

한국산 왜물개 *Aphyocypris chinensis* 정자의 미세해부학적 구조 (Pisces: Cyprinidae)

김구환* · 안승주¹

대구보건대학 방사선과, ¹대구보건대학 임상병리과

Fine Structure of Spermatozoa of Venus Fish, *Aphyocypris chinensis* (Pisces: Cyprinidae) from Korea by Kgu-Hwan Kim* and Sung-Ju Ahn¹ (Department of Radiologic Technology, Daegu Health College, Daegu 41453, Korea; ¹Department of Clinical Pathology, Daegu Health College, Daegu 41453, Korea)

ABSTRACT Spermatozoa of *Aphyocypris chinensis* was studied by transmission electron microscopy. The investigation revealed that, spermatozoa display a round head, a small midpiece and a long tail region. In the spermatozoa, the nucleus contains highly condensed homogeneous chromatin with small electron lucent areas. The base of the nucleus is slightly invaginated laterally by the nuclear fossa which contains the proximal centriole. The two centrioles orientated at an obtus angle (130°) to each other. The midpiece encircles the flagellum and is completely separated from it by the cytoplasmic channel. The midpiece contains more than 12 mitochondria. The mitochondria are arranged in 4~5 layer and are asymmetrically distributed in the postnuclear cytoplasm. The mitochondria surround the proximal part of the flagellum. The flagellum has classical 9+2 axoneme and no lateral fins. The spermatozoa of *A. chinensis* are similar to those of other cyprinids having a spherical head with a shallow nuclear fossa, a short midpiece including the asymmetrical arrangement of mitochondria and the lateral insertion of flagellum. However, there are some differences in the orientation of centrioles and the number of the mitochondria.

Key words: Spermatozoa, ultrastructure, Cyprinidae, *Aphyocypris chinensis*

서 론

왜물개 *Aphyocypris chinensis*는 Günther (1868)에 의하여 처음 기재된 종으로 동아시아 일대에서 서식하고 있다(Kim, 1997). 한국에서는 Kim *et al.* (1985)이 본 종을 분류하면서 Leuciscinae 내에서도 다른 종과 현저한 차이가 있음을 지적하였다. 또한 Lee and Kim (1987)은 *A. chinensis*의 골격 구조의 연구를 근거로 Leuciscinae와 Cultrinae의 두 가지 형질을 공유하면서, 종 고유 형질을 지니고 있어서 계통학적으로 주목이 된다고 하였다. 한편, Kim (1997)은 본종을 Danioninae로 분류하였다. 이와 같은 선행연구들을 통해 확인한 바 *A. chinensis*

는 분류와 계통학적 위치가 주목받고 있는 종이라 할 수 있다.

동물의 정자는 종마다 구조적 특이성을 지니고 있어 종을 구분하고 계통관계를 규명하는데 유용한 자료로 활용할 수 있다(Kenzo, 1993). 어류에서도 정자의 구조를 바탕으로 한 미세구조형질을 분류와 계통분석에 활용하고 있다(Jemieson, 1991).

Cyprinidae 정자의 미세구조에 관한 연구는 Cyprininae (Bacetti *et al.*, 1984; Kim, 2008), Acheilognathinae (Guan and Afzeilus, 1991), Gobioninae (Kim *et al.*, 1998; Lee and Kim, 1998a, 1998b; Kim *et al.*, 2007a), Leuciscinae (Neznanova, 2012)에서 진행되어 왔다. *A. chinensis*가 속해 있는 Danioninae는 한국에 4속 5종이 분포하며(Kim, 1997), 이 중 *Zacco* 속에서 2종의 정자 미세구조가 밝혀져 있다(Kim, 2006; Kim *et al.*, 2006). Cyprinidae 정자의 미세구조는 구형의 머리와 짧은 증편부 그리고 긴 편모형으로 경골어류 정자의 일반적인 특징을 취하고

*Corresponding author: Kgu-Hwan Kim Tel: 82-53-320-1320,
Fax: 82-53-320-1449, E-mail: kimgh@mail.thc.ac.kr

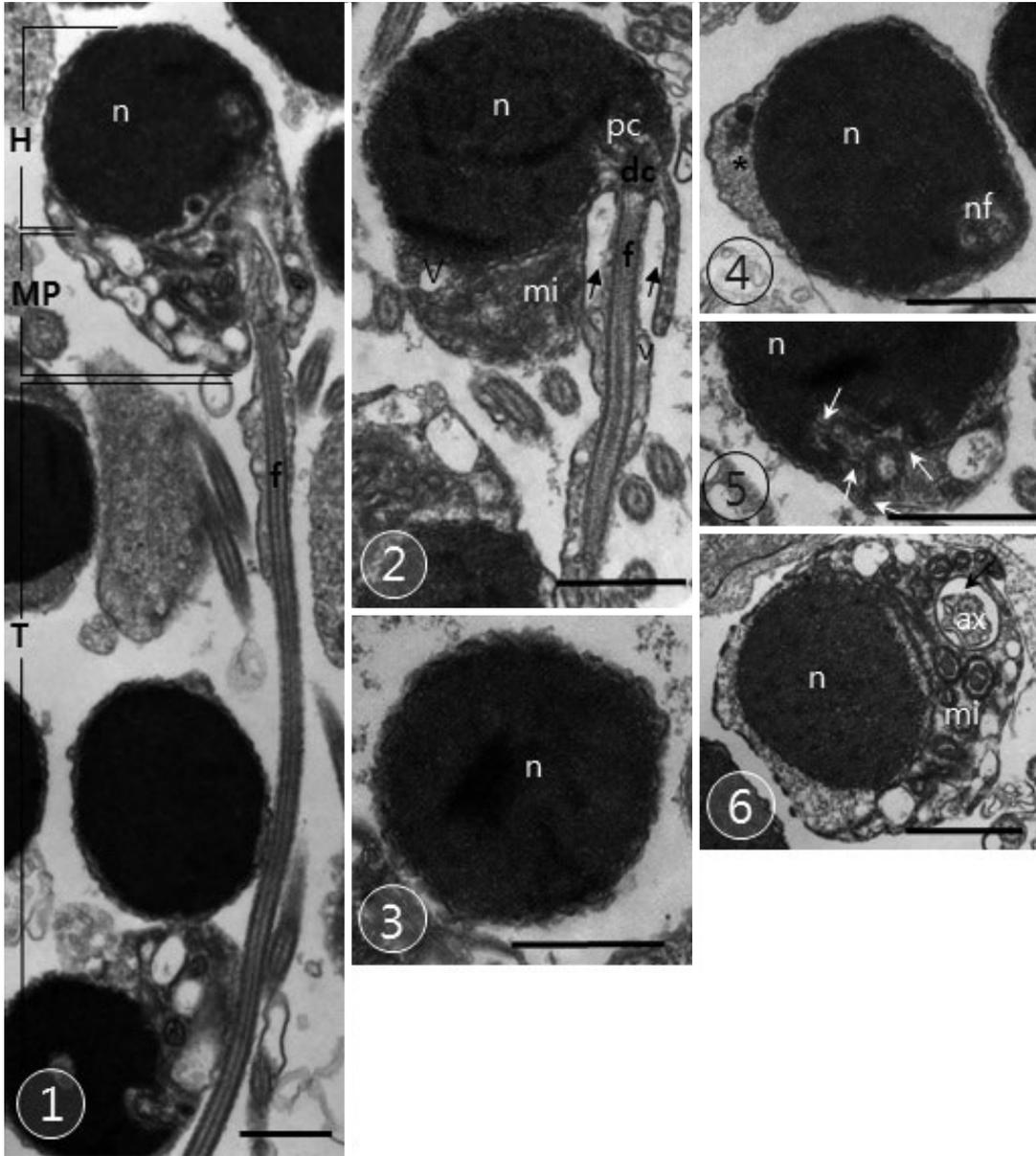


Fig. 1. The spermatozoa of *Aphyocypris chinensis*. Longitudinal section through a spermatozoon showing a spherical head (H), a short midpiece (MP) and a tail (T). bar: 1 μ m.
Fig. 2. Sagittal section of the head and midpiece appears the nucleus (n), proximal centriole (pc) and distal centriole (dc), mitochondria (mi), cytoplasmic canal (arrows) and flagellum (f) with several vesicles (v). Note the vesicles distribute to midpiece and proximal region of flagellum. bar: 1 μ m.
Fig. 3. Transeverse section through the middle region of nucleus (n) showing the highly compacted homogenous chromatin. bar: 1 μ m.
Fig. 4. Cross section of the low region of nucleus showing an electron lucent area (asterisk) and nuclear fossa (nf) which located laterally. bar: 1 μ m.
Fig. 5. Sagittal section through the nuclear fossa showing the proximal centriole and distal centriole. The nuclear fossa contains the proximal centriole. Note the centrioles connected with nuclear membrane and plasma membran and to each other by fibrous material (arrows). bar: 1 μ m.
Fig. 6. Trasverse section of basal region of nucleus showing the nucleus (n) with highly compacted chromatin, midpiece containing numerous mitochondria (mi) and axomene (ax). Note the mitochondria are separated from the axoneme by the cytoplasmic canal (arrow). bar: 1 μ m.

있으나 핵의 모양, 중심립의 각도, 중편세포질 구조와 분포형태, 미콘드리아의 수와 배열 그리고 편모의 구조에서 종간의 특이성을 나타내고 있다(Baccetti *et al.*, 1984; Kim *et al.*, 2006). 어종간 정자의 구조적 차이점을 밝히는 것은 어류의 분류와 계

통분석 자료로 활용하기에 매우 적합하다(Jemieson, 1991).

본 연구는 한국산 왜물개 *A. chinensis* 정자의 미세해부학적 구조를 밝히고, 인접분류군과 비교하여 정자의 미세구조적 계통관계를 규명하는 데 기초자료를 제공하고자 한다.

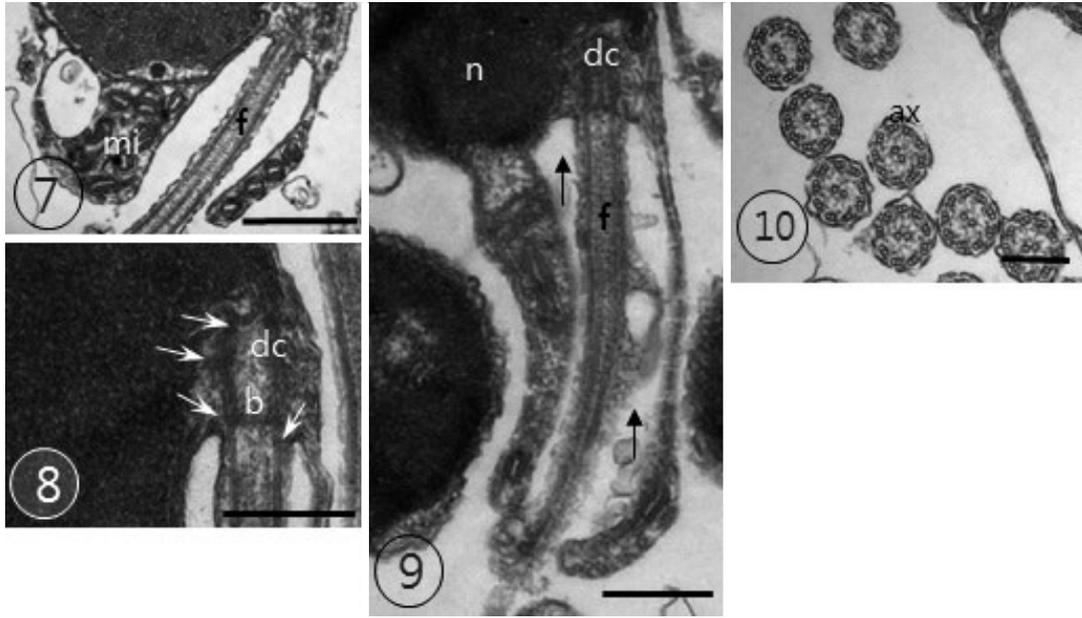


Fig. 7. Cross section of the midpiece region showing the mitochondria and proximal part of flagellum. bar: 0.5 μ m.
Fig. 8. Longitudinal section through the distal centriole showing the filamentous material (arrows) connected to the nuclear membrane and cell membrane and basal body (b). bar: 0.5 μ m.
Fig. 9. Longitudinal section of the midpiece region showing the basal portion of nucleus, distal centriole and flagellum. Note the cytoplasmic canal is invaginate to the basal part of distal centriole. bar: 0.5 μ m.
Fig. 10. Transverse section through sperm tail showing the axoneme of 9 + 2 microtubular pattern. Note the absence of lateral fins or ribbon in flagellum. bar: 0.2 μ m.

재료 및 방법

본 연구를 위하여 2018년 4~8월 경상북도 상주시 공검저수지 일대에서 *Aphyocypris chinensis* 성숙한 수컷을 포획하였다. 포획된 개체는 생체 상태로 실험실로 운반하였고 해부 후 정소를 추출하였다.

적출된 정소조직은 즉시 4°C, 2.5% glutaraldehyde, 4% paraformaldehyde (4°C, phosphate buffer, pH 7.2) 용액에서 2~3시간 전고정한 후 고정된 정소조직을 동일한 완충용액 (4°C, phosphate buffer, pH 7.2)으로 10분간 3회 세척한 후 1% osmium tetroxide (OsO₄)에서 후고정 하였다. 고정된 재료는 다시 동일한 완충용액으로 3회 세척한 후, ethanol 농도 상승순 (50% → 100%)으로 탈수하고, propylene oxide로 치환하여 Epon812 혼합액에 포매한 다음 35°C, 45°C 및 60°C 순으로 vacuum dry oven에서 중합반응 하였다. 포매된 재료는 ultramicrotome (MTXL)으로 초박절편을 만들어 copper grid에 부착한 후 uranyl acetate와 lead citrate로 염색하여 투과전자현미경 (Hitachi, H-7100)으로 관찰하였다.

결 과

Aphyocypris chinensis 정자의 전체적인 형태는 둥근 두부와

짧고 비대칭적인 중편부 그리고 길게 신장된 미부로 구성되어 있었다 (Fig. 1). 정자의 두부는 세포 장축의 외측에 위치 즉, 편모가 핵의 측면에 위치해 있었다 (Fig. 1). 구형의 두부는 그 내부에는 핵이 위치해 있고, 핵의 직경은 $2.19 \pm 0.11 \mu\text{m}$ 였다. 핵에는 침체물질이나 흔적이 발견되지 않았으며 기저부에는 핵의 일부가 함입되어 핵외를 형성하고 있었다 (Fig. 2). 핵은 동질의 염색물질로 구성되어 있으나 핵의 군데군데에 불규칙적인 vesicle들이 있으며, 원형질막과 핵막은 대부분 밀착되어 있으나 (Fig. 3) 일부 분리되어 있는 부분도 있었다 (Fig. 4). 핵의 기저부가 함입되어 형성된 핵외는 그 깊이가 핵의 직경 1/2에도 미치지 못하나 기부중심립을 포함하고 있었다 (Fig. 5). 기부중심립은 섬유성물질에 의해 핵막과 연결되어 있고 말단부 중심립 또한 섬유성물질에 의해 핵막과 원형질막에 연결되어 있었다 (Fig. 5). 두 중심립도 섬유성막에 의해 상호 연결되어 있고 두 중심립 사이의 각도는 약 130°였다 (Figs. 2, 5).

중편부는 가로직경이 $1.85 \pm 0.34 \mu\text{m}$ 이고 세로직경이 $1.67 \pm 0.33 \mu\text{m}$ 이었다. 다수의 미토콘드리아를 함유하고 있는 중편부는 핵의 기저부와 편모의 기부를 둘러쌌다 (Fig. 1). 중편부와 편모는 cytoplasmic canal에 의해 분리되어 있었다 (Fig. 6). 미토콘드리아는 단면상 최대 12개 관찰되고 4~5층으로 편모를 둘러싸고 있었다 (Figs. 6, 7). 중편부의 세포질은 비대칭적으로 분포해 있고 두부가 기울어진 방향으로 다량의 세포질이 분포

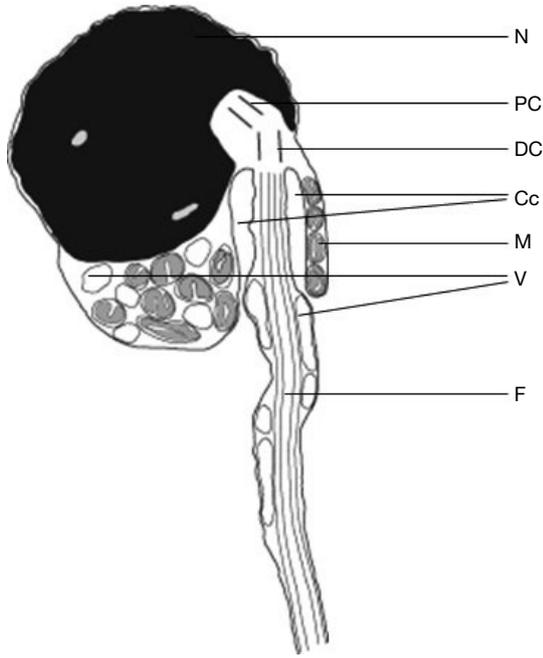


Fig. 11. Graphic illustration of longitudinal section through the mature spermatozoon of *Aphocypris chinensis*. Cc: cytoplasmic canal; DC: distal centriole; F: flagellum; M: mitochondria; N: nucleus; PC: proximal centriole; V: vesicles.

해 있었다(Figs. 1, 2, 7).

단편모로 구성된 미부는 말단부중심립에서부터 시작되었다(Fig. 8). 말단부중심립의 아랫부분에는 기저판이 형성되어 있고 cytoplasmic canal이 말단부중심립의 기저부까지 함입되어 있었다(Fig. 8). 편모의 기부는 세포질에 의해 둘러싸여 있으나 cytoplasmic canal에 의하여 분리되어 있었다(Fig. 9). 편모의 직경은 $0.22 \pm 0.016 \mu\text{m}$ 이고 그 구조는 $9+2$ 이며 기부에서는 vesicles이 관찰되나 나머지 부위에서는 나타나지 않았다(Fig. 10).

고 찰

Aphocypris chinensis 정자의 일부 미세구조는 잉어류 정자의 일반적인 형태와 유사했다. 잉어류 정자의 일반적인 구조는 다음과 같다. 두부에는 침체가 없고, 구형의 핵은 기저부에 얇은 핵외를 포함하고, 중편부는 미토콘드리아를 포함하며, 미부는 핵의 측면에서 길게 신장된 단편모로 구성되어 있다(Jamieson, 1991). *A. chinensis* 정자의 구조도 잉어류 정자와 비슷하나 핵의 구조, 중심립의 위치, 미토콘드리아의 수와 배열 그리고 편모의 구조에서 차이가 있었다. Fig. 11에서 모식도로 *A. chinensis* 정자의 미세구조를 제시하였다.

잉어류 정자의 핵은 구형으로 크기는 $2 \mu\text{m}$ 내외로(Bacetti et

al., 1984; Guan and Afzelius, 1991) *A. chinensis* 정자 핵의 크기와 유사하였다. *A. chinensis* 정자의 핵과 편모의 위치를 보면, 편모가 핵의 중심에서 벗어나 측면에 있다. 이와 같이 정자의 미부가 핵의 측면에 위치해 있는 구조는 잉어류 정자에서 나타나고 있는 공통적인 구조이다(Baccetti et al., 1984). 잉어류의 핵은 동질로 균일하게 농축되어 있지만, 핵의 여러 군데에 공포(electron lucent areas)가 나타나고 있다(Lee and Kim, 1998a; Kim et al., 2006). 잉어류는 침체가 없는 무침체수중형(anacrosomal aquasperm type)(Jamieson, 1991)이므로 핵의 vesicles은 침체와는 관련이 없다. 다만 잉어류 정자의 핵에서 나타나는 공통된 구조형질로 볼 수는 있다.

*A. chinensis*에서 나타나는 얇게 함입된 핵외는 잉어류의 전반적인 특징으로 볼 수 있다(Jamieson, 1991). Cyprinidae와 인접분류군인 Cobitidae에서도 핵외가 얇게 함입되어 있으나(Park and Kim, 1996), Siluriformes의 Siluridae(Lee and Kim, 2001)와 Bagridae(Kim and Lee, 2000)에서는 핵외가 깊이 함입되어 있다. 특히, Bagridae에서의 핵외는 기부와 기저부 중심립 모두 포함하고 있다. 그러나, *A. chinensis*를 비롯한 Cyprinidae의 핵외는 기부중심립만 포함되어 있다. 이와 같이 분류군에 따라서 핵외의 형태가 달라지고 있음을 알 수 있다. 따라서 핵외가 기부중심립만을 포함하고 있는 것은 잉어류 정자의 공통된 특징으로 볼 수 있다.

*A. chinensis*에서는 두 중심립 사이의 각도가 약 130° 로 나타나고 있으나, 경골어류 정자에서 두 중심립의 위치와 각도는 매우 다양하게 나타나고 있다. Bagridae의 *Leiocassis ussuriensis*에서는 두 중심립 사이의 각도가 180° 로 나타나기도 하나(Kim and Lee, 2000), Cyprinidae에서는 $40 \sim 145^\circ$ 로 범위가 넓게 나타나고 있다(Baccetti, et al., 1984; Kim, 2019). 잉어류 중 *Acheilognathus yamasutae*(Kim, 2008)를 제외한 대부분의 잉어류는 기부중심립이 기울어진 만큼 핵이 기울어져 있었다(Baccetti et al., 1984; Kim, 2019). 향후 잉어류 내에서 정자의 미세구조 형질과 관련된 자료가 축적되면 종간 및 분류군간, 두 중심립의 각도와 관련하여 깊이 있는 연구가 필요한 것으로 사료된다. Jamieson(1991)은 어류에서 기부중심립과 말단부중심립이 직각으로 나타나는 것은 원시형질적 특징이라고 하였다. 잉어류에서 핵의 측면에 위치한 미부의 배열은 중심립의 위치와 밀접하게 관련되어 있다(Baccetti et al., 1984). 한편 *A. chinensis*의 두 중심립은 섬유성 물질에 의하여 핵막과 원형질막에 연결되어 위치가 고정되어 있다. 편모의 기부가 되는 말단부중심립이 정자형성 과정 중 원형질막과 연결되어서 편모가 돌출되면서 cytoplasmic canal 형성되므로, cytoplasmic canal은 말단부중심립의 기저부까지 함입되어 있다(Mattei, 1970). 이와 같이 cytoplasmic canal이 말단부중심립의 기저부까지 함입된 구조는 잉어류의 공통된 특징으로 사료된다.

잉어류 정자의 미토콘드리아 수는 다양하게 나타나고 있다.

미토콘드리아 수로 구분해보면 4개의 그룹으로 구분할 수 있다. 먼저, 1개만 나타나는 *Rhodeus sericeus sinensis* (Guan and Afzelius, 1991), *Acheilognathus yamatsutae* (Kim, 2008), *Pungtungia herzi* (Lee and Kim, 1998b)이고, 두 번째, 2~5개 나타나는 *Barbus barbatus plebejus*, *Chondrostom toxostoma*, *Leciscus cephalus*, *L. souffia* (Baccetti *et al.*, 1984), *Pseudogobio esocinus* (Kim *et al.*, 2007)이고, 세 번째, 6~10개가 나타나는 *Squalidus gracilis majimae* (Lee and Kim, 1998a), *Zacco temminckii* (Kim *et al.*, 2006), *Z. koreanus* (Kim, 2006), *Carassius auratus* (Baccetti *et al.*, 1984), *Hemiculter eigenmanni* (Kim, 2019)이고, 마지막으로 11개 이상의 미토콘드리아를 가지고 있는 *Microphysogobio yaluensis* (Kim *et al.*, 2008)와 본 연구종인 *A. chinensis*로 나눌 수 있다. *A. chinensis*는 잉어류 정자에서 지금까지 보고된 미토콘드리아의 수가 가장 많은 종으로 볼 수가 있다. 어류의 정자에서 미토콘드리아의 수는 중요한 분류형질일 뿐만 아니라 정자의 이동에 힘을 제공하고, cytoplasmic collar의 모양과 크기 그리고 cytoplasmic canal의 깊이와 밀접하게 연관되어 있다 (Baccetti *et al.*, 1984).

중편세포질의 vesicles은 편모의 기부에서도 일부 나타나고 있다. Vesicles이 세포질에서 규칙적으로 나타나는 *R. sericeus sinensis* (Guan and Afzelius, 1991)와 불규칙적으로 분포하고 있는 *S. gracilis majimae* (Lee and Kim, 1998a)로 구분할 수 있다. 또한 편모에서도 vesicles이 나타나는 *Z. temminckii* (Kim *et al.*, 2006)와 나타나지 않는 *A. koreansis* (Kim *et al.*, 2007b)로 구분할 수 있다. *A. chinensis*의 경우는 세포질과 편모에 vesicles이 불규칙적으로 분포하고 있다. 이와 같이 잉어류 정자에서 나타나는 중편부와 미부에 분포하는 vesicles의 분포형태는 Cyprinidae에서도 다르게 나타나고 있으므로 어류 정자의 미세해부학적 분류형질로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

A. chinensis 정자에서 미부는 두부의 측면에서 신장되어 있다. 이와 같은 형태는 잉어과 어류의 정자에서 공통적으로 나타나는 구조로 볼 수 있다 (Baccetti *et al.*, 1984; Kim *et al.*, 2006). Mattei (1970)는 경골어류의 정자를 2가지 type으로 구분하였다. Type 1은 핵의 중앙에서 중심립이 위치하여 편모가 돌출되는 대칭적 형태이고, type 2는 핵의 측면 중심립이 위치하여 편모가 비대칭적으로 돌출되는 구조이다. *A. chinensis*를 포함한 대부분 잉어류 정자의 편모는 핵의 측면에서 돌출되어 있어 type 2는 잉어류 정자의 공통된 구조로 볼 수 있다.

요 약

Aphocypris chinensis 정자의 구조는 잉어류 정자의 일반적인 구조와 비슷하나 핵의 구조, 중심립의 위치, 미토콘드리아의 수와 배열 그리고 편모의 구조에서 차이가 있었다. *A. chinensis*

정자의 핵외가 기부중심립을 포함하고 있는 것은 잉어류 정자의 공통된 특징으로 볼 수 있다. 섬유성물질에 의하여 원형질막과 연결된 중심립은 말단부중심립의 기부부 위치까지 cytoplasmic canal이 합입되어 있다. 이와 같은 구조는 잉어류의 공통된 특징으로 사료된다. 잉어류 정자의 미토콘드리아의 수를 구분해보면, 4개의 그룹(1개, 2~5개, 6~10개, 11개 이상)으로 구분할 수 있다. *A. chinensis*는 잉어류 정자에서 지금까지 보고된 미토콘드리아의 수가 가장 많은 종이다. 잉어류 정자에서 나타나는 중편부와 미부에 분포하는 vesicles의 분포형태도 어류 정자의 미세해부학적 분류의 형질로 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 편모의 위치가 핵의 측면으로 위치해 있는 것은 *A. chinensis*를 포함한 대부분 잉어류 정자의 공통된 특징으로 사료된다.

REFERENCES

- Baccetti, B., A.G. Burrini, G. Callaini, G. Gibertini, M. Mazzini and S. Zerunian. 1984. Fish germinal cells I. Comparative spermatology of seven cyprinid species. *Gamete Res.*, 10: 373-396.
- Guan, T.L. and B.A. Afzelius. 1991. The spermatozoon of the Chinese bitterling, *Rhodeus sericeus sinensis* (Cyprinidae, Teleostei). *J. Submicrosc. Cytol. Pathol.*, 23: 351-356.
- Günther, A. 1868. Catalog of the fishes in the British Museum. Catalogue of the physostomi, containing the families Heteropogii, Cyprinidae, Gonorhynchidae, Hyodontidae, Osteoglossidae, Clupeidae, Chirocentridae, Alepocephalidae, Notopteridae, Halosauridae, in *B. Mus.*, v 7: i-xx+1-512.
- Jamieson, B.G.M. 1991. Fish evolution and systematics: Evidence from spermatozoa. Cambridge University Press, New York, pp. 135-148.
- Kenzo, U. 1993. Motility and morphology of sperm of the ayu, *Plecoglossus altivelis* at different salinities. *Japan, J. Ichthyol.*, 40: 273-278.
- Kim, I.S. 1997. Illustrated encyclopedia of fauna & flora of Korea, Vo. 37, Freshwater fishes. Ministry of Education, Yeongi, 267pp. (in Korean)
- Kim, I.S., G.Y. Lee and S.Y. Yang. 1985. Systematic study of the subfamily Leuciscinae (Cyprinidae) from Korea. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 18: 381-400. (in Korean)
- Kim, J.K., K.H. Kim and K.J. Hwang. 2008. Anatomical ultrastructure of spermiogenesis and spermatozoa of *Microphysogobio yaluensis* (Pisces: Cyprinidae) from Korea. *Korean J. Ichthyol.*, 20: 7-12. (in Korean)
- Kim, K.H. 2006. Ultrastructure of *Zacco koreanus* (Teleostei, Cypriniformes, Cyprinidae) spermiogenesis and spermatozoa. *Korean J. Ichthyol.*, 18: 347-354.
- Kim, K.H. 2008. Anatomical ultrastructure of spermatozoa of a Korean bitterling, *Acheilognathus yamatsutae* (Pisces, Cyprin-

- idae). Korean J. Ichthyol., 20: 163-166. (in Korean)
- Kim, K.H. 2019. Anatomical ultrastructure of spermatozoa of Korean sharpbelly, *Hemiculter eigenmanni* (Cypriniformes, Cyprinidae). Korean J. Ichthyol., 31: 1-6.
- Kim, K.H., A.S. Kwon and Y.H. Lee. 1998. Spermatozoal ultrastructure and phylogenetic relationships of the subfamily Gobioninae (Cyprinidae, Teleostei) Ultrastructure of the spermatozoa of the Korean gudgeon *Squalidus chankaensis tsuchigae*. Korean J. Limnol., 31: 159-164.
- Kim, K.H., D.M. Kwon, J.I. Lee and S.B. Jung. 2007a. Ultrastructure of *Pseudogobio esocinus* (Teleostei, Cyprinidae) spermiogenesis and spermatozoa. J. Kor. Fish. Soc., 40: 147-152.
- Kim, K.H., J.K. Kim and K.J. Hwang. 2007b. Ultrastructure of spermatozoa of a Korean bitterling, *Acheilognathus koreensis* (Pisces, Cyprinidae). Korean J. Ichthyol., 19: 286-291.
- Kim, K.H. and Y.H. Lee. 2000. The ultrastructure of spermatozoa of the Ussurian bullhead, *Leiocassis ussuriensis* (Teleostei, Siluriformes, Bagridae) with phylogenetic consideration. Korean J. Limnol., 33: 405-412. (in Korean)
- Kim, Y.J., C.Y. Choi and I.S. Park. 2006. Ultrastructure of dark chub *Zacco temminckii* (Cyprinidae) spermatozoa. J. Fish. Sci. Technol., 9: 1-6.
- Lee, C.L. and I.S. Kim. 1987. An osteological study of the venus fish, *Aphyocypris chinensis* Günther (Cyprinidae) from Korea. Korean J. Syst. Zool., 3: 41-50. (in Korean)
- Lee, Y.H. and K.H. Kim. 1998a. Spermatozoal ultrastructure and phylogenetic relationships of the subfamily Gobioninae (Cyprinidae, Teleostei) 1. Ultrastructure of the spermatozoa of the Korean Gudgeon *Squalidus gracilis majimae*. Korean J. Electron Microsc., 28: 63-71.
- Lee, Y.H. and K.H. Kim. 1998b. Ultrastructure of spermatozoa in *Pungtungia herzi*. Dev. Reprod., 2: 141-148.
- Lee, Y.H. and K.H. Kim. 2001. The ultrastructure of spermatozoa of the slender catfish *Silurus microdorsalis* (Teleostei, Siluriformes, Siluridae) with phylogenetic considerations. J. Submicrosc. Cytol. Pathol., 33: 329-336.
- Mattei, C. 1970. Spermiogeneses comparee des Poissons. In: Bacetti, B. (ed.), Comparative Spermatology. Academic Press, New York, pp. 57-69.
- Neznanova, S.U. 2012. Ultrastructural study of spermiogenesis in far-eastern redfins of the Genus *Tribolodon* (Pisces: Cyprinidae). Russian J. Marine Biol., 38: 156-165.
- Park, J.Y. and I.S. Kim. 1996. Fine structure spermatozoa of Cobitidae (Pisces: Cypriniformes). Korean J. Ichthyol., 8: 74-83. (in Korean)