

# 해수 순환여과 양식 연구 현황



손맹현 박사  
국립수산과학원 증식과  
TEL)033-661-8514  
E-mail) sonmh@nfrda.re.kr

## 1. 서언

우리나라 해산어류 양식은 1980년대 초반까지 자연산 방어 치어를 채포하여 남해안의 해상가두리에서 양식하였지만, 1980년대 후반 들어 넙치, 조피볼락, 참돔 등의 인공종묘생산 기술 개발로 양식용 종묘 수급이 원활해지면서 육상수조식과 해상가두리 및 축제식 양식 방법에 의해 우리나라 전연안의 양식산업은 급속한 발전을 가져왔다. 2001년도 전국 어류양식을 위한 육상수조식은 779건 166ha, 축제식은 252건 1,348ha, 해상가두리식은 465건 1,282ha으로 이 중 육상수조식 방법에 의해 넙치 양식의 경우 2000년대 들어와 연간 생산량이 약 4만톤에 이르게 되었다.

육상 수조식 양식을 하려면 사육어에 신선한 해수를 지속적으로 양수하여 공급해야 한다. 그렇지만 최근 육지로부터 오폐수 유입, 선박의 충돌 등으로 인한 유류 유출 및 잦은 적조 발생 등으로 인해 사육에 필요한 양질의 해수를 확보하는 데에 어려움이 많다. 따라서 이에 대한 대처 방안으로 최근 들어 각광을 받고 있는 순환여과 사육방법의 도입이 필요한데, 이러한 순환여과 양식은 최소의 용수를 이용하여 어류를 고밀도로

사육할 수 있어 생산력을 증대시킬 수 있고 오염 물질 처리후 배출하기 때문에 오염 배출수에 의한 수질오염 문제로 야기되는 각종 환경적 규제를 적절히 해결할 수 있는 환경 친화적 양식이다. 따라서 육상에서 환경친화적 양식인 순환여과식 양식에 관한 연구가 많이 진행되고 있다 (Chen et al., 1993; van Riin, 1996; Blancheton et al., 1997; Schuster and Stelz, 1998; Blancheton, 2000).

순환여과 사육시스템에 의한 어류 양식은 유수식 수조시스템과 같은 개방 양식과는 달리 단위 용적당 양식 어류의 사육 밀도를 높임에 따라, 이들 생물에 의해 배설되어 축적되는 대사 노폐물은 효과적으로 여과 장치에 의해 처리되지 않으면 사육 수조내 수질의 악화를 초래해서 질병이 발생하게 되며, 이로 인해 사육어는 성장 지연 또는 대량 폐사 등으로 이어질 수 있다(Roger and Klementon, 1985). 순환여과 양식시스템에서는 사육 생물에 의해 배설된 암모니아를 질산성 질소로 처리하기 위해 생물학적 여과조를 갖추어야 한다. 주로 이용되는 생물 여과 방법에는 유동층 모래여과조, 살수식 여과조, 회전원판식 여과조 및 부류식 비드 여과조 등이 있다(van Rijn,

1996; Skjolstrup et al., 1997; Lekang, O.I., 2000). 질산화 과정에 의해 사육수 중에 축적된 질산성 질소도 고농도에서는 양식 어류에게 독성을 나타내게 된다(Bonn et al., 1976; Wheaton, 1977). 그러므로 질산화 작용에 의해 축적되는 질산성 질소와 같은 무기 영양소는 사육수로부터 제거하여야 한다. 이를 위해 담수 순환 여과시스템에서는 개구리밥과 같은 식물을 이용해 제거할 수 있으나(Harvey and Fox, 1973), 해수순환 여과시스템에서는 탈질 장치(Honda et al., 1993)나 일정량의 새로운 해수 첨가함으로써 질산성 질소의 농도를 낮출 수 있다.

순환여과 사육시스템을 이용한 어류 양식은 유수식 및 가두리 양식시스템과 비교하여 막대한 시설 투자뿐만 아니라 고도의 시스템 운영 기술과 비용이 필요하므로 경제성 타당성을 고려하여 양식 생산성의 극대화를 도모하기 위한 집약적 생산 체계의 확립이 필요하다.

## 2. 해수 순환여과 양식

국내에서 실용화되어 있는 담수 순환여과양식은 IBK식 순환여과 시스템이 확립되어 있으며 열대어인 틸라피아를 대상으로 상업적으로 행해지고 있다. 해외에서는 미국의 플로리다주에서 해산어류의 종묘생산과 어미새우의 성숙을 위한 순환여과 시스템이 개발 중에 있다. 우리나라에서 반폐쇄식 해수 순환여과 사육시스템의 산업적 적용 예로는 광물미립자와 포말분리장치를 이용한 순환여과 어류양식 셋을 이용한 넙치 양식을 들 수 있다(민병서, 2002). 또한 유동층 공법 질산화조를 첨가에 의한 순환여과식 양식장에서 넙치 양식에 관한 연구를 수행하였다(이병현, 2002).

다음은 국립수산과학원에 해산어류의 순환여과 양식을 위한 생물학적 여과 시스템별 여과 능력에 관한 연구 결과를 종합하여 정리한 것이다.

### 가. 침지식 여과 시스템

해수 순환여과양식에 관한 연구로는 전 등(1997)이 해산어류의 순환여과 사육시설의 설계 기준을 설정하기 위하여 침지식 여과조에 이용될 수 있는 여과 재료들의 여과 능력에 대한 정량적인 비교를 위해 단일의 사육조에 5종류의 침지식 여과조와 1개의 회전원식 여과조를 설치하여(그림 1) 사육수의 암모니아 부하량 변화에 따른 여과재료별(표 1)로 암모니아 제거 능력과 산소 소모량을 조사함으로써 여과재료별 여과 능력을 비교 검토하였다.

실험 기간 중 사육조의 암모니아 농도는 0.052~0.904(평균 0.338±0.219)mg/L 였고 수온은 19.2~21.4(평균 20.2±0.58)°C의 범위였으며 사육수의 암모니아 농도(x: mg/L)에 대한 여과재료별 단위 용적당 일간 암모니아 제거량(y: g/m<sup>3</sup>/day)의 1/2-order kinetic 식과 1일 평균 암모니아 제거량(g/m<sup>3</sup>/day)은 표 2와 같았으며, 사육수의 용존산소 농도 3.8~7.5(평균 5.7±0.98) mg/L에서의 여과 재료 단위 용적(m<sup>3</sup>) 당 1일 산소 소비량은 모래, 산호사, 폴리에틸렌 망을 이용한 여과조에서 각각 442.1, 291.1, 및 236.9 g/m<sup>3</sup>/day 로 모래 여과조의 산소 소비량이 가장 많았으며, 자갈과 플라스틱 파관은 각각 135.6 및 134.2 g/m<sup>3</sup>/day 로 가장 적었다. 한편 회전원판 여과조는 구조적 특성으로 사육수에 비해 산소농도가 오히려 증가함을 알 수 있었다.

침지식 여과조에서 설계 기준의 하나인 적정 여과조 깊이를 산정하기 위하여, 포기(aerated)

## 기획특집

표 1. 여과재료별 크기, 표면적, 용적 및 유수량

여과재료	크기	표면적(m <sup>2</sup> )	용적(m <sup>3</sup> )	유수량(L/hr)
모래	직경 2~3 mm	278	0.086	902.6
자갈	직경 3~5 mm	44	0.074	907.2
산호사	직경 2~4 mm	29	0.067	890.4
폴리에틸렌 망	38 × 78 cm	21	0.092	902.4
플라스틱 파판	31 × 67 cm	11	0.071	902.4
회전원판	직경 33 cm	6	0.061	1017.6

표 2. 여과재료별 사육수의 암모니아 농도와 암모니아 제거량과의 상관관계

여과재료	½ - order kinetic 식	암모니아 제거량 (g/m <sup>3</sup> /day)
모래	$Y = 135.5X^{0.5} - 25.1$ ( $r^2 = 0.8110$ )	45.1
자갈	$Y = 43.7X^{0.5} - 5.5$ ( $r^2 = 0.2596$ )	17.1
산호사	$Y = 125.1X^{0.5} - 33.0$ ( $r^2 = 0.7307$ )	31.8
폴리에틸렌 망	$Y = 87.4X^{0.5} - 20.1$ ( $r^2 = 0.6780$ )	25.2
플라스틱 파판	$Y = 71.1X^{0.5} - 17.6$ ( $r^2 = 0.5206$ )	19.2
회전원판	$Y = 127.6X^{0.5} - 33.4$ ( $r^2 = 0.7146$ )	32.8

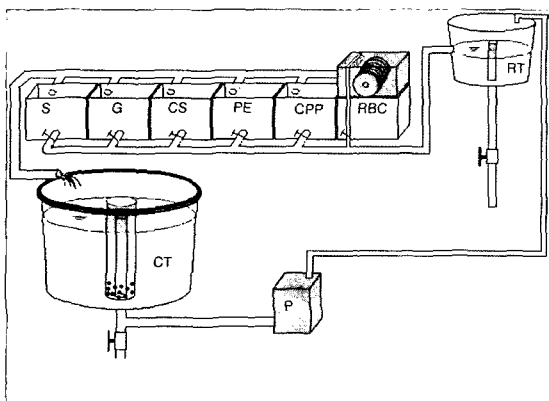


그림 1. 여과재료별 암모니아 제거 효율 실험을 위한 순환여과 시스템의 모식도

(S: 모래, G: 자갈, CS: 산호사, PE: 폴리에틸렌 망, CPP: 플라스틱 파판, RBC: 회전원판, RT: 사육수조, ST: 저수조, PM: 양수펌프)

및 비포기(unacrated) 조건 하에서 모래, 산호사 및 바이오팩 여과 재료를 이용하여 수리학적 부하량을 동일하게 조절한 후 여과조 깊이에 따른 암모니아와 아질산염 제거율 및 용존산소 소모율을 조사한 결과는 다음과 같았다(손과 전, 1999).

포기시 모래 및 산호사 여과조의 평균 암모니아 제거율은 56.9% 및 67.7%로 80cm 깊이까지는 각 여과 두께별로 유의적인 차이를 나타내었으나( $P < 0.05$ ), 80cm 깊이와 100cm 깊이의 암모니아 제거율은 유의적인 차이가 없었다. 모래 및 산호사를 이용한 여과조는 60cm 깊이까지 전체 제거량의 88.6% 및 91.4%였으며 60cm 깊이까지 제거가 거의 이루어졌다.

비포기시 모래 및 산호사 여과조의 평균 암모니아 제거율은 26.1% 및 50.6%였으며 모래 여과조의 경우 20cm와 40cm 여과 깊이에서는 유의적인 차이를 나타내었으나( $P < 0.05$ ), 40cm 이상의 여과 깊이에서는 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 모래 여과조의 경우는 40cm 깊이까지 전체 제거량의 80.5%, 산호사 여과조의 경우는 80cm 깊이까지 전체 제거량의 92.9%였다.

바이오팩 여과조의 경우는 포기 및 비포기시 모두 제거량이 극히 낮았으며, 깊이에 따른 여과율의 차이는 보이지 않았다.

포기시 및 비포기시 모래 및 산호사 여과 재료의 여과 능력을 비교하면 포기시는 비포기시에 비해 각각 2.18배 및 1.34배 우수하였고, 여과 재료별로 여과 능력을 비교하면 포기시 및 비포기에 있어서 산호사 여과재는 모래 여과재에 비해 1.19배 및 1.94배 우수하였다. 그러나 바이오팩 여과재는 재료의 특성상 모래 및 산호사 여과재에 비해 여과율이 극히 저조함이 밝혀졌다.

### 나. 회전원판식 여과 시스템

새로운 여과조를 시설한 후 여과기능이 발휘하는 시기를 조사하기 위하여 회전원판 여과 시스템을 제작하였다. 실험용 회전원판 여과 장치는 60cm의 축에 직경 32cm인 원판(재질: 폴리비닐 필름)을 각각 2.5cm 간격으로 끼우고 그 사이에 Z형으로 접은 중간재를 채워 물레방아 형태로 만들었다. 원판의 작동은 사육수를 위에서 원판에 살수하여 동작시키고, 아래에서는 원판 밑에 설치한 폭기 배관에서 공기를 불어 넣음으로써 원판이 회전되도록 하였다. 회전원판 1조의 여과 표면적은 12m<sup>2</sup>였고 여과조의 용적은 0.048m<sup>3</sup>(총여과조 용적: 0.075m<sup>3</sup>)였다. 본 실험 장치는 6개의 여

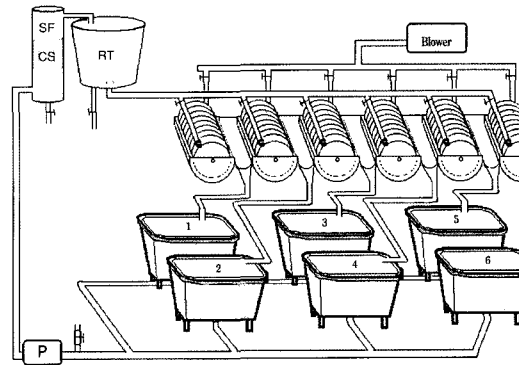


그림 2. 회전원판 여과 사육시스템의 모식도.  
(CT: 사육수조, P: 양수펌프, RT: 저수조, RBC: 회전원판, SF: 침전조, CS: 산호사)

과조와 1m<sup>3</sup> 용량의 FRP 원형사육조 1개 및 150L 용량의 저수조 1개로 구성되어 있다(그림 2).

수온 17.2 ~ 25°C에서 사육수의 암모니아의 감소는 1주, 아질산 감소는 2~3주, 질산의 축적은 4주 후에 시작되었다. 신설여과조의 작동후 6주째에 실험어는 사료를 활발하게 섭취하기 시작하였으며, 이 때 사육수의 암모니아 및 아질산 농도는 0.1mg/L 이하로 유지되었고, 질산화 작용이 원활히 행하여졌다(손과 전, 2001).

회전원판 여과 시스템에서 암모니아 제거율에 미치는 수리학적 부하율 및 회전수에 따른 조사하였다. 사육수의 암모니아 0.029 ~ 0.528mg/l 농도에서 수리학적 부하량별로 암모니아 제거량에 대한 암모니아 부하량의 영향을 1차식으로 나타내면 다음과 같다.

수리학적 부하량

$$14.8\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day} : y = 39.2x + 3.4 (r^2 = 0.9137)$$

수리학적 부하량

$$26.5\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day} : y = 53.3x + 4.0 (r^2 = 0.8686)$$

수리학적 부하량

$$37.3\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day} : y = 58.4x + 4.2 (r^2 = 0.7755)$$

사육수의 암모니아 농도 2.72mg/l 이하에서 원판의 회전속도별로 암모니아 부하량과 암모니아 제거량을 1차식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{회전속도 } 0.75\text{rpm} : y = 28.5x + 4.7 (r^2 = 0.9143)$$

$$\text{회전속도 } 1.0\text{rpm} : y = 33.6x + 8.4 (r^2 = 0.9534)$$

$$\text{회전속도 } 2.0\text{rpm} : y = 28.9x + 3.6 (r^2 = 0.9488)$$

여기서 x는 암모니아 부하량 (mg/l), y는 암모니아 제거량 (g/m<sup>3</sup>/day)이다.

회전원판 여과시스템에서 적정 수리학적 부하량과 회전속도는 각각 26.5m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/day 및 1.0rpm이었다(Son et al., 1999).

회전원판식 순환여과 사육시스템에서 조피볼락, *Sebastes schlegeli*을 대상으로 사료중의 적정 단백질 함량을 구명하기 위하여 조피볼락 사료의 단백질 함량을 달리하여 사육수의 수질 변화와 실험어의 성장을 조사하였다.

사료공급 후 경과시간에 따른 일간 사육수의 암모니아 농도 변화를 4시간 간격으로 조사한 결과, 단백질 45%와 55% 실험구는 8시간에 최고값을 나타낸 다음 서서히 낮아져 24시간 후에는 사료 공급 이전의 농도로 회복하였다. 단백질 함량이 낮은 35% 실험구의 경우 4시간에 최고값을 나타낸 다음 16시간 경과 후에 사료 공급 이전의 값으로 회복하였다. 아질산 농도 역시 암모니아 농도와 유사한 경향을 나타내었다.

단백질 함량별로 여과조에서의 일간 암모니아 제거량은 단백질 35%, 45%, 55% 실험구에서 각각 5.5, 9.8, 16.8g/m<sup>3</sup>로 단백질 함량이 높을수록 많았다.

순환여과 사육시스템에서 사료의 단백질 함량별 조피볼락의 성장을 비교한 결과, 단백질 35% 사육실험구의 일간성장률과 사료효율은 각각 1.19%와 61.8%로 단백질 45% 및 55% 사육실험

구의 1.73%와 80.2% 및 1.82%와 84.7%에 비해 유의성 있게 낮았다. 따라서 순환여과 사육시스템에서 사육 수질을 고려한 조피볼락 사료의 적정 단백질 함량은 40%로 추정되었다(손 등, 2002).

#### 다. 유동층 여과 시스템

순환여과 사육시스템에 있어서 최근 여과효율이 우수하다고 알려진 유동층 여과조의 최적 여과조건을 조사하였다.

유동층 여과조의 암모니아 제거 능력 조사를 위한 유동층 여과 시스템은 직경 8.3cm, 높이 200cm의 이상 유동층 여과조에 여과메디아로서 직경 0.5±0.1mm의 모래와 제올라이트 5.4 l를 채웠다(그림 3). 사육조는 직경 1m, 높이 65cm의 FRP 원형 수조를 이용하였고 수용적은 500 l로 조절하였다. 유동층 여과조의 최적 여과조건을 구명하기 위하여 암모니아 부하량(2, 5mg/l) 변화에 따른 여과조의 숙성 기간중 수질변화를 조사하였고, 또한 암모니아 부하량별(2, 5mg/l)로 수온(15, 25°C)과 유동비율(50, 100%)에 따른 암모니아 제거능력을 조사하였다.

수온에 따른 유동층 여과조의 경과시간에 의한 암모니아 제거량을 조사한 결과, 암모니아 2mg/l 부하 후 실험시작 3시간째 암모니아 제거량은 수온 15°C와 수온 25°C에서 각각 17.0과 37.2 mg/hr로 고수온에서 약 2.2배 높았으나, 24시간째 암모니아 제거량은 수온 15°C와 수온 25°C에서 각각 12.7과 13.2mg/hr로 차이가 거의 없었다. 암모니아 5mg/l 부하 후 실험시작 3시간째 암모니아 제거량은 수온 20°C와 수온 25°C에서 각각 18.0과 41.9mg/hr로 고수온에서 약 2.3배, 96시간째 암모니아 제거량은 8.3과 8.3mg/hr로 차이가 없었다.



그림 3. 유동층 순환 여과 사육시스템 설치 사진

유동 비율에 따른 유동층 여과조의 경과시간에 의한 암모니아 제거량을 조사한 결과, 암모니아 2mg/l 부하 후 실험시작 4시간째 암모니아 제거량은 50%와 100%의 유동비율에서 각각 21.1과 35.4mg/hr로 100% 유동비율에서 약 1.7배 높았으나, 20시간째 암모니아 제거량은 50%와 100%의 유동비율에서 각각 11.2과 13.8mg/hr로 큰 차이가 없었다. 암모니아 5mg/l 부하 후 실험시작 4시간째 암모니아 제거량은 50%와 100% 유동비율에서 각각 8.4와 17.9mg/hr로 100% 유동비율에서 2.1배 높았으나, 20시간째 암모니아 제거량은 50%와 100% 유동비율에서 각각 14.2와 21.3mg/hr로 1.5배 높아 유동비율이 높은 실험구가 낮은 실험구에 비해 암모니아 제거율이 높았다.

유수식 사육시스템과 유동층 순환여과 사육시스템에서 넙치의 성장을 비교한 결과는 다음과 같았다. 유수식 및 유동층 사육시스템의 사육수온이  $24.6 \pm 0.84^{\circ}\text{C}$ 와  $26.0 \pm 0.85^{\circ}\text{C}$ 로 유지되고 사육수의 암모니아 농도가  $1.35 \pm 1.10\text{mg/L}$ 와  $0.11 \pm 0.06$ 으로 유지될 때 유동층 순환여과 사육시스템의 넙치 성장률과 사료효율은 유수식 시스템에 비해 성장률이 유의적으로 높았다.

## 라. 향후 연구방향

우리나라는 양식에 불리한 해양환경조건, 높은 인건비와 자연 환경 보존에 관한 법률 등으로 더 고전적인 사유시스템으로 양식생산성의 향상을 지속하기에는 어려움이 많다. 그러므로 불리한 해양환경을 능동적으로 극복하고 경제적인 양식방법이 필요하다. 따라서 사육용수를 최소로 이용하고 자연으로 배출되는 오수의 양을 극소화하고, 양식시설을 최대한 효율적으로 이용하며, 자동화 시설로 양식생물의 관리가 용이하게 이루어질 수 있는 환경친화적인 해산어의 전천후 육상 양식을 위한 순환여과 시스템의 실용화 모델 개발 및 개발된 사육 시스템을 이용한 고부가 가치 양식 품종의 사육기술개발을 통한 생산성 향상을 어업인 소득 증대를 위한 연구 개발에 학계, 연구소 및 산업체 공동으로 노력해 나가야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- Blancheton, J.P., 2000. Developments in recirculation systems for Mediterranean fish species. *Aquacultural Engineering* 22, 17~31.
- Blancheton, J.P., D. Coves, and G. Lemarie, 1997. *Intensive Land Based Marine Fish Aquaculture in Closed System, Hatchery and Ongrowing Units: State of the Art and Prospects*. *Suisanzoshoku*. 45, 143~149.
- Bonn, E.W., W.M. Bailey, J.D. Bayless, K.E. Erickson and R.E. Stevens, 1976. *Guidelines for Striped Bass Culture*. Striped Bass Committee, Southern Division, American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 69pp.
- Chen, S., M.B. Timmons, D.J. Aneshansley, and

- J.J. Bisogni, 1993. Suspended solids characteristics from recirculating aquaculture systems and design implications. *Aquaculture* 112, 143~155.
- Harvey, R.M. and J.L. Fox, 1973. Nutrient removal using *Lemna minor*, *Journal of the Water Pollution Control Federation* 45(9), 1928~1938.
- Honda, H., Y. Watanabe, K. Kikuchi, N. Iwata, S. Takeda, H. Uemoto, T. Furuta and M. Kiyono, 1993. High density rearing of Japanese Flounder, *Paralichthys olivaceus* with a closed seawater recirculation system equipped with a denitrification unit. *Suisanzoshoku* 41(1), 19~26.
- Lekang, O. I. and H. Kleppe, 2000. Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media. *Aquacultural Engineering* 21, 181~199.
- Roger, G. L. and S, L. Klementon, 1985. Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilters. *Aquaculture Engineering* 4, 135~154.
- Schuster, C. and H. Stelz, 1998. Reduction in the make-up water in semi-closed recirculating aquaculture systems. *Aquaculture Engineering* 17, 167~174.
- Skjolstrup, J., P. H. Nielsen, J. O. Frier and E. Mclean, 1997. Biofilters in recirculating aquaculture systems state of the art. *Scand. Assoc. Agric. Sci. Semin.* 258, 33~42.
- Son M.H., I.G. Jeon, J.Y. Jo, and H.Y. Lee, 1999. Performance of rotating biological contactor (RBC) under different hydraulic loading rates and rotational speeds on ammonia removal in a recirculating system. *J. Fish. Sci. Tech.* 2(1), 52~57.
- van Rijn, J., 1996. "The Potential for Integrated Biological Treatment Systems in Recirculating Fish Culture A Reiview". *Aquaculture* 139, 181~201.
- Wheaton, F.W., 1977. *Aquacultural Engineering*. John Wiley and Sons, New York. 708pp.
- 민병서, 2002. 광물미립자와 포말분리장치를 이용한 순환여과어류양식 개발. 해양수산부. 40pp.
- 손맹현·전임기, 1999. 침지식 여과조의 적정 여과 깊이. *수진연구보고* 55, 41~49.
- 손맹현·전임기, 2001. 회전원판식 여과사육 시스템의 숙성시기. *수진연구보고* 60, 32~37.
- 손맹현·전임기·조기체, 2002. 순환여과 사육시스템에서 조피볼락 사육을 위한 사료의 적정 단백질 함량과 사육 수질. *수산과학원연구보고* 61, 70~76.
- 이병현, 2002. 유동층 공법 질산화조 첨가에 의한 순환여과식 양식장의 효율 개선. 해양수산부. 196pp.
- 전임기·손맹현·조재윤·이종문, 1997. 해수 순환 여과 양식 시설의 여과 재료별 암모니아 제거 능력. *한국양식학회* 10(3), 261~271.