

서북극해 멘델레프 해령 심해 퇴적층의  
자생 탄산염광물의 기원규명

(Origin of authigenic carbonates in pelagic sediments  
in Arctic Ocean from Mendeleev Ridge)



강원대학교

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서북극해 지구온난화 규명을 위한 노스윈드-멘델레프해령 주변해역의 고해양환경변화 정밀복원연구” 과제의 위탁연구 “서북극해 멘델레프 해령 심해퇴적층의 자생 탄산염광물의 기원규명” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2013. 01.

총괄연구책임자	: 남 승 일
위탁연구기관명	: 강원대학교
위탁연구책임자	: 우 경 식
위탁참여연구원	: 허 남 국
“	: 홍 석 우
“	: 황 태 현
“	: Kabir Mohammad Lutful

# 요 약 문

## I. 제 목

서북극해 맨델레프 해령 심해퇴적층의 자생 탄산염광물의 기원규명

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

인간 활동에 의해 온실가스가 증가하면서 지구 온난화의 문제가 심각해지고 있다. 2007년도에 출판된 IPCC 제4차 보고서는 가까운 미래에 지구의 환경에 많은 변화가 있을 것을 우려하고 있다. 특히, 지구온난화에 따라 태평양 서부에 위치하고 있는 West Pacific Warm Pool의 세력이 강화되면서 엘니뇨와 태풍의 발생에 많은 영향을 미치고 있으며, 이는 동아시아몬순에도 많은 영향을 미쳐 한반도 주변의 기후변화에도 큰 영향을 주고 있다. 최근 여러 연구결과에 의하면 동아시아몬순의 변화는 북극해와 북대서양의 기후와 밀접한 연관이 있는 것으로 알려지고 있다. 즉, 전 지구적 기후변화에 민감하게 반응하고 있는 북극해 주변의 기후변화는 대서양 해류의 순환에 큰 영향을 미칠 수 있다.

이 연구는 북극해 수심 1,800-2,800미터 수심에서 박스코아에 의해 채취된 자생 탄산염광물에 대한 조직분석, 안정동위원소, 미량원소와  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  초기비 분석 성분을 분석하여, 그 결과로부터 이에 대한 성인을 규명하고 이들이 생성된 고환경을 복원하고자하는 2년차 연구이다. 이 연구를 통해 1차년도에서 부족하였던 시료에 대한 조직분석과 안정동위원소 성분을 추가하였다. 분석결과를 토대로 자생 탄산염광물이 생성된 속성환경을 구체적으로 규명하였으며, 이러한 환경이 어떤 속성환경에서 어떠한 조건하에서 생성되었는 지를 이해하기 위해 이 연구를 수행하였다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

이 연구는 서북극해 노스윈드-맨델레프해령 주변해역에서 시추한 박스코어 시료를 극지연구소로부터 제공받아 사용하였다. 제공된 시료를 대상으로 1차년

도에서 수행하였던 시료를 추가로 분석하였다. 시료 내에 포함되어 있는 유공층의 분리를 위해 체질을 실시한 62.5  $\mu\text{m}$  이상의 사질 크기의 퇴적물이었으며, 이 사질퇴적물 내에 포함되어 있는 자생탄산염광물을 선별하여 조직적관찰과 안정동위원소 분석을 위한 시료를 채취하였다. 분리한 자생 탄산염광물을 중액 분리법을 이용하여 calcite와 aragonite를 분리하였으며, 이들에 대한 미세조직을 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였다. 또한 SEM에 부착된 EDAX를 이용하여 미량원소 성분 중에서 Sr 성분의 정성분석과 성장한 광물결정의 형태를 토대로 탄산염광물의 종류를 구별하였다. 분리된 자생 탄산염광물을 광물별로 산소와 탄소동위원소 성분을 분석하였다. 자생 탄산염광물이 침전하였던 시기를 파악하기 위해  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 의 초기비를 분석하였다. 이를 통해 현생 북극해의 해양환경 자료와 비교하여 과거 자생 탄산염광물이 침전된 고해양환경을 추정하고, 이들이 생성된 환경이 북극해의 고환경변화와 어떠한 관계를 가지고 있는지를 판단하였다.

#### IV. 연구개발결과

서북극해에 자생 탄산염광물은 아라고나이트와 방해석으로 이루어져 있다. 1차년도 결과에 의하면 이들이 성장한 결정의 순서를 주사전자현미경으로 관찰하면 방해석과 아라고나이트가 같이 나타나는 시료의 경우, 모두 방해석이 생성된 후 아라고나이트가 성장한 형태만이 관찰된다. 이번 2차년도에서는 아라고나이트와 방해석으로 이루어진 자생탄산염광물의 표면이 용식된 것도 발견되기 때문에 이 광물들이 생성된 조건이 아주 다양하게 변했음을 지시한다. 또한 EDAX로 광물을 추가로 분석하여 1차년도와 같이 방해석은 Mg의 정성적인 함량이 아라고나이트보다는 높지만, 아라고나이트는 방해석보다 Sr 함량이 높게 나타난다..

결정의 미세구조와 배열방향에 따라 분리한 결과 1차년도와 거의 비슷한 미세구조의 특징을 보인다. 아라고나이트의 미세구조는 Radiating Fibrous texture(RFC), Spherulitic fibrous texture, Randomly oriented fibrous texture, Bladed texture로 총 4개의 type으로 나눌 수 있고, 방해석의 미세구조는 Foliated texture, Equant texture, Bladed texture 총 3개의 type으로 구분할 수 있다. 하지만 두 광물 모두에서 표면이 용식된 etched surface가 나타나는 것이 특징적이다.

자생 탄산염광물의 산소동위원소 값은  $-5\sim+5\%$ (VPDB)의 범위에서 변화하는 것으로 보이며, 평균  $1.2\%$ (VPDB)의 값을 갖는다. 방해석과 아라고나이트 자생 탄산염광물의 산소동위원소 값은 각각  $-5\sim+5\%$ (VPDB),  $-3\sim+4\%$ (VPDB)의 범위에서 각각 변화한다. 안정동위원소의 변화를 관찰한 결과 모두 4가지 유형의 안정동위원소 성분 패턴을 보인다. Type 1은 같은 깊이 내에서 탄소와 산

소동위원소 성분이 모여있는 형태, Type 2는 탄소동위원소 성분은 변하지 않으나 산소동위원소 성분만 변하는 형태, Type 3는 산소동위원소 성분은 변하지 않으나 탄소동위원소 성분만 변하는 형태, Type 4는 두 안정동위원소 성분이 모두 변하는 형태이다. 자생탄산염광물의 미량원소 분석 결과도 이 탄산염광물이 다양한 속성환경 내에서 생성되었음을 나타낸다.

1차 년도에서 밝힌 바와 같이 연구지역에서 발견된 자생 탄산염광물은 퇴적물 깊이 1 cm 이내에서부터 30 cm에 이르기까지 거의 전 구간에 걸쳐 분포하고 있다. 이는 자생 탄산염광물에 대한 광물학적 결과와 안정동위원소 분석결과 이들은 퇴적물이 심해에서 퇴적된 후 공극수가 환원환경에 이르면서 methanogenic zone으로 변하였고 이러한 환경에서 자생 탄산염광물이 생성되었다고 밝혀냈던 1차년도의 결과와 비슷하다. 하지만 2차년도에 조직적인 결과를 바탕으로 추가적인 안정동위원소 분석을 시행한 결과는 특정한 코아 깊이 내에서 매우 복잡한 안정동위원소의 변화를 보여주고 있다. 이는 퇴적물이 퇴적된 이후 자생탄산염광물이 서로 다른 층준에서 계속적으로 새로운 광물이 생성되었을 가능성을 지시한다. 따라서 이에 대한 정확한 메카니즘의 규명을 위해서는 좀더 많은 시료와 주변 퇴적물의 분석이 추가로 필요한 것으로 생각된다.



## V. 연구개발결과의 활용계획

현재 지구온난화에 따른 기후변화는 학계의 중요한 관심사 중의 하나이다. 북극해 심해퇴적층에 산출되는 자생 탄산염광물의 존재는 아직 국제적으로도 학계에 잘 알려지지 않은 사실이다. 이러한 자생 탄산염광물의 성인과 그 고기후적 의미가 밝혀진다면, 이는 고해양학은 물론이고 해양지질 분야 내에서 학술적으로 큰 의미를 가질 것으로 기대되고, 최근 기후변화로 인해 대한민국 정부가 입는 경제적 손실은 막대하다. 또한 이 연구의 결과와 과거 북극해의 환경변화와 관련이 있다는 것이 밝혀진다면, 이 연구는 과거의 전 지구적인 기후변화를 이해하는데 많은 도움을 줄 것이며, 앞으로 전 지구적인 기후변화를 예측하는데 큰 도움을 줄 수 있는 기초자료가 될 것이다. 이는 이 연구가 국가에서 기후변화에 따른 경제적 손실을 절감할 수 있는 중요한 자료를 제공할 수 있다는 것을 의미한다.

## S U M M A R Y

This is the second-year project to investigate the origin of authigenic carbonates discovered from the pelagic sediments in Arctic Ocean. Carbonate minerals were discovered from the giant box core (PS72/410-1) of the pelagic sediments recovered from the Canadian Arctic across the central Mendeleev Ridge (Station location = Lat. 80°30.37"N, Long. 175°44,38"W) during the Arctic cruise by Polarstem in 2008. The core was 39 cm in depth and was collected from the water depth of 1802 meters.

The sediments show various colors from grey to brown as previously reported in other Arctic pelagic sediments. The sediments include planktonic foraminifers together with authigenic carbonate minerals. The contents of planktonic foraminifers and carbonate minerals vary with core depth, however these carbonate minerals are present through the whole sequence except for a few centimeters. After wet sieving, coarse fractions were texturally examined with binocular microscope and SEM, and stable isotope compositions were obtained.

Mineralogy of carbonate minerals were determined using crystal shapes and qualitative Sr contents by EDAX. The carbonates are composed of calcite, aragonite or a combination of both. Aragonite crystals show radiating fibrous, spherulitic fibrous, randomly oriented fibrous, and bladed texture, and calcite crystals show foliated texture, equant texture, and bladed texture. Various shapes of aragonite and calcite crystals are randomly distributed throughout the core. Also, noticeable is the etched surfaces of both aragonite and calcite crystals.

Highly enriched carbon isotope compositions ( $\delta^{13}\text{C} = 0 \sim +5\%$  vs. PDB) strongly indicate that they formed in and host sediments induced by methanogenic bacteria. However, a wide range of oxygen isotope values ( $\delta^{18}\text{O} = -5 \sim +5\%$  vs. PDB) are still problematic. Various shapes of carbonate crystals together with highly positive carbon isotope values indicate that these carbonates are authigenic in origin. Based on stable isotope variations, four types of stable isotopic patterns can be identified. In addition, different stable isotope and elemental compositions of authigenic carbonates take place within the same core intervals. More stable isotopic and elemental data of authigenic carbonates together with elemental compositions host sediments are necessary to understand this complicated diagenetic products.

# C O N T E N T S

Summary (Korean) . . . . .	2
Summary (English) . . . . .	5
Contents (English) . . . . .	6
Contents (Korean) . . . . .	7
List of figures . . . . .	8
List of tables . . . . .	12
Chapter 1. Introduction . . . . .	13
Section 1. Objective and significance of the study . . . . .	13
Section 2. Contents and scope of the study . . . . .	14
Chapter 2. Current domestic and foreign research . . . . .	16
Chapter 3. Results . . . . .	18
Section 1. Introduction . . . . .	18
Section 2. Study area . . . . .	19
Section 3. Methods . . . . .	22
Section 4. Results . . . . .	30
1. General aspects of sedimentary core . . . . .	30
2. Texture and mineralogy . . . . .	32
3. Carbon and oxygen isotope compositions . . . . .	73
4. Elemental compositions . . . . .	73
Section 5. Discussion . . . . .	90
1. Meaning of texture of authigenic carbonate . . . . .	90
2. Origin of authigenic carbonate from isotope compositions . . . . .	92
3. Origin of authigenic carbonate from elemental compositions . . . . .	104
Section 6. Conclusions . . . . .	106
Chapter 4. Achievements and contributions . . . . .	107
Chapter 5. Applications . . . . .	108
Chapter 6. References . . . . .	109

## 목 차

제출문	1
요약문	2
Summary	5
Contents	6
목차	7
List of figures	8
List of tables	12
제 1 장 서론	13
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성	13
제 2 절 연구개발의 내용 및 범위	14
제 2 장 국내외 기술개발 현황	16
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	18
제 1 절 서론	18
제 2 절 연구지역	19
제 3 절 연구방법	22
제 4 절 연구결과	30
1. 퇴적물 코어에 일반적인 양상	30
2. 자생 탄산염광물의 미세조직 및 광물성분	32
3. 자생 탄산염광물의 탄소 및 산소동위원소 성분	73
4. 자생 탄산염광물의 미량원소 성분	73
제 5 절 토의	90
1. 자생 탄산염광물의 조직의 의미	90
2. 자생 탄산염광물의 안정동위원소 성분에 따른 성인	92
3. 자생 탄산염광물의 미량원소 성분에 따른 성인	104
제 6 절 결론	106
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	107
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	108
제 6 장 참고문헌	109



## List of Figures

Figure 1. Retreat of Recent Arctic sea ice (EOS, 2010). . . . .	15
Figure 2. Location of Mendelejev Ridge in Arctic Ocean. . . . .	20
Figure 3. Map showing the study area and core sampling sites. . . . .	21
Figure 4. The flow chart showing the analytical procedure. . . . .	24
Figure 5. Schematic flowchart showing the detailed analytical research method. . . . .	25
Figure 6. Wet Sieving process of bulk core sediment samples. . . . .	25
Figure 7. Density separation showing separated calcite and aragonite crystals. . . . .	26
Figure 8. Density separation of clay particles with SPT solution. . . . .	27
Figure 9. Content (%) of calcium carbonate (CaCO <sub>3</sub> ), total organic carbon (TOC), and authigenic carbonates contents, and $\delta^{13}\text{C}_{org}$ values of the sediment core PS72/410-1. These data are provided by KOPRI. Red arrow indicates the interval of high CaCO <sub>3</sub> contents, and blue arrows indicate the intervals of high concentrations of authigenic carbonates. Four age dating results are included. . . . .	31
Figure 10. Coarse carbonate fractions after wet sieving composed of authigenic carbonate minerals and planktonic foraminifera. The arrows indicate authigenic carbonate crystals. Circular shapes in the back are planktonic foraminifera. . . . .	34
Figure 11. Coarse carbonate fractions after wet sieving composed of authigenic carbonate minerals and planktonic foraminifera. The arrows indicate authigenic carbonate crystals. Delicate fine fibrous shapes indicate that they are authigenic in origin. The square-ended terminations in the lower photos (arrow) strongly indicate aragonite mineralogy. . . . .	35
Figure 12. Foliated calcite crystalline texture. . . . .	36
Figure 13. Bladed calcite crystalline texture. . . . .	37
Figure 14. Equant calcite crystalline texture. . . . .	38
Figure 15. Fibrous aragonite texture. . . . .	39
Figure 16. Randomly oriented, fibrous aragonite texture. . . . .	40
Figure 17. Bladed aragonite texture. . . . .	41
Figure 18. Etched surface of authigenic calcite crystals. . . . .	42
Figure 19. Formation of aragonite (A) after calcite (C). . . . .	43
Figure 20. Equant microcrystalline calcite texture with EDAX data. . . . .	46
Figure 21. Equant microcrystalline calcite texture with EDAX data. . . . .	47
Figure 22. Spherulitic equant calcite texture with EDAX data. . . . .	48

Figure 23. Spherulitic equant calcite texture with EDAX data. . . . .	49
Figure 24. Spherulitic equant calcite texture with EDAX data. . . . .	50
Figure 25. Spherulitic equant calcite texture with EDAX data. . . . .	51
Figure 26. Foliated calcite texture with EDAX data. . . . .	52
Figure 27. Foliated calcite texture with EDAX data. . . . .	53
Figure 28. Foliated calcite texture with EDAX data. . . . .	54
Figure 29. Spirally stacked foliated calcite texture with EDAX data. . . . .	55
Figure 30. Spirally stacked foliated calcite texture with EDAX data. . . . .	56
Figure 31. Spirally stacked foliated calcite texture with EDAX data. . . . .	57
Figure 32. Spirally stacked foliated calcite texture with EDAX data. . . . .	58
Figure 33. Randomly oriented bladed calcite texture with EDAX data. . . . .	59
Figure. 34. Bladed calcite texture with etched surface with EDAX data. . . . .	60
Figure 35. Fibrous aragonite texture with EDAX data. . . . .	62
Figure 36. Fibrous aragonite texture with EDAX data. . . . .	63
Figure 37. Fibrous aragonite texture with EDAX data. . . . .	64
Figure 38. Spherulitic fibrous aragonite texture with EDAX data. . . . .	65
Figure 39. Spherulitic fibrous aragonite texture with EDAX data. . . . .	66
Figure 40. Bladed aragonite texture with EDAX data. . . . .	67
Figure 41. Bladed aragonite texture with EDAX data. . . . .	68
Figure 42. Bladed aragonite texture with EDAX data. . . . .	69
Figure 43. Spherulitic aragonite growth over the columnar calcite crystals with EDAX data. . . . .	71
Figure 44. Spherulitic aragonite growth over the columnar calcite crystals with EDAX data. . . . .	72
Figure 45. Scatter diagram of oxygen vs. carbon isotope values for the authigenic carbonates analyzed in 2011. Red points = aragonite, blue points = calcite. . . . .	75
Figure 46. Scatter diagram of oxygen vs. carbon isotope values for the authigenic carbonates analyzed in 2012. Red points = aragonite, blue points = calcite. All the analyzed data are included. . . . .	77
Figure 47. Scatter diagram of oxygen vs. carbon isotope values for the authigenic carbonates analyzed in 2012. Red points = aragonite, blue points = calcite. Very depleted oxygen isotope data points are excluded. . . . .	78
Figure 48. Scatter diagram of oxygen isotope vs. MgCO <sub>3</sub> (mole %) values for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths. . . . .	81
Figure 49. Scatter diagram of carbon isotope vs. Mg compositions for the authigenic	

carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths. . . . . 82

Figure 50. Scatter diagram of oxygen isotope vs. Mg compositions for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths. . . . . 83

Figure 51. Scatter diagram of carbon isotope vs. Sr compositions for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths. . . . . 84

Figure 52. Scatter diagram of oxygen isotope vs. Sr compositions for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths. . . . . 85

Figure 53. Scatter diagram of carbon isotope vs. Fe compositions for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths. . . . . 86

Figure 54. Scatter diagram of oxygen isotope vs. Fe compositions for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths. . . . . 87

Figure 55. Scatter diagram of carbon isotope vs. Mn compositions for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths. . . . . 88

Figure 56. Scatter diagram of oxygen isotope vs. Mn compositions for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths. . . . . 89

Figure 57. Scatter diagram of carbon vs. oxygen isotope values showing well clustered data (Type I). It is very common for calcite and aragonite crystals with the same type of texture show similar isotopic compositions. . . . . 97

Figure 58. Scatter diagram of carbon vs. oxygen isotope values for the calcite crystals with the core depth of 4-5 cm. Note the completely different two sets of data indicating two separate diagenetic environments of the formation of authigenic carbonates. . . . . 98

Figure 59. Scatter diagram of carbon vs. oxygen isotope values for the aragonite crystals with the core depth of 12-13 cm. Note the completely different two sets of data indicating two separate diagenetic environments of the formation of authigenic carbonates. . . . . 99

Figure 60. Scatter diagram of carbon vs. oxygen isotope values showing Type II trend which is consistent carbon isotope compositions with variable oxygen isotope

values. . . . . 100

Figure 61. Scatter diagram of carbon vs. oxygen isotope values showing Type III trend which is consistent oxygen isotope compositions with variable carbon isotope values. . . . . 101

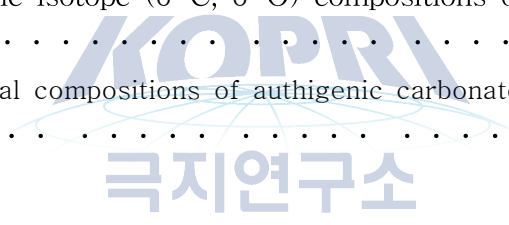
Figure 62. Scatter diagram of carbon vs. oxygen isotope values showing Type IV trend which is variable carbon and oxygen isotope compositions. . . . . 102

Figure 63. Carbon and oxygen isotope variations with core depth. . . . . 103



## List of tables

Table 1. Information on the core samples in this study. The PS72/410-1 core was also analyzed for the research in 2011. . . . .	24
Table 2. Bulk sample analysis result of the core sample (PS72/410-1) by wet sieving. . . . .	28
Table 3. Bulk sample analysis result of the core sample (PS72/422-3) by wet sieving. . . . .	29
Table 4. The EDAX data for calcite crystals. . . . .	44
Table 5. The EDAX data for aragonite crystals. . . . .	45
Table 6. The occurrence of calcite texture types with core depth. . . . .	61
Table 7. The occurrence of aragonite texture types with core depth. . . . .	70
Table 8. Stable isotope ( $\delta^{13}\text{C}$ , $\delta^{18}\text{O}$ ) compositions of authigenic carbonates analyzed in 2011. . . . .	76
Table 9. Additional stable isotope ( $\delta^{13}\text{C}$ , $\delta^{18}\text{O}$ ) compositions of authigenic carbonates analyzed in 2012. . . . .	79
Table 10. Trace elemental compositions of authigenic carbonates in this study. (unit : ppm) . . . . .	80



# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

인간 활동에 의해 온실가스가 증가하면서 지구 온난화의 문제가 심각해지고 있다. 2007년도에 출판된 IPCC 제4차 보고서는 가까운 미래에 지구의 환경에 많은 변화가 있을 것을 우려하고 있다. 특히, 지구온난화에 따라 태평양 서부에 위치하고 있는 West Pacific Warm Pool의 세력이 강화되면서 엘니뇨와 태풍의 발생에 많은 영향을 미치고 있으며, 이는 동아시아몬순에도 많은 영향을 미쳐 한반도 주변의 기후변화에도 큰 영향을 주고 있다. 최근 여러 연구결과에 의하면 동아시아몬순의 변화는 북극해와 북대서양의 기후와 밀접한 연관이 있는 것으로 알려지고 있다. 즉, 전 지구적 기후변화에 민감하게 반응하고 있는 북극해 주변의 기후변화는 대서양 해류의 순환에 큰 영향을 미칠 수 있다.

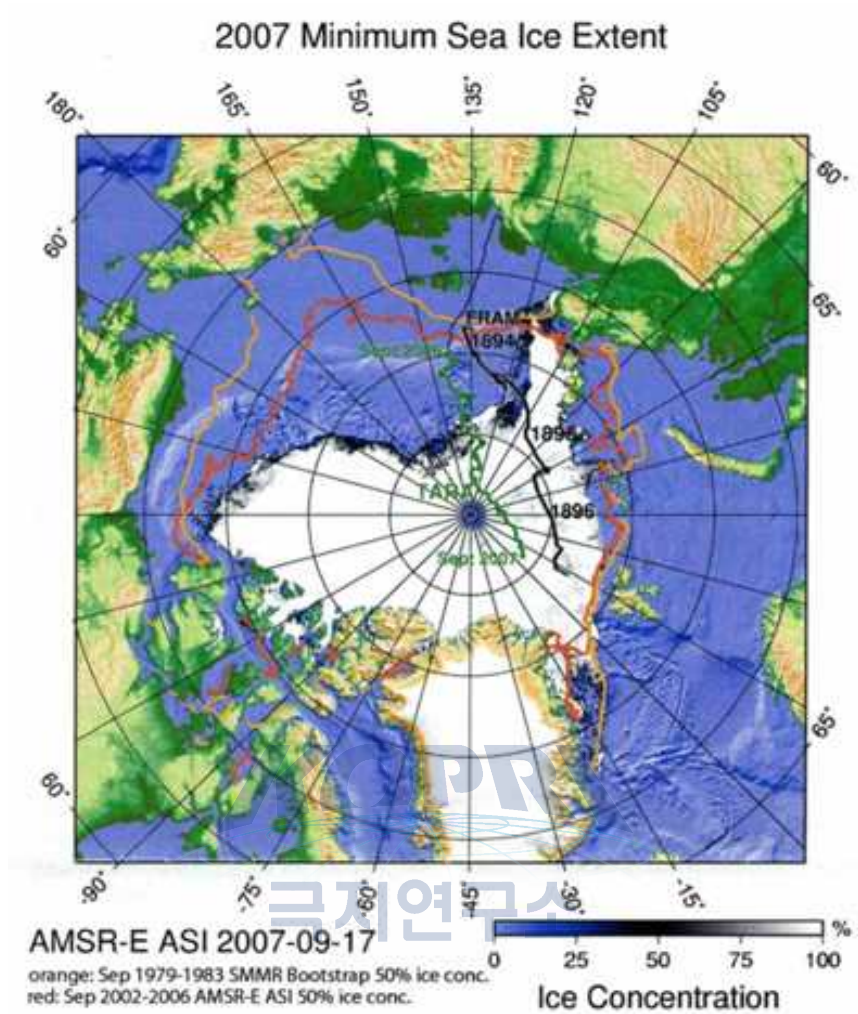
최근 지구온난화에 의해 북극해의 해빙은 지속적으로 줄어들고 있다(Figure 1). 이러한 빙하의 후퇴는 북극해의 해빙이 2030년 이전까지 완전히 사라질 지도 모른다고 학자들은 우려하고 있다. 특히 지구온난화에 따른 지구표면의 기후변화는 저위도 지역보다 극한 기후지역이 훨씬 더 많은 영향을 받고 있다는 것이 그동안 여러 지질학자들의 연구결과이다. 따라서 정확한 북극해 주변의 기후변화의 모니터링과 예측은 한반도를 포함한 전 지구기후변화의 예측에 매우 중요한 자료를 구축할 것으로 판단된다.

이를 위해 이 연구에서는 북극해에서 생성된 자생 탄산염광물을 이용하여 이들의 성인을 규명하기 위해 연구를 수행하였다. 1차년도에서 북극해에서 채취된 자생 탄산염광물에 대한 조직분석과 안정동위원소를 실시하여 이들의 생성환경을 추정한 바 있으나, 그 분석 시료의 양이 적어서 이를 보완하기 위해 더 많은 시료에 대한 분석을 실시하였다. 이를 통해 자생 탄산염광물이 생성되는 과정에 대한 이해를 하고자 하는 것이 이 연구의 목적이다. 이를 위하여 자생 탄산염광물의 종류와 이들의 다양한 성장조직을 파악하고, 조직 분석을 기준으로 산소와 탄소동위원소 성분을 추가로 분석하였다. 이러한 분석을 통하여 자생 탄산염광물이 어떤 속성환경에서 많은 양이 생성되었는지를 규명하고자 하였다. 이는 전 지구적인 기후변화를 이해하고 미래의 지구환경변화를 예측하는데 매우 중요한 자료를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

## 제 2 절 연구개발의 내용 및 범위

- 북극해 멘델레프 해령 해역(북위 80.5°)에서 3 정점으로부터 시추한 박스코어 시료를 극지연구소로부터 제공받음. 제공받은 시료는 미사크기 이상의 시료임.
- 극지연구소로부터 얻은 시료 중에서 부유성 유공충과 구별되는 자생탄산염 광물을 손으로 선별하여(picking) 채취함.
- 채취한 시료는 아라고나이트와 방해석으로 이루어져 있는 것으로 추정되어 이들을 분리하여 분석할 수 있는 방법을 개발함. 이들을 분석하기 위해 방해석(약 2.8)과 아라고나이트(약 2.9)의 비중이 서로 다른 것을 이용하여 이를 구별할 수 있는 비중액을 만들어서 이들을 분리함. 분리하기 위한 용매는 sodium polytungstate를 증류수와 혼합하여 비중이 약 2.8의 용액을 만들어서 사용함.
- Calcite와 aragonite 자생 탄산염광물의 미세조직을 실체현미경과 전자현미경으로 관찰하여 이들 광물결정이 자란 형태와 광물 결정 자체의 형태를 기준으로 이들의 조직을 분류함.
- 일부 선택된 시료에 한하여 선별된 시료를 주사전자현미경(SEM)에 부착되어 있는 EDAX를 이용하여 아라고나이트와 방해석을 구별함. 이를 위해 아라고나이트는 끝이 사각형의 모양을 지니고 Sr의 함량이 높다는 기준을 사용함.
- 방해석과 아라고나이트의 구별된 조직의 type를 분리하여 각각의 형태에 따라 질량분석기(Stable Isotope Ratio Mass Spectrometer)를 이용하여 안정동위원소(산소와 탄소)와 미량원소를 분석함. 자생 탄산염광물의 산소와 탄소동위원소 성분과 여러 미량원소 성분을 측정하여 생성되었던 속성환경을 추정함.
- 자생 탄산염광물의 안정동위원소 및 미량원소와 이미 한국해양연구원 극지연구소에서 분석을 수행하고 있는 여러 퇴적물에 대한 다른 자료와 함께 비교하여 자생 탄산염광물이 과거 해양환경에 어떠한 의미를 갖는 지를 추정하고자 함





*Fig. 1. The drift track of Ice Station Tara from September 2006 to September 2007 and the drift track of the Fram (1894-1896) are represented. The bottom topography is shown together with sea ice summer minimum extent in 2005 and 2007.*

Figure 1. Retreat of Recent Arctic sea ice (EOS, 2010).



## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

새로운 광물자원의 잠재성과 기후변화 연구의 중요한 북극해 퇴적물은 아직까지 단편적으로만 연구(지질학, 고기후학 등)되어 왔다. 특히, 서북극해는 연중 빙하로 덮혀있고, 수리학적으로 고립되어 있기 때문에 오래전부터 최근까지 지질학적인 연구가 지구상에서 가장적은 지역에 속한다. 이 지역은 상당히 많은 양의 빙하가 줄어들어 현재 가장 심한 변화를 나타내고 있다(Comiso et al., 2008; Stroeve et al., 2008).

1950년대 러시아는 북극해 중앙에서 퇴적물코어를 채취하였다. 이 퇴적물코어는 북극 빙하와 해수면의 변동과 함께 반복적인 암석학적인 자료, 미세동물군(microfauna)의 변화를 보여주고(Belov and Lapina, 1961, 1970), Eurasia 북쪽에 4기 빙하작용 동안에 연령모델을 의해 처음으로 북극해 퇴적물의 연대측정을 하였다. 또 Ericson et al. (1964)는 기후변화연구를 위해 암석학적 패턴을 이용하여 접근하였다. 그 이후 1960년대부터 1980년대까지 미국(US ice camp T-3)은 서북극해 퇴적물 코어를 수집하고, 연대측정을 위해 고지자기 경사각 자료를 획득하였다. 이 고지자기 자료는 미숙하였지만, 일정한 변화패턴을 보여주었다.

새로운 층서학적인 자료로 Lomonosov해령 중앙에서 퇴적물 코어(Oden96/12-1PC)를 채취하였다(Jakobsson et al., 2000). 이 시료는 이전에 연구된 시료들보다 경사각의 변화가 더 복잡하고, 고해상도의 고지자기 정보가 기록되어 있고, 코어에 주기적인 색변화와 산화망간(manganese oxide)의 함량변화를 대비한 결과 갈색과 Mn 함량이 높은 층이 간빙기내지 아간빙기 시기와 일치하였다. 또한 코코리스를 이용한 분석을 통해 자료를 보완하였다(Jakobsson et al., 2001; Backman et al., 2004). 이 결과는 이전 연구보다 더 정확한 고기후 이벤트와 퇴적물을 제공하였다. Lomonosov해령으로부터 채취한 퇴적물코어의 자료들을 이용하여 새로운 연령모델을 만들었고(Backman et al., 2004; Polyak et al., 2004; Spielhagen et al., 2004), 최근 이 연령모델과 북극중앙으로부터 채취한 심해퇴적물 코어의 신생대 층서와 일치함을 보여주었다(ACEX; O'Regan et al., 2008). 그러나 퇴적작용이 다른 지역과 거리상으로 먼 지역과는 일치하지 않았다(e.g., Sellen et al., 2008). 최근 서북극해 층서와 고해양학적이 연구는 2005년 HOTRAX(Healy-Oden TransArctic Expedition)에 의해 빠르게 진행되고 있다(Darby et al., 2005). Northwind, Mendeleev, Alpha, Lomonosov 해령과 같이 북극해에 주된 해령과 고원에서 퇴적물 코어를 획득하였다. 이 퇴적물 자료의 분석은 북극 고기후 발달을 이해하는데 중요하다.

북극해에서 채취한 퇴적물을 이용하여 수행된 지난 수십 년 동안의 연구는 북극해의 고해양환경을 이해하는데 많은 도움을 주었으나, 아직도 북극해의 시료에는 얻어지지 않은 지질학적 시간대가 있고, 제약된 자료로 인해 많은 문제점이 해결되지 않고 있는 것이 사실이다. 이러한 가운데 극지연구소 연구팀들은 얻어진 코어 중에 부유성 유공충을 제외

한 탄산염 성분을 발견하고 이에 대한 의문을 가지게 되었다. 이 연구는 이러한 이유로 극지연구소에서 강원대학교 지질학과에 연구를 의뢰하여 수행되었으며, 이 연구결과 이들 탄산염광물을 자생 탄산염광물로 판명되었다. 이제까지 수십 년 동안 북극해의 퇴적물에 대한 연구가 수행되어 왔으나 이러한 자생 탄산염광물의 발견의 세계 최초의 사건이라 할 수 있다. 따라서 이 연구는 외국에서도 아직 수행하지 못한 세계 최초의 연구라 평가할 수 있다.



## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 서론

퇴적암 내에 자생광물은 유체가 이동하는 동안 물과 암석의 상호작용에 유용한 자료를 제공한다(e.g. Bjorlykke, 1993, 1994). 광물화된 유체의 기원은 암석학적, 안정동위원소 연구결과를 통해 추적할 수 있다(e.g. Tilley and Longstaffe, 1989; Longstaffe et al., 1992). 따라서 자생 탄산염광물 내에도 탄산염광물이 침전할 때 퇴적물 내에 존재하는 공극수의 물리적, 화학적인 정보가 기록되어 있으며, 이러한 공극수의 성분은 잔류해수의 성분과 외부에서 공급되는 물질, 그리고 퇴적물 자체 성분의 영향을 받을 수 있다.

자생탄산염광물은 육성의 퇴적층에서 주로 연구되기도 하였지만(Chilingar et al., 1971; Kholodov, 1987, 1991, 1999; Taft, 1971), 해양환경에서도 해양저에 cold methane seeps 주변에서도 많은 연구가 이루어졌다(Ivanov et al., 1991; Von Rad et al., 1996; Suess et al., 1998). 탄산염광물의 침전은 해수의 물리화학적인 특성(pH, 염분, alkalinity,  $\text{CO}_3^{2-}/\text{Ca}^{2+}$  와  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 비, 온도, 유기물 존재에 의존하는 것으로 알려져 있고, 주로 유기물의 분해(organic matter decay), 박테리아 황산염 환원(bacterial sulfate reduction), 메탄산화작용(methane oxidation) 동안에 생성된 탄산칼슘이온에 의해 결정된다.

자생 탄산염광물의 기원은 1950년대 중반 흑해 퇴적물 내에 자생 탄산염암의 속성작용으로 인해 생성되었다고 Strakjov (1951)은 해석 한 바 있고, 1960년대에 들어 해양퇴적물 내에 자생 탄산염광물 기원이 메탄산화작용과 관계가 있다고 보고되었다(Fuex, 1977; Hathaway and Degens, 1968; Nissenbaum, 1984).

1979년부터, 활발한 열수작용이 중앙해령에서 발견되었다. 이 작용은 내부원인에 의한 가스( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  등)의 배출과 자생 탄산염광물의 생성에 의해 주목을 받았다. 피상의 탄산염 성장(buildup) 또한 열수작용에 의해 생성되었다. 이러한 탄산염암에 이산화탄소와  $\text{Ca}^{2+}$ 는 해수와 열수용액으로부터 나온 것이고, 이러한 형태의 자생 탄산염광물도 처음 보고되었다(Kelley et al., 2001; Lein et al., 2002a).

이와 같이 다양한 기원의 자생 탄산염광물은 침전할 때의 해양학적인 정보가 기록되어 있다. 이 보고서는 이러한 자생 탄산염광물의 성인에 대한 2차년도 연속 연구이다. 서북극해 멘델레프 해령 심해 퇴적층에서 채취한 코어 내에 발견된 자생 탄산염광물의 암석학적(성장한 광물의 형태와 조직) 및 화학적(산소와 탄소동위원소)인 자료를 이용하여 자생 탄산염광물의 기원과 그 탄산염광물의 분포가 고해양환경에 어떠한 의미를 가질 수 있는지를 연구하고자 하였다.

## 제 2 절 연구지역

서반구와 동반구(Western and Eastern Hemispheres)에 위치한 북극해는 두 부분으로 나눌 수 있다. 흔히 서북극과 동북극이란 용어를 사용하고, Lomonosov해령에 의해 Amerasia와 Eurasia 분지로 나뉜다. 동북극은 북대서양과 해수의 교류가 활발하고, 서북극은 뷰포트환류(Beaufort Gyre; 대략 북극 80도, 서경150도 지점을 중심으로 서서히 시계방향으로 자전하는 것)와 Lomonosov해령에 의해 수계 지리학적으로 고립되어 있다. 오랜 시간 동안 서북극해에 이러한 시스템 때문에 빙하로 항상 덮혀 있고, 생물의 종류가 다양하지 않고 어느 특정한 생물종만 우세하게 나타난다. 또한 반세기동안 해양지질학적 탐사가 이루어졌음에도 불구하고 다른 해양지역과 비교하여 자료가 많지 않다. 그 이유는 낮은 퇴적률, 생물각질의 강한 용해도, 시료 운반의 문제들은 층서적, 고기후적 연구를 더욱 느리고, 복잡하게 만들기 때문이다.

Mendeleev 해령은 East Siberian 대륙붕에서부터 북극(North Pole)까지 넓게 분포한 대양저산맥으로(위도 80°30.37'N, 경도 175°44.38') 1948년에 구소련에 고위도탐사때 발견되었다(Fig. 2). Alpha-Mendeleev 해령은 Lomonosov 해령과 Canada 분지 사이에 아치형태로 넓게 분포해 있다. 넓이는 200~800km로 Lomonosov 해령보다 넓다. Mendeleev해령의 기원은 아직 자료가 충분하지 않기 때문에 해양 또는 대륙의 특징인지, Alpha해령과 관련이 있는지는 불확실하고 논쟁 중에 있다.

Chunkchi Borderland(Chukchi Plateau and Northwind Ridge)에 인접한 Mendeleev해령의 남쪽부분은 인접한 대륙붕으로부터 퇴적물이 이동하고, 여름에 자주 빙하가 녹기 때문에 Amerasia 분지 내부보다 퇴적률이 높다(Poore et al., 1993; Phillips and Grantz, 1997). 최근 퇴적률 측정결과 0.2-0.3 mm/kyr 이다(Cranston, 1997; Huh et al., 1997).

북극해의 해수는 보통 염분이 낮지만(Aagarde et al., 1985), 저층수는 Fram 해협을 통해 Norwegian-Greenland 해수와 서로 교류하고, 대륙붕에 빙하형성에 의해 온도가 낮고, 염분을 함유하고 있다. 또 북극해는 Lomonosov 해령으로 Amerasia 분지와 Eurasia분지로 나뉘어 있기 때문에 온도, 염분 그리고 체류시간이 차이가 난다. Amerasia 분지의 심해수는 상대적으로 따뜻하고(-0.5°C), 거의 1000년 정도의 연령을 갖는다(Macdonald and Carmack, 1991). 중층수는 저층수나 표층수에 비해 상대적으로 높으며, 0°C보다 높게 나타난다. Bering 해협으로부터 들어온 태평양 해수를 포함하고 있으며, 염양염류가 높고, 상대적으로 염분이 낮다(<33 psu). 표층수는 염분이 낮은 많은 양의 민물이 유입된다. 따라서 해수를 덮고 있는 빙하가 유지된다.

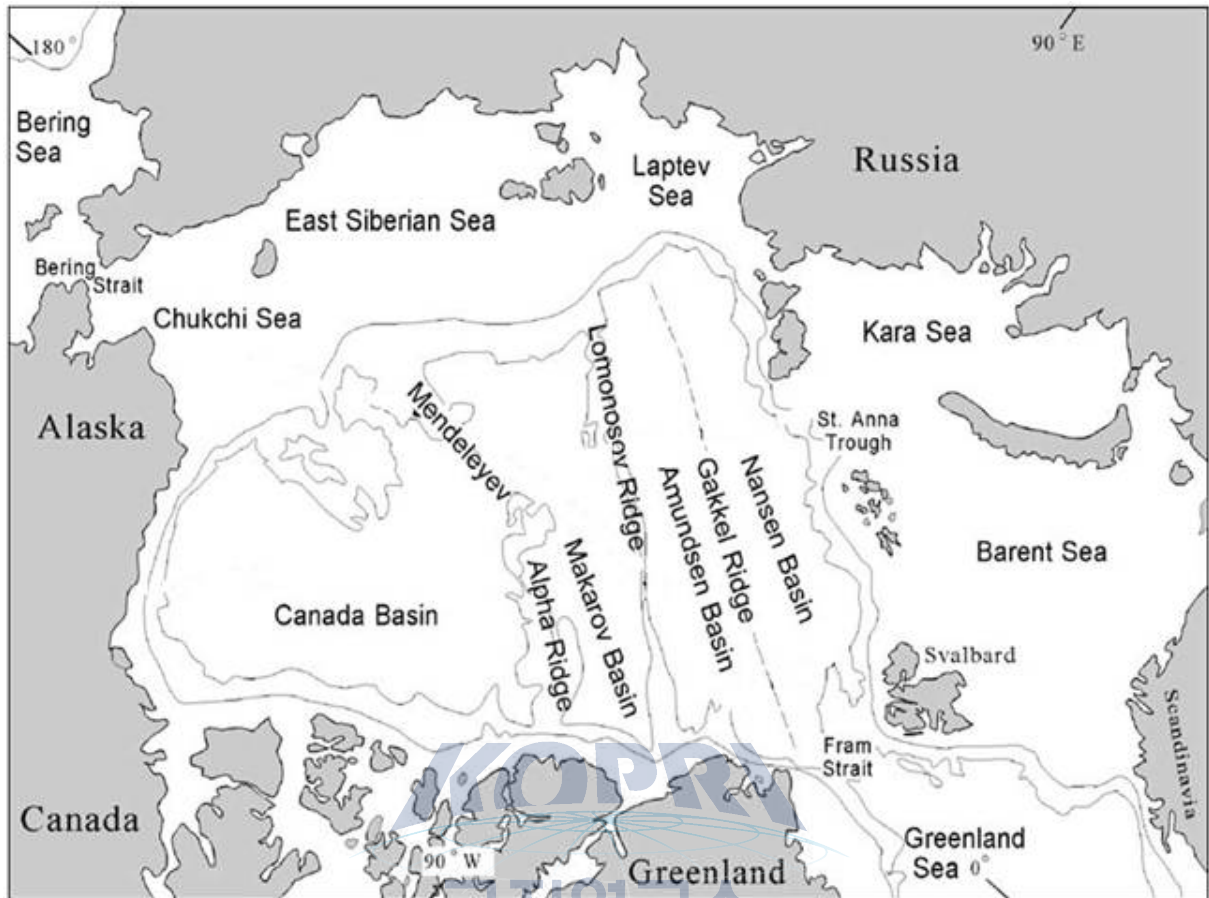


Figure 2. Location of Mendeleev Ridge in Arctic Ocean.



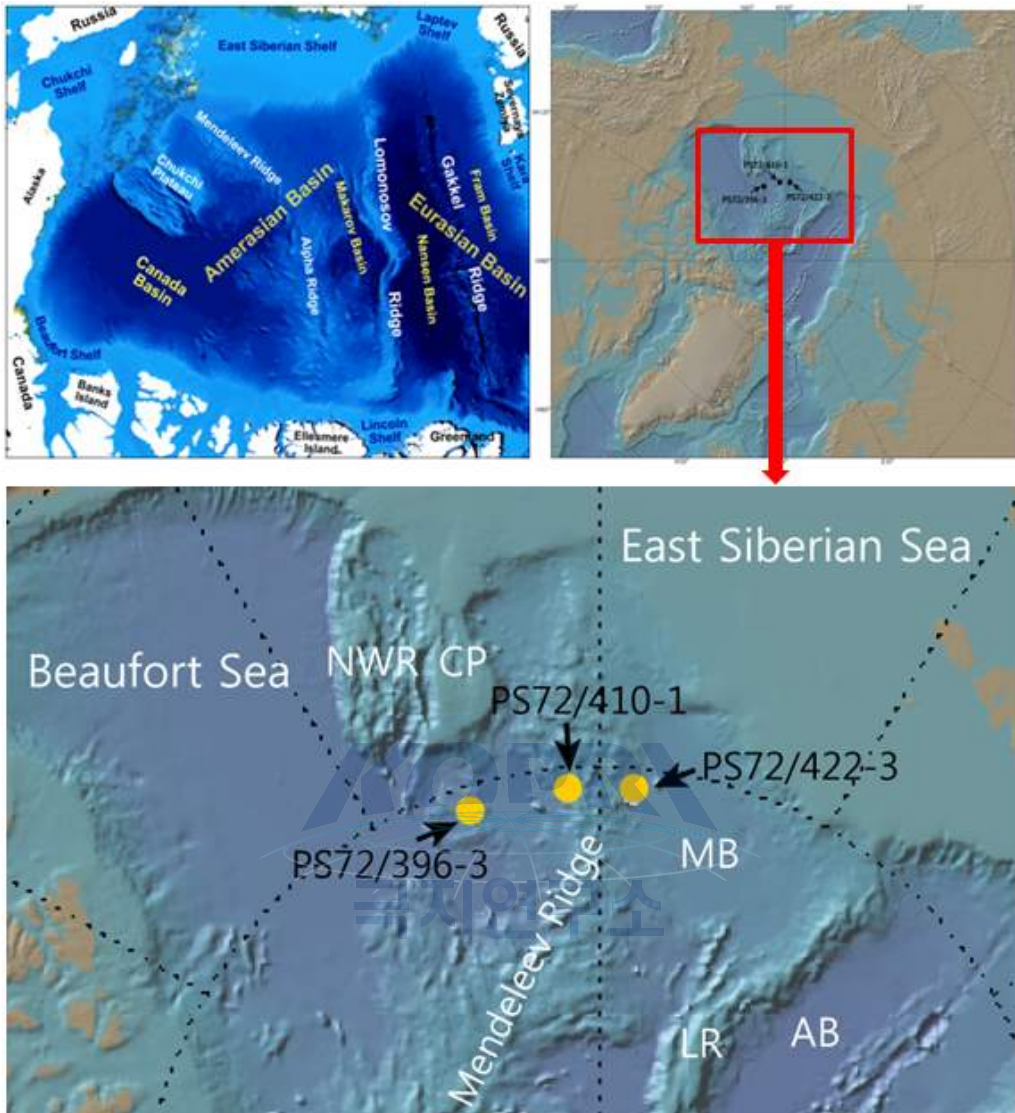


Figure 3. Map showing the study area and core sampling sites.

### 제 3 절 연구방법

이 연구를 위하여 2008년 독일 Alfred-Wegener 극지·해양연구소의 쇠빙선인 “Polarstern”을 이용하여 서북극해 멘델레프해령 해역(북위 80.5°)에서 3 정점으로부터 박스코어를 채취하였다(Fig. 3, Table 1). 이 시료(PS72/410-1, PS72/422-3, , PS72/396-3) 채취 심도는 수심 1,802m, 2,546m, 2,731m에서 채취하였다(Table 1). 이번 연구에서는 코어 중에서 PS72/410-1 박스코어를 사용하였다. 이 코어는 수심 1802m에서 채취하였으며 코어 길이는 39cm이다.

채취된 퇴적물을 wet sieving을 이용하여 사질과 이질 크기를 분리하였고(Table 2 & Table 3), 분리된 사질퇴적물에서 picking을 통해 자생 탄산염광물을 분리하였다. 그리고 자생 탄산염광물을 형태별로 분류하였다(Figs. 4, 5 & 6).

자생 탄산염광물을 중액분리법을 이용하여 방해석(calcite)와 아라고나이트(aragonite)로 분리하였다(Fig. 7). 중액분리법에서 비중액은 비중이 3.1g/cm<sup>3</sup>인 SPT(Sodium poly Tungstate) 시약과 증류수를 혼합하여 제작하였다. 방해석의 비중이 2.85g/cm<sup>3</sup>이고, 아라고나이트의 비중은 2.93g/cm<sup>3</sup>이다. 따라서 SPT시약과 증류수를 혼합하여 비중이 2.89g/cm<sup>3</sup>인 비중액을 제작하여 방해석과 아라고나이트를 분리하였다(Fig. 7). 비중이 2.89g/cm<sup>3</sup>인 비중액 100ml를 만들기 위해서는 SPT시약 454g과 증류수 101ml가 필요하다. SPT시약은 Fluka에서 제작된 가루용액을 사용하였다(Fig. 8). 방해석과 아라고나이트로 분리된 자생 탄산염광물의 조직을 관찰하기 위해 실체현미경과 주사전자현미경(SEM; Scanning Electron Microscope; S-3500N)으로 관찰하였다. 또 중액분리법을 이용하여 분리한 방해석과 아라고나이트를 확인하기 위해 EDAX(Energy Dispersive X-ray microanalysis) 분석을 하였다. EDAX 분석에서 방해석은 Mg 함량이 높은 값을 나타내고, 아라고나이트는 Sr이 높은 함량을 나타낸다.

형태와 조직적인 특징으로 분류된 방해석과 아라고나이트 자생 탄산염광물의 기원과 그 탄산염광물의 분포가 고해양환경에 어떠한 의미를 주는지를 알기 위해 안정동위원소 분석을 하였다. 먼저 필요한 경우, 자생 탄산염광물의 표면에 붙어 있는 여러 이물질과 유기물을 제거하기 위해, Ultrasonic vibrator를 이용하여 표면을 깨끗이 세척하고, 10% 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)에 넣어 24시간 동안 반응시켜 유기물을 제거하였다. 안정동위원소 분석은 채취한 미시료를 진공상태에서 380°C로 60분 동안 가열하여 광물의 결정사이와 결정 내에 존재하는 유기물을 제거하였다. 전처리가 끝난 미시료에 대하여 질량분석기(Finnigan MAT 252; automated carbonate preparation device (KIEL-III) coupled to a gas-ratio mass spectrometer)를 이용하여 산소와 탄소 안정동위원소 성분을 분석하였으며, 이는 미국 애리조나 대학에 Environmental Isotope Laboratory에서 수행하였다. 표준 시료는 NBS-18, NBS-19을 사용하였으며, 산소와 탄소동위원소 분석 값의 오차범위는 각각 <math>\pm 0.10\%</math>, <math>\pm 0.08\%</math>이며, 분석값은 VPDB 단위로 나타냈다. 자생 탄산염광물의 생

성된 속성환경을 좀 더 정밀하게 이해하기 위하여 안정동위원소를 분석한 일부 시료에 대한 미량원소를 분석하였다. 이 자료가 얻어지면 자생 탄산염광물이 생성된 속성환경을 이해하는데 좀 더 도움을 줄 것으로 기대한다. 미량원소 분석은 한국기초과학지원연구원 서울분소에 의뢰하여 분석이 이루어졌다. 분석을 위해 ICP-AES를 이용하였다.





Station	Date	Latitude	Longitude	Water depth (m)	Device
PS72/396-3 (0~39cm)	2008.09.20	80,5866	-162,3607	-2731	Giant box corer
PS72/410-1 (0~39cm)	2008.09.23	80,5096	-175,7408	-1801	Giant box corer
PS72/422-3 (0~40cm)	2008.09.25	80,55	175,7464	-2546	Giant box corer

Table 1. Information on the core samples in this study. The PS72/410-1 core was also analyzed for the research in 2011.

### Methods Flow chart

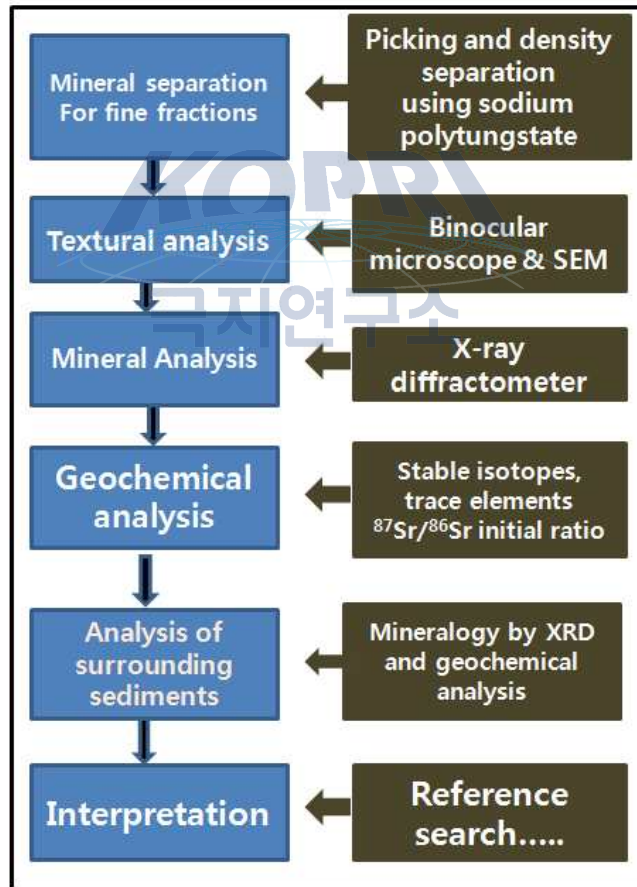


Figure 4. The flow chart showing the analytical procedure.

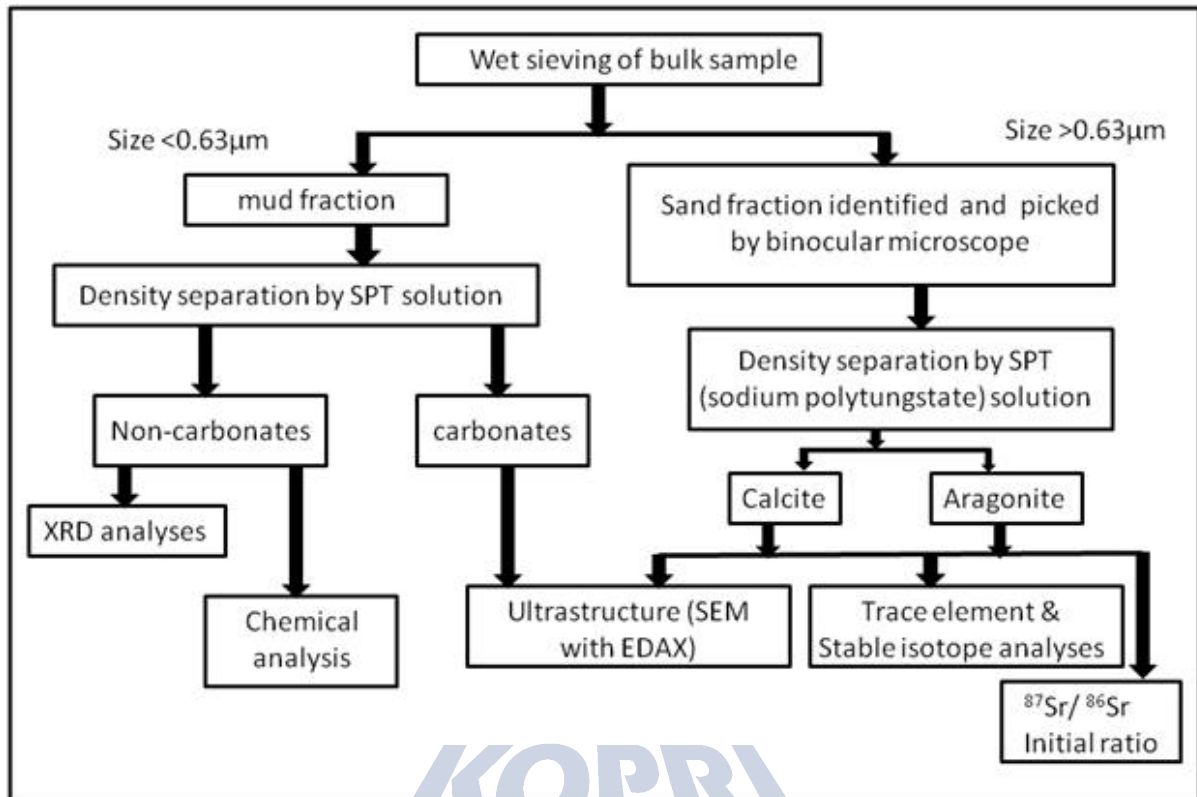


Figure 5. Schematic flowchart showing the detailed analytical research method.

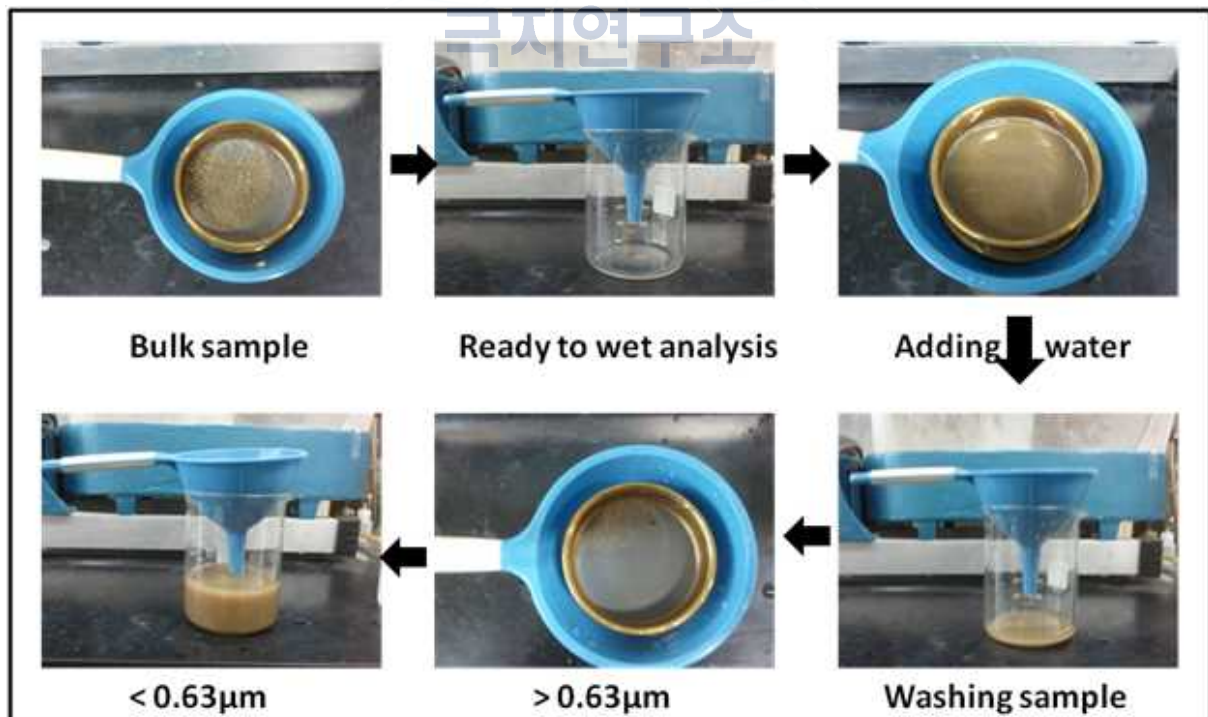


Figure 6. Wet Sieving process of bulk core sediment samples.

## Density separation

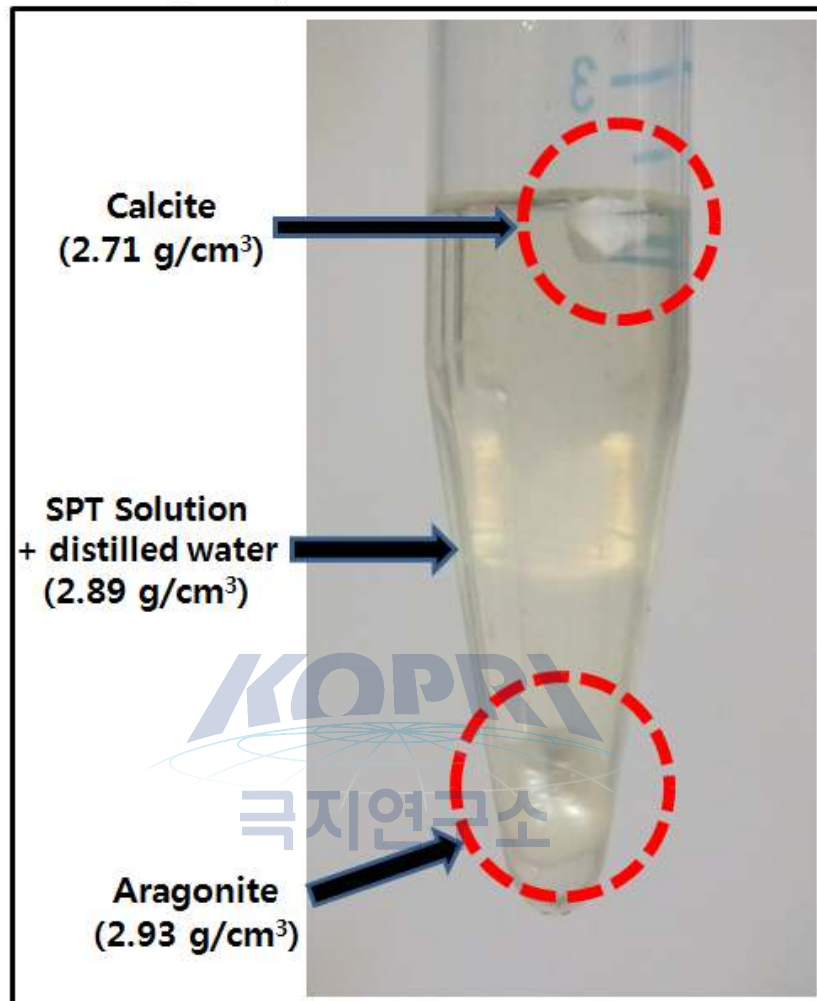


Figure 7. Density separation showing separated calcite and aragonite crystals.

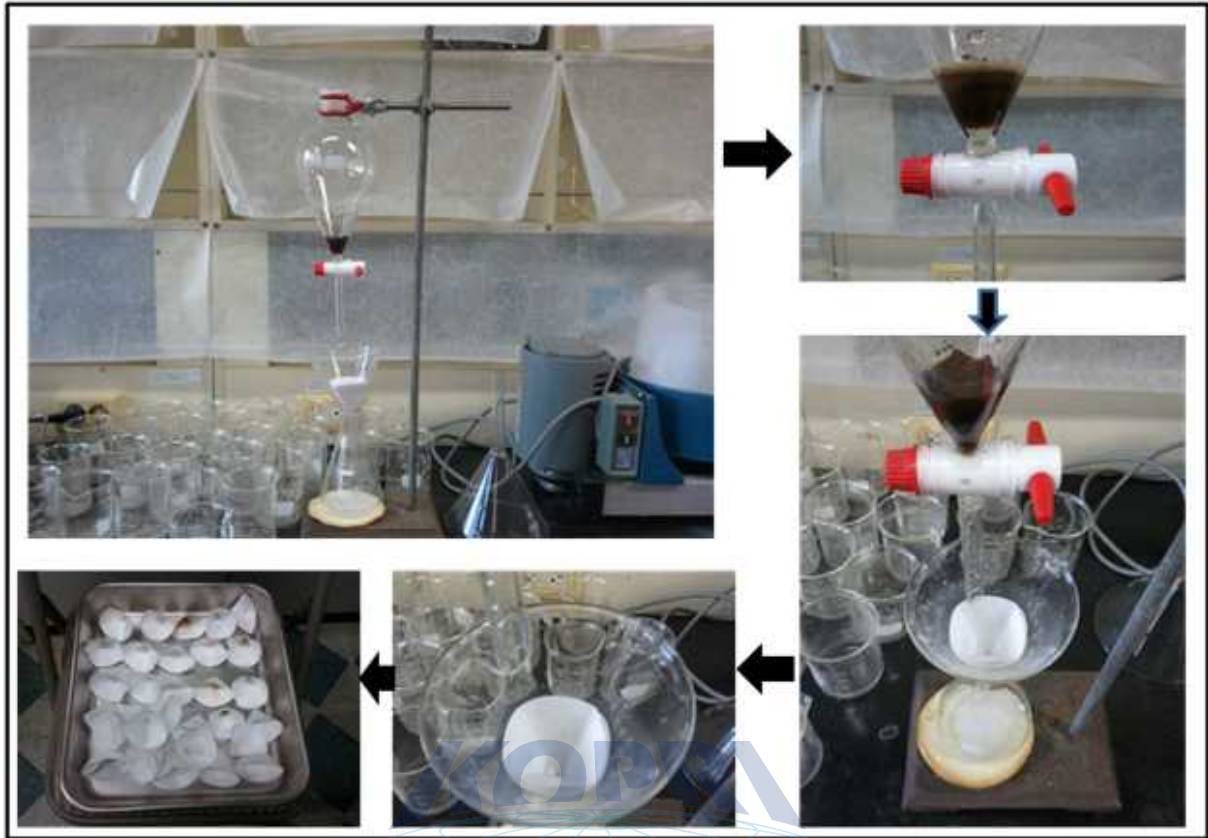


Figure 8. Density separation of clay particles with SPT solution.

Depth (cm)	Total Sample (gm)	Taken Sample (gm)	>0.63 $\mu$ m (gm)	<0.63 $\mu$ m (gm)	Washed away (gm)	Percent age of >0.63 $\mu$ m (%)	Percent age of <0.63 $\mu$ m (%)	Percent age of Washed away (%)	Sample Left (gm)
0-1 cm	13.09	6.00	0.62	5.03	0.35	10.33	83.83	5.83	7.09
1-2 cm	13.05	6.00	0.53	5.09	0.38	8.83	84.83	6.33	7.05
2-3 cm	13.82	6.00	0.47	5.13	0.40	7.83	85.50	6.67	7.82
3-4 cm	14.49	6.00	0.61	5.01	0.38	10.17	83.50	6.33	8.49
4-5 cm	13.40	7.00	0.78	5.81	0.41	11.14	83.00	5.86	6.40
5-6 cm	14.76	8.00	0.82	6.58	0.60	10.25	82.25	7.50	6.76
6-7 cm	14.13	7.00	0.67	5.82	0.51	9.57	83.14	7.29	7.13
7-8 cm	15.41	8.00	0.65	6.80	0.55	8.13	85.00	6.88	7.41
8-9 cm	17.56	8.00	0.55	6.88	0.57	6.88	86.00	7.13	9.56
9-10 cm	14.89	7.00	0.70	5.82	0.48	10.00	83.14	6.86	7.89
10-11 cm	16.72	8.00	0.65	6.82	0.53	8.13	85.25	6.63	8.72
11-12 cm	17.76	9.00	0.53	8.01	0.46	5.89	89.00	5.11	8.76
12-13 cm	18.95	9.00	0.92	7.65	0.43	10.22	85.00	4.78	9.95
13-14 cm	17.13	8.00	0.96	6.62	0.42	12.00	82.75	5.25	9.13
14-15 cm	18.31	9.00	1.29	7.09	0.62	14.33	78.78	6.89	9.31
15-16 cm	15.26	8.00	1.21	6.41	0.38	15.13	80.13	4.75	7.26
16-17 cm	16.25	8.00	1.39	6.25	0.36	17.38	78.13	4.50	8.25
17-18 cm	13.30	7.00	1.38	5.31	0.31	19.71	75.86	4.43	6.30
18-19 cm	13.10	7.00	1.25	5.35	0.40	17.86	76.43	5.71	6.10
19-20 cm	14.34	7.00	1.76	4.78	0.46	25.14	68.29	6.57	7.34
20-21 cm	15.67	6.00	1.64	4.08	0.28	27.33	68.00	4.67	9.67
21-22 cm	16.29	6.00	1.56	4.41	0.03	26.00	73.50	0.50	10.29
22-23 cm	15.72	6.00	1.50	4.27	0.23	25.00	71.17	3.83	9.72
23-24 cm	18.62	6.00	1.34	4.46	0.20	22.33	74.33	3.33	12.62
24-25 cm	15.17	6.00	0.44	5.26	0.30	7.33	87.67	5.00	9.17
25-26 cm	16.34	6.00	0.45	5.13	0.42	7.50	85.50	7.00	10.34
26-27 cm	17.74	6.00	0.56	5.12	0.32	9.33	85.33	5.33	11.74
27-28 cm	13.81	6.00	0.46	5.27	0.27	7.67	87.83	4.50	7.81
28-29 cm	17.19	6.00	0.48	5.24	0.28	8.00	87.33	4.67	11.19
29-30 cm	15.70	6.00	0.41	5.31	0.28	6.83	88.50	4.67	9.70
30-31 cm	14.67	6.00	0.42	5.27	0.31	7.00	87.83	5.17	8.67
31-32 cm	17.56	6.00	0.87	4.90	0.23	14.50	81.67	3.83	11.56
32-33 cm	15.69	6.00	1.30	4.50	0.20	21.67	75.00	3.33	9.69
33-34 cm	14.91	6.00	1.23	4.55	0.22	20.50	75.83	3.67	8.91
34-35 cm	14.40	6.00	0.46	5.28	0.26	7.67	88.00	4.33	8.40
35-36 cm	17.06	6.00	0.50	5.19	0.31	8.33	86.50	5.17	11.06
36-37 cm	15.67	6.00	0.61	5.07	0.32	10.17	84.50	5.33	9.67
37-38 cm	15.21	6.00	0.55	5.16	0.29	9.17	86.00	4.83	9.21
38-39 cm	15.75	6.00	0.50	5.18	0.32	8.33	86.33	5.33	9.75

Table 2. Bulk sample analysis result of the core sample (PS72/410-1) by wet sieving.



Depth (cm)	Total Sample (gm)	Taken Sample (gm)	>0.63 $\mu$ m (gm)	<0.63 $\mu$ m (gm)	Washed away (gm)	Percent age of >0.63 $\mu$ m (%)	Percent age of <0.63 $\mu$ m (%)	Percent age of Washed away (%)	Sample Left (gm)
0-1 cm	12.39	6.00	0.53	4.97	0.50	8.83	82.83	8.33	6.39
1-2 cm	13.53	6.00	0.55	4.98	0.47	9.17	83.00	7.83	7.53
2-3 cm	11.07	6.00	0.46	5.10	0.44	7.67	85.00	7.33	5.07
3-4 cm	13.74	6.00	0.52	5.07	0.41	8.67	84.50	6.83	7.74
4-5 cm	14.65	6.00	0.47	5.13	0.40	7.83	85.50	6.67	8.65
5-6 cm	12.70	6.00	0.42	5.16	0.42	7.00	86.00	7.00	6.70
6-7 cm	13.03	6.00	0.37	5.21	0.42	6.17	86.83	7.00	7.03
7-8 cm	10.71	6.00	0.39	5.18	0.43	6.50	86.33	7.17	4.71
8-9 cm	16.23	6.00	0.55	4.99	0.46	9.17	83.17	7.67	10.23
9-10 cm	13.51	6.00	0.54	5.21	0.25	9.00	86.83	4.17	7.51
10-11 cm	16.46	6.00	0.44	5.26	0.30	7.33	87.67	5.00	10.46
11-12 cm	14.68	6.00	0.34	5.48	0.18	5.67	91.33	3.00	8.68
12-13 cm	14.82	6.00	0.08	5.67	0.25	1.33	94.50	4.17	8.82
13-14 cm	16.74	6.00	0.12	5.61	0.27	2.00	93.50	4.50	10.74
14-15 cm	14.09	6.00	0.08	5.66	0.26	1.33	94.33	4.33	8.09
15-16 cm	12.30	6.00	0.11	5.65	0.24	1.83	94.17	4.00	6.30
16-17 cm	15.21	6.00	0.28	5.55	0.17	4.67	92.50	2.83	9.21
17-18 cm	13.17	6.00	0.09	5.60	0.31	1.50	93.33	5.17	7.17
18-19 cm	14.67	6.00	0.20	5.49	0.31	3.33	91.50	5.17	8.67
19-20 cm	13.93	6.00	0.11	5.63	0.26	1.83	93.83	4.33	7.93
20-21 cm	15.59	6.00	0.15	5.59	0.26	2.50	93.17	4.33	9.59
21-22 cm	13.56	6.00	0.29	5.44	0.27	4.83	90.67	4.50	7.56
22-23 cm	16.99	6.00	0.42	5.35	0.23	7.00	89.17	3.83	10.99
23-24 cm	13.85	6.00	0.49	5.26	0.25	8.17	87.67	4.17	7.85
24-25 cm	17.49	6.00	0.36	5.36	0.28	6.00	89.33	4.67	11.49
25-26 cm	13.94	6.00	0.21	5.56	0.23	3.50	92.67	3.83	7.94
26-27 cm	15.75	6.00	0.22	5.54	0.24	3.67	92.33	4.00	9.75
27-28 cm	16.62	6.00	0.24	5.47	0.29	4.00	91.17	4.83	10.62
28-29 cm	16.28	6.00	0.54	5.17	0.29	9.00	86.17	4.83	10.28
29-30 cm	13.66	6.00	0.43	5.31	0.26	7.17	88.50	4.33	7.66
30-31 cm	12.67	6.00	0.29	5.45	0.26	4.83	90.83	4.33	6.67
31-32 cm	16.38	6.00	0.10	5.59	0.31	1.67	93.17	5.17	10.38
32-33 cm	17.98	6.00	0.07	5.63	0.30	1.17	93.83	5.00	11.98
33-34 cm	13.23	6.00	0.05	5.66	0.29	0.83	94.33	4.83	7.23
34-35 cm	15.05	6.00	0.21	5.47	0.32	3.50	91.17	5.33	9.05
35-36 cm	12.89	6.00	0.45	5.25	0.30	7.50	87.50	5.00	6.89
36-37 cm	12.82	6.00	0.43	5.26	0.31	7.17	87.67	5.17	6.82
37-38 cm	13.26	6.00	0.40	5.31	0.29	6.67	88.50	4.83	7.26
38-39 cm	13.82	6.00	0.34	5.33	0.33	5.67	88.83	5.50	7.82

Table 3, Bulk sample analysis result of the core sample (PS72/422-3) by wet sieving.

## 제 4 절 연구결과

### 1. 퇴적물 코어에 일반적인 양상

북극해 캐나다분지(Canada Basin)에 코어시료(PS72/410-1)의 총 길이는 39cm이고, 주로 밝은 회색과 황색 내지 황갈색의 실트질 점토(silty clay; 점토함량이 50% 이상)로 구성되어 있다. 총 유기탄소(TOC; total organic carbon) 함량은 코어 하부에서 상부로 올라갈수록 증가하는데 특히 코어 10cm 깊이에서는 상부로 가면서 현저하게 증가하는 경향을 보인다. 코아 깊이 10 cm 이상에서는 약 0.2% 내외로 거의 뚜렷한 변화가 없으나, 코아 깊이 약 10cm 부근에서 뚜렷한 증가를 보이며 코아 상부로 가면서 지속적으로 증가하는 경향을 보인다. 총 탄산칼슘( $\text{CaCO}_3$ ) 함량은 코아퇴적물 내의 모든 탄산칼슘의 함량을 나타낸다. 총 탄산칼슘의 양은 코아시료에 포함되어 있는 부유성 유공충(planktonic foraminifer)와 자생 탄산염광물의 합을 나타낸 것이다. 코아의 최하부에서는 약 25%의 높은 함량을 보이다가 코아 깊이 33 cm까지 지속적으로 감소한다. 코아 깊이 33~22 cm까지는 약 5% 이하로 매우 낮은 함량을 보인다. 하지만 코아 깊이 22 cm부터 약 15 cm까지 급격히 증가하면서 약 35% 정도의 높은 함량을 나타낸다. 하지만 코아 깊이 15 cm부근에서 10 cm까지 다시 급격하게 낮아지면서 그 이후부터는 약 10% 정도의 함량을 유지하고 있다. 샌드 입자 크기의 자생 탄산염 광물의 상대적인 양을 정량적으로 서로 표시하였다. 정량적인 양은 상대적으로 가장 적은 양인 1부터 가장 많은 양인 5까지로 주관적, 정량적인 구분을 실시하였다. 코아의 상부(4~13cm)와 중하부(24~33cm)에서 높은 함량(상대적 지수 3)을 보이며, 탄산칼슘의 함량과는 서로 반대되는 경향이 관찰된다. 특히 코아 깊이 21-22 cm, 32-33 cm 구간에서는 자생탄산염광물이 전혀 나타나지 않는 것이 특이하다. 유기물에 탄소동위원소 값( $\delta^{13}\text{C}_{org}$ )은 -23.5~-24.5‰ 정도로서 코아의 깊이에 따른 값의 변화가 거의 없는 비슷한 값을 나타내었으며, 그 평균값은 -24‰ 정도이다 (Fig. 9).

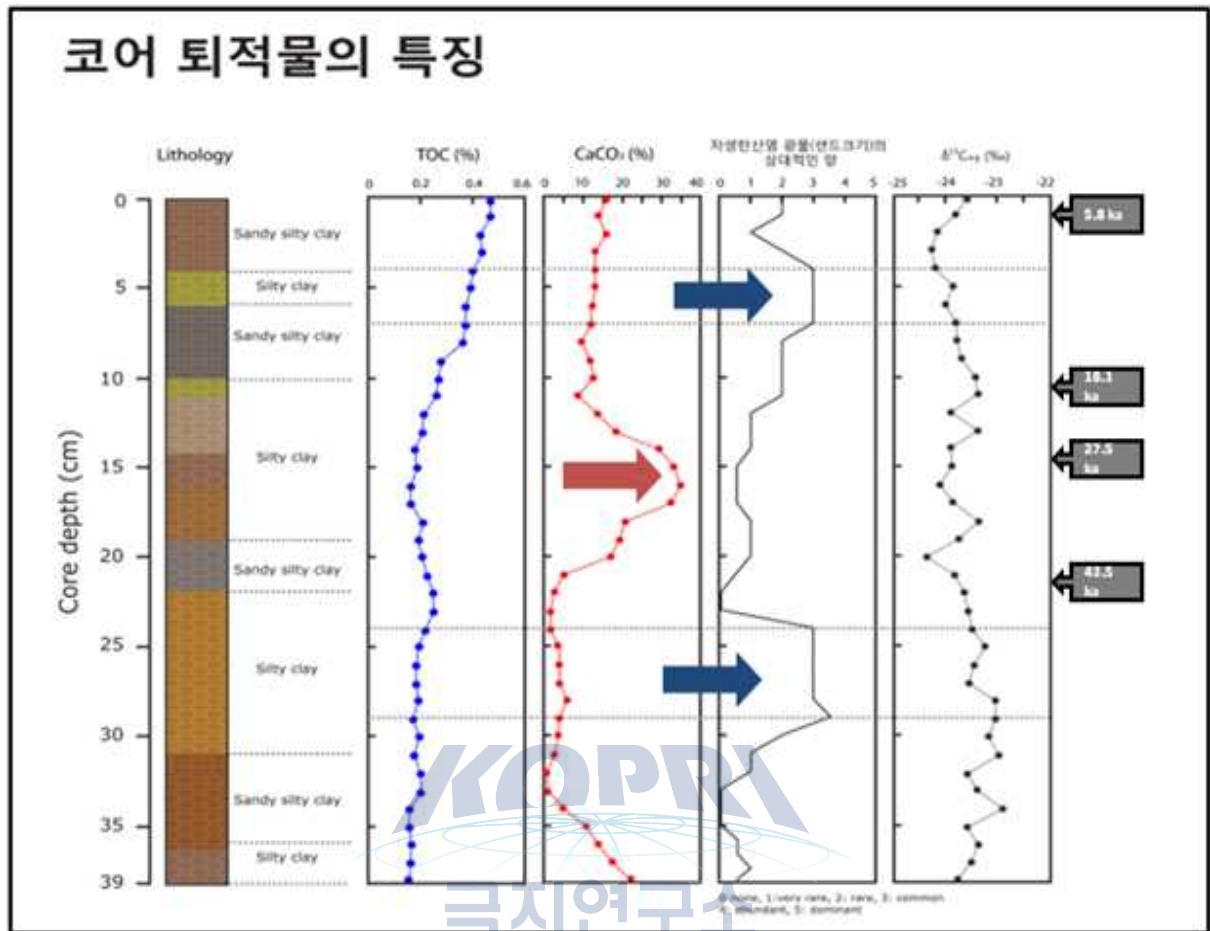


Figure 9. Content (%) of calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>), total organic carbon (TOC), and authigenic carbonates contents, and δ<sup>13</sup>C<sub>org</sub> values of the sediment core PS72/410-1. These data are provided by KOPRI. Red arrow indicates the interval of high CaCO<sub>3</sub> contents, and blue arrows indicate the intervals of high concentrations of authigenic carbonates. Four age dating results are included.



## 2. 자생 탄산염광물의 미세조직 및 광물성분

코아 퇴적물의 사질크기에 대한 조직적 분석을 실시한 결과 퇴적물 내에는 많은 양의 탄산염광물이 발견되었다. 일반적으로 부유성 유공충의 형태는 그 크기가 사질의 크기로 거의 일정하고 형태가 구형이기 때문에 쉽게 인지가 가능하다(Fig. 10). 나머지 탄산염광물로 이루어진 결정들은 침상의 결정으로부터 여러 침상의 결정이 모여서 자란 집합체로서의 결정형태를 보이는 것도 발견된다. 흥미로운 사실은 이러한 결정이 매우 다양한 성장형태를 보이면서 나타난다는 것이다(Figs. 10, 11).

이들 결정에 대한 주사전자현미경을 이용하여 결정의 형태를 좀 더 고배율로 관찰하고 이들의 Sr과 Mg 성분을 EDAX를 이용하여 정성적인 분석을 시행하여 탄산염광물의 광물성분을 구분하였다. 아라고나이트와 방해석의 Sr과 Mg 성분은 각각의 결정구조의 차이 때문에 서로 뚜렷한 성분의 차이를 보인다. 즉 아라고나이트는 Orthorhombic crystal 구조로 되어 있기 때문에 Ca이 차지하는 공간이 커서 Ca보다 이온반경이 큰 Sr, Ba 등이 Ca 대신에 잘 치환되지만, 방해석은 그 결정구조가 Hexagonal (trigonal) structure이기 때문에 Ca이 차지하는 공간이 작아서 Ca보다 이온반경이 더 작은 Mg, Fe, Mn 등의 양이온이 더 잘 치환되는 경향이 있다. 따라서 이러한 화학적인 특성을 이용하여 EDAX를 이용하여 Sr과 Mg에 대한 정성분석을 실시하면 두 광물의 구분이 어느 정도 가능하다.

또한 결정이 자란 형태도 광물성분을 구분하는 근거가 되었다. 일반적으로 자생으로 탄산염광물이 성장할 경우, 그 결정의 끝부분이 정사각형 모양의 형태(square-ended termination)를 보이면 아라고나이트로 알려져 있다. 그 결과, 시추코아 내에 포함되어 있는 자생 탄산염광물은 크게 두 가지 광물로 구분된다. 이들은 방해석과 아라고나이트로 이루어져 있다(Fig. 11). 미량원소 분석을 정량적으로 실시한 결과, 방해석은 저마그네슘 방해석과 고마그네슘방해석이 모두 나타난다(뒤의 미량원소결과 참조).

EDAX로 분석한 결과 방해석과 아라고나이트의 성분은 주로 산소(O)와 칼슘(Ca)으로 구성되어 있어 거의 비슷하지만, Mg과 Sr함량이 서로 다른 값을 나타내었다. 방해석과 아라고나이트를 구분할 수 있는 방법으로는 Mg와 Sr 함량을 가지고 구분할 수 있는데, Mg함량이 높을 경우 방해석, Sr함량이 높을 경우 아라고나이트이다. 이번 연구에서는 EDAX 정성분석 결과 값을 이용하여 방해석과 아라고나이트를 구분하였다. 방해석은 Mg과 Sr 함량은 각각 0~1.69 wt%, 0~1.71 wt%의 범위에서 나타나는 것으로 분석되었고, 아라고나이트는 Mg과 Sr 함량이 각각 -0.1~0.37 wt%, -1.2~1.37 wt%의 범위에서 나타난다. 대부분의 자생 탄산염 광물 중에서 방해석은 Sr의 함량보다 Mg 함량이 높고, 아라고나이트는 Mg 함량보다 Sr의 함량이 높게 나타는 것이 일반적인 경향이다. 하지만 이러한 경향이 뚜렷이 관찰되지 않아 두 광물을 구분하기가 용이하지 않는 경우도 있었다(Table 4 and Table 5).

탄산염광물의 성장형태를 광물이 성장하는 용액의 탄산염광물에 대한 포화도와 광물

의 종류, 그리고 용액 내의 다른 이온이나 유기기물의 함량에 따라 달라질 수 있다. 특히 용액 내의 포화도는 광물의 성장형태에 직접적인 영향을 미칠 수 있으며, 용액이 탄산염 광물에 대해 얼마나 포화상태에 있는가에 따라 섬유상(fibrous), 칼날상(bladed), 등립질(equant) 조직을 보인다. 즉 포화상태가 클수록 결정의 장축과 단축의 비가 커지면 섬유상은 장축과 단축의 비가 6:1보다 큰 경우이고, 6:1에서 4:1 사이는 칼날상에서 2:1보다 작은 등립질 조직을 보일수록 용액 내의 탄산염결정에 대한 포화도가 더 낮다고 알려져 있다.

연구지역 코아시료에서 나타나는 탄산염광물을 실체현미경과 주사전자현미경으로 관찰할 결과 방해석은 판상의 결정으로 성장한 형태와 결정이 각각의 결정형태로 성장한 두 가지가 관찰된다. 판상으로 성장한 방해석의 미세구조는 주로 삼각형 모양의 얇은 판상의 결정들이 겹쳐서 성장하는 형태(Foliated texture)(Fig. 12)로 이루어져 있다. 판상의 결정이 서로 겹쳐서 성장하는 형태에는 이러한 판들이 서로 수직방향으로 겹쳐서 성장하는 경우도 있지만(Fig. 26, 27 & 28), 비스듬한 방향으로 성장하기도 한다(Figs. 29, 30, 31 & 32). 이외에도 납작하고 긴 모양(칼날모양)의 결정들이 주상의 형태(Bladed texture)(Fig. 13)로 이루어져 있거나 등립질(Equant) 모양의 결정이 성장한 형태(Fig. 14)가 보이기도 한다. 이러한 결정의 차이는 아마도 성장속도와 관련이 있을 가능성이 있다.

아라고나이트의 미세구조는 주로 기둥 모양의 결정들이 섬유상으로 성장한 형태(Fibrous texture)(Fig. 15)가 많이 나타난다. 섬유상으로 성장한 아라고나이트는 방향성이 없이 섬유상의 결정들이 무질서하게 성장한 형태(Randomly oriented fibrous texture)를 보이기도 하지만(Fig. 16; Figs. 35, 36 & 37), 섬유상의 결정들이 구과상으로 성장한 형태(Spherulitic fibrous texture)가 발견되기도 한다(Fig. 38 & 39). 아라고나이트 조직에도 납작하고 긴모양(칼날모양)의 칼날상 결정들이 성장한 형태(Bladed texture)(Fig. 17; Figs. 40, 41 & 42)이 나타나기도 한다. 또 일부 방해석과 아라고나이트 결정에서는 녹아서 표면이 용해된 흔적(etched surface texture)들이 관찰되기도 한다(Fig. 18). 이러한 용된 흔적은 탄산염광물이 생성된 후, 공극수가 그 광물에 대해 불포화상태가 되면서 광물의 표면을 용식했다는 증거이다.

한 코아 구간에서 방해석과 아라고나이트가 함께 관찰되는 경우는 아주 여러 구간에서 나타난다. 특히 전체적으로 한 결정이 방해석과 아라고나이트 광물로 모두 이루어져 있는 경우도 관찰된다(Fig. 19; Figs. 43 & 44). 이 경우 두 광물 중에서 어느 광물이 먼저 생성되었는지를 알기 위해 고배율하에서 주사전자현미경을 이용하여 조직을 관찰하였다. 관찰한 여러 시료의 경우, 방해석이 먼저 주상의 결정으로 성장한 후에 아라고나이트가 방해석 결정 위를 성장한 구과상섬유상조직을 보이며 성장하는 형태가 여러 지점에서 발견되었다. 이러한 결과는 탄산염광물이 성장했던 공극수가 변화했다는 것을 나타내며 아마도 공극수의 pH변화와 밀접한 관련이 있을 것이다.

깊이에 따른 방해석과 아라고나이트 형태의 변화를 알아보았다(Table 6 & Table 7). 아라고나이트와 방해석결정들은 각각 다양한 조직을 보이지만 이들의 조직의 한 가지 형

태가 어느 특정한 깊이에서만 나타나지 않았다. 또한 한가지의 형태가 여러 깊이에서 나타나기도 하며, 한 깊이에서 매우 다양한 조직의 결정형태를 보여주고 있다.

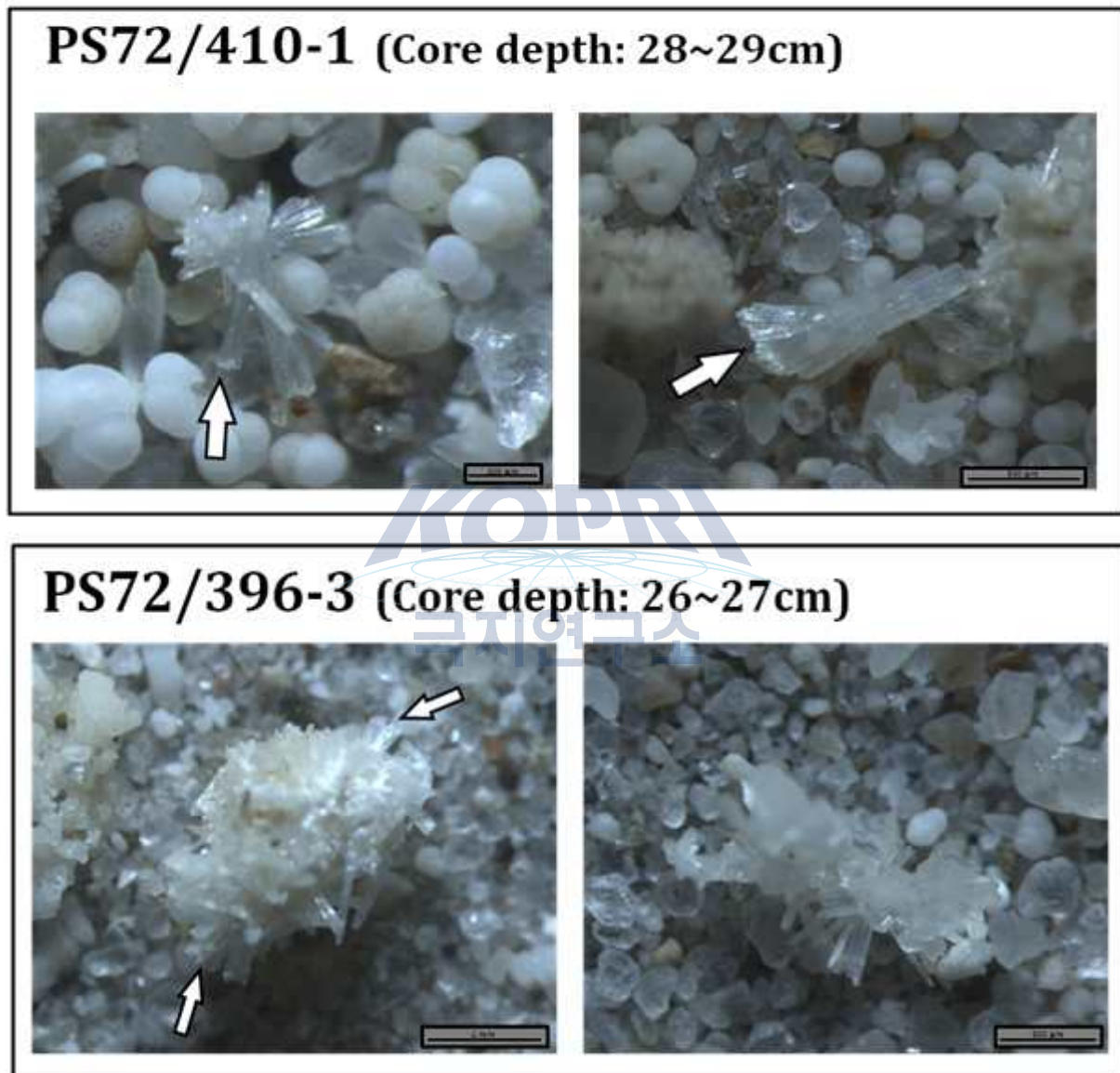
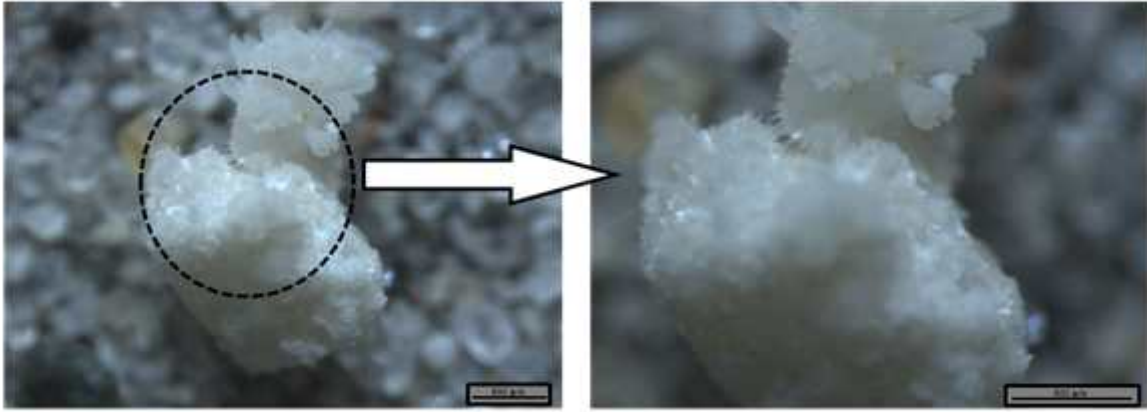


Figure 10. Coarse carbonate fractions after wet sieving composed of authigenic carbonate minerals and planktonic foraminifera. The arrows indicate authigenic carbonate crystals. Circular shapes in the back are planktonic foraminifera.

**PS72/396-3 (Core depth: 26~27cm)**



**PS72/396-3 (Core depth: 26~27cm)**



Figure. 11. Coarse carbonate fractions after wet sieving composed of authigenic carbonate minerals and planktonic foraminifera. The arrows indicate authigenic carbonate crystals. Delicate fine fibrous shapes indicate that they are authigenic in origin. The square-ended terminations in the lower photos (arrow) strongly indicate aragonite mineralogy.



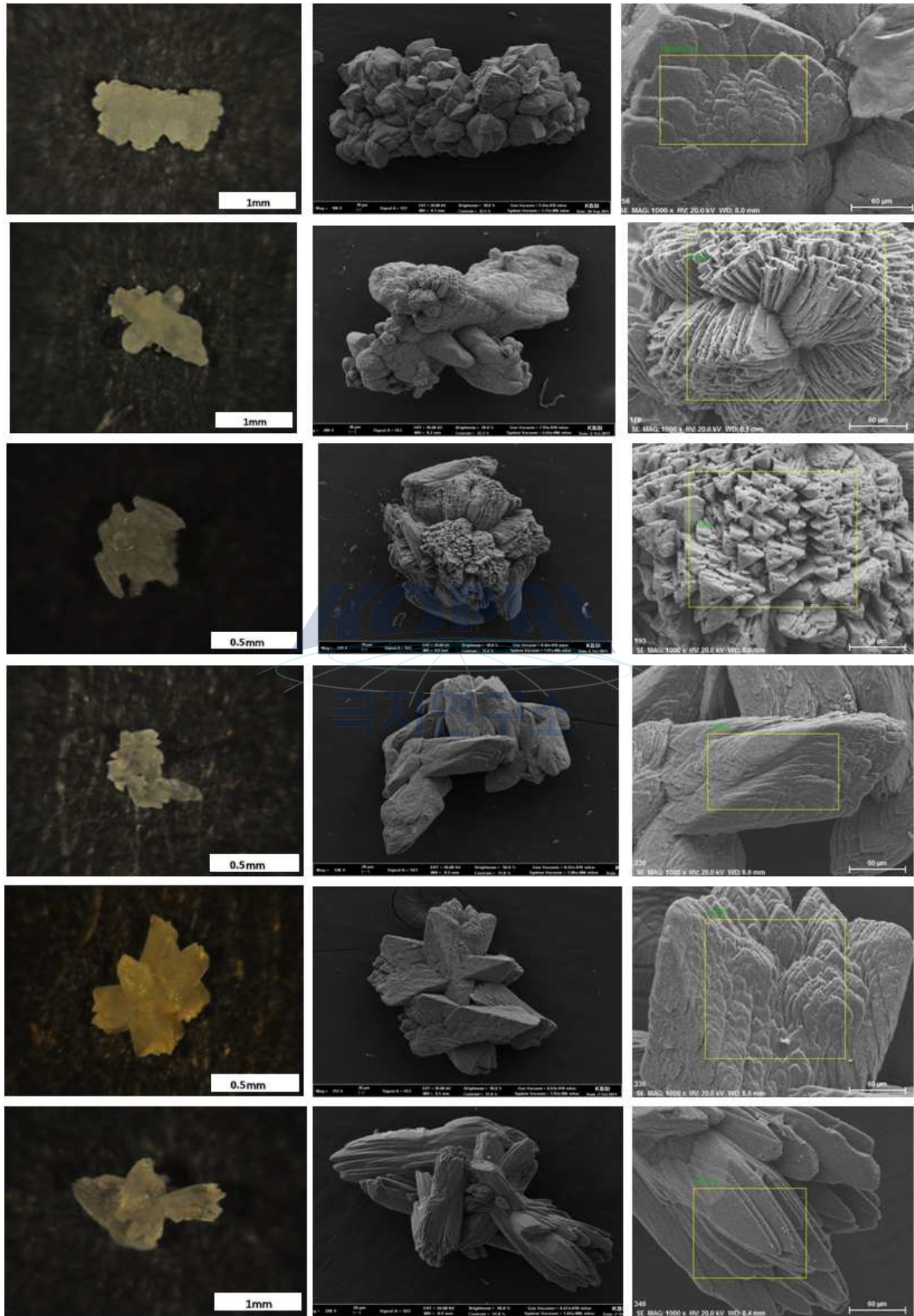


Figure 12. Foliated calcite crystalline texture.

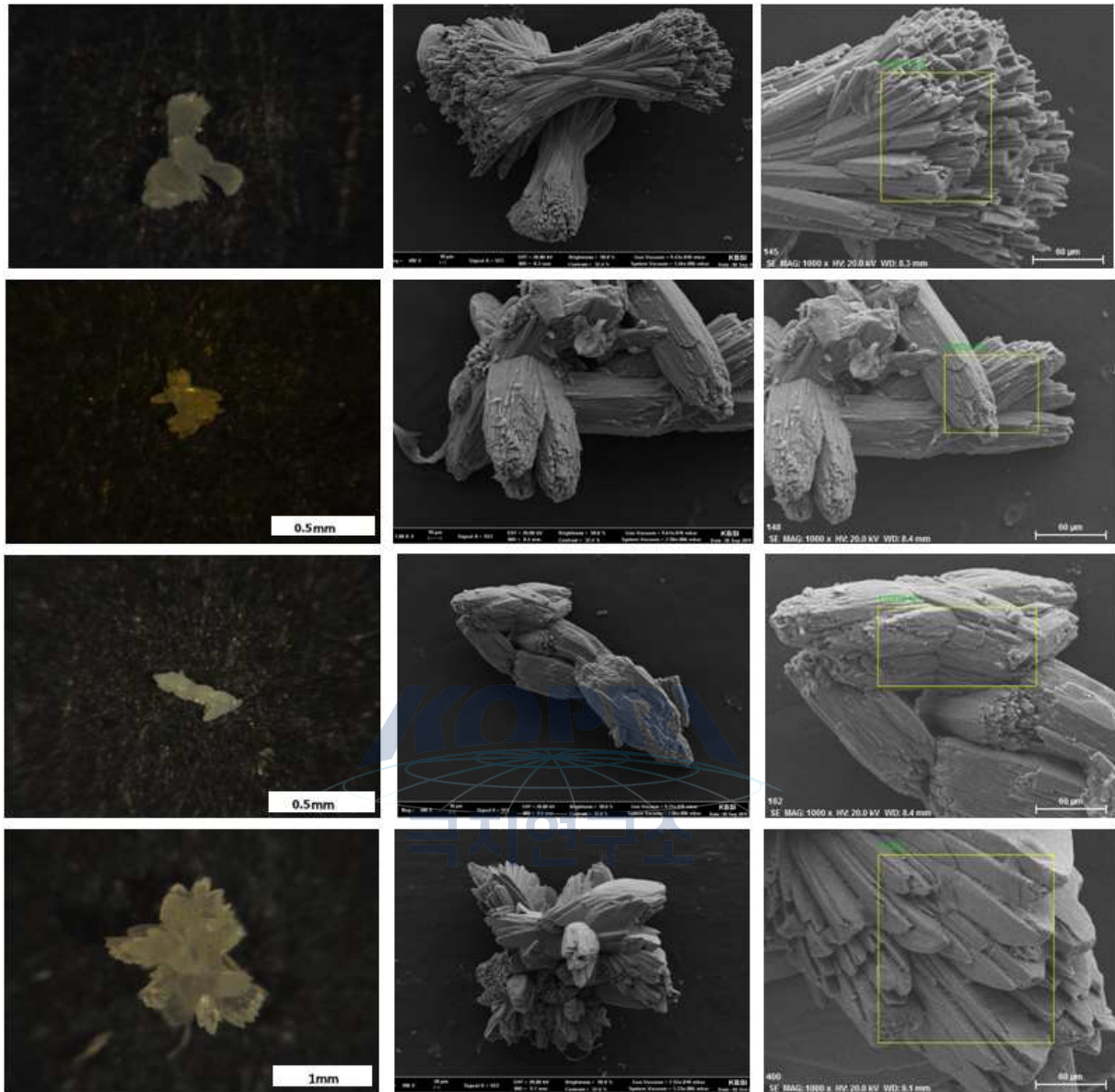


Figure 13. Bladed calcite crystalline texture.



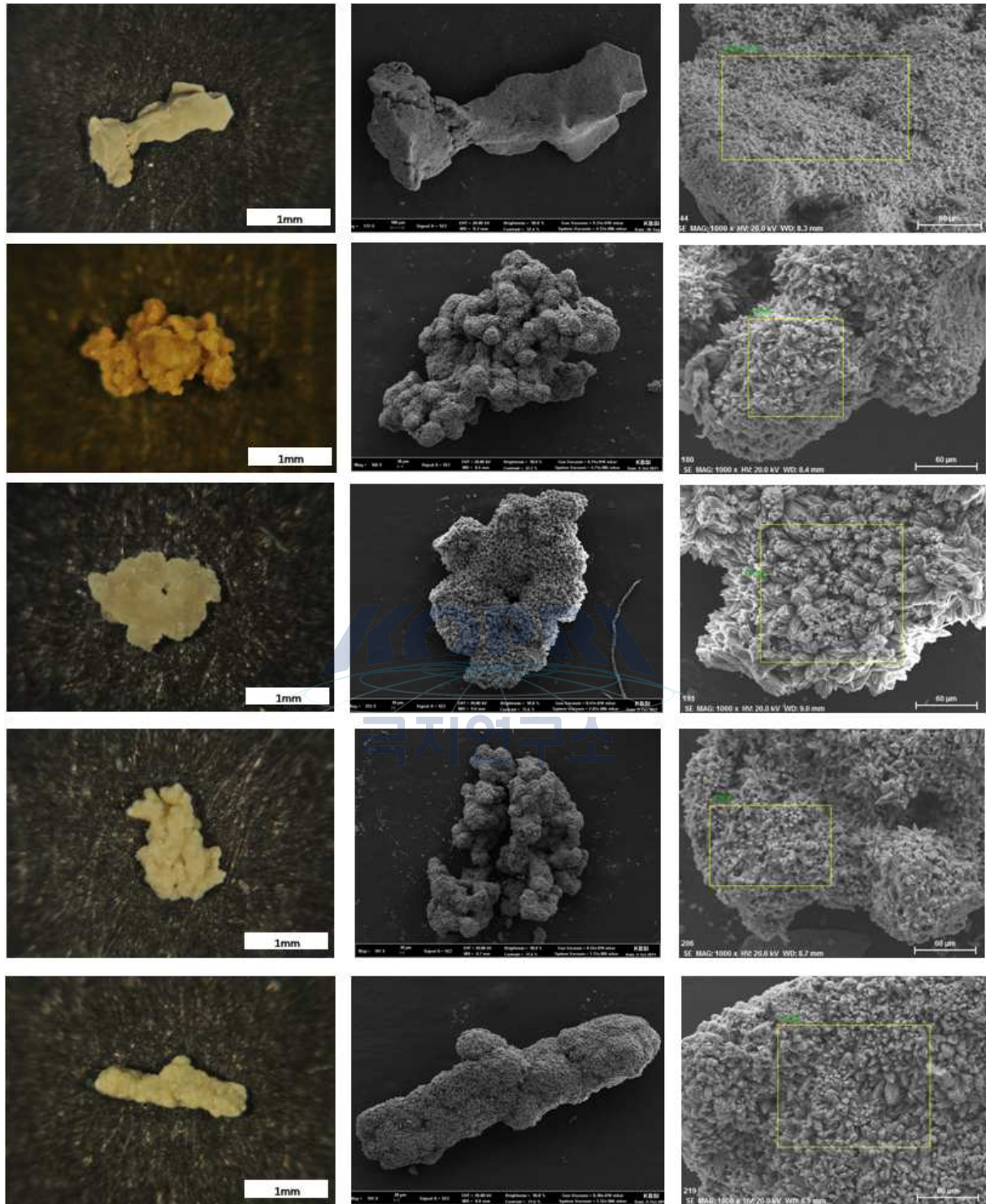


Figure 14. Equant calcite crystalline texture.

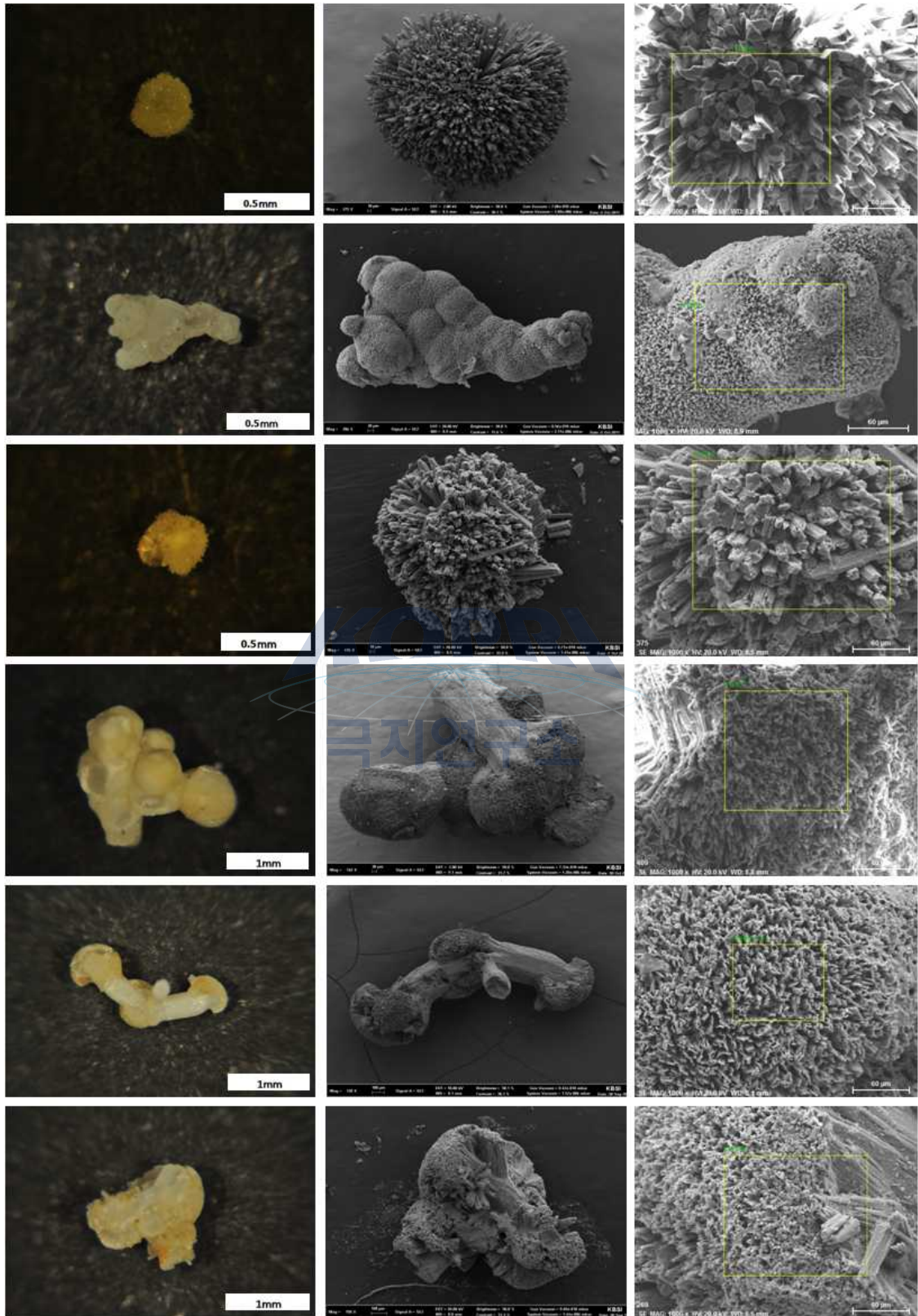


Figure 15. Fibrous aragonite texture.



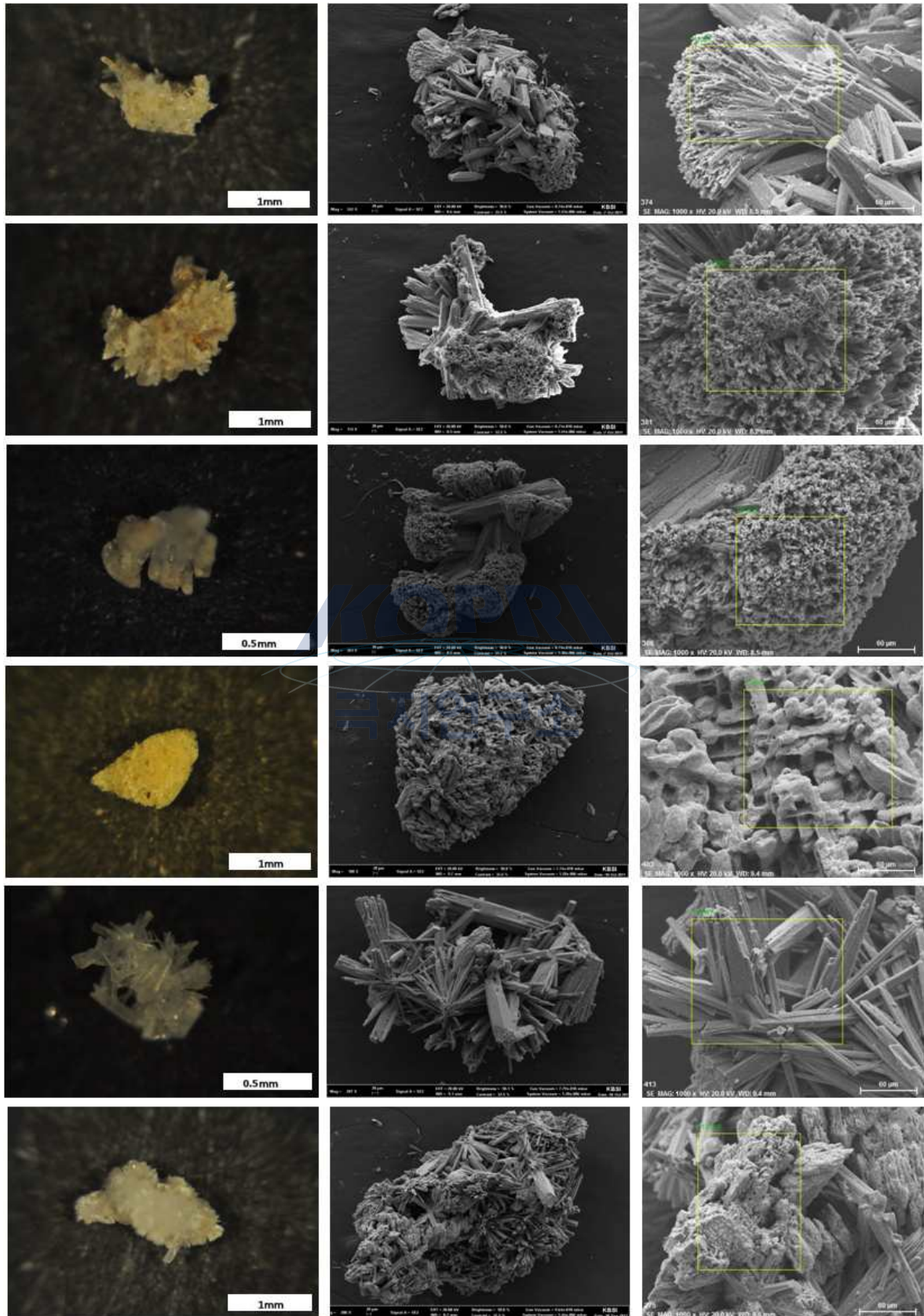


Figure 16. Randomly oriented, fibrous aragonite texture.

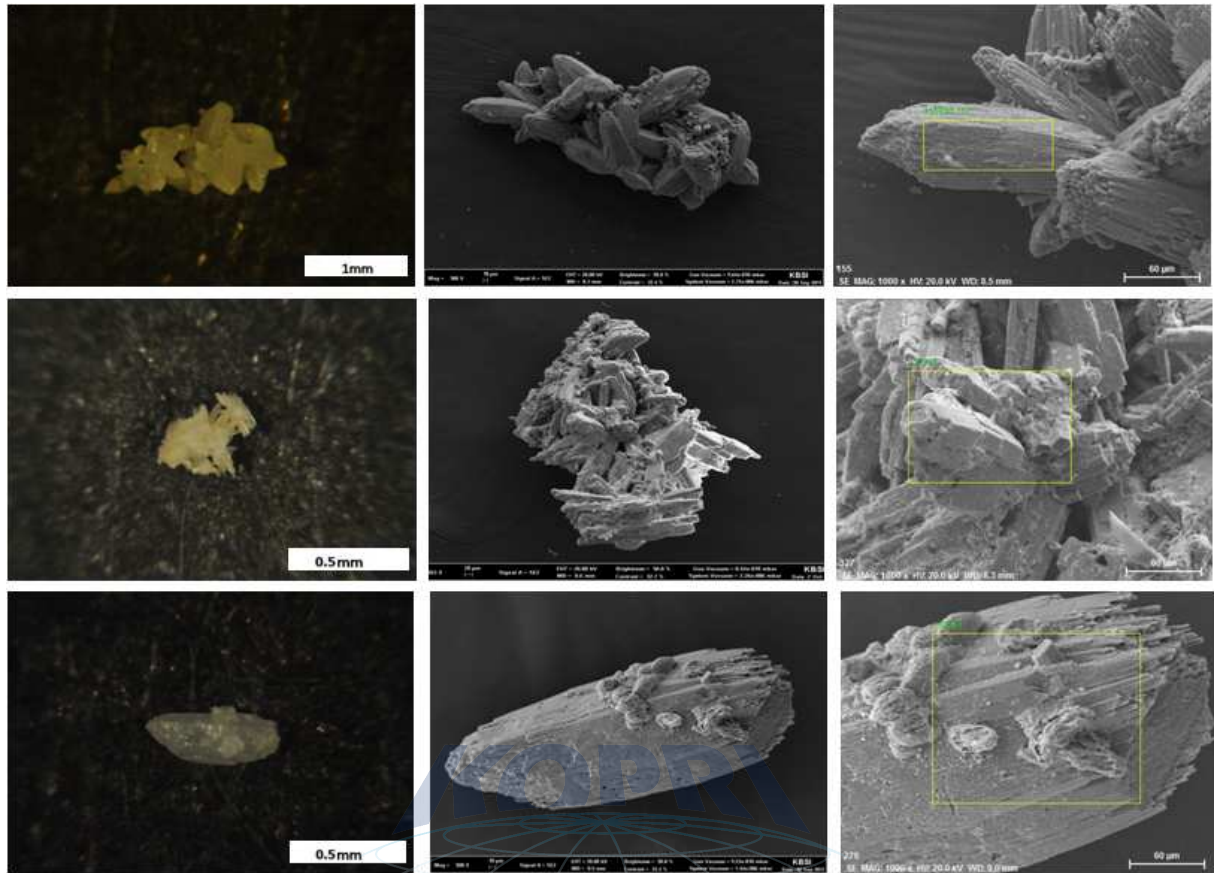


Figure 17. Bladed aragonite texture.

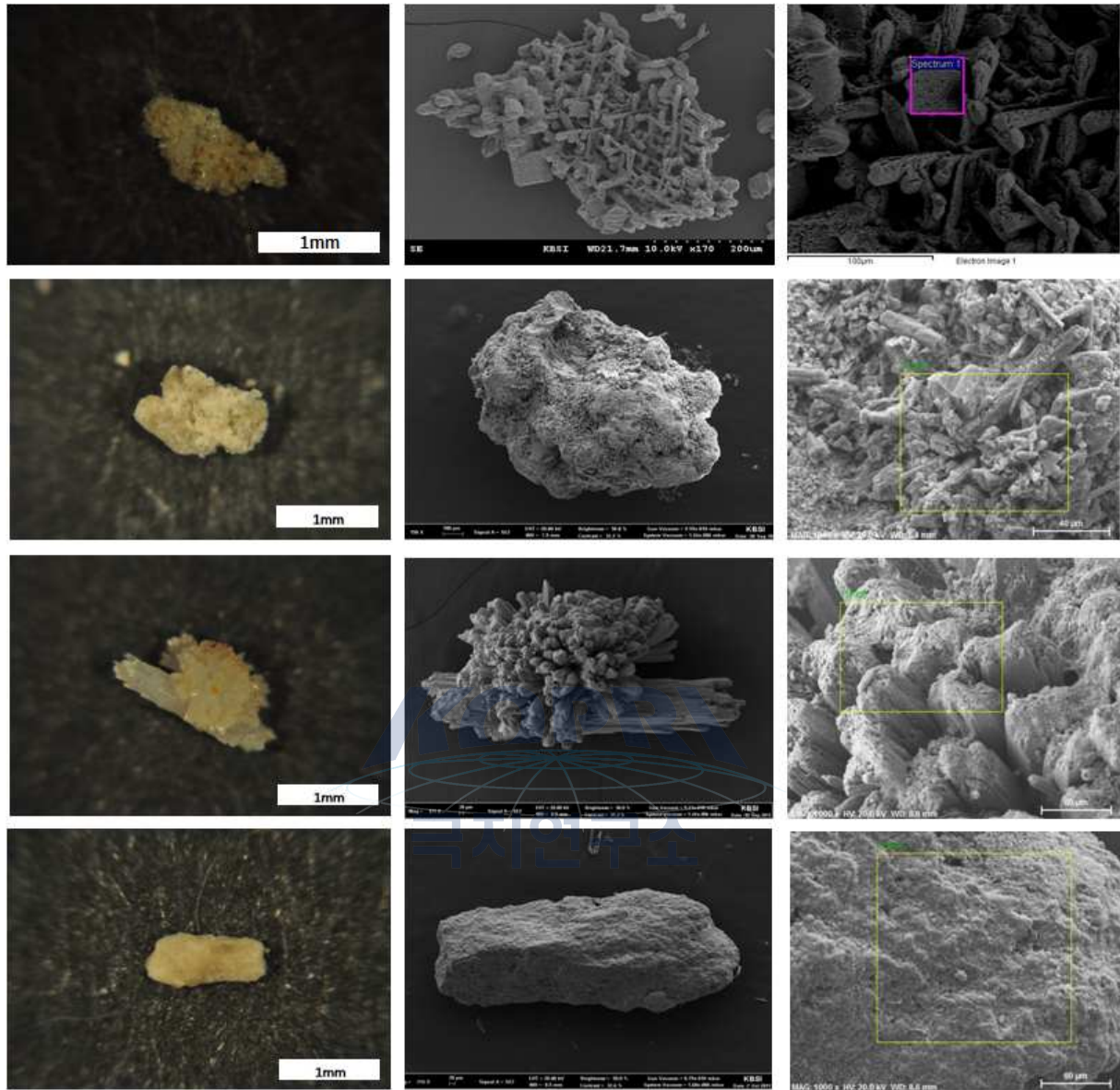


Figure 18. Etched surface of authigenic calcite crystals.



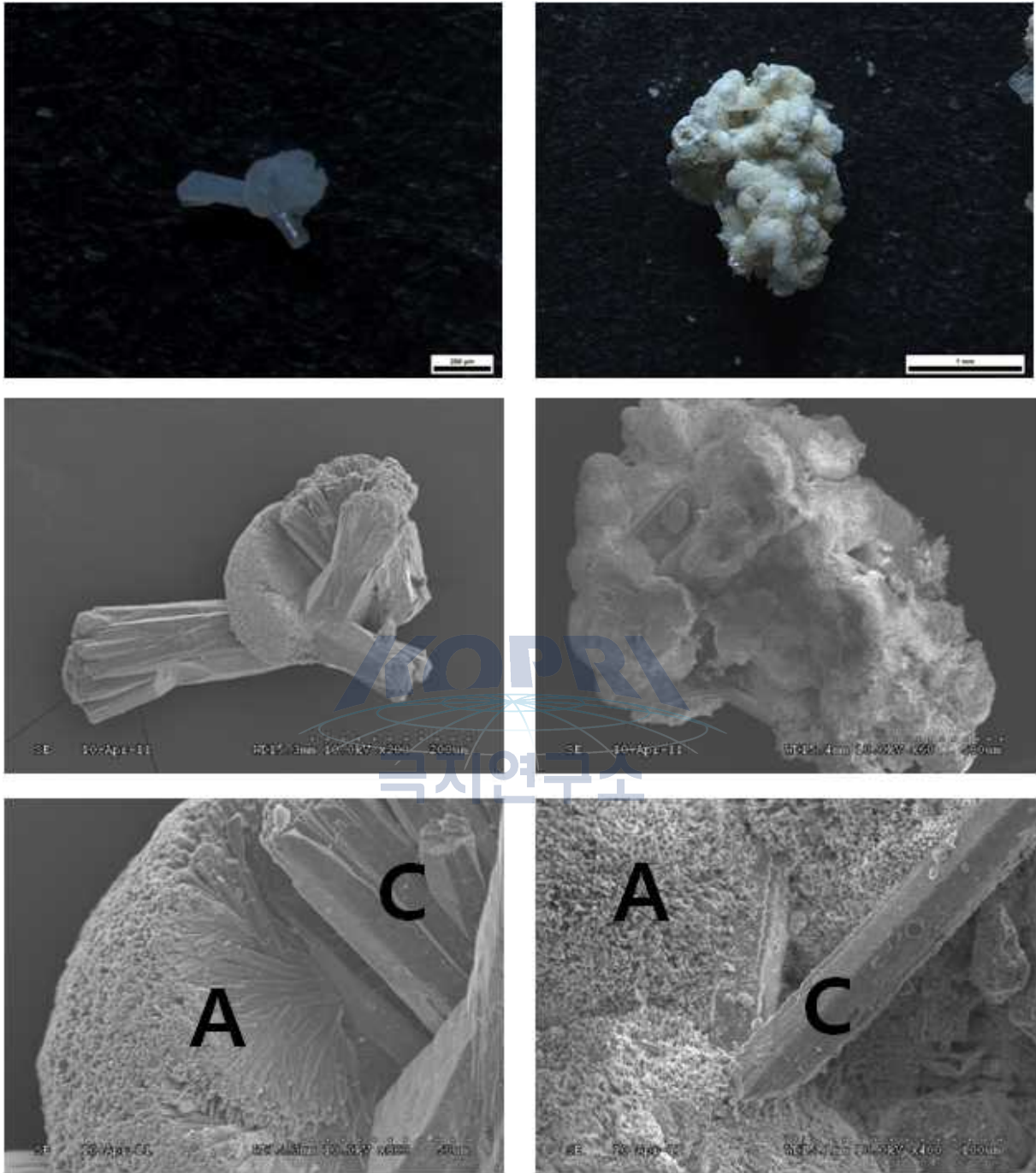


Figure 19. Formation of aragonite (A) after calcite (C).

Table 4. The EDAX data for calcite crystals.

Element	Series	un.	norm.	Atom.	Atom.	CError	(Signal)	Element	Series	un.	norm.	Atom.	Atom.	CError	(Signal)	Element	Series	un.	norm.	Atom.	Atom.	CError	(Signal)	Element	Series	un.	norm.	Atom.	Atom.	CError	(Signal)								
(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)										
Carbon	Kseries	10.69	11.78	27.42	4.5	0.87	1.0	Carbon	Kseries	10.69	11.78	27.42	4.5	0.87	1.0	Carbon	Kseries	10.69	11.78	27.42	4.5	0.87	1.0	Carbon	Kseries	10.69	11.78	27.42	4.5	0.87	1.0								
Oxygen	Kseries	30.25	33.35	49.76	18.79	0.95	1.0	Oxygen	Kseries	30.25	33.35	49.76	18.79	0.95	1.0	Oxygen	Kseries	30.25	33.35	49.76	18.79	0.95	1.0	Oxygen	Kseries	30.25	33.35	49.76	18.79	0.95	1.0	Oxygen	Kseries	30.25	33.35	49.76	18.79	0.95	1.0
Sodium	Kseries	1.04	1.14	1.19	0.65	0.02	1.0	Sodium	Kseries	1.04	1.14	1.19	0.65	0.02	1.0	Sodium	Kseries	1.04	1.14	1.19	0.65	0.02	1.0	Sodium	Kseries	1.04	1.14	1.19	0.65	0.02	1.0	Sodium	Kseries	1.04	1.14	1.19	0.65	0.02	1.0
Magnesium	Kseries	1.84	1.48	1.46	0.44	0.04	1.0	Magnesium	Kseries	1.84	1.48	1.46	0.44	0.04	1.0	Magnesium	Kseries	1.84	1.48	1.46	0.44	0.04	1.0	Magnesium	Kseries	1.84	1.48	1.46	0.44	0.04	1.0	Magnesium	Kseries	1.84	1.48	1.46	0.44	0.04	1.0
Aluminum	Kseries	1.02	1.08	1.22	0.97	0.07	1.0	Aluminum	Kseries	1.02	1.08	1.22	0.97	0.07	1.0	Aluminum	Kseries	1.02	1.08	1.22	0.97	0.07	1.0	Aluminum	Kseries	1.02	1.08	1.22	0.97	0.07	1.0	Aluminum	Kseries	1.02	1.08	1.22	0.97	0.07	1.0
Calcium	Kseries	30.81	34.12	20.82	3.02	0.02	1.0	Calcium	Kseries	30.81	34.12	20.82	3.02	0.02	1.0	Calcium	Kseries	30.81	34.12	20.82	3.02	0.02	1.0	Calcium	Kseries	30.81	34.12	20.82	3.02	0.02	1.0	Calcium	Kseries	30.81	34.12	20.82	3.02	0.02	1.0
Palladium	Lseries	3.65	4.09	9.9	0.62	0.04	1.0	Palladium	Lseries	3.65	4.09	9.9	0.62	0.04	1.0	Palladium	Lseries	3.65	4.09	9.9	0.62	0.04	1.0	Palladium	Lseries	3.65	4.09	9.9	0.62	0.04	1.0	Palladium	Lseries	3.65	4.09	9.9	0.62	0.04	1.0
Tungsten	Lseries	7.89	8.48	1.1	1.16	0.06	1.0	Tungsten	Lseries	7.89	8.48	1.1	1.16	0.06	1.0	Tungsten	Lseries	7.89	8.48	1.1	1.16	0.06	1.0	Tungsten	Lseries	7.89	8.48	1.1	1.16	0.06	1.0	Tungsten	Lseries	7.89	8.48	1.1	1.16	0.06	1.0
Strontium	Lseries	0.65	0.72	0.2	0.08	0.02	1.0	Strontium	Lseries	0.65	0.72	0.2	0.08	0.02	1.0	Strontium	Lseries	0.65	0.72	0.2	0.08	0.02	1.0	Strontium	Lseries	0.65	0.72	0.2	0.08	0.02	1.0	Strontium	Lseries	0.65	0.72	0.2	0.08	0.02	1.0
Gold	Lseries	3.19	3.52	0.43	0.99	0.09	1.0	Gold	Lseries	3.19	3.52	0.43	0.99	0.09	1.0	Gold	Lseries	3.19	3.52	0.43	0.99	0.09	1.0	Gold	Lseries	3.19	3.52	0.43	0.99	0.09	1.0	Gold	Lseries	3.19	3.52	0.43	0.99	0.09	1.0
Total		99.71	100	100	100	100	1.0	Total		99.71	100	100	100	100	1.0	Total		99.71	100	100	100	100	100	Total		99.71	100	100	100	100	1.0								



Table 5. The EDAX data for aragonite crystals.

Element	Series	un.	Cnorm.	Atom.	Cnorm.	Atom.	Cnorm.	Atom.	Cnorm.	Atom.	Cnorm.	Atom.	Cnorm.	Atom.	Cnorm.	Atom.	Cnorm.	Atom.	Cnorm.	Atom.	
		(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	
Carbon	Kseries	4.36	4.64	3.79	4.27																
Oxygen	Kseries	35.42	40.32	61.14	25.09																
Sodium	Kseries	0.68	0.78	0.82	0.32																
Calcium	Kseries	38.71	44.06	26.67	3.66																
Palladium	Lseries	2.65	2.79	0.64	0.65																
Gold	Lseries	0	0	0	0																
Strontium	Lseries	0.34	0.38	0.11	0.19																
Magnesium	Kseries	0	0	0	0																
Total		87.85	100	100	0																
Carbon	Kseries	11.7	11.85	21.86	8.52																
Oxygen	Kseries	37.33	40.99	55	21.14																
Sodium	Kseries	34.5	33.89	20.28	1.3																
Palladium	Lseries	2.39	2.51	0.51	0.44																
Silicon	Kseries	0.61	0.67	0.51	0.21																
Gold	Lseries	0.33	0.33	0.25	1.08																
Strontium	Lseries	0.86	0.94	0.33	0.39																
Magnesium	Kseries	0.04	0.05	0.04	0.04																
Total		91.06	100	100	0																
Carbon	Kseries	5.86	6.34	14.01	5.89																
Oxygen	Kseries	31.63	34.7	50.85	19.68																
Sodium	Kseries	0.71	0.8	0.89	0.31																
Calcium	Kseries	36.93	40.51	26.03	3.55																
Palladium	Lseries	2.79	3.06	0.74	0.52																
Tungsten	Lseries	1.04	1.12	0.08	1.13																
Gold	Lseries	4.05	4.44	0.58	1.14																
Magnesium	Kseries	0.18	0.2	0.21	0.17																
Strontium	Lseries	1.86	2.02	0.6	0.46																
Total		91.15	100	100	0																
Carbon	Kseries	5.98	6.41	14.01	5.89																
Oxygen	Kseries	31.63	34.7	50.85	19.68																
Sodium	Kseries	0.71	0.8	0.89	0.31																
Calcium	Kseries	36.93	40.51	26.03	3.55																
Palladium	Lseries	2.79	3.06	0.74	0.52																
Tungsten	Lseries	1.04	1.12	0.08	1.13																
Gold	Lseries	4.05	4.44	0.58	1.14																
Magnesium	Kseries	0.18	0.2	0.21	0.17																
Strontium	Lseries	1.86	2.02	0.6	0.46																
Total		91.15	100	100	0																

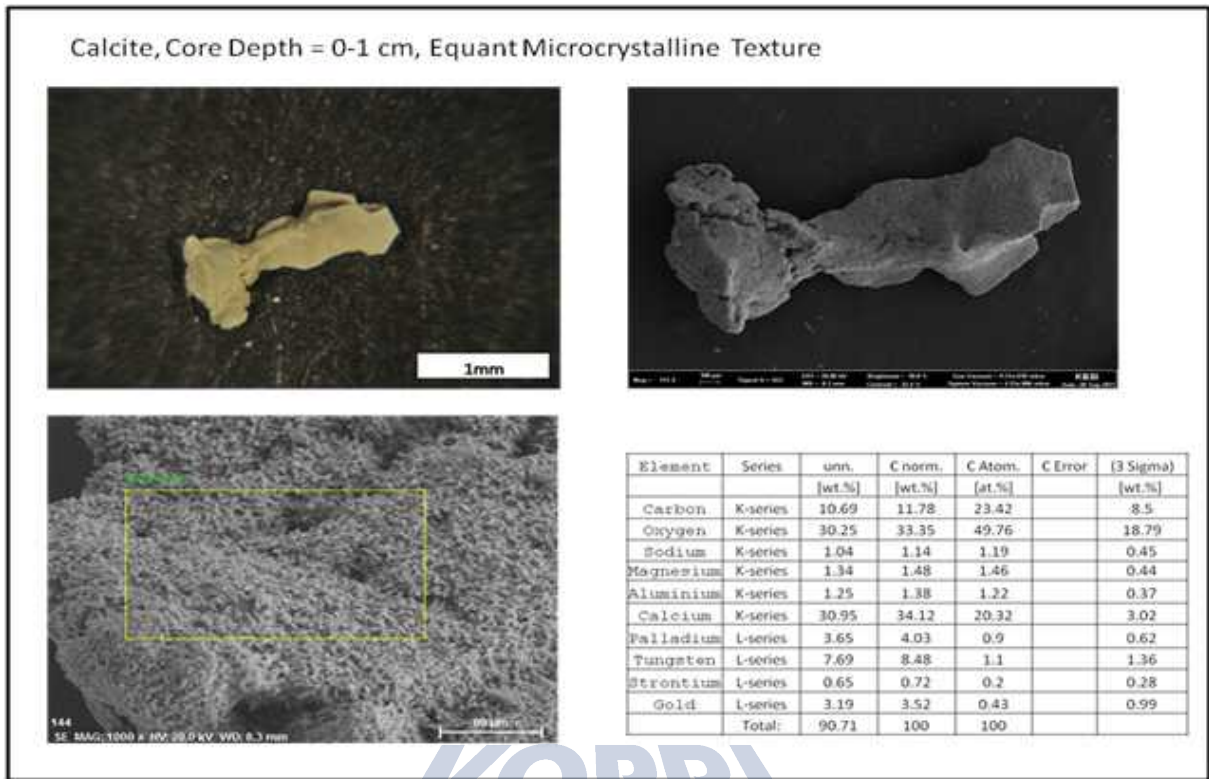
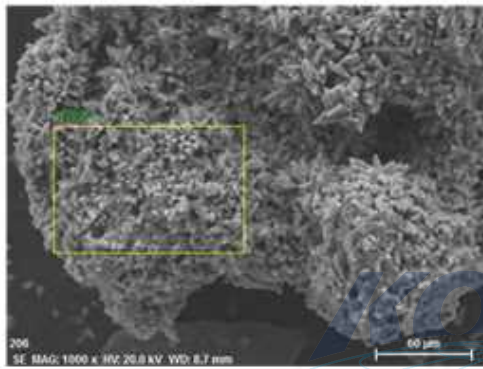
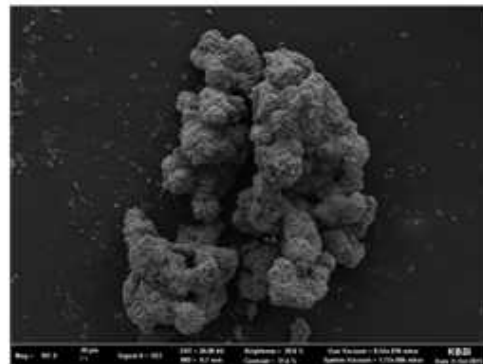


Figure 20. Equant microcrystalline calcite texture with EDAX data.



Calcite, Core Depth = 5-6 cm, Equant Micro Crystalline Texture

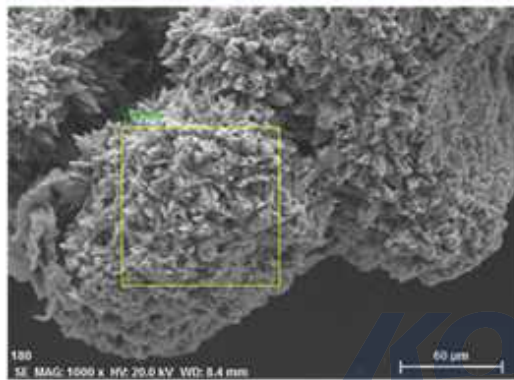
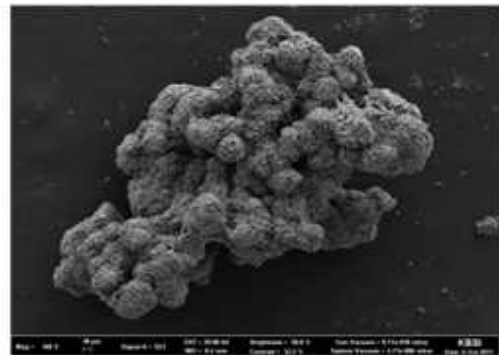
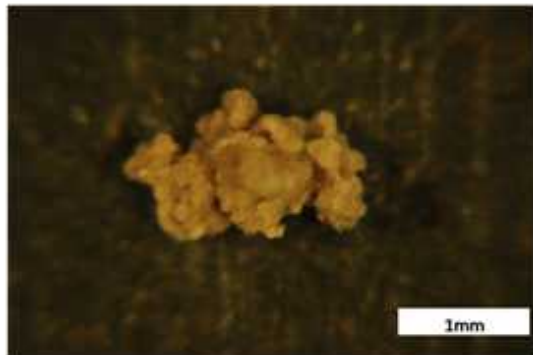


Element	Series	un.	C norm.	C Atom.	C Error	(3 Sigma)
		[wt. %]	[wt. %]	[at. %]		[wt. %]
Carbon	K-series	6.81	7.74	14.77		6.6
Oxygen	K-series	35.38	40.21	57.65		20.51
Sodium	K-series	0.86	0.98	0.97		0.4
Magnesium	K-series	1.45	1.65	1.56		0.45
Aluminium	K-series	2.02	2.3	1.96		0.49
Silicon	K-series	4.12	4.68	3.82		0.72
Calcium	K-series	25.3	28.75	16.46		2.51
Iron	K-series	1.82	2.06	0.85		0.46
Palladium	L-series	2.93	3.33	0.72		0.54
Gold	L-series	5.59	6.35	0.74		1.39
Strontium	L-series	1.71	1.94	0.51		0.45
Total:		87.97	100	100		

Figure. 21. Equant microcrystalline calcite texture with EDAX data.



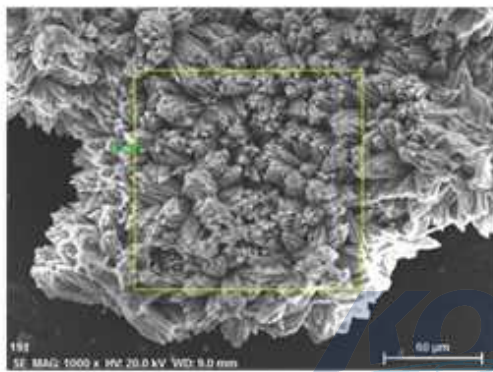
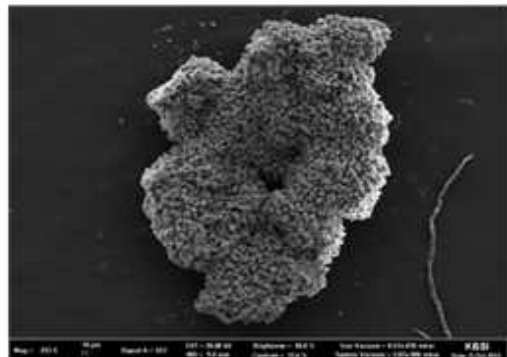
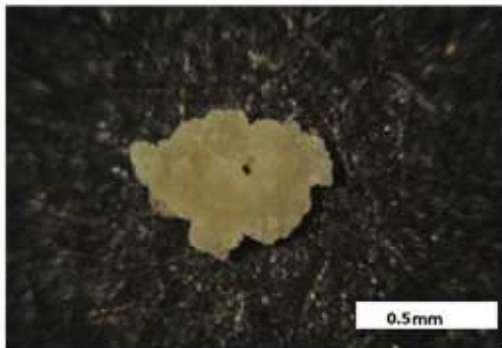
Calcite, Core Depth = 2-3 cm, Spherulitic Equant Texture



Element	Series	unn.	Cnorm.	C Atom.	C Error	(3 Sigma)
		[wt. %]	[wt.%]	[at.%]		[wt.%]
Carbon	K-series	3.53	4.27	8.65		4.16
Oxygen	K-series	33.75	40.75	61.96		20.89
Magnesium	K-series	0.68	0.82	0.82		0.27
Silicon	K-series	0.69	0.83	0.72		0.22
Calcium	K-series	35.43	42.79	25.97		3.43
Iron	K-series	0.77	0.93	0.4		0.33
Palladium	L-series	2.27	2.74	0.63		0.45
Gold	L-series	5.66	6.83	0.84		1.36
Strontium	L-series	0.04	0.04	0.01		0.03
Total:		82.81	100	100		

Figure 22. Spherulitic equant calcite texture with EDAX data.

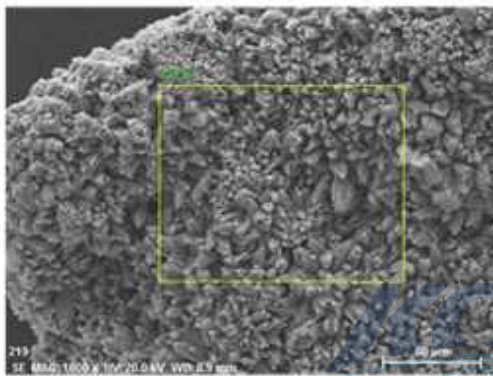
Calcite, Core Depth = 4-5 cm, Spherulitic Equant Texture



Element	Series	unn.	C norm.	C Atom.	C Error	(3 Sigma)
		[wt. %]	[wt.%]	[at.%]		[wt.%]
Carbon	K-series	6.95	6.36	12.72		6.71
Oxygen	K-series	43.55	39.86	59.86		26.39
Calcium	K-series	42.94	39.29	23.56		4.11
Palladium	L-series	2.98	2.72	0.61		0.56
Magnesium	K-series	1.36	1.24	1.23		0.44
Sodium	K-series	0.83	0.76	0.79		0.39
Zirconium	L-series	0.03	0.03	0.01		0.03
Tungsten	L-series	3.9	3.57	0.47		1.04
Strontium	L-series	0	0	0		0
Gold	L-series	6.74	6.17	0.75		1.8
Total		109.28	100	100		

Figure 23. Spherulitic equant calcite texture with EDAX data.

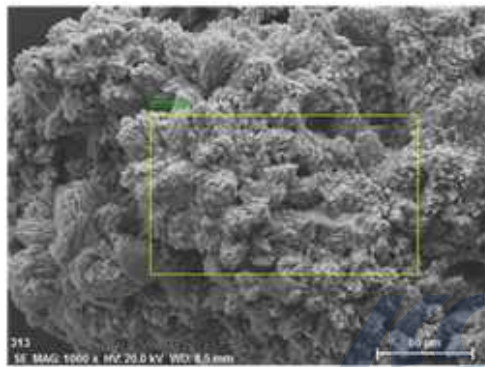
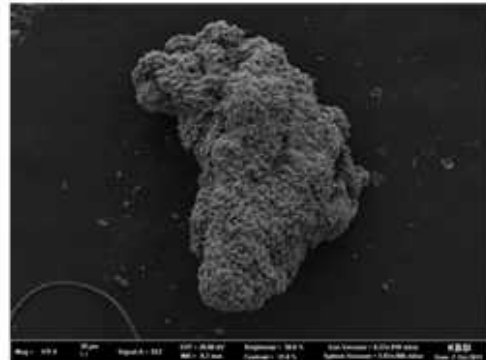
Calcite, Core Depth = 7-8 cm, Spherulitic Equant Texture



Element	Series	unn.	C norm.	C Atom.	C Error	(3 Sigma)
		[wt. %]	[wt. %]	[at. %]		[wt. %]
Carbon	K-series	9.13	8.57	16.88		8.13
Oxygen	K-series	39.29	36.91	54.56		25.32
Magnesium	K-series	1.69	1.59	1.55		0.54
Silicon	K-series	0.5	0.47	0.39		0.22
Calcium	K-series	45.07	42.33	24.98		4.32
Palladium	L-series	3.43	3.22	0.72		0.63
Gold	L-series	6.74	6.33	0.76		1.68
Strontium	L-series	0.61	0.58	0.16		0.29
Total		106.46	100	100		

Figure 24. Spherulitic equant calcite texture with EDAX data.

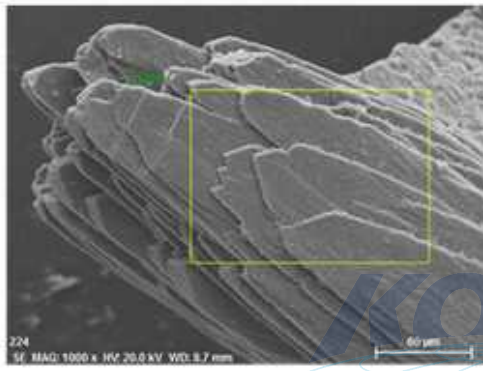
Calcite, Core Depth = 8-9 cm, Spherulitic Equant Texture



Element	Series	um.	C nom.	C Atom	C Error	(3 Sigma)
		[wt. %]	[wt %]	[at %]		[wt %]
Carbon	K-series	11.49	12.16	23.98		9.25
Oxygen	K-series	37.14	39.29	53.3		20.52
Sodium	K-series	1.65	1.75	1.65		0.57
Magnesium	K-series	1.41	1.49	1.33		0.44
Aluminium	K-series	2.95	3.32	2.51		0.63
Silicon	K-series	4.51	4.78	3.69		0.76
Chlorine	K-series	0.78	0.82	0.5		0.24
Potassium	K-series	0.98	1.01	0.57		0.26
Calcium	K-series	20.98	21.19	32.61		2.32
Iron	K-series	1.86	1.97	0.77		0.45
Palladium	L-series	2.53	2.66	0.54		0.48
Tungsten	L-series	4.6	4.87	0.57		0.96
Gold	L-series	2.75	2.91	0.32		0.89
Strontium	L-series	0.92	0.97	0.24		0.33
Total		84.53	100	100		

Figure 25. Spherulitic equant calcite texture with EDAX data.

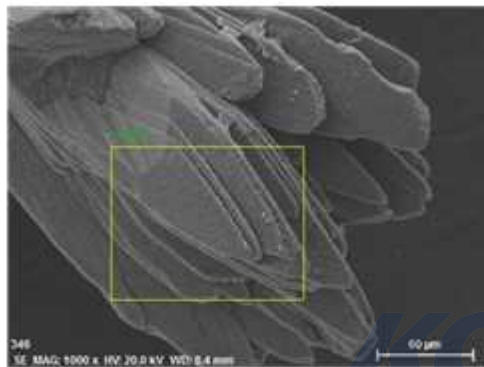
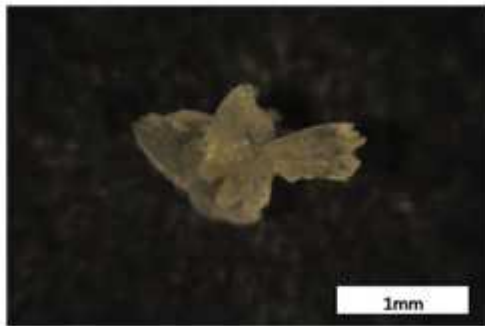
Calcite, Core Depth = 7-8 cm, Foliated Texture



Element	Series	unn.	Cnorm.	CAtom.	CError	(3 Sigma)
		[wt. %]	[wt.%]	[at.%]		[wt.%]
Carbon	K-series	6.94	7.39	14.7		6.05
Oxygen	K-series	36.02	38.37	57.27		22.3
Calcium	K-series	41.52	44.23	26.35		3.93
Palladium	L-series	3.25	3.47	0.78		0.55
Gold	L-series	5.8	6.18	0.75		1.49
Magnesium	K-series	0.08	0.09	0.09		0.13
Strontium	L-series	0.25	0.27	0.07		0.18
Total:		93.87	100	100		

Figure 26. Foliated calcite texture with EDAX data.

Calcite, Core Depth = 12-13 cm, Foliated Texture

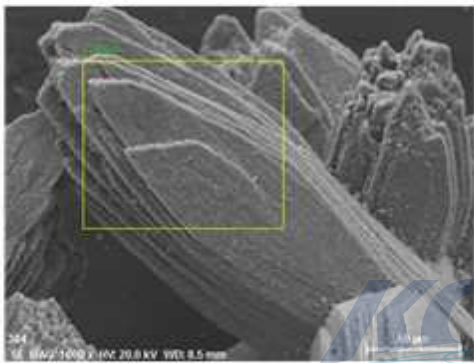
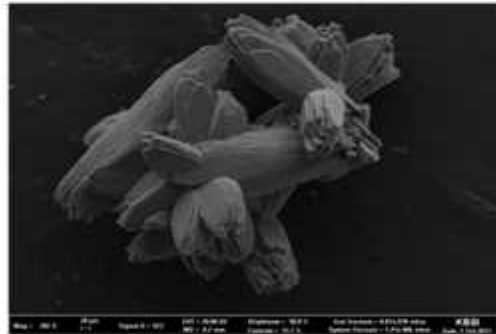
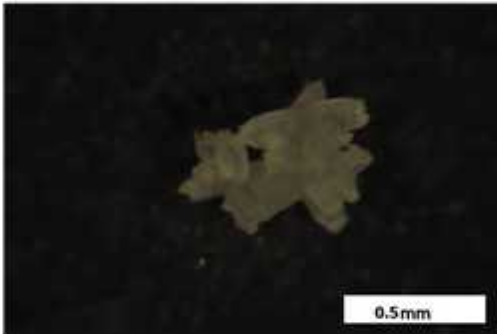


Element	Series	unn.	C norm.	C Atom.	C Error	(3 Sigma)
		[wt. %]	[wt. %]	[at. %]		[wt. %]
Carbon	K-series	5.63	6.59	13.54		5.58
Oxygen	K-series	30.24	35.41	54.59		20.79
Calcium	K-series	42.14	49.35	30.37		4.02
Palladium	L-series	2.44	2.86	0.66		0.48
Gold	L-series	4.73	5.54	0.69		1.33
Magnesium	K-series	0.08	0.09	0.09		0.13
Strontium	L-series	0.14	0.17	0.05		0.16
Total:		85.41	100	100		

Figure 27. Foliated calcite texture with EDAX data.



Calcite, Core Depth = 17-18 cm, Foliated Texture

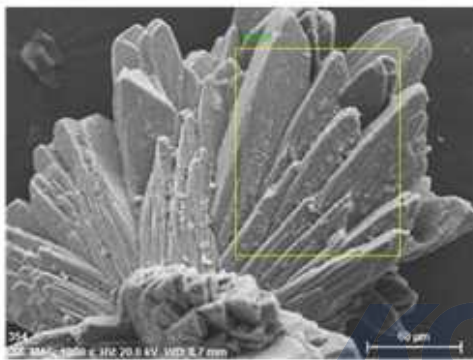
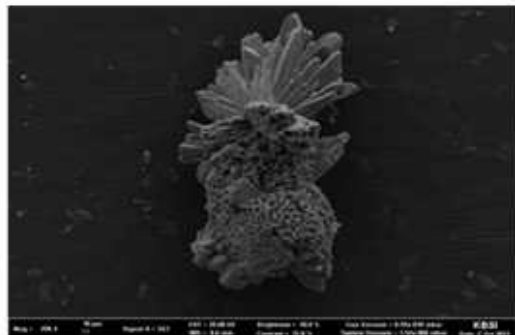


Element	Series	unn.	Cnorm.	CAtom.	C Error	(3 Sigma)
		[wt. %]	[wt.%]	[at.%]		[wt.%]
Carbon	K-series	10.66	12.24	21.65		7.7
Oxygen	K-series	37.28	42.82	56.84		21.42
Silicon	K-series	0.71	0.82	0.62		0.22
Calcium	K-series	32.59	37.44	19.84		3.11
Palladium	L-series	1.95	2.24	0.45		0.39
Gold	L-series	3.6	4.14	0.45		1.03
Magnesium	K-series	0.12	0.14	0.12		0.14
Strontium	L-series	0.14	0.16	0.04		0.14
Total:		87.07	100	100		

Figure 28. Foliated calcite texture with EDAX data.



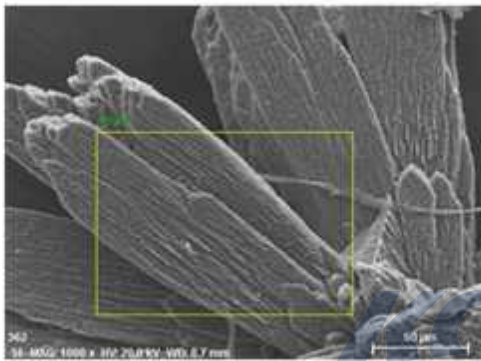
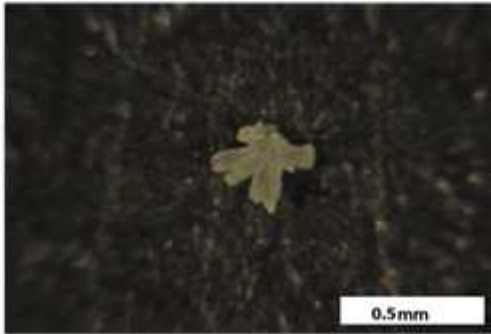
Calcite, Core Depth = 13-14 cm, Spirally stacked foliated texture



Element	Series	unn. [wt.%]	C norm. [wt.%]	C Atom. [at.%]	C Error	[3 Sigma] [wt.%]
Carbon	K-series	6.99	7.73	14.78		5.93
Oxygen	K-series	37.19	41.09	58.99		21.6
Sodium	K-series	0.65	0.72	0.72		0.3
Silicon	K-series	0.41	0.46	0.37		0.17
Calcium	K-series	37.59	41.52	23.8		3.56
Palladium	L-series	2.03	2.25	0.49		0.4
Gold	L-series	4.84	5.35	0.62		1.21
Magnesium	K-series	0	0	0		0
Strontium	L-series	0.80	0.88	0.23		0.27
Total:		90.51	100	100		

Figure 29. Spirally stacked foliated calcite texture with EDAX data.

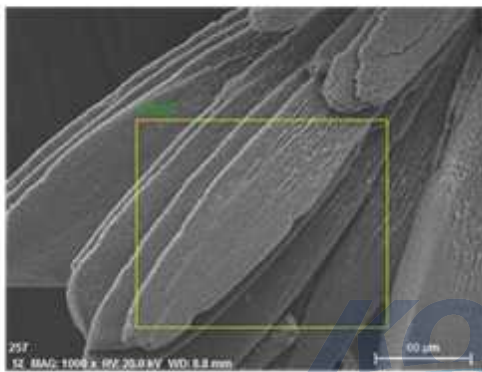
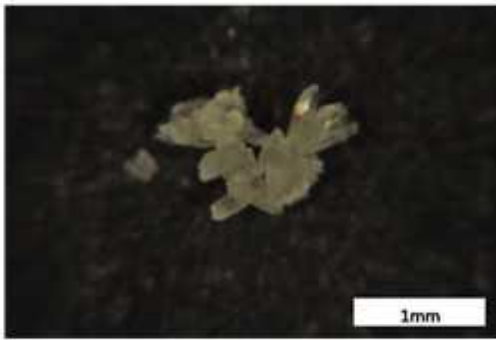
Calcite, Core Depth = 14-15 cm, Spirally stacked foliated texture



Element	Series	unn.	C norm.	C Atom.	C Error	(3 Sigma)
		[wt. %]	[wt.%]	[at.%]		[wt.%]
Carbon	K-series	7.32	7.26	15.24		7.39
Oxygen	K-series	32.28	31.99	50.45		23.75
Silicon	K-series	0.79	0.78	0.7		0.29
Calcium	K-series	50.49	50.03	31.5		4.85
Palladium	L-series	3.96	3.92	0.93		0.72
Gold	L-series	5.35	5.3	0.68		1.52
Magnesium	K-series	0.4	0.4	0.41		0.27
Strontium	L-series	0.34	0.33	0.1		0.24
Total:		100.92	100	100		

Figure 30. Spirally stacked foliated calcite texture with EDAX data.

Calcite, Core Depth = 30-31 cm, Spirally stacked foliated texture



Element	Series	unn.	C norm.	C Atom.	C Error	(3 Sigma)
		[wt. %]	[wt.%]	[at.%]		[wt.%]
Carbon	K-series	8.17	8.42	15.79		6.71
Oxygen	K-series	40.91	42.15	59.33		24.29
Calcium	K-series	41.12	42.36	23.81		3.89
Palladium	L-series	2.05	2.11	0.45		0.41
Gold	L-series	4.52	4.65	0.53		1.26
Magnesium	K-series	0.02	0.02	0.02		0.03
Strontium	L-series	0.27	0.28	0.07		0.18
Total:		97.06	100	100		

Figure 31. Spirally stacked foliated calcite texture with EDAX data.

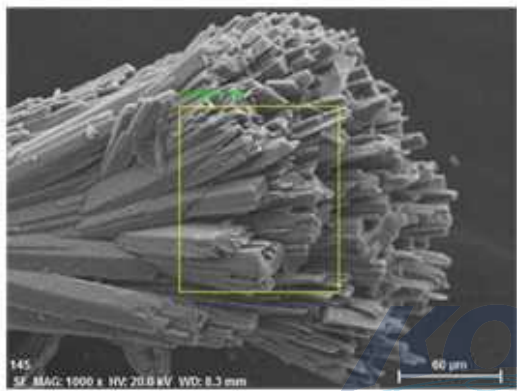
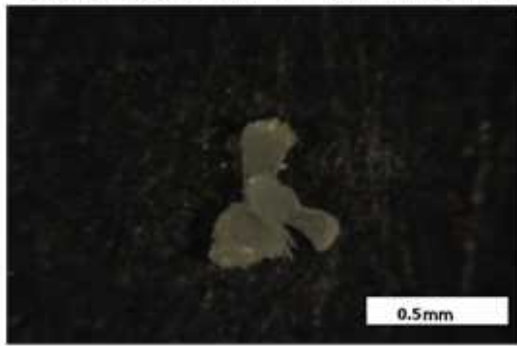
Calcite, Core Depth = 37-38 cm, Spirally stacked foliated texture



Element	Series	un.	Cnorm.	C Atom.	C Error	(3 Sigma)
		[wt. %]	[wt. %]	[at. %]		[wt. %]
Carbon	K-series	10.21	10.41	19.31		8.11
Oxygen	K-series	40.3	41.09	57.22		24.55
Calcium	K-series	39.04	39.81	22.13		3.74
Palladium	L-series	2.74	2.79	0.58		0.51
Gold	L-series	5.55	5.66	0.64		1.46
Strontium	L-series	0.16	0.16	0.04		0.16
Magnesium	K-series	0.07	0.08	0.07		0.13
Total:		98.07	100	100		

Figure 32. Spirally stacked foliated calcite texture with EDAX data.

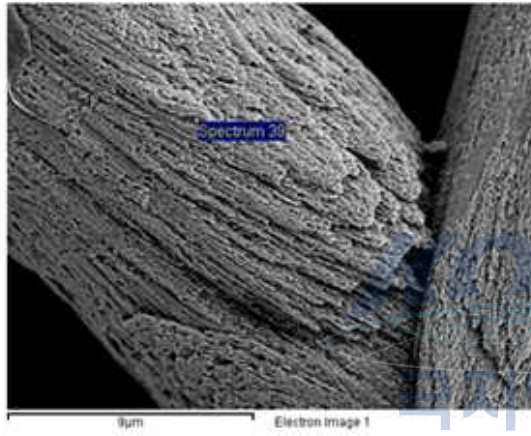
Calcite, Core Depth = 0-1 cm, Randomly bladed texture



Element	Series	un.	C norm.	C Atom.	C Error	(3-Sigma)
		[wt.%]	[wt.%]	[at.%]		[wt.%]
Carbon	K-series	5.37	5.66	11.61		5.57
Oxygen	K-series	35.35	37.26	57.41		23.32
Silicon	K-series	0.15	0.15	0.13		0.13
Calcium	K-series	45.31	47.76	29.38		4.32
Palladium	L-series	2.44	2.57	0.59		0.48
Gold	L-series	5.98	6.3	0.79		1.54
Strontium	L-series	0.28	0.29	0.08		0.19
Magnesium	K-series	0	0	0		0
Total:		94.87	100	100		

Figure 33. Randomly oriented bladed calcite texture with EDAX data.

Calcite, Depth= 11-12 cm, Bladed texture with etched surface



Element	Weight%	Atomic%
CK	10.02	16.84
OK	48.87	61.7
Na K	0.3	0.26
Mg K	0.67	0.56
Si K	1.08	0.77
SK	1.61	1.02
Ca K	37.37	18.83
Sr L	0.09	0.02
Totals	100	

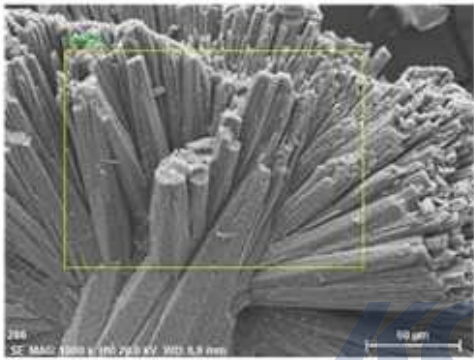
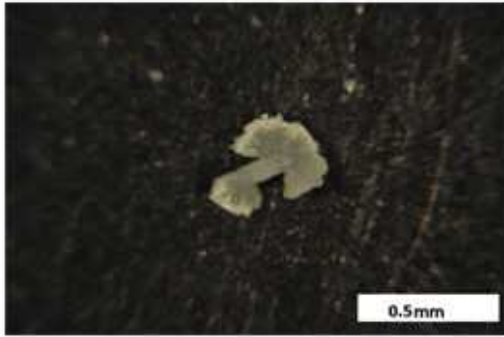
Figure. 34. Bladed calcite texture with etched surface with EDAX data.

Table 6. The occurrence of calcite texture types with core depth.

Serial no	Depth	Calcite				
		Foliated texture	Randomly bladed texture	Spherulitic fibrous texture	Equant to Spherulitic equant	Etched surface
1	0-1 cm	x	x	x	x	
2	1-2 cm	x			x	x
3	2-3 cm	x			x	
4	3-4 cm	x	x			
5	4-5 cm	x			x	
6	5-6 cm	x			x	
7	6-7 cm					x
8	7-8 cm	x			x	
9	8-9 cm				x	
10	9-10 cm					
11	10-11 cm				x	
12	11-12 cm					x
13	12-13 cm	x				
14	13-14 cm			x		
15	14-15 cm			x		
16	15-16 cm					
17	16-17 cm					
18	17-18 cm	x				
19	18-19 cm					
20	19-20 cm					
21	20-21 cm					
22	21-22 cm					
23	22-23 cm					
24	23-24 cm				x	
25	24-25 cm					
26	25-26 cm					
27	26-27 cm	x				
28	27-28 cm					
29	28-29 cm			x		
30	29-30 cm	x				
31	30-31 cm	x				
32	31-32 cm					
33	32-33 cm					
34	33-34 cm					
35	34-35 cm				x	
36	35-36 cm					
37	36-37 cm					
38	37-38 cm			x		
39	38-39 cm					



Aragonite, Core Depth = 26-27 cm, Radiating fibrous texture



Element	Series	unn.	C norm.	C Atom.	C Error	(3 Sigma)
		[wt. %]	[wt. %]	[at. %]		[wt. %]
Carbon	K-series	8.34	8.19	17.86		7.56
Oxygen	K-series	30.64	30.08	49.25		20.89
Sodium	K-series	0.66	0.65	0.74		0.35
Calcium	K-series	45.58	44.76	29.25		4.35
Palladium	L-series	4.33	4.25	1.05		0.72
Tungsten	L-series	4.02	3.95	0.56		1.06
Gold	L-series	7.05	6.92	0.92		1.72
Magnesium	K-series	0	0	0		0
Strontium	L-series	1.22	1.2	0.36		0.38
Total:		101.84	100	100		

Figure 35. Fibrous aragonite texture with EDAX data.

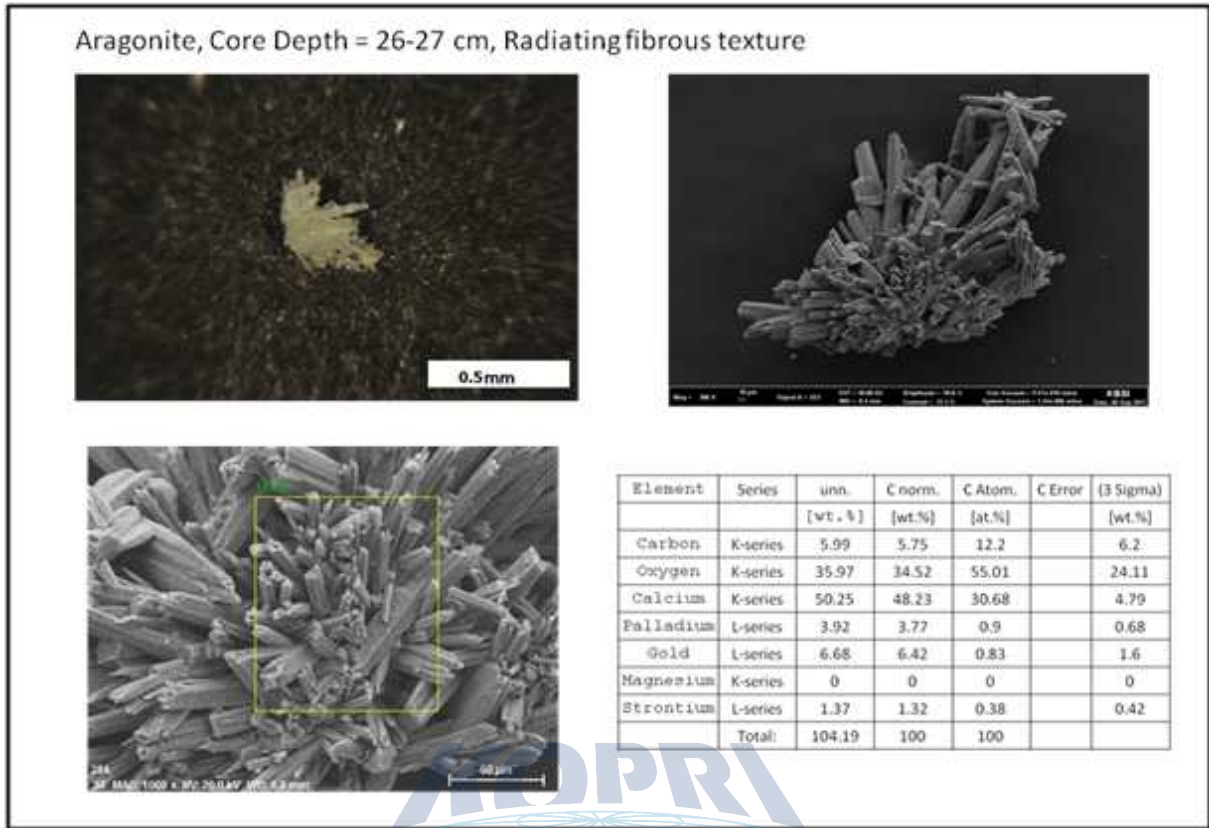
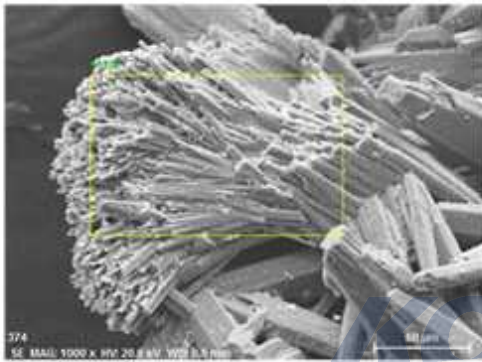
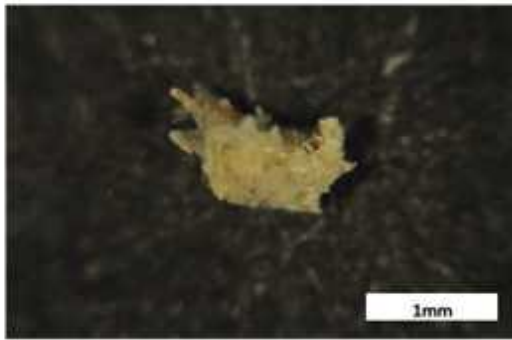


Figure 36. Fibrous aragonite texture with EDAX data.

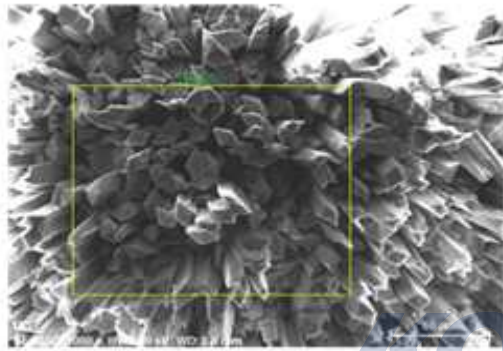
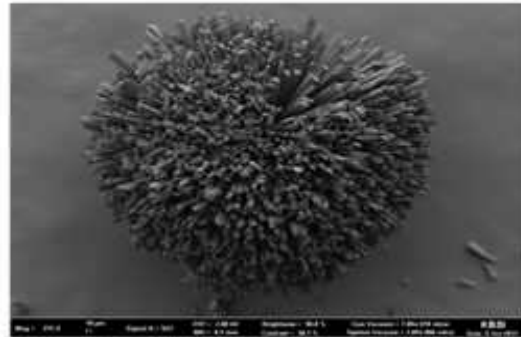
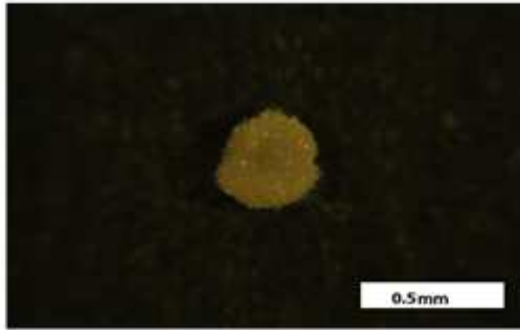
Aragonite, Core Depth = 15-16 cm, Randomly oriented fibrous texture



Element	Series	unn. [wt. %]	C norm. [wt.%]	C Atom. [at.%]	C Error	(3 Sigma) [wt.%]
Carbon	K-series	8.28	9.62	18.94		6.53
Oxygen	K-series	33	38.34	56.67		18.67
Sodium	K-series	1.07	1.25	1.28		0.41
Calcium	K-series	30.23	35.11	20.72		2.9
Palladium	L-series	2.21	2.56	0.57		0.42
Tungsten	L-series	7.75	9	1.16		1.27
Magnesium	K-series	0.03	0.04	0.04		0.03
Strontium	L-series	0.8	0.92	0.25		0.27
Gold	L-series	2.72	3.16	0.38		0.82
Total:		86.09	100	100		

Figure 37. Fibrous aragonite texture with EDAX data.

Aragonite, Core Depth = 2-3 cm, Spherulitic fibrous texture

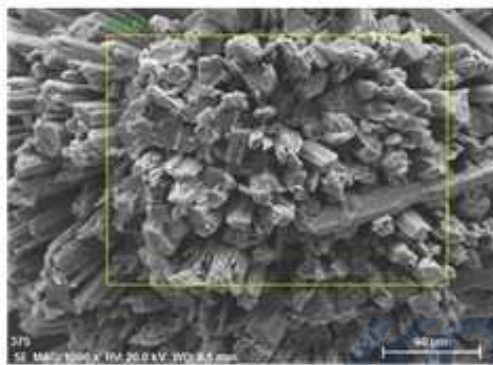
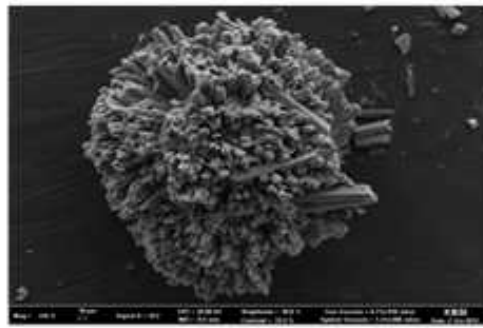
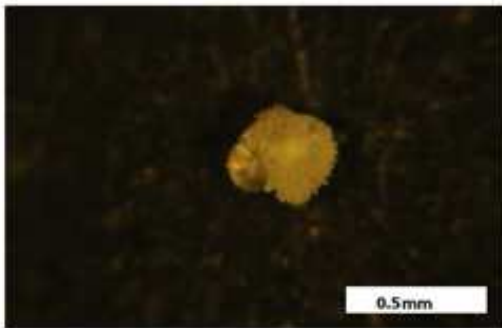


Element	Series	um.	C.norm.	C.Atom.	C.Error	(3 Sigma)
		[wt. %]	[wt.%]	[at.%]		[wt.%]
Carbon	K-series	5.99	5.21	10.41		6.71
Oxygen	K-series	45.54	39.57	59.42		30.78
Calcium	K-series	55.52	48.25	28.92		5.32
Palladium	L-series	2.84	2.47	0.56		0.59
Gold	L-series	4.13	3.59	0.44		1.3
Strontium	L-series	1.06	0.92	0.25		0.39
Magnesium	K-series	0	0	0		0
	Total:	115.08	100	100		

Figure 38. Spherulitic fibrous aragonite texture with EDAX data.



Aragonite, Core Depth = 15-16 cm, Spherulitic fibrous texture

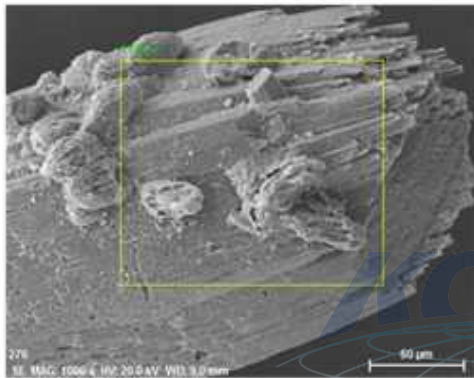
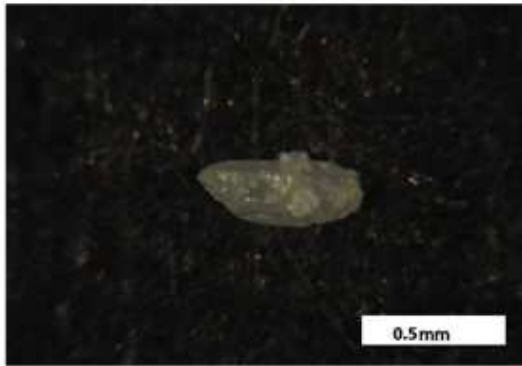


Element	Series	un. [wt. %]	C norm. [wt.%]	C Atom. [at.%]	C Error (3 Sigma) [wt.%]
Carbon	K-series	11.28	11.07	21.69	9.51
Oxygen	K-series	35.38	34.7	51.07	23.68
Calcium	K-series	43.89	43.05	25.29	4.24
Palladium	L-series	2.91	2.86	0.63	0.58
Tungsten	L-series	4.36	4.27	0.55	1.04
Magnesium	K-series	0.15	0.15	0.14	0.17
Strontium	L-series	1.09	1.06	0.29	0.38
Gold	L-series	2.89	2.84	0.34	0.98
Total:		101.96	100	100	

Figure 39. Spherulitic fibrous aragonite texture with EDAX data.



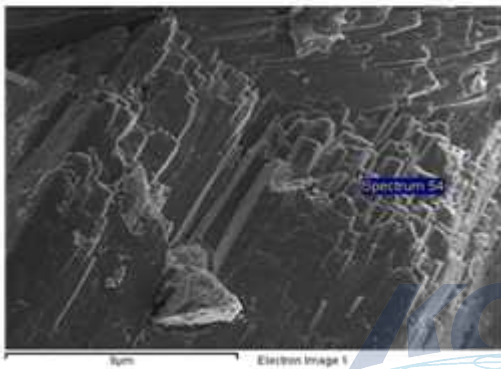
Aragonite, Core Depth = 25-26 cm, Bladed texture



Element	Series	unn.	Cnorm.	C Atom.	C Error	(3 Sigma)
		[wt. %]	[wt. %]	[at. %]		[wt. %]
Carbon	K-series	9.89	11.06	23.66		8.16
Oxygen	K-series	25.89	28.96	46.52		17.14
Sodium	K-series	0.85	0.95	1.06		0.39
Calcium	K-series	34.89	39.03	25.02		3.39
Palladium	L-series	3.99	4.46	1.08		0.67
Tungsten	L-series	7.64	8.55	1.19		1.35
Gold	L-series	4.76	5.32	0.69		1.21
Magnesium	K-series	0.33	0.37	0.39		0.21
Strontium	L-series	1.17	1.3	0.38		0.36
Total:		89.41	100	100		

Figure 40. bladed aragonite texture with EDAX data.

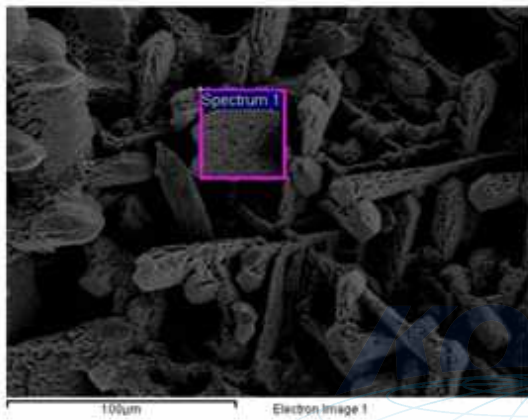
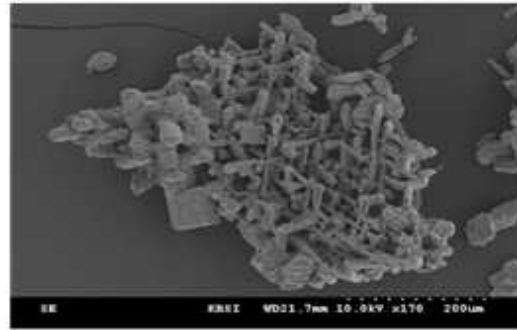
Aragonite, Core Depth = 28-29 cm, Bladed texture



Element	Weight%	Atomic%
C K	12.41	18.79
O K	61.00	69.32
Na K	0.07	0.05
Mg K	-0.10	-0.08
Ca K	25.95	11.77
Sr L	0.68	0.14
Totals	100.00	

Figure 41. Bladed aragonite texture with EDAX data.

Aragonite, Core Depth = 28-29 cm, Bladed with etched surface texture



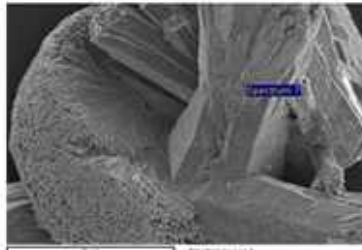
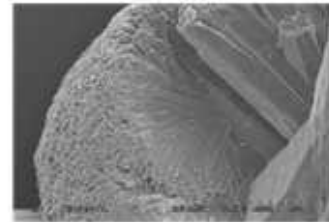
Element	Weight%	Atomic%
O K	47.53	68.00
Mg K	0.37	0.35
Al K	2.74	2.32
Si K	3.15	2.57
Ca K	47.41	27.08
Sr L	-1.20	-0.31
Totals	100.00	

Figure 42. Bladed aragonite texture with EDAX data.

Table 7. The occurrence of aragonite texture types with core depth.

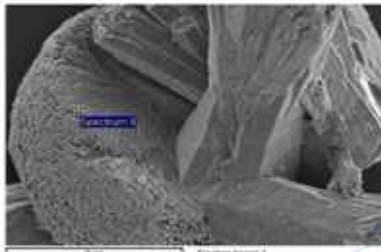
Serial no	Depth	Aragonite			
		Randomly oriented fibrous texture	Spherulitic fibrous texture	Bladed texture	Etched Surface
1	0-1 cm				
2	1-2 cm	x	x		x
3	2-3 cm		x		
4	3-4 cm				
5	4-5 cm				
6	5-6 cm				
7	6-7 cm		x		
8	7-8 cm				
9	8-9 cm				
10	9-10 cm				
11	10-11 cm	x			
12	11-12 cm				
13	12-13 cm				
14	13-14 cm				
15	14-15 cm				
16	15-16 cm	x	x		
17	16-17 cm				
18	17-18 cm				
19	18-19 cm				
20	19-20 cm				
21	20-21 cm				
22	21-22 cm				
23	22-23 cm				
24	23-24 cm	x			
25	24-25 cm				
26	25-26 cm				
27	26-27 cm	x	x		
28	27-28 cm				
29	28-29 cm			x	
30	29-30 cm				
31	30-31 cm				
32	31-32 cm				
33	32-33 cm				
34	33-34 cm				
35	34-35 cm				
36	35-36 cm				
37	36-37 cm				
38	37-38 cm				
39	38-39 cm				

Formation of Aragonite after calcite, Core Depth = 26-27 cm



Element	Weight%	Atomic%
C K	23.11	34.74
O K	44.01	49.67
Na K	0.64	0.51
Mg K	0.46	0.34
Ca K	33.54	15.11
Sr L	-1.76	-0.36
Totals	100.00	

Calcite



Element	Weight%	Atomic%
C K	9.52	15.81
O K	52.24	65.10
Na K	0.38	0.33
Mg K	0.16	0.13
Ca K	37.21	18.51
Sr L	0.49	0.11
Totals	100.00	

Aragonite

Figure 43. Spherulitic aragonite growth over the columnar calcite crystals with EDAX data.

Formation of Aragonite after calcite, Core Depth =28-29cm

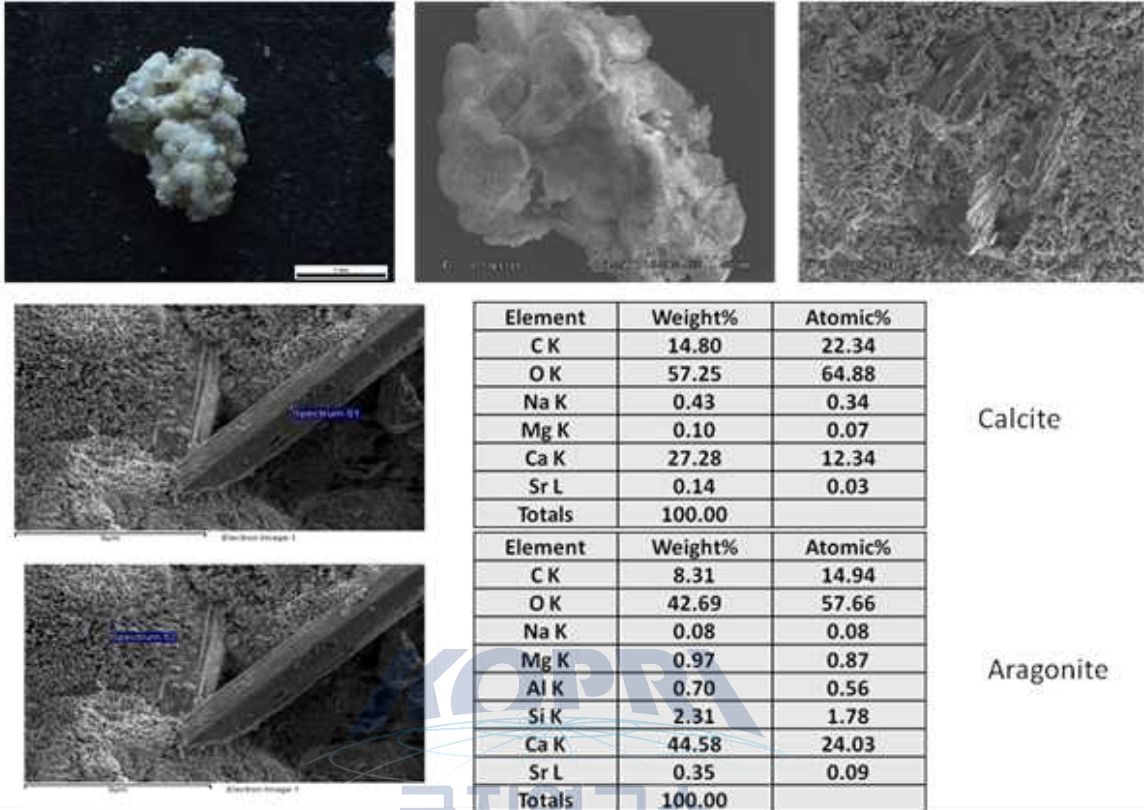


Figure 44. Spherulitic aragonite growth over the columnar calcite crystals with EDAX data.



### 3. 자생 탄산염광물의 탄소 및 산소동위원소 성분

1차 년도에 분석한 안정동위원소 성분에 추가로 자생탄산염광물에 대한 안정동위원소 분석을 실시하였다. 1차년도의 안정동위원소 분석은 실체현미경과 주사전자현미경(with EDAX data)로 분석한 자료를 토대로 시료를 선별하여 시행하였지만(Fig. 45; Table 8), 2차년도 경우에는 모든 시료에 대해 중액분리를 실시하여 아라고나이트와 방해석을 물리적으로 분리한 후에 각각의 시료에 대해 안정동위원소 분석을 실시하였다(Fig. 46, Table 9).

1차년도의 결과와 같이 자생 탄산염광물의 탄소동위원소 값은 +0.5~4.0‰(VPDB)의 거의 비슷한 범위에서 변화하는 것으로 보인다. 탄소동위원소는 산소동위원소와 달리 방해석과 아라고나이트가 거의 비슷한 범위에서 변화하고, 또 산소동위원소보다 좁은 범위에서 변화한다. 자생 탄산염광물의 산소동위원소 값은 매우 다양한 범위를 보여주고 있다(Fig. 46). 특히 일부 시료의 경우 -10‰(VPDB)의 값을 가지는 시료도 나타난다. 몇몇 시료의 산소동위원소 성분이 왜 이렇게 고갈된 값을 보이는지는 확실하지 않다. 하지만 이러한 값을 자연환경에서 정상적으로 침전한 탄산염광물의 값으로 보기는 매우 어렵다. 따라서 -4‰(VPDB) 이하의 값은 제외하고 고려하였다(Fig. 47). -4‰(VPDB) 이상의 값만을 고려할 경우, 자생 탄산염광물의 산소동위원소 값은 -4~+8‰(VPDB)의 범위에서 변화하는 것을 알 수 있다. 산소동위원소 성분이 +8‰(VPDB)의 값을 보이는 것도 아주 부화된 성분으로서 매우 특이한 값이라고 할 수 있다.

### 4. 자생 탄산염광물의 미량원소 성분

자생 탄산염광물의 생성환경에 대한 이해를 좀더 정확히 하기 위해 미량원소 분석을 실시하였다(Table 10). Mg 분석 결과 자생 탄산염광물 중에서 아라고나이트는 약 1000 ppm (1 mole% MgCO<sub>3</sub>) 이하의 값을 보인다. 이미 언급한 바와 같이 아라고나이트는 그 결정구조 상 Mg의 함량이 매우 낮게 나타난다. 하지만 방해석의 Mg 함량은 매우 다양하게 나타난다(Fig. 48). 일부시료는 저마그네슘방해석(Low Mg-calcite, LMC)로 나타나며 이들은 4 mole% MgCO<sub>3</sub> 이하의 Mg 함량을 보여준다. 하지만 일부 시료의 경우 4 mole% MgCO<sub>3</sub> 이상을 나타내는 고마그네슘방해석(HMC)로 나타난다. HMC의 경우 Mg의 mole%가 4-12까지 매우 다양한 값을 보여준다. 이러한 사실은 공극수에서 LMC에서 HMC에 이르기까지 다양한 방해석을 침전할 수 있는 속성환경이 이루어졌음을 의미한다. 특이한 사실은 코아 깊이 1-10cm (혹은 19cm)까지의 얇은 깊이에서는 모두 HMC가 나타나고 그보다 깊은 코아 깊이(>23 cm)에서는 모두 LMC가 나타난다는 사실이다.

Mg과 δ<sup>13</sup>C와의 관계를 보면 HMC로 이루어진 광물들이 모두 상대적으로 높은 탄소동

위원소 성분값(+2.5~+3.5‰)을 가지며, LMC가 상대적으로 더 낮은 탄소동위원소 성분을 보여준다(Fig. 49). 또한 아라고나이트로 이루어진 부분은 더욱 더 낮은 탄소동위원소 성분(+1.0~+2.7‰)의 값을 가진다. 하지만 Mg와  $\delta^{18}\text{O}$ 과의 관계를 보면 HMC와 LMC의 산소동위원소 성분의 거의 비슷하게 나타난다(Fig. 50). 하지만 코아깊이 12(23-24cm)에서 산출되는 아라고나이트와 13(24-25cm)에서 산출되는 방해석 시료가 상대적으로 낮은 산소동위원소 성분을 보여주는 것이 특징적이다. 그 결과 전체적으로 HMC의 산소동위원소 성분이 LMC보다 평균적으로 더 높은 산소동위원소 성분을 보여준다고 할 수도 있다.

Mg 함량의 경우 얇은 코아깊이(<10cm)에서 나타나는 HMC의 경우 대부분 10,000ppm 이상의 높은 Mg 함량을 보여주며, 대부분이 15,000-20,000ppm (6-8 mole%)의 값을 보여준다. 하지만 코아깊이 지점1(0-1cm)의 HMC는 4.5 mole%, 코아깊이 지점9와 10(9-10cm, 18-19cm)의 HMC는 각각 9, 11 mole%의 값을 보여주는 것이 특징이다. 깊은 코아깊이(>18cm)에서 나타나는 LMC의 경우에는 5,000ppm 이하의 낮은 Mg 함량을 보여주며, 아라고나이트의 Mg 함량은 2,500ppm 이하로 매우 낮은 값이다.

Sr과  $\delta^{13}\text{C}$ 와의 관계를 보면 아라고나이트로 이루어진 시료가 높은 Sr 함량을 보인다. 특히 18번 시료(코아깊이 27-28cm)의 경우 약 6,000ppm 정도로 매우 높은 Sr 값을 보여주며, 이는 거의 해수의 아라고나이트의 평형상태의 값인 약 8,000ppm의 값을 거의 보여주는 것이다. 하지만 나머지 대부분의 아라고나이트 시료는 약 2,500~4,500ppm의 값을 보여주며, 이는 방해석보다는 높은 값이지만 해수에서 평형상태로 침전되는 아라고나이트의 Sr 함량보다는 낮은 값이다. 방해석의 Sr 값은 아라고나이트보다 확실하게 낮은 값을 보여주고 있다. 흥미로운 사실은 방해석도 얇은 코아깊이(<10cm)의 것들은 상대적으로 더 높은 Sr 함량(>1,000ppm)을 나타내고 깊은 코아깊이(>18cm)의 것들은 상대적으로 더 낮은 Sr 함량(<500ppm)을 보여준다는 사실이다.

Fe와  $\delta^{13}\text{C}$ 와의 관계를 보면 얇은 코아깊이(<10cm)의 HMC 모든 시료는 높은 Fe 성분(1,500-2,500 ppm) 값을 보여준다. 단 지점7(코아깊이 7-8cm)의 시료만이 약 700ppm 정도의 낮은 Fe 값을 보인다(Figs. 53 & 54). 지점10 (코아깊이 18-19cm)의 HMC는 매우 높은 약 4,500ppm의 Fe 값을 보여준다. 깊은 코아깊이(>18cm)에서 나타나는 아라고나이트와 방해석은 모두 낮은 Fe 성분(<1,000ppm)을 나타내며, 아라고나이트와 LMC간의 Fe 성분의 차이는 거의 없다.

Mn과  $\delta^{13}\text{C}$ 와의 관계를 보면 얇은 코아깊이(<10cm)의 HMC 모든 시료는 높은 Mn 성분(60-180 ppm) 값을 보여주며, 대부분이 60-120ppm의 범위를 보인다(Figs. 55 & 56). 단 1번지점(0-1cm)의 시료가 170ppm의 값으로 약간 높은 값을 보인다. 지점10 (코아깊이 18-19cm)의 HMC도 약 190ppm으로 높은 Mn의 값을 보인다. 아라고나이트와 LMC의 Mn 값도 대부분이 30ppm 이하로 낮은 값을 보이지만 지점18(27-28cm)과 지점22(29-30cm)의 아라고나이트는 각각 140과 90ppm의 상대적으로 높은 Mn 값을 보이며, 지점 17(27-28cm)의 LMC의 Mn 성분도 약 90ppm 정도로 약간 높은 값을 보여준다.

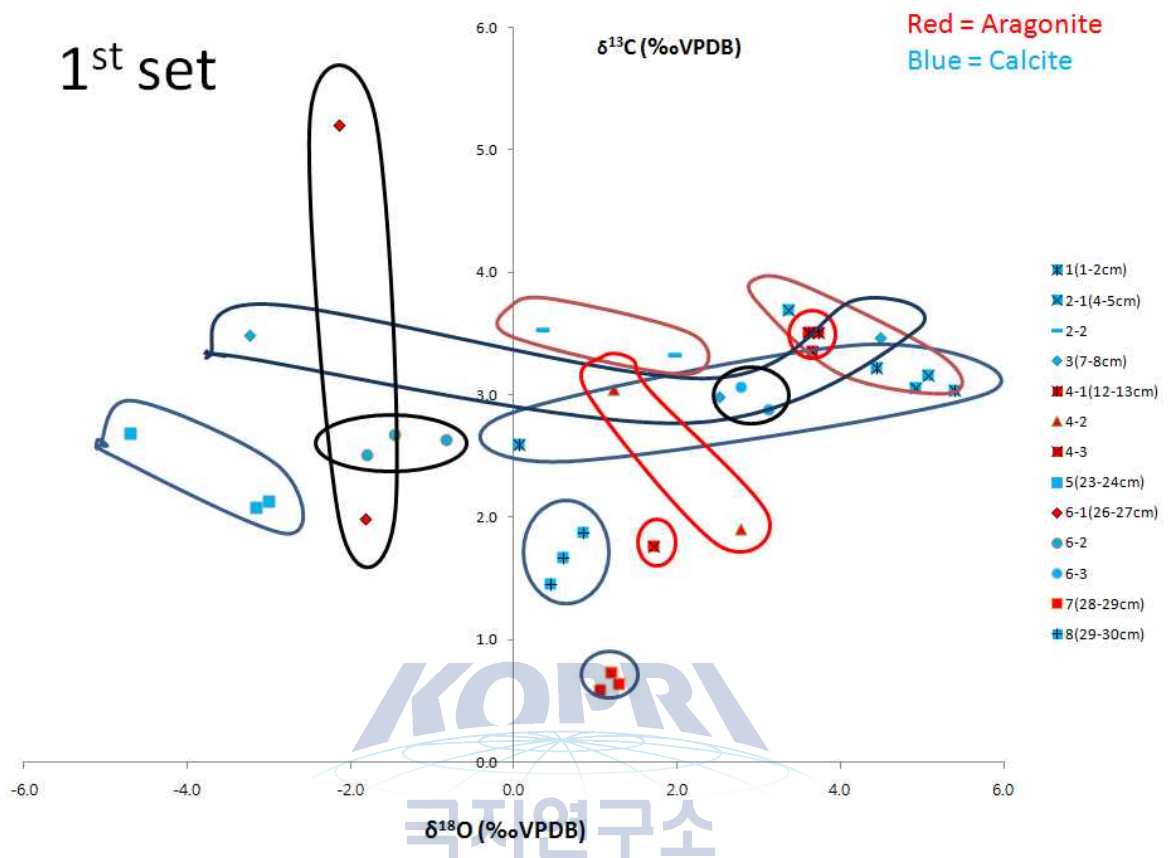


Figure 45. Scatter diagram of oxygen vs. carbon isotope values for the authigenic carbonates analyzed in 2011. Red points = aragonite, blue points = calcite.

SAMPLE ID	Composition	Core depth	$\delta^{18}\text{O}(\text{VPDB})$	$\delta^{13}\text{C}(\text{VPDB})$
1-1/HEO/K460	calcite	7-8cm	4.48	3.47
1-2/HEO/K460	calcite	7-8cm	-3.24	3.49
1-3/HEO/K460	calcite	7-8cm	2.52	2.99
2-1/HEO/K460	aragonite	12-13cm	3.74	3.51
2-2/HEO/K460	aragonite	12-13cm	3.65	3.35
2-3/HEO/K460	aragonite	12-13cm	3.61	3.51
3-2/HEO/K460	aragonite	12-13cm	1.22	3.04
3-3/HEO/K460	aragonite	12-13cm	2.78	1.91
4-1/HEO/K460	aragonite	12-13cm	1.71	1.76
5-1/HEO/K460	aragonite	26-27cm	-1.81	1.99
5-2/HEO/K460	aragonite	26-27cm	-2.13	5.21
6-1/HEO/K460	aragonite	26-27cm	-1.47	2.68
6-2/HEO/K460	aragonite	26-27cm	-1.80	2.51
6-3/HEO/K460	aragonite	26-27cm	-0.83	2.63
7-1/HEO/K460	calcite	26-27cm	3.11	2.89
7-2/HEO/K460	calcite	26-27cm	2.78	3.07
8-1/HEO/K460	calcite	29-30cm	0.44	1.46
8-2/HEO/K460	calcite	29-30cm	0.61	1.67
8-3/HEO/K460	calcite	29-30cm	0.86	1.88
9-1/HEO/K460	calcite	1-2cm	5.40	3.03
9-2/HEO/K460	calcite	1-2cm	0.07	2.59
9-3/HEO/K460	calcite	1-2cm	4.44	3.22
10-1/HEO/K460	calcite	4-5cm	5.08	3.16
10-2/HEO/K460	calcite	4-5cm	3.36	3.69
10-3/HEO/K460	calcite	4-5cm	4.92	3.05
11-2/HEO/K460	calcite	4-5cm	0.36	3.53
11-3/HEO/K460	calcite	4-5cm	1.97	3.32
12-1/HEO/K460	calcite	23-24cm	-3.16	2.08
12-2/HEO/K460	calcite	23-24cm	-3.00	2.14
12-3/HEO/K460	calcite	23-24cm	-4.70	2.69
13-1/HEO/K460	aragonite	28-29cm	1.19	0.73
13-2/HEO/K460	aragonite	28-29cm	1.28	0.64
13-3/HEO/K460	aragonite	28-29cm	1.05	0.59

Table 8. Stable isotope ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) compositions of authigenic carbonates analyzed in 2011.

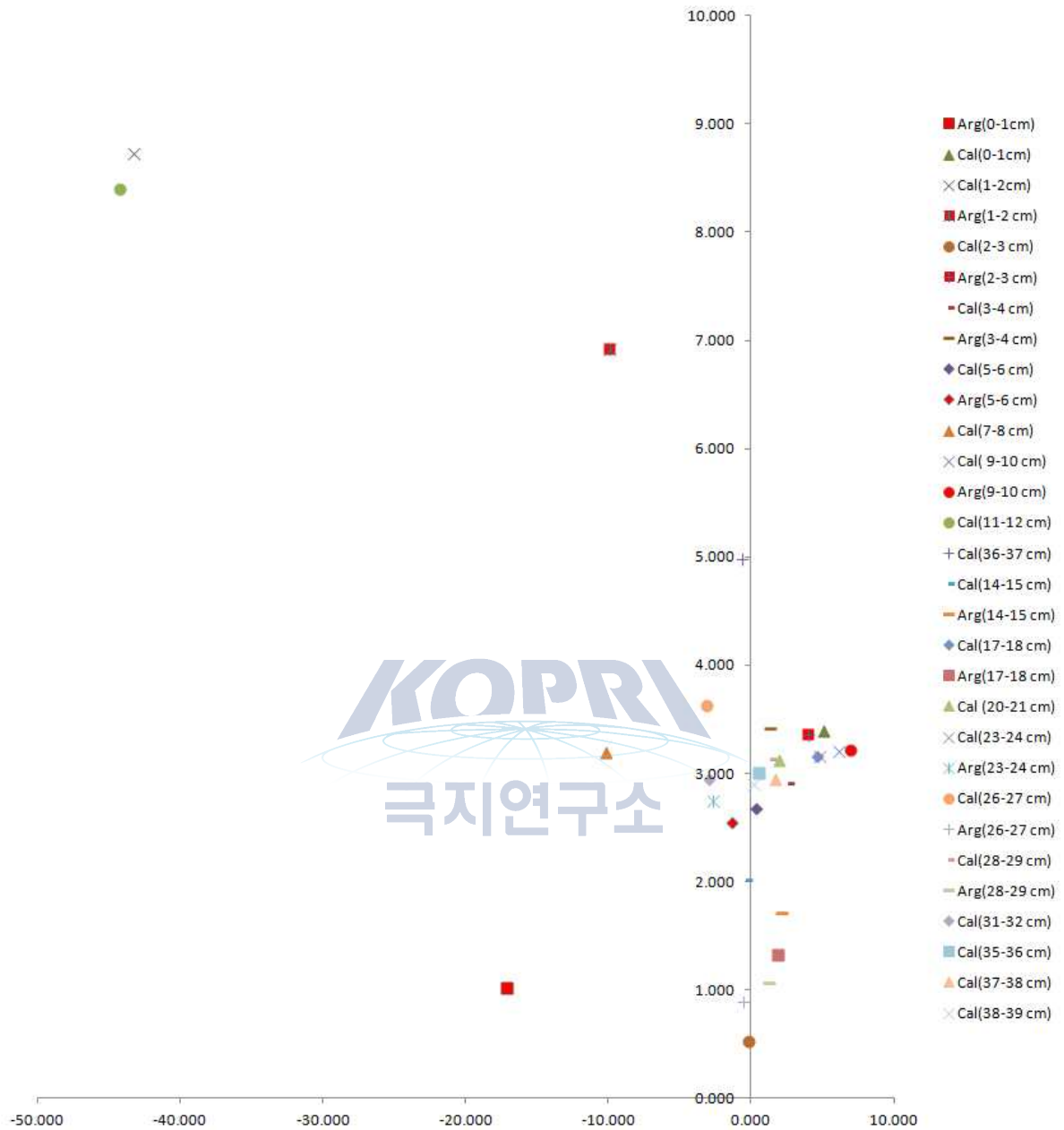


Figure 46. Scatter diagram of oxygen vs. carbon isotope values for the authigenic carbonates analyzed in 2012. Red points = aragonite, blue points = calcite. All the analyzed data are included.

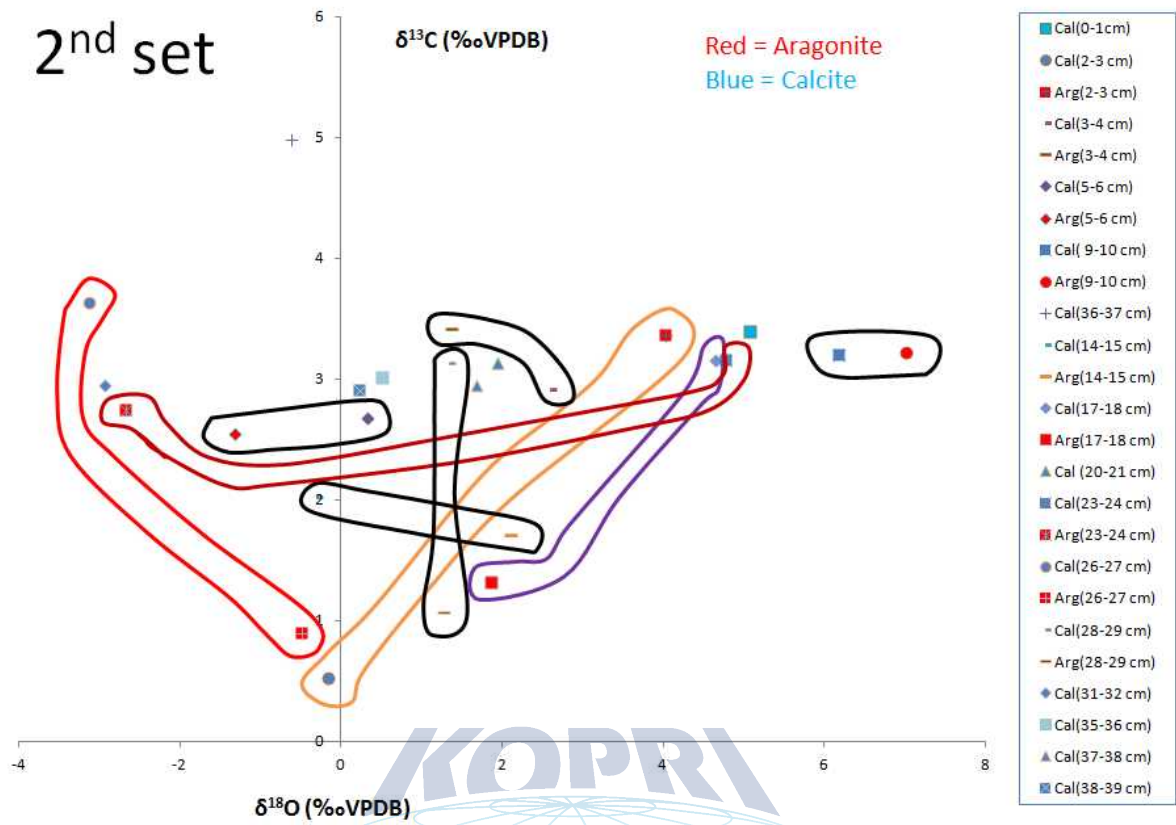


Figure 47. Scatter diagram of oxygen vs. carbon isotope values for the authigenic carbonates analyzed in 2012. Red points = aragonite, blue points = calcite. Very depleted oxygen isotope data points are excluded.



Table 9. Additional stable isotope ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) compositions of authigenic carbonates analyzed in 2012.

Depth	Sample no		d13C_mean	d18O_mean
0-1 cm	1	Calcite	3.388	5.064
	2	Aragonite	1.018	-17.117
1-2 cm	3	Calcite	8.729	-43.205
	4	Aragonite	6.919	-9.895
2-3 cm	5	Calcite	0.519	-0.168
	6	Aragonite	3.358	4.034
3-4 cm	7	Calcite	2.910	2.587
	8	Aragonite	3.414	1.367
5-6 cm	9	Calcite	2.676	0.329
	10	Aragonite	2.549	-1.322
7-8 cm	11	Calcite	3.192	-10.132
9-10 cm	12	Calcite	3.201	6.177
	13	Aragonite	3.217	7.005
11-12 cm	14	Calcite	8.399	-44.198
36-37 cm	15	Calcite	4.977	-0.622
14-15 cm	16	Calcite	2.022	-0.307
	17	Aragonite	1.709	2.107
17-18 cm	18	Calcite	3.153	4.641
	19	Aragonite	1.320	1.852
20-21 cm	20	Calcite	3.127	1.933
23-24 cm	21	Calcite	3.153	4.781
	22	Aragonite	2.745	-2.676
26-27 cm	23	Calcite	3.632	-3.129
	24	Aragonite	0.887	-0.495
28-29 cm	25	Calcite	3.133	1.340
	26	Aragonite	1.068	1.279
31-32 cm	27	Calcite	2.951	-2.930
35-36 cm	28	Calcite	3.009	0.511
37-38 cm	29	Calcite	2.950	1.688
38-39 cm	30	Calcite	2.899	0.227

Table 10. Trace elemental compositions of authigenic carbonates in this study. (unit : ppm)

Sample no.	Depth (cm)	Ba	Fe	Mg	Mn	Sr
AC-1	0-1	83	1755	12840	173.3	1260
AC-2	1-2	30	2553	19880	116.4	1423
AC-3	2-3	30	2125	21100	91.75	1636
AC-4	3-4	30	1732	20820	89.59	1566
AC-5	4-5	30	2097	21640	66.38	1589
AC-6	5-6	30	2270	20510	176.5	1549
AC-7	6-7	30	1790	21280	68.67	1660
AC-8	7-8	30	855.9	16780	30	1584
AC-9	8-9	30	1874	20460	83.41	1515
AC-10	9-10	30	1811	26600	30	1448
AC-11	10-11	173.23	307.2	8247	68.42	1339
AC-12	11-12	30	839.9	5706	30	1267
AC-13	12-13	30	2624	7619	412.4	778.7
AC-14	18-19	30	4821	32410	191.9	473.1
AC-15	23-24	30	676.0	2604	30	343.5
AC-16	23-24	30	785.9	580.6	30	4350
AC-17	24-25	30	316.8	2248	30	306.5
AC-18	24-25	30	30	140.3	30	2700
AC-19	25-26	30	304.7	2896	30	271.1
AC-20	26-27	30	881.9	3292	30	549.7
AC-21	27-28	30	662.2	1951	101.3	363.1
AC-22	27-28	30	364.5	441.3	147.8	6217
AC-23	28-29	30	906.5	5474	30	291.0
AC-24	28-29	30	54.62	937.6	30	3649
AC-25	29-30	30	22.99	1584	30	229.1
AC-26	29-30	30	818.2	415.4	102.0	4634
AC-27	30-31	30	567.7	3192	30	301.7

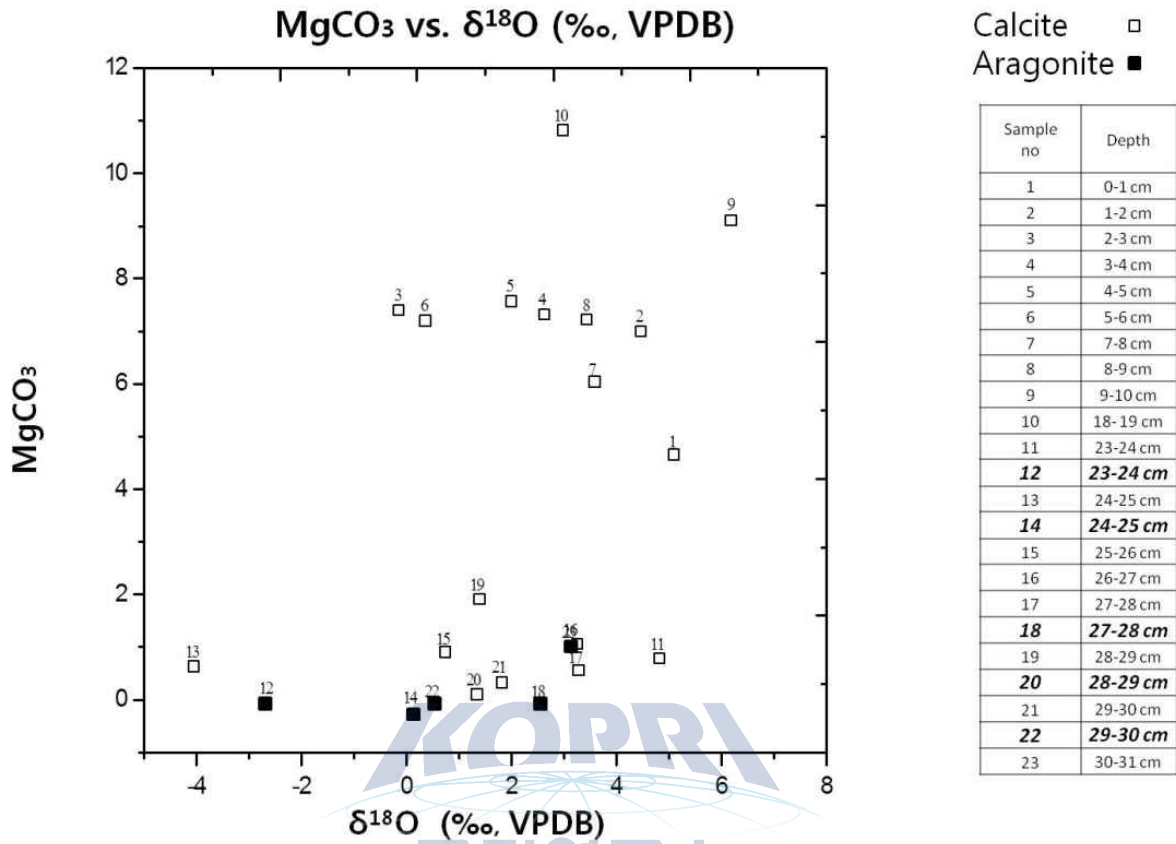


Figure 48. Scatter diagram of oxygen isotope vs. MgCO<sub>3</sub> (mole %) values for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths.

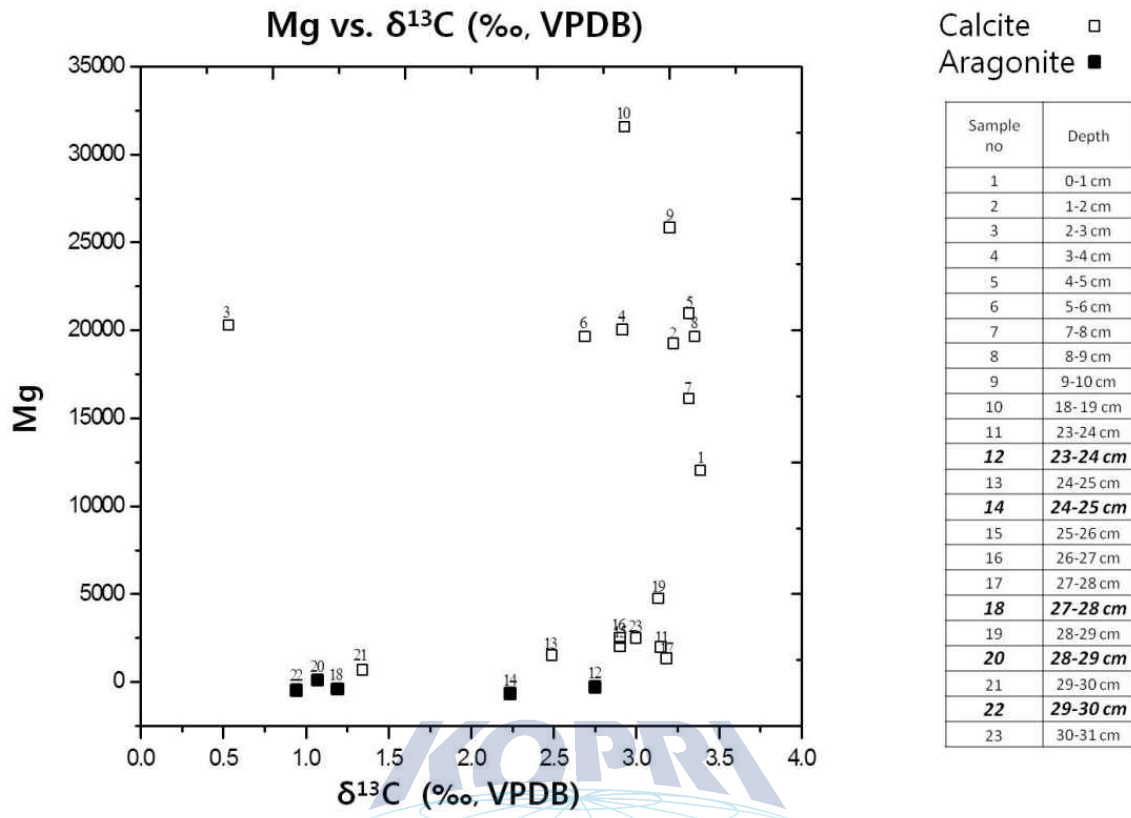


Figure 49. Scatter diagram of carbon isotope vs. Mg compositions for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths.

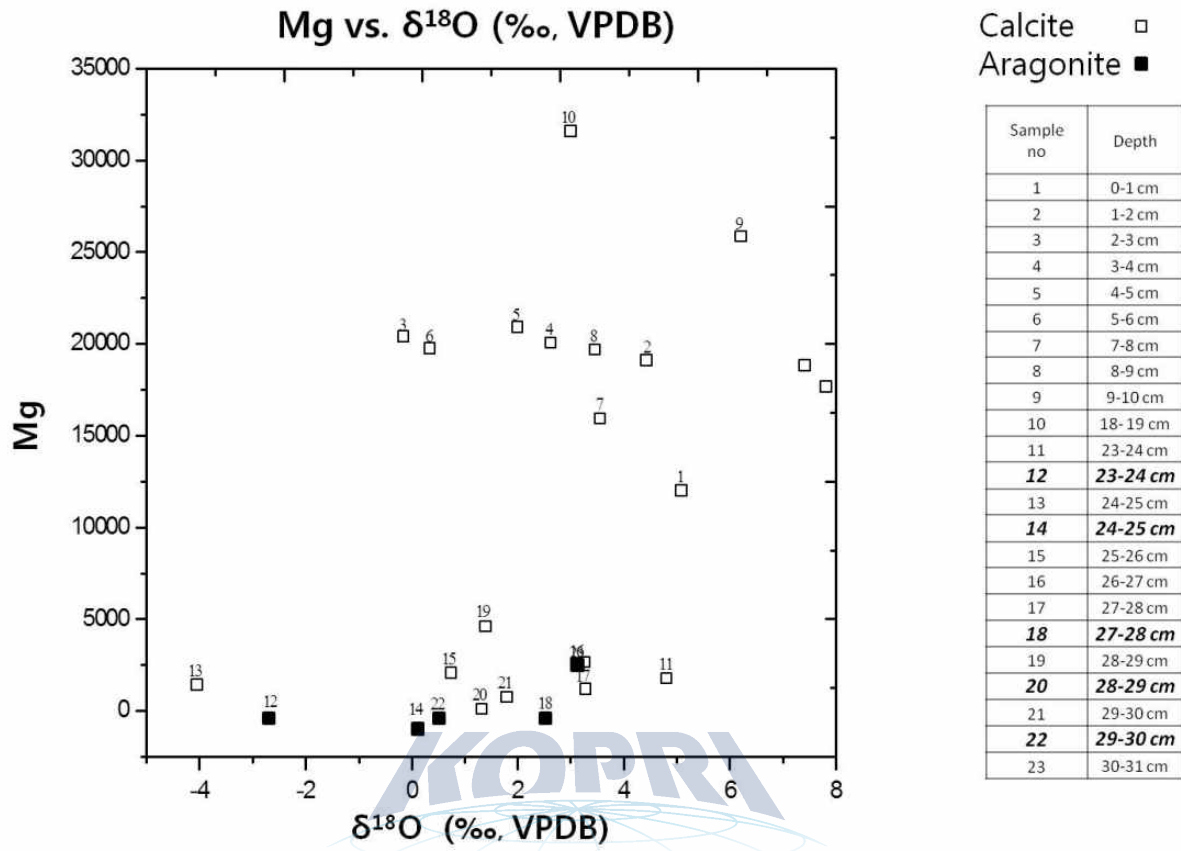


Figure 50. Scatter diagram of oxygen isotope vs. Mg compositions for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths.

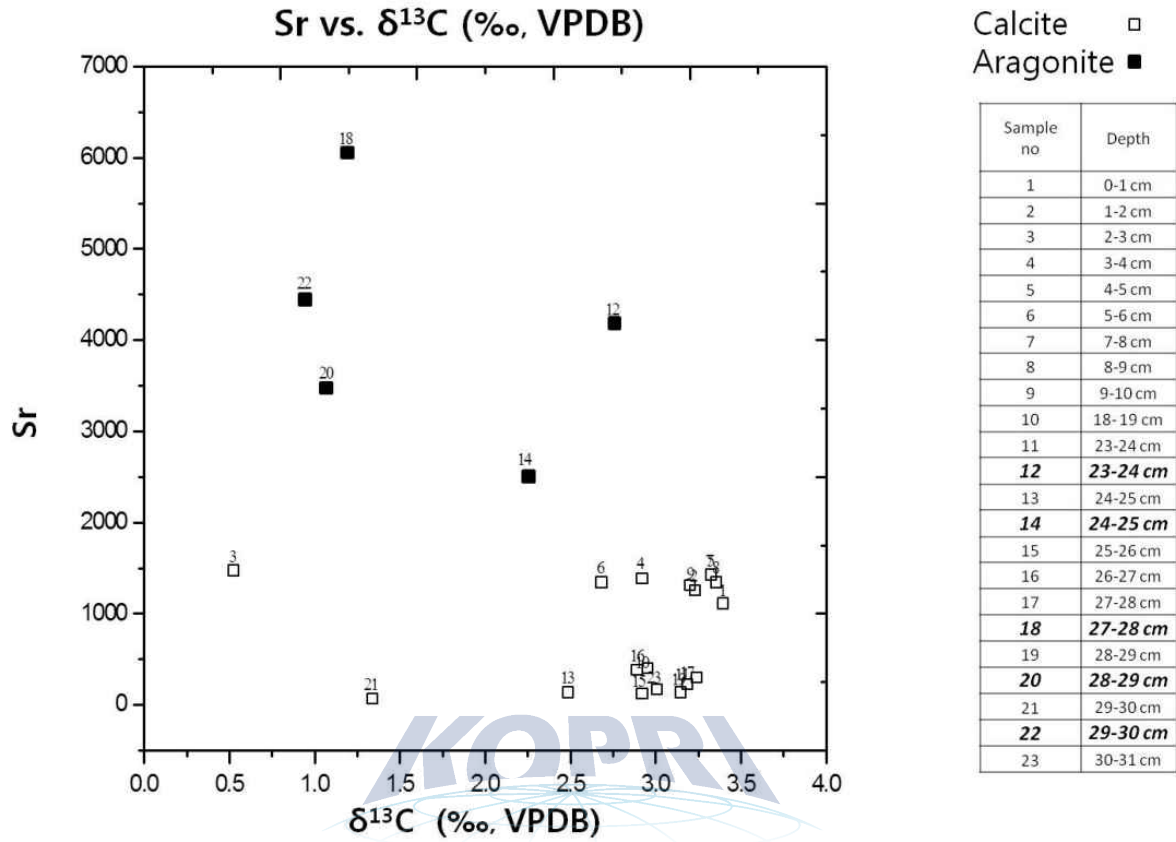


Figure 51. Scatter diagram of carbon isotope vs. Sr compositions for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths.



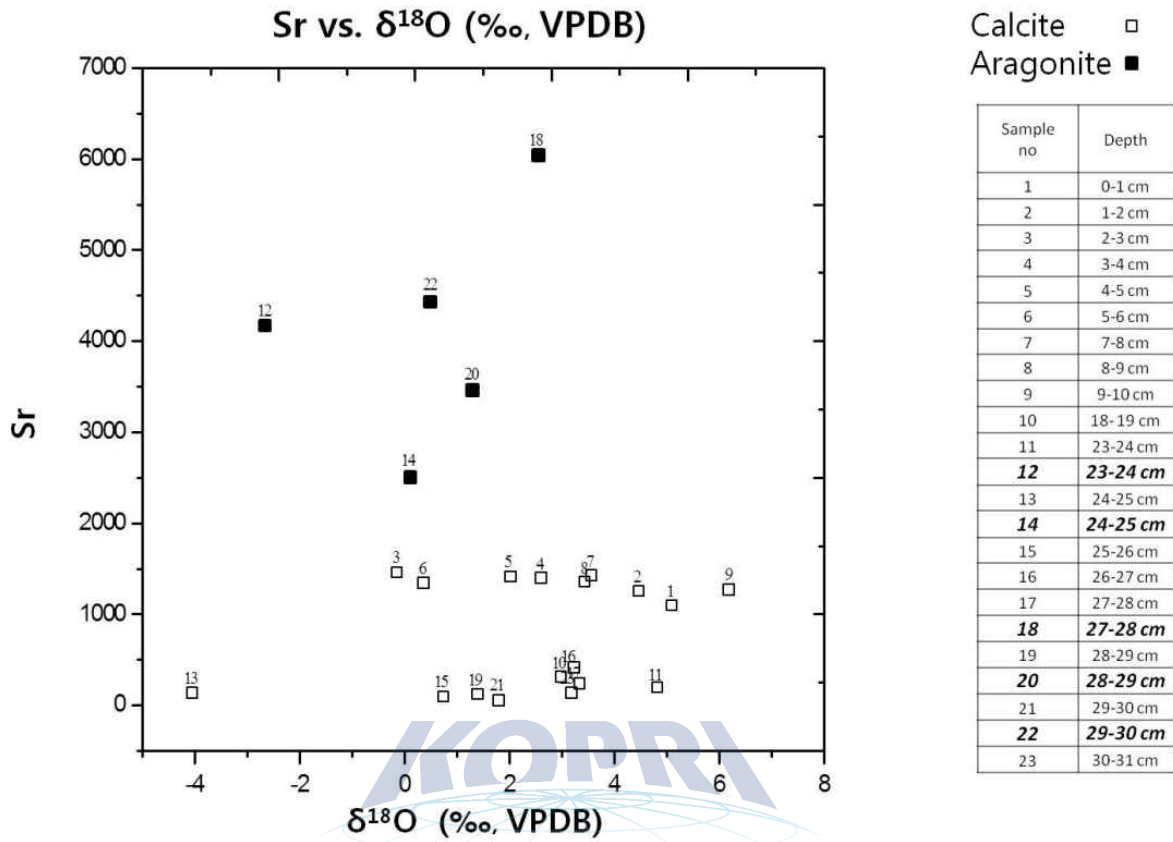


Figure 52. Scatter diagram of oxygen isotope vs. Sr compositions for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths.

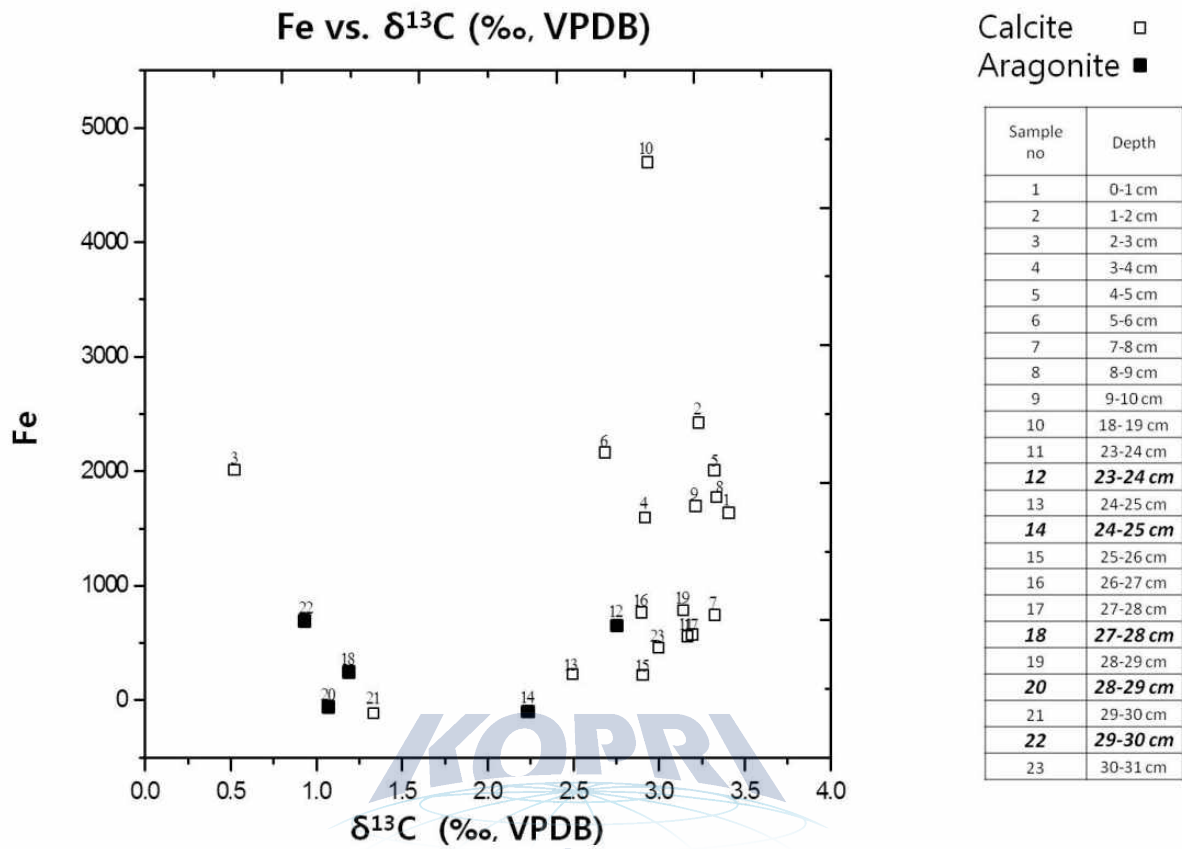


Figure 53. Scatter diagram of carbon isotope vs. Fe compositions for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths.

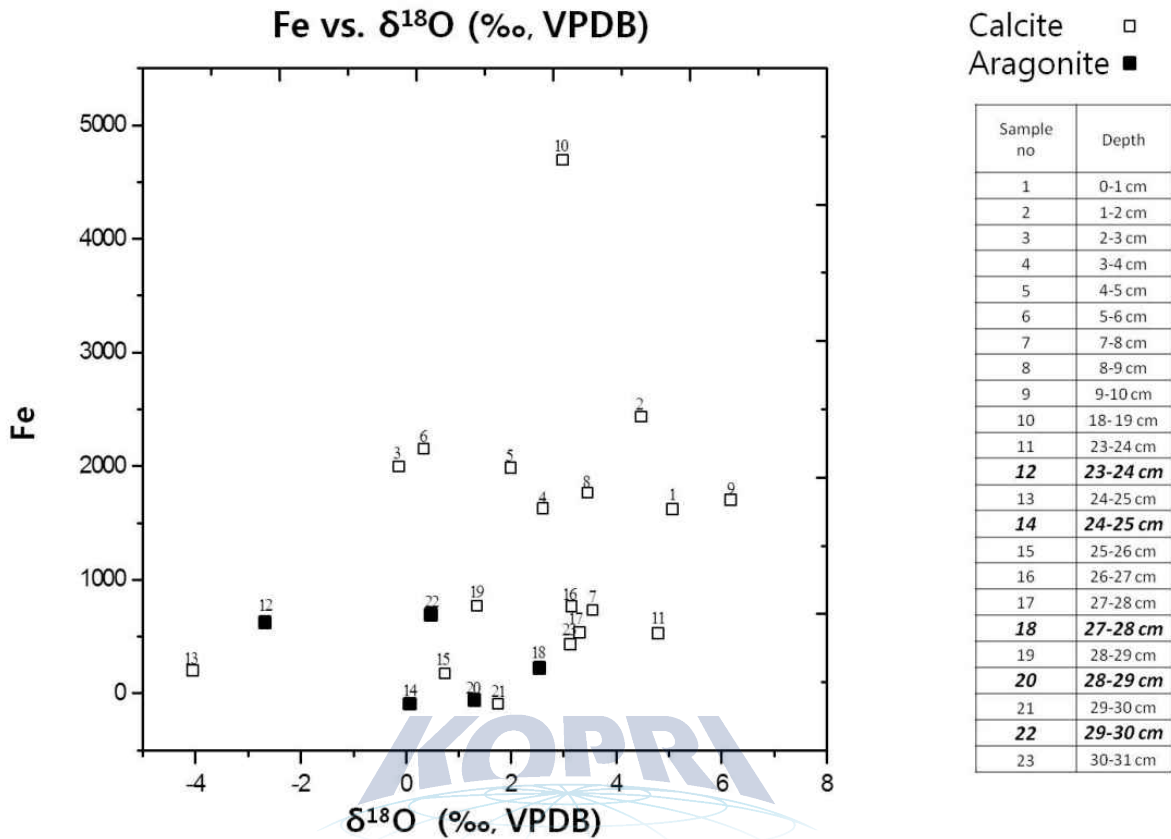


Figure 54. Scatter diagram of oxygen isotope vs. Fe compositions for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths.

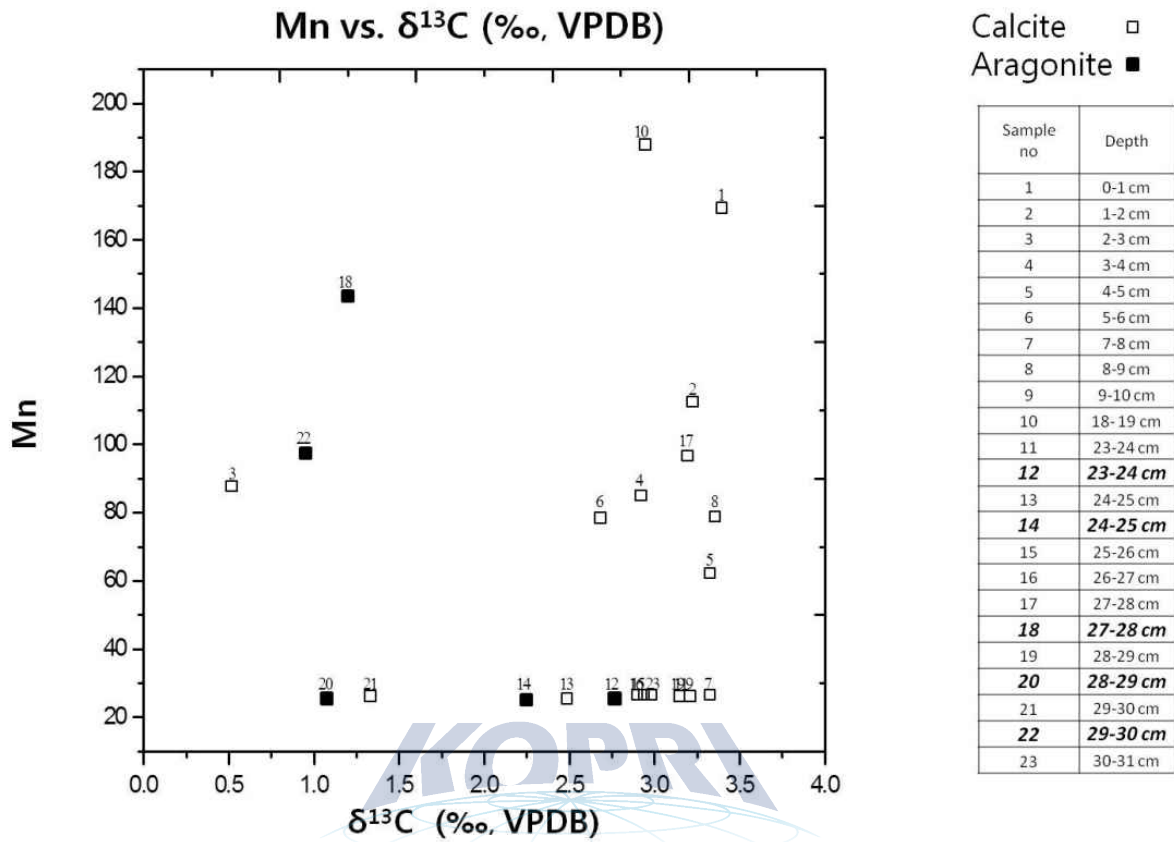


Figure 55. Scatter diagram of carbon isotope vs. Mn compositions for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths.

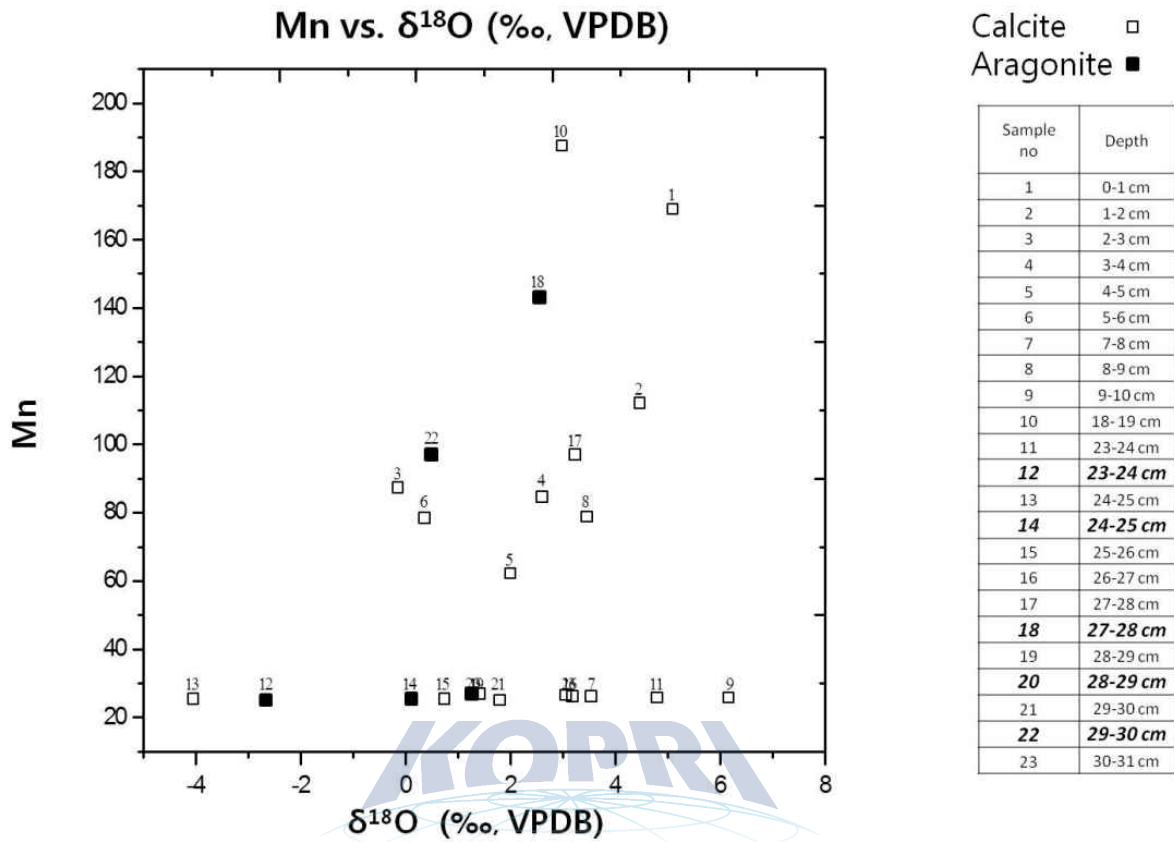


Figure 56. Scatter diagram of oxygen isotope vs. Mn compositions for the authigenic carbonates in this study. Filled squares = aragonite, open squares = calcite. All the numbers on each value denote the corresponding core depths.



## 제 5 절 토의

### 1. 자생 탄산염광물의 조직의 의미

1차년도와 마찬가지로 연구지역 내 자생 탄산염광물은 방해석과 아라고나이트로 이루어져 있다. 두 광물은 서로 다른 결정계를 가지고 있기 때문에 그 성장하는 형태가 매우 다르다. 이 연구의 조직 분석 결과에 나타나듯이 방해석은 주로 타형의 결정으로 이루어져 그 성장하는 형태가 매우 다양하다. 하지만 여러 결정형 중에서도 특히 주된 형태를 이루은 것은 등립질에서 칼날상의 조직과 판상의 조직이 겹쳐서 나타나는 조직인 엽리상 조직(foliate texture)이다. 엽리상 조직(foliate texture) 중에서도 가장 보편적으로 나타나는 형태는 stacked foliated texture로서 이들은 foliated 형태가 여러 겹으로 겹쳐서 나타나는 형태이다. 이 형태는 아직도 탄산염암석학의 분야에 잘 소개되지 않은 형태로서 그 발견 의의가 매우 높다. 하지만 stacked foliated texture 자체도 다양한 형태로 나타나는 것은 그 성인에 대한 해석이 현재로서는 매우 어려운 상황이다. 2차년도에서 이러한 엽리상 조직을 더 많은 시료에 대해 관찰한 결과, 엽리가 나타나는 조직은 크게 두 가지 형태로 나타난다. 하나는 엽리가 수직방향으로 겹쳐서 나타나는 조직이며(Fig. 26, 27 & 28), 다른 하나는 엽리상 조직이 비스듬한 방향으로 겹쳐서 올라가며 성장하는 조직이다(Figs. 29, 30, 31 & 32). 이 두 조직의 차이는 분명하지는 않지만 아마도 성장하면서 공극수의 화학성분의 변동의 차이에 의한 것으로 생각된다. 하지만 이 부분에 대한 연구는 더 많은 관찰을 필요로 한다. 방해석 결정들이 섬유상(fibrous), 칼날상(bladed), 등립질(equant) 조직을 보이는 차이는 공극수의 방해석에 대한 포화도에 의해 조절되는 것으로 생각된다. 즉, 섬유상의 조직이 가장 포화도가 높을 때이며, 등립질의 경우가 가장 포화도가 낮을 때이다. Mg 성분분석 결과, 이 연구지역의 방해석은 HMC와 LMC가 모두 나타난다. 하지만 조직과 광물과의 관계를 아직 규명하기에는 그 시료의 분석수가 부족하다. 공극수의 방해석에 대한 포화도는 주로 용액의 pH, 즉 용액 내 탄산염이온의 농도와 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다. 그 이유는 일부 시료의 경우 용해된 흔적을 보이기 때문이다(Fig. 18). 즉 공극수 내의 탄산염이온의 증가와 감소에 따라 공극수가 방해석에 대해 포화상태에 가기도 하고 불포화상태에 이룰 수 있다는 것을 의미한다. 이는 방해석에 대한 포화도와 방해석과 아라고나이트의 침전을 조절하는 요인이 Mg/Ca ratio가 아닌 탄산염이온의 농도라는 것을 의미한다.

아라고나이트는 주로 침상의 형태로 나타나는 것이 특징이다. 특히 침상의 결정 끝이 square-ended termination의 형태를 보이는 것은 아라고나이트 광물의 중요한 특성이며, 이 연구지역의 아라고나이트 결정도 모두 결정 끝이 직사각형 모양을 보여준다. 섬유상의 조직을 보이는 아라고나이트 조직은 크게 두 가지 형태로 나타난다. 하나는 이러한 섬유상의 조직이 일정한 방향성 없이 배열되어 있는 경우이고, 다른 하나는 섬유상의 조직이

한 점으로부터 방사상으로 성장하는 형태인 구과상 섬유상 조직이다. 이러한 구과상 섬유상조직은 주로 열대 천해지역의 암초(reef)지역에서만 발견되는 조직으로 이는 공극수의 성분이 아라고나이트, 즉 탄산염광물에 대해 매우 과포화상태에 이르렀음을 의미한다.

이렇게 다양한 방해석과 아라고나이트의 조직이 나타나는 것은 이들 자생 탄산염광물이 성장하였던 퇴적물 내의 공극수의 화학성분과 조성이 매우 다양했다는 것을 의미하며 약간의 차이에 따라 매우 다양한 조직의 탄산염광물이 자랄 수 있다는 것을 시사하며, 이는 탄산염광물을 연구하는 암석학계에 새로운 연구 결과를 제시하고 있다.

깊이에 따른 방해석과 아라고나이트 형태의 변화를 알아보았다(Table 6 & Table 7). 아라고나이트와 방해석결정들은 각각 다양한 조직을 보이지만 이들의 조직의 한 가지 형태가 어느 특정한 깊이에서만 나타나지 않았다. 또한 한가지의 형태가 여러 깊이에서 나타나기도 하며, 한 깊이에서 매우 다양한 조직의 결정형태를 보여주고 있다. 이러한 조직적인 형태를 두 가지 사실을 지시한다. 하나는 아주 다양한 형태의 조직과 결정의 형태는 이러한 탄산염광물이 미생물이나 생물에 의한 형성이라기보다는 무기적인 형태의 탄산염광물의 침전이라는 사실이다. 다른 하나는 한 코아 깊이에서 이렇게 다양한 결정의 조직이 나타나는 것은 한 깊이의 퇴적물 내의 공극수의 속성환경의 변화가 매우 다양하게 변화해 왔음을 지시한다.

자생 탄산염광물에 방해석과 아라고나이트가 같은 결정체 내에서 같이 발견된다는 것은 공극수의 발달에 중요한 의미를 가진다. 방해석과 아라고나이트를 서로 다른 용해도를 가지고 있으며, 두 광물이 침전되는 속성환경도 매우 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 방해석과 아라고나이트가 생성되는 환경의 차이는 (1)공극수 내의 Mg/Ca비가 차이가 나는 경우와 (2)공극수 내의 pH가 달라지는 경우이다. 일반적으로 Mg/Ca 비가 2보다 크면 아라고나이트나 고마그네슘 방해석(High-Mg calcite)이 생성되지만, Mg/Ca 비가 2보다 작으면 저마그네슘 방해석이 침전된다. 즉 공극수의 Mg/Ca비에 따라 생성되는 광물이 달라질 수 있다. 따라서 방해석이 생성된 후에 아라고나이트가 만들어진 것은 어느 정도 닫힌계에서 방해석이 생성되면서 공극수의 Ca이온이 사용되고 그 결과 Mg/Ca비가 높아지면서 아라고나이트가 침전한 것이라고 추정할 수 있다. 하지만 공극수의 pH의 값이 달라지는 것은 완전히 다른 해석을 할 수 있게 한다. 이 경우는 공극수에 탄산염이온의 공급량이 지속적으로 늘어나서 pH가 높아지면서 아라고나이트가 침전하는 경우이다.

이렇게 다양한 형태의 방해석과 아라고나이트의 발견은 이 지역의 퇴적물 내 공극수가 매몰된 후 지속적으로 탄산염광물에 대해 과포화상태를 유지했음을 지시한다. 또한 다양한 형태의 방해석과 아라고나이트 결정의 조직은 이 광물이 자생으로 무기적으로 침전한 광물임을 지시하고 있다. 미생물에 의해 침전된 광물이기에 그 결정의 크기가 너무 크며, 성장한 형태가 너무 다양하다.

## 2. 자생 탄산염광물의 안정동위원소 성분에 따른 성인

현재 해양환경에서 자생 탄산염광물이 생성되는 지역은 그리 많지 않다. 해수는 수심에 따라 탄산염광물에 대한 포화도가 다르며, 수온이 높고 압력이 낮으면 이산화탄소의 분압이 낮은 천해의 해수는 극 지역을 제외한 대부분의 저위도 지역이 탄산염광물에 대해 과포화상태에 있다. 하지만 이러한 지역에서도 자생적으로 탄산염 광물이 침전되는 곳은 지리적으로 극히 제한적이다. 주로 산호초에서도 바람이 불어오는 암초의 원양 쪽 방향에서 산호초에 많은 해수가 부서지면서 통과하거나, 혹은 해류가 빠르게 움직이는 지역에서 하드그라운드(hardground)가 만들어지는 지역에서만 자생 탄산염광물이 침전하는 것이 보통이다. 이 경우 산호초 내의 공극이나 입자 사이의 공극 내에 교질물의 형태로 입자 사이의 공극을 추진하는 것이 보통이다. 또한 해류가 빠르게 지형류(geotrophic current)의 형태로 흐르는 석회암 지역의 수십-수백 미터 깊이의 지역에서 하드그라운드가 만들어지는 곳에서도 퇴적물 내에 교질물의 형태로 자생 탄산염광물이 성장하면서 자생 탄산염광물이 성장하기도 한다. 이들 지역은 모두 해수가 끊임없이 지속적으로 흐르면서 공극 내를 통과하여 칼슘이온과 탄산염이온을 공급하여 교질물이 자란다는 공통점을 갖는다.

하지만 수온약층(thermocline)보다 깊은 수백 미터 이상의 깊이의 해양환경이나 고위도 지역의 천해 지역은 낮은 수온에 의해 보통 해수가 탄산염광물에 대해 불포화상태에 있다. 특히 수심이 깊은 지역은 이산화탄소의 분압이 높아 해수의 탄산염광물에 대한 용해도가 커져서 이 지역의 해수는 탄산염광물에 대해 불포화상태에 있는 것이 일반적이다. 이러한 지역의 탄산염입자의 퇴적은 해수의 물리·화학적 특성에 따라 조절되는 lysocline (탄산염 퇴적물이 용해되기 시작하는 깊이)의 깊이, 그리고 심해환경의 탄산염퇴적물의 분포는 탄산염보상심도(CCD; carbonate compensation depth; 탄산염 퇴적물이 용해되는 깊이)는 천해로부터 공급되는 탄산염입자의 퇴적률과 심해 해수의 탄산염광물의 용해도를 결정하는 온도, 압력, 이산화탄소의 농도와 직접적인 관련이 있다. 대부분 대양의 온도와 압력의 비슷하게 변하기 때문에 한 지역의 CCD를 결정하는 요인은 그 지역의 이산화탄소의 농도, 즉 탄산염이온의 농도와 직접적인 관련이 있는 것이다(Fig. 16). 따라서 보통 열대 지역이라 하더라도 수심이 1500미터 이상이 되는 곳에서는 대부분의 지역이 lysocline 아래이기 때문에 탄산염광물이 용해가 일어나는 것이 보통이다. 특히 수온이 낮아지는 극지방으로 가면 이러한 lysocline이나 CCD의 깊이가 더 얕아지게 된다. 하지만 최근에 발표된 자료에 의하면 북극해가 전반적으로 탄산염광물에 대해 포화상태에 있다는 사실이 알려지게 되었다. 이는 퇴적물이 퇴적된 이후에 공극수 내에서 탄산염광물이 자생적으로 침전될 수 있는 더 좋은 조건을 만들어줄 수 있는 것이다.

그럼에도 불구하고 북극해 수심 약 1,800~2,800m에서 채취한 박스코아 내 심해퇴적물에서 자생 탄산염광물은 전 세계적으로도 최초로 발견된 것이라 평가하고 있다. 이러한

자생 탄산염광물의 존재는: 1) 생산력(productivity) 증가에 따른 탄산염보상심도가 깊어짐으로써 여러 탄산염광물로 이루어진 각질이 퇴적물에 많이 포함됨으로써 나타나는 고해양학적인 영향, 2) 북극해의 심해 해류의 순환이 둔화되면서 퇴적층에 유기물이 많이 포함되어 자생 탄산염광물이 무기적으로 침전된 고해양학적 환경과 속성환경의 변화에 따른 복합적인 영향, 그리고 3) 북극해 심해퇴적층 하부에 가스하이드레이트와 같은 메탄가스가 포함되어 있어서 이 메탄가스가 유리되면서 퇴적물의 표층에 자생 탄산염광물이 고해양학적 변화와 속성작용의 영향 등 여러 가능성이 있다. 하지만 퇴적물의 성분을 조사한 결과, 퇴적물 내의 유기물의 함량이 매우 낮기 때문에 (1)의 가능성의 매우 낮다. 또한 1차년도에 조사되었던 자생탄산염광물의 높은 탄소동위원소 성분은 (3)의 가능성도 배제한다.

1차년도의 결과(Fig. 45)에 이어 추가로 이 연구를 위해 자생 탄산염광물의 산소동위원소( $\delta^{18}\text{O}$ )와 탄소동위원소( $\delta^{13}\text{C}$ )을 분석한 결과를 보면(Fig. 47), 탄소동위원소 성분은 거의 비슷하며 산소동위원소 성분은 2차년도가 1차년도보다 넓은 범위의 값을 보이는 것을 알 수 있다.

산소동위원소 값은 주로 수온과 퇴적물 사이에 공극수의 산소동위원소 성분에 의해 조절된다. 1차년도에 분석된 산소동위원소 값은  $-5\sim+6\%$ (PDB) 범위로 약 11%의 큰 변화를 보이는데, 2차년도에도  $-4\sim+7\%$ (PDB) 범위로 약 11%의 큰 범위를 보인다. 따라서 이는 1차년도에서 분석된 산소동위원소 성분이 정확한 분석치라는 것을 의미하고 있다. 이미 1차년도에 언급한 바와 같이 산소동위원소 1‰은 약 4°C 정도의 온도범위를 나타내므로 분석한 산소동위원소 값의 범위를 대략적인 온도로 환산을 하면 약 44°C 정도의 온도변화를 보이는 것으로 생각할 수 있으나 이는 실제로 매우 비현실적이다. 잘 알려진 바와 같이 북극 심해의 수온은  $-1^\circ\text{C}$  정도로 거의 일정하기 때문에 퇴적물이 채취된 코아깊이(0~30cm)의 해수의 온도도 이와 비슷할 것으로 예측할 수 있다. 따라서 이러한 이유로 인해 자생 탄산염광물의 산소동위원소 성분이 수온에 의해 조절되었다고 보기는 불가능하다. 그렇다면 산소동위원소 성분의 차이는 분명히 공극수 내의 산소동위원소 성분의 차이로 해석할 수 있다. 1차년도에서는 이러한 낮은 산소동위원소 성분을 퇴적물 내의 화산쇄설물이나 화산암편의 존재에 의한 공극수 내의 화학적 반응에 의한 산소동위원소 성분의 변화, 혹은 단한계 속성환경에서 자생탄산염광물이 침전하였기 때문일 것으로 제안한 바 있다. 현재 퇴적물에 대한 여러 암석학적인 성분을 분석 중에 있으며, 화산암 기원의 암편이 일부 발견된 것은 고무적인 일이다. 하지만 단한계 속성작용에 의해 점차적으로 산소동위원소 성분이 고갈되었다고 생각하기는 그리 쉽지 않다.

그 이유는 안정동위원소의 패턴과 관계가 있다. 자생탄산염광물의 안정동위원소가 변하는 패턴은 크게 네 가지로 구분된다: 1) 각 코아 심도별 조직적으로 비슷한 형태를 구분해보면 서로 군집을 이루는 경우(Fig. 57), 2) 탄소동위원소 성분은 비슷하게 유지하면서 산소동위원소 성분이 변하는 경우(Fig. 60), 3) 산소동위원소 성분이 비슷하면서 탄소

동위원소 성분이 변하는 경우(Fig. 61), 4) 두 동위원소가 같이 변하는 경우이다(Fig. 62). 만일 단단계에서 지속적으로 탄산염광물이 만들어진다면 대부분의 경우에 (2)번이나 (4)번 경우와 같이 산소동위원소 성분이 지속적으로 변하는 패턴을 보여주어야 할 것이다. 하지만 대부분의 시료는 서로 군집된 동위원소 패턴을 보여주고 있다. 이는 지속적으로 공극수 내에서 자생탄산염광물이 만들어지면서 공극수가 변한 것만으로는 해석하기 어렵다. 또한 (2)번 경우의 경우, 같은 심도 내에서 같은 조직을 보이는 두 시료의 산소동위원소의 차이가 거의 10%이나 보이는 것은 참으로 이해하기 어려운 현상이다. 따라서 매우 높고 낮은 산소동위원소 성분의 값과 범위는 내부 코아퇴적물에 포함된 물질과 반응한 결과이거나, 그 외 이제까지 알려지지 않고 있는 원인일 가능성이 매우 높다. 이에 대한 좀 더 정밀한 조사가 요구된다.

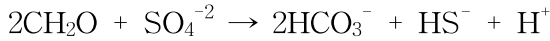
이 지역에서 발견된 자생 탄산염광물의 성인을 밝혀줄 수 있는 결정적인 증거는 안정 동위원소 중에서 탄소동위원소 값이다. 보통 해양환경에서 퇴적물이 퇴적되면 점차 매몰되면서 용존산소를 이용하여 유기물을 분해하는 박테리아가 적어지면서 다른 종류의 박테리아가 독특한 무산소환경을 지배하며 공극수의 지화학 성분을 조절한다. 잘 알려진 바와 같이 퇴적물의 깊이에 따라 oxic zone, suboxic zone, anoxic zone으로 변하는데 이 영역들 중에서 anoxic zone은 nitrate reducing zone, Mn-Fe reducing zone, sulfate reducing zone, 그리고 methanogenic zone으로 나뉜다. 이러한 지역 내에서 유기물의 탄소는 박테리아에 의해 산화되거나 환원되어 용존탄소 상태로 변화되고 변화된 탄소는 이산화탄소의 형태를 거쳐 중탄산이온, 탄산염이온의 형태로 변할 수 있다. 탄산염광물의 침전에 결정적인 영향을 주는 탄산염이온의 양은 바로 공극수의 pH에 의해 조절되는 것이 보통이다.

일반적으로 심해 퇴적물 내에 탄소동위원소 성분은 유기물의 양에 의해 일차적으로 조절되는 것으로 알려져 있다. 즉 표층인 유산소환경에서는 박테리아가 산소(O<sub>2</sub>)를 이용하여 유기물이 분해해 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)가 생성되고, 하부인 무산소환경을 산소가 없기 때문에 Nitrate(NO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), Mn·Fe, Sulfate(SO<sub>4</sub>), methan(CH<sub>4</sub>)를 이용하여 유기물을 분해해 이산화탄소를 생성하게 되어, 이렇게 유기물에서 기원한 이산화탄소가 탄산염이온으로 바뀌기 때문에 탄소동위원소 값이 감소하게 된다. 하지만 황산염환원대 아래에 존재하는 무산소환경에서는 메탄가스가 만들어지는 메탄가스생성대(methanogenic zone)가 있는데, 메탄가스는 가스자체가 매우 낮은 탄소동위원소 값을 갖고 있기 때문에 이 지역 용존탄소의 탄소동위원소 성분은 매우 부화된 값을 보여준다. 따라서 각 환원환경에 따라 보여주는 탄소동위원소 값은 뚜렷이 구별된다. 각각의 환원속성환경에서 일어나는 화학반응은 아래에 나타내었다. 이 중에서 주목할 만한 것은 (2)의 환경이다. (2)의 경우는 하부에 gas hydrate가 있어서 메탄가스가 아래로부터 공급되는 경우에만 나타날 수 있는 반응으로서 이 경우에는 황산염환원대와 메탄가스생성대 사이에 이 경우가 나타날 수 있다. 하지만 조사지역에는 가스하이드레이트가 나타나지 않기 때문에 이 반응식은 배제할 수 있



다.

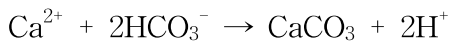
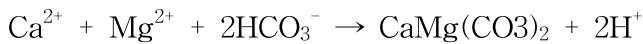
Sulfate reduction . . . . . (1)



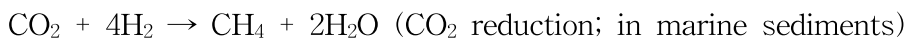
Anaerobic methane oxidation . . . . . (2)



Carbonate precipitation . . . . . (3)



Methane Production (Biogenic methane;  $\delta^{13}\text{C} < -45\%$ ) . . . . . (4)



부화된 자생 탄산염광물의 탄소동위원소 성분(Figs. 45 & 47)은 이들이 원양퇴적물이 퇴적된 후 메탄가스생성대에서 생성되었음을 지시하고 있다. 하지만 특이할 만한 사항은 분석한 자생 탄산염광물이 채취된 코아퇴적층 중에서 아주 표층(깊이 0~1cm)부터 나타나며, 이들의 탄소동위원소 성분이 모두 비슷한 범위에서 부화되어 있다는 사실이다. 즉 일반적으로 원양퇴적층에 나타나는 황산염환원대가 거의 나타나지 않고 표층부터 메탄가스생성대가 만들어져 있다는 사실이다. 이러한 경우는 크게 두 가지의 원인이 있다. 하나는 해수의 성분 자체가 산소가 매우 결핍된 조건이 있는 경우이다. 예를 들면 Black Sea 와 같은 환경으로서 Black Sea는 고립된 해수 자체에 Sulfate Reducing Zone이 존재하기 때문에 퇴적물의 표층에 methanogenic zone이 나타난다. 다른 경우는 퇴적물 중 유기물의 함량이 매우 높아 퇴적물이 퇴적되자마자 바로 산소가 결핍되면서 황산염환원대가 매우 얇게 존재하는 경우이다. 연구지역의 경우, 자생 탄산염광물의 생성환경을 설명하는데에는 많은 어려움이 따른다. 이 지역을 연구했던 연구자의 연구결과들은 이 지역의 해수가 무산소환경도 아니며, 퇴적물 내에 유기물의 함량도 높지 않다는 것이다. 따라서 자생 탄산염광물의 탄소동위원소 성분의 결과는 분명히 이들이 메탄가스환원대에서 생성되었지만, 이러한 메탄가스환원대를 조성하였던 해양환경을 설명할 수 없다는 것이 현재 연구의 가장 큰 딜레마인 것이다.

전술한 바와 같이 같은 코아 깊이 내에서 서로 비슷한 조직을 가지고 있는 자생탄산염광물의 안정동위원소 성분을 도시한 결과, 대부분 균집된 패턴을 보여준다(Fig. 57). 이는 자생탄산염광물의 생성환경에 중요한 단서를 주고 있다. 즉, 자생탄산염광물은 매몰되



자마자 급격히 공극수가 환원환경으로 바뀌면서 메탄가스환원대 내에서 생성되었고, 또한 서로 비슷한 조직을 가지는 탄산염광물들은 서로 비슷한 속성환경 내에서 생성되었다는 것이다. 이는 자생탄산염광물이 생성된 속성환경이 어느 정도 닫힌계에서 일어났음을 지시하고 있다. 하지만 이러한 군집된 형태를 좀 더 자세히 살펴보면 재미있는 현상을 볼 수 있다(Figs. 58 & 59). 두 그림 내에 있는 것은 같은 코아 깊이의 시료들만 따로 도시한 것이다. 이 그림을 보면 같은 코아 깊이 내의 시료들로 전체적으로 비슷한 범위를 보이는 것 같지만, 자세히 살펴보면 서로 차이가 나는 다른 성분을 보여주고 있다는 사실이다. 탄소동위원소 성분이 비슷하지만 서로 다른 산소동위원소 성분을 보여주는 그림 58은 산소동위원소 성분의 차이가 3‰이나 나기 때문에 같은 속성환경이라고 보기는 어렵다. 또한 산소와 탄소동위원소의 성분차이가 뚜렷한 그림 59의 경우는 더더욱 같은 속성환경에서 만들어진 것이라고 볼 수 없다. 이러한 사실은 한 층준에서 발견되는 자생탄산염광물이 서로 다른 깊이에서 만들어졌다는 사실을 암시한다. 하지만 아직도 이를 밝히기 위해서는 좀 더 많은 시료의 분석이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

안정동위원소의 값은 코아 깊이에 따라 도시해 보았다(Fig. 63). 산소동위원소의 경우, 방해석과 아라고나이트가 모두 상부로 갈수록 부화되는 경향을 보인다. 특히 방해석의 경우에는 상부와 하부의 차이가 매우 뚜렷하다. 방해석의 경우에 탄소동위원소의 변화는 코아심도별로 별차이가 없으나 아라고나이트의 경우에는 상부로 갈수록 점차 부화되고 있다. 이는 심도에 따라 퇴적물의 구성성분의 차이가 있을 경우, 이의 영향을 받았을 가능성도 있다는 것을 의미하며, 이를 증명하기 위해서는 퇴적물의 전암분석이 요구된다.

## Type I: Well clustered isotope data

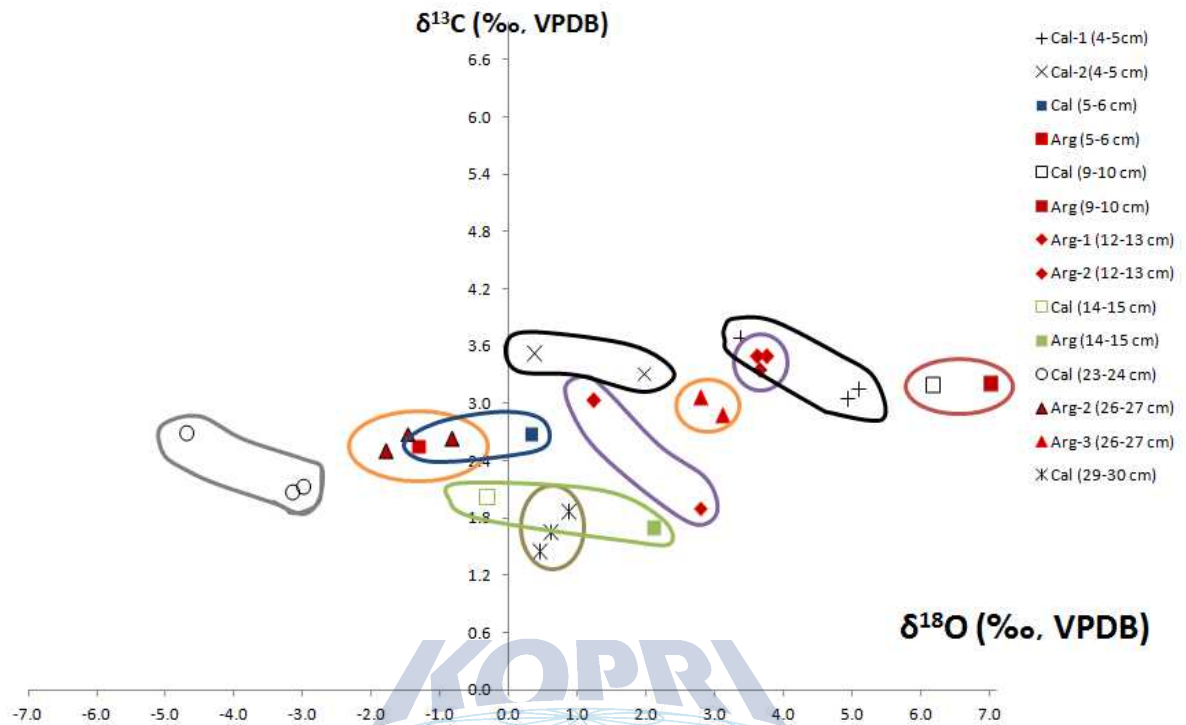


Figure 57. Scatter diagram of carbon vs. oxygen isotope values showing well clustered data. It is very common for calcite and aragonite crystals with the same type of texture show similar isotopic compositions.

## Type I at the core depth of 4-5 cm

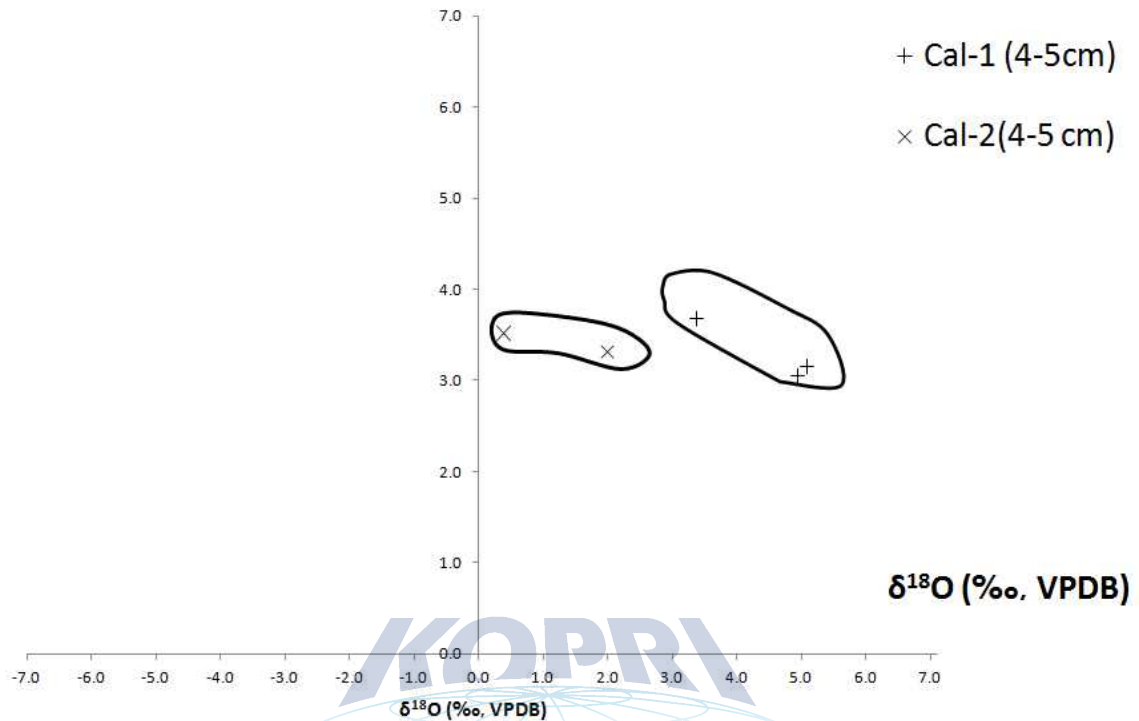


Figure 58. Scatter diagram of carbon vs. oxygen isotope values for the calcite crystals with the core depth of 4-5 cm. Note the completely different two sets of data indicating two separate diagenetic environments of the formation of authigenic carbonates.

## Type I at the core depth of 12-13 cm

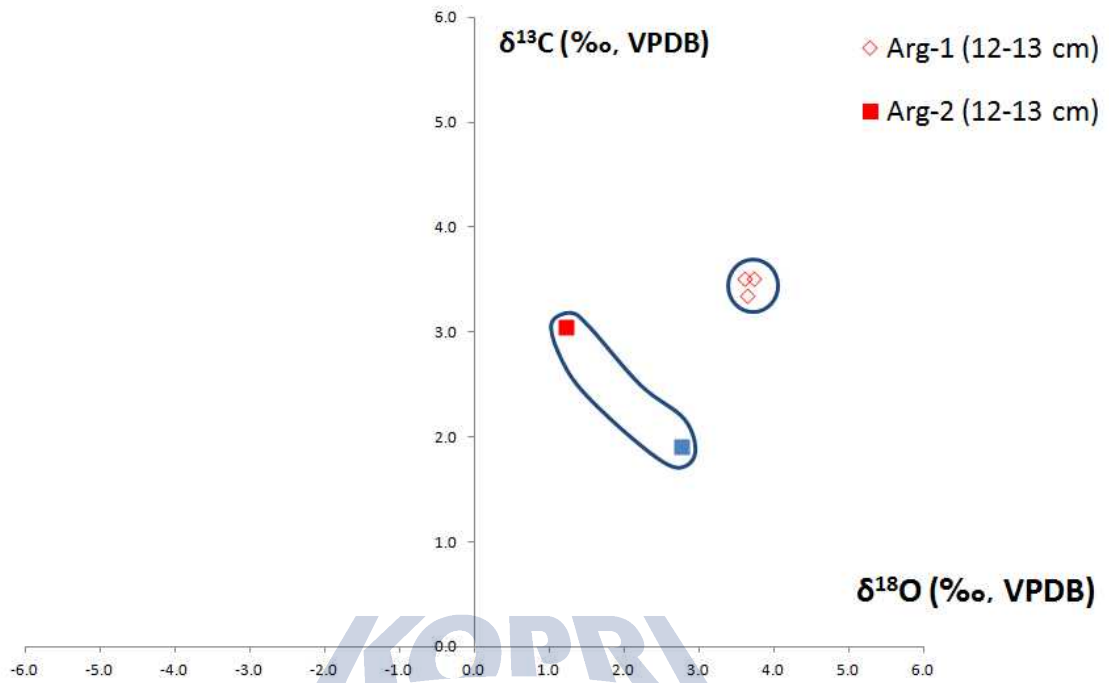


Figure 59. Scatter diagram of carbon vs. oxygen isotope values for the aragonite crystals with the core depth of 12–13 cm. Note the completely different two sets of data indicating two separate diagenetic environments of the formation of authigenic carbonates.

Type II: Similar  $\delta^{13}\text{C}$  but variable  $\delta^{18}\text{O}$  isotope data

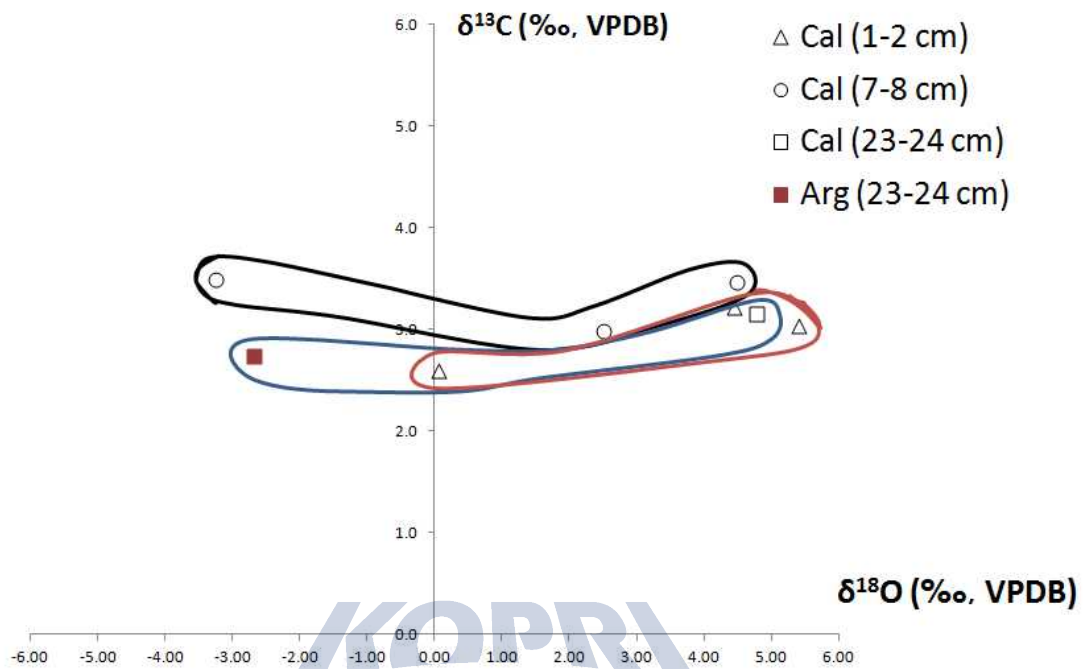


Figure 60. Scatter diagram of carbon vs. oxygen isotope values showing Type II trend which is consistent carbon isotope compositions with variable oxygen isotope values.

Type III: Similar  $\delta^{18}\text{O}$  but variable  $\delta^{13}\text{C}$  isotope data

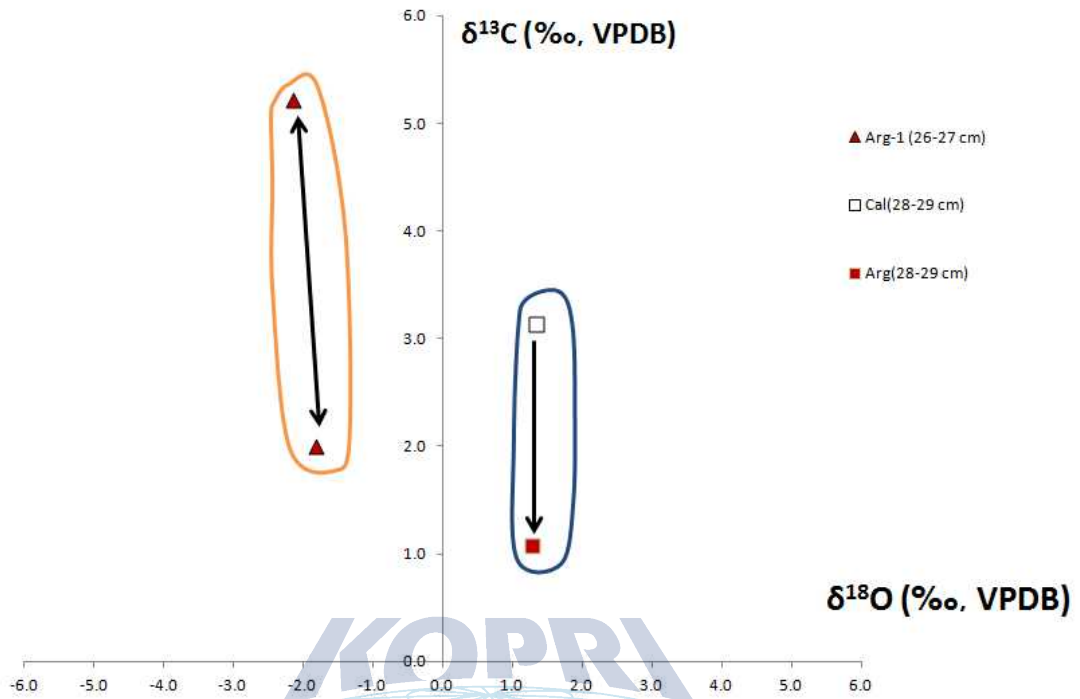


Figure 61. Scatter diagram of carbon vs. oxygen isotope values showing Type III trend which is consistent oxygen isotope compositions with variable carbon isotope values.



## Type IV: Variable $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotope data

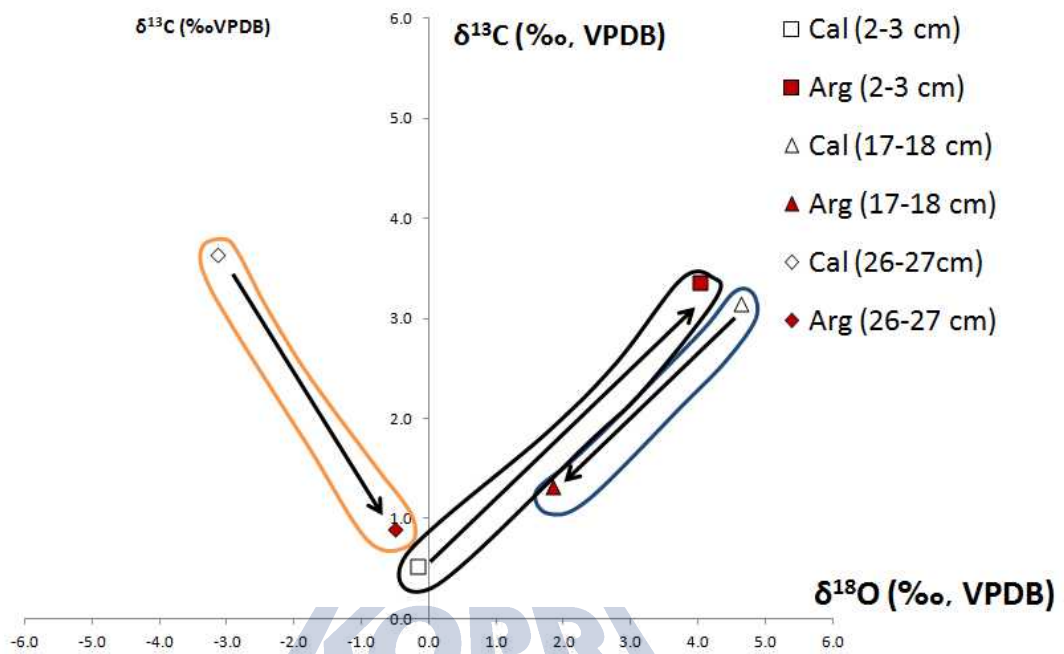


Figure 62. Scatter diagram of carbon vs. oxygen isotope values showing Type IV trend which is variable carbon and oxygen isotope compositions.

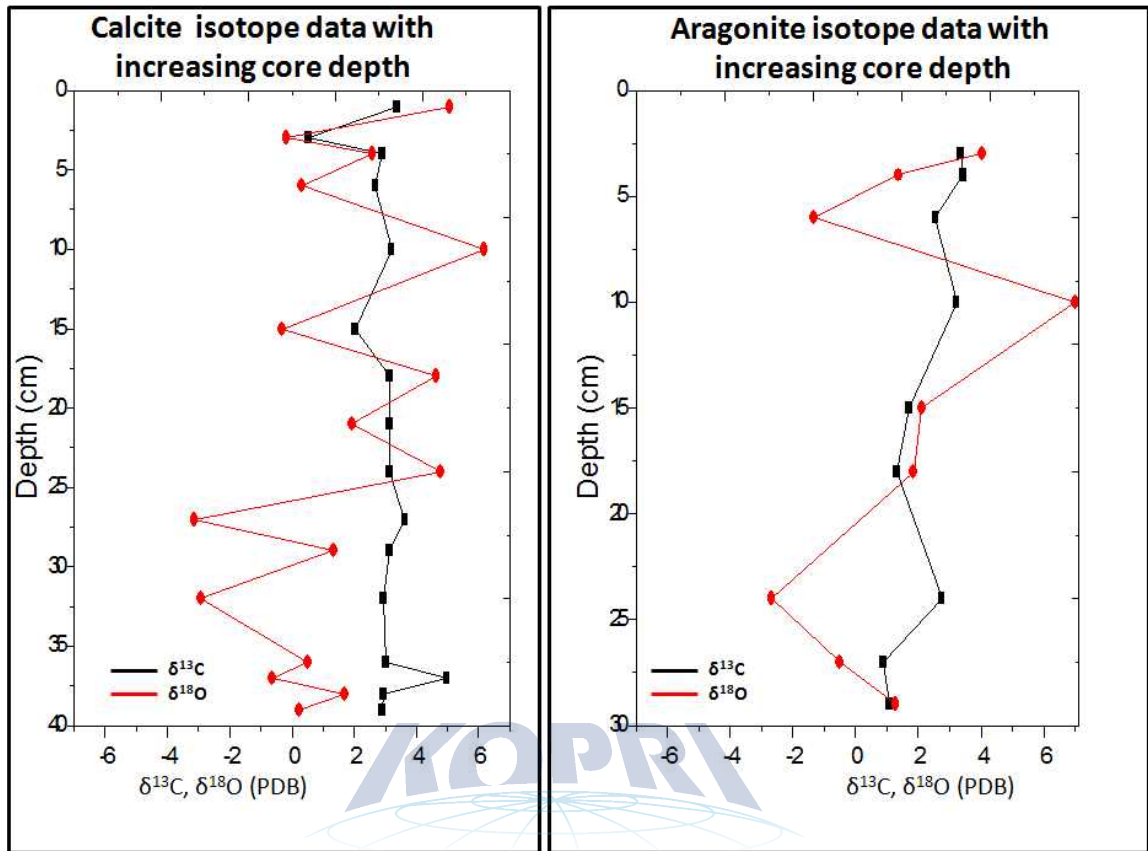


Figure 63. Carbon and oxygen isotope variations with core depth.

### 3. 자생 탄산염광물의 미량원소 성분에 따른 성인

자생 탄산염광물의 미량원소 분석결과 매우 흥미로운 사실이 밝혀졌다. 우선 자생으로 성장한 방해석은  $MgCO_3$ 의 mole%가 4mole%보다 더 낮은 LMC로부터 4mole%보다 더 높은 HMC까지 모두 나타난다는 사실이다(Fig. 48). 이는 공극수의 화학조성이 매우 다양했음을 나타낸다. 또한 특이할만한 사실은 코아깊이 10cm 이내에서는 대부분이 다 HMC가 나타나지만 코아깊이 23cm 이상에서는 모두 LMC로 나타난다는 사실이다. 이를 깊이 에 따른 속성작용의 결과로서 얇은 깊이에서는 HMC로 이루어졌던 것이 점차 매몰되면서 LMC로 변하였다고 생각할 수도 있다. 하지만 각 코아깊이에서 나타나는 시료가 점차 조성이 변하거나 화학성분이 변하지 않기 때문에 이를 속성작용의 결과로만 보기는 매우 어렵다. 또한 산소동위원소 성분이 매몰 깊이가 깊어질수록 지속적으로 고갈되지 않고 부화되었다가 고갈되는 경우가 있는 것은 속성작용으로만 보기 어려운 다른 이유이기도 하다(Fig. 63의 아라고나이트의 산소동위원소를 보라). 따라서 코아시료 내의 HMC와 LMC의 존재는 공극수의 화학적 상태에 따라 서로 각기 다른 형태의 방해석이 침전되었던 것으로 생각된다.

특이한 사실은 코아깊이에 따라 변하는 것이 방해석 내의 Mg의 함량만이 아니라 사실이다. 특히 코아깊이 지점8(8-9cm)까지는 서로 매우 비슷한 경향을 보인다. 즉, Mg의 함량의 높으며(>10,000ppm, >4mole%  $MgCO_3$ )(Figs. 48, 49 & 50),  $\delta^{13}C$  성분도 더 높은 값(>+2.5‰)을 보이고 있다. 전체적으로 범위가 많이 중복되기는 하지만 얇은 코아깊이의 HMC가 깊은 깊이의 LMC나 아라고나이트보다 상대적으로 더 높은 탄소동위원소 성분을 보이는 것은 주목할만한 현상이다. 탄소동위원소만큼 뚜렷하지는 않지만 비슷한 현상이 산소동위원소 성분에서도 볼 수 있다(Fig. 50). 대부분의 HMC와 LMC 시료는 산소동위원소 성분이 중복되지만 일부 LMC 시료가 더 낮은 산소동위원소 성분을 보여주는 것이 있다. 이러한 경향이 일반적인 경향으로 결론 짓기에는 시료분석 결과의 수가 너무 적다. 아라고나이트의 Sr 성분은 방해석보다 높게 나타나며 이는 이미 잘 알려진 사실로서 이 실험의 분석의 정확성을 증명해주고 있다. 또한 HMC의 Sr 성분 값도 LMC보다 더 높게 나타나는 것이 주목할 만하다(>1,000ppm)(Figs. 51 & 52). HMC가 LMC보다 더 높은 Fe(>1,500ppm)와 Mn(>60ppm)의 값을 보여준다(Figs. 53, 54, 55 & 56). 물론 이러한 일반적인 경향에 맞지 않는 경우도 있다. 7번 지점(7-8cm)은 낮은 Fe(700ppm)과 낮은 Mn(20ppm) 값을 보여주며, 9번 지점(9-10cm)에서는 낮은 Mn 값(20ppm)을 보여준다. 얇은 코아깊이와 깊은 깊이와 전이지점인 10번 지점(18-19cm)의 시료는 낮은 Sr(400ppm), 높은 Fe(4,500ppm)와 Mn(180ppm) 값을 보여주는 것이 특징적이다.

일부 예외적인 성분의 변화에도 불구하고 이렇게 얇은 코아시료에서 발견되는 HMC시료의 미량원소 성분과 깊은 코아시료에서 발견되는 LMC시료의 미량원소 성분의 차이는 매우 중요한 의미를 주고 있다. 이러한 사실은 안정동위원소 분석결과에서는 전혀 인지하

지 못했던 결과이기도 하다. 코아 깊이에 따라 미량원소 성분이 뚜렷한 차이를 보이는 것은 코아시료 자체의 차이에 의한 가능성이 매우 높다. 이를 확인하기 위해 코아시료 자체에 대한 분석이 요구된다.

따라서 연구지역의 코아퇴적물 내에서 발견되는 다양한 조직을 보이며 다양한 안정동위원소 성분을 나타내는 자생탄산염광물의 성인을 이해하기 위해서 앞으로 코어 퇴적물 내 fine size 퇴적물에 대한 조직적, 지화학적, 광물학적 연구, 그리고 더 많은 자생 탄산염광물의 추가적인 지화학적 분석을 실시할 필요가 있다.

아울러 이러한 자생 탄산염광물의 성인이 과연 고해양환경의 변화와 어떠한 관계를 가지고 있는 것을 추가적으로 밝힐 수 있다면 북극해의 고해양 환경변화를 이해하는데 이 자생 탄산염광물의 연구가 중요한 기여를 할 수 있을 것으로 기대한다.



## 제 6 절 결론

자생탄산염광물의 조직(미세구조와 배열방향)에 따라 분리한 결과 아라고나이트의 조직은 Radiating Fibrous texture(RFC), Spherulitic fibrous texture, Randomly oriented fibrous texture, Bladed texture로 총 4개의 type으로 나눌 수 있고, 방해석의 조직은 Foliated texture, Equant texture, Bladed texture 총 3개의 type으로 구분할 수 있다. 또한 아라고나이트와 방해석 모두의 표면에서 용식된 조직이 보이는 것은 공극수가 탄산염광물에 대해 불포화상태에도 이르렀음을 나타내며 이는 공극수의 속성환경변화가 매우 다양했음을 나타낸다. 또한 이렇게 다양한 방해석과 아라고나이트 조직을 보이는 것은 자생 탄산염광물이 무기적으로 침전했다는 것은 지시하고 있다.

자생 탄산염광물의 산소동위원소 값은  $-4\sim+8\%$ (VPDB)의 범위에서 변화하며, 탄소동위원소 값은  $+0.5\sim5.5\%$ (VPDB)의 범위에서 변화한다. 이러한 자생 탄산염광물의 탄소동위원소 성분이 이들이 퇴적물이 퇴적된 직후 메탄가스생성대(methanogenic zone)에서 생성되었음을 강력히 지시하고 있다. 하지만 넓은 범위의 산소동위원소 성분을 보이는 이유가 공극속성수의 성분이 영향을 주었다는 것은 알 수 있지만 그 성분의 원인을 해석할 수 있는 여러 증거는 아직도 매우 부족하다. 같은 코아 깊이 내에서 자생 탄산염광물의 안정동위원소 성분이 변화되는 패턴은 크게 4가지로 구분된다: 1) 서로 군집되어 나타나는 경우, 2) 탄소동위원소 성분은 일정하지만 산소동위원소 성분이 변하는 경우, 3) 산소동위원소 성분은 일정하지만 탄소동위원소 성분이 변하는 경우, 4) 산소와 탄소동위원소 성분이 모두 변하는 경우이다. 이는 자생탄산염광물이 생성된 공극수 내의 화학성분의 변화가 매우 다양했음을 나타낸다. 또한 대부분의 시료가 군집된 경향을 보이는 것은 공극수 내에서 한 단계에서 생성한 자생탄산염광물을 성분은 서로 유사하지만, 이러한 같은 깊이 내의 것들도 매몰되어가며 서로 화학성분이 달라졌음을 암시한다.

미량원소 분석결과, 방해석의 LMC와 HMC가 모두 산출되며, 코아 깊이가 얇은 수록 높은 Mg, 높은 탄소와 산소동위원소 성분, 높은 Mn, Fe, Sr 성분을 보여주는 것을 알 수 있었다. 이는 자생탄산염광물의 미량원소 성분이 퇴적물의 깊이에 따라 조절되었으며, 이는 고환경의 변화에 따른 퇴적물의 성분변화에 관련이 있을 가능성을 제시하고 있다.

이러한 연구결과는 북극해에서 산출되는 자생탄산염광물의 성분이 매우 여러 요인에 의해 조절되었음을 암시한다. 앞으로도 모암에 대한 분석과 추가적인 안정동위원소 분석이 수행되어야 북극해에서 산출되는 자생탄산염광물의 성인을 좀 더 정밀하게 이해할 수 있을 것이다.

## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- 이 연구는 서북극해 멘델레프 해령에서 채취한 코어에 분포하고 있는 자생 탄산염광물에 대한 암석학적, 지구화학적 성분을 파악함으로써, 북극지역에 고환경변화를 복원하는데 목적이 있다. 이러한 목적을 위한 단계별 성과목표는 1) 연구지역에서 코어에 존재하는 자생 탄산염광물의 미세조직과 화학성분을 분석하여 분류하고, 2) 분류된 자생 탄산염광물의 안정동위원소 성분을 분석을 통해 3) 서북극해 고해양변화를 복원하기 위한 자료로 활용할 수 있는지를 판단하는 것이다.
- 먼저 연구지역에서 박스코어를 채취하였다. 채취된 퇴적물을 wet sieving을 이용하여 사질과 이질을 분리하고, 분리된 사질 퇴적물에서 picking을 통해 자생 탄산염광물을 획득하였다. 먼저 자생 탄산염광물을 증액분리법을 이용하여 방해석과 아라고나이트로 분리하였다. 분리된 자생 탄산염광물에 대해서는 미세조직과 광물성분을 파악하고, 안정동위원소 분석을 수행하였다. 안정동위원소 분석은 미세조직과 광물성분으로 분리된 각각의 자생 탄산염광물결정으로 분석결과를 취득하였다.
- 이러한 단계별 성과목표는 순차적으로 이루어졌으며, 결과적으로 서북극해에 고해양환경변화를 자생 탄산염광물의 기원을 구명함으로써 연구목표를 충실히 수행하였다고 할 수 있다.



## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 자생 탄산염광물의 안정동위원소 성분이 침전될 당시의 고해양학적인 정보를 반영하고 있음을 확인하였으며, 이로써 자생 탄산염광물을 이용한 연구는 서북극해뿐만 아니라 자생 탄산염광물이 생성되는 지역에 고환경 복원에 있어 가능할 것이다.
- 전지구적인 기후변화에 민감하게 반응하는 북극에서 자생 탄산염광물을 이용한 고환경을 복원한다면, 이는 지구온난화의 원인 및 대응책 마련을 위한 기초자료로 활용될 것이다.



## 제 6 장 참고문헌

- Backman, J., Jakobsson, M., Lovlie, R., Polyak, L., Fedo, L.A., 2004, Is the central Arctic Ocean a sediment starved basin?, *Quat. Sci. Rev.*, 23, 1435-1454.
- Belov, N.A., Lapina, N.N., 1961, Donnye otlozheniya Arkticheskogo bassejna [Seafloor sediments of the Arctic Basin], *Morskoy Transport*, Leninar, 150, (in Russian).
- Belov, N.A., Lapina, N.N., 1970, Fluctuations in Arctic climate as revealed in floor sediment analysis, In: Tolmachev, A.I. (Ed.), *The Arctic Ocean and its coasts in the Cenozoic Era*, Gidrometeorologicheskoe Publishers, Leningrad, 19-25 (Translated from Russian).
- Bjorlykke, K., 1993, Fluid flow in sedimentary basins, *Sediment. Geol.*, 86, 137-158.
- Bjorlykke, K., 1994, Fluid-flow processes and diagenesis in sedimentary basins, In: Pamell, J. (Ed.), *Geofluids: Origin, Migration and Evolution of Fluids in Sedimentary Basins*, Geological Society, Special Publications, 78, Geological Society, London, 127-140.
- Chilingar, G., Bissel, H, and Wulf, K., 1967, *Diagenesis and Catagenesis of Carbonate Rocks, Diagenesis in Sediments*, Amsterdam: Elsevier, Translated under the title *Diagenez i Katagenez osadochnykh obrazovaniy*, Moscow: Mir, 1971, 165-290.
- Comiso, J.C., Parkinson, C.L., Gersten, R., Stock, L., 2008, Accelerated decline in the Arctic sea ice cover, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L01703.
- Darby, D., Jakobsson, M., Polyak, L., 2005, Icebreaker expedition collects key Arctic seafloor and ice data, *Eos Trans, AGU* 86, 549-556.
- Dean, W.E., Arthur, M.A. and Claypool, G.E., 1986, Depletion of  $^{13}\text{C}$  in Cretaceous marine organic matter: source, diagenetic or environmental signal?, *Mar. Geol.*, 70, 119-157.
- Deines P., (1980) The isotopic composition of reduced organic carbon. In Fritz P. and Fontes, J.C. (Ed.) *Hand-book of Environmental Isotope Geochemistry.*, The Terrestrial Environment, 1, 329-409.
- Ericson, D.B., Ewing, M., Wollin, G., 1964, Sediment cores from the arctic and subarctic seas, *Science*, 144, 1183-1192.
- Fuex, A.N., 1977, The Use of Stable Carbon Isotopes I Hydrocarbon Exploration, *J. Geochim. Explor.*, 7, 155-198.
- Hathaway, J.C. and Degens, E.I., 1968, Methane Derived Marine Carbonate of Pleistocene Age, *Science*, 165, 690-692.

- Hedges, J.I. and van Geen, A., 1982, A comparison of lignin and stable carbon isotope compositions in Quaternary marine sediments, *Mar. Chem.*, 11, 43-54.
- Ivanov, M.V., Polikarpov, G.G., Lein, A. Yu., et al., 1991, Biogeochemistry of sulfur cycle in the methane gas emanation region of the black sea, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 320, 1235-1238.
- Jakobsson, M., Lovlie, R., Al-Hanbali, H., Arnold, E., Backman, J., Morth, M., 2000, Manganese color cycles in Arctic Ocean sediments constrain Pleistocene chronology, *Geology*, 28, 23-26.
- Jakobsson, M., Lovlie, R., Arnold, E., Backman, J., Polyak, L., Knutsen, J., Musatov, E., 2001, Pleistocene stratigraphy and paleoenvironmental variation from Lomonosov Ridge sediments, central Arctic Ocean, *Glob. Planet. Change*, 31, 1-21.
- James, N.P. and P.W. Choquette, 1990, Lime-stones the sea-floor diagenetic environment, in I. A. McIlreath, and D.W. Morrow, eds., *Diagenesis*, Ottawa, Ontario, Canada, Geological Association of Canada, p. 13-34.
- Jasper, J.P. and Gagosian, R.B., 1990, The sources and deposition of organic matter in the Late Quaternary Pygmy Basin, Gulf of Mexico, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54, 117-132.
- Keeling, C.D., Whorf, T.P., Wahlen M. and van der Plicht, J., 1995, Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980, *Nature*, 375, 1021-35.
- Kelley, D.S., Karson, J.A., Blackman, D.K., et al., 2001, An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic Ridge at 30° N, *Nature (London)*, 412, 145-148.
- Kholodov, V.N., 1987, Role of sand diapirism in the interpretation of mud volcano genesis, *Litol. Polezn. Iskop.*, 4, 3-11.
- Kholodov, V.N. 1991, Problem of the genesis of minerals in elisional depressions: Communication 2. Cheleken-Boyadag Hydrotherma System, *Litol. Polezn. Iskop.*, 2, 104-123.
- Kholodov, V.N. Kuleshov, V.N., and Nedumov, R.I., 1999, Catagenetic transformations and isotopic composition of carbonates in tertiary sediments: Evidence from Kuban superdeep boreholes (SAS-1 and SAS-2), *Litol. Polezn. Iskop.*, 1, 46-57.
- Lamb, A.L., Graham, P.W. and Melanic, J.L., 2006, A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using  $\delta^{13}\text{C}$  and C/N ratios in organic material, *Earth-Sci. Rev.*, 75, 29-57.
- Lein, A.Yu., Bogdanov, Yu.A., Sagalevich, A.M., et al., 2002a, White columns of a Lost city, *Priroda*, 12, 40-46.
- Longstaffe, F.J., Tilley, B.J., Ayalon, A., 1992, Controls on pore-water evolution during

- sandstone diagenesis, Western Canada sedimentary basin: an oxygen isotope perspective. In: House-Knecht, D.W. (Ed.). *Origin, Diagenesis and Petrophysics of Clay Minerals in Sandstones*, Society of Economic Paleontology and Mineralogy, Special Publications, 47, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 13-34.
- Meyers, P.A., 1994, Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter, *Chem. Geol.*, 114, 289-302.
- Nissenbaum, A., 1984, Methane Derived Organic Matter and Carbonates, *Org. Geochem.*, 5, 187-192.
- O'regan, M., King, J., Backman, J., Jakobsson, M., Palike, H., Moran, K., Heil, C., Sakamoto, T., Cronin, M., Jordan, R., 2008, Constraints on the Pleistocene chronology of sediments from the Lomonosov Ridge, *Paleoceanography*, 23, PA1S19.
- Polyak, L., Curry, W.B., Darby, D.A., Bischof, J., Cronin, T.M., 2004, Contrasting glacial/interglacial regimes in the western Arctic Ocean as exemplified by a sedimentary record from the Mendeleev Ridge, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 203, 73-93.
- Prahl, F.G., Ertel, J.R., Goni, M.A. and Eversmeyer, B., 1994, Terrestrial organic carbon contributions to sediments on the Washington margin, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 3035-3048.
- Sellen, E., Jakobsson, M., Backman, J., 2008, Sedimentary regimes in Arctic's Amerasian and Eurasian basins: clues to differences in sedimentation rates, *Global Planet. Change*, 61, 275-284.
- Spielhagen, R., Baumann, K., Erlenkeuser, H., Nowaczyk, N., Norgaard-Pedersen, N., Bogt, C., Weiel, D., 2004, Arctic Ocean deep-sea record of northern Eurasian ice sheet history, *Quat. Sci. Rev.*, 23, 1455-1483.
- Strakhov, N.M., 1951, Calc-Dolomitic Facies of Modern and Ancient Basins, *Trudy IGN Akad. Nauk SSSR*, 124, *Der. geol.*, 221-218
- Stroeve, J., Serreze, M., Drobot, S., et al., 2008, Arctic sea ice extent plummets in 2007, *Eos Trans, AGU* 89, 13-14.
- Suess, E., Bohrmann, G., Linke, P., et al, 1998, Gas hydrates and fluid venting from the Cascadia Accretionary Margin, *EOS Transactions of the American Geophysical Union Supplement*, 77, 321-323.
- Taft, W.H., 1967, Physical chemistry of carbonate formation, *Development in Sedimentology* 9B. Carbonate Rocks. Physical and Chemical Aspects, Chilingar, G., Bissel, H., and Fairbridge R., Eds., Amsterdam: Elsevier, Translated under the title *Karbonatnye porody*, Moscow: Mir, 1971, 112-123.
- Thornton, S.F. and McManus, J., 1999, Applications of organic carbon and nitrogen

- stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: evidence from the Tay Estuary, Scotland. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 38, 219-233.
- Tilley, B.J., Longstaffe, F.J., 1989, Diagenesis and isotopic evolution of porewaters in the Alberta Deep Basin: the Falher Member and Cadomin Formation. *Geochim. Cosmochim. Acta* 53, 2529-2546
- Von Rad, U., Rosch, H., and Berner, H., et al., 1996, Authigenic carbonates derived from oxidized methane vented from the arkran ccretionary rism of Pakistan, *Mar. Geolo.*, 136, 55-77.
- Woo, K.S. and Khim, B.K., 2005, Stable oxygen and carbon isotopes of carbonate concretions of the Miocene Yeonil Group in the Pohang Basin, Korea: Types of concretions and formation condition, *Sedimentary Geology*, 183, 15-30.

