스트로보광의 위협효과에 관한 행동생리학적 연구-Ⅳ 스트로보광의 섬광빈도 및 강도에 의한 전갱이의 망막활동전위

安 永 一

강원도립대학

Physiological and Behavioral Studies on the Stimulating Effect of Strobe Light-Ⅳ Electroretinogram of Jack Mackerel by Strobe Light Frequency and Intensity

Young-Il AN

Gangwon Provincial University

Abstract

In order to assess electrophysiological responses of fish, a recording of Electroretinogram (ERG) was made on the dark-adapted eyes of anesthetized jack mackerel Trachurus japonicus in the strobe-flash frequency range of 1.7~25 Hz and in the intensity range of 56~415 lx.s. The amplitude change of the ERG is highest at the moment when the strobe light is irradiated and becomes weakest soon after, then gradually increases and becomes stable. The amplitude of the ERG by strobe flash frequencies looked stable tendency after about 12~17 minutes elapsed. During the test duration of 30 minutes, the maximum of amplitude change and stimulation amount over all the tested frequencies was found at 10 Hz. The reduction of the flash intensity caused the decrease in the amplitude and stimulation amount.

Key words : electroretinogram(망막활동전위), strobe light(스트로보광), jack mackerel(전갱이), visual physiology(시각생리학)

서 론

수중에서 어류의 망막에 나타나는 像은 일반적으로 뚜렷하지 않지만, 어류의 행동은 감각정보의 근원인 시각에 크게 의존하고 있다(Guthrie and Muntz, 1986). 시각은 물체의 형상과 관련된 형태시각과 물체의 움직임과 관련된 운동시각으로 분류되며, 먹이를 잡거나 외적을 피하는 경우 등의 다양한 행동에서 큰 역할을 한다(井上, 1978).

망막활동전위(electroretinogram : ERG)는 어류의 운동시각 기능을 측정하는 하나의 지표로서 광자극에 의한 눈의 망막 활동전위를 기록한 것으로, 어류의 생태 또는 행동과의 관계를 연구할 경우에 유용한 수단으로 활용되어 왔다(Tamura *et al.*, 1957 ; Kobayashi, 1962 ; 田村, 1963, 1970 ; 小林, 1970 ; 北村, 1987,1988). Hamasaki(1968)는 참문어의 망막에 대한 생리학적 특성을 조사하기 위하여 ERG을 이용하였고, 小林(1970)은 ERG와 어류 눈의 기능과의 관계에 대하여, 北村(1987, 1988)은 쏨뱅이의 명순응시와 암순응시에 ERG의 반응특성에 대하여, 張·有元(1993)는 어류의 운동시각기능을 조사하기 위하여 ERG의 임계융합빈도를 이용하였다.

Author : yian@gw.ac.kr

한편, 前報에서는 스트로보광에 대한 전갱이의 행동(安·有元, 1994), 심박수 변화(安·有元, 1997 ; 安·有元, 2003) 및 망막운동반응(安·有元, 1995)에 관하여 보고하였다. 본 연구에서는 스트로보광의 섬광빈도 및 강도에 대해서 전갱이의 ERG 변화를 조사·분석하여 망막의 명순응과정과 심박수 변화와의 관계를 고찰하였다.

재료 및 방법

본 실험에 사용한 실험어는 정치망으로 어획한 체장 17~19cm인 전갱이(*Trachurus Japonicus*)이며, 이들은 사육수조에서 10일 이상 적응시킨 후에 실험에 사용하였으며, 실험수온 및 사육수온은 20±1℃였다.

실험장치는 Fig. 1과 같은데, 광자극장치에는 60W, 閃光時間 12~22㎲의 스트로보스코프(管原, PS 240A)를 이용하였고, 섬광빈도는 1.7, 5, 10, 25Hz의 4단계로 하였다. 또한, 스트로보광의 강도에 대해서는 前報(安·有元, 1994 ; 2003)의 실험조건과 유사한 조건으로 하기 위하여 섬광빈도를 10Hz로 일정하게 하고 ND 필터를 이용하여 약 75 *lx·s*의 강도Ⅰ를 Ⅰ/5, Ⅰ/15, Ⅰ/3800의 4단계로 감광하였다. 스트로보광은 실험어의 위쪽으로 약 40cm 떨어진 위치에서 발광하였다. 그 위치에서 공기 중에서 스트로보광의 세기는 스트로보광 측정장치(Minolta, Ⅱ)로 측정하였고, 1.7, 5, 10, 25Hz의 경우, 각각 415, 370, 75, 56 *lx·s*였다.

스트로보광에 대한 ERG 기록은 실험어의 눈이 암순응상태에서 행하였다. 실험어를 실험전 약 5시간 이상 암순응시킨 후, FA100(20ppm)의 용액으로 마취하고, Fig.1에 나타낸 shield box 안의 플라스틱제 용기에 넣었다. 실험 중에는 마취상태를 유지하기 위하여 마취액을 실험어 입에서 아가미로 灌流시켰다. 스테인리스 주사기로 제작한 유도전극용 關電極은 눈의 각막을 통해서 유리체에 꽂아 넣고, 不關電極은 眼球의 후부에 삽입하였다. 스트로보광의 자극시간은 30분간으로 하여 4종의 섬광빈도별과 4종의 강도별로 자극하였다. 도출된 망막전위는 고감도 AC 앰프(日本光電, AB-632J)로 증폭하여 디지털오실로스코프(岩通電子, DC-6612C)의 메모리 카드에 기록과 동시에 PC의 RS232C로 수신하여 기록된 ERG 파형을 분석하였다.

ERG의 상대진폭은 스트로보광을 照射한 후 매 1분마다 기록한 ERG 진폭을 照射 직후 최초의 ERG 진폭으로 나눈 값으로 나타내었다.

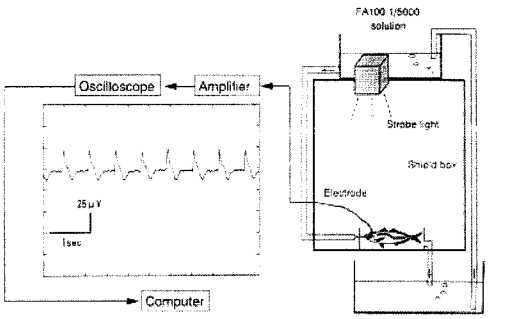

Fig. 1. Diagram showing the equipment set up for recording ERG.

결 과

1. 전갱이의 망막활동전위

암순응시킨 전갱이에 1.7Hz의 스트로보광 75 *lx·s*의 세기로 한번 광자극한 직후 최초 도출한 ERG 파형은 Fig. 2에 나타내었다. ERG 파형은 우선 a파라고 하는 음성전위가 생기고, 계속해서 b파라고 하는 갑자기 상승하는 양성 전위가 생긴 후 다시 음성 c파가 나타나는데, 광 자극이 멈추었을 때는 새로운 양성 d파가 나타났다(小林, 1970). 전갱이와 같은 연안 주행성 어류의 ERG의 특징은 원추체가 많은 망막으로부터 도출되는 것을 반영하는 것으로 b파와 d파 사이가 음성으로 나타나고, 자극광의 세기가 강하면 ERG는 일반적으로 크게 되고 각파가 뚜렷하게 나타나며, 특히 b파가 크게 된다(小林, 1970). 망막의 암순응상태에서는 b파가 가장 크지만, 명순응으로 진행됨에 따라 상대적으로 d파가 보다 뚜렷하게 되고, 파형의 형상도 변화되어 망막순응상태를 파악하는 것이 가능하였다.

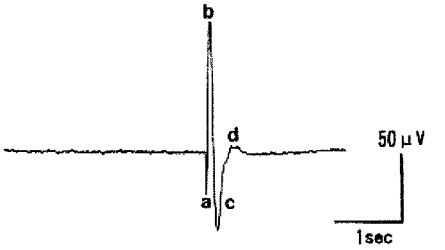

Fig. 2. ERG recorded from the dark-adapted eye of jack mackerel at a strobe flash frequency of 1.7Hz and temperature of 21℃.

2. 스트로보 섬광빈도에 따른 망막활동전위

스트로보광 1.7Hz의 섬광빈도로 연속해서 전갱이의 눈에 광자극을 했을 경우, 즉 명순응과정에 있어서 ERG의 변화는 Fig. 3과 같다. ERG의 시간경과에 따른 파형은 동물의 종류와 광의 세기, 照射時間 및 망막의 명·암순응상태 등의 조건에 따라 다르지만(小林, 1970), 전갱이에 있어서 ERG 파형의 형상과 진폭의 크기는 광자극의 시간경과와 함께 변화하였다. ERG 진폭은 음성파의 피크에서 양성파의 피크까지의 높이인데, 이 진폭의 변화를 섬광빈도 및 강도별로 분석하였다. Fig. 4는 스트로보광 자극의 시간경과에 따른 ERG의 상대진폭을 섬광빈도별로 나타내었다. ERG 진폭은 스트로보광을 자극하는 순간에 극대가 되지만, 광자극 직후 두 번째 섬광 때에 가장 작았다가 서서히 커져서 안정되는 경향을 보였다. ERG 진폭이 안정되기 시작하는 시간은 광자극 후 약 12~17분이었다. 그 안정한 때의 ERG 진폭의 크기는 스트로보광의 조건에 따라서 달랐다.

가장 강한 섬광 빈도인 1.7Hz의 경우는 스트로보광을 조사해서 12분 경과 후에 안정되지만, 상대진폭은 경우 최초 진폭의 20% 수준이었다. 5Hz의 경우는 17분 경과 후에 거의 일정하게 되지만, 이때의 상대진폭은 34.1%로 1.7Hz보다 높았다. 10Hz의 경우는 13분 경과 후에 안정하여 일시적으로 낮아지는 경우도 있었지만 상대진폭은 62.0%였고, 섬광빈도 중 진폭이 가장 현저하게 증가하였다. 25Hz의 경우는 스트로보광 조사 직후의 상대진폭이 21.5%로서 다른 섬광 빈도보다 높았지만 그 후에는 큰 변화를 보이지 않고 거의 일정하게 나타났다.

한편, 스트로보광의 연속적인 광자극에 실험어의 눈이 받는 광 자극량(照明學會, 1987)은 ERG 진폭을 시간경과에 따라 적분하여 Fig. 5와 같이 나타내었다. 섬광빈도별로 눈이 받는 자극량은 시간경과에 따라 서서히 증가하는 경향이었지만, 현저한 증가를 시작하는 시간은 섬광 빈도 1.7~10Hz의 경우 약 10분 전후였다. 특히, 그와 같은 경향은 10Hz에서 가장 현저하였고, 광 자극시간 30분에서의 자극량이 가장 많다는 것을 알 수 있다.

3. 스트로보광 강도에 따른 망막활동전위

Fig. 6은 자극 효과가 가장 현저하였던 섬광빈도를 10Hz로 일정하게 하고, 스트로보광의 강도를 변화시킨 경우에 ERG 변화를 나타내었다. ERG의 상대진폭 변화는 스트로보광 조사 1분 후에는 약 1/4로 가장 낮았다가 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 진폭의 증가 폭은 스트로보광의 강도가 감소함에 따라 현저하게 작아지는 경향을 보였다. 75 $lx \cdot s$의 스트로보광을 1/5로 감광한 경우는 스트로보광을 자극하여 15분 경과 후에 안정되었지만 상대진폭은 감광전과 비교해서 약 62% 감소하였다.

1/15의 감광한 경우는 12분 경과 후에 ERG 진폭이 거의 일정하게 되었지만, 상대진폭은 감광전의 약 72%로 감소하였다. 한편, 1/3800로 감광한 경우, ERG 진폭의 크기는 자극 전후에 급격히 감소한 후 거의 일정하게 되고 큰 변화는 보이지 않았다.

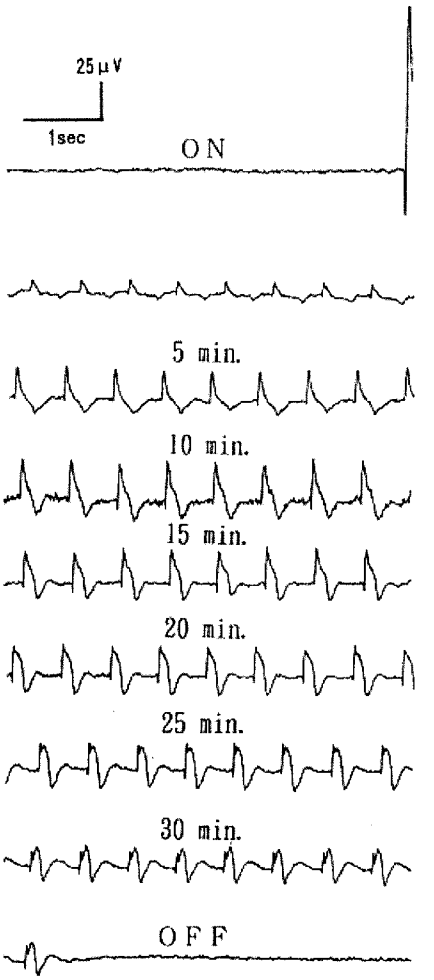

Fig. 3. Change in ERG of the fish during the process of light adaptation(1.7Hz).

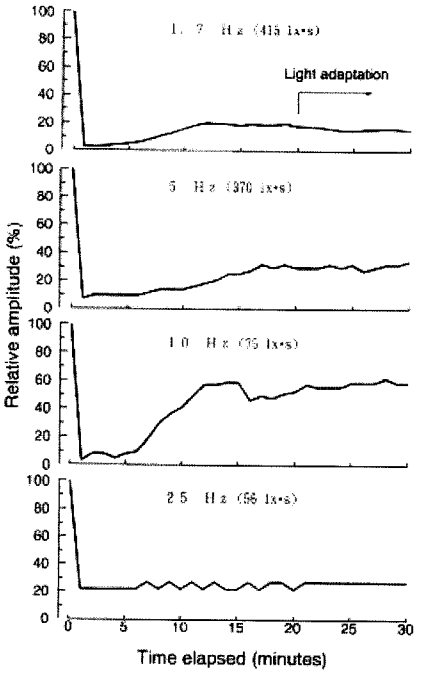

Fig. 4. Change in the ERG amplitude of the fish during the process of light adaptation at different strobe flash frequencies.

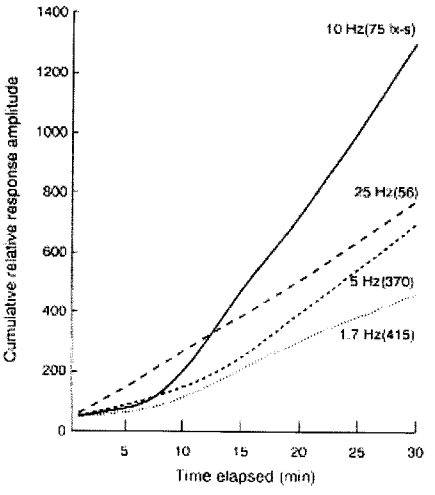

Fig. 5. Cumulative sensory response as an integral of the relative ERG amplitude according to flashing time elapsed at different flash frequencies.

스트로보광 강도별로 눈이 받는 자극량은 섬광빈도의 경우에서와 같이 Fig. 7과 같다. 자극량은 시간경과에 따라 증가하지만 스트로보광의 강도가 약해짐에 따라서 감소하였다. 30분간의 광자극에 대한 자극량은 75$lx \cdot s$의 강도 I를 1/5, 1/15, 1/3800의 감소시킨 조건에서는 75$lx \cdot s$의 자극량에 비해서 각각 약 42.8%, 31.1%, 12.9%로 감소하였다.

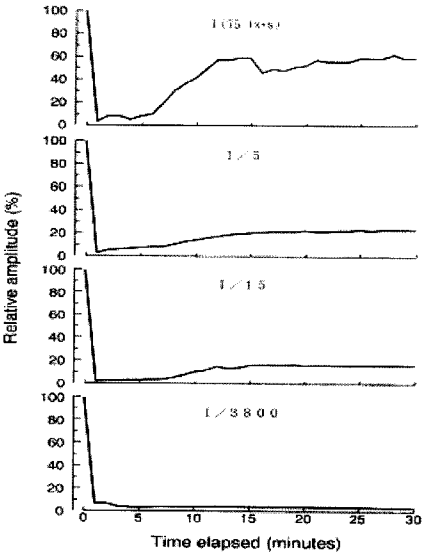

Fig. 6. Change in the ERG amplitude during the process of light adaptation according to decrease of strobe light intensity at a strobe flash frequency of 10Hz.

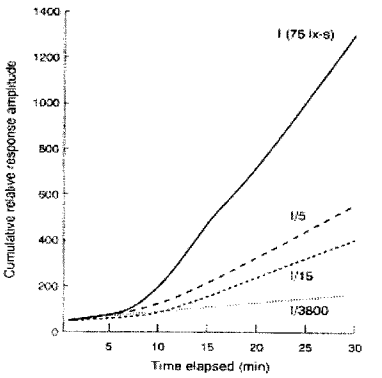

Fig. 7. Cumulative sensory response as an integral of the relative ERG amplitude according to flashing time elapsed at different light intensities.

고 찰

ERG는 색소세포가 빛을 받을 때의 전기반응으로서 음성전위와 양성전위가 나타나며, 음성전위는 망막의 표면에서, 양성전위는 망막의 안쪽부분에서 나타나는 것으로 생각된다(Tasaki K. et al., 1963 ; 小林, 1970). 본 실험에서도 전갱이의 눈에 스트로보광 자극을 주었을 때 음성과 양성전위로 ERG가 나타났으며, 광자극의 시간경과에 따라 ERG의 형상과 진폭의 크기는 달랐다. 섬광빈도를 일정하게 하고 빛의 세기를 감소시켰을 경우는 스트로보광 계측기로 측정한 조사량과 자극량이 비례하는 경향을 보였지만(Fig. 7), 실험어의 눈이 받는 자극량은 일정한 경향을 보이지 않았다. 10Hz 조건에서는 계측기로 측정한 빛의 세기는 1.7Hz와 5Hz 보다 낮지만, 감각량으로는 가장 높았다(Fig. 5). 이것은 빛이 눈의 각막 및 렌즈를 통해서 照射되어 망막에 도달되고, 그 光 중에 실제로 망막세포를 흥분하게 하는 것은 섬광빈도에 따라 다르고, 10Hz가 망막세포를 가장 잘 자극시켰기 때문일 것으로 판단된다(中村, 1969 ; 乾, 1993). 이러한 현상은 행동 실험과 심박수 변화 실험에서도 비슷하였는데, 10Hz의 경우가 가장 강한 회피 반응을 나타내었으며, 심박증가율도 가장 현저하였다(安 · 有元, 1994 ; 1997). 또한, 스트로보광의 강도를 약하게 한 경우에서는 자극효과가 낮아지고 심박증가율도 감소하였다.

한편, 어류의 운동시각기능의 연구수단으로 잘 이용되는 臨界融合頻度(Critical Fusion Frequency) 혹은 明滅融合頻度(Flicker Fusion Frequency)라고 하는 것이 있는데(Tamura and Hanyu, 1959 ; 田村, 1970), 이는 점멸하는 광의 빈도가 일정치 이상 되면 점멸이 융합해서 지속광과 같이 보여지는 현상으로서, 이 수치가 높으면 시각의 시간적 분해능이 우수한 것을 의미한다(宗宮 · 丹羽, 1991). 임계융합빈도는 표층에 서식하는 주행성 척추동물과 절족동물이 문어와 같은 야행성 동물보다 높은 것으로 생각된다(Hamasaki, 1968 ; McFarland and Loew, 1983). 전갱이의 임계융합빈도는 수온 10℃에서 단속광에서는 23Hz이고(Kobayashi, 1962), 스트로보광 자극에서는 28Hz였다(張 · 有元, 1993).

어류 눈의 임계융합빈도는 수온의 상승에 따라 증가하는 것으로 알려져 있다(Hanyu and Ali, 1964 ; 張 · 有元, 1993). Kobayashi(1962)는 수온이 10℃에서 20℃로 상승하면 임계융합빈도가 약 1.5배로 증가하고, 張 · 有元(1993)는 전갱이의 임계융합빈도가 수온 23℃에서 37Hz라고 하였다. 따라서, 본 연구에서 수온 20℃ 전후의 경우, 전갱이의 임계융합빈도는 약 35Hz로 추정된다. 스트로보 섬광빈도 25Hz의 경우에 대해서 ERG 변화가 거의 없고 진폭이 낮은 것은 전갱이의 임계융합빈도에 가깝고 1.7Hz, 5Hz 및 10Hz보다 빛의 세기가 낮기 때문인 것으로 생각된다. 또한, 이와 같은 이유로 스트로보광에 대한 심박수 변화도 적은 것으로 생각된다(安 · 有元, 1997).

한편, 北村(1988)은 섬광과 스포트라이트 광을 이용하여 쏨뱅이의 ERG를 조사하였는데, 진폭의 크기가 스포트라이트 광자극 1분경에는 암순응시 진폭의 1/2로 감소한 후 거의 일정하게 되며, 망막은 점차 명순응이 된다고 하였다. 본 연구에서도 ERG 진폭의 크기는 스트로보광을 조사한 순간에 극대로 되지만, 광자극 직후의 두번째의 섬광 때에 가장 작아졌다가 완만하게 증가하여 약 13~17분 이후부터 안정되는 경향을 보였고, ERG의 진폭이 안정되는 시점인 약 17분 이후의 명순응률은 60% 이상이었다(安 · 有元, 1995). ERG 진폭의 변화(Fig. 4,6)는 스트로보광 자극 직후에 최저로 감소하였다가, 광자극시간 10분 전후에 서서히 증가하여 안정되는 경향이 심박수 변화에서와 비슷한 경향을 보였다.

따라서, 스트로보 광자극에 대한 전갱이의 ERG 변화, 심박수 변화 및 망막운동반응의 변화가 어느 정도 일치한다고 생각되었다. 그러나, 앞으로 어류의 전기생리학적 반응과 행동생리학적 반응과의 관계를 규명할 필요가 있다. 또한, 자극광의 세기와 진폭과의 관계(田畑 · 丹羽 · 田村, 1971)는 어류의 생태, 행동 등과 밀접한 관련을 갖고 있는 것으로 알려져 있으며(小林, 1970), 이에 대한 연구도 필요하다.

요 약

스트로보광에 대한 어류의 전기생리학적 반응을 조사하기 위하여, 전갱이에 각각 4단계의 섬광빈도(1.7~25Hz)와 강도(56~415 *lx* · *s*)로 광자극을 주어, 그에 대한 망막활동전위(ERG)를 조사한 결과는 다음과 같다.

1. ERG 진폭은 스트로보광을 조사한 순간에 최대가 되고, 그 후 가장 작았다가 점차 커져서 안정되는 경향을 보였다.
2. 섬광빈도에 따른 ERG 진폭은 광자극 후 약 12

~17분부터 안정되는 경향을 보였다.

3. 전갱이가 받는 자극량은 섬광빈도 10Hz에서 가장 많았고, 스트로보광 강도가 약해짐에 따라 감소하였다.
4. ERG 진폭변화는 10Hz가 가장 컸고, 스트로보광의 강도가 감소함에 따라 적었다.

참고문헌

Guthrie, D.M. and Muntz, W.R.A.(1986) : Role of vision in fish behaviour, in "Behaviour of teleost fishes"(ed. By T.J. Pitcher), Second edition, Chapman and Hal, 89~128.

Hamasaki, D.I.(1968) : The electroretinogram of the intact anesthetized octopus, Vision Research 8, 247~258.

Hanyu, I. And Ali, M.A.(1964) : Electroretinogrm and its flicker fusion frequency of different temperature in light adapted salmon(*Salmo salar*), J. Cellular and Comparative Physiology 63, 309~320.

Kobayashi, H.(1962) : A comparative study on electroretinogram in fish with special reference to ecological aspects, J. Shimonoseki Coll. Fish. 11, 17~148.

McFarland, W.N and Loew, E.R.(1983) : Wave produced changes in underwater light and their lations to vision, Env. Biol. Fish. 8, 173~184.

Tamura, T., Mitarai, G. and Yuichiro S.(1957) : The lowest intensity of illumination to produce the maximum cone potential in the fish retina and its ecological meaning, Bull. Jap. Soc. Sci. Fish. 23, 86~91.

Tamura, T. and Hanyu, I.(1959) : The flicker electroretinogram of the carp eye, Bull. Jap. Soc. Sci. Fish. 25, 10~12.

Tasaki, K., Oikawa, T. and Norton, A.C.(1963) : The dual nature of the octopus electroretinogram, Vision Research 3, 61~73.

乾敏郎(1993) : 脳と視覺, サイエンス社、東京、126~130.

北村章二(1987) : カサゴのERG(網膜電位) - Ⅰ暗順応時における刺激と反応の關係, Bull. Natl. Res. Inst. Aquaculture 12, 53~60.

北村章二(1988) : カサゴのERG(網膜電位) - Ⅱ明順応時による反応特性の変化, Bull. Natl. Res. Inst. Aquaculture 14, 139~145.

小林 博(1970) : ERGと魚眼の機能, 「魚類生理」(川本信之 編), 厚星社厚生閣, 東京, 452~461.

中村章人(1969) : 光覺閾 · 明るさ弁別 · 明暗順応。感覺 · 知覺心理學ハンドブック(和田陽平ら編), 東京、誠信書房, 233~237.

田村 保(1963) : 魚の眼の機能の研究方法, 日水誌 29, 75~89.

田村 保(1970) : 視覺、魚類生理」(川本信之 編), 厚星社厚生閣, 東京, 423~451。

田畑満生 · 丹羽宏 · 田村保(1971) : 魚類上生体の緩電位, 日水誌 37, 487~490.

照明學會(1987) : 光をはかる, 日本理工出版會, 103~118.

安永一 · 有元貴文(1994) : ストロボ光の威嚇効果に關する行動生理學的研究 - Ⅰ.ストロボ光に對するマアジの回避行動, 日水誌 60, 713~718.

安永一 · 有元貴文(1995) : ストロボ光에 의한 전갱이와 잉어의 網膜運動反應, 한국어업기술학회지 31, 379~384.

安永一 · 有元貴文(1997) : ストロボ光の威嚇効果に關する行動生理學的研究 - Ⅱ. ストロボ光の閃光頻度によるマアジの心拍數變化, 日水誌 63, 3~9.

安永一 · 有元貴文(2003) : ストロボ광의 자극효과에 관한 행동생리학적 연구 - Ⅲ. 스트로보광 강도에 의한 전갱이의 심박수변화, 한국어업기술학회지 39, 128~133.

井上 實(1978) : 魚の行動と漁法, 厚星社厚生閣, 東京, 63~82.

山岸 宏(1989) : 行動の生物學, 講談社, 東京, 11~32.

張秀梅 · 有元貴文(1993) : ストロボ光によるマアジのERG臨界融合頻度. 東京水産大學研究報告 61~67.

張秀梅 · 有元貴文(1993) : 漁獲技術のための魚類の視覺研究序說.水産の研究 12, 36~42.

宗宮弘明 · 丹羽 宏(1991) : 視覺,「魚類生理」(板澤靖男, 羽生 功編), 厚星社厚生閣, 東京, 403~442.

2004년 4월 6일 접수
2004년 4월 9일 수리