

## Development Changes in the External Structure of the Head and the Histological Structure of the Eye in Artificially Reared Japanese Eel, *Anguilla japonica*, Leptocephalus and Glass Eel

Dae-Jung Kim, Nam-Sil Lee\*, Bae-Ik Lee, Shin Kwon Kim and Kyung-Kil Kim

New Strategy Research Center, National Fisheries Research & Development Institute (NFRDI), Busan 619-902, Korea

Received September 2, 2013 / Revised September 26, 2013 / Accepted October 22, 2013

Knowledge of morphological changes in eel larvae is very important for artificial rearing of eel larvae. In this study, we investigated the morphological structure of the head region and histological changes of the eye retina in artificially reared larvae at various stages and in glass eel just after metamorphosis. Structural changes were observed in the upper jaw (maxilla) and the lower jaw (mandible) after 100 dah (day after hatchery) and after metamorphosis. Teeth had degenerated by the time of completion of metamorphosis. Major histological changes observed in the eye retina were the formation of the outer plexiform layer and the outer nuclear layer from 100 dah larva and a change in the rod cell layer after metamorphosis. The cornea was not observed at 10 dah in the eel larva. More information is needed on the early developmental stages of eel larvae to enable mass production of glass eels. The results obtained in the present research will be useful when developing novel rearing programs for eel larvae.

**Key words** : *Anguilla japonica*, artificial rearing, eel larva, glass eel, head morphology

### 서 론

뱀장어와 같은 장어형(Anguilliformes) 어류는 길게 늘어진 형태나 부위별 지느러미의 존재유무와 관련하여 타 어종과 구분되는 형태적 특징을 가지며, 자어(렙토세팔루스; leptocephalus)에서 치어(실뱀장어; glass eel)로 변태하는 생리·생태학적 특징에 대한 관심으로 인하여 자연상태에서 채포된 자어들을 대상으로 오래 전부터 연구가 이루어져 왔다[15]. 최근 뱀장어 인공 성숙 유도에 의한 체란[8] 및 체정[7], 인공수정을 통하여 자어를 생산하는 기술을 확립하였으며[9], 변태기를 지나 실뱀장어로 성장시켰다[24]. 이러한 뱀장어 인공자어의 사육과정에서 관찰되는 시기별 형태학적 변화는 실험실내 사육을 위해 중요한 기초자료이며, 특히 시각, 청각, 후각과 같은 각종 감각기관이 분포하는 두부의 발달은 뱀장어 자어의 생리, 생리 연구에 중요한 기초자료라 할 수 있다.

부화 직후의 자어는 난황을 가지고 있으며 약 7일간은 난황의 영향을 기반으로 사료 공급없이 생존한다[9, 24]. 그러나 난황이 모두 흡수되면 사료 공급을 통하여 영양물질을 섭취해야 하며 실험실 내의 사육조건에서는 인공사료를 공급하게

된다. 본 연구에서는 난황흡수 이후 상어알 기반[24]의 인공사료 공급 시작 후 3일(부화후 10일)부터 변태 이후(부화후 약 270일) 자어를 대상으로 두부 발달의 형태학적 변화 과정과 골격 변화를 관찰하였다. 또한 일반적으로 자어가 섭이에 이용하는 주요 감각기관 중 시각 기관인 안구는 색소침착과 함께 최초의 섭이가 시작된다고 알려져 있으며[23], 또한 일반적으로 어류 자어의 먹이 섭취 양상(pattern)과 빛의 강도는 밀접한 관련성이 있다[19]. 따라서 이러한 관점에서 사육중인 자어 및 실뱀장어의 안구 발달을 조직학적으로 조사하여 자어 사육 기법을 확립하는데 필요한 기초 자료로 제공하고자 한다.

### 재료 및 방법

#### 시험어 사육

자연산 암컷 친어의 인위적 성숙 및 배란 유도는 Kim et al. [8] 방법에 따라 실시하였으며, 양식산 수컷 친어의 배정 유도는 Kim et al. [7] 방법에 따라 실시하였다. 인공 수정 및 부화 자어 생산은 Kim et al. [9] 방법에 따라 수행하였으며, 부화후 7일째 자어들은 20 l 아크릴 수조에 약 2,000마리씩 분주하였다. 사료 공급은 부화 후 8일째부터 상어알 기반의 액상 사료[24]를 변형한 slurry 형태의 사료를 1일, 5회 공급하면서 인공 실뱀장어까지 사육하였다.

#### 두부의 형태학적 형태 변화

자어 및 실뱀장어의 두부 외형 변화를 조사하기 위하여 사육중인 자어를 부화후 10일, 30일 및 60일째 개체 10마리 이상

#### \*Corresponding author

Tel : +82-51-720-2181, Fax : +82-51-720-2189

E-mail : nslee90@naver.com

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

을 채집하여 5% 중성포르말린에 고정하였고, 부화후 120일, 240일(변태직전)의 자어들과 변태 후 실뱀장어(부화후 270일)는 3-aminobenzoic-acid ethyl ester (MS-222, Sigma)로 마취시켜 실체현미경(Olympus MV510 Macroview Stereo Microscope) 및 영상장치(Olympus DP73 research digital color camera)를 이용하여 촬영하였다.

#### 안구 발달의 조직학적 변화

자어 및 실뱀장어의 안구 조직학적 변화를 조사하기 위하여 부화후 10일, 60일, 100일 및 200일째 개체 3~10마리를 5~10% 중성포르말린에 고정하였고, 인공 실뱀장어는 개체수가 제한되어 변태후 약 1주 경과한 실뱀장어 1마리를 10% 중성포르말린에 고정하여 시료로 사용하였다. 상기의 모든 시료는 부위별로 세절하여 재고정 한 후, 수세, 탈수, 파라핀친화과정을 거친 후 파라핀조직블럭을 제작하였으며, 두부에 해당하는 부위에 대하여 마이크로톰(Leica RM2165, Germany)을 이용하여 3~4  $\mu\text{m}$ 의 두께로 박절하여 슬라이드글라스에 절편을 부착시켜 건조하고, 탈파라핀 과정을 거쳐 Hematoxylin-Eosin(H&E)염색을 실시하였다. 그 후, 광학현미경(Zeiss Axio Imager A1) 및 영상장치(Germany Axio Cam MRC5, Axiovs40v 4.6.3.0, Germany)를 이용하여 분석하였다.

## 결 과

#### 두부의 현미경학적 형태변화

##### 두개 상부

부화 후 10일에서 60일째까지 자어의 정수리 부위 두개는 얇은 막과 같은 구조로 덮혀 있으며 내이(labyrinth)가 발달하는 후두부는 이낭(ear capsule)이라는 둥글게 보이는 공간이 확인되었다. 100일 이전인 10일, 30일, 60일째 자어의 두개는 안구가 차지하는 영역이 넓고 안구 위쪽을 얇은 외피가 뇌 위쪽을 덮고 있는 것처럼 보였다(Fig. 1A, 1B, 1C). 두개 상부는 120일째 자어에서 안구 위쪽으로 둥근 형태로 외형이 관찰되는 것을 알 수 있으며, 변태 이전인 240일째 자어와 변태 이후 실뱀장어의 두개골이 구조적으로 두껍고 단단해져 두부 상측의 정수리 부위를 덮고 있음을 알 수 있었다(Fig. 1D, 1E, 1F). 후두부로 발달하는 내이의 경우 초기 자어에서는 안구 바로 뒤쪽의 둥근 공포 형태로 나타나는 이낭 영역에서 형성되는 것으로 보이며 20일 이후로 공포 아래쪽에서 두 개의 이석이 관찰되기 시작하여, 60일째는 뚜렷하게 이석의 존재가 확인되고(Fig. 1A, 1B, 1C), 120일째 두부에서는 후두부로 내이가 발달하면서 이낭의 영역이 작고 단단해 지는 것을 알 수 있었다(Fig. 1D). 변태 이전인 240일째 자어의 내이 영역에서 3개의 이석이 관찰되지만 두개골이 발달하면서 실체현미경상에 잘 비쳐 보이지 않게 되며 이 시기부터 아가미뚜껑의 새개골(operculum) 발달이 눈이 띄게 나타났다(Fig. 1E, 1F).

#### 상악(maxillar)과 하악(mandible)

부화 10일째 자어는 상악(maxillar)이 하악(mandible)보다 짧고 치설이 길고 밖으로 뻗어있었으며, 30일째 자어는 하악과 치설의 길이가 비교적 짧아진 것 이외에 외형적인 큰 변화는 없었다(Fig. 1A, 1B). 60일째 자어는 상악이 하악보다 짧지만 이전보다는 상악과 하악의 길이차이가 뚜렷하게 줄어든 것을 알 수 있었다(Fig. 1C). 치설은 부화초기보다 짧아졌으나 바깥으로 향하는 경향은 계속 유지하고 있었다. 이전의 두개골이 뇌를 감싸고 있는 단순한 연골성의 보호벽과 같은 형태라면 120일째는 상악과 하악의 골격이 구조적이며 견고해 진 것을 확인 할 수 있었고, 하악 하부의 근육도 발달하고 있는 것이 관찰되었다. 또한 상악 상측의 후구(olfactory groove)의 존재도 실체현미경상에서 관찰 가능하였다. 하악의 끝이 상악보다 돌출되었지만 100일 이전의 상악과 하악의 맞물림과는 차이를 보였다(Fig. 1D). 200일 이후 서서히 변태기에 접어들면서 하악이 더욱 발달하여 구조화 되며, 치아도 매우 짧아지는 것을 알 수 있었고, 또한 상악과 하악의 연결부 주위와 하악 아래쪽에 근육이 잘 발달되어 나타났다(Fig. 1E). 변태후 실뱀장어 형태가 완성되면 상악과 하악을 따라 관찰되던 치아가 퇴화되고, 안구 전방에 작은 타원형으로 발달된 후구가 관찰되었다(Fig. 1F).

#### 아가미(Gill)와 심장(heart)

아가미형성은 부화 후 120일 자어에서 짧은 새엽이 하악 안쪽 후부인 새골(branchial)과 설골(hyal)을 따라 형성되었으며, 그 이후 새엽이 점점 길게 형성되는 것이 관찰되었다(Fig. 1D, 1E, 1F). 심장은 10일째 자어에서는 그 위치가 실체현미경상에서 명확하게 나타나지 않았으나 상악과 하악이 교차하는 바로 아래쪽에 위치하며(Fig. 1A), 30일째 이후로 하악 후부 아래쪽, 가슴지느러미 앞쪽으로 자리잡고 있음을 알 수 있었다(Fig. 1B, 1C). 120일째 자어에서는 심장이 차지하는 공간이 아가미 새엽이 형성되는 아래쪽 후방과 가슴지느러미 아래쪽 사이로 초기 자어 보다 큰 공간을 차지하고 있었다(Fig. 1D). 그 이후, 가슴지느러미 뒤쪽으로 서서히 이동하면서 변태후인 실뱀장어에서는 가슴지느러미 후방 아래쪽에 심장이 위치하며 그 크기도 커져있는 것을 확인 할 수 있었다(Fig. 1E, 1F). 변태 직전인 240일째 자어와 변태 직후 실뱀장어에서 아가미 새엽 발달이 뚜렷하게 관찰되며 변태 직후의 실뱀장어에서는 하악과 심장주위로 형성된 혈관이 잘 발달된 아가미와 연결되어 있는 것이 관찰되었다(Fig. 1E, 1F).

#### 안구 발달의 조직학적 변화

자어 성장에 따른 안구의 조직표본 사진을 Fig. 2에 나타내었다. 부화 후 10일째 자어의 안구는 각막(cornea)이 거의 형성되지 않고, 안구를 감싸는 공막과 같은 얇은 막구조가 수정체를 감싸고 있었으며, 수정체의 바로 뒤쪽인 신경절세포층의 두께는 다른 세포층에 비해 두꺼운 편이지만 세포밀도는 조절

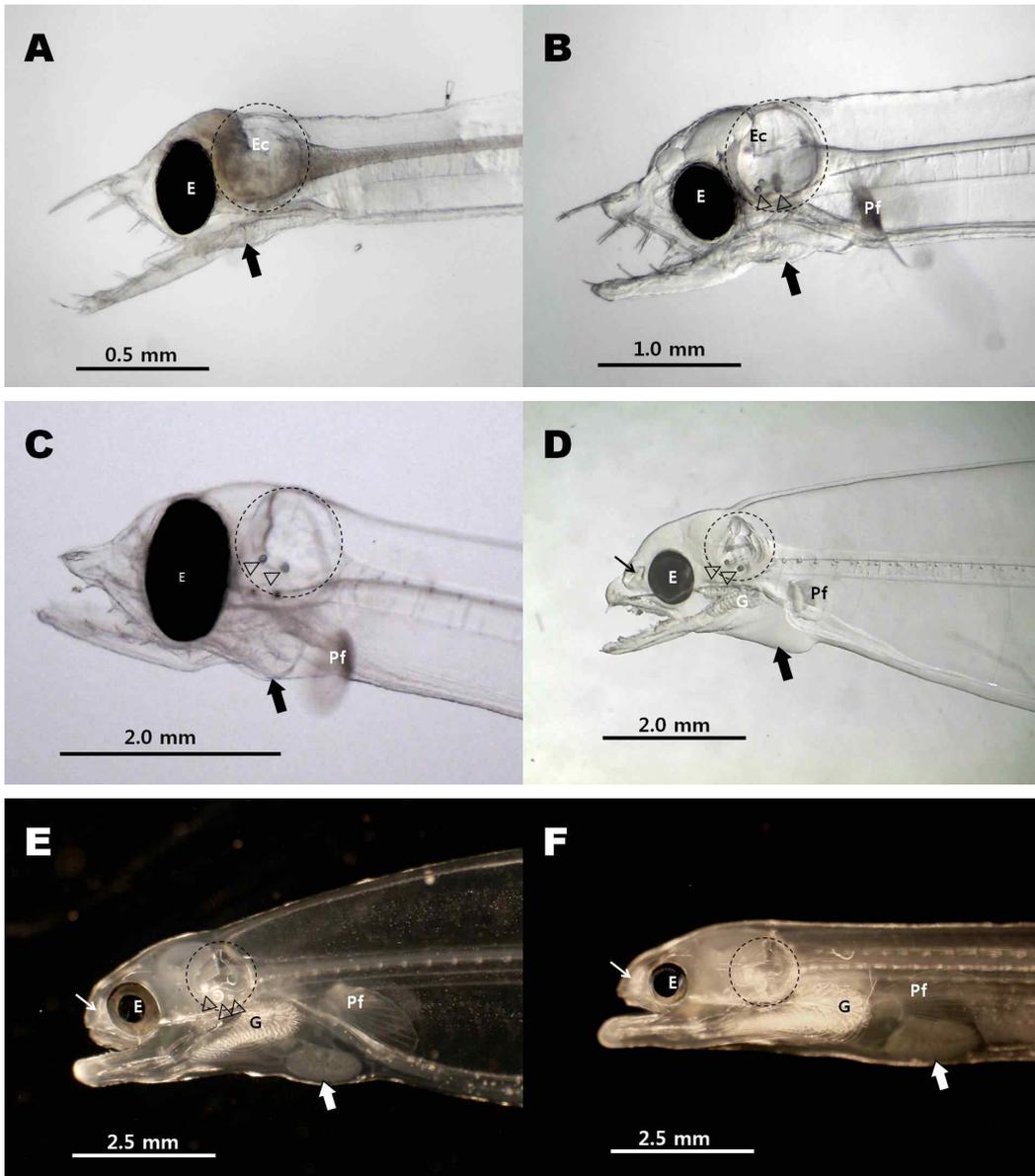


Fig. 1. Head pictures of eel larvae in various stages. A. Eel larva of 10 days after hatchery (dah), B. Eel larva of 30 dah, C. Eel larva of 60 dah, D. Eel larva of 120 dah, E. Eel larva of 240 dah (just before metamorphosis), F. Glass eel (just after metamorphosis). E; Eye, G; Gill, Pf; Pectoral fin, circle, Ec; Ear capsule, arrow heads: otholith, small arrow: olfactory groove, large arrow: position of heart.

하지 않았다. 이후 연결되는 내망상층과 내과립층 모두 같은 경향이었고, 외망상층과 외과립층은 관찰되지 않았다. 이후 정렬된 시세포층의 간상세포(rod cell) 배열이 나타나며 그 바깥으로 색소세포층이 구성되어 있었다(Fig. 2A, 2A-1). 부화 후 60일째 자어는 각막이 형성되어 안구 바깥층을 싸고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 신경절세포의 세포층 두께가 얇아지면서 세포수도 많아지고 세포밀도도 높아지는 경향을 보였으며, 외망상층과 외과립층의 형성은 아직 나타나지 않았다(Fig. 2B, 2B-1). 부화 후 100일째 자어는 신경절세포층의 세포 배열이 더욱 조밀해지고 과립층의 세포배열상이 내과립층과

외과립층으로 구분이 되는 듯 보였지만 60일째와 유사한 형태였으며, 각막과 공막의 구조가 이전보다 뚜렷하여 색소세포층보다 두터워져 있었다(Fig. 2C, 2C-1). 이러한 현상은 부화 후 200일째까지 지속되었다(data not shown). 그러나, 변태 후 실뱀장어에서는 내과립층과 외과립층의 중간 구분이 명확히 나타났으며, 신경절세포층의 세포도 단층의 세포배열이 명확히 나타났다. 시세포층의 세포형태도 간상세포의 밀집정도에서 차이를 나타내며 세포의 형태도 불규칙하며, 색소세포층도 두껍게 관찰되었다(Fig. 2D, 2D-1).

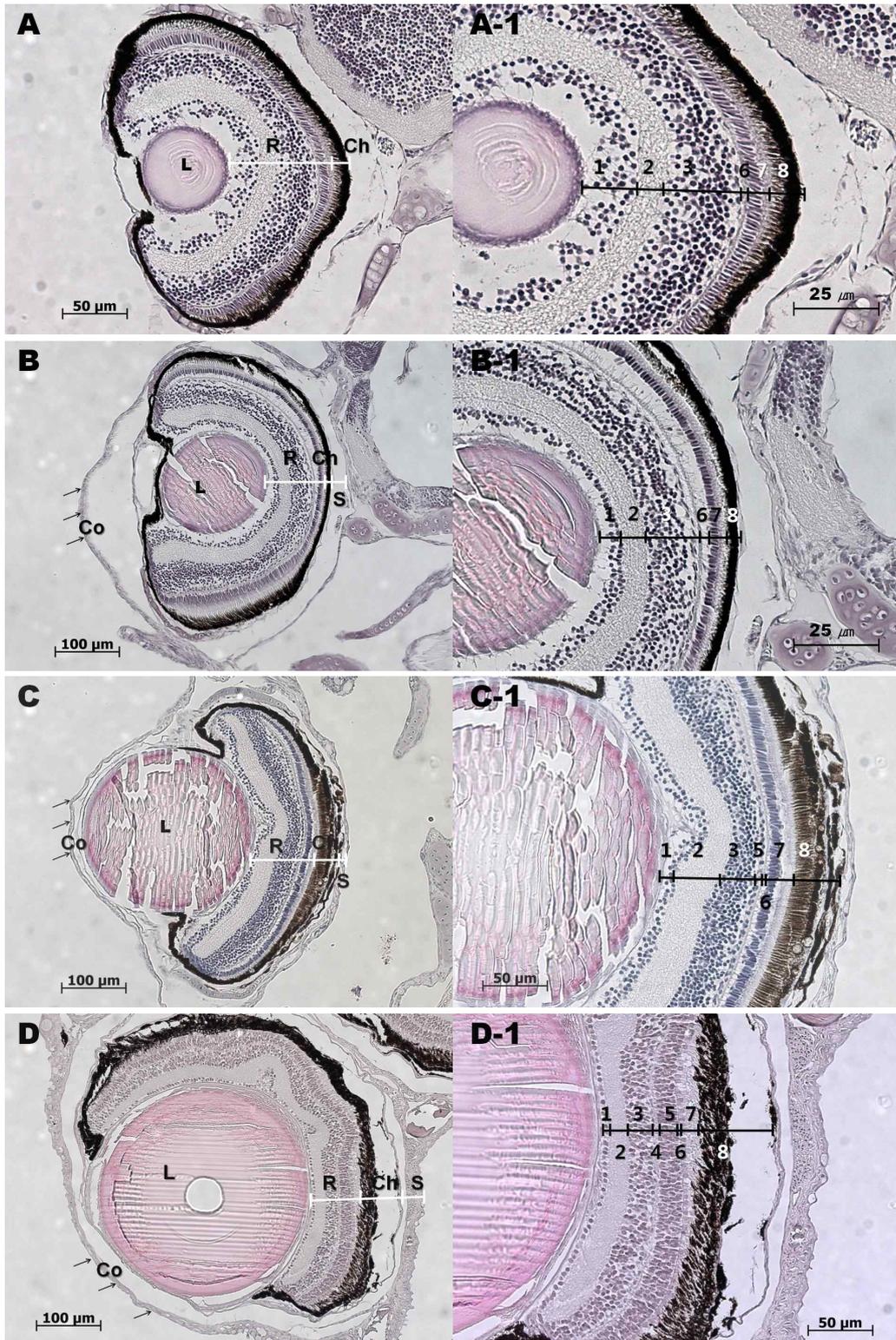


Fig. 2. Histological eye structures of eel larvae in various stages. A: Eye of 10 dah larva, A-1: High power view for retina of A, B: Eye of 60 dah larva, B-1: High power view for retina of B, C: Eye of 100 dah larva, C-1: High power view for retina of C, D: Eye of just after mepamorphosed eel larva, D-1: High power view for retina of D, L; lense, Co; cornea, R; retina, Ch; choroid, S; sclera, arrows; position of cornea, 1; ganglion cell layer, 2; inner plexiform layer (IPL), 3; inner nuclear layer (INL), 4; outer plexiform layer (OPL), 5; outer nuclear layer (ONL), 6; external limiting membrane, 7; rod and cone cell layer, 8; pigment epithelium and chroid.

## 고찰

본 연구는 자연에서 채집된 뱀장어 자어(렙토세팔루스)의 형태에 대한 연구 결과를 바탕으로 실험실 내에서 인공 수정에 의해 생산된 극동산 뱀장어의 초기자어에서 변태 후 실뱀장어의 두부 형태변화 및 안구 조직학적 분석을 실시하였다. 뱀장어의 경우 수정란에서 부화한 자어는 pre-leptocephalus 단계를 지나 장기간의 낫빛 모양인 leptocephalus 단계를 거쳐 실뱀장어로 변태하며 변태기동안 먹이는 섭취하지 않으며, 그 이후 착저가 이루어진 실뱀장어는 먹이 섭취를 재개함으로써 급속히 색소가 발현하여 검둥뱀장어(elver)로 되어 강으로 역상하여 정착 생활에 돌입하게 된다. 검둥뱀장어는 황뱀장어(yellow eel)로 수컷은 4~5년, 암컷은 10년 전후로 성장한 후초가를 은화(smoltification)라는 변태를 시작하며, 이때 성숙이 시작한 은뱀장어(silver eel)는 가을에서 초겨울 사이 외양의 산란장 이동을 위해 하강하고 바다로 진입한 은뱀장어는 산란장에서 산란후 일생을 마치게 된다[25, 26, 27]. 이러한 뱀장어 생활사의 과정중에서 개체 발생에 따른 생태학적·형태학적·생리학적변화가 많아 오래 전부터 연구 대상이 되어 왔다[13, 20, 24].

두개의 외형적 변화는 두개 골격의 변화와 관련되며, 이러한 변화는 크게 10~30일의 초기단계, 100일 전후의 중간단계, 변태 이후의 크게 세 단계로 구분하여 볼 수 있었으며, 그 중 큰 변화는 100일 기점의 중간 단계 및 변태 전과 후에 나타났다. 자연에서 채집된 초기 자어의 경우 연골성두개(chondrocranium)의 분화 및 골화(ossification)와 함께 두개상측부 및 상악과 하악이 구조적으로 발달되면서 실뱀장어의 두개골을 형성하게 된다고 보고하였다[6, 10, 11, 12]. 또한 Pfeiler [21]는 인(phosphorus)이 후기 자어의 골화에 영향을 끼치며, 변태기 자어에 인과 영양분이 결핍시 척주(vertebralcolumn)와 두개골과 같은 골격 구조 발달에 영향을 미친다고 하였다. 따라서 인공으로 생산된 뱀장어 자어 및 실뱀장어 두 개의 외형변화는 자연에서 채집된 자어 및 실뱀장어의 그것과 유사한 형태로 형성되는 것을 알 수 있었다. 한편, 타종 자어의 경우도 자어가 변태하면서 성어의 형태를 갖추어 가는데 있어 하악(mandible), 설골(hyal) 그리고 새골(branchial) 등이 구조적으로 완성되어 가는 것을 알 수 있다[2]. 뱀장어 자어의 경우에서도 이러한 경향은 일치하며 앞에서 설명한 것과 같이 부화 후 100일째와 변태 전후로 크게 차이를 나타내었다. 그러나 인공자어의 사육기간 중 하악이 탈골되어 입이 다물어지지 않는 개체도 종종 나타나는데, 현재 수조 바닥에 뿌려지는 액상사료의 공급 형태로 인해 이를 섭취하려는 자어의 무리한 하악운동이 상악과 하악의 연결구조 및 근육이 발달되기도 전에 탈골로 이어져 턱구조의 형성장애로 나타나는 것으로 추측된다. 자연상태에서는 particulate organic matter (POM)와 같은 유기물 입자를 섭취하는 것으로 알려져 있어[1, 13,

14, 16] 자연에서는 이러한 구강골격의 발달장애는 나타나지 않을 것으로 보인다.

뱀장어 초기 자어는 본 연구에서와 같이 가늘고 길게 돌출되어 있는 치설의 형태로 나타나다가, 성장하면서 점점 짧아지고 구강 내로 감추어진 짧은 치열로 관찰되며, 변태와 더불어 치아가 퇴화되고 상악 입천정 앞쪽으로 V자 모양의 요철판과 같은 형태로 발달한다[3, 10]. 이와 같은 치아의 변형은 자연계에서 먹이섭취나 생활형태가 변화되고 있음을 암시하며, 본 연구 결과에서 자어의 시기별 치아 변형이 120일째 두드러진 변화를 보여, 이 시기에 먹이섭취 방법 및 먹이 형태가 달라질 수 있음을 추측할 수 있다. 또한 가늘고 긴 초기 자어의 치설은 먹이를 물거나 뜯는 용도는 아닐 것으로 판단되며, 자어의 구강 구조나 식도의 폭, 소화능력을 생각했을 때 섭취하기에 큰 먹이가 구강으로 유입되는 것을 막기 위한 거름망과 같은 역할을 할 가능성이 높을 것으로 판단된다. 이와 같은 내용은 유럽산 뱀장어를 포함한 뱀장어목에 속하는 7종의 leptocephalus 구강 및 이빨 형태를 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 Appelbaum & Reihl [3]의 보고에도 설명하고 있다.

어류에서 내이의 발달은 중력과 관련하여 회전, 평형감각을 담당하는 것으로 알려져 있는데[4] 뱀장어 자어에서도 초기때부터 내이의 발생이 확인되며 3개의 이석이 240일째 자어에서 뚜렷하게 관찰되어 이 시기에 정상적인 내이의 역할을 할 것으로 추측된다. 또한 자어가 성장함에 따라 심장의 위치가 가슴지느러미 뒤쪽으로 이동하는 경향을 보였으며, 이러한 것은 변태과정에 필요한 아가미의 공간을 확보하기 위한 것으로 추측되며, 변태 후 심장의 크기는 물론 기능도 커질 것으로 보여 심장의 공간을 확보하는 것이 생리적인 측면에서 판단하더라도 유리할 것으로 생각된다.

본 연구 결과 뱀장어 자어 및 실뱀장어의 안구의 조직학적 구조는 다른 어류와 동일하게 가장 바깥층을 감싸고 있는 각막(cornea), 안쪽으로 구형의 수정체(lens)가 위치하며, 수정체 안쪽으로 시각을 담당하는 세포들의 배열인 망막(retina), 색소세포층인 맥락막(choroid) 그리고 가장 뒤쪽을 결합조직과 혈관으로 감싸는 공막(sclera)으로 구성되어 있었다. 수정체에서 맥락막(choroid) 방향으로 신경절세포층(ganglion cell layer), 내망상층(inner plexiform layer; IPL), 내과립층(inner nuclear layer; INL), 외망상층(outer plexiform layer; OPL), 외과립층(outer nuclear layer; ONL), 시세포층(rods and cones layer), 색소층(pigmented epithelium)으로 비교적 세분화되어 있다[22]. 그러나 본 연구 결과 이러한 안구의 조직학적 구조는 뱀장어 자어의 성장 단계에 따라 각 층의 세포 밀도 및 세포층 두께에서 차이를 나타내었으며, 또한 망막 외층의 시신경층에서 간상세포의 배열상이 초기에서 100일 이후 자어까지 명확하게 관찰되는 것을 알 수 있었고, 100일 이후 외망상층과 외과립층의 형성이 시작되는 것으로 판단되었다. 그리고 변태 이후인 실뱀장어 단계에서 각막, 망막, 맥락막, 공막의

안구구조가 완전하게 형성되는 것으로 추측되어 추후 성어의 안구구조와 비교 검토해야 할 것으로 보인다. 자연에서 채집한 유럽산 뱀장어(*A. anguilla*)의 전장 50 mm 정도 자어와 실험장어 및 검등뱀장어에 있어서 망막 구조를 조사한 결과 변태기 동안 원추체(cone)가 형성되고, 변태 후 실험장어 단계의 망막은 간상체(rod)와 원추체가 형성된다고 보고하였다[17]. 또한 자어의 망막 구조는 다른 어류와 마찬가지로 생태학적, 행동학적인 부분과 밀접한 연관성이 있는 것으로 보고하고 있으며[17, 28, 29], 각 세포층의 두께로 시각기관의 발달 정도를 판단하고자 한 경우도 있지만[18], 세포층의 두께 보다는 세포수의 증가와 연관된 세포층의 밀도나 세포층의 발달유무, 그리고 각 층을 구성하는 세포의 형태가 발달 정도를 판단하는 지표가 될 것으로 보인다. 시세포 중 간상세포는 암조건에서 반응하는 세포로 알려져 있으며[5], 뱀장어 초기 자어의 경우 후기 자어와 각 세포층의 두께에서 차이는 나타나지만 간상세포층의 배열이 명확하고 색소세포층도 뚜렷하게 존재하는 것으로 볼 때 빛을 피해 수조 저면으로 움직이는 자어의 빛에 대한 반응과 관련 있을 것으로 판단되며, Tanaka et al. [23, 24] 연구 결과에서도 부화 8일째 자어들이 어두운 곳으로 밀집하는 경향을 나타내는 것과 일치하고 있다. 외망상층과 외과립층의 형성과 시신경층 세포형태의 변화, 그리고 공막 주위의 혈관발달 등으로 볼 때 변태 이후 실험장어의 시신경 전달체계도 확립되고 활성화 될 것으로 보인다.

안구의 각 세포층에 분포하는 연결시신경과 신경절세포 등은 본 연구 결과에서는 언급하지 못하였으나 이들 세포의 미세구조변화도 흥미로운 연구과제일 것으로 생각되며, 시각뿐 아니라 두부에서 나타나는 후각, 청각 그리고 측선기관의 구조에 대한 상세한 연구도 함께 이루어진다면 뱀장어 자어의 먹이 선택 및 변태기에 이루어지는 형태학적 변화 연구의 기초자료가 될 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 국립수산물품질관리원 연구과제(뱀장어 인공종묘생산 기술개발, RP-2013-AQ-140)의 일환으로 수행되었습니다.

### References

- Allredge, A. L. and Silver, M. W. 1988. Characteristics, dynamics and significance of marine snow. *Progr Oceanogr* **20**, 41-82.
- Alexander, M. S. 2006. Asymmetric craniofacial remodeling and lateralized behavior in larval flatfish. *J Exp Biol* **209**, 610-621.
- Appelbaum, S. and Riehl, R. 1993. Scanning electron microscopic observations on the head morphology of seven different leptocephali belonging to six eel families (Anguilliformes). *Helgo Meer* **47**, 113-124.
- Anken, R. H., Ibsch, M. and Rahmann, H. 1998. Neurobiology of fish under altered gravity conditions. *Brain Res Rev* **28**, 9-18.
- Haruhisa, O. and Sampath, A. P. 2007. Optimization of single-photo response transmission at the rod-to-rod bipolar synapse. *Physiology* **22**, 279-286.
- Hulet, W. H. 1978. Structure and functional development of the eel leptocephalus, *Ariosomabalericum* (de la Roche, 1809). *Phil Trans Roy Soc London B* **282**, 107-138.
- Kim, E. O., Bae, J. Y., Lim, S. G., Son, M. H., Park, M. W., Park, M. S., Cho, Y. C. and Kim, D. 2006. Plasma sex steroid hormone profiles and testicular development in artificially maturing cultured male eel, *Anguilla japonica*. *J Korean Fish Soc* **39**, 466-471.
- Kim, D. J., Bae, J. Y. and Kim, E. O. 2007a. Changes in sex steroid hormones and ovarian development during artificial maturation of female eel, *Anguilla japonica*. *Integ Biosci* **11**, 117-124.
- Kim, D. J., Kang, E. J., Bae, J. Y., Park, M. W. and Kim, E. O. 2007b. Development of the eggs and pre-leptocephalus larvae by natural spawning of artificially matured Japanese eel, *Anguilla japonica*. *J Aquaculture* **20**, 160-167.
- Kloppmann, M. 2003. Body structure and functions, pp. 1-18. In: The eel, 3rd edition. Thorpe JE eds. Blackwell science. Ltd., Oxford, UK.
- Leiby, M. M. 1979. Leptocephalus larvae of the eel family Ophichthidae. I. *Ophichthus gomesi* Bull Mar Sci **29**, 329-343.
- Matsui, I. and Takai, T. 1959. Osteology of the Japanese eel. *J Shimonoseki Coll Fish* **8**, 53-62.
- Miller, M. J. 2009. Ecology of Anguilliform leptocephali: Remarkable transparent fish larvae of the ocean surface layer. *Aqua-Bio Sci Monogr* **2**, 1-94.
- Mochioka, N. and Iwamizu, M. 1996. Diet of anguillid larvae: leptocephali feed selectively on larvacean houses and fecal pellets. *Mar Biol* **125**, 447-452.
- Nielsen, J. G. and Smith, D. G. 1978. The eel family Nemichthyidae (Pisces, Anguilliformes). *Dana Rep* **88**, 1-73.
- Otake, T., Nogami, K. and Maruyama, K. 1993. Dissolved and particulate organic matter as possible food sources for eel leptocephali. *Mar Ecol Progr Ser* **92**, 27-34.
- Pankhurst, N. W. 1984. Retinal development in larval and juvenile European eel, *Anguilla anguilla*. *Can J Zool* **62**, 335-343.
- Park, I. S., Park, H. J., Gil, H. W. and Goo, I. B. 2012. Early growth and characteristic of histological eyedevlopment in post parturition dark banded rockfish, *Sebastes inermis*. *Dev Reprod* **16**, 101-106.
- Sabates, A., Bozzanno, A. and Vallvey, I. 2003. Feeding pattern and the visual light environment in myctophid fish larvae. *J Fish Biol* **63**, 1476-1490.
- Sasai, S., Katoh, F., Kaneko, T. and Tsukamoto, K. 2007. Ontogenic change of gill chloride cells in leptocephalus and glass eel stages of the Japanese eel, *Anguilla japonica*. *Mar Biol* **150**, 487-496.
- Pfeiler, E. 1999. Developmental physiology of elopomorphleptocephali. *Comp Biochem Physiol A* **123**, 113-128.

22. Takashi, H. 1982. IV. Sensory organs, Eye, pp. 42-46. In: An atlas of fish histology, normal and pathological features, Kodansha Ltd. Tokyo, Japan.
23. Tanaka, H., Kagawa, H., Ohta, H., Okuzawa, K. and Hirose, K. 1995. The first report of eel larvae ingesting rotifers. *Fish Sci* **61**, 171-172.
24. Tanaka, H., Kagawa, H. and Ohta, H. 2001. Production of leptocephali of Japanese eel (*Anguilla japonica*) in captivity. *Aquaculture* **201**, 55-60.
25. Tsukamoto, K. 1992. Discovery of the spawning area for the Japanese eel. *Nature* **356**, 789-791.
26. Tsukamoto, K. 2006. Spawning of eels near a seamount. *Nature* **439**, 929.
27. Tsukamoto, K., Chow, S., Otake, T., Kurogi, H., Mochioka, N., Miller, M. J., Aoyama, J., Kimura, S., Watanabe, S., Yoshinaga, T., Shinoda, A., Kuroki, M., Oya, M., Watanabe, T., Hata, K., Ijiri, S., Kazeto, Y. and Tanaka, H. 2011. Oceanic spawning ecology of freshwater eels in the western north pacific. *Nat Commun* **2**, 179.
28. Wagner, H. K. 1973. Darkness-induced reduction of the number of synaptic ribbons in fish retina. *Nature* **246**, 53-55.
29. Wagner, H. J. and Douglas, R. H. 1983. Morphologic changes in teleost primary and secondary retinal cells following brief exposure to light. *Invest Oph Vis Sci* **24**, 24-29.

---

초록 : 극동산 뱀장어(*Anguilla japonica*) 인공 자어와 실뱀장어의 두부 변화 및 안구의 조직학적 변화

김대중 · 이남실\* · 이배익 · 김신권 · 김경길  
(국립수산과학원 전략연구단)

뱀장어 자어의 형태변화에 관한 연구는 자어의 인공사육을 위해 알아야 할 중요한 부분이다. 본 연구에서는 두부의 형태학적 관찰과 함께, 부화 이후 변태 직후까지의 단계별 안구의 조직학적인 변화를 관찰하였다. 이들 결과로 부화 후 100일과 변태를 기점으로 상악과 하악의 발달에 큰 차이를 관찰할 수 있었으며, 치아는 실뱀장어로 변태하면서 퇴화한다는 것을 알 수 있었다. 안구 망막에서의 조직학적인 주요 변화는 부화 100일 이후의 OPL (outer plexiform layer)과 ONL (outer nuclear layer)의 형성과 변태 이후 간상세포층의 변화이며, 안구의 각막은 부화 10일째 자어에서 관찰되지 않았지만 이후 모든 단계에서 관찰되었다. 실뱀장어의 양산을 위해 초기 자어의 발달에 관한 더 많은 정보가 필요하며, 본 결과가 자어의 인공사육시스템 안정화에 도움이 될 것으로 기대한다.