

순환여과식 양어장의 포말분리

서근학 · 이민규
부경대학교 화학공학과

Foam Separation in Recirculating Aquaculture System

Kuen-Hack SUH and Min-Gyu LEE

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea.

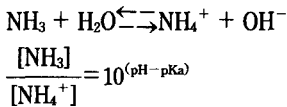
A continuous foam separator has been used to remove TSS, NH₃ and NO₂⁻ from the recirculating water in aquaculture. Experimental runs were carried out to determine the foam separation variables, such as, hydraulic retention time, superficial air velocity and foam height. The removal efficiency of TSS, NH₃ and NO₂⁻ was increased with hydraulic retention time and superficial air velocity, and removal efficiency of NH₃ was increased steadily with foam height. As DO concentration was increased with superficial air velocity and foam height, foam separator is also used for oxygen addition. It was concluded that foam separator might offer better perspective for removal of harmful components in fish culture water.

Key words : Foam separation, aquaculture, TSS, NH₃ and NO₂⁻ removal, oxygen addition

서 론

고밀도 순환식 양식의 경우 사료 찌꺼기 및 어류의 배설물 등에 의하여 순환수 중에 유기질 고형 성분이 급격하게 증가하게 된다. 유기질 고형 성분은 어류의 아가미에 손상을 가하고 병원성 미생물의 번식 등으로 어류의 성장 환경을 악화시킬 뿐만 아니라 미생물에 의해 분해되어 어류의 성장에 유해한 NH₃, NO₂⁻를 생성하여 용존 산소를 소모하게 되므로 가능한한 신속하게 제거되어야 한다.

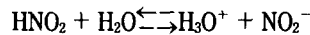
일반적으로 암모니아라 함은 총암모니아 (Total ammonia)로서 비이온성 NH₃와 NH₄⁺의 합을 말한다. 암모니아 (NH₃)는 암모늄 (NH₄⁺)이라고하는 수중 이온 형태와 평형을 이루고 있다.



식에서와 같이 pKa는 pH와 온도의 함수로서 (25°C, pKa=9.245) pH와 온도의 증가는 반응을 왼쪽으로 진행시켜 비이온화 암모니아를 증가시킨다. 위 평형이 가지는 중요한 의미는 비이온화 암모니아가 암모늄보다 수생 생물에게 유독하기 때문이다. 어류의 배설물이나 사료에 의해 발생하는 암모니아는 어류의 성장을 저해하거나 치사시키기 때문에 사육조 내의 비이온성 암모니아를 미국

환경 보호청에서는 0.02 mg/ℓ 이하로 유지하도록 권장하고 있다 (Rogers and Klemetson, 1985; EPA, 1976).

아질산염은 암모니아가 질산염으로 되는 생물학적 산화의 중간 산물로서 저농도에서도 독성을 지닌다. 혈중에 아질산염이 존재할 경우에 Hemoglobin을 Methemoglobin으로 산화시켜 산소 전달을 방해하는 역할을 한다 (Jaffe, 1964). 수중에서 아질산염은 아질산과 평형을 이루고 있다 (Wheaton et al., 1989).



아질산염과 아질산의 평형 (Ka=4.5×10⁻⁴, 25°C)은 pH에 따르고, 높은 pH에서의 평형은 아질산염쪽으로 이동하며 이때 독성도 증가한다. 양식장 순환수의 일반적인 pH (7~8)에서는 주로 아질산염 상태이다. Westin (1974)은 어류의 건강과 생산력 증대를 위해 아질산염의 농도를 0.012 mg/ℓ 이하로 유지할 것을 제안했으며 Meade (1989 a,b)는 최고 0.1 mg/ℓ를 제안하였다.

어류의 대사 작용과 소비되지 않고 남은 사료 등에 의해 발생되는 암모니아, 아질산 및 유기질 고형 성분 등은 사육중인 어류에 나쁜 영향을 야기하므로 (Miller and Libey, 1984), 고밀도로 어류를 사육하는 순환여과식 양어장에서 암모니아, 아질산 및 유기질 고형 성분 등의 처리는 양식 어류의 생산력에 큰 영향을 끼칠 수가 있다.

최근 양어장 순환수 중 어류에 유해한 성분의 처리 수단으로써 포말분리법이 검토되어지고 있다 (Chen 1994;

Weeks et al. 1992; Suh and Lee, 1995). 포말분리법은 입자상 물질이나 용존 물질을 상층하는 기포에 부착시켜 분리시키는 방법으로써, 포말분리 공정에서 제거되는 물질들은 대개가 계면 활성 물질(순환수 중 단백질 성분)들로서 이들은 물-공기 계면에 계면 활성 분자가 농축되는 성향을 가지고 있다(Rubin, 1981). 포말분리의 용액 내부로 도입된 분산 기포가 용액으로부터 포말층으로 계면 활성 물질을 제거하게 되는 것이며, 계면 활성 물질이 기포 표면에 흡착하는 현상은 친수기(hydrophilic side chain)가 액측으로 소수기(hydrophobic side chain)가 기체 측으로 배열되어 액본체(bulk liquid)농도가 증가함에 따라 기체 표면에 흡착되는 용질의 분자수가 점차 증가하여 그 표면이 완전 포화되어 표면 과잉 농도에 이르는 것이다(Davies and Rideal, 1962). David and Moffatt (1979)는 계면 활성 물질과 반대의 전하를 가지는 용존 이온들은 기-액 계면에 흡착된 계면 활성 물질과의 전기적 인력으로 기포에 흡착되어 기포와 같이 상승 분리된다고 하였으며, Pinfold (1972)와 Schnepf (1959) 등에 의해 계면 활성이 없는 물질도 계면 활성 물질과 결합시키면 계면에서의 정전기적 인력 또는 착화합물 형성에 의해 효과적인 분리가 가능하다는 것이 고찰되었다.

본 연구의 목적은 실제 운전 중인 양어장의 순환수 중에 함유된 TSS, TA, NO₂⁻ 및 총질소, 총인 등의 성분을 제거하는데 포말분리법의 영향 및 적용 가능성을 검토하기 위하여 체류 시간, 공탑 공기 유속, 포말층 높이 등의 영향에 따른 분리 특성을 조사하였다. 또한 순환수 내의 공탑 공기 유속과 포말층 높이에 따른 용존 산소 농도 변화를 조사하여 어류 성장 및 생장에 중요한 요인인 용존 산소의 영향도 검토하였다.

재료 및 방법

실험 장치

본 실험에서 사용된 포말분리장치는 Fig. 1과 같이 단

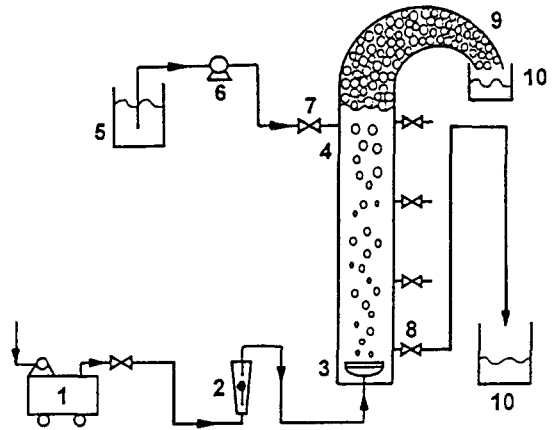


Fig. 1. Apparatus for foam separation.

- 1. Air pump
- 2. Air flow meter
- 3. Distributor
- 4. Column
- 5. Feed tank
- 6. Feed pump
- 7. Micrometer
- 8. Sampling port
- 9. Foam outlet
- 10. Beaker

순한 기포탑으로 이루어져 있으며, 내경 3 cm, 높이 75 cm의 아크릴관을 사용하여 제작하였다. 포말분리관내 액본체의 부피는 350 ml이었다. 포말분리관 하부에는 glass filter (pore size : G3)을 접합시켜 기포가 효과적으로 발생될 수 있게 하였다. 공기의 공급은 air pump를 이용하여 공급하였으며, 공기 유량을 유량계로 조절하였다. 원수는 액층 상부에서 공급하고, 공기는 탑의 하부에서 공급함으로써 향류식 접촉을 시켰다. 포말층 높이의 영향에 따른 분리특성 실험에서 포말장치 상부의 U자형관을 제거하고 길이 30 cm인 직관을 연결하여 액면에서 높이가 15 cm인 지점으로부터 상부로 3 cm 간격으로 포말유출구를 4개 설치하여 실험에 이용하였다.

실험 방법

실험은 본교 양어장에서 생성된 foam condensate를 순환수에 첨가함으로써 단백질 농도를 조정된 원수를 이용

Table 1. Summary of analytical method

Item	Method
Protein	Lowry's Method (Lowry, 1951)
TSS (Total Suspended Solid)	Vacuum Filtration
TA (Total Ammonia)	Ammonia Selective Electrode Method
NO ₂ ⁻ (Nitrite ion)	Colorimetric Method
TN (Total Nitrogen)	Ultra Violet Spectrophotometry
TP (Total Phosphate)	Ascorbic Acid Method
DO (Dissolved Oxygen)	DO-meter
pH	pH-meter

하여 연속식 포말분리 실험을 행하였다. 액본체 시료는 하부의 5cm 높이에 위치한 시료 채취구를 액본체 높이까지 튜브로 연결하여 액본체 높이와 일치한 위치에서 시료를 채취하여 TSS, TA, NO₂⁻, TN, TP 및 용존 산소를 분석하였다. 포말 형성 특성의 재현성을 증대시키기 위하여 원수의 pH는 7.2, 용액 온도는 22°C로 일정하게 유지하였다.

분석 방법

본 실험에서 사용한 각 분석 항목별 분석 방법은 Table. 1과 같다.

결과 및 고찰

양어장 순환수의 연속식 포말분리 장치의 운전시 각 성분의 제거 속도는 체류 시간, 공기 공탑 속도, 포말층 높이 등에 일반적으로 영향을 받는다. 정상 상태 도달 시간을 검토하기 위해 체류 시간 3.3분, 초기 단백질 농도 126 ppm 및 공탑 공기 유속 2.1 cm/sec의 조건에서 시간 변화에 따른 출구의 단백질, TSS, 총질소, 총인 등의 농도를 측정하여 Fig. 2에 도시하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 연속 운전 시작 20분 경과 후 정상 상태에 도달한 것을 알 수 있다. 따라서 이후 실험에서는 운전 시작 20분 경과 후 5분 간격으로 시료를 2번 채취하여 평균 분석값을 구하여 실험 자료로 이용하였다.

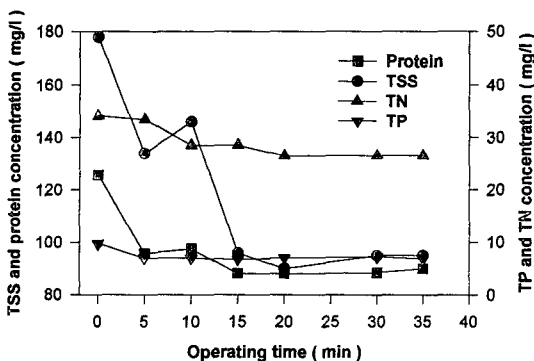


Fig. 2. Time courses of protein, TSS, TN and TP concentration in the bulk solution.

체류 시간에 따른 영향

포말분리장치에서 체류 시간 변화에 따른 각성분 분리 특성의 영향을 조사하기 위하여 공기 공탑 유속 2.1 cm/sec로 유지하고 체류 시간을 3.3, 5.0, 6.7, 8.3, 10.0분으로 변화시키는데 따른 액본체의 각 성분의 제거율을 Fig.

3에 도시하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 체류 시간이 증가할수록 각 성분 들의 제거율이 거의 직선적으로 증가하였는데, 이러한 현상은 체류 시간이 증가할수록 용액중 각 성분들이 기포와 접촉하는 시간의 증가에 의한 것으로 생각된다. 체류 시간 3.3~10분 변화시 TA의 제거율은 57~80%, NO₂⁻의 제거율 48~90%, TSS 제거율 29~64%로써, TN 제거율 20~32%, TP 제거율 4~50% 등에 비해 높은 수치를 나타낸 것으로 보아 포말분리가 TSS의 제거뿐만 아니라 TA, NO₂⁻ 이온성분등의 제거에도 매우 효과적인 분리 방법임을 알 수 있었다. 그리고 TP, TN의 제거율은 다른 각 성분들의 제거율에 비해 비교적 완만한 직선 형태로 나타나는 것으로 보아 다른 각 성분들에 비해 체류 시간 변화에 따른 제거율은 미미하다고 보아진다.

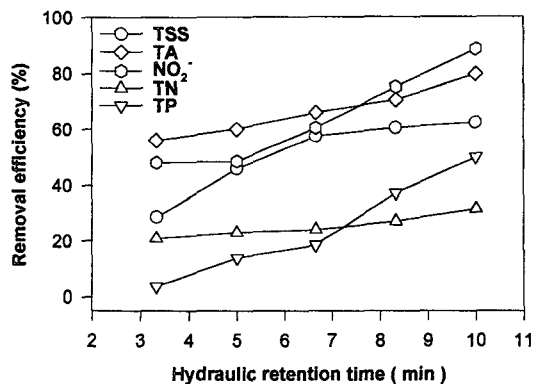


Fig. 3. Effect of HRT on effluent TSS, TA, NO₂⁻, TN, and TP removal efficiency.(initial concentration : TSS 103.5 mg/l, TA 0.3 mg/l, NO₂⁻ 5.1 mg/l, TN 45.0 mg/l, TP 4.7 mg/l).

공탑 공기 유속의 영향

포말분리장치에서 각 성분의 제거 속도는 공기 유속과 밀접한 관계가 있으므로 포말 분리관에 공급하는 공기 유속 변화에 따른 각 성분의 분리 특성을 검토하기 위하여 원수의 체류 시간을 6.7분으로 유지하고, 공탑 공기 유속을 1.4, 2.1, 2.8, 3.5 및 4.2 cm/sec로 변화하여 그에 따른 각 성분의 제거율을 Fig. 4에 도시하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 공탑 공기 유속이 증가할수록 각 성분의 제거율도 비례적으로 증가하였다. 이것은 공탑 공기 유속이 증가할수록 기.액 계면의 면적이 증가하여 흡착되는 각 성분의 양도 증가된 것으로 보아진다. 공탑 공기 유속 1.4~4.2 cm/sec 변화에 따른 각 성분의 제거율의

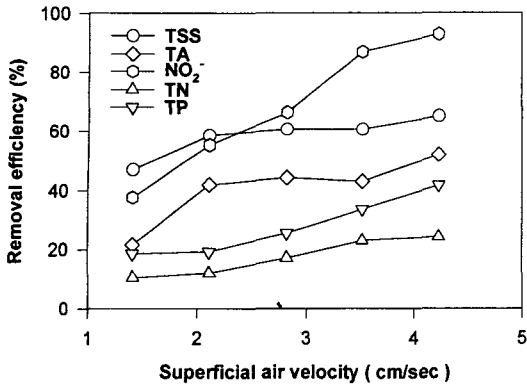


Fig. 4. Effect of SAV on effluent TSS, TA, NO₂⁻, TN and TP removal efficiency. (Initial concentration : TSS 177 mg/l, TA 3.4 mg/l, NO₂⁻ 5.4 mg/l, TN 36.8 mg/l, TP 7.8 mg/l).

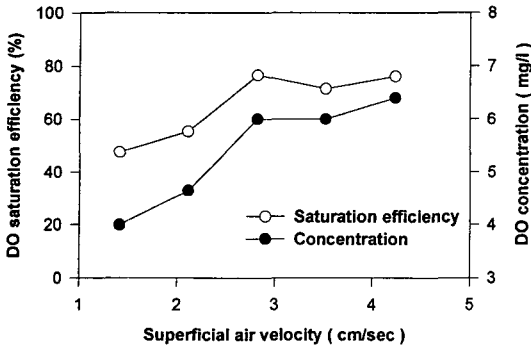


Fig. 5. Effect of SAV on effluent DO saturation efficiency and concentration.

정도는 NO₂⁻가 37~93%로 가장 높게 나타났고 다음으로 TSS 46~65%, TA 21~52%, TP 18~42%, TN 10~25% 순으로 나타났다. 상기 실험 결과로부터 포말분리법은 어류 성장에 유해한 성분인 TSS, TA, NO₂⁻를 7분 이내에 효과적으로 제거할 수 있는 방법으로 포말분리기를 이용할 경우 매우 효과적인 양어장 순환수처리 방법으로 판단되어 진다.

포말분리장치는 비교적 설계가 간단하고 더구나 순환 양식 시스템에서는 어류의 호흡 및 대사를 위해 산소 공급이 필요한데 이 산소 공급 장치를 포말 장치로도 활용 가능하고, 기포관은 병류식 흐름 형태로 운전함으로써 물을 순환시키는데 air lift 펌프로서도 활용이 가능하다. 포말장치가 장치 내의 순환수의 용존 산소에 얼마나 영향을 미치는지 알아보기 위해 공급액의 용존 산소 농도

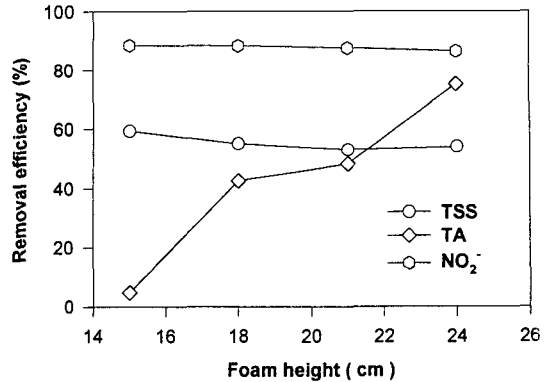


Fig. 6. Effect of foam height on effluent TSS, TA and NO₂⁻ removal efficiency. (Initial concentration : TSS 93.5 ml/l, TA 0.7 mg/l, NO₂⁻ 4.0 mg/l).

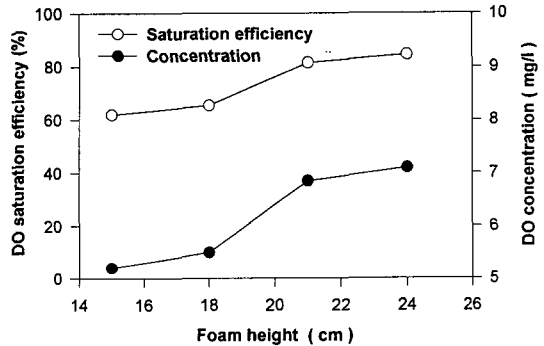


Fig. 7. Effect of foam height on effluent DO level.

가 3.20 mg/l인 경우 포말분리 실험을 수행하며 출구에서 용존 산소 변화를 Fig. 5에 도시하였다. 그림에서와 같이 공기 유속이 증가할수록 순환수 내의 용존 산소도 증가하는 현상을 나타내어 포말분리기는 매우 효과적인 산소 공급 장치로도 이용되어질 수 있음을 알 수 있었다.

포말층 높이의 영향

포말층 높이에 따른 각 성분 분리 특성의 영향을 검토하기 위하여 체류 시간 5분, 공압 공기 유속 2.1 cm/sec로 유지하고 포말분리기의 포말층 높이를 15, 18, 21 및 24 cm로 변화하여 각 성분의 제거율을 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서와 같이 TSS와 NO₂⁻는 포말층 높이 변화에 따른 각 성분 제거율은 거의 일정하였으나 TA 제거율은 포말층 높이가 증가할수록 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 포말층 높이가 증가할수록 중력에 의하여 액분체로 하강하는 포말 사이의 액체와 상승하는 공기 기체간에 항류식 접촉 기회의 증대로 포말

층은 NH_3 stripping 역할을 하여, TA는 액체에서 공기 기체로 물질 전달하여 액본체의 TA 농도가 감소하는 것으로 사료된다.

포말층 높이에 따른 용존 산소 농도의 영향을 검토하기 위하여 체류 시간 5분, 공탑 공기 유속 2.1 cm/sec, 초기 단백질 농도 60 mg/l로 유지하고 포말분리기의 포말층 높이를 15, 18, 21 및 24 cm로 변화하여 출구에서 용존 산소 농도의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 도시된 바와 같이 포말층 높이가 증가할수록 순환수 내의 용존 산소 농도도 증가하였다. 이것은 포말층 높이가 증가할수록 포말사이에 중력에 의하여 액본체로 떨어지는 액체와 상승하는 공기 기체간에 향류식 접촉 시간이 증대하여 용존 산소 농도가 증가하는 것으로 추측된다. 그러므로 위 결과에서와 같이 포말분리 장치 설계시 포말층 높이는 20 cm 이상 높게 설계함으로 해서 순환수 내의 용존 산소가 증가되고 TA 제거율이 증대하여 어류의 성장에 유익하다는 것을 알 수 있다.

요 약

포말분리관에서 양어장 순환수를 일정하게 공급하여 분리 실험을 수행하며 체류 시간, 공탑 공기 유속, 포말층 높이 등의 영향에 따른 포말 분리관의 각 성분의 분리 특성을 연구한 결과 체류 시간 및 공탑 공기 유속이 증가할수록 TSS, TA 및 NO_2^- 성분의 제거율도 비례적으로 증가하였다. 그리고 포말층의 높이가 증가할수록 TA의 제거율은 월등히 증가한 반면에 NO_2^- , TSS의 제거율은 일정하게 유지되었다. 포말분리기의 공탑 공기 유속 및 포말층 높이가 증가할수록 순환수내의 용존산소도 증가하여 포말분리기는 양어장 순환수의 산소 공급 장치로도 활용되었다. 포말분리법은 어류 성장에 유해한 TSS, TA, NO_2^- 를 단기간에 제거할 수 있고 어류 성장에 필요한 산소를 공급할 수 있는 매우 효과적인 방법으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 농림수산부에서 시행한 농림수산특정연구사업의 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

Chen, S. 1994. Modeling surfactant removal in foam fraction I. *Aquacultural Engineering*, 13, 163~181.
Chen, S. 1994. Modeling surfactant removal in foam frac-

tion II. *Aquacultural Engineering*, 13, 183~200. David, J.W., K.R. Moffatt, 1979. Electrical aspects of adsorbing colloid flotation. *Sepa. Sci., Technol.*, 14 (4), 319~332.
Davies, J.T. and E.K. Rideal. 1962. *Interfacial phenomena*. Academic Press, New York, pp. 480.
EPA (Environmental Protection Agency). 1976. *Quality Criteria for Water*. Washington D. C.
Jaffe, E.R. 1964. Metabolic processes involved in the formation and reduction of methemoglobin in human erythrocytes. In *The Red Blood Cell*, C. binship and D. surgenor eds. Academic Press, New York, 397~422.
Lowry, O.H., N.J. Rosebrough, A.L. Farr and R.J. Randall. 1951. Protein measurement with folin phenol reagent. *J. Biotech.*, 193, 265~275.
Meade, J.W. 1989a. Importance of water quality for fish growth and health AquaNor. 5th International Conference and Exhibition on Fish Farming Techniques and Equipment, Trondheim, Norway.
Meade, J.W. 1989b. *Aquaculture Management*. Van Nostrand Reinhold. New York. 190.
Miller, G.E. and G.S. Libey. 1984. Evaluation of a trickling biofilter in a recirculating aquaculture system containing channel catfish. *Aquacultural Engineering*, 3, 39~57.
Pinfold, T.A. 1972. Ion flotation in adsorptive bubble separation techniques. Academic Press, New York, 53~73.
Roger, G.L. and S.L. Klementon. 1985. Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilters. *Aquaculture Engineering*, 4, 135~154.
Rubin, E. 1981. Foam fractionation-some recent studies. In *Theory, Practice, and Process Principles for Physical Separations*, Proceedings of the Engineering Foundation Conference, M. P. Freeman and J. FitzPatrick eds. Engineering Foundation, New York, USA., 750 pp.
Schnepf, R.W. 1959. Foam fractionation. *Chem. Eng. Progr.*, 54, 42~46.
Suh, K.H. and M.G. Lee. 1995. Treatment of Aquacultural Recirculating Water by Foam Separation. *J. Korean Fish. Soc.* 28 (5), 599~606 (in Korean).
Weeks, N.C., M.B. Timmons and S. Chen. 1992. Feasibility of using foam fractionation for the removal of dissolved and suspended solids from fish culture water. *Aquacultural Engineering*, 11, 251~265.
Westin, D.T. 1974. Nitrate and nitrite toxicity to salmonid fishes. *Prog. Fish-Cult.*, 36, 86~89.
Wheaton, F., J. hochheimer and G.E. Kaiser. 1989. Biological filters for Agriculture, Scientific Article %A-4904, Maryland Agricultural Experiment Station.

1996년 9월 6일 접수

1997년 3월 5일 수리