

## 수경재배에 의한 *Salix reichardtii* 묘의 생장 및 부위별 Ni축적에 관한 연구

이창현<sup>1\*</sup> · 임유미<sup>2</sup>

<sup>1</sup>전북대학교 농업생명과학대학 산림자원학과, 전북대학교 농업과학기술연구소

<sup>2</sup>전북대학교 대학원 임학과

## Study on Accumulation of Ni in Seedlings and Growth rate of *Salix reichardtii* by Hydroponic Culture in Ni Solution

Lee, Chang-Heon<sup>1\*</sup> and Yu-Mi Lim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Forest Resource, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

<sup>2</sup>Department of Forestry, Graduate School, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

**요 약:** 본 연구는 Ni 오염지를 정화하기 위한 기초자료를 제공하고자 Ni 수용액에서 *Salix reichardtii*를 수경재배 한 후 수용액의 pH 변화와 부위별 Ni 축적량을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 영양액의 pH는 Ni의 처리농도가 낮아 *S. reichardtii*의 생장속도가 높을수록 많이 낮아졌고 Ni의 농도가 높아 생장속도가 저조할수록 적게 낮아졌다. 부위별 Ni의 축적량은 뿌리가 가장 높고 다음이 잎, 줄기의 순이었으며 오래된 줄기 내 축적량이 가장 낮았다. 즉, 식물체의 조직이 유연하고 생활세포가 많을수록 Ni축적량이 많은 것으로 나타났다. 또한 Ni의 처리 50 μmol/L까지는 농도가 높아질수록 체내 축적량은 높아졌으나 100.0 μmol/L처리구에서는 식물체가 고사되어 체내 축적량이 오히려 감소되는 경향이었다. Ni가 농도별로 함유된 영양액에서 수경재배 한 결과 Ni를 고농도로 처리할수록 *S. reichardtii*의 생장은 저조하였으며, Ni 100.0 μmol/L처리구에서는 4주후 거의 고사수준이었다.

**Abstract:** This study was carried out to provide preliminary data to purify contaminated sites by nickel (Ni). After rooted cuttings of *Salix reichardtii* had been grown in Ni solution (hydroponic culture), pH changes in the solution and the accumulated Ni amount in plant parts were measured and analyzed. When the Ni concentration was low enough for *S. reichardtii* cuttings to grow well, the pH value of the solution decreased considerably. As the Ni concentration got higher, the plant growth got poorer and the pH value decreased slowly. Roots accumulated the highest Ni amount. Leaves and stems followed after. When stems were older, the accumulated Ni amount was lower. more Ni was accumulated in the plant parts which had more flexible tissue and live cells. As the Ni concentration in solution got higher up to 50.0 μmol/L, so did the Ni accumulation in the plant parts. However, the plant individuals nearly died and the Ni accumulation tended to drop when the Ni concentration in solution was 100.0 μmol/L. The rooted cuttings of *S. reichardtii* grew poorer as the Ni concentration in solution got higher. The plants in solution with 100.0 μmol/L of Ni were practically dead in four weeks.

**Key words :** Ni accumulation, hydroponic culture, *Salix reichardtii*, heavy metal contamination

### 서 론

인구가 급증하고 산업이 발달하면서 인간은 편리하고 부유한 삶을 추구하고 살아가고자 한다. 인간 삶의 과정에서 산업폐기물, 생활폐기물, 도시하수 및 폐광으로 인하여 다량으로 지하 침출수 또는 직접적인 하천 유출수 등으로 배출되는데 이때 다양한 중금속 등이 포함된 배출물이 주

변식생에 영향을 미치는 경우가 발생하고 있다. 특히 공장폐수나 광산폐수 등에는 구리, 아연, 니켈, 카드뮴, 크롬 및 그 밖의 여러 가지 중금속이 함유되어 있어 재배작물이나 주변식생의 생육에 유해 작용을 하여 생산성 감소는 물론 인체 내에 흡수되어 중금속 축적으로 인한 각종 질병의 원인이 되기도 한다.

이와 같이 생명체에 해를 주고 환경오염의 주범인 중금속들을 제거하고 정화하기 위해 많은 연구가 진행되고 있는 가운데, 식물이 토양중이나 수중의 중금속을 흡수 축

\*Corresponding author  
E-mail: leech@jbnu.ac.kr

적하여 오염을 정화시킨다는 많은 보고가 있으며(Memon *et al.*, 2001; Alvarez *et al.*, 2003; Ali *et al.*, 2003), 중금속의 집적 능력에 대한 생화학적 기작은 아직 밝혀지지 않고 있으나 완충역할을 하는 histidine의 증가는 뜰냉이 (*Lobularia maritima*)의 니켈에 대한 내성과 집적력을 증대시킨다는 보고가 있다(Kramer *et al.*, 1996). 또한 토양 중 중금속의 종류에 따른 식물의 분포에 대한 보고(Nagy and Proctor, 1997)와 중금속에 대한 임목 뿌리의 반응(Kahle, 1993)에 대한 보고 등 식물과 중금속과의 관련된 보고는 계속되고 있는데, Samecka-Cymerman 등(2004)은 식물에 의한 정화는 완전하지 못하며 보조기능으로서 역할을 할 뿐이라고 하였다.

한편 수질오염이나 수분이 많은 토양오염지에서 식물체를 이용한 오염의 정화는 수생식물이나 수분에 대한 내성이 강한 식물을 이용해야 하는데, 버드나무류는 산소가 부족한 범람 토양에서도 내성이 크고(Jackson and Attwood, 1996) 이 때문에 수질이 오염된 지역에 식재하면 수질오염이나 주변 토양오염을 개선시키며 중금속 제거는 겨울보다 여름이 효과적이라고 하였다(Samecka-Cymerman *et al.*, 2004). Punshon 등(2003)은 늪지 주변에 자라는 버드나무의 니켈 흡수에 대하여 보고하였고, Watson 등(2003a, 2003b)은 수경재배에 의한 중금속 저항성에 대하여 보고하였다. 따라서 목본 식물로는 버드나무류가 수분이 많은 지역에 잘 자랄 수 있으며 이상에서 언급한 지역의 오염물질의 정화 개선에 이용 가능한 식물이라 할 수 있다. 그러나 버드나무류가 어느 정도의 Ni 농도에서 얼마만큼 흡수 축적하며 치사 농도는 어느 정도인지에 대한 보고는 극히 일부에(Lee, 2008) 지나지 않는다.

따라서 본 연구는 비교적 수분이 많고 산소가 부족한 지역에서도 잘 자라는 버드나무류의 일종인 *S. reichardtii* 묘를 대상으로 Ni를 농도별로 투여하여 수경재배한 후 뿌리, 잎, 줄기 및 오래된 줄기 등 부위별로 체내에 축적되는 Ni를 분석하여 그 결과로 하여금 차후 Ni로 오염된 수질이나 토양에서 식생을 이용하여 중금속 오염을 개선하는데 이바지 할 수 있는 자료의 제공을 목적으로 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 재료

재료는 호주 빅토리아 주에 자생하고 있는 *S. reichardtii*를 삽목에 의해 생산된 묘를 이용하였다.

묘의 생산은 포지에서 자라고 있는 *S. reichardtii*의 가지를 잘라 15±1 cm로 삽수를 조제하여 15×8×8 cm의 검정색 비닐 pot에 모래를 채운 후 삽수를 7~8 cm정도 묻히도록 삽목 하였다. Pot의 삽목용 토양은 모래 10 kg에 5 g의 비료(Osmocote, Scott Europe BV의 제품으로 16.0%의

**Table 1. The nutrient solution in this experiment.**

Salt	Molecular Weight	Modified Conc $\mu\text{mol/L}$	Modified half Conc. $\mu\text{mol/L}$
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	236.15	1500 $\mu\text{mol}$	750
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	80.06	500	250
KNO <sub>3</sub>	101.11	1000	500
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	246.48	500	250
MES	213.24	1000	500
NaOH	40.00	500	250
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	136.09	20	10
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	61.84	1	0.5
(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> ·4H <sub>2</sub> O	1235.96	0.010	0.005
FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	270.3	100	50
HBED	424.89	100	50
NaOH	40.00	400	200
MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	169.02	0.7	0.35
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	287.58	0.5	0.25
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	249.71	0.1	0.005
pH		5.8	

Nitrogen<N>, 3.5%의 Phosphorus<P>, 10.0%의 Potassium <K>, 2.4%의 Sulphur<S>, 1.2%의 Magnesium<Mg>, 0.02%의 Molybdenum<Mo>, 0.015%의 Zinc<Zn>, 8.0%의 Organic resin coating)를 시비하였다.

삽목 후 4주일이 지나 삽수에 뿌리가 발생하면 삽수에 의해 얻어진 묘를 pot에서 분리하여 뿌리를 증류수로 흔들어 씻은 후 뿌리의 상처를 아물게 하거나 활력을 증진시키기 위해 Hoagland and Arnon(1941)의 영양액을 적정 조정하고 농도를 1/2로 하여 조제한 영양액(Table 1)에 1주일간 침지한 다음 실험에 이용하였다.

삽목상의 온도는 낮 최고 30°C를 넘지 못하고 밤 최저 20°C 미만으로 떨어지지 않도록 조정된 상태로 유지하였다.

한편 강산성인 토양에서 중금속 흡수가 증가되고 독성을 높인다(Chaney, *et al.* 1997; Punshon, *et al.* 2003)는 보고가 있으며, 몇가지 버드나무류의 수경재배에서 pH3.5, 5.5, 7.5에서 실험한 결과 가장 적당한 산도는 pH 5.5(Watson, *et al.* 2003a)라 하였는데, 본 실험에서는 이보다 약간 중성화시킨 pH 5.8로 영양액의 산도를 조정하였다.

### 2. 방법

pH측정은 매주 영양액을 교환 할 때마다 이미 사용된 영양액을 측정하였다.

발근된 묘목에 처리한 Ni 용액의 농도는 0, 1.0, 10.0, 25.0, 50.0, 100.0  $\mu\text{mol/L}$ 이었으며 각 처리구별로 묘목은 3개체씩 5반복하였다.

각 농도별로 처리한 묘목은 2L용 불투명 용기에 뿌리부분은 광을 차단하고 수경 재배하였다(Photo 1). 생장실험은 4주간에 걸쳐 실시하였는데 매주 Ni가 농도별로 함유된 영양액을 교환하였다.



Photo 1. Growth of *S. reichardtii* in pot.

Ni용액 내에서 생장실험 4주 후 식물체를 수확하면서 잎과 줄기는 증류수로만 20초정도 세척하였고, 뿌리는 증류수(20초)-증류수(20초)-20 mM EDTA용액(4-5초)-증류수(20초)-증류수(20초)-티슈로 흡습시킨 후 잎, 줄기, 오래된 줄기 및 뿌리를 분리하여 60-70°C의 건조기에서 72시간 정도 건조시켰다. 이때 줄기는 삼목 후 눈으로부터 새로 나온 부분을 줄기(new stem)라 하고 삼목시 이미 줄기 부분인 삼수부분을 오래된 줄기(old stem)로 구분하였다.

건조시킨 시료는 잘게 부수어 200 mg씩을 취하여 질산액을 이용하여 흡후드 내에서 분해시킨 후 ICP(Perkin Elmer, ICP-OES, Optima 7300DV)로 분석하였다.

생장량은 매주 1회씩 같은 요일의 같은 시간에 mm단위로 측정하여 성장율을 산출하였다.

3. 통계분석

통계분석은 SPSS(version 12.0K)패키지를 이용하여 분산분석을 하였고, 처리 평균간 비교는 Duncan's test를 실시하였다.

결과 및 고찰

버드나무(*Salix reichardtii*) 묘에 Ni용액을 농도별로 처리하여 4주간 수경재배 한 후 Ni가 포함된 영양액의 산도 변화와 신장생장 및 식물체내의 Ni축적량을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 영양액의 산도 변화

Ni이 농도별로 포함된 영양액을 pH 5.8로 조정하여 영

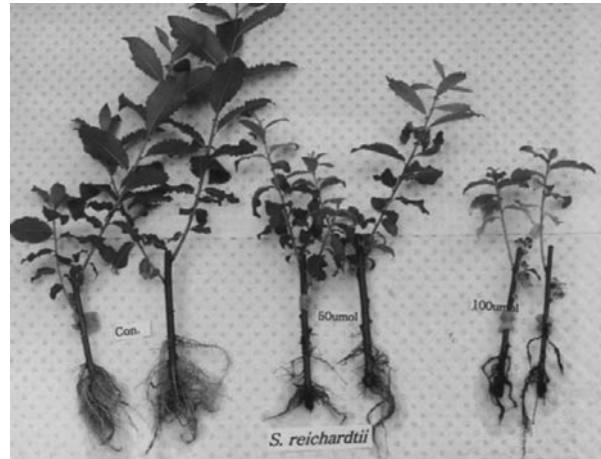


Photo 2. Growth state of *S. reichardtii* after four weeks. (Ni treated with 0, 50.0, 100.0 µmol/L)

양액을 매주 교환하면서 *S. reichardtii*를 4주간 수경재배하였는데 1주일 경과 할 때마다 산도를 측정 한 결과는 Table 2와 같이 나타났다.

pH 5.8로 조정된 영양액에서 *S. reichardtii*를 일주일간 수경재배 한 후 대조구에서부터 Ni 25.0 µmol/L처리구까지는 pH 3.2-3.8까지 낮아져 상당히 산성화되었으며, Ni 50.0 µmol/L이나 100.0 µmol/L처리구에서 영양액의 산도는 pH3.6-5.1로 낮아져 원래의 산도보다 산성화는 되었으나 Ni 25.0 µmol/L처리구 이하의 저농도 처리구에서 보다 산성화 정도가 크게 약화되었다. 즉, 산도를 pH 5.8로 조정된 Ni를 포함한 영양액에서 *S. reichardtii*의 생장이 급격하게 저하되지 않는 Ni의 저농도 처리에서는 생장에 지장이 있는 고농도 처리에서보다 산성화 정도가 컸다.

이는 Ni 100.0 µmol/L처리구에서는 Ni의 농도가 너무 높아 처리 4주후에는 거의 고사되는 모습을 보였고, 50.0 µmol/L처리구에서는 25.0 µmol/L 이하 처리구에 비해 *S. reichardtii*가 정상적인 생장을 할 수 없어 생육상태가 저조하였기 때문에 판단된다(Photo 2).

그런데 본 연구에서는 식물체의 생육에 따른 중성의 영양액이 산성화 되는 정확한 기작에 대해서는 언급하지 못했으므로 이에 대해서는 추후 더 연구할 필요가 있어야 할 것으로 사료된다.

2. 처리농도에 따른 부위별 Ni 축적

Ni를 농도별로 처리한 영양액에서 4주간 성장한 *S.*

Table 2. Changed pH after one week during investigation.

State/Treatment	Control	1.0 µmol/L	10.0	25.0	50.0	100.0
Original pH	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
Changed pH after one week	3.2-3.6	3.3-3.8	3.3-3.6	3.2-3.8	3.6-5.0	4.5-5.1
Average pH	3.44	3.43	3.43	3.50	4.04	4.75

**Table 3. Mean and standard deviation of Ni accumulation in *S. reichardtii* and results of Duncan's multiple range test for treatment of Ni in *Salix reichardtii*.**

Treat Con.\ Part	Root	Leave	New Stem	Old stem
	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD
Control	1.83±0.27 <sup>a</sup>	1.89±0.28 <sup>a</sup>	0.93±0.17 <sup>a</sup>	0.72±0.27 <sup>a</sup>
1.0 µmol/L	43.98±3.65 <sup>a</sup>	7.41±0.62 <sup>a</sup>	2.27±0.23 <sup>a</sup>	2.22±0.08 <sup>ab</sup>
10.0	469.91±29.35 <sup>b</sup>	67.29±7.44 <sup>b</sup>	18.31±2.74 <sup>b</sup>	4.17±0.61 <sup>b</sup>
25.0	839.86±37.54 <sup>c</sup>	124.04±14.40 <sup>c</sup>	41.62±3.58 <sup>c</sup>	6.97±0.47 <sup>c</sup>
50.0	2389.40±182.07 <sup>d</sup>	178.18±15.35 <sup>d</sup>	62.08±3.63 <sup>d</sup>	15.80±2.25 <sup>d</sup>
100.0	1484.89±139.46 <sup>c</sup>	173.83±9.94 <sup>d</sup>	70.28±5.93 <sup>c</sup>	25.57±2.81 <sup>c</sup>

*reichardtii*의 잎, 줄기, 뿌리 그리고 오래된 줄기 등 4부분의 Ni축적량은 Table 3에서 보는 바와 같다.

뿌리 내 Ni 축적량의 경우 대조구는 1.83 mg/kg이며 Ni 1.0 µmol/L처리구는 43.98 mg/kg, 10.0 µmol/L처리구는 469.91 mg/kg, 25.0 µmol/L처리구는 839.86 mg/kg, 50.0 µmol/L처리구는 2389.40 mg/kg, 100.0 µmol/L 1484.89 mg/kg로 나타나 50.0 µmol/L 처리구 까지는 Ni 축적량이 급격히 증가하였으나 100.0 µmol/L처리구는 오히려 감소되었다.

잎 내 Ni 축적량의 경우 대조구는 1.89 mg/kg이며 Ni 1.0 µmol/L처리구는 7.41 mg/kg, 10.0 µmol/L처리구는 67.29 mg/kg, 25.0 µmol/L처리구는 124.04 mg/kg, 50.0 µmol/L처리구는 178.18 mg/kg, 100.0 µmol/L처리구는 173.83 mg/kg로 나타나 뿌리 내에서와 마찬가지로 50.0 µmol/L 처리구 까지는 Ni 축적량이 급격히 증가하였으나 100.0 µmol/L처리구는 오히려 감소되었는데 축적량은 뿌리 내에서 보다 현저히 떨어졌다.

줄기내 Ni 축적량의 경우 대조구는 0.93 mg/kg이며 Ni 1.0 µmol/L처리구는 2.27 mg/kg, 10.0 µmol/L처리구는 18.31 mg/kg, 25.0 µmol/L처리구는 41.62 mg/kg, 50.0 µmol/L처리구는 62.08 mg/kg, 100.0 µmol/L처리구는 70.28 mg/kg로 나타나 뿌리와 잎 내에서와는 달리 100.0 µmol/L 처리구까지는 Ni 축적량이 증가하였으나 축적량은 뿌리와 잎 내에서 보다 현저히 떨어졌다.

오래된 줄기 내 Ni 축적량의 경우 대조구는 0.72 mg/kg이며 Ni 1.0 µmol/L처리구는 2.22 mg/kg, 10.0 µmol/L처리구는 4.17 mg/kg, 25.0 µmol/L처리구는 6.97 mg/kg, 50.0 µmol/L처리구는 15.80 mg/kg, 100.0 µmol/L처리구는 25.57 mg/kg로 나타나 줄기 내에서와 마찬가지로 100.0 µmol/L 처리구까지 Ni 축적량이 증가하였으나 축적량은 뿌리와 잎 내는 물론 줄기 내에서 보다 더 떨어졌다.

즉, 대조구를 제외한 Ni용액 처리구는 처리농도에 관계 없이 뿌리 내에 Ni축적량이 가장 높고 다음으로 잎 내 축적량과 줄기 내 축적량이 높았으며 오래된 줄기 내 축적량이 가장 낮게 나타났다. 이상을 Duncan's test 결과 대조구와 Ni 1.0 µmol/L처리구 사이에는 차이를 인정할 수 없

었으나 Ni 1.0 µmol/L, 10.0 µmol/L, 25.0 µmol/L, 50.0 µmol/L처리구 간에는 서로 각각 차이를 인정할 수 있었다. 또한 분산분석 결과 *S. reichardtii*의 뿌리, 잎, 줄기, 오래된 줄기 등 모든 부위에서 처리농도에 따른 Ni축적은 1%의 유의차를 보였다.

이상의 결과에서 보면 대조구는 뿌리와 잎 내 Ni 축적량이 비슷하였으며 줄기와 오래된 줄기는 뿌리와 잎에 비해 약 절반 수준의 함량이었으나 0.72-1.89 mg/kg으로 2.0 mg/kg에 미치지 못하였다. 그러나 Ni를 농도별로 처리한 용액 내에서 수경재배한 후 Ni의 식물체내 축적량은 급격히 증가하였고 그중 뿌리가 가장 높고 다음이 잎, 줄기였으며 오래된 줄기 내 축적량이 가장 낮았는데, 이는 식물체의 조직이 연합수목 즉, 생활세포가 많을수록 Ni축적량이 많은 것으로 나타났고 오래된 줄기의 경우 생활세포가 있는 껍질 부분에 비해 목질부의 비율이 많기 때문에 Ni축적량이 적은 것으로 추측된다.

특히 본 실험에서는 모든 처리구 및 모든 부위에서의 Ni축적량 중 50 µmol/L 처리구의 뿌리 내 축적량이 2389.40 mg/kg으로 가장 높았다. 그러나 Ni의 농도가 50.0 µmol/L보다 고농도인 100.0 µmol/L처리구의 뿌리 내 Ni축적량은 1484.89 mg/kg로 50 µmol/L처리구보다 오히려 훨씬 낮게 나타났는데 이는 *S. reichardtii*의 묘에 Ni 100.0 µmol/L처리는 너무 고농도여서 식물체의 대사작용을 활발히 할 수 없었으며 Ni용액 처리 4주후 Ni축적량 분석을 위해 시료를 채취할 당시는 이미 고사했거나 거의 고사단계였기 때문으로 판단된다. 한편 1.0 µmol/L과 10.0 µmol/L 처리구에서의 체내 축적 결과는 수중에 따라 차이는 있지만 그 경향은 Lee(2008)의 결과와 비슷함을 보였다.

### 3. Ni의 처리농도에 따른 기간별 생장비율

Ni 용액을 0, 1.0, 10.0, 25.0, 50.0, 100.0 µmol/L 농도로 처리하여 4주간 수경재배한 후 외견상 생장 반응을 보면 처음에는 거의 비슷한 상태를 보였으나 시간이 지날수록 Ni의 농도가 높아질수록 생장속도의 차이가 있었으며, 특히 100.0 µmol/L처리구에서는 4주가 경과한 후 거의 고사되어 생장을 멈추었으며 뿌리상태도 좋지 않음을 보였

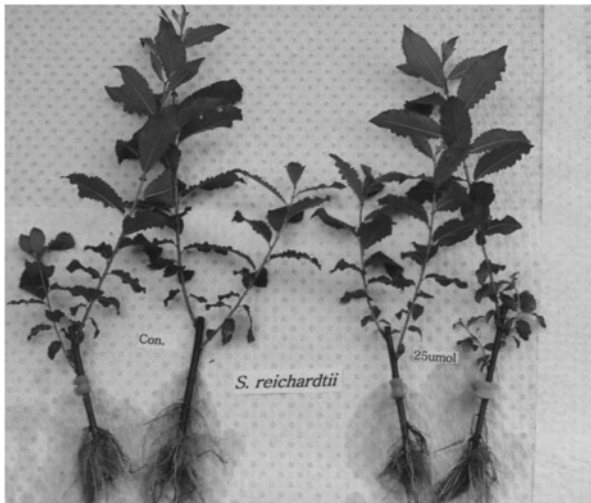


Photo 3. Growth state of *S. reichardtii* after four weeks. (Ni treated with 0, 25.0  $\mu\text{mol/L}$ )

Table 4. Weekly growth rate of *S. reichardtii* according to Ni concentration.

Treat Con. /period	First week	Second week	Third week	Forth week
Control	35.7(%)	44.6	53.5(%)	42.1(%)
1.0 $\mu\text{mol/L}$	35.0	40.3	51.1	37.6
10.0 $\mu\text{mol/L}$	34.2	36.5	38.4	32.2
25.0 $\mu\text{mol/L}$	33.3	34.2	35.2	26.3
50.0 $\mu\text{mol/L}$	30.3	31.0	17.8	10.5
100.0 $\mu\text{mol/L}$	25.6	23.8	0.8	0.0

다(Photo 1, Photo 2). 이는 버드나무가 중금속이 축적되면 식물체가 스트레스를 받으며(Punshon and Dickinson, 1997), 생장이 저조하였다는 보고(Watson *et al.*, 2000)와 같이 Ni이 식물체내에 너무 많이 축적되면 식물체의 생장은 물론 치명적인 영향을 미치는 것으로 추정할 수 있었다.

*S. reichardtii*의 생장기간에 따라 생장비율을 보면 Table 4에 나타난 바와 같이 대조구의 경우 3주째는 53.5%가 생장한 반면 첫주째는 35.7%, 2주째는 44.6%, 4주째는 42.1%가 생장하여 3주째가 1주째와 2주째 또는 4주째보다 생장속도가 빠른 것을 볼 수 있으며 1주째부터 3주째까지는 점차 생장속도가 증대되었으나 4주째부터는 생장속도가 감소되는 경향을 보였다. 한편 각 처리 농도에 따라서도 생장속도의 차이는 있지만 기간별 생장 경향은 거의 비슷하였다.

처리 농도에 따라 생장 비율을 보면 Table 4에서 보는 바와 같이 대조구의 생장속도는 첫주 1주간 생장율은 35.7%이고 2주째 44.6%, 3주째 53.5%, 4주째 42.1%였으며 1.0  $\mu\text{mol/L}$ 처리구에서는 첫주째 35.0%, 2주째 40.3%, 3주째 51.1%, 4주째 37.6%로 대조구에 비해 근소하게나마 생장속도가 저조하게 나타났고 10.0  $\mu\text{mol/L}$ 이나 25.0

$\mu\text{mol/L}$ 처리구 까지는 기간에 관계없이 고농도로 갈수록 생장속도는 서서히 감소되었으나(Photo 3) 50.0  $\mu\text{mol/L}$ 처리구의 경우 첫주째 31.0%, 2주째 17.8%, 3주째 10.5%의 생장속도로 보아 대조구에 비해 3-4배정도로 생장속도가 갑자기 저조하게 나타나 어느 한계 이상의 고농도 처리일수록 생장속도는 더욱 큰 비율로 떨어졌다. 한편 *S. reichardtii* 에 100.0  $\mu\text{mol/L}$ 처리의 경우 3주째와 4주째의 생장이 거의 되지 않은 것은 시간이 경과함에 따라 고농도의 Ni에 의해 생장이 서서히 줄어들고 결국 3주 이상이 되면 생장이 멈추게 됨을 알 수 있었고 4주 후에는 거의 고사되어가는 상태였다.

전체적으로는 *S. reichardtii* 의 신장생장 속도는 Ni를 처리하지 않은 대조구가 가장 빨랐고 Ni의 처리농도가 높을수록 저조하였다. 따라서 본 실험에서 가장 고농도 처리인 100.0  $\mu\text{mol/L}$ 처리구에서 생장속도가 가장 낮았다.

## 결론

Ni에 의한 오염지 정화를 위한 기초자료를 제공하기 위해 Ni 수용액에서 *S. reichardtii* 를 수경재배 한 후 부위별 Ni 축적량을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

영양액의 pH는 Ni의 처리농도가 낮아 *S. reichardtii* 의 생장속도가 빠를수록 많이 낮아졌고 Ni의 농도가 높아 생장속도가 저조할수록 적게 낮아졌다. 따라서 영양액의 pH는 식물체의 생육 정도에 의해 다소간 낮아질 수 있으며 25.0  $\mu\text{mol/L}$ 처리구 미만에서는 외견상 식물체 생육의 차이는 크게 나타나지 않았다.

부위별 Ni의 축적량은 뿌리가 가장 높고 다음이 잎, 줄기의 순이었으며 오래된 줄기 내 축적량이 가장 낮았다. 즉, 식물체의 조직이 유연하고 생활세포가 많을수록 Ni축적량이 많은 것으로 나타났다. 또한 Ni의 처리 농도가 50.0  $\mu\text{mol/L}$ 까지는 높아질수록 체내 축적량은 높아졌으나 100.0  $\mu\text{mol/L}$ 처리구에서는 식물체가 고사되어 오히려 감소되는 경향이였다.

Ni이 농도별로 함유된 영양액에서 수경재배 한 결과 Ni을 고농도로 처리할수록 *S. reichardtii*의 생장은 저조하였으며 Ni 100.0  $\mu\text{mol/L}$ 처리구에서는 4주후 거의 고사하였다.

이상의 결과로 보아 식물체내 중금속의 축적은 식물체의 부위에 따라 큰 차이가 있음을 보였는데 줄기에 비해 잎과 뿌리에 Ni 축적이 높은 것은 조직이 유연하고 생활세포가 많은 조직일수록 Ni축적량이 높다는 것을 보여 주었다. 한편 너무 고농도의 중금속 오염은 식물체를 고사시키므로 중금속 등의 오염지역에서 식물체에 의한 오염개선을 위해서는 식물체의 고사 한계농도와 오염지의 오염정도를 미리 파악하여 오염개선 방법이나 수종 선택을 달리 해야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구를 수행하는데 있어 많은 도움을 주신 호주 Melbourne대학교 Alan J. M. Baker교수와 W. Scott Laidlaw 박사에게 감사의 마음을 전합니다.

## 인용문헌

1. Ali, M.B., Vajpayee, P., Tripathi, R.D., Rai, U.N., Singh, S.N. and Singh, S.P. 2003. Phytoremediation of Lead, Nickel and Copper by *Salix acmophylla* Boiss.: Role of Antioxidant Enzymes and Antioxidant Substances. Bull. Environmental Contamination Toxicology 70: 462-469.
2. Alvarez, E., Fernandez Marcos, M.L., Vaamonde, C. and Fernandez-Sanjurjo, M.J. 2003. Heavy metal in the dump of an abandoned mine in Galicia(NW Spain) and in the spontaneously occurring vegetation. The Science of the total Environment 313: 185-197.
3. Chaney, R.L., Malik, K.M., Li, Y.M., Brown, S.L., Brewer, E.P., Angle, J.S. and Baker, A.J.M. 1997. Phytoremediation of soil metals. Curr Opin Biotechnology 8: 279-284.
4. Hoagland, D.R. and Arnon, D.I. 1941. The water culture method for growing plants without soil. Miscellaneous publications No. 3514, Circular of the Californian Agricultural Experimental Station 347, 461p.
5. Jung, K.-C., Kim, B.-J. and Han, S.-G. 1993. Survey on heavy metals contents in native plant near old Zinc mining sites. Korean Journal of Environmental Agriculture 12(2): 105-111.
6. Kahle, H. 1993. Response of roots of trees to heavy metals. Environmental and Experimental Botany 33: 99-119.
7. Kim, J.-H. and Lee, I.-S. 1998. Studies on cadmium and zinc detoxification of *Rumex maritimus*. The Korean Journal of Ecology 21(3): 225-231.
8. Kramer, U., Cotter-Howells, J.D., Charnock, J.M., Baker, Alan J. M., and Smith, J. Andrew C. 1996. Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel. Nature 379(6566): 635-638.
9. Lee, C.-H. 2008. A Study on Accumulation of Ni in *Salix alba* and *S. caprea* by Hydroponic Culture in Ni Solution. The Korea Society of Environmental Restoration Technology 11(5): 1-11.
10. Memon, A.R., Aktoprakligil, D., Ozdemir, A. and Vertii, A. 2001. Heavy Metal Accumulation and Detoxification Mechanisms in Plants. Turkish Journal of Botany 25: 111-121.
11. Jackson, M.B. and Attwood, P.A. 1996. Roots of Willow (*Salix viminalis* L.) show marked tolerance to oxygen shortage in flooded soils and in solution culture. Plant and soil 187: 37-45.
12. Nagy, L. and Proctor, J. 1997. Soil Mg and Ni as casual factors of plant occurrence and distribution at the Meikle Kilrannoch ultramafic site in Scotland. New Phytologist 135: 561-566.
13. Punshon, T., Gaines, K.F. and Jenkins, J.R.A. 2003. Bio-availability and Trophic Transfer of Sediment-Bound Ni and U in a Southeastern Wetland System. Archives of Environmental Contamination and Toxicology 44: 30-35.
14. Punshon, T. and Dickinson, N.M. 1997. Acclimation of *Salix* to metal stress. New Phytology 137: 303-314.
15. Punshon, T., Bertsch, P.M., Lanzirrotti, A., Mcleod, K. and Burger, J. 2003. Geochemical Signature of Contaminated Sediment Remobilization Revealed by Spatially Resolved X-ray Microanalysis of Annual Rings of *Salix nigra*. Environmental Science and Technology 37(9): 1766-1774.
16. Samecka-Cymerman, A., Stepien, D., Kempers, A.J. 2004. Efficiency in removing pollutants by constructed wetland purification systems in Poland. Jour. of Toxicology and Environmental Health, Part A 67:265-275.
17. Tommy, L. and Maria, G. 2004. No Phytochelatin(PC2 and PC3) detected in *Salix viminalis*. Physiologia Plantarum 121: 481-487.
18. Watson, C., Pulford, I.D. and Riddell-Black, D. 2000. Heavy metal toxicity responses of two Willow (*Salix*) varieties grown hydroponically: Development of a tolerance screening test. Environmental Geochemistry and Health 21: 359-364.
19. Watson, C., Pulford, I.D. and Riddell-Black, D. 2003a. Development of a Hydroponic Screening Technique to Assess Heavy Metal Resistance in Willow(*Salix*). International Journal of Phytoremediation 5(4): 333-349.
20. Watson, C., Pulford, I.D. and Riddell-Black, D. 2003b. Screening of Willow Species for Resistance to Heavy Metal: Comparison of Performance in a Hydroponics System and Field Trails. International Journal of Phytoremediation 5(4): 351-365.

---

(2010년 2월 17일 채택, 2010년 6월 3일 채택)