

다양한 진주조개 패각의 색상 및 광학적 특성 분석

이명진¹, 채원식², 서진교³, 박종완³

¹한양대학교 공학대학원 재료 및 화학공학과, ²한국기초과학지원연구원 강릉센터, ³한양대학교 공과대학 신소재공학부

Optical properties and color analysis of various pearl shells

Myung-Jin Lee¹, Weon-Sik Chae², Jin-Gyo Seo³ and Jong-Wan Park³

¹Department of Materials and Chemical Engineering, Graduate School of Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²Gangneung Center, Korea Basic Science Institute, Gangneung 210-702, Korea

³Department of Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

ABSTRACT

Optical properties and color analysis of nacreous layers were performed using various pearl shells. The cross section and microstructure of the surface in each nacreous layers were observed through a SEM (Scanning Electron Microscope), and the diffraction pattern on SEM images was analyzed using FFT (Fast Fourier Transform). Through these analyses, it was verified that the color and optical characteristics are closely related to the structure of nacreous layers. Incident angle-dependent reflection spectrum was used to examine the phenomena of color difference as the direction of observation. Quantified values on the color change were obtained by CIE L*a*b* color scale. Using this research, database for the characteristics of natural pearl shells can be established, and the precise analytic method for observation of pearl shells was suggested.

Key Words: pearl shells, diffraction, FFT (Fast Fourier Transform) simulation, reflectance, CIE L*a*b* color scale

서 론

연체동물 (mollusks)의 패각 형성 능력에 의한 생광물화 (bio-mineralization) 작용의 산물로써 패각 (shell) 과 패각의 진주층 (nacreous layer) 그리고 진주 (pearl) 가 생성된다 (Addadi *et al.*, 2006). 제한적인 몇몇 연체동물은 아름다운 진주질을 분비해 보석으로 이용 가치가 있는 진주를 생산하는데, 진주를 생산할 수 있으며 진주 광택과 다채로운 무지개 빛 현상 (iridescence) 을 갖는 진주조개를 보석학에서는 모페 (Mother-of-Pearl, MOP) 라 부르며 보석으로 이용한다. 서식환경에 따라 해수산과 담수산으로 나눌 수 있다. 해수산 모페의 종류로는 아코야 진주 (Akoya pearl) 를 생산하는 아코야진주조개 (*Pinctada fucata*), 남양진주 (South sea

pearl) 를 생산하는 흰진주조개 (*Pinctada maxima*), 흑진주 (black pearl) 를 생산하는 검은진주조개 (*Pinctada margaritifera*), 마베진주 (mabe pearl) 를 생산하는 마베조개 (*Pteria penguin*, *Pteria sterna*), 전복진주 (abalone blister pearl) 를 생산하는 전복 (abalone) 등이 있으며, 담수산 모페로는 대표적으로 담수진주 (freshwater pearl) 를 생산하는 담수조개 (*Hyriopsis schlegelii*, *Hyriopsis cumingii*) 가 있다 (Kim and Park, 2008). 우리나라에도 전복진주를 생산하는 참전복 (*Haliotis discus hannai*)와 아코야 진주를 생산하는 진주조개 (*Pinctada fucata*)가 모페로 양식되고 있다. 그 외 담수산 대칭이조개 (*Anodonta fucudai*) 나 펼조개 (*Anodonta woodiana*) 도 모페로 활용될 수 있으나 종묘 양산의 어려움 등으로 본격적인 진주 양식의 대상종이라 할 수 없어, 상업적으로 이용 가치가 있으며 현재 우리나라 진주업계에 유통되어 진주를 생산하는 모페는 참전복과 진주조개 둘로 분류한다 (Jang, 2002).

다양한 종류의 패각들은 영롱하고 화려한 색상의 진주층을 보유하고 있어 예로부터 장신구나 공예품, 나전, 예술작품의 소재, 생활용구 등에 널리 사용되어 왔다. 특히 전복의 패각

Received Oct 15, 2009; Revised Nov 3, 2009; Accepted Nov 30, 2009

Corresponding author: Jong-Wan Park

Tel: +82 (02) e-mail: jwpark@hanyang.ac.kr

1225-3480/24325

진주층은 자개라 하며, 그 층이 아름답게 잘 발달되어 있어 자연의 색상 그대로 사용하거나 표백, 조색, 염색 등의 처리를 행해 원하는 색상으로 가공하여 사용하기도 한다.

패류의 패각은 외투막에서 분비되는 결정체와 유기매질 물질을 주성분으로 대부분 CaCO_3 로 구성되며 미량의 Na, Ba, K 등의 무기물질과 콘치올린 (conchiolin) 으로 불리는 유기 성분, 그리고 약간의 H_2O 로 구성 되어 있다 (Wada, 1999). 무기물의 함량은 종에 따라 약간의 차이가 있으며 층과 층 사이에는 콘치올린의 유기매질이 층간기질로 존재한다. 콘치올린은 불용성 단백질로서, 패각에 포함된 유기물질의 총칭명이고 각 층마다 콘치올린의 화학조성과 구조는 다르다고 알려져 있다 (Matsushiro, 1997). 패각은 바깥쪽부터 각피층 (periostracum), 능주층 (prismatic layer), 그리고 진주층 (nacreous layer) 으로 이루어져 있으며 각 층마다 서로 다른 색상과 구조를 보인다. 이는 연체동물이 스스로의 생존률을 높이기 위해 발달시킨 기능적인 측면으로 이해될 수 있다.

모패의 진주층은 보는 각도에 따라 색이 변하며 특징적인 이리데이션스 (iridescence) 를 보인다. 모패의 진주광택의 색은 진주층의 미세구조에 의한 색과 진주층을 구성하는 화학성분, 진주층 속에 포함되는 색소성분에 의한 색, 유기물질에 의하여 발현되는 색이 서로 작용하여 나타난 결과로 알려져 있다 (Rayleigh., 1923; Snow *et al.*, 2005). 진주층의 색과 광택, 이리데이션스의 정도는 모패의 가치를 평가하는데 가장 중요한 특성이 되는데, 한가지 색으로 표현할 수 없는 모패는 감별자에 의해 색의 분류나 표현하는 명칭이 가지각색이며 주관적인 경향을 떨 수 밖에 없다. 진주의 경우 진주색의 차이를 적분구 방식 분광광도계를 사용하여 진주의 반사분광 스펙트럼을 그려 그 곡선에서 색을 표시하는 삼색계수 x, y, z를 산출하여 평면에 각색의 색도를 나타내기도 한다 (Uchida *et al.*, 1954). 하지만 패각은 그 기준을 정하는 정확한 척도가 없으며, 정량적으로 그 수치를 보고한 사례가 없다.

따라서 본 연구에서는 패각에서 나타나는 다양한 진주층의 색을 분류함에 있어 표색계 (color matrix system) 중 삼차극치 값에 의한 기존의 진주색 분류 방법과는 달리 CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) 표준규격인 $L^*a^*b^*$ 방식으로 분광반사율을 측정하고 그에 따른 스펙트럼을 얻었다. 또한 보는 각도에 따라 달라지는 진주층의 색을 비교 관찰하기 위해 진주층에 입사되는 빛의 각도를 달리하여 반사율을 측정하였다. 변각에 의한 반사율 측정은 보는 위치에 따라 다르게 보이는 색에 대한 정보를 파장대별로 세기를 나타내주고 CIE $L^*a^*b^*$ color scale은 color space라고 명명하는 3차원 공간상에서 색에 관한 정보를 수치화함으로써 파장영역에 대한 스펙트럼과 색의 상관관계를 알 수 있게 해준다 (Nassau, 2001).

다양한 모패에서 생산되는 진주의 가치는 패각 진주층의 광택과 가치에 의하여 결정된다. 패각 진주층의 퀄리티는 좋은 진주를 만들어 내는데 결정적이라 할 수 있으므로 본 연구 결과를 통하여 좋은 진주를 생산하기 위한 모패를 선별하는 작업 시 색의 선별에 도움이 될 것으로 생각된다. 본 연구를 통해 모패의 구조적, 광학적 특성에 대한 분석뿐만 아니라, 다양한 각도에서 파장대 반사율에 대한 분석이 이루어진다면, 모패 컬러의 다양성에 대한 원인과 객관적인 색차 정보를 보다 정확히 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

재료 및 측정 방법

본 실험에 사용된 모패는 우리나라 전남 해역에서 양식된 참전복 *Haliotis discus hannai* 패각과 경남 통영 해역의 아코야 진주조개 *Pinctada fucata* 패각, 타히티 조개 *Pinctada margaritifera* 패각, 오스트레일리아 *Pinctada maxima* 패각, 일본의 *Pteria penguin* 패각, 중국 주지의 담수조개 *Hyriopsis cumingii* 패각을 사용하였다 (Fig. 1).

각 패각의 표면은 오염물질을 제거하기 위해 5%의 수산화나트륨 용액에 5시간 담근 후 증류수로 세척하고 초음파 세척기에 1분 동안 세척하였다. 샘플들의 크기는 2 cm x 2 cm 크

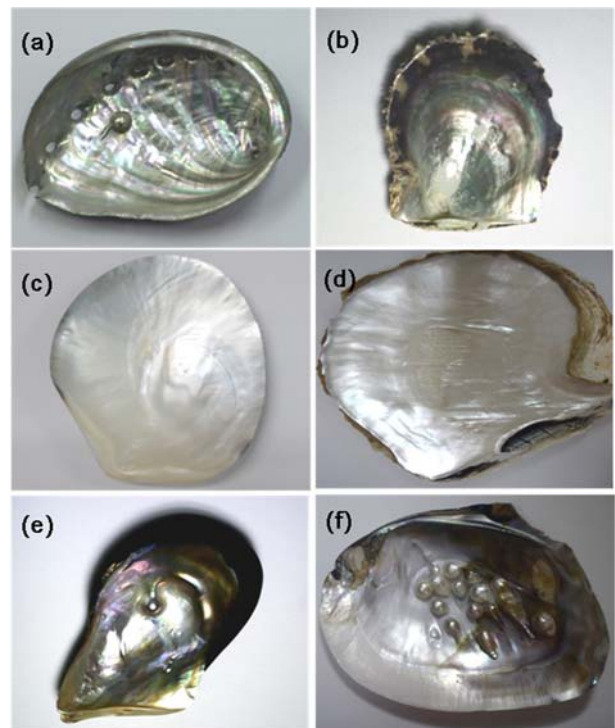


Fig 1. Various mother-of-pearls; (a) *Haliotis discus hannai*, (b) *Pinctada fucata*, (c) *Pinctada margaritifera*, (d) *Pinctada maxima*, (e) *Pteria penguin*, (f) *Hyriopsis cumingii*

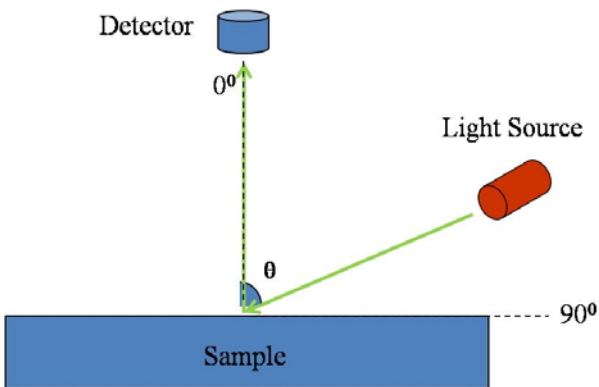


Fig 2. Schematic of incident angle-dependent detection.

기로 절단하였으며, 측정의 오차를 줄이기 위하여 패각의 여러 곳을 임의 채취하여 샘플로 사용하였다. 패각의 이미지는 10 kV 전압의 Hitachi SU-70 FE-SEM 현미경으로 관찰했다. 촬영된 SEM 이미지를 이용하여 광학적인 현상을 규명하기 위하여 FFT (Fast Fourier Transform) 방법을 사용하여 회절패턴을 관찰하였고, SEM 이미지와 FFT 방법에 의한 시물레이션 결과를 분석하였다. 패각의 파장에 대한 각도별 반사율 측정을 위해서 분광측색계 (Spectrum-photometer) 를 사용하였다. 모델명 CM-512m3 (Fig. 2) 인 이 장비는 25, 45, 75의 각도에서 샘플에 조사한 빛을 0도 방향에서 수광하여 측정하는 장비로서, 광원은 시계 방향으로 25, 45, 75에서 샘플로 입사 되며, 반사하는 빛은 0방향에서 Detector로 측정된다.

결 과

1. SEM 이미지와 FFT 결과

모패별 진주층을 SEM 으로 촬영하여 본 결과, 작은 아라고나이트 결정들이 콘치올린 단백질과 서로 연결되어 구성된 다결정집합체로서 층상 배열을 하고 있음을 확인하였다. 층과 층 사이에는 두께 20 nm이하의 콘치올린이 층간기질로 작용하여 아라고나이트 결정들을 접착시키는 역할을 하고 있었다. 차이를 보이는 것은 일매패와 이매패에 따른 층상배열이다. 패각이 소라나 전복처럼 단각인 경우를 일매패라 하고 패각이 두장인 경우 이매패라 하는데 실험에 사용된 샘플은 참전복 (*H. discus hannai*) 이 일매패이고 나머지 조개류 (*Pinctada fucata*, *Pinctada margaritifera*, *Pinctada maxima*, *Pteria penguin*, *Hyriopsis cumingii*) 가 이매패이다.

Fig. 3은 참전복과 아코야 진주조개 패각 단면의 SEM 이미지와 FFT결과를 보여준다. 진주층의 아라고나이트 결정들이 아코야 진주조개는 지그재그 모양으로 겹쳐 쌓여져 있지만 (Fig. 3-c) 참전복의 경우, 이매패와 다른 일매패만의 특징인 아라고나이트 판조결정들이 수평의 막판으로 일렬로 배열되어

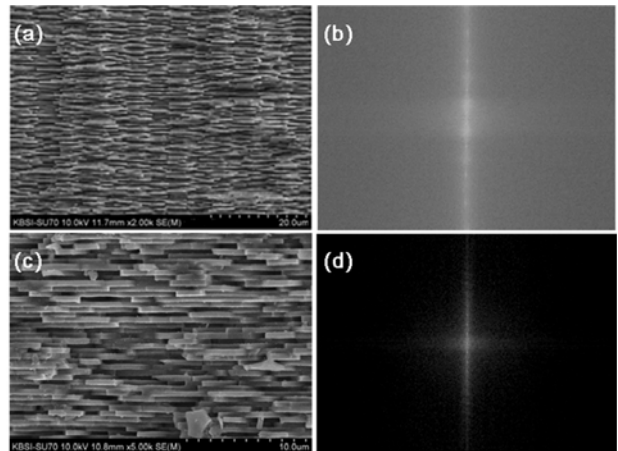


Fig 3. SEM images and FFT results of the cross-section of *Haliotis discus hannai* and *Pinctada fucata* (a) SEM image for the cross-section of *Haliotis discus hannai*, (b) FFT results for the cross-section of *Haliotis discus hannai*, (c) SEM image for the cross-section of *Pinctada fucata*, (d) FFT results for the cross-section of *Pinctada fucata*.

있고, 수직방향으로는 일정한 규칙을 띤 배열을 하고 있다 (Fig. 3-a).

아라고나이트 결정층 한 장의 두께는 참전복이 평균 $0.367 \mu\text{m}$, 아코야 진주조개 $0.475 \mu\text{m}$, 검은 진주조개 $0.450 \mu\text{m}$, 흰 진주조개 $0.410 \mu\text{m}$, 마베조개 $0.350 \mu\text{m}$, 담수조개 $1.133 \mu\text{m}$ 로 대부분 가시광 파장 정도의 결정층을 형성하고 있다. 진주층을 이루는 아라고나이트 결정은 조개의 종류별로 두께에 차이가 있었고, 배열과 구조는 일매패와 이매패 별로 전형적인 특성을 보였다.

이매패의 경우, 진주층의 두께의 차이가 있지만 배열과 구조가 거의 유사하므로 본 논문에서는 아코야 진주조개 (*P. fucata*) 의 결과만 첨부한다.

Fig. 4는 참전복 패각의 표면 이미지를 나타낸다. 진주층 표면 또한 일매패와 이매패 사이에 차이를 보이는데 Fig. 4-a의 참전복 패각 표면은 진주층을 구성하는 결정들이 층들의 더미 (stacks) 로 수직방향의 원추형인 피라미드 형태로 쌓여있다. 단면의 이미지에서도 확인한 바와 같이 일매패의 특성상 그 층이 수직으로 일정한 규칙을 띤 주상 형태로 나타나는 것을 확인 하였다. 피라미드상 돌기는 정상에서 결정이 추가되는 개수를 증가시켜 각 단의 결정이 병렬방향으로 성장 발달 한다고 보고되어 있다 (Kim et al., 2008).

Fig. 4-b에서 보여지는 진주층 표면은 육각형 모양의 아라고나이트 결정들이 판을 이루고, 부분적으로 다른 층들과 겹쳐져서 계단과 같은 패턴을 형성하고 있음이 관찰되었다. 굴곡이 있는 줄무늬가 짧고, 굽은 간격으로 있고 이러한 간격의 편차는 매우 심하였다. 계단구조와 줄무늬는 모든 이매패 조개에서

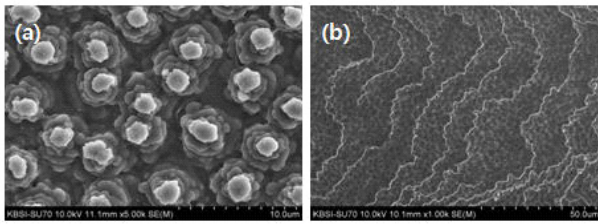


Fig 4. SEM images of the surface of *Haliotis discus hannai* and *Pinctada fucata* (a) SEM image for the surface of *Haliotis discus hannai*, (b) SEM image for the surface of *Pinctada fucata*.

공통적으로 보여지는 구조임을 확인하였다.

FFT는 Fast Fourier Transform의 약자로서 광학계에서 발생하는 푸리에 변환을 광학 시뮬레이션으로 계산하는 알고리즘이다. 공간적인 분포에 대해서 시간적인 분포를 가지는 것으로 전환해줌으로써 이로 인해 생기는 이미지를 이론적으로 계산할 수가 있다 (Jo *et al.*, 2006).

Fig. 3-b와 Fig. 3-d는 Fig. 3-a와 Fig. 3-c의 참전복 패각 및 아코야진주조개 단면의 SEM이미지로부터 계산된 광학적인 시뮬레이션 결과를 보여주며, 이를 통해 우리는 일정한 패턴의 FFT회절 이미지를 얻을 수 있었다. 참전복과 아코야진주조개 패각의 진주층 단면은 가시광파장 두께의 아라고나이트 결정이 겹쳐 쌓여진 다층 구조로 공간적인 회절격자를 형성하고 있으며, 이러한 구조에 의해 빛이 일정한 간격으로 회절되어 1차원적인 회절 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

이전 연구에 의하면 *Haliotis glabra* 의 패각 표면의 패인 홈 구조에 의해 이리데이션스가 유발된다 (Tan *et al.*, 2004) 고 하였다. 또 다른 연구에서는 *Haliotis rufescence* 진주층을 이루고 있는 아라고나이트 결정들의 배열 때문에 이리데이션스가 발생한다 (Liu., 2002) 는 주장이 있으나, 우리가 측정 한 모든 패각의 표면 FFT 결과는 표면의 회절현상을 입증할 회절 이미지를 얻을 수 없었다. 일정한 두께와 일정한 간격으로 층상을 이루고 있는 패각 단면의 구조가 패각 표면에서 보이는 컬러를 형성하는 원인이 됨을 알 수 있었다.

FFT회절이미지를 통해 우리는 패각 모두 아라고나이트가 배열된 구조적 특성에 의해 빛의 회절의 가능성을 확인하였다. 또한 이리데이션스는 빛이 패각의 표면에 입사되었을 때, 반사나 회절을 일으킴으로 나타나며 조개의 종류, 진주층의 두께, 진주층 조직의 배열과도 밀접한 관련이 있는 것을 확인하였다. 즉, 진주층의 색은 진주층을 구성하고 있는 성분, 아라고나이트의 결정구조, 빛의 회절이 복합적으로 작용하여 나타나는 현상이라 할 수 있다.

2. CIE L*a*b* color scale

CIE L*a*b* color scale은 컬러에 대한 정보를 수치화해서 나타내는 분석법으로, 측정 대상의 컬러에 대한 정량적인 분석을 하는데 매우 유용하게 사용된다.

L*축은 최대값 100부터 0까지의 범위를 가지며 100은 흰색, 0은 검은색을 나타낸다. a*축은 양의 방향으로 붉은색을 음의 방향으로 녹색의 경향을 나타내며, b*축은 양의 방향

Table. 1 CIE L*a*b* color scale for surface of various mother-of-pearls

| Mother of pearl | Degree | CIE L*a*b* color | | |
|-------------------------|-----------|------------------|---------|---------|
| | | L*(D65) | a*(D65) | b*(D65) |
| <i>H. discus hannai</i> | 25 Degree | 91.18 | 16.89 | 0.4 |
| | 45 Degree | 62.88 | 5.54 | 3.34 |
| | 75 Degree | 46.64 | 2.67 | 4.83 |
| <i>P. fucata</i> | 25 Degree | 95.94 | -0.94 | -0.98 |
| | 45 Degree | 61.53 | 0.02 | 1.72 |
| | 75 Degree | 52.95 | -1.22 | 1.07 |
| <i>P. margaritifera</i> | 25 Degree | 96.40 | -0.81 | 0.87 |
| | 45 Degree | 68.45 | -0.85 | -0.67 |
| | 75 Degree | 55.57 | -1.13 | 1.38 |
| <i>P. maxima</i> | 25 Degree | 98.38 | -1.02 | -2.07 |
| | 45 Degree | 70.88 | -0.98 | -0.75 |
| | 75 Degree | 62.11 | -1.91 | -1.38 |
| <i>P. penguin</i> | 25 Degree | 100.00 | -11.86 | 3.68 |
| | 45 Degree | 64.33 | 1.08 | 3.12 |
| | 75 Degree | 51.32 | -0.96 | -1.77 |
| <i>H. cumingii</i> | 25 Degree | 91.84 | -0.52 | 6.22 |
| | 45 Degree | 88.89 | -0.95 | 5.39 |
| | 75 Degree | 88.09 | -1.41 | 5.07 |

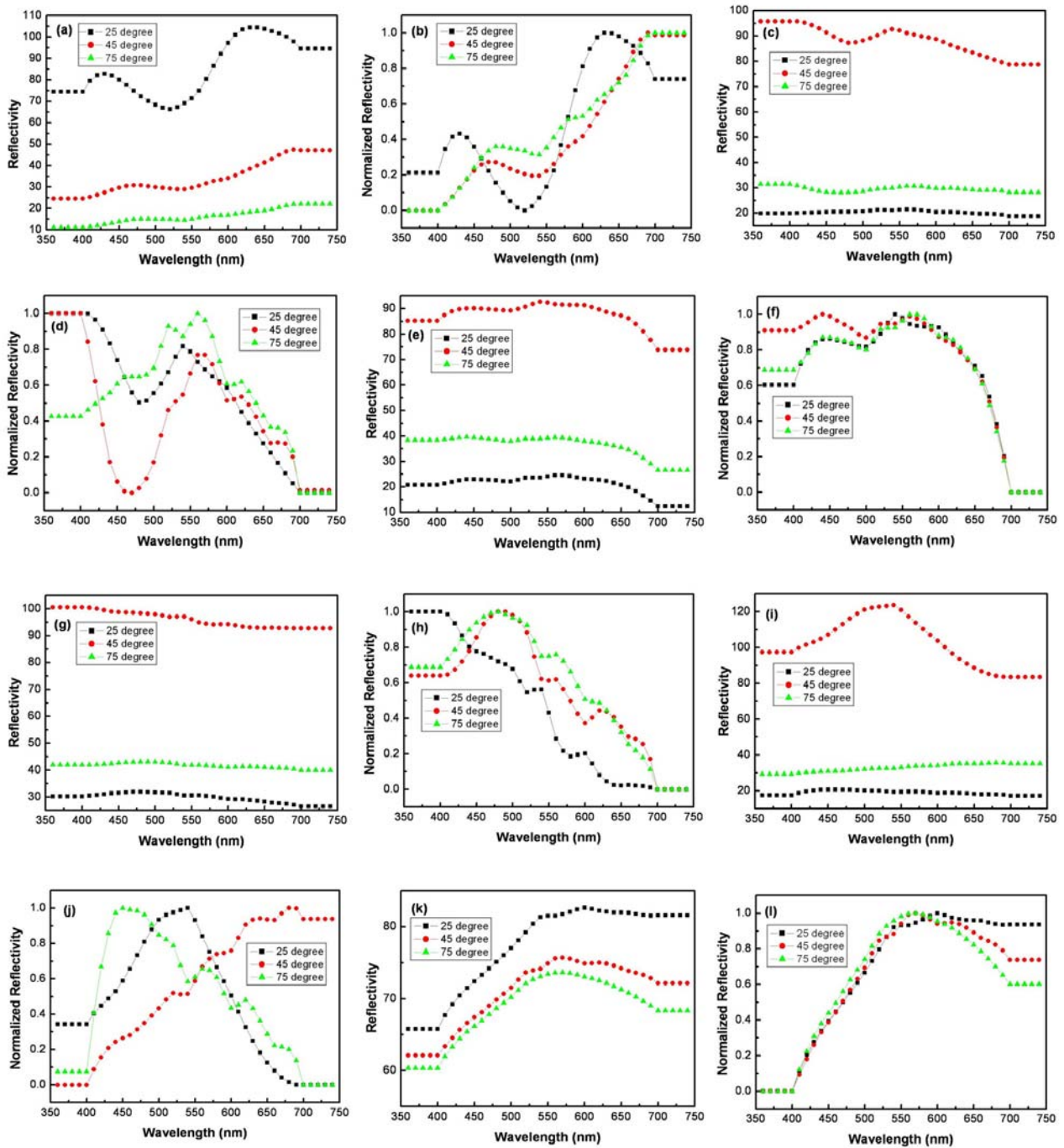


Fig 5. Reflectivity for various incident angles of light on each mother-of-pearl; (a) absolute value for each angle of *Haliotis discus hannai*, (b) relative value for each angle of *Haliotis discus hannai*, (c) absolute value for each angle of *Pinctada fucata*, (d) relative value for each angle of *Pinctada fucata*, (e) absolute value for each angle of *Pinctada margaritifera*, (f) relative value for each angle of *Pinctada margaritifera*, (g) absolute value for each angle of *Pinctada maxima*, (h) relative value for each angle of *Pinctada maxima*, (i) absolute value for each angle of *Pteria penguin*, (j) relative value for each angle of *Pteria penguin*, (k) absolute value for each angle of *Hyriopsis cumingii*, (l) relative value for each angle of *Hyriopsis cumingii*.

으로는 황색과 음의 방향으로 청색의 경향을 나타낸다. 즉, L*축은 명도에 대한 정보를 제공하며, a*축과, b*축은 색깔의 경향성에 대한 정보를 제공한다. 본 연구에서 우리는 CIE L*a*b* color scale 분석 기법을 통해 다양한 모패들의 수치를 비교 분석해보았다. Table 1은 다양한 모패들의 CIE L*a*b* color scale을 나타낸 표이다.

Table 1에서 보는 바와 같이 참전복 패각과 아코야진주조개 패각의 경우 두 패각의 명도는 큰 차이 없이 비슷함을 확인할 수가 있다. 즉, 매우 밝은 경향을 띤다. a*값은 참전복 패각이 매우 큰 양의 값을 가지므로 적색이 상당히 강한 것으로 측정되었고, 아코야진주조개 패각은 근사적으로 '0'의 값을 가지므로 적색과 녹색의 중간적인 성향을 띤 것을 알 수가 있다. 참전복 패각의 진주층은 각도가 증가함에 따라서 a*값이 감소하며 이것은 큰 각도에서 패각을 봤을 때는 적색의 경향이 매우 약해짐을 확인할 수가 있다. b*값은 두 가지 패각이 각도가 증가함에 따라서 황색의 경향을 띤게 되나, 전체적으로 참전복 패각이 아코야진주조개 패각 보다 황색의 경향성이 더 강함을 확인할 수가 있다. 그러나 아코야진주조개 패각은 각도가 증가함에 따라 b*값이 큰 변화를 보이지 않는 것으로 보아서 각도에 따른 의존성이 다소나마 약한 것으로 판단된다. 참전복패각은 매우 밝은 명도를 가지며 (최대값 100에 근사), 적색의 경향을 띤 모패임을 알 수가 있다. 각도에 따라서 적색은 얼어지지만, 황색은 큰 차이가 없는 특성을 가진다. 아코야진주조개 패각 역시 매우 밝은 명도를 가지며, 어떤 특정한 색깔이 두드러지기 보다는 각 색깔이 적정한 조합에 의한 색깔이 나타남을 알 수가 있다. 타히티의 *P. margaritifera* 패각은 녹색의 경향을 띤 모패이며, 각도에 따라서 황색과 청색의 경향이 바뀌는 것을 확인할 수 있었다. 오스트레일리아의 *P. maxima* 패각의 경우 색깔의 경향성은 각도에 따라서 큰 변화가 없고 전체적으로 약한 녹색과 청색의 경향을 띤 것을 알 수가 있었다. 일본의 *P. penguin* 패각은 L*값이 100.00으로 최대값을 가지며 다른 모패에 비해서 가장 밝은 모패임을 확인할 수 있었다. 또한 각도가 증가함에 따라 a*값과 b*값의 변화가 크게 나타났다. 중국 주지의 담수조개 *H. cumingii* 패각은 값들이 각도에 따라서 큰 변화가 없었다. 즉, 다양한 각도에서 모패를 관찰했을 때의 명도는 색깔의 경향성의 변화가 적다는 것을 확인할 수 있었다. 명도는 각도가 커짐에도 매우 밝으며, 전체적으로 녹색과 황색의 경향을 다소 띤 모패임을 알 수가 있었다.

3. 파장대 반사율 스펙트럼

우리는 패각의 진주층이 이리데이션 효과를 내는데 어떤 역할을 하는지 광학적으로 관찰 하기 위해 빛을 25, 45, 75 의 각도로 변각하여 입사시키면서 스펙트럼 반사율을 측정하였다. Fig. 5는 각 패각의 다양한 빛의 입사각 대비 반사율을 측정한

결과이다. 각 패각의 파장대 반사율은 분광측색계를 사용하여, 25, 45, 75의 각도에 대해서 반사되는 빛의 파장을 측정하여 분석함으로써 패각의 컬러에 대해서 정량화된 결과를 얻었다. 왼쪽 그래프는 빛의 세기를 보여주는 그래프이고 오른쪽의 그래프는 상대적인 비교를 위해 입사각에 따른 반사율을 규격화 하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 모든 패각의 반사율은 25가 45, 75에서 측정된 값에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 이는 CIE L*a*b* color scale 분석에서 나타난 L (명도)의 결과와도 일치한다. 참전복 패각의 경우, 전체적으로 장파장으로 갈수록 반사율이 증가하였고, 630 nm 부근에서 가장 높은 반사율을 나타내었다 (Fig. 5-a). 따라서 적색계열의 특징적인 컬러를 나타내는 것을 알 수가 있다. 입사각 25는 420 nm, 630 nm에서, 45는 470 nm와 690 nm에서 최대 반사율을 가지며, 75는 490 nm와 700 nm 부근에서 최대반사율을 나타내었다.

파장대별 컬러를 살펴보면, 420 nm는 청색을 띤 자색, 630 nm는 황색을 띤 적색, 470 nm는 청색, 690 nm는 적색, 490 nm는 청록색, 700 nm는 적색의 컬러를 나타낸다. 본 연구에서 측정한 반사율 스펙트럼에 의하면 참전복의 패각 진주층은 전체적으로 녹색을 띤 특징적으로 주황색에서 자색의 컬러를 보임을 알 수가 있는데, 이는 실제 눈으로 관측한 컬러와도 일치하는 결과를 나타낸다.

아코야 진주조개의 패각의 경우, 단파장 (370 nm) 영역에서 가장 높은 반사율을 나타내었다 (Fig. 5-c). 입사각 25는 360-400 nm, 540 nm에서 각각 최대의 반사율을 나타내었고, 45는 360-400 nm, 560-570 nm부근에서 75는 520 nm, 560 nm부근에서 최대의 반사율을 나타내었다. 파장대별 컬러의 특성에서 360-400 nm는 청색을 띤 자색, 540 nm는 황록을 띤 녹색, 520 nm는 녹색, 560 nm는 황록색, 560-570 nm는 황록을 띤 녹색 띤 황색의 컬러를 나타낸다. 따라서, 아코야 진주조개 패각은 전체적으로 청색을 띤 자색을 가지며, 큰 각도에서는 녹색계열의 컬러가 강하게 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 5-e는 타히티산 *P. margaritifera* 패각의 파장대 반사율을 나타내는 그래프이다. Fig. 5-e에서 보는 바와 같이 *P. margaritifera* 패각은 620 nm이상의 장파장으로 갈수록 반사율이 낮아져서 적색계열의 파장 영역에서는 반사율이 매우 낮아지는 것을 확인하였다. 입사각 25는 540 nm부근에서 반사율 최대값을 가지며, 45는 440 nm부근, 75는 560 nm부근에서 반사율 최대값을 나타내었다. 440 nm는 자색을 띤 청색, 540 nm는 황록을 띤 녹색, 560 nm는 황록색을 나타낸다. 따라서 타히티산 *P. margaritifera* 패각은 전체적으로 황록색의 색깔을 가진다.

Fig. 5-g는 오스트레일리아의 *P. maxima* 패각의 파장대 반

사율에 대한 그래프이다. 입사각25는 360-400 nm부근, 45는 480-490 nm부근, 75는 480 nm부근에서 반사율 최대값을 나타내었다. 360-400 nm는 청색을 띤 자색, 480-490 nm는 녹색을 띤 청색, 480 nm는 청색의 컬러를 나타낸다. 따라서, 오스트레일리아의 *P. maxima* 패각은 전체적으로 청색을 띤 자색의 컬러를 나타내며, 빛의 입사 각도가 증가함에 따라 녹색이 약간씩 강해지는 경향을 보인다.

Fig. 5-i는 일본의 *P. penguin* 패각의 파장대 반사율을 나타낸 그래프이다. 오스트레일리아의 *P. maxima* 패각과 마찬가지로 빛의 큰 입사각에서의 특징적인 색깔의 경향성을 약함을 알 수가 있다. 입사각25는 540 nm부근, 45는 680 nm부근, 75는 450 nm부근에서 반사율의 최대값을 나타내었다. 450 nm는 자색을 띤 청색, 540 nm는 황록을 띤 녹색, 680 nm는 적색을 나타내므로 일본의 *P. penguin* 패각은 전체적으로 황록을 띤 녹색을 나타내며, 빛의 입사각이 큰 경우에는 적색계열이 강해지는 경향을 보인다.

Fig. 5-k는 중국 주지의 *H. cumingii* 패각의 파장대 반사율을 나타낸 그래프이다. 입사각25는 600 nm부근, 45와 75는 570 nm부근에서 반사율 최대값을 나타내었다. 또한 전체적으로 장파장 (500 nm 이상) 영역에서의 반사율이 높은 것으로 나타났다. 600 nm는 황색을 띤 적색, 570 nm는 녹색을 띤 황색을 나타내므로 중국 주지의 *H. cumingii* 패각은 전체적으로 녹색을 띤 황색의 컬러를 나타내며, 빛의 입사각이 증가함에 따라 적색의 컬러가 열게 나타남을 알 수 있었다. 특히 하게 *H. cumingii* 패각의 경우 다른 패각의 특성과는 달리 다양한 입사각에서 파장대 반사율의 변화가 크게 나타나지 않았다. 단지 높은 입사각에서 600 nm이상의 파장대 반사율이 다소 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 *H. cumingii* 패각은 빛의 입사 각도에 대한 반사율의 의존성이 다소 적음을 알 수 있었다.

고 찰

진주를 생성하는 모패의 아름다운 진주층은 해수의 다양한 무기물질과 동물에 의해 분비되는 유기물질의 복합작용으로 만들어진다. 생물기원을 살펴보면, 그 구성원소가 대다수 탄산칼슘으로 이루어져있지만 진주층에서 나타나는 컬러는 매우 다양하므로, 그 컬러를 연구하는데 있어 보다 세밀한 관점에서 논의할 필요가 있다. 패각의 진주층과 그 진주층에서 생성된 진주의 컬러나 광택, 그리고 무지개빛 현상을 나타내게 하는 이리데이션은 생물학적 특성이 단백질 색소나 유기물질, 이물질뿐만 아니라 빛의 회절, 아라곤나이트결정 구조의 형태 등으로 인해 그 원인이 다양해 질 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 모패의 컬러 및 광학적 특성과 이리데이션의 상관관계를 고찰하고자 다양한 분석 방법을 통하여 비교 분석

하였다.

모패의 구성 성분과 미세 구조에 대하여 논하였고, 모패 진주층의 단면 및 표면의 SEM 이미지를 관찰하였다. 본 연구에서 측정된 SEM 이미지를 통해 패각의 단면은 일정한 주기 구조를 띄고 있음을 확인하였고, 이러한 주기 구조가 빛이 입사해서 반사하는 경우에 패각의 다양한 광학적 현상을 이끌어낼 수 있음을 유추해 볼 수가 있었다. 이를 확인하고자 측정된 SEM 이미지를 FFT 방법을 사용하여 시뮬레이션을 하였고, 그 결과 예상했던 것과 같이 회절현상이 명확히 일어남을 확인할 수 있었다. 또한 패각에서 발생하는 다양한 광학적 현상의 원인이 패각의 진주층을 형성하고 있는 아라곤나이트 형태의 일정한 결정구조들에 의한 것도 확인할 수 있었다.

다양한 모패의 광학적 특성을 비교분석하기 위해 참전복 패각과 아코야진주조개 패각을 포함한 총 여섯 종류 패각의 파장대 반사율 스펙트럼을 측정하였고, 보는 각도에 따라서 패각의 진주층 색깔이 다른 원인을 분석하고자 패각에 입사하는 빛의 각도를 달리하여 변각에 대한 스펙트럼을 측정하였다. 그 결과 사람의 인지에 의한 측정과 실제의 측정 사이에서 명도와 컬러가 다소 다르게 나타남을 확인할 수 있었고, 측정을 통해서 그 수치를 정량적으로 나타낼 수 있었다. 또한, 진주층의 색을 분류함에 있어 표색계 중 삼자극치 값에 의한 기존의 진주 분류 방법과는 다른 CIE L*a*b* color scale 분석기법을 통하여 모패의 컬러에 대한 보다 정확하고 정량적인 수치화 또한 가능함을 확인하였다.

정리하자면, 패각의 컬러를 분석함에 있어 생물학적, 화학적인 특성뿐만 아니라, 기존에 보고 된 간섭현상뿐만 아니라 회절현상까지 고려해야 함을 알 수가 있었고, 모패의 컬러와 품질에 대한 개인의 주관적인 느낌 (심리적인 색감) 으로 서술했던 것을 변각에 대한 반사율 스펙트럼과 CIE L*a*b* color scale의 색의 수치화를 통해서 정량적으로 분석이 가능함을 알 수 있었다. 그리고, 패각의 컬러와 품질을 결정함에 있어 각도에 대한 의존성은 반드시 고려해야 함을 확인할 수 있었다.

끝으로 본 실험에서 모패의 정량적인 분석을 통해 나온 결과는 모패 뿐만 아니라 모패에 의해서 생성되는 진주를 감별함에 있어서도 상당히 유용할 것으로 판단된다. 시중에 유통되는 모패들은 자연의 상태 그대로 사용하기도 하지만, 염료를 사용하여 색상을 칠하는 방법, 더욱 밝고 깨끗한 색상이 나타나도록 화공약품으로 표백을 하는 방법 등으로 처리를 하기도 하고 두께가 두꺼운 모패의 진주층은 구형으로 연마하여 염색한 후 저가의 모조진주로 사용하기도 한다 (Yun, 2007). 이렇게 가공된 모패들을 구별함에 있어, 자연의 상태에 대한 정량적이고 정확한 데이터가 확보될 수 있기 때문에 궁극으로 모패 감별 전반에 관한 기초적인 자료가 될 수 있을 것이다. 끝으로

모페의 정량적인 분석을 통해 나온 결과는 모페 뿐만 아니라 모페에 의해서 생성되는 진주의 색을 감별함에 있어서도 상당히 유용할 것으로 판단된다. 나아가 진주와 밀접한 상관관계를 갖는 모페에 관한 연구는 진주에 대한 연구와 더불어 꾸준히 연구되어야 할 것이다.

요 약

본 연구에서 우리는 다양한 종류의 패각을 사용하여 진주 패각에서 나타나는 컬러 및 광학적 현상에 대해 비교 분석하였다. 다양한 종류의 패각의 진주층 단면 및 표면 SEM 이미지와 FFT 시뮬레이션을 수행했다. 그리고 반사율 측정을 통하여 패각에서 나타나는 광학적 현상에 대해 규명하고 패각의 광학적 현상에 의해 모페를 감별하기 위한 데이터를 구축하였다. 또한 패각의 진주층 구조에 기인한 회절현상을 바탕으로 하여 여러 각도의 분광반사율을 측정해서 보는 각도에 따라 패각의 색이 달라지는 현상에 대해 분석하였다.

References

- Addadi, L., Joester, D., Nudelman, F., Weiner, S. (2006) Mollusk shell formation: a source of new concepts for understanding biomineralization processes. *Chemistry European Journal* **12**: 980-987.
- Kim, H.Y., and Park, J.W. (2008) UV-Vis and ED-XRF Analysis of Natural Black Colored Pearls from Freshwater Cultured Shells. *The Korean Journal of Malacology*, **24**(3): 243-251.
- Jang, S.N. (2002) Shellfish Culture. pp. 218, Sam-Kwang Publishing Company, Seoul.
- Wada, K.J. (1999) Science of Pearl. pp. 123-124, Pearl Newspaper Company, Tokyo.
- Matsushiro, A. (1997) Molecular biology of the Pearl: Creature Science Heredity, pp. 61-66 NTS Publishing Company, Tokyo.
- Rayleigh, F. (1923) Studies of iridescent color and the structure producing it. II. Mother of pearl. Royal Society of London Proceedings. A (102): 673-677
- Snow, M. R. and Pring, A. (2005) The mineralogical microstructure of shells: The iridescence colors of abalone shells. *American Mineralogist*, **90**(11): 1705-1711.
- Uchida, Y., Togi, S. and Hirai, M. (1954) Measurement of color of the pearl by the spectrophotometer. *Applied Physics*, **23**: 469-474.
- Nassau, K. (2001) The physics and chemistry of color: the fifteen causes of color. 2nd edition pp. 19-20, A Wiley-Interscience Publication. Danvers.
- Kim, H.Y., Lee, D.I., Park, J.Y., and Shim, K.B. (2008) Structural characteristics of non-nucleus Abalone half pearl cultured by a new technique. *Journal of the Korean crystal growth and crystal technology*, **18**(2): 60.
- Jo, J.H., Lee, M.H., Yim, C.S., Kim, S.W., Lee, Y.S., Kwon, I.B., and Lee, J.C. (2006) Introduction to modern photonics pp.132-135 Cheong-Mun-Gak Publishing company. Paju.
- Tan, T.L., Wong, D., and Lee, P. (2004) Iridescence of a shell of mollusk *Haliotis glabra*. *Optics Express*, **12**(20): 4847-4854.
- Liu, Y. (2002) Iridescence color of shells. 9th Congress of the International Color Association. **4421**: 364-368.
- Yun, C.J. and Kim, S.H. (2007) Organic gems and analysis. pp. 180-181, Ju-son Media Publishing Company. Seoul.