

## 자주달개비 분석법을 이용한 카펫 방출 휘발성 유기화합물의 생물학적 영향 평가

김진규\* · 신해식<sup>1</sup> · 이영엽<sup>2</sup> · 이진홍<sup>3</sup>

한국원자력연구원, <sup>1</sup>한국안전성평가연구소, <sup>2</sup>전주대학교, <sup>3</sup>충남대학교

### Biological Effects of Volatile Organic Compounds from Carpet Materials as Assessed by the *Tradescantia* Assay

Jin Kyu Kim\*, Hae Shick Shin<sup>1</sup>, Young Yup Lee<sup>2</sup> and Jin-Hong Lee<sup>3</sup>

Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongeup 580-185, Korea

<sup>1</sup>Korea Institute of Toxicology, Daejeon 305-600, Korea

<sup>2</sup>Jeonju University, Jeonju 560-759, Korea

<sup>3</sup>Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea

**Abstract** – Indoor air differs from outdoor atmosphere since it contains chemical and physical contaminants from building materials. This study deals with the biological effects of volatile organic compounds (VOCs) released from synthetic fiber carpet materials. One group of *Tradescantia* inflorescence was exposed to VOCs from the carpet sample in the environmental test chamber, while the other inflorescence group was exposed to a TO-14 standard gas mixture (1 ppm) for comparison. After the exposure, VOCs from the carpet were analysed by the desorber/GC/MS method, and micronuclei in the pollen mother cells of *Tradescantia* were scored under a microscope ( $\times 400$ ) to evaluate the genotoxicity induced by the exposure to VOCs. The chemical analysis confirmed that a total of 12 VOCs were released from the carpet materials, among which styrene ( $71.9 \mu\text{g m}^{-3}$ ) and toluene ( $49.6 \mu\text{g m}^{-3}$ ) were in the highest concentration. Twenty four hours of exposure to VOCs from the carpet in the environmental test chamber resulted in a micronucleus frequency as high as  $7.73 \pm 0.75$  MCN per 100 tetrads, which was similar to that induced after exposure to the TO-14 standard gas mixture (1 ppm) for 4 hours. Meanwhile, two hours of exposure to the standard gas mixture did not cause a significant increase in the genotoxicity compared to the spontaneous micronucleus frequency. This result indicates that exposure for a long time to the air contaminated with VOCs from the carpet materials causes a genotoxic effect. The biological-chemical combination analyses in the study proved to be an effective tool for monitoring the indoor air contaminants.

**Key words** : *Tradescantia* assay, carpet, volatile organic compounds, genotoxicity

\* Corresponding author: Jin Kyu Kim, Tel. 063-570-3130, Fax. 063-570-3139, E-mail. jkkim@keari.re.kr

## 서 론

실내 공기는 일정한 공간으로 구획되어 있을 뿐 아니라 물리적, 화학적 및 생물학적으로 매우 다양한 오염물질이 존재하고 체류할 가능성이 있다는 점이 실외 대기 환경과 다르다. 실내 공기는 인공 순환여과 설비의 도움으로 실내순환을 반복하거나 순환여과 설비가 없는 곳에서는 밀폐공간에 정체하기 때문에 실내 공기가 일단 오염될 경우, 실내 거주자는 공기 오염물질에 무방비 상태로 노출될 수밖에 없다. 때로는 시간이 경과할수록 오염물질의 농도가 축적되어 증가하거나 거주자의 생활습관에 따라서는 호흡기 관련 질환이나 피부질환에 시달리게 되는 경우도 있다. 세계보건기구는 실내 공기오염으로 인하여 매년 280만 명이 사망하고 있는 점에 비추어 실내 오염을 개발도상국가의 영·유아 사망의 주요원인으로 지적하였고, 실내 공기오염 물질이 사람 폐에 전달될 확률은 실외보다 1,000배 높다고 강조하였다(김 등 2002). 실내 환경에 관한 다양한 분석 자료들이 니켈이나 크롬 같은 중금속이나 벤젠과 벤조알파피렌 같은 휘발성 유기화합물은 돌연변이유발성 또는 발암성이 있음을 밝히고 있다(Fishbein 1993; Lewtas 1993; Schnelle *et al.* 1996).

실내공기 오염물질 중 유기용제는 휘발성 유기화합물(VOCs: volatile organic compounds)을 함유한 액상 유기화합물로서 피부에 흡수되기 쉽고, 체내에 흡수된 후에도 중추신경 등 주요 기관을 침범하기 쉽다. 또한 휘발성이 크므로 공기 중에 기체로 존재하여 피부에 직접 닿지 않더라도 호흡기로 흡입되어 중독을 일으킬 수 있다. 유기용제는 마취작용과 함께 장기적으로 반복 흡입 시에는 만성중독을 일으킨다. 실내공간에 설치되어 있는 각종 건축자재 또는 마감재인 가구, 벽지, 타일, 장판, 카펫, 석면 등에서 배출되는 VOCs나 포름알데히드(HCHO)와 같은 환경오염 물질이 원인이 되어 두통, 피로, 호흡 곤란, 천식 비염, 피부염 등의 증상이 나타날 수 있으며, 특히 접착제, 페인트 등에는 발암물질인 벤젠, 톨루엔, 자일렌 등이 다량 포함되어 있다. 미국 환경청에서는 대기 중 유해물질로 밝혀져 있는 40가지의 VOCs 화합물을 지정·분류하여 관리하고 있다. 대기 중 VOCs의 분석은 주로, 캐니스터를 이용한 용기 채취법으로 시료를 저온농축 방법을 통해 GC/MS로 분석하는 US EPA TO-14 방법과 다양한 흡착제를 충전시킨 흡착관을 이용하여 시료 채취 한 후 저온농축 방법을 통해 GC/MS로 분석하는 US EPA TO-17 방법이 현재 시행되고 있다(US EPA 1997a, b). 현재의 이러한 분석적 접근은 대상성분을 현장에서 곧 바로 분석하거나 또는 채취시료를 실험실로

옮겨와 분석하여 특정 공간의 대상성분의 농도를 결정하고 그 농도에 따른 의미를 부여하고 있는 실정이다.

최근, 다양한 환경오염물질을 유발하는 곳에서의 특정 대상성분의 시료채취와 더불어 특정 대상성분에 노출되면 민감한 반응을 보이는 자주달개비 중간잡종 클론 식물체를 같은 시료채취 공간에 노출시켜서 행하는 일련의 생물학적 현장감시 기법이 많이 시도되고 있다. 1960년대 후반에 개발된 자주달개비 수술털 분석법(*Tradescantia* Stamen Hair Assay Method: Trad-SHM)과 1970년대 후반에 개발된 자주달개비 미세핵 분석법(*Tradescantia*-Micronucleus Assay Method: Trad-MCN)은 현장실험과 실험실 실험에 폭넓게 사용되고 있다. 자주달개비 수술털 분석법은 세포의 색깔로 구분되는 세 가지의 체세포 돌연변이를 이용하는 방법이다. 자주달개비 수술털의 선단 세포는 분열능력이 있어서 발생 또는 분열과정 중 돌연변이원에 노출되면 쉽게 체세포 돌연변이를 일으킨다. 정상적으로 자주달개비 꽃과 수술털 세포의 색깔은 자주색이 우성 표현형이다. 그러나 돌연변이원, 이온화 방사선 또는 발암원의 영향을 받아 화색을 지배하는 우성 유전좌위 부분에 염색체 결실(chromosome deletion)이 일어나게 되면 상동염색체 상의 열성형질이 발현되어 꽃잎과 수술털의 전체 또는 일부분이 분홍빛으로 변화되는 분홍돌연변이(pink mutation)가 나타난다. 또한 화색과 관련된 상동염색체 양쪽의 유전좌위가 모두 결실될 경우 색소발현 능력이 소실됨에 따라 수술털 세포가 투명해지는 이른바 무색돌연변이(colorless mutation)가 일어나기도 하며, 돌연변이원이나 독성물질에 의해 수술털 선단 세포의 분열능력이 상실되는 경우는 수술털의 길이가 비정상적으로 짧아지는 치사돌연변이(lethal mutation)가 나타나기도 한다(Kim *et al.* 1998). 반면, 자주달개비 미세핵 분석법은 돌연변이원에 의해 꽃가루 모세포 감수분열 초기에 유발되는 불완전한 염색체 조각을 이용하는 방법이다. 분홍돌연변이의 분석기간이 오래 걸리는 단점이 있는 반면 Trad-MCN 방법은 비교적 단시간 내에 이뤄질 수 있다. 감수분열 초기의 꽃가루 모세포의 염색체는 동일개체의 분열중인 체세포 염색체보다도 돌연변이원에 훨씬 민감하다. 특히, 방사선, 돌연변이원, 발암원의 연구와 관련하여 자주달개비를 감수분열 전기 I 초기에 맞추어 시행하고 난 후 분열중인 염색체에 대한 적당한 회복시간을 부여하면, 무동원체 염색체 조각이나 접착성 염색체 복합부위가 감수분열 말기의 4분자 염색체기에 미세핵으로 남게 되는데 이를 계수하여 돌연변이 빈도로 표현하는 방법을 Trad-MCN assay라 한다(Kim *et al.* 1999).

본 연구에서는 실내건축마감재인 카펫에서 방출되는

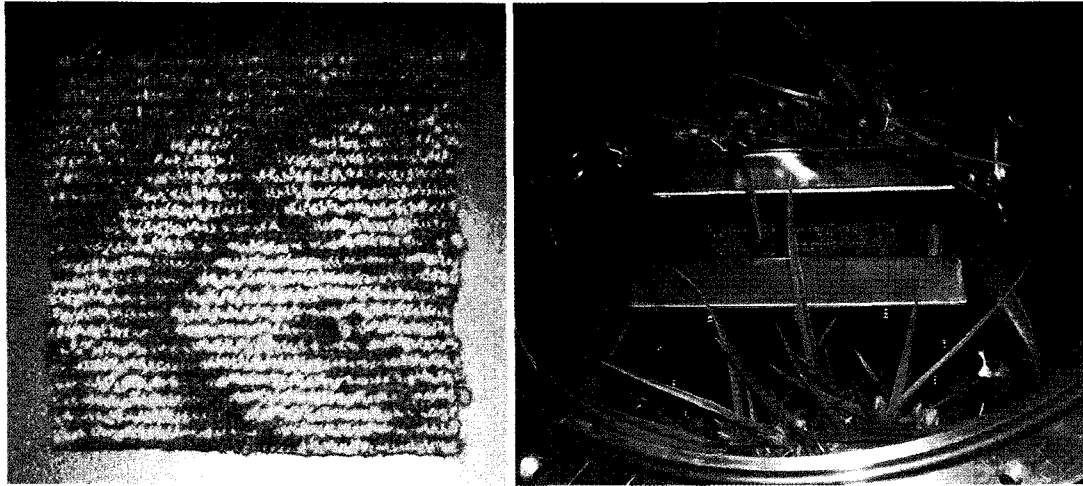


Fig. 1. *Tradescantia* inflorescence and the carpet sample deposited in the environmental test chamber (left: carpet sample, right: exposure setting).

휘발성 유기화합물의 농도와 종류를 분석함과 동시에 돌연변이원과 발암원에 민감 식물체로 알려진 자주달개비의 반응을 통하여 카펫에서 방출되는 휘발성 유기화합물의 유전독성을 평가하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 공시재료

실험용 식물체는 돌연변이원에 민감하게 반응하면서도 자연적 돌연변이율이 낮은 *Tradescantia* BNL 4430 클론을 사용하였다. 식물체로부터 15개 이상의 꽃봉오리를 가지고 있는 꽃차례를 절취한 다음 24시간 이상을 실험실 조건에 순치시킨 다음 15개의 꽃차례를 하나의 실험군으로 사용하였다(Kim *et al.* 2003a).

실험용 카펫 시료는 공장에서 출하된 합성섬유 재질의 카펫을 20 cm × 20 cm의 크기로 잘라 사용하였다.

### 2. 노출처리

환경노출용기(48 L chamber)를 이용하여 카펫과 자주달개비를 온도 25°C, 상대습도 55%하에서 24시간 노출하였다(Fig. 1). 카펫이 실내 자재인 점을 고려하여 실내 공간의 통상적 습도와 실온을 노출처리 조건으로 설정하였다. 환경노출용기 내에서 400 mg의 Tenax TA 흡착제가 충전된 스테인레스강 흡착관으로 일정 유속으로 설정된 펌프로 시료를 채취하였다. 자주달개비는 노출 후 24시간의 회복시간을 부여한 다음 고정하여 저장하였다.

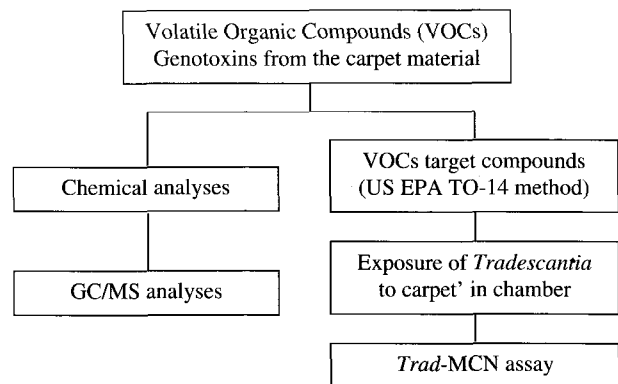


Fig. 2. Schematic diagram of the chemical analysis combined with *Trad*-MCN bioassay.

### 3. 화학분석

GC는 Finnigan GCQ (GC/MSD)를 이용하여 시료 분석하였다. 카펫에서 방출되는 VOCs의 정성 및 정량을 위해서 질량분석기(MS)가 장착된 Finnigan GCQ (GC)를 이용하여 분석을 수행하였다(Fig. 2). 전자이온화(EI) 모드에서 70 eV로 시료를 이온화하였고, 이동상 기체로는 헬륨을 사용하였다.

### 4. 미세핵 분석

화분모세포에 생성된 미세핵의 분석은 Ma (Ma 1981)의 절차를 따랐다. 환경 노출용기 내에서 노출처리가 끝난 공시시료는 양액에 침지하여 생육상 내에서 약 24~30시간의 분열 염색체 회복시간을 경과하게 한 다음, 분석용 화서를 aceto-alcohol (1:3)로 고정시켰다. 고정액에

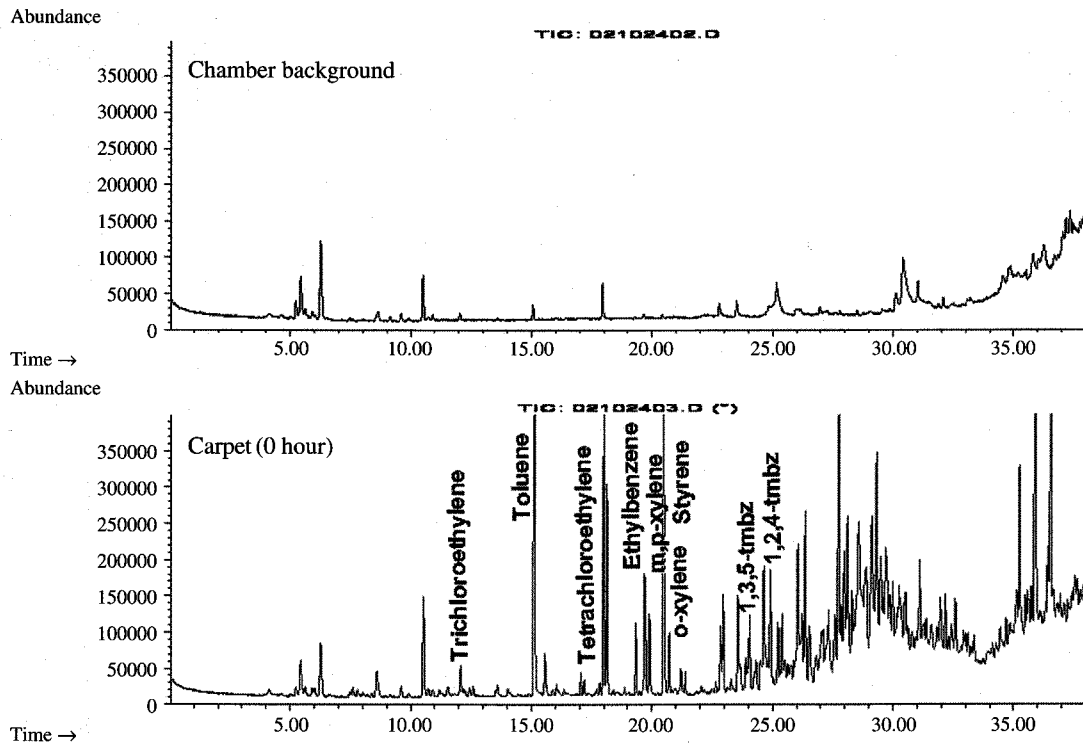


Fig. 3. GC/MS chromatogram of VOCs from the carpet sample in an adsorption tube.

침지하여 24시간 후 70% 에탄올에 담구어 4°C에 저장하였다. 미세핵 검경을 위한 프레파라트의 제작은 아세토카민 염색 압착 방식 (aceto-carmin squash method)을 응용하였다. 전처리가 끝난 후 실험군별로 15~18개의 슬라이드 프레파라트를 제작하고, 광학현미경 (Nikon)하에서 배율 400배로 검경하여 미세핵을 계수하였다. 하나의 프레파라트에서 300개 이상의 4분자 염색체를 검경하여 100 사분자 염색체당 미세핵 숫자로서 각 실험조건별 미세핵 빈도로 환산하였다.

### 결과 및 고찰

본 연구에 사용한 합성섬유 재질의 카펫에서 방출되는 휘발성 유기화합물을 흡착관을 이용하여 24시간 동안 채취한 후 화학분석을 실시한 결과, US EPA TO-14 방법에서 규정한 40 가지의 유해물질 VOCs 중 12 종류의 VOC가 검출되었으며, 농도범위는 7.0~71.9  $\mu\text{g m}^{-3}$  이었다 (Fig. 3, Table 1). 검출된 휘발성 유기화합물 중에는 특히 스티렌 (71.9  $\mu\text{g m}^{-3}$ )과 톨루엔 (49.6  $\mu\text{g m}^{-3}$ )이 높은 농도를 나타내었다 (Table 1).

환경노출시험용기 내에서 표준혼합기체 TO-14 1 ppm에 2시간 노출된 자주달개비 화분모세포에서의 미세핵

Table 1. Concentrations of VOCs from the carpet sample for 24 hour in the environmental test chamber as determined by the ATD 400 thermal desorber/GC/MS analysis

Volatile organic compounds	Concentration ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Remarks
Styrene	71.9	
Toluene	49.6	
1, 2, 4-Trimbz	16.1	
p-Dichlorobz	13.0	
m, p-Xylene	12.5	
m-Dichlorobz	12.1	
o-Dichlorobz	11.9	
Ethylbenzene	11.7	
o-Xylene	11.3	
Tetrachloroethylene	10.6	
1, 3, 5-Trimbz	10.4	
Trichloroethylene	7.0	

빈도는 Kim *et al.* (1999)이 보고한 미세핵 자연발생 빈도와 유사한 수준이었다 (Fig. 4). 반면 TO-14 1 ppm에 4시간 동안 노출시킨 자주달개비 화분모세포의 미세핵 생성률은 큰 폭의 증가를 나타내어 100 사분자 당  $7.31 \pm 0.70$  MCN을 나타내었다.

환경노출시험용기 속에서 카펫에서 방출되는 VOCs에 노출된 실험군에서는 100 사분자당  $7.73 \pm 0.75$  MCN을 나타내었다 (Fig. 4). 이와 같이 미세핵 생성률이 크게 증가된 결과는 카펫으로부터 생물체에 유전독성을 일으키

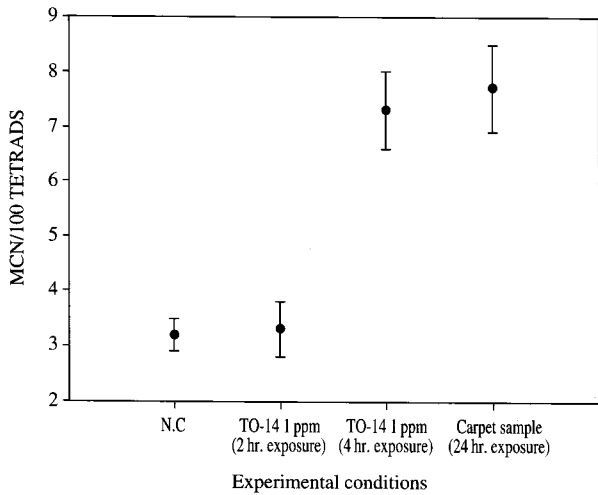


Fig. 4. Micronucleus frequencies in the pollen mother cells of *Tradescantia* under different exposure conditions in the environmental test chamber.

는 유해한 유기화합물이 방출되었음을 입증하는 것이다. 여러 가지 유해 화합물이 자주달개비의 화분모세포에 복합적으로 작용하여 세포분열시 염색체에 손상을 일으키고 그 결과 미세핵의 생성률이 크게 증가된 것이다.

실내 자재로 사용되는 카펫에서 방출되는 휘발성 유기화합물에 대한 화학적 분석과 생물검정기법을 이용하여 유전독성을 평가하였다. 대조군과 카펫에서 방출되는 독성유기화합물에 노출된 실험군 사이에는 유의성 있는 결과를 나타내었다. 즉, 카펫의 휘발성 유기화합물에 노출된 자주달개비의 화분모세포에서는 대조군에 비해 미세핵 수가 상당히 증가하였다. TO-14 표준혼합가스 4시간 노출된 자주달개비 화분모세포에서는 카펫 표품에서 방출된 VOCs에 노출시킨 실험군에서와 마찬가지로 미세핵 빈도가 큰 폭으로 증가하였다. 노출 용기 내에서 T-14 표준혼합기체에 4시간 노출된 실험군과 카펫에서 방출된 VOCs에 노출된 실험군 모두에서 유전독성이 크게 증가한 것은 *Tradescantia* 미세핵 분석법이 공기오염물질의 유전독성 평가에 유용하게 사용될 수 있음을 나타내는 결과이다. 또한 밀폐 공간이거나 환기가 잘 이뤄지지 않는 실내 공간에 새로이 제작된 합성섬유 계열의 카펫을 설치하는 것은 보건학적 측면에서도 바람직하지 않다는 점을 시사한다.

실내 작업장에서의 VOCs의 허용한계치(TLV: threshold limit values)는 8시간 작업을 기준으로 하였을 때, 톨루엔과 자일렌은 100 ppm, 스틸렌은 50 ppm으로 각각 규정하고 있으며 본 연구에서 나타난 바와 같이 카펫이 설치된 실내 공간에서 장시간 머물 경우 실내 거주자의 거의 허용한계치에 육박하는 농도의 톨루엔과 스틸렌에

노출되는 결과를 초래할 수 있다. 인간은 1일 24시간 중 85% 이상을 실내공간에서 생활하고 있다는 연구보고(Dockery and Spengler 1981)에 비추어 볼 때 사무실, 가정, 실내작업장, 공공건물, 병원, 기타 시설물을 포함한 실내공기가 오염되었을 경우 인체건강에 부정적인 영향이 유발될 수 있다.

현재까지 매우 다양한 생물검정기법이 알려져 있으나 그 중에서 *Tradescantia* 식물체를 이용한 검정기법을 적용하여 이온화 방사선(Kim *et al.* 1999), 도시 대기(Sadowska 1993; Batalha 1999; Monarca *et al.* 1999), 작업장 실내공기(Monarca *et al.* 2001), 수질(Steinkellner 1999), 폐기물 침출수(Cabrera *et al.* 1999) 그리고 토양(Knasmüller 1998)의 생물 유전독성을 평가하는데 직접적으로 활용되어 왔다. 그러나 공기 중에 포함되어 있는 휘발성 유기화합물의 경우 혼합, 희석 및 확산이 쉽게 이뤄질 뿐 아니라 노출시험이 쉽지 않기 때문에 그 생물학적 영향을 평가하는 것이 곤란하였으나 최근 자주달개비 분석법을 화학분석과 병용하여 작업장에서 발생하는 VOCs의 생물학적 영향과 미세먼지 수용성 추출물의 유전독성을 효과적으로 평가하는 등 많은 연구 사례가 있다(Kim *et al.* 2003a, b; 신 등 2003).

자주달개비 분석법과 GC/MS 분석을 병용한 생물-화학 연계기법을 활용하여 카펫에서 방출되는 VOCs의 종류 및 농도를 규명하고, 이들 휘발성 유기화합물이 분열 중인 자주달개비 화분모세포에 미치는 유전독성을 평가한 것이다. 연구결과 카펫에서 방출되는 휘발성 유기화합물에 장시간 노출되었을 경우 유전독성이 확인되었으며, 휘발성 유기화합물로 인한 실내공기 오염은 인체 건강에도 부정적 영향을 미칠 수 있다는 점을 제시하였다. 본 논문은 자주달개비 생물지표를 이용하여 휘발성 유기화합물이 존재하는 제한된 실내공간에 일정시간 이상 노출될 경우 생물유전독성이 유발된다는 사실을 밝힌 연구로 환경보건학적 측면에서 그 의미가 크다.

## 적 요

실내 공기는 대기와는 달리 실내 건축 자재에서 유래된 물질로 오염될 수 있다. 본 연구는 실내자재인 카펫에서 방출되는 휘발성 유기화합물의 생물학적 영향을 평가하기 위하여 수행되었다. 카펫과 자주달개비 BNL 4430 꽃차례를 환경노출시험용기에 넣고 일정시간 노출을 실시하였고 흡착관의 VOCs에 대한 화학분석을 실시하였다. 화학분석결과 카펫에서는 12종의 VOCs가 방출되는 것이 확인되었으며 이중 스틸렌( $71.9 \mu\text{g m}^{-3}$ )과 톨루엔( $49.6 \mu\text{g m}^{-3}$ )의 농도가 높았다. 환경노출시험용기에

서 카펫에서 방출되는 VOCs에 24시간 노출된 자주달개비 실험군의 미세핵 빈도는 100 사분자 당  $7.73 \pm 0.75$  MCN으로서 TO-14 표준혼합기체 1ppm에 4시간 노출된 실험군의 미세핵 빈도인  $7.31 \pm 0.70$ 와 유사한 높은 값을 나타내었다. 반면 표준혼합기체 1ppm에 2시간 노출된 실험군의 경우 미세핵 자연발생 빈도와 유사한 수준을 보였다. 이 같은 결과로부터 카펫에서 방출된 휘발성 유기화합물이 함유되어 있는 실내공기에 장시간 노출될 경우 생물유전독성이 유발된다는 것이 확인되었다. 본 연구에 적용한 생물-화학 병용분석 기법은 실내 공기오염의 생물학적 감시에 매우 효율적임이 입증되었다.

## 사 사

이 논문은 2006년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제번호 R01-2004-000-10695-0).

## 참 고 문 헌

- 김진규, 신해식, 이정주, 김 균, 이진홍. 2002. 지하철 시설내 부유먼지에 함유된 돌연변이원의 생물학적 영향 평가. 환경독성학회지. 17:245-252.
- 신해식, 김진규, 이재환, 황갑성, 김균, 이정주, 이진홍. 2003. 자주달개비 미세핵 분석법을 이용한 작업환경내 총 먼지 중 수용성 추출물의 유전독성 평가. 한국대기환경학회지. 19:639-646.
- Batalha JRF. 1999. Exploring the clastogenic effects of air pollutants in Sao Paulo (Brazil) using the *Tradescantia* micronuclei assay. *Mutat. Res.* 426:229-232.
- Cabrera GL, DMG Rodriguez and AB Maruri. 1999. Genotoxicity of the extracts from the compost of the organic and the total municipal garbage using three plant bioassays. *Mutat. Res.* 426:201-206.
- Dockery DW and JP Spengler. 1981. Personal exposure to respirable particulates and sulfates. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 31:153-159.
- Fishbein L. 1993. Sources, nature and levels of air pollutants. pp. 9-34. *In: Air pollution and human cancer* (Tomatis L ed.). Monographs, European School of Oncology, Springer-Verlag, New York.
- Kim JK, HS Shin, JH Lee and A Cebulska-Wasilewska. 2003a. Detection of Environmental Mutagen with *Tradescantia* Micronucleus Assay and Chemical Analysis. pp. 61-74. *In: Bioassays in Plant Cells for Improvement of Ecosystem and Human Health* (Maluszynska J and M Plewa eds.).
- Kim JK, HS Shin, JH Lee, JJ Lee and JH Lee. 2003b. Genotoxic effects of volatile organic compounds in chemical factory as evaluated by *Tradescantia* micronucleus assay and chemical analysis. *Mutat. Res.* 541:55-61.
- 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.
- Kim JK, WR Kim, JS Kim, HS Shin and JJ Lee. 1998. Effects of diurnal temperature difference and gamma radiation on the frequency of somatic cell mutations in the stamen hairs of *Tradescantia* 4430. *Kor. J. Environ. Biol.* 16:253-262.
- Ma TH. 1979. Micronuclei induced by X-rays and chemical mutagens in meiotic pollen mother cells of *Tradescantia*-A promising mutagen test system. *Mutat. Res.* 64:307-313.
- Knasmüller S, E ottmann, H Steinkellner, A Fomin, C Pickl, A Paschke, R God and M Kundi. 1998. Detection of genotoxic effects of heavy metal contaminated soils with plant bioassays. *Mutat. Res.* 420:37-48.
- Lewtas J. 1993. Experimental evidence for the carcinogenicity of air pollutants. pp. 49-61. *In: Air pollution and human cancer* (Tomatis L ed.). Monographs, European School of Oncology, Springer-Verlag, New York.
- 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.
- Monarca S, D Feretti, A Zanardini, E Falistocco and C Nardi. 1999. Monitoring of mutagens in urban air samples. *Mutat. Res.* 426:189-192.
- Monarca S, D Feretti, A Zanardini, M Moretti, M Villarini, B Spiegelhalder, I Zerbini, U Gelatti and E Lebbolo. 2001. Monitoring airborne genotoxicants in the rubber industry using genotoxicity tests and chemical analyses. *Mutat. Res.* 490:159-169.
- Sadowska A, E Plyugers, M Narkiewicz, A Pawelczak and B Lata. 1993. 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 Prevent.* 3:69-78.
- Schnelle J, K Wolf, G Frank, B Hietel, I Gebefugi and A Ketrup. 1996. Particle size-dependent concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Analyst.* 121:1301-1304.
- Steinkellner H, F Kassie and S Knasmüller. 1999. *Tradescantia*-micronucleus assay for the assessment of the clastogenicity of Austrian water. *Mutat. Res.* 426:113-116.
- US EPAa. 1997. Method TO-14, Second Edition. US EPA/625/R-96/010.
- US EPAb. 1997. Method TO-17, Second Edition. US EPA/625/R-96/010.

Manuscript Received: March 23, 2007

Revision Accepted: June 23, 2007

Responsible Editor: Jae Seok Lee