

# 연안해수와 지하해수를 사용하는 제주 넙치 양식장의 수질과 미생물 변동

김유희\*

강원도립대학교 스마트해양양식과 연구원

## Investigation of water qualities and microbials on the flow-through olive flounder, *Paralichthys olivaceus* farms using coastal seawater and underground seawater in Jeju

Youhee Kim\*

Researcher, Department of Smart Aquaculture, Gangwon State University, Gangneung 25425, Korea

This study assessed the levels of water qualities and microbials contamination of inland olive flounder farms in Jeju in the summers from 2015 to 2017. Three farms (A-C) located in a concentrated area using mixing coastal seawater and underground seawater and one farm (D) located in an independent area using only coastal seawater were selected. Total ammonia nitrogen (TAN) reached a maximum of  $0.898 \pm 1.024$  mg/L as N in the coastal seawater of A-C, which was close to the limit of the water quality management goal of the fish farm. TAN in the influent from A-C was up to three times higher than that of D, so that the discharged water did not spread to a wide range area along the coast and continued to affect the influent. TAN of the effluent in A-C increased by 2.7-4.6 times compared to the influent, resulting in serious self-pollution in the flounder farm. Heterotrophic marine bacteria in the influent of A-C was about 600 times higher than D, and the discharge of A-C was increased by about 30 times compared to the influent.

Keywords: Flounder, Water quality, Microbials, Coastal seawater, Underground seawater

### 서론

양식산업의 지속 가능한 발전을 위하여 양식장 배출 수 관리에 대한 중요성은 점차 커지고 있으나 양식장 밀집지역 연안의 수질 오염은 점차 가속화되고 있다. 해산어류의 육상수조식에서 주로 이용되는 유수식 양식 방법의 특성상 연안 수질환경 악화는 양식장 사육 환경

악화로 이어져 많은 양식장들은 어려움을 겪고 있다. 제주지역의 육상 넙치 양식장은 지하해수를 개발하여 사용할 수 있는 지역을 따라 주로 집중적으로 분포되어 있으며 특히, 남제주군, 북제주군 서귀포시, 제주시에 많이 위치하고 있으며, 이 지역 넙치 생산량은 전체의 약 60%를 차지하고 있다(Kang et al., 2015a). 제주도

\*Corresponding author: aquaengl@naver.com, Tel: +82-33-660-8221, Fax: +82-33-660-8225

남부 지역 양식장은 양식용수로 연안해수와 지하해수를 함께 이용하고 있는데, 이는 하절기의 고수온과 오염된 연안해수 문제를 적은 비용만으로 일정수준 이상의 수질을 보장할 수 있었기 때문이다. 그러나 생활 오폐수, 축산폐수, 화학비료 등으로 유발된 오염은 시기별로 다소 차이는 있으나 양식수원인 지하해수나 연안해수의 오염 증가에 영향을 미치고 있다(Oh et al., 2006; Roh et al., 2018). 따라서 장기적인 면에서는 양식장 배출수의 처리 또는 재사용 등을 통해서 연안의 오염부하를 줄이고, 양식장 사육수의 재사용시 문제가 되는 양식생물 질병 감염원의 관리와 통제가 필요하다. 지속가능한 양식을 위해서도 양식용수로 사용하는 연안해수나 지하해수를 통해 양식장 시설내로 유입되는 병원성 생물, 즉 바이러스, 세균 및 기생충 등의 시설내 유입을 차단하는 UV 등과 오존 살균 시설과 같은 생물보안(biosecurity system) 사육 시스템의 운용이 필요하다. 대표적인 친환경양식시스템인 순환여과식사육시설에서 안정적인 양식생물의 생산과 질병으로 인한 피해를 줄이기 위해 수처리 시설 외에 생물보안 시스템 도입을 시도하고 있다(Tanaka and Matsumura, 2002; Tango and Gangon, 2003; Schroeder et al., 2015; Park et al., 2018; Jung et al., 2021). 외부에서 유입하는 병원체를 엄격히 차단할 수 있으며, 질병 발생을 감소로 식품안전의 위해요소가 될 수 있는 항생제, 백신, 포르말린 등의 여러가지 화학약품 사용을 줄여 식품안전성을 확보된 양식생물 생산을 소비자들에게 공급할 수 있다. 또한 양식장 운영의 많은 부분을 차지하는 질병예방 비용의 감소로 생산원가 절감하게 되고 안정적인 양식장 운영이 가능할 수 있다. 따라서 넙치 생산시설이 밀집되어 있는 제주도에 적합한 생물안전시스템의 규모와 운영 방식을 정하기 위한 사전 연구로 질병발생 비율이 높은 고수온기인 하절기(2015~2017년)를 중심으로 육상 수조식 넙치 양식용수 오염 실태를 파악하고자 양식장에 유입되는 연안해수와 지하해수 그리고 양식장 배출수를 대상으로 수질 및 미생물의 오염도를 비교 검토하였다.

## 재료 및 방법

### 실험구 선정 및 채수시기

하절기 오염 실태를 파악하고자 제주특별자치도에 위치한 넙치 양식장 중 양식장이 밀집된 양식단지에 위치

하고 양식용수로 연안해수와 지하해수를 50:50 비율로 섞어 사용하는 양식장 3 개소(A, B, C, 서귀포시 남원읍 태흥리의 반경 6 km 이내에 위치)과 상대적으로 독립된 지역에 위치하면서 연안해수만을 양식용수로 사용하는 양식장 1개소(D, 제주시 구좌읍 하도리 지역)를 선정하여 비교하였다(Fig. 1). D 양식장은 육지 연안의 육상수조식 넙치양식장의 양식용수는 주로 연안 해수만을 이용하고 있어 이를 기준으로 선정하였다.

양식장으로 유입되는 연안해수와 지하해수 그리고 양식장 배출수를 채수하여 수질과 미생물 변화를 조사하였다. 채수는 2015년부터 2017년까지 매년 하절기(8월말~9월초의 고수온기)에 조사 양식장을 대상으로 채수하여 실시하였다.

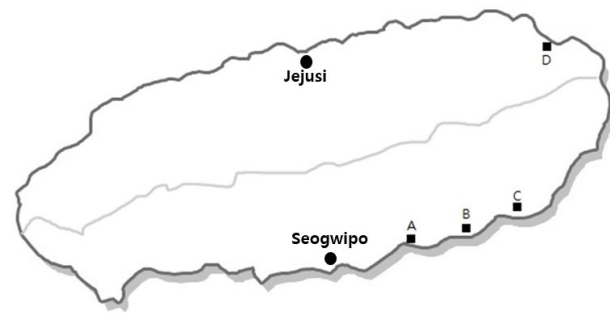


Fig. 1. Location of experimental flounder farms in Jeju.

### 대상 넙치 양식장의 사육 시설 및 사육환경

조사 대상 양식장의 사육 시설 환경은 Table 1에 나타내었다.

A 양식장은 총 수면적이 10,314 m<sup>2</sup>으로 11.5 m×11.5 m 크기의 사육수조 78개를 보유하고 있었고, 사육밀도는 22.7 kg/m<sup>2</sup> 정도로 비교적 높은 밀도로 운영하고 있었다. 그리고 양식용수는 연안해수와 지하해수를 혼합하여 사용하였다. B 양식장은 총 수면적이 7,800 m<sup>2</sup>으로 10 m×10 m 크기의 사육수조 78개를 보유하고 있었고, 사육밀도는 6.0 kg/m<sup>2</sup> 수준으로 매우 낮았으며, 양식용수는 연안해수와 지하해수를 혼합하여 사용하였다. C 양식장은 총 수면적이 4,917 m<sup>2</sup>으로 7 m×7 m 크기의 사육수조 21개와 8 m×9 m 크기의 사육수조 54개를 보유하고 있었다. 사육밀도는 14.2 kg/m<sup>2</sup>를 유지하고 양식용수는 연안해수와 지하해수를 혼합하여 사용하였다. D 양식장은 총 수면적이 2,678 m<sup>2</sup>으로 8 m×8 m 크기의 사육수조 12개와 15 m×20 m 크기의 사육수조 8개를

Table 1. The operating conditions of each fish farm for this survey in Jeju

Fish farm	Total water area (m <sup>2</sup> )	Tank size (no. of tank)	Culture density (Kg/m <sup>2</sup> )	Circulating rate of water (cycle/day)	Available depth (m)	Ratio of seawater to ground seawater	Diet*
A	10,314	11.5 m × 11.5 m (78)	22.7	30	0.6	50:50	MP & EP
B	7,800	10 m × 10 m (78)	6.0	30	0.6	50:50	MP
C	4,917	7 m × 7 m (21), 8 m × 9 m (54)	14.2	30	0.6	50:50	MP
D	2,678	8 m × 8 m (12), 15 m × 20 m (8)	16.2	18	0.6	100:0	MP

\*MP (moist pellet) and EP (extruded pellet).

보유하고 있었으며, 사육밀도는 16.2 kg/m<sup>2</sup>, 양식용수는 연안해수만 사용하고 지하해수는 사용하지 않았다. 양식장 4곳의 수조 수심은 0.6 m이었으며, 각 양식장의 순환율은 Table 1과 같이 연안해수만을 사용하는 D 양식장이 다른 3개소(A~C) 보다 낮았다.

#### 수질항목 측정방법

수질은 해양환경공정시험기준(MOMAF, 2013)과 APHA (2005)를 기준으로 측정하였다. 총 암모니아성 질소(TAN)와 질산성 질소(NO<sub>3</sub>-N)는 각각 Phenate Method와 Cadmium Reduction Method를 채택한 연속흐름분석기(SAN<sup>+</sup> Continuous Flow Analyzer, Skalar, Holland)로 측정하였으며, 아질산성 질소(NO<sub>2</sub>-N)는 Diazotization Method로 분광광도계(GENESYS 5 UV-Vis Spectrophotometer, Thermo, USA)를 이용하여 측정하였다. 미생물 배양은 APHA (2005)의 방법을 이용하였으며, 배지는 상업적으로 판매되는 제품을 사용하였다. Heterotrophic marine bacteria는 Difco<sup>TM</sup> Marine Agar 2216, Gram-negative strain은 Difco<sup>TM</sup> MacConkey Sorbitol Agar 그리고 *Vibrio* spp.은 Difco<sup>TM</sup> TCBS Agar를 사용하였다. 배양배지에 콜로니 형성단위(colony-forming unit, CFU)가 10~300 CFU가 배양되도록 희석하여 조정하였으며, 희석수는 깨끗한 자연해수를 고압멸균(J-AK4, JEIL Science, Korea) 처리 후 사용하였다. 이후 시료와 동일한 배양과정으로 멸균 여부를 확인하였다. 시료의 희석액 0.1 ml을 각각의 배지에 접종하였고 Marine Agar 배지는 30℃에서 5일 동안 배양하였으며, MacConkey Sorbitol Agar와 TCBS Agar는 35℃에서 3일 동안 배양하였다.

#### 통계처리

본 실험에 대한 결과는 평균±표준편차로 나타내었고, 양식장 간의 유입수, 배출수 그리고 지하해수는 SPSS Ver. 16.0 프로그램을 사용해 ANOVA로 검증한 후, P<0.05 수준에서 Duncan's multiple range test로 유의성을 비교하였으며, 연안해수 유입수와 지하해수는 t-Test를 통하여 비교 검증하였다.

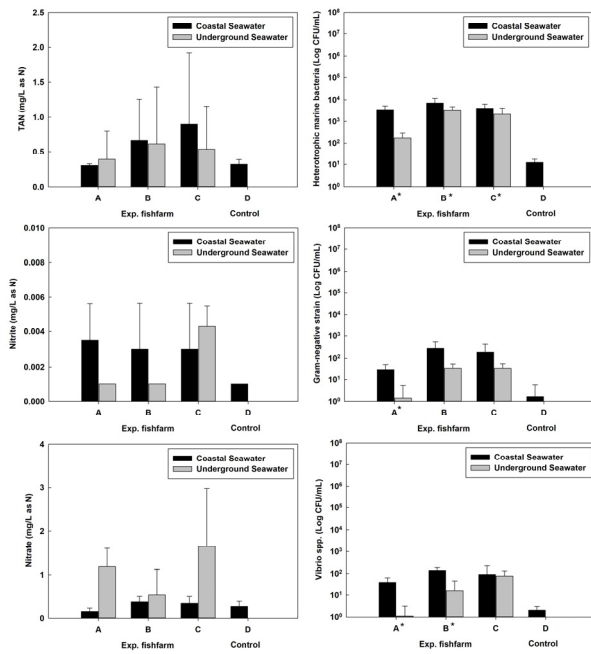
#### 결과 및 고찰

##### 양식원수로 연안해수와 지하해수 비교

조사기간 동안 지하해수의 수온은 18.7±0.4℃, 염분도는 27.1±2.7 PSU, pH는 7.2±0.8 그리고 용존산소는 7.0±1.7 mg/L를, 연안해수는 수온은 26.0±1.2℃, 염분도는 31.3±1.0 PSU, pH는 7.9±0.2 그리고 용존산소는 6.8±0.9 mg/L를 유지하였다.

연안해수와 지하해수의 수질과 미생물 오염 수준을 비교한 결과는 Fig. 2와 같다. 연안해수와 지하해수를 혼합하여 사용하는 3개 양식장(A~C)을 대상으로 조사하였다. A 양식장의 경우, 연안해수의 TAN은 0.301±0.022 mg/L as N, 지하해수는 0.387±0.410 mg/L as N으로 나타났으며, B 양식장은 연안해수의 TAN이 0.666±0.595 mg/L as N, 지하해수는 0.614±0.814 mg/L as N으로, C 양식장은 연안해수의 TAN이 0.898±1.024 mg/L as N으로, 지하해수는 0.535±0.624 mg/L as N으로 나타났다.

NO<sub>2</sub>-N는 실험구 A 양식장의 경우, 연안해수는 0.003±0.002 mg/L as N, 지하해수는 0.001±0.001 mg/L as N으로, B 양식장은 연안해수 0.003±0.002 mg/L as N, 지하해수 0.001±0.001 mg/L as N으로, C 양식장은



**Fig. 2.** Comparisons of water qualities and microbials of flow-through inland fish farm for olive flounder using costal seawater and ground seawater of fish farms in Jeju from 2015 to 2017. Asterisks indicate significant differences in the concentrations of the influent and the effluent ( $P < 0.05$ ).

연안해수는  $0.003 \pm 0.002$  mg/L as N, 지하해수는  $0.004 \pm 0.001$  mg/L as N으로 각각 나타났다.

$\text{NO}_3\text{-N}$ 는 A 양식장의 경우, 연안해수는  $0.145 \pm 0.081$  mg/L as N, 지하해수는  $1.182 \pm 0.420$  mg/L as N으로, B 양식장은 연안해수는  $0.372 \pm 0.125$  mg/L as N, 지하해수는  $0.531 \pm 0.591$  mg/L as N으로, C 양식장은 연안해수에서  $0.338 \pm 0.160$  mg/L as N으로 나타난 반면 지하해수는  $1.646 \pm 1.328$  mg/L as N으로 높았다. 미생물 지표항목을 조사한 결과, Heterotrophic marine bacteria는 A 양식장에서 취수된 연안해수와 지하해수에서  $3.5 \times 10^3 \pm 1.7 \times 10^3$  CFU/mL와  $1.7 \times 10^3 \pm 1.1 \times 10^2$  CFU/mL, B 양식장에서 취수된 연안해수와 지하해수에서  $7.2 \times 10^3 \pm 4.4 \times 10^3$  CFU/mL와  $3.4 \times 10^3 \pm 1.3 \times 10^3$  CFU/mL, C 양식장은 연안해수와 지하해수에서  $4.1 \times 10^3 \pm 2.2 \times 10^3$  CFU/mL와  $2.1 \times 10^3 \pm 2.0 \times 10^3$  CFU/mL으로 A-C 양식장 보다 연안해수에서 더 높은 값을 보였다( $P < 0.05$ ).

연안해수와 지하해수의 Gram-negative strain는 A 양식장은  $3.0 \times 10^1 \pm 2.1 \times 10^1$  CFU/mL와  $1.4 \pm 3.7$  CFU/mL, B

양식장은  $2.7 \times 10^2 \pm 2.6 \times 10^2$  CFU/mL과  $3.5 \times 10^1 \pm 2.0 \times 10^1$  CFU/mL 그리고 C 양식장은  $1.9 \times 10^2 \pm 2.3 \times 10^2$  CFU/mL과  $3.5 \times 10^1 \pm 2.0 \times 10^1$  CFU/mL로 각각 나타났으며, A양식장에서만 연안해수가 지하해수보다 유의적으로 높은 값을 보였지만( $P < 0.05$ ), B와 C 양식장에서는 연안해수와 지하해수간의 유의적인 차이가 없었다( $P > 0.05$ ).

*Vibrio* spp.의 경우, A 양식장에서 취수는 되는 연안해수에서  $4.0 \times 10^1 \pm 2.4 \times 10^1$  CFU/mL, 지하해수의  $1.1 \pm 2.0$  CFU/mL 보다 유의적으로 높았고( $P < 0.05$ ), B 양식장에서 취수는 되는 연안해수에서  $1.4 \times 10^2 \pm 4.6 \times 10^1$  CFU/mL이었으며, 지하해수에서  $1.6 \times 10^1 \pm 3.0 \times 10^1$  CFU/mL으로 연안해수에서 유의적으로 높은 값을 보였으며( $P < 0.05$ ), C 양식장에서 취수된 연안해수에서  $9.1 \times 10^1 \pm 1.3 \times 10^2$  CFU/mL이었으며, 지하해수에서  $7.8 \times 10^1 \pm 5.4 \times 10^1$  CFU/mL으로 두 양식용수간의 유의적인 차이는 없었다( $P > 0.05$ ).

이상과 같이 수질 조사 결과 지하해수의 질소화합물 함유량이 연안해수보다 오히려 높은 항목이 있었다. 양식생물을 고밀도로 양식할 경우 TAN은 그 독성이 커 종종 제한요인이 된다. 3개소(A~C)의 TAN 값을 평균할 경우 연안해수는  $0.898 \pm 1.024$  mg/L as N으로 수질관리 목표에 근접하고 있었고, 지하해수도  $0.535 \pm 0.624$  mg/L as N으로 실험구의 82% 수준으로 오염이 진행되었다.  $\text{NO}_2\text{-N}$ 는 지하해수가  $0.004 \pm 0.001$  mg/L as N으로 연안해수의  $0.003 \pm 0.002$  mg/L as N보다 높았고,  $\text{NO}_3\text{-N}$ 도 지하해수가  $1.646 \pm 1.328$  mg/L as N으로 연안해수의  $0.338 \pm 0.160$  mg/L as N보다 높았다. 이와 같이  $\text{NO}_2\text{-N}$ 과  $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 지하해수가 비교적 높게 나타났으나 검출수준이 양식생물에게 해가 될 수준이 아니어서 문제가 없었다(Bregnballe, 2015).

본 연구에서 수질 분석을 수행한 양식장은 넙치의 겨울 월동을 위해 지하해수를 장기간 사용하지만 연안해수에 대한 의존도가 높을수록 시설내로 유입되는 양식용수의 질소화합물의 농도가 상승하는 경향을 보였다. 이것은 지하해수의 자정 기간이 충분하지 못하거나 일부 연안해수의 혼입으로 미생물이 오염된 것으로 판단할 수 있으나 장기적으로 지하해수 수질 및 미생물의 모니터링을 통해서 지하해수의 관정을 관리할 필요있는 것으로 보인다. 지하해수의 TAN은 연안해수에 의존적인 값을 보이지만 하절기 지하해수가 수온 낮은 것을 감안하면 넙치 사육 적수온을 유지하거나 생존율이 높

이는데 큰 장점이 있는 것으로 나타났다. 지하해수를 양식용수로 사용할 경우 하절기 수온 조절을 위한 유류비와 전기사용비의 절감으로 생산성 향상에 크게 기여할 수 있으며, 연안 냉수대 출현이나 연안지역에서 주기적으로 발생하는 적조에 대응하는 용도로 활용이 가능할 것으로 판단된다(Lee, 2015). 나아가 지하해수로 하절기 육상양식장의 적정 수온을 유지하면 폐사율 감소로 약품사용을 줄일 수 있어 양식생물의 품질 개선 효과를 기대할 수 있다(Lee, 2015).

제주도의 육상양식장은 남제주군, 북제주군 서귀포시, 제주시 순으로 많이 분포하고 있으며, 특히 제주지역 어류 양식장 중 남제주군 지역이 전체의 약 60%를 차지하는데(Park and Oh, 1996), 이 지역이 하절기나 동절기에 지하해수를 이용할 수 있는 지역이므로 주요 넙치 생산지역이 될 수 있었다. Park and Oh (1996)는 지하해수 개발 지역의 지질 특성이 각각 다르고, 경우에 따라 지하해수원이 조석과 강수에 영향을 받을 수 있다고 하였다. 본 연구의 경우도 지하해수의 TAN이 연안해수 값의 82% 수준으로 높았던 것은 조석의 영향으로 연안해수가 영향을 주었을 것으로 판단된다. 따라서 지하수원의 활용도를 높이기 위해서는 장기적인 모니터링을 통한 수질 변화 예측이 필요하며, 대응할 수 있다면 양식장의 하절기 고수온으로 인한 재해나 질병예방에 도움이 될 것으로 판단된다. Park and Oh (1996)은 제주 남동부지역은 표고에 비해 대수층의 두께가 얇으며, 자연수위가 해수면과 가까워 해안 가까운 곳에서 착정 심도를 깊게 하여 해수가 올라오는 유형의 지하해수를 개발하는 것이 타 지역에 비해 훨씬 쉬워 제주도 동부 및 남동부지역에 육상양식장들이 밀집되어 있다고 하였다.

### 양식장 유입수와 배출수의 수질 비교

연안해수와 지하해수를 50:50 비율로 혼합하여 사용하는 양식장(A~C)의 사육수조 유입수와 배출수 그리고 연안해수만을 사용하는 양식장(D)의 사육조 유입수와 배출수의 수질과 미생물 환경을 비교하였다(Fig. 3). 유입수의 TAN 양은 A는  $0.301 \pm 0.022$  mg/L as N, B는  $0.666 \pm 0.595$  mg/L as N, C는  $0.898 \pm 1.025$  mg/L as N 그리고 D는  $0.317 \pm 0.067$  mg/L as N으로 나타났고, 배출수의 TAN 양은 A는  $1.407 \pm 1.425$  mg/L as N, B는  $2.580 \pm 2.434$  mg/L as N, C는  $2.473 \pm 2.954$  mg/L as N

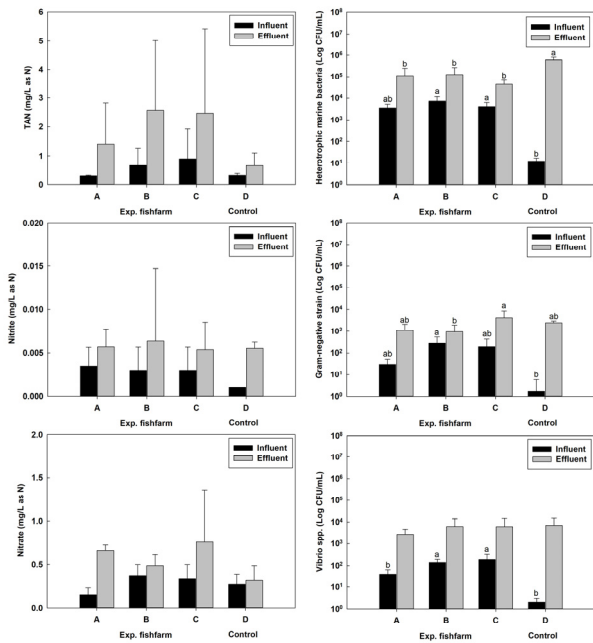
그리고 D는  $0.660 \pm 0.444$  mg/L as N으로 나타났다. 연안해수 유입수의 TAN은 D 양식장과 비교하였을 때 A~C 양어장이 3배 이상 높았다. 또한, 배출수의 TAN 농도는 A 양식장에서는 467.4%, B는 387.3%, C는 275.3%로 증가하였고, D는 208.2% 증가해 수조내의 자가오염으로 최대 4.6배 증가하였다( $P < 0.05$ ).

유입수의  $\text{NO}_2\text{-N}$  양은 A는  $0.004 \pm 0.002$  mg/L as N, B는  $0.003 \pm 0.003$  mg/L as N, C는  $0.003 \pm 0.003$  mg/L as N이었으며, 대조구인 D는  $0.001 \pm 0.001$  mg/L as N으로 각각의 실험구간의 유의적인 차이는 없었다( $P > 0.05$ ). 배출수의  $\text{NO}_2\text{-N}$  양은 A는  $0.006 \pm 0.002$  mg/L as N, B는  $0.006 \pm 0.008$  mg/L as N, C는  $0.005 \pm 0.003$  mg/L as N으로 나타났다. D는  $0.006 \pm 0.001$  mg/L as N으로 나타났으며 유의성은 나타나지 않았다( $P > 0.05$ ).

유입수의  $\text{NO}_3\text{-N}$  양은 A는  $0.145 \pm 0.081$  mg/L as N, B는  $0.372 \pm 0.125$  mg/L as N, C는  $0.338 \pm 0.160$  mg/L as N 그리고 D는  $0.266 \pm 0.121$  mg/L as N이었으며 각 실험구간 유의적인 차이는 나타나지 않았다( $P > 0.05$ ). 배출수의  $\text{NO}_3\text{-N}$  양은 A는  $0.656 \pm 0.064$  mg/L as N, B는  $0.486 \pm 0.124$  mg/L as N, C는  $0.757 \pm 0.601$  mg/L as N으로 나타났다. 그리고 D는  $0.321 \pm 0.165$  mg/L as N이었으며 각 실험구간 유의성은 없었다( $P > 0.05$ ). 유입수와 배출수 간의 농도 변화율은 평균을 기준으로 밀집지역 양식장 A, B, C 각각 452.4%, 130.6%, 223.9%로 나타났으며, 그리고 독립된 지역에 위치한 양식장 D는 120.6%로 모두 증가하는 것으로 나타났다.

Heterotrophic marine bacteria 경우, 유입수는 A는  $3.5 \times 10^3 \pm 1.7 \times 10^3$  CFU/mL, B는  $7.2 \times 10^3 \pm 4.4 \times 10^3$  CFU/mL, C는  $4.1 \times 10^3 \pm 2.2 \times 10^3$  CFU/mL 그리고 D는  $1.2 \times 10^4 \pm 5$  CFU/mL로 양식장 밀집지역인 실험구 양식장들은 대조구의 최대 약 600배 수준으로 높은 값을 보였다( $P < 0.05$ ). 반면, 배출수는 A는  $1.1 \times 10^5 \pm 1.3 \times 10^5$  CFU/mL, B는  $1.2 \times 10^5 \pm 1.4 \times 10^5$  CFU/mL, C는  $4.2 \times 10^4 \pm 2.4 \times 10^4$  CFU/mL 그리고 D는  $6.0 \times 10^5 \pm 2.1 \times 10^5$  CFU/mL로 나타나 배출수 또한 각 실험구에서는 유의적인 차이가 없었으나, 연안해수만을 양식용수로 사용하는 D에서 유의적으로 높은 값을 유지하였다( $P < 0.05$ ). 밀집지역에 위치한 양식장에서 유입수 대비 배출수가 10.2~31.0배 증가하였으나 D 양식장은 50,000배 가량 증가하였다.

어류의 병원성 미생물과 관련이 깊은 Gram-negative



**Fig. 3.** Comparison with water qualities and microbials of influent and effluent seawater from flow-through inland fish farms in Jeju from 2015 to 2017.

strain 경우, 사육 시설내 유입수는 연안해수와 지하해수를 혼합해서 사용하는 A, B, C 양식장은  $3.0 \times 10^1 \pm 2.1 \times 10^1$  CFU/mL,  $2.7 \times 10^2 \pm 2.6 \times 10^2$  CFU/mL,  $1.9 \times 10^2 \pm 2.3 \times 10^2$  CFU/mL 그리고 D 양식장은 24 CFU/mL 으로 양식장 밀집지역인 위치한 양식장(A~C)는 D 양식장 보다 15.0-135.0배 높아 유의적인 차이가 있었다 ( $P < 0.05$ ). 반면, 배출수의 경우, A, B, C 양식장에서  $1.0 \times 10^3 \pm 1.0 \times 10^3$  CFU/mL,  $9.4 \times 10^2 \pm 9.7 \times 10^2$  CFU/mL 및  $4.2 \times 10^3 \pm 4.4 \times 10^3$  CFU/mL로 각각 나타났으며, 유입수 대비 3.4-33.3배 증가하였고, 그리고 D 양식장에서는  $2.4 \times 10^3 \pm 4.9 \times 10^2$  CFU/mL로 넙치 사육조를 통과한 후 1,200배 증가하여 양식장 A~C와 유의적인 차이가 있었다 ( $P < 0.05$ ).

*Vibrio* spp.의 경우, 사육 시설내 유입수는 A, B 및 C는  $4.0 \times 10^1 \pm 2.4 \times 10^1$  CFU/mL,  $1.4 \times 10^2 \pm 4.6 \times 10^1$  CFU/mL 및  $1.8 \times 10^2 \pm 1.38 \times 10^2$  CFU/mL 그리고 D는 21 CFU/mL를 나타내어 D보다 A~C에서 20.0-90.0배 증가하여 유의적으로 높은 수치를 보였다 ( $P < 0.05$ ). 배출수는 A는  $2.7 \times 10^3 \pm 1.9 \times 10^3$  CFU/mL, B는  $6.3 \times 10^3 \pm 7.6 \times 10^3$  CFU/mL, C는  $6.1 \times 10^3 \pm 8.4 \times 10^3$  CFU/mL로 유입수보다 33.8~67.5

배 증가하였으며, 그리고 D는  $7.0 \times 10^3 \pm 8.1 \times 10^3$  CFU/mL로 유입수보다 3,500배 증가하였으나 유의적인 차이는 나타나지 않았다 ( $P > 0.05$ ).

MOF (2021)의 제주연안 환경 측정자료와 본 연구에서 조사한 A, B, C 및 D 양식장이 위치한 서귀포와 성산 연안의 수질 자료를 비교한 결과 본 연구의 질소화합물 농도가 더 높았다. NRFD (2019) 보고에 따르면, 양식장 배출구로부터 300 m 이내의 연안에서 영양염의 농도가 외측 지역의 농도보다 2~5배 높게 측정된다고 보고한 것으로 보아 양식장 밀집지역의 취수 구역과 배출 지역에 국한하여 질소화합물과 미생물의 농도가 크게 상승하고, 지속적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 연구에서 양식장 밀집 지역의 유입수는 TAN 기준으로 대조구보다 최대 약 3배 높아 밀집 지역의 양식장 배출수가 넓은 지역으로 확산되지 못하고 지속적으로 유입수에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 조사 시기인 8월말~9월초에 집중호우가 있었던 경우가 있어 강우로 인한 담수의 유입과 주관광 시즌인 하절기 제주도 특성 등도 연안해수의 질소화합물 및 미생물 측정값에 영향을 준 것으로 판단된다. 그러나, 실험구 및 대조구 양식장의  $\text{NO}_2\text{-N}$  및  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도는 유의적인 차이가 있었지만 수질 관리범위 이내의 수준이어서 문제없는 것으로 판단되며 TAN은 실험구나 대조구의 유입수나 배출수 모두 관리범위를 넘어선 농도를 보여 양식생물의 하절기 생존율에 영향을 주었을 가능성이 있었다.

Moon et al. (2007)은 제주 지역은 육상수조직 양식장이 연안에 집중되어 있고 대부분 양식장에서 MP 사료를 공급하므로 연안역 오염 증가의 원인으로 보고하고 있으며, Oh et al. (2006)의 연구에서도 유사한 결과를 보고 하였다. 그러나, Roh et al. (2018)에 따르면 제주 연안의 해수오염 정도는 양식장 밀집지역 보다 다른 지역에서 미생물의 오염도가 높은 것으로 나타나 연안 해역의 오염의 주 원인이 양식장 배출수가 아니라는 것을 보고하였다. 본 연구에서는 하절기를 중심으로 양식장 밀집지역의 유입수와 배출수 지역에 한정하여 미생물을 조사한 결과로서 Table 1과 같이 대부분의 양식장에서 MP 사료를 공급하고 있어 사료섭취시 허실의 가능성이 커 하절기 수조내 미생물의 증식에 영향을 주었을 가능성이 높으며, 넙치의 분은 사육수에 쉽게 풀리는 특성 때문에 수조내 미생물량에 영향을 주었을 가능성이 높다.

Table 2. The approximate amount of daily dissolved nitrogen compounds discharged by flow-through flounder aquaculture farm in Jeju\*

Fish Farm	Standing crop (Ton)	Volume of daily used water (Ton)	TAN released (Kg TAN/day)	NO <sub>2</sub> -N released (Kg NO <sub>2</sub> -N/day)	NO <sub>3</sub> -N release (Kg NO <sub>3</sub> -N/day)
A	234.1	123,552	22.7	0.25	63.1
B	46.8	93,600	6.0	0.28	10.7
C	69.8	59,004	14.2	0.12	24.7
D	43.4	32,136	16.2	0.16	1.8

\*The data was calculated that the measured average values of TAN, NO<sub>2</sub>-N and NO<sub>3</sub>-N in influent and effluent seawater, water area and stocking density of each farm based on Table 1.

넙치 수조식 양식개발 초기단계인 1990년대 초반에는 어류 질병 발병율이 5% 미만으로 주로 고수온기 전후에서 주로 발생하였으나 1990년대 후반부터 어류질병 발병율은 25~30%까지 증가하였으며, 계절과 관계없이 질병 발생지역과 발병 어종은 점차 확대되었다(Roh, 2003). Kim et al. (2008)은 2007년 하절기(6~10월)에 제주도 동부 연안에 위치한 양식장 4개소를 대상으로 사육 용수 등의 미생물학적 오염도를 조사한 결과 *Vibrio parahaemolyticus*, *Salmonella spp.*, *S. aureus*, *Bacillus cereus*가 빈번하게 검출된 것으로 보고하였다. 또한, Jin et al. (2007)은 양식 넙치에게 기생충이 감염된 후 수중에 널리 분포하는 비브리오균이 손상된 조직을 통해서 쉽게 2차 감염되며, 제주도 지역내 양식장의 초여름 사육수온인 22~23°C가 스쿠치카의 증식 적수온과 일치하여 큰 문제를 일으킨다고 보고하였다. 그리고, Kang et al. (2015a)는 넙치 10-30 cm 크기가 하절기 스쿠치카의 대번식으로 피해가 가장 컸다고 보고하였다. 그러므로 하절기를 중심으로 병원성 미생물의 대번식으로 양식 생물과 양식어민의 경제적 피해가 커지고 있어 사육수의 순환율 증가만으로 이 문제를 해결하기 보다는 적절한 미생물 제어 수단인 생물보안 시스템 강구될 필요가 있었다.

양식용수의 미생물학적 위해 요소가 생산성에 큰 영향을 미치므로 육상수조식 양식장의 양식용수를 UV를 활용하여 99.27%의 살균효율과 넙치 폐사율을 20~30% 낮출 수 있다(Kim et al. , 2008; Kang et al., 2015b). 또한, Park et al. (2018)은 오존처리로 병원미생물을 효율적으로 제거할 수 있다는 보고하고 있어, 다양한 살균처리 시스템을 제주도 지역의 넙치 양식장에 잘 활용한다면 생존율과 생산성 향상에 기여할 것으로 생각된다.

연안 오염 부하에 영향을 주는 요인은 N과 P의 양이라고 볼 수 있다. 배출수를 통해 버려지는 용존 질소화합

물은 연안에 서식하는 플랑크톤 등이 바로 이용하는 등 연안의 환경 오염부하량 증가에 기여할 수 있다. 본 연구에서 조사한 양식장의 사육환경과 실험을 통해 얻은 유입수와 배출수의 TAN, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N 측정값을 사용하여 제주지역 넙치양식장에서 버려지는 용존 질소화합물의 양을 추정하여 Table 2에 나타내었다.

사육밀도가 높고 방양량이 많은 양식장에서 배출되는 질소화합물의 양이 많았지만, 환수량이 높고 사육밀도가 낮더라도 양식장의 시설 운영이나 관리 방법에 따라 서도 배출되는 질소화합물의 양은 많았다. 대부분의 양식장에서 주먹이원으로 MP 사료를 공급하고 있었으며, 사료원료, 사료 공급 방법 및 공급 횟수 등도 배출수의 수질에 영향을 줄 수 있어 양식장 연안해수 유입수와 배출수의 미생물 군집의 차이를 유발할 수 있으며, 배출수의 오염 정도도 크게 달라질 것으로 판단된다.

현재 수준에서 넙치의 생산성 향상을 위하여 하절기에 유수식의 순환율을 높인다 하더라도 자가오염으로 Bregnballe (2015)나 Meade (1989)의 양식생물 관리기준을 크게 상회한 농도를 나타낼 수 밖에 없어 문제가 있었다. 따라서 생산성을 높이기 위해서는 단순히 지하수를 병용하는 수준을 넘어서 순환여과시스템과 같은 방식을 활용하여 사육수를 처리할 필요성이 있는 것으로 나타났다.

## 결론

제주지역에서 양식용수로 지하해수와 연안해수를 혼합하여 사용하는 양식장 밀집지역에 위치한 3개 양식장 (A, B, C)과 양식용수로 연안해수만을 사용하는 양식장 (밀집지역에서 독립된 양식장 D)의 유입수와 배출수를 대상으로 질소성 화합물과 미생물의 변동을 조사하였다. TAN 기준으로 A~C 양식장의 연안해수는 최대 0.898±1.024 mg/L as N 수준으로 양식장 수질관리 목표

의 한계에 근접하였고, 지하해수는 연안해수의 82% 수준으로 오염이 진행되었으나 하절기 지하해수의 저수온 특성으로 넙치의 적수온을 유지하거나 생존율이 높이는 데 큰 장점이 있었다. 하절기 양식장 유입수의 TAN 양은 D 양식장보다 A~C 양식장에서 최대 약 3배 높아 배출수가 연안의 넓은 지역으로 확산되지 못해 지속적으로 양식장 유입수에 영향을 주었다. 배출수의 TAN 양은 A~C 양식장에서 유입수 대비 2.7~4.6배 증가하여 양식장내 자가오염이 심각하였다. **Heterotrophic marine bacteria**는 양식장 밀집지역의 유입수가 독립된 곳에 위치한 D 양식장보다 약 600배 높았고, A~C 양식장 배출수를 조사한 결과 유입수 대비 약 30배 증가하여 수조 내에서 자가오염이 심각하였다. 이를 해결하기 위해 육상수조식 양식장의 사육수의 순환율을 높인다 하더라도 양식생물 관리기준을 크게 상회하는 수질 농도를 보였다. 그러므로 양식생물의 생산성을 높이고 양식어민들의 경제적 손실을 줄이기 위해서는 친환경 순환여과시스템과 같은 방식으로 양식장 주변 해역에 대한 오염 정도를 조사한 자료를 이용한 양식장의 생물보안 시스템 활용 연구들이 앞으로 필요하다.

### 사 사

이 논문은 2014년부터 3년간 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(육상 넙치양식장 생산성 향상을 위한 오존 고도산화 활용 기법 개발).

### References

APHA. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21<sup>st</sup> ed. American Public Health Association, Washington, DC, USA, 1369.

Bregnballe J. 2015. A guide to recirculation aquaculture An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming system. Food and Agriculture Organization of the United Nation & Eurofish International Organization. 95.

Jin C-N, Kang J-S, Moon Y-G, Lee C-H, Lee Y-D, Lee J, Song C-B and Heo B-S. 2007. Scuticociliatosis in flounder farms of Jeju Island. J Fish Pathol 20, 93-98.

Jung S, Park W, Park S, Park J, Kim J-W and Kim P-K. 2021.

Ozone-produced oxidants improve water quality parameters and microbial colony counts in the semi-recirculating aquaculture system for olive flounder *Paralichthys olivaceus*. Korean J Fish Aquat Sci 54, 751-760. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0751>.

Kang BJ, Jang YH, Jhon BK, Park BH and Jin CH. 2015a. Monitoring of scuticociliatosis of olive Flounder (*Paralichthys olivaceus*) farm in Jeju, Korea from 2007 to 2014. J Fish Pathol 28, 165-169. <https://doi.org/10.7847/jfp.2015.28.3.165>.

Kang BJ, Jang YH, Jhon BK, Park BH and Shin DH. 2015b. Effect of UV disinfection following mechanical filtration for influent seawater on decrease in disease outbreak of juvenile olive flounder (*Paralichthys olivaceus*). J Fish Pathol 28, 125-131. <https://doi.org/10.7847/jfp.2015.28.3.165>.

Kim YB, Moon YG, Ha JH, Kang CH, Kam SK, Song CB, Oh MC and Heo MS. 2008. Investigation of microbial contamination the level in fish farms of Jeju east coast. J Life Sci 18, 395-402. <https://doi.org/10.5352/JLS.2008.18.3.395>.

Lee KN. 2015. Effect analysis about inland fish farm for development of underground seawater. J Fish Bus Adm. 46, 63-74. <https://doi.org/10.12939/FBA.2015.46.1.063>.

Meade JB. 1989. Aquaculture management. New York. Van Nostrand Reinhold. 219.

Ministry of Oceans and Fisheries (MOF). 2021. The information of marine environmental measurement. Retrieved from <http://www.meis.go.kr/mei/observe/port.do#>. Accessed 30 Sep 2021.

Moon YG, Ha JW, Kang CH, Song CB, Oh MC and Heo MS. 2007. Survey of the level of microbial contamination in fish farms on the Jeju-Island. J Food Hyg and Safety 22, 179-191. <http://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=JAKO200734515988650&oCn=JAKO200734515988650&dbt=JAKO&journal=NJOU00292082>.

NFRD (National Fisheries Research and Development Institute). 2019. Research for mortality reduction and monitoring of the flatfish in fish-farm on the Jeju-Island. Ministry of Oceans and Fisheries, 53. <https://doi.org/10.23000/TRKO201900004677>.

Oh TG, Kim SR, Kim YH and Kim SR. 2006. Nitrate and



- chloride characteristics in the groundwater in Juju area. *J Environ Res* 3, 1-14. <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01808349>.
- Park GS and Oh YK. 1996. A Study on the Chemical Characteristics of Ground - Seawater in the Coast of Cheju Island. *J Korean Soc Environ Eng* 18, 301-315. <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06749911>.
- Park S, Kim Y, Park J and Kim P. 2018. Changes in water quality and bacterial compositions in culture water of an ozonated flounder farm. *Korean J Environ Bio* 36, 90-97. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2018.36.1.090>.
- Roh HJ, Lim YJ, Kim A, Kim NE, Kim Y, Park NB, Hwang JY, Kwon MG and Kim DH. 2018. Distribution of indicator bacteria in seawater off the coast of Jeju Island. *Korean J Fish Aquat Sci* 51, 450-455. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0450>.
- Roh S. 2003. The Present and Prospects of the land-based aquaculture in Jeju Island. 58-75. In 1st Seminar of Korean Fisheries Society.
- Schroeder JP, Klatt SF, Schlachter M, Zablotski Y, Keuter S, Spieck E and Schulz C. 2015. Impact of ozonation and residual ozone-produced oxidants on the nitrification performance of moving-bed biofilters from marine recirculating aquaculture systems. *Aquac Eng* 65, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.10.008>.
- Tanaka J and Matsumura M. 2002. Kinetic studies of removal of ammonia from seawater by ozonation. *J Chem Technol Biotechnol* 77, 649-656. <https://doi.org/10.1002/jctb.624>.
- Tango MS and Gagnon GA. 2003. Impact of ozonation on water quality in marine recirculation systems. *Aquac Eng* 29, 125-137. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(03\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(03)00061-X).
- 
2021. 10. 14 Received  
 2021. 12. 27 Revised  
 2022. 01. 24 Accepted