

## 저선량 $\gamma$ 선 조사가 참박의 초기 생육과 효소 활성 및 광합성 능력에 미치는 영향

이혜연 · 김재성\* · 백명화 · 이영근 · 임돈순

한국원자력연구소 동위원소 방사선응용연구팀

### Effects of Low Dose $\gamma$ -Radiation on the Growth, Activities of Enzymes and Photosynthetic Activities of Gourd (*Lagenaria siceraria*)

Hae-Youn Lee, Jae-Sung Kim\*, Myung-Hwa Baek, Young-Keun Lee and Don-Sun Im

Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-353, Korea

**Abstract** - Gourd seeds were irradiated with the doses of 0~20 Gy to investigate the effect of the low dose  $\gamma$ -radiation on the early growth and physiological activity. The stimulating effects of the low dose  $\gamma$ -radiation on the early growth were not noticeably high, but were increased generally at 4~16 Gy irradiation group. The catalase and peroxidase activity of cotyledon from seeds irradiated with  $\gamma$ -radiation were increased at 8 Gy irradiation group. The peroxidase activity of leaf was noticeably high at 4 Gy irradiation group. The photochemical yield of PSII, estimated as Fv/Fm, decreased with increasing illumination time by 50% after 4 hrs in the control and 8 Gy irradiation group, while Fo slightly increased. However, Fv/Fm in the 4 Gy irradiation group decreased by 40% of inhibition, indicating that photoinhibition decreased by the low dose  $\gamma$ -radiation. Changes in the effective quantum yield of PSII,  $\Phi_{PSII}$  and  $1/F_0 - 1/F_m$ , a measure of the rate constant of excitation trapping by the PSII reaction center, showed similar pattern to Fv/Fm. NPQ decreased by 70% after photoinhibitory treatment with showing similar pattern between the control and the irradiation group. These results showed the positive effect of low dose  $\gamma$ -radiation on the seedling growth and the reduction of photoinhibition in the 4 Gy irradiation group.

**Key words** : Low dose  $\gamma$ -radiation, gourd, stimulating effects, growth, photosynthesis photoinhibition

### 서 론

인구 증가와 환경 오염 등에 의한 식량 자원의 고갈과 그에 따른 수요를 대처하기 위해서는 자원의 개발과

종자의 발아력 향상 및 생육 증진을 통한 식량 생산성 향상 방법의 개발이 필요하다. 따라서 이를 해결하기 위해 다양한 연구가 진행되어져 왔는데 그 중 최근 많은 학자들에 의해 유해한 물질도 유해량 이하의 적정 농도에서는 생물활성을 촉진하는 효과, 즉 hormesis 이용 연구가 많이 수행되고 있다. 방사선도 물리적 작용물질의 하나로서 저선량의 X선과  $\gamma$ 선 등에 의한 식물의 발아력

\* Corresponding author: Jae-Sung Kim, Tel. 042-868-8072, Fax. 042-868-8061, E-mail. JSKim8@nanum.kaeri.re.kr

향상과 초기 생육 촉진 및 작물의 수량 증가 등에 관한 방사선 hormesis가 보고되고 있다. 이온화 방사선은 이것이 발견된 후 짧은 시간 내 식물에 자극작용이 있는 것으로 알려져 있는데 이온화 방사선의 종류에 상관없이 거의 비슷한 생물학적 영향을 보여주며 계통발생을 통해서 생물은 저선량 방사선에 자극 받아 발아, 출아, 성장과 발육의 촉진, 수량구성요소의 증가 등이 식물에서 관찰되었다(Luckey 1980). 채소원에작물에서는 상당한 번이를 보여주고 있으나 배추, 무, 고추, 박 등에서 발아증가와 생육촉진 및 수량증가 등 농업적 가치가 있는 것이 많이 보고되었다(김 등 1997, 2000a; 이 등 1998). 이외에도 당근의 광합성과 핵산 합성 증가(Vlasyuk 1964), 겨자의 호흡 및 catalase (CAT) 활성이 저선량 방사선 조사에 의해 증가 되었고, 김 등(1999a)도 목은 배추, 참박(2000a), 옥수수(2000b), 땅콩(1999b) 등 다양한 품종에 저선량  $\gamma$ 선을 조사하여 peroxidase (POD)나 CAT 등의 항산화 효소 활성의 증가에 따른 발아율과 생육의 증가를 관찰하였다. 이러한 저선량 방사선에 의한 생물의 유익한 효과는 일반적인 hormesis 개념과 일치되어 방사선 hormesis에 관해 많은 연구자들이 이론을 확립시키기 위해 다양한 연구를 수행하고 있다. 하지만 살아있는 생물체의 복잡성으로 인해 전체 구조에 대한 물리적 혹은 화학적 효과를 실험하는 것이 많은 어려움이 따르고 있다.

이에 본 실험에서는 저선량  $\gamma$ 선 조사에 따른 참박의 생육 증가에 대한 방사선 hormesis를 항산화 효소 활성 변화 및 광합성 수행능을 통하여 조사하였다. 자연상태에서 재배되는 작물은 다양한 환경 스트레스를 경험하게 되는데 이중 광 스트레스는 가장 흔히 일어날 수 있는 스트레스로써 결국에는 작물의 생산성을 감소시키게 된다. 따라서 저선량  $\gamma$ 선이 조사된 참박에 이러한 광저해(photoinhibition)를 유도하여 박 식물체의 광 스트레스에 대한 반응을 관찰하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 시험 재료 및 방사선 조사

시험용 참박 (*Lagenaria siceraria*) 종자로는 농우바이오에서 99년 인도에서 시판용 종자로 생산한 OK 품종을 분양 받아 사용하였고, 저선량 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설 ( $^{60}\text{Co}$ )을 이용하여  $\gamma$ 선 0, 1, 4, 8, 16, 20 Gy 수준으로 건조종자에 직접 조사하였다. 조사선량율은 Fricke dosimeter로 측정하였

다(Niels and Roger 1970).

### 2. 온실재배실험

방사선 조사 다음날 종자 100립을 배양토와 모래가 1:1로 충전된 직경이 15 cm pot에 10립씩 10반복으로 파종하여 유리온실에서 발아시켜 파종 7일 후에 발아율을 조사하고 11일 후엔 자엽장과 자엽폭을 18일 후엔 초장을 조사하였다.

### 3. 조효소액 추출

파종 11일 후와 18일 후의 생육 조사 시 각각 자엽과 제 2본엽 0.3 g씩을 액체질소를 사용하여 얼린 다음 막자사발에서 마쇄한 후 0.05 M 인산완충액 (pH 7.0) 0.6 ml를 첨가한 다음 원심분리하여 얻은 상등액을 조효소액으로 사용하였다. 단백질 정량은 bovin serum albumin (BSA)를 표준단백질로 사용한 Bradford의 방법(Bradford 1976)에 따라 측정하였다.

### 4. 효소 활성 측정

POD 활성은 pyrogallol을 기질로 사용한 방법에 따라 측정하였는데, 조효소액 100  $\mu\text{l}$ 를 3 ml cuvette에 넣고 0.1 M 인산완충액 (pH 6.0) 0.32 ml, 0.147 M  $\text{H}_2\text{O}_2$  0.16 ml, 5% pyrogallol 용액 0.32 ml과 증류수 2.1 ml을 함께 섞은 후, 420 nm에서 20초간 상온에서 흡광도 변화를 측정하여 구하였다. 또한 CAT 활성은 기질인  $\text{H}_2\text{O}_2$ 의 감소량을 측정하는 방법을 사용하였는데 효소측정을 위한 반응용액은 0.053 M  $\text{H}_2\text{O}_2$  1 ml, 효소액 0.1 ml, 0.05 M 인산완충액 (pH 7.0) 1.9 ml의 혼합액으로 하여 240 nm에서 흡광도 감소를 1분간 측정하였다(Yun *et al.* 1998).

### 5. 광저해 처리

일정한 온도(25°C)를 유지할 수 있는 아크릴통에 100 ml의 증류수를 넣은 후 원판 모양의 앞절편을 띄웠다. 광저해로 인한 열을 차단하기 위하여 수돗물이 흐르는 원통형의 유리 수조( $\Phi$ 15 cm, 높이 15.5 cm)를 아크릴통 위에 올려놓았다. 광저해 처리를 위한 광원으로는 텅스텐 할로겐 램프(Itami Protex Co. Ltd., Japan)를 사용하였으며  $900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광에서 0~6시간 동안 광저해를 유도하였다.

### 6. 엽록소 형광 측정

엽록소 형광은 Xe-PAM fluorometer (Heinz Walz,

Effeltrich, Germany)를 이용하여 측정하였다. 광저해 유도 후 잎절편을 잎 디스크 전극 chamber 안에서 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 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>), actinic light (600 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)와 saturation light (3,700 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)으로는 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. 환원되어 있던 QA가 산화되면서 엽록소 형광이 감소하는 성분을 광화학 소멸(photochemical quenching, qQ)이라 하고, 틸라코이드 막의 에너지하에 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(Krause and Weis 1991). 비광화학 소멸 계수는 Schreiber 등(1986)의 정의에 따라 계산하였다.

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

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

F<sub>m</sub> = maximal fluorescence (dark), 암상태에서 모든 광계II 반응 중심이 닫혀있을 때의 최대 형광  
 F = actual fluorescence, 광합성이 유도되고 있는 동안의 실제 형광  
 F'<sub>m</sub> = maximal fluorescence (light), 빛이 있는 상태에서 모든 광계II 반응 중심이 닫혀 있을 때의 최대 형광

7. 엽록소 정량

25 mM HEPES가 들어있는 80% 아세톤 완충용액을 사용하여 잎으로부터 엽록소를 추출하였고 Porra 등(1989)의 방법에 의하여 총 엽록소량을 계산하였다.

$$\text{Total Chl.} = 19.54A_{646.6} + 8.29A_{663.6}$$

결과 및 고찰

1. 저선량 γ선을 조사한 참박의 초기생육 조사

저선량 방사선이 참박 종자의 발아와 초기 생육에 미치는 영향을 알아보기 위하여 γ선을 참박 종자에 조사

하여 온실재배를 통해 관찰하였다. 파종 7일 후에 조사한 발아율은 대조구의 경우 70%인 반면, 20 Gy에서는 74%로 대략 6% 증가하였고 다른 저선량 조사구는 대조구와 비슷한 양상을 보였다. 파종 11일 후 자엽장과 자엽폭을 관찰한 결과 자엽장은 대조구 5.36 cm인 것에 비해 1~16 Gy의 조사구에서 1~4% 정도 증가를 보였고 특히 8 Gy에서 5.59 cm로 가장 높았다. 자엽폭은 대조구의 경우 3.09 cm였고 8 Gy와 16 Gy에서는 3.2 cm 정도로 대략 4%의 증가를 나타내어 저선량 조사구가 대조구에 비해 뚜렷한 증가 효과를 보이지는 않았으나 대체로 4~16 Gy 조사구에서 양호한 생육 양상을 보였다. 파종 18일 후 조사한 초장은 대조구가 13.8 cm에 비해 모든 저선량 조사구에서 별다른 증가 효과를 보이지 않았다. 이 등(1998)도 저선량의 감마선을 고추 작물의 건조 종자에 조사하여 각 선량별로 나타나는 hormesis 효과를 조사한 결과 대조구에 비해 저선량 γ선 조사구에서 발아율이 증가되는 것을 관찰하였고, 생육 양상 등에 영향을 미치는 적정선량을 1 Gy에서 20 Gy사이임을 보고하였다. 김 등(2000b)도 건조 종자에 저선량 γ선을 조사하여 자란 옥수수(2000b), 참박(2000a), 배추(1999a) 등의 생육이나 수량이 증가하는 것을 관찰하였으며, Koepp and Kramer(1981)는 저선량 γ선이 조사된 옥수수의 발아율이나 생육의 증가는 종자의 종피를 투과한 저선량 방사선이 지베렐린이나 앱시스산 등의 식물 호

Table 1. Growth response of gourd grown from seeds irradiated with different doses of γ-radiation

Dose (Gy)	7 DAS	11 DAS		18 DAS
	Germination rate (%)	Cotyledon length (cm)	Cotyledon width (cm)	Seedling height (cm)
0	70.0 ± 4.4 †	5.36 ± 0.06	3.09 ± 0.04	13.8 ± 0.1
1	68.3 ± 5.1	5.38 ± 0.06	3.15 ± 0.04	14.0 ± 0.2
4	68.4 ± 4.3	5.48 ± 0.13	3.08 ± 0.06	13.8 ± 0.1
8	68.4 ± 3.5	5.59 ± 0.08	3.20 ± 0.06	13.7 ± 0.2
16	67.5 ± 3.3	5.50 ± 0.11	3.20 ± 0.05	13.2 ± 0.1
20	74.0 ± 2.9	5.30 ± 0.08	3.05 ± 0.06	13.5 ± 0.2

† : mean ± SE      DAS : days after sowing

Table 2. Changes in the chlorophyll contents of gourd from seeds irradiated with different doses of γ-radiation

Dose (Gy)	Total Chl. (μmol · m <sup>-2</sup> )	Chl. a/b
0	329 ± 56.7 †	2.66 ± 0.36
4	262 ± 25.1	3.09 ± 0.05
8	263 ± 12.0	3.07 ± 0.11

† : mean ± SE,      Chl. : Chlorophyll

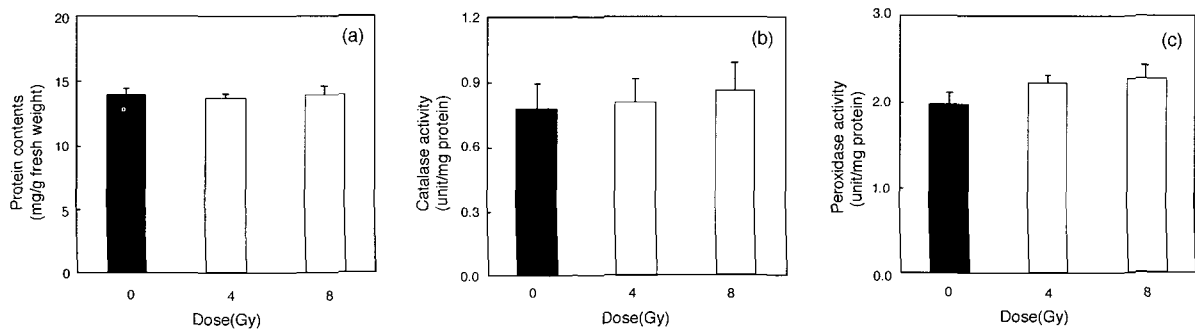
르몬의 양적평형에 영향을 미쳐 받아들 및 유식물의 성장을 촉진시키고 결국에는 광합성 기구 및 순 광합성 양과 환경 스트레스에 대한 저항성을 증가시킨다고 보고하였다.

대체로 양호한 생육 양상을 보였던 4 Gy와 8 Gy 조사구의 엽록소 함량을 조사한 결과 대조구의 경우 총 엽록소 함량이  $329 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 였고, 4 Gy 조사구는  $262 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 였으며 8 Gy 조사구에서는  $263 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 대조구에 비해 감소하였다(Table 2). 이 등(1998)은 고추에 저선량  $\gamma$ 선을 조사하여 총 엽록소를 조사한 결과 저선량 방사선 조사에 의해 엽록소 함량이 증가하는 것을 관찰하였으나 박의 경우에는 저선량 조사구에서 엽록소 함량이 20% 정도 감소하였다. 한편 엽록소 *a/b* 비의 경우는 대조구는 2.66 였고, 4 Gy와 8 Gy 조사구는 각각 3.09, 3.07였다. 일반적으로 낮은 광량에 적응된 식물의 틸라코이드 막 내의 엽록소 *a/b*는 2.0~2.2 정도인 반면 높은 광량에 적응된 식물의 경우는 2.6~3.6 사이로 알려져 있다(Anderson *et al.* 1988). 이러한 색소 양의 변화는 여러 가지 환경요인에 의해 영향을 받고 이러한 광합성 기구의 구성성분이 변화됨으로써 외부 환경에

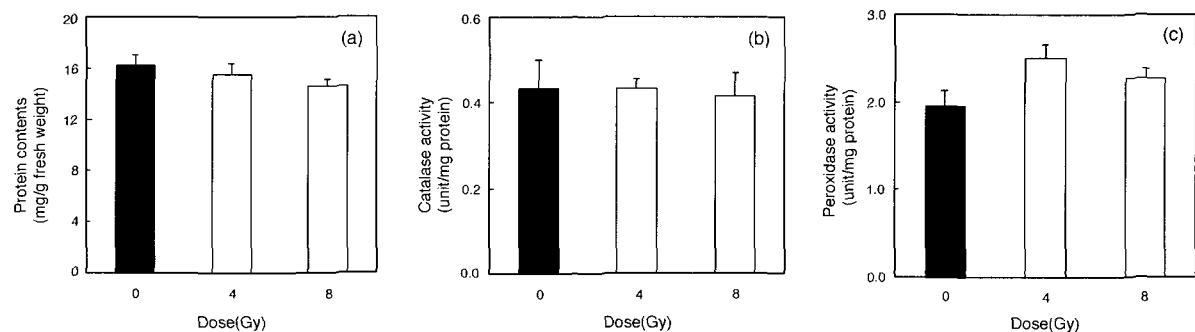
대한 적응능력을 발달시키는 것으로 보고되고 있다(Aro *et al.* 1986). 따라서 본 실험에서 저선량 방사선 조사에 의해 참박의 광합성 기구의 엽록소 *a/b*가 증가되어 빛에 대한 적응능력을 증가시키고 그 결과 생육이 증가되는 것으로 사료된다.

## 2. 저선량 $\gamma$ 선 조사에 따른 참박의 효소활성 변화

여러 환경 스트레스 의해 유발되는 산화적 스트레스는 자유 라디칼과  $\text{H}_2\text{O}_2$ 와 같은 활성 산소 종 등을 생성하여 세포에 손상을 입히게되고 결국에는 작물의 성장을 감소시킨다(Rao *et al.* 1996). 따라서 식물은 이러한 산화적 스트레스에 대해 ascorbate, glutathione, carotenoids 등과 같은 항산화제나 혹은 ascorbate peroxidase (APX), POD, CAT, glutathione reductase (GR) 등의 항산화효소 등을 증가시킴으로써 이러한 스트레스로부터 대처하게 된다(Foyer *et al.* 1994). 따라서 본 실험에서는 저선량  $\gamma$ 선이 초기 생육 시기별로 단백질과 효소 활성 변화에 어떠한 영향을 미치는지 관찰하였다. 첫째로 파종 11일 후 참박의 자엽 성장기에 대조구보다 생육이 좋았던 4 Gy와 8 Gy 조사구의 자엽을 채취하여 저선량  $\gamma$



**Fig. 1.** Enzyme activities of gourd cotyledon grown from seeds irradiated with different doses of  $\gamma$ -radiation at 11 days after planting. Data represents mean  $\pm$  SE. (a): Protein contents, (b): Catalase activity, (c): Peroxidase activity.

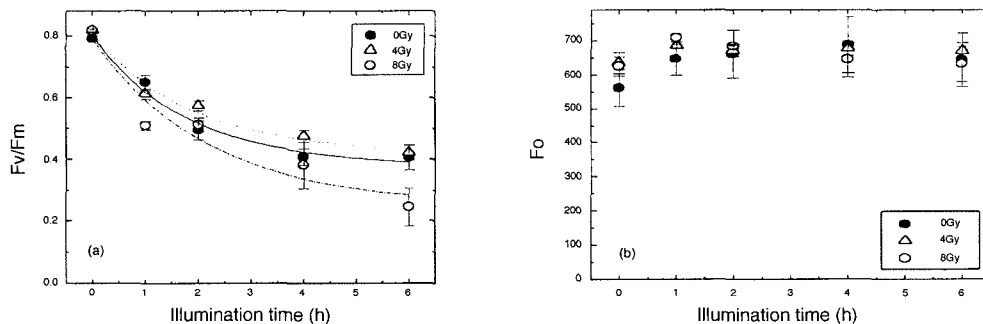


**Fig. 2.** Enzyme activities of gourd leaf grown from seeds irradiated with different doses of  $\gamma$ -radiation at 18 days after planting. Data represents mean  $\pm$  SE. (a): Protein contents, (b): Catalase activity, (c): Peroxidase activity.

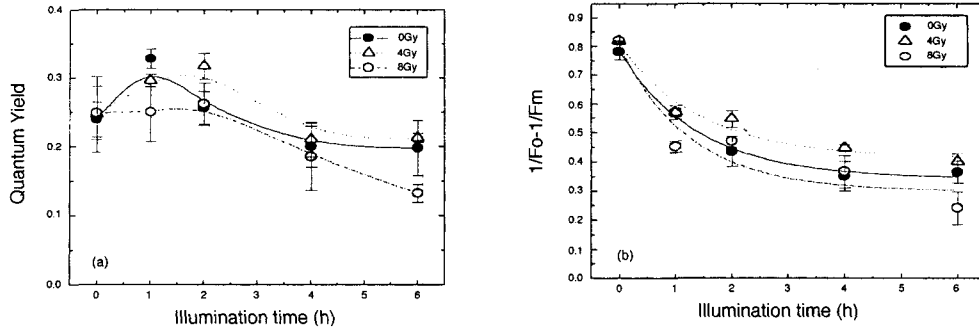
선 조사에 따른 단백질과 CAT 및 POD의 활성 변화를 조사하였다. 자엽의 단백질 함량은 대조구  $3.98 \text{ mg g}^{-1}$ 에 비해 4 Gy와 8 Gy 조사구에서 별다른 증가효과를 보이지 않았으나 (Fig. 1a), 효소활성에서는 저선량 조사구에서 높은 활성을 보였는데 CAT 활성은 대조구 0.78 unit에 비해 4 Gy와 8 Gy 조사구에서 각각 0.81 unit와 0.87 unit로 3~11% 증가하였으며 (Fig. 1b), POD 활성도는 대조구의 경우 1.99 unit인 반면 4 Gy와 8 Gy 조사구에서 각각 2.23 unit와 2.29 unit으로 12~15% 증가하였다 (Fig. 1c). 파종 18일 후인 2분엽기에 단백질과 효소활성을 측정된 결과, 단백질 함량과 CAT 활성은 대조구에 비해 별다른 증가효과를 보이지 않았으나 (Fig 2a, b), POD 활성은 대조구 1.94 unit에 비해 4 Gy와 8 Gy 조사구에서 각각 2.50 unit와 2.28 unit로 17~29% 증가하였다. Garg 등(1972)은 겨자 종자에 저선량 방사선을 조사하여 종자의 발아와 생장이 촉진되는 것을 관찰하였는데 이는 저선량  $\gamma$ 선이 CAT 및 호흡 등의 생리적인 활성에 영향을 미친 것으로 보고하였다. 또한 Zhezhe 등(1958)은 다양한 식물에 여러 종류의 방사선 ( $\text{Ra}^{226}$ ,  $\text{Th}^{232}$ ,  $\text{P}^{32}$ ,  $\text{Co}^{60}$ )을 처리한 결과 식물 생육에 가장 효과적인 선량은  $1.10^{-9} \text{ Ci}$ 이내임을 확인하였고, 방사선에 의한 효과로는 단백질 함량과 POD 활성의 증가, ascorbic acid의 양과 세포 내에서의 삼투압 증가 등을 보고하였다. Sah 등(1996)은  $\gamma$ 선 선량에 따른 POD의 활성을 조사한 결과 선량이 증가함에 따라 POD의 활성이 증가하는 것을 관찰하였고 김 등(1999a, 2000b)도 참박 유식물체에 저선량  $\gamma$ 선 조사시 CAT와 POD 활성이 1~20 Gy 범위에서 증가하고 배추 유식물체의 효소활성은 낮은 선량에서 증가하고 높은 선량에선 감소하였다고 보고하였다.

### 3. 광저해에 따른 형광 파라미터의 변화

참박의 초기 생육이 증가하고 항산화 효소의 활성이 증가되는 저선량  $\gamma$ 선 4 Gy와 8 Gy를 조사한 참박 식물체의 광 스트레스에 대한 반응 변화를 알아보기 위하여 광저해를 유도한 후 엽록소 형광을 측정하였다. 엽록소 형광은 주로 엽록소 a에서 방출되며 광합성과 밀접한 관계가 있다는 것이 밝혀진 이후로 광합성 활성을 측정하는 지표로 사용되고 있다. 반응중심이 열려 있을 때의 최소 형광을  $F_0$ 라고 하며 광계 II에 있는 엽록소 a 분자가 여기 된 후 에너지가 반응중심으로 이동하기 이전에 나오는 형광을 말한다.  $Q_A$ 를 완전히 환원시킬 수 있는 포화광을 조사했을 때 유도되는 최대 형광을  $F_m$ 이라 하며  $F_m$ 에서  $F_0$ 를 빼준 값을  $F_v$ 라 한다.  $F_v/F_m$ 은 광계 II의 활성을 나타내주는 지표로 사용되며 들뜬 에너지 포획 능력을 나타내준다. Fig. 3a에서 보는 바와 같이 광저해가 진행됨에 따라  $F_v/F_m$ 이 감소되는 경향을 보이며  $900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 빛의 세기로 4시간 처리했을 때 대조구와 8 Gy 조사구는  $F_v/F_m$ 이 각각 0.41과 0.38로 광저해를 처리하지 않았던 앞에 비해 대략 50% 정도 감소되는 것으로 나타났다. 한편 4 Gy의 경우 0.47로 40% 정도의 감소를 보이며 대조구에 비해 광 스트레스에 대해 덜 민감한 것으로 나타났다. 이는 식물체가 광저해나 UV 등의 스트레스를 받게 되면 그 극복책의 일환으로 항산화 효소의 활성이 증가되는데 Fig. 2c의 결과에서 언급한 바와 같이 4 Gy에서의 높은 POD의 활성이 광 스트레스의 저해 효과를 감소시키는 것으로 생각된다. 광계 II의 손상은  $F_0$ 의 증가를 수반하는데 본 실험에서도 광저해가 진행됨에 따라  $F_0$ 의 증가를 보였으나 대조구나 저선량 조사구간의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다 (Fig. 3b). 반응 중심에 에너지를 전달할 수 없는 엽록소 분자들이 많아지면  $F_0$ 는 증가하며 일반적



**Fig. 3.** Changes in the maximal photochemical efficiency of PSII ( $F_v/F_m$ ) (a) and changes in dark-level fluorescence yield,  $F_0$  as a function of illumination time (b) of high light ( $900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at  $25^\circ\text{C}$ . ●, Control; △, 4 Gy treatment; ○, 8 Gy treatment.

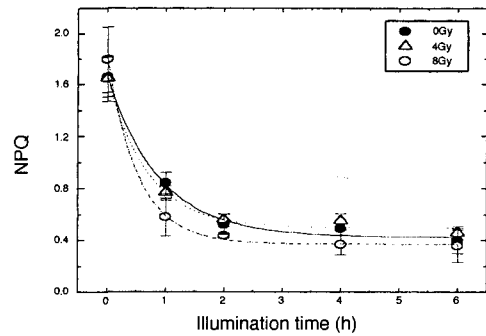


**Fig. 4.** Changes in the effective quantum yield of photochemical energy conversion at PSII reaction centers,  $\Phi_{PSII}$  with illumination time (a) and changes in the fluorescence parameter  $1/F_o-1/F_m$  with illumination time (b). Gourd leaf discs were exposed to  $900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  at  $25^\circ\text{C}$ . ●, Control; △, 4 Gy treatment; ○, 8 Gy treatment.

으로 식물이 스트레스를 받을 때 증가하는 것으로 보고 되고 있는데 (Renger and Schreiber 1986), 본 실험에서  $F_o$ 의 증가는 광스트레스로 인해 광계II의 반응중심이 손상이 되었거나 혹은 안테나로부터 반응중심으로의 여기 에너지의 전이가 방해될 받았기 때문인 것으로 사료 된다.

**4. 광저해에 따른 광계II의 광양자 수율과 흥분 포획률의 변화**

광계II의 광양자 수율을 나타내주는  $\Phi_{PSII}$  또한 광저해가 진행됨에 따라 감소하는 경향을 보였으며  $900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량을 4시간 처리했을 때 대조구와 8Gy 조사구는 각각 0.20와 0.19로 광저해를 처리하지 않았던 것에 비해 대략 20%의 감소를 보인 반면 (Fig. 4a) 4Gy 조사구는 0.21로 15%의 감소를 나타냈다. 광계II 반응중심에 의한 흥분 포획률을 나타내주는 엽록소 형광파라미터  $1/F_o-1/F_m$ 는 기능성 광계II (functional PSII after light treatment)의 수와 상관 관계가 있는 것으로 나타나 상대적으로 측정하는데 시간이 걸리는 기능성 광계II의 수를 대신하여 사용되어지고 있다 (Lee *et al.* 1999).  $1/F_o-1/F_m$ 는 광저해가 진행됨에 따라 지속적으로 감소되는 경향을 보였으며 대조구와 8Gy 조사구는 각각 0.35, 0.37로 55% 정도 감소되는 것으로 나타났다 (Fig. 4b). 반면 4Gy 조사구는 0.45로 대략 45% 정도의 감소를 보였으며 광저해에 덜 민감한 것으로 나타났다 (Fig. 4b). 틸라코이드 막을 가로 질러 형성되는  $\Delta\text{pH}$ 와 밀접한 관련이 있는 비광화학적 소멸인 NPQ는 광저해가 진행됨에 따라 감소되는 경향을 보이며  $900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서 4시간을 처리했을 때 70% 정도 감소하였고, 대조구와 저선량  $\gamma$ 선이 조사된 박간의 차이는 없는 것으로 나타났다 (Fig. 5). NPQ를 나타내는 qE, qI,



**Fig. 5.** Changes of the non-photochemical quenching, NPQ, in Gourd leaves as a function of illumination time (h). Gourd leaf discs were exposed to  $900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  at  $25^\circ\text{C}$ . ●, Control; △, 4 Gy treatment; ○, 8 Gy treatment.

qT 등은 여러 스트레스에 의한 생리적 조건에 따라 다르게 나타나며 주로 qE에 의한 영향을 가장 많이 받는다 (Briantais *et al.* 1979). 따라서 감소되는 NPQ는 광저해에 의해 ATPase가 영향을 받아  $\Delta\text{pH}$ 의 형성을 저하시킨다는 보고가 (Imbrie and Murphy 1984) 있으나 좀더 자세한 조사가 요구된다.

**적 요**

저선량  $\gamma$ 선 조사가 참박의 초기생육과 생리활성에 미치는 효과를 알아보기 위하여 참박 종자에  $\gamma$ 선을 0~20 Gy 수준으로 조사하여 생육을 관찰하였다. 저선량  $\gamma$ 선에 의한 참박의 초기생육은 대조구에 비해 4~16 Gy에서 다소 증가하였고, 생육 조사시 측정된 자엽의 경우 catalase와 peroxidase 활성이 대조구에 비해 8Gy 조사구에서 가장 높았으며 본엽은 peroxidase 활성이 4Gy

조사구에서 확연히 증가하였다.

저선량  $\gamma$ 선을 조사한 박 식물체의 광 스트레스에 대한 반응효과는 광계II의 광화학적 효율이 대조구와 8 Gy의 경우 50% 정도 감소되었으나 4 Gy에서는 40% 정도의 감소를 보였다. 반면 Fo는 광저해가 진행됨에 따라 약간의 증가를 보였으나 대조구나 저선량 조사구사이의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 광계II의 광양자 수율,  $\Phi_{PSII}$ 과 광계II 반응중심의 흥분 포획능,  $1/F_0-1/F_m$  또한 광저해가 진행되는 동안 감소하여  $\Phi_{PSII}$ 는 대조구와 8 Gy의 경우 20% 정도 감소를 보인 반면 4 Gy 조사구는 15%의 감소를 보였고,  $1/F_0-1/F_m$ 은 대조구와 8 Gy는 55%, 4 Gy는 45%의 감소를 나타냈다. 비광화학적 소멸인 NPQ는 대조구와 저선량 조사구 모두 70% 정도 감소되는 경향을 보였다. 이러한 결과를 볼 때 종자의 종피를 투과한 저선량의  $\gamma$ 선이 참박의 생육을 촉진시키고 4 Gy에서 광 스트레스에 대한 저해가 감소되었다.

## 사 사

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- 김재성, 김진규, 이은경, 이영복. 1997. 전리방사선에 의한 배추와 무의 생육촉진 효과. 한국환경농학회지. 16:390-393.
- 김재성, 이영근, 백명화, 이영복, 박영선. 1999a. 목은 배추종자의 발아와 생육에 미치는 저선량  $\gamma$ 선 효과. 한국환경생물학회지. 17:11-15.
- 김재성, 이은경, 백명화, 박홍숙, 김광호. 1999b. 저선량 감마선이 땅콩 생장에 미치는 효과. 한국환경생물학회지. 17:257-261.
- 김재성, 이영근, 박홍숙, 백명화, 정규희. 2000a. 저선량 방사선이 참박의 초기생육과 생리활성에 미치는 효과. 한국환경농학회지. 19:142-146.
- 김재성, 이영근, 박홍숙, 백명화, 김동희. 2000b. 옥수수 생육에 미치는 저선량 감마선 조사효과. 한국환경농학회지. 19:328-331.
- 이은경, 김재성, 이영근, 이영복. 1998. 저선량 감마선 조사에 의한 고추의 발아와 생육. 한국원예학회지. 39:670-675.
- Anderson JM, WS Chow and DJ Goodchild. 1988. Thylakoid membrane organisation in Sun/Shade Acclimation. pp.11-26. In Ecology of photosynthesis in Sun and Shade (Evans JR, SV Caemmerer and WW Adams III eds.). CSIRO. Melbourne.
- Aro EM, E Rintamäki, P Korhonen and P Mäenpää. 1986. Relationship between chloroplast structure and  $O_2$  evolution rate of leaf discs in plants from different biotypes in south Finland. Plant Cell Environ. 9:87-94.
- Bradford MM. 1976. A rapid sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Anal Biochem. 72:248-254.
- Briantais JM, C Vernotte, M Picaud and GH Krause. 1979. A quantitative study of the slow decline of chlorophyll *a* fluorescence in isolated chloroplasts. Biochim. Biophys. Acta 548:128-138.
- Dirk I and MV Montagu. 1995. Oxidative stress in plants. Curr. Opin. Biotech. 6:153-158.
- Foyer CH, P Descourvieres and KJ Kunert. 1994. Protection against oxygen radicals: an important defense mechanism studied in transgenic plants. Plant Cell Environ. 17:507-523.
- Garg CK, B Tirwari and O Singh. 1972. Effect of presowing gamma irradiated seeds in relation to the germination behavior of Indian colza (*Brassica campestris* L. var. Sarson Prain). Indian J. Agric. Sci. 42:553.
- Imbrie CW and TM Murphy. 1984. Mechanism of photoinactivation of plant plasma membrane ATPase. Photochem. Photobiol. 40:243-248.
- Koepp R and M Kramer. 1981. Photosynthetic activity and distribution of photoassimilated  $^{14}C$  in seedlings of Zea mays grown from gamma-irradiated seeds. Photosynthetica. 15:484-493.
- Krause GH and E Weis. 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basis. Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 42:313-349.
- Lee HY, WS Chow and YN Hong. 1999. Photoinactivation of photosystem II in leaves of *Capsicum annuum*. Physiol. Plant. 105:377-384.
- Luckey TD. 1980. Hormesis with ionizing radiation. CRC press. Inc. Boca Raton. Fla.
- Niels WH and JB Roger. 1970. Manual on Radiation Dosimetry. Mard Dekker Inc. New York.
- Porra RJ, WA Thompson and PE Kriedemann. 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.
- Rao MV, G Paliyath and DP Ormrod. 1996. Ultraviolet-B and ozone induced biochemical changes in antioxidant enzymes of *Arabidopsis thaliana*. Plant Physiol. 110:125-136.

- Renger G and U Schreiber. 1986. Practical applications of fluorometric methods to algae and higher plant research. pp.587-619. In *Light Emission by Plants and Bacteria* (Govindjee D, J. Ames and DC Fork eds.). Academic Press. New York.
- Sah NK, S Pramanik and SS Raychaudhuri. 1996. Peroxidase changes in barley induced by ionizing and thermal radiation. *Int. J. Radiat. Bio.* 69:107-111.
- Schreiber U, U Schliwa and W Bilger. 1986. Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer. *Photosynth. Res.* 10:51-62.
- Vlasyuk PA. 1964. Effect of ionizing radiation on the physiological-biochemical properties and metabolism of agricultural plants. *Inst. Fiziol. Biokhim. Rast. SSR.* 24-31.
- Yun BW, HG Hue, SY Kwon, HS Lee, JK Jo and SS Kwak. 1998. Antioxidant enzyme in *Nicotiana* cells containing an *Ipomoea* peroxidase gene. *Phytochemistry.* 48:1287-1290.
- Zhezhel NG. 1958. Studies on the mechanism of the biological effect of small doses of ionizing radiation in plant. *Vestsel'Skokhoz Nauk.* 8:123.

(Received 7 May 2001, accepted 15 June 2002)