

Absciscic acid가 Cd²⁺에 의한 닭의장풀의 생리적 반응에 미치는 영향

이 준 상

상지대학교 생명과학과

The Effects of Absciscic Acid (ABA) on Cd²⁺-induced Physiological Responses in *Commelina communis* L.

Joon Sang Lee

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

Abstract - Three-weeks old *Commelina communis* was transferred to Hoagland solution (Control, 100 μM Cd²⁺, 100 μM Cd²⁺ + 100 μM ABA, 100 μM Cd²⁺ + 50 mM KCl) and grown for a week in the solution and then a number of physiological activities were investigated. In cases of Cd²⁺ and Cd²⁺ + ABA treatments, the growth of the plants was inhibited to 71% and 81%, respectively, when compared with the control, but there were no significant difference of plant growth between Cd²⁺ and Cd²⁺ + KCl- treated plants. In the treatments of Cd²⁺, Cd²⁺ + ABA and Cd²⁺ + KCl total chlorophyll contents were reduced to 32%, 41% and 29%, respectively. In chlorophyll fluorescence experiments, Fv/Fm ratios were also reduced to 14~20% and about 23%, respectively, according to the light intensity by Cd²⁺ and Cd²⁺ + ABA-treated plants. Water stresses were increased by the treatment of Cd²⁺, Cd²⁺ + ABA and Cd²⁺ + KCl. In Cd²⁺ accumulation experiments Cd²⁺ transport into the plant by ABA was not affected, but the accumulation of Cd²⁺ into the roots was elevated to 13% when compared with the control. Cd²⁺ transport into the root was markedly inhibited to 60% by KCl. Therefore, it could be concluded that ABA did not reduce the toxicities of Cd²⁺, but enhanced Cd²⁺-induced toxicities and KCl showed no effect on Cd²⁺-induced toxicities.

Key words : cadmium-toxicities, absciscic acid, *Commelina*

서 론

자연 환경의 중요성은 지구상에 존재하는 모든 생명체의 생존과 밀접하게 관련되어 있기 때문이다. 깨끗한

자연과 환경은 생물들의 생활조건을 윤택하게 하여 생태계를 건강하게 만들며, 생태계의 건강지수는 종의 다양성과 밀접한 관계에 있다. 종의 다양성은 자연을 더욱 더 풍요롭게 만든다. 그러나 최근 산업화 및 공업화의 발달은 환경오염을 초래하여 생명체의 활동과 번식에 치명적인 영향을 끼치고 있다. Cd²⁺에 의한 토양 오염은 지구 생태계의 1차 생산자인 녹색식물의 생장을 저해하고 이는 먹이 사슬을 통해 우리인류를 위협하고 있

* Corresponding author: Joon Sang Lee, Tel. 033-730-0436, Fax. 033-730-0430, E-mail. jslee@mail.sangji.ac.kr

다. 1955~57년을 정점으로 하여 일본의 도야마현 진즈강 양쪽 기슭 일정 지역에 거주하는 40세 이상의 농촌 여성에게 발병된 이타이이타이병은 Cd^{2+} 의 노출이 먹이사슬의 최상위층에 존재하는 인간에게 미친 직접적인 결과이다. Cd^{2+} 은 인간을 비롯한 동물에게 가장 해로운 중금속으로 알려졌고(Chaudri *et al.* 1995), 식물은 농도가 높을수록 전반적인 생리장해를 일으키며, 이는 식물의 생산량 감소와 낙화촉진을 유도하는 것으로 보고 되었다(Page *et al.* 1972; Kim 1982; Kim and Park 1992; Lee 2000, 2001, 2002; Lee and Lee 2002). 앱시스산(ABA)은 에틸렌과 더불어 대표적인 스트레스 내성 호르몬으로 식물이 수분 스트레스를 받을 때 4시간에서 8시간 사이에 그 농도가 약 50 배 정도 증가될 수 있다(Taiz and Zeiger 2003). 앱시스산 농도 증가는 공변세포로 이어져 기공을 닫게 하며, 이로 인해 수분스트레스에 대한 내성을 증가시킨다.

호르몬의 기능은 특정 유전자의 활성화와 단백질의 합성 등과 연관되어 있으므로, 앱시스산이 Cd^{2+} 에 의한 식물의 독성에 어떻게 작용하는지 조사하는 것은 매우 흥미로운 주제이다. 따라서 본 연구에서는 앱시스산이 Cd^{2+} 에 의한 생리적 반응에 어떠한 영향을 주는지 조사하였다.

재료 및 방법

1. 재료

닭의장풀(*Commelina communis* L.) 종자를 질석, 토탄 그리고 양토 혼합물에 심어, 14시간의 명기와 10시간의 암기, 20°C의 온도와 80 $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (metal halides lamp)의 광도에서 재배하였다. 일주일에 한번 주기로 복합비료(원도그로 2호)를 1g L⁻¹의 농도로 주었으며, 발아 후 2주 동안 자란 식물을 실험에 사용하였다.

2. 성장률 및 엽록소 함량의 측정

3주간 성장한 닭의장풀 유식물을 Hoagland 용액으로 옮겨, 100 μM Cd^{2+} (Cadmium Chloride 1-hydrate, AnalaR, U.K.)과 100 μM Cd^{2+} + 100 μM ABA (Abscisic acid, Sigma, U.K.), 100 μM Cd^{2+} + 50 mM KCl (Sigma, U.K.)를 처리한 후 1주간 수경 재배하였다. 엽록소 함량과 엽록소 *alb* 비율의 측정은 Holden (1965)의 방법을 기초로 하였고, 성장률은 수경 재배 후에 3개의 시료를 가지고 2번 측정하였다.

3. 엽록소 형광과 수분퍼텐셜의 측정

엽록소 함량의 측정 방법과 똑 같은 방법으로 재배한 식물을 재료로 하였으며, 엽록소 형광 측정은 Teaching-Pam Chlorophyll Fluorometer (Walz, Effeltrich, Germany)를 이용하여 측정하였으며, 수분퍼텐셜은 수분퍼텐셜 측정기(PMS Instrument Co., Oregon, USA)를 통해 측정하였다.

4. 잎과 줄기에 축적된 Cd^{2+} 농도 측정

엽록소 함량의 측정 방법과 똑 같은 방법으로 재배한 식물을 재료로 하였다. 그 후 시료를 채취하여, 250 mL Teflon 비커에 넣은 후, 질산 5 mL를 첨가하고 Teflon watch glass로 덮는다. 시료를 30분간 95°C에서 가열한 후 15분간 시료를 냉각시킨 다음 질산 5 mL를 첨가하고 watch glass를 다시 올려놓고 30분간 환류 시키며, 완전한 산화를 위하여 2회 반복하였다. 시료를 냉각시키고, 증류수 2 mL와 30% 과산화수소 3 mL를 첨가하였다. Watch glass로 비커를 덮은 다음 hot plate에서 과산화반응을 시킨 후, 다시 1 mL씩 시료를 따서 이 반응을 6회 반복하였다. 냉각시킨 용액을 Whatman 41로 여과한 후 50 mL 플라스크에서 희석한 후 ICP-MS(Ion Chromatography-Mass, Varian, Ultramass 700)로 분석하였다.

결과 및 고찰

Fig. 1은 2주 동안 성장한 닭의장풀 유식물을 Hoagland 용액에 옮겨 Cd^{2+} , ABA, Cd^{2+} + ABA, KCl, Cd^{2+} + KCl을 처리하고 1주일 동안 배양한 후 닭의장풀의 줄기 성장을 살펴본 것이다. 식물성장 패턴 변화의 관찰은 가장 손쉬우면서 뚜렷하게 식물의 생리상태를 추측할 수 있는 고전적인 방법이다. 즉, 뿌리의 발달, 잎 모양, 색깔 및 크기, 줄기의 크기와 굵기 등 전체적인 외형의 변화는 식물이 어떠한 상태에 있는지 가늠하는 중요한 척도로 이용할 수 있다. Cd^{2+} 에 의한 닭의장풀의 성장패턴의 변화는 이미 보고 되었다(Lee 2002). 본 실험에서는 Cd^{2+} 에 의한 닭의장풀의 성장에 ABA가 어떠한 영향을 주는지 조사하기 위해 줄기의 길이를 측정하였다. 대조구는 1주일 동안 4.6 cm 성장하였으며, ABA 처리구는 4.5 cm, KCl 처리구도 4.7 cm 성장하여, ABA와 KCl 단독 처리구는 대조구와 성장에 차이가 없었다. Cd^{2+} 처리구는 1.33 cm 성장하여 대조구에 비해 약 71% 생장이 감소하였다. ABA를 Cd^{2+} 과 함께 처리한 경우는 0.86 cm 성장하여 대조구에 비해 약 81% 생장이 감소하

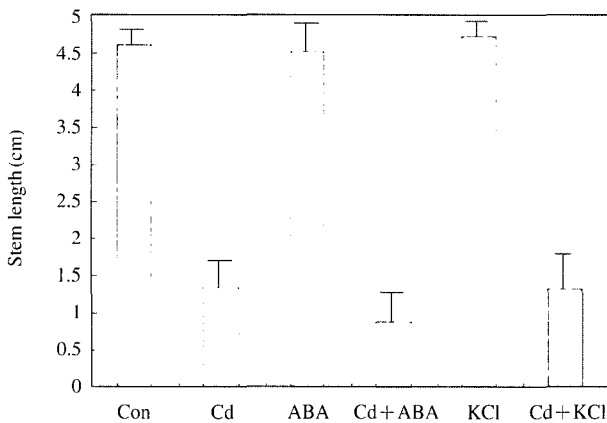


Fig. 1. The effect of ABA on the length of stem of *Commelina communis* L. Three-weeks old *Commelina* was transferred to Hoagland solution (Control, 100 μM Cd^{2+} , 100 μM Cd^{2+} + 100 μM ABA, 100 μM Cd^{2+} + 50 mM KCl) and grown for a week in the solution. Each result is the mean (\pm s.e.m.) of two replicate experiments.

Table 1. The effect of Cd^{2+} and ABA on chlorophyll content ($\mu\text{g g}^{-1}$ fr.wt) and chl *a/b* ratio in *Commelina communis* L. Parentheses indicate chl *a/b* ratio. The concentration of Cd^{2+} was 100 μM . Each result is the mean of two replicate experiments and three plants were measured. Standard errors of means (\pm s.e.m) in all the results of this experiments were less than 15%

	Control	Cd^{2+}	100 μM ABA	Cd^{2+} + 100 μM ABA	50 mM KCl	Cd^{2+} + 50 mM KCl
0	1255 (3.2)	1255	1255	1255	1255	1255
1	1280	870	1275	750	1270	910
week	(3.1)	(2.6)	(2.9)	(2.0)	(3.2)	(3.1)

였다. ABA 단독 처리시 보여준 대조구와 동등한 생장이 Cd^{2+} 과 함께 처리한 경우 Cd^{2+} 단독처리보다 억제 효과가 10%나 상승하여, ABA가 Cd^{2+} 에 의한 성장 억제에 효과가 없음을 보여주었다. ABA는 대표적인 스트레스 내성 호르몬으로 수분 스트레스를 받을 시 뿌리에서 ABA가 합성, 분비 되어 공변세포로 이동하여 기공을 닫게 한다 (Taiz and Zeiger 2003). 따라서 ABA에 의한 성장 억제는 수분 결핍과 동반되므로 본 연구에서 ABA 단독처리는 수경 재배로 인해 생장에 영향을 미치지 않은 것으로 사료된다. K^{+} 은 세포내 삼투퍼텐셜에 영향을 주는 가장 중요한 원소 중의 하나로 Cd^{2+} 과 같은 양이온을 띠고 있어 Cd^{2+} 수송 및 여러 생리적인 반응에 영향을 줄 것으로 사료되어 50 mM KCl을 Cd^{2+} 과 같이 처리하였으나 Cd^{2+} 처리구와 생장에 큰 차이가 없었다.

Table 1은 총 엽록소 함량 및 엽록소 *a/b*에 대한 Cd^{2+} 과 ABA 처리 효과를 살펴본 것이다. 엽록소 함량의 변

Table 2. The effect of Cd^{2+} and ABA on the quantum yield of Photosystem II (PSII), Fv/Fm. The concentration of Cd^{2+} used here was 100 μM . Each result is the mean of three replicate experiments and three of the plants were measured. Standard errors of means (\pm s.e.m) in all the results of this experiments were less than 10%

Light intensity $\mu\text{mole E m}^{-2}\text{s}^{-1}$	Control	Cd^{2+}	Cd^{2+} + 100 μM ABA	Cd^{2+} + 50 mM KCl
600	0.765	0.660	0.598	0.650
1200	0.768	0.632	0.602	0.660
1800	0.779	0.627	0.600	0.640
2100	0.777	0.625	0.604	0.620

화는 ABA와 KCl 단독 처리구는 대조구와 차이가 없었으나, Cd^{2+} 처리구와 Cd^{2+} + ABA에서는 뚜렷하게 관찰되었다. Cd^{2+} , Cd^{2+} + ABA, Cd^{2+} + KCl 처리구는 대조구에 비해 각각 32%, 41%, 29% 억제되었다. 정상적인 잎의 엽록소 *a/b* 비율은 일반적으로 2.5~3.5에 속한다 (Oh and Lee 1996). 본 실험에서 엽록소 *a/b* 범위는 2.0에서 3.2사이에서 측정되었으며 Cd^{2+} 과 Cd^{2+} + ABA 처리구는 2.6과 2.0이었으나, Cd^{2+} + KCl 처리구는 대조구와 같이 3.1이었다. 위의 결과로부터 Cd^{2+} 과 ABA는 엽록소 *a*에 더 민감하게 반응하는 것으로 추측된다.

식물생리의 가장 중심적인 두 가지 기능은 광합성과 증산작용이다. Fv/Fm 비율은 암 처리된 재료에 적색광을 주었을 때 광계-엽록소 *a/b* 안테나 시스템에서의 양자 수확량을 의미 한다 (Schreiber 1997). Fv/Fm 비율은 광화학 반응의 광자 비율에 비례하며 (Demming and Bjorkman 1987), 또한 광계 II 반응 중심의 수와 비례하는 것으로 보고 되었다 (Oquist *et al.* 1992). 따라서 Fv/Fm 비율이 높은 것은 광합성 활성이 크다고 볼 수 있다. Table 2는 간접적으로 광합성 활성을 측정할 수 있는 형광, Fv/Fm을 측정된 것이다.

대조구에서는 빛 광도가 증가함에 따라 Fv/Fm 비율이 미미하게 증가하였으나, 이미 600 $\mu\text{mole E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 광포화점에 이른 것으로 추측된다. 실제로 모든 처리구에서 600~1800 $\mu\text{mole E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 광도에서 Fv/Fm 비율에 큰 차이가 없었다. Cd^{2+} 처리구는 대조구에 비해 모든 광도에서 Fv/Fm 비율이 14~20% 감소하였다. Cd^{2+} + ABA 처리구는 Fv/Fm 비율이 23% 내외에서 감소하였으며, Cd^{2+} + KCl 처리구는 Cd^{2+} 처리구와 Fv/Fm 비율에 큰 차이가 없었다. 따라서 Cd^{2+} 은 식물의 중심적인 생리작용인 광합성을 억제하는 유독한 중금속임을 알 수 있다. ABA는 이러한 Cd^{2+} 의 독성 효과를 완화시켜주지 못하고 오히려 촉진시켰다. 이러한 결과는 식물의 성장, 엽록소 함량 그리고 수분 스트레스에서도 나타났다.

수분 스트레스에 대한 Cd^{2+} 과 ABA 처리 효과는 Cd^{2+}

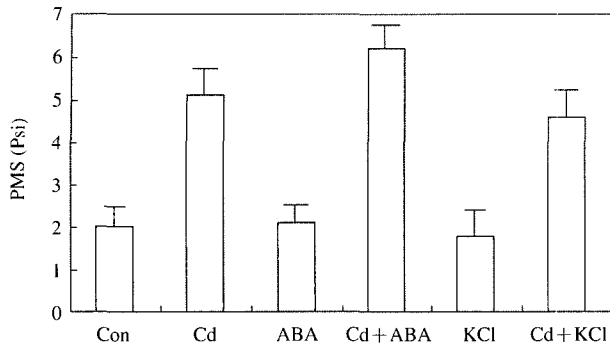


Fig. 2. The effect of ABA on water stress (PMS: pressure of moisture stress) of the stem of *Commelina communis* L. Three-weeks old *Commelina* was transferred to Hoagland solution (Control, 100 μM Cd^{2+} , 100 μM Cd^{2+} + 100 μM ABA, 100 μM Cd^{2+} + 50 mM KCl) and grown for a week in the solution. Each result is the mean of two replicate experiments.

Table 3. The effect of ABA on the accumulation of Cd^{2+} . Three-weeks old *Commelina* was transferred to Hoagland solution (Control, 100 μM Cd^{2+} , 100 μM Cd^{2+} + 100 μM ABA, 100 μM Cd^{2+} + 50 mM KCl) and grown for a week. Each result is the mean of two replicate experiments. Standard errors of means (\pm s.e.m) in all the results of this experiments were the less than 10%. The unit of the concentration of Cd^{2+} is $\mu\text{g g}^{-1}$ fr.wt

	Con	Cd^{2+}	Cd^{2+} + ABA	Cd^{2+} + KCl
All leaves	0.086	8.163	0.188	16.376
Stem	0.009	35.663	14.218	22.227
Root	0.156	136.107	154.174	53.938

처리구에서 대조구에 비해 2.5배, Cd^{2+} + ABA 처리구에서 3.0배, Cd^{2+} + KCl 처리구에서 2.3배 각각 수분 스트레스가 증가하였다. 반면에 ABA와 KCl 단독 처리구는 대조구와 차이가 없었다(Fig. 2). 식물이 수분 스트레스를 받으면 광합성, 기공 열림, 단백질 합성과 세포벽 합성 등 가장 기본적인 생리 현상이 저해 된다(Hsiao 1979). 수경재배를 통해 수분이 충분히 공급되었음에도 불구하고 Cd^{2+} 에 의해 수분 스트레스를 받았다는 것은 식물 생리의 가장 중심이 되는 광합성 및 증산 작용이 일어나지 않아 전반적인 생리 기작이 손상되었다고 볼 수 있다. 이러한 생리 작용의 억제 결과 생장 억제, 엽록소 함량 감소와 PSII 활성 감소로 나타났다(Fig 1, Table 1 and 2).

ABA 농도 증가는 공변세포로 이어져 기공을 닫게 하며, 이로 인해 수분스트레스에 대한 내성을 증가시키는 것으로 알려졌다. 그러나 ABA 처리가 Cd^{2+} 에 의한 수분 스트레스 증가를 감소시키지 못했다(Fig. 2). 이는

ABA가 Cd^{2+} 에 의한 식물의 독성 기능에 대한 내성과 무관하다는 것을 의미한다.

대조구의 잎, 줄기 그리고 뿌리에서 0.086, 0.009, 0.156 $\mu\text{g g}^{-1}$ fr.wt.의 Cd^{2+} 이 각각 검출되었다. 줄기에서는 Cd^{2+} 이 거의 검출되지 않았으나, 뿌리에서는 줄기에 비해 약 17배의 Cd^{2+} 이 검출되었다. 무기물 및 중금속은 토양, 물 그리고 공기 등 어디에나 존재하므로 이런 경로를 통해 식물에 유입되며, 뿌리는 중금속을 축적하는 첫 번째 기관으로 인해 Cd^{2+} 농도가 높은 것으로 사료된다. Cd^{2+} 을 처리한 실험구 및 다른 처리구에서도 확인된 뿌리 내 높은 농도의 Cd^{2+} 은 뿌리가 다른 기관으로의 독성 중금속의 수송을 가능한 한 억제시키는 초기 내성 시스템과 관련된 것으로 추측된다. 뿌리는 물과 무기물의 흡수와 수송에 중요하게 작용하지만, 식물 생리 현상의 중심인 광합성과 증산 작용이 일어나지 않으므로 생존 전략적으로 유독한 중금속 저장 기능이 있는 것으로 보여 진다(Lee and Lee 2002).

100 μM Cd^{2+} 처리구에서 식물의 기관에 따른 Cd^{2+} 축적을 살펴보면 식물의 생존전략을 알 수 있다. 전체 Cd^{2+} 축적의 78%가 뿌리에 집중되었으며, 줄기를 포함하면 약 95%의 Cd^{2+} 이 뿌리와 줄기에 집중되어 축적되어 있다. Cd^{2+} + ABA 처리구에서 ABA는 Cd^{2+} 수송을 억제하거나 촉진시키지는 않았지만 Cd^{2+} 의 뿌리 축적을 약 13% 심화시켰다. 반면에 KCl은 뿌리 내 Cd^{2+} 축적을 약 60% 억제시켰다. K⁺은 Cd^{2+} 과 같은 양이온을 띠고 있어 같은 수송 메커니즘에 경쟁적으로 작용하여 Cd^{2+} 수송을 억제한 것으로 사료된다.

위의 결과로부터 Cd^{2+} 에 의한 생장 억제, 엽록소 함량의 감소, 수분 스트레스의 증가와 광합성 활성의 감소는 Table 3에서 보여주듯이 Cd^{2+} 축적으로 인해 발생된 식물의 독성 결과로 추측된다. 대표적인 스트레스 내성 호르몬 ABA는 Cd^{2+} 축적으로 인해 발생된 식물의 생리적 독성을 완화시켜주지 못했으며, 오히려 독성을 증가시켰다. 이는 ABA가 Cd^{2+} 에 의해 유도된 식물의 스트레스에는 스트레스 내성 호르몬으로서 기능을 하지 못했으며, 오히려 ABA가 Cd^{2+} 독성을 증가시킨 것으로 사료된다. 따라서 Cd^{2+} 과 같은 중금속에 노출되었을 때 생성되는 phytochelatins (PCs)으로 인한 중금속 내성 반응에 ABA는 PCs의 합성과 관련된 특정 유전자 활성 및 단백질 합성과 무관한 것으로 보인다. 반면에 KCl은 Cd^{2+} 수송을 억제시켰으나, 기타 생리적인 독성 감소 기능을 보여주지 못한 이유는 미량의 농도에서 보여주는 Cd^{2+} 자체의 강력한 독성 효과 때문인 것으로 추측된다.

적 요

3주간 정상적으로 성장한 닭의장풀을 Hoagland 용액 (대조구, 100 μM Cd^{2+} , 100 μM Cd^{2+} + 100 μM ABA, 100 μM Cd^{2+} + 50 mM KCl)에서 1주간 수경재배 한 후 생장, 엽록소 함량, 엽록소 형광, 수분 스트레스와 Cd^{2+} 의 축적을 조사하여 Cd^{2+} 축적과 식물의 생리적 반응과의 연관성을 찾고자 하였다. 식물의 성장에서 Cd^{2+} 과 Cd^{2+} + ABA 처리구는 대조구에 비해 각각 71%와 81% 생장이 감소하였고, Cd^{2+} + KCl 처리구는 Cd^{2+} 처리구와 성장에 큰 차이가 없었다. 엽록소 함량은 Cd^{2+} , Cd^{2+} + ABA, Cd^{2+} + KCl 처리구에서 대조구에 비해 각각 32%, 41%, 29% 억제되었다. 엽록소 형광 측정의 경우 Cd^{2+} 처리구는 대조구에 비해 모든 광도에서 Fv/Fm 비율이 14~20% 감소하였다. Cd^{2+} + ABA 처리구는 Fv/Fm 비율이 23% 내외에서 감소하였으며, Cd^{2+} + KCl 처리구는 Cd^{2+} 처리구와 Fv/Fm 비율에 큰 차이가 없었다. 수분 스트레스에 대한 Cd^{2+} 과 ABA 처리 효과는 Cd^{2+} 처리구에서 대조구에 비해 2.5배, Cd^{2+} + ABA 처리구에서 3배, Cd^{2+} + KCl 처리구에서 2.25배 각각 수분 스트레스가 증가하였다. Cd^{2+} 수송에 대한 ABA의 효과를 살펴보면, Cd^{2+} + ABA 처리구에서 ABA는 Cd^{2+} 수송을 억제하거나 촉진시키지는 않았지만 Cd^{2+} 의 뿌리 축적을 약 13% 심화시켰다. 반면에 KCl은 뿌리 내 Cd^{2+} 축적을 약 60% 억제시켰다.

따라서 대표적인 스트레스 내성 호르몬 ABA는 Cd^{2+} 축적으로 인해 발생된 식물의 생리적 독성을 완화시켜 주지 못했으며, 오히려 독성을 증가시켰다.

사 사

본 연구는 2002년도 상지대학교 교내 연구비의 지원을 받아서 수행되었음.

참 고 문 헌

- Chaudri AM, FJ Zhao, SP McGrath and AR Crosland. 1995. The cadmium content of British wheat grain. *J. Environ. Qual.* 24:850-856.
- Demming B and O Bjorkman. 1987. Comparison of the effect of excessive high of chlorophyll fluorescence (77k) and photon yield of O_2 evolution in leaves of higher plants. *Planta* 171:171-184.
- Holden M. 1965. Chlorophylls. pp.461-488 In *Chemistry and biochemistry of plant pigments* (Goodwin TW eds.). Academic press, New York.
- Hsiao TC. 1979. Plant responses to water deficits, efficiency, and drought resistance. *Agricult. Meteorol.* 14:59-84.
- 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 and 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.
- Lee JS. 2000. 닭의장풀 내 Cd^{2+} 의 분포와 생리적 특성. *환경생물.* 18(1):63-67.
- Lee JS. 2001. 닭의장풀 내 Cd^{2+} 처리시 Cd^{2+} 흡수와 non-protein-SH 합성에 미치는 살리실릭산의 영향. *환경생물.* 19(3):218-222.
- Lee JS. 2002. Cd^{2+} 에 의한 닭의장풀의 생리적 독성에 salicylic acid가 미치는 영향. *환경생물.* 20(1):73-77.
- Lee JS and HG Lee. 2002. 닭의장풀에 Cd^{2+} 처리시 Cd^{2+} 흡수와 생장에 미치는 Ca^{2+} 의 영향. *환경생물.* 20(1):40-45.
- Oh MH and CH Lee. 1996. Disassembly of chlorophyll-protein complex in *Arabidopsis thaliana* during dark-induced foliar senescence. *J. Plant Biology* 39(4):301-304.
- Oquist G, WS Chow and JM Anderson. 1992. Photoinhibition of photosynthesis represents a mechanism for the long term regulation of photosystem II. *Planta* 186:450-460.
- Page AL, FT Bingham and C Nelson. 1972. Cadmium absorption and growth of various plant species as by solution cadmium concentration. *J. Environ. Qual.* 1:288-291.
- Schreiber U. 1997. *Chlorophyll fluorescence and photosynthetic energy conversion*. Walz. Germany.
- Taiz L and E Zeiger. 2003. *Plant physiology*. The Benjamin/Cummings Publishing Co. California USA.

Manuscript Received: September 7, 2004

Revision Accepted: January 31, 2005

Responsible Editorial Member: Joo Hwan Kim (Daejeon Univ.)