

## 자주달개비 미세핵 분석법을 이용한 비스페놀 에이 및 감마선의 생물학적 영향 비교 연구

신해식 · 송희섭<sup>1</sup> · 현성희<sup>2</sup> · 이진홍 · 김진규<sup>1,\*</sup>

충남대학교 환경공학과, <sup>1</sup>한국원력연구소, <sup>2</sup>울지의과대학교

### Comparative Study on Biological Effects of Gamma-Radiation and Bisphenol A with Tradescantia Micronucleus Assay

Hae Shik Shin, Hi Sup Song<sup>1</sup>, Soung-Hee Hyun<sup>2</sup>, Jin-Hong Lee and Jin Kyu Kim<sup>1,\*</sup>

Department Environmental Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

<sup>1</sup>Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

<sup>2</sup>Eulji University, Daejeon 301-112, Korea

**Abstract** - Some of synthetic chemicals can act as an endocrine disrupting substance in higher animals. Dioxins, DDT, PCBs and bisphenol A (BPA) are classified into endocrine disruptors and are under a strict control in many countries. This research was designed to compare the clastogenic effects of BPA to those of ionizing radiation to establish the relative effectiveness of BPA by means of *Tradescantia* micronucleus assay. For the uptake of the BPA through the stems, groups of fresh cuttings of *Tradescantia* BNL 4430 were placed in BPA solutions of 0 to 4  $\mu$ M for 6 hours under continuous aeration. The other groups of the cuttings were irradiated with 0 to 0.5 Gy of gamma-rays. The frequencies of micronucleus showed a positive dose-response relationship in the range of 0 to 0.5 Gy, and a clear concentration-response relationship in the experimental range of BPA concentrations. By comparing the two experimental results, it is possible to estimate the BPA concentration and its equivalent radiation dose for a fixed value of MCN frequency. BPA of 11.8  $\mu$ M can give rise to 53.3 MCN/100 tetrads, which is the same frequency induced by 25 cGy of gamma-rays. It is of biological importance that clinical symptoms start to develop after a whole body exposure to radiation higher than 25 cGy. The results indicate that the pollen mother cells are an excellent biological end-point for toxicity test of suspected endocrine disrupting chemicals such as bisphenol A, cotylphenol and nonylphenol.

**Key words** : Radiation, Bisphenol A, *Tradescantia*, Micronucleus

## 서 론

\* Corresponding author: Jin Kyu Kim, Tel. 042-868-2057,  
Fax. 042-868-2091, E-mail. jkkim@kaeri.re.kr

합성화학물질의 이용으로 인하여 인간은 풍요롭고 윤택한 삶을 영위하고 있다. 그러나 합성화학물질의 사용

이 내분비계 장애물질로 작용할 수 있다는 보고가 제기되면서 사회적으로 중요한 관심의 대상이 되고 있다. 대부분의 합성화학물질은 생태학적 영향에 대한 명확한 규명이 이루어지지 않고 사용되고 있는 실정이다. 특히, 이러한 합성화학물질들 중에서도, 현재 생태계에 중요한 영향을 미칠 것으로 의심이 되는 물질들, 다이옥신, 디디티, 피시비, 비스페놀 에이(BPA) 등은 선진국에서 내분비계 장애물질로 분류하여 엄격하게 관리하고 있다. 이들 물질은 내분비계의 정상적인 기능을 방해하는 화학물질로서 환경으로 배출된 화학물질이 먹이사슬을 따라 고등동물의 체내에 유입되어 마치 호르몬처럼 작용함으로써 생태계를 교란하고 있다. 이러한 합성화학물질에 노출로 인한 영향은 정자수의 감소, 암 촉진, 암수의 변화, 기형유발을 일으키는 것으로 추정되고 있다(신 1999). 합성화학물질은 앞으로도 우리 생활에서의 용도가 증가됨에 따라 이들 물질들에 대한 정확한 검색 및 시험법을 확립하고 그 위해성에 대한 생물학적 평가가 보다 상세하게 이루어져야 할 것이다.

생물체의 생식기관은 매우 민감한 세포들로 구성되어 있기 때문에 이온화 방사선과 환경독성물질에 의한 손상이 쉽게 나타난다. 자주달개비의 화분모세포(PMC; pollen mother cell)는 감수분열을 통하여 4개의 꽃가루를 형성하는 웅성 생식세포로서 방사선 또는 돌연변이원에 매우 민감하다(Ma 1979, 1980, 1999; Xu and Ma 1998). 특히 감수분열중인 화분모세포의 염색체는 동일개체의 분열중인 체세포 염색체보다도 훨씬 방사선에 민감하다는 사실이 잘 알려져 있다(Sax 1938; Ma *et al.* 1980). 그러나 화분모세포의 감수분열 중기 I(meta-phase I) 염색체가 매우 영성하여 검경시 모양을 뚜렷이 관찰하기 힘들다는 단점을 지니고 있기 때문에 염색체 이상 분석에 잘 이용되지 못하였다. 방사선 생물학적 연구와 관련하여 이같은 단점을 극복하기 위해서는 방사선 처리를 감수분열 전기 I 초기에 맞추어 시행하고 난 후 분열중인 염색체에 대한 적당한 회복시간을 부여하여야 한다(Taylor 1950). 무동원체 염색체 조각(acentric fragment)이나 점착성 염색체 복합부위(sticky chromosome complex)가 감수분열의 4분자염색체(tetrad) 시기에 미세핵으로 남게 된다. 이것을 이용한 분석과정을 일명 Trad-MCN assay라 하여 돌연변이 유발물질이나 방사선에 의한 염색체 손상 연구에 이용되기 시작하였다(Savage and Papworth 1998; Grant 1999). 1950년대 초반에 일부 연구자들에 의해 식물체가 영양부족 등의 화학적 결손에 의하여 PMC에서 미세핵이 생성됨을 밝혔다(Steffensen 1953; Steffensen 1955). 1970년대 초부터 포유동물 감수분열 세포에서도 미세핵의 생성은 염색체

손상을 의미하는 유용한 지표로서 이용되기 시작하면서부터 동물세포는 물론 식물세포에 있어서도 미세핵은 염색체 손상을 나타내는 명백한 지표로서 인식되기에 이르렀다(Heddle 1973; Savage and Papworth 1998). 최근에는 자주달개비 미세핵 분석법을 이용하여 대기오염에 대한 발암성 평가(Sadowska *et al.* 1994), 오염 토양 및 수자원의 유전독성 평가(Kong and Ma 1999), 액체상 또는 기체상의 살충제의 유전독성 평가(Ma and Mohammed 1999), 비이온화 방사선에 의한 유전자손상 분석(Wang and Wang 1999) 등 자주달개비 미세핵 분석법의 응용분야가 급속도로 다양화되고 있다.

본 연구는 Müller and Streffer (1991)에 의하여 제시된 방사선에 대한 생물지표로서의 조건들을 상당 부분 충족시키며, 환경독성물질 및 저선량 방사선에 민감하게 반응하는 것으로 밝혀진 자주달개비를 이용하여 비스페놀 에이에 의한 화분모세포 미세핵 생성률과 감마선에 의한 미세핵 생성률을 비교·평가하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 공시식물체

실험용 식물체는 방사선에 민감하게 반응하면서도 자발돌연변이율이 낮은 *Tradescantia* BNL 4430 클론을 사용하였다. 온실에서 건전하게 생육된 식물체로부터 화서를 절취하여 실험군별로 20개 이상의 화서를 생장상에서 24시간 순치시킨 다음 실험에 사용하였다.

### 2. 비스페놀 에이

비스페놀 에이(4, 4'-Isopropylidenediphenol,  $C_{15}H_{16}O_2$ , Sigma Co.)는 순수 에탄올에 용해시킨 다음 1, 2 및 4  $\mu$ M의 농도로 조제하여 사용하였다. BPA를 줄기를 통해 흡수할 수 있도록 순치된 화서군을 농도별 BPA 용액에 6시간 동안 침지하였으며 물질 흡수 및 화아의 발달을 위하여 연속폭기를 실시하였다. 흡수처리가 끝난 직후 화서를 증류수로 수세하여 잔존하는 BPA를 제거하였다.

### 3. 방사선 조사

방사선원은 한국원자력연구소의 저준위 조사시설의  $^{60}Co$ (선원강도 약 150 TBq, Panoramic Irradiator, Atomic Energy of Canada Ltd.)을 이용하였고, 절취화서가 시드는 것을 방지하기 위해 양액에 침지한 상태로 조사하였다.

4. 화서배양

방사선 조사 또는 BPA 흡수처리가 끝난 화서는 24시간의 회복기간중 Hougland's solution No.2 6배 희석액 (Conger 1964)에 침지하여 성장상 내에서 폭기를 실시하였다. 배양조건은 명기 14시간, 습도 70%, 온도 25°C, 조도 290 μE m<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup>, 암기 10시간, 습도 70%, 온도 25°C를 유지하였다.

5. 미세핵 분석

화분모세포에 생성된 미세핵을 분석하기 위해서는 화서의 고정, 저장 및 염색과정을 거쳐야 한다. 일련의 처리과정은 Ma(1981)의 절차를 따랐다. 비스페놀 에이 및 방사선 조사가 끝난 시료는 양액에 침지하여 성장상 내에서 약 24시간의 분열 염색체 회복시간이 경과한 다음 분석용 화서를 aceto-alcohol (1:3)로 고정시켰다. 고정액에 침지하여 24시간이 지나면 70% 에탄올에 담구어 냉장 저장하였다. 미세핵 검경을 위한 프레파라트의 제작은 'aceto-carmine squash method'에 따라 이뤄졌다. 전처리가 끝난 후 실험군별로 10여개의 슬라이드 프레파라트를 제작하고, 광학현미경 (Nikon) 하에서 배율 400배로 검경하여 미세핵을 계수하였다. 통상 하나의 프레파라트에서 약 300개 이상의 4분자 염색체를 검경하여 100사분자당 미세핵 숫자로서 각 실험조건별 미세핵 생성물로 환산하였다.

결과 및 고찰

방사선 및 유전독성 물질에 의한 생물학적 효과 중 돌연변이에 관해서 획득된 데이터의 양이 풍부할 경우 Chadwick and Leenhouts (1980)의 방사선 작용에 관한 분자이론에 따른 정교한 수식으로 선량-반응 관계를 표현할 수 있다. 분자이론에 따른 선량-반응식을 보면 일정한 선량범위까지는 돌연변이 발생률이 상승하여 정점에 이르게 되지만 선량이나 농도가 더욱 증가하게 되면 세포가 사망에 이르게 되기 때문에 돌연변이가 감소한 것으로 나타나는데 이때의 돌연변이는 의미를 상실한 것이다. 저선량이나 저농도에 있어서의 반응양상을 보면 방사선량이나 독성물질의 농도의 증가에 따른 생물학적 효과가 선형적으로 증가하여 일차함수 같은 양상으로 나타난다.

일반적으로 방사선 및 독성물질에 의한 돌연변이, 염색체 이상 또는 종양유발 등의 생물학적 효과를 흔히 (1)식과 같이 간단한 선형적-이차함수적 선량-반응 관

계로 표현하기도 한다 (Tubiana *et al.* 1990). 이와 같은 linear-quadratic dose-response의 경우도 선량포화가 나타나지 않는 저선량 영역에서는 선량의 제공이 곱해지는 이차함수항이 생물학적 효과에 미치는 기여분은 무시될 수 있는 수준이기 때문에 저선량 영역에 있어서의 반응관계는 단순한 일차함수로 표현할 수 있다. 이와 같이 일차함수로 선량-반응관계를 나타내는 것이 타당함은 이미 여러 연구보고를 통해 잘 입증된 사실이다 (김 등 1998; 김과 김 1998; Cebulska-Wasilewska *et al.* 1999).

$$F_{MCN} = \alpha D + b_0 \tag{1}$$

여기서,

$F_{MCN}$  = 최대 미세핵생성률 (MCN/100 tetrads)

$b_0$  = 미세핵생성률의 기저값

$\alpha$  = 단위선량당 나타나는 미세핵

$D$  = 방사선량 (cGy) 또는 물질농도 (μM/ml)

자주달개비 화서내에는 다양한 발육상태의 화아들이 공존하고 있으며, 특히 이들 중 일부 화아 내에는 감수분열중인 화분모세포가 포함되어 있다. 감수분열중인 화분모세포는 방사선에 매우 민감하기 때문에 방사선을 받게 되면 염색체의 일부가 절단되어 미세핵을 형성하게 된다. 미세핵의 생성률은 방사선량의 증가에 따라 점차 증가하는 양상을 나타냈으나, 50 cGy 이상의 다소 높은 선량영역에서는 MCN 생성률의 변이가 매우 크게 나타나서 선량-반응 관계를 규정짓기는 곤란한 것으로 밝혀졌다 (Kim *et al.* 1995). 그러나 0~50 cGy 선량범위에서 평균값보다는 최대 MCN 생성률이 갖는 선량-반응 관계가 뚜렷하다는 것을 알 수 있었다 (Fig. 1). 최대 미

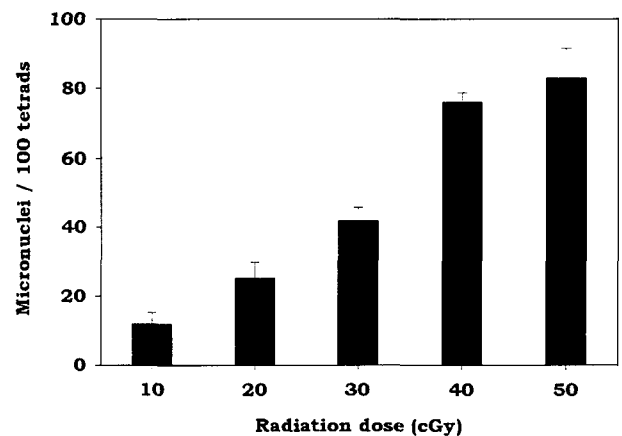


Fig. 1. Radiation dose-response relationship of micronucleus frequencies in pollen mother cells of *T. BNL 4430*.

세핵 생성률이 갖는 감마선량 반응식은 (2)식과 같다.

$$F_{MCN} = 1.97D + 4.05, \quad (r^2 = 0.95) \quad (2)$$

여기서,

$F_{MCN}$  = 최대 미세핵생성률 (MCN/100 tetrads)

$D$  = 감마선량 (cGy).

이 관계식의 회기계수  $r^2 = 0.95$ 로 0~50 cGy 선량범위에 있어서의 선량-반응 관계를 일차함수로 표현하는 것이 통계학적으로 타당함을 알 수 있었다. 관계식의 정의에 따르면 미세핵의 자발생성률은 최대 4 MCN/100 tetrads인데 이 값은 실제로 분석된 화분모세포 미세핵 자연생성률의 범위와 일치하는 것으로 나타났다 (Kim *et al.* 1999).

비스페놀 에이 1, 2 그리고 4  $\mu\text{M}$ 의 비스페놀 에이가 감수분열중인 자주달개비 화분모세포에 미치는 영향을 Fig. 2에 나타내었다. 비스페놀 에이가 전혀 포함되지 않은 1%의 에탄올 처리 대조군에서의 미세핵 생성률은  $2.33 \pm 0.62$ 이었다. BPA 1  $\mu\text{M}$ 을 처리하였을 때 미세핵의 생성률은  $8.06 \pm 0.70$  ( $p < 0.01$ ), 2  $\mu\text{M}$ 을 처리하였을 때는  $12.76 \pm 1.06$  ( $p < 0.01$ ), 그리고 4  $\mu\text{M}$ 을 처리한 자주달개비의 화분모세포 중 4분자염색체에 나타난 미세핵생성률은  $19.67 \pm 1.52$  ( $p < 0.001$ )이었다. 즉 처리한 비스페놀 에이의 농도가 높을수록 자주달개비의 화분모세포에 나타나는 염색체 손상이 따라서 증가함으로써 자주달개비의 염색체변이는 비스페놀 에이에 대하여 뚜렷한 농도-반응관계를 나타내었다. 최대 미세핵생성률이 갖는 비스

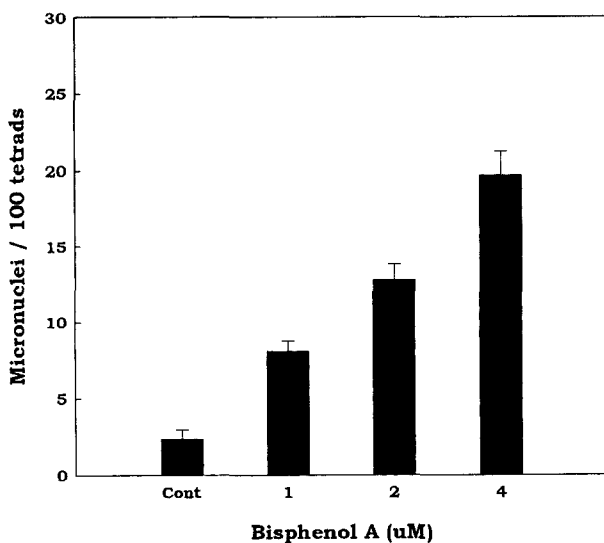


Fig. 2. Bisphenol A concentration-response of micronucleus frequencies in pollen mother cells of *T. BNL 4430*.

페놀 에이의 반응식은 (3)식과 같다. 비교적 낮은 농도에서 비스페놀 에이가 식물체에 미치는 영향을 확인할 수 있었다.

$$F_{MCN} = 4.26C + 3.24, \quad (r^2 = 0.98) \quad (3)$$

여기서,

$F_{MCN}$  = 최대 미세핵생성률 (MCN/100 tetrads)

$C$  = 비스페놀 에이 농도 ( $\mu\text{M}$ ).

이 관계식의 회기계수  $r^2 = 0.98$ 로 0~4  $\mu\text{M}$  농도 범위에 있어서의 농도-반응 관계를 일차함수로 표현하는 것에 무리가 없음을 알 수 있었다. 관계식의 정의에 따르면 미세핵의 자연생성률 (background rate)은 최대 3.2 MCN/100 tetrads인데 이 값은 실제로 분석된 화분모세포 미세핵 자연생성률의 범위와 일치하는 것으로 나타났다 (Kim *et al.* 1995).

실험결과로부터 수립된 반응-관계식을 이용하여 동일한 수준의 미세핵을 생성하는 방사선량 또는 비스페놀 에이 농도를 산정하는 것이 가능하다. 자주달개비 미세핵 분석법은 방사선 처리시기를 감수분열 전기 I에 맞추어 분석할 경우 5 cGy까지 감지해 낼 수 있으며 (Ma 1979), 이와 같은 장점을 이용하여 실험한 결과 1  $\mu\text{M}$ 의 비스페놀 에이는 방사선 1.8 cGy에 의하여 유발되는 것과 동일한 미세핵 생성률을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 인체의 여러 세포군에 손상을 유발하여 임상적 증상을 초래할 수 있는 감마선량은 25 cGy인데 (서 등 1997), 이에 상응하는 비스페놀 에이의 등가농도는 11.8  $\mu\text{M}$ 인 것으로 계산되었다 (Table 1). 인간에게 영향을 줄 수 있는 비스페놀 에이의 농도는 2~5 ppb라는 보고된 자료와 Trad-MCN에 의하여 나타난 결과와 비교하면 다른 생물학적 분석법보다 탁월한 민감성을 확인할 수 있다 (Krishnal *et al.* 1993). 합성화학물질의 농도가 매우 미량인 농도에서 염색체의 손상으로 인하여 미세핵을 유

Table 1. Radiation dose and bisphenol A concentration for inducing the same frequencies of micronuclei in *Tradescantia* pollen mother cells

Bisphenol A ( $\mu\text{M}$ )	Micronucleus frequencies (MCN/100 tetrads)	Radiation dose equivalent to BPA concentration (cGy)	Remarks
0.5	5.4	0.68	
1.0	7.5	1.8	
2.0	11.8	3.9	
4.0	20.3	8.2	
8.0	37.3	16.9	
11.8	53.3	25.0	*)

\*) External whole-body exposure dose above which clinical symptoms can develop

발하는데 상당히 민감한 반응을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

감마선 선량별 최대 미세핵 생성률의 선형 회귀식 (2) 식과 BPA 농도별 최대 미세핵 생성률의 회귀식 (3) 식을 이용하여 동일한 빈도의 미세핵을 유발하는 방사선량과 이에 상응하는 BPA 농도를 계산하는 것이 가능하다. 또한 미세핵 유발에 있어서 BPA가 가지는 단위선량에 대한 상대적 효과비도 산정하는 것이 가능하다. 단위 방사선량 1 cGy는 100 사분자 염색체당 최대 1.97개의 미세핵을 유발하는 한편, BPA 단위 농도인 1 mM은 최대 4.26개의 미세핵을 생성하는 것을 알 수 있다. 이 결과를 이용하여 상대효과비를 계산하면 1 mM의 BPA는 방사선 2.16 cGy에 상응하는 생물학적 손상을 유발하는 것을 알 수 있다.

자주달개비는 온실의 생육조건에 따라 자연돌연변이가 불안정할 수 있기 때문에 온실에서 임의적으로 화서를 절취하여 미세핵 자연생성률을 확인하였다. 대조군에 대한 민감도를 확인하기 위하여 비교 실험군으로는 저선량의 방사선 조사군을 이용하였으며 비스페놀에이 처리에 대한 음성대조군으로는 BPA 용매로 사용한 1% 에탄올을 처리한 실험군을 이용하였다. 또한 온실 생육에 필요한 관수 및 살수에 수돗물을 사용하였으며 양액의 제조에 3차 증류수를 사용하였기 때문에 이들에 대한 영향을 파악하기 위한 분석도 수행하였다. 실험결과 자연생성률은  $2.75 \pm 0.55$ 로 나타났으며, 이는 (2)식에서 미세핵의 자연생성률이 최대 4 MCN/100 tetrads로 볼 때 안정한 것으로 확인되었다. 에탄올 1% 처리군은  $2.33 \pm 0.62$ 의 안정한 범위의 미세핵 생성률을 나타냈었으나 수돗물을 처리한 실험군에서는 미세핵 생성률의 변동폭이 상당히 크게 나타났다. 그 값은 미세핵 자연생성률인  $2.70 \pm 0.72$ 에서 상당히 높은  $9.00 \pm 1.16$ 까지의 값을 나타내었다. 이같은 결과는 정수처리 과정에서 투입된 염소가 염색체 이상을 크게 증가시킨다는 연구보고(Monarca *et al.*, 1998)와 일치하는 것이다. 그러나 염소처리는 시기에 따라 그 처리량이 다르기 때문에 이러한 점을 반드시 감안해야 한다. 본 연구에서도 3회 반복된 수돗물 처리실험에서 높은 미세핵 생성률이 재현되지 않았다.

합성화학물질의 사용이 증가함에 따라 인간을 포함한 생태계에 많은 영향을 미칠 것으로 예상된다. 합성화학물질의 사용은 생태계의 다양한 변화를 유발하였고, 최근에 들어서 그러한 변화를 감지하게 되었고, 인간의 생활환경에 중대한 변화를 일으킬 수 있는 위험한 물질이라는 인식하에 관심을 가지게 되었다. 변화를 일으키는 주요원인물질에 대해서는 대부분 추정에 그치고 있다. 내분비계 장애물질로 분류되어 관리되고 있는 것들은

살충제, 다이옥신, PCB, DDT와 같은 기존의 유기염소계 화학물질과 프탈레이트, 비스페놀 에이, 폴리페닐 에톡실레이트 등과 같이 플라스틱 또는 세제와 관련되어 실제 생활과 매우 손쉽게 이용되는 물질도 있으며 일부 중금속도 관여하는 것으로 알려져 있다. 현재까지는 이러한 내분비계 장애물질들에 대한 위해도 평가방법이 마련되어 있지 않았다. 또한 동물실험을 통하여 실험을 행하고 있으나 그 원인물질에 의한 결과가 명확하게 나타나고 있지 않다. 이러한 관점에서 환경독성물질에 대한 검색은 중요한 의미를 지닌다고 할 수 있다. 특정 식품의 세포계에 나타나는 변화 또는 손상을 근거로 하여 환경내에 존재하는 환경독성물질의 생물학적 영향을 평가하기 위한 시도가 이뤄지고 있다. 방사선 및 돌연변이원에 민감한 자주달개비의 화분모세포를 생물말단점(biological end-point)으로 이용하여 생물학적 위해도를 평가하고 생물학적 정보를 획득하기 위한 연구도 이루어지고 있다. 본 연구에서 방사선과 내분비계장애물질로 관리되고 있는 비스페놀 에이가 저선량과 저농도에서 자주달개비 화분모세포의 미세핵분석에 의하여 선량·농도-반응관계가 민감하게 나타나고 있음을 확인하였으며, 앞으로도 다른 합성화학물질에 대한 독성을 검색하는데 유용한 도구로 활용될 수 있다고 판단된다.

## 적 요

합성화학물질의 몇몇은 고등동물의 내분비계를 교란하는 물질로 작용하는 것이 알려져 있다. 다이옥신, 디디티, 피시비 및 비스페놀 에이 등이 내분비계 장애물질로 분류되어 선진 각국에서는 엄격한 통제하에 관리되고 있다. 본 연구는 자주달개비 미세핵 분석법을 이용하여 염색체이상 유발에 있어서의 BPA와 방사선의 상대적 효과를 비교하기 위하여 시행되었다. 흡수처리를 위하여 자주달개비 4430 클론의 절취화서를 각각의 농도로 조제된 BPA 용액에 여섯시간 동안 침지하고 폭기를 실시하였다. 한편 방사선의 영향을 평가하기 위하여 동일 식물체의 화서군을 양액에 침지한 상태로 0~0.5 Gy까지 선량별로 조사하였다. 실험선량의 범위에서 미세핵 생성률은 분명한 선량-반응 관계를 나타내었으며 BPA 실험농도 범위에 대해서도 농도-반응 관계를 나타내었다. 이들 두가지 반응 관계식을 이용하여 동일한 미세핵 빈도를 유발하는 방사선량과 비스페놀 에이 농도를 산출할 수가 있는데, BPA 11.8  $\mu$ M은 방사선 피폭후 임상증상이 나타나기 시작하는 선량인 0.25 Gy에 상응하는 염색체 이상을 유발하는 것으로 확인되었다. 본 연구의 결과를

통하여 자주달개비 화분모세포는 비스페놀 에이, 옥틸페놀 또는 노닐페놀 등의 내분비계 장애물질의 생물학적 독성을 평가하는데 유용하게 활용할 수 있는 생물말단 점이라는 것이 입증되었다.

### 감사의 말씀

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 특정연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- 김진규, 김원록, 김재성, 신해식, 이정주. 1998. 기온일교차와 감마선의 영향에 의한 자주달개비 수술털의 체세포돌연변이 빈도. 환경생물학회지. 16:253-262.
- 김진규, 김원록. 1998. 자주달개비 수술털 분홍돌연변이의 중성자 선량반응과 RBE. 방사선방어학회지. 23:17-23.
- 신동천. 1999. 내분비계 장애물질이란?. 식품과학과 산업. 33: 2-18.
- 서두환, 김재록, 김진규. 1997. 원자력기초이론. 한국원자력연구소. 대전.
- Cebulska-Wasilewska A, K Rekas and JK Kim. 1999. Application of TSH bioindicator for studying the biological efficiency of radiation. Nukleonika. 44:15-30.
- Chadwick KH and HP Leenhouts. 1980. The Molecular Theory of Radiation Action. Springer-Verlag. Heidelberg, pp. 92-117.
- Conger A. 1964. A simple liquid-culture method of growing plants. Proc. Florida St. Horticultural Soc. 77:3-6.
- Heddle JA. 1973. A rapid in vivo test for chromosome damage. Mut. Res. 18:187-190.
- Grant WF. 1999. Higher plant bioassays for the detection of chromosomal aberrations and gene mutations—a brief historical background on their use for screening and monitoring environmental chemicals. Mut. Res. 426:107-112.
- Kim JK *et al.* 1995. Biological Monitoring of Radiation using Indicator Plants, KAERI/RR-1583/95, Korea Atomic Energy Research Institute.
- Kim JK, HS Song and SH Hyun. 1999. Dose-response relationship of micronucleus frequency in pollen mother cells of *Tradescantia*, J. Kor. Assoc. Radiat. Prot. 24:187-192.
- Kong MS and TH Ma. 1999. Genotoxicity of contaminated soil and shallow well water detected by plant bioassay. Mut. Res. 426:221-228.
- Krishnan AV, P Starhis, SF Permuth, L Tokes and D Feldman. 1993. Bisphenol A; an estrogenic substance is released from polycarbonate flasks during autoclaving. Endocrine. 132:2279-2286.
- Ma TH. 1979. Micronuclei induced by X-rays and chemical mutagens in meiotic pollen mother cells of *Tradescantia*-A promising mutagen test system. Mut. Res. 64: 307-313.
- Ma TH. 1981. *Tradescantia* micronucleus bioassay and pollen tube chromatid aberration test for *in situ* monitoring and mutagen screening. Environ. Health Prospect. 37:85-90.
- Ma TH. 1999. The international program on plant bioassays and the report of the follow-up study after the hands-on workshop in China, Mut. Res. 426:103-106.
- Ma TH, GJ Kentos, Jr. and VA Anderson. 1980. Stage sensitivity and dose response of meiotic chromosomes of pollen mother cells of *Tradescantia* to X-rays. Environ. Exp. Bot. 20:169-174.
- Ma TH and KB Mohammed. 1999. *Tradescantia*-micronucleus and -stamen hair mutation assays on genotoxicity of gaseous and liquid forms of pesticides. Mut. Res. 426:193-199.
- Monarca S, A Zanardini, D Feretti, A Dalmicio, E Falistocco, P Manica and G Nardi. 1998. Mutagenicity of extracts of lake drinking water treated with different disinfectants in bacterial and plant tests. Wat. Res. 32: 2689-2695.
- Müller WU and C Streffer. 1991. Biological indicators for radiation damage. Int. J. Radiat. Biol. 59:863-873.
- Sadowska A, E Pluygers, M Narkiewicz, A Pawelczak and B Lata. 1994. Environmental genotoxicity and cancer risk in humans: a combined evaluation correlating the results of the *Tradescantia* micronucleus assay in the field and human biomarker assessments in serum I. The TRAD-MCN assay. Eur. J. Cancer Prev. Jan. 3:69-78.
- Savage JRK and DG Papworth. 1998. An investigation of LET 'finger-prints' in *Tradescantia*. Mut. Res. 422: 313-322.
- Sax K. 1938. Chromosome aberrations induced by X-rays. Genetics 23:494-516.
- Steffensen D. 1955. Breakage of chromosomes in *Tradescantia* with a calcium deficiency. Proc. Nat. Acad. Sci. 41:155-160.
- Steffensen D. 1953. Induction of chromosome breakage at meiosis by a magnesium deficiency in *Tradescantia*. Proc. Nat. Acad. Sci. 39:613-620.
- Taylor JH. 1950. The duration of differentiation in excise anthers. Am. J. Bot. 37:137-140.
- Tubiana M, J Dutreix and A Wambersie. 1990. Introduc-

- tion to Radiobiology. Taylor & Francis. London, pp. 301-303.
- Wang S and X Wang. 1999. The *Tradescantia*-micronucleus test on the genotoxicity of UV-B radiation. Mut. Res. 426:151-153.
- Xu Z and TH Ma. 1998. Clastogenicity of formaldehyde fumes and X-rays evaluated by the *Tradescantia*-micronucleus assay. Environ. Exp. Bot. 39:169-175.

(Received 25 April 2002, accepted 15 May 2002)