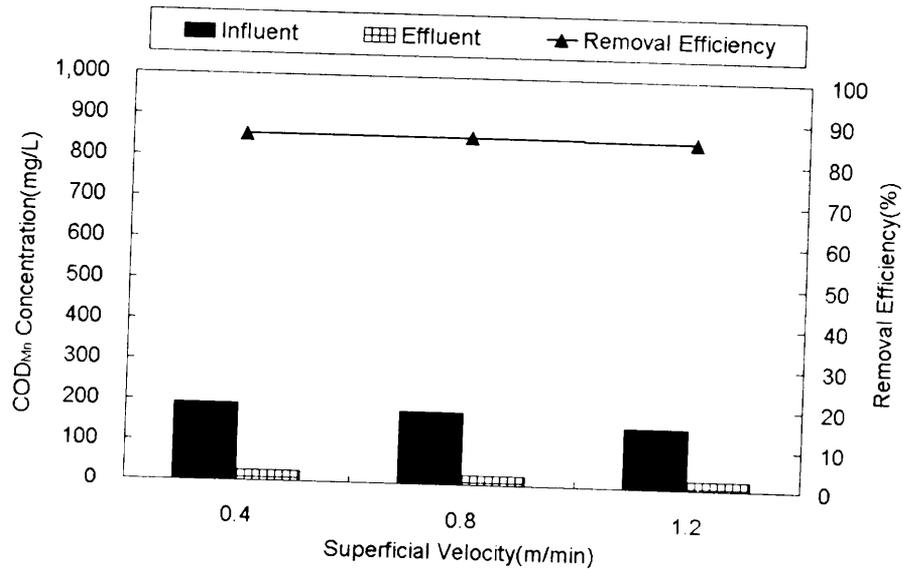


Fig. 10. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency with the SV (HRT 18hr, Packing Ratio 40%).

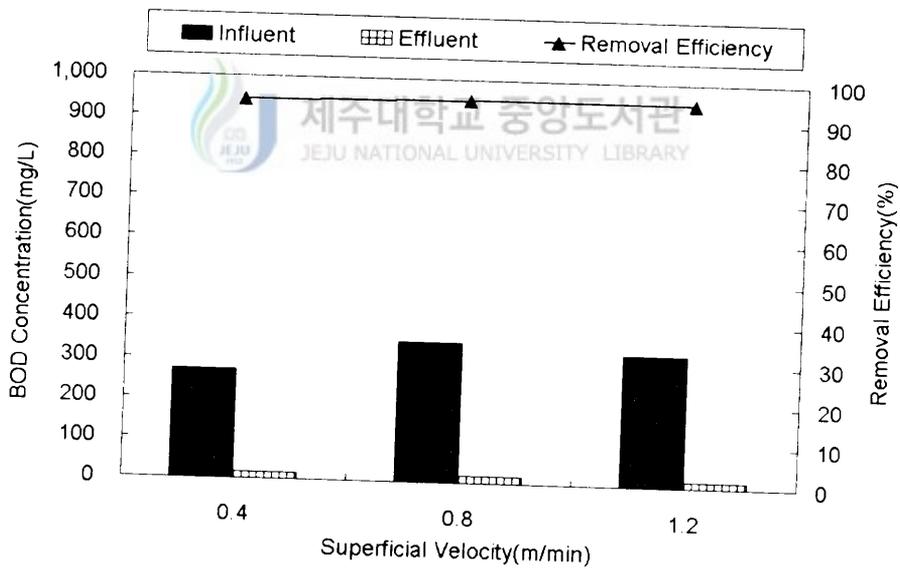


Fig. 11. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiency with the SV (HRT 18hr, Packing Ratio 40%).

(2) 질소·인 제거

침지반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 질소의 제거영향을 우선 살펴보았다. 그러나 Fig. 6에서 보여주듯이 HRT 18hr에서 질소의 제거효율이 그다지 높지 않으므로 탈질을 시키기 위한 방법으로 HRT 18hr, media 충전율 40%로 유지하여 내부관 공탑속도를 각각 0.4, 0.8, 1.2m/min으로 변화시켜 실험을 수행하였는데, Fig. 12와 Fig. 13은 각 내부관 공탑속도에 따른 T-N와 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 유입, 유출농도 및 제거효율을 나타내었다. Fig. 12와 Fig. 13에서 보여주는 바와 같이 암모니아의 제거와 질소의 제거에서 보면 상반된 결과를 보여주고 있는데, 내부관 공탑속도가 높은 경우 DO농도가 반응기 하부까지 유지되어 탈질에 방해인자로 작용한 것으로 사료된다.(Delwiche, 1987)

내부관 공탑속도의 변화에 따른 실험기간 동안 유입된 오수의 T-N 및 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 은 각각 130.81~164.29mg/ℓ(148.45mg/ℓ) 및 100.11~146.33mg/ℓ(119.73mg/ℓ)였으며, 내부관 공탑속도에 따른 변화에서는 14일 내에 모두 정상상태에 도달하였다. 내부관 공탑속도에 따른 변화에서의 유출수의 T-N 평균농도는 0.4, 0.8, 1.2m/min에 대해서 각각 62.37mg/ℓ, 94.54mg/ℓ와 97.86mg/ℓ로 나타났으며, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 평균농도는 각각 53.36mg/ℓ, 56.39mg/ℓ와 67.33mg/ℓ로 나타났다. 여기서 알 수 있듯이 침지반응장치에서 질소 제거 있어서 HRT, pH, 알카리도, 온도, 여재의 물리적 특성 등이 영향인자로 작용할 뿐만 아니라 내부관 공탑속도에도 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 또한 그림에서 알 수 있듯이 내부관 공탑속도 0.4m/min에서 질소제거에 유리함을 알 수 있었다.

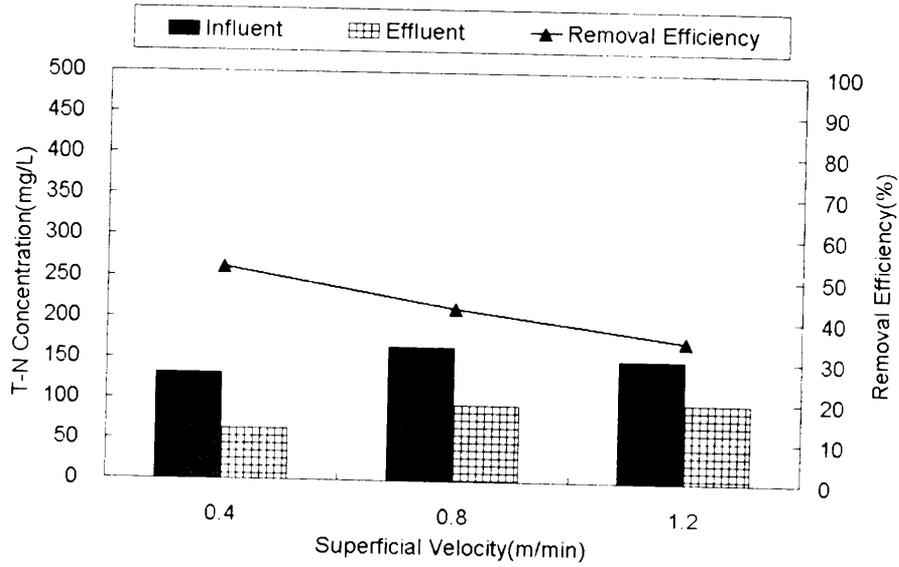


Fig. 12. Variation of T-N concentration and removal efficiency with the SV (HRT 18hr, Packing Ratio 40%).

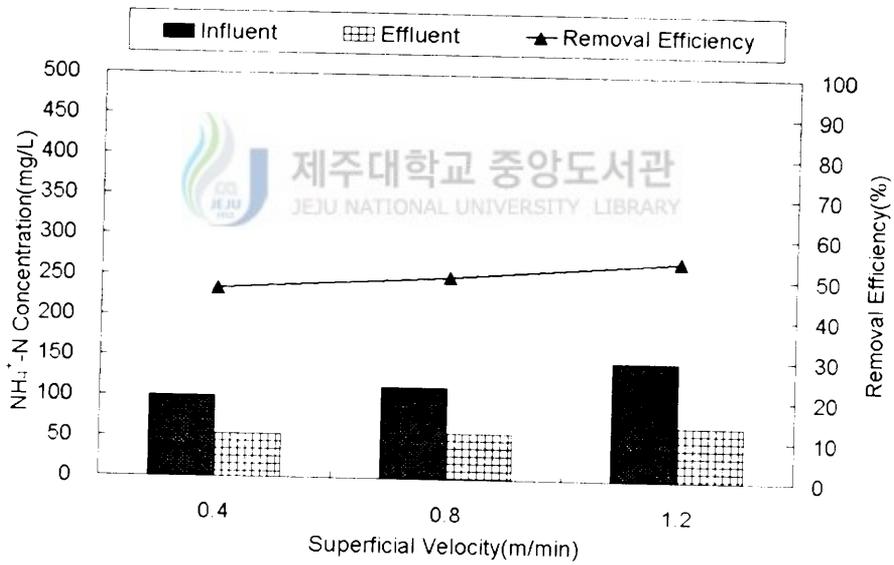


Fig. 13. Variation of NH₄⁺-N concentration and removal efficiency with the SV (HRT 18hr, Packing Ratio 40%).

간접포기형침지생물막장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 인의 제거영향을 우선 살펴보았다. 그러나 Fig. 8에서 보여주듯이 모든 HRT조건에서 인의 제거효율은 20%이하로 나타났다. 이러한 이유는 앞서도 언급하였듯이 생물학적으로 인을 제거하기 위해서는 산화질소의 영향을 줄이기 위해 탈질을 시켜야 하는데(Vinconneau, 1985), 내부관 공탑속도가 높은 경우 반응기내 선속도가 빠를 뿐만 아니라 DO농도가 반응기 하부까지 유지되므로 탈질이 된다고 하더라도 인이 방출되기에는 반응시간이 짧다고 사료된다. 그러므로 인을 제거시키기 위한 방법으로 HRT 18hr, media 충전율 40%로 유지하여 내부관 공탑속도를 각각 0.4, 0.8, 1.2m/min로 변화시켜 실험을 수행한 결과를 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 12와 Fig. 13에서 알 수 있듯이 탈질이 우수한 조건에서 인의 제거도 잘 이루어질 것이며, 이에 Fig. 14에서도 탈질이 우수한 조건에서 인의 제거 또한 우수함을 확인하였고, 내부관 공탑속도에 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

내부관 공탑속도의 변화에 따른 실험기간동안 유입된 오수의 T-P 농도는 9.88~16.91mg/ℓ (12.31mg/ℓ)였으며, 모든 조건에서 14일내에 모두 정상상태에 도달하였다. 내부관 공탑속도에 따른 변화에서의 유출수의 T-P 평균 농도는 0.4, 0.8, 1.2m/min에 대해서 각각 7.31, 7.78 및 8.64mg/ℓ로 나타났다.

Fig. 8에서 보면 T-P의 제거효율은 HRT가 증가함에 따라 조금씩 증가하고 있지만 매우 낮은 제거효율을 나타내었다. 그러나 같은 HRT조건에서 내부관 공탑속도의 변화로 인해 탈질이 더 원활히 이루어지게 되고 이에 따라 인의 제거 또한 상대적으로 높게 나타난 것으로 사료되므로 T-P의 제거에 있어서 적정 내부관 공탑속도는 0.4m/min으로 판단된다.

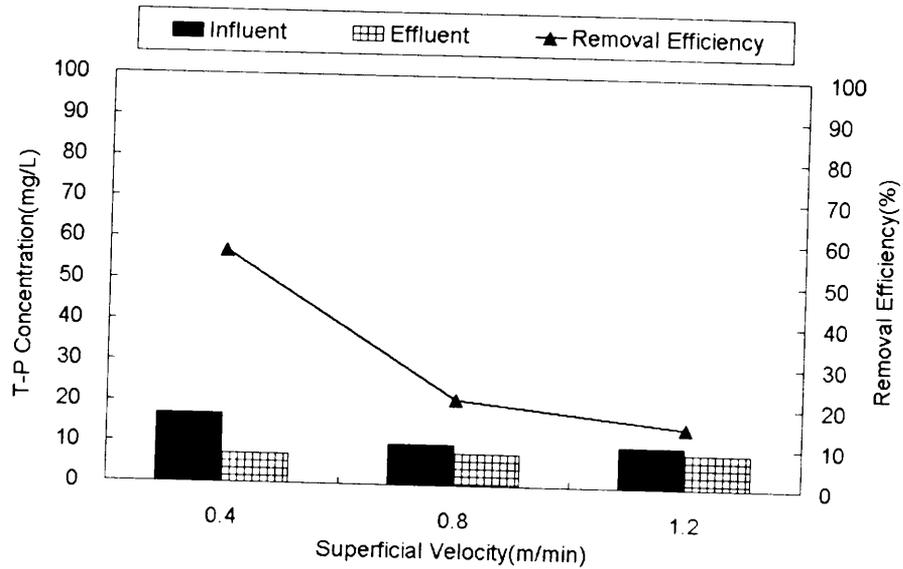


Fig. 14. Variation of T-P concentration and removal efficiency with the SV(HRT 18hr, Packing Ratio 40%).

3) 충전율에 따른 변화

(1) 유기물의 제거

본 실험에서는 우선적으로 침지반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 유기물 제거영향을 살펴보기 위해서 내부관 공탑속도를 1.2m/min로 유지하고 media 충전율을 40%로 하여 HRT를 각각 6, 12, 18, 24hr로 하여 실험을 수행하여, 적정 HRT를 18hr로 산정하였으며, 두번째로 반응기내 유체의 흐름속도를 좌우하는 적정의 내부관 공탑속도를 산정하기 위해 HRT 18hr, 충전율 40%로 하여 내부관 공탑속도를 0.4, 0.8, 1.2m/min로 수행한 결과 유기물의 제거에서는 그다지 차이는 나타나지 않았으나 질소와 인의 경우에는 내부관 공탑속도에 따라 크게 나타났다. 이에 HRT 18hr, 내부관 공탑속도 0.4m/min으로 한 조건에서 충전율에 대한 영향을 알아보기 위해서 반응기 용적에 대한 충전율 20, 30,

40%에 대해 실험을 수행하였다. Fig. 15~Fig. 17은 충전율의 변화에 따른 실험에서 media에 미생물이 안정적으로 부착된 후 COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD₅의 평균 유입, 유출농도 및 제거효율을 나타내었다.

충전율의 변화에 따른 실험기간동안 유입된 오수의 유기물농도는 COD_{Cr} 557.33~622.25mg/ℓ (599.03mg/ℓ), COD_{Mn} 183.82~193.77mg/ℓ (190.18mg/ℓ), BOD₅ 271.81~347.51 mg/ℓ (315.27mg/ℓ)이었으며, media 충전율이 20~40%로 증가함에 따라 COD_{Cr} 제거효율은 80.23~90.63%, COD_{Mn} 제거효율은 73.66~85.29%, BOD₅ 제거효율은 89.28~94.25%로 나타났다. media 충전율이 20~30%로 증가함에도 불구하고 COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD₅ 제거효율은 크게 나타나지 않았지만, 담체 충전율이 40%로 증가하자 30%에 비해 약 8.3% 증가하는 결과를 나타내었다.

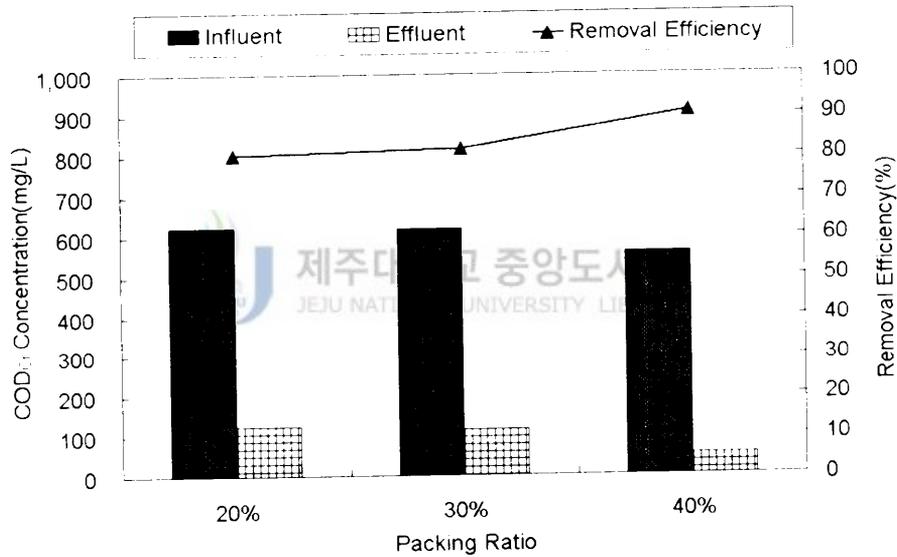


Fig. 15. Variation of COD_{Cr} concentration and removal efficiency with the media packing ratio(HRT 18hr, SV 0.4m/min).

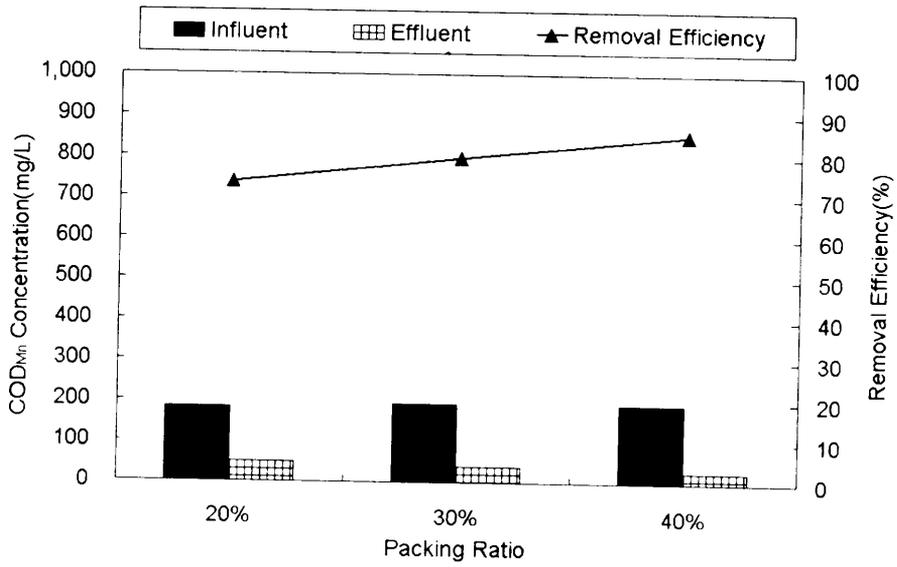


Fig. 16. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency with the media packing ratio(HRT 18hr, SV 0.4m/min).

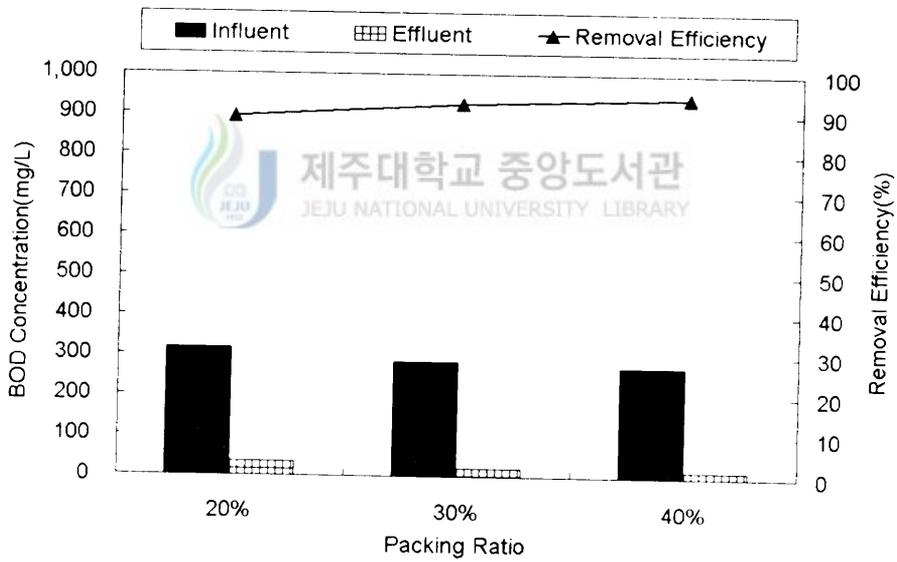


Fig. 17. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiency with the media packing ratio(HRT 18hr, SV 0.4m/min)

(2) 질소 인의 제거

침지반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 질소제거영향을 살펴보기 위해서 내부관 공탑속도를 1.2m/min로 유지하고 media 충전율을 40%로 하여 HRT를 각각 6, 12, 18, 24hr로 하여 실험을 수행하였는데, HRT 24hr와 HRT 18hr에서 크게 차이가 없으므로 적정 HRT를 18hr로 선정하였으며, 두번째로 반응기내 유체의 흐름속도를 좌우하는 적정의 내부관 공탑속도를 선정하기 위해 HRT 18hr, 충전율 40%로 하여 공기 유량을 0.4, 0.8, 1.2m/min으로 수행한 결과 유기물의 제거에서는 그다지 차이는 나타내지 않았으나 질소와 인의 경우에는 내부관 공탑속도에 따라 크게 나타났다. 이에 HRT 18hr, 내부관 공탑속도를 0.4m/min으로 한 조건에서 충전율에 대한 영향을 알아보기 위해서 반응기용적에 대한 충전율 20, 30, 40%에 대해 실험을 수행하였다.

Fig. 18과 Fig. 19는 Media 충전율 변화에 따른 T-N과 NH_4^+-N 의 유입, 유출 농도 및 제거효율을 나타낸 것으로써 20~40%로 증가함에 따라 암모니아성 질소 제거효율은 반대로 감소하고 있다. 이는 질산화에 소모되는 산소량이 유기물 산화보다 많이 요구됨에도 불구하고 Media 충전율 증가로 인해 두꺼워진 미생물막 내부로 산소의 전달이 용이하지 않아 효과적인 질산화가 이루어지지 못한 것으로 사료되었다. 또한 Media 충전율의 증가는 생물막 저부에서의 부분적 혐기화 및 산소의 부족 현상을 야기했고, 이로 인하여 Media 충전율이 40%으로 증가함에도 암모니아성 질소 제거효율은 Media 충전율 20~30%에 비해 오히려 약 10%감소하는 결과를 초래한 것으로 사료되었다. 또, 미생물이 너무 많으면 영양물질 제거효율이 오히려 감소될 수 있다는 결과를 보여주었다.(Hawks, 1963)(K. H. Lee 1995)

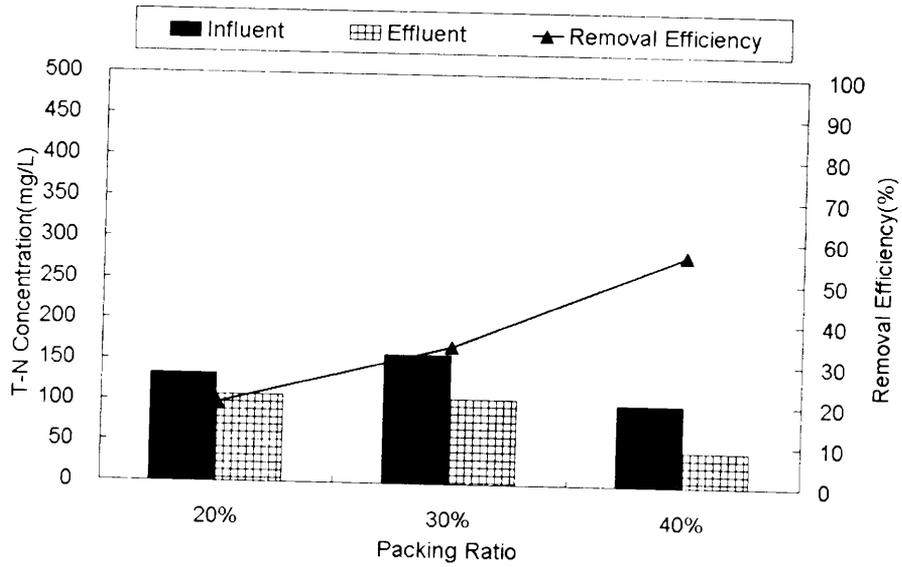


Fig. 18. Variation of T-N concentration and removal efficiency with the media packing ratio(HRT 18hr, SV 0.4m/min).

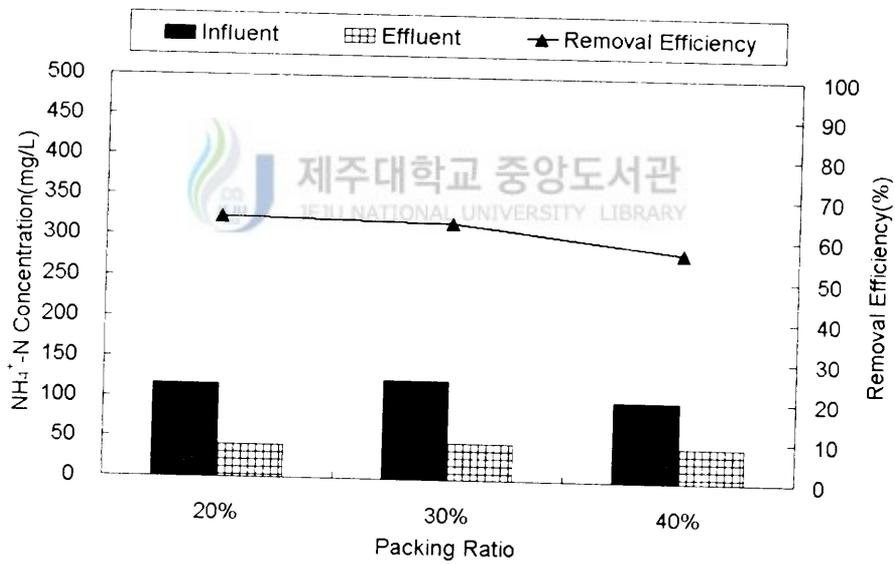


Fig. 19. Variation of NH₄⁺-N concentration and removal efficiency with the media packing ratio(HRT 18hr, SV 0.4m/min)

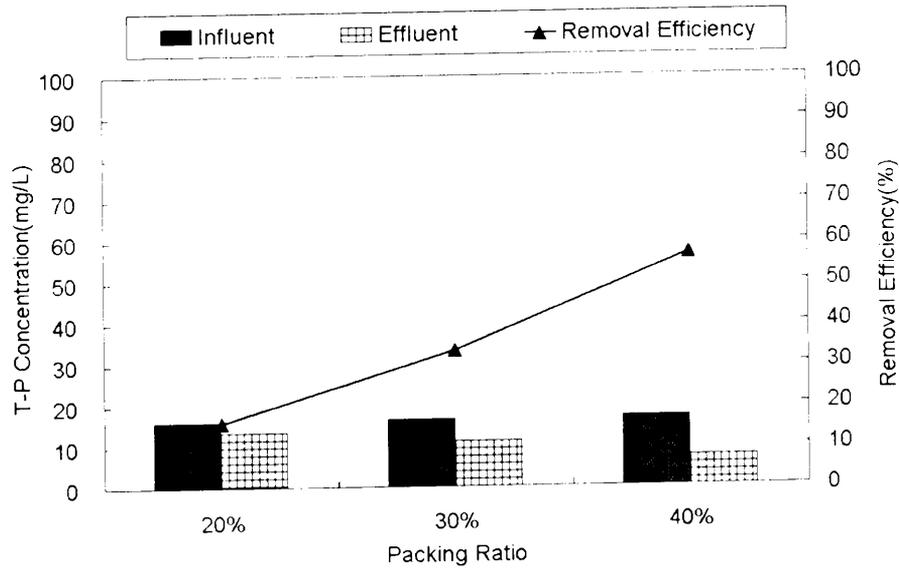


Fig. 20. Variation of T-P concentration and removal efficiency with the media packing ratio(HRT 18hr, SV 0.4m/min).

침지반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 인의 제거에 대한 영향을 살펴보기 위해서 내부관 공탑속도를 1.2m/min로 유지하고 media 충전율을 40%로 하여 HRT를 각각 6, 12, 18, 24hr로 하여 실험을 수행하여, 적정 HRT를 18hr로 산정하였으며, 두번째로 반응기내 유체의 흐름속도를 좌우하는 적정의 내부관 공탑속도를 산정하기 위해 HRT 18hr, 충전율 40%로 하여 내부관 공탑속도를 0.4, 0.8, 1.2m/min로 수행한 결과 유기물의 제거에서는 그다지 차이는 나타내지 않았으나 질소와 인의 경우에는 내부관 공탑속도에 따라 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 이에 HRT 18hr, 내부관 공탑속도를 0.4m/min으로 한 조건에서 충전율에 대한 영향을 알아보기 위해 반응기용적에 대한 충전율 20, 30, 40%에 대해 실험을 수행하였다. Fig. 20은 충전율의 변화에 따른 인의 유입, 유출 농도 및 제거효율을 나타낸 것으로 충전율 40%에서 가장 높은 제거율을 나타내고 있다. 이는 media 충전율의 증가로 인해 두꺼워진 생물막 내부로 산소 전달이 용이하지 않아 반응기 상부와 하부에 각각 호기성층과 혐기성층으로 구분

화되면서 인의 방출과 섭취가 잘 이루어진 결과라고 사료된다.

(3) TSS의 제거

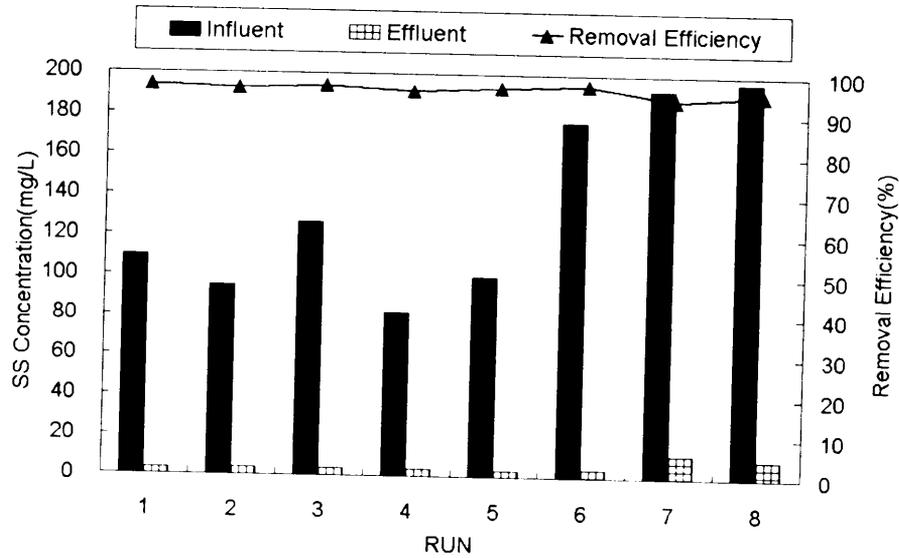


Fig. 21. Variation of TSS concentration and removal efficiency with each the Run(1: 6hr, 2: 12hr, 3: 18hr, 4: 24hr, 5: 0.4m/min, 6: 0.8m/min, 7: 20v/v%, 8: 30v/v%)

Fig. 21은 각 운전조건에 따른 TSS 유입, 유출농도 및 제거효율을 나타냈다. 운전 기간동안 역세척 횟수는 2번을 수행했으며, 이의 기준은 수두가 생겼을 경우에 행하였다.

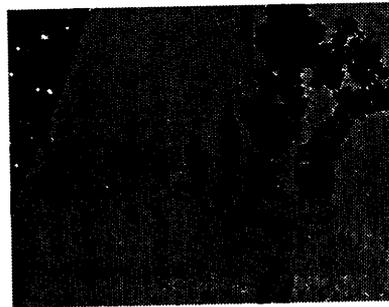
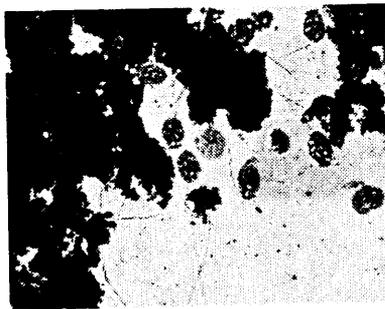
각각의 TSS의 제거율은 운전조건에 변화에도 불구하고 약 93.8~97.5%로 거의 비슷한 제거효율을 나타내었다. 이러한 결과는 침지생물반응장치가 생물학적 제거 뿐만 아니라 물리적인 여과효과가 있었기 때문으로 사료된다.

4) 미생물의 발생현황

생물막은 입자 표면에 젤라틴 형태로 부착되며, 가지형이나 선형 형태의 다당류가 중심 물질인 탄수화물로 구성되고, 다양한 종들의 미생물들이 군집화된 결합체처럼 활동한다. 미생물이 흡착표면과 직접적으로 접촉되지 않고, 약간의 공극(~10nm)이 있지만, 이것은 사이에 높은 에너지 장벽이 있으며 세포의 폴리머가 이 장벽을 넘어서 다리 역할을 하고 있는 것으로 생각할 수 있다.

흡착표면근처(0.2~0.3nm)까지 도달한 폴리머는 매우 근거리에서 활동하는 수소결합과 이온결합 등에 의해 표면과 연결된다고 생각할 수 있다. 폴리머의 경우는 이와 같은 결합이 가능한 장소가 많이 있고 개개의 결합이 약하더라도 이러한 결합이 많이 모이면 전체적으로는 미생물의 비가역적 흡착에 충분한 정도의 강한 결합이 생긴다.

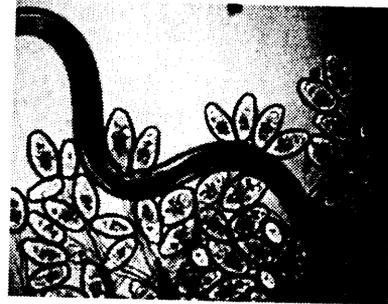
이러한 생물막을 이용하는 폐수처리 공정에서는 증식속도가 느린 미생물도 외부로 유출되지 않고 다종다양한 미생물이 증식할 수 있으므로 슬러지 연령이 길고, 슬러지의 자기산화가 촉진되기 때문에 폐슬러지의 발생량이 적으며, 다양한 미생물종이 군집을 형성함으로써 온도나 pH변동, 충격부하 및 난분해성 물질유입에 따른 대체 능력이 뛰어나고, 매질에 미생물이 부착되어 있으므로 슬러지 팽화현상으로 인한 슬러지 부상 등과 같은 문제점을 줄일 수 있는 것으로 알려져 있는데, Photo 2는 본 실험기간동안 담체에 부착된 미생물을 현미경(OLYMPUS, Model PH-2)으로 찍은 사진이다.



Vorticella sp.



Opercularia sp.

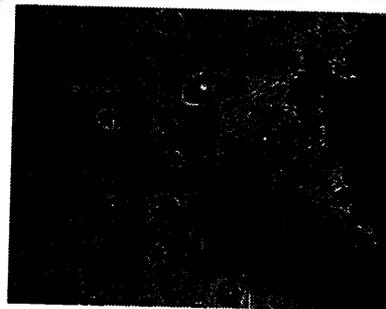


Diplogaster sp.

Epistylis sp.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



Carchesium sp.

Photo 2. Photographs of microbial attached to media during experiment period.

Carchesium은 생물막 여과법의 지표생물로 Vorticella, Opercularia, Epistylis등과 같이 산소용해율이 좋고 슬러지, 처리수질이 양호한 상태에 출현하며, 분처리수의 투명도를 좋게한다. Diplogaster는 비교적 광범위한 조건에서 출현하는 후생동물로 슬러지사이를 헤집고 다니며 슬러지를 먹고산다. 이와 같이 본 장치에서는 다양한 부착활성미생물들이 과량으로 군집을 형성할 수 있었으며, 아울러 미소후생동물(Metazoa)에 속하는 갑각강(Crustacea), 빈모강(Olygochaeta)등이 다수 증식되고 있음을 확인할 수 있었다.

따라서 본 장치에서는 세균(Bacteria)류에서 미소후생동물류까지 생물군집이 다양하게 형성되어 최종 폐슬러지의 발생을 극히 저감시킬 수 있는 것으로 평가되었다.



4. 결론

오·폐수 중의 유기물과 영양염류의 동시제거와 더불어, 경제적이고, 안정적인 유지관리가 가능한 오·폐수 고도정화장치로서 간접포기형 침지생물막여과장치 (Indirectly Aerated Submerged biofiltration; InSub)를 개발하기 위한 실험실적 모형실험의 결과로부터 다음과 같은 결론을 구하였다.

1. 간접포기형 침지생물반응막여과장치에서 오·폐수를 고도처리함에 있어 HRT에 대한 영향을 살펴보았을 때, HRT 24hr일 때가 가장 제거효율이 높았으나 HRT 18hr인 경우와 그다지 차이가 크게 나지 않으므로 경제성 등을 고려하여 실제 운전, 설계시 적정 HRT로는 18hr으로 제안하였다.
2. 내부관 공탑속도에 대한 영향을 살펴보았을 때, 유기물제거에는 많은 차이를 보이지 않았지만 질소와 인의 경우에 0.4m/min인 경우가 가장 높은 제거율을 나타내므로 적정 내부관 공탑속도로는 0.4m/min로 제안하였다.
3. 담체 충전율에 따른 유기물, 질소 그리고 인의 제거효율을 살펴보았을 때, 담체 충전율에 따른 유기물의 제거효율에서는 크게 차이를 보이지 않았으나 질소, 인의 경우에는 충전율 20v/v%와 30v/v%에서의 경우보다 40v/v%에서 상당히 높은 제거효율을 보이고 있다.
4. 각 운전조건에서 TSS의 제거효율은 담체의 물리적 여과효과에 의해서 크게 차이를 보이지 않았으며, 약 93.8~97.5%의 높은 효율을 유지했다.
5. 간접포기형 침지생물막여과장치에서 오·폐수를 고도 처리함에 있어 HRT 18hr, 내부관 공탑속도 0.4m/min, 그리고 담체 충전율 40v/v%에서 제거효율이 가장 높았으며, COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD₅, T-N, 그리고 T-P에 대한 각각의 제거효율은 90.6, 85.3, 95.0, 52.3 그리고 56.8%이다.

6. 질소·인의 고효율처리를 위해서는 선탈질에 의한 산화질소의 제거를 위해 무산소, 호기조의 조합등에 의한 System의 일부변경이 필요함을 확인할 수 있었다.



III. InSub장치에서의 액의 순환속도 예측

1. 서론

1) 연구배경 및 목적

InSub장치는 공기에 의해 교반되기 때문에 기포탑 반응기의 범주로 간주할 수 있다. 두 반응기 간의 주된 차이점은 반응기의 형태에 의존하는 유체의 흐름, 즉 수리학적 특성이 전혀 다르다는 것이다. 기포탑 반응기에서는 기포의 상승작용에 의해 형성된 난류에 의한 액상의 불규칙한 혼합이 일어난다. 반면에 InSub장치에서는 액상의 순환속도는 기상유속과 밀접한 관계가 있다. InSub장치는 상승부와 하강부의 밀도차에 의해 아주 높은 액상 순환속도를 얻을 수 있어서 혼합이 우수하고, 기포탑 반응기보다 높은 기상 유속까지 슬러그 현상의 발생을 지연할 수 있다. 또한 기상유속이 증가함에 따라 기상체류량이 증가하여 배지가 넘치는 경향이 있는데, 이러한 현상(Liquid blow out)을 유발하는 기상유속이 InSub장치보다 기포탑 반응기에서 낮다. 이러한 영향들의 결과로 기상과 액상의 속도의 측면에서 InSub장치에서 가능한 활용영역이 기포탑 반응기의 활용영역보다 넓다.

이러한 InSub장치에서의 성능은 액상순환속도와 밀접한 관련이 있다. 이 속도는 산소전달뿐만 아니라 상승부에서의 기상 체류시간을 결정하고, 혼합시간과 열전달계수와 같은 다른 변수들에도 영향을 미친다. 액의 순환속도는 기상 유속의 증가에 따라 증가하는데 이러한 InSub장치의 설계에 있어서 중요한 변수들은 직경에 대한 높이의 비(H/D)와 하강부와 상승부의 단면적 비(A_r/A_d)이다.

일반적으로 InSub장치에서 기상체류량은 InSub장치의 수리학적 특성을 나타내는 주요 변수중의 하나이다. 기상 체류량은 기-액이나 기-액-고 분산상의 전체 부피중 기상의 부피분율이다. 높은 기상 체류량은 기-액 계면적을 증가시키므로 물질전달 성능이 좋은 것을 의미하며, 상승부와 하강부간의 기상 체류량의 차이가 액상의 순환을 위한 추진력이 되므로 혼합과 밀접한 관련이 있다. 기상 체류량은 일차적으

로 기상유속에 의존하고 사용된 분산기의 종류, 탑의 직경과 Ar/Ad비 등의 반응기의 기하학적 특성, 유체의 물성, 흐름영역 등에 의해 영향을 받는다. 산소를 연속적으로 공급하더라도 상승부에서 산소로 포화된 배양액이 하강부 아래의 어느 위치에서 미생물의 산소소비에 의해 산소가 고갈되는 경우가 발생하기 때문에 상승부와 하강부의 기상 체류량의 관계도 매우 중요하다. 미생물에 대한 임계산소농도는 $9.6 \times 10^{-5} \sim 1.6 \times 10^{-3} \text{kg/n}^3$ 이다. 대기압 하에서 전형적인 배지들의 산소용해도는 $8 \times 10^{-3} \text{kgO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{s}$ 이고, 발효하는 동안에 최대 산소요구량은 $1.8 \times 10^{-4} \sim 2.7 \times 10^{-3} \text{kgO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{s}$ 이므로 공기가 포화된 배지에 산소공급을 중단할 경우 2~25분 내에 산소가 고갈될 것이다. 따라서 산소고갈을 방지하기 위해서는 미생물에 따라 하강부에서 유체의 체류시간을 2~45초보다 작게 하거나, 하강부에 기체의 재순환이나 새로운 기체를 주입해야 한다.

따라서 본 연구에서는 Airlift모형반응기와 동력학적 해석을 위한 관련식들을 이용하여 InSub에서의 액의 '내부순환속도' 및 상부에서 하부까지 액이 순환되는데 소요되는 '내부순환시간'등의 InSub장치의 기본설계인자의 도출을 목적으로 Lab test를 수행하였다.

2) 연구내용 및 범위

InSub장치는 내부 Airlift반응기와 형태상으로 유사하며, 이중관으로 구성되어 있어 내부의 관에서 포기가 이루어지면 내부관의 기액의 혼합물의 비중이 낮아지면서 상승이 이루어짐으로써 내부관과 외부관의 액의 순환이 이루어지게 된다. 이러한 액의 순환에서 상승부에서 하강부로 흐르는 영역에서 일부의 기체는 대기중으로 방출되고 일부의 기체는 하강하는 액체에 포함되거나 용해되어 액과 함께 순환이 이루어진다. 여기서 앞의 연구배경에서 언급하였듯이 하강하는 액체의 체류시간을 2~45초보다 작게 유지하지 않으면 산소의 고갈이 이루어지게 되고 이러한 조건은 무산소조건 또는 혐기성 조건을 형성할 수 있다는 것을 의미하기도 한다. 따라서 이러한 무산소조건 또는 혐기성조건 형성은 또 다른 의미로 탈질·탈인이 이루어질 수 있는 조건을 형성한다는 의미에서 상당히 중요한 부분이다.

따라서 InSub장치에서의 내부순환속도를 예측하기 위해서 직경이 다른 외부관 2개

와 직경이 다른 내부관 3개를 각각 실험하였다. 그리고 실제 측정된 값과 Cristi 등이 제안한 시행착오법을 가지고 각각 비교함과 아울러 마찰손실계수를 산정하는 K_B 의 관계식을 산출함으로써 InSub장치내의 내부순환속도를 예측하였으며, 이렇게 예측된 내부순환속도는 InSub장치에서의 탈질·탈인을 설명할 수 있는 중요한 단서를 제공하였다.

2. 재료 및 방법

1) 실험장치

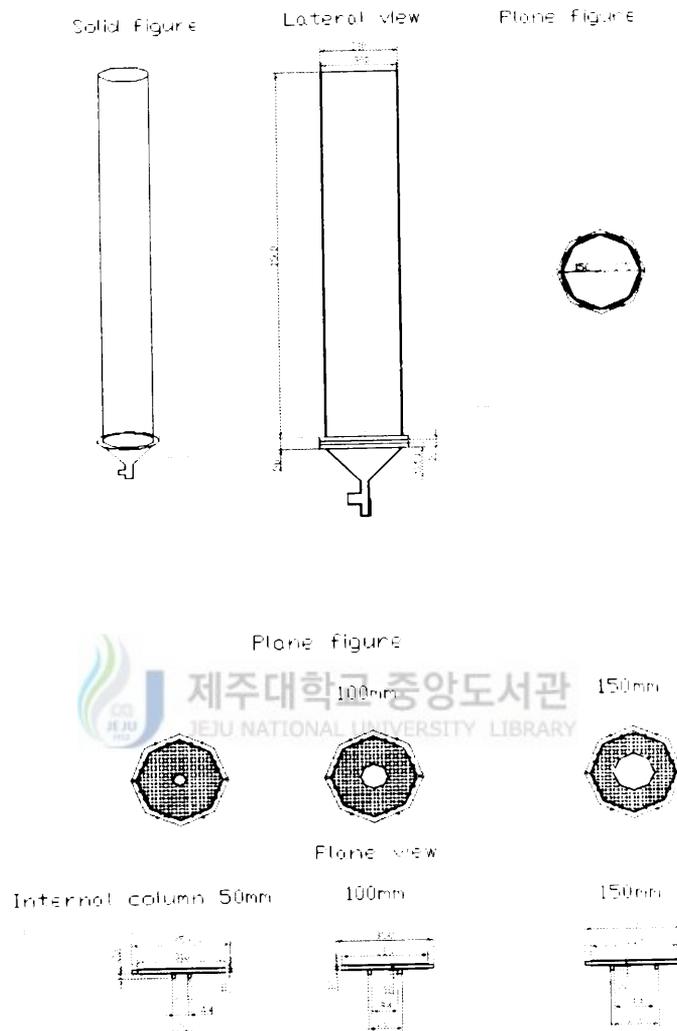


Fig. 22. Schematic diagram of InSub reactor for measuring water velocity circulated.

본 연구에서 내부순환속도를 측정하기 위한 Airlift모형반응기를 Fig. 22에 나타내었다. 각 반응기는 내부관과 외부관으로 구성되어 있으며, 5mm 아크릴로 제작하였다. 반응기를 구성하고 있는 외부관은 높이가 1.5m이고, 직경이 200mm 및 300mm로 두개를 제작하였다. 그리고 내부관은 높이가 1.2m이고 직경이 각각 50, 100 그리고 150mm로 제작하였다. 그리고 내부관을 지지하기 위하여 분산판을 제작하였는데, 분산판은 InSub장치의 분산판의 공극의 크기 비율을 계산하여 그와 같게 제작하였으며, 연결부분에서의 액의 유출을 방지하기 위하여 고무패킹을 사용하였으며, 내부관이 기울어지지 않도록 받침대를 설치하였다.

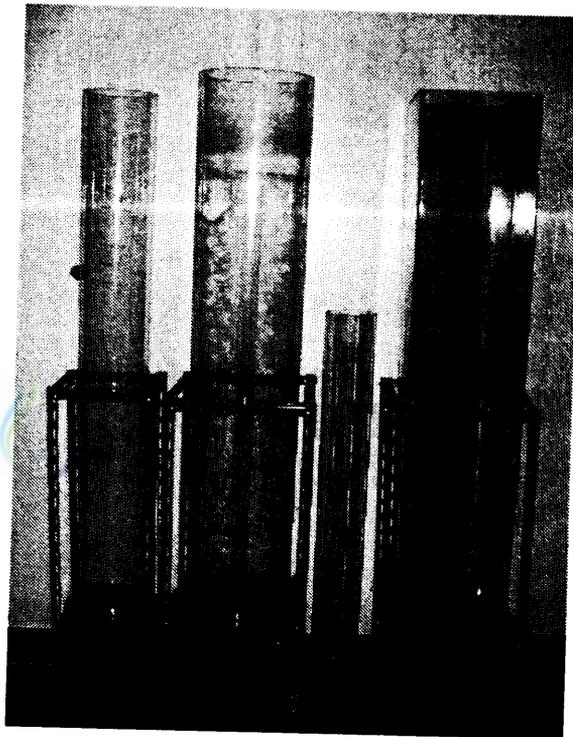


Photo 3. Photograph of InSub reactor for measuring water velocity circulated.

2) 분석방법

(1) 실험실적 모형 실험장치에서의 액의 순환속도 측정

Electric conductivity method, heat-pulse method 그리고 dye method과 같이 기체

칼럼 또는 Airlift 반응기에서 내부순환속도는 다양한 추적자방법에 의해 측정되어 왔다(Ueyama et al., 1977; Kojima et al., 1980; Wachi et al., 1991). 그러나 이러한 방법들은 흐름유형이 시간에 따라 변하는 흐름 영역에 대해서는 적당하지 않다. 이외에 충분히 빠른 반응으로 흐름 방향 및 속도를 측정하는데 이러한 비정상 흐름 영역에서 Split-film probe가 사용될 수 있다(Buchholtz et al., 1982; Franz et al., 1984; Zakrzewski et al., 1981a, 1981b). 비록 이러한 장치는 기포칼럼에서 기-액 두 개의 상 흐름에 적절히 적용되지만, 측정하기 전에 정상상태흐름에서 검량선화 되어야 한다. 또한 Noriaki et al(1997)에 의해 제안된 3개의 전극을 이용하여 측정하는 방법 등도 있지만 본 연구에서는 각 측정의 단점 및 장비의 부재로 인하여 추적자로 잉크를 사용하여 액의 속도를 측정하였다(Thanathorn Vorapongsathorn et al., 2001). 잉크를 반응기에 처음 주입할 때 수직으로 잉크가 주입되는 것을 방지하기 위하여 앞의 90°로 구부러진 주사기를 사용하여 실험하였다.

(2) 시행착오법에 의한 액의 순환속도 추정

InSub 장치에서의 내부순환속도를 산출하고자 InSub 장치와 모든 형태에서 유사한 Airlift 반응기에 관련된 식들을 사용하였다.

Airlift반응기에서의 액의 순환에 대한 많은 연구들이 있었으며, 이러한 연구들을 자세히 살펴보면 결점들이 조금씩 있음을 알 수 있었으나 이러한 결점들을 고려해보면 에너지 밸런스(Energy-balance)를 기초로 한 새로운 액순환 모델을 만들 수 있으며, Airlift의 유형에 관계없이 일반적으로 적용됨을 보여준다.

① 액순환 모델

Airlift 반응기에서의 에너지 밸런스(Energy-balance)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

반응기로의 에너지 주입율 = 에너지 소실율

또는

$$E_i = E_R + E_D + E_B + E_T + E_F \quad (2)$$

여기서,

E_i = 등은 가스팽창으로 인한 에너지 주입

$$= QP_h \ln\left(1 + \frac{\rho_D g h_D}{P_h}\right) \quad (3)$$

E_R = 상승부에서 기포뒤의 파장으로 인한 에너지 손실

E_D = 하강부에서 정체가스로 인한 에너지 손실

$E_{B(T)}$ = 반응기의 꼭대기나 바닥에서 마찰과 액의 선회로 인한 에너지 손실

E_F = 상승부와 하강부에서 마찰로 인한 에너지 손실

여기에서는 단지 뉴턴의 학설에 따라 낮은 점성(물 등)의 흐름을 고려하게 되는데 이러한 조건하에서 Airlift반응기에서의 벽 또는 표면마찰손실(E_F)은 식 38에서 다른 변수들로 인한 손실과 비교하였을 때 무시될 수 있었다. 이렇게 E_F 가 무시되는 경우는 낮은 점성의 유체에서 가능하며 Lee et al(1986)에 의해 제시된 Data에 의해 더욱 확실시 되었다.

상승부에서 기포가 지나간 뒤 파장으로 인한 에너지 손실(E_R)은 체적 제어(Control volume)로써 상승하는 액을 이용한 에너지 밸런스로 인하여 얻을 수 있다.

그러므로

$$E_i = E_R - \rho_L g h_D (1 - \epsilon_r) U_{Lr} A_r + \rho_L g h_D U_{Lr} A_r \quad (4)$$

(압력에너지 손실) (잠재에너지 증가)

식으로 나타낼 수 있으며, 따라서

$$E_R = E_i - \rho_L g h_D U_{Lr} A_r \epsilon_r \quad (5)$$

하강부에서 하강하는 액중에 포함되어 있는 기체가스가 항력으로부터 상승하려는 힘에서 발생하는 에너지 손실(E_D)은 체적 제어(Control volume)로써 하강하는 액을 이용하여 하강부상에서의 에너지 밸런스(Energy-balance)를 조사함으로써 얻을 수 있다.

$$0 = E_D + \rho_L g h_D (1 - \varepsilon_d) U_{Ld} A_d + \rho_L g h_D U_{Ld} A_d \quad (6)$$

(압력에너지 증가) (잠재에너지 손실)

또는

$$E_D = \rho_L g h_D U_{Ld} A_d \quad (7)$$

Airlift 반응기의 바닥과 윗부분에서 에너지 손실은 McCabe(1956) 등에 의한 관 흐름과 같이 같은 방법으로 정확히 산출되어질 수 있다. 그러므로 식 8과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_B + E_T = \frac{1}{2} \rho_L [V_{Lr}^3 K_T A_r (1 - \varepsilon_r) + V_{Ld}^3 K_B A_d (1 - \varepsilon_d)] \quad (8)$$

여기서 K_T 와 K_B 는 상부와 하부에 접한 부분에 대한 각각의 마찰손실계수이다. 방정식에서 V_{Lr} 과 V_{Ld} 는 상승부와 하강부에서 각각의 틈새속도(Interstitial velocity) 또는 실제 직선의 액체속도이다. 그리고 V_{Lr} 과 V_{Ld} 는 다음 식 중에 일치하는 내부관 공탑속도와 관련되어진다.

$$V_{Lr} = \frac{U_{Lr}}{1 - \varepsilon_r} \quad (9)$$

$$V_{Ld} = \frac{U_{Ld}}{1 - \varepsilon_d} \quad (10)$$

게다가, 상승부와 하강부 사이에 액체 흐름에 대한 연속상태 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_r (1 - \varepsilon_r) V_{Lr} = A_d (1 - \varepsilon_d) V_{Ld} \quad (11)$$

식 44에서 식 45와 식 47을 이용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$E_B + E_T = \frac{1}{2} \rho_L U_{Lr}^3 A_r \left[\frac{K_T}{(1 - \varepsilon_r)^2} + K_B \left(\frac{A_r}{A_d} \right)^2 \frac{1}{(1 - \varepsilon_d)} \right] \quad (12)$$

결국 식 2에서 식 5, 7 그리고 12를 각각 치환하면 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$E_i = E_i - \rho_L g h_D U_{Lr} A_r \varepsilon_r + \rho_L g h_D U_{Lr} A_r \varepsilon_d + \frac{1}{2} \rho_L U_{Lr}^3 A_r \left[\frac{K_T}{(1 - \varepsilon_r)^2} + K_B \left(\frac{A_r}{A_d} \right)^2 \frac{1}{(1 - \varepsilon_d)^2} \right] \quad (13)$$

U_{Lr} 의 향으로 정리하면 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{Lr} = \frac{2gh_D(\varepsilon_r - \varepsilon_d)}{\frac{K_T}{(1 - \varepsilon_r)^2} + K_B \left(\frac{A_r}{A_d} \right)^2 \frac{1}{(1 - \varepsilon_d)^2}}^{0.5} \quad (14)$$

식 14는 Airlift반응기들에서 액체순환속도에 대한 일반적인 식이다. 식 14의 형태는 특별히 두개의 식으로 더 간략하게 나누어질 수 있다. Split-sylinder 또는 중앙관 형태의 내부순환 Airlift(Concentric tube type internal-loop airlift)장치에 대한 상부에 접한 부분에서 에너지 손실은 바닥부분에 관련된 에너지 손실에 비교하여 일반적으로 극미할 것이다(Chisti et al., 1988b; Kubota et al., 1978).

이것은 내부순환반응기 상부는 바닥에서 압축된 흐름 경로에 반대되는 것으로써 열린 경로로 비유될 수 있기 때문이다. 이 경우에 우리는 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$U_{Lr} = \frac{2gh_D(\varepsilon_r - \varepsilon_d)}{K_B \left(\frac{A_r}{A_d} \right)^2 \frac{1}{(1 - \varepsilon_d)^2}}^{0.5} \quad (15)$$

반대로 외부형 Airlift에서는 종종 상부와 바닥연결부분이 기형학적으로 매우 유사하여 K_T 와 K_B 는 거의 대략 비슷하다. 이러한 경우에 식 14를 이용하면 다음과 같은 식을 만들 수 있다.

$$U_{Lr} = \frac{2gh_D(\varepsilon_r - \varepsilon_d)}{K_B \left(\frac{1}{(1 - \varepsilon_r)^2} + \left(\frac{A_r}{A_d} \right)^2 \frac{1}{(1 - \varepsilon_d)^2} \right)}^{0.5} \quad (16)$$

식 16을 통해서 식 14는 상승부에서 공탑액체속도(Superficial liquid velocity)의 향에서 상승부의 직경에 대하여 식을 전개한다. 상승부(하강부)

직경은 Airlift반응기에서 액체속도의 예측에 대한 기하학적 항목으로 필요하다. 왜냐하면 A_r/A_d 비 자체만으로 반응기 구조를 유일하게 규정할 수 없기 때문이다. 차원 일치의 또 다른 필요성으로 프루드 수(Froude number)의 항으로 표현되어질 수 있는 식 14부터 식 16까지 만족되어진다.

$$Fr_r^2 = \frac{U_{Lr}^2}{gh_D} \quad (17)$$

② 내부순환속도

InSub 장치와 유사한 Airlift반응기들에 대한 액체순환자료(Air-water)는 외부 그리고 내부 순환형태 두개의 Airlift반응기에서 액체순환에 있어 이용 가능한 거의 모든 자료를 사용하여 상승부에서 공탑액체속도의 실험적 값을 식 16(외부순환형) 또는 식 15(내부순환형)에 대입하여 계산된 결과에 대하여 직선을 그렸다. K_B 는 수행된 반응기의 전체운전범위이상에서 고정된 값이 사용된다는 제약조건으로써 조정 가능한 변수로 사용되었다. Airlift contactor에서 거의 20개가 넘는 액체속도범위이상에서와 반응기 크기 큰 범위(0.06~1.06m³액체부피)이상에서 식 13이 액체속도를 아주 잘 예측한다(±30%)는 것을 보여주었다.

내부순환에서 상승부와 하강부 사이에 자유영역의 강한 영향은 이 영역에서 67%감소가 상승부에서 Superficial liquid velocity의 32.5%감소가 이루어지는 것은 Hatch의 결과에서 더 분명해졌다. 내부순환 Airlift의 다른 거의 몇몇 모든 유형에 대한 K_B 계수는 상승부와 하강부 사이에 액체 흐름에 대한 자유영역과 잘 연관된다.

$$K_B = 11.40 \left(\frac{A_d}{A_b} \right)^{0.79} \quad (18)$$

모든 상관식은 A_d/A_b 범위를 0.2이상으로 하여 1.8까지 조사된 모든 경우에 적용했다. 단지 Bello(1981)의 하나가 K_B 값이 식 18과 맞지 않았다.

식 18은 K_B 를 반응기의 외면적 형태에 기초를 두어 계산하는데, 여기서 K_B 는 액체속도를 계산하는 식 15에서 사용된다.

식 14는 비록 진행이 지금보다는 복잡하더라도 액체 속도 예측에 여전히 이용될 수 있다. 왜냐하면 Airlift의 상승부에서 기-액 상승류는 기포-칼럼에서 동반하는 기-액 흐름과 일치하기 때문에 후자를 위하여 개발된 식들은 Airlift반응기들에 적용될 수 있다. 그러므로 Hills(1976)등에 기인하여 잘 알려진 기체체류량 상관식은 다음식으로 재정립 될 수 있다.

$$\varepsilon_r = \frac{U_{Gr}}{0.24 + 1.35(U_{Gr} + U_{Lr})^{0.93}} \quad (19)$$

여기서, $U_{Lr} > 0.3\text{m/s}$ (기-액에서)임.

식 19는 액체속도를 가정한 값을 사용하여 주어진 기체속도에 대해서 ε_r 을 산출하는데 사용된다.

그리고 나서 하강부 기체체류량은 아래의 식을 이용하여 구하거나

$$\varepsilon_d = 0.89\varepsilon_r \quad (20)$$

또는 다음의 식 중의 하나를 이용하여 얻을 수 있다.

$$\varepsilon_d = 0.79\varepsilon_r - 0.057 \quad (21)$$

$$\varepsilon_d = 0.460\varepsilon_r - 0.024 \quad (22)$$

식 21과 22식은 Draught-tube 내부순환형과 외부순환형 Airlift에 대해 각각 Bello 등(1985a)에 의해 보고되었다.

식 22는 외부순환형에 대해서 약간 다른 형태에서 Chisti등(1986)에 의해 얻어졌다. 식 21과 식 22는 서로 다른 수두-공간 설계에서 서로 다른 기-액 분리능 때문에 반응기 수두-공간 형태에 따라 어느 정도 의존한다. 그러나 이들 식들은 그 자체로써 기-액 분리를 통합하지 않은 반응기에서 액체속도 평가 목적으로 만족한다. 식 19에서부터 식 22까지를 이용하여 산출되는 상승부와 하강부 기체체류량은 액체순환속도 U_{Lr} 을 구하기 위하여 식 14를 이용한다. 만약 산출된 U_{Lr} 값과 원래 가정되었던 값이 일치하지 않는다면, 진행은 값이 일치될 때까지 반복된다. 이러한 진행은 내부순환형 Airlift에 대한 내부순환속도 및 기체 체류량을 산정하기 위한 시행착오법으로써 그 순서도를 Fig. 23에 묘사되었다. 이러한 방법을 사용하여

InSub장치에서의 내부순환속도뿐만 아니라 기체 체류량을 계산하였다.

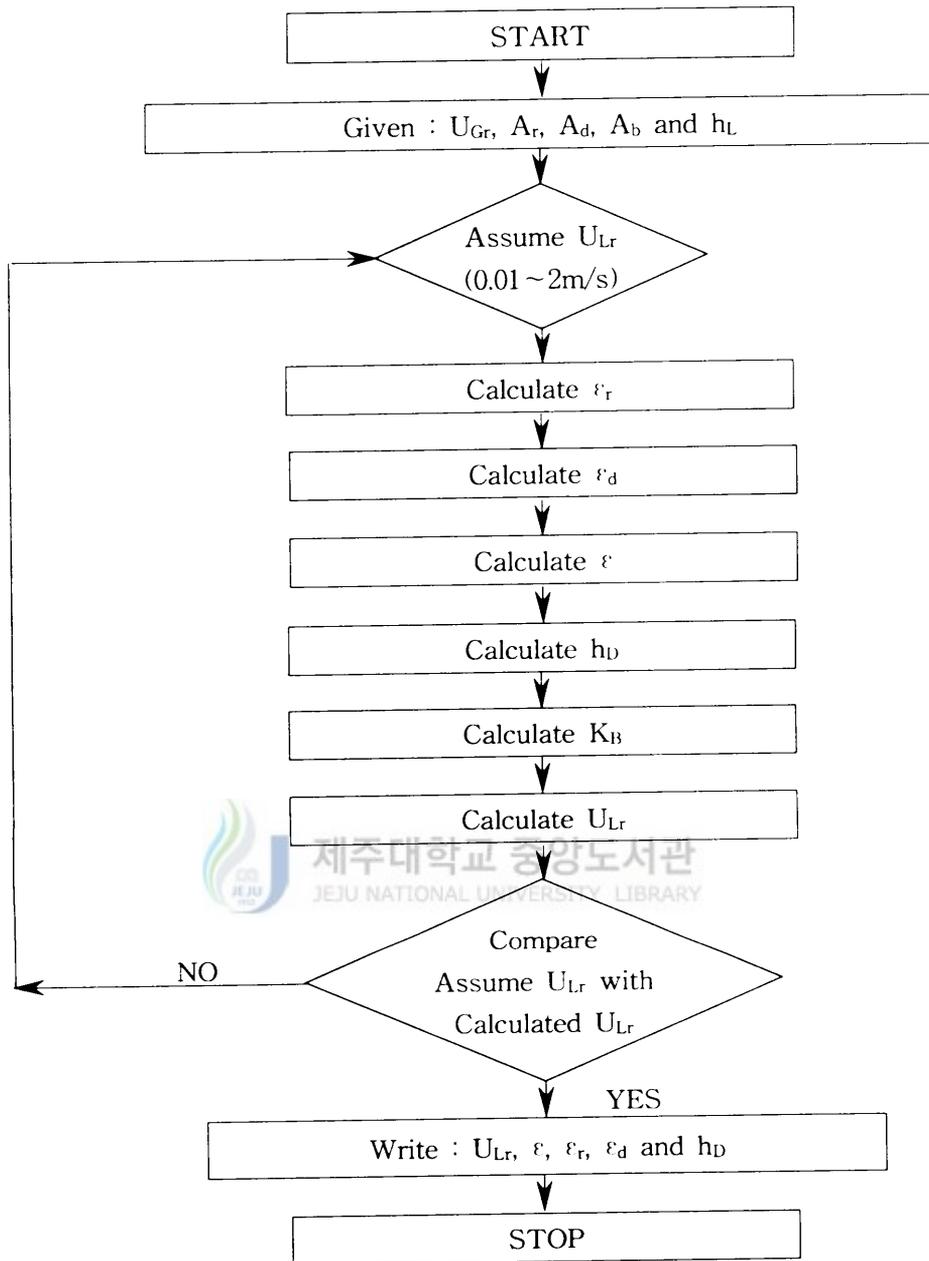


Fig. 23. The liquid circulation velocity calculation procedure. Algorithm for the simultaneous calculation of various gas holdups and the riser superficial liquid velocity for a given reactor geometry and gas flow.

3. 결과 및 고찰

1) 내부관 공탑속도의 변화에 따른 영향

(1) 내부순환속도의 변화

생물공학반응기에 주로 사용되는 반응기 형태는 크게 교반조, 기포탑 그리고 Airlift반응기로 구분되며, 혼합정도와 물질전달, 운전 비용 등을 고려하여 적합산 반응기 형태를 결정하게 된다. 이러한 측면에서 폐수처리를 위한 반응은 액상의 점도가 낮고 반응기가 커야하므로 Airlift반응기를 사용하는 것이 좋다(이근후 등, 1993).

공기부상 반응기는 공기 주입에 의해 Riser(상승부)와 Downcomer(하강부) 사이의 기체 체류량(Gas holdup) 차이에 의한 밀도 차이가 생겨서 유체의 회전이 유도되어진다(chisti. M. Y. etc., 1988). 그리고 반응기내에서 공기유입속도에 의한 혼합, 산소전달, 유체속도 및 전단응력 등의 상관관계는 미생물막 증식에 중요한 영향을 미친다. 생물막은 기질(Substrate)이 미디어에 부착되어 있는 미생물에 의해 분해되고 새로운 세포로 합성되어 가는 반응이 계속적으로 일어나면서 두께가 커진다. 특히 반응기내에서 미디어간의 전단응력과 유체와 미디어간의 전단응력의 크기는 내부순환속도에 의하여 결정되기 때문에 미생물막의 성장과 형성, 그리고 탈리에 있어서 반응기내 액체순환속도는 아주 중요하다(Heijnen, J. J., 1993).

내부순환속도가 크게 되면 전단응력들이 커져서 미생물막이 제대로 성장하지 못할 뿐만 아니라, 미디어에 미생물이 제대로 부착되어 있지 않고 탈리가 일어나게 된다. 그리고 순환유속이 작아지면 전단응력도 작아져서 반응기내의 혼합이 제대로 일어나지 않고, 미생물막이 지나치게 성장하여 미생물량의 전체밀도가 증가하게 된다. 미생물농도는 미생물막 두께가 증가함에 따라 증가하지만, 지나친 미생물막 두께의 성장은 폐슬러지양을 증가시키는 결과를 가져오므로 적절한 미생물막 두께의 선택이 중요하다. 유기물 부하율이 적고 전단응력이 클수록 미생물막이 두께는 얇아진다. 이러한 점들 때문에 반응기내 유체의 적절한 순환유속을 찾는 것은 미생물막 두께 형성에 아주 중요한 요소가 되는 것이다(Bello, R. A., 1984).

따라서 이러한 액체순환유속과 관련하여 기체 체류량(Gas holdup), 압력강하, 내부

순환속도간의 관계를 규명하기 위한 유체동역학 연구들은 주입 가스의 등은 팽창을 이용한 에너지 수지, Macroscale momentum수지, 장상상태 Mechanical 에너지 수지 등을 이용하였다(Kushalkar, K. B., 1994). 이들 모델에서의 핵심인자는 상하부에서 흐름방향 역전과 유체흐름에서의 총 마찰저항이다. 현재까지 많은 모델들이 제안 되어왔지만, 이들 모델들은 기-액 분리기의 영향을 고려하지 않았고, 그 검증 또한 Pilot scale의 반응기와 공기-물 시스템에만 제한되어 이루어졌다(Cooper, P. F., 1981).

몇몇 연구자들이 비점성 내지 저점성 유체에 대해서 모델식을 전개하였는데, 이 중 본 연구의 대상으로 한 내부순환형 Draft-tube 공기부상 반응기에 대한 모델은 Chisti 등(1988)에 의해 제시되었다.

본 연구에서는 직경이 200mm와 300mm인 외부관에 대하여 각각 직경이 50mm, 100mm, 150mm의 내부관을 교체하면서 각각의 내부관 공압속도에 따른 내부순환 속도를 실제로 실험실에서 측정된 값과 Chisti 등(1988)에 의해 제시된 시행착오법을 이용하여 계산되어진 값에 대하여 Fig. 24~Fig. 29까지 나타내었다.



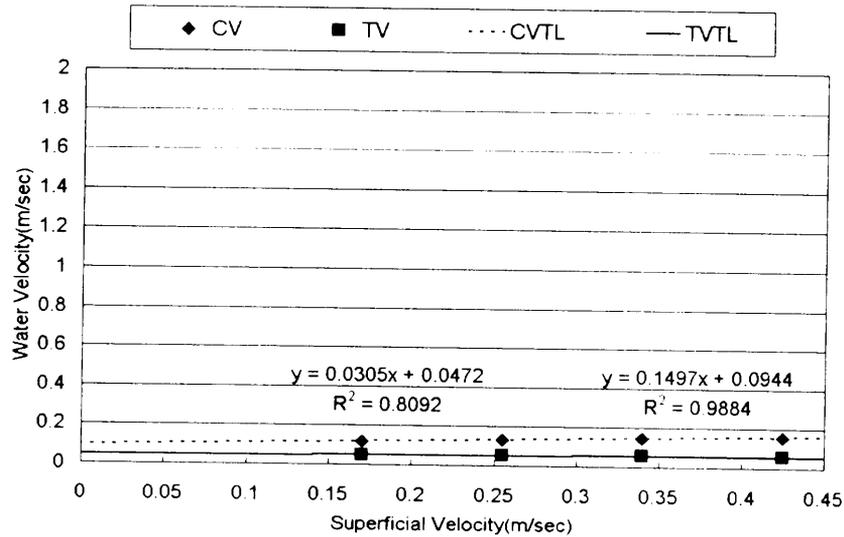


Fig. 24. Calculated liner velocity and true liner velocity of water with the superficial velocity as each diameter is 0.2 and 0.05m(CV ; Calculated Liner Velocity, TV ; True Liner Velocity, CVTL ; Calculated Liner Velocity Trend Line, TVTL ; True Liner Velocity Trend Line)

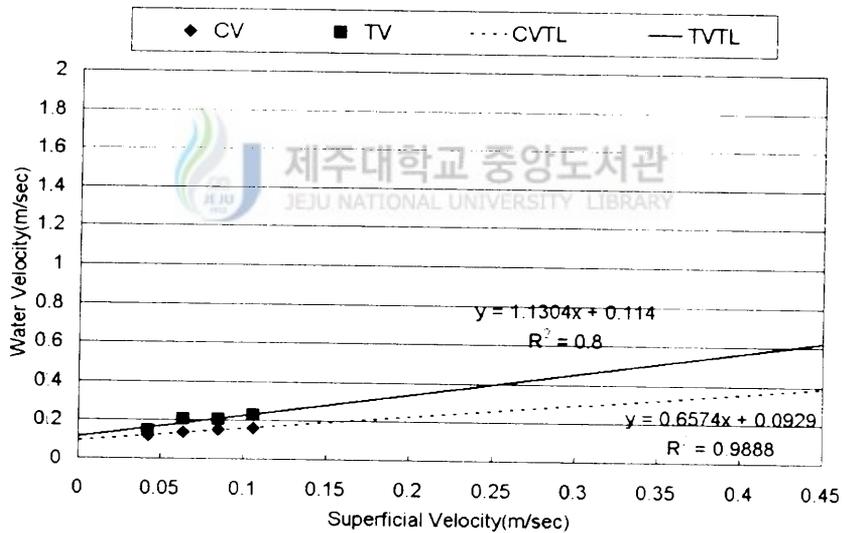


Fig. 25. Calculated liner velocity and true liner velocity of water with the superficial velocity as each diameter is 0.2 and 0.1m(CV ; Calculated Liner Velocity, TV ; True Liner Velocity, CVTL ; Calculated Liner Velocity Trend Line, TVTL ; True Liner Velocity Trend Line)

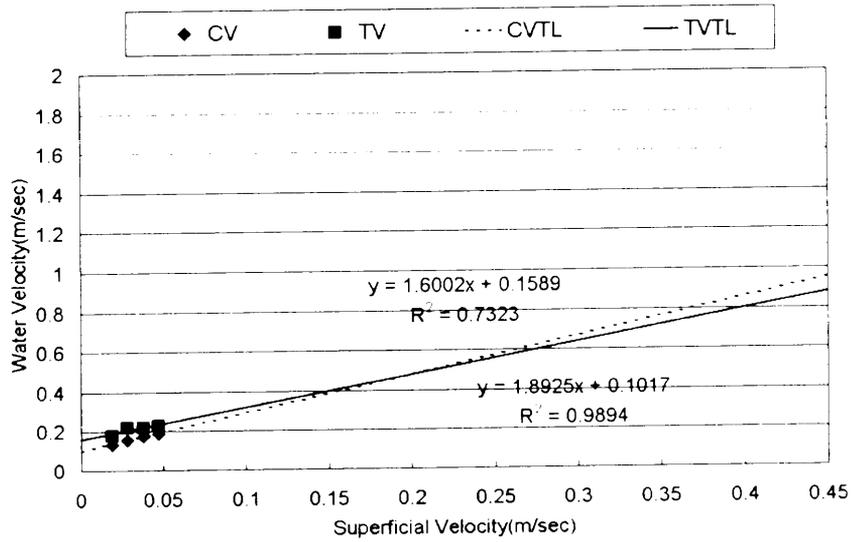


Fig. 26. Calculated liner velocity and true liner velocity of water with the superficial velocity as each diameter is 0.2 and 0.15m(CV ; Calculated Liner Velocity, TV ; True Liner Velocity, CVTL ; Calculated Liner Velocity Trend Line, TVTL ; True Liner Velocity Trend Line)

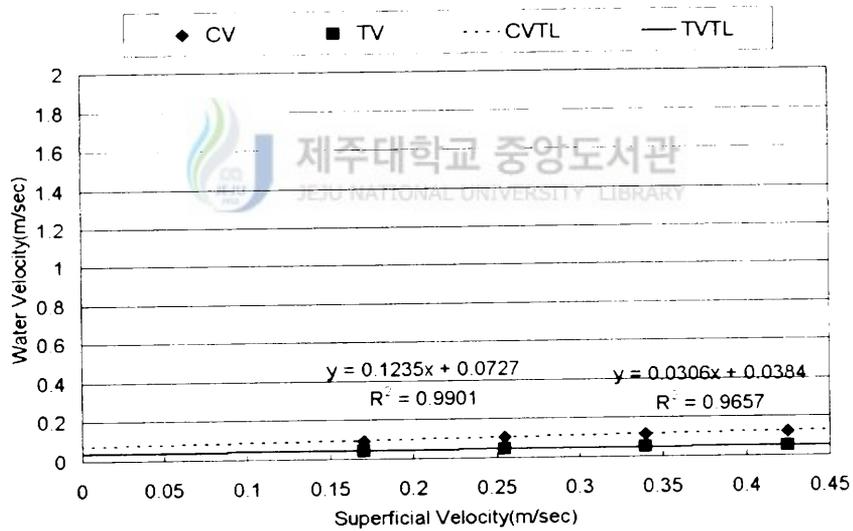


Fig. 27. Calculated inner velocity and true liner velocity of water with the superficial velocity as each diameter is 0.3 and 0.05m(CV ; Calculated Liner Velocity, TV ; True Liner Velocity, CVTL ; Calculated Liner Velocity Trend Line, TVTL ; True Liner Velocity Trend Line)

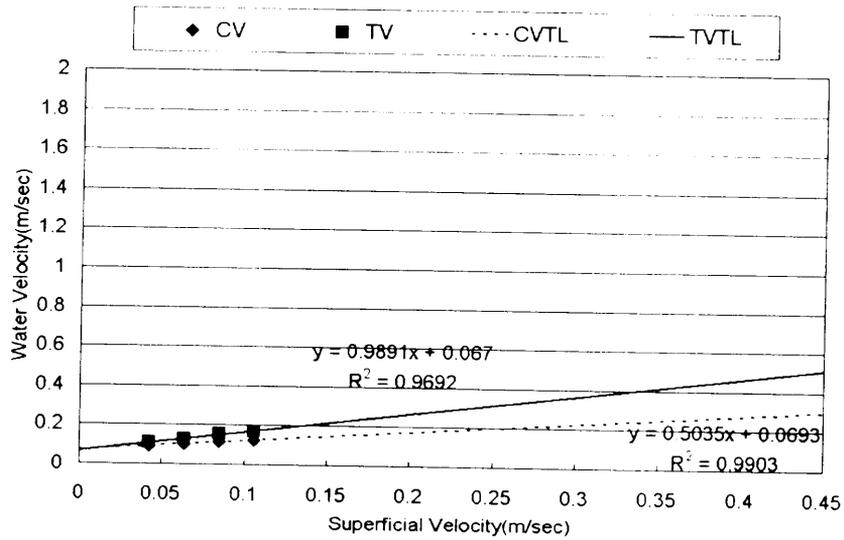


Fig. 28. Calculated liner velocity and true liner velocity of water with the superficial velocity as each diameter is 0.3 and 0.1m(CV ; Calculated Liner Velocity, TV ; True Liner Velocity, CVTL ; Calculated Liner Velocity Trend Line, TVTL ; True Liner Velocity Trend Line)

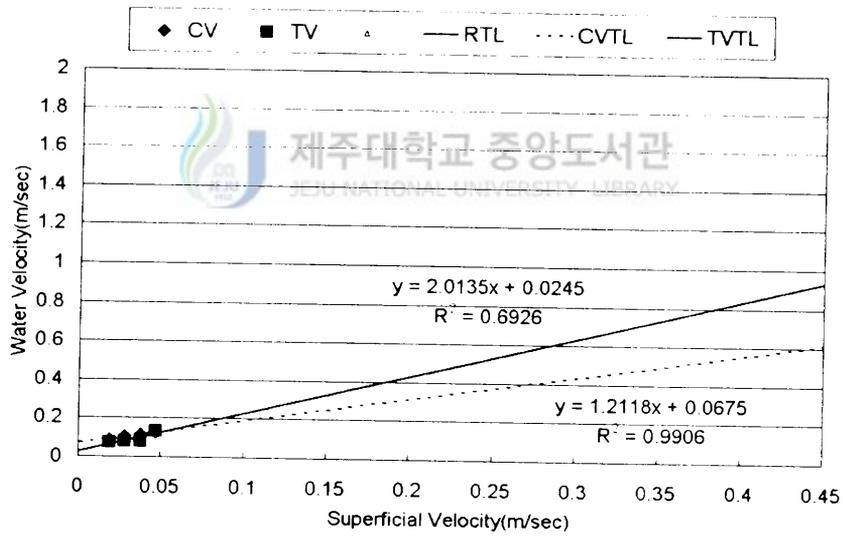


Fig. 29. Calculated liner velocity and true liner velocity of water with the superficial velocity as each diameter is 0.3 and 0.15m(CV ; Calculated Liner Velocity, TV ; True Liner Velocity, CVTL ; Calculated Liner Velocity Trend Line, TVTL ; True Liner Velocity Trend Line)

Fig. 24~Fig. 29를 보면 내부관 공탑속도가 증가할수록 시행착오법으로 계산된 내부순환속도(CV ; Calculated Liner Velocity)와 실험실에서 측정된 실제 내부순환속도(TV ; True Liner Velocity)는 증가하고 있음을 알 수 있었다. 또한 이렇게 계산되어진 값과 실제 측정된 값은 내부관 공탑속도가 낮은 경우에는 시행착오법으로 계산된 내부순환속도가 실제 측정된 내부순환속도에 비해 높은 값을 나타내었고, 반대로 내부관 공탑속도가 높은 경우에는 내부관 공탑속도가 증가함에 따라 시행착오법으로 계산된 내부순환속도가 실제 측정된 내부순환속도에 비해 낮은 값을 나타내었다.

본 연구와 비슷한 연구를 한 Karuppan Muthukumar 등(2005)과 KWang-Soo Choi(1999) 등에 의하면 실험치와 계산치는 ± 30 내의 오차범위안에 들고 있는 반면에 본 실험에서는 그 이상의 오차범위가 나타나기도 하였다. 이는 실험실에서는 단순히 단상(액체)만을 가지고 실험하였고, 시행착오법에서는 3상(기체-액체-고체)이 존재하는 것을 가정으로 하여 계산되었는데, 이는 내부관 공탑속도가 증가함에 따라 고체에 의한 영향으로 속도의 증가가 둔화된다는 것을 보여주는 것으로 사료된다. 실제 현장 pilot plant의 경우 airlift 반응기와는 달리 반응조내의 여재와 여재의 유출을 방지하기 위한 분산판에 의해 액체의 흐름에 방해될 일으킴으로 액체순환속도를 저해할 것으로 사료된다. 단적으로 Thanathorn Vorapongsathorn 등(2001)과 Sontaya Krichnavaruk 등(2002)의 결과에서는 InSub 장치에서는 분산판이 하강부(Downcomer)에 설치되어 있는 것과 반대로 분산판이 상승부(Riser)에 설치되어 있으나 분산판은 액체의 흐름에 저항을 일으켜 액체의 속도가 줄어드는 것을 보여주었다.

(2) 기체체류량의 변화

기포탑 및 포기조에서 산소의 물질전달은 생물화학 공정에서 반응기 성능의 중요한 요소이며 산소와 같이 기체의 용해도가 작은 경우 액상의 물질전달계수와 유효계면적이 물질전달 속도에 중요한 역할을 하게 된다. 액상물질 전달 계수는 액체내에서 용질로 사용된 기체의 확산도, 액상의 점도, 첨가된 고체입자의 크기나 밀도

에 영향을 받으며, 유효 계면적은 가스 체류량(gas holdup)과 기포크기에 의해 결정되며, 기포크기는 용액의 표면장력과 이온강도 그리고 첨가된 고체입자에 영향을 받는다.

Fig. 30~Fig. 35에는 직경이 200mm와 300mm인 외부관에 대하여 각각 직경이 50mm, 100mm, 150mm의 내부관을 교체하면서 각각의 내부관 공압속도에 따른 가스체류량을 chisti 등(1988)에 의해 제시된 시행착오법을 이용하여 계산되어진 값에 대하여 나타내었다.

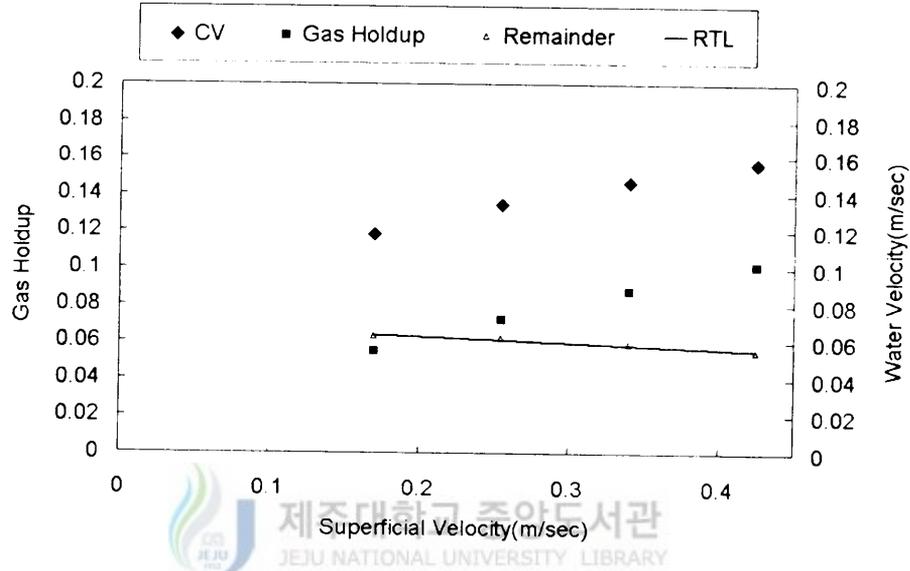


Fig. 30. Relationship between calculated liner velocity and gas holdup with the superficial velocity as each diameter is 0.2 and 0.05m(CV ; Calculated Liner Velocity, RTL ; Remainder Trend Line).

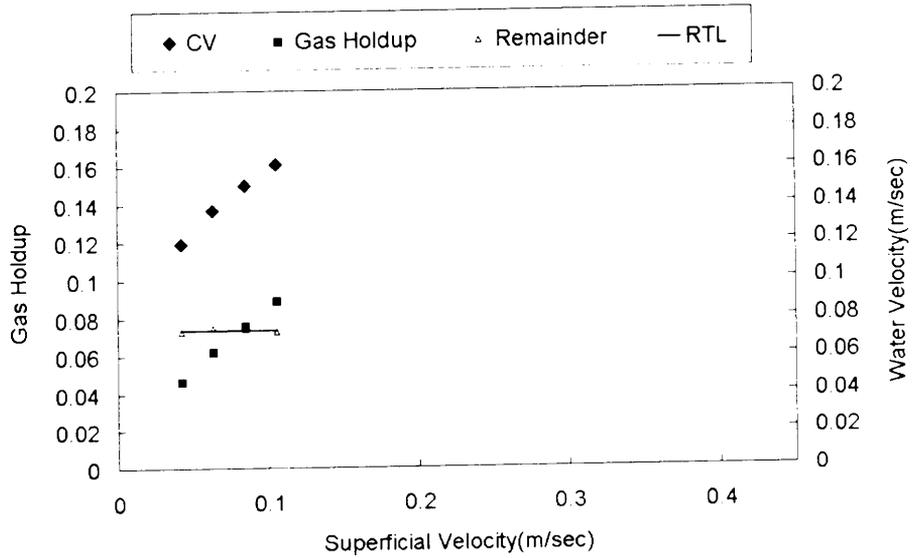


Fig. 31. Relationship between calculated liner velocity and gas holdup with the superficial velocity as each diameter is 0.2 and 0.1m(CV ; Calculated Liner Velocity, RTL ; Remainder Trend Line).

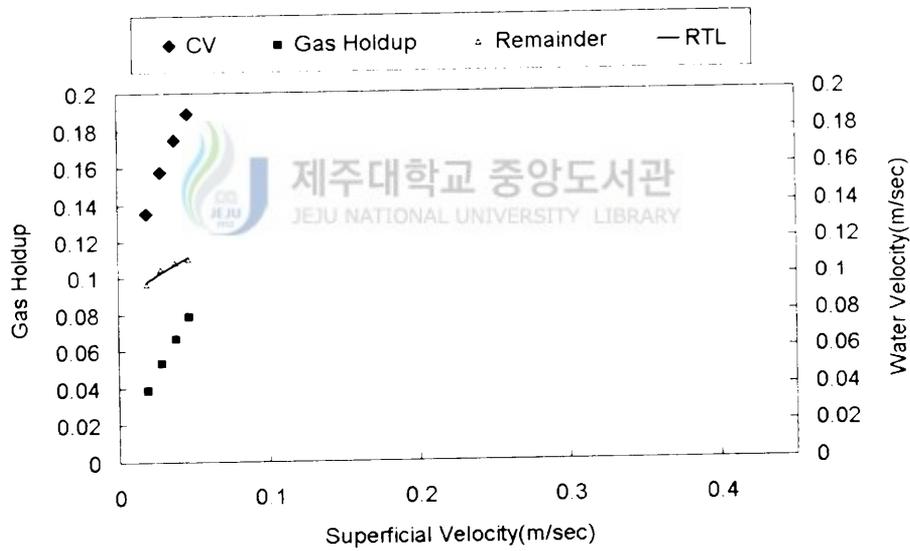


Fig. 32. Relationship between calculated liner velocity and gas holdup with the superficial velocity as each diameter is 0.2 and 0.15m(CV ; Calculated Liner Velocity, RTL ; Remainder Trend Line).

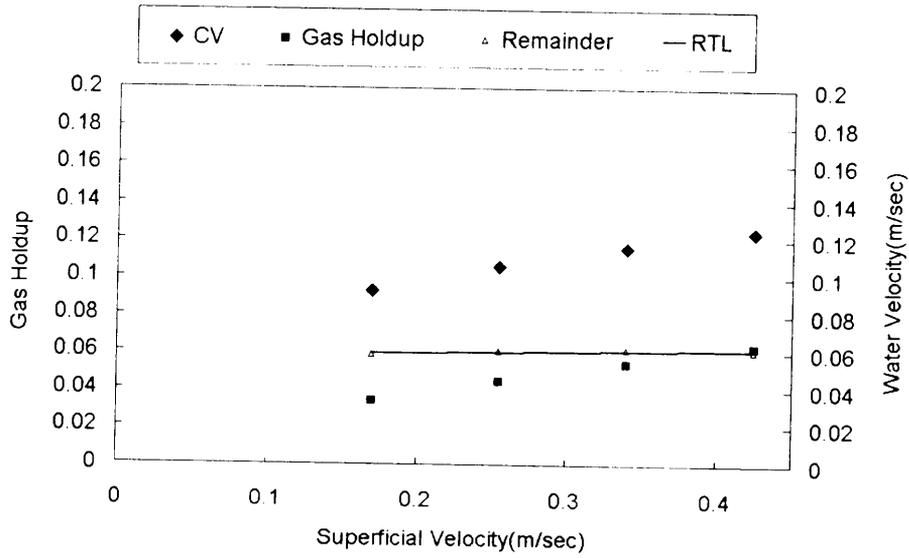


Fig. 33. Relationship between Calculated Liner Velocity and gas holdup with the superficial velocity as each diameter is 0.3 and 0.05m(CV ; Calculated Liner Velocity, RTL ; Remainder Trend Line).

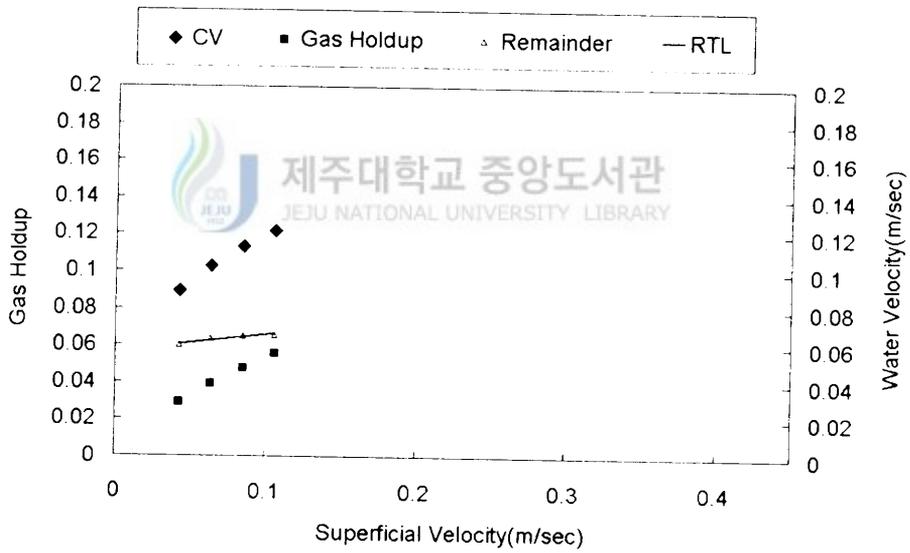


Fig. 34. Relationship between calculated liner velocity and gas holdup with the superficial velocity as each diameter is 0.3 and 0.1m(CV ; Calculated Liner Velocity, RTL ; Remainder Trend Line).

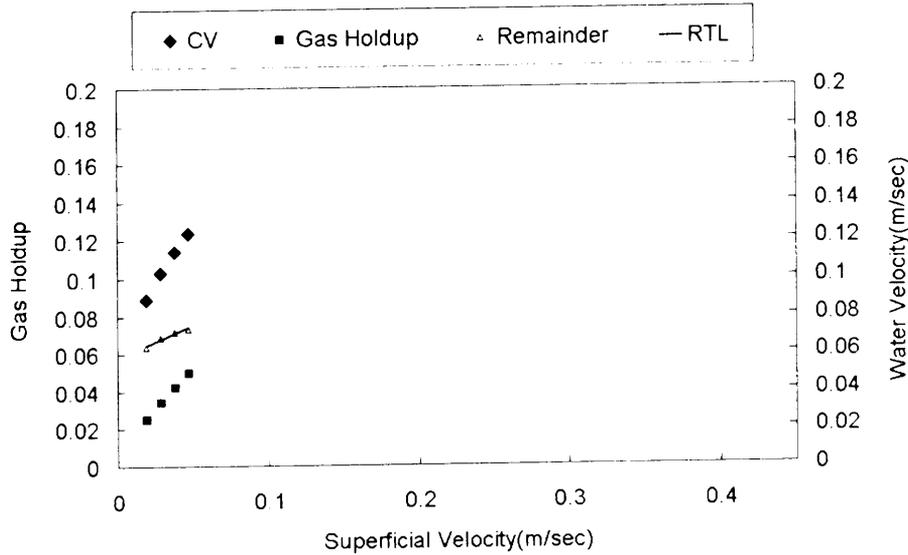


Fig. 35. Relationship between calculated liner velocity and gas holdup with the superficial velocity as each diameter is 0.3 and 0.15m(CV ; Calculated Liner Velocity, RTL ; Remainder Trend Line).

반응조내의 기체 체류량은 공탑 기체속도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하며, 높은 유속에서는 탑 상부에서 기포가 제거되지 못하고 하강부(Downcomer)로 유입되는 양이 급격히 증가하므로 반응조내의 기체 체류량이 높게 축적됨으로써 유속에 따른 기체 체류량의 차이가 점차 줄어들게 됨을 알 수 있었다.

또한 기포흐름영역(Bubble flow regime)에서는 기체 유속의 증가에 따라 유효 계면적이 증가하고, 반응기에 유입되는 에너지가 증가하여 작은 크기의 에디(Eddy)가 많이 형성되므로 기-액 물질전달이 활발히 진행되어 액상물질전달계수가 증가하게 되므로 부피 물질전달 계수가 선형적으로 증가하게 된다.

부피물질전달계수는 공탑 기체속도가 증가함에 따라 증가하며 고체 입자 또는 방해물질이 첨가되지 않은 기-액 이상의 경우에는 거의 선형적으로 증가하나, 고체 입자 또는 방해물질 예를 들어 분산판 등이 반응조에 존재하는 경우에는 기체 유속이 증가함에 따라 증가하는 정도가 둔화된다는 것을 알 수 있었다.

2) 단면적비의 변화에 따른 내부순환속도의 변화

앞에서도 언급하였듯이 InSub장치에서의 수리학적 특성은 Airlift생물반응기와 유사하며, 이러한 Airlift 생물반응기의 성능은 액체순환속도와 밀접한 관계가 있다. 이 속도는 산소전달뿐만 아니라 상승부에서의 기상 체류시간을 결정하고, 혼합시간과 열전달계수와 같은 다른 변수들에도 영향을 미친다. Airlift 생물반응기에서 내부순환속도와 혼합시간에 대해 이용 가능한 상관식들은 많은 연구자들에 의해 연구가 이루어 졌으며, 일반적으로 내부순환속도는 기상유속에 영향을 받고 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$U_L = aU_{sg}^{\beta} \quad (23)$$

여기서 U_L 은 내부순환속도이고, a 와 β 는 각각 상수이다. 내부순환속도는 기상 유속의 증가에 따라 증가한다.

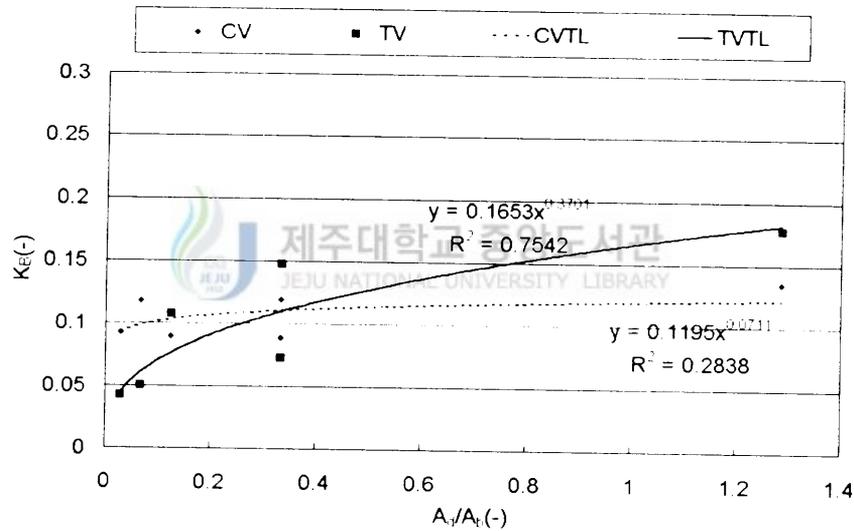


Fig. 36 Trend line on the calculated liner velocity and true liner velocity of water with the ratio of cross section as airflow is 20L/min(CV ; Calculated Liner Velocity, TV ; True Liner Velocity, CVTL ; Calculated Liner Velocity Trend Line, TVTL ; True Liner Velocity Trend Line).

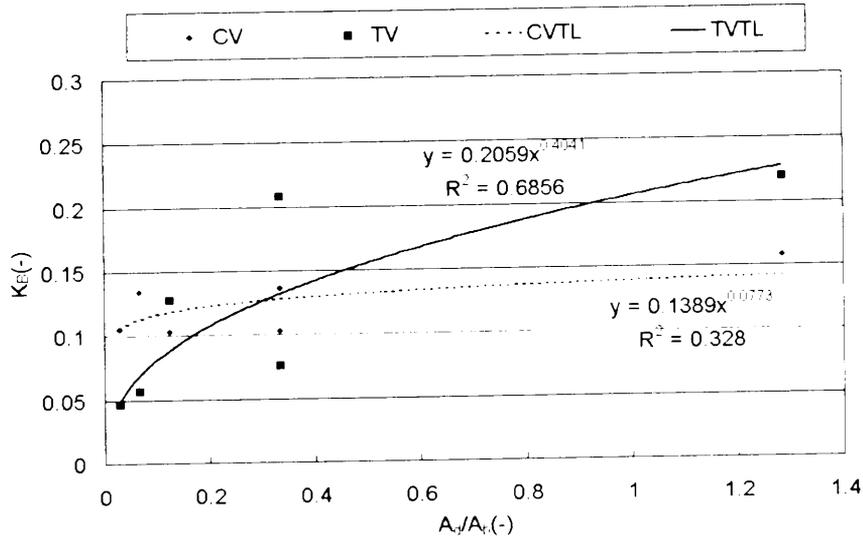


Fig. 37 Trend line on the calculated liner velocity and true liner velocity of water with the ratio of cross section as airflow is 30L/min(CV ; Calculated Liner Velocity, TV ; True Liner Velocity, CVTL ; Calculated Liner Velocity Trend Line, TVTL ; True Liner Velocity Trend Line).

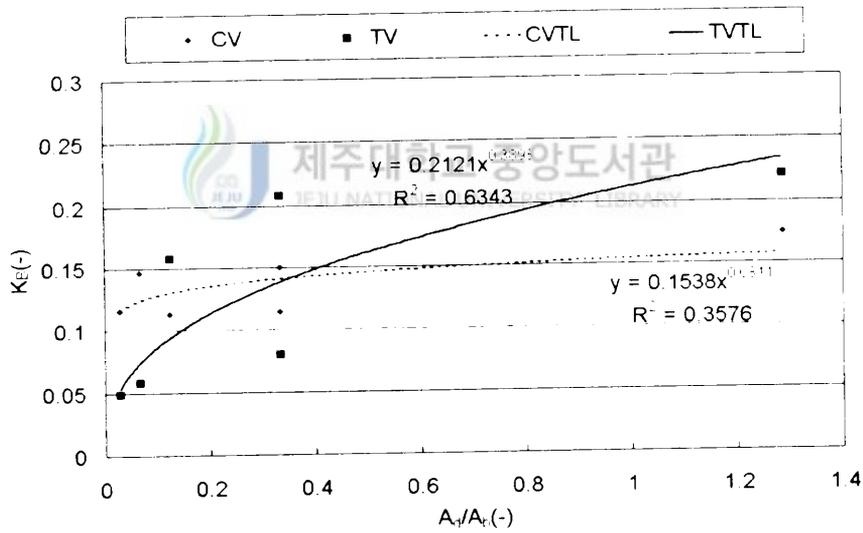


Fig. 38. Trend line on the calculated liner velocity and true liner velocity of water with the ratio of cross section as airflow is 40L/min(CV ; Calculated Liner Velocity, TV ; True Liner Velocity, CVTL ; Calculated Liner Velocity Trend Line, TVTL ; True Liner Velocity Trend Line).

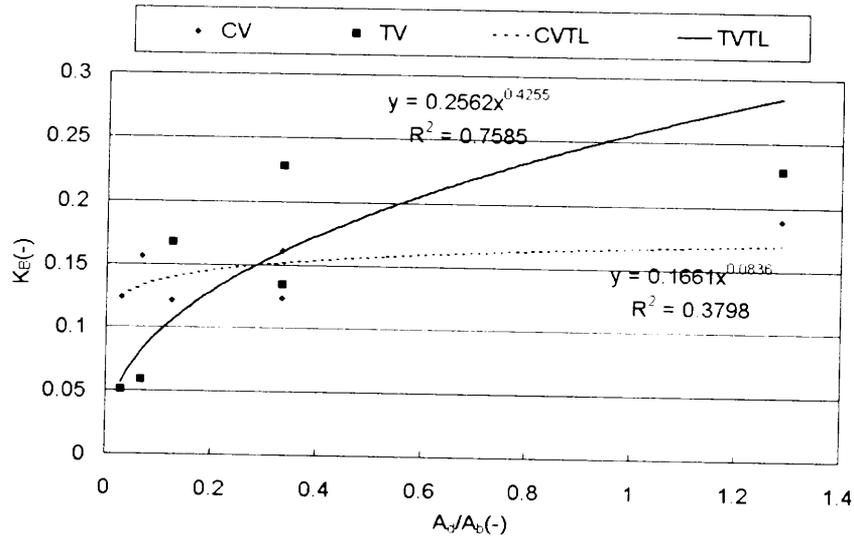


Fig. 39. Trend line on the calculated liner velocity and true liner velocity of water with the ratio of cross section as airflow is 50L/min(CV ; Calculated Liner Velocity, TV ; True Liner Velocity, CVTL ; Calculated Liner Velocity Trend Line, TVTL ; True Liner Velocity Trend Line).

Airlift 생물반응기의 설계에 있어서 중요한 변수들은 직경에 대한 높이의 비(H/D)와 하강부와 상승부의 단면적 비(A_r/A_d)이다. 산업용 Airlift 생물반응기에서는 H/D의 비가 10이상이고, Deep-shaft reactor 같은 특수한 경우에는 그 비가 33~130에 이른다. 일반적으로 이러한 반응기들은 폐수처리나 최소 20m이상의 액위가 필요한 경우에 사용된다.

액상 순환속도와 혼합시간은 Airlift 생물반응기의 높이 증가에 따라 증간한다 (Russel 등, 1994). 혼합시간은 낮은 기상유속에서는 Draft-tube의 높이의 증가에 현저하게 증가하고, 높은 유속에서는 완만한 증가를 보인다. 기포탑 반응기와 비교하여 1~2개의 Draft tube가 설치된 Airlift 생물반응기 경우에는 내부순환 경로가 길기 때문에 혼합시간이 증가한다(Margaritis 등 1981). 또한, Draft-tube가 여러 개 설치되어 있는 Airlift 생물반응기에서는 A_r/A_d 가 감소할수록 내부순환속도와 가스 체류량은 증가하고 고체 입자의 농도가 증가할수록 순환속도는 감소한다(Bakker 등1993).

Airlift 생물반응기에서의 혼합시간과 순환시간의 비는 기상유속에 무관하고, 단지 반응기의 형태나 Ar/Ad 의 비에 의존한다.

Airlift 생물반응기에서 효율적인 혼합과 물질전달을 위한 반응기 직경 대 상승부의 직경 비(dr/dc)의 값을 여러 연구진들이 제안하였다. 실험실 규모의 발효조에서 dr/dc 비는 보통 0.59~0.8이다. Weiland 등(1984)는 0.8~0.9영역의 dr/dc 를 추천하였다. 가장 좋은 액체순환성을 얻기 위한 Ar/Ad 값은 0.5~0.59로 많은 경우에 0.4~0.6의 Ar/Ad 값을 사용하였다(Jones 등, 1985, Weiland 등, 1881, 1984).

그러나 본 연구에서는 위에서 언급한 연구자들의 최적 Ar/Ad 의 값을 사용하지 않았는데, 이는 Airlift 생물반응기는 반응기 전체적으로 반응을 하도록 하고 있지만 InSub 장치는 대부분이 하강부(Downcomer)의 메디아가 존재하는 구역에서 반응을 일으킴으로써 되도록 하강부(Downcomer)의 공간을 확보하는 것이 중요하기 때문이다. 또한 각각의 기형학적 특성에 따라 마찰손실계수(K_B)가 다르게 된다.

따라서 Fig. 36~Fig. 39에는 Chisiti 등(1986)이 제안한 마찰손실계수 K_B (식 18)를 사용하여 산출한 속도를 가지고 관계식을 각각의 내부관 공탑속도에 따라 재산출하였으며, 또한 실제 측정된 내부순환속도자료를 가지고 InSub 장치에서의 마찰손실계수 K_B 의 관계식을 도식화 하였다.

그림을 보면 Chisti 등(1986)이 제안한 마찰손실계수 K_B 의 관계식은 내부관 공탑속도가 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있었으며, 실험실에 측정된 내부순환속도에 대한 마찰손실계수도 내부관 공탑속도의 증가에 따라 관계식도 증가함을 알 수 있었다. 또한 마찰손실계수 K_B 의 관계식이 서로 많은 차이를 보이는 것으로 보아 기형학적인 차이로 인한 것으로 사료된다.

따라서 InSub 장치에서의 내부순환속도를 산출함에 있어서는 실험실적으로 측정하여 산출되어진 마찰손실계수 K_B 의 관계식을 이용하여 계산하여야 할 것이다.

3) 현장규모 InSub 장치에서의 내부순환속도

앞의 단면적비에 따른 내부순환속도에서 산출된 마찰손실계수 K_B 의 관계식을 종합적으로 정리하면 Fig. 40과 같다.

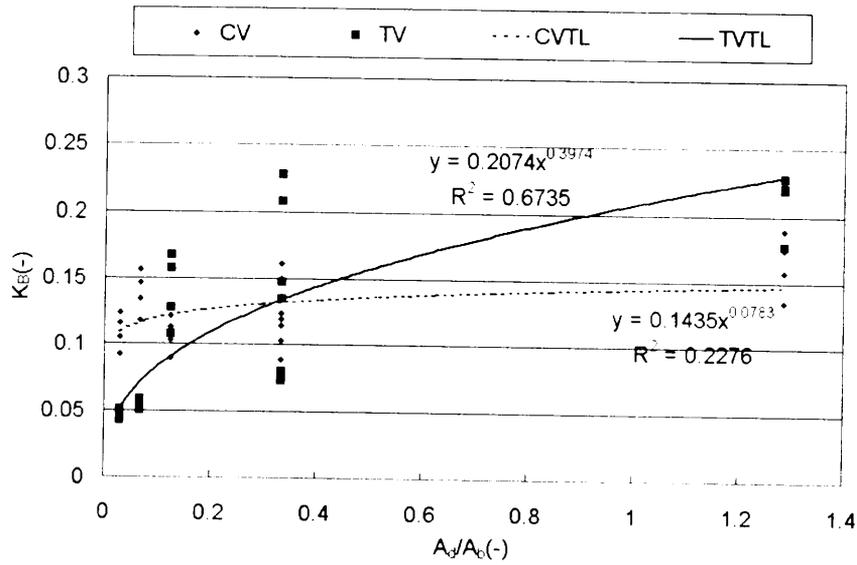


Fig. 40. Trend line on the calculated liner velocity and true liner velocity of water with the ratio of cross section for airflow(CV ; Calculated Liner Velocity, TV ; True Liner Velocity, CVTL ; Calculated Liner Velocity Trend Line, TVTL ; True Liner Velocity Trend Line).

이러한 관계식을 Chisti 등이 주장한 식과 같은 형태로 재정리하면 아래의 식과 같다.

$$\text{InSub } K_B = 20.74 \left(\frac{A_r}{A_d} \right)^{3.97} \quad (24)$$

식 16을 시행착오법에 대입하여 현장에 설치한 Pilot plant내의 내부순환속도 및 가스 체류량을 계산하면 아래의 표와 같다. 단 여기에서 계산된 내부순환속도는 반응 조내의 매디아에 대한 저항을 고려하지 않은 결과이다.

Table 3. Water liner velocity and gas holdup on the pilot plant.

V (L/min)	U_{gr} (m/sec)	U_{Lr} (m/sec)	ϵ	ϵ_r	ϵ_d	U_{Ld} (m/sec)
80	0.042463	2.346242	0.015676	0.01297	0.011542	0.041426
100	0.053052	2.532040	0.013498	0.015134	0.013469	0.044729
120	0.063662	2.694332	0.015312	0.017168	0.015279	0.047596
200	0.106103	3.463035	0.020361	0.022829	0.020317	0.061175

따라서 현장에 설치된 Pilot plant의 내부순환속도는 아래의 그림과 같이 내부관 공
 탑속도에 따라 변화할 것이다.

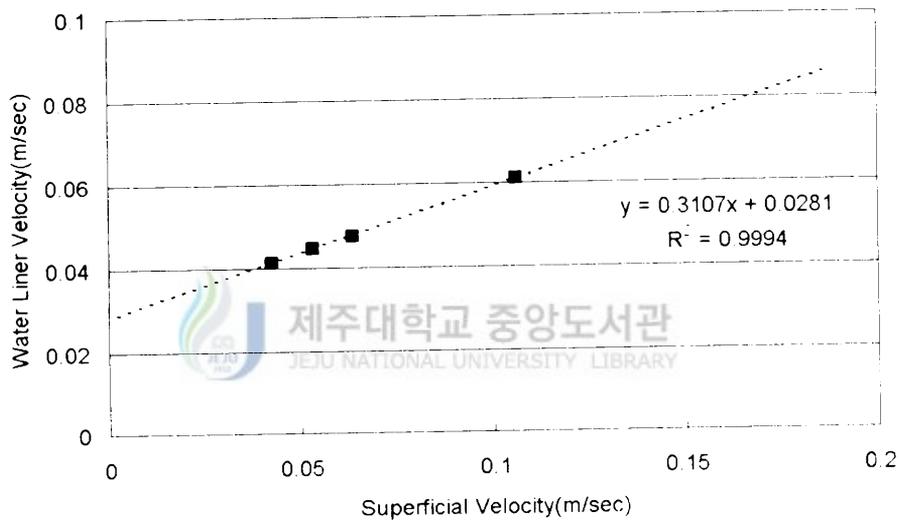


Fig. 41. Water liner velocity and trend line on the pilot plant.

결국 이러한 내부순환속도를 가지고 현장에 설치된 InSub장치에서의 내부순환시간
 을 산출할 수 있는데, 내부관 공탑속도가 2.54m/min일 때는 36.2sec가 소요될 것이
 며, 3.12m/min일 때는 33.5sec가 3.82m/min일 때는 31.5sec가 소요될 것이다. 그리
 고 내부관 공탑속도가 6.37m/min일 경우 24.5sec가 소요될 것으로 예상되나 이것은

어디까지나 반응조내에 메디아가 존재하지 않은 경우이다.

따라서 InSub pilot plant에서 InSub조내에 고형물 즉 메디아가 존재하지 않는 경우에 내부순환시간은 산소고갈을 방지하기 위해서 미생물에 따라 하강부에서 유체의 체류시간을 2~45초보다 작게 하거나, 하강부에 기체의 재순환이나 새로운 기체를 주입해야 한다는 주장들에 의해 InSub pilot plant에서는 충전담체의 내부에서 뿐만이 아니라 InSub조의 하강부 하단에서는 부분적인 DO의 고갈지역이 존재될 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 기존의 생물막공법에서의 메디아내 또는 생물막 내에서만 이루어진 탈질·탈인이 InSub장치 하단에서는 메디아표면 또는 생물막 표면에서 생성됨으로써 기존의 생물막법에 비해 고도처리시스템으로써 더 높은 처리효율을 나타낼 수 있음을 알 수 있었다.



4. 결론

본 연구에서는 Airlift모형반응기와 동력학적 해석을 위한 관련식들을 이용하여 예측된 InSub에서의 액의 내부순환속도, 내부순환시간과 실측된 이들 값들과를 검증하여 실제 InSub system의 기초설계인자들을 도출하고자 Lab test를 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 내부관 공탑속도가 증가할수록 시행착오법으로 계산된 액의순환속도(CV ; Calculated Liner Velocity)와 실험실에서 측정된 실제 액의순환속도(TV ; True Liner Velocity)는 모두 양의 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 또한 이렇게 계산되어진 값과 실제 측정된 값은 내부관 공탑속도가 낮은 경우에는 시행착오법으로 계산된 액체순환속도가 실제 측정된 액체순환속도에 비해 높은 값을 나타내었고, 반대로 내부관 공탑속도가 높은 경우에는 내부관 공탑속도가 증가함에 따라 시행착오법으로 계산된 액체순환속도가 실제 측정된 액체순환속도에 비해 낮은 값을 나타내었다.
2. Airlift반응기내에 고형물이 존재할 경우는 내부관 공탑속도가 증가될수록 액의 순환속도가 미치는 영향이 더욱 커진다는 것을 확인 할 수 있었다.
3. 반응조내의 기체 체류량은 공탑 기체속도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하며, 높은 유속에서는 탑 상부에서 기포가 제거되지 못하고 하강부(Downcomer)로 유입되는 양이 급격히 증가하므로 반응조내의 기체 체류량이 높게 축적됨으로써 유속에 따른 기체 체류량의 차이가 점차 줄어들게 됨을 알 수 있었다.
4. InSub pilot plant에서 InSub조내에 고형물 즉, 매디아가 존재하지 않는 경우에 액의순환시간은 내부관 공탑속도가 2.54m/min일 때는 36.2sec가 소요될 것이며, 3.12m/min일 때는 33.5sec가 3.82m/min일 때는 31.5sec가 소요될 것이다. 그리고 내부관 공탑속도가 6.27m/min일 경우 24.5sec가 소요될 것으로 계산되었다. 따라서

InSub조에 미디어가 존재하지 않더라도 반응조내 부유미생물(Suspended microbes)에 의한 산소고갈을 방지하기 위해서는 액의순환시간이 2~45초보다 짧아야 할 것이라는 기존의 연구들에 근거할 때 InSub pilot plant에서는 충전담체의 내부에서 뿐만이 아니라 InSub조의 하강부 하단에서는 부분적인 DO의 고갈지역이 존재될 수 있을 것으로 사료된다.

IV. 실험실규모 InSub system을 이용한 오수고도처리특성

1. 서론

1) 연구배경 및 목적

앞의 연구의 결과에서 질소·인의 고효율처리를 위해서는 선탈질에 의한 산화질소의 제거를 위해 무산소, 호기조의 조합 등에 의한 System의 일부변경이 필요함을 확인할 수 있었다.

Table 4. The main factor of processes.

Process	Main factor		Internal return (%)	Removal material	Removal efficiency (%)
	Experimental condition	HRT			
Recirculation	anoxic Zone	4hr	150이상	T-N	65
	oxic Zone	7hr			
Nitrification and denitrification	Nitrify tank	12hr	-	T-N	70~90
	Denitrify tank	12hr			
	Reaeration tank	1.5hr			
Bardenpho	Anaerobic tank	1~2hr	400	T-N	50~70
	Anoxic tank 1	2~4hr			
	Aerobic tank 1	4~12hr		T-P	50~90
	Anoxic tank 2	2~4hr			
A2/O	Anaerobic tank	0.5~1hr	100~200	T-N	50~70
	Anoxic tank	0.5~1hr		T-P	50~90
	Aerobic tank	3.5~6hr			
Modified UCT	Anaerobic tank	1~2hr	100~200	T-N	50~70
	Anoxic tank 1	2~4hr		T-P	50~80
	Aerobic tank 1	4~12hr			
	Anoxic tank 2	2~4hr			
VIP	Anaerobic tank	1~2hr	100~200	T-N	50~70
	Anoxic tank	1~2hr		T-P	80
	Aerobic tank	2.5~4hr			

따라서 상기의 연구결과를 근거로 본 InSub System의 상용화를 위해서는 현장적용성에 관한 연구, InSub의 다단화에 관한 연구 등이 수행되어야 할 것이다.

질소·인 동시 제거기술은 혐기·호기법과 순환식 질산탈질법을 조합한 생물처리법이 기본공정이며, 질소·인 양자의 제거는 원리적으로 상반된 면이 있어, 양자의 안정된 제거율 유지가 설계 및 운전의 관건이다. 통상 인제거가 불안정해질 경우는 응집제침가 등의 보완시설을 설치하는 것이 좋다.

외국의 기술로는 VIP(Virginia Initiative Plant)공법, Bardenpho공법, UCT(University of Cape Town)공법, A2/O공법, 수정 Phostrip공법, SBR공법 등이 개발되어 있으며, 국내 신기술로는 B3, DNR, HBR, P/L공법, De N&P, Bio-SAC, KIDEA 등이 개발되어 있다. 질소·인 제거성능은 모두 있으나, 수리학적 체류시간은 VIP 및 B3는 6~8hr, Bardenpho 10~20hr, 수정 UCT 9~15hr, A2/O 및 DNR, HBR은 8~12hr내외이며 각각의 공정에 대한 주요설계부하와 제거대상 및 제거효율은 Table 4와 같다. Table 4에서 보여주듯이 각각의 공정은 전공정의 HRT가 다를뿐만 아니라 각각의 공정에서의 반응조에서의 HRT 및 내부반송률이 다르며 제거효율 또한 다르게 나타나고 있다.

따라서 본 연구에서는 InSub system에서도 각각의 반응조별 체류시간 및 내부반송률에 따라 제거효율이 다르게 나타날 것으로 예상되어 반응조별 적정 HRT 및 내부반송률을 산출하기 위하여 수행되었다.

2) 연구내용 및 범위

InSub system에서도 각각의 반응조별 체류시간 및 내부반송률에 따라 제거효율이 다르게 나타날 것으로 예상되어 반응조별 적정 HRT 및 내부반송률을 산출하기 위하여 수행되었다. 본 실험을 하기 이전에 예비실험을 수행하여 InSub system의 적정 HRT는 9hr로 나타났다. 적정 HRT의 산정을 위해서 혐기/무산소조 체류시간을 6, 5, 4, 3hr로 각각 낮추면서 실험을 행하였으며, 반대로 InSub반응조에서의 체류시간은 3, 4, 5, 6hr로 차츰 높이면서 InSub system의 전체 HRT를 9hr으로 고정시켜, 실험을 행하였다. 또한 적정의 내부반송률을 산정하기 위한 실험에서는 InSub system의 전체 HRT를 9hr으로 고정시켜서 내부반송율을 0, 50, 100, 150%로 변경

시키면서 실험을 수행하였다.



2. 재료 및 방법

1) 실험장치

InSub 장치를 이용한 오수고도처리 기초적 실험 연구에서 고도처리장치로써 가능성은 보였으나 질소·인의 효율처리를 더욱 높이기 위해서는 산화질소의 제거를 위해 무산소, 호기조의 조합 등에 의한 선타질 공정을 포함한 장치의 일부변경이 필요함을 확인할 수 있었다. 또한 InSub 장치의 고도처리 가능성 실험에 의하여 InSub 장치의 상용화를 위해서 InSub system에 대한 실험실적 연구와 현장적용성에 관한 연구가 수행되었다.

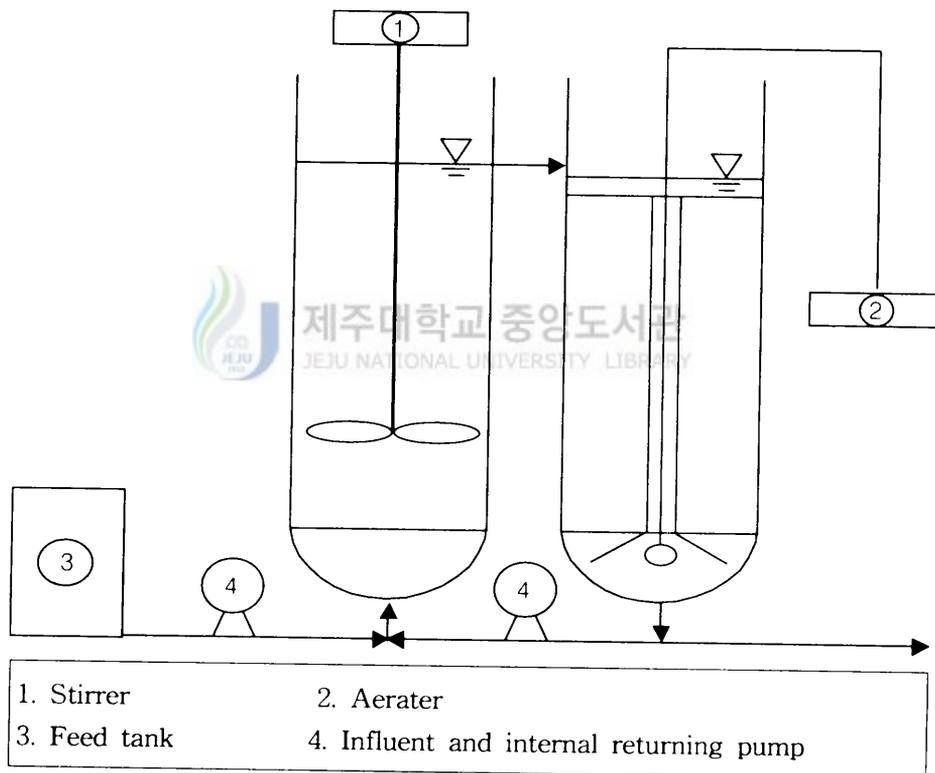


Fig. 42. Schematic diagram of InSub system on the lab scale.

Fig. 42에서는 본 실험에서 실험실적으로 사용된 InSub system의 모식도를 나타내었다. 앞서서도 설명하였듯이 질소·인의 제거효율을 더욱 높이기 위해서 선탈질조건, 즉 무산소/혐기조를 InSub 장치에 하수가 유입되기 전에 유입되도록 앞에 설치를 하였다. 무산소/혐기조 및 InSub 반응기는 직경 150mm, 높이 1m로 제작하였으며, 실용적인 운전조건에 따라 달리 하였다.

Photo 4는 본 연구에 사용된 장치를 나타낸 것이다.

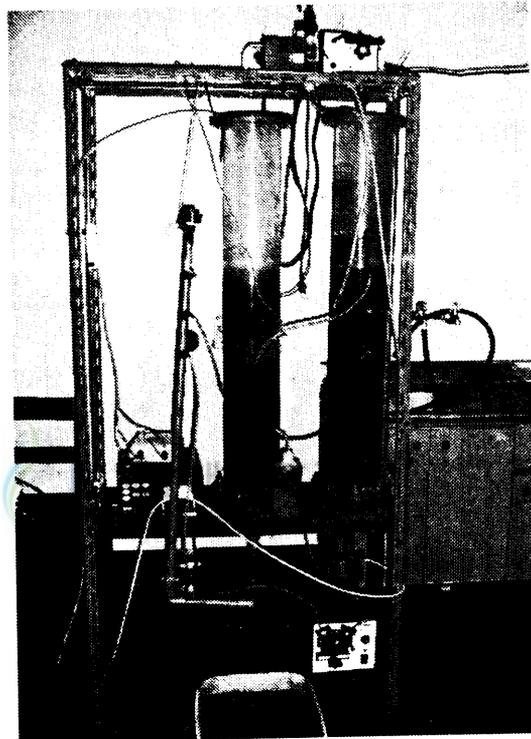


Photo 4. Photograph of InSub system on the lab scale

2) 운전조건

(1) 반응기별 수리학적 체류시간

InSub system에서의 수리학적 체류시간은 9시간으로 하여 각 반응기별 체류시간은

다음과 같이 수행하였다. 각각의 반응기별 체류시간은 무산소조/혐기조를 6, 5, 4, 3hr로 변경하였으며, InSub반응기는 3, 4, 5, 6hr로 운전조건을 변경하면서 실험을 하였다. 또한 운전조건을 변경하기 전에 InSub조를 1분간 역세를 행하였다. 모든 운전조건에서 내부관 공탑속도는 9.55m/min으로 고정하였으며, 각각의 반응기에 대한 여재의 충전율은 반응기의 실용적을 10L로 고정하였을 경우를 가정하여 20%로 하였다. 반응기별 수리학적 체류시간에 대한 실험 운전시 무산소/혐기조의 수위가 InSub조의 수위보다 높을 경우는 자연유하방식으로 흐르도록 제작하였으며, 반대로 InSub조의 수위가 높을 경우에는 펌프를 이용하여 무산소/혐기조에서 InSub조로 넘어가도록 제작하였다.

Table 5. Operating conditions with the HRT

Operating conditions	Superficial velocity (m/min)	Packing Ratio (%)	HRT(hr)	
			anaerobic/anoxic reactor	InSub reactor
Run 1	9.55	20	6	3
Run 2			5	4
Run 3			4	5
Run 4			3	6

(2) 내부반송율에 따른 실험

실험실적으로 InSub system에 대하여 연구를 진행함에 있어서 내부반송율에 대한 실험을 실시하였다. 본 실험에서는 내부관 공탑속도와 충전율을 반응기별 수리학적 체류시간에 대한 실험에서와 마찬가지로 9.55m/min 및 20%로 유지하였으며, 반응기별 HRT는 무산소/혐기조는 5hr, InSub조는 4hr로 유지하였으며, 내부반송율은 50, 100, 150%로 운전조건을 변경하면서 실험을 수행하였으며, 운전조건을 변경하기 전에 InSub조에 대하여 1분간 역세를 행하였다.

Table 6. Operating conditions with the Internal recycling

Operating conditions	Superficial velocity (m/min)	Packing Ratio (%)	HRT(hr)		Internal recycling (%)
			anaerobic/anoxic reactor	InSub reactor	
Run 2	9.55	20	5	4	0
Run 2-1					50
Run 2-2					100
Run 2-3					150

3) 분석항목 및 방법

Table 7. Analytical items and methods

Item	Analytical Methods
pH/ORP	Electrode Method(Istek 740 ; Korea)
DO	Electrode Method(Orion 810 ; USE)
TCOD _{Mn}	Titrimetric Method(KMnO ₄ , Acidic)
TBOD	Winker Azide Modification Method(20°C, 5day)
TSS	Gravimetric Method(Dry oven, 105°C)
T-N	Spectrophotometric Method(K ₂ S ₂ O ₈ , 220nm)
NH ₄ ⁺ -N	Spectrophotometric Method(Indo-Phenol, 630nm)
NO ₂ ⁻ -N	Spectrophotometric Method(Diazo, 540nm)
NO ₃ ⁻ -N	Spectrophotometric Method (Cadmium Reduction Method, 630nm)
T-P	Spectrophotometric Method

원수는 JJ 하수도사업소 1차침전지를 지나 포기조로 유입되기전의 하수를 채취하여 반응기에 유입시켰다. 각 운전조건의 유입수와 처리수에 대하여 Table 7과 같이 12개 항목을 분석하였으며, 여기서 BOD는 20°C에서 5일간의 BOD를 측정하였고, COD는 산성 100°C에서 KMnO₄에 의한 방법을 사용하여 측정하였다. T-N과 T-P는 고압멸균기(Autoclave)를 이용하여 전

처리 하였으며, NH_4^+ -N, NO_2^- -N, NO_3^- -N은 GF/C여지로 여과후 분석하였다.

반응조내에 대해서 pH, ORP, 그리고 DO는 정기적으로 전극을 집어넣어 측정하였으며, 반응조내 MLSS농도는 여재에 부착되어 있는 것을 탈리시키기 위하여 역세를 행하였으며, 역세후 탈리된 MLSS 및 실험종류후 여재의 무게를 측정하여 슬러지량을 측정하였다. 이상의 항목에 대한 분석은 수질오염공정시험방법(1997) 및 Standard Method(1998)에 준하여 실시하였다.



3. 결과 및 고찰

1) 반응기별 수리학적 체류시간에 따른 영향

반응기별 수리학적 체류시간의 변화에 따른 처리 수질을 파악하기 위하여 무산소, InSub 장치 각각의 반응조에 길이가 20mm인 직육면체 미디어를 20%씩 충전하였다. 수리학적 체류시간의 변화는 무산소조를 각각 6hr, 5hr, 4hr, 3hr로 운전하였으며, 또한 InSub조의 반응기의 수리학적 체류시간의 변화는 3hr, 4hr, 5hr, 6hr로 운전하여 총 InSub system의 수리학적 체류시간은 9hr로 운전하였다.

(1) 부유물질농도 및 제거효율의 변화

InSub system을 가지고 반응기별 수리학적 체류시간에 대한 SS농도변화 및 제거효율을 Fig. 43에 나타내었다.

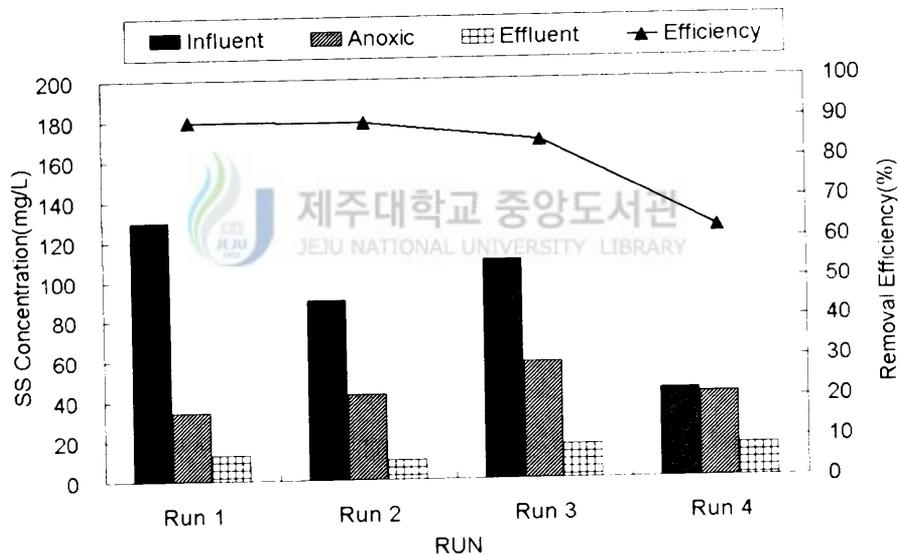


Fig. 43. Variation of SS concentration and removal efficiency with HRT on each reactor.

각각의 운전조건에서의 유입수와 무산소조 그리고 배출수에서의 농도를 살펴보면

Run 1에서는 유입수 130mg/L, 무산소조 34.6mg/L 그리고 배출수 13.2mg/L로 나타났으며, 제거효율은 89.8%로 나타났다. 그리고 Run 2에서는 유입수 90mg/L, 무산소조 42.8mg/L 그리고 배출수 9.7mg/L로 나타났으며, 제거효율은 89.2%로 나타났다. 그리고 Run 3와 Run 4에서는 각각 유입수 110mg/L과 44.0mg/L, 무산소조 58.3mg/L과 42.1mg/L 그리고 배출수는 16.8mg/L과 16.4mg/L로 나타났으며, 제거효율은 각각 84.72%와 62.7%로 나타났다. Fig. 43에서 보는 보와 같이 각각의 운전 에 대한 유입수의 농도는 일정하지 않기 때문에 제거효율만을 가지고 평가하기에는 무리가 있을 것이라 사료되지만 Run 1과 Run 2의 운전조건에서 좋은 제거효율을 나타내고 있다. 그리고 무산소조의 경우 체류시간이 짧아짐에 따라 유출수의 농도가 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 교반기의 RPM을 고정하고 반응기내의 유량이 상대적으로 적은 경우에는 혼합이 더욱 잘되어 유기물 및 미생물이 동시에 유출되어 증가된 것으로 사료된다.

(2) 유기물농도 및 제거효율의 변화

각 반응기별 수리학적체류시간의 변화에 따른 각 반응조의 유기물 농도 변화 및 제거효율 변화를 Fig. 44와 Fig. 45에 나타내었다. 각각의 운전조건에서의 유입수와 무산소조 그리고 배출수에서의 농도를 살펴보면 Run 1에서 COD_{Mn}과 BOD₅는 유입수 70mg/L, 90.3mg/L, 무산소조 18mg/L, 39.8mg/L 그리고 배출수 10.0mg/L, 14.3mg/L로 나타났으며, 제거효율은 각각 85.7% 및 84.2%로 나타났다. 그리고 Run 2에서의 COD_{Mn}과 BOD₅는 유입수 78.0mg/L, 78.5mg/L, 무산소조 28.0mg/L, 44.0mg/L 그리고 배출수는 9.0 mg/L과 5.8mg/L로 나타났으며, 제거효율은 각각 88.4% 및 92.6%로 나타났다. 그리고 Run 3와 Run 4에서의 COD_{Mn}과 BOD₅는 각각 유입수 67.5mg/L, 109.9mg/L과 58.0mg/L, 65.5mg/L이었고, 무산소조 30.0mg/L, 107.3mg/L과 40.0mg/L, 72.2mg/L로 나타났으며 그리고 배출수는 각각 10.0 mg/L과 18.1mg/L과 10.0mg/L, 18.6mg/L로써, 제거효율은 각각 85.1% 및 83.5%와 82.7% 및 71.6%로 나타났다.

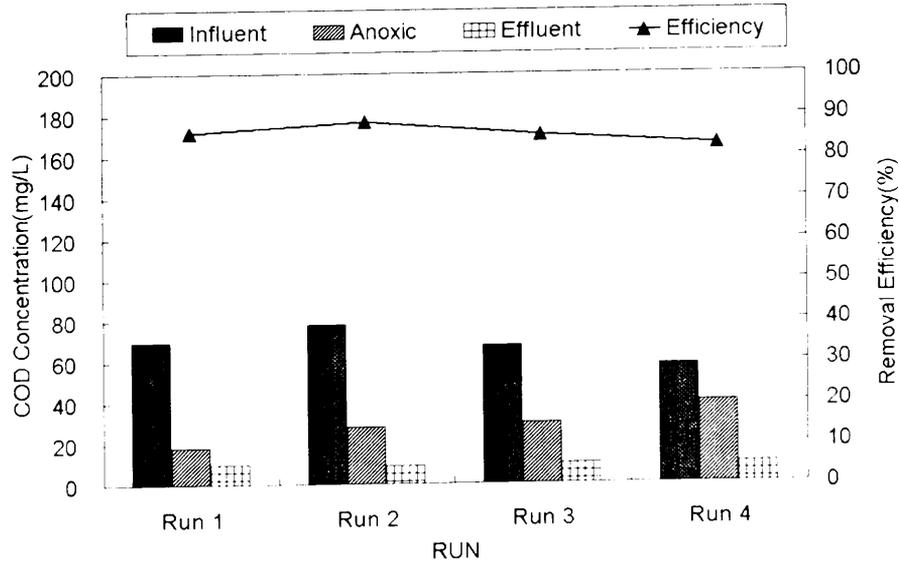


Fig. 44. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency with HRT on each reactor.

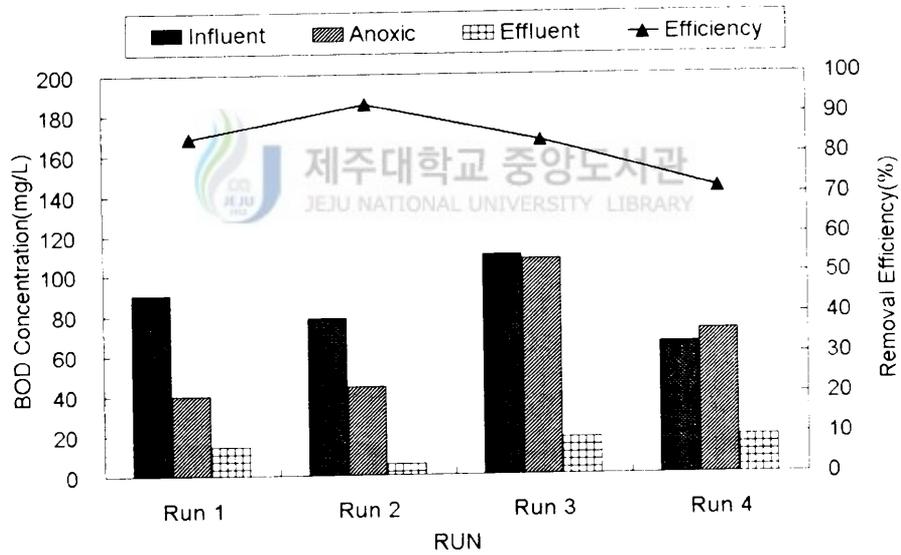


Fig. 45. Variation of BOD_5 concentration and removal efficiency with HRT on each reactor.

Fig. 44와 Fig.45에서 보는 보와 같이 SS와는 다르게 각각의 운전에 대한 유입수의 농도와 유출수의 농도는 거의 일정하고 제거효율 또한 크게 차이나진 않지만 InSub 반응조의 체류시간이 증가할수록 대체적으로 제거효율이 낮아짐을 알 수 있었다. 이는 포기시간이 증가할수록 InSub조의 미생물이 상대적으로 많이 발생하고 유출되는 양도 증가하여 SS뿐만 아니라 유기물질 또한 증가시키는 경향을 보였기 때문으로 사료된다. 또한 앞에서도 언급하였지만, 무산소조에서의 SS 농도 증가로 인하여 유출수에도 영향을 끼쳤다고 사료된다.

(3) 질소 및 인의 농도 및 제거효율의 변화

각 반응기별 수리학적체류시간의 변화에 따른 각 반응조의 T-N과 NH_4^+ -N 농도 및 T-P농도 변화 및 제거효율 변화 등을 Fig. 46~Fig. 48에 나타내었다.

전체의 운전조건에서 NO_2^- -N농도는 원수가 0mg/L~0.047mg/L이었고, 무산소조인 경우 0mg/L~0.02mg/L이었으며, 배출수의 농도는 1.32mg/L~1.83mg/L의 범위로 유출되었다. 또한 NO_3^- -N의 농도는 원수와 배출수는 검출되지 않았으며, 배출수중의 농도는 3.68mg/L~7.79mg/L의 범위로 유출되었다.

각각의 운전조건에서의 유입수와 무산소조 그리고 배출수에서의 농도를 살펴보면 Run 1에서 T-N와 NH_4^+ -N농도는 유입수 56.61mg/L, 34.67mg/L, 무산소조 31.83mg/L, 45.86mg/L 그리고 배출수 12.81mg/L, 4.67mg/L로 나타났으며, 제거효율은 각각 77.4% 및 86.5%로 나타났다. 그리고 Run 2에서의 T-N와 NH_4^+ -N농도는 유입수 55.83mg/L, 43.11mg/L, 무산소조 53.41mg/L, 19.45mg/L 그리고 배출수는 11.90 mg/L과 2.14mg/L로 나타났으며, 제거효율은 각각 78.7% 및 95.0%로 나타났다. 그리고 Run 3와 Run 4에서의 T-N와 NH_4^+ -N농도는 각각 유입수 63.51mg/L, 54.89mg/L과 27.46mg/L, 26.26mg/L이었고, 무산소조 61.49mg/L, 50.33mg/L과 23.38mg/L, 28.21mg/L로 나타났으며 그리고 배출수는 각각 15.14 mg/L과 15.66mg/L과 1.40mg/L, 0.73mg/L로써, 제거효율은 각각 76.2% 및 71.5%와 94.9% 및 97.2%로 나타났다.

Fig. 46~Fig. 47에서 보는 보와 같이 InSub 반응조의 체류시간이 증가할수록 대체적으로 질산화효율이 증가하는 것을 보여주고 있으며 T-N의 제거효율은 많은 차

이를 보이지는 않지만 Run 2에서가 가장 높은 제거효율을 나타내었다. 이는 질산화와 탈질화가 동시에 일어날 수 있는 InSub조에서의 체류시간이 증가할수록 탈질화에 비해 질산화가 많이 이루어지고 질산화미생물이 반응조의 대부분이 탈질화 미생물에 비해 질산화미생물이 상대적으로 많다는 것을 추측할 수 있다.

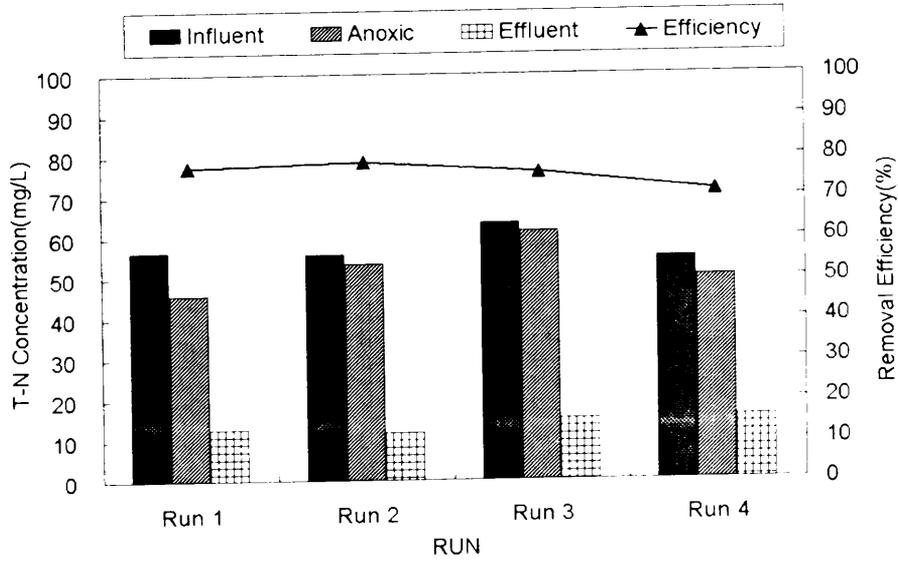


Fig. 46. Variation of T-N concentration and removal efficiency with HRT on each reactor.



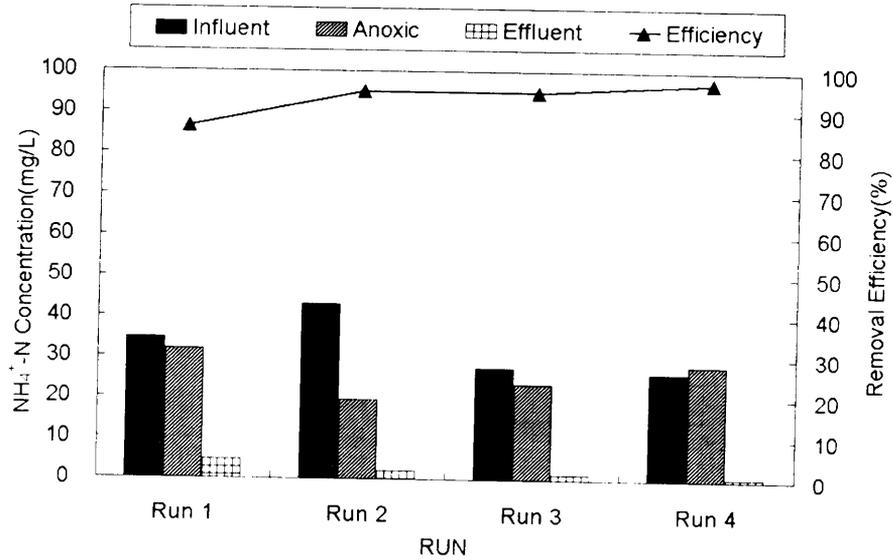


Fig. 47. Variation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration and removal efficiency with HRT on each reactor.

Fig. 48은 각각의 운전조건에서의 유입수와 무산소조 그리고 배출수에서의 T-P농도를 나타내었다. Fig. 48에서 보면 Run 1에서는 유입수 3.9mg/L, 무산소조 4.6mg/L 그리고 배출수 1.3mg/L로 나타났으며, 제거효율은 66.4%로 나타났다. 그리고 Run 2에서는 유입수 5.3mg/L, 무산소조 5.5mg/L 그리고 배출수 1.6mg/L로 나타났으며, 제거효율은 69.7%로 나타났다. 그리고 Run 3와 Run 4에서는 각각 유입수 4.6mg/L과 4.1mg/L, 무산소조 4.5mg/L과 4.0mg/L 그리고 배출수는 1.9mg/L과 1.6mg/L로 나타났으며, 제거효율은 각각 59.2%와 59.8%로 나타났다. Fig. 48에서 보는 보와 같이 T-P의 경우 Run 1과 Run 2의 운전조건에서 좋은 제거효율을 나타내고 있다. 그리고 무산소조의 경우 체류시간이 짧아짐에 따라 무산소조의 농도가 점차 낮아지는 경향을 나타내고 있는데, 이는 인의 제거에 있어서 무산소조의 체류시간이 4시간 이상이 되어야 한다는 것을 보여주고 있다.

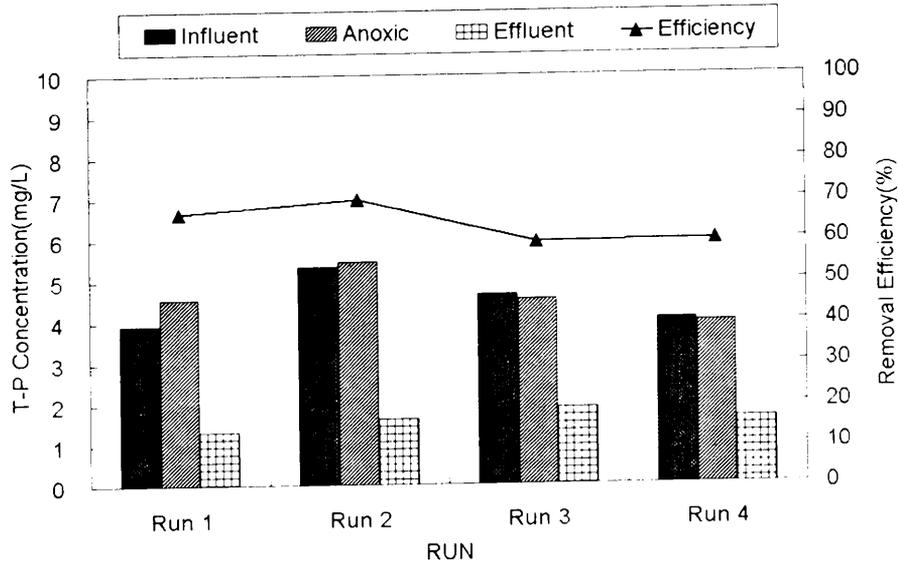


Fig. 48. Variation of T-P concentration and removal efficiency with HRT on each reactor.

2) 내부반송에 따른 영향

반응기별 내부반송의 변화에 따른 처리 수질을 파악하기 위하여 무산소, InSub 장치 각각의 반응조에 길이가 20mm인 직육면체 매디아를 20%씩 충전하였다. 수리학적 내부반송의 변화는 수리학적 체류시간을 9hr으로 하고 반응기별 수리학적 체류시간으로 무산소조 5hr, InSub 장치 4hr로 운전한 Run 2로 하였으며, InSub 장치에서 배출되는 유출수를 무산소조로 각각 0%, 50%, 100%, 150%로 내부 반송하여 탈질화를 유도하였다.

(1) 부유물질농도 및 제거효율의 변화

InSub system을 가지고 내부반송변화에 따른 SS농도변화 및 제거효율을 Fig. 49에 나타내었다.

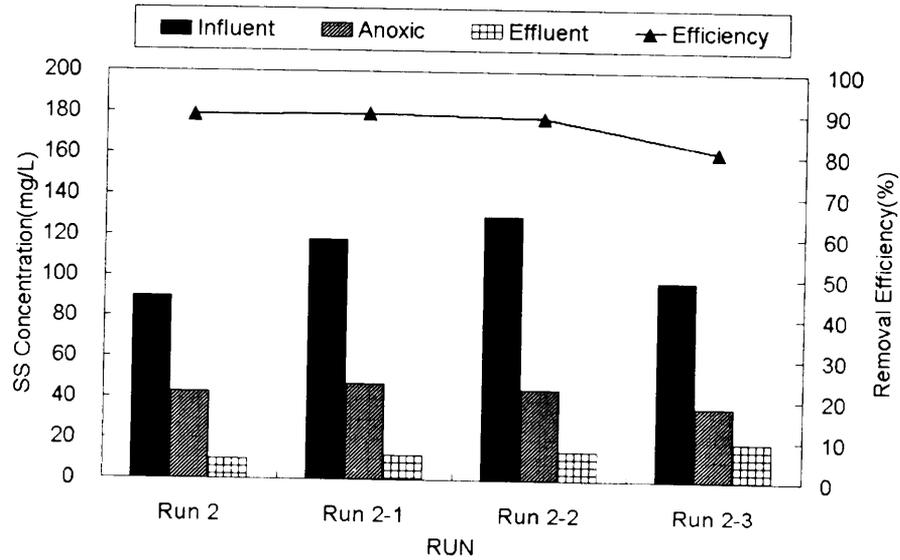


Fig. 49. Variation of SS concentration and removal efficiency with internal return on each reactor.

각각의 운전조건에서의 유입수와 무산소조 그리고 배출수에서의 농도를 살펴보면 Run 2에서는 유입수 90mg/L, 무산소조 42.8mg/L 그리고 배출수 9.7mg/L로 나타났으며, 제거효율은 89.2%로 나타났다. 그리고 Run 2-1에서는 유입수 118.0mg/L, 무산소조 46.9mg/L 그리고 배출수 12.0mg/L로 나타났으며, 제거효율은 89.8%로 나타났다. 그리고 Run 3와 Run 4에서는 각각 유입수 130mg/L과 98.0mg/L, 무산소조 44.7mg/L과 36.5mg/L 그리고 배출수는 14.6mg/L과 18.9mg/L로 나타났으며, 제거효율은 각각 88.8%와 80.7%로 나타났다. Fig. 49에서 보는 보와 같이 각각의 운전 조건에 대한 제거효율을 보면 Run 2과 Run 2-1 그리고 Run 2-2의 운전조건에서 좋은 제거효율을 나타내고 있으며, 무산소조의 경우 내부반송이 증가할수록 농도가 점차 낮아짐을 알 수 있었다. 이는 무산소조의 처리효과보다는 내부반송에 의한 무산소조에서의 회석효과로 인한 무산소조의 농도저감으로 사료된다. 또한 내부반송의 증가에 따라 배출수의 농도가 점차 증가하는 경향을 보이고 있는데 이것 또한 내부반송의 증가에 따른 유량의 증가에 의해 InSub 장치의 미생물 등이 탈리되어 유출됨으로써 증가하는 것으로 사료된다. 따라서 배출수의 양호한 수질을 유지하기 위

해서는 역세의 주기를 내부반송의 시작됨과 함께 짧게 하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

(2) 유기물농도 및 제거효율의 변화

각 내부반송의 변화에 따른 각 반응조의 유기물 농도 변화 및 제거효율 변화를 Fig. 50과 Fig. 51에 나타내었다.

각각의 운전조건에서의 유입수와 무산소조 그리고 배출수에서의 농도를 살펴보면 Run 2에서 COD_{Mn}과 BOD₅는 유입수 78mg/L, 78.5mg/L, 무산소조 28mg/L, 44mg/L 그리고 배출수 9.0mg/L, 5.8mg/L로 나타났으며, 제거효율은 각각 88.5% 및 92.6%로 나타났다. 그리고 Run 2-1에서의 COD_{Mn}과 BOD₅는 유입수 52.7mg/L, 106.2mg/L, 무산소조 32.0mg/L, 32.9mg/L 그리고 배출수는 10.3 mg/L과 12.3mg/L로 나타났으며, 제거효율은 각각 80.5% 및 88.4%로 나타났다. 그리고 Run 2-2와 Run 2-3에서의 COD_{Mn}과 BOD₅는 각각 유입수 40.0mg/L, 94.0mg/L과 48.8mg/L, 113.8mg/L이었고, 무산소조 32.0mg/L, 28.2mg/L과 35.0mg/L, 26.8mg/L로 나타났으며 그리고 배출수는 각각 9.8 mg/L과 13.5mg/L과 10.8mg/L, 14.1mg/L로써, 제거효율은 각각 75.5% 및 85.6%와 77.9% 및 87.6%로 나타났다.

Fig. 50과 Fig.51에서 보는 보와 같이 내부반송이 증가함에 InSub조내의 메디아에 부착되어 미생물이 탈리됨으로써 처리효율을 떨어뜨리는 것을 알 수 있었다. 위에서 언급한 것처럼 내부반송에 의한 InSub장치에서 배출되는 유출수에 미생물이 동시에 배출됨으로써 수질이 악화되는 것을 알 수 있었으며, 이러한 결과는 역세의 주기를 짧게 유지하여야 함을 알 수 있었다.

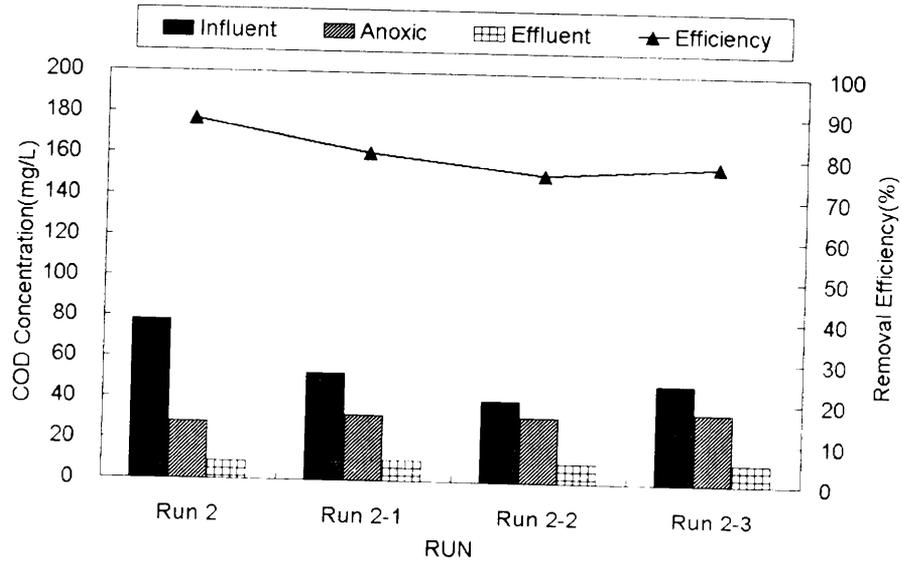


Fig. 50. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency with internal return on each reactor.

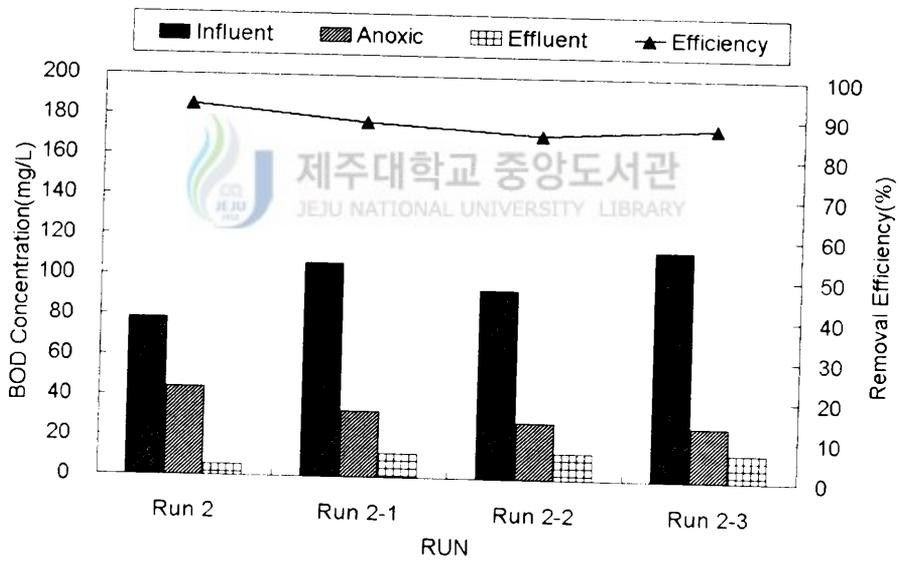


Fig. 51. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiency with internal return on each reactor.

(3) 질소 및 인의 농도 및 제거효율의 변화

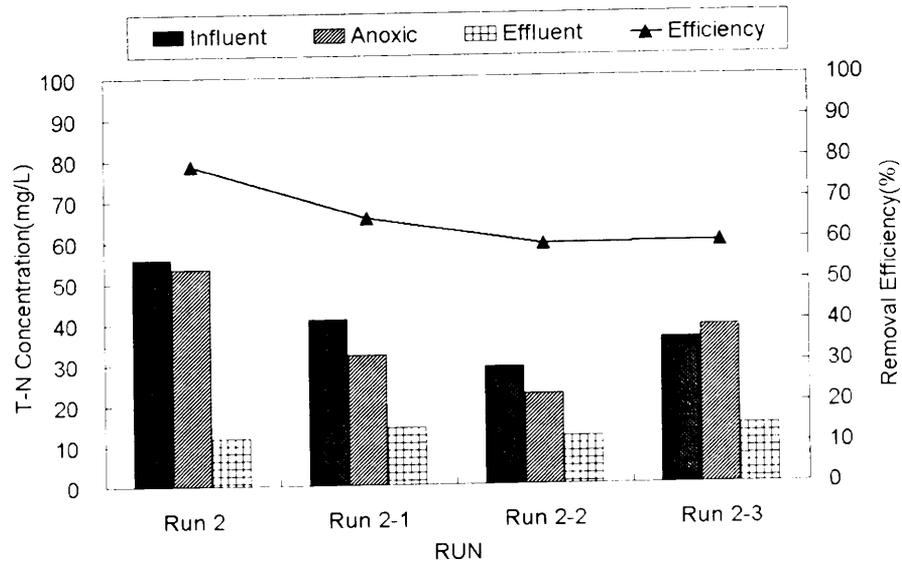


Fig. 52. Variation of T-N concentration and removal efficiency with internal return on each reactor.

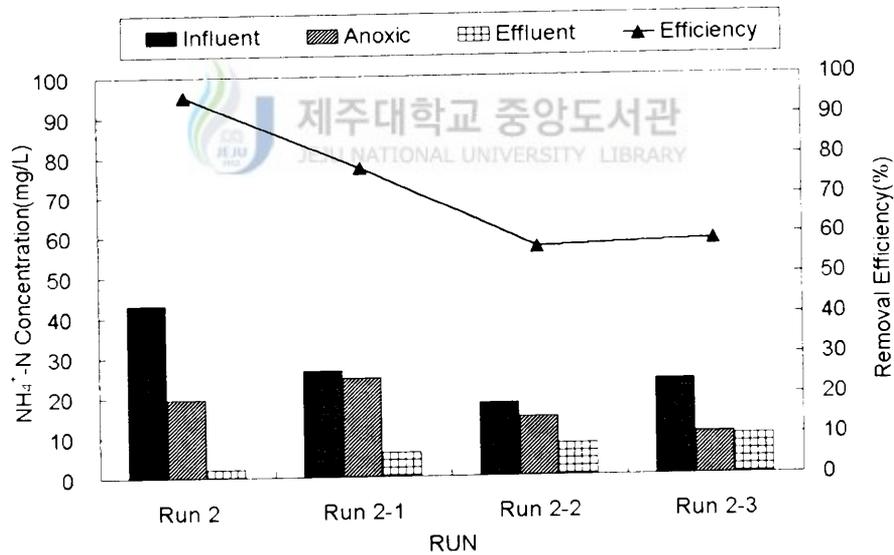


Fig. 53. Variation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration and removal efficiency with internal return on each reactor.

각 내부반송의 변화에 따른 각 반응조의 T-N과 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도 및 T-P농도 변화 및 제거효율 변화 등을 Fig. 52~Fig. 54에 나타내었다.

전체의 운전조건에서 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 농도는 원수가 0mg/L~0.48mg/L이었고, 무산소조인 경우 0mg/L~0.35mg/L이었으며, 배출수의 농도는 0.88mg/L~1.40mg/L의 범위로 유출되었다. 또한 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도는 원수와 배출수는 검출되지 않았으며, 배출수중의 농도는 2.71mg/L~4.26mg/L의 범위로 유출되었다.

각각의 운전조건에서의 유입수와 무산소조 그리고 배출수에서의 농도를 살펴보면 Run 2에서 T-N과 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 유입수 55.83mg/L, 43.11mg/L, 무산소조 53.41mg/L, 19.45mg/L 그리고 배출수 11.89mg/L, 2.14mg/L로 나타났으며, 제거효율은 각각 78.7% 및 95.0%로 나타났다. 그리고 Run 2-1에서의 T-N과 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 유입수 41.04mg/L, 26.62mg/L, 무산소조 32.03mg/L, 24.67mg/L 그리고 배출수는 14.10 mg/L과 6.09mg/L로 나타났으며, 제거효율은 각각 65.6% 및 77.1%로 나타났다. 그리고 Run 2-2와 Run 2-3에서의 T-N과 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 각각 유입수 28.98mg/L, 18.14mg/L과 35.83mg/L, 23.82mg/L이었고, 무산소조 22.31mg/L, 14.63mg/L과 38.82mg/L, 10.47mg/L로 나타났으며 그리고 배출수는 각각 11.83 mg/L과 7.80mg/L과 14.50mg/L, 9.86mg/L로써, 제거효율은 각각 59.2% 및 57.0%와 59.5% 및 58.6%로 나타났다.

Fig. 52~Fig.53에서도 마찬가지로 내부반송이 증가함에 따라 처리효율이 떨어짐을 알 수 있었다.

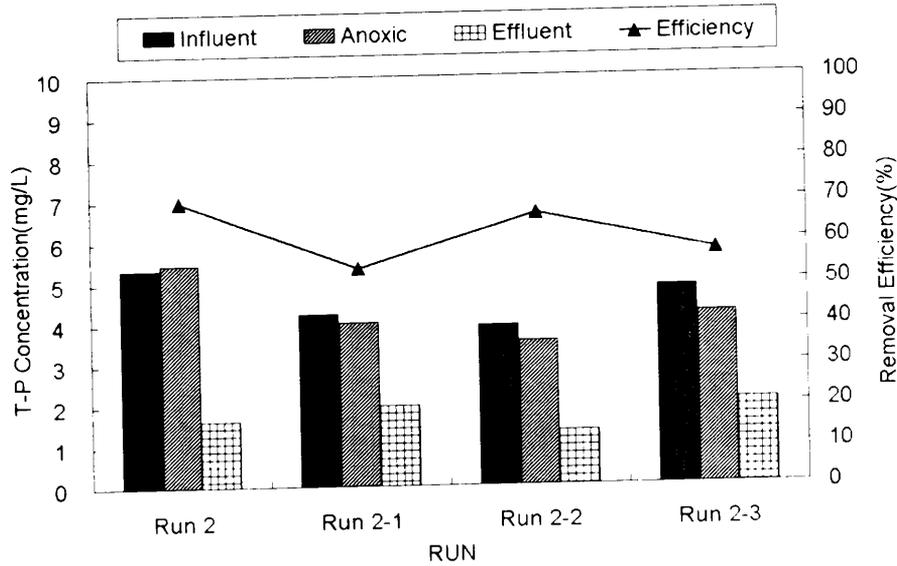


Fig. 54. Variation of T-P concentration and removal efficiency with internal return on each reactor.

Fig. 54는 각각의 운전조건에서의 유입수와 무산소조 그리고 배출수에서의 T-P 농도를 나타내었다. Fig. 54에서 보면 Run 2에서는 유입수 5.3mg/L, 무산소조 5.5mg/L 그리고 배출수 1.6mg/L로 나타났으며, 제거효율은 69.7%로 나타났다. 그리고 Run 2-1에서는 유입수 4.2mg/L, 무산소조 4.0mg/L 그리고 배출수 2.0mg/L로 나타났으며, 제거효율은 53.5%로 나타났다. 그리고 Run 2-2와 Run 2-3에서는 각각 유입수 3.9mg/L과 4.9mg/L, 무산소조 3.5mg/L과 4.2mg/L 그리고 배출수는 1.3mg/L과 2.1mg/L로 나타났으며, 제거효율은 각각 66.4%와 57.5%로 나타났다. Fig. 54에서 보는 보와 같이 T-P의 경우 Run 2와 Run 2-2의 운전조건에서 좋은 제거효율을 나타내고 있다. 모든 운전조건에 있어서 내부반송에 따른 처리효율을 비교하는 것은 실제 배출수중에 미생물이 동시에 유출됨으로써 어려울 것으로 사료되며 SBOD 및 SCOD 그리고 여과액을 가지고 실험한 T-N, T-P에서는 내부반송율이 100%인 Run 2-2에서 가장 좋은 효율을 보여주었다.

4. 결론

본 연구에서는 InSub system에서도 각각의 반응조별 체류시간 및 내부반송률에 따라 제거효율이 다르게 나타날 것으로 예상되어 반응조별 적정 HRT 및 내부반송률을 산출하기 위하여 수행하였다. 반응기별 수리학적 체류시간의 변화에 따른 처리수질을 파악하기 위한 수리학적 체류시간은 무산소조를 각각 6hr, 5hr, 4hr, 3hr로 운전하였으며, 또한 InSub조의 반응기의 수리학적 체류시간의 변화는 3hr, 4hr, 5hr, 6hr로 운전하여 총 InSub system의 수리학적 체류시간은 9hr로 운전하였다. 그리고 반응기별 적정의 수리학적 체류시간에서 InSub 장치에서 배출되는 유출수를 무산소조로 각각 0%, 50%, 100%, 150%로 내부 반송하여 탈질화를 유도하여 최적의 내부반송비를 알아보기 위한 실험에서의 결과는 다음과 같다.

1. 반응기별 수리학적 체류시간에 대한 실험에서는 반응기전체 체류시간을 9hr로 하여 수행하였을 때 최적의 조건은 무산소조 4hr, InSub조 5hr이었다.

2. 내부반송에 따른 실험에서는 유량의 증가에 의해서 InSub장치내 미디어에 부착되어 있는 미생물이 탈리되어 유출수에 미생물이 동시에 배출됨으로써 내부반송을 하지 않은 경우와 비교하여 나쁜 수질결과를 나타내었다. 이러한 결과는 내부반송을 하지 않았을 경우와 비교시 내부반송을 하였을 경우 역세주기를 짧게 운전하여야 하며, 역세주기를 짧게 하면서 운전하였을 경우 적정 내부반송율은 100%이었다.

3. 반응기별 수리학적 체류시간에 대한 배출수의 처리특성을 살펴보면 대부분이 비슷한 결과를 나타내고 있으나 그중 Run 2의 운전조건인 무산소조 5hr, InSub조 4hr로 운전하였을 경우에 제거효율이 좋으며, Run 2로 운전하였을 경우의 SS, BOD₅, COD_{Mn}, T-N, NH₄⁻-N, T-P에 대한 배출수의 농도 및 제거효율은 9.7mg/L, 5.8mg/L, 9mg/L, 11.9mg/L, 2.1mg/L, 그리고 1.6mg/L이었으며 89.2%, 92.6%, 88.5%, 78.7%, 95.0% 그리고 69.7%이었다.

V. 현장규모 InSub system을 이용한 오수고도처리특성

1. 서론

1) 연구배경 및 목적

고도처리 공정의 하나인 간접포기형침지생물막여과(InSub) system이 유기물질과 영양염류의 동시제거에 다른 타 공정에 비해 손색이 없는 것이 지금까지의 연구결과로 판명되었다.

생물학적 고도처리 장치로써의 가능성 평가, InSub조에서의 동력학적 특성 그리고 각 반응기별 최적 수리학적체류시간, 내부반송에 의한 수질 특성 및 보완 사항 등이 여러 가지 운전인자를 변화시켜 가면서 최대의 유기물질 및 영양염류 제거효율을 얻을 수 있는 운전인자에 대해서 조사하였다. 그러나 이러한 운전결과는 실험실내 lab scale의 연구결과이므로 이를 현장에 적용하기 위해서는 실제 하수 적용시의 반응기 특성을 규명할 필요가 있다.

본 연구는 현재까지의 연구에서 밝혀진 최상의 유기물질, 질소 및 인의 제거효율을 나타낸 운전조건을 InSub system에 적용하여 pilot plant에서의 적정 수리학적 체류시간의 산정과 내부관 공탑속도(superficial velocity)에 따른 배출수 수질 특성을 파악하고자 하였으며, 궁극적으로는 국내실정에 맞는 오·폐수중의 유기물질과 영양염류의 동시제거와 더불어, 경제적이고, 안정적인 유지관리가 가능한 오·폐수 고도처리장치의 개발과 상용화 기술 개발을 위하여 하수도사업소에서의 현장모형실험을 수행하였다.

2) 연구내용 및 범위

본 연구는 오수고도처리장치로써 InSub system을 개발함을 목적으로 pilot plant를 성능을 파악함과 아울러 적정의 체류시간 및 내부관 공탑속도를

산정하기 위하여 실험을 수행하였으며, 이를 위하여 유입수의 성상이 비교적 변동이 적은 하수를 대상으로 실험을 행하였다. 본 실험에서는 적정의 HRT를 구하기 위하여 체류시간을 7, 8, 9, 10hr로 변동시키면서 연속실험을 행하였으며, 모든 운전조건에서 10일에 한번씩 역세를 행하였다. 또한 적정의 내부관 공탐속도를 산정하기 위하여 내부관 공탐속도를 2.55, 3.18, 3.82, 6.37m/min으로 변동시키면서 실험을 수행하였다.



2. 재료 및 방법

1) 실험장치

하수중의 유기물과 영양염류의 동시제거를 목적으로 약 4.5m³ 유효용량의 InSub조와 동일 유효용량의 혐기/무산소조를 결합시킨 Fig. 55와 Photo 5와 같은 InSub system의 현장 모형실험장치를 JJ 하수도사업소에 설치하였다.

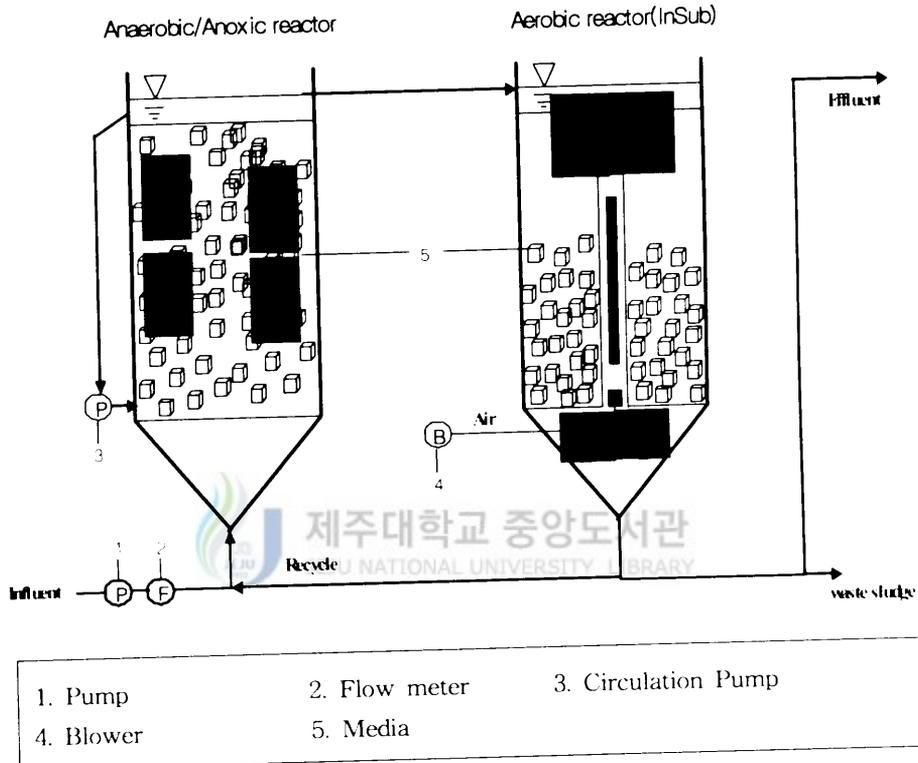


Fig. 55. Schematic flow diagram of InSub system.

Fig. 55~Fig. 57와 Photo 5는 InSub 장치의 상용화를 위해서 JJ 하수도사업소에 설치된 pilot plant의 흐름도와 설계도 그리고 사진을 나타내었다. Pilot Plant는 철제 재질의 원통형으로 InSub조는 높이 3.3m, 외부관과 내부관 지름이 각각 1.5m, 0.25m의 이중관 구조로 내부로의 송기로 인한

airlift에 의해 저비중, 다공질의 특수여재가 침지상태로 충전되어 부착미생물의 최적증식조건을 제공함과 아울러 선회류에 의한 생물막 여과를 함께 수행할 수 있도록 하였다. 또한 혐기/무산소조에도 동일한 여재를 충전하여 혐기성 미생물이 부착될 수 있도록 하였다. 따라서 혐기/무산소조에서는 유기물의 혐기성 분해, 질소의 탈질화 및 인의 용출이 이루어지는 한편, InSub조에서는 혐기/무산소조에서 생물학적으로 분해되지 않은 유기물을 산화분해하고, 인의 제거와 질소의 질산화가 이루어지게 하였다.

InSub조의 공기공급은 최대 1.65m³/min 용량의 Blower(Model-042)를 사용하였고 산기관은 막힘 현상이 적은 에코산기관(ECO-Diffuser, Model EG-700)을 사용하여 InSub조 내의 DO를 4mg/L 이상 유지하도록 하였다. 또한 역세척을 위한 산기관 4개를 추가 설치하였다. 유입폐수를 공급하는 펌프는 정격출력 250W의 유입펌프와 혐기/무산소조 내 고른 혼합을 위한 125W의 순환펌프가 설치되어 있으며 유량계를 통하여 폐수 유입량을 측정할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 사용된 부상매질(media)은 다공질의 내마모성 에테르계 폴리우레탄(polyurethane) 스폰지 담체로서 20mm인 정육면체이고, 기공이 95% 이상 파괴되어 반응조에 충전 되었을 때 미생물이 쉽게 부상매질의 안쪽으로 침투할 수 있으며, 매질 내부에 고정된 미생물에의 DO의 전달이 용이한 구조로 제작되었다. 또한 부상매질의 자체비중이 0.04 ± 0.01이기 때문에 최초 충전 시에는 반응조의 상부로 부상하게 되므로 혐기/무산소조, InSub조 각각 수면 하 50cm, 30cm의 지점에 상부분산판을 설치하고, 운전 시간의 경과에 따라 매질에의 부착 및 충전 생물막의 증량에 따라 자연 침강되는 것을 지지하는 하부분산판을 설치하였다. 각 반응기의 Media 충전율은 혐기/무산소조, InSub조 각각 20%이다.

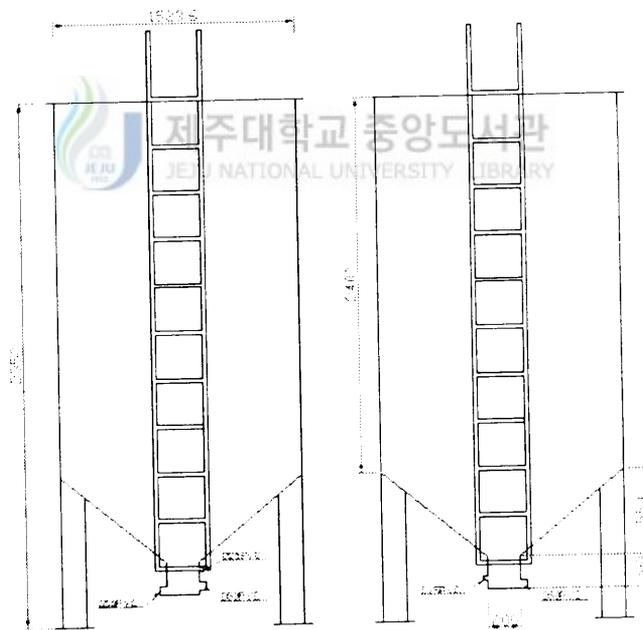
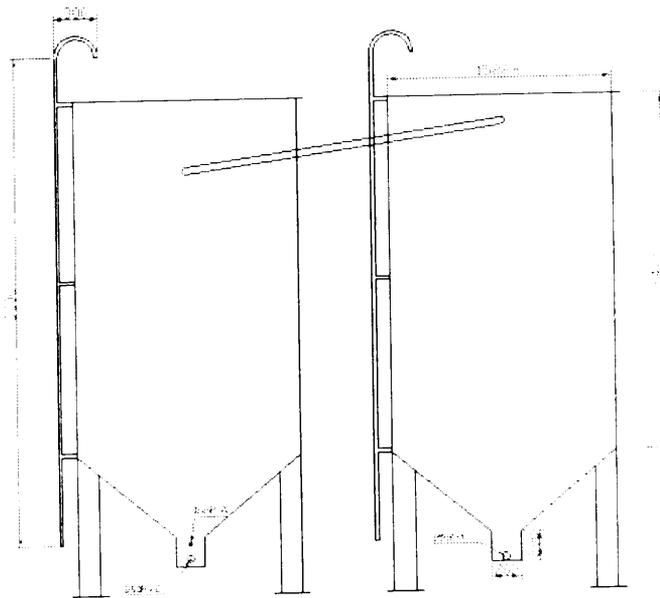


Fig. 56. External design of Pilot plant for InSub system.

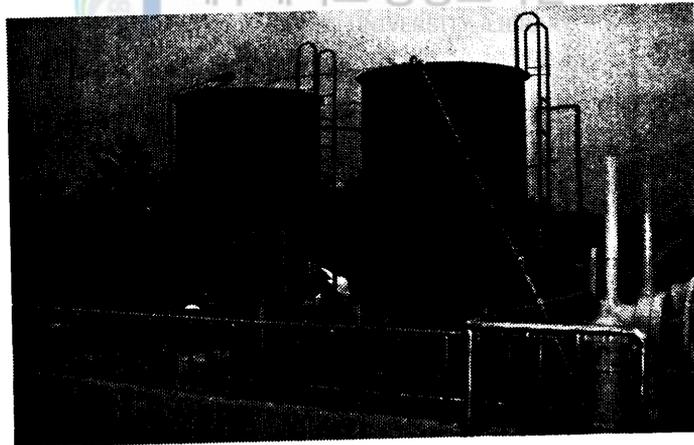
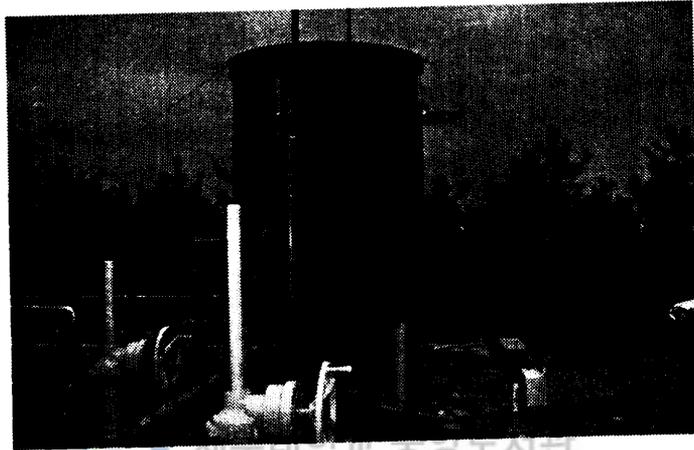
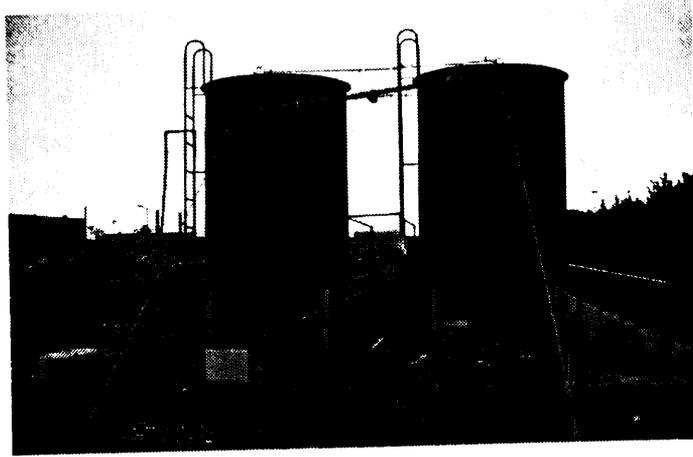


Photo 5. Photograph of Pilot plant Installed JeJu sewage treatment facility

2) 분석항목 및 방법

각 운전조건의 유입수와 처리수에 대하여 Table 7과 같이 12개 항목을 분석하였다. 여기서 BOD는 20℃에서 5일간의 BOD를 측정하였고, COD는 $K_2Cr_2O_7$ 에 의한 방법 및 산성 100℃에서 $KMnO_4$ 에 의한 방법을 사용하여 측정하였다. T-N과 T-P는 고압멸균기(Autoclave)를 이용하여 전처리 하였으며, NH_4^+-N , $NO_2^- -N$, $NO_3^- -N$ 은 GF/C여지로 여과후 분석하였다.

반응조내에 대해서 pH, ORP, 그리고 DO는 정기적으로 전극을 집어넣어 측정하였으며, 반응조내 MLSS는 여재에 부착되어 있는 슬러지량의 무게를 측정하였다. 이상의 항목에 대한 분석은 수질오염공정시험방법(1997) 및 Standard Method(1998)에 준하여 실시하였다.

3) 운전조건 및 미생물 식종

InSub system의 InSub조 내에 하수도사업소 활성슬러지로 식종하여 15일간 적용시키면서 최종유출수의 COD_{Mn} 과 NH_4^+ 를 지표로 정상상태에 도달할 수 있도록 유도하였다. 그러나 유기물 제거 및 질산화가 불규칙하게 일어났고, 이는 InSub조의 Media에 부착된 과도할 뿐만 아니라 질산화미생물에 비해 유기물미생물이 우점종으로 점유하는 것으로 판단하였다. 그에 따라 미국 ESU사 제품의 질산화 박테리아(BAC-300F)와 촉진제를 투여하여 24시간동안 원수 유입 없이 운전하였고 정상상태에 도달하여 2일후 시료채취를 시작하였다. 그 결과 질산화가 일어나기 시작했으며 유출수가 정상상태에 도달하였다. 또한 혐기/무산소조에는 한국 T사 제품(제품명 Nitcell-A)의 혐기성미생물(*Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Achromobacter*)을 식종하였다.

상용화를 위한 pilot test의 단계로서 JJ 하수도사업소에 설치하여 운전하였고, 실험은 두 가지를 수행하였으며 각각의 실험조건은 다음과 같다.

◇ 수리학적 체류시간의 변화

Table 8. Experimental conditions with variation of HRT

Superficial velocity (m/min)	Packing Ratio(%)		HRT(hr)	Quantity (L/min)
	anaerobic/anoxic reactor	InSub reactor		
6.37	20	20	10	13.8
			9	15.3
			8	17.3
			7	19.7

실험은 최종유출수가 정상상태에 도달한 후 수리학적 체류시간(Hydraulic retention time; HRT)을 변경하여 실험을 행하였다. 적정 HRT를 산정하기 위해서 내부관 공탑속도 6.37m/min, 여재충전율은 혐기/무산소조와 InSub 조 각각 20%로 하였고 HRT는 10hr, 9hr, 8hr, 7hr의 순서로 실험조건을 변경하여 실험을 행하였다.

◇ 내부관 공탑속도의 변화

Table 9. Experimental conditions with variation of SV

HRT(hr)	Packing Ratio(%)		Superficial velocity(m/min)	Air flow (L/min)
	anaerobic/anoxic reactor	InSub reactor		
9	20	20	3.82	120
			3.18	100
			2.55	80

내부관 공탑속도에 따른 실험 또한 최종유출수가 정상상태에 도달한 후 내부관 공탑속도를 변경하여 실험을 행하였다. 적정 SV를 산정하기 위해서

HRT 9hr로 하고, 여재충전율은 험기/무산소조와 InSub조 각각 20%로 하였으며, SV는 6.37m/min, 3.82m/min, 3.18m/min, 2.55m/min의 순서로 실험조건을 변경하여 실험을 행하였다.



3. 결과 및 고찰

1) 수리학적 체류시간에 따른 영향

본 연구에서는 하수고도처리장치로서 InSub공정과 혐기/무산소공정을 결합시켜 자체개발한 InSub system의 상용화를 위한 첫 단계 실험으로 현장모형실험에서의 HRT변화에 따른 변화를 살펴보았다.

Table 10에는 본 현장모형실험의 운전기간 동안의 원수, 혐기/무산소조, InSub조에서의 온도, pH, ORP 그리고 DO를 나타내었다.

Table 10. Temperature, pH, ORP and DO during operation period

Items	Influent	Anaerobic/Anoxic reactor	InSub reactor
Temp.(°C)	*19.5~23.6 (20.9)	20.9~27.3 (22.8)	20.5~28.7 (23.7)
pH	6.9~7.8 (7.2)	7.0~7.7 (7.3)	6.0~8.1 (7.2)
ORP(mV)	-263.4~-126.7 (-201.8)	-439.1~-313.5 (-357.1)	-225.2~-76.7 (-148.2)
DO(mg/L)	0.90~1.88 (1.40)	0.00~0.12 (0.03)	4.61~7.39 (6.01)

* Minimum~Maximum (Average)

부유물질과 유기물질 그리고 영양물질의 유입 · 유출농도 및 제거효율을 아래에 나타내었다.

(1) SS농도 변화 및 제거효율

부록에 나타낸 Fig. 68~Fig. 71은 각각의 HRT에 따른 원수와 혐기/무산소조 그리고 InSub조 배출수 농도 및 제거효율을 나타내었다. 실험은

HRT 10hr로부터 시작하여 점차 HRT를 낮추는 방법으로 실험을 행하였으며, InSub system에 미생물을 식종한 후 정상상태에 도달한 날부터 sampling을 하였다. 또한 예비실험을 통하여 10일이 경과 후 역세를 행하여야 하는 것을 미리 파악하여 운전을 시작하여 10일째 날에 역세를 행하였다. HRT 10hr인 경우 초기 SS 배출농도는 1.0mg/L로 낮은 농도로 나타났으며 평균 3.10mg/L로 제거효율은 93.58%로 나타났다. 또한 HRT 9hr에서의 SS 초기배출농도는 0.5mg/L로 아주 낮은 농도로 나타났고 평균 1.46mg/L로 제거효율은 96.98%로 가장 좋은 효율을 나타냈다. HRT 8hr와 7hr인 경우에도 배출수농도가 2.83mg/L와 3.83mg/L로 제거효율은 각각 94.14% 및 92.07%로 모든 조건에서 높게 나타났다. 이처럼 모든 운전조건에서 높은 제거효율을 나타내는 반면에 본 실험과 같이 침지형 생물막 반응기를 이용한 이(2002) 등의 연구에서와 권(2003) 등에 의한 pilot plant에서의 운전과 비교 시 많은 차이가 있음을 알 수 있었다. 또한 HRT의 변화에 따른 실험에서 최적의 조건에서의 물질수지에 대하여 Fig. 58에 나타내었다. 세포의 증식과 관련해서 동력학적 상수 K (Maximum specific substrate removal rate; 반응속도상수, h⁻¹)와 K_s (Half-velocity constant; 반속도상수, mg/L)결정은 유입수 및 무산소조/혐기조 유출수, 그리고 InSub조에서의 배출수에 대하여 아래의 식들을 이용하여 산출하였다.

$$-\frac{KXS}{K_s + S} = \frac{S_0 - S}{\theta} \quad (25)$$

식 25에서 θ 를 t 로 바꾸고 직선 형태를 취하면 식 26과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{tX}{S_0 - S} = \frac{K_s}{K} \frac{1}{S} + \frac{1}{K} \quad (26)$$

따라서 식 26식을 이용하여 일차방정식을 산출하여 K 및 K_s 값을 산출하면

혐기/무산소조에서는 각각 0.07 hr^{-1} 및 24.2 mg/L 이었으며, InSub조에서는 각각 0.3 hr^{-1} 및 1.3 mg/L 이었다. 이러한 값으로부터 물질수지식을 살펴보면 생물막법의 특징인 슬러지 발생량 즉 잉여슬러지가 다른 타 공법에 비해 현저히 떨어짐을 알 수 있었다.

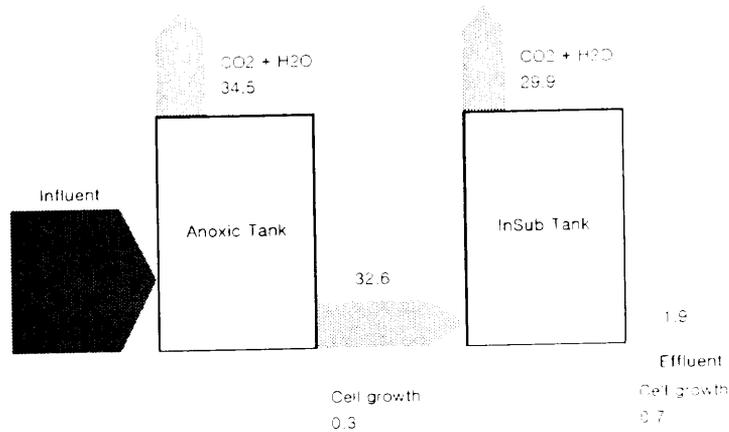


Fig. 58. Material balances for SS at 9hr of HRT.

또한 국내에서 개발된 생물여과법의 신공법들(Table 11)에 비해서도 InSub system은 아주 높은 제거효율을 나타냄을 알 수 있었다. 이는 InSub 장치에서의 장점으로써 포기에 의해 형성된 내부관에서의 상승류에 의해 내부순환이 일어나게 되고 이러한 내부순환으로 인해 외부의 침지생물막에 의해 반복 제거됨으로써 높은 제거효율을 나타내는 것으로 사료된다.

Table 11. The removal efficiency and SS, organic material and nutrient substrate concentrations of influent and effluent on the new advanced sewage treatment processes in korea

Company	Items	Concentration(mg/L)		Removal efficiency (%)
		Influent	Effluent	
HD (HRT:11.31hr)	SS	192.6	5.0	97.4
	BOD	122.3	6.1	95.0
	COD _{Mn}	65.7	8.8	86.6
	T-N	37.9	8.4	77.9
	T-P	4.0	0.6	83.8
H (HRT:13.55hr)	SS	160.7	3.0	97.4
	BOD	146.9	4.1	96.5
	COD _{Mn}	72.0	8.1	88.7
	COD _{Cr}	265.5	19.5	91.4
	T-N	27.5	8.3	65.4
	T-P	4.0	0.3	90.7
K (HRT:9.54hr)	SS	147.1	2.2	98.0
	BOD	104.5	2.8	96.7
	COD _{Mn}	65.4	8.1	87.6
	T-N	29.5	7.7	70.2
	T-P	3.7	0.6	80.1
S (HRT:8.95hr)	SS	113.4	6.4	91.2
	BOD	101.4	5.7	93.4
	COD _{Mn}	54.9	9.2	82.5
	T-N	27.4	9.1	63.4
	T-P	3.3	0.9	67.8
SM (HRT:13.79hr)	SS	66.4	10.3	80.3
	BOD	69.1	6.2	89.6
	COD _{Mn}	33.5	9.9	68.1
	T-N	23.0	11.6	44.5
	T-P	2.2	1.1	49.1

(2) 유기물농도 변화 및 제거효율

부록의 내용중 Fig. 82~Fig. 89는 HRT에 따른 유기물질 농도 및 제거효율을 알아보기 위해서 원수와 혐기/무산소조 그리고 InSub조의 배출수에 대한 BOD₅와 COD_{Mn}농도 및 제거효율을 나타내었다.

각 항목에 대한 각 조의 배출수 농도 및 제거효율에 대해서 살펴보면 BOD₅인 경우 7.09mg/L 및 90.59%이고 COD_{Mn}인 경우 9.84mg/L 및 77.18%로 나타났다. HRT 10hr에 대해서는 BOD₅의 경우, 9.05mg/L 및 87.99%로 COD_{Mn}인 경우 13.78mg/L 및 68.04%로 나타났다. 그리고 HRT 8hr에 대해서는 BOD₅의 경우, 8.79mg/L 및 88.33%로 COD_{Mn}인 경우 10.72mg/L 및 75.14%로 나타났으며, 또한 HRT 7hr에 대해서는 BOD₅인 경우 13.05mg/L 및 82.68%로 COD_{Mn}인 경우 13.01mg/L 및 69.83%로 나타내고 있다. 여기서 보면 HRT 9hr와 8hr은 비교적 유사하게 나타난 것에 비하여 10hr와 7hr에서의 제거효율은 상대적으로 낮음을 알 수 있었다. 가장 높은 제거율을 보이는 HRT 9hr에서 식 26을 사용하여 BOD₅ 및 COD_{Mn}성분에 대하여 K 및 K_s값을 계산하여 각 물질에 대한 물질수지를 Fig. 59 및 Fig. 60에 나타내었다. 여기에서도 마찬가지로 슬러지 발생량은 현저히 낮게 나타났다.

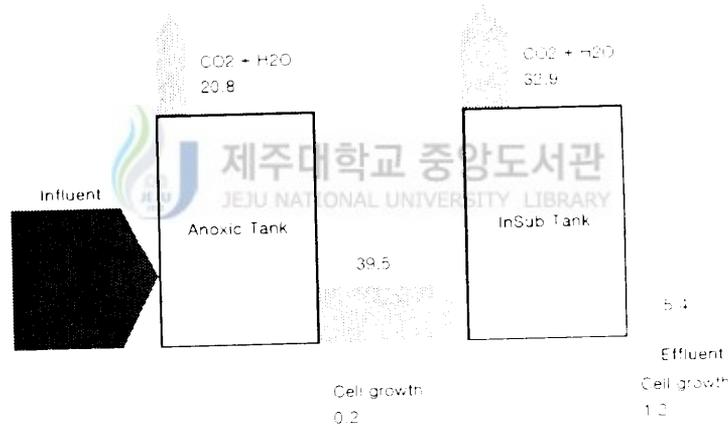


Fig. 59. Material balances for BOD₅ at 9hr of HRT.

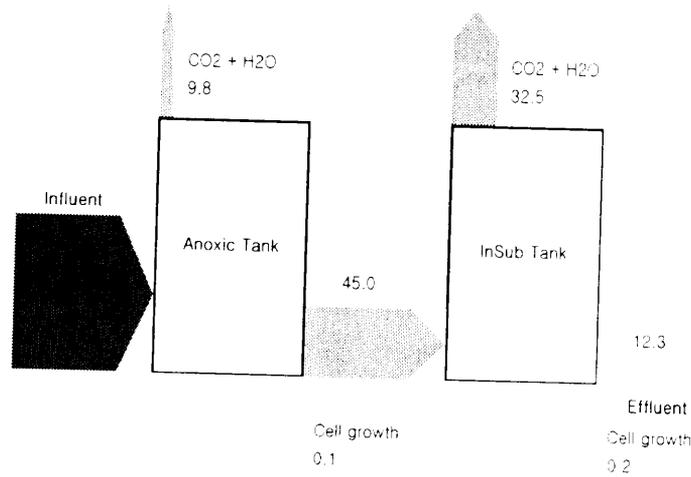


Fig. 60. Material balances for COD_{Mn} at 9hr of HRT.

한편, Table 11에서의 우리나라 신기술들에 비해 InSub system에서의 제거효율이 조금 낮게 나타나고 있는데, 이는 원수의 BOD/T-N비와 BOD/T-P비가 각각 1.9와 27.8로 유기물질에 비해 영양물질의 농도가 상대적으로 높기 때문에 유기물질 제거율이 낮은 것으로 사료된다.

(3) 질소농도 변화 및 제거효율

질소를 처리함에 있어서 생물학적으로 질소를 제거하는 경우, 하수중의 NH_4^+-N 가 호기성(aerobic) 상태에서 미생물에 의해 생물학적으로 질산화(nitrification) 되었다가 다시 무산소 상태에서 탈질화(denitrification) 반응이 일어나 질소화합물이 N_2 로 환원됨으로써 이루어진다. 본 실험에 사용된 InSub system은 이러한 질산화와 탈질화를 이룰 수 있도록 설계된 것으로써 상부 및 Media 표면에서는 질산화가 일어나고 하부 및 Media 내부에서는 탈질화가 일어날 수 있도록 설계하였다. 본 연구에서는 무산소·호기조건을 교차시켜서 유기물과 질소를 동시에 제거할 수 있는 system으로써 HRT에 따른 실험조건에서는 내부반송을 하지 않았기 때문에 제거효율이

높지 않게 나타나고 있지만 생물막공법의 장점인 혐기·호기 조건이 동시에 한 반응조내에 존재하기 때문에 내부반응이 없는 활성슬러지공법에 비해 제거효율이 높게 나타나고 있는데, 부록에서의 Fig. 90~Fig. 93은 원수, 무산소조 및 InSub조 배출수의 T-N 농도와 제거효율을 나타냈으며, 최적의 HRT에서의 T-N 성분에 대하여 물질수지를 Fig. 61에 나타내었으며, 위에서와 마찬가지로 슬러지 발생량이 현저히 낮게 나타났으며 혐기/무산소조에서의 슬러지발생량이 SS 또는 유기물에 비해 더욱 낮게 나타났다.

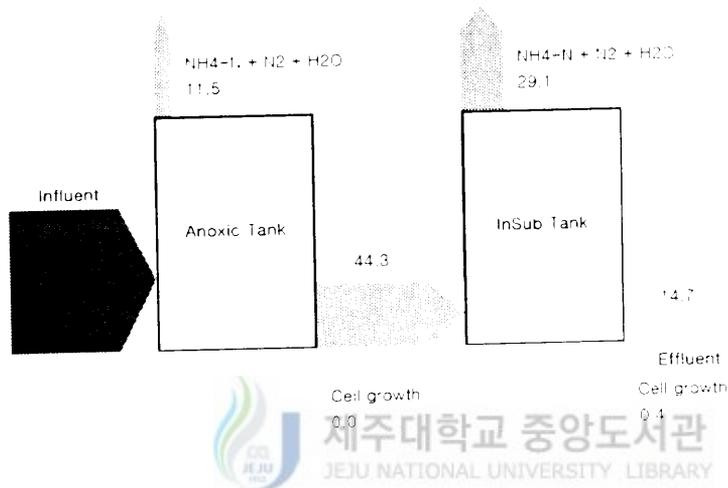


Fig. 61. Material balances for TN at 9hr of HRT.

T-N의 배출수농도 및 제거효율을 살펴보면, HRT 10hr에서는 각각 21.25mg/L 및 0.93mg/L로 45.72%, 94.25%의 제거율, HRT 9hr에서는 내부반응이 없는 조건에서도 각각 10.42mg/L 및 4.08mg/L로 73.38%와 74.75%의 비교적 높은 제거율을 나타냈으며, 8hr인 경우 17.13mg/L 및 6.64mg/L로 제거율은 56.25%, 58.91%였고, 7hr인 경우 19.44mg/L와 7.56mg/L의 배출수 농도로 50.34% 및 53.22%로 나타났다. 한(1999)과 강(2002)등에 의하면 질산화가 탈질화에 비해 상대적으로 높은 경우 유기물 제거 및 T-N 제거율이 낮아짐을 알 수 있었으며, 본 연구에서도 HRT가 10hr인 경우 유기

물 제거 및 T-N제거율이 낮아지는 결과를 보였다. 또한 Jeill Oh 등(1999)에 의하면 아질산염이 축적은 탄소원이 부족하였을 경우 발생한다고 하였으며, 본 연구에서도 HRT 10hr에서 이와 유사한 현상을 보였다. 따라서 T-N 및 유기물질의 제거에는 HRT가 중요한 영향인자임을 알 수 있었다.

(4) T-P농도 변화 및 제거효율

T-P의 경우 HRT 10hr에 대해서 배출수 농도와 제거율은 각각 1.70mg/L 및 37.27%로 낮은 제거율을 나타난데 비해, 9hr인 경우는 1.04mg/L 및 61.62%로 다소 높은 제거율을 보였다. 8hr인 경우 1.50mg/L 및 44.65%, 7hr인 경우 1.68mg/L 및 38.01%로 HRT가 짧아짐에 따라 점차 낮은 제거율을 나타냈다.

생물학적으로 인을 제거하는 원리는 혐기과정에서 방출(phosphorus release)한 인을 호기과정에서 미생물 세포 내로 섭취(phosphorus uptake)하여 인을 잉여슬러지 형태로 배출시킴으로서 제거하게 된다.

인 방출 및 섭취에 관여하는 영향인자로는 유기물의 농도, DO 및 NO_3^- -N의 농도, pH, ORP(oxidation reduction potential), 온도, SRT 등으로 알려져 있다. T-P의 제거효율은 HRT가 증가함에 따라 조금씩 증가하고 있지만 매우 낮은 제거효율을 나타내었다. 또한 HRT 10hr에서는 오히려 제거효율이 떨어지는 경향을 보였다. 이는 본 실험에 사용된 InSub system이 상부 및 Media 표면에서는 질산화가 일어나고 하부 및 Media 내부에서는 탈질화가 일어나도록 하여 질산화와 탈질화가 동시에 수행되어지도록 설계하였으나, 질산화과정에서 생성되어 탈질을 통해 제거되지 못하고 반응조 내에 잔존하는 산화질소의 영향으로 인의 방출이 저해된 것으로 사료된다(Vacher and Connell, 1967). 따라서 인 제거 방해요소인 산화질소를 제거하기 위해 내부관 공탑속도의 조절 또는 별도의 침전지를 설치함과 아울러 무산소조로의 내부반송을 통한 생물학적 탈질이 병행될 경우 더 높은 인제거가 기대된다.

Fig. 62는 T-P성분에 대한 물질수지를 나타냈으며, 특히 혐기/무산소조 및

InSub조에서의 슬러지 발생량이 현저히 떨어지는 것을 알 수 있었는데 이는 혐기/무산소조에서는 인성분을 에너지원으로 사용하고 InSub조에서는 세포내에 저장하거나 소모하는 형태를 보여주는 것으로 사료된다.

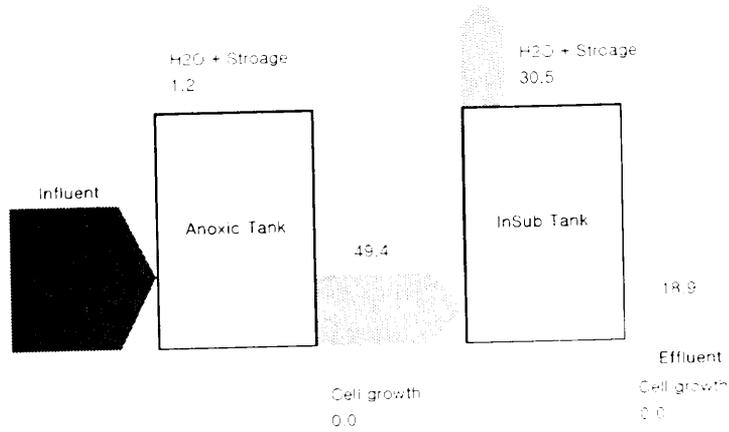


Fig. 62. Material balances for TP at 9hr of HRT.

또한 Table 11에서 우리나라 신공법들의 영양염류 제거효율은 InSub system에 비해 대체로 높게 나타나고 있으나 InSub system에서의 내부환 공탑속도의 조절 또는 별도의 침전지를 설치함과 아울러 무산소조의 내부반송을 통한 생물학적 탈질이 병행될 경우 더 높은 인제거가 기대된다.

2) 내부관 공탐속도 변화에 따른 영향

본 연구에서는 하수고도처리장치로서 InSub공정과 혐기/무산소공정을 결합시켜 자체개발한 InSub system의 상용화를 위한 두 번째 단계 실험으로 현장모형실험에서의 내부관 공탐속도 변화에 따른 영향을 살펴보았다.

Table 12는 본 현장모형실험의 운전기간 동안의 원수, 혐기/무산소조, InSub조에서의 온도, pH, ORP 그리고 DO를 나타내었다.

Table 12. Temperature, pH, ORP and DO during operation period

Items	Influent	Anaerobic/Anoxic reactor	InSub reactor
Temp.(°C)	17.1~19.3 (18.2)	18.9~23.5 (21.2)	18.2~22.3 (20.2)
pH	6.8~7.8 (7.3)	6.9~7.7 (7.3)	6.4~7.7 (7.1)
ORP(mV)	-251.9~-118.2 (-185.1)	-402.3~-309.4 (-355.8)	-208.5~-84.6 (-146.5)
DO(mg/L)	0.78~1.69 (1.24)	0.00~0.14 (0.05)	3.25~6.48 (4.87)

* Minimum ~ Maximum (Average)

(1) SS농도 변화 및 제거효율

부록의 Fig. 78~Fig. 81은 각각의 내부관 공탐속도에 따른 원수와 혐기/무산소조 그리고 InSub조 배출수 농도 및 제거효율을 나타내었다. 실험은 내부관 공탐속도 6.37m/min으로 부터 시작하여 점차 내부관 공탐속도를 낮추는 방법으로 실험을 행하였으며, 정상상태에 도달한 날부터 sampling을 하였다. 이때 초기 SS 배출농도는 0.5mg/L로 낮은 농도로 나타났으며 평균 1.46mg/L로 제거효율은 96.98%로써 가장 높게 나타났다. 또한 내부관

공탑속도 3.82m/min에서의 SS 초기배출농도는 평균 5.0mg/L로 제거효율은 89.5%로 나타났다. 내부관 공탑속도 3.18m/min과 2.55m/min인 경우에도 배출수농도가 5.1mg/L과 3.8mg/L로 제거효율은 각각 94.5% 및 94.9%로 모든 조건에서 높게 나타났다. 이처럼 모든 운전조건에서 높은 제거효율을 나타내는 반면에 본 실험과 같이 침지형 생물막 반응기를 이용한 이(2002) 등의 연구에서와 권(2003) 등에 의한 pilot plant에서의 운전과 비교 시 많은 차이가 있음을 알 수 있었다. 그리고 최적의 내부관 공탑속도에서의 SS에 대해서 물질수지를 Fig. 63에 나타내었으며, 본 실험에서도 앞서서의 실험결과와 마찬가지로 슬러지 발생량은 현저히 떨어짐을 알 수 있었다.

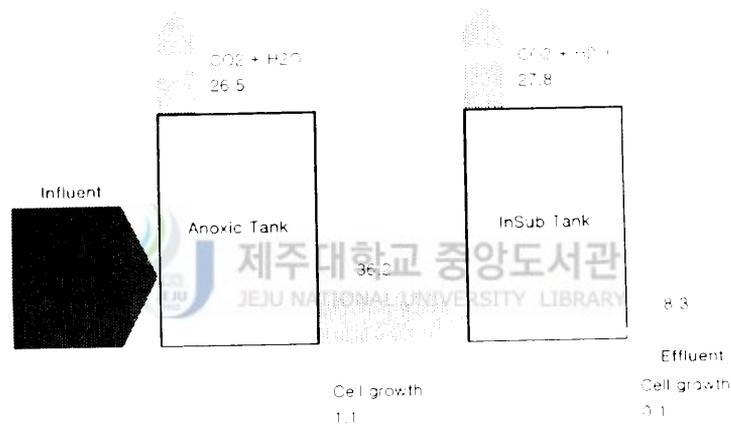


Fig. 63. Material balances for SS at 3.82m/min of SV.

(2) 유기물농도 변화 및 제거효율

부록 내에 Fig. 82~Fig. 89는 내부관 공탑속도에 따른 유기물질 농도 및 제거효율을 알아보기 위해서 원수와 혐기/무산소조 그리고 InSub조의 배출수에 대한 BOD와 COD_{Mn} 농도 및 제거효율을 나타내었다.

가장 높은 제거율을 보이는 내부관 공탑속도 3.82m/min에서의 각 항목에

대한 각 조의 배출수 농도 및 제거효율에 대해서 살펴보면 BOD₅인 경우 2.0mg/L 및 92.1%이고 COD_{Mn}인 경우 9.6mg/L 및 89.7%로 나타났다. 내부관 공탑속도 6.37m/min에 대해서는 BOD₅의 경우, 7.1mg/L 및 90.6%로 COD_{Mn}인 경우 9.8mg/L 및 77.2%로 나타났다. 그리고 내부관 공탑속도 3.18m/min에 대해서는 BOD₅의 경우, 9.0mg/L 및 89.2%로 COD_{Mn}인 경우 17.6mg/L 및 78.8%로 나타났다. 또한 내부관 공탑속도 2.55m/min에 대해서는 BOD₅인 경우 10.0mg/L 및 88.2%로 COD_{Mn}인 경우 18.40mg/L 및 74.8%를 나타내고 있다. 여기서 보면 모든 조건에서의 내부관 공탑속도에 대하여 비교적 유사하게 나타나는 것으로 보아 유기물질 제거에 대해서는 내부관 공탑속도에 크게 영향을 받지 않는 것으로 사료된다. 그리고 최적의 내부관 공탑속도에서의 물질수지를 유기물에 대하여 Fig. 64 및 Fig. 65에 나타내었으며 슬러지 발생량이 상당히 적다는 것을 보여주고 있다.

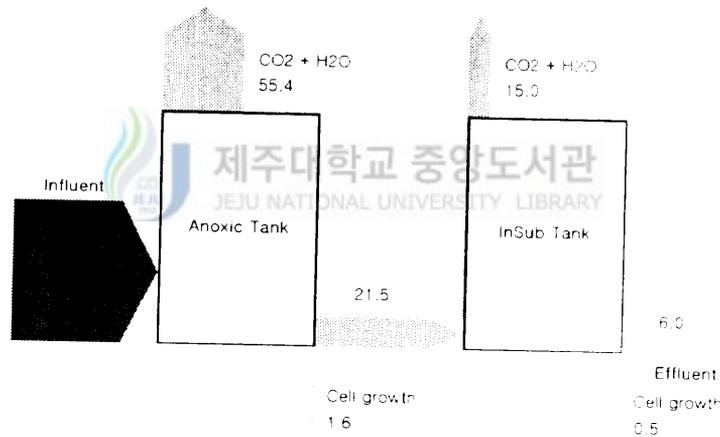


Fig. 64. Material balances for BOD₅ at 3.82m/min of SV.

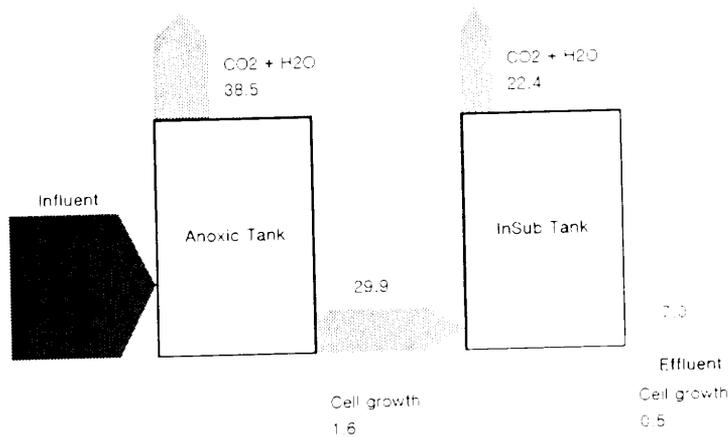


Fig. 65. Material balances for COD_{Mn} at 3.82m/min of SV.

(3) 질소농도 변화 및 제거효율

질소를 처리함에 있어서 생물학적으로 질소를 제거하는 경우, 하수중의 NH₄⁺-N가 호기성(aerobic) 상태에서 미생물에 의해 생물학적으로 질산화(nitrification) 되었다가 다시 무산소 상태에서 탈질화(denitrification) 반응이 일어나 질소화합물이 N₂로 환원됨으로써 이루어진다. 본 실험에 사용된 InSub system은 이러한 질산화와 탈질화를 이룰 수 있도록 설계된 것으로서 상부 및 Media 표면에서는 질산화가 일어나고 하부 및 Media 내부에서는 탈질화가 일어날 수 있도록 설계하였다. 본 연구에서는 무산소·호기조건을 교차시켜서 유기물과 질소를 동시에 제거할 수 있는 system으로써 생물막공법의 장점인 혐기·호기 조건이 동시에 한 반응조내에 존재하기 때문에 내부반응이 없는 활성슬러지공법에 비해 제거효율이 높게 나타나고 있으며, Fig. 100~Fig. 103에는 원수, 무산소조 및 InSub조 배출수의 T-N 농도와 제거효율을 나타냈다. 그리고 최적의 조건에서의 질소에 대하여 물질수지를 Fig. 66에 나타내었다. 본 실험조건에서의 물질수지식을 살펴보면 앞의 최적의 수리학적 체류시간에 따른 실험결과와 비교하면 무산

소/혐기조에서의 슬러지발생량이 높게 나타났는데 이는 유입수중에 산화질소가 상대적으로 많이 유입됨으로써 탈질산화균이 증식함으로써 나타난 결과로 사료된다.

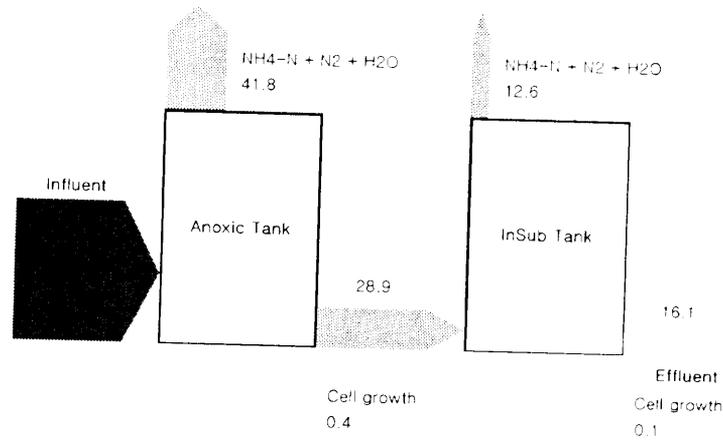


Fig. 66. Material balances for TN at 3.82m/min of SV.

T-N의 배출농도 및 제거효율을 살펴보면, 내부관 공탑속도 6.37m/min에서는 각각 10.4mg/L로 73.4%의 제거효율을 나타냈으며, 내부관 공탑속도 3.82m/min에서는 각각 5.5mg/L로 77.3%의 높은 제거효율을 나타냈으며, 3.18m/min인 경우 6.8mg/L로 제거효율은 65.7%였으며, 2.55m/min인 경우 7.1mg/L의 배출수 농도로 73.0%로 나타났다. 그림에서 보면 수리학적체류시간에 비하여 대체적으로 높은 제거효율을 나타내고 있는데, 이는 질소의 제거에 있어서 수리학적 체류시간에 비하여 내부관 공탑속도가 더욱 중요한 인자라는 것을 알 수 있었다.

(4) T-P농도 변화 및 제거효율

T-P의 경우 내부관 공탑속도 6.37m/min에 대해서 배출수 농도와 제거율은 각각 1.0mg/L 및 61.6%로 높은 제거효율을 나타냈으며, 3.82m/min인 경우는 1.3mg/L 및 45.2%의 제거효율을 보였다. 3.18m/min인 경우

1.90mg/L 및 38.1%, 2.55m/min인 경우 2.76mg/L 및 33.0%로 내부관 공탑 속도가 낮아짐에 따라 점차 낮은 제거율을 나타냈다.

결국 인의 경우에는 질소의 제거와는 반대로 내부관 공탑속도의 변화에 영향을 받으나 수리학적 체류시간에 더욱 영향을 받는 것으로 나타났다.

그리고 Fig. 67은 최적의 SV에서 T-P성분에 대하여 물질수지를 나타낸 것으로써 앞의 적정 수리학적 체류시간에서의 실험결과와 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

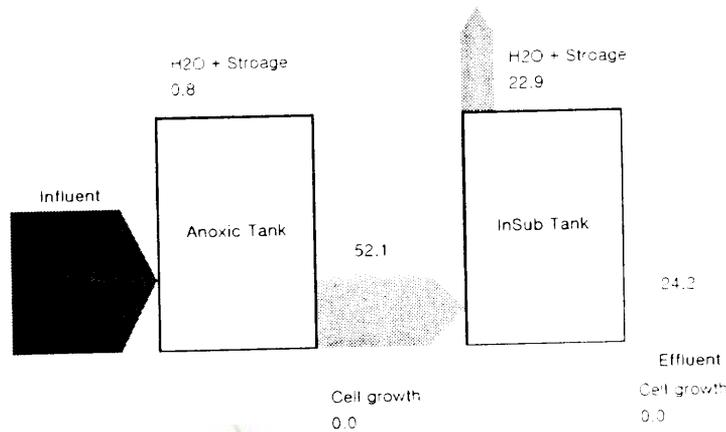


Fig. 67. Material balances for T-P at 3.82m/min of SV.

3) Pilot plant 운전 중 발생한 미생물 특성

Pilot plant 운전 중 발생한 미생물중 눈에 띄는 미생물은 아래의 사진과 같이 *Aeolosoma*속과 *Haliscomenobacter hydrossis* 이었다. *Aeolosoma*속은 *Aeolosomatidae*과에 속하고, 크기는 1mm 내외이며 피하에 홍색, 황색, 녹색 등을 띠는 유적(기름방울)을 함유하고 있는 미생물로서 생물처리에 출현하는 *A.hemprichi*는 유적이 홍색이므로 타종과의 식별은 용이하였다. 먹이원으로서 세균류, 미소동물을 주로 섭식한다고 알려진 본 속은 장시간 포기하는 활성오니와 생물막에 주로 출현한다. 본 속이 우점화하면 활성오

니는 붉은 빛을 띄며, 활성슬러지 1ml당 1,000개 출현할 때 처리수 BOD는 10mg/l 이하, SVI는 100 이하로 오니의 압밀성은 높으며, 다른 미소동물과 공존하면 양호한 수질이 얻어진다고 보고 되고 있으나 본 실험에서는 유출수중에 동시에 유출됨으로써 수질을 악화시키는 경향을 보였다. 본 속은 활성오니와 생물막에서 종종 다량으로 출현하는데 이 경우 질산화는 충분히 진행됨을 알려주는 지표로 사용될 수 있으며, Arcella속, Carochesium속, Macrobiotus속 등이 동시에 관찰되는 경우가 많다고 보고 되었다.

*Haliscomenobacter hydrossis*는 사상균으로써, 유기물 부하가 낮은 활성슬러지에서 관찰되는 일이 있으며, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 질소원으로 이용하고 유기체의 질소원으로 증식이 촉진된다고 알려져 있으며, 활성슬러지공정의 침전조에서 침전을 방해함으로써 배출수의 수질을 악화시킨다고 보고되고 있으며 사상균이 반응조에 발생할 경우 액체순환속도를 감소시키는 결과를 초래하나 본 실험에서는 배출수의 수질에 크게 영향을 주지 않았다.



Photo 6. photograph of *Aeolosoma* genus microorganism and *Haliscomenobacter hydrossis* that generated in Pilot plant

4. 결론

본 연구에서는 간접포기형침지생물막여과(Indirectly Aerated Submerged Biofiltration ; InSub)공정과 혐기/무산소(Anaerobic/Anoxic)공정을 결합시켜 자체 개발한 InSub system으로써, 기존의 복잡하고 다단계인 system들에 비해서 보다 공정을 단순화한 하수고도처리 system으로서 상용화를 위한 실험으로, 현장모형실험에서의 수리학적 체류시간(HRT)과 내부관 공탑속도(SV)의 변화에 따른 유기물 및 질소, 인의 제거 특성은 다음과 같다.

1. 각각의 HRT에 따른 SS농도 및 제거효율을 살펴보면 모든 운전조건에서 평균 3.83mg/L이하로 유지되었고, 제거효율은 92.1%이상으로 나타났으며, 내부관 공탑속도에 따른 SS농도 및 제거효율은 7.1mg/L이하로 나타났으며, 제거효율은 89.5%이상으로 나타났다.
2. 유기물의 제거효율은 각 HRT에 대하여 비슷하게 나타나고 있으나 HRT 9hr에서 가장 높은 제거효율을 나타내었으며, 또한 내부관 공탑속도의 변화에 따른 유기물 제거효율 또한 모든 운전조건에서 비슷하게 나타나고 있으며, 그중 내부관 공탑속도가 3.82m/min일 경우가 가장 높은 제거효율을 보였다.
3. 수리학적체류시간에 대한 영양염류의 제거효율에서는 T-N과 T-P가 비슷한 경향을 나타내었으며 HRT 9hr에서 가장 높은 제거효율을 나타내었다. 그리고 내부관 공탑속도변화에 따른 T-N의 경우 내부관 공탑속도가 3.82m/min일 때, 그리고 T-P의 경우는 내부관 공탑속도가 6.37m/min일 경우에 가장 좋은 제거효율을 나타내었다.
4. 본 연구의 범위에서의 적정 HRT는 9hr으로 나타났으며, 각각의 배출수 농도 및 제거효율을 살펴보면, SS 1.46mg/L 및 96.98%이며, BOD₅,

COD_{Mn} 및 COD_{Cr}에 대해서 각각의 배출농도는 7.09mg/L, 9.84 mg/L 및 16.42mg/L이고, 제거효율은 90.59%, 77.18% 및 83.92%로 나타났으며, 영양염류에 대한 T-N 및 T-P의 배출농도는 10.42mg/L 및 1.04mg/L이고 제거효율은 73.38% 및 61.62%로 나타났으며, 내부관 공탐속도변화에 따른 영향에서는 3.82m/min과 6.37m/min이었을 경우에 가장 높은 제거효율을 나타내었다.

5. 본 현장모형실험결과는 내부반송이 없는 상태에서도 HRT의 변화와 내부관 공탐속도의 변화에 따른 결과로써 고도처리system으로서 성능이 우수하며, 이후 이보다 더 높은 제거효율을 요구할 시에는 별도의 침전지를 설치하지 않고 역세주기를 짧게 유지하면서 내부반송을 하여야 한다.



VI. 종합 결론

본 연구에서는 간접포기형이라는 특수반응조를 개발하고, 침지생물막을 이용하여 고농도 생물막을 형성시켜 충격부하에의 대응력을 갖도록 하여 package화된 침단 오·폐수고도처리기술로써 간접포기형침지생물막여과(InSub ; Indirectly Aerated Submerged biofiltration)시스템을 개발하고자 연구를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. InSub 장치만에 의한 오수중 유기물 및 질소·인의 동시제거 가능성을 실험실적 모형실험에서 확인할 수 있었으나, 보다 높은 질소·인의 제거를 위해서는 선탈질에 의한 산화질소의 제거를 위해 무산소, 호기조 등을 조합하는 System으로의 일부변경이 필요함을 확인할 수 있었다.
2. InSub에서의 내부관 공탑속도의 증가에 따라 액의 순환속도 및 시간이 증가되나, 특히 내부관 공탑속도가 보다 큰 경우에 예측치가 실측치보다 낮게 계산되었으며, 이에 따라 계산된 InSub pilot plant에서는 내부관 공탑속도가 2.54~6.27m/min의 범위에서 액의 순환시간이 36.2~24.5sec의 값이 도출되어 InSub조의 하강부하단에서는 부분적인 DO의 고갈지역이 존재될 수 있을 것으로 판단되었다.
3. 적정의 반응기별 체류시간은 무산소조 4hr, InSub조 5hr로 나타났으며, 내부반송에 따른 실험에서는 내부반송을 하였을 경우 역세주기를 짧게 운전하여야 양호한 수질을 얻을 수 있음을 알 수 있었으며, 역세주기를 짧게 하면서 운전하였을 경우 적정 내부반송율은 100%이었다.
4. 현장모형실험에서는 적정 HRT로 9hr로 나타났으며, 적정 SV(내부관공탑속도)는 3.82m/min으로 나타났다.
5. 현장모형실험은 내부반송이 없는 상태에서도 HRT의 변화와 내부관 공

답속도의 변화에 따른 결과로써 고도처리system으로서 성능이 우수하며, 이후 내부반송조건을 결합시켰을 때, 보다 효율 높은 고도처리 system이 될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 본 연구 이후에도 InSub system의 상용화를 위해서 보다 높은 탈질 및 탈인화에 대한 동력학적 연구 및 내부반송조건의 변화 등에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 될 것이다.



VII. 참고문헌

- A. B. Russell, C. R. Thomas, M. D. Lilly, 1994, The influence of vessel height and top-section size on the hydrodynamic characteristics of airlift fermentors., *Biotechnology and Bioengineering*, 43(1) pp. 69~76
- Argyrios Margaritis, John D. Sheppard, 1981, Mixing time and oxygen transfer characteristics of double draft tube airlift fermentor., *Biotechnology and Bioengineering*, 23(9) pp. 2117~2135
- Bello, R. A., 1981, PHD Thesis, University of Waterloo, Ontario., A characterization study of airlift contactors for applications to fermentations.
- Bello, R. A., Robinson, C. W. and Moo-Young, M., 1984, Liquid Circulation and mixing characteristics of airlift contactors, *Can. J. of Chem. Eng.*, 62, pp. 573~577.
- Bello, R. A., Robinson, C. W. and Moo-Young, M., 1985, Gas holdup and overall volumetric oxygen transfer coefficient in airlift contactors., *Biotechnol Bioeng.*, 27, 369~381.
- Buchholz, R., K.Franz and U.Onken, 1982, Development of a directionally characteristic measuring technique for determining the turbulent flow structure in multiphase flow., *Chem. Eng. Tech.*, 54, pp. 608~609.
- Chisti, M. Y., Halard, B. and Moo-Young, M., 1984, Liquid circulation in airlift reactors., *Chem. Eng. Sci.*, Vol 43, No.3, pp. 451~457
- Chisti, M. Y., and Moo-Young, M., 1986, Paper 117a presented at the AICHE Annual Meeting, Miami Beach, 2-7 November. Hydrodynamic and oxygen mass transfer studies in bubble columns and airlift bioreactors; Chisti, M. Y., Fujimoto, K.,

- and Moo-Young, M., 1987, Hydrodynamic and oxygen mass transfer studies in bubble columns and airlift bioreactors., *Biotechnology Processes Scale-up and Mixing*, (Ho, C. S. and Oldshue, J. Y., editors), pp. 72~81.
- Chisti, Y., and Moo-Young, M., 1988, Prediction of liquid circulation velocity in airlift reactors with biological media., *J.Chem. Technol. Biotechnol.*, 42, pp. 211~219.
- Cooper, P. F., 1981, The use of biological fluidized beds for the treatment of domestic and industrial wastewater., *The Chemical Engineers.* pp. 373.
- 에스케이건설(주), 2002, "EPP(Expanded Poly-Propylene) 부상식 여재를 이용한 생물학적 하수 고도처리기술", 환경신기술지정서제45호, 환경관리공단
- Franz, K., T. Borner, H. J. Kantorek, and R. Buchholz, 1984, Flow structure in bubble column., *Ger. Chem. Eng.*, 7, pp. 365~374
- Hae Ill Lee, Kwang Soo Choi, Jeong Hoon Im, Joo Hyung Ko, Byong Hee Jun, Chang Won Kim, "Optimal Condition Estimation for Nitrification and Denitrification in Wastewater with Low COD/NH₄⁺-N and ALK./NH₄⁺-N Ratio using Submerged Biofilm Reactor", *J. of KSEE Vol. 24, No. 8 p. 1313~1323(2002)*
- Hatch, R. T., 1975, in *Single Cell Protein, II*, (Tannenbaum, S. R., and Wang, D.I.C., editors). The MIT Press(Cambridge), pp. 46~68. Fermentor design.
- Heijnen, J. J., Van Loosdrecht, M. C. M., Mulder, R., Weltevrede, R. and Mulder, A., 1993, Development and scale-up of an aerobic biofilm airlift suspension reactor., *Water Science and Technology*, 27(5-6), pp 253~261.

- 환경부, 2002, 환경신기술 소개집
- 해동이피씨(주), 2001, "DBS 공정을 이용한 하수 질소·인 제거 공법", 환경관리공단
- 현대산업개발(주), 블랙앤드비취인터내셔널코리아(유), 2001, "협기·무산소 공정의 유동적 변환에 의한 하수 중의 질소·인 제거기술 (HIBNR)", 환경신기술지정서제28호, 환경관리공단
- Hilla, J. H., 1976, The operation of a bubble column at high throughputs I. Gas holdup measurements., Chem. Eng. J., 12, pp. 89~99
- 이해일, 최광수, 임정훈, 고주형, 전병희, 김창원, 2002, "침적형 생물막 반응기를 이용한 COD/NH₄⁺-N비와 ALK./NH₄⁺-N비가 낮은 하수에서 질산화와 탈질을 위한 최적 조건 평가", 대한환경공학회지 24(8), pp. 1313-1323
- J. D. Bryers and W. G. Characklis, 1982, "Process Governing Primarry Biofilm Formation", Biotechnology and Bioeng., Vol. 14, pp. 2451~2476
- Jeill Oh and JoAnn Silverstein, Member, ASCE., 1999, Acetate limitation and nitrite accumulation during denitrification., J. ENVIRON. ENG., MARCH, EJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY
- Ji-Yong Han, Mock Huh, "Removal of nitrogen and phosphorus in sewage by change of operating conditions on SBR process", J. KSWQ June, p. 241~255(1999)
- J. M. Glvez, M. A. Gmez, E. Hontoria, J. Gonzlez-Lpez, "Influence of hydraulic loading and air flowrate on urban wastewater nitrogen removal with a submerged fixed-film reactor", J. Hazardous Materials, B101, p. 219~229, (2003)
- Jones, A.G., 1985, LiQuid circulation in a draft-tube bubble column., Chem. Eng. Sci., 40, pp. 449~462
- Joong Chun Kwon, Seo Yeon Moon, Chang Hwan Yang, Kwang Bo

- Shim, "Pilot Study of Nitrogen and Phosphorus Removal System in Municipal Wastewater using Upflow Multi-Layer Bio Reactor (KNR System)", J. of KSEE Vol. 25, No.1 p. 65~71(2003)
- J. Stephenson, "The Oligochaeta", p. 978, Oxford Clarendon press(1930)
- Kojima, E., H. Unno, Y. Sato, T. Chida, H. Imai, K. 뚜애, I. Inoue, J. Kobayashi, H.Kaji, H. Nakanishi and K. Yamamoto, 1980, Liquid phase velocity in a 5.5m diameter bubble column., Chem. Eng. Japan., 13, 16
- Kubota, H., Hosono, Y., and Fujie., 1978, Characteristic evaluation of ICI airlift type deep shape aerator., J.Chem.Eng.Jpn., 11, pp. 319~325
- 강진영, 2002, "SBR에서 양돈 폐수의 영양염류 제거시 교반/포기시간 비의 영향, 대한환경공학회지, Vol. 24, No. 1, pp. 171-180
- (주)경호엔지니어링 종합건축사무소, 2001, "혐기·무산소·호기 및 용존산소 저감조를 이용한 하수고도처리기술(KHBNR)", 환경신기술지정서제36호, 환경관리공단
- Keun-Hoo Lee and Dong-Sup Doh, 1993, Oxygen transfer in the external-loop airlift reactors with Ca-alginate gel beads., Journal of Korean Institute of Chemical Engineers Vol 31, No. 4, pp.395~402
- 권중천, 문서연, 양창환, 심광보, 2003, "상향류 다층 생물반응조를 이용한 하수의 질소·인 제거(KNR system) Pilot Plant 운전", 대한환경공학회지 25(1), pp. 65-71
- Kushalkar, K. B. and Pangarkar, V. G., 1994, Particle-liquid mass transfer in a bubble column with a draft tube., Chem. Eng. Sci., 49(1), pp. 139~149
- Lee, C.H., Glasgow, L.A., Erickson, L.E., and Patel, S. A., 1986, Liquid

- circulation in airlift fermenters; Lee, C. H., Glasgow, L. A., Erickson, L. W., and Patel, S. A., 1987, Liquid circulation in airlift fermenters. American Institute of Chemical Engineers(New York) pp. 50~59
- Margaritis, A., and Sheppard, J. D.,(1981), Mixing time and oxygen transfer characteristics of a double draft tube airlift fermenter., *Biotechnol. Bioeng.*, 23, pp. 2117~2135
- McCabe, W. L., and Smith, J. C., 1956, *Unit Operations of Chemical Engineering*, McGraw-Hill(New York), pp 151, 167
- Mock Huh, Boo-gil Kim, Jin-young Kang, "The effect of mixing/aeration time(M/A) ratio on removal of nutrient of swine wastewater by SBR", *J. of KSEE* Vol. 24, No. 1 p. 17 1~180(2002)
- M.P.Starretal.(eds.),*Theprocaryotes "A Handbookon Habitats, Isolation, and Identification of Bacteria"*, 1, 425, Springer(1981)
- Okubo.T., Okada. M., Murakami. A. and Inamori. Y., "Influence of daily variation of flow and pollution load on the performance of submerged anaerobic/aerobic biofilm system" , *water Sci. Technol.*, 22(3/4), pp. 153~160
- R. O. Brinkhurst, "Freshwater Biological Assossiation", 22, 1(1971)
- 삼성물산(주), 2001, "전무산소, 혐기, 간헐포기를 이용한 하수처리기술", 환경기술지정서제5호, 환경관리공단
- Shin, et al., 1991, " Enhanced nutrient removal porous biomass carrier sequencing batch", *wat. Sci. Tech.*, vol. 23, pp. 719
- Sutton. P. M. and Mishra. P. N., 1994, "Activative carbon based biological fluidized beds for contaminated water and wastewater treatment: a state of art review", *water Sci. Technol.*, 29(10-11), pp. 309~317
- Thanathom Vorapongsathorn, Porntip Wongsuchoto, Prasert Pavasant, 2001,

- Performance of airlift contactors with baffles., *Chemical Engineering Journal*, 84, pp. 551~556
- Ueyamam K. and T.Miyauchi, 1977, Behavior of bubbles and liquid in a bubble column., *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 3, pp. 19~23
- U.S. EPA, "Nitrogen Control" , Technomic Publishing Co., pp. 107, 1993.
- Vacher, D. and Connell, C.H., 1967, "Phosphate Removal Through Municipal Wastewater Treatment", *J. WPCF.*, vol. 39, pp. 751-771
- Wachi, S., A. G. Jones and T. P. Elson, 1991, Flow dynamics in a drafttube bubble column using various liquids., *Chem. Eng. Sci.*, 46 pp. 657~663
- W. A. M. Bakker, H. J. L. van Can, J. Tramper, C. D. de Gooijer, 1993, Hydrodynamics and mixing in a multiple air-lift loop reactor., *Biotechnology and Bioengineering*, 42(8) pp. 994~1001
- Weiland, P., and Onken, U., 1981, Differences in the behavior of bubble column and airlift loop reactors., *Ger. Chem. Eng.*, 4, pp. 174~181
- Weiland, P., 1984, Influence of draft tube diameter on operation behavior of airlift loop reactors., *Ger. Chem. Eng.*, 7, pp. 374~385
- Zakrzewski, W., J. Lippert, A. Lubbert, and K. Schugerl, 1981a, Investigation of structure of two-phase flow., Model media in bubble column bioreactors. IV. True liquid velocities and bubble velocity distributions., *Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 12, 69~75

NOMENCLATURE

U_{Gr}	SV based on riser	m/s
A_r	Riser cross-sectional area	m ²
A_b	Free area below draught-tube	m ²
A_d	Downcomer cross-sectional area	m ²
h_L	Un-aerated liquid height	m
U_{Lr}	Superficial liquid velocity in riser	m/s
ϵ	Overall gas holdup	-
ϵ_d	Gas holdup in the downcomer	-
ϵ_r	Gas holdup in the riser	-
K_B	Frictional loss coefficient	-
h_D	Gas-liquid dispersion height	m
HRT	Hydraulic retention time	hr
SRT	Sludge retention time	day
SV	Superficial velocity	m/min
F_N	nitrifier fraction	-
a_N	nitrifier yield coefficient	g VSS/gNH ₄ ⁺ -N
a	heterotrophs yield coefficient	g VSS/gBOD
A_r	ammonia nitrogen removed	mg/L
S_r	BOD removed	mg/L

APPENDIX

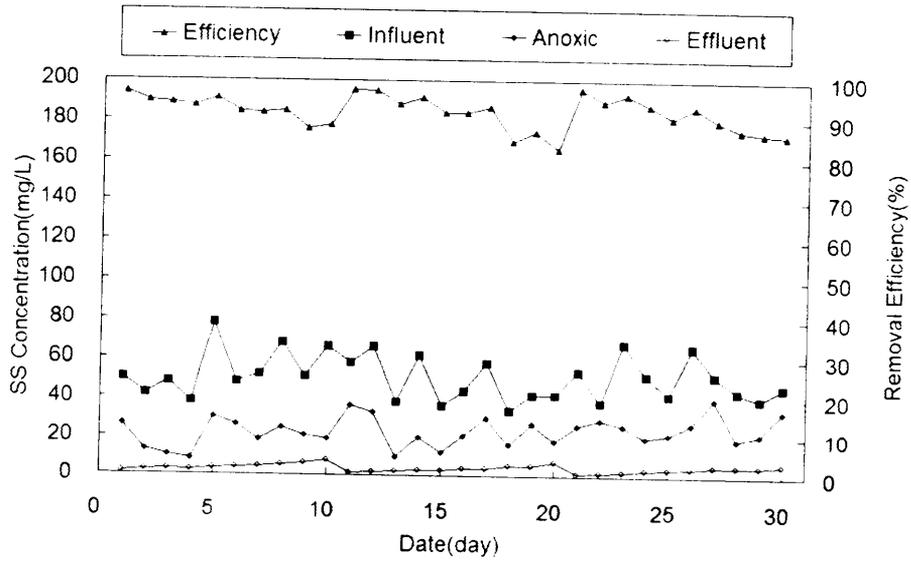


Fig. 68. The SS concentration on influent, anaerobic /anoxic and effluent and removal efficiency as HRT was 7hour.

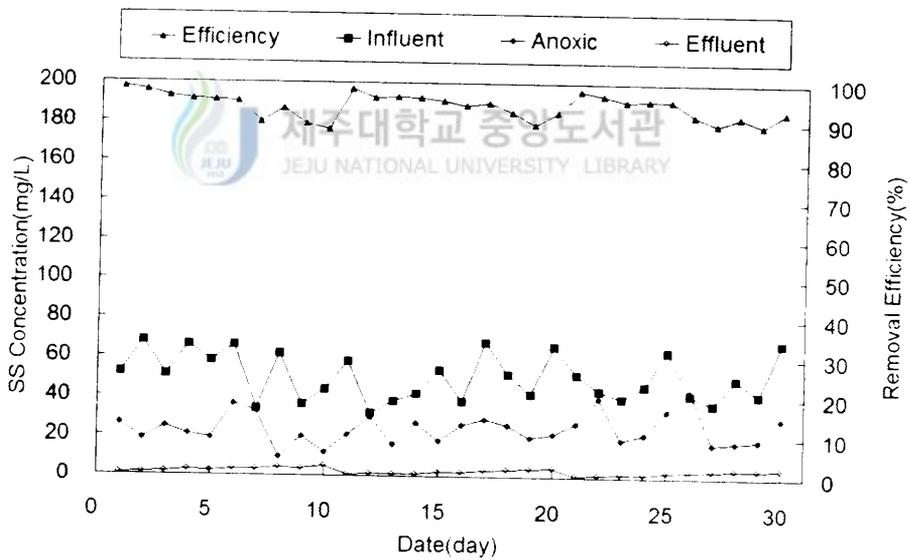


Fig. 69. The SS concentration on influent, anaerobic /anoxic and effluent and removal efficiency as HRT was 8hour.

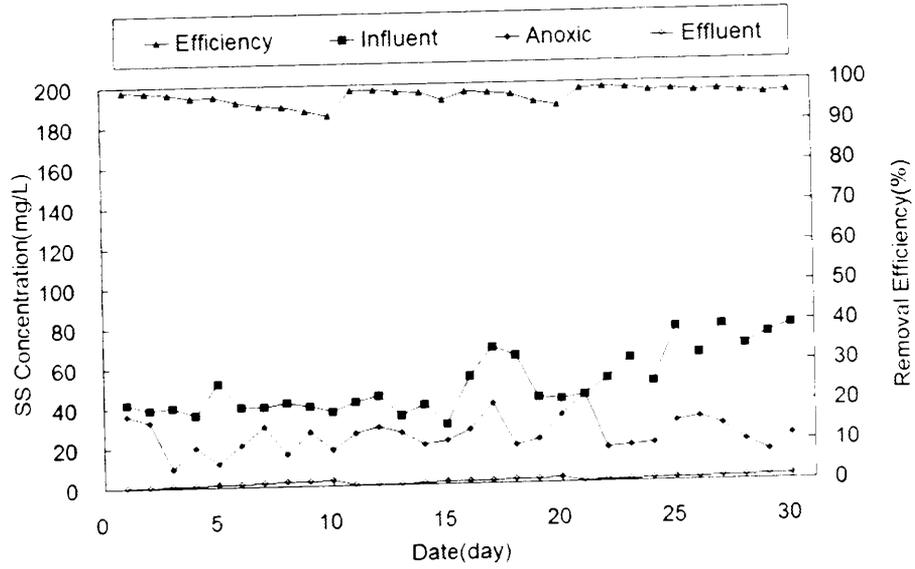


Fig. 70. The SS concentration on influent, anaerobic /anoxic and effluent and removal efficiency as HRT was 9hour.

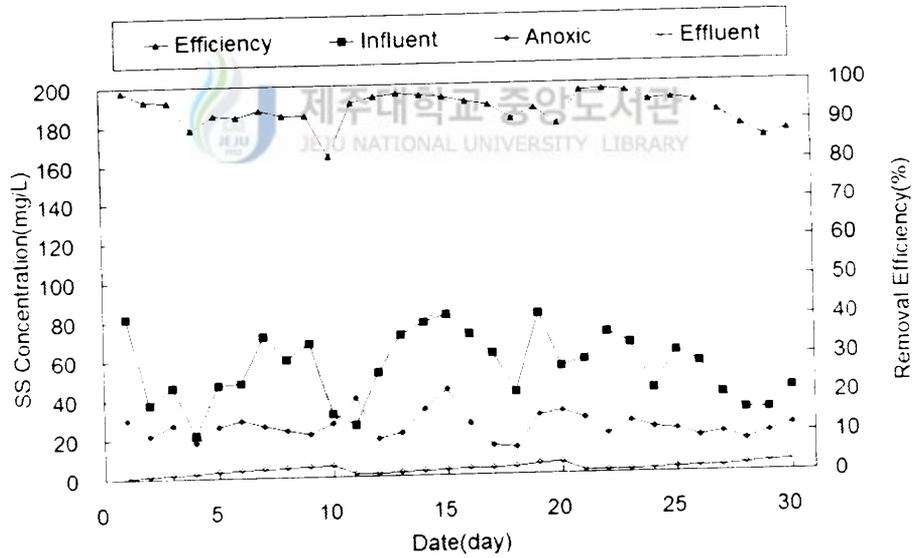
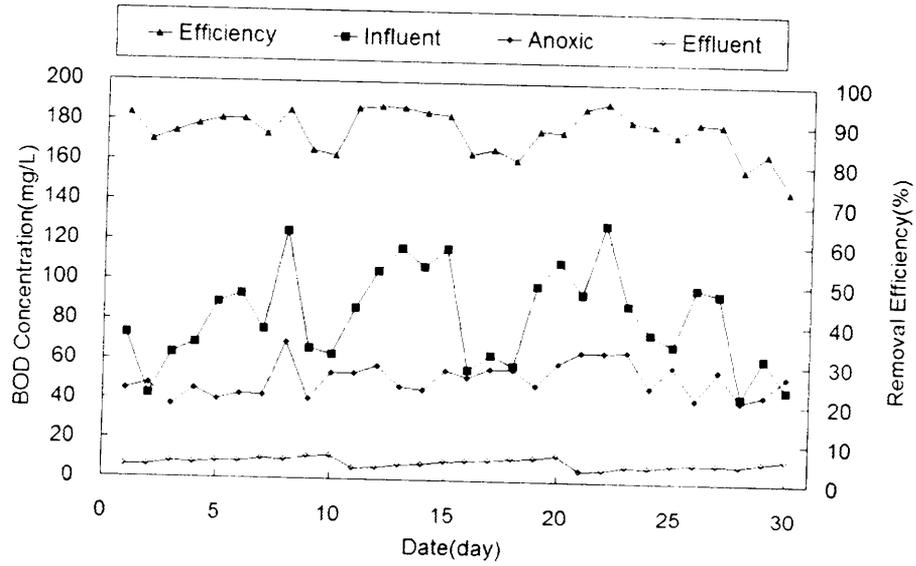


Fig. 71. The SS concentration on influent, anaerobic /anoxic and effluent and removal efficiency as HRT was 10hour.



72. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiency as HRT was 7hour.

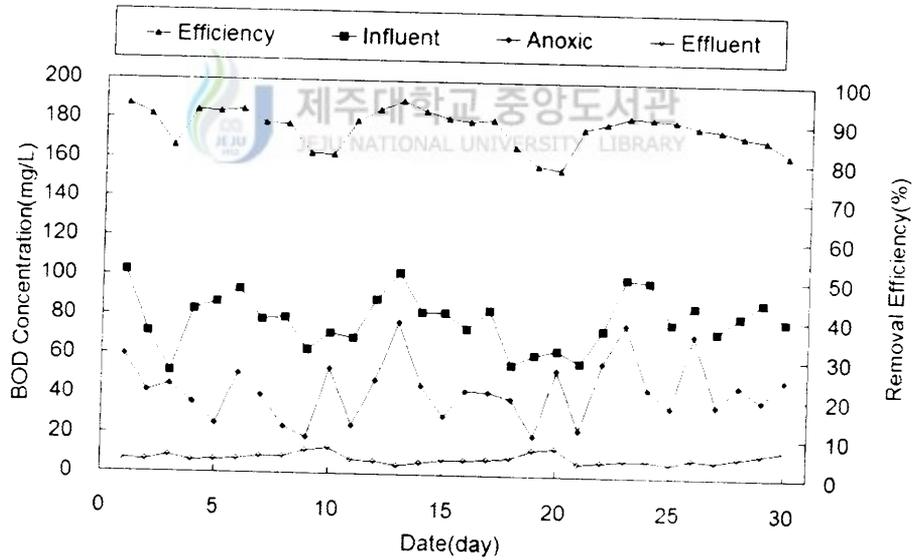


Fig. 73. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiency as HRT was 8hour.

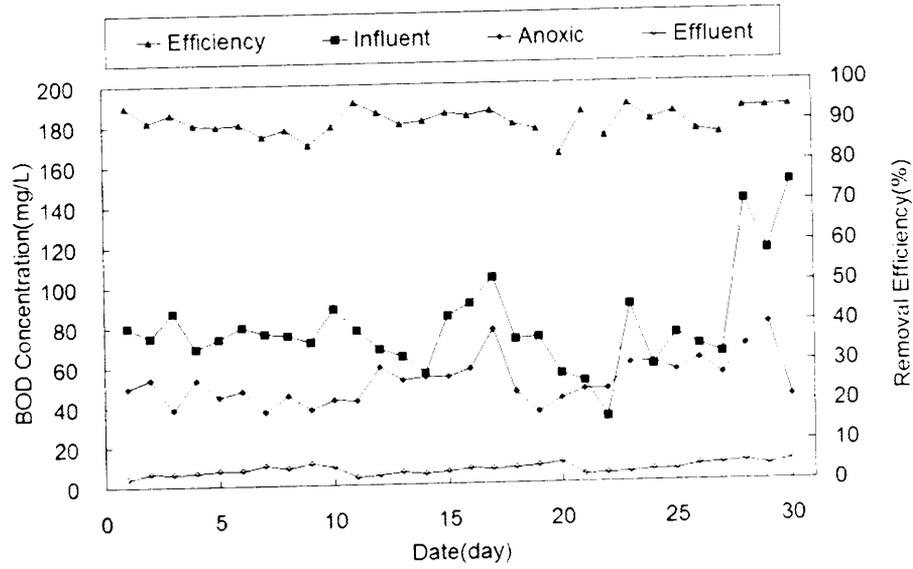


Fig. 74. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiency as HRT was 9hour.

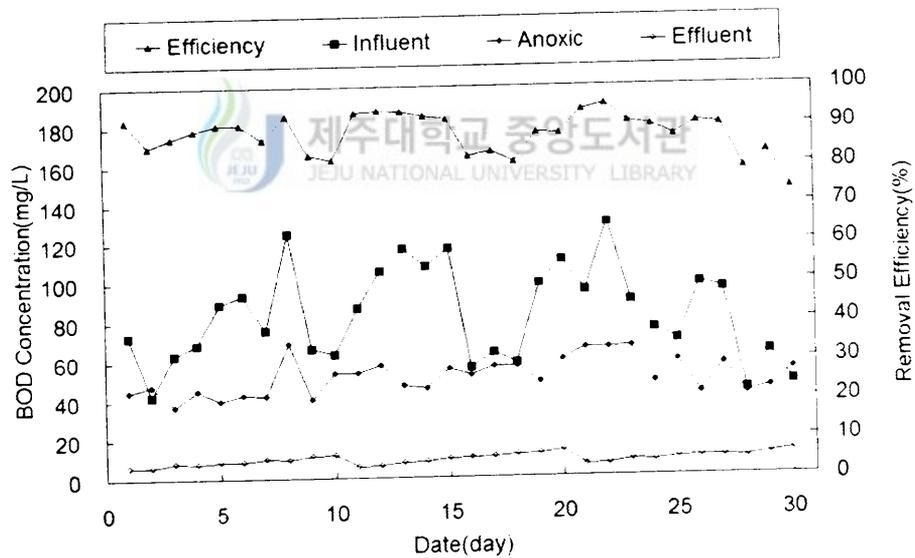


Fig. 75. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiency as HRT was 10hour.

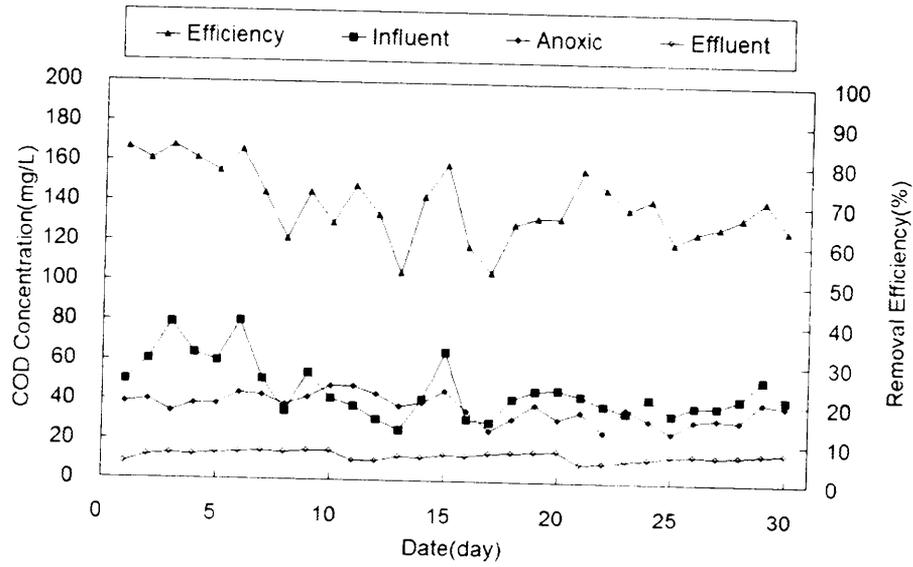


Fig. 76. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency as HRT was 7hour.

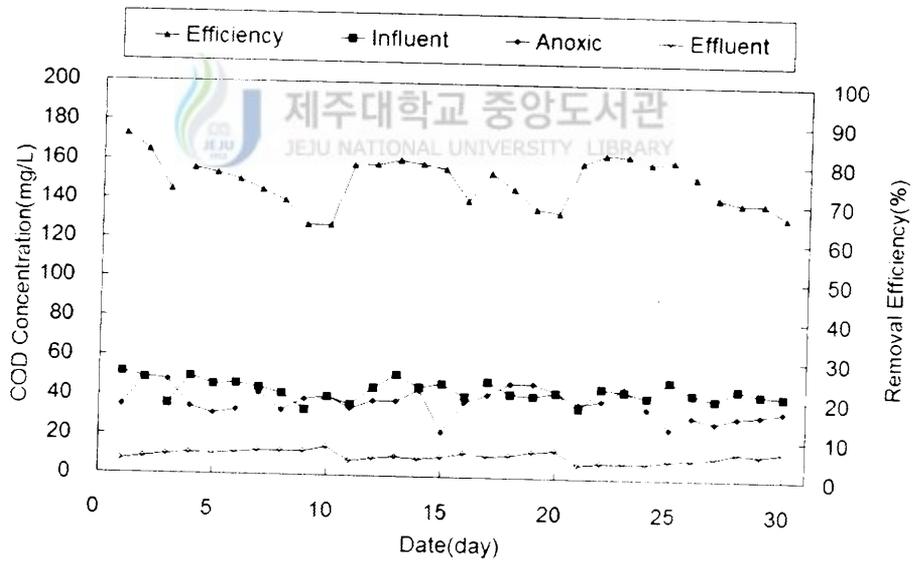


Fig. 77. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency as HRT was 8hour.

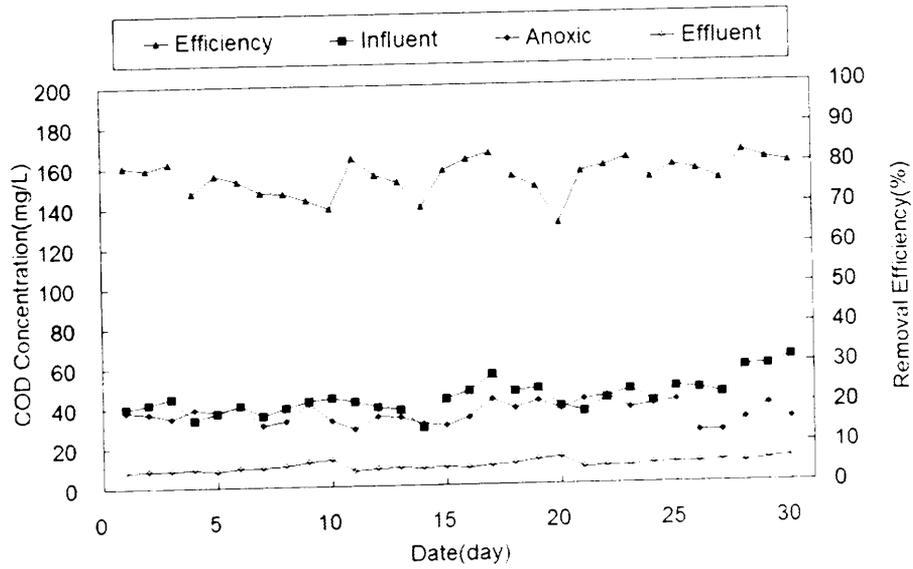


Fig. 78. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency as HRT was 9hour.

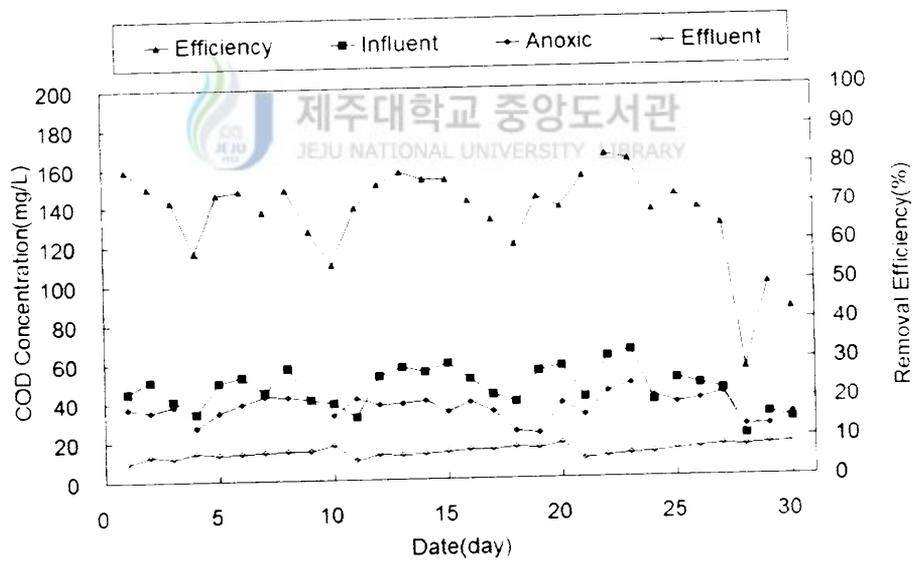


Fig. 79. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency as HRT was 10hour.

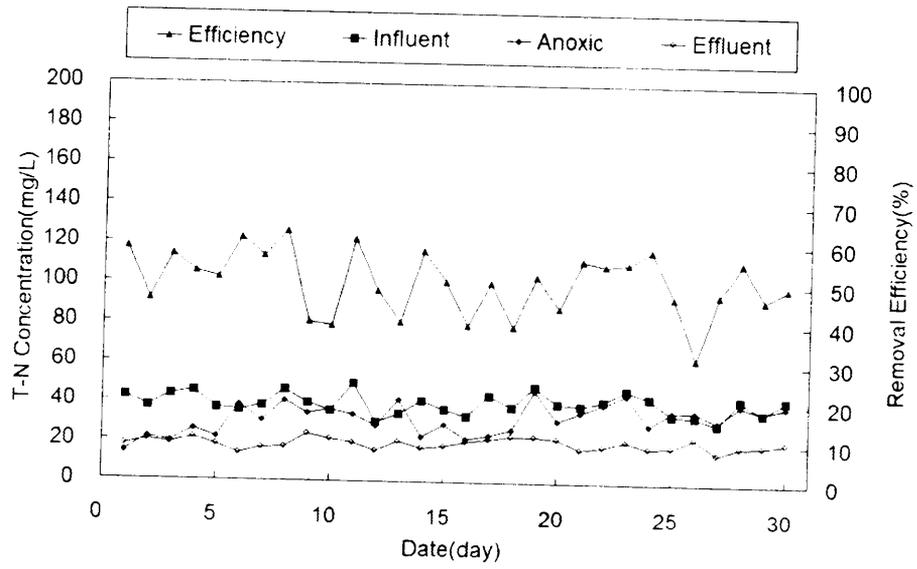


Fig. 80. Variation of T-N concentration and removal efficiency as HRT was 7hour.

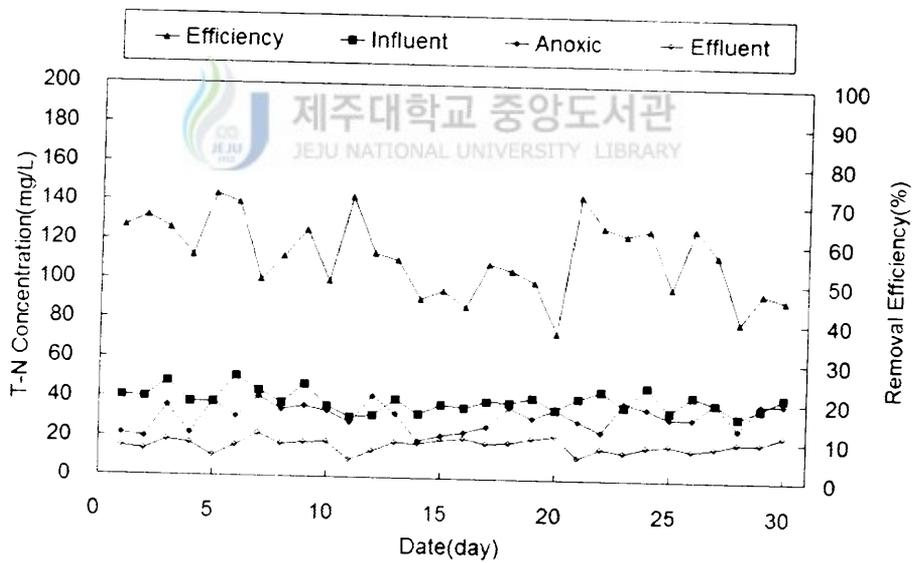


Fig. 81. Variation of T-N concentration and removal efficiency as HRT was 8hour.

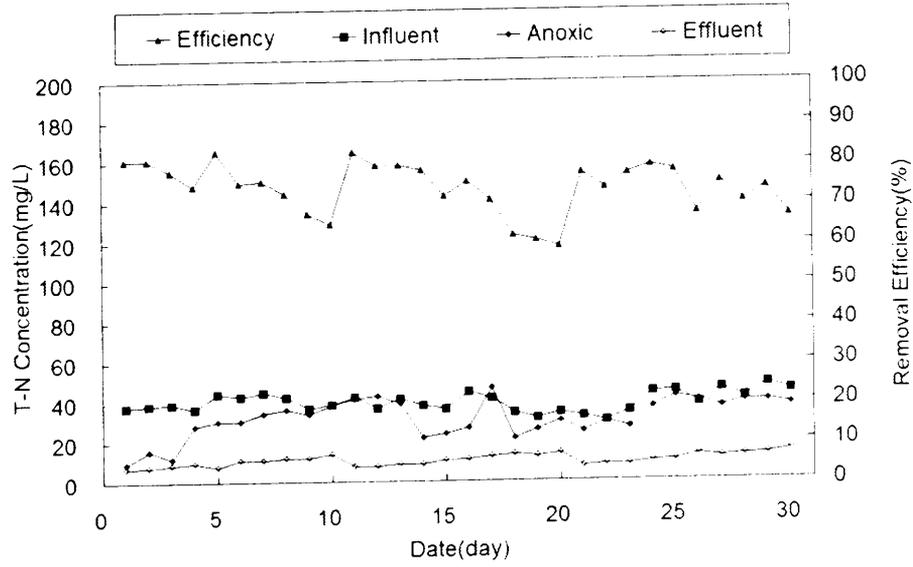


Fig. 82. Variation of T-N concentration and removal efficiency as HRT was 9hour.

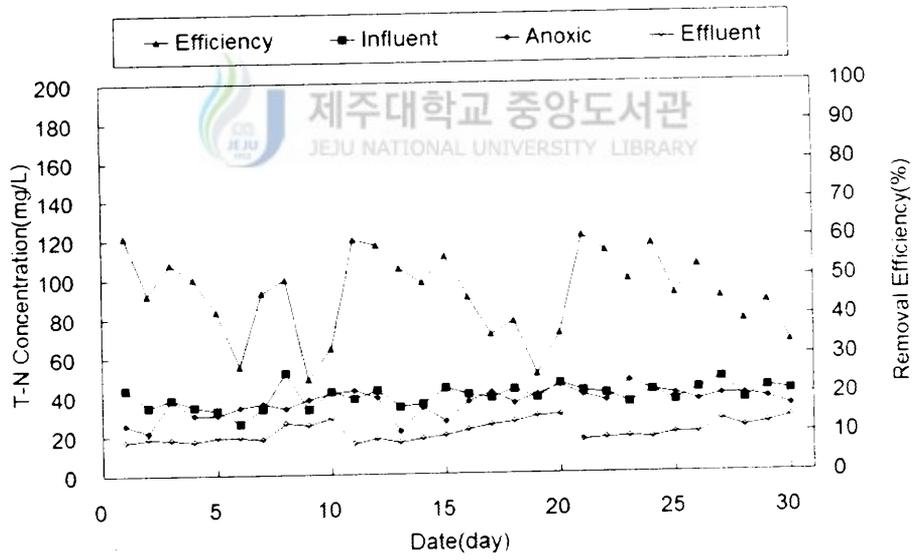


Fig. 83. Variation of T-N concentration and removal efficiency as HRT was 10hour.

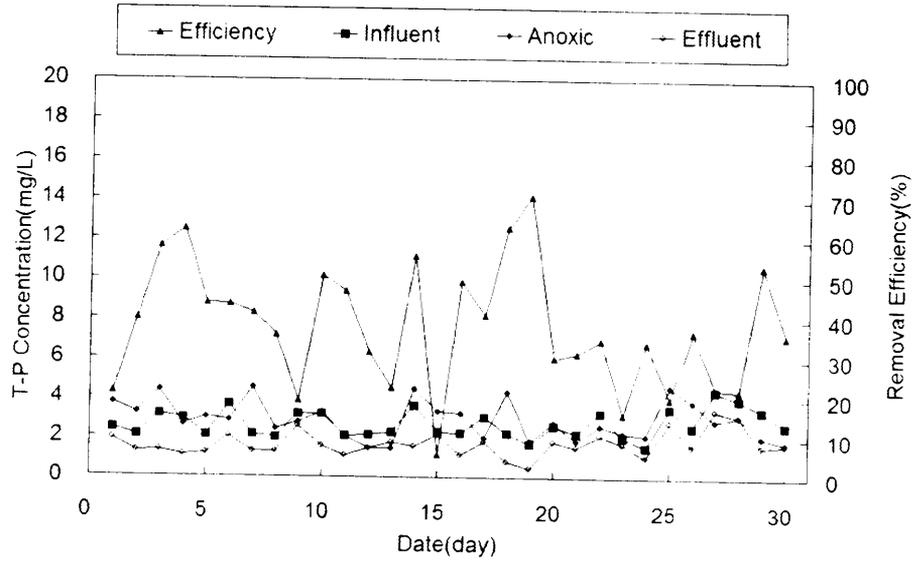


Fig. 84. Variation of T-P concentration and removal efficiency as HRT was 7hour.

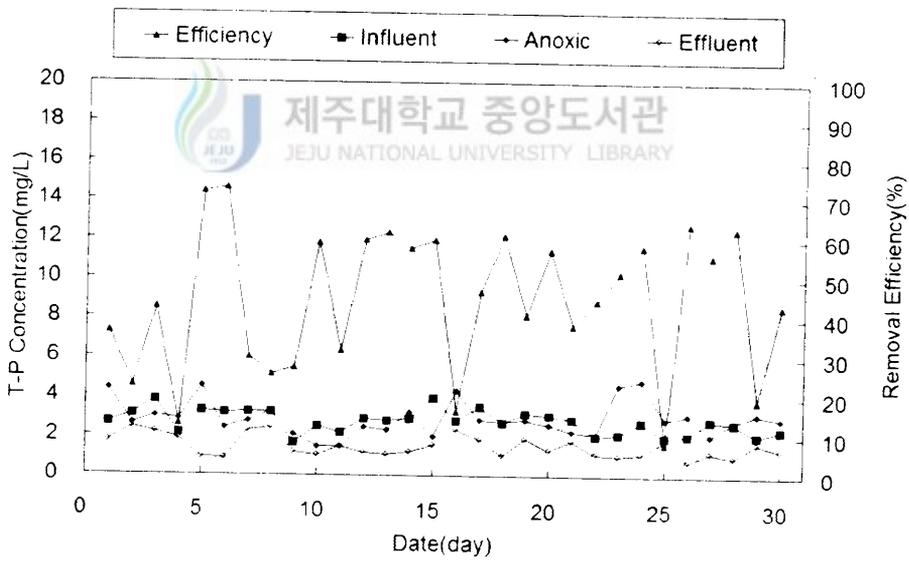


Fig. 85. Variation of T-P concentration and removal efficiency as HRT was 8hour.

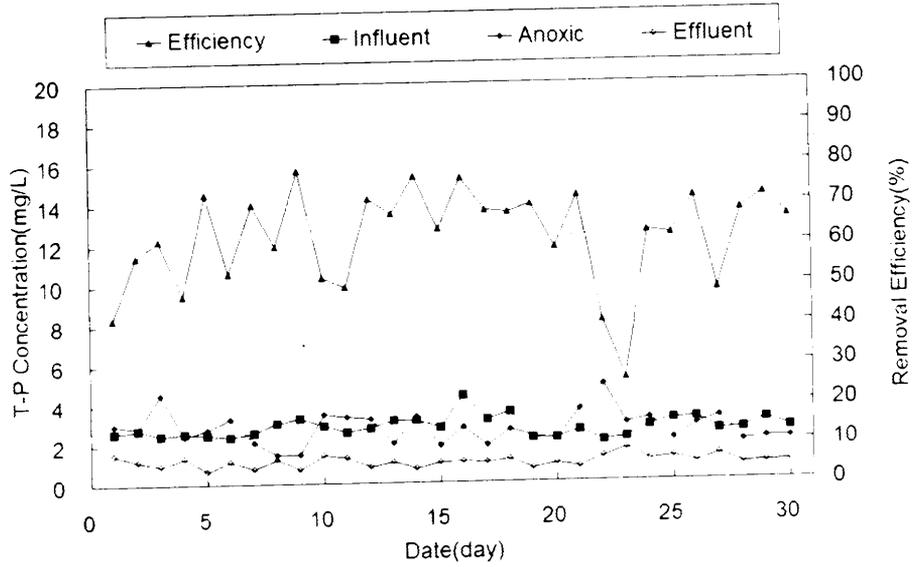


Fig. 86. Variation of T-P concentration and removal efficiency as HRT was 9hour.

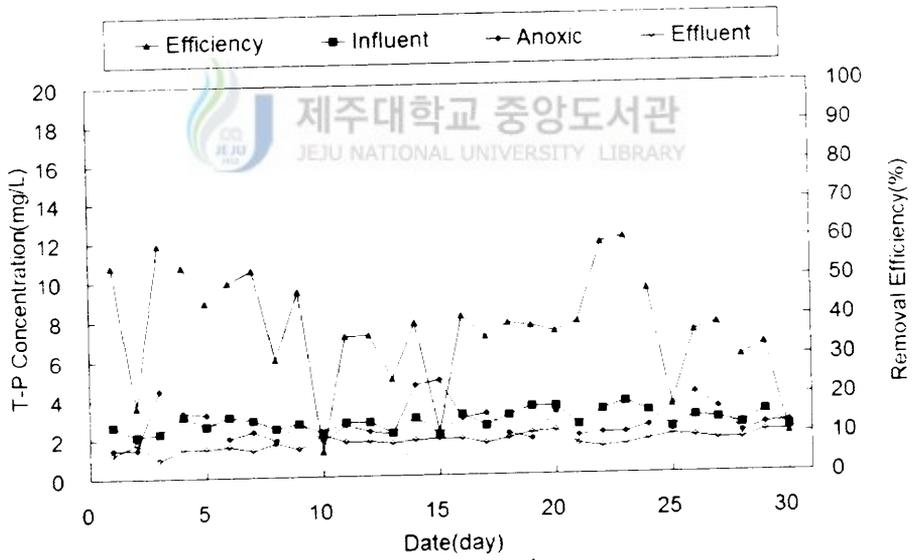


Fig. 87. Variation of T-P concentration and removal efficiency as HRT was 10hour.

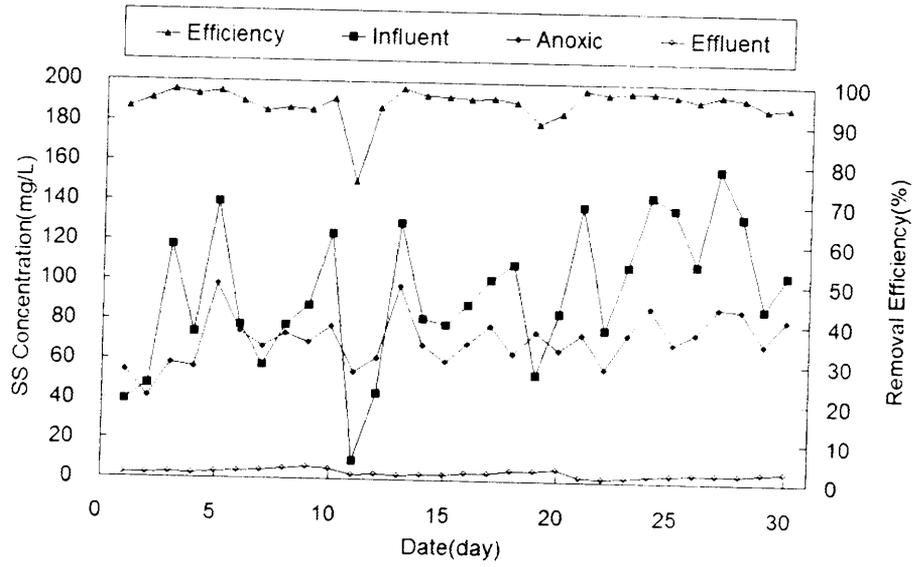


Fig. 88. Variation of SS concentration and removal efficiency as SV was 2.55min/min.

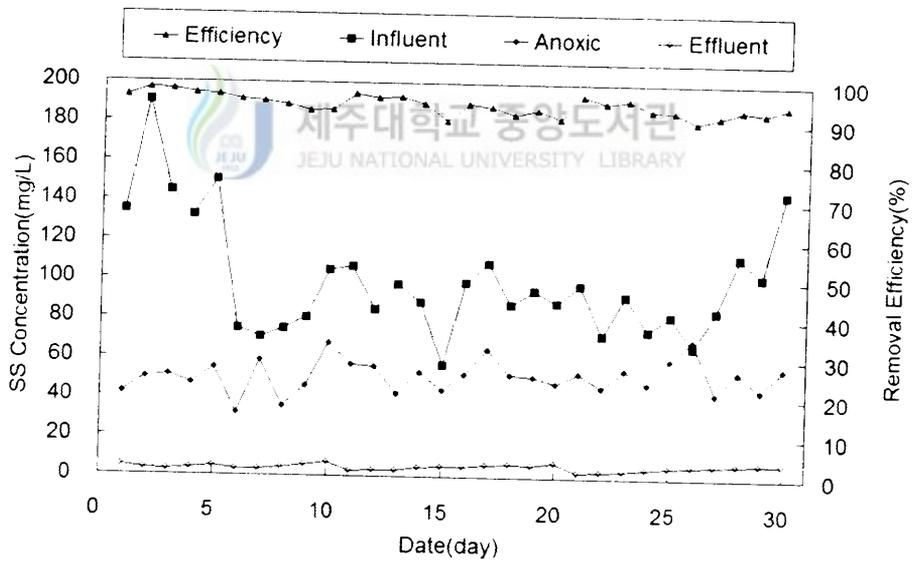


Fig. 89. Variation of SS concentration and removal efficiency as SV was 3.18m/min.

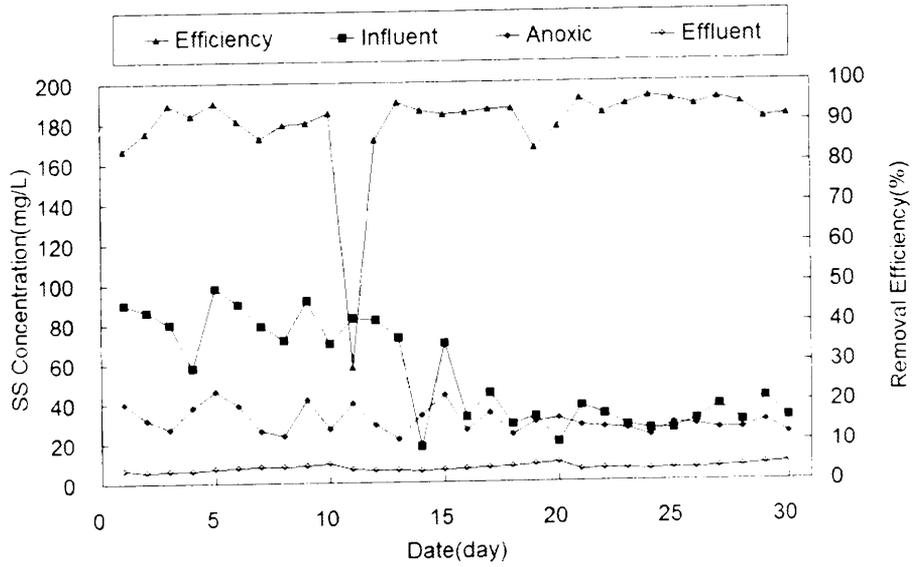


Fig. 90. Variation of SS concentration and removal efficiency as SV was 3.82m/min.

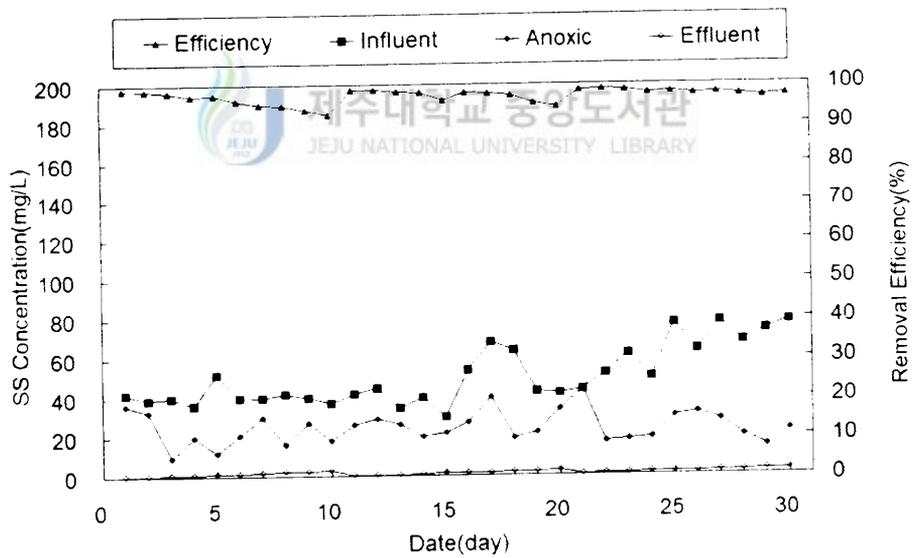


Fig. 91. Variation of SS concentration and removal efficiency as SV was 6.37m/min.

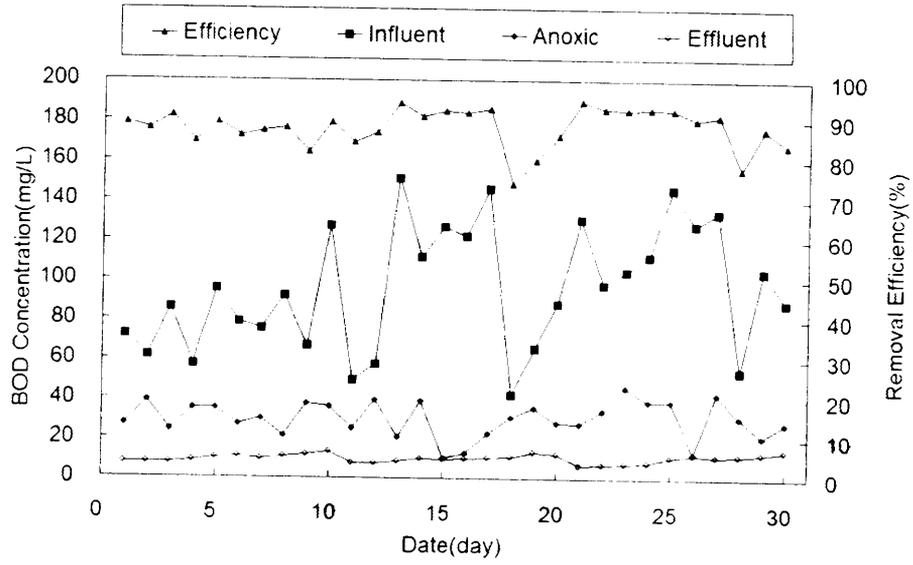


Fig. 92. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiency as SV was 2.55min/min.

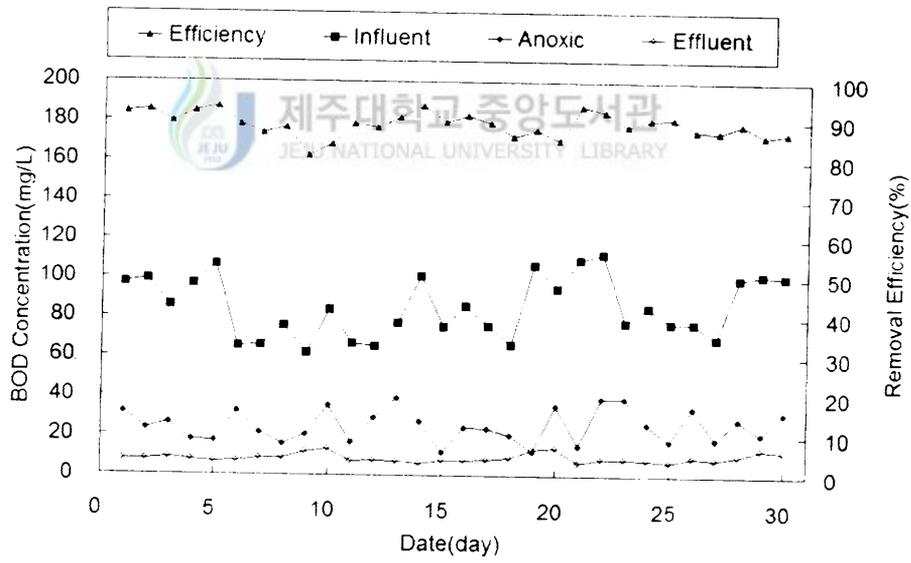


Fig. 93. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiency as SV was 3.18min/min.

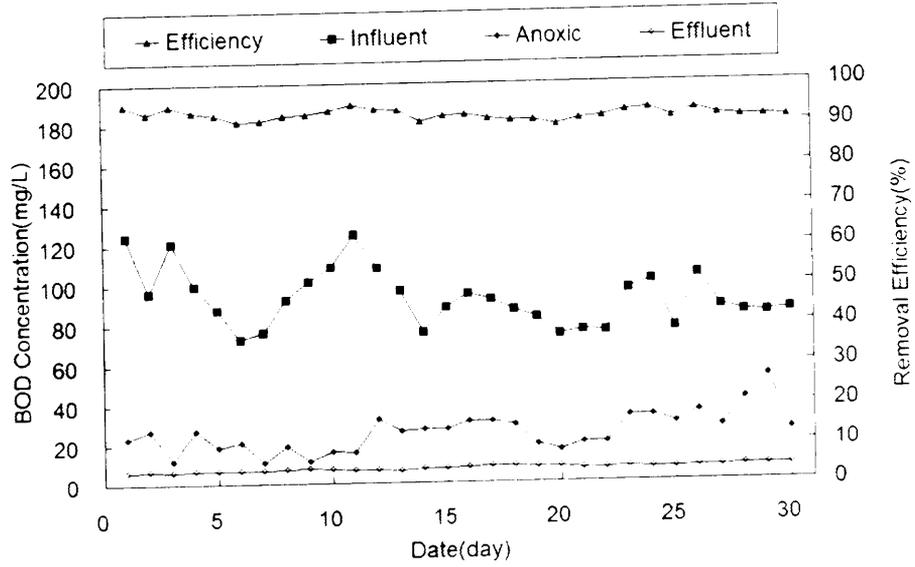


Fig. 94. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiency as SV was 3.82min/min.

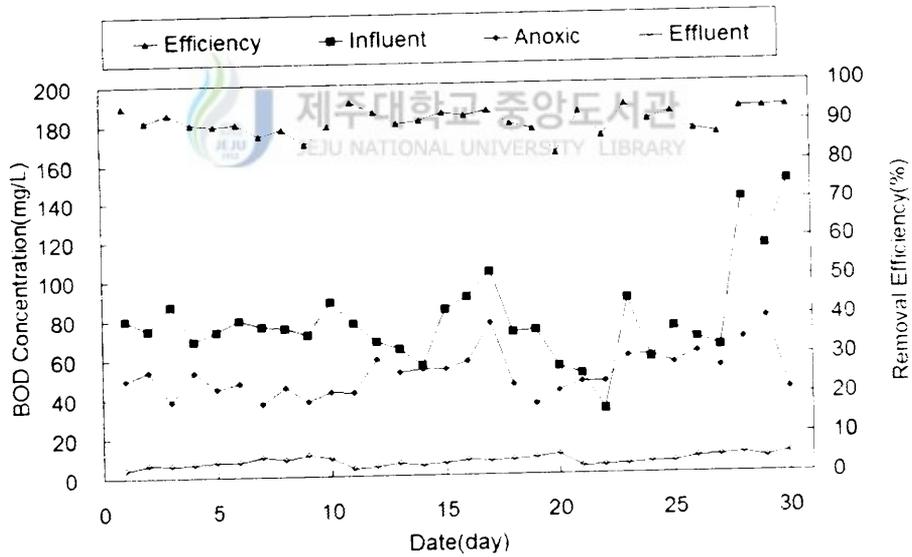


Fig. 95. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiency as SV was 6.37min/min.

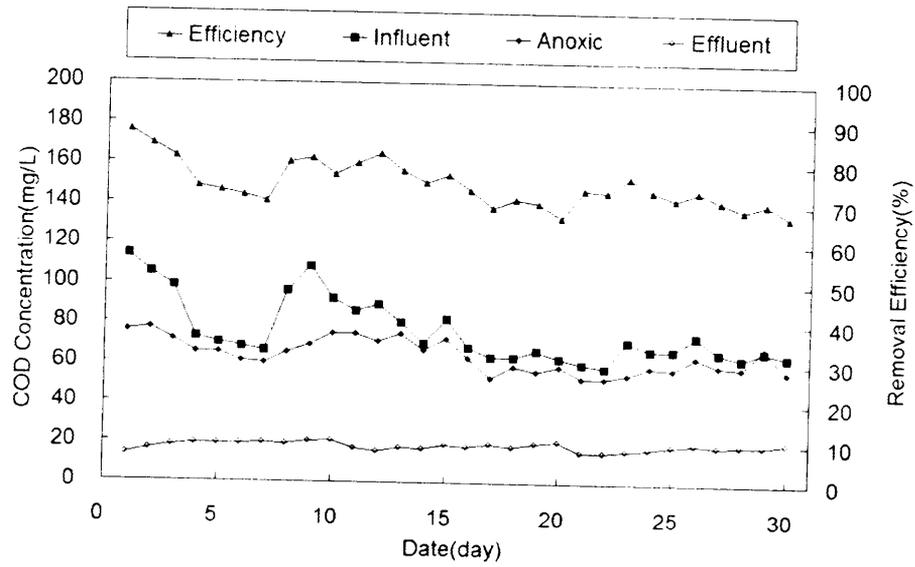


Fig. 96. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency as SV was 2.55min/min.

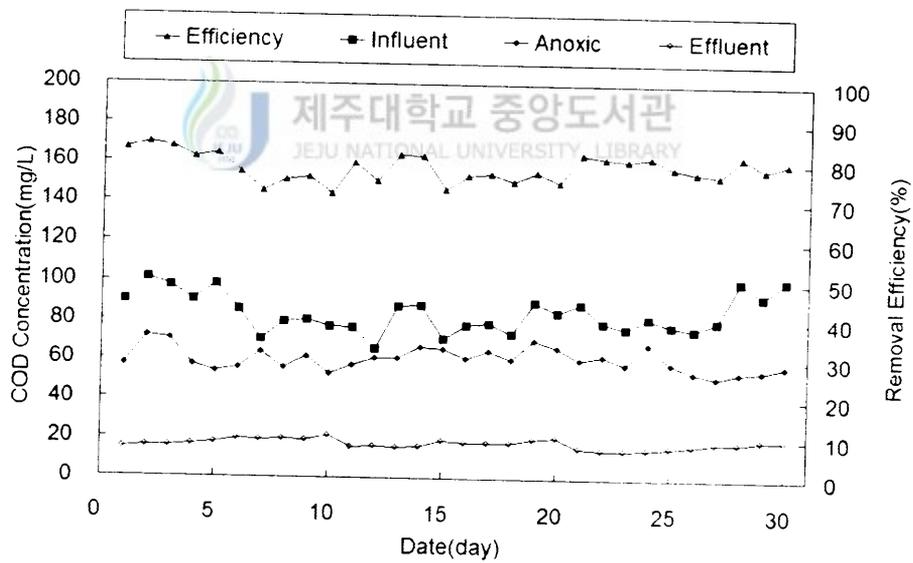


Fig. 97. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency as SV was 3.18min/min.

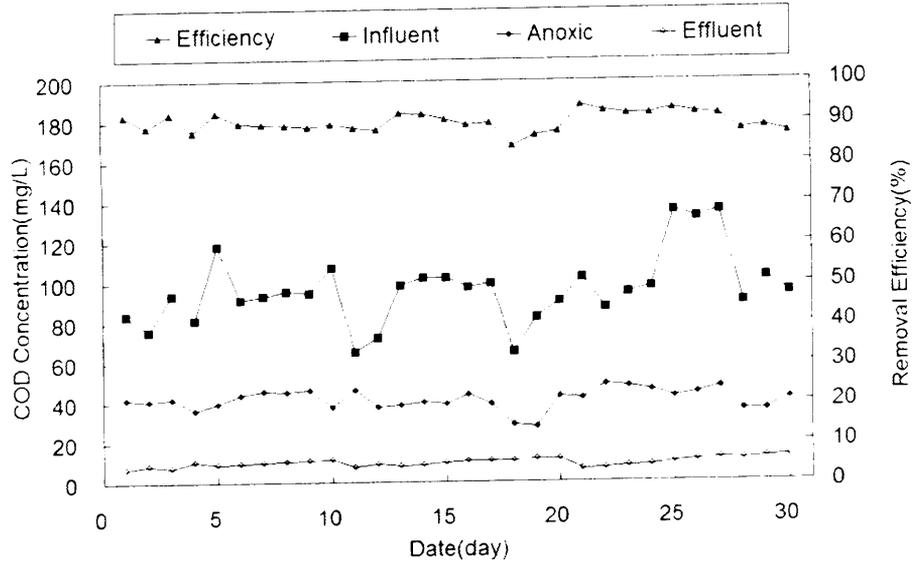


Fig. 98. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency as SV was 3.82min/min.

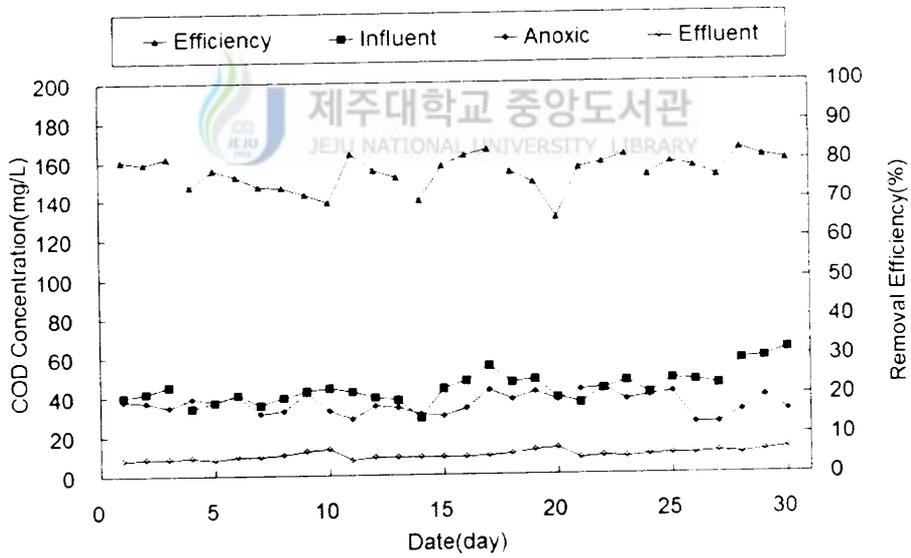


Fig. 99. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency as SV was 6.37min/min.

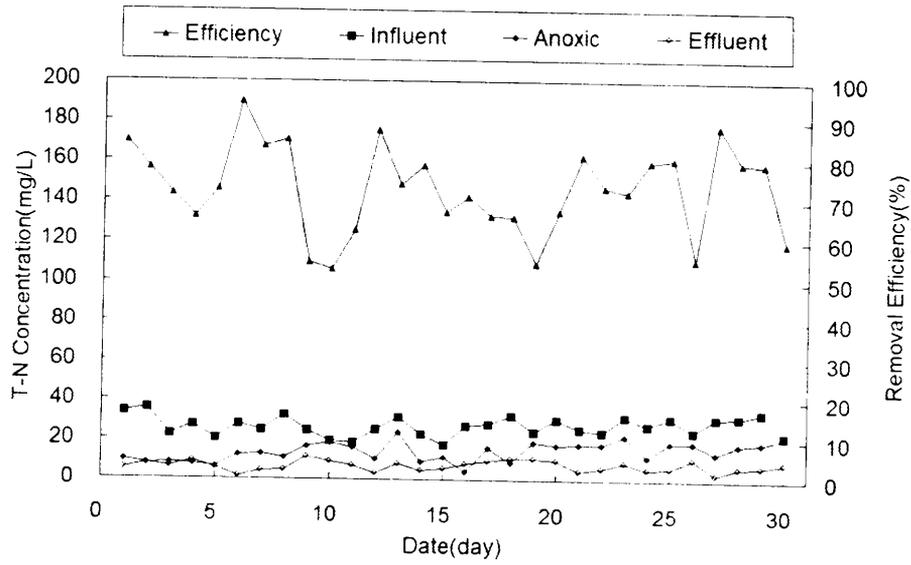


Fig. 100. Variation of T-N concentration and removal efficiency as SV was 2.55min/min.

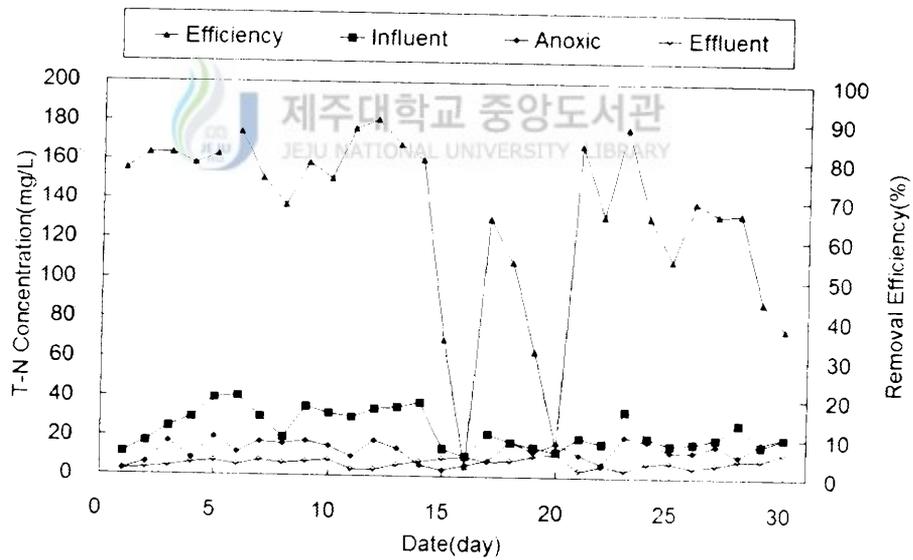


Fig. 101. Variation of T-N concentration and removal efficiency as SV was 3.18min/min.

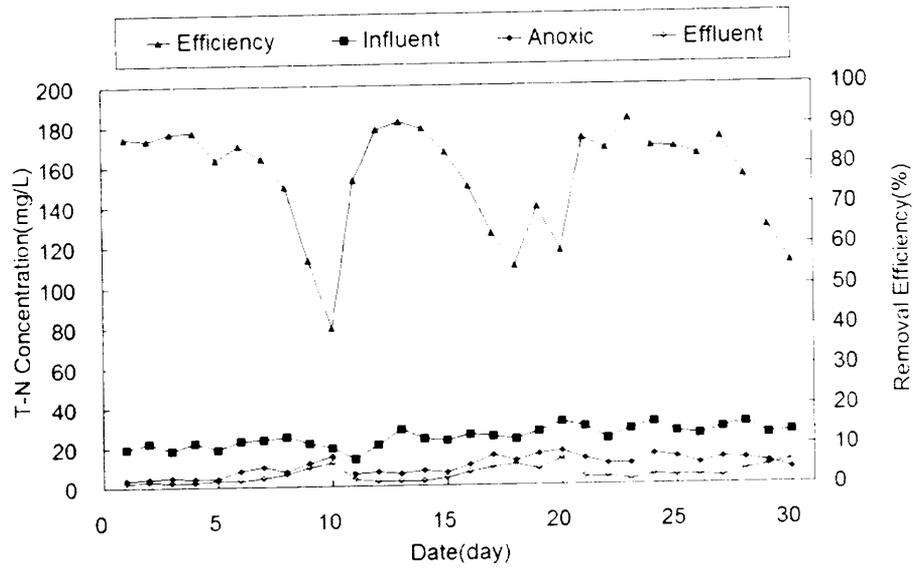


Fig. 102. Variation of T-N concentration and removal efficiency as SV was 3.82min/min.

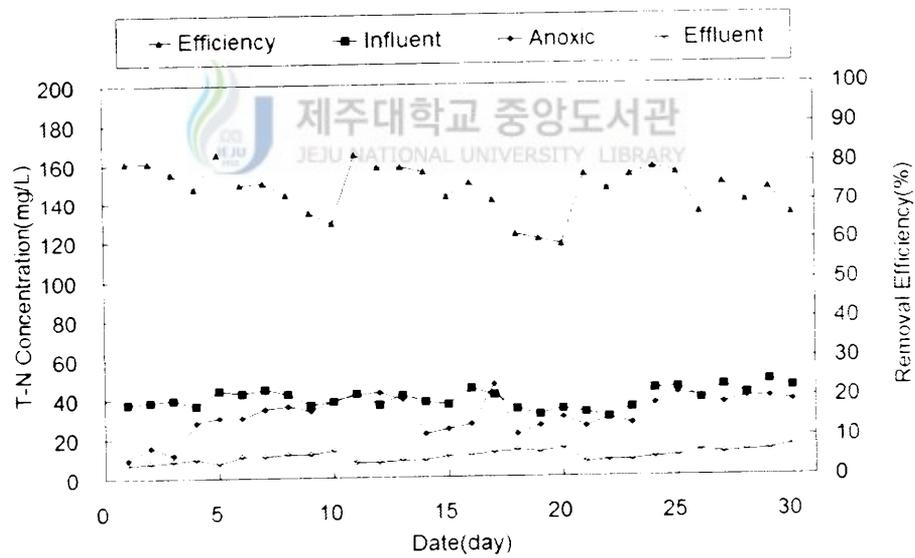


Fig. 103. Variation of T-N concentration and removal efficiency as SV was 6.37min/min.

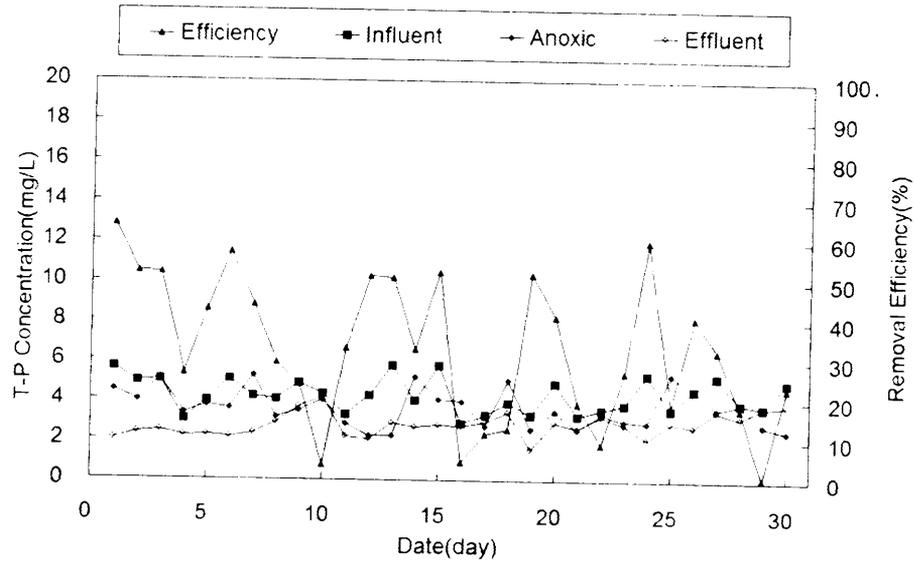


Fig. 104. Variation of T-P concentration and removal efficiency as SV was 2.55min/min.

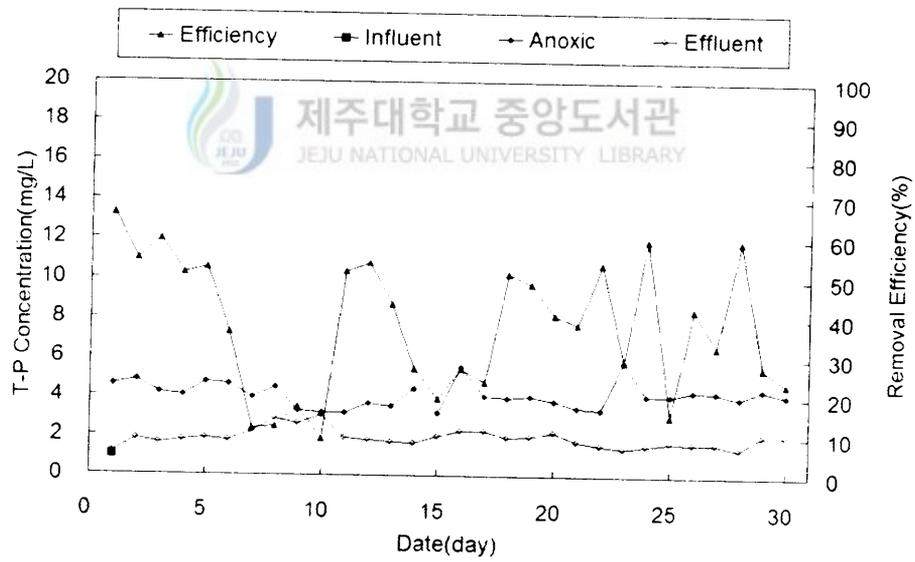


Fig. 105. Variation of T-P concentration and removal efficiency as SV was 3.18min/min.

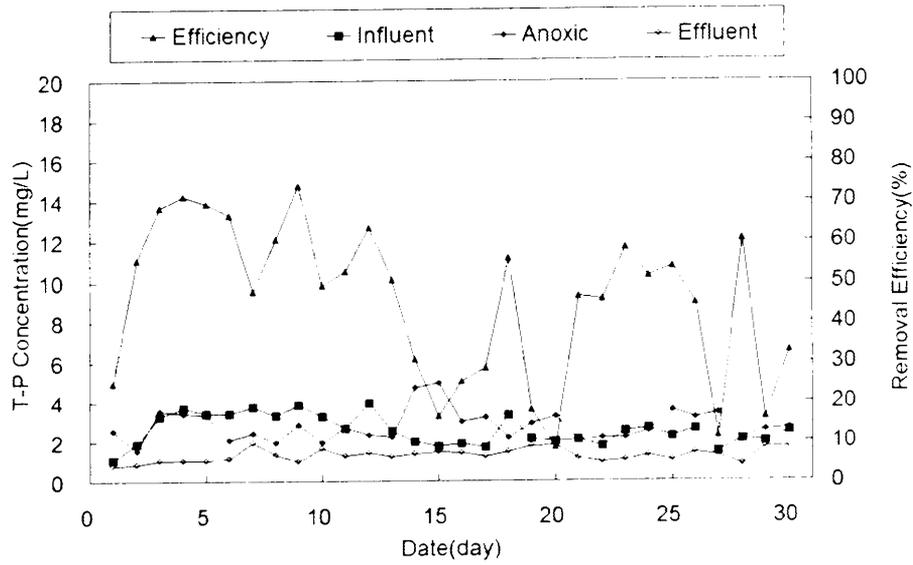


Fig. 106. Variation of T-P concentration and removal efficiency as SV was 3.82min/min.

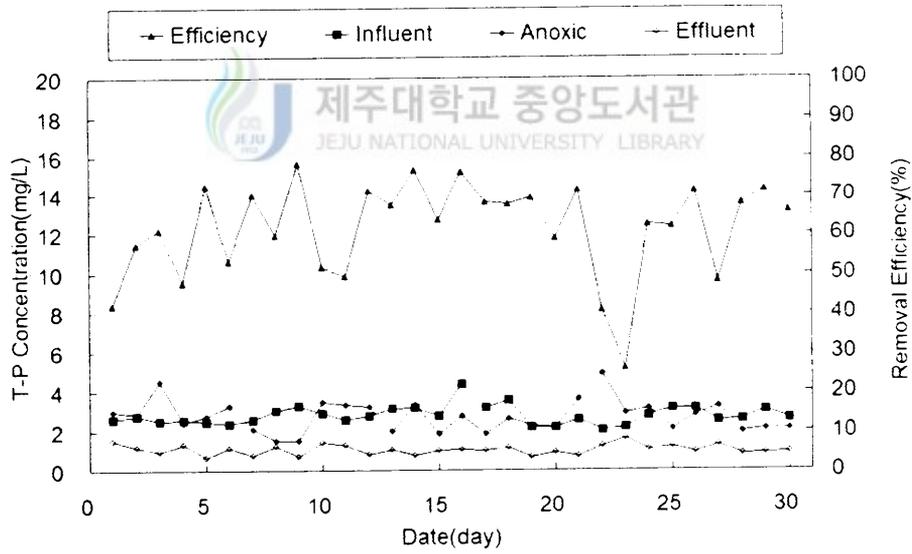


Fig. 107. Variation of T-P concentration and removal efficiency as SV was 6.37min/min.

감사의 글

대학이라는 문턱에 들어선지 십수년이라는 시간이 훌쩍 지나갔습니다. 많은 인연을 맺었지만 그중에 환경공학과라는 소속하에서 만났던 많은 분들을 잊을 수 없을 것 같습니다. 그리고 논문이 완성되기까지 많은 도움과 격려를 주신 분들께 감사의 말씀을 올리고자 합니다. 먼저 학부시절부터 지금까지 못난 제자에게 깊은 관심과 애정을 쏟아준 허목 교수님께 진심으로 감사드리며 항상 건강하시길 바랍니다. 또한 부족한 논문을 검토하시기 위해 먼 곳에서 오셔서 도와주신 김응호 교수님, 김부길 교수님 그리고 훌륭한 논문으로 만들기 위해 검토해주신 이용두 교수님과 조은일 교수님, 학부과정에서부터 지금까지 언제나 자상한 가르침을 주신 오윤근 교수님, 허철구 교수님, 이기호 교수님 그리고 지금은 외국에 계신 감상규 교수님께 감사를 드립니다.

또한 논문의 완성을 위해서 지원을 아끼지 않으신 제주환경개발(주) 강경수 사장님 외 관계자분들께 감사를 드립니다.

학교생활에서 빼놓을 수 없는 실험실선배 봉래 형, 대원이 형, 순양이 누나, 진숙이 누나, 지용이 형, 승건이 형, 회부 형, 광진이 형, 승훈이 형, 명희, 광민, 기석, 현석, 경미, 성철, 창수, 상일, 경림, 수윤, 성현, 용성, 지희 등에게 감사를 드립니다. 또한 상하수도실험실 특영, 봉권, 형건 등 실험을 도와준 후배들에게 감사를 드립니다.

그리고 실험과정에서 많은 도움을 주신 제주시청 부기철 선생님 등 제주하수처리사업소관계자분들 그리고 준호 형, 길성이 형, 재영이 형, 성수 형 등 옆에서 많은 도움을 주신 선배님들에게 감사의 말씀을 드립니다.

아울러 바쁜 업무에도 불구하고 시간을 할애해주신 고봉국 국장님, 김병현 선생님, 김현정 선생님 등 센터 관계자분들께도 감사의 말씀을 드립니다.

그밖에도 이름을 다 열거하지는 않았지만 많은 격려와 도움을 주신 선후배님들, 그리고 친구들에게도 감사의 말씀을 드립니다.

끝으로 지금까지 못난 막내의 모습을 지극한 사랑으로 지켜봐 주시며 물심

양면으로 도와주신 어머니님, 누님들, 매형들, 형님, 형수님, 조카들과 장인어른, 장모님, 형님들에게 감사의 말씀을 드리며, 어려운 생활 여건 속에서도 부족한 남편을 항상 이해해주고 힘들고 지칠때 항상 웃어주며 뒷바라지에 남다른 고생을 한 아내 은아와 항상 아빠를 보며 웃어주는 서현에게 사랑한다는 말을 전하며 모든 분들께 이 작은 결실을 드립니다.

