

바이오플락 기술을 활용한 순환침전시스템에 따른 넙치 (*Paralichthys olivaceus*)의 양성

조영록, 김현수, 김수경, 김수경, 김석렬, 허영백, 김준환*

국립수산과학원 서해수산연구소

Bio-floc technology application in olive flounder, *Paralichthys olivaceus* aquaculture according to the difference of closed recirculating systems

Yeong-Rok Cho, Hyun-Soo Kim, Su Kyoung Kim, Su-Kyoung Kim,
Seok-Ryel Kim, Young Baek Hur and Jun-Hwan Kim*

West Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Taeon 32132, Republic of Korea

*Corresponding author

Jun-Hwan Kim
Tel. 041-675-3773
E-mail. junhwan1982@korea.kr

Received: 21 February 2019
First Revised: 18 March 2019
Second Revised: 21 March 2019
Revision accepted: 16 April 2019

Abstract: Juvenile *Paralichthys olivaceus* (mean weight 685.3 ± 36.7 g) were raised in different and closed recirculating bio-floc system (control, bio-ball, and shelter) for 7 months. The water environment such as water temperature, dissolved oxygen, salinity, pH, and alkalinity according to the difference of closed recirculating system remained stable during the rearing period. No significant changes were observed in dissolved inorganic nitrogen such as ammonia, nitrite, and nitrate were observed in different closed recirculation system. The final weights according to the difference of closed recirculating were 1,524 g (control), 1,674 g (bio-ball), and 1,630 g (shelter). The survival rate was higher than 98%, and the final FCRs (Feed coefficient ratio) were 1.2, 1.1, and 1.2. The results of this study indicated high growth and survival rate in all systems.

Keywords: *Paralichthys olivaceus*, biofloc technology, water environment, growth performance, monitoring

서 론

전 세계적으로 양식산업은 1970년대 이후로 매해 9%의 빠른 성장률을 나타내며 발전하고 있다(FAO 2008). 우리나라에서도 1945년부터 꾸준히 발전되어 온 우리나라 수산양식산업은 최근 환경자정능력을 초과하는 양식장의 배출수 등으로 인해 환경악화에 따른 양식생물의 면역력

감소와 이에 따른 빈번한 질병의 발생에 어려움을 겪고 있다. 또한, 빈번한 질병의 발생으로 인한 항생제 과다 사용은 환경오염뿐만 아니라 항생제 내성균 발생 등 2차적인 문제를 초래하고 있다(Kim *et al.* 2019). 연안환경 악화로 오염된 사육수가 유입되고 이로 인해 유수량을 늘리는 악순환이 반복되고 있다. 이러한 양식산업의 연안오염으로 인한 한계를 해결하고 지속 가능한 양식산업의 기반을 마

련하기 위해 친환경양식에 대한 필요성이 증가하고 있다 (Emerenciano *et al.* 2013).

바이오플락 시스템(Bio-floc system)은 대표적인 친환경 양식 기법 중 하나로, 유용미생물을 이용하여 수중의 암모니아와 아질산질소를 효과적으로 제거함으로써 사육수를 교환하지 않고, 외부 바이러스 및 세균의 침입에 영향을 받지 않는다(Kim *et al.* 2018a). 또한 바이오플락 기술(Bio-floc technology)은 양식용수를 재사용함에 따라 높은 양식효율, 낮은 운영비용 및 환경영향 최소화 등의 장점을 가진 획기적인 기술이다(Azim and Little 2008; Hargreaves 2013; Luo *et al.* 2014; Day *et al.* 2016). 순환침전시스템은 바이오플락 및 순환여과시스템에서 부유입자의 발생을 줄이고 침전을 통한 슬러지 제거를 통해 수질안정 및 사육환경 개선을 위한 사육시스템 안정화 기법으로 많이 이용되고 있다(Jeong *et al.* 2016). 따라서 바이오플락은 최근 환경악화로 인한 빈번한 질병발생으로 인한 폐사문제를 해결하는 좋은 대안이 될 수 있을 것이다.

수질환경은 양식에서 안정적인 사육양성을 위한 필수적인 요소이다. 바이오플락은 환경독립적 운영을 통해 외부환경에 영향을 받지 않는 장점은 있지만, 수질 안정화가 이루어지지 않을 시 암모니아 쇼크 및 아질산 중독 등 양식생물에게 악영향을 줄 수도 있다(Kim *et al.* 2018b). 따라서 바이오플락 환경에서 수질안정을 통한 지속적인 사육양성이 동반되어야 한다. 어류의 건강상태를 판단하는 지표 중 성장은 가장 중요한 지표 중 하나이다(Kim and Kang 2014, 2015, 2016). 바이오플락은 유용미생물 작용으로 양식생물의 성장, 생리활성 및 면역력을 증가시킨다(Avnimelech 2007; Kim *et al.* 2015).

본 실험에 이용된 넙치는 우리나라 대표적인 양식 어

종으로, 국내해산어류 생산량에 50% 이상을 차지한다(KOSTAT 2017). 현재 넙치양식은 육상수조에서 우수식으로 이루어지고 있으며, 하루 30~40회전까지 우수하며 많은 양식용수를 필요로 한다. 이에 따라 유입수를 통한 외부 세균 및 바이러스 유입에 취약하며, 매해 질병으로 인한 지속적인 폐사가 보고되고 있다(Kim *et al.* 2019). 이러한 문제를 해결하고 지속가능한 양식산업 구축을 위한, 하나의 대안인 바이오플락 시스템은 넙치양식에서 현재 시작단계이며, 시스템정립이 절실히 요구되고 있다(Kim *et al.* 2018a). 따라서 본 실험의 목적은 바이오플락을 이용한 넙치양식에서 시스템을 안정화하기 위해 순환침전시스템 차이에 따른 사육 수질환경 및 성장의 모니터링을 통해 바이오플락 넙치 양식가능성 확인 및 시스템 탐색에 있다.

재료 및 방법

1. 실험어 및 실험환경

본 실험에 사용한 실험어인 넙치는 평균 무게 2.69 ± 0.35 g의 치어를 받아 바이오플락으로 6개월간 양성한 평균 무게 685.3 ± 36.7 g의 미성어(300마리)를 실험에 이용하였다. 침전시스템은 사육수조에서 침전조와 포기조를 거쳐 다시 사육수조로 흐르는 방식으로, 침전조의 매질은 바이어볼($\varnothing 25$ mm 크기의 3m^3 의 양), 파판(54×32 cm 파판 전복 종묘 부착 틀에 30개씩 끼워서 총 140개 수용)을 이용하였으며, 매질이 없는 대조구를 포함하여 3종류의 시스템을 구축하였다(Fig. 1). 바이오플락 사육수는 기존에 넙치를 사육하면서 조성된 안정적 수질의 바이오플락 사육수(암모니아 0.2mgL^{-1} , 아질산 0.2mgL^{-1} , 질산 100mgL^{-1})를

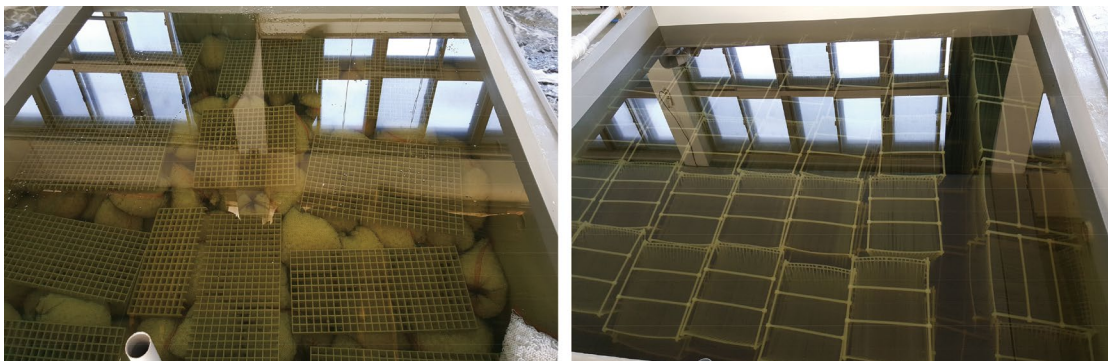


Fig. 1. The closed recirculating system (Left: bio-ball, Right: Shelter) of olive flounder, *Paralichthys olivaceus* aquaculture using bio-floc for 7 months.

Table 1. Water environment of initial experimental condition

	Temperature (°C)	Salinity (‰)	DO (mg L ⁻¹)	pH	NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	NO ₂ ⁻ (mg L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	Alkalinity
Control	18.9	34.0	6.79	7.92	0.2	0.4	100	150
Bio-ball	19.4	34.3	6.56	7.57	0.2	0.6	75	150
Shelter	19.3	34.3	6.68	7.82	0.2	0.6	75	150

이용하였으며, 접종 초기 수질조건은 Table 1과 같다. 사육 실험은 수조(5 ton) 당 50마리씩 입식 하여, 실험구간 당 2 반복으로 총 6개 수조 300마리로 사육양성하며 모니터링을 실시하였다.

2. 수질환경

수온, 염분, 용존산소 및 pH는 휴대용 수질분석기(YSI-EXO2, YSI Inc., USA)를 이용하여, 일일 2회 측정하여 모니터링 하였다. 수온은 겨울철 보일러 및 여름철 냉각기를 이용하여 적정 사육수온을 유지해 주었다. 염분은 담수 보충을 이용하여 증발되어 높아진 염분을 맞추었으며, pH의 감소는 중탄산을 이용하여 일정수준으로 유지시켜 주었다. 알칼리도 측정은 알칼리도 분석용 키트(Merck & Co., Inc., USA)를 이용하여 매일 측정하였다.

3. 질산계 물질

암모니아, 아질산 및 질산 측정은 암모니아, 아질산 및 질산 분석용 키트(Merck & Co., Inc., USA)를 이용하여 매일 측정하였다. 포도당을 탄소원으로 이용하여 암모니아 수준을 안정적으로 유지했으며, 아질산 증가 시 배양하는 아질산분해미생물을 이용하였다.

4. 성장

성장률을 파악하기 위해 생체량을 매주 1회씩 측정(3개 구간×2개 수조×10마리=60마리)하였다. 주간 측정에는 실험 생물의 스트레스를 최소화하기 위해 실험구별로 20마리를 신속하게 저울로 측정하고 다시 사육수조에 넣는 방식을 통해 평균 무게를 측정하였다.

5. 통계분석 방법

본 실험에서 수질분석은 하루 2회 측정하였으며, 침전시스템(대조구, 바이어볼, 파판) 차이에 따른 월별 유의성 검증에서 이를 활용하였다(n=60). 성장은 주간 측정을 실

시하여 성장률을 분석하였으며, 침전시스템(대조구, 바이어볼, 파판) 차이에 따른 월별 유의성 검증에서 이를 활용하였다(n=60). 실험 분석 결과에 대한 통계학적 유의성은 SPSS 통계 프로그램(SPSS Inc.)을 이용하여 ANOVA test를 실시하여 Tukey's multiple range test를 통해 $p < 0.05$ 일 때 유의성이 있는 것으로 간주하였다.

결과 및 고찰

1. 수질환경

바이오플락 넘치 사육양성 7개월간 바이오플락 순환침전시스템 차이에 따른 월별 수질환경의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 어류는 냉혈동물(cold-blooded animal)로 온도의 변화에 더욱 민감하게 반응하며, 온도는 어류의 성장, 발달 및 대사뿐만 아니라, 성숙, 배란, 산란, 부화, 생식소 발달을 포함하여 생리·생식과정에 영향을 미친다(Narum *et al.* 2013; Kim *et al.* 2017a). 본 연구결과 시스템에 따른 사육수온은 대조구 16.6~22.8°C, bio-ball 16.9~22.9°C, shelter 16.8~22.4°C의 범위로 각각 나타났으며, 월별 시스템에 따른 통계적 차이는 나타나지 않았다. 용존산소는 어류의 대사율과 에너지 소비에 영향을 미치는 중요한 인자이다(Ostrand and Wilde 2001). 본 연구결과 시스템에 따른 용존산소는 대조구 6.36~7.46 mg L⁻¹, bio-ball 6.14~6.90 mg L⁻¹, shelter 5.90~7.48 mg L⁻¹의 범위로 각각 나타났으며, 월별 시스템에 따른 용존산소의 유의적 차이는 나타나지 않았다. 용존산소는 모든 시스템에서 적절한 수준으로 공급되었다. 다양한 생태학적 환경요소 중 염분은 성장뿐만 아니라 발달에도 영향을 미치는 중요한 요소이다(Boeuf and Payan 2001). 대부분의 해산어류의 혈장이온의 항상성은 약 10~15%이며, 에너지는 이온 및 삼투압 조절의 대사를 위해 사용된다(Kim *et al.* 2018a). 따라서 혈장이온과 비슷한 저염분 환경은 어류의 항상성 조절을 위한 에너지 사용을 줄여줌으로써 성장을 향상시킬 수 있다. 본

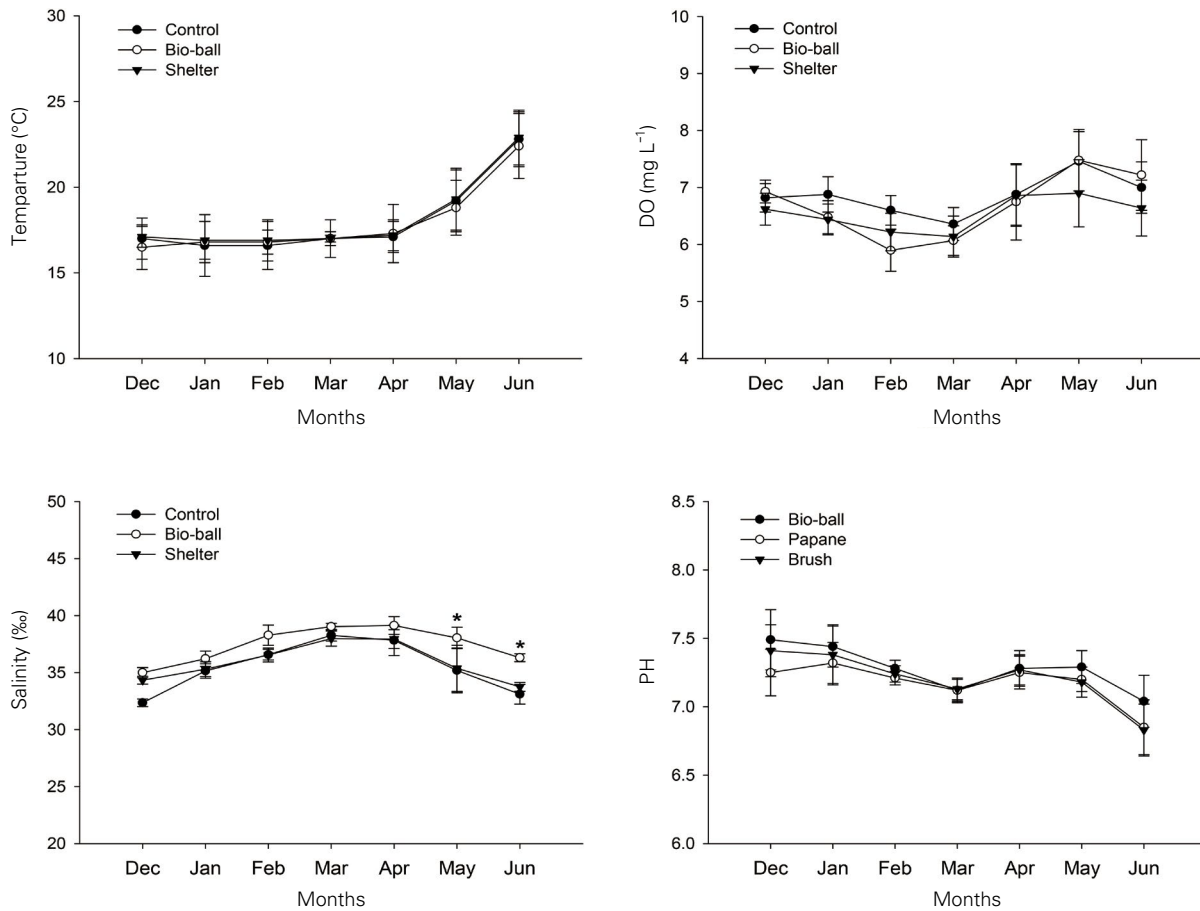


Fig. 2. A Comparative analysis of water environment in different closed recirculation system (Control, bio-ball, and Shelter) of olive flounder, *Paralichthys olivaceus* aquaculture using bio-floc was conducted for 7 months. Values with different superscript were significantly different during the months ($p < 0.05$) as determined by Tukey's multiple range test.

연구결과 시스템에 따른 염분은 대조구 32.35~38.27%, bio-ball 34.22~39.13%, 그리고 shelter 34.33~37.98%의 범위로 각각 나타났으며, bio-ball의 경우 5월, 6월 유의적인 증가를 나타내었다 ($p < 0.05$). 사육수를 교환하지 않고 100% 재순환하는 바이오플락 시스템의 특성상 증발에 따른 염분증가가 나타났다. pH는 어류의 항상성 유지에 중요한 역할을 하며, pH의 변동은 산-염기 균형 및 이온조절의 교란을 유발한다(Miron *et al.* 2008). 특히 pH는 암모니아 및 아질산 독성에 영향을 미치는 중요한 인자이기도 하다. 낮은 pH에서 아질산 독성이 강해지며, 높은 pH에서 암모니아 독성이 강해진다. 본 연구결과 시스템에 따른 pH는 대조구 7.04~7.49, bio-ball 6.83~7.41, 그리고 shelter 6.85~7.32의 범위로 각각 나타났으며, 월별 시스템별에 따른 pH의 유의적 차이는 나타나지 않았다. 바이오플락 환경에서 pH의 감소는 중탄산나트륨을 보충해 주어 적정

pH 수준을 유지하였다.

2. 질산계 물질

바이오플락 넙치 사육양성 7개월간 바이오플락 순환침전시스템 차이에 따른 월별 질산계 성분의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 질산계 물질 중 암모니아는 가장 독성이 강한 성분이며, 높은 수준의 암모니아 노출은 어류의 성장 감소뿐만 아니라 암모니아 쇼크로 인해 과다홍분 및 폐사를 유발할 수 있다(Kim *et al.* 2017b). 본 연구결과 시스템에 따른 암모니아는 대조구 0.2~0.9 mg L⁻¹, bio-ball 0.2~0.7 mg L⁻¹, 그리고 shelter 0.2~1.0 mg L⁻¹의 범위로 각각 나타났으며, 월별 시스템에 따른 암모니아의 유의적 차이는 나타나지 않았다. 사육기간 동안 안정적인 암모니아 수치를 유지했으며, 암모니아 수치는 포도당과 같은 탄소원을 공

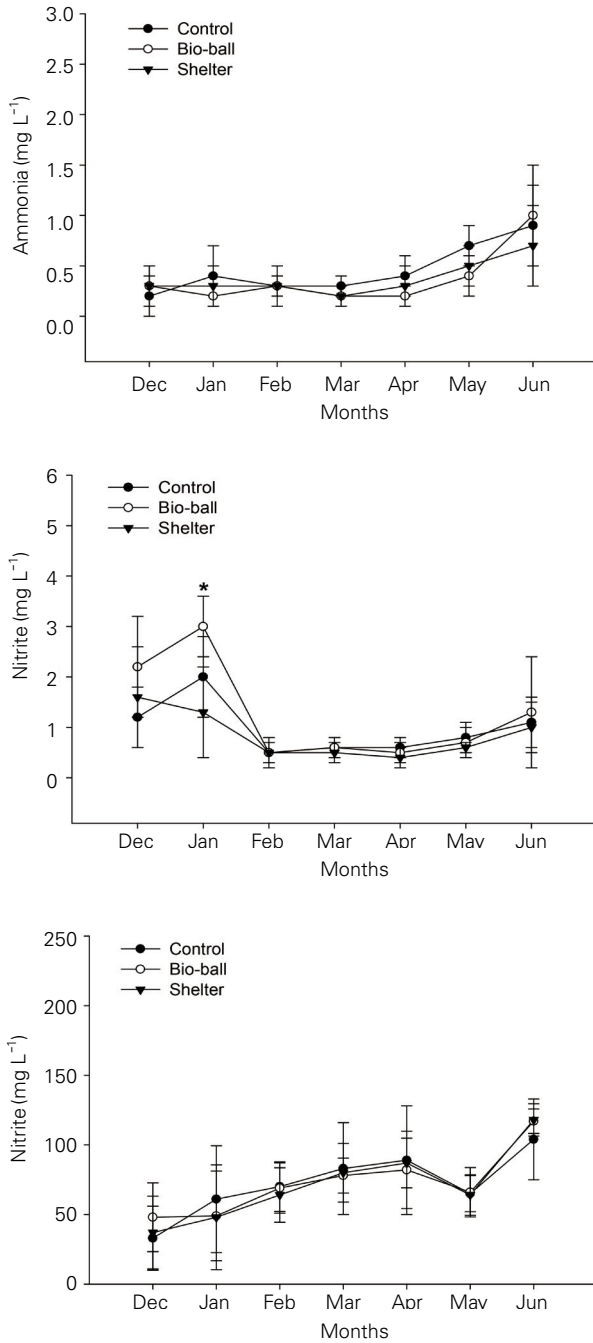


Fig. 3. A Comparative analysis of dissolved inorganic nitrogen concentrations in different closed recirculation systems (Control, bio-ball, and Shelter) of olive flounder, *Paralichthys olivaceus* aquaculture was done using bio-floc for 7 months. Values with different superscript were significantly different during months ($p < 0.05$) as determined by Tukey's multiple range test.

급해 암모니아 수치를 감소시켜 주었다. 암모니아의 질산화 과정 중 중간산물인 아질산은 어류의 이온조절장애를

Table 2. A comparative analysis of growth and survival rates in different closed recirculation system (control, bio-ball, and shelter) of olive flounder, *Paralichthys olivaceus* aquaculture using bio-floc for 7 months

		Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.
Average weight (g)	Control	732	848	925	1,054	1,098	1,220	1,524
	Bio-ball	727	832	895	1,025	1,314*	1,368	1,674
	Shelter	723	838	906	1,044	1,314*	1,373	1,630
Survival rate (%)	Control	100	100	100	100	100	100	100
	Bio-ball	100	100	100	100	99	99	98
	Shelter	100	100	99	99	99	99	99
FCR	Control	1.8	1.6	0.9	0.9	1.4*	1.6*	1.2
	Bio-ball	2.1	2.0	1.1	0.8	0.8	1.2	1.1
	Shelter	2.0	1.8	1.0	0.8	0.8	1.2	1.2

Values with different superscript are significantly different on months ($p < 0.05$) as determined by Tukey's multiple range test.

유발할 뿐만 아니라, 적혈구의 헤모글로빈 (Hb)을 메트헤모글로빈 (metHb)으로 산화시켜 heme 이온 산화, 저산소증, 용혈성 빈혈 등을 유발한다 (Kim *et al.* 2018b). 본 연구 결과 시스템에 따른 아질산은 대조구 $0.5 \sim 2.0 \text{ mg L}^{-1}$, bio-ball $0.4 \sim 1.6 \text{ mg L}^{-1}$, 그리고 shelter $0.5 \sim 2.2 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위로 각각 나타났다. Bio-ball의 경우 초기 1월에 유의적 증가가 나타났지만, 이후 2월부터 안정적 수치로 감소되었다. 초기 이후 모든 시스템에서 아질산 수치는 안정적으로 유지되었다. 질산은 암모니아 및 아질산에 비해 독성은 낮지만, 높은 수준으로 장기간 지속 시 영향을 미칠 수 있는 요소이다 (Bae *et al.* 2017). 본 연구결과 시스템에 따른 질산은 대조구 $33 \sim 104 \text{ mg L}^{-1}$, bio-ball $48 \sim 117 \text{ mg L}^{-1}$, 그리고 shelter $37 \sim 118 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위로 각각 나타났으며, 월별 시스템에 따른 질산염의 유의적 차이는 나타나지 않았다. 암모니아 및 아질산의 질산화과정에 의해 사육기간에 따른 질산염 수치는 높아졌지만, 생물에겐 영향을 미치는 수준은 아니었다. 전반적으로 시스템별 12월부터 6월까지 7개월간 사육수질환경은 안정적으로 유지되었다.

바이오플락 넘치 사육양성 7개월간 바이오플락 순환침전시스템 차이에 따른 월별 평균 무게, 생존율 및 FCR의 변화를 Table 2에 나타내었다. 본 연구결과 시스템에 따른 평균 무게는 대조구 732g에서 1,524g으로 성장 (208%)을 나타내었다. 그리고 bio-ball 723g에서 1,630g으로 성장 (225%)했으며, shelter 727g에서 1,674g으로 성장 (230%)했다. Bio-ball과 Shelter 구간에서 4월 대조구에 비해 유의적인 성장을 나타내었다 ($p < 0.05$). 최종 성장은 shelter 매질에서 가장 높은 성장이 나타났으며, 매질을 넣지 않은

대조구에서 가장 낮게 나타났다. 본 연구결과 시스템에 따른 최종 생존율은 100% (대조구), 99% (bio-ball), 그리고 98% (shelter)의 높은 생존율을 나타내었으며, 월별 시스템에 따른 생존율의 유의적 차이는 나타나지 않았다. 본 연구에서 시스템별 최종 FCR (Feed coefficient ratio)은 1.2 (대조구), 1.2 (bio-ball), 그리고 1.1 (shelter)을 나타내었다. 대조구의 경우 4월과 5월의 경우 bio-ball 및 shelter 구간에 비해 낮은 사료효율이 나타났지만, 이후 5월 비슷한 수준으로 돌아왔다. 순환침전시스템 매질에 따른 성장 및 생존율의 차이는 있었지만, 유의적인 차이는 나타나지 않았다.

본 연구 결과 모든 순환침전매질에서 수질환경 및 성장에서 유의적 변화 없이 안정적인 성장을 이루어냈다. 본 연구를 통해 순환침전시스템을 이용해 안정적인 바이오플락 넙치 사육양성을 성공적으로 이루어, 순환침전시스템을 적용한 바이오플락 넙치양식 가능성을 확인했다. 본 연구의 결과는 향후 넙치양식에서 우수식에서 바이오플락으로의 전환을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 지속 가능한 어류양식산업을 위해, 환경·생태친화적인 양식기법의 도입 및 이용은 선택이 아닌 필수가 되고 있다. 향후 바이오플락기술을 이용한 넙치 양식기술 개발을 위한 다양한 연구를 통해 고찰이 이루어져야 할 것이다.

적 요

이 연구는 초기 넙치종묘(2.69±0.35g)를 바이오플락으로 6개월간 1차 양성한 넙치를 이용하여, 침전조 매질(대조구, 바이어블, 파판)별 7개월간 사육양성을 수행하였다. 7개월간 모니터링 결과 수질은 초기 이후, 주요 독성물질인 암모니아 및 아질산 1mgL⁻¹ 이하로 안정적으로 유지되었다. 사료계수(FCR)는 사육 5~6개월에 대조구에서 유의적으로 낮게 나타났지만, 사육 7개월에는 높은 성장을 나타내며 다른 구간과 비슷한 사료계수를 나타내었다. 본 실험에서 모든 시스템에서 안정적인 성장과 수질환경이 유지되었으며, 본 실험 모니터링 결과는 최근 환경오염으로 문제가 되고 있는 우수식 넙치양식에서 친환경 미래양식인 바이오플락으로의 전환을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2019년 국립수산물과학원 ‘바이오플락을 이용한 해수양식 기술개발(대하, 넙치) (R2019011)’의 지원으로 수행된 연구입니다.

REFERENCES

- Azim ME and DC Little. 2008. The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: Water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture* 283:29-35.
- Avnimelech Y. 2007. Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds. *Aquaculture* 264:140-147.
- Bae SH, KW Kim, SK Kim, JH Kim and JH Kim. 2017. Lethal toxicity and hematological changes exposed to nitrate in flatfish, *Paralichthys olivaceus* in Biofloc and Seawater. *Environ. Biol. Res.* 35:373-379.
- Boeuf G and P Payan. 2001. How should salinity influence fish growth? *Comp. Biochem. Physiol. C-Toxicol. Pharmacol.* 130:411-423.
- Day SB, K Salie and HB Stander. 2016. A growth comparison among three commercial tilapia species in a biofloc system. *Aqua. Int.* 24:1309-1322.
- Emerenciano M, G Gaxiola and G Guzon. 2013. Biofloc Technology (BFT): A review for aquaculture application and animal food industry. *InTech* 12:302-328.
- FAO. 2008. Cultured aquaculture species information programme, *Penaeus vannamei* (Boone, 1931). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hargreaves JA. 2013. Biofloc production systems for aquaculture. Southern Regional Aquaculture Center Publication 4503.
- Jeong, UC, F Jin, JK Choi, JC Han, BC Choi and SJ Kang. 2016. A laboratory-scale recirculating aquaculture system for sea cucumber *Apostichopus japonicas*. *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 49:343-350.
- Kim JH and JC Kang. 2014. The selenium accumulation and its effect on growth, and haematological parameters in red sea bream, *Pagrus major*, exposed to waterborne selenium. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 104:96-102.
- Kim JH and JC Kang. 2015. The lead accumulation and hematological findings in juvenile rock fish *Sebastes schlegelii* exposed to the dietary lead (II) concentrations. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 115:33-39.

- Kim MS, EY Min, JH Kim, JK Koo and JC Kang. 2015. Growth performance and immunological and antioxidant status of Chinese shrimp, *Fennerpenaeus chinensis* reared in bio-floc culture system using probiotics. *Fish Shellfish Immunol.* 47:141–146.
- Kim JH and JC Kang. 2016. The chromium accumulation and its physiological effects in juvenile rockfish, *Sebastes schlegelii*, exposed to different levels of dietary chromium (Cr^{6+}) concentrations. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 41:152–158.
- Kim JH and JC Kang. 2017. Toxic effects on bioaccumulation and hematological parameters of juvenile rockfish *Sebastes schlegelii* exposed to dietary lead (Pb) and ascorbic acid. *Chemosphere* 176:131–140.
- Kim JH, HJ Park, KW Kim, IK Hwang, DH Kim, CW Oh, JS Lee and JC Kang. 2017a. Growth performance, oxidative stress, and non-specific immune responses in juvenile sablefish, *Anoplopoma fimbria*, by changes of water temperature and salinity. *Fish Physiol. Biochem.* 43:1421–1431.
- Kim JH, HJ Park, IK Hwang, JM Han, DH Kim, CW Oh, JS Lee and JC Kang. 2017b. Toxic effects of juvenile sablefish, *Anoplopoma fimbria* by ammonia exposure at different water temperature. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 54:169–176.
- Kim JH, SK Kim and JH Kim. 2018a. Bio-floc technology application in flatfish *Paralichthys olivaceus* culture: Effects on water quality, growth, hematological parameters, and immune responses. *Aquaculture* 495:703–709.
- Kim JH, JY Kim, LJ Lim, SK Kim, HS Choi and YB Hur. 2018b. 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.
- Kim JH, YJ Kang, KI Kim, SK Kim and JH Kim. 2019. Toxic effects of nitrogenous compounds (ammonia, nitrite, and nitrate) on acute toxicity and antioxidant responses of juvenile olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 67:73–78.
- KOSTAT. 2017. Status of fish culture in 2017. Korean National Statistical Office.
- Lavanya S, M Ramesh, C Kavitha and A Malarvizhi. 2011. Hematological, biochemical and ionoregulatory responses of Indian major carp *Catla catla* during chronic sublethal exposure to inorganic arsenic. *Chemosphere* 82:977–985.
- Luo G, Q Gao, C Wang, W Liu, D Sun, L Li and H Tan. 2014. Growth, digestive activity, welfare, and partial cost-effectiveness of genetically improved farmed Tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in a recirculating aquaculture system and an indoor biofloc system. *Aquaculture* 422–423:1–7.
- Miron DDS, B Moraes, AG Becker, M Crestani, R Spanevello, VL Loro and B Baldisserotto. 2008. Ammonia and pH effects on some metabolic parameters and gill histology of silver catfish, *Rhamdia quelen* (Heptapteridae). *Aquaculture* 277:192–196.
- Narum SR, NR Campbell, KA Meyer, MR Miller and RW Hardy. 2013. Thermal adaptation and acclimation of ectotherms from differing aquatic climates. *Mol. Ecol.* 22:3090–3097.
- Ostrand KG and GR Wilde. 2001. Temperature, dissolved oxygen, and salinity tolerances of five prairie stream fishes and their role in explaining fish assemblage patterns. *Trans. Am. Fish. Soc.* 130:742–749.
- Saravanan M, KP Kumar and M Ramesh. 2011a. Haematological and biochemical responses of freshwater teleost fish *Cyprinus carpio* (Actinopterygii: Cypriniformes) during acute and chronic sublethal exposure to lindane. *Pestic. Biochem. Physiol.* 100:206–211.
- Saravanan M, S Karthika, A Malarvizhi and M Ramesh. 2011b. Ecotoxicological impacts of clofibric acid and diclofenac in common carp (*Cyprinus carpio*) fingerlings: Hematological, biochemical, ionoregulatory and enzymological responses. *J. Hazard. Mater.* 195:188–194.
- Wang G, E Yu, J Xie, D Yu, Z Li, W Luo, L Qiu and Z Zheng. 2015. Effect of C/N ratio on water quality in zero-water exchange tanks and the biofloc supplementation in feed on the growth performance of crucian carp, *Carassius auratus*. *Aquaculture* 443:98–104.