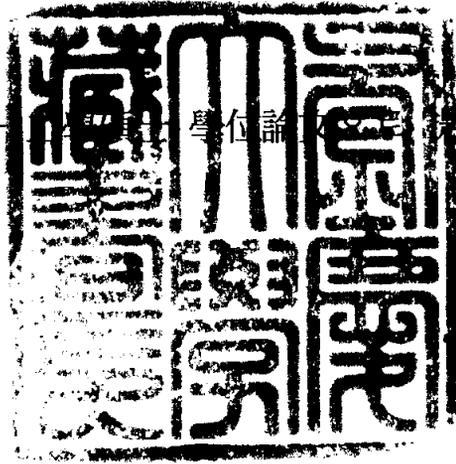


工學碩士 學位論文

회전원판 반응기(RBC)를 이용한  
모의 순환 양어장수의 암모니아 제거

指導教授 徐 根 學

이 論文을 釜慶大學校 産業大學院 化學工學科 羅仁杰 出함



2004年 2月

釜慶大學校 産業大學院

化學工學科

羅 仁 杰

羅仁杰의 工學碩士 學位論文을 認准함

2003年 12月 日

主 審 工學博士 金 容 河



委 員 工學博士 任 竣 懃



委 員 工學博士 徐 根 學



# 목 차

1. 서 론 .....	1
2. 이론적 고찰 .....	4
3. 재료 및 방법 .....	7
3.1. 회전원판 반응기 .....	7
3.2. 모의 순환여과식 실험장치 .....	7
3.3. 질화 세균군의 원판 부착 .....	9
3.4. 합성폐수 .....	9
3.5. 실험방법 .....	10
3.5.1. 회전 원판의 회전수 변화 실험 .....	10
3.5.2. 수력학적 체류시간 변화 실험 .....	10
3.6. 분석방법 및 자료계산 .....	12
4. 결과 및 고찰 .....	13
4.1. RBC 반응기의 최적 회전 원판 회전수 .....	13
4.2. 수력학적 체류시간의 변화에 따른 사육조 내 TAN농도 변화 .....	19
4.3. 이론식의 적용 가능성 검토 .....	23

4.4. COD 제거효율 .....	27
4.5. 용존산소와 pH 변화 .....	31
5. 결 론 .....	33
참고문헌 .....	35

## **List of Table**

Table 1. Composition of synthetic feedstock solution .....11

Table 2. Effect of revolution velocity of disk on the removal of TAN ..14

## List of Figure

Fig. 1. Schematic diagram of recirculating aquaculture system .....	5
Fig. 2. Schematic diagram for ammonia removal experiment using RBC in simulated recirculating aquaculture system .....	8
Fig. 3. Changes of TAN concentration and removal efficiency of RBC with variable revolution velocity of disk .....	15
Fig. 4. Changes of TAN removal rate of RBC with variable revolution velocity of disk .....	16
Fig. 5. Variation of TAN concentration of fishing tank and TAN removal rate on operating period .....	20
Fig. 6. Changes of TAN concentration of rearing tank and removal efficiency on hydraulic residence time of RBC .....	22
Fig. 7. Relationship between TAN removal efficiency of biofilter unit and recirculating ratio .....	25
Fig. 8. Comparison of observed and calculated TAN concentration of rearing tank .....	26
Fig. 9. Changes of COD concentration of rearing tank and effluent from RBC and removal efficiency on hydraulic residence time .....	28
Fig. 10. Changes of COD loading rate and removal rate on hydraulic residence time .....	30
Fig. 11. Changes of pH and DO concentration in rearing tank on hydraulic residence time of RBC .....	32

# Ammonia Removal Using the Rotating Biological Contactor

In-Geol Na

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

## Abstract

Rotating Biological Contactor(RBC) was tested for treatment of artificial rearing water in a simulated aquaculture system. Performance of RBC on the removal of TAN and COD was evaluated by controlling hydraulic residence time(HRT). As HRT of RBC was increased, TAN removal rate and removal efficiency of RBC and TAN concentration of rearing water were increased, but COD removal rate was decreased. Total alkalinity consumption rate was increased by increasing HRT of RBC. Ratio between total alkalinity consumption rate and TAN removal rate was 7.73. HRT for maintaining lowest TAN and COD concentration of artificial rearing water was 14.6 minutes and at that condition TAN and COD concentration of the water was 1.28 and 5.59g/m<sup>3</sup>, respectively.

Rotating Biological Contactor(RBC) was tested for the removal of total ammonia nitrogen(TAN) by using simulated aquaculture system. RBC performance was evaluated by controlling revolution rate of disk and hydraulic residence time(HRT). The optimum revolution rate of disk was 4 rpm. As HRT of RBC was increased, TAN removal efficiency of RBC and TAN concentration of rearing water were increased. HRT for maintaining lowest TAN concentration of rearing water was 9.5 minutes and at that condition TAN concentration of rearing tank was 1.03 g/m<sup>3</sup>.

## 1. 서 론

순환 여과식 양식은 사육조에서 유출된 폐수를 양어장 밖으로 방출하지 않고 물리적 및 생물학적 여과과정을 통해 오염물질을 제거한 후 재 사용하는 폐쇄적 시스템으로 최소의 용수를 이용하여 어류를 고밀도로 사육할 수 있어 생산력을 증대시킬 수 있고 배출수에 의한 수질오염 문제로 인하여 야기되는 각종 환경적 규제를 해결할 수 있을 뿐 아니라 소비자에 인접해 입지 할 수 있으므로 부가가치를 높일 수 있는 장점을 지니고 있는 양식 시스템이다[1, 2].

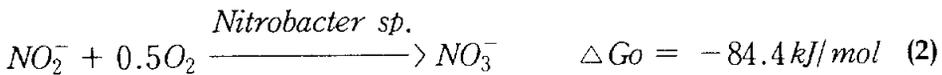
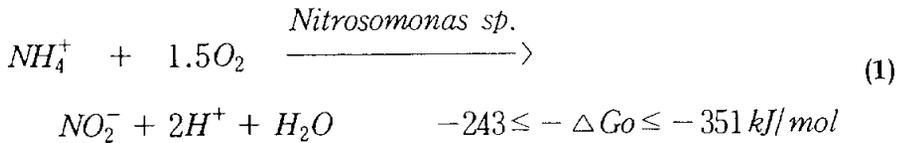
순환여과식 양식 시스템은 앞에서 언급된 장점에 반하여 미섭취 사료와 어류의 배설물 등에 의하여 발생하는 고형물, 고형물의 분해와 어류의 대사 작용에 의해 발생하는 암모니아성 질소, 암모니아성 질소의 생물학적 분해과정에서 발생하는 아질산성 질소와 같은 물질을 일정 수준 이하로 제거하지 못할 경우 수질이 악화되어 어류에 각종 질병을 유발하며, 정도가 심할 경우 어류의 대량 폐사가 발생하여 막대한 경제적 손실을 초래한다[3]. 고형물의 경우 침강, 여과 등과 같은 물리적 처리에 의해 비교적 쉽게 제거가 가능하나 용존 물질의 경우 생물학적 처리장치에 의해서만 제거가 가능하다[4].

암모니아는 양어장 순환수 처리에 있어 가장 문제가 되는 성분이다. 이는 어류의 대사작용에 있어 질소 성분의 최종 산물로서[5] 무지개송어는  $0.32 \text{ g/m}^3$ , 메기의 경우  $3.10 \text{ g/m}^3$  이상에서 독성을 일으키며[6], 이 이상의 농도에서는 어류에 치명적으로 작용하여 어류의 성장 제한 및 각종 질병을 유발한다.

수중의 암모니아는 이온성 암모니아와 비이온성 암모니아의 두 가지 형태로 존재하게 된다. 이 두가지는 모두 어류에 독성을 미치게 되며 특히 비이온성 암모니아는 더욱 독성이 강하여 동물의 세포벽을 통과하여 저농도에서도 어류에게 치명적인 피해를 발생시킨다[7]. 대부분의 어류에 대해  $0.125 \text{ g NH}_3/\text{m}^3$  이하의 농도를 권장하고 있으며[6, 8] 또한 미국 환경 보호청[24]에서는 사육조 내의 비이온성 암모니아를  $0.02 \text{ g/m}^3$  이하로 유지하

도록 하고 있다. 양어장 순환수의 암모니아는 어류에 대한 직접적인 피해 뿐 아니라 미 처리되어 수계로 방출될 경우 부영양화나 적조 등의 심각한 환경 문제를 유발하기도 한다.

순환여과식 양식 시스템에서 발생하는 암모니아는 침지식 또는 살수식 생물반응조나 회전원판 반응조와 같은 생물학적 처리 장치에 의해 제거한다. 이와 같은 생물학적 처리장치는 지지체에 질산화 미생물을 부착시켜 이들에 의해 암모니아를 질산성 질소로 산화시키는 공정으로 여기에 관여하는 미생물 속과 화학식은 다음과 같다[9].



미섭취 사료나 어류의 배설물 중 유기성분이 용출되어 발생하는 용존 유기물은 어류에 직접적인 영향을 미치지 않는으나 순환수 내에 타가 영양체 미생물을 증가시키는 요인이 된다. 타가 영양체 미생물의 일부는 병원성 미생물로서 어류에 유행병을 발생시키며[10] 용존산소를 감소시켜 폭기량을 증가시키는 원인이 된다. 또한 타가 영양체 미생물이 과도 번식할 경우 질산화를 위한 생물학적 처리장치의 우점종이 되어 질산화 효율을 감소시키는 원인이 되므로 용존 유기물을 저농도를 유지하는 것이 중요하다.

대표적인 양어장 순환수의 생물학적 암모니아 처리공정은 침지여상공법[11, 12]과 살수여상공법[13, 14], 회전원판공법[15] 등이 있다. 이중 양어장 순환수 처리를 위한 생물학적 처리장치로 가장 활발히 연구되고 현장에 많이 적용되는 것은 회전원판 공법이다. 이 공법은 단위 표면적당 여과 효율이 우수하고 원판이 회전하면서 대기 중의 공기와 접촉하면서 산소를 수중에 용해시킬 수 있다[14]. 또한 수두가 낮아 운전 경비가 절감되고 원판의

회전에 의한 전단력으로 원판 표면에 느슨하게 부착된 생물막이 탈리되어 활성이 높은 생물막의 유지가 가능하며, 한 번 활성화되면 급작스런 충격에 대해서도 활성이 쉽게 떨어지지 않는 장점이 있다[16].

현재 양어장 순환수처리 장치에 대한 연구는 폐수가 반응기를 1회 통과하는 형태로 제거하고자 하는 물질의 유입 농도를 조절하여 최대의 제거율이나 제거속도를 얻는데 목적을 두고 있다. 그러나 순환여과식 양어장의 경우 일반적인 수처리 공정과는 달리 어류의 사료섭취와 소화에 따라 사육조의 오염물질 농도가 변화하게 된다. 이로 인해 반응기로 유입되는 암모니아의 농도가 변화하게 되어 반응기에 가해지는 오염원의 부하는 변화하게 된다[17]. 또한 수처리 장치를 통과한 배출수는 사육조로 재순환되어 회석효과를 유발하여 사육조의 수질을 변화시킨다[18]. 그러므로 순환여과식 양식장의 수처리는 기존의 폐수 처리 공정과는 달리 순환식 공정으로서 이해하고 어류를 사육하는 사육조의 오염물 농도를 적정선 이하로 유지할 수 있는 운전인자를 도출하는 것이 중요하다.

본 실험에서는 양식장에서 많이 이용되고 있으나 최적의 운전인자가 없이 경험에 의존하여 운전되고 있는 회전원판반응기(rotating biological contactor, RBC)를 모의 순환 여과식 실험장치에 적용하였다. 그리고 인공 양식수를 순환시키면서 회전 원판의 회전수, 암모니아성 질소, COD의 변화등을 고찰하여 어류의 최적 사육 환경을 유지할 수 있는 운전조건을 도출하고자 하였다.

## 2. 이론적 고찰

순환 여과식 양어장에 설치 운영되고 있는 생물학적 처리장치의 최적운전인자를 도출하기 위한 실험 장치의 모식도는 Fig. 1과 같으며 수학적 modeling을 보다 간단히 하기 위하여 다음과 같이 가정하였다.

1. 사육조 내에서 발생하는 암모니아의 발생속도는 일정하다.
2. 계 전체에서 순환수의 증발, 누수 등에 의한 손실은 무시한다.
3. 암모니아의 제거는 생물학적 처리 장치(biofilter unit)에서만 발생한다.
4. 사육조는 완전 혼합체이다. ( $C_T=C_I$ )

사육조 주위의 순환수 유량의 물질 수지는 다음과 같다.

$$Q_S + Q_O = Q_W + Q_I \quad (3)$$

여기서 시스템 전체에서 증발, 누수에 의한 순환수의 손실이 없으므로 시스템으로 공급되는 보충수의 유량과 시스템 밖으로 유출되는 폐수의 유량은 동일하다. 그러므로 생물학적 처리 장치를 통과하는 순환수의 유량은 동일하다.

$$Q_S = Q_W \quad (4)$$

$$Q_O = Q_I \quad (5)$$

사육조 주변의 암모니아성 질소(total ammonia nitrogen, TAN)에 대한 물질수지식은 다음과 같다.

$$Q_S \cdot C_S + Q_O \cdot C_O = Q_W \cdot C_W + Q_I \cdot C_I \quad (6)$$

$Q_S$ 와  $Q_W$ ,  $Q_O$ 와  $Q_I$ 는 같으므로 다음과 같이 정리된다.

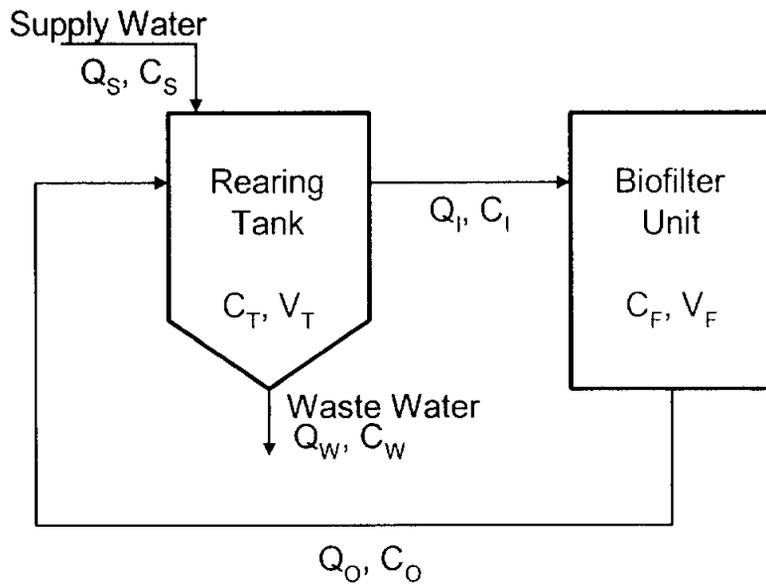


Fig. 1. Schematic diagram of recirculating aquaculture system.

$$Q_S(C_S - C_W) = Q_I(C_I - C_O) \quad (7)$$

$\frac{Q_I}{Q_S}$ 를 D라 두고, 생물학적 처리장치의 TAN 제거율을 R이라 두면 식

(7)는 다음과 같이 정리된다.

$$R = \frac{C_I - C_O}{C_I} = 1 - \frac{C_O}{C_I}$$

$$C_O = C_I(1 - R)$$

(8)

$$D = \frac{C_S - C_W}{C_I - C_O} = \frac{C_S - C_W}{C_I \cdot R}$$

여기서 사육조는 완전 혼합체로 가정하였으므로  $C_T = C_I = C_W$  이라 두고 식(8)을 사육조 내의 TAN 농도인  $C_T$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$C_T = \frac{C_S}{D \cdot R + 1} \quad (9)$$

식(9)은 사육조내의 TAN의 농도는 사육조에 가해지는 오염물의 농도  $C_S$ , 순환수의 유량  $Q_I$ 와 보충수의 유량  $Q_S$ 의 비인 D와 생물학적 처리장치의 제거율에 의해 결정됨을 의미한다. 시스템에서 발생하는 TAN의 농도는 어류의 사육밀도, 사료 투입량, 미섭취 사료 발생량에 의해 결정되므로 시스템 관리자가 제어할 수 없으며 실제 제어가 가능한 것은  $D \cdot R$ 이다.  $D \cdot R$ 을 가장 크게 운전할 때 사육조의 TAN 농도를 가장 낮게 유지할 수 있다. 일반적으로 순환수의 유량이 커짐에 따라 생물학적 처리장치의 TAN 제거율은 낮아지게 된다. 그러므로 D와 R의 상관 관계를 수학적으로 도출하면  $D \cdot R$ 의 최대값을 추정할 수 있으며 사육조 내의 TAN의 농도를 최저로 유지할 수 있는 운전인자를 도출할 수 있다.

### 3. 재료 및 방법

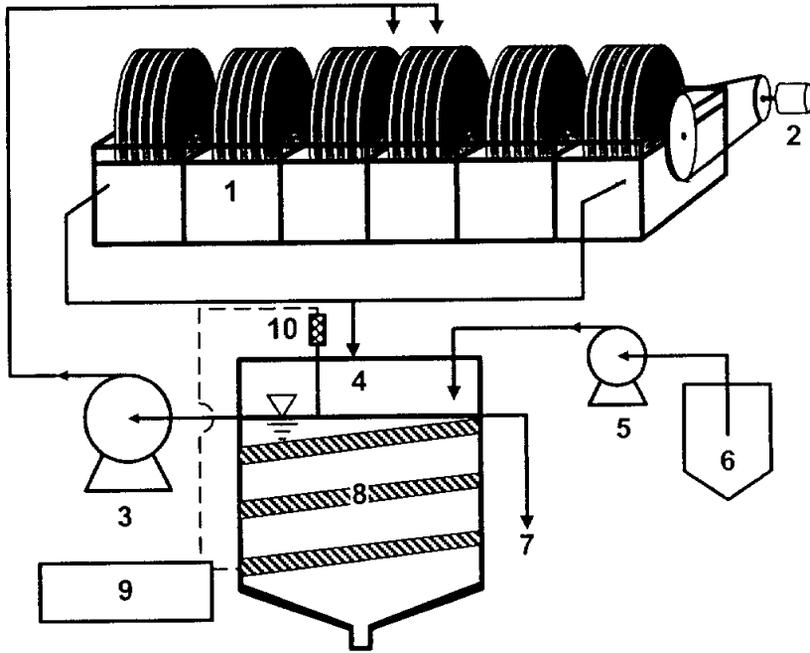
#### 3.1. 회전원판 반응기

회전원판반응기는 외부에서의 관찰이 쉽게 이루어질 수 있도록 아크릴을 이용하여 제작하였다. 원판은 두께 0.2 cm, 직경 12 cm인 폴리에틸렌 원판을 질화세균의 부착이 원활하도록 하기 위하여 표면을 거칠게 만들어 사용하였다. 또한 원판은 높이에 대하여 37.5%가 수중에 잠기도록 하였고, 나머지 부분은 대기로 노출시켜 원판에 부착되어있는 미생물에 원활한 산소의 공급이 이루어질 수 있도록 하였다. 원판의 회전은 감속 모터를 사용하여 실험 기간동안 원판 회전 속도의 변화가 없이 일정하게 회전하도록 하였다. 유입수는 총 6개의 조로 구성된 반응조의 중간 지점에서 각각 양방향으로 유입시켰다. 이 유입수는 각각의 조에서 미생물과의 원활한 반응을 거친 후에 다음 단계로 넘어가는 3단 형식이 되도록 제작하였다. 회전원판 반응기의 액본체 부피는 3.5 L였다.

#### 3.2. 모의 순환여과식 실험장치

본 실험에 사용한 모의 순환 여과식 실험장치의 모식도는 Fig. 2와 같다. 모의 사육조는 폴리 아크릴 재질을 이용하여 사육조의 액본체 부피는 반응기와 부피비가 2 : 1 이 되도록 7 L로 제작하였다. 모의 사육조 하부는 15°의 각도를 주어 회전원판 반응기에서 유출되어 침전되는 폐 슬러지가 침전하여 모의 사육조 중앙 하부에 잘 모일 수 있도록 하였으며 주기적으로 외부로 제거할 수 있도록 하기 위하여 하부 중앙에 미세망을 설치하였다. 모의 사육조 상부는 순환수의 증발로 인한 실험 오차를 줄이기 위하여 아크릴판을 이용하여 덮개를 설치하였다.

모의 사육조의 온도 유지를 위하여 모의 사육조 외부에 heating tape를 감았으며 모의 사육조 상부에 설치한 열전대(thermocouple)와 온도 제어기를 이용하여 항상 일정한 온도를 유지할 수 있도록 하였다. 인공 양식수의 순환은



- |                                  |                  |
|----------------------------------|------------------|
| 1. Rotating biological contactor | 2. Motor         |
| 3. Recirculating pump            | 4. Rearing tank  |
| 5. Feeding pump                  | 6. Feeding tank  |
| 7. Overflow line                 | 8. Heating tape  |
| 9. Heat controller               | 10. Thermocouple |

Fig 2. Schematic diagram for ammonia removal experiment using RBC in simulated recirculating aquaculture system.

cartridge type peristaltic pump를 이용하여 각 반응기에 동일한 유량으로 공급될 수 있게 하였다. 반응기를 통과한 양식수는 중력 유하식으로 모의 사육조로 유입되게 하였으며, 보충수의 공급은 미량펌프를 이용하였다.

### 3.3. 질화 세균군의 원판 부착

본 실험에 이용된 미생물은 부산광역시 수영 하수처리장 내 포기조의 활성슬러지를 65 mesh의 표준체로 거른 다음 이것을 다단으로 구성되어 있는 회전원판 반응기에 각각 2000 ppm 농도로 각각 250 mL씩 식종하였다. 하수처리장에서 채집하여 온 미생물의 우점종은 종속 영양체 미생물이 주종일 것으로 판단되어져 암모니아성 질소를 제거하는데 필요로 한 질화세균의 활성을 높이고 원판의 안정적 부착을 위하여 3개월간의 배양기간을 거쳤다.

### 3.4. 합성 폐수

시스템에 가해지는 암모니아의 양은 어류 사육밀도를 100 kg fish/m<sup>3</sup> rearing tank, 1일 사료 공급량을 0.015 kg feed/kg fish, 그리고 공급사료에서 발생하는 암모니아성 질소의 분율을 3%라고 가정[4, 7]하고 다음과 같이 계산하여 45 g TAN/m<sup>3</sup>/day으로 공급하였다.

*Rearing Density* : 10%

$$1 \text{ m}^3 \text{ rearing tank} \times 0.1 \frac{\text{kg Fish}}{\text{m}^3 \text{ Rearing tank}} = 100 \text{ kg Fish} \quad (10)$$

*Feed level* : 1.5%/day

$$100 \text{ kg Fish} \times 0.015 \frac{\text{kg Feed}}{\text{kg Fish}} = 1.5 \text{ kg Feed/day} \quad (11)$$

*TAN product* : 3%/feed

$$1.5 \frac{\text{kg Feed}}{\text{day}} \times 0.03 \frac{\text{kg TAN}}{\text{kg Feed}} = 0.045 \text{ kg TAN/day} = 45 \text{ g TAN/day} \quad (12)$$

암모니아성 질소의 사육조 내 투입은 1일 보충하는 시스템 보충수의 양을 사육조 부피의 10%로 산정하여 700 mL의 합성폐수를 만들었다. 이것을 정량 펌프를 이용하여 29.2 mL/hr의 유속으로 사육조에 연속적으로 공급하였다.

합성 폐수의 조성은 Table 1과 같다. 유기탄소원으로 포도당( $C_6H_{12}O_6$ )을 이용하였으며 암모니아원으로 염화암모늄( $NH_4Cl$ )을 사용하였다. 질산화시 소모되는 알칼리도는 중탄산나트륨염( $NaHCO_3$ )을 사용하여 공급하였으며 희석수는 염소이온의 질산화 저해 작용을 방지하기 위하여 염소이온이 비교적 적은 지하수를 이용하여 제조하였다.

### 3.5. 실험방법

#### 3.5.1 회전 원판의 회전수 변화 실험

회전원판 반응기의 최적 원판 회전수를 알아보기 위하여 회전원판 반응기의 수력학적 체류시간을 20분으로 하여 원판의 회전수를 2, 4, 6 rpm으로 변화시키면서 원판 회전수에 따른 사육조 내의 암모니아성 질소 농도 변화와 운전 안정성을 비교하였다. 사육조의 온도는 질산화에 영향을 미치지 않도록 30℃를 유지하였으며 시료는 매일 동일한 시각에 채취하였다.

#### 3.5.2 수력학적 체류시간 변화 실험

수력학적 체류시간의 변화에 따른 사육조의 암모니아성 질소 및 COD 농도 변화를 알아보기 위하여 원판의 회전수를 4 rpm으로 하여 반응기의 수력학적 체류시간을 9.5, 20, 30, 40분으로 변화시키면서 사육조와 회전원판 반응기 유출수의 암모니아성 질소 농도와 COD의 변화를 측정하였다. 운전조건 및 시료 채취는 회전 원판 회전수 변화실험과 동일하게 하였다.

**Table 1. Composition of synthetic feedstock solution**

Component	Concentration, g/m <sup>3</sup>	Function
NH <sub>4</sub> Cl	1714	Ammonia source
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	143	Organic compound
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	429	P source
MnSO <sub>4</sub>	14	Mn source
NaHCO <sub>3</sub>	4714	Alkalinity control

### 3.6 분석 방법 및 자료 계산

실험에 필요한 수질의 분석은 총 암모니아성 질소의 분석을 위하여 암모니아 선택전극(Orion Research Inc., 9512BN)이 부착된 Ion meter (Orion Research Inc., Model 720A)를 이용하여 이온선택성 전극법[19]에 의해 분석하였고, COD는 산성  $\text{KMnO}_4$ 법[20]에 따라 분석하였다. DO는 모의 사육조에 용존산소측정기(YSI, model YSI-55)의 전극을 꽂아 측정하였다. pH는 pH 미터(SUN TEX SP-701)를 사용하여 분석하였다.

암모니아성 질소 및 COD의 제거속도와 총알칼리도의 소모속도는 식(13)과 같이 계산하였다.

$$-r_a = \frac{C_{i,a} - C_{o,a}}{V_{RBC}} \times Q = \frac{C_{T,a} - C_{o,a}}{\tau_{RBC}} \quad (13)$$

여기서,  $a$  는 TAN, COD이다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 RBC 반응기의 최적 회전 원판 회전수

회전원판공법에서 원판의 회전속도는 원판에 고정화된 미생물이 대기 중의 산소를 섭취하는 시간과 유입수 속의 영양성분과의 접촉시간을 결정하며 생물막 형태를 결정한다[21]. 원판이 회전하여 반응기 내의 폐수를 지나감에 따라 원판의 표면에는 전단응력이 발생하여 과잉 부착성장된 미생물을 탈리시킨다. 회전에 의한 전단응력으로 미생물의 탈리속도가 미생물의 부착속도보다 빠를 경우 원판에 부착되어 있는 미생물의 양은 감소하여 반응기 처리 효율을 급격히 감소시켰다. 탈리속도보다 부착속도가 빠를 경우 생물막이 너무 두꺼워져 생물막 내부가 혐기적 조건이 되고 이로 인해 생물막 내부로부터 미생물이 부패하여 일시에 탈리되는 현상이 발생한다. 그러므로 원판 회전수를 적정 수준으로 유지하는 것이 중요하다.

본 실험에서 최적의 회전수를 구하기 위하여 반응기 내 합성양어장수의 체류시간을 20분으로 운전하면서 원판의 회전수를 2, 4, 6 rpm으로 변화시켜 모의 사육조의 암모니아성 질소의 농도 변화를 측정하였다. 원판 회전속도에 변화를 가한 후 3-7일 정도 경과하여 사육조 내의 암모니아성 질소 농도는 정상상태에 도달하였으며 4일 이상 정상상태를 확인 한 후 회전속도를 변화시켰다. 정상상태에서의 사육조와 반응기 유출수의 암모니아성 질소의 농도와 반응기의 암모니아성 질소 제거속도를 Table 2에 나타내었다. 그리고, Fig. 3에서는 원판의 회전속도 변화에 따른 정상상태의 사육조의 암모니아성 질소 농도와 유출수 암모니아성 질소 농도를 나타냈으며 회전 원판 반응기의 암모니아성 질소의 제거율을 도시하였다.

그리고 Fig. 4에서는 회전 원판의 회전수에 따른 회전원판 반응기의 암모니아성 질소 제거속도를 도시하였다.

**Table 2. Effect of revolution velocity of disk on the removal of TAN**

rpm	TAN concentration in rearing Tank $C_i$	TAN concentration of effluent of RBC $C_o$	TAN removal rate of RBC $\text{g/m}^3 \cdot \text{day}$
$\text{min}^{-1}$	$\text{g/m}^3$	$\text{g/m}^3$	$\text{g/m}^3 \cdot \text{day}$
2	1.38	0.18	86.40
	1.33	0.16	84.24
	1.32	0.16	83.52
	1.34	0.15	85.68
4	1.39	0.13	90.72
	1.39	0.13	90.72
	1.38	0.14	89.28
	1.39	0.14	90.00
6	1.61	0.37	89.28
	1.61	0.35	90.72
	1.56	0.34	87.84
	1.51	0.32	85.68

\* Removal rate =  $\frac{(C_i - C_o)}{t}$

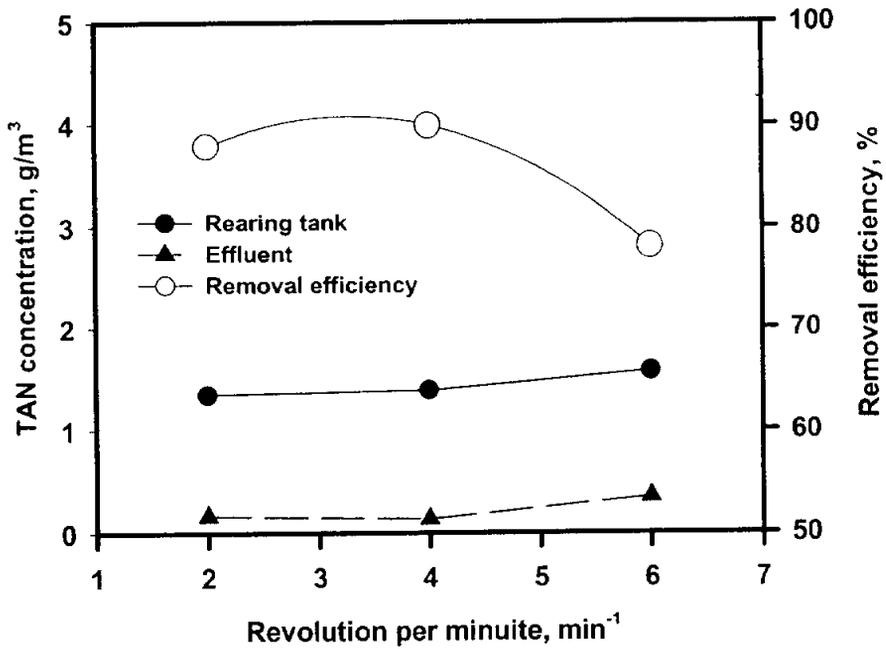


Fig. 3. Changes of TAN concentration and removal efficiency RBC with variable revolution velocity of disk.

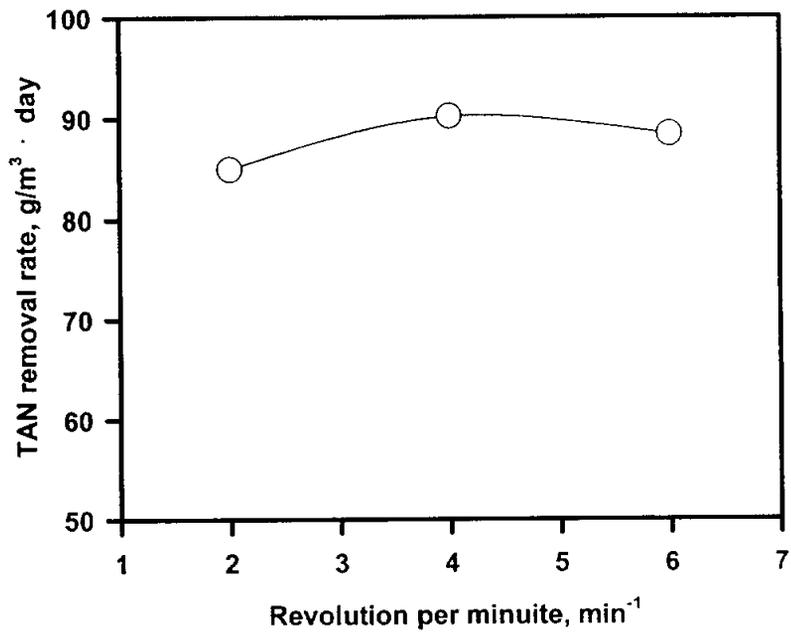


Fig. 4. Changes of TAN removal rate of RBC with varia revolution velocity of disk.

Table 2에서 보는 바와 같이 원판 회전 속도 변화에 따른 사육조의 암모니아성 질소 농도는 2 rpm의 원판 회전 속도로 운전했을 때 가장 낮았다. 4 rpm인 경우 2 rpm과 거의 비슷한 사육조 수질을 나타내었으나 6 rpm으로 운전 시에는 2와 4 rpm에 비하여  $0.15 \text{ g/m}^3$  이상 높은 값을 나타내었다. 회전원판 반응기의 암모니아성 질소의 제거율은 원판의 회전속도가 6 rpm인 경우 약 80%정도의 제거율을 나타내었으며 2와 4 rpm의 원판회전수에서 반응기의 암모니아성 질소 제거율은 큰 차이를 보이지 않았다. 4 rpm으로 운전 시 90.6%의 제거율로 2 rpm의 88.0%에 비하여 약간 높은 값을 보였다.

원판의 회전수가 감소함에 따라 사육조의 수질이 양호해 지고 제거율이 높은 것은 원판 회전수가 적을수록 원판에 발생하는 전단응력이 감소하여 부착되어있는 미생물의 양이 증가함에 따른 것으로 판단된다. 6 rpm의 회전 속도에서는 미생물의 탈리속도가 부착속도보다 커서 원판에 부착되어있는 미생물 양이 2와 4 rpm에 비해 적은 것은 것으로 사료된다.

2 rpm의 경우 4 rpm일 때 보다 낮은 제거율을 나타내는 반면 사육조의 암모니아성 질소의 농도는 더 낮게 나타났다. 이는 시스템에 발생하는 암모니아성 질소 부하량의 차이에서 발생하는 것으로 사료된다. 정상상태에서 시스템에 가해지는 암모니아의 부하는 제거량과 동일하므로 두 조건에서 동일한 암모니아성 질소 제거속도를 나타내어야 한다. 그러나 2 rpm의 경우  $85 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$  정도의 암모니아성 질소 제거속도를 나타내는 반면 4 rpm의 경우 약  $90 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 로 2 rpm에 비하여 높은 제거속도를 보였다. 암모니아성 질소 부하량이 변화하는 것은 실험 장치 주변의 온도와 습도의 변화에 따라 시스템에서 대기로 증발되는 순환수의 양이 변화하여 발생하는 현상이다. 2 rpm의 실험 조건에 비해 4 rpm에서의 증발량이 더 많은 순환수 내의 암모니아성 질소의 농도가 높아 졌기 때문인 것으로 사료된다.

실험 조건 중 운전안정성이 가장 높은 것은 4 rpm으로 사육조와 반응기 유출수의 암모니아성 질소 농도의 변화가 거의 없었으며 암모니아성 질소의 제거속도도 거의 일정하게 나타났다. 6 rpm의 경우 운전 기간 중 사육조의 농도와 제거속도의 변화폭이 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 원판의 회전속도가 변화함에 따라 원판에 부착된 미생물의 양이 변화함에 따른 것이다. 원판 회전 속도가 4 rpm일 경우 미생물의 탈리속도와 부착속도가 가장 적절히 균형이 이루고 있는 것으로 생각된다.

본 실험의 결과 4 rpm의 원판 회전수에서 가장 안정적으로 생물막이 유지되고 가장 높은 제거율을 나타내어 본 시스템에서의 최적의 회전수라고 결정하였다.

#### 4.2. 수력학적 체류시간의 변화에 따른 사육조 내 TAN농도 변화

반응기내 합성양어장수의 수력학적 체류시간의 변화에 따른 사육조 암모니아성 질소의 농도변화를 측정하기 위하여 Fig. 5에서 보는 바와 같이 수력학적 체류시간을 20, 9.5, 30, 40분으로 변화하면서 52일 동안 실험을 수행하였다. 본 시스템에 가해지는 암모니아성 질소의 부하량은 사육조를 기준으로 하여  $45 \text{ g/m}^3 \text{ rearing tank} \cdot \text{day}$ 이다. 질산화 반응기인 회전원판 반응기의 부피는 사육조의 부피의 1/2이므로 반응기의 양론적 암모니아성 질소의 제거 속도는  $90 \text{ g/m}^3 \text{ reactor} \cdot \text{day}$ 이다. 반응기가 정상상태에 도달하면 암모니아성 질소의 제거속도는 수력학적 체류시간에 관계없이 일정하므로 만일 반응기의 최대 암모니아성 질소 제거속도가 부하량보다 작을 경우 사육조의 암모니아성 질소 농도는 계속하여 증가하게 된다. 본 실험의 결과 수력학적 체류시간의 변화 후 나타난 정상상태에서의 암모니아성 질소 제거속도는  $80 - 90 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 로 양론적인 암모니아성 질소제거속도와 같거나 약간 낮은 값을 나타냈다. 이는 1일 공급되는 700 mL의 보충수에 의해 시스템 밖으로 유출되는 유출수속에 포함된 암모니아성 질소와 사육조 내의 미생물에 의해 제거되는 양의 변화에 의해 시스템에 가해지는 암모니아성 질소의 부하량에 비해 회전원판 반응기의 암모니아성 질소의 제거속도보다 낮게 나타난 것으로 판단되어진다.

원판에 부착되는 미생물의 양은 원판의 회전수 뿐만 아니라 수력학적 체류시간에 의해서도 변화하게 된다. 수력학적 체류시간이 짧을수록 반응기를 통과하는 유량이 증가하여 원판표면의 전단응력이 증대하여 미생물의 탈리속도가 커지게 된다. 운전 기간 중 사육조의 암모니아성 질소 농도는 순환수의 반응기 내 수력학적 체류시간이 9.5분일 경우가 가장 낮게 유지되었으나 유속의 증가에 의한 전단응력의 증가에 의해 원판의 생물막이 일부 탈리되어 수질이 급격히 악화되는 현상을 나타내었다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 시스템에 수력학적 체류시간의 변화가 발생할 경우 수처리 장치에 가해지는 부하가 변화하여 수질의 변화가 발생하며 질산화 반응기가 정상상태에 도달하기까지 5-15일 정도가 소요되었다. 수력학적

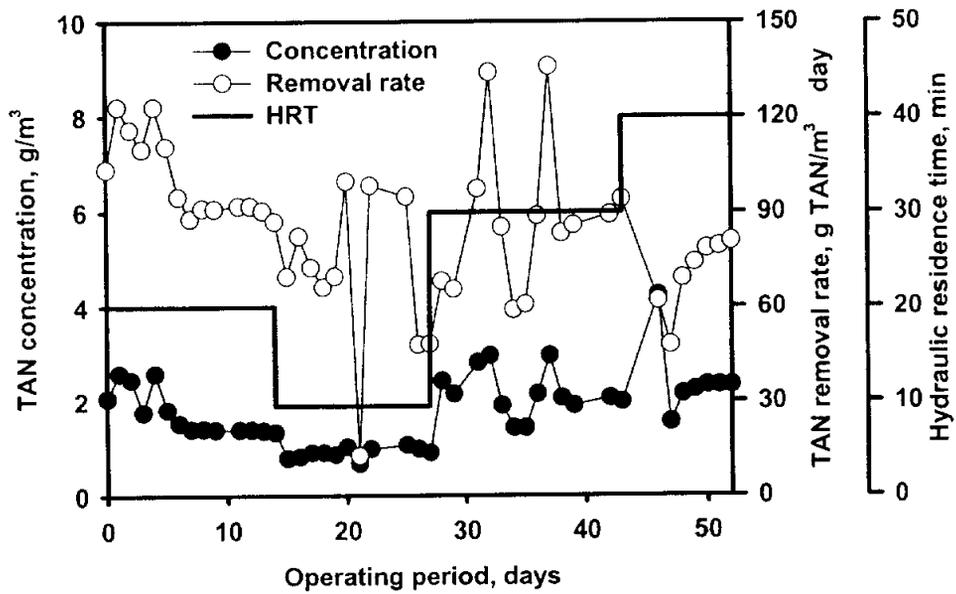


Fig. 5. Changes of TAN concentration of rearing tank and TAN removal rate on operating period.

체류시간이 짧아짐에 따른 수질의 변화는 크지 않았으나 수력학적 체류시간이 길어질 경우 정상상태에 도달하는 시간이 많이 소요되었다. 이러한 현상은 수력학적 체류시간이 짧아질 경우 원판에 부착되어 있는 미생물이 일정수준까지 탈리되기만 하면 정상상태에 도달한다. 체류시간이 길어질 경우 미생물이 원판에 더 많이 부착, 성장되어야 하므로 성장속도가 느린 질화세균의 경우 정상상태에 도달하는 시간이 긴 것으로 사료된다.

Fig. 6은 수력학적 체류시간의 변화에 따른 사육조의 암모니아성 질소 농도와 질산화 반응기인 회전원판반응기의 암모니아성 질소 제거율을 도시한 그림이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 합성 양어장 순환수의 반응기 내 수력학적 체류시간이 길어짐에 따라 암모니아성 질소의 제거율은 증가하였으나 사육조의 암모니아성 질소 농도는 더 높아져 어류 사육환경에는 악영향을 미치는 것으로 나타났다. 짧은 수력학적 체류시간에서 반응기의 암모니아성 질소의 제거율이 낮음에도 사육조의 암모니아성 질소 농도를 낮게 유지할 수 있었다. 이것은 수력학적 체류시간이 짧아짐에 따라 반응기의 암모니아성 질소의 제거율이 감소하는 반면 암모니아성 질소의 제거속도가 증가하는 현상[22]과 많은 유량에 의한 희석 효과[18]에 기인하는 것으로 생각된다. 본 시스템의 경우 시스템 전체에 가해지는 암모니아성 질소의 부하량이 모든 수력학적 체류시간에 대해 동일하여 정상상태에서 나타나는 암모니아성 질소의 제거속도는 동일한. 그렇지만 실제 반응기가 가지는 암모니아성 질소의 제거속도는 수력학적 체류시간이 짧을 경우 더 높아 사육조의 암모니아성 질소의 농도를 더 낮게 유지할 수 있는 것으로 사료된다. 또 수력학적 체류시간이 짧을 경우 사육조 내에서 발생하는 암모니아성 질소를 신속하게 생물학적 처리 장치로 유입시켜 제거함과 동시에 처리수가 유입됨으로써 사육조의 암모니아성 질소 농도를 낮게 유지할 수 있다. 그러나 수력학적 체류시간이 긴 경우 순환수가 사육조에서 머무르는 시간이 길어져 동일 유량에 발생하는 암모니아성 질소의 부하량이 커서 사육조의 암모니아성 질소의 농도는 높게 나타나는 것으로 판단된다. 그러므로 사육조 내 암모니아성 질소의 농도를 낮게 유지하기 위해서는 반응기의

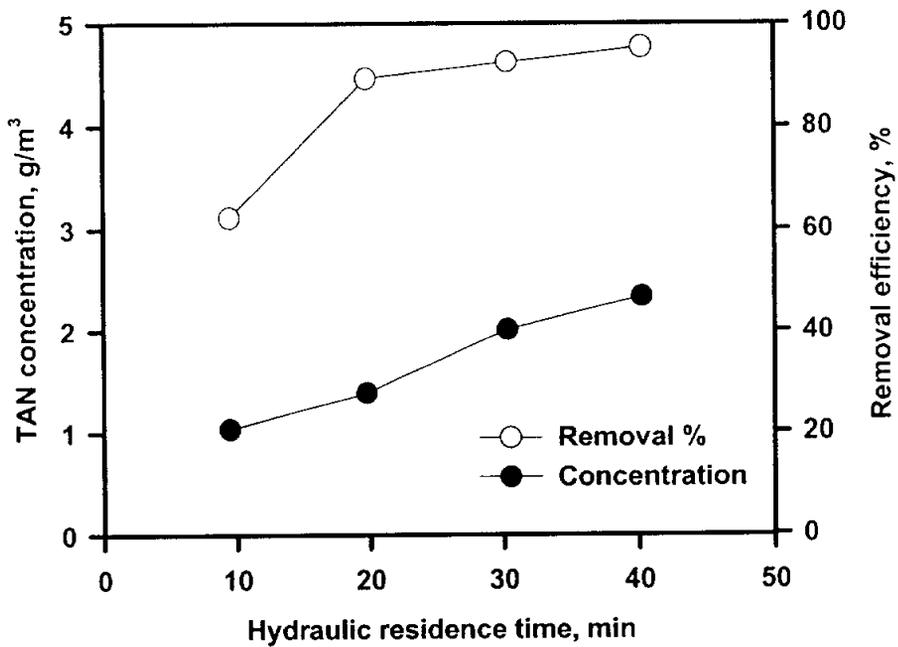


Fig. 6. Changes of TAN concentration of rearing tank and removal efficiency on hydraulic residence time of RBC.

암모니아성 질소 제거율을 높게 유지하는 것보다는 적절한 수력학적 체류 시간의 조절을 통해 사육조에서 발생하는 암모니아를 신속히 사육조로부터 제거하여 생물학적 처리장치에서 처리하는 것이 더 중요하다고 판단되어진다.

### 4.3. 이론식의 적용 가능성 검토

Fig. 7은 순환수의 유량  $Q_1$ 와 보충수의 유량  $Q_5$ 의 비인  $D$ 의 변화에 대한 회전원판 반응기의 암모니아성 질소 제거율  $R$ 의 변화를 2차 선형 회귀 분석한 결과를 나타낸 그림이다.  $D$ 의 변화에 따른 암모니아성 질소 제거속도의 변화는 2차 선형 회귀 곡선으로 잘 표현되었으며 결정계수  $r^2$ 은 0.9982였다. 회석률  $D$ 의 변화에 따른 암모니아성 질소 제거율의 변화는 다음의 식(14)로 표현되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} R &= A \times D^2 + B \times D + C \\ &= -6.1158 \times 10^{-7} D^2 + 1.4629 \times 10^{-5} D + 0.9643 \end{aligned} \quad (14)$$

Fig. 8은 식 (14)를 식 (9)에 대입하여 얻어진 수력학적 체류시간의 변화에 따른 사육조의 암모니아성 질소의 농도변화와 실험에서 얻어진 결과를 비교한 것이다. 식의 적용에 있어서  $C_5$ 는  $450 \text{ g/m}^3$ ,  $Q_5$ 는  $700 \text{ mL}(7 \times 10^{-4} \text{ m}^3)$ 로 하였다. 그림에서 나타나는 바와 같이 실제 장치의 거동과 수학적 해석을 통해 얻어진 결과식에 의한 계산값은 30분 이하의 체류시간에서는 거의 유사하였으나 40분의 체류시간에서는 실험값이 계산값에 비해 약간 낮게 나타났다. 이는 수력학적 체류시간이 길수록 반응기가 아닌 사육조 등의 영역에서 암모니아가 제거되는 비율이 증가하기 때문인 것으로 판단되어진다.

사육조 수질을 가장 양호하게 유지할 수 있는 생물학적 처리장치의 운전조건은 순환수의 양을  $D \cdot R$ 을 최대가 될 수 있도록 하는 것이다.

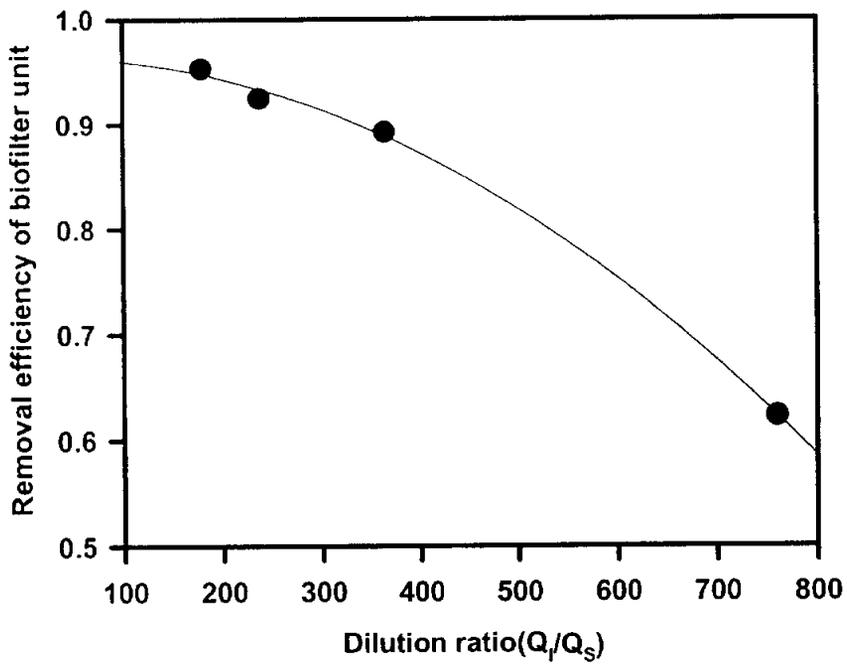


Fig. 7. Relationship between TAN removal efficiency of biofilter unit and recirculating ratio.

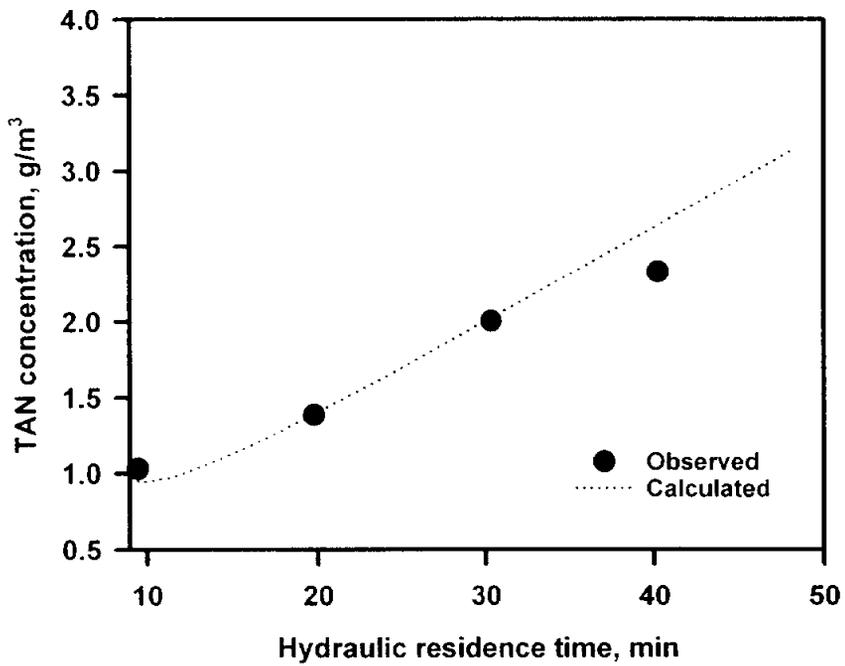


Fig. 8. Comparison of observed and calculated TAN concentration of rearing tank.

#### 4.4. COD 제거효율

순환 여과식 양어장에서 용존 유기물은 미접취 사료에서 용출되거나 어체 내에서 완전히 분해되지 않아 발생한다. 용존 유기물의 농도가 높을 경우 타가영양체 미생물의 성장을 촉진시키게 되어 생물학적 처리장치에 우점종화 되어 질산화 효율을 저하시키거나 산소 요구량을 증가시키는 원인이 된다. 일부 타가영양체 미생물은 병원균으로 어류에게 질병을 유발시키기도 한다[10]. 용존 유기물 농도의 지표로서 COD를 측정하여 수력학적 체류시간의 변화에 따른 회전원판 반응기의 처리효율을 측정하였다.

Fig. 9은 수력학적 체류시간의 변화에 따른 사육조 내 COD의 농도와 회전원판 반응기의 제거효율을 나타낸 그림이다. 수력학적 체류시간에 따른 사육조 내에서의 COD 농도는  $8 \text{ g/m}^3$ 에서  $10 \text{ g/m}^3$  사이의 대체적으로 일정한 수준을 나타내었다. COD 제거효율은 수력학적 체류시간이 9.5분일 경우 18%를 나타내었으며 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 제거효율도 선형적으로 증가하여 40분의 체류시간에서는 38%의 제거효율을 보여주었다.

회전원판 반응기의 원판에 부착되어 질산화 반응을 일으키는 질화세균은 무기탄소를 탄소원으로 이용하는 자가영양체이므로 유기탄소원인 포도당을 분해를 할 수 없다[9]. 반응기 내에서 COD 제거가 발생하는 것은 반응기 내부에 타가영양체 미생물이 일부 존재한다는 것을 알 수 있다. 사육조 내의 COD 농도가 최고  $10 \text{ g/m}^3$  정도를 보여 줌으로써 저농도로 유지됨에 따라 타가영양체 미생물의 과도한 성장에 의한 우점종화 현상이 발생하지는 않을 것으로 판단되며 이는 질산화에도 영향을 크게 미치지 못할 것으로 사료된다.

그리고 수력학적 체류시간이 길어짐에 따른 COD 제거효율이 증가하는 것은 살수여상공법을 이용하여 인공 양식수의 COD 제거효율 변화를 고찰한 Kim and Lee[23]의 보고와 같은 결과를 보여주고 있다. 이는 수력학적 체류시간이 길어짐에 따라 반응기를 통과하는 순환수 속의 COD원인

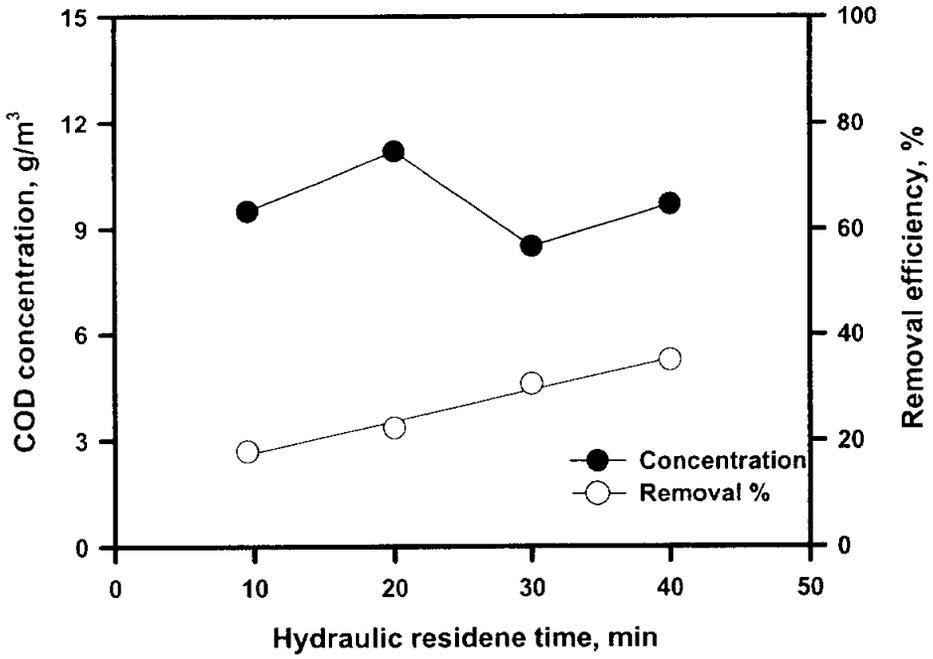


Fig. 9. Changes of COD concentration of rearing tank and TAN removal efficiency of RBC on hydraulic residence time of RBC.

포도당과 반응기 내의 타가영양체 미생물의 접촉시간이 길어짐으로써 접촉 기회가 증대하여 발생하는 현상으로 사료되며 타가영양체 미생물의 수가 많지 않아 제거효율은 그리 높지 않게 나타나는 것으로 사료된다.

Fig. 10는 수력학적 체류시간의 변화에 따른 회전 원판 반응기에 가해지는 COD의 부하속도와 제거속도를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 수력학적 체류시간이 감소함에 따라 COD 부하속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 수력학적 체류시간의 감소로 인해 회전원판 반응기로 유입되는 유입수량의 증가에 따른 것이다.

그리고 수력학적 체류시간이 감소함에 따라 COD 제거속도가 최저  $88 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 에서  $218.02 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 로 증가하였다. 이는 수력학적 체류시간의 감소로 인한 유입량의 증가로 COD 부하속도가 증가함에 따라 반응기 내의 타가영양체 미생물과 용존 유기물과의 접촉기회가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

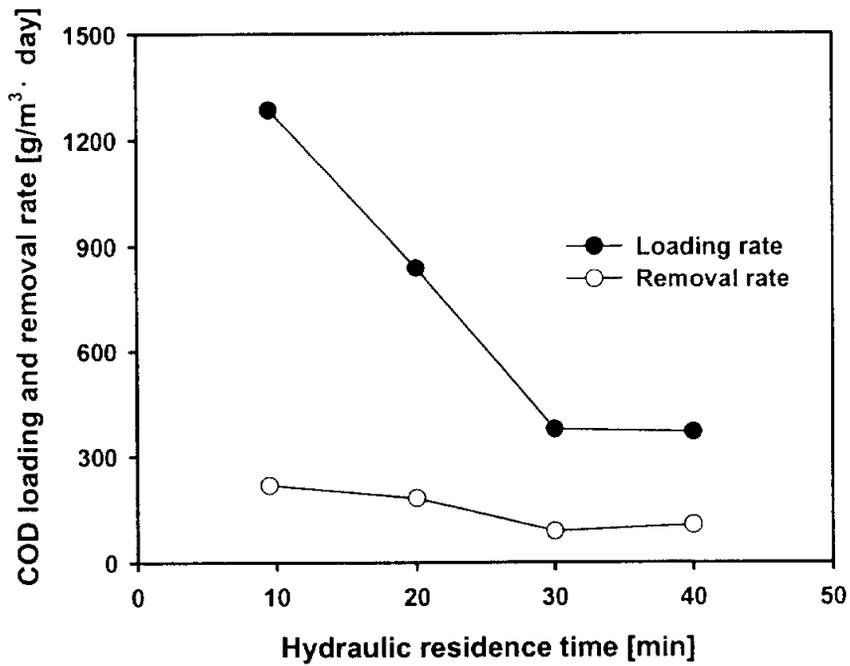


Fig. 10. Changes of COD loading rate and removal rate on hydraulic residence time.

#### 4.5. 용존산소와 pH 변화

어류에 쾌적한 환경을 조성하기 위해서는 기본적으로 호흡에 필요한 충분한 용존산소가 수중에 녹아있어야 한다. 일반적으로 어류의 사육에 권장되는 용존산소 농도는 어종에 따라 다르지만 담수성 어종의 경우 온수성 어류에 비하여 최소  $5.0 \text{ g/m}^3$  정도이며, 냉수성 어류인 경우에는 최소  $6.0 \text{ g/m}^3$  정도의 산소가 필요한 것으로 권장되어지고 있다[24].

실험기간 전체에 있어서 사육조의 용존산소 농도는  $4.85 - 6.0 \text{ g/m}^3$ 의 범위였으며 각 수력학적 체류시간에서 정상상태의 용존산소의 평균농도를 Fig. 11에 도시하였다. Fig. 11에서 보여지는 것과 같이 정상상태에서 나타난 용존산소 농도는 수력학적 체류시간의 변화에 있어서 무관하게  $5.0 - 5.5 \text{ g/m}^3$ 의 범위를 보였다. 회전 원판 반응기는 미생물이 부착된 원판이 수중과 대기를 반복하여 회전하므로 대기 중에 노출되었을 때 원판에 부착되어 있는 질화세균이 질산화에 필요한 산소를 공급받게 되고 또한 수면과 접촉하는 시점에서는 폭기가 이루어지기도 한다. 본 실험 장치의 경우 별도의 폭기 시설은 전혀 없으며 모의 사육조도 순환수의 증발을 막기 위하여 덮개를 설치하였다. 그러므로 대기중의 산소가 공급될 수 있는 부분은 회전 원판 반응기에서 이루어진 것으로 사료되며 수력학적 체류시간의 변화에 따른 용존산소 농도의 변화가 없는 것으로 보아 수처리에 필요한 용존산소는 회전원판 반응기 자체에서 공급된 것으로 판단되어진다.

또한 pH의 경우에는 사육조에서 평균 8.5를 보여줌으로써 질산화과정에 있어서 pH 영향을 받지 않을 것으로 판단되어지며, 또한 어류의 성장에도 영향이 없는 것으로 보여진다[9].

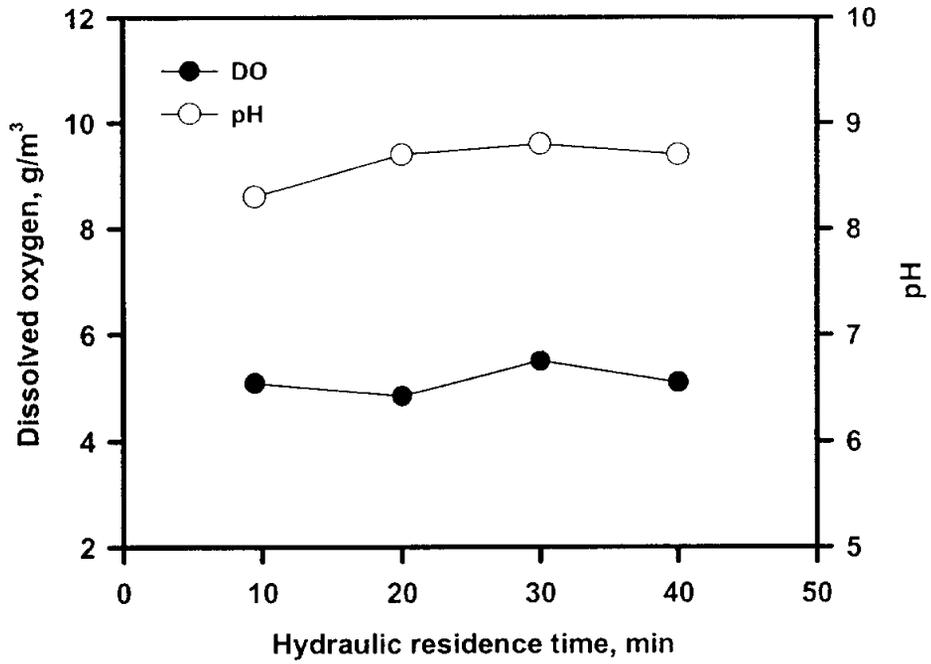


Fig. 11. Changes of pH and DO concentration in rearing tank on hydraulic residence time of RBC.

## 5. 결 론

본 연구에서는 양식장에서 많이 이용되고 있는 회전원판 반응기를 모의 순환 여과식 양어장에 적용하여 어류에 유해한 암모니아성 질소의 사육조 내의 농도를 낮게 유지할 수 있는 운전인자를 도출하고자 하였다.

본 시스템에서 사용된 회전원판 반응기의 최적 원판 회전수는 4 rpm으로 가장 안정적으로 생물막이 유지되고 가장 높은 제거율을 나타내었다.

수력학적 체류시간의 증가에 따라 회전원판 반응기의 암모니아성 질소의 제거효율은 증가하여 40분의 수력학적 체류시간에서 95.3%로 매우 높은 값을 나타내었으나 사육조의 암모니아성 질소의 농도는  $2.33 \text{ g/m}^3$ 으로 가장 높은 값을 나타내었다. 20분의 수력학적 체류시간에서는 암모니아성 질소의 제거효율은 62.2%로 실험조건 중 가장 낮았으나 사육조의 암모니아성 질소농도는  $1.03 \text{ g/m}^3$ 으로 가장 낮게 나타났다.

본 시스템에서 순환수의 유량  $Q_1$ 와 보충수의 유량  $Q_5$ 의 비인  $D$ 의 변화에 따른 암모니아성 질소 제거율의 변화는 다음의 2차 선형 회귀 곡선으로 잘 표현되었다. 이를 사육조의 물질수지식에 적용하여 수리학적 체류시간의 변화에 따른 사육조 내의 암모니아성 질소의 농도 변화를 추정해본 결과 실험치와 거의 일치하였다.

$$R = -6.1158 \times 10^{-7} D^2 + 1.4629 \times 10^{-5} D + 0.9643 \quad (r^2 = 0.9982)$$

수학적 해석의 결과 사육조의 암모니아성 질소 발생량이  $45 \text{ g/m}^3 \text{ rearing tank} \cdot \text{day}$ 이고 보충수의 양이 사육조 부피의 10%일 경우 최적 순환비( $D_{opt}$ )는 733으로 반응기 기준의 수리학적 체류시간은 9.82분이었다. 이때의 사육조의 암모니아성 질소의 농도는  $0.95 \text{ g TAN/m}^3$ 으로 유지할 수 있는 것으로 나타났다.

COD의 제거율은 수력학적 체류시간이 9.5분일 경우 18%를 나타내었으며 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 제거효율도 선형적으로 증가하여 수력학적 체류시간이 40분일 경우에는 38%의 제거효율을 나타내었

다. 또한 어류 생장에 쾌적한 환경을 조성하기 위한 기본 조건으로 충분한 용존산소가 수중에 녹아있어야 하는데 이에 대한 결과로 평균  $5 \text{ g/m}^3$ 의 용존산소 농도를 보여 주었다. pH는 평균 8.5를 유지하여 질산화 과정과 어류생장에는 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

## 참고문헌

1. Rijn, J.V., "The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture", *Aquaculture*, 139, pp. 181-201 (1996).
2. Chin, K.K., S.L. Ong and S.C. Foo, "A water treatment and recycling system for intensive fish farming", *Water Science and Technology*, 27, pp. 141-148 (1993).
3. Kim, S.K., I.S. Kong, J.K. Seo, B.J. Kim, M.G. Lee, K.H. Suh, "Removal of total ammonia-nitrogen(TAN) using immobilized nitrifier consortium", *Korean Journal of Biotechnology and Bioengineering*, 12, pp. 543-549 (1997).
4. Speece, R.E., "Trout metabolism characteristics and the rational design of nitrification facilities for water reuse in hatcheries", *Transactions of the American Fisheries Society*, 102, pp. 323-334 (1973).
5. Jobling, H.H., "Fish Bioenergetics". Chapman and Hall, London. pp. 120 (1994).
6. Meada, J.W., "Allowable ammonia for fish culture". *Progressive Fish-culturist*. 47, pp. 135-148 (1985).
7. Liao, P.B. and R.D. Mayo, "Intensified fish culture combine water reconditioning with pollution abatement", *Aquaculture*, 3, pp. 61-85 (1974).

8. Colt, J. and Armstrong, D.A., "Nitrogen toxicity to crustaceans, fish and mollusks", Bio-Engineering Symposium for Fish Culture (FCS Publ. 1), pp. 34-47 (1981).
9. Sharma B. and R. C. Ahlert, "Nitrification and nitrogen removal", *Water Research*, 11, pp. 897-925 (1977).
10. 이병헌, "순환여과식 양식장의 생물여과, 양식공학" (부경대학교 해양산업개발연구소 편), 부경대학교출판부, pp. 77 (1996).
11. Nijhof, M. and J. Bonverdeur., "Fixed film nitrification characteristics in sea-water recirculating fish culture system". *J. Aquaculture*, 87, pp. 133-143 (1990).
12. Carmignani, G.M. and J.P. Bennelt, "Rapid start-up of a biological filter in a recirculating aquaculture system containing channel catfish". *Aquacultural Engineering*. 3, pp. 39-57 (1977).
13. Roger, G.L. and S.L. Klementson., "Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilters". *Aquaculture Engineering*, 4, pp. 135-154 (1985).
14. Miller, G.E. and G.S. Libey, "Evaluation of a trickling biofilter in a recirculating aquaculture system containing channel catfish". *Aquacultural Engineering*, 3, pp. 39-57 (1984).

15. Antonie, R.L., D.L. Kluge and J.H. Mieke, "Evaluation of a rotating disk water treatment plant". *Journal Water Pollution Control Federation*, 46. pp. 298-311 (1974).
16. Libey, G.S., "Maximum nitrification with rotating biological contactors(RBCs)". Proceeding of the Workshop on Design of High Density Recirculating Aquaculture systems. pp 40-48 (1992)
17. Losordo, T.M. and H. Westers, "System carrying capacity and flow estimation, Aquaculture water reuse system : engineering design and management", M.B. Timmons and T.M. Losordo eds, Elsevier, Amsterdam, pp. 14-19 (1994).
18. Lee, S.M., D.H. Kim and K.O. Song, "Optimal hydraulic loading for ammonia control in water recycling fish culture system", Bull. *Journal of the Korean Fisheries Society*, 25, pp. 176-180 (1992).
19. APHA, AWWA and WEF, "Standard methods for the examination of water and wastewater", 18th Ed., EPS Group, pp. 4-122-4-124 (1992).
20. 산업기술연구원, "환경오염공정시험법", pp. 117-118 (1990).
21. Wheaton, F.W., J.N. Hochheimer, G.E. Kaiser, M.J. Krones, G.S. Lievey and C.C. Easter, "Nitrification filter principle, Aquaculture water reuse system : engineering design and management", M.B. Timmons and T.M. Losordo eds, Elsevier, Amsterdam, pp. 155 (1994).

22. 김인배, "순환 여과식 양식 산업 개발", 수산과학의 하이테크 (김영섭, 정현도 편저), 부산수산대학교 해양과학공동연구소, pp. 113 (1997).
23. Kim, J.S. and B.H. Lee, "Recirculating water treatment of aquaculture by using trickling filter processes", *Journal of the Korean Fisheries Society*, 29, pp. 230-237 (1996).
24. Environmental Protection Agency, "Quality criteria for water", Washington D. C., (1976).