

# 감마선 (Co-60) 조사에 의한 진주 핵의 영향

김혜연, 민봉기<sup>1</sup>, 정우건<sup>2</sup>

경상대학교 대학원 해양생명과학과, 코리아진주감정원, 영남대학교 중앙기기센터<sup>1</sup>, 경상대학교 대학원 해양생명과학과, 해양산업연구소<sup>2</sup>

## Effects of $\gamma$ -Ray Irradiation on the Color of Pearl Nucleus

Hea-Yeon Kim, Bong-Ki Min<sup>1</sup> and Woo-Geon Jeong<sup>2</sup>

Department of Marine Biology Aquaculture, Graduate School, Gyeongsang National University Tongyeong, 650-160, Korea  
Korea Pearl Laboratory, Seoul 110-390, Korea

<sup>1</sup>Center for Research Facilities, Yeungnam University, Gyongsan 712-749, Korea

<sup>2</sup>Department of Marine Biology Aquaculture & Institute of Marine Industry, College of Marine Science, Gyeongsang National University Tongyeong, 650-160, Korea

### ABSTRACT

The effect of  $\gamma$ -ray irradiation on the color of nucleus and cultured pearls was investigated. After (<sup>60</sup>Co)  $\gamma$ -ray irradiation on the pearl nucleus, its color was altered from brownish to blackish brown or gray depending on irradiation dose. It was clearly found that the all samples are composed of aragonite. ESR spectra were based on the measurement of the paramagnetic species CO<sub>2</sub>- radicals by the interaction with the  $\gamma$ -ray irradiation in Mn<sup>2+</sup> containing CaCO<sub>3</sub>. In this study, we investigated optimal detection method of  $\gamma$ -ray irradiation to establish destructive or non-destructive test for pearl nucleus.

**Key words:** nucleus, irradiation, pearl, freshwater shell, seawater pearl, ESR, nacre, color change

### 서 론

해수산 진주는 생식소 (gonad) 에 진주 핵 (nucleus) 과 한 조각의 외투막 (mantle lobe) 세포를 이식하면 진주머니 (pearl sac) 가 생성되고 그 후 진주층을 형성하게 된다 (Kim and Park, 2008; Komathu, 1992; Wada, 1999). 이 때 사용하는 진주 핵의 소재는 일반적으로 미국 미시시피강과 테네시강에서 서식하고 있는 Three-ridge Pearly Mussel (*Amblema plicata*), Ebony Shell (*Fusconaia ebena*), Wash-board Pearly Mussel (*Megalonaias gigantea*), Pig-toe Pearly Mussel (*Fusconaia flava*), Monkey-face Pearly Mussel (*Quadrula metanerva*), Mayple-leaf Pearly Mussel (*Quadrula quadrula*) 등의 담수산 조개이다 (Akamatsu, 2003; Wada, 1999).

담수산 조개가 진주 핵의 소재로서 적합한 이유는 담수산 조개로 만든 핵의 색상이 진주광택을 갖고 있는 유백색이며, 진주층의 광택과 색상 (color) 을 자연스럽게 해주고, 진주 핵과 진주층의 경도와 밀도가 거의 같고 열 팽창율도 같아, 천공할 때 진주의 파손을 줄여주며, 패각이 두껍기 때문에 여러 가지 크기 (size) 로 만들 수 있다고 알려져 있다 (Wada, 1999).

양식된 화이트 (white) 계의 진주의 색은 화이트 (white), 크림 (cream), 옐로우 (yellow), 골드 (gold) 등 다양하다. 그 중 화이트와 골드색의 진주는 그 상태로 가공을 하여 유통이 되지만 크림색이나 밝은 옐로우의 진주들은 블루 또는 흑색의 진주로 변색시켜 유통되기도 한다. 처리 방법으로는 염색, 은염처리, 감마선 (Co-60) 등이 있다.

과거 1950년대 후반에 일본의 경우 감마선이나 중성자 등으로 방사선 조사 후 처리된 흑색의 진주를 만들어, 1960년 초반에 진주시장에 유통시킨 경우도 있었다 (Wada, 1999). 처리 방법은 감마선 (Co-60) 을 진주에 조사하면 아코야양식 진주 (*Pinctada fucata*) 나 타히티안흑양식진주 (*Pinctada margaritifera*) 등의 해수산 진주는 블루에서 회색으로 변하고, 담수양식진주에 조사하면 진한 블루 블랙으로 변색된다

Received September 19, 2011 ; Accepted September 29, 2011

Corresponding author: Hea-Yeon Kim  
Tel: +82 (2) 745-1424 e-mail: banesser@hanmail.net  
1225-3480/24401



Fig. 1. Optic color change of *Pinctada maxima* (cross section) after  $\gamma$ -irradiation.

(Wada, 1999). 현재, 아코야양식진주와 담수양식진주 일부가 방사선 조사되어 블루나 회색의 처리된 컬러의 진주로 전세계적으로 유통되고 있다.

일본에서는 Lucidoscope 장치로 진주의 가공 흠, 염색의 흔적 및 유기물의 존재 등 내부조직에 관한 정보 뿐만 아니라 진주층이 얇은 아코야양식진주의 경우 구멍을 뚫지 않은 상태에서도 진주 핵의 층 구조의 줄무늬 명암으로 방사선 조사 여부의 감별이 가능했다. 방사선이 조사된 해수산 진주의 핵은 핵의 층 구조에서 투명대는 흑화되지만 불투명대는 흑화되지 않기 때문이다. 그러나 진주층이 두꺼운 아코야양식진주나 기타 진주층이 두꺼운 진주는 Lucidoscope 장치로는 검사나 감별이 불가능하다고 전해지고 있다 (Wada, 1999).

한편, 방사선 조사식품의 검지법에 대한 연구는 1960년대 부터 시작되어, 1986년에는 과거 보고된 모든 검출기법을 검토하여 전자스핀공명법 (ESR: Electron Spin Resonance), 열발광측정법 (TL: Thermoluminescence) 을 유력한 방법으로 선정하였다. 또 다른 방사선 조사식품 검지법으로는 DNA해성분석법 (Comet assay), GC / MS 기기를 이용한 hydrocarbon법과 2-Alkylcyclobutanone법, 미생물학적 방법 (DEFT / APC법) 및 광자극발광법 (Photostimulated Luminescence, PSL) 등이 있다. 광자극발광법 (Photostimulated Luminescence, PSL) 및 열발광법 (ThermoLuminescence, TL) 은 식품에 혼입된 이물질의 광물질 발광 특성을 이용하는 분석법이다. 광물질은 방사선 조사에 의하여 에너지가 저장되고 일정온도의 적외선이나 열에 노출되면 에너지를 방출하므로 이때 방출하는 빛의 양을 측정하여 방사선 조사여부를 판정하는 방법이다 (국립수의과학검역원, 2010; 권중호, 2010; Nam and Yang, 2001; Noh and Kwon, 2003).

여러 가지 검지 방법 중 본 연구에서 다루고자 하는 감마선 (Co-60) 조사에 의한 진주 핵의 변화를 분석하는 분석기법으로는 ESR이 가장 효율적이라 사료된다. ESR 측정으로 진주 핵의 방사선 조사 여부를 정확하게 감지 가능하다고 판단되는 이유는 핵과 방사선의 상호작용의 경우 분자 결합을 붕괴시키며 자유 라디칼 (free radical) 이나 이온을 형성하고 자유 라

디칼의 신호 강도의 변화는 망간 (Mn), 철 (Fe) 과 같은 상자성 전이금속의 비율과 함유하는 탄소이온의 농도 차이를 나타내기 때문이다. 또한 매우 낮은 농도까지 (ppm level) 검출이 가능하다 (Da Costa *et al.*, 2004; Ikeya, 1993).

현재, 진주시장에서는 감마선 (Co-60) 처리 방법이 더욱 발전, 남양양식진주 (*Pinctada maxima*) 에도 조사하여 실버그레이색 (silver-gray color) 으로 변색시켜 유통하고 있다. 남양양식진주의 진주층은 일반적으로 약 1.0-3.0 mm 로 아코야양식진주의 진주층 (일반적으로 약 0.2-0.6 mm) 보다 더 두꺼우므로 현실적으로 비파괴 검사로는 감별이 불가능한 사실로 인정되고 있다 (Wada, 1999).

Fig. 1은 감마선 (Co-60) 이 조사되기 전과 조사된 후의 남양양식진주 (*Pinctada maxima*) 단면이다. 절단을 하였음에도 불구하고 0.2 kGy-1 kGy 정도 조사된 양식진주들은 육안으로는 조사여부를 명확하게 구분할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 방사선 조사에 따른 진주 핵의 영향을 최첨단 분석기기를 활용하여 분석하고자 한다. 이 분석결과를 토대로 진주의 방사선 처리 유무를 판별하는 분석기술로 진주 감별, 감정 분야의 기초자료로 활용하고자 한다. 특히 ESR로 양식진주나 진주 핵에 대한 방사선 (감마선, Co-60) 조사 여부, 영향 및 검지 방법에 대한 논문이 국내는 물론 국외에서도 전무한 상태이므로 본 논문에서 다루고자 한다.

## 재료 및 방법

본 연구에서는 감마선 (Co-60) 처리 유무에 따른 진주의 색 변화를 관찰하기 위하여, 진주 핵의 색 변화가 진주의 색 변화에 직접적으로 영향을 미치므로 진주 핵(담수산 조개)을 5가지 시료로 분류하였다. 담수산 조개로 만든 진주 핵의 크기는 약 6.0-6.5 mm 로 천연 (natural) 진주 핵 2개와 0.2 kGy (선량률  $4.0 \times 10^2$ ), 0.5 kGy (선량률  $1.0 \times 10^3$ ), 1 kGy (선량률  $2.0 \times 10^3$ ), 5 kGy (선량률  $1.0 \times 10^5$ )로 각각 조사선량 된 4종류의 진주 핵, 각각 2개씩을 분석에 사용하였다. 천연 (natural) 진주 핵을 제외한 사용 된 모든 시료는 감마선 (Co-60) 을 이용하여 방사선 조사하였다.

감마선 (Co-60) 조사선량의 차이에 따른 진주 핵의 조사 전

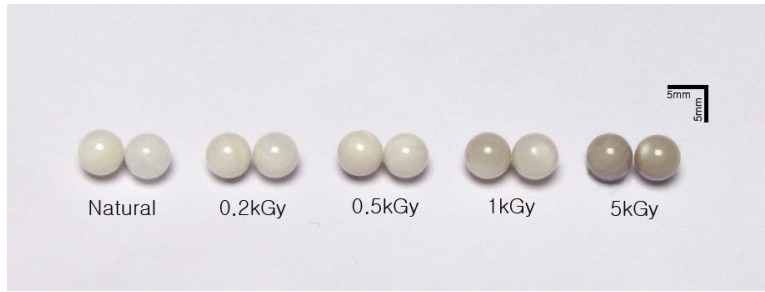


Fig. 2. Color changes of pearl nucleus after  $\gamma$ -irradiation.



Fig. 3. Optic color change of *Pinctada maxima* after  $\gamma$ -irradiation.

후의 색 변화를 측정하기 위하여 UV-Vis (Ultraviolet-visible spectroscopy, JASCO, IJY-606, Japan) 를 사용하였다. 진주 핵들은 반투명하므로 photometric mode를 reflectance %로 하고 wavelength는 260 nm-800 nm 범위의 구간으로 측정하였다. band width는 5.0 nm, scanning speed는 400 nm/min로 실온에서 비파괴로 측정하였다.

감마선 (Co-60) 조사선량의 차이에 따른 진주 핵의 상(phase identification) 을 확인하기 위하여 X-선 회절 분석기 (X-ray Diffractometer, PANalytical, X'Pert Pro MPD, Netherlands) 를 이용하였다. 이때 사용한 X-선은 Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$ ) 이었고, 10  $^\circ$ /min 의 주사속도로 2 $\theta$  가 10-90  $^\circ$  인 범위 내에서 시험하여 그 결과를 Joint Committee on Power Diffraction Standards (JCPDS) 자료와 비교하였다. 또한 정확한 X-선 실험을 진행하기 위하여 모든 시료는 막자사발을 이용하여 미분말로 만들었다. 이렇게 제작된 미세한 입자는 유리지지대 (glass-holder) 를 이용하여 모든 방향으로 균일하게 분포하도록 제작한 후 분석하였다.

감마선 (Co-60) 조사선량의 차이에 따른 라디칼의 생성 유무 확인을 위하여 ESR (Electron Spin Resonance Spectrometer: Jeol, JES-FA200, Japan) 로 확인하였다. ESR 분광기는 서로 다른 에너지의 전자 상태들 사이의 변화와 관계를 파악하는데 유용하며 또한 적은 양의 시료로 검지 가능하며 빠른 분석을 할 수 있다는 장점을 갖고 있다. X-band (9.5 GHz), power 1 mW, 중심자장 (center field) 337.764 mT, modulation frequency 100 KHz 로 실온에

서 측정하였다. 또한 막자사발을 이용, 담수산 조개로 만든 진주 핵을 분말의 상태로 만들었다.

## 결 과

### 1. 육안 관찰

감마선 (Co-60) 조사 전후의 각각의 진주 핵의 색 (color) 변화를 디지털 카메라로 관찰하여 Fig. 2에 나타내었다. 조사 선량의 차이에 따라 조사 전의 진주 핵 (natural), 조사 후의 진주 핵을 0.2 kGy, 0.5 kGy, 1 kGy, 5 kGy의 선량으로 구분하였다.

Fig. 2에서와 같이 진주 핵은 육안으로도 구분이 갈 정도로 조사선량이 증가함에 따라 갈색 (brown) 에서 흑갈색 (dark-brown) 내지는 검은 회색 (dark-gray) 으로 변화되었다. 또한 남양양식진주의 흑색도는 조사선량에 비례하여, 점차적으로 다크 실버 그레이색 (dark silver gray color)으로 변화되어 갔음을 Fig. 3에서 알 수 있었다.

### 2. UV-vis 분석 결과

감마선 (Co-60) 조사 전후의 각각의 진주 핵을 UV-vis로 가시광선 영역을 측정하여 보면 Fig. 4에서와 같다. 280 nm 에서 단백질 (protein) 에 의한 흡수가 나타났고 (Akamatsu, 2003; Matsuda & Miyoshi, 1988), 색의 변화는 선량이 증가함에 따라 비례적으로 반사도가 낮아짐을 알 수 있었다. 또한 조사선량이 증가함에 따라 360~450 nm (blue) 영역대 범위에서는 반사도가 낮아졌지만 570 nm (green) 와 700 nm (red) 영역대 범위에서는 반대로 반사도가 높아졌다. 따라

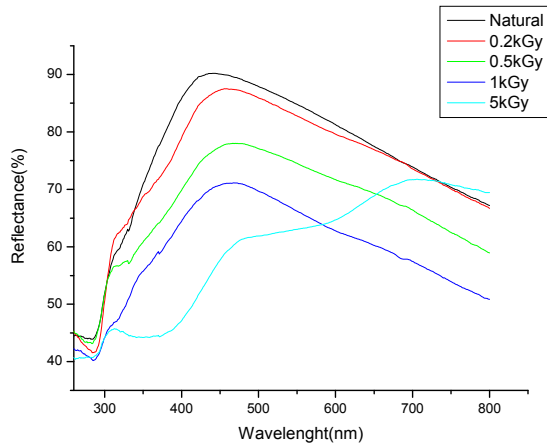


Fig. 4. Change of UV-vis spectra of pearl nucleus after  $\gamma$ -irradiation.

서 이러한 흡수, 반사 파장들이 복합적으로 작용하여 우리 눈에는 시각적으로 어두운 회색 (dark-gray) 으로 보이게 되는 것으로 사료된다.

### 3. X-선 회절 (XRD) 분석 결과

진주 핵의 주성분인 석회석 (Calcium Carbonate:  $\text{CaCO}_3$ ) 은 결정형태에 따라서 방해석 (Calcite), 아라고나이트 (Aragonite) 및 바테라이트 (Vaterite) 와 같은 동질 이상체이다. 방사선 조사선량의 차이에 따른 5종류의 진주 핵에 대한 X-선 회절 결과는 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서와 같이 모든 시료의 결정구조가 아라고나이트형 탄산칼슘 ( $\text{CaCO}_3$ : Aragonite, ICDD Card No.41-1475) 으로 분석되었다.

### 4. 전자스핀공명 (ESR) 분석 결과

감마선 (Co-60) 조사선량의 차이에 따른 5종류의 진주 핵에 대한 ESR 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서와 같이 조사되지 않은 천연 (natural) 의 진주 핵에서 대칭적인 ( $g_{\text{sym}}$ ) ESR 신호를 확인할 수 있었고, 이와는 다르게 방사선이 조사된 진주 핵에서는 특징적인 비대칭의 스펙트럼의 모양과 gyromagnetic factor ( $g$ -value:  $g_1, g_2$ ) 를 갖고 있어 천연 (natural) 진주 핵과 조사된 진주 핵의 차이를 구별할 수 있었다. 이것은 탄산칼슘 ( $\text{CaCO}_3$ ) 에서 생성된  $\text{CO}_2^-$  라디칼 (radical)로  $\text{CO}_3^{2-}$  분자 이온에서 형성 된 것이다.  $\text{CO}_2^-$  라디칼은 기타 무기성분과 결합하여  $g$ -value가  $2.002 \pm 0.001$  ( $g_1$ ) 과  $1.998 \pm 0.001$  ( $g_2$ ) 인 전형적인 비대칭 신호를 나타내어 여러 선행 연구 결과와 잘 일치하였다 (국립수의과학검역원, 2010; 권중호, 2010; 권중호 외, 2008; Noh and Kwon, 2003; Nam and Yang, 2001; 변명우 외, 2004; 식품의약품

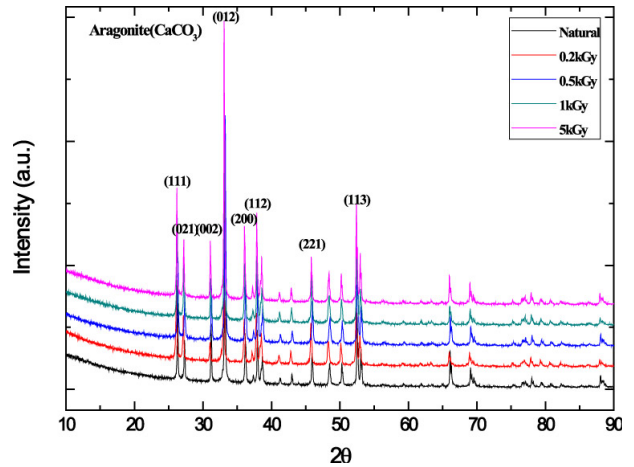


Fig. 5. X-ray diffraction spectra of powdered pearl nucleus after  $\gamma$ -irradiation.

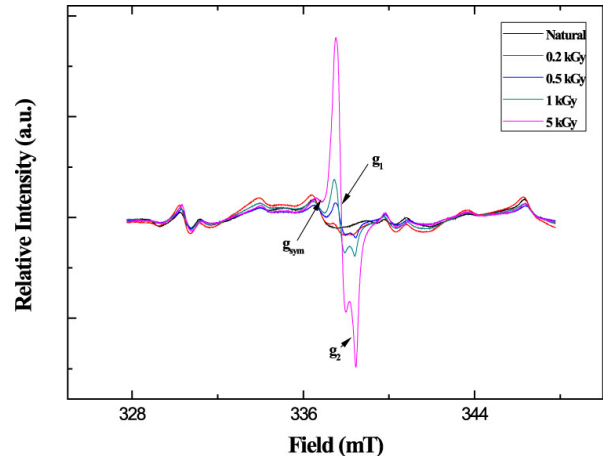


Fig. 6. X-band ESR spectra of pearl nucleus after  $\gamma$ -irradiation.

안전청, 2008). 또한 방사선 조사선량이 0.2 kGy 에서 5 kGy 로 증가할수록 비례적으로 비대칭성이 높아지는 것으로 측정되었다.

## 고 찰

감마선 (Co-60) 조사에 의한 진주 핵 (nucleus) 의 영향을 연구하였다. 방사선 조사에 따른 진주 핵의 색 (color) 변화의 원인을 규명하기 위하여 방사선 (감마선, Co-60) 처리 유무 및 조사선량의 차이에 따른 진주 핵의 변화를 관찰하였으며 다양한 분석 기자재를 이용하여 분석하였다. 방사선 조사 전후의 각각의 진주 핵의 색 (color) 변화는 육안으로도 구분이 갈 정도로 조사선량이 증가함에 따라 갈색에서 흑갈색 내지는 검은 회색 (dark-gray) 으로 변화되었다. 방사선 조사에 의한 진주의 흑화는 주로 진주 핵이 흑화되는 것으로, 진주 핵에는 망간

이 약 210-600 ppm 정도 함유하고 있기 때문에 감마선 조사 선량에 따라 흑색도가 증가하는 것이다. 진주층의 경우도 구성성분인 탄산칼슘이나 유기질이 흑변하는 것이 아니라 미량 포함하고 있는 망간의 변화에 원인이 있는 것으로 보고된 바 있다 (Wada, 1999).

Matsuda and Miyoshi (1988) 는 진주의 색과 형광에 감마선이 미치는 영향에 관한 논문에서 망간 성분을 많이 함유하고 있는 담수산 조개로 만든 진주 핵의 경우, 방사선 조사에 의하여 망간이 망간 산화물로 변하기 때문에 검은 회색으로 변한다고 보고한 바 있다. 진주 핵의 변화를 갖는 양식진주는 진주층에 존재하는 탄산망간 ( $MnCO_3$ ) 이 방사선 조사에 의하여 4, 3 산화 망간 ( $Mn_3O_4$ ), 3, 2산화망간 ( $Mn_2O_3$ ), 2산화망간 ( $MnO_2$ ) 등의 산화물로 변화하여, 진주층은 흑갈색으로 변화되는 것으로 추정하고 있다 (Wada, 1999). UV-vis 분석결과 280 nm 에서 단백질 (protein) 에 의한 흡수가 나타났고, 색의 변화는 선량이 증가함에 따라 비례적으로 반사도가 낮아지며 조사선량이 증가함에 따라 360~450 nm (blue) 영역대 범위에서는 반사도가 낮아졌지만 570 nm (green) 와 700 nm (red) 영역대 범위에서는 반대로 반사도가 높아졌는데 이것은 망간(Mn) 불순물의 영향인 것으로 선행된 연구결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 한편, Matsuda & Miyoshi (1988) 는 방사선조사 후, 진주 핵의 UV-vis peak이 420 nm 에서 440 nm 로 이동한다고 하였으나, 본 연구에서는 조사선량에 따라 430-450 nm 에서 460-480 nm 로 이동하였다.

Oh and Choi (2003) 는 양식 구형진주의 감별에 관한 연구에서 X-선 회절장치 (XRD) 를 사용하여 담수산진주와 해수진주 모두 아라곤나이트형 탄산칼슘 ( $CaCO_3$ : Aragonite) 결정구조로 되어있음을 밝혔는데 이 또한 본 연구 결과와도 일치하였다. 일반적으로 합성된 순수한 아라곤나이트는 (111) 결정면이 잘 발달되어있으나 측정된 분말에서는 (012) 결정면의 배향성이 우수한 것으로 분석되었으며 (Vongsavat *et al.*, 2006) 이것은 망간 (Mn), 철 (Fe), 마그네슘 (Mg) 등 불순물의 영향인 것으로 생각되었다. 진주를 분쇄하지 않고 직접 측정할 다른 연구자들과 유사한 측정 결과임을 확인할 수 있었다 (Oh and Choi, 2003).

Vongsavat *et al.* (2006) 는 천연 산호의 상 변화에서 결정성의 증가가 상 변화와 상관관계가 있고 그것은 불순물 등의 영향으로 격자 변화가 수반되는 것으로 보고 하였는데 그 결과도 본 연구 결과와 연관성이 있었다. 방사선 조사선량이 0.2 kGy 에서 5 kGy 로 증가해도 결정구조가 변하는 것은 관찰할 수 없었고 신호비가 높아지는 현상 즉 반가폭 (FWHM: Full Width Half Maximum) 이 작아지는 것으로 측정되어 결정성 (crystallinity) 이 높아지는 것으로 해석되었다. 또한 색

상 변화를 예상할 수 있는 어떠한 다른 형태의 피크도 발견되지 않아 망간산화물 (Manganese oxide) 로 변화되었다고 확인할 수 없었다. 다만, 방사선 조사선량이 증가 할수록 진주 핵의 구성성분인 탄산칼슘의 결정성이 높아진다는 것은 원자들의 규칙성이 우수해진다는 의미이다. 이것은 결정에서 단위포 (unit cell) 가 변하는 것이므로 진주 핵의 색 변화에 직접적으로 관계가 있음을 추측할 수 있었다.

Wencka *et al.* (2008) 은 전자스핀공명 (ESR) 을 이용하여 천연 탄산칼슘에 함유하는 다양한 상자성체 이온들인  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Zn^{2+}$  그리고  $Pb^{2+}$  들을 구별하였고 조사선량의 변화에 따른  $CO_2$  라디칼의 형태로 탄산칼슘의 결합을 분석하였다. 본 연구에서는 감마선 (Co-60) 조사선량의 차이에 따른 5종류의 진주 핵에 대한 ESR 분석 결과, 방사선이 조사되지 않은 천연의 진주 핵에서 대칭적인 ESR 신호를 확인할 수 있었고, 감마선 (Co-60) 을 조사한 진주 핵에서는 조사선량에 따라 비대칭의 스펙트럼의 모양과 g-value를 나타내어 천연 (natural) 의 진주 핵과 확연한 차이를 나타내었다. 따라서 우리 연구결과는 양식진주 및 진주 핵에 대한 방사선의 조사 여부를 판별하는 분석방법으로 ESR분석법이 적절함을 처음으로 증명하였다. 또한 본 연구에서 모든 peak에 대하여 정확한 색인 (indexing) 을 하지 않은 것은 진주 핵에는 다양한 형태의 라디칼이 혼재하기 때문이다.

진주의 색 (color) 은 진주층에 함유되어있는 단백질 색소 (pigment) 에 의하여 크림, 옐로우, 흑색 등 컬러가 결정되기도 하며, 진주 핵과 진주층 사이에 존재하는 유기물에 의하여 블루나 은회색을 나타내기도 한다. 한국의 소비자들은 유기물에 의하여 생긴 은회색의 남양양식진주를 선호하는 경향이 있다. 전술한 바처럼 감마선 (Co-60) 으로 조사된 진주의 색은 블루 내지는 은회색을 띤다. 아코야양식진주의 경우 진주층의 두께는 일반적으로 약 0.2-0.6 mm 이므로 광 투과 장치 (Komathu, 1992) 및 기타 감별기기로 비교적 쉽게, 감마선 (Co-60) 조사 여부의 감별이 가능하나 진주층이 두꺼운 남양양식진주의 경우 진주층의 두께가 일반적으로 약 1.0-3.0 mm 이므로 기존의 감별기기로는 감마선 (Co-60) 조사 여부의 감별이 어려운 것이 현 실정이다.

## 요 약

감마선 (Co-60)의 처리 유무에 따른 진주의 영향을 연구하고자 진주 핵의 색 변화를 분석하였다. 담수산 조개로 만든 진주 핵에 감마선 (Co-60) 을 조사하게 되면, 진주 핵의 색은 조사선량에 따라 갈색에서 흑갈색 내지는 검은 회색으로 변한다. 본 연구에서는 감마선 (Co-60) 을 조사하지 않은 진주 핵 2개와 선량별로 조사된 4종류의 진주 핵 8개를 분석 재료로 사용하였다. UV-vis에서는 선량별로, 육안으로 확인되는 진주 핵

의 컬러 변화 분석을 한 결과 선량이 증가함에 따라 비례적으로 반사도가 낮아짐을 확인하였고, X-선 회절분석에서는 감마선 (Co-60) 의 조사선량이 증가하여도 진주 핵의 결정구조가 변하는 것은 관찰되지 않았고 결정성 (crystallinity) 이 높아지는 것으로 측정되었다. 또한 전자스핀공명분석으로는 처음으로 진주 핵의 감마선 (Co-60) 조사여부를 증명하였다. 감마선 (Co-60) 이 조사되지 않은 천연 핵에서는 대칭적인 ESR 신호를 확인할 수 있었고, 감마선 (Co-60)이 조사된 진주 핵에서는 조사선량이 증가할수록 특징적 비대칭의 스펙트럼과 g-value를 갖고 있어 천연의 핵과 조사된 핵의 차이를 구별할 수 있었다. 또한 감마선 (Co-60) 조사선량이 증가할수록 비례적으로 비대칭성이 높아지는 것을 증명하였다. 따라서 감마선 (Co-60) 처리 유무에 따른 진주의 색 변화를 연구하기 위해서는 진주 핵의 색 변화에 대한 원인 규명 및 분석이 선행되어야 한다고 사료된다.

## REFERENCES

- Akamatsu, S. (2003) Cultured Pearl. pp. 18-135, Pearl Newspaper Company, Tokyo.
- Da Costa, Z. M., Pontuschka, W. M. and Campos, L. L. (2004) Study of the ESR signal of gamma irradiated hydroxyapatite for dose assessment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B* **218**: 283-288.
- Ikeya, M. (1993) New Applications of Electron Spin Resonance - Dating, Dosimetry and Microscopy. pp. 395-426, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.
- Kim, B.K., Lim, S.Y., Song, H.P., Yun, H.J., Kwon, J.H. and Kim, D.H. (2006) Detection Characteristics of Irradiated Aloe vera by the Analysis of PSL, TL, and ESR. *The Korean Society of Food Preservation*, **13**: 61-65.
- Kim, H.Y. and Park, J.W. (2008) UV-Vis and ED-XRF Analyses of Natural Black Colored Pearls from Freshwater Cultured shells. *Korean Journal of Malacology*, **24**: 243-251.
- Komathu, H. (1992) Pearl Identification Theory. pp. 41-63, Gemmological Association of All Japan, Tokyo.
- Matsuda, Y. and Miyoshi, T. (1988) Effects of  $\gamma$ -Ray Irradiation on Colour and Fluorescence of Pearls. *Japanese Journal of Applied Physics*, **27** (2): 235-239.
- Nam, H.S. and Yang, J.S. (2001) ESR Spectroscopy for Detecting Gamma-Irradiated Shellfishes. *The Korean Society of Food Science and Nutrition*, **30**(1): 43-47.
- Noh, J.E. and Kwon, J. H. (2003) Multistep Identification of  $\gamma$ -Irradiated Boiled-Dried Anchovies by Analysis of Thermoluminescence, Electron Spin Resonance, Hydrocarbon and 2-Alkylcyclobutanone. *The Korean Society of Food Science and Nutrition*, **32**(1): 8-14.
- Oh, J. U. and Choi, J. K. (2003) A Study on the Identification of Cultured Bead Pearls. *The Korean Society for Geosystem Engineering*, **40**(6): 389-394.
- Strzelczak, G., Vanhaelewyn, G., Stachowicz, W., Goovaerets, E., Callens F. and Michalik J. (2001) Multifrequency EPR Study of Carbonate- and Sulfate-Derived Radicals Produced by Radiation in Shells and Corallite. *RADIATION RESEARCH*, **155**: 619-624.
- Vongsavat, V., Winotai, P., Meejoo, S. (2006) Phase transitions of natural corals monitored by ESR spectroscopy. *Nuclear instruments and Methods in Physics Research, B* **243**:167-173.
- Wada, K. (1999) Science of Pearl. pp.187-254, Pearl Newspaper Company, Tokyo.
- Wencka, M., Lijewski, S. and Hoffmann, S. K. (2008) Dynamics of CO<sub>2</sub>- radiation defected in natural calcite studied by ESR, electron spin echo and electron spin relaxation. *Journal of Physics: Condensed Matter*, **20** 255237: 1-10.
- 권중호, 안재준, 이정은, 김귀란, 김동길, 김경문, 박주환. (2008) 방사선 조사식품의 ESR 검지법 적용연구. pp. 50, 식품의약품안전청, 서울
- 국립수의과학검역원. (2010) 축산물의 가공기준 및 성분규격. pp. 217-218, 국립수의과학검역원, 서울
- 권중호. (2010) 조사식품의 안전성과 이해. pp. 150-152, (사) 한국식품안전연구원, 서울
- 변명우, 이주은, 김동호, 조철훈, 김장호, 김경수. (2004) 방사선 조사식품의 검지방법 개발 및 확립. pp. 21-49, 식품의약품안전청, 서울
- 식품의약품안전청. (2008) 식품의약품안전청 고시 제 2008-51호. pp. 128-131, 식품의약품안전청, 서울