

## Effects of Combined Irradiation of Neutrons and $\gamma$ -Rays on the Pink Mutation Frequencies in *Tradescantia*

Jin Kyu Kim, Young-Keun Lee, Jae Sung Kim, Hae Shick Shin<sup>1</sup>, Soung-Hee Hyun<sup>2</sup>  
Korea Atomic Energy Research Institute, <sup>1</sup>Chungnam National University, <sup>2</sup>Eulji University

### 중성자와 감마선 중복 조사가 자주달개비 분홍돌연변이율에 미치는 영향

김진규 · 이영근 · 김제성 · 신해식<sup>1</sup> · 현성희<sup>2</sup>  
한국원자력연구소, <sup>1</sup>충남대학교, <sup>2</sup>을지의과대학교

(2000년 2월 11일 접수, 2000년 5월 19일 채택)

**Abstract** - The effects of combined irradiation of neutrons and  $\gamma$ -rays were analysed by means of *Tradescantia* stamen hair (TSH) assay. Potted plants were irradiated with 0~2 Gy of  $\gamma$ -rays. For the combined treatments, the plants were irradiated with neutrons from <sup>252</sup>Cf 24 hours before or after  $\gamma$ -irradiation. The slopes of dose-response curves were 5.98, 6.17 and 7.48, in  $\gamma$ -rays,  $\gamma$ -rays+neutrons, and neutrons+ $\gamma$ -rays irradiated groups, respectively. The biological efficacy of radiations in the induction of pink mutations increased by 25% in neutrons+ $\gamma$ -rays irradiated group, while it increased by 12% in  $\gamma$ -rays+neutrons irradiated group. The combined irradiation with two kinds of radiations results in the different efficacy of radiation depending on the order of irradiations, which is of great importance in the related fields such as sterilization and radiotherapy.

**Key words** : neutrons,  $\gamma$ -rays, *Tradescantia*, pink mutation

**요약** - 자주달개비 식물체에 감마선과 중성자를 중복 조사하였을 때 나타나는 수술털 (TSH) 분홍돌연변이율의 변화를 분석하였다. 감마선은 0~2 Gy의 범위에서 선량별 조사를 하였으며 중성자는 <sup>252</sup>Cf 선원으로 부터 일정한 거리에 식물체를 배열하여 조사하였다. 감마선을 선량별로 조사한 후 중성자를 조사한 때의 TSH 분홍돌연변이 감마선량-반응의 증가계수는 6.17로 감마선량-반응식의 5.98에 비해 12%의 방사선효율 증가를 초래했으며 중성자를 먼저 조사한 다음 감마선을 조사한 경우는 증가계수가 7.48로서 25%의 방사선 생물효율 증대가 나타났다. 두 종류의 방사선 중복 조사시 조사방식의 선·후 조합에 따른 방사선생물효율 증대가능성은 멸균 또는 세포사멸 등 방사선을 긍정적으로 이용하는 분야에 있어 매우 중요한 의미가 있다.

중심어 : 중성자, 감마선, 자주달개비, 분홍돌연변이

### 서론

이온화방사선은 생물체에 대하여 다양한 반응을 유발하며 그 반응의 정도는 선량에 따라 다르다. 생물체를 이루는 다양한 세포들 중에는 방사선에 대한 민감도가 높아 특히 영향이 잘 나타나는 것들이 있다. 인위적으로 만들어진 자주달개비 중간 잡종 *Tradescantia* BNL 4430 (T-4430) 클론의 경

우 꽃색에 있어서 유전적 이형성을 가지며 정상적으로 우성인 남색 꽃을 피우지만 꽃눈 속에서 분열과정 중에 있는 수술털 (TSH) 선단세포가 이온화방사선에 의해 유전적 손상을 받으면 자주색에서 분홍색 또는 무색 세포로 유전자 돌연변이를 일으키거나 거대세포출현, 분열능력상실 (치사돌연변이) 등의 여러 가지 체세포돌연변이를 일으킨다 [1]. TSH 세포의 분홍돌연변이는 뚜렷한 방사선량-반응 관계를 보이는 것으로 알려져 있으며 [2,3],

특히 X선의 경우 0.25 cGy까지, 중성자의 경우 0.1 cGy까지의 선량-반응이 보고되어 있다. 이같이 T-4430은 실제로 인간집단이 접하게 되는 현실적 저선량 영역의 이온화방사선에 의해서도 쉽게 유전적 변이를 일으키기 때문에 방사선에 대한 식물학적 감시 기구로서 방사선생물학, 핵의학 및 환경연구 등 다양한 분야에서 연구수단의 역할을 담당하고 있다. 우주비행에 따른 방사선의 생체영향 연구 [4], 비키니 섬의 방사능 오염토양의 생물학적 영향 및 토양 건전성 평가를 위한 응용연구 [5], 중성자를 이용한 암치료시설 외부의 방사선 감시 수단으로서의 자주달개비 응용사례 [6], 자주달개비를 이용한 보른-중성자 포획치료의 전임상 연구 [7], 방사선방어 후보물질의 선별 및 효능 평가 [8] 등은 자주달개비가 다양한 응용성을 갖고 있음을 보여주는 연구 사례들이다.

T-4430을 포함한 자주달개비를 방사선연구에 활용할 때의 장점은 여러 가지이다. 비교적 손쉬운 방법으로 여러 가지 돌연변이를 동시에 분석할 수 있으며 분석결과와 신뢰성이 인정될 수 있다. 꽃차례와 꽃눈의 크기가 작기 때문에 실험군별로 균일한 방사선량을 조사할 수 있으며 특히 방사선장의 면적 (target area)이 제한적일 때 더욱 유효하다. 수술털은 말단과 차말단 세포의 연속적 분열에 의해 이뤄지는 근본적으로 단일분열 세포성이므로 분석결과를 여타의 단일 세포계를 이용한 실험결과와 직접 비교할 수 있다. 그리고 하나의 꽃 속에 6개의 수술이 있고 각각의 수술대는 50~70개의 수술털을 갖고 있으며 각 털은 20~30개 정도의 세포로 이뤄져 있으므로 하나의 꽃을 분석하는 경우 그 결과는 약 만개의 수술털 세포에서 얻은 정보이므로 통계적으로 이점이 크다. 또한 TSH 세포의 자발돌연변이 빈도인 hair-cell division당  $10^{-4}$ 이 포유동물 세포의 자발돌연변이 빈도인  $10^{-3} \sim 10^{-7}$ /세포세대/좌위와 상당히 유사하다는 점 [9]에 비추어 볼 때 TSH 세포의 돌연변이 반응은 방사선에 의한 인간의 위해도를 평가하는 데 직접적으로 적용될 수 있는 중요한 자료를 확보하는 데 큰 도움이 될 수 있다 [10].

본 연구는 T-4430의 수술털 세포에 유발된 분홍돌연변이를 분석하는 이른바 TSH assay를 방사선생물학적 연구의 수단으로 응용한 실험연구이다. 특히 선질이 다른 두 종류의 방사선을 연계하여 중복 조사하였을 때 나타나는 방사선의 생물학적 효용성 변화에 초점을 맞추고 분석을 실시하였다. 지금까지 보고된 감마선 선량-반응 관계 [11,12]를 토대로 삼고 실험결과와 해석에 영향을

주지 않는 범위에서 가급적 낮은 선량의 중성자를 감마선조사 전후에 중복 조사하고 각각의 실험조건에 따른 방사선의 생물학적 효율 (biological efficacy) 증감여부를 규명하였다.

## 재료 및 방법

### 실험용 식물체

육묘용 상토와 부숙퇴비를 혼합한 토양이 담긴 포트에서 생육한 *Tradescantia* BNL 4430 (T-4430) 클론을 실험재료로 사용하였다. 식물체의 일반관리는 Underbrink *et al.* [1]에 의해 제시된 절차에 따랐으며 필요에 따라 부가적 보온과 조광을 실시하였다. 화서가 잘 발육된 식물체를 포트 채로 24시간 이상 실험실 조건에 순치시킨 다음 포트 20개씩 (>200 화기)을 한 실험군으로 사용하였다.

### 방사선 조사

감마선 조사는 한국원자력연구소의 저준위 조사시설 ( $^{60}\text{Co}$ , 선원강도 150 TBq, Panoramic Irradiator, Atomic Energy of Canada Ltd.)를 이용하여 상온, 공기중에서 시료를 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0 Gy의 선량으로 방사선 조사하였다. 이 때의 조사선량률은 Fricke dosimeter로 측정하였다 [13].

중성자 조사를 위해서 한국원자력연구소 검교정용 표준선장  $^{252}\text{Cf}$  중성자 선원을 사용하였다.  $^{252}\text{Cf}$  선원으로 339 cm 이격된 거리에 동심원상으로 포트를 배열하여 조사하였다. 이때의 중성자 방출률 (emission rate)은  $3.9933 \times 10^8$  neutrons/sec. 였다.

식물체는 무조사 대조군, 중성자 조사군, 감마선을 선량별로 조사한 다음 중성자를 조사한 실험군, 그리고 중성자를 조사한 다음 감마선 선량별로 조사한 실험군의 4개 실험조로 구분하였다. 두 종류의 방사선을 조사할 때 선조사와 후조사는 자주달개비 개화 주기인 24시간의 간격을 두고 이뤄졌다.

### 식물체 배양

방사선 조사후 식물체는 생장상 (growth chamber)내에서 전 실험기간 동안 관리되었으며 배양조건은 명기 14시간 동안은 20°C, 습도 80%, 조도  $290 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ , 암기는 10시간, 18°C, 상대 습도 85%를 유지하였다. 식물체의 영양분 공급을 위하여 전 실험기간 동안 Hoagland No.2 용액 1/6 희석액 [14]을 3일 간격으로 포트에 주었다.

### 분홍돌연변이 분석

돌연변이 분석은 표준화된 절차를 따라 실험현미경 (x20) 하에서 실시하였다 [11]. 화기는 검경의 용이성을 고려하여 반드시 만개상태인 것을 채화하였다. 채화된 꽃은 일련번호가 적혀 있는 페트리디시에 물 적신 습지를 깔고 4℃로 검경시까지 냉장보관 하였다. 검경용 프레파라트는 제작 직후 검경하였으며 이때 어린 색조의 분홍돌연변이에 대한 판별이 용이하도록 노란 배경 위에 프레파라트를 놓고 검경하였다.

### 돌연변이율의 산정

한 개 또는 다수의 연속된 분홍세포군 각각을 하나의 돌연변이 건수로 계수하며 한 개의 정상세포로 분리되어 있는 분홍세포군의 경우 정상세포 양쪽을 각각 건수로 계수하였다. 한 수술털 전체가 분홍세포로 이뤄진 경우가거나 수술 전부 또는 꽃 전체가 분홍세포로 이뤄진 경우도 한 건식의 분홍돌연변이로 계수하였다. 돌연변이 세포의 계수는 방사선 조사후 4주 이상 지속적으로 실시되었으며 특히 방사선 조사후 돌연변이 증가가 두드러진 고조기간 (peak interval)의 검경 결과를 통합한 자료 (pooled data)로부터 100 모당 돌연변이 건수로서 돌연변이율을 산정하였다.

### 세포주기인자의 산정

세포주기인자 (cell cycle factor)는 단독 분홍세포 건수의 총 분홍돌연변이 건수에 대한 비율로서 표시된다. 단독 분홍세포의 출현은 세포주기중 합성기(S phase) 이후에 유발된 돌연변이의 결과 [15]이기 때문에 세포주기인자는 방사선 조사에 의한 세포분열의 교란 정도를 판단하는 생물학적 척도로 사용하였다.

## 결과 및 고찰

### 중성자 조사에 의한 영향

방사선을 조사하지 않은 대조 실험군의 실험개시후 6~16일 기간중 평균 분홍돌연변이율은  $0.39 \pm 0.06$ 이었다. 한편 중성자만을 조사한 실험군의 경우 정상적인 자발돌연변이율에 비해 돌연변이율이 급증하는 고조기간이 나타나지는 않았으나 조사후 6~16일 기간중 평균 분홍돌연변이율은 자발 분홍돌연변이율에 비해 다소 높은  $0.51 \pm 0.06$ 이었다. 한국원자력연구소의 중성자 검교정 시설 내

에서의 역산란 등의 구조적 특성은 고려하지 않고 단순히 선원과 피조사체 간의 이격거리만을 고려하였을 때의 중성자 선량은 0.78 mGy로 계산되었다. 즉,  $^{252}\text{Cf}$  선원으로부터 393 cm 이격된 거리에서의 중성자 조사는 방사선을 전혀 조사하지 않은 경우에 비해 다소간의 분홍돌연변이율 상승을 초래하였을 뿐 뚜렷한 돌연변이 고조기간을 정의할 수 없었으며 물론 고조기간의 지연이나 앞당김도 없었다.

### 감마선과 중성자 조사에 의한 영향

감마선이나 X선 조사에 대한 TSH 분홍돌연변이율의 선량-반응 관계는 이미 많은 연구보고 [16,17]를 통해 잘 알려져 있으나 감마선을 선량별로 조사한 다음 일정한 저선량 중성자를 조사하였을 때 나타나는 생물학적 영향에 대한 연구는 거의 없다. 통상적인 개화주기인 24시간을 간격으로 하여 두 방사선을 중복 조사한 다음의 분홍돌연변이 일정변화를 Fig. 1에 나타내었다. 분홍돌연변이율의 고조기간은 중복 조사후 6~13일에 나타났다. 감마선 조사선량을 기준으로 0.1, 0.5 및 1.0 Gy 조사군에서는 중복 조사후 9일째에 최대 돌연변이율을 보였으며 0.3 및 2.0 Gy 조사군에서는 10일째 최대값을 보임으로써 감마선만을 조사하였을 때 나타나는 일반적 일정변화의 양상을 그대로 나타내었으나 분홍돌연변이율의 값은 훨씬 높았다.

감마선과 중성자 중복 조사에 의한 영향은 감마선만을 조사한 경우에 비해 돌연변이율의 상승폭이 크다는 것이 확인된 결과이며 이같은 중복 조사는 돌연변이 고조기간에 대한 지연이나 단축효과는 전혀 나타나지 않았다. 방사선 조사후 식물체의 생육 건전성에 대한 간접지표로서의 모당 세포수의 변화를 보면 감마선 2.0 Gy 조사군을 제외하고는 평균값인 24를 기준으로 정상적 변동폭을 보여 중복 조사가 식물체의 생육 자체에는 큰 영향을 미치지 않은 것으로 평가되었다. 세포분열의 교란정도를 나타내는 세포주기인자의 변화양상은 일반적 감마선 조사시와 동일한 양상을 보였으며 (Fig. 2) 감마선 2.0 Gy 조사군에 있어서 수술털당 세포수가 평균값에 비해 훨씬 낮게 나타난 것은 감마선 2.0 Gy 및 중성자 0.78 mGy 중복 조사는 T-4430 식물체의 생육을 저해하는 유해수준인 때문으로 해석될 수 있다.

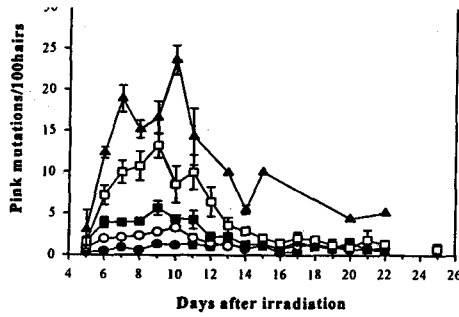


Fig. 1. Pink mutation frequencies in TSH cells irradiated with neutrons 24 hours after  $\gamma$ -irradiation. Bars represent the standard error of the mean. ( $\gamma$ -rays ; ●=0.1 Gy, ○=0.3 Gy, ■=0.5 Gy, □=1.0 Gy, ▲=2.0 Gy).

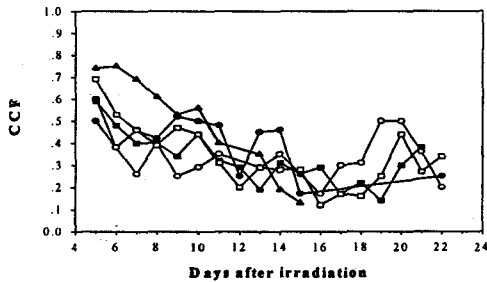


Fig. 2. Cell cycle factors in TSH cells irradiated with neutrons 24 hours after  $\gamma$ -irradiation. ( $\gamma$ -rays ; ●=0.1 Gy, ○=0.3 Gy, ■=0.5 Gy, □=1.0 Gy, ▲=2.0 Gy).

**중성자와 감마선 중복 조사에 의한 영향**

중성자를 조사하고 24시간이 지난 다음 감마선을 조사하였을 때 나타나는 선량별 분홍돌연변이 일정변화를 보면 분홍돌연변이율의 고조기간은 중복 조사 후 6~16일에 나타났으며 특징적으로 7~12일 기간중 분홍돌연변이율의 분포는 준고대 (quasi-plateau) 양상을 보였다 (Fig. 3). 감마선 선량에 따른 분홍돌연변이 최대값은 중복 조사 후 9일 또는 10일에 나타남으로써 선감마선 후중성자 조사군에서 나타난 결과와 유사하였으며 중성자 선조사군의 통합자료에 대한 감마선량별 평균값은 감마선 선조사군의 경우보다 높았다. 감마선만 조사했을 경우에 비하여 돌연변이의 고조기간 폭이 넓었으며 상승값이 수일간에 걸쳐 준고대를 이루는 것이 특징적이었다.

방사선 조사후 식물체 생육건전성에 대한 지표로서의 모당세포수 변화를 볼 때 0.1~0.5 Gy 감마선량 범위에서는 정상적 평균값인 24를 전후한 변동을 보여 생육에 지장이 전혀 없는 것으로 나타났으나 감마선 1.0 Gy 조사군에서 약간의 세포수 감소가 나타나기 시작하였고 감마선 2.0 Gy 조사군에서는 16세포 이하까지의 감소를 보임으로써 중성자+2.0 Gy 감마선 중복 조사에 따라 식물체의 생육이 크게 저해되고 있음을 알 수 있었다 (Fig. 4). 한편, 세포주기인자의 일정변화에서도 감마선량 2.0 Gy 조사군에서 세포주기인자의 감소가 두드러지게 나타남으로써 중성자 조사후 고선량의 감마선 조사는 식물체의 생육저해를 유발하는 것으로 밝혀졌다. 이러한 생육저해는 수술털 세포가 분열능력을 상실함으로써 나타나는 치사돌연변이 (lethal mutation)로 이어지기 때문에 실험상의 중요한 변수로 나타나게 된다.

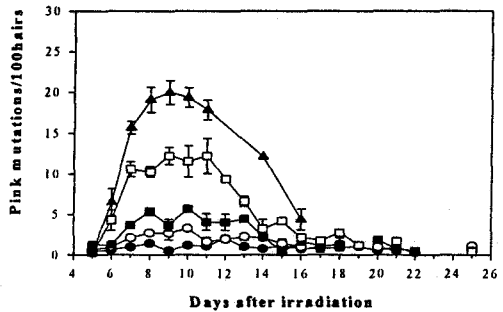


Fig. 3. Pink mutation frequencies in TSH cells irradiated with neutrons 24 hours before  $\gamma$ -irradiation. Bars represent the standard error of the mean. ( $\gamma$ -rays ; ●=0.1 Gy, ○=0.3 Gy, ■=0.5 Gy, □=1.0 Gy, ▲=2.0 Gy).

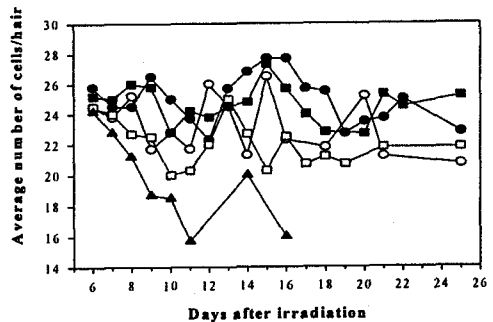


Fig. 4. Average number of the cells per hair in T-4430 irradiated with neutrons before  $\gamma$ -irradiation ( $\gamma$ -rays ; ●=0.1 Gy, ○=0.3 Gy, ■=0.5 Gy, □=1.0 Gy, ▲=2.0 Gy).

**중복 조사된 TSH 분홍돌연변이의 감마선량-반응**

방사선 조사후 6~16일 사이의 돌연변이율 고조기간에 대한 통합자료를 이용하여 감마선 선량별 평균 분홍돌연변이율을 산정하고 이를 근거로 선량-반응 관계를 정립하였다. 자주달개비의 분홍돌연변이에 관한 여러 연구 [16,17]를 통해 방사선에 의한 치사돌연변이가 우세해지는 선량인 이른바 포화선량 이하의 선량 영역에서 나타나는 분홍돌연변이율의 변화를 일차함수로 표현하는 것이 정당함이 입증된 바 있다. 본 실험의 결과도 선형 선량-반응 관계로서 정의될 수 있었으며 이때의 각 반응식의 통계학적 신뢰도는 95% 이상이었다. 감마선량 0.1 Gy에서 2.0 Gy의 범위에서 나타난 TSH 분홍돌연변이의 선량-반응 관계식의 기울기(증가계수)는 5.98이었으며, 감마선을 선량별로 조사한 후 중성자를 조사한 TSH 분홍돌연변이 감마선량-반응의 증가계수는 6.17, 중성자를 먼저 조사한 다음 감마선을 조사한 경우의 선량-반응 증가계수는 7.48이다. 감마선만 조사한 경우에 비하여 선감마선 후중성자 조사시 12%, 선중성자 후 감마선 조사시 25%의 방사선생물효율 (biological efficacy of radiation) 증대가 나타남을 확인하였다 (Fig. 5).

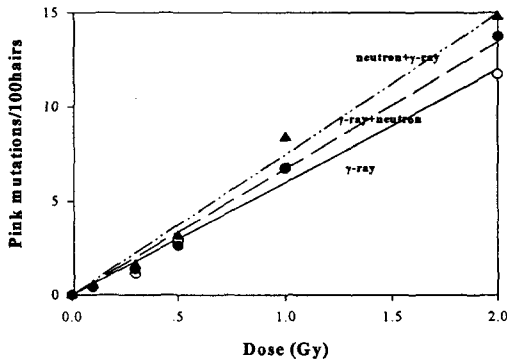


Fig. 5. Dose-response relationships of pink mutation frequencies in TSH cells (○=γ-rays, ●=γ-rays+neutrons, ▲=neutrons+γ-rays).

큰 폭의 기온일교차나 극단적 광주기 체제와 같은 불합리한 환경조건이 복합적으로 작용하였을 때 자주달개비 수술털 세포에 방사선에 의해 유발된 손상을 회복시키는 과정에 있어서 교란현상이 나타남으로써 전체적인 돌연변이율의 증가는 물론

손상회복 저해로 인한 돌연변이 고조기간 지연이 나타난다는 연구결과 [11,12,16]를 감안할 때 중복 처리의 한 조건인 중성자가 실험결과 해석상의 교란 요인이 되지 않음을 확인할 필요가 있다. 즉, 두 종류의 방사선을 연계적으로 조사하여도 돌연변이율의 상승을 나타내는 고조기간이 지연되거나 앞당겨지지 말아야 중복 조사에 의한 생물학적 영향을 정확하게 판단하는 것이 가능하기 때문이다.

중성자 선원으로부터 조사 식물체가 떨어진 이격거리 393 cm 만을 고려하여 계산한 중성자 선량은 0.78 mGy였다. 동일한 중성자 선원을 이용한 자주달개비 분홍돌연변이와 중성자 선량반응 실험연구 보고 [18]에 따르면 <sup>252</sup>Cf 중성자의 상대 생물효과비 (RBE; relative biological effectiveness) 값은 3.1~6.8의 범위를 보이는 것으로 나타났는데 이중 가장 RBE가 높은 중성자 선량-반응식의 기울기는 76.7이었다. 이같은 반응관계식을 이용하여 0.78 mGy의 중성자 선량에 의한 분홍돌연변이율을 계산하였을 경우 그 값은 0.06으로서 자발 돌연변이율의 표준오차 수준에 머물고 있다. 이론적으로 수립된 선량-반응 관계식은 0.005~0.2 Gy까지의 비교적 높은 중성자 선량 범위에 대한 분석결과로부터 산출된 것으로서 이 식을 근거로 추산해 볼 때는 본 실험에 사용된 중성자 선량이 실험결과 해석에 오류를 유발할 가능성이 있는 요인은 아닌 것으로 판단된다.

한편, 선질이 다른 두 종류의 방사선을 연계적으로 조사하였을 때 나타나는 생물학적 영향은 중복 조사의 조합조건에 따라 크게 달라질 수 있다. 방사선의 종류와 방사선량의 범위가 정해진 상황에서 조사의 선후 조건만을 바꿈으로써 방사선의 생물학적 효율을 증대시킬 수 있다는 사실은 방사선 멸균, 종양조직의 방사선 치료 등 방사선을 긍정적으로 이용하는 분야에 대한 커다란 응용가능성을 가지고 있기 때문에 그 중요성이 인정된다.

**결 론**

이온화방사선에 대한 민감도가 높은 자주달개비가 방사선의 영향을 연구하는 데 효과적으로 이용되었다. T-4430 클론의 수술털 세포에 유발된 분홍돌연변이를 분석하는 이른바 TSH assay를 방사선생물학적 연구의 수단으로 응용하여 선질이 다른 두 종류의 방사선을 식물체에 중복 조사하였을 때 나타나는 방사선의 생물학적 효용성 변화를 분

석하였다. TSH 세포의 방사선 반응양상을 변화시키지 않는 낮은 선량의 중성자를 감마선조사 전후에 중복 조사하였을 때 각각의 실험조건에 따른 방사선의 biological efficacy 증감여부를 비교·판별하는 것이 가능하였다. 감마선을 선량별로 조사하고 저선량 중성자를 조사한 경우 감마선만을 조사하였을 때에 비해 분홍돌연변이를 유발하는 방사선효율이 약 12% 증가되었으며 중성자를 먼저 조사한 후 감마선 조사한 경우는 25%의 방사선생물효율 증대가 나타났다. 선질이 다른 두 종류의 방사선을 조사함에 있어서 중성자를 먼저 조사한 다음 감마선을 선량별로 조사하는 것이 방사선의 생물학적 효용성을 보다 높게 증대시킬 수 있는 방법으로 밝혀졌다.

### 감사의 말씀

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. A. G. Underbrink, L. A. Schairer and A. H. Sparrow, *Chemical Mutagens: Principles and Methods for their Detection*, Ed. A. Hollaender, Plenum Press, New York, 3, 171-207 (1973).
2. A. H. Sparrow, A. G. Underbrink and H. H. Rossi, "Mutations induced in *Tradescantia* by small dose of X-rays and neutrons: analysis of dose-response curves." *Science*, 176, 916 (1972).
3. C. H. Nauman, A. H. Sparrow and L. A. Schairer, "Comparative effects of ionizing radiation and two gaseous chemical mutagens on somatic mutation induction in one mutable and two non-mutable clones of *Tradescantia*." *Mut. Res.* 38, 53-70 (1976).
4. N. L. Delone, V. V. Antipov and G. P. Parfenov, "New type of chromosomal aberrations in microspores of *Tradescantia paludosa* in flight experiments on board of space satellites." *Doklady Akademi Nauk SSSR*, 290, 979-981 (1986).
5. S. Ichikawa and C. Ishii, "Somatic mutation frequencies in the stamen hairs of grown in soli samples from the Bikini Island Marshall Island north pacific ocean." *Jpn J. Genet.* 66, 27-40 (1991).
6. J. Huczowski, A. Cebulska-Wasilewska and B. Lazarska, "*Tradescantia* stamen hairs : a biological monitor of dose outside the neutron beam used cancer therapy." *Radiobiologia Radiotherapia*, 26, 65-69 (1985).
7. K. Rekas, A. Cebulska-Wasilewska and J. Capala, "Biological efficiency of epidermal neutrons estimated from gene mutations in TSH assay." in *Radioactivity : Risk and Hope*, Book of Abstract, Workshop in memory of Maria Sklodowska-Curie, Krakow Poland, Oct 6-7 (1997).
8. J. K. Kim, H. S. Shin, Y. K. Kim, B. H. Lee and Y. I. Lee, "Effects of natural extracts on the radiation-induced pink mutations in *Tradescantia* stamen hair." *J. Kor. Nuc. Soc.* 31, 522-528 (1999).
9. A. H. Sparrow and R. C. Sparrow, "Spontaneous somatic mutation frequencies for flower color in several *Tradescantia* species and hybrids." *Environ. Exp. Bot.*, 16, 23-43 (1976).
10. A. H. Sparrow, A. G. Underbrink and R. C. Sparrow, "Chromosome and cellular radiosensitivity, I : the relationship of  $D_0$  to chromosome volume and complexity in seventy-nine different organisms." *Radiat. Res.*, 32, 915-945 (1967).
11. 김진규 등, 지표생물을 이용한 방사선량 감시, KAERI/RR-1834/97 (1998).
12. W. R. Kim, J. K. Kim and A. Cebulska-Wasilewska, "Effect of photoperiod on radiation-induced pink mutations in *Tradescantia* stamen hairs," *Kor. J. Environ. Biol.*, 17, 331-335 (1999).
13. W. H. Niels and J. B. Roger, *Manual on Radiation Dosimetry*. Marcle Dekker Inc., New York (1970).
14. A. Conger, "A simple liquid-culture method

- of growing plants." *Proc. Florida State Horticultural Society*, **77**, 3-6 (1964).
15. International Atomic Energy Agency, *Biological Dosimetry - Chromosome Aberration Analysis for Dose Assessment*. IAEA Technical Reports Series No. 260, p. 1-69. IAEA, Vienna (1986).
  16. 김진규, 김원록, 김재성, 신해식, 이정주, "기온 일교차와 감마선의 영향에 의한 자주달개비 수술털의 체세포돌연변이 빈도." *환경생물학회지*, **16**, 253-262 (1998).