KOREAN JOURNAL OF ICHTHYOLOGY, Vol. 27, No. 3, 228-232, September 2015
ISSN: 1225-8598 (Print), 2288-3371 (Online)

Received: June 8, 2015
Revised: September 7, 2015
Accepted: September 25, 2015

바다빙어과 빙어(*Hypomesus nipponensis*)의 심실 구조

*박노관 · 류동석**

청주대학교 생명과학과

The Structure of the Ventricle in the Heart of the Pond Smelt, *Hypomesus nipponensis* (Osmeridae) ***by No Kwan Park and Dong Suck Reu**** (Department of Life Science, Cheongju University, Cheongju, Chungbuk 28503, Korea)

ABSTRACT The structure of the ventricle in the heart of *Hypomesus nipponensis* was investigated by light and scanning electron microscope. The heart consisted of four consecutive chambers, the sinus venosus, atrium, ventricle and bulbus arteriosus. The wall of the ventricle was divided into endocardium, myocardium, subepicardium and epicardium. The valves were observed in the artrioventricular and bulboventricular junctions. The ventricular myocardium was an entirely spongy without coronary vessels. The trabecular network was formed with lumina included a central lumen and the trabecula was cylindrical shape. Collagen distribution was apparent in the subepicardium, artrioventricular valve and bulboventricular valve. But in the trabeculae, collagen distribution was observed partly in the base of the ventricle. Especially, the endocardial bridges were observed between trabeculae. These results might be considered that the structure of the ventricle in the heart of pond smelt is adapted to sedentary habit associated with its habitat and lifestyle.

Key words: Structure, teleost heart, *Hypomesus nipponensis*

서 론

경골어류의 심장은 정맥동(sinus venosus), 심방(atrium), 심실(ventricle) 및 동맥구(bulbus arteriosus)로 구성되어 있다. 심실은 심방의 수축에 의해 유입된 혈액을 동맥구를 거쳐 복대동맥으로 배출하는 펌프기능을 하며, 심방과 심실 그리고 심실과 동맥구 사이에는 혈액의 역류를 방지하는 판막이 존재한다(Santer, 1985; Farrell and Jones, 1992). 심실의 외벽은 심내막(endocardium), 심내막하층(subendocardium), 심근층(myocardium), 심외막하층(subepicardium) 및 심외막(epicardium)으로 구분되는데 심내막하층은 광학현미경 관찰에서는 심내막과 뚜렷이 구분되지 않는다(Santer and Cobb, 1972). 경골어류 심장의 심실은 모양, 해면성 심근(spongy myocardium)과 치밀성 심근(compact myocardium)의 구성 비율, 조직학적 구조 및 관상혈관(coronary vessel)의 분포 등이 차이를 보이는 것으로 알려졌다(Santer, 1985; Farrell and Jones, 1992; Icardo, 2012).

심실은 관 모양(tubular shape), 주머니 모양(sac-like shape) 및 피라미드 모양(pyramidal shape)으로 구분된다(Santer, 1985). 심실의 심근층은 해면성 심근으로만 이루어져 있고 관상혈관(coronary vessel)이 분포하지 않는 I형, 안쪽이 해면성 심근이고 바깥쪽은 치밀성 심근으로 이루어져 있으며 관상혈관이 치밀성 심근에만 분포하는 II형, 안쪽 해면성 심근과 바깥쪽 치밀성 심근으로 이루어져 있으며 관상혈관이 해면성 심근과 치밀성 심근 모두에 분포하는 III형 그리고 III형과 심근들의 구성과 관상혈관의 분포는 같지만 치밀성 심근의 구성 비율이 심실 질량의 30% 이상인 IV형으로 분류된다(Tota, 1989; Tota and Garofalo 2012).

심실의 심외막하층에는 아교질(collagen)이 분포하여 심실의 탄력성을 증가시키고 심실의 과도한 형태변화를 억제시키

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

며(Icardo *et al*., 2005), 심근층에도 아교질이 분포하여 심근층을 지지해주는 골격(scaffold) 역할을 한다고 알려져 있으나(Sánchez-Quintana *et al*., 1995), 이러한 아교질의 존재와 역할에 대해서는 분명하지 않다(Icardo, 2012).

척추동물의 심장에 관한 많은 연구에서 경골어류를 동물모델로 사용하고 있으며(Yelon, 2001; Lepilina *et al*., 2006; Taneda *et al*., 2010) 어류의 생태생리학적 연구는 종 보존을 위해 필요하다(Jensen *et al*., 1993). 이러한 연구를 수행하는데 있어 어류의 심장 구조에 관한 이해가 중요하지만 국내에 서식하는 경골어류의 심장 구조에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내에 서식하는 바다빙어과(Osmeridae) 빙어(*Hypomesus nipponensis*)의 심실 구조를 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰하여 어류 심장의 생태생리학적 연구에 관한 기초자료를 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험재료

2015년 4월에 충청북도 청주시 청원구 내수읍 비상저수지에서 채집한 전장 81.9~98.2±6.1 mm (n=10)의 빙어 성체를 실험재료로 사용하였다. 채집된 빙어를 실험실로 운반한 후 혈액 방출에 의한 심장의 형태변화를 최소화하기 위해 마취하여(MS-222, Sigma) 심장을 노출시켰으며, 0.1 M phosphate buffer (pH 7.4)로 조정된 4% formalin과 2.5% glutaraldehyde를 각각 광학현미경 시료와 주사전자현미경 시료에 뿌려주면서 형태를 유지시킨 후 적출하였고, 적출된 심장들은 각각의 고정액으로 고정하여 실험재료로 사용하였다. 본 실험은 청주대학교 동물실험윤리위원회의 승인을 받은 후 수행하였다(승인번호 CJUIACUC-B151002).

2. 실험방법

Formalin에 고정된 빙어 심장은 흐르는 물에 세척하고 ethanol 농도 상승 순으로 탈수한 다음 xylene으로 치환시켜 paraffin으로 포매하였다. Microtome (Leica 820, German)을 사용하여 5~6 μm 두께로 자른 후 hematoxylin과 eosin으로 염색하였으며, 아교질은 picrosirius red 방법(Sheehan and Hrapchak, 1980)으로 염색하여 광학현미경(Nikon OPTIPHOT-2, Japan)으로 관찰하였다. Glutaraldehyde로 고정된 심장은 2% osmium tetroxide (OsO_4)로 후고정하여 ethanol 농도 상승 순으로 탈수한 후, isoamyl acetate로 치환하여 건조시키고 gold coating (Polaron Range SC7640 sputter coater, USA)하여 주사전자현미경(Zeiss FE-SEM ULTRA/Plus, Germany)으로 관찰하였다.

결과 및 고찰

본 연구에서 빙어의 심장은 혈액이 흐르는 방향에 따라 정맥동, 심방, 심실 및 동맥구가 연속적으로 배열되어 있었다(Fig. 1). 심장의 심실 외벽은 심내막, 심근층, 심외막하층 및 심외막으로 구분되었고(Figs. 4, 6, 9) 심방과 심실 사이에는 방실판막(atrioventricular valve; Figs, 2, 3, 5, 8)이 분포하였으며, 심실과 동맥구 사이에서도 구실판막(bulboventricular valve 또는 conus valve; Figs. 2, 5)이 관찰되어 다른 경골어류의 심실 구조(Santer, 1985; Farrell and Jones, 1992; Park and Reu, 2015)와 유사하였다.

경골어류의 심실구조는 분류학적 유연관계 보다는 생활양식 및 서식지 등에 따라 구조적 차이를 보인다고 알려져 있다(Santer, 1985; Farrell and Jones, 1992; Icardo, 2012). 가자미과(Pleuronectidae), *Pleuronectes platessa*처럼 일정한 곳에 주로 머물러 생활하는 종들에서는 심실이 주머니 모양 또는 관모양이며 심근층은 관상혈관이 없는 해면성 심근으로만 구성되어 있는 I형에 속하는 경향을 보이고, 활동성이 큰 고등어과(Scombridae), *Scomber scombrus*와 같은 종에서는 피라미드 모양이며 심근층은 안쪽의 해면성 심근과 바깥쪽의 치밀성 심근으로 구성되어 있고 관상혈관이 분포하는 II, III 및 IV형 중 한 유형에 속하는 경향을 보인다(Santer and Greer-Walker, 1980; Santer *et al*., 1983; Tota *et al*., 1983). 본 실험에 의하면 빙어의 심실 모양은 주머니 모양이었으며(Fig. 1), 심근층은 해면성 심근으로만 구성되었고 관상혈관이 분포하지 않아(Figs. 2, 3, 7) 전형적인 심실 I형 구조를 보였다. 이는 빙어가 동물성 플랑크톤과 곤충의 유충 등을 먹으며 육봉형이기 때문에(Kim and Park, 2002; Kim *et al*., 2005) 저산소 상태에 노출되는 확률이 적기 때문으로 생각되며 육봉형이 아닌 빙어속 다른 종과 비교하여 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

빙어의 심실은 심방과 심실이 연결되는 부위와 심실과 동맥구가 연결되는 부위에서 중심 내강(central lumen)을 형성하고 소주(trabecula)들이 여러 개의 작은 내강들을 형성하였다(Figs. 2, 3, 8). 이는 심실 I, II, III 및 IV형의 해면성 심근에서 공통적으로 나타나는 구조로 각 내강들이 동시에 수축함으로써 심실의 펌프작용을 적절히 유지시키고, 심실에 가해지는 물리적 스트레스를 분산시켜주는 기능을 하는 것으로 알려져 있다(Icardo *et al*., 2005). 회귀성 어류로 운동성이 큰 연어과(Salmonidae), *Oncorhynchus nerka*의 소주 모양이 납작하여 소주를 구성하는 세포에 산소를 확산시키는 거리를 줄여 활동성이 큰 어류에 유리하게 작용한다고 하였다(Pieperhoff *et al*., 2009). 그러나 빙어 심실의 소주는 원기둥 모양으로(Figs. 9, 10) 차이를 보였는데 이는 빙어의 비활동적 습성과 관련이 있는 것으로 보여진다.

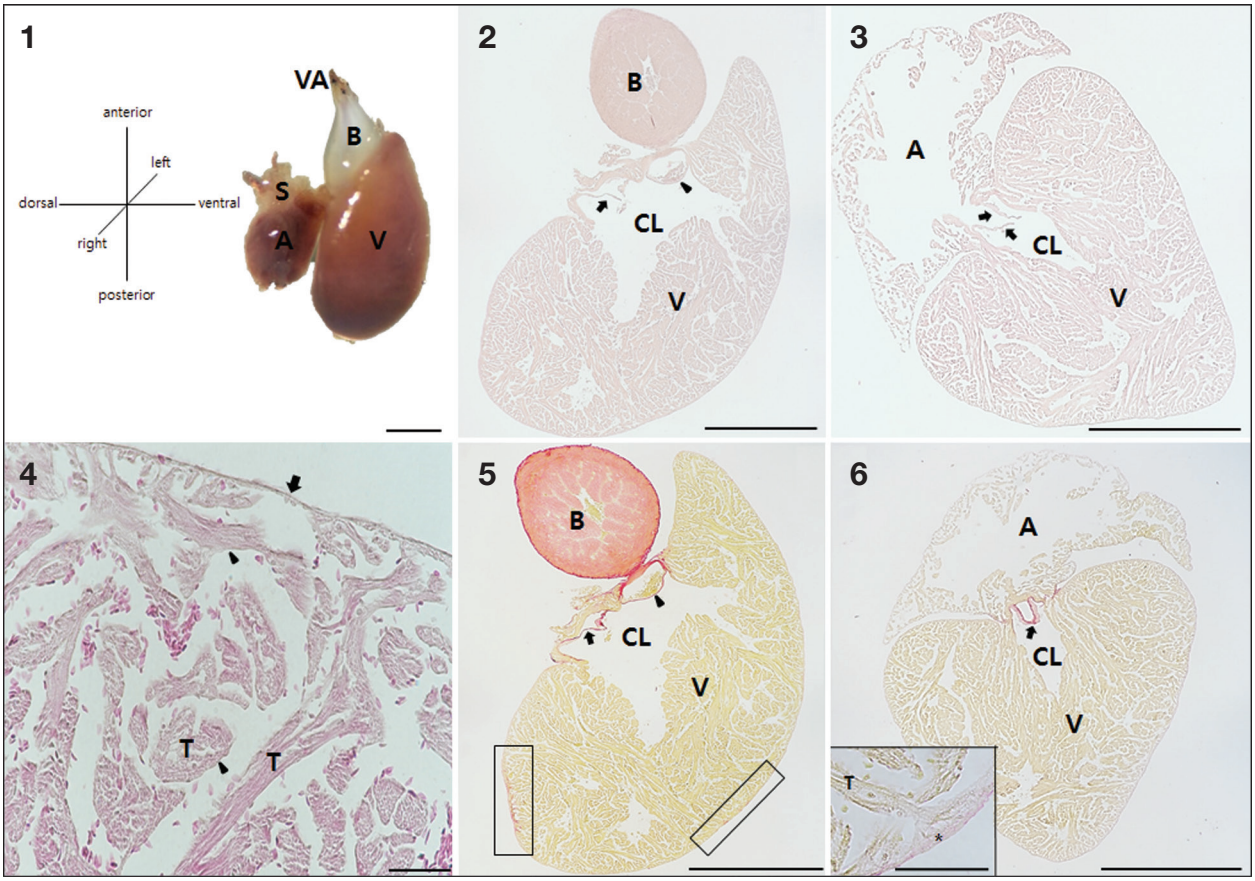

Fig. 1. External view of the heart of *Hypomesus nipponensis*. A, atrium; B, bulbus arteriosus; S, sinus venosus; V, ventricle; VA, ventral aorta. Scale bar: 1 mm.
Fig. 2. Longitudinal section of the ventricle in the heart of *H. nipponensis* stained with hematoxylin and eosin. Arrow, atrioventricular valve; Arrow head, bulboventricular valve or conus valve; B, bulbus arteriosus; CL, central lumen; V, ventricle. Scale bar: 1 mm.
Fig. 3. Transverse section of the ventricle in the heart of *H. nipponensis* stained with hematoxylin and eosin. A, atrium; Arrows, atrioventricular valves; CL, central lumen; V, ventricle. Scale bar: 1 mm.
Fig. 4. Longitudinal section of the ventricle in the heart of *H. nipponensis* stained with hematoxylin and eosin. Arrow, epicardium; Arrow heads, endocardium; T, trubecula. Scale bars: 500 μm.
Fig. 5. Longitudinal section of the ventricle in the heart of *H. nipponensis*. The distribution of collagens in trabeculated myocardium is shown in boxed areas. Arrow, atrioventricular valve; Arrow head, bulboventricular valve or conus valve; B, bulbus arteriosus; CL, central lumen; Red color, collagens; V, ventricle. Picrosirius red staining. Scale bar: 1 mm.
Fig. 6. Transverse section of the ventricle in the heart of *H. nipponensis*. A, atrium; Arrow, atrioventricular valve; CL, central lumen; Red color, collagens; V, ventricle. Inset: detail of subepicardium. Asterisk, subepicardium; Red color, collagens; T, trabecula. Scale bar: 1 mm (Inset, 500 μm).

빙어의 심장에서 방실판막(Figs. 5, 6)과 구실판막(Fig. 5)은 아교질의 분포가 뚜렷하였고 심실의 심외막하층(Fig. 6)에서도 아교질이 관찰되었다. 그러나 소주에서 아교질은 실험 개체 중 1개체에서만 심실 기저부(base)의 일부분에서 관찰되었고(Fig. 5) 다른 개체에서는 방실판막, 구실판막 및 심실의 심외막하층에서만 관찰되었다(data not shown). 심실이 피라미드 모양이며 해면성 심근과 치밀성 심근으로 구성된 도미과(Sparidae), *Pagellus centrodontus*에서는 소주를 둘러싸는 아교질이 풍부하고 주로 나선형으로 분포하여 심근의 수축능력 향상과 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Sánchez-Quintana *et al*., 1995). 따라서 빙어 심실의 소주에서 아교질의 분포가 적은 것은 저산소 상태에 대한 저항성이 떨어지는 구조로 생각된다. 그러나 한 개체의 소주에서 아교질 분포가 부분적으로 관찰되었고(Figs, 5, 8) 잉어과(Cyprinidae), *Danio rerio*의 심실에서 온도변화에 따라 아교질 분포가 차이를 보인다고 알려져 있어(Johnson *et al*., 2014), 빙어의 심실에서 계절에 따른 아교질의 분포에 관한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

특히 빙어 심실의 소주들 사이에 심내막 연결구조인 심내막교(endocardial bridge)들이 분포하였다(Fig. 10). 이와 같은 구조는 잉어과, 금붕어(*Carassius auratus*)의 심실에도 존재하는 것으로 보고되었으나(Garofalo *et al*., 2012) 구조와 기능은 정확하게 알려져 있지 않아, 심내막교에 관한 연구가 계속되어

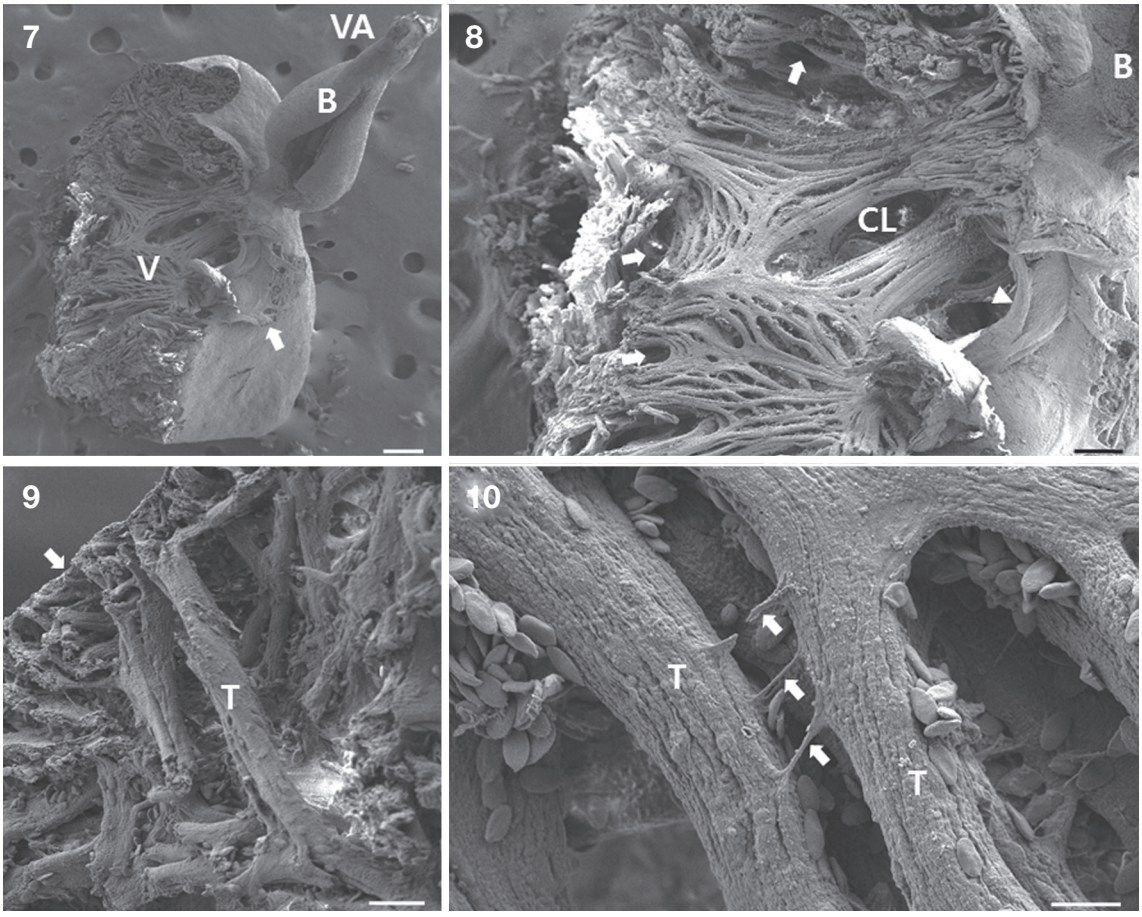

Fig. 7. A scanning electron micrograph of the heart of *H. nipponensis*. Arrow, atrioventricular segment or atrioventricular region; B, bulbus arteriosus; V, ventricle; VA, ventral aorta. Scale bar: 200 μm.
Fig. 8. A scanning electron micrograph of the ventricle in the heart of *H. nipponensis*. Arrows, small lumina: Arrow head, atrioventricular valve; B, bulbus arteriosus; CL, central lumen. Scale bar: 100 μm.
Fig. 9. A scanning electron micrograph of the ventricle in the heart of *H. nipponensis*. Arrow, epicardium; T, Trabecula. Scale bar: 20 μm.
Fig. 10. A scanning electron micrograph of the ventricle in the heart of *Hypomesus nipponensis*. Arrows, endocardial bridges; T, Trabecula. Scale bar: 10 μm.

야 할 것으로 생각된다.

국내에 서식하는 모래무지아과(Gobioninae), 참붕어(*Pseudorasbor parva*) 심실의 심근층은 전체가 해면성 심근으로 구성된 I형이었으나 II, III 및 IV형에서 나타나는 치밀성 심근층은 아니지만 소주들이 치밀하게 조직화된 외층(external layer)을 형성하였고, 심외막하층에서 관상혈관의 분포도 관찰되었으며, 심외막하층과 소주에 아교질이 풍부하였다(Park and Reu, 2015). 이는 참붕어가 빙어보다 저산소 환경에 대한 저항성이 큰 심실 구조임을 나타내는 것으로 생각된다. 따라서 같은 서식처에 서식하는 빙어와 참붕어의 심실 모양, 심근층의 구조, 관상혈관의 분포 및 아교질 분포의 차이에 대한 생태생리학적 연구가 필요할 것으로 생각된다.

결론적으로 빙어 심장의 심실은 모양, 심근층의 구조와 혈관 분포, 소주의 모양 및 아교질의 분포는 저산소 상태에 대한 저항성이 떨어지는 구조로 생각되며 이는 육봉형 빙어가 서식환경 및 생활습성 등에 적응한 결과로 생각된다.

요 약

빙어의 심실 구조를 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰하였다. 빙어의 심장은 정맥동, 심방, 심실 및 동맥구가 연속적으로 배열되어 있었다. 심실의 외벽은 심내막, 심근층, 심외막하층 및 심외막으로 구분되었고, 심방과 심실 사이의 방실판막 및 심실과 동맥구 사이의 구실판막이 관찰되었다. 심실은 주머니 모양이었으며, 심근층은 해면성 심근으로만 구성되어 있었고 관상혈관은 분포하지 않았다. 심실에서 소주들은 중심 내강과 작은 내강들을 형성하였으며, 소주는 원기둥 모양이었다. 심외막하층, 방실판막 및 구실판막에서 아교질의 분

포가 관찰되었으나 소주에서는 심실의 기저부에서 부분적으로 관찰되었다. 특히 소주들 사이에서는 심내막교가 관찰되었다. 이와 같은 결과는 육봉형 빙어가 서식환경 및 생활양식에 적응한 결과로 생각된다.

REFERENCES

Farrell, A.P. and D.R. Jones. 1992. The heart. Hoar, W.S., D.J. Randall and A.P. Farrell, 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.

Icardo, J.M. 2012. The teleost heart: A morphological approach. Wang, T. and D. Sedmera, In ontogeny and phylogeny of the vertebrate heart, Springer-Verag, New Yok Inc., pp. 35-53.

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., 303A: 665-675.

Jensen, F.B., M. Nikinmaa and R.E. Weber. 1993. Environmental perturbations of oxygen transport in teleost fishes: causes, consequences and compensations. Rankin, J.C. and F.B. Jensen, Fish Ecophysiology, Chapman & Hall, London, pp. 161-169.

Johnson, A.C., A.J. Turko, J.M. Klaiman, E.F. Johnston and T.E. Gillis. 2014. Cold acclimation alters the connective tissue content of the zebrafish (*Danio rerio*) heart. J. Exp. Biol., 217: 1868-1875.

Kim, I.S. and J.Y. Park. 2002. Freshwater fishes of Korea. Kyo-Hak Pub. Co. Ltd., Seoul, pp. 149-150. (in Korean)

Kim, I.S., Y. Choi, C.L. Lee, Y.H. Lee, B.J. Kim and J.H. Kim. 2005. Illustrated book of Korean fishes. Kyo-Hak Pub. Co. Ltd., Seoul, pp. 262-263. (in Korean)

Lepilina, A., A.N. Coon, K. Kikuchi, J.E. Holdway, R.W. Roberts, C.G. Burns and K.D. Poss. 2006. A dynamic epicardial injury response supports progenitor cell activity during zebrafish heart regeneration. Cell., 127: 607-619.

Park, N.K. and D.S. Reu. 2015. A histological study on the heart in the false dace (*Pseudorasbora parva*). Korean J. Ichthyol., 27: 26-32. (in Korean)

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.

Sánchez-Quintana, D., V. Garcia-Martinez, V. Climent and J.M. Hurle. 1995. Morphological analysis of the fish heart ventricle: myocardial and connective tissue architecture in teleost species. Ann. Anat., 177: 267-274.

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, *Pleuronecters platessa* L.. Z. Zellforch Mikrosk. Anat., 131: 1-14.

Santer, R.M. and M. Greer-Walker. 1980. Morphological studies on the ventricle of teleost and elasmobranch hearts. J. Zoo., 190: 259-272.

Santer, R.M., M. Greer-Walker, L. Emerson and P.R. Withames. 1983. On the morphology of the heart ventricle in marine teleost fish (Teleostei). Comp. Biochem. Physiol. A, 76: 453-459.

Sheehan, D.C. and B.B. Hrapchak. 1980. Connective tissue and muscle fiber stains. Entrline, M.D., Theory and practice of histotechnology, 2nd ed., The C. V. Mosby Company, London, pp. 181-201.

Taneda, Y., S. Konno, S. Makino, M. Morioka, K. Fukuda, Y. Imai, A. Kudo and A. Kawakami. 2010. Epigenetic control of cardiomyocyte production in response to a stress during the medaka heart development. Dev. Biol., 340: 30-40.

Tota, B. 1989. Myoarchitecture and vascularization of the elasmobranch heart ventricle. J. Exp. Zool. (suppl), 2: 122-135.

Tota, B., V. Cimini, G. Salvatore and G. Zummo. 1983. Comparative study of the arterial and lacunary systems of the ventricular myocardium of the elasmobranch and teleost fishes. Am. J. Anat., 167: 15-32.

Tota, B. and F. Garofalo. 2012. Fish heart growth and function: from gross morphology to cell signaling and back. Sedmera, D. and T. Wang, Ontogeny and phylogeny of the vertebrate heart, Springer, New York, pp. 55-74.

Yelon, D. 2001. Cardiac patterning and morphogenesis in the zebrafish. Dev. Dyn., 222: 552-563.