*Journal of Radiation Industry* 3(3) : 145~160(2009)

Review Paper

# 식품의 안전성 및 안정적 식량 확보를 위한 방사선 기술의 이용현황 및 전망

변 명 우*

한국방사선산업학회

# Current Status and Prospect of Radiation Technology for the Safety and Security of Food

Myung-Woo Byun*

*Korean Society of Radiation Industry*

**Abstract - Since 1960, radiation technology (RT), which had been known as the method eliminating the biologically hazardous factors of the products in the food, medical, pharmaceutical and cosmetic industries, was comprehensively investigated. The safety of food irradiation has been throughout evaluated with scientific experiments. Recently, RT has been associated with other high technologies such as biotechnology and nanotechnology, and resulted in the innovative products. Through these fusion technology with RT, the new items with high functionality and value will be shown. But, until now, consumers' acceptance on radiation is still the problem to be solved for further development. To make the consumer correctly understand RT, the benefits and defects of RT should be informed and there should be the legislated policy for the industrialization of RT by government. Therefore, this review will introduce the current status of food irradiation in the world, the safety and national agreements and the recent results from radiation fusion technology, and suggest the further work.**

**Key words : Radiation, Food, Biotechnology**

## 서 론

현대사회의 소비자들은 식품의 안전성(safety), 편이성(convenience)과 가치(values)를 중요시하며 이러한 요소들은 식품의 선택기준과 직결되고 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. 식품가공 및 저장기술로서 지금까지 이용되어온 열처리, 냉장, 냉동 혹은 보존제, 훈증제 등의 화학약품 처리는 효과, 비용, 건전성 및 환경적 측면으로 많은 문제점이 지적되면서 적용분야의 제한을 받고 있다.

* Corresponding authors: Myung-Woo Byun, Tel. +82-63-570-3080, Fax. +82-63-570-3081, E-mail. mwbyun21@hanmail.net

최근 식품의 새로운 가공기술로서 그 사용이 확대되고 있는 방사선 조사기술은 세계보건기구(WHO)에서 이미 건전성과 안전성이 승인되어 있으며, 식품을 완포장한 상태로 연속처리가 가능하여 살균처리 후 재포장에 따른 2차 오염의 방지, 에너지의 효율 증진 및 냉온살균·살충방법으로 유해성분의 생성이나 잔류성분이 남지 않는다는 장점을 갖고 있다. 식품에 대한 방사선 조사는 주로 발아, 발근 억제, 해충, 기생충 방제 및 병원균, 부패균 등의 미생물을 제어하여 식량자원의 저장 및 위해 안전성 확보 수단으로 이용되고 있다. 최근 들어 방사선 조사기술과 식품생명공학기술을 융합하여 식품내 화학적 유해성분 제거, 고기능성 신소재 개발 등의 연구가 진행되고 있다. 방사선 기술(Radiation Technology, RT)을 핵심으로 한 융합 연구는 식품의 방사선 조사가 확대되고 있는 이 시점에서 조사식품의 가치상승 효과를 각인시킬 수 있을 것이다.

따라서 본 보문에서는 식품산업에서의 RT의 이용현황과 함께 식품·생명공학 산업에서 부가적으로 기대되는 RT의 새로운 기능으로서 식품 내의 유해물질 저감화, 고부가가치 신소재 개발 분야 등에서 진행 중에 있는 방사선 융합기술(RT-based fusion technology)의 발전 방향과 조사식품의 안전성(건전성)에 대한 국가 관리체계를 살펴보기로 한다.

## 본 론

### 1. 식품 및 공중보건산업에서 이용되는 방사선의 특성

방사선은 방사성 동위원소로부터 방출되는 α(알파), β(베타), γ(감마)선 외에도 기계적으로 발생되는 X선, 전자가속기에서 나오는 전자선(electrons), 원자로에서 만들 수 있는 중성자선 등이 있다. 이들 중 X선과 감마선은 매우 짧은 초단파장이고 높은 에너지를 갖는 전자파로서, X선과 감마선보다 파장이 긴 전자파로서 우리 일상생활에서 쉽게 접하고 있는 것으로는 microwave나 라디오/TV전파, 자외선, 가시광선, 적외선 등이 있다. 방사선은 물질을 통과하면서 물질의 원자나 원자단, 분자 등을 전리시켜 이온을 생성하는 특성을 갖고 있다. 이와 같은 특성 때문에 원래 전리방사선(ionizing radiation)이라고 부르던 것을 줄여서 방사선이라고 칭하고 있다.

감마선, 전자선, X선, 자외선, α선, 중성자선 등이 방사선의 범주에 포함된다. 지금까지 FAO, IAEA, WHO와 국제식품규격위원회(CODEX) 등 관련 국제기구에서 밝힌 "식품 및 의료제품에 안전하게 이용될 수 있는 방사선"의 종류는 감마선, 전자선, X선이 있다. 이들 방사선 가운데 식품 및 공중보건산업에서 활용되고 있는 비율은 대략 감마선이 80% 이상, 전자선이 20% 미만을 차지

**Table 1.** Comparison of various decontamination/sterilization methods

| | High pressured steam | Ethylene oxide | Gamma ray | Electron beam |
|---|---|---|---|---|
| Certainty | Relatively | Depending on the penetration of EO gas | The most | Relatively |
| Treatment parameter | Temperature, time, pressure | Temperature, humidity, time, pressure, EO concentration | Time | Time |
| Process control | Relatively easy | Complicated | Easy | Easy |
| Treatment time | Minute | Hour | Second ~ Hour | Second ~ Minute |
| Process type | Batch | Batch | Batch | Continuous |
| Properties of treated produce | Heat resistance | Too many | Radiation resistance | Radiation resistance |
| Packaging type | Gas-permeable (narrow) | EO gas permeable (narrow), re-packaging | Fully packaged (wide) | Fully packaged (wide) |
| Permeability | Weak | Impossible in sealed package | Strong | Weak |
| Reaction with materials | Gas degradation | Hydroxyethylation | Radiation degradation | Radiation degradation |
| Control after treatment | Drying/Cold | De-gassing for 1 weak | Not necessary | Not necessary |
| Safety after treatment (residual toxicity) | Non | Toxic (EO level should meet be lower than the reference) | No | No |
| Treatment cost | Low | Low (higher than pressured steam gas) | Highest | High |
| Installation cost | Low | High | Highest | Highest |

하고 있으며, X선은 진단용을 제외하고는 아직까지 실제적인 이용에 한계가 있다. 그리고 전자선은 투과력이 약하여 감마선에 비해 활용범위가 협소하여 곡류의 살충이나 표면살균, 의료제품 및 제약 등의 일부 분야에 실용화되고 있다. 그러나 전자선은 전원으로 필요할 때만 발생하고 양도 조절할 수 있기 때문에 공정제어, 신속·정확성, 에너지 효율성, 소비자 수용성 등의 측면에서 장점이 있어 현재 선진국에서는 그 활용이 확대되고 있는 실정이다. 감마선은 투과력이 강하고 완제품을 포장한 상태로 연속 처리할 수 있어 살균처리 후 재포장에 따른 2차 오염의 방지와 에너지의 효율을 높일 수 있기 때문에 산업적으로 가장 많이 이용되고 있다. 특히, 제품의 품온상승(국제적으로 건전성이 허가된 10 kGy 조사시 물과 같은 열용량을 가진 산물에서 약 2.4°C 상승)에 따른 성분의 파괴를 최소화하고 외관의 변화를 막을 수 있는 냉온살균·살충방법이며, 화학 훈증제나 보존제와는 달리 유해성분의 생성이나 잔류성분이 남지 않는다는 장점이 있고, 처리 시 환경조건의 영향을 거의 받지 않는 특징이 있다. Table 1은 현재 이용되는 살균·멸균방법들과 방사선 조사방법과의 특성 및 영향인자를 비교한 것으로서 방사선 살균·멸균이 매우 효과적인 방법임을 알 수가 있다.

## 2. 방사선 조사가 생명 시스템에 미치는 영향

### 1) 방사선이 유기물에 미치는 영향

식품 등 생물소재에 방사선 조사를 할 경우 직접 혹은 간접 작용에 의한 화학적인 변화, 즉 조사분해(radiolysis)가 일어날 수 있는데, 탄수화물, 단백질, 지방 및 기타성분이 직접작용에 의한 영향을 받거나 혹은 식품 내 존재하는 수분의 조사분해 산물을 매개로 간접작용에 의한 변화가 일어날 수 있다. 예를 들면, 육류, 가금류와 같은 식품은 간접작용을 받게 되고, 허브, 향신료와 같은 건조식품의 경우는 주로 방사선에 의한 직접적 영향을 받게 된다. 이러한 원리는 다양한 기질의 혼합물에도 적용될 수 있는데, 각 구성성분이 직접작용에 의한 영향을 받거나, 다른 성분의 반응생성물에 의해 간접작용도 받게 된다(Lee *et al*. 2000; Ahn *et al*. 2004c). 하지만 방사선 기술은 일반적으로 사용되고 있는 열처리 및 기타 식품가공방법과 비교했을 때 식품성분의 변화가 적은 것으로 알려지고 있다(Doudu *et al*. 1999; Siddhuraju *et al*. 2002). Joint FAO/IAEA/WHO Study Group은 10 kGy 이상의 고선량 방사선 조사 식품에 대한 건전성 및 안전성까지 다음과 같이 재차 확인하였다. "고선량 방사선 조사는 식품의 생물학적인 위험요소(즉, 병원성 미생물)를 제거하는 상업적 열처리 가공방법과 본질적으로 유사하고, 물리적, 화학적 유해물질의 형성에는 영향을 주지 않으며 그 분해산물은 일반 식품 내의 수준과 유사하다".

### 2) 방사선의 생물학적 작용

방사선의 생물학적 작용은 세포 구성성분에 대한 직접적인 작용과 함께 방사선에 의한 분해산물이 표적에 영향을 주는 간접작용에 의하여 결정된다. 일반적으로 방사선에 대한 가장 직접적인 표적은 DNA이다. DNA에 대한 방사선의 직접효과는 DNA 분자결합 자체의 파괴에 의하여 이루어지고 간접효과는 DNA의 주변환경을 이루는 물분자를 수소 라디칼($H^{\bullet}$), 수산 radical($OH^{\bullet}$), 수용성 전자($e_s^-$)와 같은 1차 radical로 전환시키는 작용에 의하여 이루어진다. 특히 $OH^{\bullet}$ radical은 DNA 분자의 수화 경계면에서 90% 정도의 손상율을 차지함으로써 미생물의 방사선 감수성에 가장 큰 영향을 미친다. 한편, 미생물들은 DNA의 손상에 대한 다양한 복구 시스템을 가지고 있는데 일반적으로 DNA 이중나선의 복구시스템이 결여된 미생물은 방사선 감수성이 크고 방사선 저항성 미생물들은 DNA의 복구능력이 상대적으로 큰 것으로 알려지고 있다. 또한 방사선 조사에 의한 미생물의 감수성은 미생물 고유의 특성뿐만 아니라 미생물의 생존에 영향을 주는 외부환경에 의해서도 크게 좌우된다. 즉, 온도, 기체환경, 수분활성도, pH, 식품의 화학적 성분, 미생물의 생장단계와 같은 외부환경이 미생물 세포의 물리·화학적 특성에 영향을 미쳐 방사선에 대한 미생물의 반응에 차이가 생기게 되는 것이다(Radomyski *et al*. 1994).

### 3) 미생물의 방사선 감수성

방사선 조사에 대한 미생물의 감수성은 미생물의 개체수를 1/10로 줄이는데 필요한 방사선량($D_{10}$-value)으로 표시한다. 이 값은 아래와 같이 조사선량과 미생물 생존율의 반비례적 직선관계로 나타낼 수 있다.

$$D_{10}=\frac{\text{Dose}}{(\log N_0-\log N)}$$

여기서 $N_0$는 미생물의 초기균수이고 N은 방사선 조사 후 생존한 미생물의 수이다. 미생물의 생존곡선은 shoulder를 갖게되므로 방사선에 대한 미생물의 반응은 이 shoulder의 길이(L-값)와 생존곡선의 지수적 변화인 $D_{10}$-값으로 나타내는 것이 유효하다. 때로는 log 생존곡선으로부터 미생물의 완전사멸선량(inactivation dose)을 계산하여 나타내기도 하는데 일반적으로 $10^{12}$ cells $g^{-1}$ 수준의 초기미생물을 완전 사멸할 수 있는 방사선의 선량

**Table 2.** Radiation sensitivity of various microorganisms

| Microorganisms | Sterilization dose (kGy) |
|---|---|
| Insects | 0.22～0.93 |
| Virus | 10～40 |
| Fungi (hypha) | 0.5～3 |
| Fungi (spore) | 2～8 |
| Yeast (fermentabe) | 4～9 |
| Yeast (film-forming) | 3.7～18 |
| Pathogens | |
| *Mycobacterium tuberculosis* | 1.4 |
| *Staphylococcus aureus* | 1.4～7.0 |
| *Cornybacterium diphtheriae* | 4.2 |
| *Salmonella* spp. | 3.7～4.8 |
| Gram negative | |
| *Escherichia coli* | 1.0～2.3 |
| *Pseudomonas aeruginosa* | 1.6～2.3 |
| *Pseudomonas fluorescens* | 1.2～2.3 |
| *Enterobacter aerogenes* | 1.4～1.8 |
| Gram positive | |
| *Lactobacillus* spp. | 0.23～0.38 |
| *Streptococcus faecalis* | 1.7～8.8 |
| *Leuconostoc dextranicum* | 0.9 |
| *Sarcina lutea* | 3.7 |
| Spore forming-bacteria | |
| *Bacillus subtilis* | 12～18 |
| *Bacillus coagulans* | 10 |
| *Clostridium botulinum* (A) | 19～37 |
| *Clostridium botulinum* (E) | 15～18 |
| *Clostridium perfrigens* | 3.1 |
| *Putrefactive anaerobe* 3679 | 23～50 |
| *Bacillus stearothermophillus* | 10～17 |

(12D)을 표시한다. 식품미생물은 각 분류군에 따라, 또는 같은 종일 경우라도 미생물의 생장상태에 따라 방사선에 대한 감수성이 다르게 나타난다. 여기서 분류군은 원핵세포인 세균, 진핵세포인 곰팡이와 효모, 그리고 바이러스로 대별될 수 있으며 미생물의 생장상태는 영양세포의 생장단계와 포자로 구분하는 것이 보통이다. 일반적으로는 고등 미생물일수록 방사선에 민감하며 포자는 영양세포에 비하여 방사선 저항성이 큰 것이 보통이다. Table 2에서는 주요 미생물군의 방사선 감수성을 나타내었다.

4) 식품의 안전생산을 위한 방사선 조사기술의 이용

식품산업에서의 방사선 조사기술은 병원성 미생물 및 유해 생물의 사멸에 의한 위생화, 식량자원의 장기보존 및 손실방지, 그리고 국가 간 식량교역에 따른 검역관리 기술로써 이용되고 있다. 각 식품에 대한 조사선량 범위와 주요 사용 목적을 Table 3에 정리하였다.

방사선 조사식품에 관한 초기연구는 주로 ① 농산물의 발아, 발근 억제 (Inhibition of sprouting), ② 농산물의 해충구제 (Insect disinfestation), ③ 농축산물의 기생충 사멸 (Parasite disinfection), ④ 농산물의 숙도조절 (Delay of physiological process), ⑤ 저장수명 연장 (Extension of shelf-life) 등 농산물의 보존과 국제교역에서의 안전성 확보를 목적으로 이루어졌다.

식품의 방사선 조사가 기존의 살균 기술에 비하여 식품고유의 특성변화를 가장 최소화할 수 있는 기술이라고는 하지만 조사선량, 식품의 종류 등에 따라 어느 정도의 품질변화가 수반되는 것은 사실이다. 따라서 제어하고자 하는 대상 미생물, 제어 수준, 식품의 특성 등에 따라 조사선량을 조절하여야 한다. 방사선에 의한 식품 내 미생물 살균은 그 목적에 따라 ① 방사선 완전살균 (Radappertization), ② 방사선 병원성 미생물 살균 (Radicidation), ③ 방사선 부분살균 (Radurization)으로 구분한다. 각 살균의 개념을 정리하면 다음과 같다.

(1) 방사선 완전살균 (Radappertization)

*Bacillus*속 및 *Clostridium*속 등의 내생포자를 포함한 모든 미생물이 검출되지 않을 정도로 완전살균하는 처리로서 30～50 kGy의 고선량 조사가 필요하다. 통조림 식품과 병원 환자용 무균식품, 우주인 식품, 특수스포츠 식품, 실험동물용 무균사료 (SPF 또는 Germ-free 사료 등), 의약품, 의료용품 및 식품의 포장재료 등의 살균에 적용된다.

(2) 방사선 병원성 미생물 살균 (Radicidation)

식품에 오염된 식중독균, 경구전염병균 등의 병원성 미생물을 1.0～10 kGy 조사선량 범위로서 사멸시키는 방법으로 주로 위생화를 목적으로 실시되며 세계적으로 실용화가 가장 활발한 예이다.

(3) 방사선 부분살균 (Radurization)

방사선에 의해 대상 식품의 일반 오염미생물의 생균수를 감소시켜 보존기간 또는 냉장기간을 연장시키는 처리로서 0.5～10 kGy 정도의 방사선 조사선량이 요구된다.

### 3. 방사선 조사기술의 국내 · 외 이용현황

1) 국외 현황

방사선 조사기술을 이용한 국제적 식품조사 활용 분야 변천 과정은 다음과 같다.

(1) 1960년대

군 비축식량 및 우주개발 계획 우주인 식사 프로그램에 이용

(2) 1970년대

농산물 저장 목적으로 감자, 양파 등 구근류의 발아억제, 과실 및 버섯의 숙도 지연 등에 활용 ⇒ 국내에서 물

**Table 3.** Radiation dose and purpose of food

| Food | Dosage (kGy) | Main objective |
|---|---|---|
| Meat, poultry, fish, and many other highly perishable foods | 40～60 | Safe long-term preservation without refrigerated storage |
| Meat, poultry, fish, and many other highly perishable foods | 0.5～10 | Extension of refrigerated storage below 3°C |
| Frozen meat, poultry, egg and other food liable to contamination with pathogens | 3～10 | Prevention of food-poisoning |
| Meat and other foods carrying pathogenic parasites | 0.1～0.3 | Prevention of parasitic disease transmitted through food |
| Creal, flour, fresh and dried fruit and other products liable to infestation | 0.1～0.5 | Prevention of loss of stored food or spread of pests |
| Fruit and certain vegetables | 1～5 | Improvement of keeping properties |
| Tubers (for example, potatoes), bulbs (for example, onions), and other underground organs of plants | 0.05～0.15 | Extension of storage life |
| Spices and other special food ingredients | 10～30 | To minimize contamination of food to which the ingredients are added |

류비 부담 등으로 농·수·축산물 산지의 냉장·냉동 시설보다 활성화 안됨

(3) 1980년대

세계보건기구(WHO)의 세균성 식중독 방지 분야로 활용 권고 ⇒ 향신료 및 가공식품류에 대한 살균 및 살충처리에 이용

(4) 1990년대

유엔의 국제 환경 위원회(UNEP)에서 화학약품(methyl bromide, ethylene oxide 등) 대체기술로 활용 권장

(5) 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 조사기술 도입 결정

식품의 방사선 조사관련 국제 규정의 발전사는 다음과 같다.

(1) 1980년

FAO/WHO/IAEA 식품조사공동전문위원회(JECFI), 스위스 제네바

- 평균 10 kGy까지 방사선 조사를 한 어떠한 식품도 독성학적 장애를 전혀 일으키지 않으며, 독성실험은 더 이상 필요가 없고, 영양학적 및 미생물학적 문제도 일으키지 않는다는 발표

(2) 1983년

FAO/WHO Codex Alimentarius Commission (CAC), 130개국 참가

- 방사선 조사식품과 방사선 처리시설의 운용에 관한 국제 권장 규정을 제시하기 위한 Codex식품규격(CGS)을 채택
- 1984년 Codex식품규격위원회는 모든 회원국가에 대해 이 규정이 허용되도록 추천

(3) 1997년 9월 15일~20일

FAO/IAEA/WHO Joint Study Group Meeting on High-Dose Irradiation (Wholesomeness of Food Irradiation with Doses Above 10 kGy, 스위스 제네바)

- 10 kGy 이상의 선량으로 방사선 조사된 식품에 관한 화학적, 독성학적, 영양학적 그리고 미생물학적 연구자료들을 검토한 결과, 10 kGy 이상이라도 적절한 조건하에서 방사선 조사한 식품은 안전하고 영양학적으로 적합하다고 결론을 내림
- 현행 Codex식품규격위원회의 규정을 수정하여 최대선량의 제한이 없이 식품을 방사선 조사할 수 있도록 건의함(가열이나 냉동공정을 사용할 때 최대 또는 최소 한계점이 없음)

(4) 1998년 4월 27~29일

IAEA/FAO/ICGFI Regional Workshop on Harmonized Procedures and Regulations on Irradiated Food, 서울

- 아·태지역 13개국 식품법관련 공무원 및 방사선조사기술 전문가 회의
- 지역내 방사선조사식품의 교역에 수반되는 관련법규와 검역절차의 조정

상기와 같이 방사선 조사식품의 안전성은 지난 50여년간 국제기구와 선진국의 주도로 체계적인 연구가 추진되어 FAO/WHO/IAEA에서는 10 kGy 이하로 조사된 모든 식품의 안전성을 인정하였고, 10 kGy 이상의 고선량 조사식품에 대한 안전성과 건전성에 대한 기술보고서를 각 국에 배포한 바 있다(WHO, 1999). 식품의 방사선조사 현황을 보면 세계 52개국의 200여 개의 시설에서 약 230여 종의 식품군에 대하여 방사선 조사가 허가

**Table 4.** Countries approving food irradiation and the approved items

| Country | Items | Country | Items |
|---|---|---|---|
| Argentina | 13 | Mexico | 102 |
| Bangladesh | 21 | Netherland | 19 |
| Belgium | 11 | Norway | 3 |
| Brazil | 27 | Pakistan | 87 |
| Egypt | 4 | Philippines | 3 |
| Cancada | 7 | Poland | 5 |
| Chile | 20 | South Africa | 89 |
| China | 23 | Spain | 2 |
| Cuba | 18 | Syria | 20 |
| Checoslovaquia | 2 | Thailand | 25 |
| Denmark | 2 | Turkey | 92 |
| 7Finland | 2 | England | 43 |
| France | 41 | Uruguay | 1 |
| Hungary | 13 | United State | 47 |
| India | 23 | Vietnam | 8 |
| Indinesia | 22 | Yugoslavia | 23 |
| Iran | 1 | Japan | 1 |
| Israel | 47 | South Korea | 15 |
| Iraly | 6 | Russia | 52 |
| Costa Rica | 12 | Ukraine | 47 |
| Croatia | 72 | Gana | 172 |

WHO/FAO/IAEA, CODEX: approved for all food
(2000. 5. from IAEA)

되어 있고, 주요 방사선조사 대상 식품은 향신료, 건조채소류, 근채류, 가금류 등이다(Table 4). 이상의 결론과 더불어 Codex 식품규격위원회에서는 방사선 조사식품에 대한 Codex 일반규격 및 운영규정을 채택하고 각 국의 활용을 권장하고 있다.

2) 국내 현황

1966년 방사선 농학연구소가 설립되면서 마늘, 딸기, 사과, 김치, 고구마 등의 신선도 및 저장기간 연장을 위한 실험실 규모의 연구가 수행되었고, 1970년대 초반에는 쌀, 양파, 육류, 토마토 등에 대한 감마선의 응용연구가 수행되다가 일시 중단된 이후, 1980년대부터는 한국원자력연구소가 주관이 되어 관련학계와 공동으로 감마선 조사목적별로 발아억제식품에서부터 육가공제품의 살균, 위생화에 이르기까지 다양한 농수축산식품의 산업화 기반연구가 수행되었다(Byun *et al*. 1999). 최근에는 방사선 조사를 이용한 Ready to eat 식품의 위생화, 발효식품의 저장 및 저염화, 특수식품의 제조, 기능성 소재의 개발, 화학독성물질의 저감화 분야의 연구가 광범위하게 진행되고 있으며(Byun *et al*. 2000b, 2002b; Kim *et al*. 2002, 2004a; Lee *et al*. 2002a; Jo *et al*. 2003a, 2004), 방사선 조사식품의 소비자 수용도를 높이기 위한 교육 프로그램 제작 및 홍보 분야에도 연구를 강화하고 있다.

산업적 이용은 1987년 경기도 여주에 상업적 다목적 감마선 조사처리 시설이 준공되어 현재 가동중이다. 처리용량은 평균 5 kGy를 조사 기준으로 할 때, 50톤/1일 이며 향신료 등이 국내시판용 및 원료용으로, 기타 다양한 식품 및 식품원료가 수출목적으로 방사선 처리되고 있다.

국내 식품조사 영업은 1985년 대통령령(제11717호)에 의해 식품조사 처리업이 신설된 이래 1986년 식품위생법이 개정되면서 보건사회부, 1995년 경기도청, 1998년 경인지방식품의약품안전청으로 허가관청이 이관되었고, 식품 품목별로 1987, 1988, 1991, 1995, 2004년 5차에 걸쳐 다음과 같이 허용되었다.

- 1987. 10. 16 (보건사회부 고시 제87-71호)
  감자, 양파, 마늘: 0.15 kGy
  밤: 0.25 kGy
  버섯(생 및 건조): 1 kGy
- 1988. 9. 13 (보건사회부 고시 제88-60호)
  건조향신료: 10 kGy
- 1991. 12. 13 (보건사회부 고시 제91-25호)
  가공식품 제조원료용 건조식육 및 어패류분말: 7 kGy
  된장, 고추장, 간장분말: 7 kGy
  조미식품제조원료용 전분: 5 kGy
- 1995. 5. 19 (보건사회부 고시 제95-34호)
  가공식품제조원료용 건조채소류: 7 kGy
  건조향신료 및 이들 조제품: 10 kGy
  효모, 효소식품: 7 kGy
  알로에분말: 7 kGy
  인삼(홍삼포함) 제품류: 7 kGy
  2차 살균이 필요한 환자식: 10 kGy
- 2004. 5. 24 (식품의약품안전청고시 제2004-41호)
  난분, 가공식품 제조원료용 곡류, 두류 및 그 분말: 5 kGy
  조류식품: 7 kGy
  복합조미식품, 소스류, 침출차, 분말차: 10 kGy

현재 국내에서 식품에 대한 방사선 조사기준은 식품공전에 의하여 관리되고 있다. 현행 식품공전의 "제 3. 식품일반에 대한 공통기준 및 규격 6. 기준 및 규격의 적용 7. 식품의 방사선 조사기준"의 내용은 아래와 같다.

※식품의 방사선 조사기준

(1) 사용방사선의 선원 및 선종은 Co-60의 감마선으로 한다.

(2) 식품의 발아억제, 살충, 살균 및 숙도 조절의 목적에 한하여, 식품에 방사선을 조사할 경우 다음의 기준에 적합하여야 한다.

① 허용대상 식품별 흡수선량

㉮ 감자, 양파, 마늘: 0.15 kGy 이하

㉮ 밤: 0.25 kGy 이하
㉯ 생버섯, 건조버섯: 1 kGy 이하
㉰ 난분, 가공식품 제조원료용 곡류, 두류 및 그 분말, 조미식품 제조원료용 전분: 5 kGy 이하
㉱ 가공식품 제조원료용 건조식육 및 어패류분말, 된장분말, 고추장분말, 간장분말, 가공식품 제조원료용 건조채소류, 효모·효소식품, 조류식품, 알로에분말, 인삼(홍삼포함) 제품류: 7 kGy 이하
㉲ 건조향신료 및 이들 조제품, 복합조미식품, 소스류, 침출차, 분말차, 2차살균이 필요한 환자식: 10 kGy 이하

(3) 일단 조사한 식품을 다시 조사하여서는 아니되며 조사식품을 원료로 사용하여 제조·가공한 식품도 다시 조사하여서는 아니된다.

(4) 조사식품은 용기에 넣거나 또는 포장한 후 판매하여야 한다.

(5) 조사도안

조사처리된 식품에는 다음과 같은 도안을 제품포장 또는 용기에 직경 5 cm 이상의 크기로 표시하여야 한다.

(※참고로, 최근 '식품 등의 표시기준'이 '조사처리 식품의 경우에는 조사처리업소명, 전화번호, 조사년월일, 조사선량과 조사처리된 식품임을 나타내는 표시를 하여야 하고 다음과 같은 조사도안을 소비자가 알아볼 수 있도록 표시하여야 한다.'로 개정되었다.)

국내에서는 전자선 발생장치가 eb-tech(주)에 의하여 직접 생산되고 있으나 식품분야에서의 이용은 아직 본격적인 실용화단계에 이르지 못하고 있다.

식품에 대한 방사선 조사는 1987, 1988, 1991, 1995년에 총 4차례에 걸쳐 총 18개 품목의 식품조사가 허가되어 현재 주로 수출품에 대한 상업적 식품조사처리 서비스가 이루어져 왔다. 2004년 5월 25일 식품의 방사선 조사 기준 및 규격 중 개정(안)이 식약청 고시 2004-41호로 공포되어 기존의 품목을 확대하여 시행할 법적 근거를 마련하여 식품 위생화를 목적으로 한 방사선 조사기술 이용이 점차 활발해질 것으로 기대된다.

3) 국외 이용현황

(1) 영 국

허브 및 향신료에 대한 EO gas 처리 허용기간을 1991년 1월 1일로 종료시키고, 1991년 2월 13일 이후부터 과실류, 채소류, 곡류, 구근류, 향신료, 조미류, 생선, 어패류 및 닭고기를 허용선량까지 감마선 조사 허가하였다.

(2) 미 국

농무성(USDA) 식품안전검사부(FSIS)에서는 가금육에 대하여 식인성 질병예방을 위하여 1.5~3 kGy의 상업적 조사를 승인(1992년 10월 21일)하였다. 플로리다주의 식품조사시설에서는 1992년 1월부터 양파, 토마토, 딸기, 오렌지, 쥬스, 버섯 등의 신선 농산물을 대상으로 상업적 조사가 계속되어 조사식품의 시장이 확대되고 있다. 일리노이주에서는 1993년 9월부터는 가금육에 대한 상업적조사가 시작되어 감마선 조사 닭고기가 소비자들에게 판매되고 있다. 미국에서 생산되는 향신료 및 식품첨가물 중 4만 톤 이상이 매년 감마선 조사되고 있다(L.A. Times '98. 3. 15). 클린턴 대통령의 식품질병예방정책에 따라 *E. coli* O-157 및 리스테리아 등 병원균을 살균하기 위하여 미국내 생산되는 모든 냉장·냉동 육류에 감마선 조사할 수 있도록 허가하였고('97. 12. 2, FDA), 미농무성(USDA)에서 쇠고기와 같은 붉은색 육류에 잔존하는 미생물을 박멸하기 위해 감마선 조사를 승인하였다('99. 12. 23; 02. 2, 시행). 미농무성은 2004년부터 미국내 모든 학교급식에 사용되는 모든 식육 및 그 가공품에 대한 방사선 조사기술의 사용을 승인하였다.

(3) 일 본

연간 15,000톤 이상의 감자가 감마선 조사되어 생감자 및 가공용으로 유통되고 있으며 또한 단체급식 및 외식산업증가로 인한 병원성 세균에 의한 식중독 발생과 대장균 O-157의 발생으로 인해 현재 일부 식품에 대하여 감마선 조사에 대한 규제 폐기를 서두르고 있다.

(4) 중 국

중국의 경우 IAEA에 공식 보고된 감마선 조사시설은 11개소이지만 실제 성(省) 단위에서 관리되는 30만 큐리(Ci) 용량의 감마선 조사시설은 48개소(95년 현재)이며 30만 큐리 이하의 시설까지 합하면 154여 개에 이르는 것으로 확인되고 있다. 조사처리량은 149,000톤 정도로 보고되고 있으나 그 국제교역량은 수십만 톤에 이르고 있다고 판단되며, 국제적으로 대외적인 공개를 꺼리므로 정확한 전국적인 통계가 보고되지 않고 있다.

(5) 러시아

매년 약 400,000톤 이상의 곡류가 조사 처리되고 있다.

(6) 프랑스

약 7만 톤 정도의 가금육이 매년 처리되고 있으며 그 밖에 개구리 다리, 치즈, 혈청, 향신료 등이 대량 처리되고 있다.

(7) 벨기에

벨기에에서는 「Directive 1999/2/EC」에 의해 2002년 5월 28일에 Fleurus에 IBA Mediris S.A. 조사공장이 승인되었다.

(8) 독 일

독일에서는 2002년 Bundesland Sachsen의 담당관청이 검사한 결과에서 「Directive 1999/2/EC」의 요구조건이 준수되고 있음을 확인하였다. Gamma Service에서 조사된 식품의 품목은 마른 향신 허브 및 향신료, 야채 및 야채분말, 허브차, 종자(양귀비, 참깨, 아마인) 등이 있으며 총 494.4톤에 이른다.

Bundesland Bayern의 담당관청에 의한 검사는 2002년 12월 26일 수행되었다. Isotron Deutschland GmbH 회사에서 조사된 식품의 품목과 양은 향신료와 허브가 있으며 총 300.9톤에 이른다.

(9) 덴마크

덴마크에서는 2002년에 Danish Veterinary and Food Administration (DVFA)이 「Directive 1992/2/EC」의 7조 2항에 따라 마른 향신허브와 향신료의 조사를 위한 LR Plast의 조사시설을 승인하였다.

(10) 네덜란드

2001년 10월 1일부터 2002년 9월 30일까지 네덜란드의 2개의 생산시설에서 조사처리된 식품의 품목은 향신료, 허브, 탈수한 야채, 건과일류, 가금류(냉동), 새우(냉동), 개구리 고기, 달걀 흰자, 식품 등이 있으며 양은 총 7,114.4톤에 이른다.

(11) 기 타

우크라이나, 태국, 멕시코, 캐나다 등에서는 매년 수십에서 수백만 톤의 곡류 및 향신료가 감마선 또는 전자선으로 살충 또는 살균목적으로 조사처리되고 있다.

그 외 연간 1만 톤 이상의 식품을 조사하는 주요국가는 남아프리카공화국 등이 있다. 1991년 국제원자력기구(IAEA)의 공식자료에 의하면 전 세계적으로 매년 50만 톤 이상의 식품이 조사처리되고 있다는 공식집계가 발표된 바 있으나 현재 미보고된 국가나 업체들을 감안하면 실제 처리되고 있는 양은 수백만 톤에 이르는 것으로 추산된다.

핵 청정국가인 호주는 자국내 동식물의 안전 검역을 위해 방사선 조사기술을 전면 수용하였다('02. 2.).

4) 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 대하여 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 각 국에서는 자국내 보건 위생환경의 향상과 수출주도품목의 경제적인 장점과 이익에 관련된 중요한 식품산업기술로서 감마선 조사기술의 이용은 더욱 늘어날 전망이다. 이와 더불어 우리나라에서도 식품산업에서는 필수 불가결한 식품위생기술로 평가되어 이용될 전망이다.

## 4. 방사선 조사식품의 안전성

1) 방사선 조사식품의 안전성에 대한 국제적 공인

식품에 방사선 조사 후 생성되는 방사선 분해물질이 무해하다는 실험결과는 50년 이상 세계 각지의 수많은 연구자들에 의하여 검증되었다. 이러한 실험 결과들은 WHO에서 발간한 많은 보고서를 통하여 발표되었고, 1980년 국제식품조사 공동자문위원회(JECFI: Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee on the Wholesomeness of Irradiated Food)에서는 "평균 10 kGy까지 방사선 조사된 어떠한 식품도 독성학적 장해를 전혀 일으키지 않으며, 독성실험은 더 이상 필요가 없다"는 결론을 내렸다. 1992년 WHO에서는 조사식품의 안전성을 재평가하면서 적정제조기준에 따라 방사선 조사기술이 이용된다면 영양학적으로나 미생물학적으로 전혀 문제가 없다고 발표하였으며, 안전한 식품의 조리를 위한 WHO의 황금률(The WHO Golden Rule for Safe Food Preparation)에서 "가능하면 방사선으로 처리된 신선 또는 냉동된 가금육을 선택하여야 한다"고 발표하였다.

1997년 FAO/IAEA/WHO 합동회의로 열린 "고선량(10～70 kGy) 조사식품의 안전성에 관한 전문가회의"에서는 "기존 허용기준보다 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 없다"는 결론을 내리고 WHO에서 공식 발표하였다.

2) 방사선 조사식품에 관한 최근의 논란

2-Dodecylcyclobutanone (2-DCB)

2001년 2월 13일 미국의 "Public Citizen"이라는 소비

자단체에서 미국 FDA에 제출한 "방사선 조사 식품에 의한 유전자 변형"에 관한 연구보고서로 국내·외적으로 조사식품의 안전성에 대한 논란이 다시 일었다. 논란을 일으킨 이 연구보고서는 M. Knorr 등이 방사선 조사로 인해 식육 등 고지방질 식품에서 생성되는 2-DCB라는 물질(1972년에 최초로 발견되어 1990년대에 식품이 방사선 조사되었는지 아닌지를 판별하는 표준물질로 이용되어 왔다)의 독성을 평가한 내용이다. 연구자는 *in vitro* 실험을 통해 2-DCB의 독성이 있을 수 있다는 의문을 제기하였고 미국 및 각 국의 소비자 단체가 이를 인용하여 방사선 조사식품의 안전성에 대한 의혹이 증폭되었다.

그러나 정작 논문 작성자인 Dr. Delincee, Dr. Ehlermann는 본 논문과 방사선 조사식품의 안전성과는 별개의 문제라고 입장을 밝혔으며 2001년 3월 12~16일 네덜란드 헤이그에서 개최된 Codex 회의에서 WHO 대표는 FAO/IAEA/WHO가 ICGFI Study Group에서 제시한 "어떠한 선량에서도 식품 방사선 조사는 소비하기에 안전하며 영양학적으로 적절하다"고 확인하였다. 문제 발생 후 EU에서도 이 문제에 대해 방사선 조사식품의 안전성에 대하여 전혀 문제가 없는 것으로 결론을 지었고, 그 연구결과는 현재 Journal of Food Protection이라는 국제적으로 저명한 연구 논문지에 게재될 예정이다. 최근 미국 FDA와 미국 농무성은 2002년 12월 1일부터 초등학교 및 각급 학교 단체급식에 방사선 조사된 식육을 사용하는 것을 허용하고 적극 권장하고 있다. 만약 안전성에 대한 추호의 의심이 있다면 과연 미국은 자신들의 미래인 아이들의 학교급식에 방사선 조사식품을 직접 추천할 수 있을는지 의문이 가는 대목이다.

### 5. RT-BT 분야의 새로운 적용

#### 1) 식품 유해물질의 제거기술

(1) 알러지 저감화 기술

초기 방사선 생물학 분야에서는 다양한 단백질들(대부분이 수용성이며, 쉽게 얻을 수 있는 시료를 사용하였음)이 방사선에 노출되었을 때의 변화가 연구되었다. 이들 연구에서 단백질은 방사선에 의해 2, 3차 구조가 변화된다는 것을 발견했으며, 방사선 의학 및 기초생물학 분야에서 이 결과들을 이용하여 왔다. 방사선에 의한 식품 알러젠(allergen)의 구조변화 연구는 이러한 기초 생물학 결과의 응용 선상에서 시작되었다. 식품 알러지(food allergy)의 억제를 위한 연구의 기본 개념은 식품 알러지가 혈액에 존재하는 특이항체인 면역글로불린 E형(immunogod alin E, IgE)을 매개로 하는 것이 대부분이며, 알러지의 발생기전이 IgE가 체내에 유입된 알러젠을 인식하면서 시작된다는 것을 착안하여(Metchfe 1997; Beslet *et al*. 2001; Chandra 2002; Robinson 2003; Sampson 2003, 2004) 원인식품에서 주요 알러젠을 제거하거나 식품 알러젠의 구조를 변화시켜 IgE와의 결합반응을 저해하면 억제시킬 수 있다고 가정하여 다양한 연구가 진행되었다. 이 중 방사선 기술은 전술한 바와 같이 방사선이 갖고 있는 독특한 특성인 물의 이온화 경향을 이용하여 조사시 생성된 활성화된 radical들이 단백질을 공격하여 3, 4차 구조를 변화시키고, 궁극적으로 알러젠의 표면에 있는 IgE-binding epitope(항원결정기)의 구조를 변화시켜 알러지를 억제할 수 있다는 가정 하에 연구의 타당성이 검토되기 시작하였고, 이를 증명할 연구가 여러 가지 식품 알러젠을 대상으로 시도되었다(Byun *et al*. 2000a, 2002a; Lee *et al*. 2001; Swoboda *et al*. 2002; Mine *et al*. 2003).

일반적으로 식품은 가염, pH 조절, 가열 처리 등 다양한 방법에 의해 가공되고 조리된다. 이러한 가공방법들과 방사선 조사를 병용 처리하였을 때, 알러젠의 변화가 IgE와 어떠한 반응성을 나타내는지를 관찰하는 것은 매우 중요하다. 이것은 방사선 조사로 인해 감소된 IgE의 반응성이 가열 등에 의한 타 가공처리에 의해 다시 복원되는지를 확인하여 가공식품 생산 및 기타 처리에서 방사선 조사된 원료의 식품 알러지 안전성(건전성)을 평가하기 위해 반드시 확인되어야 하는 시험이다. 계란 알러젠 중 ovalbumin과 ovomucoid를 표준 알러젠으로 사용하여, 각각 가열처리와 pH 조절시 감마선 감수성을 조사하였다. 시험 결과 방사선 조사와 가열 등의 병용 처리는 IgE 반응성을 변화시키지 않았으며, 오히려 감소시키는 것으로 나타나, 방사선 조사의 이용가능성을 더욱 확신할 수 있었다(Seo *et al*. 2004). 난백 ovalbumin과 ovomucoid를 표준 항원으로 사용하여 감마선 조사 후 환자를 대상으로 한 skin prick test 결과, 감마선 조사된 알러젠에서 피부발진이 상당히 감소된 것이 관찰되었다(Jeon *et al*. 2002; Kang *et al*. 2002; Lee *et al*. 2002b). 또한, mouse를 모델 시험동물로 사용하여 ovalbumin에 대한 과민반응을 유도한 후 처리구를 경구 투여하여 혈중 ovalbumin 특이 IgE 생성량을 조사하였을 때, 감마선 조사된 알러젠은 IgE의 변화를 나타내지 않았다. 이 결과들은 세계최초로 시도된 감마선 조사된 알러젠의 *in vivo* 안전성 평가시험 결과로서 감마선 조사로 알러젠의 알러지 유발원성이 크게 감소되었다는 것을 나타낸다.

알러지 저감화 식품을 생산하기 위해서는 산업적 실증연구가 수행되어야 한다. 이를 위해 계란을 모델 식품으로 선정하여 비교적 계란을 많이 함유하는 제품인 cake

와 cookie에 감마선 조사된 난백을 원료로 사용하여 제품을 제조하여 식품학적 품질평가 및 알러지 유발성을 시험하였다. 감마선 조사된 난백을 원료로 사용한 제품의 품질은 전혀 차이가 없거나 오히려 품질을 개선하는 것으로 나타났다. 또한, 시험 처리구를 투여한 동물에게서 알러지 증상은 관찰되지 않았으며, 현재 동물시험이 계속 진행 중에 있어 알러지 안전성에 대한 최종결과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

(2) 염지 육제품내 잔류 아질산염 및 발암성 N-nitrosamine의 제거

아질산염은 염지육제품의 첨가제로서 세계적으로 그 사용량에 대한 규제를 받고 있으며 자체독성 외에도 식품가공 및 체내위액 조건에서 식품내 2, 3급 amine과 결합하여 발암성의 N-nitrosamine을 형성하는 문제점을 갖고 있다(Bartsch *et al*. 1988; Tricker *et al*. 1989). N-Nitrosamine은 다양한 식품을 비롯하여 고무제품 및 담배연기 등에 존재하는 강력한 발암물질로서, 그 종류 및 함량에 따라 혀, 식도, 간, 폐, 신장, 방광 및 췌장 등의 신체기관에 암을 유발하는 것으로 보고되고 있다. 현재까지 N-nitrosamine 생성억제에 관한 연구는 ascorbic acid 및 tocopherol 등의 산화환원 화합물(redox compound) 또는 polyphenol류 등을 첨가하여 아질산염을 nitric oxide 형태로 환원시켜 N-nitrosamine의 형성 반응을 제어하는 방향으로 진행되고 있다. 이와 같이 N-nitrosamine 생성의 전구체로 작용하는 아질산염을 소거하고자 하는 연구보고는 많지만, 식품의 가공단계나 저장 중에 이미 생성된 N-nitrosamine을 감소 혹은 제거하는 연구는 아직까지 뚜렷한 성과를 찾아보기 힘든 실정이다. 아질산염과 N-nitrosamine은 화학적으로 광분해(photolysis) 특성을 갖는데, 이러한 점을 고려할 때 방사선 조사에 의한 조사분해(radiolysis)를 유도할 수 있다는 가설하에, 방사선 조사에 의한 식품내 유해물질 및 발암물질의 저감화 가능성을 제시하고자 하였다. 따라서 물리적 처리 방법인 방사선을 이용하여 수용액 상태의 아질산염과 N-nitrosamine에 대한 조사분해 특성 확인 후 그 분해산물을 규명하였으며, 실증 적용 시험으로 이들 화합물의 저감효과를 조사하였다.

식품에 널리 존재하며 강력한 발암성 N-nitrosamine으로 알려진 N-nitrosodimethylamine (NDMA) 및 N-nitrosopyrrolidine (NPYR)을 증류수에 용해시킨 후 감마선 조사한 결과 5 kGy의 선량에서 완전히 파괴되는 것으로 나타났으며 수용액 상태의 아질산염 또한 조사선량이 증가함에 따라 유의적으로 파괴되어 식품에서의 잔류 아질산염 소거 가능성을 제시하였다(Vermeer *et al*. 1999; Ahn 2000a, b). 감마선 조사 후 완전히 파괴된 NDMA와 NPYR의 조사분해산물을 GC/MS를 이용하여 분석, 동정한 결과, NDMA의 조사분해물은 ehtyl acetate와 2-dimethyl propanol로 구성되어 있으며, 이중 ethyl acetate의 농도가 더 높은 것으로 나타났다. Ethyl acetate는 자연계에 널리 존재하며, 산업적으로 인공 과일향 제조에 쓰일 정도로 안전한 물질이다. 일반적으로 물은 감마선 조사에 의해 쉽게 radiolysis를 일으키는데, 이때 hydroxyl radical (·OH), 전자, 수소라디컬 (·H) 등이 생성된다 (Ahn 2003). 이중 hydroxyl radical은 매우 강력한 산화제이고, 물에 의해 생성된 전자 및 수소 라디컬은 환원제로 작용한다. 따라서 식품의 대부분은 물을 함유하기 때문에 감마선 조사 동안 산화 및 환원 반응을 겪게 된다. 감마선에 의해 분해된 NPYR의 주된 조사분해물은 2-butanone과 2-methyl-6-propyl piperidine으로 동정되었다. 감마선 조사에 의해 분해된 휘발성 N-nitrosamine은 생성된 radical과 반응하여 위와 같은 화합물을 생성한 것으로 보여지며, 그 경로를 도식화하는 것은 매우 복잡할 것으로 생각된다. 또한 감마선 조사에 의해 파괴된 NDMA 및 NPYR을 위액의 pH 조건(*in vitro*)에서 나이트로화반응(nitrosation)을 시킨 결과 재축합이 관찰되지 않았지만, 아질산염이 존재할 경우 산성조건에서 pH에 따라 6~78% 가량이 재생성되는 것으로 나타났다(Ahn *et al*. 2004b). 이상의 결과를 볼 때 감마선 조사시 N-nitrosamine의 구조 중 결합세기가 가장 낮은 N-NO bond가 파괴될 가능성이 가장 높으며, 유리된 nitric oxide는 N-nitrosamine 형성에 직접적으로 관여하지 않기 때문에 본 실험의 결과에서처럼 2차 생성에 대한 가능성은 매우 희박할 것으로 사료된다. 따라서 수용액 상태에서는 저선량의 감마선 조사에 의해서도 발암성 N-nitrosamine을 제거할 수 있었고, 조사후 분해물이 자체적으로 재축합 되지 않아 식품에 대한 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

수용액 상태에서의 조사분해 확인 후, 실제식품의 적용가능성을 확인하기 위하여 유화형 소시지를 제조하여 감마선 조사후 잔류 아질산염(residual nitrite) 및 N-nitrosamine의 감소효과를 관찰하였다. 소시지에서 검출된 휘발성 N-nitrosamine은 NDMA 및 NPYR의 두 종류로서, 저장기간에 따른 함량변화를 조사한 결과, 감마선 조사 직후 소시지의 NDMA 및 NPYR 함량은 유의적으로 감소하였으며, 이러한 저감효과는 저장 4주 후에도 유효한 것으로 확인되었다. 또한 소시지의 잔류 아질산염 함량도 감마선 조사에 의해 유의적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이전 보고에 따르면 1970년대 중반 미국의 상업용 염지육제품의 잔류 아질산염 함량은 52.5 ppm

이었으나 최근 대략 10 ppm 이하로 줄었다고 보고한 반면, 캐나다의 경우 1970년대부터 1990년대까지 생산된 염지육제품의 잔류 아질산염 함량이 평균 약 43.6 ppm이었으며 그 범위는 0～206 ppm까지 검출되었다고 보고하였다. 상기 잔류 아질산염 함량의 현저한 감소는 아질산염 첨가량의 감소, 환원제인 아스콜빈산의 사용 증가, 가공공정과 배합비의 개선에 따른 것으로 결론지었다. 감마선 조사가 잔류 아질산염 함량 감소효과 뿐만 아니라 기 생성된 nitrosamine의 파괴에도 영향을 준다는 연구결과는 최종 육제품 제조 후 병원성 미생물의 제어뿐만 아니라 화학적으로 생성될 수 있는 독성물질의 제거에도 매우 좋은 효과를 얻을 수 있는 기술이라는 결론을 내릴 수 있다.

(3) 발효식품 중 유해 Biogenic amine의 저감화 기술

식품에서의 biogenic amine 생성은 주로 미생물 분비 효소에 의한 유리아미노산의 탈탄산 반응에 의한 것으로 가공 전의 농수축산물과 발효식품의 숙성 및 저장 동안 생성되는 것으로 알려져 있다(Bover-Cid *et al*. 2000; Kim *et al*. 2003). Biogenic amine은 독성 물질로서, 일반적으로 인체내의 신경 및 혈관계 등을 자극하여 식중독 증상을 유발시킬 수 있고, 휘발성 N-nitrosamine과 같은 강력한 발암물질로의 전환 잠재성을 지니고 있다. 식품에서 주로 발견되며, 여러 임상병리학적 증상을 일으키는 것으로 알려진 biogenic amine으로는 putrescine, cadaverine, β-phenylethylamine, spermidine, spermine, tryptamine, tyramine 및 agmatine 등이 있다(Stralton 1991; Silla Santos 1996). 최근 연구에 의하면 sauerkraut, 치즈 및 발효소시지 등과 같은 서양의 발효식품에 상당한 양의 biogenic amine이 함유되어 있다고 보고되고 있으며, 이에 따른 다양한 식품군에 대한 함량조사, 생성관여 미생물 탐색과 동정, 생성억제 및 분석방법 최적화에 대한 연구 등이 진행되고 있다(Fernandez-Garcia *et al*. 1995). 국내에서는 아직까지 biogenic amine 관련 연구를 찾아보기 어려운데, 특히 전통 발효식품이 발달한 우리나라의 경우 여러 식품군 및 발효식품의 biogenic amine과 관련된 다양한 연구가 매우 중요할 것으로 보이며, 젓갈류, 장류 등을 비롯한 기타 생산 유통 중인 발효식품 중에 상당량이 함유되어 있을 것으로 사료된다. 따라서 수용액에서의 biogenic amine 순수물질의 방사선에 의한 파괴여부를 확인하였고, 또한 식품내의 생성을 억제시키기 위한 방안으로서 된장을 모델식품으로 감마선 조사기술을 이용할 때 초기 발효미생물의 억제로 된장 숙성 중 미생물 작용에 의해 생성되는 biogenic amine 함량을 감소시킬 수 있다는 가설 하에 본 연구를 진행하였다(Kim *et al*. 2004).

먼저 수용액 상태의 biogenic amines (BAs)을 감마선 조사한 결과 조사선량에 따라 유의적인 감소를 보였다 ($p < 0.05$). Putrescine 및 spermine의 경우 5 kGy의 감마선 조사에 의해 완전히 파괴되었으며, spermidine은 10 kGy, β-phenylethylamine 및 histamine은 15 kGy에서 각각 완전히 파괴되어 검출되지 않았다. 또한 cadaverine, tryptamine, tyramine 및 agmatine의 경우도 20 kGy의 감마선 조사에 의해 약 95～98%의 파괴율을 보였으며, 25 kGy의 감마선 조사에 의해 완전히 파괴되는 것으로 나타나, biogenic amine의 radiolysis 여부를 확인할 수 있었다. 이후 이 기술의 실제식품 적용방안의 일환으로 된장을 제조한 후 감마선 조사하여 발효기간에 따른 된장중의 BAs 종류 및 함량을 조사하였는데, 된장에 존재하는 BAs는 putrescine (PUT), tryptamine (TRP), β-phenylethylamine (PHE), spermidine (SPD), spermine (SPM) 및 histamine (HIS) 등으로 저장기간 동안 검출되었는데, 이 중 PUT, TRP, SPD, HIS 등은 감마선 조사에 의해 그 함량이 감소하였다. PUT의 경우 감마선 조사에 의해 유의적으로 감소하였으며, 특히 발효기간 동안 15 kGy의 감마선 조사에 의해 대조구보다 40～60% 가량 감소하는 것으로 나타났다. 또한, PUT의 함량 감소는 발효 2주째부터 5 kGy 이상의 감마선 조사구에서 유의적인 차이를 관찰할 수 있었다. TRP은 대조구가 발효 2주째까지 약 두 배 가량 함량이 증가되었다가 발효기간에 따라 점차 감소하는 경향을 보였으며, 감마선 조사구는 12주의 발효기간 동안 대조구보다 유의적으로 낮은 함량을 보였다. SPD의 경우 발효 2주 이후 10 kGy 이상 감마선 조사구에서 대조구 및 5 kGy 감마선 조사구에 비해 낮은 함량을 보였다. HIS의 경우 발효기간에 따라 모든 시험구에서 그 함량이 점차 감소하는 경향을 보였는데, 발효 12주째에는 감마선 조사구가 대조구에 비해 약 21～54% 가량 함량이 감소하는 것으로 나타났다. 이상의 결과를 볼 때 된장 발효시 다종의 BAs가 생성되는 것으로 나타났으며, 감마선 조사에 의해 BAs의 함량을 저감화 시킬 수 있는 것으로 나타나 추후 감마선 조사기술 적용 최적공정 확립 등의 실용화 방안이 제시되어야 할 것이다.

(4) 체내대사 저해물질의 저감화 및 생리활성 증진효과

Phytic acid는 두류, 곡류, 채소류에 다량 존재하는 화합물로서 생체내 대사방해물질 (anti-metabolic compounds) 혹은 비영양소 (anti-nutrients) 등으로 분류된다. Phytic acid는 구조적으로 여섯 개의 인 (P)을 함유하고 있어 체내에서 Ca과 P의 불균형을 초래하고, 체내의 양이온성

미네랄을 흡착, 배설시켜 체내 필수미량원소의 생체이용성과 단백질 흡수를 저하시킨다. 예를 들면 동물사료에 단백질원으로 폐 대두박을 이용시 닭, 돼지 등의 영양부족 및 체외배설에 의한 하수의 부영양화를 초래하기 때문에 심각한 환경문제까지 야기하고 있다. 하지만 최근에는 phytic acid의 항산화성 및 항암활성 능력이 보고되어 천연의약제로의 대체방안이 모색되고 있다.

수용액 상태에서 방사선 조사시 phytic acid는 5 kGy 이하의 선량에서 쉽게 파괴되는 반면에 라디칼 소거능 및 항산화능은 조사선량에 따라 10～100배 이상 증가하는 것으로 나타났다(Ahn *et al*. 2004a). 이는 phytic acid의 구조적 특성을 볼 때 방사선 조사에 의해 O-P bond의 P가 분리되면서 조사시 생성되는 H 혹은 OH 라디칼이 구조적 치환을 가져와 생리활성 및 항산화 효과를 상승시킨 것으로 판단된다. 따라서 실제식품(곡류, 두류, 채소류) 및 폐자원에 본 기술을 적용시 체내대사이용률 및 생리활성 증진효과를 도모할 수 있을 것으로 판단되며, 현재 관심에 초점이 되고 있는 건강보조식품 및 phytochemical을 이용한 천연 의약제로서의 적용가능성을 제시할 수 있을 것이다(Rickard and Thompson 1997; Park *et al*. 2004). 또한 이 분야의 연구는 phytic acid와 유사한 성질을 갖는 비영양소 그룹인 phenolic acid, tannin 등의 화합물을 시험 중에 있다.

2) 고부가가치 기능성 소재 개발

(1) 공중보건 제품용 신소재 개발

최근 화장품, 식품, 의약품 등의 원료로 사용되는 각종 인공화합물들은 그 안전성 등의 문제로 점차 사라지고 있고 점차 녹차, 감초, 감잎 등 천연식물류에 있는 생리활성 성분에 대한 관심이 높아지면서 국내외적으로 이들 생리활성 성분을 함유한 식물을 원료로 한 소재로 이동되고 있어 고순도, 고농축의 자연 유래 소재 개발과 그 수요 또한 증가하고 있는 추세이다. 기능성 식품과 대비하여 기능성 화장품은 일반 화장품에 비해 생리활성이 강조된 화장품 또는 기능이 강조된 화장품을 말한다. 2000년 7월부터 시행한 국내 화장품법(제2조 및 동법 시행규칙 제2조)에서는 기능성 화장품을 피부 멜라닌 색소 침착을 방지하거나 엷게 하는 미백 화장품, 주름개선 제품, 일소 및 일소방지용 제품으로 정의하고 있다. 현재 국내 기능성 화장품 시장규모는 2천 7백억 원으로 화장품 총매출 3조원의 8%를 차지하고 있으며 이 중 피부 미백 화장품은 5백억 원으로 국내 기능성 화장품 시장의 19%를 차지하고 있는 것을 비롯하여 하얀 피부를 갈망하는 동아시아 및 다른 세계 시장에서 큰 관심사로 대두되고 있다. 미백 화장품이란 피부에 과도한 멜라닌 색소의 침착을 방지하거나 기존의 침착된 멜라닌 색소의 색을 엷게 하여 기미나 주근깨의 생성을 억제함으로써 피부의 미백에 도움을 주는 기능을 가진 화장품을 말하는데 피부색이 검고 칙칙해지는 원인은 피부의 표피층에 있는 색소 형성세포에서 자외선, 여성호르몬 불균형, 정신적 스트레스 등으로 필요이상의 멜라닌 색소가 과잉 생성되기 때문이다. 또한 여드름과 같은 피부질환 원인균을 제거 또는 억제하는데 사용되는 화학약품의 경우 부작용이 심하고 균 제거 이외에도 정상피부를 약화시키는 효과가 있어 부작용 없는 천연물질을 이용한 소재개발이 필요시 되고 있다(An 1998).

방사선 기술을 이용한 천연소재 생산기술은 녹차를 비롯한 국내 천연식물자원으로부터 항산화, 항노화, 미백효과 등 여러 생리작용이 확인된 기능성 천연화합물을 추출, 가공하여 화장품, 식품, 의약품 등 각종 공중보건제품의 고부가가치 원료화합물로 제조하는 기술이다(Byun *et al*. 2002c, 2004a). 천연화합물을 화장품, 식품 등 공중보건산물 제조용 원료로 사용하기 위해서는 그들의 생리활성을 유지하면서도 제품에 첨가시 제품의 특성에 영향을 미치지 않도록 무색, 무미, 무취의 상태로 정제하는 공정이 가장 중요한 요소이며, 현재까지 국내 천연자원의 우수한 기능성을 확인하고서도 산업적 이용이 제한된 것은 바로 이 정제기술의 문제점 때문이며, 이로 인해 현재 대부분의 원료용 천연화합물을 외국으로부터 고가로 수입하고 있는 실정이다. 방사선 조사기술을 이용하여 천연화합물(폴리페놀, 폴리펩타이드, 폴리사카라이드 등)의 구조를 변화시킴으로써 생리활성을 상승시키고 또한 산업적 사용의 가장 큰 제한요소였던 내추럴 케미컬의 불필요한 색소와 잔류농약을 비롯한 불순물을 제거하고 고순도, 고농도의 천연화합물을 나노사이즈로 캡슐화하여 효과의 지속성과 피부침투력을 높이는 기술이 세계 최초로 기술이 개발되었다.

현재 세계적으로 천연화합물 시장은 100억$(약 13조원)이며 매년 부가가치를 높인 원료들에 대한 수요가 급증하고 있다. 따라서 본 기술은 곧바로 상업화가 가능하여 연간 1억$(약 1,300억 원) 이상의 국내 수입대체 및 수출효과를 가져올 것으로 예상된다.

녹차, 우롱차, 감초, 감잎, 상백피, 뽕나무, 소나무잎 등의 천연자원, 인동, 울금, 인삼 등의 한약자원, 버섯, 깻잎, 상치 등 채소류, 메밀 등 곡류, 미역, 다시마 등 수산물류, 톱밥, 겨, 난각, 과일껍질, 볏짚, 멸치똥 등의 부산물은 항산화, 항노화, 항균, 항알러지, 항암, 면역증강, 조혈증진, 피부미백, 고혈압, 당뇨, 고지혈증, 동맥경화 등 기능성 식품, 화장품 및 의약품의 소재로 쓰이기에 충분한 효능을 지니고 있는 것이 밝혀졌다(Wanasundara and Shahiddi

1999; Peterson 2001; Jo *et al*. 2003b; Byun *et al*. 2004b). 특히 부산물류는 환경오염 및 부산물 처리비용으로 인하여 막대한 비용이 소모되고 있으므로 이러한 폐/불용자원을 이용한 신소재 개발은 막대한 경제적 효과를 기대할 수 있다.

(2) 불용 biopolymer 이용 환경친화적 생분해성 기능성 제품 개발

인구증가, 무역의 세계화, 저개발국가를 위시한 국민일인당 소비 에너지 및 식량의 증가로 인한 지구 자원의 유한성이 큰 문제로 대두되고 있고, 동시에 이러한 자원의 이용이 증가됨에 따른 환경보전이라는 상대적 범위가 이슈화되고 있다. 생명공학, 재료공학 및 컴퓨터과학 기술은 과학적 원리에 입각한 센서(sensor)나 예측모델을 가능하게 하였으며, 가열공정, 고압, 방사선 등의 여러 가지 전자기 스펙트럼과 clean-room 기술을 이용하여 소비자 안전성을 최대한 확보하는 병용기술을 개발 할 수 있는 특징을 갖고 있다. 특히 품질보존, 안전성확보 및 경제성을 부여하는 식품유통체계는 다양한 sensing 기술을 포장재나 저장시스템에 도입하여 달성할 수 있다. 식품 내 항산화제의 저장기간 중 유출 조절, pH 조절, 항균제제 등이 포장재에 삽입될 수 있으며 소비자는 식품이 얼마나 더 안전하게 저장될 수 있는지 확인 할 수 있는 인공지능 포장재의 개발이 시도되고 있다.

에너지 이용을 최소화하고 부산물의 재활용기술을 높이거나 또는 완전히 새로운 식품생산 및 가공기술이 개발되어 환경보전을 통한 미래의 지구를 지켜야 한다. 폐/불용자원으로부터 기능성 및 약효 함유 신소재를 개발한 후 잔류하는 polysaccharide 계열의 화합물을 이용하여 식이섬유, 기능성 올리고당 및 단당류를 제조하여 음료수, 건강보조식품 등의 소재로 다시 한번 활용할 수 있다. 기능성 올리고당은 체내에서 대사가 어려워서 칼로리화 되지 않고 충치를 예방하며 장내 유용세균의 증식인자로 이용되는 등 생리적으로 좋은 효과를 가지고 있으며, 물성면에서는 설탕에 비해 저감미로 비발효성, 보습성, 난흡습성, 청량감 부여, 침투성, 수분활성 저하, 감칠맛 보강, 갈변 방지 등 여러 효과가 발견되어 현재 연구개발 및 제품생산에 박차를 가하고 있다. 이러한 기능성 올리고당 소재 개발이 가능하게 된 것은 생명공학의 발전으로 인한 효소생산기술의 발달과 여러 가지 분리정제기술의 확립에 따른 것으로 특이적으로 어떤 중합도의 올리고당을 생성하는 가수분해 효소와 특정 위치에 작용하는 당전위효소의 이용기술 등의 발전으로 대량생산기술이 개발되고 있다.

그러나 생명공학적 기법을 이용할 때에도 물리적 배열이나 높은 수준의 고분자일 경우 효소의 침투 자체가 어려워 많은 불용소재를 이용하지 못하고 있거나 산, 알카리 등의 화학적 처리를 이용하여 전처리 한 후 효소처리하여 올리고당을 제조하고 있다. 방사선을 이용하여 물리적 성질 또는 소재를 저분자화 하여 공정에 이용하면 산, 알카리 등 환경에 문제가 되는 화학물질을 쓰지 않거나 사용량을 최소한으로 줄여주어 경제적 및 문화적 이점을 가질 수 있다.

키토산, 알긴산, 카라기난, 셀룰로오스, 펙틴, 리그닌, 이눌린 등 특히 폐자원을 이용한 소재/생산기술 개발에 역점두고 수행하여할 연구부문이다. 방사선 조사선량, 처리환경 및 이용하는 고분자화합물의 종류에 따라 corss-link나 분해가 선택적으로 일어나며, 조사선량 및 처리환경과 화합물의 적절한 선택에 의하여 토양미생물에 의해 생분해되며 경제적인 식품포장재를 개발할 수 있다.

## 결 론

식품 및 의료, 제약, 화장품 등 공중보건관련 제품의 생물학적 위해요소를 사전에 차단할 수 있는 방사선 조사기술은 1960년대에 우주인 식품의 HACCP 프로그램에 본격 도입된 이래 지금까지 어떠한 식품 및 의료, 제약, 화장품 등 공중보건관련 산업의 위생화 기술보다 가장 방대하고 체계적이며 심도 있게 연구되어 왔으며, 과학적이면서도 객관적으로 그 안전성이 확실하게 입증된 상황이다. 식품 및 의료, 제약, 화장품 등 공중보건관련 산업에서 방사선 조사기술의 확대 적용을 통한 기대 효과는 다음과 같다. 첫째, 식량자원의 장기 안전 저장을 통한 식량간접증산 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 완전밀봉포장 상태로 살균·살충할 수 있는 편리성. 다섯째, 국제교역에 있어서 법률의 조화 및 경제적 측면 등이다.

상기에서 언급한 바와 같이 국제적으로 40여 년 동안 식품 및 공중보건관련 산업에서 방사선 조사기술을 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 방사선 조사기술의 특징이 사실에 입각하여 정확하게 비교 홍보되어야 할 것이며 정부 관계당국에서도 본 기술의 사용을 위한 법적 근거 마련이 필요시 된다. 또한 지금

까지 본 기술의 연구는 정부주도 하에서 추진되었으나, 앞으로는 소비자나 기업에게 자유로운 기술선택의 기회를 제공하기 위한 공동참여 연구와 방사선 조사제품의 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.

세계최초로 국내 연구진에 의해 개발되고 있는 RT와 BT/NT (나노) 기술 등과의 융합을 통한 신기술들은 국제적으로 그 독창성이 인정받고 있고, 신기술로 개발된 식품, 의약품, 화장품용 고부가가치 천연 기능성 신소재 생산기술은 100억 달러 이상의 수출로 국내 인정업계의 생산성 제고에 크게 기여하며, 2,000억 달러 이상의 세계 시장규모에서 관련 업계에 큰 파급효과를 미칠 것으로 기대된다. 또한, 천연생리활성물질을 이용한 고효능 기능성식품/물질 개발에 있어서, 있어서 RT/BT 융합기술을 구축함으로써 방사선의 긍정적 유용성의 증대 및 방사선 이용기술 선진화에 기여할 것이며, 방사선 조사기술에 대한 소비자 수용성 증진에 기여함으로써 관련산업계의 활성화에 기여할 수 있을 것이다. 식품학적 관점에서 방사선 기술을 이용한 유해물질 제거 및 기능성 신소재 개발 등에 대한 연구의 접근은 식품의 고유한 기능을 유지하면서 식품의 가치를 최대로 부여함을 그 목표로 한다. 예를 들면 알러지 저감화 식품의 경우 연구의 기본 방향을 영양학적으로 안정하며, 알러지에는 안전한 가공방법의 개발을 목표로 식품 가공공정의 변화, 병용처리기술의 개발 등이 고려되어야 한다. 또한 방사선 조사기술을 이용하여 미생물학적, 화학적, 영양학적으로 안전한 식품을 확보하여도 방사선 조사식품에 대한 국민적 이해도와 수용성이 미약하다면 가치창출은 매우 어려운 문제이다. 따라서 방사선 조사식품에 대한 정확한 정보제공 및 올바른 이해를 위한 노력과 이 분야에 대한 지속적인 연구수행과 실용화를 위한 노력이 이루어져야 할 것이다.

## 참 고 문 헌


조경환, 육홍선, 이주운, 이수영, 변명우. 2001. 감마선 조사된 우유 알러지 환자의 IgE 결합능의 변화. 한국식품영양과학회지 **30**(3):505-509.

Ahn HJ, Yook HS, Rhee MS, Lee CH, Cho YJ and Byun MW. 2002a. Application of gamma irradiation on breakdown of hazardous volatile N-nitrosamines. *J. Food Sci.* **67**:596-599.

Ahn HJ, Jo C, Kim JH, Chung YJ, Lee CH and Byun MW. 2002b. Monitoring of nitrite and N-nitrosamine levels in irradiated pork sausage. *J. Food Prot.* **65**:1493-1497.

Ahn HJ, Kim JH, Jo C, Yook HS and Byun MW. 2003. Radiolytic characteristics of nitrite by gamma irradiation. *Food Chem.* **82**:465-468.

Ahn HJ, Kim JH, Jo C, Kim MJ and Byun MW. 2004a. Comparison of irradiated phytic acid and other antioxidants antioxidant activity. *Food Chem.* **88**:173-178.

Ahn HJ, Kim JH, Jo C, Lee JW, Yook HS and Byun MW. 2004b. Effects of gamma irradiation on residual nitrite, residual ascorbate, color, and N-nitrosamines of cooked pork sausage during storage. *Food Control* **15**:197-203

Ahn HJ, Kim JH, Kim JK, Kim DH, Yook HS and Byun MW. 2004c. Combined effect of irradiation and modified atmosphere packaging in minimally processed Chinese cabbage (*Brassica rapa* L.). *J. Food Chem.* **89**:589-597.

An BJ. 1998. Chemical structure and isolated of angiotensin converting enzyme inhibitor from the Korean green tea. *Life Resources Ind.* **2**:67-80.

Bartsch H, Oshima H and Pignatelli B. 1988. Inhibitors of endogenous nitrosation; mechanisms and implications in human cancer preservation. *Mutat. Res.* **202**:307-324.

Besler M, Steinhart H and Paschke A. 2001. Stability of food allergens and allergenicity of processed foods. *J. Chromatogr. B* **756**:207-228.

Bover-Cid S, Izquierdo-Pulido M and Vidal-Carou MC. 2000. Influence of hygienic quality of raw materials on biogenic amine production during ripening and storage of dry fermented sausages. *J. Food Prot.* **63**:1544-1550.

Byun MW, Lee JW, Yook HS, Lee KH and Kim KP. 1999. The improvement of color and shelf life of ham by gamma irradiation. *J. Food Prot.* **62**:1162-11660

Byun MW, Kim JH, Lee JW, Park JW, Hong CS and Kang IJ. 2000a. Effects of gamma radiation on the conformational and antigenic properties of heat-stable major allergen in brown shrimp. *J. Food Prot.* **63**: 940-944.

Byun MW, Lee KH, Kim DH, Kim JH, Yook HS and Ahn HJ. 2000b. Effects of gamma radiation on sensory qualities, microbiological and chemical properties of salted and fermented squid. *J. Food Prot.* **63**:934-939.

Byun MW, Lee JW, Yook HS, Jo D and Kim HY. 2002a. Application of gamma irradiation for inhibition of food allergy. *Radiat. Phys. Chem.* **63**:369-370.

Byun MW, Son JH, Yook HS, Jo C and Kim DH. 2002b. Effect of gamma irradiation on the activity of Korean soybean fermented foods, *Chungkookjang* and *Doenjang*. *Radiat.*

*Phys. Chem.* **64**:245-248.

Byun MW, Jo C, Lee KH and Kim KS. 2002c. Chlorophyll breakdown by gamma irradiation in a model system containing linoleic acid. *J. Am. Oil. Chem. Soc.* **79**:145-150.

Byun MW, Jo C, Lee JW, Jo SK and Kim KS. 2004a. Application of radiation technology to develop green tea leaf as a natural resource for the cosmetic industry. *Raidat. Phys. Chem.* **71**:487-489.

Byun MW, Jo C, Jeon TW and Hong CH. 2004b. Effects of gamma irradiation on color characteristics and biological activities of extracts of *Lonicera japonica* (Japanese honeysuckle) with methanol and acetone. *Lebensm. Wiss. u Technol.* **37**:29-33.

Chandra RK. 2002. Breast Feeding, hydroysate formulas and delayed introduction of selected foods in the prevention of food hypersensitivity and allergic disease. *Nutr. Res.* **12**: 125-135.

Doudu KG, Minnaar A and Taylor IRN. 1999. Effect of cooking and irradiation on the labile vitamins and antinutrient content of a traditional African sorghum porridge and spinach relish. *Food Chem.* **66**:21-27.

Fernández-García E, Tomillo J and Núñez M. 1999. Effect of added proteinases and level of starter culture on the formation of biogenic amines in raw milk Manchego cheese. *Int. J. Food Microbiol.* **52**:189-196.

Jeon GR, Lee JW, Byun MW and Lee SY. 2002. Reduced allergenicities of irradiated egg white ovalbumin determined by skin prick test and ELISA inhibition test. *J. Asthma. Allergy Clin. Immunol.* **22**:711-9.

Jo C, Kim DH, Shin MG, Kang IJ and Byun MW. 2003a. Irradiation effect on *Bulgogi* sauce for making commercial Korean traditional meat products, *Bulgogi*. *Radiat. Phys. Chem.* **68**:851-856.

Jo C, Yook HS, Lee MS, Kim JH, Song HP, Kwon JS and Byun MW. 2003b. Irradiation effects on embryotoxicity and oxidative properties of gossypol dissolved in methanol. *Food Chem. Toxicol.* **41**:1329-1336.

Jo C, Lee WD, Kim JH, Kim DH, Ahn HJ and Byun MW. 2004. Quality attributes of low-salt *Changran Jeotkal* (aged and seasoned intestine of Alaska Pollock, *Therage chalcogramma*) developed using gamma irradiation. *Food Control* **15**: 435-440.

Kang KO, Lee JW, Jo C, Yook HS and Byun MW. 2002. Changes of allergenicity and conformational structure of egg ovomucoid by gamma irradiation in the basic condition. *J. Food Sci. Nutr.* **7**:52-56.

Kim DH, Jo C, Yook HS, Park BJ and Byun MW. 2002a. Enhancement of preservation characteristics of *Meju*, and intermediate material for Korean legume-based fermented soy sauce, *Kanjang*, by irradiation. *Radiat. Phys. Chem.* **64**:317-322.

Kim DH, Song HP, Yook HS, Ryu YK and Byun MW. 2004. Isolation of enteric pathogens in the fermentation process of *Kimchi* (Korean fermented vegetables) and its radicidation by gamma irradiation. *Food Control* **15**:441-445.

Kim JH, Ahn HJ, Kim DH, Jo C, Yook HS, Park HJ and Byun MW. 2003. Irradiation effects on biogenic amines in Korean fermented soybean paste during fermentation. *J. Food Sci.* **68**:80-84.

Kim JH, Ahn HJ, Jo C, Park HJ, Chung YJ and Byun MW. 2004. Radiolysis of biogenic amines in model systems by gamma irradiation. *Food Control* **15**:405-408.

Lee JW, Yook HS, Lee KH, Kim JH and Byun MW. 2000. Conformational changes of myosine by gamma irradiation. *Radiat. Phys. Chem.* **58**:271-277.

Lee JW, Kim JH, Yook HS, Kang KO, Lee WY, Hwang HJ and Byun MW. 2001. Effects of gamma radiation on the allergenicity and antigenicity properties of milk proteins. *J. Food Prot.* **64**:272-276.

Lee KH, Ahn HJ, Jo C, Yook HS and Byun MW. 2002a. Production of low salted and fermented shrimp by irradiation. *J. Food Sci.* **67**:1772-1777.

Lee SY, Jeon GR, Lee JW, Oh SJ, Yook HS, Cho KH and Byun MW. 2002b. Reduced allergenicities of irradiated ovalbumin and ovomucoid Determined by skin prick test and ELISA inhibition test. *J. Allergy Clin. Immunol.* **109**:s307.

Metchlfe DD, Sampson HA and Simon RA. 1997. Food allergy: Adverse reactions to foods and food additives, Blackwell Science, USA.

Mine Y, Sasaki E and Zhang JW. 2003. Reduction of antigenicity and allergenicity of genetically modified egg white allergen, ovomucoid third domain. *BBRC.* **302**:133-137.

Park HR, Ahn HJ, Kim JH, Yook HS, Kim S, Lee CH and Byun MW. 2004. Effects of irradiated phytic acid on antioxidation and color stability in meat models. *J. Agric. Food Chem.* **52**: 2572-2576.

Peterson DM. 2001. Oat antioxidants. *J. Cereal Sci.* **33**:115-129.

Radomyski T, Murano EA, Olson DG and Murano PS. 1994. Elimination of pathogens of significance in food by low-dose irradiation: a review. *J. Food Prot.* **57**:73-80.

Rickard SE and Thompson LU. 1997. Interactions and biological effects of phytic acid. In: Shahidi F, editor. Antinutrients and phytochemicals in foods. ACS symposium series, nr 662. Wahsington, D.C.: American Chemical Society. p 294 -312.

Robinson F. 2003. Producing foods for consumers with food allergy. *Conference report of British Nutrition Foundation Nutrition Bulletin* **28**:65-67.

Sampson HA. 2003. 9. Food allergy. *J. Allergy Clin. Immunol.* **111**:S540-547.

Sampson HA. 2004. Update on food allergy. *J. Allergy Clin. Immunol*. **113**:805-809.

Seo JH, Lee JW, Lee YS, Lee SY, Kim MR, Yook HS and Byun MW. 2004. Change of an egg allergen in a white layer cake containing gamma-irradiated egg white. *J. Food Prot*. **67**:1725-1730.

Siddhuraju P, Makkar HPS and Becker K. 2002. The effect of ionizing radiation on antinutritional factors and the nutritional value of plant materials with reference to human and animal food. *Food Chem*. **78**:187-205.

Silla Santos MH. 1996. Biogenic amines: their importance in foods. *Int. J. Food Microbiol*. **29**:213-231.

Stratton JE, Hutkins WR and Taylor SL. 1991. Biogenic amines in cheese and other fermented foods: a review. *J. Food Prot*. **54**:460-470.

Swoboda I, Bufajska-Schretter A, Valenta R and Spitzauer S. 2002. Recombinant fish parvalbumins: candidates for diagnosis and treatment of fish allergy. *Allergy*. **57**:94-96.

Tricker AR, Spiegelhalder B and Preussmann R. 1989. Environmental exposure to performed nitroso compounds. *Cancer Surveys*. **8**:251-259.

Vermeer ITM, Moonen EJC, Dallinga JW, Kleinjans JCS and Maanen MS. 1999. Effects of ascorbic acid and green tea on endogenous formation of N-nitrosodimethylamine and N-nitrosopiperidine in humans. *Mutat. Res*. **428**:353-361.

Wanasundara UN and Shahidi F. 1998. Antioxidative and prooxidant activity of green tea extract in marine oils. *Food Chem*. **63**:335-342.

World Health Organization. 1999. High-dose irradiation : Wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. WHO Technical Report Series 890. Geneva.

Manuscript Received: September 25, 2009
Revision Accepted: September 29, 2009