

71-1
43P.3
5-2
7-2

工學碩士 學位論文

고정화 질화세균을 이용한
저농도 암모니아의 고도처리

指導教授 徐 根 學

이 論文을



學位論文

을 提出함

2003年 2月

釜慶大學校 大學院

化學工學科

李 政 勳

李政勳의 工學碩士 學位論文을 認准함

2002年 12月 日

主	審	工學博士	李	民	圭	
委	員	工學博士	金	容	河	
委	員	工學博士	徐	根	學	

Advanced Treatment of Low Concentration Ammonia Using the Immobilized Nitrifier Consortium

Jung-Hoon Lee

*Department of Chemical Engineering, Graduate School
Pukyong National University*

Abstract

This study was performed in the airlift bioreactor using the nitrifier consortium entrapped in polyvinyl alcohol(PVA) for removing low concentration total ammonia nitrogen(TAN).

As increasing the superficial air velocity, TAN removal rate and removal efficiency increased gradually at the packing fraction of 10%(V/V) and 15%(V/V). And at the superficial air velocity of 0.83 cm/sec, TAN removal rate and removal efficiency in the conditions of all packing fractions of 10, 15, and 20%(V/V), were $316.6 \pm 7.2 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ and $92.8 \pm 2.2\%$, respectively.

TAN removal rate was continuously increased with decreasing hydraulic residence time(HRT) from 0.5 hr to 0.05 hr, whereas TAN removal efficiency decreased with increasing HRT. So TAN removal rates per packing fraction of 10, 15, and 20%(V/V), were $1007 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$, $1199 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ and $1352 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ at HRT of 0.05 hr, and the maximum TAN removal efficiencies were 93.1%, 94.1% and 96.3% at HRT of 0.35 hr.

As the initial TAN concentration increased from 2.5 g/m^3 to 10 g/m^3 , TAN removal rate also increased from $155 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ to $630 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$, and removal efficiency maintained over 90%.

The optimum temperature for nitrification was about 30°C at which TAN removal efficiency was $95.5 \pm 1.5\%$. Nitrification was effectively performed at low temperature of 10°C . At the pH range 7 to 9 in the bioreactor, removal rate and removal efficiency were $310 \pm 10 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ and $94 \pm 3\%$, respectively.

TAN removal rate followed both Monod kinetics and half order kinetics in overall TAN concentration range, but the latter was easier to apply for nitrification than the former.

목 차

목 차	i
표 목차(List of table)	iii
그림 목차(List of figure)	iv
1. 서 론	1
2. 이론적 고찰	7
2.1. 암모니아의 질산화 과정	7
2.2. 총 암모니아성 질소(TAN) 제거속도식	8
2.2.1. Monod 식을 가정한 TAN 제거속도식	8
2.2.2. 1차 속도식과 1/2차 속도식을 가정한 TAN 제거속도식	9
3. 재료 및 방법	10
3.1. 고정화 질화세균의 제조	10
3.2. 실험장치	10
3.3. 실험방법	13
3.4. 분석방법 및 자료계산	15

4. 결과 및 고찰	16
4.1. 공기 유입량에 따른 암모니아성 질소 제거특성	16
4.2. 수력학적 체류시간에 따른 암모니아성 질소 제거특성	21
4.3. 유입수 암모니아 농도 변화에 따른 암모니아성 질소 제거특성	25
4.4. 온도 변화에 따른 암모니아성 질소 제거특성	29
4.5. pH 변화에 따른 암모니아성 질소 제거특성	32
4.6. 암모니아성 질소 제거에 대한 kinetics	37
4.6.1. Monod 식에 의한 암모니아성 질소 제거속도식	37
4.6.2. 1/2차 식에 의한 암모니아성 질소 제거속도식	40
5. 결 론	44
참고문헌	46
Appendix A. 연구목록	52

List of table

Table 1. Synthetic feedstock solution	11
Table 2. Composition of substrate nutrient	14
Table 3. The result of Lineweaver-Burk plot	39
Table 4. The result of the regression by half order reaction rate	43

List of figure

Fig. 1. Flow diagram of the experiment.	6
Fig. 2. Schematic diagram for airlift bioreactor.	12
Fig. 3. The effect of superficial air velocity on total ammonia nitrogen removal rate and total ammonia nitrogen removal efficiency. ...	17
Fig. 4. The effect of superficial air velocity on dissolved oxygen concentration at DO saturation.	18
Fig. 5. The effect of superficial air velocity on effluent total ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen and total inorganic nitrogen concentration.	20
Fig. 6. The effect of hydraulic residence time on total ammonia nitrogen removal rate and removal efficiency.	22
Fig. 7. The effect of hydraulic residence time on effluent total ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen and total inorganic nitrogen concentration.	24
Fig. 8. The effect of influent total ammonia nitrogen concentration on total ammonia nitrogen removal rate and removal efficiency.	26
Fig. 9. The effect of the TAN concentration in the reactor on total ammonia nitrogen removal rate.	28

Fig. 10. The effect of temperature on total ammonia nitrogen removal rate and removal efficiency.	30
Fig. 11. The effect of temperature on effluent total ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen and total inorganic nitrogen concentration.	33
Fig. 12. The effect of pH on total ammonia nitrogen removal rate and removal efficiency.	34
Fig. 13. The effect of pH on effluent total ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen and total inorganic nitrogen concentration.	36
Fig. 14. The Lineweaver-Burk plot for the determination of kinetics parameter(a) and the relationship between the experimental data and the regression result(b).	38
Fig. 15. The regression for the determination of kinetics parameter of half order reaction rate(a) and the relationship between the experimental data and the regression result(b).	42

1. 서 론

우리나라 하폐수 배출 체계를 보면 크게 생활오수, 공업폐수, 축산폐수로 나누어지며, 그에 따른 하폐수 처리나 분뇨처리 시설에 의해 처리되고 있으나 일부 하수와 혼합처리가 가능한 경우에는 하수 관거로 방류시키고 있는 합류식 하수관거 시스템을 적용하고 있어 처리에 있어 용이하지 못하고, 처리시스템이 복잡해지고 있다. 생활오수나 축산폐수에 의한 유기질소 성분은 인과 함께 부영양화를 초래하고 녹조류나 남조류가 발생하여 정수 처리에 있어 장애를 일으킬 수 있으며, 수돗물의 냄새 및 맛의 저하, 호소에서 수산피해 등의 여러 문제를 발생시킨다.

수중의 질소 성분은 유기 질소, 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 질산성 질소 등의 네 가지 형태로 존재하며 미처리 폐수중의 주된 형태는 유기질소와 암모니아성 질소로서 약 40%가 유기질소이며 60%는 암모니아성 질소이다[1]. 암모니아화(Ammonification)는 단백질, 요소 등의 유기질소 화합물이 암모니아인 무기질소 형태로의 전환되는 것을 의미하며 세균, 방선균, 진균류 등의 매우 다양한 미생물들에 의해 수행된다[2].

총 암모니아성 질소(TAN, total ammonia nitrogen)는 용액내의 비이온성 암모니아성 질소($\text{NH}_3\text{-N}$)와 이온성 암모니아성 질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$)의 합으로 나타내며 수중 암모니아성 질소는 비이온성 암모니아(NH_3)와 이온성 암모니아(NH_4^+)의 형태로 평형을 이루어 존재하고 pH 및 온도에 영향을 받으며 중성의 pH에서 암모니아성 질소의 99%는 이온성 암모니아로 존재하고, pH 9 이상에서는 비이온성 암모니아의 농도가 급격히 증가한다.

EPA[3]에서는 어류를 사육하는 수계의 비이온성 암모니아 농도를 0.02

g/m^3 이하로 유지하도록 권장하고 있다. 비이온성 암모니아가 수중에 존재하는 비율은 pH 7 ~ 7.8인 경우 0.6 ~ 2.45%이므로 수중의 비이온성 암모니아를 0.02 g/m^3 이하로 유지하기 위해서는 총 암모니아성 질소를 2 ~ 5 g/m^3 이하로 유지하여야 한다. 또한 음용수의 총 암모니아성 질소의 수질기준은 0.5 g/m^3 이하이고 질산성 질소는 10 g/m^3 이하로 유지하여야 하므로 2 ~ 5 g/m^3 의 농도를 가지는 저농도 암모니아의 고도처리 기술이 요구되어 진다.

하폐수 중 암모니아성 질소는 암모니아 탈기법, 파과점 염소주입법, 이온교환법 등의 물리·화학적 방법의 처리효율이 높아서 많이 이용되고 있었으나 유지, 관리비가 많이 소요되고 2차 환경오염물질이 생기는 단점이 있어 최근에는 경제적이고 환경 친화적인 생물학적 처리방법을 이용하고 있다.

그러나 일반적인 생물학적 처리법은 부유상 미생물을 사용하는 활성슬러지법으로서 높은 제거효율을 얻기 위해서는 긴 SRT(Solid residence time)를 필요로 하므로 넓은 부지를 필요로 하고 유출수 속의 미생물을 분리해야 하는 문제점이 있다.

수처리공법 중 질소성분 제거를 위하여 주로 이용되어온 담체를 이용한 고정 생물막 공정은 활성 슬러지 공정 및 기타 변형공법에 비하여 유지관리가 용이하고, 에너지소비가 낮아 하수나 유기성 폐수처리공법으로 주목되고있다.

고정 생물막 공정은 활성 슬러지 공정에 비해 많은 미생물을 확보할 수가 있으며 생물막내에서 혐기, 호기, 임의성 상태의 미생물상이 존재하므로 영양염류의 제거가 효과적일 수 있다. 또한, 고정 생물막 공정은 활성 슬러지 공정과는 달리 슬러지를 반송시킬 필요가 없으므로, 섬유상 미생물이 발생되더라도 담체에 부착되므로 슬러지 팽화현상이 없을 뿐 아니라, SRT가 길어서 슬러지 생산량이 작아지는 장점이 있다. 또한 반응기내 미생물농도를 8 ~ 40

g/L 로 높게 유지하면서도 최종침전지가 필요 없게 되어 처리시설의 규모를 현저히 감소시킬 수가 있고, 따라서 건설비 및 운영비가 적게 소요된다. 또한 담체에 부착되는 미생물 양이 많고 생물상이 다양하여 생분해 속도가 낮은 기질제거에 우수하며, 수온 변화와 부하변동에 강하다.

그러나 유입폐수의 농도가 크면 담체가 쉽게 파괴되는 단점이 있으며, 보다 많은 미생물을 고정시키기 위해서는 비표면적을 크게 하여야 하지만, 비표면적이 클수록 담체의 공극률이 작아져서 미생물의 성장에 따라 공극이 빨리 폐쇄되므로 운전조작 및 처리 효율면에서 문제가 발생한다. 또한 담체에 과도하게 부착된 미생물을 제거시키기 위한 세척 방법이 충분히 확립되어 있지 않은 것도 문제점으로 대두되고 있다.

고정 생물막 공정은 생물막을 형성하는데 있어 오랜 시간이 걸리며 자연적으로 부착하기 쉬운 균이 우점종으로 밀집하게 되어 두꺼운 생물막을 형성시키는 단점이 있다. 이로 인해 생물막 내부에서는 혐기적 조건이 형성되고 외부에 부착된 미생물은 생물막과 유체의 접촉시 발생하는 전단응력에 의해 떨어져 나가게 됨으로써 반응기 내부의 생물함량이 낮아지게 되어 암모니아 제거효율이 저하되는 원인이 된다.

이와 같은 고정 생물막 공정의 문제점을 개선하는 방법으로 포괄고정화 미생물을 이용한 암모니아 제거 공정에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[4-7].

미생물의 포괄고정화법은 alginate, carrageenan, agar와 같은 천연 고분자나 poly acryl amide, poly ethylene glycol, poly vinyl alcohol과 같은 합성 고분자 용액 속에 미생물을 혼합한 후 gel 화시켜 한정된 공간 내에 미생물을 포획하는 것으로 생물공학 분야에서는 오래 전부터 이용되어 왔으며 최근에는 폐수처리에 응용되고 있다[8-9].

일본의 경우 포괄 고정화 미생물을 이용한 폐수처리에 있어 현재 가장 선도적 위치에 있으며 실제 폐수처리 공정에 적용하여 실제 플랜트를 운전 중에 있다. 일본 하수도 기술사업단은 포괄 고정화 미생물을 이용한 폐수처리에 대한 연구 결과 생체고분자는 미생물에 대한 독성이 적은 반면 생분해성이 커서 폐수처리에는 부적합하며 합성 고분자는 미생물에 대한 독성이 있고 약간 고가이지만 미생물에 의한 분해성이 약하여 내구성이 뛰어나 운전비용(Running cost)을 줄이기 위해서는 장기간 사용에 견딜 수 있는 합성 고분자가 좋다고 하였다. 합성 고분자의 일종인 PEG에 포괄 고정화한 미생물을 이용하는 파일럿 플랜트 실험결과 활성슬러지 순환변법 체류시간의 1/2 정도의 체류시간에 처리수 BOD : 20 mg/L, T-N : 10 mg/L이하의 양호한 처리결과를 얻을 수 있었으며 고수온기에는 5시간, 중수온기에는 6시간, 저수온기에는 8시간의 체류시간에서 BOD 90%, T-N 75%이상의 처리효율을 얻을 수 있었고 수온의 변화에도 안정적인 처리효율을 얻을 수 있었다고 하였다[10].

현재 우리나라에서 이루어지고 있는 고정화 미생물에 의한 폐수 내 암모니아 제거에 대한 연구는 일부 대학 및 연구소에서 이제 연구를 시작하는 단계로 냉동법에 의해 제조된 고정화 미생물을 이용하여 질소제거[11], Microcapsule에 고정화된 고정화 균주를 이용한 하폐수 중의 생물학적 탈인 및 탈질소화에 관한 연구[12] 등, 균주의 고정화 방법에 따른 연구가 수행되었다. 그리고 삼상 순환 유동층 반응기에 의한 질산화 연구[13], 무산소-호기 상향류식 생물여과 반응기의 질산화 및 탈질 연구[14] 등의 반응기 종류에 따른 연구도 진행됨으로써 실험실적 규모의 연구를 통한 연속 공정의 기초 실험이 수행되어 지고 있다. 본 연구에서도 포괄고정화법에 의한 질화세균의 고정화와 공기 부상식 반응기에 의한 질산화의 연구로 실제적인

폐수 공정으로 적용하기 위한 기초 자료를 얻기 위한 연구를 수행하였다.

현재 우리나라의 경우 하수 처리장에서 별도의 질소 제거 공정을 도입하지 않고 활성슬러지를 이용한 유기물 제거 시 부가적으로 발생하는 질소의 제거에 의존하여 하·폐수 중의 질소성분을 제거하여 왔으나 1996년부터 하수의 방류수중 영양염류규제가 추가됨으로서 전국하수처리장에서의 고도처리가 필수적이고 2001년말 현재 고도처리시설은 18개소의 하수처리장에서 가동 중에 있으며, 일부 처리시설만 고도처리시설이 설치된 처리장은 5개소이며 54개소 처리장은 고도처리시설 설치사업을 추진 중에 있다.

이와 같이 고도처리시설의 필요성에 따라 본 실험에서는 질화세균을 포괄고정화한 PVA bead를 공기부상식 생물반응기에 충전시켜, 충전율에 따른 공기유입량의 변화가 암모니아 제거에 미치는 영향과 수력학적 체류시간(HRT, hydraulic residence time), 유입수의 암모니아성 질소 농도 변화, 온도, pH가 암모니아성 질소의 산화반응에 미치는 영향을 연구하여 저농도 암모니아성 질소의 제거속도를 구하였다. 이런 과정을 통하여 하폐수의 고도처리에 있어서 저농도 암모니아성 질소의 제거를 위한 연속 공정의 개발을 위한 기초 데이터를 얻는데 본 실험의 목적이 있으며 실험을 위한 대략적인 전개 내용을 Fig. 1에 나타내었다.

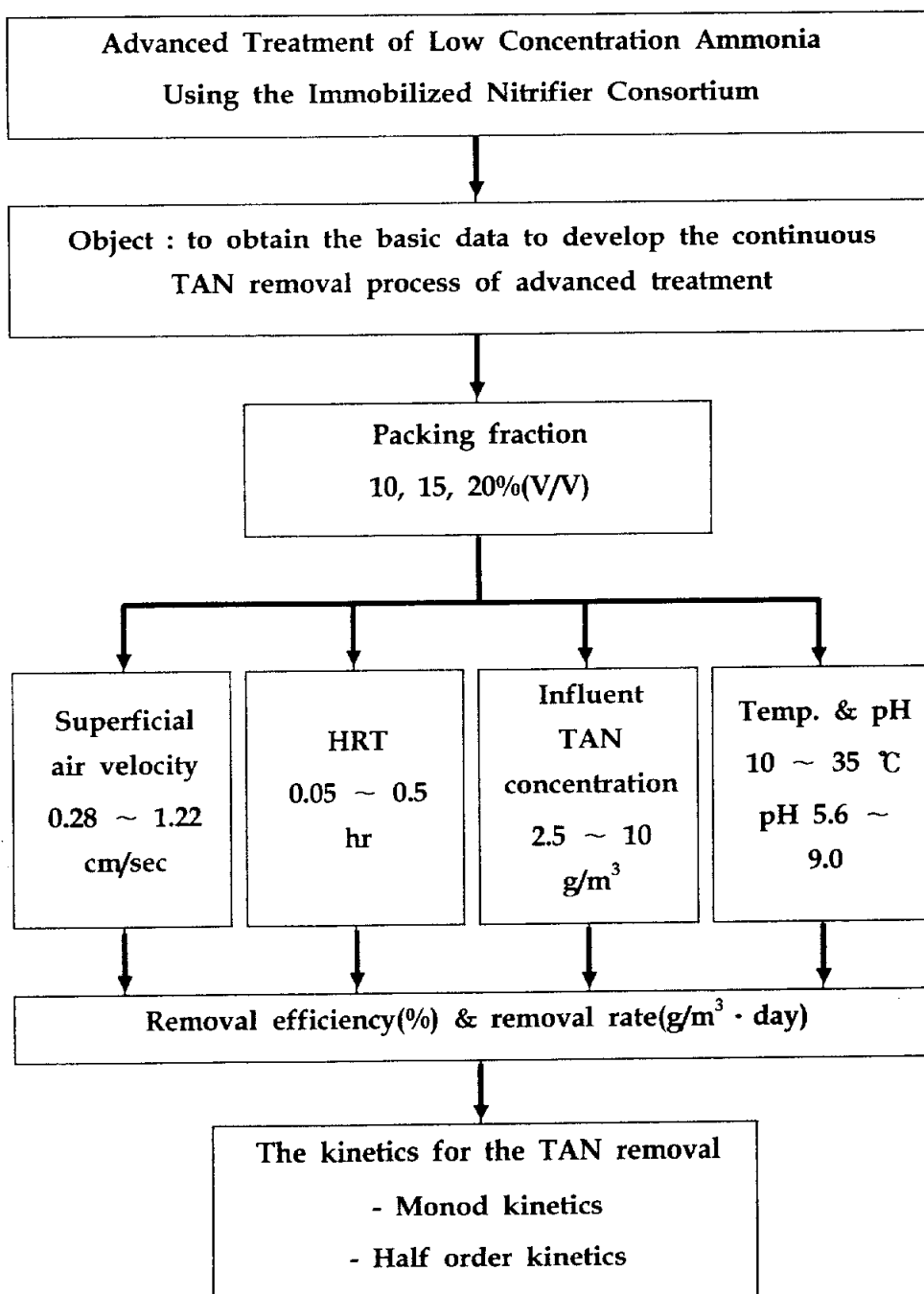
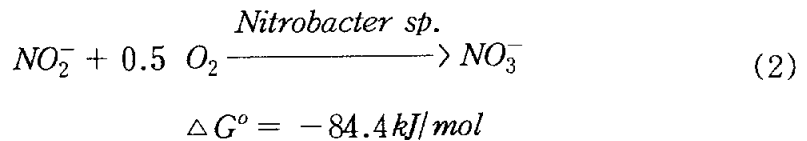
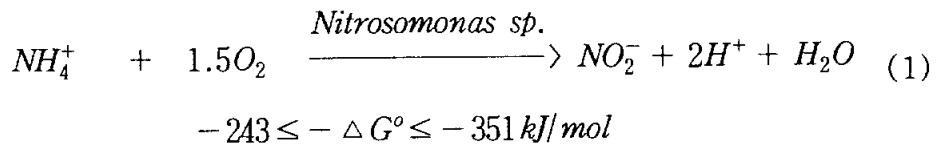


Fig. 1. Flow diagram of the experiment.

2. 이론적 고찰

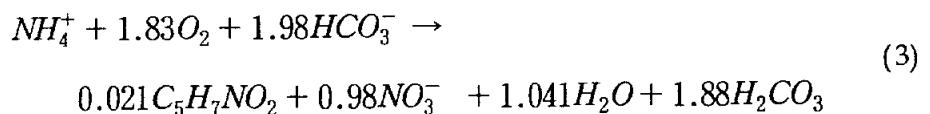
2.1. 암모니아의 질산화 과정

미생물에 의한 질산화 과정은 수중의 암모니아를 질화세균이 산소를 소비하여 아질산성 질소로 산화시키고 산화된 아질산성 질소는 다시 질산성 질소로 산화하게 되며 대표적인 질화세균으로는 독립영양 미생물인 *Nitrosomonas sp.*와 *Nitrobacter sp.*가 있고 이는 다음과 같은 두 과정으로 이루어진다[15, 16, 17].



*Nitrosomonas sp.*는 12 ~ 20°C, pH 6.5 ~ 7.5인 조건에서 0.1 ~ 0.61 day⁻¹의 증식속도를 가지며 *Nitrobacter sp.*는 같은 조건에서 0.1 ~ 0.45 day⁻¹의 증식속도를 가진다[17]. 또한 암모니아 제거 시 이론적으로 1 g의 암모니아성 질소가 질산염으로 산화되기 위해서는 4.75 g의 산소와 7.14 g의 알칼리도가 필요하다[18].

질화세균의 합성과 암모니아 산화식을 포함하는 총괄식은 다음과 같다.



2.2. 총 암모니아성 질소(TAN) 제거속도식

2.2.1. Monod 식을 가정한 TAN 제거속도식

포괄 고정화 질화세균을 이용한 질산화 반응 중 암모니아성 질소를 아질산성 질소로 산화시키는 *Nitrosomonas* sp.의 산화속도는 Monod 식으로 표현할 수 있다[19].

$$-r = \frac{-r_{\max} \cdot C}{K_S + C} \quad (4)$$

여기서 $-r$ 은 고정화 질화세균 체적 기준 TAN제거속도, $-r_{\max}$ 은 고정화 질화세균 체적 기준 최대 TAN제거속도, K_S 는 반포화상수이며 C 는 TAN 농도이다.

포괄 고정화 질화세균을 이용하는 생물반응기에서 반응기의 암모니아성 질소 제거속도는 고정화 질화세균의 양과 비례하므로 식(4)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R = -r \cdot \frac{V_B}{V_R} \quad (5)$$

여기서 R 은 반응기 액체 체적 기준 TAN제거속도, V_B 는 반응기 내에 투입한 고정화 질화세균의 총 부피이며 V_R 은 반응기의 액체 체적이다.

V_B/V_R 을 고정화 질화세균 투입율, ε 라 두고, $-r_{\max} \cdot \varepsilon$ 를 반응기 액체 체적 기준 최대 TAN 제거속도, $R_{\max}$ 로 두면 식(5)는 식(6)으로 정리된다.

$$\begin{aligned} R &= \frac{-r_{\max} \cdot C}{K_S + C} \cdot \frac{V_B}{V_R} \\ &= -r_{\max} \cdot \varepsilon \cdot \frac{C}{K_S + C} \\ &= \frac{R_{\max} \cdot C}{K_S + C} \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)의 $R_{\max}$ 와 K_S 는 다음의 Lineweaver-Burk plot에 의해 구할 수 있다[20].

Lineweaver-Burk plot은 식(6)에 이중 역수를 취한 형태로 가장 보편적으로 사용하는 형태이다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{\max}} + \frac{K_s}{R_{\max}} \cdot \frac{1}{C} \quad (7)$$

2.2.2 1차 속도식과 1/2차 속도식을 가정한 TAN 제거속도식

1차 속도식은 반응속도를 표현하는 가장 간단한 형태 중의 하나로서 Monod 식의 경우 저농도에 대해서 식(6)을 다음과 표시할 수 있다[21].

$$R = \frac{R_{\max}}{K_s} C \quad (8)$$

$R_{\max}/K_s$ 는 하나의 속도상수로 볼 수 있으므로 식(8)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R = k_1 C \quad (9)$$

여기서 k_1 은 1차 속도식의 속도상수이다.

식(8)에 의한 1차 속도식의 경우 반응물의 농도가 K_s 에 비해 매우 낮은 경우에만 성립하므로 보다 넓은 농도 범위에 대해 적용시키고자 할 경우 농도 변화에 따른 제거속도 변화의 직선관계로부터 새로운 k_1 값을 얻을 수 있다.

그리고 1/2차 속도식은 저농도의 암모니아 제거시 TAN 제거속도가 최대농도에 도달하지 않고 전이영역에 머무르는 것을 보상해 줄 수 있으며 다음과 같이 적용될 수 있다.

$$R = k_{1/2} C^{1/2} \quad (10)$$

여기서 $k_{1/2}$ 는 1/2차 속도식의 속도상수이다.

3. 재료 및 방법

3.1. 고정화 질화세균의 제조

본 연구에 사용한 질화세균은 부산 수영 하수처리장의 활성 슬러지조의 활성 슬러지를 수거하여 Table 1과 같은 암모니아 배지만을 공급하여 순양과정을 거친 후 3000 rpm에서 10 분간 원심분리시켜 농축 질화세균균을 얻었다.

고정화 방법으로는 외부환경에 대한 적응성이 높고, 질화세균을 고농도로 유지할 수 있도록 PVA(polyvinyl alcohol)-boric acid법[22]을 이용하여 농축된 질화세균을 4.5%(D.W./V)로 희석하고, 30%(W/V) PVA-HC (saponification: 100%; degree of polymerization: 2000) 용액과 동량의 부피로 혼합하였다. 그리고 PVA 15%(D.W./V)-질화세균 2.25%(D.W./V)의 혼합용액을 8℃로 냉각한 포화 boric acid 용액에 떨어뜨려 3 mm 구형의 고정화 질화세균균을 제조하여 연구에 사용하였다[23].

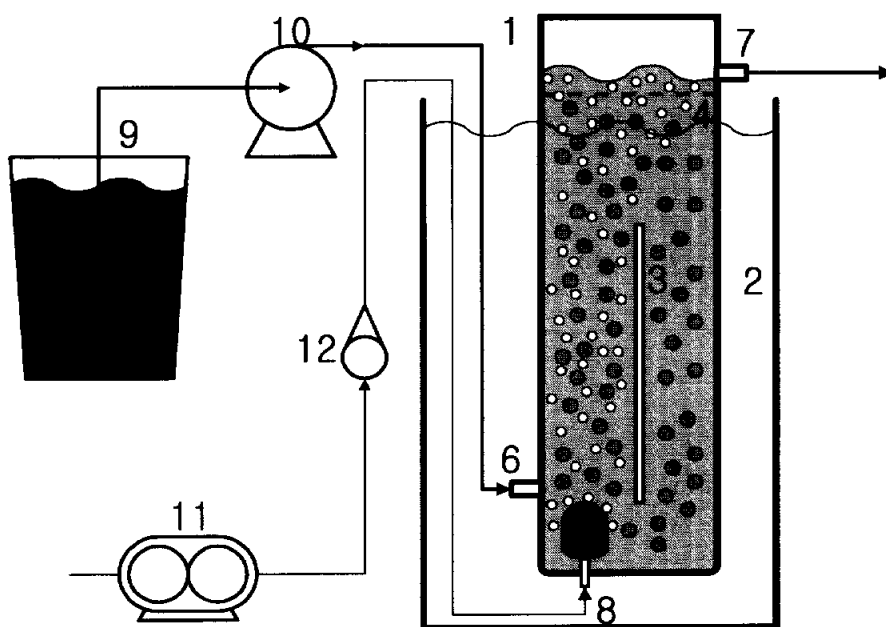
3.2. 실험장치

실험장치는 공기부상식 생물반응기로 충전되어진 질화세균 고정화된 PVA bead의 유동성을 높이기 위하여 반응기 내부에 baffle을 설치한 split-cylinder 공기부상식 생물반응기 형태로 제작하였으며[24], 공기부상식 생물반응기 및 실험장치의 모식도는 Fig. 2와 같다. 공기부상식 생물반응기는 내경 6 cm, 높이 20 cm의 아크릴 관을 이용하여 제작하였으며 이때 반응기 체적은 500 mL였다.

질화세균 고정화된 bead를 유동시키고, 질산화에 필요한 산소를 공급하기 위하여 공기펌프를, 반응기 내부의 공기 분산을 위하여 분산기를 설치하였으며, rotameter에 의해 공기량을 조절하였다. 조절된 합성 폐수는 정량펌프를 이용하여 일정한 유량으로 반응기의 상승부 하부에 설치된 유입구를 통하여

Table 1. Synthetic feedstock solution

Component	Concentration (g/m ³)	Function
NH ₄ Cl	95.48	N source
NaHCO ₃	681.73	Alkalinity control
Na ₂ HPO ₄	30.55	P source



- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. Airlift bioreactor | 7. Liquid outlet port |
| 2. Water bath | 8. Air inlet port |
| 3. Baffle | 9. Feeding tank |
| 4. Screen | 10. Peristaltic pump |
| 5. Air distributor | 11. Air pump |
| 6. Liquid inlet port | 12. Rotameter |

Fig. 2. Schematic diagram for airlift bioreactor.

공급하였다. 유입된 합성 폐수가 질화세균 고정화된 bead와 충분히 접촉 후 반응기 밖으로 배출되도록 유출구를 하강부 상부에 설치하였고, 반응기 상부에는 bead의 유출을 막기 위하여 유출구 아래에 미세망을 설치하였다[23].

3.3. 실험방법

합성 폐수는 Table 2의 폐수 성분 농도비로 원하는 농도의 TAN을 조제하여 연구에 사용하였다. 합성 폐수의 성분은 암모니아성 질소원으로 NH_4Cl , 질산화에 소모되는 알칼리도를 보충하기 위해 NaHCO_3 그리고 인성분으로 Na_2HPO_4 를 공급하였으며 수돗물을 사용하여 용해시켰다.

질화세균 고정화된 PVA bead는 반응기 체적에 대하여 10, 15, 20%(V/V)로 충전하여 실험을 수행하였고, 공기부상식 생물반응기 내부의 온도를 유지하기 위하여 반응기를 항온수조에 넣어 실험을 수행하였다.

공기 유입량의 변화에 따른 암모니아성 질소의 제거 영향을 알아보기 위하여 공탑 공기 유속을 0.28, 0.33, 0.44, 0.55, 0.66, 0.83, 0.99 및 1.22 cm/sec로 변화를 주어 암모니아 제거효율을 관찰하였고 아질산성 질소와 질산성 질소의 농도 변화를 알아보았다.

수력학적 체류시간이 암모니아 제거에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수력학적 체류시간을 0.05시간에서 0.5시간으로 점차 변화시켜 암모니아성 질소의 제거속도 및 제거효율을 구하였으며 아질산성 질소와 질산성 질소의 농도 변화를 알아보았다. 그리고 유입수 암모니아성 질소 농도의 변화가 암모니아성 질소 제거에 미치는 영향을 알아보기 위하여 유입수 암모니아성 질소 농도를 2.5, 5, 7.5 및 10 g/m³으로 변화시켜 암모니아성 질소 제거속도 및 제거효율을 구하였다. 질화세균 고정화된 bead의 pH 및 온도 변화에 따른

Table 2. Composition of substrate nutrient

Component	Concentration(g/m ³)
NH ₄ Cl(NH ₃ -N)	19.39(5.0)
NaHCO ₃	138.44
Na ₂ HPO ₄	6.20

암모니아성 질소의 제거 영향을 알아보기 위하여 pH를 5.6에서 9.0으로, 온도를 10에서 35℃로 변화시켜 암모니아성 질소 제거에 대한 pH 및 온도의 영향을 관찰하였고 아질산성 질소와 질산성 질소의 농도 변화를 알아보았다.

3.4. 분석방법 및 자료 계산

시료의 채취는 매일 1회 수행하였으며 수력학적 체류시간의 변화에 대해 반응기 출구 암모니아성 질소 농도가 일정하게 유지되는 정상상태에서 4-5회 시료를 채취하여 분석한 후 평균값을 자료로 사용하였다.

암모니아성 질소 분석을 위하여 암모니아 선택 전극(Orion Research Inc., 9512BN)이 부착된 Ion meter (Orion Research Inc., 720A)를 이용하여 이온선택성 전극법[25]에 의해 분석하였다. 질산성 질소 및 아질산성 질소의 농도는 Ion chromatography (Dionex, DX 120)를 사용하여 분석하였다. 용존산소는 반응기 상단에 용존산소측정기(YSI, YSI 55)를 꽂아 측정하였으며, pH는 pH meter (Orion Research Inc., 290A)를 사용하여 시료 채취와 동시에 측정하였다.

암모니아성 질소의 제거속도는 식(11)에 따라 계산하였다.

$$-r_{TAN} = \frac{C_i - C_o}{V} \times Q = \frac{C_i - C_o}{\tau} \quad (11)$$

여기서 $-r_{TAN}$: TAN removal rate ($\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$)

C_i : TAN influent concentration (g/m^3)

C_o : TAN effluent concentration (g/m^3)

V : Volume of reactor (m^3)

Q : Volumetric flowrate (m^3/day)

τ : Hydraulic residence time (day)

4. 결과 및 고찰

4.1. 공기 유입량에 따른 암모니아성 질소 제거특성

공기 부상식 생물반응기는 공기나 다른 기체흐름에 의해 반응물이 교반되는 반응기로써 균일한 혼합과 낮은 전단력, 높은 물질전달과 열전달 특성을 갖는 것으로 알려져 있으며 기계적인 교반 반응기에 반해 오염의 위험성이나 에너지 요구량을 현저히 줄일 수 있는 장점이 있다[26]. 이로 인하여 공기 부상식 생물반응기의 운전에 있어서 공기나 다른 기체의 유입량이 중요한 요소로 작용하게 되며, 질산화를 위한 본 연구에서는 질산화 과정 중 필요한 산소를 공급한다는 점에서 공기 유입량에 더욱 관심을 가지게 된다.

Fig. 3은 bead 충진율 10, 15, 20%(V/V)에 유입수 암모니아성 질소 농도가 5 g/m^3 , 수력학적 체류시간이 0.35시간 일 때 공기 유입량 변화에 따른 암모니아성 질소 제거효율을 나타낸 것이다. 이때 질화세균 고정화된 PVA bead를 유동하기 위한 최소 공탐 공기 유속은 0.28 cm/sec 였다.

공기 유입량 및 충진율이 증가함에 따라 제거효율 및 제거속도는 증가하였으나, 공탐 공기 유속이 0.83 cm/sec 이상에서는 각 충진율에 대한 암모니아성 질소의 제거효율 및 제거속도는 거의 일정하였다. 또한 공탐 공기 유속이 0.83 cm/sec 에서 각 충진율에 따라 제거속도는 $316.6 \pm 7.2 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$, 제거효율은 $92.8 \pm 2.2\%$ 를 보였다.

Fig. 4는 공기 유입량에 따라 반응기 내의 DO 변화와 25°C 에서의 포화 산소에 대한 비율을 나타낸 것이다. 공기 유입량의 증가에 따라 DO가 5.5 g/m^3 에서 6.8 g/m^3 로 증가하였으며 0.83 cm/sec 이상에서는 안정적인 값을 보여주었고 최대 82.7%의 포화율을 가졌다. Garrido 등[27]에 의하면 암모니아의 질산화는 산소의 물질 전달 한계로 인해 영향을 받으며,

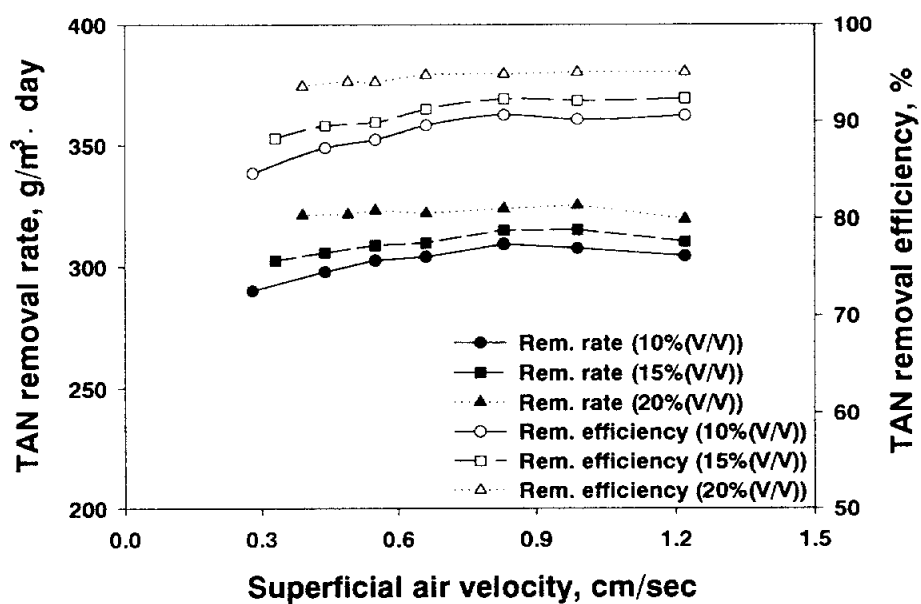


Fig. 3. The effect of superficial air velocity on total ammonia nitrogen removal rate and total ammonia nitrogen removal efficiency.

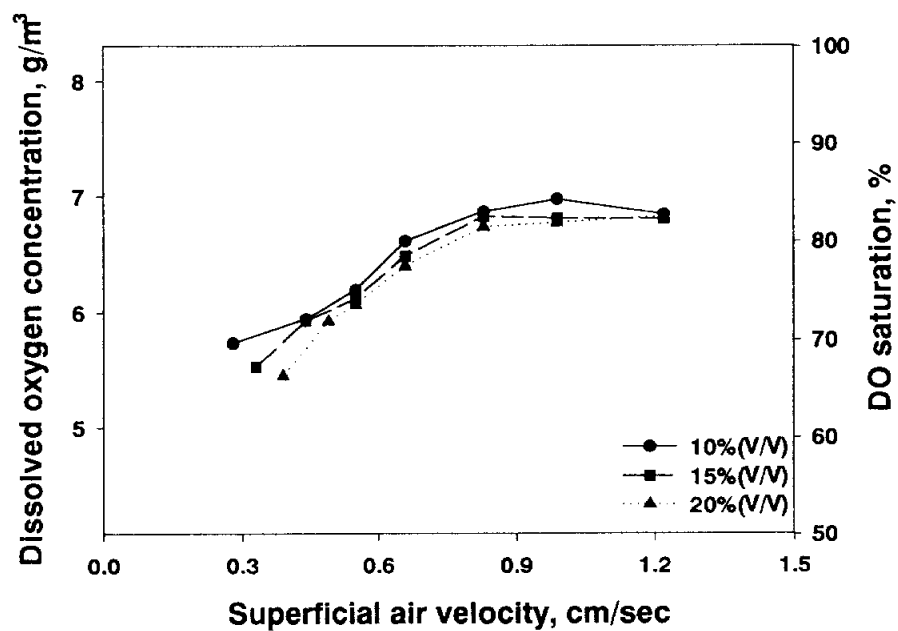


Fig. 4. The effect of superficial air velocity on dissolved oxygen concentration at DO saturation.

Rostron 등[28]은 DO가 5에서 10 g/m³으로 증가시켰을 때 질산화가 증가한다고 하였다. 그리고 Matsumura 등[29]은 DO가 6 ~ 7 g/m³에서 최대 암모니아 제거속도를 보인다고 하였는데 본 연구 결과와 잘 일치하였다.

본 연구에서도 공기 유입량의 증가에 따라 제거속도, 제거효율, 그리고 DO가 증가하다가 0.83 cm/sec 이후에는 동일한 값을 유지하였고 또한 반응기 내의 포화율에 있어서도 안정적인 값을 유지하는 것으로 보아 질산화에 있어서 산소 공급에 따른 한계에 도달한 것으로 판단되어지며 0.83 cm/sec 이상의 공기 유입량은 운전비의 증가를 초래하게 될 것으로 본다.

Fig. 5는 bead 충진율 10, 15, 20%(V/V)에 유입수 암모니아성 질소 농도가 5 g/m³, 수력학적 체류시간이 0.35시간 일 때 공기 유입량에 따른 유출수의 암모니아성 질소 농도와 아질산성 질소 농도, 질산성 질소, 그리고 총 무기질소의 농도 변화를 나타낸 것이다. 공탑 공기 유속이 0.83 cm/sec까지 증가하면서 아질산성 질소의 농도는 감소하는 반면 질산성 질소의 농도가 증가하는 것으로 보아 공기량의 증가에 따라 산소 공급이 원활히 됨으로써 질산화가 유리해 진다는 것을 알 수 있다. 공탑 공기 유속이 0.28, 0.33, 0.39 cm/sec일 때 각 충진율 마다 총 무기질소 농도가 유입 암모니아성 질소 농도인 5 g/m³에 미치지 못하고 있다. 이는 Stuckey and Barber[16]가 biopellet 내부의 무산소 구역이 존재하며 탈질이 일어난다고 보고한 것과 같이 PVA bead 외부에서의 질산화는 가능하지만 내부로의 산소 전달이 부족하여 부분적으로 탈질이 일어나는 것으로 판단되어 진다.

0.83 cm/sec 보다 높은 공탑 공기 유속에서는 암모니아성 질소의 제거속도나 제거효율에서 차이가 없는 것과 같이 질산성 질소나 아질산성 질소의 농도차가 크지 않는 것으로 나타난다. 이로 인하여 본 연구에서 질산화에 필요한 산소

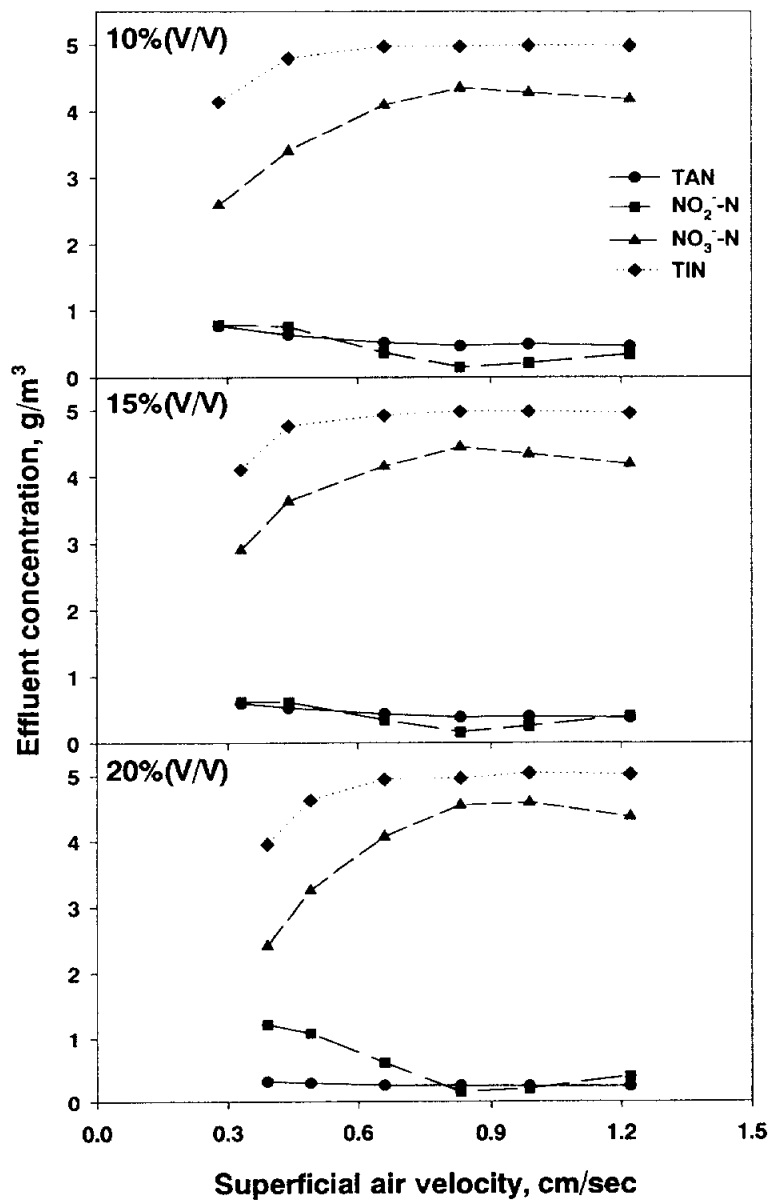


Fig. 5. The effect of superficial air velocity on effluent total ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen and total inorganic nitrogen concentration.

공급과 동시에 최대 제거속도와 제거효율을 얻기 위한 최적 공탑 공기 유속은 0.83 cm/sec로 판단되어 이후의 연구에서는 공탑 공기 유속을 0.83 cm/sec로 수행하였다.

4.2. 수력학적 체류시간에 따른 암모니아성 질소 제거특성

수력학적 체류시간은 반응기 내에서 질화세균 고정화된 PVA bead와 암모니아성 질소의 접촉시간과의 관계에 있어서 영향을 주는 요소이다. 일반적으로 체류시간이 감소할수록 반응 시간이 감소함에 따라 반응효율은 낮아지게 되지만 반응속도에 있어서는 높아지게 된다. 이로 인하여 체류시간에 따른 실험을 통하여 반응기 내 암모니아성 질소의 농도에 따른 제거속도를 알아보고 최대 제거속도를 구할 수 있을 뿐만 아니라, 적정 효율을 얻기 위한 체류시간을 찾아 최적의 운전조건을 통한 운전비 절감을 가져올 수 있다.

Fig. 6은 암모니아성 질소의 농도가 5 g/m³ 일 때 공기부상식 생물반응기에 질화세균 고정화된 bead를 10, 15, 20%(V/V)로 충전시켜, 수력학적 체류시간을 0.05, 0.1, 0.175, 0.25, 0.35 및 0.5시간으로 변화시켰을 때 암모니아성 질소의 제거속도 및 제거효율의 변화를 나타낸 것이다.

수력학적 체류시간이 0.5시간에서 0.05시간으로 감소함에 따라 충진을 10, 15, 20%(V/V)의 암모니아성 질소의 제거속도는 증가하였으며, 수력학적 체류시간 0.05시간에서 충진을 10%(V/V)는 1007 g/m³ · day, 15%(V/V)는 1199 g/m³ · day, 20%(V/V)는 1352 g/m³ · day의 제거속도를 나타내었다. 이는 Tanaka 등[8]이 PEG를 사용하여 연구한 결과인 540 g/m³ · day와 비교하여 암모니아성 질소의 제거속도가 높은 것으로 나타났고, 동일한 PVA 고정화로

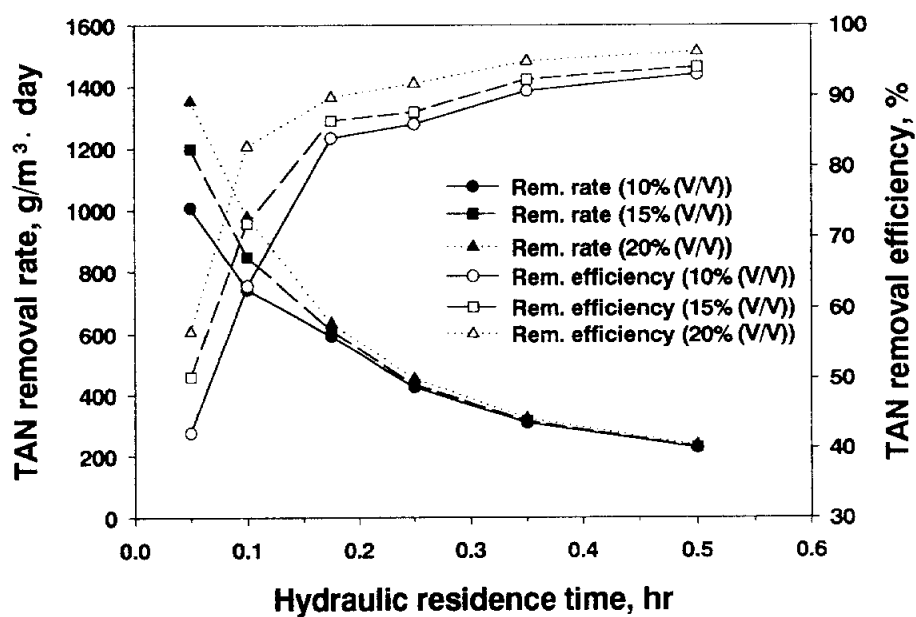


Fig. 6. The effect of hydraulic residence time on total ammonia nitrogen removal rate and removal efficiency.

연구한 Rostron 등[28]의 $700 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 와 비교하여도 높은 제거 속도를 보여 주고 있다. 이는 동일 PVA 고정화라 할지라도 bead의 크기가 본 연구의 3 mm 보다 크기 때문에 물질전달에 있어 확산 저항이 더 크게 나타남으로써 결과의 차이를 보이는 것으로 판단되어 진다. 또한 저농도에서의 trickling filter로 연구한 Timmons and Greiner[30]의 질산화 속도에 비해서도 높은 제거 속도를 보여 줌으로써 본 연구의 질산화균이 고정화된 PVA bead에 의한 저농도 암모니아의 고도처리에 있어서 효과적으로 수행할 것으로 판단되어 진다.

암모니아성 질소의 제거효율은 체류시간이 증가함에 따라 점점 증가하였으며 체류시간 0.35시간에서 충진을 10, 15, 20%(V/V)의 암모니아성 질소 제거효율은 모두 90% 이상으로 나타났고, 체류시간이 0.5시간에서는 최대 제거효율이 각 충진율에 대해서 각각 93.1%, 94.1%, 96.3%를 나타냈다.

체류시간이 감소함에 따라 제거효율 또한 감소하여 충진을 10%(V/V)는 42.1%, 충진을 15%(V/V)는 50.2%, 충진을 20%(V/V)는 56.6%의 제거효율을 나타내고 있다. 이는 체류시간이 짧을 경우 고정화된 질화세균과 합성 폐수와의 접촉기회의 증대와 기질의 농도 증가에 따른 물질 전달 속도의 향상으로 인해 제거 속도는 증가하게 된다. 그러나 고정화된 질화세균과 합성 폐수와의 접촉시간이 짧아져 질산화를 위한 충분한 시간이 확보되지 못했기 때문인 것으로 보고되어지고 있다[23].

Fig. 7은 암모니아성 질소 농도가 5 g/m^3 일 때 공기부상식 생물반응기에 질화세균 고정화된 PVA bead를 10, 15, 20%(V/V)로 충진시키고 수력학적 체류시간을 0.05, 0.1, 0.175, 0.25, 0.35, 0.5시간으로 변화시켰을 때 암모니아성 질소, 질산성 질소, 아질산성 질소 농도의 변화와 총 무기질소의 농도를 나타내었다.

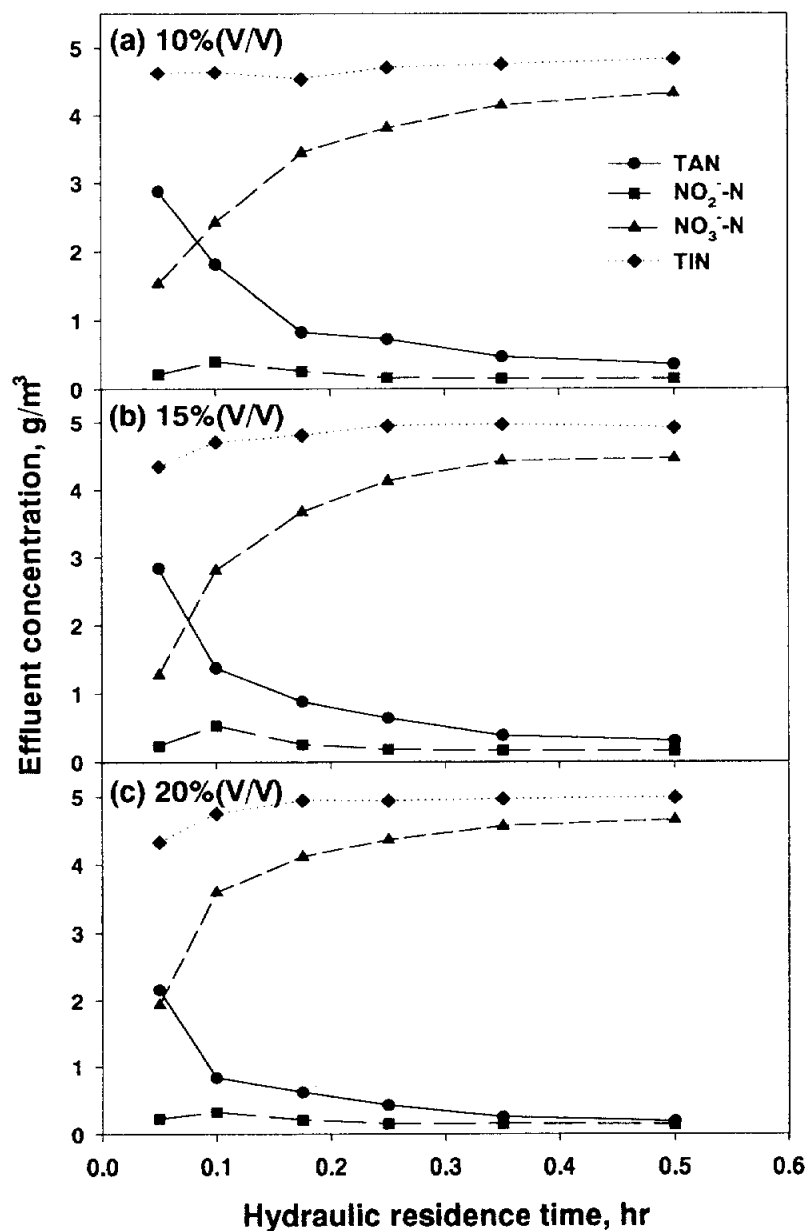


Fig. 7. The effect of hydraulic residence time on effluent total ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen and total inorganic nitrogen concentration.

수력학적 체류시간이 0.05시간에서 0.5시간으로 증가함에 따라 모든 충전율에서 반응기내 암모니아성 질소의 농도는 감소하였고 아질산성 질소의 농도는 0.05시간에서 0.1시간 사이에서는 증가하다가 0.1시간에서 0.5시간 사이에서는 감소하였으며 최대점을 갖는 0.1시간에서 질산성 질소의 증가율이 가장 큰 것을 볼 수 있다. 질산성 질소는 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 증가하였으며, 충전율이 커질 수록 총 무기질소의 양에 접근하는 것을 볼 수 있다. 유출수 총 무기질소 농도는 유입수 암모니아성 질소 농도와 같은 양이 나오는 것으로 보아 본 연구 조건 하에서 사용한 공기부상식 생물반응기내 질화세균 고정화된 PVA bead에서 질산화 반응만 일어나고 탈질반응은 일어나지 않은 것으로 판단된다. 이는 공탑 공기 유속이 0.83 cm/sec로 각 충전율에 대하여 충분하게 산소를 전달할 수 있는 최적 공기량을 공급했기 때문인 것으로 판단되어진다.

4.3. 유입수 암모니아 농도 변화에 따른 암모니아성 질소 제거특성

하폐수의 고도처리에 있어서 현장에서의 암모니아성 질소의 유입 농도가 변하므로 이에 대한 공기 부상식 생물반응기에서의 질화세균 고정화된 PVA bead의 질산화 특성을 알아보았다.

Fig. 8은 수력학적 체류시간이 0.35시간이고 질화세균 고정화된 PVA bead를 10, 15, 20%(V/V)로 충전시켜, 유입 합성폐수의 암모니아성 질소 농도를 2.5, 5, 7.5 및 10 g/m³으로 변화시켰을 때 암모니아성 질소의 제거 속도 및 제거효율을 나타낸 것이다.

충진율 변화에 따른 암모니아성 질소의 제거속도 차는 크지 않았고 2.5 g/m³에서는 155 g/m³ · day, 10 g/m³에서는 630 g/m³ · day를 나타내었다.

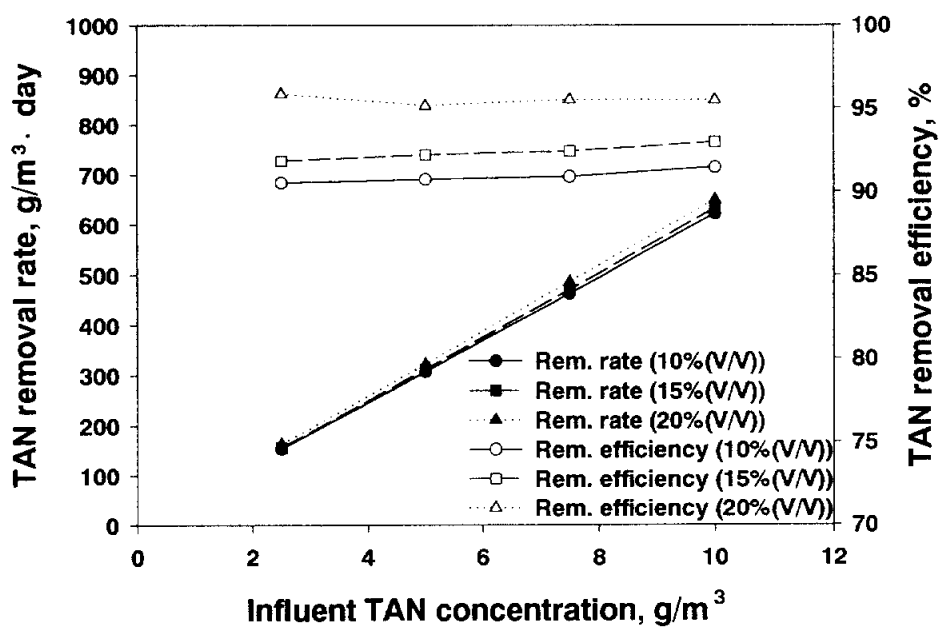


Fig. 8. The effect of influent total ammonia nitrogen concentration on total ammonia nitrogen removal rate and removal efficiency.

또한 유입수 암모니아성 질소의 농도변화에 따른 제거속도가 직선성을 나타내고 있다. 이는 제거 효율이 모든 충진율에서 90% 이상을 나타냄으로써 완전 혼합형 반응기로 보고 유출수의 암모니아성 질소의 농도가 Fig. 9에서 보여주듯이 1 g/m^3 이하의 저농도로 유지된다고 보았을 때 그에 따른 제거속도는 모든 충진율에 있어서 1차의 직선성을 보여주고 있다. 이는 Timmons and Greiner[30]가 2.5 g/m^3 이하에서 제거속도식을 1차식으로 본 것과 같은 결과를 보여주고 있다.

그리고 서 등[31]은 25 g/m^3 이상으로 유입수의 암모니아성 질소 농도가 높아짐에 따라 암모니아성 질소의 제거속도가 증가한다고 하였고 이는 질화세균 고정화된 bead 외부와 내부사이에 암모니아성 질소의 농도차가 커져 물질전달 속도의 증가로 인하여 암모니아 제거속도가 증가한 것으로 보고하였고 제거 효율은 감소한다고 하였다. Rostron 등[28]도 같은 결론을 내리고 있다.

그러나 본 연구의 유입수 농도가 10 g/m^3 이하의 저농도이고 고정화되는 질화세균은 bead의 표면에 모이기 쉽다는 것[16, 32]으로 보아 암모니아성 질소의 부하량이 증가하여도 질화세균 고정화된 bead 내의 질화세균에 의해 충분히 제거가 가능하다. 따라서 제시된 모든 유입 암모니아성 질소 농도조건에서 제거효율이 90% 이상의 효율을 보여주고 있다. 이때 제거되는 대부분의 암모니아성 질소는 bead 내부로 확산되기 이전에 bead 표면에 밀집되어 있는 질화세균에 의해 제거됨으로 bead 내부로의 기질확산이 적을 것으로 판단되어진다. 이와 같이 포괄 고정화법은 질화세균을 고농도로 유지할 수 있는 장점을 지니므로 저농도 암모니아성 질소 제거 시 질화세균을 충분히 보유할 수 있으므로 높은 제거효율을 가질 수 있다.

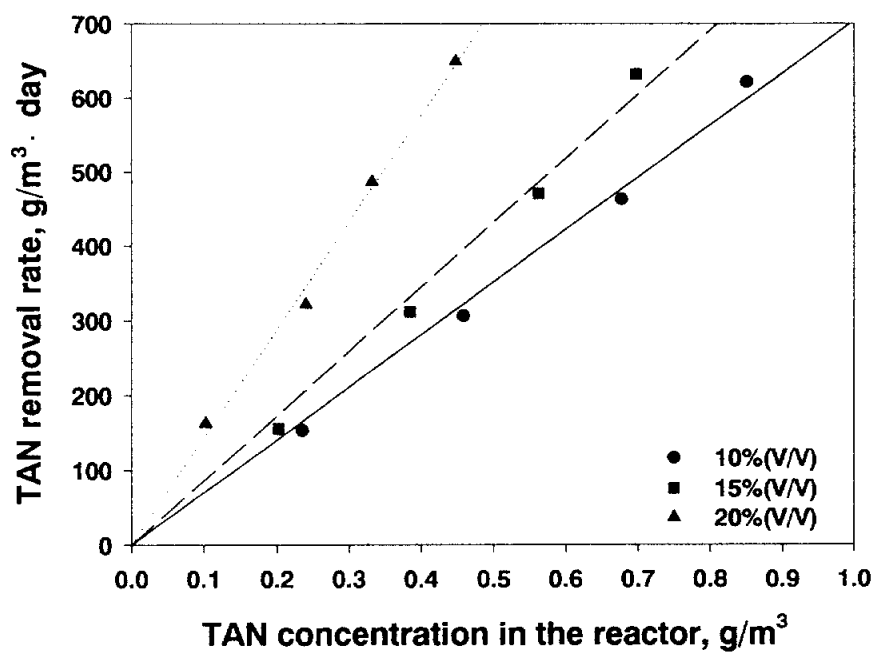


Fig. 9. The effect of the TAN concentration in the reactor on total ammonia nitrogen removal rate.

그러나 Rostron 등[28]이나 Suh 등[31]에서처럼 고농도 암모니아성 질소 제거 시에는 기질 확산저항이 존재하므로 제거효율의 감소를 보일 수도 있다.

본 연구의 제거효율은 유입수 암모니아성 질소의 농도변화에 따라 큰 변화 없이 90% 이상의 효율을 보여주고 있으며, 각 충전율에 따라 $93 \pm 2\%$ 의 제거효율을 보여주고 있다.

4.4. 온도 변화에 따른 암모니아성 질소 제거특성

암모니아의 생물학적 처리에 있어서 온도는 미생물 증식과 밀접한 관계가 있으며 Strotmann and Windecker[17]는 질화세균의 고정화가 낮은 성장률에 대한 문제를 해결하는 방법으로 이용 가능하다고 하였다. 특히 사계절이 뚜렷한 우리나라의 계절적 특성으로 인해 질화세균 고정화된 PVA bead에 의한 암모니아성 질소 제거에 대한 온도의 영향을 연구하고자 하였다.

Fig. 10은 수력학적 체류시간이 0.35시간이고 질화세균 고정화된 PVA bead를 10, 15, 20%(V/V)로 충전시켜, 공기부상식 생물반응기내 온도를 10, 15, 20, 25, 30, 그리고 35℃로 변화시켰을 때 암모니아성 질소의 제거속도 및 제거효율의 변화를 나타낸 것이다.

온도가 높아짐에 따라 암모니아 제거속도는 각 충전율에 있어서 큰 변화가 없었으며 온도변화에 있어서의 각 충전율을 비교했을 때 25℃의 경우 모든 충전율에서 $323 \pm 8 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 의 제거속도를 보이고 있으며, 10℃에서는 15, 20%(V/V)의 충전율에서 $295 \pm 5 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 의 제거속도를, 10%(V/V)의 충전율은 $270 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 의 다소 낮은 값을 나타냄으로써 25℃에서 10℃로 온도가 낮아짐에 따라 암모니아성 질소 제거속도는 8.7 ~ 16.4%의 감소를 보여주고 있다.

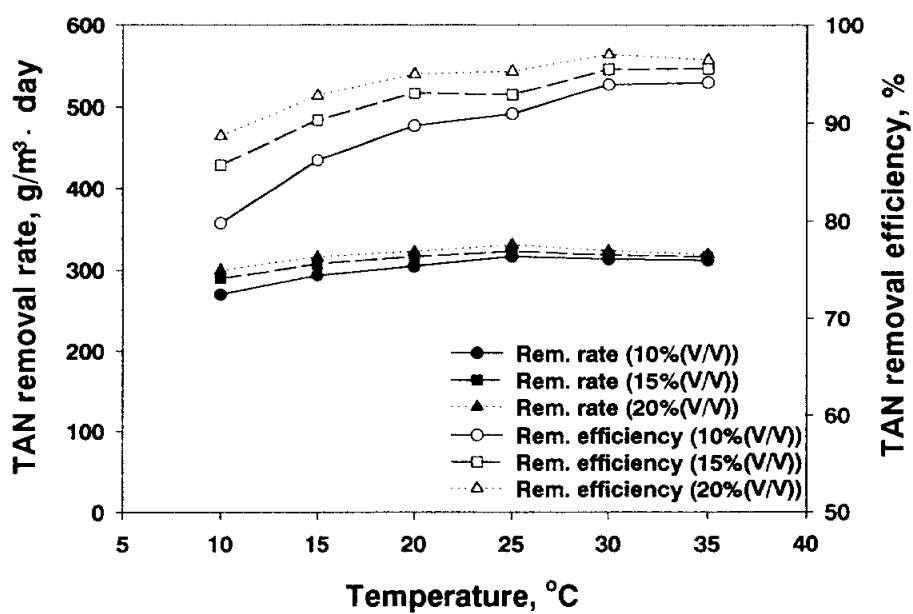


Fig. 10. The effect of temperature on total ammonia nitrogen removal rate and removal efficiency.

제거효율은 30℃의 경우 모든 충진율에 있어서 95±2%의 효율을 보여주고 있으며 35℃에서도 큰 차이가 없었다. 이는 질화세균의 생장이 8 ~ 30℃ 범위의 온도에서 이루어지며, 질화세균의 최적 성장 온도는 약 30℃인 것 [33]으로 보고되어 있는 것과 같은 결과를 보여주고 있다. 그러나 충진율 10%(V/V)의 경우 10℃로 온도가 감소함에 따라 제거효율이 79.8%로 감소하였다. Pano and Middlebrooks[34]는 Rotating Biological Contactor(RBC)에 의한 온도 영향 실험에서 온도가 20℃의 99% 제거효율에서 15℃일 때는 제거 효율이 87%로 감소하였으며, 5℃에서는 암모니아성 질소의 제거가 일어나지 않는다고 보고하고 있으며, Nishio 등[35]의 연구에서는 15 ~ 35℃에서는 제거효율에 크게 영향을 미치지 못하고 15℃이하에서 감소폭이 커진다고 하였다. 그리고 Vogelsang 등[32]은 PVA-SbQ/alginate gel bead에 의한 질산화 연구에 있어서 10 ~ 30℃의 온도 변화에 대해 25%의 활성 변화가 나타나 비교적 온도 변화에 대해 덜 민감하다고 하였다. 이는 본 실험의 결과와 비슷한 결과를 보여주고 있다. 그러나 Randall and Buth[36]의 activated sludge에 의한 질산화 연구에서 30℃, 14 ~ 17℃, 그리고 10℃의 온도 조건의 암모니아성 질소 제거효율이 각각 99%, 96 ~ 97%, 그리고 28%를 나타냄으로써 10℃에서의 제거효율 감소가 상당히 크다는 것을 보여주고 있다. 이는 고정화 담체로 사용된 PVA는 고정화된 질화세균이 질산화 과정에서 발생하는 열을 bead 내에 보존할 뿐만 아니라 유입되는 폐수의 온도 변화에 대하여 질산화균을 보호해 줌으로써 10℃의 낮은 온도에서도 충진율이 15, 20%(V/V)에서 제거효율이 각각 85.7%와 88.7%를 유지할 수 있는 이유라고 판단되어 진다. 이는 우리나라 하폐수의 평균 수온이 10 ~ 15℃이고 이에 따른 고도처리에 있어서 온도에 대한 질산화에 큰 영향 없이 제

거효율을 유지 할 수 있는 것으로 판단되어 진다.

Fig. 11은 수력학적 체류시간이 0.35시간이고 질화세균 고정화된 PVA bead를 10, 15, 20%(V/V)로 충전시켜, 공기부상식 생물반응기내 온도를 10, 15, 20, 25, 30, 그리고 35℃로 변화시켰을 때 암모니아성 질소, 질산성 질소, 아질산성 질소 농도의 변화와 총 무기 질소의 농도를 나타내었다.

충진율 10, 15, 20%(V/V) 모두 10℃에서 아질산성 질소의 농도가 0.24, 0.23, 0.18 g/m³로 다소 높은 값을 보였으나 15℃에서 35℃사이에서는 각 충전율에 대해 0.16, 0.15, 0.15 g/m³으로 유지되었으며 질산성 질소 또한 4.40±0.25, 4.47±0.2, 4.58±0.13 g/m³으로 유지되었다. 이는 암모니아성 질소의 제거속도와 제거효율이 10℃에서 다소 영향을 받는 것과 같은 결과를 보여 주고 있으나 질화세균의 고정화로 인하여 아질산성 질소와 질산성 질소 모두 온도에 대한 영향을 크게 받지 않는 것을 볼 수 있다.

4.5. pH 변화에 따른 암모니아성 질소 제거특성

질화세균에 의한 질산화는 온도와 함께 pH에 있어서도 영향을 받게 된다. 이에 따라 고정화된 질화세균이 pH의 변화에 따라 어떤 특성을 가지는가를 알아보았다.

Fig. 12는 수력학적 체류시간이 0.35시간이고 질화세균 고정화된 PVA bead를 10, 15, 20%(V/V)로 충전시켜, 유입 합성 폐수의 pH를 6, 6.7, 6.8, 7.7, 8.7, 9.6으로 변화시켜 반응기 내의 pH에 따른 암모니아성 질소의 제거 속도 및 제거 효율의 변화를 나타낸 것이다.

유입 합성 폐수의 pH보다 반응기 내의 pH가 0.8까지 감소하는 것은 질화세균에 의한 질산화 과정에 의한 것이며, 충전율 10, 15, 20%(V/V) 모두

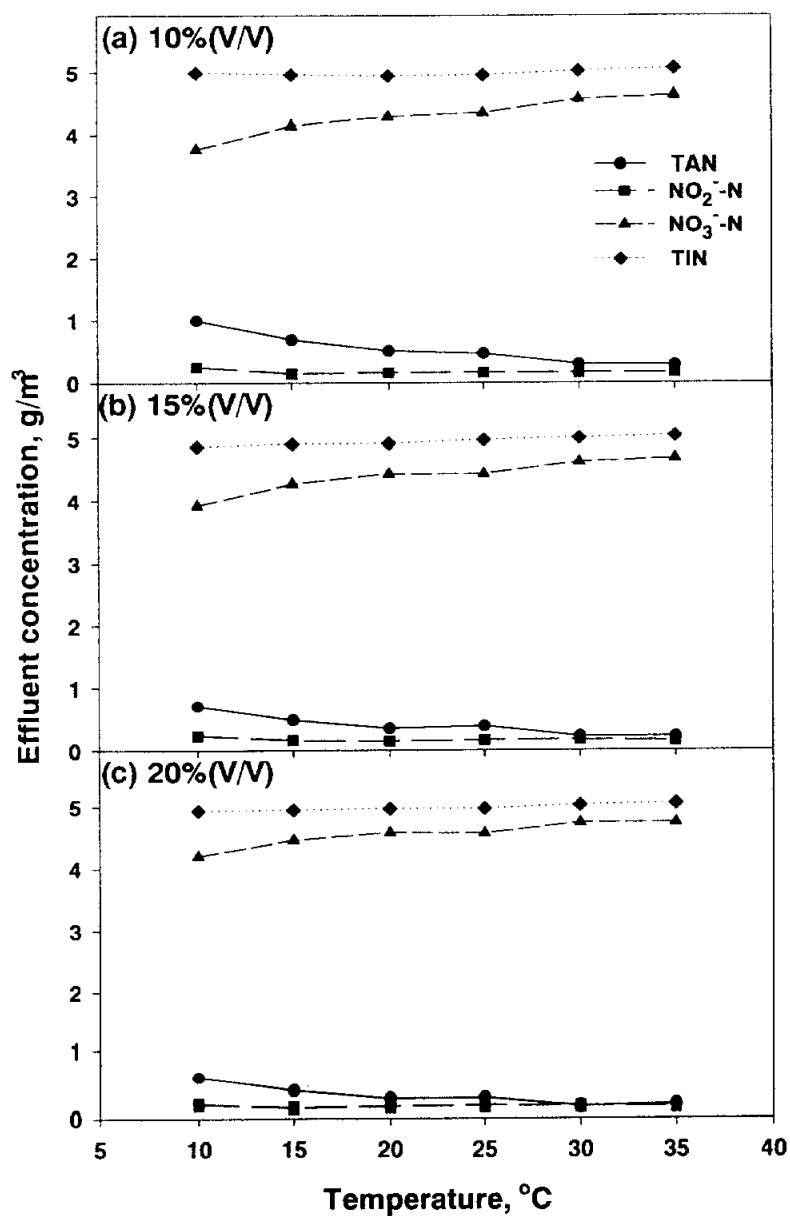


Fig. 11. The effect of temperature on effluent total ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen and total inorganic nitrogen concentration.

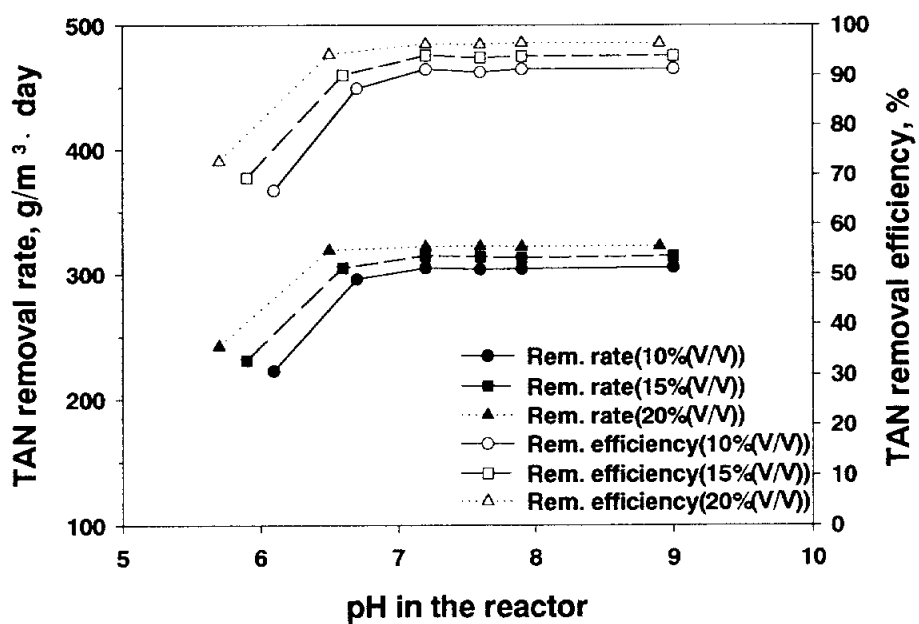


Fig. 12. The effect of pH on total ammonia nitrogen removal rate and removal efficiency.

반응기 내 pH 7 ~ 9 에서 제거속도와 제거효율이 각각 $310 \pm 10 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 와 $94 \pm 3\%$ 로 유지함으로써 Sharma and Ahlert[18]에 의해 보고된 질산화에 있어서의 최적 pH 조건인 7 ~ 8.5의 범위에 접근하는 것을 볼 수 있다. 그러나 pH 6.1 이하로 감소하면서 제거속도와 제거효율 모두 급격히 감소하였고 이는 Lahav 등[37]이 보고한 pH 6.2 이하에서 최대 제거 속도의 50% 이상 감소한다는 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다.

그러나 본 연구에서는 충진을 10%(V/V) 일 때 최적 pH조건에서 최대 $305 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 의 제거속도가 pH 6으로 낮추었을 때 $223 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 로 26.9%의 감소를 보여주고 있으며, 이는 Stuckey and Barber[16]가 PVA로 질화세균을 고정화하여 pH 영향에 대한 연구에서 pH의 감소에 따라 22.8%의 제거속도 감소를 보여준 것과 비슷한 결과를 보여주고 있다.

이와 같이 PVA에 의해 고정화된 질화세균은 유입 암모니아성 질소 폐수와 직접 접하게 되는 생물막법에 비해 PVA로 포괄 고정되어 있으므로 pH 변화에 덜 민감하게 반응하는 것으로 판단되어진다. 이는 포괄 고정화법의 장점인 pH, 온도 변화 그리고 독성물질의 유입에 대한 완충 효과로 보여진다.

Fig. 13은 수력학적 체류시간이 0.35시간이고 질화세균 고정화된 PVA bead를 10, 15, 20%(V/V)로 충진시켜, 유입 합성 폐수의 pH를 6, 6.7, 6.8, 7.7, 8.7, 9.6으로 변화시켜 반응기 내의 pH에 따른 암모니아성 질소, 질산성 질소, 아질산성 질소 그리고 총 무기 질소 농도의 변화를 나타내었다.

충진을 10, 15, 20%(V/V)에 대해서 pH가 6.1, 5.9, 5.7일 때 암모니아성 질소의 농도가 가장 크고 질산성 질소의 농도는 가장 낮게 나타났으며 pH 6.1 이상에서는 암모니아성 질소와 질산성 질소가 안정적인 값을 유지하였다.

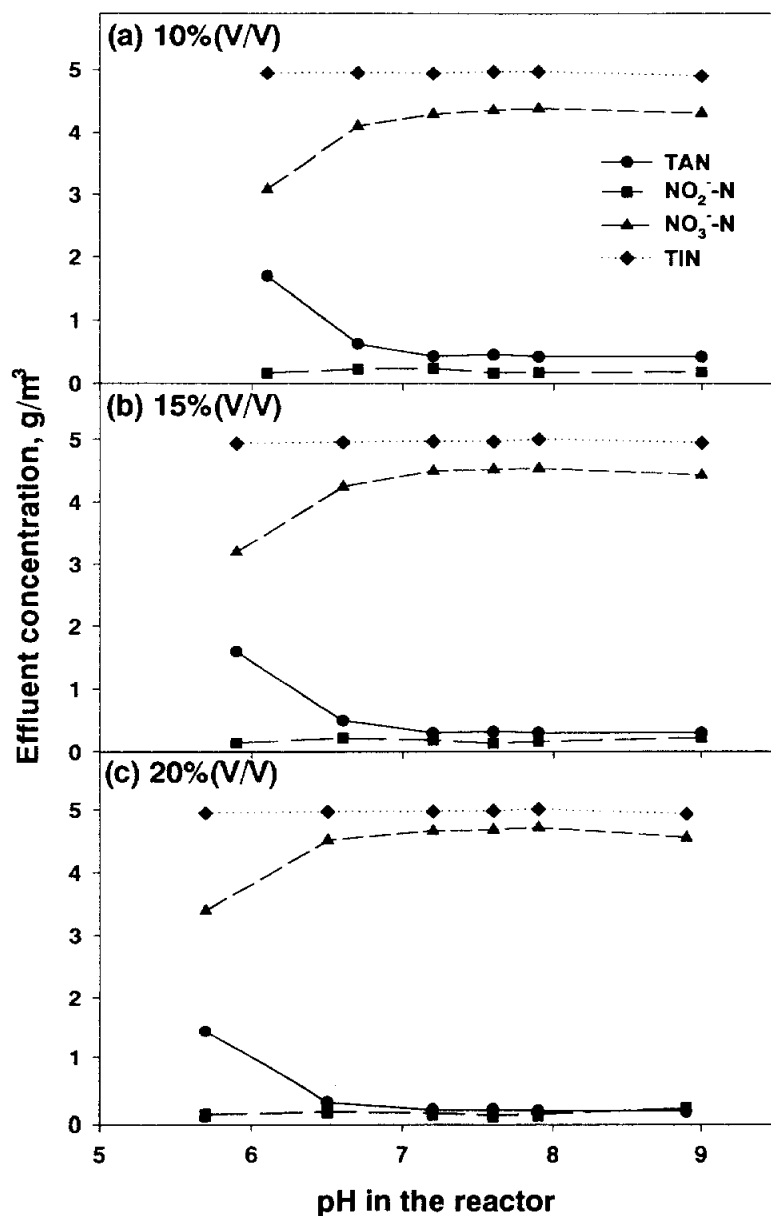


Fig. 13. The effect of pH on effluent total ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen and total inorganic nitrogen concentration.

이는 암모니아성 질소의 질산화가 pH 6.1 이하의 낮은 pH에서 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 아질산성 질소의 농도는 pH의 변화에 따라 차이가 없었다. 이는 Rostron 등[28]이 polyurethane과 polyethylene 그리고 PVA를 담체로 사용하여 질산화를 비교한 연구에서 pH의 증가에 따라 polyurethane과 polyethylene 담체에서는 아질산성 질소가 증가하였다가 3주 후에 90%이상 회복을 보인 반면 PVA 담체는 아질산성 질소의 변화 없이 질산화가 계속 유지되었다는 것과 같은 결과를 보여주고 있다.

4.6. 암모니아성 질소 제거에 대한 kinetics

4.6.1. Monod 식에 의한 암모니아성 질소 제거속도식

Fig. 14는 충진율 10, 15, 20%(V/V)에 대하여 Lineweaver-Burk plot을 이용한 선형회귀 분석 결과(a)와 R_{max} 와 K_s 를 사용하여 얻어진 암모니아성 질소 농도 변화에 따른 제거속도의 변화와 실험 데이터를 비교하여 나타낸 것이고, Table 3은 Lineweaver-Burk plot을 이용한 선형회귀 분석 결과 최대 암모니아성 질소 제거속도 R_{max} , 반포화상수 K_s 그리고 상관계수 r^2 를 정리한 것이다.

각 충진율에 대하여 암모니아성 질소 농도가 2 g/m^3 이하에서는 Monod 식에 의한 모델링이 실험 데이터와 잘 맞지만 2 g/m^3 이상의 암모니아성 질소 농도에서는 약간의 차이를 보이고 있다. 그러나 Lineweaver-Burk plot에 의한 상관계수가 0.973, 0.975, 0.985로 나타나 질화세균 고정화된 PVA bead의 암모니아성 질소 제거속도식은 Monod 식으로 잘 표현된다고 볼 수 있다. 각 충진율에 대하여 반응기 체적 기준 최대 제거속도는 $2254.98 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$, $3644.64 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$, $3374.12 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 로 나타났고, bead 기준으로 환산하였을 경우 $1929.91 \text{ g/m}^3\text{-bead} \cdot \text{day}$, $2894.87 \text{ g/m}^3\text{-bead} \cdot \text{day}$,

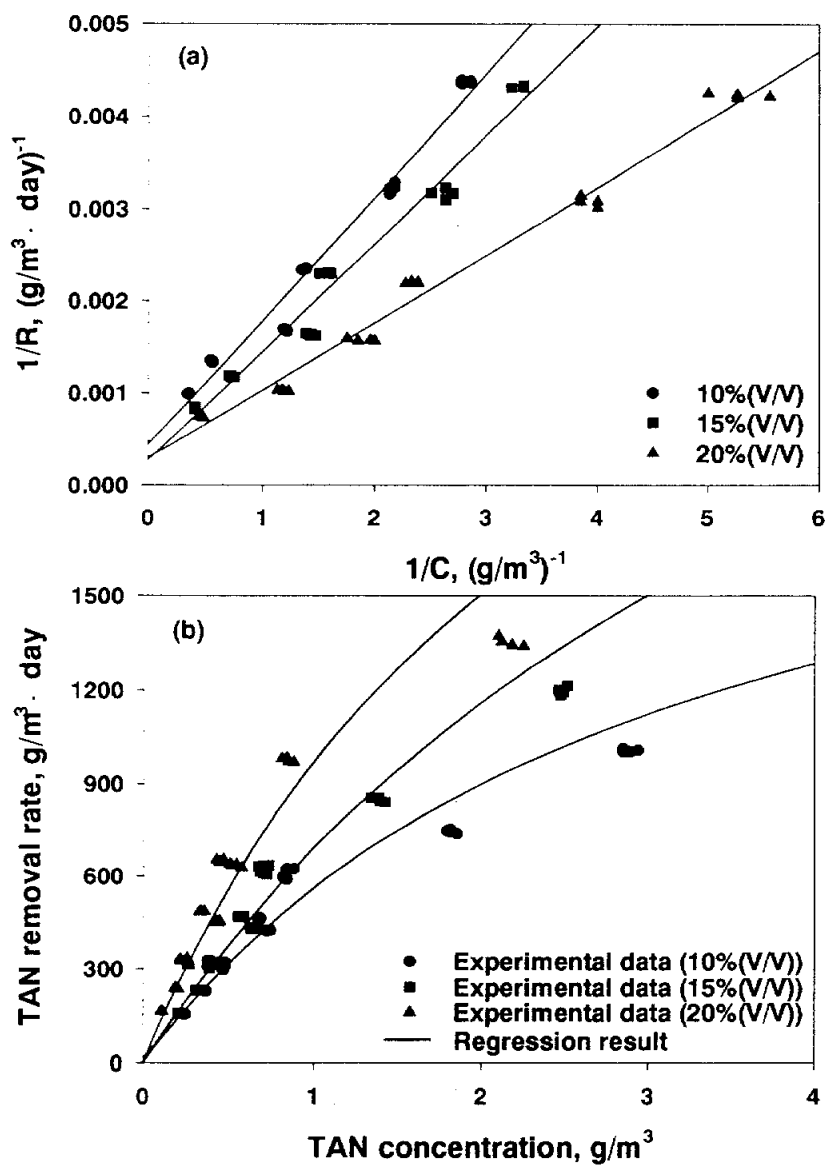


Fig. 14. The Lineweaver-Burk plot for the determination of kinetics parameter(a) and the relationship between the experimental data and the regression result(b)

Table 3 The result of Lineweaver-Burk plot.

Packing fraction		10%(V/V)	15%(V/V)	20%(V/V)
Maximum TAN removal rate($R_{\max}$), $\text{g/m}^3 \cdot \text{day}$	Based on the reactor	2254.98	3644.64	3374.12
	Based on the bead	1929.91	2894.87	3859.83
Half saturation constant(K_s), g/m^3		3.02	4.28	2.48
Correlation coefficient(r^2)		0.973	0.975	0.985

3859.83 g/m³-bead · day로 나타났다. 이는 본 실험의 충진율 10%(V/V)의 결과가 동일한 저농도 암모니아성 질소를 충진율 12%(V/V)로 연구하여 Monod 식에 적용한 Timmons and Greiner[30]의 최대 제거속도 1968 g/m³-bead · day와 비교했을 때 비슷한 결과를 얻을 수 있었고, 본 연구의 충진율 15%(V/V)에서 2894.87 g/m³-bead · day는 PEG pellet으로 질산화 연구를 한 Tanaka 등[8]의 3600 g/m³-pellet · day보다 다소 낮은 값을 보여주고 있으며, 충진율 20%(V/V)에서 얻은 최대 제거속도 3859.83 g/m³-bead · day는 Rostron 등[28]의 PVA bead를 23%(V/V) 충진한 연구결과인 2146.24 g/m³-bead · day보다는 높은 결과를 보여주고 있다. 그러나 이와 같은 결과들을 반응기 체적 기준으로 각 충진율에 대한 결과로 비교하였을 때 충진율 10%에서의 Timmons and Greiner[30]는 최대 제거속도 236.16 g/m³ · day을, 충진율 15%(V/V)에서의 Tanaka 등[8]은 최대 제거속도 540 g/m³ · day을, 그리고 충진율 23%(V/V)의 Rostron 등[28]은 최대 제거속도 700 g/m³ · day을 보여줌으로써 본 연구의 결과보다 낮은 값을 보여주었고 이런 결과로 PVA-bead를 충진한 split-cylinder 공기부상식 생물반응기가 질산화에 효과적인 것으로 판단되어 진다.

4.6.2. 1/2차식에 의한 암모니아성 질소 제거속도식

본 연구에서 Monod 식에 의한 제거속도식을 적용한 것은 전반적으로 잘 표현될 수 있으나 분수형태로 농도항을 분자와 분모에 모두 포함하고 있어 공정을 모델링하는데 있어 불편하다. 이에 반해 Timmons and Greiner[30]는 2.5 g/m³ 이하의 저농도에서 1차의 제거 속도식을, 그 이상의 농도에서는 0차식을 도입함으로써 보다 간편화시켰으나 1차 속도식 영

역에서 0차 속도식 영역사이의 전이 영역에 대한 적용이 불가능하였다[21].

Nijoh[38]는 저농도와 살수여상 생물막 공정을 이용한 질산화 반응에 있어 1/2차 속도식을 이용할 경우 저농도와 전이영역에 대해 잘 적용될 수 있다고 하였고 그 이상의 농도에 대해서는 0차 속도식을 제시하였다.

본 연구의 저농도 암모니아성 질소의 제거속도가 최대농도에 도달하지 않고 전이영역에 머무르므로 1/2차식을 적용할 경우 보다 용이하게 이용할 수 있다. 포괄 고정화한 미생물에 의한 암모니아성 질소 제거 반응에 있어서 제거속도 기작은 생물막 공정과 크게 다르지 않으므로 1/2차 속도식을 적용시킬 수 있다.

Fig. 15는 1/2차 속도식의 속도상수를 구하기 위한 선형회귀 분석 결과 (a)와 선형회귀 분석하여 구한 속도상수를 사용하여 얻어진 암모니아성 질소 농도 변화에 따른 제거속도의 변화와 실험 데이터를 비교하여 나타낸 것(b)이고, Table 4는 본 연구의 저농도 암모니아성 질소 농도범위에 대한 1/2차 속도식의 회귀 결과를 보여주고 있다.

충진율 10%, 15%, 20%(V/V)의 속도상수 $k_{1/2}$ 는 각각 $560.32 \text{ (g/m}^3)^{0.5} \cdot \text{day}$, $690.75 \text{ (g/m}^3)^{0.5} \cdot \text{day}$, $886.95 \text{ (g/m}^3)^{0.5} \cdot \text{day}$ 였으며, 상관계수는 각각 0.931, 0.905, 0.908로 나타났다.

이와 같이 본 연구에서 수행한 저농도 암모니아성 질소 범위에 대해서 실험 데이터와 잘 부합되는 것으로 나타남으로써 1/2차 속도식에 대한 적용은 저농도 뿐만 아니라 전이 영역에 대해서도 잘 표현될 수 있는 것으로 보여지고, Monod 식에 비해 간편한 형태로 제거속도식을 이용할 수 있는 것으로 판단되어 진다.

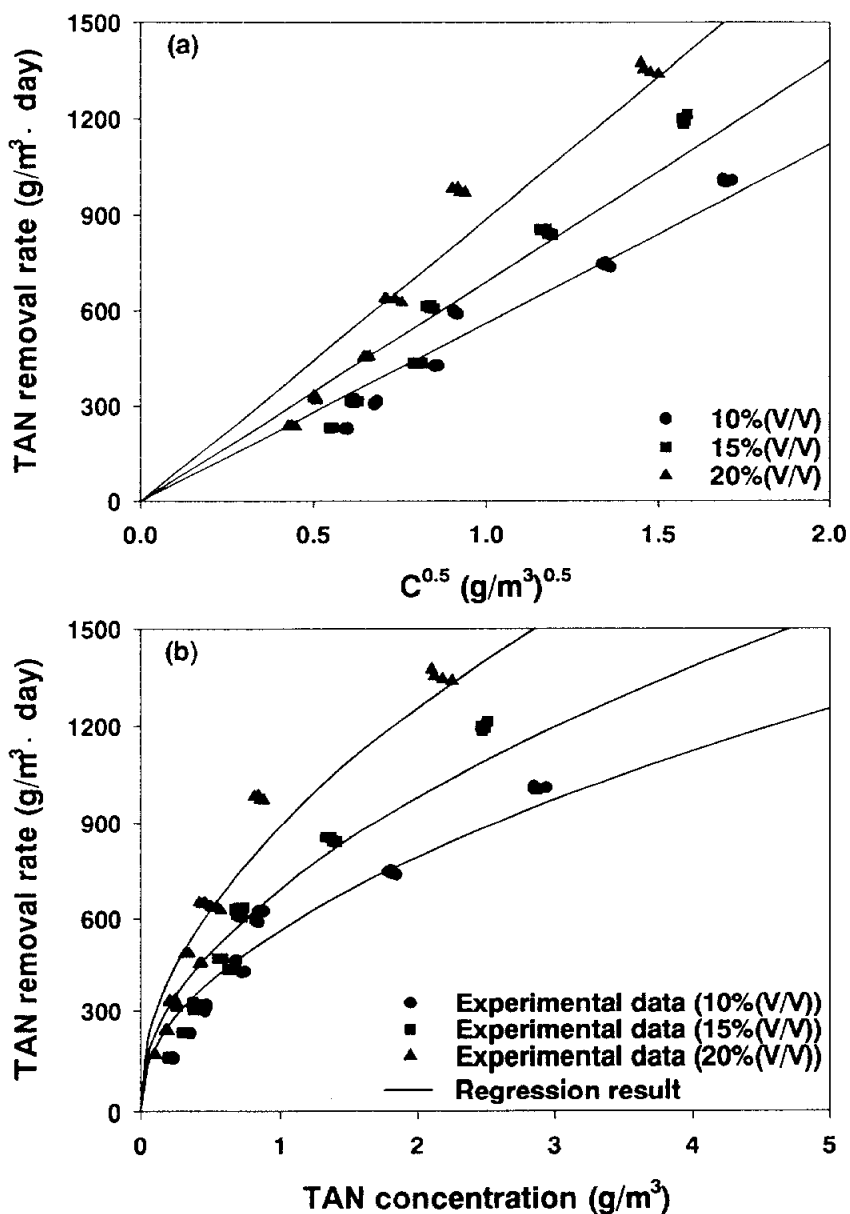


Fig. 15. The regression for the determination of kinetics parameter of half order reaction rate(a) and the relationship between the experimental data and the regression result(b).

Table 4 The result of the regression by half order reaction rate.

Packing fraction	10%(V/V)	15%(V/V)	20%(V/V)
Rate constant($k_{1/2}$), (g/m^3) ^{0.5} · day	560.32	690.75	886.95
Correlation coefficient(r^2)	0.931	0.905	0.908

5. 결 론

질화세균을 PVA에 의해 고정화시켜 공기부상식 생물반응기로 저농도의 암모니아성 질소 제거에 있어서 여러 운전 조건에 대한 최적조건을 찾고 이에 대한 모델식의 적용으로 암모니아의 고도처리에 효용성을 알아보는 실험이다.

충진율이 10, 15%(V/V)에서는 공기 유입량이 증가할 수록 제거속도와 제거효율 모두 증가하였으며, 0.83 cm/sec에서 모든 충진율에 대해 제거속도는 $316.6 \pm 7.2 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$, 제거효율은 $92.8 \pm 2.2\%$ 의 결과를 보였다. 또한 공기 유입량의 변화에 따른 반응기 내 DO 변화에 있어서는 각 충진율에 대하여 큰 차이를 보이지 않았으며 공기 유입량에 따라 5.5에서 6.8 g/m^3 의 결과를 보여주었다. 아질산성 질소와 질산성 질소의 경우 공탐 공기 유속이 0.83 cm/sec까지 증가하면서 아질산성 질소의 농도는 감소하는 반면 질산성 질소의 농도가 증가하였다.

수력학적 체류시간이 0.5시간에서 0.05시간으로 감소함에 따라 충진율 10, 15, 20%(V/V)의 암모니아성 질소의 제거속도는 증가하였으며, 수력학적 체류시간 0.05시간에서 충진율 10%(V/V)는 $1007 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$, 15%(V/V)는 $1199 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$, 20%(V/V)는 $1352 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 의 제거속도를 나타내었고, 제거효율은 체류시간이 증가함에 따라 증가하였으며 체류시간 0.35시간 이상에서 충진율 10, 15, 20%(V/V)에 대해 각각 93.1%, 94.1%, 96.3%의 최대 제거효율을 나타냈다. 또한 수력학적 체류시간이 0.05시간에서 0.5시간으로 증가함에 따라 암모니아성 질소의 농도는 감소하였고 아질산성 질소의 농도는 0.05시간에서 0.1시간 사이에서는 증가하다가 0.1시간에서 0.5시간 사이에서는 점점 감소하였으며 질산성 질소는 증가하였고, 충진율이 커질 수록 총 무기질소의 양에 접근하는 것을 볼 수 있었다.

유입수 암모니아성 질소의 농도 변화에 있어서 각 충진율에 따른 제거

속도 차는 크지 않았고 2.5 g/m^3 에서 $155 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$, 10 g/m^3 에서는 $630 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 를 나타내었고 제거효율은 90%이상을 유지하였으며, 각 충진율에 따라 93 ± 2 의 제거효율을 보여주었다.

온도변화에 따른 영향에 있어서 제거속도는 온도 상승에 따라 최대 $323 \pm 8 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 까지 회복되었고 제거효율은 충진율 10%(V/V)가 10°C 에서 79.8%로 낮았으나 30°C 에서는 모든 충진율에 있어서 $95.5 \pm 1.5\%$ 의 효율을 보여주었다. 아질산성 질소와 질산성 질소의 경우 온도에 대한 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다.

유입 합성 폐수의 pH에 따른 영향은 충진율 10, 15, 20%(V/V) 모두 반응기 내 pH 7 ~ 9 에서 제거속도와 제거효율이 각각 $310 \pm 10 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 와 $94 \pm 3\%$ 로 유지하였고, 각 충진율 10, 15, 20%(V/V)에 있어서 pH가 5.9, 5.7, 6.1 일 때 제거속도와 제거효율 모두 급격히 감소하였고 암모니아성 질소의 농도가 가장 크고 질산성 질소의 농도는 가장 낮게 나타났으며 아질산성 질소 농도의 차이는 없었다.

암모니아성 질소의 제거속도식에 대한 적용에 있어서 일반적으로 널리 사용되어지고 있는 Monod 식으로 잘 표현되었으나 모델링에 있어서 식이 복잡함으로써 이에 대하여 보다 간편한 1/2차 속도식을 적용한 결과 실험 데이터와 잘 부합되는 것으로 나타났다.

결론적으로, 저농도 암모니아의 고도처리를 위한 공기 유입량과 수력학적 체류시간과 같은 운전에 대한 최적 조건을 구하고 유입수 암모니아성 질소 농도, 온도, pH와 같은 환경적 영향에 대한 제거속도와 제거효율을 알아본 결과, 공기 부상식 생물반응기로 질화세균 고정화된 PVA bead을 이용한 저농도 암모니아성 질소제거는 수처리의 고도처리에 용이하게 적용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Sedlak, R.I., "Phosphorus and Nitrogen Removal from Municipal wastewater, Principles of Biological and Physical/Chemical Nitrogen Removal, Eckenfelder W.W., Argaman, Y.", Lewis Publishers, pp. 3 (1991).
2. Bitton, G., "Wastewater Microbiology", John Wiley & Sons, pp. 88 (1994).
3. Environmental Protection Agent, "Process design manual for nitrogen control", Office of technology transfer (1975).
4. Ariga, O., Yamakawa, T., Fufimatsu, H., and Sano, Y., "Immobilization of β -galactosidase with polyvinyl alcohol", *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 68, pp. 293-295 (1989).
5. Asano, H., Myoga, H., Asano, M. and Toyao, M., "A study of nitrification utilizing whole microorganisms immobilized by the PVA-freezing method", *Water Science and Technology*, 26, pp. 1037-1046 (1992).
6. Myoga, H., Asano, H., Nomura Y. and Yoshida, H., "Effects of immobilization conditions on the nitrification treatability of entrapped cell reactors using the PVA freezing method", *Water Science and Technology*, 23, pp. 1117-1124 (1991).
7. Kotlar, E., Tartakovsky, B., Argaman, Y. and Sheintuch, M., "The nature of interaction between immobilized nitrification and denitrification bacteria", *Journal of Biotechnology*, 51, pp. 251-258 (1996).

8. Tanaka, K., Nakao, M., Mori, N., Emori, H., Sumino, T. and Nakamura, Y., "Application of immobilized nitrifiers gel to removal of high ammonium nitrogen", *Water Science and Technology*, 29, pp. 241-250 (1994).
9. Tanaka, K., Tada, M., Kimata, T., Harada, S., Fujii, Y., Mizuguchi, T., Mori, N. and Emori, H., "Development of new nitrogen removal system bacteria immobilized in synthetic resin pellets", *Water Science and Technology*, 23, pp. 681-690 (1991).
10. 角野 立夫, 中村 裕紀, 森 直道, 江森 弘祥, "포괄고정화 미생물을 이용한 배수처리", *첨단환경기술*, pp. 51-57 (1993).
11. Youn, J.S., "Nitrogen removal using microorganisms immobilized with a PVA-freezing method(Ph.M. Dissertation)", Chonbuk National University, Chonju, Korea (1997).
12. Song, J.Y. and Lee, S.H., "Biological removal of nitrogen and phosphorus from waste water by microencapsulated strains", *Korean Journal of Biotechnology and Bioengineering*, 12, pp. 269-275 (1997).
13. Kang, T.G., Han, H.D., Cho, Y.J., Choi, H.S., Kang, Y. and Kim, S.D., "Nitrification of ammonia in the wastewater in three-phase circulating fluidized-bed reactors", *HWAHAK KONGHAK*, 40, pp. 450-456 (2002).

14. Lee, S.C. and Kim, D.J., "A study on the nitrification and denitrification of an anoxic-oxic upflow biological aerated filter", *HWAHAK KONGHAK*, 39, pp. 123-129 (2001).
15. Campos, J.L., J.M. Garrido-Fernández, Méndez, R. and Lema, J.M., "Nitrification at high ammonia loading rates in an activated sludge unit", *Bioresource Technology*, 68, pp. 141-148 (1999).
16. Stuckey, D.C. and Barber, W.P., "Nitrogen removal in a modified anaerobic baffled reactor(ABR): 2, nitrification", *Water Research*, 34, pp. 2423-2432 (2000).
17. Strotmann, U.J. and Windecker, G., "Kinetics of ammonium removal with suspended and immobilized nitrifying bacteria in different reactor systems", *Chemosphere*, 35, pp. 2939-2952 (1997).
18. Sharma, B. and Ahlert, R.C., "Nitrification and nitrogen removal", *Water Research*, 11, pp. 897-925 (1977).
19. van Ginkel, C.G., Tramper, J., Luyben, K.Ch.A.M. and Klapwijk, A., "Characterization of *Nitrosomonas europaea* immobilized in calcium alginate", *Enzyme and Microbial Technology*, 5, pp. 297-303 (1983).
20. Kim, D.K., Kim, H.K., Kim, J.S., Suh, K.H., Kim, S.K. and Kong, I.S., "Isolation and characterization of ammonia oxidizing bacteria, *Nitrosomonas* sp. PK1", *Korean Journal of Life Science*, 7, pp. 107-111 (1997).

21. Shuler, M. L. and Kargi, F., "Bioprocess Engineering - Basic Concepts", Prentice-Hall, New Jersey, 84(1992).
22. Hashimoto S. and K. Furukawa, "Immobilization of activated sludge by PVA-boric acid method", *Biotechnology and Bioengineering*, 30, pp. 52-59 (1987).
23. Suh, K.H., Kim, Y.H., Cho, J.K., Kim, B.J., Sae, J.K., Park, E.J. and Kim, S.K., "Removal of $\text{NH}_3\text{-N}$ by using immobilized nitrifier consortium in polyvinyl alcohol", *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, 8, pp. 479-483 (1999).
24. Chisti, M.Y., "Airlift Bioreactors", Elsevier Applied Science, London and New York., 1(1989).
25. APHA, AWWA and WEF, "Standard methods for the examination of water and wastewater", 20th ed., EPS Group, 4-106(1998).
26. Kim, C.W., "공기부상형 유동상 생물막 반응기에 의한 고도처리기술", *첨단환경기술*, pp. 2-8 (1998).
27. Garrido, J.M., van Benthum, W.A.J., van Loosdrecht, M.C.M. and Heijnen, J.J., "Influence of dissolved oxygen concentration on nitrite accumulation in a biofilm airlift suspension reactor", *Biotechnology and Bioengineering*, 53, pp. 168-178 (1997).

28. Rostron, W.M., Stuckey, D.C. and Young, A.A., "Nitrification of high strength ammonia wastewaters: comparative study of immobilisation media", *Water Research*, 35, pp. 1169-1178 (2001).
29. Matsumura, M., Yamamoto, T. and Wang, P.C., "Rapid nitrification with immobilized cell using macro-porous cellulose carrier", *Water Research*, 31, pp. 1027-1034 (1997).
30. Timmons, M.B. and Greiner, A.D., "Evaluation of the nitrification rates of microbead and trickling filters in an intensive recirculating tilapia production facility", *Aquaculture Engineering*, 18, pp. 189-200 (1998).
31. Suh, K.H., Kim, B.J. and Oh, C.S., "Removal of $\text{NH}_3\text{-N}$ by using immobilized nitrifier consortium in PVA-1. Effect of packing fraction and aeration rate on ammonia nitrogen removal", *Korean Journal of Biotechnonology and bioengineering*, 16, pp. 314-319 (2001).
32. Vogelsang, C., Husby, A. and Østgaard, K., "Functional stability of temperature-compensated nitrification in domestic wastewater treatment obtained with PVA-SBQ/alginate gel entrapment", *Water Research*, 31, pp. 1659-1664 (1997).
33. Liu, Y. and Capdeville, B., "Kinetic Behaviors of Nitrifying Biofilm Growth in Wastewater Nitrification Process", *Environmental Technology*, 15, pp. 1001-1014 (1994).

34. Pano, A. and Middlebrooks, E.J., "Kinetics of carbon and ammonia nitrogen removal in RBCs", *Journal Water Pollution Control Federation*, 55, pp. 956-965 (1983).
35. Nishio, T., Yoshikura, T., Mishima, H., Inouye, Z. and Itoh, H., "Conditions for Nitrification and Denitrification by an Immobilized Heterotrophic Nitrifying Bacterium *Alcaligenes faecalis* OKK17", *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 86, 351-356 (1998).
36. Randall, C.W. and Buth, D., "Nitrite build-up in an activated sludge resulting from temperature effects", *Journal Water Pollution Control Federation*, 56, pp. 1039-1049 (1984).
37. Lahav, O., Artzi, E., Tarre, S. and Green, M., "Ammonium removal using a novel unsaturated flow biological filter with passive aeration", *Water Research*, 35, pp. 397-404 (2001).
38. Nijhof, M., "Bacterial stratification and hydraulic loading effects in a plug-flow model for nitrifying trickling filters applied in recirculating fish culture systems", *Aquaculture Engineering*, 134, pp. 49-64 (1995).

Appendix A. 연구목록

1. 정기학술지 논문

- 1) 고정화 질화세균을 이용한 저농도 암모니아 폐수의 고도처리 <이정훈, 김병진, 김용하, 이경범, 임준혁, 천재기, 서근학/한국화학공학회/화공학회지(02.12)/40(6)/>
- 2) Pilot-scale 순환여과식 양식장에서 회전원판 반응기의 순화수 처리 및 산소전달 <서근학, 김병진, 이정훈, 김용하, 이석희, 김성구, 조재윤/한국수산학회/한국수산학회지(02.9)/35(5)/469-475>
- 3) 고정화 질화세균의 암모니아 제거속도식 <김병진, 이정훈, 서근학/한국화학공학회/화공학회지(02.2)/40(1)/93-99>
- 4) 포말분리기를 이용한 해수로부터 양식폐기물 제거(3.SAV영향) <김병진, 이정훈, 김성구, 김용하, 이경범, 서근학/한국화학공학회/화공학회지(01.2)/39(1)/123-129>

2. 학술회의 발표논문

- 1) Biosorption of Pb and Cr by Marine Algae, Sargassum species.<Kuen-Hack Suh, Byong-Jin Kim, Jung-Hoon Lee/ The 2001 International symposium on advanced engineering/ Oct. 24-25,2001/159-162>
- 2) 저농도 암모니아 처리공정설계를 위한 제거속도식 도출 <이정훈, 나인걸, 이민수, 김병진, 서근학/생물공학 2002추계(10.11)/ 799-802>

- 3) 양어장내 암모니아폐수 처리 시 초기 암모니아 농도, 온도 그리고 pH 영향 <이정훈, 김병진, 이민수, 나인걸, 서근학/수산학회 2002춘계 (5.16)/ 221-222>
- 4) 양어장내 암모니아폐수 처리 시 공기유입량과 수력학적 체류시간의 영향 <이정훈, 김병진, 이민수, 나인걸, 서근학/수산학회 2002춘계 (5.16)/ 223-224>
- 5) 고정화 질화세균을 이용한 저농도 암모니아의 고도처리 (II) 초기 암모니아 농도, 온도 그리고 pH의 영향 <이정훈, 김병진, 이민수, 나인걸, 서근학/생물공학 2002춘계(4.12)/346-348>
- 6) 고정화 질화세균을 이용한 저농도 암모니아의 고도처리 (I) 공기유입량과 수력학적 체류시간의 영향 <이정훈, 김병진, 이민수, 나인걸, 서근학/생물공학 2002춘계(4.12)/343-345>
- 7) 저농도 암모니아 처리시 초기암모니아 농도, 온도 그리고 pH의 영향 <이정훈, 김병진, 서근학/화학공학회 2001추계(10.19)/4371-4374>
- 8) 저농도 암모니아 처리시 공기유입량과 수력학적 체류시간 영향 <이정훈, 김병진, 서근학/화학공학회 2001추계(10.19)/4367-4370>
- 9) 포말분리법에 의한 해수내 양어장 오염물 제거시 유입 단백질 농도 영향 <이정훈, 김병진, 서근학/수산학회2001춘계(5.11)/326-327>
- 10) 양어장수의 암모니아 제거시 포괄고정화 미생물의 질산화 속도식 도출 <이정훈, 김병진, 서근학/수산학회2001춘계(5.11)/324-325>
- 11) 초기 단백질 농도가 해수의 포말 분리에 미치는 영향 <김병진, 이정훈, 서근학/화학공학회2001춘계(4.27-28)/1661-1664>

- 12) 고정화 질화세균균에 의한 저농도 암모니아 제거속도식 <김병진, 이정훈, 서근학/ 화학공학회2001춘계(4.27-28)/1657-1660>
- 13) 포말분리법에 의한 해수중의 단백질제거시 초기 단백질농도 영향 <김병진, 이정훈, 서근학/ 화공 부산,경남지부/ 화공기술논문집(12.21)/33-36>
- 14) 포말분리법에 의한 해수중의 단백질 제거 <김병진, 이정훈, 서근학/ 화학공학회 2000춘계(4.21-22)/1593-1596>
- 15) 향류공기구동식, 고속폭기식 및 벤츄리식 포말분리기에 의한 양어장수의 단백질 및 부유고형물 제거 특성<김병진, 이정훈, 서근학/ 화학공학회2000춘계(4.21-22)/ 1589-1592>
- 16) 공기부상식 생물반응기에서 고정화된 질화세균균에 의한 암모니아성 질소 제거시 체류시간, pH, 온도 및 암모니아 농도 영향 <김병진, 조진구, 이정훈, 김용하, 서근학/ 화학공학회2000춘계(4.21-22)/1585-1588>

3. 학술회의 발표논문 수상

- 1) 2002 한국생물공학회 춘계학술발표대회 - 우수포스터발표상

감사의 글

대학교에 입학하여 2학년부터 실험실 생활을 시작하며 대학원까지 5년의 기간을 마무리하는 시점에서의 결실로 이 졸업논문을 쓰게 있어서 지도교수인 서근학 교수님과 화학공학과와 여러 교수님들께 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

부족하지만 언제나 옆에서 친형처럼 조언과 꾸지람을 아끼지 않았던 병진형에게 후배라기 보다는 동생으로서의 깊은 사과와 감사의 마음을 함께 전합니다. 그리고 우리실험실을 항상 아끼고 사랑하는 안수현, 이민수, 조진구, 나인걸 선배들과 동기인 김은정, 남지연, 조문철 그리고 봉세환, 김홍렬, 강민승, 이희진, 장민경, 안성준, 장현숙에게도 감사 드리며, 특히 장샘(민경)에게는 여러모로 대학원 학위과정을 돌보아주어서 얼마나 편히 졸업하게 되었는지 모르겠습니다. 저의 뒤를 이어 우리 실험실을 이끌 신정식, 이주화 그리고 이창근, 이은정에게는 수고해 주었으면 하는 바램입니다.

대학에 진학하여 나의 재산이라고 자부하고 싶은 우리 친구들, 김정운, 남우석, 박동희, 송영두, 이기석, 정석기(이상은 싸울까봐 가나다순으로 적음)에게 함께 한 시간이 헛되지 않았기를 바라며 깊은 고마움을 전합니다. 그리고 따뜻한 마음으로 지켜봐 주신 임성일 형님과 후배이면서 선배인 상규, 홍기, 동기인 이광호 그리고 모든 분에게 감사 드립니다. 그리고... 우리경아...

부모님....

항상 저를 믿어주시는 아버님, 어머님, 고모님, 그리고 유진이에게 이 못한 아들의 학위논문을 올립니다. 사랑합니다.

2001년 12월 마지막날 이정훈 올림