

건조 홍합의 방사선 조사여부를 확인하기 위한 지방분해산물 분석

이해정 · 윤일남 · 서혜영 · 송현파 · 홍철희* · 김경수†

조선대학교 식품영양학과
*순천청암대학 호텔외식산업과

Analysis of Radiolytic Compounds of Lipids for the Detection of Irradiation in Dried *Mytilus coruscus*

Hae-Jung Lee, Il-Nam Yun, Hye-Young Seo, Hyun-Pa Song, Chul-Hee Hong* and Kyong-Su Kim†

Dept. of Food and Nutrition, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

*Dept. of Hotel and Food Service Industry, Suncheon Cheongam College, Suncheon 224-9, Korea

Abstract

Radiolytic compounds of lipids, as hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones, were determined to detect the irradiated dried *Mytilus coruscus*. The detection methods were composed of fat extraction by Soxtec apparatus from dried *Mytilus coruscus*, isolation of hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones with a florisil column chromatography and identification of GC/MS. Concentrations of the radiation-induced hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones increased with the irradiation dose. The major hydrocarbons in irradiated *Mytilus coruscus* were pentadecane and 1-tetradecene originated from palmitic acid, and heptadecane and 1-hexadecene originated from stearic acid. 2-(5'-Tetradecenyl)cyclobutanone of 2-alkylcyclobutanones was high relatively. The radiation-induced hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones from dried *Mytilus coruscus* were detected at 0.5 kGy over and not detected at the non-irradiated.

Key words: *Mytilus coruscus*, hydrocarbons, 2-alkylcyclobutanones, florisil, GC/MS

서 론

방사선 조사는 식품의 저장기간을 연장하고, 손실을 감소시키기 위한 산업적 기술로 인식되었으며, 또한 ethylene oxide, methyl bromide, ethylene dibromide, phosphine 등과 같은 식품의 화학 훈증제의 사용을 최소화하기 위해 이용되고 있다(1-3).

식품의 방사선 조사는 국제기구의 공동연구를 통하여 10 kGy 이하의 선량으로 조사된 모든 식품이 독성학적으로 안전하며 영양학적, 미생물학적으로도 문제가 되지 않는다고 하였으며(4), 최근에는 고선량 조사에 관한 보고서와 같이 어떠한 선량으로 조사된 식품일지라도 소비 및 영양학적으로 모두 안전하다고 하여(5) 식품 저장과 가공에 방사선 이용 및 방사선 조사식품의 교역이 날로 증가되고 있다. 이에 따라 방사선 조사 식품과 비조사 식품을 구별할 수 있는 합리적인 검지방법과 모든 식품에 적용할 수 있는 검지방법을 개발하고, 간편하고 일반적으로 사용할 수 있도록 많은 연구가 필요하게 되었다.

지금까지 방사선 조사 식품에 대한 검지 방법으로 지방을 함유하고 있는 식품의 hydrocarbon류나 2-alkylcyclobutanone류를 확인하는 GC 및 GC/MS 분석방법(6-12), 뼈를 함유하

나 섬유소를 포함하고 있는 식품에 함유된 radical을 분석하는 electron spin resonance(ESR)방법(13-16), 향신료, 건조야채류 등에 함유된 무기질을 이용한 thermoluminescence(TL)방법(17-19)의 이용, 그리고 DNA comet assay(20) 등과 같은 방법들이 연구되었다.

식품의 방사선 조사로 유도되는 주요 지방분해산물 중 hydrocarbon류 및 2-alkylcyclobutanone류는 Nawar(21)와 Le-Tellier 등(22)이 방사선 조사된 지방에서 생성된다고 보고한 이후, 이에 대한 연구들이 계속 진행되고 있으며 특히 이들 지방 분해화합물 분석의 간편화, 표준화를 통하여 방사선 조사식품의 검지 방법으로 활용하기 위한 연구들이 진행되고 있다(23, 24). 그러나 대부분 다량의 지방을 함유하고 있는 육류(25, 26)나 종실류(27)와 같은 식품을 대상으로 제한적으로 연구되어 왔다.

홍합은 계절에 따른 생산량 변화로 인하여 수입이 다량으로 이루어지고 있는 실정이므로 건조 홍합의 방사선 조사 여부를 확인하고 흡수선량 추정을 위하여 지방함유 식품에 유용한 화학적 방법을 이용하였다. 4.3%의 지방을 함유하고 있는 건조 홍합을 방사선 조사시켜 이로부터 유도되는 hydrocarbon류 및 2-alkylcyclobutanone류를 확인하고, 생성량을 비교·분석하

†Corresponding author. E-mail: kskim@mail.chosun.ac.kr
Phone: 82-62-230-7724. Fax: 82-62-224-8880

역방사선 조사 검지를 위한 marker로서 이용 가능성을 연구하고자 하였다.

재료 및 방법

재료

본 실험에 사용한 시료는 건조 혼합으로 한국원자력연구소 내 선원 10만 Ci의 ^{60}Co 감마선 조사시설을 이용하여 시간당 2.5 kGy 선량율로 각각 0.5, 1, 3, 5 및 10 kGy의 총 흡수선량을 얻도록 조사하였으며, 흡수선량의 오차는 ± 0.02 kGy이었다. 이를 비조사 대조시료와 함께 -18°C 로 냉동 저장하면서 실험에 사용하였다.

시약

본 연구에 사용한 모든 시약 및 지방분해산물인 hydrocarbon류와 2-alkylcyclobutanone류의 standard는 미국 Sigma사와 독일 TeLa사로부터 구입하였으며, 지방추출 및 chromatography에 사용한 n-hexane 등 유기용매는 HPLC grade 용으로 구입하여, 이를 다시 wire spiral packed double distilling(Normschliff Geratebau, Germany) 장치로 재증류한 것을 사용하였다. Florisil(60~100 mesh)은 Fisher Scientific (USA) 제품을 구입하여 550°C 회화로에서 하룻저녁 태운 뒤 desiccator에서 방냉한 후, hydrocarbon류를 분리하기 위하여 3% 물을, 그리고 2-alkylcyclobutanone류를 분리하기 위하여 20% 물을 가하여 20분 동안 균질화하고 12시간 이상 방치 후 불활성화시켜 충전제로 사용하였다.

Soxtec 기기를 이용한 방사선 조사된 혼합의 지방추출

조사선량별 시료 5 g과 Na_2SO_4 를 혼합하여 다공성 thimble에 넣고 Soxtec HT2 장치(Foss, France)에서 약 50 mL의 추출용매 n-hexane을 extraction cup에 가하고 extraction unit에 넣어서 지방을 추출하였다. 지방추출은 rinsing 및 boiling 단계를 자동으로 하게 하고, solvent recovery까지 45분이 소요되었다. 추출용액은 rotary vacuum evaporator(Büchi, Switzerland)와 N_2 gas를 이용하여 농축한 후 냉동저장하여 실험 시료로 사용하였다.

Hydrocarbon류의 분리

불활성화시킨 florisil 25 g을 200×20 mm chromatography column에 충전한 후, 추출한 지방 1 g에 정량분석을 위해 internal standard로서 1 mL n-icosane($4 \mu\text{g}/\text{mL}$ n-hexane)을 첨가하여 column에 가한 뒤 60 mL n-hexane을 용리용매로 하여 hydrocarbon류를 분리하였다. 이 용리용매는 335 mBar와 40°C 조건하에서 rotary vacuum evaporator를 이용하여 2 mL까지 농축한 후 0.5 mL까지 질소로 농축하여 GC/MS 분석기기를 이용하여 분석하였다.

2-Alkylcyclobutanone류의 분리

불활성화시킨 florisil 30 g을 200×20 mm chromatography

column에 충전한 후, 추출한 지방 0.2 g에 정량분석을 위해 internal standard로서 1 mL 2-cyclohexylcyclohexanone($1 \mu\text{g}/\text{mL}$ n-hexane)을 첨가하여 column에 가한 뒤 150 mL n-hexane 용매를 용리한 후 120 mL 2% diethylether/n-hexane을 용리용매로 하여 2-alkylcyclobutanone류를 분리하였다. 이 용리용매는 335 mBar와 40°C 조건하에서 rotary vacuum evaporator를 이용하여 2 mL까지 농축한 후 0.2 mL까지 질소로 농축하여 GC/MS 분석기기를 이용하여 분석하였다.

Hydrocarbon류의 GC/MS 분석

질량분석에 사용한 GC/MS 분석기기는 Shimadzu GC/MS QP-5050(Japan)을 사용하였으며 시료의 이온화는 electron impact ionization(EI) 방법으로 행하였다. GC/MS 분석조건은 ionization voltage를 70 eV로 하였고 ion source temperature는 250°C 로 하였다. 또한 분석할 분자량의 범위(m/z)는 40~350으로 설정하였다. Capillary column은 DB-5($30 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm}$ i.d., 0.25 μm film thickness, J&W, USA)를 이용하였다. 온도 program은 60°C 에서 170°C 까지 $25^\circ\text{C}/\text{min}$ 속도로, 205°C 까지 $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 속도로 승온시키고 다시 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 속도로 270°C 까지 승온시켰다. Carrier gas는 helium을 사용하였으며, 유속은 1.0 mL/min으로 하였다. Hydrocarbon류 분석을 위해서는 시료 1 μL 를 주입하고 split ratio는 1:20으로 하여 처음 2분 동안 splitless 하였다.

Hydrocarbon류는 total ionization chromatogram에 분리된 각 peak의 성분 분석 결과와 표준물질인 1-tetradecene($\text{C}_{14:1}$), pentadecane($\text{C}_{15:0}$), 1-hexadecene($\text{C}_{16:1}$), 1,7-hexadecadiene($\text{C}_{16:2}$), 1,7,10-hexadecatriene($\text{C}_{16:3}$), heptadecane($\text{C}_{17:0}$), 8-heptadecene($\text{C}_{17:1}$), 6,9-heptadecadiene($\text{C}_{17:2}$)의 분석에 의한 mass spectrum 및 retention time을 비교하여 확인하였으며, internal standard로 첨가된 n-icosane을 이용하여 정량하였다.

2-Alkylcyclobutanone류의 GC/MS 분석

질량분석에 사용한 GC/MS 분석기기는 hydrocarbon류 분석과 동일하며, ion source temperature는 270°C 로 하였다. 온도 program은 120°C 에서 1분 동안 유지하고 $15^\circ\text{C}/\text{min}$ 속도로 160°C 까지, $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 속도로 175°C 까지, $30^\circ\text{C}/\text{min}$ 속도로 290°C 까지 승온시키고 10분간 유지하였다. Carrier gas는 helium을 사용하였으며, 유속은 1.0 mL/min로 하였다. 시료는 2 μL 를 주입하였고 split ratio는 1:20으로 하여 처음 1분 동안 splitless 하였다.

2-Alkylcyclobutanone류는 정량적으로 분석하기 위하여 GC/MS의 selected ion monitoring(SIM) 방법을 이용하였다. 2-Dodecylcyclobutanone(DCB), 2-tetradecylcyclobutanone(TCB), 2-(5'-tetradecenyl)cyclobutanone(TECB)과 같은 표준물질을 0.1~10 ppm($\mu\text{g}/\text{mL}$ n-hexane)으로 조제하고 internal standard인 2-cyclohexylcyclohexanone은 1 ppm 농도가 되도록 하여 표준 검량선을 작성하였다.

2-Dodecylcyclobutanone과 2-tetradecylcyclobutanone은

ion m/z 98, 112를, 2-(5'-tetra-deceny)cyclobutanone은 ion m/z 67, 81, 그리고 internal standard는 ion m/z 98, 70, 83을 설정하여 표준물질과의 retention time과 ion ratio를 비교, 확인하여 정량하였다. 이들 2-alkylcyclobutanone류의 mass spectrum은 GC/MS의 full scan mode로 분석하여 확인하였다.

결과 및 고찰

건조된 홍합의 지방에는 palmitic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid, eicosapentaenoic acid(EPA), docosahexaenoic acid(DHA) 등이 많이 함유되어 있다. 이러한 지방산에 방사선을 조사시키면, 중성지방의 carbonyl group의 α 탄소와 β 탄소 위치에서 결합이 끊어져 원래의 지방산보다 탄소수가 1개(C_{n-1}) 적거나, 2개(C_{n-2}) 적으면서 첫 번째 탄소위치에 새로운 이중결합을 가진 hydrocarbon류가 생성되며(21), cyclic 화합물인 2-alkylcyclobutanone류가 지방산이나 triglyceride의 carbonyl기에 존재하는 산소로부터 전자 손실이 일어난 뒤, 모 지방산과 동일한 탄소수를 가지면서 C_2 위치에 alkyl기를 가진 화합물로 생성된다(22). Palmitic acid로부터 pentadecane(C_{15})과 1-tetradecene(C_{14}), stearic acid로부터 heptadecane(C_{17})과 1-hexadecene(C_{16}), oleic acid로부터 8-heptadecene(C_{17})과 1,7-hexadecadiene(C_{16}), linoleic acid로부터 6,9-heptadecadiene(C_{17})과 1,7,10-hexadecatriene(C_{16})이 생성됨이 확인되었으며, EPA와 DHA에서 생성되는 hydrocarbon류는 standard 물질의 부재로 인하여 동정할 수 없었지만, 이들 외에 다른 hydrocarbon류의 양을 비교하기 위해 각 시료마다 0~10 kGy 까지 방사선을 조사시켜 그 양을 살펴보았다. 2-Alkylcyclobutanone류는 palmitic acid로부터 2-dodecylcyclobutanone, stearic acid로부터 2-tetradecylcyclobutanone, oleic acid로부터 2-(5'-tetradeceny)cyclobutanone이 생성되는데 이들을 확인하기 위하여 GC/MS의 full scan mode의 total ion chromatogram(TIC)에서 얻은 mass spectrum을 비교하였으며, SIM mode에서 작성한 검량선을 이용하여 정량하여 비교하였다.

건조된 홍합에서 방사선 조사에 의해 생성되는 hydrocarbon류

홍합은 다량의 EPA와 DHA 외에 palmitic acid가 다량 차지하고 있고, 그 외 oleic acid, linoleic acid와 stearic acid가 비슷한 함량으로 함유되어 있다. 이와 같은 홍합의 지방산 조성에

의하여 각각의 hydrocarbon류가 생성됨을 확인하였다. Fig. 1은 비조사 및 10 kGy 조사된 홍합에서 생성된 hydrocarbon류의 chromatogram을 나타내었다. Nawar(21)에 의해 제시된 방사선 조사에 의한 지방분해 pattern과 동일하게 많은 hydrocarbon류가 검출되었으며, 방사선 조사선량에 따라 hydrocarbon류의 양이 증가하였다(Table 1). 그러나 지방산 조성차이에 기인하여 동일 조사선량일지라도 각각의 hydrocarbon류의 함량은 다르게 동정되었다. 이는 쇠고기, 돼지고기, 닭고기 등의 육류(28), 향신료(29), 그리고 여러 가지 다른 식품(26,27,30)에서도 확인할 수 있었다. C_{n-1} hydrocarbon류가 C_{n-2} hydrocarbon류보다 더 높은 함량으로 생성되었으며, 이와 같은 결과로부터 지방산의 α -탄소 위치에서의 생성율이 β -탄소 위치에서보다 높게 나타남을 알 수 있었다.

1-Tetradecene, pentadecane, 1-hexadecene, 1,7-hexadecadiene, 1,7,10-hexadecatriene, heptadecane, 8-heptadecene, 6,9-heptadecadiene는 0.5 kGy 이상 조사된 홍합시료에서 모두 검출 가능하였으나, 비조사 시료에서는 확인되지 않았다. Palmitic acid로부터 생성된 pentadecane과 1-tetradecene를 비교하였을 때, pentadecane이 비교적 높은 함량을 나타내었으며, C_{n-1}/C_{n-2} 의 ratio는 평균 1.4였고, 다른 지방산에서 생성되는 hydrocarbon류에 비하여 높은 함량을 차지하고 있었다. Pentadecane과 1-tetradecene은 조사선량에 따라 증가하였으며, linear regression의 r^2 는 각각 0.803과 0.883이었다. Stearic acid에서 유래한 heptadecane과 1-hexadecene 또한 heptadecane이 비교적 높은 함량을 차지하였으며, palmitic acid에서 생성된 hydrocarbon류와 비슷한 함량을 나타내었다. Hepta-

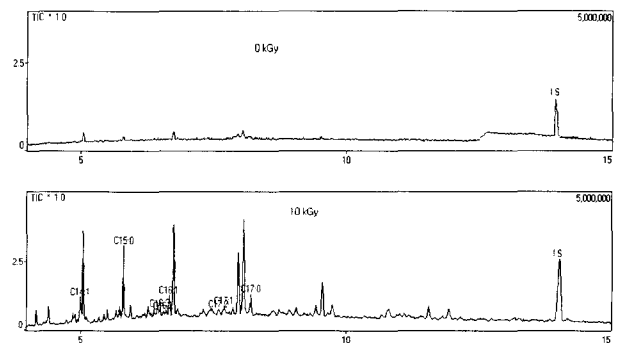


Fig. 1. Chromatograms of radiation-induced hydrocarbons in non-irradiated and 10 kGy irradiated dried *Mytilus coruscus*.

Table 1. Effect of irradiation dose on radiation-induced hydrocarbons in dried *Mytilus coruscus* ($\mu\text{g/g}$ fat)

| Irradiation dose (kGy) | C_{14} | C_{15} | C_{16} | C_{17} | C_{18} | C_{19} | C_{20} | C_{21} |
|------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 0.5 | $0.25 \pm 0.05^{1)}$ | 0.42 ± 0.03 | 0.25 ± 0.03 | 0.15 ± 0.02 | 0.16 ± 0.03 | 0.40 ± 0.03 | 0.34 ± 0.03 | 0.22 ± 0.03 |
| 1 | 0.58 ± 0.04 | 0.77 ± 0.04 | 0.39 ± 0.03 | 0.21 ± 0.02 | 0.21 ± 0.02 | 0.56 ± 0.04 | 0.49 ± 0.07 | 0.38 ± 0.04 |
| 3 | 0.72 ± 0.03 | 1.04 ± 0.04 | 0.61 ± 0.03 | 0.30 ± 0.02 | 0.36 ± 0.02 | 0.87 ± 0.03 | 0.59 ± 0.03 | 0.55 ± 0.03 |
| 5 | 1.00 ± 0.06 | 1.34 ± 0.03 | 0.84 ± 0.02 | 0.35 ± 0.03 | 0.47 ± 0.02 | 1.14 ± 0.03 | 0.89 ± 0.05 | 0.88 ± 0.05 |
| 10 | 1.39 ± 0.08 | 1.62 ± 0.06 | 1.05 ± 0.04 | 0.52 ± 0.02 | 0.66 ± 0.04 | 1.66 ± 0.05 | 1.20 ± 0.06 | 1.19 ± 0.05 |

¹⁾Mean \pm SD.

decane은 pentadecane과 유사한 함량을 나타내었으며, 1-hexadecene은 1-tetradecene 보다 약간 낮게 검출되었다. Heptadecane/1-hexadecene의 ratio는 평균 1.48로 C_{n-1} 이 C_{n-2} hydrocarbon류보다 높게 나타났다. Heptadecane과 1-hexadecene의 linear regression의 r^2 는 0.915와 0.866으로 방사선 조사선량이 증가함에 따라 각각 거의 직선상으로 생성됨을 알 수 있었다. Oleic acid로부터 생성되는 8-heptadecene과 1,7-hexadecadiene은 C_{n-1}/C_{n-2} ratio는 평균 2.28로 C_{n-1} hydrocarbon류가 높게 나타났으며, 1,7-hexadecadiene가 비교적 낮은 함량으로 확인되어서 C_{n-1}/C_{n-2} ratio가 다른 지방산보다 높게 나타남을 알 수 있었다. 8-Heptadecene과 1,7-hexadecadiene의 linear regression의 r^2 는 각각 0.883과 0.876으로 조사선량에 따라 증가하였다. Linoleic acid로부터 생성되는 6,9-heptadecadiene과 1,7,10-hexadecatriene은 oleic acid에서 생성되는 hydrocarbon류와 비슷한 함량으로 확인되었으며, C_{n-1}/C_{n-2} ratio는 평균 1.68을 나타내어 이들 또한 C_{n-1} 이 C_{n-2} hydrocarbon류보다 높은 함량을 차지하였으며, 조사선량에 따른 생성량의 linear regression의 r^2 는 각각 0.925, 0.912로 거의 직선상으로 증가함이 확인되었다.

결과적으로 홍합을 방사선 조사시켰을 때 생성되는 hydrocarbon류 모두가 방사선 조사 여부를 확인할 수 있는 marker로서 활용성이 클 것으로 생각된다.

건조된 홍합에서 방사선 조사에 의해 생성되는 2-alkylcyclobutanone류

방사선 조사된 건조 홍합으로부터 유도된 2-alkylcyclobutanone류를 SIM 방법에 의해 정량 분석한 결과는 Table 2에 나타내었고, 비조사 및 10 kGy로 조사된 건조 홍합의 chromatogram은 Fig. 2에 나타내었다. LeTellier와 Nawar(22)에 의해 밝혀진 2-alkylcyclobutanone류 또한 방사선 조사에 의해 유도된 hydrocarbon류와 같이 조사선량에 따라 함량 변화를 보였다.

건조 홍합의 palmitic acid, stearic acid와 oleic acid에서 생성된 2-dodecylcyclobutanone, 2-tetradecylcyclobutanone 그리고 2-(5'-tetradecenyl)cyclobutanone은 거의 비슷한 함량으로 검출되었다. 1 kGy 이상 조사 시료에서 2-tetradecylcyclobutanone이 비교적 낮은 함량을 차지하였으며, 2-(5'-

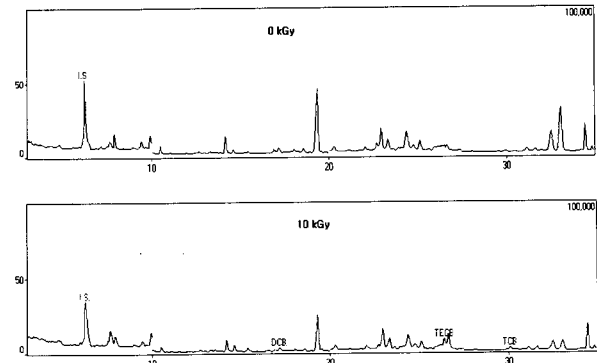


Fig. 2. Chromatograms of radiation-induced 2-alkylcyclobutanones in non-irradiated and 10 kGy irradiated dried *Mytilus coruscus*.

tetradecenyl)cyclobutanone이 대부분 높게 나타났다. 2-Dodecylcyclobutanone, 2-tetradecylcyclobutanone 그리고 2-(5'-tetradecenyl)cyclobutanone은 방사선 조사선량이 증가함에 따라 함량이 높게 나타나고 있으며, 각각 linear regression의 r^2 는 0.970, 0.924 그리고 0.880으로 거의 직선상의 수치를 보여주고 있다.

건조 홍합을 방사선 조사시켰을 때 생성되는 2-alkylcyclobutanone류 중 2-dodecylcyclobutanone, 2-tetradecylcyclobutanone과 2-(5'-tetradecenyl)cyclobutanone은 0.5 kGy 이상 조사시킨 시료에서 검출 가능하였고, 비조사 시료에서는 확인되지 않았다.

요 약

건조된 홍합을 방사선 조사시켜 생성된 hydrocarbon류를 분리하기 위하여 Soxtec 기기를 이용하여 지방을 추출한 뒤, florisil column chromatography하였으며, GC/MS 분석기기로 성분을 확인하였다. 0.5~10 kGy의 선량별로 조사된 건조된 홍합에서 방사선 조사에 의해 생성된 hydrocarbon류 함량이 조사선량에 따라 증가하였으며, 동일한 선량으로 조사된 시료임에도 방사선 조사에 의해 생성된 hydrocarbon류 각각의 함량이 다르게 정량되었다. 건조된 홍합의 방사선 조사에 의해 생성되는 hydrocarbon류와 2-alkylcyclobutanone류는 0.5 kGy 이상 조사된 시료에서 모두 검출되었으며, 비조사 시료에서는 검출되지 않았다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었으며 그 지원에 감사드립니다.

문 헌

1. Sjöberg AMK, Tuominen TP, Kiutamo T. 1992. Evaluation

Table 2. Effect of irradiation dose on radiation-induced 2-alkylcyclobutanones in dried *Mytilus coruscus* ($\mu\text{g/g}$ of fat)

| Irradiation dose (kGy) | 2-Dodecylcyclobutanone | 2-Tetradecylcyclobutanone | 2-(5'-Tetradecenyl)cyclobutanone |
|------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| 0 | - | - | - |
| 0.5 | 0.016 ± 0.004 ¹⁾ | 0.019 ± 0.005 | 0.014 ± 0.002 |
| 1 | 0.026 ± 0.005 | 0.023 ± 0.003 | 0.048 ± 0.004 |
| 3 | 0.046 ± 0.003 | 0.041 ± 0.004 | 0.069 ± 0.008 |
| 5 | 0.056 ± 0.004 | 0.075 ± 0.004 | 0.080 ± 0.007 |
| 10 | 0.104 ± 0.006 | 0.096 ± 0.005 | 0.121 ± 0.010 |

¹⁾Mean ± SD.

- of a gas chromatographic method for detection of irradiation of chicken and a chicken meat product. *J Sci Food Agric* 59: 65-75.
2. Schreiber GA, Helle N, Bögl KW. 1993. Detection of irradiated food-methods and routine applications. *Int J Radiat Biol* 63: 105-130.
 3. Diehl JF. 1995. Potential and current applications of food irradiation. In *Safety of irradiated foods*. 2nd ed. Marcel Dekker Inc, New York. p 291-339.
 4. WHO. 1981. Wholesomeness of irradiated food. In *Report of A Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee*. Technical Report Series-659. Geneva, Switzerland.
 5. WHO. 1999. High-Dose Irradiation-Wholesomeness of food irradiated with dose above 10 kGy. In *Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group*. WHO Technical Report Series 890. World Health Organization. Geneva, Switzerland.
 6. Morehouse KM, Ku Y. 1993. Identification of irradiated foods by monitoring radiolytically produced hydrocarbons. *Radiat Phys Chem* 42: 359-362.
 7. Morehouse KM, Ku Y. 1990. A gas chromatographic method for the identification of gamma-irradiated frog legs. *Radiat Phys Chem* 35: 337-341.
 8. 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.
 9. Choi CR, Hwang KT. 1997. Detection of hydrocarbons in irradiated and roasted sesame seeds. *JAOCs* 74: 469-472.
 10. Meier W, Artbo A, Nägeli P. 1996. Detection of irradiation of fat-containing foods by on-line LC-GC-MS of alkylcyclobutanones. *Mitt Gebiere Lebensm Hyg* 87: 118-122.
 11. Boyd DR, Crone AVJ, Hamilton JTG, Hand MV. 1991. Synthesis, characterization and potential use of 2-dodecylcyclobutanone as a marker for irradiated chicken. *J Agric Food Chem* 39: 789-792.
 12. Crone AVJ, Hamilton JTG, Stevenson MH. 1992. Effect of storage and cooking on the dose response of 2-dodecylcyclobutanone, a potential marker for irradiated chicken. *J Sci Food Agric* 58: 249-252.
 13. Morehouse KM, Ku Y. 1992. Gas chromatographic and electron spin resonance investigations of irradiated shrimp. *J Agric Food Chem* 40: 1963-1971.
 14. Desrosiers MF, Simic MG. 1988. Postirradiation dosimetry of meat by electron spin resonance spectroscopy of bones. *J Agric Food Chem* 36: 601-603.
 15. Goodman BA, Mcphail DB, Duthie DML. 1989. Electron spin resonance spectroscopy of some irradiated food stuffs. *J Sci Food Agric* 47: 101-111.
 16. Stevenson MH, Gray R. 1989. The effect of irradiation dose, storage time and temperature on the ESR signal in irradiated chicken drumsticks. *J Sci Food Agric* 48: 269-274.
 17. Autio T, Pinnioja SI. 1990. Identification of irradiated foods by the thermoluminescence of mineral contamination. *Z Lebensm Unters Forsch* 191: 177-180.
 18. Heide L, Guggenberger R, Bögl KW. 1990. Application of thermoluminescence measurements to detect irradiated strawberries. *J Agric Food Chem* 38: 2160-2163.
 19. Pinnioja S, Autio T, Niemi E, Pensala O. 1993. Import control of irradiated foods by the thermoluminescence method. *Z Lebensm Unters Forsch* 196: 111-115.
 20. Jabir AW, Deeble DJ, Wheatley PA, Smitt CJ, Parsons BJ, Beaumont PC, Swallow AJ. 1989. DNA modifications as a means of detecting the irradiation of wheat. *Radiat Phys Chem* 34: 935-940.
 21. Nawar WW. 1986. Volatiles from food irradiation. *Food Rev Int* 2: 45-78.
 22. LeTellier PR, Nawar WW. 1972. 2-Alkylcyclobutanones from the radiolysis of triglycerides. *Lipids* 7: 75-76.
 23. Morehouse KM, Ku Y. 1993. Identification of irradiated foods by monitoring radiolytically produced hydrocarbons. *Radiat Phys Chem* 42: 359-362.
 24. Spiegelberg A, Schulzki GM, Helle N, Bögl KW, Schreiber GA. 1994. 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.
 25. Kim KS, Kim EA, Lee HJ, Yang JS, Byun MW. 1999. Quantitative comparison of radiation-induced hydrocarbons from irradiated beef, pork and chicken. *Kor J Food Sci Technol* 32: 301-307.
 26. Morehouse KM, Kiesel M, Ku Y. 1993. Identification of meat treated with ionizing radiation by capillary gas chromatographic determination of radiolytically produced hydrocarbons. *J Agric Food Chem* 41: 758-763.
 27. Lee HJ, Lee MY, Kim KS. 1999. Detection of radiation-induced hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones from peanut. *J Food Sci Nutr* 4: 270-275.
 28. Schreiber GA, Schulzki G, Spiegelberg A, Helle N, Bögl KW. 1994. Evaluation of a gas chromatographic method to identify irradiated chicken, pork and beef by detection of volatile hydrocarbons. *JAOCs Int* 77: 1202-1217.
 29. Bendini A, Toschi TG, Lercker G. 1998. Influence of γ -irradiation and microwaves on the linear unsaturated hydrocarbon fraction in spices. *Z Lebensm Unters Forsch A* 207: 214-218.
 30. Lee HJ, Byun MW, Kim KS. 2000. Detection of radiation-induced hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones in irradiated perilla seeds. *J Food Protect* 63: 1563-1569.

(2002년 4월 11일 접수; 2002년 8월 5일 채택)