

## 제주도 우도의 홍조단괴 해변 퇴적물의 특징과 형성조건: 예비연구 결과

김진경<sup>1\*</sup> · 우경식<sup>1</sup> · 강순석<sup>2</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지질학과, <sup>2</sup>제주도 민속자연사박물관

### Characteristics and Formation conditions of the Rhodoliths in Wu Island beach, Jeju-do, Korea: Preliminary Report

JIN KYOUNG KIM<sup>1\*</sup>, KYUNG SIK WOO<sup>1</sup> AND SOON-SEOK KANG<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

<sup>2</sup>Jeju-Do Folklore and Natural History Museum, Jeju 690-834, Korea

제주도 북제주군 우도의 서쪽에 분포하는 서광리 해안에는 3개의 해변이 발달해 있으며, 이 해변들에는 모두 홍조단괴로만 이루어져 있는 해변퇴적물이 분포한다. 해변을 이루는 홍조단괴 퇴적물은 조립 샌드에서 그레놀로 입자의 크기에 따라 해변과 평행한 방향으로 대상분포하고 있으며, 해안가의 암반 사이와 해변의 북쪽에 위치하는 방파제에는 자갈 크기의 홍조단괴가 밀집되어 퇴적되어 있다. 이는 서광리 앞의 천해에서 성장하던 홍조단괴가 태풍에 의해 해안가로 운반되었기 때문으로 생각된다. 홍조단괴를 이루는 홍조류에 대한 조직적 관찰 결과, 대부분의 홍조류는 덮개상 홍조류의 일종인 *Lithophyllum* sp.로 분류된다. 해변을 이루는 조립 샌드에서 그레놀의 홍조단괴는 핵을 중심으로 천해에서 성장하다가 파랑에 의해 그 표면이 심하게 마모된 것이 특징이다. 또한 자갈에서 왕자갈 크기의 홍조단괴는 다른 생물체의 각질을 포함하고 있거나, 태선류와 같은 덮개상 동물과 함께 자란 것도 관찰할 수 있다. 홍조단괴는 성장함에 따라 그 형태가 둥심원상에서 둥상으로 변화해 가는데, 이는 홍조단괴가 자라면서 크기가 커짐에 따라 조류나 파랑에 의해 잘 뒤집히거나 구르지 않게 되고 비교적 에너지가 낮은 지점에서 성장하였음을 의미한다. 홍조단괴 내에 형성된 공극(콘셉터클, 태선류 내의 공극, 천공 등)에는 천해 교질작용에 의해 형성된 구과상이나 침상의 아라고나이트 교질물과 방해석 교질물이 발견된다. 서광리 앞 천해에서 많은 홍조단괴가 성장하는 것은 이 지역이 홍조단괴의 성장에 알맞은 해양학적 조건을 가지고 있기 때문이다. 즉 이 지역은 수온이 약 19°C 정도로 연중 따뜻하고, 하천을 통한 화산쇄설성 퇴적물의 유입이 없어 바닷물이 매우 맑은 상태로 유지되기 때문에 홍조류의 서식에 알맞은 조건을 가지고 있다. 또한 우도수로의 천해 지역은 수심이 대부분 15 m 정도로 얕아 매우 빠른 조류가 흐르며, 이러한 빠른 조류와 파랑으로 인해 홍조류가 빈번히 뒤집히거나 구르며 성장하여 홍조단괴를 형성한 것으로 생각된다. 또한 여름철마다 이 지역에 영향을 주고 있는 태풍은 홍조단괴의 성장에 기여를 한 것으로 추정된다.

Three beaches of the Seogwang-ri coast in the western part of Wu Island, Jeju-do, are solely composed of rhodoliths (red algal nodules). The beach sediments are coarse sand to granule in size and they show the banded distribution according to size. Commonly the larger pebble-sized rhodoliths are concentrated near the rocky coast, resulting from the transportation of the nodules from shallow marine environments by intermittent typhoons. Based on the internal texture of the rhodoliths, it appears that crustose red algae, *Lithophyllum* sp., is the main contributor for the formation of the rhodolith. The coarse sand to granule-sized grains show that they started to grow from the nucleus as rhodoliths, but the surface was severely eroded by waves. However, the pebble to cobble-sized grains exhibit the complete growth pattern of rhodoliths and sometimes contain other calcareous skeletons. It is common that encrusting red algae are intergrown with encrusting bryozoan. The surface morphology of rhodolith tends to change from the concentric to domal shape towards the outer part. This suggests that the rhodolith grew to a certain stage by rolling, but it grew in more quiet condition without rolling as it became larger. Aragonite and calcite cements can be found in the pores within rhodoliths (conceptacle, intraskeletal pore in bryozoan, and boring), and this means that shallow marine cementation has occurred during their growth. Growth of numerous rhodoliths in shallow marine environment near the Seogwang-ri coast indi-

\*Corresponding author: jink92@hanmail.net

cates that this area has suitable oceanographic conditions for their growth such as warm water temperature (about 19°C in average) and clear water condition due to the lack of terrestrial input of volcanoclastic sediments. Fast tidal current and high wave energy in the shallow water setting can provide suitable conditions enough for their rolling and growth. Typhoons passing this area every summer also influence on the growth of rhodoliths.

**Key words:** Rhodoliths, Red Algal Nodules, *Lithophyllum* sp., Wu Island, Seogwang-ri Coast

## 서 론

제주도 북제주군 우도의 서광리 해안에는 최근까지 '산호사 해빈'으로 알려진 해빈퇴적물이 있으나, 실제로 이 퇴적물은 산호가 아닌 홍조단괴로 이루어져 있다(우, 2001, 2002). 홍조류는 세포 내 혹은 세포벽 사이에 탄산염광물인 방해석을 침전시키며 자라는 해조류이며, 홍조단괴란 이러한 홍조류에 의해 형성된 단괴를 말한다. 즉, 홍조단괴는 홍조류가 핵을 중심으로 성장하면서 조류나 파도에 의해 반복적으로 뒤집히고 구르며 동심원상으로 자라 형성되는 것이다.

최근에 제주도를 비롯한 우리나라 여러 지역의 해안에서 발생하고 있는 소위 '백화현상'이라고 알려진 것도 홍조류에 의한 현상이다. 홍조류는 살아있을 때에는 조직 내의 색소 때문에 붉은 색을 띠지만, 죽어서 유기물이 분해되면 탄산염 각질을 만드는 다른 생물과 같이 백색으로 변하게 된다. 홍조류는 크게 덮개상 홍조류와 마디상 홍조류로 나뉘며, 이 두 형태의 홍조류는 우리나라 해변 전역에 걸쳐 서식하고 있다. 그러나 국내에서는 홍조류에 대한 체계적인 연구는 아직도 매우 미흡한 상태이며, 마디상 홍조류 중에서 산호말과 게발속(*Amphiroa*)에 해당하는 유절산호말과 홍조류에 대한 연구는 발표된 적이 있으나(최, 1989), 덮개형 홍조류에 대한 분류학적, 생태학적인 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

홍조단괴에 대한 연구는 18세기 후반부터 수행되기 시작하였으며(Pallas, 1766; Ellis and Solander, 1786), Bosellini and Ginsburg (1971)는 처음으로 이러한 단괴에 대해 'rhodolite'라는 용어를 사용하였고, Adey and Macintyre(1973)와 Bosence(1983)는 'rhodolith'라는 용어를 사용하였다. 한편 Peryt(1983)는 'rhodoid'라는 용어를 제안하기도 하였으며, 또 다른 학자들은 'algal ball'이나 'algal nodule'이라는 용어를 사용하기도 한다. 이러한 용어들은 모두 덮개상 홍조류에 의해 동심원상의 층들을 형성하고 있는 탄산염으로 이루어진 단괴를 지시한다.

홍조단괴는 중생대 이후 극지방에서부터 열대지방에 이르는 광범위한 지역에서 형성되었으며, 홍조단괴를 형성하는 현생 홍조류들도 민물환경에서 서식하는 몇 종을 제외하면 대부분 전 세계의 모든 바다에서 광범위하게 나타난다. 홍조류의 분포를 조절하는 가장 주된 요인은 수온과 햇빛이며, 대부분의 종들은 이 두 가지 요인의 복합적인 영향을 받는다. 그러나 어떤 종들은 주로 수온에 의해서, 또는 주로 햇빛에 의해서 영향을 받기도 한다(Adey, 1966, 1970; Adey and McKibbin, 1970; Adey and Adey, 1973). 홍조류는 전 세계 바다의 넓은 지역에서 산출되고는 있으나, 대부분의 많은 종들은 따뜻하고 이질퇴적물의 유입이 없는 수심 100 m 이하의 저위도 지역 천해에 서식한다. 홍조류가 홍조단괴를 형성하기 위해서는 홍조류가 피복하면서 자랄 수 있는 핵(nucleus)과 홍조단괴가 지속적으로 굴러다니면서 성장할 수 있는 해양학적인 조건이 필요하다(Prager and Ginsburg, 1989).

이 연구의 목적은 주로 홍조단괴로 이루어진 우도 서광리 해빈 퇴적물의 조직적 특성을 밝히고, 연구지역에서 홍조단괴를 형성하는 홍조류의 종을 동정하며, 홍조단괴가 성장할 수 있는 조건과 그 성장과정을 추정하는 것이다.

## 연구지역

우도는 제주도의 동부 성산포항에서 동북쪽으로 약 3.8 km 떨어진 곳에 위치하고 있으며(Fig. 1), 신생대 제 4기의 플라이스토세 후기(Late Pleistocene)의 수성화산(hydro-volcano) 활동으로 형성된 화산섬이다(Sohn and Chough, 1993).

우도에는 모두 세 지역의 해안에 해빈퇴적물이 분포하고 있으며, 이는 우도의 서쪽에 분포하는 해빈인 서광리 해빈, 북동쪽에 분포하는 하고수동 해빈, 그리고 남동쪽에 분포하는 검멀레 해빈이다. 이 세 지역의 해빈퇴적물은 주로 탄산염입자나 화산암편으로 이루어져 있다. 그러나 특히 서광리의 해빈퇴적물은 탄산염 입자 중 거의 홍조류의 단괴로만 이루어져 있어 다른 지역과는 매우 다른 양상을 나타낸다(우, 2001, 2002).

우도 주변의 해저지형은 매우 특이한 형태를 나타내는데, 우도를 중심으로 하여 동서의 해저지형이 매우 상이한 구조로 되어 있다. 우도의 서쪽 해저지형인 제주도와 우도 사이에는 성산반도와 종달반도에서 우도로 이어지는 우도수로가 위치하고 있으며, 우도수로는 채널(channel)의 형태를 띠고 있다. 우도수로는 연안으로부터 완만한 경사를 이루고 있으며, 기반은 주로 견고한 암반층이고 암반 사이에는 홍조단괴를 포함한 탄산염 퇴적물이 얇게 덮여 있다. 우도수로 중 종달반도와 우도 사이는 최대 수심이 20.7 m, 평균 수심이 15 m 정도로 매우 얇은 수심 분포를 보이며, 성산반도와 우도 사이는 수심 20 m 이상의 골짜기가 형성되어 있다(Fig. 2). 또한 우도수로 내에는 모우트(moat) 현상에 의해 형성된 갯골이 여러 군데 발달해 있다. 주변에 비해 다소 깊은 골짜기나 갯골 등은 우도수로의 빠른 해류에 의해 형성된 것으로 생각된다. 우도수로에서 해류의 유속은 창조류 시 북향으로 3.0 knot, 낙조류 시 남향으로 2.6 knot로 매우 빠르게 관측되었다(국립해양조사원, 1990). 반면 우도의 동쪽 해저지형은 외해로 급격하게 깊어지는 형태를 이루고 있어 해안에서 바다로 약 3 km 정도 나아가면 수심이 100 m 이상으로 깊어진다. 우도 주변의 수온은 여름철(8월)에 26°C, 겨울철(2월)에 14°C를 나타내며 연평균수온이 약 19°C에 이르러 연중 대체로 따뜻한 수온을 유지한다. 염분은 여름철(8월)에 31.4‰, 겨울철(2월)에 34.2‰로 연평균 약 33.4‰을 나타낸다(곽, 1993).

## 연구방법

우도 서광리의 천해에 서식하고 있는 홍조단괴의 서식환경을

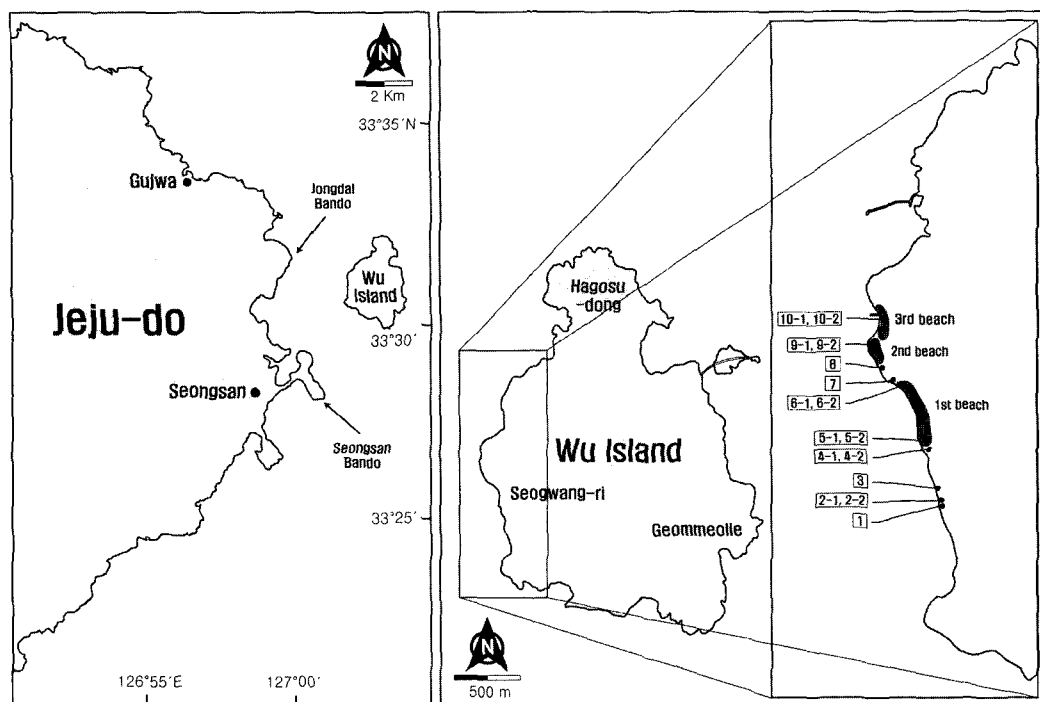


Fig. 1. Location map of the study area and the sampling localities.

알아보기 위하여 스쿠버다이빙을 실시하였다. 이로부터 홍조단괴가 자라고 있는 천해환경을 조사하였으며, 현재 해저에서 성장하고 있는 여러 개의 홍조단괴를 채취하였다. 또한 서광리 해빈퇴적물의 구성성분을 파악하기 위하여 해안을 따라 해빈퇴적물을 채취하였다. 해빈퇴적물은 서광리 제 1해빈 남쪽 해안의 네 지점에서 여섯 개의 시료(시료번호: 1, 2-1, 2-2, 3, 4-1, 4-2), 제 1해빈의 두 지점에서 네 개의 시료(시료번호: 5-1, 5-2, 6-1, 6-2), 제 2해빈의 한 지점에서 두 개의 시료(시료번호: 9-1, 9-2), 그리고 제 3해빈의 한 지점에서 두 개의 시료(시료번호: 10-1, 10-2)를 채취하였다. 이 중 퇴적물이 입자의 크기에 따라 대상으로 분포하고 있는 2, 4, 5, 6, 9, 10번 지점에서는 크기에 따라 두 종류의 시료를 채취하였다. 또한 제 1해빈과 제 2해빈의 경계부근에 있는 암반 사이에 집중적으로 분포하는 자갈크기의 홍조단괴를 채취하였다(시료번호: 7, 8; Fig. 1). 서광리 제 1해빈의 남쪽 해안과 제 1, 2, 3해빈에서 채취한 해빈퇴적물(시료번호: 1, 2-1, 2-2, 3, 4-1, 4-2, 5-1, 5-2, 6-1, 6-2, 9-1, 9-2, 10-1, 10-2)의 경우에는 입자크기를 알아보기 위하여 시료를 건조시킨 후 체분석을 실시하였다. 또한 채취한 모든 해빈퇴적물시료와 현재 천해에서 성장하고 있는 홍조단괴시료를 박편으로 제작한 후 편광현미경을 이용하여 조직적인 특성을 관찰하였다. 박편제작 시에는 시료를 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>에 24 시간 동안 반응시켜 시료 내에 남아 있는 유기물을 제거한 후에 에폭시로 경화하여 박편을 제작하였다.

### 결과 및 토의

#### 우도 홍조단괴의 분포

우도에는 서광리, 하고수동, 검멀레 지역에 모두 세 개의 해빈

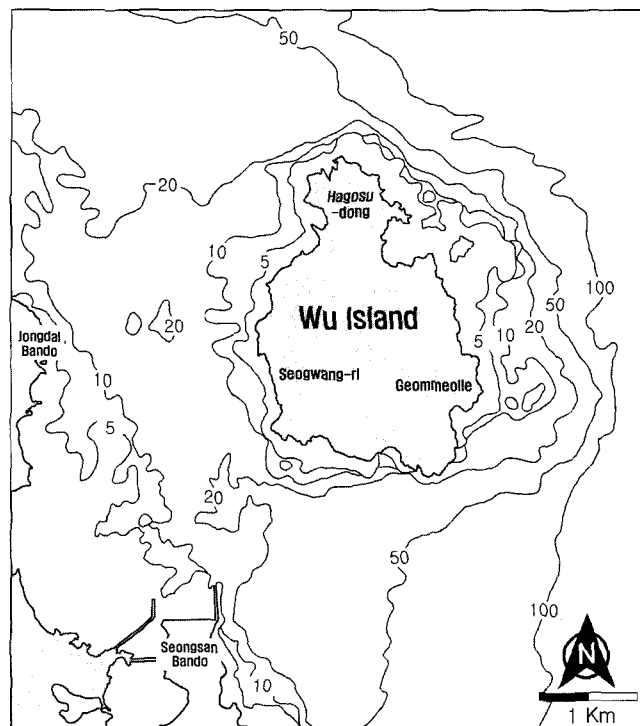
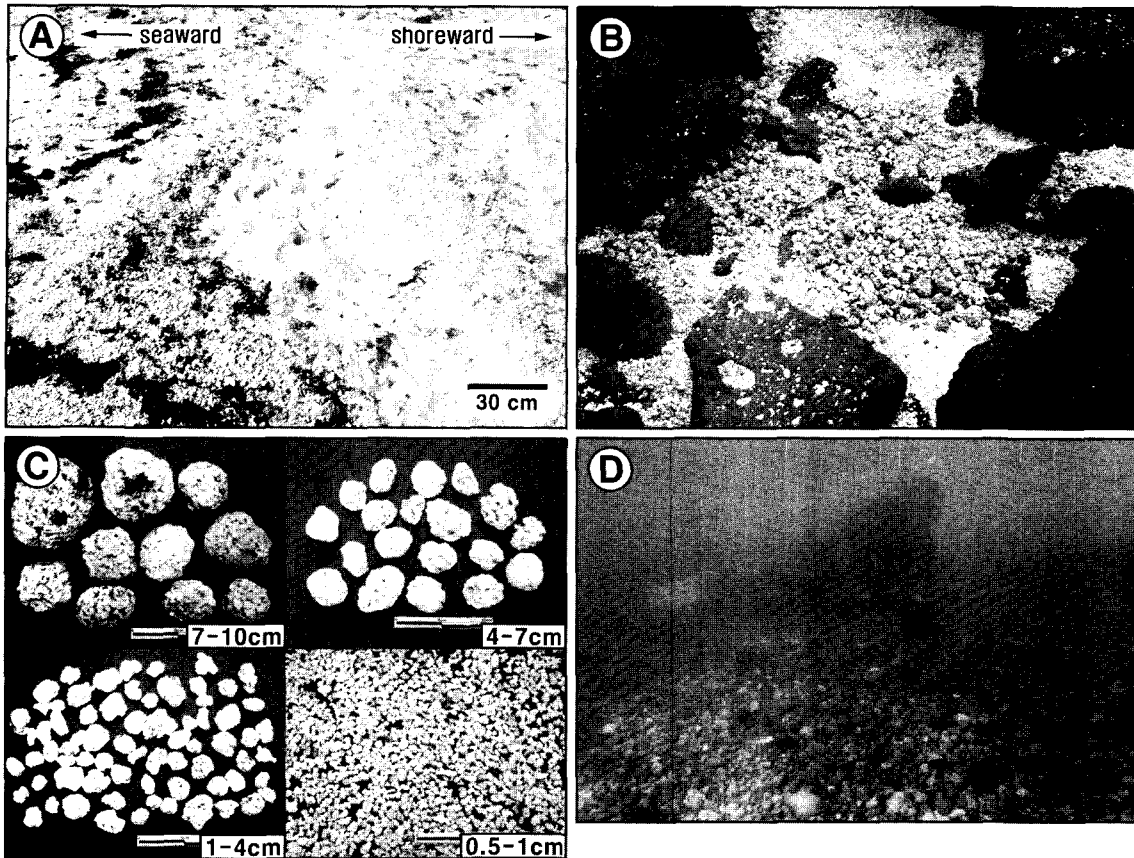


Fig. 2. Bathymetric map around the Wu Island (depth contours in meters).

이 분포하고 있다. 이 중 하고수동의 해빈퇴적물은 대부분 연체동물과 극피류, 홍조류, 태선동물의 조각과 저서성 유공충으로 이루어져 있고, 검멀레의 해빈퇴적물은 다량의 화산암편과 극소량의 연체동물 조각으로 이루어져 있다(우, 2002). 이는 제주도 주변의



**Fig. 3.** (A) Banded distribution of the beach sediments in the Seogwang-ri beach. (B) Pebble-sized rhodoliths concentrated in the rocky shore. (C) Various size range of the rhodoliths in this study. (D) Live rhodoliths in the shallow marine environment near the Seogwang-ri coast.

해빈퇴적물이 주로 탄산염 입자와 화산암편으로 이루어진 것과 비슷한 경향을 보인다(지와 우, 1995). 그러나 우도의 서쪽에 위치한 서광리의 해빈퇴적물은 탄산염 입자 중 99%가 홍조단괴와 그 조각으로만 이루어져 있어 다른 지역과는 구별되는 특징을 보인다. Foster *et al.*(1997)이 미국 캘리포니아 만의 해저 면이 모두 홍조단괴로 덮여 있다고 보고한 사례가 있으나, 전 세계적으로 이러한 홍조단괴로만 이루어진 해빈은 매우 드물게 나타나는 것으로 알려져 있다.

연구지역인 서광리 해안에는 모두 세 개의 해빈이 발달하여 있다. 세 개의 해빈은 전체적으로는 매우 유사한 양상의 퇴적물 분포를 보인다. 즉 해빈의 홍조단괴 퇴적물은 크기에 따라 해안선에 평행하게 대상으로 분포하고 있으며(Fig. 3A), 해안에 불규칙하게 분포하고 있는 암반들 사이와 방파제에는 자갈 크기의 홍조단괴가 몰려서 퇴적되어 있다(Fig. 3B). 스쿠버다이빙을 통해 서광리 앞의 천해를 조사한 결과, 해저에는 암반들이 부분적으로 노출되어 있으며 암반이 없는 곳에는 주로 홍조단괴를 포함한 탄산염퇴적물이 퇴적되어 있다. 천해에서 성장하고 있는 홍조단괴의 크기는 직경이 수 mm에서 10 cm 이상까지 다양하게 나타나며(Fig. 3C), 특히 크기가 큰 홍조단괴들은 암반들 사이나 암반 주변에 밀집되어 나타나는 경향이 있다(Fig. 3D). 이는 암반이 없는 곳은 이 지역의 빠른 조류에 그대로 노출이 되기 때문에 다양한 크기의 홍

조단괴가 조류에 의해 뒤집히고 구르며 성장하지만, 어느 정도 성장하고 나면 더 이상 조류에도 움직이지 않고 비교적 수력학적 에너지가 작은 암반 사이나 암반 주변으로 몰려 고정된 채로 성장하게 되는 것으로 생각된다. 이렇게 크기가 왕자갈 크기 이상인 홍조단괴는 태풍의 영향에 의해 간헐적으로 움직이며 성장한 것으로 생각할 수 있다.

서광리의 홍조단괴 퇴적물은 해안가에 퇴적된 이후 죽어 백색을 띠고 있으며, 지속적으로 파도 등에 의해 마모되었기 때문에 원마도가 양호하다. 홍조단괴 퇴적물의 입자크기는 조립 샌드(coarse sand)에서 그라놀(granule)이며, 큰 입자와 작은 입자들이 크기별로 몰려서 띠를 이루며 분포한다. 또한 이 크고 작은 입자의 띠들은 서로 반복되어 교호하며 해안선과 평행한 방향으로 대상으로 분포하고 있다(Fig. 3A). 낙조류 시에는 약 20 m가 넘는 폭을 가지고 있는 서광리 해빈에 이러한 큰 입자와 작은 입자로 구성된 띠들이 약 열 개 이상 반복되어 교호하는 것을 관찰할 수 있었다. 이 지역을 찾는 관광객들에 의해 해빈퇴적물이 교란을 받았음에도 불구하고 해빈퇴적물들은 크기에 따라 뚜렷한 대상분포를 보이고 있다. 이러한 퇴적물의 분포는 서광리의 모든 해빈에서 같은 경향을 보이며 연장되어 있다. 퇴적물의 입자 크기를 정확하게 측정하기 위하여 해빈의 여러 지점에서 퇴적물을 채취하였으며, 특히 2, 4, 5, 6, 9, 10번의 시료채취지점에서는 큰 입자들이 몰려있

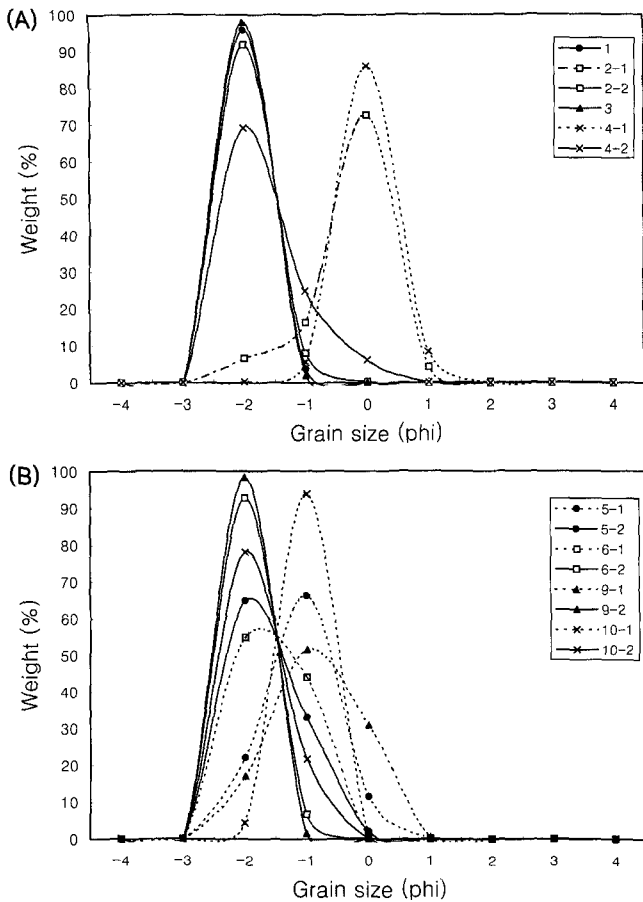


Fig. 4. (A) Size distribution curve of the sediments collected from the rocky shore south of Seogwang-ri beach. (B) Size distribution curve of the sediments in the Seogwang-ri beach.

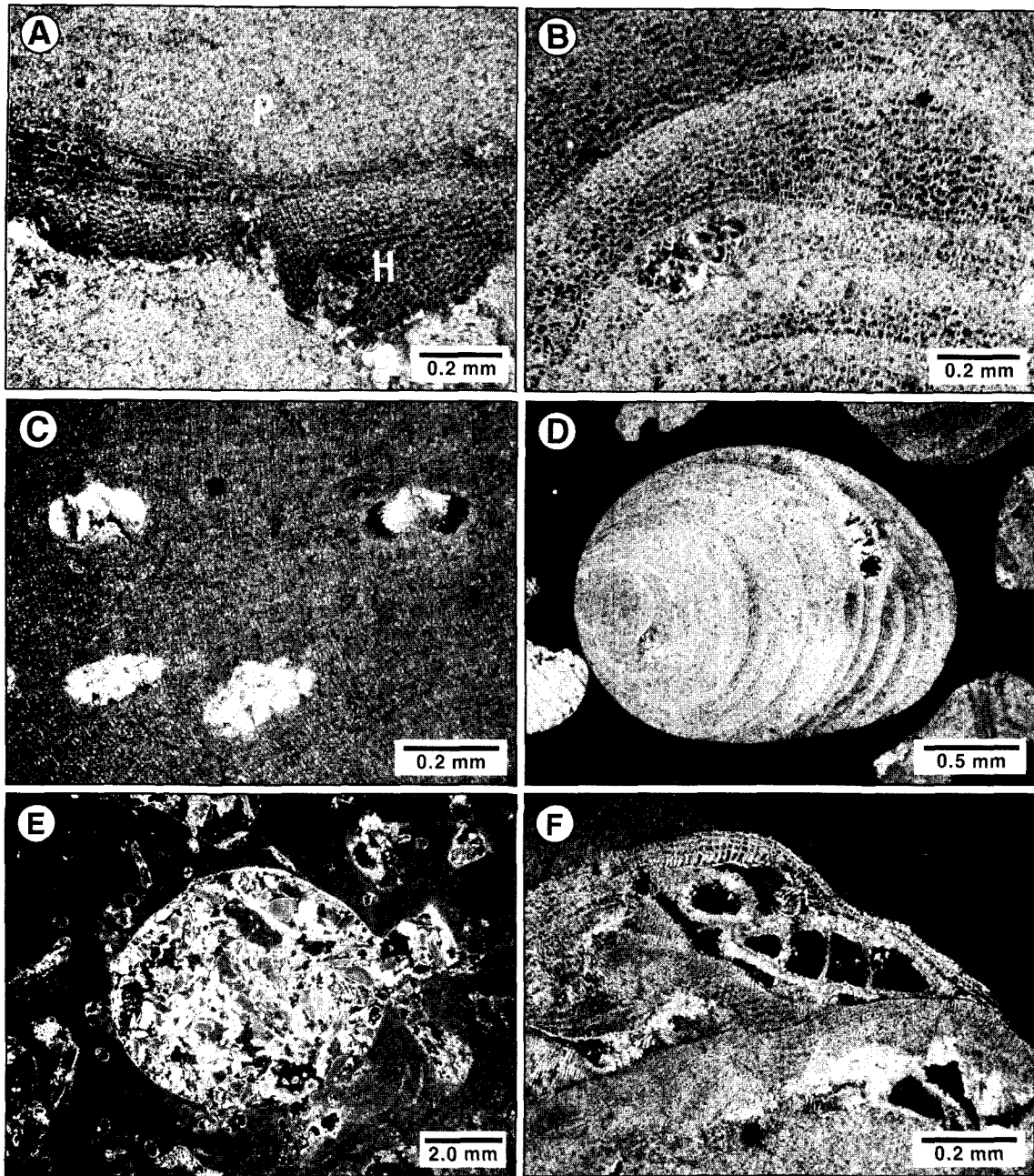
는 띠와 작은 입자들이 몰려있는 띠에서 각각 시료를 채취하였다 (Fig. 1). 채취한 퇴적물들에 대해 체분석을 실시한 결과, 제 1해빈 남쪽 해안에 있는 퇴적물들은 대부분 -2φ와 0φ의 크기가 우세하며, 분급도가 극양호~양호로 매우 좋은 분급을 나타낸다(Fig. 4A). 하지만 제 1, 2, 3해빈의 퇴적물들은 대부분 -2φ와 -1φ의 크기가 우세하고 0φ에 해당하는 조립 샌드의 입자가 거의 나타나지 않는다. 또한 분급도가 극양호~중간양호로 나타나 분급이 조금 나빠진 것을 볼 수 있다(Fig. 4B). 작은 크기의 입자가 제 1해빈 남쪽 해안에서는 대체로 0φ의 크기를 보이는 반면, 제 1, 2, 3해빈에서는 -1φ의 크기를 보이는 것은 해빈의 위치에 따른 수력학적인 에너지의 차이로 인해 서로 운반되는 퇴적물 입자의 크기가 다르게 퇴적된 것이라고 생각된다. 또한 제 1, 2, 3해빈의 퇴적물이 제 1해빈 남쪽 해안에서보다 분급도가 나빠진 것은 아마도 관광객들에 의해 교란을 받았기 때문인 것으로 판단된다.

서광리 해빈에 분포하는 홍조단괴 퇴적물은 서광리 앞 천해에서 서식하고 있는 홍조단괴가 파도나 태풍(혹은 폭풍)에 의해 해안으로 몰려와서 퇴적된 것으로 생각된다. 서광리의 홍조단괴 해빈은 경사가 약 15° 정도로 상당히 가파른 편이지만, 바람이 거의 없는 날에도 쇄파대(surf zone)로부터 해빈으로 밀려오는 바닷물은 그레놀 이상의 퇴적물 입자들을 충분히 움직일 수 있는 에너

지를 가지고 있다. 그러나 파랑의 영향에 의해 운반되는 홍조단괴의 양은 그리 많지 않기 때문에, 이 지역에 분포하는 많은 양의 홍조단괴는 주로 태풍에 의해 천해로부터 해안으로 이동되어 퇴적된 것으로 생각된다. 실제로 여름철에는 서광리 해빈의 북쪽에 많은 양의 홍조단괴 퇴적물이 퇴적되지만, 겨울철에는 이 북쪽의 퇴적물들은 침식되는 대신 해빈의 남쪽에 퇴적되는 현상이 나타난다. 이는 여름철에는 북상하는 태풍의 영향으로 천해의 많은 양의 홍조단괴 퇴적물이 북쪽 해빈으로 이동하여 퇴적되지만, 겨울철에는 태풍의 영향은 받지 않는 대신 오히려 남하하는 조류나 파도의 영향을 받아 북쪽 해빈에 퇴적되었던 퇴적물들이 침식되고 남쪽으로 운반되어 퇴적되는 것으로 생각된다. 이러한 원인에 의해 서광리 해빈의 퇴적물은 몇 년 이내의 짧은 기간 동안에도 그 분포가 달라지고 있다. 해빈의 홍조단괴 퇴적물이 크기에 따라 해안선에 평행한 방향으로 대상 분포하는 현상은 해빈 퇴적물이 태풍에 의해 운반되어 퇴적된 것임을 지시한다. 즉 태풍에 의해 바닷물이 여러 입자 크기의 홍조단괴를 해빈까지 운반시킨 후 바닷물이 바다로 다시 빠져 나갈 때, 큰 입자에서부터 작은 입자 크기의 홍조단괴가 차례대로 퇴적되는 것이다. 이는 대상으로 분포하는 홍조단괴 퇴적물의 입자의 크기를 관찰해 볼 때, 육지 쪽에서 바다 쪽으로 갈수록 입자의 크기가 점이적으로 작아지는 경향을 보이는 현상으로부터 추정할 수 있다. 또한 입자의 크기가 큰 입자로 이루어진 부분은 작은 입자로 이루어진 퇴적물을 피복하고 있으며, 이 지점에서는 입자의 크기가 급격하게 변하는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 3A). 이것은 한번의 운반과정을 통해 다양한 크기의 입자가 이동된 후에, 다른 시점에 또 다른 퇴적물이 그 위에 퇴적되었음을 나타낸다. 이러한 퇴적물의 분포는 정상적인 해양조건에서 나타나기가 어려우며 태풍과 같은 높은 에너지의 해류에 의해 일시적으로 다량의 퇴적물이 이동한 것으로 생각할 수 있다. 따라서 입자의 크기가 큰 지점에서부터 서서히 작아지는 지점까지가 태풍에 의한 한 번의 퇴적작용에 의해 형성된 띠라는 것을 알 수 있다. 이러한 홍조단괴의 띠들은 끊어지지 않고 서광리 제 1, 2, 3해빈에 걸쳐 거의 연속적으로 이어지는데, 이는 이 지역에 태풍이 올 때 서광리 해빈이 전체적으로 모두 같은 영향권 내에 있었다는 것을 나타낸다. 해안에 불규칙하게 분포하고 있는 암반들의 사이나 방파제 주변에는 주로 해빈퇴적물보다 크기가 큰 자갈(pebble) 크기의 홍조단괴가 몰려서 분포하는데, 이러한 현상도 이들이 태풍에 의해 운반되어 퇴적된 것임을 지시한다. 여름철에 북상하는 태풍은 평상시보다 수력학적 에너지가 커서 천해의 자갈 크기의 홍조단괴를 운반할 수 있었던 것으로 추정된다. 이렇게 운반되어 암반 사이나 방파제 주변에 퇴적된 홍조단괴들은 다른 해류의 영향으로부터 보호되기 때문에 계속 해빈에 남아 있을 수 있는 것이다.

우도 홍조단괴의 조직

일반적으로 홍조단괴를 형성하는 덮개상 홍조류(Subfamily Melobesioidea; crustose coralline algae)는 11개의 속(genus)으로 분류된다(Johnson, 1961). 특히 홍조류의 하이퍼텔러스(hypothallus)와 페리텔러스(perithallus)의 조직, 콘셉터클(conceptacle)의 형태와 아퍼처(aperture)에 나타나는 유형에 따라 홍조류의 분류가 이루어지고 있다. 우도에서 산출되는 홍조단괴의 하이퍼텔러스는 비교적 큰 방(cell)들이 규칙적으로 활의 모양으로 휘어져 배열되어



**Fig. 5.** Photomicrographs showing the internal texture of the rhodoliths. (A) Co-axial hypothallus (H) and peritallus (P). (B) Repetition of the peritallitic tissue. (C) Conceptacles with a single aperture in the peritallus, filled with spherulitic aragonite cements. (D) Granule-sized rhodolith grain. Note that the surface is severely eroded. (E) The bore within the rhodolith filled with calcareous skeletal grains. (F) Benthic foraminifera trapped within the rhodolith.

있으며(co-axial hypothallus; Fig. 5A), 페리텔러스의 방들은 하이퍼텔러스의 방들보다는 크기가 조금 작운데, 이 방들의 벽의 두께는 수직적으로는 얇은 반면 수평적으로는 그보다 두껍게 발달되어 있는 형태를 보인다(peritallitic tissue; Fig. 5B). 일부 덮개상 홍조류의 경우에는 페리텔러스 내에 크기가 큰 방인 메가셀(megacell)이 존재하는 경우도 있지만, 연구지역의 홍조단괴를 이루는 홍조류 내에는 메가셀이 존재하지 않는 것으로 관찰되었다. 일반적으로 홍조류는 포자(spore)로 번식하며, 따라서 홍조류의 조직 내에는 포자가 들어 있는 공간이 존재한다. 이 공간을 콘셉터클이라고

하며, 대부분의 덮개상 홍조류의 경우에는 콘셉터클이 페리텔러스 내에 형성되어 있다. 콘셉터클에는 포자가 나오는 입구인 아파처가 존재하며, 아파처는 한 개 또는 여러 개가 발달한다. 보통 유성생식을 하는 홍조류는 아파처가 한 개 발달한 콘셉터클을 가지고 있으며, 무성생식을 하는 경우에는 아파처가 한 개 발달한 콘셉터클과 여러 개 발달한 콘셉터클을 모두 가지고 있다고 알려져 있다(Johnson, 1961). 이 연구에서의 홍조단괴의 경우에는 페리텔러스 내에서 한 개의 아파처가 발달해 있는 콘셉터클을 다량 관찰할 수 있다(Fig. 5C). 이와 같은 여러 가지 조직적인 특징으로

부터 우도 서광리 해안에 서식하고 있는 홍조류는 덮개상 홍조류 중 *Lithophyllum* 속에 속하는 것으로 판단된다.

서광리 해빈에 퇴적되어 있는 홍조단괴 해빈퇴적물 중 -2~0Φ에 해당하는 극조립 샌드나 그레놀 크기 입자들은 핵을 중심으로 자라다가, 파랑에 의해 얇은 해저 면을 굴러다니면서 그 표면이 심하게 마모된 것이 특징이다. 따라서 대부분 원마도가 매우 높으며, 핵을 중심으로 자란 층(layer)들은 완전한 동심원의 구조를 보이지 못하고 끊겨서 나타난다(Fig. 5D). 이 크기의 홍조단괴의 경우에는 핵을 중심으로 자란 얇은 층들이 보통 수~수십 개가 관찰되며, 각 층의 두께는 약 100~200 μm이다. 한 층이 형성될 때, 층이 시작하는 기저부에서는 방의 크기가 조금 신장되어 나타나며, 층의 상부에서는 방의 크기가 작아지는 규칙성을 보인다(Fig. 5B). Frantz *et al.*(2000)은 홍조단괴의 한 층에 나타나는 이러한 방의 크기변화는 여름철과 겨울철의 계절적인 변화를 반영한다고 하였으며, 따라서 층들의 개수로부터 홍조단괴의 연령을 대략적으로 판단할 수 있다고 하였다.

홍조단괴의 성장초기에 핵을 이루던 입자는 박편 상에서 쉽게 관찰되지 않는다. 이는 핵을 이루는 입자의 크기가 너무 작아서 박편 제작 시 정확하게 핵이 있는 부분이 포함되도록 절단하지 못하였기 때문일 가능성이 높다. 또는 표면이 심하게 마모되는 과정에서 핵이 있는 중심부까지도 마모되었을 가능성도 있다. 실제로 그레놀 크기의 몇몇 홍조단괴에서는 핵이 있었던 중심부까지도 마모되어 없어져 버린 형태가 관찰된다. 이 크기의 홍조단괴에서는 생식기관인 콘셉터클은 거의 관찰되지 않는다. 일부 홍조단괴에는 내부를 다른 생물체가 뚫고 들어간 천공(boring)의 흔적이 발견되고, 천공 내에는 다른 생물체들의 각질이 퇴적되어 채우고 있다(Fig. 5E).

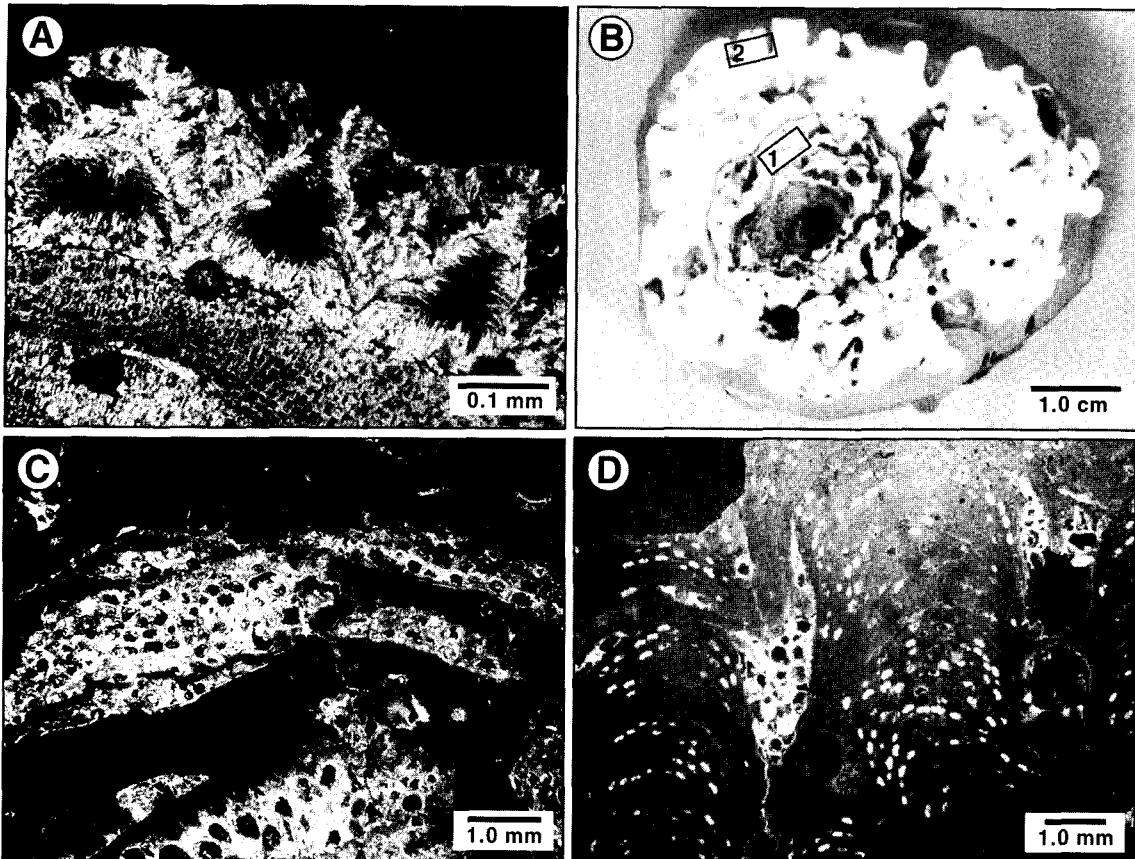
서광리 해빈에 퇴적되어 있는 홍조단괴 해빈퇴적물 중 -4~-2Φ에 해당하는 자갈 크기 입자들의 경우에는 핵을 중심으로 성장해 가며 다른 생물체의 각질을 포획하거나, 또는 태선류와 같은 생물들이 일시적으로 홍조단괴 위에 자라기도 하는 특징을 보인다. 따라서 전체적으로는 역시 단괴의 형태를 나타내지만, 다른 생물체의 각질을 포획한 부분에서는 불규칙한 공극이 형성되고 매우 성긴 조직을 가지며 성장하고 있다. 포획된 생물체들의 각질은 주로 유공충이나 환형동물이 만든 석회질 관(worm tube), 복족류, 이매패류 등이며(Fig. 5F), 이들 각질 조각들이 홍조류의 공극 내에 퇴적되어 있는 것도 관찰된다. 또한 핵을 중심으로 자라다가 일시적으로 성장이 멈춘 흔적이 발견되기는 하지만, 그레놀의 홍조단괴에서와는 달리 그 표면이 심하게 마모되지는 않았다. 이는 성장이 잠시 멈춘 후 심한 운반, 침식과정 없이 다시 그 표면을 기저로 홍조류가 연속적으로 자랐음을 암시한다. 잠시 성장을 멈추었을 때에는 딱딱한 물질을 기저로 고착하여 성장하는 태선류가 그 표면에 일부 자라고 있는 경우도 관찰되는데, 이때 태선류의 공극 내에 침상의 방해석 교질물이 공극을 충전하고 있는 경우도 관찰된다(Fig. 6A). 또한 페리텔러스 내에는 생식기관인 콘셉터클이 다량 존재하며, 콘셉터클의 내부는 대부분 비어 있거나, 천해속성작용의 영향으로 침상의 아라곤나이트 결정이 구과상(spherulitic)으로 자란 것도 관찰된다(Fig. 5C). 이와 같은 태선류의 공극이나 홍조류의 콘셉터클 내에서 발견되는 천해속성산물인 아라곤나이트와 방해석 교질물은 국내의 천해 퇴적물에서는 잘 알려져 있지 않

다. 일반적으로 이러한 천해 교질물은 주로 열대와 아열대의 산호초에서 보고되었으며, 온대지방의 탄산염퇴적물 내에는 극히 제한된 분포를 보이는 것으로 알려져 있다. 특히 방해석 교질물의 마그네슘 함량에 대해서는 앞으로 정밀한 조사가 요구된다.

서광리 앞 천해에서 현재 성장하고 있는 왕자갈 크기의 홍조단괴를 여러 개 채취하여 박편을 제작한 후, 그 조직을 관찰하였다. 그 결과 홍조단괴가 성장해감에 따라 홍조류가 자라다가 잠시 성장을 멈추었을 때 태선류가 그 위를 피복하며 자라고, 그 위에 다시 홍조류가 자라는 형태, 즉 홍조류와 태선류가 서로 교호하며 성장하는 형태가 흔히 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 홍조단괴가 성장하는 초기에는 홍조류의 층들이 동심원의 형태를 보이지만, 어느 정도 크기로 성장한 후부터는 돔상(domal)의 형태로 성장하고 있다(Fig. 6B). 홍조류가 동심원상으로 자랄 때에는 태선류와 홍조류가 서로 교호하며 성장하지만(Fig. 6C), 홍조류가 돔상으로 자랄 때에는 태선류가 돔(dome)들의 사이인 골 부분에 부분적으로 자라는 경우가 우세하게 나타난다(Fig. 6D). 또한 돔들 사이에는 불규칙한 공극이 많이 형성되고, 이 공극 내에는 다른 생물들의 탄산염 입자가 퇴적되어 있기도 한다. 일반적으로 홍조단괴의 크기와 모양, 밀도, 부피에 대한 표면적의 비율 등은 주로 해류의 속도에 의해 조절된다고 연구되어 왔다(Bosence, 1976; Scoffin *et al.*, 1985). 특히 외형이 좀 우툴두툴(lumpy)한 동심원상의 단괴는 높은 유속의 환경에서 형성되는 반면, 가지가 발달한 돔상의 단괴는 낮은 유속의 환경에서 형성된다고 알려져 있다(Bosence, 1976). 이 연구에서의 홍조단괴의 성장형태가 동심원상에서 돔상으로 변화하는 것도 홍조단괴의 크기에 따른 수력학적인 에너지의 영향이 다르기 때문이라고 생각할 수 있다. 즉, 홍조단괴의 크기가 작을 때에는 조류에 의해 쉽게 뒤집히고 구르며 성장하여 동심원상의 형태를 보이지만, 단괴가 점차 커짐에 따라 이러한 조류의 영향에도 쉽게 뒤집히거나 이동되지 않고 비교적 해류의 에너지가 낮은 암반 사이와 같은 지점에 고정된 채로 성장하여 돔상의 형태를 띠게 되는 것이라고 판단된다.

#### 우도 홍조단괴의 성인

홍조단괴는 덮개형 홍조류가 핵을 피복하여 자라기 시작하여 조류나 파랑 등에 의해 계속해서 뒤집히고 구르면서 자라기 때문에 전체적으로는 구형을 유지하며 성장하게 된다. 다른 지역에 비해 이러한 홍조단괴가 서광리 앞바다에서 많이 서식하는 것은 이 지역이 홍조단괴가 서식하는데 필요한 몇 가지 해양학적인 조건을 만족시키고 있기 때문이다. 첫째로 홍조단괴가 성장할 수 있기 위해서는 그 지역이 홍조류가 서식할 수 있는 환경조건을 갖추고 있어야 한다. 일반적으로 홍조류의 분포는 수온과 햇빛에 의해 조절되어지며, 수온이 높은 열대지방으로 갈수록 그 종이 다양하게 나타난다고 알려져 있다(Adey, 1966, 1970; Adey and McKibbin, 1970; Adey and Adey, 1973). 우도 주위 천해의 수온은 여름철에 약 26°C에 이르며, 겨울철에도 약 14°C에 이르러 연중 내내 따뜻하게 유지되고 있다. 또한 성산과 우도 주변에는 하천이 없어서 이 지역으로 화산쇄설성 퇴적물이 유입되지 않아 항상 맑고 깨끗한 바닷물이 유지된다. 이러한 천해환경은 홍조류의 서식에 필요한 조건을 잘 충족시키고 있다고 판단된다. 둘째로 홍조단괴가 형성되기 위해서는 홍조단괴가 핵을 중심으로 성장해 갈 때, 반복적



**Fig. 6.** (A) Fibrous calcite cements that grow within the intraskeletal pores of byzoan. (B) Cross-section of the rhodolith showing the growth morphology from the concentric to domal shape towards the outer part. (C) Photomicrograph of (1) in (B) showing the intergrowth of red algae and bryozoan. (D) Photomicrograph of (2) in (B) showing the domal shape with numerous conceptacles. Note the bryozoan that grew between the domes.

으로 뒤집히거나 해저 면을 구를 수 있어야 한다(Prager and Ginsburg, 1989). 수심이 얇은 연안에서 성장하는 홍조단괴의 경우에는 조류나 파도가 홍조단괴를 반복적으로 구르게 하는 역할을 하는 것이 일반적이다(Bosellini and Ginsburg, 1971; Davies and Marshall, 1986; Scoffin *et al.*, 1985; Tsuji *et al.*, 1989). 그러나 깊은 바다에서 성장하는 홍조단괴의 경우에는 홍조단괴를 구르게 하는 요인에 대해 여러 의견이 제시되고 있다. Tsuji *et al.* (1989)은 잔물결(ripple)이 이동하면서 홍조단괴의 표면을 마모시키고 구르게 한다고 하였으며, Minoura and Nakamori(1982)는 홍조단괴가 얇은 연안에서 형성된 후 깊은 바다로 이동되어 오는 것이라고 하였다. McMaster and Conover(1969)는 수심 90 m 이상의 환경에서는 홍조단괴를 구르게 할 수 있는 요인이 없다고 주장하지만, Prager and Ginsburg(1989)는 주로 성게나 물고기와 같은 생물들이 홍조단괴를 구르게 하는 역할을 하며, 간혹 태풍 등에 의한 영향을 받기도 한다고 주장하였다. 이와 같이 홍조단괴가 성장하려면 뒤집히거나 구를 수 있는 해양학적인 조건이 필요한데, 우도의 서광리 앞바다는 이러한 조건을 잘 만족시키고 있다. 성산과 우도 사이의 우도수로는 국내에서 조류가 가장 빠른 지역 중의 하나로 알려져 있다. 이는 우도수로의 수심이 기존에 발표된 자료에 의하면 일부 지역만을 제외하고는 대부분 15 m 이내로 매

우 낮기 때문이며(Fig. 2), 따라서 이 지역에는 유속이 약 2.6~3.0 knot에 이르는 매우 빠른 조류가 형성될 수 있다. Marrack(1999)는 캘리포니아 앞 바다의 홍조단괴를 연구한 결과, 수심 약 4.5 m 인 지점에서는 유속이 0.25~0.30 m/s 이상 되어야 홍조단괴가 움직이며 성장할 수 있다고 하였다. 이에 비교해 볼 때, 우도수로의 해수면 근처에서 측정된 조류의 유속은 약 2.6~3.0 knot이며, 이는 약 1.30~1.55 m/s에 해당하는 빠르기이다. 수심이 깊어짐에 따라 유속이 어느 정도 감소할 것으로 예상되나, 이는 홍조단괴를 매우 빈번히 뒤집고 구르게 하는 데에는 충분한 빠르기라고 생각된다. 또한 이 지역에는 해마다 여름철에 몇 차례의 태풍이 북상하는데, 이러한 태풍은 해저 면에서 자라고 있는 조립 샌드 크기에서부터 왕자갈 크기까지의 홍조단괴를 모두 움직일 수 있는 충분한 에너지를 가지고 있는 것으로 생각된다. 따라서 이 지역이 태풍의 영향을 받는 시기에는 해저면의 홍조단괴들이 매우 급격하게 움직이고 구르며 성장하였을 것으로 판단된다.

이와 같이 서광리 앞의 천해는 홍조단괴가 성장하기에 알맞은 해양학적인 환경조건을 가지고 있으며, 천해에서 성장한 많은 양의 홍조단괴가 이 지역에 간헐적으로 북상하는 태풍에 의해 해안가로 운반되어 서광리 해변에 홍조단괴 퇴적물을 지속적으로 공급한 것으로 보인다.



## 결 론

1. 제주도 북제주군 우도 서광리에 분포하는 해빈퇴적물은 모두 조립 샌드에서 자갈 크기에 해당하는 홍조단괴로 이루어져 있으며, 서광리 앞 천해에는 현재에도 많은 양의 홍조단괴가 성장하고 있다.

2. 서광리의 해빈퇴적물은 입자의 크기에 따라 해안선과 평행한 방향으로 대상분포를 하고 있다. 이는 천해의 홍조단괴들이 계속해서 해빈으로 운반되어 올 때, 간헐적으로 이 지역에 영향을 주는 태풍의 에너지 차이에 의해 퇴적물이 차별화되어 재동되었기 때문이라고 생각된다. 또한 해안에 불규칙하게 분포하는 암반들 사이나 북쪽의 방파제에는 자갈 크기의 홍조단괴가 몰려 있는데, 이는 특히 태풍의 에너지가 클 때 천해로부터 운반된 홍조단괴가 암반 사이에 퇴적되면, 암반이 이 홍조단괴들을 다른 해류의 영향으로부터 보호하는 역할을 할 수 있기 때문에 암반 사이에 계속 남아 있는 것으로 생각된다.

3. 우도 홍조단괴를 형성하는 홍조류는 내부의 조직적 특징으로 보아 덮개상 홍조류 중 *Lithophyllum* sp.에 해당하는 것으로 판단된다.

4. 서광리 해빈퇴적물 중 극조립 샌드나 그레놀 크기의 홍조단괴는 핵을 중심으로 자란 뒤, 파랑에 의해 얇은 해저 면을 굴러다니면서 그 표면이 심하게 마모된 것이 특징이다. 그러나 자갈 크기의 홍조단괴는 대체로 연속적으로 성장하며, 다른 생물체들의 각질을 포획하거나 태선류와 교호하며 성장하는 형태를 보여준다. 태선류의 공극 내에는 방해석 결정이 침상의 교질물로 자라 있기도 하며, 콘셉터클 내에는 천해속성작용에 의한 침상의 아라고나이트 결정이 구과상으로 자라 있는 것이 관찰된다.

5. 서광리 앞 천해에서 성장하고 있는 왕자갈 크기의 홍조단괴는 성장 초기에는 핵을 중심으로 동심원상으로 성장하다가 크기가 커지면서 점차 둥상으로 변화해 간다. 이는 홍조단괴의 크기가 작을 때에는 조류나 파랑에 의해 자주 뒤집히거나 구르며 성장했으나, 크기가 커짐에 따라 해류의 영향에도 이동되지 않고 비교적 에너지가 낮은 암반 사이에서 고정된 채로 성장하였음을 의미한다.

6. 서광리 앞 천해에 많은 홍조단괴가 서식할 수 있는 것은 이 지역의 수온이 연중 내내 따뜻하고 화산 쇄설성 퇴적물의 유입이 없어 맑은 바닷물을 유지하고 있기 때문이며, 또한 빠른 조류와 간헐적으로 영향을 준 태풍에 의해 홍조단괴가 빈번히 뒤집히고 구를 수 있는 해양학적 조건을 갖추고 있기 때문이다.

## 사 사

이 연구는 문화재청의 지질·광물 문화재 정밀조사보고서의 일부분으로 구성되었다. 이 논문을 심사하신 김석윤 교수님과 김부근 교수님께 감사드린다.

## 참고문헌

국립해양조사원, 1990. 해류도 (우도 및 부근). 대한민국 해양수산부, No. 226.  
 박희상, 1993. 한국해역해양 환경도-제2권(남해). 해양연구소, 157 pp.  
 우경식, 2001. 지질, 광물 문화재 자원 조사 보고서. 문화재청, 226-229.

우경식, 2002. 지질, 광물 문화재 정밀 조사 보고서. 문화재청, 173-216.  
 지옥미, 우경식, 1995. 제주도 해빈퇴적물의 구성성분. 한국해양학회지, 30: 480-492.  
 최희성, 1989. 한국산 홍조 산호말과 개발속 식물에 대한 분류학적 연구. 박사학위 논문, 서울대학교, 서울, 320 pp.  
 Adey, W. H., 1966. Distribution of saxicolous crustose corallines in the northwestern North Atlantic. Journal of Phycology, 2: 49-54.  
 Adey, W. H., 1970. Some relationships between crustose coralline algae and their substrates. Science Islandica, 2: 21-25.  
 Adey, W. H. and Adey, P. J., 1973. Studies on the biosystematics and ecology of the epilithic crustose corallines of the British Isles. British Phycological Journal, 8: 343-407.  
 Adey, W. H. and Macintyre, I. G., 1973. Crustose coralline algae: a re-evaluation in the geological sciences. Geological Society of American Bulletin, 84: 883-904.  
 Adey, W. H. and McKibbin, D. L., 1970. Studies on the maerl species *Phymatolithon calcareum* Pallas (nov. comb.) and *Lithothamnium corallioides* Crouan in the Ria de Vigo. Botanica Marina, 13: 100-106.  
 Adey, W. H. and M. Vassar, 1975. Colonization, succession and growth rates of tropical crustose coralline algae (rhodophyta, cryptonemiales). Phycology, 14: 55-69.  
 Bosellini, A. and Ginsburg, R. N., 1971. Form and internal structure of recent algal nodules (Rhodolites) from Bermuda. Journal of Geology, 79: 669-682.  
 Bosence, D. W. J., 1976. Ecological studies on two unattached coralline algae from western Ireland. Palaeontology, 19: 365-395.  
 Bosence, D. W. J., 1983. The occurrence and ecology of recent rhodoliths-A review. In: T. Peryt (Editor), Coated Grains. Springer, Berlin, 225-242.  
 Davies, P. J. and Marshall, J. F., 1986. Capricorn and Bunker Reefs, Southern Great Barrier Reef. 12th International Sedimentological Congress, Field Excursion Guide, 103 pp.  
 Ellis and Solander, 1786. The natural history of many curious and uncommon zoophytes. London, 208 pp.  
 Foster, M. S., R. Riosmena-Rodriguez, D. L. Steller, and Wm. J. Woelkerling, 1997. Living rhodolith beds in the Gulf of California and their implications for paleoenvironmental interpretation. Geological Society of American Bulletin, 318: 127-139.  
 Frantz, B. R., Kashgarian, M., Coale, K. H., and Foster, M. S., 2000. Growth rate and potential climate record from a rhodolith using <sup>14</sup>C accelerator mass spectrometry. Limnology and Oceanography, 45: 1773-1777.  
 Georgina-Rivera, M., 1999. Edad y crecimiento de *Lithothamnium crassiusculum* (Foslie) Mason (Corallinales, Rhodophyta) en el suroeste del Golfo de California Mexico. Tesis, Universidad Autonoma de Baja California.  
 Johnson, J. H., 1961. Limestone-building algae and algal limestones. Johnson publishing company, Colorado, 297 pp.  
 McMaster, R. L. and Conover, J. T., 1969. Recent algal stromatolites from the Canary Islands. Journal of Geology, 74: 647-652.  
 Marrack, E. C., 1999. The relationship between water motion and living rhodolith beds in the Southwestern Gulf of California, Mexico. Palaios, 14: 159-171.

- Minoura, K. and Nakamori, T., 1982. Depositional environment of algal balls in the Ryukyu Group, Ryukyu Island, southwestern Japan. *Journal of Geology*, **90**: 602–609.
- Pallas, 1766. *Elenchus zoophytorum*. Imk, The Hague, 451 pp.
- Peryt, T. M., 1983. *Coated Grains*. Springer, Berlin, 655 pp.
- Potin, P., J. Y. Foc'h, C. Augris, and J. Cabioch, 1990. Annual growth rate of the calcareous red alga *Lithothamnion corallioides* (Corallinales, Rhodophyta) in the Bay of Brest, France. *Hydrobiologia*, **204/205**: 263–267.
- Prager, E. J. and Ginsburg, R. N., 1989. Carbonate nodule growth on Florida's outer shelf and its implications for fossil interpretations. *Palaios*, **4**: 310–317.
- Scoffin, T. P., Stoddart, D. R., Tudhope, A. W., and Woodroffe, C., 1985. Rhodoliths and coralloliths of Muri Lagoon, Rarotonga, Cook Islands. *Coral Reefs*, **4**: 71–80.
- Sohn, Y. K. and Chough, S. K., 1993. The Udo tuff cone, Cheju Island, South Korea: transformation of pyroclastic fall into debris fall and grain flow on a steep volcanic cone slope. *Sedimentology*, **40**: 769–786.
- Tsuji, Y., Sunouchi, H., Yamamura, T., Kodato, T., Yuki, T., and Iwamoto, H., 1989. Present-day carbonate sediments and their depositional environments, western offshore Miyako Island, Ryukyus. *Earth Monthly (Chikyu)*, **11**: 612–617.

---

2003년 5월 7일 원고접수

2003년 10월 23일 수정본 채택

담당편집위원: 강효진