

부유부엽성 개구리밥 식물체의 구조분화 연구

김 경 애, 김 인 선*
계명대학교 생물학과

Structural Aspects of the Reduced Free-floating Hydrophyte, *Spirodela polyrhiza*

Kyoung Ae Kim and In Sun Kim*

Biology Department, Keimyung University, Shindang-Dong, Talseo-gu, Taegu 704-701, Korea

(Received April 30, 2000)

ABSTRACT

Aspects of structural differentiation of the free-floating hydrophyte, *Spirodela polyrhiza*, has been investigated. The hydrophyte exhibited highly reduced structures having only fronds, connective stalks, and roots as a mature plant. The fronds were major photosynthetic and vegetatively reproducing organ during the growth. Daughter fronds which developed early in the mother frond were also chlorenchymatous, but they remained within foliage sheaths of the mother frond before separation from connecting stalks. Although the stalks and roots originated from the same meristematic region of the frond, they exhibited the distinct polarity showing former lateral growth and latter axial growth. Air chambers were formed only in the fronds and roots. Cellular components were scattered throughout the diffuse cytoplasm in most of the actively growing stalk cells. Root cells protected by the root cap demonstrated relatively complex organization, showing dense cytoplasm with Golgi, rER, mitochondria, and chloroplasts in the cortical cells. Cells in the root cap were highly vacuolated within the peripheral cytoplasm. Such reduction and differentiation of the plant body in *Spirodela polyrhiza* most effectively contributes to the better adaptation of smaller plants to superficial aquatic environments, while also enabling the rapid growth.

Key words : Free-floating, Reduced Hydrophyte, *Spirodela polyrhiza*, Ultrastructure

서 론

형태적 유연성을 지니면서 수중에 잘 적응할 수 있는 수생식물은 물의 부력을 지지기능으로 이용할 수 있다. 그러나, 세포내 세포벽과 원형질의 밀도가

물보다 다소 높기 때문에 가라 앉으려는 경향이 있어(이, 1997), 조직 내에 통기조직이나 기실을 발달시켜 부력 및 기체 공급을 촉진시킨다. 특히 *Lemna* 및 *Spirodela*와 같이 매우 축소된 식물체를 형성하는 부유부엽성 수생식물 뿌리의 기실은 수중에 분포하는 양분의 흡수 및 수송에도 관여하는 것으로 알려져

* Correspondence should be addressed to Dr. InSun Kim, Biology Department, Keimyung University, Shindang-Dong, Talseo-gu, Taegu 704-701, Korea. Ph.: (053) 580-5305, FAX: (053) 580-5164, E-mail: botany@kmu.ac.kr

있다(Meijer & Sutton, 1987). 이와 같이 수생식물의 뿌리는 수중의 무기이온 및 양분흡수에 중요한 역할을 하는데 식물체 전체가 수표면에서 성장하는 *Lemna* 및 *Spirodela* 등은 뿌리에서 뿐만 아니라 엽상체에서도 양분의 흡수가 일어난다(Sutton & Ornes, 1977; Satake & Shimura, 1983; Ice & Couch, 1987; Meijer & Sutton, 1987). 이러한 흡수능으로 인해 이들이 오수정화에 활용될 수 있는 가능성 여부가 집중적으로 조사되고 있고(Wang & Lewis, 1997), 또한 엽육세포내 여러 효소 및 단백질 등의 생화학적 특성이나(Klich et al., 1985; Ley et al., 1997), 식물자원화 가능성(Sand-Jensen, 1989; Wang & Lewis, 1997) 등도 지속적으로 연구되고 있다. 반면 이들 식물체에 대한 구조적 연구는 일부 종의 엽상체(Witztum, 1974a; Klich et al., 1985; Leon & Sutton, 1987) 및 연결사(Witztum, 1974b), 잠아(Newton et al., 1978), 뿌리(Echlin et al., 1982) 등에서 개략적인 연구가 수행되어 있을 뿐이다.

개구리밥과의 *Lemna* 및 *Spirodela* 속 식물은 미분화된 작은 엽상체와 소수의 짧은 뿌리를 형성하고, *Wolffia* 및 그 유사 종들은 엽상체로만 구성되어 있는 극도로 축소된 식물체를 발달시킨다(Anderson et al., 1973; Bernard & Bernard, 1990; White & Wise, 1998). 이런 형태적 특성에 의해 *Wolffia* 및 *Lemna* 종은 여러 영역에서 광범위하게 연구되고 있고, 엽상체가 곧 식물체인 *Wolffia*는 구조적으로 활발히 연구되어 엽상체내 엽록체의 미세구조 및 자엽상체 발달 등이 규명되어 있다(Anderson et al., 1973; Bernard & Bernard, 1990; White & Wise, 1998). 개구리밥(*Spirodela polyrhiza*) 또한 10 mm 내외의 축소된 식물체로 짧은 시간에 매우 빠른 속도로 성장 및 증식하는 대표적 부유부엽성 수생식물로 잘 알려져 있으나 미분화된 엽상체 및 뿌리로 구성된 단순한 식물체로 간주되어 구조적으로 자세히 연구된 바 없다. 이에 본 연구는 개구리밥의 광합성 및 부유에 중요한 기능을 수행하는 엽상체와 동일 분열조직에서 기원하지만 극성에 의해 뚜렷히 분화되어 있는 연결사와 뿌리의 분화 발달양상을 구조적으로 상세히 밝히고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험 재료

여러 엽상체가 모여 10 mm 내외의 축소된 식물체를 이루는 개구리밥 [*Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid.]은 경상남도 창원 우포늪과 대구광역시 및 다사 지역의 연못 등지에서 1998년 5월부터 1999년 10월에 걸쳐 채취되었다. 실험실로 옮겨진 식물체로부터 발달중인 1~2 mm의 어린 엽상체 및 어린 뿌리, 5~7 mm의 성숙한 모엽상체, 10 mm 내외의 성숙한 뿌리, 엽상체간에 형성되어 있는 연결사를 실험재료로 사용하였다.

2. 시료제작

투과전자현미경(TEM)으로 연구될 각각의 엽상체, 뿌리, 연결사 조직을 1.0×1.0 mm로 세절하였다. 세절된 조직을 3% glutaraldehyde 용액으로 실온에서 2~3시간 진공상태로 전고정시킨 후 0.1 M sodium phosphate buffer 용액(pH 6.8)으로 15분 간격으로 3회 세척하였다. 시료는 다시 4°C에서 2% aqueous osmium tetroxide (OsO₄) 용액으로 2~20시간 후고정시켰고 동일한 buffer 용액으로 3회 세척하였다(Kim, 1996). 그 후 시료는 30% acetone을 시작으로 10% 상승 단계별로 탈수과정을 거치고 acetone과 Spurr resin 용액이 3:1, 2:1, 1:1, 1:2로 혼합된 혼합액으로 실온에서 1 시간씩 치환 처리되어 Spurr 용액에 포매되었다. 포매된 시료는 60°C에서 48시간 중합 경화되었고 0.5~0.8 μm 두께의 semi-thin section으로 제작되어 0.1% toluidine blue 용액 염색과 함께 Zenalumar 광학현미경으로 조사되었다. 이를 다시 Reichert Ultracut-S ultramicrotome을 이용하여 60~90 nm의 ultra-thin section을 제작하였고 coating된 100-, 200-, 300-mesh copper grid에 올려 2% uranyl acetate와 lead citrate로 이중 염색한 후 Hitachi H-7100 TEM(기초과학 지원연구소 소재)으로 연구되었다.

주사전자현미경(SEM)으로 연구될 시료는 TEM법과 동일한 고정 및 탈수과정을 거치고 100% acetone으로 3회 세척되어 isoamyl acetate로 치환시킨 후 4°C에서 냉장 보관하였다. 이후 액체 CO₂에 의한

critical point drying (임계점건조) 과정을 거치고 gold coating을 시킨 후 Hitachi S-4200 SEM으로 관찰하였다.

결 과

엽상체

엽상체는 광합성 및 부유에 중요한 기능을 수행하는 기관으로 어린 엽상체는 모엽상체에서 형성되어 발달하였다(Fig. 1). 엽상체의 상피에는 6~7개의 부세포로 둘러싸인 불규칙형(anomocytic)의 기공이 산재하였으며, 길이 17.0~24.0 μm , 폭 14.0~18.0 μm 의 기공이 125~140개/ mm^2 분포하였다(Fig. 2). 이들 상피에는 육상식물의 상피에 흔히 축적되는 epicuticular wax는 전혀 관찰되지 않았고(Fig. 3), 하피세포는 상피세포에 비해 매우 작고 얇은 층을 이루었다. 엽육조직은 책상조직 및 해면조직 세포로 분화되지 않았으며, 자엽상체내 엽육조직에는 작은 세포간극만이 발달하였다(Fig. 4). 모엽상체가 형성하는 얇은 엽육상의 보호층에서 발달하는 자엽상체는 세포질의 밀도가 매우 높으며, 빛에 노출되기 전에 이미 녹말입자를 함유한 엽록체를 형성하였다(Fig. 5). 엽상체가 점차 분화됨에 따라 세포간극은 기실로 확장되었으며 하표피에서 더욱 신장되었고(Fig. 6), 기실을 접하는 엽육세포는 한층으로 배열하여 기실 주위를 불규칙하게 포위하였다. 성숙한 엽육세포 엽록체에는 일반적으로 4~7층의 틸라코이드가 모여 형성된 그라나가 잘 발달하였으나, 일부 다른 엽상체 엽육세포의 경우에는 비교적 큰 녹말입자를 다량 포함하기도 하였다(Fig. 7). 엽육세포간 세포벽에는 원형질연락사가 다수 분포하며(Fig. 8), 일부 엽육세포는 액포에 많은 탄닌을 축적하여 탄닌세포화 되거나(Fig. 9), 결정체를 포함하는 이형세포로 변형되었다.

연결사

뿌리와 동일한 분열조직에서 기원하나 극성에 의해 뚜렷히 분화되어 있는 연결사에는 형태 및 크기가 비슷한 장방형의 표피세포들이 측부로 평행 배열되어 있다(Fig. 10). 모엽상체에서 측부생장으로 길게 신장되어 자엽상체와 모엽상체를 연결하던 연결사는

두 곳의 탈리층에서 모엽상체와 자엽상체를 분리시켰다. 이러한 연결사에는 기실이 형성되지 않으며 관속은 내부 중앙에 위치하였다. 연결 기능을 활발히 수행하는 연결사 세포에는 액포가 거의 발달하지 않으며 분산된 세포질에 소기관들이 산재하였다(Fig. 11). 연결사내 세포들의 세포벽 비후는 위치에 따라 다르게 나타나는 양상을 띄었다. 연결사 기능을 수행한 후 탈리층에서 분리된 연결사 세포는 소기관들이 점차 소실되어 세포질의 밀도가 현저히 낮아졌다(Fig. 11, Inset).

뿌리

엽상체 하피에서 돌기상으로 발달하는 어린 뿌리는 하피의 중앙에서 근관에 둘러싸여 발달하였다(Fig. 12). 근관의 분화는 뿌리의 발달과 동시에 진행되어 초기에는 뿌리와 근관이 쉽게 구별되지 않으나(Fig. 12, Inset) 성숙한 후에는 1~2 mm의 뚜렷한 원주형 구조를 이루었다. 분화 초기의 뿌리와 근관 사이의 경계층은 밀착되어 있고, 근관 삼입부위는 매끄럽게 연결되어 있었다. 이 시기의 근관세포에는 소수의 엽록체가 분포하였으나, 뿌리가 신장함에 따라 근관층 세포들은 심하게 액포화되어 소기관들이 세포벽 주위로 밀려나 세포질은 극소량만이 관찰되었다. 분화초기 뿌리의 근경단 분열조직에서는 세포분열이 활발하게 일어나 뿌리는 매우 빠른 속도로 신장하였고, 분열 조직내 중앙의 시원세포를 기준으로 다면체를 이룬 세포들이 활발히 세포분열을 하여 여러 세포형으로 분화되었다. 이때의 세포분열은 매우 불규칙하였으며(Fig. 13), 조직 내에는 세포 간극이나 기실이 거의 형성되지 않았고 뿌리의 거의 모든 세포는 엽록체를 함유하였다. 특히 뿌리의 피층 세포에는 치밀한 세포질내에 조면소포체, 골지체, 미토콘드리아 등이 특징적으로 분포하였다(Fig. 14). 뿌리 중앙에 위치한 유관속은 잘 발달되지 않았고, 특히 목부는 매우 단순한 형태를 띄었다. 뿌리의 지속적인 생장으로 수중에 10~15 mm 수직으로 신장된 피층조직내 세포들 또한 근관세포와 함께 심하게 액포화되어 세포 중앙에 거대 액포를 형성하였다(Fig. 15). 수직으로 신장된 피층조직에는 여러 개의 원주형의 기실이 피층세포들 사이에서 형성되었으며 뿌리와 근관사이

의 경계층도 점차 넓어져 있었다.

고 찰

세포내 원형질의 밀도는 물보다 높기 때문에 수생 식물은 통기조직이나 기실을 발달시켜 기체공급을 촉진시키고 기관이나 조직에 부력을 준다. 얇은 막으로 구획화되어 있는 이러한 기실은 식물체 스스로가 생산한 가스로 채워지는 것으로 알려져 있다(이, 1997). 이렇게 형성된 통기조직 및 기실의 형태, 크기, 분포양상은 식물에 따라 다른데(Mauseth, 1988), 축소된 개구리밥의 엽상체 및 뿌리에도 기실은 잘 발달되어 있어 작은 식물체의 부유에 중요한 역할을 하는 것으로 추정되었다. 어린 엽상체에는 전형적인 엽육세포가 엽신의 대부분을 차지하나 성숙함에 따라 세포간극이 확장되어 하피 부위에 커다란 기실로 신장된다. 하피 주위의 엽육세포들은 다른 수생식물의 기실 형성과 같은 양상으로 신장되는 기실에 밀려 얇은 층으로 되어 기실을 접하게 된다(Rascio et al., 1994). 엽상체내 엽육세포 엽록체에는 대부분 그라나가 발달하였는데 이는 연결사 및 뿌리세포에 분포하는 엽록체와 거의 같은 유형이었고 이러한 엽록체의 구조는 *Lemna* (Beaumont & Grenier, 1980), *Spirodela* (Formin et al., 1992), *Wolffia* (Anderson et al., 1973; Bernard & Bernard, 1990; White & Wise, 1998), 그리고 *Eloдея* (Rascio et al., 1994) 등의 일부 부유부엽성 수생식물에서 보고된 바 있다. 또한 많은 엽육세포들은 액포에 탄닌을 축적하여 탄닌세포화 되거나 결정체들을 형성하여 이형세포화 되었는데 이는 수중의 원생생물이나 해충으로부터 엽상체를 보호하기 위해 발달시키는 일종의 엽육세포 변형현상으로 간주된다(이, 1997). 상피에는 비후된 각피층이나 wax 층이 발달하지 않았는데 이것 또한 여러 수생식물에서 공통적으로 나타나는 특성 중의 하나이다(Mauseth, 1988; 이, 1997). 엽상체의 상피에는 다른 *Spirodela* 종의 경우와 같이(Klich et al., 1986) 불규칙형의 기공이 흔히 관찰되었다. 본 연구에서 조사된 하피의 기공은 크기 $17.0-24.0 \times 14.0-18.0 \mu\text{m}$ (길이 \times 폭)으로서 1 mm^2 단위 면적당 125-140개 분포하였다. 동일 종에서 엄(1990)은 $20.0-25.0 \times 12.5-17.5 \mu\text{m}$ 크기의 기공이

152-162개/ mm^2 분포한다고 보고한 바 있다. 그러나 본 실험에서 측정된 기공의 크기 및 빈도는 동일 종의 다른 식물체에서 조사된 크기 및 분포빈도의 범주를 크게 벗어나지 않으므로, 이는 식물체가 서식하는 각기 다른 수중 환경에 의해 기인된 것이라 사료되었다.

개구리밥의 엽상체들은 모엽상체에서 기원한 연결사에 의해 연결되는데 탈리층에서 모엽상체 및 자엽상체는 분리된다. 연결기능을 활발히 수행하는 연결사 세포에는 액포의 형성이 미비하고 세포질이 분산되어 있으나 연결사 조직에서 일어나는 이러한 현상에 대해서는 전혀 알려진 바 없다. 그러나 연결사 세포에도 엽상체나 뿌리조직에서와 같이 엽록체가 발달하여 연결기능 이외에도 광합성을 수행할 수 있음을 암시하였다. 연결사의 중심에는 뿌리에서와 같이 유관속의 발달이 미비하였으나 기실은 형성되지 않아 뿌리와는 다른 양상을 보였다.

식물체의 뿌리는 일반적으로 고정, 흡수, 저장 및 통도기능을 수행하는데(고 등, 1981; Mauseth, 1988; 이, 1997), 개구리밥의 뿌리는 엽상체 하피에서 형성되어 직접 수분을 흡수하며 생장 기간내 물속에 늘어서 있다(윤, 1990). 근관에 의해 보호되어 있는 뿌리 정단부위의 근정단 분열조직에서는 분화 초기단계에 분열이 불균등하게 아주 빠르게 일어나 시원세포를 기준으로 다양한 세포들로 발달하였다. 이때의 어린 뿌리조직 내에는 세포간극이나 기실이 형성되지 않으나 뿌리가 신장하여 유관속이 다소 분화되고 여러 세포유형으로 분화 발달하기 시작하면 피층 내에는 수 개의 기실이 형성되어 부유 기능을 첨가하였다. 피층 세포간에는 대사산물의 원활한 이동 및 수송에 관여하는 원형질연락사가 아주 잘 발달되어 있고, 피층세포 내에는 조면세포체, 골지체, 미토콘드리아, 엽록체 등이 특징적으로 발달하였다. 뿌리세포와 근관세포층은 이미 발달초기에 매우 다르게 분화하여 뿌리를 덮고 있는 근관세포는 내부의 뿌리를 보호하고 뿌리세포들과 함께 작은 식물체의 무게중심을 잡는 중요한 역할을 하는 것으로 추정되고 있다(윤, 1990).

이와 같이 개구리밥(*Spirodela polyrhiza*)은 매우 축소된 식물체를 이루나 구조적으로는 효율적으로

발달된 분화체계를 이룬다. 엽상체의 하표피 부위 및 뿌리의 피층조직 내에 잘 발달되어 있는 기실은 부유와 양분 흡수에 주요 기능을 수행하며, 동일조직에서 기원하는 연결사와 뿌리는 극성과 함께 매우 다르게 분화하여 연결사는 측부생장으로, 뿌리는 수직으로 발달하여 각각의 기능을 수행한다. 이들 조직내 세포 또한 매우 다르게 분화하여 연결사 및 뿌리, 근관은 각기 특징적인 미세구조를 지닌 세포들로 발달한다. 또한 이들은 식물체 전체에 엽록체를 함유하여 광합성을 수행할 수 있으므로 활발한 자엽상체 형성 및 성장발달에 필요한 양분을 원활히 공급할 수 있을 것이다. 이러한 구조는 수표면에 부유하여 빠르게 성장하는 작은 식물체의 크기와 이들의 짧은 생활환과 밀접한 관계가 있을 것으로 추정된다.

참 고 문 헌

- 고경식, 임경빈, 임응규: 식물형태학. Woosung Munhwasa, Seoul, pp. 94-96, 1981. (Korean)
- 엄미영: 한국산 수생식물 잎의 표피형에 관한 연구. Thesis for Master, Graduate School, Sungshin Women's University, pp. 4-8, 1990. (Korean)
- 이유성: 현대식물형태학. Toseochulpan Woosung, Seoul, pp. 251-286, 1997. (Korean)
- 윤석금: 물풀의 비밀. Woongjin Chulpansa, Seoul, pp. 5-11, 1990. (Korean)
- Anderson JL, Thomson WW, Swader JA: Fine structure of *Wolffia arrhiza*. Can J Bot 51 : 1619-1622, 1973.
- Beaumont GA, Grenier LG: Effects physiologiques de l'atrazine a doses subletales sur *Lemna minor*. V. Influence sur l'ultrastructure des chloroplastes. Can J Bot 58 : 1571-1577, 1980.
- Bernard FA, Bernard JM: Flower structure, anatomy and life history of *Wolffia australiana* (Benth.) den Hartog and van der Plas. Bull Torrey Bot Club 117 : 18-26, 1990.
- Echlin P, Lai CE, Hayes TL: Low-temperature X-ray microanalysis of differentiating vascular tissue in root tip of *Lemna minor* L. J Microscopy 126 : 285-306, 1982.
- Formin AV, Ladygin G, Semenova GA: Accumulation of pigments and formation of chloroplast ultrastructure in the process of greening of etiolated duckweed plants. Sov Plant Physiol 38 : 483-488, 1992.
- Ice JC, Couch R: Nutrient absorption by duckweed. J Aquat Plant Manage 25 : 30-31, 1987.
- Kim IS: Water storage cells in succulent *Orostachys malacophyllus*. Kor Soc Electron Micro 26 : 457-463, 1996.
- Klich MG, Mujica MS, Fernandez OA: The effect of gibberellic acid on the buoyancy *Spirodela intermedia* W. Koch. Aquat Bot 21 : 63-69, 1985.
- Klich MG, Mujica MB, Fernandez OA: Stomatal morphology and ontogeny in *Spirodela intermedia* W. Koch. Aquat Bot 26 : 155-164, 1986.
- Leon EM, Sutton DL: Influence of plant position on growth of duckweed. J Aquat Plant Manage 25 : 28-30, 1987.
- Ley S, Dölger K, Appenroth KJ: Carbohydrate metabolism as a possible physiological modulator of dormancy in turions of *Spirodela polyrrhiza* (L.) Schleiden. Plant Sci 129 : 1-7, 1997.
- Mauseth JD: Plant Anatomy. The Benjamin/Cummings Publishing Co., Menlo Park, pp. 257-261, 1988.
- Meijer LE, Sutton DL: Influence of plant position on growth of duckweed. J Aquat Plant Manage 25 : 28-30, 1987.
- Newton RJ, Shelton SJ, Duffey JE: Turion formation and germination in *Spirodela polyrrhiza*. Amer J Bot 65 : 421-428, 1978.
- Rascio N, Mariani P, Vecchia FD, Zanchin A, Pool A, Larcher W: Ultrastructural and photosynthetic features of leaves and stems of *Elodea canadensis*. J Plant Physiol 144 : 314-323, 1994.
- Sand-Jensen K: Environmental variables and their effect on photosynthesis of aquatic plant communities. Aquat Bot 34 : 5-25, 1989.
- Satake K, Shimura S: Carbon dioxide assimilation from air and water by duckweed *Spirodela polyrrhiza* (L.) Schleid. Hydrobiologia 107 : 51-55, 1983.
- Sutton DL, Ornes WH: Growth of *Spirodela polyrrhiza* in static sewage effluent. Aquat Bot 3 : 231-237, 1977.
- Wang W, Lewis MA: Metal accumulation by aquatic macrophytes. In: Wang W, Gorsuch JW, Huges JS, eds, Plants for Environmental Studies, pp. 367-416, Lewis Publishers, New York, 1997.
- White SL, Wise RR: Anatomy and ultrastructure of *Wolffia columbiana* and *Wolffia borealis*, two nonvascular aquatic angiosperms. Intl J Plant Sci 159 : 297-304, 1998.
- Witzum A: Ultraviolet irradiation and pigment cell idioblasts in *Spirodela origorhiza* (Lemnaceae). Amer J Bot 61 : 713-

716, 1974a.

Witztum A: Abscission and the axillary frond in *Spirodela origorrhiza* (Lemnaceae). Amer J Bot 61 : 805-808, 1974b.

< 국문초록 >

미분화된 엽상체 및 연결사와 뿌리로만 구성되어 있는 개구리밥 (*Spirodela polyrhiza*) 식물체의 구조분화 양상이 연구되었다. 엽상체는 엽육세포 내에 발달하여 있는 다수의 엽록체와 얇은 막으로 구획화된 기실이 잘 발달되어 있어 광합성 및 부유에 중요한 역할을 하고, 측부로 발달하는 연결사에는 기실이 형성되어 있지 않으며

탈리층을 형성하여 모엽상체와 자엽상체를 분리시킨다. 뿌리는 흡수 및 식물체의 중심을 잡는데 중요한 역할을 하며, 근단부위에는 액포화된 근관세포층이 뚜렷히 발달하여 있다. 뿌리의 피층에는 원주형 기실이 형성되어 있으며 피층세포 내에는 잘 발달된 골지체, 미토콘드리아, rER 등의 세포소기관들이 치밀하게 분포하였다. 엽상체, 연결사, 뿌리세포에는 엽록체가 발달하며 다수의 원형질 연락사가 분포하였다. 개구리밥은 10 mm 내외의 매우 축소된 식물체를 구성하나 효율적으로 잘 발달된 구조분화체계를 이룬다. 이러한 구조는 수표면에 부유하여 빠르게 성장 및 증식하는 작은 식물체 크기와 이들의 짧은 생활환과 밀접한 관계가 있는 것으로 추정된다.

FIGURE LEGENDS

- Fig. 1.** Adaxial side of the *Spirodela polyrhiza* showing several roots (arrow) and a daughter frond (D) emerging from the mother frond (M). Bar = 1 μ m.
- Fig. 2.** Anomocytic stomata (st) in the upper epidermis. Bar = 20 μ m.
- Fig. 3.** Striated cuticles (arrow) on upper epidermal cells from Fig. 2. Note the absence of epicuticular waxes over the surface. Bar = 5 μ m.
- Fig. 4.** Small intercellular air spaces (A) within mesophyll tissue of the daughter frond. Bar = 75 μ m.
- Fig. 5.** Dense cytoplasm in mesophyll cells of the daughter frond. S=starch grain. Bar = 2 μ m.
- Fig. 6.** Air chamber (AC) formed close to the lower epidermis of the mother frond. Bar = 50 μ m.
- Fig. 7.** Mesophyll chloroplasts with numerous starch grains (S) in the mother frond. Bar = 3 μ m.
- Fig. 8.** Numerous plasmodesmata (PD) in mesophyll cell interfaces. Bar = 1 μ m. Inset: Plasmodesmata in longitudinal view (arrows). Bar = 0.3 μ m.
- Fig. 9.** Idioblastic tannin-accumulating cell (T) in the frond mesophyll. Bar = 3 μ m.
- Fig. 10.** A stalk (ST) laterally connected to the frond. Bar = 40 μ m.
- Fig. 11.** Part of a stalk cell exhibiting diffuse cytoplasm. Bar = 2 μ m. C = chloroplast, N = nucleus. Inset: Degrading stalk cells after frond separation. Bar = 2 μ m.
- Fig. 12.** Developing roots. R = root. Bar = 70 μ m. Inset: Initiation of the root system (arrow head) over the foliage sheath (F). Bar = 100 μ m.
- Fig. 13.** Uneven and irregular cell divisions (arrow heads) among immature root cells. Bar = 1 μ m.
- Fig. 14.** Part of cortical cells in the developing root. C = chloroplast, G = Golgi, N = nucleus. Bar = 2 μ m.
- Fig. 15.** Highly vacuolated root cortical (R) and root cap (RC) cells. Bar = 2 μ m.



