

방사선 조사된 잣으로부터 조사 여부를 확인하기 위한 Hydrocarbon류와 2-Alkylcyclobutanone류의 분석

이해정 · 김경수[†]

조선대학교 식품영양학과

Analysis of Radiolytically Produced Hydrocarbons and 2-Alkylcyclobutanones from Irradiated Pinenut

Hae-Jung Lee and Kyong-Su Kim[†]

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

Abstract

Pinenut was irradiated with the dose of 0.5~10 kGy. Radiation-induced hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones were extracted from pinenut, separated by florisil column chromatography and identified with GC/MS method. Concentrations of hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones were increased with the increase of irradiation dose and the composition of fatty acids in pinenut affected on products detected. The major hydrocarbons in irradiated pinenut were 8-heptadecene and 1,7-hexadecadiene originated from oleic acid and 6,9-heptadecadiene and 1,7,10-hexadecatriene originated from linoleic acid. 2-(5'-Tetradecenyl)cyclobutanone originated from oleic acid was highest in the irradiated pinenut. Radiation-induced hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones in pinenut were detected at 0.5 kGy and over, but not detected in the unirradiated samples.

Key words: pinenut, hydrocarbons, 2-alkylcyclobutanones, florisil, GC/MS

서 론

식품의 방사선 조사는 발아나 숙도를 억제하고 해충 구제 및 부패를 감소시켜 저장기간을 늘리고 병원성 및 부패 미생물의 감소와 살균으로 식품의 안전성과 품질 향상에 효과가 크며(1), 평균 10 kGy 이하로 조사된 모든 식품은 독성학적으로 안전하며, 영양학적, 미생물학적으로도 문제가 되지 않는다(2)는 보고 이후, 세계적으로 식품 방사선 조사의 실용화에 대한 관심이 높아졌다. 이에 따라 방사선 조사식품의 검지기술에 대한 연구가 재인식되었으며, 조사식품의 검지관련 연구들이 FAO, IAEA, WHO 등의 여러 국제기구에 의해 공동으로 광범위하게 시도되어 왔다.

지금까지 연구된 방사선 조사식품에 대한 검지방법으로는, 뼈나 섬유소를 함유하고 있는 식품에서 방사선 조사에 의해 생성되는 radical 분석을 위한 electron spin resonance (ESR) 방법(3,4), 향신료, 건조야채류 등에 부착된 무기질 측정을 위한 thermoluminescence(TL) 방법(5,6), DNA 손상 측정을 위한 DNA Comet assay(7,8) 그리고 지방을 함유하고 있는 식품의 방사선 조사여부를 판별하는데 가장 유망한 방법으로 제시되고 있는 GC와 GC/MS에 의한 방사선 조사에 의해 생성된 지방분해산물을 검지하는 방법(9,10) 등이 있다.

Nawar(11)와 LeTellier 등(12)이 식품의 방사선 조사에 의해 지방에서 유도되는 주요 지방분해산물로 hydrocarbon류와 2-alkylcyclobutanone류가 생성된다고 보고한 이후, 이에 대한 연구들이 계속 진행되고 있으며 특히 이들 지방분해화합물 분석의 간편화, 표준화를 통하여 방사선 조사식품의 검지방법으로 활용하기 위한 연구들이 진행되고 있다(13-23).

그러나, 이러한 연구들의 대부분은 다량의 지방을 함유하고 있는 육류(24)나 종실류(25,26)와 같은 종류의 식품을 대상으로 제한적으로 수행되어 왔다. 우리나라의 전통식품에 많이 사용되고 있는 잣은 국내 생산량이 적어서 다량 수입하고 있는 상태이므로, 잣을 방사선 조사시켜 생성되는 hydrocarbon류와 2-alkylcyclobutanone류를 분리, 확인하고, 생성량을 비교·분석하여 방사선 조사 여부를 확인하고 흡수선량 추정을 위한 marker로서 이용 가능성을 연구하고자 하였다.

재료 및 방법

재료

본 실험에 사용한 잣은 산지에서 직접 구입하였으며, 한국 원자력연구소 내 선원 10만 Ci의 ⁶⁰Co 감마선 조사시설을 이용하여 시간당 2.5 kGy 선량율로 각각 0.5, 1, 3, 5 및 10 kGy

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

의 총 흡수선량을 얻도록 조사하였으며, 흡수선량의 오차는 ± 0.02 kGy이었다. 이를 비조사 대조시료와 함께 -18°C 에 두고 실험에 사용하였다.

시약

본 연구에 사용한 모든 시약은 특급시약으로 미국 Sigma사에서, 지방분해산물인 hydrocarbon류와 2-alkylcyclobutanone류의 standard는 독일 TeLA사로부터 구입하였으며, 지방추출 및 chromatography에 사용한 n-hexane, diethyl ether 등 유기용매는 HPLC grade로 구입하여, 이를 다시 wire spiral packed double distilling 장치(Normschliff Geratebau, Wertheim, Germany)로 재증류한 것을 사용하였다. Florisil (60~100 mesh, Fisher Scientific, Pittsburgh, USA)은 550°C 회화로에서 하루저녁 태운 뒤 저장하였다가 사용전 130°C 에서 5시간 이상 탈수하여 desiccator에서 식힌 후, hydrocarbon류 분리를 위해 3% 물을 가하고, 2-alkylcyclobutanone류를 분리하기 위하여 20% 물을 가하여 각각 20분 동안 균질화하고 12시간 이상 방치하여 불활성화시킨 후, 충전제로 사용하였다.

방사선 조사시료의 지방추출

지방추출을 위해 잣 시료 30 g에 재증류된 n-hexane 30 mL를 첨가하여 Ultra Turrax(IKA Labortechnik, Staufen, Germany)로 여러 번 균질화하였다. 균질화된 시료는 $1500 \times \text{g}$ 로 20분간 원심분리시켜 투명한 상등액을 분리한 후 잔존물에 처음 사용한 혼합 유기용매량의 1/3을 다시 첨가하여 재추출하고 이를 원심분리하여 상등액을 첫 번째 상등액과 합한 후 rotary vacuum evaporator(Büchi, Flawil, Switzerland)를 사용하여 유기용매를 제거하고 질소를 사용하여 잔존유기용매를 휘발시킨 뒤 지방만을 취하여 냉동 저장하여 시료로 사용하였다.

Hydrocarbon류의 분리

불활성화시킨 florisil 25 g을 200×20 mm chromatography column에 충전시키고, 재증류한 n-hexane을 3 mL/min의 유속으로 conditioning한 후, 추출한 지방 1 g에 정량분석을 위한 internal standard로서 1 mL eicosane($4 \mu\text{g/mL}$ n-hexane)을 첨가하여 florisil column에 가한 뒤 60 mL n-hexane을 용리용매로 하여 hydrocarbon류를 분리하였다. 이 용리용매는 rotary vacuum evaporator를 이용하여 2 mL까지 농축한 후 다시 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 지방시료 0.2 g에 internal standard인 1 mL 2-cyclohexylcyclohexanone($1 \mu\text{g/mL}$ n-hexane)을 첨가하여 column에 가하였다. 3 mL/min 유속으로 150 mL n-hexane을 용리하여 제거한 후, 2% diethyl ether/n-hex-

ane 혼합용매(v/v) 120 mL을 용리용매로 하여 2-alkylcyclobutanone류를 분리하였다. 이 용리용매는 rotary vacuum evaporator를 이용하여 2 mL까지 농축하고 질소가스를 이용하여 0.2 mL까지 농축한 후 GC/MS 분석기기를 이용하여 분석하였다.

Hydrocarbon류의 GC/MS 분석

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

Hydrocarbon류는 total ionization chromatogram(TIC)에 분리된 각 peak과 standard 물질(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 retention time 및 mass spectrum을 비교하여 확인하였으며, internal standard를 이용하여 hydrocarbon류의 생성량을 정량하였다.

2-Alkylcyclobutanone류의 GC/MS 분석

질량분석에 사용한 GC/MS 분석기기는 Shimadzu GC/MS QP-5050을 사용하였으며 시료의 이온화는 electron impact ionization(EI) 방법으로 행하였다. 온도 program은 120°C 에서 1분동안 유지하고 15°C/min 속도로 160°C 까지, 0.5°C/min 속도로 175°C 까지, 30°C/min 속도로 290°C 까지 승온시키고 10분간 유지하였고, 시료는 2 μL 를 주입하고, split ratio는 1:20으로 하여 처음 1분동안 splitless시켰다. 다른 분석 조건은 hydrocarbon류 분석과 동일하게 하였다.

2-Alkylcyclobutanone류는 정량적으로 분석하기 위하여 selected ion monitoring(SIM) 방법을 이용하였다. 정량분석을 위하여 2-alkylcyclobutanone류의 standard인 2-dodecylcyclobutanone(DCB), 2-tetradecylcyclobutanone(TCB) 그리고 2-(5'-tetradecenyl)cyclobutanone(TECB)과 internal standard인 2-cyclohexylcyclohexanone을 0.1~5 ppm 조제하여 이들 용액을 2-alkylcyclobutanone류를 분리하는 방법으로 동일하게 실험하였으며, SIM 방법으로 분석하여 표준 검량선을 작성하였다. 2-Alkylcyclobutanone류 생성량은 표준 검량선과 internal standard를 이용하여 정량하였다. DCB와 TCB는 ion m/z 98, 112를, TECB는 ion m/z 67, 81, 98,

109를 설정하여 시료에서 분리된 2-alkylcyclobutanone류와 standard 물질과의 retention time과 ion ratio를 비교, 확인하였다. 이들 2-alkylcyclobutanone류의 mass spectrum은 GC/MS의 full scan mode로 분석하여 확인하였다.

결과 및 고찰

방사선 조사에 의해 잣에서 생성된 hydrocarbon류

지방을 방사선 조사시키면 2가지 형태의 hydrocarbon류가 생성되는데, 이는 C_{n-1} hydrocarbon류와 C_{n-2} hydrocarbon류로서 각각 carbonyl group의 α 탄소와 β 탄소위치에서 결합이 끊어져 원래의 지방산보다 탄소수가 1개 적거나, 2개 적으면서 첫 번째 탄소위치에 새로운 이중결합을 가진 화합물이 생성된다(11). 이런 지방 분해 원리에 의해 palmitic acid로부터 pentadecane($C_{15:0}$)과 1-tetradecene($C_{14:1}$), stearic acid로부터 heptadecane($C_{17:0}$)과 1-hexadecene($C_{16:1}$), oleic acid로부터 8-heptadecene($C_{17:1}$)과 1,7-hexadecadiene($C_{16:2}$), linoleic acid로부터 6,9-heptadecadiene($C_{17:2}$)과 1,7,10-hexadecatriene($C_{16:3}$)이 생성되는 것이 확인되었다.

잣은 다량의 oleic acid와 linoleic acid를 함유하고 있고, 소량의 palmitic acid와 stearic acid를 함유하고 있다. Oleic acid와 linoleic acid는 26.29%, 46.70%를 나타내었으며, palmitic acid와 stearic acid는 4.94%, 1.98%의 조성을 나타내었다(26). 이와 같은 잣의 지방산 조성에 의하여 oleic acid로부터 유도된 $C_{17:1}$ 과 $C_{16:2}$, linoleic acid로부터 유도된 $C_{17:2}$ 와 $C_{16:3}$ 이 방사선 조사된 잣의 주요 hydrocarbon류임을 예측할 수 있다. Fig. 1은 비조사된 시료와 10 kGy 조사시킨 잣에서 생성된 hydrocarbon류의 chromatogram을 나타내었다. Nawar

(11)에 의해 제안된 방사선 조사에 의한 지방 분해 pattern과 동일하게 많은 hydrocarbon류가 검출되었으며, 방사선 조사 선량에 따라 hydrocarbon류의 양이 증가하였다(Table 1). 그러나 지방산 조성 차이에 기인하여 동일 조사선량일지라도 각각의 hydrocarbon류 함량은 다르게 동정되었다. 이는 육류(27), 갑각류(28), 향신료(22) 그리고 여러 가지 식품(9,25,29)에서도 확인할 수 있었다. C_{n-1} hydrocarbon류가 C_{n-2} hydrocarbon류보다 더 높은 함량으로 생성되었는데, 이는 브라질 콩과는 다른 결과를 나타내었다(30).

$C_{14:1}$, $C_{15:0}$, $C_{16:1}$, $C_{16:2}$, $C_{16:3}$, $C_{17:0}$, $C_{17:1}$, $C_{17:2}$ 는 0.5 kGy 이상 조사된 잣에서 모두 검출되었으나, 비조사 시료에서는 확인되지 않았다. Palmitic acid로부터 생성된 $C_{15:0}$ 과 $C_{14:1}$ 을 비교하였을 때, $C_{15:0}$ 이 높은 생성량을 나타내었다. 주요 분해산물과 비교하여 $C_{15:0}$ 과 $C_{14:1}$ 의 함량은 상대적으로 낮았다. $C_{17:0}$ 과 $C_{16:1}$ 은 stearic acid로부터 생성되는 hydrocarbon류로서 소량 확인되었다. 이는 잣의 지방산 조성 중 palmitic acid와 stearic acid가 소량 존재함에 기인하여 매우 적은 양의 화합물들이 확인되었지만, 방사선 조사선량에 따라 증가하였다. 따라서 잣의 경우, 이들 hydrocarbon류는 방사선 조사여부를 검지하는데 marker로서 활용 가능성이 낮을 것으로 사료된다. 잣에 다량 함유되어 있는 oleic acid로부터 유도된 $C_{17:1}$ 과 $C_{16:2}$ 는 높은 함량을 나타내었고, 특히 $C_{17:1}$ 이 다량 확인되었다. $C_{17:2}$ 와 $C_{16:3}$ 또한 모지방산인 linoleic acid가 잣의 지방에 다량 함유되어 있는 것에 기인하여 높은 함량이 확인되었으며, $C_{17:2}$ 가 $C_{16:3}$ 보다 비교적 높은 함량을 차지하였다. 잣의 지방산 조성분해 기전을 토대로 하여 방사선 조사에 의해 생성된 주요 hydrocarbon류는 $C_{16:2}$, $C_{16:3}$, $C_{17:1}$, $C_{17:2}$ 로 확인되었다. 이런 hydrocarbon류는 잣의 방사선 조사 여부를 검

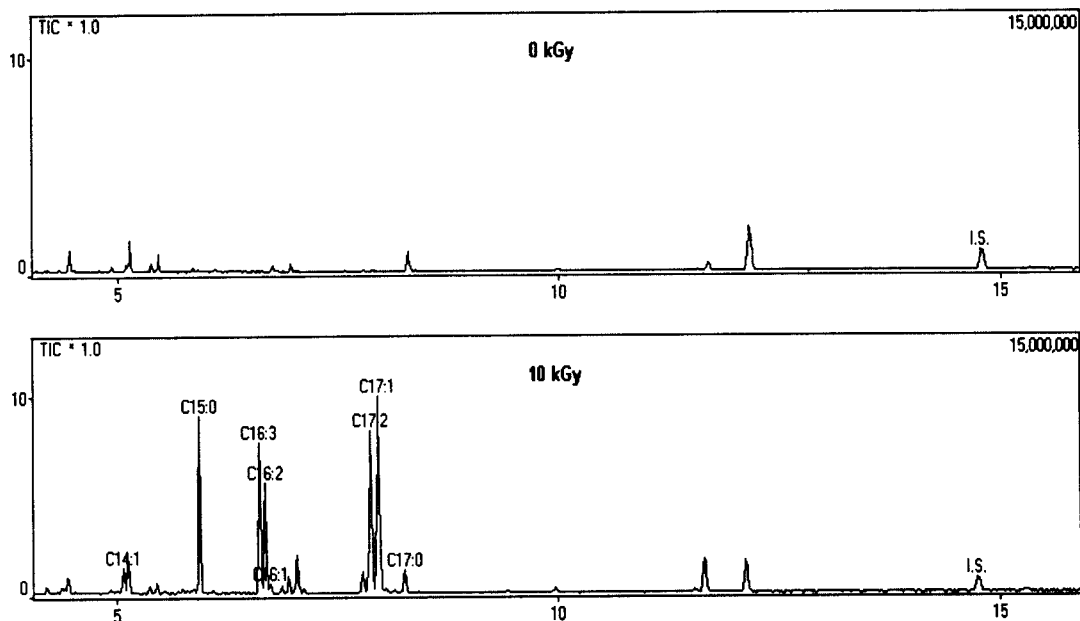


Fig. 1. Chromatograms of hydrocarbons from unirradiated and 10 kGy irradiated pinenut.

Table 1. Concentrations of radiation-induced hydrocarbons from pinenut ($\mu\text{g/g fat}$)

| Irradiation dose (kGy) | C _{14:1} | C _{15:0} | C _{16:1} | C _{16:2} | C _{16:3} | C _{17:0} | C _{17:1} | C _{17:2} |
|------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 0.5 | 0.056 ± 0.036 ¹⁾ | 0.505 ± 0.085 | 0.120 ± 0.029 | 0.061 ± 0.009 | 0.081 ± 0.007 | 0.065 ± 0.005 | 0.420 ± 0.030 | 0.049 ± 0.007 |
| 1 | 0.151 ± 0.032 | 1.380 ± 0.115 | 0.142 ± 0.030 | 0.125 ± 0.017 | 0.166 ± 0.009 | 0.302 ± 0.035 | 1.982 ± 0.178 | 0.087 ± 0.005 |
| 3 | 0.241 ± 0.028 | 2.410 ± 0.200 | 0.180 ± 0.024 | 0.781 ± 0.062 | 1.026 ± 0.066 | 0.505 ± 0.020 | 3.987 ± 0.151 | 1.098 ± 0.002 |
| 5 | 0.268 ± 0.028 | 2.924 ± 0.180 | 0.198 ± 0.016 | 1.085 ± 0.129 | 1.347 ± 0.053 | 0.581 ± 0.050 | 5.457 ± 0.318 | 1.991 ± 0.089 |
| 10 | 0.576 ± 0.069 | 3.580 ± 0.402 | 0.296 ± 0.024 | 2.967 ± 0.317 | 3.773 ± 0.306 | 0.745 ± 0.020 | 6.793 ± 0.591 | 5.539 ± 0.511 |

¹⁾Mean ± Standard deviation.

지할 수 있는 marker로서의 활용 가능성이 높을 것으로 사료된다.

방사선 조사에 의해 잣에서 생성된 2-alkylcyclobutanone류

지방을 방사선 조사시키면 지방산이나 triglyceride의 carbonyl기에 존재하는 산소로부터 전자 손실이 일어난 뒤, 모 지방산과 동일한 탄소수를 가지면서 C₂ 위치에 alkyl기를 가진 cyclic 화합물인 2-alkylcyclobutanone류가 생성된다(12). 이런 원리를 토대로 하여, 잣의 지방에 많이 함유되어 있는

oleic acid와 linoleic acid로부터 각각 2-(5'-tetradecenyl)cyclobutanone(TECB)와 2-(5',8'-tetradecadienyl)cyclobutanone이 생성되며, 소량 함유되어 있는 palmitic acid와 stearic acid로부터 각각 2-dodecylcyclobutanone(DCB)와 2-tetradecylcyclobutanone(TCB)가 생성된다. 그러나 linoleic acid로부터 유도된 2-alkylcyclobutanone류 화합물은 standard 물질의 부재로 인하여 확인할 수 없었다. Linoleic acid로부터 유도된 화합물을 제외한 2-alkylcyclobutanone류를 selected ion monitoring(SIM) 방법에 의하여 정량하여 Table 2에 나타내었다. Fig. 2는 비조사된 시료와 10 kGy 조사시킨 잣에서

Table 2. Concentrations of radiation-induced 2-alkylcyclobutanones from pinenut ($\mu\text{g/g fat}$)

| Irradiation dose (kGy) | 2-Dodecyl-cyclobutanone | 2-Tetradecyl-cyclobutanone | 2-(5'-Tetradecenyl)-cyclobutanone |
|------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| 0 | - | - | - |
| 0.5 | 0.037 ± 0.008 ¹⁾ | tr ²⁾ | 0.181 ± 0.026 |
| 1 | 0.110 ± 0.005 | 0.031 ± 0.005 | 0.430 ± 0.023 |
| 3 | 0.127 ± 0.017 | 0.063 ± 0.008 | 1.407 ± 0.105 |
| 5 | 0.138 ± 0.023 | 0.216 ± 0.041 | 2.330 ± 0.167 |
| 10 | 0.437 ± 0.055 | 0.499 ± 0.049 | 6.372 ± 0.298 |

¹⁾Mean ± standard deviation.

²⁾Trace.

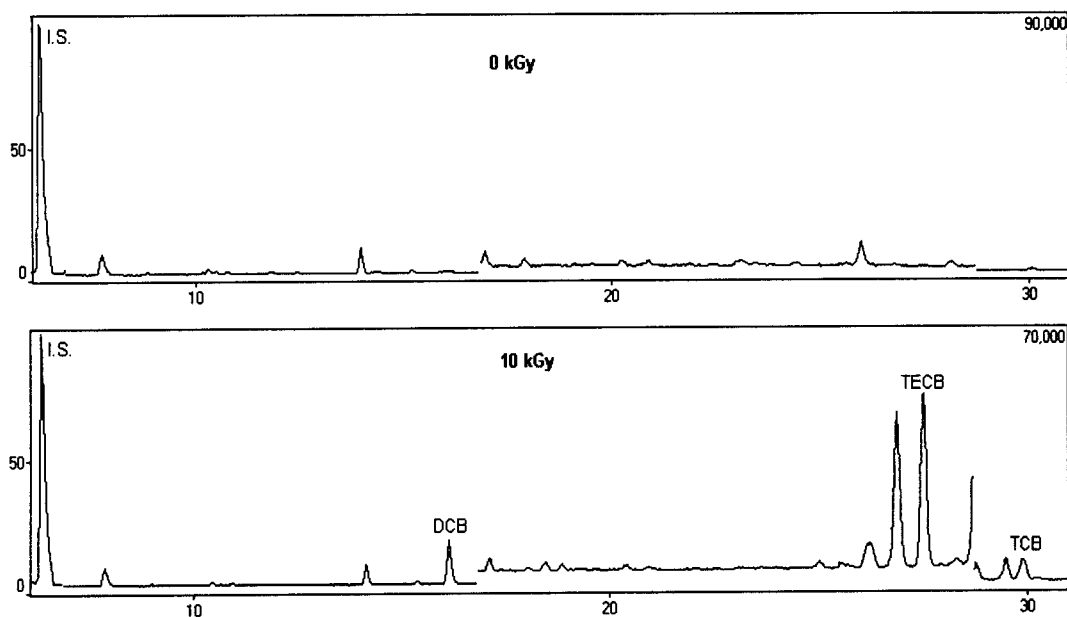


Fig. 2. Chromatograms of 2-alkylcyclobutanones from unirradiated and 10 kGy irradiated pinenut.

생성된 2-alkylcyclobutanone류의 chromatogram을 나타내었다.

잣의 방사선 조사에 의해 생성된 2-alkylcyclobutanone류 중 oleic acid로부터 유도된 TECB가 가장 높은 함량을 보인 반면 DCB와 TCB는 잣의 지방산 조성에 의하여 매우 낮은 함량을 나타내었다. 조사선량과 생성된 2-alkylcyclobutanone류의 관계를 보면 조사선량이 증가함에 따라 2-alkylcyclobutanone류의 함량이 증가하였다. 조사 선량에 따라 DCB, TCB, TECB는 0.5 kGy 이상 조사한 시료에서 검출 가능하였지만, TCB의 경우 0.5 kGy에서 미량 존재하였고, 비조사 시료에서는 모두 확인되지 않았다.

지금까지의 결과를 종합해 보면, 잣에서 방사선 조사로 유도된 hydrocarbon류와 2-alkylcyclobutanone류는 조사선량에 따라 비례적으로 증가하였으며, hydrocarbon류와 2-alkylcyclobutanone류는 0.5 kGy 이상 조사된 잣에서 검출할 수 있었으며, 이들이 방사선 조사 검지법에 활용될 수 있으리라 생각되며, 특히 주된 hydrocarbon류로 확인된 C_{16:2}, C_{16:3}, C_{17:1}, C_{17:2}와 2-alkylcyclobutanone류 중 TECB가 잣의 방사선 조사 여부를 검지하는데 이용 가능성이 매우 클 것이라고 본다. 그러나 저장 온도 및 기간과 같은 조건들의 영향에 따른 변화 뿐만 아니라 여러 다른 식품 항목에서도 더 많은 연구가 수행되어야 할 것이다.

요 약

잣을 0.5~10 kGy 선량으로 방사선 조사시켜 생성된 hydrocarbon류와 2-alkylcyclobutanone류를 분리, 확인하였다. 지방은 n-hexane을 사용하여 추출한 뒤 불활성화된 florisil로 충전한 column chromatography로 hydrocarbon류와 2-alkylcyclobutanone류를 분리하였으며, GC/MS로 확인하였다. 잣에서 방사선 조사에 의해 생성된 각각의 hydrocarbon류와 2-alkylcyclobutanone류 함량은 조사선량에 따라 증가하였다. Hydrocarbon류는 oleic acid와 linoleic acid로부터 유도된 C_{16:2}, C_{16:3}, C_{17:1}, C_{17:2}가 많이 생성되었으며, 2-alkylcyclobutanone류 또한 oleic acid로부터 유도된 TECB가 가장 높은 함량을 나타내었다. 이들 화합물이 잣의 방사선 조사 여부 및 흡수선량 추정을 위한 marker로서 이용할 수 있을 것이다. 조사선량에 따라 생성된 hydrocarbon류와 2-alkylcyclobutanone류는 0.5 kGy 이상 조사된 모든 시료에서 검출할 수 있었으며, 비조사 시료에서는 확인되지 않았다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었으며 그 지원에 감사드립니다.

문 헌

1. Diehl, J.F.: Potential and current applications of food ir-

- radiation. In *Safety of irradiated foods*, 2nd ed., Marcel Dekker Inc., New York, p.291-338 (1995)
- WHO: Wholesomeness of irradiated food. Report of A Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. In *Technical Report Series 659*, Geneva, Switzerland (1981)
- Esteves, U.P., Andrade, M.E. and Empis, J.: Detection of prior irradiation of dried fruits by electron spin resonance (ESR). *Radiat. Phys. Chem.*, **55**, 737-742 (1999)
- Duliu, O.G.: Electron paramagnetic resonance identification of irradiated cuttlefish (*Sepia officinalis* L.). *Appl. Radiat. Isotopes*, **52**, 1385-1390 (2000)
- Schreiber, G.A., Helle, N. and Bögl, K.W.: An interlaboratory trial on the identification of irradiated spices, herbs and spice-herb mixture by thermoluminescence analysis. *J. AOAC Int.*, **78**, 88-93 (1995)
- Raffi, J., Yordanov, N.D., Chabane, S., Douif, L., Gancheva, V. and Ivanova, S.: Identification of irradiation treatment of aromatic herbs, spices and fruits by electron paramagnetic resonance and thermoluminescence. *Spectrochim. Acta (A)*, **56**, 409-416 (2000)
- Delincée, H.: Detection of irradiated food: DNA fragmentation in grapefruits. *Radiat. Phys. Chem.*, **52**, 135-139 (1998)
- Merino, L. and Cerda, H.: Control of imported irradiated frozen meat and poultry using the hydrocarbon method and the DNA comet assay. *Eur. Food Res. Technol.*, **211**, 298-300 (2000)
- Lee, H.J., Byun, M.W. and Kim, K.S.: Detection of radiation-induced hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones in irradiated perilla seeds. *J. Food Protection*, **63**, 1563-1569 (2000)
- Stewart, E.M., Moore, S., Grahm, W.D., McRoberts, W.C. and Hamilton, J.T.G.: 2-Alkylcyclobutanones as markers for the detection of irradiated mango, papaya, Camembert cheese and salmon meat. *J. Sci. Food Agric.*, **80**, 121-130 (2000)
- Nawar, W.W.: Volatiles from food irradiation. *Food Rev. Int.*, **2**, 45-78 (1986)
- LeTellier, P.R. and Nawar, W.W.: 2-Alkylcyclobutanones from the radiolysis of triglycerides. *Lipids*, **7**, 75-76 (1972)
- Boyd, D.R., Crone, A.V.J., Hamilton, J.T.G. and Hand, M.V.: Synthesis, characterization and potential use of 2-dodecylcyclobutanone as a marker for irradiated chicken. *J. Agric. Food Chem.*, **39**, 789-792 (1991)
- Crone, A.V.J., Hamilton, J.T.G. and Stevenson, M.H.: 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 (1992)
- Morehouse, K.M. and Ku, Y.: Identification of irradiated foods by monitoring radiolytically produced hydrocarbons. *Radiat. Phys. Chem.*, **42**, 359-362 (1993)
- Crone, A.V.J., Hand, M.V., Hamilton, J.T.G., Sharma, N.D., Boyd, D.R. and Stevenson, M.H.: Synthesis, characterisation and use of 2-tetradecylcyclobutanone together with other cyclobutanones as markers for irradiated liquid whole egg. *J. Sci. Food Agric.*, **62**, 361-367 (1993)
- Stevenson, M.H., Crone, A.V.J. and Hamilton, J.T.G.: The use of 2-alkylcyclobutanones for the detection of irradiated lipid containing foods. In *BCR Information: Recent Advances on the Detection of Irradiated Food*, EUR/14315/EN. Commission of the European Communities, Brussels-Luxembourg, Belgium, p.333-341 (1993)
- Spiegelberg, A., Schulzki, G.M., Helle, N., Bögl, K.W. and Schreiber, G.A.: 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)

19. Meier, W., Artbo, A. and Nagëli, P. : Detection of irradiation of fat-containing foods by on-line LC-GC-MS of alkylcyclobutanones. *Mitt. Gebiere Lebensm. Hyg.*, **87**, 118-122 (1996)
20. Hartmann, M., Ammon, J. and Berg, H. : Detection of radiation-induced hydrocarbons in processed food and complex lipid matrices: A new solid phase extraction (SPE) method for detection of irradiated components in food. *Z. Lebensm. Unters. Forsch. A*, **204**, 231-236 (1997)
21. Stewart, E.M., Moore, S., McRoberts, W.C., Graham, W.D. and Hamilton, J.T.G. : 2-Alkylcyclobutanones as markers for exotic fruits. *Food Sci. Technol. Today*, **12**, 103-105 (1998)
22. Bendini, A., Toschi, T.G. and Lercker, G. : Influence of γ - irradiation and microwaves on the linear unsaturated hydrocarbon fraction in spices. *Z. Lebensm. Unters. Forsch. A*, **207**, 214-218 (1998)
23. Ndiaye, B., Jamet, G., Miesch, M., Hasselmann, C. and Marchioni, E. : 2-Alkylcyclobutanones as markers for irradiated foodstuffs II. The Cen (European Committee for Standardization) method: Field of application and limit of utilization. *Radiat. Phys. Chem.*, **55**, 437-445 (1999)
24. Kim, K.S., Kim, E.A., Lee, H.J., Yang, J.S. and Byun, M.W. : Quantitative comparison of radiation-induced hydrocarbons from irradiated beef, pork and chicken. *Korean J. Food Sci. Technol.*, **32**, 301-307 (1999)
25. Lee, H.J., Lee, M.Y. and Kim, K.S. : Detection of radiation-induced hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones from peanut. *J. Food Sci. Nutr.*, **4**, 270-275 (1999)
26. Kim, Y.K., Chung, K.N., Ishi, H. and Muraki, S. : Volatile components of pinenut. *Korean J. Food Sci. Technol.*, **18**, 105-109 (1986)
27. Schreiber, G.A., Schulzki, G., Spiegelberg, A., Helle, N. and Bögl, K.W. : Evaluation of a gas chromatographic method to identify irradiated chicken, pork and beef by detection of volatile hydrocarbons. *J. AOCS Int.*, **77**, 1202-1217 (1994)
28. Morehouse, K.M., Kiesel, M. and Ku, Y. : Identification of meat treated with ionizing radiation by capillary gas chromatographic determination of radiolytically produced hydrocarbons. *J. Agric. Food Chem.*, **41**, 758-763 (1993)
29. Nawar, W.W., Zhu, Z., Wan, H., Detroot, E., Chen, Y. and Aciukewicz, T. : Progress in the detection of irradiated foods by measurements of lipid-derived volatiles. In *Detection methods for irradiated foods-current status*, McMurray, C.H., Stewart, E.M., Gray, R. and Pearce, J. (eds.), Royal Society of Chemistry, Cambridge, p.250-258 (1996)
30. Villavicencio, A.C.H., Mancini-Filho, J., Hartmann, M., Ammon, J. and Delincée, H. : Formation of hydrocarbons in irradiated Brazilian beans: Gas chromatographic analysis to detect radiation processing. *J. Agric. Food Chem.*, **42**, 4215-4220 (1997)

(2000년 11월 29일 접수)