Check for updates

JFMSE, 38(5), pp. 1060~1067, 2026.
수산해양교육연구, 제38권 제5호, 통권143호, 2026.
www.ksfme.or.kr
https://doi.org/10.13000/JFMSE.2026.10.38.5.1060

육상양식 사육수의 용존기체 과포화현상 해소방안 연구

김수강 · 윤영석 · 오성립* · 강봉조†
제주특별자치도 해양수산연구원(지방해양수산연구사 · *,†지방해양수산연구관)

A Study on Mitigating Dissolved Gas Supersaturation in Culture Water of Land-Based Aquaculture Systems

Soo-Kang KIM · Young-Seock YOON · Seong-Rip OH* · Bong-Jo KANG†
Jeju SpecialSelf-Governing Province Ocean and Fisheries Reserch Institute(researcher · *,†principal researcher)

Abstract

This study developed and evaluated a degassing device based on the Venturi principle to mitigate gas supersaturation occurring in culture water in land-based aquaculture systems. To evaluate the degassing efficiency of the device, an experiment was conducted in a circular PP tank with a diameter of 5 m, maintaining a water depth of 50 cm under a flow-through culture system from February 6 to February 24. The culture water supply systems were classified into three types: a submerged inlet, an exposed inlet, and an inlet equipped with the degassing device. Gas saturation levels in the culture water were measured under each treatment. The mean oxygen saturation (SAT) was highest in the degassing device-equipped treatment (84.23 ± 0.39%) and lowest in the submerged inlet treatment (56.24 ± 0.24%), with a significant difference among treatments ($p < 0.05$). The mean total gas pressure (TGP) increased significantly in the following order: degassing device-equipped treatment > exposed inlet treatment > submerged inlet treatment ($p < 0.05$). In contrast, residual gas saturation (RES) was highest in the submerged inlet treatment (110.04 ± 0.38%) and lowest in the degassing device-equipped treatment (103.66 ± 0.42%) ($p < 0.05$). These results indicate that the Venturi-based degassing device effectively reduced gas supersaturation in culture water and may be applicable to the management of gas saturation in land-based aquaculture systems.

Key words : Gas supersaturation, Degassing device, Oxygen saturation, Total gas pressure, Residual gas saturation

I. 서 론

넙치(*Paralichthys olivaceus*)는 우리나라를 대표하는 양식 어종으로서 횟감용으로 널리 소비되는 주요 수산물이다. 1983년 국내에서 인공종자 생산기술이 성공적으로 확립된 이후 제주지역을 중심으로 육상양식 산업이 본격적으로 발전하였으며, 현재 제주도는 국내 넙치 생산의 핵심 지역으로 자리하고 있다. 이 후 양식생산량은 1990년 1,000톤 내외에 불과했으나 육상양식 기술의 발달로 2024년 기준 40,125톤으로 전체 어류양식 생산량의 48.9%를 차지하고, 제주지역의 경우 19,906톤으로 전국 생산량의 49.6%의 점유율을 보이고 있다(Statistics Korea, 2025).

최근 제주 지역을 비롯한 우리나라의 넙치 양식은 어려운 상황에 직면해 있다. 인건비, 사료비

† Corresponding author : 064-710-8480, kbj1922@korea.kr
※ 이 논문은 2026년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학원기술진흥원(과제번호 RS-2022-KS221670)의 지원을 받아 연구되었음

및 전기료 등 경영비 상승과 환경변화, 질병 등에 의한 폐사가 증가하여 양식어가 경제성이 악화되고 있다(Shim et al., 2019; Kim et al., 2022; Baek et al., 2024).

육상양식은 해상가두리 양식에 비해 외부 해황 변동의 영향을 적게 받고 사육환경 제어가 용이하다는 장점은 있으나(Badiola et al., 2012), 펌프 및 여과시설의 지속 가동으로 인해 에너지 비용이 증가하여 생산원가 상승 요인이 되고 있다(Bostock et al., 2010; FAO, 2022). 또한 육상양식장이 밀집한 지역에서는 취·배수 체계의 구조적 특성상 배출수가 재 유입될 가능성이 있어 환경관리의 중요성이 강조된다(National Institute of Fisheries Science, 2018; Kim, 2022).

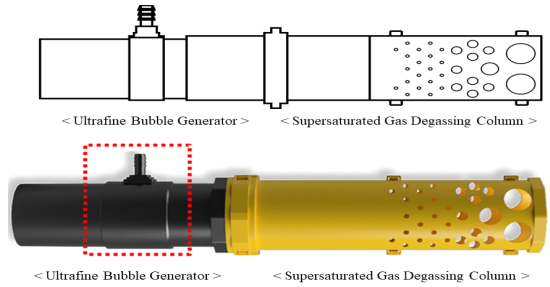
초기 육상양식 시스템은 고가수조를 이용한 사육수 공급과 링브로워 방식의 폭기장치를 설치하여 산소를 공급하였다. 그러나 최근 생산량 증대를 위해 산소발생기 및 액체산소를 사용하면서 폭기장치를 없애고, 노후화된 고가수조를 철거하면서 펌프에서 바로 수조로 사육수가 공급되는 분배기 방식으로 전환하고 있는 추세이다. 보통 양식장 사육수는 지하 40~50m의 깊은 곳에 있는 지하해수 및 연안 수심 20m 이상의 저층수를 취수하여 사용하고 있는데, 여기서 지하해수 및 연안 저층수를 탈기과정 없이 직접 공급하면서 사육수의 기체 과포화 현상이 발생하고 있다. 어류가 기체 과포화상태에 장기간 노출되면 피부, 눈 및 아가미에 공기 색전이 형성되어 가스병(gas bubble disease)을 일으킬 수 있으며(Grahn et al., 2007), 양식어류 뿐만아니라 연안에 서식하는 어류도 급성 대량 폐사하는 사례가 보고되고 있다(Grahn et al., 2007; Machova et al., 2017; Midilli et al., 2019).

이 연구에서는 넙치 육상양식장에서 링블로워 방식의 폭기장치를 제거하여 사육수의 탈기과정을 거치지 않고 공급되는 조건에서 발생하는 기체 과포화 현상을 해소하기 위해 개발된 과포화 기체 탈기장치의 효과를 평가하였다.

Ⅱ. 연구 방법

1. 과포화기체 탈기장치 개발 및 제작

탈기장치는 벤츄리(Venturi) 원리를 이용하여 별도의 동력 공급없이 초미세기포를 발생시키는 구조로 해수가 장치 내부를 통과하면서 압력 차에 의해 공기가 유입되고, 생성된 미세기포를 통해 사육수의 과포화된 기체를 탈기하는 방식으로 설계 제작하였다([Fig. 1]).

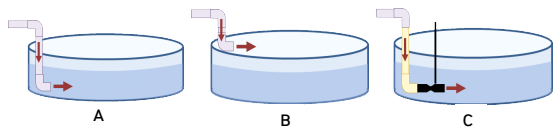


[Fig. 1] Schematic diagram and prototype of the degassing device.

2. 과포화기체 탈기장치 효과성 분석 시험

과포화기체 탈기장치의 탈기효과를 알아보기 위해 양식장에서 사용되는 분배기를 이용하여 공급하는 형태의 사육수를 공급하였다. 시험수조는 직경 5m의 PP원형수조에 유수식 방법으로 수심 50㎝를 유지하여 2월 6일부터 2월 24일 까지 총 18일간 기체포화도의 변화를 측정하였다.

시험방법은 수조내 사육수 공급 형태별로 구분하여 주수구 잠입형태(A), 주수구 노출형태(B)와 탈기장치 장착하여 공급하는 형태(C)로 설정하였다([Fig. 2]).



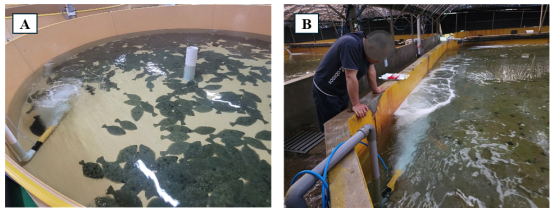
[Fig. 2] Type of aquaculture water supply in tank (A: submerged inlet, B: surface inlet, C: degasser).

기체포화도 측정은 Handy Polaris TGP(Denmark, OxyGuard.) 센서를 이용하여 총기체포화도(TGP, %), 산소포화도(SAT, %), 잔여기체포화도(RES, %)를 구분하여 매일 오전 10시와 17시에 3회 반복 측정하여 그 평균값으로 시험구별 비교분석하였다.

3. 탈기장치 적용 사육 실증시험

탈기효과를 확인한 시제품을 직접 넙치 사육에 적용하기 위한 실증시험을 3월 1일부터 8월 12일까지 140일간 수행하였다.

넙치 사육시 수심은 90cm를 권고하고 있으나 양식 현장에서는 수심 50cm에서 사육하는 방법을 선호하여 수심 조건을 각각 50cm와 90cm로 설정하고, 탈기장치 적용 유무에 따른 시험구별 기체포화도를 비교하였다. 시험어는 평균 체중 200 g급 넙치를 직경 5m의 PP원형수조에 시험구별로 950마리씩 입식하고 고가수조를 거친 지하해수(18±0.5℃ 유지)를 이용하여 1일 24회전 유수식으로 사육하였다. 배합사료(EP)는 1일 3회 공급하였고 매일 폐사개체를 확인하여 제거하여 주었다([Fig. 3]).



[Fig. 3] Field applications of the degassing device (A: application at research institute, B: application at fish farm).

시험구의 기체포화도 측정은 총기체포화도, 산소포화도, 잔여기체포화도를 1일 2회(오전 사료급이 전과 후 1시간 이내, 17시) 측정하여 그 평균값을 1일 측정값으로 하였으며 측정시마다 3회 반복 측정하였다.

탈기장치가 넙치의 성장 및 생존에 미치는 영향을 알아보기 위해 월 1회 시험구별 10마리씩 3회 반복 체중을 측정하였고 시험종료시 시험구별 생존율을 비교 분석하였다.

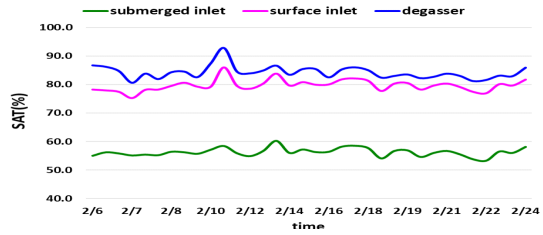
4. 통계분석

실험결과에 따른 통계처리는 SPSS program을 사용하여 분산분석(ANOVA test)를 이용하여 분석하였고, 실험구간의 유의차에 대한 다중검정은 Duncan(1955)의 방법에 의하여 실시하였다. 평균간의 유의성은 $P<0.05$ 수준으로 하였다.

Ⅲ. 연구 결과

1. 탈기장치 효과성 분석

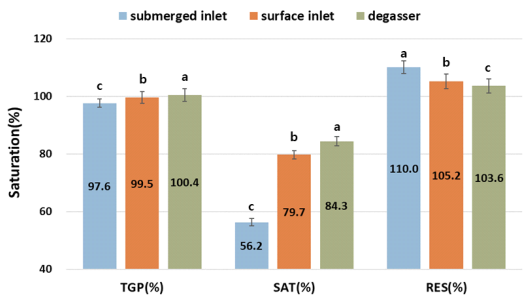
사육수 공급 형태별로 구분하여 주수구 잠입형태(A), 주수구 노출형태(B)와 탈기장치 장착하여 공급하는 형태(C)에 대하여 18일간 탈기장치의 탈기효과를 분석하였다. 그 결과 산소포화도(SAT) 변화추이는 탈기장치를 장착한 수조에서 80.6~92.8%로 가장 높은 값을 유지하였고 주수구 노출형 수조는 75.2~86.0%, 주수구 잡입형의 수조가 53.3~60.2%의 순으로 낮게 나타났다([Fig. 4]).



[Fig. 4] Dissolved gas saturation in aquaculture water according to the application of degassing devices (measured 3 times per day for 18 days).

시험 종료 시 시험구별 평균 기체포화도를 비교 분석한 결과([Fig. 5]), 사육수의 평균 SAT는 탈기장치 장착형에서 가장 높은 값을 나타냈으며 (84.23±0.39%), 주수구 잠입형에서 가장 낮게 나

타났다(56.24±0.24%)($p<0.05$).



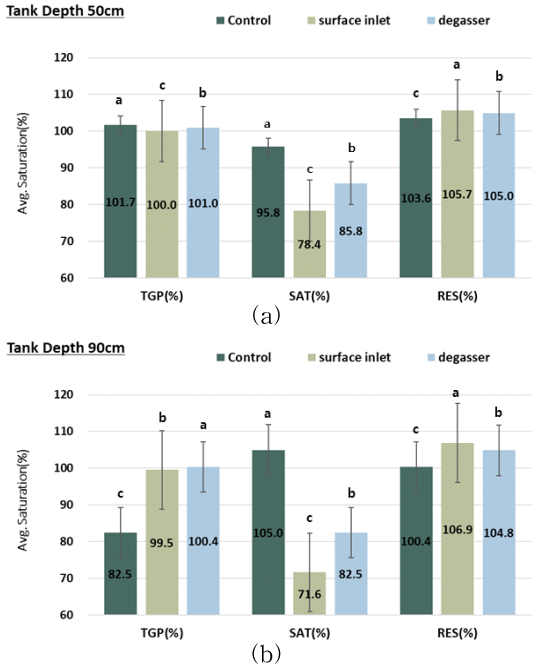
[Fig. 5] Comparison of average gas saturation by aquaculture Water supply type (18days).

TGP는 탈기장치 장착형 > 주수구 노출형 > 주수구 잠입형의 순으로 유의적으로 증가하였다($p<0.05$). RES는 주수구 잠입형에서 가장 높은 값을 나타냈으며(110.04±0.38%), 탈기장치 장착형에서 가장 낮은 값을 나타냈다(103.66±0.42%)($p<0.05$).

2. 탈기장치 적용 사육형태별 기체포화도 비교

사육수조 수심에 따른 평균 기체포화도 결과를 [Fig. 6]에 제시하였다. 사육수심 50㎝ 조건에서 사육수의 평균 TGP와 SAT는 유입원수 > 탈기장치 장착형 > 주수구 노출형의 순으로 유의적으로 감소하였다.($p<0.05$). RES는 반대로 주수구 노출형 > 탈기장치 장착형 > 유입원수 순으로 나타났다($p<0.05$). 탈기장치 장착형이 주수구 노출형보다 SAT와 TGP를 효과적으로 유지하면서 RES를 감소시키는 것으로 나타났다.

사육수심 90cm 조건에서는 유입원수가 가장 높은 SAT와 TGP를 나타냈으며, 주수구 노출형이 가장 낮은 값을 나타냈다($p<0.05$). 반면, RES는 주수구 노출형이 가장 높게 나타났다. 탈기장치 장착형이 주수구 노출형보다 유의적으로 높은 SAT와 TGP 및 낮은 RES를 나타내어 탈기효과가 있는 것으로 확인되었다($p<0.05$).



[Fig. 6] Comparison of gas saturation at different depths of the aquaculture tank according to the application of a degassing device.

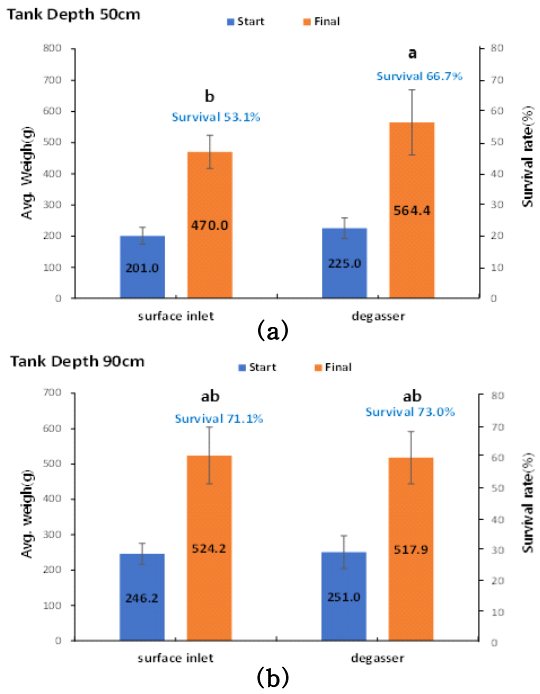
3. 탈기장치 적용 사육형태별 성장도

탈기장치 장착하여 140일간 넙치를 사육하여 성장도를 분석하였다.

사육수조 수심 50㎝에서 시험종료 시 시험어의 평균 체중은 주수구 노출형 시험구 201.0±26.8g에서 470.0±53.5g으로 269.0g 증중되었고, 탈기장치 장착 시험구가 225.0±32.8g에서 564.4±104.6g으로 339.4g 증중되어 탈기장치 수조가 높은 성장량을 보였다. 사료계수는 1.3으로 시험구간 동일한 값을 나타내었다. 생존율은 탈기장치 적용 시험구에서 66.7%로 주수구 노출형(53.1%)보다 상대적으로 높은 경향을 보였다([Fig. 7]).

사육수조 수심 90cm 조건에서 시험종료 시 시험어의 평균 체중은 주수구 노출형 시험구가 246.2± 30.0g 에서 524.2±80.0g으로 278.0g 증중되었고, 탈기장치 장착 수조가 251.0±46.6g에서

517.9±74.0g으로 266.9g 증중되었다. 사료계수는 1.6으로 시험구간 동일한 값을 나타내었으며 생존율은 탈기장치 적용 시험구에서 73.0%로 주수구 노출형(71.11%)보다 상대적으로 높은 경향을 보였다([Fig. 7]).



[Fig. 7] Growth performance of flounder by aquaculture system with degassing device.

Ⅳ. 결 론

해수 중에 용존되어 있는 기체의 과포화상태는 수온, 압력 등에 의해 평형 용해도 보다 높은 상태를 말하며, 총기체포화도가 100%일 때 용존기체의 총압력이 대기압과 같은 정상상태이며 115% 이상일 때 기포병(GBD) 발생 위험이 있으며, 120% 이상일 때 급성 피해 가능성이 있다고 보고되고 있다(Weitkamp and Katz. 1980.).

본 연구는 제주지역 넙치 육상양식장에서 문제시되고 있는 사육수 내 기체 과포화 현상을 개선하기 위하여 벤츄리 원리를 이용한 탈기장치를 개발하고, 이를 현장에 적용하여 수질 안정성과 성장 효과를 검증하였다.

1. 탈기장치의 기체포화도 개선 효과에 대한 해석

18일 간의 실험에서 산소포화도(SAT)는 처리구 간 뚜렷한 차이를 나타냈다. 탈기장치를 장착한 수조에서 84.3%로 가장 높은 값을 보였으며, 주수구 노출형(79.7%), 주수구 잠입형(56.2%) 순으로 감소하였다. 특히 주수구 잠입형에서 산소포화도가 크게 저하된 것은 수중으로 직접 유입되는 방식이 공기와의 접촉면을 감소시켜 산소 재용해를 제한한 결과로 해석된다. 이러한 결과는 수류 조건 및 주수 방식이 용존산소 농도에 직접적인 영향을 미친다는 선행연구와 일치한다(Boyd, 1998). 반면 탈기장치 장착형에서 높은 산소포화도가 유지된 것은 탈기 과정에서 질소와 같은 불활성 기체가 제거되면서 상대적으로 산소의 용해 및 확산이 촉진되었기 때문으로 판단된다(Timmons et al., 2002). 잔여기체포화도(RES)는 탈기장치 장착형에서 103.6%로 가장 낮았으며, 주수구 노출형(105.2%), 주수구 잠입형(110.0%) 순으로 증가하였다. 특히 주수구 잠입형에서 110% 수준의 과포화 상태가 나타난 것은 주목할 필요가 있다. 이는 수중에서 직접 유입되는 과정에서 미세기포가 수체 내에 잔존하고, 외부로의 방출 없이 축적되면서 기체 과포화 상태를 유발한 것으로 해석된다. 일반적으로 총기체포화도가 110% 이상일 경우 어류의 기포병 발생 위험이 증가하는 것으로 알려져 있어(Grahn et al., 2007; Machova et al., 2017; Midilli et al., 2019), 잠입형 주수 방식은 장기 사육 시 생리적 스트레스 요인으로 작용할 가능성이 높다.

탈기장치 장착형 수조에서는 잔여기체포화도가 가장 낮게 나타나, 탈기장치가 과포화 기체 제거에 효과적으로 작용함을 확인하였다. 이는 탈기장치가 벤츄리 구조를 통해 형성된 미세기포에

의해 과포화된 용존기체를 효과적으로 탈기시켰기 때문으로 판단된다. 벤츄리 방식은 별도의 동력 없이 압력차에 의해 기체 교환을 유도하는 방식으로, 에너지 소비를 최소화하면서 탈기 효율을 확보하는 장점이 있다(Badiola et al., 2012). 종합적으로, 주수 방식에 따라 기체환경의 질적 차이가 뚜렷하게 나타났으며, 특히 주수구 잠입형은 산소포화도 저하와 기체 과포화 증가라는 불리한 조건을 동시에 유발하는 것으로 확인되었다. 반면 탈기장치의 적용은 산소포화도를 개선하고 잔여기체포화도를 감소시켜, 양식환경의 안정성을 확보하는 데 효과적인 것으로 나타났다.

2. 수심 조건에 따른 탈기 효과 차이

사육수심 50㎝와 90㎝ 조건에서 주수구 노출형과 탈기장치 장착형 간 기체환경 변화를 비교·분석하였다. 총기체포화도(TGP)는 모든 처리구에서 유입원수와 유사한 수준을 유지하였으며, 이는 시스템 내에서 총 기체량 자체의 변화보다는 기체 조성의 변화가 주요하게 작용하였음을 시사한다. 이러한 결과는 사육수 내 기체교환 과정에서 총기체포화도는 상대적으로 안정적으로 유지되지만, 개별 기체 성분의 변화가 수질 및 생물에 더 중요한 영향을 미친다는 기존 연구와 일치한다(Colt, 1984; Wedemeyer, 1996). 산소포화도(SAT)의 경우, 주수구 노출형 처리구에서 유입원수 대비 크게 감소하였으며, 수심 증가에 따라 감소폭이 더욱 확대되는 경향을 보였다. 이는 수심 증가로 인한 체류시간 증가와 더불어 수조 내 양식생물 및 미생물의 호흡에 따른 산소 소비 증가 등에 기인한 것으로 판단된다. 특히 유수식 양식시스템에서 산소는 빠르게 소비되는 반면 외부로부터의 재공급은 제한적이기 때문에 수심 증가가 곧 산소 이용 효율 저하로 이어질 수 있다(Boyd, 1998). 반면 탈기장치 장착형 처리구에서는 상대적으로 높은 산소포화도를 유지하였는데, 이는 탈기 과정에서 질소 등 불활성 기체가 제거되면서 산소의 재용해 및 기체교환 효율이 향상된 결과로 해석된다(Timmons et al., 2002). 잔여기체포화도(RES)는 모든 처리구에서 유입원수보다 높은 값을 나타내어 시스템 내 기체 과포화 상태가 형성되고 있음을 확인하였다. 특히 주수구 노출형에서 더 높은 값을 나타냈으며, 수심 90㎝ 조건에서 그 차이가 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이는 수심 증가에 따른 수압 상승으로 기체 용해도가 증가하고, 용존 기체가 수중에 축적되면서 과포화 상태가 심화된 것으로 판단된다. 동일 유량조건에서 수심이 깊어질수록 수압증가 및 기체용해도가 증가하고 기체 방출이 제한되면서 수중에 잔류기체가 축적되는 결과로 해석된다(Weitkamp and Katx, 1980). 탈기장치 장착형에서는 잔여기체포화도가 주수구 노출형보다 낮게 나타나, 탈기장치가 과포화 기체 제거에 효과적으로 작용함을 확인하였다. 이는 탈기장치가 수중 기체를 대기 중으로 방출하여 기체평형 상태를 회복시키는 원리에 기반하며, 특히 질소 제거에 효과적인 것으로 알려져 있다(Colt and Tomasso, 2001). 따라서 탈기장치는 단순한 산소 공급 장치가 아니라, 사육수의 기체 균형을 조절하는 핵심 장치로 기능한다고 볼 수 있다.

결론적으로, 탈기장치는 총기체포화도에는 큰 영향을 미치지 않으나 산소포화도를 향상시키고 잔여기체포화도를 감소시키는 효과를 나타내어 사육수의 기체환경 개선에 유익한 역할을 수행하는 것으로 나타났다. 특히 넙치와 같은 저서성 어종의 경우 저산소 및 기체 과포화에 민감하게 반응하므로, 이러한 환경 변화는 성장 저하 및 생존율 감소로 이어질 가능성이 있다(Wedemeyer, 1996). 또한 수심 증가에 따라 산소포화도는 감소하고 잔여기체포화도는 증가하는 경향을 완화하는 데에도 효과적인 것으로 판단되므로, 육상양식 시스템 설계 시 적정 수심 유지와 함께 탈기장치의 적용이 필수적으로 고려되어야 할 것이다.

3. 성장 및 생존율 개선 효과

140일간의 넙치 성장시험 결과, 수심 50cm 조건에서 탈기장치 적용 수조의 증체량이 339.4g로 주수구 노출형 증체량 269.0g보다 유의적으로 높게 나타났다. 이는 과포화 기체 스트레스 감소로 인해 어류의 대사 효율에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 일반적으로 만성적인 기체 과포화 노출은 섭이 저하, 스트레스 증가, 면역력 저하로 이어질 수 있다(FAO, 2022). 본 연구에서 사료계수는 동일하였으나 성장량 차이가 발생한 점은 사료 이용 효율보다는 생리적 스트레스 완화 효과가 주요 요인일 가능성을 시사한다. 수심 90cm 조건에서는 성장 차이가 크지 않았으나, 생존율은 탈기장치 적용 수조에서 다소 높게 나타났다. 이는 넙치사육 환경에서 탈기장치가 생존 안정성 확보에 기여할 수 있음을 보여준다. 특히 제주지역과 같이 육상양식장이 밀집하여 취·배수 재유입 가능성이 존재하는 환경에서는(Kim, 2012; Kim et al., 2022.) 기체포화도 관리가 생산성 유지의 핵심 요소가 될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 현장 적용성 및 산업적 의의

육상양식은 외부 환경 영향이 적고 제어가 용이하다는 장점이 있으나, 펌프 및 산소공급 장치 가동으로 에너지 비용이 증가하는 구조적 한계를 가진다(Bostock et al., 2010; FAO, 2022). 본 탈기장치는 별도의 동력 없이 작동하는 구조로 설계되어 에너지 부담을 최소화하면서 수질 개선 효과를 확보할 수 있다는 점에서 경제성이 높다. 특히 제주지역은 넙치 생산량이 전국의 약 50%를 차지하는 핵심 생산지로 사육수 관리 기술의 개선은 지역 수산업 경쟁력 확보와 직결된다. 최근 경영비 상승과 수입 어종 증가로 인한 가격 경쟁 심화 상황(Shim et al., 2019; Kim et al., 2022; Baek et al., 2024)에서 생산성 향상 및 폐사율 감소는 양식어가 소득 안정에 직접적으로 기여할 수 있을 것으로 보인다.

본 연구는 육상 실험수조에서 수행된 실증시험으로, 양식장 사육수조 및 환경을 고려하여 사육수 환수율, 사육밀도, 계절 조건에 따른 추가 검증이 필요하다. 또한 가스병 발생률, 혈액학적 스트레스 지표 등 생리학적 분석이 병행된다면 탈기장치의 효과를 보다 정량적으로 입증할 수 있을 것이다.

References

Badiola M, Mendiola D and Bostock J(2012). Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. Aquacultural Engineering, 51, 26~35.

Baek EY, Seng JW and Kim DY(2024). A study on the characteristics and development direction of olive flounder aquaculture by region. The Journal of Korean Island, 36(2), 17~42.

Bostock J, McAndrew B, Richards R, Jauncey K, Telfer T, Lorenzen K, Little D. C, Ross L, Handisyde N, Gatward I, and Corner R(2010). Aquaculture: Global status and trends. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 365(1554), 2897~2912.

Boyd CE(1998). Pond water aeration systems. Aquacultural Engineering. 18(1), 9~40. https://doi.org/10.1016/ S0144-8609(98)00019-3

Colt J(1984). Computation of Dissolved Gas Concentrations in Water as Functions of Temperature, Salinity, and Pressure. American Fisheries Society.

Colt J and Tomasso JR(2001). Hatchery water supply and treatment. In: Fish Hatchery Management, 2nd ed. American Fisheries Society, 91~186.

FAO(2022). The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Grahn B. H, Sangster C, Breaux C, Stephen C and Sandmeyer L(2007). Case report: clinical and pathologic manifestations of gas bubble disease in captive fish. Journal of Exotic Pet Medicine, 2(16), 104~112.

Kim JS(2012). Effect of submarine groundwater discharge (SGD) on the budgets of nutrients in the

coastal sea off Jeju Island, Korea.
Kim J, Kim Y, Park SE, Kang DJ and Rho T (2022). Impact of aquaculture on distribution of dissolved organic matter in coastal Jeju Island, Korea. Environmental Science and Pollution Research, 29, 553~563.
Kim NL, Hanl HS, Lee SH, Kim KW and Kim DH(2022). An Economic Analysis of the Extruded Pellets on the Olive Flounder Paralichthys olivaceus Farms in the Jeju Region. Korea Journal of Fish Aquat Sci, 55(5), 681~687. https://doi.org/10.5657/KFAS.2022. 0681
Kim YH(2022). Investigation of water qualities and microbials on the flow-through olive flounder (Paralichthys olivaceus) farms using coastal seawater and underground seawater in Jeju. Journal of Korean Soc Fish Ocean Technol, 58(1), 59~67.
Machova J, Faina R, Randak T, Valentova O, Steinbach C, Kroupova HK and Svobodova Z (2017). Fish death caused by gas bubble disease: a case report. Veterinární medicína, 62(4), 231~237.
Midilli S, Çoban D, Güler M and Küçük S(2019). Gas bubble disease in Nile tilapia and hybrid red tilapia (Cichlidae, Oreochromis spp.) under culture conditions. Journal of Fisheries and Aquatic Sciences (Su Ürünleri Dergisi), 36(3), 285~291.
National Institute of Fisheries Science(2018). Development of technologies to reduce pollution loads from effluents in densely populated aquaculture coastal areas of Jeju. NIFS Research Report.
Shim JD, Hwang SD, Jang SY, Kim TW and Jeong JM(2019). Monitoring of the mortalities in oliver flounder (*Paralichthys olivaceus*) farms of Korea. Journal of Fish Pathol, 32, 29~35. https://doi.org/10.7847/JFP.2019.32.1.029
Statistics Korea(2025), Survey on Fishery Production in 2024. Accessed 30 January 2026 from KOSIS Korean Statistical Information Service.
Timmons MB, Ebeling JM, Wheaton FW, Summerfelt ST and Vinci BJ(2002). Recirculating Aquaculture Systems. Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, NY, USA.
Wedemeyer GA(1996). Physiology of Fish in Intensive Culture Systems. Chapman & Hall, New York, USA.
Weitkamp DE and Katz M(1980). A review of dissolved gas supersaturation literature. Transactions of the American Fisheries Society, 109(6), 659~702.

• Received : 24 June, 2026
• Revised : 18 August, 2026
• Accepted : 31 August, 2026