

## 원자력발전소 사육 재래산양의 방사선 생물학적 평가

김세라 · 김태환\* · 이해준 · 오 현\*\* · 조성기\*\* · 오기석 · 박인철\*\*\* · 손창호 · 김성호<sup>1</sup>

전남대학교 수의과대학, \*원자력의학원,  
\*\*한국원자력연구소, \*\*\*강원대학교 수의과대학

## Radiobiological Evaluation in Korean Native Goat Bred in the Nuclear Power Plant

Se-ra Kim, Tae-hwan Kim\*, Hae-june Lee, Heon Oh\*\*, Sung-kee Jo\*\*, Ki-seok Oh,  
In-chul Park\*\*\*, Chang-ho Son and Sung-ho Kim<sup>1</sup>

College of Veterinary Medicine, Chonnam National University

\*Korea Institute of Radiological & Medical Science

\*\*Korea Atomic Energy Research Institute

\*\*\*College of Veterinary Medicine, Kwangwon National University

**Abstracts :** Cytogenetic and hematological analysis was performed in peripheral blood from the Korean native goat bred in the nuclear power plant (Wolsong and Uljin) and control area. The frequency of micronuclei (MN) in peripheral blood lymphocytes from goat was used as a biomarker of radiobiological effects resulting from exposure to environmental radiation. An estimated dose of radiation was calculated by best fitting linear-quadratic model based on the radiation-induced MN data over the range from 0 to 4 Gy from the goat lymphocytes with in vitro irradiation. MN rates in goats from the Wolsong and Uljin nuclear power plant, and control area were 9.60/1000, 6.83/1000 and 9.88/1000, respectively. There were no significant differences in MN frequencies and hematological values in goats between nuclear power plant and control area. High level of platelet in the goat from Uljin nuclear power plant was observed, which seemed to be related to the goat management.

**Key words :** Radiation, micronuclei, goat, lymphocyte, nuclear power plant.

### 서 론

방사선 피폭의 선량측정은 직업적, 질병치료시 또는 불의의 사고에 의한 방사선 피폭의 경우 가장 기본적으로 요구되는 사항이다. 대부분의 경우 방사선의 선량측정은 film, quartz fibril electrometer, glass rod dosimeter 등의 개인용 계측기를 사용한 물리적 측정이 주로 이루어진다. 그러나 이와 같은 측정방법은 계측기 자체에 대한 방사선 조사량의 측정일 뿐 작업종사자 또는 피폭자가 받은 방사선량의 표시는 아니며 특히, 선량측정에 많은 한계가 있다. 따라서 이와 같은 단점을 극복할 수 있는 방법은 피폭된 개체 자체에 대한 생물학적 선량측정이며, 피폭시 물리적 계측기가 없는 경우, 또는 부분피폭의 상태에서는 생물학적 선량측정의 중요성은 한층 더 강조된다<sup>19,31</sup>.

방사선 피폭의 생물학적 선량측정은 각종 단백질 및 핵산의 변화를 중심으로 한 효소변화측정 즉, 생화학적 방법<sup>14,39</sup>과 미성숙염색체응축(premature chromosome condensation)

검사법을 비롯한 세포유전학적 방법<sup>23</sup>, 조혈세포<sup>9</sup>, 정자산생<sup>22</sup>, 체모의 변화<sup>25</sup>를 이용한 세포조직학적 방법, 기타 면역학적 변화 등을 관찰하는 방법들이 제시되고 있다. 생물학적 선량 측정의 조건으로, 피폭량에 따른 반응의 일치(dose-dependence)와 전리 방사선에 대해 특징적인 반응을 보여 선량측정이 용이해야 하며 피폭 후 빠른 결과의 산출, 부분피폭의 검출과 피폭 후 피폭선량의 지속성, 만성피폭과 분할피폭의 적용성 및 다양한 선질에 대하여 모두 측정 가능하여야 한다. 그러나 현재 위의 조건을 모두 만족시킬 수 있는 지표는 없으나 개인용 계측기를 이용한 물리적 측정방법의 문제점을 보완하기 위하여 생물학적 선량 측정법이 중요시되고 있다<sup>1</sup>.

가장 많이 적용되는 생물학적 선량측정은 혈액내 림프구의 숫적 변동이며<sup>0</sup> 이외 dicentric과 centric ring의 계측을 중심으로 한 염색체 분석법이 몇몇 방사선 사고시 적용 측정되었다<sup>4,10,12,13,26</sup>. 그러나 혈액세포의 숫적 변화는 원줄기세포(stem cell) 및 세포성숙계로부터 어느 정도 이용가능한지의 정도, 시간경과 후의 세포사멸에 의한 수적 소실의 비율, 비장과 같은 혈액보유장기 상태 등의 변화에 따른 혈구수치의 차이로 인한 해석상의 문제점이 있고<sup>9</sup> 염색체분석법은 재료의 제작 및 분석에 많은 시간과 노력 있어야 하고, 또한 상당한 수준의 숙련된 기술이 있어야 할 수 있다는 단점이

<sup>1</sup>Corresponding author.  
E-mail : shokim@chonnam.ac.kr

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었다.

있다<sup>13,21</sup>. 골수세포를 이용하는 전통적인 미소핵 검사에 비하여 세포질분열 차단 림프구를 이용한 미소핵 검사는 일회 분열의 확인 및 미분열세포의 배제가 가능하기 때문에 현재 방사선생물학분야에서 선량측정 및 반응조절물질의 효과 검증 시험에 많이 적용되고 있다<sup>1,11,15,21,27,37</sup>.

동물은 주위 환경에 존재하는 여러 가지 유해물질에 영향을 받는다. 방사선을 비롯한 물리적 유전장해 유발물질 및 농약 등의 화학적 유전장해 유발물질에 의해 돌연변이, 대사장해, 생식이상, 면역저하 등의 증상을 일으킬 수 있다. 특히 애완동물을 비롯한 가축은 인간의 생활환경을 공유한다는 관점에서 대상 자체의 장해뿐만 아니라 인간에 대한 유해인자의 작용을 대변할 수 있어 주위 환경의 유해성 평가 분야에서 매우 중요하다<sup>2,7</sup>.

본 연구에서는 재래산양의 대상으로 혈액수치 및 세포질분열차단 림프구에서 발생한 미소핵을 측정하여 원자력발전소와 대조지역의 차이를 관찰하였으며 미소핵 발생 정도를 시험적으로 산출된 방사선 피폭 선량-반응 곡선식에 적용하여 추정선량을 파악하였다.

## 재료 및 방법

### 혈액 수치 관찰

실험대상 재래산양의 말초혈액을 헤파린이 첨가된 vacutainer에 채취하여 동물전용 혈구분석기(Hemavet 850\*, CDC Technologies Inc. USA)를 사용, 백혈구, 적혈구 및 혈소판의 상태를 검사항목 별로 분석하였다. 백혈구는 총백혈구, 호중구, 호산구, 호염구, 단핵구, 림프구를 감별 측정하고 총수 및 백분율을 산출하였으며, 적혈구는 총적혈구, hemoglobin, hematocrit 등을 산출하였다.

### 실험세포 및 배양

시험적 방사선 조사 후 선량-반응식을 도출하기 위하여 광주인근 지역의 건강한 3두의 재래산양 말초혈액을 사용하였고, 월성원자력발전소(5두) 및 울진원자력발전소(6두) 내의 사육장에서 사육중인 재래산양(1-2세) 및 전남 화순 지역(8두) 사육 재래산양(1-2세)의 혈액을 채취하여 원전 사육 재래산양 실험군과 대조지역 사육 재래산양 실험군으로 적용하였다. Histopaque-1077 kit(Sigma)를 이용하여 림프구를 분리하여 HBSS(Sigma)에 수세한 후 15% heat inactivated fetal bovine serum(Hyclone), L-glutamine(Sigma), 2-mercaptoethanol(Sigma)과 항생제가 첨가된 RPMI1640(Gibco BRL) 배지에 부유시켰다. 림프구는 multi-well tissue culture plate(Falcon, Becton Dickinson)를 사용하여 배지 ml당  $5 \times 10^5$ 개의 농도로 37°C, 5% CO<sub>2</sub> 배양기에서 배양하였다. 배지 ml당 1% 및 2%의 phytohaemagglutinin (PHA, Sigma)을 첨가하고 2, 4, 6 또는 12 µg의 Cytochalasin B (Cyt-B, Aldrich Chemical Co.)를 첨가한 후 이핵세포를 얻기 위한 최적농도를 파악하였다.

### 방사선조사

시험적 방사선 조사 후 선량-반응식을 도출하기 위하여, 분리된 림프구는 멸균된 polystyrene tube(Falcon, Becton Dickinson)에 분주하여 PHA첨가 직전에 1, 2, 4 Gy의 <sup>60</sup>Co 감마선을 1000 cGy/min의 선량율로 1회 조사(Gammacell 3000 Elan, Nordion International Co., Canada)하였다.

### Cytokinesis-blocked method

Cyt-B는 dimethylsulphoxide(Sigma)에 ml당 2 mg의 양으로 원액을 만들어 -70°C에 보관하였으며 실험을 통하여 얻어진 최적용량을 적용하여 배양 44시간에 첨가하였다. 배양 개시 후 72시간에 세포를 수확하였으며 cytocentrifuge를 이용하여 검경용 표본을 만들고 건조 후 Diff Quik kit (International Reagents Corp.)를 이용하여 염색하였다.

### 미소핵의 검정

미소핵은 유침하에서 1000배 배율의 현미경으로 관찰하였으며 주핵에서 분리된 구형으로 지름이 주핵의 50% 이하이며 이핵세포의 세포질내에 존재하여야하고 빛의 반사와 같은 형상이 없고 염색성이 주핵에 비하여 진하지 않은 것을 미소핵으로 판정하였다<sup>1</sup>. 모든 성적의 분석은 Graph PAD In Plot program을 사용하였다.

## 결 과

원전 및 대조지역 사육 재래산양의 혈액수치에서 각 군 사이의 유의성 있는 차이는 없었으며 방사선 피폭 유무의 지표가 될 수 있는 림프구의 수치도 유의성 있는 차이는 없었다(Table 1). 울진원자력발전소 사육 재래산양의 혈소판이 높은 수치를 나타낸 것은 외부기생충 증감염 또는 사육장의 구조에 따른 운동량 과다 등의 원인에 의한 것으로 생각된다.

세포질분열 차단 림프구, 즉 2개의 핵을 가진 림프구의 유도는 PHA 2% 투여군에서 높게 유도되었고, Cyt-B의 첨가량이 증가할수록 전체림프구에 대한 이핵 림프구의 유도율은 증가하였으나 4핵 세포의 유도율과 Cyt-B 자체의 세포독성을 고려하여 최적농도는 4 µg/ml로 동일하였다. 위의 조건에서 배양된 림프구에서 이핵 림프구는 약 12% 였다.

시험적 방사선 조사에 따른 미소핵의 발생 양상은 Table 2 및 3과 같으며 방사선조사에 따라 linear-quadratic model을 적용하여 얻은 곡선식은  $y = (0.1353 \pm 0.01157)D + (0.004322 \pm 0.0003208)D^2 + 0.00867$  ( $y = CB$  세포당 MN의 수,  $D =$  방사선 조사량 Gy)였다.

월성 및 울진 원전과 대조지역 사육 재래산양의 미소핵 발생은 1000개의 이핵세포 당 각각 평균 9.60개, 6.83개 및 9.88개였으며, 대상 재래산양의 모든 개체에서 세포 당 2개 이상의 미소핵을 가진 경우는 없었다(Table 4). 조사 대상 재래산양의 미소핵 발생빈도를 시험적 방사선 조사 후 얻은 방사선량-반응식에 대입하여 추정선량을 파악하기 위

**Table 1.** Hematological values in goat bred in Wolsong, Uljin nuclear power plant and control region (mean  $\pm$  S.D.)

Test	Unit	Control	Wolsong	Uljin
Erythrocyte	M/ $\mu$ l	16.89 $\pm$ 0.95	14.65 $\pm$ 3.26	14.81 $\pm$ 2.62
Hemoglobin	g/dL	11.13 $\pm$ 0.95	9.98 $\pm$ 1.78	7.62 $\pm$ 1.16
Hematocrit	%	28.64 $\pm$ 2.22	26.77 $\pm$ 4.81	31.33 $\pm$ 6.13
Thrombocyte	K/ $\mu$ l	452 $\pm$ 186	300 $\pm$ 164	1356 $\pm$ 342*
Leukocyte	K/ $\mu$ l	15.69 $\pm$ 3.69	13.31 $\pm$ 2.21	15.33 $\pm$ 3.75
Neutrophil	K/ $\mu$ l	3.75 $\pm$ 2.00	3.95 $\pm$ 0.98	4.72 $\pm$ 1.39
Lymphocyte	K/ $\mu$ l	9.55 $\pm$ 2.04	7.42 $\pm$ 1.48	8.60 $\pm$ 2.21
Monocyte	K/ $\mu$ l	2.12 $\pm$ 0.67	1.58 $\pm$ 0.62	1.73 $\pm$ 0.55
Eosinophil	K/ $\mu$ l	0.21 $\pm$ 0.17	0.26 $\pm$ 0.23	0.19 $\pm$ 0.10
Basophil	K/ $\mu$ l	0.07 $\pm$ 0.05	0.11 $\pm$ 0.11	0.09 $\pm$ 0.04

\*p &lt; 0.01 as compared with control group.

**Table 2.** Micronuclei (MN) per 500 cytokinesis-blocked lymphocytes following irradiation of goat

Experimental group	No. of cells without MN	Number of micronuclei per cell				Total number of MN
		1	2	3	4	
donor 1						
0 cGy	496	4				4
100 cGy	437	52	11			74
200 cGy	375	100	21	4		154
400 cGy	274	151	59	15	1	318
donor 2						
0 cGy	495	5				5
100 cGy	432	61	7			75
200 cGy	380	92	26	2		150
400 cGy	281	143	61	15		310
donor 3						
0 cGy	496	4				4
100 cGy	439	50	11			72
200 cGy	389	85	20	6		143
400 cGy	281	155	50	10	4	301

**Table 3.** Frequency of micronuclei in cytokinesis-blocked (CB) cells following treatment with gamma-rays

Dose (cGy)	micronuclei per CB cell (mean $\pm$ S.D.)
0	0.009 $\pm$ 0.001
100	0.147 $\pm$ 0.003
200	0.298 $\pm$ 0.011
400	0.619 $\pm$ 0.017

하여,  $y = aD + bD^2 + C$ 를  $D = [-a \pm \sqrt{a^2 - 4b(C - y)}] \div 2b$ 로 전환하고 위의 식을 근거로 세포 당 미소핵의 수를 대입한 바, 추정선량은 울진원전 사육 재래산양은, 선량-반응식 도출을 위한 재래산양에서 방사선 비조사군의 발생을 보다 낮았으며, 강제적 추정선량은 월성원전 사육 재래산양에서

**Table 4.** Micronucleus frequency in binucleated cells of goat lymphocytes from Wolsong, Uljin nuclear power plant and control region

Subject	Number of MN per 1000 CB cells		
	Control	Wolsong	Uljin
1	6	8	9
2	16	6	5
3	8	12	7
4	5	9	6
5	6	13	6
6	15		8
7	13		
8	10		
Mean $\pm$ S.D.	9.88 $\pm$ 4.32	9.60 $\pm$ 2.88	6.83 $\pm$ 1.47

0.68 cGy, 울진원전 사육 재래산양에서 -1.39 cGy, 대조지역 사육 재래산양에서 0.89 cGy였다.

## 고 찰

방사선 피폭에 대한 생물학적 선량측정 방법으로 세포유전학적 분석법인 미소핵검사시 림프구를 주로 사용하는데, 이는 비교적 수명이 길고, 정상상태에서는 분열하지 않으며 표본의 채취가 용이하기 때문이다<sup>4,12,13,26</sup>. 또한 기존의 염색체 분석법에 비하여 미소핵검사는 염색체 검사에 관한 특별한 숙련이나 기술 없이도 분석이 비교적 쉬우며 단기간에 수행될 수 있다. 특히 세포질분열 차단 림프구의 사용에 따라 방사선생물학 분야의 연구가 더욱 용이하게 되었다<sup>1,8,11,27,37</sup>. 미소핵은 전리방사선의 직접효과 또는 free radical에 의한 염색체의 centromere의 부재(acentric fragment), 두개 이상의 centromere 존재, kinetochore의 결손 또는 방추사의 손상 등에 의해 세포분열 시 주핵(main nucleus)에 포함되지 못해 형성되는 것으로 알려져 있다<sup>1,11,27,38</sup>.

원자력발전소를 대상으로 한 방사선 피폭 유무의 조사는 주로 직접적으로 방사선에 노출될 가능성이 있는 작업종사자를 대상으로 하고 있다<sup>6,20,32,35,36</sup>. 염색체이상을 지표로 한 세포유전학적 검사에서 대조군에 비해 정상 허용범위 내에서 약간의 상승 또는 비슷한 수치를 나타낸다<sup>3,18</sup>. 지금까지 주로 사용되었던 염색체이상 측정법은 판별에 많은 시간을 요하고 상당한 기술적 숙련이 필요하여 많은 수의 대상을 조사하는데는 어려움이 있었다. 이에 비하여 간단하면서도 방사선에 의한 장해의 생물학적 선량측정이 가능한 세포질분열 차단 림프구의 미소핵을 관찰하는 실험이 적용되어 의료적 방사선 피폭이나 환경적 방사선 피폭 측정에 적용되고 있다<sup>35,36</sup>.

동물 유래 세포를 이용한 방사선 피폭의 생물학적 측정능 과거 염색체의 이상유무 및 동물종 간의 감수성 차이가 조사되었으며<sup>17</sup>, 최근 간편한 미소핵 발생에 관한 연구가 진행되면서 두 가지 세포유전학적 분석간의 차이 점 등이 알려지고 있다<sup>5,16,27</sup>. 원전 주변 동물을 대상으로 한 연구는 소를 대상으로, 체르노빌 원전 사고 후 방사성 물질의 내부오염에 대한 장기 별 방사능 물질의 축적 및 유즙내 방사성 물질의 유무를 파악하는 조사 연구가 주를 이루고 있다<sup>29,30,34</sup>. 소에서 림프구 미소핵 측정법은 1993년 Scarfi 등<sup>28</sup>에 의해 최초 보고된 이래 방사선 및 과산화수소에 의한 독성 시험에 사용되었고<sup>10</sup> 최근 슬로바키아에서 지역별 환경 오염의 차이를 파악하는 방법으로 실제 적용되었으나<sup>33</sup> 재래산양의 세포질분열 차단 림프구 미소핵 발생을 적용한 생물학적 조사는 보고된바 없어 본 연구의 결과를 비교 평가할 수는 없다. 지금까지의 연구에서 동물유래 세포를 사용한 염색체 분석에서 방사선에 대한 동물별 민감도의 차이는 핵의 량, DNA의 량, 염색체의 수, 염색체완의 수(chromosome arm number)와 관련하여 설명되어 왔으나, 미소핵발생과 관련하여 명확한 결론을 도출하지 못하였다<sup>5</sup>. 최근 방사선에 의한 세포의 사

멸에 따른 동물별 세포생존율의 차이 등의 요인이 관계된다는 보고가 있어 미소핵 측정은 염색체 이상의 결과에서 산출된 동물 별 방사선 감수성을 그대로 적용할 수는 없고 각 동물에 대한 직접적인 림프구 미소핵의 조사 연구가 필요하다고 하였다<sup>5</sup>.

본 연구는 원전 사육 재래산양의 림프구 미소핵 발생을 지표로 한 방사선 피폭 가능성 판별을 위한 최초의 세포유전학적 보고로서, 원전 사육 재래산양과 대조 지역 사육 재래산양에서 비슷한 혈액 수치 및 미소핵 발생 수치를 나타냄으로서 원전에 의한 사육 재래산양의 방사선 생물학적 유해성은 없는 것으로 평가되었다. 가축 유래 세포를 사용한 연구에서는 대상 가축의 연령이 중요하며<sup>24</sup> 특히 환경적 유해요인의 평가에서 유해인자의 저농도 장기 노출이 보다 정확한 결과를 나타내리라 사료되며, 따라서 방사성 물질의 내부오염이나 전리방사선의 외부 피폭 유무 판단을 위하여 원자력시설 주변의 가축에 대해서도 고령 가축을 대상으로 한 연구가 필요하다고 사료된다.

애완동물이나 가축은 인간의 환경을 공유하므로 직접 인체를 대상으로 하는 조사연구를 대체할 수 있는 동물을 대상으로 한 연구조사가 계속되어야 할 것으로 생각되며 이와 같은 관점에서 원자력 시설 지역의 생물감시체계의 확립이 필요하다.

## 결 론

월성 및 울진원자력발전소와 대조지역(전남 화순)에서 사육된 재래산양의 말초혈액을 이용하여 혈액학적 분석 및 세포유전학적 분석을 실시하였다. 환경방사선 노출에 대한 지표로서 각 지역 재래산양의 림프구를 대상으로 세포질분열 차단세포를 유도하고 이들 세포에서 미소핵 측정을 실시하였다. 시험관내에서 실험적으로 방사선을 조사한 림프구를 대상으로 도출된 최적 선량-반응식에 각 지역 재래산양에서 측정된 미소핵 빈도를 적용하여 추정 선량을 파악하였다. 월성 및 울진 원전과 대조지역 사육 재래산양의 미소핵 발생은 100개의 이핵세포 당 각각 평균 9.60개, 6.83개 및 9.88개였다. 원전 사육 재래산양과 대조지역 사육 재래산양의 혈액수치 및 미소핵의 발생에서 유의성 있는 차이가 없어, 본 연구에서의 결과는 원자력발전소와 대조지역의 방사선 관련 유해성은 차이가 없는 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. Almasy Z, Krepinsky AB, Bianci A, Koteles GJ. The present state and perspectives of micronucleus assay in radiation protection. A review. *Appl Radiat Isot* 1987; 38: 241-249.
2. Backer LC, Grindem CB, Corbett WT, Cullins L, Hunter JL. Pet dogs as sentinels for environmental contamination. *Sci Total Environ* 2001; 274: 161-169.
3. Braselmann H, Schmid E, Bauchinger M. Chromosome aberrations in nuclear power plant workers: the influence of

- dose accumulation and lymphocyte life-time. *Mutat Res* 1994; 306: 197-202.
4. Brewen JG, Preston RJ, Littlefield LG. Radiation-induced human chromosome aberration yields following an accidental whole-body exposure to <sup>60</sup>Co gamma-rays. *Radiat Res* 1972; 49: 647-656.
  5. Catena C, Asprea L, Carta S, Tortora G, Conti D, Parasacchi P, Righi E. Dose-response of X-irradiated human and equine lymphocytes. *Mutat Res* 1997; 373: 9-16.
  6. Chung HW, Kim SY, Sohn EH, Ha SW. Analysis of chromosome aberrations in nuclear-power-plant workers considering the lifetime of lymphocytes. *Int J Radiat Biol* 2000; 76: 923-927.
  7. Di Bernardino D, Ramunno L, Jovino V, Pacelli C, Lioi MB, Scarfi MR, Burguete I. Spontaneous rate of sister chromatid exchanges (SCEs) in mitotic chromosomes of sheep (*Ovis aries* L.) and comparison with cattle (*Bos taurus* L.), goat (*Capra hircus* L.) and river buffalo (*Bubalus bubalis* L.). *Hereditas* 1997; 127: 231-238.
  8. Fenech M. The advantages and disadvantages of the cytokinesis-block micronucleus method. *Mutat Res* 1997; 392:11-18.
  9. Fieldner TM, Nothdurft W, Steinbach KH. Blood cell changes after radiation exposure as an indicator for hemopoietic stem cell function. *Bone Marrow Trans* 1988; 3: 77-84.
  10. Flores MJ, Pinero J, Ortiz T, Pastor N, Mateos JC, Cortes F. Both bovine and rabbit lymphocytes conditioned with hydrogen peroxide show an adaptive response to radiation damage. *Mutat Res* 1996; 372: 9-15.
  11. He JL, Jin HY, Jin LF, Gao SY. Monitoring of human exposure to radiation with the binucleated lymphocyte micronucleus assay. *Biomed Environ Sci* 2000; 13: 32-36.
  12. IAEA. Biological dosimetry with particular reference to chromosome aberration analysis. A review of methods. Vienna:IAEA-SM-199/4, 1969.
  13. IAEA, Biological dosimetry : chromosomal aberration analysis for dose assessment, Technical report 260. Vienna: IAEA. 1986.
  14. Kim SH. Relationships between radiation-induced prostaglandin E2 and natural killer cell activity in mice. *Korean J Vet Res* 1987; 27: 185-189.
  15. Kim SH, Cho CK, Kim TH, Yoo SY, Koh KH, Yun HG. Frequency of micronuclei in lymphocytes following gamma and fast-neutron irradiations. *Anticancer Res* 1993; 13: 1587-1592.
  16. Kim SH, Han DU, Lim JT, Jo SK, Kim TH. Induction of micronuclei in human, goat, rabbit peripheral blood lymphocytes and mouse splenic lymphocytes irradiated in vitro with gamma radiation. *Mutat Res* 1997; 393: 207-214.
  17. Leonard A. Cytogenetic effects of ionizing radiations in somatic cells from experimental mammals and extrapolation to man, In Ishihara T, Sasaki M, ed, *Radiation-induced chromosome damage in man*, Alan R Liss Inc, New York: 561-583, 1983.
  18. Leonard A, Deknudt G, Leonard ED, Decat G. Chromosome aberrations in employees from fossil-fueled and nuclear-power plants. *Mutat Res* 1984; 138: 205-212.
  19. Lloyd DC. An overview of radiation dosimetry by conventional cytogenetic method, In Eisert WG, Mendelsohn ML, ed *Biological Dosimetry*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: 3-13, 1984.
  20. Muirhead CR, Boice JD Jr, Raddatz CT, Yoder RC. Comparison of dose histories for U.S. nuclear power plant workers, based on records held by a major dosimetry service company and on the NRC REIRS database. *Health Phys* 1996; 70: 645-650.
  21. Muller W-U, Streffer C. Biological indicators for radiation damage. *Int J Radiat Biol* 1991; 59: 863-873.
  22. Sheiner EK, Sheiner E, Hammel RD, Potashnik G, Carel R. Effect of occupational exposures on male fertility: literature review. *Ind Health* 2003; 41: 55-62.
  23. Pantelias GE, Maillie HD. The use of peripheral blood mononuclear cell prematurely condensed chromosomes for biological dosimetry. *Radiat Res* 1984; 99: 140-150.
  24. Peace BE, Succop P. Spontaneous micronucleus frequency and age: what are normal values? *Mutat Res* 1999; 425: 225-230.
  25. Potten CS, Geng L, Taylor P. Hair medullary cell counts : a simple and sensitive indicator of radiation exposure. *Int J radiat Biol* 1990; 57: 13-21.
  26. Ramalho AJ, Nascimento ACH, Natarajan AT. Dose assessments by cytogenetic analysis in the Goiania(Brasil) radiation accident. *Radiat Protect Dosimetry* 1988; 25: 97-100.
  27. Ramalho A, Sunjevaric I, Natarajan AT. Use of frequencies of micronuclei as quantitative indicators of X-ray-induced chromosome aberrations in human peripheral blood lymphocytes: comparison of two methods. *Mutat Res* 1988; 207: 141-146.
  28. Scarfi MR, Lioi MB, Di Bernardino D, Zeni O, Coviello AM, Matassino D. Measurement of micronuclei by cytokinesis-block method in bovine lymphocytes. *Mutat Res* 1993; 289: 291-295.
  29. Shliakhtenok AS. Dynamics of <sup>134</sup>Cs + <sup>137</sup>Cs accumulation in insects inhabiting the 30-kilometer zone of Chernobyl Nuclear Power Station. *Radiats Biol Radioecol* 2003; 43: 93-96.
  30. Spirin EV. Reconstruction of I-131 in milk and exposure doses to the thyroid gland of cattle after the Chernobyl AES. *Radiats Biol Radioecol* 2002; 42: 564-568.
  31. Stephan G, Hadnagy W, Hammermaier C, Imhof U. Biologically and physiologically recorded doses after an accidental exposure to <sup>60</sup>Co gamma-rays. *Health Phys* 1983; 44: 409-411.
  32. Straube E, Straube W, Romer T. Does occupational nuclear power plant radiation affect conception and pregnancy? *Early Pregnancy* 1995; 1: 130-133.
  33. Sutiakova I, Sulik E, Rimkova S, Sakalikova A, Sutiak V. Micronucleus frequency in cytokinesis-blocked bovine lymphocytes from regions with different pollution levels in Slovakia. *Bull Environ Contam Toxicol* 2001; 66: 449-455.
  34. Tempel K. Chernobyl and its consequences--some veterinary medical points of view. *Tierarztl Prax Ausg G Grosstiere Nutztiere* 1997; 25: 401-405.
  35. Thierens H, Vral A, Barbe M, Aousalah B, De Ridder L. A cytogenetic study of nuclear power plant workers using the micronucleus-centromere assay. *Mutat Res* 1999; 445: 105-

- 111.
36. Thierens H, Vral A, Barbe M, Meijlaers M, Baeyens A, Ridder LD. Chromosomal radiosensitivity study of temporary nuclear workers and the support of the adaptive response induced by occupational exposure. *Int J Radiat Biol* 2002; 78: 1117-1126.
37. Thierens H, Vral A, Morthier R, Aousalah B, De Ridder L. Cytogenetic monitoring of hospital workers occupationally exposed to ionizing radiation using the micronucleus centromere assay. *Mutagenesis* 2000; 15: 245-249.
38. Thomson EJ, Perry PE. The identification of micronucleated chromosomes: a possible assay for aneuploid. *Mutagenesis* 1988; 3: 415-418.
39. UNSCEAR, Report : Sources and effects of ionizing radiation, Annex G, Early effects in man of high doses of radiation, chapter III : prognostic indicators and biological dosimetry. United Nations, New York, 583-612, 1988.