

돌마자(*Microphysogobio yaluensis*)의 정소 내 생식세포에 관한 연구

김 재 구, 김 동 희¹, 류 동 석*

청주대학교 생명과학과, ¹연세대학교 원주의과대학 환경의생물학교실

A Study on the Reproductive Cells in Testes of *Microphysogobio yaluensis*

Jae Goo Kim, Dong Heui Kim¹ and Dong Suck Reu*

Department of Life Science, Cheongju University, Cheongju, Chungbuk 360-764, Korea

¹Department of Environmental Medical Biology, Wonju College of Medicine, Yonsei University,
Wonju, Gangwon 220-701, Korea

(Received August 14, 2009; Accepted September 23, 2009)

ABSTRACT

The reproductive cells in testes of *Microphysogobio yaluensis* were investigated using light and electron microscopes.

The testis of *Microphysogobio yaluensis* consisted of numerous testicular cysts contained synchronized cells. Sperms were full in testicular sacs of mature testes. Leydig cells were located among testicular cysts. The nucleus of primary spermatocytes was round and mitochondria were congregated in cytoplasm. The size of secondary spermatocyte was smaller than that of primary spermatocyte and the nucleus of a secondary spermatocyte was round or oval. In spermatids, the nucleus was round and electron-dense. In spermiogenesis, the nucleus was condensed and a flagellum started to be formed. The mitochondria were rearranged along the flagellum. The sperm had a round head, the acrosome was not found and a motile flagellum consisted of an axoneme with a typical 9+2 pattern of microtubule.

Keywords : *Microphysogobio yaluensis*, Testis, Primary spermatocyte, Secondary spermatocyte, Spermatid, Flagellum

서 론

돌마자(*Microphysogobio yaluensis*)는 잉어목 잉어과 모래무지아과에 속하는 한국고유종으로 유속이 완만한 하천의 자갈이나 모래바닥에 살며, 부착조류와 수서곤충을 주로 섭식한다. 산란기는 5월에서 7월 사이이며, 이 시기에는 암컷과 수컷 모두 주둥이의 기부와 가슴지느러미 및 배지느러미의 기부가 주황색을 띤다. 수온 18~25°C에서 산란하며 10

여 마리가 떼 지어 수초 등의 산란장 주변을 돌면서 부착성란을 낳아 산란한다. 수정란이 부화하는 데 약 20시간이 걸리며, 36일이 지나면 종 특유의 흑색반점이 몸의 옆면에 나타나 성어와 거의 같은 형태를 갖추게 된다. 서식지는 한강, 금강, 섬진강, 낙동강 등 서해와 남해로 유입하는 하천에 널리 분포한다(Choi et al., 1990; Kim & Park, 2002).

척추동물의 정자형성과정(spermatogenesis)은 정소의 세정관 또는 정소낭에서 이루어지며, 세정관과 정소낭의 내벽에는 정원세포와 세르톨리 세포(Sertoli cell)가 분포한다. 세

* Correspondence should be addressed to Dr. Dong Suck Reu, Department of Life Science, Cheongju University, Cheongju, Chungbuk 360-764, Korea. Ph.: (043) 229-8528, Fax: (043) 229-8525, E-mail: re8448@cju.ac.kr

르톨리 세포는 정자형성과정에 있어 정원세포에 필요한 영양분을 공급하고 정소낭을 형성하여 분화중인 생식세포들을 둘러싸기도 하며, 인접한 생식세포 간에 세포질교(cytoplasmic bridge)를 형성하는 것으로 알려져 있다. 경골어류의 정자형성과정은 정소낭 내에서 이루어지며 정자변태과정(spermiogenesis)을 마친 정자의 두부에는 침체가 존재하지 않기 때문에 난막의 동물극쪽에 위치하고 있는 난문(micropyle)을 통해서 수정이 이루어진다(van den Hurk et al., 1978; Billard, 1984; Gwo & Gwo, 1993). 경골어류의 정자는 두부와 중편 그리고 꼬리로 구분되며 꼬리를 이루는 편모는 많은 경골어류에서 한 개를 보유하지만 2개를 보유한 종도 알려져 있으며(Poirier & Nicholson, 1982; Matos et al., 2002), 편모의 미세소관도 9+2 구조로 이루어졌지만 9+0 구조를 가진 뱀장어(Todd, 1976)와 9+1의 구조를 가진 tilapia(Bern & Avtalion, 1990) 등 어중에 따라 차이를 보인다.

지금까지 경골어류의 정소 내 생식세포에 관한 연구는 채집이 쉽고 실험실 내 양어가 어렵지 않은 종에서 연구가 활발하게 진행되어 왔으나 모래무지아과에 속하는 한국고유종의 연구는 참몰개(Kim et al., 1998), 긴몰개(Lee & Kim, 1998) 및 쉬리(Reu, 2008) 등의 연구를 제외하면 여전히 미흡한 실정이다. 특히 대부분의 국내담수어는 연중 특정시기에만 산란하는 연주기를 보여 한국고유종의 정소 내 생식세포에 관한 연구는 어려운 실정이다.

따라서 본 연구는 모래무지아과에 속하는 한국고유종 돌마자(*Microphysogobio yaluensis*)의 정소 내 생식세포를 조사하여 수온변화, 환경오염 및 서식지 파괴 등으로 멸종위기에 처한 한국고유종 보존을 위한 기초자료를 제시하고자 돌마자의 정소 내 생식세포의 특성을 확인하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험재료

2008년 3월부터 2008년 8월까지 충북 괴산군 청천면 지촌리 달천 일대에서 돌마자(*Microphysogobio yaluensis*)를 채집하여 실험재료로 사용하였다.

2. 실험방법

1) 광학현미경 시료의 제작

정소 내 생식세포의 형성과정 및 형태를 관찰하기 위해 채집한 돌마자의 정소를 적출하여 4°C의 10% formalin에 12시간 고정한 후 12시간 수세하였고 ethanol 농도 상승순(70~100%)으로 탈수한 다음 xylene으로 치환하여 paraffin으로 포매하였고 block을 제작하였다. Block은 microtome(Leica-820, Germany)으로 2~4µm로 section하여 hematoxy-

lin과 eosin으로 이중 염색하였으며 광학현미경(Olympus CK-2, Japan)을 이용하여 관찰하였다.

2) 전자현미경 시료의 제작

채집한 돌마자의 정소를 0.1 M phosphate buffer (pH 7.4)로 조정된 2.5% glutaraldehyde로 4°C에서 4시간 전고정 후 1% osmium tetroxide로 90분간 후고정하여, ultramicrotome(Reichert Ultracut E, Germany)으로 초박절편을 만들어 uranyl acetate와 lead citrate로 이중 염색하여 투과전자현미경(JEM-1200EX II, JEOL, Japan)으로 미세구조를 관찰하였다.

결 과

돌마자(*M. yaluensis*)의 정소는 한 쌍으로 복강의 소장과 복측 장간막 사이에 머리쪽에서 꼬리쪽으로 길게 위치하고 있으며, 좌우 정소의 모양과 크기는 비슷하며, 한 쌍의 정소는 뒤쪽에서 만나 생식구(genital aperture)에 개구되어 있었다.

성숙초기 정소의 정소낭 내에는 발생과정이 비슷한 생식세포들이 분포하였으며, 정소낭과 정소낭 사이에는 라이디히 세포(Leydig cell)들이 존재하며, 일부 정소낭에서는 정자가 이탈되어 있었다(Figs. 1, 2). 성숙이 완료된 정소 내에는 대부분이 정자들로 가득하였으며(Fig. 3), 부분적으로 제2정모세포들과 세포질교를 확인할 수 있었다(Fig. 4).

정소낭의 생식세포들을 전자현미경으로 관찰한 결과 정원세포는 확인할 수 없었으나 제1정모세포와 제2정모세포 및 정세포들을 관찰할 수 있었다(Fig. 5). 제1정모세포의 핵은 직경 3µm 정도의 원형이었으며 미토콘드리아들은 세포질 한쪽에 모여 있었다(Fig. 6). 제2정모세포들은 직경 1.5µm 정도의 구형 또는 난형의 핵을 보유하고 있으며 핵 가까이에는 미토콘드리아들이 존재하였다(Fig. 7). 또한 정자형성과정이 진행될수록 제2정모세포는 더욱 농축되어 높은 전자밀도의 핵을 보유하고 있었다. 핵은 세포에서 한쪽에 치우쳐 존재하였고, 세포질에는 미토콘드리아들이 분포하였다(Fig. 8). 정세포의 직경은 약 700nm로 핵이 세포질의 한쪽에 치우쳐 있었으며 핵은 구형으로 전자밀도가 매우 높았고 세포질에는 미토콘드리아들이 분포하고 있었다(Fig. 9). 정자완성과정을 마친 정자의 두부는 구형이었으며 침체는 보유하지 않았고 적은 수의 미토콘드리아들이 편모를 따라 채배열되었다. 편모는 한 개 보유하였으며(Fig. 10), 또한 doublets의 가장자리에 outer dense fibers도 확인할 수 있었고(Fig. 12) 미세소관은 전형적인 9+2 구조였다(Fig. 11).

고 찰

본 실험에서 돌마자는 *Channa gachua* (Sanwal & Khanna,

1972), 송사리 (Grier, 1976), 피라미 (Cho & Reu, 1998), 꺾지 (Gye, 2002) 및 쉬리 (Reu, 2008)와 같이 정소낭 내에서 정자형성이 이루어지는 것으로 나타났다. 정소낭은 편평한 한 층의 세포들이 경계를 이루고 있는데 이 경계는 포유동물의 세르톨리 세포의 기능과 유사한 세포로 보고된 바 있으며 (Gwo & Gwo, 1993), 정소낭 내의 인접한 생식세포들은 세포질교를 형성하여 동일하게 분화되고 정자완성을 마칠 때까지 세포질교는 계속하여 존재하는 것으로 알려져 있다 (Grier, 1976). 또한 정소낭과 정소낭 사이에는 라이디히 세포들이 존재하며 이는 생식세포들의 정자형성과정이 정소낭 내에서 동시성을 보이는 것과 관련이 있으며 testosterone을 분비하는 것으로 알려져 있다 (Jose, 1994). 돌마자의 정소낭과 정소낭 사이에도 라이디히 세포들을 확인할 수 있었으며 가슴지느러미와 배지느러미의 기부가 주황빛을 띠는 것도 이와 관련이 있는 것으로 보여진다.

암컷의 산란시기에 가까워질수록 정소낭의 정원세포들이 제1정모세포로 분화하기 시작하여 성숙 초기에 이르면 제1정모세포가 제2정모세포로 분화하게 되고 성숙 후기에는 제2정모세포들이 정세포로 분화하여 정자완성과정에 이르게 되고 정자완성과정을 마친 정자들은 정소낭의 내강에 분포하는 동시성을 보인다. 본 실험에 의하면 난생을 통하여 발생과정을 수행하는 돌마자 성숙초기의 정소 내에는 분화도도가 비슷한 생식세포들을 보유한 정소낭들로 구성되어 있었으나 성숙기에 가까울수록 정소낭 내에는 정자들로 가득하여 swordtail (Lim, 1994), 피라미 (Cho & Reu, 1998), 꺾지 (Gye, 2002) 및 쉬리 (Reu, 2008) 등과 같이 정소 내의 생식세포들이 동시적으로 분화한 것으로 확인하였다. 이는 돌마자의 암컷이 산란기에 수많은 난자를 산란한 후 수 환경에서의 수정률을 높이기 위한 적응현상으로 판단된다. 또한 돌마자의 경우 꺾지 (Gye, 2002) 및 쉬리 (Reu, 2008) 등과 같이 정세포가 정자완성과정 중에 이미 정소낭 내강에 이탈된 것으로 나타나 정자완성을 마친 정자가 정소낭 내강으로 이탈된다는 보고 (Burke & Leatherland, 1984)와 차이가 있는 것으로 보인다.

어류 정자의 두부 모양은 신장형, 탄환형, 리본형, 초승달형 및 구형 등으로 다양하나 본 실험에 사용한 돌마자의 정자 두부는 구형으로 관찰되었으며, 이는 zebrafish (Deung et al., 1993), 피라미 (Cho & Reu, 1998), 동자개 (Lee, 1998), 긴물개 (Lee & Kim, 1998) 및 쉬리 (Reu, 2008)의 정자가 구형인 두부를 가진 것과 유사하였으나 초승달형인 뱀장어과 어류 (Todd, 1976)와 타원형인 무지개송어 (Billard, 1983) 및 장원추형인 난태생 어류 *Xiphophorus maculatus* (Kim et al., 2003) 등의 정자 두부와 쉽게 구분되었다. 또한 정자의 두부에 첨체를 보유하지 않는 어종은 난자의 구조에 의존하여 수정이 이루어지는데 난자에는 정자의 두부 크기와 비슷한 크기의 난문을 난막의 동물극쪽에 보유하여 정자의 진입통

로로서의 기능을 수행하는 것으로 알려져 있다 (Brummett & Dumont, 1979; Stehr & Hawkes, 1979; Iwamatsu & Ohta, 1981). 돌마자의 정자도 첨체를 보유하지 않아 대부분의 경골어류처럼 난자 난막에 정자 두부의 직경과 크기가 유사한 난문이 존재하여 화학적인 반응을 거치지 않고 정자를 진입시키는 것으로 판단된다.

돌마자의 정자는 운동성을 부여하기 위해 대부분의 어류와 같이 편모 1개를 가지고 있었으며 2개를 보유한 시클리드과 양성어류 (hermaphrodite fish)인 *Satanoperca jurupari* (Matos et al., 2002)와 동자개과 어류인 channel catfish (Poirier & Nicholson, 1982)와는 차이를 보였다. 정자완성을 마친 정자의 기저부는 근위중심체 (proximal centriole)와 원위중심체 (distal centriole)로 구성되어 있지만 종에 따라 중심체에서 형성된 미세소관 (microtubule)은 구조적 차이를 보인다. 돌마자에서 정자의 편모는 대부분의 경골어류에서처럼 9+2 구조의 미세소관을 보유하는 것으로 확인되어 9+0 구조의 뱀장어 (Todd, 1976)의 경우와 9+1의 구조를 가진 tilapia (Bern & Avtalion, 1990) 등과는 차이를 보였다.

포유동물의 정자 편모에는 세포골격구조인 외측조대 섬유 (outer dense fiber)들이 특이하게 존재한다 (Fawcett, 1975). 외측조대 섬유의 기능은 편모의 구조를 지탱하며, 편모운동 중에 편모가 절단되는 것을 방지하는 것으로 추측하고 있다 (Baltz et al., 1990). 또한 편모운동을 말단까지 효과적으로 전달해 효율성을 높이는 것으로 알려져 있다 (Lindemann, 1996). 경골어류에서 편모운동에 영향을 미치는 axonemal fins은 불락 (Lee, 1996), 문치가자미 (An et al., 1999), 대농갱이 (Kim & Lee, 2000) 및 *Satanoperca jurupari* (Matos et al., 2002) 등의 종에서 보유하고 있는 것으로 보고된 바 있으나 본 연구에서 돌마자 정자의 편모에는 axonemal fins이 아닌 외측조대 섬유를 보유한 것으로 확인되었으며, 이는 정자가 효과적으로 난자를 만나기 위해 진화한 것으로 판단되며, 경골어류 정자의 미세구조는 종 간에서 차이를 보이며 특유의 생식전략에 따라 적응된 결과로 판단된다.

참 고 문 헌

- An CM, Lee JS, Huh SH: Ultrastructural study on the spermatogenesis of the marbled sole, *Limanda yokohamae* (Teleostei : Pleuronectidae). Korean J Electron Microscopy 29 : 427-435, 1999. (Korean)
- Baltz JM, Williams PO, Cone RA: Dense fibers protect mammalian sperm against damage. Biol Reprod 43 : 485-491, 1990.
- Bern O, Avtalion RR: Some morphological aspects of fertilization in tilapias. J Fish Biol : 375-381, 1990.
- Billard R: Spermiogenesis in the rainbow trout (*Salmo gairdneri*). An ultrastructural study. Cell Tiss Res 223 : 265-284, 1983.
- Billard R: Ultrastructural changes in the spermatogonia and sperma-

- toocytes of *Poecilia reticulata* during spermatogenesis. Cell Tiss Res 237 : 219-226, 1984.
- Brummett AR, Dumont JN: Initial stages of sperm penetration into the egg of *Fundulus heteroclitus*. J Exp Zool 210 : 417-434, 1979.
- Burke MG, Leatherland JF: Seasonal changes in testicular histology of brown bullheads, *Ictalurus nebulosus* Lesueur. Can J Zool 62 : 1185-1194, 1984.
- Cho JH, Reu DS: Ultrastructural study on the spermatogenesis of pale chub (*Zacco platypus*). Korean J Electron Microscopy 28 : 181-191, 1998. (Korean)
- Choi KC, Jeon SR, Kim IS, Son YM: Coloured illustrations of the freshwater fishes of Korea. Hyang-moon Pub. Co., Seoul, pp. 77-78, 222, 1990.
- Deung YK, Kim WJ, Kim DH, Song SB, Reu DS: An ultrastructural study on the spermatogenesis of the zebrafish (*Brachydanio rerio*). J Wonju Medical College 6 : 186-194, 1993. (Korean)
- Fawcett DW: The mammalian spermatozoon. Dev Biol 44 : 394-436, 1975.
- Grier HJ: Sperm development in the teleost *Oryzias latipes*. Cell Tiss Res 168 : 419-431, 1976.
- Gwo JC, Gwo HH: Spermatogenesis in the black porgy, *Acanthopagrus schlegelii* (Teleostei: Perciformes: Sparidae). Mol Rep Dev 36 : 75-83, 1993.
- Gye MC: Spermatogenesis of *Coreoperca herzi* (Perciformes; Percichthyidae). Korean J Limnol 35 : 232-236, 2002.
- Iwamatsu T, Ohta T: Scanning electron microscopic observation on sperm penetration in teleostean fish. J Exp Zool 218 : 261-277, 1981.
- Jose MS: Leydig cell: endocrine, paracrine and autocrine regulation. Endocrine Soc Rev 15 : 574-626, 1994.
- Kim DH, Reu DS, Deung YK: An ultrastructural study on the spermatogenesis of *Xiphophorus maculatus*. Korean J Electron Microscopy 33 : 267-274, 2003. (Korean)
- Kim IS, Park JY: Freshwater fishes of Korea. Kyo-hak Pub. Co., Seoul, pp. 148-149, 2002.
- Kim KH, Kwon AS, Lee YH: Spermatozoal ultrastructure and phylogenetic relationships of the subfamily Gobioninae (Cyprinidae) 2. Ultrastructure of spermatozoa in the Korean gudgeon, *Squalidus chankaensis tsuchigae*. Korean J Limnol 31 : 159-164, 1998.
- Kim KH, Lee YH: The Ultrastructure of spermatozoa of the ussuriian bullhead, *Leiocassis ussuriensis* (Teleost, Siluriformes, Bagridae) with phylogenetic considerations. Korean J Limnol 33 : 405-412, 2000.
- Lee JS: Ultrastructural study on the spermatogenesis of rockfish, *Sebastes inermis* (Pisces : Scorpaenidae). Korean J Electron Microscopy 26 : 267-275, 1996. (Korean)
- Lee YH, Kim KH: Spermatozoal ultrastructure and phylogenetic relationships of the subfamily Gobioninae (Cyprinidae, Teleostei) 1. Ultrastructure of the spermatozoa of the Korean slender gudgeon *Squalidus gracilis majimae*. Korean J Electron Microscopy 28 : 63-71, 1998. (Korean)
- Lindemann CB: Functional significance of the outer dense fibers of mammalian sperm examined by computer simulation with the geometric clutch model. Cell Motil Cytoskel 34 : 258-270, 1996.
- Matos E, Santos MNS, Azevedo C: Biflagellate spermatozoon structure of the hermaphrodite fish *Satanoperca jurupari* (Heckel, 1840) (Teleostei, Cichlidae) from the amazon river. Braz J Biol 62 : 847-852, 2002.
- Poirier GR, Nicholson N: Fine structure of the testicular spermatozoa from the channel catfish. J Ultrastr Res 80 : 104-110, 1982.
- Reu DS: A study on the reproductive cells in testis of *Coreoleuciscus splendidus*. J Ind Sci Cheongju Univ 25 : 31-36, 2008.
- Sanwal R, Khanna SS: Seasonal changes in the testes of a freshwater fish *Channa gachua*. Acta Anat 83 : 139-148, 1972.
- Stehr CM, Hawkes JW: The comparative ultrastructure of the egg membrane and associated pore structure in the starry flounder, *Platichthys stellatus* (Pallas), and pink salmon, *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum). Cell Tiss Res 202 : 347-356, 1979.
- Todd PR: Ultrastructure of the spermatozoa and spermiogenesis in the New Zealand freshwater eels (Anguillidae). Cell Tiss Res 171 : 221-232, 1976.
- van den Hurk R, Peute J, Vermeij JAJ: Morphological and enzyme cytochemical aspects of the testis and vas deferens of the rainbow trout, *Salmo gairdneri*. Cell Tiss Res 186 : 309-325, 1978.

< 국문 초록 >

모래무지아과에 속하는 한국고유종 돌마자 (*Microphysogobio yaluensis*)의 정소 내 생식세포를 조사하여 수온변화, 환경오염 및 서식지 파괴 등으로 멸종위기에 처한 한국고유종 보존을 위한 기초자료를 제시하고자 돌마자의 정소 내 생식세포의 특성을 확인한 바 다음과 같은 결과를 얻었다.

돌마자의 정소가 성숙초기에는 정소의 정소낭 내에는 발생과정 이 비슷한 생식세포들이 분포하였으며, 정소낭과 정소낭 사이에는 라이디히 세포들이 존재하였다. 또한 성숙후기 정소의 정소낭에는 정자들이 가득하였으며 제2정모세포들도 남아있었다. 제1정모세포의 핵은 직경 3µm 정도의 구형이었으며 미토콘드리아들은 세포질 한 쪽에 모여 있었다. 제2정모세포들은 직경 1.5µm 정도의 구형 또는 난형의 핵을 보유하고 있으며 제1정모세포보다 작았다. 정자완성과정 중에 있는 정세포의 핵은 구형으로 전자밀도가 높게 나타났으며 편모를 형성하기 시작하였고 세포질의 미토콘드리아는 편모를 따라 재배열되었다. 특히 정자의 두부는 구형으로 침체는 보이지 않았으며 편모는 전형적인 9+2 구조의 미세소관으로 이루어져 있는 특징들을 나타내었다.

FIGURE LEGENDS

- Fig. 1.** A light micrograph of primary spermatocytes, secondary spermatocytes and spermatids in testicular sacs of *Microphysogobio yaluensis* in March. TS: Testicular sac, PS: Primary spermatocytes, SS: Secondary spermatocytes, ST: Spermatids (Scale bar=100 μm).
- Fig. 2.** A light micrograph of primary spermatocytes, secondary spermatocytes, spermatids and Leydig cells in testis in April. PS: Primary spermatocytes, SS: Secondary spermatocytes, ST: Spermatids, LC: Leydig cells (Scale bar=50 μm).
- Fig. 3.** A light micrograph of sperms in mature testis of *M. yaluensis* in June. S: Sperms (Scale bar=250 μm).
- Fig. 4.** A light micrograph of secondary spermatocytes, sperms and cytoplasmic bridge in mature testis of *M. yaluensis*. S: Sperms, SS: Secondary spermatocytes, Arrowhead: Cytoplasmic bridge (Scale bar=25 μm).
- Fig. 5.** A transmission electron micrograph of primary spermatocytes, a secondary spermatocyte and spermatids in testis of *M. yaluensis*. PS: Primary spermatocytes, ST: Spermatids, F: Flagella, Arrowhead: Basal part of flagellum (Scale bar=0.5 μm).
- Fig. 6.** A transmission electron micrograph of primary spermatocytes. N: Nucleus, M: Mitochondria (Scale bar=1 μm).
- Fig. 7.** A transmission electron micrograph of secondary spermatocytes. N: Nucleus; M: Mitochondria (Scale bar=1 μm).
- Fig. 8.** A transmission electron micrograph of a early spermatid. N: Nucleus, M: Mitochondria (Scale bar=1 μm).
- Fig. 9.** A transmission electron micrograph of spermatids in middle stage. N: Nucleus, M: Mitochondria, F: Flagella (Scale bar=0.5 μm).
- Fig. 10.** A transmission electron micrograph of a late spermatid. N: Nucleus, F: Flagellum, M: Mitochondria (Scale bar=0.5 μm).
- Fig. 11.** A transmission electron micrograph of cross-sectioned flagella. Showing general microtubule structure of 9+2 pattern. Arrow: Central microtubules (singlet), Arrowhead: Peripheral microtubules (doublets) (Scale bar=0.1 μm).
- Fig. 12.** A transmission electron micrograph of cross-sectioned flagella. Arrowhead: Outer dense fibers (ODF) (Scale bar=0.2 μm).





