

녹색 식품가공기술 분야에서 방사선 기술의 역할 및 전망

Use of Irradiation in Food Processing as Green Technology

이주운*, 윤요한

Ju-Woon Lee, Yohan Yoon

한국원자력연구원 정읍 방사선과학연구소
방사선식품생명공학 연구팀

Team for Radiation Food Science & Biotechnology, Advanced Radiation Technology Institute, Korea
Atomic Energy Research Institute

I. 서론

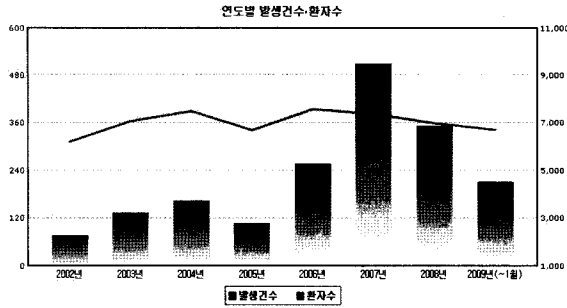
1980년대 이후부터 방사선 기술(radiation technology)이 식품 및 공중보건제품의 위생화에 효과적이라는 과학적 사실이 알려지면서 국제적으로 활발히 연구되고 있고 산업적 활용이 증가하고 있다. 식품의 방사선 조사(food irradiation)는 농산물의 저장성 증가, 축육, 가금육 및 그 가공품의 미생물학적 안전성 보장, 수출입 농수축산물의 효율적인 검역관리 및 보존제와 같은 화학약품 처리 등 첨가제의 이용 없이 안전하게 목적을 달성할 수 있는 기술이다. 비록 방사선 기술이 원자력 기술의 하나로 분류되어 아직까지 일반 국민들에게 방사능 물질 오염식품과 방사선 조사식품이 혼동되고 산업 발전에 어려움을 겪고 있으나, 국제적 발전 추이를 보면 기술의 이용이 빠른 속도로 증가하고 있다. 그 이유는 식품 및 사료를 포함한 식량자원의 교역이 활발하게 증가하고 있고, 미국 등 선진국을 중심으로 식중독 등 식인성 질병 예방이 기존의 방법으로

는 그 실효성이 매우 낮기 때문으로 사료된다. 특히, 미국의 경우 매년 발생하는 식중독 사망사고를 해결하기 위한 방안으로 식육류의 방사선 조사를 허가하였고 사용 선종도 감마선, 전자선, X-선 등을 목적에 맞게 이용할 수 있는 기준을 만든 것은 매우 의미 있는 미국의 조치라고 판단된다. 또한, 국제환경보호위원회(UNEP)가 의결한 methyl bromide (MeBr) 등의 화학훈증제 사용 축소 및 금지규정에 따라 국제무역기구(WTO), 국제식물검역위원회(IPPC) 및 식물위생검역기준(ISPM) 등에서는 방사선 기술을 국제 식량교역에서 검역관리 기술로서 활용하기를 강하게 권고하고 있는 상황에서 주요 식량 수입국인 우리의 대응 방안 마련도 매우 시급하게 추진되어야 할 것이다. 2009년 현재 방사선 조사식품을 허가한 국가는 56개국으로 약 253개 식품품목이 방사선 처리되어 유통될 수 있다(1).

정부는 지난 2001년 7월과 2007년 1월 제 2, 3차 원자력진흥종합계획 수립에서 방사선/RI 이용기술의

*Corresponding author: Ju-Woon Lee

Team for Radiation Food Science & Biotechnology, Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute
1266 Sinjeongdong, Jungeup, Jeonbuk 580-185, Korea
Tel: +82-63-570-3204
Fax: +82-63-570-3207
email: sjwlee@kaeri.re.kr



(식품의약품안전청, 2009)

그림 1. 우리나라의 연도별 식중독 발생건수 및 환자수

확대 및 융합기술을 통한 신산업 창출을 위한 정책을 시행 중에 있다. 이의 일환으로 산업 활용성이 크거나 잠재적 가치가 높은 방사선 조사 선종의 이용확대와 방사선 조사 제품의 확대를 주요한 골자로 연구개발 사업을 추진하고 있다.

지난 2002년부터 2009년까지의 국내 식중독 발생 건수 및 환자수는 그림 1과 같다. 2002년부터 전반적으로 매년 증가하는 추세이며, 2007년에는 501건으로 가장 높은 식중독 발생건수를 기록하였다. 환자수도 매년 6,000명 이상으로 발생하고 있는데 이는 생활패

표 1. 우리나라의 원인식품별 식중독 발생 동향

연도	2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007		총계	
	건수	환자수	건수	환자수	건수	환자수	건수	환자수	건수	환자수	건수	환자수	건수	환자수 (%)	건수 (%)	환자수
총계	93	6,406	78	2,980	135	7,909	165	10,388	109	5,711	259	10,833	510	9,686	1,349	53,913
육류 및 그 가공품	15	728	13	316	14	438	20	1,016	9	442	21	507	41	607	133	4,054 (9.9) (7.5)
난류 및 그 가공품	0	0	3	55	2	485	1	6	7	343	0	0	2	82	15	971 (1.1) (1.8)
어패류 및 그 가공품	17	494	11	384	21	372	18	419	19	415	41	1,211	108	1,473	235	4,768 (17.4) (8.8)
복합조리 식품	13	522	15	481	36	3,394	22	1,276	13	1,339	29	848	39	1,056	167	8,916 (12.4) (16.5)
곡류 및 그 가공품	3	569	2	27	3	53	1	82	1	24	1	14	1	2	12	771 (0.9) (1.4)
육류 및 그 가공품	0	0	1	137	0	0	0	0	0	0	3	20	0	0	4	157 (0.3) (0.3)
야채류 및 그 가공품	2	77	1	7	3	420	8	297	4	37	7	533	11	219	36	1,590 (2.7) (2.9)
과자류	0	0	0	0	1	59	2	167	0	0	1	6	0	0	4	232 (0.3) (0.4)
지하수 및 음용수	1	32	1	34	3	279	11	1,355	4	716	5	154	12	234	37	2,804 (2.7) (5.2)
불명	39	3,390	26	1,282	47	2,180	80	5,625	44	2,133	143	7,221	262	5,309	641	27,140 (47.5) (50.3)
기타	3	594	5	257	5	229	2	145	8	262	8	319	34	704	65	2,510 (4.8) (4.7)

<자료: 식품의약품안전청, 2009>

턴의 변화로 인한 외식의 증가와 학교급식 등 집단급식에서 식중독이 집단적으로 발생하는데 그 원인이 있다. 이와 같이 식중독의 발생이 대형화됨으로써 사회적 이슈가 되고 있으며 정부차원에서의 식중독예방을 위한 노력에도 불구하고 계속 그 발생이 증가할 것으로 예상된다.

원인식품별 식중독 발생현황(표 1)을 보면 식중독 발생건수는 어패류 및 그 가공품이 17.4%로 가장 많았지만, 환자수는 김밥과 도시락 등 복합조리식품의 섭취로 인해 발생한 것이 16.5%로 가장 많은 부분을 차지했다. 그 외 육류 및 그 가공품이 많았고 지하수 및 음용수, 야채류 및 그 가공품으로 인해서도 식중독이 발생하였다. 특히, 2007년엔 어패류 및 그 가공품으로 인해 108건이 넘는 식중독이 발생하여 어패류의 위생관리가 시급한 실정이다.

따라서, 국제적인 기술과 산업 발전 추이에 부응하고 국내외 연구결과를 검토해본 결과, 식품산업에서 방사선 조사의 실용화는 국내 관련 산업의 기술선택의 폭을 넓히고, 대학 및 관련연구기관, 산업체에 종사하고 있는 연구자들의 실용화 기술개발 활성화에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

II. 국내외 현황

1. 기술발전 동향

방사선 식품조사 기술은 '90년대 초반부터 안전성에 관한 과학적 뒷받침과 WHO/IAEA/FAO 등의 국제기구와 선진국의 보건당국(FDA 등)의 주도에 의해 실용화 기반이 마련되었다. 1990년에 안전한 식품의 준비를 위한 WHO의 황금률 (the WHO golden rules for safe food preparation)에서 “가능하면 방사선으로 처리된 신선하고 냉동된 가금육을 선택해야한다”라고 발표하였다. 1992년 WHO/ICU(국제소비자연맹)공동으로 방사선 조사식품의 안전성을 재평가하였고, 1995년 UR 협상에서 식품교역의 검역분쟁 해결과 식품 위생화를 위해 방사선 조사기술의 적용이 긍정적으로 검토되었다. 2001년 10월 23~25일 국제 방사선 식품조사 자문위원회(international consultative

group on food irradiation, ICGFI) 18차 회의(이탈리아, 로마)에서 방사선 조사식품의 국제적 실용화 확대를 위한 규정과 홍보방안을 마련하여 관련 국제기구(WHO, FAO, Codex 등)에 제안하여 협의하였다. 2002년 “방사선 조사식품의 안전성 논란”에 관해 EU Committee에서는 기 수행한 연구결과들을 검토한 후 “조사식품의 안전성에는 문제가 없다”고 발표하여 조사식품의 안전성이 재검증됨에 따라 본 기술의 사용이 EU는 물론 세계적으로 확대될 것으로 기대되었다. Global industries analysts (GIA) 2005년 보고에 의하면, 동년 현재 미국, 영국 등의 선진국을 포함하여 52개국에서 250여종의 식품에 방사선 조사를 허가하였고, 이 중 30여 개국에서 상업적 규모로 본 기술을 실용화하여 연간 수십만 톤의 농수산물 및 가공식품이 방사선 처리되어 유통되고 있으며, 매년 약 35%의 신장률로 증가하고 있다.

1990년대부터 감마선 조사가 원자로에서 생산된 방사성동위원소(Co-60, Cs-137)를 이용한다는 이유로 소비자 수용성의 한계를 나타내고, 방사선종간 처리 특성의 차이로 인해 전자선, X-선 등의 방사선이 식품생명공학 연구에 사용되기 시작하였다. 전자선, X-선 조사는 발생장치를 통해 조사처리가 진행되므로 기 작동이 간편하고 방사성동위원소를 사용하지 않는다는 점에서 “beam 처리”로서 소비자들에게 홍보되고 있다. 전자선의 경우, 감마선에 비해 투과력은 약하나 빠른 처리속도와 conveyor 시스템으로 햄버거 패티, 부분육(계육 포함), 해산물 등 냉장/냉동이 필요한 식품의 조사에 활발히 연구되었다. 2002년 미국 USDA의 학교급식에 사용되는 식육 및 그 가공품에 대한 방사선 조사허가를 시점으로 전자선 조사기술을 이용한 식육 가공품의 방사선 조사가 상업적으로 활발히 이용되고 있다. 현재까지의 연구에서 감마선 조사와 전자선 조사의 특성 차이가 크게 없는 것으로 보고됨에 따라, 조사물품의 포장, 크기, 온도 조건 등 공정 특성에 맞게 이용할 수 있는 방사선 조사선종이 다양화 될 것으로 판단된다.

X-선의 이용은 전환 에너지 효율이 매우 낮아 아직 상업적 규모로 이용되고 있지는 않으나, 미국, 캐나다 등을 중심으로 X-선 변환장치개발이 활발히 추진됨에

따라 식품조사 규모의 에너지 효율을 갖는 발생장치와 상업적으로 공급될 것으로 기대된다. 현재, 세계적으로 감마선 조사와 전자선 조사 이용비율은 80:20 정도로 감마선 조사가 많이 이용되고 있는데, 주로 향신료, 과일 등의 검역처리를 위해 이용하기 때문에 대용량 포장 후 선적이 용이한 감마선 조사가 활용되는 것으로 판단된다. 그러나 자국 내에서 소비되는 식육가공품 등 병원성 미생물 제어 등 식품의 위생화 개선을 위한 방사선 조사는 전자선의 이용이 효율적이기 때문에 미국을 중심으로 전자선 조사기술의 산업적 활용이 점차 증가추세에 있다. 따라서 전자선, X-선 등 감마선 이외의 방사선 이용연구가 전 세계적으로 활발히 진행 중이다.

Food Irradiation update news letter (Minnesota beef council, 2010. 1.)에 따르면 영국의 한 연구결과에서 FDA/USDA 허가 받은 살균제, 농약, 제초제, 생육촉진제등이 동식물에서 제 역할을 못하고 있다고 밝혀 화학적 보존기술의 한계를 시사하고 있다. 미국의 Dr. Harry Hull는 *E. coli*와 *Salmonella* 식중독 사고를 막기 위해선 분쇄육과 채소류에 방사선을 조사해야 한다고 주장하였고, 실 예로 Oklahoma의 national steak and poultry사는 *E. coli* O157:H7 오염이 의심되는 112톤 소고기 회수하는 사태가 발생되기도 하였다. IAEA는 최근 지구온난화는 새로운 해

충이나 질병을 발생시킬 수 있기 때문에 원자력(방사선) 기술을 이용하여 제어를 해야 한다고 주장하고 있다. 또한, 미국의 농생물학자들은 농작물의 나방을 제어하기 위해 방사선 기술을 이용해 한다고 주장했다. 방사선을 이용하면 암컷 수컷 모두 불임시킬 수 있기 때문이고 현재 나방의 숫자도 점점 줄어들고 있다.

한국원자력연구원은 국제적인 연구동향에 부응하고 선도하기 위해 국내에서도 2000년대부터 고선량 조사에 대한 광범위한 연구를 전개하였고, 2003년부터 방사선 조사와 식품공학기술을 병용하여 8종의 우주식품(김치 : 25 kGy, 라면 : 10 kGy, 수정과 : 6 kGy, 생식바 : 10 kGy, 비빔밥 : 25 kGy, 불고기 : 44 kGy, 미역국 : 10 kGy, 오디음료 : 6 kGy)을 개발하였다(그림 2). 2010년부터는 안전한 식품개발과 국가재난/비상사태시 구호식량의 안정공급, 환자, 영·유아, 특수 환경종사자들을 위한 차별화된 식품 제공 등 급변하는 주변 환경에서 부응하고 관련분야 기술고도화 및 산업체 요구에 부응할 수 있는 핵심기술을 확보할 계획이다.

2. 국외 산업 현황

초기 방사선 조사된 식품범위는 향신료 및 한약재, 건조식품성 조미료, 신선과실 및 채소류(주로 수·출





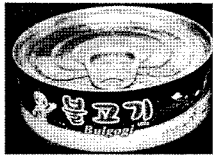



			
우주김치	우주라면	우주수정과	우주생식바
			
우주불고기	우주비빔밥	우주참뽕음료	우주미역국

그림 2. 방사선기술을 이용한 한국형 우주식품

입), 밀가루 및 기타 곡류, 마쇄 쇠고기, 돼지고기, 가공육, 닭고기, 해산물 및 기타 식품이다. 식품조사 수입은 2005년도에 7억 6천 6백만 달러로 예상되었으며, 2006년에는 10억 달러, 2010년에는 식품조사기술이 수입을 끌어올려서 19억 달러가 될 것이며, 식품조사 수입은 2000~2010년 기간에 연간 36% 성장할 것으로 전망된다. 미국은 단일 시장으로 가장 크며 그 수입이 2005년에 2억 8천 7백만 달러이며 2010년에는 5억 8천만 달러에 이를 것으로 예상된다. 캐나다와 아시아, 태평양국가, 중동 및 라틴 아메리카를 포함한 기타 세계시장이 39.5~46.6%의 시장성장을 이룰 것으로 전망했다(2).

가. 미국 및 캐나다

향신료와 식물성 조미료는 미국에서 중요한 방사선 조사식품이며 파스타와 분쇄 쇠고기가 소량 처리되고 있다. 방사선 조사비용은 파운드당 1/2 cent부터 7 cent이며 제품의 형태, 방사선종, 처리 물량 및 조사 시설의 위치에 따라 다르다. 방사선 조사 식품과 비조사 식품과의 가격 차이는 파운드당 5 cent 이하이며 방사선 조사된 식물성 약재와 향신료는 화학적 처리를 한 것과 같은 값으로 판매되고 있다. 방사선 조사 육류가 35개주의 슈퍼마켓에서 판매되고 있다. 일인당 연간 쇠고기 소비량은 65파운드, 돼지고기는 52파운드, 닭고기는 약 80파운드가 소비되어, 연간 약 450억 파운드의 방사선조사 가공육이 소비되는 셈이다.

방사선 식품조사 수입은 단순 처리비용만을 계산하였을 때, 2005년도에 766백만 달러로 예상되었으며, 2006년에는 10억 달러, 2010년에는 19억 달러로 2000~2010년 기간에 연간 36% 성장할 것으로 전망된다. 미국은 단일 시장으로서는 가장 큰 규모를 형성하고 있으며, 그 수입이 2005년에 287백만 달러에서 2010년에는 580백만 달러에 이를 것으로 예상된다.

Canada에서는 현재 감자, 밀, 양파, 통 밀가루와 건조 조미료 제품만이 방사선조사 할 수 있도록 허가되어 산업적으로 처리되고 있다. 확장하려고 하는 품목은 신선 및 냉동 가금육류, 가공 및 건조새우, 신선 및 냉동 쇠고기와 망고이다. 캐나다에서 식품조사에서 발생하는 수입은 2005년에 6천 3백만 달러(US)로 예상

되며 이와 같은 수입은 급속도로 개선 되어 2006년에는 7천 9백 50만 달러에서 2010년에는 1억 4천 9백 60만 달러로 될 것이며, 2000년 ~ 2010년 사이에 연간 성장률이 39.7% 이상 될 것으로 분석된다.

나. 유럽

방사선 조사 할 수 있도록 허가된 식품의 종류는 유럽의 나라에 따라 다르다. 현재 이 지역의 여러 회사에서는 건조 방향성식물성 약재, 향신료와 채소 조미료가 방사선 조사되고 있다. 현재 유럽에서는 최고 조사선량이 10 kGy로 제한되어 있다. 2005년도에 유럽은 전체 방사선조사 식품의 약 14%가 계산 되었으며 방사선조사 식품의 수입은 2005년에 1억 8백 60만 달러였으며 2006년에는 1억 3천 7백만 달러로 예상되고 2010년에는 2억 일천 3백만 달러가 될 것이며 2000 ~ 2010 기간에 연간 성장률을 24.9%로 반영한 것이다.

다. 아시아 등 기타 지역

식품조사 산업은 여타 세계시장에서 급속도로 성장하고 있어서 높은 생산량을 나타내고 있으나 방사선 조사 기술침투는 저조하다. 지역적으로 아시아 태평양 지역, 중동 및 라틴아메리카가 포함되며 수입은 2005년도에 3억 6백 50만 달러이며 2010년에는 9억 8천 9백만 달러가 될 것이며 2000년 ~ 2010년간 CAGR 46.6%의 성장을 이룰 것이다.

중국 소비자는 1990년 이래 방사선조사 사과를 맛보았다. 1995년 이래 Belgium과 중국에서 방사선조사 향신료, 조미료와 기타 식물성 조미료가 시판 되었다. 2004년 중국에서 약 10만 톤의 식품이 방사선조사 되었는데 이들의 대부분은 마늘이었다. 태국에서는 Nham라고 부르는 방사선조사 발효 돼지고기 소시지가 소매업자와 소비자로부터 대단한 인기를 얻어 대형 시장이 형성되었고 이 지역에서 제품의 우수성이 선전되었다. 1993년 방글라데시에서는 Chittagong에 있는 준 상업적 방사선조사 시설에서 처리된 방사선조사 수산물을 시판 하였다. 1990년대 초기 이래 남아프리카에서는 쇠고기와 닭고기로 가공된 즉석식품이 저장기간이 연장되며 안전하게 산업적으로 유통되었고, 이와 같은 식품은 육외 활동과 하이킹, 사파리, 등산 등 대

형 행사에서 큰 인기였다. 아르헨티나는 1985년에 방사선조사 양파와 마늘의 판매를 전격적으로 추진하고 기대이상으로 3일 만에 10톤이 판매되었다.

3. 국내 현황

가. 국내 기술 동향

방사선 조사식품에 대한 국내 연구는 80년대부터 한국원자력연구원을 중심으로 수행되기 시작하였다. 연구개발의 재원은 1992년 국가연구개발사업(원자력연구개발사업)의 본격적인 시행 전까지는 한국원자력연구원의 기본사업으로 수행되었다. 1997년도 국가차원의 원자력진흥종합계획의 수립과 함께 방사선 조사식품 분야의 연구도 중장기 발전계획과 시행계획에 따라 순차적으로 수행되어지고 있다. 2009년도 현재 제3차 원자력진흥종합계획(2007년 - 2011년)에 의거하여 제4차 원자력연구개발사업 중 방사선기술개발사업에서 수행하고 있으며, 1단계(2007년 - 2009년, 3년)를 수행 중이다.

국내의 방사선 조사 연구는 감마선을 방사선원으로 연구하였으며, 2000년까지 대부분의 연구들이 Co-60의 감마선을 조사선원으로 사용하였다. 2000년대 들어 한국원자력연구원이 자체 개발한 전자선 조사기와 EB-Tech(주)가 러시아로부터 도입한 전자빔 조사기를 이용하여 국내에서도 전자선 조사연구가 시작되었다. 제3차 원자력연구개발사업(2002년 - 2006년)을 통해 전자선 조사에 대한 기초, 기반연구가 수행되었고, 제 4차 원자력연구개발사업 1단계(2007년 - 2009년)에서 실용화를 위한 핵심기술을 개발하였다.

식품에 대한 초기 연구는 감자, 양파, 마늘, 밤 등 농산물의 저장기간 연장 및 유통 중 품질유지를 위한 저선량(< 1 - 3 kGy)의 방사선 조사 연구가 진행되었다. 1990년대에는 식품의 주요 부패균, 병원성 미생물 등에 대한 방사선 영향연구 및 감수성 평가, 인삼 등 주요 수출품목에 대한 검역관리 연구, 식육 및 가공품, 수산식품 등의 안전공급 기술개발과 함께 방사선 조사식품의 관능품질 유지를 위한 병용처리 연구가 시작되었다. 2000년대에는 본격적인 식품가공기술의 한분야로서 방사선 기술의 적용을 위한 병용처리기술을 개발하였고, 세계최초로 방사선 에너지를 이용한 기능성 식

의약품 소재개발 연구를 착수하였다. 한편, 1998년에 세계보건기구(WHO, 1997)로부터 고선량 조사식품(< 75 kGy)의 안전성(건전성) 평가가 보고됨에 따라 국제적으로 선량에 구애 없이 식품의 안전저장과 위생적 제품생산을 위한 연구가 활발하게 전개되고 왔다.

나. 산업 동향

1987년 한국원자력연구원의 기술지원으로 민간기업[그린피아가기술(주)]에 의한 국내 최초 상업용 감마선 조사시설 설치, 산업화를 달성한 이래 1987, 1991, 1995, 2004년 한국원자력연구원과 국제기관의 연구 수행 결과를 바탕으로 보건복지부(현 보건복지가족부)로부터 26개 식품품목(약 60여종 식품)에 대한 방사선 조사허가를 취득하여 국내에서 실용화 및 산업화 확대에 필수적인 기반을 확립하였다. 2009년 현재 산업체 2곳[그린피아가기술(주), 소아(주)]에서 상업적 감마선 조사시설을 운영 중에 있다.

2006년까지 평균 처리용량은 평균 5 kGy를 조사 기준으로 할 때, 50톤/일 규모이었으며, 향신료 등이 가공식품 원료용으로, 기타 식품 및 식품원료가 수출 목적으로 감마선 조사되었다. 그러나 2007년 방사선 조사식품 표시제 개정 공고(2007-69, 2007년 10월 19일) 이후 식품에 대한 감마선 조사가 급감하여 2009년 현재는 거의 없는 수준으로 일부 수출용 건조야채류에 이용되는 것으로 나타났다.

한편, 현재 국내 식품위생법(식품공전)에는 식품의 방사선 조사에 이용하는 방사선 종류를 감마선으로 한정하고 있어 식품 특성 및 목적을 고려하여 전자선, X-선 등의 다양한 방사선의 이용이 고려되어야 한다. 전자선을 이용한 연구는 국내 연구용 전자선 조사시설이 취약하고 단편적으로 수행되어 왔고, 초보단계의 연구 수준에 있었으나, 2000년 이후 한국원자력연구원과 산업체 2곳에 전자선 조사시설의 설치가 완료됨에 따라 본격적인 연구개발이 가능하다. 이와 같이 국내 연구개발은 원자력(연)을 중심으로 기초/기반연구 및 실용화 연구가 수행하여 일부 기술은 현재 선진국 수준에 도달하였으나, 선진국의 기술개발 동향과 국제환경변화에 대응할 수준의 집중적이고 체계적인 정책 지원 및 제도정비가 필요하다.

다. 2010년도 신규 방사선조사 허가 신청

(1) 전자선 조사

전자선 조사(electron-beam irradiation)는 전자선 가속기로 발생시킨 가속 전자선을 이용하여 식품 및 공중보건제품의 위생화, 고분자 가교 및 특성 개선 등에 활용하는 방사선 조사기술의 한 분야이다. 전자선은 감마선과 X선에 비해 투과도가 낮아 살균에 필요한 선량이 약간 증가하는 경향에 있으나, 감마선에 비해 처리속도가 빠른 특징이 있어 냉장, 냉동식품의 처리에 효과적이며 대량의 제품을 연속적으로 처리할 수 있다. 또한, 전자선 조사시설은 감마선 조사시설과 달리 두꺼운 차폐시설과 방사능 물질을 안전하게 보관하기 위한 컨테이너 및 차폐수 등이 불필요하므로 설치비용이 저렴한 장점이 있고 필요에 따라 간편하게 X-선으로 변환하거나, 이동형으로도 활용할 수 있어 다양한 산업에 이용이 가능하기 때문에 전자선은 식품산업 뿐만 아니라 의료기기 및 공중보건 제품의 살균, 고분자 공업용 신소재 개발, 산업폐수 및 슬러지 처리와 같은 환경분야 등 다양한 산업에 활용이 가능하다. 또한, 기술의 비약적인 발전으로 인해 전자선 조사시설이 보다 집약화 되고, 정확해짐에 따라 향후 새로운 응용분야의 창출이 가능할 것이다. 또한 대학, 산업체 등의 실용화 연구 확대가 기대된다.

(2) 식육 및 식육가공품

식육과 그 가공제품의 선도유지 및 위생화 방법은 크게 세 가지로 나누어 생각할 수 있는데, 첫째가 냉동저장법으로 이는 단백질의 변성에 의한 품질 저하를 일으키고, 육즙의 유출 등 가공처리시 경제적인 손실을 야기시키며, 장기간 저장할 때는 지방산패 및 불포화지방산의 감소를 일으켜 결과적으로 품질을 저하시킨다. 둘째로 포장을 달리하는 방법으로 여기에는 진공포장법, CA포장법, MA포장법, 이중포장법 등이 있는데 산소의 접촉을 차단시킴으로써 미생물의 생육 및 지방산패를 억제시켜 저장기간이 연장되나 포장된 상태에서 색택이 저하되는 단점이 있다. 셋째로 화학약품을 이용하는 방법이 있는데 이는 유기산 및 보존제를 일정 농도로 희석시켜 침지 또는 육표면에 살포

하면 미생물의 생육을 저해시키는 효과가 있지만, 이 역시 표면색도가 변질되어 기호도가 저하되는 단점이 있다. 상기 방법들 중 병원성/부패성 미생물을 완벽하게 제어할 수 있는 방법은 없어 궁극적으로 저장성 연장은 크게 기여한다고 할 수 없다. 이렇게 여러 육류관련 독성과 질병의 발생뿐만 아니라 식품에 화학물질의 잔류와 식품첨가물 이용에 대한 일반인들의 우려가 증가하면서 세계적으로 방사선 식품조사(Food Irradiation)에 대하여 흥미를 갖기 시작했다.

식품가공 및 저장기술로서 지금까지 이용되어온 열처리, 냉장, 냉동 혹은 보존제, 훈증제 등의 화학약품처리는 효과, 비용, 건전성 및 환경적 측면에서 많은 문제점들이 지적되면서 적용분야의 제한을 받고 있다. 이러한 시점에서 최근 방사선을 이용한 식품의 위생화 기술이 도입되어 전 세계적으로 연구되고 있으며, 방사선을 조사한 식품의 안전성은 이미 세계보건기구(WHO), 국제식량농업기구(FAO), 국제원자력기구(IAEA), 미국식품의약품국(FDA) 등 국제기관과 국제학술단체에서 식품의 보존 및 위생화 수단으로 그 건전성을 공인하였다. 1960년대부터 안전성 및 건전성에 관한 연구가 시작되어 현재는 고선량 조사에 관한 WHO/FAO/IAEA(제네바, 1997년 9월 15~20일) 공동전문가 자문위원회에서 “50년 이상에 걸쳐 평균 75 kGy (10~100 kGy) 만큼 고선량 조사된 식품을 연구한 결과 그 식품은 미생물학적, 영양학적, 독성학적으로 안전하고 건전하며 영양적으로 충분하다”라고 발표한 바 있다.

(3) 건조·반건조 수산식품

건조 어포류에는 수산식품 유래 *Salmonella*, *Vibrio* 및 *Staphylococcus*와 같은 병원성 미생물이 존재할 수 있으며, 최근 우리나라에서 생산되어 유통되는 쥐치포의 경우 황색포도상구균과 살모넬라균과 같은 병원성 미생물이 수차례 검출되어 건포류에 대한 위생화 방법 확립이 시급한 실정이다. 1990년대 동남아국가들에서 건조 수산물에 대한 방사선 조사 연구가 활발히 추진되었으며 비교적 저선량의 방사선 조사를 통해 수산식품의 저장기간을 최소 2 - 3배 연장시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다. 방사선 조사에 의한 건조 수산식품의 위생화는 수산식품을 완전히 포장된 상태

에서 처리가 가능하기 때문에 이차오염을 방지할 수 있는 장점이 있으며, 방사선 조사는 대표적인 비가열 살균 기술로서 기존의 식품가공 살균기술에 비해 품질에 큰 영향을 주지 않으면서 저장기간 연장 및 위생화를 위한 방법으로 이용될 수 있다.

방사선 조사는 반건조 수산식품에서 보다 효과적으로 이용될 수 있다. 우리나라에서 유통되고 있는 대표적인 반건조 수산식품인 콩치과메기는 비위생적으로 생산될 경우 *Salmonella*, *Shigella*, *Vibrio* 및 *E. coli* 등 병원성 미생물에 의해 식중독을 유발시킬 수 있다. 따라서, 콩치과메기의 위생화를 위한 방사선 조사 효과를 평가한 결과 5 kGy 이하의 방사선 조사를 통해 이들 병원성 미생물을 효과적으로 제거가 가능하였으며, 저장기간을 크게 연장시킬 수 있는 것이다. 또한, 반건조 오징어를 대상으로 한 실험에서도 방사선 조사에 의해 미생물이 효과적으로 감소하는 것으로 나타나 방사선 조사가 건조 수산식품은 물론 반건조 수산식품의 위생화에도 매우 효과적인 기술로 활용될 수 있을 것이다.

III. 안전성에 대한 국제적 평가

1. 방사선 조사식품에 대한 국제적 평가

방사선 조사는 1921년 미국에서 육류의 기생충 사멸을 목적으로 최초 사용된 이래 조사식품의 건전성에 관한 연구가 활발히 이뤄지기 시작한 이래 1961년 벨기에 브뤼셀에서 WHO/FAO/IAEA가 공동으로 방사선 조사식품의 건전성에 관한 과학적 연구결과를 평가하기 위한 최초의 회의가 소집되었으며, 식품조사공동전문위원회(Joint expert committee on food irradiation, JECFI)를 설치하였다. 1970년에는 WHO 주도로 FAO, IAEA 및 OECD가 방사선 조사식품의 안전성 평가를 위해 방사선 식품조사 분야 국제과제를 신설하였으며, 24개국이 본 과제에 참여하여 12년간 연구를 수행한 결과, 식품에 방사선 조사로 인한 발암성 물질이나 기타 독성물질이 발견되지 않았다고 보고하였다. 1980년 스위스 제네바에서 JECFI는 과거 40년 동안 전 세계적으로 수행된 방사선 조사식품의 건전성/안전성 시험에 대한 결과를 종합적으로 평가하

여 10 kGy 이하의 선량으로 방사선을 조사할 경우 어떠한 식품도 독성학적 장해를 전혀 일으키지 않으며, 독성실험은 더 이상 필요가 없고 영양학적 및 미생물학적인 측면에서 문제를 일으키지 않는다고 발표하였다. 1982년에는 FAO 및 WHO의 요구에 의해 식품미생물국제위원회 및 국제미생물학회의 식품미생물국제연맹은 방사선 식품조사의 안전성에 관한 증거를 재확인하였으며, 동 위원회는 JECFI의 결정을 인정하면서 방사선 식품조사는 건강에 대하여 어떠한 장애도 일으키지 않는다고 결론지었다. 1983년에는 FAO/WHO의 공동규격위원회에서 JECFI의 추천내용을 일반규격기준의 방사선 조사식품 규격으로 채택하였고, 식품조사에 이용되는 조사시설 운전지침으로 발표하였다. 1984년에는 20개국 이상이 FAO, WHO, IAEA 후원하에 식품조사 국제규격기구를 조직하여 국제교역, 경제, 법제화, 규격 및 홍보에 관한 사항을 다루기도 하였다. 1988년에는 스위스 제네바에서 FAO, WHO, IAEA 및 국제교역센터 UNCTAD/GATT 공동으로 개최된 방사선 조사식품에 대한 수용성, 규제 및 교역에 관한 국제회의에 약 80여 개국의 대표가 참석하여 방사선 조사식품에 대하여 소비자 및 교역의 전망에 대한 결의문을 채택하였다. 1992년 WHO는 방사선 조사식품의 안전성을 재평가하면서 식품제조 기준에 따라 방사선 조사기법이 엄격히 이용된다면 영양학적으로나 미생물학적으로 전혀 문제가 없다고 발표하였다. 그리고 안전한 식품의 조리를 위한 WHO의 황금률(the WHO golden rules for safe food preparation)에서 가능하면 이온화 방사선 처리된 신선하고 냉동된 가금육을 선택해야 한다고 발표하였다. 1997년에는 FAO/IAEA/WHO 합동회의로 열린 고선량(10~70 kGy) 조사식품의 안전성에 관한 전문가 연구회의에서 기존 허용 기준보다 10배 이상 높여도 아무런 건강상의 위험은 없으며, 특히 불을 너무 가하면 타서 못 먹게 되는 것처럼 방사선도 과량 조사하면 유해물질이 생성되기 이전에 맛과 품질이 변하므로 최대선량을 제한할 필요가 없다는 결론을 내리고 각국에 이 사실을 WHO press로 발표하였다. 1998년 서울에서 FAO/IAEA 주관으로 방사선 조사식품에 관한 법규와 절차의 조화를 위한 워크숍을 개최하고, 조사식품의

무역을 위한 아시아·태평양 지역의 국가간 법률 조화를 합의하였으며, 1999년에는 FAO/IAEA /WHO 전문가 합동으로 10 kGy 이상 고선량 조사식품의 안전성과 건전성에 관한 기술보고서를 각국의 정부기관에 배포하기에 이르렀다.

2. 방사선 조사식품의 위해성에 관한 연구결과

방사선 조사식품은 발아의 방지나 식중독균의 살균을 위해 방사선 에너지로 처리된 식품을 말하며, 방사능 오염식품과는 전혀 다른 것이다. 특히 방사선이 조사되었을 때 생성되는 물질, 즉 방사성 분해산물(radiolytic products)은 40년간 민감한 검사방법들을 통해 확인한 결과, 위험하다는 증거를 나타내지 않았다. 이와 함께 FDA는 검출되지 않은 radiolytic products의 양은 식품을 1 kGy로 조사할 때 식품 1 kg당 3 mg 이내로 radiolytic products의 안전성에 대해 까다로운 평가를 실시하였으나 유해하다는 증거는 발견되지 않았다고 발표하였다.

Joint FAO/IAEA/WHO expert committee에서는 1964년, 1969년 그리고 1976년에 방사선 조사식품의 안전성에 대한 회의에서 각 국가전문기관에서 수행한 평가보고서를 통해 방사선 조사식품에는 독성이 없다고 결론지었다. 1981년 FAO/IAEA/WHO의 회의에서도 방사선 조사식품의 안전성을 재확인하였다. 1970년부터 1982년까지 수행한 프로젝트에서도 방사선 조사식품에 의한 독성물질의 생성이나 암을 유발하는 어떠한 증거도 관찰되지 않았다고 결론을 내렸으며, 1992년 방사선 조사에 대한 전문위원회는 1980년 이후에 발표된 자료와 문헌들을 평가하여 이전의 결과를 재확인하였다. 1994년 WHO에서는 그동안 발표된 방사선 조사식품에 대한 독성학적 연구들을 재검토하였으나 많은 연구들이 10 kGy까지는 어떠한 독성학적 증거가 나타나지 않았다고 결론을 내렸다. 1997년 WHO/FAO/IAEA에 의해 결성된 전문가 모임에서도 고 선량으로 조사된 식품의 안전성에 대해 10 kGy 이상의 방사선 조사가 독성학적인 관점에서 볼 때 인체에 위해를 줄만한 식품 조성의 변화를 일으키지 않는다고 하였다.

한편 Delience 등(3)과 Knoll 등(4)은 방사선 조사

시 2-Dodecyclobutanone(2-DCB)이 생성되며 그 유해성을 보고하였으나, 이들 연구에서 쥐의 대장세포에 손상이 나타난 것은 2-DCB의 과량투여에 기인한 것으로 이 양은 실제적으로 방사선 조사식품을 섭취할 때 통상적으로 섭취할 수 없는 과량이었다. 이 논란에 대해 CODEX에서는 과학적인 증거자료를 통하여 2-DCB가 공중 보건상 위해가 없다고 밝혔다.

3. 방사선 조사식품의 방사선 분해산물의 위해성

방사선 분해물질(radiolytic products)의 특성은 조사된 식품의 구성성분에 크게 의존하며 대부분의 방사선 분해물질은 지질, 단백질, 탄수화물로부터 생성된다. 방사선 분해산물은 포도당, 포름산(formic acid), 아세트알데히드(acetaldehyde), 이산화탄소 등으로 이들은 열처리 과정에서도 생성되는 물질이며 식품에 자연적으로 존재한다. 물이 주요 구성성분인 식품에서 전리방사선에 의해 물이 이온화되어 free hydroxy radical들과 hydrated electron이 생성되게 된다. 일반적으로 자유라디칼이 형성된 후 서로 반응하거나 식품 구성성분과 반응해서 반응성이 없는 안정된 물질을 만든다. 따라서 식품이 소비자에게 전달될 때는 방사선 조사된 식품에 자유라디칼이 남아있지 않게 된다. 자유라디칼은 일반적으로 반응성이 매우 크고 불안정한 구조를 가지고 있어 계속해서 물질과 반응하여 안정한 물질로 전환된다. 액체가 존재할 때(예: 타액) 자유라디칼은 서로 반응하여 없어지기도 한다. 결국 방사선 조사에 의해 생성된 자유라디칼이 식품에 그대로 존재하는 경우는 드물며, 미량 존재한다 해도 우리가 섭취할 때 액화되어 타액 등에 없어지므로 식품 안전성에는 문제를 일으키지 않는다. 이것은 독일 Karlsruhe에 있는 federal research centre에서 수행된 장기간의 실험으로 확인되었는데, 이 실험에서는 방사선 조사한 분유를 동물들에게 먹였으나 동물들에게 어떠한 돌연변이나 종양도 발생하지 않았다. 이 시험에서는 9세대에 걸쳐 이러한 사료를 쥐에게 공급하여 사육하였으나 어떠한 독성도 나타나지 않았다고 발표함으로써 방사선 조사시 생성되는 자유라디칼에 의해 식품의 안전성에 문제가 일어나지 않음을 시사하였다.

4. FDA, 미육군 등의 안정성 평가

가. 아만성 독성시험

미국 FDA에서는 26건의 Rat를 사용한 아만성 독성평가가 이뤄졌다. 이 실험에서는 0.1~55.8 kGy로 조사된 양파, 생선, 돈육, 빵, 콩, 과일, 감자, 새우, 우육, 베이컨, 버섯 등의 식품이 검토되었다. 그 결과 대부분의 시료에서 방사선 조사의 영향은 관찰되지 않아 조사식품을 섭취함에 따른 독성학적인 영향이 없다는 사실을 확인하였다. Brin 등(5)의 시험에서 55.8 kGy의 선량으로 조사한 돈육을 rat에 84일간 투여하였을 때, 혈장 alanine aminotransferase (plasma transaminase)와 체중의 감소가 관찰되었다. 하지만 이는 피리독신의 감소로 인한 결과로 추정하였으며, FDA는 이 연구가 영향학적인 실험으로 독성학적으로는 의미가 없다고 판단하였다. 한편, 개를 사용한 시험에서 개에게 투여한 55.8 kGy로 조사된 우육 및 0.07 kGy로 조사된 우육과 양고기는 어떠한 악영향을 나타내지 않았다.

나. 번식시험 및 체기형성시험

Rat와 마우스를 사용한 번식시험에서는 55.8 kGy로 조사한 돈육 및 59 kGy로 조사한 계육이 사용되었으나, 이들 시험에서는 조사에 의한 영향은 관찰되지 않았다. 56 kGy로 조사한 우육을 개에게 투여한 시험이 2건 있었으며, 이들 모두에서는 방사선 조사에 의한 악영향은 관찰되지 않았다. 45 kGy로 조사한 계육을 햄스터와 토끼에 투여한 시험들이 이뤄졌으나 방사선 조사에 대한 영향은 발견할 수가 없었다.

다. 만성 독성시험

Rat를 사용하여 만성 독성시험이 실시된 결과 극단적인 고선량(27.9~55.8 kGy)이 조사된 식품군이 투여되었음에도 방사선 조사와 관련된 종양의 증가는 관찰되지 않았다. 이와 관련하여 3건의 연구가 실시되었으나, 고선량 방사선 조사는 어떠한 나쁜 영향도 관찰되지 않는 것으로 확인되었다.

한편 베이컨, 햄, 생선을 혼합해서 55.8 kGy로 조사한 Read 등(6)의 연구에서 제 3세대에서 체중 증가율

의 저하가 관찰되었다. 제 2세대와 제 3세대 부모의 2회째 번식에서 새끼의 체중이 유의적으로 저하되었고 보고하였다. 그러나 방사선 조사에 의한 영향은 적은 것으로 나타났다. 마우스에 대해 18건의 만성 독성 시험을 실시한 결과에서도 방사선 조사에 의한 나쁜 영향은 나타나지 않았으며, 역시 55.8 kGy로 조사된 베이컨, 베이컨 지방 및 7 kGy로 조사된 계육을 마우스에 일생동안 각각 투여하였으나 어떠한 악영향도 나타나지 않는 것으로 확인되었다. Monsen(7)은 55.8 kGy로 조사된 돈육, 계육을 기초로 한 조사식품을 사료로 사용하여 마우스에 투여한 결과 심장에 심이의 확장을 일으킨다고 지적하였으나, Monsen의 연구실에서 Thompson(8)이 동일 계통의 마우스 약 5,000마리를 사용해 대규모의 실험을 실시하여 80만개 이상의 심장 절편을 상세히 조직병리학적으로 조사해본 결과 보고된 장애를 전혀 관찰하지 못하였다. 따라서 방사선 조사가 심장장애의 원인이 아님이 명확히 밝혀지게 되었다. 대부분의 경우에 고선량으로 조사한 축산식품이 일생동안 또는 작게는 1년 동안의 기간 동안 동물들에게 투여되었다. 그 결과 일정한 패턴이나 경향을 나타내는 어떠한 악영향도 관찰되지 않았으며 이는 동물에 대해 방사선 조사를 실시한 축산식품을 섭취시켜도 나쁜 영향이 없다는 사실을 입증하게 하였다.

5. 중국의 안전성 시험

사람에 대한 안전성 평가시험은 철저한 계획과 관리 아래에서 이루어졌다. 건강한 지원자에 대해 35종의 방사선 조사식품이 제공되었고(9), 대조군에 대해서는 비조사된 동일한 식품이 공급되었다. 제공된 식품은 곡물(2건), 콩 및 그 조제품(10건), 야채, 과일(20건), 식육, 생선, 계란, 계육(30건), 조미료(10건)였다. 방사선 조사선량은 육류는 8 kGy, 그 외의 식품은 1~1.5 kGy로 조사되었고, 하루 평균섭취량은 육류 40 g, 야채와 과일류가 300 g, 곡류가 470 g으로 전체식사의 60.3%를 차지하였다. 남성 36명, 여성 34명의 의대생으로 구성된 인원이 조사식품군과 대조군으로 무작위하게 분류되어 90일간의 시험이 이뤄졌다. 시험 결과, 방사선 조사식품은 일상생활, 학습, 운동에 어떠한

악영향을 미치지 않았으며, 건강진단에서도 조사식품을 90일간 섭취함에 따른 영향이 인지되지 않았으며, polypoid 발생률 모두 정상범위였다고 발표하였다. 한편 미 육군에게 고선량(25-40 kGy)으로 조사된 54종의 식품을 젊은 지원자들에게 섭취하게 한 후 연구를 수행한 결과에서도 섭취에 따른 독성학적인 영향은 확인되지 않았다. 현재 52개국에서 방사선조사식품이 상업적으로 이용 및 판매되고 있으며, “더 이상의 human test는 필요하지 않다”는 결론을 짓고 있다.

IV. 결 론

현 식품산업에서의 문제핵심기술 해결과 WTO/FTA 대비를 위한 방사선 식품조사기술은 국내·외의 추세로 볼 때 빠르게 증가할 것으로 기대된다. 식품의 살균, 살충 등에 사용되는 화학훈증제의 사용 금지와 국가 간 교역에서 품질규격이 더욱 엄격해지고 있기 때문이다. 방사선 조사를 식품에 활용할 수 있는 산업 및 실용화 연구기반을 국내에 조성하고 이를 통한 식품 및 관련 산업 발전에 기여하는 효과를 얻을 수 있다. 식품에 방사선 조사를 이용할 경우 부패 및 병원성 미생물에 대한 위생학적 안전성을 보장하고, 제품의 가공성을 증진시킬 수 있다. 방사선 조사시 천연항산화제 및 진공/질소 포장방법의 병용처리는 제품의 관능적 품질변화를 최소화하는 동시에 저장수명을 연장하고, 병원성 미생물에 의한 식중독 방지 등 위생적, 영양적으로 안전성을 보장하여 국민보건 향상과 관련 산업체의 생산성 향상에 크게 기여할 수 있다. 또한, 대학 등 관련 연구기관과 산업체에서 방사선 조사 실용화를 위한 연구를 활발히 진행할 수 있어 다양한 기술이 제공되어 국내 시장뿐만 아니라 국제시장에도 진출할 수 있는 계기가 마련될 수 있을 것으로 사료된다.

위생적 품질관리가 절대적으로 요구되는 가공식품의 대량생산체제에서 현실적으로 분말 및 건조식품과 까다로운 검역체제에서 수출용 가공식품에 적합한 살균, 살충 방법이 불완전한 상황에서 국내·외 식품산업에서 식품조사 처리기술의 요구는 점차 증가되고 있다. 또한, 기존 검역관리 및 저극 해충 방제에 훈증제로 사용하고 있는 methyl bromide 등이 오존층 파괴물질로 규

정되어 몬트리올 환경협약에 의해 2015년 전면 금지기로 하여 그 대체방법으로 방사선 조사기술의 이용이 급속하게 이루어질 전망이므로 그 수요는 크게 늘어날 전망이다. 방사선 식품조사 시설은 의료용품, 공중보건제품, 화장품류, 식품포장용기 멸균 등 산업적으로 다용도로 활용될 수 있기 때문에 조사시설의 건설이 세계적으로 증가하고 있는 추세이다. 따라서 식품산업에서 방사선 기술의 이용은 이들 산업의 건전한 발전을 위한 국내기술 자립과 충분한 국제 경쟁력 확보 및 소비자와 생산자의 안전과 이익 보장은 물론 국민보건 향상에 크게 이바지할 수 있고 나아가 우리의 실정에 알맞은 신기술의 정착을 기대할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. IAEA(International Atomic Energy Agency). Irradiation to ensure the safety and quality of prepared meals. Joint FAO/IAEA programme (2009)
2. GIA (Global Industries Analysts) Report. Food irradiation-A historical review. pp.7-27. In: Food irradiation trends, global industry analysts. Inc, California (2005)
3. Delincee H, Pool-Zobel BL. Genotoxic properties of 2-dodecylcyclobutanone, a compound formed on irradiation of food containing fat. Radit. Phys. Chem. 52:39-42 (1998)
4. Knoll N, Weise A, Clsussen U, Sendt W, Marian B, Gleit M, Pool-Zobel BL. 2-Dodecylcyclobutanone, a radiolytic product of palmitic acid, is genotoxic in primary human colon cells and in cells from preneoplastic lesions. Mut. Res. 594: 10-19 (2006)
5. Brin M, Ostashever AS, Tai M. Effects of feeding X-irradiated pork to rats on their pyridoxine nutrition as reflected in the activity of plasma transaminases. J. Nutrition. 75: 35-38 (1961)
6. Read M S, Kraybill HF, Worth W, Thompson SW, Issac GJ. Successive generation rat feeding studies with a composite diet of gamma-irradiated foods. Toxicol. Appl. Pharmacol. 3: 153-173 (1961)
7. Monsen H. Heart lesions in mice induced by feeding irradiated foods. 19: 1031-1034 (1960)
8. Thompson SW, Hunt RD, Ferrell JF. Histopathology of mice fed irradiated foods. Rep. 279. Rep. US. Army Med. Res. Nutr. Lab. Denver. 15: 1-68 (1963)
9. Shao S, Feng J. Safety estimation of persons feeding from 35 kinds of irradiated diets-chromosome aberrations and SCE analysis of cultured lymphocyte. J. Chin. Radit. Med. Prot. 3: 271 (1988)