

방사선 조사된 라면수프의 조사선원에 따른 전자스핀공명 분석특성

안재준 · 이주운¹ · 정형욱² · 권중호*

경북대학교 식품공학과, ¹한국원자력연구원 정읍방사선과학연구소, ²식품의약품안전청

Analytical Characteristics of Electron Spin Resonance for Identifying Irradiated Ramen Soup with Radiation Sources

Jae-Jun Ahn, Ju-Woon Lee¹, Hyung-Wook Chung², and Joong-Ho Kwon*

Department of Food Science & Technology, Kyungpook National University

¹Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute

²Korea Food & Drug Administration

Abstract The identification characteristics of irradiated commercial Ramen soup were investigated depending on radiation sources and doses by electron spin resonance (ESR) spectroscopy. Two commercial powder soups (RS-1, RS-2) were irradiated at 0 to 20 kGy under ambient conditions by both a Co-60 gamma irradiator and an electron beam (EB) accelerator, respectively. Crystalline sugar-induced multi-component signals with g-values of 2.010/2.011, 2.006, 2.002 and 1.999 were detected in the irradiated Ramen soup (RS-1, RS-2), whereas Mn²⁺ signals were observed in non-irradiated samples, thereby distinguishing each other. Under the same analytical conditions, the intensity of ESR signals was higher in EB-irradiated samples than the gamma-irradiated ones. Determination coefficients (R^2) between irradiation doses and corresponding ESR responses were above 0.9665 in all the samples, and the magnetic field of specified g-value remained constant. The predominant ESR signals of g_2 (2.010-2.011) and g_3 (2.002) increased with corresponding doses of irradiation ($R^2 = 0.9750-0.9981$).

Key words: ramen soup, radiation sources, electron spin resonance (ESR), detection

서 론

라면은 1958년 일본에서 최초 개발된 이후, 인스턴트식품으로서 세계에서 널리 이용되고 있는 식품이다. 우리나라에서는 1963년 최초로 라면이 생산된 이후, 비약적으로 발전하여 왔으며, 2007년 기준 약 3,000만 톤 이상의 수출량을 기록하고 있다(1). 또한 라면과 밀접한 연관성을 지녀온 수프는 초기에는 단순한 조미료 역할에서 현재에는 독자적인 맛을 추구하며 라면의 기호도를 결정하게 되었다. 라면의 수프는 대부분 건조 상태의 분말이나 절편상태로써 다양한 재료로 제조되어 저장 유통되므로 미생물 혼입과 해충의 번식도 문제로 되고 있다. 따라서 이를 관리할 목적으로 화학약제의 사용이 금지된 아래 방사선 조사기술의 활용할 가능성이 매우 크며(2), 국내에서는 라면수프를 포함한 복합조미식품의 미생물의 살균을 목적으로 10 kGy까지 감마선 조사가 허가되어 있다(3). 그러나 세계적으로 57개국에서 식품의 방사선 조사가 허가되어 있으며, 대부분 10 kGy까지의 감마선, 전자선 및 X-선이 허용되어 있을 뿐 아니라 미국과 뉴질랜드는 최고 30 kGy까지 허가되어 있어서 다양한 조사선원 및 고준위 선량에서의 품질변화와 조사식품의 수입관리를 위한 검지특성의 연구도 필요

하다(4,5).

방사선 조사식품의 검지방법에 관한 연구는 1970년대부터 꾸준히 진행되어 왔으며, 그 결과 hydrocarbon류 분석에 의한 방법(6-8), electron spin resonance(ESR)을 활용하는 방법(9,10), thermoluminescence(TL)에 의한 방법(11-14) 등이 가장 유망한 방법으로 제시되고 있다. 이 중 ESR 방법은 방사선 조사에 의해 생성되는 짹짓지 않은 전자의 spectrum을 측정하여 방사선 조사여부를 판별하는 방법으로써 cellulose를 함유하는 식품(15), crystalline sugar를 함유하는 식품(16), 뼈를 함유하는 식품(17)을 대상으로 분석하는 방법이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 국내에서도 방사선 조사식품의 허가(3)와 검지법이 고시된 점을 감안하여 방사선 조사된 라면수프의 ESR spectrum 형태와 signal 강도를 조사선원과 선량에 따라 분석하여 ESR 분석방법이 라면수프의 방사선 조사여부 검지에 적용 가능성을 검토하였다.

재료 및 방법

실험재료

본 실험에서는 다소비 분말 라면수프 2종(RS-1, RS-2)을 2007년 8월 N사에서 제공받아 사용하였다. 시료는 PE-laminated film에 10-10.5 g 단위로 포장된 상태였으며, 이를 그대로 방사선조사 시료로 사용하였다.

방사선 조사 및 저장

포장된 라면수프의 방사선 조사는 현재 국제적으로 널리 식품

*Corresponding author: Joong-Ho Kwon, Department of Food Science and Technology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

Tel: 82-53-950-5775

Fax: 82-53-950-6772

E-mail: jhkwon@knu.ac.kr

Received October 24, 2008; revised December 10, 2008;

accepted December 21, 2008

에 이용되고 있는 감마선과 전자선의 선원을 이용하였으며, 각각 2.5, 5, 10, 20 kGy의 흡수선량을 얻도록 처리하였다. 먼저 감마선 조사는 정읍 방사선연구소에 소재한 ^{60}Co 감마선 조사시설(AECL, IR-79, MDS Nordion International Co. Ltd., Ottawa, ON, Canada)을 이용하여 실온($22\pm2^\circ\text{C}$)에서 0.69 Gy/sec의 선량률로 조사하였다. 전자선 조사는 electron beam accelerator(ELV-4, 2.5 MeV, EB-Tech., Deajon, Korea)를 이용하여 electric current를 선량에 따라 다르게 하여 1회 조사하였다. 조사한 시료는 비조사 시료와 함께 실온($10\pm3^\circ\text{C}$)에 보관하면서 실험에 사용하였다.

시료의 전처리

시료의 ESR 측정을 위하여 준비된 시료는 50°C 의 건조기에서 48시간 건조한 후 내경이 3.7 mm인 pyrex ESR tube에 충진하였으며, 충진된 시료의 양(0.28 g) 수준으로 3회 반복 측정하였다.

ESR 측정 및 분석

시료의 ESR 측정은 ESR X-band spectrometer(TES-300, JEOL, Tokyo, Japan)를 이용하였다. 즉, 측정 조건은 central field 327±0.6 mT; sweep width 10-15 mT; microwave power 1.0 mW; modulation frequency 100 kHz; modulation amplitude 10 mT; sweep time 30 sec; time constant 0.3 sec 등이었다. 이때 모든 ESR spectra는 실온에서 측정하였으며 ESR cavity에 같은 조건으로 고정시켜 측정하였다. 그리고 본 실험에서는 두 가지의 실험이 병행되었다. 먼저 각 시료에 대한 최적 spectra를 얻은 뒤 그에 따른 parameter를 분석하였고, 둘째는 선원이 다른 시료에 대해 동일한 조건으로 측정하여 선원에 따른 ESR intensity를 비교하였다.

결과분석

방사선 조사된 라면수프의 ESR 측정 실험 결과는 Origin(18)에 의해 분석하였고, ESR 분석에 영향을 미치는 반응변수와 회귀변수간의 산점도를 분석하기 위하여 SAS(19)를 이용하여 최소제곱법(least square method)과 다중회귀모형(polynomial regression model)으로 나타내었다.

결과 및 고찰

비조사 시료의 ESR 특성

전자스핀공명분석에서 측정하는 에너지의 차이는 시료에 존재하는 짹짓지 않은 전자와 외부에서 걸어주는 자기장 사이에서 일어나는 상호작용에 의하여 발생하는 Zeeman effect에 의하여 발생된다(23). Fig. 1은 방사선 처리하지 않은 시판 라면수프 2종의 ESR spectra를 나타낸 것으로써 Mn^{2+} radical이 관찰되었다. Mn^{2+} ion은 중심의 center peak($g = 2.002-2.006$)를 중심으로 저자장과 고자장에서 각각 3개의 peak를 나타내며, 각 peak 사이의 간격은 시료에 따라 8~10 mT의 간격을 나타내었다. Mn^{2+} ion의 발생기 작은 식물 단백질 복합체에서 열 변화(24), 건조(25), 발효(26) 등으로 인해 $\text{Mn}(\text{II})$ 결합이 떨어져 발생한다고 보고된 바 있으며(27), 이는 비조사 시료와 조사시료 모두에서 발견되므로 방사선에 특이적으로 생성되는 라디칼로 볼 수 없다. ESR spectrum의 intensity는 PSL의 photon counts와 같은 절대적인 값이 아니라 실험 시 측정되는 ESR 보정수치에 따라 달라지므로 ESR 측정 시에는 측정시료의 고유한 특성 값이 필요하게 된다. G-value는 Zeeman effect에 의해 발생되는 에너지의 차이를 보정하기 위한 값으로 일반적인 자유전자의 값은 2.002로 알려져 있다. 또한 g-value는 spin-orbital coupling에 의존한 값이므로 원자 및 분자 전

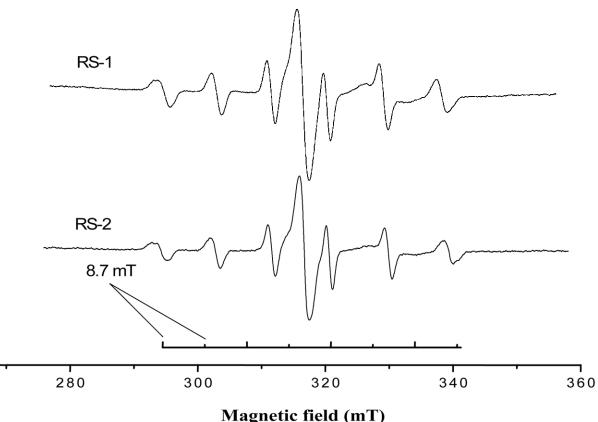


Fig. 1. ESR spectra of non-irradiated Ramen soup (RS-1, RS-2).

체에 비 편재화되어 있는 짹짓지 않은 전자에 대한 정보를 제공하며, 각각의 radical spectra에 따라 유일한 값을 가지기 때문에 실험으로부터 얻은 자기장의 세기와 시료에 주사한 전자기파의 주파수로부터 g-value를 구할 수 있으며, 시료에 대한 여러 가지 정보를 얻을 수 있다. 본 실험에서 측정된 비조사 수프류의 g-value는 peak의 순서대로 2.150, 2.092, 2.037, 2.006, 1.981, 1.929, 1.878 등이었으며, 각 peak의 간격은 8.55-9.10 mT의 범위로 나타났다(Table 1).

조사선원 및 선량에 따른 ESR 특성

식품에서 생성된 radical들은 식품 내에 존재하는 수분에 의해 빠르게 중화되지만, 빠 및 건조시료와 공기와의 접촉을 최대한

Table 1. ESR signal parameter of Mn^{2+} radical from non-irradiated Ramen soup

Signal	Specification	Ramen soup	
		RS-1	RS-2
1	g-value ¹⁾	2.1503	2.1504
	$\Delta H^2)$ (%)	11.9	9.8
	Magnetic field (mT)	305.32	305.34
2	g-value	2.0924	2.0920
	ΔH (%)	16.4	11.9
	Magnetic field (mT)	313.78	313.80
3	g-value	2.0373	2.0374
	ΔH (%)	21.8	14.7
	Magnetic field (mT)	322.26	332.28
4	g-value	2.0061	2.0062
	ΔH (%)	100.0	100.0
	Magnetic field (mT)	327.28	327.30
5	g-value	1.9818	1.9819
	ΔH (%)	20.1	13.3
	Magnetic field (mT)	331.28	331.30
6	g-value	1.9297	1.9298
	ΔH (%)	21.2	16.2
	Magnetic field (mT)	340.22	340.25
7	g-value	1.8787	1.8788
	ΔH (%)	14.7	11.8
	Magnetic field (mT)	349.46	349.48

¹⁾71.448 × microwave GHz / magnetic field

²⁾Signal intensity / ESR intensity × 100

줄어도록 포장된 식품은 radical의 수명이 상대적으로 오랫동안 유지될 수 있는 환경에 갇히게 된다(20-22). 본 실험에 사용된 라면수프의 수분함량은 1.8-3.2%였으며, 선원에 따른 ESR spectra를 측정한 결과는 Fig. 2와 같다. ESR spectra의 형태는 선원에 따른 차이가 나타나지 않았으며, 측정된 RS-1과 RS-2 모두 center field

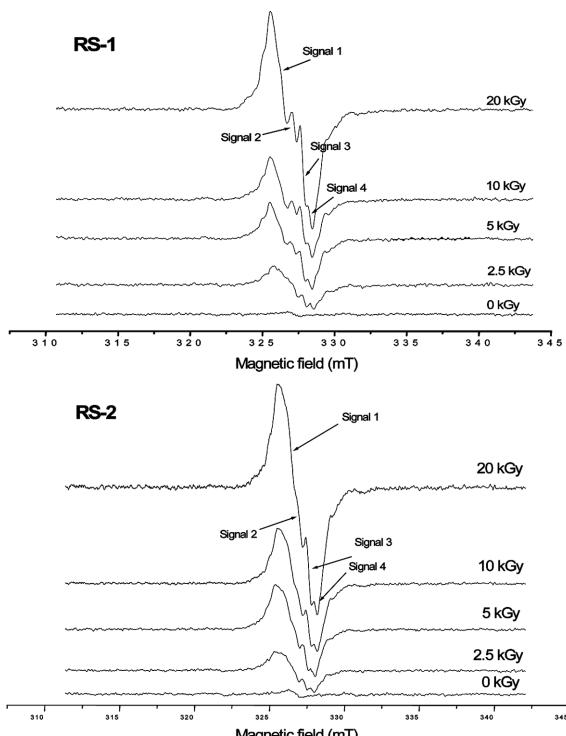


Fig. 2. ESR spectrum of irradiated Ramen soup. Signal 1, $g = 2.011$; signal 2, $g = 2.006$; signal 3, $g = 2.002$; signal 4, $g = 1.999$.

의 g -value가 2.006인 signal이었으며, 방사선 조사에 의해 특이적으로 생성되는 crystalline sugar radical로 확인되었다. ESR spectra의 형태는 크고 작은 signal이 4개가 323-331 mT의 자장영역에서 나타났으며, 모두 조사선량에 따라 유의적으로 증가하였다. 또한 라면수프의 선원에 따른 ESR intensity의 차이는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 RS-1은 20 kGy에서 감마선 3015 ± 24.6 , 전자선 2089 ± 41.7 로 각각 나타났다. 그리고 RS-2는 20 kGy에서 감마선 3327 ± 28.4 , 전자선 3648 ± 22.9 로 나타나 감마선 조사시료보다 전자선 조사시료의 ESR intensity가 더 높게 나타났으며, 이러한 경향은 다른 조사선량에서도 동일하였다. 라면수프의 방사선 조사선량과 ESR intensity 간의 상관관계를 Table 2에 나타내었다. 각각의 결정계수(R^2)는 RS-1의 경우 감마선 0.9665, 전자선 0.9861 이었으며, RS-2의 경우 감마선 0.9950, 전자선 0.9865로써 높은 상관성을 보여 Desrosiers과 Simic(9)의 결과와 일치하였다.

방사선 조사된 라면수프에서 나타난 각 signal의 g -value와 자장영역을 Table 3과 4에 나타내었다. RS-1의 경우 $g_1 = 2.011 - 2.0115$, $g_2 = 2.0060 - 2.0061$, $g_3 = 2.0027$, $g_4 = 1.999 - 2.0001$ 의 범위로 나타났으며, RS-2의 g -value는 $g_1 = 2.0101 - 2.0103$, $g_2 = 2.0058 - 2.0062$, $g_3 = 2.0023 - 2.0026$, $g_4 = 1.9996 - 1.9997$ 의 범위로써 선량과 선원이 변화하여도 모두 일정한 값을 나타내었다. 또한 g -value가 나타난 자장영역 역시 RS-1은 326.40-326.52 mT, 327.30-327.42 mT, 327.78-327.92 mT, 328.23-328.37 mT로 나타났으며, RS-2는 326.54-326.70 mT, 327.22-327.41 mT, 328.80 - 327.97 mT, 328.25 - 328.44 mT로 나타나 모두 일정하게 관찰되었다. 방사선 조사된 라면수프의 ESR spectra에서 각 signal의 intensity를 조사선원 및 조사선량별로 비교하기 위하여 ESR intensity에 대한 백분율로 나타낸 결과, RS-1은 ESR intensity가 증가할수록 signal 1의 H는 증가하는 경향을 나타내었으며, 그 외의 signal은 감소하거나 큰 변화가 없었다. RS-2의 경우 signal 1은 선량이 증가할수록 H 역시 증가하였고 signal 2는 선량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 방사선 유래 radical의 조사선원 및 선원에 따른 변화를 관찰하기

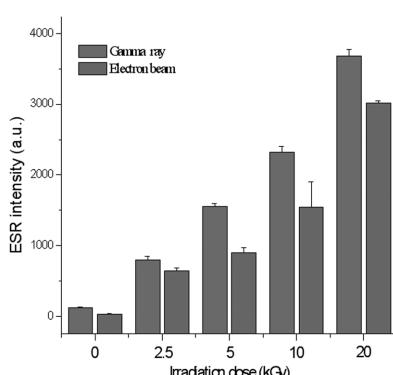


Fig. 3. ESR intensity of irradiated Ramen soup using different radiation sources (left : RS-1, right : RS-2).

Table 2. Correlation coefficients (R^2) between irradiation dose and ESR signal intensity in irradiated Ramen soup at 0 to 20 kGy

Irradiated Sample	Radiation source	Intensity	Regression expressions and coefficients	
			Mathematical fit ¹⁾	Determination Coefficients
RS-1	Gamma ray	S1-S4 ²⁾	$y = -1.01410x^2 + 187.41592x + 286.06277$	$R^2 = 0.9665$
	Electron beam	S1-S4	$y = 1.34205x^2 + 116.44721x + 187.25308$	$R^2 = 0.9861$
RS-2	Gamma ray	S1-S4	$y = -2.98184x^2 + 229.53075x + 159.36062$	$R^2 = 0.9950$
	Electron beam	S1-S4	$y = -2.02595x^2 + 189.05521x + 170.87708$	$R^2 = 0.9865$

¹⁾x: irradiation dose (kGy), y: ESR intensity

²⁾ESR intensity (peak to peak)

Table 3. ESR signal parameter of crystalline sugar radical from irradiated RS-1 with different radiation sources

Signal	Parameter	Gamma ray				Electron beam			
		2.5	5	10	20	2.5	5	10	20
1	g-value ¹⁾	2.0115	2.0110	2.0113	2.0115	2.0113	2.0112	2.0112	2.0110
	ΔH (%) ²⁾	37.3	45.3	49.3	51.5	39.2	47.6	45.6	53.6
	M.F. ³⁾ (mT)	326.40	326.43	326.51	326.42	326.42	326.41	326.48	326.45
2	g-value	2.0060	2.0061	2.0060	2.0060	2.0060	2.0061	2.0060	2.0060
	ΔH (%)	24.0	15.2	12.9	13.7	27.5	41.9	35.7	37.4
	M.F. (mT)	327.35	327.30	327.40	327.33	327.35	327.35	327.42	327.36
3	g-value	2.0027	2.0027	2.0027	2.0027	2.0027	2.0027	2.0027	2.0027
	ΔH (%)	27.5	41.9	35.7	37.4	29.8	38.5	39.6	38.8
	M.F. (mT)	327.84	327.78	327.92	327.85	327.85	327.80	327.86	327.84
4	g-value	1.9999	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	1.9999	2.0000	2.0001
	ΔH (%)	13.9	18.4	13.8	10.7	14.5	16.3	15.5	15.2
	M.F. (mT)	328.29	328.23	328.37	328.30	328.31	328.34	328.36	328.33

¹⁾71.448 × microwave GHz / magnetic field²⁾Relative intensity = [(signal intensity/ESR intensity) × 100]³⁾Magnetic field**Table 4. ESR signal parameter of crystalline sugar radical from irradiated RS-2 at different radiation sources**

Signal	Parameter	Gamma ray				Electron beam			
		2.5	5	10	20	2.5	5	10	20
1	g-value ¹⁾	2.0101	2.0101	2.0101	2.0101	2.0101	2.0101	2.0103	2.0101
	ΔH (%) ²⁾	34.0	41.5	45.7	52.1	38.6	43.2	48.4	51.6
	M.F. ³⁾ (mT)	326.64	326.57	326.54	326.70	326.55	326.63	326.58	326.60
2	g-value	2.0060	2.0060	2.0060	2.0059	2.0061	2.0062	2.0058	2.0060
	ΔH (%)	35.1	22.5	26.1	16.2	36.3	24.8	25.7	38.3
	M.F. (mT)	327.31	327.24	327.22	327.39	327.36	327.41	327.25	327.33
3	g-value	2.0023	2.0026	2.0024	2.0024	2.0023	2.0024	2.0024	2.0024
	ΔH (%)	25.6	29.7	29.5	39.7	29.4	31.8	36.3	41.7
	M.F. (mT)	327.93	327.80	327.80	327.97	327.95	327.91	327.86	327.81
4	g-value	1.9997	1.9996	1.9997	1.9997	1.9997	1.9997	1.9997	1.9997
	ΔH (%)	12.3	11.0	14.0	12.8	15.8	12.4	12.9	13.0
	M.F. (mT)	328.35	328.27	328.25	328.41	328.44	328.33	328.38	328.36

¹⁾71.448 × microwave GHz / magnetic field²⁾Relative intensity = [(signal intensity/ESR intensity) × 100]³⁾Magnetic field

위하여 signal 1($g=2.011$, 2.010)과 signal 3($g=2.002$, 2.002)의 강도(peak to peak)의 변화를 Fig. 4와 5에 나타내었다. 조사선량 2.5-20 kGy의 범위에서 $g=2.010$ 과 2.002의 signal intensity는 선량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하였고 결정계수는 RS-1 0.9750-0.9849, RS-2 0.9822-0.9981로써 매우 높게 나타났다. 이는 $g=2.0034$ 인 cumin의 ESR spectra에서 선량이 증가함에 따라 signal intensity가 증가하였다는 Abdel-Fattah(28)의 보고와 유사한 결과를 나타내었다. 이상의 결과를 바탕으로 방사선 조사 라면수프의 ESR 검지에서 그 parameter들의 특성을 체계적으로 분석함으로써 정확한 검지를 위한 자료의 축적과 라면수프와 유사한 식품들의 방사선 조사 여부 판별에 필요한 기초자료를 활용될 것이다(28).

요 약

시판 분말 라면수프(RS-1, RS-2)에 대하여 방사선 조사선원(감마선, 전자선, 0-20 kGy)에 따른 ESR 분석특성을 연구한 결과, 수

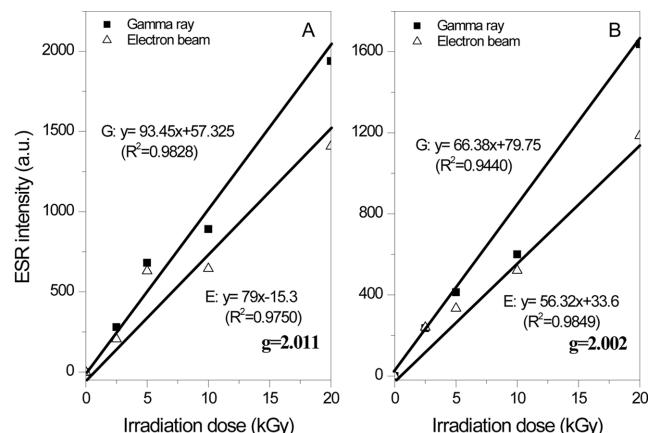


Fig. 4. Weighted lineared least-square regression analysis of ESR signals of irradiated RS-1 at different radiation sources. (A) $g=2.011$; (B) $g=2.002$.

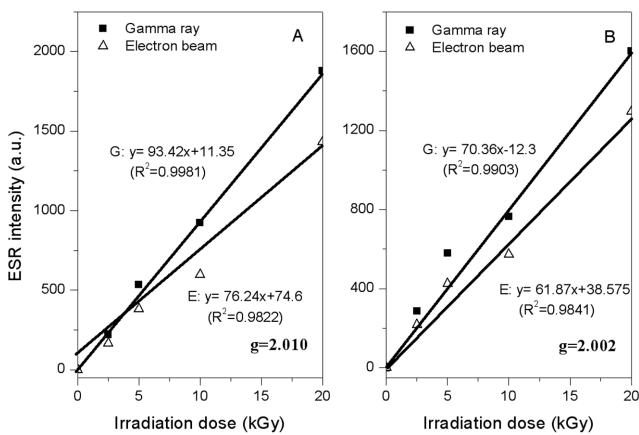


Fig. 5. Weighted linear least-squares regression analysis of ESR signals of irradiated RS-2 at different radiation sources. (A) $g=2.010$; (B) $g=2.002$.

프에 함유된 결정형 당이 방사선 에너지에 의해 free radical을 생성하는 것으로 나타났다. 즉, 방사선 처리되지 않은 2종의 라면 수프에서는 Mn^{2+} radical이 나타났으나, 조사시료의 ESR spectra는 RS-1에서 $g=2.011, 2.006, 2.002$ 및 1.999 , RS-2에서 $g=2.010, 2.006, 2.002$ 및 1.999 의 4개의 peak를 가진 multi-component signal 이 각각 확인되어 조사여부의 판별이 가능하였다. 또한 감마선 및 전자선과 조사선량에 따른 ESR intensity를 비교한 결과, 동일 측정조건에서는 모든 선량에서 전자선 조사시료가 감마선 조사시료보다 높은 강도를 나타내었다. 라면수프의 방사선 조사선량과 ESR intensity 간의 R^2 는 0.9665 이상을 보이면서 각 signal의 intensity는 조사선량이 증가함에 따라 일정한 비율로 증가하였으며, g -value가 나타나는 자장영역은 일정하였다. 이를 중 강도가 큰 $g_2(2.010-2.011)$ 와 $g_3(2.002)$ 의 signal 증가는 조사선량과 높은 선형적 상관을 나타내었다($R^2=0.9750-0.9981$).

문 헌

- KATI. Korea Agro-Fisheries Trade Corporation homepage. <http://www.at.or.kr>. Accessed July 5, 2008.
- Diel JF. Potential and actual applications of irradiated foods. pp. 217-253. In: safety of Irradiated Foods, Marcel Dekker, Inc., New York, NY, USA (1990)
- KFDA. Korea Food Standard Code, 2-1-9~2-1-10 Korea Food & Drug Administration, Seoul, Korea (2008)
- WHO/FAO. Food irradiation - A technique for preserving and improving the safety of food. World Health Organization, Geneva, Switzerland (1988)
- IAEA. International Atomic Energy Agency homepage. <http://nucleus.iaea.org/NUCLEUS/nucleus/Content/index.jsp>. Accessed July 5, 2008.
- Morehouse JM, Ku Y, Albrecht HL, Yang GC. Chromatographic and electron spin resonance investigations of gamma-irradiated frog legs. Radiat. Phys. Chem. 32: 61-68 (1991)
- Lesgards G, Raffi J, Pouliquen I, Chaouc AA, Giamarchi P, Prost M. Use of radiation-induced alkanes and alkenes to detect irradiated food containing lipids. J. AOAC Int. 70: 179-185 (1993)

- Schreiber GA, Schulzku G, Helle N, Bgl KW. Methods for routine control of irradiated food: optimization of a method for detection of radiation-induced hydrocarbons and its application to various foods. Radiat. Phys. Chem. 43: 433-444 (1994)
- Desrosiers MF, Simic MG. Postirradiation dosimetry of meat by electron spin resonance spectroscopy of bones. J. Agr. Food Chem. 36: 601-603 (1988)
- Sanderson DCW, Slater C, Caimes KJ. Detection of irradiated food. Nature 30: 23-24 (1989)
- Heide L, Bgl KW. The identification of irradiated spices with thermo- and chemiluminescence measurements. Int. J. Food Sci. Technol. 22: 93-103 (1987)
- Schreiber GA, Ziegelmann B, Quitzsch G, Helle N, Bgl KW. Luminescence techniques to identify the treatment of foods by ionizing irradiation. Food Struct. 12: 385-396 (1993)
- Schreiber GA, Helle N, Bgl KW. An interlaboratory trial on the identification of irradiated spices, herbs, and spice-herb mixtures by thermoluminescence analysis. J. AOAC Int. 78: 88-93 (1995)
- Schreiber GA, Hoffmann A, Helle N, Bgl KW. Methods for routine control of irradiated food : Determination of the irradiation status of shellfish by thermoluminescence analysis. Radiat. Phys. Chem. 43: 533-544 (1994)
- CEN. Detection of irradiated food containing cellulose, method by ESR spectroscopy. European Committee for Standard. English version of EN 1787, Brussels, Belgium (2000).
- CEN. Detection of irradiated food irradiated food containing crystalline sugar, method by ESR spectroscopy. European Committee for Standard. English version of EN 13708, Brussels, Belgium (2001).
- CEN. Detection of irradiated food irradiated food containing bone, method by ESR spectroscopy. European Committee for Standard. English version of EN 1786, Brussels, Belgium (1996).
- Origin. Origin Tutorial Manual. version 6.0. Microcal Software, Inc., Northampton, MA, USA. pp. 20-45 (1999)
- SAS. SAS Users Guide, SAS Institute Inc. Cary, NC, USA (1986)
- Raffi JJ, Benzaria SM. Identification of irradiated foods by electron spin resonance techniques. J. Radiat. Steril. 1: 281-304 (1993)
- Delinceé H. Detection of food treated with ionizing radiation. Trends Food Sci. Technol. 9: 73-82 (1998)
- Stachowics W, Strzelozak-Burlinska G, Michalik J. Application of electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy for control of irradiated food. J. Sci. Food Agr. 58: 407-415 (1992)
- Alan O. Electron Spin Resonance Spectroscopy. Vol. 2. Academic Press, New York, NY, USA. pp. 1013-1031 (2001)
- Rhodes CJ, Thuy TT, Harry M. A determination of antioxidant efficiencies using ESR and computational methods. Spectrochim. Acta A 60: 1401-1410 (2004)
- Morsy MA, Khaled MM, Novel. EPR characterization of the anti-oxidant activity of tea leaves. Spectrochim. Acta A 58: 1271-1277 (2002)
- Martin P, Vlasta B, Andrej S. Antioxidant properties of tea investigated by EPR spectroscopy. Biophys. Chem. 106: 39-56 (2003)
- Jezierski A, Czechowski F, Jerzykiewicz M, Golonka I, Drozd J, Bylinska E, Chen Y, Seaward MRD. Quantitative EPR study on free radicals in the natural polyphenols interacting with metal ions and other environmental pollutants. Spectrochim. Acta A 58: 1293-1300 (2002)
- Abdel-Fattah AA. Identification and dose assessment of irradiated cumin by EPR spectrometry. Appl. Radiat. Isotopes 56: 557-562 (2002)