

LED 광원에 대한 암순응시 볼락 (*Sebastes inermis*)의 시각 스펙트럼 민감도

허민아 · 강경미¹ · 신현옥^{2*}

부경대학교 수산물리학과, ¹KOICA-PKNU국제수산과학협동과정, ²부경대학교 해양생산시스템관리학부

Visual spectral sensitivity of dark-adapted rockfish (*Sebastes inermis*) in LED light source

Min-A HEO, Gyeong-Mi KANG¹ and Hyeon-Ok SHIN^{2*}

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

¹KOICA-PKNU International Graduate Program of Fisheries Science, Busan 608-737

²Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

The characteristics of aquatic light fields are generally reflected in the visual systems of fishes inhabiting them. Therefore, research on light sensitivity of fish is useful to explain the correlation between the visual function and habitat, behavior and distribution of fish. Rockfish is an important species in coastal ecology and also one of the main species for culturing in Korea. To make a contribution on the maintenance of the fish resources and understanding the ecology of the rockfish, the visual spectral sensitivities of the dark-adapted rockfishes were measured in the range of visible light (405~660 nm) using a light source of light-emitting diodes (LEDs). In order to assess electrophysiological response of the fish, the ERGs (electroretinograms) of the dark-adapted rockfishes were recorded on a data logger (12 bits) and a laptop computer. Juvenile (n=5; weight: 20.3±5.2 g; total length: 10.3±0.7 cm) and adult (n=5; weight: 87.8±21.8 g; total length: 18.1±1.3 cm) rockfishes were used in experiment. The visual threshold of juvenile and adult rockfish were 11.66 (log quanta/cm²/s) and 11.81 (log quanta/cm²/s) in 574 nm, respectively. The peak wavelength of the spectral sensitivity in the dark-adapted juvenile and adult rockfish was commonly 551 nm (series of green color). Collectively, these results demonstrate that the rockfish has suitable visual capabilities for inhabiting coastal water in Korea.

Keywords: Rockfish, ERG (Electroretinogram), LED, Visual spectral sensitivity

서론

해수면 부근에서의 조도의 일일변화는 해역, 시간 등에 따라 광범위한 차이를 나타내며, 해수면을 통과

하는 투과광은 수심이 증가할수록 산란과 흡수로 인해 파장 스펙트럼 (color)과 강도 (intensity)가 변화한다 (McFarland, 1986). 특히 원양해역의 경우, 가장 깊이

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

투과되는 파장대는 단파장 (청색 계열)이고 연안해역에서는 중간파장 (녹색 계열), 또한 하구와 담수해역에서는 장파장 (황-적색 계열)이다 (Jerlov, 1968). 이와 같은 해양에서의 자연광의 투광 특성은 일반적으로 어류의 시각 시스템에 영향을 주며, 선택적 압력 (selective pressure)의 반복된 과정을 거쳐 대부분의 어류들은 서식지에 적응하는데 적합한 감광성 메커니즘을 지니게 되었다 (Munz and McFarland, 1977; Levine and MacNichol, 1979). 따라서 어류의 광 민감성에 대한 연구는 시각 능력뿐만 아니라 시각과 서식 환경과의 상관관계, 어류의 분포와 행동, 포식자-피식자 간의 상호작용 등을 설명하기에 유용한 지표로 이용되고 있다 (Horodysky et al., 2008; Matsumoto et al., 2010, 2012).

현재 수산물 소비에 있어 양식 수산물의 비중은 날로 커지고 있으며, 친환경 고품질 수산물에 대한 요구도 점점 증가하고 있는 실정이다. 이에 양식 산업에서는 생물에게 있어 매우 중요한 요소인 빛을 이용하여 수산물을 사육하는 방법을 시도하고 있으며 (Cha et al., 2010; Choi, 2013), 광원으로는 소비전력이 적고 친환경적인 LED를 많이 이용하고 있다. 따라서 수산물의 생산성과 품질을 효과적으로 향상시키기 위해서는 수생동물의 광 민감성에 대한 연구도 동시에 이루어져야 할 필요가 있다.

본 연구의 실험어인 볼락 (*Sebastes inermis*)은 썸뱅이목 (Order Scorpaeniformes) 양볼락과 (Family Scorpaenidae)에 속하는 난태성 경골어류로, 우리나라 전 연안해역과 일본 북해도 이남의 수심 20~50 m 암반 해역에 주로 무리지어 서식한다 (NFRDI, 2004). 볼락은 연안어업의 중요한 대상이 되고 있을 뿐만 아니라, 산출에서부터 유어, 성어기까지 한 살이를 연안에서 보내는 연안 정착성 어류로서, 연안의 천해생물군집에서 중요한 생태학적 지위를 차지하는 종으로 알려져 있다 (Hatanaka and Iizuka, 1962). 볼락은 산업적 가치가 높은 어종이나, 각종 오염물질의 연안유입과 치어의 무분별한 남획 등으로 자원량이 급격히 감소하고 있다 (KORDI, 1997). 볼락의 자원증대를 위하여 해양목장화 사업뿐만 아니라 수산생물 종묘 방류사업의 중요한 어종으로 선정하여 관리하고 있으며, 최근 들어서는 그 방류량이 증가하는 추세에 있다 (MOMAF, 2004, 2006; NFRDI, 2007). 지금까지의 볼락의 국내외 연구로서는 자연산 볼락의 생물학적 특성 및 교미 습성 규명 (Shimomiya

and Ezaki, 1991), 초기생활사 (Kim and Han, 1993; Kim et al., 1993), 섭식 생태 (Kim and Kang, 1999), 양식산 볼락의 성장 특성 (Choi et al., 2005), 수온과 광주기에 따른 치어의 산소 소비율 (Oh and Noh, 2006), 성장단계별 차등발현 유전자 탐색 (Jang, 2011), 초기 성장 및 눈의 조직학적 발달 특성 (Park et al., 2012) 등이 있으나, 볼락의 광 민감성에 대한 연구는 보고된 바가 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 볼락의 지속적인 자원 관리와 양식에서의 생산성 향상에 기여할 목적으로, 차세대 광원으로 주목받고 있는 LED를 이용하여 암순응시 볼락의 ERG (electroretinogram)를 측정하고, 그 결과로부터 기존에 연구되지 않았던 볼락의 시각 스펙트럼 민감도 (visual spectral sensitivity)를 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

실험어

본 연구에서 실험어는 볼락 치어와 성어로 구분하여 각각 5마리씩, 총 10마리를 사용하였다. 볼락 치어는 경상남도수산자원연구소에서 2013년 1월 중순에 산출하여 자란 치어를 2013년 3월 30일에 부경대학교 LED-해양융합기술연구센터의 실험실 내 수조로 운반하여 약 17개월 동안 사육 중이었던 것을 사용하였다. 사육 수조는 순환여과식 수조 (L1050×W600×H600 mm)를 사용하였고, 수온은 히터와 냉각기를 이용하여 18±1℃로 유지시켰다. 볼락 성어는 자연 상태의 치어를 잡아 육지도 연안의 해상 가두리에서 사육한 것을 사용하였다. 볼락 치어는 전장 10.3±0.7 cm, 체중은 20.3±5.2 g 이었고, 볼락 성어는 전장 18.1±1.3 cm, 체중은 87.8±21.8 g이었다.

광원 (light source)

ERG 측정을 위해서 9개의 단일 LED 광원을 사용하였다. 각각의 광원은 서로 다른 피크 (peak) 파장을 가지며, 그 파장의 범위는 405~660 nm이었다 (Fig. 1, Table 1). 하나의 단일 광원으로 LED 패키지 (L5×W5×H1.5 mm) 1개를 사용하였고, 각 파장에 해당하는 9개의 LED 패키지를 에폭시 기판 (L80×W80×H1.5 mm)에 3×3 행렬로 배열 및 배선 한 후 접착시켜 사용하였다. 각 LED 광원들은 수동으로 조절하였으며, 에폭시 기판은 실험

어의 안구에서 약 17 cm 위쪽에 설치하여, LED 패키지로부터 방사되는 빛이 실험어의 동공 전체에 충분히 비추어 질 수 있도록 하였다.

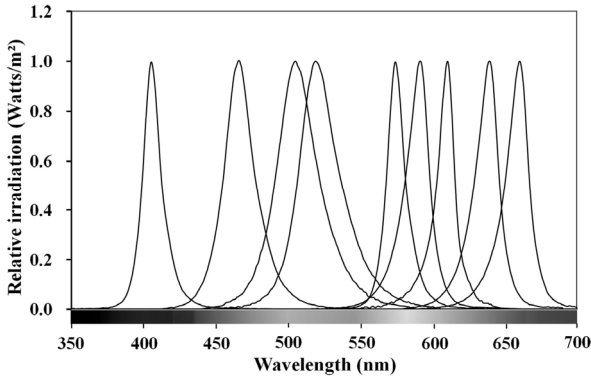


Fig. 1. Measured relative spectral power curves of LED light sources used in experiment.

Table 1. Specifications of LEDs used as light source in the experiment

No	Peak Wavelength (nm)	Device (LUXPIA, Korea)	Forward voltage (V)	Forward current (mA)
1	405	LVH1056	3.3	60
2	465	LBH1056	3.3	60
3	505	LCH1056	3.2	60
4	520	LGH1056	3.2	60
5	574	LYG1056	2.0	60
6	591	LYH1056	2.0	60
7	610	LAU1056	2.0	60
8	640	LRH1056	2.1	60
9	660	LRU1056	2.0	60

광 강도 (light intensity) 조절

ERG wave는 광 자극의 강도, 안구와 자극 광 장치간의 거리, 망막의 명순응 및 암순응 상태 등의 영향을 받으며, 이에 본 연구에서는 다른 조건은 모두 일정하게 하고 광 파장과 강도만을 달리하여 ERG를 측정하였다.

자극광의 강도는 광원에 공급되는 전류를 제어함으로써 조절하였다. 전원은 직류-전력공급기 (DC power supply, GP-430TP, LG Precision co., Ltd., Korea)를 사용하여 공급하였고, 전류는 저항의 크기가 다른 8개의 고정 저항을 직렬로 연결하여 제어하였다. 전류 제어에 사용한 8개의 고정 저항은 Table 2에 나타내었다. R1~R8 순으로 저항을 연결하여 광원에 흐르는 전류를 단계적으로 증가시켰고, 광 강도를 점차 높이는 방법으

로 ERG를 측정하였다. 자동적인 광 강도 조절을 위해, 저항에 PLC (programmable logic controller, K7M-DR206, LS Industrial Systems, Korea)를 연결하여 R1~R8까지 타임 스위칭 되도록 조정하였다 (Fig. 2). 광 자극은 5 sec 간격으로 100 ms 동안 주었으며 8단계의 광 강도에 대하여 최소 5번 이상 ERG를 측정하였다.

인간의 시감도를 측정할 경우, 광 강도는 주로 Photometry (lm, lux, cd, etc)를 사용하여 측정하지만 어류의 경우에는 주로 Radiometry (W, W/m², etc)를 사용한다. Radiometry는 빛의 전체 에너지 함량, 즉 광 에너지를 측정하는 반면, Photometry는 단지 인간이 눈으로 감지할 수 있는 범위 (가시광선)의 빛만을 측정하는 것으로 광의 밝기 등을 측정할 경우에 사용된다. 즉, Radiometry는 Photometry 보다 넓은 범위의 빛의 특성을 측정한다는 차이가 있다. 어류는 일반적으로 인간이 보지 못하는 자외선 영역까지도 볼 수 있으며, 산란과 흡수라는 해양의 광 특성을 고려한다면 광 에너지를 나타내는 단위를 사용하는 것이 적합하다. 본 연구에서는 광 에너지와 양의 선형 관계에 있는 광량을 측정하였으며 단위는 quanta/cm²/s로 표현하였다. 자극 광의 강도 (quanta/cm²/s)는 radiometer (QSL-2101, Biospherical Instruments Inc., USA)를 사용하여 실험어의 안구와 거의 동일한 위치에서 측정하였다.

Table 2. Resistances used to adjust electric current

No.	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Resistance (kΩ)	59.2	50.0	44.0	33.0	25.0	16.6	8.2	3.3

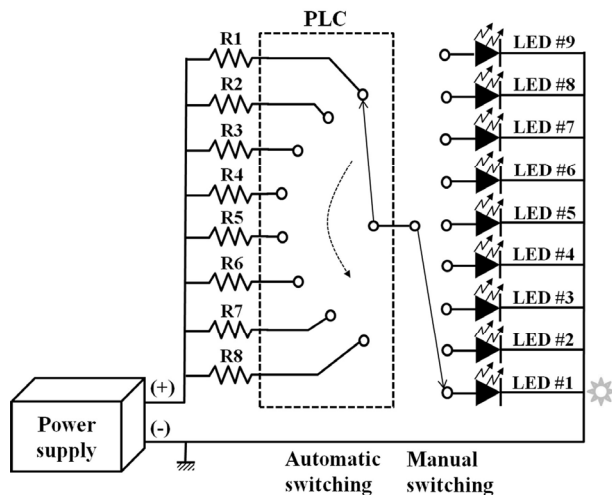


Fig. 2. Circuit diagram of a prototype automatic light intensity controller.

ERG 측정

ERG를 기록하는 동안 볼락이 움직이지 못하도록 gallamine triethiodide (0.37 mg/10 ml 용액의 1.2-1.4 ml)를 근육 내 주사하여 근육을 마비시켰다. 내장 기관에 손상을 주지 않기 위해 볼락의 등과 꼬리 부근으로 주사하였으며, gallamine triethiodide의 적정량을 2~3번에 걸쳐 나눠서 주사하였다. 마비에 소요된 시간은 개체마다 차이가 있었으나 약 10-15분 정도 소요되었다. 볼락이 근육의 마비로 인해 옆으로 기울어 유연하지 못하는 상태가 되었을 때 정육면체 금속 프레임 (L600×W600×H600 mm) 안에 두었다. 볼락을 해수로부터 꺼낸 상태에서 ERG를 기록하였고, 해수 (18-20℃)를 볼락의 아가미에 인위적으로 공급하여 실험 동안에도 호흡을 가능하게 하였다. ERG 기록 전 볼락을 암실에 한 시간 넘게 두어 충분히 암순응 (dark adaption)을 시켰으며, 금속 프레임에 암막커튼을 덮어 씌워 실험 장치에서 나오는 미세한 빛을 완전히 차단하였다. 실험 동안에는 흐릿한 적색 손전등만을 사용하였다.

ERG는 염화은으로 코팅 된 2개의 silver wire 전극 (540800, A-M systems, USA, Ø0.2×L11 mm)을 사용하여 기록하였다. 2개의 전극 중 기록 전극으로 사용한 것은 볼락의 각막에 접촉시켰고, 기준 전극은 아가미 움직임의 영향이 적은 안구 주변에 접촉시켰다. 전극으로 인해 눈에 상처가 생기지 않도록 전극의 끝 부분을 구부려 각막에 닿게 하였으며, 기록 전극 및 기준 전극은 3축 micromanipulator (MM3, Narishige Scientific Instrument Lab., Japan)를 사용하여 고정하였다. ERG 측정 장치들을 철망 cage 내에 설치하여 외부로부터 인가되는 전기적 잡음을 최대한 억제하였다.

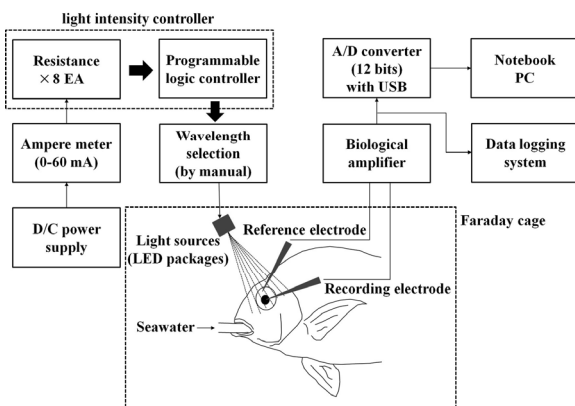


Fig. 3. Schematic diagram of ERG measurement system.

ERG 신호는 수 μ V수준으로 미약하므로, bioelectric amplifier (P400, PhysioLab, Korea)로 약 25,000배 증폭하여 데이터로거 (DA20, RION, Japan)와 PC로 동시에 전송하였다 (Fig. 3). 측정된 ERG 데이터는 Labchart8 reader software (ADInstruments, New Zealand)를 사용하여 필터링 한 후 분석하였다 (low cutoff, 0.1 Hz; high cutoff, 40 Hz).

시각 (명암각) 역치 및 스펙트럼 민감도

본 실험에서는 ERG의 b-wave가 최소 진폭을 생성하는데 필요한 자극 광의 강도를 시각 역치로 하였다. b-wave의 진폭 (μ V)은 a-wave의 최저점과 b-wave의 최고점의 차이로 정의된다. 자극 광이 약하여 a-wave가 나타나지 않은 경우에는 baseline으로부터 b-wave의 진폭을 계산하였다. 민감도는 역치의 역수로 나타낼 수 있으므로, 각 파장에 해당하는 시각 역치를 역수로 하여 상대적인 스펙트럼 민감도를 구하였다.

스펙트럼 민감도의 모델 근사

측정 데이터로부터 볼락의 스펙트럼 민감도 곡선과 피크 파장을 추정하기 위해서 α -band의 시각 색소 흡광도를 나타내는 SSH (Stavenga et al. 1993)의 모델 식을 사용하였다. 그 모델 식은 식 (1)과 같다.

$$\alpha = A \exp - a_0 x^2 (1 + a_1 x) \quad (1)$$

여기서, α 는 시각 색소의 흡광도이며 A, a_0 및 a_1 은 가중계수를 나타낸다. x 는 $x = \log(\lambda / \lambda_{\max})$ 로부터 구할 수 있다. 여기서 λ 및 λ_{\max} 는 각각 파장 및 피크 파장이다. 이 모델의 매개 변수들 (λ_{\max} , 각각의 가중 계수)은 최대 우도 방법 (maximum likelihood)을 사용하여 측정 데이터에 모델 근사시킴으로써 추정하였다. 모델 근사는 SPSS 통계소프트웨어 (Ver.22, IBM, USA)의 비선형 회귀 분석을 통해 시행하였다.

결과

광원의 광 강도 특성

본 연구에서 광원으로 사용한 LED 패키지에 대하여 광학적 특성을 조사하였다. LED 패키지에 인가되는 전류를 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60 mA로 점차 증가시켰고, 이에 따른 스펙트럼 곡선의 변화를 관찰하였다. 그 결

과, 전류가 증가함에 따라 광 강도 (W/m^2)가 증가하였으며, 곡선의 피크 파장은 전류가 증가하여도 거의 변화하지 않고 일정하게 유지되었다 (Fig. 4). 광원으로 사용한 9개의 LED 패키지 모두 유사한 변화를 나타내었으며, ERG를 측정하기에 적합한 단일 광으로 판단되었다.

9개 파장의 광 강도 ($quanta/cm^2/s$)와 전류와의 관계는 Fig. 5와 같다. LED 패키지에 인가되는 전류가 증가함에 따라 광 강도가 선형적으로 증가하였으며 (결정계수 $r^2 > 0.97$), 광 강도의 기울기는 파장마다 차이를 보였다. 60 mA 전류를 주었을 때의 광 강도는 574 nm (녹색 계열)에서 1.5610^{13} $quanta/cm^2/s$ 로 가장 낮았으며, 465 nm (청색 계열)에서 6.1510^{14} $quanta/cm^2/s$ 로 가장 높았다. 광 강도는 574 nm에서 장파장 (591, 610, 620, 640 nm)으로 갈수록 높아졌으며, 505 및 520 nm의 광 강도는 각각 1.9110^{14} 및 2.9710^{14} $quanta/cm^2/s$ 로 동일한 녹색 계열의 광원인 574 nm보다 더 높았다. 405 nm (보라색 계열)에서의 광 강도는 2.5610^{14} $quanta/cm^2/s$ 로 같은 단파장 영역인 465 nm보다 더 낮았다.

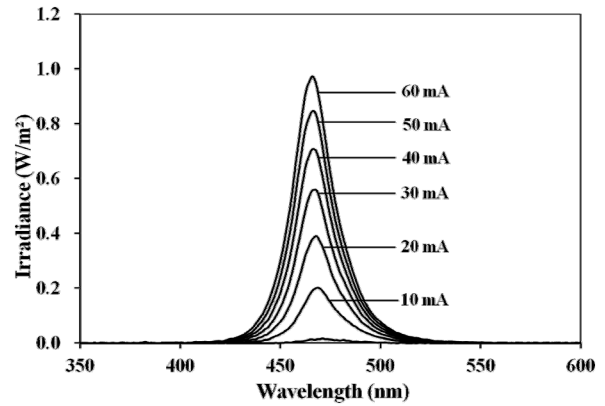


Fig. 4. Measured spectral power curves of 465 nm LED package with different current values.

ERG waveform

본 실험에서 측정한 암순응시 볼락의 ERG waveform의 한 예는 Fig. 6과 같다. a-wave와 b-wave가 관찰되었으며 a-wave는 b-wave에 비하여 상당히 작거나 거의 나타나지 않았다. 이러한 ERG waveform에서 비시감도의 지표로 사용한 것은 진폭이 큰 b-wave이었다.

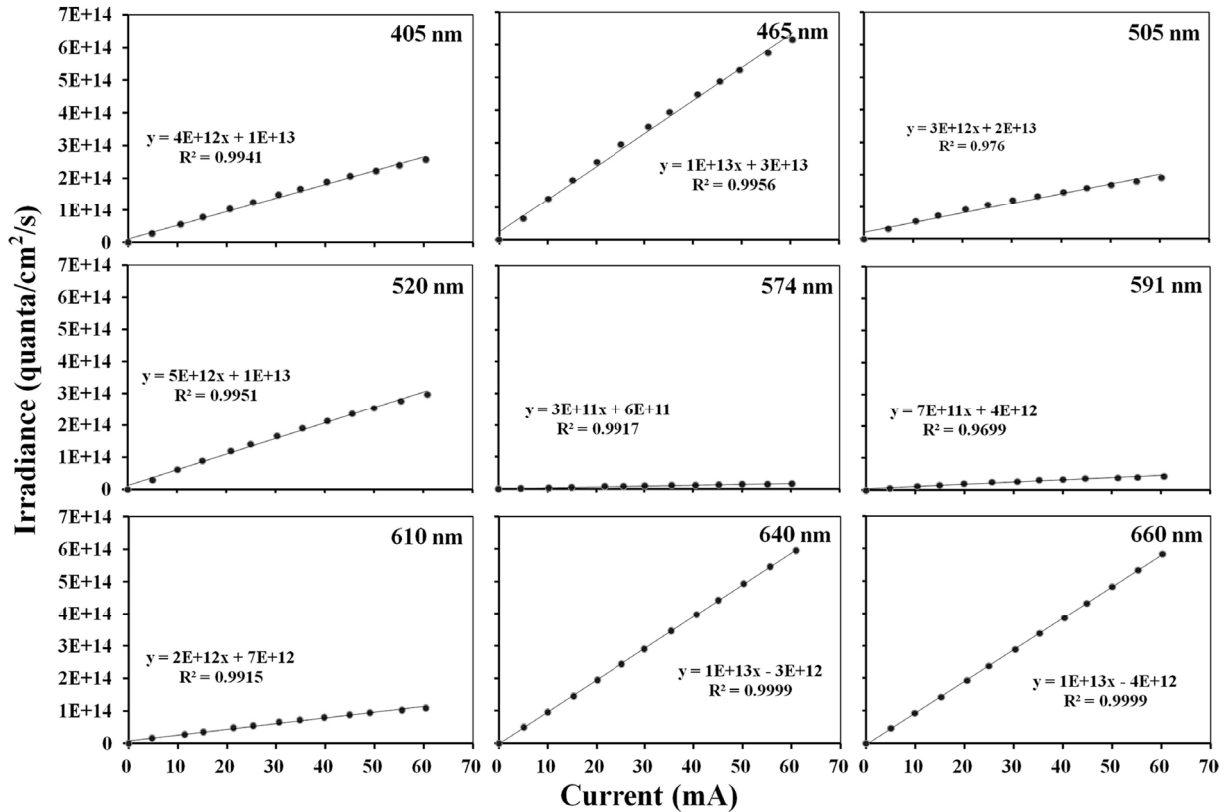


Fig. 5. Relationship between the LED light intensity (irradiance) and electric current for nine wavelength LED packages.

LED 자극 광의 강도에 따른 b-wave의 진폭 변화를 분석하였으며, 그 결과의 예는 Fig. 7, 8과 같다. Fig. 7은 574 nm 광 강도에 따른 볼락 치어와 성어의 ERG waveform을 각각 나열한 것이다. 볼락 치어와 성어 모두 망막에 인가되는 자극 광의 강도가 증가함에 따라 b-wave의 진폭이 증가하였다. 볼락 치어 5마리에서 측정된 610 nm 자극 광의 강도에 따른 b-wave 진폭 변화는 Fig. 8에 나타내었다. 자극 광의 강도가 12.85, 12.88, 12.96 및 13.14 ($\log \text{ quanta/cm}^2/\text{s}$)로 증가함에 따라, b-wave의 진폭이 각각 7.82, 11.74, 20.57 및 $39.37 \mu\text{V}$ 로 증가하였다. 이러한 변화는 볼락 성어에서도 유사하게 나타났다.

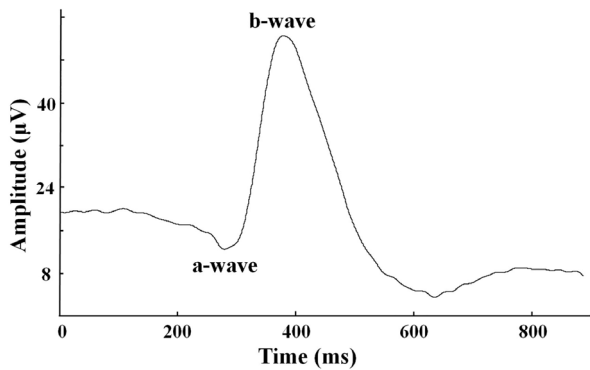


Fig. 6. An example of measured ERG waveform in a dark-adapted rockfish.

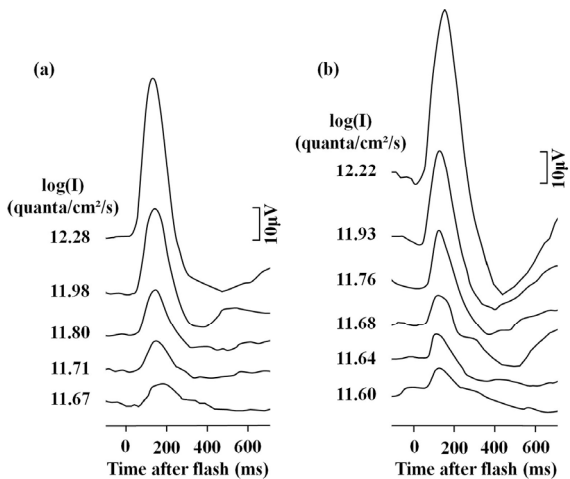


Fig. 7. Measured ERG waveforms from dark-adapted (a) juvenile ($n=1$, W: 16.72 g, TL: 9.8 cm) and (b) adult ($n=1$, W: 59.4 g, TL: 15.8 cm) rockfish in response to rising light intensity with a wavelength of 574 nm. The numbers on left indicate intensity (I) in log units.

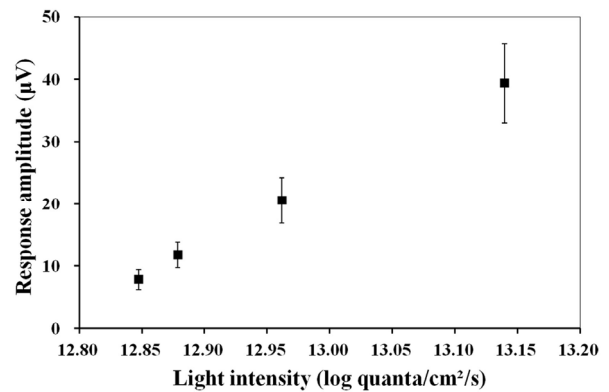


Fig. 8. Relationship between response amplitude and log intensity of dark-adapted juvenile rockfish ($n=5$, W: 10.3 ± 0.7 g, TL: 20.3 ± 5.2 cm) in 610 nm light stimuli. Error bars represents the mean \pm standard deviation (S.D).

시각 (명암각) 역치

시각 역치를 결정하는 b-wave의 최소 진폭은 자극 광의 파장과 볼락 개체에 따라 차이를 보였으며, 그 크기는 $0.6 \sim 19.4 \mu\text{V}$ 이었다. 실험에 사용한 볼락 치어의 5마리 중 2마리는 실험 도중 신호가 불안정하게 변하여 660 nm 파장에서의 ERG를 측정하지 못하였다. 볼락 치어 ($n=5$)와 성어 ($n=5$)를 각각 평균하여 나타낸 파장별 시각 역치는 Table 3과 같다. 시각 역치는 볼락 치어와 성어 모두 574 nm (녹색 계열)에서 가장 낮았으며, 591 nm (주황 계열)에서 두 번째로 낮았다. 청·녹색 계열 (465, 505, 520 nm)과 적색 계열 (610, 640, 660 nm)로 갈수록 시각 역치는 높아졌으며, 각 파장에 해당하는 시각 역치의 표준 편차는 모두 0.21 미만이였다. 574 nm에서 볼락 치어의 시각 역치는 11.66 ($\log \text{ quanta/cm}^2/\text{s}$)으로, 성어의 시각 역치인 11.81 ($\log \text{ quanta/cm}^2/\text{s}$) 보다 다소 낮았으나, 통계적으로 유의한 차이는 없었다 (Independent two samples t-test, $n=5$, $p=0.18$).

체장에 따른 시각 역치를 비교한 결과는 Fig. 9와 같다. 9개의 LED파장 중에서 역치가 가장 낮았던 2개의 파장 (574, 591 nm)에 대하여 조사한 결과, 체장이 증가함에 따라 시각 역치도 높아지는 경향이 나타났다. 그러나 통계적으로는 유의한 차이는 없었다 (Spearman's rho correlation, $n=10$, $p=0.31$ in 574 nm; $p=0.38$ in 591 nm).

Table 3. Averaged visual threshold values of juvenile and adult rockfish for nine LED light wavelengths

Wavelength (nm)	Visual threshold (log quanta/cm ² /s)	
	Juvenile	Adult
405	13.030	12.971
465	13.033	13.042
505	13.010	13.011
520	12.728	12.747
574	11.659	11.805
591	12.354	12.442
610	12.825	12.886
640	12.838	13.031
660	13.125	13.353

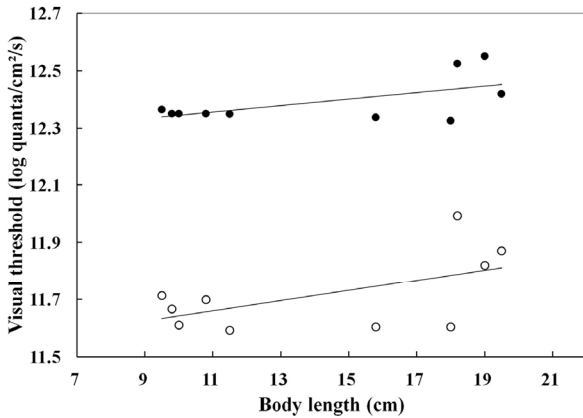


Fig. 9. Relationship between the visual threshold and body length of rockfish (n=10). Open and solid points represent the threshold in 574 nm and 591 nm, respectively.

스펙트럼 민감도 곡선

민감도 근사에 의해 추정된 볼락 치어와 성어의 암순응시 시각 스펙트럼 민감도는 Fig. 10과 같다. 민감도 곡선의 피크 파장(λ_{max})은 551 nm로 동일하였으며 측정 데이터와 근사 값과의 결정 계수 (R²)는 두 그룹 모두 0.98 이상이었다. 볼락 치어와 성어의 스펙트럼 민감도 곡선의 식은 각각 식 (2) 및 (3)과 같다.

$$V(\lambda)=2.932 \times \exp[-4214.186 \times \log(\lambda / 551)^2 \times (1-10.676 \times \log(\lambda / 551))] \quad (R^2=0.989) \quad (2)$$

$$V(\lambda)=2.932 \times \exp[-4214.186 \times \log(\lambda / 551)^2 \times (1-10.676 \times \log(\lambda / 551))] \quad (R^2=0.980) \quad (3)$$

따라서 볼락은 어두운 환경에서 녹색광 계열에 가장 민감하며, 청색광 계열 (단파장)보다는 황·적색광 계열 (장파장)에 더 민감한 것으로 나타났다.

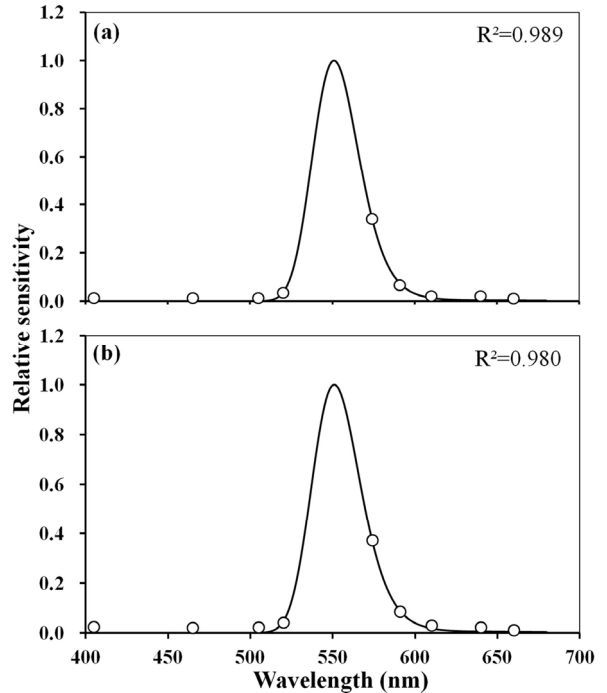


Fig. 10. Relative spectral sensitivity of (a) juvenile and (b) adult rockfish. Circles indicate measured sensitivity based on the threshold light intensity. Solid lines indicate the curve fitted to the template of Stavenga et al. (1993).

고찰

암순응시 볼락의 스펙트럼 민감도 곡선의 피크 파장은 551 nm 에서 나타났다. 그러나 참다랑어 (bluefin tuna, *Thunnus orientalis*)와 고등어 (chub mackerel, *Scomber japonicus*)의 스펙트럼 민감도 곡선의 피크 파장은 479 nm와 482 nm로 보고된바 있다 (Matsumoto et al., 2009, 2010). 이러한 차이는 이들 어종이 서로 다른 환경에 서식하기 때문인 것으로 판단된다. 참 다랑어와 고등어와 같은 깊고 맑은 원양해역에 서식하는 어류는 일반적으로 청색광 계열 (479, 482 nm)에 민감하고, 볼락과 같은 연안해역에 주로 서식하는 어류는 녹색광 계열 (551 nm)에 민감하다고 알려져 있다 (Munz and McFarland, 1977). 또한 연안해역에서의 어류의 시각 색소가 청녹색 배경광에서는 500-550 nm, 녹색 배경광에서는 520-570 nm의 스펙트럼 파장범위 내에 있

을 때 가장 양호한 시정특성을 갖는다고 보고된 바 있다 (Lythgoe, 1979). 따라서 본 연구의 조사대상 어종인 볼락은 연안해역에 가장 적합한 시각 능력을 지니고 있는 것으로 판단된다.

암순응시 어류의 스펙트럼 민감도는 간상세포에 의한 것이며, 이는 빛이 적은 환경에서 작용한다. 간상세포는 해질 무렵부터 활발하게 작용하기 시작하는데, McFarland (1991)가 해역별 스펙트럼 분포를 조사한 결과에 따르면, 450~660 nm 사이에 위치하는 간상세포는 약 3 m 수층의 희미한 빛을 잘 감지한다. 이로부터 볼락의 시각 능력은 이른 아침과 늦은 오후에 표층 가까이 부상하여 섭식 활동을 하는데 잘 적응되어 있는 것으로 판단된다.

금붕어 (*Curassius auratus*)와 제브라피쉬 (*Danio rerio*)의 경우, 어류가 성숙함에 따라 시감도가 다소 증가한다고 보고된 바 있으나 (Powers et al., 1988, Bilotta et al., 2001), 본 연구의 볼락의 경우에는 성숙에 크게 영향 받지 않는 것으로 나타났다. 담수어와 해수어는 서식 환경의 차이가 크기 때문에 그들의 시각 시스템 또한 다를 수 있다고 판단되며, 또한 시감도에 영향을 줄 수 있는 사육 환경의 차이를 배제하기 위해서 동일한 광 조건에서 자란 개체들에 대한 추가 연구가 필요할 것이다.

최근 볼락 가두리 양식장에서 야간 점등 (빛)을 이용하여 동물플랑크톤을 유도함으로써 자연산 먹이 생물을 활용하기 위한 방안이 연구되고 있다 (Kim, 2006). 따라서 가두리 양식장에서 야간에 녹색 계열 (551 nm)의 광원을 사용하여 볼락의 먹이 인지 능력을 향상시킨다면, 이들 광원에 군집한 플랑크톤의 섭이능력이 향상되어 볼락의 성장률을 간접적으로 촉진시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 볼락은 음성 주광성이므로 지나치게 밝은 불빛에는 잘 접근하지 않기 때문에 희미한 불빛이 효과적이다. 이를 위해 볼락의 시각 역치인 11.66 (log quanta/cm²/s)을 고려하여 적절한 수중 조도를 유지시킨다면, 비교적 약한 광으로도 효율적인 효과를 가져올 수 있으므로 생산비 절감 및 생산성 향상 등과 같은 효과를 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 LED 광원 (405-660 nm)에 대한 암순응시 볼락의 망막전위도 (ERG)를 측정하여 시각 스펙트럼 민감도를 추정하였다.

볼락 치어 (n=5)와 볼락 성어 (n=5)의 시각 역치는 574 nm (녹색 계열)에서 가장 낮았으며, 591 nm (주황 계열)에서 두 번째로 낮았다. 574 nm에서 볼락 치어의 시각 역치는 11.66 (log quanta/cm²/s)으로, 볼락 성어의 시각 역치인 11.81 (log quanta/cm²/s) 보다 다소 낮았으나, 통계적으로 유의한 차이는 없었다 (Independent two samples t-test, n=5, p=0.18). 볼락의 체장이 증가함에 따라 시각 역치도 높아지는 경향이 나타났으나, 통계적으로 유의한 차이는 없었다 (Spearman's rho correlation, n=10, p=0.31 in 574 nm; p=0.38 in 591 nm). 암순응시 볼락 치어와 성어의 시각 스펙트럼 민감도 곡선의 피크 파장(λ_{max})은 551 nm (녹색 계열)로 동일하였다. 따라서 본 연구의 조사대상 어종인 볼락은 연안해역에 가장 적합한 시각 능력을 지니고 있는 것으로 판단되며, 가두리 양식장에서 야간에 녹색 계열의 광원을 사용하여 볼락의 먹이 인지 능력을 향상시킨다면, 볼락의 성장률을 간접적으로 촉진시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Bilotta J, Saszik S and Sutherland S.E. 2001. Rod Contributions to the Electroretinogram of the Dark-Adapted Developing Zebrafish. *Develop dynamics* 222, 564-570. (DOI:10.1002/dvdy.1188)
- Choi CY. 2013. Development of the high valued product of marine fish using an environmental-friendly LED light. Korea Maritime University.
- Dayco Industrial Research Institute. 2009. Status and prospects of LED and LED Lighting Market. Jinhan M&B, Korea, p. 11.
- Hatanaka MY and KK Iizuka. 1962. Studies on the fish community in the Zostera area-III. Efficiency of production of *Sebastes inermis*. *Jap Fish Soc* 28, 305-313.
- Horodysky AZ, Masick JA, Latour RJ, Brill RW and Warrant E.J. 2008. Comparative visual function in five sciaenid fishes inhabiting Chesapeake Bay. *J Exp Biol* 211, 3601-3612. (DOI:10.1242/jeb.023358)
- Jang YS. 2011. Investigation of Growth Stage Related Genes in Dark-banded Rockfish *Sebastes inermis*. *Korean J Ichthyol* 23(1), 21-29.

- Jerlov NG. 1968. Optical Oceanography. Elsevier, New York, p. 4-9.
- Kim CK and Kang YJ. 1999. Feeding Ecology of Black Rockfish, *Sebastes inermis*. J Korean Fish Soc 32(5), 637-641.
- Kim HM. 2006. Effect of Night-lights on Intermediate Culture of *Sebastes inermis* in Tongyeong. Ph.D. thesis, Yosu National University, Korea.
- Kim YU and Han KH. 1993. The early life history of the rockfish, *Sebastes inermis*. 1. Egg development and morphology of larvae by artificial treatment in aquarium. J Korean Fish Soc 26, 458-464.
- 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 Korean 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.
- Levine JS and MacNichol EF. 1979. Visual pigments in teleost fishes: effects of habitat, microhabitat, and behavior on visual system evolution. Sensory Processes 3, 95-131.
- Lythgoe, J. N. 1979. The Ecology of Vision. Clarendon press, Oxford, New York.
- Matsumoto T, Ihara H, Ishida Y, Okada T, Ishibashi Y, Kurata M and Sawada Y. 2009. Electroretinographic Analysis of Night Vision in Juvenile Pacific Bluefin Tuna (*Thunnus orientalis*). Biol 217, 142-150.
- Matsumoto T, Ihara H, Ishida Y, Yamamoto SK, Murata O and Ishibashi Y. 2010. Spectral sensitivity of juvenile chub mackerel (*scomber japonicus*) in visible and ultraviolet light. Fish Physiol Biochem 36, 63-70. (DOI:10.1007/s10695-008-9289-z)
- Matsumoto T, Okada T, Sawada Y and Ishibashi Y. 2012. Visual spectral sensitivity of photopic juvenile Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*). Fish Physiol Biochem 38, 911-917. (DOI:10.1007/s10695-011-9574-0)
- McFarland WN. 1986. Light in the sea: correlations with behaviors of fishes and invertebrates. Am Zool 26(2), 389-401.
- McFarland WN. 1991. Light in the sea: the optical world of elasmobranchs. J Exp Zool 256, 3-12.
- 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.
- Munz FW and McFarland WN. 1977. Evolutionary adaptations of fishes to the photic environment. In handbook of sensory physiology 7(5), 193-274.
- NFRDI. 2004. Commercial Fishes of the Coastal & Offshore Waters in Korea. National Fisheries Research and Development Institute, 1-333.
- NFRDI. 2007. Effects of Released Fisheries Resources in 2007. National Fisheries Research and Development Institute, 1-256.
- Oh SY and Noh CH. 2006. Effects of Water Temperature and Photoperiod on the Oxygen Consumption Rate of Juvenile Dark-banded Rockfish, *Sebastes inermis*. J Aquacul 19(3), 210-215.
- Park IS, Park HJ, Gil HW, and Goo B. 2012. Early Growth and Characteristic of Histological Eye Development in Post Parturition Dark banded Rockfish, *Sebastes inermis*. Dev Reprod 16(2), 101-106.
- Choi HJ, Hong KP, Oh SY, Noh CH, Park YJ, Myoung JG, and Kim JM, Hur JW, Zhang CI, Park IS. 2005. Growth Characteristics of Cultured Dark-Banded Rockfish, *Sebastes inermis* Cuvier. J Aquacul 18(3), 147-153.
- Powers MK, Bassi CJ, Rone LA and Raymond PA. 1988. Visual detection by the rod system in goldfish of different sizes. Vis Res 28(2), 211-221.
- Shinomiyama A and Ezaki O. 1991. Mating habits of the rockfish *Sebastes inermis*. Environ Bio Fish 30, 15-22.
-
2015. 1.29 Received
 2015. 2.23 Revised
 2015. 2.24 Accepted