

## 論 文

## 생물막을 이용한 상수 원수에서의 암모니아 제거 특성

## Ammonia Removal Characteristics of Biofilm Reactor

신 함 식\* · 임 경 호\*\* · 이 상 민\*\*

Hang-Sik Shin\* · Kycong-Ho Lim\*\* · Sang-Min Lee\*\*

## Abstract

The presence of ammonia, usually in the form of ammonium ion ( $\text{NH}_4^+$ ), can enhance bacterial growth in the distribution system and make the production of drinking water more costly if ammonium must be removed to ensure good disinfection. Removal of ammonia by biological oxidation could be economical which prevents excess chlorine dosage. In this research, effects of hydraulic retention time (HRT) and media type on the ammonia removal efficiencies of submerged biofilm reactor were investigated. The biofilm reactors combined the characteristics of high biological solids capture efficiency and good hydraulic control. The results indicate that biofilms can remove over 77 percent of the ammonia with HRT of longer than 2 hr even at low temperature ranging from 14.6 to 16.6°C. The HRT has a significant effect on nitrification. The overall nitrification and efficiency of ammonia removal increase with increasing HRT. It has also been observed that when the fibrous media was used, the ammonia removal, nitrification rate and endurance to shock improved.

## 1. 서 론

상수 원수에 존재하는 질소 형태는 유기질소, 암모니아, 아질산성 질소 및 질산성 질소이며 이들 모두는 음용수에는 부적합한 화합물이다. 일반적으로 유기질소는 미생물에 의해 암모니아성 질소로 변환되며,  $\text{NO}_2^-$ 는 비교적 불안정한 화합물이므로 자연수에서는 잘 관찰되지 않는다. 따라서 음용수에 문제를 일으키는 질소 형태는 대부분 암모니아와  $\text{NO}_3^-$  형태

이다. 1) 암모니아의 경우 상수원에서의 농도가 3mg N/L를 초과하는 경우가 드물며 지표수내 평균 농도는 0.2mg N/L이하이다. 2) 또한 지역 및 계절적으로 농도가 변하며 특히 겨울철에는 지표수의 암모니아 농도가 가장 높아지는데 이는 질산화율이 감소하기 때문이다. 상수 원수에서 발견되는 일반적인 암모니아 농도 범위에서는 인체에 이따한 심각한 독성도 나타내지 않는다. 그러나 암모니아는 독립영양성 세균의 성장에 전자공여체로 작용하며 처리장 및 급배수관망에 질산화 미생물의 성장을 초래할 수 있다. 1) 이러한 이유로 수돗물중의 암모니아 농도를 0.5mg N/L로 제한하고 있다.

급배수관망에서의 미생물 성장은 여러 가지

\* 한국과학기술원 토목공학과 교수

\*\* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

심에서 비롯되지 못하다. 미생물 slime은 수소이온 및 산소의 농도구배를 형성하여 관망부식을 가속화하며, 3) 유수능력을 감소시켜 급배수에 필요한 에너지 비용을 증가시킨다. 4) 또한 slime의 부패, 미생물의 대사산물 및 소독제와 slime의 반응등에 의해 수돗물에 맛, 냄새 및 색도 문제를 유발한다. 5) 한편, 소독제와 slime의 반응은 잔류염소의 유지를 어렵게 하며 따라서 *Klebsiella* 또는 *Enterobacter*와 같이 잠재적 병원성 미생물이 증식할 수 있게 한다. 이 밖에 관망내에 slime이 있으면 고동동물이 성장할 수도 있다. 따라서, 비록 처리장 유출수가 수질기준을 만족한다 하더라도 급배수관망에서의 미생물 증식은 수질을 악화시키고 소비자의 불만을 높일 수 있다. 암모니아는 또한 염소소독을 행할 때 chloramine생성으로 살균력이 저하되며 염소요구량(8~10mg Cl/mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)이 커서 파괴점염소소독(breakpoint chlorination)을 실시하기 위해서는 다량의 염소가 투입되어야 하므로 비경제적일 뿐만 아니라 염소계유기화합물의 발생 가능성을 높일 수 있다.

화학적·생물학적 공정들이 암모니아 제거에 적용될 수 있다. 우선 이온교환과 화학적 산화를 고려할 수 있는데 기술적인 관점에서 이온교환법의 주요한 단점은 수중의 암모니아 농도가 다른 양이온보다 매우 낮다는데서 발생한다. 암모니아를 위한 실질적인 선택성 양이온교환기가 없기 때문에 사용되는 양이온교환기의 흡수 능력이 암모니아보다는 다른 양이온에 의해 소모된다. 이 공정은 또한 물의 이온 조성에 좋지 못한 변화를 일으키게 되고 사용한 재생 용액의 폐기가 문제될 수 있다. 암모니아 제거를 위한 파괴점 염소주입은 과량의 염소를 필요로 하므로 염소주입후에 입상활성탄 흡착처리를 하여 염소처리 결과 발생하는 THM 등을 제거해야 하는 등 한계가 있는 것으로 지적되고 있다.

이에 비해 생물학적 산화에 의한 암모니아 제거는 경제적이며, 효율적인 암모니아 제거를 통해 고농도 염소주입의 필요성을 배제할 수

있다. 6) 질산화 과정에서 암모니아는 먼저 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>로 산화되고 다시 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>로 변하는데 이러한 산화 반응은 대부분 독립영양성 세균인 *Nitrosomonas* 및 *Nitrobacter*에 의해서 이루어진다. 질산화 세균은 증식계수(Y)가 작고 최대 성장 속도가 느리므로 세포체류시간이 길어야 하는데 생물막 반응조는 부착성 미생물을 이용하므로 이에 가장 적합한 시스템이라 할 수 있다. 질산화를 위한 생물막 반응조의 구비 조건은 1) 비표면적이 커야 하며, 2) 전단력에 의한 손실과 막힘 현상을 최소화 할 수 있어야 하고, 또한 3) 1.0g의 NH<sub>4</sub>-N을 NO<sub>3</sub>-N으로 산화하기 위해서는 약 4.5g의 산소가 필요하므로 충분한 용존산소 농도가 공급될 수 있어야 한다. 본 연구는 대형 원수를 대상으로 실험실 규모의 침적여상법(submerged biofilm process)을 이용하여 상수원수내 암모니아 제거를 위한 전처리 생물막 공정의 특성을 조사하였으며 특히 수리학적 체류시간과 여재의 종류에 따른 영향을 중심으로 살펴보았다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험재료

본 연구에서 사용한 실험 장치는 기질 부하, 접촉 매체 및 수리학적 체류시간의 영향을 고찰하기 위하여 실험실 규모로 제작하였으며 실험장치의 공정도는 Fig. 1과 같다. 장치의 구성

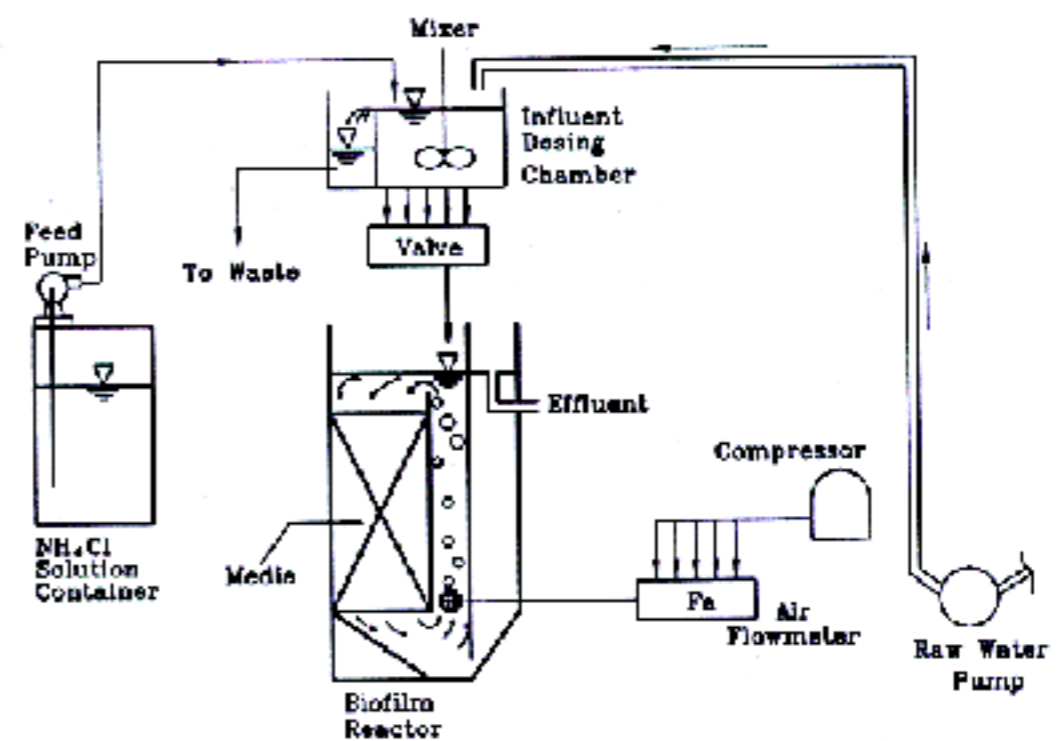


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

**Table 1.** Operating Conditions of Submerged Biofilm Reactors

반응조	R 1	R 2	R 3	R 4	R 5
항목					
여재종류	격자형 단면의 polycarbonate				섬유상 여재
HRT(hr)	3.0	2.0	1.0	0.5	2.0
유입수량(l/d)	28	42	84	167	42

은 크게 원수펌프, 농축암모늄 용액조, 원수의 정량 공급장치, 생물막 반응조, 공기 blower, 공기 유량계 등으로 이루어 졌으며 생물막 반응조는 5mm 두께의 아크릴 판을 이용하여 매질 충전부, 폭기부 및 침전조로 구성된 측면폭기형 반응조로써 모두 5개조를 제작하였다.

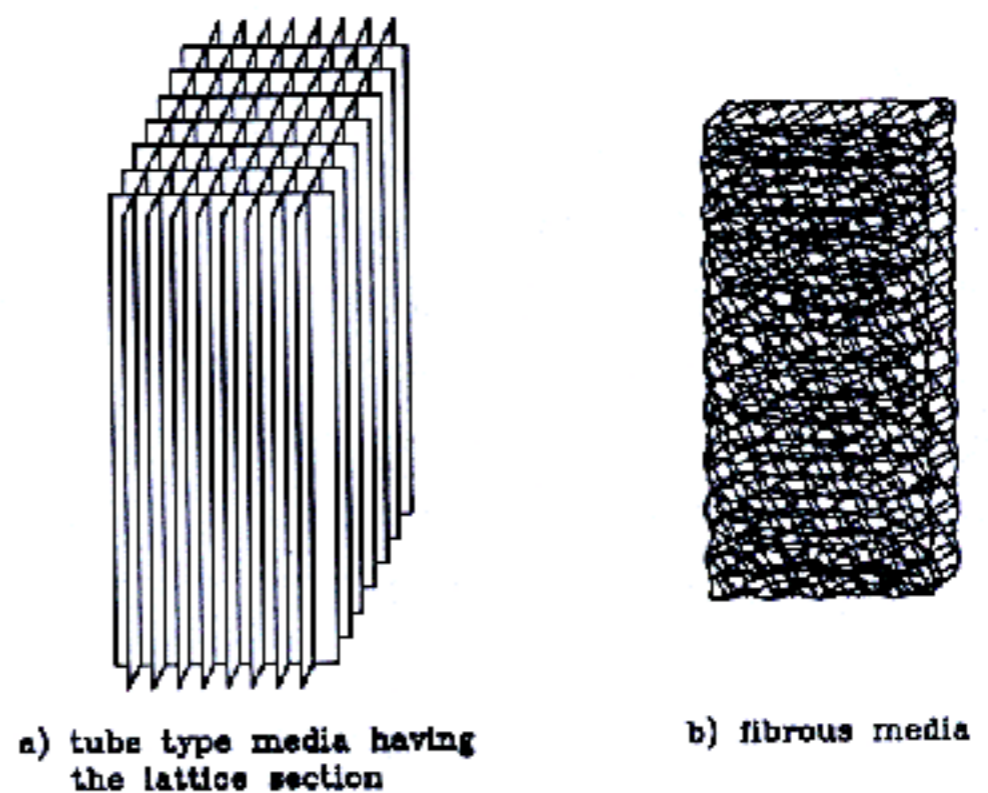
각 반응조에는 산기관을 설치하여 공기를 공급하였는데 air lift에 의하여 반응조내 물의 순환과 산소의 공급이 동시에 이루어지도록 하였다. 반응조내 물의 순환은 반응조 상부에서 충전매질을 통과하여 반응조 하부로 흐르는 하향류로 하였으며 충전매질에서 탈리된 생물막은 반응조 저면에 가라앉아 침전·제거되도록 하였다. 폭기조와 침전조는 칸막이로 분리하여 침전이 원활히 이루어지도록 하였으며 산기관은 반응조 바닥에서 약 7cm 높은 곳에 설치하여 완전히 침전된 슬러지가 재 부상하지 않도록 설계하였다. 각 반응조내 매질 충전율은 60%이다.

한편, 본 실험에서는 청주 용수관리사무소에 송수된 대청 원수를 각 반응조의 유입 원수로 사용하였다. 실험기간 동안 대청 원수의 암모니아 농도는 0.1mg/L 이하로 매우 낮게 유지되었다. 따라서 본 실험에서는 반응조 유입수에 암모니아를 spiking하여 암모니아 농도를 평균 2.5mg/L으로 유지하며 5개의 생물막 반응조에서의 암모니아성 질소 제거 성능을 관찰하였다. 질소제거실험에 이용된 생물막 시스템은 유기물 및 탁도 제거 실험을 통해 미리 안정상태(steady state)로 운전되고 있는 반응조를 이용하였다. 7)

2.2 운전방법

제작된 5개의 반응조는 계절 변화에 따른 수온의 변화를 직접적으로 받을 수 있도록 설치하였으며 Table 1과 같이 접촉매체의 종류와 수리학적 체류시간(hydraulic retention time, 이하 HRT)을 실험변수로 하여 질소제거 및 질산화 성능을 관찰하였다.

이때, 반응조 R1에서 R4까지의 충전매질은 Fig. 2 a)에 나타낸 것 처럼 cell size가 10 × 10mm인 polycarbonate 재질의 격자형 단면으로 충전 길이를 전체 20cm로 하였다. 이때 미생물이 부착 가능한 표면적은 4개 반응조 모두 6,020cm<sup>2</sup>이었다. HRT는 30min에서 3 hr까지 변화시켰으며 폭기강도는 접촉매질을 통과하는 순환유속을 2~3m/min<sup>8)</sup>으로 하기 위해 공기 공급량을 1.5L/min으로 조정하였다. 한편, 반응조 R5에는 비표면적이 약 421m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>인 섬유상 여재((Fig. 2 b) 참조)를 사용하였



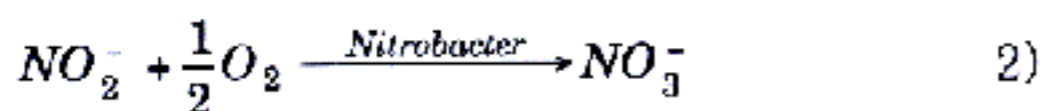
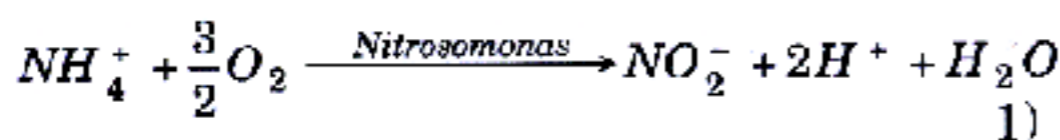
**Fig. 2.** Schematic diagram of media types.

는데 재질은 polyviniliden chloride이며 1.0cm 두께의 막재를 8.5cm × 20.0cm의 직사각형으로 재단하여 4편을 장착하였으며 총진면적은 약 2,960cm<sup>2</sup>이었다. 시료수의 분석은 Standard Method<sup>9)</sup>에 준하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 암모니아 제거 성능

Fig. 3 a)는 실험기간동안 변화되는 유입원수의 온도 및 DO를 나타내었으며, Fig. 3 b) 및 c)는 유입수 및 각 반응조 유출수의 시간에 따른 암모니아성 질소 농도 및 제거율을 각각 표시한 것이다. 약 30일 정도의 실험기간 동안 유입수의 온도는 17°C에서 12°C까지 점진적으로 감소하였으며 생물공정의 운전조건으로는 비교적 낮은 수치를 나타냈다. 용존산소농도는 7.2~8.5의 변화를 보였다. 질산화에 있어 DO농도는 중요한 영향인자로 여겨지며 아래의 식 1)과 2)로 표시되는 질산화의 생화학적 기작을 고려해 볼 때 각각 3.43mg O<sub>2</sub>/mg N 및 1.14mg O<sub>2</sub>/mg N의 용존산소를 필요로 한다. NO<sub>3</sub>-N으로 완전 질산화가 이루어지기 위해서는 따라서 4.57mg O<sub>2</sub>/mg N의 산소가 소모된다. Fig. 3의 유입수내 DO농도는 7.2~8.5mg/L로서 평균 8.17mg/L이었으며 암모니아 농도는 2.48mg N/L이므로 DO/NH<sub>4</sub>-N 농도비는 3.29로 화학평형상수 4.57보다는 작은 값이다. 따라서 반응조 내에서의 지속적인 폭기는 안정적인 질산화 공정의 유지에 도움이 될 것으로 판단된다.



본 실험에 사용한 생물막 반응조의 암모니아 제거율은 운전시간의 경과에 따라 지속적으로 증가하였으며 정상상태까지 도달하는 시간은 약 10일 정도가 소요되었다. 잘 알려진 바와

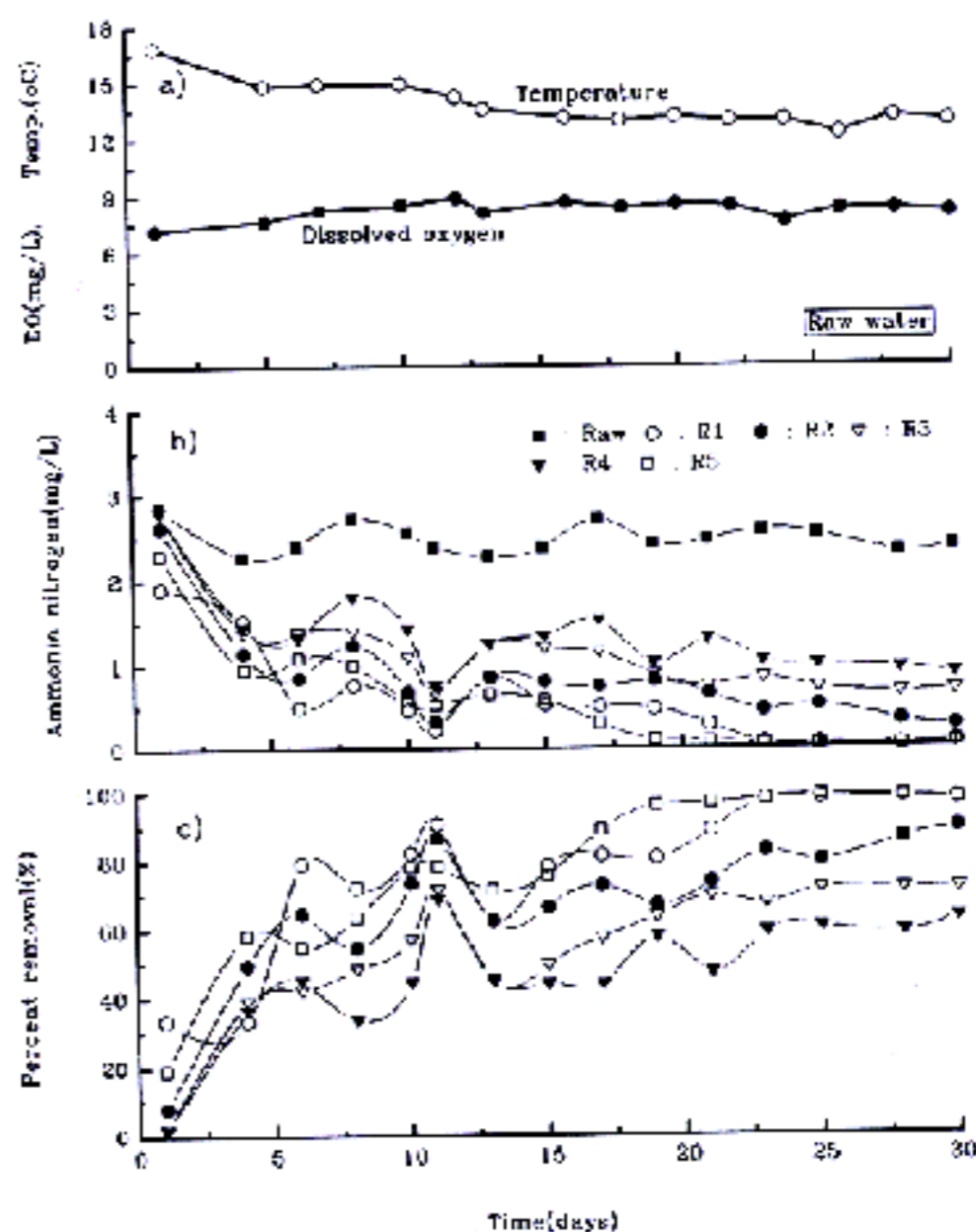


Fig. 3. Ammonia removal by submerged biofilm reactors with operation time.

같이 질산화균은 독립영양성 미생물로서 CO<sub>2</sub>를 탄소원으로 이용하며 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 및 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>를 산화시켜 에너지를 획득한다. 이러한 에너지 획득과정에서는 동시에 CO<sub>2</sub>를 유기성 중간 대사산물로 환원시키기 위한 환원력(reducing power)을 얻기도 하며 최종적인 전자수용체는 산소이다. 따라서 CO<sub>2</sub>의 동화작용은 독립영양성 미생물의 주요한 에너지 소비원이 된다.<sup>10)</sup> 그러나 질소의 산화를 통해 얻을 수 있는 자유 에너지는 종속영양균이 유기물의 산화를 통해 얻는 에너지에 비해 매우 작기 때문에 질산화균의 성장속도는 종속영양균에 비해 매우 느리다. 그러므로 유기물질이 풍부한 오염된 하천수의 경우 종속영양미생물이 반응조내의 우점종을 이루어 질산화균의 성장조건을 방해할 수 있지만, 유기물 농도가 낮은 상수원수를 기질로 하는 생물막에서는 이러한 질산화세균이 훨씬 더 빠르게 성장할 수 있다. 본 실험에 이용된 대청호의 유기물 농도는 약 3.1mg TOC/L이었으며,<sup>11)</sup> 실험 결과는 약 10일 정도의 적응 기간

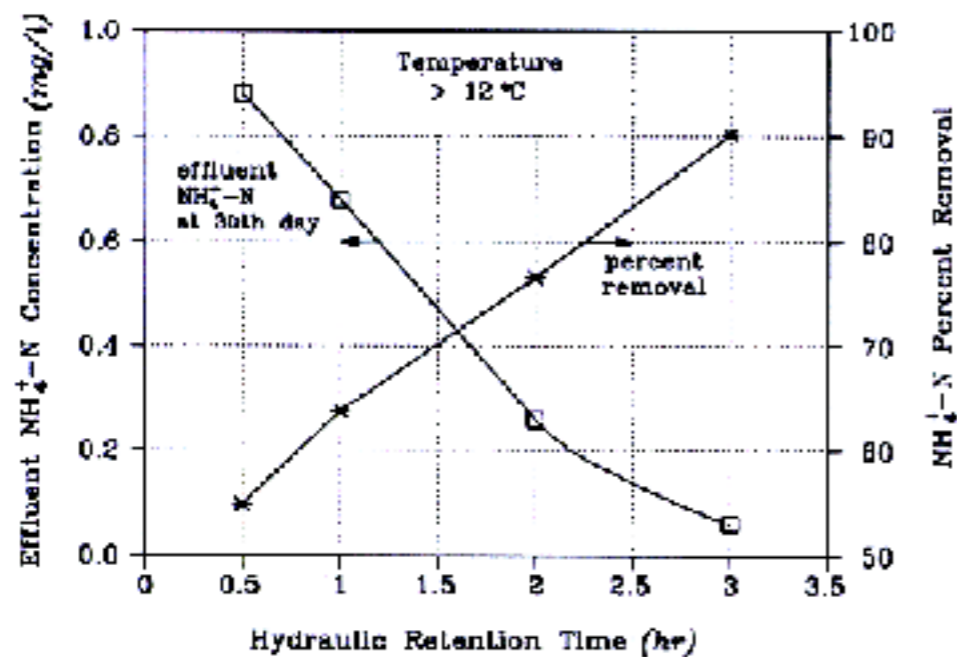


Fig. 4. Variation of ammonia concentration and removal percent with HRTs.

을 통해 질산화균이 충분히 활성화되고 있음을 보여주고 있다. 따라서 생물막법을 이용한 상수 원수의 전처리에 있어서 암모니아성 질소의 충분한 제거를 위해서는 약 10~15일 정도의 적응 기간이 필요할 것으로 사료된다.

운전 13일경에 제거율이 저조해진 것은 운전 부주의로 반응조에 유기물이 과량 투입되어 생물막 시스템에 충격이 가해졌기 때문이며, 즉각적인 정상운전 재개후 운전시간의 경과에 따라 암모니아 제거율이 점차 회복되는 모습을 보여주고 있다.

Fig. 4는 각 HRT별로 운전 10일 이후의 NH<sub>4</sub>-N의 평균 제거효과와 운전 30일에 채취한 각 반응조 유출수의 암모니아 농도를 도시한 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 암모니아의 질산화에는 체류시간이 중요한 영향인자로 작용한다. 실제로 수질기준인 0.5mg NH<sub>4</sub>-N/L를 만족하기 위해서는 2hr 이상의 체류시간이 필요하며 90%의 제거율을 얻기 위해서는 3hr 이상의 긴 체류시간이 요구된다. H.-H. Yeh 등<sup>12)</sup>은 Coke를 충전시킨 생물여상을 이용하여 수온 20~27°C인 경우에 대해 56min의 체류시간으로 97%의 암모니아 제거율을 얻었으며 HRT 16min에서도 70% 이상의 제거효과를 획득하였다. 질산화는 온도에 큰 영향을 받으므로 이와 같은 차이는 우선 원수의 온도차에 의한 것으로 보인다. 본 실험의 경우 반응조의 온도는 실내에 설치된 까닭에 원수의 온도보다는 약간 높게 14.6~16.6°C의

분포를 보였다. 또한, 반응조내에 많은 양의 질산화균을 유실(washout) 없이 확보할 수 있는 시스템의 안전성도 영향을 미칠 것으로 보이는데<sup>10)</sup> 이에 사용하는 여재의 비표면적 등 물리적 특성이 중요하다고 사료된다. 본 실험에서 섬유상 여재를 이용한 R5의 경우 동일한 HRT로 운전된 R2에 비해 보다 우수한 질소 제거 효과를 나타냈으며 전체적인 운전기간을 통해서도 R5의 효율이 매우 안정화되어 있다. 더욱이 암모니아성 질소 제거성능이 약 90%로 비슷한 R1과 R5를 비교해 볼 때 섬유상 매질을 사용한 R5의 경우는 시스템에 가해진 충격의 완충능력이 보다 뛰어난 것으로 나타났다. Fig. 3 c)에서 보듯이 시스템에 고농도 유기물의 침가로 인한 충격이 가해진 후에도 R5는 제거율의 감소폭이 상대적으로 작았으며, 감소 후 정상상태에 도달하는 시간도 더 빠르게 나타났다. 이러한 결과는 섬유상 매질의 특성상 성장 속도가 느리고 유실되기 쉬운 질산화 미생물의 보유에 보다 유리하고 이에 따라 R5는 표면이 매끄러운 격자형 단면 여재를 사용한 반응조보다 더 많은 미생물량을 함유할 수 있었기 때문으로 사료된다.<sup>7)</sup>

### 3.2 질산화 성능

반응조 유출수의 운전시간에 따른 아질산염과 질산염 농도를 나타내면 각각 Fig. 5의 a) 및 b)와 같다. 아질산성 질소는 운전초기에 비교적 활발히 생성되기는 하였으나 전반적으로 0.1mg N/L 미만의 극히 미량의 농도를 나타내었다. 운전초기에 아질산성 질소의 농도가 비교적 크게 측정된 것은 *Nitrobacter*에 의한 2단계 질산화 과정이 충분히 활성화되지 못하여 NO<sub>2</sub>-N이 반응조내에 누적됐기 때문으로 사료된다.<sup>13)</sup> 그러나 아질산성 질소는 수중에서 매우 불안정한 특성을 갖고 있어서 검출 농도는 낮게 나타난다. 반면, 각 반응조 유출수의 질산성 질소의 농도는 지속적으로 증가하여 15일 이후에는 매우 안정한 모습을 나타내고 있다. 각 반응조 유출수의 산화질소(NO<sub>3</sub>-N +

**Table 2.** Nitrification by Submerged Biofilm Reactors at Various HRTs after 10 days

Reactor	Influent (mg N/L)	Effluent (mg N/L)*			NH <sub>4</sub> -N Removal percent	Nitrification percent#
		NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N		
R1		0.243	0.065	2.583	90.2	81.6
R2	NH <sub>4</sub> -N: 2.480	0.571	0.166	2.220	76.6	71.0
R3	NO <sub>2</sub> -N: 0.019	0.882	0.097	1.904	63.8	55.5
R4	NO <sub>3</sub> -N: 0.605	1.104	0.109	1.664	54.9	46.3
R5		0.249	0.130	2.605	89.9	85.1

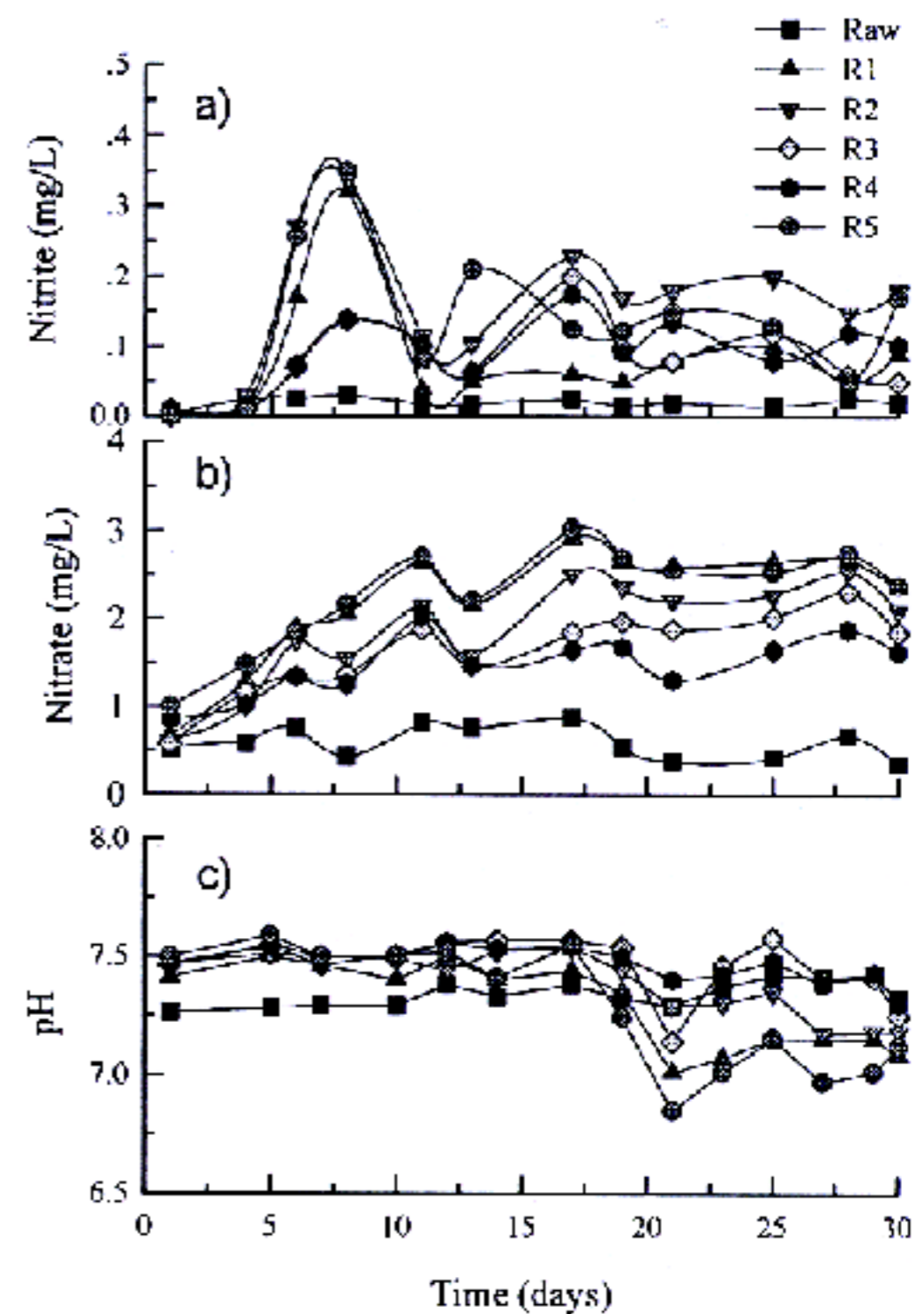
\*: based on the data collected after 10 days #: % oxidized NH<sub>4</sub>-N/influent NH<sub>4</sub>-N

NO<sub>2</sub>-N)는 90% 이상이 NO<sub>3</sub>-N으로 구성되어 있다.

Table 2는 각 반응조의 성분별 질소농도를 바탕으로 암모니아 제거율과 질산화율(nitrification efficiency)을 나타낸 것으로 질산화율은 암모니아 제거율과 마찬가지로 HRT에 따라 현저한 차이를 나타내고 있다. 이러한 사실은 질소제거의 주요 기작이 질산화 과정을 통해 이루어지고 있음을 나타낸다. HRT가 큰 R1과 R2의 경우 제거된 암모니아중 70% 이상이 생물학적 질산화 과정을 통해서 제거된다는 것은 질산화 미생물이 양호하게 증식하였음을 보여주고 있다. 그러나 수처리 시설의 HRT가 크다는 것은 초기 건설 비용 및 운전비용의 경제적인 부담을 크게 하므로 가능한한 HRT를 줄여야 하며 상수처리에의 적용 가능성을 높이기 위해서는 30min 미만의 HRT에서도 충분한 처리능력이 유지되어야 할 것으로 판단된다. 생물막 공정의 경우 이를 위해서는 비표면적이 크고, 생물량의 보유능력이 뛰어난 반응조 시스템의 개발 연구가 뛰어나야 할 것으로 사료된다.

Fig. 5 c)의 시간에 따른 pH 변화 과정도 질산화에 의한 것으로 반응조내 질산화균의 활동이 활발해지면서 반응조 유출수의 pH가 점차적으로 감소하고 있으며 HRT가 길 수록 큰 폭으로 변화하였다. 이러한 pH의 변화는 두단계로 이루어진 질산화 과정중 *Nitrosomonas*에 의해 암모니아가 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>로 산화되는 첫 번째 과정에서 발생하는 H<sup>+</sup>에 의해 알칼리도

(alkalinity)가 소모되면서 나타나는 현상이다. 일반적으로 질산화 과정에서 생성된 H<sup>+</sup>에 의해 소비되는 알칼리도는 6.0~7.4mg as CaCO<sub>3</sub>/mg N 정도이다.<sup>6)</sup> 따라서 충분한 알칼리도가 존재하지 않는 원수의 경우 질산화반응으로 인한 pH감소를 막을 수 없으며 최적 pH



**Fig. 5.** Nitrification by submerged biofilm reactors with time

인 7.6이하로 떨어지면 질산화 속도가 감소하므로 인위적으로 보충하는 등의 대책이 필요하다. 한편, 섬유상 여재를 사용한 R5는 질산화 능력이 우수하여 HRT 3hr를 가진 격자형 여재 생물막 반응조와 비슷한 효율을 보여주고 있다. 이러한 결과는 비표면적이 크고 활성미생물의 보유 능력이 뛰어난 섬유상 여재를 이용하게 되면 더 짧은 HRT에서도 보다 효율적으로 암모니아를 제거할 수 있음을 나타내며 생물막 공정의 적용 가능성을 제고해 준다.

#### 4. 결 론

본 연구는 전처리 생물막 공정의 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 원수의 암모니아성 질소 농도를 평균 2.48mg N/L로 유지하여 질소 제거 성능을 관찰한 결과 생물막 반응조가 충분한 질소세기율을 갖기 위해서는 약 10~15일 정도의 적응 기간이 필요한 것으로 나타났다.

2. 반응조의 수온이 14.6~16.6°C로 낮았음에도 불구하고 R1(HRT 3hr) 및 R2(HRT 2hr)에서 각각 90.2% 및 76.6%의 비교적 높은 질소제거효과를 나타냈다.

3. 생물학적 질산화 공정은 HRT가 중요한 영향인자로 작용하였으며, HRT가 클수록 암모니아 제거율이 증가하여 2hr이상의 HRT에서는 0.3mg N/L 이하의 양호한 유출수를 얻을 수 있었다.

4. 미생물 보유 능력이 뛰어난 섬유상 여재를 이용할 경우 질소제거율, 질산화 속도 및 내충격성이 보다 우수한 것으로 나타났으며 더 짧은 HRT에서도 보다 효율적인 암모니아 제거가 가능하였다.

5. 질산화의 진행과 함께 pH가 하강하므로, 알칼리도가 부족한 원수에 대해서는 질산화에 필요한 석성조건을 유지하기 위해 인공적으로 알칼리도를 투입하는등 대책이 필요하다.

#### 참고문헌

1. Edward, J. B. and Patricia B. C., "Biological processes in drinking water treatment," *JAWWA*, Vol. 80, No. 9, pp. 82~93, 1988.
2. Rittmann, B. E. and Snocynk, V. L. "Achieving biologically stable drinking water," *JAWWA*, Vol. 76, No. 10, pp. 106~114, 1984.
3. Lee, S. H., O'Connor, J. T. and Banerji, S. K., "Biologically mediated corrosion and its effects on water quality in distribution systems," *JAWWA*, Vol. 72, No. 11, p.636, 1980.
4. Picologlou, B. F., Zelver, N. and Characklis, W. G., "Biofilm growth and hydraulic performance," *Jour. Hydr. Div. ASCE*, Vol. 106, p.733, 1980.
5. Allen, M. J., Taylor, R. H. and Geldreich, E. E., "The occurrence of microorganisms in water main encrustations," *JAWWA*, Vol. 72, No. 1, p.61, 1980.
6. McHarness, D. D., Haug, R. T. and McCarty, P. L., "Field studies of nitrification with submerged filters," *Journal WPCF*, Vol. 47, No. 2, pp. 291~309, 1975.
7. 신항식, 임경호, 이의진, 최계운, "생물막공정에 의한 상수원수에서의 유기물 제거," 수질보전학회지, in press, 1995.
8. 小島貞男, "浸透ろ床法 (接觸ばつ氣法)," 生物膜法, 洞澤 勇(Eds.), 思考社, 日本, pp. 38~65, 1981.
9. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 17th Ed., APHA, AWWA, and WPCF, Washington, D.C., 1992.
10. Rittmann, B. E., "Aerobic biological treatment," *Environ. Sci. Tech.*, Vol. 21, No. 2, pp. 128~136, 1987.
11. 신항식, 임경호, 전항배, 박창호, "생물막공정을 이용한 상수의 고도처리," 대한환경공학회지, 제 17권, 8호, pp. 763~773, 1995
12. Hsuan-Hsien Yeh and Hsien-Cheng Kao, "Testing a coke biofilter for the pretreatment of polluted surface water in Taiwan," *JAWWA*, Vol. 85, No. 5, pp. 96~102, 1993.
13. Randall, C. W. et al., "Nitrite build-up in activated sludge resulting from temperature effect," *Journal WPCF*, Vol. 56, pp. 1039~1044, 1984.