한국환경과학회지 제14권(제3호), 345~350, 2005
Journal of the Environmental Sciences

Zeatin이 Cd^{2+}에 의한 닭의장풀의 생리적 독성에 미치는 영향

이 준 상
상지대학교 생명과학과
(*2004*년 *10*월 *22*일 접수; *2005*년 *3*월 *19*일 채택)

The effects of zeatin on Cd^{2+} -induced physiological toxicities in *Commelina communis* L

Joon Sang Lee
Department of Life Science, Sangji University, Wonju 220-702, Korea
(Manuscript received 22 October, 2004; accepted 19 March, 2005)

Three-week old *Commelina communis* was transferred and grown in Hoagland solution containing 100μM Cd^{2+}, 100μM Cd^{2+}+100μM kinetin, 100μM Cd^{2+}+100μM zeatin and 100μM Cd^{2+}+200μM zeatin for 7 days, and then a number of physiological activities were investigated. In control, the length of the stem of plants was increased to 4.7cm, but in Cd^{2+}, Cd^{2+}+kinetin, Cd^{2+}+100μM zeatin and Cd^{2+}+200μM zeatin treatments, the growth of plants were increased to 1.5cm, 2.1cm, 3.9cm and 4.3cm, respectively. In the treatments of Cd^{2+}, Cd^{2+} +kinetin, Cd^{2+}+100μM zeatin and Cd^{2+}+200μM zeatin, total chlorophyll contents were reduced to 26%, 24%, 15% and 3%, respectively, on the contrast to the control. In chlorophyll fluorescence experiments, Fv/Fm ratios were also reduced to 44%, 21%, 17% and 5% in the light intensity of 2100μmole E $m^{-2}s^{-1}$ by Cd^{2+}, Cd^{2+}+ kinetin, Cd^{2+}+100μM zeatin and Cd^{2+}+200μM zeatin treatments on the contrast to the control. Water stresses were increased to 2.6, 1.7 and 1.2 times by Cd^{2+}, Cd^{2+}+kinetin and Cd^{2+}+100μM zeatin. On the other hand, combination of Cd^{2+}+200μM zeatin reduced water stress to 0.12%.

In Cd^{2+} accumulation experiments Cd^{2+} transports were inhibited to 33%, 48% and 70% by Cd^{2+}+kinetin, Cd^{2+}+100μM zeatin and Cd^{2+}+200μM zeatin. Therefore, it could be concluded that zeatin clearly reduced the toxicities of Cd^{2+} by reducing the absorption of Cd^{2+}.

Key Words : Cadmium toxicity, Cytokinin, Kinetin, Zeatin

1. 서 론

자연 환경은 지구상에 존재하는 모든 생명체의 생존과 밀접하게 관련되어 있다. 깨끗한 자연과 환경은 생물의 생활조건을 윤택하게 하여 생태계를 건강하게 만들며, 생태계의 건강지수는 종의 다양성과 밀접한 관계에 있다. 그러나 최근 산업화 및 공업화의 발달은 환경오염을 초래하여 생명체의 활동과 번식에 치명적인 영향을 미치고 있다.

카드뮴에 의한 토양 오염은 지구 생태계의 1차 생산자인 녹색식물의 생장을 저해하고 이는 먹이사슬을 통래 우리 인류를 위협하고 있다. 일반적으로 인간을 비롯한 동물에게 가장 해로운 중금속으로 알려져 있고[1], 식물에서는 농도가 높을수록 심각한 전반적인 생리적 장해를 일으키며, 이는 식물의 생산량 감소와 낙화촉진을 유도하는 것으로 보고되었다[2~8].

식물이나 조류들은 필수 원소나 중금속을 그들이 서식하는 환경에 따라 적절한 농도를, 때로는 치명적인 농도를 함유하고 있다. 따라서 식물이나 조류는, 필수원소의 경우 결핍과 유독한 농도 사이를 유지시킬 수 있는 기작과 유해한 중금속의 경우 유독한 농도 이하로 유지시키는 기작이 필요하다.

한편 식물, 조류 외에도 동물, 곰팡이, 대장균 등을 포함한 생물은 중금속을 격리시킬 수 있는 metallothioneins (MTs)로 알려진 단백질과 펩티드들을

Corresponding Author : Joon Sang Lee, Department of Life Science, Sangji University, Wonju 220-702, Korea
Phone: +82-33-730-0436
E-mail: jslee@mail.sangji.ac.kr

함유하고 있으며 이들에 의해 세포 내의 중금속 항상성이 유지되고 해독 작용이 일어난다[9].

최근 유전공학 기술을 이용하여 중금속, 제초제, 동위원소 등 유독물질을 보다 더 많이, 더 빠르게 흡수하고 이들의 독성에 내성을 가지는 식물을 개발하고자 하는 phytoremediation 기술이 경쟁적으로 발전하고 있다. 또한 게놈 연구에 의해 밝혀진 여러 환경정화 능력을 가진 유전자들을 식물에 발현시켜 오염된 환경을 효과적으로 정화할 수 있는 식물을 생산하는 기술들이 연구되고 있다[10].

유전자 재조합에 의한 중금속의 효과적인 제거도 중요하지만, 어떤 화학물질이 Cd^{2+}을 비롯한 중금속의 흡수를 억제하는지 또한 MTs 활성을 촉진시키는지를 밝혀내는 것도 매우 중요하다. 이러한 기초적인 연구는 오염된 지구로부터 생산되는 농작물의 안정성을 증가시키는데 필수적이다.

Cytokinin은 식물의 세포분열을 촉진시키는 식물호르몬으로서 자연적으로 합성되는 zeatin과 합성 cytokinin인 kinetin이 있다. 이들은 세포 분열 이외에 노화 억제와 조직 배양에서 뿌리와 줄기 발달에 영향을 준다. Cytokinin은 tRNA의 활성을 조절하여 생장을 촉진하는데, cytokinin을 함유한 tRNA들이 수용체와 결합하면 단백질 합성이 이루어지지 않으나 세포내 cytokinin의 농도가 높아져서 tRNA 수용체와 결합에 경쟁적으로 작용하면 cytokinin이 tRNA와의 결합이 깨어져서 단백질 합성을 촉진한다고 알려졌다[11]. 따라서 같은 아미노산일지라도 유전자에 따라 사용하는 코돈이 다르므로 어떤 단백질의 합성은 cytokinin에 의해 촉진되는 반면 어떤 단백질의 합성은 cytokinin에 의해 저해된다.

호르몬의 기능은 특정 유전자의 활성과 단백질의 합성 등과 연관되어 있으므로, cytokinin이 Cd^{2+}에 의한 식물의 생장억제, 광합성 활성 감소, 수분 스트레스 증가 등과 관련한 생리적인 반응과 식물의 독성에 어떻게 작용하는지 조사하는 것은 매우 흥미로운 주제이다. 따라서 본 연구는 대표적인 cytokinin인 zeatin과 합성 cytokinin인 kinetin을 사용하여 MTs의 활성을 간접적으로 알 수 있는 생리적 반응과 Cd^{2+} 수송을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

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

2.2. 생장률 및 엽록소 함량 측정

3주간 생장한 닭의장풀 유식물을 Hoagland 용액으로 옮겨, Cd^{2+} (100μM; cadmium chloride 1-hydrate, AnalaR, U.K.) 단독처리와 kinetin (100μM) 및 zeatin (100μM, 200μM; Sigma, U.K.)과 복합처리를 한 후 1주간 수경 재배하였다. 엽록소 함량과 엽록소 a/b 비율의 측정은 Holden (1965)의 방법을 기초로 하였다. 생장률은 수경 재배 후에 3개의 시료를 가지고 2번 측정하였다.

2.3. 엽록소 형광 및 수분퍼텐셜 측정

3주간 생장한 닭의장풀 유식물을 Hoagland 용액으로 옮겨 Cd^{2+} (100μM) 단독처리와 kinetin (100μM) 및 zeatin (100μM, 200μM)과 복합 처리를 한 후 1주간 수경재배하였다. 엽록소 형광 측정은 Teaching-Pam Chlorophyll Fluorometer (Walz. Effeltrich. Germany)를 이용하여 측정하였으며, 수분퍼텐셜은 수분퍼텐셜 측정기 (PMS Instrument Co., Oregon. USA)를 통해 측정하였다.

2.4. 잎과 줄기에 축적된 Cd^{2+} 함량 측정

3주간 생장한 닭의장풀 유식물을 Hoagland 용액으로 옮겨 Cd^{2+} (100μM) 단독처리와 kinetin (100μM) 및 zeatin (100μM, 200μM)과 복합처리를 한 후 1주간 수경재배하였다.

Cd^{2+} 함량을 조사하기 위해서 먼저 시료를 채취하여 250mℓ Teflon 비커에 넣은 후, 질산 5mℓ를 첨가하고 Teflon watch glass로 덮은 다음 시료를 30분간 95℃에서 가열하였다. 15분간 시료를 냉각시킨 다음 질산 5mℓ를 첨가하고 watch glass를 다시 올려놓고 30분간 환류시켰다. 완전한 산화를 위하여 이 과정을 2회 반복하였다. 냉각시킨 사료에 증류수 2mℓ와 30% 과산화수소 3mℓ를 첨가하고서 watch glass로 덮은 다음 hot plate에서 과산화반응을 시킨 후, 1ml씩 시료를 채취했으며 이 반응은 6회 반복하였다. 냉각시킨 용액을 Whatman 41로 여과한 다음 50mℓ 플라스크에서 희석한 후 ICP-MS (Ion Chromatography-Mass, Varian, Ultramass 700)로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3주간 재배한 닭의장풀을 Hoagland 용액에 100μM Cd^{2+} 단독처리구와 100μM Cd^{2+} + 100μM kinetin, 100μM Cd^{2+} + 100μM zeatin 및 100μM Cd^{2+} + 200μM zeatin 복합처리구에서 7일간 재배한 후 길이 생장을 조사한 결과는 Fig. 1에서와 같다. 대조구는 1주간 4.7cm 생장하였으나 Cd^{2+} 처리구는 1.5cm 생

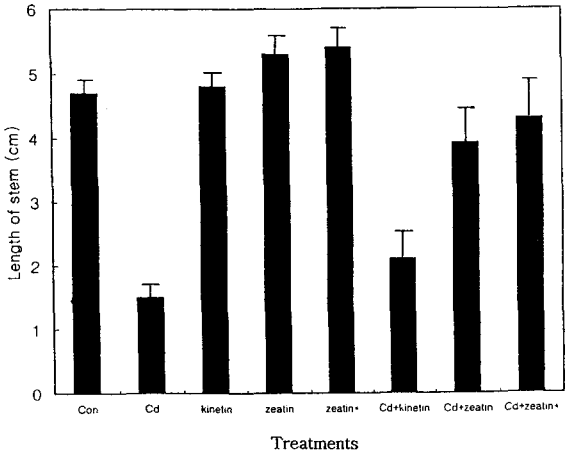

Fig. 1. The effect of Cd^{2+} and zeatin on the stem length of *Commelina communis* L. 3-week old *Commelina communis* was transferred and grown in Hoagland solution containing 100μM Cd^{2+}, 100μM kinetin, 100μM zeatin, 200μM zeatin, 100μM Cd^{2+}+100μM kinetin, 100μM Cd^{2+}+100μM zeatin and 100μM Cd^{2+}+200μM zeatin for 7 days. Each result is the mean (±S.E.) of two replicate experiments. Zeatin* indicate the concentration of 200μM.

장하여 대조구에 비해 약 68% 생장이 감소하였다. Kinetin을 Cd^{2+}과 함께 처리한 경우는 2.1cm 생장하여 대조구에 비해 생장이 약 54% 감소하였다. Cd^{2+}을 100μM zeatin 또는 200μM zeatin과 함께 각각 처리시 3.92cm 및 4.3cm 생장이 증가하였다. 200μM zeatin 처리는 대조구에 비해 약 5% 감소하였다. 따라서 zeatin 농도의 증가는 생장과 관련된 Cd^{2+} 독성에 의한 생장 억제를 다소 완화시켰다.

Table 1은 총 엽록소 함량 및 엽록소 a/b에 대한 Cd^{2+}과 zeatin의 단독처리와 복합처리 효과를 나타낸 것이다. Cd^{2+} 단독처리구는 대조구에 비해 엽록소 함량이 약 26% 억제되었으나, cytokinin과 Cd^{2+}을 복합처리한 경우는 Cd^{2+}에 의한 엽록소 함량 감소를 크게 억제하였다. Cd^{2+}을 100μM kinetin, 100μM zeatin 및 200μM zeatin과 복합처리 하였을 경우 엽록소 함량은 24%, 15% 그리고 3% 억제되었다. Zeatin에 의해 엽록소 함량의 감소 억제 효과가 나타나는 사실은 첫째로, 엽록소 합성 과정에 관여하는 다양한 대사 과정에 Cd^{2+}에 의한 독성을 완화시키는 phytochelatins (PCs) 활성과 관련된 단백질의 합성, 두 번째는 Cd^{2+} 흡수의 저해 그리고 마지막으로 엽록소 생성이 zeatin에 의해 활성 되어 초래될 수 있다고 추측된다.

정상적인 잎의 엽록소 a/b 비율은 일반적으로 2.5~3.5로 보고된 다 있는데[13], 본 실험에서 엽록소 a/b 범위는 2.7~3.2사이에서 측정되었으며 Cd^{2+} 처리구에서 그 값이 가장 낮았음은 Cd^{2+}이 엽록소 a에 매우 민감하기 때문인 것으로 볼 수 있다.

Fig. 2는 광합성 활성을 간접적으로 측정할 수 있

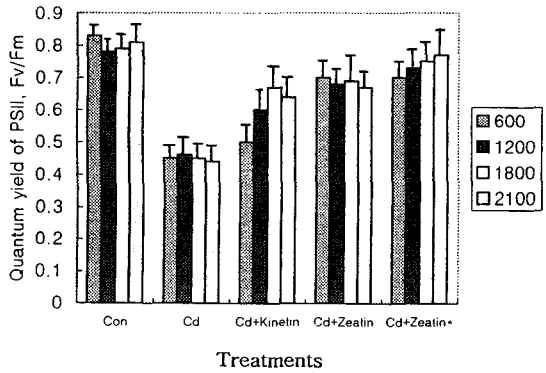

Fig. 2. The effect of Cd^{2+} and zeatin on the quantum yield of photosystem II (PSII), Fv/Fm of *Commelina communis* L. 3-week old *Commelina* was transferred and grown in Hoagland solution containing 100μM Cd^{2+}, 100μM kinetin, 100μM zeatin, 200μM zeatin, 100μM Cd^{2+}+100 μM kinetin, 100μM Cd^{2+}+100μM zeatin and 100μM Cd^{2+}+200μM zeatin for 7 days. Each result is the mean (±S.E.) of three replicate experiments and three of the plants in each experiment were measured. Zeatin* indicate the concentration of 200μM. The unit of light intensity is μmole E $m^{-2}s^{-1}$.

Table 1. The effect of Cd^{2+} and zeatin on chlorophyll content (μg g^{-1} fr.wt.) and chl a/b ratio in *Commelina communis* grown for 7 days. Each result is the mean (±S.E.) of two replicate experiments

Treatments	Chl. content (μg g^{-1} fr.wt.)		chl. a/b ratio	
	0 day	7 days	0 day	7 days
Control	1054±78	1180±98	3.2	3.1
100μM Cd^{2+}	1054±78	870±72	3.2	2.7
100μM Cd^{2+}+100μM kinetin	1054±78	900±76	3.2	3.0
100μM Cd^{2+}+200μM zeatin	1054±78	1000±83	3.2	3.2
100μM Cd^{2+}+200μM zeatin	1054±78	1150±75	3.2	3.1

는 형광, Fv/Fm을 측정한 것이다. Fv/Fm 비는 암처리된 재료에 적색광을 주었을 때 광계-엽록소 a/b 안테나 시스템에서의 양자 수확량을 의미 한다[14]. Fv/Fm 비는 광화학 반응의 광자 비율에 비례하며[15], 또한 광계 II 반응 중심의 수와 비례하는 것으로 보고 되었다[16]. 따라서 Fv/Fm 비가 높은 것은 광합성 활성이 크다고 볼 수 있다.

대조구에서는 광도가 증가함에 따라 Fv/Fm 비에 변화가 없어 이미 600 μmole E $m^{-2}s^{-1}$에서 광포화점에 이른 것으로 보인다. Cd^{2+} 처리구는 대조구에 비해 모든 광도에서 Fv/Fm 비는 약 44% 감소하였다. 이는 Cd^{2+}이 광합성을 심각하게 억제하는 유독한 중금속임을 보여주며, Cd^{2+}에 의한 엽록소 함량의 감소와 연관된 것으로 추측된다. 광합성에서 태양 에너지인 광자를 받아들이는 엽록소 양의 감소는 광합성 작용의 억제로 이어진다. 2100μmole E $m^{-2}s^{-1}$의 광도에서 Cd^{2+}과 복합 처리한 100μM kinetin, 100μM zeatin, 그리고 200μM zeatin 처리구에서의 Fv/Fm 비는 21%, 17% 그리고 5% 감소하였다.

이러한 결과는 수분 스트레스에서도 나타났다(Fig. 3). Cd^{2+} 처리구는 대조구에 비해 수분 스트레스가 2.6배 증가하였으며, Cd^{2+}을 100μM kinetin, 100μM zeatin과 함께 재배 하였을 경우 1.7배 그리고 1.2배 증가하였다. 그러나 200μM zeatin과 복합 처리시는 오히려 수분스트레스가 0.12% 감소하였다.

식물이 수분 스트레스를 받으면 광합성, 기공 열림, 단백질 합성과 세포벽 합성과 같은 기본적인 생리현상이 저해된다[11]. 수경재배를 통해 수분이 충분히 공급되었음에도 불구하고 Cd^{2+}에 의해 수분 스트레스를 받았다는 것은 광합성 활성 및 증산작용이 저해되어 전반적인 생리 기작이 손상되었다고 볼 수 있다. 이러한 생리 작용의 억제 결과 생장 억제, 엽록소 함량 감소 및 PSII 활성 감소로 나타난 것으로 사료된다.

Table 2는 닭의장풀의 뿌리, 줄기 및 잎의 Cd^{2+} 축적에 미치는 cytokinin의 효과를 나타낸 것이다. 대조구의 잎, 줄기 및 뿌리에 축적된 Cd^{2+} 함량은 각각 0.091, 0.007, 0.146μg/g fr.wt.였다. 줄기에서는 Cd^{2+}이 극히 미량 검출되었으며, 뿌리에서는 줄기에 비해 약 21배의 Cd^{2+}이 검출되었다. 무기물과 중금속은 토양, 물 및 공기 등 다양한 경로를 통해 식물에 유입되는데, 뿌리는 중금속을 축적하는 첫 번째 기관이므로 Cd^{2+} 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다. Cd^{2+} 처리구 뿐만 아니라 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, 광합성과 증산 작용이 일어나지 않으므로

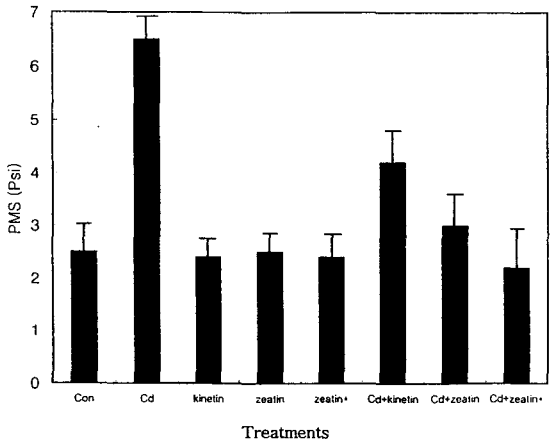

Fig. 3. The effect of zeatin on Cd^{2+}-induced water stress (PMS: plant moisture stress) in stem of *Commelina communis* L. 3-week old *Commelina* was transferred to and grown in Hoagland solution containing 100μM Cd^{2+}, 100μM kinetin, 100μM zeatin, 200μM zeatin, 100μM Cd^{2+}+100μM kinetin, 100μM Cd^{2+}+100μM zeatin and 100μM Cd^{2+}+200μM zeatin for 7 days. Each result is the mean (±S.E.) of three replicate experiments and three of the plants in each experiment were measured. Zeatin* indicate the concentration of 200μM.

Table 2. The effect of cytokinin on the accumulation of Cd^{2+} in *Commelina communis* L. 3-week old *Commelina* was transferred and grown in Hoagland solution for 7 days. Each result is the mean (±S.E.) of two replicate experiments

Treatments	Cd^{2+} concentration(μg/g fr.wt)		
	Leaves	Stem	Roots
100μM Cd^{2+}	8.163±0.72	35.663±3.51	136.107±10.63
100μM Cd^{2+}+100μM kinetin	6.188±0.58	14.218±2.45	100.15 ± 9.56
100μM Cd^{2+}+200μM zeatin	4.564±0.35	14.346±3.36	75.43 ± 6.74
100μM Cd^{2+}+200μM zeatin	3.744±0.26	8.243±0.63	43.621± 0.37

생존 전략상 유독한 중금속 저장 기능이 있는 것으로 보여진다[5].

100μM Cd^{2+} 처리구에서 식물의 기관에 따른 Cd^{2+} 축적 양상을 살펴보면, Cd^{2+} 축적량의 78%가 뿌리에 집중되었으며, 약 96%의 Cd^{2+}이 뿌리와 줄기에 집중되어 축적되어 있었다. Cd^{2+} + kinetin 처리구에서 kinetin은 Cd^{2+} 수송을 33% 억제하였으며, 100μM zeatin과 200μM zeatin의 복합 처리구에서는 Cd^{2+} 수송을 각각 48%, 70% 억제시켰다. 이러한 결과로부터 Cd^{2+}에 의한 생장 억제, 엽록소 함량의 감소, 수분 스트레스의 증가 및 광합성 활성의 감소는 Table 2에서 보여 주듯이 Cd^{2+} 축적에 기인한 독성 때문인 것으로 추측된다. 한편 cytokinin은 Cd^{2+} 축적으로 인해 발생되는 다양한 독성 증상을 뚜렷이 완화시켜 주었다. Auxin 및 abscisic acid 등이 다양한 이온들의 수송에 관여하는 것으로 알려졌는데[11], cytokinin도 이온 채널 및 막단백질 등에 영향을 주어 Cd^{2+} 수송을 억제하는 것으로 사료되나 cytokinin이 어떤 기작으로 Cd^{2+} 수송에 영향을 주었는지에 대해서는 계속 연구되어야 할 과제이다. Cd^{2+}과 같은 중금속에 노출되었을 때 cytokinin이 phytochelatins (PCs)의 합성과 관련된 특정 유전자 활성 및 단백질 합성과 유관한 것으로 추측되며 이들의 상관관계의 연구를 통해 알 수 있을 것으로 보인다.

4. 결 론

3주간 재배한 닭의장풀을 Hoagland 용액에 100μM Cd^{2+} 단독처리구와 100μM Cd^{2+} + 100μM kinetin, 100μM Cd^{2+} + 100μM zeatin 및 100μM Cd^{2+} + 200μM zeatin 복합처리구에서 7일간 수경재배한 후 생장, 엽록소 함량, 엽록소 형광, 수분 스트레스 및 Cd^{2+} 축적량을 조사하여 Cd^{2+} 축적과 식물의 생리적 반응과의 연관성을 조사하였다. Cd^{2+}처리구는 대조구에 비해 생장이 약 68% 감소하였으나, kinetin을 Cd^{2+}과 복합처리한 경우는 대조구에 비해 약 54% 생장이 감소하였다. Cd^{2+}과 zeatin의 복합처리구에서 200μM zeatin 처리는 대조구와 비교해 줄기 생장에 큰 차이가 없었다. 엽록소 함량에 있어 Cd^{2+} 처리구는 대조구에 비해 약 26% 억제되었다. 반면에 cytokinin과 Cd^{2+}을 함께 처리한 경우 Cd^{2+}에 의한 엽록소 함량의 감소를 크게 완화시켰다. Cd^{2+}을 100μM kinetin, 100μM zeatin, 그리고 200μM zeatin과 함께 복합처리하였을 경우 엽록소 함량은 24%, 15% 그리고 3% 억제되었다.

Fv/Fm 비에 있어서 Cd^{2+} 처리구는 대조구에 비해 모든 광도에서 약 44% 감소하였다. 2100μmole $E\ m^{-2}s^{-1}$의 광도에서 cytokinin을 Cd^{2+}과 함께 처리한 경우 100μM kinetin, 100μM zeatin, 그리고 200μM zeatin 처리구에서의 Fv/Fm 비는 21%, 17% 그리고 5% 감소하였다.

수분 스트레스에 있어서 Cd^{2+} 처리구는 대조구에 비해 2.6배 증가하였으나, Cd^{2+}을 100μM kinetin 및 100μM zeatin과 함께 재배하였을 경우 1.7배 및 1.2배 증가하였으나 200μM zeatin 처리시는 오히려 0.12% 감소하였다. Cd^{2+}수송에 대한 cytokinin의 효과를 보면, Cd^{2+} + kinetin 처리구에서 kinetin은 33% 억제하였으며, 100μM zeatin과 200μM zeatin 처리구에서는 각각 48%와 70% 억제시켰다. 이러한 결과로부터 cytokinin은 Cd^{2+} 축적에 의해 유도된 독성 증상을 뚜렷하게 완화시켜 주었다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 상지대학교 교내 연구비의 지원을 받아서 수행되었음.

참 고 문 헌

1) Chaudri, A. M., F. J. Zhao, S. P. McGrath and A. R. Crosland, 1995, The cadmium content of British wheat grain, J. Environ. Qual., 24, 850-856.
2) Lee, J. S., 2000, 닭의장풀 내 Cd^{2+}의 분포와 생리적 독성, 한국환경생물학회지, 18(1), 63-67.
3) Lee, J. S., 2001, 닭의장풀 내 Cd^{2+} 처리시 Cd^{2+} 흡수와 nonprotein-SH 합성에 미치는 살리실릭산의 영향, 한국환경생물학회지, 19(3), 218- 222.
4) Lee, J. S., 2002, Cd^{2+}에 의한 닭의장풀의 생리적 독성에 salicylic acid가 미치는 영향, 한국환경생물학회지, 20(1), 73-77.
5) Lee, J. S. and H. G. Lee, 2002. 닭의장풀에 Cd^{2+} 처리시 Cd^{2+} 흡수와 생장에 미치는 Ca^{2+}의 영향, 한국환경생물학회지, 20(1), 40-45.
6) Page, A. L., F. T. Bingham and C. Nelson, 1972, Cadmium absorption and growth of various plant species by the treatment of different cadmium concentration, J. Environ. Qual., 1, 288-291.
7) Kim, B. W., 1982, Studies on the effect of heavy metal on the growth of various plants, Korean J. Ecology, 5(4), 176-186.
8) Kim, B. W. and J. S. 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.

9) Rauser, W. E., 1990, Phytochelatins, Annu. Rev. Biochem., 59, 61-86.
10) 이영숙, 2004, 유전공학적 방법을 이용한 환경 정화용 식물개발, 생명현상의 이해를 위한 새로운 접근, 수원대학교 논총, 135, 1027-1039.
11) Taiz, L. and E. Zeiger, 2003, Plant physiology, The Benjamin/Cummings Publishing Co, California USA, 690pp.
12) Holden, M., 1965, Chorophylls, In: Chemistry and Biochemistry of Plant Pigments. Goodwin T. W. (Ed.), Academic press, New York, 461-488pp.
13) Oh, M. H. and C. H. Lee, 1996, Disassembly of chlorophyll-protein complexes in *Arabidopsis thaliana* during dark-induced foliar senescence, J. Plant Biology, 39(4), 301-307.
14) Schreiber, U., 1997, Chlorophyll fluorescence and photosynthetic energy conversion, Walz, Germany, 450pp.
15) Demming, B. and O. Bjorkamn, 1987, Comparison of the effect of excessive high chlorophyll fluorescence (77k) and photon yield of O_2 evolution in leaves of higher plants, Planta, 171, 171-184.
16) Oquist, G., W. S. Chow and J. M. Anderson, 1992, Photoinhibition of photosynthesis represents a mechanism for the long term regulation of photosystem II, Planta, 186, 450-460.