

특집 : 단체급식에서의 안전성 확보를 위한 합리적인 개선방안

식자재 안전공급을 위한 식품 방사선 조사 이용현황 및 전망

이 주 운

한국원자력연구소 방사선연구원 방사선식품생명공학연구소

Application and Prospect of Food Irradiation for Providing the Safe Food Materials

Ju-Woon Lee

Dept. of Radiation Food Science and Biotechnology, Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongeup 580-185, Korea

서 론

현대 식품산업은 소비자들은 식품의 안전성(safety), 편리성(convenience)과 가치(values)를 중요시하는 경향에 따라 식품의 선택기준이 다양화되고 있다. 특히 식품의 안전성에 대한 국민적 관심이 높아짐에 따라 식품매개 질병의 예방과 위생적인 식품의 생산기반 확립을 위해서 이러한 문제점을 해결하거나 개선할 수 있는 새로운 식품저장 및 가공기술 개발의 필요성이 보건당국 및 산업계로부터 시급히 요구되고 있다. 식품산업의 고도화 및 국제화 시대를 맞아 고부가가치의 제품을 생산하기 위해서는 원료의 안정공급, 위생적 생산, 효율적 제조공정, 안전저장 및 유통을 위한 기술이 확보되어야 한다.

또한, 식품안보 측면에서 고려할 때, 전 세계 식품 생산량의 1/4 정도의 거대한 물량이 부패, 해충감염, 세균과 곰팡이 오염을 조절하지 못하여 수확 후 손실된다. 더욱이 2030년에 세계 인구는 100억명으로 증가하나 이때 예상되는 식량 증산량은 4% 수준에 머무를 것으로 예측하고 있다. 이에 장기적인 식량 수급대책 및 위생화 처리는 국가적인 차원에서 매우 중요한 문제로 대두되고 있으며 수확된 식량의 저장 중 손실을 감소시키려는 방안에 대한 연구들이 진행되고 있다.

이 중 방사선 조사를 이용한 방법은 현재 식품의 가공 및 저장에 이용되고 있는 화학약품(방부제, 훈증제 등)에 대한 인체유해성 및 환경오염의 단점들을 보완할 수 있는 위생적인 식품저장 기술로 기대되어지고 있다. 하지만 방사선 식품조사는 다양한 선량의 범위에서 몇몇 식품에서 관찰되는 특유한 방사선 분해산물(unique radiolytic

products: URP)의 생성 유무로, 방사선조사식품을 사용하는 것에 대한 찬반의 논란이 끊임없이 이어져왔다. 이에 따라 과거 40년 이상 방사선조사식품의 안전성에 대해 수백 건의 안전성시험이 이뤄져 왔으며, WHO(세계보건기구), FAO(국제식량농업기구), IAEA(국제원자력기구) 등을 비롯한 국제기구와 CI(국제소비자연맹) 등은 10 kGy 이하의 방사선조사에서는 심각한 화학적인 변화를 찾아볼 수 없었으며, 생성 화합물들이 조사식품에만 특이하게 생성되는 것이 아니라는 사실을 관찰하였다. 또한 조사된 식품은 비조사 식품과의 영양적인 차이가 거의 나지 않는다고 결론지었다.

한편, 식품의 위생화를 위해 이미 설정된 10 kGy 이하의 조사선량이 미흡하다는 기술적인 문제점이 보고되고 있으며, 이에 따라 완전살균과 장기저장을 위해서는 10 kGy 이상의 고선량 조사가 필요하다고 알려져 있다. 그 예로, 향신료의 경우, 프랑스는 11 kGy의 방사선조사를, 미국과 아르헨티나는 최고 30 kGy의 조사를 허가하고 있다. 특히 면역결핍 환자들을 위한 완전 멸균식을 위해 네덜란드 당국은 75 kGy의 고선량 방사선조사를 허가하고 있으며, 영국을 비롯한 여러 나라에서도 방사선 멸균 병원을 위해 선량 제한을 두고 있지 않는 실정이다. 최근에는 군식량이나 우주식품 등의 식품에도 방사선조사기술이 적용되어 일부 품목은 실용화되었다. 그러나 방사선조사식품의 안전성에 대한 소비자의 태도는 풀어야 할 과제로 여겨지고 있다.

따라서 본보에서는 현재 방사선조사에 대한 국제적 평가 및 독성시험 그리고 식품 조사의 안전성 여부를 확인하고자 하였다.

식자재의 안전생산을 위한 방사선조사기술의 활용분야

식품산업에서의 방사선조사기술은 병원성 미생물 및 유해 생물의 사멸에 의한 위생화, 식량자원의 장기보존 및 손실방지, 그리고 국가 간 식량교역에 따른 검역관리기술로써 이용되고 있다. 각 식품에 대한 조사선량 범위와 주요 사용 목적을 표 1에 정리하였다.

방사선조사식품에 관한 초기연구는 주로 ① 농산물의 발아, 발근 억제(inhibition of sprouting), ② 농산물의 해충구제(insect disinfection), ③ 농축산물의 기생충 사멸(parasite disinfection), ④ 농산물의 속도조절(delay of physiological process), ⑤ 저장수명 연장(extension of shelf-life) 등 농산물의 보존과 국제교역에서의 안전성 확보를 목적으로 이루어졌다. 아래에서는 방사선을 이용한 식품의 위생화와 관련하여 미생물에 대한 방사선의 작용 기작, 미생물의 방사선 감수성 등을 살펴본다.

식자재의 저장 안정성 확보

식량자원은 수확 후 저장 및 유통과정에서 손실되는 양이 연간 10% 이상에 달하고 있으나, 직접적 증산방법에 의한 식량증가율은 연간 2.5% 정도에 그치고 있다. 이에 FAO 및 WHO 등 국제기구들은 약 20% 정도의 식량자원을 간접증산시킬 수 있는 방사선 기술을 식량의 장기 안전 저장방법으로 적극적으로 활용할 것을 권고하고 있다. 방사선 기술은 현재 52개국 250여 식품품목에 대해 발아/발근 억제, 속도 지연, 해충 및 기생충 방제 및 부패/병원성 미생물의 살균 등 식량자원의 장기 안전저장에 사용하고 있다.

표 1. 주요 식품군의 방사선조사 목적 및 유효선량

주요 식품군	조사선량 (kGy)	주요 목적 및 효과
육류, 가금육, 어패류, 채소 및 기타 신선식품을 이용한 특수영양식품, 무균식품 등	20~70	상업적 완전살균 멸균처리 후 상온 보존
향신료	8~30	미생물의 유효한 감균 및 곤충사멸 화학살균 살충의 대체
육류, 가금육, 어패류	1~10	병원성 미생물의 살균 및 부패 방지
팥기 등 과채	1~4	곰팡이의 제거로 보존성 연장
곡류, 과일, 야채	0.1~1	해충의 제거
바나나, 아보카도, 망고 등	0.25~0.35	숙성의 지연
돼지고기	0.08~0.15	선모충의 제거
감자, 양파, 마늘	0.05~0.15	발아의 억제

식중독 예방

방사선조사기술은 전자선 혹은 감마선을 식품에 쬐어 대장균 O157:H7, 살모넬라, 황색포도상구균 및 노로바이러스 등 식품에 존재하는 병원성 미생물을 효과적으로 사멸시킬 수 있는 식중독 예방기술로서 이용되고 있다. 특히, 미국 농무부(USDA)는 식중독 사고를 원천봉쇄하기 위해 2003년 5월 국립학교 점심 급식 프로그램에 방사선 조사된 쇠고기(햄버거 포함)의 공급을 승인, 2004년 1월부터 고등학교 학생들에게 방사선이 조사된 햄버거를 급식으로 공급하고 있으며, 본 연구팀도 방사선조사 기술이 적용된 새로운 형태의 단체급식 관리체제인 'RT-HACCP (Radiation Technology based Hazard Analysis Critical Control Point, 방사선조사기술 기반 위해요소중점관리)' 구축을 위한 연구를 진행 중에 있다.

식품 가공공정 개선/신소재 개발

방사선 기술은 천연 식품자원의 산업적 활용을 극대화시킬 수 있는 식품가공 및 공정 개선 기술로도 활용된다. 식품 제조용 원료로 사용되는 천연 식품자원은 생리활성 등 기능성을 유지하면서도 제품 첨가시 제품의 특성에 영향을 미치지 않도록 무색, 무미, 무취의 상태로 정제하는 공정이 가장 중요한 요소인데, 일부 천연 식품자원은 이러한 문제로 인해 산업적 이용이 제한되고 있다. 방사선조사 기술은 천연화합물의 생리활성을 그대로 유지시키면서 불필요한 색소 및 잔류농약을 비롯한 불순물을 제거하여, 고순도, 고농도의 천연화합물을 제조하는 가공기술로서 이용되고 있다.

식품교역에서 선진 검역처리기술

최근 국가간 농산물의 교역이 증가함에 따라 검역처리의 중요성은 점점 강조되고 있다. 그러나, 최근까지 농산물의 검역처리를 위해 사용되고 있는 화학훈증 처리 방법은 환경오염을 유발하며, 인체에 유독한 것으로 알려져 있어 세계적으로 점차 사용이 금지되고 있다. 방사선 기술은 지난 수십년 동안 세계보건기구(WHO), 세계식량농업기구(FAO), 세계무역기구(WTO) 등의 국제기구 및 국제학회들을 통해 안전성이 입증되어 이러한 화학적 보존제 및 훈증제 등을 대체할 수 있는 가장 효과적인 기술로서 적극 권장되고 있다.

식품 유해물질 제거기술

방사선 기술의 산업적 이용 활성화를 위한 새로운 시도로 물리적 에너지인 방사선과 생명공학을 융합하여 식품 내 알레르기 유발물질 및 독성 발암물질인 나이트로자민류, 바이오제닉 아민류, 고시폴, 에틸 카바마이트 등을 제

거하는 기술을 세계최초로 개발한 바 있다. 이를 통해 방사선이 식품에 자연적으로 존재하는 알레르기 유발물질과 식품의 가공 및 저장 중 생성될 수 있는 독성물질은 방사선에 의해 제거됨이 과학적으로 증명되었고 방사선 식품이용의 일차적 목적인 식중독미생물의 사멸과 함께 부차적으로 화학적 안전성 개선에도 큰 역할을 할 수 있음을 입증하였다.

방사선조사기술의 이용현황

국제적 식품조사 활용 분야 변천 과정

- **1960년대:** 군 비축식량 및 우주개발 계획 우주인 식사 프로그램에 이용
- **1970년대:** 농산물 저장 목적으로 감자, 양파 등 구근류의 발아억제, 과일 및 버섯의 숙도 지연 등에 활용 ⇒ 국내에서 물류비 부담 등으로 농·수·축산물 산지의 냉장·냉동 시설보다 활성화 안됨.
- **1980년대:** 세계보건기구(WHO)의 세균성 식중독 방지 분야로 활용 권고⇒향신료 및 가공식품류에 대한 살균 및 살충 처리에 이용.
- **1990년대:** 유엔의 국제 환경 위원회(UNEP)에서 화학약품(methyl bromide, ethylene oxide 등) 대체기술로 활용 권장
- **2000년대:** WTO 체제의 자유무역체제에서 식물위생검역 조치의 적용에 관한 일반 협정(SPS)과 무역에 대한 기술적 장해에 관한 협정(TBT)에 의해 정부 주도하에 식품조사 이용 및 보급에 전력 ⇒ 미국 FDA 및 농무성(클린턴 행정부, 2000년 2월 시행): 수출 및 자국내 유통되는 모든 육류 및 부산물에 감마선 조사 기술 도입 결정

상기와 같이 방사선조사식품의 안전성은 지난 50여년간 국제기구와 선진국의 주도로 체계적인 연구가 추진되어 FAO/WHO/IAEA에서는 10 kGy이하로 조사된 모든 식품의 안전성을 인정하였고(표 2), 10 kGy 이상의 고선량

표 2. 식품의 방사선조사를 지지 또는 권고하는 국제기구 및 단체

세계보건기구(WHO)	미국의학협회(AMA)
국제식량농업기구(FAO)	미국수의학협회(AVMA)
미국농무성(USDA)	미국육류학회(AMI)
미국식품의약국(USFDA)	미국영양사협회(ADA)
국제원자력기구(IAEA)	식품공학자연구소(IFT)
국제식품안전센터(NCFS)	Kiplinger Agricultural Letter (KAL)
미국공중보건국(USPHS)	하버드보건레터(HHL)
미국질병통제센터(CDC)	Mayo 클리닉보건레터(MCHL)
농학기술회의(CAST)	Prevention Magazine

조사식품에 대한 안전성과 건전성에 대한 기술보고서를 각 국에 배포한 바 있다. 식품의 방사선조사 현황을 보면 세계 52개국의 200여개의 시설에서 약 250여종의 식품군에 대하여 방사선조사가 허가되어 있고, 주요 방사선조사 대상 식품은 향신료, 건조채소류, 근채류, 가공류 등이다(표 3).

방사선조사식품에 대한 국제적 평가

전 세계적으로 52개국에서 식품에 방사선조사를 승인하고 있으며, 30개국에서 방사선조사식품이 판매되고 있다. 방사선조사는 1921년 미국에서 육류의 기생충 사멸을 목적으로 최초 사용된 이래 조사식품의 건전성에 관한 연구가 활발히 이뤄지기 시작하였다.

육류 등 식육제품의 경우 여러 종류의 병원균으로 오염되어 있다. 부패균뿐만 아니라 병원성 세균도 이온화 방사선으로 사멸할 수 있어 위생적으로 안전하게 저장기간을 연장시킬 수 있다. 25~45 kGy의 고선량으로 세균, 효모 및 곰팡이를 완전히 제거하여 멸균시킬 수 있다. 돼지고기의 경우에는 선모충(*Trichinella spiralis*)이 포함되어 있을 수 있기 때문에 철저하게 조리되어야 한다. 또한 선모

표 3. 식품조사 허가국가 및 목적별 허가품목수

허 가 국	목적별 허가품목	허 가 국	목적별 허가품목
아르헨티나	13	멕시코	102
방글라데시	21	네델란드	19
벨기에	11	노르웨이	3
브라질	27	파키스탄	87
이집트	4	필리핀	3
캐나다	7	폴란드	5
칠레	20	남아프리카공화국	89
중국	23	스페인	2
쿠바	18	시리아	20
체코	2	태국	25
덴마크	2	터키	92
핀란드	2	영국	43
프랑스	41	우루과이	1
헝가리	13	미국	55
인도	23	베트남	8
인도네시아	22	유고	23
이란	1	일본	1
이스라엘	47	한국	26
이탈리아	6	러시아연방	52
코스타리카	12	우쿠라이나	47
크로아티아	72	가나	172

WHO/FAO/IAEA, CODEX 모든 식품허가

충에 의한 질병으로 인해 사망할 수도 있다. 기생충 유충의 경우에는 0.3 kGy의 선량으로 비전염성으로 만들 수 있으며, 이런 방법을 돼지고기에 처리하여 선모충에 안전한 상태로 만들 수 있는 가능성이 미국의 무역협회와 정부 부서에 의해 증명되었다. 그리고 저선량의 방사선조사는 돼지고기 촌충에 의해 유발되는 낭충증(cysticercosis)와 톡소플라스마증(*Toxoplasma gondii*)에 의한 Toxoplasmosis에 의한 위험을 없앨 수 있다.

1961년 벨기에 브뤼셀에서 WHO, FAO, IAEA가 공동으로 방사선조사식품의 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 방사선조사식품의 안전성 평가를 위해 방사선 식품조사 분야 국제과제를 신설하였으며, 24개국이 본 과제에 참여하여 12년간 연구를 수행한 결과, 식품에 방사선조사로 인한 발암성 물질이나 기타 독성물질이 발견되지 않았다고 보고하였다. 1980년 스위스 제네바에서 JECFI는 과거 40년 동안 전 세계적으로 수행된 방사선조사식품의 건전성/안전성 시험에 대한 결과를 종합적으로 평가하여 10 kGy 이하의 선량으로 방사선을 조사할 경우 어떠한 식품도 독성학적 장애를 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 방사선조사식품 규격으로 채택하였고, 식품조사에 이용되는 조사시설 운전 지침으로 발표하였다. 1984년에는 20개국 이상이 FAO, WHO, IAEA 후원 하에 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 방사선조사식품에 대한 수용성, 규제 및 교역에 관한 국제회의에 약 80여 개국의 대표가 참석하여 방사선조사식품에 대하여 소비자 및 교역의 전망에 대한 결의문을 채택하였다. 1992년 WHO는 방사선조사식품의 안전성을 재평가하면서 식품제조 기준에 따라 방사선조사기법이 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 연구 회의에서 기존 허용 기준보다 10배 이상 높여도 아무런 건강상의 위험은 없으며, 특히 불을 너무 가하면 타서 못 먹게 되는 것처럼 감마선도 과량 조사하면 유해물질이 생성되기 이전에 맛과 품질이 변하므로 최대선량을 제한할 필요가 없다는 결론을 내리고 각국에 이 사실을 WHO press로 발표하였다. 1998년 서울에서 IAEA/WHO 주관으로 방사선조사식품에 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.

방사선조사식품에 대한 주요 국가별 견해

미국: 식품의 방사선조사는 미국에서 1963년에 제한된 범위로 사용하도록 승인되었으며, 1970년 FDA는 방사선조사식품의 안전성 평가기준을 검토, 평가, 권장하기 위한 위원회를 설치하였다. 1986년에는 과일과 채소의 성장과 성숙방지, 해충 사멸 등을 위해 방사선조사를 1 kGy까지 허용한다는 법안을 FDA가 연방관보에 제시하였다. USDA 식품안전검사부에서는 1992년 10월에 식인성 질병예방을 위해 가금육에 대해 1.5~3 kGy의 상업적인 조사를 허가하였다. 1992년 1월부터 플로리다 주에서는 양파, 딸기, 오렌지 그리고 버섯 등의 농산물에 대해 상업적인 조사를 허가하였고, 일리노이 주에서는 1993년 9월부터 가금육에 대한 방사선조사를 실시하고 있다. 1997년 12월에 FDA는 병원성 대장균인 O157:H7의 살균을 위해 돼지고기, 쇠고기, 양고기 등에 대한 방사선조사를 허가하였다. 식중독은 미국에서 해마다 공중보건 문제를 일으키는 주된 요인이며, 미국 질병통제센터(CDC)는 육류, 가금류 등을 통해 발생하는 식중독을 예방하기 위해 방사선조사를 지지하는 입장이다.

영국: 1980년 JECFI는 10 kGy 이하의 선량으로 방사선을 조사할 경우 어떠한 식품도 독성학적 장애를 일으키지 않으며, 독성실험은 더 이상 필요가 없고 영양학적 및 미생물학적인 측면에서 문제를 일으키지 않는다고 발표하였다. 또한 국제식품규격위원회의 방사선 조사식품의 기준(Codex Alimentarius General Standard for Irradiated Food)의 승인에 따라 1982년에 방사선 조사 및 신규 식품의 권고 위원회(Advisory

Committee on Irradiated and Novel Foods: ACINF)가 설립되었다. ACINF는 소매점에서 식품이 방사선조사되었다는 표시를 필요로 한다는 과학적이거나 공중 위생적 이유는 없다는 견해를 취하였다. 그러나 위원회는 소비자에게 정보를 제공하기 위해서 방사선조사식품과 방사선조사된 원료가 포함된 혼합식품에 대해 구체적인 용어로 그 처리에 대한 표시를 하도록 권고하였다. 1991년 1월 식품안전법(Food Safety Act)이 시행되면서 식품방사선조사에 대한 새로운 규정이 마련되었으며, 식품규정 1990(Food Regulation 1990)은 처리시설에 대한 엄격한 허가관리를 조건으로 방사선조사식품을 승인하였다. 또한 소비자에게 판매하는 식품에 대해 방사선조사 표시를 할 것을 요구하였다. 이러한 표시는 조사처리되지 않은 식품 내에 포함되어 있는 조사된 원료에도 적용되며, 방사선조사되었음(irradiated) 또는 이온화 방사선으로 처리되었음(treated with ionizing radiation)이라는 단어를 사용하도록 하였다.

프랑스 : 프랑스는 식품의 방사선조사를 상업적으로 많이 이용하는 주요국가 중 하나이다. 프랑스 정부는 초기에 식품의 방사선조사에 대해 매우 엄격한 규정을 제안하였다. 식품방사선조사에 대한 허가를 하기 전에 장기간 동물 급식 연구, 영양학적 평가, 관능적 특성에 대한 방사선조사 처리의 효과, 기술적 숙성, 포장재료 등에 대한 정보들이 상세하게 기술되도록 당국에 의해 요구되었다. 1970년 방사선조사 식품에 대한 표기에 관한 법령에서 irradié(방사선조사되었음) 또는 traité par irradiation(방사선조사로 처리되었음)이라는 문구와 함께 표시하도록 요구하고 있으나 1991년 법령에 의하면 traité par ionisation(이온화로 처리되었음) 또는 traité par rayonnements ionisation(이온화조사 처리되었음)이라고 문구를 표기하도록 하였다. 1972년에는 감자에 대해 0.75~150 Gy로 방사선조사를 허용하였으며 그 후 5년에 걸쳐 발아억제를 위해 양파, 마늘, 골파류에 대한 방사선조사를 허용하였다. 그리고 JECFI의 1980년 발표 후에 더 많은 식품에 대한 방사선조사를 허용하였다.

방사선조사식품의 위해성에 관한 연구결과

방사선조사식품은 발아의 방지나 식중독균의 살균을 위해 방사선 에너지로 처리된 식품을 말하며, 방사능 오염 식품과는 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 방사성 분해산물의 양은 식품을 1 kGy로 조사할 때 식품 1 kg당 3 mg 이내로 방사성 분해산물의 안전성에 대해 까다로운 평가를 실시하였으나 유해하다는 증거는 발견되지 않았다고 발표하였다.

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

한편 Delience 등(1)과 Knorr 등(2)은 방사선조사시 2-Dodecyclobutanone(2-DCB)이 생성되며 그 유해성을 보고하였으나, 이들 연구에서 쥐의 대장세포에 손상이나 타난 것은 2-DCB의 과량투여에 기인한 것으로 이 양은 실제적으로 방사선조사식품을 섭취할 때 통상적으로 섭취할 수 없는 과량이었다. 이 논란에 대해 CODEX에서는 과학적인 증거자료를 통하여 2-DCB가 공중 보건상 위해가 없다고 밝혔다.

방사선조사식품의 방사성 분해산물의 위해성

방사성 분해산물의 특성은 조사된 식품의 구성성분에게 크게 의존하며 대부분의 방사성 분해물질은 지질, 단백질, 탄수화물로부터 생성된다. 방사성 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 자유 수산화 라디칼(free hydroxy radical)들과 수화된 전자(hydrated electron)가 생성되게 된다. 일반적으로 자유라디칼이 형성된 후 서로 반응하거나 식품 구성성분과 반응해서 반응성이 없는 안정된 물질을 만든다. 따라서 식품이 소비자에게 전달될 때는 방사선조사된 식품에 자유라디칼이 남아 있지 않게 된다. 자유라디칼은 일반적으로 반응성이 매우

크고 불안정한 구조를 가지고 있어 계속해서 다른 물질과 반응하여 안정한 물질로 전환된다. 액체가 존재할 때(예: 타액) 자유라디칼은 서로 반응하여 없어지기도 한다. 결국 방사선조사에 의해 생성된 자유라디칼이 식품에 그대로 존재하는 경우는 드물며, 미량 존재한다 해도 우리가 섭취할 때 액체나 타액 등에 없어지므로 식품 안전성에는 문제를 일으키지 않는다. 이것은 독일 Karlsruhe에 있는 정부 연구기관(Federal Research Centre)에서 수행된 장기간의 실험으로 확인되었는데 이 실험에서는 45 kGy로 조사된 매우 건조한 분유를 동물들에게 먹였으나 동물들에게 어떠한 돌연변이나 종양도 발생하지 않았다. 이 시험에서는 9세대에 걸쳐 이러한 사료를 쥐에게 공급하여 사육하였으나 어떠한 독성도 나타나지 않았다고 발표함으로써 방사선조사시 생성되는 자유라디칼에 의해 식품의 안전성에 문제가 일어나지 않음을 시사하였다.

FDA의 안전성 평가

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(표 4). 그 결과 대부분의 시료에서 방사선조사의 영향은 관찰되지 않아 조사식품을 섭취함에 따른 독성학적인 영향이 없다는 사실을 확인하였다. Brin 등(28)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.

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 방사선조사에 의한 악영향은 관찰되지 않았다. 45 kGy로 조사한 계육을 햄스터와 토끼에 투여한 시험들이 이뤄졌으나 방사선조사에 대한 영향은 발견할 수가 없었다.

만성 독성시험 : Rat를 사용하여 만성 독성시험이 실시된 결과 극단적인 고선량이 조사된 식품군이 투여되었음에도 방사선조사와 관련된 종양의 증가는 관찰되

표 4. 쥐에 대한 아만성 독성평가

Duration (day)	Samples	Irradiation dose (kGy)	Effects	Ref
90	생선(고등어)	2	none	3
90	양파	0.1	none	4
84	커피, 흑두	1	none	5
84	돼지고기, 베이컨, 콩, shri	55.8	none	6
90	당근	1	none	7
90	닭고기	6	none	8
90	생선(유럽산 넙치)	3.4	none	9
84	생선(대구, saithe)	3.4	none	10
90	망고	0.8	none	11
90	양파	0.25	none	12
90	생선	6	none	13
90	생선(대구)	6	none	14
90	감자	2	none	15
90	쇠고기	55.8	none	16
98	쇠고기	55.8	none	17
90	닭고기	47	none	18
120	전채식이	45	none	19
90	생선(고등어)	1.5	none	20
84	쇠고기, 돼지고기	55.8	none	21
84	혼합: 쇠고기, 생선, 베이컨	60	none	22
126	코코아콩	0.5	none	23
105	밀	2	none	24
90	버섯	5	none	25
90	새우	3	none	26
90	전채식이	50	none	26
90	딸기	50	none	27

지 않았다. 이와 관련하여 3건의 연구가 실시되었으나, 27.9~55.8 kGy의 방사선조사는 어떠한 나쁜 영향도 관찰되지 않는 것으로 확인되었다. 한편 베이컨, 햄, 생선을 혼합해서 55.8 kGy로 조사한 Read(1961)의 연구에서 제 3세대에서 체중 증가율의 저하가 관찰되었다. 제 2세대와 제 3세대 부모의 2회째 번식에서 새끼의 체중이 유의적으로 저하되었다고 보고하였다. 그러나 방사선조사에 의한 영향은 적은 것으로 나타났다. 마우스에 대해 18건의 만성 독성시험을 실시한 결과에서도 방사선조사에 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(29)은 55.8 kGy로 조사된 돈육, 계육을 기초로 한 조사식품을 사료로 사용하여 마우스에 투여한 결과

심장에 심이의 확장을 일으킨다고 지적하였으나, Monsen의 연구실에서 Thompson(30)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 방사선조사가 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 방사선조사를 실시한 축산식품을 섭취시켜도 나쁜 영향이 없다는 사실을 입증하게 하였다.

사람을 대상으로 한 안전성 시험: 사람에게 대한 안전성 평가시험은 철저한 계획과 관리 아래에서 이루어졌다. 건강한 지원자에 대해 35종의 방사선조사식품이 제공되었고(31), 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. 방사선조사선량은 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, 방사선조사식품은 일상생활, 학습, 운동에 어떠한 악영향을 미치지 않았으며, 건강 진단에서도 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.

국제적 실용화 전망

WHO/FAO/IAEA 등의 각종 국제기구에서는 잔류독성이나 오존층 파괴와 같은 환경상의 문제점이 지적되고 있는 화학 보존제와 훈증제의 대체기술로 감마선 조사기술의 사용을 권장하고 있으며 이를 지금까지 인류가 사용하였던 그 어떤 식품보존방법보다도 우수한 기술로 평가하고 있다. 또한 오늘날 국제무역에 있어 모든 식품에 대

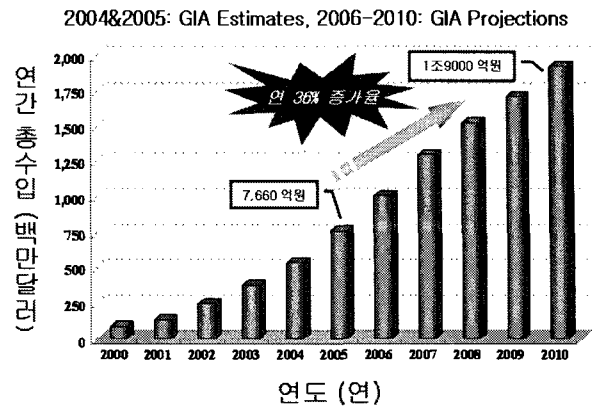


그림 1. 방사선조사식품의 상업적 규모 및 전망(단순처리비용 기준).

하여 조사를 허용하고 있는 국제식품규격위원회(Codex)의 감마선 조사기준이 권고에 머무르지 않고 OECD가입국에 대해 강제적으로 시행되고 있는 만큼, 우리나라에서도 식품의 감마선 조사기술의 이용은 소비자 홍보교육과 더불어 적극적으로 재고되어야 할 것이다. 향후 세계 각국에서는 자국내 보건 위생환경의 향상과 수출주도품목의 경제적인 장점과 이익에 관련된 중요한 식품산업기술로서 감마선 조사기술의 이용은 더욱 늘어날 전망이다(그림 1). 이와 더불어 우리나라에서도 식품산업에서는 필수 불가결한 식품위생기술로 평가되어 이용될 전망이다.

결 론

식품 및 의료, 제약, 화장품 등 공중보건관련 산업에서 방사선조사기술의 확대 적용을 통한 기대 효과는 다음과 같다. 첫째, 식량자원의 장기 안전 저장을 통한 식량간접 증산 및 가격 안정화. 둘째, 식품 및 공중보건산물의 안전성 확보로 국민 질병예방과 품질 경쟁력 향상에 따른 국가 생산성 향상. 셋째, 화학 훈증제 사용 금지에 따른 대체기술. 넷째, 이용의 다양성 및 완전 밀봉포장 상태로 살균·살충할 수 있는 편리성. 다섯째, 국제교역에 있어서 법률의 조화 및 경제적 측면 등이다.

식품·생명공학 산업에서 관련 제품의 생물학적 위해요소를 사전에 차단할 수 있는 방사선조사기술은 1960년대에 우주인 식품의 HACCP 프로그램에 본격 도입된 이래 지금까지 어떠한 식품 및 의료, 제약, 화장품 등 공중보건관련 산업의 위생화 기술보다 가장 방대하고 체계적이며 심도있게 연구되어 왔으며, 과학적이면서도 객관적으로 그 안전성이 확실하게 입증된 상황이다. WHO, FAO, IAEA 그리고 CI 등은 1992년 제네바 회의를 통해 방사선 조사는 건강에 해로움을 초래하는 식품성분의 변화를 생성하지 않는다고 결론지었다. 10 kGy 이하로 조사하는 저

선량에서는 방사선조사에 의한 심각한 화학적인 변화를 찾아볼 수 없었으며, 이러한 화합물들이 조사식품에서만 특이적으로 생성되지 않는다는 사실을 관찰하였다. 그리고 이온화 방사선은 미생물을 사멸시키거나 불활성화시킬 수 있는 화학적 변화를 미생물 내부에 일으켜서 식품내의 미생물의 수와 종을 상당수 감소시키며, 병원균의 유독성을 감소시킴을 확인하였다. 또한 10 kGy이하의 선량으로 조사된 식품은 비조사 식품과 영양적인 차이가 거의 나지 않았다. JECFI에서도 식품에 대한 10 kGy까지의 방사선조사는 특별히 미생물학적, 영양학적인 문제를 일으키지 않는다고 했다. 그리고 식품에 조사한 경우 독성학적인 중요성이 없어서 더 이상 식품에 대한 독성학적인 연구가 필요 없다고 하였다. JECFI의 최종 평가에서 5,000에서 500,000회 이상의 동물실험에서 방사선조사된 식이와 조사되지 않은 식이 사이에는 특별한 차이가 없다고 결론지었다. 이밖에 국제기구(FAO/WHO/IAEA)의 공동연구를 통해 방사선조사식품은 어떠한 조사선량에서도 안전하고 건전하다고 광범위한 과학적인 검사를 통해 결론지었다. 특히 방사선 식품조사는 저장기간을 연장하고 유해동물이나 병원균을 불활성화시킴으로써 보다 안전하고 풍부한 식품의 공급을 보증할 수 있다. GMP에 규정된 필요조건이 충족되는 한, 방사선조사식품은 안전하고 효과적이라고 말할 수 있다.

상기에서 언급한 바와 같이 국제적으로 40여년 동안 식품 및 공중보건관련 산업에서 방사선조사기술을 이용한 위생화 연구결과는 재래적으로 이용되어 오던 타 방법의 많은 문제점을 보완하거나 해결하기 위한 대체방안으로서의 그 안전성과 경제성이 인식되어지고 있다. 그러나 본 기술의 실용화는 소비자의 이해가 선행되어야 하므로 무엇보다도 현행 위생화 방법의 장단점과 방사선조사기술의 특징이 사실에 입각하여 정확하게 비교 홍보되어야 할 것이며 정부 관계당국에서도 본 기술의 사용을 위한 법적 근거 마련이 필요시 된다. 또한 지금까지 본 기술의 연구는 정부주도 하에서 추진되었으나, 앞으로는 소비자나 기업에게 자유로운 기술선택의 기회를 제공하기 위한 공동참여 연구와 방사선조사제품의 관리 및 적절한 홍보 등의 협력이 요구된다. 따라서 식품 및 공중보건관련 산업에서 원자력 기술의 이용은 이들 산업의 건전한 발전을 위해 보다 적극적이고 긍정적인 자세로서 연구개발과 산업화 기반을 다져 나감으로써, 소비자와 생산자의 안전과 이익 보장은 물론 국민보건과 국가경제 향상에도 크게 이바지할 수 있고 나아가 우리의 실정에 알맞은 새로운 기술의 정착을 기대할 수 있을 것이다.

비록 방사선조사기술을 이용하여 미생물학적, 화학적, 영양학적으로 안전한 식품을 확보하여도 방사선조사식품

에 대한 국민적 이해도와 수용성이 미약하다면 가치창출은 매우 어려운 문제이다. 따라서 방사선조사식품에 대한 정확한 정보제공 및 올바른 이해를 위한 노력과 이 분야에 대한 지속적인 연구수행과 실용화를 위한 노력이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. Delincee H, Pool-Zobel BL. 1998. Genotoxic properties of 2-dodecylcyclobutanone, a compound formed on irradiation of food containing fat. *Radiat Phys Chem* 52: 39-42.
2. Knorr MD, Ehlermann, AE, Delincee H. 1999. Genotoxicity of 2-dodecylcyclobutanone, Bundesforschungsanstalt fur Ernährung. *Federal Nutrition Research Institute*.
3. Aravindakshan M, Chaubey RC, Chauhan PS, Sundaram K. 1977. Multigeneration feeding studies with an irradiated whole diet, in *Food Preservation by irradiation*. *Internat Atomic Energy Agency*.
4. Aravindaksan M, Chauhan PS, Nadkarni GB. 1980. Mutagenicity evaluation of irradiated onion in the germ cell of male mouse as revealed by the dominant lethal test. Pre-print of work on contract IFIF 1612/R3/CF.
5. Bernardes B. 1980. Short-term toxicity studies of irradiated coffee and black beans. Technical Report, In *WHO irradiated legumes monograph*.
6. Brin, M, Ostashever AS, Tai M, Kalinsky H. 1961. Effects of feeding X-irradiated pork to rats on their pyridoxine nutrition as reflected in the activity of plasma transaminase. *J Nutr* 75: 35-38.
7. Coquet B, Rondot G, Genouw P, et al. 1980. Translation: irradiated legumes; toxicity and reproduction studies in the rat. Technical Report - summary. In *WHO irradiated legumes monograph*.
8. De Knecht-van Echelen A, Van der Mevlen HC, Til HP, DeGrott AP. 1971. Multi-generation study in rats with radiation-pasteurized chicken. Technical Report No. R3622.
9. Dent NJ, Kinch DA, McGregor DB, Wickramaratne GA. 1976. 90-day toxicity and reproductive toxicity of irradiated European Plaice. Technical Report, IFIP-R-41.
10. Dent NJ, McGregor DB, Wichramaratne GA. 1977. An investigation of the elevated serum alkaline phosphatase levels in rats fed irradiated fish diets. Technical Report, IFIP-R42. In *WHO Irradiated Fish Monograph*.
11. Derse PH. 1979. Toxicity studies on rats fed a diet containing 15% irradiated Kent mangoes. IFIP-R51 Technical Report. WARF-# T-701.
12. Gabriel KL, Edmonds RS. 1976. To study the effects of radurized onions when fed to beagle dogs. *Food Irradiation Information* 6: 116.
13. Hickman BT, Parker AE. 1969. Bronchogenic carcinoma: changing concepts of management with irradiation. *J Mississippi State Medical Association* 10: 125-129.

14. Hickman JR. 1975. To assess the toxicological safety of cod treated with polyphosphate dip and subsequently irradiated to extend its storage life at chill temp by rat feeding studies. *Fd. Irrad. Inf.* (5) FAO/IAEA. Suppl. p 96.
15. Jaarma M, Henricson B. 1964. On the wholesomeness of gamma irradiated potatoes. *Acta Vet Scand* 5: 238.
16. Malhotra OP, Reber EF. 1963. Methionine and testosterone affect occurrence of hemorrhagic diathesis in rats. *American J Physiology* 205: 1089-1092.
17. Malhotra OP, et al. 1965. Effect of methionine and vitamin K3 on hemporrhages induced by feeding a ration containing irradiated beef. *Tox Appl Pharmacol* 7: 402-408.
18. McGown EL, Lewis CM, Waring PP. 1979. Investigation of possible antithiamine properties in irradiation sterilized chicken. Final Report. Presidio of San Francisco, CA, Division of Nutrition Technology, Letterman Army Institute of Research.
19. Metwalli OM. 1977. Study on the effect of food irradiation on some blood serum enzymes in rats. *Zeitschrift fur Ernährungswissenschaft* 16: 18-21.
20. Nadharni GB. 1980. Wholesomeness studies in rats frd irradiated Indian mackerel. IFIP Technical Report. R-54.
21. Read MS, Kraybill HF, Worth WS, Thompson SW, Issac GJ, Witt NF. 1961. Successive generation rat-feeding studies with a composite diet of gamma-irradiated foods. *Toxicol Appl. Pharmacol* 3: 153-173.
22. Read MS, Kraybill HF, Worth WS, Witt NF. 1958. Wholesomeness of a composite diet of frozen-stored gamma-irradiated foods fed to rats. *Fed Proc* 17: 190.
23. Tahyi EEK, Mensah N. 1979. Short-term feeding of rats on irradiated cocoa beans. Technical Report to IFIP, WHO Irradiated Cocoa Beans.
24. Vakil UK, Aravindakshan, M, Srimivas H, Chauhan PS, Sreenivasan A. 1973. Nutritional and wholesomeness studies with irradiated foods: India's program, In Radiation Preservation of Food, Proceedings Series, International Atomic Energy Agency, Viena. p 673-701.
25. Van Logten MJ, Den Tonkelaar EM, Van Esch GJ, Van Steenis G, Kroes R. 1971. The wholesomeness of irradiated mushrooms. *Food and Cosmetics Toxicol* 9: 379-388.
26. Van Logten MJ, Den Tonkelaar EM, Van Esch GJ, Kroes R. 1972. The wholesomeness of irradiated shrimps. *Food and Cosmetics Toxicol* 10: 781-788.
27. Verschuuren HG, van Esch GJ, van Kooij JG. 1966. Effect of feeding irradiated onion to consecutive generations of the rat. *Food Cosmetic Toxicology* 4: 593-596.
28. Brin M, Ostashever AS, Kalinsky H. 1961. Effects of feeding X-irradiated pork to rats on their thiamine nutrition as reflected in the activity of erythrocyte transketolase. *J Nutr* 75: 29-34.
29. Monsen H. 1960. Heart lesions in mice induced by feeding irradiated foods. *Fed Proc* 19: 1031.
30. Thompson SW, Hunt RD, Ferrel J, Jenkins ED, Nonse H. 1963. Histopathology of mice fed irradiation foods. *Technical Report #279, Project 3: 012501-A-803.*
31. Anon. 1987. Safety evaluation of 35 kinds of irradiated human foods. *Chinese Medical J* 100: 715-718.