



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사학위논문

제주도 우도 부근의 홍조단괴를 이용한
고환경 복원과 단괴 성장률 추정

허 남 국

강원대학교대학원

지질학과

2013년 2월

우 경 식 교 수 지 도

이학석사학위논문

제주도 우도 부근의 홍조단괴를 이용한
고환경 복원과 단괴 성장률 추정

Paleoenvironmental reconstruction and growth rate
estimation using rhodolith near Udo, Jeju Island

강원대학교대학원

지질학과

허 남 국

허남국의 석사 학위논문을
합격으로 판정함

2012년 12월

심사위원장 정 대 교 (인)

위 원 우 경 식 (인)

위 원 김 진 경 (인)

제주도 우도 부근의 홍조단괴를 이용한 고환경 복원과 단괴 성장률 추정

허남국

강원대학교 대학원 지질학과

제주도 북동쪽에 위치하고 있는 우도와 성산사이 천해환경에서 발견되는 홍조단괴(UD-RAN-01, 02)의 특징을 관찰하고 미량원소 함량과 안정동위원소를 고해상도로 분석하여 이들이 성장하던 당시의 환경을 추정하였다. 홍조단괴를 이루고 있는 생물은 대부분 덮개상 홍조류이며, 이 외에도 태선동물, 워튜브, 보링한 이매패류가 관찰된다. 홍조류 내에는 생식포자가 위치하고 있던 콘셉터클이 관찰되는데 생식포자가 배출된 후 빈공간은 천해 교질작용에 의해 방해석 교질물이 충전하고 있다. 채취한 홍조단괴 내에서는 성장률에 따른 여름과 겨울 셀 크기(cell size)의 차이를 명확하게 보여준다. 즉 여름에는 성장률이 높아 셀의 크기가 크지만 겨울에는 작다. 여름과 겨울의 주기와 각 셀의 크기를 측정한 결과 UD-RAN-01, UD-RAN-02 시료의 연성장률은 각각 0.25, 0.12 mm/year으로 추정할 수 있었으며, 약 100, 300년의 기간 동안 성장했던 것으로 생각된다.

홍조단괴가 성장하면서 환경의 변화에 따라 홍조단괴를 이루는 고마그네슘 방해석 내의 미량원소와 안정동위원소 성분 변화를 알아보기 위하여 성장방향을 따라 함량 변화를 측정하였다. 미량원소 측정결과 홍조단괴의 $MgCO_3$ 의 함량을 이용하여 계산된 수온은 두 시료 모두 겨울에 측정된 온도와 큰 차이를 보인다. 이는 겨울에 성장한 홍조단괴 셀 크기가 매우 작아서, 겨울철 성장부분과 여름철 성장부분

이 분석과정에서 혼합되었기 때문일 가능성이 높다. 하지만 이 홍조단괴가 성장할 당시에 겨울 수온의 차이가 실제로 있었을 가능성도 완전히 배제할 수는 없다. $MgCO_3$ 의 함량을 이용하여 계산된 여름온도는 UD-RAN-01 시료가 28.3°C로 현재와 비슷한 해수 수온에서 성장하였으며, UD-RAN-02 시료는 34.2°C로 현재보다 높은 해수 수온에서 성장한 것으로 판단된다.

두 홍조단괴에 대한 안정동위원소 측정결과 홍조단괴의 산소동위원소 성분은 탄소동위원소 성분과 비례하는 관계를 보여준다. 이는 산소, 탄소동위원소 성분 변화에 영향을 주는 요인이 해수의 동위원소 성분의 변화라는 것을 의미하며 이는 곧 민물의 유입으로 인해 두 성분이 영향을 받은 것으로 판단된다. 그러나 물의 성분과는 관련이 없이 수온에 의해서만 영향을 받는 마그네슘 함량의 변화는 홍조단괴 내의 마그네슘 함량이 주로 수온에 의해서 영향을 받았던 것으로도 판단된다.

분석된 홍조단괴의 탄소동위원소 성분은, 현재 해수의 평균 탄소동위원소 성분이 -0.2‰이고, UD-RAN-01, UD-RAN-02 시료의 평균 탄소동위원소 성분은 0.2‰, -1.1‰을 보여 현재 해수와 UD-RAN-01 시료는 거의 비슷한 값을 갖고, 전반적으로 UD-RAN-02 시료가 고갈된 값을 보인다. 또 현재 해수의 탄소동위원소 성분과 두 시료의 탄소동위원소 성분은 산소동위원소 성분이 고갈된 값을 갖는 여름철에 변화하는 범위가 넓어진다. 탄소동위원소 성분이 변화하는 범위는 현재 해수와 UD-RAN-01 시료가 비슷한 반면 UD-RAN-02 시료는 가장 넓은 범위에서 변화한다. 따라서 UD-RAN-02 시료가 성장할 당시 해수는 여름철에 유입되는 양쯔강 유출수의 영향을 더 많은 받았을 것으로 생각된다. 결과적으로 UD-RAN-01 시료는 현재와 비슷한 환경에서 성장하고, UD-RAN-02 시료는 현재보다 온난다습한 환경에서 성장한 것으로 판단된다.

목 차

요약	i
목차	iii
List of Tables	v
List of Figures	vi
1. 서론	1
1.1. 서론	1
1.2. 홍조단괴의 정의와 성장형태	4
1.3. 홍조단괴의 분포와 생성환경	6
2. 연구지역	9
3. 연구방법	13
4. 연구결과	16
4.1. 홍조단괴의 형태	16
4.2. 홍조단괴의 구성요소	19
4.3. 홍조단괴의 절대연대	23
4.4. ICP-MS를 이용하여 측정한 홍조단괴의 미량원소 성분	26
4.5. LA-ICP-MS를 이용하여 측정한 홍조단괴의 미량원소 성분	33
4.6. 홍조단괴의 안정동위원소 성분	38
5. 토의	44
5.1. 홍조단괴의 성장률	44
5.2. 홍조단괴의 연대와 성장률로 측정한 성장기간 비교	53
5.3. LA-ICP-MS와 ICP-MS를 이용한 미량원소 성분 비교	56
5.4. 홍조단괴의 마그네슘 성분 변화	58
5.5. 홍조단괴의 산소동위원소 성분 변화	64
5.6. 홍조단괴의 탄소동위원소 성분 변화	70
6. 결론	75

참고문헌	77
Appendices	87
Abstract	99

List of Tables

Table 1. Mean sea water temperature and salinity in the study area.	11
Table 2. Measured length of the longest, intermediate and shortest diameters of 27 rhodoliths.	18
Table 3. Results of radiocarbon and $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ age dating of the UD-RAN-02.	24
Table 4. Trace element (Mg, Sr, Ba, U) compositions of the red algae of various sites in Korea and Japan.	32
Table 5. Stable isotope compositions of the UD-RAN-01.	42
Table 6. Stable isotope compositions of the UD-RAN-02.	43
Table 7. Estimated growth rates for rhodoliths. Growth in $\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ unless otherwise noted.	47
Table 8. Growth intervals of the part of UD-RAN-01 examined for growth rates. The values are separately measured for the growth intervals with the longest, intermediate and shortest lengths between growth laminae.	51
Table 9. Growth intervals of the part of UD-RAN-02 examined for growth rates. The values are separately measured for the growth intervals with the longest, intermediate and shortest lengths between growth laminae.	52
Table 10. Trace element (Mg, Sr, Ba, U) content of rhodoliths by ICP-MS and LA-ICP-MS.	57
Table 11. Mean values of Mg, MgCO_3 , and $\delta^{18}\text{O}$ compositions and calculated growth temperatures.	64

List of Figures

Figure 1. (A) Growth habits of the crustose coralline algae. Left to right: irregular crust, nodule, and rigid branched form. (B) Typical growth form of the articulated coralline algae (left) and internal structure of calcareous segment (right). geniculum (g); intergeniculum (ig); medullary filaments (mf); cortical filaments (cf). (After Wray, 1977).	5
Figure 2. The world distribution of living rhodoliths. Squares are from the map in Bosence (1983).	7
Figure 3. A chart showing oceanographic element necessary for rhodolith growth.	8
Figure 4. Location map of the study area and the sampling site of rhodoliths (arrow) in this study (depth contours in meters).	10
Figure 5. Seasonal variations of salinity and sea temperature of study area at the water depth of 0 m, 10 m and 20 m	12
Figure 6. (A) Living rhodoliths in the shallow marine environment between the Seongsan and Udo. (B) Collected living rhodoliths from the study area.	15
Figure 7. (A) Histogram showing the rhodolith size distribution. (B) Classification of rhodolith shapes by plotting on Sneed and Folk diagram (1958). Longest (L), intermediate (I) and shortest (S) diameters of the rhodolith. $I:L = \sqrt[3]{S^2/(L*I)}$	17
Figure 8. A generalized example of potential band structure in a longitudinal section of a rhodolith. A 1° band is a single row of cells, and a 4° band represents a possible annual band. Four 1° bands are shown in	

each 3° band, but this number can vary greatly, especially between 3° bands within a 4° band. S is summer and W is winter (After Foster, 2001). 21

Figure 9. Photomicrographs showing the internal texture of the rhodoliths. (A) Conceptacles in the red algae. (B) A closeup of (A). Note that the conceptacle is filled with shallow marine cements. (C) Coralline red algae. (D) Bryozoan (bry). (E) Serpulid worm tubes. (F) Borings in the rhodolith. (G) The bore within the rhodolith filled with calcareous skeletal grains and detrital grains. (H) Boring bivalve (bv) remained within the bore. 22

Figure 10. Sampling points of the UD-RAN-02 for age dating. The solid lines represent the sampling area for the radiocarbon dating and the dotted lines are for the uranium–thorium dating. 24

Figure 11. Age versus growth length of the UD-RAN-02. 25

Figure 12. Mean values of the trace element (Mg, Sr, Ba, U) from the red algae with latitude. 1=Sokcho, 2=Gangneung, 3=Dokdo, 4=Pohang, 5=Haseo, 6=Busan, 7=Udo, Jejudo, 8=Okinawa. 29

Figure 13. Mean values of the trace element (Mg, Sr, Ba, U) from the crustose coralline algae with latitude. 1=Sokcho, 2=Gangneung, 3=Dokdo, 4=Pohang, 5=Haseo, 6=Busan, 7=Udo, Jejudo, 8=Okinawa. 30

Figure 14. Mean values of the trace element (Mg, Sr, Ba, U) from the articulated coralline algae with latitude. 1=Sokcho, 2=Dokdo, 3=Haseo. 31

Figure 15. Trace elements content (Mg, Sr, Ba, U) of the UD-RAN-01 was measured by using a LA-ICP-MS. Spot analyses were carried out along the laser transects on a cross section of rhodolith. Most of the trace element values show similar trend except for a few intervals. The

arrows show the trend. It is notable that three main Mg peaks always have two lows (grey areas). 36

Figure 16. Trace elements content (Mg, Sr, Ba, U) of the UD-RAN-02 was measured by using a LA-ICP-MS. Spot analyses were carried out along the laser transects on a cross section of rhodolith. Every trace elements show low value (grey area). 37

Figure 17. Oxygen and carbon isotope compositions of the UD-RAN-01. 40

Figure 18. Oxygen and carbon isotope compositions of the UD-RAN-02. 41

Figure 19. (A) Polished cross section of the UD-RAN-01. Indicating the LA-ICP-MS and isotope transect on the surface of the polished slab. (B) The part of the UD-RAN-01 examined for growth rates. Annual growth laminae are indicated by white dashed lines. S=summer, W=winter. 48

Figure 20. (A) Polished cross section of the UD-RAN-02. Indicating the LA-ICP-MS and isotope transect on the surface of the polished slab. (B) The part of the UD-RAN-02 examined for growth rates. Annual growth laminae are indicated by white dashed lines. 49

Figure 21. Thin section photo showing different cell sizes between summer and winter. Growth rate is higher in summer than winter because of the higher isolation in summer. White and grey arrows (area) indicate summer and winter growth intervals, respectively. S=summer, W=winter. 50

Figure 22. Age versus growth length of the UD-RAN-02. Grey area is growth period. 55

Figure 23. (A) Sampling points of the UD-RAN-02 for age dating. (B) A closeup of the dotted line area. (C) Borings in the rhodolith. 55

Figure 24. (a) Scatter diagram of magnesium versus strontium contents of the rhodoliths using ICP-MS and LA-ICP-MS. (b) Scatter diagram of barium versus uranium contents of the rhodoliths using ICP-MS and LA-ICP-MS. 57

Figure 25. Satellite images of the sea temperature (2010). 59

Figure 26. Magnesium contents of the rhodoliths. The solid lines indicate the magnesium value of rhodoliths in the summer. The dotted lines indicate the magnesium value of the rhodoliths in the winter. The number is calculated value of the temperature by using $MgCO_3$ value of the rhodoliths. 63

Figure 27. Oxygen isotope profile for the rhodoliths. The dotted lines indicate the oxygen isotopic values in the winter. The number is calculated oxygen isotope values of the seawater in winter by using oxygen isotopic value. 69

Figure 28. (a) Scatter diagram of carbon isotope versus magnesium contents of the rhodoliths. (b) Scatter diagram of oxygen isotope versus carbon isotope contents of the rhodoliths. 71

Figure 29. Scatter diagram of oxygen versus carbon isotope compositions of the rhodoliths (UD-RAN-01, 02) and recent seawater (DIC) (UDW) from Udo, Jeju island. 73

Figure 30. Scatter diagram of oxygen versus carbon isotope compositions of the rhodoliths (UD-RAN-01, 02) and recent seawater (DIC) (UDW) from Udo, Jeju island. The carbon isotope compositions show wide range with less and less oxygen isotope compositions. 74

1. 서 론

1.1. 서론

인간 활동에 의해 온실가스가 증가하여 지구 온난화가 가속되면서 우리나라를 비롯한 전 세계는 기상이변의 피해를 입고 있다. 특히 지구온난화에 따라 태평양 서부에 위치하고 있는 West Pacific Warm Pool의 세력이 강화되면서 엘니뇨와 태풍의 발생에 많은 영향을 미치고 있는 것으로 알려지고 있으며, 2007년도에 발간된 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 제4차 보고서는 가까운 미래에 지구의 환경에 많은 변화가 있을 것을 우려하고 있다(IPCC, 2007). 따라서 여러 가지 기상 이변에 대한 예측을 위해서는 과거의 기후변화를 추적하는 것이 중요하며, 이를 위해 여러 종류의 고기후지시자(paleoclimate proxy)를 이용하여 고환경을 복원할 수 있는 연구가 필요하다.

고기후지시자들은 과거 기후상태의 정보를 직·간접적으로 제공하여 지역적, 시간적으로 기후자료를 이해하는데 중요하다(Jones et al., 2001). 고기후지시자는 육지와 해양환경에 모두 존재하는데, 육지에 존재하는 고기후지시자는 나무나이테(Jones et al., 1998; Briffa, 2000), 호수퇴적물, 퇴스(loess)등이 있고, 최근에 동굴생성물을 이용한 고기후 연구(Linge et al., 2001; Henderson, 2006)가 활발하게 수행되고 있다.

해양환경의 지시자로 많이 이용되어온 것은 조초성 산호(hermatypic coral)다. 이와 같이 산호가 고기후 복원에 중요한 역할을 하는 몇 가지 특징이 있다. 1) 연성장선이 잘 발달하기 때문에 연속적으로 자란 산호일 경우 연대 추정이 수월하다. 2) 연성장률이 1~2 cm로 빠르고, 수백 년 동안 지속적인 성장을 하기 때문에 고해상도의 분석이 용이하다. 3) 주로 수 미터 내외의 수심에서 성장하고 있는 산호를 대상으로 연구할 경우, 시료채취가 용이하고 일정한 수심에서의 환경 변화 복원이 가능하다. 4) 골격이 탄산칼슘(CaCO_3)으로 이루어져 있기 때문에 안정동위원소와 여

러 미량원소에 대한 분석이 가능하다(Gagan et al., 2000; Cole, 2003; Correge, 2006; Grottoli and Eakin, 2007). 이러한 특징을 이용하여 지구의 기후변화 연구, 특히 열대해역 기후변화의 기록과 ENSO와의 관계(Charles et al., 1997; Druffel, 1997; Kawahata et al., 2000), 해양 표층수의 고수온(paleo temperature)을 복원하거나 고염분(paleo salinity), 고강수량(paleo precipitation) 기록을 복원하는 등 산호를 이용한 연구가 활발히 진행되어 왔다(Gagan et al., 2000; Shimamura et al., 2005; Greer et al., 2006; Goodkin et al., 2007). 그러나 산호는 주로 열대지방과 아열대지방에서만 제한적으로 나타나기 때문에 고위도 지역에 고기후를 복원하기에 어려움이 있고, 생체효과(vital effect)의 영향을 받아 고기후 해석을 복잡하게 한다(Shirai et al., 2005).

이매패류의 기후지시자로서의 응용은 1980년 초부터 급속하게 발달하여 지난 30년 동안 기후지시자로서 꾸준히 연구되었다. 이매패류를 기후지시자로 이용할 수 있었던 이유는 전 세계적으로 넓게 분포하고, 다양한 환경과 수심에서 서식하며, 많은 이매패류 종(specie)들이 수십 년에서 많게는 수백 년까지 오랜 기간 동안 성장하기 때문이다(Strom et al., 2004; Wanamaker et al., 2008). 이매패류 화석은 양이 풍부하고 지질학적인 시간 동안 넓게 분포하기 때문에(e.g., Krantz et al., 1987), 주거지 주변에 형성된 패총(shell mound)과 같은 고고학적인 지역에 잘 보존되어 있어 과거 환경뿐만 아니라 문화를 조사하는데 중요한 지시자 역할을 한다(e.g., Quitmyer and Jones, 2009; Walker and Surge, 2006). 또 이매패류는 패각 내에 연성장선이 잘 발달하기 때문에 계절적인 변화를 잘 파악할 수 있다(Jones, 1980; Richardson, 1989). Jones(1981)는 고기후의 지시자로 중위도 지역에서 이매패류(bivalve)를 이용하였다. 그러나 이매패류는 유년기에서 노년기로 갈수록 성장률이 감소해 고기후 해석을 복잡하게 하고, 노년기동안에 고해상도의 분석에 어려움이 있다(Goodwin et al., 2003).

저위도와 같은 한정된 지역에서 나타나 고위도지역에 고기후 연구가 어려운 산호와 노년기로 갈수록 성장률이 감소해서 고기후 해석을 어렵게 하는 이매패류의

단점들을 보완하기 위해 새로 발견된 지시자가 홍조단괴(rhodolith)이다. 최근의 연구(Halfar et al., 2007, 2008; Hetzinger et al., 2009; Kamenos et al., 2008)에 의하면 홍조단괴는; 1) 열대 및 아열대의 얕은 바다에만 분포하는 산호와 극지 및 고산 지역에만 분포하는 빙하와는 달리, 홍조단괴는 저위도부터 고위도까지 전 세계적으로 분포하기 때문에 여러 지역의 기후변화를 복원하는데 중요한 역할을 할 수 있고, 2) 다른 생물들보다 성장기간이 길기 때문에 더 오랜 기간 동안의 기록을 얻을 수 있으며, 3) 성장층(growth laminae)이 잘 발달하여 시간적으로 연속적인 자료를 얻을 수 있기 때문에 고기후 지시자로 유용하다. 또한 홍조단괴는 고마그네슘 방해석(Mg-calcite)으로 이루어져 있기 때문에 방해석 내에 포함되어 있는 안정동위원소와 미량원소의 변화를 통해 과거의 기후정보를 추적할 수 있는 장점이 있어서 과거환경과 고기후변화의 연구를 위해 홍조단괴가 많이 이용되어 왔다(Adey, 1965; Chave and Wheeler, 1965; Moberly, 1968; Halfar et al., 2000).

이 연구에서는 제주도 북동쪽에 위치하고 있는 우도와 성산사이의 천해환경에서 채취한 홍조단괴의 조직적 특징을 살펴보고, 이 홍조단괴에 기록된 안정동위원소 성분과 미량원소 분석을 통해 홍조단괴가 생성되던 당시의 과거해양환경 및 기후변화를 추정하는 것이 가능한지를 판단하는 것이 목적이다. 또 고해양 및 기후변화를 추정하는 것이 가능하다면 홍조단괴가 성장하던 당시의 해양환경을 복원하는 것이 목적이다.

1.2. 홍조단피의 정의와 성장형태

홍조류(red algae)는 총 3개의 과(Family)로 나뉘지고, 이 중 Corallinaceae 과는 2개의 아과(Subfamily)로 나뉜다. 마디 사이가 석회질로 연결되고, 덮개형으로 성장하는 덮개상 홍조류(Melobesoideae=crustose coralline algae; 그림 1A)와 마디 사이가 유기물질로 연결되고, 가지상으로 성장하는 마디상 홍조류(Corallinoideae=articulated coralline algae; 그림 1B)로 나뉜다. 덮개상 홍조류는 다양한 형태로 성장을 한다. 표면은 층리가 잘 관찰되고 평평하다. 또 가지처럼 보이면서 굽기가 굽고, 구형의 형태를 갖고 있는 것도 있다. 덮개상 홍조류가 지속적으로 성장하면서 구형(spheroidal) 내지 타원형(ellipsoidal)으로 성장한 것을 홍조단피라고 한다(Johansen, 1981). 홍조단피는 rhodolith, rhodolite 혹은 rhodoid의 용어들을 사용하고, 어떤 학자들은 프랑스 고어로 maërl이란 용어를 사용하기도 한다. 또는 크고 둥근 엽상체(thalli)를 rhodoliths 라고 부르고, 작고 가지형태의 엽상체를 maërl 라고 부르는 학자들도 있다(Foster, 2001).

홍조단피는 매몰되지 않을 정도의 딱딱한 기저층 위를 구르면서 성장한다. 주변에 암초(reef)에서 부서져 나온 조각(fragment)이나 작은 골격질 입자가 핵이 되며, 이 핵 위에 포자(spore)가 침착을 하여 홍조단피가 자라기 시작한다. 조류나 파랑 등에 의해 계속적으로 뒤집히고 구르면서 단피형태로 성장한다. 이 결과 전체적으로 구형에서 타원형까지 다양하게 그 형태를 유지하면서 성장을 한다(Bosence, 1983). 홍조단피는 성장률이 매우 느리고, 오랜 기간 동안 성장한다. 보고된 바에 의하면 홍조단피의 크기는 직경 20~30 cm 이상 도달하며 성장기간은 최대 500~800 년 동안 성장한다고 보고된 바 있다(Adey and Macintyre, 1973). 보통 홍조단피의 연평균성장률은 0.015~2.5 mm/year이고, 20 m 보다 얕은 수심에서 형성되는 홍조단피의 평균 성장률은 0.4 mm/year정도로 알려져 있다(Foster, 2001).

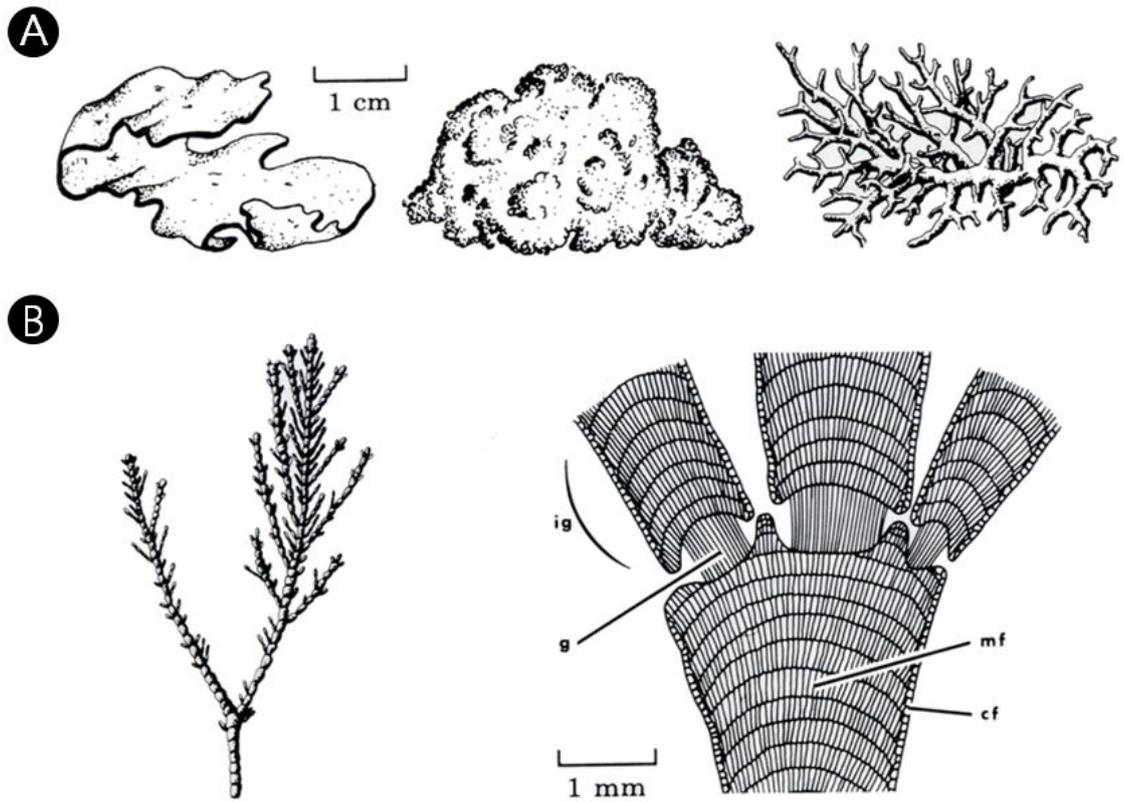


Fig. 1. (A) Growth habits of the crustose coralline algae. Left to right: irregular crust, nodule, and rigid branched form. (B) Typical growth form of the articulated coralline algae (left) and internal structure of calcareous segment (right). geniculum (g); intergeniculum (ig); medullary filaments (mf); cortical filaments (cf). (After Wray, 1977).

1.3. 홍조단괴의 분포와 생성환경

홍조단괴는 저위도에서 고위도까지 전 세계 천해지역에서 다수 보고되고 있다(그림 2). 주로 조간대(intertidal zone)에서 잘 발견되지만, 수심이 깊은 250 m 조하대(subtidal zone)에서도 발견된다(Logan et al., 1969). 홍조단괴가 전 세계 천해지역에서 많이 형성되지만 성장하고 서식하는데 필요한 몇 가지 해양학적인 조건이 있다(그림 3). 홍조단괴가 성장할 수 있기 위해서는 그 지역이 홍조류가 서식할 수 있는 해양학적인 조건을 갖추고 있어야 한다. 1) 홍조류는 식물이기 때문에 광합성을 할 수 있는 수심(photic zone)에서 성장한다(Adey and Adey, 1973). 2) 홍조류가 서식하기 적합한 온도, 염분, 영양염류 등의 조건이 맞아야 한다. 모든 홍조류가 같은 범위의 환경조건에서 서식하지는 않는다. 종별로 차이가 많이 나지만 각각 종들이 서식하고 있는 온도, 염분 등의 조건이 맞아야 홍조단괴가 형성될 수 있다(Adey, 1970). 3) 홍조단괴가 형성되기 위해서는 홍조단괴가 핵을 중심으로 성장해갈 때 반복적으로 구를 수 있고, 퇴적물에 매몰되지 않을 정도의 수력에너지가 있어야 한다. 수력에너지가 약한 지역에서는 게나 가재 등의 생물활동이 성장에 중요한 요소로 작용하기도 한다(Prager and Ginsburg, 1989).

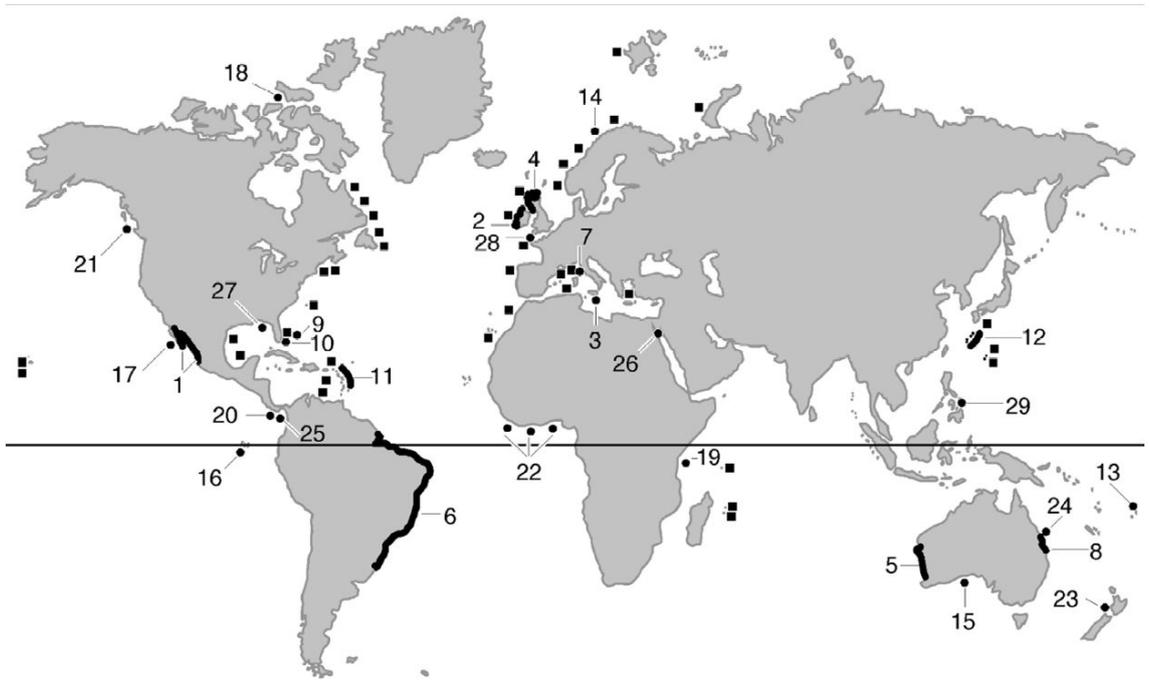


Fig. 2. The world distribution of living rhodoliths. Squares are from the map in Bosence (1983).

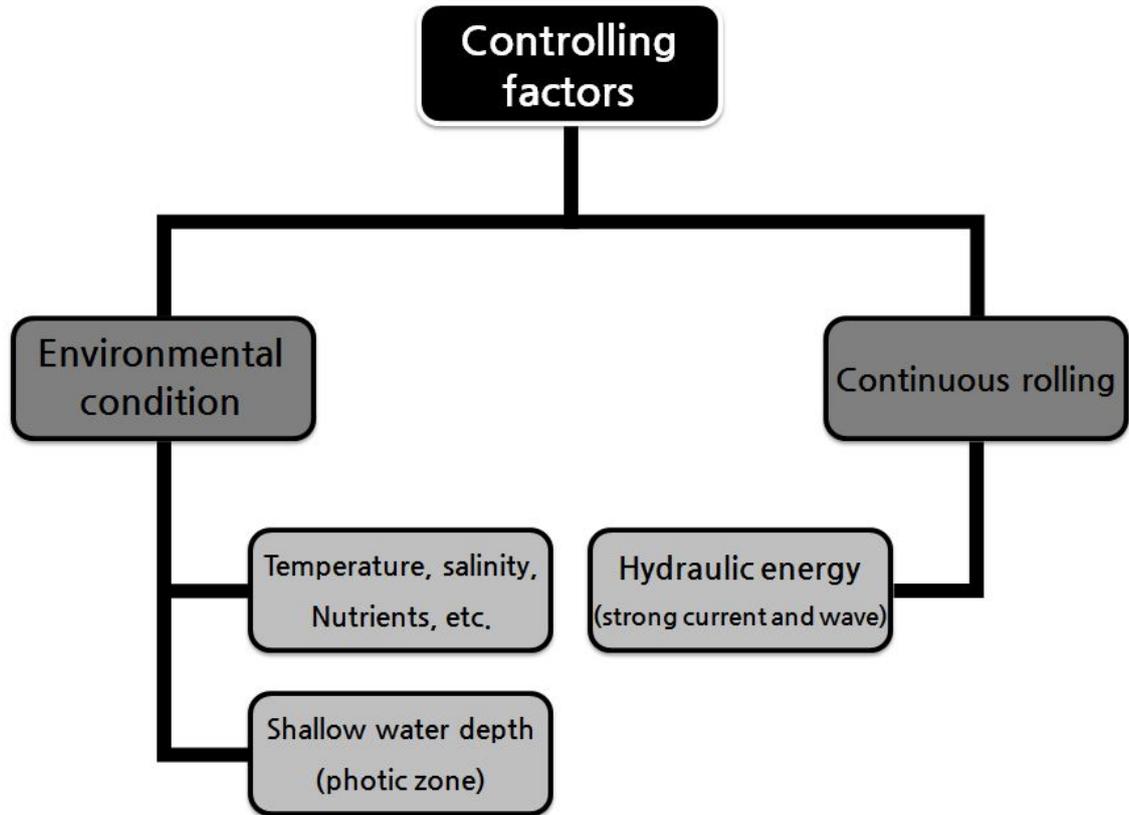


Fig. 3. A chart showing oceanographic element necessary for rhodolith growth.

2. 연구지역

우도는 제주도 동부 성산포항에서 동북쪽으로 약 3.8 km 떨어진 곳에 위치하고 있으며(그림 4), 신생대 제 4기의 플라이스토세 후기(Late Pleistocene)의 수성화산 활동(hydro-volcanism)으로 형성된 화산섬이다(Sohn and Chough, 1993). 우도 주변의 해저지형은 매우 특이한 형태를 나타내는데, 우도를 중심으로 하여 동서의 해저지형이 매우 상이한 구조로 되어 있다. 우도의 서쪽에는 제주도와 우도 사이에 우도수로가 위치하고 있다. 우도수로는 연안으로부터 완만한 경사를 이루고 있으며, 기반은 주로 견고한 암반층이고 암반위에는 홍조단괴를 포함한 탄산염 퇴적물이 얇게 덮여 있다. 우도수로는 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. 반면 우도의 동쪽 해저지형은 외해로 급격하게 깊어지는 형태를 이루고 있어, 해안에서 바다로 약 3 km 정도 나아가면 수심이 100 m 이상으로 깊어진다. 우도수로에서 해류의 유속은 창조류 시 북쪽 방향으로 1.5 m/s, 낙조류 시 남향으로 1.3 m/s로 매우 빠르게 관측되었다(국립해양조사원, 1990).

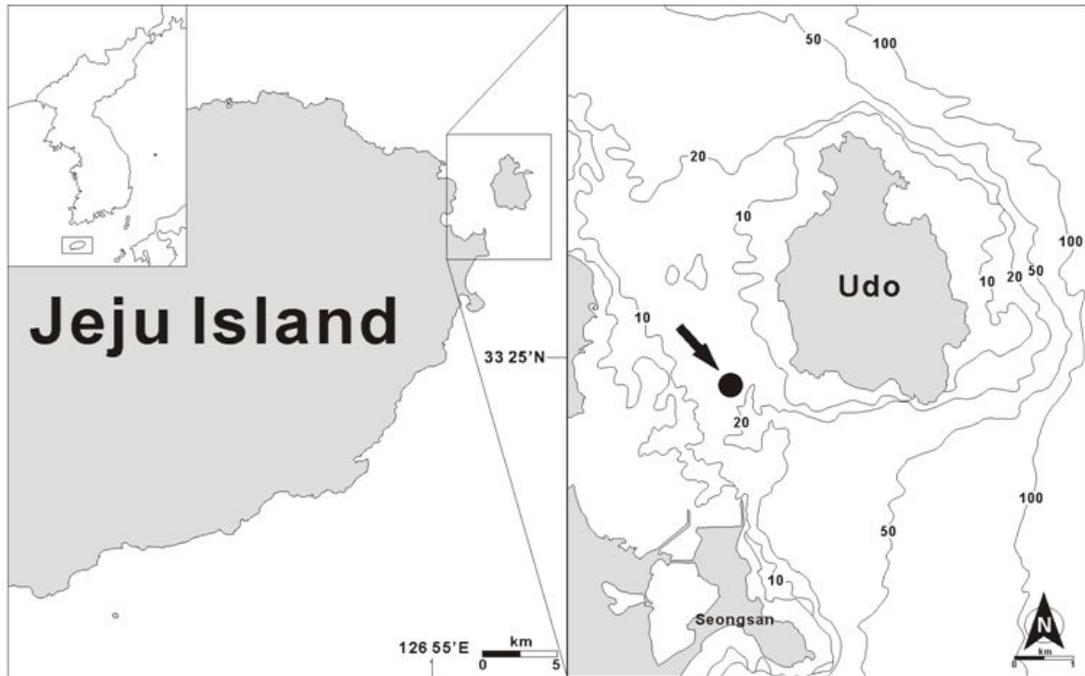


Fig. 4. Location map of the study area and the sampling site of rhodoliths (arrow) in this study (depth contours in meters).

해양환경 자료는 국립해양조사원에서 관측된 자료를 인용하였다 (<http://info.khoa.go.kr>). 1968년 8월부터 2011년 10월까지 매달 또는 두 달에 한번 정선관측지점 400-27(33°50'N, 127°07'E)에서 관측되었고, 관측된 수심은 0(표층), 10, 20 m이다(표 1). 수심 0 m에서 관측된 수온과 염분을 보면, 겨울철 평균 수온이 약 15.0°C이며 여름철 평균 수온이 약 26.8°C이다(그림 5a). 수온은 연간 약 11.8°C의 변화폭을 보인다. 염분은 겨울철 평균이 약 34.5‰, 여름철 평균이 약 31.4‰로서, 여름철이 겨울철보다 낮은 경향을 보이고, 뚜렷한 계절 변화가 나타난다. 수심 10 m에서는 가장 낮았던 겨울철 평균 수온이 약 15.0°C이며 수온이 가장 높은 여름철 평균 수온이 약 24.3°C이다(그림 5b). 수온은 연간 약 9.3°C의 변화폭을 보인다. 염분은 겨울철 평균이 약 34.4‰, 여름철 평균이 약 32.4‰이다. 수심 20 m

에서는 가장 낮았던 겨울철 평균 수온이 약 14.6°C이며 수온이 가장 높은 여름철 평균 수온이 약 23.4°C이다(그림 5c). 수온은 연간 약 8.8°C의 변화폭을 보인다. 염분은 겨울철 평균이 약 34.4‰, 여름철 평균이 약 32.9‰로서, 표층과 마찬가지로 수심 10, 20 m에서도 여름철이 겨울철보다 낮은 경향을 보이고, 뚜렷한 계절 변화가 나타난다.

Table 1. Mean sea water temperature and salinity in the study area.

depth (m)	mean sea temperature (°C)		mean sea salinity (‰)	
	summer	winter	summer	winter
0	26.8	15.0	31.4	34.5
10	24.3	15.0	32.4	34.4
20	23.4	14.6	32.9	34.4

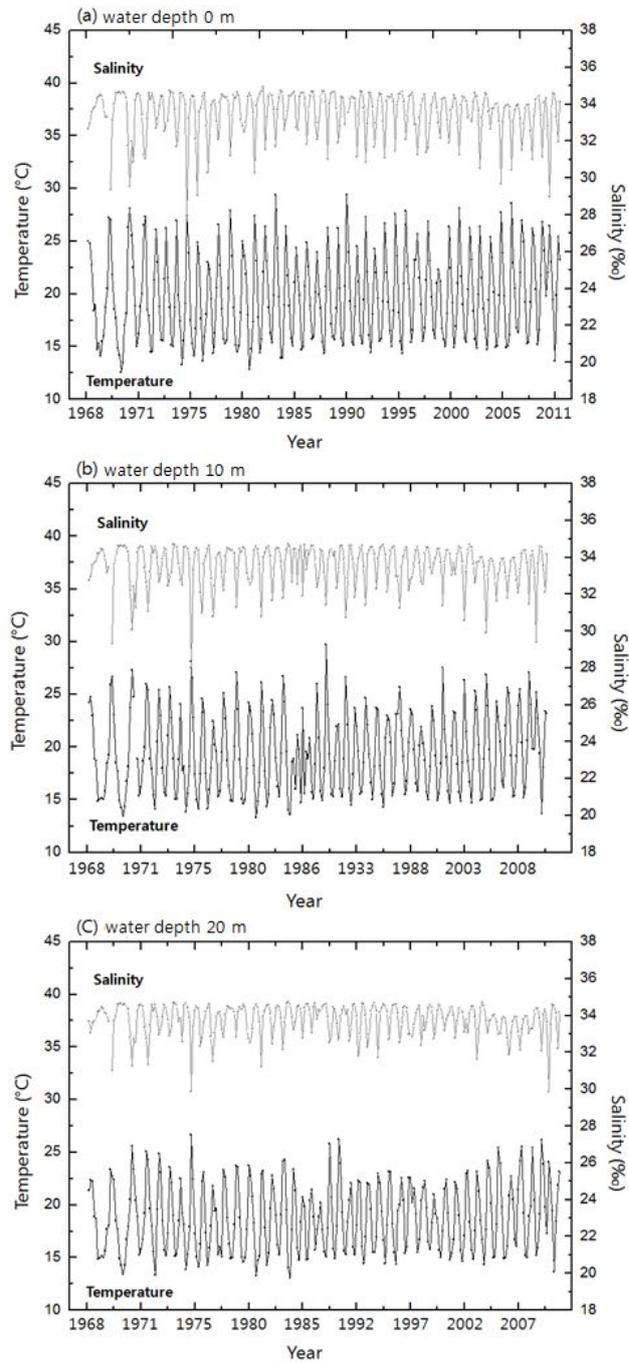


Fig. 5. Seasonal variations of salinity and sea temperature of study area at the water depth of 0 m, 10 m and 20 m.

3. 연구방법

홍조단괴에 대한 성인과 특징을 알아보기 위해 2010년 8월 성산반도와 우도사이의 천해(33°30.5001'N, 126°55.9016'E)에서 스쿠버 다이빙을 실시하여 현재 성장하고 있는 홍조단괴를 채집하였다(그림 4, 6B). 채취한 시료를 부드러운 솔로 깨끗이 물 세척한 후 24시간 자연건조하였다. 조직적인 특성관찰을 위해 슬랩과 박편을 제작하여 실체현미경과 편광현미경으로 관찰하였다. 깨짐을 방지하기 위해 에폭시로 상온에서 24시간 경화한 후 최대 성장축을 따라 절단하였고, 이때 에폭시 내부에 있는 기포를 제거하고 홍조단괴 내부로 에폭시를 스며들게 하기 위해 100°C 진공상태에서 20분간 처리하였다. 또 홍조단괴를 절단하였을 때 생교란작용을 받지 않고, 연속적으로 성장한 부분을 2×3 cm 크기로 절단하여 지화학적인 분석을 하였다. 지화학적인 분석에 이용된 홍조단괴(UD-RAN-01, 02)의 직경은 6, 12 cm이다. 그 단면을 100, 800, 1200, 2400번과 3000번 SiC 연마제로 연마한 후, 1 μm Al₂O₃ 연마제로 다시 연마하였다. 홍조단괴 내에 남아있는 연마제를 제거하기 위해 초음파세척기로 30분간 처리한 후 자연 건조하였다.

연대분석은 방사성탄소(radiocarbon)와 우라늄-토륨연대측정법(uranium thorium dating)을 통해 이루어 졌다. 미시료는 시료 중앙에서 성장방향을 따라 미량표품채취기(dental drill)을 이용하여 3 지점에서 각각 3개의 시료를 채취하였다. 방사성탄소 연대분석은 두 곳에서 실시되었다. 시료 약 200 mg 을 채취하여 한국지질자원연구원(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources; KIGAM) 지질특성분석센터에서 실시하였고, 시료 50 mg 을 채취하여 미국의 BETA 분석실험실에서 이루어졌다. 시료를 염산(HCl)과 수산화나트륨(NaOH)을 이용해 전처리한 후 AMS(Accelerator Mass Spectrometry)로 측정하였다. 측정값은 2 sigma calibration curve를 이용하여 calendar age로 보정되었다. 우라늄-토륨연대분석은 미국의 미네소타대학에서 TIMS(Finnigan MAT 262-RPQ mass spectrometer)를 이용하여 분

석하였다. 분석 절차는 Edwards et al.(1987)과 Cheng et al.(2000)의 방법에 따라 진행하였다. 미시료를 질산(HNO₃)에 용해시킨 후 ²²⁹Th과 ²³³U-²³⁶U (²³³U ≅ ²³⁶U) 추적자를 가하였다. 우라늄(Uranium)과 토륨(Thorium) 추적자 용액은 뉴브런스윅스 실험실(New Brunswick Laboratories; NBL)의 표준 시료(Standard Reference Material)인 112-A 중액을 사용하여 보정하였으며, 아이오와(Iowa)의 아미즈(Ames) 연구소에 있는 표준물질조제센터(Standard Materials Preparation Center)의 정제토륨 금속이 이용되었다. 우라늄 토륨은 Fe(OH)₃가 포함된 시료-추적자 용액으로부터 동시에 침전시켰으며, 이온 교환 반응으로 추출하였다. 이를 위해 바이오-래드 음이온교환합성수지(Bio-Rad naion exchange resin AGI X8, 100-200 mech)를 이용하였다.

미량원소(Mg, Sr, U, Ba) 분석은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)와 레이저 삭마 유도결합플라즈마 질량분석기(LA-ICP-MS)를 이용하였다. 미량원소의 함량차이가 많이 나기 때문에 ICP-MS와 유도결합플라즈마 원자방출분광기(ICP-AES)로 나누어 분석하였다. 위도별로 채취된 홍조단괴의 분말시료 3 mg 채취하였다. 채취된 분말시료를 250°C에서 질산(HNO₃)과 반응시킨 후 분석하였다. 분석은 한국기초과학지원연구원(Korea Basic Science Institute)에서 이루어졌다. LA-ICP-MS 분석은 홍조단괴의 성장축을 따라 고해상도로 이루어졌고, 콘셉터클(conceptacle)이 있는 부분은 콘셉터클을 피해 옆부분을 따라 분석하였다. 분석은 한국기초과학지원연구원에서 질량분석기(mass spectrometer; Thermo Scientific Company X7)에 연결된 UV 레이저 삭마 시스템(213 nm Nd:YAG laser; New Wave UP213)을 이용하였다. Laser energy densities는 6 J/cm²이고, 레이저 삭마 시스템에서 헬륨(helium)을 이용하였다(0.90 l/min). 분석은 홍조단괴의 최대 성장축을 따라서 spot 분석을 실시하였고, spot size와 spot 사이 간격은 55 μm로 하였다. 외부표준시료는 NIST SRM(U.S. National Institute of Standard and Technology Standard Reference Material) 610을 사용하였다. NIST SRM 610 자료는 GeoReM database(K. P. Jochum and F. Nehring, GeoReM preferred values, 2006; see

http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/sample_query_pref.asp로부터 얻을 수 있다. 각각의 분석은 칼슘(Ca)의 함량을 내부표준시료로 이용하여 보정하였으며, Virginia Tech의 AMS 소프트웨어를 이용하여 각각의 미량원소 함량을 계산하였다.

안정동위원소 분석은 홍조단괴의 성장축을 따라 미량표품채취기를 이용하여 약 300~400 μg 채취하였다. 채취된 분말시료를 70°C 진공상태에서 인산(H_3PO_4)과 반응시켜 추출한 CO_2 가스를 이용하여 산소와 탄소동위원소를 측정하였으며, 분석은 미국 애리조나 대학의 Environmental Isotope Laboratory에서 질량분석기(Mass spectrometer; Finnigan MAT 252)를 이용하여 분석하였다. 표준시료는 NBS-18과 NBS-19를 사용하였으며, 분석오차 범위는 산소동위원소가 $\pm 0.10\%$, 탄소동위원소가 $\pm 0.08\%$ 이다. 모든 분석 값은 VPDB(Vienna Pee Dee Belemnite) 단위이다.

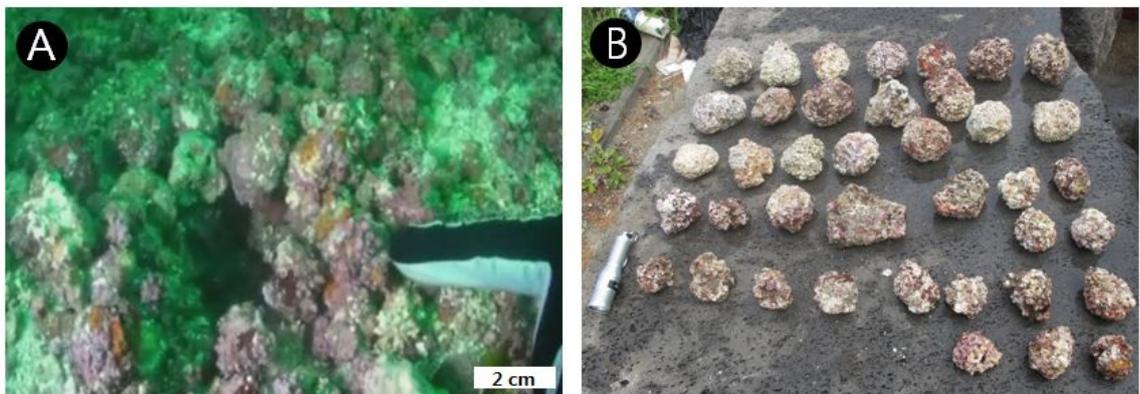


Fig. 6. (A) Living rhodoliths in the shallow marine environment between the Seongsan and Udo. (B) Collected living rhodoliths from the study area.

4. 연구결과

4.1. 홍조단괴의 형태

홍조단괴의 형태는 구형, 타원형, 원반형에서부터 불규칙한 형태까지 매우 다양하게 나타난다. 표면도 울퉁불퉁하거나 혹은 매끈하거나 불규칙한 표면까지 매우 다양하다. 채취한 홍조단괴 형태의 다양성을 알아보기 위해 채취한 홍조단괴의 단축(shortest diameter), 중축(intermediate diameter), 장축(longest diameter)의 길이를 측정하여 홍조단괴의 형태를 Sneed and Folk 도표(Sneed and Folk, 1958)에 도시해 보았다. 단축의 길이는 4~8 cm까지 나타나며, 평균직경은 5.8 cm이다. 중축의 길이는 5.5~9 cm까지 나타나며, 평균직경은 7 cm이다. 장축의 길이는 6~10 cm까지 나타나며, 평균직경은 7.9 cm이다. 이 세 축의 평균직경은 약 7 cm이다(표 2). 홍조단괴의 형태를 육안으로 관찰하였을 때는 그 형태가 매우 다양하게 보였지만, 측정한 직경을 Sneed and Folk 도표에 도시해본 결과 구형과 타원형 사이에 연장된 구형(elongate)의 형태가 주를 이루었다(그림 7B). 따라서 평균 직경 7 cm 이상의 홍조단괴는 대부분 연장된 구형의 형태로 성장했을 것으로 추정된다.

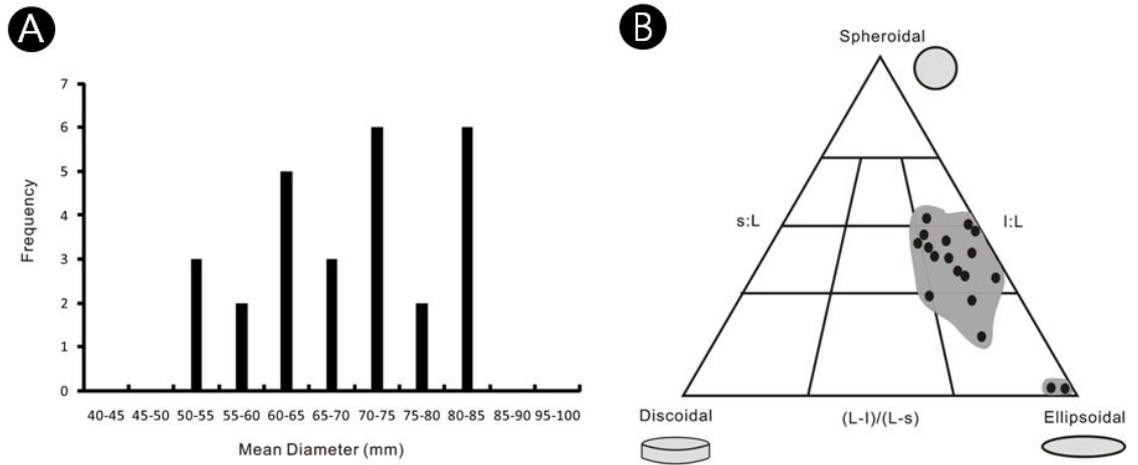


Fig. 7. (A) Histogram showing the rhodolith size distribution. (B) Classification of rhodolith shapes by plotting on Sneed and Folk diagram (1958). Longest (L), intermediate (I) and shortest (S) diameters of the rhodolith. $I:L = \sqrt[3]{S^2/(L \cdot I)}$

Table 2. Measured length of the longest, intermediate and shortest diameters of 27 rhodoliths. (unit: cm)

Sample no.	L (longest)	I (intermediate)	S (shortest)
1	10.0	9.0	6.0
2	8.5	8.0	7.0
3	10.0	9.0	6.0
4	9.0	8.0	7.5
5	8.5	6.5	6.0
6	9.0	8.0	6.0
7	7.5	7.5	6.5
8	8.5	6.5	6.0
9	10.0	8.0	7.5
10	9.0	8.0	5.5
11	9.5	6.5	5.0
12	7.0	6.5	5.0
13	8.0	7.0	5.5
14	6.0	6.0	4.0
15	7.0	6.5	5.0
16	6.0	6.0	6.0
17	7.0	6.5	6.5
18	6.5	5.5	4.5
19	7.0	6.0	5.0
20	6.5	6.0	6.0
21	8.5	8.0	8.0
22	6.5	6.0	4.0
23	7.0	6.0	4.5
24	6.0	6.0	5.5
25	9.0	7.0	6.0
26	8.5	8.0	7.5
27	8.5	6.0	5.5
average	7.9	7.0	5.8

4.2. 홍조단괴의 구성요소

홍조단괴를 이루고 있는 홍조류는 덮개상 홍조류이다. 덮개상 홍조류는 무수히 많은 작은 셀(cell)들로 이루어져 있는데 이 셀들이 층을 이루어 성장을 한다. 셀의 크기는 차이가 나는데 이 차이는 여름철과 겨울철의 계절적인 변화를 반영한다. 일사량이 많고 온도가 높은 여름철에는 셀의 크기가 크고, 일사량이 적고 온도가 낮은 겨울철에는 셀의 크기가 작기 때문이다(그림 8). 따라서 여름과 겨울에 셀 크기의 주기성을 이용하여 홍조단괴의 성장기간을 대략적으로 판단할 수 있다(Frantz et al., 2000). 덮개상 홍조류 내에는 매년 겨울마다 생식포자를 배출하여 성장하기 때문에 생식포자가 위치하고 있던 콘셉터클이 많이 존재하고, 포자가 나오는 입구인 아파처(aperture)가 있다. 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). 연구지역에서의 홍조단괴의 경우에는 한 개의 아파처가 발달해 있는 콘셉터클을 다량 관찰 할 수 있으며, 이를 근거로 홍조단괴의 대부분이 *Lithophyllum* 속에 의해 생성된 것으로 제안된 바 있다(김진경 외, 2003). 콘셉터클 내부는 생식포자가 배출된 후 빈 공간으로 남아있거나, 천해 속성작용에 의해 형성된 방해석 교질물이 공극을 충전하고 있다(그림 9A, B). 덮개상 홍조류 외에도 태선동물(bryozoan), 워뉘브(serpulid worm tube)가 단괴 내에 홍조류와 함께 자란 조직이 관찰된다(그림 9C, D, E). 또 홍조단괴 내에는 보링(boring)의 흔적이 많이 발견된다(그림 9F). 보링은 길쭉한 형태부터 원형까지 형태가 다양하고, 크기는 수 μm 부터 3 cm까지 보링한 생물에 따라 매우 다양하게 나타난다. 직경이 0.3 mm보다 큰 보링은 주로 이매패류, 갯지렁이, 삿갓조개와 같은 생물에 의한 것이고, 0.3 mm보다 작은 보링은 조류, 균류, 박테리아에 의해 생성된다고 제안된 바 있다(Checconi et al., 2010). 보링내부는 빈 공간으로 남아있거나, 성게, 저서성유공충, 쇠설성 입자 등으로 이루어진 내부퇴적물(internal sediments)이 퇴적된 형태로 발견된다(그림 9G). 또는 실제로 보링을 한 이매패류가 보링 내에서 살던 형태로 남아 있기도 한다(그

림 9H).

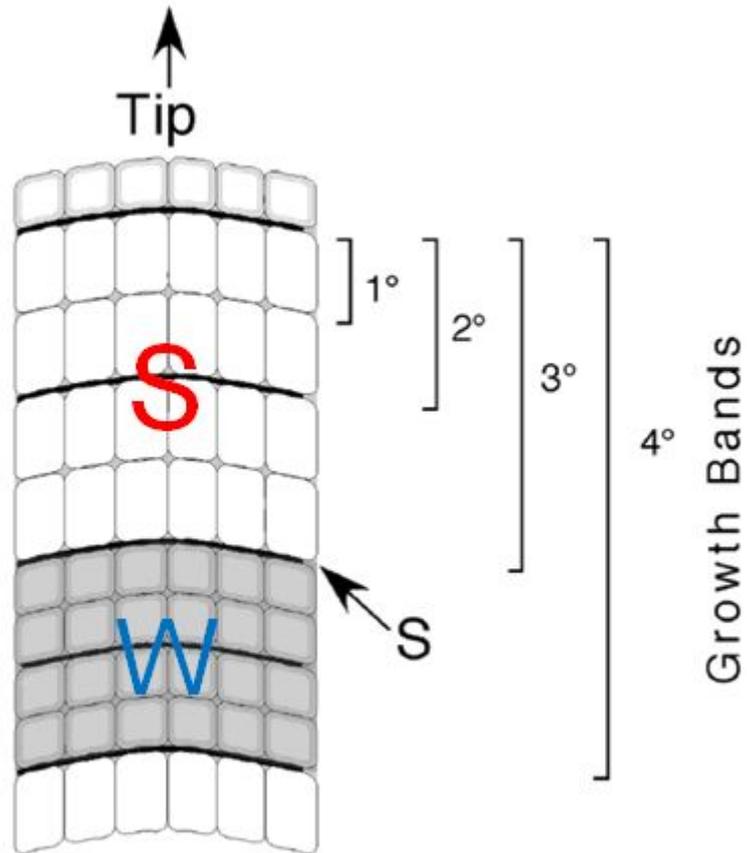


Fig. 8. A generalized example of potential band structure in a longitudinal section of a rhodolotih. A 1° band is a single row of cells, and a 4° band represents a possible annual band. Four 1° bands are shown in each 3° band, but this number can vary greatly, especially between 3° bands within a 4° band. S is summer and W is winter (After Foster, 2001).

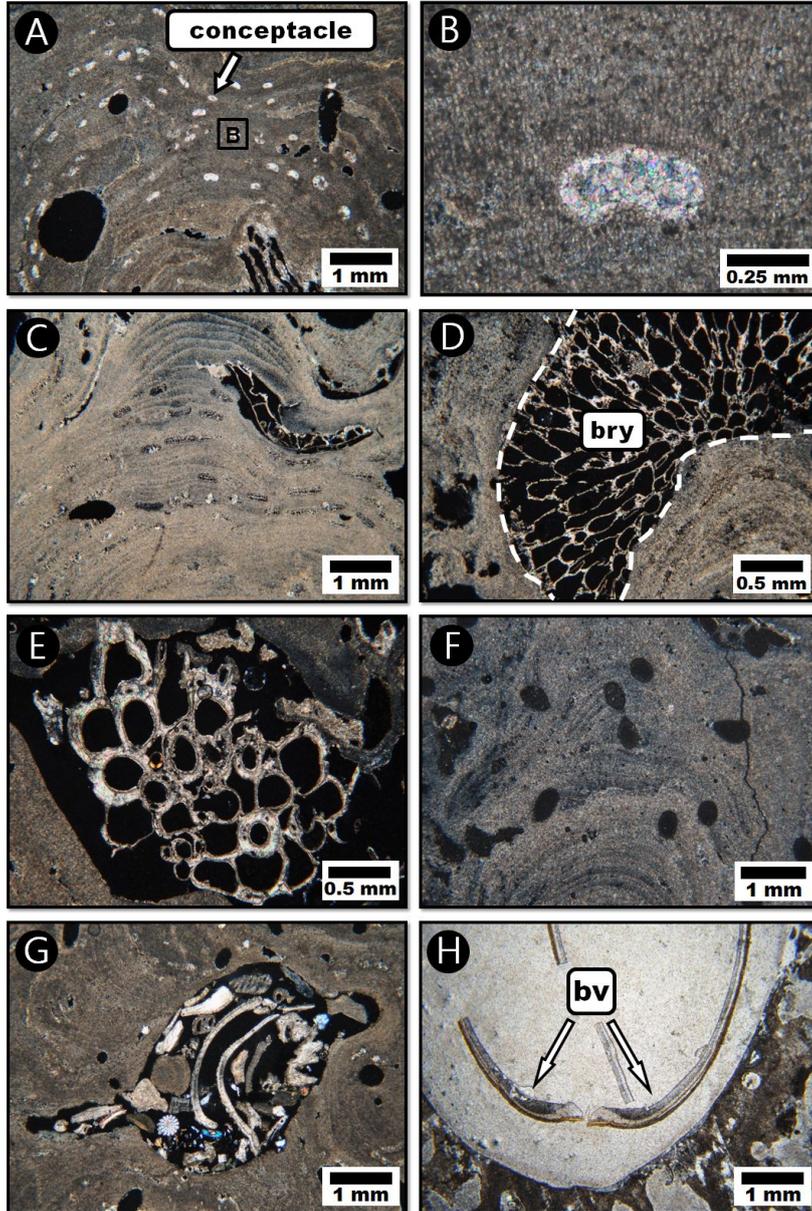


Fig. 9. Photomicrographs showing the internal texture of the rhodoliths. (A) Conceptacles in the red algae. (B) A closeup of (A). Note that the conceptacle is filled with shallow marine cements. (C) Coralline red algae. (D) Bryozoan (bry). (E) Serpulid worm tubes. (F) Borings in the rhodolith. (G) The bore within the rhodolith filled with calcareous skeletal grains and detrital grains. (H) Boring bivalve (bv) remained within the bore.

4.3 홍조단괴의 절대연대

UD-RAN-02 시료의 연대는 방사성탄소와 우라늄-토륨연대 측정을 통해 표 3과 같은 결과를 얻었다. 홍조단괴의 중앙에서 성장방향을 따라 같은 성장층이라고 생각되는 3 지점에서 각각 3개의 시료를 채취하여(그림 10) 연령 분석한 결과, 방사성탄소를 이용하여 분석한 연대는 중앙에서부터 성장방향을 따라 2840 ± 40 , 2180 ± 40 , 2030 ± 40 yr BP와 1820 ± 30 , 1890 ± 30 , 1840 ± 30 yr BP의 값을 보였고, 우라늄-토륨을 이용하여 분석한 연대는 2076 ± 319 , 1925 ± 775 , 2283 ± 358 yr BP인 것으로 분석되었다(표 3). 이 연대값들을 지점별로 정리하면 가장 오래된 연대인 첫 번째 지점은 2840 ± 40 , 1820 ± 30 , 2076 ± 319 yr BP로 연대가 가장 많이 차이나는 2840 ± 40 yr BP를 제외한 두 연대의 평균연대는 1948 ± 174 yr BP이고, 그 다음으로 젊은 연대인 두 번째 지점은 2180 ± 40 , 1890 ± 30 , 1925 ± 775 yr BP로 평균연대는 1998 ± 281 yr BP이다. 마지막으로 가장 젊은 연대인 세 번째 지점은 2030 ± 40 , 1840 ± 30 , 2283 ± 358 yr BP로 평균연대는 2051 ± 140 yr BP이다(그림 11). 이 연구에 사용된 UD-RAN-01 시료의 연대는 분석 중에 있다.

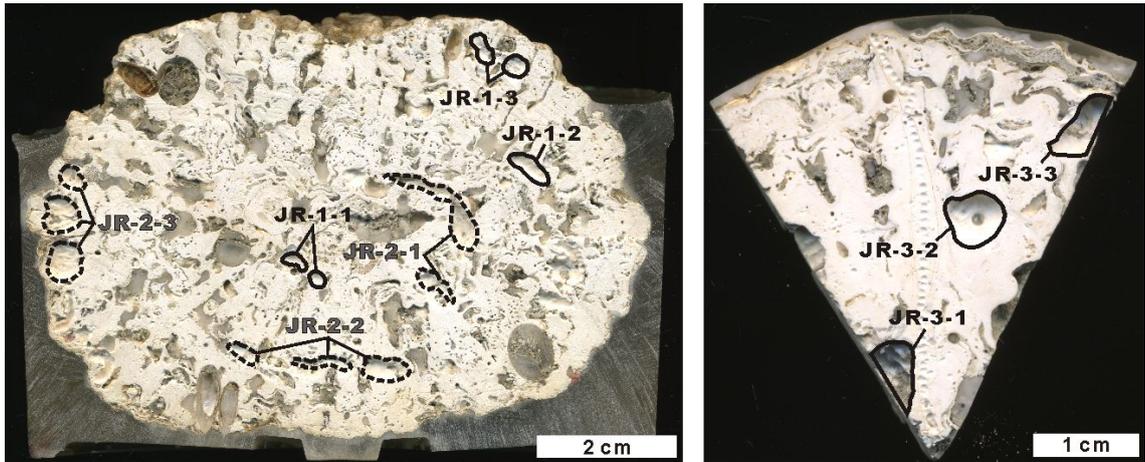


Fig. 10. Sampling points of the UD-RAN-02 for age dating. The solid lines represent the sampling area for the radiocarbon dating and the dotted lines are for the uranium–thorium dating.

Table 3. Results of radiocarbon and $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ age dating of the UD-RAN-02.

Dating method	Sample no.	Age (yr BP)
^{14}C age (KIGAM)	JR-1-1	2840±40
	JR-1-2	2180±40
	JR-1-3	2030±40
^{230}Th age	JR-2-1	2076±319
	JR-2-2	1925±775
	JR-2-3	2283±358
^{14}C age (BETA)	JR-3-1	1820±30
	JR-3-2	1890±30
	JR-3-3	1840±30

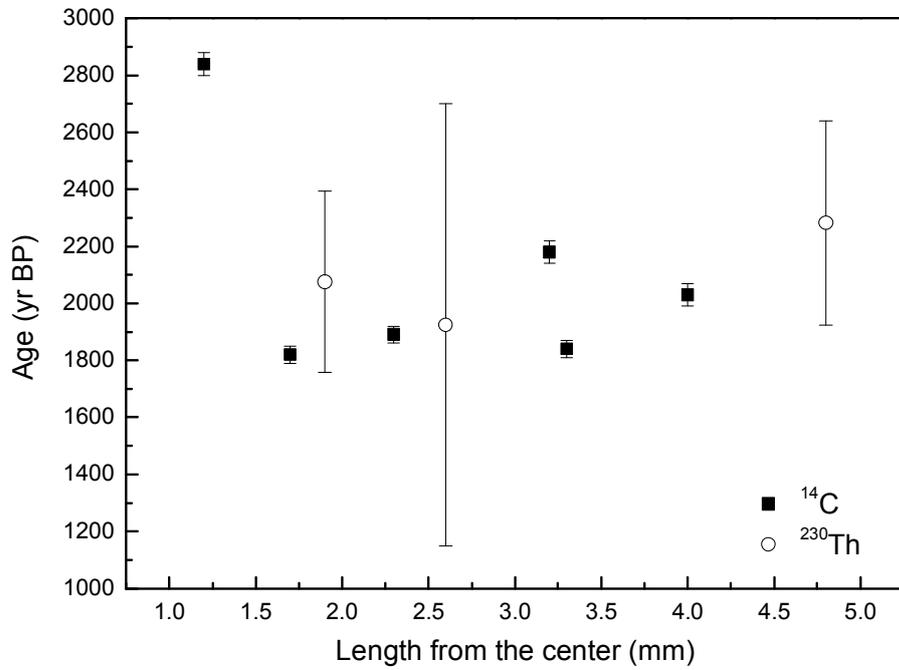


Fig. 11. Age versus growth length of the UD-RAN-02.

4.4. ICP-MS를 이용하여 측정된 홍조단괴의 미량원소 성분

위도에 따라 미량원소의 함량변화를 파악하기 위해 동해안을 따라 채취한 홍조단괴를 분석하였다(표 4). 홍조류 내 마그네슘의 함량은 가장 낮은 값이 29,720 ppm으로 독도의 마디상 홍조류에서 나타나며, 가장 높은 값은 42,677 ppm으로 오키나와의 덮개상 홍조류에서 나타난다. 두 지역의 함량차이는 약 13,000 ppm이고, 모든 지역의 평균값은 약 37,500 ppm이다. 포항을 제외하고 속초에서 부산까지는 34,000~36,000 ppm 사이의 거의 비슷한 범위의 값을 갖고, 제주도와 오키나와는 이보다 높은 값을 보여 저위도로 갈수록 증가하는 경향을 나타낸다. 스트론튬의 함량은 가장 낮은 값이 1,618 ppm으로 하서의 마디상 홍조류에서 나타나며, 가장 높은 값은 2,627 ppm으로 부산의 덮개상 홍조류에서 나타난다. 두 지역의 함량차이는 약 1,000 ppm이고, 모든 지역의 평균값은 약 2,100 ppm이다. 나머지 세 개의 섬지역(독도, 제주, 오키나와)은 평균값인 2,100 ppm과 비슷하거나 낮은 값을 보이고, 나머지 지역에서는 저위도로 갈수록 증가하는 경향을 보인다. 바륨의 함량은 가장 낮은 값이 5,037 ppb로 오키나와의 덮개상 홍조류에서 나타나며, 가장 높은 값은 12,248 ppb로 하서의 덮개상 홍조류에서 나타난다. 두 지역의 함량차이는 약 7,000 ppb로 홍조단괴 내에 극미량으로 존재하는 값에 비해 많은 차이를 보이고, 모든 지역의 평균값은 약 8,800 ppb이다. 우라늄의 함량은 가장 낮은 값이 235 ppb로 독도의 마디상 홍조류에서 나타나며, 가장 높은 값은 882 ppb로 부산의 덮개상 홍조류에서 나타난다. 두 지역의 함량차이는 약 650 ppb이고, 모든 지역의 평균값은 492 ppb이다. 홍조단괴에 존재하는 극미량 원소인 바륨과 우라늄은 서로 비슷한 경향을 보이고, 마그네슘과는 서로 반대되는 경향성을 보여준다. 2개의 마루와 1개의 골이 나타나는데 마루부분은 바륨이 고위도부터 첫 번째 마루는 강릉, 두 번째 마루는 하서에 해당하고 두 지역의 함량은 비슷한 값을 보인다. 우라늄은 고위도부터 첫 번째 마루는 바륨과 같은 지역인 강릉이고, 두 번째 마루는 하서와 비슷한 위도에 위치한 부산에 해당하고 두 지역의 함량도 비슷한 값을 보인다. 골부분은 바륨이 고위도부터 독도, 포항에 해당하고, 최저값인 오키나와보다 높은 값을 갖는 반면 우라늄은

독도, 포항, 하서에 해당하고, 독도에서 최저값을 갖는다(그림 12).

이 연구에 사용된 같은 아과인 덮개상 홍조류 내의 미량원소 함량변화를 살펴 보면 마그네슘은 가장 낮은 값이 약 35,000 ppm으로 부산에서 나타나며, 가장 높은 값은 약 43,000 ppm으로 가장 저위도에 위치한 오키나와에서 나타난다. 두 지역의 함량차이는 8,000 ppm이고, 8개 지역의 평균값은 38,200 ppm이다. 평균값을 기준으로 평균값보다 낮은 값이 나타나는 지역은 고위도부터 강릉, 독도, 하서, 부산이고, 이중 가장 높은 값을 갖는 지역은 독도이다. 평균값보다 높은 값이 나타나는 지역은 고위도부터 속초, 포항, 제주, 오키나와이다. 스트론튬은 가장 낮은 값이 약 2,000 ppm으로 제주도 우도에서 나타나며, 가장 높은 값은 약 2,600 ppm으로 부산에서 나타난다. 두 지역의 함량차이는 600 ppm이고, 8개 지역의 평균값은 1,800 ppm이다. 제주도와 오키나와 모두 낮은 값을 보이고, 두 지역을 제외한 나머지 지역의 값은 저위도로 갈수록 점차 증가하는 경향을 보인다. 바륨은 가장 낮은 값이 약 5,000 ppb로 오키나와에서 나타나며, 가장 높은 값은 12,000 ppb로 하서에서 나타난다. 이 두지역의 함량차이는 7,000 ppb이고, 8개 지역의 평균값은 8,700 ppb이다. 우라늄은 가장 낮은 값이 약 300 ppb로 포항에서 나타나며, 가장 높은 값은 약 900 ppb로 부산에서 나타난다. 두 지역의 함량차이는 600 ppb이고, 8개 지역의 평균값은 600 ppb이다. 바륨과 우라늄은 서로 비슷한 경향을 보이고, 마그네슘과는 서로 반대되는 경향성을 보여준다. 2개의 마루와 한 개의 골이 관찰되는데 고위도부터 첫 번째 마루부분은 강릉지역으로 두 원소 모두 높은 값을 갖는다. 두 번째 마루부분은 바륨은 하서이고, 우라늄은 부산으로 거의 비슷한 지역에 해당한다. 반면에 골부분은 독도와 포항 부분에 해당하는데, 바륨에서는 최저값보다 높은 값을 가지며, 우라늄에서는 최저값보다 낮은 값을 갖는다(그림 13).

마디상 홍조류 내의 미량원소 함량변화를 살펴보면 마그네슘은 가장 낮은 값이 약 30,000 ppm, 가장 높은 값은 약 36,000 ppm으로 모두 독도에서 나타난다. 두 홍조류의 함량 차이는 6,000 ppm이고, 3개 지역의 평균값은 33,800 ppm이다. 모든 지역의 평균값은 34,000 ppm정도의 비슷한 값을 갖는다. 스트론튬은 가장 낮은 값이

1,600 ppm으로 하서에서 나타나며, 가장 높은 값은 약 1,900 ppm으로 독도에서 나타난다. 두 지역의 함량 차이는 300 ppm이고, 3개 지역의 평균값은 1,800ppm이다. 마그네슘과 달리 하서를 제외한 나머지 두 지역에서 1,900 ppm정도의 비슷한 값을 갖는다. 바륨은 가장 낮은 값이 약 6,000 ppb로 속초에서 나타나며, 가장 높은 값은 약 12,000 ppb로 하서에서 나타난다. 두 지역의 함량 차이는 6,000 ppb이고, 3개 지역의 평균값은 9,000 ppb이다. 고위도에서 저위도로 갈수록 점차 증가하는 경향을 보여준다. 우라늄은 가장 낮은 값이 약 200 ppb로 독도에서 나타나며, 가장 높은 값은 약 300 ppb로 속초에서 나타난다. 두 지역의 함량차이는 100 ppb이고, 3개 지역의 평균값은 260 ppb이다. 속초를 제외한 나머지 두 지역에서 약 250 ppb 내외의 비슷한 값을 갖는다(그림 14).

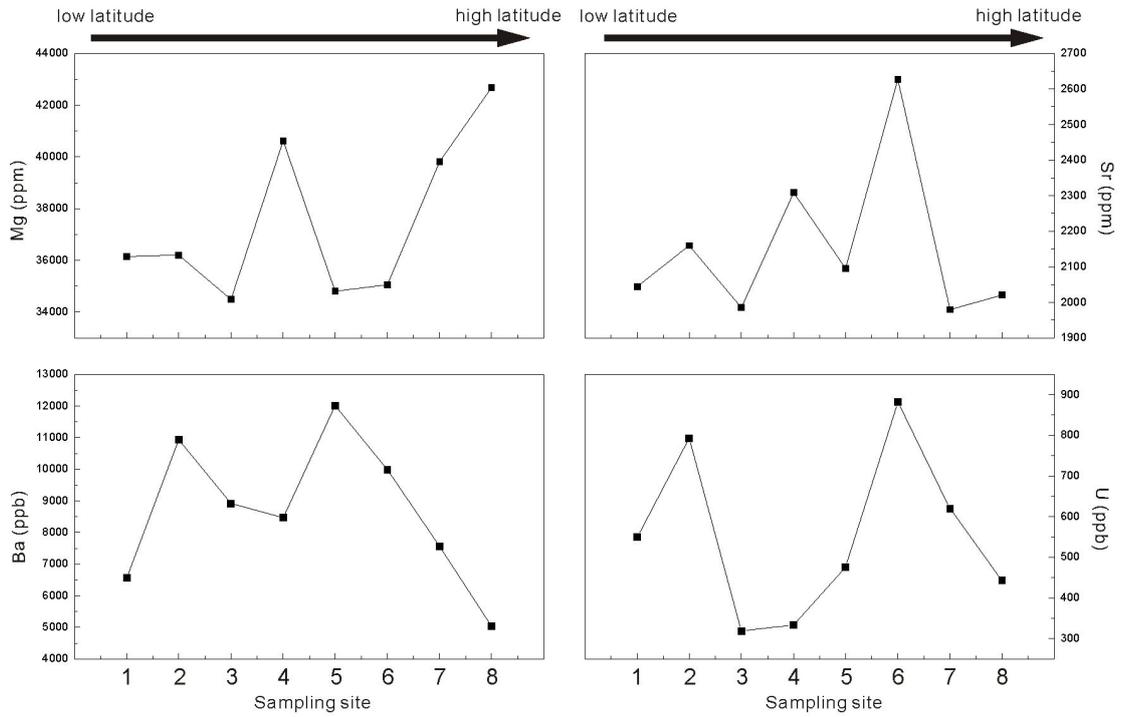


Fig. 12. Mean values of the trace element (Mg, Sr, Ba, U) from the red algae with latitude. 1=Sokcho, 2=Gangneung, 3=Dokdo, 4=Pohang, 5=Haseo, 6=Busan, 7=Udo, Jeju, 8=Okinawa.

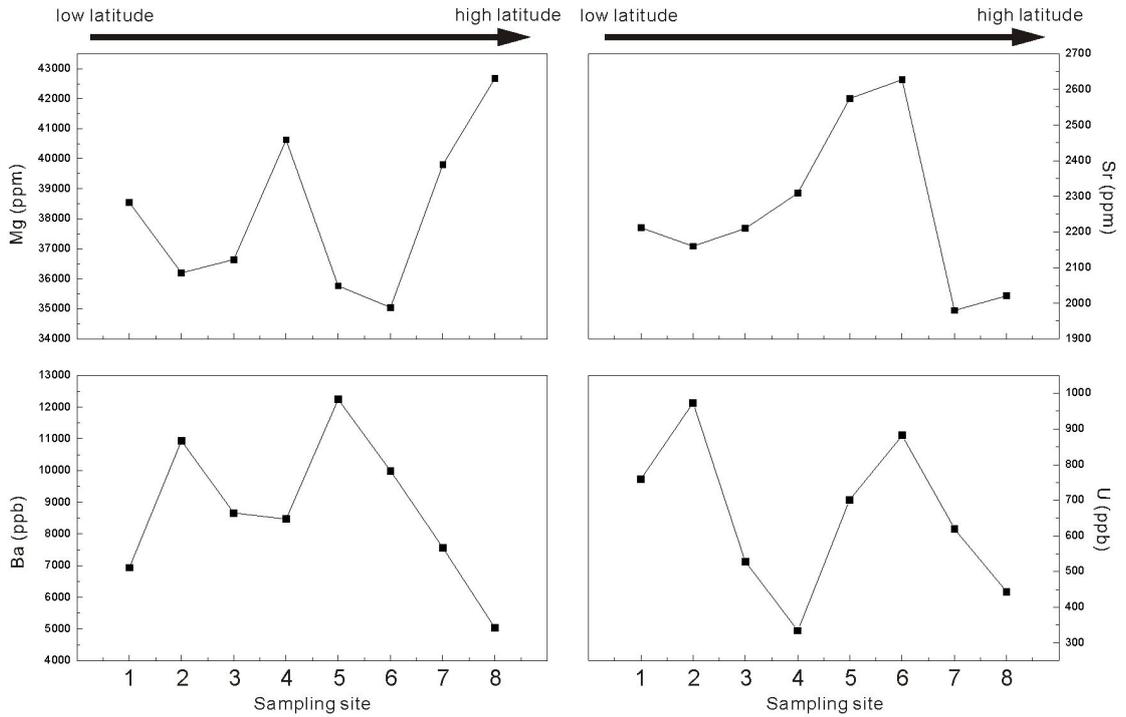


Fig. 13. Mean values of the trace element (Mg, Sr, Ba, U) from the crustose coralline algae with latitude. 1=Sokcho, 2=Gangneung, 3=Dokdo, 4=Pohang, 5=Haseo, 6=Busan, 7=Udo, Jeju, 8=Okinawa.

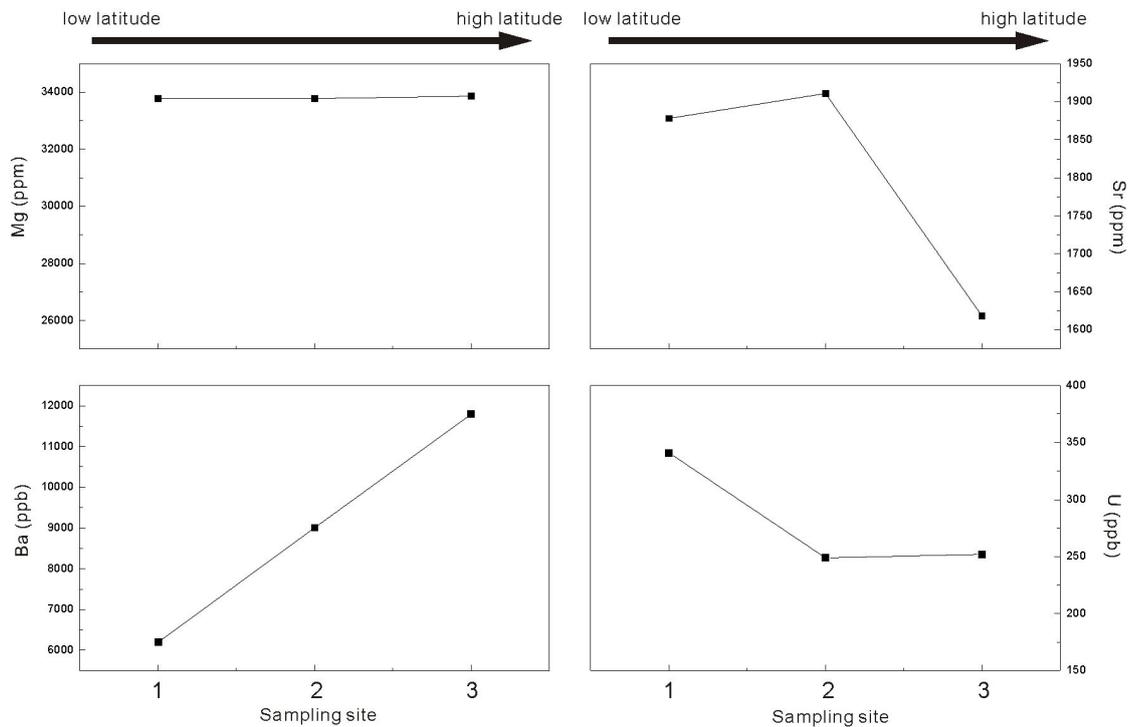


Fig. 14. Mean values of the trace element (Mg, Sr, Ba, U) from the articulated coralline algae with latitude. 1=Sokcho, 2=Dokdo, 3=Haseo.

Table 4. Trace element (Mg, Sr, Ba, U) compositions of the red algae of various sites in Korea and Japan.

site	date	taxon	Mg (ppm)	Sr (ppm)	Ba (ppb)	U (ppb)
Sokcho	1990. 08.13	crustose coralline	38,540	2,212	6,939	759
		articulated coralline	33,775	1,878	6,200	341
Gangneung	1989. 10.28	crustose coralline	36,200	2,160	10,935	793
		crustose coralline	36,637	2,210	8,666	528
Dokdo		articulated coralline	29,720	1,895	9,045	283
		articulated coralline	35,395	1,899	10,097	230
			36,230	1,939	7,894	235
Pohang	1993. 01	crustose coralline	40,630	2,309	8,466	334
Haseo	1989. 08	crustose coralline	35,760	2,574	12,248	701
		articulated coralline	33,855	1,618	11,795	252
Busan	1990. 02.01	crustose coralline	35,053	2,627	9,989	882
U island, Jejudo	2010. 08	crustose coralline	39,813	1,980	7,556	620
Okinawa		crustose coralline	42,677	2,021	5,037	443
average			36,483	2,102	8,836	492

4.5. LA-ICP-MS를 이용하여 측정 한 홍조단괴의 미량원소 성분

미량원소 분석결과 UD-RAN-01 시료의 마그네슘(Mg)의 함량은 30,400~56,900 ppm의 범위에서 변화하며, 평균 40,200 ppm의 값을 갖는다. 홍조단괴가 성장함에 따라 크게 3개의 주기를 보이는데, 각 마루 부분에서는 작은 골에 의해 2개의 작은 마루가 나타난다(그림 15a, b, c). 마루부분의 함량은 약 50,000~55,000 ppm의 범위를 보이고, 골 부분에서는 약 30,000~40,000 ppm까지 비교적 넓은 범위를 보인다. 또 성장함에 따라 골의 간격이 좁아지고, 마루의 최대값을 기준으로 증가할 때는 서서히 증가하지만 감소할 때는 빠르게 감소한다. 스트론튬(Sr)의 함량은 700~2,300 ppm의 범위이고 평균값은 약 1,200 ppm의 값을 갖는 것으로 분석되었다. 2,000 ppm이상의 높은 피크가 4개 나타나는데 첫번째 피크를 제외하고는 마그네슘과 유사한 구간에서 나타난다. 높은 피크를 제외한 나머지 부분에서는 거의 700~1,700 ppm사이에서 변화한다. 또 마그네슘과 같이 높은 피크를 기준으로, 증가할 때는 서서히 증가하지만 감소할 때는 빠르게 감소한다. 바륨(Ba)과 우라늄(U)은 홍조단괴 내에 존재하는 극미량 원소이다. 바륨의 함량은 2~9 ppm의 범위에서 변화하며, 평균값은 약 4 ppm의 값을 갖는 것으로 분석되었다. 처음에 높은 피크가 나타나고 급격히 감소하여 일정한 값을 가지다가, 80번 지점부터 상승하여 높은 피크에 이른다. 그 이후 약간의 함량 변화를 보이고 다시 165번 지점부터 상승했다가 점차적으로 감소한다. 높은 피크들은 8~9 ppm의 값을 가지며, 높은 피크를 제외한 나머지 피크들의 평균값은 약 4~5 ppm의 함량을 가진다. 분석된 원소 중 홍조단괴 내에 가장 적게 함유되어 있는 우라늄의 함량은 0.3~0.7 ppm의 범위에서 변화하며, 평균값은 약 0.5 ppm의 값을 갖는 것으로 분석되었다. 처음에 높은 피크가 나타난 후 뚜렷한 3개의 마루와 골 주기를 보이는데 이때 마루의 값이 골의 값보다 오래 지속되고 피크들이 증가하고 감소할 때 대칭을 이루며 변화한다. 마루 구간의 값은 최소 0.6 ppm에서 최대 0.8 ppm까지 0.2 ppm의 변화폭을 보이며 약 0.7 ppm의 평균값을 보인다. 골 구간의 함량은 최소 0.3 ppm에서 최대 0.4 ppm로 0.1 ppm의 차이를 보이며, 약 0.35 ppm의 평균값을 보인다. 마루와 골의 평균값은 약 0.35 ppm

의 차이를 보인다. 미량원소들의 전반적인 주기 경향은 시료번호 80, 140, 170번 지점에서 모두 높은 피크를 보이고, 비슷한 경향성을 보이지만, 바륨의 경우에는 스트론튬과 경향성이 더 비슷하고, 우라늄은 마그네슘과 더 비슷한 경향성을 보여준다 (그림 15).

UD-RAN-02 시료의 마그네슘의 함량은 25,300~85,700 ppm의 범위에서 변화하며, 평균 53,000 ppm의 값을 갖는다. 홍조단괴가 성장함에 따라 크게 5개의 마루와 골이 나타난다. 마루의 평균값은 70,000 ppm으로 3번째 마루를 제외한 나머지 마루에서 거의 비슷한 값을 보인다. 3번째 마루는 길이가 120~250번까지 가장 길게 나타난다. 처음에는 120~150번까지 증가하다가 220번 지점까지는 일정하게 유지되고, 225번 지점에서 85,000 ppm의 최대값을 갖는다. 최대값을 기준으로 증가할 때는 서서히 증가하고 감소할 때는 빠르게 감소한다. 골의 길이는 약 100정도의 비슷한 범위를 갖고, 평균값은 35,000 ppm으로 2번째 골을 제외한 나머지 골에서 거의 비슷한 값을 보인다. 2번째 골은 120번 지점에서 25,000ppm의 최소값을 갖는다.

스트론튬의 함량은 800~2,400 ppm의 범위이고 평균값은 약 1,600 ppm의 값을 갖는 것으로 분석되었다. 0~120번 지점까지 2개의 마루와 골이 관찰되는데 두 마루는 2,000 ppm으로 거의 비슷한 함량을 보이지만, 두 골은 1번째 골에서 1,800 ppm의 값을 갖고, 2번째 골에서는 현저하게 낮은 800 ppm의 값을 갖는다. 또 350~450번 지점까지는 1개의 마루와 골이 관찰되는데, 마루의 함량은 375번 지점을 기준으로 증가하고 감소하는 변화를 보이지만, 골은 약 1,200 ppm의 일정한 값을 갖는다. 이 두 부분을 제외한 나머지 부분에서는 1,200~1,800 ppm 사이의 비교적 일정한 값을 갖는다. 바륨의 함량은 2~9 ppm의 범위에서 변화하며, 평균값은 약 5 ppm의 값을 갖는 것으로 분석되었다. 처음에 높은피크가 나타나고 급격히 감소하여 100번 지점까지 일정한 값을 가지다가 다시 급격히 감소한다. 그 이후 함량변화를 보이며 375번 지점까지 약 2 ppm정도 서서히 증가하고, 마지막에 작은 골이 관찰된다. 우라늄의 함량은 0.1~1.7 ppm의 범위에서 변화하며, 평균값은 약 0.4 ppm의 값을 갖는 것으로 분석되었다. 100번 지점을 기준으로 함량이 높은 부분과 낮은 부분

으로 나뉜다. 함량이 높은 부분은 2개의 높은 피크를 제외하고 0.7~1.2 ppm의 범위에서 변화하고, 함량이 낮은 부분은 약 0.5 ppm의 일정한 값을 갖는다(그림 16). 미량원소들의 전반적인 경향은 100번 지점에서 최소값을 갖는 골이 관찰되고, 이 부분을 제외한 나머지 부분들은 일정한 범위 내에서 변화한다. 그러나 우라늄은 100번 지점을 기준으로 뚜렷한 함량차이를 보인다.

두 시료 내의 마그네슘 평균함량은 UD-RAN-02 시료가 약 13,000 ppm, 최고값이 약 30,000 ppm정도 높게 나타나지만, 최저값은 약 5,000 ppm정도 낮게 나타난다. 바륨과 스트론튬의 평균함량도 UD-RAN-02 시료에서 더 높은 값을 갖는데 바륨은 약 400 ppm정도 높고, 우라늄은 약 1 ppm정도 높게 나타난다. 하지만 우라늄의 최고값은 UD-RAN-02 시료가 1 ppm 높게 나타나는 반면 평균함량은 UD-RAN-01 시료가 약 0.1 ppm정도 높게 나타난다.

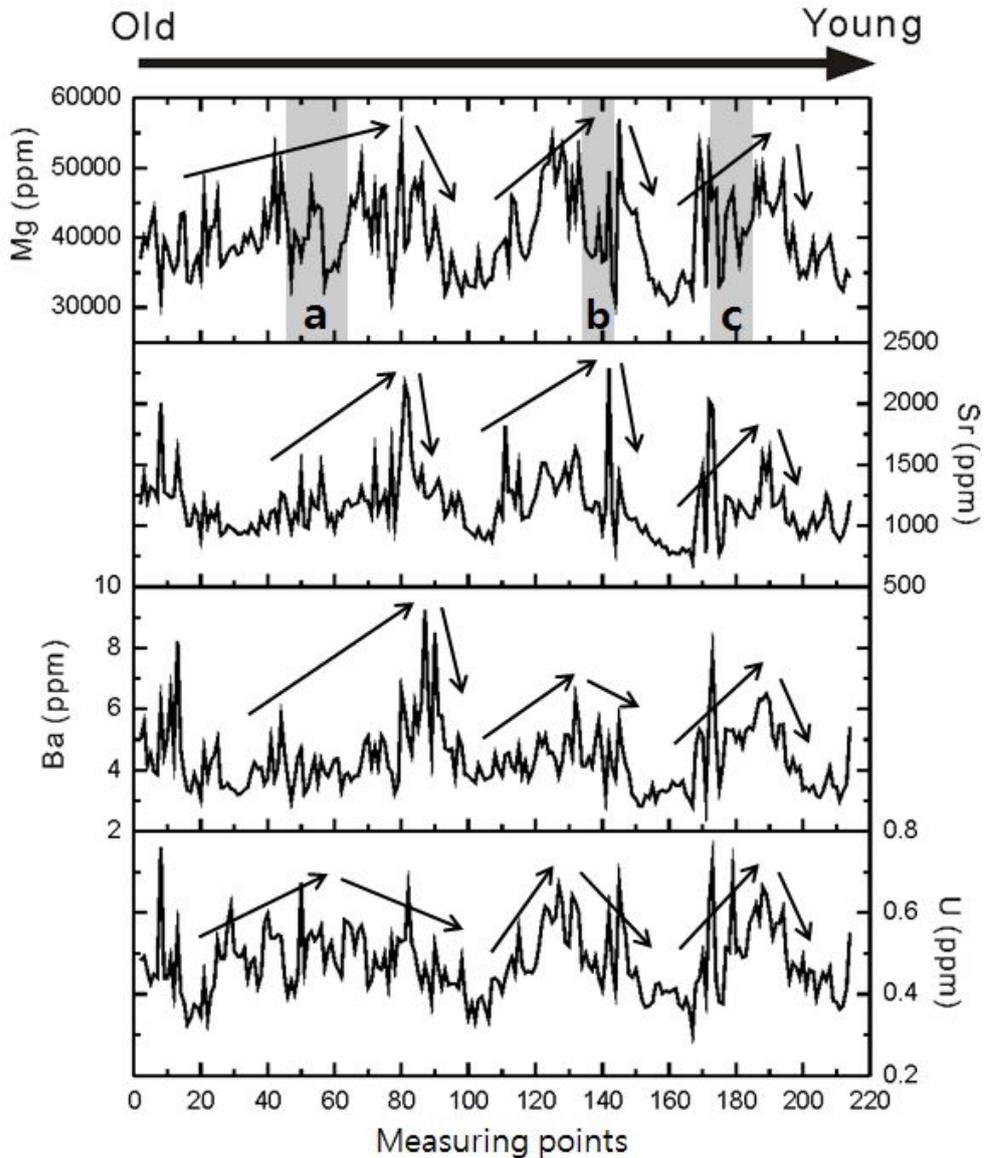


Fig. 15. Trace elements content (Mg, Sr, Ba, U) of the UD-RAN-01 was measured by using a LA-ICP-MS. Spot analyses were carried out along the laser transects on a cross section of rhodolith. Most of the trace element values show similar trend except for a few intervals. The arrows show the trend. It is notable that three main Mg peaks always have two lows (grey areas).

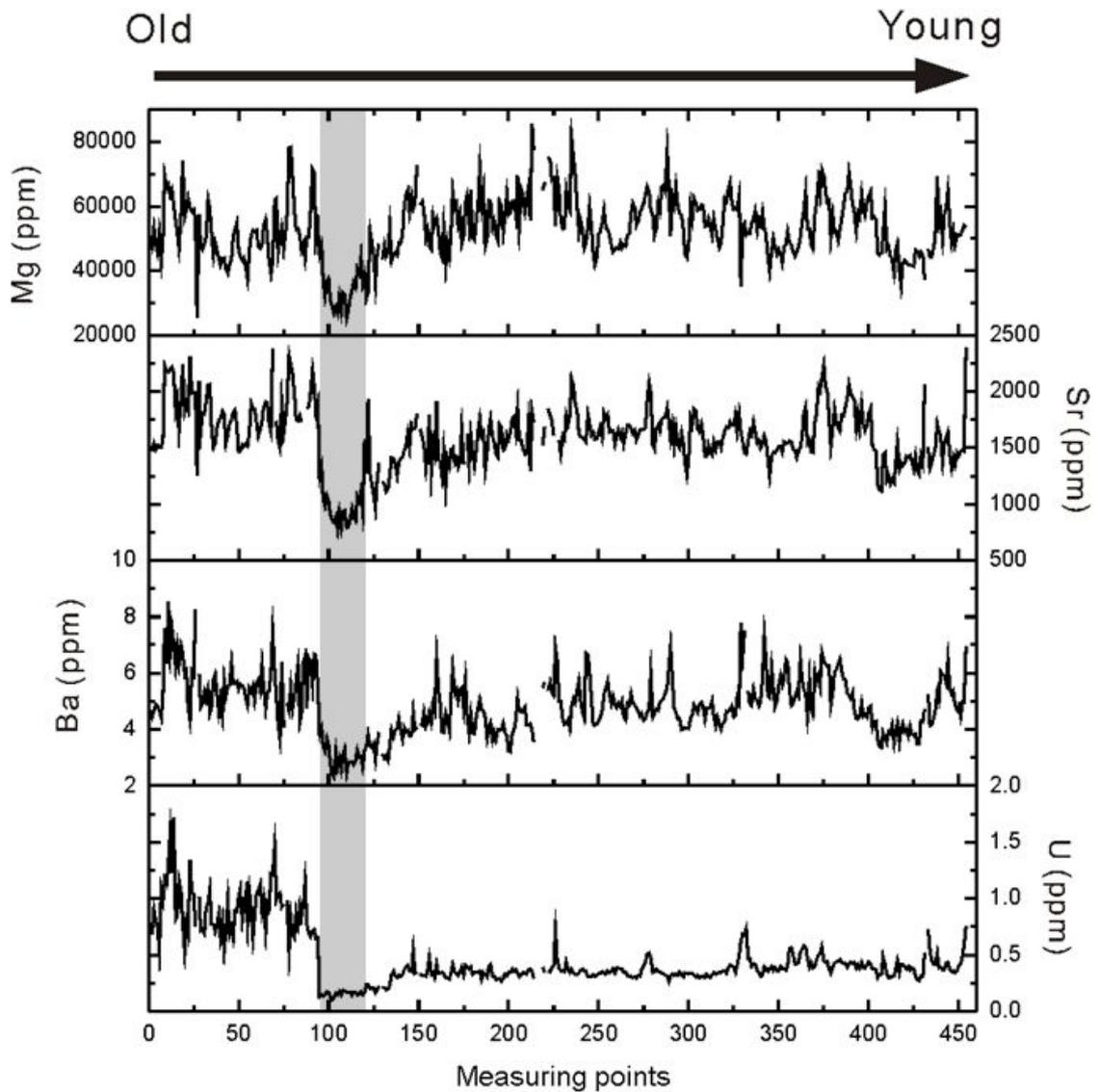


Fig. 16. Trace elements content (Mg, Sr, Ba, U) of the UD-RAN-02 was measured by using a LA-ICP-MS. Spot analyses were carried out along the laser transects on a cross section of rhodolith. Every trace elements show low value (grey area).

4.6. 홍조단괴의 안정동위원소 성분

UD-RAN-01 시료의 산소동위원소 성분을 분석한 결과, $-1.0\sim 0.5\%$ 의 범위에서 변화하며, 평균 -0.3% 의 값을 갖는다. 최소값인 시료번호 9번을 기준으로 크게 두 부분으로 나뉜다. 초기 1~9번 구간까지는 점차 값이 작아지는 경향을 보이고, 감소하는 값의 크기는 점차 증가한다. 최종적으로 감소한 값은 약 1.0% 정도이다. 그 이후 9~24번 구간까지는 점차 값이 증가하는 경향을 보이고, 3개의 마루와 2개의 골이 나타난다. 마루의 값은 최소 -0.4% 에서 최대 0.5% 까지 약 0.9% 의 변화폭을 보이며 약 0.1% 의 평균값을 보인다. 반면 골의 값은 최소 -0.9% 에서 최대 -0.7% 까지 약 0.2% 의 변화폭을 보여 마루보다 변화폭이 작으며 약 -0.8% 의 평균값을 보인다. 또 골에서 골 사이의 거리는 길어지고 주기의 폭도 넓어진다.

탄소동위원소 성분은 산소동위원소 성분보다 더 넓은 범위에서 변화한다. $-0.7\sim 1.3\%$ 의 범위에서 변화하며, 평균 0.2% 의 값을 갖는다. 홍조단괴가 성장함에 따라 탄소동위원소 값은 주기적인 변화가 잘 관찰되고, 3개의 큰 마루와 골이 나타난다. 마루의 값은 최소 0.8% 에서 최대 1.3% 까지 약 0.5% 의 변화폭을 보이며 약 0.9% 의 평균값을 보인다. 반면 골의 값은 최소 -0.7% 에서 최대 -0.4% 까지 0.3% 의 변화폭을 보여 마루보다 변화폭이 작으며 약 -0.4% 의 평균값을 보인다. 또 산소동위원소 성분과 달리 마루와 골의 값들이 거의 비슷하다(그림 17).

UD-RAN-02 시료의 산소동위원소 성분을 분석한 결과, $-1.9\sim 0.0\%$ 의 범위에서 변화하며 평균 -1.0% 의 값을 갖는다. 주기의 폭에 따라 크게 두 부분으로 나뉜다. 주기의 폭이 넓은 구간은 18~31번으로 $-1.9\sim 0.0\%$ 까지 약 1.9% 의 변화폭을 보이며 평균값은 약 -0.9% 이다. 폭이 좁은 구간은 1~17, 32~56번으로 $-1.6\sim -0.4\%$ 까지 약 1.2% 의 변화폭을 보이며 평균값은 -1.0% 이다. UD-RAN-01 시료의 산소동위원소 성분보다 낮은 값을 보이는데 최대값은 약 0.5% , 최소값은 약 1.0% , 평균값은 약 0.6% 낮다. 그러나 최소값과 최대값의 차이는 UD-RAN-02 시료가 0.5% 높다.

탄소동위원소 성분은 $-2.0\sim 0.4\%$ 의 범위에서 변화하며 평균 -1.1% 의 값을 갖는

다. 그러나 52번 지점을 제외하고는 산소동위원소 값과 비슷한 $-2.0\sim 0.0\%$ 의 범위에서 변화한다. 전체적인 주기는 성장할수록 주기의 폭이 넓어지고, 이는 UD-RAN-01 시료와 비슷하다. 1~21번 구간은 $-1.8\sim -0.9\%$ 의 범위에서 변화하며 평균값은 약 -1.3% 이다. 22~42번 구간은 $-1.7\sim 0.0\%$ 의 범위에서 변화하며 보이며 평균값은 약 -0.9% 이다. 43~56번 구간은 $-2.0\sim 0.4\%$ 의 범위에서 변화하며 평균값은 약 -0.9% 이다. UD-RAN-01 시료의 탄소동위원소 성분보다 낮은 값을 갖고, 최대값은 약 1.0% , 최소값은 약 1.2% , 평균값은 약 1.0% 낮다. 그러나 최소값과 최대값의 차이는 UD-RAN-02 시료가 0.3% 높다(그림 18).

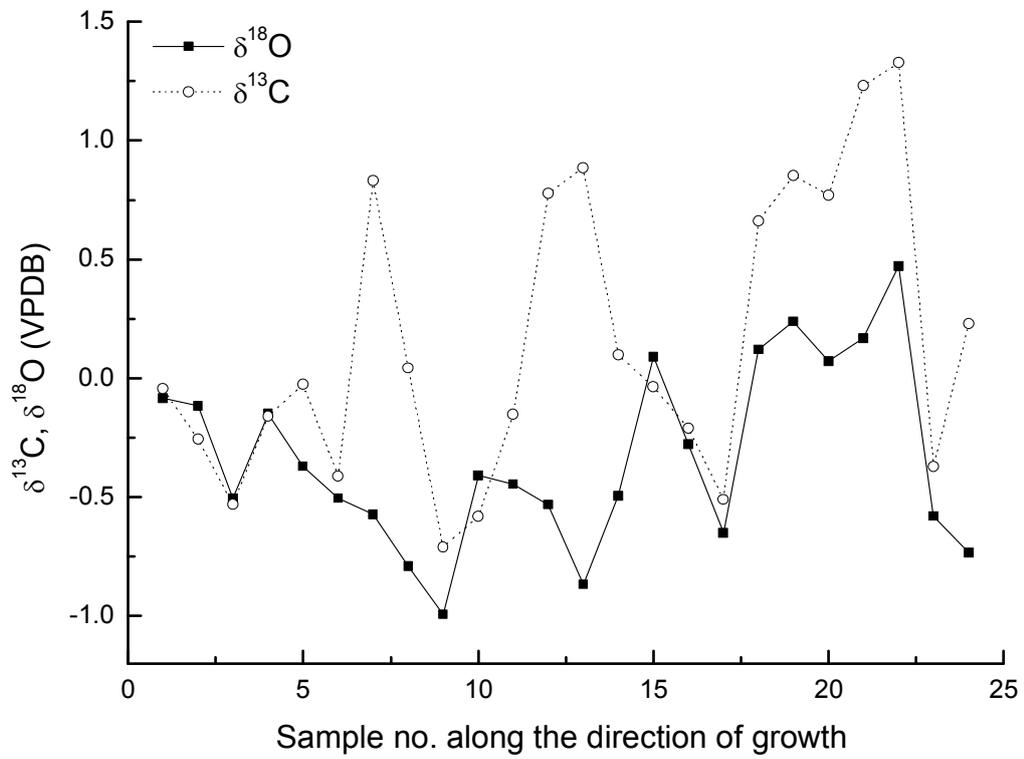


Fig. 17. Oxygen and carbon isotope compositions of the UD-RAN-01.

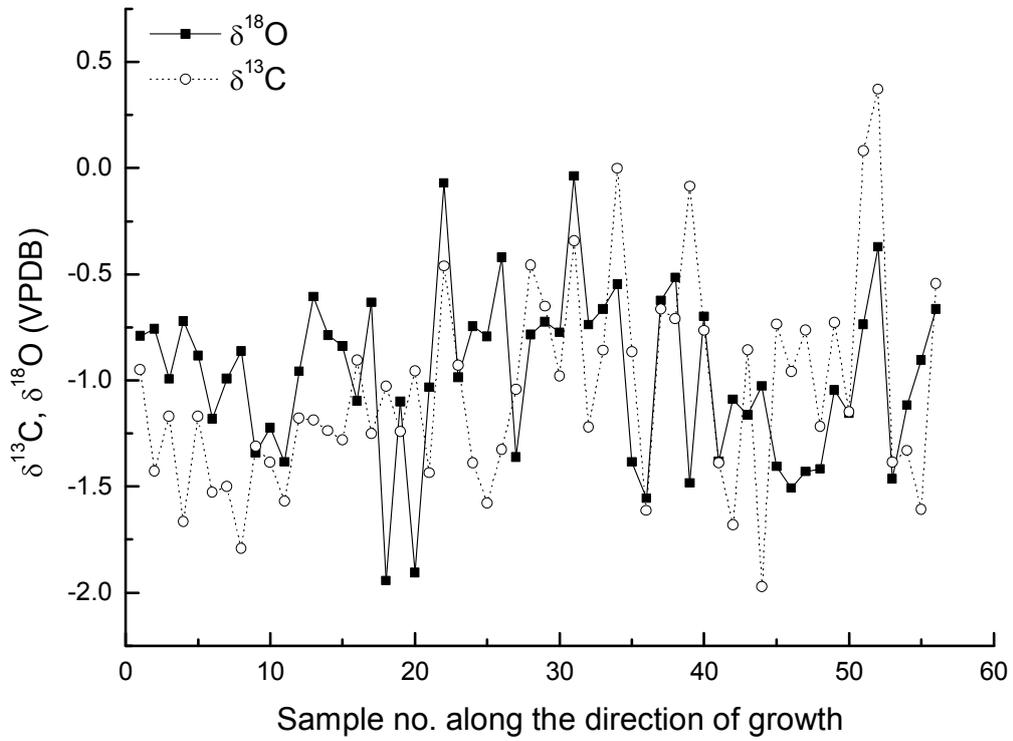


Fig. 18. Oxygen and carbon isotope compositions of the UD-RAN-02.

Table 5. Stable isotope compositions of the UD-RAN-01.

Sample no.	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)	Sample no.	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)
1	-0.1	0.0	13	-0.9	0.9
2	-0.1	-0.3	14	-0.5	0.1
3	-0.5	-0.5	15	0.1	0.0
4	-0.2	-0.2	16	-0.3	-0.2
5	-0.4	0.0	17	-0.7	-0.5
6	-0.5	-0.4	18	0.1	0.7
7	-0.6	0.8	19	0.2	0.9
8	-0.8	0.0	20	0.1	0.8
9	-1.0	-0.7	21	0.2	1.2
10	-0.4	-0.6	22	0.5	1.3
11	-0.4	-0.2	23	-0.6	-0.4
12	-0.5	0.8	24	-0.7	0.2

Table 6. Stable isotope compositions of the UD-RAN-02.

Sample no.	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)	Sample no.	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)
1	-0.8	-1.0	29	-0.7	-0.7
2	-0.8	-1.4	30	-0.8	-1.0
3	-1.0	-1.2	31	0.0	-0.3
4	-0.7	-1.7	32	-0.7	-1.2
5	-0.9	-1.2	33	-0.7	-0.9
6	-1.2	-1.5	34	-0.6	0.0
7	-1.0	-1.5	35	-1.4	-0.9
8	-0.9	-1.8	36	-1.6	-1.6
9	-1.3	-1.3	37	-0.6	-0.7
10	-1.2	-1.4	38	-0.5	-0.7
11	-1.4	-1.6	39	-1.5	-0.1
12	-1.0	-1.2	40	-0.7	-0.8
13	-0.6	-1.2	41	-1.4	-1.4
14	-0.8	-1.2	42	-1.1	-1.7
15	-0.8	-1.3	43	-1.2	-0.9
16	-1.1	-0.9	44	-1.0	-2.0
17	-0.6	-1.3	45	-1.4	-0.7
18	-1.9	-1.0	46	-1.5	-1.0
19	-1.1	-1.2	47	-1.4	-0.8
20	-1.9	-1.0	48	-1.4	-1.2
21	-1.0	-1.4	49	-1.1	-0.7
22	0.0	-0.5	50	-1.2	-1.2
23	-1.0	-0.9	51	-0.7	0.1
24	-0.8	-1.4	52	-0.4	0.4
25	-0.8	-1.6	53	-1.5	-1.4
26	-0.4	-1.3	54	-1.1	-1.3
27	-1.4	-1.0	55	-0.9	-1.6
28	-0.8	-0.5	56	-0.7	-0.5

5. 토 의

5.1. 홍조단괴의 성장률

홍조단괴는 일 년에 한 번씩 겨울철에 콘셉터클이라는 포자낭에서 포자를 배출하고, 이 포자로부터 홍조단괴가 성장한다. 일반적으로 홍조단괴의 평균 성장률은 0.015~2.5 mm/year이고, 20 m 보다 얇은 수심에서 형성되는 홍조단괴의 평균 성장률은 0.4 mm/year 정도로 알려져 있다(Foster, 2001). 또 홍조단괴는 극지방과 같이 온도가 낮고, 일사량이 적어 광합성을 하기 어려운 기간이 오랫동안 지속되어도 광합성이 활발한 기간동안 저장된 탄수화물을 이용하여 성장하기 때문에(Freiwald and Henrich, 1994) 성장률의 변화 없이 계속적으로 자란다고 보고되기도 하였다(Henrich et al., 1996). 그러나 최근의 연구에 의하면 온도가 높고 일사량이 많은 여름에 성장률이 빠르다고 제안되었다(Foster, 2001). 홍조단괴는 주로 온도가 높고, 일사량이 많은 늦은 봄에서 초겨울(5~10월)까지 성장하고, 온도가 낮고, 일사량이 적은 초겨울부터 늦은 봄(11~4월)까지 느리게 성장을 하거나 성장을 하지 않는다(Halfar, 2008). 또한 성장이 빠른기간 동안에는 셀의 크기가 크고, 성장이 느린 기간 동안에는 셀의 크기가 작다(그림 9). 이러한 성장률의 차이에 의한 셀 크기의 차이 때문에 조직적으로 뚜렷한 차이를 보이는 성장선이 매년 나타난다. 성장선은 년 주기뿐만 아니라, 월(lunar) 주기에 따른 성장선이 존재하기도 하며(Freiwald and Henrich, 1994), 매몰에 의한 성장 중지(Cabioch, 1966), 엘리노와 라니냐의 영향(Foster, 2001)에 의해 독립적으로 나타나기도 한다. 특히 매몰에 의해 성장이 멈추었던 기간에는 불연속적인 성장선이 나타날 수 있으며 이는 일종의 불연속면(hiatus)으로 간주될 수 있다.

계절에 따라 성장률의 차이 때문에 형성되는 성장선을 이용하여 연구지역에서 채취한 홍조단괴의 연성장률을 측정하였다. 홍조단괴의 연성장률은 시료를 두 부분(그림 19, 20a, b)으로 나누어 측정하였다. 연구지역에서 채취한 홍조단괴에서도 계

절에 따른 셀 크기의 차이에 의한 성장선이 뚜렷하게 관찰된다(그림 21). 하지만 덮개상 홍조류가 불규칙한 기질(substrate) 위에서 성장하고, 콘셉터클의 존재와 위치, 각 셀의 성장속도가 위치에 따라 차이가 나기 때문에 성장선이 기질과 항상 일정한 간격을 보이지는 않는다. 따라서 홍조단괴 성장층의 최대, 중간, 최소 두께를 측정하고 평균을 내어 홍조단괴의 연성장률을 측정하였다. 조사결과 UD-RAN-01 시료는 a, b 구간의 평균성장률이 각각 0.22, 0.27 mm/year로 이 두 구간의 평균값을 계산해보면 UD-RAN-01 시료의 연평균성장률은 0.25 mm/year로 추정할 수 있다(표 8). 분석된 홍조단괴 부분의 성장방향 길이는 약 2.5 cm이고, 연평균 성장률은 0.25 mm/year로 추정되기 때문에 분석된 홍조단괴 부분이 성장했던 기간은 약 100년으로 추정할 수 있다. 반면 UD-RAN-02 시료는 a, b 구간의 평균성장률이 각각 0.11, 0.13 mm/year로 이 두 구간의 평균값을 계산해보면 UD-RAN-02 시료의 연평균성장률은 0.12 mm/year로 추정할 수 있다(표 9). 이는 UD-RAN-01 시료의 반 정도에 불과하다. 분석된 홍조단괴 부분의 성장방향 길이는 약 3.5 cm이고, 연평균 성장률은 0.12 mm/year로 추정되기 때문에 분석된 홍조단괴 부분이 성장했던 기간은 약 300년으로 추정할 수 있다. 이와 같은 성장선이 연(year)주기라는 증거는 다음과 같다. 성장선은 연주기 뿐만 아니라 매몰에 의한 성장 중지, 엘리뇨와 라니냐의 영향에 의해서 생성될 수 있다. 하지만 이 주기성들은 연단위의 주기보다 길다. 따라서 이러한 요인에 영향을 받았다면 홍조단괴 내에 성장선사이의 길이가 연평균 성장률보다 길어야 한다. 일반적으로 수심 20 m 보다 얕은 깊이에서 성장하는 다른 지역 홍조단괴의 평균성장률은 0.4 mm/year 내외(0.25~0.6mm/year), 즉 성장선사이의 간격이 0.4 mm내외이다(Foster, 2001; 표 7). 연구지역에 홍조단괴는 수심 20 m 이내에서 채집하였기 때문에 연평균성장률이 0.4 mm 내외일 가능성이 높다. 조직적으로 측정한 두 시료의 연평균성장률은 각각 0.25, 0.12 mm/year이다. 따라서 조직적으로 측정한 두 시료의 성장률은 매몰에 의한 성장 중지, 엘리뇨와 라니냐의 영향이 아닌 연주기로 생각할 수 있다. 또 두 시료의 성장선사이에 셀 크기는 여름과 겨울에 따른 차이를 명확하게 보여준다(그림 21).

하지만 두 홍조단괴의 연평균성장률은 다른 지역에서 성장하는 홍조단괴의 연평균성장률보다 느리다. 이 이유는 다음과 같다. 성장률에 영향을 미치는 주된 요소는 홍조류의 종, 수온과 같은 환경적인 요소, 지역적인 요인 정도로 볼 수 있다. 먼저 홍조류의 종에 따른 연평균성장률을 보면 Norway에서 채취한 *Lithothamnion glaciale* 종은 채취수심이 차이가 나지만 20 m 이내로 생물이 광합성을 하는데 큰 차이가 없음에도 불구하고 약 두 배 정도의 차이를 보인다. 또한 *Lithothamnion crassiusculum* 종은 같은 지역(Gulf of California), 같은 수심에서 채취됐음에도 불구하고 거의 세 배 정도의 성장률 차이를 보여준다(표 7). 따라서 홍조류의 종이 같음에도 불구하고 성장률의 차이가 많이 나는 것으로 보아 성장률이 홍조류의 종에 많은 영향을 받지 않는다고 생각할 수 있다. 두 번째는 홍조단괴가 서식하는 수온이다. *Lithothamnion crassiusculum* 종은 같은 위도(24° N), 같은 수심(3 m), 즉 같은 수온에서 채취했음에도 불구하고 약 세 배 정도의 성장률 차이를 보여준다. 또한 *Lithothamnion glaciale* 종은 온도가 가장 낮은 고위도(Norway, 70° N)에서 채취했음에도 불구하고 성장률이 가장 높다. 따라서 수온도 성장률에 영향을 거의 미치지 않는다고 생각할 수 있다. 마지막으로 지역적인 요인이다. 연구지역인 제주도는 매년 태풍의 영향권에 있다. 홍조단괴는 주로 여름에 빠르게 성장을 하는데 연구지역은 여름철에 태풍의 영향을 받고, 이 태풍으로 인해 홍조단괴가 매몰된다. 결국 광합성을 하여 성장하는 홍조단괴들이 광합성을 원활하게 할 수 없기 때문에 연평균성장률이 낮은 것으로 생각된다. 태풍 뿐만 아니라 조류도 상당히 빠르고, 딱딱한 홍조단괴가 비치(beach) 형태로 되어 있기 때문에 홍조단괴가 구르면서 침식되어 다른지역의 홍조단괴보다 연평균성장률이 낮은 것으로 생각된다. 또 다른지역에서 채취된 홍조단괴에 비해 보링이 많이 관찰되는데 보링을 하는 생물에 의해 홍조류의 성장률이 영향을 받거나 보링으로 인해 손실로 영향을 받았을 가능성도 있다. 하지만 홍조단괴가 성장할 당시의 환경적인 조건이 현재와 다르기 때문에 성장률이 낮았을 가능성도 배제할 수 없다.

Table 7. Estimated growth rates for rhodoliths. Growth in $\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ unless otherwise noted.

Species	Location	Depth (m)	Growth rate	From
<i>Lithothamnion glaciale</i>	Norway	7	1.0	Freiwald and
	(~70° N)	18	0.6	Henrich, 1994
	Newfoundland		0.25-0.45	Halfar et al., 2000
<i>Phymatolithon calcareum</i>	Spain	5.5	0.486	Bosence, 1983
	Baltic	13	0.5-2.7	Bohm et al., 1978
<i>Lithothamnion crassiusculum</i>	Gulf of California	3	0.25-0.45	Halfar et al., 2000
	(24° N)			
	Gulf of California	3	0.6	Frantz et al., 2000
	(24° N)			
	Gulf of California	3	0.6	Georgina-Rivera, 1999
	(24° N)			
Rhodoliths (no species)	Bermuda	2-5	0.4	Bosellini and Ginsburg, 1971
	(~32° N)			

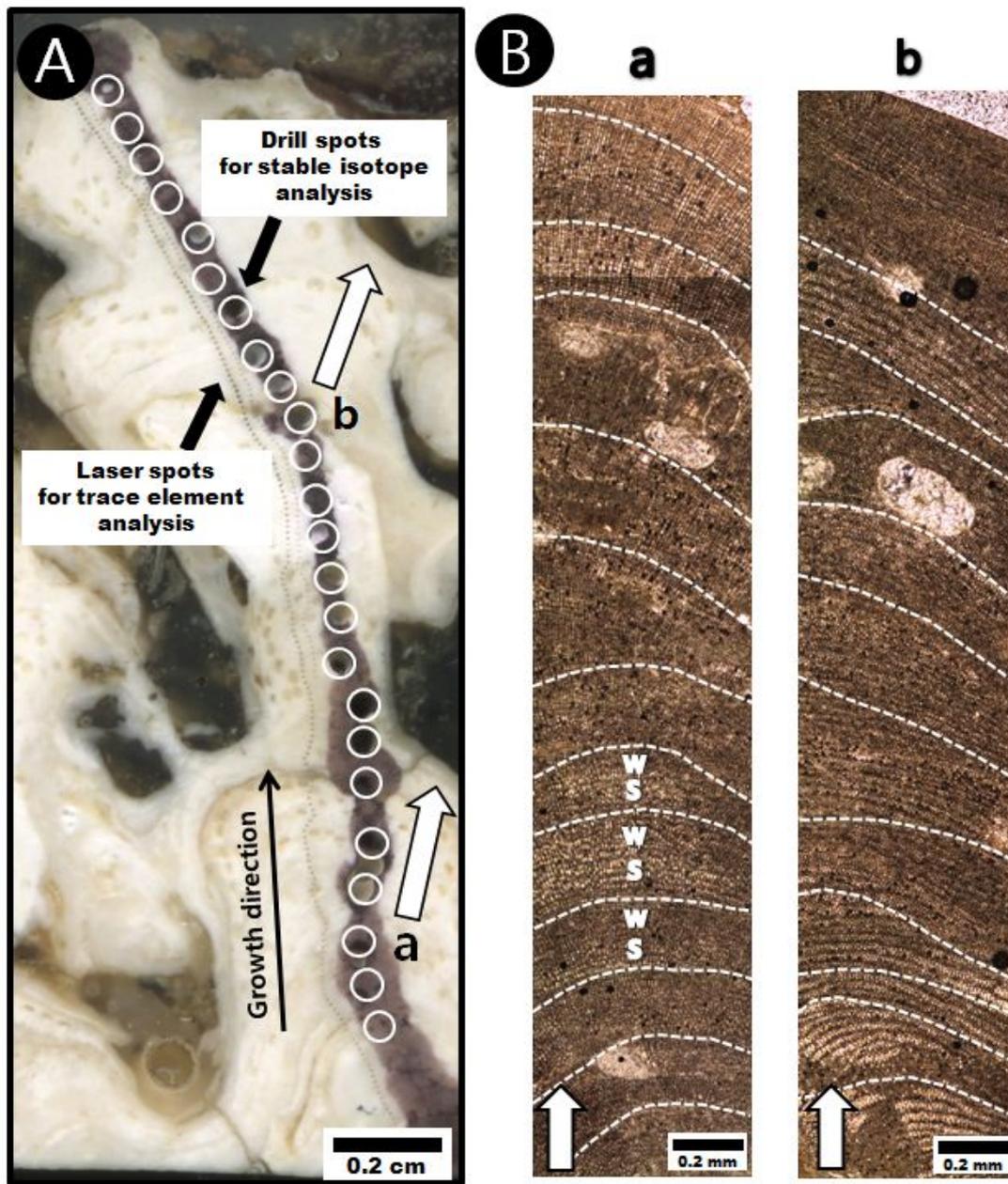


Fig. 19. (A) Polished cross section of the UD-RAN-01. Indicating the LA-ICP-MS and isotope transect on the surface of the polished slab. (B) The part of the UD-RAN-01 examined for growth rates. Annual growth laminae are indicated by white dashed lines. S=summer, W=winter.

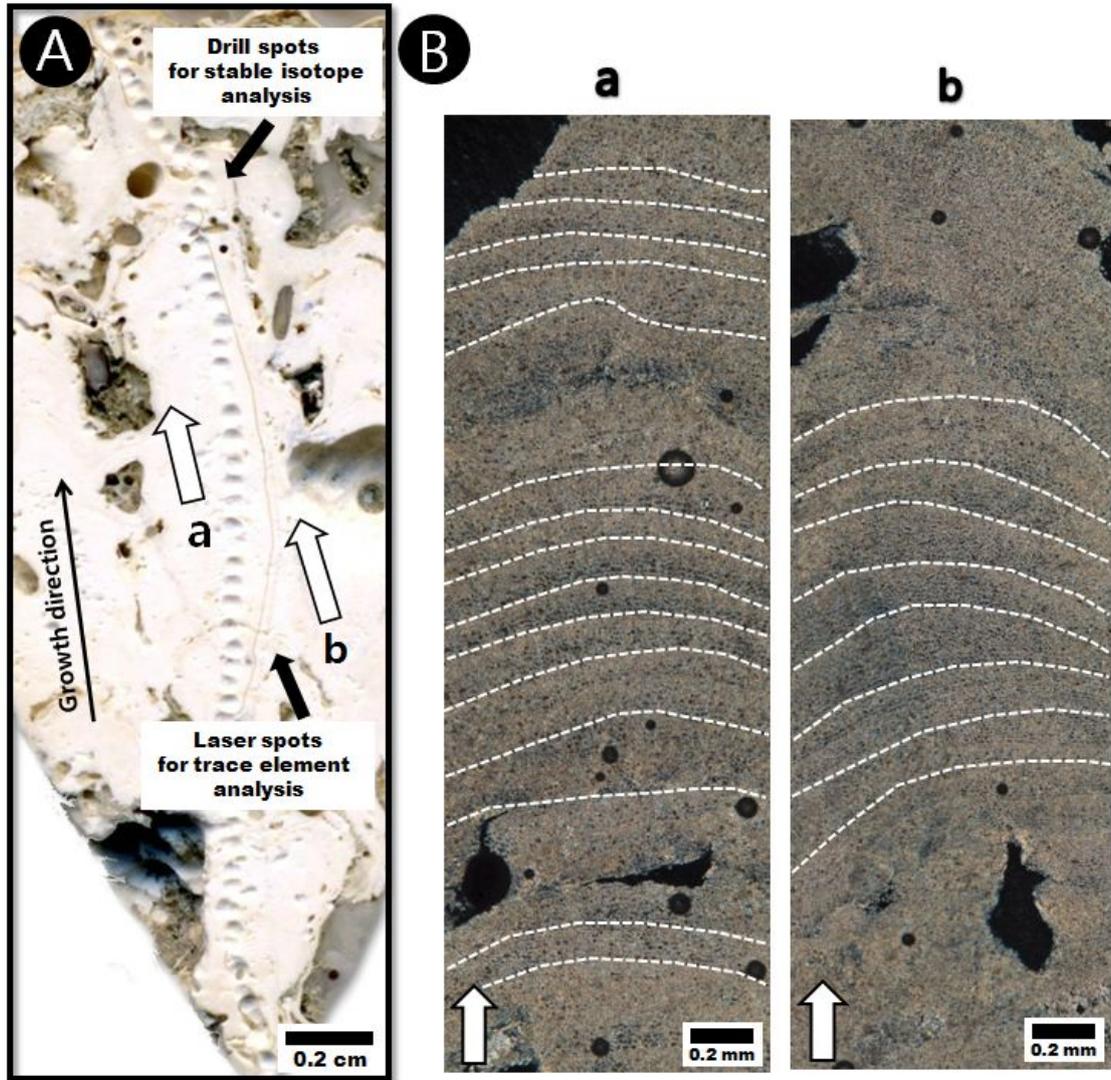


Fig. 20. (A) Polished cross section of the UD-RAN-02. Indicating the LA-ICP-MS and isotope transect on the surface of the polished slab. (B) The part of the UD-RAN-02 examined for growth rates. Annual growth laminae are indicated by white dashed lines.

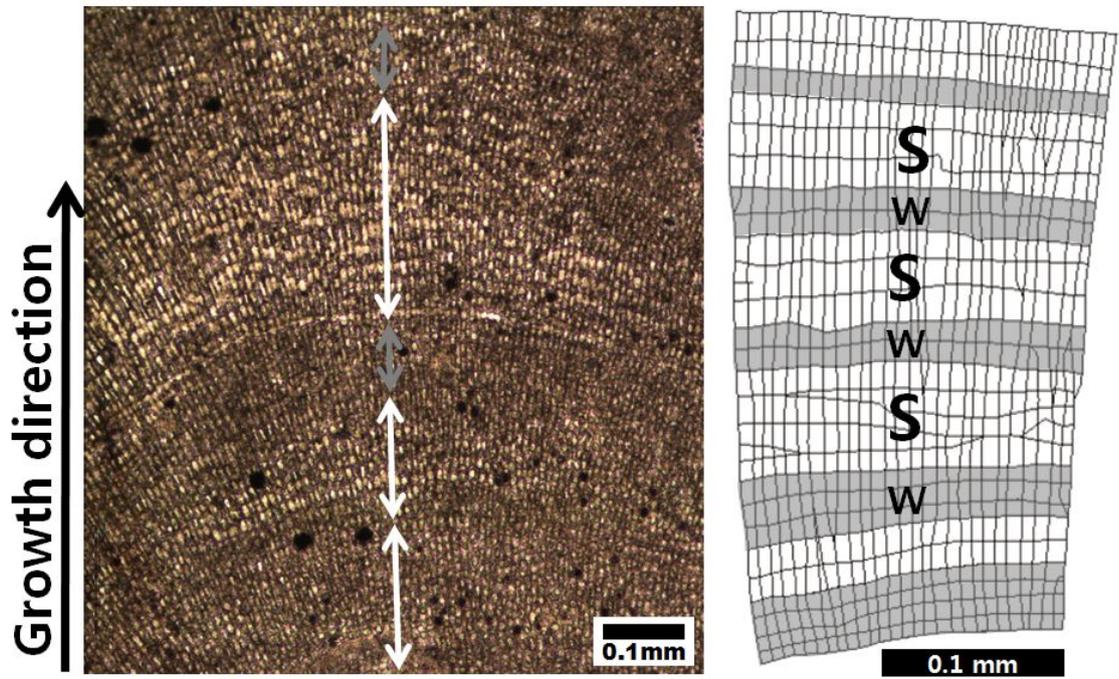


Fig. 21. Thin section photo showing different cell sizes between summer and winter. Growth rate is higher in summer than winter because of the higher isolation in summer. White and grey arrows (area) indicate summer and winter growth intervals, respectively. S=summer, W=winter.

Table 8. Growth intervals of the part of UD-RAN-01 examined for growth rates. The values are separately measured for the growth intervals with the longest, intermediate and shortest lengths between growth laminae. (unit: mm)

Section	Growth interval			
	Longest axis	Intermediate axis	Shortest axis	Mean
a	0.18	0.17	0.17	0.17
	0.20	0.20	0.20	0.20
	0.23	0.20	0.20	0.21
	0.28	0.26	0.24	0.26
	0.20	0.19	0.15	0.18
	0.22	0.22	0.20	0.21
	0.33	0.30	0.23	0.29
b	0.40	0.30	0.25	0.32
	0.18	0.13	0.10	0.14
	0.32	0.22	0.10	0.21
	0.43	0.35	0.28	0.35
	0.50	0.04	0.29	0.40
	0.30	0.28	0.22	0.27
	0.30	0.27	0.22	0.27
	0.28	0.17	0.10	0.18
	0.30	0.30	0.30	0.30

Table 9. Growth intervals of the part of UD-RAN-02 examined for growth rates. The values are separately measured for the growth intervals with the longest, intermediate and shortest lengths between growth laminae. (unit: mm)

Section	Growth interval			
	Longest axis	Intermediate axis	Shortest axis	Mean
a	0.11	0.11	0.11	0.11
	0.22	0.17	0.17	0.19
	0.14	0.11	0.09	0.11
	0.08	0.07	0.07	0.07
	0.16	0.12	0.11	0.13
	0.12	0.10	0.10	0.11
	0.11	0.11	0.11	0.11
	0.10	0.09	0.09	0.09
	0.16	0.13	0.12	0.14
	0.17	0.14	0.12	0.14
	0.09	0.08	0.08	0.08
	0.11	0.10	0.10	0.10
	0.09	0.08	0.08	0.08
b	0.21	0.20	0.19	0.20
	0.16	0.14	0.11	0.14
	0.13	0.12	0.10	0.12
	0.17	0.14	0.11	0.14
	0.11	0.11	0.09	0.10
	0.10	0.09	0.08	0.09
	0.10	0.09	0.08	0.09

5.2. 홍조단괴의 연대와 성장률로 측정한 성장기간 비교

홍조단괴의 연대측정 결과와 쉘의 연성장률로 측정된 성장기간을 비교해보았다. UD-RAN-01 시료의 연대는 분석 중에 있기 때문에 UD-RAN-02 시료의 자료만 해석하였다. 먼저 측정된 모든 연대측정 결과는 약 2,900~1,800 yr BP 사이의 연령을 보인다는 것이 흥미로운 점이다. 이중 2840±40 yr BP 연대를 갖는 JR-1-1을 제외하고 대부분 2,300~1,800 yr BP 사이에 존재한다. 따라서 UD-RAN-02 시료는 약 2,000대 yr BP에 성장했다고 추정할 수 있다.

홍조단괴는 핵을 중심으로 구르면서 성장을 하기 때문에 핵에서부터 성장방향을 따라 연대측정을 할 경우 점점 젊은 연대를 갖는 것이 일반적이다. 연구기관별로 측정한 연대를 보면(표 3), 우라늄-토륨연대(JR-2-1, JR-2-2, JR-2-3)는 중앙에서부터 성장방향을 따라 세 개의 시료를 분석하였는데 가장 바깥쪽 시료(JR-2-3)가 가장 젊은 연대를 갖아야 하지만 가장 늙은 연대를 보였고, 중간시료(JR-2-2)가 가장 젊은 연대를 보였다. 또 BETA에서 측정한 방사성탄소연대(JR-3-1, JR-3-2, JR-3-3)측정 결과, 중간시료(JR-3-2)가 가장 늙은 연대를 보여 상대적인 연령이 서로 역전되는 결과 값을 보여준다. 반면 한국지질자원연구원에서 측정한 방사성탄소연대(JR-1-1, JR-1-2, JR-1-3)측정 결과, 성장방향을 따라 점점 젊은 연대를 보였다. 따라서 한국지질자원연구원에서 측정한 방사성탄소연대가 가장 이 홍조단괴의 성장을 잘 나타내고 있는 것으로 판단된다. 이 연대는 성장방향을 따라 2840±40, 2180±40, 2030±40 yr BP로 가장 젊은 연대와 늙은 연대가 약 800년의 차이를 보인다. 따라서 UD-RAN-02 시료는 약 800년 동안 성장한 것으로 생각된다(그림 22).

UD-RAN-02 시료의 조직적인 특징인 쉘의 크기를 이용하여 측정한 연간성장률로 성장기간을 추정해본 결과 약 300년 정도로 나타났다. 이는 연대측정을 통해 추정한 성장기간인 800년보다 500년의 많은 차이를 보인다. 이렇게 조직적인 결과와 연대측정결과가 많은 차이를 보이는 이유는 다음과 같다. 연대측정결과, 성장기간은 약 800년이다. 이중 약 650년이 JR-1-1과 JR-1-2 사이에 성장기간이며, JR-1-2에서 JR-1-3 사이는 150년 밖에 되지 않는다. JR-1-1과 JR-1-2 사이에 조직을 보면

0.5~1.0 cm 정도의 범위 안에 1 mm 이하의 보링이 많이 관찰된다(그림 23B, C). 이 보링의 크기는 이매패류, 갯지렁이, 삿갓조개와 같은 생물이 아닌 조류, 균류, 박테리아와 같은 생물에 의해 생성된 크기이다. 이와 같은 생물들이 홍조단괴 중앙에 보링을 만들기 위해서는 표면에서부터 뚫고 들어간 흔적들이 보여야 하는데 그런 흔적들은 관찰할 수 없었고, 단단한 홍조단괴를 수 cm나 뚫고 들어갈 수 없을 것이다. 따라서 이 보링들은 홍조단괴가 다 성장한 후에 생성된 것이 아니라 보링이 위치한 지점까지 성장한 후 또는 성장하는 동안 생성된 것으로 생각된다. 결과적으로 홍조단괴 중앙 0.5~1.0 cm구간에 보링들은 홍조단괴가 성장을 하지 않았거나, 성장이 매우 느렸을 때 조류나 균류에 또는 박테리아와 같은 생물들이 보링을 한 것으로 생각된다. 따라서 이 보링이 생성되는 시기 동안에 거의 성장을 하지 않았기 때문에 셀의 크기를 이용하여 측정한 성장기간과 차이를 보인 것으로 생각된다. 하지만 시료채취 시 JR-1-1 시료가 JR-1-2, JR-1-3번 시료와 다른 성장방향에서 채취되었기 때문에 차이가 났을 가능성도 있다.

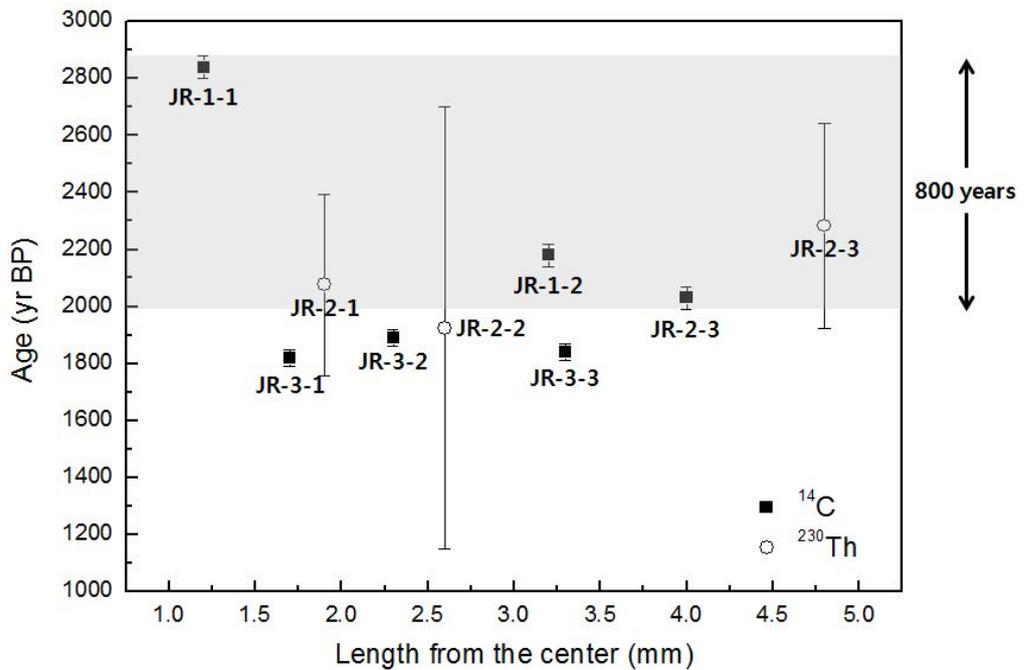


Fig. 22. Age versus growth length of the UD-RAN-02. Grey area is growth period.

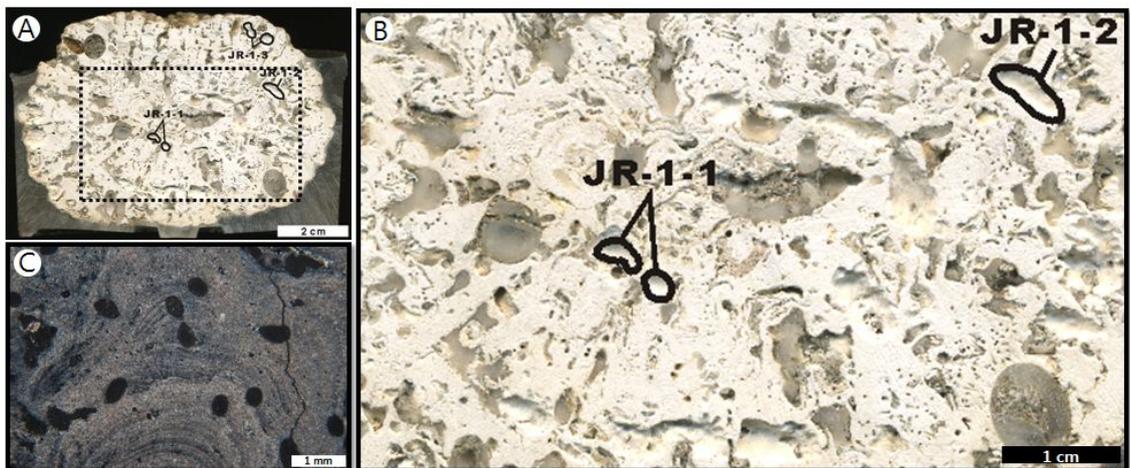


Fig. 23. (A) Sampling points of the UD-RAN-02 for age dating. (B) A closeup of the dotted line area. (C) Borings in the rhodolith.

5.3. LA-ICP-MS와 ICP-MS를 이용한 미량원소 성분 비교

홍조류의 미량원소 함량의 해석을 위해 두 기기(LA-ICP-MS, ICP-MS)를 이용한 값을 모두 비교해보았다. ICP-MS를 이용한 홍조단괴의 미량원소 함량은 모든 시료의 평균값을 적용하였다. 마그네슘 값은 30,000~43,000 ppm의 범위에서 변화하며 평균값은 38,000 ppm, 스트론튬 값은 1,600~2,600 ppm의 범위에서 변화하며 평균값은 2,200 ppm이다. 바륨 값은 5.0~12.0 ppm의 범위에서 변화하며 평균값은 9.0 ppm이고, 우라늄 값은 0.8~0.2 ppm의 범위에서 변화하며 평균값은 0.6 ppm이다. LA-ICP-MS를 이용한 홍조단괴의 미량원소 함량은 UD-RAN-01 시료가 마그네슘 값은 30,000~57,000 ppm의 범위에서 변화하며 평균값은 40,000 ppm, 스트론튬 값은 700~2,300 ppm의 범위에서 변화하며 평균값은 1,200 ppm, 바륨 값은 3.0~9.0 ppm의 범위에서 변화하며 평균값은 4.0 ppm, 우라늄 값은 0.3~0.8 ppm의 범위에서 변화하며 평균값은 0.5 ppm이다. UD-RAN-02 시료는 마그네슘 값은 35,000~85,000 ppm의 범위에서 변화하며 평균값은 53,000 ppm, 스트론튬 값은 800~2,400 ppm의 범위에서 변화하며 평균값은 1,600 ppm, 바륨 값은 3.0~9.0 ppm의 범위에서 변화하며 평균값은 5.0 ppm, 우라늄 값은 0.1~1.7 ppm의 범위에서 변화하며 평균값은 0.5 ppm이다(표 10). ICP-MS와 LA-ICP-MS를 이용한 미량원소의 평균값은 마그네슘 함량이 UD-RAN-02 시료에서 약 12,000 ppm 정도 높고, 스트론튬 함량은 ICP-MS를 이용하여 분석한 함량이 높기는 하지만 같은 범위에 속해 있다. 마그네슘 함량차이에 대해서는 다음 토의 부분에 자세히 설명되어 있다. 바륨은 ICP-MS를 이용하여 분석한 함량이 더 높지만 대부분의 시료가 같은 범위의 값을 갖고, 우라늄 역시 대부분의 값이 0.3~0.8 ppm 내에 존재한다(그림 24). 따라서 분석기기는 다르지만 홍조류의 미량원소 함량이 비슷한 범위에 값을 갖는 것으로 확인할 수 있으며, 이는 이러한 지화학적 자료들이 고해양환경의 해석에 사용될 수 있음을 의미한다.

Table 10. Trace element (Mg, Sr, Ba, U) content of rhodoliths using ICP-MS and LA-ICP-MS. (unit: ppm)

Instrument	Sample	Trace element content	Mg	Sr	Ba	U
ICP-MS		max	42,677	2,627	12.2	0.8
		min	29,720	1,618	5.0	0.2
		average	37,479	2,152	8.7	0.6
LA-ICP-MS	UD-RAN-01	max	56,897	2,288	9.2	0.8
		min	30,399	709	2.8	0.3
		average	40,244	1,116	4.3	0.5
	UD-RAN-02	max	85,685	2,387	8,5	1.7
		min	25,295	781	2,3	0.1
		average	52,990	1,587	4,8	0.5

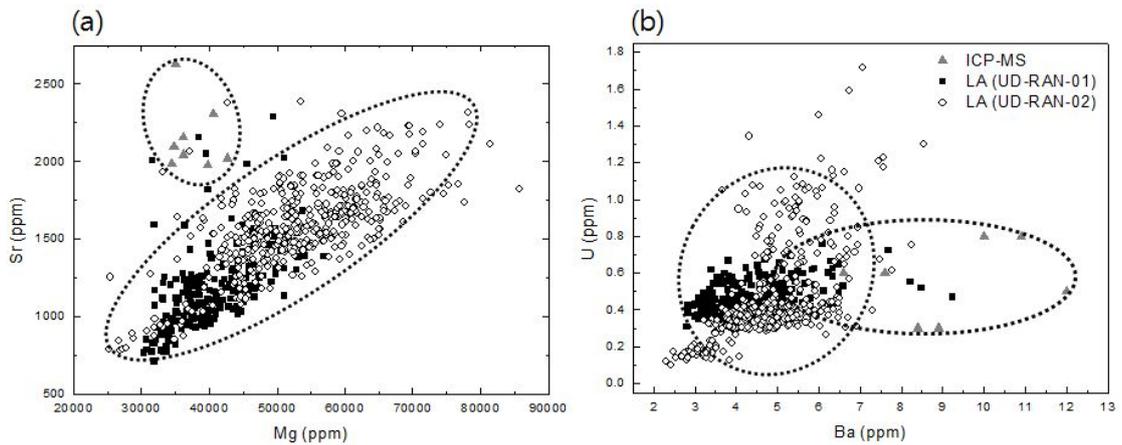


Fig. 24. (a) Scatter diagram of magnesium versus strontium contents of the rhodoliths using ICP-MS and LA-ICP-MS. (b) Scatter diagram of barium versus uranium contents of the rhodoliths using ICP-MS and LA-ICP-MS.

5.4. 홍조단괴의 마그네슘 성분 변화

과거의 연구에서 골격질 탄산염광물 내 마그네슘 함량의 계절적인 변화는 해수의 온도변화와 잘 대비된다고 보고되었다(Chave, 1954; Chave and Wheeler, 1965; Moberly, 1968; Milliman et al., 1971; Hetzinger et al., 2009, 2011). 그러나 Moberly(1968)는 홍조단괴와 이매패류의 마그네슘 함량은 수온 이외에도 빛의 강도, 생물학적인 순환과 관련이 있다는 것을 밝혀냈다. 유공충과 산호와 같은 석회질 해양 생물들은 탄산칼슘(CaCO_3)으로 이루어져 있다. 생물 각질 내에 칼슘(Ca)이 마그네슘으로 치환하면서 열을 흡수하기 때문에 해수의 온도가 높아짐에 따라 활발한 치환작용이 일어난다. 따라서 석회질 각질 내에 마그네슘 함량은 해수의 온도가 높아질수록 치환작용이 활발해져 방해석 내의 마그네슘 함량은 높아진다(Lea, 2003). 이후의 연구에서도 홍조단괴 내 마그네슘 함량이 주로 수온과 관계가 있다고 제안하고 있다(Henrich et al., 1996; Halfar et al., 2000). 아래와 같이 Halfar et al. (2000)가 제시한 온도방정식을 이용하여 홍조단괴의 마그네슘 함량의 변화에 따른 해수의 온도변화를 계산할 수 있다.

$$T(^{\circ}\text{C}) = 1.15 * \text{MgCO}_3(\text{mol}\%) + 8.15 \dots\dots\dots (1)$$

홍조단괴의 MgCO_3 함량을 이용하여 성장할 당시의 수온을 계산할 수 있다. 먼저 위도별로 채취한 덮개상 홍조류의 MgCO_3 함량을 살펴보면 고위도부터 속초는 12.8 mol%, 강릉은 12.2 mol%, 독도는 12.3 mol%, 포항은 13.3 mol%, 하서는 12.0 mol%, 부산은 11.8 mol%, 제주도 우도는 13.1 mol%, 오키나와는 13.8 mol%로 이 값을 위 온도방정식에 대입하면 수온은 속초가 22.8°C, 강릉이 22.1°C, 독도는 22.3°C, 포항은 23.5°C, 하서는 22.0°C, 부산은 21.8°C, 제주도 우도는 23.2°C, 오키나와는 24.1°C이다. 포항을 제외하고 속초부터 부산까지는 1°C 이내의 차이로 거의 비슷한 수온을 보이고, 이보다 저위도에 위치한 제주도 우도와 오키나와는 2°C 내외의 차이를 보인다. 이러한 온도의 차이는 속초에서 부산까지는 따뜻한 쿠로시오

난류와 북한한류가 만나서 서로 혼합이 일어나는 지역이기 때문에 온도의 변화가 뚜렷하지 않지만, 제주도와 오키나와는 주로 쿠로시오 난류의 영향을 받으면서 저위도 지역에 위치하고 있기 때문에 온도의 차이가 나타나는 것으로 생각된다(그림 25). 이와 같이 온도가 높은 저위도로 내려갈수록 홍조류의 $MgCO_3$ 함량을 이용하여 계산한 수온도 증가하는 경향을 보였다. 따라서 수온이 증가함에 따라 $MgCO_3$ 함량도 증가함을 알 수 있다.

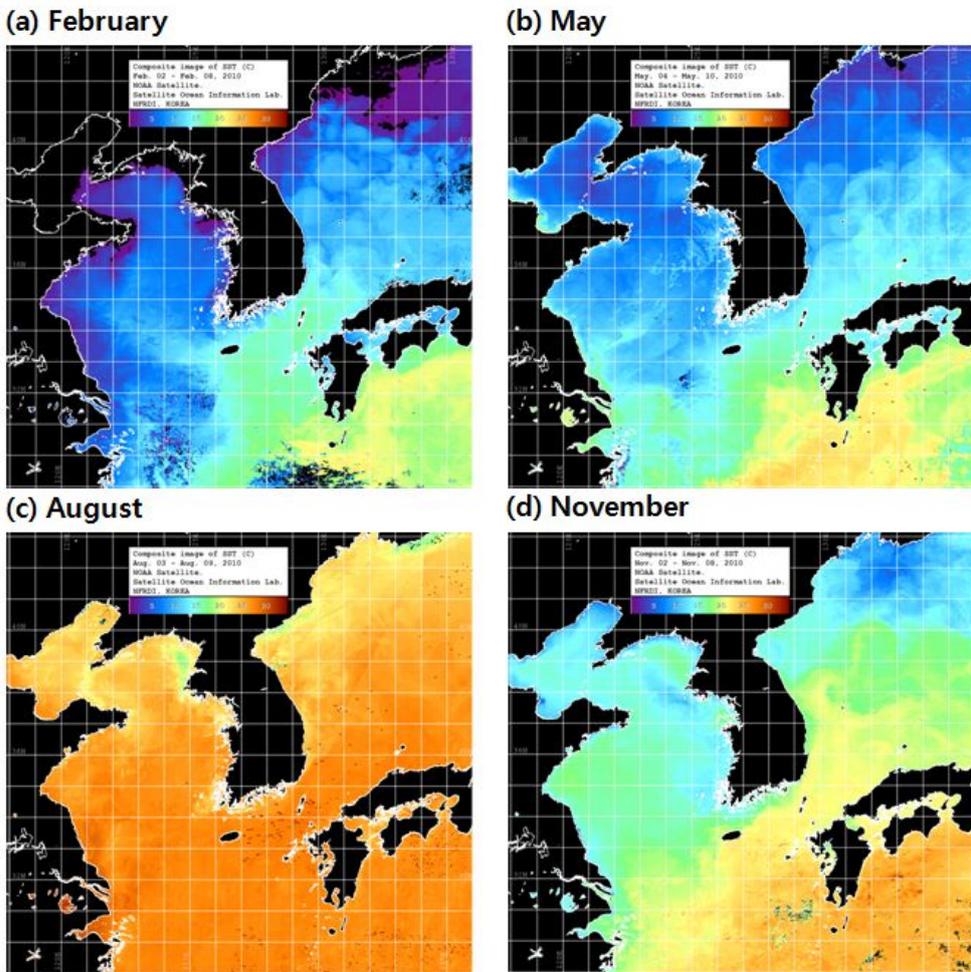


Fig. 25. Satellite images of the sea temperature (2010).

홍조단괴가 연속적으로 성장하지 않고, 홍조단괴 내의 Mg 함량이 조직적인 성장률로 계산한 성장기간의 연주기를 보여주지 못하기 때문에 $MgCO_3$ 함량의 최고값과 최저값을 이용하였다. UD-RAN-01 시료의 $MgCO_3$ 함량의 최고값과 최저값은 각각 약 17.5와 9.8 mol%이다. 이 값을 위의 방정식에 대입하면 성장온도는 약 28.3와 19.4°C로 8.9°C의 차이를 보인다. UD-RAN-02 시료의 Mg 함량 중 다른 값들에 비해 상대적으로 낮아 분석의 오류로 판단되는 시료번호 100~115번 구간을 제외하고 $MgCO_3$ 함량을 계산하였다. 계산한 $MgCO_3$ 의 최고값과 최저값은 각각 약 22.6, 11.8 mol%이다. 이 값을 위의 방정식에 대입하면 성장온도는 약 34.2, 21.8°C로 12.4°C의 차이를 보인다(그림 26; 표 11). 제주도 우도 연안(정지관측지점 21301; 33°48'N, 126°97'E)에서 관측한 수온 자료에 따르면, 최근 40년간 가장 낮았던 수온은 약 10.3°C이고, 가장 높았던 수온은 약 29.1°C로 약 18.8°C의 수온변화를 보인다(그림 5). 이러한 관측에 의한 수온의 차이는 홍조단괴의 $MgCO_3$ 함량을 이용하여 계산한 수온차보다 UD-RAN-01 시료는 9.9°C, UD-RAN-02 시료는 6.4°C 정도로 각각 더 높다. 또 $MgCO_3$ 의 함량을 이용하여 계산된 수온과 측정된 수온을 비교하면 UD-RAN-01 시료는 높은 $MgCO_3$ 의 함량을 이용하여 계산된 가장 높았던 수온, 즉 여름수온은 28.3°C이고, 측정된 여름수온은 29.1°C로 0.8°C의 차이를 보여 두 수온의 차이가 거의 없다. 그러나 낮은 $MgCO_3$ 의 함량을 이용하여 계산된 가장 낮았던 수온, 즉 겨울수온은 19.4°C이고, 실제 측정된 겨울수온은 10.3°C로 9.1°C의 많은 차이를 보인다. UD-RAN-02 시료도 마찬가지로 측정된 수온과 여름에는 계산된 수온이 34.2°C이고, 측정된 수온은 29.1°C로 5.1°C의 차이를 보이고, 겨울에는 계산된 수온이 21.8°C이고, 측정된 수온은 10.3°C로 11.5°C의 많은 차이를 보인다. 이렇게 실제 측정된 수온차가 홍조단괴의 $MgCO_3$ 함량을 이용하여 계산한 수온차보다 크고, 실제 측정된 수온과 홍조단괴의 $MgCO_3$ 함량을 이용하여 계산한 수온의 차이에서 여름보다 겨울에 차이가 더 많이 나는데 그 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다.

홍조단괴는 온도가 낮고 일사량이 적은 겨울보다 온도가 높고 일사량이 많은

여름에 더 빠른 성장을 하기 때문에 겨울에 성장한 셀의 크기가 여름보다 더 작다 (그림 9). 셀의 크기는 시기마다 차이가 있으나 여름에 자란 셀은 보통 0.05~0.20 mm 정도이며, 겨울의 것은 0~0.07 mm 정도이다. 따라서 성장간격이 상대적으로 높은 여름에 성장한 부분은 성장간격이 넓어서 여름에 자란 부분만이 분석되었을 가능성이 높지만 겨울에 자란 부분의 경우에는 그 간격이 작아서 분석당시 여름에 성장한 부분과 함께 분석되었을 가능성이 있다. 또한 이미 언급한바와 같이 일 년 동안 홍조단괴가 성장한 크기는 각각 0.25, 0.12 mm이다. LA-ICP-MS를 이용하여 분석한 spot size와 spot 사이의 간격은 약 55 μm 로서 이 간격으로 분석할 경우 일 년 동안 자란 부분의 분석 수가 제한되어 일 년 간격의 주기성을 보여주기 어렵게 될 것으로 생각된다. 결과적으로 MgCO_3 의 함량을 이용하여 계산된 겨울온도가 높게 나왔기 때문에 측정된 온도와 계산된 온도의 차이가 여름에 많이 나고, MgCO_3 의 함량을 이용하여 계산된 여름과 겨울의 온도차이가 작아져 측정된 수온차보다 낮게 나온 것으로 생각된다. 하지만 현재의 분석결과와 해상도를 고려할 때 실제로 이 홍조단괴가 성장할 당시에 겨울수온의 차이가 있었을 가능성도 완전히 배제할 수는 없다.

따라서 마그네슘 성분을 이용한 추정온도는 해상도상 겨울의 최저수온은 반영하지 못하지만 여름의 수온은 비교적 성장당시의 수온을 지시한다고 생각할 수 있다. 따라서 계산된 여름수온은 UD-RAN-01 시료가 28.3 $^{\circ}\text{C}$, UD-RAN-02 시료는 34.2 $^{\circ}\text{C}$ 로서 UD-RAN-01 시료가 성장할 당시의 여름수온은 현재와 비슷하고, UD-RAN-02 시료가 성장할 당시의 여름수온은 현재보다 높았을 것이라고 생각된다. 하지만 UD-RAN-02 시료의 정확한 성장시기를 모르기 때문에 이 시료에 대한 정확한 성장연대 측정이 이루어져야 좀 더 정량적인 고해양조건에 대한 해석이 가능할 것으로 생각된다. 또 온도와 일사량에 직접적인 영향을 받는 성장률과 비교를 해보면 일반적으로 겨울보다 수온과 일사량이 높은 여름에 성장률이 빠르다. 그러나 이 연구에서 홍조단괴의 마그네슘 함량을 분석한 결과에 의하면, 온도와 성장률이 일치하지 않는 것으로 분석되었다. 마그네슘 함량을 이용하여 계산된 온도를 보

면 UD-RAN-01 시료보다 UD-RAN-02 시료가 더 높고, 성장률은 UD-RAN-01 시료가 0.25 mm, UD-RAN-02 시료가 0.12 mm로 UD-RAN-01 시료가 2배나 더 높다. 이와 같이 온도와 성장률이 서로 반대의 경향을 보여주고 있다. 이는 홍조단괴의 Mg 함량이 온도에 의해서 조절된다고 가정할 때, 홍조단괴의 성장률이 온도보다는 일사량에 의해 더 많은 영향을 받았을 것이라고 생각할 수 있다. 하지만 앞에서 언급한 바와 같이 두 홍조단괴가 성장하다가 매몰되었을 경우에는 계속해서 성장이 이루어지지 않았을 수도 있다. 이는 성장률이 홍조단괴가 성장하던 중 매몰되어 그 성장이 일시적으로 멈추었기 때문에 성장률이 낮게 나타났을 가능성도 있다고 판단된다.

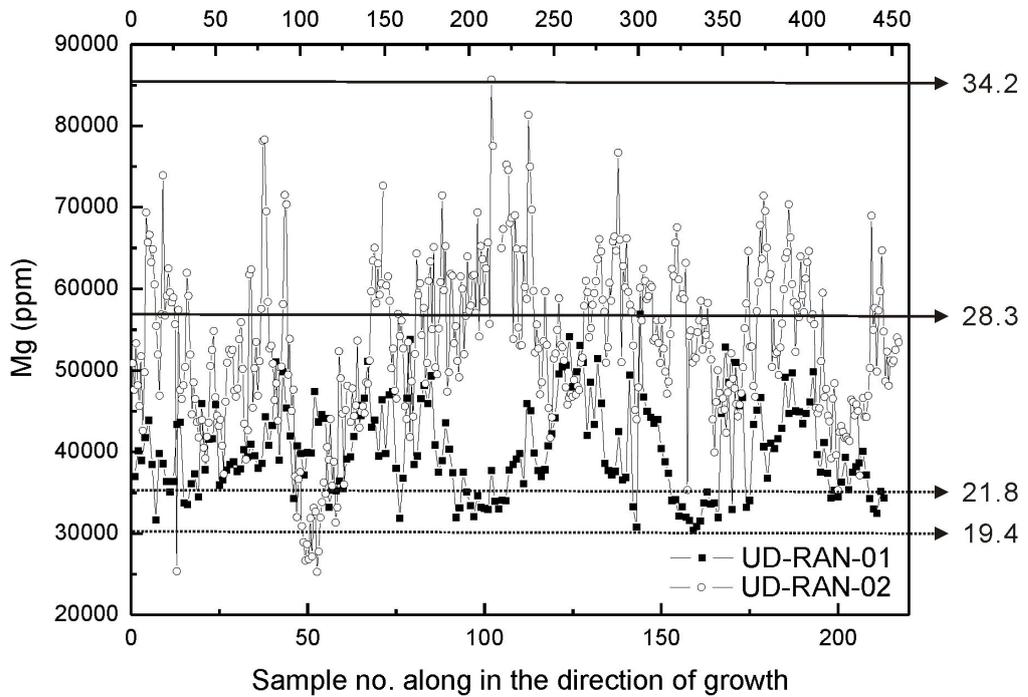


Fig. 26. Magnesium contents of the rhodoliths. The solid lines indicate the magnesium value of rhodoliths in the summer. The dotted lines indicate the magnesium value of the rhodoliths in the winter. The number is calculated value of the temperature by using MgCO_3 value of the rhodoliths.

Table 11. Mean values of Mg, MgCO₃, and δ¹⁸O compositions and calculated growth temperatures.

Sample no.	Mg (ppm)	MgCO ₃ (mol %)	Temperature ¹ (°C)	δ ¹⁸ O (‰,VPDB)	Temperature ² (°C)
UD-RAN	57000	17.5	28.3	-1.0	21.7
-01	30000	9.8	19.4	0.5	15.2
UD-RAN	85000	22.6	34.2	-1.9	26.3
-02	35000	11.8	21.8	0.0	17.6

*Temperature¹ is calculated temperature by using the MgCO₃ content(or equation (1)).

*Temperature² is calculated temperature by using the MgCO₃ content and δ¹⁸O(or equation (2)).

5.5. 홍조단괴의 산소동위원소 성분 변화

유공층과 산호와 같은 석회질 해양 생물들의 산소동위원소 성분은 성장하는 주변 해수의 수온에 직접적인 영향을 받는다(Epstein et al., 1951, 1953). 홍조단괴도 성장하는 주변 해수의 수온에 영향을 받아 지역적인 수온을 반영하고 있다(Halfar et al., 2000). 따라서 수온이 낮은 겨울철에는 산소동위원소 성분이 부화되고 수온이 높은 여름철에는 고갈되는 형태의 주기적인 변화를 보이는 것이 일반적이다. 뿐만 아니라 해수의 산소동위원소 성분인 염분변화에 따라 영향을 받을 수 있다. 해수의 산소동위원소 성분은 원양에서 그 변동의 폭이 매우 작은 편이지만 지역적으로 강수나 용빙수와 같은 염분이 낮은 민물의 영향을 많이 받는 지역에서는 그 값이 변화한다(Ingram et al., 1996; Hellings et al., 2001; Elliot et al., 2003). 일반적으로 염분이 낮은 민물일수록 산소동위원소 성분이 고갈된 값을 갖는다. 연구지역인 제주도는 하천이 발달하지 않아 육지로부터 직접 유입되는 하천수의 영향이 없고 사면이 바다로 둘러싸여 있어 해수의 영향을 주로 받는 환경이다. 강수량은 여

름철이 겨울철보다 많지만 이 차이에 의해서는 실제 해수의 변화가 크지 않을 것으로 생각된다. 그러나 관측된 해양자료를 살펴보면 여름철 해수의 염분이 뚜렷하게 낮아지는 것을 볼 수 있다(그림 5). 이는 쿠로시오 해류와 그 지류인 대마난류 그리고 계절풍을 따라 이동하는 양자강 유출수(Changjiang River Discharge)에 의한 영향으로 제주도 연안 해수는 민물의 영향을 받는다(Beardsly et al., 1985; Chen et al., 1994). 주로 여름철에 제주도 근해까지 영향을 주는 양자강 유출수에 대해서는 실제 관측자료를 통해 많이 연구되었다(eg., Lie et al., 2003; Siswanto et al., 2008; Kim et al., 2009). 이러한 변화로 인해 연구지역에서 채취한 홍조단괴의 산소동위원소 성분 역시 온도의 영향뿐만 아니라 민물의 영향에 의해 고갈된 값을 보일 것으로 예상할 수 있다.

홍조단괴의 산소동위원소 성분변화는 아래와 같이 온도방정식을 이용하여 해수의 온도변화를 계산할 수 있다. 온도방정식은 Epstein et al.(1953)의 공식에 Tarutani et al.(1969)이 홍조단괴가 고마그네슘방해석으로 각질을 만들 때 분별작용으로 인해 발생한 마그네슘 함량을 추가하여 수정하였다.

$$T(^{\circ}\text{C}) = 16.5 - 4.3(\delta^{18}\text{O}_{\text{algae}} - \delta^{18}\text{O}_w) + 0.14(\delta^{18}\text{O}_{\text{algae}} - \delta^{18}\text{O}_w)^2 + 0.06 * \text{MgCO}_3 \dots\dots\dots (2)$$

여기서 T는 수온, $\delta^{18}\text{O}_{\text{algae}}$ 는 홍조단괴의 산소동위원소 성분, $\delta^{18}\text{O}_w$ 는 해수의 산소동위원소 성분을 의미한다. 해수의 산소동위원소 성분은 2개월 간격으로 18개월 동안 측정된 값의 평균값을 적용하였다(김정숙, 2012; 0.0‰, SMOW). $0.06 * \text{MgCO}_3$ 는 홍조단괴가 고마그네슘방해석으로 각질을 만들 때 분별작용으로 인해 발생한 값을 보정한 것이다(Tarutani et al., 1969). MgCO_3 함량은 홍조단괴의 평균값인 13.2 mol%(UD-RAN-01)와 16.2 mol%(UD-RAN-02)를 이용하였다. 홍조단괴의 산소동위원소 성분은 0.6~1 mm의 해상도로 분석된 것이며, 이는 UD-RAN-01, 02 시료의 연성장률인 0.25, 0.12 mm보다 약 3~10배 정도 길다. 따라서 분석의 해상도가 연

주기의 변화를 반영할 수 없기 때문에 분석된 산소동위원소 성분의 최고값과 최소 값을 이용하여 수온을 계산하였다.

UD-RAN-01 시료의 산소동위원소 성분은 최고값이 0.5‰, 최저값은 -1.0‰이다. 이 값을 위의 방정식에 대입하면 성장온도는 각각 15.2, 21.7°C로 이 두 값은 6.5°C의 차이를 보인다. UD-RAN-02 시료의 산소동위원소 성분은 최고값이 0.0‰, 최저값은 -1.9‰이다. 이 값을 위의 방정식에 대입하면 성장온도는 각각 17.6, 26.3°C로 이 두 값은 8.7°C의 차이를 보인다(표 10). 두 시료의 산소동위원소를 이용하여 계산한 온도와 MgCO₃ 함량을 이용하여 계산한 온도를 비교해보면, UD-RAN-01 시료는 MgCO₃ 함량을 이용하여 계산된 수온이 28.3, 19.4°C, 산소동위원소 성분을 이용하여 계산한 수온은 21.7, 15.2°C로 MgCO₃ 함량을 이용하여 계산된 수온이 여름에는 6.6°C, 겨울에는 4.2°C 높다. UD-RAN-02 시료는 MgCO₃ 함량을 이용하여 계산된 수온이 34.2, 21.8°C, 산소동위원소 성분을 이용하여 계산한 수온은 26.3, 17.6°C로 MgCO₃ 함량을 이용하여 계산된 수온이 여름에는 7.9°C, 겨울에는 4.2°C 높다.

앞서 언급했듯이 연구지역인 제주도는 주로 여름철에 제주도 근해까지 양자강 유출수에 의해 영향을 받는다. Moon et al.(2009)은 양자강 유출수의 이동경로를 확인하기 위해 인공위성이 추적할 수 있는 입자(particles)를 양자강 하구에 띄워 그 경로를 관측한 결과, 양자강 유출수는 계절풍에 의해 주로 여름철에 양자강 하구에서부터 제주해협을 거쳐 남해를 지나가는 것으로 관측되었다. 또 제주도 인근 해안에서 관측된 해양자료를 살펴보면 여름철에는 29~33%의 넓은 범위의 값을 갖지만, 겨울철에는 34~35%로 대체로 일정한 값을 갖는다(그림 5). 따라서 홍조단괴가 보이는 여름철 산소동위원소 성분은 해수의 수온뿐만 아니라 양자강 유출수, 즉 담수유입으로 인해 여름철에 고갈된 해수의 산소동위원소 성분의 영향을 받고 있어 측정된 수온보다 계산된 수온이 높아야 한다. 그러나 두 시료는 산소동위원소 성분을 이용하여 계산한 여름철수온이 MgCO₃ 함량을 이용하여 계산된 여름철수온보다 낮게 나온다. 그 이유에 대해서는 현재 자료만으로 해석하기에 어려움이 따른다. 산

소동위원소 성분을 이용한 온도복원식을 보면 해수의 산소동위원소 성분($\delta^{18}\text{O}_w$)이 포함되어 있고, 이 해수의 산소동위원소 성분은 홍조단괴가 성장할 당시의 값을 의미한다. 그러나 채취한 홍조단괴가 성장할 당시의 해수의 산소동위원소 값을 모르기 때문에 현재 해수의 산소동위원소 성분인 0.0‰을 이용하여 수온을 계산하였다. 또 Milliman(1974)는 *Lithopyllum* 속의 산소동위원소 성분이 해수의 산소동위원소 성분과 -2.7‰ 정도 일정한 차이의 비평형 상태를 보인다고 제안하였다. 두 시료의 산소동위원소 성분과 MgCO_3 함량을 이용하여 계산한 온도를 보면 여름은 UD-RAN-01, UD-RAN-02 시료가 6.6, 7.9°C이고, 겨울은 두 시료 모두 4.2°C의 차이를 보인다. 계산된 두 수온의 차이가 여름에 높기는 하지만 계절별로 일정한 차이를 보이고 있다. 따라서 두 시료를 이용하여 계산된 여름철수온이 낮게 나온 것으로 생각된다.

두 시료의 산소동위원소 성분을 이용하여 성장하였을 당시의 해수 산소동위원소 성분을 추정할 수 있다. 이를 위해 두 시료의 겨울철 산소동위원소 성분을 이용하였고, 겨울철 산소동위원소 성분을 이용한 이유는 다음과 같다. 실제 측정된 해수의 자료를 보면 여름철의 수온이 많은 차이를 보이고, 양자강 유출수의 영향을 받아 제주도 인근 해수의 염분변화가 심하다. 그러나 겨울철에는 양자강 유출수의 영향을 가장 적게 받아 염분변화가 거의 없이 일정하고, 수온도 일정한 값을 보인다(그림 5). 따라서 두 홍조단괴가 성장하던 당시의 해수의 수온이 어느 정도 일정했다고 가정하면 홍조단괴의 겨울 산소동위원소 성분차이는 각각의 홍조단괴가 성장하던 겨울 해수의 산소동위원소 성분만을 지시한다고 생각할 수 있다. 먼저 온도복원식에 현재 측정된 겨울 해수의 산소동위원소 성분과 겨울 온도를 대입하면 현재 성장하고 있는 홍조단괴의 겨울 산소동위원소 성분을 추정할 수 있다. 겨울 해수의 산소동위원소 성분인 0.1‰(김정숙, 2012)과 겨울 수온인 10.3°C를 대입한 결과 현재 성장하고 있는 홍조단괴의 겨울 산소동위원소 성분은 약 1.5‰(3)로 계산된다(①).

현재 분석된 UD-RAN-01, UD-RAN-02 시료의 산소동위원소 성분은 각각

0.5‰, 0.0‰이고, 현재의 해수의 온도와 산소동위원소의 값으로 계산된 홍조단괴의 산소동위원소 성분이 1.5‰이기 때문에 계산된 홍조단괴와 두 시료의 산소동위원소 성분의 차이는 각각 1‰, 1.5‰이 된다. 이 차이는 수온, 염분에 의해 영향을 받을 수 있는데, 최근 수십 년 간 겨울철 수온 모니터링의 결과를 보면 그 온도의 차이가 거의 나타나지 않는다. 따라서 UD-RAN-01, UD-RAN-02 시료와 계산된 홍조단괴(현재)의 값의 차이는 겨울 수온의 차이가 아닌 겨울 해수의 산소동위원소 성분의 차이일 가능성이 높다.

이를 증명하기 위해 두 시료의 산소동위원소 성분과 겨울 수온을 이용하여 두 시료가 성장할 당시의 겨울 해수의 산소동위원소 성분을 구해 보았다. 두 시료의 산소동위원소는 각각 1‰, 1.5‰이고, 겨울 수온은 변화가 거의 없기 때문에 지난 40년간 수온의 변화가 거의 없다고 생각되는 겨울평균 수온인 10.3°C를 이용하였다. 이 값들을 이용하여 두 시료가 성장할 당시의 산소동위원소 성분을 계산한 값(②, ③)은 각각 -1.0‰, -1.5‰((4), (5))이다(그림 27).

① 현재

$$T = 16.5 - 4.3(\delta^{18}O_{alga} - 0.1) + 0.14(\delta^{18}O_{alga} - 0.1)^2$$

$$0.14\delta^{18}O_{alga}^2 - 4.33\delta^{18}O_{alga} + 16.9 = T$$

0.14 $\delta^{18}O_{alga}^2$ 는 0에 가깝고, 겨울온도 T = 10.3°C 대입하면,

$$-4.33\delta^{18}O_{alga} = -6.6$$

$$\therefore \delta^{18}O_{alga} = 1.5 \dots\dots\dots (3)$$

② UD-RAN-01

$$T = 16.5 - 4.3(0.5 - \delta^{18}O_w) + 0.14(0.5 - \delta^{18}O_w)^2$$

$$0.14\delta^{18}O_w^2 + 4.17\delta^{18}O_w + 14.51 = T$$

0.14 $\delta^{18}O_w^2$ 는 0에 가깝고, 겨울온도 T = 10.3°C 대입하면,

$$4.17\delta^{18}O_w = -4.21$$

$$\therefore \delta^{18}\text{O}_w = -1.0 \dots\dots\dots (4)$$

③ UD-RAN-02

$$T = 16.5 - 4.3(0.0 - \delta^{18}\text{O}_w) + 0.14(0.0 - \delta^{18}\text{O}_w)^2$$

$$0.14\delta^{18}\text{O}_w^2 + 4.3\delta^{18}\text{O}_w + 16.67 = T$$

0.14 $\delta^{18}\text{O}_w^2$ 는 0에 가깝고, 겨울온도 T = 10.3°C 대입하면,

$$4.3\delta^{18}\text{O}_w = -6.37$$

$$\therefore \delta^{18}\text{O}_w = -1.5 \dots\dots\dots (5)$$

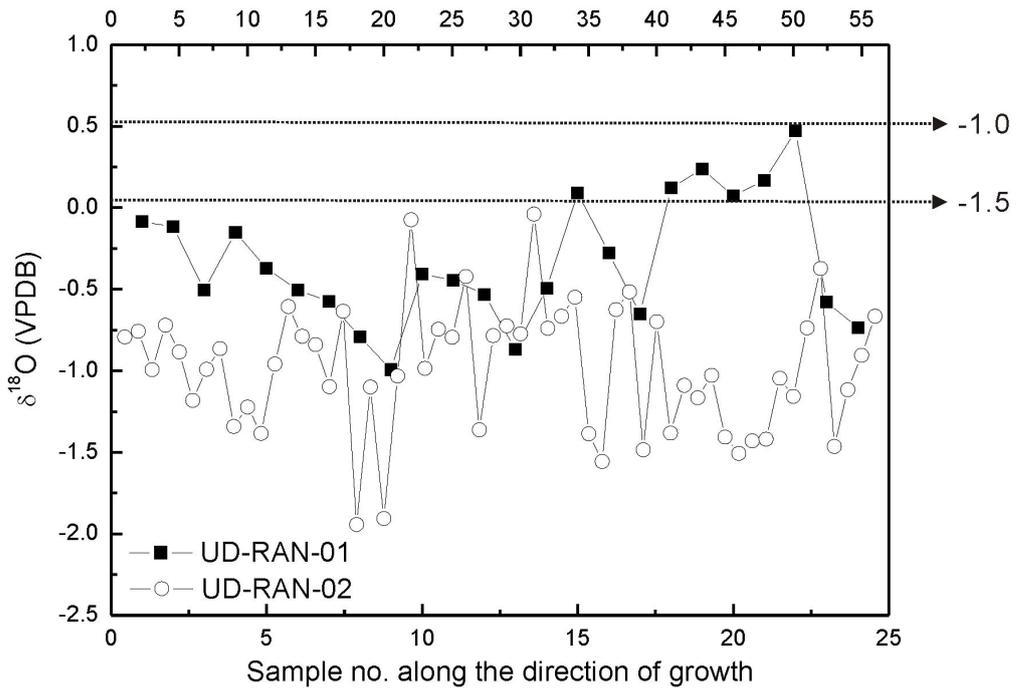


Fig. 27. Oxygen isotope profile for the rhodoliths. The dotted lines indicate the oxygen isotopic values in the winter. The number is calculated oxygen isotope values of the seawater in winter by using oxygen isotopic value.

5.6. 홍조단괴의 탄소동위원소 성분 변화

일반적으로 석회질 해양 생물들이 탄소동위원소 성분을 기록할 때는 해수의 용존무기탄소(DIC)량과 생물체의 신진대사(metabolism)의 영향을 받는다(McConnaughey, 1989). DIC는 해수의 일차 생산성과 관련이 있는데, 식물플랑크톤의 생산력(primary productivity)에 의해 일차적으로 조절되는 것으로 알려져 있다. 즉 식물성플랑크톤의 생산력이 높아지면 광합성이 활발하여 해수에 녹아있는 ^{12}C 의 소모가 ^{13}C 보다 활발하므로 해수의 탄소동위원소 값이 부화되는 경향을 보이고, 반대로 생산력이 낮아지면 해수의 탄소동위원소 값은 고갈되는 경향을 보인다. 이 외에도 용승현상에 의해 고갈된 탄소동위원소 성분을 가진 심해수가 천해로 올라옴에 따라 DIC의 탄소동위원소 값이 영향을 받을 수 있다(Bemis and Geary, 1996; Sonnerup et al., 2000). 또한 해수주변의 식생(C_3 , C_4 식물 등)의 영향을 받기도 하고, 산업화가 시작되면서 화석연료사용으로 인한 대기 탄소동위원소 변화(Suess effect)의 영향으로 해수의 탄소동위원소 성분이 산업화 이전보다 낮은 값을 보이는 경우도 보고되었다(Bacastow et al., 1996; Sonnerup et al., 2000). 그리고 이러한 해수에서 성장한 홍조단괴의 껍데기는 해수의 탄소동위원소 성분을 반영하게 된다.

연구지역 주변해역에서 1991년 9월부터 1992년 6월까지 식물플랑크톤의 생물량을 측정하기 위해 Chlorophyll a를 측정한 결과에 의하면, 겨울철에는 Chlorophyll a의 농도가 1 mg/m^3 이하의 낮은 값을 보이지만, 여름철에는 급격히 증가하여 약 2 mg/m^3 이상의 높은 값을 보인다(Lee J.B. et al., 1993). 즉 춘계와 하계의 수온상승과 함께 식물성플랑크톤의 광합성이 활발하여 높은 생산력을 보이지만 추계와 동계의 저조한 광합성으로 낮은 생산력을 나타내고 있다. 따라서 우도에서 이와 같은 일차생산력의 계절적인 변화로 인해 해수의 탄소동위원소 성분이 겨울철에 감소하고 여름철에 증가하는 계절적인 주기성을 나타낼 것이라고 생각할 수 있다.

만약 홍조단괴의 탄소동위원소 성분이 DIC에 영향을 받는다면 식물성플랑크톤의 생산력이 높은 여름철에 탄소동위원소 성분이 부화된 값을 보여야 한다. 그러나 이번 연구에서 분석된 두 시료의 탄소동위원소 성분은 높을수록 여름을 지시하는

마그네슘 함량과 반비례하고(그림 28a), 고갈될수록 여름을 지시하는 산소동위원소 성분과는 비례한다(그림 28b). 이는 여름에 탄소동위원소 성분이 고갈된 값을 갖는 것을 의미한다. 따라서 연구지역 해수의 탄소동위원소 성분이 일차생산력에 의해 주로 조절되는 것이 아니라, 다른 요인에 의해 더 크게 조절된다는 것을 의미한다. 이는 곧 해수염분의 영향을 주는 민물의 유입으로 인해 해수의 탄소동위원소 성분이 영향을 받는 것을 의미한다.

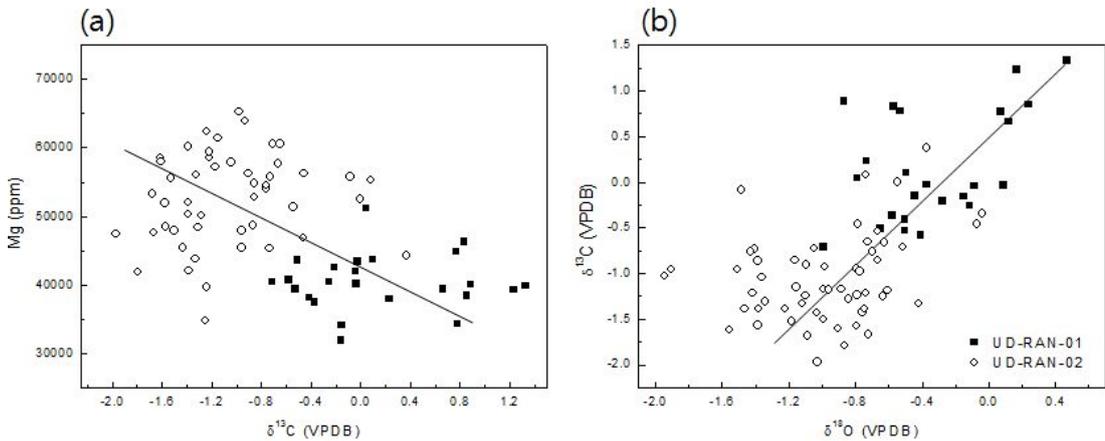


Fig. 28. (a) Scatter diagram of carbon isotope versus magnesium contents of the rhodoliths. (b) Scatter diagram of oxygen isotope versus carbon isotope contents of the rhodoliths.

탄소동위원소 성분을 살펴보면, 현재 해수의 탄소동위원소 성분은 1.9‰의 변화를 보이고, UD-RAN-01, UD-RAN-02 시료는 각각 2.0‰, 2.3‰의 변화를 보여 약 2.0‰ 내외의 비슷한 범위를 갖는다(그림 29). 민물의 유입에 의해 조절되는 탄소동위원소 성분은 주로 여름철에 양쯔강 유출수에 영향을 받아 해수의 탄소동위원소 성분이 고갈된 값을 보이고, 겨울철에는 민물의 유입이 없어 해수의 탄소동위원소

성분이 일정한 값을 갖는다. 즉 탄소동위원소 성분이 변화하는 범위는 여름철에 양쯔강 유출수의 영향을 어느 정도 받았는지에 따라 달라진다. 여름철에 양쯔강 유출수에 영향을 많이 받았을 때는 탄소동위원소 성분이 변화하는 범위가 넓고, 영향을 적게 받았을 때는 탄소동위원소 성분이 변화하는 범위가 좁다. 따라서 현재 해수의 탄소동위원소 성분과 두 시료의 탄소동위원소 성분이 변화하는 범위가 비슷하다는 것은 여름철에 양쯔강 유출수의 영향을 비슷하게 받았다는 것을 지시한다. 그러나 평균 탄소동위원소 성분은 차이를 보이고 있다. 현재 해수의 평균 탄소동위원소 성분은 -0.2% 이고(김정숙, 2012), UD-RAN-01, UD-RAN-02 시료의 평균 탄소동위원소 성분이 0.2% , -1.1% 을 보여 현재 해수와 UD-RAN-01 시료는 거의 비슷한 값을 갖고, 전반적으로 UD-RAN-02 시료가 고갈된 값을 보인다(그림 29). 즉 UD-RAN-02 시료가 성장할 당시 민물의 영향을 더 많이 받았다는 것을 지시한다. 또 두 시료의 탄소동위원소 성분은 산소동위원소 성분이 고갈된 값을 갖는 여름철에 변화하는 범위가 넓어지고, UD-RAN-02 시료가 더 넓은 범위에서 변화한다(그림 30). 따라서 UD-RAN-02 시료가 성장할 당시 해수는 강수량이 증가하여 여름철에 유입되는 양쯔강 유출수의 영향을 더 많은 받았을 것으로 생각된다.

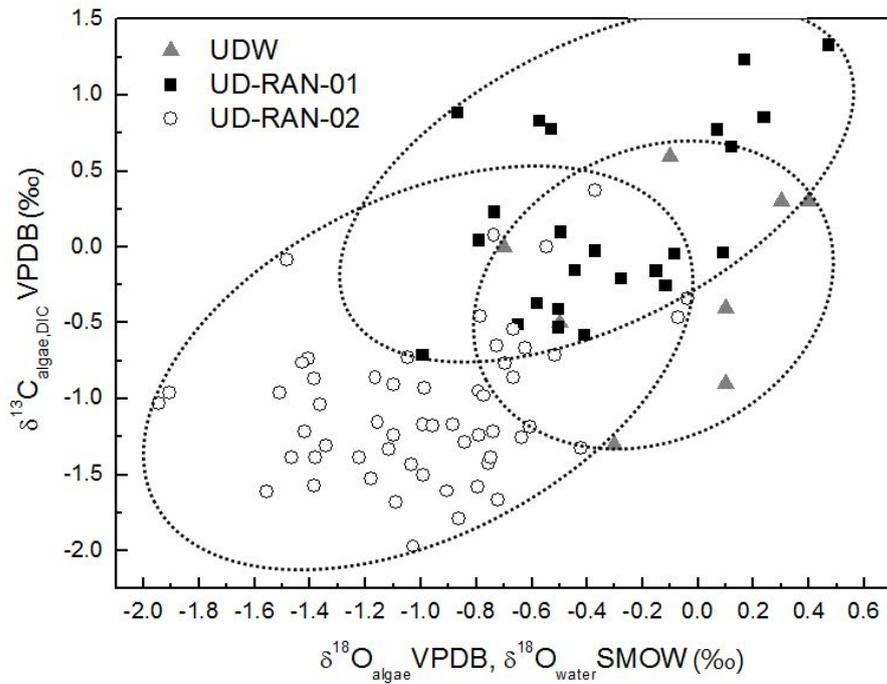


Fig. 29. Scatter diagram of oxygen versus carbon isotope compositions of the rhodoliths (UD-RAN-01, 02) and recent seawater (DIC) (UDW) from Udo, Jeju island.

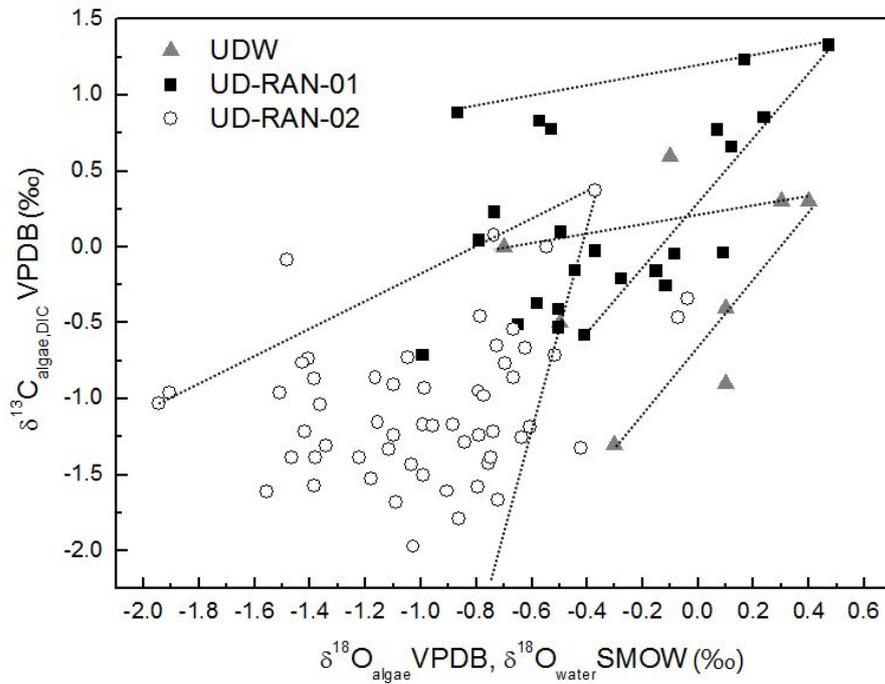


Fig. 30. Scatter diagram of oxygen versus carbon isotope compositions of the rhodoliths (UD-RAN-01, 02) and recent seawater (DIC) (UDW) from Udo, Jeju island. The carbon isotope compositions show wide range with less and less oxygen isotope compositions.

6. 결 론

제주도 북동쪽에 위치하고 있는 우도와 성산 사이의 천해환경에서 채취한 홍조단괴 내의 셀은 여름에 성장한 부분이 겨울에 성장한 부분보다 더 크다. 셀 크기의 주기적 변화를 이용하여 연평균성장률을 측정된 결과 UD-RAN-01, 02 시료는 각각 0.25, 0.12 mm/year의 성장률을 보이며, 약 100, 300년 동안 성장했던 것으로 생각된다.

미량원소 분석결과 홍조단괴의 $MgCO_3$ 의 함량을 이용하여 계산된 수온과 측정된 수온의 차이는 두 시료 모두 겨울에 큰 차이를 보인다. 이는 겨울에 성장한 홍조단괴 셀 크기가 매우 작아서, 겨울철 성장부분과 여름철 성장부분이 분석과정에서 혼합되었기 때문일 가능성이 높다. 하지만 이 홍조단괴가 성장할 당시에 겨울 수온의 차이가 실제로 있었을 가능성도 완전히 배제할 수는 없다. 여름온도는 UD-RAN-01 시료가 28.3°C로 현재와 비슷한 수온에서 성장하였으며, UD-RAN-02 시료는 34.2°C로 현재보다 높은 수온에서 성장한 것으로 판단된다.

두 홍조단괴에 대한 안정동위원소 측정결과 홍조단괴의 산소동위원소 성분은 탄소동위원소 성분과 비례하는 관계를 보여준다. 이는 산소, 탄소동위원소 성분 변화에 영향을 주는 요인이 해수의 동위원소 성분의 변화라는 것을 의미하며, 이는 곧 민물의 유입으로 인해 두 성분이 영향을 받은 것으로 판단된다. 그러나 물의 성분과는 관련이 없이 수온에 의해서만 영향을 받는 마그네슘 함량의 변화는 홍조단괴 내의 마그네슘 함량이 주로 수온에 의해서 영향을 받았던 것으로도 판단된다. 두 시료의 산소동위원소 성분을 이용하여 성장하였을 당시에 해수 산소동위원소 성분을 추정하였다. 두 시료가 성장할 당시 겨울철해수의 산소동위원소 성분을 구하면 UD-RAN-01, UD-RAN-02는 각각 -0.7, -1.1%의 값을 보인다.

분석된 홍조단괴의 탄소동위원소 성분결과, 현재 해수의 평균 탄소동위원소 성분은 -0.2‰이고, UD-RAN-01, UD-RAN-02 시료의 평균 탄소동위원소 성분은 0.2,

-1.1‰을 보인다. 이 값들을 보면 현재 해수와 UD-RAN-01 시료는 거의 비슷한 값을 갖고, UD-RAN-02 시료는 현재 해수보다 고갈된 값을 보인다. 또 현재 해수의 탄소동위원소 성분과 두 시료의 탄소동위원소 성분은 산소동위원소 성분이 고갈된 값을 갖는 여름철에 변화하는 범위가 넓어진다. 이 변화하는 범위 역시 현재 해수와 UD-RAN-01 시료는 비슷한 반면 UD-RAN-02 시료는 더 넓은 범위에서 변화한다. 따라서 UD-RAN-02 시료가 성장할 당시 해수는 여름철에 유입되는 양쯔강 유출수의 영향을 더 많은 받았을 것으로 생각된다. 결과적으로 UD-RAN-01 시료는 현재와 비슷한 환경에서 성장하고, UD-RAN-02 시료는 현재보다 온난다습한 환경에서 성장한 것으로 판단된다.

참고문헌

- 국립해양조사원, 1990, 해류도(우도 및 부근). 대한민국 해양수산부, No, 226.
- 김정숙, 2012, 서해안, 남해안 및 제주도 지역의 패층에서 발견되는 애매패류의 지화학적성분을 이용한 후기 홀로세 고기후 연구. 강원대학교 석사학위논문, 51 p.
- 김진경, 우경식, 강순석, 2003, 제주도 우도의 홍조단괴 해빈 퇴적물의 특징과 형성 조건: 예비연구 결과. 한국해양학회지, 8, 401-410.
- Adey, W.H., 1970, The effects of light and temperature on growth rates in boreal-subarctic crustose corallines. J. Phycol., 6, 269-276.
- Adey, W.H., 1965, The genus *Clathromorphum* (corallinaceae) in the Gulf of Maine. Hydrobiologia, 26, 539-573.
- Adey, W.H. and Adey, P.J., 1973, Studies of the biosystematics and ecology of the epilithic crustose Corallinaceae of the British Islands. British Phycol. Jour., 8, 343-407.
- Adey, W.H., and I. G. Macintyre, 1973, Crustose coralline algae: A Re-evaluation in the geological sciences. Geological Society of America Bulletin, 84, 883-904.
- Adey, W.H., and McKibbin, D.L., 1970, Studies on maerl species *Phymatolithon calcareum* (Pallas) nov.comb. and *Lithothamnion coralloides* Crouan in the Ria de Vigo. Botanica Marine, 13, 100-106.
- Bacastow, R.B., Keeling, C.D., Lueker, T.J. and Wahlen, M., 1996, The ^{13}C Suess effect in the world surface oceans and its implications for oceanic uptake of CO_2 : analysis of observations at Bermuda. Global Biogeochemical Cycles, 10, 335-346.
- Beardsley, R.C., Limeburner, R., Yu, H. and Cannon, G.A., 1985, Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. Continental Shelf Research, 4, 57-76.

- Bemis, B.E. and Geary, D.H., 1996, The usefulness of bivalve stable isotope profiles as environmental indicators: Data from the eastern Pacific Ocean and the southern Caribbean Sea. *PALAIOS*, 11, 328-339.
- Bohm, L., Schramm, W. and Rabsch, U., 1978, Ecological and physiological aspects of some coralline algae from the western Baltic. Calcium uptake and skeleton formation in *Phymatolithon calcareum*. *Kieler Meeresforsch*, 4, 282-288.
- Bosellini, A. and Ginsburg, R. N., 1971, Form and internal structure of recent algal nodules (rhodoliths) from Bermuda. *The Journal of Geology*, 79, 669-682.
- Bosence, D. J., 1983, The occurrence and ecology of recent rhodoliths - a review. In Peryt, T.M. (editor) *Coated Grains*. Springer-Verlag, Verlin, 217-224 p.
- Briffa, K.R., 2000, Annual climate variability in the Holocene: interpreting the message of ancient trees. *Quaternary Science Reviews*, 19, 87-105.
- Cabioch, J., 1966, Contribution a l'etude morphologique anatomique et systematique de deux Melobesiees: *Lithothamnion calcareum* (Pallas) Areschoug et *Lithothamnion coralliodes* Crouan. *Botanica Marina*, 9, 33-53.
- Charles, C.D., Hunter, D.E. and Fairbanks, R.G., 1997, Interaction between the ENSO and the Asian Monsoon in a coral record of tropical climate. *Science*, 277, 925-928.
- Chave, K.E., 1954, Aspects of the biogeochemistry of magnesium, 1: Calcareous marine organisms. *Journal of Geology*, 62, 226-283.
- Chave, K.E., and Wheeler, B.D., Jr., 1965, Mineralogic changes during growth in the red alga *Clathromorphum compactum*. *Science*, 147, 621.
- Checconi, A., Bassi, D., Carannante, G. and Monaco, P., 2010, Re-deposited

- rhodoliths in the Middle Miocene hemipelagic deposits of Vitulano (Southern Apennines, Italy) : Coralline assemblage characterization and related trace fossils. *Sedimentary Geology*, 225, 50–66.
- Chen, C., Beardsley, R.C., Limeburner, R., Yu, H. and Kim, K., 1994, Comparison of winter and summer hydrographic observation in the Yellow and East China Sea and adjacent Kuroshio during 1986. *Continental Shelf Research*, 14, 909–929.
- Cheng, H., Edwards, R.L., Hoff, J., Gallup, C.D., Richards, D.A., and Asmeron, Y., 2000, The half-lives of uranium-234 and thorium-230. *Chemical Geology*, 169, 17–33.
- Cole, J.E., 2003, Holocene coral records: windows on tropical climate variability. In *Global change in the Holocene*, 168–184 pp.
- Correge, T., 2006, Sea surface temperature and salinity reconstruction from coral geochemical tracers. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 232, 408–428.
- Druffel, E.R.M., 1997, Pulses of rapid ventilation in the North Atlantic surface ocean during the past century. *Science*, 275, 1454–1457.
- Edwards, R.L., Chen, J.H., Wasserburg, G.J., 1987, ^{238}U – ^{234}U – ^{230}Th – ^{232}Th systematics and the precise measurement of time over the past 500,000 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 81, 175–192.
- Elliot, M., deMenocal, P.B., Linsley, B.K. and Howe, S.S., 2003, Environmental controls on the stable isotopic composition of *Mercenaria mercenaria*: Potential application to paleoenvironmental studies. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4, 10561, 10.1029/2002GC000425.
- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lwenstam, H.A. and Urey, H.C., 1951, Carbonate–water isotope temperature scale. *Bulletin of Geological Society of*

- America, 62, 417–426.
- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lwenstam, H.A. and Urey, H.C., 1953, Revised carbonate–water isotopic temperature scale. *Bulletin of Geological Society of America*, 64, 1315–1326.
- Foster, M. S., 2001, Rhodoliths: Between rocks and soft places. *Journal of Phycology*, 37, 659–667.
- Frantz, B. R., Kashgarian, M., Coale, K. H. and Foster, M. S., 2000, Growth rate and potential climate record from rhodolith using ^{14}C accelerator mass spectrometry. *Limnology and Oceanography*, 45, 1773–1777.
- Freiwald A. and Henrich T., 1994, Reefal coralline algal build-ups within the Arctic circle: morphology and sedimentary dynamics under extreme environmental seasonality. *Sedimentology*, 41, 963–984.
- Gagan, M.K., Ayliffe, L.K., Beck, J.W., Cole, J.E., Druffel, E.R.M., Dunvar, R.B. and Schrag, D.P., 2000, New views of tropical paleoclimates from corals. *Quaternary Science Reviews*, 19, 45–64.
- Georgina–Rivera, M., 1999, *Edad y Crecimiento de Lirhorhamnium crassiusculum (Foslie) Mason (Corallinales, Rhodophyta) en El Suroeste del Golfo de California, Mexico*. Tesis, Universidad Autonoma de Baja California Sur, La Paz, Baja California Sur.
- Goodkin, N.F., Hughen, K.A. and Cohen, A.L., 2007, A multicoral calibration method to approximate a universal equation relating Sr/Ca and growth rate to sea surface temperature. *Paleoceanography*, 22, doi:10.1029/2006PA001312.
- Goodwin, D.H., Schone, B.R. and Dettman, D.L., 2003, Resolution and Fidelity of oxygen isotopes as paleotemperature proxies in bivalve mollusk shells: Models and observations. *Palaios*, 18, 110–125.
- Greer, L. and Swart, P.K., 2006, Decadal cyclicity of regional mid–Holocene

- precipitation: evidence from Dominican coral proxies. *Paleoceanography*, 21, doi:10.1029/2005PA001166.
- Grottoli, A.G. and Eakin, M., 2007, A review of modern coral $\delta^{18}\text{O}$ and $\Delta^{14}\text{C}$ proxy records. *Earth Science Reviews*, 81, 67–91.
- Halfar, J., Zack, T., Kronz, A. and Zachos, J., 2000. Growth and high-resolution paleoenvironmental signals of rhodoliths (coralline red algae): a new biogenic archive. *Journal of Geophysical Research*, 105, 22,107–22,116.
- Halfar, J., Steneck, R., Schone, B.R., Moore, G.W.K., Joachimski M.M., Kronz, A., Fietzke, J. and Estes, J.A., 2007, Coralline alga reveals first marine record of subarctic North Pacific climate change. *Geophysical Research Letters*, 34(L07702), doi:10.1029/2006GL208811.
- Halfar, J., Steneck, R.S., Joachimski, M., Kronz, A. and Wanamaker Jr, A.D., 2008, Coralline red algae as high-resolution climate recorders. *Geology*, 36, 463–466.
- Hellings, L., Dehairs, F., Van Damme, S. and Baeyens, W., 2001, Dissolved inorganic carbon in a highly polluted estuary (the Scheldt). *Limnology and Oceanography*, 46, 1406–1414.
- Henderson, G.M., 2006, Caving in to new chronologies. *Science*, 313, 620–622.
- Henrich, R., Freiwald, A., Wehrmann, A., Schafer, P., Samtleben, C., and Zankl, H., 1996, Nordic cold-water carbonates: Occurrences and controls, in Reitner, J., Neuweiler, F., Gunkel, F., eds., *Global and Regional Controls on Biogenic Sedimentation*. *Gottinger Arbeiten Geol. Palaonton*. Gottinger, Germany, 35–53.
- Hetzinger, S., J. Halfar, A. Kronz, R. Steneck, W. H. Adey, P. A. Lebednik and B. R. Schone, 2009, High-resolution Mg/Ca ratios in a coralline red algae as a proxy for Bering Sea temperature variations from 1902 to 1967.

- Palaios, 24, 406–412.
- Hetzinger, S., Halfar, J., Zack, T., Gamboa, G., Jacob, D.E., Kunz, B.E., Kronz, A., Adey, W., Lebednik, P.A. and Steneck, R.S., 2011, High-resolution analysis of trace elements from the North Atlantic and North Pacific in encrusting coralline algae by laser ablation ICP-MS. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 302, 81–94.
- Ingram, B.L., Ingle, J.C. and Conrad, M.E., 1996, A 2000 yr record of Sacramento San Joaquin River inflow to San Francisco Bay estuary, California. *Geology*, 24, 331–334.
- IPCC, 2007. Fourth assessment report (AR4), climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 p.
- Johansen, H. W. (ed.), 1981, *Coralline Algae: A First Synthesis*. CRC Press, Boca Raton, Fla., 239 p.
- Johnson, J. H., 1961, *Limestone-building algae and algal limestones*. Golden,, Colorado School of Mines, Dept. of Publications, 297 p.
- Jones, D.S., 1980, Annual cycle of shell growth increment formation in two continental shelf bivalves and its paleoecologic significance. *Paleobiology*, 6, 331–340.
- Jones, D.S., 1981, Annual growth increments in shells of *Spisula solidissima* record marine temperature variability. *Science*, 211, 165–167.
- Jones, P.D., Briffa, K.R., Barnett, T.P. and Tett, S.F.B., 1998, High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with General Circulation Model control-run temperatures. *The Holocene*, 8, 455–72.
- Jones, P.D., Osborn, T.J., and Briffa, K.R., 2001, The evolution of climate over

- the last millennium. *Science*, 292, 662–667.
- Kamenos, N., Cusack, M. and Moore, P.G., 2008, Coralline algae are global paleothermometer with bi-weekly resolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 771–779.
- Kawahata, H., Suzuki, A. and Ohta, H., 2000, Export fluxes in the Western Pacific Warm Pool. *Deep Sea Research Part I*, 47, 2061–2091.
- Kim, H.-C., Yamaguchi, H., Yoo, S., Zhu, J., Okamura, K., Kiyomoto, Y., Tanaka, K., Kim, S.-W., Park, T., Oh, I.S. and Ishizaka, J., 2009, Distribution of Changjiang diluted water detected by satellite chlorophyll- and its interannual variation during 1998–2007. *Journal of Oceanography*, 65, 129–135.
- Krantz, D.E., Williams, D.F. and Jones, D.S., 1987, Ecological and paleoenvironmental information using stable isotopic profiles from living and fossil molluscs. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 58, 249–266.
- Lea, D.W., 2003, Elemental and isotopic proxies of marine temperatures, in Elderfield, H., ed., *The Oceans and Marine Geochemistry*, Treatise on Geochemistry. Elsevier–Pergamon, Oxford, 6, 365–390.
- Lee, J.B., Choa, H.J., Go, Y.B. and Choi, Y.C., 1993, Bioecological studies of the Eastern coastal area in Cheju Island(II) phytoplankton dynamics and primary productivity around U-Ddo. *Journal of Korean Earth Science Society*, 14, 458–466.
- Lie, H.J., Cho, C.H., Lee, J.H. and Lee, S., 2003, Structure and eastward extension of the Changjiang River plume in the East China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 108: 3077, doi:10.1029/2001JC001194.
- Linge, H., Lauritzen, S.H., Lundberg, J. and Berstad, I.M., 2001, Stable isotope stratigraphy of Holocene speleothems: examples from a cave system in

- Rana, northern Norway. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 167, 209–224.
- Logan, B.W., J. L. Harding, W. M. Ahr, J.D. Williams and R. G. Snead, 1969, Carbonate sediments and reefs, Yucatan Shelf, Mexico. *American Association of Petroleum Geologists*, 11, 1–198.
- McConnaughey, T., 1989, ^{13}C and ^{18}O isotopic disequilibrium in biological carbonates: I. Patterns. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 151–162.
- Milliman, J. D., 1974, *Marine carbonates*. Springer-Verlag, New York, 375 p.
- Milliman, J. D., M. Gastner and J. Mueller, 1971, Utilization of magnesium in coralline algae. *Geological Society of America Bulletin*, 81, 573–580.
- Moberly, R.Jr., 1968, Composition of magnesian calcites of algae and pelecypods by electron microprobe analysis. *Sedimentology*, 11, 61–82.
- Moon, J-H., Pang, I-C. and Yoon, J-H., 2009, Response of the Changjiang diluted water around Jeju Island to external forcings: A modeling study of 2002 and 2006, *Continental Shelf Research*, 29, 1549–1564.
- 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.
- Quitmyer, I.R. and Jones, D.S., 2009, Shell middens as archives of paleobiological and paleoenvironmental data. *Journal of Shellfish Research*, 28, 722–722.
- Richardson, C.A., 1989, An analysis of the microgrowth bands in the shell of the common mussel *Mytilus edulis*. *Journal of the Marine Biological Association (United Kingdom)*, 69, 447–491.
- Rosenheim, B.E., Swart, P.K. and Thorrold, S.R., 2005, Minor and trace elements in sclerosponge *Ceratoporella nicholsoni*: biogenic aragonite near the inorganic endmember. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*,

228, 109–129.

- Shimamura, M., Oba, T., Xu, G., Lu, B., Wang, L., Murayama, M., Toyoda, K. and Winter, A., 2005, Fidelity of $\delta^{18}\text{O}$ as a proxy for sea surface temperature: Influence of variable coral growth rates on the coral *Porites lutea* from Hainan Island, China. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6, doi:10.1029/2005GC000966.
- Shirai K., Kuysakabe M., Nakai S., Ishii T., Watanabe T., Hiyagon H. and Sano Y., 2005, Deep-sea coral geochemistry: implication for the vital effect. *Chemical Geology*, 224, 212–222.
- Siswanto, E., Nakata, H., Matsuoka, Y., Tanaka, K., Kiyomoto, Y., Okamura, K., Zhu, J.R. and Ishizaka, J., 2008, The long-term freshening and nutrient increases in summer variation. *Journal of Geophysical Research*, 113, C10030. doi:10.1029/2008JC4812.
- Sneed, E.D. and Folk, R.L., 1958, Pebbles in the lower Colorado River, Texas, a study in particle morphogenesis. *Journal of Geology*, 66, 114–150.
- Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 1993, The Udo tuff cone, Cheju Island, South Dorea: transformation of pyroclastic fall into debris fall and grain flow on a steep volcanic cone slope. *Sedimentology*, 40, 769–786.
- Sonnerup, R.E., Quay, P.D. and McNichol, A.P., 2000, The Indian Ocean ^{13}C Suess effect. *Global Biogeochemical Cycles*, 14, 903–916.
- Strom, A., Francis, R.C., Mantua, N.J., Miles, E.L. and Peterson, D.L., 2004, North Pacific climate recorded in growth rings of geoduck clams: a new tool for paleoenvironmental reconstruction. *Geophysical Research Letters*, 31 (L06206), 4 p. doi:10.1029/2004GL019440.
- Tarutani, T., R. N. Clayton and T. K. Mayeda, 1969, The effect of polymorphism and magnesium substitution on oxygen isotope fractionation between calcium carbonate and water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,

33, 987–996.

Walker, K.J. and Surge, D., 2006, Developing oxygen isotope proxies from archaeological sources for the study of Late Holocene human–climate interactions in coastal southwest Florida. *Quaternary International*, 150, 3–11.

Wanamaker, A.D., Heinemeier, J., Scourse, J.D., Richardson, C.A., Butler, P.G., Eiriksson, J. and Knudsen, K.L., 2008, Very long-lived mollusks confirm 17th century AD tephra-based radiocarbon reservoir ages for north Icelandic shelf waters. *Radiocarbon*, 50, 399–412.

Wray, J.L., 1977, *Calcareous algae*. Elsevier, Amsterdam.

Appendices

Appendix 1. Trace elements compositions of the UD-RAN-01.

(unit: ppm)

Measuring point	Mg	Sr	Ba	U	Measuring point	Mg	Sr	Ba	U
1	37,007	1,180	5.01	0.48	33	39,360	937	3.44	0.44
2	40,169	1,405	5.55	0.49	34	40,967	1,010	3.90	0.48
3	38,964	1,204	4.17	0.46	35	39,545	963	4.25	0.49
4	41,766	1,316	4.52	0.43	36	38,031	931	4.04	0.42
5	43,896	1,290	3.96	0.45	37	38,591	1,090	4.09	0.44
6	38,425	1,228	3.86	0.44	38	44,272	1,009	3.55	0.57
7	31,671	2,006	6.09	0.76	39	40,826	983	3.72	0.60
8	39,765	1,280	4.50	0.44	40	43,262	1,114	4.95	0.54
9	38,570	1,255	5.04	0.44	41	51,064	1,132	3.71	0.54
10	36,376	1,235	6.49	0.49	42	39,017	999	4.07	0.55
11	35,107	1,238	4.63	0.41	43	49,835	1,268	5.66	0.54
12	36,379	1,587	8.22	0.55	44	45,399	1,246	4.59	0.44
13	43,374	1,294	4.65	0.40	45	41,974	1,107	3.76	0.40
14	43,642	1,172	3.85	0.38	46	34,287	964	3.01	0.43
15	33,782	1,004	3.34	0.33	47	40,720	1,107	3.67	0.40
16	33,554	1,005	3.29	0.34	48	39,786	1,045	4.45	0.45
17	36,086	1,151	3.85	0.37	49	37,164	1,430	4.70	0.67
18	37,315	1,089	3.53	0.37	50	39,918	997	3.23	0.46
19	34,517	904	3.07	0.35	51	39,864	981	3.44	0.54
20	45,946	1,199	4.64	0.44	52	47,416	1,250	3.92	0.55
21	37,811	999	3.76	0.34	53	43,660	1,163	4.37	0.53
22	41,538	1,107	4.30	0.40	54	44,557	1,144	3.58	0.54
23	41,627	1,053	4.47	0.42	55	44,124	1,469	4.33	0.56
24	45,807	1,151	4.97	0.53	56	33,227	1,216	3.93	0.47
25	35,919	921	3.44	0.49	57	35,309	1,020	3.79	0.51
26	36,552	942	3.44	0.49	58	35,245	1,083	4.05	0.53
27	37,756	1,004	3.56	0.57	59	36,450	965	4.34	0.48
28	38,455	987	3.40	0.62	60	35,521	1,109	4.37	0.46
29	38,790	966	3.35	0.51	61	39,124	1,075	3.35	0.44
30	37,612	933	3.20	0.49	62	39,387	1,189	3.83	0.58
31	37,911	933	3.24	0.49	63	41,904	1,213	3.90	0.58
32	40,259	955	3.36	0.51	64	45,706	1,161	3.65	0.56

Appendix 1. continued

(unit: ppm)

Measuring point	Mg	Sr	Ba	U	Measuring point	Mg	Sr	Ba	U
65	44,440	1,175	3.80	0.51	97	32,030	1,170	4.79	0.48
66	46,595	1,194	3.81	0.55	98	34,642	987	3.86	0.40
67	51,082	1,308	4.26	0.57	99	33,203	963	3.82	0.34
68	43,025	1,204	4.91	0.54	100	33,049	937	3.67	0.38
69	43,915	1,202	5.09	0.42	101	32,957	908	3.58	0.33
70	39,501	1,091	4.15	0.43	102	37,749	978	4.17	0.39
71	46,421	1,548	4.74	0.49	103	33,955	902	3.90	0.39
72	39,789	1,110	4.13	0.47	104	33,024	886	3.69	0.37
73	47,009	1,189	5.12	0.46	105	34,102	951	3.74	0.34
74	47,395	1,263	4.92	0.50	106	34,021	880	3.79	0.44
75	37,977	1,055	4.09	0.43	107	37,758	1,051	4.51	0.44
76	31,885	1,591	3.93	0.53	108	38,435	1,180	4.04	0.43
77	36,786	1,032	3.25	0.47	109	39,146	1,080	3.82	0.40
78	46,621	1,331	3.56	0.54	110	39,833	1,818	4.51	0.44
79	53,813	1,681	6.59	0.53	111	36,090	1,280	4.57	0.47
80	38,450	2,155	5.89	0.53	112	45,907	1,286	4.11	0.49
81	39,486	2,050	5.05	0.65	113	45,078	1,175	3.97	0.45
82	46,536	1,567	4.57	0.53	114	39,870	1,470	4.75	0.55
83	48,185	1,393	6.12	0.50	115	37,713	1,051	3.84	0.47
84	45,934	1,323	5.43	0.45	116	36,966	1,071	4.26	0.45
85	49,310	1,462	6.30	0.42	117	37,815	1,070	3.68	0.46
86	40,863	1,237	9.24	0.47	118	40,731	1,160	3.94	0.45
87	37,474	1,228	6.32	0.44	119	42,247	1,241	4.41	0.47
88	38,914	1,257	4.69	0.38	120	44,223	1,361	5.12	0.51
89	43,550	1,305	8.49	0.52	121	49,568	1,516	4.83	0.58
90	40,375	1,376	5.80	0.46	122	50,475	1,513	5.13	0.62
91	37,448	1,272	5.80	0.42	123	50,627	1,424	4.55	0.61
92	31,968	1,071	4.72	0.46	124	54,159	1,391	4.58	0.58
93	33,151	1,116	4.64	0.42	125	48,030	1,264	4.33	0.59
94	37,522	1,244	4.70	0.43	126	49,803	1,330	3.81	0.67
95	35,100	1,117	3.81	0.43	127	53,109	1,384	4.24	0.63
96	33,452	1,254	5.10	0.41	128	51,003	1,489	5.15	0.53

Appendix 1. continued

(unit: ppm)

Measuring point	Mg	Sr	Ba	U	Measuring point	Mg	Sr	Ba	U
129	42,040	1,336	5.14	0.52	161	31,570	774	3.50	0.41
130	48,561	1,502	4.52	0.64	162	33,767	771	3.50	0.37
131	43,383	1,630	6.34	0.63	163	35,057	819	3.65	0.37
132	51,455	1,547	5.61	0.60	164	33,612	785	3.21	0.39
133	45,985	1,285	4.12	0.47	165	33,704	804	3.03	0.36
134	38,616	1,138	4.14	0.50	166	31,942	710	2.81	0.31
135	37,739	1,141	4.42	0.47	167	44,708	1,031	4.80	0.43
136	37,205	1,117	4.12	0.46	168	52,864	1,303	5.33	0.44
137	37,593	1,193	4.98	0.49	169	48,565	1,459	5.15	0.49
138	42,497	1,183	5.60	0.44	170	32,960	782	3.19	0.40
139	36,538	963	4.47	0.41	171	51,019	2,023	5.89	0.63
140	36,865	1,134	3.23	0.49	172	45,626	1,981	7.69	0.72
141	49,457	2,289	4.93	0.60	173	46,673	1,126	5.08	0.43
142	33,282	1,105	4.07	0.48	174	33,195	770	3.43	0.38
143	30,765	850	3.72	0.41	175	34,049	844	4.12	0.38
144	56,898	1,390	5.60	0.67	176	43,346	1,245	5.35	0.51
145	46,762	1,217	4.72	0.59	177	45,164	1,230	5.29	0.50
146	45,004	1,095	4.17	0.54	178	46,674	1,179	5.32	0.69
147	44,267	1,055	3.90	0.45	179	40,651	1,036	4.96	0.50
148	43,501	1,047	3.18	0.44	180	36,772	1,190	5.19	0.51
149	43,996	1,062	3.07	0.46	181	41,094	1,149	4.77	0.49
150	40,427	978	2.82	0.42	182	40,444	1,108	5.31	0.49
151	38,794	943	2.83	0.38	183	41,625	1,065	5.41	0.57
152	37,374	993	3.17	0.37	184	42,883	1,063	5.33	0.59
153	34,040	916	3.07	0.37	185	49,153	1,222	5.83	0.62
154	34,142	882	3.49	0.38	186	44,745	1,173	6.33	0.58
155	32,137	851	2.97	0.42	187	49,687	1,565	6.30	0.66
156	33,276	883	3.29	0.43	188	45,021	1,415	6.49	0.65
157	31,998	825	3.34	0.40	189	44,949	1,591	6.23	0.60
158	31,591	827	3.29	0.41	190	43,478	1,162	5.11	0.54
159	30,399	764	3.36	0.40	191	44,726	1,169	4.80	0.57
160	30,834	785	3.62	0.41	192	46,145	1,200	5.45	0.57

Appendix 1. continued

(unit: ppm)

Measuring point	Mg	Sr	Ba	U	Measuring point	Mg	Sr	Ba	U
193	49,802	1,287	5.49	0.61	204	37,477	1,033	3.12	0.42
194	39,659	1,029	4.13	0.49	205	38,203	1,070	3.31	0.45
195	37,525	1,010	3.94	0.44	206	38,623	1,251	3.66	0.43
196	41,152	1,092	4.36	0.48	207	40,083	1,166	4.09	0.46
197	37,358	991	3.96	0.47	208	37,193	961	3.46	0.38
198	34,325	900	4.09	0.44	209	34,310	925	3.46	0.38
199	35,291	969	3.36	0.49	210	33,003	882	3.01	0.36
200	34,450	911	3.44	0.42	211	32,440	926	3.31	0.37
201	36,297	1,003	3.32	0.46	212	35,148	1,032	3.52	0.41
202	39,353	1,089	3.48	0.46	213	34,356	1,204	5.42	0.55
203	35,343	974	3.16	0.39					

Appendix 2. Trace elements compositions of the UD-RAN-02.

(unit: ppm)

Measuring point	Mg	Sr	Ba	U	Measuring point	Mg	Sr	Ba	U
1	50,877	1,490	4.67	0.70	33	61,971	2,062	5.42	0.96
2	47,629	1,481	4.45	0.69	34	59,167	2,064	4.58	1.07
3	53,343	1,542	4.65	0.90	35	51,937	1,695	4.78	0.77
4	48,199	1,485	4.88	0.80	36	44,606	1,504	5.78	0.77
5	45,641	1,521	4.82	0.76	37	48,548	1,538	5.97	0.71
6	51,747	1,517	4.68	0.55	38	46,498	1,669	5.30	0.76
7	42,618	1,510	4.42	1.08	39	43,688	1,749	4.59	0.86
8	49,771	1,560	5.18	0.98	40	41,779	1,759	5.09	0.65
9	69,411	2,227	7.58	1.17	41	43,836	1,825	4.48	0.80
10	65,691	2,180	6.36	1.13	42	43,924	1,791	5.73	0.55
11	66,660	2,170	8.54	1.30	43	40,511	1,535	5.17	0.71
12	63,283	2,201	6.75	1.59	44	39,191	1,618	5.54	0.99
13	64,902	2,218	7.58	1.23	45	41,886	1,710	5.58	0.68
14	60,545	2,166	7.06	1.72	46	43,605	1,748	6.34	0.75
15	55,476	1,831	6.24	0.82	47	50,543	1,815	5.63	0.66
16	51,938	1,927	6.94	0.85	48	52,531	1,836	5.63	0.89
17	46,899	1,660	6.32	1.16	49	54,862	1,687	5.69	0.88
18	56,849	1,897	6.98	1.06	50	46,721	1,464	5.43	1.01
19	73,950	2,237	6.72	0.80	51	44,439	1,468	5.61	1.08
20	56,744	1,827	5.95	0.53	52	43,202	1,528	5.56	0.81
21	59,153	1,899	6.07	0.78	53	43,947	1,513	5.47	0.94
22	62,531	1,840	4.80	0.69	54	40,763	1,535	5.09	1.05
23	59,550	2,312	4.32	1.34	55	37,270	1,519	4.85	0.77
24	58,328	1,983	6.08	1.06	56	46,170	1,633	5.48	1.07
25	58,952	1,990	5.95	1.04	57	50,947	1,889	5.34	0.90
26	55,670	1,986	8.24	0.75	58	52,542	1,846	5.54	0.65
27	25,358	1,255			59	52,050	1,846	5.03	0.84
28	57,455	2,086	5.96	1.02	60	52,524	1,717	5.67	1.05
29	47,611	1,647	4.79	0.71	61	47,522	1,604	5.78	1.07
30	46,505	1,807	4.91	0.73	62	46,794	1,663	5.41	1.12
31	48,178	1,797	5.34	0.69	63	47,759	1,729	6.28	0.88
32	50,415	1,906	5.06	0.92	64	53,818	1,861	5.53	0.99

Appendix 2. continued

(unit: ppm)

Measuring point	Mg	Sr	Ba	U	Measuring point	Mg	Sr	Ba	U
65	55,920	1,908	4.77	0.71	97	36,981	1,050	3.38	0.13
66	50,207	1,904	5.30	0.95	98	31,989	982	3.22	0.14
67	43,457	1,719	5.39	0.91	99	36,662	1,075	3.68	0.17
68	39,081	1,638	6.06	1.22	100	37,535	1,029	3.43	0.17
69	42,648	2,377	7.45	1.21	101	30,902	910	2.80	0.13
70	61,788		5.99	1.46	102	28,914	856	2.41	0.10
71	62,410	1,737	5.20	0.99	103	26,696	840	2.31	0.12
72	45,455	1,566	4.23	1.03	104	28,685	889	3.22	0.16
73	50,274	1,497	3.68	1.05	105	26,851	782	2.66	0.15
74	53,489	1,907	6.38	0.92	106	31,858	928	2.96	0.18
75	46,930	1,637	4.06	0.95	107	27,149	787	2.55	0.14
76	51,149	1,744			108	33,165	934	3.12	0.18
77	57,578	1,909	4.93	0.98	109	32,714	942	3.31	0.18
78	78,149	2,313	4.67	0.54	110	25,295	788	2.46	0.17
79	78,331	2,235	5.52	0.83	111	27,763	795	2.79	0.17
80	69,523	2,173	4.71	0.68	112	31,950	872	2.84	0.17
81	58,437	1,971	5.18	0.65	113	33,856	955	2.84	0.14
82	52,698	1,750	5.71	0.88	114	36,266	875	2.75	0.17
83	53,043	1,740	6.31	0.76	115	34,878	851	2.89	0.17
84	50,858	1,787	4.25	0.93	116	40,599	1,070	3.27	0.14
85	46,359	1,734	4.56	0.84	117	39,065	1,029	3.03	0.15
86	48,413		6.38	0.96	118	44,044	1,118	3.06	0.17
87	43,851		6.61	1.15	119	35,856	943	2.67	0.15
88	50,392	1,851	4.75	0.77	120	38,817	1,574	3.29	0.17
89	50,469	1,863	6.52	0.69	121	31,343	1,277	3.38	0.23
90	58,139	1,984	6.38	0.66	122	33,182	1,932	3.83	0.23
91	71,524	2,188	5.59	0.71	123	52,347	1,268	3.43	0.20
92	70,365	2,052	6.67	0.73	124	49,040	1,182	3.36	0.21
93	49,474	1,820	6.62	0.65	125	44,687	1,080	3.51	0.20
94	53,864	1,907	5.51	0.65	126	36,012	967	2.95	0.16
95	45,029	1,243	3.83	0.13	127	45,160	1,208	3.51	0.19
96	47,634	1,334	4.07	0.14	128	48,143	1,366	3.90	0.22

Appendix 2. continued

(unit: ppm)

Measuring point	Mg	Sr	Ba	U	Measuring point	Mg	Sr	Ba	U
129					161	52,671	1,393	5.46	0.33
130	43,680	1,200	3.12	0.21	162	45,612	1,377	4.85	0.34
131	47,827	1,180	2.97	0.21	163	44,048	1,253	3.91	0.35
132	44,432	1,111	3.08	0.19	164	53,484	1,478	3.89	0.33
133	45,703	1,134	2.91	0.20	165	41,814	1,158	4.56	0.29
134	53,651	1,259	3.43	0.23	166	48,684	1,402	4.32	0.29
135	42,998	1,410	3.99	0.32	167	44,321	1,332	3.96	0.28
136	44,953	1,406	3.73	0.36	168	52,017	1,482	5.17	0.34
137	45,593	1,362	3.97	0.31	169	64,350	1,500	6.11	0.41
138	44,755	1,255	4.04	0.30	170	59,222	1,367	5.29	0.34
139	48,548	1,370	4.39	0.32	171	60,720	1,401	5.39	0.34
140	48,392	1,403	4.03	0.31	172	54,331	1,326	5.03	0.32
141	51,220	1,414	3.65	0.32	173	57,691	1,383	5.40	0.35
142	59,710	1,472	4.06	0.37	174	48,403	1,663	5.48	0.39
143	63,475	1,512	3.91	0.39	175	50,930	1,354	4.73	0.32
144	65,053	1,635	3.96	0.40	176	60,982		5.66	0.41
145	58,275	1,512	3.75	0.36	177	63,363	1,624	4.48	0.39
146	63,114	1,735	3.78	0.35	178	55,048	1,347	3.87	0.37
147	59,276		4.59	0.54	179	65,150	1,619	4.53	0.39
148	60,665	1,658	3.99	0.34	180	50,412	1,487	3.87	0.33
149	72,675	1,798	4.06	0.35	181	49,520	1,342	3.85	0.34
150					182	55,151	1,468	4.44	0.35
151	60,443	1,666	4.19	0.33	183	60,841	1,655	4.78	0.35
152	61,526	1,590	4.15	0.32	184	71,491	1,761	5.07	0.35
153	58,529	1,529	4.61	0.32	185	59,849	1,605	4.72	0.28
154	50,274	1,310	4.10	0.31	186	65,272	1,636	4.66	0.34
155	52,681	1,439	4.23	0.36	187	47,407	1,304	4.41	0.33
156	47,509	1,792	4.58	0.48	188	49,759	1,456	3.70	0.30
157	46,557	1,284	4.26	0.33	189	61,847	1,668	4.09	0.40
158	56,942	1,529	4.89	0.34	190	61,630	1,753	4.24	0.41
159	54,203	1,441	4.65	0.30	191	53,325	1,596	3.63	0.31
160	56,120	1,908	6.48	0.41	192	55,423	1,547	3.90	0.31

Appendix 2. continued

(unit: ppm)

Measuring point	Mg	Sr	Ba	U	Measuring point	Mg	Sr	Ba	U
193	51,167	1,451	3.64	0.28	225	68,687	1,610	5.21	0.41
194	49,172	1,419	3.98	0.28	226	53,871		6.87	0.71
195	61,523	1,707	3.99	0.29	227	69,010		6.45	0.47
196	60,035	1,681	3.99	0.27	228	64,950	1,565	4.99	0.38
197	52,003	1,477	4.22	0.30	229	55,263	1,444	4.98	0.36
198	56,693	1,485	3.89	0.33	230	53,071	1,607	4.36	0.35
199	63,971	1,614	3.77	0.31	231	53,108	1,578	4.17	0.35
200	57,361	1,572	3.25	0.34	232	64,857	1,790	4.19	0.44
201	57,985	1,631	3.22	0.34	233	60,223	1,709	4.35	0.37
202	61,616	1,759	3.87	0.37	234	58,793	1,779	4.05	0.34
203	61,757	1,775	3.97	0.35	235	81,356	2,110	4.80	0.37
204	57,062	1,634	4.36	0.37	236	75,026	2,044	5.10	0.34
205	69,413	1,849	5.11	0.34	237	69,708	1,894	4.96	0.33
206	54,145	1,569	4.65	0.31	238	59,781	1,817	5.40	0.32
207	65,250	1,565	4.62	0.32	239	52,176	1,623	5.73	0.34
208	63,681	1,492	4.68	0.35	240	55,651	1,598	5.02	0.36
209	58,471	1,445	4.79	0.33	241	52,689	1,587	4.59	0.37
210	62,511	1,456	4.14	0.33	242	47,058	1,573	4.40	0.35
211	65,725	1,707	4.15	0.36	243	48,544	1,551	6.71	0.35
212	55,724	1,293	4.19	0.38	244	53,589	1,792	6.65	0.31
213	85,685	1,822	3.99	0.35	245	59,700	1,715	6.03	0.31
214	77,546	1,734	3.56	0.29	246	53,135	1,610	4.99	0.30
215					247	45,377	1,636	4.17	0.33
216					248	41,760	1,574	4.15	0.31
217					249	44,252	1,579	4.19	0.32
218					250	51,453	1,639	4.30	0.33
219	65,033	1,521	5.49	0.39	251	52,070	1,688	4.43	0.34
220	67,346	1,683	5.67	0.34	252	54,980	1,592	4.69	0.35
221					253	58,862	1,811	5.23	0.34
222	75,262	1,846	5.39	0.35	254	53,117	1,766	5.48	0.33
223	74,610	1,789	5.66	0.35	255	52,856	1,791	5.72	0.36
224	68,072	1,742	5.32	0.38	256	51,196	1,643	5.26	0.34

Appendix 2. continued

(unit: ppm)

Measuring point	Mg	Sr	Ba	U	Measuring point	Mg	Sr	Ba	U
257	47,924	1,650	4.90	0.36	289	66,025	1,741	6.17	0.26
258	45,823	1,652	5.17	0.37	290	50,990	1,577	6.90	0.31
259	46,642	1,532	4.85	0.34	291	62,784	1,708	5.69	0.33
260	47,117	1,602	4.78	0.38	292	60,201	1,526	4.75	0.32
261	46,785	1,661	4.93	0.38	293	66,199	1,677	4.60	0.33
262	48,826	1,599	4.82	0.37	294	59,647	1,525	4.35	0.32
263	47,036	1,640	5.00	0.38	295	58,032	1,498	4.38	0.35
264	48,077	1,534	4.44	0.34	296	57,247	1,629	3.99	0.33
265	47,616	1,630	4.34	0.35	297	53,043	1,538	4.02	0.30
266	50,981	1,697	4.92	0.32	298	45,157	1,370	4.07	0.34
267	51,562	1,699	4.87	0.31	299	44,015	1,259	4.04	0.34
268	57,934	1,672	5.27	0.31	300	47,931	1,406	4.03	0.33
269	61,019	1,630	4.98	0.30	301	60,150	1,761	4.40	0.33
270	59,593	1,658	4.85	0.30	302	56,131	1,705	4.51	0.33
271	54,093	1,568	4.78	0.29	303	62,458	1,843	4.87	0.32
272	55,199	1,602	4.64	0.31	304	61,003	1,820	4.73	0.30
273	58,060	1,657	4.47	0.31	305	58,762	1,670	4.61	0.31
274	59,488	1,665	4.56	0.38	306	59,135	1,643	4.91	0.30
275	60,951	1,667	4.34	0.40	307	60,508	1,712	4.98	0.30
276	63,655	1,677	4.40	0.43	308	60,225	1,614	4.81	0.31
277	66,105	1,903	4.59	0.51	309	53,673	1,424	4.36	0.30
278	64,600	2,077	4.74	0.52	310	53,945	1,427	4.75	0.33
279	58,685	1,984	5.95	0.47	311	56,183	1,526	4.75	0.30
280	57,197	1,526	4.45	0.34	312	53,372	1,461	4.81	0.30
281	50,960	1,492	4.55	0.35	313	50,941	1,436	5.01	0.32
282	52,833	1,665	4.73	0.37	314	56,207	1,554	4.47	0.34
283	60,765	1,702	4.68	0.35	315	52,704	1,485	4.13	0.33
284	58,543	1,651	4.97	0.34	316	49,867	1,552	4.43	0.33
285	65,847	1,749	5.02	0.34	317	47,143	1,553	4.21	0.34
286	66,431	1,770	5.12	0.33	318	48,621	1,500	4.01	0.34
287	64,691	1,769	5.28	0.32	319	54,437	1,582	4.21	0.36
288	76,744	1,854	5.49	0.31	320	62,460	1,643	4.30	0.36

Appendix 2. continued

(unit: ppm)

Measuring point	Mg	Sr	Ba	U	Measuring point	Mg	Sr	Ba	U
321	61,599	1,685	4.65	0.33	353	47,311	1,553	5.78	0.38
322	65,683	1,680	4.64	0.39	354	48,330	1,537	6.47	0.36
323	67,534	1,731	4.71	0.41	355	52,107	1,541	6.36	0.40
324	61,169	1,702	4.81	0.40	356	49,003	1,563	5.46	0.55
325	58,919	1,700	4.45	0.39	357	47,792	1,550	4.85	0.56
326	59,377	1,791	4.51	0.34	358	45,871	1,488	4.91	0.51
327	58,788	1,643	5.11	0.41	359	44,357	1,476	5.16	0.42
328	63,216	1,798	4.92	0.49	360	45,822	1,411	5.34	0.42
329	35,325	1,638	7.76	0.62	361	47,185	1,465	5.20	0.43
330	54,229	1,550	6.67	0.69	362	50,379	1,505	6.45	0.52
331	54,879	1,453	7.49	0.67	363	55,170	1,592	5.75	0.55
332	50,984	1,440		0.73	364	58,203	1,801	5.43	0.58
333	51,656	1,560	5.35	0.46	365	64,631	1,866	5.24	0.57
334	51,506	1,648	4.90	0.46	366	52,947	1,539	4.48	0.47
335	54,685	1,615	4.84	0.39	367	52,913	1,565	5.76	0.39
336	56,121	1,728	5.41	0.42	368	48,096	1,464	4.70	0.43
337	58,540	1,645	5.11	0.42	369	46,802	1,458	4.53	0.38
338	52,571	1,542	5.01	0.36	370	57,256	1,724	6.03	0.39
339	55,918	1,564	4.83	0.34	371	60,809	1,799	5.69	0.46
340	54,347	1,496	5.01	0.31	372	67,829	2,047	5.92	0.50
341	58,303	1,547	5.83	0.32	373	63,723	2,006	5.55	0.51
342	53,147	1,607	7.31	0.40	374	71,430	2,114	6.73	0.57
343	51,336	1,565	6.51	0.38	375	69,576	2,228	6.42	0.45
344	44,011	1,403	5.17	0.35	376	65,048	2,043	6.32	0.44
345	39,963	1,248	5.12	0.38	377	61,174	2,007	6.25	0.44
346	46,148	1,429	6.22	0.39	378	61,812	1,756	6.24	0.37
347	50,036	1,460	5.48	0.36	379	50,443	1,516	4.88	0.34
348	47,238	1,453	4.81	0.39	380	57,042	1,678	5.35	0.39
349	45,055	1,480	5.01	0.36	381	52,032	1,841	6.05	0.43
350	46,587	1,510	5.55	0.36	382	52,220	1,742	6.11	0.43
351	45,185	1,508	5.92	0.40	383	49,449	1,677	6.31	0.44
352	42,360	1,462	5.57	0.38	384	52,790	1,652	6.49	0.46

Appendix 2. continued

(unit: ppm)

Measuring point	Mg	Sr	Ba	U	Measuring point	Mg	Sr	Ba	U
385	55,773	1,789	6.08	0.43	417	39,612	1,311	3.55	0.34
386	59,976	1,782	5.78	0.42	418	35,300	1,365	4.02	0.42
387	63,801	1,855	5.78	0.43	419	42,454	1,340	4.21	0.42
388	64,495	1,935	5.31	0.39	420	43,195	1,367	3.93	0.39
389	70,374	2,064	5.23	0.42	421	42,499	1,426	4.02	0.38
390	66,338	1,992	5.10	0.43	422	41,768	1,416	3.76	0.40
391	60,593	1,946	5.30	0.43	423	41,881	1,428	4.10	0.37
392	58,377	1,931	4.71	0.43	424	41,530	1,382	3.86	0.38
393	52,278	1,673	4.40	0.38	425	41,344	1,310	3.80	0.38
394	57,975	1,798	4.37	0.41	426	46,409	1,426	3.83	0.31
395	56,528	1,671	4.46	0.38	427	46,145	1,301	3.50	0.28
396	63,977	1,882	4.93	0.43	428	44,488	1,263	3.50	0.27
397	59,225	1,710	4.46	0.39	429	45,830	1,428	4.31	0.31
398	57,160	1,650	4.54	0.38	430	45,036	1,357	4.27	0.31
399	61,301	1,698	4.44	0.41	431	37,117	2,063	4.71	0.51
400	63,284	1,800	4.76	0.44	432				
401	64,639	1,849	4.83	0.42	433	46,625	1,502	5.24	0.72
402	56,303	1,529	4.08	0.37	434	44,323	1,317	4.13	0.54
403	56,875	1,483	4.27	0.38	435	44,270	1,357	4.15	0.45
404	55,678	1,471	4.28	0.37	436	46,903	1,437	4.39	0.41
405	45,425	1,172	3.65	0.30	437	50,310	1,484	4.64	0.41
406	44,750	1,130	3.39	0.32	438	68,994	1,712	5.32	0.51
407	45,367	1,113	3.35	0.32	439	54,966	1,649	5.05	0.38
408	51,124	1,433	3.89	0.48	440	57,695	1,600	6.06	0.39
409	59,542	1,453	3.67	0.41	441	49,842	1,378	5.94	0.37
410	46,759	1,217	3.53	0.33	442	57,336	1,541	5.91	0.37
411	47,719	1,258	3.92	0.30	443	59,677	1,592	5.65	0.43
412	44,469	1,183	3.85	0.30	444	64,713	1,636	6.46	0.43
413	43,760	1,223	4.14	0.30	445	54,779	1,447	5.48	0.37
414	39,191	1,189	3.52	0.32	446	48,669	1,320	5.25	0.35
415	46,557	1,366	3.98	0.37	447	52,323	1,414	5.36	0.36
416	48,430	1,548	4.23	0.45	448	48,123	1,349	4.87	0.34

Appendix 2. continued

(unit: ppm)

Measuring point	Mg	Sr	Ba	U	Measuring point	Mg	Sr	Ba	U
449	51,193	1,456	4.70	0.36	452	52,502	1,479	4.98	0.48
450	50,896	1,426	4.83	0.40	453	54,044	1,471	4.97	0.58
451	51,201	1,467	4.46	0.42	454	53,459	2,388	6.94	0.75

Paleoenvironmental reconstruction and growth rate estimation using rhodolith near Udo, Jeju island

Heo, Nam-Guk

Department of Geology

ABSTRACT

The rhodoliths (UD-RAN-01, 02) was investigated to delineate paleoenvironmental reconstruction using textural, stable isotope compositions and high resolution trace element data. It was collected from shallow marine environment between Udo (U Island) and Seongsan, which is located in the northeastern part of Jeju island. The rhodolith is mostly made up of coralline red algae with living ones on the surface with a minor contribution by bryozoans, serpulid worm tubes and boring bivalves. Conceptacles filled with shallow marine cements are commonly observed within red algae. Clear difference of cell size between summer and winter in the rhodolith can be observed. Cell size is larger during summer due to faster growth rate. Cell size variations together with seasonal cyclicity indicate that annual growth rate of UD-RAN-01, UD-RAN-02 are about 0.25, 0.12 mm/year respectively. Based on cell counting and counting of annual growth laminae, it is estimated that the UD-RAN-01, UD-RAN-02 had grown for about 100 and 300 years.

Trace elements (Mg, Sr, Ba, U) and isotope compositions were analyzed to delineate paleoenvironmental changes during the growth of the rhodoliths.

Calculated temperatures using magnesium compositions of both the rhodoliths show significantly difference in real winter paleotemperature. It is likely that microsampling of the rhodolith during winter intervals was not accurate enough to show real seasonal variations due to smaller cell size and narrower spacing of winter growth intervals. However, it cannot also be ruled out that paleowinter temperature was lower during winter. Calculated summer paleotemperatures using magnesium compositions are considered that UD-RAN-01 is 28.3°C and was grown similar seawater temperature in today. UD-RAN-02 is 34.2°C and was grown higher seawater temperature than today.

There is clear linear relationship between carbon and oxygen isotope values. This should imply that both isotope compositions were influenced by the same controlling factors. It is considered that both the oxygen and carbon isotope compositions are effected by fresh water input. However, Variation of magnesium composition is unrelated water composition and only affected by sea-temperature. Magnesium composition of the rhodoliths is mostly effected by sea-temperature.

The carbon isotope composition of present seawater is -0.2‰ and The carbon isotope compositions of UD-RAN-01, UD-RAN-02 are 0.2‰, -1.1‰. Present seawater and UD-RAN-01 have similar value and UD-RAN-02 has the most depleted value. Also, The carbon isotope compositions of present seawater and UD-RAN-01, UD-RAN-02 are wider values in summer than winter. The variation value of present seawater and UD-RAN-01 have similar range and UD-RAN-02 has the widest range. Thus, UD-RAN-02 was more effected by Changjiang River. Consequently, It is considered that UD-RAN-01 was grown similar environment in today and UD-RAN-02 was grown warmer and wetter than today.