



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이 학 석 사 학 위 논 문

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



2015년 2월

부경대학교 대학원

수산물리학과

허민아

이 학 석 사 학 위 논 문

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

지도교수 신 현 옥

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함.

2015년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

수 산 물 리 학 과

허 민 아

허민아의 이학석사 학위논문을 인준함.

2015년 2월 일



주 심 수산학박사 이 대 재 인

위 원 수산학박사 강 경 미 인

위 원 수산학박사 신 현 옥 인

목 차

List of Figures	iii
List of Tables	v
Abstract	vi
서 론	1
1. 연구 배경	1
1.1. 광 스펙트럼과 어류의 시각	1
1.2. 볼락 (<i>Sebastes inermis</i>)의 산업적 가치	2
1.3. 망막전위도 (electroretinogram, ERG)	3
1.4. 발광다이오드 (light emitting diode, LED)	5
2. 연구 목적	7
재료 및 방법	8
1. 실험어	8
2. 광원 (light source)	8
3. 광 강도 (light intensity) 조절	12
4. ERG 측정	14
5. 시각 역치 및 스펙트럼 민감도	17

6. 스펙트럼 민감도의 모델 근사	18
결 과	19
1. 광원의 광 강도 특성	19
2. ERG waveform	23
3. 시각 역치	29
4. 시각 스펙트럼 민감도 곡선	35
고 찰	37
요 약	39
감사의 글	40
참고문헌	41



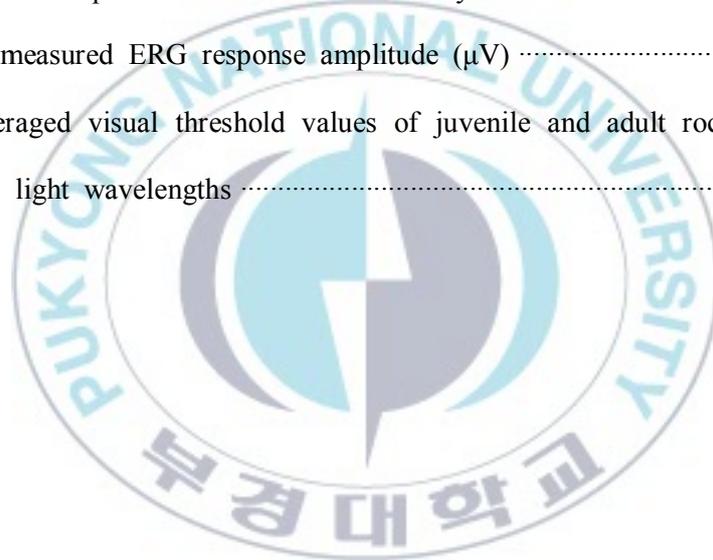
List of Figures

Fig. 1. Cells of the retina to show where the main element of the ERG originate.	4
Fig. 2. Measured relative spectral power curves of LED light sources used in experiment.	11
Fig. 3. Arrangement of LED packages attached on an epoxy board.	11
Fig. 4. Circuit diagram of a prototype automatic light intensity controller.	13
Fig. 5. Schematic diagram of ERG measurement system.	16
Fig. 6. Measurement of b-wave amplitude in ERG waveform.	17
Fig. 7. Measured spectral power curves of 610 nm LED package with different current values.	19
Fig. 8a. Relationship between the LED light intensity (irradiance) and electric current for nine LED packages (405-591 nm).	21
Fig. 8b. Relationship between the LED light intensity (irradiance) and electric current for nine LED packages (610-660 nm).	22
Fig. 9. An example of measured ERG waveform in a dark-adapted rockfish.	24
Fig. 10. 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) in response to rising light intensity with a wavelength of 574 nm.	25
Fig. 11. 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.	26
Fig. 12. Visual threshold of individual juvenile rockfish for LED light wavelengths. Body weights and total lengths are (a) 21.0 g, 10.8 cm, (b) 16.7 g, 9.8 cm, (c) 16.9 g, 10.0 cm, (d) 16.7 g, 9.5 cm and (e) 30.1 g, 11.5 cm, respectively.	30
Fig. 13. Visual threshold of individual adult rockfish for LED light wavelengths. Body weights and total lengths are (a) 59.4 g, 15.8 cm, (b) 77.8 g, 18.0 cm, (c) 96.1 g, 19.0 cm, (d) 81.0 g, 18.2 cm and (e) 124.6 g, 19.5 cm, respectively.	31
Fig. 14. Averaged visual threshold of (a) juvenile and (b) adult rockfish for nine LED light wavelengths.	32
Fig. 15. 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.	34
Fig. 16. 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).	36

List of Tables

Table 1. Comparison of traditional electric light and LED light	6
Table 2. Specifications of LEDs used as light source in the experiment	10
Table 3. Resistances used to adjust electric current	13
Table 4. Relationship between the LED intensity radiated to juvenile rockfish (n=5) and measured ERG response amplitude (μV)	28
Table 5. Relationship between the LED intensity radiated to adult rockfish (n=5) and measured ERG response amplitude (μV)	28
Table 6. Averaged visual threshold values of juvenile and adult rockfish for nine LED light wavelengths	33



Visual spectral sensitivity of scotopic rockfish (*Sebastes inermis*) in LED light source

Min Ah Heo

*Department of Fisheries Physics, Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

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 visual function and habitat, behavior and distribution of fish. Rockfish are important species in coastal ecology and also one of the main species for aquaculture. To maintain resources and understand ecology of rockfish, a spectral sensitivity of scotopic rockfish in the range of visible light (405~660 nm) was investigated using light-emitting diodes (LEDs). In order to assess electrophysiological response of fish, an electroretinogram (ERG) of the dark-adapted eyes of rockfish was recorded. The juvenile (n=5, W: 20.3±5.2 g, TL: 10.3±0.7 cm) and adult (n=5, W: 87.8±21.8 g, TL: 18.1±1.3 cm) rockfish were used in experiment. The visual threshold of juvenile and adult rockfish were each 11.66 (log quanta/cm²/s) and 11.81 (log quanta/cm²/s) in 574 nm, respectively. Peak wavelength of the spectral sensitivity in the dark-adapted juvenile and adult rockfish were 551 nm (green). Collectively, these results demonstrate that the rockfish has suitable visual capabilities for inhabiting coastal water.

서 론

1. 연구 배경

1.1. 광 스펙트럼과 어류의 시각

해수면 부근에서의 조도의 일일변화는 해역, 시간 등에 따라 광범위한 차이를 나타내며, 해수면을 통과하는 투과광은 수심이 증가할수록 산란과 흡수로 인해 파장 스펙트럼 (color)과 강도 (intensity)가 변화한다 (McFarland, 1986). 특히 원양해역의 경우, 가장 깊이 투과되는 파장대는 단파장 (청색 계열)이고 연안해역에서는 중간파장 (녹색 계열), 또한 하구와 담수해역에서는 장파장 (황·적색 계열)이다 (Jerlov, 1968). 이와 같은 해양에서의 자연광의 투과 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.

1.2 볼락 (*Sebastes inermis*)의 산업적 가치

본 연구의 실험어인 볼락 (*Sebastes inermis*)은 쏨뱅이목 (Order Scorpaeniformes) 양볼락과 (Family Scorpaenidae)에 속하는 난태성 경골 어류로, 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, 출산에서부터 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 중요 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 광민감성에 대한 연구는 보고된 바가 거의 없다.

1.3 망막전위도 (electroretinogram, ERG)

동공을 통해 인가된 빛은 각막과 후극부 사이의 양성적인 전기적 변화를 일으키는데, 이렇게 빛에 반응하여 망막에서 나타나는 활동 전위를 망막전위도라 한다. ERG 검사는 망막의 기능을 객관적으로 검증할 수 있는 유용한 방법으로 현재 널리 이용되고 있으며, 수산 분야에서는 어류의 생태 또는 행동과의 관계를 구명하기 위한 연구에 유용한 수단으로 활용되고 있다 (Horodysky et al., 2008; Matsumoto et al., 2010, 2012).

ERG는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 일반적으로 a, b, c, d-wave로 구성된다. 음성 전위도인 a-wave는 광수용체에 의해서 발생되고, 이어서 나타나는 양성 전위도인 b-wave는 ON-양극세포 (bipolar cell)와 내핵층 (inner nuclear layer)에 있는 뮐러세포 (Müller cell)에 의해 생기게 되며, c-wave는 망막 색소 상피층에 의해, 그리고 d-wave는 빛에 의한 자극이 중단 되어 OFF-양극세포에 의해 생성되어 진다 (Brown, 1967). 암순응 상태에서의 ERG waveform에서는 a, b-wave가 가장 흔히 측정되며, 일반적으로 진폭이 큰 b-wave가 망막감도의 지표로서 사용되어 진다.

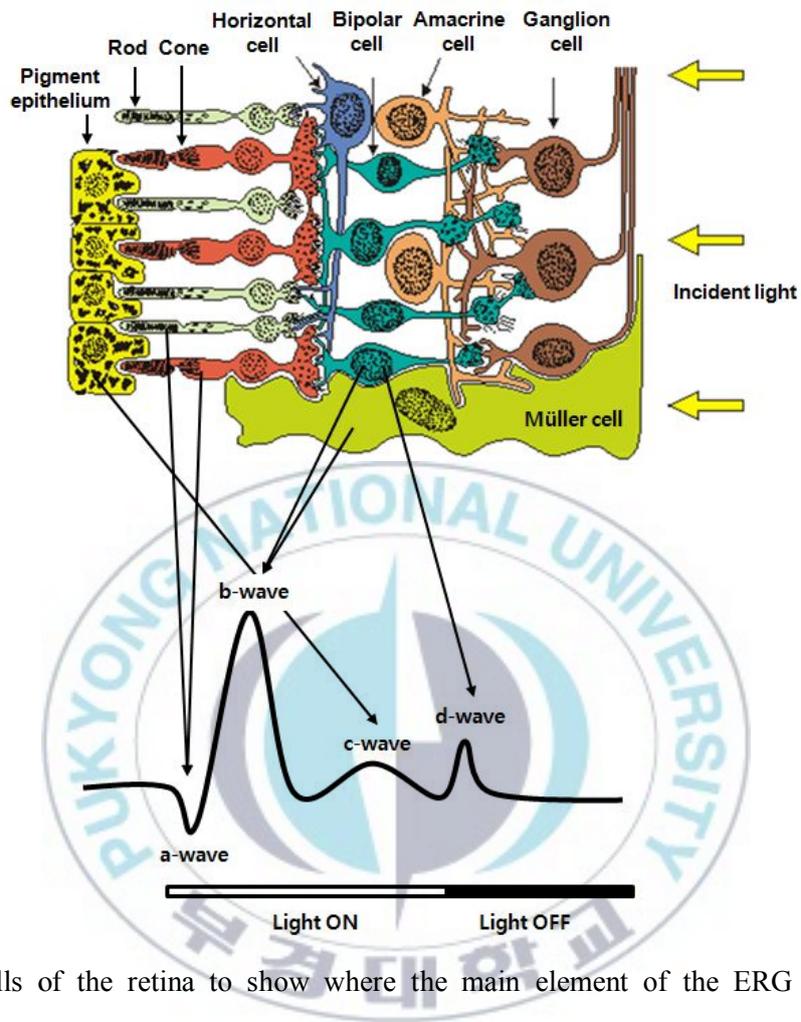


Fig. 1. Cells of the retina to show where the main element of the ERG originate.

1.4 발광다이오드 (light emitting diode, LED)

LED는 전기 에너지를 빛 에너지로 변환해 주는 광 반도체 소자로, 에너지 고갈 및 환경오염의 위기를 대응할만한 차세대 광원으로 평가 받고 있다.

LED는 수은 (Hg)을 함유하고 있는 형광등과 달리 유해 물질을 함유하고 있지 않아 친환경적이며, 5만 시간 이상의 긴 수명으로 백열등보다 수명이 10~30배 길다. 또한 전기 에너지로부터 광 전환 효율이 90%로 높아 에너지 절감 효과가 매우 크다는 장점을 지닌다. 특히 필요로 하는 파장역을 단일 또는 혼합하여 임의로 조절할 수 있으며, 응답 속도가 100 ns로 매우 뛰어나서 분 단위 또는 초 단위의 간헐적인 광 제어가 가능하다. 하지만 단가가 높아서 낮은 가격 경쟁력을 가지고 있으며, 열에 취약하다는 단점을 가지고 있다 (Table 1).

이러한 LED의 혁신적 기능은 백열등과 같은 기존 광원을 대체할 뿐만 아니라 휴대 전화, 자동차, 식물 육성, 경관 조명 등 기존 산업 전반에 폭넓게 응용되고 있으며, 신산업 창출과 함께 급격한 성장을 이룩할 것으로 전망된다. LED는 국내 어업 분야에서도 응용되고 있는데 집어등이 그 대표적인 예이다. 에너지 절감을 위한 LED 집어등 개발 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 현재 기존의 집어등보다 60% 이상 에너지를 절감하는 성과를 이루었다 (NFRDI, 2010). 또한 최근에는 양식 산업에서도 어패류의 생산성과 품질 향상을 위해 LED 광 시스템 도입에 대한 연구가 활발히 진행 중이다 (Cha et al., 2010; Choi, 2013).

Table 1. Comparison of traditional electric light and LED light

Traditional electric light		LED light	
On/Off control	multi-color, multi-level brightness control	⇒	intelligence·emotion lighting
slow response speed (fluorescent light:1~3 s)	fast response speed (~10 ns)	⇒	
miniaturization limits	miniaturization·Slip	⇒	Phone·LCD BLU
low photoconversion efficiency	high photoconversion efficiency	⇒	high efficiency CO ₂ reduction
mercury-containing (gas light source)	mercury-free (solid light source)	⇒	eco-friendly
impossible to concentrate emission band	possible to concentrate emission band	⇒	used as special lighting (electronics, health etc)
short life (3,000~7,000 hours)	long life (50,000~100,000 hours)	⇒	easy to maintain
excellent heat-resistance	vulnerable to heat	⇒	thermal design needs
cheap price	high price	⇒	supply design needs

(DACO Industrial Research Institute, 2009)

2. 연구 목적

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, 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.

불락은 우리나라의 해양목장화를 비롯한 자원 조성용 어종으로서 관심 받고 있으며, 수산자원 증대를 위한 방류사업의 중요한 대상 품종 중 하나이다. 그러나 최근 실시되고 있는 방류사업은 방류량의 증대에만 노력하고 있으며, 방류되는 치어의 기아내성 및 도피성 등을 고려한 생태 적응력과 같은 검토는 부족한 실정이다. 해양 목장 내에서의 효율적인 자원관리를 위해서는 목표 어종의 행동과 섭식 환경 등의 기초정보는 필수적이다. 이를 위해, 어류의 시각 기능은 그들이 서식하는 환경과 밀접한 관련이 있으며, 어류의 생태 또는 행동과의 관계를 구명하기에 유용한 지표로 이용될 수 있다.

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

재료 및 방법

1. 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. 사육수조는 순환여과식 수조 (L1050×W600×H600 mm)를 사용하였고, 수온은 히터와 냉각기를 이용하여 $18 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지시켰다. 볼락 성어는 자연 상태의 치어를 잡아 욱지도 연안의 해상 가두리에서 사육한 것을 사용하였다. 볼락 치어는 전장 10.3 ± 0.7 cm, 체중은 20.3 ± 5.2 g이었고, 볼락 성어는 전장 18.1 ± 1.3 cm, 체중은 87.8 ± 21.8 g이었다.

2. 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 (Table 2, Fig. 2). 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 (Fig. 3). 각 LED 광원들은 수동으로 조절하였으며, 에폭시 기판은

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



Table 2. Specifications of LEDs used as light source in the experiment

No	Peak Wavelength (nm)	Device (LUXPIA, Korea)	Forward voltage (V)	Forward current (mA)	Luminous intensity (mcd)
1	405	LVH1056	3.3	60	800
2	465	LBH1056	3.3	60	1000
3	505	LCH1056	3.2	60	1500
4	520	LGH1056	3.2	60	3500
5	574	LYG1056	2.0	60	500
6	591	LYH1056	2.0	60	500
7	610	LAU1056	2.0	60	500
8	640	LRH1056	2.1	60	1500
9	660	LRU1056	2.0	60	500



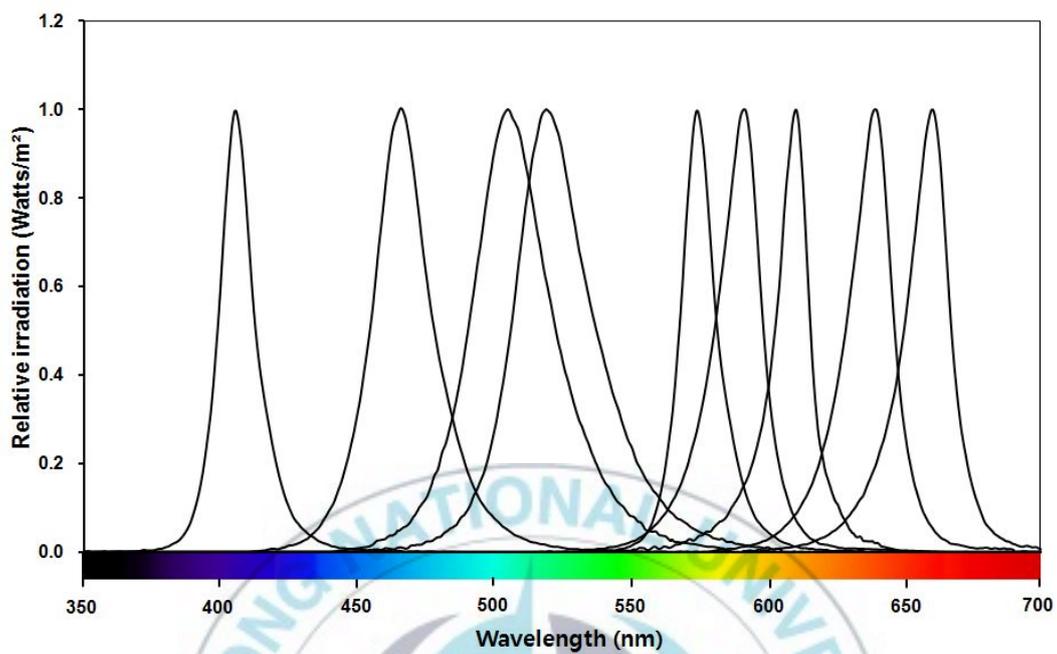


Fig. 2. Measured relative spectral power curves of LED light sources used in experiment.

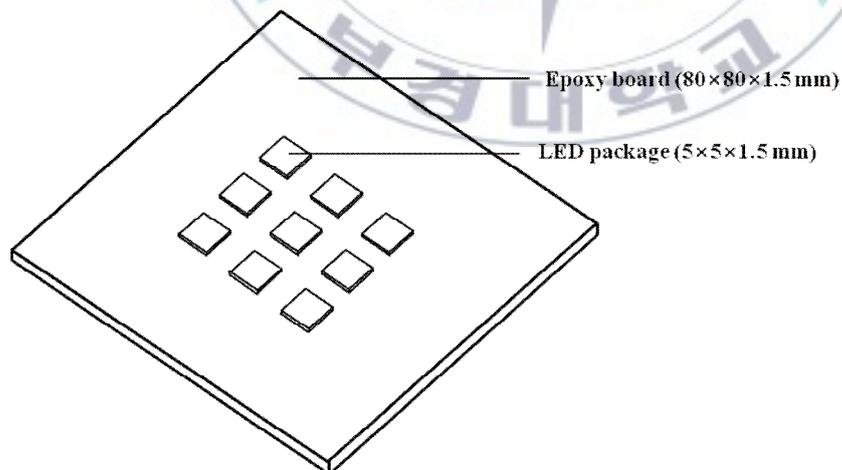


Fig. 3. Arrangement of LED packages attached on an epoxy board.

3. 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.

자극 광의 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 3에 나타내었다. R1~R8 순으로 저항을 연결하여 광원에 흐르는 전류를 단계적으로 증가시켰고, 광 강도를 점차 높이는 방법으로 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. 4). 광 자극은 5 sec 간격으로 100 ms 동안 주었으며 8단계의 광 강도에 대하여 최소 5번 이상 ERG를 측정하였다. 자극 광의 강도 ($\text{quanta/cm}^2/\text{s}$)는 radiometer (QSL-2101, Biospherical Instruments Inc., USA)를 사용하여 실험어의 안구와 거의 동일한 위치에서 측정하였다.

4. ERG 측정

ERG를 기록하는 동안 불락이 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 불락의 등과 꼬리 부근으로 주사하였으며, gallamine triethiodide의 적정량을 2~3회에 걸쳐 나눠서 주사하였다. 마비에 소요된 시간은 개체마다 차이가 있었으나 약 10-15분 정도 소요되었다. 불락이 근육의 마비로 인해 옆으로 기울어 유평하지 못하는 상태가 되었을 때 정육면체 금속 프레임 (L600×W600×H600 mm) 안에 두었다. 불락을 해수로부터 꺼낸 상태에서 ERG를 기록하였고, 해수 (18-20 °C)를 불락의 아가미에 인위적으로 공급하여 실험 동안에도 호흡을 가능하게 하였다. ERG 기록 전 불락을 암실에 한 시간 넘게 두어 충분히 암순응 (dark adaption)을 시켰으며, 금속 프레임에 암막커튼을 덮어 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, $\varnothing 0.2 \times L11$ mm)을 사용하여 기록하였다. 2개의 전극 중 기록 전극으로 사용한 것은 불락의 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. ERG 신호는 수 μV 수준으로 미약하므로, bioelectric amplifier (P400, PhysioLab, Korea)로 약 25,000배 증폭하여 데이터로거 (DA20, RION, Japan)와 PC로 동시에 전송하였다 (Fig. 5). 측정된 ERG 데이터는 Labchart8 reader software (ADInstruments, New Zealand)를 사용하여 필터링 한 후 분석하였다 (low cutoff, 0.1 Hz; high cutoff, 40 Hz).



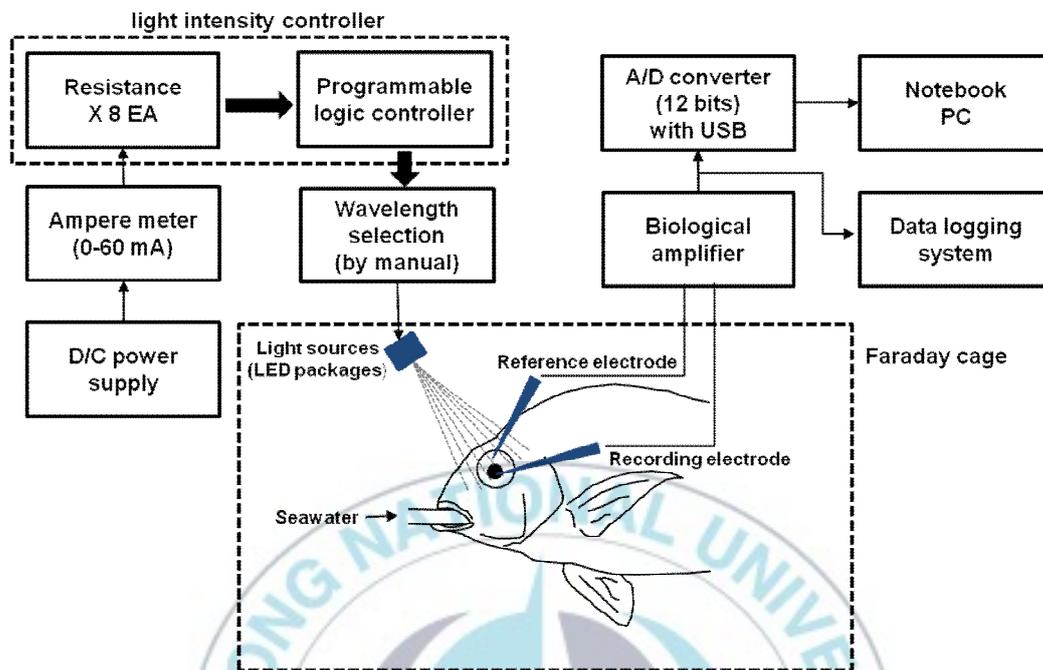


Fig. 5. Schematic diagram of ERG measurement system.

5. 시각 역치 및 스펙트럼 민감도

생물의 감각 기관이 감지할 수 있는 최소한의 자극의 세기를 역치 (threshold)라고 한다. 본 실험에서는 ERG의 b-wave가 최소 진폭을 생성하는데 필요한 자극 광의 강도를 시각 역치로 하였다. b-wave의 진폭 (μV)은 a-wave의 최저점과 b-wave의 최고점의 차이로 정의된다 (Fig 6). 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.

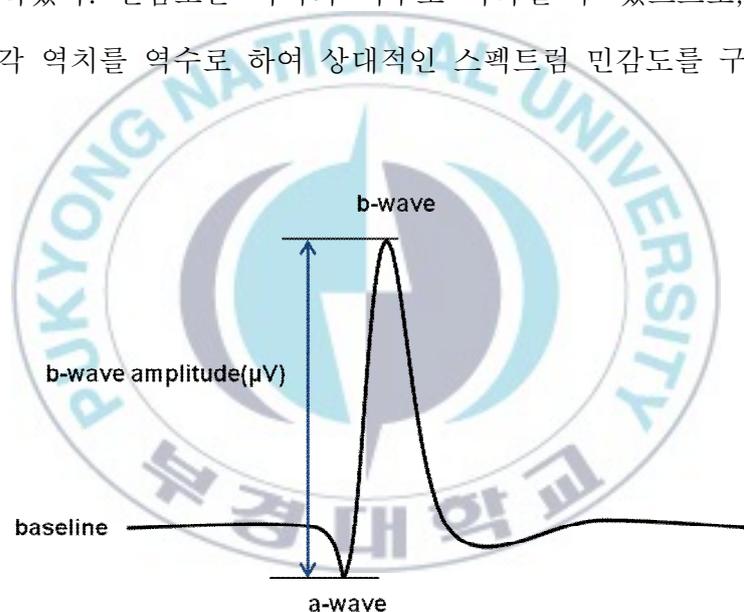


Fig. 6. Measurement of b-wave amplitude in ERG waveform.

6. 스펙트럼 민감도의 모델 근사

측정 데이터로부터 불락의 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.

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

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.

결 과

1. 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 결과, 전류가 증가함에 따라 광 강도 (W/m^2)가 증가하였으며, 곡선의 피크 파장은 전류가 증가하여도 거의 변화하지 않고 일정하게 유지되었다 (Fig. 7). 광원으로 사용한 9개의 LED 패키지 모두 유사한 변화를 나타내었으며, ERG를 측정하기에 적합한 단일 광으로 판단되었다.

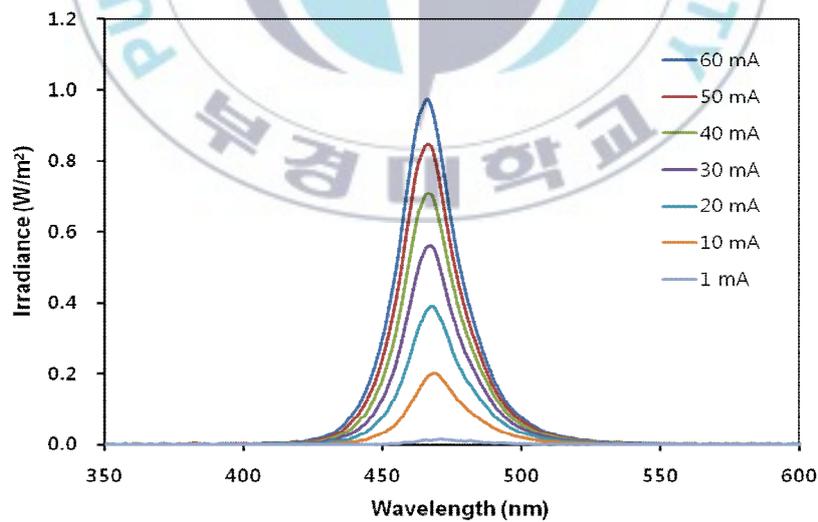
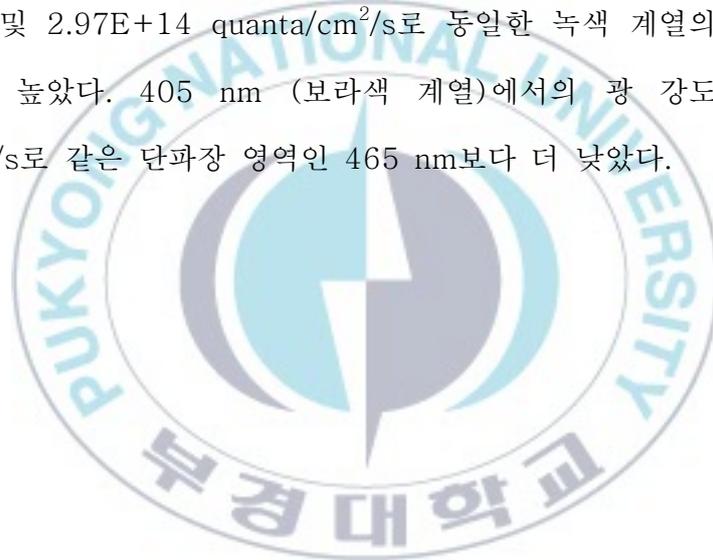


Fig. 7. Measured spectral power curves of 465 nm LED package with different current values.

9개 파장의 광 강도 (quanta/cm²/s)와 전류와의 관계는 Fig. 8과 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 1.56E+13 quanta/cm²/s로 가장 낮았으며, 465 nm (청색 계열)에서 6.15E+14 quanta/cm²/s로 가장 높았다. 광 강도는 574 nm에서 장파장 (591, 610 620 640 nm)으로 갈수록 높아졌으며, 505 및 520 nm의 광 강도는 각각 1.91E+14 및 2.97E+14 quanta/cm²/s로 동일한 녹색 계열의 광원인 574 nm보다 더 높았다. 405 nm (보라색 계열)에서의 광 강도는 2.56E+14 quanta/cm²/s로 같은 단파장 영역인 465 nm보다 더 낮았다.



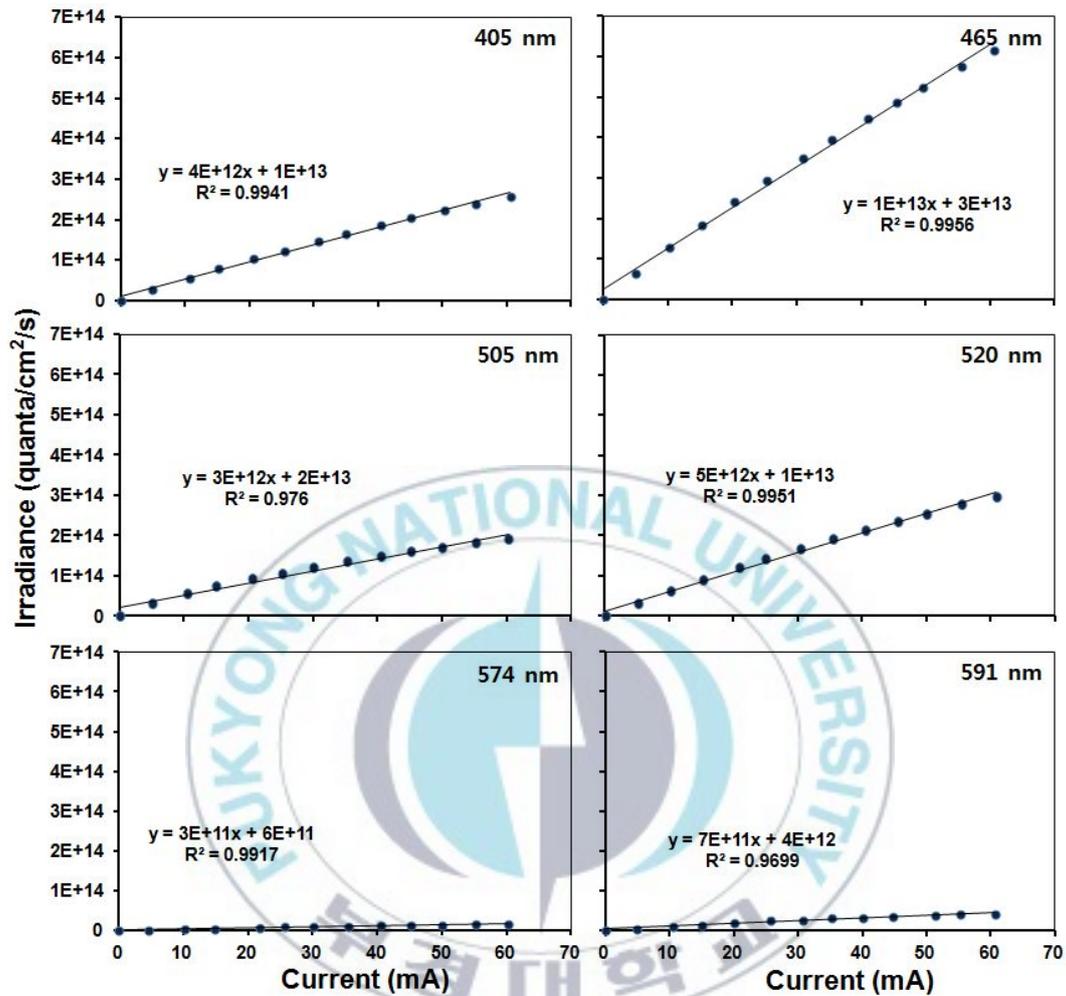


Fig. 8a. Relationship between the LED light intensity (irradiance) and electric current for nine LED packages (405-591 nm).

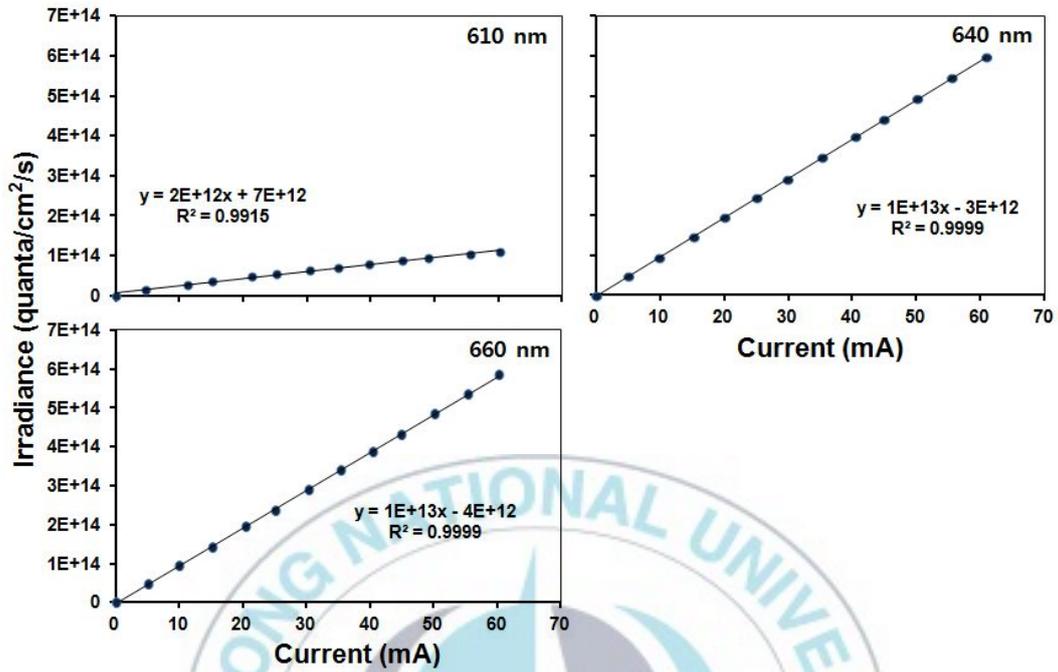


Fig. 8b. Relationship between the LED light intensity (irradiance) and electric current for nine LED packages (610-660 nm).

2. ERG waveform

본 실험에서 측정한 암소시 볼락의 ERG waveform은 Fig. 9와 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.

LED 자극 광의 강도에 따른 b-wave의 진폭 변화를 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 10, 11과 같다. Fig. 10은 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 진폭도 증가하였다. 볼락 치어 5마리에서 측정한 610 nm 자극 광의 강도에 따른 b-wave 진폭 변화는 Fig. 11에 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 μV 로 증가하였다. 이러한 변화는 볼락 성어에서도 유사하게 나타났다.

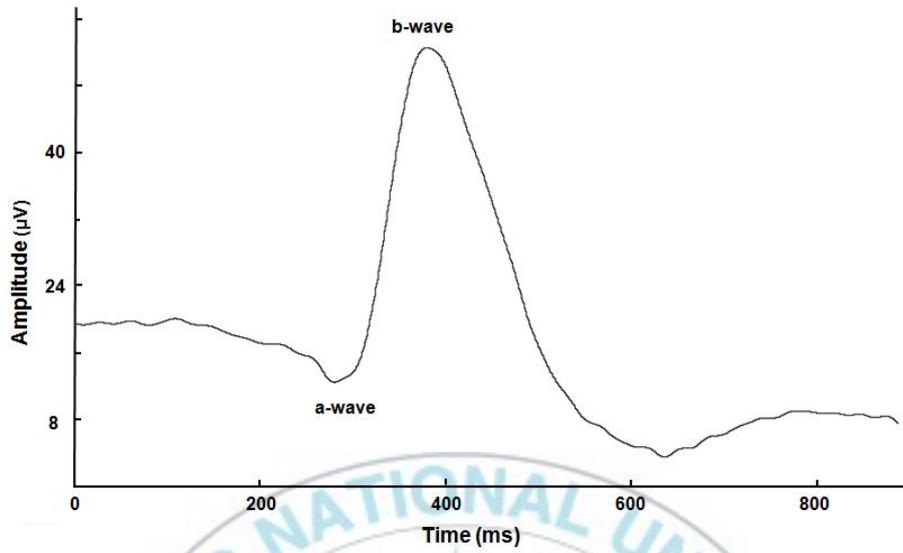
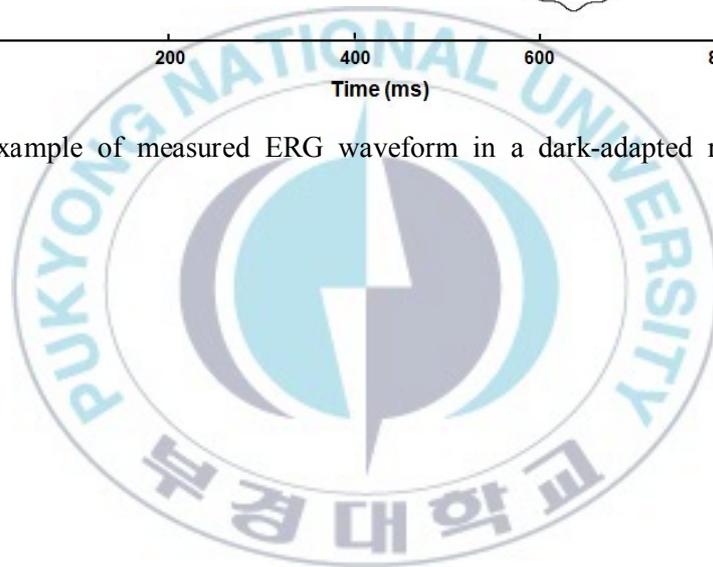


Fig. 9. An example of measured ERG waveform in a dark-adapted rockfish.



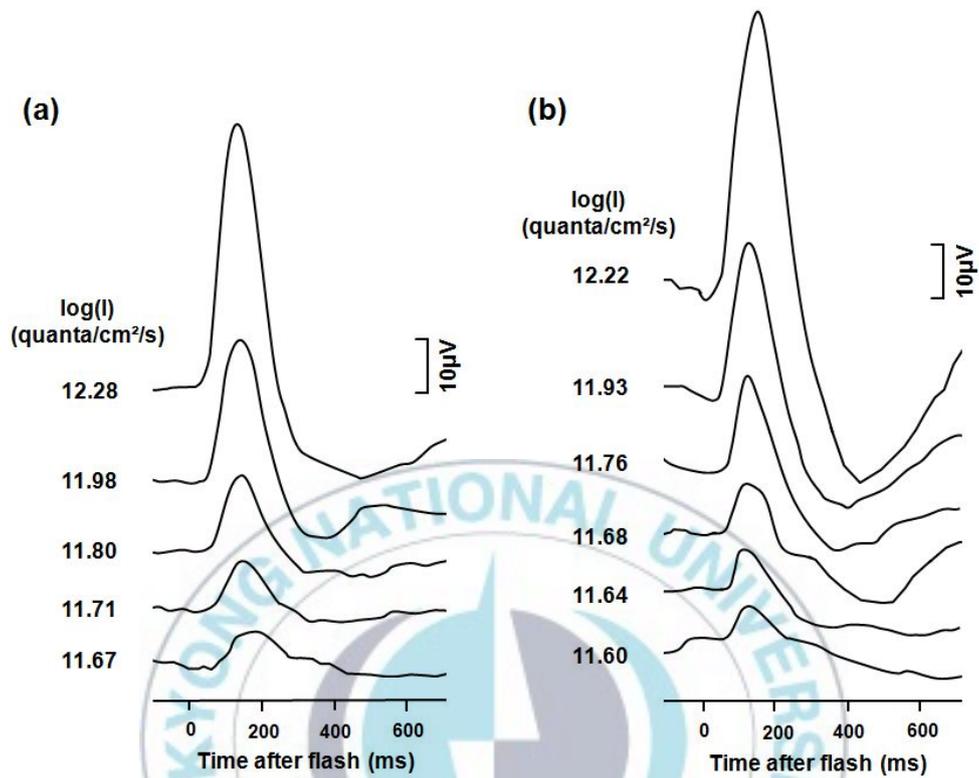


Fig. 10. Measured ERG waveforms from dark-adapted (a) juvenile ($n=1$, W: 16.72 g, TL: 9.8 cm) and (b) adult ($n=1$, W: 59.4 g, TL: 15.8 cm) rockfish in response to rising light intensity with a wavelength of 574 nm.

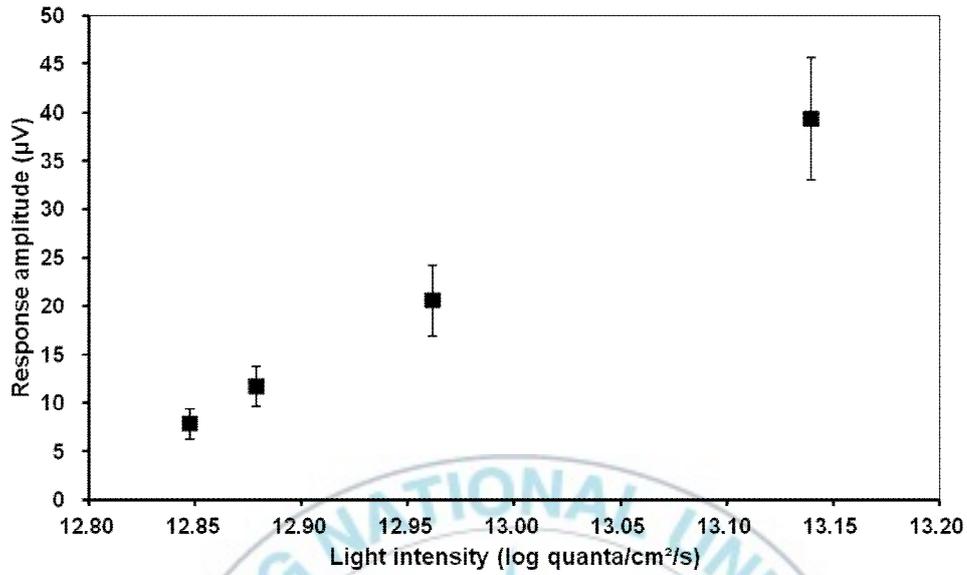


Fig. 11. Relationship between response amplitude and log intensity of dark-adapted juvenile rockfish (n=5, W: 10.3±0.7 g, TL: 20.3±5.2 cm) in 610 nm light stimuli. Error bars represents the mean ± standard deviation (S.D).

Table 4는 실험에 사용한 5마리의 볼락 치어에 인가한 파장별 광 강도의 최소, 최대치와 이때 발생하는 ERG 반응 진폭의 최소, 최대치를 나타낸다. 단 파장인 405 및 465 nm의 경우에는 12.95~13.69 및 13.02~13.32 (log quanta/cm²/s)를 인가하였을 때, ERG 진폭은 각각 4.63~105.37 및 5.28~67.02 μ V이었다. 중간 파장인 505, 520, 574 및 591 nm의 경우에는 13.01~13.11, 12.72~12.99, 11.59~12.36 및 12.35~12.75 (log quanta/cm²/s)를 인가하였을 때, ERG 진폭은 각각 4.35~75.71, 4.71~70.05, 3.20~69.02 및 1.56~64.36 μ V이었다. 장파장인 610, 640 및 660 nm의 경우에는 12.81~13.14, 12.64~13.78 및 12.98~13.89 (log quanta/cm²/s)를 인가하였을 때, ERG 진폭은 각각 0.83~58.42, 2.29~55.57 및 2.03~30.08 μ V이었다.

Table 5는 실험에 사용한 5마리의 볼락 성어에 인가한 파장별 광 강도의 최소, 최대치와 이때 발생하는 ERG 반응 진폭의 최소, 최대치를 나타낸다. 단 파장인 405 및 465 nm의 경우에는 12.95~13.53 및 13.03~13.34 (log quanta/cm²/s)를 인가하였을 때, ERG 진폭은 각각 2.61~71.11 및 5.24~17.87 μ V이었다. 중간 파장인 505, 520, 574 및 591 nm의 경우에는 13.01~13.13, 12.72~13.07, 11.60~12.57 및 12.33~12.94 (log quanta/cm²/s)를 인가하였을 때, ERG 진폭은 각각 1.89~17.86, 3.08~16.38, 2.93~9.36 및 1.45~14.40 μ V이었다. 장파장인 610, 640 및 660 nm의 경우에는 12.81~13.40, 12.64~14.02 및 13.11~14.06 (log quanta/cm²/s)를 인가하였을 때, ERG 진폭은 각각 1.83~26.12, 8.67~41.48 및 5.98~20.52 μ V이었다.

Table 4. Relationship between the LED intensity radiated to juvenile rockfish (n=5) and measured ERG response amplitude (μV)

Wavelength (nm)	Light intensity (log quanta/cm ² /s)		ERG amplitude (μV)	
	Min	Max	Min	Max
405	12.95	13.69	4.63	105.37
465	13.02	13.32	5.28	67.02
505	13.01	13.11	4.35	75.71
520	12.72	12.99	4.71	70.05
574	11.59	12.36	3.20	69.02
591	12.35	12.75	1.56	64.36
610	12.81	13.14	0.83	58.42
640	12.64	13.78	2.29	55.57
660	12.98	13.89	2.03	30.08

Table 5. Relationship between the LED intensity radiated to adult rockfish (n=5) and measured ERG response amplitude (μV)

Wavelength (nm)	Light intensity (log quanta/cm ² /s)		ERG amplitude (μV)	
	Min	Max	Min	Max
405	12.95	13.53	2.61	71.11
465	13.03	13.34	5.24	17.87
505	13.01	13.13	1.89	17.86
520	12.72	13.07	3.08	16.38
574	11.60	12.57	2.93	9.36
591	12.33	12.94	1.45	14.40
610	12.81	13.40	1.83	26.12
640	12.64	14.02	8.67	41.48
660	13.11	14.06	5.98	20.52

3. 시각 역치

시각 역치를 결정하는 b-wave의 최소 진폭은 자극 광의 파장과 볼락 개체에 따라 차이를 보였으며, 그 크기는 0.6~19.4 μV 이었다. 실험에 사용한 볼락 치어의 5마리 중 2마리는 실험 도중 신호가 불안정하게 변하여 660 nm 파장에서의 ERG를 측정하지 못하였다 (Fig. 12(a), 12(c)). ERG 진폭 데이터를 분석한 결과, LED 파장에 따른 볼락 치어와 성어의 개체별 시각 역치는 Fig. 12, 13과 같다. 시각 역치는 볼락 10마리 모두 574 nm (녹색 계열)에서 가장 낮았으며, 그 범위는 11.59~11.99 ($\log \text{ quanta/cm}^2/\text{s}$)이었다. 볼락 치어 (n=5)와 성어 (n=5)를 각각 평균하여 나타낸 파장별 시각 역치는 Fig. 14와 같다. LED 파장에 따른 시각 역치의 분포는 서로 거의 동일하였고 시각 역치는 574 nm 다음으로 591 nm (주황 계열)에서 두 번째로 낮았다 (Table 6, Fig. 14). 청색 계열 (405, 465, 505 nm)과 적색 계열 (610, 640, 660 nm)로 갈수록 시각 역치는 높아졌으며, 각 파장에 해당하는 시각 역치의 표준 편차는 모두 0.21 미만이었다. 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).

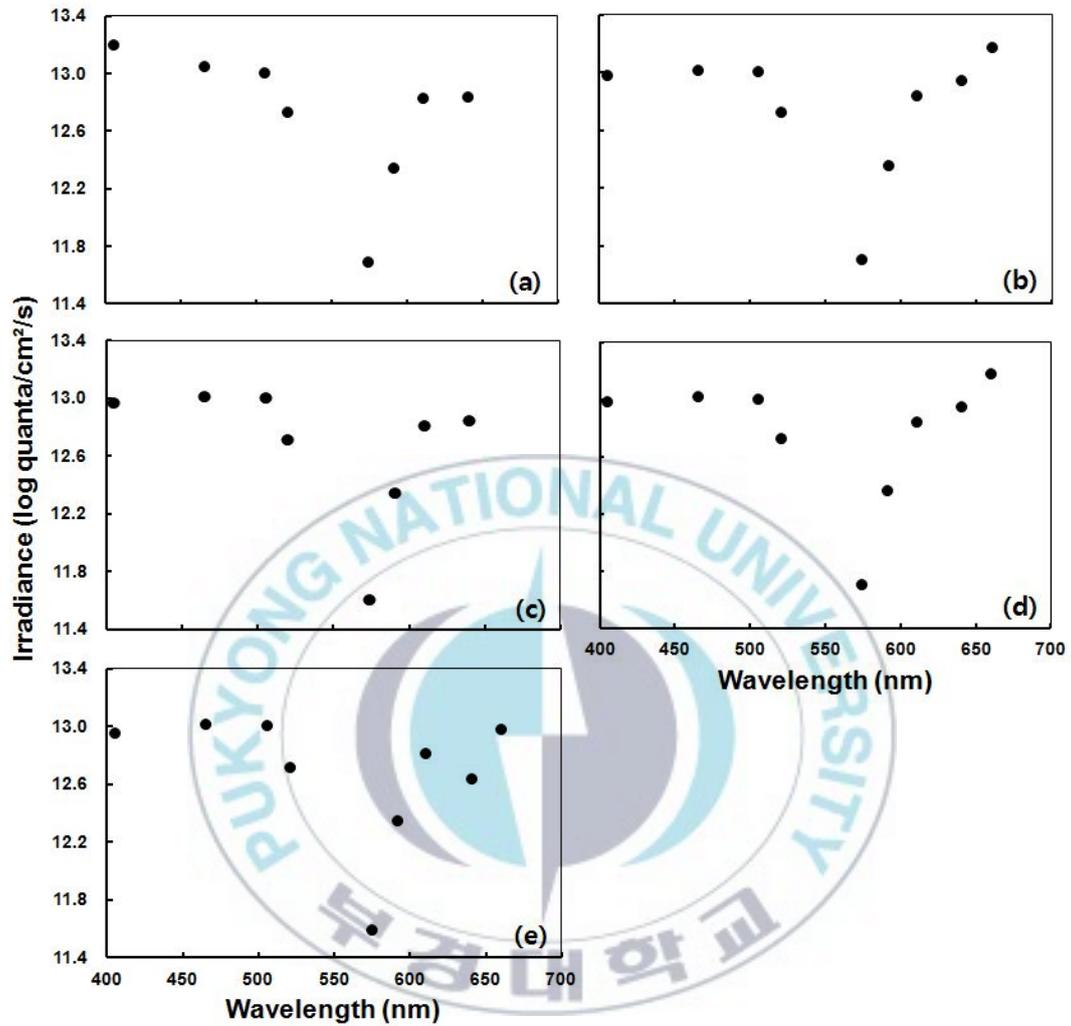


Fig. 12. Visual threshold of individual juvenile rockfish for LED light wavelengths. Body weights and total lengths are (a) 21.0 g, 10.8 cm, (b) 16.7 g, 9.8 cm, (c) 16.9 g, 10.0 cm, (d) 16.7 g, 9.5 cm and (e) 30.1 g, 11.5 cm, respectively.

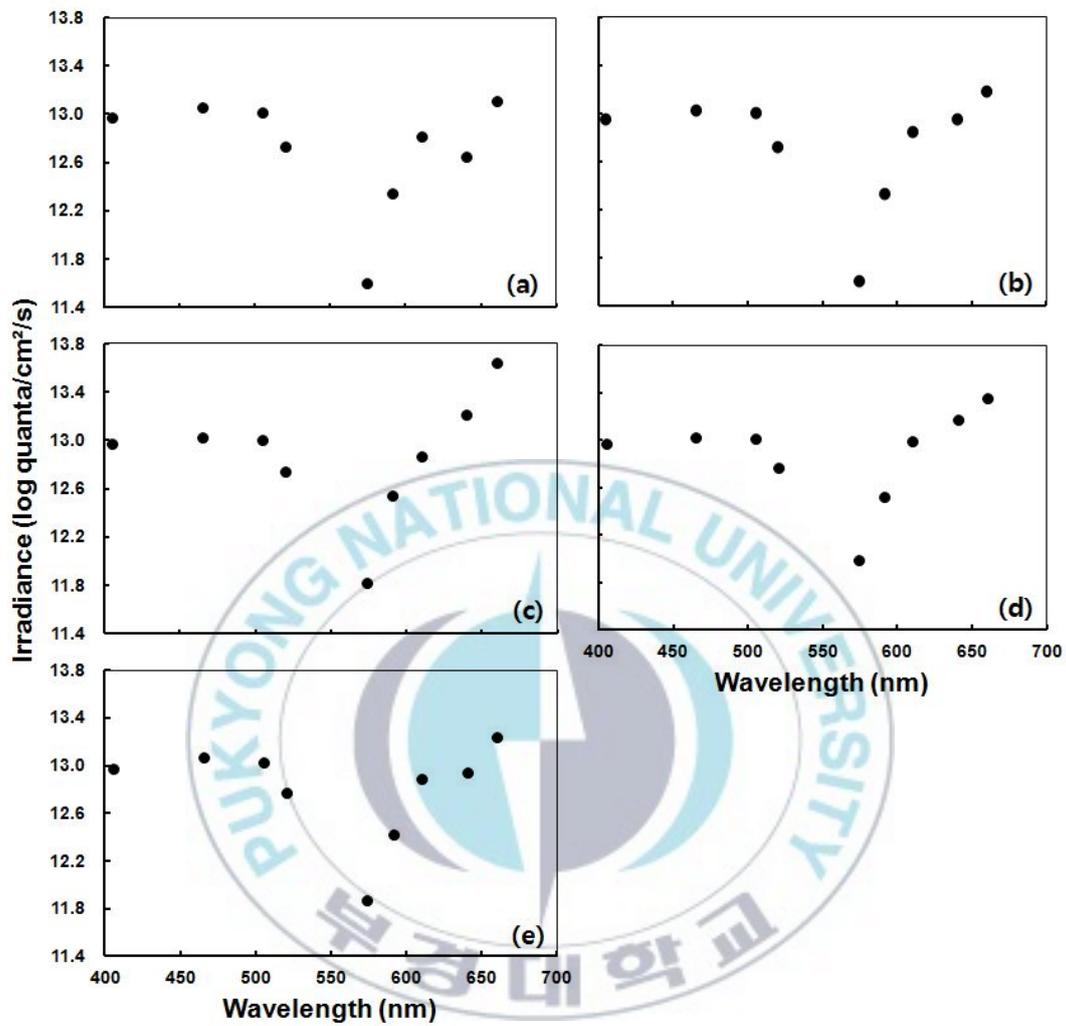


Fig. 13. Visual threshold of individual adult rockfish for LED light wavelengths. Body weights and total lengths are (a) 59.4 g, 15.8 cm, (b) 77.8 g, 18.0 cm, (c) 96.1 g, 19.0 cm, (d) 81.0 g, 18.2 cm and (e) 124.6 g, 19.5 cm, respectively.

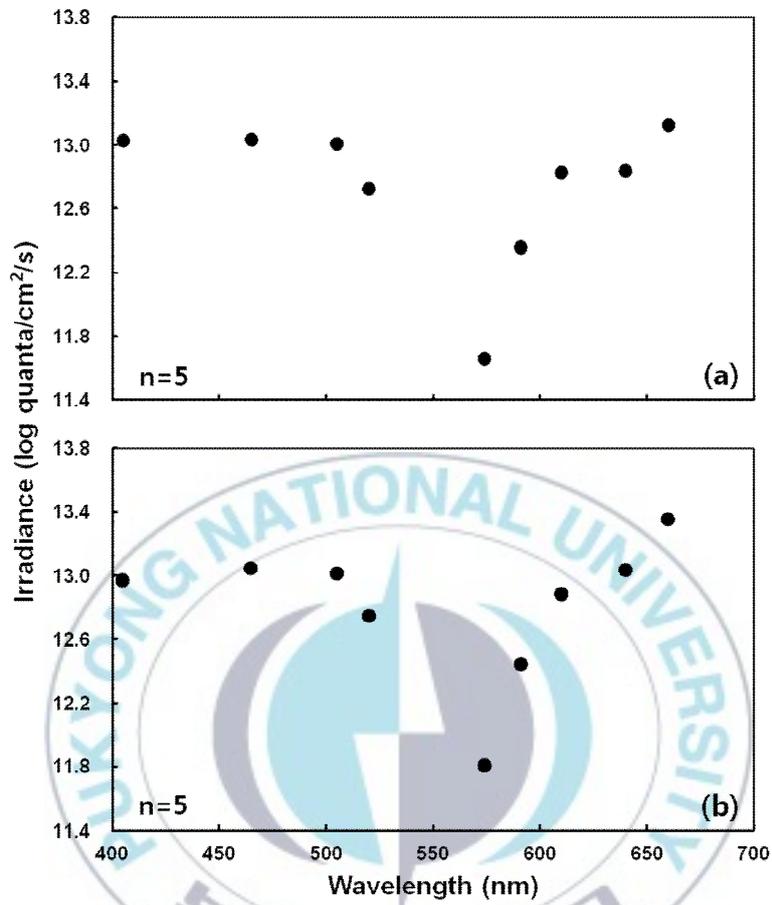


Fig. 14. Averaged visual threshold of (a) juvenile and (b) adult rockfish for nine LED light wavelengths.

Table 6. 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



체장에 따른 시각 역치를 비교한 결과는 Fig. 15와 같다. 9개의 LED과장 중에서 역치가 가장 낮았던 2개의 과장 (574, 591 nm)에 대하여 조사한 결과, 체장이 증가함에 따라 시각 역치도 높아지는 경향이 나타났다. 그러나 통계적으로는 유의한 차이는 없었다 (Spearman's rho correlation, $n=10$, $p=0.31$).

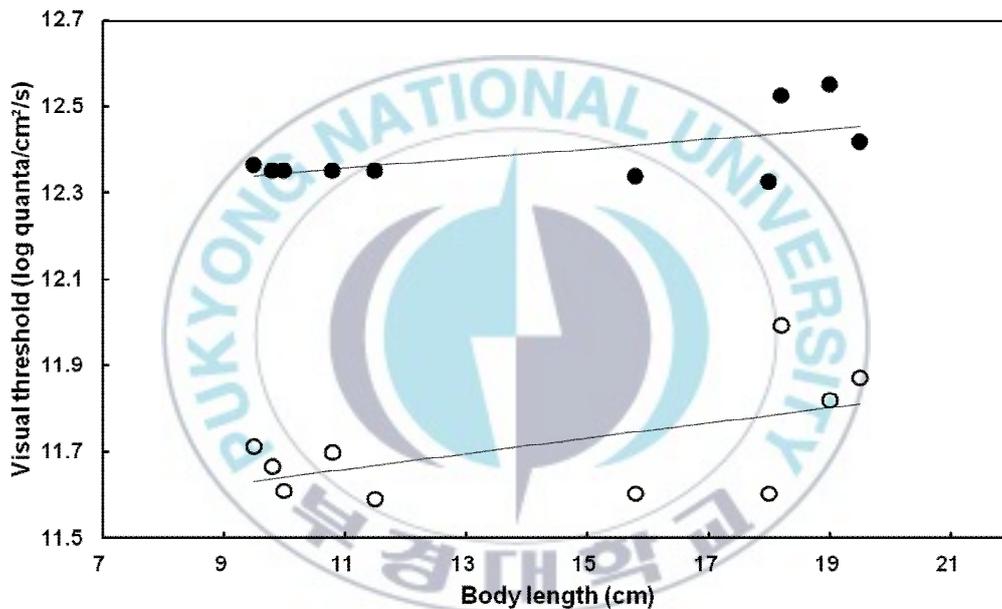


Fig. 15. Relationship between the visual threshold and body length of rockfish ($n=10$). Open and solid points represent the threshold in 574 nm and 591 nm, respectively.

4. 시각 스펙트럼 민감도 곡선

민감도 근사에 의해 추정된 불락 치어와 성어의 암소시 시각 스펙트럼 민감도는 Fig. 16과 같다. 민감도 곡선의 피크 파장(λ_{\max})은 551 nm로 동일하였으며 측정 데이터와 근사 값과의 결정 계수 (R^2)는 두 그룹 모두 0.98 이상이었다. 불락 치어와 성어의 스펙트럼 민감도 곡선의 식은 각각 식 (2) 및 (3)과 같다.

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

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

따라서 불락은 어두운 환경에서 녹색 계열에 가장 민감하며 청색 계열 (단파장)보다는 황적색광 계열 (장파장)에 더 민감한 것으로 나타났다.

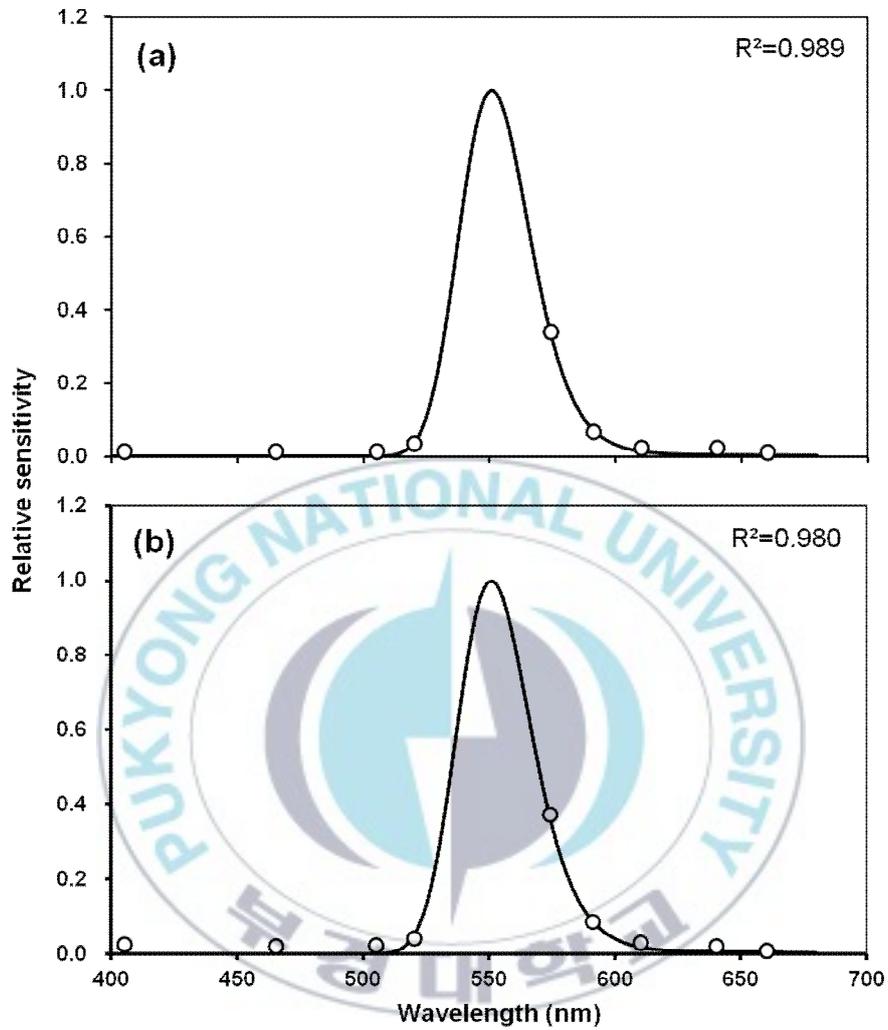


Fig. 16. Relative spectral sensitivity of (a) juvenile and (b) adult rockfish. Circles indicate measured sensitivity based on the threshold light intensity. Solid lines indicate the curve fitted to the template of Stavenga et al. (1993).

고 찰

암소시 볼락의 스펙트럼 민감도 곡선의 피크 파장은 551 nm 에서 나타났 다. 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. 참다랑어와 고등어와 같은 깊고 맑은 원양해역에 서식하는 어류는 일반적으로 청색광 계열 (479, 482 nm)에 민감하고, 볼락과 같은 연안해역에 주로 서식 하는 어류는 녹색광 계열 (551 nm)에 민감하다고 알려져 있다 (Munz and McFarland, 1977). 또한 연안해역에서의 어류의 시각 색소가 청녹색 배경광 에서는 500-550 nm, 녹색 배경광에서는 520-570 nm의 스펙트럼 파장범 위 내에 있을 때 가장 양호한 시정특성을 갖는다고 보고된 바 있다 (Lythgoe, 1979). 따라서 본 연구의 조사대상 어종인 볼락은 연안해역에 가 장 적합한 시각 능력을 지니고 있는 것으로 판단된다.

암소시 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 가까 이 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 불락의 경우에는 성숙에 크게 영향 받지 않는 것으로 나타났다.

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

그러나 불락은 음성 주광성이므로 지나치게 밝은 불빛에는 잘 접근하지 않기 때문에 희미한 불빛이 효과적이다. 이를 위해 불락의 시각 역치인 11.66 ($\log \text{ quanta/cm}^2/\text{s}$)을 고려하여 적절한 수중 조도를 유지시킨다면, 비교적 약한 광으로도 효율적인 효과를 가져 올 수 있으므로 생산비 절감 및 생산성 향상 등과 같은 효과를 가져 올 수 있을 것으로 판단된다.

요 약

어류의 광 민감성에 대한 연구는 시각과 서식 환경과의 상관관계, 어류의 분포와 행동, 포식자-피식자 간의 상호작용 등을 설명하기에 유용한 지표로 이용되고 있다. 볼락 (*Sebastes inermis*)은 최근 우리나라의 해양목장화를 비롯한 자원 조성용 어종으로서 관심 받고 있으며, 양식 대상 종으로서도 높은 산업적 가치를 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 LED 광원 (405-660 nm)에 대한 암소시 볼락의 망막전위도 (ERG)를 측정하여 시각 스펙트럼 민감도를 추정하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 볼락 치어 (n=5)와 볼락 성어 (n=5)를 각각 평균하여 나타낸 파장별 시각 역치의 분포는 서로 거의 동일하였으며, 시각 역치는 574 nm (녹색 계열)에서 가장 낮았다.
2. 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).
3. 볼락의 체장이 증가함에 따라 시각 역치도 높아지는 경향이 나타났으나, 통계적으로 유의한 차이는 없었다 (Spearman's rho correlation, n=10, p=0.31).
4. 암소시 볼락 치어와 성어의 시각 스펙트럼 민감도 곡선의 피크 파장(λ_{max})은 551 nm (녹색 계열)로 동일하였다.

감사의 글

설렘과 두려움을 안고 시작했던 석사과정이 끝나가고 어느새 졸업만을 앞두고 있습니다. 지난 2년을 되돌아보면서 이 논문이 나오기까지 많은 응원과 도움을 주셨던 분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

가장 먼저, 부족한 저를 지도해 주신 신현옥 교수님께 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 새로운 실험을 열과 성의를 다해 지도해 주셨고, 제자에 대한 교수님의 깊은 애정을 느낄 수 있었고, 연구자로서의 태도와 마음가짐을 배울 수 있었습니다. 신현옥 교수님이 아니었다면, 대학원의 길을 생각하지도 못했고 앞으로 연구자의 길을 가겠다는 선택 또한 못했을 것입니다. 정말 마음 깊이 존경과 감사의 마음을 전합니다.

그리고 저의 부족한 논문을 세심하게 심사해 주신 이대제 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 주옥같은 조언과 가르침이 있었기에 논문이 무사히 완성될 수 있었습니다. 특히 논문을 쓰면서 조언이 필요하여 찾아갈 때마다 흔쾌히 열정적으로 조언을 해주시고 저의 논문을 심사해 주셨던 강경미 교수님께 정말 감사드립니다.

석사과정을 같이 시작하여 2년동안 가족보다도 더 많은 시간을 함께 보내 온 겸선배에게 감사의 말을 전합니다. 선배가 있었기에 서로 격려하면서 힘들었던 석사과정을 무사히 즐겁게 마칠 수 있었습니다.

마지막으로, 뒤에서 묵묵히 저를 항상 응원하며 걱정해준 사랑하는 저의 가족에게 감사드립니다.

참고 문헌

- Bilotta J, Saszik S and Sutherland S.E. 2001. Rod Contributions to the Electroretinogram of the Dark-Adapted Developing Zebrafish. *Development dynamics*, 222, 564-570.
- Brown KT. 1967. The electroretinogram: Its components and their origins. *Vision research*, 8, 633-677.
- Cha SW, Kim SJ, Jang UY, Kil GS and Choi CY. 2010. LED Lighting System for Aquaculture. *International Conference on Marine Engineering*, 2010 (4), 417-418.
- 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*. *Japan of journal of fisheries and aquatic sciences*, 28, 305-313.
- Horodysky AZ, Musick JA, Latour RJ, Brill RW and Warrant EJ. 2008. Comparative visual function in five sciaenid fishes inhabiting Chesapeake Bay. *The Journal of Experimental Biology*, 211, 3601-3612.
- Jang YS. 2011. Investigation of Growth Stage Related Genes in Dark-banded Rockfish *Sebastes inermis*. *Korean Journal of Ichthyology*, 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*. Korean journal of fisheries and aquatic sciences, 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. Korean journal of fisheries and aquatic sciences, 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. Korean journal of fisheries and aquatic sciences, 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*). Biology, 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 Physiology Biochemistry*, 36, 63-70.
- Matsumoto T, Okada T, Sawada Y and Ishibashi Y. 2012. Visual spectral sensitivity of photopic juvenile Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*). *Fish Physiology Biochemistry*, 38, 911-917.
- McFarland WN. 1986. Light in the sea: correlations with behaviors of fishes and invertebrates. *American Society of Zoology*, 26(2), 389-401.
- McFarland WN. 1991. Light in the sea: the optical world of elasmobranchs. *Journal of Experimental Zoology*, 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*. Korean journal of Aquaculture, 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*. Development Reproduction, 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. Korean journal of Aquaculture. 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. Vision Research, 28(2), 211-221.
- Shinomiya A and Ezaki O. 1991. Mating habits of the rockfish *Sebastes inermis*, Environmental biology fisheries, 30, 15-22.