

해안 식물의 무기 및 유기용질 양상

최성철 · 배정진 · 추연식*

경북대학교 생물학과

적 요: 염습지와 사구지역에 생육하는 해안식물의 생리생태학적 특성을 이해하기 위하여 무기이온(Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^-)과 유기용질(수용성 당, glycine betaine)을 정량적으로 측정하였다. 명아주과 식물(가는갯능쟁이, 통통마디, 솔장다리, 나문재, 칠면초)은 K^+ 이온 대신에 Na^+ 이온과 Cl^- 이온을 축적하는 경향을 보였다. 그러나 교란지에 서식하는 좀명아주는 다른 명아주과 식물에 비해 Na^+ 이온 대신에 높은 K^+ 이온을 함유하였다. 조사된 대부분의 명아주과 식물은 체내 수용성 Ca^{2+} 이온의 함량이 낮고, 비교적 소량의 수용성 당을 함유하였으며, glycine betaine을 다량 함유하였다. 이와는 대조적으로 단자엽에 속하는 벼과(갯쇠보리, 갈대, 갯잔디)와 사초과(통보리사초, 좀보리사초)의 식물은 Na^+ 와 Cl^- 이온을 효과적으로 배제하여 체내 낮은 함량을 유지하였으며, 또한 K^+ 이온을 선호하며, 명아주과 식물보다 더 많은 당을 삼투물질로 축적하였다. 결론적으로, 명아주과식물은 무기이온과 glycine betaine을 축적하고, 단자엽식물은 K^+ 이온과 수용성 당을 축적하는 효과적인 이온조절을 통해 염습지 및 사구지역에 적응하는 것으로 여겨진다.

검색어: 글리신베타인, 당, 무기이온, 유기용질, 해안식물

서 론

자연 상태에서 식물은 건조, 염분, 온도 등 다양한 형태의 환경 스트레스하에 생존하고 있으며, 이러한 환경인자는 작물과 식물의 생산성을 제한요소이다(Boyer 1982). 고등식물의 성장과 생산성에 영향을 주는 여러 환경요인들 중에서 과도한 토양 및 지하수의 염분농도는 식물의 성장 억제, 순 광합성의 감소 및 대사 조절기능을 가진 효소의 활성을 저하시킨다(Cheeseman 1988).

해안 염습지는 조수의 침수시간과 빈도에 따라 시간과 공간적인 환경의 변화가 심하며, 육상과 해양의 물리적, 생물학적 상호작용이 복잡하게 얽힌 독특한 서식지를 이루고 있다. 또한 해안 염습지는 토양의 낮은 수분포텐셜, 과도한 Na^+ 및 Cl^- 이온 그리고 이들의 상호 작용으로 인해 식물 종자의 발아와 성장을 억제한다. 이러한 염습지 환경에서 식물이 생육하기 위해서는 이들 요인에 대한 적응이 필요하며, 특히 식물 체내의 낮은 삼투포텐셜의 유지와 같은 생리적 저항성이 매우 중요하다(Lee and Ihm 1986).

한편 해안 사구는 주로 염이 포함된 해풍이나 모래 입자에 의한 마찰력 같은 요인이 식물의 성장에 영향을 끼치며, 특히 해안으로부터의 거리에 따라 식물의 분포 및 성장의 현저한 차이를 보인다(Lee and Chon 1983).

염은 크게 세 가지 형태로 식물의 성장을 제한하는데, 첫째는 뿌리 주변 토양의 수분포텐셜을 감소시킴으로써 발생하는 수분 이용성의 감소, 둘째는 과도한 Na^+ 와 Cl^- 의 흡수로 인한 이온의 독성 효과, 그리고 셋째는 이온흡수와 수송의 제한에 의한 체내

이온의 불균형으로 인한 생리적 부작용이다(Marschner 1995).

염에 대한 식물의 저항성에는 크게 염 배제형과 염 축적형으로 나눌 수 있는데, 먼저 염 배제형은 보편적으로 단자엽 식물에서 주로 나타나며, 뿌리 수준에서 염 유입을 배제함으로써 조직이나 기관으로의 염수송을 억제한다(Kinzel 1989, Gorham *et al.* 1991, Schachtman *et al.* 1992). 염 축적형은 보통 염생식물(halophyte)에서 나타나며, 흡수된 염을 액포에 축적하거나, 형태적 구조적 변화로 수분 유입을 증가시켜 흡수되어진 염 이온을 희석하는 다육화 현상, 특수한 표피구조인 bladder hair의 형성 및 염 분비선(salt glands)의 형성에 의해 유입된 염을 체외로 제거함으로써 염 스트레스에 대하여 내성을 갖게 된다(Jefferis *et al.* 1979, Reimann and Breckle 1988, Breckle 1990).

일반적으로 고농도의 염 환경 하에 서식하는 식물종은 토양의 낮은 수분포텐셜로 인해 수분스트레스에 노출된다. 민감종의 경우 토양 수분포텐셜의 감소로 인해 팽압의 상실을 보이지만, 건조와 염 조건에 대해 저항성을 가지는 종의 경우 세포질 내용질의 농도를 증가시키는 삼투조절(osmoregulation) 기작을 수행한다. 삼투조절은 건조 또는 염 환경하의 식물의 생존에 있어 결정적인 역할을 수행하는 것으로 알려져 있으며, 잘 알려진 세포질성 삼투물질로는 프롤린(proline), 베타인(betaines), 당(sugar), 당알코올류(sugar alcohols) 등이 있다(Storey and Wyn Jones 1977, David 1984, Smirnov 1995). 이러한 용질은 수용성으로 중성 pH에서 전하를 띠지 않는 경향이 있고, 생화학적 반응을 저해하지 않으며, Na^+ 와 Cl^- 의 해로운 영향으로부터 효소와 생체막을 보호하는 것으로 알려져 있다(Gorham *et al.* 1981, Robinson and Jone 1986, Yancey *et al.* 1982, Huetterer and Albert 1993).

* Corresponding author; Phone: 82-53-950-5346, e-mail: yschoo@knu.ac.kr

본 연구는 우리나라의 다양한 해안지대(사구, 염습지)에 생육하고 있는 식물의 무기이온 및 유기용질의 양상을 통해 해안사구 및 염습지에 서식하는 대표적인 식물의 생리생태학적 특성을 밝히고자 한다. 또한 이들 식물이 속한과의 공통점과 차이점을 확인, 이해함으로써 염분 환경 하에 있는 같은 과에 속하는 식물의 생태적인 특징을 예측하기 위한 기초 자료를 확보하고자 한다.

재료 및 방법

실험 재료

본 실험은 우리나라의 염습지와 사구지역에서 서식하고 있는 명아주과의 가는갯쟁쟁이(*Atriplex gmelini*), 쯤명아주(*Chenopodium serotinum*), 통통마디(*Salicornia europaea*), 솔장다리(*Salsola collina*), 나문재(*Suaeda glauca*), 칠면초(*Suaeda japonica*), 벼과의 갯쇠보리(*Ischaemum antheplhoroides*), 갈대(*Phragmites communis*), 갯잔디(*Zoysia sinica*), 그리고 사초과의 통보리사초(*Carex kobomugi*), 쯤보리사초(*Carex pumila*)를 실험재료로 이용하였다. 서식장소 및 개체간의 오차를 줄이기 위해 생육상태가 양호한 잎을 가능한 많이 채집하여 사용하였으며, 이들 식물이 생육하고 있는 서식처의 토양환경을 조사하기 위해 표층에서 20 cm 깊이의 토양을 시료로 채취하였다(Table 1).

토양 무기이온 분석

각 조사지에서 채집된 토양의 무기이온 함량은 공기 중에서 건조시켜 2 mm 체눈을 통과시킨 토양 시료 10 g에 증류수를 50 ml (1:5) 넣고 1시간 교반한 다음, 토양액을 pore size 0.45 μm 의 GF/C filter로 여과 추출하였다. 무기양이온(K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+)과 Cl^- 의 함량은 각각 ICP(Jobinyvon 38 plus)와 Cl^- 적정기(Mettler Toledo Titrators DL50)를 이용하여 정량적으로 분석하였다.

식물체의 수분함량비

각 조사지에서 잎의 생량(FW)을 측정된 후, 70°C 건조기에서 3일간 건조하여 건량(DW)을 측정하였고, 건량에 대한 식물체의 수분함량비는 (FW-DW)/DW 로 구하였다.

식물체 추출 및 무기이온 분석

건조된 식물 잎을 분쇄기(UDY cyclone sample mill)로 갈아 균질한 분말로 만든 후 시료 1 g을 25 ml measuring flask에 넣은 다음 수조(97°C)에서 1시간 동안 증탕하였다. 상온에서 충분히 냉각시키고 증류수를 이용하여 최종 부피를 25 ml로 맞춘 후, pore size 0.45 μm 의 GF/C filter로 여과 추출하였다. 식물체의 무기이온 함량은 시료 추출액을 2차 증류수로 1/100로 희석하여 ICP를 이용하여 무기양이온(K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+)을 정량 분석하였으며, Cl^- 는 적정기를 이용하여 분석하였다.

삼투물농도(Osmolality) 측정

삼투물농도는 추출 시료액 50 μl 를 채취하여 빙점 강하법의 원리를 이용한 Osmometer (Micro-Osmometer 3MO, Advanced Instruments)로 측정하였다.

총 이온함량 측정

추출 시료를 증류수와 1:4의 비율로 희석한 후, Conductivity meter (Checkmate II CE, Corning)를 이용하여 측정하였으며, 측정된 시료의 총 이온함량은 Na^+ 와 Cl^- 이온의 등가(NaCl equivalent)로서 계산하였다.

기용성 탄수화물 분석

Table 1. Sampling sites and plant species collected from several habitats

Site no.	Location	Plant species (Abbr.)
1	Nakdong, Boryeong-si, Chungcheongnam-do	Sal.eur, Sua.gla, Sua.jap, Phr.com
2	Dongjin, Buan-gun, Jeollabuk-do	Atr.gme, Sal.eur, Phr.com, Zoy.sin
3	Gomso, Buan-gun, Jeollabuk-do	Sua.jap, Phr.com
4	Duu, Youngkwang-gun, Jeollanam-do	Sal.eur, Sua.jap,
5	Duu-2	Phr.com, Car.pum
6	Hajodae, Yangyang-gun, Gangwon-do	Che.ser, Phr.com
7	Namae, Yangyang-gun, Gangwon-do	
8	Naksan, Yangyang-gun, Gangwon-do	Che.ser, Phr.com
9	Mangsang, Donghae-si, Gangwon-do	Zoy.sin Car.kob
10	Maengbang, Gangneung-si, Gangwon-do	
11	Mangyang, Uljin-gun, Kyeongsangbuk-do	
12	Sagumi, Haenam-gun, Jeollanam-do	
13	Balpo, Goheung-gun, Jeollanam-do	
14	Iho, Jeju-si, Jeju Island	Sas.col, Isc.ant
15	Gwagji, Bukjeju-gun, Jeju Island	
16	Hyeobjae, Bukjeju-gun, Jeju Island	Car.pum
17	Sanbansan, Namjeju-gun, Jeju Island	Car.kob
18	Jungmun, Seogwipo-city, Jeju Island	

Chenopodiaceae (*Atriplex gmelini* : Atr.gme, *Chenopodium serotinum* : Che.ser, *Salicornia europaea* : Sal.eur, *Salsola collina* : Sas.col, *Suaeda glauca* : Sua.gla, *Suaeda japonica* : Sua.jap), Gramineae (*Ischaemum antheplhoroides* : Isc.ant, *Phragmites communis* : Phr.com, *Zoysia sinica* : Zoy.sin), Cyperaceae (*Carex kobomugi* : Car.kob, *Carex pumila* : Car.pum).

Table 2. Soil chemical characteristics of sampling site (SM: Salt marsh; SD: Sand Dune; dl: detection limit)

Habitat	Site no.	Exchangeable soil inorganic ions					Total ions
		Ca	Na	K	Mg	Cl	
μmol/g soil							
SM	1	1.44	35.88	5.61	13.56	130.5	368.5
	2	0.28	8.40	1.05	0.79	26.2	83.9
	3	0.69	22.20	2.65	4.21	72.7	210.3
	4	0.93	10.63	2.07	3.2	39.1	110.7
SD	5	0.08	1.33	0.08	0.08	<dl	14.6
	6	0.32	0.86	0.08	0.16	<dl	14.0
	7	0.16	0.47	0.02	0.10	<dl	10.2
	8	0.20	0.68	0.10	0.17	<dl	12.9
	9	0.42	0.47	0.03	0.07	<dl	11.2
	10	0.37	0.44	0.02	0.05	<dl	10.9
	11	0.14	8.00	0.19	0.32	8.1	23.5
	12	0.62	1.25	0.09	0.16	<dl	14.3
	13	0.22	4.27	0.30	0.19	<dl	18.1
	14	0.87	1.49	0.13	0.45	3.9	17.4
	15	1.29	1.07	0.11	0.46	<dl	18.8
	16	1.15	1.19	0.16	0.66	<dl	20.0
	17	0.78	0.97	0.11	0.54	<dl	16.2
	18	0.83	0.74	0.07	0.41	<dl	14.4

추출액 20 μl와 증류수 580 μl의 용액에 5% phenol 용액 400 μl 와 H₂SO₄ 2 ml을 첨가하여 10분간 방치 후, 교반하여 상온에서 30분 냉각시킨 다음, UV-VIS Spectrophotometer (UV mini 1240, Shimadzu)를 사용하여 490 nm의 파장에서 측정하였다. 표준용액은 glucose (2~40 μg in 200 μl)를 사용하였다(Dubois *et al.* 1994).

Betaine계 화합물의 추출 및 정량분석

시료 추출액 3 ml를 음이온 교환수지(DOWEX 1×4-50, 20~50 mesh, OH⁻-form)와 약한 양이온 교환수지(Amberlite CG-50, 100~200 mesh, H⁺-form)에 통과시킨 다음, 회전 증발기(rotary evaporator)를 이용하여 건조시키고, 1 ml의 증류수에 용해시켰다. 시료는 0.45 μm membrane filter를 이용하여 여과한 후 HPLC (SPD-10A UV-VIS Detector, Shimadzu)를 이용하여 다음과 같은 조건(Column : Partisil SCX 10 μm, mobile phase : 50 mM KH₂PO₄ with 5% methanol pH=4.6, Flow rate 1.5 ml/min, wave length 195 nm)하에서 정량 분석하였다.

결과 및 고찰

토양 환경

생육지의 기후, 토양의 환경조건 그리고 식물체의 미네랄 이용도는 식물의 분포에 매우 중요한 영향을 미친다(Albert and Kinzel 1973). 염습지와 해안사구 토양의 무기이온 및 총 이온함량은 생육지 환경에 따라 뚜렷한 차이를 보였다(Table 2). 조사된 토양의 총 이온함량은 10.2~443.7 μmol/g로 변화하였으며, 염습지 토양이 가장 높은 값을 보였다(368.5 μmol/g soil). 토양 내 Ca²⁺, Na⁺, K⁺ 및 Mg²⁺와 같은 양이온은 각각 0.08~1.44, 0.47~35.88, 0.02~5.61, 0.07~13.56 μmol/g의 값을 나타내었으며, 사구지역의 Na⁺이온 함량(0.44~8.00 μmol/g soil)은 염습지 토양(8.40~35.88 μmol/g soil)에 비해 현저히 낮은 값을 보였다. Cl⁻ 이온은 동진, 곰소와 같은 염습지에서는 26.2~130.5 μmol/g의 함량을 나타내었으나, 사구지역 토양의 Cl⁻이온은 매우 낮은 값을 보였다. 전반적으로 염습지 토양은 사구 토양에 비해 매우 높은 무기이온(Na⁺, Cl⁻)함량을 나타내었다. 따라서 염습지에 서식하는 식물은 토양의 높은 무기이온에 의한 이온 독성과 낮은 수분 포텐셜 그리고 조수에 의한 침수의 영향을 받는 반면에, 해안 사구지역의 식물은 토양 자체의 염분 농도보다는 염을 포함한 바람, 모래에 의한 마찰력 그리고 토양의 건조성에 더 큰 영향을 받을 것으로 생각된다.

식물체의 수분함량비

식물의 다육성을 나타내는 지표로 염환경에 서식하는 식물의 수분함량비는 Fig. 1과 같다. 명아주과 식물은 교란지나 해안사구지역에 출현하는 좀명아주(3.83), 솔장다리(6.02)보다 염습지에 서식하는 식물(6.92~8.70)이 더 많은 수분을 함유하는 것으로 조사되었고, 칠면초의 경우 가장 큰 수분함량비의 변화를 보였다. 명아주과 식물은 식물종과 서식처에 따라 다소 차이를 보였지만, 전반적으로 사초과나 벼과 식물에 비해서 매우 높은 수분 함량을 나타내었다. 단자엽식물인 벼과와 사초과 식물은 식물종별 및 생육지 형태에 무관하게 2.7 이하의 낮은 값을 보였다. 조사된 명아주과 식물의 높은 수분함량비는 염 환경에서의 식물

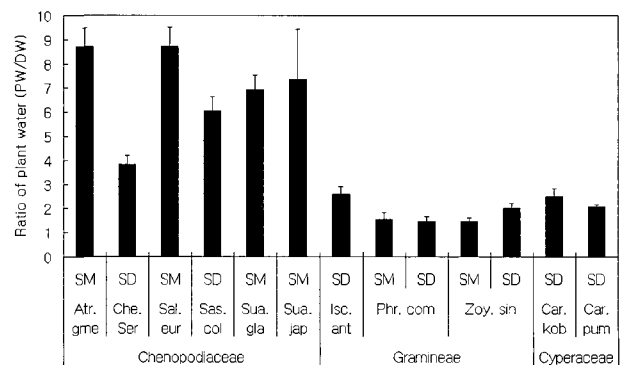


Fig. 1. Ratio of plant water to dry weight in the leaves of plants which belong to three families (SM: Salt marsh; SD: Sand Dune).

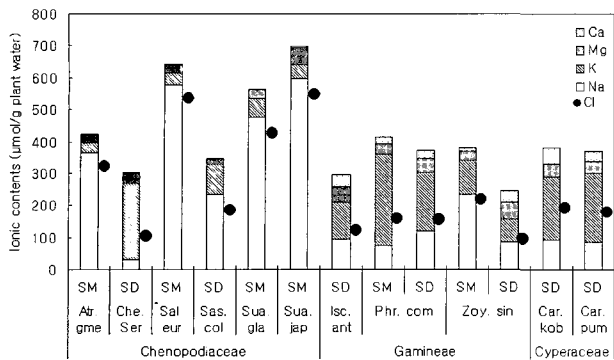


Fig. 2. Contents of cations ($\mu\text{mol/g plant water}$) and chloride ($\mu\text{mol/g plant water}$) in the leaves of plant which belong to three families (SM: Salt marsh; SD: Sand Dune).

체 내에 축적된 Na^+ 와 Cl^- 과 같은 이온의 농도를 희석하기 위해 조직을 다육화 함으로써 이들 이온의 독성을 회피하는 것으로 여겨진다.

식물체 내의 무기이온 함량

조사된 식물의 체내 수용성 무기이온 함량은 Fig. 2와 같다. 명아주과 식물은 염 환경 하에서 전반적으로 벼과 및 사초과 식물에 비해 높은 양이온(특히, Na^+) 및 음이온(Cl^-) 함량을 나타내었다. 대체로 염을 적절히 배제하지 못하는 식물은 고농도의 Na^+ 에 의한 K^+ 와 Ca^{2+} 의 선택성 감소로 인해 이들 이온의 흡수가 저해되고, 동시에 과도한 Na^+ 이온을 유입하게 된다(Ashraf *et al.* 1994). 명아주과 식물 중 교란지 및 해안사구에 생육하는 좁명아주와 솔장다리의 경우, 염습지에 생육하는 종과는 이온함량에 있어 뚜렷한 차이를 보였다. 교란지에 생육하는 좁명아주는 체내 높은 K^+ 함량($238.30 \mu\text{mol/g plant water}$)과 낮은 Na^+ 함량($31.39 \mu\text{mol/g plant water}$)을 보인 반면, 해안사구 및 염습지에 적응한 종들은 낮은 K^+ 함량($31.20\sim 94.09 \mu\text{mol/g plant water}$)에 비해 현저히 높은 Na^+ 함량($235.02\sim 579.24 \mu\text{mol/g plant water}$)을 보였다. 이러한 특징은 명아주과 식물이 보편적으로 토양에 존재하는 알칼리 양이온을 체내 삼투를 위해 적극적으로 활용하기 때문으로 생각된다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 명아주과 식물은 체내 매우 낮은 Ca^{2+} 함량($<4 \mu\text{mol/g plant water}$)을 나타내었다. 일반적으로 명아주과에 속하는 식물은 생리적인 혐칼슘식물(physiological calciophobe)로 알려져 있는데, 유입되는 Ca^{2+} 을 Ca-oxalate 형태로 액포에 축적함으로써 세포질에 소량의 유리 Ca^{2+} 이온($10 \mu\text{mol/g plant water}$ 이하)만을 함유하는 것으로 여겨진다(Choo and Song 1998, Kinzel 1989).

벼과와 사초과에 속하는 식물은 생육지에 상관없이 다소 일정한 양이온과 Cl^- 를 식물체내에 함유하였다. 염습지에 생육하는 일부 종(갯잔디)을 제외하고는 체내 Na^+ 함량($93.2 \pm 17.3 \mu\text{mol/g plant water}$)이 낮고 다량의 K^+ 이온($176.9 \pm 76.3 \mu\text{mol/g plant water}$)을 축적하는 양상을 보였다. 사초과의 대표적 식물인 *Carex*속 식물은 사구지역에 생육하며 다량의 K^+ 이온과 소량의

Na^+ 이온을 함유하는데, 이온이 풍부한 곳에서는 이온 배제자로, 이온이 부족한 곳에서는 이온 축적자로 작용함으로써 체내 이온함량을 효과적으로 조절하는 것으로 생각된다(Choo 1995, Choo and Albert 1997). 벼과에 속하는 식물은 해안사구에 비해 염습지에서 이온함량이 다소 증가하는 양상을 보였는데, 갈대는 염습지($286.29 \mu\text{mol/g plant water}$)에서 해안사구($182.30 \mu\text{mol/g plant water}$)보다 더 많은 K^+ 함량을 나타내었고, 갯잔디는 염습지($234.06 \mu\text{mol/g plant water}$)에서 해안사구($86.88 \mu\text{mol/g plant water}$)보다 더 높은 Na^+ 를 함유하였다. 일반적으로 건생형 잎구조(xeromorphic leaf structure)를 가진 단자엽 식물은 수분을 체내에 많이 저장할 수 없으므로, 뿌리에서의 효과적인 이온(Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , 중금속 이온 등) 배제기작을 가지는 것으로 알려져 있다. 즉, 이들 식물은 체내 낮은 이온함량을 유지하지만 K^+ 를 선택적으로 흡수하는 효율적인 이온 흡수체계를 가지며, 삼투조절에 보편적으로 당이 중요한 역할을 담당하는 것으로 알려져 있다(Huetterer and Albert 1993, Choo and Albert 1999). K^+ 는 세포내에서 삼투조절자(osmoticum)로서 세포내 팽압을 유지시키는 역할을 하기 때문에 K^+ 이온의 절대적인 양과 함께 세포내 다른 무기이온과의 균형이 팽압 유지 및 체내 생리, 생화학적 대사에 매

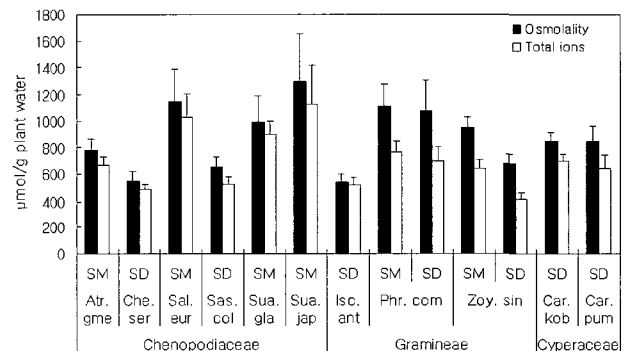


Fig. 3. Osmolality ($\mu\text{mol/g plant water}$) and total ion contents ($\mu\text{mol/g plant water}$) in the leaves of plant which belong to three families (SM: Salt marsh; SD: Sand Dune).

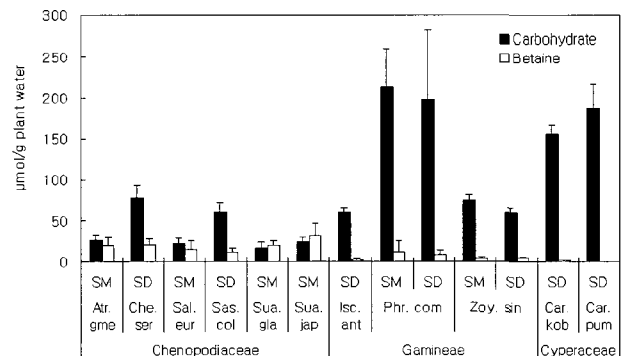


Fig. 4. Glycine betaine ($\mu\text{osm/g plant water}$) and carbohydrate contents ($\mu\text{mol/g plant water}$) in the leaves of three plant families (SM: Salt marsh; SD: Sand Dune).

우 중요한 의미를 가지게 된다. 특히 K^+ 는 Na^+ 와 경쟁적 흡수기 작을 가지므로 K^+ 와 Na^+ 의 균형정도는 단백질 대사에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(이 등 1999).

식물체의 삼투물농도, 총 이온, 당, 글리신베타인 함량

조사된 식물종의 총 이온 함량은 삼투물농도의 변화와 뚜렷한 관련성을 나타내었다(Fig. 3). 명아주과 식물은 생육지에 따라 삼투물농도와 총 이온함량에 있어 중간 뚜렷한 차이를 보였다. 고염 환경에 적응한 칠면초가 가장 높은 삼투물농도(1299.91 $\mu\text{sm/g plant water}$)와 총 이온함량(1126.83 $\mu\text{sm/g plant water}$)을 보여 주었으며, 교란지에 생육하는 쯤명아주가 가장 낮은 삼투물농도(550.89 $\mu\text{sm/g plant water}$)와 총 이온함량(487.54 $\mu\text{sm/g plant water}$)을 나타내었다. 단자엽식물 중 벼과의 갈대가 가장 높은 삼투물농도(1113.71 $\mu\text{sm/g plant water}$)와 총 이온함량(762.28 $\mu\text{sm/g plant water}$)을 나타내었고, 갯쇠보리가 가장 낮은 삼투물농도(540.35 $\mu\text{sm/g plant water}$), 갯잔디가 가장 낮은 총 이온함량(418.50 $\mu\text{sm/g plant water}$)을 나타내었다.

수용성 당 함량과 글리신베타인 함량에서는 명아주과와 단자엽 식물(벼과, 사초과) 간에 뚜렷한 차이를 보였다(Fig. 4). 조사된 대부분의 명아주과 식물의 당 함량(16.5~77.6 $\mu\text{mol/g plant water}$)은 단자엽식물(59.6~213.1 $\mu\text{sm/g plant water}$)에 비해 비교적 낮은 함량을 보였지만, 해안사구와 교란지에 생육하는 명아주과 식물인 솔장다리(60.7 $\mu\text{sm/g plant water}$)와 쯤명아주(77.6 $\mu\text{sm/g plant water}$)는 염습지에 서식하는 다른 식물종에 비해 높은 당함량을 나타내었다. 염습지에 서식하는 명아주과 식물은 삼투물농도와 무관하게 낮은 체내 수용성 당을 함유하며, 삼투 조절 물질로 알려진 glycine betaine (11.8~31.5 $\mu\text{sm/g plant water}$)을 많이 함유하는 것으로 조사되었다. 한편 단자엽식물은 명아주과 식물에 비해 다량의 당을 함유하였으며, 삼투물농도의 증가와 더불어 당 함량이 증가하는 양상을 보였으나, glycine betaine은 명아주과에 비해 낮은 함량(~11.2 $\mu\text{sm/g plant water}$)을 보였다. Glycine betaine은 4가 암모늄 화합물(quaternary ammonium compound) 중의 하나로 건조, 고염 그리고 저온과 같은 스트레스에 처한 많은 식물체에서 축적되는 세포질내 삼투물질이다. 염 환경하에서 식물은 체내에 흡수된 무기이온(Na^+ 와 Cl^-)을 주로 액포에 저장하며, 세포내 삼투유지를 위해 세포질에 glycine betaine을 축적한다. 또한 glycine betaine은 저온하에서 틸라코이드막을 보호하고, 낮은 수분포텐셜에서 광합성효율을 유지시킨다. Glycine betaine의 합성을 위해 형질전환되거나 외부에서 glycine betaine을 공급받은 식물은 건조, 염 그리고 저온스트레스에 대한 저항성을 나타내는 것으로 알려져 있다(Glenn *et al.* 1999, Rathinasabapathi 2000, Robinson and Jones 1986, Xing and Rajashekar 1999).

따라서 염습지 및 해안사구에 서식하는 명아주과 식물은 많은 무기이온(Na^+ , Cl^-)을 체내에 흡수하고, 또 세포질성 삼투 조절 물질인 glycine betaine을 축적함으로써, 토양의 낮은 수분포텐셜 환경을 극복하는 반면, 벼과와 사초과에 속하는 식물은 체

내 이온함량이 낮고, 수분포텐셜을 유지하기 위해 다량의 수용성 당을 축적함으로써 염분 및 해안사구 환경에 적응하는 것으로 조사되었다.

결과적으로 염분 환경하의 명아주과 식물은 염 축적형 식물로 토양의 낮은 수분포텐셜에 대해 무기이온(Na^+ , Cl^-)을 삼투 조절에 직접적으로 이용하며, 흡수된 이들 이온의 독성효과를 희석(다육화)이나 배출 그리고 액포 내에 Na^+ 와 Cl^- 이온의 구획화를 통해 조절하며, 삼투 조절 물질로 glycine betaine을 축적하는 생리적인 특성을 갖는다. 이와는 달리 벼과와 사초과에 속하는 식물들은 염 배제형 식물로 체내 일정한 무기이온 함량을 유지하며, K^+ 이온을 선택적으로 흡수하고, 체내 높은 당을 함유하는 생리적 특성을 보인다. 이러한 생리적 특성으로 인해 명아주과, 벼과 그리고 사초과에 속하는 식물은 해안사구와 염습지의 건조와 고염 환경을 효율적으로 극복해 나가는 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 학술진흥재단(2001년 지방대 육성 프로그램)에 의해서 수행되었음.

인용문헌

- Albert, R. and H. Kinzel. 1973. Unterscheidung von physiotypen bei halophyten des neusiedlerseegebiets. *Z. Pflanzenphysiol.* 70: 138-157.
- Ashraf, M., R. Noor, E.U. Eafar and M. Mujahid. 1994. Growth and ion distribution in salt stressed *Melilotus indica* (L.) ALL. and *Medicago sativa* L. *Flora* 189: 207-213.
- Breckle, S.W. 1990. Salinity tolerance of different halophyte types. *In* N. Bassam and M. Dambroth (eds), *Genetic Aspects of Plant Mineral Nutrition*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. pp. 167-175.
- Boyer, J.S. 1982. Plant productivity and environment. *Science* 218: 443-448.
- Cheeseman, J.M. 1988. Mechanisms of salinity tolerance in plants. *Plant Physiol.* 87: 547-550.
- Choo, Y.S. 1995. Mineral metabolism and organic solute pattern in *Carex* species of Austria - an ecophysiological approach. Ph. D Thesis, University of Vienna. 339 p.
- Choo, Y.S. and S.D. Song. 1998. Ecophysiological characteristics of plant taxon-specific calcium metabolism. *Korean J. Ecol.* 21: 47-63.
- Choo, Y.S. and R. Albert. 1997. The physiotype concept- an approach integrating plant ecophysiology and systematics. *Phyton* 37: 93-106.
- Choo, Y.S. and R. Albert. 1999. Mineral ion, nitrogen and organic

- solute pattern in sedges (*Carex* spp.)- a contribution to the physiotype concept. I. Field sample. *Flora* 194: 59-74.
- David, K.S. 1984. Quantitation and purification of quaternary ammonium compounds from halophyte tissue. *Plant Physiol.* 75: 273-274.
- Dubois, M., K.A. Gillies, J.K. Hamilton, P.A. Rebers and F. Smith. 1994. Monosaccharides *In* M.F. Chaplin and J.F. Kennedy (eds), *Carbohydrate Analysis*, Oxford University Press. pp. 2-3.
- Glenn, E.P., J.J. Brown and E. Blumwald. 1999. Salt tolerance and crop potential of halophytes. *Critical Review in Plant Science* 18: 227-255.
- Gorham, J., A. Bristo, E.M. Young and R.G. Wyn Jones. 1991. The presence of the enhanced K/Na discrimination trait in diploid *Triticum* species. *Theor. Appl. Genet.* 82: 729-736.
- Gorham, J., L.I. Hughes and R.G. Wyn Jones. 1981. Low molecular weight carbohydrate in some salt stressed plants. *Physiol. Plant.* 53: 27-33.
- Huetterer, F. and R. Albert. 1993. An ecophysiological investigation of plants from a habitat in Zwingendorf (Lower Austria) containing Galuber's salt. *Phyton* 33: 139-168.
- Jefferis, R.L., T. Rudmik and E.M. Dillon. 1979. Responses of halophytes to high salinities and low water potential. *Plant Physiol.* 64: 989-994.
- Kinzel, H. 1989. Calcium in the vacuoles and cell wall of plant tissue. *Flora* 182: 99-125.
- Lee, J.S. and B.S. Ihm. 1986. The strategies of *Salicornia herbacea* and *Suaeda japonica* for coping with environmental fluctuation of salt marsh. *Korean J. Environ. Biol.* 4: 15-25.
- Lee, W.T and S.K. Chon. 1984. Ecological studies on the costal plants in Korea. *Korean J. Ecol.* 7: 74-84.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic press, London. 889 p.
- Rathinasabapathi, B. 2000. Metabolic engineering for stress tolerance: installing osmoprotant synthesis pathway. *Ann. Bot.* 86: 709-716.
- Reimann, C. and S.W. Breckle. 1988. Salt secretion in some *Chenopodium* species. *Flora* 180: 289-296.
- Robinson, S.P. and G.P. Jones. 1986. Accumulation of glycinebetaine in chloroplasts provides osmotic adjustment during salt stress. *Aust. J. Plant Physiol.* 13: 659-668.
- Schachtman, D.P., E.S. Lagudah and R. Munns. 1992. The expression of salt tolerance from *Triticum tanzhii* in hexaploid wheat. *Theor. Appl. Genet.* 84: 714-719.
- Smirnoff, N. 1995. Environment and plant metabolism. Bioscience, Oxford. 270 p.
- Storey, R. and R.G. Wyn Jones. 1977. Quaternary ammonium compounds in plants in relation to salt resistance. *Phytochemistry* 16: 557-453.
- Xing, W. and C.B. Rajashekar. 1999. Alleviation of water stress in beans by exogenous glycine betaine. *Plant Science* 148: 185-195.
- Yancey, P.H., M.E. Clark, S.C. Hand, R.D. Bowlus and G.N. Somero. 1982. Living with water stress: Evolution of osmolyte systems. *Science* 217: 1214-1222.

(2004년 11월 17일 접수; 2004년 12월 17일 채택)

Inorganic and Organic Solute Pattern of Coastal Plants, Korea

Choi, Sung-Chul, Jung-Jin Bae and Yeon-Sik Choo*

Department of Biology, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

ABSTRACT : In order to elucidate the ecophysiological characteristics of coastal plants, we collected them on salt marsh and sand dune, and analyzed inorganic (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) and organic solutes (soluble carbohydrate, glycine betaine). Chenopodiaceous plant species (*Atriplex gmelini*, *Salicornia europaea*, *Salsola collina*, *Suaeda glauca*, *Suaeda japonica*) showed a tendency to accumulate inorganic ions such as Na^+ and Cl^- instead of K^+ . However, *Chenopodium serotinum* which lives in ruderal habitat contained more K^+ and less Na^+ than the other Chenopodiaceous plants. Most Chenopodiaceous plant species maintained very low level of soluble Ca^{2+} and relatively low concentration of carbohydrates and showed high concentration of glycine betaine which is among the most effective known compatible solutes in the leaves of plant under drought and saline conditions. On the other hand, plant species which belong to Gramineae (*Ishaemum antheophoroides*, *Phragmites communis*, *Zoysia sinica*) and Cyperaceae (*Carex kobomugi*, *Carex pumila*) absorbed K^+ selectively and excluded Na^+ and Cl^- effectively regardless of habitat conditions, and they accumulated more soluble carbohydrate as osmoticum than Chenopodiaceous plants. These results suggested that physiological characteristics such as high storage capacity for inorganic ions (especially alkali cations, chloride) and the accumulation of glycine betaine in chenopodiaceous plants and K^+ -preponderance, an efficient regulation of ionic uptake (exclusion of Na^+ and Cl^-) and the accumulation of soluble carbohydrate in monocotyledonous plants enable them to grow dry and saline habitats.

Key words : Carbohydrate, Coastal plant, Glycine betaine, Inorganic ions, Organic solutes
