

한국산 녹조식물 해캄속(*Spirogyra*)의 수리표현학

김지환* · 김영환¹ · 이인규²

(충북대학교 기초과학연구소*, ¹충북대학교 생명과학부, ²서울대학교 생명과학부)

Numerical Phenetics of the Genus *Spirogyra* (Zygnematales, Chlorophyta) in Korea

Jee-Hwan Kim*, Young Hwan Kim¹ and In Kyu Lee²

* Institute for Basic Science, Chungbuk National University, Cheongju 361-763

¹School of Life Science, Chungbuk National University, Cheongju 361-763 and

²School of Biological Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

The morphotaxonomic characters of the genus *Spirogyra* were investigated to clarify their taxonomic category and the variation range among species on the basis of comparative morphological and numerical analyses by unialgal cultures and field samples collected from various freshwater habitats in Korea. 25 characters selected on morphological feature of the species were examined on 568 individuals for morphological comparisons and numerical analyses. Width, length and their length/width ratio of vegetative cell, shape of septum, chloroplast number, maximum width, width, length and their length/width ratio of female gametangium, length of male gametangium, size and shape of zygospore, and cell wall ornamentation of the spore showed a comparatively high vector in principal component analysis. In cluster analysis, 15 taxa analysed were divided into 8 major groups by the average taxonomic distance 1.0 level. Considering the morphology and numerical analysis, *Spirogyra crassoidea* could not be recognized as an independent species, therefore it was treated as a variety of *S. ellipsospora*. *S. koreana* (nom. invalidum), recognized as a new taxon, is under the investigation for its clear taxonomic category.

Key Words: cluster analysis, morphotaxonomic characters, principal component analysis, *Spirogyra*

서 론

녹조류 해캄속(*Spirogyra*)은 별해캄목(Zygnematales) 별해캄과(Zygnemataceae)에 속하는 분류군으로 전 세계 담수역에 흔하게 분포하며 현재까지 400여 종이 포함되는 것으로 알려져 있다(Kadlubowska 1984, Devi and Panikkar 1994). 본 속 식물은 원주형의 단핵 세포가 일렬로 배열된 분지하지 않는 사상체로 물 속에 자유로이 부유하며 가끔 부착생활을 하기도 한다. 각 세포에는 1-16개의 엽록체가 나선형으로 배열되어 있고, 엽록체에는 많은 수의 피레노이드가 있으며, 1개의 핵이 세포질의 중앙부에 위치하고 있다(Transeau 1951; Randhawa 1959).

해캄속은 Link(1820)에 의하여 처음으로 설정된 이래,

Kützing(1843, 1849), Czurda(1932), Jao(1935), Traseau(1951) 등에 의해 형태분류의 기초가 확립되었다. 그 후 본 속 식물에 대한 범세계적인 분류 연구가 수행된 바 없으나, 지역분류군에 대한 식물상 연구를 통하여 영양세포의 크기, 엽록체의 수, 격벽의 모양, 암배우자낭의 모양, 접합관의 기원과 모양, 포자의 크기와 모양, 포자벽의 무늬 등이 전형적인 식별형질로 인정되어 왔다(Randhawa 1959; Yamagishi 1966; Jao and Hu 1978; Kadlubowska 1984; Hoshaw and McCourt 1988; Devi and Panikkar 1994). 그러나 본 속의 경우 체형이 매우 단순하고, 속내 분류군의 많은 종들 간에 형태 변이의 폭이 중복되며, 단일 클론(clone)의 실내배양된 개체들도 형태와 염색체수가 매우 다양하게 나타나는 배수성 중복합체(polyplod species complex) 현상이 관찰되고(Allen 1958), 자연집단에서도 중복합체(species complex) 현상이 확인되고 있어서 형태 식별형질에 의한 종의 범주와 분류군의 위치를 설정하는 데 많은 혼란을 겪어왔다(McCourt

*Corresponding author (jeehwan1@hanmail.net)

et al. 1986; Wang et al. 1986; Hoshaw et al. 1987). 따라서 현재까지 기재된 대부분의 종들은 실내배양을 통한 검증과정 없이 자연집단을 대상으로 형태의 특징에 근거하여 기재되었기 때문에, 실내배양을 이용하여 각 종에 대한 중복합체 현상이나 배수성에 의한 형태변이 혹은 잡종의 유무 등의 재검토가 필요한 실정이다.

해감속 식물에 대한 수리표현학 연구는 아직 수행된 바 없으나 조류의 다른 분류군에 대한 연구결과로 보아, 이러한 연구는 형태 변이의 폭이 넓은 분류군에 대한 분류학적 문제점을 해결하는 데 적합한 것으로 인식되고 있다(Ducker et al. 1965; McGuire 1984; Necchi et al. 1993). 따라서 체형이 단순하고 형태 변이의 폭이 많은 종에서 중복되는 본 속 식물에 대한 수리표현학 연구는 종의 독립성과 범주를 규명하는 데 보다 효율적인 연구 접근법이 될 수 있다.

한국산 해감속 식물은 정(1962)에 의해 6종이 처음으로 기재된 후 현재까지 37종이 보고 되어 있으나, 대부분 자연집단에 대한 기재적인 연구이며(정 1968; 정 1970, 1990; 정 등 1972; 이와 박 1985; 정과 김 1991), 실내배양을 통한 분류 연구는 아직 시도된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 한국산 해감속 식물을 대상으로 자연집단에 대한 연구와 함께 실내배양을 통하여 유성생식을 유도하고, 접합포자를 포함한 형태 식별형질의 검토가 가능한 개체군을 중심으로 식별형질들을 비교 검토하고 이를 수리표현학 방법으로 분석하여, 1) 현재까지 전통적으로 인식되고 있는 각 분류군의 식별형질을 재검토하고, 2) 주요 식별형질들의 변이 형태와 그 폭을 파악하여 종의 독립성과 그 범주를 규명하며, 3) 이들 분류군 간의 표현형의 유연관계(phenetic relationship)를 밝히고자 시도되었다.

재료와 방법

본 연구는 1996년 5월부터 1998년 6월까지 우리나라 각지의 호소, 저수지, 하천, 논 등의 다양한 서식처에서 채집한 해감속 식물을 대상으로 수행하였다. 채집한 재료는 저온 보관하여 실험실로 옮긴 후, 일부는 5% 포르말린-담수 용액에 고정하여 액침 표본으로 만들어 서울대학교 생물학과 표본관(SNU)에 보관하였고, 나머지는 순수 분리하여 실내배양의 재료로 사용하였다. 식물체의 형태 특징은 광학현미경(Olympus BH-2, BX50)과 미분간섭차현미경(Olympus Vanox AH-2, DIC)을 사용하여 관찰하고 측정하였다.

본 연구에 사용된 재료는 자연집단과 실내배양을 통하여 유성생식이 확인된 *Spirogyra africana* (Fritsch) Czurda, *S.*

Table 1. Characters used for morphological analysis and numerical phenetics of the genus *Spirogyra* in Korea

1. Length of vegetative cell (μm)
2. Width of vegetative cell (μm)
3. Length - width ratio of vegetative cell (Character 1/Character 2)
4. Number of chloroplasts
5. Number of twists in chloroplasts
6. Length of female gametangium (μm)
7. Maximum width of female gametangium (μm)
8. Width of female gametangium in cross wall (μm)
9. Length - width ratio of female gametangium (Character 6/Character 8)
10. Maximum width - width in cross wall ratio of female gametangium (Character 7/Character 8)
11. Length of spore (μm)
12. Maximum width of spore (μm)
13. Length - maximum width ratio of spore (Character 11/Character 12)
14. Spore width at 1/4 point from the end
15. Character 14/(Spore width at 1/2 point from the end)
16. Distance from the spore end to the widest point of spore (μm)
17. Length of male gametangium (μm)
18. Width of male gametangium (μm)
19. Character 17/Character 18
20. Shape of septum: frequency of replicate septum per a OTU (in filament with five cells)
21. Sexuality: frequency of aplanospore per a OTU
22. Shape of spore (Character 16/Character 11)
23. Ornamentation of spore: absent (0), present (1)
- * Shape of the female gametangium:
24. Swollen only conjugation side: $[(\text{Character } 7 \times 2) - \text{Character } 8] / \text{Character } 8$
25. Swollen only outer side: $[(\text{Character } 7 \times 2) - \text{Character } 8] / \text{Character } 8$

decimina (Müller) Kützing, *S. distenta* Transeau, *S. dubia* Kützing, *S. ellipsozona* Transeau, *S. ellipsozona* var. *crassoidea* Transeau, *S. frigida* Gay, *S. gracilis* (Hassall) Kützing, *S. koreana* (nom. invalidum)¹⁾, *S. mirabilis* (Hassall) Kützing, *S. submajuscula* Kützing, *S. peipingensis* Jao, *S. varians* (Hassall) Kützing, *S. variformis* Transeau와 *S. weberi* Kützing 등 14종 1 변종이 포함되는 총 568개체를 대상으로 하였다(Appendix).

식별형질의 분석

식별형질의 분석은 14종 1변종 568개체를 대상으로 수행하였다. 형질의 선택은 지금까지 종을 구분하는 주요 식별형질로 흔히 사용되는 영양세포의 크기, 암·수 배우자낭의 크

1) 본 종은 김과 김(2002)의 저서에서 신종(*S. koreana* sp. nov.)으로 다루어 진 바 있으나, 비합법적인 명명이므로 본 논문에서는 *S. koreana* (nom. invalidum)로 사용하였다.

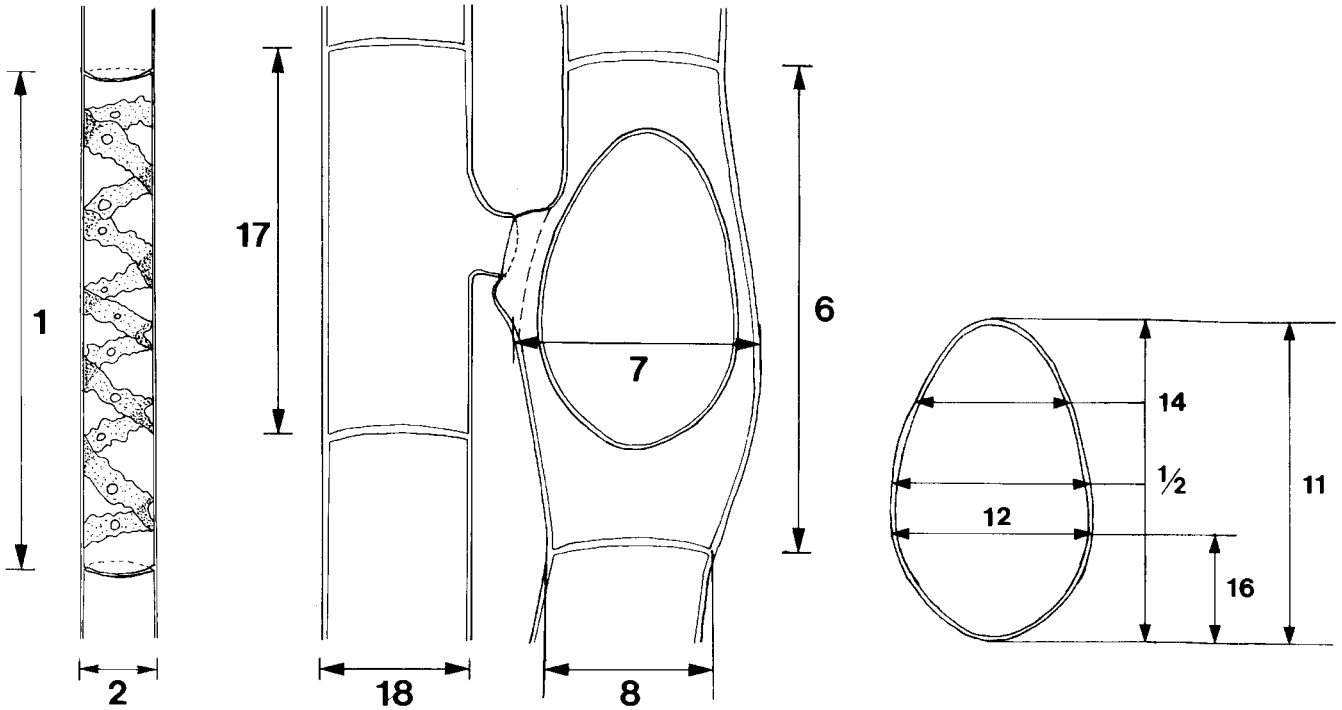


Fig. 1. A diagram showing vegetative and fertile cell characters of *Spirogyra* for morphological analysis. Numbers correspond to the character numbers in Table 1.

기, 포자의 크기 등을 포함한 19개의 정량형질과 격벽의 모양, 생식 유형, 포자의 모양 등 6개의 정성형질을 선택하였다(Table 1, Fig. 1). 정성형질 가운데, 격벽의 모양(형질 20)과 생식 유형(형질 21)은 5세포를 1단위 사상체로 간주하여 1단위 사상체당 각각 주름진 격벽과 부동포자가 나오는 빈도를 계산하였고, 포자의 모양(형질 22)은 포자의 끝으로부터 폭이 가장 넓은 점까지의 거리를 포자의 길이로 나누어 측정하였다. 암배우자낭의 모양(형질 24, 25)은 암배우자낭의 최대 폭(형질 7)과 격벽에서의 폭(형질 8)을 각각 2로 나눈 후, 접합한 쪽과 반대쪽으로 팽창한 경우로 구분하여 암배우자낭의 최대폭/2의 값을 암배우자낭의 격벽에서의 폭/2의 값으로 나누어 측정하여 가능한 한 정량화하였다.

수리표현학 분석

본 연구에서 운영분류단위, 즉 OTU(operating taxonomic unit)는 5세포를 가진 사상체 1개를 1개체로 정하고, 14종 1변종에 포함되는 총 568개체를 대상으로 식별형질 분석에서 얻어진 25개 형질을 사용하여 주성분분석(principle components analysis: PCA)과 유집분석(cluster analysis: CA)을 실시하였다.

주성분분석은 SAS 프로그램(Release 6.04)을 사용하여 초기 자료행렬로부터 correlation matrix를 계산한 후 수행하였다. 유집분석은 NTSYS-pc 프로그램(Rohlf 1998)을 사용하였고, 각 형질의 측정치를 표준화한 후 OTU간의 average

taxonomic distance를 계산하였으며, UPGMA 방법으로 유집하여 phenogram을 작성하였다(Sneath and Sokal 1973).

결 과

식별형질의 분석

한국산 해감속 식물을 대상으로 식별형질을 분석한 결과, 영양세포의 크기, 엽록체의 수, 격벽의 모양, 생식 유형, 암배우자낭의 모양, 포자의 크기와 모양, 포자벽의 무늬 등이 종을 구분하는 유용한 식별형질이 됨을 확인하였고, 25개 형질에 대한 분류군내의 변이 폭은 Fig. 2에 나타낸 바와 같다.

영양세포: 영양세포의 길이는 *Spirogyra dubia*, *S. gracilis*, *S. koreana* (nom. inval.), *S. mirabilis*, *S. submajuscula*와 *S. varians*에서 형질 값이 중복되어 이들 분류군 간에 뚜렷한 차이가 없었으나, *S. africana*와 *S. variformis*에서는 비교적 길고, *S. distenta*와 *S. peipingensis*에서는 비교적 짧았다(Fig. 2, 형질 1). 세포의 폭은 *S. ellipsozona*, *S. ellipsozona* var. *crassoidea*와 *S. peipingensis*에서 현저히 넓고, *S. frigida*에서는 가장 좁았으며, 일부 분류군 간에 변이의 폭이 중복되었다(Fig. 2, 형질 2). 한편, 세포의 길이와 폭의 비는 *S. frigida*에서 최대 값을 보여 다른 분류군에 비하여 상대적으로 길이가 길고 폭이 좁은 경향을 나타내었고, *S. distenta*, *S. ellipsozona*, *S. ellipsozona* var. *crassoidea*, *S. submajuscula*와 *S. peipingensis*에서는 매우 작은 값

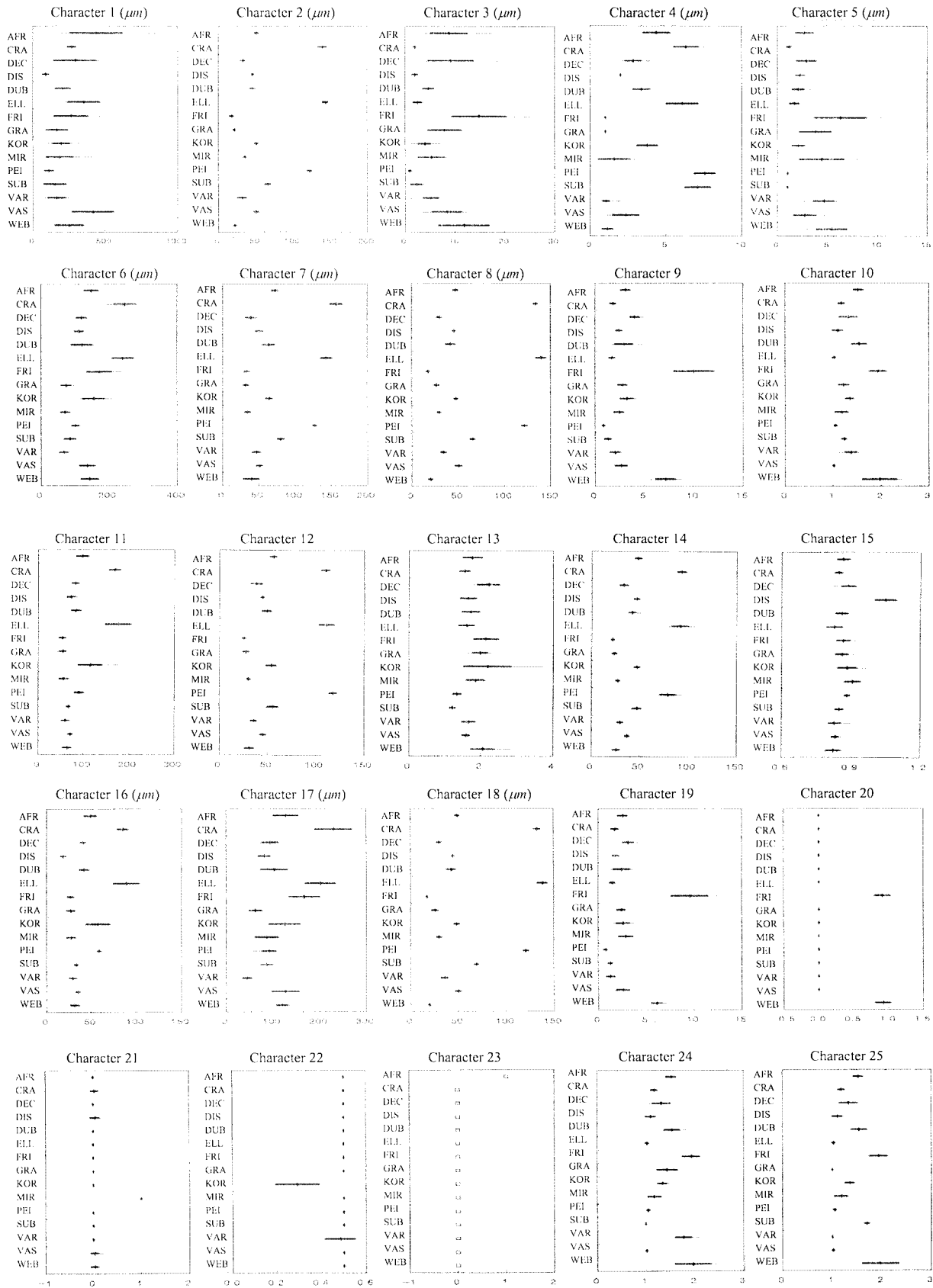


Fig. 2. Ranges and means of twenty-five characters for 15 taxa of *Spirogyra* in Korea. Character numbers correspond to those in Table 1. Taxa codes: AFR, *S. africana*; DEC, *S. decimina*; DIS, *S. distenta*; DUB, *S. dubia*; ELL, *S. ellipsospora*; CRA, *S. ellipsospora* var. *crassoidea*; FRI, *S. frigida*; GRA, *S. gracilis*; KOR, *S. koreana* (nom. inval.); MIR, *S. mirabilis*; PEI, *S. peipingensis*; SUB, *S. submajuscula*; VAR, *S. varians*; VAS, *S. variformis*; WEB, *S. weberi*.

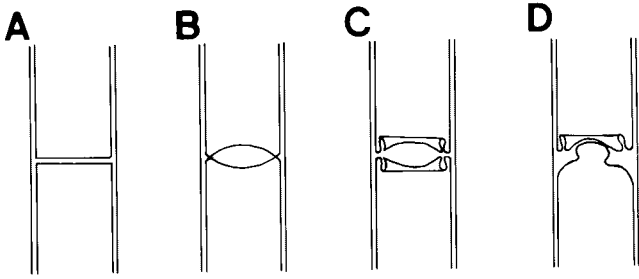


Fig. 3. Septum shapes of *Spirogyra*. A and B. Plane type. C and D. Replicate type. (A and B: *Spirogyra africana*, *S. decimina*, *S. distenta*, *S. dubia*, *S. ellipsozona*, *S. ellipsozona* var. *crassoidea*, *S. gracilis*, *S. koreana* (nom. inval.), *S. mirabilis*, *S. peipingensis*, *S. submajuscula*, *S. varians*, *S. variformis*, C and D: *S. frigida*, *S. weberi*)

을 보여 세포의 폭은 넓지만 길이는 짧은 특징을 반영하였다 (Fig. 2, 형질 3).

엽록체: 엽록체의 수는 세포당 1-8개로 다양하며 분류군 간에 중복되었지만, *Spirogyra frigida*, *S. gracilis*와 *S. varians*에서 1개, *S. distenta*에서 2개로 일정하였고, *S. weberi*에서 1-2개가 관찰되었다. 또한 *S. mirabilis*와 *S. variformis*에서 1-3개, *S. africana*, *S. decimina*, *S. dubia*와 *S. koreana* (nom. inval.)에서는 2-5개, 그리고 *S. ellipsozona*, *S. ellipsozona* var. *crassoidea*, *S. peipingensis*와 *S. submajuscula*에서는 5-8개로 일부 분류군 간에 형질범위가 중복되었다(Fig. 2, 형질 4).

엽록체의 회전수는 1-10회전으로 다양하였으며, *S. ellipsozona*, *S. ellipsozona* var. *crassoidea*, *S. peipingensis*와 *S. submajuscula* 같이 세포의 폭이 넓고 엽록체의 수가 많은 분류군에서는 회전수가 비교적 적었고, 세포의 폭이 상대적으로 좁고 엽록체 수가 적은 *S. frigida*에서는 회전수가 가장 많았다(Fig. 2, 형질 5).

격벽: 해삼속 식물에서 격벽의 유형은 plane, replicate, semireplicate, colligate 그리고 unduliseptate로 구분되며, 종을 구분하는 주요 식별형질로 인식되어 왔다(Randhawa 1959, Kadlubowska 1984, Devi and Panikkar 1994). 본 연구 결과 한국산 식물에서 관찰되는 격벽의 모양은 2가지 유형의 4가지 형태로 구분되었다(Fig. 3). 첫째, 편평한 끝 벽을 갖는 유형(plane type)으로 횡단세포벽의 중간 박막층(middle lamella)이 팽창하지 않으며 인접한 세포 간에 평행하게 위치한 형태(Fig. 3A)와, 인접한 세포 쪽으로 팽창되어 서로 겹친 형태(Fig. 3B)로 구분되었으며, 조사된 대부분의 종은 여기에 속하였다. 둘째, 횡단세포벽의 중간 박막층이 확대되어 구형의 주름이 형성된 유형(replicate type)으로, 인접한 양쪽 세포에서 모두 주름이 생긴 형태(Fig. 3C)와 한쪽에서만 주

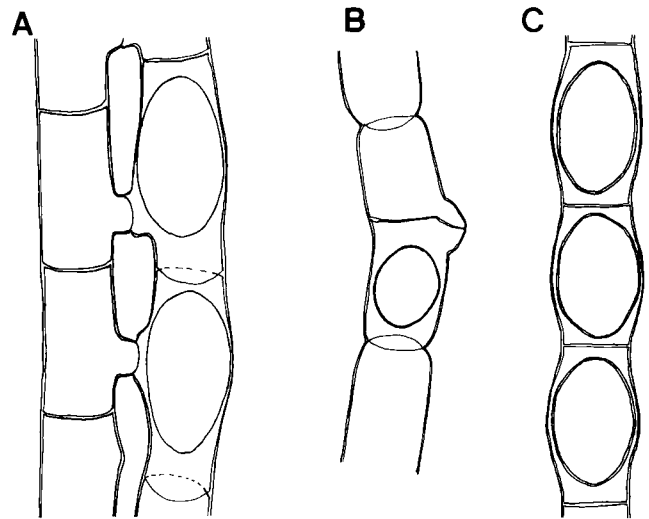


Fig. 4. Types of zygote formation of *Spirogyra*. A and B. Sexual reproduction: A, Scalariform conjugation; B, Lateral conjugation. C. Asexual reproduction, forming aplanospore. (A: *Spirogyra africana*, *S. decimina*, *S. distenta*, *S. dubia*, *S. ellipsozona*, *S. ellipsozona* var. *crassoidea*, *S. frigida*, *S. gracilis*, *S. koreana* (nom. inval.), *S. peipingensis*, *S. submajuscula*, *S. varians*, *S. variformis*, *S. weberi*, B: *S. gracilis*, C: *S. distenta*, *S. ellipsozona* var. *crassoidea*, *S. mirabilis*, *S. varians*, *S. variformis*, *S. weberi*)

름이 생긴 형태(Fig. 3D)가 동일한 사상체에서 나타나며, *S. frigida*와 *S. weberi*가 속하였다(Fig. 2, 형질 20).

생식유형: 해삼속 식물의 생식 유형은 사다리꼴 접합 또는 측면접합에 의한 유성생식과 부동포자(aplanospore)에 의한 무성생식으로 구분되었다(Fig. 4). *Spirogyra mirabilis*는 주로 부동포자에 의한 무성생식을 하고 접합포자는 극히 드물게 관찰된 반면, *S. africana*, *S. decimina*, *S. dubia*, *S. ellipsozona*, *S. frigida*, *S. koreana* (nom. inval.), *S. submajuscula*와 *S. peipingensis*는 사다리꼴 접합에 의한 유성생식만이 관찰되었고, *S. gracilis*는 사다리꼴 접합과 드물게 측면접합이 관찰되었으며, *S. distenta*, *S. ellipsozona* var. *crassoidea*, *S. varians*, *S. variformis*와 *S. weberi*는 사다리꼴 접합에 의한 유성생식을 하면서 드물게 부동포자의 형성도 관찰되었다(Fig. 2, 형질 21).

수정된 세포: 본 속 식물에서 비운동성 배우자의 접합에 의하여 유성생식이 이루어지는 경우, 수배우자낭은 투명하고 영양세포에 비하여 짧아질 뿐 폭의 변화는 없고 원주형으로 일정하나, 암배우자낭은 다음의 6가지 형태로 구분되었다(Fig. 5). 첫째, 암배우자낭의 내·외벽이 곧은 원주형은 *S. distenta*, *S. ellipsozona*, *S. ellipsozona* var. *crassoidea*, *S. peipingensis*와 *S. variformis*에서 관찰되었다(Fig. 5A). 둘째, 암

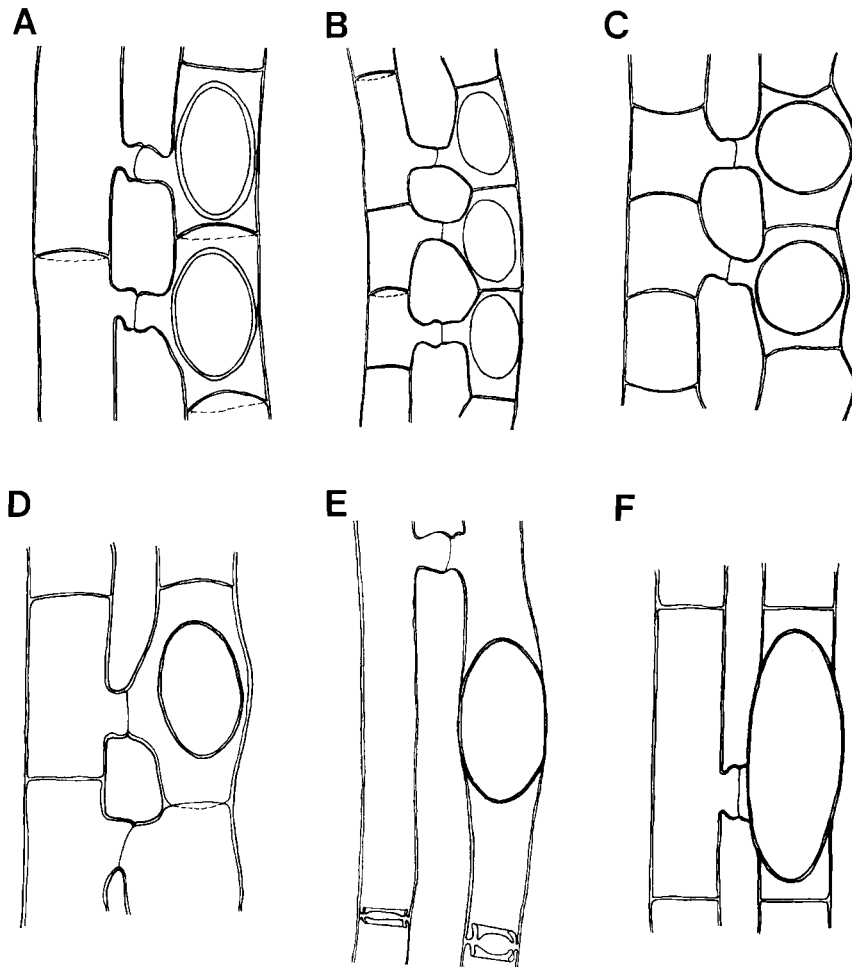


Fig. 5. Fertile cell shapes of *Spirogyra*. A. Cylindrical type. B-F. Inflated type: B, Inner inflated type; C, Outer inflated type; D, Bi-inflated type; E, Cylindrically inflated type; F, Enlarged type. (A: *Spirogyra distenta*, *S. ellipsospora*, *S. ellipsospora* var. *crassoidea*, *S. peipingensis*, *S. variformis*, B: *S. gracilis*, *S. varians*, C: *S. submajuscula*, D: *S. africana*, *S. dubia*, *S. frigida*, *S. koreana* (nom. inval.), *S. mirabilis*, E: *S. weberi*, F: *S. decimina*)

배우자낭의 벽이 팽창하는 형태로 이들은 그 팽창하는 위치와 모양에 따라 다시 5가지로 구분되었다. 1) 암배우자낭의 내벽이 팽창하고 외벽은 곧은 형태를 한 것으로, *S. gracilis*와 *S. varians*가 여기에 속하였다(Fig. 5B). 2) 암배우자낭의 내벽이 곧고 외벽이 팽창한 형태인 것으로, *S. submajuscula*가 포함되었다(Fig. 5C). 3) 암배우자낭의 양쪽 벽이 모두 팽창한 형태를 하는 것으로, *S. africana*, *S. dubia*, *S. frigida*와 *S. koreana* (nom. inval.)가 포함되었고(Fig. 5D), 4) 암배우자낭의 길이가 길며 내·외벽이 평행하게 원주형처럼 팽창하는 것으로, *S. weberi*가 속하였으며(Fig. 5E), 5) 암배우자낭이 짧고 접합포자가 접합관 부분까지 채워져서, 암배우자낭의 양쪽 벽에 압력이 가해짐으로서 팽창된 형태를 한 것으로 *S. decimina*가 여기에 속하였다(Fig. 5F).

한편 각 분류군의 암배우자낭의 크기(형질 6-10), 수배우자낭의 크기(형질 17-19)와 암배우자낭의 형태(형질 24, 25)를 정량적으로 분석하여 식별형질로 이용한 결과(Fig. 2), 암

배우자낭의 길이는 *S. ellipsospora*와 *S. ellipsospora* var. *crassoidea*에서 뚜렷이 길고, *S. gracilis*, *S. mirabilis*와 *S. varians*에서 현저히 짧았으며(Fig. 2, 형질 6), 최대 폭과 격벽에서의 폭은 *S. ellipsospora*와 *S. ellipsospora* var. *crassoidea*에서 현저히 넓고, *S. frigida*, *S. gracilis*, *S. mirabilis*와 *S. weberi*에서 매우 좁았다(Fig. 2, 형질 7-8). 길이와 폭의 비는 *S. frigida*에서 최대 값을 보여 다른 분류군에 비하여 길이가 길고 폭이 좁은 특징을 나타내었다(Fig. 2, 형질 9). 최대 폭과 격벽에서의 폭의 비는 *S. frigida*와 *S. weberi*에서 상대적으로 높아 암배우자낭의 양쪽벽이 현저하게 팽창한 특징과 연관되어 나타났으며, *S. distenta*, *S. ellipsospora*, *S. ellipsospora* var. *crassoidea*, *S. peipingensis*와 *S. variformis*에서 상대적으로 낮아 암배우자낭의 벽이 팽창하지 않은 원주형이었다(Fig. 2, 형질 10).

수배우자낭의 길이는 *S. ellipsospora*와 *S. ellipsospora* var. *crassoidea*에서 뚜렷이 길고, *S. varians*에서 가장 짧았으며(Fig. 2, 형질 17), 폭은 *S. ellipsospora*, *S. ellipsospora* var. *crassoidea*와

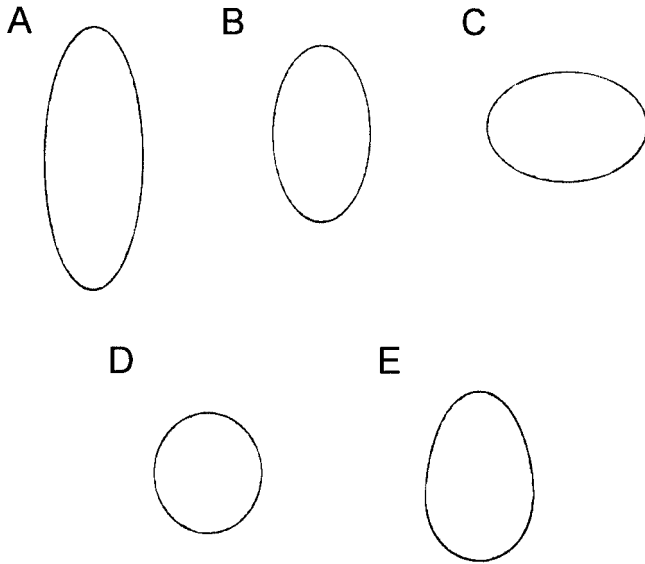


Fig. 6. Zygosporangium shapes of *Spirogyra*. A-C. Elliptical types: A, Narrowly elliptical type; B, Elliptical type; C, Transversely elliptical type. D. Spherical type. E. Ovate type. (A: *Spirogyra decimina*, *S. frigida*, *S. koreana* (nom. inval.), *S. weberi*, B: *S. africana*, *S. distenta*, *S. dubia*, *S. ellipsozona*, *S. ellipsozona* var. *crassoidea*, *S. frigida*, *S. gracilis*, *S. varians*, *S. variformis*, C: *S. peipingensis*, D: *S. submajuscula*, E: *S. dubia*, *S. koreana* (nom. inval.), *S. varians*)

*S. peipingensis*에서 현저히 넓고, *S. frigida*와 *S. weberi*에서 가장 좁게 나타났다(Fig. 2, 형질 18). 한편 수배우자낭의 길이와 폭의 비 역시 *S. frigida*에서 최대 값을 보여 다른 분류군에 비하여 길이가 길고 폭이 좁은 형태를 하였으며, *S. peipingensis*는 매우 작은 값을 보여 길이와 폭의 크기가 거의 유사한 형태적인 특징을 나타내었다(Fig. 2, 형질 19).

포자의 크기, 모양과 색상: 포자의 길이는 *Spirogyra ellipsozona*와 *S. ellipsozona* var. *crassoidea*에서 뚜렷이 길고, *S. frigida*, *S. gracilis*와 *S. mirabilis*에서 현저히 좁았다(Fig. 2, 형질 11). 포자의 최대 폭은 *S. peipingensis*에서 가장 넓었고(Fig. 2, 형질 12), 길이와 최대 폭의 비는 *S. decimina*, *S. frigida*, *S. koreana* (nom. inval.)와 *S. weberi*에서 비교적 큰 값을 보여 포자가 신장된 타원형 내지 난형임을 반영하였고, *S. submajuscula*에서 매우 낮은 값을 보여 포자가 구형임을 반영하였다(Fig. 2, 형질 13). 포자의 1/4 지점에서의 폭은 *S. ellipsozona*와 *S. ellipsozona* var. *crassoidea*에서 뚜렷이 넓었으며, *S. frigida*와 *S. gracilis*에서 가장 좁았다(Fig. 2, 형질 14). 또한 포자 끝으로부터 길이 1/4 지점에서의 폭을 1/2 지점에서의 폭으로 나눈 값은 *S. distenta*에서 비교적 커서, 이 종의 포자가 비교적 넓은 폭을 가진 타원형임을 알 수 있었다(Fig. 2, 형질 15).

포자의 형태는 포자의 길이와 폭의 비(형질 13) 그리고 포

Table 2. Loadings of the first three principal components for 5 vegetative cell characters from the analysis of 333 OTUs among 15 taxa of *Spirogyra*. Character numbers correspond to those in Table 1

No. of character	Component		
	1	2	3
1	0.115	0.784	-0.162
2	-0.488	0.310	0.587
3	0.483	0.424	-0.190
4	-0.508	0.324	-0.016
5	0.506	0.040	0.769
Eigenvalue	2.832	1.468	0.427
Cumulative % of eigenvalue	56.7	86.0	94.6

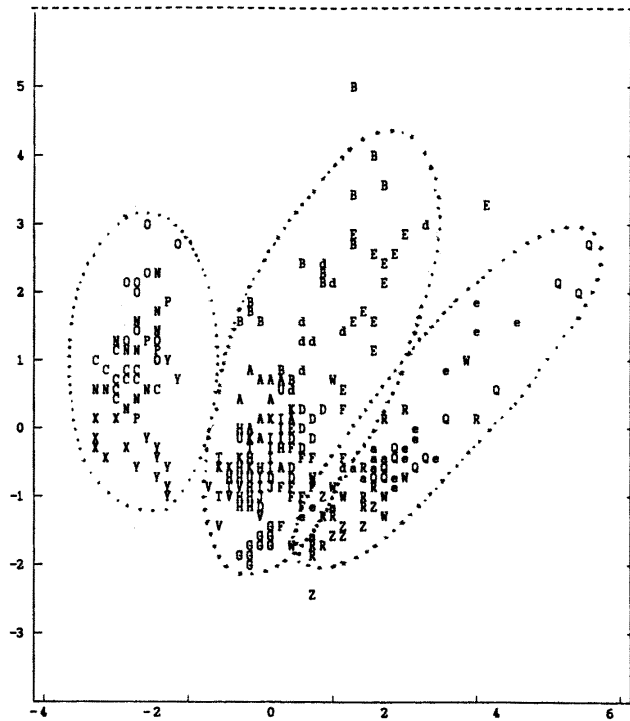
자 끝으로부터 최대 폭까지의 거리를 포자의 길이로 나눈 값(형질 22)을 계산하여 정량적으로 분석하였다. 그 결과 포자는 좁은 타원형, 타원형, 횡 타원형, 구형과 난형의 5가지로 구분되었고(Fig. 6), 일부 종을 제외하고는 다음과 같이 그 형태가 대부분 일정하였다. 첫째, *S. decimina*와 *S. weberi*는 포자의 모양이 좁고 긴 타원형으로 일정하였으나(Fig. 6A), *S. frigida*는 좁고 긴 타원형과 짧은 타원형의 포자(Fig. 6B)가 함께 관찰되었으며, 둘째, *S. peipingensis*는 횡 타원형으로 일정하였고(Fig. 6C), 셋째, *S. submajuscula*는 구형으로 일정하였으며(Fig. 6D), 넷째, *S. koreana* (nom. inval.)는 긴 타원형과 난형(Fig. 6E)의 포자가 함께 관찰되었으나, *S. varians*는 난형과 타원형의 포자가 함께 관찰되었고, 그 외 분류군들은 모두 타원형으로 일정하였다.

수리표현학 분석

한국산 해감속 식물의 형태 변이 양상과 각 분류군의 한계를 파악하기 위하여 14종 1변종에 포함되는 568개체를 대상으로 식별형질 분석에서 얻어진 25개 형질을 사용하여 주성분분석과 유집분석을 수행하였다.

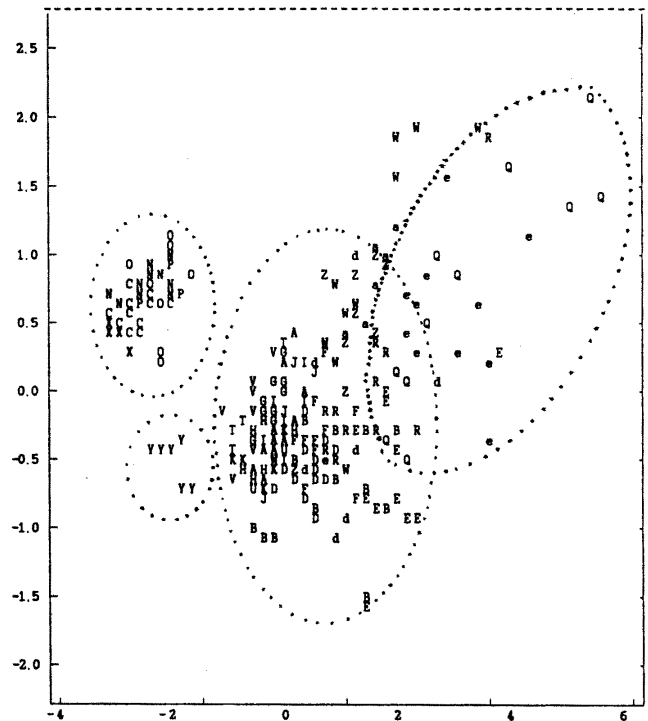
주성분분석: 주성분분석은 3단계로 수행하였고, 그 일차 주성분분석은 한국산 해감속 식물 14종 1변종에 포함되는 333개체를 대상으로 영양세포의 5개 형질(형질 1-5, Table 1)을 사용하여 실시하였다. 주성분분석 결과, 주성분 1, 2, 3이 전체 분산의 94.6%를 설명하는 것으로 나타났으며(Table 2), 나머지 주성분들은 그 기여율이 4% 미만이었다. 주성분 1은 전체 분산의 56.7%를 설명하며, 영양세포의 길이와 폭의 비(형질 3)와 엽록체 수(형질 4)의 기여율이 높았다. 주성분 2는 전체 분산의 29.3%를 설명하며, 영양세포의 길이(형질 1)가 높은 기여율을 보였다. 한편, 주성분 3은 전체 분산의 8.6%를 설명하며, 영양세포의 폭(형질 2)과 엽록체의 회전

PC 2 (29.3%)



PC 1 (56.7%)

PC 3 (8.6%)



PC 1 (56.7%)

Fig. 7. Principal components analysis for 333 OTUs among 15 taxa of *Spirogyra* in Korea, using 5 vegetative cell characters (character 1-5). Some individuals are hidden due to the same value. Taxon codes: A, B, *S. africana*; D, E, F, *S. decimina*; G, *S. distenta*; H, I, J, K, L, M, *S. dubia*; N, O, P, *S. ellipsozona*; C, *S. ellipsozona* var. *crassoidea*; Q, *S. frigida*; R, S, *S. gracilis*; T, U, V, *S. koreana* (nom. inval.); W, *S. mirabilis*; X, *S. peipingensis*; Y, *S. submajuscula*; Z, a, b, *S. varians*; d, *S. variformis*; e, *S. weberi*.

수(형질 5)가 높은 상관관계를 나타내었다(Table 2).

이 가운데서 기여율이 가장 높은 주성분 1과 2를 축으로 각 OTU를 배열한 결과, 주성분 1에서 1) *Spirogyra ellipsozona*, *S. ellipsozona* var. *crassoidea*, *S. peipingensis*와 *S. submajuscula*의 그룹이 왼쪽에, 2) *S. frigida*와 *S. weberi*의 그룹은 오른쪽에, 그리고 3) *S. distenta*를 포함하는 나머지 분류군들의 그룹이 가운데 위치하며 구분되었다(Fig. 7). 한편, 주성분 3과 1을 축으로하여 각 OTU들을 배열한 결과, 주성분 1과 2에 의하여 뚜렷이 구분되지 않았던 첫 번째 그룹의 *S. submajuscula*가 주성분 3에 의하여 *S. ellipsozona*, *S. ellipsozona* var. *crassoidea*와 *S. peipingensis*의 그룹으로부터 분리되었다(Fig. 7).

2차 주성분분석은 수정된 배우자낭 세포의 변이 양상을 파악하기 위하여 14종 1변종에 포함되는 총 235 OTU를 대상으로 수행하였다. 이차 주성분분석 결과, 처음 3개의 주성분이 전체 분산의 72.8%를 설명하며(Table 3), 나머지 주성분들은 그 기여율이 7% 미만이었다. 주성분 1은 전체 분산의 44.6%를 설명하며, 수정한 배우자낭 세포 중 암배우자낭의 최대 폭(형질 7), 암배우자낭의 폭(형질 8), 포자의 폭(형질

12), 포자의 끝으로부터 1/4 지점에서의 폭(형질 14)과 수배우자낭의 폭(형질 18) 등의 기여율이 높았다(Table 3). 주성분 2는 전체 분산의 19.1%를 설명하며, 암배우자낭의 길이(형질 6), 암배우자낭의 길이/폭의 비(형질 9), 수배우자낭의 길이(형질 17), 수배우자낭의 길이/폭의 비(형질 19), 격벽의 유형(형질 20)과 암배우자낭의 모양(형질 25) 등이 높은 기여율을 보였다(Table 3). 주성분 3은 기여율이 9.1%로 비교적 낮으며, 포자의 길이/폭의 비(형질 13)와 포자의 끝으로부터 1/4 지점에서의 폭/1/2 지점에서의 폭의 비(형질 15)가 높은 상관관계를 나타내었다(Table 3).

기여율이 가장 높은 주성분 1과 2를 축으로 각 OTU를 배열한 결과, 1) *S. ellipsozona*와 *S. ellipsozona* var. *crassoidea*의 그룹, 2) *S. peipingensis*, 3) *S. frigida*와 *S. weberi*의 그룹, 4) 상기한 5종을 제외한 나머지 그룹으로 뚜렷이 구분되었다(Fig. 8). 한편, 주성분 3과 1을 축으로 각 OTU들을 배열한 결과, 주성분 1과 2에 의하여 구분되지 않았던 *S. koreana* (nom. inval.)의 일부 개체들이 높은 주성분 3값을 보였고, 일부 개체들은 *S. decimina*, *S. distenta*와 *S. mirabilis*의 일부 개체와 유사한 값을 가졌다.

Table 3. Loadings of the first three principal components for 20 fertile cell characters from the analysis of 235 OTUs among 15 taxa of *Spirogyra*. Character numbers correspond to those in Table 1

No. of character	Component		
	1	2	3
6	0.203	0.349	0.185
7	0.311	0.110	-0.169
8	0.323	0.061	-0.074
9	-0.207	0.353	0.182
10	-0.217	0.290	-0.283
11	0.282	0.182	0.162
12	0.316	0.076	-0.122
13	-0.118	0.129	0.544
14	0.321	0.087	-0.066
15	-0.036	-0.135	0.422
16	0.286	0.186	0.099
17	0.191	0.347	0.148
18	0.323	0.060	-0.083
19	-0.193	0.358	0.161
20	-0.158	0.354	-0.028
21	-0.030	-0.111	0.160
22	-0.006	-0.003	-0.172
23	-0.002	0.055	-0.172
24	-0.230	0.203	-0.295
25	-0.168	0.316	-0.243
Eigenvalue	8.914	3.831	1.809
Cumulative % of eigenvalue	44.6	63.7	72.8

3차 주성분분석은 2차 주성분분석 결과 주성분 1과 2에 의하여 3그룹으로 뚜렷이 구분되는 *Spirogyra ellipsospora*, *S. ellipsospora* var. *crassoidea*, *S. peipingensis*, *S. frigida*와 *S. weberi* 5종을 제외한 후, 나머지 그룹인 10종 177개체를 대상으로 9개 형질들(형질 6, 10, 11, 17, 21-25)을 사용하여 수행하였다. 3차 주성분분석 결과, 주성분 1, 2, 3이 전체 분산의 72.4%를 설명하며(Table 4), 나머지 주성분들은 그 기여율이 9% 미만이었다. 주성분 1은 전체 분산의 35.3%를 설명하며, 암배우자낭의 길이(형질 6), 포자의 길이(형질 11)와 수배우자낭의 길이(형질 17) 등의 기여율이 높았다. 주성분 2는 전체 분산의 24.5%를 설명하며, 암배우자낭의 최대 폭/폭의 비(형질 10)와 암배우자낭의 모양(형질 24)이 높은 기여율을 보였다. 한편 주성분 3은 기여율이 12.6%로 비교적 낮았으며, 생식 유형(형질 21), 포자의 모양(형질 22)과 포자벽의 무늬(형질 23) 등이 높은 상관관계를 나타내었다(Table 4).

기여율이 높은 주성분 1과 2를 축으로 각 OTU를 배열한 결과, 주성분 1에서 1) *Spirogyra africana*, *S. dubia*와 *S. koreana* (nom. inval.)는 오른쪽에, 2) *S. distenta*, *S. gracilis*, *S. mirabilis*와 *S. varians*는 왼쪽에 위치하며 약하게 구분되었고, 3) *S. decimina*, *S. submajuscula*와 *S. variformis*는 상기한 2그룹의 중

Table 4. Loadings of the first three principal components for 9 fertile cell characters from the analysis of 177 OTUs among 10 taxa of *Spirogyra*. Character numbers correspond to those in Table 1

No. of character	Component		
	1	2	3
6	0.468	-0.277	0.022
10	0.305	0.544	-0.055
11	0.469	-0.196	-0.126
17	0.426	-0.281	0.214
21	-0.177	-0.114	0.427
22	-0.182	0.225	0.631
23	0.261	0.109	0.550
24	0.091	0.583	-0.194
25	0.378	0.302	0.106
Eigenvalue	3.174	2.210	1.132
Cumulative % of eigenvalue	35.3	59.8	72.4

간에 위치하였다.

한편, 주성분 3과 1을 축으로 각 OTU들을 배열한 결과, 주성분 1과 2에 의하여 뚜렷이 구분되지 않았던 1) *S. mirabilis*, 2) *S. africana*, 3) *S. koreana* (nom. inval.), 그리고 4) 나머지 분류군들의 그룹이 뚜렷이 구분되었다(Fig. 9).

유집분석: 유집분석은 2차 주성분분석과 동일하게 14종 1변종에 포함되는 총 235개체를 대상으로 수정된 배우자낭 세포에 관한 20개 형질(형질 6-25, Table 1)을 사용하여 수행하였다. 표준화된 자료행렬로부터 OTU간의 average taxonomic distance를 계산하여 이를 UPGMA 방법으로 유집한 결과, 한국산 해감속 식물의 OTU들은 average taxonomic distance 1.0 수준에서 8개의 그룹으로 유집되었다(Fig. 10). 그룹 1은 *S. peipingensis*의 OTU들만으로 구성된 단일 집단, 그룹 2는 *S. ellipsospora*와 *S. ellipsospora* var. *crassoidea*의 OTU들로 구성되어 있고, 그룹 3은 *S. mirabilis*의 단일 군, 그룹 4는 *S. frigida*와 *S. weberi*의 OTU들로 구성되어있으며, 그룹 5와 6은 각각 *S. koreana* (nom. inval.)와 *S. distenta*의 OTU들로 구성된 단일 무리, 그룹 7은 *S. decimina*, *S. dubia*, *S. gracilis*, *S. varians*, *S. variformis*와 *S. submajuscula*의 OTU들을 포함하는 집단, 그룹 8은 *S. africana*의 OTU들만 포함하였다. 이 중에 그룹 2는 *S. ellipsospora* var. *crassoidea*의 OTU들이 *S. ellipsospora*의 OTU들과 함께 유집되어, 이들이 동일종에 속하며 정량형질이 매우 유사한데, 다만 포자가 편압되어 포자에 세로로 선이 생기는 특징을 지닌 *S. ellipsospora* var. *crassoidea*가 포자가 편압되지 않는 *S. ellipsospora*와 구분되는 특징의 차이 뿐이었다.

한편, average taxonomic distance 0.6 수준에서 그룹 7은 *S. variformis*, *S. submajuscula*, *S. decimina*, *S. varians*, *S. gracilis*와

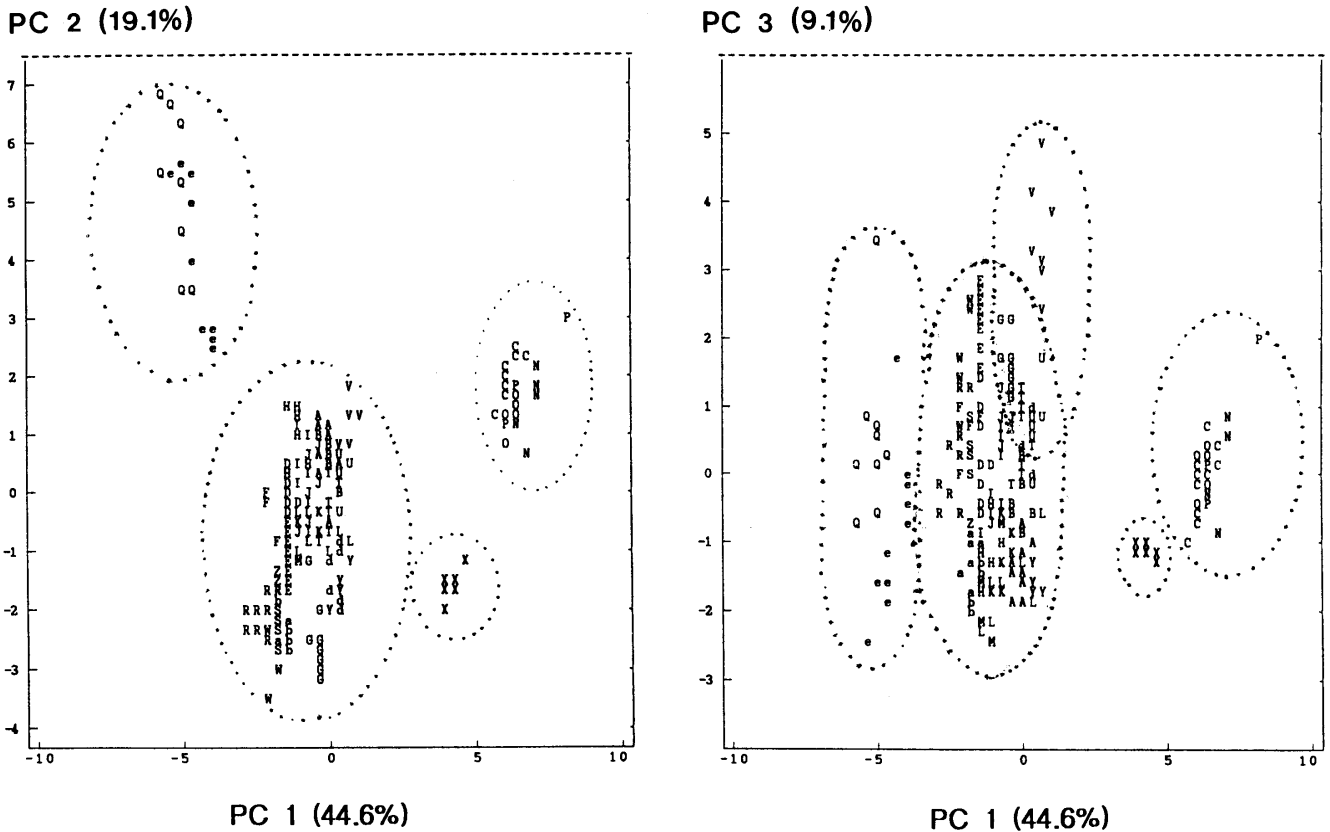


Fig. 8. Principal components analysis of 235 OTUs among 15 taxa of *Spirogyra* in Korea, using 20 fertile cell characters (character 6-25). Some individuals are hidden due to the same value. Taxon codes as in Fig. 7.

*S. dubia*로 구분되었으며, *S. dubia*의 무리 안에 *S. dicimina*의 일부 지역 집단이 포함되어 있는데 이들은 *S. decimina* 종내 개체군간의 변이 형태로 판단하였고, *S. koreana* (nom. inval.)는 7개의 OTU가 나머지와 구분되었으나, *S. koreana* (nom. inval.)의 변이의 폭이 넓은 특징으로 나타난 결과라고 판단하였고, *S. gracilis*, *S. koreana*와 *S. variformis*의 그룹 안에 *S. varians*의 OTU가 각각 1개씩 포함되어 있었으나 이들은 outlayer로 판단하였다.

고 찰

식별형질의 분석

해감속 식물은 영양세포의 크기, 엽록체의 수, 격벽의 모양, 생식 유형, 접합관의 기원과 모양, 암배우자낭의 모양, 포자의 크기와 모양, 포자벽의 무늬 등이 전형적인 식별형질로 인정되어 왔다 (Randhawa 1959; Kadlubowska 1984; Hoshaw and McCourt 1988). 본 연구에서 자연집단이나 실내배양을 통하여 유성생식이 이루어진 한국산 해감속 식물을 대상으로 영양세포의 크기와 암배우자낭의 모양 등 25개의 형질을 분석한 결과, 대부분의 형질들은 분류군 간에 변이의 폭이 흔히 중복되었다. 그러나 엽록체의 회전수(형질

5), 접합관의 기원과 모양, 포자벽의 색상 등을 제외한 대부분의 형질들이 종을 구분하는 유용한 형질임이 확인되었다.

영양세포의 크기는 본 속의 종을 식별하는 주요 형질로 인식되어 왔으나, Czurda(1932)는 일부 종에서 환경 변화에 따라 세포 길이의 변이가 심하기 때문에 종의 식별형질로서의 가치가 없다고 주장한 바 있다. 또한 자연집단과 실내배양에서 일부 종의 배수성 개체들이 관찰되므로, 영양세포의 폭이 식별형질로 사용되는데 의문이 제기된 바 있다(Czurda 1932; Miller and Hoshaw 1974; McCourt et al. 1986). 본 연구 결과, 영양세포의 길이(형질 1)는 일부 분류군에서 평균과 변이의 폭이 중복되어 식별형질로 이용하기에 다소 불안정한 경향을 보였다. 그러나 영양세포의 폭(형질 2)은 일부 분류군에서 중복되었지만, 한 분류군의 클론 배양으로 얻은 개체들에서 영양세포의 폭이 비교적 안정된 경향을 보였으며 종을 식별하기에 충분한 차이를 보였다(Fig. 2). 영양세포의 길이와 폭의 비(형질 3)는 *S. frigida*에서 최대 값을 보였고, *S. distenta*, *S. ellipsozoa*, *S. ellipsozoa* var. *crassoidea*, *S. submajuscula*와 *S. peipingensis* 등에서 매우 작은 값을 보여 다른 분류군들로부터 이들 분류군을 식별하는 데 효과적이었다. 그 외 엽록체의 수(형질 4), 암·수배우자낭의 길이(형질 6, 17), 폭(형질 7, 8, 18)과 길이 대 폭의 비(형질 9, 10,

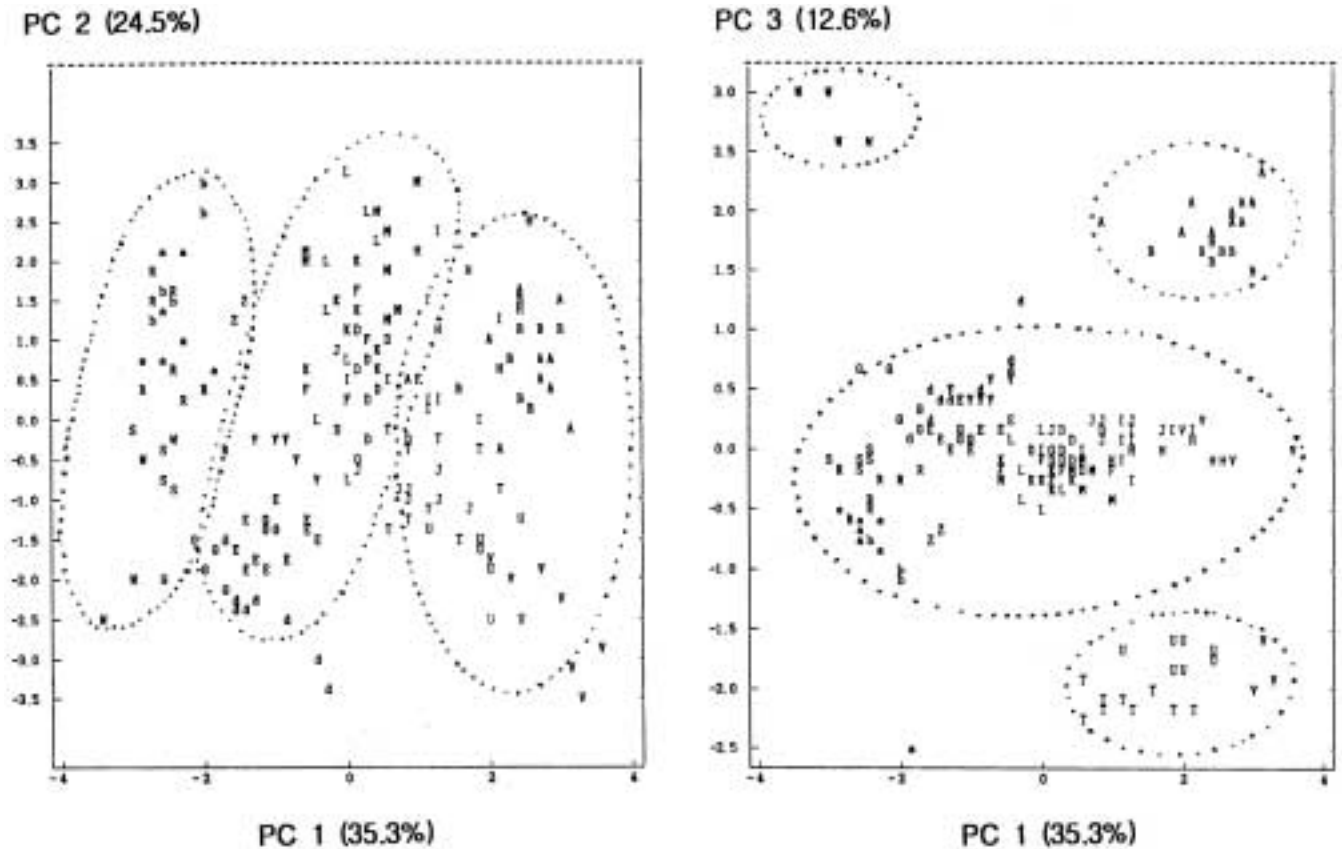


Fig. 9. Principal components analysis of 177 OTUs of 10 taxa of *Spirogyra* in Korea, using 9 fertile cell characters (character 6, 10, 11, 17, 21-25). Some individuals are hidden due to the same value. Taxon codes as in Fig. 7.

19), 암배우자낭의 모양(형질 24, 25), 포자의 크기(형질 11-16)와 형태(형질 22), 포자벽의 무늬(형질 23), 격벽의 유형(형질 20), 생식 유형(형질 21) 등의 식별형질들은 일부 분류군에서 변이의 폭이 중복되었지만, 이들 식별형질들의 조합을 통하여 비교 분석하면 분류군 간에 뚜렷한 차이를 보이므로 종을 식별하는 데 유용한 형질임을 확인하였다. 그러나 엽록체의 회전수(형질 5), 접합관의 기원과 모양, 포자벽의 색상은 많은 분류군에서 평균과 변이의 폭이 매우 유사하므로 이들을 식별형질로 이용하기에는 부적합한 것으로 판단되었다.

수리표현학 분석

한국산 해감속 식물 14종 1변종을 대상으로 수리표현학 분석을 수행한 결과, 1) *S. ellipsozona*와 *S. ellipsozona* var. *crassoidea*, 2) *S. peipingensis*, 3) *S. frigida*와 *S. weberi*, 4) *S. mirabilis*, 5) *S. africana*, 6) *S. koreana* (nom. inval.)가 뚜렷이 구분되었고, 이들을 제외한 나머지 분류군들 즉, *S. gracilis*와 *S. varians*, *S. decimina*, *S. distenta*, *S. dubia*, *S. submajuscula*와 *S. variformis*는 주성분분석에서 매우 인접한 1개의 그룹으로 배열되었다(Figs. 8, 9). 유집분석에서는 average taxonomic distance 1.0 수준에서 *S. distenta*가 다른 분류군들로부터 분리

된 것을 제외하고는 주성분분석의 결과와 일치하였다(Fig. 10).

한편, 주성분분석에서 뚜렷이 구분되지 않았던 분류군들은 유집분석 결과, average taxonomic distance 0.6 수준에서 *S. dubia*의 OTU들 사이에 *S. dicimina*의 일부 지역 집단의 OTU들이 포함되어 있는 것과, *S. gracilis*와 *S. variformis*의 그룹 안에 *S. varians*의 OTU가 각각 1개씩 포함되어 있는 것을 제외하고는 *S. decimina*, *S. submajuscula*, *S. variformis*, *S. dubia*, *S. gracilis*와 *S. varians*가 뚜렷이 구분되었다.

*S. ellipsozona*와 *S. ellipsozona* var. *crassoidea*는 영양세포의 폭이 현저히 넓고 엽록체의 수가 많으며, 암배우자낭의 모양과 포자벽의 무늬 등이 매우 유사하나, 포자의 모양과 포자가 편압되어 있는지의 유·무에 근거하여 식별되고 있다. Transeau(1914)는 처음에 *S. crassoidea*를 *S. ellipsozona* var. *crassoidea*로 인식하였으나, 그 후 *S. ellipsozona* var. *crassoidea*의 포자는 편압되며 세로로 선이 생기는 특징에 의하여 *S. ellipsozona*로부터 분리하여(Transeau 1937), 현재까지 *S. crassoidea*라는 독립된 종으로 다루어 왔다. 그러나 본 연구에서 영양세포의 크기, 암배우자낭의 크기와 생식 유형 등에 관한 25개 형질의 자료를 기초로 하여 주성분분석과 유집분석을 수행한 결과, *S. crassoidea*의 OTU들은 모두 *S. ellipsozona*

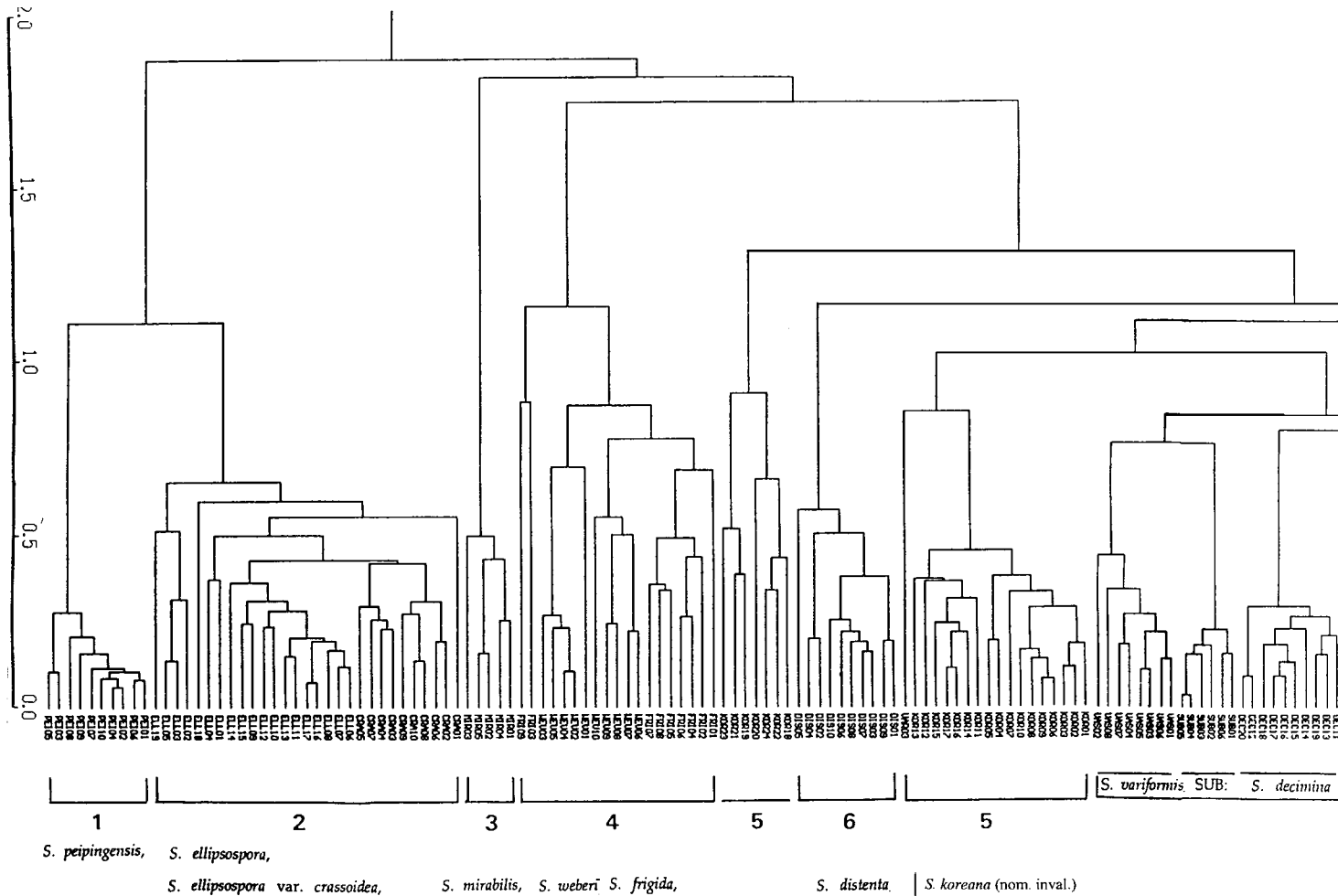


Fig. 10. UPGMA phenogram for 235 OTUs among 15 taxa of *Spirogyra* based on average taxonomic distance computed from 20 standardized characters. Taxon codes as in Fig. 2.

와 함께 유집되었고(Figs 7-10), 형태 식별형질에 의한 종 구분이 불명확하므로 이 두 분류군을 독립된 종이 아니라 Transeau(1914)가 처음 기재한 대로 동일종에 포함되는 한 변종, *S. ellipospora* var. *crassoidea*로 환원되어야 할 것으로 결론지었다.

*S. peipingensis*는 영양세포의 폭이 좁은 반면 세포의 길이가 짧아서 6-8개의 엽록체가 1회전하며, 암·수 배우자낭이 짧은 원주형으로 포자가 횡타원형으로 일정하게 위치하고 있어서 다른 분류군들과는 쉽게 식별이 되었고, 주성분분석과 유집분석에서도 뚜렷하게 구분되었다.

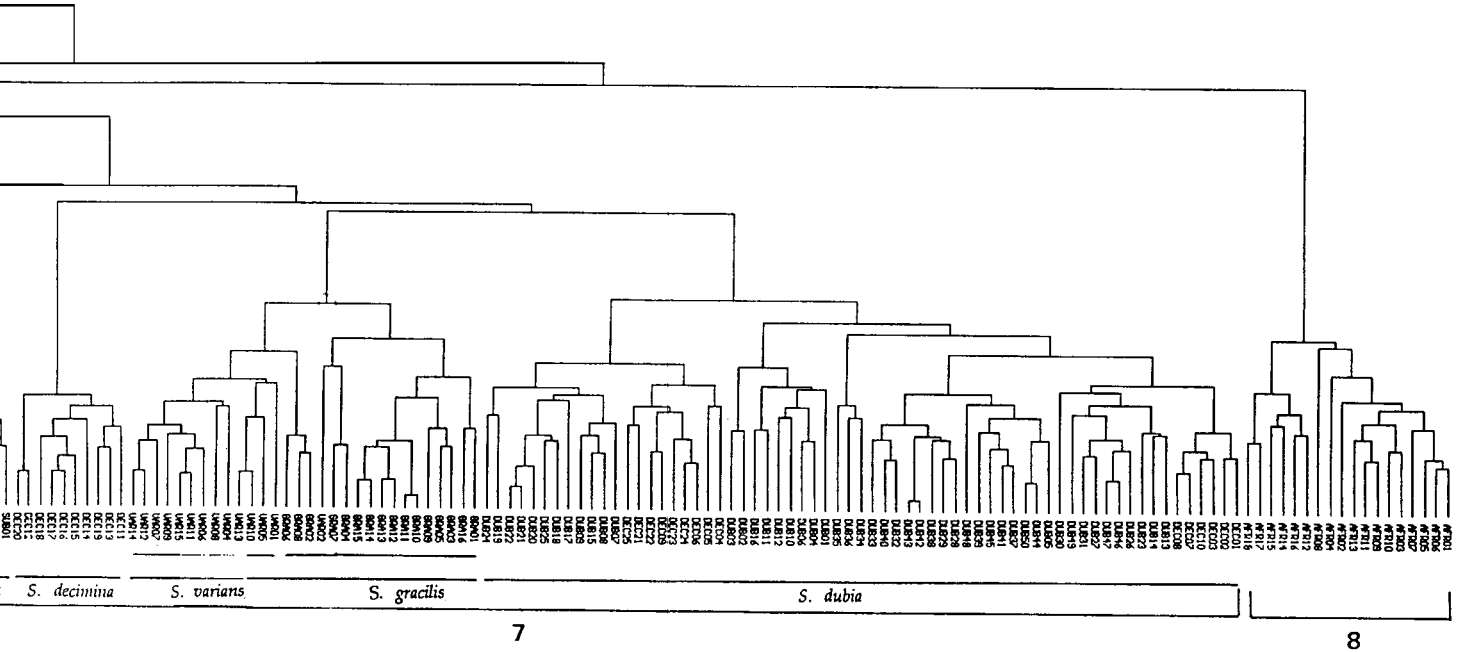
*S. frigida*와 *S. weberi*도 유연관계가 가까운 분류군으로 확인되었는데, 이들 두 종은 영양세포의 폭과 암·수 배우자낭의 폭이 좁아 영양세포의 길이와 폭의 비, 그리고 암·수 배우자낭의 길이와 폭의 비가 뚜렷이 크고, 엽록체 수는 1개 또는 2개이며 주름진 격벽을 갖는 공통된 특징을 가지고 있어서 수리표현학 분석에서 함께 유집되는 분류군이다(Figs 7-10). 그러나 *S. frigida*는 엽록체가 항상 1개로 일정하고 암배우자낭이 양쪽에서 팽창하며 타원형의 포자를 갖지만, *S.*

*weberi*는 엽록체가 1개 또는 2개이고 암배우자낭이 양쪽으로 팽창하지만 내·외벽이 원주형 모양으로 평행하게 팽창하고, 좁고 긴타원형의 포자를 가지며 접합포자 외에 부동포자를 형성하는 특징으로 *S. frigida*와 식별되었다.

*S. mirabilis*는 영양세포의 크기가 *S. varians*와 유사하고, 엽록체 수가 *S. distenta*와 *S. variformis*와 유사하며, 암·수배우자낭의 크기가 *S. gracilis*와 유사하여 1, 2차 주성분분석 결과 이들 종들이 뚜렷이 구분되지 않았으나(Figs 7, 8), 3차 주성분분석 결과 생식 유형이 주로 부동포자에 의한 무성생식을 하며 접합포자는 극히 드물게 관찰되는 특징에 의하여 식별되었다(Fig. 9). 또한 유집분석결과 average taxonomic distance 1.0 수준에서 *S. mirabilis*는 독립된 그룹을 형성하므로 주성분분석 결과와 일치하였다(Fig. 10).

상기한 4그룹을 제외하고 *S. africana*와 *S. koreana* (nom. inval.)는 영양세포의 특징과 생식에 관련된 형질들의 변이 폭이 *S. dubia*와 거의 중복되어 1, 2차 주성분분석에서 하나의 그룹으로 유집되었으며(Figs 7, 8), 영양세포의 특징만으로는 종을 식별하기 어려운 형태의 복합체를 형성하였다. 그러

*Editorial note: The middle part of this phenogram designated for *S. decimina* has been duplicated.



(Editorial note: The middle part of this phenogram designated for *S. decimina* has been duplicated.)

나 3차 주성분분석 결과 이들은 포자의 모양과 포자벽의 무늬 등과 높은 상관관계를 갖는 주성분 3에 의해 뚜렷하게 구분되었다(Fig. 9). 또한 성숙한 포자벽에 불규칙한 파상의 미세 구조가 있는 *S. africana*는 무늬가 없는 분류군들과 구별되었고, 포자벽에 무늬가 없는 분류군들은 다시 2개의 독립된 집단을 형성하였다. 즉, 암배우자낭의 길이가 짧고, 포자가 타원형이며, 불염세포가 팽창하는 특징을 갖는 *S. dubia*에 비하여 포자의 모양이 긴타원형 내지 난형을 하며, 영양세포와 포자의 크기가 다소 큰 특징을 갖는 분류군들은 주성분 3에 의해 *S. dubia*와 뚜렷하게 구분되었다. 따라서 이들은 영양세포의 특징이 매우 유사한 *S. africana*와 *S. dubia*로부터 분리되어 독립된 종으로 처리하는 것이 타당하다고 사료된다.

상기한 6그룹을 제외한 나머지 분류군들은 주성분분석에서 1개의 그룹으로 배열되었으나, 유집분석에서는 average taxonomic distance 0.6 수준에서 각 분류군들이 아 그룹을 이루며 뚜렷이 구분되었다(Fig. 10). 이 가운데 *S. gracilis*와 *S. varians*가 가장 가까운 분류군으로 파악되었는데, 이들 두 종은 기본적으로 엽록체가 1개이고, 접합에 의한 유성생식을

하며, 수정된 세포가 접합한 쪽에서 팽창하고, 포자는 타원형이며, 포자벽의 미세 구조는 평활한 특징으로 수리표현학 분석에서 함께 유집되는 분류군들이지만(Figs 7-10), *S. varians*는 영양세포의 크기가 *S. gracilis*에 비하여 크고 종 내에서 변이가 심하며, 접합포자 외에 부동포자가 형성되고 불염세포가 강하에 팽창하는 특징에 의하여 식별되었다.

한편, *S. decimina*는 엽록체가 2개로 일정하고 암배우자낭은 원주형이거나 약간 늘어나는 특징으로 *S. dubia*, *S. gracilis*, *S. varians*, 그리고 *S. variformis*와 구분되며, 좁고 긴타원형의 포자를 갖는 특징 때문에 *S. submajuscula*와 식별되었다. 그러나 *S. decimina*의 일부 지역 집단의 OTU들이 *S. dubia*의 그룹에 포함되었는데, 이들은 *S. decimina*의 종내 개체군(intraspecific population) 간의 형태 변이로 판단되었다.

*S. variformis*는 주성분분석에서 *S. decimina*, *S. dubia*, *S. gracilis*, 그리고 *S. submajuscula*와 인접하여 배열되었으나(Figs 7-9), 암배우자낭이 팽창하지 않는 원주형이고 불염세포가 술통 모양으로 강하게 팽창하는 특징으로 유집분석에서 앞의 4 분류군들과 뚜렷이 분리되어 유집되었으므로 독립된 종

으로 판단하였다(Fig. 10).

*S. submajuscula*는 주성분분석에서 *S. dubia*, *S. variformis*와 *S. decimina* 등과 동일한 그룹을 형성하였으나, 영양세포의 길이가 짧고 암배우자낭이 접합한 반대쪽에서 강하게 팽창하며, 구형의 포자를 갖는 특징으로 유집분석에서 다른 분류군들과 분리되어 유집되었다(Fig. 10).

이상의 결과를 종합해 보면, 한국산 해캄속 식물은 크게 1) 격벽이 주름진 *S. frigida*와 *S. weberi* 그룹과 격벽이 편평한 그룹으로 구분되었다. 격벽이 편평한 특징을 갖는 분류군들은 2) 성숙한 포자벽이 파형의 무늬를 갖는 *S. africana*와 포자벽에 무늬가 없는 집단으로 구분되었고, 포자벽에 무늬가 없는 나머지 분류군들은 3) 주로 부동포자에 의한 포자를 형성하는 *S. mirabilis*와 나머지 분류군들 즉, 4) 영양세포의 폭이 현저히 넓고, 엽록체 수가 5-8개로 많고, 암배우자낭이 원주형이며 포자가 타원형인 특징을 갖는 *S. ellipsospora*와 *S. ellipsospora* var. *crassoidea* 그룹, 5) 접합포자가 횡타원형으로 암배우자낭안에 위치하고 있는 *S. peipingensis*, 6) 영양세포의 폭이 48-54 μm 이고, 암배우자낭이 양쪽에서 팽창하며 접합포자가 긴타원형 내지 난형인 특징을 갖는 *S. koreana* (nom. inval.), 7) 영양세포의 폭이 20-70 μm 이고, 엽록체 수가 1-5개이며 형태 변이의 폭이 심한 *S. gracilis*, *S. varians*, *S. dubia*, *S. decimina*, *S. submajuscula*와 *S. variformis*를 포함하는 그룹으로 구분되었다.

참고문헌

- 김영환, 김지환. 2002. 녹조식물 해캄의 생물학. 도서출판 개신. 청구. 230 pp.
- 이갑숙, 박영린. 1985. 우포(늪) 일대의 담수조류에 대한 연구. 대구대학교 산업기술연구 4: 251-271.
- 정영호. 1962. 한국산 담수조류의 연구. 서울대학교 논문집 D: 11-44.
- 정영호. 1968. 한국식물도감 제9권 식물편(담수조류). 삼화출판사. 서울. 573 pp.
- 정준. 1970. 영남지역의 담수조류에 대한 분류학적 연구. 경북인쇄소, 대구. 115 pp.
- 정준. 1990. 은해사 계곡과 그 일대의 담수조류. 경북대학교 자연과학 논문집 50: 5-21.
- 정준, 김성달, 이갑숙. 1972. 제주도산 담수조류(II). 한국육수학회지 5: 15-31.
- 정준, 김용재. 1991. 성주군 일대의 담수조류. 경북대학교 자연과학 논문집 51: 33-58.
- Allen M.A. 1958. *The biology of a species complex in Spirogyra*. Ph.D. Dissertation. Indiana Univ. Bloomington. 240 pp.
- Czurda V. 1932. Zygnemales. In: Pascher A. (ed.), *Die Süßwasser-Flora Mitteleuropas*. H. 9. 2nd ed. Gustav. Fischer, Jena. 232 pp.
- Devi K.U. and Panikkar M.V.N. 1994. *Species of the genus Spirogyra from Kerala, India (Chlorophyceae: Zygnemataceae)*. Gebrüder Borntraeger, Berlin. 124 pp.
- Ducker S.C., Williams W.T. and Lance G.N. 1965. Numerical classification of the Pacific forms of *Chlorodesmis* (Chlorophyta). *Aust. J. Bot.* 13: 489-499.
- Hoshaw R.W. and McCourt R.M. 1988. The Zygnemataceae (Chlorophyta): a twenty-year update of research. *Phycologia* 27: 511-548.
- Hoshaw R.W., Wells C.V. and McCourt R.M. 1987. A polyploid species complex in *Spirogyra maxima* (Chlorophyta, Zygnemataceae), A species with large chromosomes. *J. Phycol.* 23: 267-273.
- Jao C.C. 1935. Studies on the freshwater algae of China. I. Zygnemataceae from Szechwan. *Sinensia* 6: 551-645.
- Jao C.C. and Hu H. 1978. Studies on the Zygnemataceae of China (I). *Oceanol. Limnol. Sinica* 9: 194-204.
- Kadlubowska J.Z. 1984. *Süßwasserflora von Mitteleuropa. Band 16: Chlorophyta VIII — Conjugatophyceae I (Zygnemales)*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart. 532 pp.
- Kützing F.T. 1843. *Phycologia generalis*. Leipzig. pp. 274-442.
- Kützing F.T. 1849. *Species algarum*. Leipzig. 920 pp.
- Link H.F. 1820. *Epistola de algis aquaticis in genera disponendis*. Bonn.
- McCourt R.M., Hoshaw R.W. and Wang J.-C. 1986. Distribution, morphological diversity and evidence for polyploidy in North American Zygnemataceae (Chlorophyta). *J. Phycol.* 22: 307-313.
- McGuire R.F. 1984. A numerical taxonomic study of *Nostoc* and *Anabaena*. *J. Phycol.* 20: 454-460.
- Miller R.D. and Hoshaw R.W. 1974. Cell width as a taxonomic character with special reference to *Zygnema circumcarinatum* Czurda. *Br. Phycol. J.* 9: 145-148.
- Necchi O., Sheath R.G. and Cole K.M. 1993. Distribution and systematics of the freshwater Genus *Sirodotia* (Batrachospermales, Rhodophyta) in North America. *J. Phycol.* 29: 236-243.
- Randhawa M.S. 1959. *Zygnemataceae*. Indian Council of Agricultural Research, New Delhi. 478 pp.
- Rohlf F.J. 1998. *NTSYS-pc: Numerical taxonomy and multivariate analysis system*. Version 1.50. State Univ. of New York, Stony Brook.
- Sneath P.H.A. and Sokal R.R. 1973. *Numerical taxonomy: The principles and practice of numerical classification*. Freeman, San Francisco. 573 pp.
- Transeau E.N. 1914. New species of green algae. *Amer. J. Bot.* 1: 294-301.
- Transeau E.N. 1937. Filamentous algae of Lake Erie. *Amer. Midland Nat.* 18: 936-938.
- Transeau E.N. 1951. *The Zygnemataceae*. Ohio state Univ. Press, Columbus. 327 pp.
- Wang J.C., Hoshaw R.W. and McCourt R.M. 1986. A polyploid species complex of *Spirogyra communis* (Chlorophyta) occurring in nature. *J. Phycol.* 22: 102-107.
- Yamagishi T. 1966. Studies on the Genus *Spirogyra* collected in Japan. *Sc. Rep. T.K.D. Sect. B.* 12: 73-105.

Received 10 December 2003

Accepted 15 December 2003

Appendix. Materials used for morphological analysis and numerical phenetics of the genus *Spirogyra* in Korea

Taxon	Taxon code	Individuals		Locality	Collection date
		vegetative cell	fertile cell		
<i>S. africana</i>	AFR	AFR01~12	AFR01~10	Toksan, Yesan-gun, Chungchongnam-do	6 Aug. 1996
		AFR13~26	AFR11~18	Chongchon, Koesan-gun, Chungchongbuk-do	8 Aug. 1996
<i>S. ellipospora</i> var. <i>crassoidea</i>	CRA	CRA01~12	CRA01~10	Chonjiyeon, Namcheju-gun, Cheju-do	16 Jun. 1996
<i>S. decimina</i>	DEC	DEC 01~14	DEC01~10	Chongchon, Koesan-gun, Chungchongbuk-do	8 Aug. 1996
		DEC15~28	DEC11~20	Maepo, Tanyang-gun, Chungchongbuk-do	25 Sept. 1996
		DEC41~54	DEC21~25	Tokchon, Tanyang-gun, Chungchongbuk-do	22 May 1996
<i>S. distenta</i>	DIS	DIS01~14	DIS01~10	Chojung, Chongwon-gun, Chungchongbuk-do	20 Apr. 1997
<i>S. dubia</i>	DUB	DUB01~12	DUB01~06	Chonjeyeon, Namcheju-gun, Cheju-do	16 Jun. 1996
		DUB13~26	DUB07~16	Chonjeyeon, Namcheju-gun, Cheju-do	15 Jun. 1996
		DUB27~38	DUB17~25	Sasok, Chinchon-gun, Chungchongbuk-do	18 Jul. 1996
		DUB39~50	DUB26~33	Sosan, Sosan-gun, Chungchongnam-do	6 Aug. 1996
			DUB34~41	Oenyang, Ulsan-shi, Kyongsangnam-do	25 Jul. 1996
			DUB42~50	Toksan, Yesan-gun, Chungchongnam-do	21 Sept. 1997
<i>S. ellipospora</i>	ELL	ELL01~13	ELL01~05	Taeon, Taeon-gun, Chungchongnam-do	6 Aug. 1996
		ELL14~27	ELL06~12	Miho stream, Chongwon-gun, Chungchongbuk-do	1 Jun. 1998
		ELL28~37	ELL13~19	Dalchon stream, Chungju-shi, Chungchongbuk-do	25 Sept. 1996
<i>S. frigida</i>	FRI	FRI01~12	FRI01~09	Chonmi stream, Namcheju-gun, Cheju-do	16 Jun. 1996
<i>S. gracilis</i>	GRA	GRA01~14	GRA01~09	Chojung, Chongwon-gun, Chungchongbuk-do	2 Mar. 1997
			GRA10~16	Oenyang, Ulsan-shi, Kyongsangnam-do	25 Sept. 1997
<i>S. koreana</i> (nom. inval.)	KOR	KOR01~12	KOR01~10	Duchon, Hongchon-gun, Kangwon-do	25 Jul. 1996
		KOR13~22	KOR11~17	Sasok, Chinchon-gun, Chungchongbuk-do	18 Jul. 1996
		KOR23~34	KOR18~24	Duchon, Hongchon-gun, Kangwon-do	25 Jul. 1996
<i>S. mirabilis</i>	MIR	MIR01~14	MIR01~05	Ochang, Chongwon-gun, Chungchongbuk-do	18 Jul. 1996
<i>S. peipingensis</i>	PEI	PEI01~13	PEI01~10	Songkye, Sanchung-gun, Kyongsangnam-do	24 Oct. 1996
<i>S. submajuscula</i>	SUB	SUB01~12	SUB01~06	Chiri Mt., Hadong-gun, Kyongsangnam-do	8 Nov. 1996
<i>S. varians</i>	VAR	VAR01~13	VAR01~02	Kwangkyo, Suwon-shi, Kyonggi-do	14 May 1996
		VAR14~23	VAR03~09	Maepo, Tanyang-gun, Chungchongbuk-do	25 Sept. 1996
			VAR10~15	Dorim stream, Shillim-dong, Seoul-shi	30 May 1996
<i>S. variformis</i>	VAS	VAS01~14	VAS01~08	Toksan, Yesan-gun, Chungchongnam-do	6 Aug. 1996
<i>S. weberi</i>	WEB	WEB01~16	WEB01~10	Toksan, Yesan-gun, Chungchongnam-do	6 Aug. 1996

