

자주달개비 미세핵 분석법을 이용한 작업환경내 총 먼지 중 수용성 추출물의 유전독성 평가

Genotoxicity of Heavy Metals among the Particulates in the Working Environment as Assessed by *Tradescantia*-Micronucleus (Trad-MCN) Assay

신해식^{1),2)} · 김진규^{1),*} · 이재환³⁾ · 황갑성⁶⁾ · 김 균⁴⁾ · 이정주⁵⁾ · 이진홍²⁾

¹⁾한국원자력연구소, ²⁾충남대학교 환경공학과, ³⁾연세대학교 화학과

⁴⁾한국화학연구원부설안전성평가연구소, ⁵⁾용인대학교 환경·생명학부

⁶⁾충청대학 생명공학부

(2003년 7월 10일 접수, 2003년 10월 23일 채택)

Hae Shik Shin^{1),2),*}, Jin Kyu Kim¹⁾, Jae-Hwan Lee³⁾, Kap Sung Hwang⁶⁾,
Kyun Kim⁴⁾, Jeong-Joo Lee⁵⁾ and Jin-Hong Lee²⁾

¹⁾Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 305-353, Korea

²⁾Dept. of Environmental Engineering, Chungnam National University,
Gung Dong, Daejeon, 305-764, Korea

³⁾Dept. of Chemistry, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

⁴⁾Korea Institute of Toxicology, Daejeon 305-600, Korea

⁵⁾Dept. of Environmental Health, Yong-In University, 449-714, Korea

⁶⁾Faculty of Bioengineering, Chung Cheong University, 363-792, Korea

(Received 10 July 2003, accepted 23 October 2003)

Abstract

In this study, we evaluated genotoxicity of heavy metals among particulates with *Tradescantia*-micronucleus (Trad-MCN) assay in the various working environment. In a synthetic fiber factory and a rubber factory, chromium concentration was higher than any other heavy metals. On the other hand, nickel concentration was the highest in a semi-conductor factory. The difference in genotoxicity among the working environment was statistically significant as Trad-MCN frequencies were 4.67 ± 0.35 MCN/100 tetrads ($p < 0.01$) for the synthetic fiber factory, 5.73 ± 0.81 MCN/100 tetrads ($p < 0.01$) for the rubber factory, and 15.60 ± 2.58 ($p < 0.01$) ($p < 0.001$) for the semi-conductor factory. As a result, heavy metals among particulates in the working environment can be considered to have hazardous potential to human health, although they cannot directly induce DNA damage to the workers in the working environments.

Key words : Working Environment, Heavy metal, ICP analysis, *Tradescantia*-micronucleus assay

* Corresponding author

Tel : +82-(0)42-868-2057, E-mail : jkkim@kaeri.re.kr

1. 서 론

현대사회의 산업보건(industrial hygiene) 문제는 주로 19C 이후에 대형 공장과 생산시설이 출현하고 이에 따라 대규모 임금노동자가 특정 작업에 종사하기 시작하면서부터 발생되었다. 과학과 공업기술의 발달로 대규모 생산체제를 갖추게됨에 따라 수많은 신물질이 합성·제조되어, 특정 직업 또는 실내 작업장에 종사하는 근로자들은 여러 가지 환경요인에 과다하게 노출되면서 직업병(occupational diseases)이 발생되기 시작하였다. 총 먼지, 흡입성 먼지, 섬유, 금속먼지, 흙을 포함하고 있는 복잡 다양한 실내작업공간의 공기는 실내 거주자들의 생명을 위협할 정도는 아닐지라도 분명히 건강에 악영향을 미치고 있다(Leonard *et al.*, 1999; 김윤신, 1999). 더욱이 대부분의 사람들은 실내오염에 의한 인체영향이 실외의 대기 오염 보다 더욱 심각하다는 사실을 거의 인식하지 못하고 있으며, 실내 오염물질의 정상과 농도에 대해서도 간과하고 있다. 한정된 공간 속에서 인공적인 설비를 통하여 오염된 공기가 계속적으로 순환되고 있거나, 아예 그러한 설비자체가 없는 밀폐지역에서 오랫동안 생활함으로써 각종 오염물질에 무방비 상태로 노출되어 있을 뿐만 아니라 그 오염물질의 농도가 시간이 지날수록 누적되어 실내 작업자 또는 거주자들은 호흡기와 관련된 각종 질환에 시달리고 있는 상황이다. 특히, 작업장에서는 유해물질을 다량으로 사용하거나 농축된 상태로 사용하므로 근로자들이 납, 수은, 니켈, 카드뮴, 먼지 등 발암물질이나 인체 유해물질에 쉽게 노출됨으로써 건강을 크게 위협받고 있다(김기현 등, 1999; Yocom, 1982). 또한 기술개발에 따라 새로운 오염물질이 발생하는 것도 예상할 수 있다. 따라서 작업종사자의 피해는 직접적 또는 계속적인 만큼 그 영향이 직업병과 노동재해에 결부될 수 있을 것으로 판단된다.

먼지는 그 구성 성분과 따라 여러 종류로 나눌 수 있으며, 그 크기에 따라 인체에 미치는 영향이 서로 다르다. 먼지는 콧구멍, 눈, 입 등을 통하여 인체에 침투하며, 호흡기를 통해 흡입된 먼지들은 기도 또는 기관지의 점액에 잡혀 결국 폐포까지 흡입되므로 각종 호흡성 질환을 일으키는 것으로 알려져 있다. 실내작업자의 경우 발암물질과 유해물질이 포함된 각

종 먼지를 흡입하기 때문에 폐에 섬유증식을 일으키거나 폐기능을 저하시키는 직업병을 겪기도 한다. 유리규산의 흡입에 의한 규폐증은 그 대표적인 예로서 폐결핵과 합병률이 높게 나타난다. 일산화탄소, 아황산가스, 이황화탄소, 이산화탄소 등의 유독가스에 의한 중독과 납, 수은, 니켈, 크롬, 아연 등의 무기금속에 의한 중독이 특수 작업환경 하에서 발생하기도 하고, 종종 직업병으로서 문제가 되기도 한다(허귀석 등, 2003; 김기현 등, 1999).

식물체를 이용한 생물학적 분석방법은 대기를 비롯한 실내작업환경 중 실질적인 유전독성 영향을 파악하는데 가장 적절한 생물학적 도구로 판명되었으며(Batalha *et al.*, 1999), 이 중 자주달개비를 이용한 미세핵 분석방법은 환경 중에 유전독성을 판단하기 위하여 가장 폭넓게 사용되고 있는 생물학적 분석방법이다(김진규 등, 2002a, b; Ichikawa, 1992; Nauman *et al.*, 1976; Sparrow *et al.*, 1975). 자주달개비의 꽃가루모세포(PMC; pollen mother cell)는 감수분열 초기에는 발암원과 돌연변이원에 매우 민감하게 영향을 받는다(Ma *et al.*, 1980; Ma, 1979). 특히, 감수분열 중인 꽃가루모세포의 염색체는 동일개체의 분열중인 체세포 염색체보다도 방사선을 비롯한 발암원과 돌연변이원에 민감하다는 사실이 잘 알려져 있다(Kim, 1995; Ma, 1980; Sax, 1938). 그러나 꽃가루모세포의 감수분열 중기 I(metaphase I) 염색체가 뚜렷하지 않기 때문에 검경시 모양을 정확히 관찰하기 힘들다는 단점으로 인해 염색체의 이상 분석에 많이 이용되지 못했다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 방사선, 돌연변이원 및 발암물질의 처리를 감수분열 전기 I 초기에 맞추어 시행하고 난 후 분열 중인 염색체에 대한 적당한 회복시간을 부여하여야 한다(Taylor, 1950). 염색체 손상에 따른 산물인 무동원체 염색체 조각(acentric fragment)이나 점착성 염색체 복합부위(sticky chromosome complex)가 감수분열의 사분자 염색체(tetrad) 시기에 미세핵으로 남게 된다. 이것을 이용한 분석과정을 일명 *Tradescantia*-micronucleus(Trad-MCN) assay라 하며 돌연변이 유발물질이나 방사선에 의한 염색체 손상 연구에 이용되기 시작하였다(Ma, 1979; Ma *et al.*, 1978). 1950년대 초반에는 식물체가 영양부족 등의 화학적 결손에 의하여 PMC에서 미세핵이 생성됨을 확인하였다(Ma *et al.*, 1978; Steffensen, 1953). 1970년대 초부터 포유동물 감수분

열 세포에서도 미세핵의 생성은 염색체 손상을 의미하는 유용한 지표로서 이용되기 시작하면서부터 동물세포는 물론 식물세포에 있어서도 미세핵은 염색체 손상을 나타내는 명백한 지표로서 활용되었다(Steffensen, 1955). 최근 실내작업 환경과 관련된 관리대상 물질 오염상태는 주로 양적인 측면에서 파악되고 있지만 발암성 평가와 관련된 연구는 매우 미흡한 실정이다. 따라서, 실내 작업환경의 관리를 위해서는 발암물질의 종류에 대한 화학적 분석 및 생물학적 평가가 병행되어야 한다.

실내작업환경의 총 먼지 중 발암 또는 돌연변이원성 물질에 민감한 식물체를 이용한 실내오염물질의 생물학적 영향평가는 인체 위해성에 관한 추정을 가능케 할 뿐 아니라 실내오염물질의 관리 대책을 제시할 수 있다는 점에서 중요한 의미를 갖는다. 본 연구에서는 방사선 및 환경 중에 포함된 돌연변이 유발물질의 지표식물로 널리 이용되고 있는 자주달개비(*Tradescantia* BNL 4430)(Kim *et al.*, 1999; 신해식 등, 1997; Ma *et al.*, 1984)를 이용하여 작업환경 중에 발생하는 입자상 물질 중 총 먼지에 포함되어 있는 중금속물질에 의한 생물학적 영향을 밝히고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 공시재료

실험용 식물체는 방사선에 민감하게 반응하면서도 자연돌연변이율(intrinsic mutation rate)이 낮은 *Tradescantia* clone 4430(T-4430)을 사용하였다. 온실에서 생육된 T-4430 식물체로부터 10개 정도의 꽃봉오리를 가지고 있는 꽃차례를 절취하여 24시간 동안 실험실의 성장상 내에서 명기 14시간 동안 온도 22°C, 습도 70%, 조도는 293 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ 로, 암기는 10시간, 온도 20°C, 상대습도 70%의 조건에 순치를 시킨 다음 10~12개의 꽃차례를 하나의 실험군으로 사용하였다.

2.2 방사선조사

한국원자력연구소의 감마선 조사시설(^{60}Co , 선원 강도 150 TBq, Panoramic Irradiator, Atomic Energy of Canada Ltd.)을 이용하여 방사선에 대한 자주달개비 미세핵의 민감성 관찰을 위하여 상온 공기 중에

서 공시재료를 10 cGy부터 70 cGy까지 10 cGy 단위의 선량으로 조사하였다. Fricke dosimeter로 측정된 조사선량율은 0.44 Gy/hr였다(Niels and Roger, 1970). 감마선 선량-반응 관계에 대해서 이미 보고(Kim *et al.*, 1996; Ichikawa *et al.*, 1978)된 바와 같이 포화선량인 50 cGy 이하의 선량영역에서는 선형적 반응을 나타낸다는 점을 그대로 적용하였다.

2.3 호흡성 먼지시료의 시료채취 및 분석

청주공단지역의 섬유공장과 고무 공장 그리고 근거리에 위치한 반도체 공장의 각각의 실내작업장 근로자 5명에게 개인시료포집기(BASIC-5, A.P.BUCK, Inc.)를 8시간 동안 착용하게 하여 실내 작업장에 존재하는 총 먼지 시료를 채취하였다. 일일 근로시간 9시간 이상 근로를 하면서 실내작업환경에서 8시간 이상을 보내는 근로자를 대상으로하여 개인시료포집기(personal air monitor)를 착용시킨 다음 8시간 동안 총 먼지를 채취하였다. 개인시료포집기 여과지의 공극은 5.0 μm 이고 지름은 37 mm인 유리섬유여지를 사용하였다. 각각의 실내작업장에서 채취한 총 먼지 시료채취여과지 5개의 시료 중 3개의 시료는 자주달개비의 미세핵 분석법의 반복실험에 사용하였다. 나머지 2개의 시료는 화학적 분석에 반복 사용하였다. 개인시료 포집기를 분당 1.5 l로 운전하여 시료의 총 부피가 0.72 m^3 로 하였다. 실내작업환경에서 채취한 여과지는 증류수(0.1 l)에 침지하여 여과한 후(재)한 국화학시험연구원의 유도결합플라즈마(ICP, Wavelength 170~820 nm, labtam)를 이용하여 실내 작업환경에서 채취한 시료 내의 중금속 함량을 분석하였다.

2.4 호흡성 먼지 추출물의 처리

섬유공장, 반도체공장, 고무공장에서 포집된 여과지를 증류수(0.1 l)에 침지하여 진탕 여과한 후 여과액에 노출하였다. 실험군에 대한 대조군은 공여지를 실험군과 같은 방법으로 처리하여 노출하였다. 본 연구에서는 인체유해성분에 대한 노출조건과 유사하도록 유기용매를 이용하지 않고 여과지에 채취된 총 먼지 중 수용성의 성분만을 대상으로 자주달개비의 절취 화서를 24시간 동안 침지하여 노출시켰다.

2.5 미세핵의 분석

꽃가루모세포에 생성된 미세핵 분석은 Ma(1981)

의 절차를 따랐다. 방사선을 조사한 실험군과 호흡성 먼지 추출물에 노출이 끝난 실험군은 양액에 침지하여 생육상 내에서 약 24~30시간의 분열 염색체 회복시간이 경과한 다음 분석용 꽃차례를 acetic acid-ethanol (1:3)로 고정시켰다. 고정액에 침지한 후 24시간이 지난 후 다시 70% 에탄올에 침지하여 냉장 저장하였다. 미세핵 검경을 위한 프레파라트의 제작은 'aceto-carmine squash method' (Ma, 1981) 방법을 따랐다. 전처리가 끝난 후 실험군별로 5~10개의 슬라이드 프레파라트를 제작하고, 광학현미경 (Nikon) 하에서 배율 400배로 검경하여 미세핵을 계수하였다. 실내작업장의 총 먼지에 포함된 유해 중금속노출에 의한 자주달개비 미세핵의 표현은 통상 하나의 프레파라트에서 약 300개 이상의 사분자염색체를 검경하여 100 사분자염색체당 미세핵 숫자로 환산하여 나타내었다. 대조군과 실험군당 3개의 개인시료 포집여과지를 가지고 3반복을 실시하였다. 실험군당 최소 5개의 프레파라트를 제작하였다. 즉 실험군당 4,500개 이상의 사분자염색체를 검경하여 관찰자에 따른 오차범위를 최소화하였다.

2.6 통계 분석

분석결과에 대한 통계처리는 Dunnett의 t-test에 의해 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 자주달개비 미세핵의 선량-반응 관계

자주달개비 꽃차례 내에는 다양한 발육상태의 꽃봉오리들이 공존하고 있으며, 특히 이들 중 일부 꽃봉오리 내에는 감수분열중인 꽃가루모세포가 들어 있어 감수분열 중인 꽃가루모세포는 물리화학적 자극에 민감하기 때문에 방사선을 받게 되면 염색체의 일부가 절단되어 미세핵을 형성하게 된다. 미세핵 생성물은 방사선량의 증가에 따라 점차 증가하는 양상을 보이는데 0~50 cGy 선량범위에서 선량-반응 관계가 뚜렷하다는 것을 미세핵 생성물의 선형성의 결과에서 확인할 수 있었다(그림 1).

최대 미세핵 생성물이 갖는 감마선량 반응식은 (1)식과 같다.

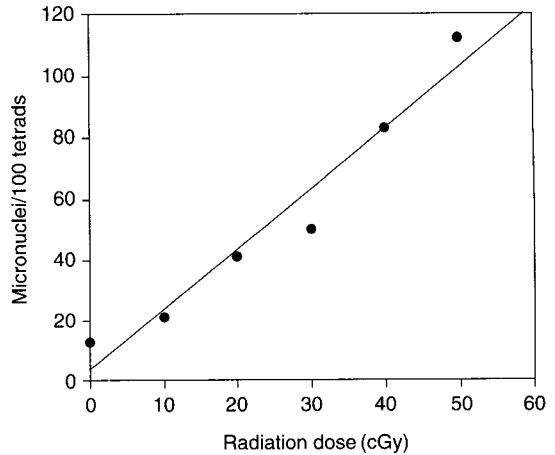


Fig. 1. Linearity of *Tradescantia*-micronucleus (Trad-MCN) according to radiation dose-response.

$$F_{MCN} = 1.97D + 4.05, \quad (r^2 = 0.95) \quad (1)$$

F_{MCN} : 최대 미세핵생성물 (MCN/100 tetrads)

D: 감마선량 (cGy).

이 관계식의 회귀계수 $r^2 = 0.95$ 로 0~50 cGy 선량 범위에 있어서의 선량-반응 관계를 일차함수로 표현하는 것에 무리가 없음을 알 수 있었다. 관계식의 정의에 따르면 미세핵의 자연생성물 (background rate)은 최대 4 MCN/100 tetrads인데 이 값은 실제로 분석된 꽃가루모세포 미세핵 자연생성물의 범위와 일치하는 것으로 나타났다 (Kim, 1995).

Knasmüller *et al.* (1998)이 Cd^{3+} , Cr^{6+} , Ni^{2+} , 그리고 Zn^{2+} 과 같은 중금속이 인간과 동물에게 DNA 손상을 유발시키고 돌연변이유발에 대하여 상당히 민감하게 반응한다는 실험결과를 보고한 바 있어 이들 중금속의 유전독성 영향을 판단하는데 자주달개비 미세핵 분석법이 민감한 방법임이 이미 입증되었다. 하지만 Cu^{2+} , Cr^{2+} 또는 Sb^{3+} 과 같은 금속이온에 대해서는 명확한 양성반응이 나타나지 않음을 또한 밝혔다. 그 중, 니켈 중금속은 직업적으로 노출된 인간에게 염색체 변이를 일으키며, 특히 호흡기 조직에 암을 유발하는 것으로 잘 알려져 있다 (Magos, 1991; IARC, 1990; Leonard *et al.*, 1987). 일반적으로 방사선 및 독성 물질에 의한 돌연변이, 염색체 이상 또는 종양유발 등의 생물학적 효과를 간단한 선형-이차함수 선량-반응 관계 모델을 이용한다 (Tubiana *et*

al., 1990). 니켈에 의한 농도별 민감성 조사에서 0~10 mM 용량범위에서 최대 미세핵 생성률이 갖는 용량 반응식은 식(2)를 따르는 것으로 보고한 바 있다.

$$F_{MCN} = 0.40D + 1.79, \quad (r^2 = 0.89) \quad (2)$$

F_{MCN} : 최대 미세핵생성률 (MCN/100 tetrads)

D : Nickel Dosage (mM).

이 관계식에서 회귀계수 (r^2)는 0.89로 0~10 mM 선량범위에 있어서의 용량-반응 관계를 일차함수로 표현하는 것에 무리가 없음을 알 수 있었다. 관계식의 정의에 따르면 미세핵의 자연생성률 (background rate)은 최대 1.8 MCN/100 tetrads인데 이 값은 실제로 본 연구에서 분석된 꽃가루모세포 미세핵 자연생성률의 범위와 일치하는 것으로 나타났다. (2)식을 이용하여 본 연구의 실내작업환경 중 총 먼지의 노출을 통하여 분석된 미세핵 빈도를 니켈의 농도로 환산하면 34 mM의 용량에 해당된다. 이는 자주달개비의 미세핵 시스템이 니켈의 농도에 따라 민감하게 반응하는 것을 의미한다. Knasmüller *et al.* (1998)에 의하면 6가 크롬 또한 니켈과 유사한 용량-반응 관계를 나타낸다고 알려져 있다.

3. 2 실내 작업환경에서의 자주달개비 미세핵 분석의 적용

본 연구에서 실내작업환경 중의 총 먼지를 분석한 결과 섬유공장과 고무공장에서 크롬의 농도가 가장 높았으며, 특히, 반도체공장에서는 니켈의 농도가 다른 중금속의 농도에 비하여 상대적으로 높게 존재하는 것으로 나타났다. 용매를 증류수로 하였다라는 점을 감안할 때 다른 유기용매를 사용하여 추출하였을 때는 더욱 더 높은 농도를 나타낼 것으로 예상된다. 섬유공장과 고무공장에서는 자주달개비의 염색체이상 (chromosome aberrations) 실험에 다른 유해성 중금속에 비하여 크롬이 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되었으며, 반도체 공장의 경우에는 크롬, 납, 망간, 아연의 영향도 있겠지만 니켈의 영향이 보다 지배적일 것으로 판단되었다. 또한, 실내작업환경 중 총 먼지내의 유해 중금속의 종류와 농도 분포는 작업환경마다 서로 다르게 나타남을 알 수 있었다(표 1).

실내작업장 총 먼지추출물을 자주달개비의 화분모세포에 노출시킨 결과 실내작업장에 따라 서로 상이한 돌연변이 미세핵의 빈도를 나타내었다(그림

Table 1. Concentrations of toxic metals for each working environment. (unit: mg/L = ppm)

Heavy metals	Control	S.F ^{a)}	S.C ^{b)}	R.F ^{c)}
As	- ^{d)}	-	-	-
Cd	0.003	0.008	0.005	0.005
Cr	0.013	0.140	0.205	0.173
Ni	0.014	0.035	4.638	0.073
Pb	0.044	0.015	0.210	0.090
Hg	-	-	-	-
Mn	0.003	0.010	0.133	0.030
Se	-	-	-	-
Zn	0.004	0.033	0.300	0.025

^{a)} SF : Synthetic Fiber Factory
^{c)} RF : Rubber Factory

^{b)} SC : Semiconductor Factory
^{d)} Not detected

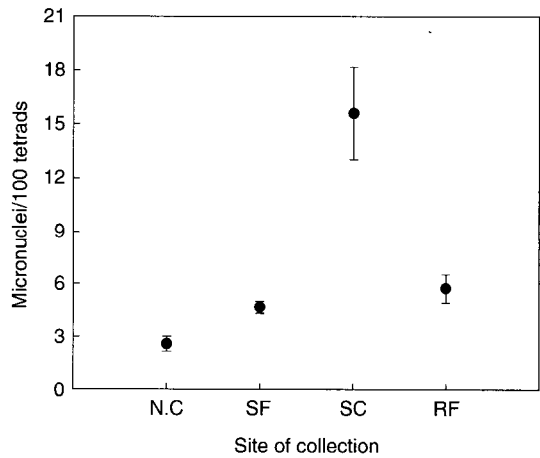


Fig. 2. Effects of particulates collected from job sites on the micronucleus frequencies in Tradescantia pollen mother cells. N.C; negative control, SF; Synthetic Fiber Factory ($p < 0.01$), RF; Rubber Factory ($p < 0.01$), SC; Semiconductor Factory ($p < 0.001$).

2). 섬유공장, 반도체공장, 고무공장의 작업환경에 대해 각 4.67 ± 0.35 , 15.6 ± 2.58 , 5.73 ± 0.81 MCN/100 tetrads로 실내작업장마다 다소 상이한 미세핵 생성률을 보이는 것으로 나타났다.

대조군과 실험군 각각의 15개 프레파라트에 대하여 프레파라트당 300개의 사분자염색체를 계수하였다. 300개의 사분자염색체당 미세핵의 수를 100개의 사분자염색체당 미세핵의 수로 환산하여 대조군과 실험군을 Dunnett의 t-test에 의해 통계분석을 하였다. 대조군의 미세핵 생성률 2.57 ± 0.43 MCN/100

tetrads를 섬유공장 4.67 ± 0.35 MCN/100 tetrads ($p < 0.01$), 고무공장 5.73 ± 0.81 MCN/100 tetrads ($p < 0.01$), 반도체공장 15.6 ± 2.58 MCN/100 tetrads ($p < 0.001$)을 유발하였으며, 통계적으로 유의성 있는 차이를 나타내었다(그림 2). 특히 반도체 공장의 경우 미세핵 생성물의 유의성은 대조군과 비교하였을 때 더욱 더 두드러진 돌연변이를 보이는 것으로 나타났다.

Steinkellner *et al.* (1998)은 식물체 (*Tradescantia*, *Allium cepa*, *Vicia faba*)의 성장점을 이용하여 중금속 유전독성력을 비교 조사한 결과, 세 가지 식물체의 생물학적 평가에서 $As^{3+} > Pb^{2+} > Cd^{2+} > Zn^{2+} > Cu^{2+}$ 의 순서로 유전독성력을 나타내었다. 식물체를 이용한 생물학적 평가방법 중 자주달개비를 이용한 미세핵 분석방법이 가장 민감한 것으로 평가하였다. Knasmüller *et al.* (1998)은 자주달개비 미세핵분석법을 이용하여 Cd^{3+} , Cr^{6+} , Ni^{2+} , 그리고 Zn^{2+} 의 중금속이 민감하게 세포핵 손상을 유발하고 있다고 밝혔다. 이와 같은 결과들을 고려할 때, 반도체 공장의 경우 크롬, 니켈, 납, 망간, 아연의 농도가 섬유공장보다 상대적으로 높기 때문에 단일 물질보다는 복합물질에 의한 상호작용을 더 크게 받은 것으로 사료된다. 또한 섬유공장과 고무공장에서의 미세핵생성물의 증가는 크롬의 농도가 다른 중금속보다 상대적으로 높은 원인에 의한 것으로 판단된다(표 1). 카드뮴, 크롬, 납, 망간 아연의 농도는 작업장에 따라 다소 차이는 있었으나, 니켈만크롬 농도의 차이를 보이지는 않은 것으로 나타났다. 미세핵 분석방법의 통계적 검증을 위해 대조군을 가지고 미세핵 생성물을 평가한 결과 미세핵 생성물은 2.57 ± 0.43 MCN/100 tetrads로 나타나 이는 화분모세포의 최대 자발 생성물인 4 MCN/100 tetrads 값 이하인 것으로 확인하였다(Kim *et al.*, 1999).

4. 결 론

1. 방사선 조사에 의한 자주달개비의 미세핵 생성물은 선량이 증가함에 따라 뚜렷한 선량-반응 관계를 나타내었다. 그러나 방사선량이 50 cGy 이상의 선량에서는 선량-반응 관계가 모호한 관계로 인하여 그 반응을 규정짓기는 곤란하였다. 선량반응 관계식

을 통하여 회기계수가 $r^2=0.95$ 로 선량의 증가에 따라 미세핵 생성물이 뚜렷하게 증가하는 것으로 나타났다.

2. 실내작업장의 화학적 분석은 중금속의 농도가 다양하게 나타났으며 작업환경에 따라 중금속의 농도가 달리 나타남을 확인하였다. 또한 총 먼지의 농도에 따른 돌연변이 빈도가 증가하는 것이 아니라 총 먼지에 포함된 위해성 중금속의 농도에 따라 빈도도 변화하고 있음을 자주달개비 미세핵 분석방법을 통하여 확인할 수 있었다. 이는 실내작업장의 호흡성먼지의 농도도 중요하지만 총 먼지에 포함된 돌연변이원에 대한 중요성을 감안해야 할 것으로 사료된다.

3. 자주달개비 미세핵 분석법을 통하여 각 작업장에 다른 미세핵 생성물의 변화를 나타내었다. 섬유공장의 경우 4.67 ± 0.35 MCN/100 tetrads ($p < 0.01$), 고무공장의 경우 5.73 ± 0.81 MCN/100 tetrads ($p < 0.01$), 반도체공장의 경우 15.60 ± 2.58 MCN/100 tetrads ($p < 0.001$)로 미세핵 생성물은 각각의 작업환경에 따라 유의성 있게 변화하였다. 이러한 변화는 입자상 물질에 포함된 유해물질을 흡입한 실내작업환경의 작업자들에게 유전적인 손상을 유발시켜 건강에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

4. 실내작업환경 중 총 먼지에 대한 화학적/생물학적 분석결과 화학적 분석에 의한 유해성 중금속의 농도에 따라 자주달개비 미세핵 생성물이 민감하게 반응함을 확인할 수 있었다. 실내작업환경 중 총 먼지에 포함된 돌연변이원에 대한 화학적·생물학적 평가 자료는 유사 작업환경을 대상으로 한 후속 연구에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

위의 결과를 종합적으로 볼 때 본 연구에서 화학적 분석과 자주달개비의 미세핵 분석결과를 결합하여 인체에 유해한 발암원으로 알려진 중금속의 농도 분석과 염색체변이를 이용한 복합기법은 매우 유용한 것으로 나타났다. 또한 자주달개비를 이용한 생물학적 감시기법인 미세핵 분석법(Trad-MCN)은 실내작업환경 중 돌연변이원에 대한 현장감시 및 유형별 구별이 가능한 장점을 지니고 있다. 앞으로 실내작업장의 돌연변이 유발원에 대한 근본적인 규명이 계속 필요하며, 본 연구의 자주달개비를 이용한 미세핵 분석방법의 결과를 볼 때 실내작업장 환경에서 노동자의 안전을 위하여 개인보호구 및 장치가 필요

할 것으로 판단되며 유해물질의 노출에 대한 다양한 대비가 요구될 것으로 생각된다. 자주달개비 미세핵 분석법은 비교적 단순하며, 신속한 분석방법으로 결과를 1~2일 내로 얻을 수 있는 장점을 지니므로 본 실험을 통하여 확립된 실험절차는 작업환경 중에 포함된 가스상·입자상 물질의 돌연변이원에 대한 생물학적 평가방법으로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 김기현, 김조천, 김종호, 이강용, 정채춘, 김득수, 구운서, 강공연, 손부순, 이병규, 이정주 (1999) 신제 대기오염 개론, 1판, 향문사, 272 pp.
- 김윤신 (1999) 실내공기질 연구의 현황과 전망, 한국대기환경학회지, 15(4), 371-383.
- 김진규, 신해식, 이병현, 송희섭 (2002) 자주달개비 미세핵 분석법(Trad-MCN)을 이용한 잠재적 생물재해 요인의 평가, 방재연구 5(1), 27-37.
- 김진규, 신해식, 이정주, 김 균, 이진홍 (2002) 지하철 시설 내 부유먼지에 함유된 돌연변이원의 생물학적 영향 평가, 환경독성학회지, 17(3), 245-252.
- 신해식, 이정주, 김진규 (1997) 환경오염 감지를 위한 자주달개비 미세핵 분석법, 제22회 보건학종합학술논문집, 171.
- 허귀석, 이재환, 신해식, 김진규, 이영엽, 이대운, 이진홍 (2003) 화학공장 실내 작업장에서의 유해물질 평가를 위한 VOC 분석법과 자주달개비 미세핵 분석법의 비교, 분석과학, 16(1), 1-11.
- Batalha, R.F., T. Guimaraes, J.A. Lobo, J.F.C. Lichtenfels, T. Deur, A. Carvalho, S. Alves, M. Domingos, G. S. Rodrigues, and H.N. Saldiva (1999) Exploring the clastogenic effects of air pollutants in Sao Paulo (Brazil) using the *Tradescantia* micronuclei assay, *Mutat. Res.*, 426, 229-232.
- IARC (1990) Chromium, nickel and welding, Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks of Chemicals to Man, Vol. 49, International Agency for Research on Cancer, Lyon.
- Ichikawa, S., C.H. Nauman, A.H. Sparrow, and C.S. Takahashi (1978) Influence of radiation exposure rate on somatic mutation frequency and loss of reproductive integrity in *Tradescantia* stamen hairs, *Mut. Res.*, 52, 171-180.
- Ichikawa, S (1992) *Tradescantia* stamen-hair system as an excellent botanical tester of mutagenicity: its responses to ionizing radiations and chemical mutagens, and some synergistic effects found, *Mutat. Res.*, 270, 3-22.
- Kim, J.K. (1995) Biological Monitoring of Radiation using Indicator Plants, KAERI/RR-15 83/95., Korea Atomic Energy Research Institute.
- Kim, J.K., Y.K. Lee, H.S. Song, K.J. Chun, and K.C. Kim (1996) *Tradescantia* as biological indicators of radiation. Proc KARP Autumn Mtg., Cheju, Korea, 8, 24-28.
- Kim, J.K., H.S. Sung, and S.H. Hyun (1999) Dose-response relationship of micronucleus frequency in pollen mother cells of *Tradescantia*, *J. Kor. Assoc. Radiat. Prot.*, 24, 187-192.
- Knasmüller, S., E. Gottmann, 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.
- Leonard, A., G.B. Gerber, and P. Jacquet (1987) Carcinogenicity, mutagenicity and teratogenicity of nickel, *Mutat. Res.*, 87, 1-15.
- Leonard, A., G.B. Gerber, C. Stecca, J. Rueff, H. Borba, P.B. Farmer, R.J. Sram, A.E. Czeizel, and I. Kalina (1999) Mutagenicity, carcinogenicity, and teratogenicity of acrylonitrile, *Mutat. Res.*, 436, 263-283.
- Ma, T.H., A.H. Sparrow, L.A. Schairer, and A.F. Nauman (1978) Effect of 1, 2-dibromoethane (DBE) on meiotic chromosome of *Tradescantia*, *Mut. Res.*, 58, 251-258.
- Ma, T.H. (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, T.H., G.J. Kentos, Jr, and V.A. 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, T.H. (1981) *Tradescantia* micronucleus bioassay and pollen tube chromatid aberration test for in site monitoring and mutagen screening, *Environ. Health Perspect.*, 37, 85-90.
- Ma, T.H., M.M. Harris, V.A. Anderson, I. Ahmed, I. Mohammad, J.K. Bare, and G. Lin (1984) *Tradescantia*-Micronucleus (Trad-MCN) tests on 140 health related agents, *Mutat. Res.*, 138, 157-167.
- Magos, L. (1991) Epidemiological and experimental aspects

- of metal carcinogenesis: physicochemical properties, kinetics and the active species, *Environ. Health Perspect.*, 95, 157-189.
- Nauman, C.H., A.H. Sparrow, and L.A. Schairer (1976) Comparative effects of ionizing-radiation and two gaseous chemical mutations on somatic mutation induction in one mutable and two non-mutable clones of *Tradescantia*, *Mut. Res.*, 38, 53-70.
- Niels, W.H. and J.B. Roger (1970) *Manual on Radiation Dosimetry*. Marcle Dekker Inc, New York.
- Sax, K. (1938) Chromosome aberrations induced by X-rays, *Genetics.*, 23, 494-516.
- Sparrow, A.H., A.G. Underbrink, and H.H. Rossi (1975) Mutations induced in *Tradescantia* by small dose of X-rays and neutrons: analysis of dose-response curves, *Science*, 176, 916.
- Steffensen, D. (1953) Induction of chromosome breakage at meiosis by a magnesium deficiency in *Tradescantia*, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 39, 613-620.
- Steffensen, D. (1955) Breakage of chromosomes in *Tradescantia* with a calcium deficiency, *ibid.*, 42, 155-160.
- Steinkellner, H., K. Mun-Sik, C. Helma, S. Ecker, and T.H. Ma, M. Kundi, and S. Knasmuller (1998) Genotoxic effects of heavy metals: comparative investigation with plant bioassays, *Environ. Mol. Mutagen.*, 31, 183-191.
- Taylor, J.H. (1950) The duration of differentiation in excise anthers. *Am. J. Bot.*, 37, 137-140.
- Tubiana, M., J. Dutreix, and A. Wambersie (1990) *Introduction to Radiobiology*. Taylor & Francis. London., 301-303.
- Yocom, J.E. (1982) Indoor-Outdoor air quality relationships. A critical review. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 32, 500-520.