

## 저선량 $\gamma$ -선 조사가 고추의 광합성과 광 스트레스 경감에 미치는 효과

이혜연 · 김재성 · 백명화 · 박순철 · 박연일<sup>1)</sup>

한국원자력연구소 동위원소 방사선응용연구팀, <sup>1)</sup>충남대학교 생물학과  
(2002년 1월 15일 접수, 2002년 3월 25일 수리)

### Effects of Low Dose $\gamma$ -Radiation on Photosynthesis of Red Pepper (*Capsicum annuum* L.) and the Reduction of Photoinhibition

Hae-Youn Lee, Jae-Sung Kim, Myung-Hwa Baek, Soon-Chul Park, and Youn-Il Park<sup>1)</sup> (Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-353, Korea, <sup>1)</sup>Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea)

**ABSTRACT:** The effect of low dose  $\gamma$  radiation on photosynthesis and the reduction of photoinhibition in red pepper plant was investigated. The seedling height, leaf width and leaf length of pepper were stimulated in plants grown from seeds irradiated with the low dose of 4 Gy. The O<sub>2</sub> evolution in the 4 Gy irradiation group was 1.5 times greater than in the control. To investigate the effect of low dose  $\gamma$  radiation on response to high light stress, photoinhibition was induced in leaves of pepper by illumination of high light (900  $\mu$  mol/m<sup>2</sup>/s). Pmax was decreased with increasing illumination time by 20% in the control, while hardly decreased in the 4 Gy irradiation group. The photochemical yield of PSII, estimated as Fv/Fm, was decreased with increasing illumination time by 50% after 4 hours while Fo did not change. However, Fv/Fm in the 4 Gy irradiation group was decreased by 37% of inhibition, indicating that the photoinhibition was decreased by the low dose  $\gamma$  radiation. Changes in the effective quantum yield of PSII,  $\Phi_{PSII}$ , and 1/Fo-1/Fm, a measure of the rate constant of excitation trapping by the PSII reaction center, showed similar pattern to Fv/Fm. And NPQ was decreased after photoinhibitory treatment, showing no difference between the control and the 4 Gy irradiation group. These results showed the positive effect of low dose  $\gamma$  radiation on the seedling growth and the reduction of photoinhibition.

**Key words:** low dose  $\gamma$ -radiation, pepper, photosynthesis, photoinhibition

### 서 론

인간을 포함한 지구상의 모든 생물은 대기와 지구 등에서 방출되는 자연방사선과 의학적인 목적으로 사용되는 인공 방사성 핵종 등으로부터 방출되는 방사선에 노출되어 있다. 따라서 인간 생활에 위협이 되고 있는 방사선에 대한 여러 가지 효과가 동·식물을 대상으로 오랜 기간 연구되어져 왔다<sup>1)</sup>. 고선량의 경우에는 세포벽, 세포막 그리고 단백질<sup>2)</sup>, 핵산 등에 영향을 미치고<sup>3)</sup>, 또한 효소활성<sup>4,5)</sup>, 에틸렌 생성의 증가 및 호흡의 증가<sup>7,11)</sup> 등의 식물의 생리적 활성에 영향을 주는 것으로 나타났다. 한편, 저선량의 방사선을 식물의 종자나 유식물에 조사하였을 경우 대조구에 비해 발아율, 생장율, 장기 개화 유도, 발근력 증진, 수량증가 등이 관찰되었다<sup>12,13)</sup>. 이러한 저선량 방사선의 자극 효과는 벼, 콩, 들깨 등의 곡물류 등에

서 연구되어져 왔으며<sup>14,15)</sup>, 불리한 환경 조건에서 방사선을 처리하지 않은 대조구에 비해 저선량이 조사된 작물의 발아율과 병에 대한 저항성이 증가된다는 보고도 있다<sup>16,17)</sup>. Kim 등<sup>18)</sup>도 둑은 배추, 참파<sup>19)</sup>, 토마토<sup>20)</sup>, 옥수수<sup>21)</sup>, 땅콩<sup>22)</sup> 등 다양한 품종에 저선량의 감마선을 조사하여 peroxidase (POD)나 catalase (CAT)등의 항산화 효소 활성의 증가에 따른 발아율과 생육의 증가를 관찰하였다. 이러한 저선량 방사선에 의한 생물의 유익한 효과는 일반적인 hormesis개념과 일치하여 방사선 hormesis에 관해 많은 연구자들이 이론을 확립시키기 위하여 많은 연구를 진행하고 있다. 그러나 지금까지의 식물과 방사선과의 관계가 식물 육종 수단으로 방사선을 식물체에 처리하는 차원에서 이용되어져 왔을 뿐 환경 스트레스의 개념으로 식물체나 식물 배양 세포에 대한 방사선 내성 기구를 연구한 예는 드물다. 본 실험에서는 일차적으로 저선량  $\gamma$  선 조사에 따른 고추 생육의 hormesis를 광합성 수행능과 연계하여 조사하였다. 다음으로 자연상태의 여러 환경 스트레스 조건 (저온, 고온, 수분 스트레스 등)에서 식물체가 과다한 양

\*연락처:

Tel: +82-42-868-8072 Fax: +82-42-868-8061

E-mail: jskim8@naver.kaeri.re.kr

의 빛에 노출되면 광합성 기구가 손상되고 결국에는 생산성이 감소 (photoinhibition)되므로 무조사구와 저선량  $\gamma$ 선이 조사된 고추에 광저해를 유도하여 저선량  $\gamma$ 선 조사가 광 스트레스에 대한 저해를 감소시키는지를 확인하였다.

## 재료 및 방법

### 시험 재료 및 방사선조사

시험용 고추 (*Capsicum annuum* L.)는 농우바이오에서 96년 중국에서 생산하여 실온에서 저장한 태양 품종의 종자를 분양 받았다. 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설 ( $^{60}\text{Co}$ )을 이용하여  $\gamma$ 선 4 Gy를 건조종자에 직접 조사하고 방사선 무조사구와 비교하였다. 조사선량율은 Fricke dosimeter로 측정하였다.

### 온실재배실험

방사선 조사 다음날 종자 100립을 배양토와 모래가 1:1로 충진된 직경이 15 cm인 pot에 20립씩 5번복으로 파종하여 유리온실에서 재배하면서 발아율을 조사하였고 30~40일 동안 자란 고추의 초장을 조사한 후 제 3엽을 잘라 지름이 1.5 cm 인 코르크 보러로 원모양의 잎절편을 낸 후 실험에 사용하였다.

### 광저해 처리

일정한 온도 (25°C)를 유지할 수 있는 아크릴통에 100 mL의 중류수를 넣은 후 원판 모양의 잎절편을 띄웠다. 광처리로 인한 열을 차단하기 위하여 수돗물이 흐르는 원통형의 유리수조 ( $\phi$  15 cm, 높이 15.5 cm)를 아크릴통 위에 올려놓았다. 광저해 처리를 위한 광원으로는 텅스텐 할로겐 램프 (Itami Protex Co. Ltd., Japan)를 사용하였으며 900  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광에서 0~6시간 동안 광저해를 유도하였다.

### 엽록소 형광 측정

엽록소 형광은 Xe-PAM flurometer (Heinz Walz, Effeltrich, Germany)를 이용하여 측정하였다. 광저해 유도 후 잎절편을 잎 디스크 전극 chamber안에서 30분 동안 암 적응시킨 후 Fo (반응 중심이 열려있을 때의 형광)와 Fm (암 적응 후 최대 형광)을 측정하였다. 일정 형광 측정광은 xenon-measuring flash lamp를 통하여 조사하였고 (0.5  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ), actinic light (600  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) 와 saturation light (3700  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )로는 main control unit에 의해 조절되는 actinic-/saturation light unit (XE-AL)을 통하여 조사하였다. 엽록소 형광 소멸은 actinic light 조건에서 잎절편이 지속적으로 광합성을 수행하는 동안 포화광을 조사하여 분석하였다. 광합성이 수행되는 동안 포화광을 가함으로써 광계II의 환원 정도를 분석할 수 있다<sup>23)</sup>. 비광화학 소멸 계수는 Schreiber 등<sup>24)</sup>의 정의에 따라 계산하였다. 환원되어 있던 Q<sub>A</sub>가 산화되면서 엽록소 형광이 감소하는 성분을 광화학 소멸 (photochemical quenching, qQ)이라 하고, 틸라코이드막의 에너지화에 의한 소멸을 에너지

의존성 소멸 (energy-dependent quenching, qE), 광계II 복합체의 광저해에 따른 소멸을 광저해 소멸 (photoinhibitory quenching, qI)이라 하며, 이때 qE와 qI를 함께 비광화학 소멸 (non-photochemical quenching, NPQ)이라 한다<sup>25-28)</sup>.

$$\text{NPQ (nonphotochemical quenching)} = (\text{Fm}' - \text{Fm}) / \text{Fm}'$$

$$\Phi_{\text{PSII}} (\text{effective quantum yield of PSII}) = (\text{Fm}' - \text{F}) / \text{Fm}'$$

Fm = maximal fluorescence (dark), 암상태에서 모든 광계II 반응 중심이 닫혀있을 때의 최대 형광

F = actual fluorescence, 광합성이 유도되고 있는 동안의 실제 형광

F'm = maximal fluorescence (light), 빛이 있는 상태에서 모든 광계II 반응 중심이 닫혀 있을 때의 최대 형광

### 엽록소 정량

25 mM HEPES가 들어있는 80% 아세톤 완충용액을 사용하여 잎으로부터 엽록소를 추출하였고 Porra 등<sup>29)</sup>의 방법에 의하여 총 엽록소량을 계산하였다.

$$\text{Chls a + b} = 19.54A_{646.6} + 8.29A_{663.6}$$

### 산소 발생 측정

산소 발생은 잎절편을 Hansatech 산소 전극 chamber, Model LD2 (Hansatech Instrument Ltd., King's Lynn, Norfolk, U.K.)에 넣어 25°C 기체 상태에서 측정하였다. 광합성을 위한 기질로 사용되는 이산화탄소는 1 M carbonate/bicarbonate 완충용액 (pH 9)을 스푼지에 적셔 공급하였다<sup>30)</sup>. Pmax는 1000  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 에서 측정하였으며 낮은 광에서의 광합성율은 neutral density filters를 사용하여 조절하였다.

## 결과 및 고찰

### 저선량 $\gamma$ 선 조사에 의한 고추 초기 생육

$\gamma$ 선이 조사된 종자로부터 자란 고추의 생육변화를 조사하였다. 저선량  $\gamma$ 선을 조사하여 온실에서 재배한 고추 종자의 발아율은 Table 1에서 보는 바와 같이 대조구와 4 Gy 조사구 모두 비슷하게 90% 정도로 양호하였으며  $\gamma$ 선 조사에 따른 어떤 차이를 보이지 않았다. 파종 후 30일이 지난 고추 식물의 높이는 대조구의 경우 17 cm인 정도에 비해 4 Gy 조사구는 대략 20 cm정도로 대조구에 비해 대략 10% 정도 증가하는 것으로 나타났다 (Table 1). 엽폭은 대조구의 경우 3.6 cm이었으나 4 Gy 조사구는 4.4 cm 정도로 대조구에 비해 대략 20% 정도의 증가를 볼 수 있었으며 (Table 1), 엽장의 경우도 4 Gy 조사구가 대조구에 비해 10% 정도 증가되는 것을 볼 수 있었다 (Table 1). 저선량 방사선의 자극효과는 다양한 품종과 환경상태에서 진행되어져 왔는데 그 예로 Luckey<sup>12)</sup>와 Miller and Miller<sup>13)</sup>는 작물종자에 저선량  $\gamma$ 선을 조사하여 초기 생육 촉진과 수량증가를 관찰하였고, Izvorska<sup>31)</sup>는 고추 종자에 저선량의  $\gamma$ 선을 조사했을 때 생육이 촉진되고 수량이 증가하는

Table 1. Growth response of pepper developed from seeds irradiated with different doses of V-radiation

Traits	Irradiation dose (Gy)	
	0	4
Germination rate (%)	92.0 ± 2.0 <sup>†</sup>	87 ± 3.4
Seedling Height (cm)	17.8 ± 0.2	20 ± 0.6
Leaf Width (cm)	3.60 ± 0.2	4.4 ± 0.3
Leaf Length (cm)	7.00 ± 0.0	7.9 ± 0.2
Chl a/b	2.82 ± 0.2	3.11 ± 0.1
Chl Content ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )	308 ± 16	345 ± 24

<sup>†</sup> Mean ± standard error(n=3).

것을 보고하였으며 Kim 등<sup>21)</sup>도 옥수수 재래종, 대두<sup>32)</sup>, 고추<sup>33)</sup> 종자에 V선을 조사하여 초기 생육과 수량을 조사한 결과 저선량의 V선 조사에 의해 종자 발아 및 초기 생육이 촉진되는 것을 관찰하였다. 특히 고추의 경우 0, 4, 8, 20, 50 Gy를 조사한 선량 중 4 Gy, 8 Gy, 20 Gy의 선량에서 생육 촉진이 뚜렷하게 관찰되었으며 후속 고선량에 대한 내성 실험에서도 4 Gy 조사구에서 고추의 내성이 대조구에 비해 증가하는 것으로 나타났다<sup>33)</sup>. Koepp 와 Kramer<sup>34)</sup>는 2 Gy와 10 Gy의 V선이 조사된 옥수수의 발아율과 초기 생육이 증가되는 것을 관찰하였고 또한 CO<sub>2</sub> 가스 교환을 통해 측정한 광합성율이 증가되는 것을 관찰하였다. 이들은 종자에 투과된 저선량의 V선이 지베렐린/앱시스산과 같은 식물 호르몬의 평형에 변화를 일으켜 발아의 대사과정의 초기에 관여한 뒤 식물체내의 생리적인 과정을 촉진시키고 그 결과 광합성이 증가된다고 보고하였다.

다음으로 저선량 V선을 조사하여 엽록소 함량의 변화를 분석하였다. 총 엽록소 양은 대조구가 308  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ 인 반면 4 Gy 조사구의 엽록소 양은 345  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ 로 12% 증가하였다 (Table 1). 엽록소 a/b의 비는 대조구의 경우 2.8이었고 4 Gy 조사구는 3.1이었다 (Table 1). 이러한 결과들을 통해 저선량 V선 조사에 의해 엽록소 함량이 증가된다는 것을 알 수 있었으며 Lee 등<sup>35)</sup>도 고추에 저선량 V선을 조사하여 총 엽록소 함량을 조사한 결과 대조구의 함량이 36.68임에 비해 4 Gy와 8 Gy 조사구에서는 49.82와 50.52로 높은 엽록소 함량을 관찰하였다. Anderson 등<sup>36)</sup>은 Chl a/b 와 총 엽록소 함량, 텔라코이드막을 구성하고 있는 구성 성분, 그리고 광합성 활성과의 관계를 조사한 결과 엽록소 a/b 가 증가할수록 광합성 기구의 구성성분과 광합성능이 증가하는 것을 관찰하였고 파라미터간에 밀접한 상관관계가 있다고 보고했다.

### 산소 발생

고추 잎에서 광자선속밀도 (photon fluence rate, PFR)에 따른 광합성 특성을 조사하기 위하여 광량에 따른 산소발생을 조사하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 대조구와 4 Gy의 V선을 조사한 고추 사이에 별로 차이가 없는 것으로 나타났다.

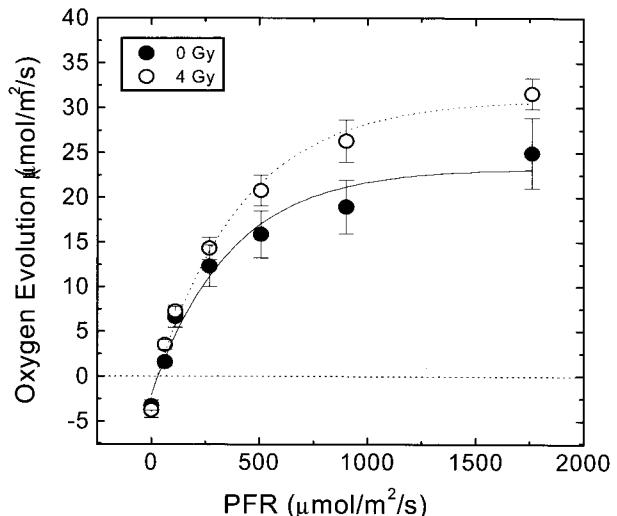
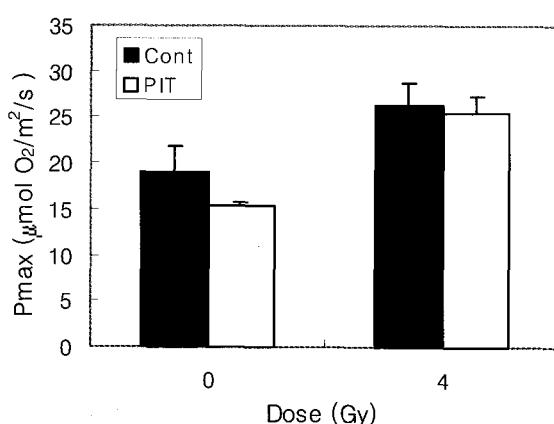


Fig. 1. Change in the O<sub>2</sub> evolution in pepper leaf discs as a function of photon fluence rate (PFR). ●, Control ; ○, 4 Gy treatment.

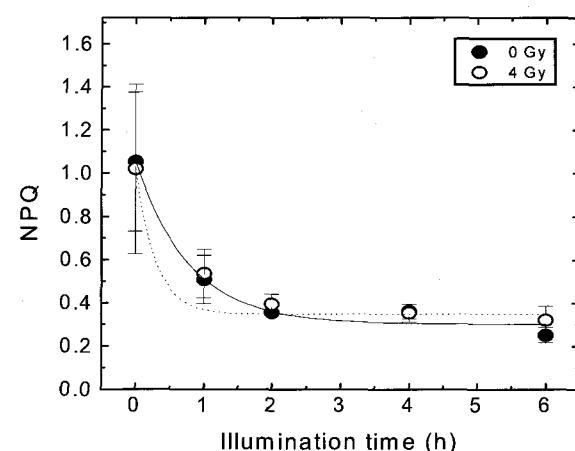
V선이 조사된 고추의 산소 발생이 1000  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광량에서 포화되는 것으로 나타났다. 포화광에서 각각의 산소 발생은 대조구의 경우 16  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , 4 Gy 조사구는 25  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 대조구에 비해 1.5배정도 높은 것으로 나타났다 (Fig. 1). 호흡률의 경우 대조구는 3.3  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , 4 Gy 조사구는 3.8  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 저선량 V선이 조사되었을 때 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 1). 저선량 방사선 조사에 의해 당근의 광합성과 핵산 합성의 증가<sup>37)</sup>, 호밀<sup>38)</sup>과 메밀<sup>39)</sup>의 수량 및 광합성이 증가되는 것이 관찰되었다. 본 실험에서도 산소 발생율을 측정한 결과 저선량 V선 조사에 의해 고추의 광합성 능이 증가되는 것을 알 수 있었다. 반면, 제한된 낮은 광량에서는 변화하는 광량에 따른 산소 발생의 차이가 대조구나 4 Gy의 V선을 조사한 고추 사이에 별로 차이가 없는 것으로 나타났다.

### 광저해에 따른 산소발생의 변화

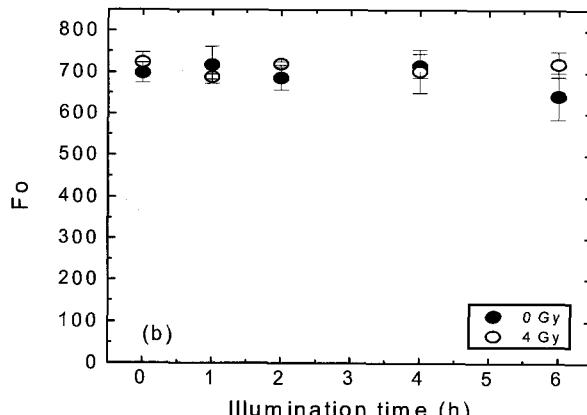
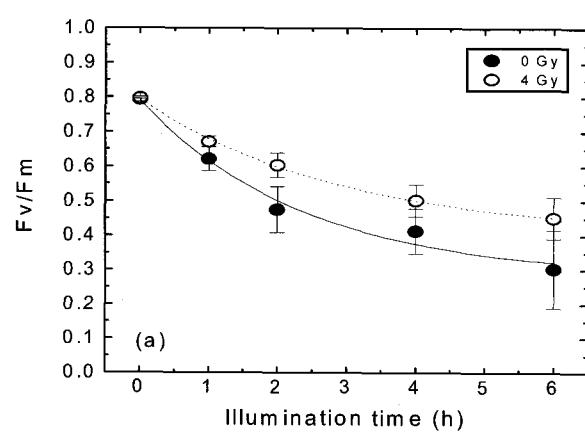
광 스트레스에 대한 저선량 V선이 조사된 고추의 반응 변화를 알아보기 위하여 대조구와 저선량 V선이 조사된 고추에서 Pmax를 조사하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 대조구와 4 Gy의 V선이 조사된 고추의 산소 발생을 조사한 결과 대조구는 18.9  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  이었고 4 Gy 조사구에서는 26.3  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  였다. 다음으로 900  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 에서 4시간 동안 광저해를 유도했을 때 대조구의 경우 산소 발생이 15.4  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  으로 20%정도 감소되는 반면, 4 Gy 조사구는 25.5  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 광 스트레스에 의해 3% 정도의 감소를 보였다 (Fig. 2). Grisenko 와 Mazhara<sup>40)</sup> 등은 옥수수에 저선량을 조사한 후 감염에 대한 저항력이 증대된 것을 관찰하였고, 콩과 식물에서 한발에 대한 저항성 증가도 보고하였다. 본 실험의 결과를 통해 저선량 V선 처리가 고추의 광 스트레스에 대한 저해를 감소시키는 것을 알 수 있었다.



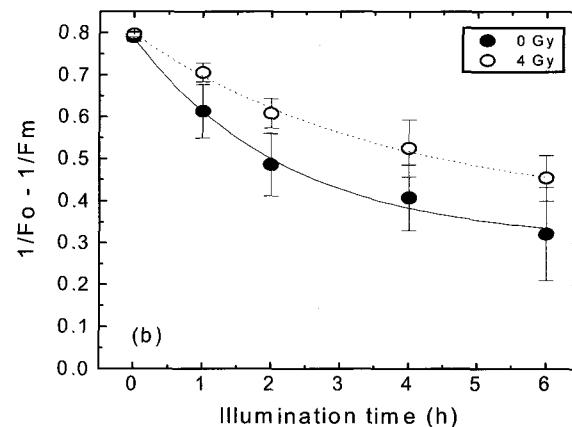
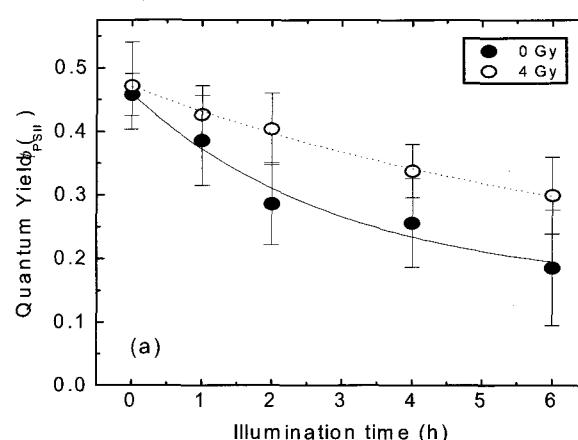
**Fig. 2** Changes in the maximal photosynthetic  $O_2$  evolution ( $P_{\text{max}}$ ) in pepper leaf discs with PIT or without PIT(Cont). Pepper leaf discs were exposed to  $900 \mu \text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  for 4 hrs at  $25^\circ\text{C}$ . Data presented are mean values  $\pm \text{S.E.}$  for 3 measurements. PIT represents photoinhibition.



**Fig. 4.** Changes of the non-photochemical quenching, NPQ, in pepper leaves as a function of illumination time. Pepper leaf discs were exposed to  $900 \mu \text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  at  $25^\circ\text{C}$ . ●, Control ; ○, 4 Gy treatment.



**Fig. 3.** Changes in the maximal photochemical efficiency of PSII ( $F_v/F_m$ ) as a function of illumination time. (a), Changes in dark-level fluorescence yield,  $F_o$  as a function of illumination time; (b), Pepper leaf discs were exposed to  $900 \mu \text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  at  $25^\circ\text{C}$ . ●, Control ; ○, 4 Gy treatment.



**Fig. 5.** Changes in the effective quantum yield of photochemical energy conversion at PSII reaction centers,  $\Phi_{\text{PSII}}$  with illumination time. (a), Changes in the fluorescence parameter,  $1/F_o - 1/F_m$  with illumination time; (b), Pepper leaf discs were exposed to  $900 \mu \text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  at  $25^\circ\text{C}$ . ●, Control ; ○, 4 Gy treatment.

### 광저해에 따른 형광 파라미터의 변화

염록소 형광과 광합성 메카니즘 사이의 관계는 1931년 Kautsky가 암적응 된 잎에 빛이 조사될 경우에 독특한 양상으로 형광이 방출된다는 것을 밝힘으로써 연구되기 시작한 이후 광합성의 생물·물리학적 측면을 측정하는데 편리하게 사용되어져 왔다<sup>41-43)</sup>. 일반적으로 Fo와 Fv/Fm은 광계 II의 활성을 나타내주는 지표로 환경 스트레스에 대한 식물의 반응 양상을 측정하는데 널리 사용되고 있다. Fig. 3a에서 보는 바와 같이 광저해가 진행됨에 따라 Fv/Fm이 감소되는 경향을 보이며 대조구의 경우  $900 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광량을 4시간 처리하였을 때 Fv/Fm의 값이 0.4 정도로 50%의 감소를 볼 수 있었다. 반면 4 Gy 조사구의 경우 Fv/Fm값이 대략 0.5 정도로 대조구에 비해 광 스트레스에 대해 덜 민감한 것으로 나타났다 (Fig. 3a). 한편, Fo는 광저해가 진행됨에 따라 거의 변화가 없었으며 또한 대조구나 4 Gy 조사구간의 차이도 없는 것으로 나타났다 (Fig. 3b). 틸라코이드 막을 가로 질러 형성되는  $\Delta\text{pH}$ 와 밀접한 관련이 있는 비광화학적 소멸인 NPQ는 광저해가 진행됨에 따라 감소되는 경향을 보이며  $900 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광량에서 4시간을 처리했을 때 60%정도 감소하였고 (Fig. 4), 대조구와 4 Gy의 V선이 조사된 고추사이에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 감소되는 NPQ는 광저해에 의해 ATPase 가 영향을 받아  $\Delta\text{pH}$ 의 형성을 저하시키는 것으로 보고 된 바 있다<sup>44)</sup>.

### 광저해에 따른 광계II의 광양자 수율과 여기 포획률의 변화

광계II의 광양자 수율을 나타내주는  $\Phi_{\text{PSII}}$ 는 대조구의 경우  $900 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광량을 4시간 처리했을 때 대략 43% 감소한 반면 4 Gy 조사구의 경우 28% 정도 감소되는 것으로 나타났다 (Fig. 5a). 이러한 결과를 통해 저선량 V선 조사가 광계II로부터 광계I으로의 전자전달 감소를 억제하는 것을 알 수 있었다. 광계II 반응중심에 의한 여기 포획률을 나타내주는 염록소 형광 파라미터 1/Fo-1/Fm는 가능성 광계II (functional PSII after light treatment)의 수와 상관관계가 있는 것으로 나타나 상대적으로 측정하는데 시간이 걸리는 가능성 광계II의 수를 대신하여 사용되어지고 있다<sup>45)</sup>. 1/Fo-1/Fm 또한 광저해가 진행됨에 따라 감소되었으며  $900 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광량을 4시간을 처리했을 경우 대조구의 경우 광계II의 수가 48%정도 감소한 반면, 4 Gy 조사구는 30% 감소되는 것으로 나타났다 (Fig. 5b). 따라서 이 두 파라미터를 통해 4 Gy의 V선이 조사된 고추의 경우 대조구에 비해 광 스트레스에 대해 덜 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

### 요약

고추 종자에 저선량 V선을 조사시킨 고추 식물체의 생육과 광합성 능 및 광 스트레스 반응에 미치는 영향을 조사하였다. 저선량 4 Gy가 조사된 고추 식물체에서 광합성에 의한 산소발생이 대조구에 비해 1.5배정도 높은 것으로 나타났다.

고추 잎에  $900 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 빛의 세기로 광저해를 4시간 유도하였을 때 최대 광합성능 (Pmax)이 대조구의 경우 20%정도 감소되는 반면, 4 Gy 조사구는 3% 정도의 감소를 보였다. Fv/Fm는 광저해가 진행됨에 따라 감소되는 경향을 보이며 대조구의 경우 4시간 처리시 Fv/Fm 값이 50% 정도 감소되는 것을 볼 수 있었다. 반면 4 Gy 조사구는 Fv/Fm값이 대략 37%정도 감소되어 대조구에 비해 광 스트레스에 대해 덜 민감한 것으로 나타났다. Fo는 광저해가 진행됨에 따라 거의 변화가 없었으며 대조구나 4 Gy 조사구 사이의 차이도 거의 없는 것으로 나타났다. 광계II의 광양자 수율인  $\Phi_{\text{PSII}}$ 과 광계II 반응중심에 의한 여기 포획률을 나타내주는 1/Fo-1/Fm 또한 광저해가 진행됨에 따라 감소되었으며 4시간을 처리했을 경우 각각 대조구는 47%, 4 Gy 조사구는 30%의 감소를 볼 수 있었다. 비광화학적 소멸인 NPQ는 광저해가 진행됨에 따라 감소되는 경향을 보였으나 대조구와 4 Gy 조사구간에 차이는 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 볼 때 종자의 종피를 투과한 저선량의 V선이 식물의 광합성을 증대시키고 동시에 광 스트레스에 대한 저해를 감소시키는 것으로 보인다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 원자력중장기개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. 大山ハルミ, 山田 武 (1997) 底線量 放射線の 健康影響-放射線ホルミック. *Radioisotopes* 46, 360-370.
2. Ferullo, J.-M., Nespolous, L. and Triantaphylides, C. (1994) Gamma-ray-induced changes in the synthesis of tomato pericarp protein, *Plant Cell Environ.* 17, 901-911.
3. Casarett, A. P. (1968) Radiation chemistry and effects of gamma radiation on the cell. In Casarett, A. P. (ed.), *Radiation Biology*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
4. Riov, J., Monselise, S. P. and Kahan, R. S. (1970) Radiation damage to grape fruit in relation to ethylene production and phenylalanine ammonia-lyase activity, *Radiat. Bot.* 10, 281-286.
5. Pendharkar, M. B. and Nair, P. M. (1975) Induction of phenylalanine ammonia-layse (PAL) in gamma irradiated potatoes, *Radiat. Bot.* 15, 191-197.
6. Frylink, L., Dubery, I. A. and Schabert, J. C. (1987) Biochemical changes involved in stress response and ripening behavior of gamma-irradiated mango fruit, *Phytochemistry* 26, 681-686.
7. Young, R. E. (1965) Effect of ionizing radiation on respiration and ethylene production of avocado fruit, *Nature*

- 205, 1113-1114.
8. Abdel-Kader A. S., Moris, L. L. and Maxie, E. C. (1968) Physiological studies of gamma irradiated tomato fruits, I. Effects on respiratory rate, ethylene production and ripening, *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.* 92, 553-567.
  9. Lee, T. H., McGlasson, W. B. and Edwards, R. A. (1968) Effect of gamma radiation on tomato fruit picked at four stages of development, *Radiat. Bot.* 8, 259-267.
  10. Akamine, E. K. and Goo, T. (1971) Respiration of gamma-irradiated fresh fruits, *J. Food Sci.* 36, 1074-1077.
  11. Romani, R. J. (1984) Respiration, ethylene, senescence, and homeostasis in an integrated view of postharvest life, *Can. J. Bot.* 62, 2950-2955.
  12. Luckey, T. D. (1980) Hormesis with ionizing radiation, CRC press, Inc. Boca Raton, Fl.
  13. Miller, M. W. and Miller, W. M. (1987) Radiation hormesis in plants, *Health Physics* 52, 607-616.
  14. Kim, J. S., Song, H. S., Kim, J. K., Lee, Y. K. and Lee, Y. B. (1998) Stimulation effect of early growth in crops by low dose radiation, *Korean J. Environ. Agri.* 17, 156-159.
  15. Kim, J. S., Lee, Y. K., Song, H. S., Park, H. S. and Kim, J. K. (1999) Effects of low dose ionizing radiation on the growth and yield of soybean cultivars, *Korean J. Environ. Agri.* 18, 66-69.
  16. Simon, J., Digleria, M. and Lang, Z. (1981) Comparative studies on the effects of low doses X-ray and gamma irradiation on the amylase activity of maize seedling, *Proc. European Soc. for Nuclear Methods in Agriculture*, Aberdeen, U.K.
  17. Kim, J. S., Lee, E. K., Song, J. Y., Kim, H. G. and Lee, Y. B. (2000) Induction of resistance against Phytophthora Blight of pepper by low dose gamma ray radiation, *Korean J. Environ. Bio.* 18, 47-51.
  18. Kim, J. S., Lee, Y. K., Back, M. W., Lee, Y. B. and Park, Y. S. (1999) Influence of the low dose  $\gamma$ -ray radiation on the old seed germination and growth of chinese ecabbage, *Korean J. Environ. Biol.* 17, 11-15.
  19. Kim, J. S., Lee, Y. K., Park, H. S., Back, M. H. and Chung, K. H. (2000) Effects of low dose gamma radiation on the early growth and physiological activity of gourd (*Lagenaria leucantha* L.), *Korean J. Environ. Agri.* 19, 142-146.
  20. Kim, J. S., Kim, J. K., Back, M. H. and Kim, D. H. (1999) Effects of low dose  $\gamma$ -ray on the early growth of tomato and the resistance to subsequent high doses of radiation, *J. Korean Asso. Radiat. Prot.* 24, 123-129.
  21. Kim, J. S., Lee, Y. K., Park, H. S., Back, M. H. and Kim, D. H. (2000) Influence of low dose gamma radiation on the growth of maize (*Zea mays* L.) varieties, *Korean J. Environ. Agri.* 19, 328-331.
  22. Kim, J. S., Lee, E. K., Back, M. H., Park, H. S. and Kim, K. H. (1999) Effect of low dose of gamma radiation on the growth of groundnut (*Arachis hypogaea* L.), *Korean J. Environ. Biol.* 17, 257-261.
  23. Hodges, M., Cornic, G. and Briantais, J.-M. (1989) Chlorophyll fluorescence from spinach leaves: resolution of non-photochemical quenching, *Biochim. Biophys. Acta.* 974, 289-293.
  24. Schreiber, U., Schliwa, U. and Bilger, W. (1986) Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer, *Photosynth. Res.* 10, 51-62.
  25. Krause, G. H. and Weis, E. (1984) Chlorophyll fluorescence as tool in plant physiology, II. Interpretationn of fluorescence signals, *Photosynth. Res.* 5, 139-157.
  26. Krause, G. H. and Weis, E. (1991) Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basis, *Ann. Rev. Plant Physiol., Plant Mol. Biol.* 42, 313-349.
  27. Park, Y. I. and Hong, Y. N. (1994) Phosphate-deficiency reduces the electron transport capacities of thylakoid membranes through limiting photosystem II in leaves of chinese cabbage, *J. Photosci.* 1, 95-105.
  28. Havaux, M., Strasser, R. J. and Greppin, H. (1991) A theoretical and experimental analysis of the qP and qNP coefficients of chlorophyll fluorescence quenching and their relation to photochemical and nonphotochemical events, *Photosynth. Res.* 27, 41-55.
  29. Porra, R. J., Thompson, W. A. and Kriedemann, P. E. (1989) Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophyll a and b with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll by atomic absorption spectroscopy, *Biochim. Biophys. Acta.* 975, 384-394.
  30. Öquist, G., Chow, W. S. and Anderson, J. M. (1992) Photoinhibition of photosynthesis represents a mechanism for long-term regulation of photosystem II, *Planta* 186, 450-460.
  31. Izvorska, N. (1973) The gamma ray effect on the growth, productivity and some biochemical changes of pepper, *Inst. Fiziol. Rast. Bulg. Akad. Nauk.* 18, 79-83.
  32. Kim, J. S., Chae, S. K., Back, M. H. and Kim, D. H. (2000) Effects of low dose radiation on the radiosensitivity of soybean(*Glycine max* L.) plant, *Korean J. Environ. Agric.* 19, 324-327.

33. Kim, J. S., Back, M. H., Kim, D. H., Lee, Y. K. and Lee, Y. B. (2001) Effects of low dose gamma radiation on the early growth of pepper and the resistance to subsequent high dose of radiation, *Korean J. Environ. Biol.* 19, 71-77.
34. Koepp, R. and Kramer, M. (1981) Photosynthetic activity and distribution of photoassimilated  $^{14}\text{C}$  in seedlings of *Zea mays* grown from gamma-irradiated seeds, *Photosynthetica*, 15, 484-493.
35. Lee, E. K., Kim, J. S., Lee, Y. K. and Lee, Y. B. (1998) Effect of low dose  $\gamma$ -ray irradiation on the germination and growth in red pepper (*Capsicum annuum* L.), *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 39, 670-675.
36. Anderson, J. M., Chow, W. S. and Goodchild, D. J. (1988) Thylakoid membrane organisation in Sun/Shade Acclimation. In Ecology of photosynthesis in Sun and Shade, J. R. Evans, S. von Caemmerer and W.W. Adams III (eds), CSIRO, Melbourne, p.11-26.
37. Vlasyuk, P. A. (1964) Effect of ionizing radiation on the physiological-biochemical properties and metabolism of agricultural plants, *Inst. Fiziol. Biokhim. Rast. SSR*. 24-31.
38. Kuzin, A. M. (1955) The utilization of ionizing radiation in agriculture. Proc. Int. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy, United Nations, Geneva, 12, 149-151.
39. Skok, J., Chorny, W. and Rakosnik, E. J. (1965) An examination of stimulatory effects of ionizing radiation in plants, *Radiat. Bot.* 5, 281-292.
40. Grisenko, G. V. and Mazhara, V. M. (1968) Ionizing and other types of radiation and their influence on the resistance of corn to stalk and root rot. *Tr. Vses. Sovetsk. Immunitetu Rast.* 2, 21-25.
41. Holzwarth, A. R. (1987) Picosecond fluorescence spectroscopy and energy transfer in photosynthetic antenna pigments. In The Light Reactions, J. Bafber (ed.), Elsevier, Amsterdam, p.95-158.
42. Lavorel, J. and Etienne, A. L. (1979) In vivo chlorophyll fluorescence. In Processes of Photosynthesis, J. Barber (ed.), Elsevier, Amsterdam, p.203-268.
43. Papageorgiou, G. (1975) Chlorophyll fluorescence. An intrinsic probe of photosynthesis. In Bioenergetics of Photosynthesis, J. Amesz and Govindjee (eds.). Academic Press, New York, p.587-619.
44. Imbrie, C. W. and Murphy, T. M. (1984) Mechanism of photoinactivation of plant plasma membrane ATPase, *Photochem. Photobiol.* 40, 243-248.
45. Lee, H. Y., Chow, W. S. and Hong, Y. N. (1999) Photo-inactivation of photosystem II in leaves of *Capsicum annuum*, *Physiol. Plant.* 105, 377-384.