

## 참붕어 (*Pseudorasbora parva*) 심장의 조직학적 연구

박노관 · 류동석\*

청주대학교 생명과학과

**A Histological Study on the Heart in the False dace (*Pseudorasbora parva*) by No Kwan Park and Dong Suck Reu\*** (Department of Life Science, Cheongju University, Cheongju, Chungbuk 363-764, Korea)

**ABSTRACT** The histological structure of the heart in *Pseudorasbora parva* was investigated by light microscope. The heart consisted of four consecutive chambers, the sinus venosus, atrium, ventricle and bulbus arteriosus. The wall of the sinus venosus was divided into endocardium, myocardium and epicardium, and the walls of the atrium and ventricle were divided into endocardium, subendocardium, myocardium, subepicardium and epicardium, and the wall of the bulbus arteriosus was divided into endocardium, subendocardium (ridge tissue), middle layer, subepicardium and epicardium. The valves were observed in the sinoatrial, atrioventricular and bulboventricular junctions. The sinus venosus wall was mostly made up of collagen. The rings of tissue were observed at the sinoatrial junction. The atrium was composed of a spongy trabeculate myocardium surrounded by an external rim of thin myocardium, and collagens were distributed in the subepicardium and trabeculae. The ventricle was a spongy myocardium with vessels in subepicardium. In the subepicardium and trabeculae of the ventricle, collagens were distributed. In the bulbus arteriosus, the diameter and length of the ridges were differed. The endocardial cells were convex and the non-clustered subendocardial cells showed irregular shapes. The cells of the middle layer were arranged into incomplete layers that showed different orientations. The subepicardium was formed by cells of different morphology. Collagens and elastins were demonstrated in the subendocardium, middle layer and subepicardium of the bulbus arteriosus. The epicardium was a single layer composed of flattened cells.

**Key words :** Fish heart, histological structure, *Pseudorasbora parva*

### 서 론

경골어류의 심장은 가슴의 복부 중앙에 위치하고, 혈액이 흐르는 방향에 따라 정맥동 (sinus venosus), 심방 (atrium), 심실 (ventricle) 및 동맥구 (bulbus arteriosus)가 연속적으로 배열되어 있으며, 다른 구조로는 동맥원추 (conus arteriosus) (Schib *et al.*, 2002; Grimes *et al.*, 2006; Icardo, 2006; Pieperhoff *et al.*, 2009; Icardo, 2012)와 방실계 (atrioventricular segment 또는 atrioventricular region)가 알려져 있다 (Icardo and Colvee, 2011). 심방과 심실은 근육성 방으로 수축 기능을

하며 다른 구조들은 혈액이 원활하게 흐르도록 도와주는 기능을 한다. 일반적으로 정맥동과 심방, 심방과 심실 및 심실과 동맥구 사이에는 혈액의 역류를 막는 판막이 존재한다 (Icardo, 2012). 몸의 각 부분에서 돌아오는 정맥혈을 모아 심방으로 보내는 정맥동은 심내막 (endocardium), 심근층 (myocardium) 및 심외막 (epicardium)으로 구분되는 외벽으로 이루어져 있고 (Leknes and Saetersdal, 1980), 외벽의 구성 성분들은 주로 근육과 아교질 (collagen)이며, 경골어류에서 그 구성 비율은 다양하다 (Icardo, 2012). 심방의 외벽은 심내막, 심근층, 심외막하층 (subepicardium) 및 심외막으로 구분된다. 심근층은 일반적으로 아교질에 의해 지지되는 소주 (trabecula)들이 복잡하게 배열되어 있는 해면성 심근 (spongy myocardium)으로 이루어져 있으며, 얇은 심근층이

\*Corresponding author: Dong Suck Reu Tel: 82-43-229-8528  
Fax: 82-43-229-8525, E-mail: re8448@cju.ac.kr

해면성 심근을 둘러싸 테두리(rim)를 형성하고(Santer and Cobb, 1972; Icardo, 2012), 이는 종에 따라 구조적으로 차이를 보인다(Simões *et al.*, 2002; Icardo, 2006). 심실의 외벽 또한 심내막, 심근층, 심외막하층 및 심외막으로 구분되며 심근층의 소주에는 이를 지지해 주는 아교질이 분포한다(Santer and Cobb, 1972). 심실의 구조는 치밀성 심근(compact myocardium)과 해면성 심근의 구성 비율, 조직학적 구조 및 관상혈관(coronary vessel)의 분포 등에 따라 다르다(Santer, 1985; Farrell and Jones, 1992). 동맥구는 심실과 복대동맥 사이에 위치하며 심실이 수축하는 동안 팽창하여 탄력적인 저장소 역할을 수행하므로 많은 종에서 탄력성을 유지하기 위해 아교질과 탄력소(elastin)가 분포한다고 알려져 있고(Farrell and Jones, 1992; Braun *et al.*, 2003), 조직학적으로는 심내막, 심내막하층(subendocardium), 중간층(middle layer), 심외막하층 및 심외막으로 구분되며 중간층은 평활근세포로 구성되어 있어 동맥구의 탄력성을 증가시킨다. 동맥구의 구조는 종에 따라 크게 차이를 보인다(Icardo *et al.*, 1999a, b, 2000a, b).

이와 같이 경골어류의 심장 구조가 다양한 것으로 알려져 있으나 국내에서는 경골어류의 심장 구조에 관한 연구가 매우 빈약한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 출현빈도가 비교적 높고 저수지와 하천의 얇은 곳 표면층에서 무리지어 서식하는 잉어과(Cyprinidae) 모래무지아과(Gobioninae)에 속하는 참붕어 심장의 정맥동, 심방, 심실 및 동맥구의 조직학적 구조를 광학현미경으로 관찰하여 기초자료로 제시하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 실험재료

2014년 8월부터 9월 사이에 충청북도 청주시 상당구 낭성면 관정리 절골소류지에서 유인어망을 이용하여 채집한 전장 78.0~88.0±3.4 mm (n=7)의 참붕어 성체를 즉시 또는 최대 2주까지 양어하면서 연수를 절단하여 심장을 적출하였다. 연수절단 후 심장의 형태변화를 최소화하기 위해 신속하게 심장을 노출시키고 0.1 M phosphate buffer (pH 7.4)로 조정된 4% formalin 또는 2.5% glutaraldehyde를 뿌려주면서 형태를 유지시켜 적출하였고, 적출된 심장들은 각각의 고정액으로 고정하여 실험재료로 사용하였다.

### 2. 실험방법

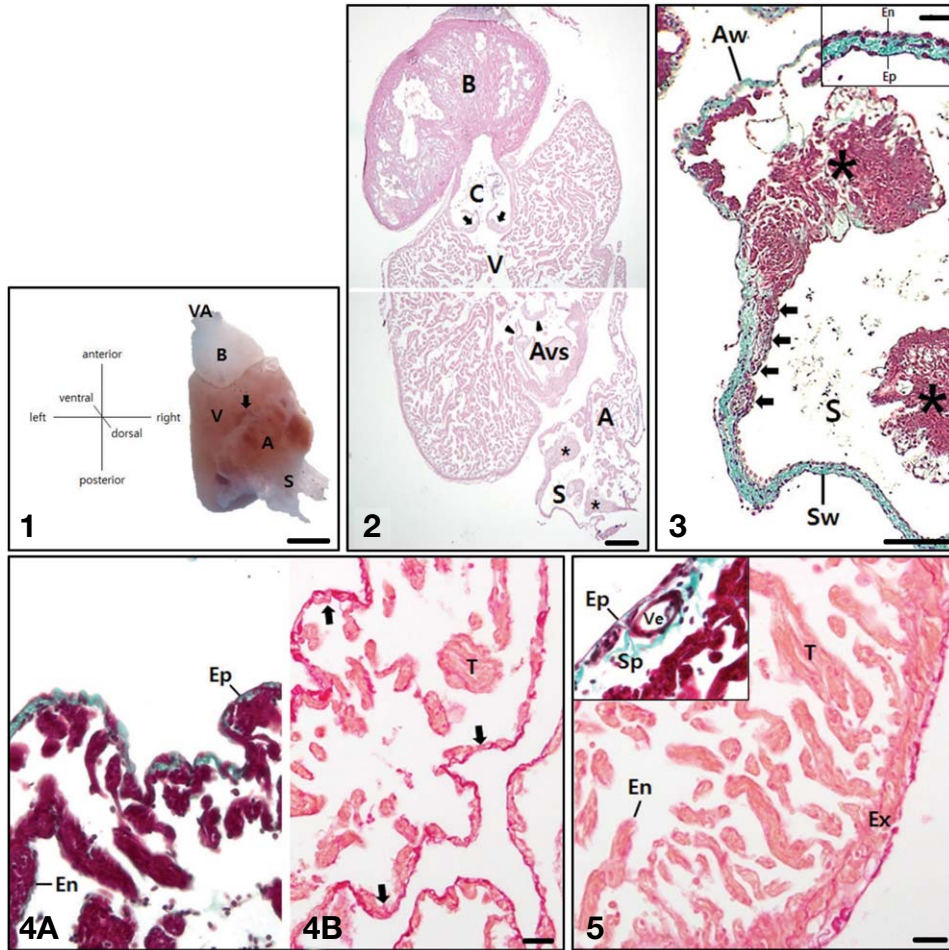
Formalin에 고정된 참붕어 심장은 흐르는 물에 세척하고 ethanol 농도 상승순으로 탈수한 다음 xylene으로 치환시켜 paraffin으로 포매하였다. Microtome (Leica 820, German)으

로 5~6 µm 두께로 자른 후 hematoxylin과 eosin으로 염색하여 광학현미경(Nikon OPTIPHOT-2, Japan)으로 관찰하였으며, 아교질은 Masson's trichrome 염색과 picrosirius red 염색(Sheehan and Hrapchak, 1980)으로 확인하였다. 그리고 탄력소는 elastic stain kit (Sigma, USA)을 이용하여 염색한 후 광학현미경(Nikon OPTIPHOT-2, Japan)으로 관찰하였다. Paraffin section에서는 동맥구 외벽의 조직학적 구조가 뚜렷하지 않아 glutaraldehyde로 고정된 심장을 2% osmium tetroxide (OsO<sub>4</sub>)로 후고정하여 ethanol 농도 상승순으로 탈수한 후 propylene oxide로 치환하고 epon 혼합액에 포매한 다음 ultramicrotome (Leica UITRACUT E, German)을 사용하여 semi-thin section (1 µm)하고 toluidine blue로 염색하여 광학현미경(Nikon OPTIPHOT-2, Japan)으로 관찰하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 정맥동

참붕어의 심장은 정맥동, 심방, 심실 및 동맥구가 연속으로 배열되어 있었다(Figs. 1, 2). 정맥동과 심방은 혈액의 역류를 막는 동방판막(sinoatrial valve)에 의해 구분되었으며(Figs. 2, 3), 정맥동의 외벽은 심내막, 심근층 및 심외막으로 구분되었다(Fig. 3). 심내막은 한 층의 심내막 세포(endocardial cell)들로 이루어져 있었으며, 심근층은 대부분이 아교질이고 아교질 사이에 세포들이 드물게 흩어져서 분포하였으나 다발을 이루지는 않았고, 심외막은 한 층의 심외막 세포(epicardial cell)들로 구성되었다. 특히, 심근층의 아교질은 정맥동 외벽 두께의 대부분을 차지하였다(Fig. 3). 경골어류에서 정맥동의 심근층은 잉어과의 *Danio rerio* (Menke *et al.*, 2011)와 *Carassius auratus* (Garofalo *et al.*, 2012)에서는 본 실험에 사용된 참붕어와 유사하게 대부분 아교질로 구성되어 있으나, 가자미과(Pleuronectidae)의 *Pleuronectes platessa*는 아교질 사이에 심근 다발들이 드물게 분포하고(Santer and Cobb, 1972), 뱀장어과(Anguillidae)의 *Anguilla anguilla*는 대부분이 심근이며(Farrell and Jones, 1992), 잉어과의 *Cyprinus carpio*는 심근이 평활근세포로 대체되는(Yamauchi, 1980) 등의 구조적 차이를 보였다. 정맥동의 심근층에서 심근의 비율이 높아질수록 심장의 심박수는 감소하고, 높은 심박수를 필요로 하는 어류는 정맥동의 심근층에서 심근 비율이 낮아지는 경향을 보인다(Jensen *et al.*, 2014). 따라서 서식환경 등에 따라 정맥동의 조직학적 구조가 차이를 보일 것으로 생각되며 본 실험에 사용된 참붕어 정맥동의 조직학적 구조는 무리지어 헤엄쳐 다니는 습성과 용존산소가 부족한 환경에서도 서식할 수 있도록 적응된 결과로 생각된다.



**Fig. 1.** External view of the heart of *Pseudorasbora parva*. A, atrium; Arrow, B, bulbus arteriosus; S, sinus venosus; atrioventricular segment or atrioventricular region; V, ventricle; VA, ventral aorta. Scale bar: 1 mm.

**Fig. 2.** Longitudinal section of the heart of *Pseudorasbora parva* stained with hematoxylin and eosin. A, atrium; Arrows, bulboventricular valve or conus valve; Arrow heads, atrioventricular valve; Asterisks, sinoatrial valve; Avs, atrioventricular segment or atrioventricular region; B, bulbus arteriosus; C, conus arteriosus; S, sinus venosus; V, ventricle. Scale bar: 200  $\mu$ m.

**Fig. 3.** Longitudinal section of the sinus venosus. Arrows, specialized rings of tissue; Asterisks, sinoatrial valve; Aw (epicardium and subepicardium), atrium wall; Green, collagen; S, sinus venosus; Sw, sinus venosus wall. Inset: detail of sinus venosus wall. En, endocardium; Ep, epicardium; Myocardial layer, the space between the endocardium and epicardium. Masson's trichrome staining. Scale bar: 100  $\mu$ m (inset, 20  $\mu$ m).

**Fig. 4.** Longitudinal section of the atrium. (A) Masson's trichrome staining. Green, collagen in subepicardium; En, endocardium; Ep, epicardium. (B) Picosirius red staining. Arrows, external rim of myocardium; Red, collagen; T, trabecula. Scale bar: 20  $\mu$ m.

**Fig. 5.** Longitudinal section of the ventricle. Picosirius red staining. En, endocardium; Ex, external layer of thin compact trabeculae; Green, collagen; T, Trabecula. Inset: vessel in subepicardium. Masson's trichrome staining. Ep, epicardium; Red, collagen; Sp, subepicardium; Ve, vessel. Scale bar: 20  $\mu$ m.

참붕어의 정맥동과 심방의 연결부위에는 고리 모양의 조직이 분포하였는데 (Fig. 3), 이 조직은 잉어과 *C. auratus* (Garofalo *et al.*, 2012)와 송어과 (Mugilidae) *Mugil cephalus* (Zaccone, *et al.*, 2010)의 정맥동과 심방의 연결부위에서도 발견되며, 이곳에는 신경이 밀집되어 있어 박동원 (pacemaker) 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

## 2. 심방

참붕어의 심방은 심내막, 심근층, 심외막하층 및 심외막으

로 구분되었고, 심근층은 소주들을 형성하여 해면성 심근을 이루고 있었으며, 한 층의 심내막 세포들이 소주들을 덮고 있었다. 얇은 심근층에 의해서 형성된 비연속적인 테두리가 심외막하층과 인접한 부분에서 해면성 심근을 둘러싸고 있었다. 심방의 심외막하층과 소주에는 아교질이 분포하였으며, 심외막하층에서 아교질의 분포가 더 뚜렷하였다 (Fig. 4A, B). 참붕어 심방의 조직학적 구조는 광학현미경 관찰에서 일반적인 경골어류와 유사하였으나 (Icardo, 2012) 미세 구조적 연구가 필요할 것으로 생각된다.

### 3. 심실

참붕어 심실의 심근층은 해면성 심근으로만 구성되었으며 조직학적으로 심방과 동일한 층으로 구분되었으나, 해면성 심근의 소주들은 심방보다 치밀하게 분포하였으며, 심외막하층과 만나는 부분에서는 해면성 심근의 소주들보다 얇은 소주들이 더 치밀하게 조직화되어 외층(external layer)을 형성하였다. 소주에는 아교질이 분포하였는데 외층을 이루는 소주에 더 많이 분포하였다. 심외막하층에서 아교질은 소주에서의 분포보다 많았다(Fig. 5). 경골어류의 심실은 해면성 심근으로 구성된 종과 해면성 심근과 치밀성 심근이 층을 이루어 구성된 종으로 구분된다. 남극빙어과(Channichthyidae)의 *Chaenocephalus aceratus* (Harrison et al., 1991), 도미과(Sparidae)의 *Sparus auratus* (Icardo et al., 2005) 및 시클리과(Cichlidae)의 tilapia (*Oreochromis niloticus* × *mosambicus* × *hornorum*) (Pieperhoff et al., 2009) 등은 참붕어와 유사하게 해면성 심근으로 구성되었으며, 잉어과의 *C. auratus* (Garofalo et al., 2012), 연어과(Salmonidae)의 *Oncorhynchus nerka*와 *O. mykiss* (Pieperhoff et al., 2009) 및 세라살무스과(Serrasalmidae)의 *Piaractus mesopotamicus* (Simões et al., 2002) 등은 바깥쪽의 치밀성 심근층과 안쪽의 해면성 심근층으로 구성되어 있다고 알려져 있다. 해면성 심근은 소주들에 의해 심실이 몇 개의 작은 공간으로 나뉘어져 각 공간들이 동시에 수축함으로써 심실의 펌프작용을 적절히 유지시키고, 심실에 가해지는 물리적 스트레스를 분산시켜 주는 기능을 한다(Icardo et al., 2005). 활동적인 어류에서는 수축 기능을 향상시키기 위해 해면성 심근을 둘러싸는 치밀성 심근층이 존재하기도 한다(Farrell and Jones, 1992). 따라서 참붕어 심실의 심근층에서 외층은 비록 치밀성 심근층은 아니지만 치밀성 심근층과 같은 기능을 하여 참붕어 심실의 수축력을 증가시키는 구조로 생각된다.

참붕어의 심방과 심실사이의 방실편막(atrioventricular valve)이 관찰되었고(Fig. 2), 심실의 심외막하층에서는 혈관이 관찰되었다(Fig. 5). 심실이 해면성 심근으로 구성된 종들은 일반적으로 관상혈관을 가지고 있지 않지만 일부 종에서는 심실의 심외막하층에 혈관이 분포하는 것으로 알려져 있으나(Harrison et al., 1991; Icardo et al., 2005), 그 기능은 밝혀지지 않았다(Icardo, 2012).

### 4. 동맥구

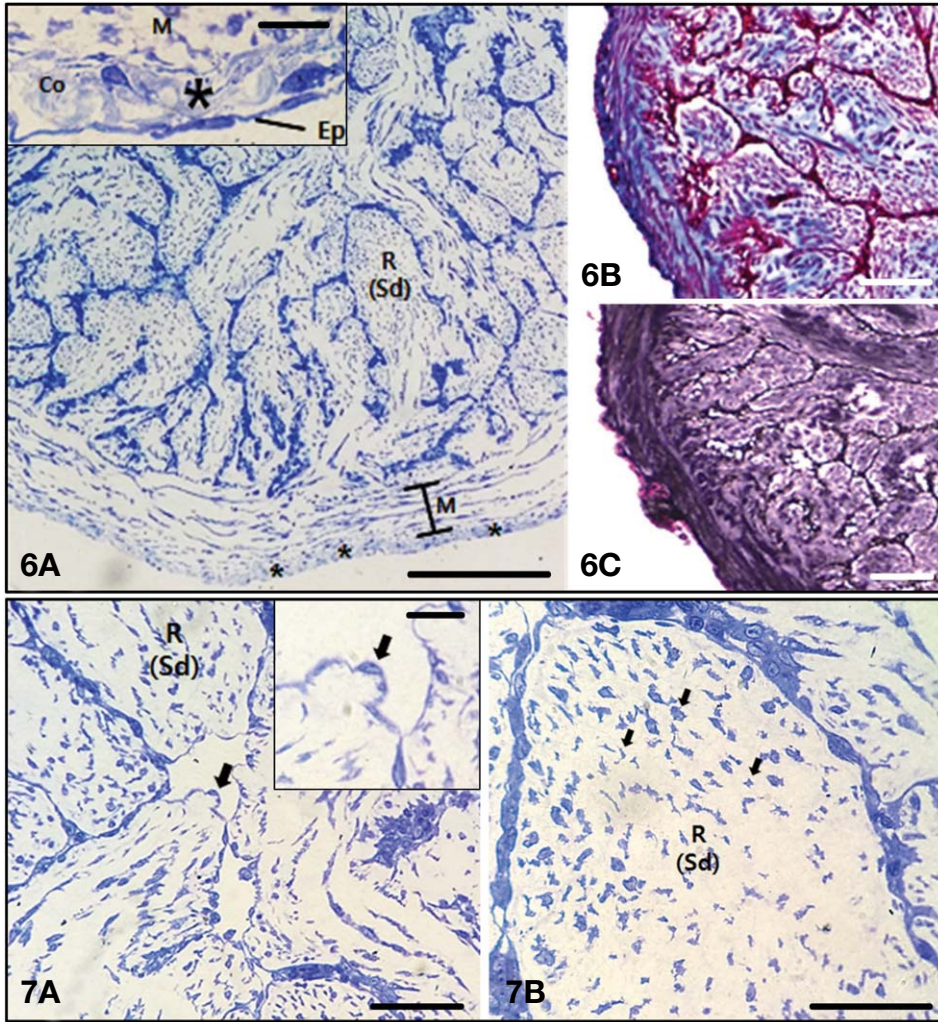
참붕어 동맥구의 외벽은 심내막, 심내막하층, 중간층, 심외막하층 및 심외막으로 구분되었고(Figs. 6A, 7A), 심실과 동맥구의 연결부위인 동맥원추(conus arteriosus)에는 구실판막(bulboventricular valve 또는 conus valve)이 관찰되었다(Fig. 2). 동맥구의 심내막하층은 이랑(ridge)을 형성하고 있었으며, 이랑의 표면은 심내막이 덮고 있었다(Figs. 6A, 7A).

심내막 세포는 블록한 모양이었으며, 핵은 세포막에 가깝게 위치하고 있었다(Fig. 7A). 이랑들은 동맥구 벽 두께의 약 70~80%를 차지하고 있었으며, 이랑들의 직경과 길이는 매우 다양했다. 이랑의 끝 부분은 둥글었으며, 이랑의 바닥 부분에서부터 끝 부분에 걸쳐 여러 곳에서 주머니 모양의 팽대부가 관찰되었다(Figs. 6A, 7A). 남극빙어과의 *Chionodra* *co hamatus*와 *Chaenocephalus aceratus*, 남극암치과(Nototheniidae)의 *Trematomus bernacchii*, *Notothenia coriiceps* 및 *Dissosticus mawsonii*, 뱀장어과의 *A. anguilla*, 바리과(Serranidae)의 *Serranus cabrilla*, 전갱이과(Carangidae)의 *Trachurus trachurus*, 도미과의 *Sparus pagrus*와 *Pagellus acarne* (Icardo et al., 2000b), 잉어과의 *D. rerio* (Hu et al., 2001)와 *C. auratus* (Garofalo et al., 2012), 버들붕어과(Anabantidae)의 *Anabas testudineus* (Munshi et al., 2001), 고등어과(Scombridae)의 *Thunnus albacares*와 *T. obesus* 및 청새치과(Istiophoridae)의 *Makaira nigricans* (Braun et al., 2003) 등의 연구에서 동맥구 이랑들의 모양과 배열 형태는 종 특이적이었으며, 본 실험에 사용된 참붕어 동맥구의 이랑 모양과 배열 형태도 보고된 종들과는 다르게 나타났다. 그러나 국내에서 서식하는 경골어류에서 동맥구의 구조가 알려져 있지 않아 많은 종에서의 비교연구를 통해 종 특이성을 판단해야 할 것으로 생각된다. 이랑의 구조적 차이가 기능적으로 어떻게 차이를 보이는지는 밝혀지지 않았다(Icardo, 2012).

심내막하층의 세포들은 모양이 불규칙했고 무리지어 분포하지는 않았으며(Fig. 7B), 심내막하층에는 아교질과 탄력소가 분포하였다(Fig. 6B, C). 동맥구의 중간층은 벽 두께의 20~30% 정도를 차지하고 있었으며, 세포들은 배열방향이 다르게 불규칙한 층을 이루었고(Fig. 6A), 아교질과 탄력소가 관찰되었는데, 탄력소는 심내막하층보다 더 많이 분포하였다(Fig. 6B, C). 경골어류의 동맥구는 심실이 수축할 때 팽창되면서 심실로부터 배출된 혈액을 저장하고, 심실이 이완되는 동안 팽창된 동맥구가 본래의 모양으로 되돌아오면서 동맥구의 혈액을 내보낸다. 이는 아가미 혈관이 심실의 수축기에 형성되는 강한 혈압으로부터 손상되는 것을 방지하고 심실의 이완기에도 혈액의 흐름이 지속적으로 일어나도록 하는 중요한 기능을 한다(Braun et al., 2003). 또한, 신경전달물질(neurotransmitter)과 측분비인자(paracrine factor) 등이 동맥구의 수축에 직접 관여하여 혈액의 흐름을 조절한다고 알려져 있다(Evans et al., 2003). 따라서 참붕어의 동맥구는 외벽이 두껍고 조직에 아교질과 탄력소가 풍부하여 환경변화에 따라 혈액의 흐름을 적절히 조절할 수 있는 구조로 생각되며, 이는 참붕어가 용존산소가 부족한 환경에서도 서식할 수 있도록 중요한 역할을 수행하는 것으로 판단된다.

심외막하층은 매우 얇았으며 치밀한 파상의 아교질과 탄력소가 분포하였고, 아교질과 탄력소 사이에 분포하는 세포





**Fig. 6.** Transverse sections of the bulbus arteriosus. (A) Semi-thin section stained with toluidine blue. Asterisks, subepicardium; M, middle layer; R (Sd), ridge (subendocardium). Inset: detail of subepicardium. Co, Collagen; Ep, epicardium. (B) Masson's trichrome staining. Blue, collagen. (C) Elastin staining. Black, elastin. Scale bars: (A) 200  $\mu$ m (inset, 10  $\mu$ m); (B), (C) 100  $\mu$ m.

**Fig. 7.** Transverse semi-thin sections of the bulbus arteriosus stained with toluidine blue. (A) Endocardial cell of endocardium. Arrow, endocardial cell; R (Sd), ridge (subendocardium). Inset: detail of endocardial cell. Arrow, endocardial cell (B) Distribution of ridge cells (subendocardial cells) in ridge (subendocardium). Arrows, ridge cells; R (Sd), ridge (subendocardium). Scale bars: (A) 50  $\mu$ m (inset, 10  $\mu$ m); (B) 100  $\mu$ m.

들은 불규칙한 모양이었으며, 심외막은 한 층의 편평한 세포들로 구성되었다(Fig. 6A). 심외막하층에는 일반적으로 아교질이 풍부하며, 여러 종류의 세포들이 분포하는데, 이 세포들 중 일부는 면역반응과 관련이 있을 것으로 알려졌다(Icardo *et al.*, 2000b).

결론적으로 경골어류는 습성, 운동성, 생활양식 및 서식환경 등의 종합적인 요인에 따라 혈액을 적절하게 공급하기 위하여 정맥동, 심방, 심실 및 동맥구의 구조가 다양한 차이를 보일 것으로 생각되며, 참붕어의 정맥동에서 심박수를 증가시키는 구조, 심실에서 수축력을 증가시키는 구조 및 동맥구에서 아가미로의 혈액 흐름에 대한 조절 능력을 향상시키는 구조는 무리지어 헤엄쳐 다니는 습성과 용존산소

가 부족한 서식환경 등에 적응한 결과로 생각된다.

## 요 약

참붕어 심장의 조직학적 구조를 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 참붕어의 심장은 정맥동, 심방, 심실 및 동맥구가 연속적으로 배열되어 있었다. 정맥동은 조직학적으로 심내막, 심근층, 심외막층으로 구분되었고, 심방과 심실은 심내막, 심내막하층, 심외막하층 및 심외막으로 구분되었으며, 동맥구는 심내막, 심내막하층, 중간층, 심외막하층 및 심외막으로 구분되었다. 정맥동과 심방, 심방과 심실 및 심실과 동

맥구 사이에는 판막이 존재하였다. 정맥동은 대부분 아교질로 구성된 외벽을 가지고 있었으며 정맥동과 심방의 연결 부위에는 고리 모양의 조직이 분포하였다. 심방은 얇은 심근층에 의해서 형성된 비연속적인 테두리가 소주들에 의해 형성된 해면성 심근을 둘러싸고 있었고, 심외막하층과 소주에는 아교질이 분포하였다. 심실의 심근층은 해면성 심근으로 이루어져 있고, 심외막하층에는 혈관이 분포하였으며, 심실의 심외막하층과 소주에는 아교질이 분포하였다. 동맥구에서 심내막하층에 의해 형성된 이랑은 직경과 길이가 매우 다양했고, 심내막 세포는 블록한 모양이었으며, 심내막하층의 세포들은 불규칙한 모양이었으나 무리를 지어 분포하지는 않았다. 중간층의 세포들은 배열방향이 다르게 불규칙한 층을 이루었고, 심외막하층에서는 서로 다른 모양의 세포들이 관찰되었다. 동맥구의 심내막하층, 중간층 및 심외막하층에는 아교질과 탄력소가 풍부하였고, 심외막은 한 층의 편평한 세포들로 이루어져 있었다.

### 인 용 문 헌

- Braun, M.H., R.W. Brill, J.M. Gosline and D.R. Jones. 2003. Form and function of the bulbus arteriosus in yellowfin tuna (*Thunnus albacares*), bigeye tuna (*Thunnus obesus*) and blue marlin (*Makaira nigricans*): static properties. *J. Exp. Biol.*, 206: 3311-3326.
- Evans, D.H., A.C. Harrie and M.S. Kozlowski. 2003. Characterization of the effects of vasoactive substances on the bulbus arteriosus of the eel, *Anguilla rostrata*. *J. Exp. Zool. A Comp. Exp. Biol.*, 297: 45-51.
- Farrell, A.P. and D.R. Jones. 1992. The heart. In: Hoar, W.S., D.J. Randall and A.P. Farrell (eds.), *Fish physiology*, vol XII, The cardiovascular system Part A. Academic, San Diego, pp. 1-87.
- Garofalo, F., S. Imbrogno, B. Tota and D. Amelio. 2012. Morpho-functional characterization of the goldfish (*Garassius auratus* L.) heart. *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.*, 163: 215-222.
- Grimes, A.C., H.A. Stadt, I.T. Sheperd and M.L. Kirby. 2006. Solving an enigma: arterial pole development in the zebrafish heart. *Dev. Biol.*, 290: 265-276.
- Harrison, P., G. Zummo, F.B. Tota and I.A. Johnston. 1991. Gross anatomy, myoarchitecture, and ultrastructure of the heart ventricle in the haemoglobinless icefish *Chaenocephalus aceratus*. *Can. J. Zool.*, 69: 1339-1347.
- Hu, N., H.J. Yost and E.B. Clark. 2001. Cardiac morphology and blood pressure in the adult zebrafish. *Anat. Rec.*, 264: 1-12.
- Icardo, J.M. 2006. Conus arteriosus of the teleost heart: dismissed, but not missed. *Anat. Rec. A*, 288: 900-908.
- Icardo, J.M. 2012. The teleost heart: A morphological approach. In: Wang, T. and D. Sedmera (eds.), *In ontogeny and phylogeny of the vertebrate heart*, Springer-Verag, New York Inc., pp. 35-53.
- Icardo, J.M. and E. Colvee. 2011. The atrioventricular region of the teleost heart. A distinct heart segment. *Anat. Rec.*, 294: 236-242.
- Icardo, J.M., E. Colvee, M.C. Cerra and B. Tota. 1999a. Bulbus arteriosus of Antarctic teleosts. I. The white-blooded *Chionodraco hamatus*. *Anat. Rec.*, 254: 396-407.
- Icardo, J.M., E. Colvee, M.C. Cerra and B. Tota. 1999b. Bulbus arteriosus of Antarctic teleosts. II. The red-blooded *Trematomus bernacchii*. *Anat. Rec.*, 256: 116-126.
- Icardo, J.M., E. Colvee, M.C. Cerra and B. Tota. 2000a. Light and electron microscopy of the bulbus arteriosus of the European eel (*Anguilla anguilla*). *Cells Tissues Organs*, 167: 184-198.
- Icardo, J.M., E. Colvee, M.C. Cerra and B. Tota. 2000b. The bulbus arteriosus of stenothermal and temperate teleosts: a morphological approach. *J. Fish Biol.*, 57: 121-135.
- Icardo, J.M., S. Imbrogno, A. Gattuso, E. Colvee and B. Tota. 2005. The heart of *Sparus auratus*: a reappraisal of cardiac functional morphology in teleosts. *J. Exp. Zool. A Comp. Exp. Biol.*, 303: 665-675.
- Jensen, B., B.J.D. Boukens, T. Wang, A.F.M. Moorman and V.M. Christoffels. 2014. Evolution of the sinus venosus from fish to human. *J. Cardiovasc. Dev. Dis.*, 1: 14-28.
- Leknes, I.L. 1980. Ultrastructure of atrial endocardium and myocardium in three species of gadidae (Teleostei). *Cell Tissue Res.*, 210: 1-10.
- Leknes, I.L. and T.S. Saetersdal. 1980. On the ultrastructure of the sinus venosus in *Chimara monstrosa* L. (Elasmobranchii: Holocephali). *Zoomorphology*, 96: 183-189.
- Menke, A.L., J.M. Spitsbergen, A.P. Wolterbeek and R.A. Woutersen. 2011. Normal anatomy and histology of the adult zebrafish. *Toxicol. Pathol.*, 39: 759-775.
- Munshi, J.S.D., K.R. Olson, P.K. Roy and U. Ghosh. 2001. Scanning electron microscopy of the heart of the climbing perch. *J. Fish Biol.*, 59: 1170-1180.
- Pieperhoff, S., W. Bennett and A.P. Farrell. 2009. The intercellular organization of the two muscular systems in the adult salmonid heart, the compact and the spongy myocardium. *J. Anat.*, 215: 536-547.
- Santer, R.M. 1985. Morphology and innervation of the fish heart. *Adv. Anat. Embryol.* 89: 1-102.
- Santer, R.M. and J.L. Cobb. 1972. The fine structure of the heart of the teleost, *Pleuronectes platessa* L. *Z. Zellforsch. Mikrosk. Anat.*, 131: 1-14.
- Schib, J.L., J.M. Icardo, A.C. Durán, A. Guerrero, D. López, E. Colvee, A.V. de Andrés and V. Sans-Coma. 2002. The conus arteriosus of the adult gilthead seabream (*Sparus auratus*). *J. Anat.*, 201: 395-404.
- Sheehan, D.C. and B.B. Hrapchak. 1980. Connective tissue and muscle fiber stains. *Enrline, M.D., Theory and practice of*

- histotechnology, 2nd ed., The C.V. Mosby Company, London, pp. 181-201.
- Simões, K., C.A. Vicentini, A.M. Orsi and C. Cruz. 2002. Myo-architecture and vasculature of the heart ventricle in some freshwater teleosts. *J. Anat.*, 200: 467-475.
- Yamauchi, A. 1980. Fine structure of the fish heart. Bourne, G., Heart and heart-like organs, vol. 1, Academic, New York, pp. 119-148.
- Zaccone, G., A. Mauceri, M. Maisano, A. Giannetto, V. Parrino and S. Fasulo. 2010. Postganglionic nerve cell bodies and neurotransmitter localization in the teleost heart. *Acta. Histochem.*, 112: 328-336.