

명아주과 3종 식물의 염 환경에 대한 적응특성의 비교

김진아 · 추연식 · 이인중* · 배정진 · 김인숙 · 추보혜 · 송승달[†]

경북대학교 자연과학대학 생물학과, 경북대학교 농업생명과학대학 농학과*

적 요: 건조 및 염 환경에 우점종으로 분포하고 있는 명아주과 식물의 염 및 무기 영양 농도에 따른 생리적 적응특성을 비교하기 위해 염습지에 널리 분포하는 칠면초(*Suaeda japonica*), 통통마디(*Salicornia herbacea*) 및 채소로 재배되는 근대(*Beta vulgaris* var. *cicla*)를 재료로 하여 염 농도(0, 50, 100, 200, 400 mM NaCl) 및 무기 영양염 농도(Hoagland 용액의 1/1, 1/5, 1/10배액)를 달리하여 식물의 염생장과, 질소, 무기 이온, 전기 전도도 및 삼투조절물질의 변화를 정량적으로 분석하였다. 3종 명아주과 식물은 무기영양 및 염의 농도변화에 대해 식물체에 상당량의 염을 축적하였으며, 높은 내염성 기구를 통해 400 mM NaCl 처리에서도 현저히 생장을 촉진하는 호염성의 통통마디와 200 mM NaCl 처리까지 약간의 생장 촉진을 보이는 근대 및 높은 내염성을 가지면서 50 mM NaCl 이상 처리구에서 약간의 생장 저해를 보이는 칠면초의 세가지 염내성의 종 특성을 보였다. 무기이온의 동태에 있어서 3종 식물은 무기 영양 및 염 농도와 무관하게 체내에 소량의 수용성 Ca를 함유하였고(<10 μM/g plant water), K⁺이온은 염 농도가 증가함에 따라 다소 감소하였으며, Na⁺과 Cl⁻은 배지의 무기 영양과는 무관하게 염 농도가 증가함에 따라 현저히 증가하였다. 총 질소 함량은 무기 영양 및 염의 농도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 전기 전도도와 삼투물농도는 무기영양보다 염의 농도가 증가함에 따라 증가하는 양상을 보였다. Glycinebetaine과 proline의 함량은 각각 0.2~2.5 μM/g plant water와 0.1~0.6 μM/g plant water였고, 50 mM NaCl 처리구에서 최대치를 보였다.

검색어: 칠면초, 통통마디, 근대, 염 환경, 이온평형, glycinebetaine, proline.

서 론

식물의 생육은 자연환경의 다양한 요인에 의해 영향을 받고 있다. 특히 토양 및 지하수에 함유되는 과도한 염 농도는 염 감수성 식물의 생산성을 저해하는 요인이 된다. 토양의 염류화를 이루는 지역으로는 항상 습한 상태를 유지하는 해안 염습지와 장기적 지속적인 토양 수분 증발로 인해 지표면으로 유입되는 염류가 축적되는 사막 건조 지대, 그리고 심각한 물 부족으로 인해 상당량의 염을 가진 관개수를 이용한 경작지 등을 들 수 있다(Szabolcs 1989).

염 환경에서 식물은 크게 3가지 형태의 스트레스를 받는다. 첫째, 주위의 낮은 삼투 포텐셜이 식물체의 수분 이용성을 감소시켜 수분 스트레스를 초래한다. 둘째, 특정 이온의 독성이 고농도의 Na⁺, Cl⁻, Mg²⁺, SO₄²⁻ 등의 이온들로부터 야기될 수 있다. 셋째, 이들 이온의 높은 농도로 인해 세포내 이온의 불균형이 초래된다. 예로서 과도한 Na⁺에 의해 K⁺의 흡수 및 분배가 저해되거나 고농도의 Cl⁻는 NO₃⁻나 PO₄³⁻ 이온의 흡수 및 이용성을 저해하는 것이 보고되어 있다(Bernstein 1975).

염에 대한 식물의 적응반응으로는 크게 염 배제형과 염 축적형으로 나눌 수 있다. 염 배제형은 단자엽 식물에서 주로 볼 수 있는 것처럼 조직이나 기관으로의 염의 수송을 억제하는 것이

다(Kinzel 1989, Schachtman *et al.* 1992). 즉 염의 체내 유입을 제한하기 위해 뿌리에서 원형질막을 투과하는 초기 유입을 막거나, 뿌리 표피 세포의 세포질로부터 다량의 염 유출을 촉진하고, 뿌리 세포내 액포에 Na⁺을 축적함으로써 지상부로의 이동을 억제하는 것이다(Davenport *et al.* 1997). 염 축적형은 보통 염생식물에서 나타나며, 흡수된 염을 액포에 축적하거나, 형태적 구조적 변화로 수분 유입을 증가시켜 흡수된 염 이온을 희석하는 다즙다육화 현상과 특수한 표피구조인 낭모 및 염선의 형성에 의해 염을 축적하여 체외로 제거함으로써 염 스트레스에 대하여 내성을 갖는 것이다(Reimann and Breckle 1988, Breckle 1990). 염 환경에 대한 식물의 생리적인 적응방법으로는 삼투조절물질(proline, sugars, sugar alcohols, betaines 등)의 축적을 들 수 있다. 이러한 물질은 수용성으로 중성 pH에서 전하를 띄지 않는 경향이 있고, 생화학적 반응을 저해하지 않아 삼투조절에 깊은 관련이 있다. 최근 다양한 식물 종류에 대해서 환경 스트레스에 반응하여 합성되는 질소화합물의 축적에 관한 연구가 많이 진행 중에 있다(Huetterer and Albert 1993, Hanson *et al.* 1995).

명아주과(Chenopodiaceae)의 식물은 사막지대 및 염수의 영향을 받는 지대를 포함하는 교란지, 염생지 및 건조지대에 우점종으로 분포하여 강한 염 내성을 가지며, 사탕무우, 근대 및 시금치를 제외하고는 일반적으로 경제적 가치가 없는 야생형 초본이다. 명아주과 식물의 염 환경에 대한 생리적 특징은 무기 이온

[†] Author for correspondence; Phone: 82-53-950-5348, e-mail: sdsong@knu.ac.kr

(특히 알칼리 양이온과 Cl^- , NO_3^- 및 SO_4^{2-} 등)에 대한 높은 저장능력, 생체내의 매우 낮은 수용성 칼슘농도, 높은 K/Ca비, 그리고 glycinebetaine 함량의 증가 등이 일반적으로 알려져 있다 (Breckle 1990, Choo 1995). 이들 명아주과 식물의 염 환경에 대한 적응 방법은 염모를 통해 염을 제거하거나(예; *Atriplex*, *Halimione*, *Salsola*), 흡수된 염을 회석하는 다육화(예; *Suaeda*, *Salicornia*), 세포질성 삼투조절물질인 glycinebetaine의 축적(예; *Spinach*, *Beta*)과 같은 기작들이 보고되고 있다(Wyn Jones and Storey 1981, Reiman and Breckle 1988).

본 연구는 우리나라의 해안 염습지에 우점하는 명아주과의 칠면초, 통통마디와 채소인 근대에 대하여 염 환경하에서 무기 영양 농도가 변함에 따라 생육과정에서 양이온과 음이온의 평형패턴의 변화와 질소량의 변화를 정량화하고, 삼투물농도 및 조질물인 glycinebetaine과 proline의 변화 패턴을 정량화하는 것을 목적으로 하였다.

재료 및 방법

실험 재료

본 실험의 재료는 염환경에서 우점종인 명아주과 식물로서 바닷가에 널리 군생하는 칠면초(*Suaeda japonica*), 통통마디(*Salicornia herbaceae*)와 채소로 재배되고 있는 근대(*Beta vulgaris* var. *cicla*)를 선택하였다. 칠면초와 통통마디는 각각 동진강유역과 서해안 근산의 자연 생육지에서 채집하여 종자를 수집하였고 근대는 종묘상에서 종자를 구입하였다.

생육 조건 및 처리

식물의 종자를 균일한 크기로 선별하여 각각 1% $HgCl_2$ 로 2분간 멸균 처리 후, 25°C 항온기에서 발아시켜 모래를 채운 플라스틱 포트(직경 12 cm×높이 9 cm)에 이식하여 1주일간 Hoagland 완전배지에 적응시킨 후, 줄기의 길이가 약 5 cm 자란 균일한 개체를 선별하고 Hoagland 완전 배지(1/1)와 1/5, 1/10으로 희석한 배양액 처리구에 각각 0, 50, 100, 200, 400 mM NaCl 의 염 농도를 매일 처리하였으며, 근대의 경우 100 mM NaCl 처리구의 측정치는 얻지 못하였다. 모든 처리는 3반복으로 하였고 통계처리는 Unistat 1.2를 이용하였다.

수확 및 분석

식물체는 염 환경 처리 2주 후 수확하였고, 수확한 식물체의 잎은 70°C 건조기에 3일 동안 건조시켜 건량을 측정하였다.

건조시킨 잎은 분쇄기(UDY cyclone sample mill)로 분말로 만든 후, 증류수 15 ml에 시료 0.5 g을 넣고 100°C 증탕기에 1시간 동안 끓인 후, 최종 용량을 25 ml로 맞추고, 여과기(GF/C, 1.2 μm)로 추출하였다.

시료 추출액의 무기 음이온(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})은 IC(Ion Chromatography; Column, Sykam LCA A14; Eluat, 7.5 mM Na_2CO_3 ; Flow rate, 1.5 ml/min)로 정량하였고, 무기 양이온(Na^+ , K^+ , Mg^{2+} ,

Ca^{2+})은 ICP (Inductively Coupled Plasma; Jobinyvon 38 Plus)로 정량 분석하였다. 삼투물농도는 추출 시료용액(50 μl)을 빙점 강하법의 원리를 이용한 Osmometer (Micro-Osmometer 3MO, Advanced Instruments)로 측정하였다. 전기 전도도는 추출 시료(1 ml)를 2차 증류수 3 ml로 희석하여 전기전도도계 (Check mate 90; Mettler-Toledo)로 측정하였다. Glycinebetaine과 proline의 함량은 추출 시료 각 5 ml를 증류수 8 ml로 희석하여 이온 교환시킨 후, speedvac으로 건조시키고 1 ml의 D_2O 에 녹여서 NMR Spectrometer (Unity Plus 300NMR Spectrometer, Varian Co.)로 정량하였다.

식물체의 총 질소 함량은 micro-Kjeldahl법으로 분석하였다. 분말 시료 약 50 mg을 Kjeldahl-flask에 넣고 분해 촉매제(K_2SO_4 : $CuSO_4 = 9:1$ w/w)와 황산(H_2SO_4) 1 ml를 첨가하여 500~600°C에서 3시간 동안 분해한 후, 증류(40% NaOH)하여 발생하는 암모늄을 0.02 N 황산에 흡수시켜, 역적정으로 정량하였다.

결 과

영양염 및 염 농도 처리에 대한 3종 식물 잎의 건물량의 변화는 Fig. 1과 같다.

칠면초는 무기영양의 감소에 의해 완전배지에 비해 건물량이 감소하였고 염 농도를 400 mM까지 높임에 따라 대조구에 비해 약간의 감소를 보였다. 이에 비해, 통통마디는 무기 영양의 영향

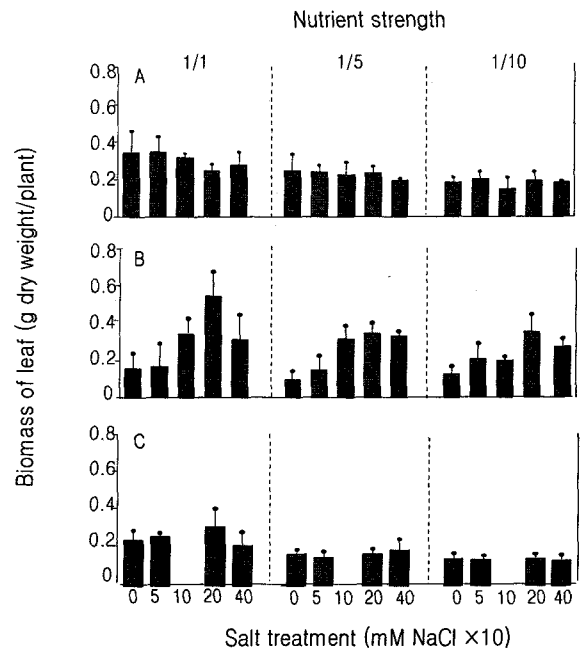


Fig. 1. Effects of mineral nutritions and salts gradients on leaf dry weight of three species of Chenopodiaceae (A, *Suaeda japonica*; B, *Salicornia herbacea*; C, *Beta vulgaris*). N.S. (Nutrient strength) : 1/1, Hoagland complete solution; 1/5, 1/5 diluted solution; 1/10, 1/10 diluted solution. Narrow bars on histograms mean standard error.

은 현저하지 않았으나, 염 농도 증가에 의해서는 건물량이 증가하여 특히, 염 농도 200 mM NaCl 에서 건물량이 현저히 증가하였고(250~350%), 400 mM 염 처리구에서도 대조구보다 건물량이 높았다(150~250%). 근대는 무기 영양이 감소함에 따라 건물량이 감소하였고, 염 농도 200 mM NaCl 처리구 까지 건물량이 증가하다가 400 mM NaCl 처리구에서는 대조구보다 감소하였다.

무기 영양 및 염 농도처리에 따른 잎의 무기 양이온 및 음이온 함량의 변화는 Fig. 2와 같이 외부의 염 농도 증가에 따라 이온 함량은 증가하였고, 무기 영양 농도에 따라서는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

염 농도 증가에 따라 3종 식물은 모두 Na⁺와 Cl⁻ 함량이 현저히 증가하였으며, Ca²⁺은 소량 함유하였고, K⁺는 식물 종간의 차이는 있으나 염 농도 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 그 밖의 이온들은 큰 변화가 없었다. 칠면초는 염 농도가 증가할수록 Na⁺와 Cl⁻ 함량이 모두 증가하였고, 완전 배지의 400 mM NaCl 처리구에서 대조구에 비해 각각 3배와 6배 이상 증가하였다. 염 처리에 의해 가장 높은 무기 이온 함량을 보인 통통마디는 칠면초와 마찬가지로 염 농도가 증가할수록 양이온과 음이온 함량이 증가하였고, 완전배지의 400 mM NaCl 처리구의 Na⁺와 Cl⁻의 함량이 대조구에 비해 각각 3배와 4배 이상 증가하였다. 1/5 및 1/10 희석 배지에서도 비슷한 양이온 및 음이온 함량의 변화패턴을 보였다. K⁺은 일정한 패턴을 보였고, Mg²⁺는 칠

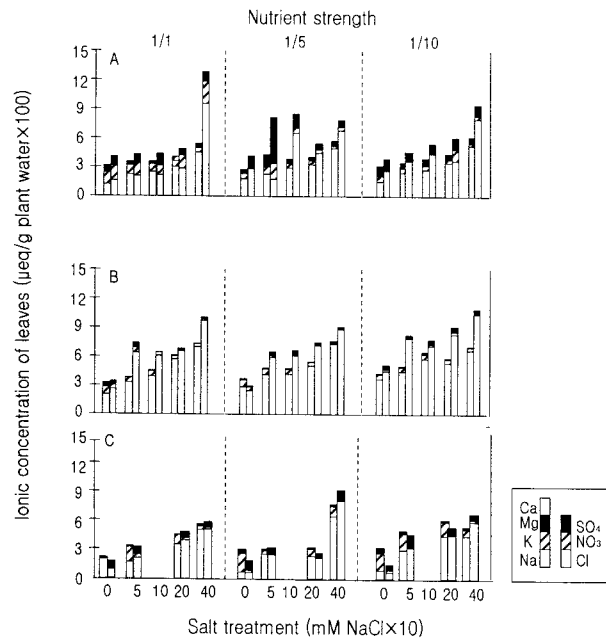


Fig. 2. Effects of mineral nutrition and salts gradients on the ionic concentrations in leaves of three species of Chenopodiaceae (A, *Suaeda japonica*; B, *Salicornia herbacea*; C, *Beta vulgaris*). N.S. (Nutrient strength) : 1/1, Hoagland complete solution; 1/5, 1/5 diluted solution; 1/10, 1/10 diluted solution.

면초와 근대에 비해 상당히 낮은 함량을 보였으며, Ca²⁺ 및 SO₄²⁻ 함량도 매우 낮았다. 근대는 비교적 양이온 및 음이온의 총 함량은 낮았으나 염 농도가 증가함에 따라 이온 함량이 증가하였고, 1/5 희석 영양 배지에서 Na⁺와 Cl⁻ 함량은 400 mM NaCl 처리구에서 대조구에 비해 11배와 15배 증가하였다. 그 밖의 이온들은 일정한 패턴을 보였으나, 특히 K⁺ 함량은 완전배지의 400 mM NaCl 처리구에서 대조구에 비해 5배나 감소하였다.

무기 영양 및 염 농도 처리에 따른 K/Na 비를 보면, 칠면초와 통통마디는 염처리 하지 않은 대조구에서도 근대에 비해 Na⁺를 상당량 함유하고 있어서 1/10정도의 낮은 K/Na 비를 보였다. 근대는 대조구에서 무기 영양구배에 따라 K/Na 비가 3~7에서 염 농도 처리에 의해 급격히 감소하여 50 mM NaCl 처리구에서 0.1~0.8로 되고 200 mM NaCl 이상의 처리구에서는 거의 일정한 값을 보였다. 대조구에서 무기 영양 구배에 따라 비교적 낮은 K/Na 비(0.15~0.40)를 보였던 통통마디는 200 mM NaCl 처리구에서 0.09~0.06으로 감소하였다. 칠면초는 대조구에서 무기 영양 구배에 따라 0.3~1.0의 K/Na 값을 보이다가 염 농도가 증가함에 따라 감소하여 400 mM NaCl 처리구에서는 0.05~0.09로

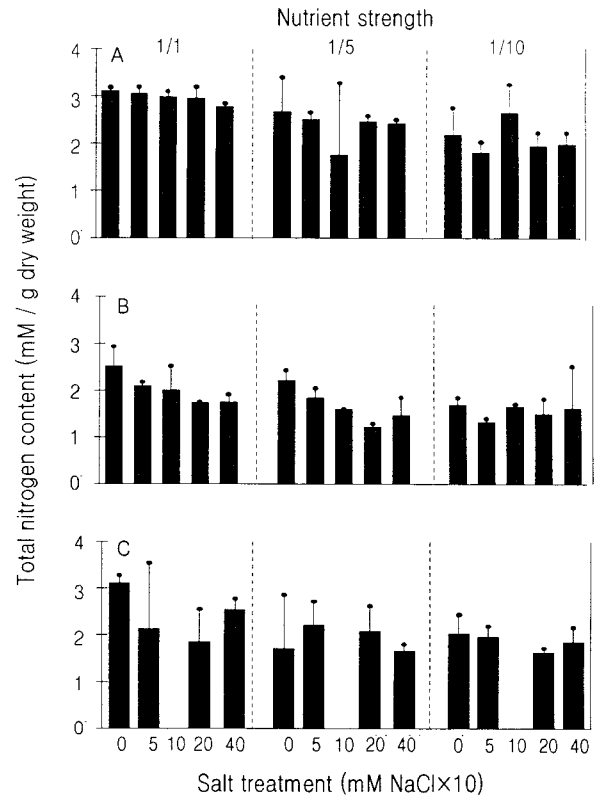


Fig. 3. Effects of mineral nutrition and salts gradients on the total nitrogen contents in leaves of three species of Chenopodiaceae (A, *Suaeda japonica*; B, *Salicornia herbacea*; C, *Beta vulgaris*). N.S. (Nutrient strength) : 1/1, Hoagland complete solution; 1/5, 1/5 diluted solution; 1/10, 1/10 diluted solution. Narrow bars on histograms mean standard error.

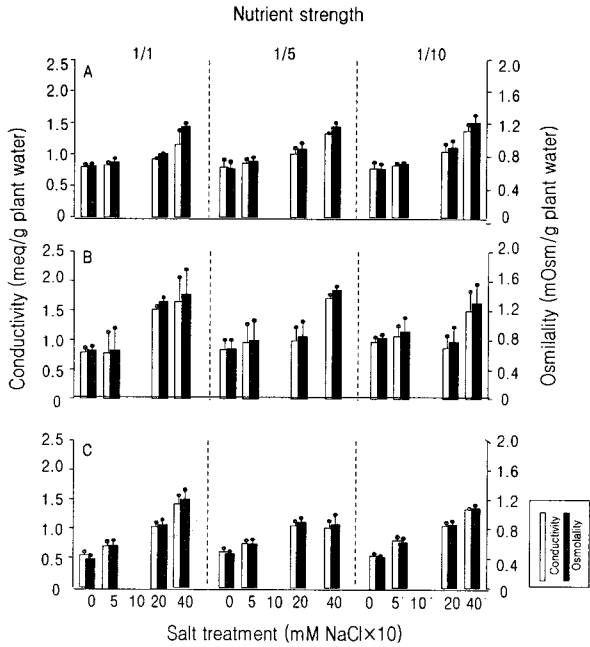


Fig. 4. Effects of mineral nutrients and salts gradients on the conductivity and osmolality in leaf extracts of three species of Chenopodiaceae (A, *Suaeda japonica*; B, *Salicornia herbacea*; C, *Beta vulgaris*). N.S. (Nutrient strength) : 1/1, Hoagland complete solution; 1/5, 1/5 diluted solution; 1/10, 1/10 diluted solution. Narrow bars on histograms mean standard error.

되었다.

무기 영양 및 염 농도에 따른 잎의 총 질소 함량의 변화는 Fig. 3과 같이 모두 완전배지에서 3 mM/g dry weight 정도의 높은 질소 함량을 가졌으나 무기 영양 농도가 희석될 수록 2 mM/g dry weight 이하로 감소하였다. 염 처리 농도가 증가함에 따라 총 질소 함량은 감소하였고, 근대는 완전배지에서 200 mM NaCl 처리구까지는 감소하였으나, 400 mM NaCl 처리구에서는 질소 함량이 증가하였다.

전기 전도도의 변화와 흡수력을 나타내는 삼투물농도의 변화는 Fig. 4와 같이 염 농도가 증가함에 따라 증가하는 양상을 보였다.

철면초는 대조구에서 전기 전도도와 삼투물농도가 각각 0.77 ~ 0.79 meq/g plant water와 0.61 ~ 0.64 mosm/g plant water였으며, 400 mM 염 처리구에서는 각각 1.16 ~ 1.43 meq/g plant water와 1.15 ~ 1.24 mosm/g plant water로 증가하였다. 1/10 무기 영양 희석배지의 400 mM 처리구에서는 전기 전도도와 삼투물농도가 모두 대조구에 비해 2배로 증가하였다. 통통마디는 완전배지의 경우 400 mM 처리구에서 전기 전도도와 삼투물농도가 대조구에 비해 2배 이상 증가하였다. 근대는 전기 전도도가 완전배지의 경우 대조구에서 0.54 meq/g plant water 였으나 400 mM 처리구에서는 1.41 meq/g plant water로 약 3배 증가하였고, 삼투물농도는 0.39 mosm/g plant water에서 1.20 mosm/g plant water로 3

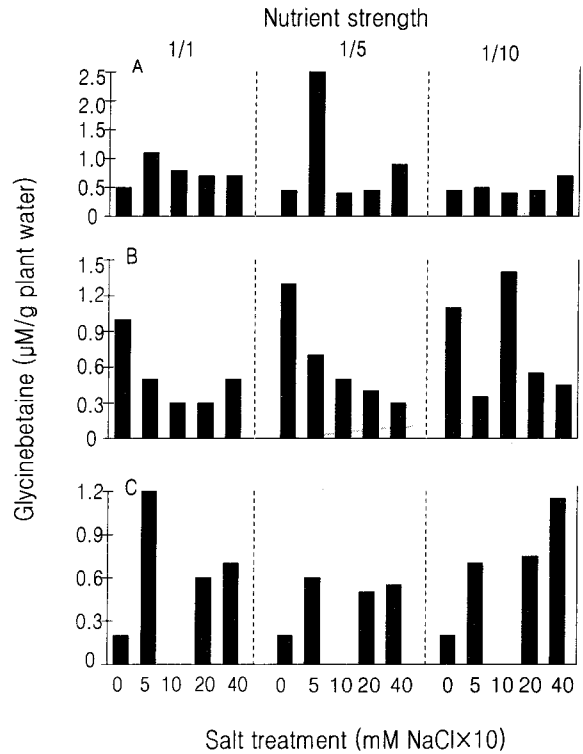


Fig. 5. Effects of mineral nutrition and salts gradients on the glycinebetaine contents in leaves of three species of Chenopodiaceae (A, *Suaeda japonica*; B, *Salicornia herbacea*; C, *Beta vulgaris*). N.S. (Nutrient strength) : 1/1, Hoagland complete solution; 1/5, 1/5 diluted solution; 1/10, 1/10 diluted solution.

배 이상 증가하였다.

식물체의 glycinebetaine 함량의 변화는 Fig. 5와 같이 무처리구의 대조구에서 철면초, 통통마디 및 근대가 각각 0.5, 1.0 및 0.2 µM/g plant water 수준이었으나, 영양 구배와 염처리 구배에 따라 철면초는 50 mM 염 처리시에 1/5희석 배지에서 2.5 µM/g plant water로 급격히 증가하였다가 100 mM 이상 고염농도에서는 다시 0.5 µM/g plant water수준으로 감소하였다.

통통마디는 완전배지와 1/5희석 배지에서는 염 농도가 증가함에 따라 0.6 µM/g plant water 이하로 감소하는 경향을 보였으나, 1/10 희석 배지의 100 mM NaCl 처리구에서 1.4 µM/g plant water 까지 증가하였다가 200 mM 이상 고염농도에서 0.5 µM/g plant water 이하로 감소하였다. 근대는 완전 영양배지와 50 mM 염 처리구에서 1.2 µM/g plant water로 증가하였다가 200 mM 이상 고염농도에서 0.6 µM/g plant water 수준으로 감소하였고, 1/5 희석 배지에서는 0.6 µM/g plant water 이하의 수준에서 염농도에 따라 큰 변화가 없었으며, 1/10 희석 배지에서는 고염농도에서 증가하여 400 mM NaCl 처리구에서 1.1 µM/g plant water를 보였다.

식물체의 proline 함량의 변화는 Fig. 6에서의 같이 무처리구에서 0.1 µM/g plant water 이하의 소량이었고, 철면초에서는 1/5

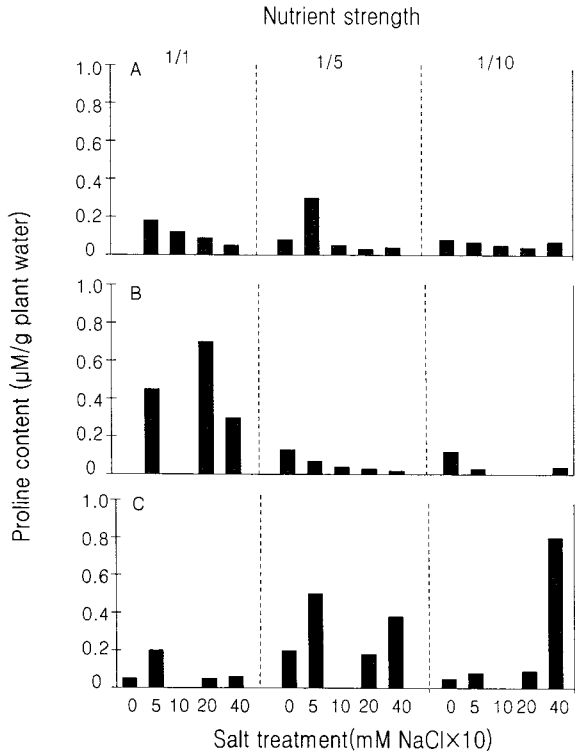


Fig. 6. Effects of mineral nutrition and salts gradients on the proline contents in leaves of three species of Chenopodiaceae (A: *Suaeda japonica*, B: *Salicornia herbacea*, C: *Beta vulgaris*). N.S. (Nutrient strength) : 1/1, Hoagland complete solution; 1/5, 1/5 diluted solution; 1/10, 1/10 diluted solution.

희석 영양구배의 50 mM 염처리구에서 0.27 µM/g plant water로 1/10희석 배지에 비해 3배 이상 증가하였으나 100 mM 이상 400 mM 까지의 염처리구에서는 0.1 µM/g plant water이하로 감소하여 처리간에 큰 차이를 보이지 않았다.

통통마디에서는 1/5희석 영양구배의 50 mM 염처리구에서 0.06 µM/g plant water수준의 매우 낮은 함량에서 염농도에 따라 감소하여 400 mM 염처리구에서는 0.02 µM/g plant water이하로 감소하였으며, 완전배지와 1/10희석배지에서는 저농도의 염처리에서 보다 낮았고 고농도 염처리에서 약간 높은 경향을 보였다. 근대는 1/5희석 영양배지의 50 mM 염처리에 0.5 µM/g plant water로서 1/10희석 배지에 비해 4배정도 증가하였으나, 200 mM 이상의 염처리구에서는 0.2 µM/g plant water수준으로 감소하였고, 1/10 희석배지의 400 mM 염처리구에서 0.8 µM/g plant water로 증가하였다.

고 찰

일반적으로 명아주과 식물은 염에 대해서 강한 내성을 가지는 것으로 알려져 있다(Reimann and Breckle 1993). 본 실험에서 염 환경하에 생육시킨 3종 명아주과 식물은 무기영양 및 염의

농도변화에 대해 식물체에 상당량의 염을 축적하였으며, 높은 내염성 기구를 통해 400 mM NaCl 처리에서도 현저히 생장을 촉진하는 호염성의 통통마디와 200 mM NaCl 처리까지 약간의 생장 촉진을 보이는 근대 그리고 높은 내염성을 가지면서도 50 mM NaCl 이상 처리구에서 약간의 생장 저해를 보이는 칠면초의 세 가지 염내성의 종 특성을 보였다(Fig. 1). 특히 통통마디는 200 mM NaCl의 높은 염 농도에서도 생장이 대조구에 비해 3배이상 현저히 촉진되는 것으로 보아 호염성식물에 속하고, 이는 형태적인 다즙다육화 조직의 발달에 의해 흡수된 염을 희석함으로써 염에 의한 생장저해를 극복한 것이다. 무기 영양의 농도에 따른 영향은 완전배지에 비해 1/10 희석 배지에서 30~40%의 감소를 보였고, 또한 염 처리 농도에 따라 무기 양이온과 음이온의 함량이 현저히 증가하였다는 사실에서 염 스트레스에 대한 대사적 조절의 균형이 교란된 것으로 생각된다(Fig. 2).

염 농도 처리에 따른 통통마디와 칠면초의 잎 조직의 생존율에서 통통마디는 염 농도의 넓은 범위에 적응할 수 있으나, 칠면초는 제한적 염 농도 범위에서 적응한다는 보고가 있다(Lee and Ihm 1986). 본 실험에서도 통통마디는 내염의 범위가 넓고 염 환경에서 현존량이 증가하는 반면, 칠면초는 생장을 위해 50 mM 이하의 제한적인 염 환경에 적응하였다. 통통마디는 내염의 범위가 넓고 생육이 현저히 촉진되는 것으로 보아 다육화와 대사적인 다른 적응 기작이 있는 것으로 생각된다.

외부 환경의 염 농도 증가에 따라 내부의 양이온 및 음이온 함량은 점차 증가하였고, 특히 과도한 Na⁺흡수에 의해 다른 무기 양이온 (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)의 함량이 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2). 이것은 고농도의 Na⁺와 Cl⁻에 의해 막의 선택적 투과성이 깨어져, 이온 흡수가 조절되지 않음으로써 Na⁺ 및 Cl⁻ 이온의 과다 유입현상이 유발된 것으로 생각된다. 일반적으로, 외부 환경에 고농도의 Na⁺이 존재하여 식물체내에 과잉 흡수되면, K⁺, Ca²⁺과 같은 필수 양이온의 유입이 제한되고, 과잉 흡수된 이온에 의해 독성의 유발과 다른 이온의 결핍 현상 등으로 인해 이온 불균형이 초래되고 염생식물은 염농도가 증가함에 따라 내부의 K⁺함량이 감소한다(Boursier and Lauchli 1990). 식물은 생육에 요구되는 양보다 더 많은 Ca²⁺을 흡수하여 CaCO₃ 형태로 세포벽에 함유하고(Pollak and Albert 1990), 성숙한 식물체에서는 대부분의 수용성 Ca²⁺이 액포에 다양한 형태로 존재한다(Kinzel 1989). Fig. 2에서 보듯이 3종 식물은 모두 매우 소량의 수용성 Ca²⁺을 함유하였고, 이는 명아주과 식물의 특징 중 하나로서 Ca-옥살산염을 형성함으로써 세포내에 매우 소량의 수용성 Ca²⁺을 가지는 것으로 생각된다. 식물체의 음이온 패턴은 염 농도의 증가에 따라 Na⁺함량 증가와 더불어 음이온 중에서 Cl⁻가 현저히 증가하였다. 염 환경에서 다른 무기 음이온에 비해 Cl⁻ 유입이 상대적으로 큰 것은 NO₃⁻와 같은 다른 무기 음이온을 치환시키는 기능에 따른 것이라는 보고와 일치한다(Alam 1994). 식물체에 있어서 Cl⁻는 필수 원소로 액포내의 삼투 조절에 중요한 작용을 수행할 뿐만 아니라 결핍시 위조증상을 보이지만, 과잉 존재시에는 잎의 황백화 현상을 유발하는 것이다(Chavan

and Karadge 1990).

K/Na 비의 변화는 근대, 칠면초, 통통마디의 순으로 각각 7.5, 1.0, 0.4에서 염 처리에 의해 0.40~0.05로 현저히 감소하였다. 대부분의 염생식물은 염 농도가 증가함에 따라서 식물체의 K^+ 이온 농도가 감소하는데 염에 민감한 감수성 식물의 경우는 염 농도가 증가하면 생장 감소와 더불어 K^+ 이온 함량이 증가한다. 염을 배제하지 못하는 식물은 고농도의 염 처리에서 K^+ 와 Ca^{2+} 의 흡수가 저해되는 동시에 과도한 Na^+ 을 유입하게 되고 이온독성 및 영양의 불균형으로 인해 생장의 저해가 일어나는 것이다 (Ashraf *et al.* 1994).

질소 함량의 변화에 있어서, 통통마디와 근대는 배지에 함유된 소량의 NO_3^- 함량으로 인해 식물체내에 NO_3^- 를 거의 함유하지 않았지만, 칠면초는 비교적 많이 함유하였다. 질산성 식물로 널리 알려진 명아주과 식물은 중간 차이는 있으나 토양의 낮은 질산 이온에도 불구하고 NO_3^- - 질소를 많이 함유하고 있다. Fig. 3의 총 질소 함량을 보면, 무기 영양 및 염 처리 농도에 따라 생장의 저해를 초래하여 총 질소 함량의 감소를 보였으나 비콩과의 다른 종에 비하면 비교적 높은 값을 유지하였다. 이들 식물이 염 환경에 적응하기 위해 유효한 물질인 glycinebetaine을 포함하여 4가 암모늄 화합물을 체내에 많이 함유하여 높은 질소 함량을 나타내는데 염 처리 농도가 높을수록 총 질소 함량이 감소하는 것은 생장의 저해와 대사적 억제에 기인하는 것이 더 큰 요인이라고 생각된다.

식물체 추출액의 전기 전도도와 삼투물농도가 염 처리 농도에 비례해서 증가한 것은 염 스트레스에 대한 식물체의 수분 포텐셜을 조절하는 중요한 요인이 무기이온의 농도 변화에 의한 것으로 볼 수 있다. 그러나 200 mM NaCl 까지 생장의 축진을 보였던 통통마디는 저 농도의 염 처리구에서는 전기 전도도와 삼투물농도의 변화가 나타나지 않았는데 이것은 형태적으로 다육화 조직의 기능과 또 다른 유기산이나 저분자 탄수화물의 대사에 의한 적응으로 생각된다.

염 환경에 따른 식물체의 glycinebetaine 함량의 변화를 보면, 칠면초, 통통마디 및 근대는 50 mM 염 처리구에서 각각 1/5, 1/10 및 1/1 영양배지에서 최대 함량을 보였다. Glycinebetaine은 많은 염생식물에 축적되어 주요 세포질성 삼투 조절 물질로 작용하는데, 염 농도가 증가함에 따라 glycinebetaine 함량에 뚜렷한 증가를 보이지는 않았으나 50 mM 염 처리구에서는 상당히 증가하여 영양구배에 따른 중간 특성의 차이를 보였다. 염생식물에서는 proline이 주요 세포질성 삼투 물질로 작용하는데, Fig. 6에서 보듯이 이들 식물에서는 proline 함량이 상대적으로 매우 낮게 함유되어 주요 세포질성 삼투 조절물질로 작용하지는 않는 것으로 생각된다.

사 사

이 논문은 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-20100-001-3)지원으로 수행되었음.

인용문헌

- Alam, S.M. 1994. Nutrient uptake by plants under stress conditions. In Handbook of Plant and Crop Stress (Pessaraki, M. ed.). Marcel Dekker, New York. pp. 227-246.
- Ashraf, M.R., Z.U. Noor Zafar and M. Mujahid. 1994. Growth and ion distribution in salt stressed *Melilotus indica* (L.) ALL. and *Medicago sativa* L. Flora 189: 207-213.
- Bernstein, L. 1975. Effects of salinity and sodicity on plant growth. Amer. Rev. Phytopathol. 13: 295-312.
- Boursiner, P. and A. Lauchli, 1990. Growth responses and mineral nutrient relations of salt-stressed Sorghum. Crop Sci. 30: 1226-1233
- 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.
- Chavan, P.D. and A. Karadge. 1990. Influence of sodium chloride and sodium sulfate salinization on photosynthetic carbon assimilation in plant. Plant Physiol. 56: 201-207.
- Choo, Y.S. 1995. Mineral metabolism and organic solute pattern in *Carex* species of Austria - An Ecophysiological Approach. Ph. D Thesis, University of Vienna. pp. 1-339.
- Davenport, R.J., R.J. Reid and F.A. Smith. 1997. Sodium-calcium interactions in two wheat species differing in salinity tolerance. Physiol. Plant. 99: 323-327.
- Hanson, A.D., J. Rivoal, M. Burnet and B. Rathinasabapathi. 1995. Biosynthesis of quaternary ammonium and tertiary sulphonium compounds in response to water deficit. In N. Smirnov (ed.), Environment and Plant Metabolism. Bios Scientific Publishers, Oxford. pp. 189-198.
- 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.
- 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. Kor. J. Ecol. 4: 15-25.
- Pollak, J. and R. Albert. 1990. Physiological characterization of Boraginaceae with regard to their ecological status, Flora 184: 151-168.
- Reimann, C. and S.W. Breckle. 1988. Salt secretion in some *Chenopodium* species. Flora 180: 289-296.
- Reimann, C. and S.W. Breckle. 1993. Sodium relation in Chenopodiaceae, a comparative approach. Plant, Cell and Environment 16: 323-328.

Schachtman, D.P. E.S. Lagudah and R. Munns. 1992. The expression of salt tolerance from *Triticum tanchii* in hexaploid wheat. *Theoretical and Applied Genetics* 84: 714-719.

Szabolcs, I. 1989. Salt-Affected Soils. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 120-143.

Wyn Jones, R.G. and R. Storey. 1981. Betaines. In Paleg, L.G. and D. Aspinall, (eds.), *Plant and Biochemistry of Drought Resistance in Plants* Academic Press, Sydney, Australia, pp. 121-136.

(2002년 4월 8일 접수; 2002년 5월 6일 채택)

Adaptations and Physiological Characteristics of Three Chenopodiaceae Species under Saline Environments

Kim, Jin A, Yeon-Sik Choo, In-Jung Lee*, Jeong Jin Bae, In-Sook Kim, Bo Hye Choo and Seung-Dal Song[†]

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

Department of Agronomy, College of Agriculture and Life Sciences,

*Kyungpook National University, Taegu, 702-701, Korea**

ABSTRACT : Three species of Chenopodiaceae, *i.e.* *Suaeda japonica*, *Salicornia herbacea*, *Beta vulgaris* var. *cicla*, were investigated to compare the physiological characteristics through ionic balances and osmoregulations under different environmental salt gradients. Plants were harvested in two weeks from treatments with salt gradients (0, 50, 100, 200 and 400 mM NaCl) and mineral nutrition gradients (1/1, 1/5, 1/10 dilutions of Hoagland solution). Plants were analyzed for growth responses, ionic balances, osmolalities, conductivities, glycinebetaine and proline contents quantitatively. Three plants of Chenopodiaceae accumulated salts into tissues unlike some salt sensitive species, and showed unique adaptation patterns to overcome saline environments, *i.e.* strong growth stimulation for *Salicornia herbacea*, growth negative tolerance for *Suaeda japonica*, and growth positive tolerance for *Beta vulgaris* var. *cicla*. The absorption of inorganic Ca²⁺ ions was inhibited remarkably due to the excess uptake of Na⁺ with increasing salinity. The K⁺ content in plants was significantly reduced with increasing salinity. Total nitrogen content was reduced as mineral nutrients and salinity increases. Conductivity and osmolality increased with increasing salinity regardless of mineral nutrients. The ranges of glycinebetaine and proline contents were 0.2~2.5 μM/g plant water and 0.1~0.6 μM/g plant water, respectively.

Key words : *Beta vulgaris* var. *cicla*, Glycinebetaine, Ionic patterns, Proline, *Salicornia herbacea*, Salinity, *Suaeda japonica*
