

碩士學位論文

간접폭기형
침적생물막여과장치를 이용한
오수처리 특성



濟州大學校 大學院

環境工學科

金 廣 晉

2002年 12月

간접폭기형
침적생물막여과장치를 이용한
오수처리 특성

指導教授 許 木

金 廣 晋



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2002年 12月

金廣晋의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 감 상 규 印

委 員 조 은 일 印

委 員 허 목 印

濟州大學校 大學院

2002年 12月

Treatment Character of Sewage by using Indirectly Aerated Submerged Biofilter

Gwang-Jin Kim
(Supervised by Professor Mock Huh)

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



2002. 12.

This has been examined and approved.

Thesis director, Eun-Il Cho, Prof. of Environmental Engineering

Thesis director, Sang-Kyu Kam, Prof. of Environmental Engineering

Thesis director, Mock Huh, Prof. of Environmental Engineering

December. 2002.

Department of Environmental Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

Summary.....	1
I. 서론.....	4
II. 이론적 고찰.....	6
1. 생물막 메커니즘.....	6
2. 생물학적 질소 제거.....	9
1) 생물학적 질산화.....	9
2) 생물학적 탈질화.....	12
3. 생물학적 인 제거.....	13
4. 국내 상용화 생물여과법.....	16
III. 재료 및 방법.....	19
1. 실험장치 및 분석방법.....	19
1) 실험장치.....	19
2) 분석항목 및 방법.....	21
2. 유입 오수의 수질특성.....	22
3. 실험조건.....	23
IV. 결과 및 고찰.....	27
1. 체류시간에 따른 변화.....	27
2. 순환류의 공탑속도에 따른 변화.....	32
3. 충전율에 따른 변화.....	38
4. 미생물의 발생현황.....	44
V. 결론.....	48
VI. 참고문헌.....	50

Summary

Following results from the model test at laboratory was came out to develop Indirectly Aerated Submerged Bio-filter(INSUB) as advanced purifier of sewage and wastewater, which can eliminate organism and nutrient salts at the same time, which is safe and economical to be maintained and managed.

1. In looking into effect on HRT in advanced purifying of sewage and wastewater, the Elimination rate was the highest at 25 hours of HRT. But there was not much difference comparing to 18 hours of HRT. Therefore, 18 hours of HRT is suggested to be operated and designed in practice considering economical efficiency



2. As looking into effect on superficial velocity, there was not much difference for eliminating organism. But in the case of nitrogen and phosphorus, the highest elimination rate was shown at 1.017m/hr, Therefore the proper superficial velocity is suggested at 1.017m/hr.

3. Considering elimination efficiency for organism, nitrogen and phosphorus with media packing ratio, there was not much difference for eliminating organism. But in the case of nitrogen and phosphorus showed much higher elimination rate at 40 v/v % than 20 v/v% and 30v/v%.

4. elimination rate of TSS did not show much difference in physical filtering efficiency at each operation condition. It kept high efficiency of

about 93.8 % to 97.5 %.

5. In advanced purifying sewage and wastewater at INSUB, elimination rate was the highest at 18hr of HRT, 1.017m/hr of superficial velocity and media packing ratio is the highest at 40 v/v%. Each elimination rate for COD_{cr} COD_{mn} BOD₅ T-N AND T-P was 90.6, 85.3, 95.0, 52.3 and 56.8 %.

6. It's confirmed that there should be followed some necessary changes of system by anoxic and mixture of aerobic reactor to remove nitric oxide by first getting rid of nitrogen for the high efficiency of nitrogen and phosphorus

To use INSUB system commonly based on results of the study, studies on application of job-site and its ramification and automatization has to be carried out gradually.

I. 서 론

우리 나라 도시 하수(Municipal wastewater)의 처리는 하수관거를 통하여 하수종말처리시설로 유입·처리되는 종말처리체계와 발생원에 오수처리시설을 설치하여 하수종말처리시설과 동일한 수준인 BOD 20mg/ℓ 이하로 처리하는 개별처리체계로 대별할 수 있다. 우리 나라는 1990년대 초 ‘맑은 물 공급 종합대책’의 수립·추진과 더불어 하수종말처리시설 설치사업을 본격적으로 시작하여, 2000년 말 현재에는 하수종말처리시설에 의한 하수도 보급률이 전국평균 70.5%에 이르고 있다. 그리고 하수종말처리시설이 설치되어 있지 않는 지역에 건축되는 건물에 대해서는 건축연면적 규모에 따라 오수처리시설의 설치를 의무화하여 오염원을 발생원에서 개별 처리하도록 하고 있다. 그러나 최근 환경오염 현상의 악화에 따른 대응의 일환으로 국가 및 지역에서의 환경규제가 강화되어 하·폐수 처리수중의 N, P 등의 영양염류의 고도처리가 요구되게 되었다.

1976년 청계 하수처리장을 시발로 현재 유기물 처리공정의 80%이상을 활성슬러지법을 기초로한 재래식 생물학적 처리공법을 채택하고 있어, 우수한 유기물 처리효율과 저렴한 운전비용으로 장점으로 갖고 있지만 SRT를 적정하게 유지해 주기 위해서는 고도의 운전기술과 유지관리가 필요하고 슬러지 팽화가 자주 발생하고 부하변동이 큰 경우에 대처하기 어려울 뿐만 아니라 잉여슬러지가 다량 발생하는 등의 문제점과 질소, 인 등의 영양염류는 거의 미처리된채 방류되고 있는 실정이다. 또한 환경규제가 강화되면서 HRT와 SRT의 증가가 필요해지고, 이 때 처리장의 부지를 확장해야하는 문제가 생긴다. (오 등, 1989).

현재 구미 선진국에서 상업적으로 실용화된 생물학적 질소·인 제거방법의 대부분은 폭기조와 연속으로 접속시켜 유입하수의 유기물을 이용하여 혐기 및 무산소조를 운영하는 A2/O, Bardenpho, VIP, UCT 등과 2차침전

지의 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 위해서는 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 방법으로 기존의 살수여상법(Trickling filter process), 회전원판법(Rotating biological contactor), 침적여상법(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 Biofilter System으로는 최근, 입상황을 이용한 공법, 전탈질 생물여과를 이용한 공법, 부상식여재를 이용한 공법 등 몇몇 기업에서의 환경신기술이 제시되고 있으나 모두 상용화의 초보단계에 있는 최신 기

술개발과제의 하나이다(환경부, 2002).

따라서 본 연구에서는 국내실정에 맞는 오·폐수중의 유기물과 영양염류의 동시제거와 더불어, 경제적이고, 안정적인 유지관리가 가능한 오·폐수 고도정화장치로서 간접폭기형 침적생물막여과장치(Indirectly Aerated Submerged Biofilter; 이하 'INSUB'로 기술)를 개발하기 위해서 실험실적 모형실험에 의한 기초적 설계인자의 도출을 목적으로 하였다.



II. 이론적 고찰

1. 생물막 메커니즘

생물막이란 고체표면에 형성된 미생물의 점액질 막과 그 함유물을 말하며, 이의 형성은 Fig. 1과 같이 물리, 화학, 생물학적인 현상들이 복합적으로 작용하여 이루어진다. 이러한 작용은 다음과 같은 순차적 과정을 통해 진행된다(Bryers and Characklis, 1982).

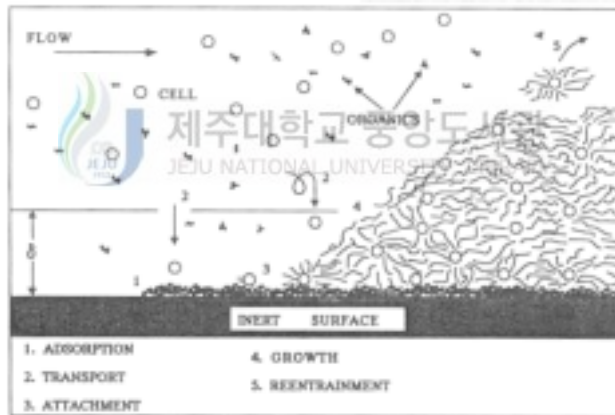


Fig. 1. Process contributing to biofilm development.

- (1) 기질이 액체로부터 고체표면에 전달되어 흡착됨.
- (2) 미생물이 고체표면으로 분자확산, 와류, 침전 등에 의해 이동.
- (3) 미생물이 고체표면에 부착.
- (4) 미생물이 기질을 섭취하고 성장하여 생물막이 형성.
- (5) 생물막으로부터 과증식된 미생물은 액체의 흐름에 의한 전단력 탈리.

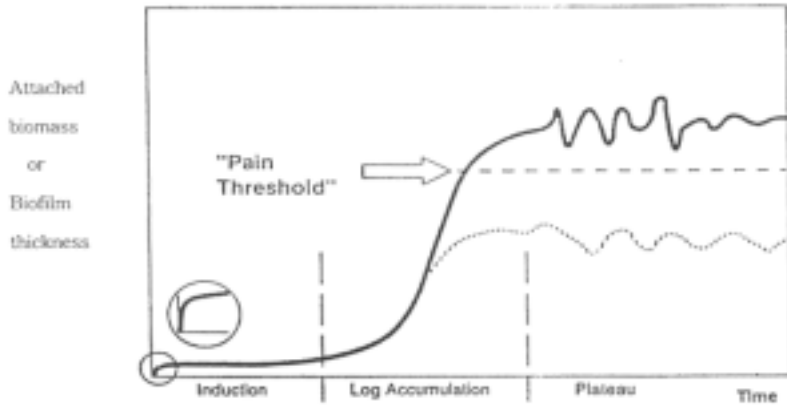


Fig. 2. Time dependent development of biofilm.

시간의 흐름에 따른 생물막의 형성기전을 Fig. 2에 나타내었다. 시간의 경과에 따른 생물량 및 생물막 두께의 변화과정은 곡선의 형태를 가지며 크게 세부분으로 구분된다(Melo 등, 1992). 첫 번째 부분은 Induction phase로서 미생물이 초기 부착을 하는 부분이고, 두 번째 부분은 부착된 미생물의 성장이 활발하게 일어나는 Log accumulation phase, 마지막으로 탈착과 부착이 평형에 도달하여 정적상태의 안정한 생물막을 형성하게 되는 Plateau phase이다.

이러한 생물막은 기저부(Substratum), 기초막(Base Film), 표면막(Surface Film), 액상(Bulk Liquid), 가스상(Gas)의 구조로 되어 있으며, 이 중 기초막과 표면막이 미생물막 형성의 주가되며 기초막은 연속적인 고체의 망구조를 이루고, 표면막은 불연속적인 사상성구조를 이룬다.

일반적으로 생물막의 밀도는 기질의 농도와 비례하며, 세포의 증식계수가 클 때 높은 것으로 알려져 있다.

한편, 생물막 내부의 생화학 반응속도는 용액상의 반응속도보다 떨어지는 것으로 알려져 있는데 그 이유는 용액상의 지질이나 산소가 생물막 내부로

전달되는 과정에서 여러 방해물질을 받기 때문이다. 방해물질로는 생물막 표면의 액막이 있는데, 이러한 액상 막은 생물막 내부로의 물질전달에 방해를 주고 생물막 내부로의 기질 전달에 저항체가 된다.

초기에 식중 되었거나 자연적으로 형성된 생물막이 점차 성장하여 일정한 두께 이상이 되면 외부의 생물막은 생물산화기능을 갖는 호기성 층과 호기성 층의 산소차단 효과에 의한 내부의 혐기성 층으로 나뉘어진다. 호기성 층에서는 유기물이 계속해서 흡착되며 산화·분해되어 CH_4 , CO_2 , N_2 , H_2S 가 방출되어 생물막의 점도를 감소시키고 결과적으로 미생물의 부착력을 감소시킴으로 생물막의 탈리를 촉진하기도 한다. 생물막 내측의 혐기성 미생물에 의한 작용은 폐수 중의 유기물 농도를 낮추기보다는 증식된 슬러지를 산화시키는 역할을 함으로써 생물막 공법에 있어서 슬러지의 발생을 감소시키는 한 이유가 되기도 한다(Boller, M. W. 등 1993).

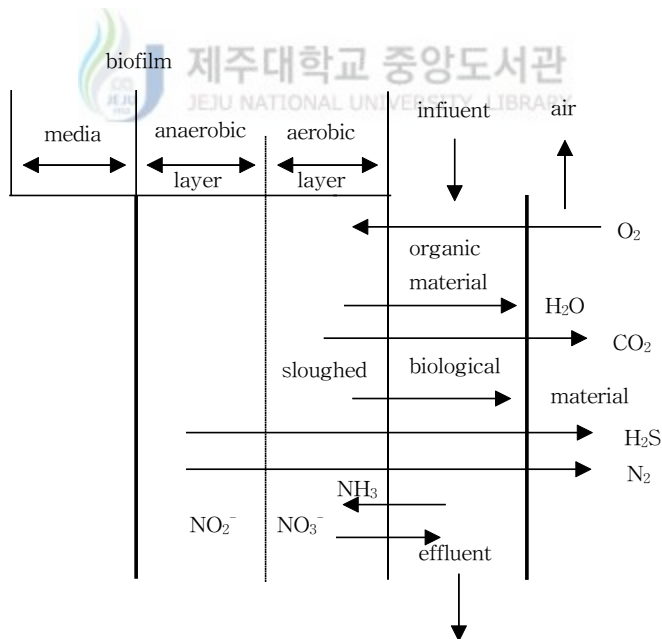
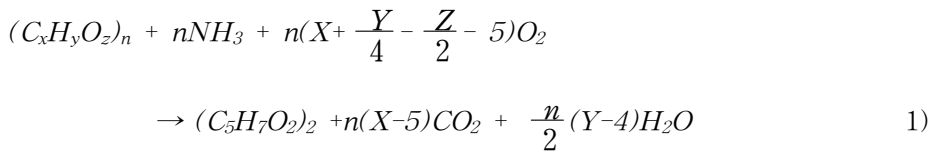


Fig. 3. Organic removal process by biological aerated filter.

생물막 안으로의 기질 전달 정도를 결정하는 요소로는 폐수 유량, 기질

농도, 기질의 분자확산계수, 미생물에 의한 기질분해속도 등이 있으며, 일반적으로 폐수의 유량과 농도가 증가하면 기질의 전달량도 증가하는 것으로 보고되었다(김, 1998).

호기성 생물막에서 유기물의 호기성 대사를 화학 양론적으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다(이 등, 1991).



즉 유기물과 질소 화합물이 산소의 존재하에서 미생물체와 탄산가스, 물을 생성한다. 그리고 증식된 미생물은 영양원이 부족하게 되면 다음과 같이 미생물 자신을 산화시키는 내생호흡을 하게 된다.



2. 생물학적 질소 제거

생물학적 질소 제거는 하수 중의 암모니아성 질소(NH_4^+-N)가 호기성 상태에서 *Nitrosomonas* 속에 의해 아질산성 질소($NO_2^- -N$)로의 산화 작용과 *Nitrobacter* 속에 의한 아질산성 질소($NO_2^- -N$)의 질산화 반응(Nitrification)이 이루어져 질산성 질소($NO_3^- -N$)로 산화된다. 질산화 반응에서 생성된 질산성 질소는 무산소(Anoxic) 상태에서 탈질화 반응(Denitrification)이 일어나 질소화합물이 질소가스(N_2)로 환원되므로써 질소 제거가 이루어진다. 생물학적 질소 제거방법은 물리·화학적 처리보다 처리효율이 높고, 경제성과 유지관리 측면에서 유리함으로 널리 사용되고 있다(신상의 등, 1992).

1) 생물학적 질산화

질산화 반응은 암모니아성 질소가 질산화 미생물에 의하여 호기성 조건에서 아질산성 질소와 질산성 질소로 산화되는 반응으로 식 3)으로 표현되는 암모니아 산화반응과 식 4)로 표현되는 아질산 산화 반응으로 구분된다.

Nitrosomonas ;



Nitrobacter ;



질산화에 관여하는 미생물 중 *Nitrosomonas*(*N. europaea*, *N. monocella*)와 *Nitrococcus* 등의 미생물은 암모니아 산화에 관여하는 것으로 알려져 있으며, *Nitrobacter*(*N. agilis*, *N. winogradskyi*)와 *Nitrosocystis* 등의 미생물은 아질산성 질소의 산화에 관여하는 것으로 알려져 있다 (Painter, 1977; Kelly, 1971).

이들 미생물은 세포합성에 무기 탄소원을 필요로 하며, 암모니아 산화에서 얻은 대부분의 에너지는 CO₂가 세포로 환원하는데 이용하는 독립영양 미생물(*Chemoautotroph*)이다. *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter*의 세포 생성 이론식은 다음과 같다(Sharma and Ahlert, 1975).

Nitrosomonas

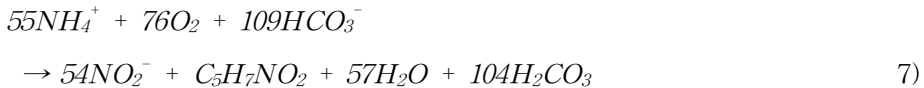


Nitrobacter

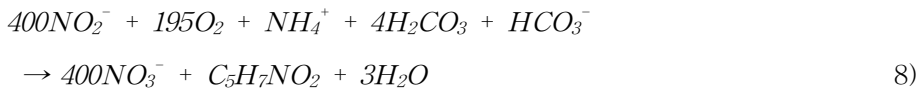


그러나, 수용액 내에서는 CO₂ 형태보다는 대부분 HCO₃⁻형태로 존재하므로 다음과 같은 반응을 한다(Sharma and Ahlert, 1975).

Nitrosomonas



Nitrobacter



Total reaction



위의 식 7)에서 완전한 질산화가 일어나면 1mg의 NH₄⁺-N이 NO₂-N으로 변환되기 위해 3.158mg O₂가 필요하고, 1mg의 NO₂-N이 NO₃-N으로 변환되기 위해서는 1.114mg O₂가 필요하게된다. 따라서 이론적인 총 O₂소요량은 4.272mg O₂/mg NH₄⁺-N이 되므로 전자수용체로써 많은 산소가 필요하다. 그리고 산화된 암모니아성 질소 1mg당 8.64mg의 중탄산이 요구되며 많은 양의 알칼리도가 필요하기에 적당한 pH조정과 유지가 필요하다. 암모니아성 질소 1mg당 0.17mg의 세포가 생산되기에 질산화 미생물은 세포증식속도가 매우 느리다(EPA, 1975).

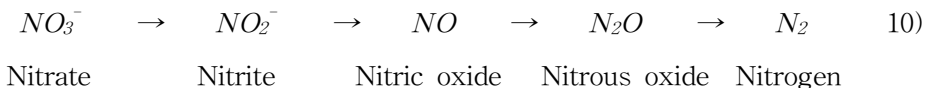
완전한 질산화 과정은 상기와 같은 일련의 반응이 연속적으로 일어나야 하는데, 일반적으로 질산화 과정에서의 속도제한(rate limiting)단계는 NH₄⁺-N를 NO₂⁻-N으로 산화시키는 반응으로 알려져 있다.

이러한 반응에서 질산화 미생물은 환경조건에 대단히 민감하고 특히 신진대사나 1차 산화반응을 방해하는 물질에 민감하다. 그리고 다양한 유기물 및 무기물에 의해 반응이 억제 될 수 있으며 Alkalinity, pH, DO, 온도, 질소원과 유기물의 성분 및 농도 등에 의해 영향을 받을 수 있다.

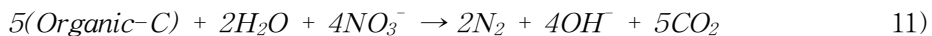
2) 생물학적 탈질화

탈질의 생물학적 과정은 질산화 과정에서 생성된 NO_3^- -N나 NO_2^- -N를 생물학적으로 무산소(Anoxic)상태하에서 질소 가스의 형태로 환원시키는 과정이다. 가스상 물질은 주로 질소가스인 N_2 이지만, Nitrous oxide(N_2O) 혹은 Nitrous oxide, NO로 변환되기도 한다. 가스상 질소는 생물학적 성장을 위해 쉽게 이용할 수 있는 형태가 아니므로, 탈질은 환경에 크게 해를 주지 않는 질소 형태로 변환시키는 것이라고 할 수 있다. 탈질을 위해서는 Nitrate가 존재하는 무산소(Anoxic)조건이 구비되어야하고 유기 및 무기 전자 공여체(Electron donor)가 필요하다.

탈질에 관한 반응 경로는 여러 가지가 제시되고 있지만 가장 일반적으로 알려진 경로는 다음과 같다.



또한 일반적인 유기물일 경우의 반응식은 다음과 같다.



탈질 과정은 통성·중속영양세균(facultative·heterotrophic bacteria)에 의해 이루어지며 탈질소화에 작용하는 미생물은 *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Achromobacter*, *Bacillus* 등으로 이들 세균은 무산소 상태에

서 필요한 산소를 질산염이나 아질산염으로부터 공급 받게되며 이 중에서 *Pseudomonas, denitrificans*의 탈질성이 높다(U. S. SDA. 1989).

용존산소의 존재는 탈질반응에서의 효소작용을 억제하며 탈질을 방해하는데 이는 최종전자수용체로서 질산성질소보다는 산소를 이용할 때 훨씬 많은 에너지를 발생하며 미생물들이 산소를 더 선호하기 때문이다(Toit and Davis, 1973).

과거에는 이러한 변환과정이 혐기성 탈질화(Anaerobic denitrification)로 알려졌지만 주요 생화학적 경로는 혐기성이 아닌 호기성 반응경로를 변경한 것이며, 혐기성 대신 무산소(Anoxic)이라는 개념으로 대체되는 경향이 있다. 일반적으로 호기성 미생물 중에서 산소대신 질산이나 아질산을 최종전자수용체로 사용할 수 있는 전달체계를 가진 미생물이라면 탈질화를 수행할 수 있다(Painter, 1970).

유기성탄소(Organic Darbon)는 탈질을 일으키는데 필요한 에너지를 공급하며 DO, pH, Alkalinity, 온도, NO_3^- -N, SRT 및 독성물질 등이 탈질과정에 영향을 준다.

3. 생물학적인 제거

인의 발생원은 생활하수나 산업폐수 및 분뇨 등이며 기타 농경지 유출수, 축산폐수와 같은 비점오염원에서도 상당량의 인이 배출되고 있다(Metcalf and Eddy, 1973). 하천으로 방출되는 과도한 양의 인은 인근 수계의 부영양화로 이어지는 Choi(1992)등에 의하면 우리 나라의 경우 하수에서 발생되는 총인은 0.202gP/capita/day이며, 분뇨는 1.5gP/capita/day로 전체 발생량 가운데 80% 이상이 분뇨에 의해 기인한다고 보고하였다.

인은 폐수내에서 정인산(ortho-p), 폴리인산(Poly-p), 유기인(Org-p)의 형태로 존재하며 이들은 용해성 인과 불용성 인으로 분류된다.

인의 제거에 관련된 미생물들은 일반적으로 *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Pseudomonas* 등으로 알려져 있으며, 이들은 세포내에 poly-p를 축적하여 인을 제거하고 유기물을 섭취해서 PHB(poly- β -hydroxybutyrate)나 glycogen 등과 같은 물질 축적시 필요한 에너지원으로 이용하며 아울러 poly-p를 가수분해하면서 인을 다시 방출한다. 이러한 인의 과잉섭취작을 이용한 혐기-호기 공법은 phoredox, Bardenpho, Phostrip, UCT, SBR 등의 공정이 개발되어 있다.

미생물은 일반적으로 1~2.5% 정도의 인을 세포내에 함유하고 있다. 이러한 미생물들의 성장환경 조건을 달리하면 세포내의 인의 함량을 5% 혹은 그 이상으로 유리할 수 있으며, 이러한 과잉의 인 섭취를 이용한 생물학적인 제거에 관한 연구가 널리 진행되고 있다(Stensel H. D, 1992). 인은 미생물의 번식에 탄소나 질소에 비하여 소량이 필요하므로 세포합성에 의하여 제거하는 방법으로는 만족할 만한 결과를 얻을 수 없고, 인의 방출 및 과잉섭취현상을 이용하여야 미생물의 각종 물질대사에 필요한 생화학적 당량 이상의 인을 효과적으로 제거할 수 있다.

생물학적으로 인을 제거하기 위한 공법은 반응조내 혐기, 호기상태를 유지하여야 하는데 혐기성 상태에서는 인이 미생물로부터 방출되어 고농도 용해성 인이 수중에 존재하게 된다. 인의 방출은 전형적으로 수중의 유기물로부터 미생물체내의 유기물인 PHB 혹은 glycogen을 체내에 합성하는 과정에서 이루어지며, 산소 혹은 산화된 질소가 존재하면 인의 방출은 제한된다.

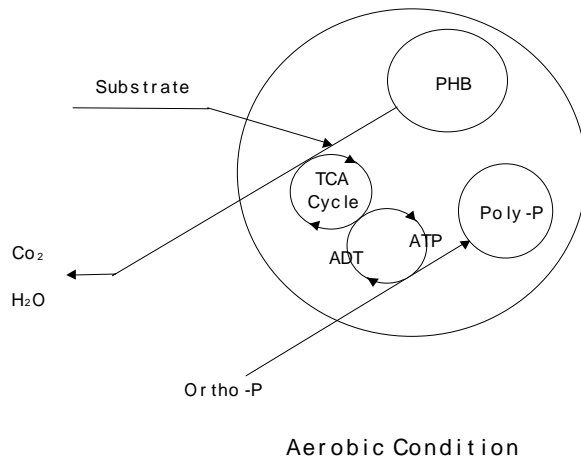
인 제거 미생물은 혐기성 조건에서 세포내에 축적되어 있던 무기인 (Poly-p)을 분해할 때 발생하는 에너지를 이용하여 acetate와 같은 유기산을 섭취한 후에 PHB(poly- β -hydroxybutyrate)로 전환하여 저장하고, 이때에 유리된 정인산(Ortho-Phosphate)을 용액내로 방출시키는데, 이 현상을 인의 방출(Phosphorus Release)이라 한다.

Nicholl과 Osborn은 acetate나 그외의 발효산물들은 혐기성 상태에서 인

의성 미생물에 의해 발효반응으로부터 생성되고, 이러한 발효산물들은 유입하수의 BOD로부터 제공되며 PHB로 합성된 뒤 저장되며 이러한 기작은 *Acinetobacter*에 의한다고 Deinema에 의해 확인되었다.

혐기성 다음에 호기성으로 전환하여 주면 인 제거 미생물은 저장되었던 PHB를 분해하여 ATP를 합성하고, 이를 이용하여 용액내로부터 정인산을 섭취하여 무기인으로 합성하여 세포내에 저장시킨다. 이러한 현상을 인의 과잉섭취(Phosphorus Luxury Uptake)라고 하며 이 과정을 Fig. 4로 나타낼 수 있다(Somiya and Matsumoto, 1988)(Comeau et al, 1986) (Comeau et al, 1987).

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 혐기성 조건에 있는 인 박테리아는 Acetate와 같은 탄수화물을 저장하고 전달하기 위한 에너지 제공체로서 정인산을 이용한다. 호기성 조건하에서는 외부의 탄소원 또는 저장된 유기물을 산화하면서 얻어진 에너지는 인 박테리아에 의해 수중의 인을 세포 체내에 축적하는데 이용되어지고 세포증식 및 높은 에너지 단계인 Poly-P의 재합성에 이용되고 있는 것으로 설명할 수 있다.



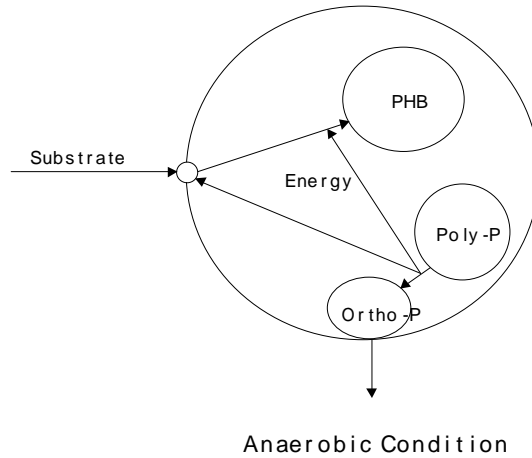


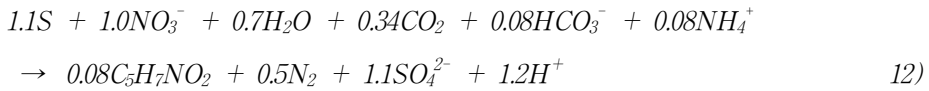
Fig. 4. Biochemical mechanism of the phosphorus removal

4. 국내 상용화 생물여과법

1) 입상황을 이용한 공법

물리화학적 처리를 통하여 부유물질(SS) 및 인(P)을 제거하고, 여재가 충전되어 호기상태로 운전되는 생물막여과조(산화조 및 질산화조)여재층에 유입원수를 통수시켜 여재의 표면에 부착된 생물막(biofilm)에 의해 유입원수중의 유기물 및 암모니아를 산화시키며, 입상 황이 충전된 무산소 조건의 생물막여과조(입상 황 탈질조)에서 황(S)을 수소공여체로 사용하는 독립영양 탈질균이 생물학적 탈질을 수행하는 하수처리기술이다.

황(S)을 수소공여체로 이용하여 탈질을 수행할 때 고려되는 경험적인 반응식은 다음과 같다.

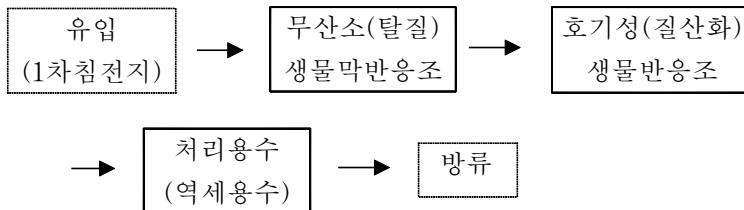


수중의 인을 제거하는데 있어 화학적 인제거의 원리는 수중에 용존되어있는 인화합물에 황산알루미늄을 주입하여 인산알루미늄형태의 침전물을 형성시켜 제거하는 원리로서 반응식은 다음과 같다.



2) 전탈질 생물여과공법

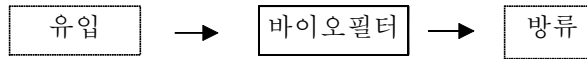
Clay 재질의 소성 입자인 BIOFIL™ 여재(Expanded Clay)를 충전한 무산소(탈질) 생물여과조와 호기성(질산화) 생물여과조로 구성된 상향류 유입방식으로서, 호기성(질산화) 생물여과조에서 산화된 질산성질소를 무산소(탈질) 생물여과조로 내부반송시켜 유입수중의 유기탄소원을 이용하여 탈질시키는 전탈질 기능과, 여재층의 물리적 여과기능과 여재층 표면 및 공극에 부착된 미생물막의 포획기능 및 생물학적 분해기능을 이용하여 하수중의 유기물질 및 질소를 처리하는 기술이다.



3) 바이오휠터(Biofilter)를 이용한 공법

혐기성부패조를 거친 오수가 흡수성 여재인 바이오휠터가 충전된 조상부에서 노즐을 통하여 간헐적으로 살수되면, 자연유하에 의해 통과되면서 바이오휠터 여재층에 형성된 호기성미생물들에 의해 유기물질의 산화분해 및 부유물질이 제거되는 살수여상방식의 오수처리기술이다.

기존의 살수여상에서는 오·폐수와 공기의 유로가 동일하여 오·폐수가 살수되는 동안 공기의 흐름이 차단된다. 따라서 기존의 살수 여상은 여재 하부에 충분한 공기의 흐름이 보장되지 않으나, 이 공법은 흡수성 여재의 특성에 의해 반응조내에서 공기와 오폐수의 흐름이 분리되므로 공기공급으로 여재 표층에는 원활한 산소공급에 의한 호기성 조건을 부여할 수 있고, 여재 심층에는 혐기성 조건이 생성되어, 전체적으로 임의성 조건이 형성된다.



4) 부상식 여재를 이용한 공법

혐기조, 무산소조, 호기조, 침전조 및 생물막여과반응조(BAF : Biological Aerated Filtration)의 공정으로 구성된 이 기술은 혐기조와 무산소조에서는 유입수 중의 유기물을 이용하여 질소·인을 제거하고, 부상식 여재를 충전한 생물막여과반응조에서는 침전조 월류수를 질산화함과 동시에 부유물질을 여과·처리할 수 있는 처리기술이다.

Ⅲ. 재료 및 방법

1. 실험장치 및 분석방법

1) 실험장치

본 연구는 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 접촉 효율을 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 조절함과 아울러 충전된 다공성 부상매질의 생물막을 보다 두껍게 형성시켜 매질 표면의 호기영역과 매질 심부에서의 혐기영역의 동시 조성을 효과적으로 하여 다양한 호기 및 혐기성 미생물의 서식환경을 가능하게 하고,

넷째, 반응조내 과잉 충전층에의 과잉생성 생물체의 탈리는 일정 주기적으로 공기의 공급을 차단한 후, 부상된 매질에의 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 있게 하기 위해서 Fig. 5.에서와 같은 INSUB 장

치를 자체 고안하여 실험적 모형실험을 수행하였다.

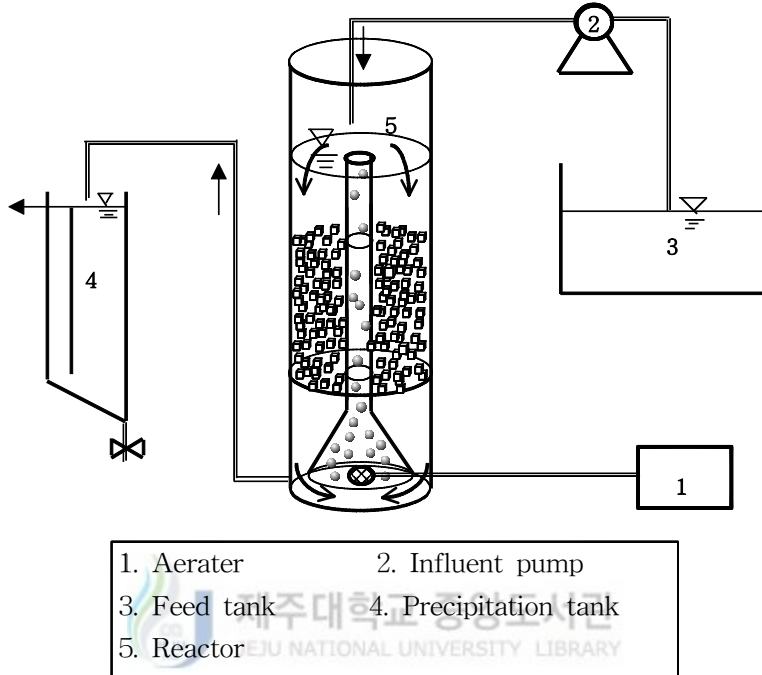


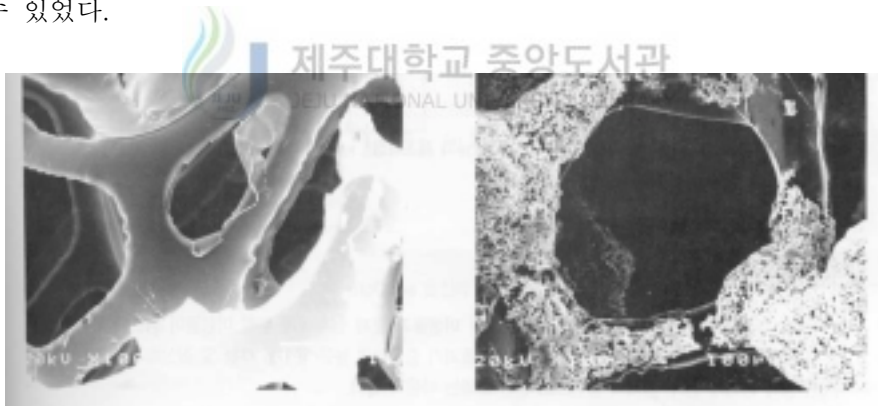
Fig. 5. Schematic flow diagram of reactor.

INSUB는 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 Air Lift에 의한 물순환을 도모하는 간접폭기형(Indirectly Aerated)반응조와 저비중·침적형 스폰지 매질을 이용하는 침적 생물막(Submerged Biofilter)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 실

협기간동안 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 0.035 ± 5 이기 때문에 최초 충전시에는 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 부착형성되어 있음을 확인할 수 있었다.



(a)

(b)

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

2) 분석항목 및 방법

원수는 제주대학교 구내 오수처리장에서 일정시간을 정하여 채취하였다. 각 운전조건의 유입수와 처리수에 대하여 Table 1과 같이 12개 항목을 분

석하였다. 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℃, 5day)
TSS	Gravimetric Method(Dry oven, 105℃)
T-N	Spectrophotometric Method($K_2S_2O_8$, 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

2. 유입 오수의 수질특성

본 실험에 사용된 오수의 수질은 대학내 발생오수의 특성상 수질의 경시 변화가 큰 특징을 갖고 있으나, 이를 보다 완화시키기 위해서 주간 및 일

간 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 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 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 raw wastewater used in this study

Item	Maxium	Minimum	Mean
TCOD _{cr} (mg/ℓ)	622.25	370.50	496.35
TCOD _{Mn} (mg/ℓ)	208.84	152.54	180.69
TBOD (mg/ℓ)	377.52	271.81	324.66
TSS (mg/ℓ)	176.65	82.00	129.32
T-N (mg/ℓ)	298.73	100.11	199.42
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/ℓ)	263.05	87.61	175.33
$\text{NO}_2^-\text{-N}$ (mg/ℓ)	1.04	0.15	0.59
$\text{NO}_3^-\text{-N}$ (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

3. 실험조건

실험장치는 온도조절이 가능한 항온실에 설치하여 20±2℃에서 운전하였

으며, 유입수는 생폐수의 성상을 유지시키기 위해 $4\pm 1^{\circ}\text{C}$ 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. 6에 나타내었다.

(1) 수리학적 체류시간의 변화

적정의 수리학적 체류시간을 산정하기 위해서 공탐속도를 3.051m/hr 로 하고 여재의 충전율을 40%로 하여 수리학적체류시간을 6, 12, 18, 24hr로 하여 적정의 수리학적 체류시간을 산출했다.

(2) 순환류의 공탐속도 변화

공탐속도의 변화에 따라 반응조내의 폐수의 선속도가 달라지기 때문에 적정의 수리학적 체류시간의 산정후 적정의 공탐속도를 산출해야 하는데, 위에서 산정된 적정의 수리학적 체류시간 18hr로 하고, 여재의 충전율은 40%로 하여 공탐속도를 $1.017, 2.034, 3.051\text{m/hr}$ 로 하여 적정의 공탐속도를 산출했다.

(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 공탐속도 1.017m/hr 에서 충전율을 40, 30, 20%로 하여 적정의 충전율을 산출했다.

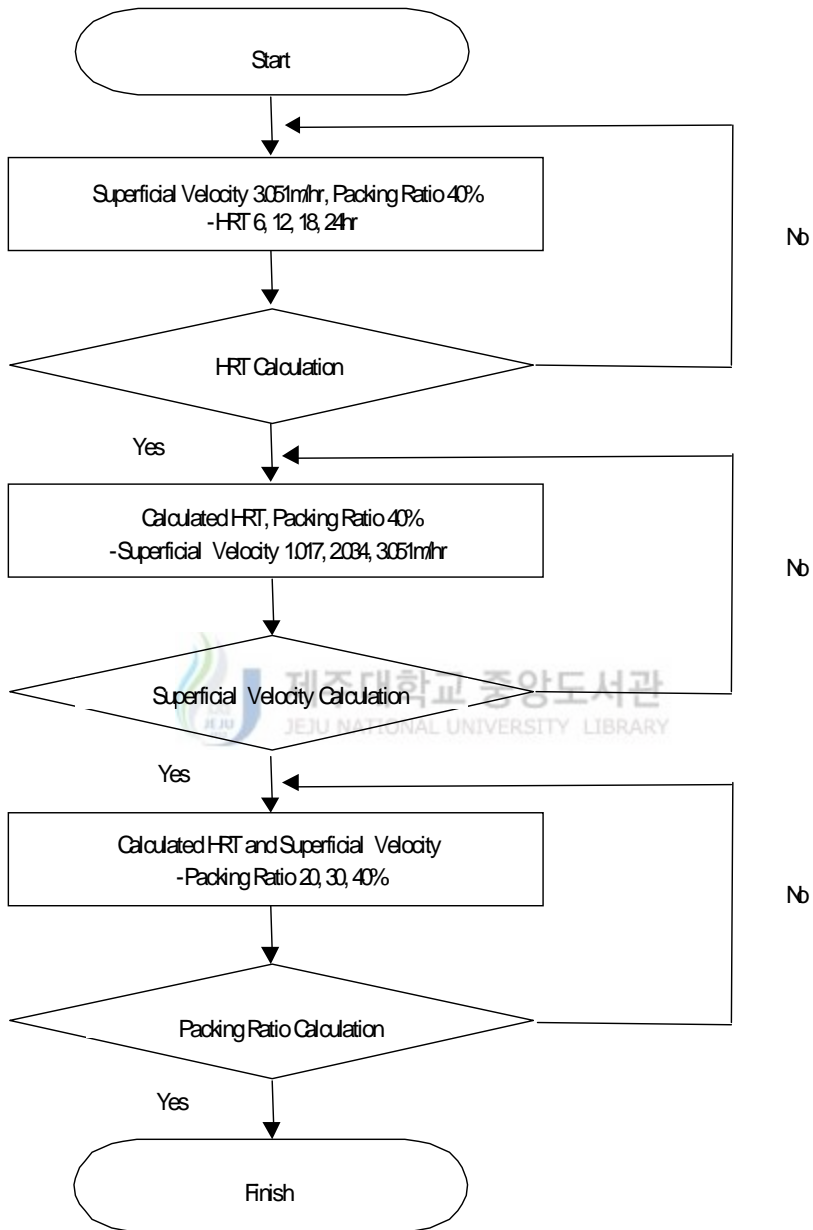


Fig. 6. Flow diagram for this experimental procedure.

IV. 결과 및 고찰

1. 체류시간에 따른 변화

1) 유기물 제거

본 실험에서는 우선적으로 침적반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 유기물 제거영향을 살펴보기 위해서 공탑속도를 3.051m/hr으로 유지하고 media 충전율을 40%로 하여 HRT를 각각 6, 12, 18, 24hr로 하여 실험을 수행하였는데, HRT가 짧아짐에 따라 유입유량은 증가하고 수리학적 부하량도 높아졌다. Fig. 7, 8, 9는 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.

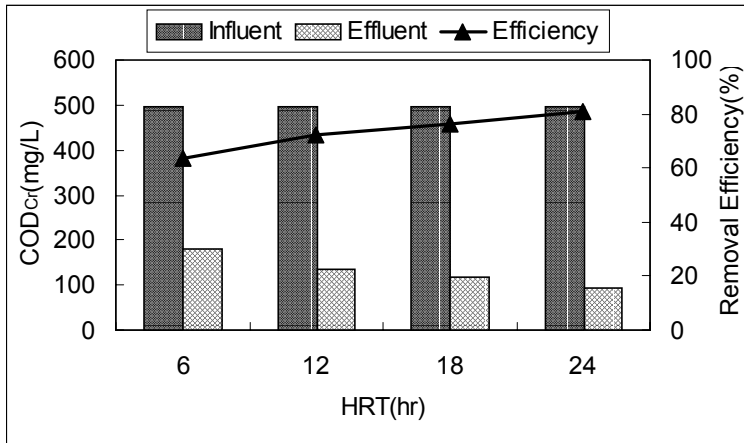


Fig. 7. Variation of COD_{cr} concentration and removal efficiency with the HRT(Packing Ratio 40%, SV 3.051m/hr).

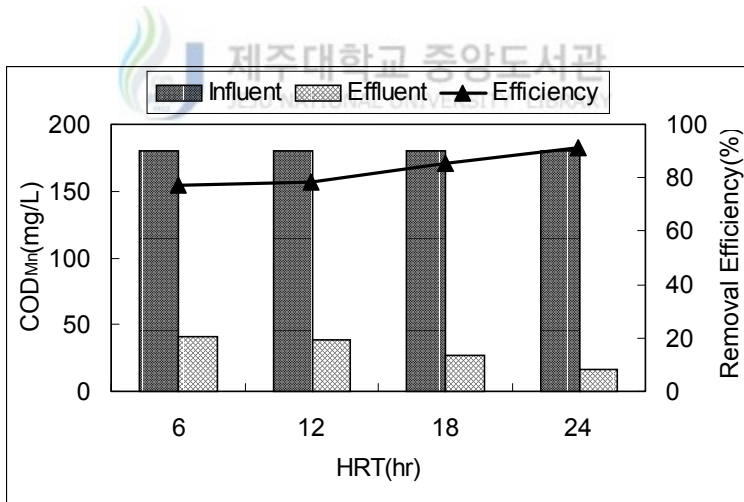


Fig. 8. Variation of COD_{mn} concentration and removal efficiency with the HRT(Packing Ratio 40%, SV 3.051m/hr).

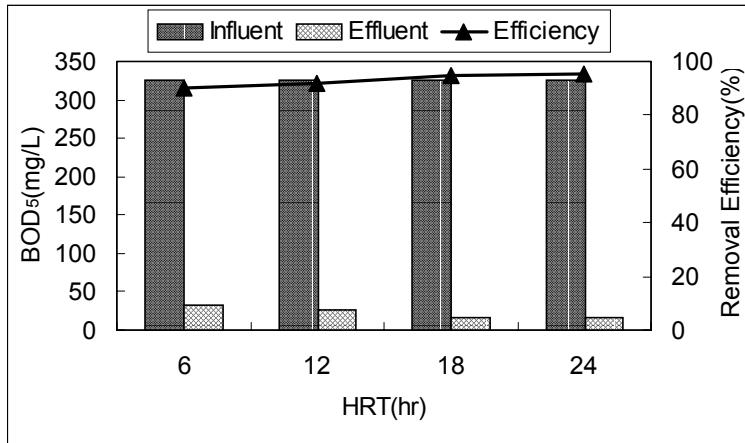


Fig. 9. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiency with the HRT(Packing Ratio 40%, SV 3.051m/hr).

2) 질소·인 제거

침적반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 질소의 제거영향을 살펴보기 위해서 공탑속도를 3.051m/hr로 유지하고 media 충전율을 40%로 하여 HRT를 각각 6, 12, 18, 24hr로 하여 실험을 수행하였는데, Fig. 10과 Fig. 11은 각 HRT별로 운전 개시후 정상상태에 도달한 후 T-N과 NH₄⁺-N의 유입, 유출농도 및 제거효율을 나타내었다. Fig. 10과 Fig. 11에서 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 침적반응장치는 이러한 질산화와 탈질화를 이룰 수 있도록 설계된 것으로써 상부 및 media 표면에서는 질산화가 일어나고 하부 및 media 내부에서는 탈질화가 일어날 수 있도록 설계

하였다.

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 이에 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 동시제거효율을 도출하고자 하였다.

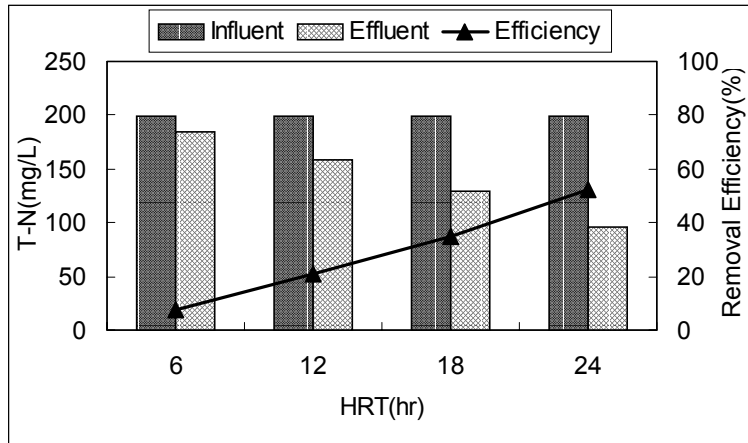


Fig. 10. Variation of T-N concentration and removal efficiency with the HRT(Packing Ratio 40%, SV 3.051m/hr).

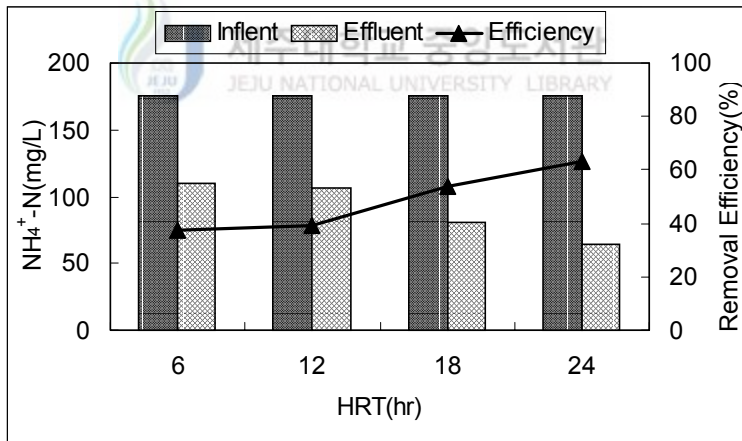


Fig. 11. Variation of NH₄⁺-N concentration and removal efficiency with the HRT(Packing Ratio 40%, SV 3.051m/hr).

침적반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 인의 제거영향을 살펴보기 위해서 공탑속도를 3.051m/hr로 유지하고

media 충전율을 40%로 하여 HRT를 각각 6, 12, 18, 24hr로 하여 실험을 수행하였는데, Fig. 10은 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)였으며, HRT 24시간으로 운전하였을 경우 10일만에 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 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. 이는 Fig. 12에서 나타난 바와 같이 질산화과정에서 생성되어 탈질을 통해 제거되지 못하고 반응조 내 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.

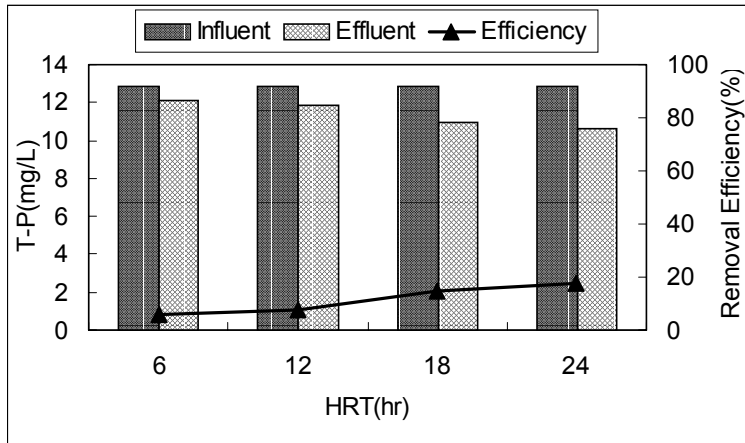


Fig. 12. Variation of T-P concentration and removal efficiency with the HRT(Packing Ratio 40%, SV 3.051m/hr).

2. 순환류의 공탑속도에 따른 변화



1) 유기물 제거

본 실험에서는 우선적으로 침적반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 유기물 제거영향을 살펴보기 위해서 공탑속도를 3.051m/hr로 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 공탑속도를 산정하기 위해 HRT 18hr, 충전율 40%로 하여 공탑속도를 1.017, 2.034, 3.051m/hr로 수행하였다. Fig. 13, Fig. 14, Fig 15는 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, 공탑속도 3.051m/hr로 운전하였을 경우 14일만에 정상상태에 도달하였다. 이때의 유출수의 COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD₅의 평균 농도는 각각 103.40mg/ℓ, 22.69mg/ℓ, 16.33mg/ℓ로 나타났다. 공탑속도 1.017, 2.034m/hr인 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. 13, 14, 15에서 알 수 있듯이 공탑속도의 변화에서 COD_{Cr}을 제외한 유기물의 제거에는 별다른 차이를 나타내지 않고 있다. COD_{Cr}의 경우는 공탑속도에 따른 선속도의 증가로 인해 난분해성 유기물질을 분해하기 위한 접촉기회가 줄어든 것이 제거율에 영향을 미치고, 전체적으로는 선속도 증가에 큰 영향을 받지 않는 것으로 보여지며, 이것은 유기물 산화가 매우 빠르게 일어남을 보여준다. 이러한 것은 질화 및 탈질에 관계하여 공탑속도가 1.017m/hr인 경우가 유기물제거에 유리함을 보여주는 것으로 사료된다.

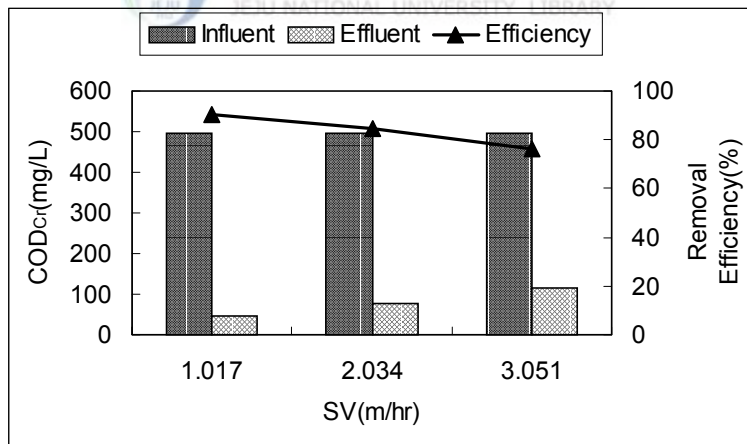


Fig. 13. Variation of COD_{Cr} concentration and removal efficiency with the SV(HRT 18hr, Packing Ratio 40%).

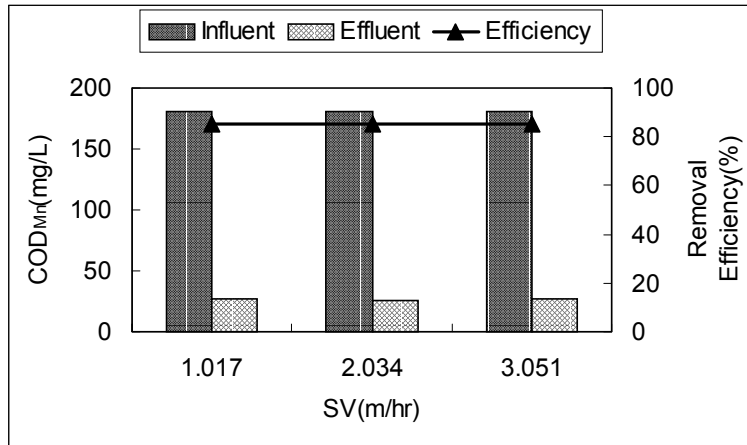


Fig. 14. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency with the SV (HRT 18hr, Packing Ratio 40%).

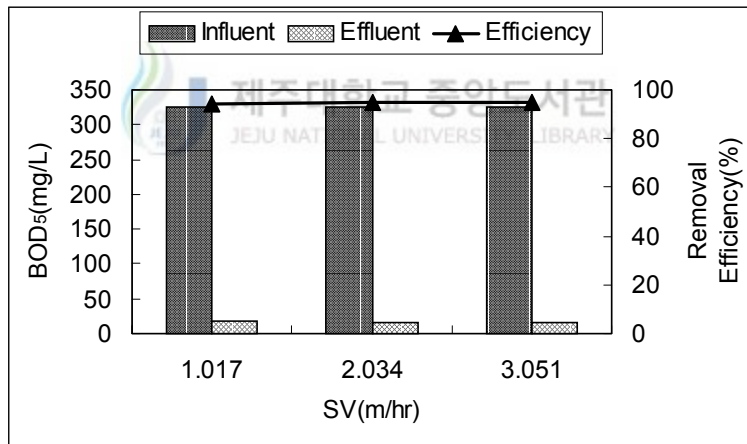


Fig. 15. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiency with the SV (HRT 18hr, Packing Ratio 40%).

2) 질소·인 제거

침적반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 질소의 제거영향을 우선 살펴보았다. 그러나 Fig. 10에서 보여주듯이 HRT 18hr에서 질소의 제거효율이 그다지 높지 않으므로 탈질을 시키기

위한 방법으로 HRT 18hr, media 충진율 40%로 유지하여 공탑속도를 각각 1.017, 2.034, 3.051m/hr로 변화시켜 실험을 수행하였는데, Fig. 16과 Fig. 17은 각 공탑속도에 따른 T-N와 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 유입, 유출농도 및 제거효율을 나타내었다. Fig. 16과 Fig. 17에서 보여주는 바와 같이 암모니아의 제거와 질소의 제거에서 보면 상반된 결과를 보여주고 있는데, 공탑속도가 높은 경우 DO농도가 반응기 하부까지 유지되어 탈질에 방해인자로 작용한 것으로 사료된다.(Delwiche, 1987)

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, 공탑속도에 따른 변화에서는 14일 내에 모두 정상상태에 도달하였다. 공탑속도에 따른 변화에서의 유출수의 T-N 평균농도는 1.017, 2.034, 3.051m/hr에 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 침적반응장치에서 질소 제거 있어서 HRT, pH, 알카리도, 온도, 여재의 물리적 특성 등이 영향인자로 작용할 뿐만 아니라 공탑속도에도 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 또한 그림에서 알 수 있듯이 공탑속도 1.017m/hr에서 질소제거에 유리함을 알 수 있었다.

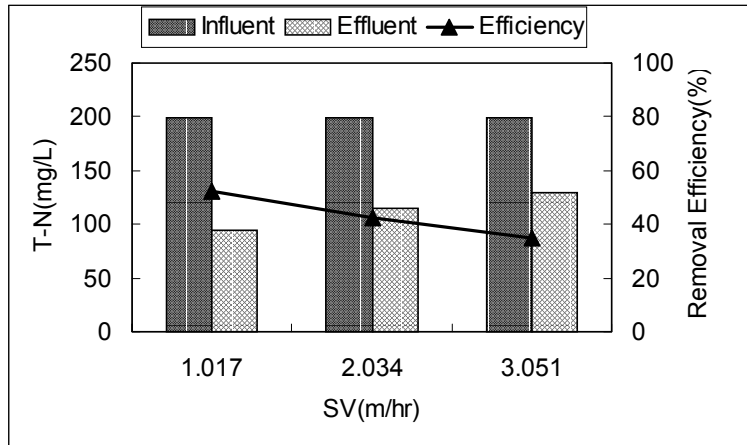


Fig. 16. Variation of T-N concentration and removal efficiency with the SV(HRT 18hr, Packing Ratio 40%).

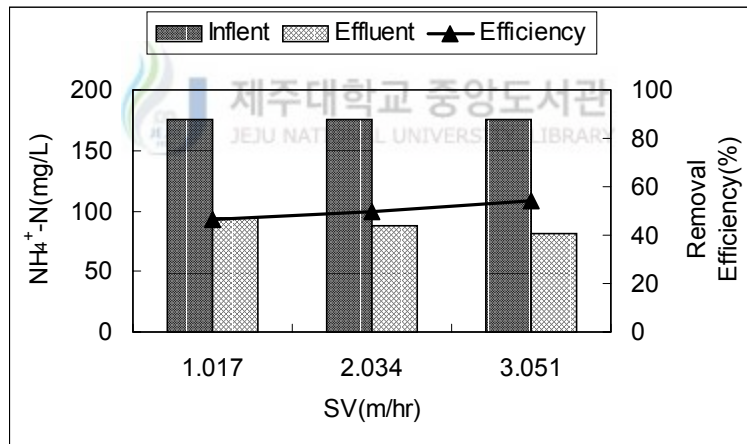


Fig. 17. Variation of NH₄⁺-N concentration and removal efficiency with the SV(HRT 18hr, Packing Ratio 40%).

침적반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 인의 제거영향을 우선 살펴보았다. 그러나 Fig. 18에서 보여주듯이 모든 HRT조건에서 인의 제거효율은 20%이하로 나타나고 있다. 이러한 이유는 앞서서도 언급하였듯이 생물학적으로 인을 제거하기 위해서는 산화질소

의 영향을 줄이기위해 탈질을 시켜야 하는데(Vinconneau, 1985), 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 공탑속도를 각각 1.017, 2.034, 3.051m/hr로 변화시켜 실험을 수행한 결과를 Fig. 18에 나타내었으며 그림은 각 공탑속도에 따른 T-P의 유입, 유출농도 및 제거효율을 나타내었다. Fig. 16과 Fig. 17에서 알 수 있듯이 탈질이 우수한 조건에서 인의 제거도 잘 이루어질 것이며, 이에 Fig. 18에서도 탈질이 우수한 조건에서 인의 제거 또한 우수함을 확인하였고, 공탑속도에 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

공탑속도의 변화에 따른 실험기간동안 유입된 오수의 T-P 농도는 9.88~16.91mg/l (12.31mg/l)였으며, 모든 조건에서 14일내에 모두 정상상태에 도달하였다. 공탑속도에 따른 변화에서의 유출수의 T-P 평균농도는 1.017, 2.034, 3.051m/hr에 대해서 각각 7.31, 7.78 및 8.64mg/l로 나타났다.

Fig. 12에서 보면 T-P의 제거효율은 HRT가 증가함에 따라 조금씩 증가하고 있지만 매우 낮은 제거효율을 나타내었다. 그러나 같은 HRT조건에서 공탑속도의 변화로 인해 탈질이 더 원활히 이루어지게 되고 이에 따라 인의 제거 또한 상대적으로 높게 나타난 것으로 사료되므로 T-P의 제거에 있어서도 적정 공탑속도는 1.017m/hr로 판단된다.

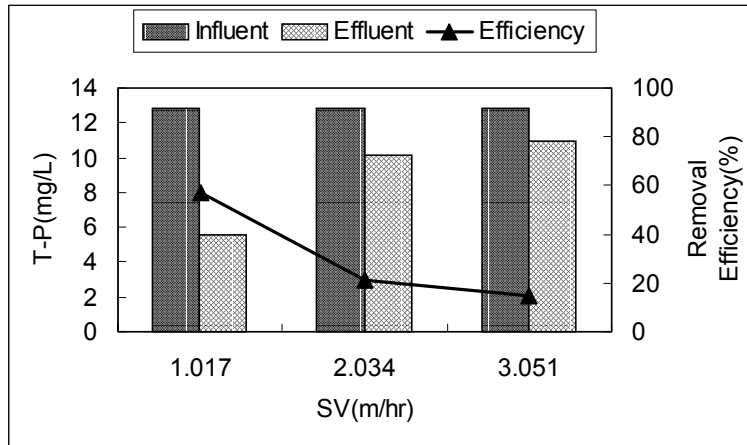


Fig. 18. Variation of T-P concentration and removal efficiency with the SV(HRT 18hr, Packing Ratio 40%).

3. 충전율에 따른 변화



1) 유기물의 제거

본 실험에서는 우선적으로 침적반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 유기물 제거영향을 살펴보기 위해서 공탑속도를 3.051m/hr로 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 공탑속도를 산정하기 위해 HRT 18hr, 충전율 40%로 하여 공탑속도를 1.017, 2.034, 3.051m/hr로 수행한 결과 유기물의 제거에서는 그다지 차이는 나타내지 않았으나 질소와 인의 경우에는 공탑속도에 따라 크게 나타났다. 이에 HRT 18hr, 공탑속도 1.017m/hr로 한 조건에서 충전율에 대한 영향을 알아보기 위해서 반응기 용적에 대한 충전율 20, 30, 40%에 대해 실험을 수행하였다. Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21은 충전율의 변화에 따른 실험에서 media에

미생물이 안정적으로 부착된 후 COD_{Cr} , COD_{Mn} , BOD_5 의 평균 유입, 유출 농도 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), BOD_5 271.81~347.51 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%, BOD_5 제거효율은 89.28~94.25%로 나타났다. media 충전율이 20~30%로 증가함에도 불구하고 COD_{Cr} , COD_{Mn} , BOD_5 제거효율은 크게 나타나지 않았지만, 담체 충전율이 40%로 증가하자 30%에 비해 약 8.3% 증가하는 결과를 나타내었다.

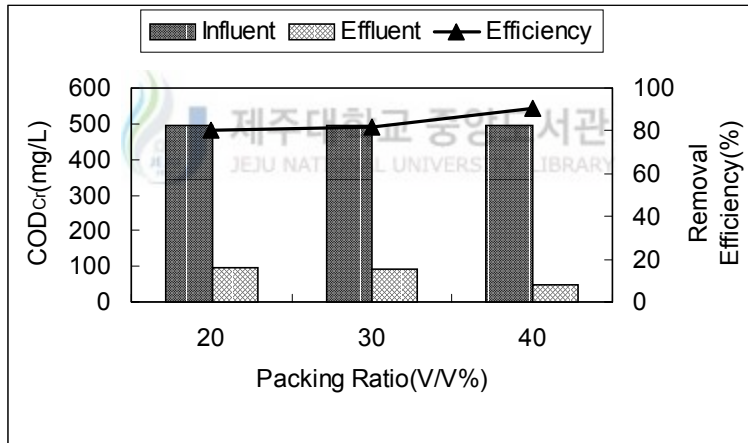


Fig. 19. Variation of COD_{Cr} concentration and removal efficiency with the media packing ratio(HRT 18hr, SV 1.017m/hr).

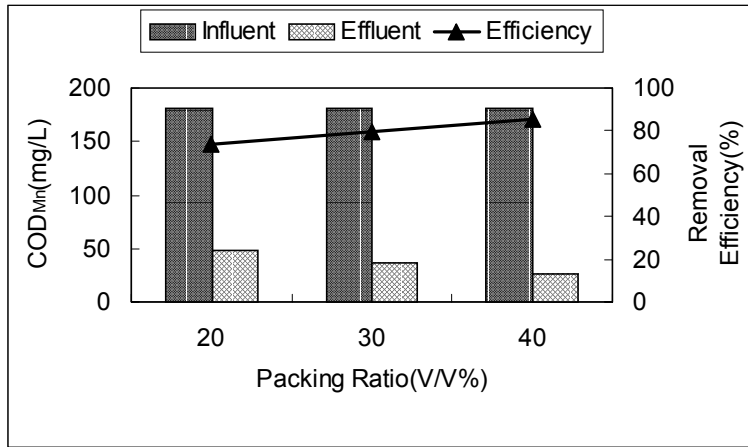


Fig. 20. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency with the media packing ratio(HRT 18hr, SV 1.017m/hr).

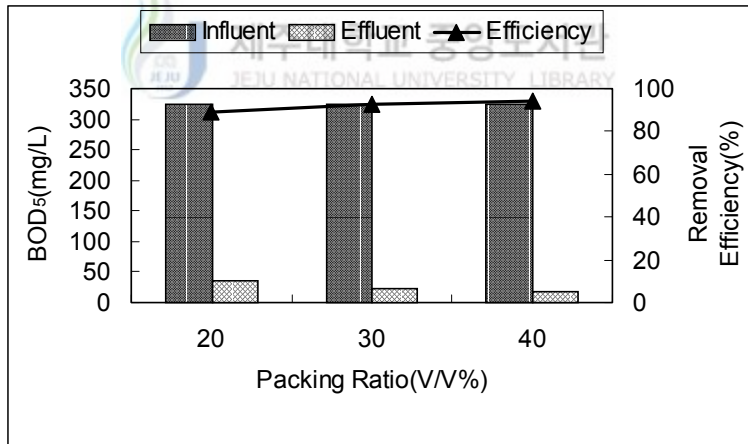


Fig. 21. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiency with the media packing ratio(HRT 18hr, SV 1.017m/hr)

2) 질소 인의 제거

침적반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 질소제거영향을 살펴보기 위해서 공탑속도를 3.051m/hr로 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 산정하였으며, 두번째로 반응기내 유체의 흐름속도를 좌우하는 적정의 공탑속도를 산정하기 위해 HRT 18hr, 충전율 40%로 하여 공기 유량을 1.017, 2.034, 3.051m/hr으로 수행한 결과 유기물의 제거에서는 그다지 차이는 나타내지 않았으나 질소와 인의 경우에는 공탑속도에 따라 크게 나타났다. 이에 HRT 18hr, 공탑속도를 1.017m/hr로 한 조건에서 충전율에 대한 영향을 알아보기 위해서 반응기용적에 대한 충전율 20, 30, 40%에 대해 실험을 수행하였다.

Fig. 22와 Fig. 23은 media 충전율 변화에 따른 T-N과 NH_4^+ -N의 유입, 유출 농도 및 제거효율을 나타낸 것으로서 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 감소될수 있다는 결과를 보여주었다.(Hawks, 1963)(K. H. Lee 1995)

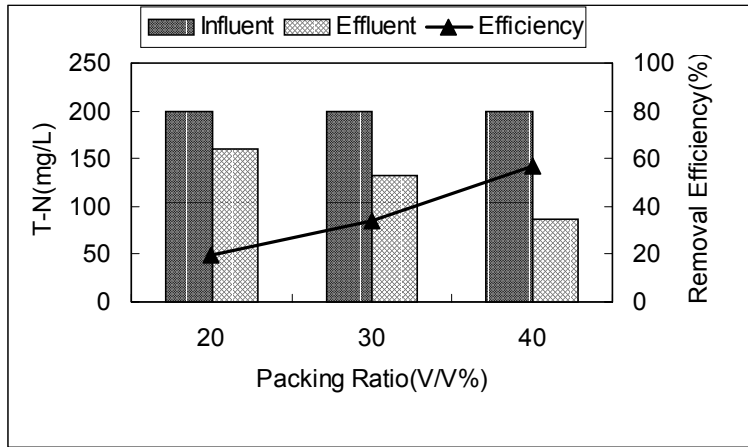


Fig. 22. Variation of T-N concentration and removal efficiency with the media packing ratio(HRT 18hr, SV 1.017m/hr).

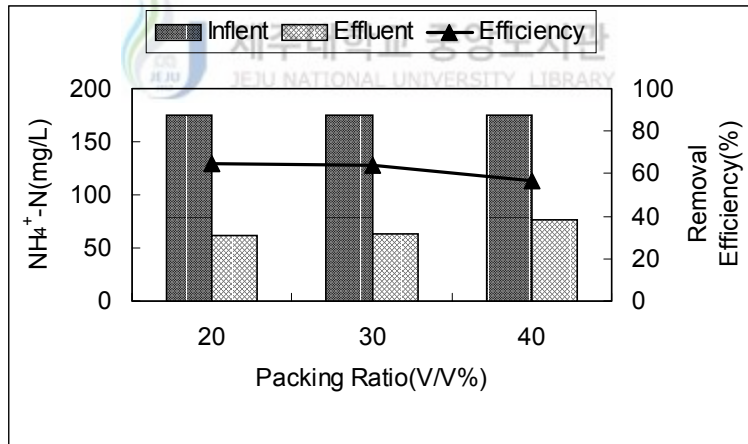


Fig. 23. Variation of NH₄⁺-N concentration and removal efficiency with the media packing ratio(HRT 18hr, SV 1.017m/hr)

침적반응장치에 의해서 오수를 처리할 경우 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 인의 제거에 대한 영향을 살펴보기 위해서 공탑속도를 3.051m/hr로

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 공탑속도를 산정하기 위해 HRT 18hr, 충전율 40%로 하여 공탑속도를 1.017, 2.034, 3.051m/hr로 수행한 결과 유기물의 제거에서는 그다지 차이는 나타내지 않았으나 질소와 인의 경우에는 공탑속도에 따라 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 이에 HRT 18hr, 공탑속도를 1.017m/hr로 한 조건에서 충전율에 대한 영향을 알아보기 위해서 반응기용적에 대한 충전율 20, 30, 40%에 대해 실험을 수행하였다. Fig. 24는 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 산소전달이 용이하지 않아 반응기 상부와 하부에 각각 호기성층과 혐기성층으로 구분화되면서 인의 방출과 섭취가 잘 이루어진 결과라고 사료된다.

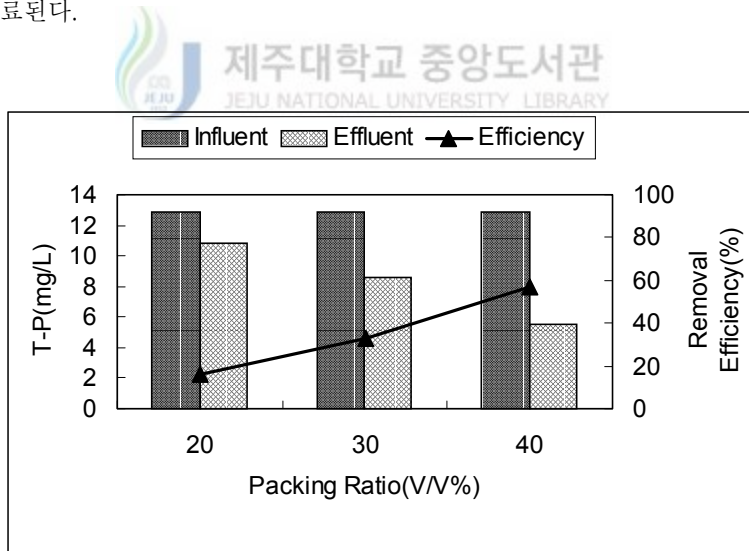


Fig. 24. Variation of T-P concentration and removal efficiency with the media packing ratio(HRT 18hr, SV 1.017m/hr).

3) TSS의 제거

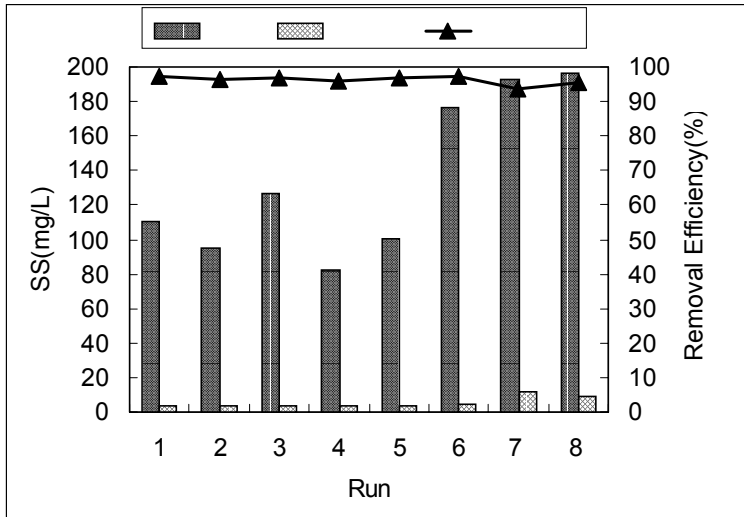


Fig. 25. Variation of TSS concentration and removal efficiency with each the Run(1: 6hr, 2: 12hr, 3: 18hr, 4: 24hr, 5: 2.034/hr, 6: 1.017m/hr, 7: 20v/v%, 8: 30v/v%)

Fig. 25는 각 운전조건에 따른 TSS 유입, 유출농도 및 제거효율을 나타냈다. 운전 기간동안 역세척 횟수는 2번을 수행했으며, 이의 기준은 수두가 생겼을 경우에 행하였다.

각각의 TSS의 제거율은 운전조건의 변화에도 불구하고 약 93.8~97.5%로 거의 비슷한 제거효율을 나타내었다. 이러한 결과는 침적생물반응장치가 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

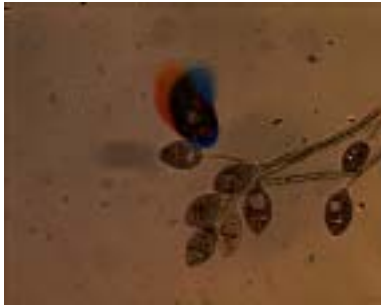
활동한다. 미생물이 흡착표면과 직접적으로 접촉되지 않고, 약간의 공극(~10nm)이 있지만, 이것은 사이에 높은 에너지 장벽이 있으며 세포의 폴리머가 이 장벽을 넘어서 다리 역할을 하고 있는 것으로 생각할 수 있다.

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 충분할 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 미생물 종이 군집을 형성함으로써 온도나 pH변동, 충격부하 및 난분해성 물질유입에 따른 대체능력이 뛰어나고, 매질에 미생물이 부착되어 있으므로 슬러지 팽화현상으로 인한 슬러지 부상 등과 같은 문제점을 줄일 수 있는 것으로 알려져 있는데, Photo. 2. 는 본 실험기간동안 담체에 부착된 미생물을 현미경(OLYMPUS, Model PH-2)으로 찍은 사진이다.



Vorticella 屬



Opercularia 屬



Diplogaster 屬

Epistylis 屬



Carchesium 屬

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



V. 결 론

오·폐수 중의 유기물과 영양염류의 동시제거와 더불어, 경제적이고, 안정적인 유지관리가 가능한 오·폐수 고도정화장치로서 간접폭기형 침적생물막여과장치(Indirectly Aerated Submerged Biofilter; INSUB)를 개발하기 위한 실험실적 모형 실험의 결과로부터 다음과 같은 결론을 구하였다.

1. 간접폭기형 침적생물반응장치에서 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, 설계 시 적정 HRT로는 18hr으로 제안하였다.
2. 공탑속도에 대한 영향을 살펴보았을 때, 유기물제거에는 많은 차이를 보이지 않았지만 질소와 인의 경우에 1.017m/hr인 경우가 가장 높은 제거율을 나타내므로 적정 공탑속도로는 1.017m/hr로 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. 간접폭기형 침적생물반응장치에서 오·폐수를 고도 처리함에 있어 HRT 18hr, 공탑속도 1.017m/hr, 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.

상기의 연구결과를 근거로 본 INSUB System의 상용화를 위해서 현장적용성에 관한 연구, INSUB의 다단화에 관한 연구, 자동화에 대한 연구 등이 순차적으로 수행되어야 할 것이다.



VI. 참 고 문 헌

- Boller, M. W Gujer, and M. Tschui, 1993, parameters Affecting Nitrifying Biofilm Reactor, Second International Specialized Conference on Biofilm Reactors, September 29th-October, pp 15-25
- Comeau, Y., Hall, K. J., and Hancock, R. E. W., 1986, "Biochemical Model for Enhanced Biological Phosphorus Removal", Water Res., Vol. 20, No. 12, pp. 1511~1521
- Comeau, Y., Hall, K. J., and Rstowitz. B., 1987, "Phosphate Release and Uptake in Enhanced Biological Phosphorus Removal from Wastewater", J. WPCF, Vol. 59, No.7, pp. 707~715
- Delwiche C. C., 1970, "The Nitrogen Cycle", Scientific American, Vol. 223, No. 3, pp. 137-146
- 이규성, 홍종형, 조용형, 김성수, 1991, 수질오염방지기술. 동화기술, pp. 228-229, 313-319.
- 이채남, 박영식, 최윤찬, 송승구, 1995, "담체의 표면거칠기와 전단응력이 미생물 부착에 미치는 영향", 부산대학교 환경연구보, 13권
- Groenestijn, J. W. and M. H. Deinema., 1985, Effects of Cultural Conditions on Phosphate Accumulation and Release by Acinetobater Strain 210A Proceedings of the International Conference, Management Strategies for Phosphorus in the Environment, Lisbon, Portugal, July 1-4
- Hawks. H. A., 1963, The Ecology of Wastewater Treatment, A Pergamon Press Book, The Macmillan Company.
- 한지용, 1999, Removal of nitrogen and phosphorus in sewage by change of operating condition on SBR process, 한국물환경학회지, 제 15권 2호

- 환경부, 1997, 오·폐수 처리기술, 풍림 산업 기술 연구소, p. 42
- 환경부, 2002, 환경신기술 소개집
- J. D. Bryers and W. G. Characklis, 1982, "Process Govering Primarry Biofilm Formation", *Biotechnology and Bioeng.*, Vol. 14, pp. 2451-2476,
- Kelly, D. P., 1971, "Autotrophy : Concepts of Lithotrophic Bacteria and Their Organic Metabolism", *Annual Review of Microbiology*, Vol. 25, p. 177
- Melo, L. F., T. R. Bott, M. Fletcher and B. Capdevills, 1992, "Biofilms-Science and Technology", Klvwer Academic Pubilisger, pp.1-60
- Metcalf and Eddy, Inc., 1973. Design of nitrification and denitrification facilities, EPA. technology transfer seminar publication.
- Nicholls, H. A., pitman, A. R. and D. W. Osbon., 1984, The readily Biod-gradable Fraction of Sewage; Its Influence on Phosphorus Removal and Measurement. Enhanced Biological Phosphorus Removal from the Wastewater, Vol. 1, IAWPRC Post Conference Seminar, September 24, Paris, France, p. 105
- K. H. lee, D. S. Kim, C. W. Kim and T. J. Park, 1995, "Operation characteristics of an aerobic submerged fixed-film reactor in a high organic loading", *J. of KSEE*, Vol. 17, No. 5, 471-480
- 김남천, 방종인. 1992, 생물학적 폐수처리기술. 동화기술. pp. 33-74
- 김창원, 1998, "공기 부상형 유동상 생물막 반응기에 의한 고도처리기술", *첨단환경기술*, p. 5
- 오영민, 김종재, 1989, "현장실무자를 위한 활성슬러지법", 동화기술
- 윤조희, 이상훈, 1999, "A₂O공정을 이용한 생물막법에서 수리학적 체류시간 변화에 따른 유기물과 질소제거 특성", *한국물환경학회지*, 제15

- 권, 제2호, pp.193-201
- Painter, H. A., 1977, "Microbial transformation of inorganic nitrogen",
Prog. Wat., Vol. 8, No. 4~5, pp. 3~29.
- Painter, H. A. 1970, A review of literature on inorganic nitrogen
metabolisms, Wat. res., Vol. 4, pp. 393~405.
- 山本 외 5명, 1993, "생물여과 process에 의한 하수처리에 관한 연구", 첨단
환경기술, 1권 3호
- Sharma, B. and Ahlert, R. C., 1977, "Nitrification and Removal", Wat.
Res., Vol. 11, pp. 897~925.
- 신상의, 박주석, 1992, "수처리공학", 동화기술, p. 346
- Somiya, I., Tsuno, H. and Matsmoto, M., 1988 "Phosphorus
Release-Storage Reaction and Organic Substrate Behavior in
Biological Phosphorus Removal", Water Res., Vol. 22, No. 1,
pp. 49~58
- Standard method, 1998
- Stensel H. D., et al., 1992. Design and retrofit of wastewater treatment
plants for biological nutrient removal, Technomic public Co.
Inc.
- 수질오염 공정시험방법, 1997
- Toit, P. J., and Davis, T. R., 1973, "Denitrification Studies with
Laboratory Scales Continuous Flow Units", Water Res., Vol.
7, p. 489
- U. S. EPA, 1975, "Process Design Manual for Nitrogen Control", EPA
Technology Transfer
- U. S. SDA, 1989, "principles and practice of phosphorus and nitrogen
removal from municipal wastewater", New York, NY
- Vacher, D. and Connell, C. H., 1967, "Phosphate Removal Through Municipal

Wastewater Treatment”, J. WPCF., Vol. 39, pp. 751-771

Vinconneau, J. C., Hascoet, M. C. and M. Florentz, 1985, "The First Applications of Biological phosphorus Removal in France", Proceedings of the Internatioal Conference, Management strategies for Phosphorus in the Environment, Lisbon, Portgal, July 1-4

Yuhei Inamori, 金周永, 1992. 生物活性炭流動床法における浄化能と生物相. 用水と廢水. 제34권, 제11호



감사의 글

지난 석사과정의 배움이 한편의 부족한 논문으로나마 나오게 되어 감사의 마음을 전하고자 합니다.

이 연구논문이 완성되기까지 애정과 채찍질로 독려해주신 허목교수님의 지도와 관심이 없었다면 이 논문이 완성되기는 어려웠을 것입니다.

감사합니다. 교수님!

논문을 위해 아낌없이 지도 편달해주신 감상규 교수님, 조은일 교수님, 흐트러질 때마다 격려해주신 허철구 교수님, 이기호 교수님, 관심으로 지켜봐 주신 오윤근 교수님, 이용두 교수님 진심으로 감사드립니다.

바쁜 와중에도 많은 조력을 아끼지 않았던 강진영, 오경미, 고기석 선생에게도 고마움을 전하며 석사과정동안 함께 했던 선후배님들께도 감사의 마음을 전합니다. 이름을 모두 적어드리지 못하지만 이해하시리라 믿습니다. 폐수·폐기물 연구실 후배들, 곧 결혼하는 김병현 조교 선생님께도 감사의 마음을 전합니다.

마지막까지 묵묵히 지켜 봐주신 아버님, 어머님께 이 작은 결실을 받칩니다. 고맙습니다.

