

시금치 葉綠體의 光合成 電子傳達 活性에 미치는 Cd²⁺의 沮害 效果

朴 康 殷 · 鄭 華 淑*
慶北大學校 師範大學 生物教育科

분리한 시금치 엽록체에 Cd²⁺을 처리하였을 때 광계 I에 비해서 광계 II의 활성이 낮은 농도의 Cd²⁺에 의해 억제되었다. 그러므로 Cd²⁺에 의해 1차적으로 광계 II 활성이 저해되었다는 것을 알 수 있다. 광계 II의 전자공여체인 diphenylcarbazide를 첨가했을 때 대조구에 비해 활성이 크게 증가하였다. Cd²⁺ 처리시 Mn²⁺과 Ca²⁺을 외부에서 첨가했을 때 광계 II 활성은 회복되었지만 회복되는 정도가 15%로 낮았다. 50 μM Cd²⁺ 처리구에서 광계 II 활성은 크게 감소하였으나 Fv/Fm는 미소하게 감소하였으며 100 μM Cd²⁺ 처리구에서 Fv/Fm는 크게 감소하였다. 광계 I 활성은 Cd²⁺의 처리 농도가 증가함에 따라 감소하였으나 세척하였을 경우 0.2 mM의 Cd²⁺ 처리구에서 대조구보다 활성이 증가하였으며 농도가 높아짐에 따라 활성의 회복 정도가 컸다.

주요어: 시금치 엽록체, Cd²⁺, 광계 I, 광계 II, 엽록소 형광

Cd²⁺은 대단히 유독하여 식물체에 있어서 물의 이용, 수송, 엽록소 함량, 광합성 그리고 암호흡에 심각한 억제 영향을 준다 (Bazzaz *et al.*, 1974; Strickland *et al.*, 1979; Cataldo *et al.*, 1983; Poschenrieder *et al.*, 1989). Cd²⁺ 이온은 콩과 밀 등의 곡물에서 잎으로 쉽게 수송될 수 있으며(Weigel and Jager, 1980), 식물체의 다른 부분보다 잎에 높은 농도로 축적된다 (Wagner and Yeagan, 1986). Cd²⁺이 광합성 전자전달 활성에 미치는 영향에 대한 많은 연구가 *in vitro*에서 수행되었는데 이들 초기 연구에서는 Cd²⁺이 광계 II의 산화 부위에 영향을 미치며 산소발생중심계를 억제시킨다고 보고하였다(Weigel, 1985). 또한 Cd²⁺은 light-harvesting chlorophyll a/b protein complex II의 구조와 구성을 변화시킨다고 보고된 바 있다 (Krupa, 1987). 광계 II의 활성에 Cd²⁺이 미치는 비슷한 억제 영향은 *in vivo*의 연구에서도 관찰되었는데 이들 연구에서 Cd²⁺은 광계 II 활성에 영향을 미치나 광계 I에는 영향을 주지 못한다고 하였다(Baszynski *et al.*, 1980). Cd²⁺의 억제 부위는 광계 II의 산화 부위라는 것이 일반적으로 받아들여지고 있다 (Singh and Singh, 1987). Cd²⁺은 산소발생중심계의 Mn²⁺, Ca²⁺에 영향을 주어 광계 II의 반응을 억제시킨다는 보고도 있었다(Sheoran and Singh, 1993). 그러나 Krupa(1987)는 Cd²⁺ 처리가 광계 II 활성을 감소시키는 것은 주로 Cd²⁺이 광계 II 근처의 지질환경을 변화시키기 때문이라고 제안했다. 밀 잎의 발달 초기 동안 저농도의 Cd²⁺ 이온을 처리했을 때 광계

I과 광계 II의 1차 광화학반응이 변형되었으며 광계 I보다는 광계 II가 민감하게 반응하였다(Atal *et al.*, 1991). 이와 같이 Cd²⁺이 광합성 전자전달에 미치는 영향은 완전히 밝혀지지 않았으며, 또한 주로 광계 II에 대해 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 Cd²⁺이 광합성 전자전달 활성에 미치는 영향과 세척으로 인한 활성의 회복 정도를 알아보고, 엽록소 형광 변화를 측정하여서 Cd²⁺이 광합성 전자전달 활성변화에 미치는 영향을 밝히고자 하였다.

재료 및 방법

재료 및 처리

시금치(*Spinacia oleracea* L.)를 시장에서 구입하여 싱싱한 어린 잎을 골라 식물 재료로 사용하였으며, 시금치에서 추출한 엽록체에 Cd²⁺을 상온에서 10분간 처리하였다.

엽록체 추출

엽록체 추출은 Obokata(1987)의 방법을 변형하여 시금치의 어린 잎을 냉각한 증류수로 세척한 뒤에 STN buffer(pH 8.0) 140 mL와 1 M ascorbate-Na 1.4 mL를 넣어 냉각시킨 blender에서 20초간 마쇄한 후 2겹의 가아제로 여과하였다. 이 여과액을 300g에서 1분간 원심분리하여 침전물을 버리고 상정액을 다시 600g에서 10분간 원심분리하여 얻은 침전물을

*교신저자: Fax (053) 955-0820

STN buffer(pH 7.8)로 현탁하고 1000 g에서 10분간 원심분리하여 침전된 엽록체를 STN buffer(pH 7.8)로 재현탁하여 엽록체 시료로 사용하였다. 모든 추출과정은 0-4°C에서 행하였다.

Cd²⁺ 처리 및 세척

추출된 엽록체를 50 mM Hepes buffer(pH 7.8, 100 mM sucrose, 2 mM MgCl₂, 10 mM NaCl)로 현탁한 후 CdCl₂ 용액을 농도별로 첨가하여 20°C, 0.7 W·m⁻² 백색광 아래서 10분간 처리하였다. Cd²⁺을 세척하기 위해서는 Cd²⁺ 처리 후 4000 g에서 10분간 원심분리하여 침전된 엽록체를 STN buffer(pH 7.8)로 현탁시켰다.

광합성 활성 측정

광합성의 광계 II와 광계 I의 전자전달 활성을 알아보기 위하여 Clark형의 산소전극을 이용하여 20°C에서 각각 산소 발생량과 소모량을 측정하였다. 광계 I의 전자전달 활성은 50 mM Hepes buffer(pH 7.8, 100 mM sucrose, 2 mM MgCl₂, 10 mM NaCl)와 2 mM methylviologen(MV), 2 mM NaN₃, 1 μM 3-(3,4-dichlorophenyl)-1,1-dimethylurea(DCMU), 0.1 mM 2,6-dichlorophenol-indophenol(DCPIP), 5 mM ascorbate-Na, 2 mM NH₄Cl, 25 μg/mL 엽록소가 포함된 반응액으로 산소 소모량을 측정하였고, 광계 I 활성 측정시 전자공여체로 *N,N,N,N*-tetramethyl-*p*-phenylenediamine(TMPD)을 사용할 때는 DCPIP 대신 반응액에 50 μM TMPD가 되도록 첨가하여 산소 소모량을 측정하였다(Atal *et al.*, 1991). 광계 II의 전자전달 활성은 50 mM Hepes buffer(pH 7.8, 100 mM sucrose, 2 mM MgCl₂, 10 mM NaCl)와 0.5 mM *p*-phenylenediamine, 2 mM K₃[Fe(CN)₆], 0.05% BSA, 2 mM NH₄Cl, 50 μg/mL의 엽록소가 포함된 반응액의 산소 발생량으로 측정하였으며(Critchley, 1981), DCPIP 광환원율에 의한 광계 II의 활성측정은 50 mM Hepes buffer(pH 7.8, 100 mM sucrose, 2 mM MgCl₂, 10 mM NaCl)와 30 μM DCPIP, 10 μg/mL의 엽록소가 포함된 반응액으로 20°C에서 측정하였다(Terashima, 1989). 이 때 엽록소 함량은 Arnon(1949)의 방법에 따라 652 nm에서 80% acetone 추출액의 흡광도를 측정하여 산출하였다. 광계 II 전자 공여체인 diphenylcarbazide(DPC)는 Vernon과 Show(1969)가 사용한 방법을 따랐으며 반응액의 최종 농도는 0.15 mM이 되도록 하였다.

엽록소 형광유도

엽록소 a의 형광은 Fluorometer(H. Walz, Effeltrich, Ger-

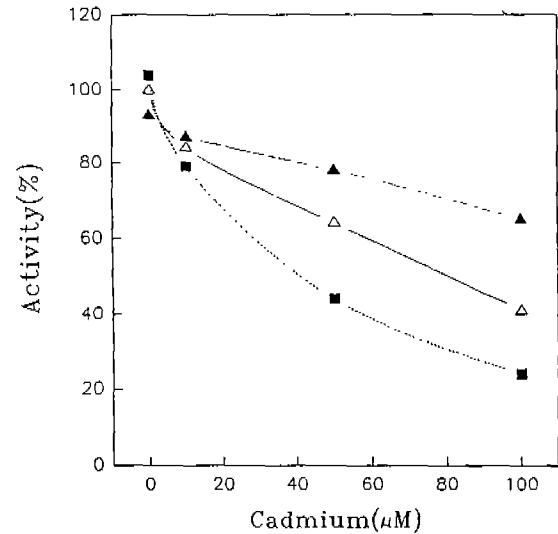


Fig. 1. Effect of Cd²⁺-treatment temperature on the PSII electron transport activity of the chloroplasts isolated from spinach. ▲, 10°C; △, 20°C; ■, 30°C. The value corresponding to 100% was 240 μmolc O₂·mg Chl⁻¹·h⁻¹.

many)를 이용하여 측정하였다. 유도과정은 엽록소 함량이 30 μg/mL인 반응액으로 하여 시료를 5분간 암상태에서 적응시킨 후에 약한 LED(light emitting diode) 광을 조사하여 initial fluorescence(F₀)를 구하였으며, 포화광(3000 μmol·m⁻²·s⁻¹)을 조사하여 maximal fluorescence(F_m)를 구하였다. 그리고 variable fluorescence(F_v)는 F_m-F₀로 계산하였다(Rees *et al.*, 1993).

결과 및 고찰

Cd²⁺이 광계 II 활성에 미치는 영향

시금치에서 추출한 엽록체에 Cd²⁺을 처리할 때, 온도에 따른 광계 II 전자전달 활성 변화는 Fig. 1과 같다. 20°C 대조구의 광계 II 활성을 100%로 할 때 100 μM의 Cd²⁺ 처리구에서 광계 II 활성은 처리온도가 10, 20, 30°C 일 때 각각 28, 59, 80% 감소하여 처리온도가 증가함에 따라 억제 정도가 컸다. 처리 온도가 높을수록 처리 농도 증가에 따른 활성의 감소가 컸다. Briantais 등(1992)도 시금치 엽록체의 틸라코이드 막에서 온도 변화에 따른 전자전달 활성의 변화를 보고하였는데 본 연구의 대조구와 유사한 양상을 보였다. 저온에서는 광계 II 활성의 감소가 작고 고온에서는 활성의 감소가 큰 것으로 보아 저온에서는 엽록체 틸라코이드 막이 Cd²⁺에 대해 비교적 안정하며 온도가 증가함에 따라 저항성이 현저히 낮아진다는 것을 알 수 있다.

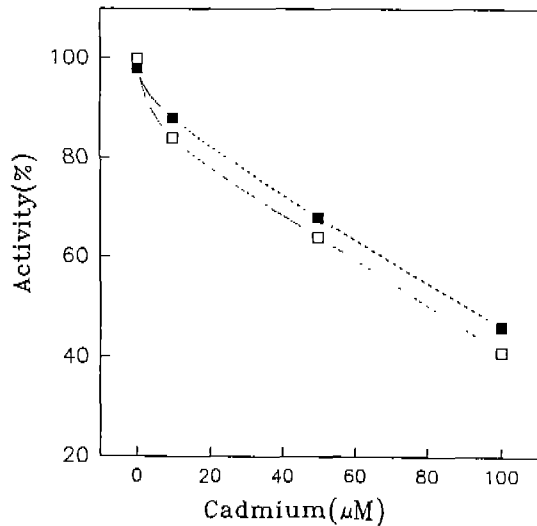


Fig. 2. PSII electron transport activity of Cd²⁺-treated chloroplasts and washed chloroplasts after the treatment of Cd²⁺. □, Cd²⁺ treated chloroplasts; ■, Cd²⁺-treated chloroplasts were washed by centrifuge. The value corresponding to 100% was 240 μmole O₂·mg Chl⁻¹·h⁻¹.

분리한 엽록체에 Cd²⁺을 처리하여 광계 II 활성을 측정할 것과 이것을 원심분리하여 Cd²⁺을 세척한 후 측정할 광계 II 활성 변화는 Fig. 2와 같다. Cd²⁺을 처리하였을 때의 광계 II 활성에 비해 Cd²⁺을 처리한 후 원심분리하여 Cd²⁺을 세척하고 재현탁했을 때의 광계 II 활성이 고농도에서 약 5% 회복되었다. 그러므로 Cd²⁺ 처리 후 세척으로 인한 활성 회복은 미미하였다.

분리한 엽록체에 50 μM Cd²⁺을 처리한 후 인공 전자공여체로 DPC를 첨가하여 광계 II 활성 변화를 측정하였다(Table 1). 엽록체에 50 μM Cd²⁺을 처리하였을 때 광계 II 활성은 53%로 나타났으나 이 엽록체 반응액에 광계 II 인공 전자공여체인 DPC를 0.15 mM이 되도록 첨가하여 DCPIP 환원율을 측정하였을 때는 활성이 97%로 회복되었고, 대조구에 DPC를 첨가했을 때의 광계 II 활성은 30% 증가한 데 비해 50 μM Cd²⁺ 처리구에 DPC를 첨가했을 때는 50 μM Cd²⁺ 처리구보다 44%나 증가하였다. Singh과 Singh(1987)도 Cd²⁺의 억제 부위는 광계 II의 산화부위라고 한 바 있다. 이것으로 Cd²⁺의 1차적인 억제 부위는 광계 II의 산화부위 중 물 분해반응이 일어나는 곳이라는 것을 알 수 있다. 따라서 Cd²⁺이 광계 II의 물 분해반응에 관여하는 Ca²⁺과 Mn²⁺에 미치는 영향을 알아보기 위해 50 μM Cd²⁺ 처리시 엽록체 반응액에 Mn²⁺과 Ca²⁺의 농도를 달리하여 실험한 결과 각각 1 μM, 10 mM일 때 활성이 최대로 회복되었고(데이터에는 없음), 이 때 광계 II 활성은 각각 10%와 15% 보호되었다. 또한 엽록체 틸라코이드막을 안정화시키는 BSA를 0.5% 되도록 첨가했을 때 광계

Table 1. Effect of DPC, Mn²⁺, Ca²⁺ and BSA on the DCPIP photoreduction activity of chloroplasts treated with Cd²⁺

Treatment Cd ²⁺ (μM)	Addition	DCPIP photoreduction (μmole·mg Chl ⁻¹ ·h ⁻¹) [%]
Control	— ^a	120 [100]
50	—	64 [53]
Control	0.15 mM DPC	156 [130]
50	0.15 mM DPC	116 [97]
50	1 μM Mn ²⁺	75 [63]
50	10 mM Ca ²⁺	82 [68]
50	0.5% BSA	131 [109]

Mn²⁺, Mn(CH₃COO)₂·4H₂O; Ca²⁺, Ca(CH₃COO)₂·H₂O.
^aMeans omitted from reaction mixture.

Table 2. Chlorophyll fluorescence characteristics of chloroplasts treated with Cd²⁺

Treatment Cd ²⁺ (μM)	Fluorescence parameters (relative units)			
	F _o	F _v	F _m	F _v /F _m
Control	1.60	5.40	7.00	0.771 (100%)
10	1.60	5.20	6.80	0.764 (99%)
50	1.65	4.85	6.50	0.746 (97%)
100	1.75	2.95	4.70	0.628 (82%)

II 활성은 56%나 보호되었다(Table 1). Ghanotakis 등(1987)은 광계 II에서 물 분해반응이 일어나기 위해서는 광계 II에 관계된 단백질 이 외에도 Mn²⁺, Cl⁻ 그리고 Ca²⁺이 필요하다고 보고하였다. 본 실험에 사용한 반응액인 HEPES buffer에 10 mM의 NaCl이 포함되어 있고 또한 CdCl₂에도 Cl⁻가 포함되어 있으므로 Cl⁻에 의한 영향은 배제하였다. Rashid 등(1991)은 Mn²⁺과 Ca²⁺ 소실로 인해 광계 II 산화부위가 불활성화되었을 때 외부에서 Mn²⁺과 Ca²⁺을 첨가하면 활성이 회복된다고 보고한 바 있다. 또한 Baszynski 등(1980)의 실험에서도 Cd²⁺이 산소발생중심계의 Mn²⁺에 영향을 주어 광계 II 반응이 억제된다는 보고와 비슷한 결과가 나타났지만 Cd²⁺ 처리로 억제된 활성이 Ca²⁺ 또는 Mn²⁺을 첨가해도 약 15% 정도 밖에 회복되지 않는 것으로 보아 Ca²⁺과 Mn²⁺ 이외의 다른 요인 또한 억제에 관계함을 알 수 있다.

Cd²⁺이 엽록소 형광에 미치는 영향

Cd²⁺을 처리하여 엽록소에서 방출되는 형광을 측정하였다(Table 2). 들뜬 에너지가 광계 II의 반응중심으로 이동하기 전에 광계 II 안테나의 들뜬 엽록소 분자들이 발하는 형광인 F_o는 Q_A가 완전 산화상태에 있을 정도의 미약한 유도광을

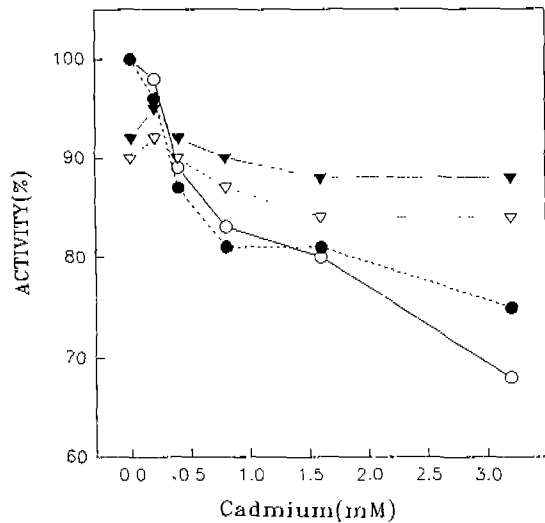


Fig. 3. Comparison of PSI electron transport activity between DCPIPH₂ and TMPDH₂. They were added as electron donor in the reaction medium. ○, chloroplasts were treated Cd²⁺ and then DCPIPH₂ was added as electron donor; ▽, Cd²⁺-treated chloroplasts were washed by centrifuge and DCPIPH₂ was added as electron donor; ●, chloroplasts were treated Cd²⁺ and then TMPDH₂ was added as electron donor; ▼, Cd²⁺-treated chloroplasts were washed by centrifuge and TMPDH₂ was added as electron donor. The values corresponding to 100% oxygen consumption activity (PSI) of DCPIPH₂ and TMPDH₂ were 315 and 345 μmole O₂·mg Chl⁻¹·h⁻¹, respectively.

조사함으로써 나타나는데(Harris and Heber, 1993) Fo값은 저농도인 10 μM Cd²⁺ 처리하였을 때는 변화가 없었으나 그 이상의 농도에서는 증가하였다. 이것으로 보아 50 μM 이상의 Cd²⁺ 처리구에서는 광계 II 반응중심으로의 들뜬 에너지 전달이 억제됨을 알 수 있다. 50 μM Cd²⁺ 처리구에서 광계 II 활성은 47%나 감소한 반면, 들뜬 에너지가 광계 II 안테나에 의해 수확된 후 광계 II 반응중심으로 전달되어 광화학반응에 이용되는 효율을 의미하는 Fv/Fm는(Bolhàr-Nordenkamp and Öquist, 1993) 3% 감소하였다. 그러나 100 μM Cd²⁺ 처리농도에서는 산소발생 활성이 59% 감소하였으며 Fv/Fm는 18%나 감소하였다. 이것으로 50 μM 이하의 Cd²⁺ 처리농도에서는 광계 II의 산화부위가 억제되며 100 μM Cd²⁺ 처리농도에서는 광계 II 반응중심이 불활성화되거나 광계 II 환원부위도 억제된다는 것을 알 수 있지만 앞으로 형광 소멸요인 등을 분석하여야 될 것으로 사료된다.

Cd²⁺이 광계 I 활성에 미치는 영향

Cd²⁺이 광합성 전자전달 활성에 미치는 영향에 대한 대부

분의 선행 연구가 광계 II를 중심으로 수행되었기 때문에 광계 I에 대한 억제 기작에 대해서는 연구가 미비하였다. 그러므로 본 실험에서는 Cd²⁺이 광계 I에 미치는 영향을 알아보기 위해 다음과 같은 실험을 하였다. Cd²⁺을 처리한 것과 Cd²⁺ 처리 후 원심분리하여 Cd²⁺을 세척해서 재현탁한 것에 광계 I 전자공여체인 DCPIPH₂와 TMPDH₂를 사용하여 광계 I 활성을 측정하였다(Fig. 3). 분리한 시금치 엽록체에 Cd²⁺을 농도별로 처리하여 측정한 광계 I 활성의 변화는 전자공여체로 DCPIPH₂ 또는 TMPDH₂를 사용했을 때 두 경우 다 활성의 감소가 비슷하였다. 그러나 Cd²⁺ 처리된 엽록체를 원심분리하여 세척한 후 활성을 측정하면 전자공여체로 DCPIPH₂를 사용한 것보다 TMPDH₂를 사용한 것의 광계 I 활성이 높게 나타났다. Baszynski 등(1980)은 *in vivo*에서 Cd²⁺이 광계 II 활성은 억제하지만 광계 I 활성에는 영향을 주지 못한다고 한 바 있다. *In vitro*에서 행한 본 실험에서도 광계 II 활성이 41%의 감소를 나타내는 100 μM Cd²⁺ 보다 높은 200 μM Cd²⁺ 처리구에서도 광계 I 활성은 미소한 감소만 관찰되었다. 또한 분리한 엽록체에 Cd²⁺을 처리하고 원심분리하여 Cd²⁺을 세척한 후 재현탁하여 각 광계의 활성을 측정했을 때, 광계 II 활성은 100 μM Cd²⁺ 처리구에서 약 5% 회복되었지만 광계 I 활성은 3.2 mM Cd²⁺ 처리구에서 약 16%나 회복되었다. 그러므로 Cd²⁺ 처리된 엽록체 틸라코이드 막의 광계 I에 Cd²⁺이 미치는 억제 영향은 세척에 의하여 Cd²⁺를 제거함으로써 크게 감소한다는 것을 알 수 있다. Sheoran과 Singh(1993)은 *in vivo*에서 중금속을 처리하면 광계 II 활성이 억제되어 광계 II 광수집 복합체로부터 광계 I로의 에너지 전이가 증가되어 광계 I 활성이 증가된다고 보고한 바 있다. 그러나 본 실험에서 분리한 엽록체에 Cd²⁺을 처리하고 원심분리하여 Cd²⁺을 세척한 후 재현탁하여 광계 I 활성을 측정했을 때 대조구보다 활성이 높은 것을 설명하기 위해서는 앞으로 더 연구되어야 될 것으로 사료된다.

이상의 연구에서 Cd²⁺은 50 μM 이하의 농도에서 광계 II 산화부위를 주로 억제하며, 100 μM 처리구에서는 광계 II 반응중심 또는 광계 II 환원부위도 억제한 것으로 생각된다. Cd²⁺을 처리하고 원심분리하여 Cd²⁺을 제거한 후 측정된 광계 I 활성은 3.2 mM 처리구에서 16%나 회복되었다.

인 용 문 헌

- Arnon, D. 1949. Copper enzymes in isolated in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.* 24: 1-15.
 Atal, N., P.P. Saradhi and P. Mohanty. 1991. Inhibition of the chloroplast photochemical reactions by treatment of wheat seedling with low concentrations of cadmium: Analysis of electron transport activities and

- changes in fluorescence yield. *Plant Cell Physiol.* **32**: 943-951.
- Basznyi, T., L. Wajda, M. Król, D. Wolińska, Z. Krupa, and A. Tukendorf.** 1980. Photosynthetic activities of cadmium-treated tomato plants. *Physiol. Plant.* **48**: 365-370.
- Bazzaz, F.A., G.L. Rolfe, and R.W. Carlson.** 1974. Effect of Cd on photosynthesis and transpiration of excised leaves of corn and sunflower. *Physiol. Plant.* **32**: 373-376.
- Bolhár-Nordenkamp, H.R. and G. Öquist.** 1993. Chlorophyll fluorescence as a tool in photosynthesis research. In, *Photosynthesis and Production in a Changing Environment*. D.O. Hall, J.M.O. Scurlock, H.R. Bolhár-Nordenkamp, R.C. Leegood and S.P. Long (eds.). Chapman & Hall, London. pp. 193-206.
- Briantais, J.M., J.M. Ducruet, M. Hodges and G.H. Krause.** 1992. The effects of low temperature acclimation and photoinhibitory treatments on photosystem 2 studied by thermoluminescence and fluorescence decay kinetics. *Photosynth. Res.* **31**: 1-10.
- Cataldo, D.A., T.R. Garland and R.E. Wildung.** 1983. Cadmium uptake kinetics in intact soybean plants. *Plant Physiol.* **73**: 844-848.
- Critchley, C.** 1981. Studies on the mechanism of photo-inhibition in higher plants. I. Effects of high light intensity on chloroplast activities in cucumber adapted to low light. *Plant Physiol.* **67**: 1161-1165.
- Ghanotakis D.F., D.M. Demetriou and C.F. Yocum.** 1987. Isolation and characterization of an oxygen-evolving photosystem II reaction center core preparation and a 28 kDa Chl-a-binding protein. *Biochim. Biophys. Acta* **891**: 15-21.
- Harris, G.C. and U. Heber.** 1993. Effects of anaerobiosis on chlorophyll fluorescence yield in spinach (*Spinacia oleracea*) leaf discs. *Plant Physiol.* **101**: 1169-1173.
- Krupa, Z.** 1987. Cadmium-induced changes in the composition and structure of the light-harvesting chlorophyll a/b protein complex II in radish cotyledons. *Physiol. Plant.* **73**: 518-524.
- Obokata, J.** 1987. Synthesis and assembly of the polypeptides of photosystem I and II in isolated etiochloroplasts of wheat. *Plant Physiol.* **84**: 535-540.
- Poschenrieder, C., B. Gunse and J. Barcelo.** 1989. Influence of cadmium on water relation, stomatal resistance, and abscisic acid content in expanding bean leaves. *Plant Physiol.* **90**: 1365-1371.
- Rashid, A., M. Bernier, L. Pazdernick, and R. Carpentier.** 1991. Interaction of Zn²⁺ with the donor side of photosystem II. *Photosynth. Res.* **30**: 123-130.
- Rees, D., P. Horton and U. Schreiber.** 1993. The relationship between photosystem II intrinsic quantum yield and millisecond luminescence in thylakoids. *Photosynth. Res.* **37**: 131-138.
- Sheoran and Singh.** 1993. Effect of heavy metals on photosynthesis in higher plants. In, *Photosynthesis: Photo-reactions to Plant Productivity*. Y. Abrol, P. Mohanty and Govindjee (eds.). Kluwer, Dordrecht. pp. 451-468.
- Singh, D.P. and S.P. Singh.** 1987. Action of heavy metals on Hill activity and O₂ evolution in *Anacystis nidulans*. *Plant Physiol.* **83**: 12-14.
- Strickland, R.C., W.R. Chaney and R.J. Lamoreaux.** 1979. Cadmium uptake by *Pinus resinosa* ait. pollen and the effect on cation release and membrane permeability. *Plant Physiol.* **64**: 366-370.
- Terashima, I., L.K. Huang and C.B. Osmond.** 1989. Effects of leaf chilling on thylakoid functions, measured at room temperature, in *Cucumis sativus* L. and *Oryza sativa* L. *Plant Cell Physiol.* **30**: 841-850.
- Vernon, L.P. and E.R. Show.** 1969. Photoreduction of 2,6-dichlorophenol-indophenol by diphenylcarbazide. A photosystem II reaction catalyzed by tris-washed chloroplasts and subchloroplast fragment. *Plant Physiol.* **44**: 1645-1649.
- Wagner, G.J. and R. Yeagan.** 1986. Variation in cadmium accumulation potential and tissue distribution of cadmium in tobacco. *Plant Physiol.* **82**: 274-279.
- Weigel, H.J.** 1985. The effect of Cd²⁺ on photosynthetic reactions of mesophyll protoplasts. *Physiol. Plant.* **63**: 192-200.
- Weigel, H.J. and H.J. Jäger.** 1980. Subcellular distribution and chemical form of cadmium in bean plants. *Plant Physiol.* **65**: 480-482.

Inhibitory Effect of Cd²⁺ on Photosynthetic Electron Transport Activity in Isolated Spinach Chloroplasts

Park, Kang Eun and Hwa Sook Chung*

Department of Biology Education, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

ABSTRACT

The effect of Cd²⁺ on the electron transport rate of PSI and PSII was investigated in isolated spinach chloroplasts. In photosystem II, the rate of electron transport was decreased as the concentration of Cd²⁺ was increased from 1 to 100 μM. The inhibitory effect of Cd²⁺ was reduced when diphenylcarbazide was added to the reaction medium, indicating that Cd²⁺ affects primarily PSII oxygen evolving complexes of thylakoid membrane. The inhibitory effect of Cd²⁺ was reduced when Mn²⁺ and Ca²⁺ were added to the reaction medium, but the inhibitory effect was not fully relieved. Although the activity of PSII was decreased significantly by the treatment of 50 μM Cd²⁺, Fv/Fm was decreased slightly. However, the treatment of 100 μM Cd²⁺ resulted in the marked decrease of Fv/Fm. In photosystem I, the rate of electron transport decreased as the concentration of Cd²⁺ was increased from 0.2 to 3.2 mM. The inhibitory effect of Cd²⁺ was decreased when the chloroplast treated with Cd²⁺ was washed by centrifugation.

Key words : spinach chloroplast, Cd²⁺, PSI, PSII, chlorophyll fluorescence

*Corresponding author: Fax +82-53-955-0820