

## X-선 조사식품 4종의 유전독성학적 안전성 평가

정다운<sup>1</sup> · 황옥화<sup>1</sup> · 송범석<sup>2</sup> · 변명우<sup>3</sup> · 강일준<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한림대학교 식품영양학과·한국영양연구소

<sup>2</sup>한국원자력연구원 첨단방사선연구소

<sup>3</sup>우송대학교 외식조리영양학부

## Genotoxicological Safety Evaluation of X-ray Irradiated Four Foods

Da-Woon Jung<sup>1</sup>, Yu-Hua Huang<sup>1</sup>, Beom-Seok Song<sup>2</sup>, Myung-Woo Byun<sup>3</sup>, and Il-Jun Kang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Food Science and Nutrition & The Korean Institute for Nutrition, Hallym University

<sup>2</sup>Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute

<sup>3</sup>School of Culinary Nutrition, Woosong University

**ABSTRACT** This study evaluated the genotoxic effects of 30 kGy of X-ray irradiation to four foods (chicken, egg powder, dried green onion, and black pepper). In bacterial reversion assay with *Salmonella* Typhimurium TA98, TA100, TA1535, and TA1537, the X-ray irradiated foods did not show a significantly increased number of revertant colonies in the presence or absence of the S9 metabolic activation system. In chromosomal aberration tests with Chinese hamster ovary (CHO) cells, the X-ray irradiated foods showed no increase in the frequency of chromosomal aberrations. In *in vivo* mouse micronucleus assay, the X-ray irradiated foods did not show any increase in the frequency of polychromatic erythrocytes with micronuclei. These results indicate that 30 kGy of X-ray irradiation to four foods (chicken, egg powder, dried green onion, and black pepper) showed no genotoxic effects under these experimental conditions.

**Key words:** genotoxicity, X-ray irradiated food, bacterial reversion assay, chromosomal aberration test, micronucleus assay

## 서 론

식품조사는 전리방사선을 이용하여 식품에 처리하는 것으로 최근 방사선 조사 기술이 다른 기술에 비해 기능적, 영양적 및 관능적 손실을 최소화하여 줄여 식품을 보존한다는 사실이 입증되었다(1,2). 또한 미생물의 생육을 억제하고 과일 및 채소의 발아를 지연하며, 해충을 사멸하는 등의 이점 때문에 향후 방사선 조사 기술의 활용은 점차 증가될 것으로 전망된다(3-5).

식품의약품안전처는 식품이 영양학적 품질에 영향을 받지 않고 노출될 수 있는 선량이 최대 10 kGy라고 명시하였다(6). 그러나 식품의 안전한 위생을 위해서는 10 kGy 이하의 조사선량이 미흡하다는 문제점이 보고되고 있으며, 완전 살균과 장기저장을 위해서 10 kGy 이상의 고선량 조사가 필요하다고 한다(7). 미국 FDA에서는 rat을 이용하여 0.1~55.8 kGy로 조사된 양파, 돈육, 빵, 고등어 등 식품의 아만성 독성평가를 수행한 결과 대부분의 시료에서 방사선 조사의

악영향은 나타나지 않았다(8). 그러나 아직까지 소비자들의 방사선 조사식품에 대한 안전성을 우려하고 있어 수용도가 높지 않으며 방사선 분해 산물에 대해서도 논쟁이 끊이지 않고 있다(9,10). 방사선 조사식품의 실용화를 증대하기 위해서는 소비자들에게 방사선 조사식품에 대하여 정확한 정보를 제공할 필요가 있다(11). 방사선 분해 산물은 다양한 선량의 범위로 식품에 조사하면서 식품의 구성성분인 지질, 단백질, 탄수화물로부터 생성되는데 이는 포도당, 포름산, 아세트알데히드, 이산화탄소 등으로 열처리 과정에서도 생성되며 식품에 자연적으로도 존재한다. 또한 방사선에 의해 물이 이온화되어 형성된 자유라디칼은 식품 구성성분과 반응하여 안정한 물질로 전환되므로 안전성에 문제를 일으키지 않는다(8).

식품 방사선에 이용되는 조사선원으로는 감마선, X-선 및 전자선 등이 있으며, 세계적으로 50여 개국에서 260종의 식품에 대해 위 3종의 선원에 대해 사용이 허가되어 식품의 품목과 목적에 맞게 0.1~30 kGy까지 조사가 이루어지고 있다(12-14). 감마선은 Co-60 및 Cs-137 등과 같은 방사성동위원소에서 자연적으로 방출되는 빛에너지에 이용하는 방법이며, X선 및 전자선은 전자를 빠른 속도로 가속시켜 방출되는 에너지를 이용하는 방법이다. X-선 및 전자선은 감마선에 비해 투과력이 약하므로 대용량의 식품조사 처리

Received 9 June 2014; Accepted 4 July 2014

Corresponding author: Il-Jun Kang, Department of Food Science and Nutrition & The Korean Institute for Nutrition, Hallym University, Chuncheon, Gangwon 200-702, Korea  
E-mail: ij kang@hallym.ac.kr, Phone: +82-33-248-2135

가 어려운 단점이 있으나 기계적인 장치를 이용하므로 on/off가 가능하여 에너지를 효율적으로 이용할 수 있다. 전자선은 고선량을 신속하게 처리할 수 있는 장점이 있는 반면 입자방사선이라는 특징으로 인하여 투과력이 작다는 단점이 있기 때문에 X-선이 전자선에 비해 보다 두꺼운 시료의 처리가 가능하다(12,15). 또한 식품의 성분 변화를 최소화하고 설비비용이 감마선조사시설보다 저렴하며 조사선량의 조절이 용이하고, 방사성동위원소를 사용하지 않는 환경 친화적인 수단으로 감마선조사의 대체기술로 활발히 이용되고 있다(16,17). 우리나라는 1986년부터 감마선 조사처리가 허가되어 이용되어 왔으며, 2012년 7월 30일 전자선조사가 허용되어 식품조사기술의 실용화가 본격적으로 추진되고 있다(18).

지금까지 방사선인 감마선을 주로 상업적으로 사용하고 있으나, 감마선 조사식품의 안전성에 대한 소비자의 태도와 고선량 조사식품에 따른 다양한 형태의 연구는 여전히 풀어야 할 과제로 여겨지고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 감마선조사의 대체기술인 X-선 조사의 상용화를 위한 기초연구로 고선량으로 조사한 X-선 조사식품의 안전성을 검토할 목적으로 30 kGy로 X-선 조사한 식품 4종(닭고기, 전란분말, 건과, 후추)의 유전독성학적 안전성 평가를 실시하였다.

## 재료 및 방법

### 시료 및 X-선 조사 처리

본 연구에 사용한 시료는 닭고기, 전란, 과, 후추로 시중에서 판매 중인 것을 구입하여 동결건조기(Vacuum Freeze Dryer, Model SFDSF12, Samwon Freezing Co., Seoul, Korea)에 동결건조 하여 독성시험 시료로 사용하였다. X-선 조사는 ㈜이비테크에 설치되어 있는 LINAC Electron Accelerator(Model ELV-8, 10 MeV, EB-Tech, Daejeon, Korea)에 부착된 X-선 컨버터로부터 발생하는 제동 X-선(7.5 MeV, 1 mA)에 1.12 m/min의 속도로 시험물질을 노출시켜 각각 흡수선량이 30 kGy가 되도록 반복하여 처리하였다. 흡수선량 확인은 cellulose triacetate dosimeter system을 이용하였으며 총 흡수선량의 오차는 목표 선량의 5% 이내였다.

### 복귀돌연변이원성 시험

시험에 사용된 균주는 *Salmonella* Typhimurium LT2를 친주로 하는 *S. Typhimurium* TA98, TA100, TA1535, TA1537로 국립보건연구원(Osong, Korea)으로부터 분양받아 계대 보존하여 사용하였다. 이들 균주는 사용에 앞서 histidine 요구성, crystal violet 감수성, ampicillin 내성, spontaneous 복귀변이 수 등을 확인하였다. 30 kGy로 X-선 조사한 식품 4종(닭고기, 전란분말, 건과, 후추)은 농도 증가에 따라 탁도와 점도가 높아지기 때문에 용해 가능한 최고 적용 농도인 5,000 µg/plate를 공비 5로 희석하여 용량

단계 5단계로 설정하였으며, S9 mixture를 가하지 않은 대사 활성 부재 시스템과 S9 mixture를 가한 대사 활성 적용 시스템으로 나누어 본 시험을 수행하였다. 균주를 nutrient broth에 하룻밤 동안 배양하여 대수기( $2 \times 10^9$  cells/mL) 상태에 이르도록 한 다음 배양액 0.1 mL를 시험물질(X-선 조사식품 4종) 0.1 mL, S9 mixture 또는 0.2 M Na-phosphate buffer 0.5 mL를 혼합하여 37°C에서 30분간 pre-incubation 하였다. Histidine/biotin을 함유한 top agar 2.5 mL를 가하여 minimal glucose agar 배지에 부어 굳은 후에 37°C에서 48시간 동안 배양한 후 복귀돌연변이 집락을 계수하였다(19). 양성대조물질로는 sodium azide(SA), 4-nitroquinoline N-oxide(4NQO), acridine mutagen ICR-191(ICR-191), benzo[a]pyrene(B[a]P) 및 2-aminoanthracene(2-AA) 등을 각 시험 균주의 특성에 맞추어 사용하였다.

### 염색체 이상 시험

Chinese hamster lung(CHL) fibroblast를 사용하여 30 kGy로 X-선 조사한 식품 4종(닭고기, 전란분말, 건과, 후추)의 염색체 이상 시험을 실시하였다. 배지는 minimal essential medium에 fetal bovine serum(FBS)을 5% 되도록 첨가하여 사용하였으며, 음성대조물질로는 시험물질의 용매인 dimethylsulfoxide(DMSO)를, 양성대조물질로는 대사 활성 조건 하에서는 benzo(a)pyrene을 DMSO에 용해시켜 사용하였으며, 대사 활성 부재 하에서는 ethyl methane sulfonate(EMS)를 멸균증류수에 용해시켜 사용하였다. 예비시험에서 시험물질(X-선 조사식품 4종)을 처리하여 독성 여부를 관찰하고, 그 결과에 따라 농도를 625~5,000 µg/mL로 설정하여 본 시험을 하였다. S9 mixture(20%, v/v), 시험물질(X-선 조사식품 4종) 및 양성대조물질이 포함된 배양액으로 6시간 배양한 다음 보통의 배양액으로 교환하여 16시간 동안 더 배양한 후 colcemid를 처리한 다음 0.05% trypsin-EDTA로 세포를 모아 염색체 이상 시험을 위한 표본을 제작하였다. 광학현미경 하에서 1,000배의 배율로 각 시험군당 100개의 잘 퍼진 분열 중기 상에 대하여 동원체 수 및 염색체 이상의 유무를 관찰하고, 이상의 종류와 수를 기록하였다(20).

### 소핵 시험

ICR 마우스(수컷, 5주령)를 사용하여 약 1주일간의 순화 기간을 거친 후 30 kGy로 X-선 조사한 식품 4종(닭고기, 전란분말, 건과, 후추)을 경구투여 하였다. 예비시험으로 경구투여가 가능한 최고 농도를 투여하여 관찰한 결과 모든 동물에서 특별한 육안적 이상 소견이 관찰되지 않았다. 이에 2,000 mg/kg/day를 본 시험의 고용량으로 설정하고, 공비를 2로 하여 1,000, 500, 250 mg/kg/day를 24시간 간격으로 2회 경구투여 하였다. 마지막 투여 후 24시간이 경과한 다음 Schmid(21)의 방법에 따라 골수검체를 제작하였다.

즉 마우스의 대퇴골에서 골수를 적출하여 FBS로 현탁하였다. 마우스당 2,000개의 다염성적혈구(polychromatic erythrocyte, PCE)를 관찰하여 그중 소핵을 가진 다염성적혈구(micronucleated polychromatic erythrocyte, MNPCE)의 수를 계수하였다. 소핵 출현 빈도는 개체당 2,000개의 PCE에서 관찰되는 MNPCE 수와 소핵 유무에 상관없이 적혈구(red blood cell, RBC)의 PCE : RBC 비율로 산출하였다.

### 통계분석

이상의 실험에서 얻어진 결과는 Statistical Package for Social Sciences 10.0(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 이용하여 ANOVA 분석을 하였으며 시료 간의 유의성은 Duncan's multiple range test로  $P < 0.01$  수준에서 비교하였다.

## 결과 및 고찰

### X-선 조사식품 4종의 복귀돌연변이원성 시험

복귀돌연변이 유발성을 시험하기 위해 30 kGy로 X-선 조사한 식품 4종(닭고기, 전란분말, 건과, 후추)을 시험물질로 사용하여 *S. Typhimurium* TA 98, TA100, TA1535 및 TA1537에 대한 복귀돌연변이 집락 수를 조사하였다. 예비시험에서 모든 처리군에서 침전의 생성은 관찰되지 않아 본 시험에서는 농도군당 3개의 평판을 사용하여 5,000 µg/plate 이하 4개의 농도군과 음성 및 양성대조군으로 시험군을 구성하였다. 먼저 S9 mixture를 가하지 않은 대사 활성 부재 시의 경우, 시험물질(X-선 조사한 식품 4종)은 모든 시험 군주에서 시험 적용 농도인 40~5,000 µg/plate의 범위에서 복귀변이 집락 수의 농도 의존적인 증가 혹은 감소를 보이지 않았으며 음성대조군과 비교해서도 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(Table 1). 대사 활성계를 도입한 즉 S9 mixture를 가한 상태에서도 시험물질(X-선 조사한 식품 4종)은 각각의 시험 적용 농도에서 복귀변이 집락 수의 증가를 보이지 않았다. 일반적으로 돌연변이원성의 판정은 음성대조군 복귀변이 집락 수의 2배 이상인 경우를 양성으로 한다(18). 예를 들어 본 실험에서 TA100, TA1535 및 TA1537의 양성대조물질로 사용한 2-AA는 각각 약 3.8배, 10배 및 20배의 복귀변이 집락 수의 증가를 보여 강한 돌연변이원성을 나타낸 반면 시험물질(X-선 조사한 식품 4종)은 전 시험 적용 농도에서 음성대조군과 유사한 복귀변이 집락 수를 나타내었다(Table 2). 따라서 시험물질(X-선 조사한 식품 4종)이 대사 활성 적용 및 대사 활성 부재 시 모두 유의할 만한 복귀돌연변이 증가를 나타내지 않는 것으로 보아 돌연변이 유발성은 없는 것으로 사료된다. 이와 같은 결과는 감마선 조사된 닭고기가 복귀돌연변이를 유발하지 않아 유전독성학적으로 안전하다는 Kwak 등(22)의 보고와 일치하였다.

**Table 1.** *Salmonella* Typhimurium reversion assay with 30 kGy X-ray irradiated four foods in the absence of S9 metabolic activation system

Test Compound (µg/plate)	Conc.	No. of His+ revertants per plate <sup>1)</sup>			
		TA98	TA100	TA1535	TA1537
Chicken	5,000	27±4	157±16	12±2	8±2
	1,000	22±6	168±14	14±3	11±3
	200	26±4	174±16	13±2	10±2
	40	25±3	171±12	15±6	8±3
	0	28±6	167±16	13±3	7±2
Egg powder	5,000	27±6	174±16	15±3	11±2
	1,000	27±4	172±18	13±3	10±2
	200	28±6	175±14	12±2	10±3
	40	27±5	168±18	14±4	8±3
	0	26±5	172±15	13±4	8±3
Dried green onion	5,000	28±5	173±15	14±3	10±2
	1,000	26±6	170±16	15±3	11±2
	200	27±5	168±18	14±3	8±3
	40	26±4	171±14	13±4	10±2
	0	28±5	169±14	12±3	9±3
Black pepper	5,000	28±6	174±14	14±2	10±2
	1,000	28±5	168±16	14±4	9±2
	200	26±6	172±12	14±3	8±2
	40	27±4	170±18	13±3	9±3
	0	26±6	171±14	13±2	7±3
SA <sup>2)</sup>	0.5	ne <sup>3)</sup>	412±13*	319±16*	ne
4NQO <sup>2)</sup>	0.5	532±27	ne	ne	ne
ICR-191 <sup>2)</sup>	0.5	ne	ne	ne	135±28*

<sup>1)</sup>Each value represents the mean±SD of three plates and expressed of revertant colonies per plate.

<sup>2)</sup>SA (sodium azide), 4NQO (4-nitroquinoline N-oxide), ICR-191 (acridine mutagen ICR-191) were used as positive controls for the corresponding strains.

<sup>3)</sup>Not examined.

\*Significantly different from the control ( $P < 0.01$ ).

### X-선 조사식품 4종의 염색체 이상 시험

본 연구에서는 Chinese hamster lung(CHL) fibroblast 세포를 대상으로 하여 30 kGy로 X-선 조사한 식품 4종(닭고기, 전란분말, 건과, 후추)의 유전독성을 평가하였다. 시험물질(X-선 조사한 식품 4종)에 대한 예비독성 시험을 수행한 결과 독성을 나타내지 않아, 적용 가능한 최고 농도인 5,000 µg/mL를 시험 적용 최고 농도로 설정하여 염색체 이상 시험을 실시하였다. 즉 CHL fibroblast 세포배양에서 시험물질(X-선 조사한 식품 4종)의 시험 적용 농도를 5,000, 2,500, 1,250, 625 µg/mL 4단계로 설정하여, 염색분체 결손(chromatid type deletions, TD), 염색분체 교환(chromatid type exchanges, TX), 염색체 결손(chromosome type deletions, CD), 염색체 교환(chromosome type exchanges, CX), 염색분체 및 염색체 차이(chromatid and chromosome type gap, G) 등의 염색체 이상 유무를 측정하였다. 우선 S9 mixture를 가하지 않은 대사 활성 부재 시의 시험에서 용매대조군인 DMSO는 100개의 중기염색체에서 평균 0.5개의 CD, 1개의 CX, 0.5개의 기타 type을 제

**Table 2.** *Salmonella* Typhimurium reversion assay with 30 kGy X-ray irradiated four foods in the presence of S9 metabolic activation system

Test Compound ( $\mu\text{g}/\text{plate}$ )	Conc. ( $\mu\text{g}/\text{plate}$ )	No. of His+ revertants per plate <sup>1)</sup>			
		TA98	TA100	TA1535	TA1537
Chicken	5,000	40 $\pm$ 7	168 $\pm$ 17	11 $\pm$ 2	10 $\pm$ 3
	1,000	35 $\pm$ 9	172 $\pm$ 12	12 $\pm$ 1	12 $\pm$ 2
	200	42 $\pm$ 8	154 $\pm$ 14	11 $\pm$ 1	10 $\pm$ 2
	40	38 $\pm$ 6	162 $\pm$ 17	9 $\pm$ 3	14 $\pm$ 3
	0	39 $\pm$ 8	177 $\pm$ 16	12 $\pm$ 2	12 $\pm$ 2
Egg powder	5,000	38 $\pm$ 6	178 $\pm$ 15	11 $\pm$ 1	12 $\pm$ 2
	1,000	41 $\pm$ 5	172 $\pm$ 17	12 $\pm$ 2	13 $\pm$ 3
	200	36 $\pm$ 7	169 $\pm$ 16	12 $\pm$ 1	12 $\pm$ 3
	40	37 $\pm$ 6	174 $\pm$ 18	10 $\pm$ 2	10 $\pm$ 2
	0	36 $\pm$ 7	164 $\pm$ 17	9 $\pm$ 2	12 $\pm$ 3
Dried green onion	5,000	41 $\pm$ 8	175 $\pm$ 16	12 $\pm$ 2	12 $\pm$ 2
	1,000	40 $\pm$ 6	177 $\pm$ 13	11 $\pm$ 2	12 $\pm$ 2
	200	38 $\pm$ 6	169 $\pm$ 16	10 $\pm$ 1	10 $\pm$ 3
	40	40 $\pm$ 8	166 $\pm$ 15	11 $\pm$ 2	12 $\pm$ 3
	0	37 $\pm$ 9	172 $\pm$ 17	10 $\pm$ 3	10 $\pm$ 3
Black pepper	5,000	42 $\pm$ 7	179 $\pm$ 18	12 $\pm$ 2	11 $\pm$ 2
	1,000	40 $\pm$ 8	176 $\pm$ 16	10 $\pm$ 2	10 $\pm$ 3
	200	42 $\pm$ 6	168 $\pm$ 15	11 $\pm$ 2	11 $\pm$ 3
	40	40 $\pm$ 8	167 $\pm$ 16	10 $\pm$ 2	12 $\pm$ 3
	0	37 $\pm$ 6	167 $\pm$ 12	9 $\pm$ 3	10 $\pm$ 2
B[ $\alpha$ ]P <sup>2)</sup>	1	218 $\pm$ 26*	ne <sup>3)</sup>	ne	ne
2-AA <sup>2)</sup>	1 (2)	ne	648 $\pm$ 35	103 $\pm$ 12*	218 $\pm$ 27*

<sup>1)</sup>Each value represents the mean $\pm$ SD of three plates and expressed of revertant colonies per plate.

<sup>2)</sup>B[ $\alpha$ ]P (benzo[ $\alpha$ ]pyrene) and 2-AA (2-aminoanthracene) were used as positive controls for the corresponding strains.

<sup>3)</sup>Not examined.

\*Significantly different from the control ( $P < 0.01$ ).

외하고 98개 모두 정상으로 염색체 이상 유발성이 없었으며, 염색체 이상 유발 물질인 양성 대조군 EMS는 64개만이 정상을 나타내어 양성의 염색체 이상 유발능을 나타내었다 (Table 3). 한편 시험물질(X-선 조사한 식품 4종)의 경우 모든 시험 농도군에서 96개 이상이 정상을 나타내어 염색체 이상 유발능을 보이지 않았다. 대사 활성계를 도입한 즉 S9 mixture를 가한 상태에서도 시험물질(X-선 조사한 식품 4종)은 모든 시험농도에서 5% 미만의 염색체 이상 유발능을 보였다(Table 4). 즉 양성 대조군인 benzo(a)pyrene은 78개만이 정상을 나타내어 양성의 염색체 이상 유발능을 나타낸 반면, 시험물질(X-선 조사한 식품 4종)의 경우는 최고 농도인 5,000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 에서도 96개 이상 정상을 나타내 염색체 이상 유발능을 보이지 않았다. CHL 세포의 경우 통상 자연발생의 염색체 이상을 가진 증기세포 출현율은 3%를 초과하는 일이 거의 없으므로 5% 미만의 평균 이상 증기상 출현율을 음성으로 판정하며, 양성대조군에서는 이 빈도가 10% 이상이어야 한다(19). 본 시험에서 이상 증기상의 빈도는 음성대조군이 2였으며, 모든 시험군의 모든 농도군에서 음성대조군에 비해 통계학적으로 유의한 증가를 나타내지 않았다. 따라서 시험물질(X-선 조사한 식품 4종)은 대

사 활성 부재 및 대사 활성 적용 모두에서 유의할 만한 염색체 이상을 나타내지 않는 것으로 보아 염색체 이상 유발성이 없는 것으로 판단되며, 이 결과는 감마선조사에 의한 돈육의 염색체 이상 시험에서 감마선 조사 돈육이 염색체 이상을 유발하지 않았다는 Kang 등(23)의 연구와도 일치하였다.

#### X-선 조사식품 4종의 소핵 시험

30 kGy로 X-선 조사한 식품 4종(닭고기, 전란분말, 건과, 후추)의 소핵 유발성을 검토하기 위해 소핵 시험을 수행한 결과, 전 시험용량 단계를 걸쳐 소핵을 가진 망상적혈구의 출현율이 음성대조군과 유의적인 차이를 나타내지 않았다 (Table 5). 즉 시험물질(X-선 조사한 식품 4종)을 시험동물 kg당 250~2,000 mg의 범위로 경구투여 한 결과, 2,000개의 PCE 중 MNPCE가 전 적용 용량 범위에서 1.8~3.8의 수준을 나타내 용매 대조군(DMSO) 2.3에 비해 소핵 발현 빈도가 유의성 있게 증가하지 않았다. 소핵 시험은 2,000개의 PCE 중 MNPCE의 빈도가 음성대조군은 평균 7(0.35%) 이하, 양성대조군은 평균 50(2.5%) 이상일 것이 판정 기준이다. 본 시험에서 양성대조물질로 사용한 cyclophosphamide·H<sub>2</sub>O(CPA)는 소핵 수가 현저히 증가한 98.25개의 소핵빈도를 보임으로써 본 시험이 적합하게 행해졌음을 알 수 있었다. 또한 세포독성의 지표인 PCE : RBC 값은 모든 투여군에서 0.29(음성대조군의 94%) 이상으로 세포독성이 관찰되지 않았다. 따라서 30 kGy로 X-선 조사한 식품 4종(닭고기, 전란분말, 건과, 후추)이 유의할 만한 소핵 발현을 유발하지 않는 것으로 보아 직접변이원이나 간접변이원으로 작용하지 않음을 알 수 있었으며, 이는 Yu와 Jo(24), Jo(25)의 실험 결과와도 일치하였다.

이상의 결과를 종합해 보면 30 kGy로 X-선 조사한 식품 4종(닭고기, 전란분말, 건과, 후추)는 대표적인 *in vitro* 유전독성 시험인 *S. Typhimurium* 복귀돌연변이 시험 및 염색체 이상 시험에서 음성을 나타내었고, *in vivo* 유전독성 시험에서도 안전하다는 것을 알 수 있었다. 앞으로 본 연구 결과를 토대로 단·장기 독성연구를 수행하여 X-선 조사식품의 독성학적 안전성 평가에 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 요 약

본 연구는 방사선 조사식품에 대한 소비자들의 수용성을 증대하고, 감마선조사의 대체기술로 X-선 조사의 상용화를 확대할 목적으로 30 kGy X-선 조사식품 4종(닭고기, 전란분말, 건과, 후추)의 유전독성학적 안전성 평가를 실행하였다. *Salmonella* Typhimurium TA98, TA100, TA1535 및 TA1537에 대한 X-선 조사식품 4종의 복귀변이 집락 수를 조사한 결과, 대사 활성계 도입 및 부재 시 모두 시험 적용 농도인 40~5,000  $\mu\text{g}/\text{plate}$ 의 범위에서 복귀변이 집락 수의 농도 의존적인 증가 혹은 감소를 보이지 않았다. 그리고 포유류 배양세포를 이용한 염색체 이상 시험에서도 X-선

**Table 3.** Chromosomal aberration test on 30 kGy X-ray irradiated four foods in the absence of S9 metabolic activation system using a Chinese hamster lung cell line

Test compound	Conc. (µg/mL)	G <sup>3)</sup>	CD	CX	TD	TX	Other	Nor	Total
DMSO <sup>1)</sup>	—	0	0.5	1	0	0	0.5	98	100
EMS <sup>2)</sup>	800	1	1	1	4	29	0	64	100
Chicken	5,000	0	1	0.5	1	0	0.5	97	100
	2,500	0	0	1	1	0	0	98	100
	1,250	0	0.5	0	0.5	1	0	98	100
	625	0	1	1	0	0.5	0.5	97	100
Egg powder	5,000	0	0.5	1	1	0.5	0	97	100
	2,500	0	1	0.5	2	0.5	0	96	100
	1,250	0	0.5	2	0	0.5	0	97	100
	625	0	1	0.5	0	0.5	0	98	100
Dried green onion	5,000	0	1	0.5	1	0.5	0	97	100
	2,500	0	0	1	0	0	1	98	100
	1,250	0	0.5	1	0.5	1	0	97	100
	625	0	0.5	0.5	0	0	0	99	100
Black pepper	5,000	0	1	0.5	0.5	1	0	97	100
	2,500	0	1	1	0.5	0.5	0	97	100
	1,250	0	0.5	0.5	1	1	0	97	100
	625	0	1	0.5	0	0.5	0	98	100

Number of findings of mean aberrant metaphases. 100 metaphases were examined per culture.

<sup>1)</sup>Dimethyl sulfoxide (negative control).

<sup>2)</sup>Ethyl methanesulfonate (positive control).

<sup>3)</sup>G: gaps (chromatid type+chromosome type), CD: chromosome type deletions, CX: chromosome type exchanges, TD: chromatid type deletions, TX: chromatid type exchanges, Other: metaphases with more than 10 aberrations (including gaps) or with chromosomes fragmentation, Nor: normal.

**Table 4.** Chromosomal aberration test on 30 kGy X-ray irradiated four foods in the presence of S9 metabolic activation system using a Chinese hamster lung cell line

Test compound	Conc. (µg/mL)	G <sup>3)</sup>	CD	CX	TD	TX	Other	Nor	Total
DMSO <sup>1)</sup>	—	0	0.5	1	0	0	0.5	98	100
B(α)p <sup>2)</sup>	20	0	2	3	4	13	0	78	100
Chicken	5,000	0	1	0	0.5	0	0.5	98	100
	2,500	0	0.5	1	0.5	1	0	97	100
	1,250	0	0.5	0.5	0	1	0	98	100
	625	0	1	1	0	0	0	98	100
Egg powder	5,000	0	2	1	0	1	0	96	100
	2,500	0	1	0.5	1	0.5	0	97	100
	1,250	0	1	1	0	0	0	98	100
	625	0	1	1	0.5	0.5	0	97	100
Dried green onion	5,000	0	1	1	0.5	0.5	0	97	100
	2,500	0	1	1	0	1	0	97	100
	1,250	0	1	1	0	0	0	98	100
	625	0	1	0.5	0	0.5	0	98	100
Black pepper	5,000	0	0.5	1	1	0.5	0	97	100
	2,500	0	1	1	1	0	1	96	100
	1,250	0	1	0.5	0.5	1	0	97	100
	625	0	2	1	0	0	0	97	100

Mean aberrant metaphases of duplicate cultures. 100 metaphases were examined per culture.

<sup>1)</sup>Dimethyl sulfoxide (negative control).

<sup>2)</sup>Benzo[α]pyrene (positive control).

<sup>3)</sup>G: gaps (chromatid type+chromosome type), CD: chromosome type deletions, CX: chromosome type exchanges, TD: chromatid type deletions, TX: chromatid type exchanges, other: metaphases with more than 10 aberrations (including gaps) or with chromosomes fragmentation, Nor: normal.

**Table 5.** Frequency of micronuclei from marrow in mice treated with 30 kGy X-ray irradiated four foods<sup>1)</sup>

Test compound	Dose (mg/kg)	MNPCE/2,000 PCE <sup>2)</sup>	PCE : RBC ratio <sup>3)</sup>
DMSO <sup>4)</sup>		2.3±1.3	0.31±0.03
CPA <sup>5)</sup>	70	98.2±27.4*	0.24±0.03
Chicken	2,000	2.8±1.1	0.33±0.03
	1,000	3.8±1.2	0.31±0.02
	500	2.5±1.6	0.32±0.03
	250	1.8±1.4	0.29±0.03
Egg powder	2,000	2.6±1.2	0.31±0.03
	1,000	3.2±1.1	0.33±0.03
	500	3.5±1.5	0.31±0.03
	250	2.3±1.4	0.32±0.02
Dried green onion	2,000	3.0±1.5	0.29±0.03
	1,000	3.6±1.2	0.32±0.03
	500	2.8±0.8	0.33±0.02
	250	3.4±1.2	0.31±0.03
Black pepper	2,000	2.4±1.5	0.31±0.03
	1,000	3.6±1.2	0.32±0.02
	500	3.8±0.8	0.32±0.03
	250	2.8±1.6	0.33±0.02

<sup>1)</sup>Each value represents the mean±SD.

<sup>2)</sup>MNPCE: micronucleated polychromatic erythrocyte, PCE: polychromatic erythrocyte.

<sup>3)</sup>RBC: red blood cells (polychromatic erythrocyte+normochromatic erythrocyte).

<sup>4)</sup>Dimethyl sulfoxide (negative control).

<sup>5)</sup>Cyclophosphamide·H<sub>2</sub>O (positive control).

\*Significantly different from the control at  $P<0.01$ .

조사식품 4종은 625~5,000 µg/mL의 시험 적용 농도에서 염색체 이상 유발능이 5% 미만이어서 염색체 이상을 유발하지 않는 것으로 나타났다. 또한 설치류 망상적혈구를 이용하여 X-선 조사식품 4종의 소핵 형성 시험을 수행한 결과 시험 적용 농도인 250~2,000 mg/kg의 범위에서 소핵을 가진 망상적혈구의 출현율이 음성대조군과 유의한 차이를 나타내지 않아 소핵을 유발하지 않음을 확인하였다. 이상의 결과를 바탕으로 위해 분석 결과 30 kGy X-선 조사식품 4종(닭고기, 전란분말, 건과, 후추)은 본 시험조건에서 유전독성이 없는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(2013M2A2A6043298)을 통해 수행되었으며, 그 지원에 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Joint FAO/IAEA. 1999. *Facts about food irradiation*. FAO/IAEA, Vienna, Austria.
2. Chauhan SK, Kumar R, Nadanasabapathy S, Bawa AS. 2009. Detection methods for irradiated foods. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 8: 4-16.
3. WHO. 1991. Food irradiation-a technique for preserving and improving the safety of food. Geneva, Switzerland.
4. WHO. 1999. High dose irradiation; Wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. Report of joint FAO/IAEA/WHO Study Group. WHO Technical Report Series 890. p 9-37.
5. Joint FAO/IAEA. 2006. Division of nuclear techniques in food and agriculture. IAEA, Vienna, Austria.
6. Gecgel U, Gumus T, Tasan M, Daglioglu O, Arici M. 2011. Determination of fatty acid composition of  $\gamma$ -irradiated hazelnuts, walnuts, almonds, and pistachios. *Radiat Phys Chem* 80: 578-581.
7. Roberts T, Unneverhr L. 1994. New approaches to regulating food safety. *Food Rev* 17: 2-8.
8. Lee JW. 2006. Application and prospect of food irradiation for providing the safe food materials. *Food Industry and Nutrition* 11(3): 12-20.
9. Malone JW. 1990. Consumer willingness to purchase more for potential benefits of irradiated fresh food products. *Agribusiness* 6: 163-178.
10. Foster A. 1990. The impact of consumer acceptance on trade in irradiated foods. *Br Food J* 92: 28-34.
11. Kwon JH. 2013. Food Safety and radioactive contamination. *Food Science and Industry* 46(3): 1-1.
12. Kwon JH. 2010. Safety and understanding of irradiated food. Korea Safety Research Institute, Seoul, Korea. p 9-29.
13. Kwon JH, Chung HW, Kim BK, Ahn JJ, Kim GR, Jo DJ, An KA. 2011. Research and application of identification methods for irradiated foods. *Safe Food* 6: 11-27.
14. Farkas J, Farkas CM. 2009. History and future of food irradiation. *Trends Food Sci Technol* 22: 121-126.
15. Miller RB. 2003. Food irradiation using bremsstrahlung X-rays. *Radiat Phys Chem* 68: 963-974.
16. Johnson J, Farkas CM. 1999. Irradiation control of insect pests of dried fruits and walnuts. *Food Technol* 53: 46-51.
17. Ko JK, Ma YH, Song KB. 2005. Effect of electron beam irradiation of the microbial growth and qualities of chicken breast. *J Korean Soc Appl Biol Chem* 48: 120-127.
18. KFDA. 2012. *Korea Food Standard Code 2012-48*. Korea Food & Drug Administration, Cheongwon, Korea. p 2-3.
19. Maron DM, Ames BN. 1983. Revised methods for the *Salmonella* mutagenicity test. *Mutat Res* 113: 173-215.
20. Wakata A, Sasaki MS. 1987. Measurement of micronuclei by cytokinesis-block method in cultured Chinese hamster cells: Comparison with types and rates of chromosome aberrations. *Mutat Res* 190: 51-57.
21. Schmid W. 1975. The micronucleus test. *Mutat Res* 31: 9-15.
22. Kwak HJ, Chung CK, Kang IJ. 2001. Microbiological and genotoxicological safety of gamma-irradiated chicken. *Korean J Food Cookery Sci* 17: 617-624.
23. Kang IJ, Park JHY, Kang YH, Lee HK, Byun MW. 1999. Hygienic quality and genotoxicological safety of gamma irradiated pork. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 28: 1092-1098.
24. Yu YB, Jo SK. 2000. Evaluation on the safety of  $\gamma$ -irradiated *Angelica gigas* Nakai: stability of active components and safety in genotoxicity test. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 29: 300-306.
25. Jo SK. 1997. Genotoxicological safety of the gamma-irradiated medicinal herbs in the micronucleus test using CHO cells *in vitro*. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 26: 952-957.