

工學碩士 學位論文

生物膜 反應機의 充續率 變化에 따른
有機物 分解 및 窒酸化

指導教授 孫 仁 植



2002年 2月

釜慶大學校 産業大學院

土 木 工 學 科

徐 進 浩

이 論文을 徐進浩의 工學碩士 學位論文으로 認准함

2001年 12月 15日

主 審 工學博士 李 鍾 出



委 員 工學博士 鄭 鎭 護



委 員 工學博士 孫 仁 植



目 次

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	v
第 1 章 序 論	1
第 2 章 文 獻 研 究	2
2.1. 생물막 공법	2
2.1.1. 생물막 형성	2
2.1.2. 생물막 여재(Media)	4
2.2. 생물막 공법을 이용한 유기물 분해	6
2.3. 생물막 공법을 이용한 질소제거 공정	8
2.3.1. 질산화	8
2.3.2. 질산화에 미치는 영향인자	9
2.3.3. 생물막공법에서의 질산화	11
第 3 章 材 料 및 方 法	13
3.1. 세라믹 미디어	13
3.2. 미디어 충진율의 변화에 따른 동력학	14
3.3. Pilot Plant 동력학	15
3.4. 수질분석방법	16
第 4 章 結 果 및 考 察	17
4.1. 미디어 충진율의 변화에 따른 동력학	17
4.1.1. pH의 변화	17
4.1.2. 미디어 충진율 변화에 따른 유기물 제거 특성	18
가. 충진율 변화에 따른 유기물 처리효율 변화	18

나. 유기물 부하량 변화에 따른 제거량 변화	19
4.1.3. 부유물질 제거 특성	21
4.1.4. 매디아 충진을 변화에 따른 질산화 특성	22
가. 충진을 변화에 따른 질산화 효율 변화	22
나. 암모니아성 질소 부하율 변화에 따른 질산화 효율 변화	22
다. 아질산성 질소의 농도 변화	24
다. 질산성 질소 농도 변화	25
4.2. Pilot Plant 운전결과	26
4.2.1. 유기물 제거 효율	26
4.2.2. 부유물질 제거효율	27
4.2.3. 질산화 효율	27
第 5 章 結 論	31
參考文獻	32
감사의 글	35

List of Tables

Table 3.1 Characteristics of Media.	13
Table 3.2 Characteristics of influent.	14
Table. 3.3 Analytical methods.	16

List of Figures

Fig. 2.1 Forming course of biofilm.	3
Fig. 2.2 Schematic diagram of the removal by the biological fixed -film.	7
Fig. 2.3 Profile of substrate distribution through biofilm.	7
Fig. 2.4 Nitrification of fixed biofilm process.	12
Fig. 3.1 Surface of Ceramic Media(SEM).	13
Fig. 3.2 Schematic diagram of Reactor.	14
Fig. 3.3 Schematic diagram of Pilot Plant.	15
Fig. 4.1 pH Variation(Lab Scale Reactor).	17
Fig. 4.2 COD _{Cr} Concentration Variation(Lab Scale Reactor).	18
Fig. 4.3 BOD ₅ Concentration Variation(Lab Scale Reactor).	19
Fig. 4.4 COD _{Cr} Loading Rate Variation(Lab Scale Reactor).	20
Fig. 4.5 COD _{Cr} Removal Rate Variation at Different Loading.	20
Fig. 4.6 TSS and VSS Concentration Variation(Lab Scale Reactor). ..	21
Fig. 4.7 NH ₄ ⁺ -N Concentration Variation(Lab Scale Reactor).	22
Fig. 4.8 NH ₄ ⁺ -N Loading Rate Variation.	23
Fig. 4.9 NH ₄ ⁺ -N Removal Rate Variation at Different Loading.	23
Fig. 4.10 NO ₂ ⁻ -N Concentration Variation(Lab Scale Reactor).	24
Fig. 4.11 NO ₃ ⁻ -N Concentration Variation(Lab Scale Reactor).	25
Fig. 4.12 Variations of COD _{Cr} Concentration.	26
Fig. 4.13 Variations of TSS Concentration.	27
Fig. 4.14 Variations of NH ₄ ⁺ -N Concentration.	28
Fig. 4.15 Variations of NO ₂ ⁻ -N Concentration.	29
Fig. 4.16 Variations of NO ₃ ⁻ -N Concentration.	29

Effect of Volumetric Loading rate on Degradation of Organics and Nitrification

Seo, Jin Ho

*Department of Civil Engineering, Graduate school of Industry,
Pukyong National University*

Abstract

A biofilm process for the wastewater treatment system was evaluated to investigate both the removal efficiency of organic matters and nitrification kinetics. To conduct this experiment, several different packing rates of a ceramic media were used. The result of this study showed that the constantly high removal efficiency of organics and ammonia nitrogen was obtained by maintaining the packing rate of media from 20% up to 80%.

Some important experimental results are obtained as follows:

1. The organic removal efficiency was maintained 80.9% high when the packing rate of media was varied from 80% to 20% at which the organic loading rate was also increased from 0.47 to 2.5 Kg COD_{Cr}/m³/day.
2. Under the varied packing rate of media, the loading rate of ammonia nitrogen was also increased from 0.1 to 0.42 Kg NH₄⁺-N/m³/day. And, the removal efficiency of ammonia nitrogen was significantly reduced at above 0.3 Kg NH₄⁺-N/m³/day of loading rate which was observed at 20% of the media packing rate.

3. According to the result of pilot plant tests, the removal efficiencies of organics and ammonia nitrogen were average 63.8% and 63.5, respectively, at 20% of the media packing rate. However, the nitrification reaction was insufficiently occurred due to the accumulation of nitrite nitrogen in effluent.

4. As an overall conclusion, this biofilm process using the ceramic media was very efficient in the removal of organic matters, but less efficient in the removal of ammonia nitrogen. In addition, the 20% of media packing rate was found to be optimal for the nitrification.

第 1 章 序 論

생물막공법은 미생물을 매디아에 부착·성장시켜 수중의 오염물질을 분해하는 공법으로 질산화균 같이 성장속도가 느린 미생물의 효과적인 증식이 가능하다. 또한 생물막내에 다양한 미생물종이 출현하여 군집을 형성함으로써 온도, pH, 충격부하, 난분해성 물질 등에 대해 안정적인 처리 효율을 유지할 수 있으며, 반응기내 미생물 농도를 일정하게 유지할 수 있는 장점이 있다. 뿐만 아니라 슬러지의 자기산화 촉진으로 인한 슬러지 발생량이 적으며, 슬러지 팽화로 인한 부상이 없다(이규훈 등, 1995 ; Huag, R.T. and McCarty, P.L., 1972).

생물막공법에서 매디아의 재질은 미생물의 활성을 유지하는 데에 중요한 영향 인자 중의 하나이다. 매디아로 이용되는 것으로는 무기입자를 비롯하여 섬유, 합성물질 등 각종 Polymer가 사용되고 있으며, 최근 높은 강도와 비표면적을 가진 세라믹을 이용한 매디아가 개발되어 표면거칠기 뿐만 아니라 기공율과 기공크기를 조절하여 미생물의 부착능을 증가시키고 많은 양의 미생물 서식처 제공할 수 있어 각종 수처리공정의 매디아로 급부상하고 있다(Kawase, M., T. et al., 1989; Odd. Ivar Lekang and Helge Kleppe, 2000).

본 연구는 생물막 공법을 이용하여 생활하수를 처리하는 데에 있어서 다공성 세라믹 매디아의 충진율 변화에 따른 유기물의 분해 및 암모니아성 질소의 질산화 특성을 살펴보고, 최적 충진율을 도출하여, 이를 바탕으로 Pilot Scale 반응기의 장기 연속운전을 통하여 유기물의 분해 및 질산화 효율을 측정하고자 한다.

第 2 章 文 獻 研 究

2.1 생물막 공법

생물막공법은 매디아 등에 부착성장되어 생물막을 형성한 미생물에 의해 기질분해와 세포합성이 이루어지는 공법이다. 이는 미생물이 매디아에 고정되어 있으므로 긴 SRT를 가지며, 질산화균과 같이 비 증식속도가 느린 미생물의 증식이 가능하다. 또한 종 다양성이 증가하게 되며, 특히 타 공법에 비하여 동물성 성분의 점유율이 높고 미소 후생동물의 현존량이 현저하게 큼으로 먹이사슬이 길고 복잡해져 pH, 온도, 수질변동 등의 환경조건 변동에 대응할 수 있는 능력이 크다(이창근, 1995). 또한 고액분리가 양호하며 저농도의 처리에도 적용이 잘되고 슬러지의 발생량이 적은 특징을 가진다.

생물막의 공법에는 오래전부터 사용되었던 살수여상법, 회전원판법이 있으며, 그 외 고정생물막 공법, 유동생물막 공법, 침지여상법 등으로 최근 많은 연구사례가 보고되고 있다.

2.1.1 생물막 형성

생물막의 형성과정은 초기-대수적 축적-정상 및 감쇄 상태의 4단계로 나타낼 수 있는데, 각각의 생물막은 다양한 계면을 통한 물질전달 과정과 지지매체에 생물막이 축적되는 과정으로 분류할 수 있다. 따라서 생물막 형성은 유체의 마찰력이 크지 않을 때, 다음과 같이 물리적, 화학적, 생물학적 공정을 거쳐서 형성하게 된다(W.G. Characklis, 1990).

- (1) 유기물 분자가 젖은 표면에 흡착되어 지지매체 형성
- (2) 미생물이 벌크 액체로부터 젖은 표면으로 이동
- (3) 고체 표면에서의 미생물 부착

(4) 부착된 미생물의 대사작용 및 성장

(5) 액체의 전단력에 의한 생물막의 탈리

Marshall등(1971)은 부착과정에서 두 단계의 명확한 단계로 구성되어 있다고 제안하였다. 1단계는 즉각적으로 일어나며 미생물의 부착능이 상대적으로 약하고 가역적인 단계인 반면 2단계는 비가역적인 단단한 부착으로 세포 중합체 형성을 위한 3시간 이상의 잠복기간을 필요로 하며, 이 단계에서는 부착상태에 있는 생물막을 흐르는 물에서 세척을 하여도 부착된 표면으로부터 생물막이 떨어지지 않는다고 하였다 (Fig. 2.1)

생물막이 두텁게 성장하면 산소전달의 정도가 달라 깊이에 따라 다른 성격을 보이게 된다. 생물막 외부 층의 미생물은 직접적으로 산소와 접촉하게 되어 호기성을 형성하게 된다. 산소 침투가 가능한 생물막의 두께는 2~3mm로 알려져 있으며, 실제로 0.1~0.2mm만 호기성을 띠므로 생물막이 두꺼워지면 미디어 근처에는 혐기성 상태를 이루게 된다(Schulzer, K. L., 1957).

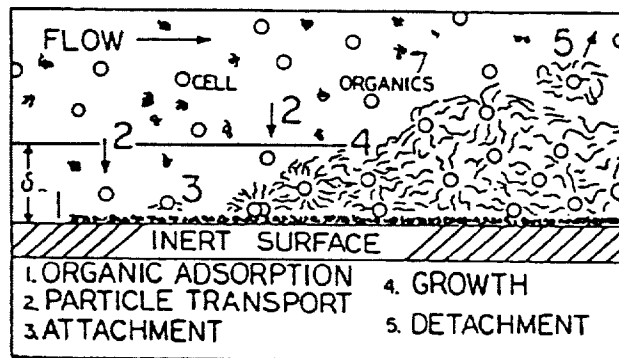


Fig. 2.1. Forming course of biofilm.

2.1.2 생물막 여재(Media)

생물막의 지지대로 사용하는 미디어는 미생물이 부착·성장하므로 공학적인 측면에서 생물막을 빠르게 형성시키고 고농도의 미생물을 유지할 수 있는 조건을 구하는 것이 중요하다. 이를 위해 미디어는 표면적 및 미생물 부착성이 뛰어나야 한다. 또한 미생물의 입장에서 보았을 때 미디어는 미생물의 서식처로서 충분한 공간을 제공하여야 하고 영양분의 공급로가 확보되어야 하며 독성물질의 유출이 없어야 한다.

미디어로 사용되는 것으로는 무기입자를 비롯하여 섬유, 고분자물질, 합성물질, 플라스틱 등 다양한 소재가 사용되고 있다. 이들은 대체로 비표면적을 늘리거나 표면거칠기에 변화를 주어 미디어의 성능을 높이는 방향으로 설계되어 왔다. 우리나라에서 폐수처리용 미디어에 관심을 갖기 시작한 것은 1990년대 이후로 외국의 기술에 의해 개발된 미디어 도입을 시작으로 많은 연구가 진행되어 왔다(박재구 등, 2000).

최근에 들어서는 비표면적이거나 표면거칠기 뿐만 아니라 인위적으로 기공률과 기공크기를 변화시키는 세라믹 미디어가 각광 받고 있으며 운전특성에 적합하도록 담체를 설계하여 제조하는 수준에 이르렀다.

1) 기공율

기공율은 미디어에 포함된 공극의 양을 나타내는 값으로 미디어의 기공은 두 가지로 나뉘어진다. 외부와 연결되어 물질의 이동이 가능한 것을 연속기공이라 하고, 외부와의 물질이동이 불가능한 기공을 고립기공이라 한다. 미디어의 성질은 이런 연속기공과 고립기공의 양적 비율에 따라 좌우된다. 미디어의 기공은 미생물의 서식처가 되므로 기공율이 높을수록 보다 많은 양의 미생물을 서식시킬 수 있다. 현재 사용되고 있는 세라믹 미디어의 경우 평균 기공률은 약 70%-80%로 평가되고 있다. J.H. Tay등(1996, 1999)은 혐기성 조건에서 담체의 기공율, 비표면적, 기공크기

에 따른 폐수처리특성 실험에서 동일한 비표면적을 갖는 매디아의 폐수의 처리효율은 기공율이 높고 기공의 크기가 큰 담체를 투입한 경우에 보다 높게 나타남을 확인하였다. 또한 박태주 등(1989)은 'saran 1000D'와 'saran 4000D'를 이용하여 동일한 기공율에서 비표면적의 차이에 따른 폐수처리 특성을 보고한 바 있다. 이 보고에 의하면 두 종류의 담체가 동일한 기공률에 약 2배의 비표면적 차이가 남에도 불구하고 처리효율은 비표면적이 큰 쪽이 약 9.5%농도 높게 나타났으며, 폐수처리 효율에 미치는 영향은 매디아의 비표면적 보다는 기공률에 의한 영향이 크다고 보고하고 있다.

2) 기공크기의 분포

다공체를 이루는 기공의 크기는 작게는 수 μm 에서 수백 μm 까지 다양하게 분포한다. 폐수처리에 사용되는 미생물의 크기가 보통 $4.5\mu\text{m}$ 내외라고 보면 매디아의 기공은 미생물의 크기에 대해 10배 이상 되어야 미생물 서식처로서 바람직하다. 따라서 매디아의 평균기공크기는 적어도 $50\mu\text{m}$ 이상 되어야 함을 알 수 있다(박재구 등, 2000).

3) 표면거칠기와 비표면적

매디아의 비표면적이나 표면거칠기 등은 초기 미생물막 형성 시에 영향을 미치는 것으로 보이며 그 중에서도 매디아의 표면거칠기는 초기 미생물막의 형성에 큰 영향을 미치는데 이는 매디아의 표면 거칠기가 클수록 유체의 전단응력으로부터 부착된 미생물을 보호하게 되어 초기 미생물막 형성을 용이하게 하기 때문이다(A.P. Annachhatre, 1996; C. S. Harendranath et al., 1996).

2.2 생물막 공법을 이용한 유기물 분해

Sarner(1986)는 폐수 내에 존재하는 기질이 생물막에 의해 제거될 때, 용존성 유기물은 생물막의 내부로 이동하고, 입자상 유기물은 생물막의 표면에 흡착됨으로서 제거된다고 하였다. 또 大 英 (1981)은 생물막에서 호기성 분해와 혐기성 분해가 동시에 이루어져 유기물이 분해되고, 생물막의 내부에서는 유기물의 분해 반응 경로는 대단히 복잡하다고 하였다.

생물막의 표면으로 전달된 기질은 깊이에 따른 농도경사에 의해 생물막 내부의 기질확산계수와 생물막내의 기질농도를 구하나 그 측정이 매우 어려워 모델에 의한 간접적인 측정방법을 쓰고 있다(박종웅, 1988). Rittmann and McCarty(1980)는 Fig. 2.2와 같이 생물막의 표면에 정체된 액막을 가상하여 생물막에 의한 용존성 기질의 제거과정을 설명하였다.

이때 생물막의 내부와 표면 근처에서의 기질 농도는 생물막 깊이에 따라 변화하는 것으로 생각되며 정체된 액막을 통하여 이동하는 용해성 기질은 다음과 같은 Fick's 확산 법칙에 적용된다고 하였다.

$$J = -D \frac{dS}{dz} = D \frac{S - S_e}{L}$$

여기서 J = Z방향 기질 유동량 ($ML^{-2}T^{-1}$)

S = 액막내에서의 기질의 농도 (ML^{-3})

S_e = 생물막의 표면에서의 기질의 농도 (ML^{-3})

L = 액막의 깊이(L)

D = 액막에서의 기질의 확산계수 (L^2T^{-1})

dS/dz = Z방향으로의 기질농도 기울기 (ML^{-4})

Rittmann and Chang(1988)와 Kissel(1984)등은 기질의 제거는 액막확

산, 생물막내에서의 확산, 물질대사 반응속도에 의해 동시에 영향을 받을 수 있다고 하였으며, 또한 생물막의 표면에 유기성 입자가 흡착되면 용존 유기물질의 제거효율을 저하시키는데 악영향을 미치며, 그 원인은 흡착된 입자성 유기물의 분해활동에 많은 용존산소가 소비되어 생물막내의 내부에서 국지적으로 산소부족 현상이 일어나기 때문이라고 하였다.

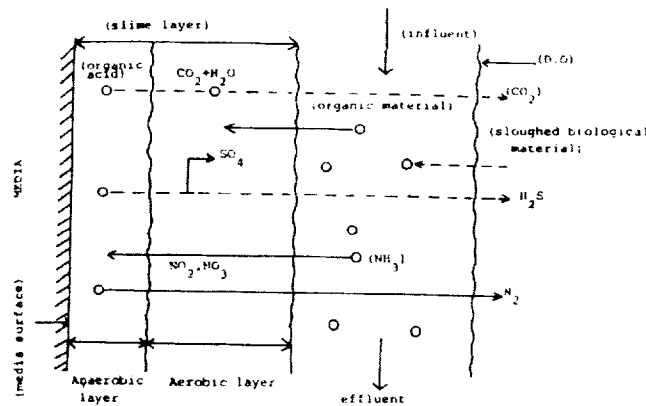


Fig. 2.2 Schematic diagram of the removal by the biological fixed-film.

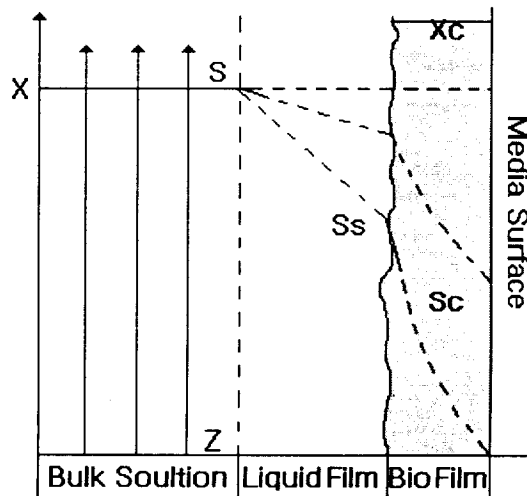
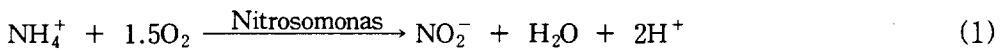


Fig. 2.3 Profile of substrate distribution through biofilm.

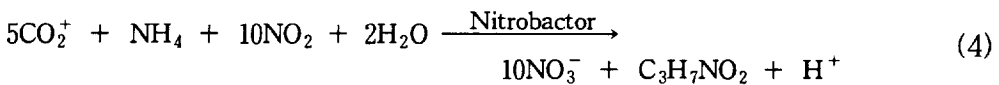
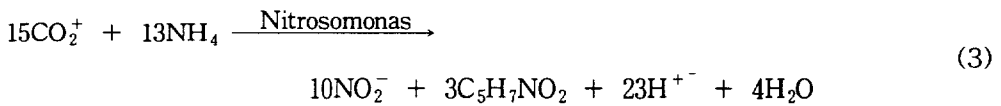
2.3 생물막 공법을 이용한 질소제거 공정

2.3.1 질산화

질산화는 호기성 상태에서 질산화 미생물인 *Nitrosomonas*와 *Nitrobactor*에 의해 암모니아가 아질산을 거쳐 질산으로 산화되는 과정으로 다음의 2단계로 이루어진다.

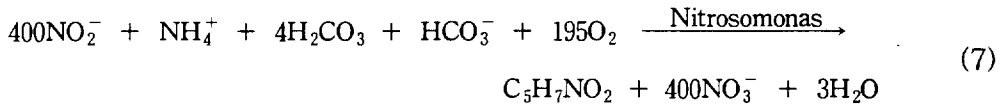
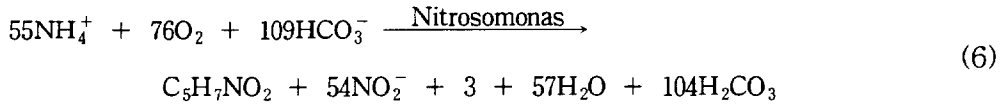


질산화 박테리아는 종속영양 미생물과 비교해서 매우 느린 성장을 하며 산화된 에너지 기질당 세포 생산량도 적다. 이는 에너지 기질과는 별개로 질소와 산소는 독립영양 미생물인 질산화 박테리아가 유기세포물질의 합성에 무기탄소를 요구하기 때문이다. 무기질소 산화에서 얻은 에너지는 CO_2 를 유기형태로 환원시키는데 주로 이용된다. *Nitrosomonas*와 *Nitrobactor*의 구성이 $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$ 로 나타난다고 가정할 때 세포성장 화학양론식은 다음과 같다.

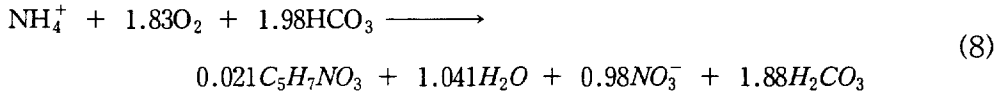


*Nitrosomonas*의 세포성장은 $0.15\text{g VSS/g NH}_4^+\text{-N}$ 이고, *Nitrobactor*의

세포성장은 0.02 g VSS/ g $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 으로 가정하면, 세포성장의 화학 양론식은 다음 식 (6), (7)과 같다.



두 식을 결합한 질산화 미생물의 합성과 산화의 전체 반응은 다음 식 (8)과 같다.



질산화에 있어서 1g의 암모니아를 제거하는데는 4.33g의 산소를 필요로 하고 7.14g의 알칼리도가 소모되며 0.15g의 새로운 세포가 합성된다.

Nitrosomonas와 Nitrobactor는 편성 호기성으로서 오랫동안 산소가 없어도 치사하지 않는다(Painter, 1970). 또한 기질이 없을 때 호기성 조건보다는 혐기성 조건에서 호흡율의 감소가 상대적으로 천천히 일어나며 산소가 없을 때 Nitrobactor는 질산염을 아질산으로 환원시킬 수 있다(Sharma et al. 1977).

2.3.2 질산화에 미치는 영향인자

1) 수소이온농도, pH

질산화에 대한 pH영향은 연구자에 따라 다르게 나타나고 있으며, 이러

한 결과는 pH에 대한 실험이 순응기간 없이 진행되었기 때문에 더욱 복잡하다. Wild(1975)등은 pH 7.0에서 비증식율이 pH 8.0에서의 비증율의 50%정도이고 정비례한다고 보고하였다. Downing(1964)등은 pH 7.2~8.0의 범위에서는 질산화에 미치는 영향이 미미하며, pH 7.2이하에서는 pH 감소와 비례하여 비증식율이 감소한다고 보고하였다.

또한 Hall(1974)은 pH 7.0-9.4의 범위에서는 완전한 질산화가 일어나고, 6.3이하에서는 전혀 질산화가 일어나지 않음을 보고하였다.

순치된 생물의 경우 언급된 것보다 pH의 영향을 덜 받는다. 낮은 pH에서 순치된 미생물은 이전의 최대증식율을 회복할 수 있다(Stankewich, 1972; Haug and McCarty, 1972.). 생물막공법에서는 pH 7.0에서 pH 6.0까지 떨어뜨려 운전할 수 있다.

2) 온도

증식율과 최대 증식율의 값은 온도에 따라 변화한다. 많은 연구자들이 온도에 의한 증식율 및 최대증식율을 산정하기 위한 실험을 행하였다.

U.S. EPA의 Nitrogen Control Manual(1975)에서는 20℃에서의 비증식율은 $0.3-0.5d^{-1}$ 의 범위로 제안하고 있다.

질산화 미생물의 반포화상수(K_s)는 일반적인 종속영양 미생물의 반포화 상수보다 낮은 것으로 알려져 있다. Knowles(1965)등은 온도와 K_s 의 관계식을 다음과 같이 제안하고 있다.

$$K_s = 10^{0.021T - 1.148} \quad (9)$$

이 식을 이용하면 10℃, 15℃, 20℃에서의 K_n 은 0.23, 0.41, 0.74 mg/l이다. 질산화 미생물의 생장율은 8-30℃범위에서 온도의 영향을 받는데 최적의 온도는 약 30℃로 보고되고 있다.

3) 용존산소

Downing and Scragg(1958)은 질산화가 일어나기 위한 최소의 농도는 0.3mg/l라고 보고하였다. 또한 Schoberl and Engel(1964)의 실험에서는 1.0mg/l이상의 농도에서는 Nitrosomonas에 의한 질산화에 영향이 없었고 2.0mg/l이상의 농도에서는 Nitrobactor의 질산화에 영향을 주지 않았다.

DO의 영향을 나타내는 데는 암모니아 농도와 DO 농도를 함수로 하는 double Monod kinetic 식이 일반적으로 이용되고 있다.

$$\mu_n = \frac{(\mu_{n,max})N}{K_s + N} \left[\frac{DO}{K_0 + DO} \right] \quad (10)$$

4) C/N 비

우리나라의 경우는 유기물에 비해 TN농도가 비교적 높아 COD/TN 비를 낮게 하고 있어 질소제거율이 외국의 경우보다 상당히 낮다. BOD₅/TKN 비율이 증가함에 따라 질산화 미생물은 감소한다. 탄소 산화와 질산화 작용의 복합공정에서 이 비율은 5이상인데 단계분리 질산화 공정에서는 3보다 작다(Melcalf and Eddy, 1991).

2.3.3 생물막공법에서의 질산화

암모니아 제거를 위한 가장 경제적이고 광범위하게 이용되고 있는 방법은 생물학적 처리이며 그 중에서도 짧은 수리학적 체류시간에도 높은 미생물 체류시간을 유지하여 기질의 부하변동에 강하고 슬러지의 부가적인 반송을 생략할 수 있는 고정생물막이 널리 사용되고 있다. 활성슬러지의 문제점을 보완한 각종 변법과 상수처리의 전처리공정으로 생물막공법의 적용여부에 관한 연구개발(박미경, 1991)도 최근에 활발히 진행되고 있다.

매디아 표면에 부착된 생물상은 종속영양 미생물과 독립영양 미생물로 구성되어 있다. 이 미생물 중 질산균은 Fig. 2.4와 같이 용존 산소가 존재

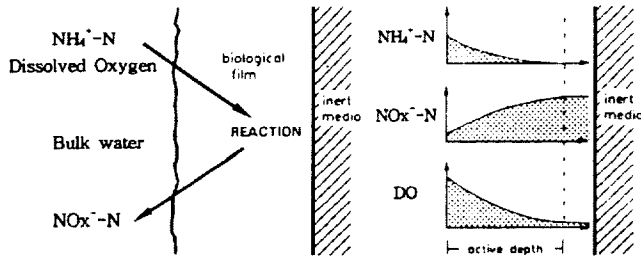


Fig. 2.4 Nitrification of fixed biofilm process.

하는 수중의 암모니아성 질소를 제거하는데 관여한다. 매디아에 형성된 생물막 내부로 용존 산소와 암모니아성 질소가 통과하여 Nitrosomonas와 Nitrobactor에 의해 질산염으로 질산화되어 생물막 외부로 방출되어 물의 흐름에 따라 유출된다. 생물막이 계속 성장하고, 막이 두꺼워지면 산소가 생물막의 내부까지 도달하지 못한다. 호기성 생물막 공법에서 산소가 침투할 수 있는 생물막의 두께는 2~3mm라고 알려져 있는데 생물막이 두꺼워져 혐기성층이 현저하게 증대하는 것은 호기성 처리에 도움이 되지 못하며 비대해진 생물막의 탈리를 위한 역세가 필요하다.

第 3 章 材料 및 방법

3.1 세라믹 미디어

본 연구에 사용된 미디어는 Fig. 3.1에 나타난 바와 같이 공극율이 매우 높은 다공성 세라믹 소재의 미디어로서 (주)씨엠코에서 국내기술로 자체 개발한 원통형 미디어를 사용하였으며 미디어의 특성은 Table 3.1과 같다.

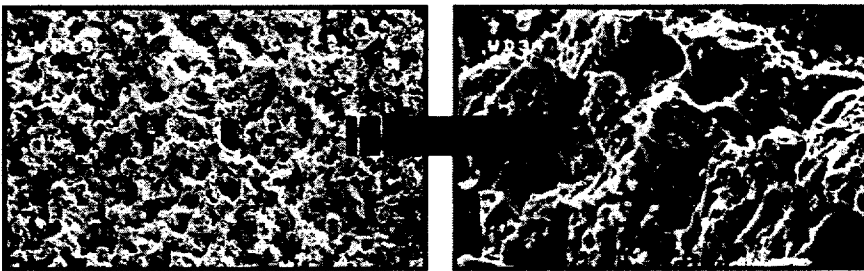


Fig. 3.1 Surface of Ceramic Media(SEM).

Table. 3.1 Characteristics of media.

Parameters	Value
I. D. (mm)	15
O. D. (mm)	30
Length (mm)	25
Porosity (%)	80
Specific Surface Area (m^2/m^3)	11,000
Specific Gravity	1.7

3.2 메디아 충전율의 변화에 따른 동력학

본 연구에 사용된 반응기는 Fig. 3.2와 같으며 아크릴을 이용하여 실험실에서 제작하였다. 전체 반응조 용량은 12 L 이며 반응기의 성능향상을 위해 반응기를 4개조로 분할하였다. 각 조의 하부에는 산기장치를 설치하여 반응기 내부로 공기를 공급하였다.

반응기에 식종된 미생물은 00분뇨처리장의 반송슬러지를 이용하였으며 미생물 부착을 위해 식종 후 2일 동안 폭기한 후 유입수를 유입하였다.

유입수수는 00시 S하천으로 방류되는 생활하수를 직접 채수하여 사용하였으며 유입수의 성상은 Table 3.2와 같았다.

반응기는 20℃ 항온을 유지하였으며, 유입수는 Cole Parmer사의 Master Flex 펌프를 사용하여 HRT는 6시간으로 일정하게 운전하여, 주 3회 유입수와 유출수의 수질을 평가하였다.

메디아의 충전율의 변화에 따른 유기물의 분해와 암모니아성질소의 질산화반응을 평가하기 위하여 메디아 충전율을 80%, 60%, 40%, 20%로 변화하면서 실험하였다.

Table 3.2 Characteristics of influent.

	Unit	Concentration	Average
pH		7.14~8.50	7.53
COD _{Cr}	mg/L	48.91~363.51	111.83
BOD ₅	mg/L	48.50~170	83.96
TSS	mg/L	26.79~448	98.34
NH ₄ ⁺ -N	mg/L	10.12~33.08	20.17

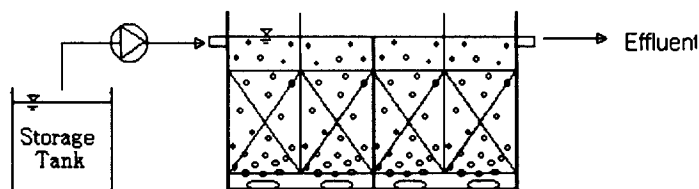


Fig. 3.2 Schematic diagram of Reactor.

3.3 Pilot Plant 동력학

본 Pilot Plant 연구는 세라믹 미디어를 이용한 혐기-호기 생물학적 수처리공정에 세라믹미디어를 최소 충진율로 충진한 후 연속운전을 수행하여 일정한 미디어 충진율에서의 유기물의 분해와 암모니아성 질소의 질산화 및 탈질화 효율을 측정하고 낮은 미디어 충진율에서의 미생물 부착특성 및 장기간 연속운전을 통한 처리효율을 평가하고 공법의 안정성을 검증하였다.

Pilot Plant 반응기는 AO공법으로 저류조, 혐기조, 폭기조 그리고 살균 및 미량오염물질 제거를 위한 UV-광촉매 살균조로 구성된다. 각 조별 용량은 각각 1 ton, 1.2 ton, 1.2 ton, 0.2 ton으로 이루어져 있으며, 혐기조와 폭기조에는 미생물 부착·고정을 위한 세라믹 미디어를 20%씩 충진하였다.

반응기는 00시 위생환경사업소 내에 3m × 6m의 컨테이너를 배치하고 컨테이너 속에 설치하며, 내부 온도는 20℃로 항온을 유지하였다.

본 Pilot Plant의 HRT는 혐기조와 폭기조 모두 8시간으로 운전하였으며, 시료분석을 위하여 원수와 각 조의 유출수를 직접 채수하여 주 3회 분석하였다. 또한 유입수는 위생환경사업소내 1차 소화조 유출수를 이용하여 본 합병정화조 시스템의 유입수로 취수해 연속적으로 운전하였다.

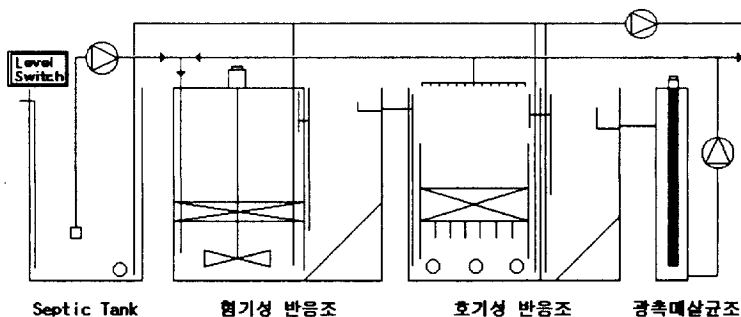


Fig. 3.3 Schematic diagram of Pilot Plant.

3.4 수질분석방법

본 연구에서 세라믹메디아의 특성과 각각의 반응기의 유기물 분해효율 및 질산-탈질 효율을 측정하기 위하여 각각의 반응기로 유입되는 유입수와 처리된 유출수를 직접 채수하여 이를 분석하여 평가하였으며, 이를 위하여 Table 3.3의 방법으로 수질을 분석하였다.

Table 3.3 Analytical methods.

Parameters	Methods
pH	pH meter (Orion 420A+)
COD _{Cr}	Standard Methods*
BOD ₅	수질오염공정시험법**
TSS, VSS	수질오염공정시험법**
NH ₄ ⁺ -N	Ion Chromatography (Dionex DX-120, cation column)
NO ₂ ⁻ -N	Ion Chromatography (Dionex DX-120, anion column)
NO ₃ ⁻ -N	Ion Chromatography (Dionex DX-120, anion column)

*. APHA., AWWA & WPCF, 1989

**.. 김복현 외, 1999

第 4 章 結果 및 考察

4.1 메디아 충전율의 변화에 따른 동력학

4.1.1 pH의 변화

Fig. 4.1에 반응조 운전기간 중 유입수와 유출수의 pH의 변화를 도시하였다. Fig. 4.1에 나타난 바와 같이 유입수 중의 pH는 7.14~8.50이었으며, 유출수의 경우 암모니아성 질소의 질산화반응으로 인해 급격하게 저하되는 것을 관측할 수 있었다.

이것은 암모니아성 질소의 질산화과정에서 1 mg의 암모니아성 질소를 질산성질소로 산화시키는데 약 7.14 mg(as CaCO_3)의 알칼리도가 소비됨에 따른 것으로(Randall C.W. et al., 1992). 본 연구에서는 알칼리도 물질의 첨가를 배제하고 질산화 과정에서의 pH 변화를 살펴보았다.

Fig. 4.1에 나타난 바와 같이 질산화반응이 진행되면서 pH는 4로 저하

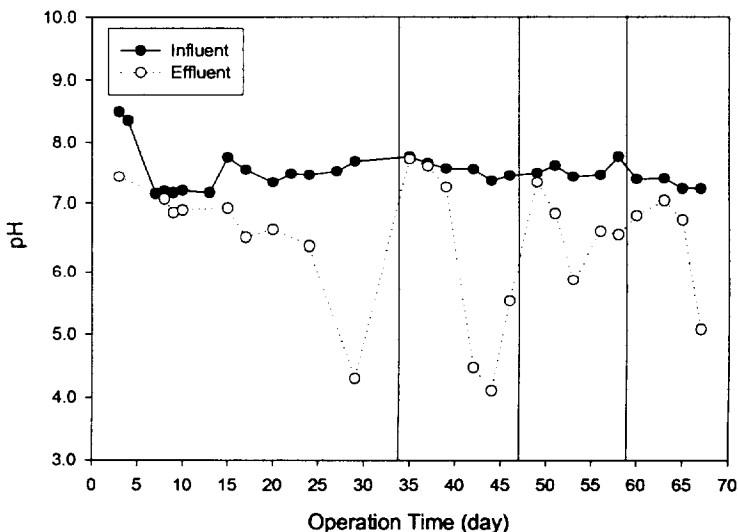


Fig. 4.1 pH Variation(Lab Scale Reactor).

되었지만 충진율을 변화시키는 시점에서 질산화반응의 저하와 함께 pH의 증가를 확연히 관찰할 수 있었다. 이러한 현상은 충진율을 변화시킬 때마다 반복적으로 나타났다.

4.1.2 미디어 충진율 변화에 따른 유기물 제거 특성

가. 충진율 변화에 따른 유기물 처리효율 변화

Fig. 4.2와 4.3에 반응조의 충진율 변화에 따른 COD_{Cr} 및 BOD_5 의 농도변화를 나타내었다. Fig. 4.2와 4.3에 나타난 바와 같이 유기물제거에 있어서 미생물이 미디어에 부착된 후에는 유입수의 부하변동이 심함에도 불구하고 COD_{Cr} 의 경우 평균 80.9%, BOD_5 의 경우 평균 83.2%의 안정적인 처리효율을 얻을 수 있었다. 충진율의 변화에 따른 처리수의 농도변화를 살펴보면, 충진율을 변화시키는 시점에서 COD_{Cr} 및 BOD_5 의 농도가 조금씩 증가하는 경향이 나타났으나, 그 증가폭이 크지 않았고 이내 안정화되어 충진율을 80%에서 20%까지 변화시켜도 처리수질에는 거의 영향을 미

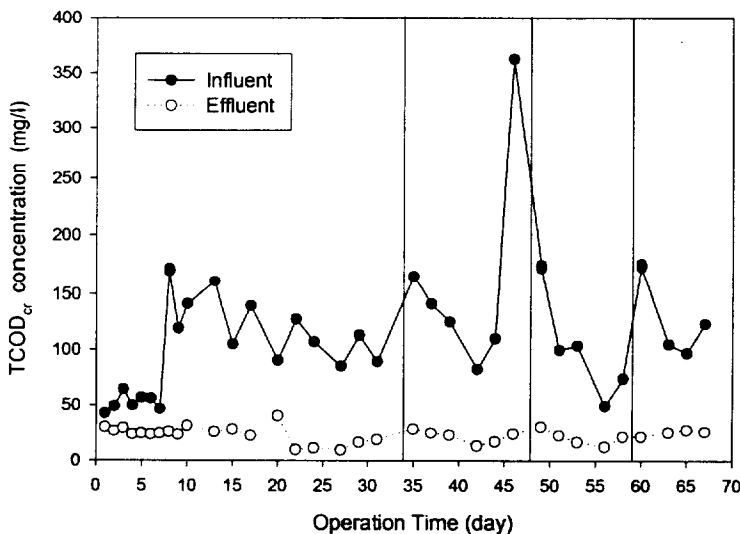


Fig. 4.2 COD_{Cr} Concentration Variation(Lab Scale Reactor).

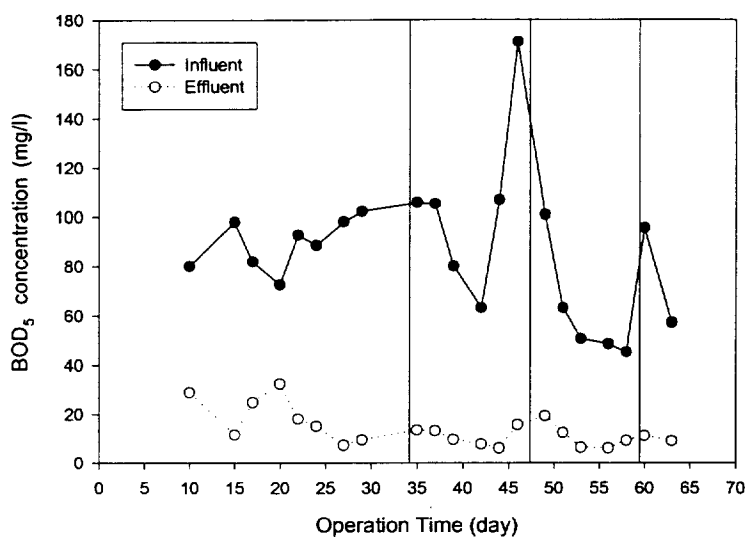


Fig. 4.3 BOD₅ Concentration Variation(Lab Scale Reactor).

치지 않는 것으로 나타나 본 실험에 사용된 세라믹 미디어의 경우 20%만 충전하여도 안정적인 유기물 제거 효율을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

이는 부산대학교의 과제결과보고(1999)에서 세라믹미디어를 이용하여 HRT 10시간으로 운전한 생물막반응기에서 미디어충진율 15%에서도 유기물제거효율이 80.6%의 높은 제거효율을 보인다는 결과와 비교해 볼 때에 미디어 충전율을 20%로 하여도 유기물제거에는 충분할 것으로 사료된다.

나. 유기물 부하량 변화에 따른 제거량 변화

Fig. 4.4는 운전기간동안 미디어의 충전율을 80%에서 20%로 변화시켰을 때 미디어의 유기물 용적부하의 변화를 나타낸 것이며, 80% 충전 시 0.4773 kgCOD/m³day에서 2.493 kgCOD/m³day로 증가하였다.

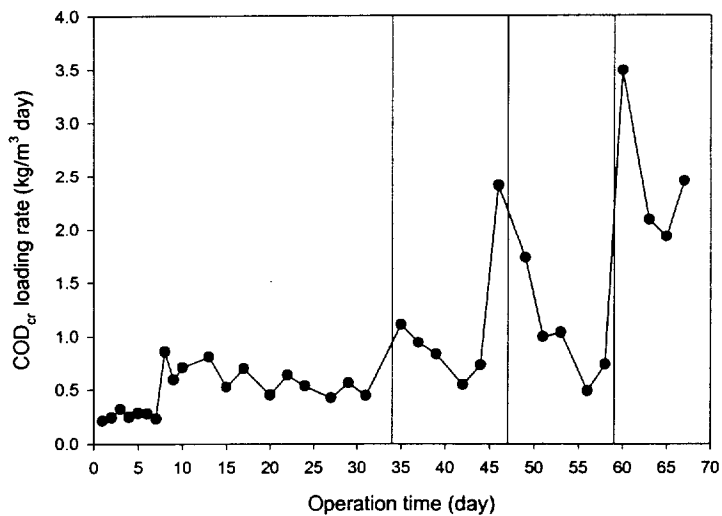


Fig. 4.4 COD_{Cr} Loading Rate Variation(Lab Scale Reactor).

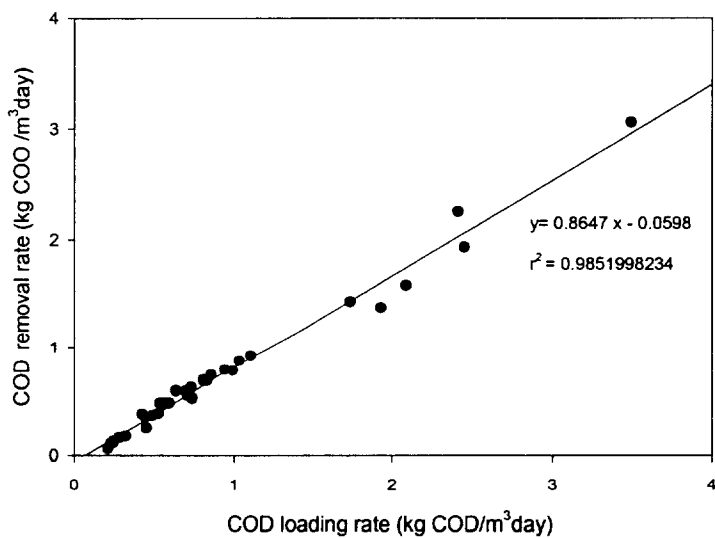


Fig. 4.5 COD_{Cr} Removal Rate Variation at Different Loading.

Wang 등(1991)에 의하면 포기침적여상공법으로 0.05 ~ 0.5 kgCOD/m³day의 부하량에서 79.4 ~ 83.0 %의 제거효율을 나타내었다고 하였으며, 본 연구에서는 이보다 높은 부하에서도 평균 80.9 %의 안정적인 효율을 얻을 수 있었다.

또한 Fig. 4.5는 유입부하량의 변화에 따른 제거량을 도시한 것으로 이를 선형회귀분석한 결과 유입부하량의 변화에 대해 선형적으로 제거량이 증가하고 있었으며, 상관계수가 0.9852로 매우 높은 상관관계를 나타내었다.

4.1.3 부유물질 제거 특성

본 실험기간 동안 부유물질의 농도변화를 측정하여 Fig. 4.6에 도시하였다. Fig. 4.6에 나타난 바와 같이 유입수의 농도변화와 매디아 충전율의 변화에도 불구하고 유출수 중의 TSS와 VSS는 각각 5.84 mg/L와 5.74 mg/L로 95%이상의 높은 제거효율을 유지하였다.

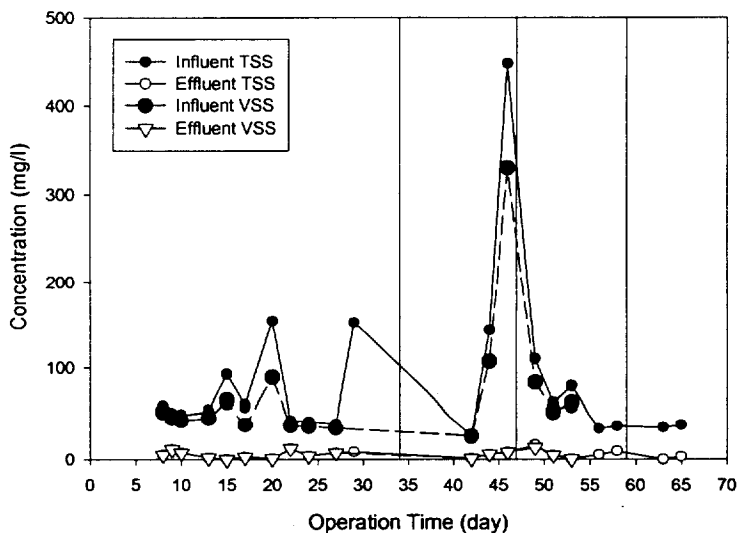


Fig. 4.6 TSS and VSS Concentration Variation(Lab Scale Reactor).

4.1.4 미디어 충진율 변화에 따른 질산화 특성

가. 충진율 변화에 따른 질산화 효율 변화

미디어 충진율의 변화에 따른 암모니아성 질소의 질산화 효율을 측정하기 위하여 유입수와 유출수중의 암모니아성 질소의 농도를 측정하여 Fig. 4.7에 나타내었다.

Fig. 4.7에 나타난 바와 같이 암모니아성 질소의 제거효율은 운전기간 중 70~90%의 높은 제거효율을 보였으나, 미디어 충진율을 20%로 하였을 경우 그 제거효율이 60.7%로 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

나. 암모니아성 질소 부하율 변화에 따른 질산화 효율 변화

Fig. 4.8은 운전기간동안 미디어의 충진율을 80%에서 20%로 변화시켰을 때 미디어에 대한 암모니아성 질소의 용적부하의 변화를 나타낸 것이며, 80% 충진 시 $0.1 \text{ kgNH}_4^+-\text{N}/\text{m}^3\text{day}$ 에서 $0.4189 \text{ kgNH}_4^+-\text{N}/\text{m}^3\text{day}$ 로 증가하였다.

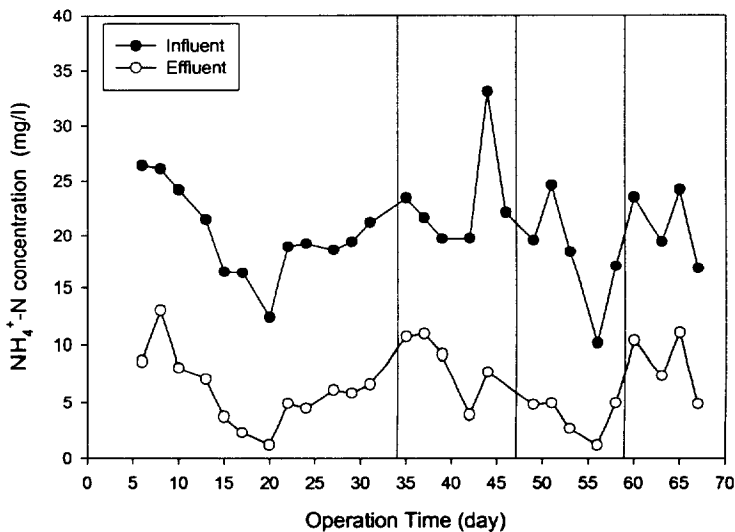


Fig. 4-7. NH_4^+-N Concentration Variation(Lab Scale Reactor).

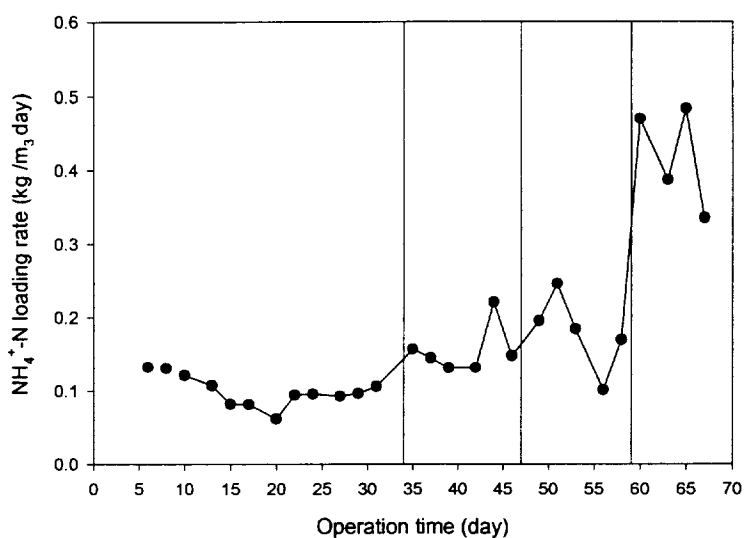


Fig. 4.8 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ Loading Rate Variation.

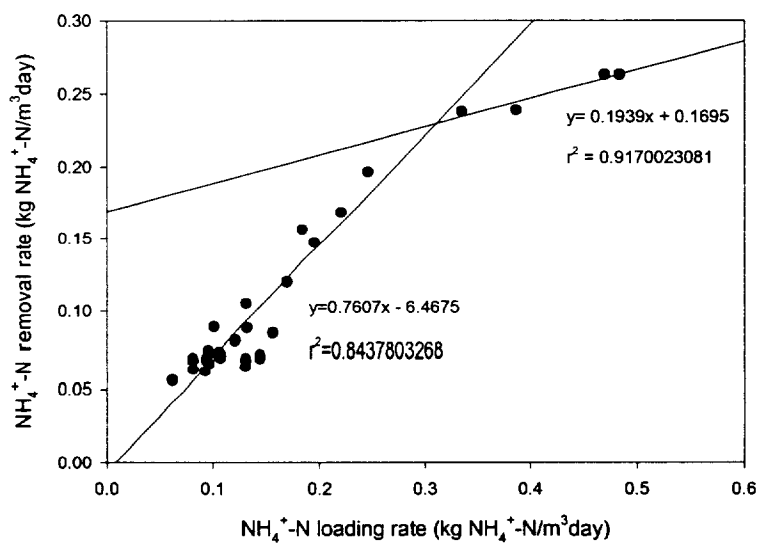


Fig. 4.9 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ Removal Rate Variation at Different Loading.

또한 Fig. 4.9는 암모니아성 질소의 유입부하량 변화에 따른 제거량을 도식한 것으로 이를 선형회귀분석한 결과 매디아 충진율 80%~40%의 범위에서 유입부하량의 변화에 대해 선형적으로 제거량이 증가하는 일정한 제거속도를 나타내었으나, 20%의 충진율에서는 제거량이 급격하게 감소하여 기울기가 0.1939로 제거속도가 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다.

다. 아질산성 질소의 농도 변화

Fig. 4.10은 운전기간 중 아질산성 질소의 농도변화를 나타낸 것이다. 아질산성 질소의 농도는 반응조 충진율을 변화시키는 단계에서 반응조 유출수 중에 크게 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 충진율을 변화시키는 과정에서 질산화미생물이 충격을 받는 것으로 사료된다. 그러나 운전기간 전반에 걸쳐 아질산성 질소의 농도는 1mg/L 미만으로 매우 낮게 유

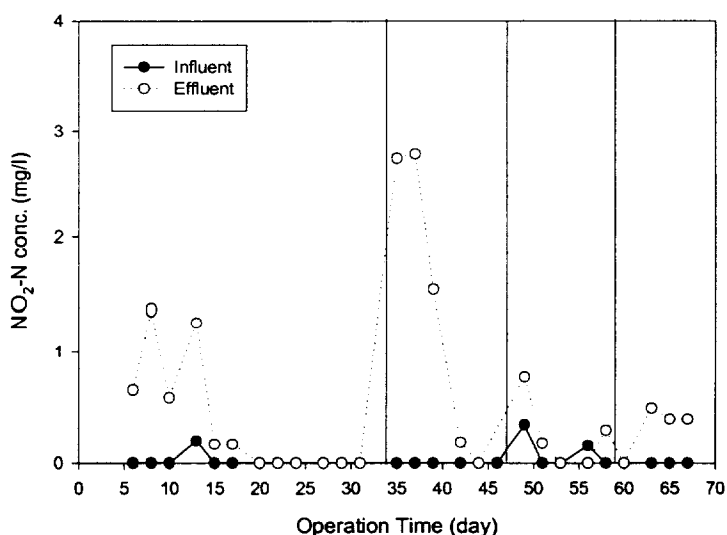


Fig. 4.10 NO₂⁻-N Concentration Variation(Lab Scale Reactor).

지되었다.

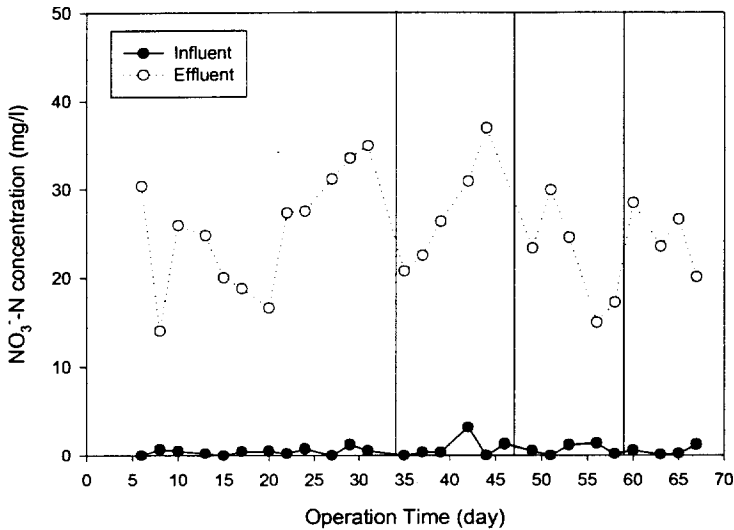


Fig. 4.11 NO₃⁻-N Concentration Variation(Lab Scale Reactor).

라. 질산성 질소 농도 변화

Fig. 4.11은 운전기간 중 질산성 질소의 농도변화를 도시한 것으로서, Fig. 4.11에 나타난 바와 같이 유입수 중에서는 질산성 질소가 매우 미량 존재하였으나, 질산화 과정의 최종산물로 반응조 유출수 중에 14.06 mg/L ~ 36.9 mg/L(평균 25.19 mg/L)의 질산성 질소가 측정되었다. 질산성 질소의 농도 또한 반응조 내의 매디아 충진율을 변화시키는 과정에서 그 생성량이 급격하게 감소하는 경향을 나타내었으며, 운전기간이 경과함에 따라 그 생성량 또한 회복되는 것을 알 수 있었다.

그러나 매디아 충진율 40%와 20%의 경우 질산성질소의 생성량이 일정수준에서 더 이상 회복되지 않고 유지되었으며 이는 매디아의 충진율이 낮아짐에 따라 질산화율이 감소하는 것으로 사료된다.

4.2 Pilot Plant 운전결과

4.2.1 유기물 제거 효율

본 연구에서 Pilot Plant의 운전을 통하여 유기물의 제거효율을 측정하기 위해 각각의 반응조 유출수를 취하여 수중에 용존되어 있는 용존성 유기물의 농도를 측정하기 위하여 화학적 산소요구량(COD)을 측정하여 그 결과를 Fig. 4.12에 도시하였다.

Fig. 4.12에 나타난 바와 같이 유입수의 평균 용존성 COD는 1242 mg/L로 나타났으며, 혐기조 유출수의 경우, 533 mg/L, 폭기조 유출수는 485 mg/L, 유출수는 450 mg/L로 각각 나타났으며, 혐기조에서 대부분의 COD가 모두 제거되고 있는 것으로 나타났다.

전체 운전기간 중 용존성 유기물 제거효율은 63.8%로 유기물 부하의 변동 등에 안정적으로 제거되었다.

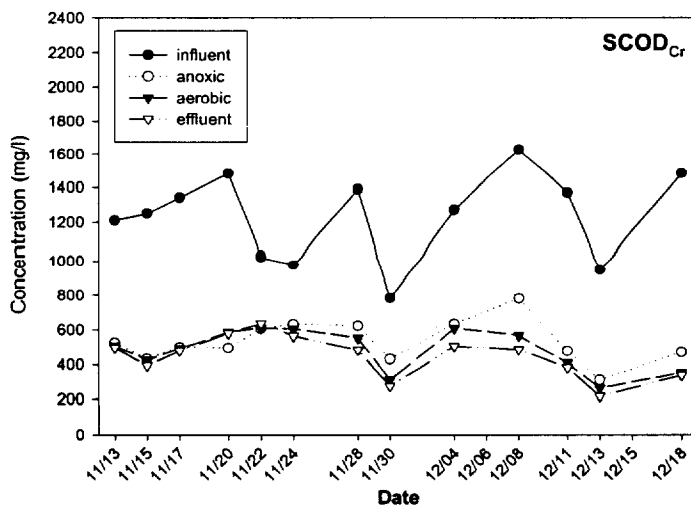


Fig. 4.12 Variations of COD_{Cr} Concentration.

4.2.2 부유물질 제거효율

운전기간 중에 부유물질의 제거효율을 측정하기 위하여 각각의 유출수 중 TSS의 농도를 측정하여 Fig. 4.13에 나타내었다. Fig. 4.13에 나타난 바와 같이 부유물질의 경우 유입수에는 평균 14,830 mg/L로 나타났으며, 혐기조유출수는 340 mg/L, 폭기조 유출수 138 mg/L, 유출수 86 mg/L로 각각 나타났다. 이와 같이 유입된 부유물질의 평균 제거율은 99.4 %로 운전기간 전반에 걸쳐 안정적으로 제거되고 있는 것으로 나타났다.

4.2.3 질산화 효율

본 Pilot Plant의 질산화를 통한 암모니아성 질소의 제거효율을 측정하기 위해 암모니아성질소($\text{NH}_4^+ - \text{N}$), 아질산성질소($\text{NO}_2^- - \text{N}$), 질산성질소($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 농도를 각각 측정하여 그 결과를 Fig. 4.14, 4.15, 4.16에 도시하였다.

Fig. 4.14에 나타난 바와 같이 암모니아성질소의 경우 유입수에는 평균

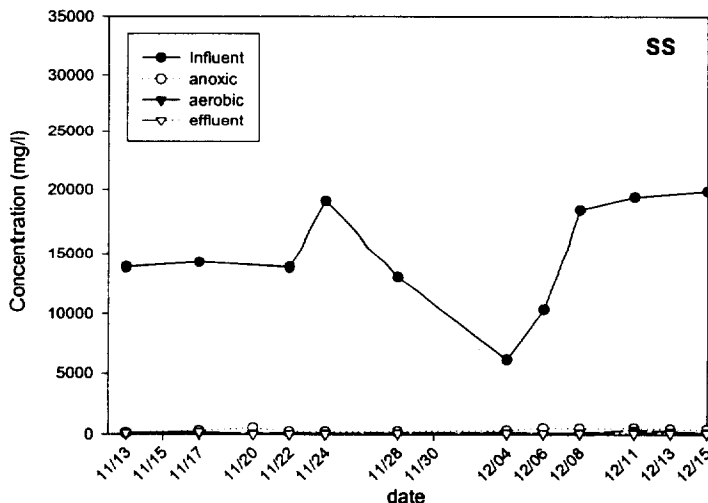


Fig. 4.13 Variations of TSS Concentration.

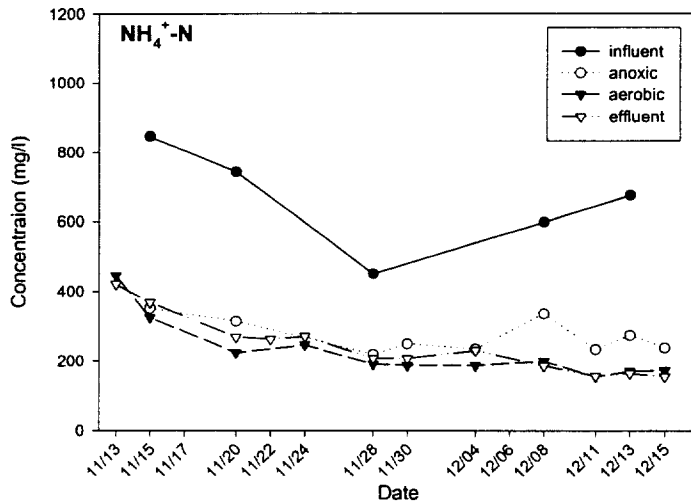


Fig. 4.14 Variations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ Concentration.

663 mg/L로 나타났으며, 혐기조유출수는 273 mg/L, 폭기조 유출수 228mg/L, 유출수 242mg/L로 각각 나타났다. 따라서 주로 폭기조에서 발생하는 질산화반응에 의해 63.5 %의 암모니아가 질산화 되어 제거되고 있는 것으로 나타났다.

Fig 4.15에 나타난 바와 같이 아질산성질소의 경우 유입수에는 평균 30 mg/L로 나타났으며, 혐기조유출수는 262 mg/L, 폭기조 유출수 358 mg/L, 유출수 366 mg/L로 각각 나타났다. 또한 아질산성 질소의 농도는 운전초기에 거의 검출되지 않다가 반응조 운전 경과 일이 지속될수록 조 내에 급격하게 축적되고 이후 지속적으로 감소하고 있는 경향을 나타내었다.

이와 같은 결과로 미루어 본 Pilot Plant 반응기의 질산화과정은 암모니아성 질소가 완전히 질산으로 전환되지 못하고 *Nitrosomonas*에 의해 중간단계인 아질산의 형태로 유출되고 있는 것으로 사료된다.

Fig. 4.16에 나타난 바와 같이 질산성질소의 경우 본 사업기간 동안

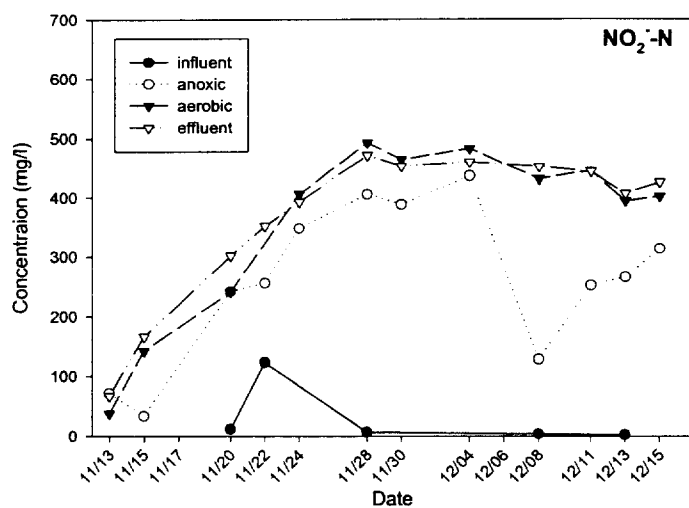


Fig. 4.15 Variations of NO₂⁻-N Concentration

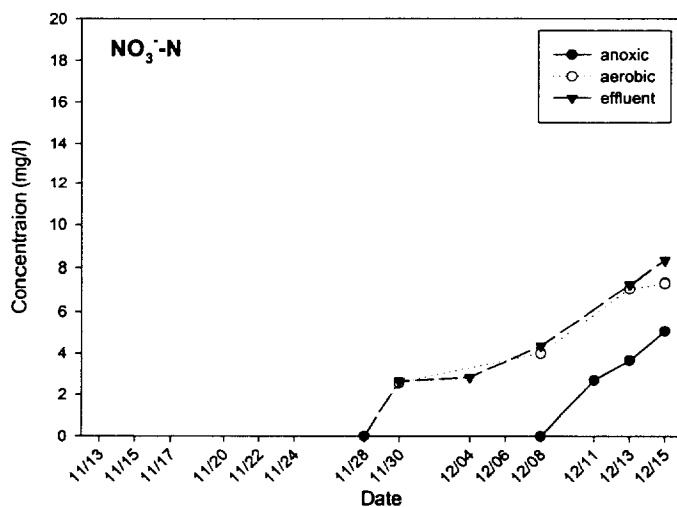


Fig. 4.16 Variations of NO₃⁻-N Concentration

거의 검출되지 않았으며, 11월 28일 이후부터 미량 검출되기 시작하였다.

이상과 같은 결과에서 반응조 운전 경과 후 질산화반응이 지속적으로 증가하는 것을 알 수가 있었으며, 운전초기에 질산화반응의 중간산물인 아질산성 질소가 반응조 내부에 축적되는 것은 반응조 운전초기에 매디아에 미생물이 완전히 부착되지 못하여 생물막 형성이 이루어지지 못한 영향으로 판단되며, 또한 반응조 내의 매디아 충전율이 낮아 완전한 질산화를 유도하는 데에 상당한 시일이 소요된 것으로 사료된다.

第 5 章 結 論

세라믹메디아를 이용한 생물막 수처리 공법에 있어서 메디아의 충진율의 변화에 따른 유기물의 분해와 질산화 동력학을 측정하고 메디아 충진율을 80%~20%까지 변화시켜 운전하여 안정적인 유기물 제거와 암모니아성 질소의 질산화효율을 얻을 수 있었다.

1. 유기물질 제거에 있어서 메디아 충진율을 80~20%로 변화를 주었을 때 유입 유기물 부하량은 $0.47 \text{ kgCOD}_{\text{Cr}}/\text{m}^3\text{day}$ 에서 $2.5 \text{ kgCOD}_{\text{Cr}}/\text{m}^3\text{day}$ 로 증가하였으나, 유기물 제거효율은 평균 80.9 %의 안정적인 제거효율을 유지하였다.

2. 메디아 충진율 변화에 따른 암모니아성 질소의 유입부하는 $0.1 \text{ kgNH}_4^+-\text{N}/\text{m}^3\text{day}$ 에서 $0.42 \text{ kgNH}_4^+-\text{N}/\text{m}^3\text{day}$ 로 증가하였으며, 메디아 충진율 20 %일 때 즉 유입부하 $0.3 \text{ kgNH}_4^+-\text{N}/\text{m}^3\text{day}$ 이상에서 제거효율이 급격하게 감소하였다.

3. 메디아 충진율 20 %로 설계한 Pilot Plant의 경우 운전기간 동안 평균 유기물 제거율 63.8 %의 처리효율을 얻을 수 있었으며, 평균 63.5 %의 암모니아성 질소의 제거율을 유지하고 있었으나, 유출수 중에 아질산성 질소가 축적되어, 완전한 질산화 반응이 이루어지지 않았다.

4. 세라믹 메디아를 이용한 생물막 반응기에 있어서 유기물 제거반응이 질산화를 통한 암모니아성 질소의 제거반응보다 수월하게 이루어짐을 알 수 있었으며, 본 연구에 있어서 안정적인 질산화제거공정을 위해서는 40 %이상 메디아를 충진해야 할 것으로 평가되었다.

參考文獻

- 1) A.P. Annachhatre, 1996, Anaerobic Treatment of Industrial Wastewaters, Resources, Conservation and Recycling, 16, 161-166
- 2) APHA., AWWA & WPCF(1989), Standard Methods for the examination of water and wastewater, 17th, ed.
- 3) Argaman Y., Brenner A.,1986, Single-sludge nitrogen removal : Modeling and experimental results., J. WPCF, 58, 853-860
- 4) C. S. Harendranath, K. Satish and Krishna Lala, 1996, Immobilization in Fixed Film Reactors : An Ultrastructural Approach., Wat. Sci. Tech., 33(8), 7-15
- 5) Dawning, A.L., Painter, H.A. and G., 1964, Nitrofication in the activated sludge process. J. Proc. Inst. Sew. Purif., 64, 130-158
- 6) Erik Sarner,1986, Removal of particulate and dissolved organic in aerobic fixed-film biological processes, Journal WPCF, 58(2) 165-172
- 7) Hall, I.R., 1974, Some studies on nitrification in the activated sludge process., J. Wat. Pollut. Control., Fed 73, 538-547
- 8) Harremoes, P., and M.H. Christensen, 1971, Denitrification med methan, Vand 1, 7-11
- 9) Haug, R.T. and P.L.McCarty, 1972, Nitrification with the Submerged Filter., J.Wat. Pollut. Control, Fed., 44, 2086
- 10) Huag, R.T. and McCarty, P.L.(1972), Nitrification with surbmmerged filters. WPCF 44(11)
- 11) J.H.Tay, K.Y.Show, and S.Jeyaseelan.,1999, Influence of Support Media on Biomass Growth and Retention in Anaerobic Filter, Wat. Res., 33(6), 1471-1481)
- 12) J.H.Tay, S.Jeyaseelan and K.Y.Show,1996, Performance of Anaerobic Packed-bed System with Different Media Characteristics, Wat. Sci. Tech., 34(5/6), 453-459
- 13) Kawase, M., T. Nomura and T. Majima(1989), An Aerobic Fixed Bed

Reactor with Porous Ceramic Carrier, Wat. Sci. Tech., 21, 77-86

- 14) Kissel J.C, Mecarty P.L, and Street R. L., 1984, Numerical simulation of mixed culture biofilm, J. Environ. Eng., 110(2), 393-411
- 15) Knowles, G., A.L. Downing and M.J. Barrett., 1965, Determination of Kinetic Constants for Nitrifying Bacteria in Mixed Culture with the Aid of a Computer., J. Gen Microbial., 38, 263
- 16) Marshall, K.C., Stout, R. and Robert, F.H.(1971), Mechanism of the initial events in the sorption of Marine Bacteria to surface. J. Gen. Microbial., 68, 337-348
- 17) Melfalf and Eddy, 1991, Wastewater Engineering, Treatment. Disposal. Reuse., McGraw Hill
- 18) Odd. Ivar Lekang, Helge Kleppe(2000), Efficiency of nitrification in tricking filters using different filter media, Aquacultural Eng., 21, 181-199
- 19) Painter, H.A., 1970, A review of literature on inorganic nitrogen metabolism in microorganism, Wat. Res., 4, 393-450
- 20) Randall C.W., Barnard J. L. and Stensel H.D.(1992), Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal, 5. Wat. Qual. Management Lib., Technomic Pub. Co. Inc.
- 21) Rittmann B. E. and Chang. H. T., 1988, Comparative study of biofilm shear loss and different adsorptive media., JWPCF, 60(3)., 362-368
- 22) Rittmann B.E. and McCarty P.L, 1980, Model of steady state biofilm kinetics, Biotech. Bioeng., 22, 2243
- 23) Schulzer, K. L., 1957, Experimental vertical screen trickling filter, Sewage and Industrial wastes, 29, 458
- 24) Sharma, B. and Albert, R.C. 1977, Nitrification and nitrogen removal, Wat. Res. 6, 859-869
- 25) Skerman, V.B.D. and I.C. MacRae, 1957, The influence of Oxygen Availability on the Degree of Nitrate Reduction by Pseudomonas denitrification, Dan. J. of Microbiol., 3, 505
- 26) Stankewich, M.J. Jr., 1972, Biological Nitrification with the High Purity Oxygenation Process., Proceeding, 27th Annual Purdue Industrial Waste

Confence, Purdue University, West Lafayette, Ind.

- 27) Syend-Erik Jepsen, Jes la cour Jansen, 1994, Biological filter for Post-denitrification ., Water Sci. & Tech. 27(5-6),369-379
- 28) W.G. Characklis, 1990, Biofilm, John Wiley & Sons Inc.
- 29) Wild, H. E., C.N. Sawyer and T.D. McMahon, 1975, Factor Affacting Nitrification Kinetics, J. Wat. Pollut. Control, Fed., 43, 1845
- 30) 길대수, 1996, 여재를 사용한 무산소-호기공법의 질소 및 인제거에 관한 연구, 부산수산대학교, 석사학위논문
- 31) 김복현 외(1999), 수질환경오염시험법, 동화기술
- 32) 大 英(1981), 小型狀 接觸材の性質と應用, 用水と廢水, 23(4), 29
- 33) 박미경, 1991, 생물막 공법을 이용한 고농도 상수원수 처리에 관한 연구., 고려대학교 대학원 토목공학과, 석사학위 논문
- 34) 박재구, 이태경, 정영, 2000, 폐수처리용 세라믹 담체, 세라미스트, 3(6), 11-19
- 35) 박종웅, 1988, 호기성 침지형 생물막공법이 처리효율에 미치는 영향인자, 서울시립대학교 박사학위논문
- 36) 박태주, 이민규, 안갑환, 송승구., 1989, 고정생물막 공법을 이용한 고농도 폐수처리시 비표면적 영향., J. Korean Ins. Chem. Eng., 28(1) 114-123
- 37) 부산대학교 환경기술·산업개발 연구센터(1999), 기존하수처리장의 시설개조에 따른 영양소제거 공정 Pilot Plant 연구 과제보고서, 97-10-21-99-B-2, 부산대학교
- 38) 이규훈, 김동석, 김창원, 박태주 (1995) 호기성 고정생물막의 고부하 조건에서의 운전특성. 대한환경공학회지. 17(5). 471-480
- 39) 이창근(1995), 고정 생물막공법에서 부착미생물의 역세에 관한 연구, 석사학위논문, 부산수산대학교
- 40) 최해경, 2000, 무산소-호기-무산소-탈기(Anaoxic-Oxic-Anoxic-Stripper)공정을 이용한 고도 하수처리에 관한 연구, 부경대학교, 박사학위논문

감사의 글

먼저 부족함에도 불구하고 심사하여 주신 교수님들께 감사를 드립니다.

짧은 시간동안 많은 지혜와 지식을 깨우치시게 열성적으로 지도하신 손인식 지도교수님과 심사를 맡으신 이종출 교수님, 정진호 교수님께 감사를 드리며 대학원 생활동안 세상을 살아가는 지혜와 학문적 깨우침을 주신 김상용 교수님, 김종수 교수님, 이영대 교수님께 감사드리며 토목공학과 교수님 및 선후배 여러분께 감사드립니다.

학교생활동안 논문준비과정에서부터 오늘까지 함께한 차귀현 사장님, 손정기 부장님, 김경호 차장님께는 고마움을 전합니다.

또한 바쁜 직장생활 중에서도 학문에 충실할 수 있도록 도움을 주신 직장동료 여러분과 물사랑회 선후배 및 사회 선후배 여러분께도 감사를 드립니다.

끝으로 대학원 생활동안 최선을 다하지 못한 제가 부끄럽게 느껴지며 졸업 후에도 항상 책을 가까이 하며 부족한 면을 보충할 것을 약속드리며 오늘이 있기까지 믿음으로 항상 자식이 잘 되기만을 바라시고 조용히 지켜 봐주신 부모님과 가족들에게 무한한 감사와 고마움 드리며 이 한편의 논문을 바칩니다.

2001 年 12 月

서 진 호