



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2008년 8월
박사학위논문

방사선 선종에 따른 식육 및 그 가공품의
식품학적 특성에 대한 비교 연구

조선대학교 대학원

응용과학과 (식품·생명공학전공)

김 왕 근

2008년 8월

박사학위논문

방사선 선종에 따른 식육 및 그 가공품의 식품학적 특성에 대한 비교연구

김 왕 근

방사선 선종에 따른 식육 및 그 가공품의
식품학적 특성에 대한 비교 연구

*Comparison of the Effects of the Radiation Types on the Quality
Characteristics of Meats and their Processed Products*

2008년 8월 일

조선대학교 대학원

응용과학과 (식품 · 생명공학전공)

김 왕 근

방사선 선종에 따른 식육 및 그 가공품의
식품학적 특성에 대한 비교 연구

지도교수 김 경 수

이 논문을 이학박사학위 신청논문으로 제출함.

2008년 4월 일

조선대학교 대학원

응용과학과 (식품 · 생명공학전공)

김 왕 근

김왕근의 박사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	이학박사	인
위 원	KT&G중앙연구원	이학박사	인
위 원	한국원자력연구원	농학박사	인
위 원	그린피아기술(주)	이학박사	인
위 원	조선대학교	이학박사	인

2008년 6월 일

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	xi
제 1장 서론	1
제 1절 연구배경 및 목적	1
제 2절 문헌고찰	11
1. 방사선 조사식품의 경제성 및 시장 전망	11
2. 방사선 조사의 기술적 특성	19
가. 물의 방사선 분해	19
나. 방사선의 생물학적 영향	26
다. 방사선 살·멸균의 원리	30
라. 방사선이 식품성분에 미치는 영향	31
마. 방사선 화학반응에 영향을 미치는 환경요인	38
3. 방사선 선원과 선종별 특성	40
가. 감마선원 및 선종	40
나. 전자선원	41
다. X선원	44
제 2장 재료 및 방법	45
제 1절 시료의 준비	45
1. 원료육 준비	45

2. 햄버거 패티 제조	45
제 2절 방사선 조사	47
1. 감마선 조사	47
2. 전자선 조사	47
제 3절 저장성 평가시험	48
1. 시료의 가속 저장	48
2. 미생물 생육시험	48
3. 지방 산패도(TBA 값) 측정	49
4. 휘발성 염기태 질소(VBN) 함량 측정	49
제 4절 이화학적 특성 평가	50
1. 색도 측정	50
2. 경도 측정	50
제 5절 관능 평가	51
제 6절 복귀돌연변이 시험법을 이용한 단기 안전성 평가	52
1. 시험용액의 제조	52
2. 복귀돌연변이 시험	52
제 7절 검지 특성 연구	54
1. 시약	54
2. 시료의 지방추출	54

3. Hydrocarbon류 분리	54
4. GC/MS에 의한 분석	55
제 8절 통계 처리 및 결과 평가	56
제 3장 결과 및 고찰	57
제 1절 방사선 선종별 조사가 미생물 생육에 미치는 효과	57
1. 분쇄 우육 및 분쇄 돈육	57
2. 햄버거 패티	68
제 2절 선종별 조사에 의한 식육 및 가공품의 이화학적 특성변화	76
1. 일반성분의 변화	76
2. 지방 산패도의 변화	81
3. 휘발성 염기태 질소 함량의 변화	88
4. 색도에 미치는 영향	94
5. 햄버거 패티의 경도에 미치는 영향	101
6. 햄버거 패티의 관능적 특성에 미치는 영향	104
제 3절 복귀돌연변이 시험	108
제 4절 검지 특성 연구	117
1. 분쇄 우육의 hydrocarbon류 분석	117
2. 분쇄 돈육의 hydrocarbon류 분석	122

제 4장 요약 127

참고문헌 130

표 목 차

Table 1. Annual Markets (Sales Figures) and Compound Annual Growth Rate on Products of Frozen Foods (2002-2006)	3
Table 2. The Status of Registered Patents in the World with respect to the Food Categories (Items) and Radiation Types (1980~2004)	9
Table 3. The Number of Patients showing symptoms of food Poisoning in Korea (2003~2007)	12
Table 4. Cost evaluation for Irradiation with respect to the Categories of Radiations	15
Table 5. Global Market Perspective (Trends for Food Irradiation Markets with respect to the Geographic Region - US, Canada, Japan, Europe and the Rest of World Markets. It was analyzed independently with Annual Sales Figures in US Million dollar (\$) from 2000 to 2010 fiscal years) ..	18
Table 6. Spur reaction of water radiolysis by radiation	22
Table 7. List of G values (primary yield) of water radiolysis by several radiation types with different LET (Linear Energy Transfer)	25
Table 8. Formula for manufacturing hamburger patty	46
Table 9. Effects on growth of total aerobic bacteria of ground beef with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	60
Table 10. Effects on growth of total aerobic bacteria of ground pork with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	61
Table 11. Effects on growth of lactic acid bacteria of ground beef with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	64

Table 12. Effects on growth of psychrophilic bacteria of ground beef with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	65
Table 13. Effect on the growth of lactic acid bacteria of ground pork with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	66
Table 14. Effect on growth of psychrophilic bacteria of ground pork with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	67
Table 15. Effect on growth of total aerobic bacteria of beef patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	69
Table 16. Effect on growth of total aerobic bacteria of pork patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	70
Table 17. Effect on growth of lactic acid bacteria of beef patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	72
Table 18. Effect on growth of psychrophilic bacteria of beef patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	73
Table 19. Effect on growth of lactic acid bacteria of pork patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	74
Table 20. Effect on growth of psychrophilic bacteria of pork patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	75

Table 21. Contents of moisture, crude protein and crude fat of ground beef with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation	77
Table 22. Contents of moisture, crude protein and crude fat of ground pork with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation	78
Table 23. Contents of moisture, crude protein and crude fat of beef patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation	79
Table 24. Contents of moisture, crude protein and crude fat of pork patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation	80
Table 25. Contents of malondialdehyde ($\mu\text{mol}/g$) of ground beef with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	83
Table 26. Contents of malondialdehyde ($\mu\text{mol}/g$) of ground pork with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	84
Table 27. Contents of malondialdehyde ($\mu\text{mol}/g$) of beef patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	86
Table 28. Contents of malondialdehyde ($\mu\text{mol}/g$) of pork patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	87
Table 29. Contents of volatile basic nitrogen (mg%) of ground beef with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	89
Table 30. Contents of volatile basic nitrogen (mg%) of ground pork with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	90
Table 31. Contents of volatile basic nitrogen (mg%) of beef patties with different	

packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	92
Table 32. Contents of volatile basic nitrogen (mg%) of pork patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C	93
Table 33. Changes of Hunter's color values in gamma ray or electron beam-irradiated ground beef	96
Table 34. Changes of Hunter's color values in gamma ray or electron beam irradiated ground pork.	97
Table 35. Changes of Hunter's color values in gamma ray or electron beam irradiated beef patties	99
Table 36. Changes of Hunter's color values in gamma ray or electron beam irradiated pork patties	100
Table 37. Changes of hardness (<i>g</i>) in gamma ray or electron beam irradiated beef patties	102
Table 38. Changes of hardness (<i>g</i>) in gamma ray or electron beam irradiated pork patties	103
Table 39. Evaluation of sensory qualities of gamma ray or electron beam irradiated beef patties	106
Table 40. Evaluation of sensory qualities of gamma ray or electron beam irradiated pork patties	107
Table 41. Result of AMES test of 50 kGy gamma ray irradiated beef	109
Table 42. Result of AMES test of 50 kGy electron beam irradiated beef	110
Table 43. Result of AMES test of 50 kGy gamma ray irradiated pork	111
Table 44. Result of AMES test of 50 kGy electron beam irradiated pork	112
Table 45. Result of AMES test of 50 kGy gamma ray irradiated beef patties	113

Table 46. Result of AMES test of 50 kGy electron beam irradiated beef patties	114
Table 47. Result of AMES test of 50 kGy gamma ray irradiated pork patties	115
Table 48. Result of AMES test of 50 kGy electron beam irradiated pork patties	116
Table 49. Concentrations of radiation induced hydrocarbons generated from ground beef irradiated with gamma ray with under the different packaging conditions of vacuum or 100% of nitrogen gas	120
Table 50. Concentrations of radiation induced hydrocarbons generated from ground beef irradiated with electron beam with under the different packaging conditions of vacuum or 100% of nitrogen gas	121
Table 51. Concentrations of radiation induced hydrocarbons generated from ground pork irradiated with gamma ray with under the different packaging conditions of vacuum or 100% of nitrogen gas	125
Table 52. Concentrations of radiation induced hydrocarbons generated from ground pork irradiated with electron beam with under the different packaging conditions of vacuum or 100% of nitrogen gas	126

그림 목 차

Fig. 1. Water radiolysis by ionizing radiation	20
Fig. 2. Schematic picture of the process of DNA damage by ionizing radiation ·	29
Fig. 3. Major products of gamma radiolysis of glucose in aqueous solutions	32
Fig. 4. Depth Dose distribution by electron beam	43
Fig. 5. Comparison of the effect of gamma ray and electron beam radiation on the production of radiation-induced hydrocarbons in ground beef under the different packaging conditions	119
Fig. 6. Comparison of the effect of gamma ray and electron beam radiation on the production of radiation-induced hydrocarbons in ground pork under the different packaging conditions	124

ABSTRACT

Comparison of the Effects of the Radiation Types on the Quality Characteristics of Meats and their Processed Products

Kim, Wang-Geun

Advisor : Prof. Kim, Kyong-Su, Ph.D.

Department of Applied Science and Technology,

Graduate School of Chosun University

This study was conducted to evaluate the safety, physicochemical and sensory properties, and detection characteristics of minced beef and pork (raw meat), beef and pork patties (meat products) irradiated with gamma ray or electron beam at the absorbed dose from 5 to 20 kGy. The aims of this study were to prepare the government approval for the extension of food irradiation item to meat or its products, to promote the industrial application of radiation technology with the fundamental information on the diverse radiation types, and to apply basic data in policy for introduction of good irradiation practise (GIP).

Minced beef and pork were prepared in 24 hours after butchery for the experiment, and hamburg patties were manufactured by commercial methods. Vacuum packaging and 100% N₂-packaging were used for discrimination of difference between the packaging methods. Gamma (430 kCi, Co-60) and electron beam (2.5 MeV, electron accelerator) were used for food irradiation, and the absorbed doses used were up to 20 kGy under room temperature (18°C). The microbiological and sitological characteristics of the samples were observed during accelerated storage at 30°C for 10 days. The effect of radiation types and packaging methods on the quality characteristics of meat and their processed product were summarized in the table.

Summary of the effects of the radiation types and packaging methods on the quality characteristics of meats and their processed products

Classification	Radiation type	Packaging method
Reduction & growth inhibition of microorganisms	γ -ray > E-beam	N ₂ gas < Vacuum
Change of approximate composition	No difference	No difference
Increase of lipid oxidation	γ -ray > E-beam	N ₂ gas < Vacuum
Increase of volatile nitrogen compounds	γ -ray < E-beam	N ₂ gas > Vacuum
Change of color	γ -ray > E-beam	N ₂ gas < Vacuum
Decrease of hardness	γ -ray > E-beam	No difference
Deterioration of sensory properties	γ -ray > E-beam	N ₂ gas < Vacuum
Manifestation of mutagenicity	No manifestation	-
Production of hydrocarbon	γ -ray > E-beam	No difference

1. The results of the microbial growth of raw meat (minced beef and pork) and meat products (beef and pork patties) during the accelerated storage showed that the microcidal effect of gamma irradiation was superior to that of electron beam irradiation. It was also found that vacuum packaging was more effective in inhibiting the microbial growth than N₂-packaging during storage. These phenomenon was revealed as the results of the growth of lactobacillus and psychrophilic bacteria similar to those of total aerobic bacteria.
2. The effects of the radiation types and packaging methods on the approximate composition of minced meats and meat products were not observed. Also, there was no significantly different between irradiated and non-irradiated samples.
3. The 2-thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) values of all samples were significantly increased depending upon irradiation dose as well as the storage periods. Gamma irradiated samples has a little high TBARS values than those of electron beam irradiated samples. It was also found that

N₂-packaging was more effective in inhibiting the lipid oxidation than vacuum packaging. The change of volatile basic nitrogen (VBN) value was similar to microorganisms growth pattern. Namely, the extent of increase in VBN value of gamma ray irradiated samples were lower than that of electron beam irradiated samples.

4. The change pattern of color by irradiation was very different between minced beef and pork, and these results were also same to meat products. In minced beef, color values such as L* (brightness), a* (redness) and b* (yellowness) were decreased depending upon irradiation dose. Otherwise, all of color values of minced pork was significantly increased by irradiation. There were no difference between radiation types or packaging methods.
5. The hardness of beef or pork patties treated with irradiation was significantly decreased depending on irradiation dose. The hardness of vacuum packaged samples was increased by the pressure from the vacuum packaging. However, the difference between irradiation types was not significant.
6. The sensory properties such as color, chewiness, taste, and overall acceptability of beef or pork patties were decreased depending upon irradiation dose. Gamma irradiated samples has a lower sensory scores than those of electron beam irradiated samples. It was also found that N₂-packaging was more effective in minimizing the deterioration of sensorial qualities than vacuum packaging.
7. In the AMES tests of minced beef and pork, beef or pork patties treated with irradiation, any mutagenicities against *Salmonella typhimurium* TA98 and TA100 were not detected in all irradiated samples. For these reason, it was evident that irradiation did not induce mutagenicity.

8. The change of hydrocarbons by irradiation was evaluated for the detection of irradiated meat. The results showed that hydrocarbons (1-hexadecene, 6,9-heptadecadiene, 1,7,10-hexadecatriene, 1-tetradecene, pentadecane, 1,7-hexadecadiene, 1,7,10-hexadecatriene, heptadecane, 8-heptadecene) were detected in all of irradiated samples, but these hydrocarbons were not detected in non-irradiated samples. Especially, the contents of 8-heptadecene and 1,7-hexadecadiene induced from oleic acid were highest among the hydrocarbons. Gamma irradiated samples had a higher hydrocarbon contents than those of electron beam irradiated samples. But, there were no difference between vacuum and N₂- packaging. According to fatty acid compounds and degradation pathway of beef and pork, it could be deliberated that a great amount of produced hydrocarbons such as 8-heptadenene and 1,7-hexadecadien were able to be used as identification factor of irradiated meat.

제 1장 서 론

제 1절 연구 배경 및 목적

인간의 전통적인 생활양식은 인종적, 문화적, 사회적, 지리적 요인 등에 의하여 민족적, 국가적, 지역적인 고유 양식을 갖는다. 그러나 20세기 들어 과학기술의 비약적인 발전에 기인한 경제활동 규모의 확대, 교통 및 정보통신의 발달 등으로 크게 변화하였다. 이러한 생활양식의 변화는 현대인의 식생활에도 크게 영향을 미쳐 육류 소비의 증가를 가져오고 있다. 전 세계 육류생산은 1950년 이후 5배, 1970년대 이후로는 2배가 증가하였으며 2004년 육류생산량은 약 2억5천만 톤 규모이다. 이는 축산기술의 발달과 공장식 농장 경영, 과학적인 보관방법의 보급 및 다양한 조리방법과 가공품의 개발, 국제무역을 통한 육류 수급의 광역화 등에 의한 영향이라 할 수 있다.

2006년 현재 개도국의 일인당 연간 육류소비량은 30 kg이며 산업국은 80 kg을 육박하고 있다(월드워치연구소, 2006). OECD/FAO에 의하면 2016년까지 육류소비량의 전망은 선진국은 1인당 가금류의 소비증가에 힘입어 2.1 kg 증가하고 개도국은 소득 증가에 따라 3.3 kg (돈육 42%, 가금육 36%, 우육 17%, 양고기 5%) 증가할 것으로 내다보고 있다(OECD-FAO, 2005).

최근 우리나라는 소득의 증가, 교육수준의 향상, 여성의 취업증가, 주 5일제 근무의 정착 등 경제사회적 변화에 의한 독신세대와 핵가족의 증가에 따라 식생활도 간편성, 편리성을 추구하는 경향으로 변화하였다. 이는 단체급식, 즉석식품(RTE foods: ready to eat foods), 편의식품(convenience foods) 시장의 확대와 외식산업의 발달을 가져왔다. 이에 따라 식품제조 및 가공업체는 장기보존이 가능하고 바로 섭취하거나 최소한의 조리과정 만을 요하는 식품을 개발하여 시장에 출시하고 있다. 대부분의 제품은 식품 제조과정에서 생존한 병원균 등 미생물의 위협과 유통과정에서의 품질손상을 최소화하기 위한 조치로 식품위생법, 축산물가공처리법 등 관계 규정을 준수하여 식육류는 -18℃의 보관 온도 하에서 최단 4개월에서 최장 18개월 기간의 유통기간을 정하여 냉동상태로 판매되고 있다(식품저널, 2007).

우리나라 냉동식품시장 규모는 (Table 1) 총 5,536억 원으로 식품산업에서 약 2% 정도 (총 식품산업규모 : 약 29조6천억 원)이나 2002년을 기준으로 산출한 연평균성

장률 (CAGR)은 평균 7.4%로 나타나고 있어 향후 성장이 기대되고 있다. 냉동식품 중에서 면밥류 (Wheat/Rice), 기타를 제외한 모든 품목이 기호도가 높은 육가공 관련식품으로 이들 매출액이 5,170억 원을 차지하여 총 매출액의 약 93%를 점유하고 있다(한국육가공협회, 2006).

Table 1. Annual Markets (Sales Figures) and Compound Annual Growth Rate on Products of Frozen Foods (2002~2006)

(unit: million won)

Foods	2002	2003	2004	2005	2006	CAGR %
Rissole	115,901.7	133,113.2	145,509.3	223,196.9	219,977.4	17.4
Pizza	4,019.2	3,702.0	4,934.8	3,769.2	4,104.1	0.5
Fried	58,653.2	53,591.6	38,782.4	31,357.4	30,593.6	-15.0
Patty	137,151.0	127,285.2	125,338.2	136,962.1	152,098.2	2.6
Fritters	63,621.5	59,172.2	72,031.9	75,011.7	75,602.6	4.4
Croquette	2,443.9	1,881.3	2,525.5	2,708.2	2,678.0	2.3
Hot dog	6,387.2	6,720.5	6,882.1	7,134.7	7,937.4	5.6
Seasoned meat	2,505.5	1,880.6	2,561.3	5,676.0	6,923.4	28.9
Wheat/ Rice	8,815.1	8,634.6	11,194.8	15,733.2	17,110.2	18.0
Others	16,705.4	19,711.3	23,230.3	26,567.0	36,611.4	21.7
Total	416,203.7	415,692.5	432,990.6	528,116.4	553,636.3	7.4

Reference : Korean Meat Industries Association, 2006

Collective Statistics from 20 member companies of KMIA

한편 최근 식육가공업체들은 소비자의 새로운 경향인 친환경, 건강, 안전위생, 간편성 등을 우선한 Well-being이라는 새로운 소비양식에 부응하기 위하여 냉장식품(Chilled foods)의 대중화와 생산품목의 다양화를 도모하고 있다. 이를 위한 방편으로 식품변패와 병원성 미생물의 생성을 막기 위해 냉장 및 수송 장치의 온도관리를 강화하고 있다. 또한 신속한 공급과 유통을 위해 대량생산시스템, 물류자동시스템을 도입하고 있다. 냉장식품은 냉동식품에 비해 식품의 관능적, 영양적 특성 변화를 최소화하여 소비자의 기호도, 선호도, 안전성을 향상시키기 위해 생육은 $-1^{\circ}\text{C} \sim +1^{\circ}\text{C}$, 조리육은 $0^{\circ}\text{C} \sim +8^{\circ}\text{C}$ 를 유지하고 있다.

냉장식품은 보관환경이 소홀해지면 식품위해미생물이 성장하여 안전성이 저하될 수 있으므로 미생물학적 안전성을 유지하는 것이 중요한 요소이다. 따라서 냉장온도에서도 자랄 수 있는 식품위해 미생물의 성장을 염두에 두어야 한다(FDA, 1980; FAO, 1984). 특히 약산성 냉장식품의 경우 (예; meat, dough)에는 병원성 세균에 오염되기 쉽기 때문에 더욱 엄격한 위생 및 온도 관리 하에서 포장, 저장되어야 한다. 사례를 들면 미국에서는 1998과 2002년 사이에 RTE 식품의 약 5만6천 톤이 리스테리아균 (*Listeria monocytogenes*)의 오염으로 회수되었다. 이 병원균은 냉장온도에서 매우 광범위하게 증식되는 유기체로 리스테리아병을 일으킨다. 매년 2,500명의 증례가 발생하며 500명 정도가 사망하는 약 20%의 사망률을 보고하고 있다. 이러한 통계의 상당수는 RTE 식품으로부터 기인하고 있다. 표본조사에 의하면 RTE 육류 제품 2.5%, 프랑크푸르트 소시지 (Frankfurt sausage) 1.6%와 햄 5.1%, 얇게 자른 점심용 육류 등이 오염되었다고 보고했다(IFST, 2006, [Komolprasert, 2002]).

이와 같은 오염된 식육 및 그 가공품을 조리한 식품에서 발생하는 질병을 사전에 예방하기 위해서는 축산물의 원료관리, 처리, 가공·포장 및 유통 각 단계에서 오염을 방지하는 것이 매우 중요하다. 우리나라는 식품위생법 및 축산물가공처리법 등 관련 법률에서 예방 및 관리에 대한 제반 규정을 마련하고 있으며 특히, 축산물에 대해서는 1998년 축산물 위해요소 중점관리기준 (HACCP: Hazard Analysis and Critical Control Points)이 제정·시행하고 있다 (국립수의과학검역원, 2007).

그러나 이러한 법적 제도적 장치에도 불구하고 매년 식중독이 발생하고 있으며 식품의약품안전청의 공식적인 통계에 의하면(Table 3) 2007년 한 해 동안에도 발생건수는 510건, 환자 수는 9,687명에 달한다(KFDA, 2007). 이들 중 대부분이 식육 및 그 가공품의 오염과 관련된 직접 원인균인 세균성 병원균인 장관 출혈성 *Escherichia*

coli O157:H7, *Salmonella*, *Listeria*, *Staphylococcus aureus* (MRSA), *Bacillus cereus*, *Campylobacter*, *Clostridium botulinum* 등에 의한 것이었다. 이 밖에 바이러스인 *Norovirus* 와 버섯, 복어, 조개 등에 의한 자연독 식중독, 화학물질에 의한 화학성 식중독 등이다.

식품산업에 있어서 식중독의 원인이 되는 병원성 미생물의 성장을 지연시키거나 차단하기 위한 방법으로 건조, 훈연, 염장 등과 같은 종래의 방법에서 발전하여 열살균법, 통조림화, 냉장, 냉동 및 화학 방부제 사용 등 물리화학적 살·멸균기술이 이용되고 있으나 1990년대 들어 세계 각국에서 방사선 조사가 널리 활용되고 있다. 이는 오랜 기간의 연구결과를 바탕으로 병원성 세균 및 바이러스의 대부분이 1~3 kGy 정도의 방사선 조사를 통해 살·멸균이 가능하고 후술하는 세계보건기구(WHO) 등 국제기구에서 식품의 독성학적 안전성, 미생물학적 안전성, 영양학적 적격성이 확보되었기 때문이다(WHO, 1992).

미국은 경우에는 1993년과 1997년에 *E. coli* O157:H7균에 오염된 햄버거 패티의 유통으로 인한 식중독 발생 및 사망사건을 계기로 식육에 대한 방사선 조사에 대한 활발한 연구를 진행하였다. 2000년 미국 식품의약품청 (USFDA)은 그 동안의 연구결과를 바탕으로 냉장육 4.5 kGy, 냉동육 7.0 kGy의 조사규격을 제정하고 방사선을 조사한 냉장·냉동육의 유통을 허가하여 냉장육의 유통이 일반화되고 있다(USFDA, 2006). 영국의 경우에는 1991년 식품안전법에서 식육에 대해 7.0 kGy 조사를 승인하였다(IFST, 2006).

방사선 조사기술의 큰 장점은 식품을 완전히 포장한 상태에서 처리할 수 있는 위생화 기술로서 미생물 및 해충에 의한 이차적인 오염이 없이 안전하게 생산할 수 있는 점이다(Kwon *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 2005b). 방사선 조사는 식품의 맛을 잃게 하거나 상하게 하는 생물학적 프로세스를 조절 할 수 있는 매우 효과적인 방법이다(Suresh, 2005; Miller, 2005). 또한 방사선을 조사할 때 방사선에 의한 온도상승은 미미하여 품질, 성분 등의 변화를 수반하지 않기 때문에 냉장 및 냉동식품의 살균, 멸균에 있어 비가열적인 처리가 가능하다는 점이다(林徹, 2004). 아울러 방사선 (감마선, 전자선, X선 등)이 식품에 균일하게 투과하기 때문에 균일처리 및 포장처리가 가능하고 연속적으로 대량처리가 용이하다는 특징이 있다.

이와 같이 식품의 가공, 저장 및 위생화 방법으로 알려진 방사선 조사기술은 식품의 저장기간 연장, 살충, 살·멸균, 건조식품의 물성개선 등에 효과가 탁월하다는 것

이 인정되고 있다. 더욱이 방사선기술을 이용한 식품조사는 화학약제 등을 사용하지 않기 때문에 약제에 의한 환경오염과 식품에 대한 약제 잔류가 없는 환경 친화적 처리방법으로 인식하고 있다. 종래의 살균을 위해 사용된 에틸렌옥사이드 (ethylene oxide : C₂H₄O)는 식품 중에 잔류하여 인체에 암 등을 유발할 가능성이 있기 때문에 사용이 제한되고 있다. 또한 병해충의 구제를 위해 훈증제로 쓰이던 취화메틸 (CH₃Br)은 유엔환경보호위원회 (UNEP)에서 지구의 오존층 파괴물질로 지정되어 검역 등 일부 용도에만 한정되어 있다. 선진국은 2005년부터 사용이 금지되었으며 개도국은 2015년까지만 허용하고 있다.

방사선을 이용한 식품의 위생화 기술에 대한 관심은 1896년 독일에 의해 선보였고(Stewart, 2004) 1920년대 초기에 시작됐다. 미국은 1950년대와 1960년대에 미국의 Natick Soldier 센터에서 군용양식에 대해 저선량 및 고선량의 조사실험을 실시하였으며 비슷한 시기에 영국은 저온 연구국 프로그램 (Low Temperature Research Station programme)으로 저선량 저온살균에 집중하였다(Hannan, 1955). 1980년대부터는 연구결과가 실용화되어 전 세계에서 산업적으로 활용되고 있다.

방사선 조사식품의 건전성은 세계보건기구 (WHO), 국제식량농업기구 (FAO), 국제원자력기구 (IAEA), 세계무역기구 (WTO) 및 미국 식품의약품청 (USFDA) 등에서 식품의 보존 및 위생화 수단으로 그 건전성을 공인하였다(WHO, 1981, 1992; ICGF, 1994; Thayer *et al.*, 1994; Kyzlink, 1990). 세계보건기구(WHO)는 1999년에 10 kGy를 초과한 선량으로 조사한 식품의 건전성과 최고선량을 규정할 필요성 여부를 검토할 목적으로 최고선량에 관한 전문가위원회를 개최하였다. 이 위원회는 “우수제조규범 (GMP: Good Manufacturing Practice)을 전제로 하여 의도한 기술상의 목적을 달성하기 위해서 적절한 선량을 조사한 식품은 적절한 영양을 갖고 안전하게 섭취할 수 있다”는 결론을 내렸다(WHO, 1999). 한편 Codex (FAO/WHO 합동 식품규격위원회)는 1983년에 10 kGy 이하의 조사를 인정하는 Codex 일반규격을 제정한 바 있으며 2003년에는 기술적인 필요성이 있으면 10 kGy 이상의 조사도 인정하는 Codex 규격을 채택하였다(Codex, 2003a, b).

현재 세계적으로 많은 나라에서 그 건전성과 경제성이 공인되어 52개국에서 250여종의 식품에 방사선 조사를 허용하고 있다. 이들 국가 중 30여개 국가에서는 상업적 규모로 실용화되고 있다(GIA, 2005). 우리나라는 1991년에 일부식품에 대해 조사가 허용되었다. 2004년에는 허용대상 식품이 확대되어 현재는 26개 품목에서 방사선

식품조사가 실시되고 있다(식품공전, 2007).

우리나라는 방사선 이용기술 분야에 있어서 선진국과 비교하여 전반적으로 기술개발이 낙후되어있기 때문에 앞으로 기초과학, 공업, 의료, 농업 분야 등 다양한 산업분야에서 그 이용을 촉진하고 관련기술의 자립을 위해서는 우선 기술개발에 대한 정부의 지원확대가 필요하다고 인식되고 있다.

과학기술부(현 교육과학기술부)는 제3차 원자력진흥종합계획(2007~2011)에서 원자력을 포함한 방사선 이용기술분야에 대한 진흥정책 및 지원방안을 밝히고 있다. 동 계획에서는 방사선 및 방사성동위원소 이용진흥분야의 정책목표를 “방사선 이용확대를 통한 국민 보건증진과 삶의 질 향상”으로 정하였다. 주요 추진과제로 방사선 산업의 육성을 위한 지원제도의 정착에 두고 방사선 조사식품의 활성화를 위한 세부 실천과제를 마련하였다. 그 내용으로는 국제협약 이행을 위한 식품 안전관리 및 공급체계와 관련한 법적·제도적 추진근거를 마련하고 축육 등에 대한 식품류의 방사선 조사 허가품목을 확대하는 시책 등이 포함되어 있다. 이와 함께 방사선 조사식품의 검지기준을 도입하고 산업화 촉진을 위하여 방사선 조사시설의 시설 안전규제의 합리화를 도모하며 방사선 식품생명 및 생물공학분야의 원천기술개발 등을 추진하기로 하였다. 구체적인 기술개발 분야에 대해서는 원자력 및 방사선이용과 관련된 전반적인 연구개발계획을 담은 원자력연구개발 5개년계획(2007~2011)에서 정하였다. 동 계획에서는 방사선 이용분야를 중요시하여 사회적 수요에 부응한 방사선융합기술개발을 전략적으로 추진하고 방사선 식품조사 분야의 연구개발도 활성화하기로 하였다(과학기술부, 2007).

한편 보건복지부 (현 보건복지가족부)는 원자력진흥종합계획에서 도입키로 한 국제적인 방사선 조사식품의 검지기준으로 유럽표준분석법 (CEN standards) 및 Codex 표준분석법으로 채택된 검지법 (CEN standards 10종류, 1996~2004; Codex standards 9종류, 2001~2003)중에서 우선 광자극발광법 (Photo Stimulated Luminescence : PSL), 열발광법 (Thermo-Luminescence : TL) 등 2종류의 방사선 조사식품 검지법을 채택하고 2007년 4월 식품공전을 개정·고시하였다. 동 고시에는 건조향신료 및 이들 조제품 등 7종의 식품 등에 대하여 검지법을 적용하기로 하였으며 그 시행 시기는 산업계의 준비기간 등을 감안하여 2010년 1월 1일로 정하였다(보건복지부, 2007).

국가계획인 원자력진흥종합계획 등에서 추진하기로 한 방사선 조사식품 분야의

진흥을 위해서는 정부는 물론 관련 산업계, 연구계, 학계 등의 역할 분담과 상호 협력이 중요하다고 사료된다. 정부는 선진국의 사례 조사 및 법제 연구 등을 추진하여 관련 제도의 도입 및 법규 등을 조기에 마련하여야 할 것이며 산업계는 향후 식육 및 그 가공품에 대한 방사선 조사 허가품목의 확대를 대비하여 상업적 이용이 활성화될 수 있도록 시설의 도입과 상업적 서비스제공 방안 등을 강구하여야 한다. 이와 함께 학계 및 연구계에서는 방사선 조사식품의 안전성 제고와 원활한 공급체계의 확립을 위해 정책연구 등을 통하여 정부의 관련 제도 도입과 법제화 등을 지원하고 방사선 식품조사 분야가 산업의 한 축으로 성장할 수 있도록 실용화 연구개발을 추진하여 관련 연구 성과의 산업체로의 이전을 활성화시켜야 할 것이다.

특히 이들 관련 주체들이 역할 분담을 통해서 추진하여야 할 여러 분야 중에서 핵심이 되는 과제는 식육 및 그 가공품에 대한 식품조사를 조기에 허용하는 것과 식품공전에서 방사선의 선원과 선종을 코발트 60 (^{60}Co)과 감마선만으로 제한하고 있는 것을 선진국 수준으로 다양화하는 것이 우선되어야 할 것이다. 이는 식육 및 그 가공품에 대한 식품조사가 1990년대부터 미국, EU, 인도, 브라질, 남아프리카, 태국 등 선진국 및 개도국에서 이미 시행되어 식중독 예방을 통해 국민보건에 이바지하고 있으며 방사선 선원과 선종의 이용을 확대하고 있고 2000년대 초부터는 세계 각국이 10 MeV 이하의 전자선과 5 MeV 이하의 X선을 이용한 식품조사를 허용하고 있기 때문이다(GIA, 2005).

세계적으로 식품조사에 이용되고 있는 방사선의 선종별 활용현황을 추정할 수 있는 국내외 특허 등록현황을 살펴보면(Table 2) 감마선은 54%인 87건, 전자선은 23%인 37건, 감마선, 전자선, X선 등의 병행이 23건이다. 전체적으로 전자선 사용은 감마선에 비해서는 낮은 편이지만 전자선 조사도 일반화되고 있는 추세임을 나타내고 있어 전자선 조사의 도입 타당성을 설명해주고 있다(한국원자력연구원, 2007).

Table 2. The Status of Registered Patents in the World with respect to the Food Categories (Items) and Radiation Types (1980~2004)

Food Items	γ -ray	E-beam	X-ray	γ -ray/ E-beam/	γ -ray/ E-beam/ X-ray	α -ray/ β -ray/ γ -ray	Other	Total
Chemical Incorporated	6	2			1			9
Functional Food	16	4			2	1		23
Ingredient Powder	5	3			1			9
Processed Food	14	4		3	1			22
Packing Materials	6	3		6	4			19
Fruit/Vegetables/ Plants	6	3						9
Protein	2	9			1			12
Mushroom	6				1			7
Dairy Product	2	1			3			6
Fish Shellfish	1			2			1	4
Corn	4	2						6
Meat	7	3			1	1		12
Fodder	2	3		1	1			7
Ferment	9		2					11
Other	1			1	1	1		4
Total	87	37	2	13	17	3	1	160

Reference : Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), 2007

그 동안 국내외 여러 연구자들에 의해 감마선, 전자선조사를 통한 식품의 저장성 및 위생화 (살균 등) 연구, 가공적성 연구, 안전성 연구 등이 수행되었다. 그러나 본 연구에서 시도한 식육 및 그 가공품에 대해 동일한 시료를 포장방법을 달리하여 중선량부터 고선량까지 감마선과 전자선을 조사하여 보고한 연구사례는 찾아보기 힘든 실정이다. 다만 저장성 연장 및 위생화 연구에서는 감마선을 조사한 우육, 분쇄돈육, 시판 양념갈비, 햄버거 패티 등과 전자선을 조사한 분쇄돈육, 돈육 어깨살, 돈육등심, 비타민 E 식이 수송아지 분쇄육 등을 연구하였다. 또한 감마선 및 전자선을 병행하여 조사한 냉동우육, 육류 등에 대해 중선량 (1~10 kGy) 연구를 수행하였다(Chawla & Chander, 2004; Gomes, 2003a; Kanatt *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2004, 2005a). 가공적성 연구에서는 감마선을 조사한 bologna 소시지와 항산화제 (BHA : butylated hydroxyanisole, AP:ascobylpalmitate, TOC: α -tocopherol, CAR: β -carotene) 첨가 햄버거 패티, luncheon meat 등에 대한 중선량 (1~10 kGy) 연구, 로즈마리 추출분말 병용처리 햄버거 스테이크에 대한 중고선량 (5~20 kGy) 연구, 냉동 치즈볼에 대한 연구 등이 보고되었다(Al-Bachir & Mehio, 2001; Kang *et al.*, 2007; Kanatt *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2005a, 2004a). 안전성 연구에서는 감마선 중선량 (1~3 kGy) 조사에 의한 붉은 (양념) 쇠고기와 햄의 유전독성학적 평가 (AMES test) 및 동물성 식품에 접촉시킨 병원균의 감수성 연구 등을 실시하였다(ICGFI, 1994).

이에 본 연구에서는 식육 및 그 가공품 중 소비가 확대되고 있는 분쇄 우육, 분쇄 돈육과 대표적 즉석·편의식품인 햄버거 제조용 우육 패티, 돈육 패티에 대해 감마선 및 전자선을 중선량부터 고선량까지 (1~20 kGy) 조사하여 저장성, 이화학적 특성, 관능, 안전성 및 검지특성을 평가하였다.

본 연구 결과는 향후 정부의 식육 및 그 가공품에 대한 식품 조사품목 확대 허용 및 조사 선종의 다양화에 대비하고 우수조사기준 (GIP: Good Irradiation Practise) 도입 등을 위한 정책적 기초자료로서의 활용과 함께 관련기술의 산업화 촉진을 위한 실용화를 목적으로 연구하였다.

제 2절 문헌고찰

1. 방사선 조사식품의 경제성 및 시장 전망

오염된 식품에 의해 발생하는 질병에 대한 문제는 식품의 제조, 보존, 유통 과정에서 고도의 위생화 기술 적용, 공중보건과 관련한 제반 식품위생 안전시스템 확립, 그리고 의학기술의 비약적인 발전에도 불구하고 범지구적인 중대한 경제사회적 문제로 대두되고 있다. 세계적으로 가장 큰 경제적인 관심사는 매년 62억US\$에서 362억US\$에 이르는 생산성 손실 및 의료비용 등으로 지불하는 고유의 사회적 비용이다. 보건위생의 최고 선진국이라 할 수 있는 미국에서도 매년 7,000만 명이 병원성 미생물에 의해 질병에 걸린다고 보고되었으며 약 32만4천 명이 병원에 입원하고 있다. 또한 매년 5,000여 명이 식중독의 원인으로 사망한다고 추정하고 있다(GIA, 2005).

우리나라도 2005년을 기준으로 추정한 식중독 환자 수는 7,038,861명으로 동년도 인구의 약 14.9%에 해당하며 이중 입원환자는 225,242명으로 보고하였다. 이에 따른 생산성 손실, 의료비용, 역학비용, 여가비용 등 사회적 손실 비용은 약 1조6천억 원으로 계산하고 있다. 가장 큰 손실은 생산성 손실로 1조2천억 원 (74.6%)이며, 의료비용은 4천2백억 원 (24.8%), 역학비용은 0.01%, 여가비용은 0.6%로 추정하였다. 이와 함께 단체급식으로 인한 식중독을 총 식중독의 65%로 추산하면 사회적 손실비용을 1조281억 원에서 1조320억 원에 이르는 것으로 추정하였다(이계임 등, 2007)

Lee *et al.* (2007)의 추정 자료는 식품의약품안전청 등 보건당국이 발표한 실제 통계 (Table 3)와는 환자 수에서 큰 차이를 보이고 있다. 이는 연구자들이 비용 산출을 위해 추정된 식중독 발생환자 수로부터 발병률 자료를 이용하여 환자수와 입원율을 산출하여 입원 환자 수를 추정하였다고 밝힌 바 있다.

Table 3. The Number of Patients showing symptoms of food Poisoning in Korea (2003~2007)

Year	2003	2004	2005	2006	2007
<i>Salmonella</i>	416	839	753	576	1,497
<i>MRSA</i>	808	763	863	1,924	843
<i>Vibrio vulnificus</i>	732	300	663	547	634
<i>Bacillus cereus</i>	198	84	24	59	50
<i>Clostridium perfringens</i>	12	680		160	81
<i>Clostridium botulinum</i>	3				
<i>Campylobacter jejuni</i>	215	175	175	53	449
<i>Enteropathogenic E. coli</i>	1,502	2,043	1,883	2,832	1,945
<i>Bacillus others</i>	226	1,156	45	5	
<i>Sub total</i>	4,112	6,040	4,406	6,156	5,303
<i>Norovirus</i>	1,442	922	719	3,338	2,345
<i>Virus others</i>	164	485	25	33	32
<i>Sub total</i>	1,606	1,407	744	3,371	2,377
<i>Chemicals</i>			8	14	
<i>Natural toxins</i>	11	15	3	4	22
<i>Unknown cause</i>	2,180	2,926	550	1,288	1,788
<i>Total</i>	7,909	10,388	5,711	10,833	9,686

<Source: Korea Food & Drug Administration (KFDA), 2007>

전술한 식중독에 의한 막대한 사회적 손실을 줄이는 위한 사전 예방책의 하나로 는 식품을 병원성 미생물의 오염으로부터 차단하는 효율적인 살·멸균 방법의 이용 이다. 국제식품조사자문그룹 (ICGFI : International Consultative Group on Food Irradiation)이 제시한 육류(가금류 포함) 및 어패류의 살·멸균 처리에 있어서 방사 선 조사와 타 처리 방법과의 비교 자료에 의하면 방사선 조사는 적용범위가 넓고 국제적으로 인정되어 있으며 조사장치에 의한 환경영향이 적고 에너지 소비가 또한 적다는 장점을 들고 있다. 특히 가격 (Cost)면에서 “단위품목당 가격이 저렴하고 고가의 설비투자는 문제가 되지 않는다. 다만 포장가격에 영향이 있다”라고 하였다 (ICGFI, 1998).

이러한 경제성에 대한 검토 결과에도 불구하고 방사선 조사시설을 구축하기 위해 서는 시설운전에 대한 안전조치가 강구되어야 하기 때문에 상당한 초기 투자비가 소요되어야 한다는 점이다. 즉 조사시설 내 작업인력의 출입상황, 선원상태, 선원 보 관 수조의 수위·수질상태 (감마선 조사시설인 경우), conveyor belt 구동 안전성, 차 폐 상태 등을 점검하여 정상적으로 작동하기 위한 조건이 만족되지 않는 경우 자동 적으로 관련 장치를 작동할 수 없도록 하는 interlock system의 구비와 그 밖의 경 보시스템, 중앙 집중제어시스템 설치 등이 조사시설 구축 시에 포함되어야 하기 때 문이다. 미국의 경우에는 2005년을 기준으로 전자선 조사시설의 구축에 필요한 금액 은 4~5백만 US\$, 감마선과 X선 조사시설은 5.75~17백만US\$ 정도이다(Table 4).

그러나 동 조사시설은 우육과 가금류를 기준으로 1개소 당 연간처리량은 무려 45,360~998,000톤에 달하여 대규모 살·멸균 처리가 가능하므로 식육 1kg당 조사비 용도 최소 0.011 US\$에서 최고 0.046 US\$ 정도밖에 소요되어 않음을 알 수 있다(원 화로 환산할 때 11~46원 상당). 따라서 방사선 식품조사는 매우 저렴한 비용으로 식육의 위생화를 통한 식중독 예방에 기여할 수 있어 타 살·멸균처리 기술과 비교 하여 충분한 경쟁력은 물론 경제성이 있다고 할 수 있다.

만약 미국과 같은 동일한 조사시설을 우리나라에 적용할 경우 2006년 국내에서 판매된 냉동식품 중 패티류 33,023톤 (한국육가공협회, 2006)정도는 전자선 조사시 설 단 1개소만으로도 조사 처리가 가능할 것으로 사료된다.

2001년 미국 질병예방관리센터 (CDC)는 만약 가금육을 포함한 식육에 방사선 조 사기술을 50% 수준으로 적용할 경우 미국 내 식중독 발생환자는 88만 명 이하로 사 망자는 350명 이하로 낮출 수 있다고 보고하여 방사선 조사기술의 이용이 식품의

안전유통과 위생화에 큰 효과가 있음을 인정하였다. 실제로 미국 농무성 (USDA)은 2002년 말까지 자국 내 학교급식에 사용되는 모든 식육 및 그 가공품에 대한 방사선 조사를 승인하였으며(2002. 10. 25.) 학교급식에서의 안전위생 확보를 위해 방사선 조사식품의 사용을 권고하여 2004년부터 시행에 들어갔다. 특히 캘리포니아 주정부는 “방사선 조사식품에 대한 캘리포니아 학교점심 안전조례 (California Safe School Lunch Act)”를 제정하여 시행하고 있다(GIA, 2005).

우리나라도 사례로 든 미국의 경우와 같이 식육 및 그 가공품에 대한 방사선 조사기술의 도입과 편의식품 및 단체급식 등에 대한 조사식품의 공급이 조기에 이루어진다면 식중독에 의한 막대한 경제사회적 손실비용을 최소화할 수 있을 것이다.

Table 4. Cost evaluation for Irradiation with respect to the Categories of Radiations

Technology	Cost (US\$)	Annual Capacity (meat/poultry)	Cost per Kilogram ¹⁾ (in cents)
Electron Beam Irradiation	\$4 ~ \$5 million	100 million pounds (≒ 45,360 ton)	1.147 ~ 3.441 (≒ 11 ~ 34₩)
Gamma Irradiation/ X-ray Irradiation	\$5.75 ~ \$17 million	220 million pounds (≒ 99,792 ton)	1.835 ~ 4.588 (≒ 18 ~ 46₩)

<Source: Food Irradiation Trends, A Global Strategic Business Report October 2005>

¹⁾ For US market, the cost estimated per Pound (of the Source data) is converted into that per Kilogram using the exchange rate of 1 US \$ equal to 1,000 ₩.

한편 세계무역기구 (WTO)는 가맹국의 위생과 식물방역조치로 2003년 식품검역조치에 관한 국제기준인 “위생과 식물 방역조치에 관한 협정 (SPS : Agreement on the Application of Sanitary and Phytosanitary Measures)”을 제정하여 “검역조치로서의 방사선조사 사용지침 (ISPM No18 : Guidelines for the use of irradiation as a phytosanitary measure)”을 정하였다. 또한 “무역상 기술적 장해에 관한 협정” (TBT : Technical Barriers on Trade)을 체결하여 SPS 협정에서 규정되지 않는 무역상의 여러 상황들을 보완하기 위해 기술적인 요구를 무역장벽으로 하는 것을 방지하고 있다(日本 農林水産省 植物検疫所, 2007). 이에 따라 앞으로 방사선 조사식품은 국제시장에서 원활한 유통이 기대되고 있으며 관련 산업에의 적용도 더욱 가속화될 전망이다.

2007년 방사선 조사식품의 세계시장 규모는 12억9,887만 US\$이며 2010년에는 19억324만 US\$ 규모로 예측하고 있다(Table 5). 2007년을 기준으로 한 시장점유율에서는 미국이 32.7%, 캐나다가 9.3%, EU가 12.5%, 그 외 국가들이 47.5%를 차지하고 있으나 2010년에는 미국 30.1%, 캐나다 7.7%, EU 11.0%, 그 외 국가는 51.2%를 점유할 것으로 예측하고 있다. 이들 중에서 그 외 국가점유율에는 우리나라와 중국, 인도, 브라질 등 신흥개도국들이 포함되어 있어 이들 국가들의 성장전망은 매우 밝다고 할 수 있다. 또한 세계시장의 연평균성장률 (CAGR)은 전체 36.12%를 차지하고 있어 향후 세계 식품조사산업의 급속한 성장이 기대되고 있다.

현재 미국이 세계시장 점유율면에서 높게 나타난 주된 요인은 1990년대 중반부터 USDA 등 연방 정부가 주관이 되어 방사선 조사와 관련한 축육 및 가금육의 HACCP 실시를 위한 연방규칙 (FSIS 9 CFR 317, 318, and 381, 21 CFR 179.26)의 도입과 개정 등 (USDA FSIS, 2008)을 통하여 적극적인 방사선 조사식품 진흥정책과 기술개발을 추진하였기 때문이다. 이와 함께 대형 식품제조·공급업체들의 활발한 설비투자 및 시장개척의 산물이라 할 수 있다. 2001년 Boxed Beef사는 방사선을 조사한 냉동 우육 패티를 플로리다 주에서 시험 판매하였고 Emm-pack, Kraft사 등이 백화점, 슈퍼마켓 등에 공급하였다. Wal-Mart와 Publix사는 ground beef에 대해 방사선 조사를 실시하여 시판하였다. 또한 Huisken Meats사는 미국 내에서 햄버거용 패티의 공급은 물론 처음으로 전자선을 조사한 우육 패티도 가공·판매하였다(GIA, 2005).

우리나라의 방사선 조사식품 시장은 식육 및 그 가공품에 대한 조사가 허용되지

않기 때문에 시장 자체가 형성되지 못하고 있다. 이리함에도 불구하고 향신료 등 식품조사가 허용된 일부 제품에 대하여 그린피아기술(주), 소야(주) 등 단 2개 회사가 상업용 조사시설을 갖추고 식품조사서비스업으로 등록되어 영업 활동을 하고 있다. 두 회사는 2005년에 총 5,397톤을 처리하였지만 매출액에 21억446만원에 불과한 실정하다(식품의약품안전청, 2006). 이와 같이 관련 산업이 침체되고 있는 원인은 식품조사산업의 육성정책이 선진국에 비해 미흡하고 식품조사 허용품목이 한정되어 있기 때문이라고 할 수 있다. 아울러 방사선 조사식품에 대하여 소비자나 식품생산자의 이해와 수용도가 낮은 것이 중요한 원인으로 지적되고 있다.

Table 5. Global Market Perspective (Trends for Food Irradiation Markets with respect to the Geographic Region - US, Canada, Japan, Europe and the Rest of World Markets. It was analyzed independently with Annual Sales Figures in US Million dollar (\$) from 2000 to 2010 fiscal years).

Region	United States	Canada	Europe	Rest of World	Total
2000	38.64	5.3	23.04	21.53	88.51
2001	56.58	9.49	30.4	40.5	136.97
2002	113.54	16.03	42.2	76.75	248.52
2003	181.12	25.41	60.55	116.43	383.51
2004	239.26	38.72	81.83	177.98	537.78
2005	287.35	63.35	108.62	306.47	765.79
2006	351.23	79.5	137.12	437.14	1,004.98
2007	425.79	93.57	162.14	617.38	1,298.87
2008	482	111.37	177.2	758.57	1,529.14
2009	531.64	131.61	195.52	850.89	1,709.66
2010	580.71	149.6	213.36	988.73	1,932.40
CAGR %	31.13	39.66	24.93	46.62	36.12

<Source: Food Irradiation Trends, A Global Strategic Business Report October 2005>

Taken the figures of 2004 and 2005 FY from GIA estimations.

Statistical uncertainties in the figures at this table is 10%(+/-).

Exchange rates employed in this table are 1 US \$ is equal to 1.23 Canadian Dollars, 0.83 Euro, and 0.56 British Pound, which are taken at July 1, 2005. The figures are not considered for the inflation in national economics. It is reported in nominal figures and the information is provided for the purpose of Service Provider.

2. 방사선 조사의 기술적 특성

가. 물의 방사선 분해

(1) 물리화학 (Physico-Chemical) 과정(Buxton, 1988)

물 분자가 방사선 에너지를 흡수하면 이온화와 여기가 일어난다. Fig. 1과 같이 이온화에 의해 H_2O^+ 와 e^- 가 생성된다. 이 이온화 및 여기전자는 방사선이 30 nm를 통과하는 시간 내에 상호작용에 의해 생기는 것으로 가정하여 10^{-16} sec라는 값을 산출한다. 이온화로 H_2O^+ 와 e^- 의 일부는 재결합하여 물의 여기상태를 생성하는 것으로 추정한다. 재결합을 하지 않는 H_2O^+ 는 주위의 물 분자와 반응하여 H_3O^+ 와 OH를 생성한다. $\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}$ 반응은 이온반응으로서 잘 알려져 있고, 반응 시간 스케줄은 물질이 기체 상태가 됐을 때 (gearshift)의 속도정수를 이용하여 추정하면 10^{-14} sec이다.

한편 이온화로 생긴 전자의 잉여에너지는 물 분자를 이온화하고 주위의 물 분자를 여기 함에 따라 손실되고 동일계와 같은 에너지로 열화하여 주위에 있는 물 분자의 배향으로 소멸된다. 또한 전자 자신이 만든 강한 전기장에 의해 더욱 강한 배향구조를 형성하여 안정화한다. 이 상태를 수화전자 (hydrated electron)라고 부르며 e_{aq}^- 로 표기한다(수화전자는 주위에 6개의 물 분자가 배향된 상태다). 최근 펨토초 (10^{-15} sec) 레이저 플래시 포토시스템 (laser flash photo system)을 이용한 연구에서 수화전자의 형성 과정은 수백 펨토초 (10^{-15} sec)라는 사실이 실험적으로 확인되었다. 여기상태인 물 (H_2O^*)은 분해되어 OH, H (H_2 , O)를 생성한다. 이어서 방사선 에너지를 흡수하여 1 피코초 (10^{-12} sec) 후에는 e_{aq}^- , H_3O^+ , H, OH, (H_2)가 생성되고 이때의 수량을 initial yield 라고 부른다. 이들 물 분해생성물은 공간적으로는 수 nm에 한 쌍 이상 분포하며 이 국소영역을 super라고 부른다. 이들 super는 전자선, 감마선 등 저 LET (Linear Energy Transfer) 방사선에서는 상호 수백 nm정도 떨어져 있다고 추정하고 있다.

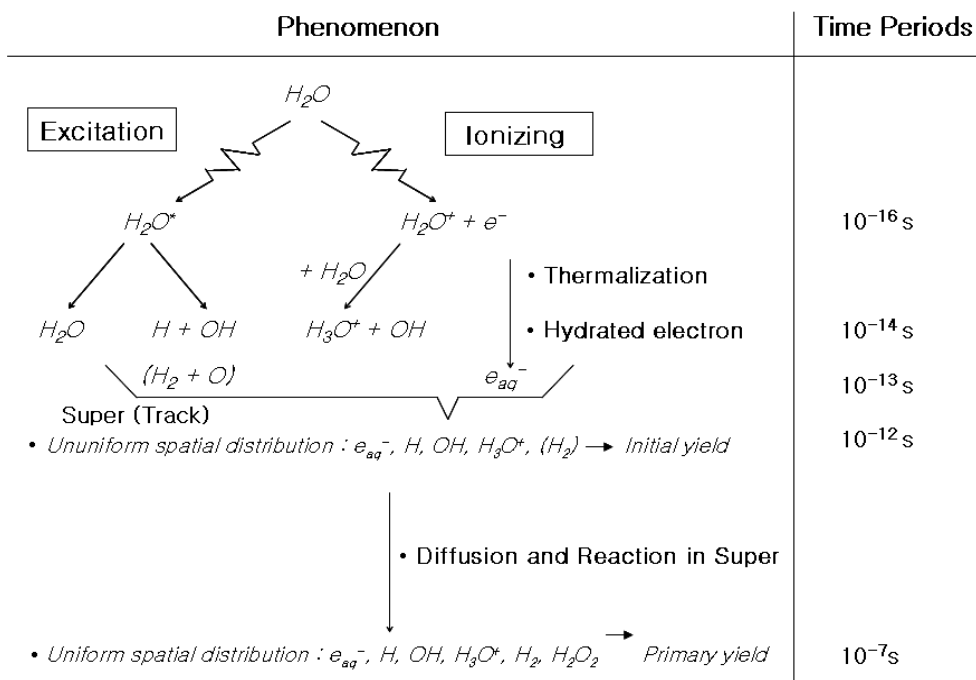


Fig. 1. Water radiolysis by ionizing radiation.

(2) 화학 (Chemical) 과정

국소적으로 불균일하게 분포한 물 분해 생성물은 확산에 의해 넓게 동일계 내에서 균일분포 상태로 진행된다. 동시에 그 생성물들은 반응성이 풍부하기 때문에 상호반응을 일으킨다(Spur reaction라 부름) (Buxton, 1987). 이러한 확산과 반응을 동시에 진행하여 서브 마이크로초 (10^{-7} sec)를 경과하면 동일계 내에서 균일하게 분포하게 된다. 이 시점에서의 수량을 primary yield라고 부르며 super내 반응과 확산의 과정에서 분자상의 생성물인 H_2O_2 및 H_2 가 생성된다고 추정하고 있다. super내 반응에는 물의 재생 반응도 포함되어 있기 때문에 물의 분해 총량은 피코초 (10^{-12} sec)보다 마이크로초 (10^{-6} sec)쪽이 소량이다(Table 6).

Table 6. Spur reaction of water radiolysis by radiation

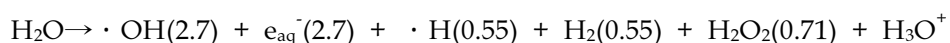
Spur reaction	Reaction Rate Coefficient ¹⁾ (10 ¹⁰ M ⁻¹ s ⁻¹)
$e_{\text{aq}}^- + e_{\text{aq}}^- + (2\text{H}_2\text{O}) \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	54
$e_{\text{aq}}^- + \cdot\text{OH} \rightarrow \text{OH}^-$	3.0
$e_{\text{aq}}^- + \cdot\text{H}_3\text{O}^+ \rightarrow \cdot\text{H} + \text{H}_2\text{O}$	2.3
$e_{\text{aq}}^- + \cdot\text{H} + (\text{H}_2\text{O}) \rightarrow \text{H}_2 + \text{OH}^-$	2.5
$\cdot\text{H} + \cdot\text{H} \rightarrow \text{H}_2$	2.5
$\cdot\text{OH} + \cdot\text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	0.53
$\cdot\text{OH} + \cdot\text{H} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	3.2
$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	14.3

¹⁾The reaction rate coefficients are not considered with the water molecules, which are involved in the reaction. However, since the water molecules themselves are contributed into the total Spur reaction, the molecules indicated by parenthesis should be considered to reaction coefficients in the chemical point of view.

Table 7은 LET이 다른 방사선에 의한 물의 분해 primary G값이다(Buxton, 1987). LET이 증가하면 super 생성의 간격이 좁아져 super의 중첩이 생긴다. 이것을 track 구조라고 부른다. Super가 겹치면 고립된 super인 경우보다 super 반응이 일어나기 쉽다. 즉 라디칼들이 반응하여 H₂O₂, H₂의 수량은 증가하고 이것에 수반하여 라디칼 수량은 감소한다. LET 증가에 의한 e_{aq}⁻ (hydrated electron) 및 OH 수량의 감소와 H₂O₂ 수량의 증가를 비교하면 그 상관관계를 알 수 있다. 또한 H + OH → H₂O가 되는 물의 재생반응도는 LET 증가에 따른 기여가 커지기 때문에 그것에 수반되어 물 분해 G값도 감소한다.

일반적으로 수용액에는 용질이 존재한다. 용질농도가 맞은 경우에는 super내에 존재하는 용질의 비율이 낮고 그 용질이 수화분자, 수소원자, OH 라디칼 어느 것이나 반응성이 높은 경우에도 super내 반응은 용질에 영향을 받지 않고 진행된다. super내 반응이 종료되고 물 분해 생성물이 동일계에 균일하게 분포한 단계에서는 대부분의 반응이 일어난다. 이 조건을 만족하는 경우에는 용질 농도를 변화시켜도 분자 상 생성물의 수량은 용질의 농도에 의존성을 나타내지 않고 용질은 라디칼 생성물과 반응하여 같은 양의 반응 생성물을 가진다.

대부분의 물은 식품의 중요한 구성 성분이다. 결과적으로 물의 방사선 분해는 식품의 방사선 조사 현상에서 중요한 역할을 한다. 순수한 물이 조사되었을 때 수많은 높은 반응생성물들이 형성되고, 이는 다음 방정식과 같다.



상대적 생성량은 G 값 (100 eV 흡수로 인해 생성된 종의 수)으로 표시한다. 수산화라디칼 (·OH)은 강한 산화제인 반면 수화전자 (e_{aq}⁻)와 수소원자 (·H)는 환원제로 작용한다. 그러므로 모든 식품에 포함되어 있는 물은 조사되는 동안 산화·환원 반응이 모두 일어난다(Stevenson, 1992). 수산화 라디칼은 방향족 (aromatic) 및 올레핀 (olefinic) 화합물에 더해지거나 C—H 결합으로부터 수소원자를 분리한다. 반면에 수화전자는 대부분 방향족 화합물 (aromatic compound), 카르복실산 (carboxylic acid), 케톤 (ketone), 알데히드 (aldehyde), 티올 (thiol) 들에 더해진다. 수소원자는 C—H 결합으로부터 수소가 분리되고 또는 olefinic에 더해진다(Nawar, 1986). 수소분자 (H₂)와 과산화수소 (H₂O₂)는 물의 방사선 분해의 유일한 안정된 최종 생성물이

다. 그러나 그들은 아래와 같이 조사에 의해 생성된 라디칼에 의하여 크게 소비되고 심지어 고선량 조사에서도 소량 생산된다.

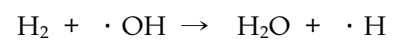
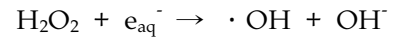


Table 7. List of G values (primary yield) of water radiolysis by several radiation types with different LET (Linear Energy Transfer)

LET / eV nm ⁻¹	G Value						
	-H ₂ O ¹⁾	e _{aq} ⁻	OH	H	H ₂	H ₂ O ₂	HO ₂
Gamma ray / 0.23	4.08	2.63	2.72	0.55	0.45	0.68	0.008
18 MeV D ⁺ / 12.3	3.46	1.48	1.78	0.62	0.68	0.84	-
32 MeV He ²⁺ / 61	3.01	0.72	0.91	0.42	0.96	1.00	0.05
12 MeV He ²⁺ / 108	2.84	0.42	0.54	0.27	1.11	1.08	0.07

¹⁾The sign of negative in water, -H₂O, indicated the decrease in G value by radiolysis.

나. 방사선의 생물학적 영향

방사선에 의한 DNA의 손상은 방사선 에너지가 매질에 부여되는 물리적 과정 ($\sim 10^{-15}$ sec), 라디칼과 이온이 생성되는 물리화학적 과정 ($\sim 10^{-12}$ sec)에서 생성된 라디칼 등이 확산·반응하는 화학적 과정 ($\sim 10^{-6}$ sec)을 거쳐 발생한다. 이 중에서 방사선의 DNA에 대한 작용은 이온화 에너지 DNA에 직접 전리·여기 하는 직접작용과 DNA 이외의 물 분자 등이 방사선 분해에 의해 생기는 라디칼을 사이에 두고 DNA에 작용하는 간접작용으로 분류된다. 양쪽 모두 DNA 손상에 중요한 역할을 담당하고 있다.(Nikjoo & Uehara, 2004). 방사선조사에 의해 생성되는 활성종 중에서 DNA 사슬절단에 직접적으로 관여하는 것은 $\cdot\text{OH}$, O , e_{aq}^- 로 추정한다. 그 중에서도 OH 라디칼이 DNA 사슬과 반응하는 확률이 가장 크다. 그러나 DNA와 반응한 OH 라디칼은 모두가 DNA 사슬 절단을 유도하는 것은 아니며 약 80%가 염기와 약 20%가 당쇄와 반응한다고 발표하였다(Schulte-Frohinde & Bothe, 1991). 다른 학자들은 당쇄와 반응하는 OH 라디칼의 일부가 사슬 절단을 유도한다고 주장하였다(Nikjoo & Uehara, 2004; Yokoya *et al.*, 2002). 두가닥 사슬 절단 (DSB : Double Strand Break)에 관해서는 직접작용, 간접작용에도 불구하고 10 염기쌍 이내의 다른 고리위에 두 개의 외가닥 사슬 절단 (SSB : Single Strand Break)을 생성한 경우에는 DSB가 생성된다고 하는 것이 일반적이다(Nikjoo & Uehara, 2004). 다만 낮은 확률이지만 한번의 OH 라디칼의 반응에 의해서 radical swing over라고 불리는 현상이 일어나 DSB가 생길 수 있다는 설도 있다(Laverne & Pimblott, 1993).

지금까지 DNA의 방사선 조사에 대한 직접효과를 정량적으로 취급한 연구는 그 실험조건이 설정이 곤란하여 많은 연구가 수행되지 못하였다. 이는 어떤 조건으로 DNA를 직접 이온화해야 하는가와 특히 시료인 DNA에 어떤 조건으로 조사해야 하는가에 대한 문제이다. DNA에 한정하지 않고 생체시료에는 물 분자가 필히 포함되어있고 구조상, 기능상으로 중요한 역할을 수행하고 있기 때문이다. DNA에는 뉴클레오티드 (nucleotide) 1개당 20~22개의 물 분자가 결합되고 그 중 15~17개는 nucleotide으로 5개는 인산에 결합되어 있다. 이와 같은 생체시료를 조사할 때에는 반드시 간접효과인 물에서 생기는 라디칼 반응이 일어난다. 최근에는 단결정 DNA (Debijs *et al.*, 2001), 필름상태인 DNA (Boudaiffa *et al.*, 2000), 냉동 건조한 DNA에

수증기를 쪼여서 임으로 수화한 시료를 이용한 연구사례들이 보고되고 있다(Cai & Sevilla, 2002). 그러나 이들 연구에서는 OH 라디칼의 생성을 관측할 수 없기 때문에 간접효과를 부정하고 있다.

간접효과로는 방사선을 조사할 때 생성되는 $\cdot\text{OH}$ ($\cdot\text{HO}_2$, O_2^- , super oxide radical)의 분자종과 생체분자와의 반응결과로 생기는 생체손상이 있다. 이에 대한 연구는 주로 plus radio system법에 의해 추진되어 상세하게 보고되어 있다(Schute-Frohlinde, 1985). 그러나 만약 이들 활성종이 세포내에서 생성되었다고는 해도 그 수명 내에 DNA와 반응하는가에 대한 여부는 생체분자가 OH 라디칼과의 반응에 있어 매우 반응성이 풍부하고 특이적이기 때문이라는 예를 들어 최초로 충돌한 분자와 반응한다고 주장하였다. 또한 이들 활성종은 활성 산소종으로서 방사선을 조사하지 않더라도 생리적 조건하에서도 생성되는 것으로 알려져 있고 세포내에서는 이들 활성종의 소거제가 존재한다고 하였다(小林一雄, 1988).

O_2^- 의 분해효소인 항산화물질 SOD (Super Oxide Dismutase) 등은 라디칼 소거제로서 세포내에는 고농도 (1~10 mM)의 아스코르빈산 (askorbinsäure)과 글루타티온 (glutathione)이 존재한다. 따라서 방사선의 조사에 의해 생성된 활성종이 소거되지 않고 확산되어 핵에 존재하는 DNA와 반응할 확률은 적다고 말할 수 있다. 이는 DNA 근방 또는 DNA에 수화한 물로부터 생성된 OH 라디칼과의 반응에 의해 장애가 생긴다고 가정한다.

Monte Carlo method에 의한 DNA 손상유발과정의 시뮬레이션 (Fig 2)은 직접작용 및 간접작용에 의해 생성되는 DNA 손상의 생성량 및 위치를 산출하는 모사실험이다. 먼저 작용의 출발점에 있는 물리적 과정에서는 매질의 반응 단면적 탄성산란 및 비탄성산란을 고려한 비적구조의 시뮬레이션을 행한다. 출력으로서 방사선과 매질과의 상호작용이 일어나는 모든 위치와 분자의 변화를 일으키는 비탄성충돌의 사상 (phenomenon)인 전리·여기의 형태마다 에너지 량을 부여한다. 생체조직의 대부분은 물이며 그 외의 다른 생체분자도 주요 구성 원소는 비교적 가볍다. 여기서 많은 연구가 생체를 액상의 물로서 다룬다(Nikjoo & Uehara, 2004). 직접작용에 의한 DNA 손상 평가를 행하는 경우에는 수증에서의 비적구조에 DNA 모델을 중첩시키는 것으로 DNA에 부여된 에너지 및 분포를 구하고 그 정보에 근거하여 DNA 손상을 산출하는 방법을 취하고 있다(Charlton & Humm, 2004).

한편 DNA가 아닌 주위의 물 분자가 전리 또는 여기에 의해서 해리한 경우에는

OH, H, H₂, H₂O⁺, 아여기 전자 등의 화학종을 생성하고 이들 화학종이 반응을 반복 하면서 수중으로 확산하는 가운데 DNA에 작용한다(Lavere *et al.*, 1996). 화학종끼리의 반응에는 2분자 간 반응의 확산방정식을 풀 때에 반응반경까지 근접한 쌍 (pair) 과 반드시 반응한다는 경계조건을 활용해서 반응확률을 구한다. 확산반응에서는 시간단계 (time step)를 구분하고 단계마다 활성종간의 모든 조합에 관해서 반응확률을 구하여 랜덤 워크(random walk)에 따라 이동거리를 계산한다(Tomita *et al.*, 1998).

DNA 손상유발 과정의 시뮬레이션은 DNA의 직접 손상에 대한 이해에 공헌하였다. LET에 의존한 DNA 손상 수율 및 공간분포에 관한 해석결과는 생물학적으로 중요한 수복 불가능한 손상으로서 이는 방사선 비적에 연해서 생긴 미세공간에 복수의 전리 및 여기에 의해 DNA의 수십 염기쌍 이내에 국소적인 손상 (사슬 절단 및 염기 손상)이 한데 모여서 생긴 클러스터 (cluster) 손상 (Goodhead, 1994) 또는 다중 손상 (Ward, 1998)이라는 개념을 제공하였다. 클러스터 손상은 활성산소 등에 의해서는 거의 생기지 않고 방사선에 의한 특징적 손상으로 이해되고 있다. 고 LET 방사선에서는 그 생성량이 증대된다는 것을 시뮬레이션을 통해 추측하고 있다.

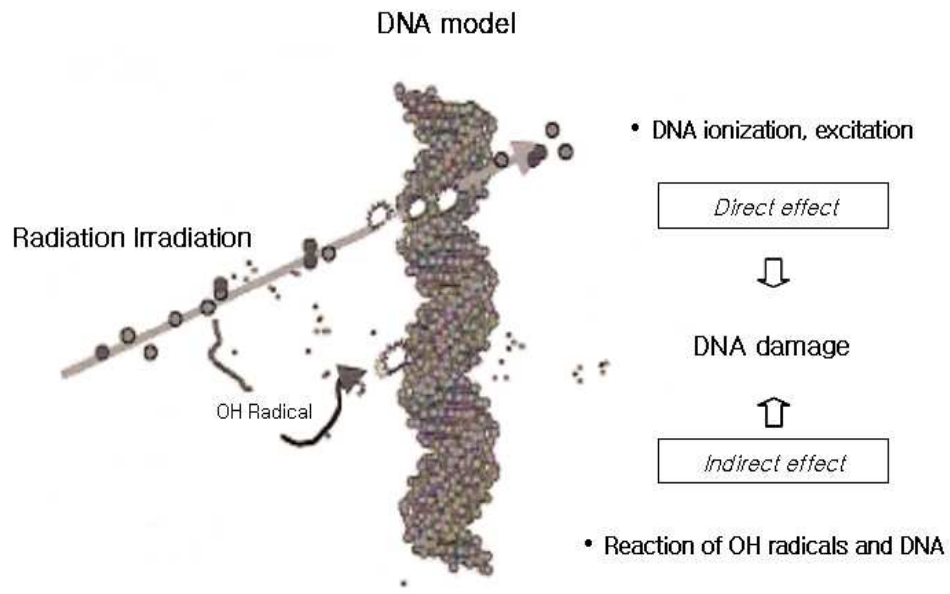


Fig. 2. Schematic picture of the process of DNA damage by ionizing radiation.
 (日本放射線化学会、2006a).

다. 방사선 살·멸균의 원리

세포에 방사선조사를 할 때 용매인 물 분자로부터 생긴 라디칼과 생체구성분자와의 반응에 의한 간접효과와, 생체고분자에 직접적인 이온화에 의한 직접효과로 분류된다. 이중 간접효과에 대해서는 생체구성물질의 80%는 물이고 세포의 전체 건조중량의 50%~80%가 단백질이며 DNA는 1/10~1/20%에 불과하기 때문에 물의 방사선 분해로 생성되는 라디칼 반응을 중심으로 한 방사선의 간접효과가 중요하다고 인식되고 있다. 직접효과에 대해서는 DNA가 세포내에 차지하는 비율은 높지 않아 과연 실제로 세포에 방사선을 조사할 때에 DNA의 이온화가 일어난다는 직접적인 증거는 얻지 못하고 있지만 von Sonntag (1987)는 세포내 DNA의 40%가 직접효과에 의한 것이며 60%가 물에서 생긴 라디칼에 의한 간접효과에 기인한다고 하였다. 그러나 OH 라디칼에 의한 DNA 절단은 직접효과의 50% 정도라고 보고하였다 (Krisch *et al.*, 1991).

방사선을 생물에 조사하면 돌연변이, 종양세포로의 형질전환, 세포사 등 여러 가지 생물학적 영향을 초래한다. 생체를 구성하는 무수한 생체분자 중에서도 생물 영향의 표적이면서 특히 유전정보를 가지고 있어 생명에 있어 가장 중요한 역할을 담당하는 것이 바로 DNA이다. 방사선에 의한 세포손상은 DNA의 외가닥 사슬 절단 (SSB), 두 가닥 사슬 절단 (DSB), 염기손상, DNA와 단백질 간의 가교 등의 분자변화가 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 세포는 여러 가지 형태의 DNA 손상을 적절한 경로를 갖고 수복할 수 있는 기능을 갖추고 있어 손상의 대부분이 원래대로 수복된다. 하지만 DNA 손상 중에서 수복 불가능할 상태일 때는 세포의 치사를 가져오며 일부가 손상되는 경우에는 세포의 돌연변이를 일으키는 생물학적 영향을 가져온다고 알려져 있다. 지금까지 수복 불가능한 DNA 손상은 γ 선이나 X선 등의 저 LET 방사선에 비해 α 입자선이나 중이온 등 고 LET 방사선에 발생되기 쉽다고 보고되었다(Cox *et al.*, 1977).

살균·멸균을 목적으로 하는 방사선 조사의 원리는, 방사선을 조사함으로써 조사 대상물에 존재하는 유해한 미생물이 가지는 유전물질인 DNA의 생물활성을 소실시키는 데 있다. 식품조사에 의해 식물 (과실과 야채) 및 식품에 붙어 있는 병원성 미생물 및 기생충 등의 사멸 효과는 DNA에 대해 방사선이 작용하는 것이다. 방사선의 DNA에의 작용은 거의 모두가 생물에 포함되어 있는 물 분자가 조사에 의해 여

기되어 생성한 OH 라디칼에 의한 것이며 그것으로 인해 DNA 사슬이 절단된다. DNA 외가닥 사슬 절단은 용이하게 수복되지만 두 가닥 사슬의 같은 부분이 동시에 손상을 입으면 수복 불가능 또는 사멸에 의해 세포증식력을 상실하고 돌연변이를 일으킨다. 대부분은 세포 증식능력의 상실로 세포사가 일어나지만 정도에 따라 발아 억제, 불임화, 살균 및 멸균의 효과를 얻는다(WHO, 1994; 伊藤均, 2004).

라. 방사선이 식품 성분에 미치는 영향

(1) 탄수화물 (Carbohydrate)

탄수화물의 화학적 반응은 복잡하고 많은 방사선 분해 생성물의 생성이 가능하다. 수용액상에서 생성되는 자유 라디칼 중 수산화 라디칼 (hydroxyl radical : $\cdot\text{OH}$)은 탄수화물의 방사선 분해에 매우 중요한 역할을 한다. 첫 번째로 다음과 같이 탄소와 결합된 수소원자가 분리된다.

① 분리 (Abstraction) :



이렇게 수소원자가 분리되어 생성된 디옥시카르보닐 라디칼 (deoxy carbonyl radical)은 다음과 같이 다른 반응에 관여한다(Dauphin *et al.*, 1977; Nawar, 1986).

② 불균형 (Disproportional) :



③ 이분자체 형성 (Dimerization) :

방사선 조사는 매우 복잡한 메커니즘으로 전분, 셀룰로오스 (cellulose), 펙틴 (pectin)과 같은 다당류를 분해하며 그 기전은 아직 규명되지 않았다. 그러나 많은 연구에서 다당류의 당체결합 (glycosidic bond)이 분열되어 포도당 (glucose), 맥아당 (maltose), 에리트로오스 (erythrose), 리보오스 (ribose), 만노오스 (mannose)와 같은 저분자당이 형성된다고 보고하였다(Dauphin *et al.*, 1977; Sokhey & Chinnaswamy, 1993; Simic, 1983). 또한 포름산 (formic acid), 아세트알데히드 (acetaldehyde), 메탄올 (methanol), 아세톤 (acetone), 에탄올 (ethanol), 메틸 포메이트 (methyl formate) 등의 분해산물이 생성된다. Raffi *et al.* (1981)은 전분의 기원(옥수수, 감자, 밀 또는 쌀)에 관계없이 조사에 의한 최종 분해산물은 대부분 동일하였다고 보고하였다. 감마선 조사에 의하여 생성된 자유 라디칼들은 전분입자의 구조와 양을 변화시킨다고 보고하였다(Sokhey & Chinnaswamy, 1993; Raffi *et al.*, 1980).

저선량으로 조사된 전분은 입자구조의 변화가 관찰되지 않았으나 100 kGy 이상의 고선량 조사에 의해 손상이 관찰되었다(Sokhey & Chinnaswamy, 1993; Tomasik & Zaranyika, 1995). 옥수수 전분과 쌀 전분의 결정도 (crystallinity)는 조사 선량에 비례적으로 증가되었다(Mc Arthur & D'Appolonia, 1984; Wootton *et al.*, 1988). 또한 방사선 조사는 전분의 호화 점성을 감소시키고 수용도와 산도를 증가시킨다(Bao *et al.*, 2001; Roushdi *et al.*, 1981). 전분의 팽윤력은 조사에 의해 일반적으로 감소되나 20 kGy이하 조사 시에는 증가되어 그 이상의 조사에 의해서는 감소하였다고 보고하였다(El-Saadany *et al.*, 1974; Raushdi *et al.*, 1981). Rayas-Duarte & Rupnow (1993)는 조사 선량이 증가함에 따라 전분의 호화 엔탈피가 증가하였으며 20 kGy로 조사된 건조 콩 전분의 호화 최대온도가 증가하였다고 보고하였다.

Bachman *et al.* (1997)은 2 kGy의 조사된 밀 전분의 노화도가 Lasco triticale 밀 전분의 경우에는 감소하였으나 Grana 밀 전분의 경우에는 증가하였다고 보고하였다. 아밀로오스 (amylose)와 아밀로펙틴 (amylopectin)의 분자 길이는 조사 선량이 증가함에 따라 감소하였다(Sokhey & Chinnaswamy, 1993; Roushdi *et al.*, 1981; Rayas-Duarte & Rupnow, 1993). 또한 겔 크로마토그래피 (Gel-chromatography)를 통한 연구에서 조사된 전분은 fraction I peak (주로 amylopectin으로 구성)의 분열이 관찰되었다고 보고하였다(Sokhey & Chinnaswamy, 1993). 이러한 방사선이 조사된 전분은 구조에 따라 α - 및 β -amylase 등 소화 효소에 대해 반응성이 변화한다는 연구결과도 있다(Ananthaswamy *et al.*, 1970).

(2) 단백질 (Protein)

수용액 상태에서 조사될 때 글리신 (glycine)과 알라닌 (alanine)과 같은 단순 아미노산은 다음과 같은 반응에 의해 변화된다.

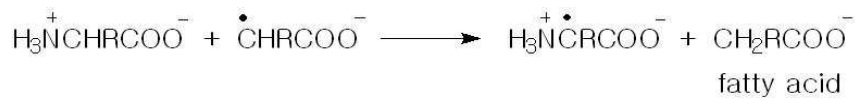
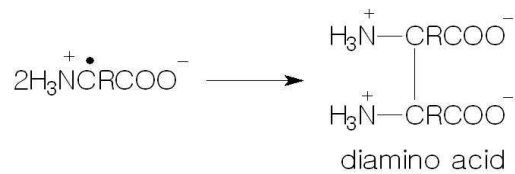
① 수소원자 제거 :



② 탈 아미노 반응 :



생성된 라디칼들은 다음과 같은 반응에 의해 변화된다.





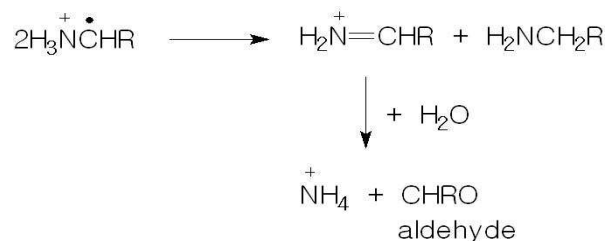
아미노산 (imino acid)는 다음과 같이 자발적으로 가수분해된다.



또한 탈탄산반응이 일어나 본래의 아미노산보다 탄소수 1가 적은 아민 (amine)이 생성된다.



탈탄산반응에 의해 생성된 라디칼은 다른 화합물과 반응하여 amine과 aldehyde를 생성한다.



펩티드 (Peptide)의 방사선 화학은 그 구성 성분인 아미노산의 경우와 유사하다. Peptide 결합수가 증가할수록 hydrated electron에 대한 반응성이 증가되고 생성된 라디칼은 탈아미노반응 (deamination)이나 주사슬 절단(main chain scission)에 의해 파괴된다(Rustgi & Riesz, 1978). peptide의 방사선 분해산물은 주로 암모니아 (ammonia), 지방산 (fatty acid), 케토산 (keto acid) 및 아미드 (amide) 유사화합물이고 라디칼들의 재결합에 의해 디아미노산(diamino acid)이 생성되기도 한다 (Delincée, 1983; Lieber & Koppoldava, 1964). Peptide에서 일어난 라디칼 반응은 단백질에서도 유사하게 일어난다.

단백질에 대한 방사선 화학반응은 peptide chain의 폴딩 (folding), 이황화결합 (disulfide bond), 이온결합 (ionic bond), 수소결합 (hydrogen bond), 소수성결합 (hydrophobic bond)이나 몇몇 sub unit간 결합과 같은 이차적 결합 등 복잡한 구조에 의해 달라진다. 폴리펩티드 (polypeptide) 기본 구조인 C-N 결합의 분열, disulfide 결합의 분리와 같은 반응들에 의해 단백질은 더 작은 단백질로 분열될 수 있다(Diehl, 1995). 방사선 조사에 의한 단백질의 분리와 응집현상은 단백질의 이차 및 삼차구조가 조사 시 생성되는 수화전자, 수소원자, 수산화 라디칼과 같은 물 라디칼과 상호작용하여 일어난다. 구성 단백질은 분자 내 polypeptide간 교차결합에 영향을 준다.

(3) 지질 (Lipid)

식품의 지방 및 지질은 주로 글리세롤 (glycerol)과 에스테르 결합(ester bond)을 하고 있는 지방산인 중성지방 (triglycerides)으로 이루어져 있다. 지질의 방사선 화학의 기본적 기초를 이해하기 위해 순수한 중성지방을 대상으로 모델을 개발하여 연구하였다(Nawar, 1977). 방사선에 의한 지질의 변화는 크게 두 가지에 의해 나타난다. 첫 번째는 산소분자에 의해 촉진되는 자동 산화반응에 의한 것이고 두 번째는 고에너지 방사선이 직접 혹은 간접적으로 지질분자에 영향을 주어 변화되는 것이다(Nawar, 1986). 지질이 방사선 조사되면 직접적 효과 (전자 발생 및 콤프턴 효과)에 의해 양이온 라디칼과 여기분자가 생성된다. 일반적으로 방사선 조사에 의한 지질의 분해 기초는 카르보닐기 (carbonyl group) 또는 이중결합 (double bond)에 대하여 양전하 이동에 의한 이온화가 일어나는 것으로 이해되며 carbonyl group 주위에서 분열현상이 많이 일어난다(Nawar, 1978). 16개의 자유 라디칼이 carbonyl group 주위 결합의 분열에 의해 우선해서 생성되는 것으로 알려져 있다. 이들은 분리 (abstraction), 해리 (dissociation), 재결합 (recombination)을 포함한 수많은 반응에 관여한다. 불균형화와 라디칼 분자 상호반응, 안정적인 방사선 분해산물의 형성 유발은 형성물의 존재방식에 따라 제 1의 재결합 그리고 제 2의 생성물로 분류된다. 산소의 존재 안에서 조사된 지방의 주요 비산화 방사선 분해생성물은 이산화탄소, 수소, 일산화탄소, 탄화수소 그리고 C₀ aldehyde이다. 조사에 의하여 형성된 탄화수소는 대부분 C₀₋₁ alkane이며 지방산보다 1개의 탄소가 없다. C_{0-2:1}은 1위치에 이중결

합을 가지고 있고 지방산보다 2개의 탄소원자가 없다(Nawar et al., 1990). 이러한 화합물은 방사선 조사식품을 검출하는데 사용된다.

(4) 비타민 (Vitamin) 등 미량성분

비타민 손실은 방사선 식품조사에 있어 가장 큰 영양 손실의 우려를 가지고 있다. 비타민 B 종류와 비타민 C와 같은 수용성 비타민은 방사선 조사과정에서 산화될 수 있다. 티아민 (thiamin : vitamin B₁)은 가장 방사선 조사에 파괴되기 쉬우며 다음으로 비타민 C, 피리독신 (pyridoxine : vitamin B₆), 리보플라빈 (riboflavin : vitamin B₂), 니아신 (niacin : nicotinic acid) 등이 손실되기 쉽다. 지용성 비타민 종류에서는 비타민 E가 가장 저항성이 약하고 다음으로 비타민 A와 비타민 K의 순서를 갖는다. 비타민 D는 비교적 방사선 조사에 안정적이다. 비타민류는 방사선 조사과정 중에 파괴되며 조사 후 보존과정에서도 손실된다. 따라서 보존과정에서 산소와의 접촉을 최소화하는 것이 중요하다(Shea, 2000).

Thiamin은 수용성 비타민 중에서 방사선에 가장 민감하다. 방사선을 조사한 돼지 갈비 (porkchop), 닭고기 (chicken), 칠면조 (turkey), 다진 쇠고기 (minced beef), 베이컨 (bacon)등에서 방사선 조사 후 파괴되는 것으로 알려져 있다. 닭고기의 경우에는 빙점에서 방사선을 조사했을 때 thiamin의 손실이 현저히 감소된다는 보고가 있다. 돼지고기나 쇠고기의 경우에는 열처리 멸균 시에는 각각 20%와 65%이며 방사선 조사 시 (45 kGy)에는 80%가 보존된다는 보고가 있다.

Riboflavin은 방사선에 가장 안정한 비타민이다. 돼지갈비나 닭 가슴살에서 방사선 조사 후 약간 증가하는 경향을 보였으며 조리된 닭고기에서도 riboflavin과 다른 비타민이 방사선 조사 시에(6 kGy) 증가된다는 보고가 있다.

Niacin은 수용상태에서는 thiamin이나 riboflavin보다 불안정하지만 방사선 조사식품에서는 매우 안정하다. 돼지갈비나 닭고기는 방사선조사 시 niacin의 손실이 거의 없는 것으로 알려져 있다. pyridoxine은 riboflavin 정도의 안정성을 가지며 6 kGy 방사선 조사한 조리 닭고기에서는 손실이 거의 없는 것으로 보고되었다. 시아노코발아민 (cyanocobalamin : vitamin B₁₂)도 방사선에 안정되어 있다. 닭고기와 돼지갈비에서 방사선 조사 전후에 있어 성분량의 변화는 없는 것으로 보고되었다.

비타민 B의 일종인 엽산 (folic acid)은 방사선 조사에 따른 손실이 거의 없다. 지

용성 비타민 중에서 방사선에 가장 민감하여 지용성 비타민 손실의 지표로 사용하고 있는 비타민 E는 공기 중에서 방사선 조사 시에는 50%가 손실되는 것으로 알려져 있지만 진공포장 시에는 90%가 보존되는 것으로 보고되었다. 비타민 A는 우유, 버터 등에 함유되어 있으며 식이에 있어 매우 중요한 비타민이지만 방사선 손실이 너무 커서 상업적 방사선 조사는 어려우나 닭고기에서는 손실이 없는 것으로 보고되었다. 비타민 D는 비타민 E나 A에 비해 안정하며 비타민 K는 지용성 비타민 중에서 가장 안정하게 보존된다(Stevenson, 1994).

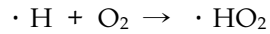
방사선 식품조사와 가스치환 등 변형된 공기포장 방식이 방사선 조사 후 4주간의 보존기간 동안 소시지에 미치는 영향 연구에서 식품의 포장을 100% 이산화탄소와 100% 질소를 사용하거나 25%의 이산화탄소와 75%의 질소를 사용하였고 0, 5, 10 kGy의 방사선을 조사한 후 보존된 아질산염 (nitrite), 아스코르브산 (ascorbic acid, vitamin C), 나이트로소 마이오글로빈 (nitroso myoglobin) 및 식품의 색을 관찰하였다. 방사선은 아스코르브산의 성분에 변화가 일으키지 않았으나 방사선을 조사한 소시지의 색깔은 열어졌다. 이산화탄소나 이산화탄소/질소 포장이 아질산염의 손실이나 소시지의 붉은색 감소 방지에 더 효과적임을 보고하였다(Ahn *et al.*, 2003).

X선과 전자선의 방사선 조사효과를 관찰하기 위해 방사선 조사와 저장온도, 방사선 조사 후 조리, 진공 및 공기포장을 한 다진 닭고기의 thiamin성분을 조사하였다. 3 kGy의 X선과 전자선으로 조사한 시료는 대조시료에 비해 thiamin량이 감소하였지만 X선과 전자선 등 조사 선종에 대한 차이는 없었다. 진공포장 시료에서 X선 조사 시는 31.1%가 전자선 조사에서는 28.0%가 감소하였다. 닭고기의 조리온도는 87.2±4℃ 범위에서 조리 식품의 포장상태는 thiamin의 함량 변화에 영향을 미치지 않았다(van Calenberg *et al.*, 1999).

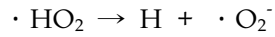
마. 방사선 화학반응에 영향을 미치는 환경 요인

(1) 산소 (Oxygen)

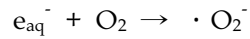
방사선을 조사되는 동안 산소의 유무는 방사선 화학반응에 큰 영향을 준다. 과산화수소 라디칼 (Hydroperoxyl radical : $\cdot\text{HO}_2$)은 수소 라디칼 (hydrogen radical : $\cdot\text{H}$)과 산소의 결합에 의해 형성된다.



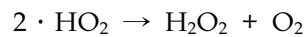
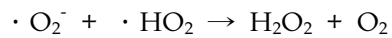
그리고 음이온 과산화 라디칼 ($\cdot \text{O}_2^-$)이 생성된다.



음이온 과산화 라디칼 ($\cdot \text{O}_2^-$)은 산소와 함께 수화전자 (e^-)의 반응에 의하여 형성된다.



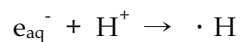
과산화수소 라디칼 (Hydroperoxyl radical)과 초과산화 라디칼 (superoxide radical)은 둘 다 산화제이다. 이들 라디칼 중 하나는 과산화수소 (H_2O_2)가 생성된다(Diehl, 1995; Swallow, 1977).



미량의 과산화수소는 산소가 없는 환경에서 조사되었을 때 형성된다. 지방을 포함한 식품을 호기적 환경에서 조사할 경우에는 자동산화가 일어나 산패취가 생성될 수 있다. 따라서 혐기 상태에서 조사는 이러한 이취와 냄새를 억제할 수 있다. 강한 산화제인 오존 또한 조사하는 동안 산소로부터 형성된다.

(2) 수소이온농도 (pH)

수용성 상태의 pH는 조사의 결과에 영향을 줄 수 있다. 평형 상태의 pH 의존은 다음과 같은 반응식에 의하여 설명된다(Diehl, 1995).



산성 상태는 수화전자를 소멸시키는 반면 알칼리 상태는 수용액 전자를 형성시킨다.

(3) 조사 온도

조사되는 동안 온도는 매우 중요하다. 초기 조사와 흥분 상태 그리고 더 많은 활성종의 반응과 관련하여 중요한 것은 온도이다(Swallow, 1997). 특히, 동결식품의 경우 물의 방사선 분해 (water radiolysis)에 의하여 중간체 생성이 억제되고 다른 식품 구성 화합물과 작용이 자유롭지 않기 때문이다(Urbain, 1986). 그러므로 동결은 식품성분에 대한 방사선의 영향을 감소시킬 수 있다. 동결식품이 해동될 때 방사선 분해산물의 산출이 증가될 수 있다. 그러나 동결에서 해동상태로 이동하는 동안 중간 생성 반응물이 변화될 수 있다.

3. 방사선 선원 및 선종별 특성

식품 및 공중보건 제품의 위생화를 목적으로 이용하는 전리방사선은 코발트 60 (^{60}Co), 세슘 137 (^{137}Cs) 선원으로부터 방출되는 감마선과 전자선 발생장치로 부터 방출되는 전자선 그 것을 변환하여 얻는 X선 등이 있다.

가. 감마선원 및 선종

감마선은 파장이 매우 짧은 전자파이기 때문에 물질 속으로 투과하는 투과력이 높아 밀도가 큰 물질의 처리에 용이하며 선원으로부터 모든 방향으로 방사가 가능하다.

감마선의 선원은 사용되는 ^{60}Co 은 비방사성 물질인 ^{59}Co 를 원자로에서 핵분열 시 발생하는 열중성자를 조사시켜 얻는다. ^{60}Co 은 반감기가 5.27년이며 β 붕괴하여 니켈의 안정동위원소인 니켈 ^{60}Ni 이 된다. 동시에 1.173 및 1.332 MeV (평균에너지, 1.25 MeV)의 강한 γ 선을 방출하므로 γ 선원으로 널리 사용된다. 또 하나의 감마선 선원인 ^{137}Cs 은 원자로에서 사용된 연료의 재처리 과정에서 얻는 핵종으로 반감기가 30.1년이며 최대 에너지 1.176 MeV (6.5%), 0.514 MeV (93.5%)의 β 선을 방출하면서 붕

피하는 수명이 긴 방사성 핵종이다. 이들 감마선원의 투과성의 기준이 되는 감마선의 물속에서의 반값 두께 (투과하는 광자의 수가 절반이 되는 흡수체의 두께)는 ^{60}Co 은 11cm, ^{137}Cs 은 8.1cm 정도이다(日本放射線化学会, 2006c-e).

금속코발트 (^{59}Co)를 원자로안의 중성자선으로 조사해서 만든 ^{60}Co 은 방출되는 γ 선의 투과력이 크기 때문에 ^{60}Co 을 이용한 조사장치는 두껍고 밀도가 높은 물품에 높은 선량을 대규모로 조사할 수 있는 장치로 활용된다. 다만 ^{60}Co 의 반감기가 5.27년으로 비교적 짧기 때문에 선원의 12%를 매년 보충할 필요가 있으며 전자선과 비교해서 조사처리의 속도가 느리다. 1960년대를 중심으로 Cs-137을 이용한 조사시설의 설치가 검토되었으나 분말 상으로 취급이 불편하며 γ 선의 에너지가 ^{60}Co 의 절반 정도로 적기 때문에 실용화가 지연되었다. 따라서 현재 사용되고 있는 감마선 조사장치는 대부분 ^{60}Co 을 선원으로 하고 있다. ^{60}Co 의 감마선은 중규모의 조사시설인 3.7×10^{16} Bq의 용량에서는 출력이 14.8 kW이지만 유효하게 피조사물에 조사되는 것은 이의 20~30% 정도이다. 또한 에너지 강도는 조사표면으로부터 선형으로 감소하여 물과 같은 비중이 1인 물질에서 약 11 cm의 심도로 50%가 된다. 이것들을 고려하여 실제 멸균작업에서는 균이 들어가지 않도록 내포장재로 밀봉한 최종 제품으로 행하는 것이 보통이다.

식품 등에서 멸균을 목적으로 사용되는 선원은 대부분이 ^{137}Cs 보다 감마선 에너지 강도가 높은 ^{60}Co 이 사용된다. ^{60}Co 선원으로부터 방출되는 γ 선은 투과력이 크기 때문에 이를 이용한 조사장치는 두껍고 밀도가 높은 물품을 많은 선량으로 대규모로 조사할 수 있다. 그러나 전자선과 비교하여 조사처리의 속도는 느리다(日本放射線化学会, 2006c).

나. 전자선원

가속기가 산업에 이용된 것은 40여년 이상 경과되었으며 그 필요성 및 중요성은 매우 크다. 가속기는 전자와 같이 매우 가벼운 입자를 가속한다. 소위 전자가속기라 함은 양자나 무거운 입자를 가속하는 이온가속기로 분류할 수 있다. 전자가속기에는 일반전자 발생부, 가속부, 빔 추출부, 이용부로 구성되어 있다(日本放射線化学会, 2006c).

전자선은 전자가속기에서 발생하는 전자의 흐름이며 입자선의 일종이다. β 선도 전

자의 흐름이지만 방사성동위원소의 붕괴에 의해 발생하는 것만을 β 선이라고 부른다. 전자선은 가속기에 의해 발생시키기 때문에 일반적으로 그 출력은 높아 최대 200 kW에 달한다. 또한 Beam을 지향시키기 때문에 효율이 높고 조사 방법에 따라 90% 이상이 피조사물에 흡수된다. 다만 하전입자의 빔이기 때문에 물질의 원자와 반응하여 비교적 감쇄하기 쉽다. 전자선 각각의 에너지에 의한 심도 선량분포는 Fig. 4와 같다. 선량은 조사되면 일단 물질 내부에서부터 증대한다. 이것은 입사전자에 의해 전리작용을 일으키고 이로 인해 발생하는 전자가 더해지기 때문이다. 투과도는 예를 들어 비중 1인 물질에 5 MeV에너지의 경우 최대 투과가 약 2.7 cm로 한정되어 있다. 따라서 에너지가 높은 가속기가 실용적이지만 멸균을 목적으로 하는 산업용 가속기는 방사화의 우려 때문에 최대 10 MeV로 한정되어 있다.

전자선의 특징은 출력은 높지만 투과력에 한계가 있기 때문에 밀도가 작은 제품을 대량으로 처리하는 것에 유용하다. 전자선의 경우도 감마선과 같이 최종 포장 상태에서 처리되는 것이 많지만 포장내의 선량분포가 크기 때문에 조사하기 전에 신중하게 내부 선량분포를 측정하여 실시하는 것이 필요하다. 또한 투과 능력을 향상시키기 위해서 양면을 조사하는 방법도 널리 실시되고 있다. 전자선 멸균은 감마선 등과 다르게 기계적 장치인 가속기에서 전자를 발생시켜 사용하기 때문에 안전성이 높아 향후 활용성이 큰 분야로 전망되고 있다. 가속기는 정전가속형에서는 5 MeV급과 고주파가속형에서는 10 MeV급이 주로 사용되고 있다. 전자가속기의 용도는 매우 넓어 의료용, 산업용, 연구용으로서 폭 넓게 이용되고 있다(伊藤均, 1990). 의료용은 전자선을 X선으로 변환한 방사선 치료기기 등이 암 치료에 활용되고 있다. 산업용에서는 고분자 고기능화 (중합 및 가교 등), 반도체 격자결함 검사, 멸균, 살균 등에 이용되고 있다(日本放射線化学会, 2006c). 한편 가속기를 이용한 연구 분야에서는 소립자 및 원자핵 물리 등의 연구를 행하고 있으며 최근에는 산업적 활용도를 제고하기 위하여 장치의 소형화, 빔의 고품질화를 도모하고 있다.

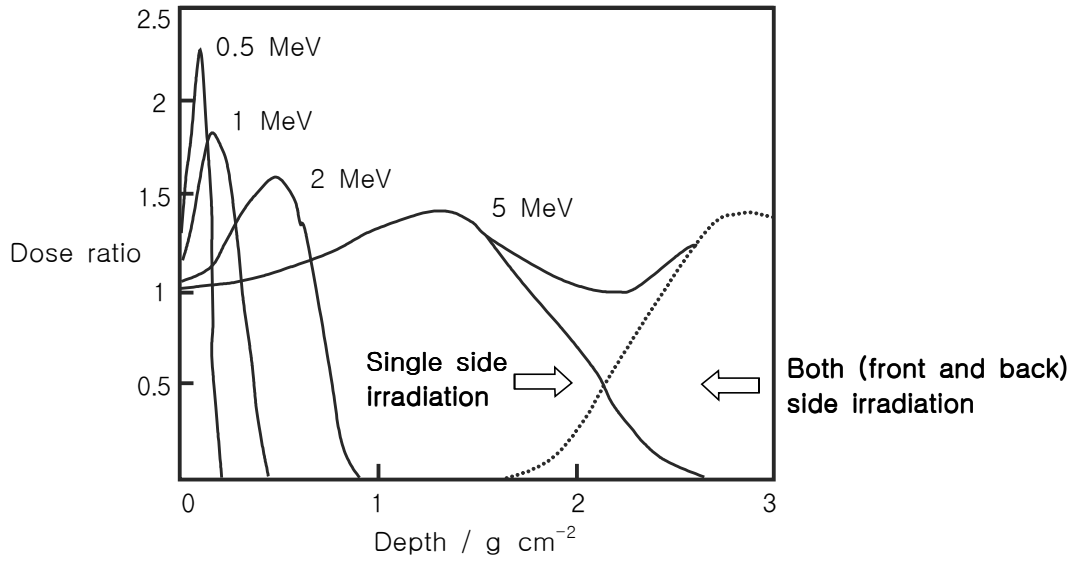


Fig. 4. Depth Dose distribution by electron beam.

다. X선 원

X선원은 가속한 전자를 양극 금속에 충돌시켜 X선을 얻는다. X선은 양극 금속의 내각공동에서 외각전자로 천이하는 특성을 살린 특성 X선과 고속의 하전 입자가 전기장을 통과할 때에 가속도를 받아서 전자기파를 방출하는 제동방사에 의한 연속 X선으로 나뉜다. 연속 X선은 특성 X선에 비해 강도가 약하다.

X선 발생시간은 연속형과 펄스형이 있다. 연속형 X선의 발생 원리는 열음극에서 방출된 전자를 30 ~ 80 kV의 전위차로 가속시켜 동, 몰리브덴, 텅스텐 등의 양극에 충돌시킴으로서 양극의 금속원자의 내각(주로 K각) 준위에 공동을 생성하고 그 공동을 메우기 위해 천이하는 높은 준위(주로 L각)로부터 형광 X선을 얻는다. 또한 30 ~ 80 kV로 가속된 전자가 양극 금속원자의 원자핵 근방을 통과하여 핵으로부터의 힘으로 궤도를 구부릴 때에 방출하는 전자로부터 연속 X선을 얻는다. 형광 X선은 원자의 전자 천이를 반영한 단색이며 연속 X선에 비하여 압도적으로 큰 강도를 갖는다(日本放射線化学会、2006e).

X선은 감마선과 같이 투과 능력이 크며, 방사성동위원소를 사용하지 않기 때문에 방사성동위원소의 감쇄나 보관에 문제가 없어 전자가속기를 그대로 사용한다는 이점이 있다. 그러나 5 MeV의 전자선을 X선으로 변환시킬 경우에는 변환 효율이 약 8% 정도로 낮으며 유효하게 조사할 수 있는 것 또한 변환효율 중에서 40% 정도로 저하된다. 즉 100 kW의 전자선을 변환 X선으로 사용할 경우에 3 kW 정도밖에 이용할 수 없고 남은 대부분은 열로 변환하기 때문에 그 열을 물로 냉각하여 제거할 필요가 있다. 1986년 미국에서 X선을 이용한 상용설비가 의료용구의 멸균용으로 도입되었지만 그 후에는 전자선만으로도 대응할 수 있는 제품이 많아졌다. 방사화를 방지하기 위해 변환 X선용으로 사용할 수 있는 전자에너지는 5 MeV 이하로 제한하고 있다(日本放射線化学会、2006d).

2001년 벨기에 IBA SA사는 연간 처리량 90,720톤 규모의 최신식 X선 조사 설비를 미국에 설치하여 AmeriCold 사로 하여금 2002년부터 식품조사에 상업적으로 활용되고 있다(GIA, 2005).

제 2장 재료 및 방법

제 1절 시료의 준비

1. 원료육 준비

시험에 사용한 식육 시료는 도축 후 24시간이 경과된 우육의 우둔부위 (bovine M. *Semitendinosus*)와 돈육 후지부위 (porcine ham)를 지역 식육점으로부터 구입하여 과도한 표면지방을 제거한 후에 지름 3 mm hole plate가 장착된 grinder (M-12S, Hankook Fujee Industries Co., Seoul, Korean)를 이용하여 가늘게 저미어 시료를 준비하였다. 햄버거 패티용 돼지 등지방 (pork back fat)은 표면 색택이 우유빛이고 이취가 없는 것을 구입하여 식육과 같은 방법으로 얇게 저미어 사용하였다.

원료육의 저장성 평가를 위해 분쇄된 우육과 돈육을 대조구와 처리구로 분류하여 폴리에틸렌비닐 (polyethylene vinyl)에 넣어 진공 및 100% 질소가스 치환포장을 하여 계획된 흡수선량에 맞게 각각 감마선과 전자선 조사를 실시하고 가속저장법의 조건 (30℃, incubator)에서 저장하며 시험에 사용하였다.

2. 햄버거 패티 제조

햄버거 패티는 국내 생산업체에서 상용하는 방법을 이용하여 제조하였다. Table 8과 같이 원료 및 부재료를 준비한 후 배합 순서에 맞게 혼합하였다. 시료의 혼합은 각각의 원료를 배합순서에 맞게 혼합기 (M15 mixer, Falsf Co., Spain)에 넣은 후 1차 혼합 8분, 2차 혼합 2분, 3차 혼합은 1분간 실시하여 혼합하였다. 이때 우육과 돈육을 전체 배합비에 대해 각각 51.5% 비율이 되도록 첨가하여 우육 패티와 돈육 패티를 제조하였으며 혼합육 (meat mixture)은 100 g 정도의 무게와 10 mm의 두께를 갖도록 Mould ($\phi 105 \times 10$ mm)를 이용하여 성형한 다음 가열처리하였다. 가열은 85℃로 예열된 Cooker (NU-VUES-3 cooker, Menominee, Mich)에서 중심 온도가 70℃가 될 때까지 실시한 후 상온에서 방냉하고 polyethylene vinyl 포장지를 사용하여 진공과 질소치환 포장을 하였다.

Table 8. Formula for manufacturing hamburger patty

Materials	Content(%)	Remark ¹⁾
Ground meat (Beef or Pork)	51.5	1
Pork back fat	16.4	1
Iced water	6.1	1
Ginger	1.0	2
Onion	8.5	2
Egg white	4.3	2
Tomato catsup	1.6	2
Isolated soy protein	4.1	2
Dried bread powder	4.1	3
Nutmeg powder	0.05	1
NaCl	0.63	1
Flavor enhancing wine	0.41	1
Black pepper powder	0.21	1
Red color reagent	0.01	1
Trisodium phosphate	0.21	1
Sugar	0.83	1
Sum	100	

¹⁾Numbers in remark indicate the order of addition of materials in a mixer.

제 2절 방사선 조사

1. 감마선 조사

시료의 감마선 조사는 선원 33만 Ci, 코발트 60 감마선 조사시설 (IR-221 gamma irradiator, MDS Nordion, Canada)을 이용하여 실온 ($20 \pm 1^\circ\text{C}$)에서 분당 70 Gy의 선량률로 하여 흡수선량이 5, 10, 15, 20 kGy가 되도록 조사하였으며 흡수선량의 확인은 방사선 선량계 (ceric cerous dosimeter, Bruker Instruments, Rheinstetten, Germany)를 사용하여 총 흡수선량의 오차를 계산하였다.

2. 전자선 조사

전자선 조사는 ELV4-electron accelerator (Energy 2.5 MeV, Beam power 40 kW, EB tech., Korea)를 이용하여 감마선 조사와 동일한 흡수선량을 갖도록 조사하였다. 이 때 빔 전류의 세기 (beam current)는 각각 1.9, 3.2, 4.5 mA 및 6.4 mA이었다. 흡수선량의 확인은 감마선 조사구와 동일하게 실시하였다.

제 3절 저장성 평가시험

1. 시료의 가속 저장

가속저장(가혹저장) 시험은 새로 개발된 식품이 시판되기 전에 저장·유통되는 기간을 감안하여 미생물의 한계를 측정 및 예측하는데 사용되는 방법이다(Kilcast & Subramaniam, 2000). 이 시험법을 이용하여 전자선 또는 감마선 조사가 냉장유통 시 신선육 또는 햄버거 패티의 품질 유지와 저장성에 미치는 영향을 빠르게 확인하기 위해 실시하였다. 가속저장 시험은 저장 온도를 높여 미생물의 생육과 품질변화 속도를 증가시켜 단시간 내에 저장 및 유통 중 식품의 품질변화 양상, 오염미생물의 생육과 부패도달 속도 및 저장가능 기간을 측정하거나 예측하는데 사용되는 방법으로 가속저장 시험을 통해 즉석 햄버거스테이크(Oh *et al.*, 2004) 및 고추장(Lee *et al.*, 1997)의 저장 중 품질변화와 유통기한을 예측한 연구가 보고된 바 있다.

즉 방사선 조사 후 시료를 가속조건 온도인 30°C Incubator (Fisher Isotemp, Fisher Scientific Inc., Pittsburgh, PA, USA)에서 저장하며 품질변화시험을 실시하였다. 시험은 제조 직후 및 저장 2, 5, 10 일에 실시하였다.

2. 미생물 생육 시험

미생물 검사를 위한 시험액은 시료 10 g에 멸균한 0.1%의 펩톤(peptone)수를 100 mL까지 채워 2분간 균질기 (Stomacher, Mark II Lab Blender, Tekmar Teledyne Technologies Inc., Mason, Ohio, USA)를 이용하여 잘 균질한 다음 총균수는 Plate Count Agar (Difco Co., USA), 젖산균은 MRS broth (Difco Co.), 저온균은 Tryptic Soy Agar (Difco Co.)를 이용하여 생육을 검사하였다. 총균 및 젖산균은 37°C에서 48시간, 저온 (0°C~25°C)에서도 잘 성장하는 부패균인 저온균 슈도모나스균 (*Pseudomonas spp.*)의 경우에는 5°C에서 7일 동안 배양한 후에 형성된 집락을 계수하였다. 미생물수는 시료 1 g당 log 집락형성단위(colony forming unit, CFU)로 나타났다. 검출을 위한 최소계수 한계치는 1 log CFU/g이었다.

3. 지방 산패도(TBA 값) 측정

지방 산패도(thiobarbituric acid value)는 Jo *et al.* (2000)의 TBARS (2-thiobarbituric acid reactive substances)법으로 측정하였다. 시료 5 g에 50 μ L의 산화방지제(BHA : butylated hydroxyanisole, (7.2% in ethanol)와 증류수 15 mL을 넣은 후 homogenizer (DIAX 900, Heidolph, Co., Ltd., Germany)로 균질화시켰다. 균질물 1 mL에 TBA/TCA 용액 (20 mL TBA in 15% tri-chloro acetic acid, TCA) 2 mL을 넣은 후 끓는 물에서 15분간 가열하였다. 냉각 후 원심분리기 (UNION 5KR, Hanil Science Industrial, Co., Ltd., Inchun, Korea)를 이용하여 원심 분리한 다음 (2,000 rpm, 15분간) 상층액 1 mL을 취하여 532 nm에서 흡광도를 측정하고 검량선을 이용하여 지질의 과산화 지표인 말론디알데히드 (MDA : malondialdehyde)의 몰농도를 구하였다. 이 때 얻어진 결과는 μ g malondialdehyde/g sample (wet weight basis)로 표시하였다.

4. 휘발성 염기태 질소(VBN) 함량 측정

휘발성 염기태 질소 (VBN : volatile basic nitrogen)의 함량은 Conway 미량 확산법을 이용하여 측정하였다(Japanese Ministry of Hygiene, 1973). 시료 2 g에 10% TCA 10 mL을 가하여 혼합기 (blender)로 30초간 균질화한 후 다시 10% TCA로 20 mL까지 채운 후 여과지 (Whatman Paper No. 4)로 여과한 여과액 1 mL을 Conway 외실 왼쪽에 넣고 내실에 0.01N 붕산 (H_3BO_3) 1 mL과 Conway 산알칼리 지시약 (0.066% methyl red in ethanol : 0.066% bromocresol green in ethanol = 1 : 1) 50 μ L을 가하고 외실 오른쪽에 탄산칼륨 (K_2CO_3) 1 mL을 넣어 37°C에서 2시간 방치한 후 내실에 0.02N 황산 (H_2SO_4)으로 엷은 붉은색이 될 때까지 적정하였다.

제 4절 이화학적 특성 평가

1. 색도 측정

시료표면을 color/color differencemeter (Spectrophotometer, Model CM-3500d, Minolta Co., Japan)를 이용하여 헌터 색체계(Hunter's color system)에 의한 명도 (L^* : lightness), 적색도 (a^* : redness) 및 황색도 (b^* : yellowness)에 대해 각각의 값을 측정하였다. 이 때 표준색은 L^* 값이 90.5, a^* 값이 0.4, b^* 값이 11.0인 색 보정 평판 (calibration plate)를 표준으로 사용하였다.

2. 경도 측정

Claus *et al.* (1990)의 방법을 변형시켜 포장방법별 방사선 조사에 의한 우육 패티와 돈육 패티의 물성변화를 관찰하였다. 물성시험기 (texture analyser, TA-XT2i, SMS Co. Ltd., UK)를 이용하여 경도를 측정하고 힘-시간 곡선(force(g) - time(s) curve)을 구한 후 texture expert software system으로 값을 구하였다. 측정조건은 pre-test speed 5.0 mm/s, test-speed 5.0 mm/s, post-test speed 5.0 mm/s, distance 30%로 실시하였다.

제 5절 관능 평가

우육 및 돈육 패티의 관능검사는 Oh *et al.* (2004)의 방법을 사용하여 평가하였다. 관능평가용 시료는 170°C가 되도록 예열된 조리기 (cooker, NU-VUES-3 cooker, Menominee, Mich)에서 패티의 중심온도가 70°C가 될 때까지 가열한 후 관능평가자에게 제시하였다. 관능검사를 위한 평가자(panel)는 미리 훈련된 10인을 대상으로 하였으며 이때의 평가항목은 색택(color), 씹힘성 (chewiness), 맛 (taste), 이취 (off-flavor) 및 전체적인 기호도(overall acceptability)를 7점 척도법으로 평가하였다. 이취를 제외한 4가지 평가항목의 배점은 1: 매우 나쁘다. ~4: 보통이다. ~7: 매우 좋다. 로, 이취의 경우는 1: 전혀 없다. ~4: 보통이다. ~7: 아주 심하다. 로 척도를 정하여 실시하였다. 평가자의 나이·성별 등을 기록하고 관능검사 중에는 정수기에 서 받은 물을 각 시료 사이에 제공하였으며 관능에 미치는 영향을 최소화하기 위해 평가시간은 15~20분으로 정하였다.

제 6절 복귀돌연변이 시험법을 이용한 단기 안전성 평가

유전독성학적 안전성을 평가하기 위해 원료육과 햄버거 패티를 50 kGy의 흡수선량으로 감마선을 조사한 후 Ames *et al.* (1975)에 의해 개발되어 Maron & Ames (1983)에 의해 개선된 복귀돌연변이 평가법을 준용하여 실시하고 시료의 처리는 Yook *et al.* (2000)의 방법을 이용하여 실시하였다.

1. 시험용액의 제조

시험용액을 제조는 시료를 분쇄한 후 각각 10 g의 시료를 30 mL의 증류수(물 추출물)나 혼합 유기용매 (용매추출물, methanol:chloroform = 2:1)가 들어있는 삼각 flask에 넣고 3분간 균질하였다. 균질물을 shaking incubator (Bio-shaker BR-40LF, TAITEC, Tokyo, Japan)에서 4℃, 20 rpm으로 교반하며 하룻밤동안 추출하였다. 추출물은 9,000 × g 에서 30분간 원심 분리하여 상등액을 취하였다. 이 조작을 3회 반복하여 얻은 상등액을 동결 건조하였다. 추출물은 증류수로 녹여 멸균한 여과지 (0.45 μm filtration kit, MILLEX-HV, Millipore, Molsheim, France)로 여과한 후 5,000 μg/plate부터 1,250 μg/plate의 농도로 준비하여 복귀돌연변이 시험에 사용하였다. 용매추출물은 물 대신 디메틸설폭사이드 (DMSO : dimethylsulfoxide) (Aldrich Chemical Co., Inc., Milwaukee, USA)를 사용하여 용해시킨 다음 물 추출물과 같은 방법으로 여과한 후 시험에 사용하였다.

2. 복귀돌연변이 시험

시험에 사용된 균주는 *Salmonella typhimurium* LT2를 친주로 하는 *S. typhimurium* 으로 한국화학연구원 안전성평가연구소에서 분양받아 형질을 확인한 후 사용하였다. TA98과 TA100에서는 histidine 유전자의 G-C (guanine-cytosine) 염기쌍의 변화가 검출될 수 있다. 이러한 균주는 DNA 손상의 수복기능이 결손되어 있고 자외선, 방사선 또는 각종 유전독성유발물질에 대해 높은 감수성을 나타내는 것으로 알려져 있다. TA98과 TA100의 대사활성화를 위한 간 균질액 (S9 fraction)은

Sprague-Dawley rat의 간으로부터 분리한 것으로 Oriental Yeast Co. (Tokyo, Japan)에서 구입하였으며, 5% (v/v)의 S9 mix를 제조하여 사용하였다. S9 mix는 0.5 mL/plate로 처리하였다. 음성 대조군은 시험물질의 조제에 사용한 증류수를 사용하였으며 양성 대조군의 시험균주 및 종류와 대사활성화 유무에 따라 TA98(-S9)에 4NQO (4-nitroquinoline-N-oxide), TA98(+S9)과 TA100(+S9)에 2-AA (2-aminoanthracene), TA100(-S9)에 SA (sodium azide)을 사용하여 유전독성유발을 확인하였다. 독성유발물질은 모두 Sigma Chemical Co. (St Louis MO, USA)로부터 구입하여 사용하였다.

시험물질의 검지처리는 대사 활성계 적용 (+S) 및 미적용 (-S) 하에 대사활성법으로 하였으며 각 농도군당 3개의 plate를 사용하였다. 시험물질 0.1 mL과 S9 mix (혹은 멸균 증류수) 0.5 mL에 NB(nutrient broth) 배지에서 12시간 배양시켜 대수기 (약 2×10^9 cells/mL) 상태에 이르도록 한 배양액 0.1 mL을 top agar에 혼합하여 최소 글루코오스 한천 평판 (minimal glucose agar plate)에 부어 고화시킨 다음 37°C에서 48시간 배양한 후 복귀돌연변이 집락수를 계수하였다.

시험결과는 복귀돌연변이 집락수의 평균과 표준편차로 나타내었으며 돌연변이 유발성의 판정은 복귀돌연변이 집락수가 용매 대조군의 2배 이상이면서 용량의존성을 갖는 경우를 양성으로 하였다.

제 7절 검지 특성 연구

1. 시약

본 연구에 사용한 모든 시약은 특급시약으로 미국 Sigma사 (Sigma Chemical Co., St. Louis, MO, USA)에서 지방분해산물인 hydrocarbons의 standard는 독일 TeLA사 (Berlin, Germany)로부터 구입하여 사용하였다. 지방추출 및 chromatography에 사용한 n-pentane, n-hexane, isopropanol 등 유기용매는 고속액체크로마토그래피 (HPLC : High Performance Liquid Chromatography)용으로 구입하여 이를 다시 나선충전관 이중증류장치 (wire spiral packed column double distilling) (Normchliff, Wertheim, Germany)로 재증류한 것을 사용하였다. 흡착제 (Florisil, 60~100 mesh)는 Fisher Scientific사 (Pittsburgh, PA, USA)의 제품을 구입하여 Lee & Kim et al. (2001)의 방법으로 550℃ 마이크로웨이브 회화로 (灰化爐)에서 하룻저녁을 태운 뒤 저장하였다가 사용하기 전 5시간 이상 130℃에서 탈수하고 상온에서 식힌 후 다시 3% 물을 가하여 균질화하고 이를 12시간 이상 방치한 후 불활성화시켜 충전제로 사용하였다.

2. 시료의 지방추출

지방추출 및 hydrocarbons의 분리는 Schreiber *et al.*(1994)의 방법에 준하여 실험하였다. 비교적 지방함량이 적은 시료를 30g씩 재어 이를 작게 자른 후 beaker에 담아 재증류된 n-pentane과 isopropanol 혼합용매 (3:2, v/v) 30 mL를 첨가하고 균질기 (homogenizer, DiAx 900, Heidolph, Germany)로 여러 번 균질화하였다. 균질화한 시료는 1,500 × g로 20분간 원심 분리시켜 상등액을 분리한 후 잔존물에 처음 사용한 혼합 유기 용매량의 1/3을 다시 첨가하여 재추출하고 이를 원심 분리하여 상등액을 첫 번째 상등액과 합한 후 진공회전농축기 (rotary vacuum evaporator)를 사용하여 유기 용매를 제거하고 질소기류 하에서 잔존 유기용매를 휘발시킨 뒤 지방만을 취하여 냉동 저장하여 시료로 사용하였다.

3. Hydrocarbon류 분리

불활성화시킨 흡착제 florisil 25 g를 280 × 20 mm 크로마토그래피 분리관 (chromatography column)에 충전한 후 추출한 지방 1 g에 internal standard로 1 mL eicosane (4 µg/mL hexane)을 첨가하여 분리관 (column)에 가한 뒤 60 mL n-hexane 을 용리용매로 사용하여 hydrocarbons를 분리하였다. 이 용리용매는 rotary vacuum evaporator를 이용하여 2 mL까지 농축한 후 1 mL까지 질소로 농축하여 GC/MS 분석기기를 이용하여 분석하였다.

4. GC/MS에 의한 분석

질량분석에 사용한 분석기기는 Finnigan GC/MS (Polaris Q with Trace GC)를 사용하였으며 시료의 이온화는 전자이온화(EI : electron impact ionization)방법으로 행하였다. GC/MS 분석조건은 ionizing voltage를 70 eV로 하였다. 이온원 (ion source) 과 injector 온도는 각각 250°C로 하였으며 carrier gas는 Helium을 사용하고 유속은 1.0 mL/min으로 하였다. 아울러 분석할 분자량의 범위는 30~350(m/z)으로 설정하였다. 모세분리관 (capillary column)은 DB-5 (30 m × 0.32 mm i.d., 0.25 µm film thickness, J&W Scientific, Folsom, USA)를 이용하였다. 온도는 60°C를 기준으로 설정하고 25°C/min 속도로 170°C까지, 2°C/min 속도로 205°C/min까지, 10°C/min 속도로 270°C까지 승온시켰다. Hydrocarbon류 분석을 위해서 시료 1 µL를 주입하고 split ratio는 1:20으로 하였다. Total ionization chromatogram (TIC)에 분리된 각 peak의 성분분석은 mass spectrum library (Robert, 1995)와 mass spectral data book (Stehagen *et al.*, 1974)의 spectrum과의 일치 및 retention index와 표준물질의 분석 data를 비교하여 확인하였으며 internal standard를 이용하여 hydrocarbon류의 생성량을 정량화하였다.

제 8절 통계 처리 및 결과 평가

각 항목에 대해 동일한 실험을 5회 반복 실시하였으며, 얻어진 결과들을 SAS[®] software (1988)에서 개발한 general linear model procedures를 이용하였으며 least square 평균값을 Duncan의 multiple range test법을 사용하여 평가하였다($P < 0.05$).

제 3장 결과 및 고찰

제 1절 방사선 선종별 조사가 미생물 생육에 미치는 효과

1. 분쇄 우유 및 분쇄 돈육

가. 총균수의 변화

포장방법 (질소치환 포장, 진공 포장)을 달리한 후 흡수선량별로 감마선과 전자선이 조사된 분쇄 우유 및 분쇄 돈육을 30℃에서 10일간 가속저장 시험을 하였을 때 총균수의 생육변화를 각각 Table 9와 10에 나타내었다.

분쇄 우유의 방사선 선종별로 초기 미생물의 감균 효과는 거의 비슷하게 나타나 선종별 차이는 없는 것으로 판단되었다. 또한 포장방법별 차이도 두드러지게 나타나지는 않았다. 분쇄 우유의 초기 미생물 오염수준은 4.9 log CFU/g로 일반적인 분쇄 식육에서 발견되는 수준이었으나(Lee *et al.*, 1998a; Kim *et al.*, 1998b), 가속저장 2일째 이미 부패가 한 것으로 나타났다.

일반적으로 식품에서 총균수가 6 log CFU/g에 도달하면 부패 초기이며 7 log CFU/g에서는 부패현상을 나타내어 더 이상 가식이 불가능하다(Lee *et al.*, 2000). 본 실험에서도 총균수가 7 log CFU/g 이상 된 시료는 포장재가 미생물의 대사과정에 의해 생성된 가스로 인해 부풀어 올랐으며 심한 부패취와 함께 점액질이 생성되는 등 전형적인 부패 현상이 관찰되었다.

감마선, 전자선을 조사한 처리구 모두에서 조사선량에 의존적으로 초기 오염된 총균수의 양이 감소되었다. 질소치환 및 진공포장 하여 5 kGy 감마선 조사한 우유의 총균수는 각각 4.48 및 3.20 log CEU/g으로 비조사구에 비해 약간 감소하였으며, 진공포장 처리구가 미생물 감균에 효과적인 것으로 나타났다. 10 kGy 조사구 역시 질소치환 및 진공포장 처리구에서 각각 3.62 및 3.04 log CFU/g으로 선량이 증가할수록 총균수가 감소하였다. 그러나 다른 많은 연구결과의 보고와는 달리 방사선 조사 직후 10 kGy 처리구 까지 미생물의 생존이 발견되어 오염된 미생물의 방사선 저항성이 높게 나타났다. 생육

이 관찰된 시료에서 발견된 주요한 미생물의 균락을 관찰한 결과 *Bacillus* spp.으로 판명되었다. *Bacillus* spp.는 Gram 양성 내열성균으로 방사선 조사에서도 상당히 강한 저항성을 나타내는 것으로 보고된 D_{10} 값은 0.59 kGy이다(Yook, 1999). 식육의 주요 오염균은 아니나 본 연구에서와 같이 식육을 처리하고 분쇄하는 과정에서 오염되어 저장성에 영향을 줄 수 있다(Thayer & Boyd, 1993). Kim *et al.* (1998)은 우육을 5°C에서 8일간 저장하면서 총균수를 분석한 결과, 3 kGy 조사에 의해 8일 정도 미생물 성장이 지연된 것으로 보고하였다.

고선량인 15 kGy 이상의 시료에서도 저장 중 생존한 균의 증식이 발견되었다. 감마선을 조사한 분쇄 우육의 경우 저장 2일이 경과했을 때 15 kGy 조사된 쇠고기에서 질소치환 포장의 경우 3.80 log CFU/g, 진공포장의 경우 3.34 log CFU/g로 균의 생장이 발견되었고 20 kGy 조사구의 경우 포장방법별 차이가 없이 저장 5일경부터 생존한 균의 회복현상을 나타내었다.

전자선 조사구의 경우 감마선 조사구와 아주 유사한 미생물 생육을 보이는 것을 나타냈으나 동일선량에서 감마선이 전자선에 비해 미생물 생육억제에 보다 효과적인 것으로 나타났다. 방사선 선종별 조사 비교는 거의 연구된 바가 없으며 미생물학적인 영향 측면에서 비교되어 있을 뿐이다. Chung *et al.* (2000)은 쇠고기에 감마선과 전자선을 조사하여 병원성 세균 및 일반세균에 관한 살균효과를 알아보았으며 감마선과 전자선의 총균수에 대한 영향은 거의 비슷하지만 감마선에서 조금 더 살균효과가 크다는 보고가 있어 본 연구 결과도 같은 경향을 나타내었다.

포장방법에 따른 방사선 조사의 영향은 명확하게 드러나지는 않았으나 대체적으로 진공포장 후 조사하는 것이 방사선 조사에 대한 효과가 조금 더 큰 것으로 나타났다.

한편 분쇄 돈육의 경우 감마선 및 전자선 조사선량이 증가함에 따라 총균수가 감소하였으며, 저장기간이 경과함에 따라 돈육의 총균수는 점차 증가하는 것으로 나타나 분쇄 우육과 동일한 경향이였다. 조사 직후 비조사구의 총균수는 3 ~ 4 log CFU/g이었으나 분쇄 우육과 달리 감마선, 전자선 조사구 모두 10 kGy 이상의 선량에서는 미생물 생육이 관찰되지 않았다.

선종별 미생물 사멸효과는 분쇄 우육의 결과와 마찬가지로 감마선 조사가 다소 효과적인 것으로 나타났으나 포장방법별 방사선 조사에 의한 총균수 감소율은 진공 포장하여 조사할 경우가 더 우수한 감소효과를 보여 Byun *et al.* (1999)의 결과와 일치하였다. Javanmard *et al.* (2006)은 닭고기의 미생물학적, 화학적, 관능적 품질에 대한 냉동저장

(-18℃)과 감마선 조사 (5 kGy)의 병용처리 효과를 확인한 결과 병용처리에 의해 미생물 증식을 효과적으로 막을 수 있었고 저장성 개선 및 화학적, 관능적 품질 특성도 냉동닭 고기와 유의적인 차이가 없는 것으로 나타났다.

총균수의 회복기간을 살펴보면 감마선과 전자선 모두 15 kGy까지는 저장 2일 만에 균의 회복이 시작되었는데 이는 분쇄 우육의 결과와 동일하였으며 Kwak *et al.* (2002)의 연구에서도 유사하게 나타났다. Byun *et al.* (1999)은 감마선 조사가 진공 포장, 합기 포장된 돈육의 저장성에 미치는 영향을 평가한 바 있으며 진공 포장 시에 살균 효과 및 균 증식억제 효과가 우수하다고 보고한 바 있다(Lee *et al.*, 1999a).

조사선종에 따른 영향 역시 분쇄 우육의 결과와 같이 감마선이 전자선에 비해 미생물 생육 억제에 보다 효과적인 것으로 나타났다. 이러한 현상은 분쇄육의 경우 일반 식육과는 달리 분쇄과정에 의해 미생물이 내부까지 오염되는데 이때 감마선이 전자선에 비해 투과도가 높기 때문에 분쇄육 내부에 오염된 미생물 제어에 보다 효과적이기 때문으로 사료된다. 그러나 포장방법에 따른 방사선 조사의 영향은 거의 없는 것으로 나타나 분쇄 우육의 결과와는 다른 결과를 얻었다.

방사선 조사에 의한 미생물의 사멸은 주로 미생물 세포의 DNA 손상에 기인한다 (Alper, 1977; Verma & Singh, 2001). 또 다른 중요한 기전은 방사선조사에 생성된 반응성이 높은 활성 산소종이 미생물 세포막에 산화적 손상을 주기 때문이다(Mishra, 2004). 이중 과산화수소(hydrogen peroxide)는 전이금속원소 (transition metal element)와 반응하여 단백질, 지방, DNA와 같은 세포 구성성분에 손상을 준다(Asad *et al.*, 2004). 산소가 존재할 경우 방사선 조사에 의한 세포 손상이 촉진되며 세포막 구조에 손상을 주어 에너지 생성과 같은 세포의 정상적인 대사과정을 교란하고 성장을 저해한다 (Alper, 1977). 토코페롤과 정자유 (eugenol)와 같은 항산화성분 및 콜레스테롤은 방사선 조사에 의한 지방 손상에 변화를 준다(Mishra, 2004).

이와 같이 방사선 조사에 의한 미생물 손상은 여러 가지 조건에 따라 달라질 수 있는데 본 연구 결과에서도 확인된 바와 같이 조사선종 및 포장방법을 달리할 경우 미생물의 방사선 민감도에 영향을 주기 때문으로 사료된다. 또한, 현재까지 식육을 저장하는 동안 방사선 조사가 미생물 생육에 미치는 살균효과를 확인한 연구들은 많이 있으며 동일한 종류의 식육이라도 같은 선량에서 미생물의 살균효과는 연구자별로 상당히 다를 수 있다. 그러한 이유는 도체의 처리방법, 초기 미생물 오염도와 미생물의 종류 등이 다르기 때문으로 판단된다.

Table 9. Effects on growth of total aerobic bacteria of ground beef with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

(Unit: log CFU/g)

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	4.94	- ¹⁾	-	-
		5	4.48	5.97	-	-
		10	3.62	4.15	6.59	-
		15	ND ²⁾	3.80	5.80	6.83
		20	ND	ND	4.23	5.62
	Vacuum	0	4.90	-	-	-
		5	3.20	5.91	-	-
		10	3.04	4.04	6.45	-
		15	ND	3.34	5.40	6.78
		20	ND	ND	3.45	5.58
Electron Beam	N ₂	0	4.94	-	-	-
		5	4.64	6.99	-	-
		10	3.65	5.61	7.81	-
		15	ND	3.83	6.81	7.92
		20	ND	ND	5.34	7.69
	Vacuum	0	4.90	-	-	-
		5	3.32	6.92	-	-
		10	3.18	5.49	7.72	-
		15	ND	3.68	6.40	7.86
		20	ND	ND	5.46	6.62

¹⁾Bar indicates no determination of cells because of spoilage.

²⁾Not detected within the detection limit < 1.00 log CFU/g.

Table 10. Effects on growth of total aerobic bacteria of ground pork with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

(Unit: log CFU/g)

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	4.83	- ¹⁾	-	-
		5	3.49	5.72	-	-
		10	ND ²⁾	4.61	6.58	-
		15	ND	3.77	5.84	6.98
		20	ND	ND	4.57	5.59
	Vacuum	0	3.75	-	-	-
		5	3.38	5.61	-	-
		10	ND	4.49	6.43	-
		15	ND	3.68	5.83	6.86
		20	ND	ND	4.49	5.53
Electron Beam	N ₂	0	4.83	- ¹⁾	-	-
		5	2.85	6.76	-	-
		10	ND	5.65	7.67	-
		15	ND	3.79	6.49	7.98
		20	ND	ND	5.59	7.63
	Vacuum	0	3.75	-	-	-
		5	3.48	6.69	-	-
		10	ND	4.91	7.46	-
		15	ND	3.75	6.48	7.89
		20	ND	ND	5.54	7.61

¹⁾Bar indicates no determination of cells because of spoilage.

²⁾Not detected within the detection limit < 1.00 log CFU/g.

나. 젖산균 및 저온균의 생육변화

식육 내에서 병원성균을 제외한 일반 미생물 중 젖산균의 오염도는 상당히 높은 편이다(Yook, 1999). 또한, 저온균은 호기적인 조건의 저온에서 육류의 변질을 초래하는 주요 미생물이기 때문에 저온에서 유통되는 식품에 있어서 총균이나 중온균보다 부패의 중요한 지표로서 평가된다(Hayes, 1992; Kraft, 1986). 특히, *Bacillus* spp. 등 포자 형성균은 호냉성, 호열성균들이 대부분이고 강력한 단백질 및 전분질 분해력이 있어 식품의 부패에 관여하며 바실러스 세라우스(*Bacillus cereus*)는 최저 7°C의 낮은 온도에서도 저장유통 시에 성장을 계속 유지하는 저온성 미생물로 간주되고 있다(Meer *et al.*, 1991; Turner *et al.*, 1996). 이러한 포자 형성균은 식품 중 식육 및 가공육과 그 가공품, 곡류, 어패류, 유류 및 유제품 등에 많이 존재한다(Kamer & Gilbert, 1989; Harmon & Kautter, 1991; Greenberg *et al.*, 1966; Kreiger *et al.*, 1983; Franklin, 1970). 이 중 *B. cereus*는 식육 및 가공육에 생육하여 식중독을 유발시키는 엔테로톡신 (enterotoxin)을 생산하기도 한다(Lund, 1991; Schmidt *et al.*, 1961; Sooltan *et al.*, 1987; van Netten *et al.*, 1990; Harmon & Kautter, 1991).

분쇄 우육을 질소치환 포장, 진공 포장한 후 감마선과 전자선을 각각 조사하고 3 0°C에서 10일간 가속저장 시험을 하였을 때 젖산균 (Lactic acid bacteria)과 저온균 (Psychrophilic bacteria)인 슈도모나스균 (*Pseudomonas* spp.)의 생육변화를 각각 Table 11과 Table 12에 나타냈다. 비조사 대조구인 분쇄 우육의 초기 젖산균과 저온균수는 모두 4 log CFU/g 정도인데 반해 5 kGy 이상 감마선이나 전자선을 조사했을 경우 모두 검출한계 이하로 나타나 총균수 (Table 9)와 비교할 때 방사선에 대한 감수성이 매우 높음을 알 수 있었다. 이 결과는 Yook (1999)의 보고와도 같은 경향을 나타낸 것이다.

감마선 조사구에서 젖산균과 저온균은 저장이 진행됨에 따라 차츰 회복되어 증식하였는데 10 kGy까지는 저장 2일 만에 생육이 관찰되었고 15 kGy 이상부터는 저장 5일부터 회복이 발견되었다. 전자선 조사구의 경우에는 저장에 따른 젖산균의 회복속도에 있어서 감마선 조사구와 약간의 차이를 보였다. 15 kGy까지는 저장 2일 만에 회복되어 앞서 기술한 감마선 조사에 의한 젖산균의 회복속도에 비해 기간이 단축되어 기존의 연구와 일치하였다(Kim *et al.*, 1998b). 또한, 포장방법에 따른 젖산균과 저온균의 살균효과는 총균수 생육 결과와 마찬가지로 유의적인 차이를 보이지

않았으나 진공포장 처리구가 저온균 생육저하에 약간 더 효과적이었다.

한편, 분쇄 돈육을 질소치환 포장, 진공 포장한 후 감마선과 전자선을 각각 조사하고 30℃에서 10일간 가속저장 시험을 하였을 때의 젖산균 (Lactic acid bacteria)과 저온균 (Psychrophilic bacteria)의 생육변화를 각각 Table 13과 Table 14에 나타냈다. 분쇄 돈육 또한 분쇄 우육의 결과에서와 같이 총균수 결과(Table 10)에 비해 젖산균과 저온균의 감마선 조사에 대한 감수성은 아주 민감한 편이었으며 전자선이 감마선에 비해 사멸효과가 조금 떨어지는 것을 알 수 있었다. 포장방법별 방사선 조사에 의한 젖산균과 저온균의 사멸효과 역시 진공 포장하여 조사 처리하는 것이 질소치환 포장에 비해 생육억제 효과가 우수한 것으로 나타나 분쇄 우육의 결과와 유사하였다.

Table 11. Effects on growth of lactic acid bacteria of ground beef with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

(Unit: log CFU/g)

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	4.65	- ¹⁾	-	-
		5	ND ²⁾	4.90	-	-
		10	ND	3.88	5.84	-
		15	ND	ND	4.57	5.93
		20	ND	ND	3.71	4.59
	Vacuum	0	4.76	-	-	-
		5	ND	4.68	-	-
		10	ND	3.53	5.83	-
		15	ND	ND	4.26	5.89
		20	ND	ND	3.36	4.57
Electron Beam	N ₂	0	4.65	-	-	-
		5	ND	5.92	-	-
		10	ND	3.77	6.87	-
		15	ND	3.90	5.59	7.56
		20	ND	ND	4.73	6.72
	Vacuum	0	4.76	-	-	-
		5	ND	4.69	-	-
		10	ND	3.57	6.83	-
		15	ND	2.78	5.36	7.49
		20	ND	ND	4.43	6.66

¹⁾Bar indicates no determination of cells because of spoilage.

²⁾Not detected within the detection limit < 1.00 log CFU/g.

Table 12. Effects on growth of Psychrophilic bacteria of ground beef with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

(Unit: log CFU/g)

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	4.80	- ¹⁾	-	-
		5	3.34	5.15	-	-
		10	ND ²⁾	3.49	6.69	-
		15	ND	ND	5.72	5.79
		20	ND	ND	3.32	4.58
	Vacuum	0	5.81	-	-	-
		5	ND	4.63	-	-
		10	ND	3.45	6.32	-
		15	ND	ND	4.80	5.72
		20	ND	ND	3.20	4.49
Electron Beam	N ₂	0	4.80	-	-	-
		5	3.61	6.57	-	-
		10	ND	5.52	7.72	-
		15	ND	3.53	7.71	7.82
		20	ND	ND	5.41	7.51
	Vacuum	0	5.81	-	-	-
		5	ND	6.54	-	-
		10	ND	5.46	7.45	-
		15	ND	3.80	6.74	7.76
		20	ND	ND	5.32	7.45

¹⁾Bar indicates no determination of cells because of spoilage.

²⁾Not detected within the detection limit < 1.00 log CFU/g.

Table 13. Effect on the growth of lactic acid bacteria of ground pork with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

(Unit: log CFU/g)

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	3.81	- ¹⁾	-	-
		5	ND ²⁾	5.83	-	-
		10	ND	4.45	6.58	-
		15	ND	ND	5.68	5.86
		20	ND	ND	4.57	4.68
	Vacuum	0	3.76	-	-	-
		5	ND	4.91	-	-
		10	ND	3.72	6.54	-
		15	ND	ND	5.59	5.64
		20	ND	ND	4.32	4.59
Electron Beam	N ₂	0	3.81	-	-	-
		5	ND	6.83	-	-
		10	ND	4.49	6.59	-
		15	ND	2.78	5.72	7.54
		20	ND	ND	4.62	6.72
	Vacuum	0	3.76	-	-	-
		5	ND	6.93	-	-
		10	ND	4.73	6.56	-
		15	ND	2.60	5.63	7.53
		20	ND	ND	4.41	5.68

¹⁾Bar indicates no determination of cells because of spoilage.

²⁾Not detected within the detection limit < 1.00 log CFU/g.

Table 14. Effect on growth of Psychrophilic bacteria of ground pork with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

(Unit: log CFU/g)

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	3.91	- ¹⁾	-	-
		5	2.30	5.67	-	-
		10	ND ²⁾	4.40	6.54	-
		15	ND	ND	5.38	5.71
		20	ND	ND	3.18	4.26
	Vacuum	0	4.87	-	-	-
		5	ND	4.85	-	-
		10	ND	3.79	6.51	-
		15	ND	ND	4.59	5.65
		20	ND	ND	3.11	4.18
Electron Beam	N ₂	0	3.91	-	-	-
		5	2.78	6.66	-	-
		10	ND	4.83	7.58	-
		15	ND	3.82	6.40	7.87
		20	ND	ND	6.26	7.57
	Vacuum	0	4.87	-	-	-
		5	2.00	6.54	-	-
		10	ND	4.71	7.54	-
		15	ND	3.79	6.32	7.69
		20	ND	ND	5.15	7.41

¹⁾Bar indicates no determination of cells because of spoilage.

²⁾Not detected within the detection limit < 1.00 log CFU/g.

2. 햄버거 패티

가. 총균수의 변화

우육 패티를 제조하여 질소치환 포장, 진공 포장을 하고 감마선과 전자선을 각각 조사한 후 30℃에서 10일간 저장하면서 총균수를 살펴본 결과를 Table 15에 나타내었다. 비조사구의 미생물 오염도는 약 3.61 log CFU/g 정도였으나 5 kGy 이상의 감마선 조사구의 경우 포장방법에 상관없이 검출한계 이하로 나타나 Oh *et al.* (2004)의 결과와 일치하였다. 그러나 전자선의 경우에는 10 kGy 조사구에서도 미생물 검출되어 감마선에 비해 미생물 살균 효과가 크게 감소하였다.

가공식품의 초기 미생물을 제어하는 것은 식품의 위생성, 안전성 및 저장성을 확보하는데 있어 매우 중요하다(Park *et al.*, 1996). 일반적으로 식품의 저장 초기에 총균수가 많으면 부패 변질에 도달하는 시간이 짧아지므로 저장 초기에 총균수가 적을수록 저장성이 좋아지는데 (Song *et al.*, 2000) 이러한 측면에서 볼 때 감마선이 전자선에 비해 보다 효과적인 방법으로 판단된다.

포장방법에 의한 사멸율의 차이는 거의 없었으며 진공 포장할 경우가 조금 더 효과적이었다. 부패에 도달하는 시기를 살펴보면 패티의 가열처리로 인해 비조사구의 경우에는 저장 2일 만에 부패에 도달하였고 조사선량이 증가할수록 부패시기가 지연되어 20 kGy로 조사를 할 경우에 저장 10일이 경과하여도 부패되지 않았다. 이와 같은 결과는 Oh *et al.* (2004)의 연구와 일치하는 것으로 나타났다. Yildirim *et al.* (2005)은 미트볼의 미생물학적, 화학적 품질지표에 대한 감마선 조사 (7 kGy)의 미생물 사멸효과 연구에서 대장균 (*Coliform*, *E. coli*)은 2 kGy에서, 곰팡이와 효모 및 포도상구균 (*Staphylococcus spp.*)은 4 kGy에서 완전 살균되어 미생물학적인 안전성을 확보할 수 있었다고 보고하였다.

돈육 패티를 제조하여 질소치환 포장, 진공 포장하고 감마선 및 전자선을 조사한 후 30℃에서 10일간 저장하면서 총균수를 살펴본 결과는 Table 16에 나타내었다. 비조사구의 총미생물 오염도는 3 log CFU/g 정도였으며 감마선의 경우에는 5 kGy 이상 조사 시 포장방법에 상관없이 검출한계 이하로 나타났으나 전자선의 경우 10 kGy 조사구에서도 미생물 검출되어 감마선에 비해 미생물 살균 효과가 크게 감소하였다. 또한, 진공 포장이 질소치환 포장에 비해 미생물 사멸 및 생육억제 효과가 좋은 것으로 나타나 모든 결과가 앞의 우육 패티의 실험(Table 15)과 동일하게 나타났다.

Table 15. Effect on growth of total aerobic bacteria of beef patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

(Unit : log CFU/g)

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	3.61	- ¹⁾	-	-
		5	ND ²⁾	7.59	-	-
		10	ND	5.66	6.65	-
		15	ND	3.78	5.86	7.40
		20	ND	ND	3.80	5.88
	Vacuum	0	3.62	-	-	-
		5	ND	5.54	-	-
		10	ND	3.93	6.64	-
		15	ND	2.48	5.83	7.38
		20	ND	ND	3.79	5.88
Electron Beam	N ₂	0	3.61	-	-	-
		5	3.15	7.79	-	-
		10	2.70	6.95	-	-
		15	ND	6.66	-	-
		20	ND	6.90	-	-
	Vacuum	0	3.62	-	-	-
		5	3.11	7.72	-	-
		10	2.48	6.72	-	-
		15	ND	6.43	-	-
		20	ND	5.72	-	-

¹⁾Bar indicates no determination of cells because of spoilage.

²⁾Not detected within the detection limit < 1.00 log CFU/g.

Table 16. Effect on growth of total aerobic bacteria of pork patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

(Unit : log CFU/g)

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	3.57	- ¹⁾	-	-
		5	ND ²⁾	6.96	-	-
		10	ND	5.76	6.57	-
		15	ND	3.54	5.77	7.34
		20	ND	ND	3.76	6.72
	Vacuum	0	3.56	-	-	-
		5	ND	6.89	-	-
		10	ND	5.76	6.49	-
		15	ND	3.32	5.72	7.26
		20	ND	ND	3.75	5.46
Electron Beam	N ₂	0	3.57	-	-	-
		5	3.32	8.62	-	-
		10	2.48	6.87	-	-
		15	ND	6.67	-	-
		20	ND	6.59	-	-
	Vacuum	0	3.56	-	-	-
		5	3.32	7.91	-	-
		10	ND	6.83	-	-
		15	ND	6.61	-	-
		20	ND	5.51	-	-

¹⁾Bar indicates no determination of cells because of spoilage.

²⁾Not detected within the detection limit < 1.00 log CFU/g.

나. 젖산균 및 저온균의 변화

우육 패티를 각각 질소치환 포장 또는 진공 포장한 후 감마선 및 전자선을 조사하여 30℃에서 10일간 가속저장하면서 젖산균과 저온균을 측정된 결과를 Table 17과 18에 나타내었다. Song *et al.* (2000)은 햄버거 패티의 저온저장 중 저온균의 생육이 품질에 크게 영향을 준다고 보고하였는데 앞의 총균수에 비해 젖산균과 저온균은 전자선에 비해 감마선에서 감수성이 조금 더 높게 나타나 사멸률이 우수한 것으로 나타나 분쇄 우육의 실험결과와 일치하였다. 이러한 결과는 Chung *et al.* (2000)의 보고에서도 확인할 수 있었다. 즉, 슈도모나스 플루오레센스 (*Pseudomonas fluorescens*)와 살모넬라 티피무리움 (*Salmonella Typhimurium*)을 접종시키고 감마선과 전자선을 조사 후 이들의 살균여부를 알아보았을 때 감마선이 전자선에 비해 *P. fluorescens* 살균에 더 효과적이라고 보고했다. 포장방법별 방사선 조사에 의한 젖산균과 저온균의 사멸효과에 있어서는 진공 포장이 질소치환 포장에 비해 좋게 나타났다.

돈육 패티를 질소치환 포장, 진공 포장한 후 감마선과 전자선을 조사하고 30℃에서 10일간 가속저장하면서 젖산균과 저온균의 생육을 관찰한 결과를 각각 Table 19와 20에 나타내었다. 돈육 패티 또한 우육 패티의 결과에서와 같이 총균수에 비해 젖산균과 저온균의 감마선 조사에 대한 감수성은 아주 민감한 편이었으며 전자선이 감마선에 비해 사멸효과가 조금 떨어지는 것을 알 수 있었다. 포장방법별 방사선 조사에 의한 젖산균과 저온균의 사멸효과 역시 진공 포장하여 조사 처리하는 것이 질소치환 포장에 비해 생육억제 효과가 우수한 것으로 나타나 현재까지의 연구 결과와 동일한 경향이였다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때 분쇄 우육과 돈육 및 그 가공품인 햄버거 패티는 미생물 오염에 의한 저장 안전성에 문제가 있는 것으로 확인되었으나 방사선 조사는 초기 미생물 감균 및 저장중 미생물 생육 지연에 매우 효과적으로 식육 및 그 가공품의 미생물학적 안전성 확보에 매우 유용한 방법임이 입증하였다.

Table 17. Effect on growth of lactic acid bacteria of beef patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

(Unit : log CFU/g)

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	3.40	- ¹⁾	-	-
		5	ND ²⁾	5.38	-	-
		10	ND	4.86	6.59	-
		15	ND	ND	5.72	5.81
		20	ND	ND	3.68	4.92
	Vacuum	0	3.32	-	-	-
		5	ND	5.32	-	-
		10	ND	3.72	6.58	-
		15	ND	ND	5.69	5.80
		20	ND	ND	3.64	4.90
Electron Beam	N ₂	0	3.40	-	-	-
		5	2.85	7.60	-	-
		10	ND	6.72	-	-
		15	ND	6.32	-	-
		20	ND	5.53	-	-
	Vacuum	0	3.32	-	-	-
		5	2.48	7.75	-	-
		10	ND	6.71	-	-
		15	ND	5.83	-	-
		20	ND	5.56	-	-

¹⁾Bar indicates no determination of cells because of spoilage.

²⁾Not detected within the detection limit < 1.00 log CFU/g.

Table 18. Effect on growth of psychrophilic bacteria of beef patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

(Unit : log CFU/g)

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	3.45	- ¹⁾	-	-
		5	ND ²⁾	7.51	-	-
		10	ND	5.67	6.49	-
		15	ND	3.76	5.66	6.79
		20	ND	ND	3.71	5.66
	Vacuum	0	3.46	-	-	-
		5	ND	7.59	-	-
		10	ND	5.65	6.46	-
		15	ND	3.67	5.65	6.77
		20	ND	ND	3.67	5.62
Electron Beam	N ₂	0	3.45	-	-	-
		5	3.11	7.83	-	-
		10	ND	6.92	-	-
		15	ND	5.93	-	-
		20	ND	5.62	-	-
	Vacuum	0	3.46	-	-	-
		5	3.08	7.79	-	-
		10	ND	6.59	-	-
		15	ND	5.91	-	-
		20	ND	5.57	-	-

¹⁾Bar indicates no determination of cells because of spoilage.

²⁾Not detected within the detection limit < 1.00 log CFU/g.

Table 19. Effect on growth of lactic acid bacteria of pork patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

(Unit : log CFU/g)

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma-ray	N ₂	0	3.32	- ¹⁾	-	-
		5	ND ²⁾	5.66	-	-
		10	ND	4.67	6.46	-
		15	ND	ND	5.71	5.76
		20	ND	ND	3.61	4.83
	Vacuum	0	3.28	-	-	-
		5	ND	5.63	-	-
		10	ND	3.93	6.32	-
		15	ND	ND	5.63	5.66
		20	ND	ND	3.57	4.72
Electron Beam	N ₂	0	3.32	-	-	-
		5	ND	7.54	-	-
		10	ND	6.76	-	-
		15	ND	6.40	-	-
		20	ND	5.43	-	-
	Vacuum	0	3.28	-	-	-
		5	ND	7.51	-	-
		10	ND	6.63	-	-
		15	ND	5.32	-	-
		20	ND	5.15	-	-

¹⁾Bar indicates no determination of cells because of spoilage.

²⁾Not detected within the detection limit < 1.00 log CFU/g.

Table 20. Effect on growth of psychrophilic bacteria of pork patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

(Unit : log CFU/g)

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	3.54	- ¹⁾	-	-
		5	ND ²⁾	6.89	-	-
		10	ND	4.65	6.45	-
		15	ND	ND	5.63	6.91
		20	ND	ND	3.67	5.38
	Vacuum	0	3.56	-	-	-
		5	ND	6.85	-	-
		10	ND	4.61	6.38	-
		15	ND	ND	5.61	6.72
		20	ND	ND	3.63	5.18
Electron Beam	N ₂	0	3.54	-	-	-
		5	3.34	7.59	-	-
		10	ND	6.75	-	-
		15	ND	5.86	-	-
		20	ND	5.66	-	-
	Vacuum	0	3.56	-	-	-
		5	3.32	7.51	-	-
		10	ND	6.71	-	-
		15	ND	5.85	-	-
		20	ND	5.57	-	-

¹⁾Bar indicates no determination of cells because of spoilage.

²⁾Not detected within the detection limit < 1.00 log CFU/g.

제 2절 선종별 조사에 의한 식육 및 가공품의 이화학적 특성 변화

가. 일반성분의 변화

포장방법 및 방사선 선종별 조사가 분쇄 우육, 분쇄 돈육, 햄버거 패티 2종의 일반성분에 미치는 영향을 조사한 결과를 Table 21-24에 나타내었다. 수분(moisture), 조단백(crude protein) 및 조지방(crude fat) 함량은 포장방법 및 방사선 조사선종에 관계없이 방사선 조사에 의한 유의적 변화가 없는 것으로 나타났다($p < 0.05$). 방사선은 강한 에너지를 갖는 빛으로서 조사된 물체의 중량 등 주요 구성성분의 함량 변화 등을 일으키지 않는다고 보고하였다 (Lambert *et al.*, 1992). 일반적으로 방사선 조사된 식육의 중량과 단백질, 지질 및 수분과 같은 일반성분의 변화는 거의 없으며 (Giroux & Lacroix, 1998) 오히려 가열조리 등의 물리적 처리에 의해 영양성분의 파괴가 더 심해진다고 보고되어 있다. 본 연구에서도 일반성분의 변화가 거의 없는 것으로 판단되었다.

이러한 결과는 Kwak *et al.* (1998)의 연구 보고에서 매우 잘 정리되어 있다. 분쇄 돈육을 이용한 그들의 연구에서 일반성분은 감마선 조사와 저장기간에 따라 수분함량만이 감소하였을 뿐 다른 성분 변화는 없는 것으로 나타났다. pH 및 산도, 총 아미노산 조성, 무기질 함량 등에서도 감마선 조사에 의한 조성변화는 없었다.

Giroux & Lacroix (1998)는 방사선이 조사된 식육의 영양학적 가치에 대한 연구를 수행하였다. 방사선 조사에 의해 필수지방산 및 아미노산의 손실은 거의 없으나 thiamin 함량은 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 감소는 식육을 가열할 때 더 심해지는 것으로 나타났고 냉동 병용처리를 통해 방사선이 조사되는 동안 손실되는 양을 줄일 수 있을 것으로 판단하였다.

Table 21. Contents of moisture, crude protein and crude fat of ground beef with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Moisture (%)	Crude protein (%)	Crude fat (%)
Gamma ray	N ₂	0	56.7±4.1 ^a	22.4±1.4 ^a	10.61±1.1 ^a
		5	62.3±3.4 ^a	19.7±1.2 ^a	10.1±2.4 ^a
		10	58.6±2.9 ^a	21.2±2.5 ^a	9.2±1.7 ^a
		15	56.9±1.3 ^a	20.4±1.9 ^a	9.8±2.6 ^a
		20	60.1±4.7 ^a	21.5±2.1 ^a	8.4±1.4 ^a
	Vacuum	0	64.6±5.3 ^a	20.3±1.2 ^a	9.82±1.2 ^a
		5	59.6±3.1 ^a	20.7±1.5 ^a	9.2±1.4 ^a
		10	60.8±2.9 ^a	19.6±1.2 ^a	8.3±1.1 ^a
		15	57.3±4.2 ^a	21.8±2.3 ^a	10.1±2.7 ^a
		20	56.3±3.6 ^a	22.9±1.9 ^a	8.4±1.9 ^a
Electron Beam	N ₂	0	56.7±4.1 ^a	22.4±1.4 ^a	10.61±1.1 ^a
		5	59.4±1.8 ^a	21.7±2.6 ^a	9.7±1.7 ^a
		10	61.4±3.2 ^a	19.3±1.8 ^a	8.5±1.4 ^a
		15	59.5±2.7 ^a	22.1±2.5 ^a	10.1±2.9 ^a
		20	55.1±3.5 ^a	20.6±1.3 ^a	10.3±2.1 ^a
	Vacuum	0	64.6±5.3 ^a	20.3±1.2 ^a	9.82±1.2 ^a
		5	61.2±4.8 ^a	19.6±1.6 ^a	8.3±2.5 ^a
		10	63.5±2.6 ^a	21.4±2.3 ^a	9.1±1.6 ^a
		15	58.9±3.1 ^a	19.8±1.5 ^a	7.8±1.3 ^a
		20	61.3±2.4 ^a	18.9±2.8 ^a	9.3±2.1 ^a

^{a-a}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

Table 22. Contents of moisture, crude protein and crude fat of ground pork with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Moisture content (%)	Crude protein (%)	Crude fat (%)
Gamma ray	N ₂	0	56.8±5.1 ^a	18.2±1.7 ^a	14.14±1.3 ^a
		5	58.9±4.5 ^a	21.7±1.4 ^a	14.10±1.5 ^a
		10	62.3±3.1 ^a	20.4±2.7 ^a	13.51±1.3 ^a
		15	57.8±2.8 ^a	19.6±1.2 ^a	12.76±1.7 ^a
		20	55.5±4.5 ^a	24.2±2.5 ^a	14.44±2.1 ^a
	Vacuum	0	68.8±4.6 ^a	20.1±5.3 ^a	11.38±2.1 ^a
		5	56.3±3.2 ^a	20.9±1.3 ^a	12.04±2.5 ^a
		10	63.7±4.6 ^a	18.7±1.7 ^a	10.93±1.3 ^a
		15	61.4±3.9 ^a	19.6±2.4 ^a	11.27±1.6 ^a
		20	59.7±5.1 ^a	21.7±1.4 ^a	11.81±2.1 ^a
Electron Beam	N ₂	0	56.8±5.1 ^a	18.2±1.7 ^a	14.14±1.3 ^a
		5	61.7±3.6 ^a	20.7±2.6 ^a	13.68±1.8 ^a
		10	58.4±4.8 ^a	19.8±1.2 ^a	11.74±1.4 ^a
		15	60.7±2.4 ^a	22.6±2.4 ^a	13.49±1.7 ^a
		20	63.5±3.9 ^a	21.9±1.9 ^a	10.89±0.9 ^a
	Vacuum	0	68.8±4.6 ^a	20.1±5.3 ^a	11.38±2.1 ^a
		5	62.8±5.4 ^a	19.8±1.5 ^a	11.39±1.8 ^a
		10	57.1±2.6 ^a	21.3±2.2 ^a	10.94±2.1 ^a
		15	59.6±3.8 ^a	20.6±1.8 ^a	11.58±2.6 ^a
		20	57.3±3.2 ^a	19.8±1.2 ^a	12.61±1.7 ^a

^{a-a}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

Table 23. Contents of moisture, crude protein and crude fat of beef patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Moisture (%)	Crude protein (%)	Crude fat (%)
Gamma ray	N ₂	0	46.1±3.9 ^a	16.5±1.2 ^a	14.6±1.9 ^a
		5	51.6±4.1 ^a	17.7±1.7 ^a	13.8±2.4 ^a
		10	49.3±5.7 ^a	18.4±2.1 ^a	15.7±2.1 ^a
		15	47.4±3.3 ^a	16.9±2.5 ^a	14.9±2.7 ^a
		20	48.8±4.6 ^a	18.2±1.9 ^a	13.2±1.2 ^a
	Vacuum	0	49.3±4.9 ^a	18.7±1.6 ^a	13.4±2.1 ^a
		5	51.4±3.8 ^a	17.1±1.9 ^a	14.6±1.4 ^a
		10	47.2±4.1 ^a	16.4±2.1 ^a	13.9±1.7 ^a
		15	48.7±5.2 ^a	18.9±1.4 ^a	15.3±1.2 ^a
		20	52.4±3.9 ^a	17.1±1.7 ^a	14.1±1.5 ^a
Electron Beam	N ₂	0	51.3±3.6 ^a	15.8±1.6 ^a	13.3±1.3 ^a
		5	46.9±5.2 ^a	18.4±2.1 ^a	15.6±2.1 ^a
		10	47.7±4.7 ^a	18.1±2.4 ^a	14.4±2.4 ^a
		15	51.6±3.4 ^a	16.3±2.2 ^a	15.2±1.7 ^a
		20	49.2±4.3 ^a	17.9±1.6 ^a	14.5±1.6 ^a
	Vacuum	0	51.1±4.9 ^a	15.7±2.1 ^a	14.7±2.2 ^a
		5	51.5±5.1 ^a	16.1±1.5 ^a	15.3±1.9 ^a
		10	49.4±4.7 ^a	14.4±2.5 ^a	14.1±1.4 ^a
		15	51.8±4.2 ^a	17.9±1.8 ^a	14.6±2.1 ^a
		20	49.3±5.4 ^a	16.1±1.9 ^a	13.9±2.3 ^a

^{a-a}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

Table 24. Contents of moisture, crude protein and crude fat of pork patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Moisture (%)	Crude protein (%)	Crude fat (%)
Gamma ray	N ₂	0	48.6±4.8 ^a	17.9±1.4 ^a	14.3±1.6 ^a
		5	47.3±5.3 ^a	16.3±2.2 ^a	13.9±2.3 ^a
		10	45.8±4.2 ^a	16.7±1.8 ^a	15.4±2.1 ^a
		15	51.1±4.9 ^a	17.5±1.4 ^a	14.7±1.8 ^a
		20	48.4±5.3 ^a	16.3±2.1 ^a	14.3±1.5 ^a
	Vacuum	0	48.7±5.2 ^a	17.3±2.3 ^a	13.8±1.1 ^a
		5	51.4±4.4 ^a	18.5±1.7 ^a	15.2±2.7 ^a
		10	43.5±3.9 ^a	16.9±1.5 ^a	14.6±1.2 ^a
		15	47.7±5.4 ^a	17.3±1.9 ^a	15.1±2.1 ^a
		20	49.3±4.7 ^a	16.7±2.3 ^a	14.3±1.6 ^a
Electron Beam	N ₂	0	46.3±4.8 ^a	17.1±1.2 ^a	15.3±1.4 ^a
		5	47.5±5.6 ^a	17.6±2.4 ^a	14.2±2.1 ^a
		10	51.2±4.2 ^a	16.1±1.5 ^a	14.4±1.6 ^a
		15	45.8±4.9 ^a	17.4±2.2 ^a	15.1±1.3 ^a
		20	48.6±5.3 ^a	16.9±1.7 ^a	14.9±1.7 ^a
	Vacuum	0	47.3±5.1 ^a	16.9±2.1 ^a	14.1±1.6 ^a
		5	45.7±3.9 ^a	17.4±1.9 ^a	13.4±2.1 ^a
		10	51.4±4.3 ^a	16.8±1.7 ^a	14.6±2.4 ^a
		15	49.2±5.1 ^a	17.3±2.4 ^a	15.2±1.6 ^a
		20	46.8±4.9 ^a	16.7±2.1 ^a	13.9±1.4 ^a

^{a-a}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

2. 지방 산패도의 변화

가. 분쇄 우유 및 분쇄 돈육

포장방법을 달리하여 각각 감마선과 전자선을 조사한 분쇄 우유 및 분쇄 돈육의 가속저장 기간 중의 TBA 값의 변화를 각각 Table 25와 26에 나타냈다. 식육은 저장이 진행됨에 따라 점차 지방산패가 일어나며 이로 인해 과산화물 함량도 증가하며 (Kim *et al.*, 2002) 식육에 방사선을 조사할 경우에도 역시 방사선 조사에 의해 생성된 hydroxyl radical에 의해 지방이 산화된다(Thakur & Singh, 1994; Koh & Whang, 2002; Gomes *et al.*, 2003b; Whang, 2003). 육류의 주요 지방산은 palmitic acid (C_{16:0}), stearic acid (C_{18:0}), oleic acid (C_{18:1}) 및 linoleic acid (C_{18:2})이며, 이들 지방산은 우유에 각각 23.5±2.0, 9.5±2.0, 43.0±4.6 및 1.5±0.9, 돈육에 25.4±1.3, 10.9±1.5, 34.7±2.0 및 10.4±1.3의 비율(%)로 존재한다(Kim *et al.*, 1999). 이중 oleic acid와 linoleic acid와 같은 불포화 지방산은 방사선 조사에 의해 쉽게 산화된다(Giroux & Lacroix, 1998). 지방산화는 방사선 조사선량에 의존적이며 특히 산소가 존재할 경우 지방산화가 촉진된다(Merritt *et al.*, 1975). 본 연구 결과에서도 대조구 (0.49 MA μmol/g)에 비해 20 kGy의 감마선 또는 전자선이 조사된 4개 처리구의 TBA 값이 1.46 ~ 2.49 MA μmol/g 으로 가장 높게 나타나 방사선 조사에 의해 식육의 지방산패가 촉진되며 선량 의존성을 나타낸다는 연구 결과들(Yook *et al.*, 1998a; Aziz *et al.*, 2002; Byun *et al.*, 2002; Poon *et al.*, 2003)과 같은 경향을 나타내었다.

조사선종에 따른 영향의 판단하기 위하여 TBA 값을 동일 선량에서 비교하였을 때 감마선 조사구가 전자선 조사구에 비해 높게 나타나 감마선이 전자선에 비해 지방산패를 더욱 촉진시켜 지방산패 측면에서는 전자선이 감마선에 비해 효과적일 것으로 기대되었다.

포장방법에 따른 TBA 값은 질소치환 및 진공 포장군간에 수치적 차이는 다소 있지만 유의적인 차이는 없는 것으로 나타났다. 이는 질소치환 및 진공 포장 둘 다 지방산화의 주요 인자인 산소를 차단해 산소에 의한 산화를 방지하는 것으로 판단되었다. Smith *et al.* (1960)은 감마선의 경우 포장방법에 상관없이 지방산화를 촉진한다고 하여 본 연구결과를 뒷받침하였으며 Johnston *et al.* (1992)은 산소가 존재할 경우 전자선을 조사한 시료에서도 일정 기간이 지나면 지방산화가 촉진된다고 보고하

였는데 본 연구에서는 질소치환 및 진공포장 모두 산소를 제거하여 두 포장군간 차이가 없는 것으로 판단되었다. 그러나 진공포장 또는 질소포장을 하여 산소를 제거하였음에도 불구하고 15 kGy 이상의 고선량 방사선 조사 시에 감마선과 전자선 조사구 모두에서 TBA 값이 매우 높게 나타나 포장방법 이외에 지방산화 억제를 위한 후행 연구가 있어야 할 것으로 판단되었다.

분쇄 돈육의 경우에는 분쇄 우육의 결과와 마찬가지로 방사선 조사선량이 증가함에 따라 TBA 값도 증가하였으며 저장 중에 지속적으로 증가하는 것으로 나타나 이전의 연구와 동일한 결과를 얻을 수 있었다(Heath *et al.*, 1990; Byun *et al.*, 1999; Min *et al.*, 1999b; Lee *et al.* 1999b; Nam *et al.* 2001). 또한, 감마선이 전자선에 비해 돈육의 지방산화를 더욱 증가시키는 것으로 나타났으나 포장방법에 따른 차이는 보이지 않아 분쇄 우육의 결과와 일치하였다.

일반적으로 방사선 조사에 의한 지방의 산화는 지방산의 불포화도가 높을수록 촉진되며, 돈육의 경우 불포화도가 높은 linoleic acid 함량이 높기 때문에 상대적으로 우육에 비해 방사선 조사에 의한 지방산화가 증가하게 된다(Giroux & Lacroix, 1998). 본 연구 결과에서는 방사선을 조사하지 않은 분쇄 우육의 TBA 값이 분쇄 돈육에 비해 다소 높게 나타났으며 동일선량에서 우육이 돈육에 비해 방사선 조사에 의해 지방산패도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 시료의 처리 및 보관 등 시료 준비과정에 기인한 것으로 판단된다.

지금까지 방사선 조사에 의한 지방산화를 방지하기 위해 질소치환 또는 진공 포장 외에도 냉동 방사선 조사 및 항산화제 첨가와 같은 다양한 연구가 수행되어 왔다(Ahn & Lee, 2006. Food Irradiation Research and Technology). 이들 방법은 방사선 조사에 의한 지방산화를 방지하는데 매우 효과적인 방법이지만 본 연구 결과에서와 같이 조사선량이 높아질 경우에는 하나의 방법을 단독으로 사용하는 것보다는 두 가지 이상의 처리를 동시에 병용하는 것이 더욱 효과적일 것으로 판단되어 향후 이를 위한 연구가 추진되어야 할 것으로 사료되었다.

Table 25. Contents of malondialdehyde ($\mu\text{mol/g}$) of ground beef with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	0.49±0.42 ^a	- ¹⁾	-	-
		5	1.44±0.32 ^b	-	-	-
		10	1.58±0.41 ^b	2.29±0.72 ^a	2.68±0.92 ^a	-
		15	2.07±0.23 ^{bc}	2.47±0.42 ^{ab}	2.99±1.01 ^a	3.35±1.32 ^a
		20	2.49±0.54 ^c	2.97±0.55 ^b	3.67±0.79 ^b	3.83±0.97 ^a
	Vacuum	0	0.52±0.33 ^a	-	-	-
		5	1.08±0.52 ^b	-	-	-
		10	1.35±0.29 ^{bc}	2.33±0.26 ^a	2.45±0.82 ^a	-
		15	1.96±0.42 ^c	2.41±0.36 ^a	2.91±0.88 ^{ab}	3.93±1.44 ^a
		20	2.27±0.37 ^c	2.85±0.53 ^b	3.03±0.91 ^b	4.18±1.07 ^a
Electron Beam	N ₂	0	0.49±0.42 ^a	-	-	-
		5	0.94±0.29 ^b	-	-	-
		10	1.12±0.29 ^b	1.58±0.83 ^a	-	-
		15	1.27±0.42 ^{bc}	2.20±0.91 ^b	-	-
		20	1.46±0.39 ^c	2.29±0.86 ^b	-	-
	Vacuum	0	0.52±0.33 ^a	-	-	-
		5	0.88±0.36 ^a	-	-	-
		10	0.94±0.46 ^{ab}	1.82±0.63 ^a	-	-
		15	1.05±0.29 ^b	2.02±0.72 ^{ab}	-	-
		20	1.99±0.38 ^c	2.42±0.43 ^b	-	-

^{a-c}Means within the same column of each treatment different letters differ significantly ($p < 0.05$).

¹⁾Bar indicates no determination of TBA value because of spoilage.

Table 26. Contents of malondialdehyde ($\mu\text{mol/g}$) of ground pork with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	0.42±0.19 ^a	- ¹⁾	-	-
		5	1.25±0.44 ^b	-	-	-
		10	1.77±0.38 ^{bc}	2.44±0.83 ^a	2.01±1.02 ^a	-
		15	1.84±0.29 ^c	2.51±0.94 ^a	3.07±1.01 ^b	3.20±1.22 ^a
		20	2.01±0.22 ^c	2.75±0.88 ^b	3.22±0.79 ^b	3.18±1.52 ^a
	Vacuum	0	0.48±0.21 ^a	-	-	-
		5	1.17±0.64 ^b	-	-	-
		10	1.59±0.73 ^b	2.41±0.86 ^a	2.84±0.99 ^a	-
		15	2.06±0.48 ^c	2.88±0.77 ^b	2.95±1.08 ^a	3.45±1.19 ^a
		20	2.08±0.62 ^c	2.91±0.99 ^b	3.00±1.13 ^a	3.64±0.97 ^a
Electron Beam	N ₂	0	0.42±0.19 ^a	-	-	-
		5	0.73±0.36 ^{ab}	-	-	-
		10	0.87±0.54 ^b	2.02±0.72 ^a	-	-
		15	1.03±0.56 ^{bc}	2.32±0.85 ^{bc}	-	-
		20	1.39±0.44 ^c	2.50±0.69 ^c	-	-
	Vacuum	0	0.48±0.21 ^a	-	-	-
		5	0.85±0.54 ^a	-	-	-
		10	1.07±0.48 ^{ab}	2.08±0.53 ^a	-	-
		15	1.55±0.47 ^b	2.13±0.44 ^a	-	-
		20	1.84±0.39 ^c	2.71±0.34 ^b	-	-

^{a-c}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

¹⁾Bar indicates no determination of TBA value because of spoilage.

나. 햄버거 패티

우육 패티 및 돈육 패티의 가속저장 중의 감마선, 전자선 조사와 포장방법에 따른 TBA 값의 변화를 각각 Table 27 및 28에 나타내었다. 우육 패티의 경우 저장 초기 TBA 값은 비조사구에서 1.75 ~ 2.01 MA $\mu\text{mol/g}$ 이었으나 감마선과 전자선 모두 조사선량이 증가함에 따라 유의적으로 증가하는 것으로 나타났다 ($p < 0.05$). 일반적으로 방사선은 수용액 또는 오일 에멀전 (oil emulsion) 상태에서 hydroxyl radical을 생성시키는데 육류의 경우 근육세포의 약 75%를 차지하는 물이 지방 이중막 (lipid bilayer)으로 둘러싸여져 있기 때문에 지방의 산화를 야기한다(O'Connell & Garner, 1983; Thakur & Singh, 1994). 그러나 이러한 현상은 산소가 방사선에 비해 더욱 중요한 역할을 하며 특히, 조리된 육가공품의 경우 이러한 현상이 뚜렷하다(Ahn & Lee, 2006).

방사선 선종에 따른 영향으로는 원료육의 결과와 마찬가지로 감마선이 전자선에 비해 지방산화를 더욱 촉진시키는 것으로 나타났다. 이는 미생물 생육시험 결과에서와 같이 감마선이 전자선에 비해 투과도가 높기 때문에 지방산화에 미치는 영향이 크기 때문으로 사료된다.

포장방법을 달리할 경우에는 사용된 원료육의 종류 및 조사선종에 관계없이 질소 치환 포장이 진공 포장에 비해 지방산화 억제에 효과적인 것으로 나타났다. 일반적으로 방사선에 의한 지방의 산화는 포장방법, 저장조건 등에 따라 그 정도가 다르게 나타난다고 알려져 있으나(Shin & Lee, 2002) 질소치환과 진공 포장의 차이에 대해서는 보다 명확한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

Ahn & Lee (2006)는 질소치환 또는 진공 포장방법과 항산화제를 병용처리가 방사선 조사에 따른 신선육과 가공육의 산화적 품질변화를 조절하는데 매우 효과적이라고 제시한바 있는데 본 연구 결과에서도 질소치환 또는 진공 포장만으로는 고선량 방사선 조사에 의한 지방산화를 억제하기에는 충분하지 못한 것으로 나타나 항산화제와 같은 병용처리가 필요한 것으로 사료되었다.

Table 27. Contents of malondialdehyde ($\mu\text{mol/g}$) of beef patties with different packaging and gamma ray or electron beam-irradiation during storage at 30°C

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	2.01±0.79 ^a	- ¹⁾	-	-
		5	2.23±0.95 ^a	-	-	-
		10	2.38±0.85 ^a	2.52±1.02 ^a	3.11±1.38 ^a	-
		15	2.83±0.93 ^{ab}	2.99±0.74 ^{ab}	3.37±1.27 ^a	4.29±1.53 ^a
		20	3.01±1.04 ^b	3.37±1.05 ^b	3.44±0.94 ^a	4.63±1.62 ^a
	Vacuum	0	1.75±0.93 ^a	-	-	-
		5	2.35±0.90 ^b	-	-	-
		10	2.54±1.12 ^b	2.91±0.26 ^a	3.23±1.11 ^a	-
		15	2.88±0.91 ^{bc}	2.94±0.36 ^a	3.95±0.98 ^b	4.69±1.42 ^a
		20	3.21±0.95 ^c	3.22±0.53 ^a	3.74±0.88 ^b	5.37±1.09 ^b
Electron Beam	N ₂	0	2.01±0.79 ^a	- ¹⁾	-	-
		5	2.11±0.82 ^a	-	-	-
		10	1.97±0.78 ^a	2.08±0.83 ^a	-	-
		15	2.53±0.91 ^b	2.35±0.91 ^{ab}	-	-
		20	2.92±1.02 ^b	2.99±0.86 ^b	-	-
	Vacuum	0	1.75±0.93 ^a	-	-	-
		5	1.51±0.74 ^a	-	-	-
		10	2.18±0.66 ^{ab}	2.31±0.96 ^a	-	-
		15	2.85±0.59 ^b	2.99±0.83 ^b	-	-
		20	2.98±0.85 ^b	3.01±0.77 ^b	-	-

^{a-c}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

¹⁾Bar indicates no determination of TBA value because of spoilage.

Table 28. Contents of malondialdehyde ($\mu\text{mol/g}$) of pork patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	1.76±0.74 ^a	- ¹⁾	-	-
		5	1.82±0.72 ^a	-	-	-
		10	1.99±0.84 ^a	2.83±0.85 ^a	3.22±1.02 ^a	-
		15	2.37±0.79 ^{ab}	3.07±0.73 ^a	3.44±0.98 ^a	4.25±1.41 ^a
		20	2.98±1.04 ^b	3.11±0.66 ^a	3.99±1.09 ^b	4.53±1.29 ^a
	Vacuum	0	1.79±0.83 ^a	-	-	-
		5	1.89±0.83 ^a	-	-	-
		10	2.18±0.77 ^{ab}	2.66±1.06 ^a	3.25±0.82 ^a	-
		15	2.72±0.74 ^{bc}	2.90±0.92 ^{ab}	3.21±0.88 ^a	4.07±1.52 ^a
		20	3.01±0.73 ^c	3.18±0.96 ^b	3.63±0.91 ^b	4.88±1.39 ^b
Electron Beam	N ₂	0	1.76±0.74 ^a	- ¹⁾	-	-
		5	1.92±0.84 ^a	-	-	-
		10	2.15±0.79 ^{ab}	2.33±0.78 ^a	-	-
		15	2.21±0.59 ^b	2.64±0.89 ^{ab}	-	-
		20	2.82±0.85 ^c	3.04±0.69 ^b	-	-
	Vacuum	0	1.79±0.83 ^a	-	-	-
		5	1.73±0.53 ^a	-	-	-
		10	1.92±0.57 ^a	2.44±0.80 ^a	-	-
		15	2.61±0.64 ^b	2.78±0.91 ^b	-	-
		20	2.76±0.70 ^b	2.97±0.79 ^b	-	-

^{a-c}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

¹⁾Bar indicates no determination of TBA value because of spoilage.

3. 휘발성 염기태 질소 함량의 변화

가. 분쇄 우육 및 분쇄 돈육

포장방법 및 방사선 선종별 조사가 저장 중의 분쇄 우육과 분쇄 돈육의 휘발성 염기태 질소 (VBN : Volatile basic nitrogen) 함량에 미치는 영향을 조사한 결과를 Table 29 과 30에 나타내었다. 저장초기 분쇄 우육과 분쇄 돈육의 VBN 함량은 약 2~3 mg%로 조사선종 및 포장방법에 관계없이 방사선 조사에 의해 유의적 차이가 없는 것으로 나타나($p < 0.05$), 방사선 조사가 육류의 VBN 함량에 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다.

육류의 저장 중 근육단백질은 아미노산 및 저분자의 무기태 질소로 분해되는데 이 때 생성되는 단백질 분해효소에 의해 아미노산과 펩타이드가 증가하며 아데닐산 (AMP : adenosine monophosphate)의 분해에 의해 암모니아가 생성되므로 VBN 함량이 증가하게 된다(Greenberg *et al.*, 1966 ; Park *et al.*, 1988 ; Davies & Board, 1998). 따라서 VBN 함량은 육류의 신선도를 평가하는 중요한 지표 중 하나로 원료육 및 포장육에 한하여 VBN 함량을 20 mg%이하로 규정하고 있다.

본 연구 결과에서도 분쇄 우육 및 분쇄 돈육의 VBN 함량은 저장기간이 증가함에 따라 지속적으로 증가하는 경향이었으나 감마선 또는 전자선 조사구의 경우 대조구에 비해 VBN 함량의 증가가 억제되었다. 이는 방사선 조사에 의해 분쇄 우육과 분쇄 돈육의 미생물이 감소하였기 때문으로 사료되며 다른 연구 결과들도 본 연구 결과를 뒷받침해 주고 있다(Whang, 2003 ; Whang, 2002 ; Koh & Whang, 2002 ; Aziz *et al.*, 2002 ; Byun *et al.*, 1999)

방사선 선종에 따른 차이는 감마선 조사가 전자선 조사에 비해 저장 중에 VBN 함량 증가를 억제하는데 효과적인 것으로 나타났다. 이는 미생물 생육결과와 일치하는 결과로 감마선이 전자선에 비해 초기 미생물의 제어에 더욱 효과적이기 때문이다. 따라서 전자선의 경우 분쇄 우육과 분쇄 돈육의 품질을 유지하는데 감마선에 비해 보다 높은 선량이 요구되는 것으로 판단되었다.

포장방법별 비교에서는 조사선종에 관계없이 진공 포장구가 질소치환 포장구에 비해 VBN 생성을 억제하는데 보다 효과적인 것으로 나타났다. 이는 미생물 생육 결과와 같이 진공 포장이 질소치환 포장에 비해 저장 중의 미생물 생육억제에 효과적이기 때문으로 사료된다.

Table 29. Contents of volatile basic nitrogen (mg%) of ground beef with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	2.45±0.31 ^a	- ¹⁾	-	-
		5	2.24±0.24 ^a	-	-	-
		10	2.57±0.31 ^a	6.32±0.43 ^a	13.36±1.42 ^a	-
		15	2.85±0.58 ^a	6.15±0.52 ^a	8.55±0.97 ^b	11.56±1.62 ^a
		20	2.15±0.16 ^a	6.17±0.39 ^a	7.63±0.83 ^b	7.95±0.97 ^b
	Vacuum	0	2.42±0.24 ^a	-	-	-
		5	1.89±0.27 ^a	-	-	-
		10	2.45±0.51 ^a	5.95±0.37 ^a	11.55±1.23 ^a	-
		15	2.42±0.34 ^a	5.71±0.31 ^a	7.95±0.84 ^b	9.81±0.84 ^a
		20	2.18±0.25 ^a	5.64±0.45 ^a	5.35±0.61 ^c	5.75±0.67 ^b
Electron Beam	N ₂	0	2.45±0.31 ^a	- ¹⁾	-	-
		5	2.05±0.18 ^a	-	-	-
		10	2.75±0.25 ^a	6.35±0.97 ^a	-	-
		15	2.83±0.43 ^a	6.32±0.51 ^a	-	-
		20	2.52±0.34 ^a	6.28±0.74 ^a	-	-
	Vacuum	0	2.42±0.24 ^a	-	-	-
		5	2.87±0.45 ^a	-	-	-
		10	2.19±0.28 ^a	5.95±0.63 ^a	-	-
		15	2.05±0.54 ^a	5.83±0.72 ^a	-	-
		20	2.47±0.21 ^a	5.75±0.43 ^a	-	-

^{a-c}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

¹⁾Bar indicates no determination of VBN because of spoilage.

Table 30. Contents of volatile basic nitrogen (mg%) of ground pork with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	2.27±0.28 ^a	- ¹⁾	-	-
		5	2.75±0.28 ^a	-	-	-
		10	2.49±0.35 ^a	7.15±0.62 ^a	14.55±1.84 ^a	-
		15	2.05±0.14 ^a	6.37±0.74 ^{ab}	8.21±0.93 ^b	9.57±0.86 ^a
		20	2.83±0.26 ^a	5.11±0.39 ^b	7.53±0.56 ^a	7.94±0.59 ^b
	Vacuum	0	2.19±0.36 ^a	-	-	-
		5	2.16±0.28 ^a	-	-	-
		10	2.84±0.35 ^a	6.14±0.68 ^a	10.3±1.27 ^a	-
		15	2.38±0.51 ^a	4.83±0.52 ^b	6.85±0.73 ^b	7.76±0.64 ^a
		20	2.45±0.32 ^a	3.76±0.49 ^b	4.14±0.54 ^c	4.55±0.58 ^b
Electron Beam	N ₂	0	2.27±0.28 ^a	- ¹⁾	-	-
		5	2.14±0.34 ^a	-	-	-
		10	2.82±0.49 ^a	7.55±0.82 ^a	-	-
		15	1.95±0.27 ^a	6.58±0.59 ^{ab}	-	-
		20	2.47±0.42 ^a	5.54±0.63 ^b	-	-
	Vacuum	0	2.19±0.36 ^a	-	-	-
		5	2.79±0.42 ^a	-	-	-
		10	2.45±0.16 ^a	6.51±0.73 ^a	-	-
		15	3.15±0.54 ^a	5.05±0.46 ^b	-	-
		20	3.58±0.35 ^a	3.89±0.38 ^c	-	-

^{a-c}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

¹⁾Bar indicates no determination of VBN because of spoilage.

나. 햄버거 패티

우육 패티와 돈육 패티를 진공 및 질소치환 포장하고 각각 감마선과 전자선을 조사하여 30℃에서 10일간 가속저장하면서 VBN 함량을 측정한 결과를 Table 31과 32에 나타내었다. 분쇄육의 결과와 마찬가지로 우육 패티와 돈육 패티의 VBN 함량은 방사선 조사에도 불구하고 2.5 ~ 3.6 mg%로 유의적 차이가 없는 것으로 나타났으며($p < 0.05$) 조사선종 및 포장방법에 따른 차이도 없었다. 또한 저장기간이 증가함에 따라 방사선 조사구가 대조구에 비해 VBN 함량 증가가 억제되어 미생물 생육 결과와 일치하였다. Al-Bachir *et al.* (2001)는 lucheon meat에 감마선을 조사하여 저장 중의 VBN 함량을 분석한 결과 감마선 조사된 시료의 VBN 함량이 비조사구에 비해 낮았다고 보고하여 본 연구 결과와 일치하였다.

조사선종 및 포장방법에 따른 차이 역시 감마선 조사와 진공포장이 각각 전자선 조사와 질소치환 포장에 비해 저장 중 VBN 함량의 증가를 억제하는데 조금 효과적인 것으로 나타나 분쇄육의 결과와 일치하는 경향이었다.

이상의 결과에서와 같이 육류 및 육가공품의 중요한 품질 지표인자인 VBN 함량은 미생물 생육과 밀접한 관련이 있으며 특히 감마선과 진공포장이 VBN 함량 증가를 억제하는데 효과적임을 확인할 수 있었다.

Table 31. Contents of volatile basic nitrogen (mg%) of beef patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	3.1±0.41 ^a	- ¹⁾	-	-
		5	3.6±0.28 ^a	-	-	-
		10	2.5±0.49 ^a	6.1±0.54 ^a	12.8±0.94 ^a	-
		15	3.4±0.31 ^a	5.2±0.49 ^{ab}	9.1±0.78 ^b	12.3±0.91 ^a
		20	3.2±0.27 ^a	4.5±0.61 ^b	6.2±0.56 ^c	7.9±0.83 ^b
	Vacuum	0	2.5±0.38 ^a	-	-	-
		5	2.7±0.38 ^a	-	-	-
		10	2.8±0.24 ^a	5.4±0.64 ^a	12.4±0.91 ^a	-
		15	3.4±0.43 ^a	5.1±0.46 ^a	8.8±0.86 ^b	11.7±0.69 ^a
		20	2.5±0.27 ^a	3.9±0.52 ^b	5.6±0.62 ^c	7.3±0.64 ^b
Electron Beam	N ₂	0	3.1±0.41 ^a	- ¹⁾	-	-
		5	2.5±0.38 ^a	-	-	-
		10	3.2±0.31 ^a	6.3±0.38 ^a	-	-
		15	2.9±0.46 ^a	5.4±0.74 ^{ab}	-	-
		20	2.8±0.39 ^a	4.6±0.47 ^b	-	-
	Vacuum	0	2.5±0.38 ^a	-	-	-
		5	2.4±0.41 ^a	-	-	-
		10	3.5±0.47 ^a	5.7±0.49 ^a	-	-
		15	2.7±0.39 ^a	5.3±0.51 ^a	-	-
		20	3.2±0.24 ^a	4.1±0.37 ^b	-	-

^{a-c}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

¹⁾Bar indicates no determination of VBN because of spoilage.

Table 32. Contents of volatile basic nitrogen (mg%) of pork patties with different packaging and gamma ray or electron beam irradiation during storage at 30°C

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Storage period (days)			
			0	2	5	10
Gamma ray	N ₂	0	2.9±0.34 ^a	- ¹⁾	-	-
		5	2.5±0.26 ^a	-	-	-
		10	2.8±0.31 ^a	5.9±0.53 ^a	11.2±0.92 ^a	-
		15	3.2±0.51 ^a	5.1±0.43 ^a	8.9±0.69 ^b	11.9±0.96 ^a
		20	2.9±0.49 ^a	4.2±0.32 ^b	6.5±0.54 ^c	7.1±0.73 ^b
	Vacuum	0	3.1±0.43 ^a	-	-	-
		5	3.2±0.52 ^a	-	-	-
		10	2.9±0.43 ^a	5.6±0.63 ^a	10.9±0.79 ^a	-
		15	2.8±0.29 ^a	4.7±0.41 ^{ab}	7.6±0.45 ^b	10.6±0.84 ^a
		20	2.5±0.33 ^a	3.9±0.47 ^b	6.1±0.54 ^c	6.9±0.61 ^b
Electron Beam	N ₂	0	2.9±0.34 ^a	-	-	-
		5	2.8±0.41 ^a	-	-	-
		10	2.6±0.35 ^a	6.1±0.31 ^a	-	-
		15	2.9±0.57 ^a	5.3±0.52 ^{ab}	-	-
		20	3.1±0.32 ^a	4.3±0.45 ^b	-	-
	Vacuum	0	3.1±0.43 ^a	-	-	-
		5	2.6±0.27 ^a	-	-	-
		10	3.2±0.52 ^a	5.8±0.53 ^a	-	-
		15	2.7±0.41 ^a	4.9±0.36 ^{ab}	-	-
		20	2.8±0.35 ^a	4.1±0.44 ^b	-	-

^{a-c}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

¹⁾Bar indicates no determination of VBN because of spoilage.

4. 색도에 미치는 영향

가. 분쇄 우육 및 분쇄 돈육

방사선 조사에 따른 질소치환 및 진공 포장한 분쇄 우육과 분쇄 돈육의 표면색도 변화를 Table 33과 34에 나타내었다. 우육의 경우에는 명도 (L*), 적색도 (a*), 황색도 (b*)는 조사선종 및 포장 방법에 관계없이 조사선량이 증가함에 따라 유의적으로 감소한 반면 돈육의 경우에는 명도, 적색도, 황색도 모두 유의적으로 증가하여 상반된 결과를 얻을 수 있었다 ($p < 0.05$).

일반적으로 식육의 마이오글로빈 (myoglobin)은 산화하여 옥시마이오글로빈 (oxymyoglobin)을 형성하고 산화과정이 계속 진행됨에 따라 메트마이오글로빈 (metmyoglobin)이 형성되어 암갈색으로 변화한다. 그러나 방사선이 조사된 식육은 이온화 에너지의 흡수에 의해 Fe^{2+} 가 산화되어 Fe^{3+} 의 생성과 함께 방사선 자체에 의한 metmyoglobin의 파괴가 발생된다(Clarke & Richards, 1971). 또한 방사선 조사에 의해 공기 중의 이산화탄소 (CO) 또는 질소 (NO)가 육색소인 myoglobin과 결합하여 CO-Mb 또는 NO-Mb이 생성되므로 고정화된 밝은 선홍색을 띄게 된다. 하지만 우육의 경우 계육, 돈육과 같은 백색육에 비해 헴 색소 (Heme pigment)의 함량이 10배 이상 높아 CO-Mb와 같은 고정화색소의 생성비율이 낮아지기 때문에 적색도가 감소하는 것으로 알려져 있다(Ahn & Lee, 2006). Nanke *et al.* (1998)와 Yook *et al.* (1998b)은 진공 포장한 우육에 방사선을 조사할 경우 적색도가 감소하고, 이와 반대로 돈육에 방사선을 조사할 경우 명도와 적색도가 증가한다고 보고하여 본 연구 결과를 뒷받침하였다(Whitehair *et al.*, 1964; Nam & Ahn, 2003; Lee & Lee, 2004b).

우육의 경우 조사선종이 육색에 미치는 영향에 있어서는 상호 차이가 없는 것으로 나타났으나 진공 포장이 질소치환 포장에 비해 조사에 따른 육색변화가 더욱 큰 것으로 나타났다. 그러나 돈육의 경우 포장방법에 따른 차이는 없었으나 감마선이 전자선에 비해 색도변화에 미치는 영향이 큰 것으로 확인되었다. 이러한 방사선 조사에 의한 육색소 변화는 조사선량, 원료육의 종류, 근육의 형태 및 포장방법과 같이 다양한 조건에 따라 서로 다른 결과를 나타내기 때문으로 사료된다(Satterlee *et*

al., 1971 ; Shahidi *et al.*, 1991 ; Luchsinger *et al.*, 1996 ; Nanke *et al.*, 1999).

식육의 색이 중요한 이유는 모든 개개의 식육이 고유한 색을 가지고 있으며 각 식품의 형태, 크기, 풍미 등과 함께 소비자들의 상품 가치면에서 크게 자리 잡고 있기 때문이다. 일반적으로 식육에 대해서는 과거 경험과 편견을 통해서 식육의 특정한 색을 기대 또는 연상하게 된다. 따라서 식육의 선택은 시각적 상품 가치면에서 소비자의 기호에 큰 영향을 끼친다(Jhu & Brewer, 1998). 특히 소비자 구입 시 고려사항 중 가장 중요한 선택요인은 외관이나 색깔이며(Risvik, 1994) 소비자는 선홍색을 가장 선호한다. 본 연구 결과에서 돈육의 경우 방사선 조사에 의해 붉은색이 증가하게 되어 많은 장점을 부여할 수 있을 것으로 기대되었다. 그러나 우육의 경우 감마선 및 전자선 조사에 의해 색이 어두워지는 문제가 발생할 수 있어 이를 해결하기 위한 연구가 추진되어야 할 것으로 사료된다.

Table 33. Changes of Hunter's color values in gamma ray or electron beam irradiated ground beef

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Hunter's color value		
			L*	a*	b*
Gamma ray	N ₂	0	38.18±0.93 ^a	19.98±0.24 ^a	26.75±0.31 ^a
		5	37.22±0.47 ^a	15.53±0.19 ^b	24.41±0.27 ^b
		10	36.83±0.28 ^b	12.12±0.11 ^c	21.69±0.14 ^c
		15	34.81±0.31 ^c	9.95±0.13 ^d	19.31±0.23 ^d
		20	33.18±0.24 ^d	8.36±0.07 ^e	16.29±0.16 ^e
	Vacuum	0	38.18±0.93 ^a	19.98±0.24 ^a	26.75±0.31 ^a
		5	36.86±0.82 ^a	14.24±0.29 ^a	23.95±0.28 ^a
		10	36.17±0.53 ^a	11.85±0.16 ^b	21.12±0.19 ^b
		15	34.57±0.62 ^b	9.45±0.17 ^c	18.51±0.13 ^c
		20	33.12±0.47 ^c	8.12±0.11 ^d	16.14±0.17 ^d
Electron Beam	N ₂	0	38.18±0.93 ^a	19.98±0.24 ^a	26.75±0.31 ^a
		5	37.81±0.85 ^a	15.97±0.23 ^a	24.63±0.28 ^a
		10	37.27±0.39 ^a	12.61±0.14 ^b	21.75±0.14 ^b
		15	35.68±0.71 ^b	10.35±0.05 ^c	19.49±0.24 ^c
		20	33.82±0.47 ^c	8.42±0.08 ^d	16.61±0.19 ^d
	Vacuum	0	38.18±0.93 ^a	19.98±0.24 ^a	26.75±0.31 ^a
		5	37.46±0.52 ^a	15.63±0.25 ^a	24.14±0.31 ^a
		10	36.95±0.71 ^a	11.92±0.18 ^b	21.43±0.27 ^b
		15	35.47±0.46 ^b	9.58±0.21 ^c	18.92±0.14 ^c
		20	33.71±0.38 ^c	8.19±0.16 ^d	16.43±0.11 ^d

^{a-e}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

Table 34. Changes of Hunter's color values in gamma-ray or electron beam irradiated ground pork

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Hunter's color Values		
			L*	a*	b*
Gamma-ray	N ₂	0	44.35±0.97 ^c	7.17±0.13 ^e	8.14±0.06 ^e
		5	44.75±0.46 ^{bc}	7.88±0.07 ^d	8.39±0.14 ^d
		10	45.21±0.62 ^b	8.42±0.17 ^c	8.95±0.27 ^c
		15	46.76±0.58 ^a	9.64±0.21 ^b	9.47±0.22 ^b
		20	47.42±0.71 ^a	10.48±0.46 ^a	10.26±0.39 ^a
	Vacuum	0	44.35±0.97 ^c	7.17±0.13 ^e	8.14±0.06 ^e
		5	44.88±0.57 ^c	7.91±0.06 ^d	8.58±0.11 ^c
		10	45.46±0.84 ^c	8.53±0.13 ^c	9.16±0.19 ^b
		15	46.91±0.51 ^b	9.72±0.32 ^b	9.59±0.27 ^b
		20	48.68±0.76 ^a	10.63±0.21 ^a	10.54±0.43 ^a
Electron Beam	N ₂	0	44.35±0.97 ^c	7.17±0.13 ^e	8.14±0.06 ^e
		5	43.91±0.91 ^b	7.42±0.08 ^d	8.17±0.09 ^d
		10	44.84±0.43 ^b	7.98±0.27 ^c	8.82±0.14 ^c
		15	45.39±0.76 ^{ab}	8.54±0.16 ^b	9.27±0.27 ^b
		20	46.72±0.82 ^a	9.81±0.24 ^a	9.75±0.16 ^a
	Vacuum	0	44.35±0.97 ^c	7.17±0.13 ^e	8.14±0.06 ^e
		5	44.24±0.58 ^b	7.58±0.14 ^d	8.58±0.06 ^c
		10	45.16±0.39 ^b	8.37±0.19 ^c	9.16±0.24 ^b
		15	46.28±0.57 ^a	8.69±0.23 ^{bc}	9.49±0.31 ^{ab}
		20	47.24±0.61 ^a	9.98±0.27 ^a	9.84±0.28 ^a

^{a-e}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

나. 햄버거 패티

방사선 조사에 따른 질소치환 및 진공 포장한 우육 패티와 돈육 패티의 표면 색도를 각각 Table 35와 36에 나타내었다. 방사선 조사한 우육 패티의 명도 (L^*), 적색도 (a^*) 및 황색도 (b^*)는 분쇄 우육과 마찬가지로 조사선종 및 포장 방법에 상관없이 조사선량이 증가함에 따라 유의적으로 낮아지는 경향이였다 ($p < 0.05$). 특히 a^* 는 조사선량이 증가할수록 비조사구가 15.57에서 20 kGy 감마선 조사구가 4.52로 큰 폭으로 감소한 반면 L^* 와 b^* 는 우육 패티의 감소폭에 비해 상대적으로 적게 감소하는 것으로 나타났다. 한편 동일선량에서 비교할 때 조사선종에 따른 차이는 없으므로 나타났으며 진공 포장이 질소치환 포장에 비해 색 변화가 큰 것으로 나타나 분쇄 우육과 동일한 결과를 나타냈다.

돈육 패티의 경우에는 우육 패티와는 반대로 방사선 조사선량이 증가함에 따라 a^* 가 유의적으로 증가하였으나, L^* 와 b^* 는 유의적인 변화가 없는 것으로 나타났으며 ($p < 0.05$). 포장방법에 따른 차이도 없었다. 그러나 감마선이 전자선에 비해 돈육의 적색도 (a^*) 증가에 미치는 영향이 큰 것으로 나타나 분쇄 돈육과 동일한 결과를 얻었다. Lee *et al.* (1999c)은 돈육 햄버거 스테이크의 적색도가 방사선 조사에 의해 증가하였다고 보고하였으며 Lim & Lee (2007) 또한 돈육 발효 소시지에 전자선을 조사하고 육색 변화를 분석한 결과 적색도 (a^*) 와 황색도 (b^*) 값이 증가한 것으로 보고하여 본 연구 결과와 일치하였다.

Table 35. Changes of Hunter's color values in gamma ray or electron beam irradiated beef patties

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Hunter's color Values		
			L*	a*	b*
Gamma ray	N ₂	0	40.94±0.91 ^a	15.57±0.09 ^a	21.65±0.26 ^a
		5	40.72±0.62 ^a	12.35±0.13 ^b	21.31±0.18 ^a
		10	40.35±0.78 ^a	8.19±0.22 ^c	20.79±0.21 ^b
		15	39.71±0.37 ^{ab}	6.45±0.06 ^d	20.41±0.27 ^{bc}
		20	39.38±0.53 ^b	4.86±0.14 ^e	20.29±0.19 ^c
	Vacuum	0	40.94±0.91 ^a	15.57±0.09 ^a	21.65±0.26 ^a
		5	40.65±0.85 ^a	11.84±0.14 ^a	20.95±0.13 ^a
		10	40.31±0.63 ^a	7.91±0.23 ^b	20.32±0.28 ^b
		15	39.53±0.41 ^{ab}	5.75±0.19 ^c	19.81±0.19 ^{bc}
		20	39.18±0.52 ^b	4.52±0.05 ^d	19.46±0.22 ^c
Electron Beam	N ₂	0	40.94±0.91 ^a	15.57±0.09 ^a	21.65±0.26 ^a
		5	40.82±0.78 ^a	12.97±0.14 ^a	21.89±0.31 ^a
		10	40.53±0.49 ^a	8.61±0.08 ^b	21.65±0.28 ^a
		15	40.48±0.53 ^a	6.35±0.12 ^c	21.37±0.14 ^a
		20	40.27±0.57 ^a	5.42±0.26 ^d	20.71±0.32 ^b
	Vacuum	0	40.94±0.91 ^a	15.57±0.09 ^a	21.65±0.26 ^a
		5	40.79±0.36 ^a	12.63±0.19 ^a	21.74±0.28 ^a
		10	40.43±0.71 ^a	8.32±0.13 ^b	21.33±0.17 ^a
		15	40.35±0.52 ^a	5.98±0.07 ^c	20.81±0.23 ^b
		20	40.14±0.65 ^a	4.89±0.12 ^d	20.63±0.29 ^b

^{a-e}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

Table 36. Changes of Hunter's color values in gamma ray or electron beam irradiated pork patties

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Hunter's color Values		
			L*	a*	b*
Gamma ray	N ₂	0	48.17±0.94 ^a	4.25±0.04 ^e	10.17±0.23 ^a
		5	48.68±0.67 ^a	4.63±0.09 ^d	10.43±0.18 ^a
		10	49.31±0.73 ^a	5.38±0.14 ^c	10.86±0.27 ^a
		15	49.69±0.61 ^a	6.61±0.26 ^b	10.41±0.29 ^a
		20	49.84±0.59 ^a	7.37±0.18 ^a	10.85±0.18 ^a
	Vacuum	0	48.17±0.94 ^a	4.25±0.04 ^e	10.17±0.23 ^a
		5	49.73±0.75 ^a	4.67±0.08 ^d	10.48±0.21 ^a
		10	50.26±0.48 ^a	5.41±0.24 ^c	10.07±0.32 ^a
		15	50.46±0.62 ^a	6.65±0.17 ^b	10.53±0.26 ^a
		20	50.71±0.57 ^a	7.42±0.29 ^a	10.96±0.23 ^a
Electron Beam	N ₂	0	48.17±0.94 ^a	4.25±0.04 ^e	10.17±0.23 ^c
		5	48.35±0.79 ^a	4.49±0.04 ^d	10.29±0.15 ^b
		10	48.93±0.57 ^a	4.86±0.07 ^c	10.64±0.18 ^b
		15	49.47±0.52 ^a	5.58±0.14 ^b	11.37±0.23 ^a
		20	49.59±0.64 ^a	6.65±0.18 ^a	11.58±0.21 ^a
	Vacuum	0	48.17±0.94 ^a	4.25±0.04 ^e	10.17±0.23 ^c
		5	49.13±0.83 ^a	4.54±0.07 ^d	10.41±0.23 ^b
		10	49.41±0.74 ^a	5.15±0.08 ^c	10.76±0.15 ^b
		15	49.76±0.47 ^a	5.73±0.15 ^b	11.41±0.24 ^a
		20	49.95±0.59 ^a	6.89±0.24 ^a	11.75±0.29 ^a

^{a-e}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

5. 햄버거 패티의 경도에 미치는 영향

포장 방법을 달리하여 감마선과 전자선을 조사한 우육 패티 및 돈육 패티의 경도 측정 결과를 Table 38 및 39에 나타냈다. 우육 패티와 돈육 패티의 경도는 방사선 조사선량이 증가할수록 유의적으로 감소하는 것으로 나타났다 ($p < 0.05$). 일반적으로 식육에 대한 방사선 조사는 근육 또는 피부 조직의 세포내 콜라겐 구조에 영향을 주고(Bowes & Moss, 1962; Horowitz *et al.*, 1986; Tzaphlidou *et al.*, 1997), 마이오신 (myosin)의 두부 (head part)를 변성시킨다(Lee *et al.*, 2000). 또한, Yook *et al.* (2001)은 우육의 흉골하악근 (*M. sternomandibularis*)에 방사선을 조사한 후의 형태학적인 특성을 분석한 결과 액틴 (actin)과 myosin 으로 구성된 근원섬유 (myofibril)의 가로무늬근인 근절 (sarcomere)이 방사선 조사에 의해 크기가 길어지고 부피가 팽창되며 동시에 근원섬유의 집합체인 근육 (muscle bundle)의 파괴가 관찰되었다고 보고하였다. 결과적으로 근육의 전단력이 감소한다고 하여 본 연구 결과를 뒷받침하였다. 그럼에도 불구하고 방사선 조사에 의한 조직변화로 인해 방사선 조사 식육의 연도가 향상된다는 긍정적인 연구결과들이 보고되었다(Whitehair *et al.*, 1964; Smulder *et al.*, 1990; Park *et al.*, 2004).

포장방법이 우육 패티와 돈육 패티의 경도에 미치는 영향은 비조사구와 조사구 모두 진공포장 시에 경도가 전반적으로 높은 것으로 나타났는데 이는 진공포장에 의해 햄버거 패티의 부피가 감소되었기 때문으로 사료된다. 한편 조사선종에 의한 영향은 우육 패티와 돈육 패티 모두 감마선이 전자선에 비해 경도 감소에 더욱 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며 이는 감마선이 전자선에 비해 투과도가 높아 햄버거 패티에 존재하는 근원섬유 단백질에 더욱 많은 영향을 주기 때문으로 판단되었다.

Table 37. Changes of hardness (g) in gamma ray or electron beam irradiated beef patties

Package	kGy	Radiation Type	
		Gamma ray	Electron Beam
N ₂	0	358.94±14.06 ^b	358.94±14.06 ^b
	5	332.63±43.45 ^{bc}	352.80±24.85 ^b
	10	285.25±29.32 ^{cd}	346.79±47.41 ^{bc}
	15	292.71±36.40 ^{cd}	339.37±36.84 ^c
	20	251.20±41.22 ^d	282.20±96.98 ^d
Vacuum	0	451.26±31.79 ^a	451.26±31.79 ^a
	5	441.79±24.09 ^a	436.04±34.73 ^a
	10	432.67±44.23 ^a	447.83±41.48 ^a
	15	435.35±1.97 ^a	426.54±6.39 ^a
	20	380.01±19.21 ^{ab}	360.16±17.05 ^{ab}

Values are mean ± standard deviation (n=5).

^{a-d}Means with the same superscripts in each a column are significantly different (p < 0.05).

Table 38. Changes of hardness (g) in gamma ray or electron beam irradiated pork patties

Package	kGy	Radiation Type	
		Gamma ray	Electron beam
N ₂	0	363.76±19.91 ^b	363.76±19.91 ^{ab}
	5	296.23±31.82 ^c	363.73±27.37 ^{ab}
	10	289.50±48.41 ^c	353.97±43.74 ^{ab}
	15	267.84±21.60 ^c	356.78±48.35 ^{ab}
	20	253.31±30.53 ^c	308.61±34.34 ^b
Vacuum	0	431.76±45.35 ^a	431.76±45.35 ^a
	5	395.67±50.32 ^{ab}	424.38±6.22 ^a
	10	385.06±27.59 ^{ab}	423.21±61.62 ^a
	15	386.43±20.32 ^{ab}	419.93±83.64 ^a
	20	375.69±28.35 ^b	407.34±69.88 ^a

Values are mean ± standard deviation (n=5).

^{a-c}Means with the same superscripts in each a column are significantly different (p<0.05).

6. 햄버거 패티의 관능적 특성에 미치는 영향

포장방법을 달리하여 방사선을 조사한 우육 패티와 돈육 패티의 관능검사 결과를 각각 Table 39와 40에 나타냈다. 우육 패티와 돈육 패티의 색 (color), 씹힘성 (chewiness), 맛 (taste), 종합적 기호도 (overall acceptability)는 포장방법에 관계없이 감마선과 전자선 조사구 모두 조사선량이 증가함에 따라 유의적으로 감소하고 반대로 이취는 증가하는 것으로 나타나 방사선 조사에 의한 관능적 품질저하를 확인할 수 있었다 ($p < 0.05$).

측정 항목별로 살펴보면 색은 우육 패티의 경우에 모든 시료에서 유의적 차이를 보이지 않았으나 돈육 패티의 경우 15 kGy 이상의 고선량 조사시 유의적으로 감소하였다. 이는 돈육 패티의 색도 측정결과 (Table 36)에서 나타난 바와 같이 방사선 조사에 의해 돈육 패티 내부까지 적색도 (a^*)가 증가하여 비조사구와 큰 차이를 보이기 때문으로 사료된다. 씹힘성은 우육 패티와 돈육 패티 모두 방사선 조사에 의해 감소하였는데 이는 햄버거 패티의 경도 측정결과(Table 37 & 38)와 일치하는 경향이 있었다. 또한 맛은 역시 우육 패티와 돈육 패티 모두 방사선 조사선량이 증가함에 따라 감소하였는데 이는 방사선 조사에 의해 이취가 증가가 그 원인으로 사료된다.

식육 및 식육가공품의 방사선 조사에 있어서 가장 중요한 관점은 관능적 품질 변화이다. 방사선 조사에 의해 발생하는 이취는 단백질 또는 아미노산의 변화에 의해 생성된 황함유 휘발성 물질에 기인한 것으로 이는 지방산화에 의한 생성물과는 다른 것이다(Schweigert *et al.*, 1954; Merritt, 1966). 이러한 이취는 물에 젖은 개의 냄새(wet dog odor)와 같은 냄새(Koleva *et al.*, 2002) 또는 옥수수 구운 냄새(barbecued corn-like odor)와 같은 냄새로 인식되기도 한다(Ahn *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2004d).

한편 포장방법 및 조사선중에 따른 영향으로는 우육 패티와 돈육 패티 모두 질소치환 포장과 전자선 병용처리구의 관능평가 결과가 전반적으로 높게 나타나 관능적 품질저하 방지 측면에서 질소치환과 전자선 조사가 가장 효과적인 것으로 판단되었다. 그러나 본 연구 결과에서와 같이 질소치환 또는 진공 포장을 하였음에도 불구하고 여전히 방사선 조사에 의해 관능적 품질저하를 효과적으로 억제하지는 못하였으며 이러한 현상은 특히 10 kGy 이상의 고선량 방사선 조사에 의해 더욱 두드러진 것으로 나타났다.

현재까지 방사선 조사에 의한 관능적 품질변화를 최소화하기 위한 방법으로는 천연 항산화제, 포장방법 및 조사조건 개선 등을 이용한 연구가 보고되었다(Lee et al., 2000; Oh et al., 2004; Lee et al., 2005a; Kang et al., 2004, 2007). Ahn & Lee (2006)는 이들 방법을 단독으로 사용하는 것에 비해 항산화제와 포장방법을 병용하는 것이 방사선 조사에 의한 식육 및 가공품의 산화적 품질변화를 방지하는데 가장 효과적이라고 지적한바 있다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때 방사선 조사는 식육 및 식육가공품의 저장에 있어서 매우 효과적 이었으나 지방산패 및 이취 발생에 따른 관능적 품질이 변화하는 문제를 확인할 수 있었다. 따라서 식육 및 식육가공품에 대한 방사선 조사를 활성화하기 위해서는 앞서 언급한 것처럼 방사선 조사에 의한 관능적 품질저하를 방지하기 위한 연구가 활발히 추진되어야 할 것으로 사료된다.

Table 39. Evaluation of sensory qualities of gamma ray or electron beam irradiated beef patties

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Color	Chewiness	Taste	Off-flavor	Overall acceptance
Gamma ray	N ₂	0	6.8±0.4 ^a	6.6±0.7 ^a	6.8±0.6 ^a	1.2±0.1 ^c	6.8±0.7 ^a
		5	6.3±0.5 ^a	6.1±0.5 ^a	6.1±0.5 ^a	1.9±0.1 ^b	6.1±0.6 ^a
		10	5.9±0.4 ^a	5.6±0.6 ^a	5.7±0.6 ^{ab}	2.1±0.2 ^b	5.6±0.4 ^a
		15	5.7±0.5 ^a	5.2±0.4 ^{ab}	5.3±0.6 ^b	2.5±0.2 ^b	4.8±0.2 ^b
		20	5.4±0.6 ^a	4.6±0.3 ^b	4.1±0.3 ^c	3.1±0.3 ^a	4.2±0.3 ^c
	Vacuum	0	6.8±0.4 ^a	6.6±0.7 ^a	6.8±0.6 ^a	1.2±0.1 ^c	6.8±0.7 ^a
		5	6.2±0.6 ^a	5.9±0.4 ^a	6.1±0.6 ^a	2.1±0.2 ^b	5.8±0.4 ^a
		10	6.1±0.5 ^a	5.4±0.6 ^a	5.7±0.5 ^{ab}	2.6±0.3 ^{ab}	5.1±0.6 ^b
		15	5.5±0.5 ^a	4.9±0.3 ^{ab}	5.2±0.5 ^b	2.8±0.3 ^a	4.6±0.3 ^{bc}
		20	5.3±0.4 ^a	4.1±0.4 ^b	3.9±0.3 ^c	3.2±0.2 ^a	4.1±0.3 ^c
Electron Beam	N ₂	0	6.8±0.4 ^a	6.6±0.7 ^a	6.8±0.6 ^a	1.2±0.1 ^c	6.8±0.7 ^a
		5	6.6±0.6 ^a	6.2±0.6 ^a	6.4±0.6 ^a	1.7±0.2 ^b	6.3±0.3 ^a
		10	6.4±0.5 ^a	5.8±0.5 ^a	6.1±0.5 ^{ab}	1.9±0.2 ^{ab}	5.7±0.5 ^{ab}
		15	6.1±0.5 ^a	5.5±0.5 ^{ab}	5.6±0.3 ^b	2.2±0.3 ^a	5.2±0.3 ^b
		20	5.9±0.3 ^a	5.1±0.4 ^b	4.4±0.4 ^c	2.6±0.2 ^a	4.5±0.4 ^b
	Vacuum	0	6.8±0.4 ^a	6.6±0.7 ^a	6.8±0.6 ^a	1.2±0.1 ^c	6.8±0.7 ^a
		5	6.5±0.5 ^a	6.1±0.5 ^a	6.2±0.5 ^a	1.8±0.3 ^b	6.1±0.5 ^{ab}
		10	6.4±0.5 ^a	5.5±0.5 ^a	5.9±0.6 ^{ab}	2.1±0.3 ^b	5.3±0.4 ^b
		15	6.2±0.6 ^a	5.1±0.6 ^{ab}	5.4±0.5 ^b	2.5±0.2 ^{ab}	4.9±0.3 ^{bc}
		20	5.8±0.4 ^a	4.3±0.3 ^b	4.3±0.4 ^c	2.7±0.2 ^a	4.3±0.4 ^c

^{a-c}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

Table 40. Evaluation of sensory qualities of gamma ray or electron beam irradiated pork patties

Radiation Type	Package Type	Dose (kGy)	Color	Chewiness	Taste	Off-flavor	Overall acceptance
Gamma ray	N ₂	0	6.8±0.8 ^a	6.7±0.7 ^a	6.8±0.6 ^a	1.2±0.1 ^c	6.8±0.8 ^a
		5	6.3±0.5 ^a	6.3±0.6 ^a	6.2±0.5 ^a	2.1±0.1 ^b	6.2±0.4 ^a
		10	5.8±0.4 ^a	5.7±0.4 ^{ab}	5.9±0.5 ^a	2.3±0.1 ^b	5.7±0.5 ^a
		15	5.2±0.4 ^{ab}	5.4±0.5 ^b	5.4±0.3 ^{ab}	2.8±0.3 ^a	5.2±0.6 ^{ab}
		20	4.9±0.3 ^b	4.8±0.3 ^b	4.5±0.5 ^b	3.2±0.2 ^a	4.6±0.3 ^b
	Vacuum	0	6.8±0.8 ^a	6.7±0.7 ^a	6.8±0.6 ^a	1.2±0.1 ^c	6.8±0.8 ^a
		5	6.1±0.6 ^a	6.1±0.5 ^a	6.2±0.4 ^a	2.2±0.2 ^b	5.9±0.4 ^a
		10	5.6±0.5 ^a	5.7±0.4 ^a	5.9±0.6 ^a	2.7±0.3 ^{ab}	5.5±0.5 ^a
		15	5.1±0.4 ^{ab}	5.2±0.4 ^{ab}	5.3±0.4 ^{ab}	3.1±0.3 ^a	4.8±0.2 ^{ab}
		20	4.7±0.5 ^b	4.4±0.5 ^b	4.4±0.3 ^b	3.3±0.2 ^a	4.3±0.4 ^b
Electron Beam	N ₂	0	6.8±0.8 ^a	6.7±0.7 ^a	6.8±0.6 ^a	1.2±0.1 ^c	6.8±0.8 ^a
		5	6.6±0.6 ^a	6.5±0.5 ^a	6.5±0.6 ^a	1.8±0.2 ^b	6.6±0.5 ^a
		10	6.2±0.3 ^a	6.1±0.5 ^a	6.2±0.5 ^a	2.1±0.2 ^{ab}	5.9±0.5 ^a
		15	5.7±0.6 ^a	5.7±0.4 ^{ab}	5.6±0.5 ^{ab}	2.5±0.4 ^a	5.5±0.3 ^{ab}
		20	5.3±0.5 ^a	5.2±0.5 ^b	4.9±0.4 ^b	2.7±0.3 ^a	4.8±0.4 ^b
	Vacuum	0	6.4±0.4 ^a	6.4±0.6 ^a	6.6±0.7 ^a	2.1±0.2 ^b	6.5±0.5 ^a
		5	5.9±0.6 ^a	5.8±0.6 ^{ab}	6.1±0.3 ^a	2.3±0.2 ^b	5.6±0.4 ^a
		10	5.4±0.5 ^{ab}	5.5±0.3 ^b	5.4±0.5 ^{ab}	2.7±0.1 ^a	5.1±0.4 ^{ab}
		15	5.1±0.3 ^b	4.6±0.4 ^c	4.7±0.6 ^b	2.9±0.2 ^a	4.7±0.3 ^b
		20	5.8±0.4 ^a	4.3±0.3 ^b	4.3±0.4 ^c	2.7±0.2 ^a	4.3±0.4 ^c

^{a-c}Means within the same column different letters differ significantly ($p < 0.05$).

제 3절 복귀돌연변이 시험

감마선과 전자선을 조사한 분쇄 우육, 분쇄 돈육, 우육 패티, 돈육 패티의 물 추출물과 디메틸설폭시화물 (Dimethyl sulfoxide) 추출물을 첨가하였을 때에 *Salmonella typhimurium* TA98과 TA100에 대한 복귀돌연변이 집락수를 조사한 결과를 Table 4 1~48에 제시하였다. 실험에 사용된 두 균주의 생균수는 $1.0 \sim 1.8 \times 10^9$ /mL 수준이었으며 예비시험 결과에 따라 모든 시료는 5,000 $\mu\text{g}/\text{plate}$ 를 최고농도로 설정하여 복귀돌연변이 시험을 수행하였다. 대사활성 부재 시의 경우에는 모든 시험균주에서 시험 적용 농도인 1,250~5,000 $\mu\text{g}/\text{plate}$ 의 범위에서 복귀돌연변이 집락수가 용매대조군과 비교하였을 때 유의적인 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 대사 활성계 (S-9 mixture)를 도입하였을 때에는 시험물질에 대해 *S. typhimurium*을 이용한 복귀돌연변이 시험 결과에서 시험한 모든 검체는 적용 농도에서 복귀돌연변이 집락수간의 유의적인 차이가 없었다. 일반적으로 돌연변이원성의 판정은 음성대조군 복귀돌연변이 집락수의 2배인 경우를 양성으로 하므로 돈육 패티, 우육 패티의 물 추출물, Dimethyl sulfoxide 추출물에 대한 시험적용농도에서 복귀돌연변이를 유발하지 않는 것으로 보아 감마선, 전자선 조사에 의한 복귀돌연변이 원성은 없는 것으로 나타났다. 현재까지 방사선 조사식품의 안전성과 관련된 연구는 이미 1950년대부터 수행되기 시작하여 국제적으로 수많은 연구결과가 보고되었지만 방사선 조사가 식품에 어떠한 독성도 유발하지 않는다고 결론지었다(WHO, 1994; WHO, 1999). 방사선 조사된 식육 및 식육가공품의 안전성과 관련된 국내의 여러 연구에서도 안전성이 입증되었는데 Yook (1999)은 육가공제품에 감마선을 조사할 경우 유전독성학적으로 안전하다고 보고하여 본 실험과 일치하였다. Lee *et al.* (2005c)은 볶은 (양념)쇠고기와 햄에 감마선을 조사하여 유전독성학적 평가(Ames test) 시험에서 복귀돌연변이 집락수는 증가하지 않았다고 보고하였으며 Jo *et al.* (2005)도 동물성 식품에 대한 에임즈 시험 (AMES test)에서 10 kGy까지 조사된 샘플은 비조사구와 결과와 유사하다고 보고하였다.

Table 41. Result of AMES test of 50 kGy gamma ray irradiated beef

Extraction method	Irradiation dose (kGy)	Dose ($\mu\text{g}/\text{plate}$)	Number of revertant colonies (His+) per plate			
			TA98 (-S9)	TA98 (+S9)	TA100 (-S9)	TA100 (+S9)
Distilled Water	0	1,250	36 \pm 1 ^a	29 \pm 2	233 \pm 8	263 \pm 16
		2,500	26 \pm 3	30 \pm 3	243 \pm 1	274 \pm 12
		5,000	36 \pm 3	39 \pm 2	217 \pm 5	284 \pm 1
	50	1,250	39 \pm 8	29 \pm 6	265 \pm 16	274 \pm 8
		2,500	34 \pm 1	34 \pm 1	218 \pm 3	214 \pm 11
		5,000	32 \pm 3	38 \pm 6	214 \pm 27	208 \pm 1
Negative control	H ₂ O		47 \pm 8	42 \pm 1	277 \pm 4	359 \pm 20
Dimethyl sulfoxide	0	1,250	23 \pm 2	20 \pm 4	220 \pm 21	303 \pm 24
		2,500	19 \pm 1	21 \pm 6	211 \pm 3	289 \pm 6
		5,000	28 \pm 8	24 \pm 4	257 \pm 23	292 \pm 54
	50	1,250	20 \pm 1	21 \pm 3	268 \pm 11	235 \pm 11
		2,500	16 \pm 5	30 \pm 6	225 \pm 9	254 \pm 34
		5,000	25 \pm 7	28 \pm 2	212 \pm 6	280 \pm 57
Negative control	DMSO		31 \pm 2	33 \pm 3	265 \pm 35	300 \pm 28
Positive control	4-NQO	0.5	734 \pm 4			
	2-AA	2	1051 \pm 6			
	SA	0.5	692 \pm 61			
	2-AA	2	1477 \pm 398			

Abbreviations: 4-NQO, 4-nitroquinoline-N-oxide; SA, Sodium azide; 2-AA, 2-aminoanthracene.

^aValues are the mean \pm S.D. (P < 0.05).

Table 42. Result of AMES test of 50 kGy electron beam irradiated beef

Extraction method	Irradiation dose (kGy)	Dose ($\mu\text{g}/\text{plate}$)	Number of revertant colonies (His+) per plate			
			TA98 (-S9)	TA98 (+S9)	TA100 (-S9)	TA100 (+S9)
Distilled Water	0	1,250	32±4 ^a	28±9	256±47	175±2
		2,500	20±3	22±2	223±28	195±17
		5,000	34±4	38±3	226±25	246±40
	50	1,250	23±5	35±11	184±49	210±47
		2,500	33±6	23±6	187±4	179±4
		5,000	44±2	34±6	147±49	239±21
Negative control	H ₂ O		47±8	42±1	277±4	359±20
Dimethyl sulfoxide	0	1,250	23±2	20±4	228±9	268±26
		2,500	21±1	21±4	234±29	277±23
		5,000	24±3	24±4	250±14	269±22
	50	1,250	20±1	22±1	254±9	235±11
		2,500	20±11	24±1	226±7	254±34
		5,000	25±7	25±1	224±11	280±57
Negative control	DMSO		31±2	33±3	265±35	300±28
Positive control	4-NQO	0.5	734±4			
	2-AA	2		1051±6		
	SA	0.5			692±61	
	2-AA	2				1477±398

Abbreviations: 4-NQO, 4-nitroquinoline-N-oxide; SA, Sodium azide; 2-AA, 2-aminoanthracene.

^aValues are the mean ± S.D. (P < 0.05).

Table 43. Result of AMES test of 50 kGy gamma ray irradiated pork

Extraction method	Irradiation dose (kGy)	Dose ($\mu\text{g}/\text{plate}$)	Number of revertant colonies (His+) per plate			
			TA98 (-S9)	TA98 (+S9)	TA100 (-S9)	TA100 (+S9)
Distilled Water	0	1,250	38 \pm 1 ^a	37 \pm 1	225 \pm 16	282 \pm 9
		2,500	31 \pm 6	34 \pm 1	244 \pm 1	238 \pm 35
		5,000	34 \pm 1	39 \pm 3	207 \pm 30	258 \pm 23
	50	1,250	24 \pm 3	41 \pm 6	199 \pm 4	241 \pm 4
		2,500	35 \pm 4	32 \pm 1	260 \pm 18	202 \pm 3
		5,000	29 \pm 5	31 \pm 9	294 \pm 2	303 \pm 14
Negative control	H ₂ O		47 \pm 8	42 \pm 1	277 \pm 4	359 \pm 20
Dimethyl sulfoxide	0	1,250	23 \pm 2	30 \pm 3	299 \pm 30	310 \pm 59
		2,500	21 \pm 2	29 \pm 8	273 \pm 11	276 \pm 6
		5,000	19 \pm 4	22 \pm 4	310 \pm 14	340 \pm 28
	50	1,250	26 \pm 1	35 \pm 6	310 \pm 14	260 \pm 28
		2,500	21 \pm 6	35 \pm 3	305 \pm 7	281 \pm 13
		5,000	22 \pm 8	30 \pm 4	302 \pm 6	268 \pm 17
Negative control	DMSO		31 \pm 2	33 \pm 3	265 \pm 35	300 \pm 28
Positive control	4-NQO	0.5	734 \pm 4			
	2-AA	2	1051 \pm 6			
	SA	0.5	692 \pm 61			
	2-AA	2	1477 \pm 398			

Abbreviations: 4-NQO, 4-nitroquinoline-N-oxide; SA, Sodium azide; 2-AA, 2-aminoanthracene.
^aValues are the mean \pm S.D. (P < 0.05).

Table 44. Result of AMES test of 50 kGy electron beam irradiated pork

Extraction method	Irradiation dose (kGy)	Dose ($\mu\text{g}/\text{plate}$)	Number of revertant colonies (His+) per plate			
			TA98 (-S9)	TA98 (+S9)	TA100 (-S9)	TA100 (+S9)
Distilled Water	0	1,250	37 \pm 7 ^a	33 \pm 3	272 \pm 40	275 \pm 13
		2,500	39 \pm 1	35 \pm 1	187 \pm 11	217 \pm 19
		5,000	36 \pm 1	40 \pm 3	238 \pm 14	298 \pm 13
	50	1,250	38 \pm 1	29 \pm 3	262 \pm 23	271 \pm 51
		2,500	35 \pm 2	44 \pm 1	239 \pm 16	257 \pm 24
		5,000	35 \pm 5	29 \pm 7	277 \pm 12	302 \pm 22
Negative control	H ₂ O		47 \pm 8	42 \pm 1	277 \pm 4	359 \pm 20
Dimethyl sulfoxide	0	1,250	22 \pm 1	30 \pm 2	288 \pm 13	265 \pm 5
		2,500	26 \pm 5	28 \pm 8	263 \pm 3	285 \pm 7
		5,000	24 \pm 3	26 \pm 2	301 \pm 1	343 \pm 25
	50	1,250	23 \pm 4	35 \pm 6	289 \pm 16	267 \pm 19
		2,500	26 \pm 1	35 \pm 3	290 \pm 14	276 \pm 7
		5,000	27 \pm 1	29 \pm 2	302 \pm 6	268 \pm 16
Negative control	DMSO		31 \pm 2	33 \pm 3	265 \pm 35	300 \pm 28
Positive control	4-NQO	0.5	734 \pm 4			
	2-AA	2		1051 \pm 6		
	SA	0.5			692 \pm 61	
	2-AA	2				1477 \pm 398

Abbreviations: 4-NQO, 4-nitroquinoline-N-oxide; SA, Sodium azide; 2-AA, 2-aminoanthracene.

^a Values are the mean \pm S.D. ($P < 0.05$).

Table 45. Result of AMES test of 50 kGy gamma ray irradiated beef patties

Extraction method	Irradiation dose (kGy)	Dose ($\mu\text{g}/\text{plate}$)	Number of revertant colonies (His+) per plate			
			TA98 (-S9)	TA98 (+S9)	TA100 (-S9)	TA100 (+S9)
Distilled Water	0	1,250	32±4 ^a	28±9	256±47	175±2
		2,500	20±3	22±2	248±6	195±17
		5,000	34±4	38±3	228±23	246±40
	50	1,250	24±4	35±10	184±49	235±12
		2,500	33±6	23±6	187±4	250±37
		5,000	41±6	34±6	168±21	239±21
Negative control	H ₂ O		47±8	42±1	277±4	359±20
Dimethyl sulfoxide	0	1,250	23±8	18±4	237±52	252±40
		2,500	23±4	24±6	273±39	280±28
		5,000	31±6	28±11	255±22	298±25
	50	1,250	30±2	22±3	235±35	261±1
		2,500	38±4	28±4	255±7	315±35
		5,000	28±3	29±1	290±14	326±22
Negative control	DMSO		31±2	33±3	265±35	300±28
Positive control	4-NQO	0.5	734±4			
	2-AA	2	1051±6			
	SA	0.5	692±61			
	2-AA	2	1477±398			

Abbreviations: 4-NQO, 4-nitroquinoline-N-oxide; SA, Sodium azide; 2-AA, 2-aminoanthracene.

^aValues are the mean ± S.D. (P < 0.05).

Table 46. Result of AMES test of 50 kGy electron beam irradiated beef patties

Extraction method	Irradiation dose (kGy)	Dose ($\mu\text{g}/\text{plate}$)	Number of revertant colonies (His+) per plate				
			TA98 (-S9)	TA98 (+S9)	TA100 (-S9)	TA100 (+S9)	
Distilled Water	0	1,250	37±7 ^a	33±3	271±39	270±5	
		2,500	34±6	33±2	246±30	226±6	
		5,000	31±6	30±4	232±23	292±4	
	50	1,250	36±1	29±3	267±16	259±33	
		2,500	31±3	34±1	241±13	257±24	
		5,000	32±1	29±7	277±12	281±8	
Negative control	H ₂ O		47±8	42±1	277±4	359±20	
		1,250	25±6	20±1	247±38	257±33	
		2,500	24±1	27±2	270±35	256±8	
		5,000	28±2	25±6	250±16	279±1	
		1,250	26±3	23±1	262±3	278±24	
		50	2,500	30±7	26±1	254±8	283±11
Negative control	DMSO	5,000	26±1	30±2	293±18	304±9	
			31±2	33±3	265±35	300±28	
		4-NQO	0.5	734±4			
		2-AA	2		1051±6		
		SA	0.5			692±61	
		2-AA	2				1477±398

Abbreviations: 4-NQO, 4-nitroquinoline-N-oxide; SA, Sodium azide; 2-AA, 2-aminoanthracene.

^aValues are the mean ± S.D. (P < 0.05).

Table 47. Result of AMES test of 50 kGy gamma ray irradiated pork patties

Extraction method	Irradiation dose (kGy)	Dose ($\mu\text{g}/\text{plate}$)	Number of revertant colonies (His+) per plate			
			TA98 (-S9)	TA98 (+S9)	TA100 (-S9)	TA100 (+S9)
Distilled Water	0	1,250	40 \pm 3 ^a	39 \pm 4	303 \pm 15	322 \pm 13
		2,500	37 \pm 2	40 \pm 2	273 \pm 1	297 \pm 13
		5,000	41 \pm 8	32 \pm 8	280 \pm 7	306 \pm 47
	50	1,250	36 \pm 4	38 \pm 8	226 \pm 8	248 \pm 6
		2,500	39 \pm 6	43 \pm 3	259 \pm 7	289 \pm 49
		5,000	38 \pm 8	35 \pm 4	239 \pm 25	264 \pm 18
Negative control	H ₂ O		47 \pm 8	42 \pm 1	277 \pm 4	359 \pm 20
Dimethyl sulfoxide	0	1,250	31 \pm 5	39 \pm 2	199 \pm 57	283 \pm 20
		2,500	25 \pm 4	33 \pm 3	235 \pm 28	221 \pm 27
		5,000	31 \pm 6	30 \pm 1	263 \pm 14	282 \pm 7
	50	1,250	26 \pm 1	21 \pm 4	234 \pm 30	250 \pm 1
		2,500	34 \pm 2	28 \pm 1	208 \pm 42	232 \pm 14
		5,000	25 \pm 5	31 \pm 6	175 \pm 21	216 \pm 6
Negative control	DMSO		31 \pm 2	33 \pm 3	265 \pm 35	300 \pm 28
Positive control	4-NQO	0.5	734 \pm 4			
	2-AA	2	1051 \pm 6			
	SA	0.5	692 \pm 61			
	2-AA	2	1477 \pm 398			

Abbreviations: 4-NQO, 4-nitroquinoline-N-oxide; SA, Sodium azide; 2-AA, 2-aminoanthracene.

^aValues are the mean \pm S.D. (P < 0.05).

Table 48. Result of AMES test of 50 kGy electron beam irradiated pork patties

Extraction method	Irradiation dose (kGy)	Dose ($\mu\text{g}/\text{plate}$)	Number of revertant colonies (His+) per plate			
			TA98 (-S9)	TA98 (+S9)	TA100 (-S9)	TA100 (+S9)
Distilled Water	0	1,250	31 \pm 4 ^a	48 \pm 6	215 \pm 11	254 \pm 20
		2,500	35 \pm 5	48 \pm 7	200 \pm 16	237 \pm 47
		5,000	35 \pm 1	46 \pm 4	226 \pm 27	252 \pm 12
	50	1,250	39 \pm 3	29 \pm 4	207 \pm 13	280 \pm 8
		2,500	42 \pm 4	36 \pm 1	240 \pm 28	235 \pm 21
		5,000	42 \pm 1	41 \pm 5	284 \pm 4	282 \pm 23
Negative control	H ₂ O		47 \pm 8	42 \pm 1	277 \pm 4	359 \pm 20
Dimethyl sulfoxide	0	1,250	29 \pm 3	34 \pm 5	217 \pm 32	247 \pm 31
		2,500	25 \pm 4	29 \pm 3	238 \pm 25	235 \pm 7
		5,000	29 \pm 2	30 \pm 2	263 \pm 14	250 \pm 52
	50	1,250	24 \pm 4	21 \pm 4	234 \pm 29	250 \pm 1
		2,500	32 \pm 1	20 \pm 1	227 \pm 16	228 \pm 20
		5,000	25 \pm 5	26 \pm 1	211 \pm 29	242 \pm 31
Negative control	DMSO		31 \pm 2	33 \pm 3	265 \pm 35	300 \pm 28
Positive control	4-NQO	0.5	734 \pm 4			
	2-AA	2	1051 \pm 6			
	SA	0.5	692 \pm 61			
	2-AA	2	1477 \pm 398			

Abbreviations: 4-NQO, 4-nitroquinoline-N-oxide; SA, Sodium azide; 2-AA, 2-aminoanthracene.

^aValues are the mean \pm S.D. (P < 0.05).

제 4절 검지 특성 연구

1. 분쇄 우육의 *hydrocarbon*류 분석

보통 육류의 지방에는 다량의 oleic acid를 비롯하여 팔미트산 (palmitic acid), 스테아르산 (stearic acid), 리놀레산 (linoleic acid) 등이 함유되어 있는데(Kim *et al.*, 2002) 이러한 지방산에 방사선을 조사하게 되면 중성지방의 카보닐기(carbonyl group)의 α 탄소와 β 탄소의 위치에서 결합이 끊어져 원래의 지방산보다 탄소수가 1개 (C_{n-1}) 적거나, 2개 (C_{n-2}) 적으면서 첫 번째 탄소위치에 새로운 이중결합을 가진 다양한 탄화수소 (hydrocarbon)이 생성된다(Nawar, 1986; Nawar, 1994). 따라서 이러한 원리를 이용하여 육류와 같이 지방을 함유하고 있는 식품의 방사선 조사 검지 방법으로 GC 및 GC/MS를 이용한 hydrocarbon을 분석하는 화학적 방법이 이용되고 있다(Boyd *et al.*, 1991; Crone *et al.*, 1992; Morehouse & Ku, 1993; Bergaentzle *et al.*, 1994; Meier *et al.*, 1996; Choi & Hwang, 1997).

본 실험에서는 분쇄 우육에 조사선종 (감마선과 전자선) 및 포장방법 (진공 및 질소치환)을 달리하여 처리하였을 때 hydrocarbon의 함량변화를 분석하였으며 그 결과를 Fig. 5 및 Table 49~50에 나타냈다. 방사선 비조사구의 경우에는 hydrocarbon이 검출되지 않았으나 방사선 조사된 모든 시험군에서 hydrocarbon이 검출되는 것을 확인하였다. palmitic acid ($C_{16:0}$)로부터 pentadecane ($C_{15:0}$)과 1-tetradecene ($C_{14:1}$), stearic acid ($C_{18:0}$)로부터 heptadecane ($C_{17:0}$)과 1-hexadecene ($C_{16:1}$), oleic acid ($C_{18:1}$)로부터 8-heptadecene ($C_{17:1}$)과 1,7-hexadecadiene ($C_{16:2}$), linoleic acid ($C_{18:2}$)로부터 6,9-heptadecadiene ($C_{17:2}$)과 1,7,10-hexadecatriene ($C_{16:3}$)이 생성되었다.

Nawar (1986)와 Stevenson (1992)은 hydrocarbon이 조리과정 또는 지방산화의 결과로서 생성되지 않는 방사선 조사식품의 지표물질이라고 하여 본 연구 결과를 뒷받침하였다. 그러나 Cha *et al.* (2000)은 우육에 감마선을 조사하여 휘발성 향기성분을 분석한 결과 총 150종의 화합물 중 71종의 hydrocarbon이 검출되었는데 방사선 비조사 시료에서도 pentadecane, 1-tetradecene 및 heptadecane과 같은 hydrocarbon이 검출되었으며 Hwang *et al.* (1997)도 방사선 비조사 우육에서 pentadecane과 heptadecane이 검출되었다고 보고하여 본 연구 결과와 상반된 결과를 보였다.

Hydrocarbon 함량은 방사선 조사에 의해 oleic acid, palmitic acid, stearic acid,

linoleic acid에서 유도된 hydrocarbon 순으로 증가하였는데 이는 우육에 함유되어 있는 지방산 함량이 많을수록 방사선 조사에 의해 유도되는 hydrocarbon의 함량 또한 증가하기 때문이다. 또한 지방산 기원에 따른 C_{n-1} 와 C_{n-2} hydrocarbon의 함량을 비교한 결과 다른 지방산의 경우 큰 차이가 없었으나 oleic acid로부터 유도된 C_{n-2} hydrocarbon인 1,7-hexadecadiene이 8종의 hydrocarbon 중 가장 높은 함량을 나타냈다. 동 결과는 이전의 연구에서도 동일한 결과를 확인하였다(Kim *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 2004).

방사선 조사선량이 증가함에 따라 hydrocarbon 함량은 15 kGy 까지 유의적으로 증가하다가 다시 20 kGy에서 감소하는 경향을 보였으며 이와 같은 결과는 조사선종 또는 포장방법을 달리한 조건에서도 동일하게 나타났다. 현재까지 10 kGy 이상의 고선량 방사선 조사가 hydrocarbon의 함량 변화에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되지 않아 정확한 원인을 규명하기는 어려우나 방사선 조사선량이 증가함에 따라 hydrocarbon 함량이 증가하다가 일정 선량 이상에서는 다시 감소하는 현상을 발견하였다.

한편 조사선종에 따른 영향의 경우 동일선량에서 감마선 조사구가 전자선 조사구에 비해 hydrocarbon 함량이 높게 나타났으며 포장조건을 달리하여 감마선을 조사한 경우에는 질소치환 포장이 진공포장에 비해 약간 높은 hydrocarbon 함량을 보였으나 전자선 조사구는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 아직까지 조사선종 및 포장조건이 hydrocarbon의 생성에 미치는 영향에 대한 비교 연구가 없어 명확한 이유를 제시할 수 없으나, 이는 감마선과 전자선의 특성, 즉 선량률과 투과도 및 공기조성 등에 의한 차이로 인해 방사선 조사에 의한 산화작용에 미치는 영향이 다르기 때문으로 사료된다.

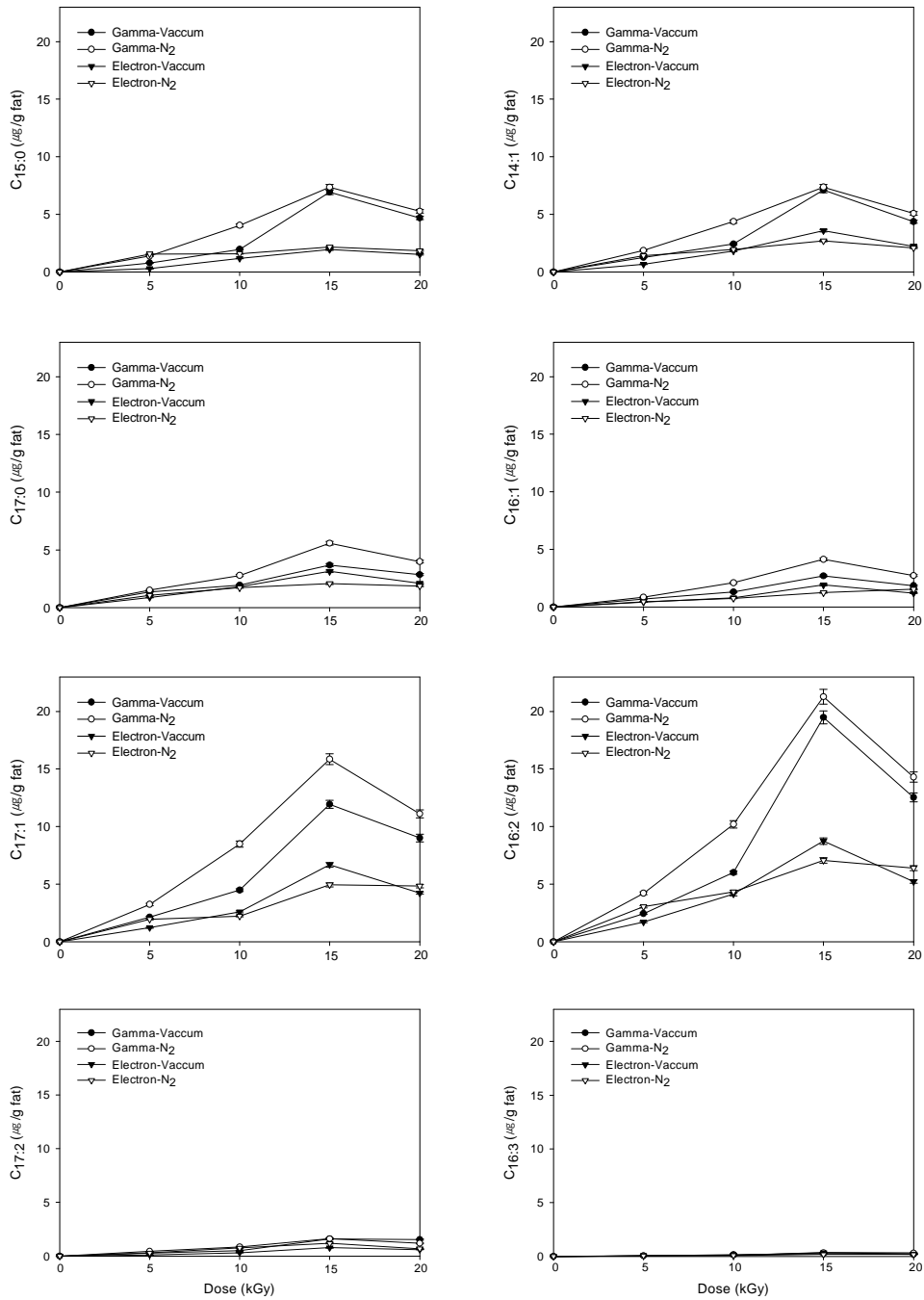


Fig. 5. Comparison of the effect of gamma and electron beam radiation on the production of radiation-induced hydrocarbons in ground beef under the different packaging conditions.

Table 49. Concentrations of radiation induced hydrocarbons generated from ground beef irradiated with gamma ray with under the different packaging conditions of vacuum or 100% of nitrogen gas

(Unit : $\mu\text{g}/\text{g}$ fat)

Packaging Type	Dose (kGy)	Palmitic acid		Stearic acid		Oleic acid		Linoleic acid	
		C _{15:0}	C _{14:1}	C _{17:0}	C _{16:1}	C _{17:1}	C _{16:2}	C _{17:2}	C _{16:3}
Vacuum	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	0.788 ± 0.033	1.268 ± 0.042	1.371 ± 0.047	0.689 ± 0.030	2.140 ± 0.068	2.452 ± 0.074	0.284 ± 0.011	0.056 ± 0.005
	10	1.961 ± 0.066	2.422 ± 0.071	1.935 ± 0.064	1.315 ± 0.047	4.489 ± 0.122	6.016 ± 0.145	0.498 ± 0.026	0.160 ± 0.004
	15	6.943 ± 0.217	7.132 ± 0.242	3.683 ± 0.125	2.701 ± 0.089	11.930 ± 0.349	19.478 ± 0.564	1.600 ± 0.053	0.249 ± 0.012
	20	4.698 ± 0.154	4.374 ± 0.133	2.859 ± 0.091	1.862 ± 0.056	9.006 ± 0.342	12.527 ± 0.388	1.533 ± 0.049	0.180 ± 0.002
N ₂ Gas	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	1.384 ± 0.040	1.871 ± 0.062	1.514 ± 0.056	0.857 ± 0.025	3.247 ± 0.102	4.218 ± 0.114	0.439 ± 0.018	0.046 ± 0.001
	10	4.046 ± 0.132	4.376 ± 0.135	2.791 ± 0.090	2.106 ± 0.070	8.486 ± 0.267	10.200 ± 0.322	0.858 ± 0.031	0.114 ± 0.001
	15	7.358 ± 0.241	7.362 ± 0.232	5.577 ± 0.169	4.139 ± 0.131	15.850 ± 0.472	21.272 ± 0.640	1.611 ± 0.056	0.347 ± 0.007
	20	5.272 ± 0.167	5.086 ± 0.155	3.983 ± 0.124	2.731 ± 0.086	11.104 ± 0.343	14.300 ± 0.447	1.189 ± 0.040	0.314 ± 0.010

¹⁾Mean \pm SD

Table 50. Concentrations of radiation induced hydrocarbons generated from ground beef irradiated with electron beam with under the different packaging conditions of vacuum or 100% of nitrogen gas

(Unit : $\mu\text{g}/g$ fat)

Packaging Type	Dose (kGy)	Palmitic acid		Stearic acid		Oleic acid		Linoleic acid	
		C _{15:0}	C _{14:1}	C _{17:0}	C _{16:1}	C _{17:1}	C _{16:2}	C _{17:2}	C _{16:3}
Vacuum	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	0.288 ± 0.010	0.677 ± 0.025	0.872 ± 0.028	0.435 ± 0.016	1.226 ± 0.045	1.723 ± 0.057	0.111 ± 0.003	0.080 ± 0.001
	10	1.179 ± 0.036	1.822 ± 0.057	1.822 ± 0.067	0.806 ± 0.028	2.601 ± 0.076	4.156 ± 0.152	0.315 ± 0.011	0.109 ± 0.002
	15	1.949 ± 0.061	3.591 ± 0.112	3.141 ± 0.102	1.918 ± 0.069	6.682 ± 0.206	8.747 ± 0.278	0.773 ± 0.028	0.338 ± 0.006
	20	1.533 ± 0.052	2.234 ± 0.074	2.099 ± 0.059	1.216 ± 0.042	4.233 ± 0.097	5.223 ± 0.148	0.597 ± 0.014	0.237 ± 0.005
N ₂ Gas	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	1.567 ± 0.052	1.420 ± 0.051	1.071 ± 0.041	0.449 ± 0.018	1.961 ± 0.064	3.043 ± 0.097	0.287 ± 0.010	0.053 ± 0.002
	10	1.592 ± 0.027	1.962 ± 0.063	1.721 ± 0.036	0.753 ± 0.033	2.222 ± 0.049	4.340 ± 0.141	0.747 ± 0.018	0.080 ± 0.001
	15	2.169 ± 0.054	2.696 ± 0.068	2.083 ± 0.073	1.249 ± 0.047	4.947 ± 0.171	7.058 ± 0.241	1.180 ± 0.038	0.179 ± 0.008
	20	1.842 ± 0.056	2.083 ± 0.043	1.865 ± 0.058	1.540 ± 0.052	4.831 ± 0.155	6.390 ± 0.213	0.681 ± 0.027	0.170 ± 0.007

¹⁾Mean \pm SD

2. 분쇄 돈육의 hydrocarbon류 분석

분쇄 돈육을 진공포장 및 질소치환 포장하여 각각 감마선과 전자선을 조사한 후 방사선 조사에 의해 생성되는 hydrocarbon 함량을 분석한 결과를 Fig. 6 및 Table 51~52에 나타냈다. 돈육의 경우에는 우육의 결과와 같이 방사선 비조사구에서는 hydrocarbon이 검출되지 않았으나 방사선 조사된 모든 시료에서 hydrocarbon이 검출되는 것을 확인하였다. 즉 지방산 기원에 따라 oleic acid 유도 hydrocarbon 함량이 가장 높게 나타났으며 이 중에서 1,7-hexadecadiene의 함량이 가장 높아 우육과 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 돈육의 경우에는 stearic acid에서 유도된 hydrocarbon의 함량이 가장 낮아 우육과는 다른 결과를 보였다. 이는 우육과 돈육의 지방산 조성 차이에 기인한 결과로서 돈육의 경우 우육에 비해 linoleic acid 함량이 상대적으로 높기 때문인 것으로 사료된다. 반면에 돈육의 경우 우육과는 달리 방사선 조사선량이 증가함에 따라 20 kGy 까지 hydrocarbon이 지속적으로 증가하는 경향이었으며 이러한 결과는 조사선종 및 포장조건을 달리했을 경우에도 동일하게 나타났다. Kim *et al.* (1999; 2004)은 우육, 돈육, 계육에 최대 10 kGy의 감마선을 조사한 후 hydrocarbon 함량을 분석한 결과 축종과 관계없이 감마선 조사선량이 증가함에 따라 hydrocarbon 함량이 증가하였으며 linoleic acid 유도 hydrocarbon인 6,9-heptadecadiene과 1,7,10-hexadecatriene의 함량이 우육에서 가장 낮게 나타났다고 보고하여 본 연구 결과와 일치하였다.

감마선과 전자선이 돈육의 hydrocarbon 생성에 미치는 영향은 동일선량으로 조사할 경우 감마선이 전자선에 비해 보다 많은 hydrocarbon을 생성시키는 것으로 확인되어 우육과 같은 결과를 얻었으나 포장조건을 달리하여 감마선과 전자선을 조사한 경우 hydrocarbon 종류에 따라 상반된 결과를 나타내 포장방법에 따른 차이는 없는 것으로 사료되었다.

아울러 방사선 조사에 의한 분쇄 우육 및 분쇄 돈육의 지방산패도 분석결과 (Table 25~26)에서도 감마선이 전자선에 비해 지방산화를 증가시켰으나 포장방법에 따른 유의적 차이는 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 방사선 조사에 의한 지방산패도와 hydrocarbon 함량과 상관관계가 있음을 보여주고 있다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때 우육 및 돈육에 방사선을 조사할 경우 다양한 hydrocarbon이 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 oleic acid로부터 유도되는

hydrocarbon인 8-heptadecene과 1,7-hexadecadien은 조사선종 및 포장방법의 차이에 관계없이 다량으로 검출되는 것으로 나타나 방사선 조사된 육류의 검지할 때 지표 물질로서 활용가능성이 높은 것으로 사료된다. 그러나 방사선 조사선종 및 포장방법에 따른 hydrocarbon 함량변화에 대한 보다 정확한 기전을 규명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

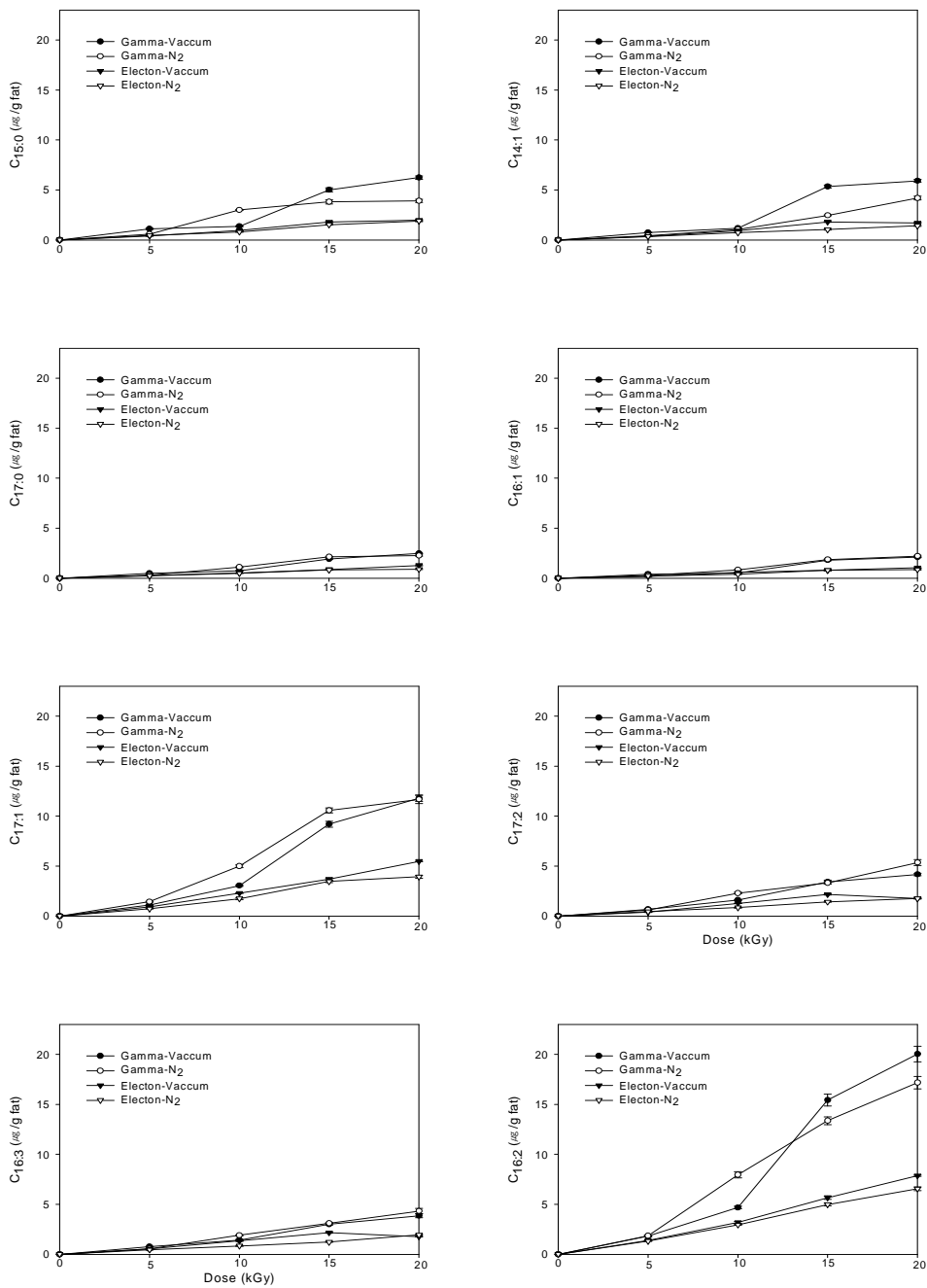


Fig. 6. Comparison of the effect of gamma and electron beam radiation on the production of radiation induced hydrocarbons in ground pork under the different packaging conditions.

Table 51. Concentrations of radiation induced hydrocarbons generated from ground pork irradiated with gamma ray with under the different packaging conditions of vacuum or 100% of nitrogen gas

(Unit : $\mu\text{g}/\text{g}$ fat)

Packaging Type	Dose (kGy)	Palmitic acid		Stearic acid		Oleic acid		Linoleic acid	
		C _{15:0}	C _{14:1}	C _{17:0}	C _{16:1}	C _{17:1}	C _{16:2}	C _{17:2}	C _{16:3}
Vacuum	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	1.101 ± 0.049	0.735 ± 0.014	0.481 ± 0.027	0.396 ± 0.031	1.107 ± 0.023	1.807 ± 0.086	0.669 ± 0.052	0.763 ± 0.034
	10	1.360 ± 0.049	1.175 ± 0.026	0.719 ± 0.028	0.517 ± 0.012	3.046 ± 0.081	4.678 ± 0.133	1.596 ± 0.041	1.414 ± 0.062
	15	5.010 ± 0.203	5.342 ± 0.146	1.920 ± 0.037	1.803 ± 0.064	9.198 ± 0.292	15.436 ± 0.601	3.409 ± 0.193	3.011 ± 0.094
	20	6.231 ± 0.174	5.912 ± 0.153	2.479 ± 0.033	2.098 ± 0.048	11.790 ± 0.313	20.043 ± 0.782	4.166 ± 0.131	3.860 ± 0.194
N ₂ Gas	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	0.572 ± 0.018	0.433 ± 0.015	0.309 ± 0.012	0.252 ± 0.003	1.433 ± 0.032	1.849 ± 0.048	0.611 ± 0.015	0.533 ± 0.011
	10	2.987 ± 0.055	1.032 ± 0.043	1.091 ± 0.047	0.828 ± 0.034	4.988 ± 0.141	7.946 ± 0.317	2.290 ± 0.075	1.897 ± 0.047
	15	3.803 ± 0.204	2.455 ± 0.053	2.134 ± 0.037	1.863 ± 0.043	10.575 ± 0.236	13.360 ± 0.398	3.323 ± 0.113	3.098 ± 0.045
	20	3.908 ± 0.147	4.182 ± 0.195	2.257 ± 0.075	2.205 ± 0.098	11.674 ± 0.412	17.186 ± 0.627	5.353 ± 0.292	4.323 ± 0.283

¹⁾Mean \pm SD

Table 52. Concentrations of radiation induced hydrocarbons generated from ground pork irradiated with electron beam with under the different packaging conditions of vacuum or 100% of nitrogen gas

(Unit : $\mu\text{g}/\text{g}$ fat)

Packaging Type	Dose (kGy)	Palmitic acid		Stearic acid		Oleic acid		Linoleic acid	
		C _{15:0}	C _{14:1}	C _{17:0}	C _{16:1}	C _{17:1}	C _{16:2}	C _{17:2}	C _{16:3}
Vacuum	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	0.386 ± 0.017	0.362 ± 0.028	0.278 ± 0.009	0.180 ± 0.007	0.927 ± 0.036	1.392 ± 0.049	0.375 ± 0.012	0.541 ± 0.029
	10	0.941 ± 0.018	0.906 ± 0.028	0.502 ± 0.019	0.576 ± 0.016	2.290 ± 0.042	3.195 ± 0.092	1.272 ± 0.023	1.363 ± 0.075
	15	1.796 ± 0.057	1.802 ± 0.058	0.866 ± 0.058	0.786 ± 0.053	3.695 ± 0.107	5.664 ± 0.172	2.162 ± 0.075	2.171 ± 0.061
	20	1.964 ± 0.073	1.703 ± 0.053	1.267 ± 0.050	1.027 ± 0.008	5.475 ± 0.030	7.863 ± 0.051	1.764 ± 0.011	1.757 ± 0.039
N ₂ Gas	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	0.444 ± 0.010	0.344 ± 0.017	0.226 ± 0.004	0.214 ± 0.009	0.723 ± 0.035	1.307 ± 0.011	0.441 ± 0.010	0.452 ± 0.026
	10	0.803 ± 0.044	0.721 ± 0.031	0.493 ± 0.013	0.374 ± 0.010	1.735 ± 0.091	2.950 ± 0.051	0.846 ± 0.037	0.836 ± 0.042
	15	1.522 ± 0.041	1.307 ± 0.044	0.820 ± 0.027	0.801 ± 0.055	3.465 ± 0.117	4.974 ± 0.148	1.420 ± 0.046	1.217 ± 0.030
	20	1.894 ± 0.067	1.411 ± 0.042	0.892 ± 0.054	0.859 ± 0.054	3.925 ± 0.143	6.552 ± 0.188	1.749 ± 0.049	1.933 ± 0.062

¹⁾Mean \pm SD

제 4장 요약

본 연구에서는 점차 소비가 확대되고 있는 즉석·편의식품인 햄버거 제조용 분쇄우육, 분쇄돈육과 가공 완제품인 우육 패티, 돈육 패티에 대해 감마선 및 전자선을 중선량부터 고선량까지 (5~20 kGy) 조사하여 저장성 평가, 이화학적 특성 평가, 관능 평가, 안전성 평가, 검지특성 평가를 실시하였다. 이 연구를 통하여, 향후 정부의 식육 및 그 가공품에 대한 방사선 식품조사품목 확대허용 및 조사 선종의 다양화에 대비하고 적정 조사기준 (GIP: Good Irradiation Practise) 도입 등을 위한 정책적 기초자료로의 활용과 함께 관련기술의 산업화 촉진을 위한 실용화를 목적으로 실시하였다.

시험시료는 가공육제품의 주원료인 분쇄우육과 분쇄돈육을 준비하였고 가공 육제품은 햄버거 패티를 상용의 방법으로 제조하였다. 포장방법별 차이를 식별하기 위해 진공 포장과 100% 질소가스를 이용한 가스치환 포장법을 도입하였다. 식품조사에 사용한 방사선은 감마선 (430 kCi, Co-60)과 전자선 (2.5 MeV, 선형가속기)으로 하여 20 kGy까지 주어진 선량이 흡수되도록 실온 (18℃)에서 조사하였다. 포장 후 시료는 30℃에서 10일 동안 가속저장하면서 미생물적, 식품학적 품질특성 변화를 관찰하였으며 방사선 조사선종 및 포장방법이 식육 및 그 가공품의 품질특성에 미치는 영향을 종합적으로 정리하면 다음과 같다.

<방사선 조사선종 및 포장방법이 식육 및 그 가공품의 품질특성에 미치는 영향>

구분	조사선종	포장방법
미생물 감균 및 생육 억제 효과	감마선 > 전자선	질소치환 < 진공
일반성분 변화	차이 없음	차이 없음
지방 산패도 증가	감마선 > 전자선	질소치환 < 진공
휘발성 염기태 질소 증가	감마선 < 전자선	질소치환 > 진공
색도 변화	감마선 > 전자선	질소치환 < 진공
경도 감소	감마선 > 전자선	차이 없음
관능품질 저하	감마선 > 전자선	질소치환 < 진공
복귀돌연변이원성 발현	없음	-
Hydrocarbon 생성	감마선 > 전자선	차이 없음

1. 원료육 (분쇄 우육, 분쇄 돈육), 가공육제품 (우육 패티, 돈육 패티)의 저장 중 미생물 생육은 감마선 조사가 전자선 조사에 비해 다소 높은 미생물 사멸효과가 나타났으며 진공포장이 질소치환 포장에 비해 미생물 생육억제에 보다 효과적인 것으로 나타났다. 이 결과는 총균수, 젖산균, 저온균에서 모두 동일하게 관찰되었다.
2. 방사선 조사가 분쇄 식육과 그 가공품의 일반성분 조성에 미치는 영향을 확인한 결과 유의적 변화가 없었으며 포장방법별, 방사선 선종별에 따른 차이도 없었다.
3. 저장 중 원료육과 가공육의 이화학적 품질변화에서 지방산화도 (TBARS)는 방사선 조사선량 및 저장기간이 증가함에 따라 유의적으로 증가하였다. 감마선이 전자선에 비해 지방산화를 촉진시켰으며 질소치환 포장이 진공포장에 비해 지방산화 방지에 효과적인 것으로 나타났다. 휘발성 염기태 질소 (VBN)는 미생물 사멸 효과에 의한 차이에 의해 감마선 조사구가 전자선조사구에 비해 낮은 VBN 함량을 보이는 것으로 사료되었다.
4. 원료육의 색도는 분쇄 우육의 경우 방사선 조사선량이 증가함에 따라 명도 (L^*), 적색도 (a^*), 황색도 (b^*)가 모두 감소한 반면에 분쇄 돈육의 경우에는 유의적으로 증가하여 상반된 결과를 얻었다. 또한 조사선종 및 포장방법에 따른 영향은 분쇄 우육과 분쇄 돈육에 따라 다른 결과를 보여 차이가 없는 것으로 판단되었다. 이러한 경향은 가공육제품에서도 같은 경향으로 나타났다.
5. 햄버거 패티 2종의 경도 (hardness)에 대한 방사선 조사의 영향평가에서 조사선량이 증가할수록 경도는 유의적으로 감소하였다. 경도는 진공 포장 시에 발생하는 압력에 의해 진공포장구의 경도가 질소치환 포장에 비해 조금 높게 나타났으나 방사선 선종간 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.
6. 햄버거 패티 2종의 관능적 품질 특성에 대한 포장방법과 방사선 조사의 영향평가 시험에서 조사선량이 증가함에 따른 이취증가로 인해 색, 씹힘성, 맛, 종합적기호도가 유의적으로 감소하였다. 또한 감마선이 전자선에 비해 관능적 품질 저하현상이

크게 나타났으며 질소치환 포장에 진공포장에 비해 관능적 품질 저하 방지에 효과적이므로 나타났다.

7. 방사선 조사된 분쇄 우유, 분쇄 돈육, 햄버거 패티 2종에 대한 복귀돌연변이 시험에서 *Salmonella typhimurium* TA98과 TA100 균주에 대한 어떠한 돌연변이원성도 발견되지 않아 유전독성학적으로 안전한 것으로 판단되었다.

8. 방사선 조사된 식육 및 그 가공품에 대한 검지특성 연구의 일환으로 방사선 조사에 의한 hydrocarbon 함량 변화를 살펴보았다. 방사선 비조사 분쇄우유 및 분쇄 돈육의 경우 hydrocarbon이 검출되지 않았으나 방사선 조사구에서는 1-hexadecene, 6,9-heptadecadiene, 1,7,10-hexadecatriene, 1-tetradecene, pentadecane, 1,7-hexadecadiene, 1,7,10-hexadecatriene, heptadecane, 8-heptadecene이 모든 시료에서 검출되었다. 특히 oleic acid로부터 유도된 8-heptadecene과 1,7-hexadecadien의 함량이 가장 높게 나타났다.

한편 조사선종에 따른 비교결과 감마선이 전자선에 비해 많은hydrocarbon을 생성시키는 것으로 나타났으나 포장조건을 달리하여 방사선을 조사한 경우에는 조사선종 및 hydrocarbon 종류에 따라 상반된 결과를 나타내 포장방법에 따른 차이는 없는 것으로 사료되었다. 따라서 우유와 돈육에 대한 지방산 조성과 분해 경로를 토대로 하여 다량 생성된 주요 hydrocarbon류인 8-heptadecene과 1,7-hexadecadien은 포장방법의 차이에 관계없이 다량 검출되어 방사선 조사된 식육을 검출하는데 활용가능성이 높은 것으로 판단된다.

참고문헌

- Ahn, D.U., Jo, C., Olson, D.G. 2000. Analysis of volatile components and the sensory characteristics of irradiated raw pork. *Meat Sci.* 54, 209-215.
- Ahn, H.J., Jo, C., Lee, J.W., Kim, J.H., Kim, K.H., Byun, M.W. 2003. Irradiation and modified atmosphere packaging effects on residual nitrite, ascorbic acid, nitrosomyoglobin, and color in sausage. *J Agric Food Chem.* 51, 1249-1253.
- Ahn, D.U., Lee, E.J., 2006. Mechanisms and prevention of quality changes in meat by irradiation. In: *Food Irradiation Research and Technology*, Blackwell publishing, IFT Press pp 127-142.
- Al-Bachir, M., Mehio, A. 2001. Irradiated luncheon meat: microbiological, chemical and sensory characteristics during storage. *Food Chem.* 75, 169-175.
- Alper, T. 1977. The role of membrane damage in radiation-induced cell death. *Adv. Exp. Med. Biol.* 84, 139-165.
- Ames, B.N., McCann, J., Yamasaki, E., 1975. Methods for detecting carcinogens and mutagens with the Salmonella/Mammalian -microsome mutagenicity test. *Mutation Res.* 31, 347.
- Ananthaswamy, H.N., Vakil, U.K., Sreenivasan, A., 1970. Effect of gamma radiation on wheat starch and its components. *J Food Sci.* 35, 795-798.
- Asad, N.R., Asad, L.M.B.O., de Almeida, C.E.B., Felzenszwalb, I., Cabral-Neto, J.B., Leitao, A.C. 2004. Several pathways of hydrogen peroxide action that damage the E-coli genome. *Gen. Mol. Biol.* 27, 291-303.
- Aziz, N.H., Mahrous, S.R., Youssef, B.M., 2002. Effect of Gamma ray and microwave treatment on the shelf-life of beef products stored at 5°C. *Food Cont.* 13, 437-444.
- Bachman, S., Gambus, H., Nowotna, A., 1997. Effect of gamma-irradiation on some physicochemical properties of triticale starch. *Polish J Food Nutr Sci.* 6, 31-39.
- Bao, J.S., Shu, Q.Y., Xia, Y.W., Bergman, C., McClung, A., 2001. Effects of gamma irradiation on aspects milled rice (*Oryza sativa*) end-use quality. *J Food Quality.*

- 24, 327-336.
- Bergaentzle, M., Sanguer, F., Hasselmann, C., Marchioni, E., 1994. Detection of γ -irradiated raw-milk camembert cheeses by capillary gas chromatographic analysis of volatile hydrocarbons. *Food Chem.*, 51, 177-182.
- Boudaiffa, B., Cloutier, P., Hunting, D., Huels, M.A., Sanche, L., 2000. Resonant Formation of DNA Strand Breaks by Low-Energy (3 to 20 eV) Electrons. *Science* 287, 1658-1660.
- Bowes, J.H., Moss, I.A., 1962. The effect of gamma radiation on collagen. *Radiat. Res.* 16, 211-215.
- Boyd, D. R., Crone, A. V. J., Hamilton, J. T. G., Hand, M. V., 1991. Synthesis, characterization and potential use of 2-dodecylcyclobutanone as a marker for irradiated chicken. *J. Agric. Food Chem.*, 39, 789-792.
- Buxton, C.V., 1987. Radiation chemistry of the liquid State. In: Farhataziz, Rodgers, M.A.J. (Eds.), *Water and homogeneous aqueous solutions, Radiation Chemistry. Principle and Practice*, CVH Publishers, New York, pp. 321-349.
- Byun, M.W., Lee, J.W., Yook, H.S., Lee, K.H., Kim, H.Y., 2002. Improvement of shelf stability and processing properties of meat products by gamma irradiation. *Radiat. Phys. Chem.* 63, 361-364.
- Byun, M.W., Cho, O.K., Lee, J.W., Kim, J.H., Kim, K.P., Kim, Y.J., 1999. Effect of gamma irradiation on shelf life of pork loin. *Korean J. Postharvest Sci. Technol.* 6, 16-22.
- Cai, Z., Sevilla, M., 2004. Topics in Current Chemistry 237: Long Range Transfer in DNA II, In: Gary Shuster, (Eds.), Springer-Verlag, pp 103-128.
- van Calenberg, S., Philips, B., Mondelaers, W., Van Cleemput, O., Huyghebaert, A., 1999. Effect of irradiation, packaging, and postirradiation cooking on the thiamin content of chicken meat. *J. Food Prot.* 62, 1303-1307.
- Cha, Y. J., Kim, H., Park, S. Y., Kim, S. J., You, Y. J., 2000. Identification of irradiation-induced volatile flavor compounds in beef. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 29, 1042-1049.
- Charlton, D.E., Humm, J.L., 1988. A method of calculating initial DNA strand

- breakage following the decay of incorporated ^{125}I . *Int. J. Radiat. Biol.*, 53, 353-365.
- Chawla, S.P., Chander, R., 2004. Microbiological safety of shelf-stable meat products prepared by employing hurdle technology. *Food Cont.* 15, 559-563.
- Choi, C. R., Hwang, K. T., 1997. Detection of hydrocarbons in irradiated and roasted sesame seeds. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 74, 469-472.
- Chung, M.S., Ko, Y.T., Kim, W.S., 2000. Survival of *Pseudomonas fluorescens* and *Salmonella Typhimurium* after electron beam and gamma irradiation of refrigerated beef. *Journal of Food Protection*. 63, 162-166.
- Clarke, R., Richards, J.F., 1971. Effect of gamma-irradiation on beef myoglobin. *J. Agr. Food Chem.* 19, 170-174.
- Claus, J.R., Hunt, M.C., Kastner, C.L., Kropf, D.H., 1990. Low-fat, high-added water bologna: Effects of massaging, preblending, and time of addition of water and fat on physical and sensory characteristics. *J. Food Sci.* 55, 338-341.
- Codex Alimentarius Commission. 2003a. Codex General Standard Irradiated Foods, CODEX STAN 106-1983, REV. 1-2003
- Codex Alimentarius Commission. 2003b. "Recommended International Code of Practice for Radiation Processing of Food", CAC/RCP 19-1979, Rev. 2-2003
- Cox, R., Thacker J., Goodhead G.T., 1977. Inactivation and mutation of cultured mammalian cells by aluminium characteristic ultrasoft X-ray. *Int. J. Radiat. Biol.* 31, 561-576.
- Crone, A. V. J., Hamilton, J. T. G., Stevenson, M. H., 1992. Effect of storage and cooking on the dose response of 2-dodecyl chlobutanone, a potential marker for irradiated chicken. *J. Sci. Food Agric.*, 58, 249-252.
- Dauphin, J.F., Saint-Lébe, L.R., 1977. Amsterdam: Elsevier Scientific. Radiation chemistry of carbohydrates. In P. S. Elias, & A. J. Cohen, *Radiation Chemistry of Major Food Components*, Chap. 5, pp. 131-220.
- Davies, A., Board R., 1998. *The microbiology of meat and poultry*. Blackie Academic & Professional, London, UK, p.288

- Delincée, H., 1983. Cambridge: Special Publication 86. Recent advances in radiation chemistry of proteins. In P. S. Elias, & A. J. Cohen, Recent Advances in Food Irradiation, Royal Society of Chemistry, pp. 57-79.
- Diehl, J.F., 1995. Chemical effects of ionizing radiation, In: Safety of Irradiated Foods, Chap. 3. Marcel Dekker, Inc, New York, pp. 43-88, 339-375.
- Dizdaroglu, M., Henneberg, D., Schomburg, G., von Sonntag, C., 1975. Radiation chemistry of carbohydrates. Gamma-radiolysis of glucose in deoxygenated N₂O saturated aqueous solution. Z. Natwforsch. 30b, 416-425.
- El-Saadany, R.M.A., El-Fatah, A., El-Safti, A., El-Saadany, F.M., 1974. Degradation of corn starch. Starch/Staerke. 26, 190-192.
- FAO, 1984. Codex general standard for irradiated foods and recommended international code of practice for the operation of radiation facilities used for the treatment of foods, Codex Alimentarius Commission. Rome, Italy. pp. 100-110.
- FDA. 2006. Code of Federal Regulations, 2006 21CFR179.26. "Irradiation in the Production, Processing and Handling of Food".
- FDA, 1980. Final report of the USFDA Bureau of Foods, Irradiated Foods Committee.
- Franklin, J.G. 1970. Spores in milk: problems associated with UHT processing. J. Appl. Bacteriol., 33, 180-191.
- Giroux, M., Lacroix, M., 1998. Nutritional adequacy of irradiated meat - a review. Food Research International. 31, 257-264.
- GIA. 2005. Food Irradiation Trends. A Global Strategic Business Report. Global Industry Analysts, Inc.
- Gomes, H.A., Silva, E.N., Cardello, H.M.A.B., Cipolli, K.M.V.A.B. 2003a. Effect of gamma radiation on refrigerated mechanically deboned chicken meat quality. Meat Sci. 65, 919-926.
- Gomes, H.A., Silva, E.N., Nascimento, M.R.L., Fukuma, H.T. 2003b. Evaluation of the 2-thiobarbituric acid method for the measurement of lipid oxidation in mechanically deboned gamma irradiated chicken meat. Food Chem. 80, 433-437.

- Goodhead, D.T., 1994. Initial events in the cellular effects of ionizing radiations: clustered damage in DNA. *Int. J. Radiat. Biol.*, 65, 7-17.
- Greenberg, R.A., Tompkin, R.B., Bladel, B.O., Kittaka, R.S., Anellis, A. 1966. Incidence of mesophilic *Clostridium* spores in raw pork, beef and chicken in processing plants in the United States and Canada. *Appl. Microbiol.*, 14, 789-793.
- Hannan, R. S., 1955. Science and technological problems in using ionising radiations for the Preservation of food. dept. sci. Indust. Res. Food Investigation Report No. 61. H.M.S.O.
- Harmon, S.M. and Kautter, D.A. 1991. Incidence and growth potential of *Bacillus cereus* in ready-to-serve foods. *J. Food Prot.*, 54, 372-374.
- Hayes, P.P., 1992. Food microbiology and hygiene. Elsevier applied sci., London and New York, p. 107.
- Heath, J.L., Owens, S.L., Tesch, S., Hannah, K.W., 1990. Effect of high-energy electron irradiation of chicken on thiobarbituric acid values, shear values, odor and cook yield. *Poult. Sci.* 69. 313-319.
- Horowitz, R., Kempner, E.S., Bisher, M.E., Podolsky, R.J., 1986. A physiological role for titin and nebulin in skeletal muscle. *Nature* 323. 160-162.
- Hwang, K. T., Park, J. Y., Kim, C. K., 1997. Application of hydrocarbons as marker for detecting post irradiation of imported meat and fish. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.*, 26, 109-115.
- ICGFI, 1994. Summary report. Eleventh Meeting of the International Consultative Group on Food Irradiation., 2 - 4 Nov 1994, FAO/IAEA /WHO.
- ICGFI, 1998. Irradiation and Trade in Food and Agricultural Products.
- IFST, 2006. The Use of Irradiation for Food Quality., 7.19
- Japanese Ministry of Hygiene. 1973. Food sanitation indices. I. Volatile basic nitrogens. 30-32.
- Javanmard, M., Rokni, N., Bokaie, S., Shahhosseini, G., 2006. Effect of gamma irradiation and frozen storage on microbial, chemical and sensory quality of chicken meat in Iran. *Food Control.* 17, 469-473.

- Jhu, R., Brewer, M.S., 1998. Discoloration of fresh pork as related to muscle and display conditions. *J. Food Sci.* 63, 763-767.
- Jo, C., Ahn, D.U., 2000. Production volatile compounds from irradiated oil emulsions containing amino acids or proteins. *J. Food Sci.* 65, 612-616.
- Jo, C., Lee, N.Y., Kang, H.J., Hong, S.P., Kim, Y.H., Kim, H.J., Byun, M.W., 2005. Radio-sensitivity of pathogens in inoculated prepared foods of animal origin. *Food Microbiol.* 22, 329-336.
- Johnston, D.E., Knight, M.K., Ledward, D.A., 1992. The chemistry of muscle-based foods. pp. 313-314.
- Kamer, J.M. and Gilbert, R.J.: *Bacillus cereus* and other *Bacillus* species. In: Doyle, M.P. (Ed.) Foodborne bacterial pathogens. Marcel Dekker, New York, 191-234 (1989)
- Kanatt, S.R., Chander, R., Sharma, A. 2005. Effect of radiation processing on the quality of chilled meat products. *Meat Sci.* 69, 269-275.
- Kannat, S.R., Chander, R., Sharma, A. 2007. Antioxidant potential of mint (*Mentha spicata* L.) in radiation-processed lamb meat. *Food Chem.* 100, 451-458.
- Kang, H.J., Jo, C., Kwon, J.H., Kim, J.H., Chung, H.J., Byun, M.W. 2007. Effect of a pectin-based edible coating containing green tea powder on the quality of irradiated pork patty. *Food Cont.* 18, 430-435.
- Kang, H.J., Jo, C., Lee, N.Y., Kim, J.O., Byun, M.W. 2004. Effect of gamma irradiation on microbial growth, electron donating ability, and lipid oxidation of marinated beef rib (*Galbi*) with different packaging methods. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 33, 888-893.
- KFDA. 2007. Food code. Munyoungsa, Seoul, pp. 173, 265.
- Kilcast, D., Subramaniam, P., 2000. The stability and shelf-life of food. CRC Press, Florida, USA, pp. 5-20.
- Kim, J.H., Park, J.G., Song, B.S., Lee, J.W., Kim, W.G., Hwang, Y.J., Byun, M.W. 2007. Combination effect of gamma irradiation and silk peptide on the radio-sensitivity of bacteria and storage stability of ready-to-eat hamburger patty. *Korean J. Food Preserv.* 14, 481-486.

- Kim, J.H., Jeon, J.Y., Ryu, S.R, Lee, J.W., Kim, J.H., Oh, S.H., Seo, J.H., Byun, M.W. 2005a. Quality improvement of chicken breast meat in a group-meal service by gamma irradiation. *Korean J. Food Preserv.* 12, 28-35.
- Kim, J.H., Kim, J.H., Lee, J.W., Byun, M.W., 2004. Effect of gamma irradiation on quality of meat and meat products. *Korean J. Food Sci. Ani. Resour.* 24, 373-385.
- Kim, J.K., Jo, C., Kim, H.J., Lee, J.W., Hwang, H.J., Byun, M.W., 2005b. Microbiological safety of minimally processed white radish in modified atmosphere packaging combined with irradiation treatment. *Korean J. Food Sci. Technol.* 37, 11.
- Kim, K.S., Lee, J.M., Hong, C.H., 2004. Solid phase extraction (SPE) method for detection of irradiated meats. *Lebensm.- Wiss. u.-Technol.*, 37, 559-563.
- Kim, K. S., Kim, E. A., Lee, H. J., Yang, J. S., Byun, M. W., 1999. Quantitative comparison of radiation-induced hydrocarbons from irradiated beef, pork and chicken. *Korean J. Food Sci. Technol.*, 31, 301-307.
- Kim, S., Yook, H.S., Lee, J.W., Choi, C., Byun, M.W., 1998a. Sterilization of *Escherichia coli* O157:H7 contaminated beef by gamma irradiation. *Korean J. Food Sci. Technol.* 30, 1209-1213.
- Kim, W.S., Chung, M.S., Ko, Y.T., 1998b. Effects of low dose gamma ray and electron beam irradiation on growth of microorganisms in beef during the refrigerated storage. *Korean J. Food Sci. Ani. Resour.* 18, 232-239.
- Kim, Y.H., Nam, K.C., Ahn, D.U., 2002. Volatile profiles, lipid oxidation and sensory characteristics of irradiated meat from different animal species. *Meat Science.* 61, 257-265.
- Koh, K.H., Whang, K., 2002. Effect of electron beam irradiation on the oxidative and microbiological stability of ground pork during storage. *Korean J. Food Sci. Ani. Resour.* 22, 316-321.
- Koleva, I.I., Beek, T.A., Linssen, J.P.H., Groot, A., Exstatieva L.N., 2002. Screening of plant extracts for antioxidant activity. A comparative study on three testing methods. *Phytochem Anal.* 13, 8-17.

- Kraft, A.A., 1986. Meat microbiology. In muscle as food, Bechtel, P.J.(ed.), Academic press, USA, New York, pp. 239.
- Kreiger, R.A., Snyder, O.P., Pflug, I.J. 1983. *Clostridium botulinum* ionizing radiation D-value determination using a micro food sample system. J. Food Sci. 48, 141-145.
- Krisch, R.E., Flick, M.B., Trumbore, C.N., 1991. Radiation chemical mechanisms of single- and double-strand break formation in irradiated SV40 DNA. Radiat. Res. 126, 251-259.
- Kwak, H.J., Lee, S.O., Jung, I.C. 2002. Irradiation of chicken for the improvement of hygiene. Korean J. Cul. Res. 8, 249-257.
- Kwak, H.J., Kang, I.J. 1999. Quality characteristics of gamma-irradiated chickens. Korean J. Postharvest Sci. Technol. 6, 411-416.
- Kwak, H.J., Kye, S.K., Kang, I.J., 1998. Irradiation of pork meat for improvement of hygienic and keeping quality. J. of the East Asian of Dietary Life. 8, 430-440.
- Kwon, O.J., Yook, H.S., Kim, S.A., Byun, M.W., 1997. Effect of Gamma ray and heat treatment on sterilization of *Escherichia coli* O157:H7. Korean J. Food Sci. Technol. 29, 1016.
- Kyzlink, V., 1990. Principles of food preservation. Dev. Food Sci. 22, 337.
- Lambert, A.D., Smith, J.P., Dodds, K.L., 1992. Physical, chemical and sensory changes in irradiated fresh pork packaged in modified atmospheres. J. Food Sci. 57, 1294-1299.
- Lavere, T., Becker, D., Sevilla, M.D., 1996. Yields of $\cdot\text{OH}$ in gamma-irradiated DNA as a function of DNA hydration: hole transfer in competition with $\cdot\text{OH}$ formation. Radiat. Res. 145, 673-680.
- Laveren, J.A., Pimblott, S.M., 1993. Yields of hydroxyl radical and hydrated electron scavenging reactions in aqueous solutions of biological interest. Radiat. Res. 135, 16-23.
- Lee, H.J. & Kim, K.S., 2001. Analysis of radiolytically produced hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones from irradiated pinenut. J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.

30, 37-42.

- Lee, J.W., Kim, J.H., Kim, J.H., Oh, S.H., Seo, J.H., Kim, C.J., Cheong, S.H., Byun, M.W., 2005a. Application of gamma irradiation for the microbiological safety of fried-frozen cheese ball. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 34, 729-733.
- Lee, J.W., Kim, J.H., Oh, S.H., Lee, Y.S., Kim, D.J., Oh, S.U., Byun, M.W., 2004a. Radiation sensitivity of *Aspergillus flavus* in semi-dried beef jerky. *Food Sci. Biotechnol.* 13, 613-615.
- Lee, J.W., Lee, K.H., Yook, H.S., Lee, H.J., Byun, M.W., 1999a. Sanitizing and extending of shelf life of chicken meat by gamma irradiation. *J. Fd. Hyg. Safety* 14, 160-166.
- Lee, J.W., Yook, H.S., Kim, S.A., Sohn, C.B., Byun, M.W., 1999b. Effect of gamma irradiation on the physicochemical properties of pork loin. *Korean J. Food Sci. Technol.* 31, 705-711.
- Lee, J.W., Yook, H.S., Kim, J.H., Kim, K.P., Lee, H.J., Byun, M.W., 1999c. Use of gamma irradiation for improving quality and assuring safety of meat products. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 28, 858-864.
- Lee, J.W., Yook, H.S., Lee, K.H., Kim, J.H., Byun, M.W., 2000. Conformational changes of myosin by gamma irradiation. *Radiat. Phys. Chem.* 51, 271-278.
- Lee, K.A., Lee, Y.J., 2004b. Physico-chemical changes in irradiated beef and pork loins. *J. Korean Liv. Sci.* 13, 1031-1036.
- Lee, K.A., Kim, M.J., 2004c. Physico-chemical properties of irradiated chicken. *J. Korean Liv. Sci.* 13, 91-96.
- Lee, K.Y., Kim, H.S., Lee, H.G., Han, O., Chung, U.J., 1997. Studies on the prediction of the shelf-life of kochujang through the physicochemical and sensory analyses during storage. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 26, 588-594.
- Lee, M.H., Min, J.S., Whang, S.G., Jung, M.S., Kwon, J.H., 1998a. Technology development for improving the hygienic quality of agricultural and livestock products by low-dose electron-beam irradiation. Ministry of Agriculture and Forestry.
- Lee, N.Y., Jo, C., Kang, H.J., Hong, S.P., Kim, Y.H., Lee, K.H., Byun, M.W.,

- 2005c. Microbiological and mutagenical safety evaluation of gamma irradiated ready-to-eat foods of animal origin. *Korean J. Food Sci. Ani. Resour.* 25, 13-19.
- Lee, N.Y., Jo, C., Kang, H.J., Kim, D.S., Byun, M.Y., 2004d. Radio-sensitivity of contaminated pathogens in marinated beef rib (Galbi) treated with γ -irradiation and its sensory properties. *Koeran J. Food Sci. Technol.* 36, 168-173.
- Lee, S.H., Moon, W.S., Park, K.N., 2000. Antimicrobial activity of *Caesalpinia sappan* L. extracts and its effect on preservation of ground meats. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 29, 888-892.
- Liebster, J., Koppoldava, J., 1964. The radiation chemistry of amino acids, *Advan. Radiation Biol.* 1, 157-226.
- Lim, D.G., Lee, M.H., 2007. Combination effect of packaging and electron beam irradiation on quality traits of fermented sausages during storage. *J Anim. Sci. Technol.* 49, 539-548.
- Luchsinger, S.E., Kropf, D.H., Garcia-Zepeda, C.M., Hunt, M.C., Marsden, J.L., Rubio-Canas, E.J., Kastner, C.L., Kuecker, W.G., Mata, T., 1996. Color and oxidative rancidity of gamma and electron beam irradiated boneless pork chops. *J. Food Sci.* 61, 1000-1005, 1093.
- Lund, B.M. 1991. Foodborne disease due to *Bacillus* and *Clostridium* species. *In: Waites, W.M. and Arbuthnott, J.P. (eds.): Foodborne illness, Hodder and Stoughton, London, p.86-96.*
- Mc Arthur, L.A., D'Appolonia, B.L., 1984. Gamma radiation of wheat. II. Effects of low-dosage radiations on starch properties. *Cereal Chemistry.* 61. 321-326.
- Maron, D.M., Ames, B.N., 1983. Revised methods for Salmonella mutagenicity test. *Mutation Res.* 113, 173.
- Meer, R.R., Baker, J., Bodyfelt, F.W., Griffiths, M.W., 1991. Psychrotrophic *Bacillus* spp. in fluid milk products: a review. *J. Food Prot.*, 54, 969-979.
- Meier, W., Artbo, A., Nageli, P., 1996. Detection of irradiation of fat-containing foods by on-line LC-GC-MS of alkyl cyclobutanones. *Mitt. Gebiere Lebensm. Hyg.*, 87, 118-122.
- Merritt, C. Jr., Angelini, P., Wierbicki, E., Shuts, G.W., 1975. Chemical changes

- associated with flavor in irradiated meat. *J. Agric. Food Chem.* 23, 1037-1043.
- Merritt, C. Jr., 1966. Chemical changes induced by irradiation in meats and meat components. In *Food Irradiation(STI/PUB/127)*. Int. Atomic Energy Agency, Vienna.
- Miller, R. D., 2005. *Electronic Irradiation of Foods. An Introduction to the Technology*. Springer. New York.
- Min, J.S., Kim, I.S., Lee, M.H., 1999a. Effects of electron beam radiation on the microflora and sensory characteristics of pork loin. *Korean J. Food Sci. Technol.* 31, 746-750.
- Mishra, K.P. 2004. Cell membrane oxidative damage induced by gamma-radiation and apoptotic sensitivity. *J. Environ. Pathol. Toxicol. Cncol.* 23, 61-66.
- Morehouse, K.M., Ku, Y., 1992. Gas chromatographic and electron spin resonance investigations of irradiated shrimp. *J. Agric. Food Chem.* 40, 1963-1971.
- Nam, K.C., Ahn, D.U., 2003. Effect of irradiation on meat color. *Food Sci. Biotechnol.* 12, 198-205.
- Nam, K.C., Ahn, D.U., 2002. Carbon monoxide-heme pigment is responsible for the pink color in irradiated raw turkey breast meat. *Meat Sci.* 60, 25-33.
- Nam, K. C., Ahn, D.U., Jo, C., 2001. Lipid oxidation, color, volatiles, and sensory characteristics of aerobically packaged and irradiated pork with different ultimate pH. *J Food Sci.* 66, 1225-1229.
- Nanke, K.E., Sebranek, J.G., Olson, D.G., 1999. Color characteristics of irradiated aerobically packaged pork, beef and turkey. *Journal of Food Science.* 64, 272-278.
- Nawar, W. W., 1994. Progress in the detection of irradiated foods by measurement of lipid derived volatiles. In: McMurray CH, Stewart EM, Gray R, Pearce J, Eds. *Detection methods for irradiated foods-current status*. Cambridge (United Kingdom): The royal society of chemistry. p 241-248.
- Nawar, W.W., Zhau, R., Yoo, Y. J., 1990. Radiolytic products of lipids as markers for detection of irradiated meats. In D. E. Johnston, & M. H. Stevenson, *Food Irradiation and the Chemist Royal Society of Chemistry*, Cambridge: Special

- Publication 86. pp. 13-24.
- Nawar, W.W., 1986. Volatiles from food irradiation. *Food Rev. Int.* 2, 45-78.
- Nawar, W.W., 1978. Reaction mechanisms in the radiolysis of fats: A review. *J. Agric. Food Chem.* 26, 21-25.
- Nawar, W.W., 1977. Radiation chemistry of lipids. In P. S. Elias, & A. J. Cohen, *Radiation Chemistry of Major Food Components*, Chap. 3, Amstrerdam: Elsevier Scientific. pp. 21-61.
- van Netten, P., van de Moosdijk, A., van Hoensel, P., Mossel, D.A.A., Perales, I. 1990. Psychrotrophic strains of *Bacillus cereus* producing enterotoxin. *J. Appl. Bacterol.*, 69, 73-79.
- Nikjoo, H., Uehara, S., 2004, Charged particle and photon interaction with matter. (Eds.), Marcel Decker, New York, pp. 491-532.
- OECD-FAO. 2005. *Agricultural Outlook 2007~2016*. OECD
- Oh, S.H., Kim, J.H., Lee, J.W., Lee, Y.S., Park, K.S., Kim, J.G., Lee, H.K., Byun, M.W., 2004. Effects of combined treatment of gamma irradiation and addition of rosemary extract powder on ready-to-eat hamburger steaks: I. Microbiological quality and shelf-life. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 33, 687-693.
- O'Connel, M.J., Garner, A., 1983. Radiation-induced generation and properties of lipid hydroperoxide in liposomes. *Int. J. Radiat. Biol.* 44, 615-625.
- Park, G.B., Kim, Y.J., Lee, H.G., Kim, J.S., Kim, Y.H., 1988. Changes in freshness of meats during postmortem storage II. Changes in freshness of beef. *Korean J. Anim. Sci.* 30, 672-677.
- Park, K.J., Jung, S.W., Park, B.I., Kim, Y.H., Jeong, J.W., 1996. Initial control of microorganism in Kimchi by the modified preparation method of seasoning mixture and the pretreatment of electrolyzed acid-water. *Korean J. Food Sci. Technol.* 28, 1104-1110.
- Park, K.S., Kim, J.G., Lee, J.W., Oh, S.H., Lee, Y.S., Kim, J.H., Kim, J.H., Kim, W.G., Byun M.W., 2004. Effects of combined treatment of gamma irradiation and addition of rosemary extract powder on ready-to-eat hamburger steaks: II.

- Improvement in quality. J. Korean Soc. Food Sci. Nutr. 33, 694-699.
- Poon, P.W.B., Wong, P.Y.Y., Dubeski, P., Durance, T.D., Kitts, D.D., 2003. Application of electron-beam irradiation pasteurization of ground beef, from steers fed vitamin E fortified diets: microbial and chemical effects. J. Sci. Food Agric. 83, 542-549.
- Raffi, J., Michel, J.P., Saint-Léve, L., 1980. Theoretical study of the radiopolymerization of starch. Starch/Staerke. 32, 227-229.
- Raffi, J.J., Agnel, J.P., Thiery, C.J., Frejaille, C.M., Saint-Lébe, L.R., 1981. Study of gamma-irradiated starches derived from diffenet foodstuffs: A way for extrapolating wholesomeness data. Journal of Agricultural Food Chemistry. 29, 1227-1232.
- Rayas-Duarte, P., Rupnow, J.H., 1993. Gamma-irradiation affects some physical properties of dry bean (*Phaseolous vulgaris*) starch. J. Food Sci. 58, 389-394.
- Risvik, E., 1994. Sensory properties and preferences. Meat Sci. 36, 67-77.
- Robert, P.A., 1995. Identification of Essential Oil Components by Gas chromatography/Mass spectroscopy. Allured Publishing Corporation, USA.
- Roushdi, M., Harras, A., El-Meligi, A., Bassim, M., 1981. Effect of high dose of gamma rays on corn grains. Influence on the chemical composition of whole grains and the technological process of starch and by-product isolation. Cereal Chemistry. 58, 110-112.
- Rustgi, S., Riesz, P., 1978. Hydrated electron-initiated main-chain scission in peptides in ESR and spin trapping study. International Journal of Radiation Biology. 34, 449-460.
- Satterlee, L.D., Wilhelm, M.S., Barnhart, M.H., 1971. Low dose gamma irradiation of bovine met-myoglobin. J. Food Sci. 36, 549-551.
- Shahidi, F., Pegg, R.B., Shamsuzzaman, K., 1991. Color and oxidative stability of nitrite-free cured meat after gamma irradiation. J. Food Sci. 56, 1450-1452.
- SAS Institute Inc, 1988. SAS User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, NC.
- Schmidt, C.F., Lechowich, R.V., Folinazzo, J.F. 1961. Growth and toxin production by Type E *Clostridium botulinum* below 40⁰F. J. Food Sci., 26, 626-630.

- Schreiber, G.A., Schulzki, G., Spiegelberg, A., Helle, N., Bögl, K.W., 1994. Evaluation of a gas chromatographic method to identify irradiated chicken, pork and beef by detection of volatile hydrocarbons. *JAOCS International*. 77, 1202-1217.
- Schulte-Frohlinde, D., Bothe, E. 1991. Radiation-induced damage and biological inactivation of plasmid DNA in water-alcohol mixtures. *NATO ASI Series H* 54, 317-332.
- Schulte-Frohlinde, D., 1985. Oxidative Stress. In: Sies, H., (Eds.), Academic Press, New York.
- Schweigert, B.S., Doty, D.M., Niven, J.R.C.F., 1954. A summary of studies on the irradiation of meat. In: *Radiation Sterilization: Review of the Literature in Selected Fields*. Chicago Quartermaster Depot, US Army, Chicago, IL.
- Shea, K.M., 2000. Technical Report: Irradiation of Food. *American Academy of Pediatrics*. 106, 1505-1510.
- Shin, D.S., Lee, J.I., 2002. Effect of irradiation, packing methods and storage periods on the oxidation of cholesterol in beef meat. *J. Anim. Sci. & Technol.* 44, 113-122.
- Simic, M.G., 1983. Radiation chemistry of water-soluble food components. In E. S. Josephson, & M. S. Peterson, *Preservation of Food by Ionizing Radiation*, vol. 2, Chap. 1. Boca Raton CRC Press, pp. 1-73.
- Smith, N.L., Tinsley, I.J., Bubl, C.E., 1960. The thiobarbituric acid test in irradiation sterilized beef. *Food Technol.* 14, 317-320.
- Smulders, F.J.M., Marsh, B.B., Swartz, D.R., Russell, R.L., Hoenecke, M.E. 1990. Beef tenderness and sarcomere length. *Meat Sci.* 23, 179-184.
- Sokhey, A. S., Chinnaswamy, R., 1993. Chemical and molecular properties of irradiated starch extrudates. *Cereal Chemistry*. 70, 260-280.
- Song, H.J., Moon, G.I., Jung, I.C., 2000. Quality and storage stability of hamburger during low temperature storage. *Korean J. Food Sci. Ani. Resour.* 20, 72-78.
- von Sonntag, C., 1987. *The Chemical Basics of Radiation Biology*, Talker and

- Francis, New York.
- Sooltan, J.R.A., Mead, G.C., Norris, A.P. 1987. Incidence and growth potential of *Bacillus cereus* in poultry meat products. *Food Microbiol.*, 4, 347-351.
- Stehagen, E., Abrahamsom, S., Malafferty, F.W., 1974. The Wiley / NBS Registry of Mass Spectral Data, John Wiley and Sons, N.Y.
- Stevenson, M.H., 1992a. Irradiation of meat and poultry, In D. A. Ledward, D. E. Johnston, & M. K. Knight, *The Chemistry of Muscle-Based Foods*. Cambridge, Royal Society of Chemistry Special Publication 106. pp. 308-324.
- Stevenson, M. H., 1992b. Progress in the identification of irradiated food. *Trends in Food Science and Technology*, 3, 257-262.
- Stewart, Eileen M., 2004. Food irradiation: more pros than cons? *Biologist* (51) (1) 91-94.
- Suresh, D., Pillai, Leslie A., Braby, Lavergne *et al.*, 2005. Electron Beam Technology for Food Irradiation. "The International Review of Food Science and Technology (Winter 1004/2005). An Official Publication of the International Union of Food Science and Technology(IUFoST)".
- Swallow, A.J., 1997. Chemical effects of irradiation, In P. S. Elias, & A. J. Cohen, *Radiation Chemistry of Major Food Components*, Chap. 3, Amsterdam: Elsevier Scientific, pp. 5-20.
- Thakur, B.R., Singh, R.K., 1994. Food irradiation. Chemistry and applications. *Food Rev. Int.* 10, 437-473.
- Thayer, D.W., Boyd, J.B., Lakitz, F.L., Hampson, J.W., 1994. Variations in radiation sensitivity of foodborne pathogens associated with the suspending meat. *J. Food Sci.* 60, 63.
- Thayer, D.W., Boyd, G., 1993. Elimination of *Escherichia coli* O157:H7 in meats by gamma irradiation. *Applied and Environmental Microbiology.* 59, 1030-1034.
- Tomasik, P., Zaranyika, M.F., 1995. Nonconventional methods of modification of starch. *Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry.* 51, 243-320.
- Tomita, H., Kai, M., Kusama T., Ito, A., 1998. Monte Carlo simulation of DNA strand-break induction in supercoiled plasmid pBR322 DNA from indirect

- effects. *Radiat. Environ. Biophys.* 36, 235-241.
- Turner, B.E., Foegeding, P.M., Larick, D.K., Murphy, A.H. 1996. Control of *Bacillus cereus* spores and spoilage microflora in sous vide chicken breast. *J. Food Sci.*, 61, 217-219.
- Tzaphlidou, M., Kounadi, E., Leontiou, I., Matthopoulos, P., Glaros, D., 1997. Influence of low doses of gamma irradiation on mouse skin collagen fibrils. *Inter. J. Radiat. Biol.* 71, 109-114.
- USDA FSIS, 2008. (<http://www.usda.gov/>)
- Urbain, W.M., 1986. *Food Irradiation*, Academic Press, Orlando, FL.
- Verma, N.C., Singh, R.K. 2001. Stress-inducible DNA repair in *Saccharomyces cerevisiae*. *J. Env. Pathol. Toxicol. Oncol.* 20, 1-7.
- Ward, J.F., 1998. *Prog. Nucl. Acids and Mole. Biol.*, 35, 95-125
- Whang, K., 2003. Effect of different conveyer speed of electron beam irradiation on the oxidative and microbiological stability of ground pork during refrigeration. *Korean J. Food Sci. Ani. Resour.* 22, 50-55.
- Whang, K., 2002. Combination effect of modified atmosphere packaging and electron beam irradiation on the oxidative and microbiological stability of ground pork during storage. *Korean J. Food Sci. Ani. Resour.* 22, 322-329.
- Whitehair, L.A., Bray, R.W., Wechel, K.G., Evans, G.W., Heiligman, F., 1964a. Influence of intramuscular fat level on organoleptic, physical, and characteristics of irradiated pork, I: high-temperature short-time pre-irradiation heat treatment. *Food Technol.* 18, 108-114.
- WHO, 1999. High-dose irradiation: Wholesomeness of food irradiation with doses above 10 kGy, Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group, WHO Technical Report Series, No. 890, Geneva.
- WHO, Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food, Geneva (1994).
- WHO, 1992. Global health situation and projections estimates, Geneva, Switzerland.
- WHO, Review of the safety and nutritional adequacy of irradiated food, WHO/HPP/FOS/92.2. Geneva (1992).

- WHO, 1981. Wholesomeness of Irradiated Food (Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee), Technical Report Series-651.
- Wootton, M., Djojonegoro, H., Damasio, M. H., 1988. Effects of gamma-irradiation on the quality of Australian rice. *Cereal Chemistry*. 7, 309-315.
- Yildirim, I., Uzunlu, S., Topuz, A., 2005. Effect of gamma irradiation on some principle microbiological and chemical quality parameters of raw turkish meat ball. *Food Control*. 16, 363-367.
- Yokoya, A., Cunniffe, S.M.T., O'Neill, P., 2002. Effect of Hydration on the Induction of Strand Breaks and Base Lesions in Plasmid DNA Films by Radiation. *J. Am. Chem. Soc.* 124, 8859-8866.
- Yook, H.S., 1999. Effect of gamma irradiation on the microbiological, biochemical, morphological, nutritional, toxicological and food processing characteristics of beef. Ph.D. Thesis, Chungnam National Univ, Korea.
- Yook, H.S., Lee, E.M., Kim, D.H., Lee, K.H., Lee, H.J., Lee, Y.N., Byun, M.W., 2000. Genotoxicological safety on water-soluble fraction of gamma irradiated Korean soybean fermentation foods. *J. Food Hyg. Safety*. 15, 297.
- Yook, H.S., Lee, K.H., Lee, J.W., Kang, K.O., Byun, M.W., 1998a. Effect of gamma irradiation on lipid oxidation of korean beef. *Korean J. Food Sci. Technol.* 30, 1179-1183.
- Yook, H.S., Lee, J.W., Lee, K.H., 1998b. Effect of gamma irradiation on pigments of beef. *Korean J. Food Sci. Technol.* 30, 1184-1188.
- 林徹, 2004. 食品照射の背景と有用性, *FFI J.*, 209, 1035.
- 小林一雄, 1998. 活性酸素 (中野、浅田、大柳編) 蛋白質核酸酵素 別冊 33, 2678-2683.
- 伊藤均, 1990. 電子線^γ 殺菌・滅菌効果, *医科機械学*, 60, 469.
- 伊藤均, 2004. 放射線照射による食品の衛生化」*FFI J.*, 209(12)
- 日本放射線化学会, 2006a. 放射線化学のすすめ “5-2 放射線によるDNA損傷誘発過程のモンテカルロシミュレーション(渡邊立子)”, 87
- 日本放射線化学会, 2006c. 放射線化学のすすめ “8-1電子加速器と電子源(鷺尾線方一)”, 154.

日本放射線化学会, 2006d. 放射線化学のすすめ “8-3 γ 線源(山本幸男)”, 159-160

日本放射線化学会, 2006e. 放射線化学のすすめ “8-4 X 線源(中川和道)”, 16

日本農林水産省植物検疫所, 2007, (<http://www.pps.go.jp/law/index.html>)

과학기술부, 2007. 원자력연구개발 5개년계획(2007~2011)

과학기술부, 2007. 제3차 원자력진흥종합계획(2007~2011)

국립수의과학검역원, 2007. 검역원 고시 제2007-22호(2007. 11. 27)

보건복지부, 2007. 보건복지부 고시 제2004-41호, 2007.4.12

식품의약품안전청, 2007. 식중독예방 대국민홍보 사이트 (<http://fm.kfda.go.kr/index.html>)

식품의약품안전청, 2006. 2005년도 식품 및 식품첨가물 생산실적

식품공전, 2007. 조사식품 규정

식품저널, 2007. 식품유통연감. 248

월드워치연구소(The Worldwatch institute), 2006, 지구환경보고서

이계임 외, 2007, 식품위해물질관리의 편익분석 방법과 적용사례, 농촌경제. 30, 17-19.

한국원자력연구원, 2007. 방사선식품분야특허조사

한국육가공협회, 2006. <http://www.kmia.or.kr/>

감사의 글

다섯 살에 초등학교를 입학해서 오십을 넘은 나이에 정규교육과정의 마지막 코스를 마치고 박사학위를 받게 되었습니다. 고인이 되신 아버지께서 “늘 공부하면서 살아라” 라는 말씀을 새기면서 실천하고자 했지만 너무 늦게 결실을 얻었습니다. 개인으로 봐서는 영광스러운 일임에도 불구하고 지난 세월 질곡의 나날들이 주마등처럼 떠올라 가슴이 저뭉칩니다. 십년을 주기로 공부할 수밖에 없었던 경제적인 어려움과 고달픔, 때로는 나태함과 무력감에 빠져 들어 자책했던 지난날들도 이제는 내 인생의 자취로서 부끄럽지 않습니다.

오늘 이 박사학위 논문이 있기까지 저의 학문적 편력을 이해하고 받아들여 학문을 배양해주시고 독려를 아끼지 않으신 김경수 지도교수님께 먼저 무한한 감사드립니다. 만학의 어려움을 격려해주시고 아낌없는 성원과 지원을 마다하지 않은 한국원자력연구원 정읍 방사선과학연구소 변명우 소장님께 뜨거운 가슴으로 고마움을 표합니다. 논문심사에 있어서 공사다망하심에도 불구하고 심사위원장으로 지도하여 주신 유상하 교수님과 수학 중에 직접 기기분석학을 열강해 주시고 논문심사까지 맡아주신 K&G 이문수 연구소장님, 동문 선배님이면서 심사지도까지 해주신 그린피아기술(주) 김관수 박사님께 깊은 감사를 올립니다.

논문을 탈고함에 있어 우수한 연구경험을 바탕으로 논문의 완성도를 높게 해주신 방사선 식품생명공학기술연구실장 이주운 박사님과 실험분석과정과 내용 기술에 있어 수많은 수정에 큰 도움을 주신 김재훈, 최종일, 송범석 박사님께 감사를 드립니다. 또한 실험기기사용 등과 데이터 처리까지 도와주신 박재남, 박진규, 한인준님께 감사드립니다.

적지 않은 시간 속에서 항상 서로 격려하면서 동문수학했던 한규재, 정양모, 서혜영 박사님과 전삼녀 선생님께 기쁨을 함께하며 감사에 마음을 전합니다. 유일한 동기로서 서로 격려하면서 학문에 매진했던 정찬희 박사님과 이 기쁨을 함께합니다. 아울러 시험 분석과 행정적 지원 등을 도와주신 식품분석실험실 심성례 랩장을 비롯한 김준형, 김원, 노기미, 류근영, 양수형, 정민석, 우지연 님께 감사를 드리며 학문

에 대한 매진에 격려를 보냅니다.

교육과학기술부 공무원으로 재직하면서 방사선 관련분야의 학위를 받도록 인도하여주신 조청원 국립과학관 관장님과 김영식 원자력국 국장님, 김진홍 원자력정책과 과장님께도 감사드립니다. 아울러 과학기술부 동기모임인 삼사회 회원님인 강호성, 김재근, 김제철, 이상대, 이건남, 이순중, 정홍영, 최원식 님들과도 이 기쁨을 함께하고 싶습니다.

한국원자력의학원에 재직하면서 박사과정을 격려해 주시고 시간을 배려해주신 김종순 원장님께 고마움을 드리며 성원해주신 최만섭 전문위원님과 방사선의학연구소장 오근배 소장님을 비롯한 이윤실, 천기정, 김유석 박사님과 성균관대 채종서 교수님께 감사드립니다. 또한 초고 등의 교정과 제책 등의 번거로움을 마다하지 않으신 강상훈, 김수관 팀장, 김용한 연구원, 방선희, 황다혜 님께도 고마움을 전합니다.

어린 시절부터 항상 걱정해주시고 끊임없는 도움과 격려를 아끼지 않으신 김광민, 하경순 큰형님 내외분, 김남규, 김영심 작은형님 내외분을 비롯한 모든 가족에게 고마움을 전합니다. 특히 누구보다도 더 기뻐하는 사랑하는 아내 이분옥과 만학을 응원하며 찬사를 보낸 우리 딸 라해와 아린에게 남편으로서 애비로서 무한한 사랑과 크고 큰 고마움을 이 논문에 실어 선물로 드립니다.

끝으로 이미 고인이 되신 아버님의 영전에 이 영광을 고하며 이 기쁨도 함께하지 못하고 희미한 기억과도 고통하면서 노인병원서 생의 마지막 등불을 부여잡고 계시는 어머니에게 못 다한 효도를 대신하여 이 논문과 박사학위를 바칩니다.

2008. 7월

김 왕 근

저작물 이용 허락서

학 과	응용과학과	학 번	20057537	과 정	박사
성 명	한글 : 김 왕 근 한문 : 金 汪 根 영문 : Kim, Wang-Geun				
주 소	경기도 안양시 동안구 비산동 1102-4 관악 부영아파트 207-1601				
연락처	E-MAIL : wgkim77@hotmail.com				
논문제목	한글 : 방사선 선종에 따른 식육 및 그 가공품의 식품학적 특성에 대한 비교 연구 영문 : Comparison of the Effects of the Radiation Types on the Quality Characteristics of Meats and their Processed Products				
<p>본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.</p> <p style="text-align: center;">- 다 음 -</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함. 3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함. 4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음 7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함. <p style="text-align: center;">동의여부 : 동의(O) 반대()</p> <p style="text-align: center;">2008년 8월 일</p> <p style="text-align: center;">저작자: 김 왕 근 (서명 또는 인)</p> <p style="text-align: center; font-size: 1.2em; font-weight: bold;">조선대학교 총장 귀하</p>					