

순환여과 양식시스템 내 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)의 적정 용존산소 농도평가

박근홍 · 최진서¹ · 이영훈² · 박정환^{3*}

부경대학교 대학원 수산생물학과 대학원생, ¹부경대학교 양식응용생명과학전공 학생, ²부경대학교 대학원 수산생물학과 대학원생, ³부경대학교 양식응용생명과학전공 교수

Evaluation of the optimal dissolved oxygen level for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in the recirculating aquaculture system

Kunhong PARK, Jinseo CHOI¹, Younghun LEE² and Jeonghwan PARK^{3*}

Graduate student, Department of Fisheries Biology, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

¹Student, Department of Aquaculture and applied Life Sciences, National University, Busan 48513, Korea

²Graduate student, Department of Fisheries Biology, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

³Professor, Department of Aquaculture and applied Life Sciences, National University, Busan 48513, Korea

Conventional aquaculture faces declining productivity, shifting to recirculating aquaculture system (RAS), known for minimizing water usage and maintaining consistent water temperatures for year-round fish growth. Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), a globally important cold-water species and the third most farmed fish in inland waters of Korea, valued for its fecundity and rapid growth. Dissolved oxygen, an important environmental factor affecting fish production and economics, highlights the need for smart aquaculture practices. Since 2018, the rise of intelligent aquaculture platforms, incorporating information and communications technology (ICT), emphasizes the essential role of RAS implementation. This eight-week study aimed to determine the optimal dissolved oxygen concentration for rainbow trout in RAS, utilizing a device for continuous monitoring, control and record. Dissolved oxygen concentrations were set at 5-6 mg/L, 9-10 mg/L, 14-15 mg/L and 17-18 mg/L. The growth rate significantly decreased at 5-6 mg/L, with no significant differences in other experimental groups. In hematological analysis, growth hormone (GH) was significantly highest at 5-6 mg/L, followed by 9-10 mg/L while Insulin-like growth factor-1 (IGF-1) was significantly lowest at 5-6 mg/L. In conclusion, the optimal dissolved oxygen concentration for rainbow trout in RAS is approximately 9-10 mg/L. Higher concentrations do not contribute to further growth or profitability.

Keywords: Recirculating aquaculture system, Rainbow trout, Dissolved oxygen, ICT, Oxygen monitoring and control system

Received 31 October 2023; Revised 20 November 2023; Accepted 23 November 2023

*Corresponding author: parkj@pknu.ac.kr, Tel: +82-51-629-5911, Fax: +82-51-629-5908

Copyright © 2023 The Korean Society of Fisheries and Ocean Technology

서론

기존 유수식 양식 방법은 양식 배출수에 의한 연안 환경 오염으로 잦은 질병의 발생, 항생제 사용, 양식 수산물에 대한 불신 등 생산성이 지속해서 감소하고 있다(Kim et al., 2013). 이로 인해 순환여과 양식시스템(Recirculating aquaculture system, RAS)을 이용한 양식 방법에 관한 관심과 중요성이 커지고 있다. 순환여과 양식시스템은 폐쇄형 환경에서 물 사용을 최소화하면서 집약적으로 운영될 수 있다. 이 때문에 환수량을 줄여 어류의 사육 수온을 효과적으로 유지할 수 있으며(Schram et al., 2014) 면적대비 생산성이 높고 어류의 최적 성장 기간을 연중 유지할 수 있다(Park et al., 2008). 또한 기존 양식 방법과 비교하여 상대적으로 농축된 배출수를 다양한 수처리 시스템을 통해 효과적으로 처리할 수 있다(Summerfelt and Vinci, 2008).

무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)는 냉수성 어종으로(Behnke, 1992) 다른 어류에 비해 성장이 빠르고 번식력이 강해서 전 세계적으로 많이 양식되고 있다. 또한, 우리나라에서 지난 50년간 양식되어 왔으며 내수면의 주요 양식 어종이다. 특히, 무지개송어는 최근 우리나라에서 급증하는 연어 수입에 대한 대체 어종으로 국내에서 많은 관심을 받고 있다(Paek and Park, 2016). 2022년 연어 수입량은 76,000톤 규모로 국내 넙치 생산량보다 30,000톤 더 많은 수준이며 연간 증가 추세를 보이고 있다(FIPS, 2023). 반면에 국내 무지개송어 생산량은 2021년 약 2,800톤으로(KMI, 2022) 미비하지만, 지속해서 증가하는 수입 연어 등에 대한 시장 경쟁력을 확보하기 위해 생산량을 증대해야 한다는 주장이 제기되고 있다(Lee, 2013; Paek and Park, 2016).

사육수의 환경 요인 중 하나인 용존산소는 어류의 생산량을 결정하는 중요한 요인이며(Erez et al., 1990; Itazawa and Hanyu, 1991), 수용밀도를 결정하거나(Kawamoto, 1977), 사료 요구량을 계산(Buentello et al., 2000)하는데 중요한 변수다. 일반적으로 용존산소 농도가 임계점 이하로 떨어지면 사료효율 및 사료섭취율이 감소하여 성장률에 영향을 미친다(Thetmeyer et al., 1999; Foss et al., 2002). 연어과 어종은 용존 산소의 포화도 80~100% 사이에서 최대 사료 효율 및 성장이 나타난다고 보고된 바 있다(Yovita, 2007). 용존산소량이 낮아지면 성장 지연과 질병 발생, 스트레스 유발에 영향을 주며 지속해서

저산소 상태가 되면 폐사할 수 있다(Herrmann et al., 1962; Fischer, 1963; Itazawa 1970; Cameron, 1971). 산소 결핍에 대한 민감도는 종마다 다르며(Ekau et al., 2010), 대부분의 송어 종의 경우, 낮은 용존산소 농도(5~6 mg/L)에 노출되면 폐사율이 증가한다(Doudoroff and Shumway, 1970; Weithman and Haas, 1984). 산소 포화도가 100% 이상 과포화되면 기포병이 발생할 수 있다(Yovita, 2007). 기포병은 총 기체 포화도가 110% 이상에서 발생하는데 어류의 아가미, 혈관, 조직 등에 기포가 발생하는 질병으로 알려져 있다. 산소포화도 130~300%에 Senegal sole (*Solea senegalensis*) 치어를 노출시킨 결과 기포병, 비정상적인 헤엄, 피하기중, 안구 돌출, 출혈, 아가미 장애 등의 증상이 나타났다(Salas-Leiton et al., 2009). 반면 turbot (*Scophthalmus maximus*)은 산소 포화도 147~223%까지 상승해도 성장률, 신진대사에 대해 특별한 영향이 나타나지 않았다는 연구 결과가 있다(Person et al., 2002). 이러한 연구 결과는 산소 과포화가 미치는 영향이 어종에 따라 다를 수 있음을 의미한다.

순환여과 양식시스템은 고밀도 사육이 가능하며 고밀도로 사육했을 경우, 양식생물에 의한 용존산소의 소모량이 많다. 용존산소 공급 관리가 적절히 이루어지지 않을 경우 용존산소의 농도가 급격히 감소하여 대량 폐사로 인한 경제적 손실의 주요 원인이 되기도 한다. 이러한 경제적 손실을 방지하기 위해 순환여과 양식시스템에서는 순도가 높은 액체 산소와 산소용해기를 이용하여 높은 용존산소(과포화) 농도를 유지하는 경향이 있으나, 이는 운영 경비 측면에서도 손실 요인이 될 수 있어 경제적인 용존산소 농도에 대한 평가가 필요하다.

용존산소는 양식에서 중요한 환경 요인이지만 이전 연구들은 주로 단기간에 한정되어 진행되었으며, 특히 순환여과 양식시스템에서 진행된 결과는 거의 없다. 그 이유는 기존 장치로는 일정한 용존산소 농도를 지속적으로 안정적으로 유지하기 어렵기 때문이다. 이 연구는 이러한 문제를 보완하고 장기간 용존산소가 어류에 미치는 영향을 평가하기 위해 설정한 용존산소 농도를 안정적이고 지속해서 유지할 수 있고 모니터링 및 제어할 수 있는 시스템을 이용하였다.

2018년 이후, 글로벌 양식 수산물 생산체계는 급격히 추진되고 있으며 이에 따라 ICT를 융복합 기술을 활용한

스마트양식 플랫폼이 빠르게 개발 및 보급되고 있다. 스마트양식을 성공적으로 수행하기 위해서는 다양한 센서로부터 획득한 정보를 기반으로 성장, 수질 및 사료공급을 체계적으로 관리하고 데이터의 활용, 분석, 통합 관리하여 다양한 성장 활동에 대한 판단을 체계화할 수 있어야 한다 (NARS, 2019). 그러나 스마트양식을 효과적으로 수행하기 위해서는 순환여과 양식시스템의 도입이 반드시 필요하며, 순환여과 양식시스템을 효과적으로 운영하기 위한 무지개송어 양식의 기초 데이터가 부족한 상황이다.

본 연구를 통해 순환여과 양식시스템에서 무지개송어의 성장 지연 및 폐사를 방지하고 최적의 용존산소 농도를 도출하며 스마트 양식 플랫폼을 구축하기 위한 순환여과 양식시스템에서의 수질 기초자료로 제시하고자 한다.

재료 및 방법

사육 시스템

본 연구에서 담수 순환여과 양식시스템은 모서리가 둥근 정사각형의 수조(110x110x100 cm) 12개, 생물학적 여과조(100x100x100 cm) 2개, 생물학적 여과조와 동일 규격의 저수조 1개, 드럼필터(0.55Kw, NT-PM-20, Netech, Guangdong, China), 냉각기(1.5 HP, HAK-1500, Hiirac, Gimhaem, Korea) 2개, UV 살균기(40W, HS-50, Hansung-UV, Seongnam, Korea) 2개, 순수산소발생기

(0.48Kw, O2MOS-7LC, Goyang, Korea) 4개로 구성하였다(Fig. 1). 사육 수조는 중앙으로 경사를 지게 하여 배수구를 통해 고형물이 쉽게 빠져나갈 수 있도록 설계하였다. 무지개송어가 수조 밖으로 탈출하는 것을 방지하기 위해 전체 사육 수조 위에 아크릴 판(110 cm X 100 cm X 0.5 cm)을 올리고 가운데 부분에 구멍을 뚫어 사료를 공급할 수 있도록 하였다. 사육 수조에서 발생하는 고형물을 제거하기 위해 드럼필터 내 80 μm의 스테인리스 망을 이용하였고, 생물학적 여과조는 2개의 수조(100x100x100 cm)를 연결하여 구성한 유동상 여과조를 이용하였다. 생물학적 여과조 내 여과재(Kaldnes K1, Yuangeng International Group, Shenzhen, Guangdong, China)의 충진율은 80%이었다. 여과재는 실험 시작 이전부터 숙성시켜 사용하였다. 배출되는 사육수는 드럼필터, 생물학적 여과조, UV 살균기를 거쳐 다시 사육 수조로 유입되었다. 산소공급은 산소발생기, 수질측정 제어기(Pacific, Oxyguard, Farum, Denmark), 솔레노이드 밸브(6W, WV121S Parker, Seongnam, Korea)를 이용하여 수조마다 개별적으로 산소량을 조절하였다.

시스템 내 총 수량은 약 10,300 L이며 시스템 내 모든 수조의 유량은 680 L/hr으로 일간 24회전으로 조절하였다. 일간 환수량은 4주 차까지 전체 시스템 수량의 10%, 5주 차부터는 15%로 설정하였다. 일간 환수량에는 드럼필터

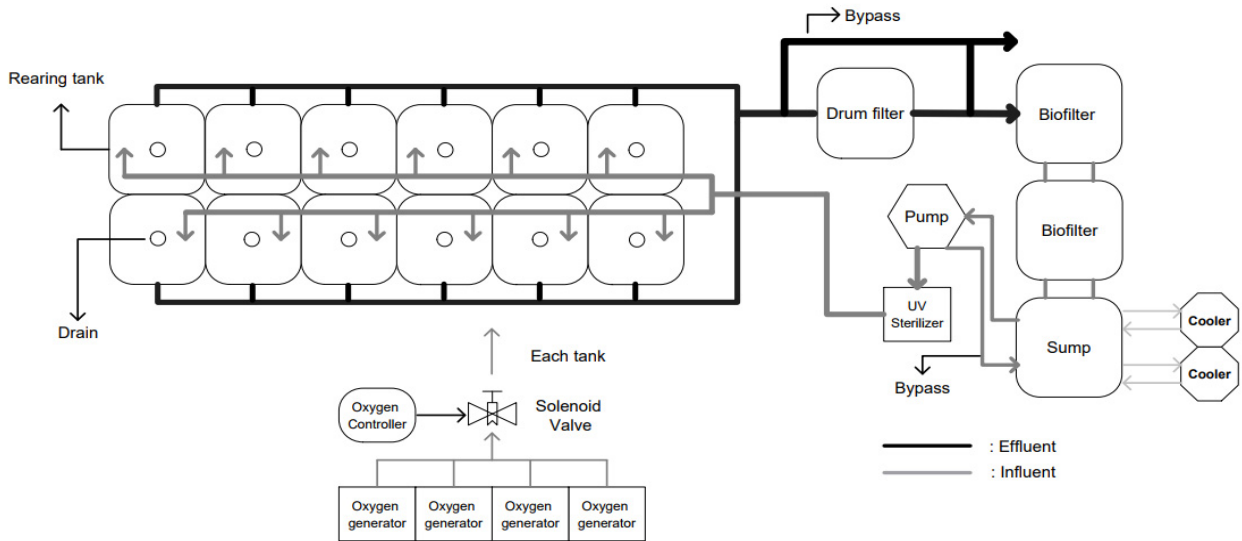


Fig. 1. The schematic drawing of the experimental recirculating aquaculture system and oxygen monitoring and control system.



Fig. 2. Actual operation figures of dissolved oxygen control system and sensor.

의 역세적으로 배출되는 수량을 포함하여 계산하였다.

실험 어류 및 실험 조건

본 실험에 사용된 실험 어류는 경상북도 상주시 청리면 수상리에 있는 양식장(LeeHwaJeong, Korea)에서 사육 중인 무지개송어를 분양받아 부산광역시 남구 부경대학교 양식시스템 연구실에서 2주간 순치하였다. 담수 순환여과 양식시스템에서 무지개송어를 사육할 때 용존산소가 미치는 영향을 확인하기 위해 4개의 실험구로 나누어 3반복으로 각 사육 수조에 90 마리의 무지개송어를 수용하고 5~6 mg/L (Treatment 1), 9~10 mg/L (Treatment 2), 14~15 mg/L (Treatment 3), 17~18 mg/L (Treatment 4)의 용존산소를 유지하였다. 순수산소발생기에 솔레노이드 밸브를 설치하였고 수질측정 제어기를 통해 자동 조절하였다. 실험에 이용된 무지개송어는 평균 체중 123.7 ± 12.9 g, 전장 21.4 ± 1.4 cm로 실험조건에 적합한 무지개송어를 선별하였다. 사육 시

스템으로 실험어 수용 전, 후로 3일간 절식하였다. 실험 기간 광주기는 12L:12D (08:00-20:00, 20:00-08:00)로 유지하였다. 사육 수온은 냉각기를 이용하여 적정 수온을 유지하였고 pH는 중탄산나트륨을 넣어 적정 pH를 유지하였다. 사료는 송어용 시판 배합 사료(침강 사료, High fat trout, Daehan Feed, Incheon, Korea)를 공급(Table 1)하였으며, 오전 10:00, 오후 7:00 에 2회 반복으로 공급하였으며, 먹지 않고 남은 사료는 회수하여 총공급한 사료량에서 제외하였다.

Table 1. Ingredient of commercial feed

Ingredient	Content (%)
Crude Protein	44
Crude fat	22
Crude ash	13
Crude fiber	5
Calcium	1.0
Phosphorus	1.8

총 실험 기간은 8주이고 실험 종료시 각 실험구별 20마리를 무작위로 선별하여 개별 개체 중량 및 전장, 체중 성장률, 전장 성장률, 일간 성장률, 일간 사료섭취량, 사료효율, 비만도, 생존율을 측정하였다. 측정 시에는 측정 전, 후를 포함하여 3일간 절식하였다. 성장 관련 인자들은 아래의 수식에 따라 계산하였다.

$$\text{Weight growth rate (\%)} = \{(\text{Final average weight} - \text{Initial average weight}) / \text{Initial average weight}\} \times 100 \quad \text{식(1)}$$

$$\text{Length growth rate (\%)} = \{(\text{Final average length} - \text{Initial average length}) / \text{Initial average length}\} \times 100 \quad \text{식(2)}$$

$$\text{Daily Growth rate (\%/day)} = \{\ln(\text{Final weight}) - \ln(\text{Initial weight}) / \text{Rearing period}\} \times 100 \quad \text{식(3)}$$

$$\text{Daily feed intake (\%/day)} = \text{Daily growth rate} \times \text{Feed coefficient ratio} \quad \text{식(4)}$$

$$\text{Feed coefficient ratio (FCR)} = \text{Feed intake (kg)} / \{\text{Final weight (kg)} - \text{Initial weight (kg)}\} \quad \text{식(5)}$$

$$\text{Condition factor} = \text{Weight} / (\text{Length})^3 \times 100 \quad \text{식(6)}$$

$$\text{Survival rate (\%)} = \text{Final number of fish} / \text{Initial number of fish} \times 100 \quad \text{식(7)}$$

수질 분석

pH, 용존산소(Dissolved oxygen, DO), 총 암모니아성 질소(Total ammonia nitrogen, TAN), 아질산성 질소(Nitrite nitrogen, NO₂-N), 질산성 질소(Nitrate nitrogen, NO₃-N), 총 부유 고형물(Total suspended solids, TSS), 탁도(Turbidity), 총 유기탄소(Total organic carbon, TOC)를 수조별로 측정하였다. pH는 1일 3회(11:00, 15:00, 19:00) 휴대용 다항목 수질 측정기(AM70, Apera Instruments, Columbus, USA)를 이용하여 측정하였고 용존산소는 수질측정제어기(Pacific, Oxyguard, Farum, Denmark)를 이용하여 한 시간에 약 5회 연속측정하였다. 총 암모니아성 질소, 아질산성 질소는 주 2회(화요

일, 금요일), 질산성 질소, 총 부유 고형물, 탁도, 총 유기탄소는 주 1회(금요일) 측정하였다. TAN와 NO₂-N는 각각 Salicylate method (Hach method 8155)와 Diazotization (Hach method 8507)을 이용하여 분광광도계(DR 900, Hach, Loveland, USA)로 흡광도를 측정하였다. NO₃-N는 Cadmium Reduction Method (Hach Method 8039), Turbidity는 Absorptometric Method (Hach Method 8237), Total organic carbon은 Direct TNT Method (Hach method 10129)에 따라 분광광도계(DR 900, Hach, Loveland, USA)를 이용하여 측정하였다. Total suspended solids는 해수공정시험기준(MOF, 2018)에 따라 측정하였다.

혈액학적 분석

용존 산소 농도에 따른 무지개송어의 혈액학적 영향을 조사하기 위해 각 사육 수조 당 20마리를 무작위로 선별하여 혈액을 채취하였다. 혈액 채취 시, 스트레스를 최소화하기 위해 MS-222 (Sigma-Aldrich, Missouri, USA)를 이용하여 실험어를 마취하였고, 헤파린(Sigma-Aldrich, Missouri, USA)이 처리된 주사기를 이용하여 미부혈관에서 채혈하였다. 헤모글로빈 수치와 Hematocrit 측정을 위해 전혈은 채혈 직후 사용되었으며, 혈장 성분 분석을 위한 혈장은 원심분리기를 통하여 혈액에서 분리하였고, -80℃ 미관에서 냉동 후, 해동하여 혈액 분석을 진행하였다. 전혈은 헤모글로빈(Hemoglobin), 헤마토크리트(Hematocrit)를 측정하는데 사용되었으며, 분리한 혈장은 용존산소에 따른 어류의 성장인자, 스트레스인자에 대한 영향을 조사하기 위해 성장 호르몬(Growth hormone, GH), 인슐린유사성장인자(Insulin-like growth factor 1, IGF-1), 코티졸(Cortisol)을 측정하였다. GH는 GH ELISA kit (Cusabio, Wuhan, China), IGF-1는 IGF-1 ELISA kit (Cusabio, Wuhan, China), Cortisol은 Cortisol ELISA kit (Enzo, New York, USA)로 분석하였다.

헤모글로빈은 임상용 kit (Asan Pharm, Seoul, Korea)를 이용하여 Cyan-methemoglobin법으로 측정하였다. 적혈구 용적(Hematocrit)은 내부가 헤파린으로 코팅된 모세관 내로 혈액을 넣어 쥘링 왁스로 쥘링하고, Micro-hematocrit centrifuge (Digital Centrifuge, Digisystem Laboratory Instruments Inc, Taiwan)으로 12,000 rpm, 10분간 원심분리 후 Micro-hematocrit reader를 이용하

여 측정하였다. 또한 이 값으로부터 평균적혈구혈색소 농도(Mean corpuscular hemoglobin concentration, MCHC)를 아래의 수식을 통해 계산하였다.

$$\text{Mean corpuscular hemoglobin concentration (MCHC, \%)} = \text{Hemoglobin (g/dL)/hematocrit (\%)} \times 100 \quad \text{식(8)}$$

통계 분석

통계 처리는 SPSS 27.0 통계프로그램을 이용하여 실시하였다. One way ANOVA test를 실시하여 결과값들 간의 유의성 분석을 실시하였다. 이 때, 등분산성 검정을 위해 Levene 검정을 실시했다. 등분산일 경우에는 Duncan's multiple range test를 이용하였고, 등분산성이 아닐 경우 Games-Howell's multiple range test를 실시하여 유의성을 검정하였다.

결 과

어류의 성장 및 생존율

총 8주 간의 사육 기간이 끝나고 측정한 구간별 성장

률 및 생존율의 결과를 Table 2에 나타냈다. 8주 간의 최종 성장 지표의 측정 결과인 총 중량, 사육밀도, 증중량, 일간 성장률, 중량 성장률, 체장 성장률, 일간 사료섭취율은 실험구 간에 유의한 차이가 있었다($P < 0.05$). 위에서 언급한 항목별로 Treatment 1은 Treatment 2, Treatment 3, Treatment 4와 유의적인 차이가 있었지만 ($P < 0.05$) Treatment 2, Treatment 3, Treatment 4 사이에서는 유의하게 차이가 없었다($P > 0.05$). 사료섭취량, 사료계수, 비만도, 생존율은 모든 구간에서 유의하게 차이가 없었다($P > 0.05$).

수질 분석

총 8주간의 실험 기간의 수질 분석 결과를 Table 3에 나타냈다. pH는 모든 구간에서 유의한 차이가 없었다 ($P > 0.05$). 용존산소량의 경우 실험구별로 목표 용존산소량과 유사하게 유지되어 구간별로 차이가 있었다 ($P < 0.05$). TAN와 NO₂-N 농도는 저수조(Sump)와 Treatment 1에서 다른 구간에 비해 낮았다($P < 0.05$).

8주간의 용존산소의 변화를 관찰하기 위해 시간당 약

Table 2. Growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared in four different dissolved oxygen concentrations for eight weeks at recirculating aquaculture system

Parameter	Treatment 1	Treatment 2	Treatment 3	Treatment 4	P value
Initial total biomass (kg)	10.9±0.1	10.7±0.0	10.9±0.1	10.9±0.1	0.370
Final total biomass (kg)	20.0±0.2 ^b	25.1±0.6 ^a	23.8±1.8 ^a	25.2±0.4 ^a	0.001
Weight gain (kg)	9.1±0.13 ^b	14.4±0.6 ^a	13.0±1.7 ^a	14.2±0.3 ^a	0.000
Initial stocking density (kg/m ³)	16.0±0.2	15.8±0.0	16.0±0.2	16.1±0.2	0.370
Final stocking density (kg/m ³)	29.4±0.3 ^b	36.9±0.8 ^a	35.0±2.7 ^a	37.0±0.6 ^a	0.001
Growth rate (Weight, %)	92.3±8.1 ^b	126±6 ^a	106±17 ^a	125±5 ^a	0.009
Growth rate (Length, %)	13.1±1.1 ^b	19.0±0.8 ^a	19.0±2.8 ^a	18.1±1.8 ^a	0.011
Daily growth rate (%/day)	1.17±0.08 ^b	1.45±0.05 ^a	1.44±0.13 ^a	1.44±0.04 ^a	0.011
Daily feed intake (%/day)	1.39±0.13 ^b	1.58±0.11 ^a	1.64±0.08 ^a	1.66±0.04 ^a	0.024
Feed conversion ratio	1.19±0.03	1.09±0.05	1.16±0.09	1.14±0.01	0.212
Condition factor	1.23±0.02	1.24±0.04	1.23±0.04	1.26±0.04	0.576
Survival rate (%)	97.4±3.6	98.3±0.6	96.7±3.0	97.0±3.2	0.901

Table 3. Water quality (pH, dissolved oxygen, TAN, NO₂-N) in the experimental recirculating aquaculture system during eight weeks

Parameter	Target dissolved oxygen concentration (mg/L)					P value
	Treatment 1	Treatment 2	Treatment 3	Treatment 4	Sump	
pH	7.20±0.07	7.18±0.07	7.19±0.07	7.19±0.08	7.19±0.07	0.180
Dissolved oxygen (mg/L)	5.92±0.67 ^c	9.13±0.69 ^c	14.04±0.97 ^b	17.06±0.76 ^a	9.18±0.42 ^d	0.000
TAN (mg/L)	0.48±0.13 ^b	0.53±0.12 ^a	0.54±0.13 ^a	0.54±0.13 ^a	0.38±0.10 ^c	0.000
NO ₂ -N (mg/L)	0.64±0.12 ^b	0.66±0.12 ^a	0.66±0.12 ^a	0.67±0.12 ^a	0.64±0.13 ^b	0.006

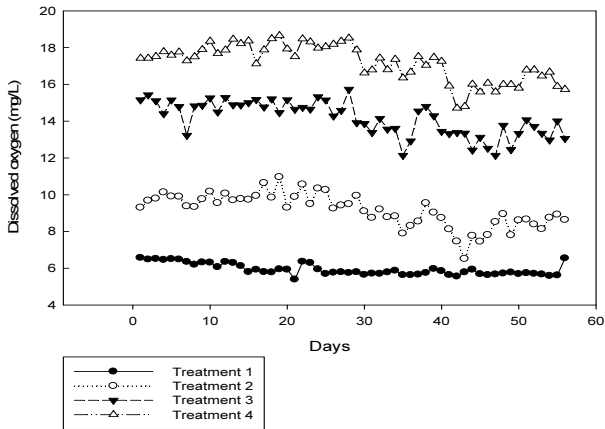


Fig. 3. Dissolved oxygen (mg/L) concentration profiles for four different treatments over 56 days.

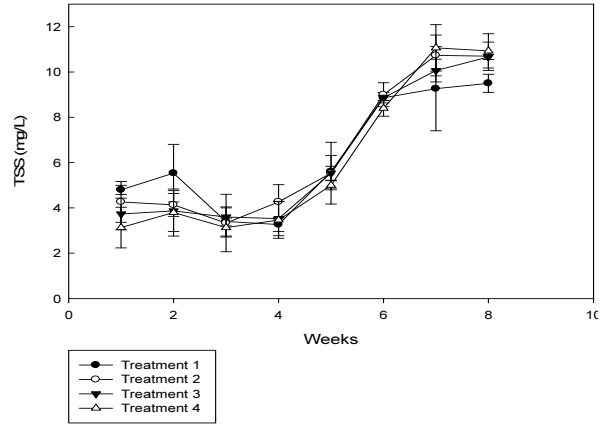


Fig. 6. Total suspended solids (TSS) in the experimental recirculating aquaculture system during eight weeks.

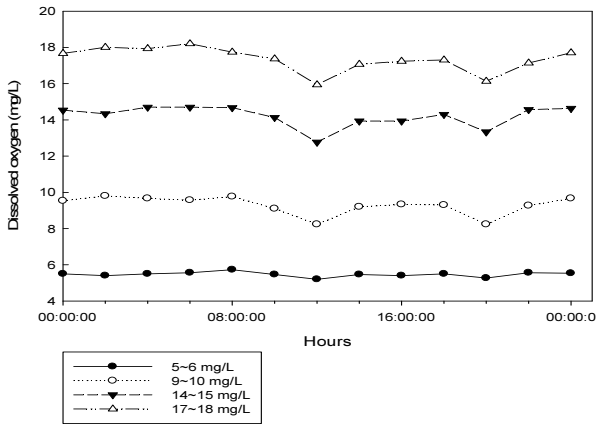


Fig. 4. Daily dissolved oxygen (mg/L) concentration profiles for four different treatments over 24 hours, including a 2-month average.

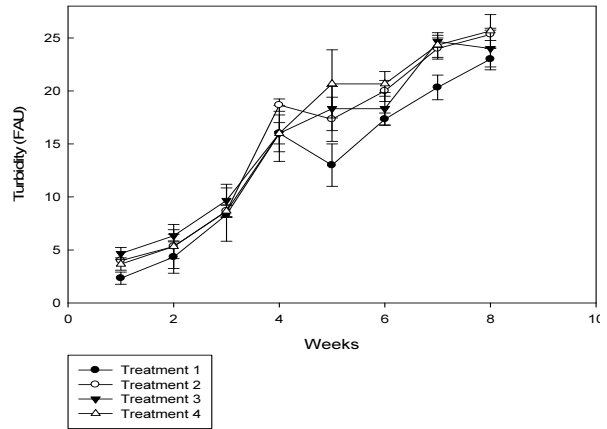


Fig. 7. Turbidity in the experimental recirculating aquaculture system during eight weeks.

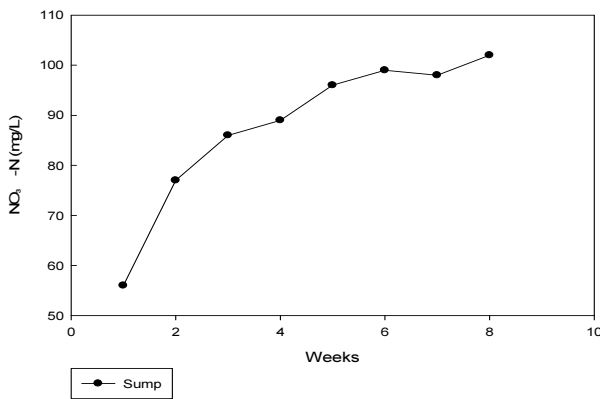


Fig. 5. $\text{NO}_3\text{-N}$ in the sump of the experimental recirculating aquaculture system during eight weeks.

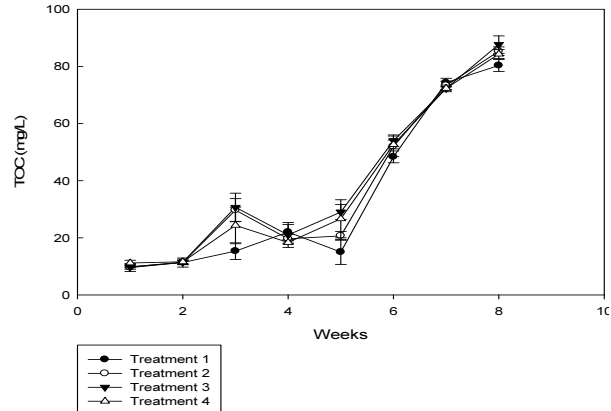


Fig. 8. Total organic carbon (TOC) in the experimental recirculating aquaculture system during eight weeks.

5회의 용존산소량을 측정하였고 이를 하루 단위로 Fig. 3에 나타내었다. 각 실험구별로 목표로 한 용존산소가 일정하게 유지되는지 관찰하기 위해 2시간 간격으로 일주기로 용존산소량을 측정하였다(Fig. 4). 전 실험 기간 및 일주기 변화로 볼 때 각 실험구별로 목표로 한 용존산소 농도가 일정하게 유지되었다. Fig. 5, 6, 7, 8에 각각 NO₃-N, total suspended solids, turbidity, total organic carbon 농도 변화를 나타내었다. 이 수질 지표들은 순환여과 양식시스템 내에 지속해서 축적되는 경향을 보였으나 실험구별로 유의하게 차이가 나타나지는 않았다.

혈액학적 분석

총 8주간의 실험이 종료된 후 용존산소량에 따른 혈액학적 분석 결과, Hemoglobin과 Hematocrit는 실험구별로 유의하게 차이가 있었으며 용존산소가 높은 구간일수록 수치가 낮았다($P < 0.05$). MCHC는 용존산소 농도 구간별로 유의하게 차이가 없었다($P > 0.05$). GH 농도는 실험구별로 유의하게 차이가 있었고 Treatment 1에서 가장 높았고 용존산소 농도가 높아질수록 상승하였다($P < 0.05$). IGF-1 농도는 실험구별로 유의하게 차이가

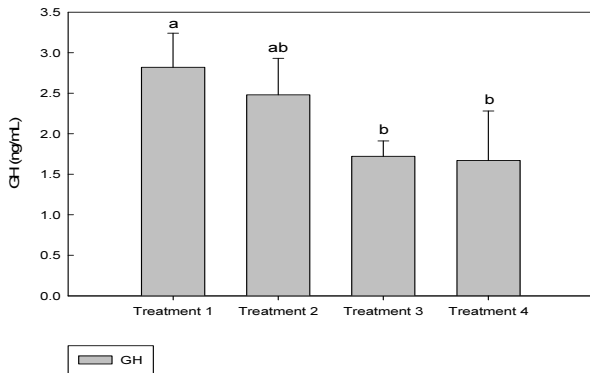


Fig. 9. Growth hormone (GH) levels of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared in four different dissolved oxygen ($P < 0.032$).

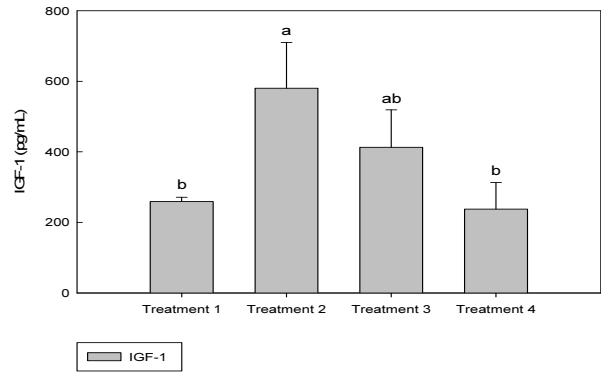


Fig. 10. Insulin like Growth Factor (IGF-1) levels of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared in four different dissolved oxygen ($P < 0.006$).

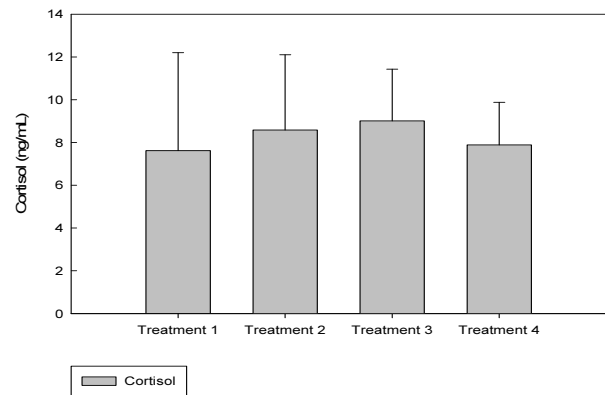


Fig. 11. Cortisol levels of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared in four different dissolved oxygen.

있었으며 Treatment 2에서 가장 높고 Treatment 3이 두 번째로 높았으며, Treatment 1과 Treatment 4에서 가장 낮았다($P < 0.05$). Cortisol 농도는 실험구별로 유의하게 차이가 없었다($P > 0.05$).

고찰

본 연구에서는 총 8주간 용존산소 모니터링 및 제어를 통해 용존산소량에 따른 무지개송어의 성장과 스트

Table 4. Hematological changes in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to four different dissolved oxygen concentration for eight weeks at recirculating aquaculture system

	Treatment 1	Treatment 2	Treatment 3	Treatment 4	P value
Hemoglobin (g/dL)	12.2±0.6 ^a	11.7±0.6 ^a	10.4±0.5 ^b	10.2±0.1 ^b	0.004
Hematocrit (%)	45.6±0.0 ^a	42.5±1.4 ^b	39.8±1.2 ^b	37.9±2.5 ^c	0.002
MCHC (%)	26.7±1.3	27.5±1.4	26.2±2.1	27.0±1.7	0.818

레스에 미치는 영향을 평가하였다. Treatment 1에서는 다른 실험구와 비교해 총 중량, 체중 성장률, 전장 성장률, 일간 사료섭취량이 모두 유의적인 차이가 있었다. Treatment 1를 제외한 실험구 간의 유의적인 차이는 보이지 않았다. 이는 용존산소량을 특정 농도까지 증가시키면 어류의 성장률을 향상한다는 연구(Brett and Groves, 1979)와 일치하였고 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)는 산소 포화도가 약 60% 미만으로 감소하면 식욕이 감소하였다는 연구(Jobling, 1995)와도 일치하였다. 이와 유사하게 European sea bass (*Dicentrarchus labrax*), blue tilapia (*Oreochromis aureus*), channel catfish (*Ictalurus punctatus*) 등 대부분의 어종이 저산소 환경에 노출되었을 때 성장이 감소하였다는 연구(Thetmeyer et al., 1999; Papoutsoglou and Tziha, 1996; Buentello et al., 2000)가 보고되었다. 특히 냉수성 어종의 이상적인 용존산소량은 10~11 mg/L이고 최소 7 mg/L 이상 유지되어야 한다. 용존산소량이 5 mg/L 이하로 내려갈 경우, 호흡곤란을 일으킬 수 있다(NIFS, 2017). 다만, 5~6 mg/L을 유지한 실험구의 생존율은 다른 실험구와 비교해 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 하지만 만성적인 저산소로 인하여 사료섭취량이 적어지고 성장률에 부정적인 영향이 나타났다. Treatment 1의 무지개송어는 사료 급여 시에 사료를 섭취하다가도 금방 섭식 활동이 감소하였다. 어류는 저산소 환경에서 성장, 섭식 활동 및 유영 활동이 저하하게 된다는 연구 결과(Poon et al., 2001; Miller et al., 2002)와 일치하였다. 이는 저산소 환경으로 인해 무지개송어가 항상성을 유지하려는 조절 반응으로 보인다.

실험기간 동안 수온, pH는 모든 실험구에서 차이가 나타나지 않았다. 총 암모니아성 질소와 아질산성 질소는 저수조와 Treatment 1에서 유의하게 낮게 나타났는데, 이는 다른 실험구에 비해 일간 사료 섭취량이 적어 생긴 결과로 판단된다. 모든 실험구에서 총 암모니아성 질소는 평균 0.52 ± 0.13 mg/L, 아질산성 질소는 평균 0.66 ± 0.12 mg/L으로 유지되어 무지개송어의 사육 적정 범위를 유지하였다. 수온은 17.58 ± 0.52 °C를 유지하여 냉수성 어류인 무지개송어의 적정 사육수온 12~18 °C 이내로 유지되었으며 pH는 7.19 ± 0.07 를 유지하여 무지개송어의 적정 pH 6.7~8.2 이내로 유지하였다(NIFS, 2017). 질산성 질소, 총 부유 고형물, 탁도, 총 유기탄소

는 8주간의 실험 기간에 지속해서 축적되는 경향이 나타났다. 질산성 질소는 본 실험의 시스템에서 탈질을 할 수 있는 장치나 환경이 없기 때문에 지속해서 축적된 것으로 판단된다. 총 부유 고형물은 드럼필터의 80 µm 망목보다 작은 고형물들이 제거되지 않고 지속해서 축적된 것으로 보인다. 총 유기탄소는 지속적인 사료 공급으로 인하여 축적된 것으로 판단된다. 실험이 종료된 시점의 질산성 질소 농도는 102 mg/L로 높았지만, 3개월 간 무지개송어에 대한 80~100 mg/L의 질산성 질소 농도의 만성 독성 실험에서 성장, 생존율, 혈액학적 항목의 수치가 낮은 농도의 질산성 질소 대조군과 큰 차이가 없었다는 결과(Davidson et al., 2014)를 보았을 때, 질산성 질소는 무지개송어의 성장 및 혈액학적인 분석 결과에 영향을 미치지 않았을 것으로 판단된다.

혈액학적 분석 결과 전혈을 이용하여 측정된 헤모글로빈 농도는 Treatment 1에서 Treatment 4로 갈수록 유의하게 낮아지는 결과가 나타났다. 125일 동안의 과포화(180%) 환경에서 무지개송어의 적혈구 감소가 관찰되었다는 연구(Edsall and Smith, 1990)와 일치한다. 헤마토크리트의 수치는 Treatment 1에서 Treatment 4로 갈수록 유의하게 낮아지는 경향이 나타났으며 경골어류에서 만성적인 저산소 환경이 헤마토크리트 수치를 증가시킨다는 연구(Yamamoto et al., 1985)와 일치하며 이는 산소를 더 효율적으로 운반하기 위한 생리적인 현상으로 판단된다.

본 연구에서 혈장을 이용하여 측정된 GH는 용존산소 농도가 높아지면서 낮아졌으며 IGF-1은 GH 변화와 달리 Treatment 2에서 가장 높게 나타나고 Treatment 3, Treatment 1, Treatment 4 순으로 낮아지는 경향이 있었다. 무지개송어를 대상으로 한 이전 연구에서 사료 섭취가 부족한 어류들의 혈중 GH가 상승하고 IGF-1이 감소한다고 보고한 바 있다(Sumpster et al., 1991; Gabillard et al. 2003; Reinecke, 2010). 또한 사료를 제한 공급하거나 사료 섭취량이 충분하지 않을 경우, GH mRNA 활성이 증가하면서 GH가 상승하게 되고, 간에서 IGF-1 발현을 제한하여 IGF-1이 감소한다고 보고한 바 있다(Peterson and Waldbieser, 2009; Shimizu et al., 2009). 이러한 연구 결과를 토대로 볼 때, 본 연구에서도 사료 섭취량이 다른 실험구와 비교하여 상대적으로 적었던 Treatment 1에서 높은 GH와 낮은 IGF-1 값이 나타난 것으로 판단된다. 하지만 사료 섭취량이 비슷했던 Treatment 2~4에

서 용존산소의 농도가 증가하면서 GH와 IGF-1이 감소하였는데, 최근 연구에서도 고농도 용존산소가 무지개송어의 GH를 감소시키고 IGF-1의 변화에도 영향을 준다고 보고된 바 있다(Aksakal and Ekinci, 2021). 이는 사료 섭취량 이외에 용존산소 농도가 다양한 측면에서 사료 대사 효율과 이와 관련된 GH와 IGF-1의 변화에도 영향을 미치는 것으로 판단된다. 혈장 cortisol의 경우 저산소 환경에서 cortisol 농도가 높아진다는 이전의 연구 결과(Min et al., 2013; Han and Kim, 2016)와 달리 본 연구에서는 실험구 간에 차이가 없었다. 이는 장기간 사육이 진행되면서 무지개송어가 낮은 용존산소 농도에 적응하였기 때문으로 판단된다. 본 연구에서 장기간 고농도 용존산소에 노출된 무지개송어의 cortisol 농도가 높아지지 않았는데, 무지개송어가 용존산소 과포화(173±24%) 환경에서 혈장 cortisol 농도가 상승하지 않는다는 연구 결과(Caldwell and Hinshaw, 1994)와 일치하며, 장기간의 과포화 환경에 적응했을 것으로 판단된다. 본 실험은 8주간 용존산소 모니터링 및 제어장치를 이용하여 지속적이고 일정하게 용존산소 농도를 유지하였다. 이는 용존산소의 농도에 어류가 노출되는 기간에 따라 어류가 내분비학적으로 순응하는 수준이 달라질 수 있음을 시사(Sumpter et al., 1991; Gabillard et al. 2003)한다.

결론

본 연구는 이전의 연구들과 비교하여 상대적으로 장기간 각기 다른 용존산소 농도에 일정하게 무지개송어를 노출하였다. Treatment 2가 Treatment 3, Treatment 4와 비교해 유의적인 차이는 없었지만 거의 모든 성장 지표에서 가장 좋은 결과가 나왔으며, GH가 유의적으로 높고 IGF-1은 유의하게 낮게 나타났다. 또한 용존산소 농도가 가장 높았던 Treatment 4에서 GH와 IGF-1이 상대적으로 낮아지는 경향으로 볼 때 사육 기간이 더욱 길어질 경우, 높은 농도의 용존산소가 성장에 직접적인 영향을 미칠 가능성도 배제할 수 없을 것으로 판단된다.

용존산소의 농도와 어류의 대사 효율은 수온, 염도, 고형물 등 다른 수질 요인의 변동에 따라 크게 달라질 수 있기 때문에 특정 조건에서 구한 결과를 확대 해석하기는 어려울 수 있다. 따라서 주요 수질 요인 변동에 따른 무지개송어의 적정 용존산소 농도에 관한 부가적

인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구의 조건에서 도출된 결과로 볼 때, 무지개송어의 용존산소 농도는 최소 6 mg/L 이상을 유지하는 것이 바람직하며 9~10 mg/L 이상의 과포화 상태를 유지하는 것은 성장 및 경제적인 측면에서 부가적인 효과를 기대하기는 어려울 것으로 판단된다.

사사

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(IITP)의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2021-0-00225, 최적의 수산 양식 설계·운영을 위한 디지털 아쿠아 트윈 핵심 플랫폼 기술 개발).

References

- Aksakal E and Ekinci D. 2021. Effects of hypoxia and hyperoxia on growth parameters and transcription levels of growth, immune system and stress related genes in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2021.111060>.
- Behnke RJ. 1992. Native trout of Western North America. American Fisheries Society, Bethesda Maryland, U.S.A., 1-275.
- Brett JR and Groves DD. 1979. Physiological energetics. In: Hoar WS, Randall DJ and Brett JR, Eds. *Fish Physiology*, VIII. Academic Press, New York, U.S.A., 280-352.
- Buentello, JA, Gatlin I and Neill DM. 2000. Effects of water temperature and dissolved oxygen on daily feed consumption, feed utilization and growth of channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Aquaculture* 182, 339-352. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00274-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00274-4).
- Caldwell CA and Hinshaw J. 1994. Physiological and haematological responses in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) subjected to supplemental oxygen in fish culture. *Aquaculture* 126, 183-193. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(94\)90259-3](https://doi.org/10.1016/0044-8486(94)90259-3).
- Cameron JN. 1971. Oxygen dissociation characteristics of the blood of the rainbow trout, *Salmo gairdneri*. *Comparative Biochemistry and Physiology* 38A, 699-704. [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(71\)90136-8](https://doi.org/10.1016/0300-9629(71)90136-8).
- Davbidson J, C Good, C Welsh and ST Summerfelt. 2014. Comparing the effects of high vs. low nitrate on the

- health, performance, and welfare of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) within water recirculating aquaculture systems. *Aquaculture Engineering* 59, 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.01.003>.
- Doudoroff P and Shumway DL. 1970. Dissolved oxygen requirements of freshwater fishes. Food and Agricultural Organization of the United Nations Technical Paper 86, 291.
- Edsall DA and Smith CE. 1990. Performance of rainbow trout and Snake River cutthroat trout reared in oxygen-supersaturated water. *Aquaculture* 90, 251-259. [http://doi.org/10.1016/0044-8486\(90\)90249-M](http://doi.org/10.1016/0044-8486(90)90249-M).
- Ekau W, Auel H, Pörtner H-O and Gilbert D. 2010. Impacts of hypoxia on the structure and processes in pelagic communities (zooplankton, macro-invertebrates and fish). *Biogeosciences* 7, 1669. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1669-2010>.
- Erez J, Krom MD and Neuwirth T. 1990. Daily oxygen variations in marine fish ponds, Elat, Israel. *Aquaculture* 84, 289-305. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(90\)90094-4](https://doi.org/10.1016/0044-8486(90)90094-4).
- Fisheries Information Portal System (FIPS). 2023. Fisheries Statistics in fisheries information service. Retrieved from <https://fips.go.kr/p/S020702/#>. Accessed Jan 2023.
- Fischer RJ. 1963. Influence of oxygen concentration and of its diurnal fluctuations on the growth of juvenile Coho Salmon. Masters of science thesis. Oregon State University. Corvallis, Oregon, 48.
- Foss A, Evensen TH and Øiestad V. 2002. Effects of hypoxia and growth and food conversion efficiency in the spotted wolffish *Anarhichas minor* (Olafsen). *Aquaculture* 33, 437-444. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.2002.00693.x>.
- Gabillard JC, Weil C, Rescan PY, Navarro I, Gutierrez J and Le Bail PY. 2003. Effects of environmental temperature on IGF1, IGF2, and IGF type I receptor expression in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *General and Comparative Endocrinology* 133, 233-242. [https://doi.org/10.1016/S0016-6480\(03\)00167-9](https://doi.org/10.1016/S0016-6480(03)00167-9).
- Han JD and Kim HY. 2016. Changes in respiratory metabolism and blood chemistry of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) exposed to hypoxia. *KFAS* 49, 45-52. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2016.0045>.
- Herrmann RB, Warren CE and Doudoroff P. 1962. Influence of oxygen concentration on the growth of juvenile Coho Salmon. *Transactions of the American Fisheries Society* 91, 155-167. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1962\)91\[155:IOOCOT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1962)91[155:IOOCOT]2.0.CO;2).
- Itazawa Y. 1970. Characteristics of respiration of fish considered from the arterio-venous difference of oxygen content. *Bull Jap Soc Sci Fish* 36, 571-577. <https://doi.org/10.2331/suisan.36.571>.
- Itazawa Y and I Hanyu. 1991. Fish physiology. Koseisha-Koseikaku, Tokyo, Japan, 621.
- Jobling M. 1995. Environmental biology of fishes. Chapman and hall fish and fisheries series 16. Volume 76, Issues 1, 266. <https://doi.org/10.1017/S0025315400029313>.
- Kawamoto N. 1977. Fish physiology. Koseisha-Koseikaku, Tokyo, Japan, 605.
- Kim YM, Lee MS and Chung YH. 2013. The residues of antibiotics (tetracycline, oxolinic acid and ciprofloxacin) and malachite green in cultured rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *JFMSE* 25, 828-835. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2013.25.4.828>.
- Korea Maritime Institute (KMI). 2022. Fisheries observation center. Inland waters trout report (December 2022), 2.
- Lee NS. 2013. The trend and prospect of seawater aquaculture of trout in Korea. *Aqua Info* 7, 40-53.
- Miller D, Poucher S and Coiro L. 2002. Determination of lethal dissolved oxygen levels for selected marine and estuarine fishes, crustaceans and a bivalve. *Mar Biol* 140, 287-296. <https://doi.org/10.1007/s002270100702>.
- Min BH, Park MS, Myeong JI and Hwang HK. 2013. Physiological stress responses in black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*). *KFAS* 46, 819-826. <http://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0819>.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF). 2018. Seawater process testing standards, 51-54.
- National Assembly Research Service (NARS). 2019. Current status and future tasks of the smart aquaculture industry, 2-9.
- National Institute of Fisheries Science (NIFS). 2017. Rainbow trout aquaculture standard manual, 16.
- Paek JY and Park KI. 2016. An economic analysis of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) aquaculture farms. *JFMSE* 28, 1280-1289. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2016.28.5.1280>.
- Papoutsoglou SE and Tziha G. 1996. Blue tilapia (*Oreochromis aureus*) growth rate in relation to dissolved oxygen concentration under recirculated water conditions.

- Aquacultural Engineering 15, 181-192. [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(95\)00013-5](https://doi.org/10.1016/0144-8609(95)00013-5).
- Park Jh, Kim PK and Jo JY. 2008. Growth performance of disk abalone (*Haliotis discus hannai*) in pilot- and commercial-scale recirculating aquaculture systems. *Aquaculture Int* 16, 191-202. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.02.001>.
- Person-Le RJ, Pichavant K, Vacher C, Bayon N L, Severe A and Boeuf G. 2002. Effects of O₂ supersaturation on metabolism and growth in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.). *Aquaculture* 205(3-4), 373-383. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00689-5](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00689-5).
- Peterson BC and Waldbieser GC. 2009. Effects of fasting on IGF-I, IGF-II, and IGF-binding protein mRNA concentrations in channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Domestic Animal Endocrinology* 37, 74-83. <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2009.03.004>.
- Poon WL, Hung CY and Randall DJ. 2001. The effect of aquatic hypoxia on fish. In: Proceedings of the sixth international symposium on fish physiology, toxicology and water quality. Thurston RV, eds. *Ecosystems Research Division, Georgia*, 31-49.
- Reinecke M. 2010. Influences of the environment on the endocrine and paracrine fish growth hormone-insulin-like growth factor-I system. *Journal of fish biology* 76, 1233-1254. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02605.x>.
- Salas-Leiton, E, Canovas-Conesa, B, Zerolo, R, Lopez-Barea, J, Canavate, JP and Alhama, J. 2009. Proteomics of juvenile Senegal Sole (*Solea senegalensis*) affected by gas bubble disease in hyperoxygenated ponds. *Marine Biotechnology*. 11, 473-487. <http://doi.org/10.1007/s10126-008-9168-8>.
- Schram E, Roques JAC, Abbink W, Yokohama Y, Spanings T, Vries PD, Bierman S, Vis HVD and Flik G. 2014. The impact of elevated water nitrate concentration on physiology, growth and feed intake of African catfish (*Clarias gariepinus*) (Burchell 1822). *Aquaculture Res* 45, 1499-1511. <https://doi.org/10.1111/are.12098>.
- Shimizu M, Cooper KA, Dickhoff WW and Beckman BR. 2009. Postprandial changes in plasma growth hormone, insulin, insulin-like growth factor (IGF)-I, and IGF-binding proteins in coho salmon fasted for varying periods. *American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology* 297, 352-361. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.90939.2008>.
- Summerfelt ST, Vinci BJ. 2008. Better management practices for recirculating aquaculture systems. *Environmental best management practices for aquaculture*. Blackwell publishing, Ames, IA, 389-426. <https://doi.org/10.1002/9780813818672.ch10>.
- Sumpter JP, Bail PY Le, Pickering AD, Pottinger TG and Carragher JF. 1991. The effect of starvation on growth and plasma growth hormone concentrations of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *General and comparative endocrinology* 83, 94-102. [https://doi.org/10.1016/0016-6480\(91\)90109-J](https://doi.org/10.1016/0016-6480(91)90109-J).
- Thetmeyer, H, Waller, U, Black, KD, Inselmann, S and Rosenthal, H. 1999. Growth of European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) under hypoxic and oscillating oxygen conditions. *Aquaculture* 174, 355-367. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00028-9](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00028-9).
- Weithman AS and Haas MA. 1984. Effects of dissolved-oxygen depletion on the rainbow trout fishery in Lake Taneycomo, Missouri. *Transactions of the American Fisheries Society* 113, 109-124. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1984\)113<109:EODDOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1984)113<109:EODDOT>2.0.CO;2).
- Yamamoto K, Itazawa Y, and Kobayashi H. 1985. Direct observations of fish spleen by an abdominal window method and its application to exercised and hypoxic yellowtail. *Jap J Ichthyol* 31, 427-433. <https://doi.org/10.11369/jji1950.31.427>.
- Yovita JM. 2007. The effects of dissolved oxygen on fish growth in aquaculture. Kingolwira National Fish Farming Centre, Fisheries Division. Ministry of Natural Resources and Tourism, Tanzania, 30.