

## 무의 초기 생육과 생리 활성 및 UV-B 스트레스에 미치는 저선량 $\gamma$ 선 효과

### Effects of Low Dose $\gamma$ Radiation on Early Growth and Physiological Activities of Radish (*Raphanus sativus* L.) and the Reduction of Ultraviolet-B stress

김재성, 이영근, 이혜연, 백명화, 유준철

한국원자력연구소 대전시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

저선량  $\gamma$ 선 조사가 무 식물체의 초기 생육과 광합성 능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 무 종자에  $\gamma$ 선을 0~10 Gy 수준으로 조사한 뒤 생육을 관찰하였다. 파종 20일 후 조사한 초장은 대조구에 비해 10 Gy 조사구에서 7% 증가하였고, 산소 발생을 통해 측정한 최대 광합성 능은 10 Gy 조사구에서 1.2배 높았다. 생육 조사시 측정한 효소 활성은 대체로 저선량 조사구에서 증가하는 경향을 보이며, 특히 10 Gy 조사구에서 CAT는 30%, POD는 29% 증가하였으며 SOD는 130% 증가하였다. 저선량  $\gamma$ 선이 조사된 무 식물체의 UV-B 스트레스에 대한 반응을 조사한 결과 최대 광합성능(Pmax)은 대조구는 76%, 10 Gy 조사구는 75% 감소를 보이며 대조구와 저선량 조사구간의 차이가 거의 없었다. 광계II의 광화학적 효율(Fv/Fm)은 스트레스가 진행됨에 따라 감소되는 경향을 보이며 대조구 경우 UV-B를 4시간 처리했을 때 Fv/Fm은 75% 감소하였으나 10 Gy 조사구는 69% 감소되었다. Fo는 스트레스가 진행됨에 따라 증가되었고 Fm은 감소되었으며 대조구에 비해 저선량 조사구가 UV-B 스트레스에 대해 덜 민감한 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 저선량 자극에 의한 항산화 효소 활성의 증가가 무 식물체의 생육 촉진에 영향을 미치는 것으로 보이며 동시에 UV-B 스트레스에 대한 저해 효과를 감소시키는 것으로 생각된다.

#### ABSTRACT

The effect of low dose  $\gamma$  radiation on early growth and photosynthesis in radish plant was studied. The seedling height of radish was stimulated in plants grown from seeds irradiated with the low dose of 10 Gy. The O<sub>2</sub> evolution in the 10 Gy irradiation

group was 1.2 times greater than in the control. The catalase and peroxidase activity of radish leaves grown from seeds irradiated with  $\gamma$  radiation were increased at 10 Gy irradiation group as the superoxide dismutase activity of leaves was. To investigate the effect of low dose  $\gamma$  radiation on response to UV-B stress, UV-B was given at the intensity of  $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  to the detached leaves. Pmax was decreased with increasing illumination time by 76% in the control, while decreased by 75% in the 10 Gy irradiation group. The photochemical yield of PSII, estimated as Fv/Fm, was decreased with increasing illumination time by 75% after 4 hours while Fv/Fm in the 10 Gy irradiation group was decreased by 69% of inhibition, indicating that the low dose  $\gamma$  radiation retarded the deteriorative effect of UV-B on PSII. The initial fluorescence (Fo) was slightly increased with increasing illumination time, while the maximal fluorescence (Fm) was decreased. These results showed the positive effect of low dose  $\gamma$  radiation on the seedling growth and the reduction of the deteriorative effect of UV-B stress on photosynthesis in radish plant.

## 서 론

인구증가와 산업화로 인해 환경 오염물질이 생태계로 꾸준히 방출되고 있으며 이러한 환경 오염에 의해 대기 중의 오존층이 파괴되어 지구 표면으로 도달하는 UV 양이 늘어나고 있다. 증가된 UV는 식물의 광합성, 암호흡, 증산 작용, 생장 발달 및 형태 등과 같은 생리·생화학적 과정에 손상을 입히거나 단백질 및 핵산까지 영향을 미쳐 결국에는 식물의 생산성 감소를 초래하게 된다. 따라서 식량 자원의 고갈과 그에 따른 수요를 대처하기 위해서는 자원의 개발과 종자의 발아력 향상 및 환경 스트레스 하에서의 생육 증진을 통한 식량 생산성 향상 방법의 개발이 필요하다. 이를 해결하기 위해 다양한 연구가 진행되어져 왔는데 그 중 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 향상과 초기 생육 촉진 및 작물의 수량 증가 등에 관한 방사선 hormesis가 보고되고 있다. 이온화 방사선은 그 종류에 상관없이 거의 비슷한 생물학적 영향을 미치는 것으로 나타나는데 저선량 방사선 자극에 의해 발아, 출아, 생장과 발육의 촉진, 수량구성요소의 증가 등이 식물에서 관찰되었고<sup>1)</sup>, 김 등<sup>2)</sup>도 묵은 배추, 참박<sup>3)</sup>, 옥수수<sup>4)</sup>, 땅콩<sup>5)</sup> 등 다양한 품종에 저선량  $\gamma$ 선을 조사하여 항산화 효소 활성의 증가에 따른 발아율과 생육의 증가를 확인하였다. 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 저선량  $\gamma$ 선 조사에 따른 무 생육의 방사선 hormesis를 광합성 수행 능력과 연계하여 조사하였다. 자연상태에서 식물은 다양한 환경 스트레스를 경험하기 쉬운데 특히 오존층의 파괴로 인해 지구에 도달하는 UV-B가 점차적으로 증가되고 있으며 결국에는 작물의 생산성이 감소되게 된다. 따라서 무조사구와 저선량  $\gamma$ 선이 조사된 무에 UV-B를 처리하여 저선량  $\gamma$ 선 조사가 UV-B 스트레스에 대한 저해효과를 지연시키는지 확인하였다.

## 재료 및 방법

**시험 재료 및 방사선 조사 :** 시험용 무 종자로는 농우바이오에서 시판용 신규 종자로 분양 받은 백옥무를 사용하였고, 저선량 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설 ( $^{60}\text{Co}$ )을 이용하여  $\gamma$ 선 0, 2, 4, 8, 10 Gy 수준으로 건조종자에 직접 조사하였다. 조사선량율은 Fricke dosimeter로 측정하였다<sup>6)</sup>.

**온실재배실험 :** 방사선 조사 다음날 종자 100립을 배양토와 모래가 1:1로 충진된 직경이 15cm pot에 10립씩 10반복으로 파종하여 유리온실에서 발아시켜 파종 7일 후에 발아율을 조사하고, 20일 후에는 초장을 조사하였다.

**조효소액 추출 :** 파종 후 20일된 무 잎 0.3 g 썬을 액체질소를 사용하여 얼린 다음 막자사발에서 마쇄한 후 0.05 M 인산완충액(pH 7.0) 0.6 ml을 첨가한 다음 원심분리하여 얻은 상등액을 조효소액으로 사용하였다. 단백질 정량은 bovin serum albumin(BSA)를 표준단백질로 사용한 Bradford의 방법<sup>7)</sup>에 따라 측정하였다.

**효소 활성 측정 :** Peroxidase(POD) 활성은 pyrogallol을 기질로 사용한 방법에 따라 측정하였는데, 조효소액 100  $\mu\text{L}$ 를 3 ml cuvette에 넣고 0.1 M 인산 완충액(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 catalase(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<sup>8)</sup>. Superoxide dismutase(SOD) 활성은 Spychalla 등<sup>9)</sup>의 방법을 변형하여 측정하였다.

**UV-B 처리 :** UV-B 처리는 일정한 온도 (25°C)가 유지되는 생장기(growth chamber)에서 petridish에 원판 모양의 잎절편을 띄운 후 빛이 있는 상태에서 유도하였다. UV-B 처리를 위한 광원으로는 UV-B 램프(XX-15B, Spectronics Corporation, USA)를 사용하였으며 0~4 시간 동안 유도하였다. UV-B의 광도는 Digital Radiometer (DRC-100X, Spectronics Corporation, USA)로 측정하였고 본 실험에 사용된 광도는  $0.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  였다.

**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 스폰지에 적셔 공급하였다<sup>10)</sup>. Pmax는  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 측정하였으며 낮은 광에서의 광합성율은 neutral density filters를 사용하여 조절하였다.

**엽록소 형광 측정** : 엽록소 형광은 Xe-PAM fluorometer (Heinz Walz, Effeltrich, Germany)를 이용하여 측정하였다. UV-B 스트레스 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( $0.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), actinic light( $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )와 saturation light( $3700 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )으로는 main control unit에 의해 조절되는 actinic-/saturation light unit(XE-AL)을 통하여 조사하였다. 엽록소 형광 소멸은 actinic light 조건에서 잎 절편이 지속적으로 광합성을 수행하는 동안 포화광을 조사하여 분석하였다. 환원되어 있던  $Q_A$ 가 산화되면서 엽록소 형광이 감소하는 성분을 광화학 소멸(photochemical quenching, qQ)이라 하고, 틸라코이드 막의 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>11)</sup>. 비광화학 소멸 계수는 Schreiber 등<sup>12)</sup>의 정의에 따라 계산하였다.

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

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

$F_m$  = 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 닫혀있을 때의 최대 형광

**엽록소 정량** : 25 mM HEPES가 포함된 80% 아세톤 완충용액을 사용하여 잎으로부터 엽록소를 추출하였고 Porra 등<sup>13)</sup>의 방법에 의하여 총 엽록소량 및 카로티노이드 함량을 계산하였다.

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

## 결 과

### 1. 저선량 $\gamma$ 선을 조사한 무의 초기생육 조사

저선량 방사선이 무 종자의 발아와 초기 생육에 미치는 영향을 알아보기 위하여  $\gamma$ 선을 무 종자에 조사하여 온실재배를 통해 관찰하였다. 파종 7일 후에 조사한 발아율은 대조구와 10 Gy 조사구 모두 90% 정도로 시판용 신규종자라서 종자발아율이 양호하였으며  $\gamma$ 선 조

사에 따른 어떤 차이를 보이지 않았다(Table 1). 파종 20일 후 조사한 초장은 대조구 13.09 cm에 비해 10 Gy 조사구는 14.06 cm로 7% 정도 증가하였으나 통계적 유의성은 없었다(Table 1).

## 2. 저선량 $\gamma$ 선 조사에 따른 무의 엽록소 함량 및 SOD 활성 변화

대체로 양호한 생육 양상을 보였던 10 Gy 조사구의 엽록소 함량을 조사한 결과 대조구의 경우 총 엽록소 함량이  $296.3 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$  인 반면, 10 Gy 조사구는  $332.2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 대조구에 비해 다소 증가하는 경향을 보였다(Table 2). 한편 엽록소 a/b 는 대조구는 2.18 이었고, 10 Gy 조사구는 2.24였다(Table 2). 저선량  $\gamma$ 선 조사가 항산화 효소인 SOD활성에 어떠한 영향을 미치는지 조사한 결과 대조구의 경우 SOD 활성이 14.24 unit인 반면 10 Gy 조사구는 33.13 unit으로 대조구에 비해 130% 증가되었다(Table 2).

## 3. 저선량 $\gamma$ 선 조사에 따른 무의 효소활성 변화

다양한 환경 스트레스에 의해 유발되는 산화 스트레스는 자유 라디칼과  $\text{H}_2\text{O}_2$ 와 같은 활성 산소 종 등을 생성하여 세포에 손상을 입히게되고 결국에는 작물의 성장을 감소시킨다<sup>14)</sup>. 따라서 식물은 이러한 산화 스트레스에 대해 ascorbate, glutathione, carotenoids 등과 같은 항산화 물질이나 SOD, CAT, POD, glutathione reductase(GR) 등의 항산화 효소를 증가시킴으로써 이러한 스트레스에 대처하게 된다. 저선량의  $\gamma$ 선을 광합성 세균인 시아노박테리아에 조사했을 때 세포 증식의 증가와 더불어 SOD, GR 등의 항산화 효소가 증가되는 것을 관찰되었는데 이는 저선량의 방사선 자극이 산화 스트레스 하에서 증가되는 항산화 효소의 활성 증가와 관련이 있음을 보고한 것이다<sup>15)</sup>. 따라서 본 실험에서 저선량  $\gamma$ 선이 무 잎의 항산화 효소 활성 변화에 어떠한 영향을 미치는 가를 조사하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 저선량의  $\gamma$ 선이 단백질의 함량에는 영향을 미치지 않는 것으로 보였으나 CAT활성은 대조구가 0.05 unit인 반면, 10 Gy조사구는 0.07 unit 으로 대조구에 비해 30 % 증가하였고, 대체적으로 저선량 조사구에서 증가하는 경향을 보였다. POD 활성은 대조구는 0.19 unit였고 10 Gy조사구는 0.25 unit 으로 대조구에 비해 29% 증가하였다(Fig 1).

## 4. 산소 발생

무 잎에서 광자선속밀도(photon fluence rate, PFR)에 따른 광합성 특성을 조사하기 위하여 광량에 따른 산소발생을 조사하였다. Fig. 2a 에서 보는 바와 같이 대조구와 10 Gy의  $\gamma$ 선이 조사된 무의 산소 발생은  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서 포화되는 것으로 나타났다. 포화광에서 각각의 산소 발생은 대조구의 경우  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 10 Gy 조사구는  $12 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 대조구에 비해 1.2 배정도 높은 것으로 나타났다(Fig. 2a). 호흡률의 경우 대조구는  $0.89 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 10 Gy 조사구는  $1.35 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 저선량  $\gamma$ 선이 조사되었을 때 증가하는 경향을 보였다(Fig. 2a).

## 5. UV-B 스트레스에 따른 산소발생의 변화

UV-B 스트레스에 대한 저선량  $\gamma$ 선이 조사된 무 식물체의 반응 변화를 알아보기 위하여 대조구와 저선량  $\gamma$ 선이 조사된 무 잎에서 최대 광합성 능(Pmax)을 조사하였다. Pmax는 무 잎의 산소 발생이 포화되는  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서 측정하였다. Fig. 2b

에서 보는 바와 같이 대조구와 10 Gy의  $\gamma$ 선이 조사된 무의 산소 발생을 조사한 결과 대조구는  $10.64 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이었고 10 Gy 조사구에서는  $12.07 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 였다. 다음으로 UV-B 스트레스를 4시간 동안 유도했을 때 Pmax는 대조구의 경우  $2.54 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 으로 76%의 감소를, 10 Gy 조사구는  $3.01 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 75% 감소를 보였으며 대조구와 저선량 조사구간의 차이는 거의 없었다.

#### 6. UV-B 스트레스에 따른 형광 파라미터의 변화

무 잎의 초기 생육이 증가하고 항산화 효소의 활성이 증가되는 저선량 10 Gy가 조사된 무 식물체의 UV-B 스트레스에 대한 반응 변화를 알아보기 위하여 UV-B 스트레스를 유도한 뒤 엽록소 형광을 측정하였다. 엽록소 형광은 주로 엽록소 a에서 방출되며 광합성과 밀접한 관계가 있다는 것이 밝혀진 이후로 광합성 활성을 측정하는 지표로 사용되고 있다. Fig. 3a 에서 보는 바와 같이 UV-B 스트레스가 진행됨에 따라 Fv/Fm이 감소되는 경향을 보이며 대조구의 경우 UV-B를 4시간 처리하였을 때 Fv/Fm의 값이 0.2 정도로 75%의 감소를 볼 수 있었다. 반면 10 Gy 조사구의 경우 Fv/Fm값이 대략 0.3 정도로 대조구에 비해 UV-B 스트레스에 대해 덜 민감한 것으로 나타났다(Fig. 3a). 광계II의 광양자 수율을 나타내는  $\Phi_{\text{PSII}}$ 는 대조구의 경우 UV-B를 4시간 처리했을 때 대략 90% 감소하는 반면, 10 Gy 조사구는 84% 감소되었다(Fig 3b). 광계II의 손상은 Fo의 증가와 Fm의 감소를 수반하는데 본 실험에서도 UV-B 스트레스가 진행됨에 따라 Fo는 증가한 반면 Fm은 감소하는 경향을 보였으며 10 Gy 조사구에서 UV-B 스트레스에 대한 저해효과가 지연되는 것으로 나타났다(Fig 4).

### 참 고 문 헌

1. Luckey, T.D. 1980. Hormesis with ionizing radiation, CRC press, Inc. Boca Raton, FL.
2. Kim, J.S., Y.K. Lee, M.W. Back, Y.B. Lee and Y.S. Park. 1999. Influence of the low dose  $\gamma$ -ray radiation on the old seed germination and growth of chinese cabbage. Korean J. Environ. Biol. 17: 11-15.
3. Kim, J.S., Y.K. Lee, H.S. Park, M.H. Back and K.H. Chung. 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.
4. Kim, J.S., Y.K. Lee, H.S. Park, M.H. Back and D.H. Kim. 2000. Influence of low dose gamma radiation on the growth of maize(*Zea mays* L.) varieties. Korean J. Environ. Agri. 19: 328-331.
5. Kim, J.S., E.K. Lee, M.H. Back, H.S. Park and K.H. Kim. 1999. Effect of low dose of gamma radiation on the growth of groundnut(*Arachis hypogaea* L.). Korean J. Environ. Biol. 17: 257-261.
6. Niels W.H. and J.B. Roger. 1970. Manual on Radiation Dosimetry. Mard Dekker Inc. New York.
7. Bradford M.M. 1976. A rapid sensitive method for quantitation of microgram quantities

- of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem.* 72: 248-254.
8. Yun B.W., H.G. Hue, S.Y. Kwon, H.S. Lee, J.K. Jo and S.S. Kwak. 1998. Antioxidant enzyme in *Nicotiana* cells containing an *Ipomoea* peroxidase gene. *Phytochemistry.* 48: 1287-1290.
  9. Spychalla and S.L. Desborough. 1990. Superoxide dismutase, catalase and alpha tocopherol content of stored potato tubers. *Plant Physiol.* 94 : 1214-1218.
  10. Öquist, G., W.S. Chow and J.M. Anderson. 1992. Photoinhibition of photosynthesis represents a mechanism for long-term regulation of photosystem II. *Planta* 186: 450-460.
  11. Krause G.H. and E. Weis. 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basis. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42: 313-349.
  12. 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.
  13. Porra R.J., W.A. Thompson and P.E. 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.
  14. Rao, M.V., G. Paliyath and D.P. Ormrod. 1996. Ultraviolet-B-and Ozone-induced biochemical changes in antioxidant enzymes of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiol.* 110 : 125-136.
  15. Conter, A., D. Dupouy, C. Delteil and H. Planel. 1986. Influence of very low doses of ionizing radiation on *Synechococcus lividus* metabolism during the initial growth phase. *Arch. Microbiol.* 144: 286-290.

**Table 1.** Growth response of radish grown from seeds irradiated with different doses of  $\gamma$  radiation.

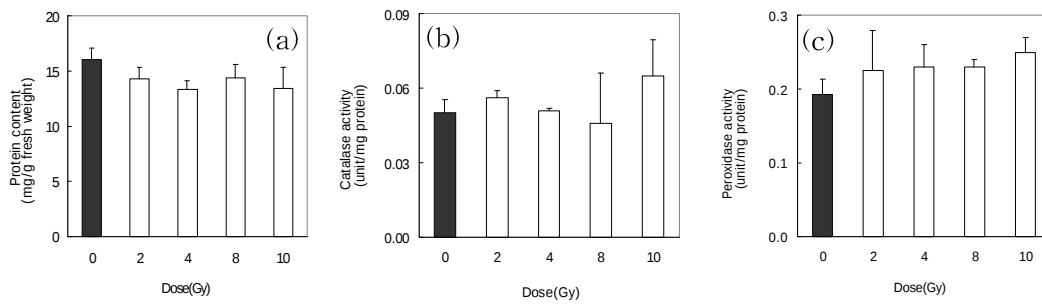
| Dose<br>(Gy) | Germination rate<br>(%)     | Seedling height<br>(cm) |
|--------------|-----------------------------|-------------------------|
| 0            | 92.9 $\pm$ 2.4 <sup>†</sup> | 13.09 $\pm$ 0.09        |
| 2            | 94.3 $\pm$ 0.0              | 13.53 $\pm$ 0.09        |
| 4            | 87.1 $\pm$ 2.4              | 12.69 $\pm$ 0.09        |
| 8            | 93.3 $\pm$ 1.9              | 13.01 $\pm$ 0.12        |
| 10           | 91.0 $\pm$ 0.5              | 14.06 $\pm$ 0.10        |

<sup>†</sup> : mean $\pm$ SE

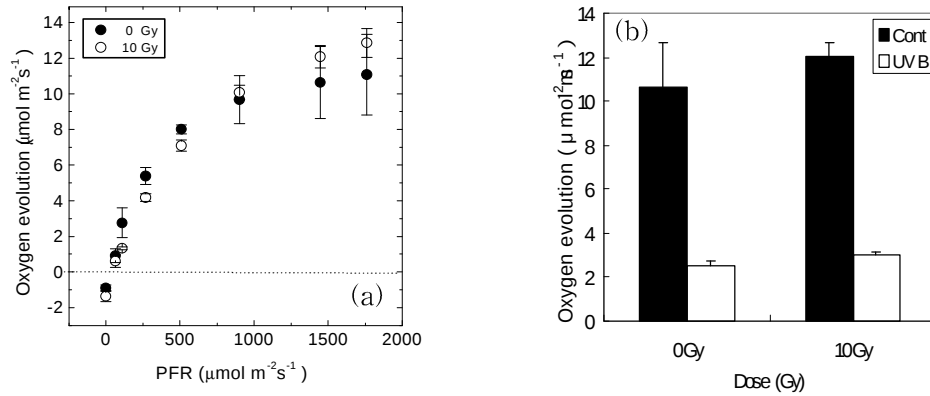
**Table 2.** Changes in the chlorophyll contents and SOD activity of radish from seeds irradiated with different doses of  $\gamma$  radiation.

| Dose<br>(Gy) | Total Chls<br>( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ) | Chl a/b         | SOD activity<br>( $\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$ ) |
|--------------|-------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 0            | 296.3 $\pm$ 21.10 <sup>†</sup>                        | 2.18 $\pm$ 0.06 | 14.24 $\pm$ 0.63                                                          |
| 10           | 332.2 $\pm$ 13.70                                     | 2.24 $\pm$ 0.01 | 33.13 $\pm$ 1.87                                                          |

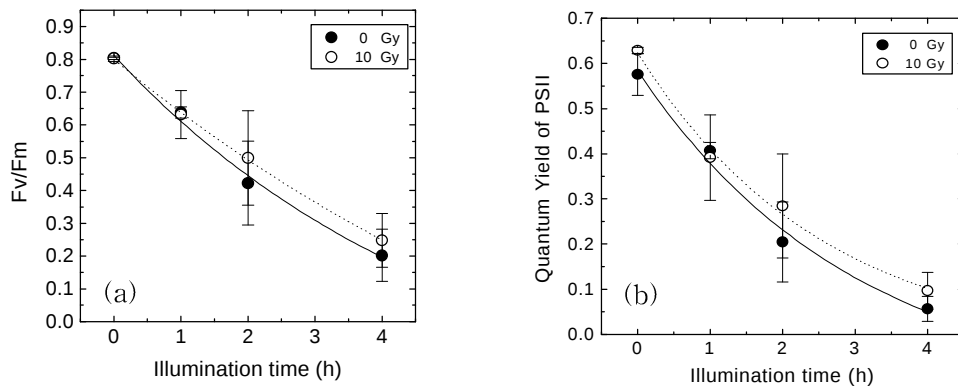
<sup>†</sup> : mean $\pm$ SE



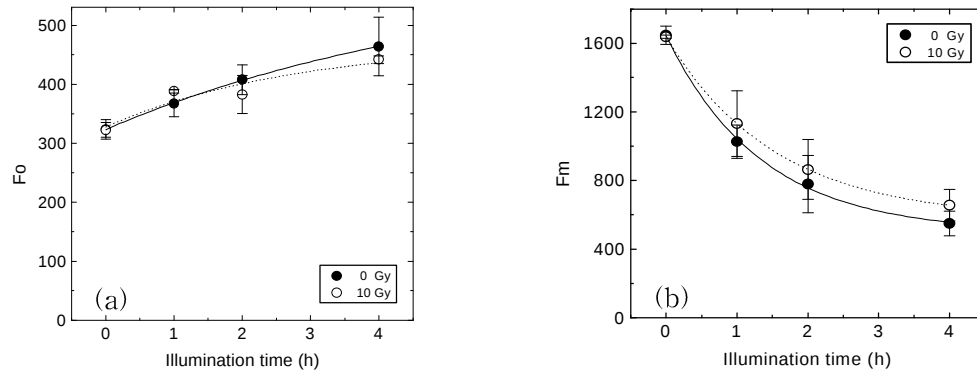
**Fig. 1.** Enzyme activities of radish leaves grown from seeds irradiated with different doses of  $\gamma$  radiation at 20 days after planting. Data represents mean $\pm$ SE. (a) ; Protein contents, (b) ; Catalase activity, (c) ; Peroxidase activity.



**Fig. 2.** Change in the  $\text{O}_2$  evolution in radish leaf discs as a function of photon fluence rate (PFR). ●, Control ; ○, 10 Gy treatment(a). Changes in the maximal photosynthetic  $\text{O}_2$  evolution (Pmax) in radish leaf discs with UV-B stress or without stress(Cont)(b). UV-B was given at the intensity of  $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  to the detached leaves. Data presented are mean values  $\pm$ S.E. for 3 measurements.



**Fig. 3.** Changes in the maximal photochemical efficiency of PSII ( $F_v/F_m$ ) as a function of illumination time(a). Changes in the effective quantum yield of photochemical energy conversion at PSII reaction centers,  $\Phi_{\text{PSII}}$  with illumination time. UV-B was given at the intensity of  $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  to the detached leaves. ●, Control ; ○, 10 Gy treatment.



**Fig. 4.** Changes in dark-level fluorescence yield ( $F_o$ ) as a function of illumination time(a). Changes in the maximal fluorescence of PSII ( $F_m$ ) as a function of illumination time(b). UV-B was given at the intensity of  $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  to the detached leaves. ●, Control ; ○, 10 Gy treatment.