

환수량 조절을 통한 넙치(*Paralichthys olivaceus*) 육상 양어장의 전기 에너지 절감 효과 분석

김남리 · 박노백¹ · 최진 · 민병화*

국립수산과학원 양식연구과, ¹해양수산부 해양수산생명자원과

Analyse of the Electric Energy Savings Effects of Adjusting Water Turn-over on Land-based Fish Farms Raising Olive Flounder *Paralichthys olivaceus*

Nam Lee Kim, Noh Back Park¹, Jin Choi and Byung Hwa Min*

Aquaculture Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

¹Marine and Fisheries Bioresources Division, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong 30110, Republic of Korea

This study was designed to analyze the effects of reducing water turnover in olive flounder *Paralichthys olivaceus* farms, focusing on olive flounder growth, decreasing electricity costs, and developing measures to ensure business stability. Daily water turnover was set at 18 in the control group and six in the experimental group. Juvenile fish were reared for 12 months. No significant differences in mean weight were observed between groups until five months. After five months, the mean weight of the control group grew significantly faster than that of the experimental group. Maintaining water turnovers level at six turnovers for the first five months after stocking juvenile fish and then increasing water turnover resulted in a 34.4% reduction in electricity costs compared to the control group. This approach presents a potential method to enhance the profitability of olive flounder farms and ensure stable productivity and profitability without sacrificing olive flounder growth.

Keyword: Fish farm, Water turnovers, Energy saving, Growth performance

서론

우리나라 양식넙치 생산량은 2022년 45,801톤으로 양식어류 생산량의 50%를 차지하고 있으며(KOSIS, 2022), 생산금액은 702,441백만원으로 55%를 차지하여 국내 단일 양식품종으로 가장 높은 생산량과 생산금액을 나타내는 중요한 품종이다(KOSIS, 2022). 하지만 밀집된 넙치양식장으로부터 사료 찌꺼기, 배설물 및 항생제 등은 연안오염을 지속적으로 초래하고 있으며, 양식넙치의 질병발생으로 인한 폐사가 증가하고 있다(Kim et al., 2018). 대부분의 양식장에서는 사료 찌꺼기의 빠른 배출과 질병 예방을 위해 더 많은 환수량을 필요로 하며 이는 결국 전력비용 증가로 이어지는 악순환을 초래한다. 또한 최근에는 전기요금의 대폭 상승으로 수산 양식업에 해당하는 농사용 전기요금이 2023년 5월 기준 kWh당 53원으로 2022년 4월 대

비 35.5%가 인상되어 양식어가의 경영비용 상승이 불가피할 것으로 보인다(KEPCO, 2023). 현재 넙치양식은 대부분 육상 수조식으로 이루어지고 있으며, 양식어류의 생활환경을 유지하기 위해 해수공급, 산소공급 및 수온조절 등을 위한 장비들이 상시 가동되어야 한다(Kim and Lee, 2017). 그 외에도 사료 보관을 위한 냉동창고, 사료 제조기 등의 전력 사용이 필수적이다. 이러한 양식장 내 전력비용은 전체 경영비용 중 10% 이상을 차지하고 있다(NIFS, 2016; Jwa et al., 2020; Kim et al., 2021). 이 중 양수펌프를 가동하는 전력량은 전체 전력사용량 중 70~90%를 차지하여 육상 양식장에서는 해수 취수에 따른 에너지 소비가 가장 많은 것으로 나타나고 있다(Kim, 2003; Kim et al., 2017; Choi et al., 2021). 따라서 사육수 사용량을 줄인다면 전력 소비량 절감이 가능할 것이다. 사육수의 환수량을 줄이기 위해서는 우선적으로 유입되는 사육수를 소독처리하여 병원균을

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2750 Fax: +82. 51. 720. 2439

E-mail address: pkmhbh@korea.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2023.0716>

Korean J Fish Aquat Sci 56(5), 716-720, October 2023

Received 13 September 2023; Revised 10 October 2023; Accepted 23 October 2023

저자 직위: 김남리(연구원), 박노백(연구관), 최진(연구사), 민병화(연구관)

제어함으로써 질병이 발생하지 않도록 하는 것이 중요하다. 실제로 유입 해수를 자외선, 전기분해, 여과 등을 이용하여 살균하였을 때 양식어류의 폐사율 저감 효과가 나타나고 있다(Lee et al., 2013; Kang et al., 2015). 따라서 사육수를 소독할 경우에는 유입 병원균 제어를 통한 환수량 저감이 가능할 것으로 판단된다. 이 연구는 넙치 육상 양어장의 전기 에너지 절감을 위해 수행되었다. 이에 사육수 환수량 조절을 통한 넙치의 성장과 전력 비용 절감 효과를 분석하였고, 어체 크기를 고려하여 효과적으로 환수량을 줄일 수 있는 방안을 제시하였다.

재료 및 방법

운영비용 및 전력비용 현황 조사

실험 양식장의 연간 운영비용과 전력비용은 Table 1과 같다. 실험 양식장의 면적은 7,273 m²이며, 100 m² (10×10 m)의 수조가 64개로 구성되어 있다. 전체 생산비용 중 전기료가 230,400천 원으로 13.6%를 차지하여 3번째로 높은 비율을 차지하고 있다.

실험조건 및 사육관리

환수량 저감에 따른 넙치 성장도 조사를 위해 대조구는 18회전, 실험구는 6회전으로 설정하였으며, 실험구의 사육수는 전기분해 장치(concentrate time; CT=20–25 mg·min/L)를 거쳐 수조로 공급하였다. 실험어의 전장은 대조구와 실험구 각각 12.7±0.7 cm와 12.7±0.6 cm, 체중은 23.2±4.0 g과 22.2±3.7 g이었으며, 10,200마리를 각각의 사각 콘크리트수조(10×10 m)에 수용하였다. 실험기간은 12개월 간 수행하였으며, 실험어의 성장에 따라 하루 2–3회 상업용 배합사료를 공급하였다. 실험기간 동안 사육환경은 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Annual operating cost of the experimental farm

Items	Cost (1,000 won)	Operating costs (%)
Feed cost	500,000	29.5
Labor cost	363,000	21.4
Electricity cost	230,400	13.6
Depreciation cost	175,684	10.4
Maintenance cost	100,000	5.9
Seedstock cost	87,500	5.2
Tax and public charge	70,000	4.1
Medicine cost	60,000	3.5
Food expenses	40,000	2.4
Office expenses	35,000	2.0
Others	25,000	1.5
Selling expenses	8,300	0.5
Total	1,694,884	100.0

성장 및 생존율 분석

실험 시작 후 매일 대조구 및 실험구에서 무작위로 30마리를 포획하여 성장도를 측정하였으며, 각 개체를 대상으로 전장과 체중을 디지털 버니어 캘리퍼스(CD-AX; Mitutoyo, Kanagawa, Japan)와 전자저울(SWII-CW; CAS, Yangju, Korea)을 사용하여 각각 0.1 cm 및 0.1 g까지 측정하였다. 실험 종료 시 증중률(weight gain rate) 및 사료효율(feed efficiency)은 아래의 식으로 계산하였으며, 생존율은 매일 폐사어를 파악하여 실험 종료 시의 생존율을 구하였다.

$$\text{Weight gain rate (\%)} = \frac{\text{final body weight} - \text{initial body weight}}{\text{initial body weight}} \times 100$$

$$\text{Feed efficiency (\%)} = \frac{\text{Weight gain rate}}{\text{feed intake (dry matter)}}$$

통계처리

사육수 환수량에 따른 넙치의 성장도 유의성을 검정(P<0.05)하기 위해서 통계처리 프로그램 SPSS version 23 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)에 의한 independent t-test를 실시하였다.

양수펌프에 대한 전기요금 산출

우리나라 전기요금은 종류별로 일반용, 주택용, 산업용, 농사용 등으로 분류되며, 계약전력에 따라 300 kW 미만인 경우 ‘갑(A)’, 그 이상인 경우는 ‘을(B)’로 구분된다. 수산물양식업은 농사용 ‘을(B)’로 구분되어 있다(Table 3). 전기요금의 체계는

Table 2. Environmental conditions during the experimental period

Parameters	Turnovers of day	
	18	6
Water temperature (°C)	17.0–22.8	16.7–22.8
Salinity (psu)	29.8–34.0	29.8–34.0
pH	7.5–7.9	7.3–7.8
Turbidity	0.5–4.4	0.5–8.7
Dissolved oxygen (mg/L)	4.2–10.5	3.1–9.9

Table 3. Electric rates of agricultural service

Classification	Demand charge (Won/kW)	Energy charge (Won/kWh)
A	360	35.4
Low-Voltage	1,150	53.0
		Summer (Jun–Aug) 55.7
B Low-Voltage (A, B)	1,210	Spring, Fall (Mar–May, Sep–Oct) 53.7
		Winter (Nov–Feb) 55.7

Source, KEPCO (2023).

기본요금과 전력량요금으로 구성되어 있으며, 기본요금과 전력량요금의 합에 대해 부가가치세 10%와 전력산업기반기금 3.7%를 부과하여 계산된다. 전기요금 체계의 계산식은 아래와 같다(KEPCO, 2023).

$$\text{월별 기본요금(원)} = (P_{cont} \times BPC) \times 1.137$$

$$\text{월별 전력량요금(원)} = \left[\sum_{i=1}^{24} (PC_i \times PL_i) \right] \times n \times 1.137$$

$$\text{월별 전기요금(원)} = \text{월별 기본요금} + \text{월별 전력량 요금}$$

i =시간(1-24)

n =월별 일수

PC_i = i 시간대의 계시별 요금제(원/kWh)

PL_i = i 시간대의 부하량(kWh)

P_{cont} =계약전력(kW)

BPC =기본요금 단가(원/kW)

실험 양식장의 양수펌프 용량은 150마력 2대와 60마력 3대로 총 5대를 사용하고 있으며, 24시간 가동하고 있다. 본 연구에서는 위의 월별 전기요금 계산식에 따라 양식장에서 18회전과 6회전을 운행할 경우의 양수펌프에 대한 연간 전기요금을 산출하였다. 양수펌프는 18회전과 6회전 모두 24시간, 365일 가동되어야 하며 100% 전력을 사용하는 것으로 가정하였다. 따라서 18회전 시 5대의 양수펌프를 가동하는 전력 소비량을 산출하였으며, 6회전 시 18회전 대비 회전율이 67% 감소하는 비율을 전력량에 적용하여 산출하였다. 전기요금은 수산물양식업에 해당하는 농사용 ‘을’ 저압 요금제를 적용하였으며, 기본요금은 kW당 1,150원, 전력량요금은 kWh당 53.0원을 적용하여 계산하였다(2023년 5월 16일 기준).

결 과

성장 및 생존율

실험 종료 시 체중, 증중량, 사료섭취량, 사료효율 및 생존율은 Table 4에 나타내었다. 12개월동안 넙치의 체중은 대조구에서 1,447.0±160.5 g, 실험구에서 764.7±134.1 g으로 나타났다. 실험 개시 5개월까지는 환수량에 따른 대조구(449.0±56.8 g)와 실험구(412.6±61.6 g)간 체중에 유의적 차이가 없었다($P > 0.05$). 6개월 쯤부터 대조구(604.2±65.8 g)가 실험구(501.7±73.6 g)보다 유의하게 높았으며($P < 0.05$), 실험 종료 시에는 대조구(1,447.0±160.5 g)가 실험구(764.7±134.1 g) 대비 89.2% 더 높게 나타났다(Fig. 1). 증중량은 대조구(6,190.4%)가 실험구(3,228.3%)보다 더 높게 나타났으며 사료섭취량도 대조구(15,431 kg)가 실험구(9,666 kg)보다 많았다. 사료효율도 대조구(94.1%)가 실험구(78.4%)보다 더 높은 것으로 나타났다. 생존율은 대조구에서 94.6%, 실험구에서 92.2%로 나타났다.

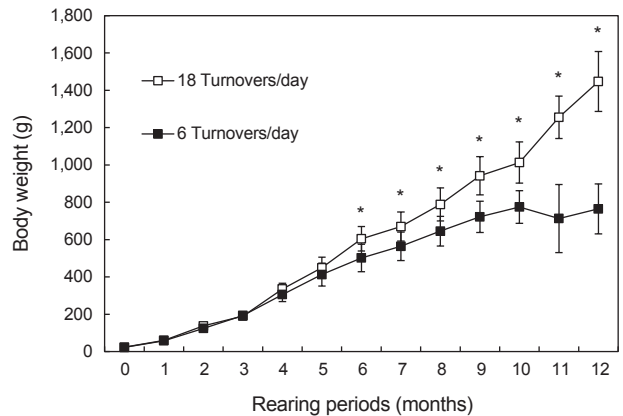


Fig. 1. Mean (±S.D) body weight of olive flounder *Paralichthys olivaceus* according to different water turnovers. *Significant difference at $P < 0.05$ level.

환수량별 양수펌프의 전력량

해당 양식장의 사육 수조의 유효수심은 0.65 m, 일일 환수량은 18회전이며, 1개 수조당 충당되는 사육수량은 1,170 m³, 64개 수조에는 74,880 m³의 유량이 필요한 것으로 나타났다. 이에 대한 양수펌프 5대(150마력 2대, 60마력 3대)의 시간당 전력량은 360 kW (1 hp=0.75 kW)이며 일일 최대 수요 전력량은 8,640 kWh, 연간 최대 수요 전력량은 3,153,600 kWh로 추정되었다. 6회전을 기준으로 1개 수조당 사육수량은 390 m³, 64개 수조에는 24,960 m³이 필요한 것으로 나타났다. 6회전에 대한 전력량은 18회전을 기준으로 환수량을 67% 감소한 비율을 전력량에 적용하여 추정한 바, 6회전 운영시 119 kW가 필요한 것으로 나타났다. 이때의 필요한 양수펌프 용량은 최소한 60마력(45 kW) 3대가 필요한 것으로 나타났다. 따라서 이 양수펌프 3대 가동 시 일일 최대 수요전력은 3,240 kWh, 연간 최대 수요 전력은 1,182,600 kWh로 분석되었다(Table 5).

환수량별 전기요금

환수량에 따라 추정된 전력량을 바탕으로 연간 전기요금을 분

Table 4. Growth performance and survival of olive flounder *Paralichthys olivaceus* according to different water turnovers

Parameters	Turnovers of day	
	18	6
Initial mean weight (g/fish)	23.2±4.0	22.2±3.7
Final mean weight (g/fish)	1,447.0±160.5	764.7±134.1
Weight gain (%)	6,190.4	3,228.3
Feed intake (kg)	15,431	9,666
Feed efficiency (%)	94.1	78.4
Survival (%)	94.6	92.2

Table 5. Energy consumption according to different water turnovers

Turnovers of day	Water lift pump						
	hp ¹	kW	Unit	kW	Operating time/day	kWh/day	kWh/year
18	150	112.5	2	225	24	5,400	1,971,000
	60	45	3	135	24	3,240	1,182,600
Total	-	-	5	285	24	8,640	3,153,600
6	60	45	3	135	24	3,240	1,182,600

¹ 1 hp=0.75 kW.

석한 내용을 Table 6에 나타내었다. 18회전 시 5대의 양수펌프 가동으로 인한 연간 기본요금은 5,648,616원, 연간 전력량요금은 190,039,090원으로 총 전기요금은 195,687,706원으로 분석되었다. 이는 앞서 조사한 양식장 전력비용 중 양수펌프 가동으로 인한 비용이 84.9%를 차지하는 것을 알 수 있다. 6회전 시 최소 3대의 양수펌프 가동이 가능하며 연간 기본요금은 2,118,231원, 연간 전력량요금은 71,264,659원으로 총 전기요금은 73,382,890원으로 분석되었다. 따라서 환수량에 따른 전기요금을 비교해보면 18회전 대비 6회전 운영시 전기요금이 62.5% 절감되어 연간 122,304,816원을 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

고찰

본 연구에서는 넙치양식장의 환수량 저감에 따른 넙치의 성장도와 전기요금 절감효과를 분석하였으며, 그 결과를 바탕으로 환수량 적용 방안을 제시하였다. 12개월 간 환수량에 따른 성장도 조사 결과, 18회전에 비해 6회전 시 넙치의 성장도가 낮게 나타났다. 전기요금을 분석한 결과, 환수량을 18회전에서 6회전으로 줄일 경우 기존의 양수펌프 5대(150마력 2대, 60마력 3대)에서 최소 3대(60마력 3대)로 가동이 가능할 것으로 나타났다. 이에 따른 양수펌프에 대한 기본요금과 전력량요금이 절감되어 연간 총 122,304,816원(62.5%)의 전기요금이 절감되는 것으로 나타났다.

하지만 6회전 시 전기요금 절감은 가능하나 넙치의 낮은 성장도로 인해 소득이 감소할 우려가 있다. 따라서 환수량에 따른 성장도에 유의적 차이가 나타나지 않는 종자 입식 후 5개월까지

Table 6. Energy saving rate according to different water turnovers

Parameters	Turnovers of day	
	18	6
Electrical energy (kW/year)	3,153,600	1,182,600
Demand charge (won/year)	5,648,616	2,118,231
Energy charge (won/year)	190,039,090	71,264,659
Total charge (won/year)	195,687,706	73,382,890
Energy saving rate (%)	-	62.5
Energy saving charge (won)	-	122,304,816

6회전, 그 이후부터 환수량을 증가시켜 18회전을 유지하는 방안에 대한 전력비용을 분석하였다. 그 결과, 연간 기본요금은 4,177,622원, 연간 전력량요금은 124,210,800원으로 총 전기요금은 128,388,422원으로 분석되었다. 따라서 18회전 대비 전기요금이 34.4% 절감되어 연간 67,299,283원의 전기요금을 절감할 수 있는 것으로 나타났다(Table 7).

Choi et al. (2021)은 넙치 양식장의 태양광발전시스템 설치 및 활용 시 연 평균 19.9%의 에너지가 절감되는 것으로 나타났으며 Kim et al. (2017)은 간만조 등의 데이터를 기반으로 양식장 펌프 제어를 통해 펌프 전력을 절감하는 시스템을 개발하였는데 실험 결과 기존 시스템 대비 40%의 펌프 전력량 절감이 가능한 것으로 나타났다. 이처럼 양식장 내 에너지 절감을 위해서는 양식장 시설물 교체 및 설치비용에 높은 비용이 소요된다. 이에 반해 소독수를 활용한 환수량 감소에 따른 에너지 절감은 초기투자비용의 부담이 낮으면서 전기요금을 절감할 수 있는 대안으로 판단된다.

제주지역 넙치양식장의 환수량은 1일 15-30회전으로 평균 24회전으로 조사된 바 있다(NIFS, 2016). 본 연구에서는 전기분해로 사육수를 소독할 경우 제주지역의 최소 환수량(15회전)보다 적은 환수량(6회전)을 사용하더라도 종자 입식 후 5개월까지(약 410-450 g)는 넙치의 성장과 생존율에는 차이가 없는 것을 확인하여 사육수 사용량 저감이 가능함을 시사하였다. 하지만 종자 입식 후 6개월 이후부터는 6회전 시 성장률이 감소하는 것으로 보아 어가의 생산성 피해를 최소화할 수 있는 성장 단계별 환수량 구멍에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

Table 7. The estimated energy saving rate by applying turnovers considering optimal growth of olive flounder *Paralichthys olivaceus* (6 turnovers of day, juvenile-5 months; 18 turnovers of day, 6 months-12 month)

Parameters	Values
Electrical energy (kW/year)	2,300,400
Demand charge (won/year)	4,177,622
Energy charge (won/year)	124,210,800
Total charge (won/year)	128,388,422
Energy saving rate (%)	34.4
Energy saving charge (won)	67,299,283

본 연구의 에너지 절감효과에 대해서는 환수량 저감에 따른 감소비율을 전력소비량에 적용하여 추정하였기 때문에 환수량 별 정확한 전력소비량을 파악하기에 한계가 있다. 향후에는 이를 보완하기 위한 환수량에 따른 양수펌프의 전력소비량 모니터링을 통한 시계열 데이터를 바탕으로 한 분석이 필요하다. 또한 양식장 내 소독장치에 대한 구입비용 및 이에 대한 전력소비량을 포함하여 분석한다면 보다 현실적이고 의미 있는 연구결과 도출이 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2023년도 국립수산물과학원 수산과학연구사업(R2023045)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Choi HS, Na JH, Lee HY and Noh JY. 2021. The effect of remodeling replacement of photovoltaic power generation system in fish farm: Analysis of energy saving effect through simulation. *Curr Photovolt Res* 9, 11-16. <https://doi.org/10.21218/CPR.2021.9.1.011>.
- Jwa MS, Park KI and Kim DH. 2020. The current status and an economic analysis of Jeju olive flounder aquaculture. *J Kor Soc Fish Mar Edu* 32, 1612-1622. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2020.12.32.6.1612>.
- Kang BJ, Jang YH, Jhon BK, Park BH and Shin DH. 2015. 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.2015.28.3.125>.
- KEPCO (Korea Electric Power Corporation). 2023. Electricity Tariff Structure. Retrieved from <http://home.kepc.co.kr>. action on Jul 20, 2023.
- Kim DH and Lee KI. 2017. A study on energy consumption by the fish farm building types: Focused an aquatic plant heating energy. *J Archit Inst Korea* 37, 279-282.
- Kim HS, Kim BG and Kwak YS. 2017. Design and implementation of energy saving system based on OpenADR 2.0b by fish farm pump control. *J Korea Inst Inform Technol* 15, 69-76. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2017.15.12.69>.
- Kim JH, Kim JY, Lim LJ, Kim SK, Choi HS and Hur YB. 2018. Effects of waterborne nitrite on hematological parameters and stress indicators in olive flounders, *Paralichthys olivaceus*, raised in bio-floc and seawater. *Chemosphere* 209, 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.082>.
- Kim NL, Park KI, Lee BJ and Kim DH. 2021. An economic analysis of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) aquaculture in Wando region. *J Kor Soc Fish Mar Edu* 33, 734-743. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2021.6.33.3.734>.
- Kim PK. 2003. The electric status of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) farms. *Kor Acuatic* 15, 34-43.
- KOSIS (Korean statistical information service). 2022. Statistic Database for Aquaculture Production. Retrieved from <https://kostat.go.kr/portal/korea/index>. action on Jun 21, 2023.
- Lee HJ, Yu HS, Oh EG, Shin SB, Park K and Kim JH. 2013. Germicidal effect of electrolyzed seawater on live fish and shellfish. *Korean J Fish Aquat Sci* 46, 534-539. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0534>.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2016. Standard Manual of Olive Flounder Aquaculture. NIFS, Busan, Korea.