

볼락(*Sebastes inermis*)치어의 성장에 미치는 LED 광파장의 영향

신현옥* · 허민아¹ · 허겸¹

부경대학교 해양생산시스템관리학부, ¹부경대학교 수산물리학과

The effect of LED light wavelength on the growth of fingerling *Sebastes inermis*

Hyeon-Ok SHIN, Min-A HEO¹ and Gyeom HEO¹

Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

¹Department of Fisheries Physics, Graduate School, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Experiments designed to measure the effect of LED (light-emitting diode) light wavelength on the growth of fingerling rockfishes (*Sebastes inermis*) were conducted. Fingerling rockfishes (average body weight of individual: 1.13g) were divided into two groups by wavelength of the LED light [light power: 1,620 mW; wavelength: 518 nm (green color), 622 nm (red color)]. Triplicate groups of 180 individuals were reared over 7 weeks. Lighting duration was 14 hours from 06:00 to 20:00. A water tank exposed on the natural light in a room through the windows was used as a control. At results of the first experiment [initial average body weight (BW) of individual: 1.13 g; standard deviation (SD): 0.13 g], the final individual BW exposed on the green color was increased 0.39 g than the red color, and decreased 0.12 g than the natural light in the room. At results of the second (initial individual BW: 5.07 g; SD: 0.70 g) and the third experiment (initial individual BW: 10.67 g; SD: 0.67 g), the final individual BW exposed on the green color was increased 1.07 g and 2.55 g than the red color, respectively, and increased 0.57 g and 0.84 g than the natural light, respectively. The relative growth rate of the green color was higher about 8% significantly ($p < 0.05$) than the natural light. In the case of the red color the relative growth rate was lower significantly ($p < 0.05$) than the natural light.

Keywords: growth, LED, light wavelength, fingerling rockfish, body weight

서론

볼락 (*Sebastes inermis*)은 우리나라의 동해, 남해 및 서해 연안에 분포하며, 일본 북해도 이남의 수심 20~50 m 암반 해역에 주로 무리지어 서식한다. 몸이 방추형으로 측편되어 있고, 몸의 빛깔은 서식 장소 및 수심에

따라 변화가 심하지만 회갈색이 많다 (Chyung, 1977). 볼락은 산출에서 성어기까지를 연안에서 보내는 연안 정착성 어류로서, 연안의 천해생물군집에서 중요한 생태학적 지위를 차지하는 종이다 (Hatanaka and Iizuka, 1962). 볼락은 우리나라의 주요 양식 어종 중의 하나이

*Corresponding author: shinho@pknu.ac.kr, Tel: +82-51-629-5893, Fax: +82-51-629-5886

며, 경상남도 통영지방에서 특히 선호되는 어종이다. 우리나라의 2013년도 통계청 자료 중 어류양식동향조사에서 시도·시군구별 양식방법별 어종별 양식현황 자료에 의하면, 2013년도 어류양식의 생산량 및 생산금액은 각각 73,108 M/T 및 749,139백만원이며, 이 중 조피볼락을 포함한 볼락류의 생산량 및 생산금액은 전체 어류양식 대비 각각 32.8% 및 24.3%로 나타나 있다. 이와 같이 산업적 가치가 높은 볼락류는 오염물질의 연안 유입과 무분별한 남획 등으로 자원량이 급격히 감소하고 있다 (KORDI, 1997). 볼락의 급격한 자원량 감소를 완화시키고 나아가 자원량 회복을 위하여 바다목장화 사업을 실시하는 한편, 볼락을 종묘 방류사업의 주요 어종으로 선정하여 관리하면서, 근년에 들어서는 그 방류량이 증가 추세에 있다 (MOMAF, 2004, 2006; NFRDI, 2007).

볼락과 관련한 국내 연구로는 볼락의 섭식 생태 (Kim and Kang, 1999), 성장단계별 차등발현 유전자 탐색 (Jang, 2011), 양식산 볼락의 성장 특성 (Choi et al., 2005), 볼락의 초기 생활사 (Kim et al., 1993) 등이 있었다. 인공광 노출에 따른 어류의 성장에 관한 국외 연구로는 광강도에 따른 어류의 성장 (Puvanendran and Brown, 2002; Karakatsouli et al., 2010; Liu et al., 2012; Sykes et al., 2014; Woolley et al., 2014), 광파장에 따른 어류의 성장 (Luchiarri et al., 2009; Heydarnejad et al., 2011; Volpato et al., 2013), 광주기에 따른 어류의 성장 (Handeland et al., 2013; Taylor and Migaud, 2009) 등이 보고되었다. 그러나 광파장에 따른 볼락의 성장에 관한 보고는 거의 보이지 않았다.

본 연구에서는 볼락 양식에서의 생산성 향상에 기여할 목적으로, 볼락의 성장을 촉진하는 최적의 광파장을 도출하고자 3회 반복 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

재료 및 방법

실험어

실험어는 경상남도수산자원연구소에서 분양 받은 볼락(*Sebastes inermis*) 치어로 2013년 1월 중순에 산출한 것이다. 2013년 3월 30일 경상남도수산자원연구소에서 뜰채로 잡아 낸 약 200마리의 실험어는 각각 33리터 정도의 해수를 채운 2개의 비닐주머니 (용량: 100 l)에

나누어 담고, 50~60 l 의 액체산소를 주입하여 비닐주머니를 충분히 부풀리고 입구를 고무밴드로 단단히 묶은 다음, 스티로폼 박스에 넣어 볼락 치어의 자세를 안정화시켰다. 이 스티로폼 박스는 에어컨으로 18~19℃로 실내 온도를 낮춘 승용차를 이용하여 부정대학교 LED-해양융합기술연구센터의 실험실로 운반하였다. 실험어는 비닐주머니에 담긴 채로 실험수조의 물 (수온: 18℃)에 대략 5분간 넣어 비닐주머니 속의 수온과 수조의 수온이 비슷하게 되었을 때 작은 플라스틱 바가지를 이용하여 여러 개의 수조로 분산 수용하였다. 이들 실험어는 1개월 이상 실험실 환경에 순치시킨 후 사용하였다.

사육수조 및 사육조건

사육수조는 FRP수지를 입힌 직사각형의 목재수조 (내부크기: L1,050×W600×H600 mm; 수위 50 cm)로 순환여과식 구조이고, 수온은 온도조절기 (801H, Ami Corp., Korea)가 붙은 침수형 티타늄 히터 (2 kW)와 냉각기 (DBM-250, 1/3 HP, Daeil, Korea)를 이용하여 18±1℃로 유지시켰다. 수조에는 살모렐라균에 대한 살균까지 가능한 소형 광·화학 병용 살균기를 설치하였다. 실험에 사용한 해수는 물차로부터 공급받았으며, 실험에 사용하기 전에 해수용 탱크 (용량: 2톤)에 넣어 살균한 다음 사용하였다. 환수는 1주일에 50%씩 1회 실시하여 2주마다 100% 환수되도록 하였다. 볼락 치어의 사료는 경상남도수산자원연구소에서 사용하던 것과 같은 배합사료를 사용하였으며, 먹이공급량은 개체당 평균 체중의 약 2%에 해당하는 양을 1일 2회 (오전 9~10시, 오후 4~5시)로 나누어서 공급하였다. 실내 조명 (백색 형광등)은 먹이 공급할 때에는 켜고, 먹이 공급이 끝나면 껐다.

광원 및 광 조건

실험에 사용한 광원은 본 실험을 위하여 주문 제작한 평판형 (L500×W500 mm) LED (light emitting diode) 광이었다. 수조에 노출하는 광의 강도, 주기, 파장 및 광원의 ON/OFF는 실험실 내에 설치하여 둔 개인용 컴퓨터를 사용하여 제어할 수 있도록 하였다. LED 광원의 광강도는 실험실 내에 설치된 개인용 컴퓨터에서 RGB 각각에 대한 LED 설정값 (0~255)에 따라 조절

할 수 있도록 하였다. LED 광파장은 RGB의 LED 설정값을 조합하여 원하는 탁월 파장 (dominant wavelength)을 발생시킬 수 있었다.

적색계열 (광파장: 622 nm)의 LED 광에 노출한 실험구-A와 녹색계열 (518 nm)의 LED 광에 노출한 실험구-B의 광강도는 1,620 mW로 일정하게 하였다. 대조구는 실험실 창문을 통하여 실내로 유입되는 자연광에 노출되도록 하였다. 실험구에는 합판과 암막 커튼을 이용하여 가능한 한 외부로부터의 광이 수조내부로 유입되지 못하도록 하였으며, 또한 수조 내에 노출되는 LED 광이 외부로 유출되어 타 수조에 영향이 미치지 않도록 하였다.

LED 광의 조명주기는 1일 14시간 (ON: 06:00~20:00)으로 하였다. 실험실 내에 설치된 개인용 컴퓨터에서 RGB에 대한 LED 설정값은 정하면 이 값이 무선으로 송신되고 각 수조에 설치된 LED광원은 무선수신기로부터 수신된 데이터에 따라 광강도와 광파장이 정해진다. 각 수조의 LED광원의 강도 및 파장은 동시에 조절된다. 광자극의 시작과 종료는 개인용 컴퓨터를 통하여 자동제어 되도록 하였다. 이와는 별도로 실험수조실 중앙부 천정 부근에는 20W의 3파장 전구 1개를 매일 14시간 (ON: 06:00~20:00) 켜두었다.

성장 실험

제 1차 실험은 2013년 4월 6일에서 2013년 6월 28일에 걸쳐 83일간 실시하였다. 실험구-A, 실험구-B 및 대조구에는 실험어인 볼락 치어를 20마리씩 수용하였다. 실험 시작 초기의 개체어의 체중은 평균 1.13 g 이었으며, 표준편차 (standard deviation: SD)는 0.13 g 이었다. 제 2차 반복 실험은 2013년 7월 15일에서 2013년 9월 2일에 걸쳐 49일간 실시하였다. 실험구-A, 실험구-B 및 대조구에는 제 1차 실험과 마찬가지로 볼락 치어를 20마리씩 수용하였다. 실험 시작 초기의 개체어의 체중은 평균 5.07 (SD: 0.70) g 이었다. 제 3차 반복 실험은 2013년 9월 12일에서 2013년 11월 25일에 걸쳐 74일간 실시하였다. 실험구-A, 실험구-B 및 대조구에는 제 1차 실험과 마찬가지로 볼락 치어를 20마리씩 수용하였으며, 실험 시작 초기의 개체어의 체중은 평균 10.67 (SD: 0.19) g 이었다. 볼락 치어의 체중은 5마리 전후를 한번에 측정함으로써 측정시 물방울의 혼입에 따른 어체중의 변화 및 볼락 치어에 대한 handling 스트레스를

최소화하기 위하여 노력하였다.

제 2차 실험 및 제 3차 실험은 제 1차 실험과 광조건 및 사육조건을 동일하게 하였으며, 실험이 끝난 볼락 치어는 반복실험에 사용하지 않았다.

성장률 (specific growth rate: SGR)은 $SGR = \frac{\ln(W_f) - \ln(W_i)}{t} \times 100$ 로부터 구하였다. 여기서, W_f 및 W_i 는 각각 최종 및 최초의 실험어 개체의 평균 체중 (g)이며, t 는 실험기간 (day)이다. 대조구 대비 성장률은 $(SGR_A - SGR_C) / SGR_C$ 로부터 구하였으며, SGR_A 및 SGR_C 는 각각 비교대상 실험구 및 대조구의 성장률이다.

결 과

광원의 방사조도

실험수조 바닥에 노출되는 LED 광원의 방사조도 및 그 분포를 조사하기 위하여 모델 실험을 실시하였다. 모델 실험은 Fig. 1의 (a)와 같이 설계하였으며, 이 실험을 통하여 구한 실험수조 바닥에서의 LED 광의 방사조도 분포는 Fig. 1의 (b)에 나타내었다. 설계 조건은 평판형 LED (L500×W500 mm) 광원을 2개로 하였으며, 광원으로부터 직하방의 수조 바닥까지의 거리는 0.9 m로 하였다. 또한, 광원에서 발생하는 빛은 수조외부로 유출되지 않는 것으로 가정하였다. 모델 실험 결과, 수조바닥 중심부에서의 방사조도 (irradiance)는 $5.1 \times 10^{-4} \text{ mW/mm}^2$ 이었으며, 수조바닥에서의 평균 방사조도는 $4.2 \times 10^{-4} \text{ mW/mm}^2$ 이었다.

수조 내의 수중조도

수중조도계를 사용하여 사육 수조 바닥에서의 수중조도를 측정된 결과는 Table 1과 같다. 수중조도는 볼락 치어 20마리씩 수용한 상태에서 직사각형 수조의 네 모서리와 중앙에서 각각 측정하였다. 실험구-A 및 실험구-B에서 LED 광원의 광강도를 모두 1,620 mW로 일정하게 하였을 때, 실험구-A, 실험구-B 및 대조구의 수조바닥 (이격거리: 0.9 m)에서의 평균 수중조도는 실내 형광등을 ON했을 때에 각각 187.7, 457.2 및 27.3 lx 이었으며, 실내형광등 OFF시에는 각각 185.9, 443.6 및 0.2 lx이었다.

성장 실험 (제 1차~제 3차) - 체중 변화

2013년 4월 6일부터 2013년 11월 25일까지 3회에 걸쳐 파장을 달리하는 LED 광자극에 노출시킨 볼락 치어

의 개체어 평균 체중 변화는 Table 2와 Fig. 2에 나타나 있다.

제 1차 실험 결과, 녹색계열 (518 nm, 1620 mW)의 LED 광에 노출한 실험구-B가 적색계열 (622 nm, 1620 mW)의 LED 광에 노출한 실험구-A보다 개체어 평균

체중이 0.39 g 증가하였으나 실내 자연광에 노출시킨 대조구보다는 개체어 평균 체중이 0.12 g 감소하였다. 신뢰성을 높이기 위한 제 2차 반복실험 결과에서는 녹색광 (518 nm)에 노출한 볼락 치어는 적색광 (622 nm) 이나 자연광에 노출한 것보다 개체어 평균 체중이 각각

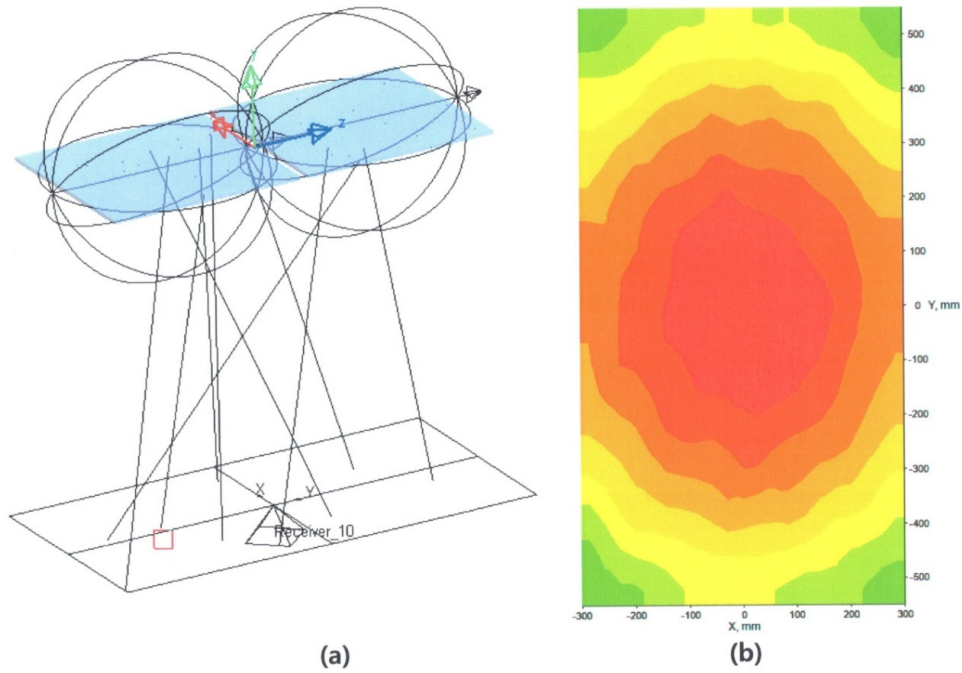


Fig. 1. Modeling design (a) for calculating the irradiance distributed on the bottom of a test tank used in experiment and its results (b). Light source was plane type LED (size: L500×500 mm; light power: 1,620 mW).

Table 1. Illuminance measured on the bottom of the rearing tank. Each tank contains 20 individuals of *Sebastes inermis*

Rearing tank	Room light	Illuminance (lx)						Mean	SD
		Coner_1	Coner_2	Coner_3	Coner_4	Center			
Test-A (622 nm)	ON	184.6	188.2	171.8	174.8	218.9	187.7	18.7	
	OFF	184.0	182.5	176.0	168.5	218.4	185.9	19.2	
Test-B (518 nm)	ON	490.0	420.0	415.0	449.0	512.0	457.2	42.8	
	OFF	460.0	391.0	402.0	455.0	510.0	443.6	48.2	
Control	ON	21.0	20.7	22.1	25.1	47.6	27.3	11.5	
	OFF	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.208	0.1	

Table 2. Change of individual mean body weight of *Sebastes inermis*

No. of exp.	Date	Duration (day)	Mean body weight (g)		
			Test-A (622 nm)	Test-B (518 nm)	Control
1st	2013/04/06	0	1.09±0.23	1.09±0.06	1.20±0.04
	2013/06/28	83	3.26±0.66	3.65±0.30	3.88±0.59
2nd	2013/07/15	0	5.18±0.70	5.12±1.06	4.90±0.38
	2013/09/02	49	8.52±0.84	9.53±0.21	8.74±1.23
3rd	2013/09/12	0	10.58±0.09	10.56±0.40	10.88±1.24
	2013/11/25	74	15.01±0.88	17.54±1.82	17.02±1.81

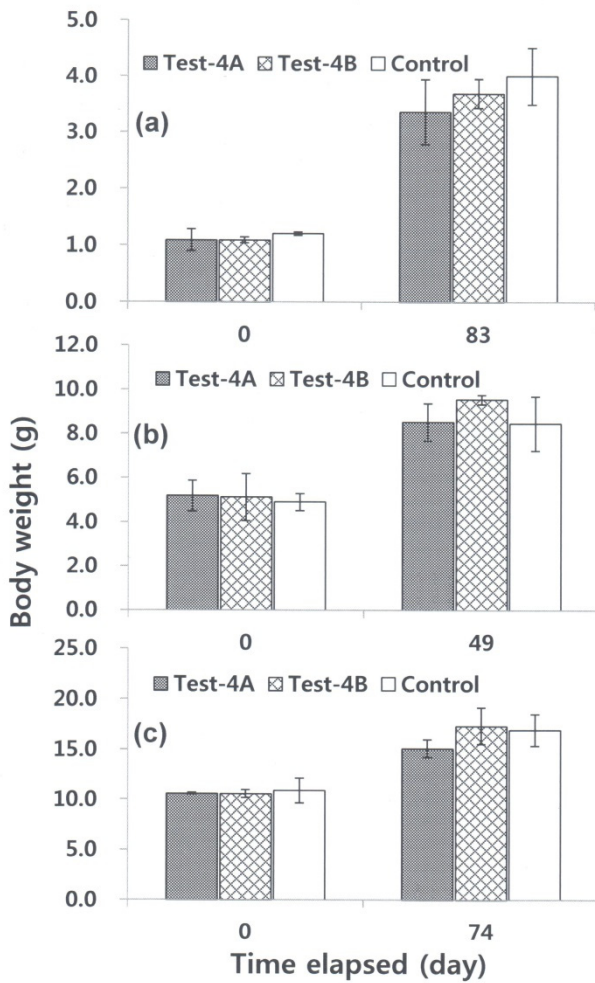


Fig. 2. Change of individual body weight of fingerling *Sebastes inermis* exposed on the LED light stimuli (a) from 6 April to 28 June 2013, (b) 15 July to 2 September 2013 and (c) 12 September to 25 November 2013. Dominant wavelengths of LED light in Test-A and Test-B were 622 nm and 518 nm, respectively. Light intensity was commonly same as 1620 mW.

1.07 g 및 0.57 g 증가하였다. 제 3차 실험 결과에서는 제 2차 실험 결과와 마찬가지로 녹색광 (518 nm)에 노출한 볼락 치어가 적색광 (622 nm)이나 자연광보다 개체 평균 체중이 각각 2.55 g 및 0.84 g 증가한 것으로 나타났다.

통계분석 프로그램인 SPSS (ver. 21, IBM Co., U.S.A)를 사용하여 대응표본에 대한 T-검정을 실시하여 LED 광에 노출시킨 볼락 치어의 체중 변화에 대한 통계적 의미를 검토하였다. SPSS로 실험 데이터의 정규성을 ‘Shapiro-Wilk’로 검정한 결과, 실험 데이터는 정규성이 있는 것으로 판단하였다 ($p > 0.05$). 1차, 2차 및 3차

에 걸쳐 실시한 성장실험 각각 ($n=4$)에 대해서는 녹색광에 노출한 볼락 치어의 개체 평균 체중이 적색광보다 증가한 것에 대하여 통계적 의미를 부여할 수 없었으나 ($p > 0.05$), 1차~3차의 성장실험 결과의 전체 ($n=12$)에 대해서는 녹색광에 노출한 볼락 치어가 적색광에 노출한 볼락 치어보다 개체 평균 체중이 유의하게 증가한 것으로 나타났다 ($p < 0.05$). 적색광에 노출한 볼락 치어는 실내 자연광에 노출한 볼락 치어보다 개체 평균 체중이 유의하게 감소한 것으로 나타났다 ($p < 0.05$).

성장 실험 (제 1차~제 3차) - 대조구 대비 성장률

2013년 4월 6일부터 2013년 11월 25일까지 3회에 걸쳐 파장을 달리하는 LED 광자극에 노출시킨 볼락 치어의 대조구 대비 성장률은 Table 3과 같다.

Table 3. Relative growth rate of *Sebastes inermis* refer to control

No. of exp.	Relative growth rate			Body weight (g)
	Test-A (622 nm)	Test-B (518 nm)	Control	
1 st	-0.066	0.030	0.000	1 to 5
2 nd	-0.140	0.074	0.000	5 to 10
3 rd	-0.218	0.134	0.000	10 to 15
Mean	-0.142	0.079		

제 1차 실험에서는 녹색계열 (518nm)의 LED광에 노출한 실험구-B의 성장률은 실내 자연광에 노출한 대조구나 적색계열 (622 nm)의 LED광에 노출한 실험구-A보다 성장률이 약 3.0% 높았다. 제 2차 반복실험에서는 녹색광 (622 nm)에 노출한 볼락 치어는 적색광 (518 nm)이나 실내 자연광에 노출한 볼락 치어보다 성장률이 약 7.4% 높게 나타났다. 제 3차 반복실험에서도 제 1차 및 제 2차 실험결과와 유사하게 녹색광 (622 nm)에 노출한 볼락 치어는 적색광 (518 nm)이나 자연광에 노출시킨 볼락 치어보다 성장률이 약 13.4% 높은 것으로 나타났다.

이 실험 결과로부터, 녹색광 (518 nm)에 노출한 볼락 치어는 통상적으로 실내의 자연광에 노출된 대조구에 비하여 평균적으로 약 8% 전후의 성장촉진 효과가 나타났으며, 성장촉진 효과는 1~15 g의 개체 평균 체중 범위에서 작은 어체 (체중: 1~5 g)보다는 상대적으로 큰 어체 (5~10 g 또는 10~15 g)일수록 증가하는 경향이 있었다.

반면에 적색광 (622 nm)에 노출한 볼락 치어는 실내 자연광에 노출한 대조구보다 성장이 둔화 (성장률: 약 -14.2%)된 것으로 나타났으며, 그 둔화되는 정도는 작은 어체 (체중: 1~5 g)보다는 상대적으로 큰 어체 (5~10 g 또는 10~15 g)일수록 증가하는 경향을 보였다.

SPSS의 대응표본 T-검정에서는 1차, 2차 및 3차 성장실험에서 얻은 각각의 성장률에 대해서는 통계적 의미를 부여할 수 없었으나 ($p>0.05$), 3배수 실험결과 전체 ($n=12$)에 대해서는 녹색광에 노출한 볼락 치어의 성장률이 적색광에 노출한 볼락 치어보다 유의하게 높았다 ($p<0.05$). 적색광에 노출한 볼락 치어의 성장률은 실내 자연광에 노출한 볼락 치어보다 유의하게 낮았다 ($p<0.05$).

볼락 치어의 활동성

LED 광파장에 따른 볼락 치어의 활동성을 관찰하기 위하여 2014년 3월 14일 적외선 CCTV카메라와 디지털녹화장치 (H0401L, NADATEL Co., Korea)를 사용하여 실험수조 내의 볼락 치어 (평균 전장: 8.1 cm)의 행동을 기록하고 분석하였다. 광원으로 LED광을 사용한 실험수조의 조명시간은 1일 14시간 (06:00~20:00)이었다. 평상시의 연직적인 행동에서는 적색계열 (622 nm)의 LED 광에 노출한 실험구의 볼락 치어는 수조바닥 부근에 조용히 머물러 있는 행동이 자주 관찰되었으며, 녹색계열 (518 nm)의 LED 광에 노출한 볼락 치어는 주로 중층에 떠 있는 행동이 자주 관찰되었다. 실내 자연광에 노출한 볼락 치어의 경우에는 녹색광 (518 nm)에 노출한 볼락 치어와 유사한 연직행동이 관찰되었다. 2014년 3월 14일 00시부터 익일 00시까지 25시간동안 녹화한 볼락 치어의 행동을 매시간 5분씩 분석하여 활동량의 지표로 생각한 5분간의 평균 이동거리 (이하 'MD5'라 한다.)를 구하였다. 그 결과, 적색광에 노출한 볼락 치어가 가장 많이 활동한 것 (MD5: 12.26 m)으로 나타났으며, 그 다음이 녹색광 (MD5: 9.40 m), 자연광 (MD5: 6.41 m)의 순이었다. 적색광에 노출한 볼락 치어의 주간 활동량 (MD5: 7.14 m)은 야간보다 약 39.6% 많았다. 녹색광 및 자연광의 경우에는 주간의 활동량 (녹색광의 MD5: 5.05 m; 자연광의 MD5: 3.47 m)이 야간보다 각각 16.2%, 17.9% 많았다. 적색광, 녹색광 및 대조구에서 최대의 활동량을 나타낸 시간대는 각각 08:00 (MD5: 27.8 m), 06:00 (24.1 m) 및 21:00

(20.4 m)이었으며, 최소 활동량을 나타낸 시간대는 각각 22:00 (MD5: 2.7 m), 20:00 (3.7 m) 및 20:00 (1.7 m)이었다.

고 찰

목표 광파장과 광파워 결정

이번 실험에 사용한 평판형 LED 광원은 적색, 녹색 및 청색 LED 패키지를 조합하여 목표로 하는 탁월 파장 및 광파워를 구할 수 있도록 하였다. 여기서 탁월 파장이란 용어를 사용한 것은 RGB (red green blue)의 LED 패키지를 조합하여 발생시킨 파장은 특정의 고유한 파장을 발생시킬 수 있도록 만든 LED에서 발생시킨 파장과 차이가 있기 때문이다. 1개의 LED패키지는 1개의 파장을 발생시키며, 발생할 수 있는 광파워도 매우 약하다. 강한 광파워를 발생시키려면 많은 수의 LED패키지를 직렬 또는 병렬로 연결하여야 한다.

목표로 하는 광파장과 광파워는 이번 실험의 광원에서 사용할 수 많은 적색, 녹색 및 청색 LED 패키지의 부분적인 ON/OFF와 LED패키지에 인가되는 전류를 미세하게 조정하여 발생시켰다. LED 패키지의 부분적인 ON/OFF와 LED패키지에 인가되는 전류는 개인용 컴퓨터에 설치한 조명제어 프로그램을 통하여 제어하였다. 조명제어프로그램에는 광원별로 할당된 채널 (1~20)을 선택하고 해당 채널에 대한 RGB의 LED값을 입력하고 시간을 선택하여 원하는 광조건을 만들 수 있도록 하였다.

목표로 하는 광파장을 발생시키기 위한 RGB의 LED 값은 Microsoft의 EXCEL 프로그램을 사용하여 만든 'Dominant Wavelength Calculator'를 사용하여 구하였다. 'Dominant Wavelength Calculator'는 ① RGB 스펙트럼을 만들고, 이를 이용하여 x, y좌표를 구한다. ② 적분구를 이용하여 측정된 광학적 와트와 호환되게 만든다. ③ 각 파장별 색좌표 CIE1931을 사용하여 각각의 단파장 좌표와 기준좌표와의 기울기를 구하고, 테스트 좌표와의 기울기도 구한다. ④ 색좌표 상에 기울기가 같은 곳이 2개 생기기 때문에 기울기의 차가 작은 것을 2군데 구한 다음, ⑤ 이를 이용하여 목표로 하는 최종 탁월 파장을 구한다.

실험에 사용한 평판형 LED광원에 대하여 적분구를 이용하여 측정된 LED값과 광파워의 관계는 Fig. 3에

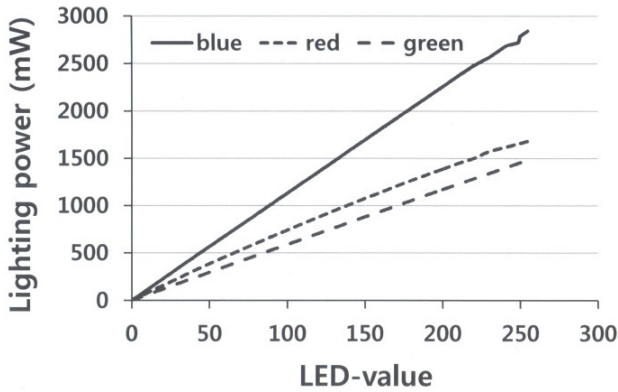


Fig. 3. Relationship between LED-values and light power of the light source used in experiment.

Table 3. Relationship between LED-values and light power of the light source used in experiment

LED-value	Light power (mW)		
	BLUE	RED	GREEN
0	0	0	0
10	113.67	80.05	58.82
20	226.51	156.33	118.47
30	341.14	233.54	178.01
40	453.82	310.79	235.52
50	565.71	385.33	294.61
60	679.89	457.79	354.62
70	792.65	529.97	413.65
80	905.34	602.35	471.74
90	1018.67	672.74	531.93
100	1131.59	741.86	589.49
110	1244.21	811.04	648.07
120	1357.05	878.54	706.39
130	1469.66	946.57	764.01
140	1585.17	1010.90	821.94
150	1696.49	1076.69	882.19
160	1808.71	1139.25	938.60
170	1920.52	1204.77	996.26
180	2033.44	1266.80	1054.54
190	2144.87	1328.71	1113.02
200	2256.58	1386.35	1170.62
210	2371.06	1448.07	1227.58
220	2479.34	1500.58	1285.11
230	2565.34	1576.28	1341.56
240	2676.77	1617.07	1400.20
250	2787.63	1660.83	1455.49
255	2843.06	1682.71	1483.13

나타내었다. 청색, 적색 및 녹색에 대한 각각의 LED값을 0~255까지 총 256단계로 나누어 부여하면서 각 단계별 광파워를 측정하였다. 각각의 RGB의 LED값에

대하여 측정된 광파워를 일부 추출하여 나타낸 것이 Table 3이다. 청색 LED는 LED값이 0~255로 변함에 따라 발생하는 광파워가 0~2,843.1 mW이었다. 적색과 녹색 LED의 경우에는 LED값이 0~255로 변함에 따라 각각 0~1,139.3 mW 및 0~1,483.1 mW의 광파워가 발생하였다.

어류의 성장과 광파장

젤라틴 필터나 백상지 필터를 사용하여 만든 단색광에 민물 농어를 노출시켜 실험한 Luchiari et al. (2009)의 연구에 의하면, 민물 농어는 보다 긴 파장의 빛이 짧은 파장보다 성장과 먹이섭취를 촉진한다고 보고하였다. 단색광 (실험구: 청색, 녹색, 황색 및 적색 젤라틴 필터 사용; 대조구 (n= 5): 백색 종이 필터))에 노출시킨 민물 농어는 보다 긴 파장에서 condition factor (CF), feed efficiency (FE), specific growth rate (SGR) 모두 유의한 플러스 효과를 나타내었다. 적색광에서 사육한 민물 농어는 백색광에서 사육한 것보다 최종 체중, SGR 및 CF가 유의하게 높았으며, FE는 녹색광, 황색, 적색이 백색보다 유의하게 좋았다 (Dunnett's posthoc test, P<0.05). 반면에 청색광은 측정된 factor가 백색광과 비슷하였다. 성장실험 후 시각수용체의 흡광도를 조사한 결과, 530 nm에서 rods의 λ_{max} 가 나타났고, 2개 cone classes에서는 355 및 603 nm에서 최대 흡광이 있었다고 보고하였다.

광파장과 어류 성장에 관한 다른 연구로는 Hyedamejad et al. (2011)의 연구가 있었다. 무지개 송어 (15.16±0.29 cm; 32.27±1.18 g)를 실험 대상으로 하여 빛의 색깔이 성장 및 스트레스 반응에 미치는 영향을 조사한 Hyedamejad et al. (2011)의 연구에 의하면, 물고기는 16개의 유리수조 (140×30×80 cm)에 12마리씩 수용하여 4가지 색깔 즉, 황색 (546 nm), 적색 (605 nm), 청색 (470 nm) 및 백색 (full spectrum, 대조구) 중 1개 색깔의 빛에서 사육하였다. 실험은 125일간 지속되었으며, 스트레스 반응은 코티졸 (cortisol) 수준을 측정하여 평가하였다. 황색광에서 사육한 물고기의 사료효율은 다른 색깔의 광에서 사육한 것보다 유의하게 낮았으며, 체중 및 전장은 다른 색깔의 광에서 사육한 것보다 좋았다. 그러나 condition factor나 specific growth rate에서는 빛 색깔에 따른 차이가 없었으며, 황색광에서 사육한 물고기의 코티졸을 다른 색깔의 빛에 노출시킨 것

보다 코티졸 수준이 낮았다고 보고하였다.

한편, 나일 틸라피어를 실험 대상으로 하여 8주동안 비슷한 광 수준에서 5개의 파장 즉, 백색광 (full light spectrum), 청색광 (452 nm), 녹색광 (516 nm), 황색광 (520 nm) 및 적색광 (628 nm)에서 사육하면서 먹이섭취, 먹이섭취 시작시간의 지연 (latency to begin feeding), 성장 및 사료효율 (feed conversion)을 4주 동안 지속적으로 측정한 Volpato et al. (2013)의 연구에 의하면, 적색광은 사람의 경우처럼 물고기의 먹이섭취 동기를 자극하는 것으로 나타났으나, 여분의 먹이섭취가 성장으로 이어지지는 않았다고 보고하였다. Volpato et al. (2013)의 연구 결과는 적색계열 LED광에 노출시킨 볼락이 녹색계열 LED광에 노출시킨 볼락보다 활발하지만 성장으로 연결되지 않은 것과 일맥 상통하는 연구 결과라고 사료된다.

이들 연구결과로부터 판단하면, 어류의 성장에 긍정적인 요소로 작용하는 빛의 파장은 어종마다 다른 경우가 많으며, 다양한 양식어종에 LED와 같은 에너지 소모가 적은 광원을 적용하여 성장 촉진이나, 사료효율 향상 등을 도모하기 위해서는 더욱 많은 추가적인 실험이 필요함을 알 수 있다.

결론

볼락 치어 (연령대: 0~1세; 체중범위: 1~15 g)에 대하여 적색계열 (622 nm) 및 녹색계열 (518 nm)의 LED 광 (광강도: 1,620 mW; 광주기: 일출 및 일몰을 포함한 14시간), 그리고 실내의 자연광 (대조구)에 노출시켜 사육하면서 성장실험을 실시한 결과, 1차 실험에서는 녹색광 (622 nm)에 노출한 볼락은 적색광 (518 nm)에 노출시킨 경우보다 개체어 체중이 평균 0.39 g 증가하였으나 실내에서의 자연광에 노출시킨 볼락보다는 개체어 체중이 평균 0.12 g 감소하였다. 2차실험 및 3차실험에서는 녹색광이 적색광이나 자연광에 노출시킨 볼락보다 평균 개체어 체중이 각각 1.07 g 및 2.55 g 증가하였으며, 대조구보다는 각각 0.57 g 및 0.84 g 증가하였다. 3반복실험 전체를 통하여 구한 녹색광에 노출시킨 볼락 치어의 대조구 대비 성장률은 실내 자연광에 노출시킨 경우보다도 약 7.9%로 유의하게 높았다 ($p<0.05$). 적색광에 노출한 볼락 치어는 대조구에 비하여 성장률이 약 -14.2%로 유의하게 낮았다 ($p<0.05$).

사사

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업(과제번호: 10037416, 해양 LED 융합기술지원 기반구축 및 상용화 기술개발)으로 지원된 연구임

References

- Choi HJ, Hong KP, Oh SY, Noh CH, Park YJ, Myoung JG, Kim JM, Hur JW, Zhang CI and Park IS. 2005. Growth Characteristics of Cultured Dark-Banded Rockfish, *Sebastes inermis* Cuvier. J Aquac, 18(3), 147-153.
- Chyung MK. 1977. The Fishes of Korea, IL-JI SA, Seoul, Korea, pp 499-500.
- El-Sayed AFM, El-Ghobashy AE and El-Mezayen MM. 2013. Effect of feed colour on growth and feed utilization of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) larvae and fingerlings. Aquac Nutrit 19, 870-876. (doi: 10.1111/anu. 12031)
- Handeland SO, Imsland AK, Bjornsson BT and Stefansson SO. 2013. Long-term effects of photoperiod, temperature and their interaction on growth, gill Na^+ , K^+ -ATPase activity, seawater tolerance and plasma growth-hormone levels in Atlantic salmon *Salmo salar*. J Fish Biol 83, 1197-1209. (doi: 10.1111/jfb.12215)
- Hatanaka M and Iizuka K. 1962. Studies on the fish community in the Zostera area-III. Efficiency of production of *Sebastes inermis*. Nippon Suisan Gakkaishi 28, 305-313.
- Heydarnejad MS, Parto M and Pilevarian AA. 2011. Influence of light colours on growth and stress response of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) under laboratory conditions. J Animal Physiol and Animal Nutrit 97, 67-71. (doi: 10.1111/j. 1439-0396.2011.01243.x)
- Jang YS. 2011. Investigation of Growth Stage Related Genes in Dark-banded Rockfish *Sebastes inermis*. Kor J Ichthyol 23(1), 21-29.
- Karakatsouli N, Papoutsoglou ES, Sotiropoulos N, Mourtikas D, Stigen-Martinsen T and Papoutsoglou SE. 2010. Effects of light spectrum, rearing density and light intensity on growth performance of scaled and mirror common carp *Cyprinus carpio* reared under recirculating system conditions. Aquac Eng 42, 121-127. (doi: 10.1016/j.aquaeng.2010.01.001)
- Kim CK and Kang YJ. 1999. Feeding Ecology of Black Rockfish, *Sebastes inermis*. J Kor Fish Soc 32(5), 637-641.
- Kim YU, Han KH and Byun SK. 1993. The early life history of the rockfish, *Sebastes inermis*. 2. Morphological and skeletal development of larvae and juveniles. J Kor Fish Soc 26, 465-476.
- KORDI. 1997. A study for the marine ranching program in Korea. Ecosystem management model and stocking technique. Korea

- Ocean Research and Development Institute, Bachelor of Science in Physical Education, 97602-00-1073-3, p 361.
- Liu Y, Mou Z, Xu G, Li Y and Wang C. 2012. The effect of light intensity on the growth of *Brachymystax lenok* (Pallas, 1773). *Aquac Res* 43, 1838-1844. (doi: 10.1111/j. 1365-2109.02993.x)
- Luchiari AC, Morais Freire FA, Pirhonen J and Koskela J. 2009. Longer wavelengths of light improve the growth, intake and feed efficiency of individually reared juvenile pikeperch *Sander lucioperca* (L.). *Aquac Res* 40, 880-886. (doi: 10.1111/j. 1365-2109.2008.02160.x)
- MOMAF. 2004. Studies on the Development of Marine Ranching Program in Tonyeong, Korea. Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, Seoul, Korea, 1-1125.
- MOMAF. 2006. Studies on the Development of Jeonnam Archipelago Marine Ranching Program in Korea. Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, Seoul, Korea, 1-640.
- NFRDI. 2007. Effects of Released Fisheries Resources in 2007. National Fisheries Research and Development Institute, 1-256.
- Puvanendran V and Brown JA. 2002. Foraging, growth and survival of Atlantic cod larvae reared in different light intensities and photoperiods. *Aquac* 214, 131-151.
- Rountrey A, Coulson PG, Meeuwig JJ and Meekan M. Water temperature and fish growth: otoliths predict growth patterns of a marine fish in a changing climate. *Global Change Biol* 20, 2450-2458. (doi: 10.1111/gcb.12617)
- Stasko AD, Gunn JM and Johnston TA. 2012. Role of ambient light in structuring north-temperate fish communities: potential effects of increasing dissolved organic carbon concentration with a changing climate. *Environ Rev* 20, 173-190. (doi: 10.1139/A2012-010)
- Sykes AV, Quintana D and Andrade JP. 2014. The effect of light intensity on growth and survival of cuttle fish (*Sepia officinalis*) hatchlings and juveniles. *Aquac Res* 45, 2032-2040. (doi: 10.1111/are. 12150)
- Taylor J and Migaud H. 2009. Timing and duration of constant light affects rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) growth during autumn-spring grow-out in freshwater. *Aquac Res* 40, 1551-1558. (doi: 10.1111/j.1365-2109.2009.02260.x)
- Volpato GL, Bovi TS, Freitas RHA, Silva DF, Delicio HC, Giaquinto PC and Barreto RE. 2013. Red light stimulates feeding motivation in fish but does not improve growth. *PLOS ONE* 8, 1-5.
- Woolley LD, Fielder DS and Qin J. 2014. Swimbladder inflation, growth and survival of yellowtail kingfish *Seriola lalandi* (Valenciennes, 1833) larvae under different temperature, light and oxygen conditions. *Aquac Res* 45, 1489-1498. (doi: 10.1111/are.12097)
-
2015. 1. 31 Received
2015. 4. 11 Revised
2015. 5. 19 Accepted