

## 한국 서해안 서해낙지 (*Octopus minor*)의 정자 완성에 관한 미세구조 I

장 남 섭\*, 김 상 원, 한 종 민  
목원대학교 자연과학대학 생명과학부

### **Fine Structure on the Spermiogenesis of *Octopus minor* on the Western Coast of Korea I**

Nam Sub Chang\*, Sang Won Kim and Jong Min Han  
Department of Biology, Mokwon University, Taejon 302-729, Korea  
(Received June 9, 2001)

#### **ABSTRACT**

The spermiogenesis of a Korean octopus, *Octopus minor*, inhabiting western of Korea Sea was observed by electron microscopy. The obtained results are as follows:

The spermiogenesis of *Octopus minor* proceeds through four stages; early-, mid-, and late-spermatid, and mature sperm.

An early spermatid is a spherical cell looking light due to the low electron density. The acrosome formed from Golgi complex of the upper nucleus looks dark due to the high electron density.

The extra-nuclear rod (enr) stemming from proximal centriole is transformed from round shape into oval shape, elongating to the upper nucleus. In our observation, the axoneme was being formed from distal centriole, and the manchette composed of a number of microtubules is also found around nuclear membrane.

In a mid-spermatid, chromatins in the nucleus contract shaping fine threads, and the manchette is also observed around nuclear membrane. Especially, the spherical acrosome is transformed into long oval one which is tinged with a number of horizontal stripes and has the middle electron density.

In a late-spermatid, chromatins in the nucleus contract thick and short. Furthermore, the mitochondrial sleeve, in which the axoneme is surrounded with mitochondria, is observed at middle piece. The axoneme has a typical structure of 9+2 and around it, 9 coarse fibers are observed.

Also in the acrosome cavity of mature sperm, horizontal striation is found. However, regularly spaced processes are peculiarly observed in there. A sperm is about 390  $\mu\text{m}$  long, whose head is bent a little like a banana while the acrosome region is helical. In the middle piece of sperm, 11~12 mitochondria are surrounding coarse fibers that reach the main piece of tail, while nothing but 9+2 structured axoneme is found in the end piece.

**Key words :** *Octopus minor*, Spermiogenesis, Ultrastructure

\* Correspondence should be addressed to Dr. Nam Sub Chang, Department of Biology, Mokwon University, 800 Doan-dong, Seo-ku, Taejon 302 729, Korea. Ph.: 042-829-7582, FAX: 042-829-7580, E-mail: nschang@mokwon.ac.kr  
Copyright © 2001 Korean Society of Electron Microscopy

## 서 론

두족강(Cephalopoda)의 정자에 관한 연구는 Chun (1903)의 연구를 필두로 많은 연구가 있었다.

Franzén (1967)은 광학 현미경을 통해 Cephalopoda 중 여러 종을 대상으로 정자 형태를 비교 연구한 결과 침체와 머리부위가 다양한 구조임을 확인한 바 있다.

특히 전자현미경을 사용한 연구는 Galangau와 Tuzet (1968a, b)에 의해 시작되었고, 이후 상세한 변태과정이 많은 학자들에 의해 활발히 연구되어 왔다 (Austin et al., 1964; Anderson & Personne, 1970; Maxwell, 1974, 1975; Fields & Thompson, 1976; Arnold, 1978; Arnold & Williams-Arnold, 1978; Healy, 1989, 1990).

Maxwell (1974)은 *Eledone cirrhosa*에서 정자의 침체와 머리부위가 나선형으로 꼬여 있음을 확인한 바 있으며, 이어 Maxwell (1975)에는 오징어류 3종 (*Eusepia officinalis*, *Loligo forbesi*, *Alloteuthis subulata*)의 정자 침체 및 머리부위의 구조가 약간 굽어 있어 바나나 모습을 하고 있다고 하였다. 그러나 Healy (1990)는 감오징어류 *Spirula spirula*의 정자에서 전자밀도가 낮아 투명하게 보이는 subacrosomal material을 침체의 하단부에서 관찰한 바 있다.

두족강 핵의 하단부 중심소체에 관한 연구는 *Eledone cirrhosa* 및 *Eusepia officinalis* (Maxwell, 1974, 1975) 등의 종에서는 centriolar pit에서 한 개의 중심소체가 관찰되고 이들로부터 편모가 형성된다고 한 반면, Franzén (1967)과 Healy (1989)는 *Octopus*에서는 2개의 중심소체가 핵의 하단부에서 관찰되고, 그 중 원위중심소체로부터 축삭이 형성된다고 하였다.

정자의 중편을 구성하는 미토콘드리아의 연구에서 Maxwell (1975)은 축삭과 mitochondrial pocket이 분리되어 mitochondrial spur를 형성한다고 언급한 반면, Healy (1990)는 *Spirula spirula*에서 미토콘드리아가 축삭을 감싸기 위해 mitochondrial sleeve를 형성한다고 하였다.

두족강 꼬리부위 축삭의 구조는 9+2형이고, 그 주위를 굵은섬유(coarse fibres)들이 둘러싸고 있다는 많은 연구 결과도 있다(Maxwell, 1974, 1975; Healy, 1989, 1990).

성숙정자에서 글리코겐의 침착에 관한 연구는 Anderson & Personne (1970)과 Maxwell (1975) 등이 있다. 이들은 PA-TSC-SP 방법(Thiéry, 1967)을 이용하여 꼬리 전체에서 글리코겐이 관찰된다고 한 반면, Healy (1989, 1990)는 중편에서도 dense material이 관찰되었는데, 이들이 글리코겐일 가능성이 높다고 하였다.

이와 같이 Cephalopoda의 정자형성과정은 종에 따라 그 형태가 매우 다양하게 나타난 바 있어, 본 연구에서는 지금까지 연구가 미진했던 한국 서해안 서해낙지(*Octopus minor*)를 재료로 하여 이들의 정자 완성과정을 전자 현미경을 통하여 관찰하였기에 이를 보고하고자 한다.

## 재료 및 방법

2000년 9월부터 한국의 서해안에서 서해낙지(*Octopus minor*)를 채집하여 실험실로 옮긴 다음 실험재료로 사용하였다.

서해낙지를 30% ethyl alcohol로 마취시킨 다음 개별하고 정소를 적출하였다. 정소는 실험에 사용할 수 있도록 적당한 크기로 잘라낸 다음, 2.5% paraformaldehyde-3% glutaraldehyde로 1시간 30분 전고정하고, 이어 OsO<sub>4</sub>로 2시간 후고정하였다. 고정이 끝난 재료는 0.2 M phosphate buffer (pH 7.3)로 3회 세척하고, ethanol 농도순으로 탈수시킨 다음, 통상법에 따라 Epon 812로 포매하였으며 60°C 파라핀 오븐에서 40시간 경화시켰다.

Epon블럭은 LKB-V ultramicrotome을 사용하여 1 µm 두께의 박절편을 만들고 이를 methylene blue로 단일염색을 한 후 광학현미경하에서 정확한 부위를 확인하고, 초박절편을 만들었다. 초박절편은 uranyl acetate와 lead citrate로 이중염색을 하고, Hitachi H-600 투과전자현미경(75 kV)으로 관찰하였다.

## 결 과

우리나라 서해안에서 서식하는 서해낙지(*Octopus minor*)를 대상으로 정자 완성과정에 관한 미세구조를 전자현미경을 통해 관찰한 결과 초기·중기·후기 정세포 그리고 성숙정자 등 4단계로 구분할 수 있었다.

### 1. 초기 정세포 (early spermatid)

초기 정세포는 직경이 9.3  $\mu\text{m}$  정도인 둥근 형태의 세포로서, 6.4  $\mu\text{m}$  정도 크기의 둥근 핵을 소지하고 있었다. 이들은 전자밀도가 낮아 비교적 밝게 관찰되었으며 핵은 세포질 대비 크게 보였다.

핵질은 비교적 밝았으며 이질염색질들이 핵막 주위에 밀집되어 있었다. 골지체로부터 유도된 것으로 보이는 침체는 모양이 불규칙(직경 1.9  $\times$  1.2  $\mu\text{m}$ )했으며 핵의 상단부 핵막에 근접해 있었고 전자밀도는 높게 나타났다.

이들의 세포질은 다양한 크기(0.2~0.4  $\mu\text{m}$ )의 공포들이 존재할 뿐 비교적 단순한 형태를 보였다(Fig. 2).

핵막 주위에는 0.2  $\mu\text{m}$  정도 크기의 미세소관들이 80 nm 간격으로 둘러싸고 있어 만철틀(manchette)를 형성했다(Fig. 5). 이어 핵은 그 모양이 장타원형으로 변모되고 핵내 이질염색질들은 핵막 주위로부터 중앙 부위로 응축반응이 일어났다(Fig. 4).

핵의 하단부에서는 근위중심소체가 핵막 주름 속으로 들어가 둥근 형태의 extra-nuclear rod (enr)를 형성하였으며(Fig. 3) 이어, 원위중심소체로부터는 꼬리를 형성기 위한 축삭형성이 시작되었다. enr은 핵의 응축과 더불어 그 모양이 타원형으로 변모되었다(Fig. 4).

### 2. 중기 정세포 (mid spermatid)

두부 상단부의 횡단면에서, 핵은 도우넛 형태였고 직경은 1.38  $\mu\text{m}$  정도였다. 이들 내강에는 전자밀도가 높은 작은 막대형 또는 둥근 모양의 과립들로 둘러싸인 enr의 타원형체(직경 0.5  $\mu\text{m}$ )가 관찰되었다.

두부 하단부 횡단면도 핵의 형태가 역시 도우넛

모양이었으며, 그 내강에는 9+2형의 축삭(axoneme)과 이들을 둘러싼 9개의 굵은섬유(coarse fibre)가 관찰되었다(Fig. 6). 핵내 염색질들은 작은 과립상(직경 30 nm) 또는 짧은 실모양(길이 150 nm)으로 핵질내 고르게 분산되어 있어 초기 정세포보다 전자밀도가 높게 나타났다(Fig. 7).

구형의 침체(직경 2  $\mu\text{m}$ )는 이중막과 전자밀도가 높은 과립상의 acrosomal rod로 둘러싸여 있는 반면, 내강은 전자밀도가 낮아서 밝게 보였다(Fig. 8). 이후, 이들은 타원형으로 모습이 변모되고 핵과 접촉된 부위는 약간 편평해지면서 전자밀도가 높은 치밀반(desmosome)을 형성하였다(Fig. 9). 이어, 내강 속에는 층판상의 물질들이 농축되어 가로무늬가 나타나기 시작했으며, 핵의 하단부는 enr들이 점차 핵의 상단부까지 신장되는 모습도 관찰되었다(Fig. 10).

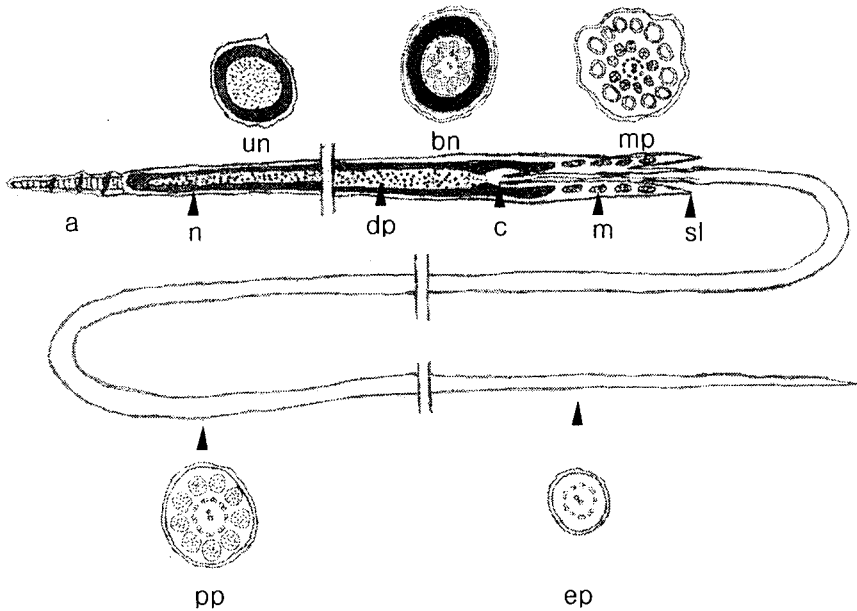
### 3. 후기 정세포 (late spermatid)

두부 상단부 횡단면에서 핵은 도우넛 형태였으며(직경 1  $\mu\text{m}$ ), 굵고 불규칙한 형태의 이질염색질(크기 44  $\times$  130 nm)들로 가득차 있어 중기 정세포보다 전자밀도가 높게 나타났다(Fig. 11). 핵의 내강에는 enr들의 농축이 진행되어 왔으나 핵내 염색질보다는 전자밀도가 비교적 낮게 나타나 두 부위간 구분을 할 수 있었다(Figs. 13, 14).

두부 하단부 횡단면도 상단부의 구조와 동일하였으나 핵의 두께가 0.13  $\mu\text{m}$  정도 증가되어 있었고 내강에는 9+2구조의 축삭과 9개의 굵은섬유들이 계속 존재하였다(Fig. 12). 그러나 이들의 종단면에서는 정세포의 두부가 길다란 막대 모양으로 발달하였으며, 핵의 중앙에는 enr이 대부분 차지하고 있었다(Fig. 14). 핵질은 층판처럼 농축되고 내강의 enr도 검은 과립상으로 변모되면서 핵의 내부를 가득 채워 치밀전(dense plug)을 형성하였다(Figs. 13, 14).

### 4. 성숙정자 (mature sperm)

성숙정자의 길이는 대략 390  $\mu\text{m}$  정도이고, 다른 낙지류들과는 달리 침체와 머리부위는 꼬여 있지 않았다. 머리의 길이는 65~70  $\mu\text{m}$  정도로 약간 굵은 형태를 하고 있어 바나나 모양이었으며, 꼬리는 그 길이



**Fig. 1.** Diagram of mature sperm in *Octopus minor*. a, acrosome; bn, basal nucleus; c, centriole; dp, dense plug; ep, end piece; m, mitochondria; mp, midpiece; n, nucleus; pp, principal piece; sl, mitochondrial sleeve; un, upper nucleus.

가 약 310~330  $\mu\text{m}$ 로 나타났다 (Fig. 1).

성숙정자의 침체 내강에는 많은 수의 가로무늬 (cross striation)가 형성되면서 원뿔형으로 변모하는 과정이 관찰되었으며, 침체는 0.9~1  $\mu\text{m}$  정도 간격의 나선형상으로 꼬여 있었다 (Fig. 15).

성숙정자 두부의 상단부 횡단면은 그 형태가 구형 (직경 0.6  $\mu\text{m}$ )의 가락지 모양이었으며, 핵은 농축되어 전자밀도가 매우 높게 나타났다. enr 역시 농축되었지만, 핵보다는 전자밀도가 약간 낮아서 핵과 구분되었다 (Fig. 16).

핵의 하단부 횡단면은 전자밀도가 매우 높은 도우넛 형태였으며 9개의 굵은섬유와 9+2의 축삭이 관찰되었다 (Fig. 18). 이들의 종단면에서는 축삭 주위를 둘러싸고 있는 미토콘드리아가 관찰되었는데, 이들은 mitochondrial sleeve를 형성하였다 (Fig. 17). 이어, 중편 종단면에서도 12개의 미토콘드리아가 굵은섬유와 축삭을 둘러싸고 있는 모습이 관찰되었는데, 이들 미토콘드리아 (직경 0.1  $\mu\text{m}$ ) 내강에는 변형된 약간의 크리스테가 관찰될 뿐, 전자밀도는 낮아서 밝게 보였다 (Figs. 16, 19).

굵은섬유들은 대부분 구형이었으며 직경은 90 nm 였다 (Figs. 18, 19). 꼬리의 주편 (main piece)에서도 9개의 굵은섬유와 9+2 구조의 축삭이 보였다. 그러나 꼬리의 단편 (end piece)에서는 9+2구조의 축삭만 존재하였다 (Fig. 18).

## 고 찰

Healy (1989)는 *Vampyroteuthis infernalis*의 정자 완성 과정을 정세포의 형태, 핵의 응축 과정 그리고 extra-nuclear rod (enr)의 형태 변화 및 농축에 따라 초기·중기·후기 정세포 그리고 성숙정자 등으로 나누어 관찰한 바 있으며, *Octopus minor*를 재료로 한 본 연구에서도 같은 결과를 보였다.

Maxwell (1975)은 3종의 오징어류 (*Loligo forbesi*, *Eusepia officinalis*, *Alloteuthis subulata*)인 경우 골지체로부터 유도된 침체가 초기에는 침체막 (acrosomal membrane)이 전자밀도가 높은 과립으로 둘러싸여 있고, 이것이 점차 acrosomal rod를 형성한다고 하였는데, 본 연구에서도 중기 정세포의 침체막이 전자밀도

가 높은 과립들로 둘러싸여 있어 이들이 acrosomal rod인 것으로 사료되었다.

두족강의 성숙정자에 대한 미세구조적 연구는 Franzén(1967)에 의해 시작되었다. Franzén (1967)은 *Octopus vulgaris*, *Octopus defilipp* 그리고 *Eledone moschata* 등의 침체는 나선형으로 꼬여 있으나, *Octopus macropus*의 침체는 꼬여 있지 않고 뾰족한 모습을 보인다고 하였다. Healy (1990)도 *Spirula spirula*의 침체가 꼬이지 않고 구형인 형태를 하고 있으며, 다만 핵의 상단부에서 subacrosomal material 이 관찰된 바 있다고 하였다. Maxwell (1975)도 *Eledone cirrhosa*의 침체가 나선형으로 꼬여 있으며, superficial keel를 형성한다고 하였는데, 본 연구에서도 정자의 침체가 꼬여 있어 Franzén (1967)과 Maxwell (1975)의 연구 결과와 거의 동일하였으나, 머리부위가 꼬여 있지 않은 점은 달랐다. 이어 침체는 후기 정세포가 되면서 내강에 많은 수의 가로무늬가 형성되고 원뿔형으로 계속 신장되는 것을 관찰하였는데, 이같은 가로무늬는 Healy (1989)가 *Octopus*에서도 관찰한 바 있다.

*Octopus minor*의 염색질이 농축된 두부는 길고 바나나 모양으로 휘어져 있어 Maxwell (1975)이나 Healy (1989, 1990) 등이 관찰한 연구 결과와 일치하였으나, 나선형으로 길게 꼬여 있다고 보고한 Franzén (1967)이나 Maxwell (1974)과는 달랐다. 이로 미루어 오징어류는 물론이고 같은 낙지류 사이에서도 두부의 길이와 형태가 매우 다양하게 나타난 바 있어 중간 정자 형태 비교연구에 매우 흥미 있는 일이라 하겠다.

초기정세포의 핵 하단부 근위중심소체로부터 유도된 enr은 처음에는 구형으로 관찰되고, 이후 타원형으로 변모하였는데, 이러한 결과는 Healy (1989)의 연구 결과와 일치한다. 그러나 enr이 이들은 성숙정자로 변태하면서 전자밀도가 점차 높아져 결국 치밀전(dense plug)를 형성하는 것은, Healy (1989)의 연구 결과와 일치하였으나, enr이 핵의 상단부 1/3 지점까지 신장된다고 한데 비해, 본 연구에서는 핵의 상단부 0.15  $\mu\text{m}$ 까지 신장된 바 있어 약간 다른 결과를 보였다. enr의 기능은 현재까지 잘 알려져 있지 않으나 핵의 내강에 위치하고 있어 이들이 핵의 응축 과정에 관

여하고 핵을 단단하게 유지하는 기능을 소지하는 것으로 사료된다.

Maxwell (1975)은 성숙 정자의 중편을 구성하는 여러 개의 미토콘드리아들이 한데 모여 길게 늘어선 뒤 mitochondrial spur를 형성한다고 한 반면, Maxwell (1974)과 Healy (1989, 1990)는 중편에서 미토콘드리아가 mitochondrial sleeve를 형성한다고 하여, 본 연구의 결과는 Maxwell (1974)의 연구 결과와 대체로 일치하였다. 그러나 *Octopus minor*에서는 중편 속에 미토콘드리아의 수가 11~12개 정도 관찰된 데 비해 Healy (1989)가 관찰한 *Vampyroteuthis infernalis*의 중편에서는 미토콘드리아의 수가 3~4개로 관찰되어 종에 따른 차이가 확인되었다.

두족강의 꼬리 부위를 구성하는 축삭은 전형적인 9+2형의 미세소관에, 9개의 굵은 섬유들이 둘러싸고 있다는 많은 연구 결과가 있었다(Franzén, 1967; Maxwell, 1974, 1975; Mealy, 1989, 1990).

본 실험에서도 축삭이 전형적인 9+2형으로 미세소관 주위를 9개의 굵은 섬유들이 둘러싸고 있어 동일한 결과를 보였다. 또한 정자의 주편에서도 9개의 굵은섬유가 축삭을 둘러싸고 있고, 단편에서는 굵은 섬유가 관찰되지 않아 Maxwell (1975) 결과와 일치하였으나 특이하게도 주편의 굵은섬유 주위에 전자밀도가 높은 물질들이 밀집되어 있어 이들이 글리코젠 입자인지는 좀더 심도 있는 연구를 통해서 확인해야 할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- Anderson WA, Personne P: The localisation of glycogen in the spermatozoa of various invertebrate species. *J Cell Biol* 44: 29-51, 1970.
- Arnold JM: Spermatogenesis in *Nautilus pompilius*. II. Sertoli cell-spermatid functional complexes. *Anat Rec* 191: 261-268, 1978.
- Arnold JM, Williams-Arnold LD: Spermatogenesis of *Nautilus pompilius* I. General survey. *J Exp Zool* 205: 13-26, 1978.
- Austin CR, Lutwak-Mann C, Mann T: Spermatophores and spermatozoa of the squid *Loligo pealii*. *Proc R Soc London*

- B 161 : 143-152, 1964.
- Chun C: Über Leuchtorgane und Augen von Tiefsee-Cephalopoden. Verh. Dtsch. Zool. Ges. 13 : 67-91, 1903.
- Franzén Å: Spermatogenesis and spermatozoa of the Cephalopoda. Ark Zool 19 : 323-334, 1967.
- Fields WG, Thompson KA: Ultrastructure and functional morphology of spermatozoa of *Rossia pacifica* (Cephalopoda, Decapoda). Can J Zool 54 : 908-932, 1976.
- Galangau V, Tuzet O: L'acrosome d' *Octopus vulgaris* Lmk. Observations au microscope lectronique. -C. r. hebd. S anc Acad Sci Paris (D) 267 : 1462-1467, 1968a.
- Galangau V, Tuzet O: Les mitochondries pendant la spermatogen se d' *Octopus vulgaris* Lmk. Recherches au microscope lectronique. -C. r. hebd. S anc Acad Sci Paris (D) 267 : 1735-1737, 1968b.
- Healy JM: Spermatozoa of the deep-sea cephalopd *Vampyroteuthis infernalis* Chun: Ultrastructure and possible phylogenetic significance. Philos Trans R Soc Lond Biol 323 : 589-600, 1989.
- Healy JM: Ultrastructure of spermatozoa and spermiogenesis in *Spirula spirula* (L.): systematic importance and comparison with other cephalopods. Helgol Wiss Meeresunters 44 : 109-123, 1990.
- Maxwell WL: Spermiogenesis of *Eledone cirrhosa* Lamarck (Cephalopoda, Octopoda). Proc R Soc Lond Biol 186 : 181-190, 1974.
- Maxwell WL: Spermiogenesis of *Eusepia officinalis* (L.), *Loligo forbesi* (Steenstrup) and *Alloteuthis subulata* (L.) (Cephalopoda, Decapoda). Proc R Soc Lond Biol 191 : 527-535, 1975.
- Thiéry J: Mise en evidence des polysaccharides sur copes fines en microscope electronique. J Microscopie 7 : 987-1019, 1967.

### < 국문 초록 >

우리나라 서해안에서 채집된 서해낙지(*Octopus minor*)의 정자 완성과정을 전자현미경을 통해 관찰한 결과 다음과 같았다.

서해낙지의 정자 완성 과정은 초기 중기 후기 정세포 그리고 성숙정자 등 4단계로 나눌 수 있었다.

초기 정세포는 구형의 세포로서 전자밀도가 낮아 밝게 보였으며 핵의 상단부 골지체로부터 형성된 침체는 전자밀도가 높아서 어렵게 관찰되었다. 핵의 하단 근위 중심소체에서 유도된 것으로 보이는 extra-nuclear rod (en)는 처음에는 구형에서 타원형으로 변모되면서 핵의 상단부위까지 신장되었으며, 원위중심소체로부터는 축삭이 형성되는 모습도 관찰되었다. 핵막 주위에서 많은 수의 미세소관으로 형성된 만chette(manchette)도 관찰되었다.

중기 정세포는 핵내 염색질이 가는 실모양으로 응축되었고, 이 시기에서도 만chette가 핵막의 주위에서 관찰되었다. 특히 구형의 침체는 긴 타원형으로 변모되면서 많은 수의 가로무늬를 형성하였고 전자밀도는 중등도로 나타났다.

후기 정세포는 핵내 염색질이 굵고 짧게 응축되었고, 중편에서는 미토콘드리아가 축삭을 감싸고 있는 mitochondrial sleeve를 형성하였다. 축삭은 전형적인 9+2 구조를 보였으며 축삭 주위에서는 9개의 굵은 섬유(coarse fibres)도 관찰되었다.

성숙정자의 침체 내강에서도 가로무늬가 관찰되었는데 특히하게도 가로무늬 사이에서 일정한 간격의 돌기물들이 관찰되었다. 성숙정자의 전체 길이는 약 390 μm였으며 침체는 나선형으로 꼬여 있었으나 머리부위는 꼬여 있지 않고 바나나 모양으로 약간 휘어져 있었다. 또한 정자의 중편에는 11~12개의 미토콘드리아가 굵은 섬유들을 둘러싸고 있었으며, 이 굵은 섬유들은 꼬리의 주편(main piece)까지만 연결되고 단편(end piece)에서는 9+2구조의 축삭만이 관찰되었다.

**FIGURE LEGENDS**

- Figs. 2, 3.** Electron micrographs showing the early spermatid. arrow, centriole; A, acrosome; e, extra-nuclear rod; G, Golgi complex; N, nucleus. Scale bars = 3  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ .
- Fig. 4.** Longitudinal section through the early spermatid at basal nucleus. arrow, centriole; e, extra-nuclear rod; N, nucleus. Scale bar = 1  $\mu\text{m}$ .
- Fig. 5.** Magnification of Fig. 4. Electron micrograph showing the microtubules on the perinuclear envelope. arrow, microtubule; N, nucleus. Scale bar = 0.5  $\mu\text{m}$ .
- Fig. 6.** Cross section through the mid spermatid at upper (arrow) and basal nucleus (arrow head). e, extra-nuclear rod; N, nucleus. Scale bar = 2  $\mu\text{m}$ .
- Fig. 7.** Cross section through the mid spermatid at basal nucleus. arrow, microtubule; Ax, axoneme; N, nucleus. Scale bar = 1  $\mu\text{m}$ .
- Figs. 8, 9.** Longitudinal sections through the acrosome and head region of mid spermatid. A, acrosome; e, extra-nuclear rod; N, nucleus. Scale bars = 1  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ .
- Fig. 10.** Longitudinal section through the acrosome and head region of mid spermatid. Arrow, cross striation; A, acrosome; e, extra-nuclear rod. Scale bar = 0.5  $\mu\text{m}$ .
- Figs. 11, 12.** Cross sections through the late spermatid at upper (arrow) and basal nucleus (arrow head). Ax, axoneme; e, extra-nuclear rod; N, nucleus. Scale bars = 1  $\mu\text{m}$ , 0.5  $\mu\text{m}$ .
- Figs. 13, 14.** Longitudinal sections through the late spermatid. arrow, nuclear skirt; Ax, axoneme; e, extra-nuclear rod; N, nucleus. Scale bars = 1  $\mu\text{m}$ , 4  $\mu\text{m}$ .
- Fig. 15.** Longitudinal section through the mature sperm at the acrosome. arrow, cross striation; A, acrosome. Scale bar = 0.5  $\mu\text{m}$ .
- Fig. 16.** Cross section through the mature sperm at the head and the middle piece. arrow, mitochondria; dp, dense plug; N, nucleus. Scale bar = 1  $\mu\text{m}$ .
- Fig. 17.** Longitudinal section through the mature sperm. arrow, mitochondrial sleeve; dp, dense plug; N, nucleus. Scale bar = 2  $\mu\text{m}$ .
- Fig. 18.** Electron micrograph showing the mature sperm. arrow, basal nucleus; arrow head, main piece; open arrow, end piece; Ax, axoneme; cf, coarse fibres; N, nucleus. Scale bar = 0.5  $\mu\text{m}$ .
- Fig. 19.** Cross section through the mature sperm at the middle piece. Ax, axoneme; cf, coarse fibres; M, mitochondria. Scale bar = 0.5  $\mu\text{m}$ .

