

## 염 스트레스가 근대 (*Beta vulgaris* var. *cicla* L.)의 무기이온 및 glycine betaine 함량에 미치는 영향

최 성 철 · 김 종 국<sup>1</sup> · 추 연 식\*

(경북대학교 생물학과, <sup>1</sup>경북대학교 생명과학부)

**Effects of Salt Stress on Inorganic Ions and Glycine Betaine Contents in Leaves of *Beta vulgaris* var. *cicla* L. Choi, Sung-Chul, Jong-Guk Kim<sup>1</sup> and Yeon-Sik Choo\* (Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea; <sup>1</sup>Department of Life Science and Biotechnology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea)**

Growth, inorganic solutes and glycine betaine accumulation in spinach beet (*Beta vulgaris* var. *cicla* L.) were studied under different salt conditions. Plants of forty-three days old were assessed by growing for a further 10 and 20 days at four NaCl concentrations (0, 100, 200, 300 & 400 mM). The dry weight of leaves was maximal in plants which were grown at 100 to 200 mM NaCl treatments and after 10d it was decreased slightly at salt treatments of more than 300 mM NaCl. Under the salt conditions, leaves of *B. vulgaris* contained high inorganic ions to maintain low water potential, but low water soluble carbohydrate contents. Total ionic content and osmolality increased with increasing salt concentration. Salt stress led to a preferential accumulation of glycine betaine in leaves of *B. vulgaris*, especially for the 200 mM NaCl treatment. These findings suggest that a high degree of NaCl tolerance of *B. vulgaris* resulted from the accumulation of glycine betaine, which is known to have osmoprotectant properties in the cytoplasm.

**Key words :** *Beta vulgaris*, spinach beet, glycine betaine, osmolality, salt stress

### 서 론

자연 상태에서 식물은 다양한 형태의 환경 스트레스에 노출되며, 염과 건조는 전 세계에 걸쳐 식물의 생산성을 저하시키고 있으며, 특히 염 (NaCl) 스트레스는 농작물 생산을 제한하는 주요한 환경요인 중의 하나로 알려져 있다 (Lopez and Satti, 1996; Larcher, 2003; Wang *et al.*, 2003).

염 (NaCl)은 크게 세 가지 형태로 식물의 성장을 제한하는데, 첫째는 뿌리 주변 토양의 수분 퍼텐셜 감소로 인해 발생하는 수분결핍, 둘째는 과도한 Na<sup>+</sup>와 Cl<sup>-</sup>의 흡수로 인한 이온의 독성효과, 마지막으로 이온 흡수와 수송의 제한으로 인한 이온의 불균형을 들 수 있다 (Marschner, 1995). 그러나 대부분의 식물은 거친 환경에서 살아남아 생육하기 위한 다양한 방어기작을 발달시켜 왔으며, 복합적인 생리적 기작을 통해 염 (NaCl)과 건조 스트

\* Corresponding author: Tel: +82-53-950-5346, Fax: +82-53-953-3066, E-mail: yschoo@knu.ac.kr

레스에 극복하는 것으로 알려져 있다(Bradley and Morris, 1991; Volkmar *et al.*, 1998; Flowers and Colmer, 2008; Li *et al.*, 2010).

건조와 염(NaCl) 조건에 대해 저항성을 가지는 종의 경우 세포질 내 용질의 농도를 증가 시키는 삼투조절 기작을 수행한다. 삼투조절은 건조 또는 염(NaCl) 환경하의 식물의 생존에 있어 결정적인 역할을 수행하는 것으로 알려져 있으며, 잘 알려진 세포질성 삼투조절 물질로는 proline, glycine betaine, soluble sugar, 그리고 polyols 등이 있다(Rhodes and Hanson, 1993; Di Martino *et al.*, 2003; Moghaieb *et al.*, 2004). 삼투조절물질은 삼투조절에 사용되는 용질의 종류와 그 식물의 분류학적 위치와 연관되어 있으며, 어떤 종의 특징적인 생리양상이 그 종의 생태적 적응을 결정하거나 또는 상당한 영향을 미치기 때문에 특정 식물의 환경적응을 규명하는데 있어 특이적인 생리생태학적 특성을 고려할 필요가 있다(Choo and Albert, 1997). 대부분의 식물은 glycine betaine을 거의 생성하지 못하지만 명아주과에 속한 많은 식물은 염(NaCl)이나 건조환경을 극복하기 위해 체내 glycine betaine를 생성하는 것으로 알려져 있다(McCue and Hanson, 1990; Choo and Song, 1998).

명아주과(Chenopodiaceae)는 대략 100속 1,500종으로 구성되며, 전세계에 널리 분포하며, 사막지대 및 염분의 영향을 받는 지대를 포함하여 교란지, 염습지, 건조한 생육지에서 뚜렷한 생태적 위치를 차지하고 있는 대표적인 식물군으로 알려져 있다(Heywood, 1993; Akhiani *et al.*, 1997). 우리나라에는 7속 15종이 보고되어 있으며, 교란지, 해안 사구 및 염습지에 주로 분포하고 있다. 지금까지의 연구 결과 명아주과 식물의 분포에 관해서는 많이 알려지게 되었으나 이들의 건조 및 염 환경 적응기작에 관해서는 아직도 자세히 규명되지 않는 상태에 있다(Lee, 1988; Choi *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2012).

본 연구는 염(NaCl) 환경하에서 명아주과 속하는 대표적인 작물인 근대(*Beta vulgaris* var. *cicla* L.)를 대상으로 체내 무기이온, 유기용질, glycine betaine 축적 등 어떠한 생리적 특성을 통해 염분 환경을 어떻게 극복하는지를 규명하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 식물재료 및 생육

본 실험의 재료인 근대(*Beta vulgaris* var. *cicla* L.)는 동원농산종묘(주)에서 구입하였으며, 근대 종자는 증류수

로 먼저 5~6회 씻어낸 후, 26°C 항온기에서 5일간 발아시켰다. 발아된 유식물은 질석(vermiculite)을 채운 plastic pot (직경 10 cm 높이 15 cm)에 옮겨 심고, 온실에서 광주기(14시간, 25°C), 암주기(10시간, 18°C)를 유지하였으며, Hoagland 배양액을 처리하여 43일간 생육시켰다. 생육된 근대는 염(NaCl) 100, 200, 300 및 400 mM의 농도가 포함된 배양액을 60 mL씩 하루에 한 번 각 pot 마다 처리하였으며, 처리 후 10, 20일 2회 수확하였다. 수확한 식물 개체수는 생육 상황에 따라 3~5개체를 3반복 실험하였다.

### 2. 식물체 추출 및 무기이온 분석

잎의 생량(fresh weight: FW)을 측정된 후, 70°C 건조기에서 3일간 건조하여 건량(dry weight: DW)을 측정하였으며, plant water는 (FW-DW)/DW로 구하였다. 건조된 식물 잎을 분쇄기(UDY cyclone sample mill)로 갈아 균질한 분말로 만든 후 시료 1 g을 25 mL measuring flask에 넣은 다음 95°C water bath에서 1시간 동안 중탕하였다. 상온에서 충분히 냉각시키고 최종 부피를 25 mL로 맞춘 후, GF/C filter (pore size 1.2 µm)로 여과 추출·여과한 시료 추출액을 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma; Perkin Elmer Optima 7300 DV)로 무기양이온(Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>)을 정량 분석하였다.

### 3. 총이온 함량 측정

총이온 함량은 추출 시료를 증류수와 1:4의 비율로 희석하여, 전기전도도 측정기(Electronic conductivity meter: Mettler Check Mate 90, USA)를 이용하여 측정하였으며, 총 이온함량은 Na<sup>+</sup>와 Cl<sup>-</sup> 이온의 농도 등가(NaCl equivalent)로 계산하였다.

### 4. 가용성 탄수화물 분석

식물 추출액 20 µL와 증류수 580 µL의 용액에 5% phenol 용액 400 µL와 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 원액 2 mL을 첨가하고 10분간 방치한 후, 잘 혼합한 다음 상온에서 30분 냉각시킨 후, UV-VIS Spectrophotometer (UV mini 1240, Shimadzu)를 사용하여 490 nm의 파장에서 측정하였다. 표준용액 glucose (2~40 µg in 200 µL)를 사용하여 당 함량을 측정하였다(Chaplin and Kennedy, 1994).

### 5. Glycine betaine 분석

시료 추출액 3 mL를 anion exchange (DOWEX 1×4,

20~50 mesh, OH<sup>-</sup>-form)와 cation exchange (Amberlite CG-50, 100~200 mesh, H<sup>+</sup>-form) column 내로 loading 시키고 통과한 시료를 rotary evaporator를 이용하여 건조시키고, 1 mL의 증류수에 용해시킨 다음 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 µM KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> with 5% methanol, flow rate 1.5 mL min<sup>-1</sup>, wave length 195 nm)에서 정량 분석하였다.

## 6. 삼투몰 농도 측정

삼투몰 농도는 추출시료액 50 µL를 채취하여 빙점강화법의 원리를 이용한 Osmometer (Micro-Osmometer 3MO, Advanced Instruments)로 측정하였다.

## 7. 통계처리

통계분석은 SPSS v19.0를 이용하여 염 (NaCl) 농도, 처리기간 그리고 염 (NaCl) 농도×처리기간(상호작용)에 따라 식물체내에 축적되는 용질의 함량이 유의한 차이를 보이는지를 비교 분석하기 위해 two-way ANOVA를 사용하였고, 개별적인 요인의 효과를 one way ANOVA와 사후분석으로 Duncan's multiple range test를 이용하여 분석하였다 ( $P < 0.05$ ;  $N=3$ ).

## 결과 및 고찰

### 1. 생장

NaCl 처리에 따른 근대 (spinach beet) 잎의 건중량의 변화는 Fig. 1과 같다. 염 (NaCl) 처리 후 10일까지는 대조구와 처리구 간의 뚜렷한 생장의 차이는 나타나지 않았으며, 염 (NaCl) 처리 20일 후에는 염 (NaCl) 농도에 따라 근대 잎의 건중량의 차이를 보였다. 염 (NaCl) 농도의 증가함에 따라 염 (NaCl) 200 mM까지는 대조구와 유사하거나 다소 낮은 건중량을 보인 반면, 염 (NaCl) 400 mM 처리구에서는 뚜렷한 생장의 저해를 나타내었다 (Fig. 1).

일반적으로 염 (NaCl)에 내성이 약한 대부분의 작물에 비해 명아주과 식물은 염 (NaCl)에 대해서 다소 높은 내성을 가지며, 염 습지에 생육하는 명아주과 식물인 칠면초와 통통마디는 염 (NaCl) 400 mM까지 대조구보다 건중량이 증가하는 강한 염 저항성을 나타낸다. 염 (NaCl)에 민감한 식물종의 경우 염 (NaCl) 200 mM에서 잎과 뿌리의 생량과 건량이 급격한 감소를 보인다. 사탕무 (sugar

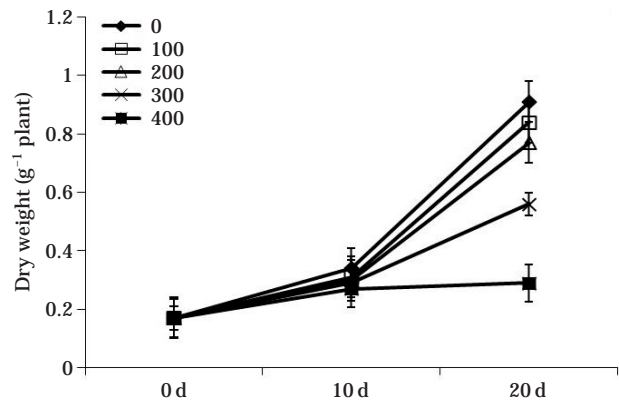


Fig. 1. Effect of NaCl treatments (0, 100, 200, 300 and 400 mM) on leaf dry weight of *Beta vulgaris*. Data represent mean values  $\pm$  S.D.

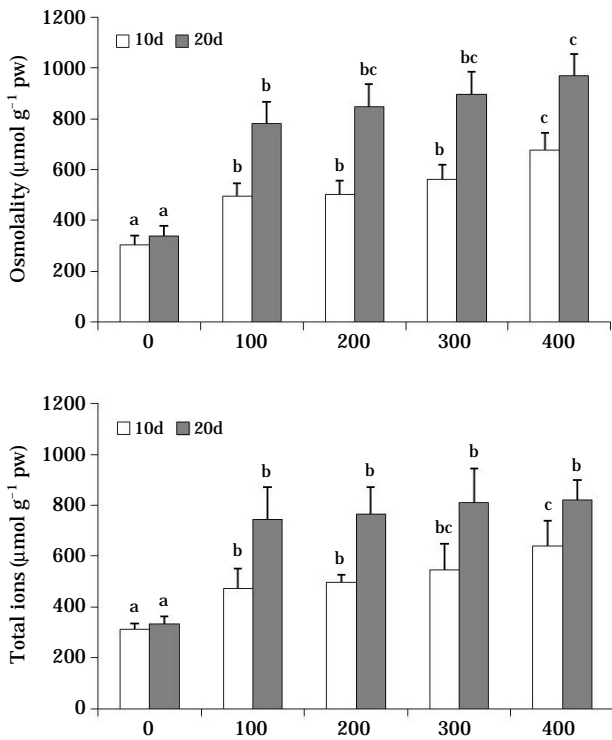
beet)는 발아 및 초기 생육시기에는 염 (NaCl) 농도의 증가에 따라 식물 생장에 민감한 반응을 보이지만 무기이온, proline 그리고 glycien betaine의 축적과 같은 높은 삼투 조절 능력을 보여 비교적 염 (NaCl) 저항성이 있는 것으로 알려져 있다 (Gzik, 1996; Ghoulam and Fares, 2001; Kim *et al.*, 2002). 근대 역시 200 mM 이하의 염 (NaCl) 농도에서도 대조구와 유사한 생장 반응을 보여 염 (NaCl) 200 mM까지 염 내성을 가지는 것으로 여겨진다.

### 2. 삼투몰 농도, 무기 양이온, 총 이온 함량

근대의 잎에 축적되는 총 이온 함량과 삼투몰 농도는 염 (NaCl) 농도와 처리기간에 의해  $P < 0.001$ 로 유의한 결과를 나타내었으며, 염 (NaCl) 농도와 처리기간 두 요인이 개별적으로 삼투몰 농도와 총 이온 함량에 영향을 주는 것으로 나타났다. 삼투몰 농도는 염 (NaCl) 농도 요인에 대한 사후분석 결과  $P < 0.05$  수준에서 10일째 처리구는 3개, 20일째 처리구는 4개 그리고 총 이온 함량은 10일째 처리구는 4개, 20일째 처리구는 2개의 그룹으로 나누어졌다. 염 (NaCl) 처리에 의해 근대 잎에 축적되는 총 이온 함량과 삼투몰 농도 또한 증가하는 양상을 보였다 (Fig. 2).

NaCl 20일 처리 후 대조구의 삼투몰 농도는  $338.1 \mu\text{mol g}^{-1} \text{pw}$ 이고, 400 mM NaCl 처리구는  $969.4 \mu\text{mol g}^{-1} \text{pw}$ 로 약 3배 증가하였으며, 총 이온 함량은 대조구 ( $332.0 \mu\text{mol g}^{-1}$ )에 비해 400 mM NaCl 처리구에서  $821.0 \mu\text{mol g}^{-1} \text{pw}$ 로 약 2.5배 증가하였다.

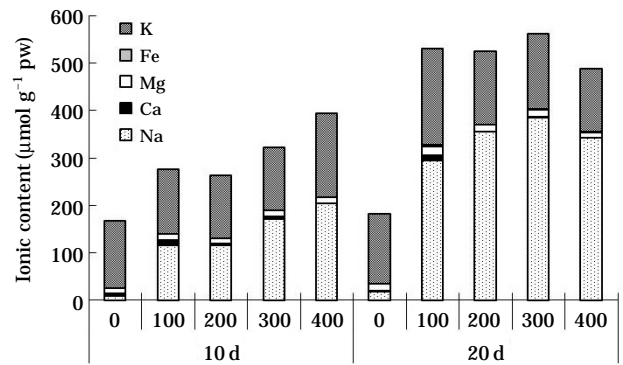
근대 잎의 총 이온 농도와 삼투몰 농도는 염 (NaCl) 처리함에 따라 증가하였으며, 그 이유로는 Na<sup>+</sup>와 Cl<sup>-</sup>이온의 유입증가와 관련이 있는 것으로 나타났다. 근대는 염 환경하에서 잎의 삼투 포텐셜을 유지하기 위해 체내 삼



**Fig. 2.** Effect of NaCl treatments (0, 100, 200, 300 and 400 mM) on osmolality and total ion concentrations ( $\mu\text{mol g}^{-1}$  plant water) in leaves of *Beta vulgaris*. Data represent mean values  $\pm$  S.D. The different letters indicate significant differences according to a one-way ANOVA and Duncan's multiple range test ( $P < 0.05$ ;  $N=3$ ). Two-way ANOVA of osmolality and total ions concentration by the NaCl concentration and period is as follows: concentration\*\*\*, period\*\*\*, concentration  $\times$  period<sub>n.s.</sub> \*\*\* $P < 0.001$ ; n.s., not significant.

투물 농도를 증가시키며, 초기 염 (NaCl) 스트레스 하에서는 삼투물 농도의 대부분이 이온의 함량으로 나타났으며 이후 이온 이외에 다른 용질을 식물체내 함유하는 것으로 조사 되었다. 근대의 경우 염 (NaCl)에 대한 반응으로 주로  $\text{Na}^+$ 와  $\text{Cl}^-$ 을 축적하여 삼투조절에 이용하는 것으로 판단되며, 염 습지에서 생육하는 같은 명아주과 식물인 나문재 (*Suaeda asparagoides*)와 해홍나물 (*Suaeda maritima*)도 생육지 환경에 따라 잎의 삼투물 농도를 적절하게 유지하기 위해  $\text{Na}^+$ 와  $\text{Cl}^-$ 과 같은 무기이온을 주로 이용하는 것으로 알려져 있다(Choi et al., 2012).

염 (NaCl) 처리에 대한 근대 잎의 무기양이온 함량은 Fig. 3과 같다. 대조구는 무기 양이온 중  $\text{K}^+$  이온을 주로 축적하며,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  그리고  $\text{Fe}^{2+}$  이온 순으로 식물체내에 함유하는 것으로 나타났다. 염 (NaCl) 농도와 처

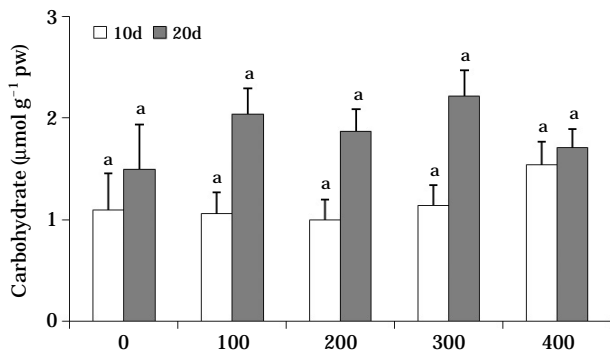


**Fig. 3.** Effect of NaCl treatments (0, 100, 200, 300 and 400 mM) on inorganic cation concentration ( $\mu\text{mol g}^{-1}$  plant water) in leaves of *Beta vulgaris*. Data represent mean values.

리 시간이 증가함에 따라 근대 잎의 양이온 함량도 증가하였으며, 주로  $\text{Na}^+$  이온을 식물체 내에 축적하는 것으로 나타났다. 염 처리 10일 후에는 식물체내  $\text{Na}^+$  이온의 함량이 증가하는 경향을 보였으며,  $\text{K}^+$  이온을 비롯한 다른 무기 양이온의 함량은 큰 변화를 보이지 않았다. 처리 20일에는 염 (NaCl) 처리구에서  $\text{Na}^+$  이온 함량의 현저한 증가를 보였으며, 염 (NaCl) 처리구 간에는 함량의 큰 차이를 보이지 않았다. 400 mM 처리구에서는  $\text{Na}^+$  이온의 현저한 증가로 인해  $\text{K}^+$  이온의 함량이 감소하는 경향을 나타내었다.

K/Na 비에 있어서 대조구는 20일째 8의 값을 보였으나, 염 (NaCl) 처리구에서는 10일째 100, 200, 300 그리고 400 mM에서 각각 1.16, 1.13, 0.78, 0.87의 값을 그리고 20일째 염 처리 구에서는 0.69, 0.44, 0.41, 0.39값으로 염 처리 시간이 길어지고, 농도가 증가할수록 현저히 감소하는 양상을 보였다.

대부분의 염생식물은 염 (NaCl) 농도가 증가함에 따라 식물체의  $\text{K}^+$  이온 농도가 감소하는데 염에 민감한 감수성 식물의 경우는 염 농도가 증가하면 성장 감소와 더불어  $\text{K}^+$  이온 함량이 증가한다. 염을 배제하지 못하는 식물은 고농도의 염 처리에서  $\text{K}^+$ 과  $\text{Ca}^{2+}$  이온의 흡수가 저해되는 동시에 과도한  $\text{Na}^+$  이온을 유입하게 되고 이로 인해 이온 독성 및 영양의 불균형으로 인해 생장의 저해가 일어나게 된다(Ashraf et al. 1994). 식물체 내 과도한  $\text{Ca}^{2+}$  이온함량은 유해한 영향을 미칠 수 있기 때문에 보통 세포질에는 낮은  $\text{Ca}^{2+}$  농도를 유지하고 있으며, 특히 명아주과 식물은 소량의 유리  $\text{Ca}^{2+}$  이온을 식물체에 축적하는 것으로 알려져 있다(Choo and Song, 1998). 염 환경에 적응한 식물들은 염에 의한 저해를 피하기 위하여 세포

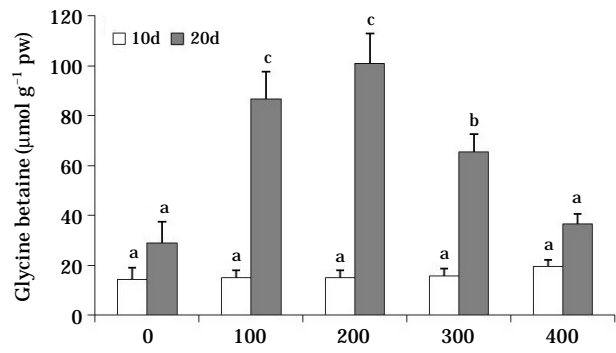


**Fig. 4.** Effect of NaCl treatments (0, 100, 200, 300 and 400 mM) on carbohydrate concentrations ( $\mu\text{mol g}^{-1}$  plant water) in leaves of *Beta vulgaris*. Data represent mean values  $\pm$  S.D. The different letters indicate significant differences according to a one-way ANOVA and Duncan's multiple range test ( $P < 0.05$ ;  $N=3$ ). Two-way ANOVA of carbohydrate by NaCl concentration and period is as follows: concentration<sub>n.s.</sub>, period<sup>\*\*\*</sup>, concentration  $\times$  period<sub>n.s.</sub>. <sup>\*\*\*</sup> $P < 0.001$ ; n.s., not significant.

내에 축적되는 염을 희석하기 위한 수분함량의 증가(다육성), 염분비선(salt gland)을 통한 배출, trichome에 축적, 뿌리로의 이동, 액포 내에 저장하는 등 다양한 생리적 조절 기작을 가지고 있다(Shabala and Mackay, 2011). 명아주과 식물인 사탕무(sugar beet)는 초기 생장에서 영양분을 흡수하기 위해  $\text{K}^+$ 과  $\text{Na}^+$ 을 많이 축적하여 삼투 조절에 이용하며, 생장함에 따라 식물 체내 수분 함량을 증가시켜 축적된 이온의 농도를 점차 희석시킨다(Kenter and Hoffmann, 2005). 염(NaCl) 스트레스에 대한 반응으로 근대는 잎에 축적되는  $\text{Na}^+$  이온을 적절히 구획화함과 동시에 수분함량을 증가하여 이온독성을 회피하고  $\text{Na}^+$  이온과  $\text{K}^+$  이온의 균형을 유지함으로써 염(NaCl) 환경에 적응하는 것으로 여겨진다.

### 3. 가용성 탄수화물 함량

염(NaCl)의 처리에 의한 가용성 탄수화물 함량의 변화는 개별적인 염(NaCl) 농도 그리고 염(NaCl) 농도와 처리기간 상호작용과 유의하지 않는 것으로 나타났고( $P=0.05$  이상) 처리기간에 따라 증가하는 경향을 나타냈다( $P < 0.001$ ). 전반적으로 근대는 소량의 가용성 탄수화물을 함유하였다(Fig. 4). 염(NaCl) 400 mM 처리구에서 가장 적은 함량 변화를 나타내었고, 300 mM 처리구에서 가장 많은 가용성 탄수화물 함량 변화를 보였다. 대부분의 식물에서 건조 또는 염(NaCl) 스트레스에 대한 반응으로 sucrose와 같은 가용성 탄수화물의 축적이 보고되



**Fig. 5.** Effect of NaCl treatments (0, 100, 200, 300 and 400 mM) on the glycine betaine concentrations ( $\mu\text{mol g}^{-1}$  plant water) in leaves of *Beta vulgaris*. Data represent mean values  $\pm$  S.D. The different letters indicate significant differences according to one-way ANOVA and Duncan's multiple range test ( $P < 0.001$ ;  $N=3$ ). Two-way ANOVA of glycine betaine by NaCl concentration and period is as follows: concentration<sup>\*\*\*</sup>, period<sup>\*\*\*</sup>, concentration  $\times$  period<sup>\*\*\*</sup>. <sup>\*\*\*</sup> $P < 0.001$ .

고 있으며, 특히 벼과와 사초과 식물에서 많이 함유하는 것으로 알려져 있다. 명아주과 식물 중 해안사구에 생육하는 솔장다리(*Salsola collina*)는 다른 명아주과 식물에 비해 많은 가용성 탄수화물을 함유하는 생리적 특성을 가지고 있다(Popp and Smirnoff, 1995; Choo and Albert, 1999; Choi et al., 2004). 사탕무(sugar beet)는 일반적으로 생장 초기에 많은 양의 당을 빠르게 뿌리에 축적하고 생장함에 따라 그 함량 또한 지속적으로 증가하는 것으로 알려져 있다(Kenter and Hoffmann, 2005). 염(NaCl) 환경하에서 근대는 당의 농도가 다소 증가하였으나 전반적으로 소량의 가용성 탄수화물을 함유하며, 염(NaCl) 처리에 따른 당 함량의 큰 변화를 보이지 않아 당은 근대의 주요 삼투 조절물질로 큰 기여를 하지 않는 것으로 여겨진다.

### 4. Glycine betaine 함량의 변화

근대는 염(NaCl) 농도, 처리기간 그리고 염(NaCl) 농도와 처리기간 상호작용에 따라 잎에 축적되는 Glycine betaine 함량의 차이를 나타내었다( $P < 0.001$ ). 근대의 glycine betaine에 대한 염(NaCl) 농도 요인은 염(NaCl) 처리 10일째까지의 근대 잎의 glycine betaine의 함량은 대조구와 모든 처리구에서 유사한 값( $P=0.05$  이상)을 나타내었으나, 20일째에는 처리구 사이에  $P < 0.001$ 로 뚜렷한 차이를 보였다. 사후분석 결과 염(NaCl) 처리 20일째에는 3개의 그룹으로 나누어졌으며, 대조구와 NaCl 400

mM이 가장 낮은 glycine betaine 함량을 보였고, NaCl 100과 200 mM 염 (NaCl) 처리구까지는 현저한 증가를 보였지만, 300 mM 염 (NaCl) 농도에서는 다소 감소하는 경향을 나타내었다 (Fig. 5). 근대 잎에 축적되는 glycine betaine의 함량은 시간에 따라 증가하지만 처리되는 염 (NaCl) 농도(100~300 mM)에 의해 더 많은 양이 축적되는 것으로 나타났다.

세포질성 삼투조절 물질로 알려진 glycine betaine은 여러 식물에서 염류, 냉해, 열 그리고 건조와 같은 스트레스에 대한 반응으로 세포질에 축적되며, 넓은 범위의 생리적 pH에서 전하를 띠지 않고 세 개의 methyl group의 탄화수소로 구성되어 있지만 물에 잘 녹으며 여러 생리적 반응에서 효소나 단백질과의 domain 역할 같은 특성을 가지고 있다. 삼투적 stress 하에서 세포질에 많이 축적되더라도 생화학적 반응을 저해하지 않으며 세포막 유지, 세포 구조 안정화 그리고 광합성 효율을 유지하기 위해 이용된다 (Wang and Showalter, 2004). 식물 생리와 유전학적 연구를 통해 glycine betaine 축적은 염 (NaCl) 저항성과 관련이 있을 뿐만 아니라 glycine betaine을 생성하지 않는 식물에 외부적 공급에 의해서도 염 (NaCl) 저항성이 증가하는 것으로 알려져 있다 (Harinasut *et al.*, 1996). 명아주과의  $C_3$  식물인 사탕무 (sugar beet)와 시금치 (spinach)에서 glycine betaine은 건조나 염 (NaCl)과 같은 여러 스트레스 반응으로 CMO (choline monooxygenase)와 BADH (betaine aldehyde dehydrogenase) 효소에 의해 엽록소에서 생성되어 세포질에 축적된다 (Sakamoto and Murata, 2002). 명아주과 식물인 근대 역시 식물체내  $Na^+$ 와  $Cl^-$  같은 무기 이온이 축적됨에 따라 삼투조절을 위해 glycine betaine의 축적하는 것으로 보아 glycine betaine은 근대의 염 스트레스에 대한 주요 세포질성 삼투 조절물질로 작용하는 것으로 생각된다.

결론적으로 명아주과 식물인 근대의 경우 무기이온의 효과적인 축적과 질소성 삼투조절물질인 glycine betaine을 축적함으로써 200 mM의 염 (NaCl) 환경에서도 뚜렷한 생장의 저해 없이 삼투문제를 극복하는 것으로 여겨진다.

## 적 요

염 (NaCl) 스트레스 하에서 근대의 이온축적 및 삼투조절물질로 알려진 Glycine betaine (GB) 함량 변화를 알아보기 위하여 0, 100, 200, 300 및 400 mM의 염 (NaCl)을 처리하여 생장, 이온양상 및 GB 함량을 조사하였다.

염 (NaCl) 농도와 처리시간이 증가함에 따라 근대 잎의

건중량은 염 (NaCl) 0, 100 그리고 200 mM은 큰 변화를 보이지 않았으나 300 mM 이상의 염 (NaCl) 농도에서는 감소하는 경향이 나타내었다.

양이온 함량은 염 (NaCl) 농도 및 처리시간이 증가함에 따라 증가하였으며, 주로  $Na^+$  이온을 축적하며  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  그리고  $Fe^{2+}$  순으로 식물체 내에 함유하는 것으로 나타났다.

총 이온함량과 삼투물 농도는 염 (NaCl) 농도가 증가함에 따라 증가하는 양상을 보였으며,  $Na^+$ 와 같은 무기이온을 직접적인 삼투 조절자로 이용하는 것으로 나타났다.

Glycine betaine은 10일째까지는 함량의 변화를 보이지 않았으나 염 처리 후 20일째 200 mM 염 (NaCl) 농도까지 현저하게 Glycine betaine 농도가 증가하였으며, 300 mM 염 (NaCl) 농도에서는 다소 감소되는 양상을 보였다. 근대는 염 (NaCl) 스트레스에 대한 세포질성 삼투 조절물질로 Glycine betaine을 축적하는 특성을 나타내었다.

결과적으로, 근대는 식물체 내로의 염 (NaCl)의 유입을 배제하는 기작보다는 효율적인 염 (NaCl)의 재분배 및 구획화와 무기이온을 삼투조절에 이용하며, Glycine betaine과 같은 세포질성 삼투조절물질을 축적하는 생리적 특성으로 염 (NaCl) 환경을 극복하는 것으로 여겨진다.

## 사 사

본 연구는 환경부 '차세대 에코이노베이션 기술개발사업'으로 지원 받은 과제임. 부분적으로 2013학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- Akhani, H., P. Trimborn and H. Ziegler. 1997. Photosynthetic pathways in *Chenopodiaceae* from Africa, Asia and Europe with their ecological, phytogeographical and taxonomical importance. *Plant Systematics and Evolution* **206**: 187-221.
- Ashraf, M.R., Z.U. Noor Zafar and M. Muhahid. 1994. Growth and in distribution in salt stressed *Melilotus indica* (L.) ALL. And *Medicago sativa* L. *Flora* **189**: 207-213.
- Bradley, P.H. and J.T. Morris. 1991. Relative importance of ion exclusion, secretion and accumulation in *Spartina alterniflora* Loisel. *Journal of Experimental Botany* **42**: 1525-1532.
- Chaplin, M.F. and J.F. Kennedy. 1994. Carbohydrate Analysis: A Practical Approach, p. 2-3. In: Monosaccharide

- (Chaplin, M.F. eds.). Oxford University Press, New York.
- Choi, S.C., J.J. Bae and Y.S. Choo. 2004. Inorganic and organic solute pattern of coastal plant, Korea. *Korea Journal of Ecology* **27**: 355-361.
- Choi, S.C., S.H. Lim, S.H. Kim, D.G. Choi, J.G. Kim and Y.S. Choo. 2012. Growth and solute pattern of *Suaeda maritima* and *Suaeda asparagoides* in an abandoned salt field. *Journal of Ecology and Field Biology* **35**: 1-8.
- 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 samples. *Flora* **194**: 59-74.
- Choo, Y.S. and S.D. Song. 1998. Ecophysiological characteristics of plant taxon-specific calcium metabolism. *Korean Journal of Ecology* **21**: 47-74.
- Di Martino, C.S. Delfino, R. Pizzuto, F. Loreto and A. Fuggi. 2003. Free amino acids and glycine betaine in leaf osmoregulation of spinach responding to increasing salt stress. *New Phytologist* **158**: 455-463.
- Flowers, T.J. and T.D. Colmer. 2008. Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist* **179**: 945-963
- Ghoulam, C. and K. Fares. 2001. Effect of salinity on seed germination and early seedling growth of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Seed Science and Technology* **29**: 357-364.
- Gzik, A. 1996. Accumulation of proline and pattern of alpha-amino acids in sugar beet plants in response to osmotic, water and salt stress. *Environmental and Experimental Botany* **36**: 29-38.
- Harinasut P., K. Tsutsui, T. Takabe, M. Nomura, T. Takabe and S. Kishitani. 1996. Exogenous glycinebetaine accumulation and increased salt-tolerance in rice seedlings. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry* **60**: 366-368.
- Heywood, V.H. 1993. Flowering Plants of the World, p. 72-73. B.T. Batsford, London..
- Kenter C. and C.M. Hoffmann. 2005. Seasonal patterns of sucrose concentration in relation to other quality parameters of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture* **86**: 62-70.
- Kim, J.A., Y.S. Choo, I.J. Lee, J.J. Bae, I.S. Kim, B.Y. Choo and S.D. Song. 2002. Adaptations and Physiological Characteristics of Three Chenopodiaceae Species under Saline Environments. *Korean Journal of Ecology* **25**: 171-177.
- Larcher, W. 2003. Physiological Plant Ecology, p. 345-450, Springer.
- Lee, J.S. 1988. Studies on the distribution of vegetation in the salt marsh of the Mankyung River estuary. *Korean Journal of Environmental Biology* **6**: 1-10.
- Li, R., F. Shi and K. Fukuda. 2010. Interactive effects of various salt and alkali stresses on growth, organic solutes and cation accumulation in halophyte *Spartina alterniflora* (Poaceae). *Environmental and Experimental Botany* **68**: 66-74.
- Lopez, M.V. and S.M. E Satti. 1996. Calcium and potassium-enhanced growth and yield of tomato under sodium chloride stress. *Plant Science* **114**: 19-27.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plant, p. 662-663. Academic press, London.
- McCue, K.F. and A.D. Hanson. 1990. Drought and salt tolerance: towards understanding and application. *Trends Biotechnol* **8**: 358-362.
- Moghaieb, R.E.A., H. Saneoka and K. Fujita. 2004. Effect of salinity on osmotic adjustment, glycinebetaine accumulation and the betaine aldehyde dehydrogenase gene expression in two halophytic plants, *Salicornia europaea* and *Suaeda maritima*. *Plant Science* **166**: 1345-1349.
- Popp, M. and N. Smirnov. 1995. Polyol accumulation and metabolism during water deficit, p. 199-215. *In: Environment and Plant Metabolism : Flexibility and Acclimation* (Smirnov, N. ed.). Bios Scientific oxford.
- Rhodes, D. and A.D. Hanson. 1993. Quaternary ammonium and tertiary sulfonium compounds in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* **44**: 357-384.
- Sakamoto, A. and N. Murata. 2002. The role of glycine betaine in the protection of plant from stress: clues from transgenic plants. *Plant, Cell and Environment* **25**: 163-171.
- Shabala, S. and A. Mackay. 2011. Ion transport in halophytes. *Advances in Botany* **57**: 151-199.
- Volkmar, K.M., Y. Hu and H. Steppuhn. 1998. Physiological responses of plants to salinity: a review. *Canadian Journal of Plant Science* **78**: 19-27.
- Wang, L.W. and A.M. Showalter. 2004. Cloning and salt-induced, ABA-independent expression of choline monoxygenase in *Atriplex prostrata*. *Physiologia Plantarum* **120**: 405-412.
- Wang, W., B. Vinocur and A. Altman. 2003. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta* **218**: 1-14.

(Manuscript received 21 May 2013,  
Revised 12 August 2013  
Revision accepted 23 August 2013)