

고정화 미생물을 이용한 공기 부상식 생물반응기에 의한 순환 여과식 양어장의 순환수 처리

서근학* · 김병진¹ · 김성구²

부경대학교 화학공학과, ¹부산바이오기업지원센터, ²부경대학교 생물공학과

Treatment of Recirculating Aquacultural Water by an Airlift Bioreactor Containing Immobilized Microorganisms

Kuen-Hack SUH*, Byong-Jin KIM¹ and Sung-Koo KIM²

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

¹Busan Bio-Industry Support Center, Busan Technopark, Busan 608-737, Korea

²Department of Biotechnology and Bioengineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Performance of an airlift bioreactor (ABR) containing the immobilized microorganisms was evaluated in an integrated pilot scale recirculating aquaculture system stocked with Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) at an initial rearing density of 5% and compared to a rotating biological contactor (RBC) for 40 days. The TAN concentration of rearing tank for ABR and RBC were maintained at 0.4 g/m³ and 0.5 g/m³, respectively. The nitrite nitrogen was completely removed by the ABR. The ABR's aeration was more stable than the RBC's. On the whole, the feasibility of ABR as an aquacultural water treatment unit was recognized.

Key word: Airlift bioreactor, Immobilized microorganisms, RBC, Recirculating aquaculture system, *Oreochromis niloticus*

서 론

암모니아는 양어장 순환수 처리에 있어 가장 문제가 되는 성분으로 어류의 대사작용에 있어 질소 성분의 최종 산물로서 (Jobling, 1994) 수중에서 이온 상태의 NH₄⁺와 비이온 상태인 NH₃의 두 가지 형태로 존재한다. NH₄⁺와 NH₃는 모두 어류에 독성을 미치며 특히 NH₃는 더 독성이 강하여 대부분의 어류에 대해 0.125 g NH₃/m³ 이하의 농도를 권장하고 있다 (Colt and Armstrong, 1981; Meade, 1985). 양어장 순환수의 암모니아는 어류에 대한 직접적인 피해 뿐 아니라 미처리 되어 수계로 방출될 경우 부영양화나 적조 등의 심각한 환경 문제를 유발하기도 한다.

미접취 사료나 어류의 배설물 중 유기성분이 용출되어 발생하는 용존 유기물은 어류에 직접적인 영향을 미치지 않는으나 순환수 내에 타가영양체 미생물을 증가시키는 요인이 된다. 타가영양체 미생물의 일부는 병원성 미생물로서 어류에 유행 병을 발생시키며 용존산소를 감소시켜 폭기량을 증가시키는 원인이 된다 (Speece, 1973).

순환여과식 양식 시스템에서 발생하는 암모니아나 용존 유기물은 침지식 또는 살수식 생물반응기나 회전원판 반응기 (rotating biological contactor: RBC)와 같은 생물학적 처리 장치에 의해 제거하며 이와 같은 생물학적 처리장치는 지지체에 질산화 미생물을 부착시켜 이들에 의해 암모니아를 질산화

질소로 산화시키거나 (Sharma and Ahlert, 1977) 용존 유기물을 분해하는 공정이다.

양어장 순환수 처리를 위한 생물학적 처리장치 중 가장 활발히 연구되고 현장에 많이 적용되는 회전원판 반응기는 단위 표면적 당 여과 효율이 우수하고 원판이 회전하면서 대기중의 공기와 접촉하면서 산소를 수중에 용해시킬 수 있으며 수두가 낮아 운전 경비가 절감되고 원판의 회전에 의한 전단력으로 원판 표면에 느슨하게 부착된 생물막이 탈리 되어 활성 높은 생물막의 유지가 가능한 장점이 있다 (Miller and Libey, 1984, Libey, 1992). 그러나 유량의 급격한 변동에 의해 미생물 막이 탈리되거나 외부에서 유입된 독성 물질에 의해 수처리 효율이 급격히 변화되는 단점을 가진다.

생물학적 처리법 중 미생물을 담체 내부에 가두어 수처리에 이용하는 포괄 고정화법은 반응기 내부의 미생물 농도를 고농도로 유지할 수 있어 유입되는 폐수를 짧은 시간 안에 처리할 수 있으며 온도나 pH 같은 환경조건이 급격히 변화하거나 독성물질이 유입되어도 고정화 미생물 자체의 완충작용에 의해 활성이 크게 변하지 않으므로 양어장 순환수 처리에 있어 회전원판 반응기의 단점을 보완할 수 있다 (Kim et al., 1997).

포괄고정화법에 많이 사용되는 담체는 κ -carrageenan, alginate 등과 같은 천연 고분자가 많이 사용되었으나 폐수처리에서는 생분해에 의해 담체가 파손되는 단점이 있어 PEG

*Corresponding author: khsuh@pknu.ac.kr

(polyethylene glycol), PCS (polycarbamoyl sulphonate), PVA (polyvinyl alcohol) 등과 같은 합성 고분자가 이용되고 있으며, 이중 PVA는 가격이 저렴하고 고정화 시 강도가 강하고 장기간의 사용에 대한 내구성이 크며 미생물에 대한 독성이 없는 장점을 가지고 있다 (Hashimoto and Furukawa, 1987).

본 연구에서는 실험실에서 많이 연구되고 있는 포괄 고정화 미생물을 이용하는 공기 부상식 생물반응기 (airlift bioreactor: ABR)를 실제 어류를 사육하는 pilot-scale 순환여과식 양어장에 적용시켜 순환수 처리를 수행하였다. 동시에 현재 양식업계에서 가장 많이 사용하고 있는 회전 원판 반응기와의 비교를 통해 포괄 고정화 미생물을 사용하는 순환수 처리장치의 현장 적용 가능성을 비교 평가하였다.

재료 및 방법

고정화 미생물

본 연구에서 사용한 고정화 미생물은 질화세균균을 PVA에 포괄고정화 하여 사용하였으며 고정화 질화세균균의 제조에 사용한 질화세균균은 활성슬러지를 순양하여 사용하였으며 그 방법은 Suh et al. (1999)의 연구와 동일하게 수행하였다.

고정화 질화세균균은 PVA-boric acid법 (Hashimoto and Furukawa, 1987)을 이용하여 제조하였다. 3,000 rpm에서 10분간 원심분리시켜 얻은 농축 질화세균균을 4.5% (D.W./V)로 희석하고, 30% (W/V) PVA-HC (saponification: 100%; degree of polymerization: 2,000) 용액과 동량의 부피로 기포가 생기지 않도록 천천히 혼합하여 PVA 15%–질화세균균 2.25%인 혼합용액을 만들었다. 이 혼합용액을 정량펌프를 이용하여 일정한 속도로 8°C로 냉각한 포화 boric acid 용액에 떨어뜨려 구형의 고정화 질화세균균을 제조하였다. 고정화 질화세균균은 포화된 boric acid 용액에 20시간 동안 완속 교반시켜 bead 내부까지 완전히 경화시킨 후, bead 주위에 묻어 있는 boric acid를 제거하기 위하여 흐르는 수돗물에 세척하였다. 이러한 방법으로 제조한 질화세균 고정화된 bead의 평균직경은 4 mm였다.

공기부상식 반응기

본 연구에서 사용한 ABR은 고정화 미생물의 유동성을 높이기 위하여 반응기 내부에 방해판 (baffle)을 설치한 split-cylinder airlift bioreactor 형태로 제작하였다. 공기부상식 생물반응기의 설계도는 Fig. 1과 같다. 공기부상식 생물반응기는 내경 600 mm, 높이 2,000 mm의 아크릴 관을 이용하여 제작하였으며 반응기 내 유체가 차지하는 체적은 0.50 m³였다.

질화세균 고정화된 bead를 유동시키고 질산화에 필요한 산소를 공급하기 위해 고정화 미생물이 상승하는 상승부의 하부에 산기석을 이용한 공기 분산기를 설치하여 15 L/min의 유량으로 공기를 공급하였다. 합성 양어장수의 유입구는 bead가 침강하는 부분인 하강부의 액면 아래에 설치하여 유입된 합성 양어장수가 질화세균 고정화된 bead와 접촉하지 않고

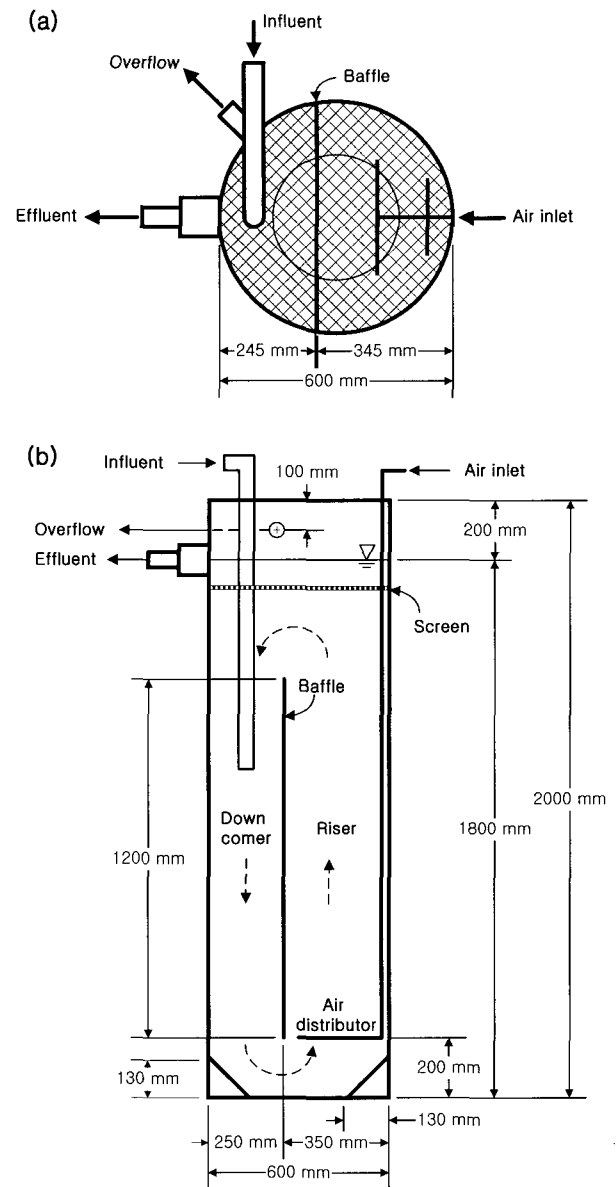


Fig. 1. Top view (a) and side view (b) of airlift bioreactor.

배출되는 것을 방지하였다. 유출구는 하강부 상부에 설치하였으며, 반응기 상부에는 bead의 유출을 막기 위하여 유출구 아래에 미세망을 설치하였다.

반응기의 하부에는 유체 유동이 없는 정체영역 (dead zone)이 발생하지 않도록 모서리 부분을 둥글게 만들었다. 유체와 고정화 미생물을 유동시키고 용존산소를 공급하는 공기분산기는 공급되는 공기가 상승부 전체에 고르게 분포하여 공급될 수 있도록 설계하였다. 상승부와 하강부를 구분하는 baffle은 상승부가 차지하는 면적이 60%가 되도록 벽면으로부터 345 mm 거리에 설치하였다.

회전원판 반응기

ABR과의 성능 비교를 위해 사용한 질산화 반응기는 RBC로서 Fig. 2에서 보는 바와 같이 1,200 mm × 900 mm × 450 mm의 규모로 PVC plate를 이용하여 제작하였으며 액층의 부피는 0.475 m³였다. 원판은 직경 680 mm의 corrugated skylight plate 100장을 사용하였으며 원판의 총 표면적은 72.6 m²이었다. 원판의 회전은 유입수를 원판 상부에서 살수하여 순환수가 낙하하는 수력에 의해 회전하도록 하였다.

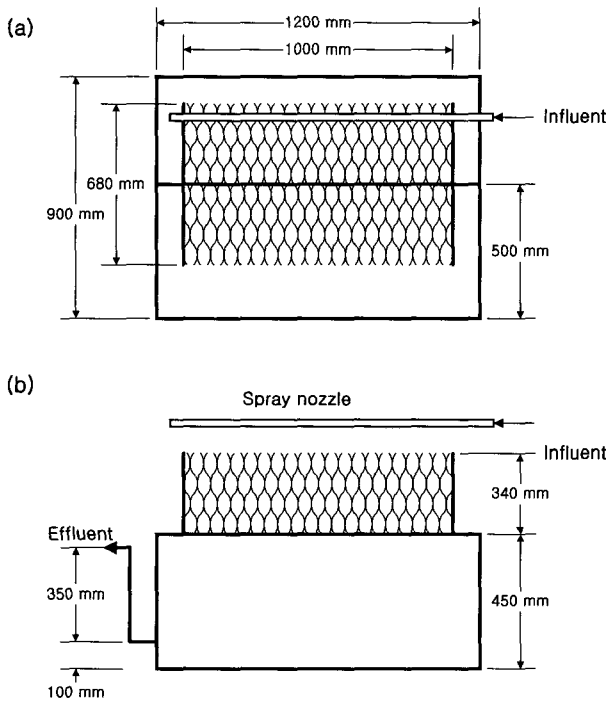


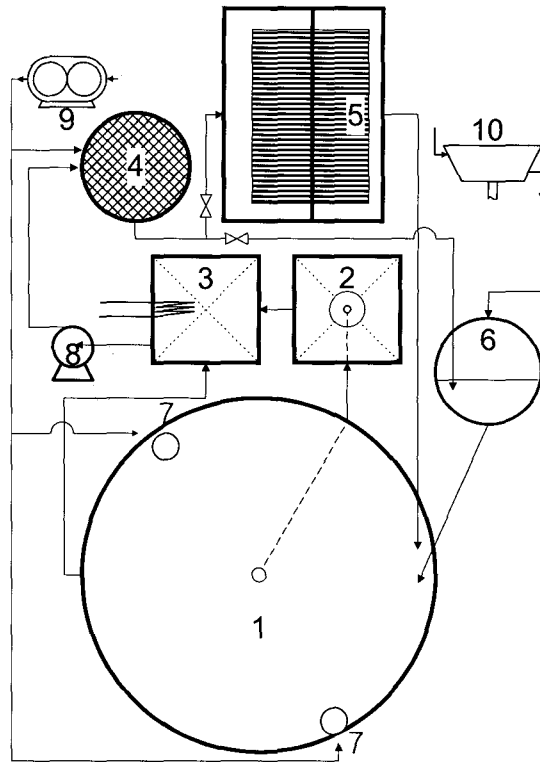
Fig. 2. Top view (a) and front view (b) of rotating biological contactor.

순환 여과식 양식 시스템

본 연구에서 사용한 순환 여과식 양식 시스템의 모식도는 Fig. 3과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 순환 여과식 양식 시스템은 상하 이중배출구 (double drain) 구조인 2.5 m³ 규모의 사육조, 0.25 m³ 규모의 저류조와 동일한 규모의 침강성 고형물을 제거하기 위한 침전조, 부유 고형물을 제거하기 위한 floating bead filter, 암모니아 산화를 위한 0.475 m³ 규모의 RBC와 0.5 m³ 규모의 ABR, 용존 및 미세 고형물을 제거하기 위한 포말 분리기로 구성되어 있다. 순환수는 1대의 펌프를 이용하며 순환 시켰다. 부족한 용존산소의 보충을 위해 순환 펌프에서 floating bead filter로 공급되는 순환수의 일부분을 사육조로 우회시켜 사육조 표면으로 떨어뜨려 폭기시켰다. 시스템의 상부에는 태양광에 의한 수온의 급격한 변화와 조류의 번식 등을 방지하기 위해 차양막을 설치하였다.

실험어 수용

본 연구를 위해 수용한 실험어는 열대성 담수어종인 틸라피



- 1. Fish tank
- 2. Sedimentation tank
- 3. Storage tank
- 4. Floating bead filter
- 5. RBC
- 6. Airlift bioreactor
- 7. Foam separator
- 8. Recirculating pump
- 9. Air blower
- 10. Air compressor

Fig. 3. Schematic diagram of pilot plant scale recirculating aquaculture system.

아 중 국내 내수면의 주요 양식 대상 종인 나일 틸라피아 (*Oreochromis niloticus*)로 부경대학교 양어장에서 사육중인 것을 사용하였다. 사육 밀도는 사육조 기준 5%로서 평균 어체 중 590.7 g인 어류를 212마리 총 125.2 kg 수용하였다.

어류 사육 및 시스템 관리

Pilot plant의 운전은 매일 오전 9시에 첫 사료를 공급하고 매 2일 마다 침전조 및 floating bead filter를 청소하여 2일간 발생한 고형물을 시스템 외부로 제거하고 보충수를 공급하여 시스템의 수위를 유지시켰다. 침전조 내부의 고형물은 하부의 drain valve를 열어 침전조 내부의 순환수를 모두 배출시켜 제거시켰다. Floating bead filter에서 걸러진 고형물은 순환수의 공급을 중단하고 2분간 공기를 불어넣어 bead 층에 걸러져 있는 고형물을 분리한 후 3분간 침강시켜 하부로 제거하였다. 보충수는 부경대학교 부속 양어장의 순환수를 이용하였으며 보충수의 양은 사육조의 약 10%에 해당하는 0.25 m³을 사용하여 일간 보충되는 순환수의 양은 사육조 용적의 5%였다. 실험 기간 중 보충수의 평균 수질은 Table 1과 같았다. 질산화시 소모되는 알칼리도의 보충은 공업용 중탄산나트륨을 이용하

Table 1. Average water quality of make up water

Component	Composition
Total ammonia nitrogen	0.20 g/m ³
Nitrite nitrogen	0.00 g/m ³
Nitrate nitrogen	2.01 g/m ³
COD _{Cr}	19.33 g/m ³
Total suspended solid	2.40 g/m ³

Table 2. Composition of experimental diet

Component	Composition
Moisture	9.41%
Crude protein	37.00%
Crude lipid	3.96%
Crude ash	8.68%

였으며 보충수를 공급할 때 저류조에 살포하여 완전히 용해되도록 하였다.

실험어에 급이한 사료는 부상 사료로서 그 성상은 Table 2와 같으며 사료공급은 초기 사육밀도를 기준으로 총 어체중의 1%에 해당하는 사료를 1일 3회에 나누어 손으로 던져 공급하였다. 어류가 사료를 섭취하지 않을 경우 사료 급이를 중지하였다. 사육조 내의 온도는 25°C로 설정하였으며 회전원판반응기의 원판 회전속도는 1 rpm을 유지하도록 하였다.

실험 방법

본 연구에서 순환여과식 양어장의 질산화 반응기인 ABR의 운전을 위해 어류를 사육조 용적 기준으로 5% 입식하여 총 40일간 사육하였다. ABR의 성능 평가를 위해 현재 양어장에서 가장 많이 사용하고 있는 RBC를 대조구로써 운전하였다. 어류를 입식한 후 초기 15일간은 본 연구에서 사용된 pilot-scale 순환여과식 양식시스템에서 110일간 운전되어 원판에 미생물 부착과 숙성이 완전히 진행된 RBC를 이용하여 운전하면서 RBC 운전에서 나타나는 각 수질 인자의 변화를 관찰하였다. 그 후 RBC가 부착되어 있는 시스템에 ABR을 동시에 연결하고 사육조의 암모니아성 질소 농도를 관찰하면서 ABR을 통과하는 유량을 점차 증가시켰다. 3일간의 RBC와 ABR의 동시운전 기간을 통해 전체 유량을 ABR로 보낼 수 있었으며 어류입식 후 18일째부터는 ABR만으로 운전하면서 사육조와 ABR에서 나타나는 수질인자를 측정하였다.

수질 분석

시스템의 수질을 측정하기 위해 시스템 점검을 마친 후 약 1시간 경과 후 수질 분석에 필요한 시료를 채취하였다. 각 수질항목은 standard method (APHA et al., 1992)에 따라 암모니아성 질소 (total ammonia nitrogen, TAN)는 선택성 이온전극법 (9512-BN, Orion co.), 아질산성 질소(nitrite nitrogen, NO₂-N)와 질산성 질소 (nitrate nitrogen, NO₃-N)는 이온 크래마토그래피법 (DX-120, Dionex Co.), 화학적 산소요구량 (chemical oxygen demand, COD)은 개방 환류법 (open reflux method), 총부유물질 (total suspended solid, TSS)은 진공 여과

법, 총 알칼리 도(total alkalinity, TA)는 적정법에 의해 수행하였다. 수소이온농도 (pH)와 용존산소 (dissolved oxygen, DO)는 pH-meter (720A, Orion Research Co.)와 DO-meter (YSI-55, Yellow Springs Instrument)를 이용하여 분석하였다.

결과 및 고찰

질소 성분 농도 변화

실험기간에 나타난 총 암모니아성 질소, 아질산성 질소 및 질산성 질소의 사육조 내부의 농도 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 초기 15일간은 RBC만을 이용하여 질소제거를 수행하였으며 실험에 사용된 RBC의 숙성이 거의 완전하게 진행된 상태이므로 TAN의 농도가 어류 입식 직후부터 0.86 g/m³ 정도의 농도를 유지하였다. 어류가 시스템에 완전히 적응한 후인 8일째부터는 0.5 g/m³의 농도를 유지하였다. ABR이 완전히 연결되어 운전되기 시작한 18일 이후부터는 0.4 g/m³의 TAN 농도를 나타내어 RBC를 사용한 사육기간에 비해 더 낮은 TAN 농도를 나타내었다. 실험기간 중에 ABR을 운전함에 따른 특별한 문제점은 발견되지 않았으나 31일째에 TAN의 농도가 12 g/m³까지 상승하는 현상이 나타났다. 이는 ABR에 공기를 공급하기 위한 공기압축기 (air compressor)의 고장이 발생하여 1일간 반응기 내로 용존산소의 공급이 중단됨과 동시에 고정화 미생물의 유동이 발생하지 않아 발생한 현상이었다. 이후 공기압축기를 수리하여 공기를 공급함과 동시에 이전과 동일한 수준의 농도를 나타내었다. 이것으로 보아 고정화 미생물을 사용할 경우 24시간 정도 용존산소가 공급되지 않는 상태에서도 고정화 담체 내의 미생물이 크게 영향을 받지 않고 활성을 유지할 수 있는 것으로 생각된다. 또한 실험기간 전체에 걸쳐 고정화 담체의 성장변화는 발생하지 않았으며 이것으로 보아 PVA는 양어장 순환수와 같은 폐수처리에 대한 미생물 고정화 담체로 적합하다고 사료된다.

Fig. 5는 질산화 반응기인 RBC와 ABR에 공급되는 유입수

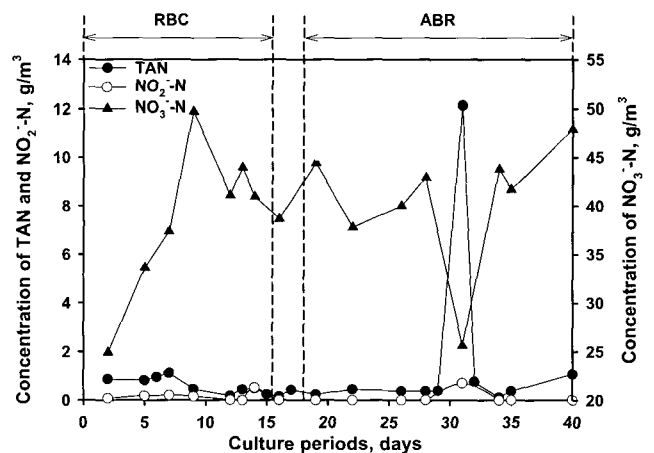


Fig. 4. The variation of concentrations of total ammonia nitrogen, nitrite nitrogen and nitrate nitrogen in rearing tank during the culture periods.

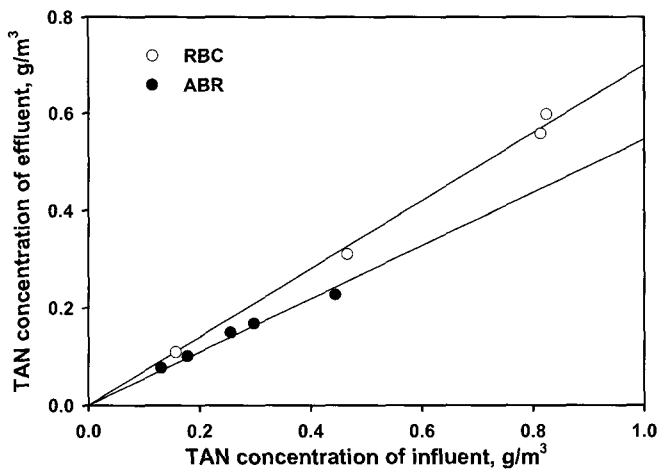


Fig. 5. The changes of influent TAN concentration on effluent concentration.

의 TAN 농도 변화에 따른 처리수의 농도 변화를 나타낸 것이다. 이때 나타난 직선의 기울기가 클수록 유입수 내의 농도에 비해 유출수 내의 농도가 더 높은 것으로 반응기의 처리효율이 더 낮은 것이다. 본 연구 결과 각 반응기가 나타낸 유입수 농도 변화에 따른 유출수 농도에 대한 직선의 기울기는 RBC가 0.7이었으며 ABR은 0.55였다. 이것으로 보아 RBC에 비해 ABR의 암모니아 제거능력이 더 뛰어난 것으로 나타났으며 ABR이 양어장 순환수 처리장치로서 적용성이 높은 것으로 나타났다.

아질산성 질소 농도의 변화는 암모니아성 질소와 유사한 경향으로 나타났다. 어류 사육 시작 후 3일째 0.2 g/m³까지 증가하기도 하였으나 그 이후부터는 거의 검출되지 않았다. ABR만을 운전하기 시작하면서 공기압축기가 고장난 31일째에만 0.7 g/m³ 정도의 농도를 나타낸 것을 제외하고는 사육조 내에서 아질산성 질소는 전혀 검출되지 않았다. 또한 공기가 공급되기 시작하면서부터 이전과 같은 수질을 바로 나타내어 ABR이 매우 안정적으로 운전됨을 알 수 있었다.

질산성 질소 농도는 어류 사육개시 후 7일이 경과함에 따라 직선적으로 증가하여 최고 49 g/m³까지 상승하였으며 이후 40 g/m³ 정도의 농도로서 유지되었다. 본 시스템은 질산성 질소를 제거할 수 있는 탈질 반응기를 별도로 설치하지 않은 시스템으로 암모니아성 질소의 산화로 발생된 질산성 질소는 시스템 내에 누적되어 증가하게 된다. 탈질 반응기가 없음에도 불구하고 7일 이후부터 질산성 질소가 일정한 농도로 유지되는 것은 질소 성분의 농도가 낮은 보충수의 공급에 의해 발생하는 희석 효과로서 시스템 내의 질산성 질소의 농도가 높아짐에 따라 희석에 의해 배출되는 질산성 질소의 양이 시스템에서 발생하는 질산성 질소의 양과 동일해져 질산성 질소가 일정한 농도로 유지되는 것이다. ABR이 운전되면서도 질산성 질소의 농도는 RBC를 운전할 때와 거의 동일한 수준으로 유지되었으나 공기압축기가 고장난 31일 경에는 25 g/m³

까지 감소되는 현상을 보였다. 이는 ABR로 공기가 공급되지 않아 반응기 내에 혐기적 조건이 형성되어 탈질현상이 발생되어 나타난 현상으로 생각된다. 그러나 질산화 미생물이 일시적으로 용존산소의 공급이 중단된다고 하여 탈질 미생물로 전환되지 않는다. 그러므로 이러한 탈질 현상은 고정화 미생물의 중심영역, 즉 내부 확산 저항에 의해 용존산소가 거의 전달되지 않는 혐기성 영역에 탈질 미생물이 분포해 있었다고 생각된다.

용존산소 농도 변화

용존산소는 어류의 성장에 직접적으로 영향을 미치는 인자로서 적절한 농도를 유지하는 것은 매우 중요하다. 본 사육시스템에서 용존산소의 공급은 기본적으로 순환수의 순환에 의한 자연적인 폭기와 펌프에 의해 이송되는 순환수 중 일부분을 사육조로 재순환시켜 수면과의 충돌에 의해 이루어지도록 하였다. 그러나 본 연구에서 이용한 RBC와 ABR은 질산화에 소모되는 용존산소를 자체적으로 공급, 이용함과 동시에 순환수의 용존산소를 증가시키는 역할도 수행한다. RBC 경우 원판 회전에 의해 대기중의 산소를 순환수에 용해시키며, ABR에서는 고정화 미생물을 유동시키기 위해 공급한 공기에 의해 용존산소가 증가된다.

본 실험에서 나타난 사육조 내 용존산소 농도를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 RBC를 사용한 경우에는 용존산소의 변화 범위가 크게 나타났으나 ABR을 사용한 경우에는 거의 일정한 용존산소 농도를 나타내었다. RBC를 사용할 경우 용존산소의 공급은 원판의 회전에 의해 이루어지므로 질산화에 필요한 산소는 대기로부터 직접 전달받으나 순환수의 용존산소를 증가시키는 것은 원판이 회전함에 따른 원판과 수면과의 충돌에 의해 이루어진다. 이 경우 온도, 습도 등과 같은 외부 조건에 의해 많은 영향을 받으며 특히 원판의 회전

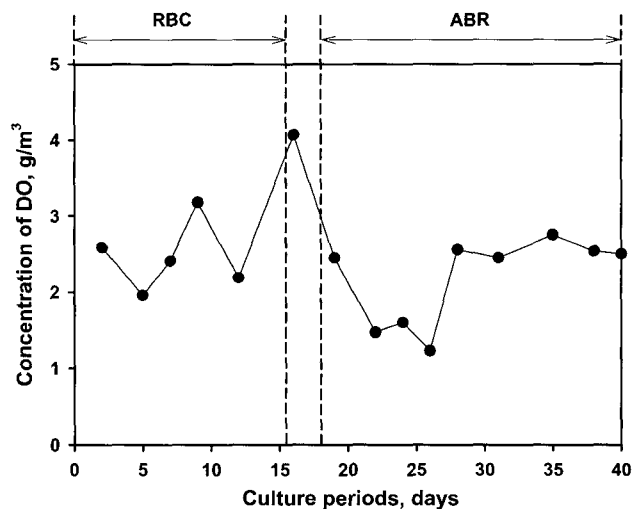


Fig. 6. The variation of DO concentrations in rearing tank during the culture periods.

속도에 크게 영향을 받게 되므로 이와 같은 조건에 의해 용존 산소가 균일하게 전달되기는 어렵다. 이에 비해 ABR의 경우에는 고정화 미생물의 유동을 위해 공기를 일정하게 주입하게 되므로 용존산소의 전달이 균일하게 이루어지는 것으로 생각된다.

Fig. 7에 RBC와 ABR에 공급되는 순환수 내의 용존산소 농도 변화에 따른 반응기 유출수 중의 용존산소 변화를 나타내었다. 그림에서 나타난 직선의 기울기가 클수록 유입수에 대한 유출수의 용존산소 전달량이 더 많은 것으로 본 연구의 결과 ABR이 RBC에 비해 용존산소 전달 능력이 더 뛰어난 것으로 나타났다. 이는 RBC의 경우 원판의 회전에 의존하여 용존산소가 전달되므로 용존산소 전달효율이 높지 못한 반면 ABR의 경우 공기가 외부로부터 강제적으로 일정하게 공급됨에 따른 현상으로 생각된다.

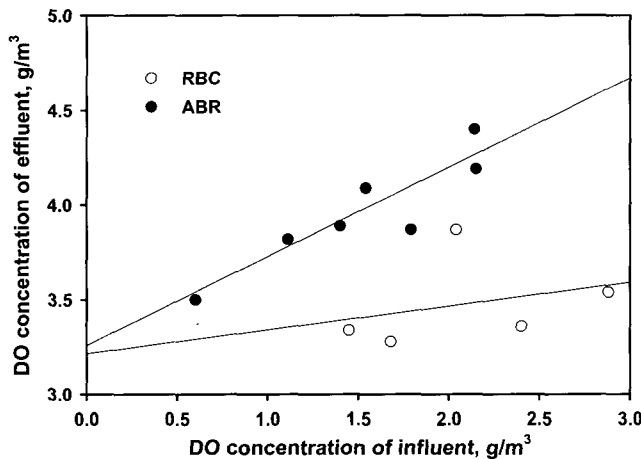


Fig. 7. The changes of influent DO concentration on effluent concentration.

유기물 농도 변화

순환 여과식 양어장에서 용존 유기물은 미섭취 사료에서 용출되거나 어분 중 어체 내에서 완전히 분해되지 않은 성분이 물 속에 용해되어 발생한다. 용존 유기물의 농도가 높을 경우 타가영양체 미생물의 생장을 촉진시키게 되어 질산화 효율을 저하시키거나 산소요구량을 증가시키는 원인이 된다. 유기물 농도의 지표로서 COD_{Cr} 를 측정하여 Fig. 8에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 RBC를 사용한 경우 COD_{Cr} 농도는 25-55 g/m^3 의 범위를 보였으며, ABR의 경우 5-35 g/m^3 의 범위를 나타내어 ABR의 유기물 제거능력이 RBC에 비해 더 높은 것으로 나타났다.

RBC의 경우 원판에 부착되는 미생물의 성상이 다양하므로 타가영양체 미생물이 질산화 미생물과 공존하여 분포하게 됨으로써 용존 유기물을 분해하게 된다. 그러나 시스템에서 발생하는 유기물의 농도가 높을 경우 질산화 미생물에 비해 상대적으로 증식속도가 빠른 유기물을 분해하는 타가영양체

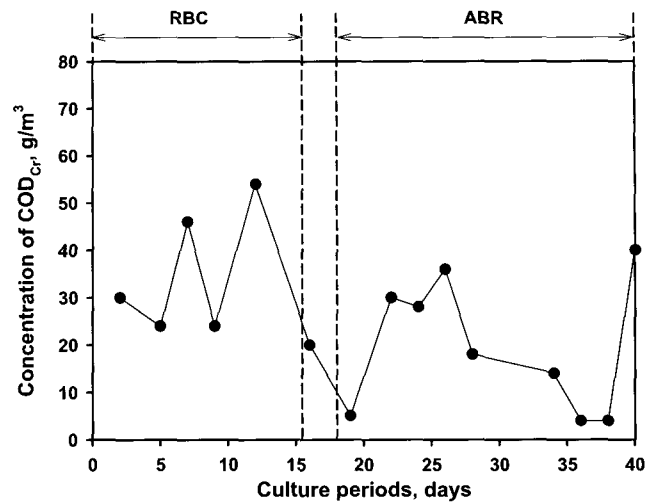


Fig. 8 The variation of COD concentrations in rearing tank during the culture periods.

미생물 분포가 증대하게 되어 질산화 효율이 급격히 저하되기도 한다. 반면 ABR의 경우 포괄 고정화된 질산화 미생물의 농도는 거의 변화가 발생하지 않으며 타가영양체 미생물은 고정화 담체 내에 질산화 미생물이 존재하지 않는 기공 내에서 증식하게 되므로 질산화 효율에는 크게 영향을 주지 않으면서도 효율적으로 유기물 제거를 수행할 수 있다.

본 연구에서 ABR이 RBC에 비해 유기물제거에 더 효율적인 것으로 나타난 것은 RBC의 경우 질산화 미생물이 원판의 표면에만 부착, 성장되나 ABR의 경우 고정화 미생물 내의 미세한 기공 내에 부착, 성장되므로 더 많은 미생물이 증식되었고 또한 RBC에 비해 반응기내 용존산소 농도가 더 높게 유지되어 미생물의 활성이 더 높게 유지되었기 때문으로 생각된다.

부유 고형물 농도 변화

부유성 고형물은 어체의 아가미를 손상시키고 질병에 대한 저항력을 약화시킬 수 있으며 (Wickins, 1980) biofilter를 막히게 할 수 있다 (Muir, 1982). 또한 고형물에 의해 발생하는 암모니아는 어류에 나쁜 영향 (Liao and Mayo 1974; Spotte, 1979)을 끼칠 수 있기 때문에 양식장 순환수 중의 고형물의 농도를 낮게 유지하는 것은 매우 중요하다고 하였다.

Fig. 9에 실험기간에 나타난 총부유물질의 농도 변화를 도시하였다. RBC를 사용한 실험기간에는 3-7 g/m^3 범위 농도 변화를 나타내었으며 ABR을 사용한 실험 기간에는 4-9 g/m^3 의 범위를 나타내어 전반적으로 ABR을 사용한 경우가 RBC를 사용한 경우에 비해 사육조의 고형물 농도가 조금 더 높은 것으로 나타났으나 어류의 성장에 영향을 미칠 정도의 범위는 아닌 것으로 나타났다.

본 시스템은 고형물의 제거는 침전조와 floating bead filter에 의해 수행되도록 되어있다. 그러므로 시스템에서 제거되는

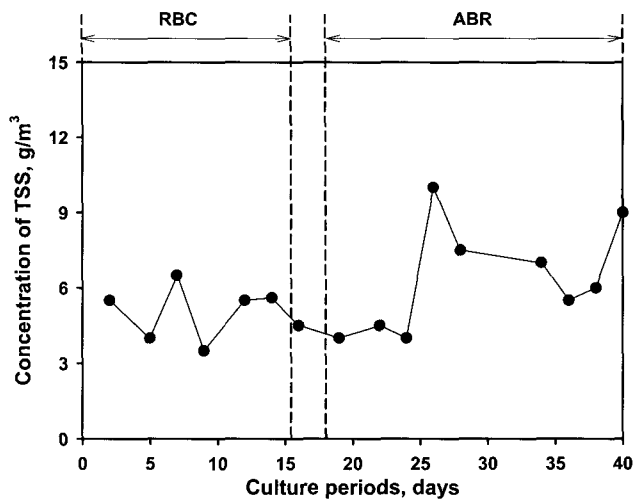


Fig.9. The variation of TSS concentrations in rearing tank during the culture periods.

고형물의 양은 질산화 반응기의 종류와 무관하게 일정하다고 볼 수 있다. ABR의 경우 반응기 내에 고형물이 침적되는 현상은 전혀 없었으나 RBC를 사용할 경우 반응기 하부에 고형물이 침적되는 현상을 보였다. 즉, RBC의 경우 침전조와 같은 역할을 수행하여 사육조의 고형물 부하를 줄이게 된 것으로 생각된다. 이런 현상은 ABR의 경우 반응기내의 순환 속도가 매우 빨라 고형물이 침적되지 않으나 RBC의 경우 반응기 내 유속이 빠르지 않으므로 유입되는 순환수 중에 포함된 고형물의 일부는 침전되는 현상이다. 그러나 질산화 반응기 내에 고형물이 많이 침적될 경우 고형물이 부패하게 되어 용존산소 요구량을 증가시키게 되고 병원성 미생물이 증가될 수도 있어 질산화 효율을 저하시킬 수 있으므로 질산화 반응기 내의 고형물 침적은 방지해야 한다.

알칼리도 및 수소이온 농도 변화

본 실험기간 동안 나타난 총 알칼리도와 pH의 변화를 Fig. 10에 도시하였다. 알칼리도는 용존산소와 함께 암모니아성 질소의 질산화 과정에서 가장 중요한 인자이다. 질산화에 관여하는 질화세균은 자가영양체로 유기탄소를 탄소원으로 이용할 수 없으므로 세포합성에 무기탄소원으로 알칼리도를 필요로 하고 질산화시 발생하는 수소이온에 의한 pH의 강하를 방지하는데도 이용된다 (Sharma and Ahler, 1977). 본 연구에서는 질산화에 필요한 알칼리도의 공급을 위해 매일 120g의 중탄산나트륨을 공급하였다. 그 결과 실험 전반에 걸쳐 7.5 정도의 pH를 유지할 수 있었다.

RBC를 사용한 어류 사육기간 동안 알칼리도는 실험 초기 22 g as CaCO₃/m³ 정도에서 질산화가 진행됨에 따라 15 g as CaCO₃/m³ 까지 감소하였으며 pH는 7.5 정도로 계속 유지되었으며, 시스템의 질산화 반응기를 ABR로 교체함에 알칼리도와 pH의 변화는 거의 없었다. 그러나 공기압축기의 작동이 중지된 31일 쯤의 경우 질산화 반응이 진행되지 않아 알칼리

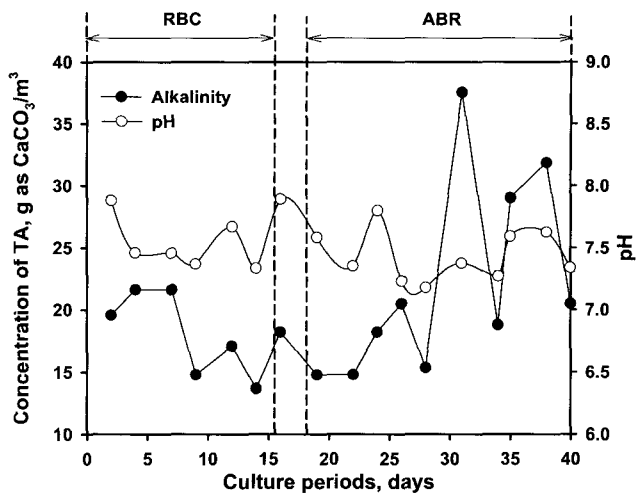


Fig. 10 The variations of total alkalinity concentrations and pH in rearing tank during the culture periods.

도는 급격히 증가하여 38 g as CaCO₃/m³ 까지 상승하였다. 전체적인 사육조 내 알칼리도 및 pH의 변화를 볼 때 ABR과 RBC 두 반응기의 차이점은 없는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

APHA, AWWA and WEF. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th Ed., EPS Group, pp. 4382.

Colt, J. and D.A. Armstrong. 1981. Nitrogen toxicity to crustacean, fish and mollusks. Bio-Engineering Symposium for Fish Culture. FCS Publ., 1, 34-47.

Hashimoto, S. and K. Furukawa. 1987. Immobilization of activated sludge by PVA-boric acid method. Biotech. Bioeng., 30, 52-59.

Jobling, H.H. 1994. Fish Bioenergetics. Chapman and Hall, London, pp. 120.

Kim, S.K., J.K. Seo, J.S. Lee, I.S. Kong and K.H. Suh. 1997. Removal of total ammonia-nitrogen (TAN) using immobilized nitrifier consortium J. Kor. Fish. Soc., 30(5), 816-822.

Liao, P.B. and R.D. Mayo. 1974. Intensified fish culture combine water reconditioning with pollution abatement. Aquaculture, 3, 61-85.

Libey, G.S. 1992. Maximum nitrification with rotating biological contactors (RBCs). In: Proceedings of the Workshop on Design of High Density Recirculating Aquaculture Systems. Louisiana State Univ. Baton Rouge, Louisiana, pp. 40-48.

Meade, J.W. 1985. Allowable ammonia for fish culture. Prog. Fish-Culturist, 47, 135-148.

Miller, G.E. and G.S. Libey. 1984. Evaluation of a

- trickling biofilter in a recirculating aquaculture system containing channel catfish. *Aquacult. Eng.*, 3, 39-57.
- Muir, J.F. 1982. Recirculated system in aquaculture. In: *Recent Advances in Aquaculture*, Vol. 1. Croom Helm and Westview Press, London, pp. 253-268.
- Sharma B. and R.C. Ahlert. 1977. Nitrification and nitrogen removal. *Water Res.*, 11, 897-925.
- Speece, R.E. 1973. Trout metabolism characteristics and the rational design of nitrification facilities for water reuse in hatcheries. *Trans. Ame. Fish. Soc.*, 102, 323-334.
- Suh, K.H., Y.H. Kim and B.J. Kim. 1999. Nitrifier consortium immobilized bioreactor for $\text{NH}_3\text{-N}$ removal in synthetic aquaculture water. *HWAHAK KONGHAK*, 37(3), 487-493. (in Korean)
- Wickins, J.F. 1980. Water quality requirements for intensive aquaculture. In: *A Review, Symposium on New Developments in the Utilization of Heated Effluents and Recirculation Systems or Intensive Aquaculture*. EIFAC, 11th Session, Stavanger, Norway, pp. 245-252.

2003년 9월 9일 접수
2003년 12월 10일 수리