

닭의장풀 내 Cd²⁺의 분포와 생리적 독성

이 준 상

(상지대학교 생명과학과)

적 요 - Cd²⁺이 닭의장풀의 엽록소 함유량, 기공 크기, 수분퍼텐셜, 이온 수송에 대한 효과와 기관내의 카드뮴의 축적에 대하여 조사하였다. 3주간 성장한 닭의장풀을 Hoagland 용액 (±5 mM Cd²⁺)에서 4일 동안 수경배양하였다. 카드뮴은 식물의 뿌리, 줄기 그리고 잎 등 모든 기관에 축적되었다. 뿌리로부터의 거리와 잎의 나이 등이 카드뮴 분포를 결정짓는 가장 중요한 요소였다. 대부분의 Cd²⁺이 뿌리로부터 가장 인접한 성숙한 첫 번째 잎에 축적되었다. 잎에 Cd²⁺의 축적은 여러 생리적인 대사의 활성에 감소를 가져왔다. 카드뮴 처리는 70%의 엽록소 함량 감소를 가져왔으며, 엽록소 a/b 비도 2로 감소하였다. Cd²⁺은 또한 20%의 수분퍼텐셜을 감소시켰다. 카드뮴 처리는 여러 광도 (100~1,000 μmol Em⁻²s⁻¹)에서 광합성 활성을 약 60% 감소시켰으며 기공전도도도 비슷한 반응을 보였다. 따라서, Cd²⁺이 닭의장풀의 전반적인 생리적 활성을 감소시키거나 차단하는 것으로 추측된다.

서 론

깨끗하고 무기물이 풍부한 토양은 지구 생태계 유지에 매우 중요하다. 지구생태계의 1차 생산자인 녹색식물은 토양 속에 존재하는 이들 무기물과 수분을 흡수함으로써 식물의 성장과 발달을 이룬다. 따라서, 토양의 오염은 결국 생태계의 피해를 초래하여 종 다양성에 치명적인 악영향을 미친다.

토양 오염의 주범인 중금속에는 원자량이 100을 넘는 원소로서, 납, 수은, 카드뮴 그리고 구리 등이 있다. 중금속은 생명체에 축적되어 효소의 활성을 억제하는 농도에 종종 도달하기도 한다. Cd²⁺은 인간을 비롯한 동물에게 가장 해로운 중금속으로 알려졌다 (Chaudri *et al.* 1995), 식물은 Cd²⁺의 농도가 높을수록 식물체의 지상부, 지하부 및 전체 식물의 생산량의 감소와 낙화가 촉진되었다 (Page *et al.* 1972; Kim 1982; Kim & Park 1992). Kim (1992)은 사르비아, 맨드라미, 채송화, 돌나물 (*Sedum sarmentosum* Bunge)에서 Cd²⁺ 1,000 ppm에 의해서 전체적으로 약 67% 이상의 성장 억제가 일어났음을 관찰하였다. Cd²⁺을 비롯한 다른 중금속 및 오존, 이산화황을 비롯한 환경오염원은 식물의 광합성 기작 및 성장을 억제하고 노화를 촉진하는 것이 공통적인 특성이다 (Willmer 1983).

식물은 중금속에 대해 저항성을 가지는 것으로 알려

졌다. 식물에서 합성되는 (γ-Glu-Cys)nGly, 여기에서 n=2~11인 구조의 Phytochelatins (PCs)이 Cd²⁺ 저항성과 관련되어 있는 것으로 알려졌다 (Rausser 1990; Steffens 1990). 식물이 Cd²⁺를 포함하는 중금속에 노출되면 PCs의 농도가 증가하여 중금속 내성을 보인다 (Rausser 1990; Maitai *et al.* 1996). Yun *et al.* (1997)은 *Canavalia lineata* 유식물에 Cd²⁺를 처리했을 때 뿌리에서 PCs의 지속적인 증가를 관찰했다. 대부분의 PCs의 실험은 뿌리에서 행해졌다 (Ris De Vos *et al.* 1992; Maitai *et al.* 1996). Rausser (1990)는 총설 논문에서 잎보다 뿌리에서 더 높은 PCs가 존재한다는 것을 보고하였다. PCs는 균류를 비롯한 대부분의 식물에서 관찰되며 닭의장풀의 PCs 역시 Cd²⁺의 식물체 내의 분포에 관여하는 것으로 추측된다. 세포 내에서 Cd²⁺는 액포, 세포질, 세포벽, 세포소기관 등 다양한 부위에서 관찰되나 뿌리에서는 주로 세포질과 액포에 존재하는 것으로 알려졌다 (Rausser 1990). 이는 액포가 발달된 잎에 많은 농도의 Cd²⁺를 함유할 수 있다는 것을 의미한다.

국내외적으로 Cd²⁺에 대한 연구는 Cd²⁺에 대한 내성과 관련하여 PCs에 집중되어 있다. 따라서, Cd²⁺에 대한 식물의 전반적인 현상을 이해하기 위해서는 PCs의 유도 및 합성된 농도를 이해하는 것도 매우 중요하다. 그러나, 기초적으로 Cd²⁺이 어떻게 식물의 성장, 광합성능의 감소와 기공 닫힘에 관여하는지 아는 것도 매우 필요하며, 이러한 Cd²⁺의 작용에 PCs의 역할을 이해하는

것의 병행도 필요하다.

따라서, 본 실험은 1차 생산자인 식물이 카드뮴의 노출에 어떻게 반응하는지 닭의장풀 내 카드뮴의 분포와 그의 독성을 측정하였다.

재료 및 방법

1. 식물재료

닭의장풀(*Commelina communis* L.) 종자를 질석(蛭石), 토탄 그리고 양토 혼합물에 심어, 14시간의 명기와 10시간의 암기, 20°C의 온도와 80 $\mu\text{mol Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ (metal halide lamp)의 광도 하에서 재배하였다. 일주일에 한번 주기로 복합비료(원더그로 2호)를 1g/L의 농도로 주었으며, 발아 후 3주 동안 자란 식물을 실험에 사용하였다.

2. 뿌리, 줄기 및 잎 내에 축적된 Cd^{2+} 농도 측정

3주간 정상적으로 성장한 닭의장풀을 Hoagland 용액 ($\pm 5 \text{ mM}$ cadmium chloride 1-hydrate)에서 3일간 수경 재배하였다. 식물체내의 부위별 Cd^{2+} 농도는 원자흡광광도기 (5,100 PC, Perkin Elmer)를 통해 측정하였다.

3. 엽록소 함량 측정

엽록소 함량의 측정은 Holden (1965)의 방법을 기초로 하였다. 3주 동안 자란 닭의장풀을 Hoagland 용액 ($\pm 5 \text{ mM}$ 5 mM cadmium chloride 1, hydrate)에서 4일간 수경재배 한 후의 엽록소 함량 변화와 엽록소 a/b 비율을 조사하였다.

4. 수분퍼텐셜, 광합성능 및 기공전도도의 측정

3주간 자란 닭의장풀을 Hoagland 용액 ($\pm 5 \text{ mM Cd}^{2+}$)에서 4일간 배양하였다. 수분퍼텐셜은 수분퍼텐셜 측정기 (PMS Instrument co)를 통해 측정하였다. 여러 광도에서 광합성능과 기공전도도는 LI-6400 Portable Photosynthesis System (LI-COR, Lincoln Nebraska)을 이용하여 측정하였다.

결과 및 고찰

Fig. 1은 3주간 정상적으로 성장한 닭의장풀을 Hoagland 용액에 5 mM Cd^{2+} 을 3일간 처리 한 후 식물체 내에 분포되는 Cd^{2+} 의 농도를 보여준 것이다. 그림에서 보듯이 Cd^{2+} 이 식물의 모든 부위에 축적된 것을 알 수 있다. 뿌리에 비해 줄기의 Cd^{2+} 의 양은 매우 낮게 나타났으며 뿌리로부터 가장 인접한 잎의 Cd^{2+} 농도가 매우

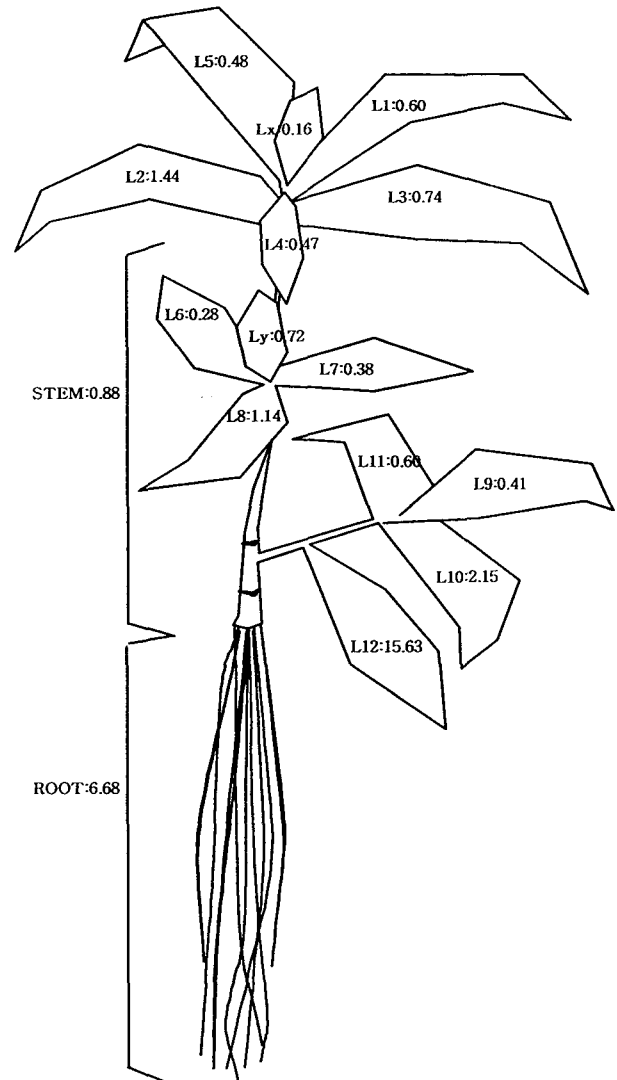


Fig. 1. The accumulation of Cd^{2+} in leaves, roots, and stem of *Commelina communis* L. L indicates the abbreviation of leaf and the unit of cadmium concentration is mg/kg fr.wt.

높은 것이 흥미로운 결과이다. 줄기의 생체량은 2.06g이고 뿌리는 0.43g인데 반해 Cd^{2+} 의 양은 줄기가 0.88이고 뿌리는 6.68 mg/kg fr.wt이었다. 그리고 L12의 생체량은 0.08g이었고 축적된 Cd^{2+} 의 농도는 15.63 mg을 나타내었다. 줄기는 유관속 조직에 존재하는 독성인 중금속을 잎으로 보냄으로써 독성으로부터 보호받는 것으로 추측되며 아울러 Cd^{2+} 을 제거하거나 또는 구획화하여 저장하는 시스템이 다른 부위에 비해 미미하게 존재하는 것으로 추측된다. 유관속 조직은 어떤 물질을 저장하는 것이 주된 역할이 아니라, 수송이 주된 역할로 줄기에 카드뮴의 양이 적게 존재한 것으로 보인다. 뿌리는

Table 1. Width, length or fresh weight of leaves, stem and root in *Commelina communis*. The number of the leaf represents the no. in Fig. 1

No. of leaf	Width(cm)	Length(cm)	Fresh Weight(g)
L1	1.1	5.9	0.09
L2	1.2	7.6	0.16
L3	2.1	8.9	0.32
L4	0.4	2.2	0.02
L5	1.9	8.3	0.29
L6	0.9	3.8	0.05
L7	1.1	4.5	0.06
L8	1.8	7.2	0.12
L9	0.5	2.7	0.02
L10	1.1	3.9	0.03
L11	0.9	3.1	0.05
L12	1.5	5.5	0.08
Lx	0.2	2.2	0.01
Ly	0.2	1.3	0.01
stem	-	13.6	2.06
root	-	2.06	0.43

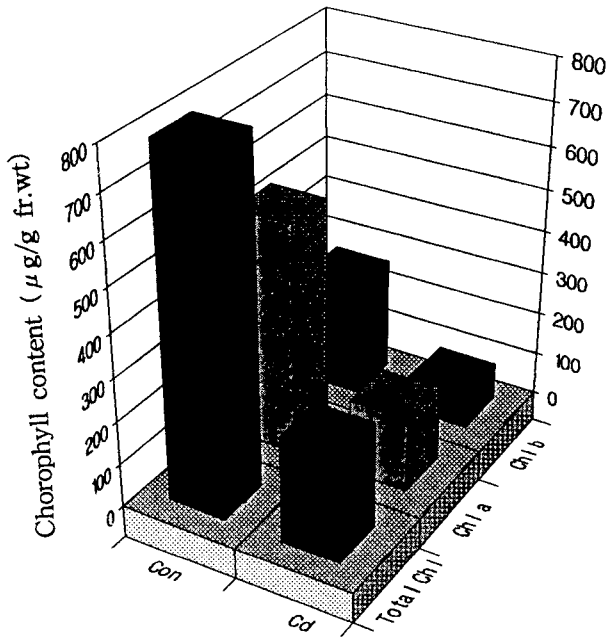


Fig. 2. The effect of Cd²⁺ on the chlorophyll content and chlorophyll a/b ratio in *Commelina communis* L.

직접 중금속에 노출된 부위로 그 농도가 높은 것으로 보인다. L12에서 보여준 높은 농도의 Cd²⁺는 잎의 해부학적, 생리적 특성 그리고 위치의 결과로 추측된다. Table 1은 Fig. 1의 뿌리, 줄기, 그리고 잎의 너비, 길이 및 무게를 나타낸 것이다.

Fig. 2는 3주 동안 자란 닭의장풀에 ±5 mM Cd²⁺를 처리한 Hoagland 용액에서 4일간 배양한 후 엽록소 함

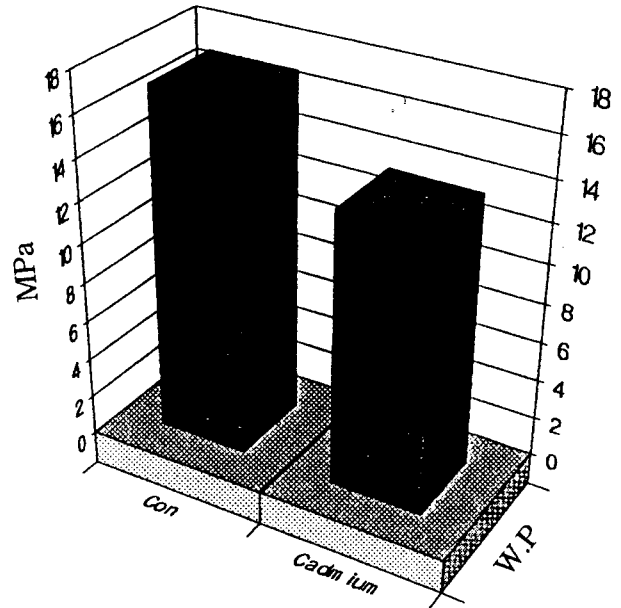


Fig. 3. The effect of Cd²⁺ on water potential of the stem in *Commelina communis* L.

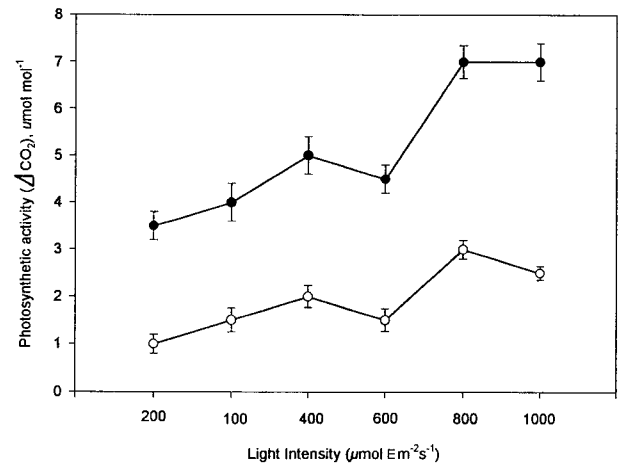


Fig. 4. Photosynthetic activity as a function of light intensities in *Commelina communis* L. Each point is the mean (±s.e.m.) of 2 measurements. Closed circles; hoagland solution-treated and open circles; Cd²⁺-treated.

량의 변화와 엽록소 a/b를 조사한 것이다. 전체 엽록소 함량은 약 70% 감소되었으며 엽록소 a/b 비율도 2로 감소하였다. 정상적인 잎의 엽록소 a/b비율은 일반적으로 2.5~3.5에 속한다(Oh & Lee 1996). 그러나 Fig. 2의 결과는 엽록소 a/b가 약 2로 측정되었다. 엽록소 a가 b보다 더 안정적으로 알려졌는데(Lee 1999), Cd²⁺는 엽록소 a에 더 민감하게 반응하는 것으로 추측된다. 전체 엽록

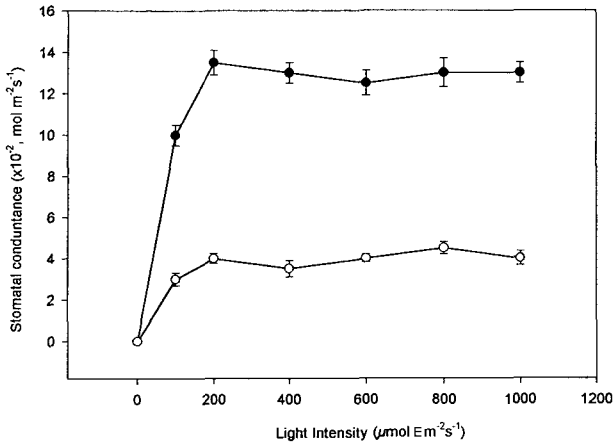


Fig. 5. Stomatal conductance as a function of light intensities in *Commelina communis* L. Each point is the mean (\pm s.e.m.) of 2 measurements. Closed circles; Hoagland solution-treated and open circles; Cd^{2+} -treated.

소 함량은 다른 결과들(Lee 1999; Oh & Lee 1996)과 유사하게 측정되었다.

Fig. 3은 줄기의 수분퍼텐셜에 미치는 Cd^{2+} 의 효과를 나타낸 것이다. 수분퍼텐셜은 식물의 수분 함유량을 알 수 있게 하는 척도이다. Cd^{2+} 처리는 자연적인 조건에서 닭의장풀의 수분퍼텐셜을 약 20% 감소시켰다. Cd^{2+} 에 의한 수분퍼텐셜의 억제는 Cd^{2+} 이 식물 전반에 미치는 손상과 관련된 것으로 추측된다.

Fig. 4는 3주간 자란 닭의장풀에 $\pm 5\text{mM Cd}^{2+}$ 을 처리한 Hoagland 용액에서 4일간 배양한 후 여러 광도에서 광합성능을 측정된 것이다. 대조구에 비해 Cd^{2+} 처리구는 광합성능이 현저하게 감소한 것을 알 수 있으며 이 결과는 Cd^{2+} 가 식물의 생장량의 감소함을 관찰한 보고들(Page *et al.* 1972; Kim 1982; Kim & Park 1992)과 일치함을 알 수 있다. 광합성능의 억제는 식물 생장의 억제와 일치한다(Taiz & Zeiger 1991).

Fig. 5는 Fig. 4와 똑 같은 조건에서 기공전도도를 측정된 것이다. Cd^{2+} 에 의한 기공 열림의 억제가 관찰되었으며 기공전도도의 감소는 Cd^{2+} 이 기공 열림의 조절 기능을 상실하게 만든 때문으로 추측된다. 결과로 나타내지는 않았지만, 3주간 자란 닭의장풀에 $\pm 5\text{mM Cd}^{2+}$ 을 처리한 Hoagland 용액에서 4일간 배양하면 잎이 황백화 되고 마르며 곧이어 고사하는 것이 관찰되었다. 따라서, Cd^{2+} 이 닭의장풀의 전반적인 생리적 활성을 감소시키거나 차단하여, 결과적으로 노화를 촉진하고 식물의 고사를 유도하는 것으로 추측한다.

참 고 문 헌

- Chaudri AM, FJ Zhao, SP McGrath & AR Crosland (1995) The cadmium content of British wheat grain. *J. Environ. Qual.* **24** : 850-855.
- Holden M (1965) Chlorophylls. pp. 461-488. In Chemistry and biochemistry of plant pigments (Goodwin TW ed). Academic press, New York.
- Kim BW (1982) Studies on the effect of heavy metal on the growth of various plants. *Korean J. Ecology.* **5**(4) : 176-186.
- Kim BW & JS Park (1992) Study on the resistance of various herbaceous plants to the effects of heavy metals- Responses of plants to soil treated with cadmium and lead. *Korean J. Ecology.* **15** (4) : 433-449.
- Kim BW (1992) Ecological study on the effect of heavy metals to the vascular plants. 상지대학교 자연과학 논총: 1-8.
- Lee JS (1999) Salicylic acid가 닭의장풀의 광합성에 미치는 영향. *환경생물학회지* **17**(3) : 359-363.
- Maitani T, H Kubota, K Sato & T Yamada (1996) The composition of metal bound to classIII metallothionein (phytochelatin and its desglycyl peptide) induced by various metals in root cultures of *Rubia tinctorum*. *Plant Physiol.* **110** : 1145-1150.
- Oh MH & CH Lee (1996) Disassembly of chlorophyll-protein complex in *Arabidopsis thaliana* during dark-induced foliar senescence. *J. Plant Biology.* **39**(4) : 301-307.
- Page AL, FT Bingham & C Nelson (1972) Cadmium absorption and growth of various plant species as by solution cadmium concentration. *J. Environ. Quality* **1** : 288-291.
- Rausser WE (1990) Phytochyletins. *Annu. Rev. Biochem.* **59**: 61-86.
- Ris De Vos CH, JV marjolein, Vooijs R & H Schat (1992) Glutathione depletion due to copper-induced phytochyletin synthesis causes oxidative stress in *Silence cucubalus*. *Plant physiol.* **98** : 853-858.
- Steffens JC (1990) The heavy metal-binding peptides of plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biology* **41** : 553-575.
- Taiz L & E Zeiger (1991) Plant Physiology. The Benjamin Cumming Publishing Co. Inc. USA.
- Yun IS, ID Hwang, YM Byoung & YM Kwon (1997) Effect of spermine on the phytochelatin concentration and composition in cadmium-treated roots of *Canavalia lineata* Seedlings. *J. Plant Biology* **40**(4) : 275-278.
- Willmer CM (1983) Stomata. Longman Inc., New York.

The Distribution of Cd²⁺ and its Physiological Toxicity in *Commelina communis* L.

Joon Sang Lee

(Department of Life Science, Sangji University, Wonju 220-702, Korea)

Abstract - The effect of Cd²⁺ on chlorophyll content, water potentials, ion transport, photosynthesis, stomatal apertures and Cd²⁺ accumulation of organs in *Commelina communis* was investigated. 3-weeks old *Commelina communis* was transferred to and grown in Hoagland solution in the presence or absence of 5 mM Cd²⁺ for 4 days. Cd²⁺ was accumulated in all parts of the organs including leaves, roots and stem. The proximity from the root and the age of leaf were significant factors responsible for the distribution of cadmium. Most of Cd²⁺ was accumulated in the first leaf which was the nearest from the root. Cd²⁺ accumulation in the leaves led to significant reductions in a series of physiological metabolism. Cd²⁺ reduced total chlorophyll content up to 70%, and changed chlorophyll a/b ratio to 2. Cd²⁺ also reduced about 20% of water potential. The treatment of Cd²⁺ showed about 60% inhibition of photosynthetic activity when measured at various light intensity (100~1,000 $\mu\text{mol Em}^{-2}\text{s}^{-1}$). Similar effect was found in terms of stomatal conductance. Therefore, it could be concluded that the treatment of Cd²⁺ decrease or block various physiological activities. [Cadmium, Photosynthesis, Stomatal conductance].