



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

2022년 8월  
석사학위 논문

경상남도 고성군 서남부 지역에  
분포하는 구조절리와 중첩된  
주상절리의 해석

조선대학교 대학원  
과학교육학과(지구과학전공)  
이 수 영

경상남도 고성군 서남부 지역에  
분포하는 구조절리와 중첩된  
주상절리의 해석

Interpretation of structural joints and columnar joints  
distributed in the southwestern region of Goseong-gun,  
Gyeongsangnam-do

2022년 8월 26일

조선대학교 대학원  
과학교육학과(지구과학전공)  
이 수 영

경상남도 고성군 서남부 지역에  
분포하는 구조절리와 중첩된  
주상절리의 해석

지도교수 안 건 상

이 논문을 이학석사학위 신청 논문으로 제출함

2022년 4월

조선대학교 대학원  
과학교육학과(지구과학전공)  
이 수 영

## 이수영의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수

안 경 진



위 원 조선대학교 교수

박 영 신



위 원 조선대학교 교수

안 건 상



2022년 5월

조선대학교 대학원

## 목 차

I. 서론 .....	1
1. 연구 배경 .....	1
2. 연구 동향 .....	5
3. 연구 방법 .....	7
II. 이론적 배경 .....	9
1. 단열 .....	9
2. 구조절리의 분류 .....	10
3. 주상절리 용어정리 .....	11
4. 주상절리 형성이론 .....	11
III. 연구지역 지질 .....	14
1. 일반지질 .....	14
2. 퇴적암층(사암) .....	16
3. 유문암 .....	16
4. 유문암질 응회암 .....	22
IV. 구조절리와 주상절리의 형태분석 .....	32
1. 구조절리 형태분석 .....	34
1) Site 4 (하일면 동화리 마을 남부) .....	34
2) Site 1 (하일면 춘암리 맥전포항) .....	39
3) Site 2 (하일면 춘암리 용암포항 건너편 해안 노두) .....	43
4) Site 3 (남부 무인도서) .....	47

5) Site 5 (동부 무인도서) .....	51
6) 연구지역 구조절리 방향성 측정 결과 .....	57
2. 구조절리가 중첩된 주상절리 .....	59
1) Site 1 (하일면 춘암리 맥전포항) .....	59
2) Site 2 (하일면 춘암리 용암포항) .....	61
3) Site 3 (남부권역 무인도서 중 토끼섬) .....	61
3. 주상절리 형태분석 .....	64
1) Site 1 (하일면 춘암리 맥전포항) 주상절리 .....	64
2) Site 2 (하일면 춘암리 용암포항) 주상절리 .....	68
3) Site 3, 5 (연구지역 무인도서) 주상절리 .....	75
4) 연구지역 주상절리 측정 결과 .....	81
V. 암석화학 .....	82
1. 주성분원소 .....	84
2. 미량원소 .....	86
VI. 토의 .....	89
VII. 결론 .....	91
<b>【참고문헌】</b> .....	96

## List of Tables

Table 1. Columnar joint of the world in Giants Causeway Guide .....	3
Table 2. Strike of structural joints of site 4 at Donghwa-ri .....	38
Table 3. Strike of structural joints of site 1 at Maekjeonpo(port) .....	42
Table 4. Strike of structural joints of site 2 at Yongampo(port) region .....	46
Table 5. Strike of structural joints of site 3 at uninhabited island southern .....	50
Table 6. Strike of structural joints of site 5 at uninhabited island eastern region .....	56
Table 7. Strike of structural joints of total site in study area .....	57
Table 8. Measurement of columnar joint in Maekjeonpo(port) .....	65
Table 9. Measurement of columnar joint in Yongampo(port) .....	73
Table 10. Measurement of columnar joint in uninhabited island .....	79
Table 11. Measurement of columnar joint in study area .....	81
Table 12. Site with names, geographical location in the study area .....	82
Table 13. Major elemental analyses(wt%) in study area .....	85
Table 14. The concentration of trace elements(ppm) in study area .....	88
Table 15. Classification of structural joints and columnar joints that develop by region among the research areas .....	91



## List of Figures

Figure 1. Location of columnar joint in South Korea .....	2
Figure 2. Columnar joint restoration process with overlapping structural joint .....	8
Figure 3. Schematic model showing joint classification according to geometry	10
Figure 4. Symbols of Columnar joint .....	12
Figure 5. Schematic formation of cracks at cooling surface on thermal contraction model .....	13
Figure 6. The geology map of study area in Goseong .....	15
Figure 7. Photographs of the Donghwa-ri .....	17
Figure 8. Microphotographs of sandstone on the Donghwa-ri .....	18
Figure 9. Photographs of outcrop in the Anjang-seom(island) .....	20
Figure 10. Microphotographs of rhyolitic on the Anjang-seom(island) .....	21
Figure 11. The rhyolite tuff layer covering the sedimentary rock layer .....	22
Figure 12. Photographs of outcrop in the Maekjeonpo(port) area .....	23
Figure 13. Microphotographs of rhyolitic tuff on the Maekjeonpo(port) area .....	24
Figure 14. Photographs of outcrop in the Yongampo(port) area .....	26
Figure 15. Microphotographs of rhyolitic tuff on the Yongampo(port) .....	27
Figure 16. Photographs of outcrop in the Tokki-seom(island) .....	28
Figure 17. Microphotographs of rhyolitic tuff on the Tokki-seom(island) .....	29
Figure 18. Photographs of outcrop in the Neuk-do(island) .....	30
Figure 19. Microphotographs of rhyolitic tuff on the Neuk-do(island) .....	31
Figure 20. Distribution area of structural joint and columnar joint .....	33
Figure 21. Structural joints distributed in Donghwa-ri .....	35
Figure 22. Rose diagram shows strike of all structural joints and main structural joints at site 4 in Donghwa-ri .....	38
Figure 23. Structural joints distributed in Maekjeonpo(port) .....	40
Figure 24. Rose diagram shows strike of all structural joints and main structural joints at site 1 in Maekjeonpo(port) .....	42

Figure 25. Structural joint intersecting in the shape of an X(northern area) ..... 44

Figure 26. Structural joint intersecting in a grid pattern(southern area) .... 45

Figure 27. Rose diagram shows strike of all structural joints and main structural joints at site1 in Yongampo(port) ..... 46

Figure 28. Structural joint developed at the edge of Anjang-seom(island) ..... 48

Figure 29. Structural joint in the east-west direction across Tokki-seom(island) ..... 49

Figure 30. Structural joint that develops by breaking the section of columnar joint ..... 49

Figure 31. Rose diagram shows strike of all structural joints and main structural joints at site 3 in uninhabited island southern region ..... 50

Figure 32. Structural joint in the horizontal direction formed primarily after cooling ..... 52

Figure 33. After the formation of the first horizontal joint, the second vertical joint formed by tectonic movement ..... 52

Figure 34. Horizontal columnar joints formed by the intrusion of lava flows ..... 53

Figure 35. Cross section of columnar joint exposed after fracture by structural joint ..... 53

Figure 36. Structural joint that develops across the island in the EW direction ..... 54

Figure 37. Structural joint in three directions developed in Jangyeo ..... 55

Figure 38. Structural joints that develop in a certain direction on the eroded land ..... 55

Figure 39. Rose diagram shows strike of all structural joints and main structural joints at site 5 in uninhabited island eastern region ..... 56

Figure 40. Rose diagram shows strike of all structural joints and main structural joints at all study area ..... 58

Figure 41. Photograph and sketch of overlapping phenomenon of columnar and structural joints in Maekjeonpo(port) ..... 60

Figure 42. Photograph and sketch of overlapping phenomenon of columnar and structural joints in Yongampo(port) ..... 62

Figure 43. Photograph and sketch of overlapping phenomenon of columnar and structural joints in Tokki-seom(island) ..... 63

Figure 44. Columnar joint measurement site in Maekjeonpo(port) ..... 65

Figure 45. Photograph and sketch of columnar joint in Maekjeonpo(port) (Site 1-A) ..... 66

Figure 46. Photograph and sketch of columnar joint in Maekjeonpo(port) (Site 1-B) ..... 67

Figure 47. Columnar joint measurement site in Yongampo(port) ..... 69

Figure 48. Photograph and sketch of columnar joint in Yongampo(port) (Site 2-A) ..... 70

Figure 49. Fiamme structure of welded tuff developed in the cross section of columnar joint ..... 71

Figure 50. Concentric circular structure by iron oxide ..... 71

Figure 51. Photographs of columnar joint across from Yongampo(port) (Site 2-B) ..... 72

Figure 52. Cross section of columnar joint across from Yongampo(port) (Site 2-B) ..... 72

Figure 53. Photographs of columnar joint across from Yongampo(port) (Site 2-C) ..... 74

Figure 54. Cross section of columnar joint across from Yongampo(port) (Site 2-C) ..... 74

Figure 55. Columnar joint developed in Anjang-seom(island) ..... 75

Figure 56. Photograph and sketch of columnar joint in Anjang-seom(island) ..... 76

Figure 57. Columnar joint developed in Tokki-seom(island) ..... 77

Figure 58. Photograph and sketch of columnar joint in Tokki-seom(island) ..... 78

Figure 59. Photograph and sketch of columnar joint in Neuk-do(island) .. 80

Figure 60. Location of the sampling area in Goseong ..... 83

Figure 61. Total alkali vs SiO<sub>2</sub> (wt%) diagram(TAS) with analyses of rock in study area ..... 84

Figure 62. AFM diagram for study area ..... 86

Figure 63. Spidergram of trace element concentration in rock to Primitive  
Mantle ..... 87

Figure 64. Columnar joint restoration process with overlapping structural  
joint ..... 90

Figure 65. Structural joint by cutting horizontal columnar joint ..... 90

Figure 66. Structural joints and columnar joints in the study area ..... 93

Figure 67. Total alkali vs SiO<sub>2</sub> (wt%) diagram(TAS) with analyses of rock  
in Goseong, Manjae-do, Goheung area ..... 94

## ABSTRACT

### Interpretation of structural joints and columnar joints distributed in the southwestern region of Goseong-gun, Gyeongsangnam-do

Lee, Sooyoung

Advisor : Prof. Ahn Kun-sang Ph.D.

Department of Natural Sciences(Earth Science)

Graduate School of Chosun University

In the southern coast of the Korean Peninsula, columnar joints are well developed by various igneous activities in the Cretaceous to the Quaternary time. However, the cross-sections and columns of the joints were destroyed due to structural joints by exterior physical forces. Therefore, characteristic shapes by above columnar joints were changed and difficult to interpret them. For example, an area where columnar joints are developed was actually interpreted as one formed by joints by tectonic movement. The study areas are composed of Maekjeonpo(port) and Yongampo(port), Donghwa-ri village, and surrounding uninhabited islands in the southwestern area of Goseong-gun, Gyeongsangnam-do. In this area, strikes of columnar joints were measured at five localities composed of rhyolitic tuffs and others. In addition, structural joints overlapped the columnar ones were also measured together in the rocks of the Jindong Formation in strike scope. In this study, structural joints developed in the rhyolites and rhyolitic tuffs of the formation were measured in strike, particularly. Additionally, original columnar joints where overlapped structural ones were removed in the rocks were

measured in shape and size of the cross-sections. This method is proposed as an analytical one on columnar joints.

The frequencies of structural joints measured in the study area are as follows. Joints in the northeast direction are NS~N9°E 4.29%, N10°E~N19°E 4.29%, N20°E~N29°E 5.71%, N30°E~N39°E 6.43%, and N40°E~N49°E 2.86%. The joints in the north-northwest direction are N11°W~N20°W 2.86%, N21°W~N30°W 11.43%, N31°W~N40°W 4.29%, and N41°W~N50°W 0.71%. In the east-west direction, N80°E~N89°E 15.71% and N81°W~EW 19.29% are predominate.

The polygon numbers (N) of columnar joints measured in the study area are 7% for rectangles, 29% for pentagons, 43% for hexagons, 20% for heptagons, and 1% for octagons. Among them, hexagons occupy the highest position. The widths (L) of the column surface in the joints are 1~10cm 16.2%, 11~20cm 23.8%, 21~30cm 19.1%, 31~40cm 15.0%, 41~50cm 7.6%, 51~60cm 7.9%, 61~70cm 4.3%, 71 2.9% for ~80cm and 3.2% for those over 81. 11~20cm accounted for the highest proportion among them. The angles ( $\theta$ ) between the column planes showed the highest frequency with 23.6% of 140° or more, 100°-109° 12.8%, 120°-129° 11.5%, 90°-99° 11.5%, 110°-119 ° 9.6%, 130°~139° 9.6%, 80°~89° 9.0%, 70°~79° 4.5%, 3.8% below 69°.

The rocks possessing the columnar joints were plotted in TAS diagram through XRF analyses. Maekjeonpo and Yongampo ports, uninhabited islands of Anjang-seom(island), Tokki-seom(island), Yuk-seom(island), and Neuk-do(island) are composed of rhyolites. On the other hand, the Donghwa-ri village was plotted in the dasite area.

In the study areas, the structural and columnar joints in the Jindong formation are mutually similar in trend. The columnar joints show original cross-sections through removal of structural ones of approximate three trends and are capable of their morphological approaches. In southern

coast, columnar joints in rhyolites and rhyolitic tuffs are developed in Goheung and Manjaedo areas. Comparing to the columnar joints of the above two areas and the study area, the overall appearance is similar, but it is very different from the width of the column faces in the joints, Manjaedo area. It is inferred that the growth rates of the joints were different due to surrounding conditions during cooling.

The results of this study suggest a method to interpret the areas where columnar and structural joints are mixed, and would be used as basic data to interpret columnar joints distributed in the southern coast, not limited to the study area.

## 국문초록

한반도 남해안에는 중생대 백악기부터 신생대 제4기까지의 화성활동으로 형성된 주상절리가 발달하고 있다. 하지만 물리적 힘에 의해 만들어진 구조적 절리 등의 영향으로 주상절리의 단면과 기둥이 훼손되어 그 형태를 해석하는데 많은 어려움이 있었다. 실제로 주상절리가 형성되었던 지역이지만 지구운동에 의해 만들어진 단순한 절리대로 해석한 경우도 존재한다. 연구지역은 경상남도 고성군 서남부 일대 중 맥전포항, 용암포항, 동화리 마을 그리고 주변 무인도서 등이다. 이 지역의 진동층에 해당하는 유문암질 응회암 등으로 구성된 주상절리를 대상으로 총 5곳에서 주상절리 측정이 이루어졌으며, 진동층 암석에 발달하는 주상절리에 중첩되어 나타나는 구조절리의 주향도 함께 측정하였다. 특히, 이 연구에서는 이 층의 유문암과 유문암질 응회암에 전개되는 구조절리의 주향을 측정하였다. 그리고 이들 암석들의 주상절리에 중첩되어 나타나는 구조절리를 제거한 후, 주상절리 본연의 단면 형태를 복원하여 그 형태와 크기를 측정하였다. 이를 이용하여 연구지역에 분포하는 특징적인 주상절리를 분석하는 방법을 제시하였다.

연구지역에서 측정된 구조절리의 전체 빈도수는 다음과 같다. 북북동 방향의 절리는 NS~N9°E 4.29%, N10°E~N19°E 4.29%, N20°E~N29°E 5.71%, N30°E~N39°E 6.43% 그리고 N40°E~N49°E 2.86%이다. 북북서 방향의 절리는 N11°W~N20°W 2.86%, N21°W~N30°W 11.43%, N31°W~N40°W 4.29%과 N41°W~N50°W 0.71%이다. 동서 방향은 N80°E~N89°E 15.71%와 N81°W~EW 19.29%가 가장 우세하다.

연구지역에서 측정된 주상절리 다각형의 수(N)는 4각형이 7%, 5각형이 29%, 6각형이 43%, 7각형이 20%, 8각형이 1%로 6각형이 가장 높은 비율을 차지한다. 기둥면의 폭(L)은 1~10cm 16.2%, 11~20cm 23.8%, 21~30cm 19.1%, 31~40cm 15.0%, 41~50cm 7.6%, 51~60cm 7.9%, 61~70cm 4.3%, 71~80cm 2.9%, 81cm 이상 3.2%로 11~20cm가 가장 높은 비율을 차지한다. 기둥면 사이의 각( $\theta$ )은 140°이상이 23.6%로 가장 높은 빈도율을 보이며, 100°~109°



12.8%, 120°~129° 11.5%, 90°~99° 11.5%, 110°~119° 9.6%, 130°~139° 9.6 %, 80°~89° 9.0%, 70°~79° 4.5%, 69° 이하 3.8%의 빈도율을 보인다.

주상절리가 전개되는 암석들은 XRF 분석을 통하여 그 유형을 TAS도에 표시하였다. 주상절리가 전개되는 맥전포항, 용암포항, 그리고 무인도서인 안장섬, 토끼섬, 육섬, 늑도 지역 등은 유문암에 해당한다. 한편 동화리 마을 지역은 데사이트 영역에 표시되었다.

연구지역 중 진동층 암석에 발달하는 구조절리와 주상절리에 발달하는 방향성은 서로 유사하게 나타난다. 크게 세 방향으로 발달하는 구조절리를 제거하면 본연의 주상절리 단면을 관찰할 수 있으며, 연구지역 주상절리의 형태학적 분석이 가능하다.

남해안에 위치한 지역 중 유문암 및 유문암질응회암에 주상절리가 발달하는 지역으로는 고흥과 만재도가 있다. 위의 두 지역과 연구지역의 주상절리를 비교해보면 절리 기동면 쪽에서 고흥 지역과 전체적으로 유사한 모습을 보이지만, 만재도 지역과는 많은 차이를 보였다. 이는 냉각 당시 환경에 의한 주상절리의 성장 속도 차이에서 비롯된 것으로 추정된다.

본 연구를 통해 나타난 결과는 주상절리와 구조절리가 혼재된 지역을 해석하는 방법을 제시하는 한편, 연구지역에 국한되지 않고 남해안에 존재하는 특이한 형태의 주상절리를 해석하는 기초자료로서 활용될 수 있을 것이다.

# I. 서론

## 1. 연구 배경

주상절리는 분출된 용암이나 응회암이 냉각되어 수축할 때 다각형으로 갈라져 기둥처럼 형성되는 암상이다. 지표나 지하 얕은 곳에서 용암이 냉각되기 시작하면 여러 개의 점을 중심으로 수축하며 부피가 축소되는 과정에서 균열이 만들어지고 이 균열은 주로 사각형에서 칠각형까지 다양하게 나타난다. 이들 다각형 중에서 6각형의 단면이 가장 많은 이유는 안정된 구조와 효율성 때문으로 알려져 있다(안건상, 2014a).

주상절리는 지형·지질학적 가치가 높고 경관이 우수하여 천연기념물이나 명승, 또는 국가지질공원으로 지정되어 보호되고 있다. 남한 전체적으로는 68개 이상의 지역에서 주상절리가 분포한다고 알려져 있다(손정모, 2016; Fig. 1). 대표적인 지역은 포항 달전리(천연기념물 제415호), 제주 문섬·범섬(천연기념물 제421호), 강원도 한탄강 대교천 현무암 협곡(천연기념물 제436호), 무등산 주상절리대(천연기념물 제465호), 강동화암주상절리(시도기념물 제42호), 양남 주상절리군(경주시), 직소폭포(부안군), 적벽강(부안군), 중문-대포주상절리대(제주도) 등이 있다.

Giants Causeway Guide(2021)는 우리나라 중문-대포주상절리대를 포함하여 세계적으로 유명한 주상절리 25곳을 소개하고 있다(Table 1). 대표적인 곳으로 미국의 The Sea Cave, Devils Postpile, 아이슬란드 Aldeyjarfoss, Arnarstapi, 아르메니아의 Garni Gorge, 일본 타카치호 계곡, 한국의 대포동 주상절리대 등이 이에 해당한다.

해안의 절벽에서 관찰되는 수직방향의 절리는 주상절리와 구조절리의 2가지 가능성이 있다. 주상절리와 구조절리는 전면부에서 기둥면을 볼 때 형태적으로 유사하다. 그러나, 상부에서 관찰할 때 주상절리는 다각형의 형태를 보이는 반면 구조절리는 선구조의 형태로 나타난다. 또한, 주상절리는 마그마가 분출된 후 냉각되거나 화산쇄설류가 쌓여 냉각될 때 만들어지는 1차 구조로 화산활동의 직접적인 증거가 될 수 있다. 구조절리는 확장 단열에 의한 응력을 받아 형성된 신장절리로, 지각 상부의 취성(brittle)변형에 노출된 환경에서 확장응력을 받고 있을 때 형성된다(김영석 역, 2013). 구조절리는 취성변형에 노출된 환경에서 확장응력을 받은 후,

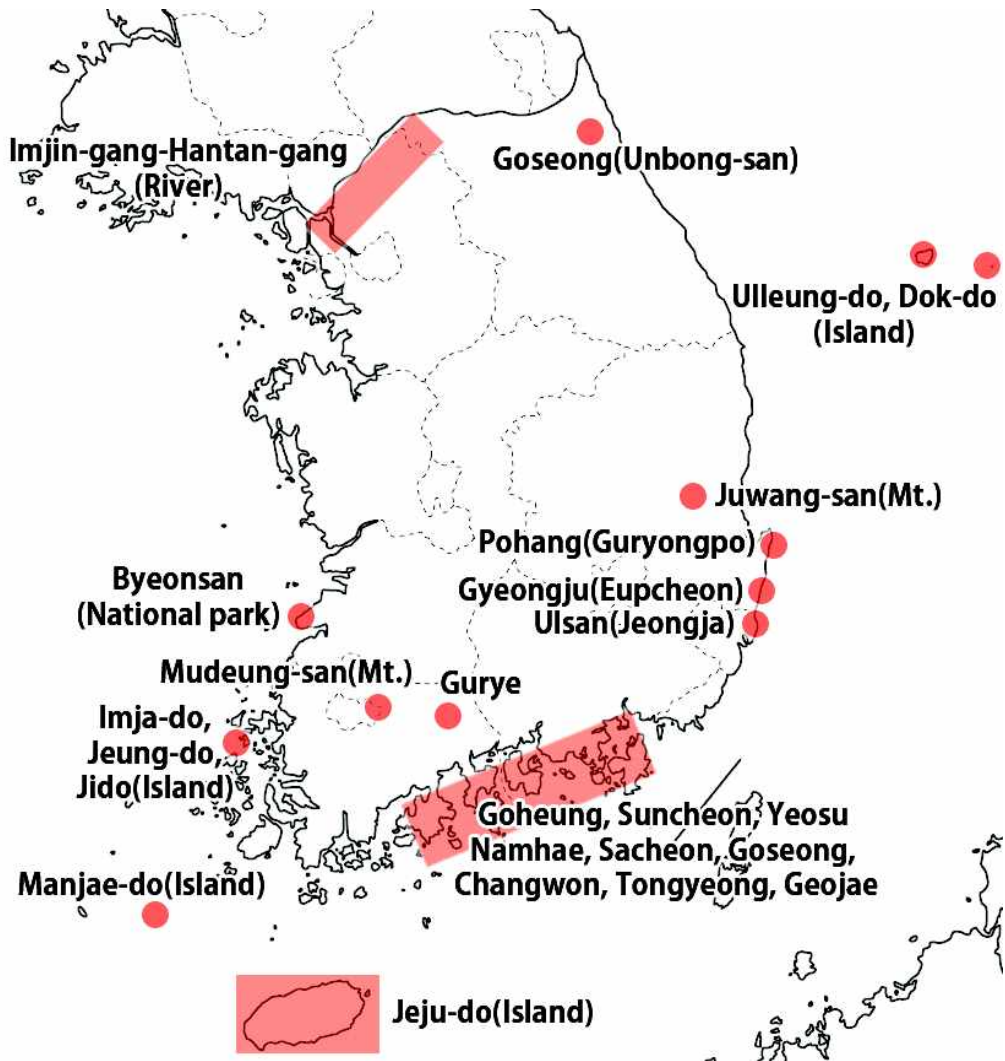


Fig. 1. Location of columnar joint in South Korea(modified of Son, 2016).

Table 1. Columnar joint of the world in Giants Causeway Guide.  
 (<https://giantscausewayofficialguide.com/about/similar-structures-around-the-world/>)

국가	명칭	국가	명칭
America	The Sea Cave, Akun Island	Germany	Zlaty Vrch Czech Republic
	Devils Postpile	India	St. Mary Island
Armenia	Garni Gorge	Israel	The Hexagonal Pool
Iceland	Aldeyjarfoss	Japan	Takachiho Gorge
	Arnarstapi	Korea	Basalt Cliffs
	Dveghamrar	Mexico	Los Prismas
	Gerduberg	Portugal	Flores Island
	Kalfshamarsvik	Russia	Cape Stolbchaty
	Kirkjugolf	Scotland	Fingals Cave, Staffa Flow
	Litlanesfoss, Fljotsdalur valley	Spain	Los Organos
	Reynisfjara Beach, Vik Village	Taiwan	Penghu
	Studlagil	Vietnam	Ghenh Da Dia
	Svartifoss Waterfall		

붕압이 없거나 낮은 곳 또는 낮은 차등응력인 환경에서 형성되어 지구조운동의 증거가 될 수 있다. 연구지역은 일반적 주상절리와 함께 특이한 구조절리가 같이 중첩되거나 이로 인해 파쇄된 형태를 보이는 주상절리가 분포하고 있다. 이러한 현상은 연구지역을 포함한 인근 지역에서도 발견된다. 안건상(2014a)은 연구지역 주변인 병풍바위 전망대 근처의 주상절리 연구에서 기둥면이나 연장선이 불분명하고 맥전포항까지 이어지는 해안에 존재하는 절리는 기다란 직사각형 형태라서 주상절리가 아닐 수 있다는 의문점을 제시했다.

구조절리는 대표성을 띠는 방향으로 각각 절리조를 이루어 발달하며, 연구지역처럼 주상절리와 구조절리가 혼재된 지역은 주상절리의 형성 메커니즘을 규명하는데 어려움이 있다. 일반적으로 전면부에서 보는 절리의 기둥만으로 주상절리와 구조절리 구분이 어려운 경우도 존재하며, 여러 구조절리가 복합적으로 형성된 구조를 보며 주상절리의 기둥 단면으로 오인하고 주상절리로 해석하는 경우가 발생한다.

이러한 문제점을 해소하기 위해서는 주상절리 내에서 발달하는 구조절리 및 독자적으로 형성된 구조절리의 기준을 명확하게 할 필요가 있다. 또한, 구조절리의 형태학적 기준을 마련하여 주상절리 특성을 연구하는데 중첩되는 구조절리와 구분이 필요하다.

경남 고성지역을 포함하여 한반도 남부에는 중생대 백악기부터 신생대 제4기에 이르기까지 활발한 화산활동으로 형성된 주상절리가 분포하고 있다. 경상남도 고성 서남부지역의 화산암 하부에 분포하는 퇴적암층에는 여러 퇴적구조와 함께 구조절리가 대표성을 띠는 방향으로 잘 기록되어 있으며, 연구지역 주변의 화산암에도 경사가 수직 및 수평인 여러 주향의 구조절리가 발달한다. 그리고 이 구조절리들은 화산암에 만들어진 주상절리와 중첩되어 나타난다. 병풍바위를 기준으로 동부에 존재하는 맥전포항, 용암포항, 동화리마을 남부와 그 주위 무인도서들이 포함된다. 이 해안가에서 발견되는 절리들의 특징은 주상절리와 구조절리들이 중첩되어 나타나는 현상으로, 특히, 용암포항에서는 주상절리 암체에서 구조절리로 인해 분리된 암석이 해안가 주변에서 발견되기도 한다.

이 연구는 진동층의 퇴적층에 기록된 주상절리와 구조절리의 중첩 현상을 분석하고 구조절리 영향을 받는 주상절리의 형태학적 특성을 밝히는데 목적이 있다. 연구의 선행 조건으로 주상절리의 생성 당시 구조를 정확히 파악하기 위해서 구조절리 중첩 영향을 최대한 배제할 필요가 있다. 따라서, 구조절리가 주상절리에 중첩되어 있는 경우 이를 해석할 수 있는 명확한 기준과 방법을 제시하고자 한다. 또한, 연구지역인 산성 및 중성 화산암의 주상절리와 유사한 성분의 다른 지역 주상절리와 비교하여 연구지역 주상절리의 형태학적인 특징을 비교하고자 한다. 연구결과는 구조절리와 주상절리가 혼재되어 있는 지질환경을 해석할 수 있는 기초자료로 활용할 수 있다.

연구지역은 경상남도 고성의 하일면 춘암리, 동화리, 송천리를 포함한 총 연장 16km 해안과 해안 인근에 위치하는 무인도서를 포함한다. 상세 연구지역은 경상남도 고성군 하일면 춘암리의 맥전포항, 춘암리의 용암포항, 동화리 남부 일대, 안장섬, 토끼섬, 육섬, 늑도, 장여 등이다. 연구대상은 이들 지역에 존재하는 주상절리와 구조절리이다.

## 2. 연구 동향

주상절리에 대한 국외 연구는 주상절리의 형성 과정을 파악하기 위한 실내연구 및 현장연구가 지속적으로 진행되고 있다. 현재까지 진행된 실내연구 중 전분 혼합액 실험은 현무암 주상절리의 냉각률 효과 및 형태학적인 특성을 이해하기 위한 대표적인 실험이다. Toramaru and Matsumoto(2004)는 전분 혼합액 실험에서 전분액과 램프 사이의 거리를 다양하게 제어하며 램프가 가까이 있을 땐 빨리 굳기 때문에 높은 냉각률로 5각형이 형성되고 램프가 멀리 있을 땐 천천히 굳기 때문에 낮은 냉각률로 6각형이 잘 형성됨을 밝혀냈다. 이후 Goehring *et al.*(2006)은 옥수수 전분액을 통한 실험에서 램프 높이와 건조 시간에 따라 증발속도가 달라짐을 확인하고 증발 속도를 고정시키거나 젤라틴을 첨가하는 등 다양한 값을 산출하였다. 실험결과에 따르면 특정 깊이의 기둥 지역은 위 실험의 조건과 관련이 있고 기하학적인 패턴과도 관련이 있음을 밝혀냈다.

이와 달리, Hetényi *et al.*(2012)는 실험연구를 통한 주상절리의 형성과정의 공통적 요소 외에 현장연구를 통한 정량적 관찰의 필요성을 제시하였다. 이를 통해, 규장질 용암과 고철질 용암의 지화학적 성분차이가 주상절리의 규모에 영향을 미치는 것을 밝혀냈다. Goehring and Morris(2008)는 콜롬비아 강의 현무암 일대에서 현장조사, 분석, 모델링 등을 수행하였다. 이 연구는 Ground Coulee, Snake River, Columbia Gorge에 초점을 두고 있으며, 위의 지역은 비이상적인 동일집단과 현무암 주상절리의 거대한 샘플들이 부분적으로 형성되어 있다고 한다. 그리고 연구를 통하여 기둥의 반지름과 마디층의 크기는 각각 비례하며, 용암의 냉각률에는 반비례함을 밝혀냈다. 또한 Vasseur and Wadsworth(2019)는 주상절리 용암은 지열 저장 시스템에서 중요한 상(facies)이며, 주상절리 용암의 투과성은 균열네트워크의 특징이라고 하였다. 이들은 기둥의 냉각 수축을 모델링하여 용암이 자리잡은 후 시간에 따른 투과성을 예측할 수 있도록 연구하였다.

국내연구는 2000년대 접어들어 활발히 진행되고 있다. 홍현주(2005)는 제주도 서귀포시 대포동 해안에 위치한 지삿개 주상절리의 형태학적인 분석과 모암인 현무암의 암석학적 연구를 통해 대포동 현무암이 알칼리 계열의 전이질 현무암인 것으로 밝혀냈다. 오강호 등(2006)은 전라남도 신안군 해안에 분포하는 주상절리를 형태학적으로 분석하고, 국내에 분포하는 다른 주상절리들과의 형태를 비교 분석하면서 향후 새로이 발견되는 주상절리의 연구에 대한 필요성을 제시하였다. 우현동 등

(2013)은 울릉도의 조면암질 단애에 발달된 주상절리를 대상으로 광물학적 및 형태학적인 특징을 연구하여 형태 및 광물 차이에 의한 고온의 암체가 냉각될 당시의 온도구배를 모델링하였다. 안건상(2014a)은 남한에 존재하는 주상절리를 대상으로 분포지역을 그룹화하여 한탄강 유역, 제주도, 울릉도와 독도, 포항-경주-울산, 남해안과 서해안으로 분류하고 이들의 암석학 및 형태학적 특징 차이를 비교하였다. 또한, 후속 연구로 우리나라에 존재하는 주상절리의 연구 전략 방법으로 켈러네이드와 엔테블리취의 기하학적 형태, 형성 메커니즘과 패턴의 변화, 수평단면과 내부구조, 주상절리 상하부의 판상절리, 전분 혼합액의 건조실험, 절리 형성에 대한 수치 모델 및 컴퓨터 그래픽 활용, 화산암의 산출 상태에 따른 주상절리 형태와 크기, 모암의 암석학적 및 광물학적 연구, 주상절리와 연관된 2차 경관 등의 방향을 제시하였다(안건상, 2014b). 안건상과 손정모(2015)는 전남 신안군 증도에 존재하는 중생대 백악기 말 용결구조를 가진 유문암질 라피리응회암 주상절리의 형태 및 암석학 연구를 통해 단면의 다각형 빈도 분포와 지질학습장으로서의 활용가치를 제시하였다. 또한, 전라남도 고흥지역 중 도화면 유주산, 팔영산, 용바위 세 지역에서 발달하는 주상절리의 형태학적인 분석을 통해 산성암 계열의 주상절리 형성 메커니즘을 밝히고 염기성암에서 발달한 주상절리의 형성 메커니즘과는 다름을 제시하였다(손정모와 안건상, 2014). 손정모(2016)는 우리나라 남부지역에 분포하는 주상절리들의 구조적인 분석을 통하여 우리나라 18곳에서 주상절리의 단면 다각형의 수, 기둥면의 폭, 기둥면 사이의 각을 측정하고 다양한 분석을 통하여 남부지역 주상절리는 크게 네 가지의 형성메커니즘이 존재함을 밝혀냈다. 조민호(2017)는 전라북도 변산반도의 적벽강과 직소폭포 일대에 분포하는 주상절리의 연구를 통하여 주상절리가 형성될 당시 화학 조성보다는 냉각률에 더 많은 영향을 받았을 것이라 제시하고 있다. 또한 정형은 등(2019)은 전라남도 지역에 발달한 모암이 안산암인 주상절리의 형태학적 분석 및 구조 연구를 통하여 모암이 현무암인 경우와 데사이트인 경우를 비교하여 주상절리의 형성에 화학 조성 영향보다는 형성당시의 환경과 상황에 따라 크기와 형태가 결정됨을 밝혀냈다.

안건상(2019)은 제주도 서귀포시에 분포하는 상하부가 역전된 주상절리에 대한 연구를 통하여 이들의 형태, 화학성분, 층서관계를 통하여 상하부가 역전된 주상절리의 형성 메커니즘을 규명하였다.

김태광(2020)은 강원도 한탄강에 존재하는 용암류의 단위를 구분하고 7곳(직탕폭포, 송대소, 화적연, 교동가마소, 구라이골, 통현리, 명우리)의 주상절리 구조의 해석

을 통하여 한탄강 주상절리대 용암류의 기준 및 한탄강에 발달한 주상절리의 형성 메커니즘의 기초 연구를 제시하였다.

안건상(2021)은 제주도 애월읍 해안에 발달하는 원통형 용암류 내부 관찰을 통해 동심원 구조와 방사상 절리를 발견하였으며, 원통형 로브를 크기와 형태에 따라 메가로브와 원형로브 두 그룹으로 분류하였다. 또한, 동심원 구조의 4가지 요인을 밝혀내며 방사상 절리가 발달한 용암로브의 절리를 해석하는 방법을 제시하였다.

주상절리에 대한 연구들은 국외 및 국내에서 다양하게 연구되고 있으며, 특히, 주상절리의 분포, 주상절리의 연구 방법, 형태학적인 특성, 형성 메커니즘, 암석학적 연구가 주를 이루고 있다. 이들 연구는 대부분 대표적이거나 전형적인 주상절리에 대한 연구로 주상절리와 함께 수반되는 지질구조 현상들에 대한 중첩 현상 등의 연구는 많이 미흡한 실정이다.

### 3. 연구 방법

문헌 조사를 통하여 연구지역의 지질분포·층서·지사 등 기초자료를 수집하였다. 예비 현장 조사를 통해 구조절리와 주상절리가 발달하는 곳을 파악한 후 중점 조사지역으로 선정하였다.

구조절리와 중첩된 주상절리에서 온전한 형태의 주상절리를 관찰하기 위하여 구조절리를 제거할 필요가 있다. 주상절리와 구조절리가 혼재되어 있을 경우 이 둘을 구분하여 구조절리의 방향을 측정하기는 어렵다. 따라서 조사지역 중 퇴적암 지대에 발달하는 구조절리의 방향을 측정한 후 화산암에 중첩된 구조절리와 비교하여 일치하는 방향을 먼저 제거한다(Fig. 2a). 이 과정을 거치고 나면 원래 형태보다 좀 더 선명한 주상절리를 관찰할 수 있고(Fig. 2b), 그 외에 부수적인 구조절리를 제거하면 온전한 형태의 주상절리를 복원할 수 있다(Fig. 2c). 그 후에 복원된 주상절리 형태의 다각형의 수(N), 기둥면의 폭(L), 기둥면 사이의 각( $\theta$ )을 측정하여 형태학적 분석을 하였다.

또한 주상절리가 형성되는 층과 구조절리가 발달되어 있는 지층의 암질을 파악하기 위하여 암석들을 채취하고 박편을 제작하여 편광현미경을 이용해 구성광물을 관찰하였다.

주상절리를 구성하는 암석의 화학 분석을 위하여, 시료를 이용하여 비드(bead)를 제작한 뒤 X-선 형광분석기(Rigaku社 RIX-2000, 50kv 30mA)를 이용하여 주성분 원



소를 분석하였으며, 미량원소 분석은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS; Thermo Elemental X7)를 이용하였다.

현장에서 측정한 자료와 화학분석 자료를 활용하여 연구지역에 분포하는 주상절리와 구조절리의 중첩현상을 분석하였고, 구조절리가 주상절리에 중첩되어 있는 경우 이를 해석할 수 있는 기준과 방법을 수행하였다. 이를 통하여 경상남도 고성군 서남부지역에 분포하는 주상절리의 형태학적 특징을 파악하고자 하였다.

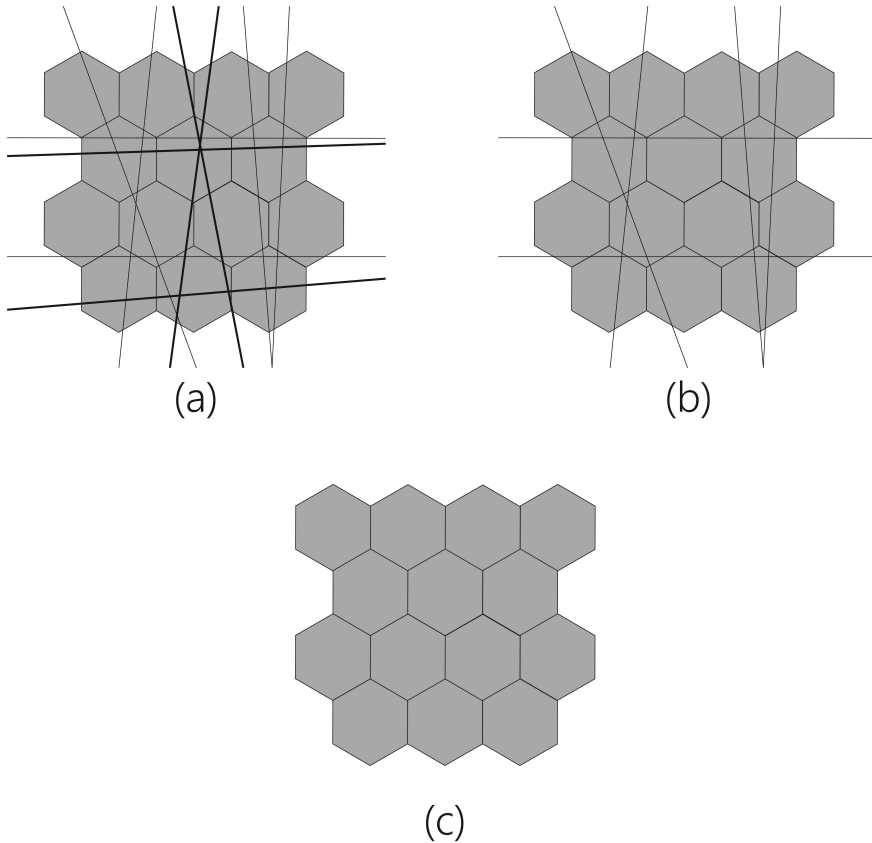


Fig. 2. Columnar joint restoration process with overlapping structural joint.

- (a) The overlapping structure of columnar joints and structural joints observed in the outcrop of tuff,
- (b) Removal of structural joints in the direction coincident with the sedimentary rock zone,
- (c) All structural joints removed

## II. 이론적 배경

지구의 표면에서 발견되는 취성구조로는 절리와 단층 등이 있다. 취성구조는 응기와 냉각이 진행되는 암석에서 천천히 형성될 수 있고, 지구조운동 동안에는 더 격렬하게 형성될 수 있다. 그리고 단열에 의해 만들어진 취성구조는 원자 규모에서 결정격자가 순간적으로 파열됨을 의미한다.

절리(joint)는 지표와 지표 근처에서 발생하는 확장단열(extension fracture)의 한 종류이며, 확장단열은 절리면에 수직으로 확장하는 단열이다. 절리는 눈으로 볼 때 변위가 거의 없지만 자세히 관찰하면 아주 미소하게 확장변위를 보여주므로 확장단열로 분류된다(김영석 역, 2013). 그리고 주상절리(columnar joint)는 용암류가 분출된 후 냉각될 때 만들어지는 1차 구조이며, 화산활동의 증거가 될 수 있다. 분출 후 냉각될 때 수축을 하게 되면 일정한 간격으로 형성된 수축점으로 수축되며, 다각형으로 갈라져 기둥형태의 모양으로 배열이 된다. 본 연구에선 용암류의 냉각으로 인해 형성된 주상절리와 지구조운동에 의한 물리적 힘으로 형성된 절리를 구분하기 위하여 후자를 구조절리(structural joint)라 표현하였다.

### 1. 단열

단열은 외부(지체구조적) 또는 내부(열적 또는 잔류) 응력의 결과로 형성되는 두 방향에 대해 한 방향이 매우 좁은 평면 내지 준평면의 불연속면이다. 단열은 깨진 암석이나 광물에서의 변위 및 역학적 성질의 불연속면이고, 점착력(또는 응집력)의 감소와 손실이 대부분 단열의 특징이다. 단열은 종종 면으로 기술되지만, 어느 정도 규모에서는 항상 두께가 결부되어 있다. 단열은 전단단열(미끌림면)과 인장단열(절리, 열극, 세맥)로 나눌 수 있다. 이에 더하여 폐쇄 또는 수축단열이 정의될 수 있다. 단열은 매우 좁은 대상의 구간으로 종종 면으로 생각되며 변위 및 역학적 성질(강도와 균기)에서의 불연속성과 관련이 있다.

전단단열(shear fracture) 또는 미끌림면(slip surface)은 상대적인 운동이 단열에 평행한 단열이다. 확장단열(extension fracture)은 벽에 대해 수직으로 확장을 보여주는 단열이다. 절리(Joint)는 거시적으로 감지될만한 변위가 거의 없거나 전혀 없지만, 자세히 관찰하면 대부분의 절리가 절리면을 가로지른 아주 미소한 확장변위

를 보이므로 확장단열로 분류된다. 확장단열은 가스, 유체, 마그마 또는 광물로 채워진다. 공기나 유체로 채워질 때 열극이라 한다.

과거에는 이외에도 전단형 절리, 혼합형 절리 등이 존재하였으나, 현재 구조지질학적 관점에서는 이들을 절리라고 하지 않고 단층으로 분류하고 있다. 즉, 절리는 확장 단열인 신장절리만을 인정하고 있으며, 이러한 신장절리는 지각 상부의 취성 변형에 노출된 환경에서 확장응력을 받고 있을 때 만들어진다. 이러한 조건은 봉압이 없거나 낮은 곳과 낮은 차응력인 환경에서 가능한데, 이는 지표 근처에서 발견됨을 뜻한다(김영석 역, 2013).

## 2. 구조절리의 분류

절리(joint)는 지각 내에서 취성 암석의 변형으로 형성되는 열림 모드 단열이다. 주상절리는 용암류의 냉각으로 형성되는 1차적인 구조지만, 절리는 물리적인 힘인 응력에 의해 형성되는 구조이다. 본 연구에선 주상절리와 물리적인 절리를 세분화하기 위하여 지구조운동에 의해 물리적 작용으로 만들어지는 절리를 구조절리(structural joint)라 구분한다.

박강섭(2007)에 따라 기하학적인 분류로 나뉘보면 서로 인접해 있는 절리들이 비슷한 방향으로 발달하면 이를 절리조(joint set)라 한다. 편평한 면을 가지며, 일정한 간격과 평행하게 발달하는 절리를 규칙 절리(systematic joint)라 한다. 이에 반해 휘어지거나 불규칙한 면을 가지며 서로 다른 방향으로 발달하는 절리는 불규칙절리(nonsystematic joint)라 한다. 그리고 두 규칙 절리의 경계를 넘지 않으며 그 사이에 형성되는 절리를 교차절리(cross joint)라 한다(Fig. 3).

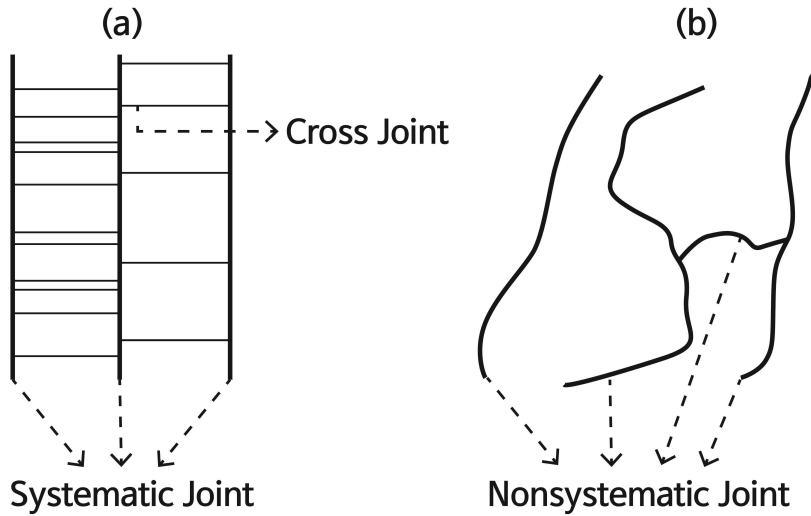


Fig. 3. Schematic model showing joint classification according to geometry(modified of Park, 2007). (a) Systematic joints have similar strikes and dips and Cross joint develops between systematic joints, (b) Nonsystematic joints have different strikes and dips

### 3. 주상절리 용어정리

본 연구에서 사용되는 용어는 Hetényi *et al.*(2012)와 Grossenbacher and McDuffie(1995)의 연구를 기반으로 안건상(2014b)의 연구에서 제시한 것을 사용한다. 주상절리 다각형의 수를  $N$ , 단면적을  $A$ , 기둥면의 폭(가로 넓이)은  $L$ , 기둥면 사이의 각은  $\theta$ , 기둥의 높이는  $H$ , 최대 직경을  $D$ 로 표기한다. 그리고 겹보기 직경은 경우에 따라  $D1$ - $D3$ 로 나타내도록 한다(Fig. 4).

### 4. 주상절리 형성이론

주상절리는 고온의 용암류가 분출된 후 급속히 냉각될 때 만들어지는 구조이다. 분출 후 냉각될 때 수축을 하게 되면 표면에서는 수축 중심이 일정한 간격으로 형성되며, 이 중심으로 수축되며 점차 냉각된다. 수축이 되는 곳의 중심을 냉각점이라 한다(Fig. 5a). 이 때 두 수축 중심사이에 응력이 발생하고 냉각이 진행되면 응

력도 증가한다. 이 응력이 암석의 인장강도를 초과할 때 균열이 만들어지고 그 이후에 응력이 해소된다(Fig. 5b). 전체적으로 표면의 상태가 동일할 때 수축점은 등간격으로 형성되어 수축하기 때문에 표면에는 6각형에 가까운 형태의 균열 전면(fracture front)이 형성된다(Fig. 5c). 2차원 상에서 6각형의 벌집 구조는 균열 길이(L) 당 스트레스 방출이 최대치에 도달하기 때문에 반대로 계(system)에서의 에너지는 최소화된다(Mallet, 1875).

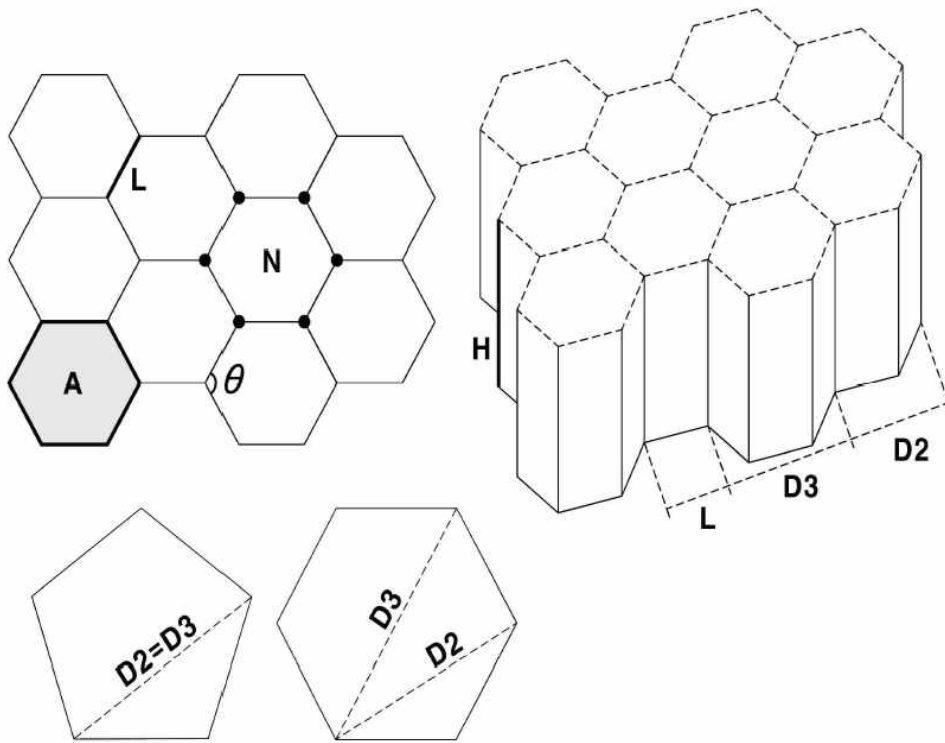


Fig. 4. Symbols of Columnar joint(modified of Hetényi *et al.*, 2012).

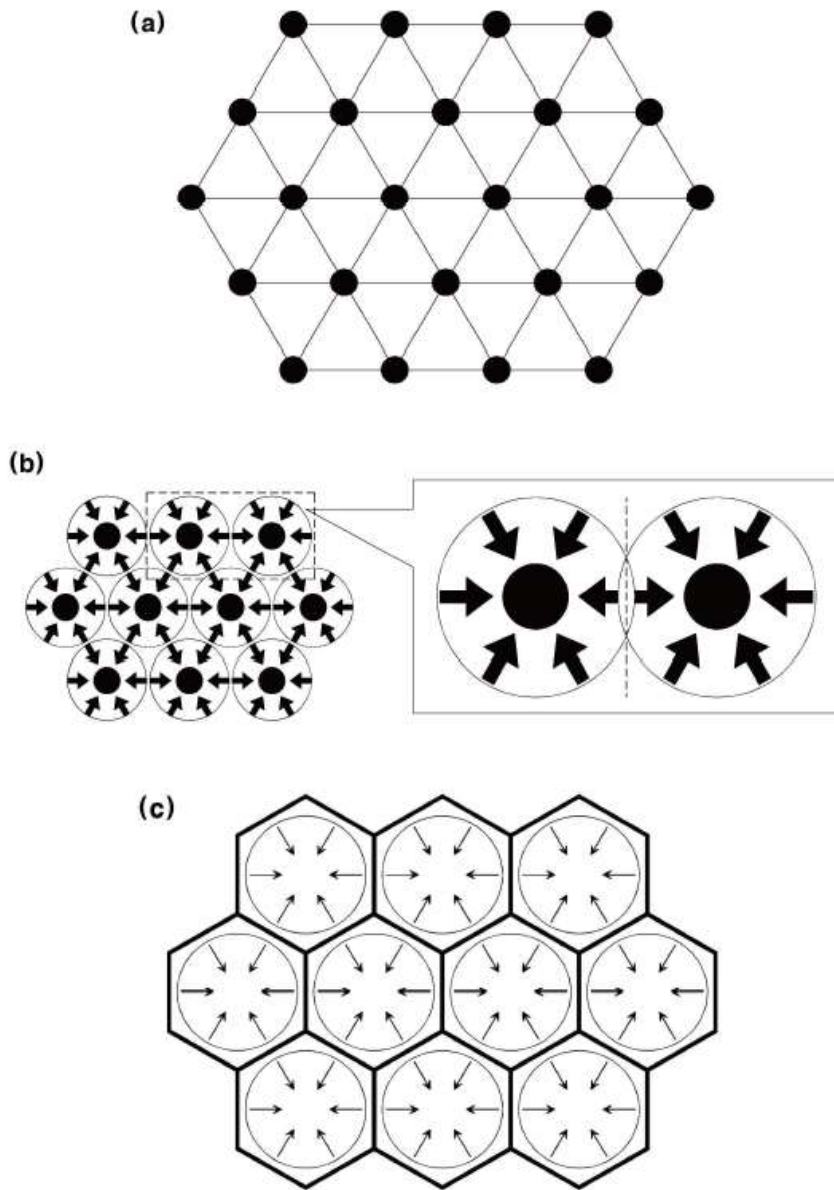


Fig. 5. Schematic formation of cracks at cooling surface on thermal contraction model(modified of Nishiwaki and Hirotsishi, 2009).

### Ⅲ. 연구지역 지질

#### 1. 일반지질

연구지역을 포함한 경상남도 고성지역에는 하부로부터 경상누층군의 하양층군에 해당하는 함안층, 진동층, 유천층군의 안산암 및 안산암질집괴암이 퇴적되어 있으며, 이들을 관입한 불국사 화강암류와 암맥(중성암맥, 산성암맥)이 관입하고 있다 (Fig. 6).

함안층은 하부의 신라역암 위에 정합으로 퇴적되며, 구성암상은 자색셰일, 사질셰일, 백색 내지 녹색 사암, 회색 사암 등이 대부분을 차지한다. 연구지역 내 가장 넓은 부분을 차지하는 진동층은 하위의 함안층을 정합으로 덮고 있으며, 회색, 암회색 및 회녹색의 사질셰일, 셰일 및 사암으로 구성된다(지정만 외, 1983).

유천층군 안산암은 주로 분출상이 우세하며, 칠곡층, 신라 역암층, 함안층, 진동층 등을 광범위하게 덮고 있으며, 일부는 이들 지층을 암맥상으로 관입한다. 또한, 안산암과 안산암질집괴암은 서로 밀접하게 수반되어 있어, 두 암석이 서로 호층을 이루거나 안산암이 안산암질집괴암을 관입하는 것으로 보고되어, 안산암과 안산암질집괴암은 동일 마그마로부터 기원으로 보고 있다(지정만 외, 1983, 공달용 외, 2018).

불국사화강암류는 주로 북부에 분포하며, 주 구성암상은 화강섬록암으로 하양층군 퇴적암류와 유천층군 화산암류를 관입한다. 암맥류는 고철질 암맥과 규장질 암맥이 있다. 중성암맥은 비현정질로서 치밀하며, 암녹색 내지 녹회색을 띠고, 특징적으로 장식 반정을 많이 함유하고 있다. 산성암맥은 북동-남서 방향으로 진동층을 주로 관입하고 있으며, 석영반암, 규장반암, 규장암 등으로 산출된다. 규장질 암맥의 일부는 퇴적암의 층리면을 관입한 암상(sill)으로 관찰된다(지정만 외, 1983).

본 연구에서 조사할 지층은 하양층군의 최상부층인 진동층에 해당한다. 진동층은 고성군, 사천 일부, 남해군 창선도 동부, 거제도에 걸쳐 분포하며, 이들은 안산암, 각섬석 화강암, 알칼리장석 화강암 등이 관입하고 있다. 진동층은 흑색 내지 암회색 셰일과 사암, 엽상층리가 잘 발달하는 이암으로 구성되며 층의 두께는 최대 1,000m에 이른다(한국지질자원연구원, 2002).

장기홍(1998)에 따르면 하양층군을 구성하는 함안층과 최상부인 진동층군 사이에는 구산동응회암이 존재한다. 구산동응회암은 저콘을 이용한 CHIME 연대 측정 결

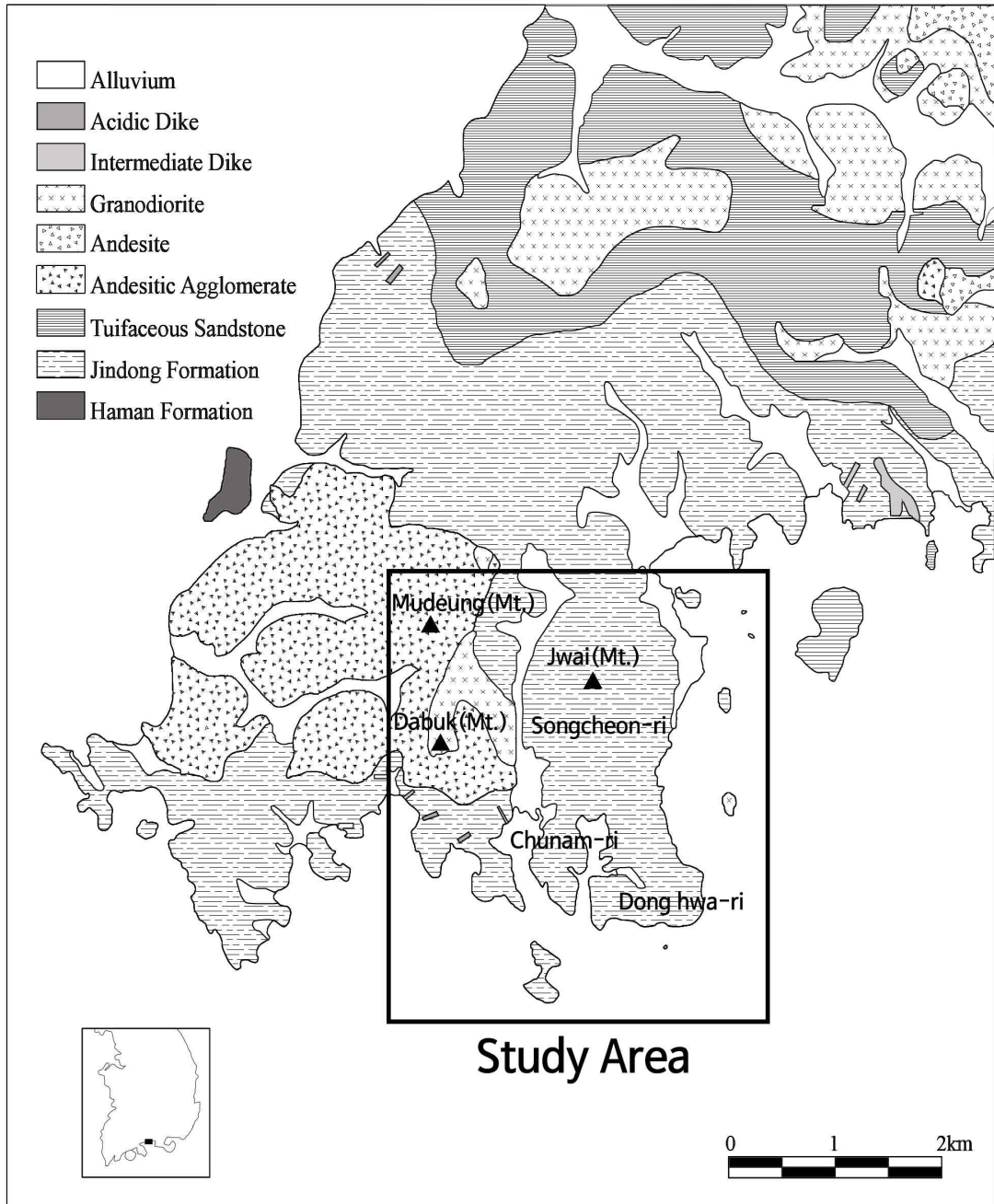


Fig. 6. The geology map of study area in Goseong(modified of Kong et al., 2018).



과  $113.6 \pm 10$  Ma 로 나타났으며, 이를 통하여 함안층은 Aptain 후기, 진동층은 Albian 초기에 해당한다고 해석하였다. 그러나 좌용주(2004)는 구산동응회암에서 분리된 저콘에 대해 LA-ICP-MS분석을 실시하여  $96 \pm 2$  Ma,  $97 \pm 3$  Ma의 U-Pb 연대값을 얻었다. 그리고 다른 저콘을 분석하여  $107 \pm 4$  Ma 값을 얻었다. 이는 Albian 중기에서 Cenomenian 중기에 해당한다. 좌용주 등(2004)은 구산동응회암층 연구를 통해서  $96 \pm 2$  Ma,  $97 \pm 3$  Ma의 U-Pb 연대는 분출 시기를 지시하며, 장기홍 등(1998)의 연구 결과인  $113.6 \pm 10$  Ma 값은 구산동응회암층 분출 당시 포획된 기존의 화산암에서 도출된 값으로 해석하고 있다. 이를 근거로 함안층은 112 Ma(Albian 초기)에서 97~96Ma(Cenomanian 중기)까지로 판단하고, 진동층은 97~96 Ma(Cenomanian 중기)에서 82~80 Ma(Campanian 초기)로 보고 있다.

연구지역은 경상남도 고성군 하일면의 춘암리, 동화리, 송천리를 포함한 총 연장 16km 해안과 인근에 위치하는 무인도서인 안장섬, 토끼섬, 육섬, 늑도, 장여를 포함한 지역이다.

## 2. 퇴적암층(사암)

연구지역의 퇴적암류는 진동층군에 해당하는 회색, 암회색 및 회녹색의 사질세일, 세일 및 사암이다(지정만 외, 1983). 동화리마을 남부 해안에는 10m 높이의 해식애가 자리하고 있으며 층리가 잘 관찰된다(Fig. 7a). 암석 표본을 채취하여 박편을 제작한 결과 0.2mm 크기의 사장석 반정이 관찰되는 사암으로, 기질부는 석영, 장석 등의 미정질 내지 은정질 광물로 구성되어 있다. 입자와 입자 사이를 채우고 있는 응회질 물질로 인해 응회질 사암으로 볼 수 있다(Fig. 8a,b). 어촌마을 항구 남측 200m 지점에서 변질이 진행된 사암 또한 발견되는데(Fig. 7b), 녹색의 변질부는 장석이 녹염석화가 진행된 부분이다(Fig. 8c,d). 구조절리가 발달되어 있는 육섬 또한 사암으로 이루어져 있다. 0.1~0.3mm 크기의 사장석들이 알파이트 쌍정을 보이며 밀집되어 있다. 석영과 장석들로 구성되어 있으며, 사암편도 관찰된다.

## 3. 유문암

연구지역에서 화산암은 주로 유문암질응회암이지만 안장섬에서는 유문암이 관찰되며, 주상절리가 발달한다(Fig. 9). 현미경 하에서 유문암의 특징인 유상구조가 발달하고 있으며, 0.8mm 크기의 사장석 반정이 관찰된다. 노란 부분은 에피도트화가

진행되어 있고, 하얀색의 장식부분은 견운모화가 진행되고 있다. 철산화물 또한 부분적으로 분포하고 있다(Fig. 10).

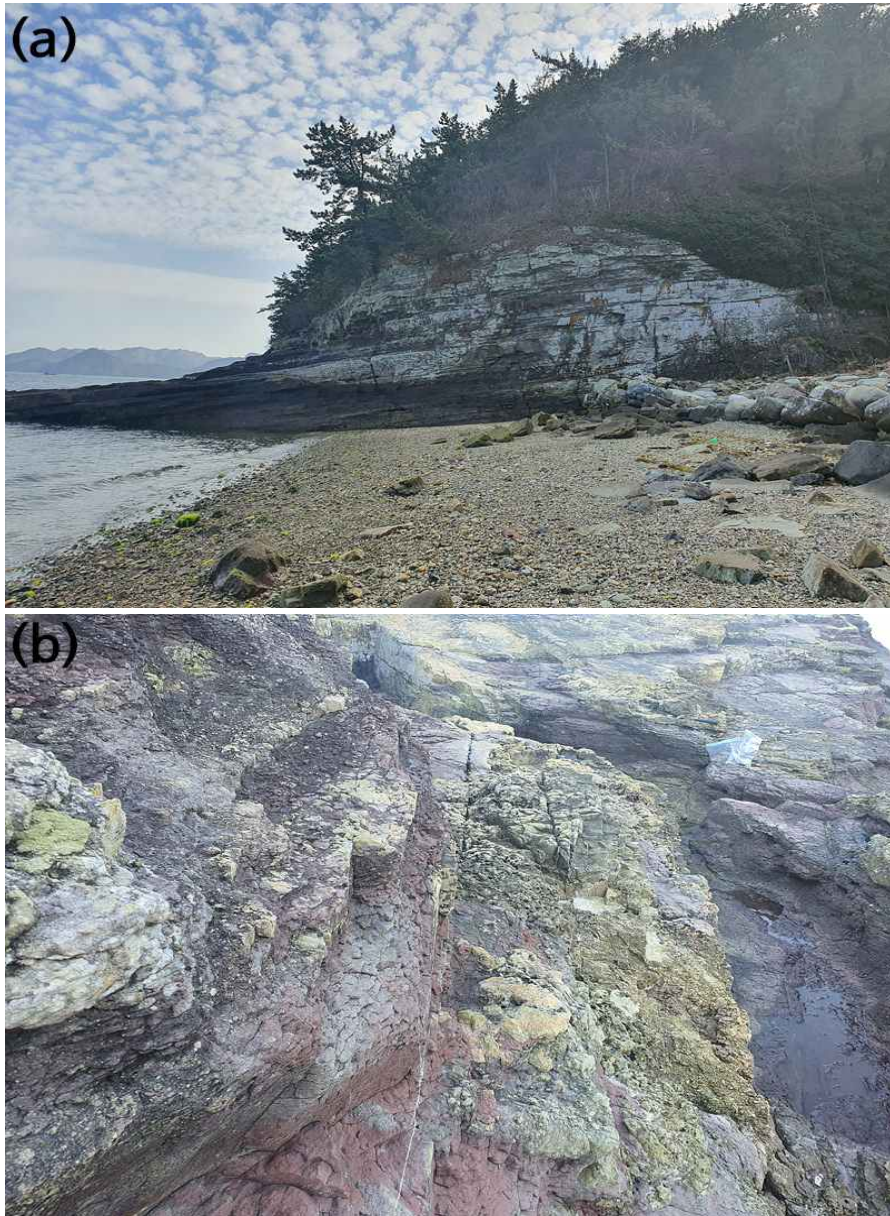


Fig. 7. Photographs of outcrop in the Donghwa-ri.  
(a): sea cliff      (b): altered sandstone

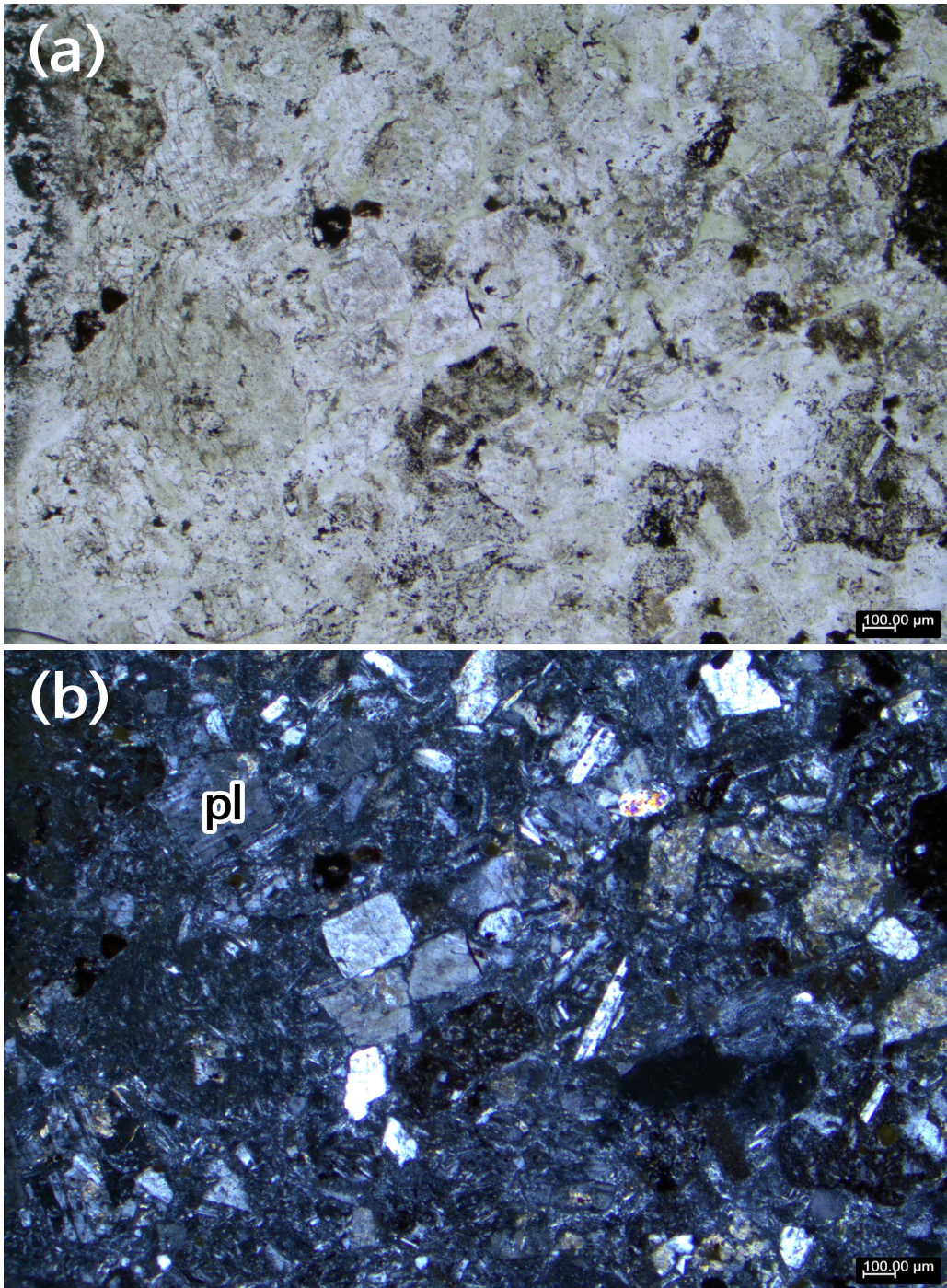


Fig. 8. Microphotographs of sandstone on the Donghwa-ri.

(pl: plagiocase)

(a),(c): open nicol, (b),(d): cross nicol

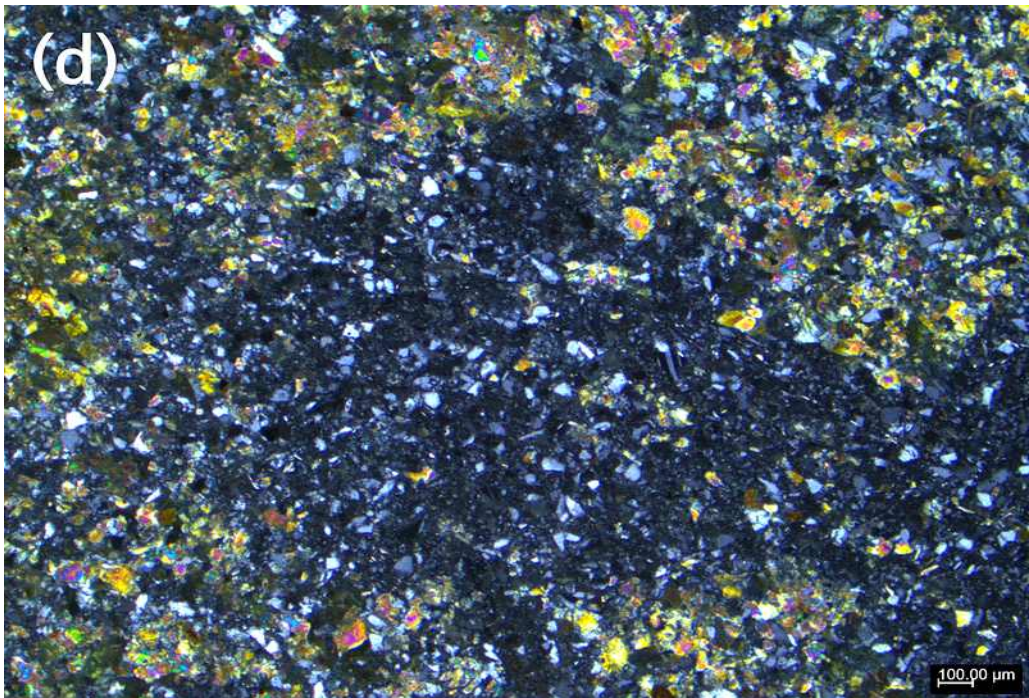
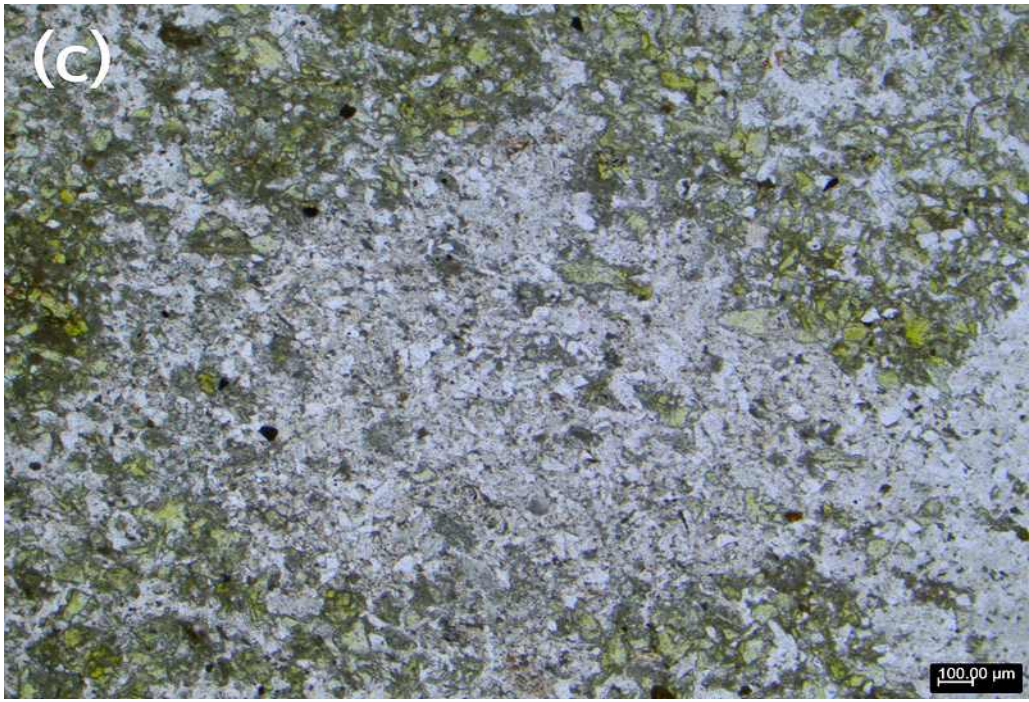


Fig. 8. Continued.



Fig. 9. Photographs of outcrop in the Anjang-seom(island).

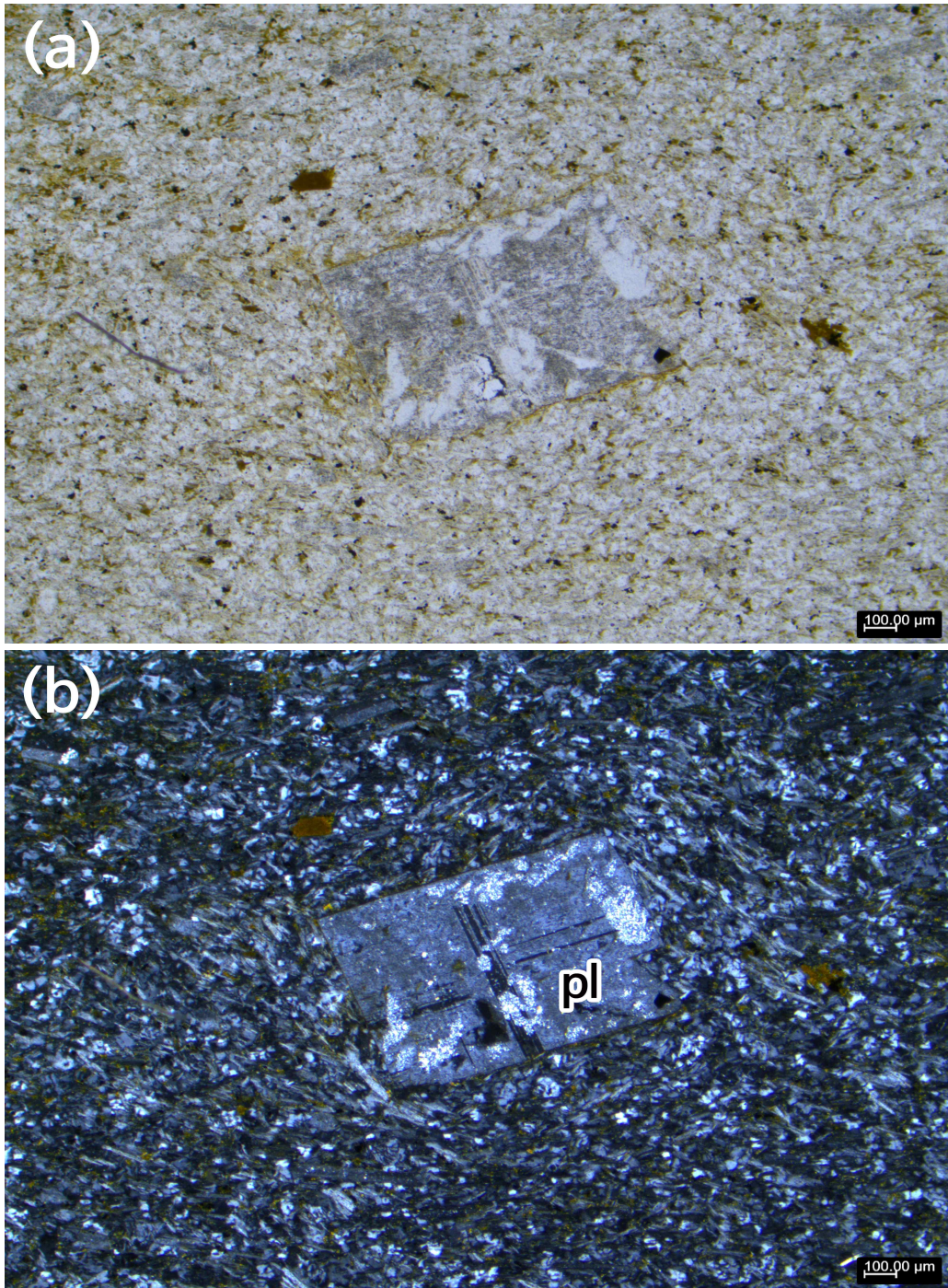


Fig. 10. Microphotographs of rhyolite on the Anjang-seom(island).

(pl: plagiocase)

(a): open nicol, (b): cross nicol

#### 4. 유문암질 응회암

연구지역에서 유문암질응회암은 맥전포항, 용암포항, 토끼섬, 늑도에 분포한다. 1:250,000 목포·여수 지질도폭에서 연구지역은 진동층의 퇴적암으로 기재되어 있으나, 본 연구에서 현장을 답사한 결과 주상절리가 분포하는 지역의 암석은 유문암질 응회암으로 이루어져 있다. 해안에 분포하는 암석을 조사한 결과 하부는 진동층에 대비되는 퇴적암류가 분포하며, 이를 유문암질응회암이 피복하고 있다(Fig. 11).

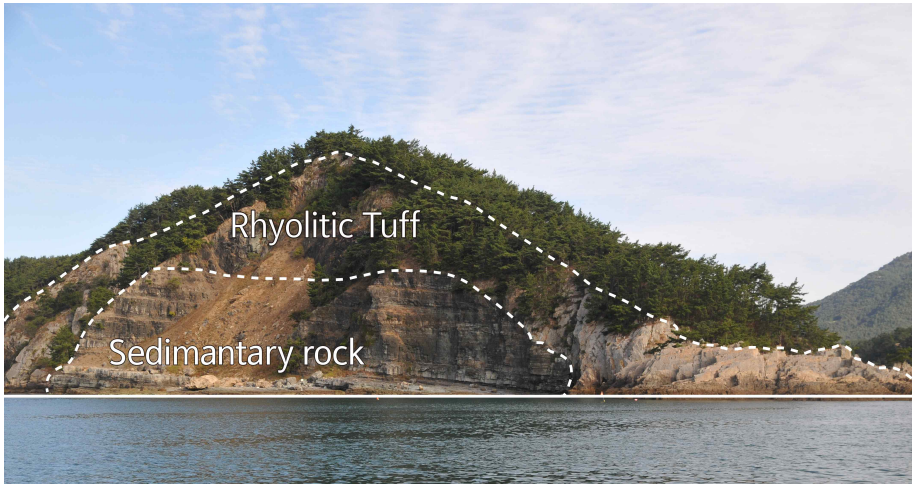


Fig. 11. The rhyolite tuff layer covering the sedimentary rock layer.

맥전포항에 분포하는 산성화산암을 상부와 하부로 나누어 암석 표본을 채취하였다. 그 결과 상부와 하부 모두 유문암질응회암으로 판별되었다(Fig. 12). 채취한 암석 시료를 절단하여 육안으로 관찰하면 열은 노란색으로 풍화되어 있다. 이 암석은 현미경 하에서 0.3~0.8mm 크기의 사장석 반정과 0.1~0.2mm 크기의 석영이 관찰되며, 장석이 덩어리를 이루고 있다. 장석은 견운모화가 진행되었으며, 산화작용으로 인한 철산화물이 곳곳에 분포한다(Fig. 13). 용암포항에서는 용암포항 남측 약 100m 지점(Fig. 14)과 건너편 해안도로에 발달한 주상절리에서 암석 표본을 채취하였다. 용암포항 해안에는 주상절리가 깨져 널려있으며, 이들은 용결구조를 보이는 용결응회암이다. 편광현미경 하에서는 0.5~0.6mm 크기의 사장석 반정이 관찰되며, 광물들이 원형구조로 배열되어 있다. 장석들은 에피도트화가 진행되었으며, 짙은 갈색의 철산화물이 산발적으로 분포하고 있다(Fig. 15). 토끼섬 해안에는 주상절리가 발달한다(Fig. 16). 편광현미경 하에서는 0.5~1mm 크기의 사장석 반정이 관찰되

며, 알바이트 쌍정을 보이며, 장석들은 에피도트화가 진행 되었다(Fig. 17). 녹도는 용암류가 관입하여 옆으로 누운 형태의 주상절리가 발달한다(Fig. 18). 박편사진 상에서 석영과 장석들이 관찰되며 주로 광물편과 암편(사암편)으로 구성되어 있다. 장석들은 견운모화가 진행되었다(Fig. 19).



Fig. 12. Photographs of outcrop in the Maekjeonpo(port) area.



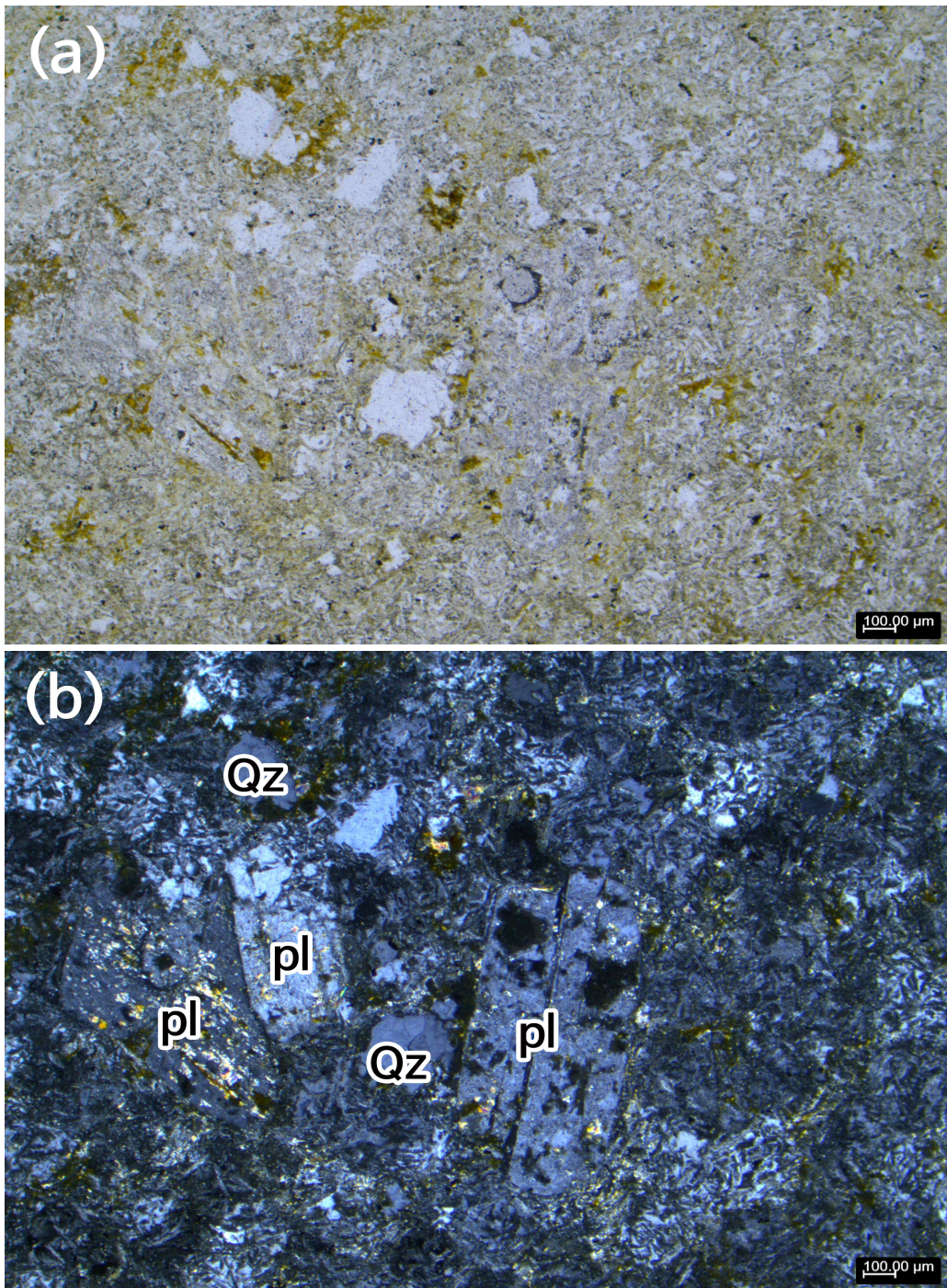


Fig. 13. Microphotographs of rhyolitic tuff on the Maekjeonpo(port) area.

(Qz: quartz, pl: plagiocase)

(a),(c): open nicol, (b),(d): cross nicol

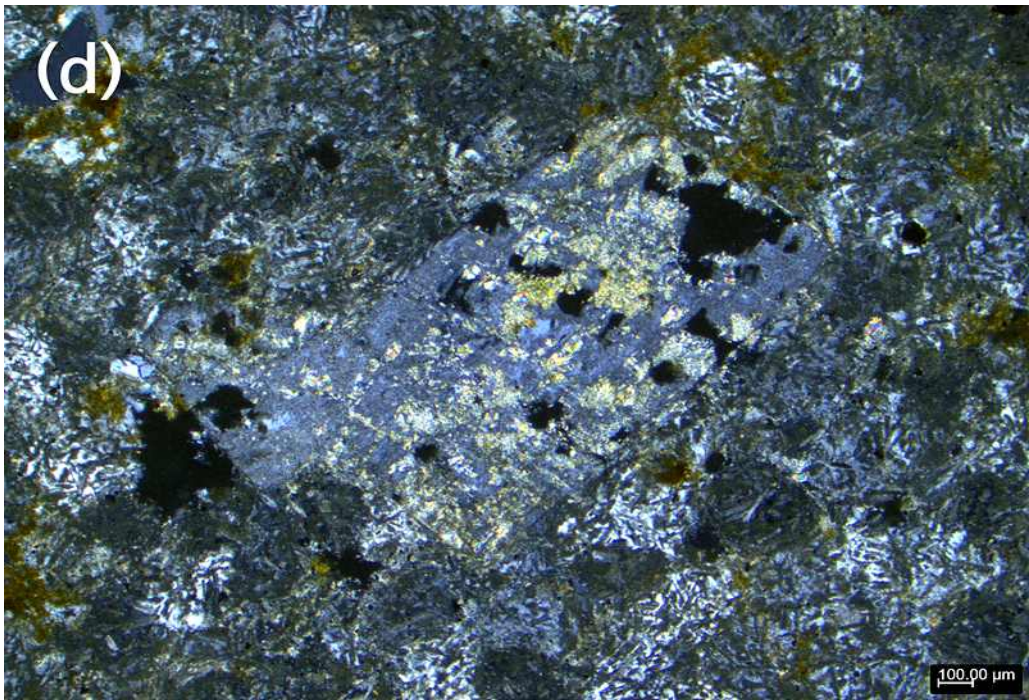
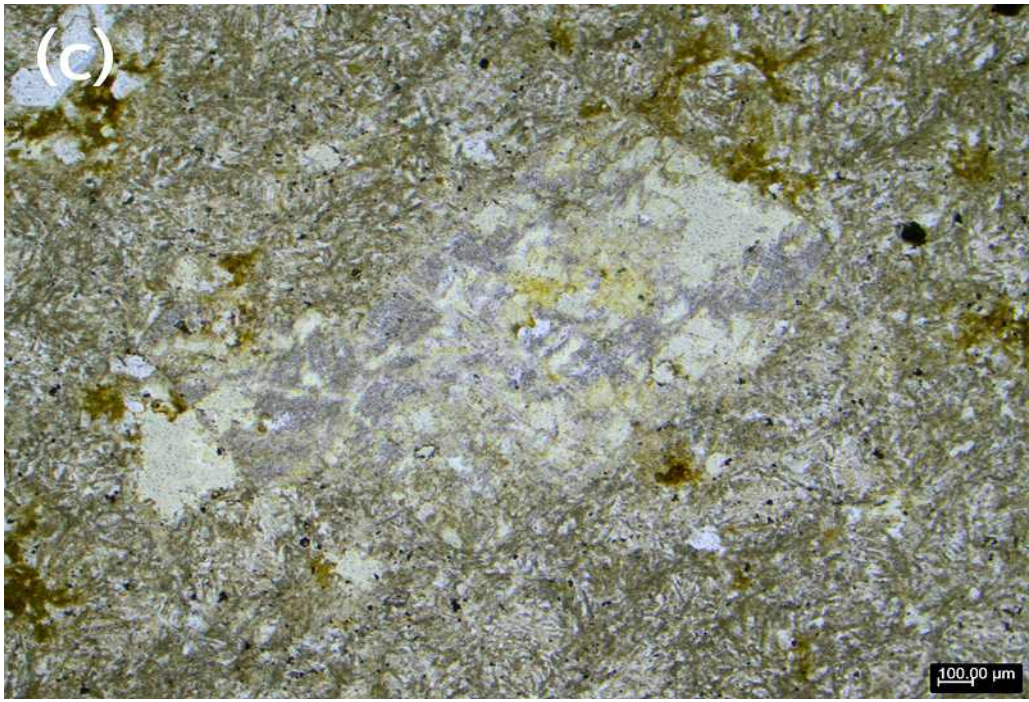


Fig. 13. Continued.



Fig. 14. Photographs of outcrop in the Yongampo(port) area.

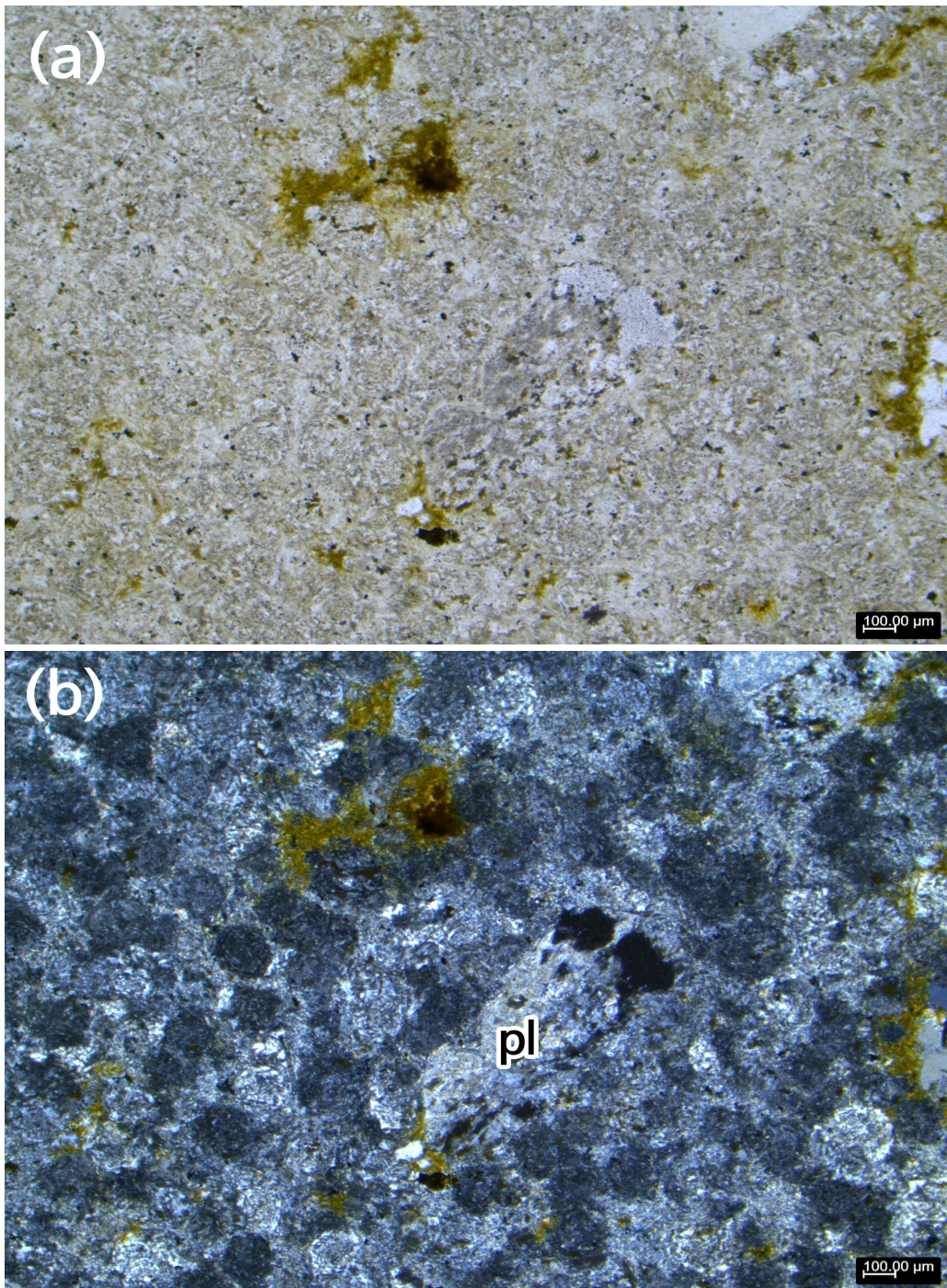


Fig. 15. Microphotographs of rhyolitic tuff on the Yongampo(port).  
(pl: plagioclase)  
(a): open nicol, (b): cross nicol



Fig. 16. Photographs of outcrop in the Tokki-seom(island).

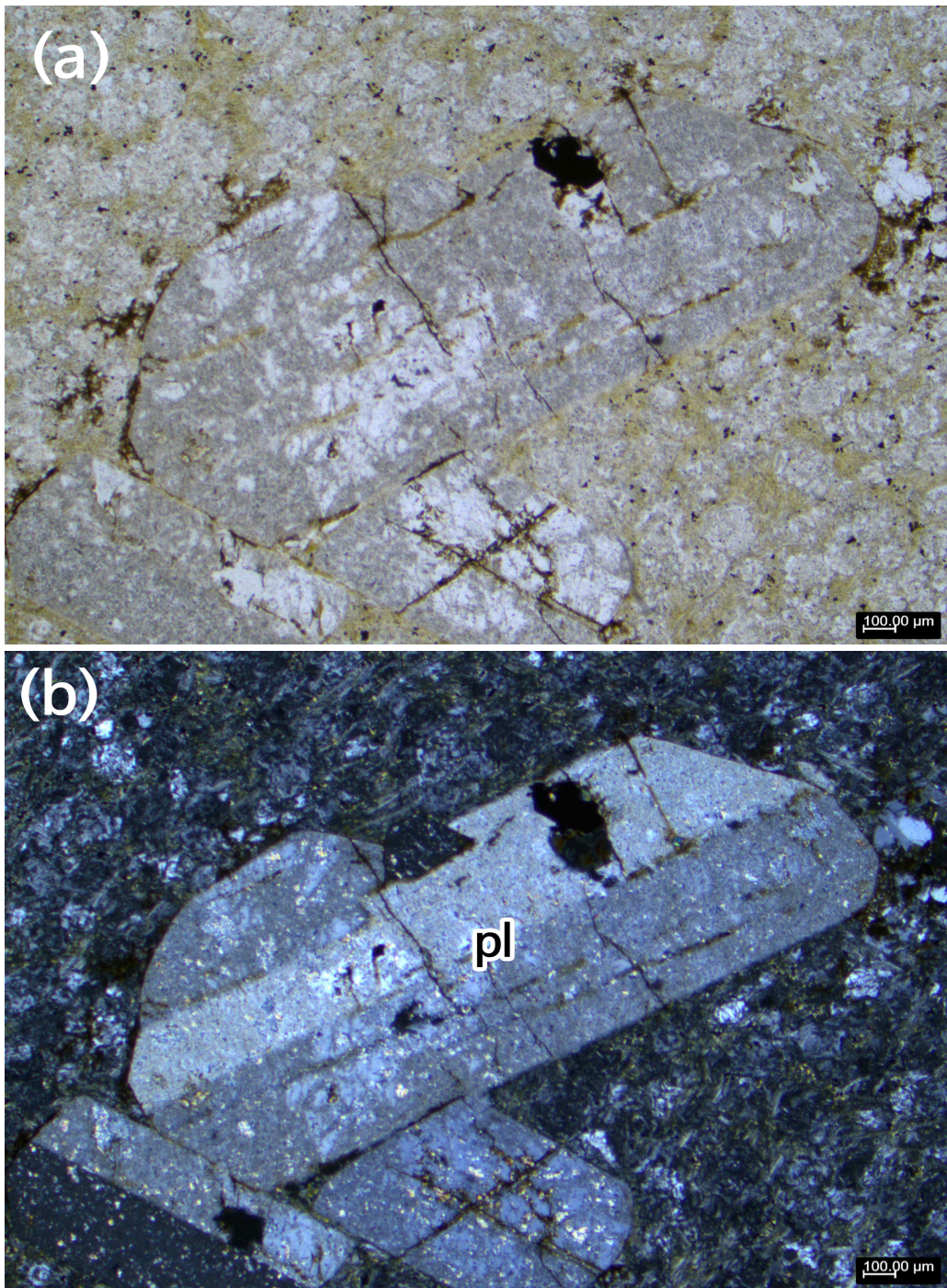


Fig. 17. Microphotographs of rhyolitic tuff on the Tokki-seom(island).

(pl: plagioclase)

(a): open nicol, (b): cross nicol

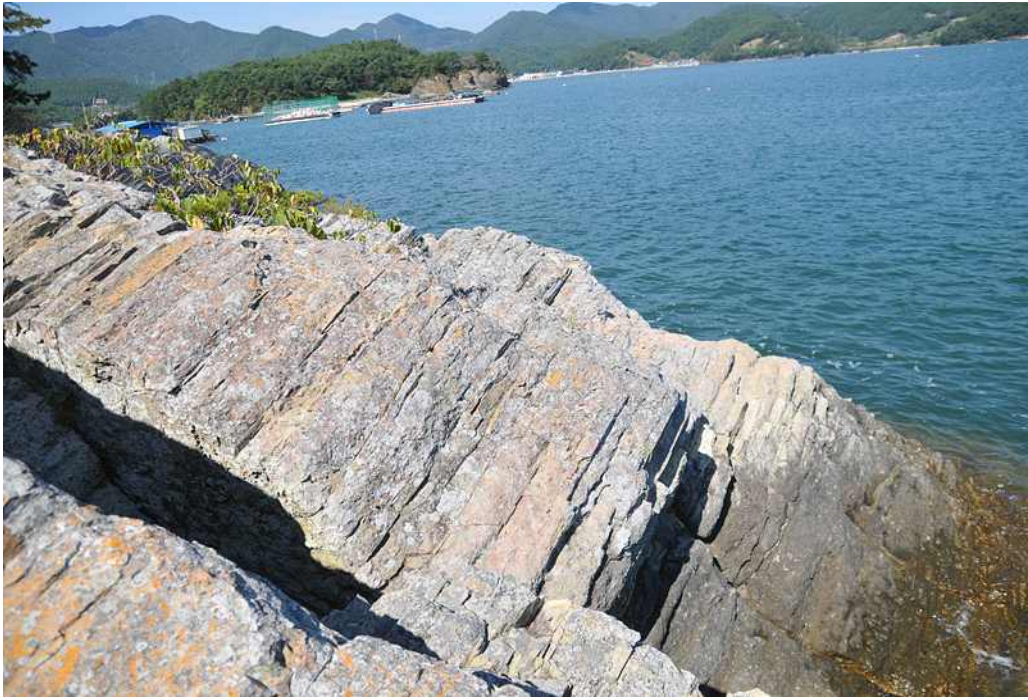


Fig. 18. Photographs of outcrop in the Neuk-do(island).

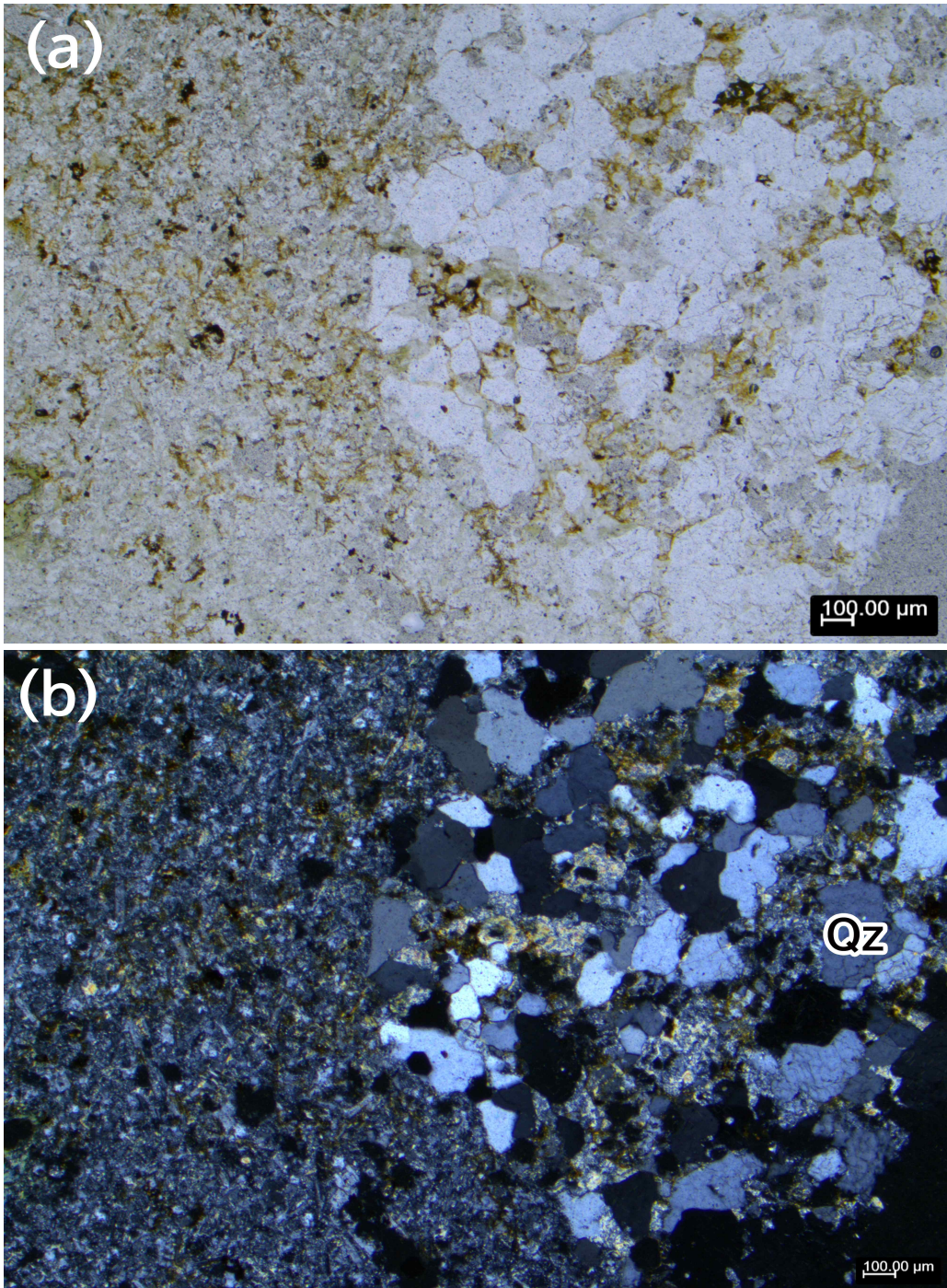


Fig. 19. Microphotographs of rhyolitic tuff on the Neuk-do(island).

(Qz: quartz)

(a): open nicol, (b): cross nicol



## IV. 구조절리와 주상절리의 형태분석

연구지역에는 구조절리와 주상절리가 중첩되어 발달하고 있다. 취성의 구조는 지각의 국부적 파열강도 단계까지 응력이 집중되는 곳에서 발생하며, 취성변형은 상부에서 발생하는 지각변형의 전형적인 형태이다(김영석 역, 2013). 주상절리는 용암류가 냉각될 당시 형성되는 1차적인 구조지만, 절리는 물리적인 힘에 의해 형성되는 구조이다. 본 연구에선 주상절리와 절리를 구분하기 위하여 지구조운동에 의한 응력으로 만들어지는 절리를 구조절리(structural joint)라 부른다.

본 연구에서는 주상절리 본연의 형태에 간섭하고 있는 구조절리를 배제하기 위해 퇴적암에 발달한 구조절리의 주향을 측정하였다. 구조절리의 주향 측정은 경상남도 고성군 서남부 지역 진동층군에 속하는 퇴적암과 그 위에 덮여진 응회암층을 대상으로 하였다.

특히 연구지역에서 구조절리의 방향성을 측정하면 어떤 지구조운동의 영향을 받았는지 추적할 수 있다. 연구지역 중 동화리마을의 퇴적층에서 발달하는 구조절리의 방향과 용암포항, 맥전포항 등 주상절리에 중첩되어 있는 구조절리의 방향성을 비교하였다.

구조절리의 방향성을 알아보기 위해 총 5곳에서 주향을 측정하였다(Fig. 20). 지층의 경사가 완만한 파식대지와 주상절리 단면을 가로지르거나 파쇄하는 구조절리의 주향을 측정했다. 절리의 주향을 측정할 때는 직선상의 뚜렷하게 발달한 것을 선별하였고, 휘어지거나 명확한 방향성을 가지지 않는 경우는 측정에서 제외하였다. 측정된 구조절리 주향 방향은 스테레오 넷(stereo net) 중 로즈 다이어그램(rose diagram)에 데이터 값을 입력하여 각 방향의 빈도율을 나타냈으며, 빈도율이 높을수록 많은 영역을 차지하며 뻗어나가는 형태를 보인다. 또한 각 지점별 절리 방향의 빈도율을 Table 2에서 6에 나타내었다.



Fig. 20. Distribution area of structural joint and columnar joint(modified of <https://map.kakao.com/>).

## 1. 구조절리 형태분석

### 1) Site 4 (하일면 동화리 마을 남부)

동화리 마을은 좌이산을 기준으로 남쪽에 위치한 마을이다. 동화리 마을 동측 끝에는 부경대학교 수산과학기술센터가 위치하고 있으며, 연구지역은 부경대학교 수산과학기술센터에서 남쪽으로 100m 정도에 위치한 어촌마을에 있는 해안이다. 이 어촌마을에서 좀 더 남측으로 해안을 따라 가다보면 거대한 해식애가 자리한다.

동화리 마을 남부 해안은 연구지역 중 구조절리가 가장 잘 발달하는 곳이다. 이 지역은 대체적으로 퇴적암층으로 이루어져 있고, 현장에서 채취한 샘플을 분석한 결과 응회질사암과 사암으로 밝혀졌다. 이 퇴적암 지대에는 구조절리라고 하는 물리적 힘에 의해 형성된 절리가 존재한다. 이 구조절리는 대략 3개 정도의 직선이 교차하여 망상을 이룬다. 수 미터의 길이로 형성된 절리들은 대부분 규칙절리로 보이며, 평행하고 있는 두 규칙절리에 짧은 교차절리가 발달하고 있다(Fig. 21).

동화리 마을 남부지역에서는 각각 5개의 구역으로 나누어 총 65개의 구조절리 방향을 측정하였다. 절리 방향은 NS~N10°E 2.94%, N10°E~N20°E 7.35%, N20°E~N30°E 8.82%, N30°E~N40°E 1.47%, N40°E~N50°E 1.47%, N50°E~N60°E 1.47%, N60°E~N70°E 2.94%, N70°E~N80°E 1.47%, N80°E~EW 30.88%로 북동 방향에서는 N80°E~EW가, N10°E~N20°E, N20°E~N30°E 순으로 우세하게 발달한다. 북서 방향에서는 NS~N10°W 2.94%, N10°W~N20°W 2.94%, N20°W~N30°W 13.24%, N30°W~N40°W 4.41%, N70°W~N80°W 1.47%, N80°W~EW 16.18%로 N80°W~EW, N20°W~N30°W 순으로 많은 비율을 차지하고 있다(Table 2).

높은 비율을 차지하는 주향들을 분류해보면 동서방향(N80°E~N89°E, N81°W~EW)이 가장 우세하며, 다음으로 북북서-남남동(N21°W~N30°W), 북북동-남남서 방향(N10°E~N29°E)순으로 분포한다(Fig. 22).

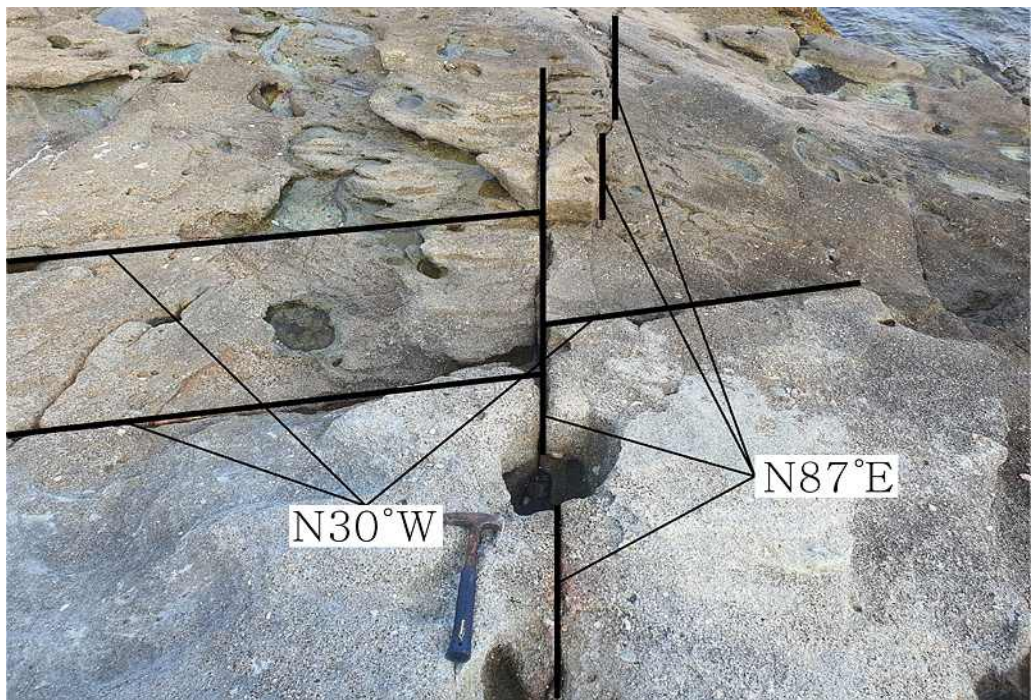
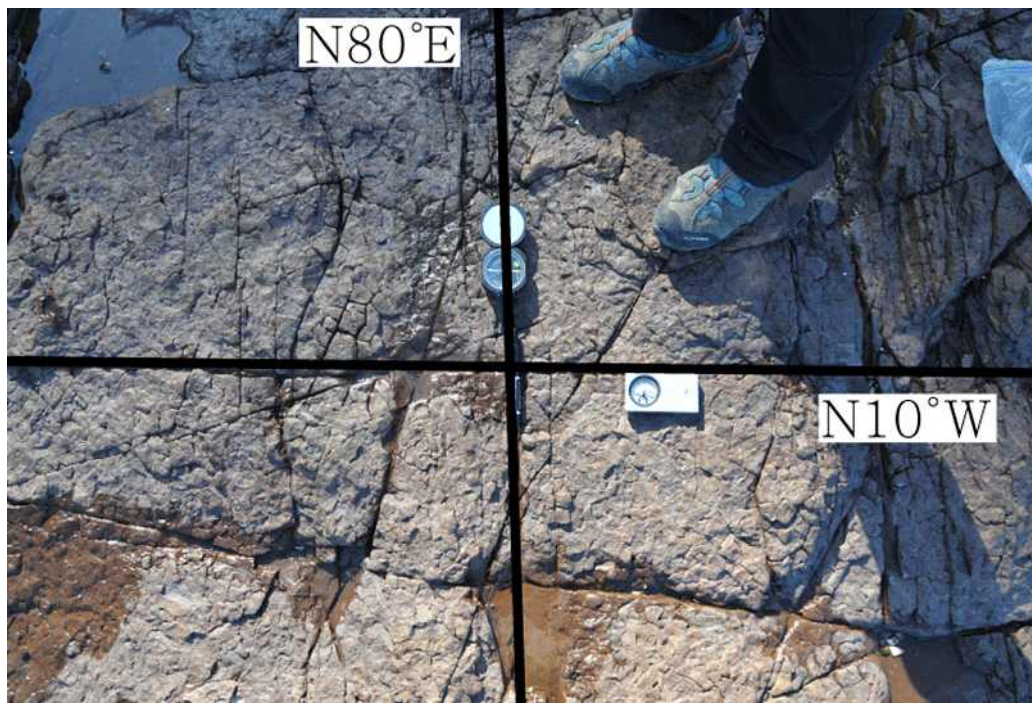


Fig. 21. Structural joints distributed in Donghwa-ri.

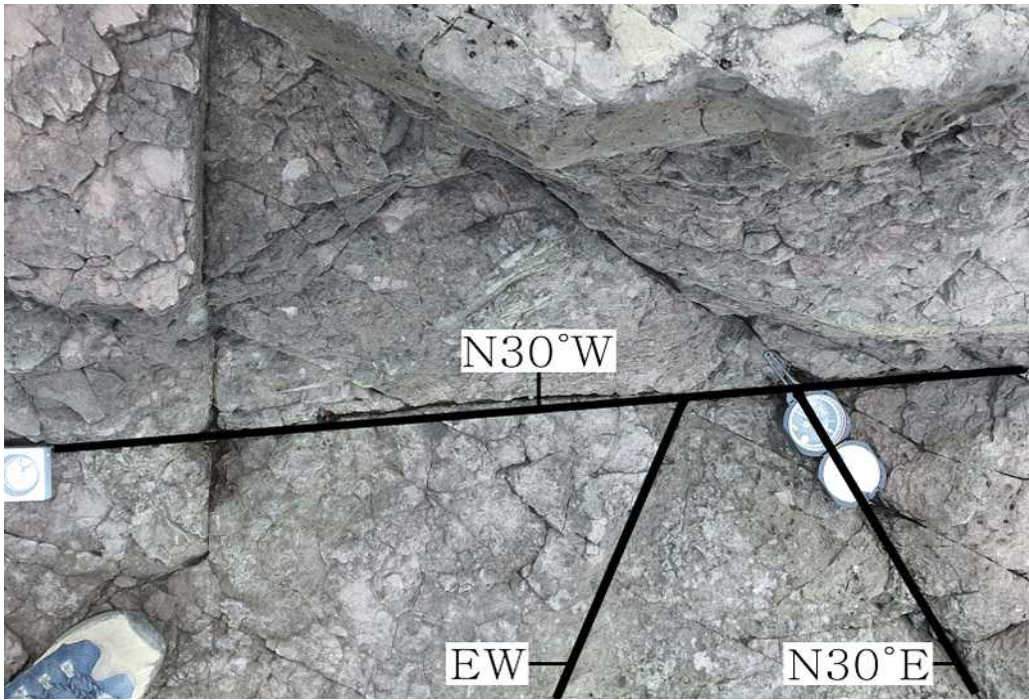


Fig. 21. Continued.

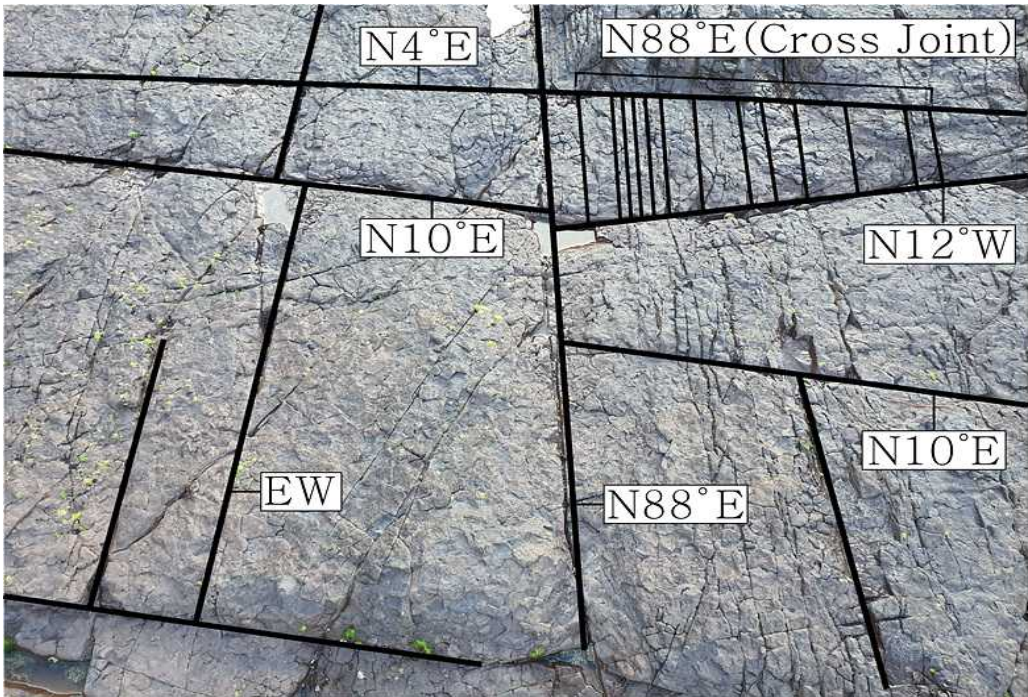
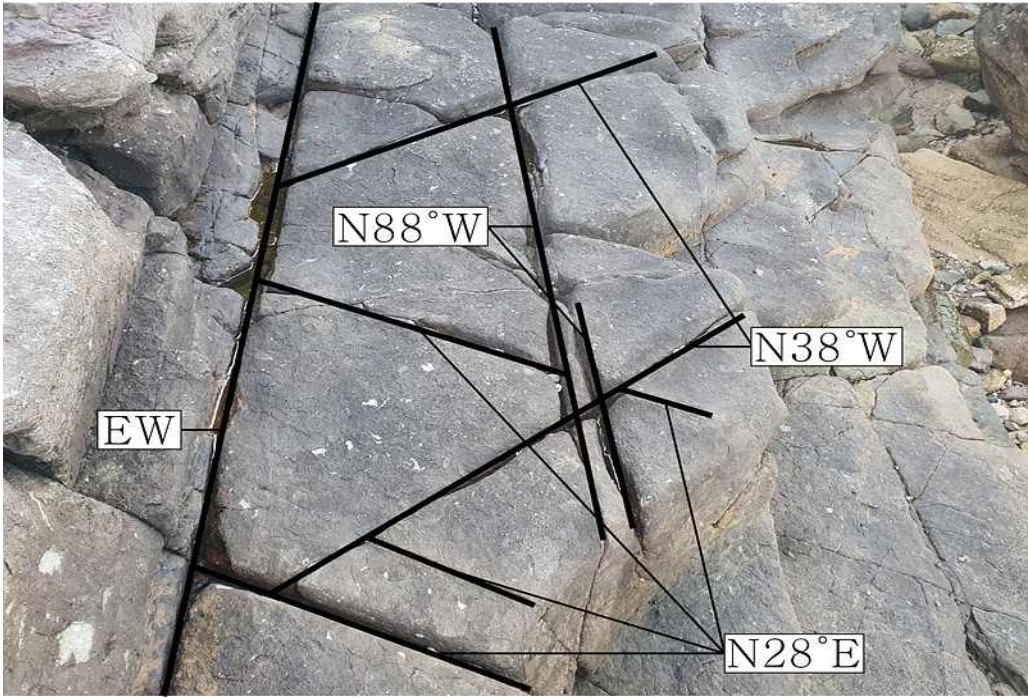


Fig. 21. Continued.

Table 2. Strike of structural joints of site 4 at Donghwa-ri.

방향	NS~ N10°E	N10°~ 20°E	N20°~ 30°E	N30°~ 40°E	N40°~ 50°E	N50°~ 60°E	N60°~ 70°E	N70°~ 80°E	N80°~ EW
빈도율 (%)	2.94	7.35	8.82	1.47	1.47	1.47	2.94	1.47	30.88
방향	NS°~ N10°W	N10°~ 20°W	N20°~ 30°W	N30°~ 40°W	N40°~ 50°W	N50°~ 60°W	N60°~ 70°W	N70°~ 80°W	N80°~ EW
빈도율 (%)	2.94	2.94	13.24	4.41	-	-	-	1.47	16.18

N = 68

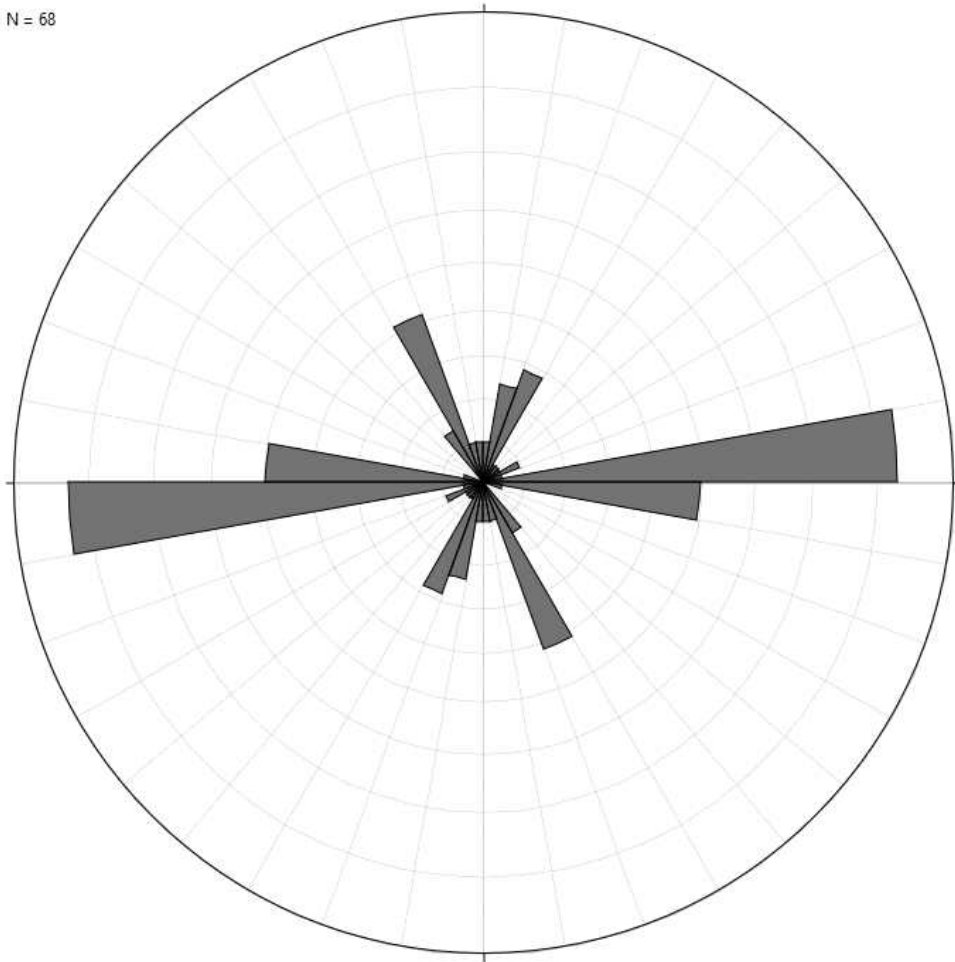


Fig. 22. Rose diagram shows strike of all structural joints and main structural joints at site 4 in Donghwa-ri.

## 2) Site 1 (하일면 춘암리 맥전포항)

맥전포항은 공룡 발자국 화석의 답사지로 유명한 상죽암군립공원에서 해안선을 따라 약 1.5km 지점이며, 이는 Fig. 20의 Site 1에 해당한다. 이 지역에는 백악기 진동층의 퇴적암과 응회암이 분포한다. 응회암은 맥전포항에서 북서쪽 해안으로 800m에 걸쳐 넓게 분포하고, 퇴적암은 풍화와 침식에 노출되어 있다. 노출된 퇴적암 지대에는 층리가 뚜렷하게 발달하고, 응회암에는 구조절리와 주상절리가 중첩되어 발달한다. 응회암에 발달한 복잡한 절리선에서 퇴적암에서 측정한 절리의 방향을 제거하면 다각형의 주상절리 형태가 도출된다.

맥전포항에서의 구조절리 방향은 크게 두 노두에서 총 36개의 구조절리 방향을 측정하였다. 지층이 지각변동이나 지구조운동에 의해 외력을 받으면 2~3개 방향으로 균열을 형성하게 되는데, 이 지역에서는 크게 3개의 방향이 나타난다(Fig. 23). 측정된 절리방향은 크게 북북동방향과 북북서방향이 가장 뚜렷하고, 이들을 동서방향으로 지나는 절리가 발달한다. 북북동 방향의 절리는 NS~N10°E 2.78%, N20°E~N30°E 2.78%, N30°E~N40°E 11.11% 그리고 N40°E~N50°E 5.56%이다. 북북서 방향의 절리는 N10°W~N20°W 2.78%, N20°W~N30°W 11.11%, N30°W~N40°W 8.33%과 N40°W~N50°W 2.78%이다. 동서 방향은 다소 분산되는 경향이 있으나, N70°W~N80°W 22.22%와 N80°W~EW 16.67%가 가장 우세하게 나타난다(Table 3). 맥전포항에서 구조절리 방향은 동서방향(N71°W~EW)이 가장 우세하며, 다음으로 북북서-남남동(N21°W~N30°W)과 북북동-남남서(N30°E~N39°E) 방향의 절리가 유사하게 분포한다(Fig. 24).



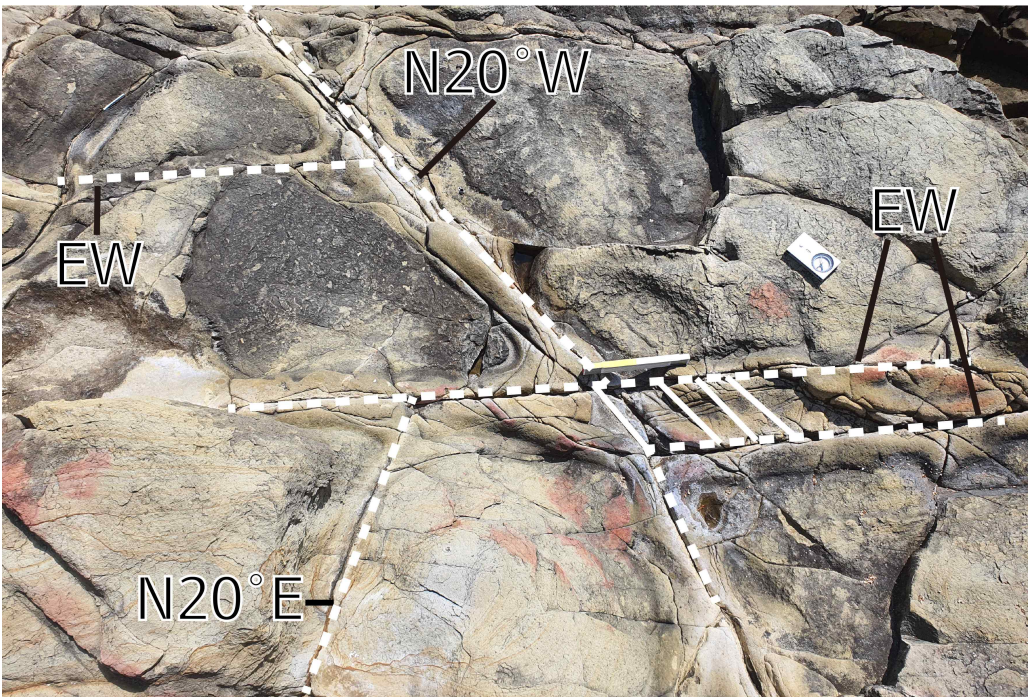
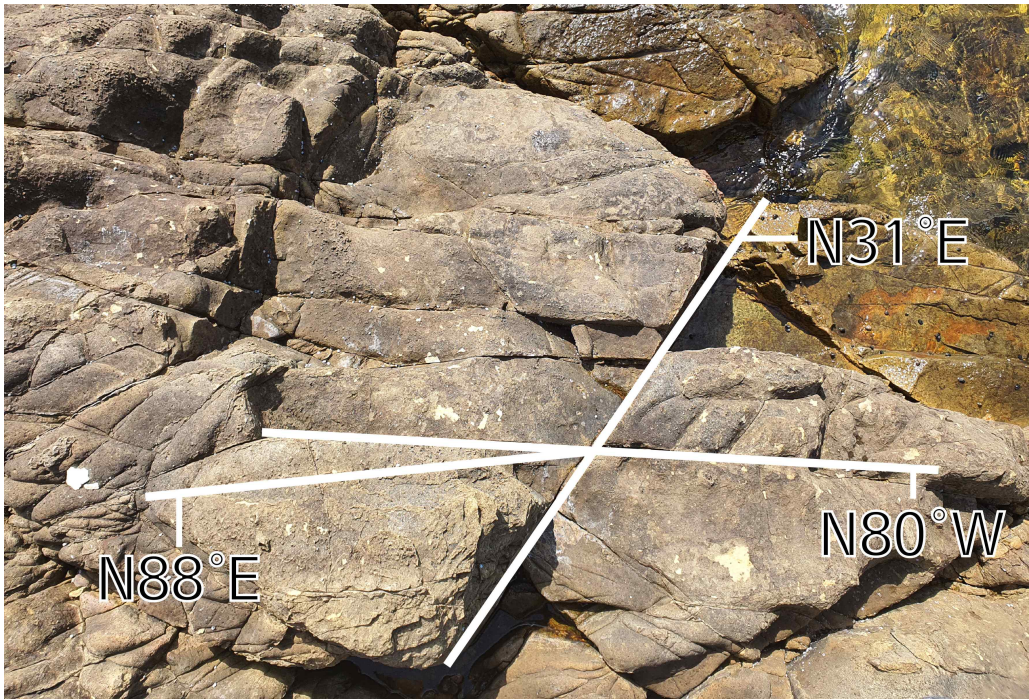


Fig. 23. Structural joints distributed in Maekjeonpo(port).

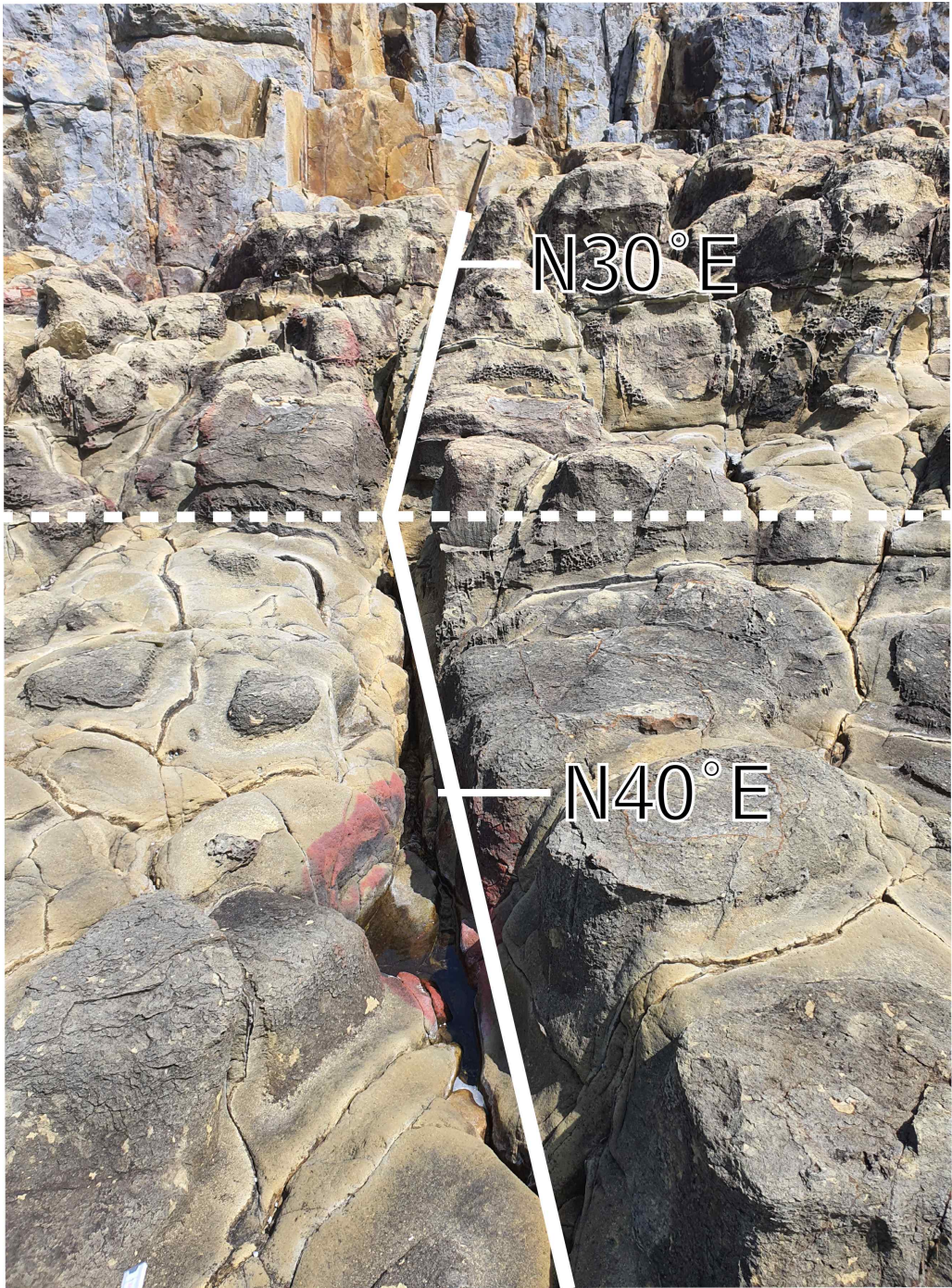


Fig. 23. Continued.

Table 3. Strike of structural joints of site 1 at Maekjeonpo(port).

방향	NS~ N10°E	N10°~ 20°E	N20°~ 30°E	N30°~ 40°E	N40°~ 50°E	N50°~ 60°E	N60°~ 70°E	N70°~ 80°E	N80°~ EW
빈도율 (%)	2.78	-	2.78	11.11	5.56	2.78	2.78	2.78	2.78
방향	NS~ N10°W	N10°~ 20°W	N20°~ 30°W	N30°~ 40°W	N40°~ 50°W	N50°~ 60°W	N60°~ 70°W	N70°~ 80°W	N80°~ EW
빈도율 (%)	-	2.78	11.11	8.33	2.78	-	2.78	22.22	16.67

N = 36

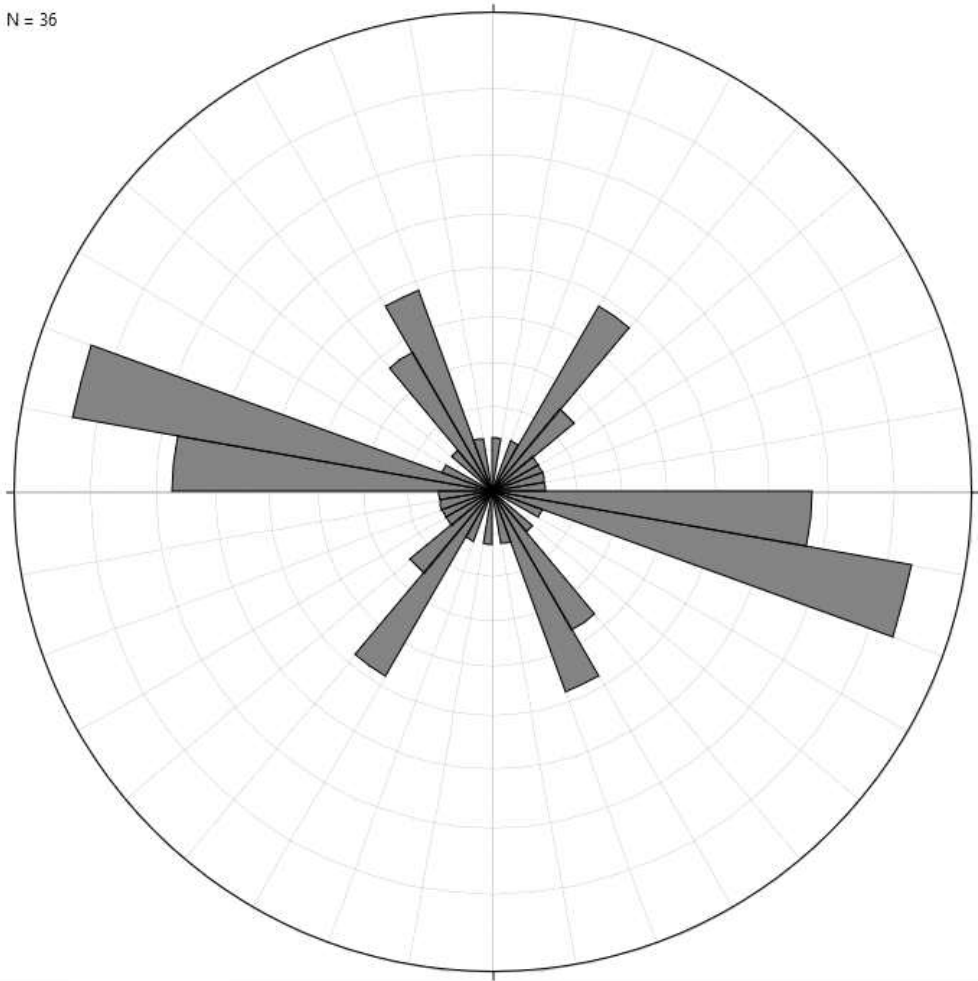


Fig. 24. Rose diagram shows strike of all structural joints and main structural joints at site 1 in Maekjeonpo(port).

### 3) Site 2 (하일면 춘암리 용암포항 건너편 해안 노두)

Site 2에서 구조절리는 용암포항 건너편에 위치한 해안 노두에서 측정하였다. 상대적으로 북측에 위치한 해안 노두에서 구조절리는 크게 두 방향을 가지며 X자로 교차하여 발달한다(Fig. 25). 퇴적암지대 위에 응회암이 피복된 형태를 보이며, 응회암층에 형성된 주상절리 기둥이 관찰된다. 이 기둥은 구조절리에 의해 일정한 방향으로 파쇄된 형태를 보이고 있다.

남측에 위치한 해안 노두에서는 구조절리가 3개의 절리조를 이루며 서로 교차하여 발달한다. 마치 거미줄처럼 보이는 이러한 형태는 연구지역의 구조절리를 대표적으로 보여준다(Fig. 26). 하일면에 위치한 용암포항의 건너편 해안의 구조절리 방향을 종합해보면 Table 4와 같다. 절리 방향은 NS~N10°E 7.69%, N20°E~N30°E 7.69%, N30°E~N40°E 7.69%, N40°E~N50°E 7.69%, N60°E~N70°E 7.69%로 북동 방향에서는 우세하게 발달하는 방향성은 보이지 않는다. 북서 방향에서는 NS~N10°W 23.08%, N10°W~N20°W 7.69%, N20°W~N30°W 7.69%, N50°W~N60°W 7.69%, N60°W~N70°W 7.69%, N80°W~EW 7.69%로 남북 방향(NS~N10°W)이 가장 우세하게 발달하며, 그 외의 방향들은 유사하게 분포하는 모습을 보인다(Fig. 27).

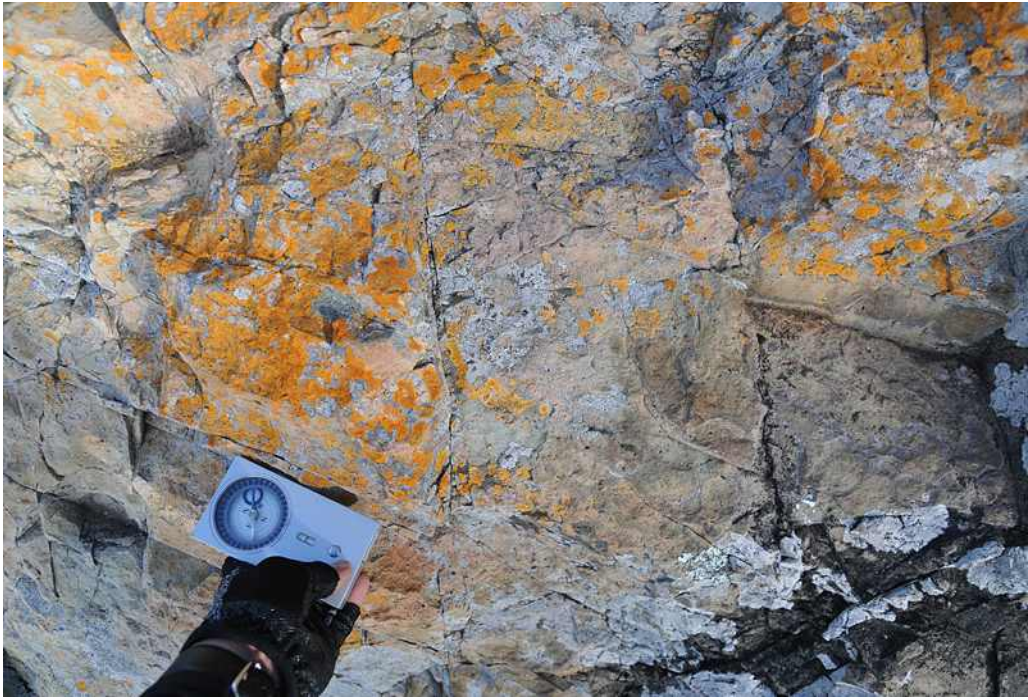


Fig. 25. Structural joint intersecting in the shape of an X(northern area).



Fig. 26. Structural joint intersecting in a grid pattern(southern area).

Table 4. Strike of structural joints of site 2 at Yongampo(port).

방향	NS~ N10°E	N10°~ 20°E	N20°~ 30°E	N30°~ 40°E	N40°~ 50°E	N50°~ 60°E	N60°~ 70°E	N70°~ 80°E	N80°~ EW
빈도율 (%)	7.69	-	7.69	7.69	7.69	-	7.69	-	-
방향	NS°~ N10°W	N10°~ 20°W	N20°~ 30°W	N30°~ 40°W	N40°~ 50°W	N50°~ 60°W	N60°~ 70°W	N70°~ 80°W	N80°~ EW
빈도율 (%)	23.08	7.69	7.69	-	-	7.69	7.69	-	7.69

N = 13

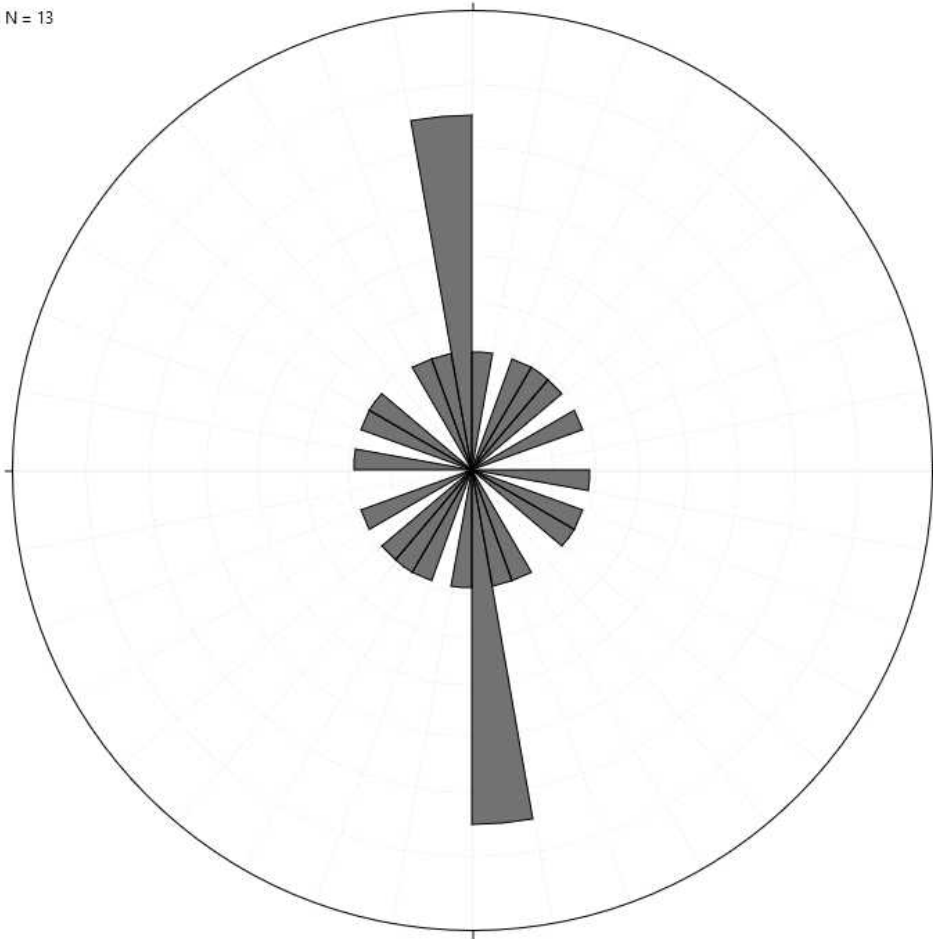


Fig. 27. Rose diagram shows strike of all structural joints and main structural joints at site 2 in Yongampo(port).

#### 4) Site 3 (남부 무인도서)

연구지역 최남단에 위치한 안장섬 또한 주상절리가 존재한다. 전체적인 섬의 지형을 보았을 때 일정한 방향의 구조절리들이 섬을 가로지르고 있는 형태를 보이며, 지구조운동에 의해 형성된 절리의 틈이 오랜 시간 파도에 의한 침식으로 넓게 이격된 모습 또한 관찰된다(Fig. 28).

토끼섬은 안장섬 북서쪽 방향으로 1.2km로 지점에 위치하는 면적 608m<sup>2</sup>의 무인도서이다. 동서방향의 구조절리가 섬 전체를 가로지르고 있다(Fig. 29). 수직의 기둥 구조가 기울어져 있으며, 전면부에서만 관찰했을 때 구조절리선인지 주상절리 기둥인지 판별하기 어렵다. 기둥단면을 살펴보았을 때 EW 방향의 구조절리에 의해 윗부분이 반쯤 파쇄된 형태를 보인다. 유문암질응회암의 주상절리가 구조절리에 의해 잘게 쪼개진 모습을 보이며, 이 때 구조절리의 방향은 EW, N30°E, N70°~80°W이다. 주상절리의 초기 형태를 알아보기 힘들 만큼 파쇄되어 있다(Fig. 30).

연구지역의 남부권역에 위치한 무인도서의 구조절리 방향을 종합해보면 Table 5와 같다. 절리 방향은 NS~N10°E 9.09%, N10°E~N20°E 4.55%, N30°E~N40°E 13.64%, N50°E~N60°E 9.09%로 북동 방향에서는 N30°E~N40°E가 우세하게 발달한다. 북서 방향에서는 N20°W~N30°W 9.09%, N30°W~N40°W 4.55%, N50°W~N60°W 4.55%, N60°W~N70°W 4.55%, N70°W~N80°W 4.55%, N80°W~EW 36.36%로 N80°W~EW가 높은 비율을 차지하고 있다.

이 지역의 절리 방향을 요약하면 동서방향(N81°W~EW)가 가장 우세하게 발달하며, 다음으로 북북동-남남서 방향(N30°E~N39°)E이 우세하게 나타난다(Fig. 31).





Fig. 28. Structural joint developed at the edge of Anjang-seom(island).



Fig. 29. Structural joint in the east-west direction across Tokki-seom(island).

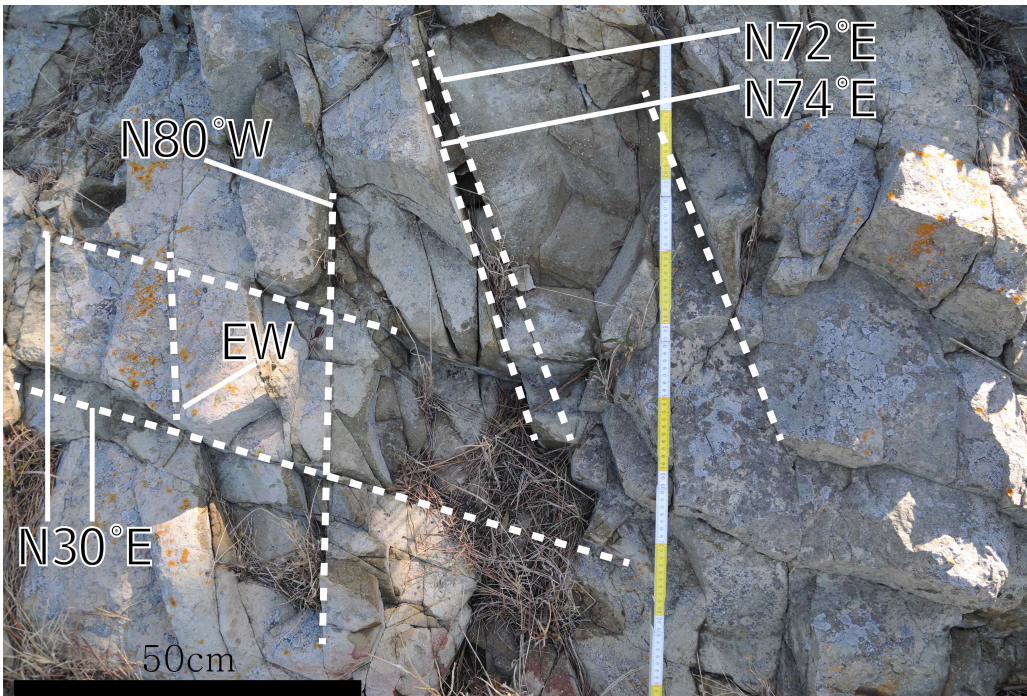


Fig. 30. Structural joint that develops by breaking the section of columnar joint.

Table 5. Strike of structural joints of site 3 at uninhabited island southern region.

방향	NS~ N10°E	N10°~ 20°E	N20°~ 30°E	N30°~ 40°E	N40°~ 50°E	N50°~ 60°E	N60°~ 70°E	N70°~ 80°E	N80°~ EW
빈도율 (%)	9.09	4.55	-	13.64	-	9.09	-	-	-
방향	NS°~ N10°W	N10°~ 20°W	N20°~ 30°W	N30°~ 40°W	N40°~ 50°W	N50°~ 60°W	N60°~ 70°W	N70°~ 80°W	N80°~ EW
빈도율 (%)	-	-	9.09%	4.55	-	4.55	4.55	4.55	36.36

N = 22

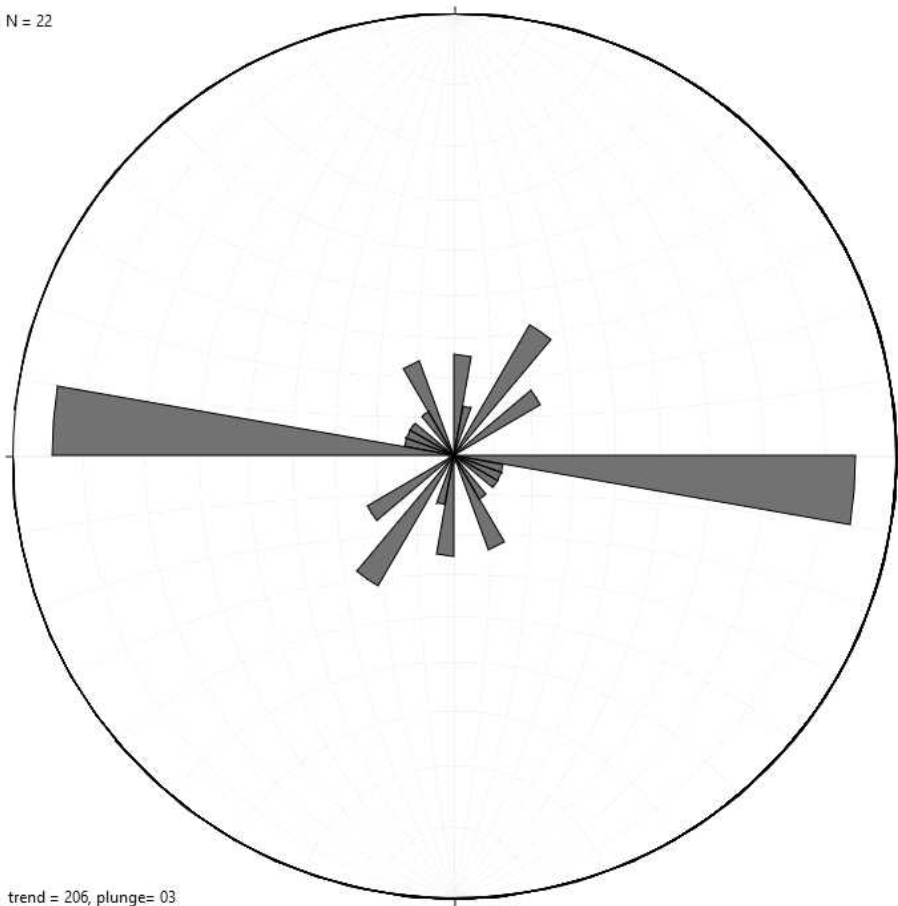


Fig. 31. Rose diagram shows strike of all structural joints and main structural joints at site 3 in uninhabited island southern region.

## 5) Site 5 (동부 무인도서)

육섬은 유인도인 자란도 남서측에서 1.2km 떨어진 지점에 위치하는 무인도서이다. 마그마가 암맥상으로 관입하여 수평방향으로 주상절리가 형성되었으며, 그 이후에 지구조운동에 의해 수직으로 가로지르는 구조절리가 형성되었을 것으로 추정된다(Fig. 32, 33). 이때 수직의 구조절리 방향은 대부분 동서방향이다.

녹도는 하일면 송천리에 있는 지포마을 동측에 위치한 해안에서 100m가량 떨어진 지점에 위치하는 무인도서이며, 육섬에서 약 750m 가량 북측지점에 위치한다. 녹도도 위의 육섬과 마찬가지로 용암류의 관입에 의해 형성된 무인도서이다. 암맥으로 관입 후 냉각되어 수평의 주상절리가 형성되었다. 주상절리를 구성하는 암석은 사암편이 함유된 유문암질 응회암이다. 그 이후 여러개의 구조절리가 EW 방향으로 섬을 가로지르며(Fig. 34, 36), 이러한 구조절리에 의해 주상절리의 일부분이 파쇄되어 단면이 노출된 형태를 띠고 있다(Fig. 35).

장여는 하일면 송천리에 위치한 작은 무인도서이다. 평평한 파식대지에 산성암맥이 관입한다. 섬의 북측면에 분포하는 퇴적암에서 층리가 발달한다. 장여 남측에 위치한 파식대지에서 구조절리가 크게 세 방향으로 발달되어 있으며, 주향은 NS, EW, N30°E 방향이다(Fig. 37, 38).

동부권역 무인도서의 구조절리 방향을 종합해보면 Table 6과 같다. 절리 방향은 NS~N10°E 20%, N30°E~N40°E 20%이다. 북서 방향에서는 N70°W~N80°W 20%, N80°W~EW 40%로 N80°W~EW가 많은 비율을 차지하고 있다(Fig. 39).



Fig. 32. Structural joint in the horizontal direction formed primarily after cooling.



Fig. 33. After the formation of the first horizontal joint, the second vertical joint formed by tectonic movement.



Fig. 34. Horizontal columnar joints formed by the intrusion of lava flows.



Fig. 35. Cross section of columnar joint exposed after fracture by structural joint.

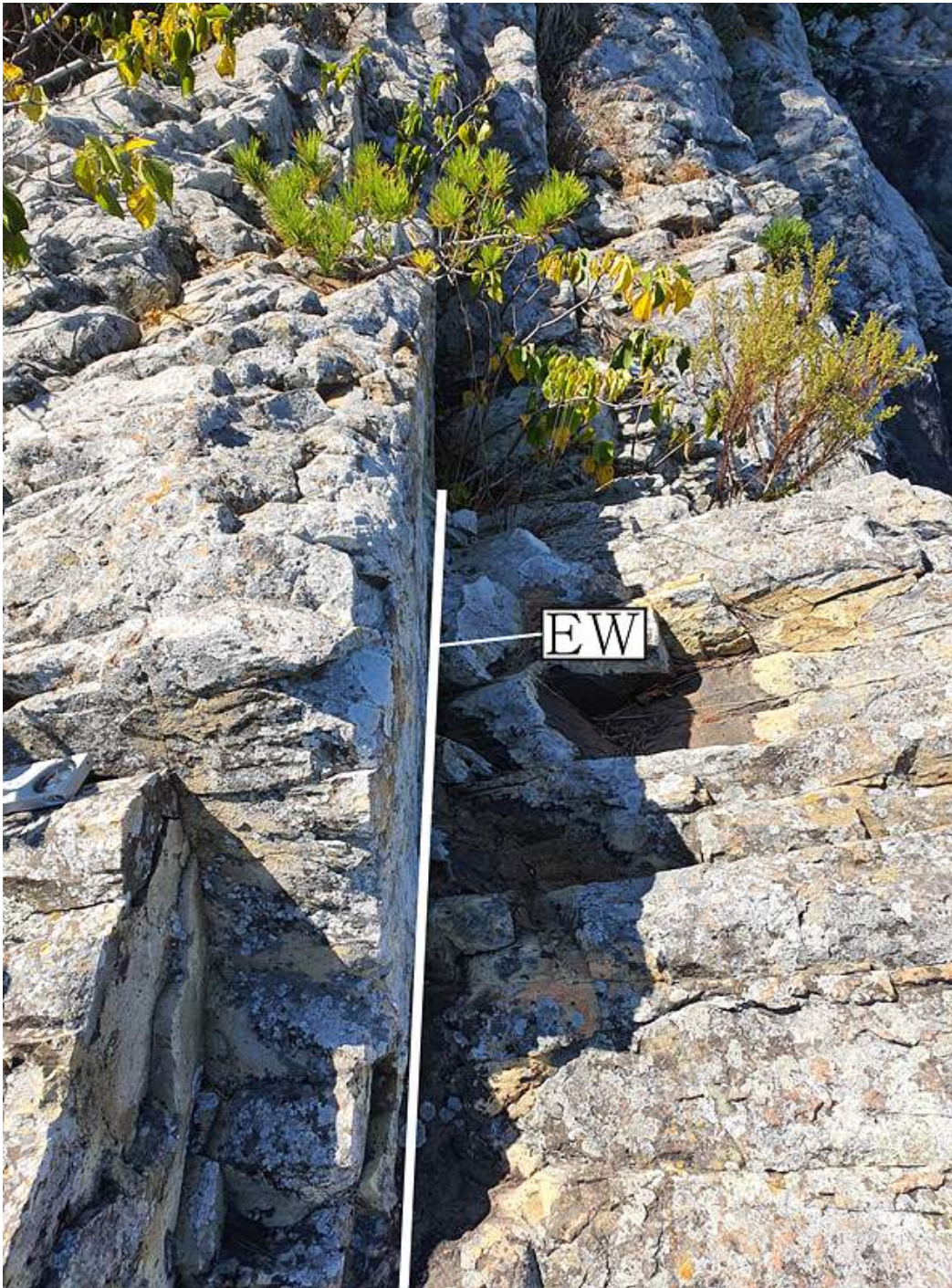


Fig. 36. Structural joint that develops across the island in the EW direction.

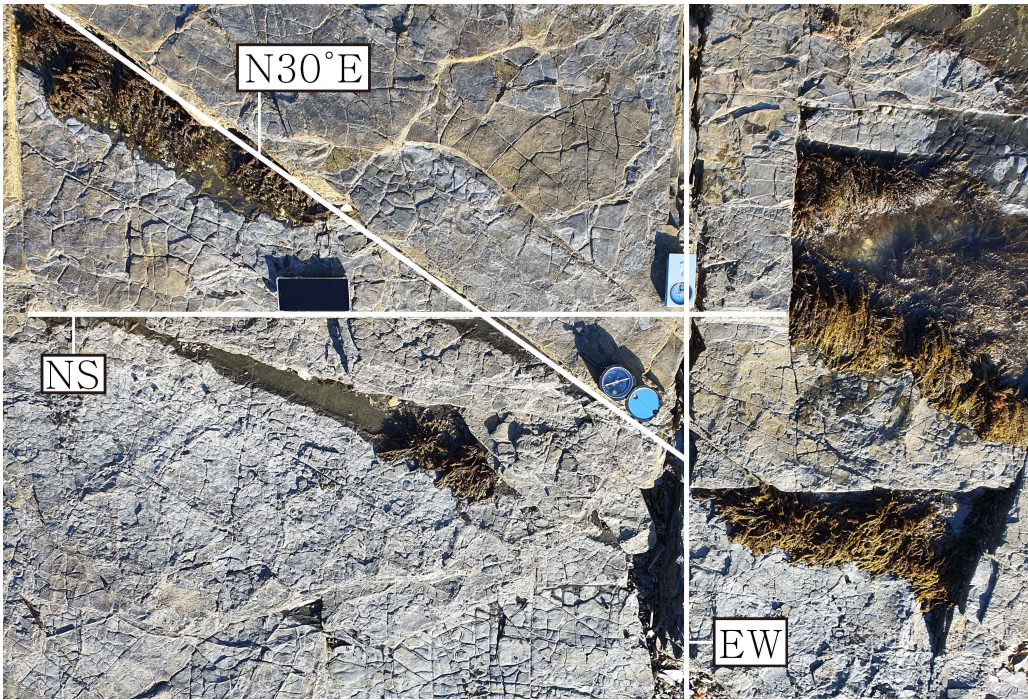


Fig. 37. Structural joint in three directions developed in Jangyeo.



Fig. 38. Structural joints that develop in a certain direction on the eroded land.



Table 6. Strike of structural joints of site 5 at uninhabited island eastern region.

방향	NS~ N10°E	N10°~ 20°E	N20°~ 30°E	N30°~ 40°E	N40°~ 50°E	N50°~ 60°E	N60°~ 70°E	N70°~ 80°E	N80°~ EW
빈도율 (%)	20	-	-	20	-	-	-	-	-
방향	NS°~ N10°W	N10°~ 20°W	N20°~ 30°W	N30°~ 40°W	N40°~ 50°W	N50°~ 60°W	N60°~ 70°W	N70°~ 80°W	N80°~ EW
빈도율 (%)	-	-	-	-	-	-	-	20	40

N = 5

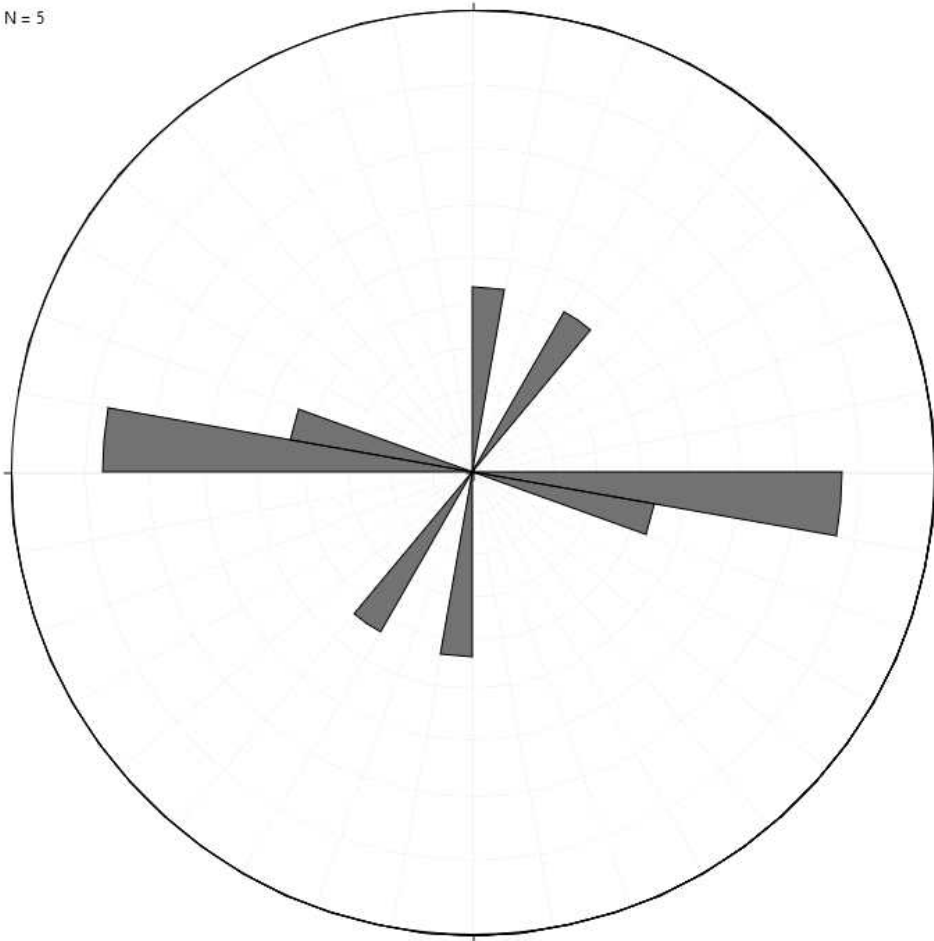


Fig. 39. Rose diagram shows strike of all structural joints and main structural joints at site 5 in uninhabited island eastern region.

## 6) 연구지역 구조절리 방향성 측정 결과

측정된 연구지역 구조절리의 주향을 요약하면 Table 7과 같다. 북북동 방향의 절리는 NS~N10°E 4.86%, N10°E~N20°E 4.17%, N20°E~N30°E 5.56%, N30°E~N40°E 6.94% 그리고 N40°E~N50°E 2.78%이다. 북북서 방향의 절리는 N10°W~N20°W 2.78%, N20°W~N30°W 11.11%, N30°W~N40°W 4.86%과 N40°W~N50°W 0.69%이다. 동서 방향은 N80°E~EW 15.28%와 N80°W~EW 19.44%가 가장 우세하다.

전체 연구지역에서 높은 빈도율을 가지는 절리 방향을 분류해보면 N80°E~EW, N80°W~EW의 동서방향이 가장 우세하며, N20°W~N30°W의 북북서-남남동 방향, N30°E~N40°E의 북북동-남남서 방향 순으로 발달한다(Fig. 40).

Table 7. Strike of structural joints of total site in study area

방향	NS~ N10°E	N10°~ 20°E	N20°~ 30°E	N30°~ 40°E	N40°~ 50°E	N50°~ 60°E	N60°~ 70°E	N70°~ 80°E	N80°~ EW
빈도율 (%)	4.86	4.17	5.56	6.94	2.78	2.78	2.78	1.39	15.28
방향	NS°~ N10°W	N10°~ 20°W	N20°~ 30°W	N30°~ 40°W	N40°~ 50°W	N50°~ 60°W	N60°~ 70°W	N70°~ 80°W	N80°~ EW
빈도율 (%)	3.47	2.78	11.11	4.86	0.69	1.39	2.08	7.64	19.44

N = 144

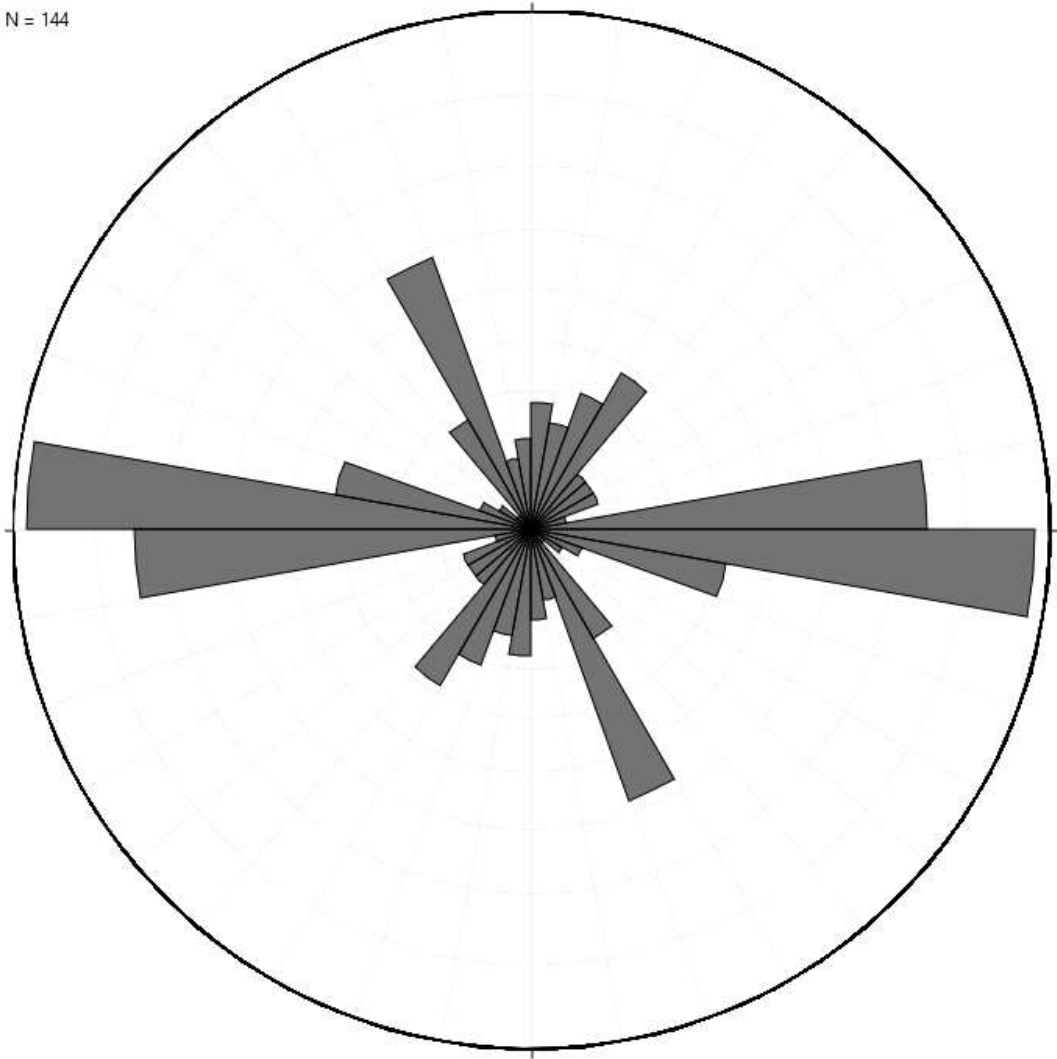


Fig. 40. Rose diagram shows strike of all structural joints and main structural joints at all study area.

## 2. 구조절리가 중첩된 주상절리

연구지역에 발달하는 주상절리는 대부분 구조절리와 혼재되어 발달한다. 물리적 힘에 의해 형성된 구조절리가 주상절리 단면을 가로지르며 발달하여 그 형태를 해석하는데 어려움이 있거나, 주상절리가 아닌 구조절리만 발달한 지역으로 해석할 수 있다. 5각형 내지 6각형으로 이루어진 주상절리를 구조절리가 절단하는 형태가 발견되며, 이로 인해 연구지역 주상절리 다각형은 삼각형 내지 사각형으로 분할된 형태로 관찰된다. 또한 주상절리의 형태 분석을 위해 단면의 크기와 다각형을 측정할 때 구조절리선과 주상절리 사이 틈의 경계가 명확하지 않아 원래의 크기보다 작게 측정되거나 단면의 다각형 수를 다르게 해석할 가능성이 높았다.

정확한 주상절리 다각형과 크기를 파악하기 위해 연구지역에서 현장조사시 구조절리와 주상절리가 중첩되어 발달하는 곳은 현장에서 먼저 구조절리선을 찾아 제외한 후에 주상절리의 온전한 형태를 찾아내고, 실내작업에서는 사진 자료를 스케치하며 앞서 해석한 우세하게 발달하는 방향의 구조절리를 제거한 후에 주상절리의 다각형을 찾아내어 복원하였다.

### 1) Site 1 (하일면 춘암리 맥전포항)

맥전포항에서는 구조절리가 중첩된 주상절리뿐만 아니라 구조절리만 형성된 곳이 존재한다. 이 지역은 주로 유문암질응회암으로 이루어져 있으며, 그 아래에 사암으로 이루어진 진동층이 존재하고 그 위로 응회암층이 피복되어 있다. 맥전포항은 파식대지에 주상절리대가 형성되어 있다. 오랜 기간 파도에 의해 풍화와 침식을 받으며 깎여나가 주상절리의 밑기둥 단면만 관찰할 수 있다. 기둥면을 볼 수 없어 컬러네이드의 기둥 높이는 측정할 수 없지만 당시 주상절리의 다각형의 수(N), 기둥면의 폭(L), 기둥면 사이의 각( $\theta$ )는 추정이 가능하다. 그리고 그 위로 지구조운동에 의한 수 많은 물리적인 구조절리들이 지나가고 있다. 이 구조절리들은 앞서 살펴본 바와 같이 동서, 북북동-남남서, 북북서-남남동의 방향으로 발달하며, 이 절리조에 해당하는 구조절리들이 주상절리에 중첩되어 있는 형태이다. 이러한 구조절리들은 주상절리 위에 선을 그려 놓은 것처럼 존재하기도 하지만, 주상절리의 일부분을 파쇄하기도 한다. 이로 인해 주상절리의 온전한 형태를 파악하기도 어려울뿐더러 주상절리가 아닌 구조절리가 그물형태(망상)로 교차하는 형태로만 보이게 된다.

구조절리가 중첩되어 있는 양상을 살펴보면, N30°E와 N42°W가 X자로 중간을 크게 교차하여 가로지르고 있고, N9°E, N50°E, N60°E 방향의 부수적인 구조절리들이 주상절리 단면에 중첩되어 있다(Fig. 41).

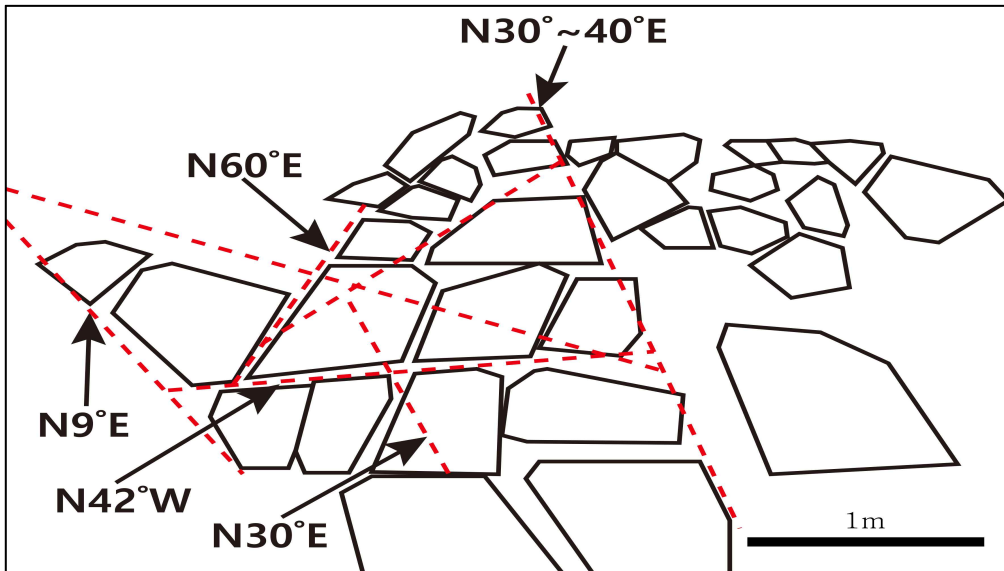


Fig. 41. Photograph and sketch of overlapping phenomenon of columnar and structural joints in Maekjeonpo(port).

## 2) Site 2 (하일면 춘암리 용암포항)

용암포항에서 남쪽 약 100m 지점의 해안에 파쇄된 주상절리 기둥들이 있고 해안에서 육지로 향하는 20m 지점에 거대한 암체가 존재한다. 이 암체의 높이는 대략 5m 가량이며, 유문암질응회암으로 구성되어있다. 주상절리가 발달하고 있으며, 구조절리가 중첩되어 있거나 그 영향으로 파쇄되어 있다.

EW 방향의 구조절리가 크게 중앙을 가로지르고 양측면 또한 N80°E~EW 방향의 구조절리가 발달하고 있다. N26°E 방향은 사진상 왼쪽측면에서 EW방향과 함께 발달하며, N50°E 또한 EW 방향과 교차하여 발달하고 있다. 이는 지층이 지각변동에 의해 외력을 받으며 형성되는 2~3개의 균열에 해당하는 것으로 보이며, EW 방향이 주방향이며 N26°E와 N50°E는 부수적으로 형성된 구조절리로 판단된다(Fig. 42).

EW와 N26°E 방향은 높은 빈도율을 보이는 연구지역의 절리조에 해당하며, 스케치상으로 이를 제거하면, 용암포항에 발달하는 온전한 형태의 주상절리를 분석할 수 있다.

## 3) Site 3 (남부권역 무인도서 중 토끼섬)

토끼섬은 구조절리가 중첩된 형태와 구조절리에 의해 파쇄된 형태를 잘 보여준다. N80°W~EW 방향과 N30°E 방향이 서로 교차하여 격자무늬를 형성하며 중첩되어 있고, N72°E~N74°E 방향의 구조절리가 주상절리 단면 중앙을 가로지르며 파쇄하고 있다. 위에 언급된 방향은 모두 연구지역에서 높은 빈도율의 절리조에 해당하는 방향이다. 우세하게 발달하는 구조절리뿐만 아니라 이로인해 형성된 다른 부수적인 구조절리들은 해안노두에 발달하며 격자무늬를 형성하고 있다(Fig. 43).

이 지역은 주상절리 다각형을 구조절리가 복잡하게 절단하여 초기의 다각형을 구분하기 쉽지 않다. 그러나 구조절리 방향을 제외하면 본래의 주상절리 다각형을 관찰할 수 있다.

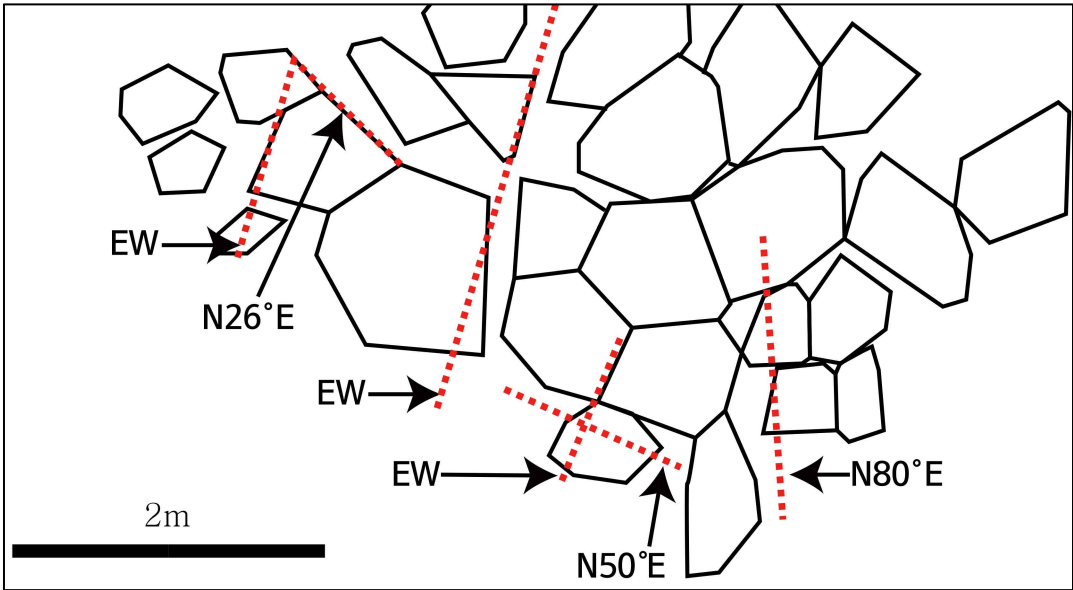


Fig. 42. Photograph and sketch of overlapping phenomenon of columnar and structural joints in Yongampo(port).

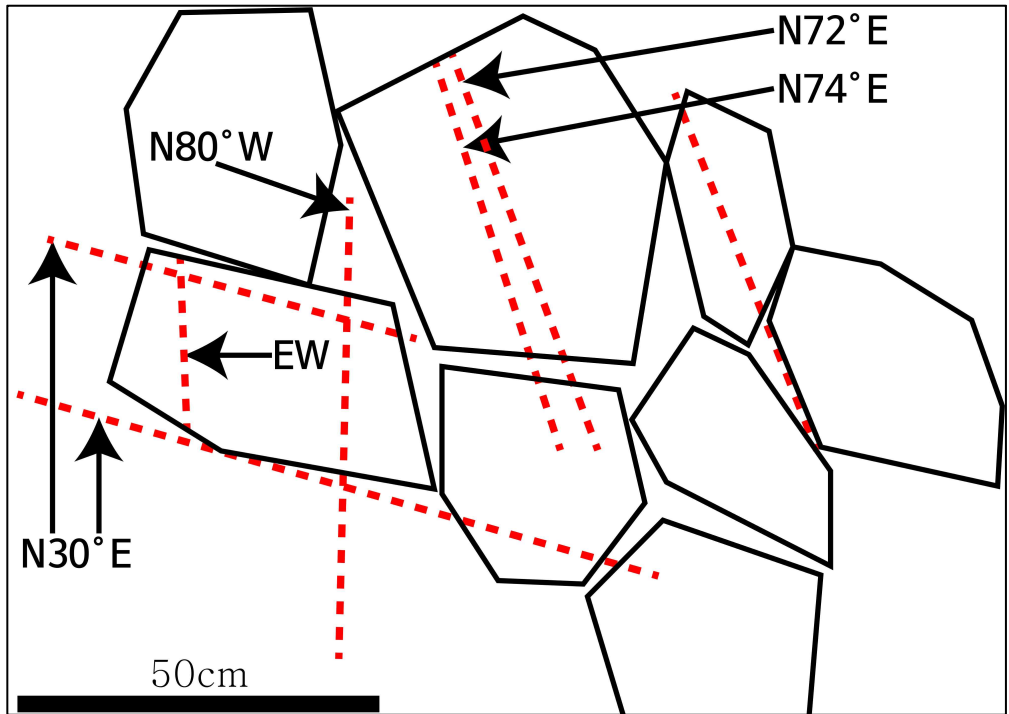
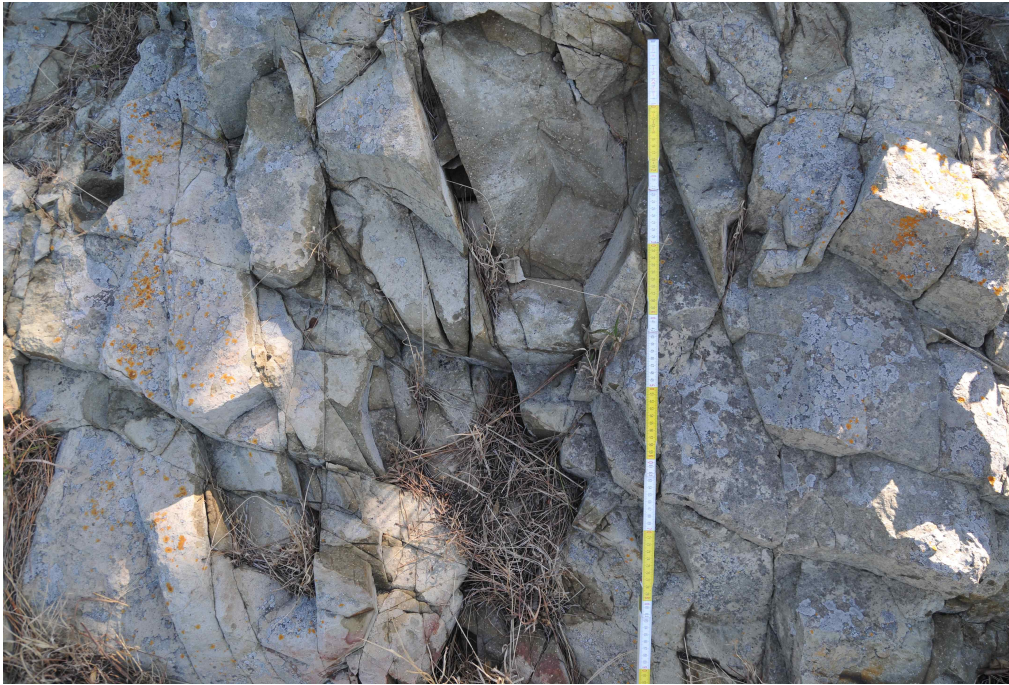


Fig. 43. Photograph and sketch of overlapping phenomenon of columnar and structural joints in Tokki-seom(island).



### 3. 주상절리 형태분석

주상절리 형성과정에서 다각형, 기둥면의 폭, 기둥면 사이의 각은 매우 중요한 요소이다(Toramaru and Matsumoto, 2004). 이에 따라 구조절리의 영향을 제거한 주상절리의 형태분석을 위하여 현장조사시 구조절리가 중첩되어 있는 지역은 후속 작업으로 최대한 원래 형태를 복원하여 단면도를 스케치하고, 다각형의 수(N), 기둥면의 폭(L), 기둥면 사이의 각( $\theta$ )을 측정하였다.

#### 1) Site 1 (하일면 춘암리 맥전포항) 주상절리

이 지역의 주상절리는 맥전포항에서 북서측으로 발달한 해안에서 400m에 걸쳐 분포한다. 수직방향의 켈러네이드 구조를 보이지만, 파식대지에 발달하여 풍화에 오랜 기간 노출되어 있어 그 높이는 굉장히 낮다. 구조절리에 의한 중첩 및 파쇄가 잘 나타나며, 주상절리 본연의 형태를 판별하기 어려울 정도로 난해한 형태를 보인다. 맥전포항 일대는 진동층군의 회백색, 회색, 회녹색, 암회색, 흑색의 사암 및 셰일로 기재되어 있지만(한국지질자원연구원, 2002), 현장조사 결과 주상절리가 발달한 곳은 유문암질응회암으로 구성되어 있음을 확인하였다.

Fig. 44는 맥전포항 일대에서 주상절리가 위치한 지역을 표시한 곳으로, 단면의 구조를 잘 파악할 수 있는 곳인 A, B Site에서 주상절리의 형태를 측정하였다(Fig. 45, 46).

Site 1 (맥전포항 일대)의 주상절리 다각형의 수(N)는 4각형 6.4%, 5각형 34%, 6각형 36.2%, 7각형 21.3%, 8각형 2.1%로 6각형이 가장 높은 비율을 차지한다. 기둥면의 폭(L)은 1~10cm 7.2%, 11~20cm 27.6%, 21~30cm 21.6%, 31~40cm 13.6%, 41~50cm 7.6%, 51~60cm 8.0%, 61~70cm 4.8%, 71~80cm 3.6%, 80cm 이상 6.0%로 11~20cm가 가장 높은 비율을 차지한다. 기둥면 사이의 각( $\theta$ )은 140° 이상이 19.9%로 가장 높은 빈도율을 보이며, 110°~119° 16.5%, 120°~129° 13.9%, 130°~139° 13.9%, 100°~109° 12.4%, 90°~99° 9.0%, 80°~89° 5.3%, 69° 이하 4.9%, 70°~79° 4.1%, 의 빈도율을 보인다.

Site 1 지역의 측정값을 종합적으로 나타내면 Table 8과 같다. 다각형의 수(N)은 5각형 34%, 6각형 36.2%, 7각형 21.3%의 빈도율을 보이며, 기둥면의 폭(L)은 11~20cm가 27.6%로 가장 높은 비율을 보인다. 그리고 기둥면 사이의 각( $\theta$ )은 140° 이상이 19.9%로 가장 높은 빈도율을 보인다.

Table 8. Measurement of columnar joint in Maekjeonpo(port).

N	4	5	6	7	8	N: number of the polygon L: side length of the polygon $\theta$ : internal angles of the polygon face			
	6.4%	34%	36.2%	21.3%	2.1%				
L	1~10cm	11~20cm	21~30cm	31~40cm	41~50cm	51~60cm	61~70cm	71~80cm	80cm~
	7.2%	27.6%	21.6%	13.6%	7.6%	8.0%	4.8%	3.6%	6.0%
$\theta$	~69°	70°~79°	80°~89°	90°~99°	100°~109°	110°~119°	120°~129°	130°~139°	140°~
	4.9%	4.1%	5.3%	9.0%	12.4%	16.5%	13.9%	13.9%	19.9%



Fig. 44. Columnar joint measurement site in Maekjeonpo(port).

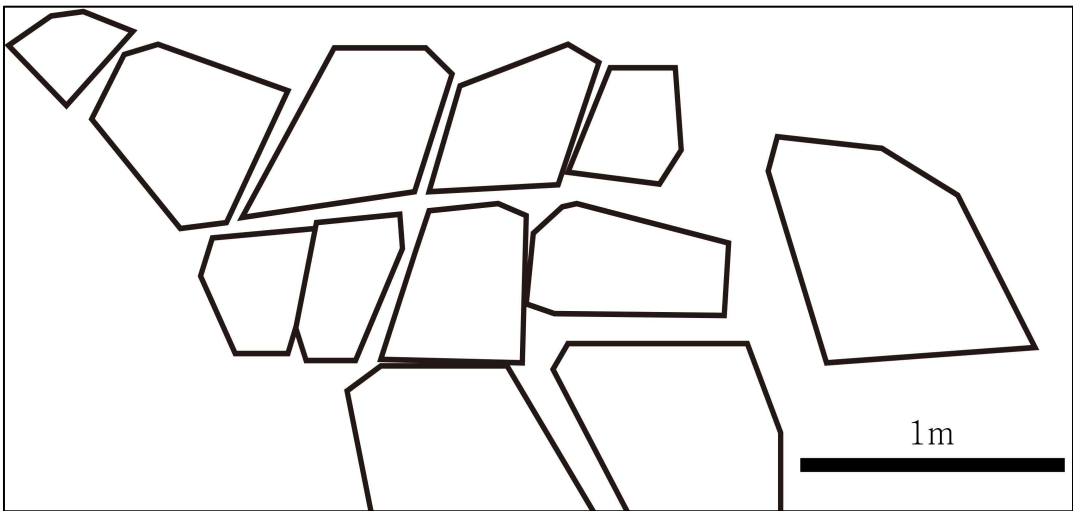


Fig. 45. Photograph and sketch of columnar joint in Mækjeonpo(port)(Site 1-A).

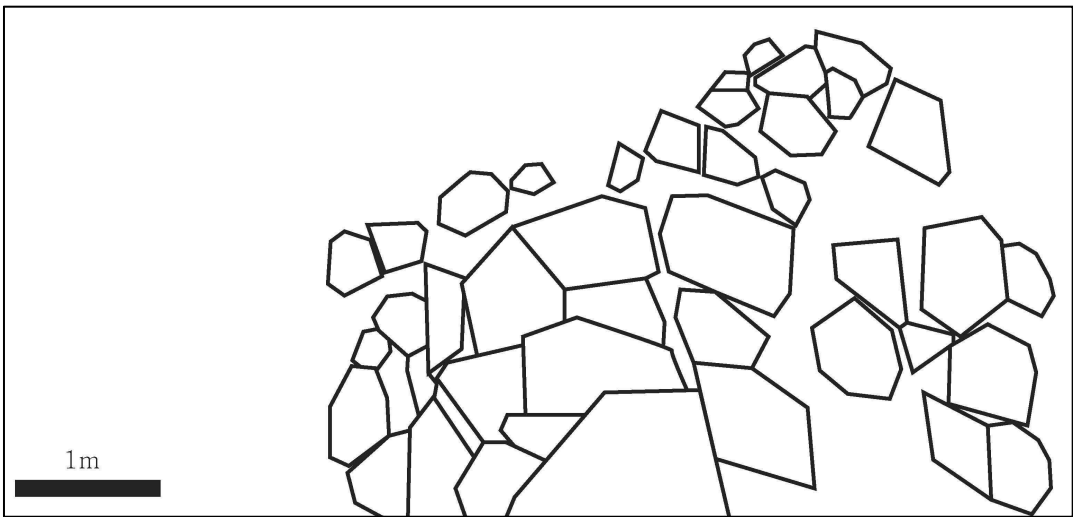


Fig. 46. Photograph and sketch of columnar joint in Mækjeonpo(port)(Site 1-B).

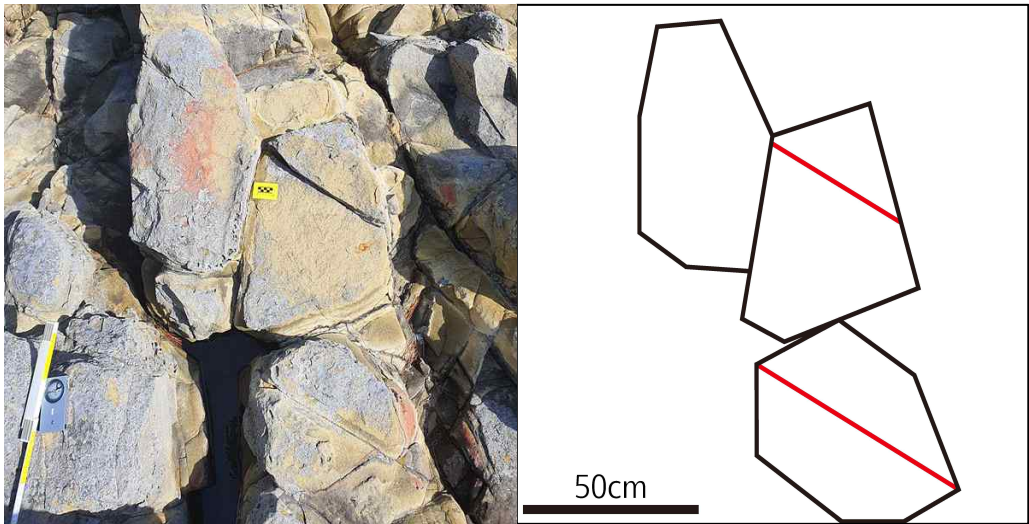


Fig. 46. Continued.

## 2) Site 2 (하일면 춘암리 용암포항) 주상절리

용암포항에 발달하는 주상절리는 구조절리가 중첩된 형태를 보이고 있다. 앞서 설명한 절리조 방향의 응력과 구조절리와 구조절리 사이에서 생성된 힘에 의해 여러 갈래로 갈라진 모습이다. 파쇄된 기둥들을 아래 해안에서 관찰할 수 있다.

Fig. 47은 용암포항 일대에서 주상절리가 위치한 지역을 표시한 곳으로 이 중 단면의 구조를 잘 파악할 수 있는 곳인 A, B, C Site에서 주상절리의 형태를 측정하였다.

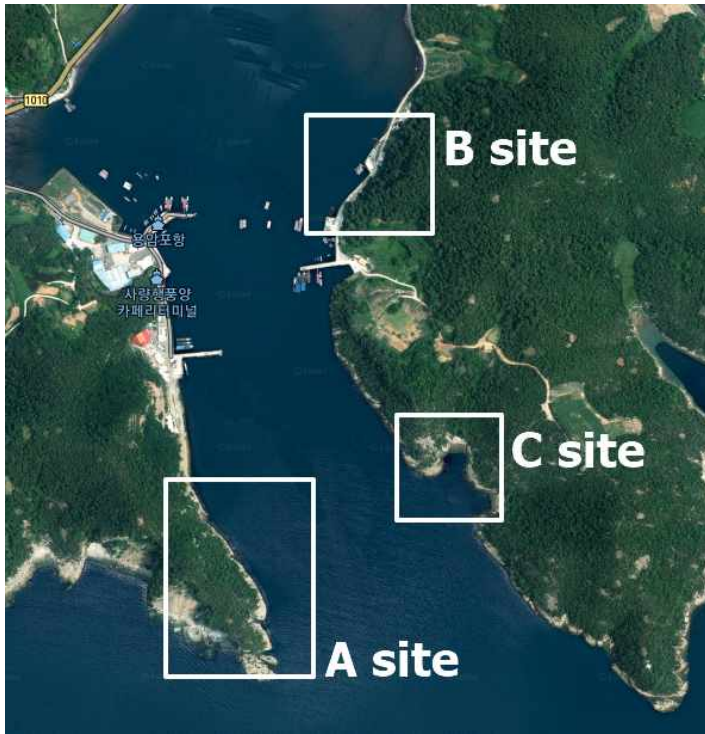


Fig. 47. Columnar joint measurement site in Yongampo(port).

Site 2-A 지역의 주상절리는 용암포항에 있는 여객선 터미널에서 남측으로 약 300m 지점에 위치하며, 해안에 약 150m에 걸쳐 분포한다. 수직방향의 켈러네이드 구조를 보이며, 높이는 5~10m이다(Fig. 48). 일부 파쇄된 기둥 파편은 피아메구조가 발달한 용결응회암이다(Fig. 49). 용결응회암은 화산쇄설류 중 화산유리가 용결하여 생성되며, 자체 무게에 의해 압밀화되기 때문에 퇴적물의 중하위가 가장 강하게 용결된다. 이를 통하여 주상절리가 냉각될 당시 압축 방향을 추정할 수 있으며, 수평 및 수직방향과 같은 형성 당시 방향성을 알 수 있다. 노출된 단면 내부에는 철산화물이 동심원상의 구조를 보인다(Fig. 50). Aydin and DeGraff(1988)에 따르면 이는 주상절리가 냉각되는 과정에서 냉각면에서 내부로 진행되는 일련의 전파에 의해 형성된다.

Site 2-B 지역의 주상절리는 용암포항의 동측 건너편 해안에 있는 항구에서 북측으로 약 200m 지점에 위치하며, 도로가에 약 100m에 걸쳐 분포한다. 수직방향의 켈러네이드 구조를 보이며, 높이는 약 5m에 이른다(Fig. 51). 주상절리 하단부의 파쇄된 부분으로만 단면을 관찰할 수 있다(Fig. 52).

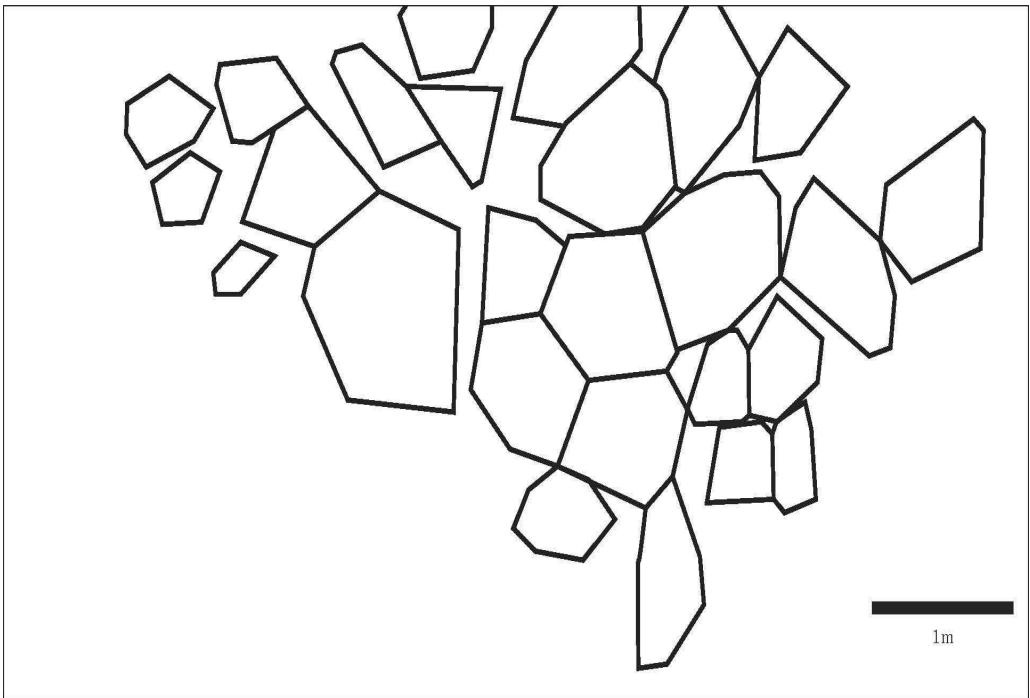


Fig. 48. Photograph and sketch of columnar joint in Yongampo(port)(Site 2-A).



Fig. 49. Fiamme structure of welded tuff developed in the cross section of columnar joint.



Fig. 50. Concentric circular structure by iron oxide.





Fig. 51. Photographs of columnar joint across from Yongampo(port)(Site 2-B).



Fig. 52. Cross section of columnar joint across from Yongampo(port)(Site 2-B).

Site 2-C 지역의 주상절리는 용암포항의 동측 건너편 해안에 있는 항구에서 남측으로 약 400m 지점에 위치하며, 해안에 약 100m 둘레에 걸쳐 분포한다(Fig. 53). 수직방향의 컬러네이드 구조를 보이며, 높이는 약 3~4m이다. 하부 조간대는 구조절리와 파도에 의한 침식이 오랜 기간 진행되어 주상절리와 구조절리를 분간하기 어려운 상태이며, 주상절리의 단면부만 핵석풍화 형태로 노출되어 있는 형태이다. 주상절리는 조상대에 잘 발달하며, 다른 지역에 비해 구조절리의 영향은 많이 받지 않아 비교적 온전한 형태의 단면을 관찰할 수 있다(Fig. 54).

Site 2의 주상절리 다각형의 수(N)는 4각형이 7.7%, 5각형이 23.1%, 6각형이 50.0%, 7각형이 19.2%로 6각형이 가장 높은 비율을 차지한다. 기둥면의 폭(L)은 1~10cm 3.4%, 11~20cm 10.1%, 21~30cm 21.5%, 31~40cm 25.5%, 41~50cm 13.4%, 51~60cm 13.4%, 61~70cm 6.7%, 71~80cm 4.0%, 80cm 이상 2.0%로 21~30cm가 가장 높은 비율을 차지한다. 기둥면 사이의 각( $\theta$ )은 140° 이상이 26.2%로 가장 높은 빈도율을 보이며, 120°~129° 16.1%, 110°~119° 13.4%, 130°~139° 12.8%, 100°~109° 12.1%, 80°~89° 6.0%, 90°~99° 6.0%, 70°~79° 4.7%, 69° 이하 2.7%의 빈도율을 보인다. Site 2 지역의 측정값을 종합적으로 나타내면 Table 9와 같다. 다각형의 수(N)은 5각형 23.1%, 6각형 50.0%, 7각형 19.2%의 빈도율을 보이며, 기둥면의 폭(L)은 31~40cm가 25.5%로 가장 높은 비율을 보인다. 그리고 기둥면 사이의 각( $\theta$ )은 140° 이상이 26.2%로 가장 높은 빈도율을 보인다.

Table 9. Measurement of columnar joint in Yongampo(port).

N	4	5	6	7	N: number of the polygon L: side length of the polygon $\theta$ : internal angles of the polygon face				
	7.7%	23.1%	50.0%	19.2%					
L	1~10cm	11~20cm	21~30cm	31~40cm	41~50cm	51~60cm	61~70cm	71~80cm	80cm~
	3.4%	10.1%	21.5%	25.5%	13.4%	13.4%	6.7%	4.0%	2.0%
$\theta$	~69°	70°~79°	80°~89°	90°~99°	100°~109°	110°~119°	120°~129°	130°~139°	140°~
	2.7%	4.7%	6.0%	6.0%	12.1%	13.4%	16.1%	12.8%	26.2%



Fig. 53. Photographs of columnar joint across from Yongampo Port(Site 2-C).

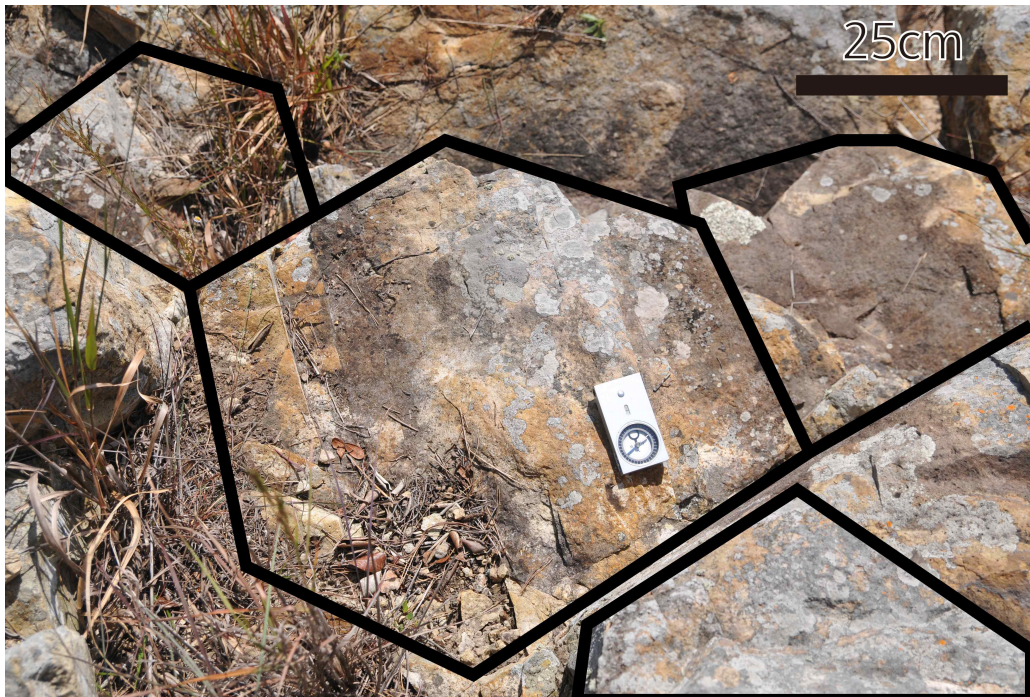


Fig. 54. Cross section of columnar joint across from Yongampo(port)(Site 2-C).

### 3) Site 3, 5 (연구지역 무인도서) 주상절리

안장섬에서 주상절리는 북북동쪽 가장자리 부분에 약 80m에 걸쳐 분포한다. 켈러네이드 구조를 보이지만 약 40° 가량 기울어져 발달한다. 기둥의 일부가 노출되어 단면들을 확인할 수 있었다(Fig. 55, 56).

토끼섬은 전체적으로 주상절리가 발달하고 있다(Fig. 57). 남측에 주로 발달하고 있으며, 북측 해안은 풍화 및 침식으로 그 형태를 알아보기 힘들다. 현장 조사는 남측에 접안하여 섬의 상부에 발달한 주상절리 단면을 조사하였다. Fig. 58과 같이 구조절리에 의해 파쇄된 주상절리의 온전한 형태 분석을 위하여 단면을 스케치하였다.



Fig. 55. Columnar joint developed in Anjang-seom(island).

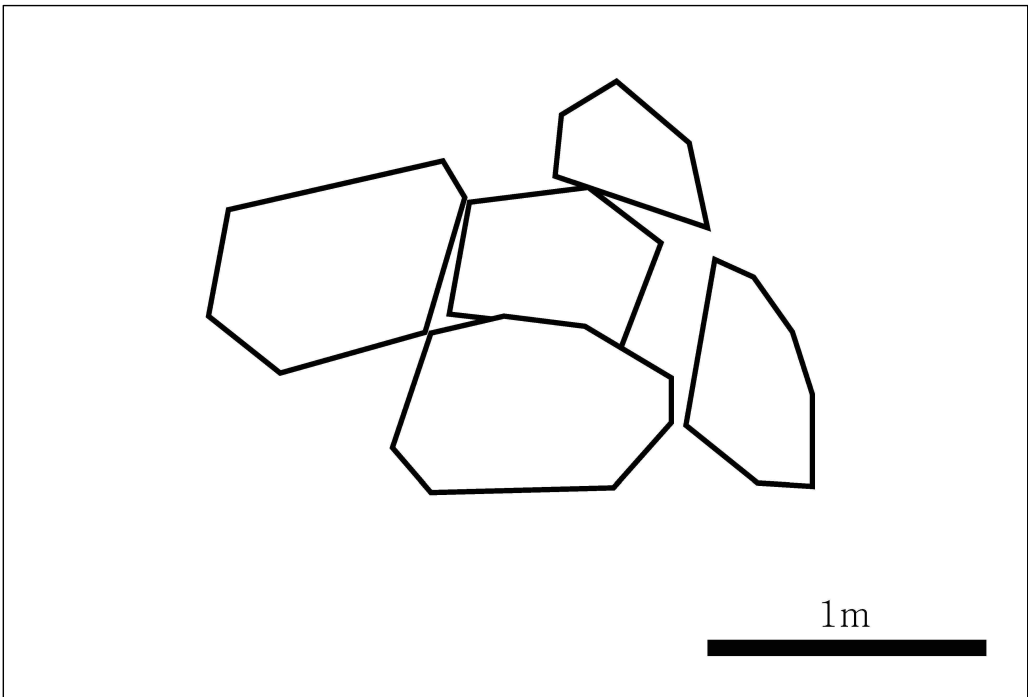


Fig. 56. Photograph and sketch of columnar joint in Anjang-seom(island).



Fig. 57. Columnar joint developed in Tokki-seom(island).

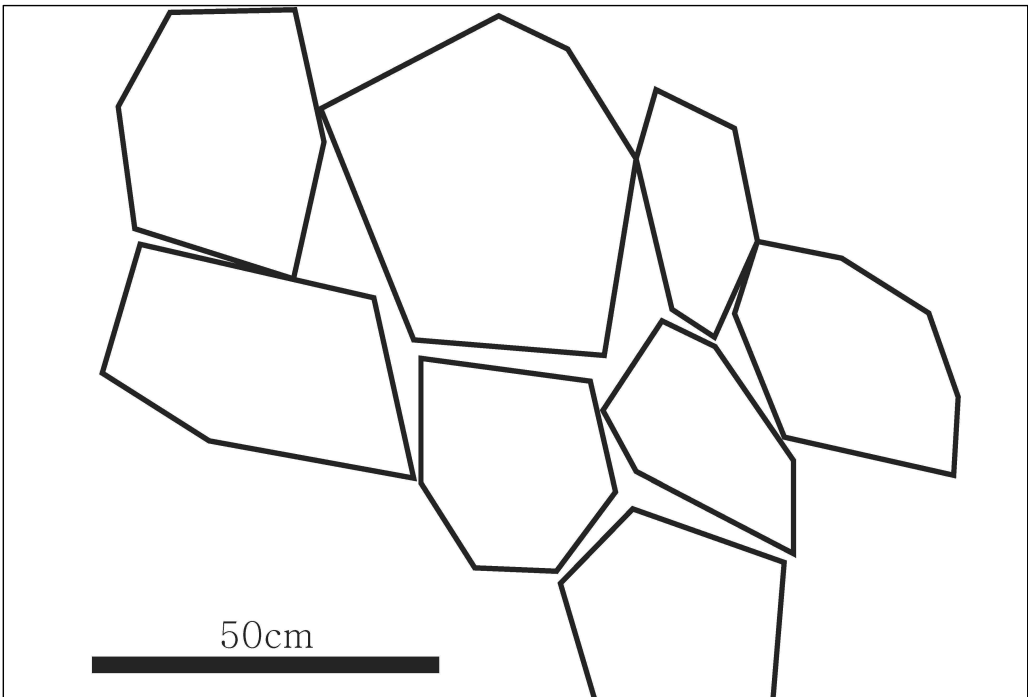
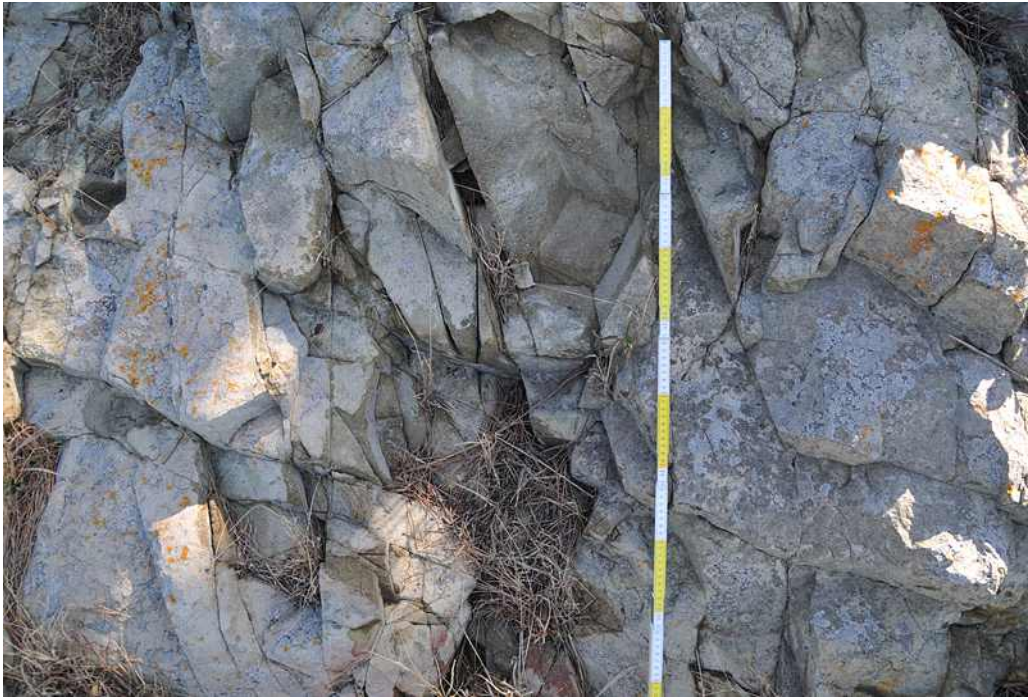


Fig. 58. Photograph and sketch of columnar joint in Tokki-seom(island).

늑도는 용암류가 NS방향으로 수평 관입한 모습을 보인다. 주상절리 단면에서 기둥폭은 다른 지역보다 작은 경향을 보이며, 이는 용암류 냉각될 당시 빠르게 식으면서 형성된 주상절리임을 시사한다. 수평으로 형성된 주상절리대에서 EW방향으로 구조절리가 발달하고 있으며, 이로 인해 마치 계단식 풍화가 진행된 것처럼 보인다. 구조절리가 기둥을 가로지르기 때문에 다른 지역에 비해 주상절리 단면이 훼손되지 않고 온전한 형태로 남아있다(Fig. 59).

Site 3, 5의 주상절리 다각형의 수(N)는 4각형이 7.4%, 5각형이 25.9%, 6각형이 48.1%, 7각형이 18.5%로 6각형이 가장 높은 비율을 차지한다. 기둥면의 폭(L)은 1~10cm 42.9%, 11~20cm 30.8%, 21~30cm 12.8%, 31~40cm 7.1%, 41~50cm 1.9%, 51~60cm 2.6%, 61~70cm 1.3%, 71~80cm 0.6%로 1~10cm가 가장 높은 비율을 차지한다. 기둥면 사이의 각( $\theta$ )은 140° 이상이 27.6%로 가장 높은 빈도율을 보이며, 100°~109° 12.8%, 120°~129° 11.5%, 90°~99° 11.5%, 110°~119° 9.6%, 130°~139° 9.6%, 80°~89° 9.0%, 70°~79° 4.5%, 69° 이하 3.8%의 빈도율을 보인다.

Site 3, 5 지역의 측정값을 종합적으로 나타내면 Table 10과 같다. 다각형의 수(N)는 5각형 25.9%, 6각형 48.1%, 7각형 18.5%의 빈도율을 보이며, 기둥면의 폭(L)은 11~20cm가 30.8%로 가장 높은 비율을 보인다. 그리고 기둥면 사이의 각( $\theta$ )은 140° 이상이 27.6%로 가장 높은 빈도율을 보인다.

Table 10. Measurement of columnar joint in uninhabited island.

N	4	5	6	7	N: number of the polygon L: side length of the polygon $\theta$ : internal angles of the polygon face				
	7.4%	25.9%	48.1%	18.5%					
L	1~10cm	11~20cm	21~30cm	31~40cm	41~50cm	51~60cm	61~70cm	71~80cm	80cm~
	42.9%	30.8%	12.8%	7.1%	1.9%	2.6%	1.3%	0.6%	-
$\theta$	~69°	70°~79°	80°~89°	90°~99°	100°~109°	110°~119°	120°~129°	130°~139°	140°~
	3.8%	4.5%	9.0%	11.5%	12.8%	9.6%	11.5%	9.6%	27.6%



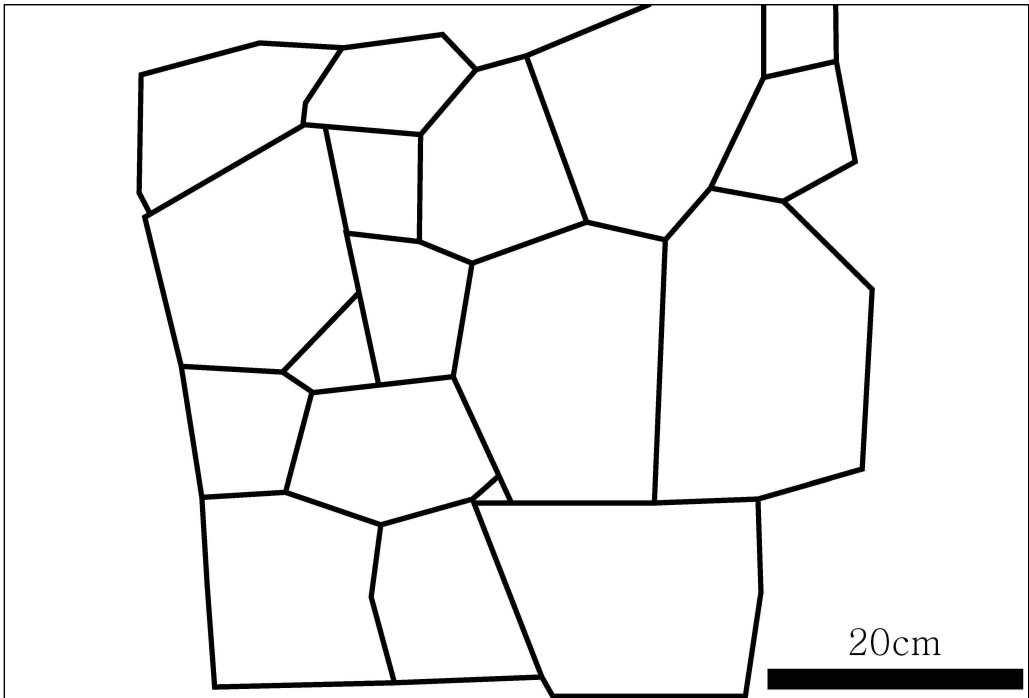


Fig. 59. Photograph and sketch of columnar joint in Neuk-do(island).

#### 4) 연구지역 주상절리 측정 결과

연구지역 전체에 분포하는 구조절리가 중첩된 주상절리에서 구조절리 영향을 제거한 온전한 형태인 주상절리의 다각형의 수(N)는 4각형 7%, 5각형 29%, 6각형 43%, 7각형 20%, 8각형 1%로 6각형이 가장 높은 비율을 차지한다. 기둥면의 폭(L)은 1~10cm 16.2%, 11~20cm 23.8%, 21~30cm 19.1%, 31~40cm 15.0%, 41~50cm 7.6%, 51~60cm 7.9%, 61~70cm 4.3%, 71~80cm 2.9%, 80cm 이상이 3.2%로 11~20cm가 가장 높은 비율을 차지한다. 기둥면 사이의 각( $\theta$ )은 140° 이상이 23.6%로 가장 높은 빈도율을 보이며, 120°~129° 13.8%, 110°~119° 13.8%, 100°~109° 12.4%, 130°~139° 12.4%, 90°~99° 8.9%, 80°~89° 6.5%, 70°~79° 4.4%, 69° 이하 4.0%의 빈도율을 보인다.

연구지역의 측정값을 종합적으로 나타내면 Table 11과 같다. 다각형의 수(N)은 5각형 29%, 6각형 43%, 7각형 20%의 빈도율을 보이며, 기둥면의 폭(L)은 11~20cm가 23.8%로 가장 높은 비율을 보인다. 그리고 기둥면 사이의 각( $\theta$ )은 140° 이상이 23.6%로 가장 높은 빈도율을 보인다.

Table 11. Measurement of columnar joint in study area.

N	4	5	6	7	8	N: number of the polygon L: side length of the polygon $\theta$ : internal angles of the polygon face			
	7%	29%	43%	20%	1%				
L	1~10cm	11~20cm	21~30cm	31~40cm	41~50cm	51~60cm	61~70cm	71~80cm	80cm~
	16.2%	23.8%	19.1%	15.0%	7.6%	7.9%	4.3%	2.9%	3.2%
$\theta$	~69°	70°~79°	80°~89°	90°~99°	100°~109°	110°~119°	120°~129°	130°~139°	140°~
	4.0%	4.4%	6.5%	8.9%	12.4%	13.8%	13.8%	12.4%	23.6%

## V. 암석화학

연구지역을 구성하는 암석들의 암석화학적 특성을 파악하기 위해 총 12개의 암석시료에 대해 주성분원소와 미량원소를 분석하였다. 연구지역에서 암석 표본을 채취한 사이트는 위성지도상에 표시하고(Fig. 60), 좌표는 Table 12와 같이 나타내었다. 주성분원소 분석은 X-선 형광분석기(XRF)를 사용하였고, 미량원소 분석은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)를 사용하였다.

Table 12. Site with names, geographical location in the study area.

Site name	Latitude	Longitude	Administrative district
GS-01	34°53'59.12"N	128°09'45.94"E	Hail-myeon, Goseong-gun
GS-02	34°53'57.85"N	128°09'47.60"E	Hail-myeon, Goseong-gun
GS-03	34°54'08.55"N	128°09'38.63"E	Hai-myeon, Goseong-gun
GS-04	34°54'07.78"N	128°09'39.79"E	Hai-myeon, Goseong-gun
GS-05	34°53'53.78"N	128°10'30.13"E	Hail-myeon, Goseong-gun
GS-06	34°53'38.29"N	128°12'06.52"E	Hail-myeon, Goseong-gun
GS-07	34°54'01.29"N	128°12'08.32"E	Hail-myeon, Goseong-gun
GS-08	34°53'25.00"N	128°10'41.38"E	Hail-myeon, Goseong-gun
GS-09	34°53'29.50"N	128°11'30.24"E	Hail-myeon, Goseong-gun
GS-10	34°55'14.94"N	128°12'27.18"E	Hail-myeon, Goseong-gun
GS-11	34°55'42.35"N	128°12'18.26"E	Hail-myeon, Goseong-gun
GS-12	34°54'11.70"N	128°10'42.58"E	Hail-myeon, Goseong-gun



Fig. 60. Location of the sampling area in Goseong(modified <https://map.kakao.com/>).

## 1. 주성분 원소

연구지역을 구성하는 암석의 주성분 원소 분석결과는 Table 13과 같다.  $\text{SiO}_2$ 는 64.19~74.83wt%,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 는 2.32~7.65wt% 범위로 데사이트에서 유문암질의 범위를 보인다(Fig. 61). 유문암질 암석에서  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 는 14.00~15.04wt%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 는 1.79~3.21wt%,  $\text{K}_2\text{O}$ 는 2.90~3.41wt%,  $\text{Na}_2\text{O}$ 는 2.75~4.28wt%,  $\text{CaO}$ 는 0.03~1.55wt%,  $\text{MgO}$ 는 0.07~1.35wt%,  $\text{MnO}$ 는 0.01~0.07wt%,  $\text{P}_2\text{O}_5$ 는 0.01~0.07wt%,  $\text{TiO}_2$ 는 0.11~0.28wt%의 범위로 나타난다. 데사이트질 암석에서  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 는 13.57~15.90wt%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 는 2.61~6.32wt%,  $\text{K}_2\text{O}$ 는 1.14~2.44wt%,  $\text{Na}_2\text{O}$ 는 1.18~3.81wt%,  $\text{CaO}$ 는 0.91~8.36wt%,  $\text{MgO}$ 는 0.22~2.91wt%,  $\text{MnO}$ 는 0.05~0.15wt%,  $\text{P}_2\text{O}_5$ 는 0.01~0.13wt%,  $\text{TiO}_2$ 는 0.11~0.63wt%로 나타난다.

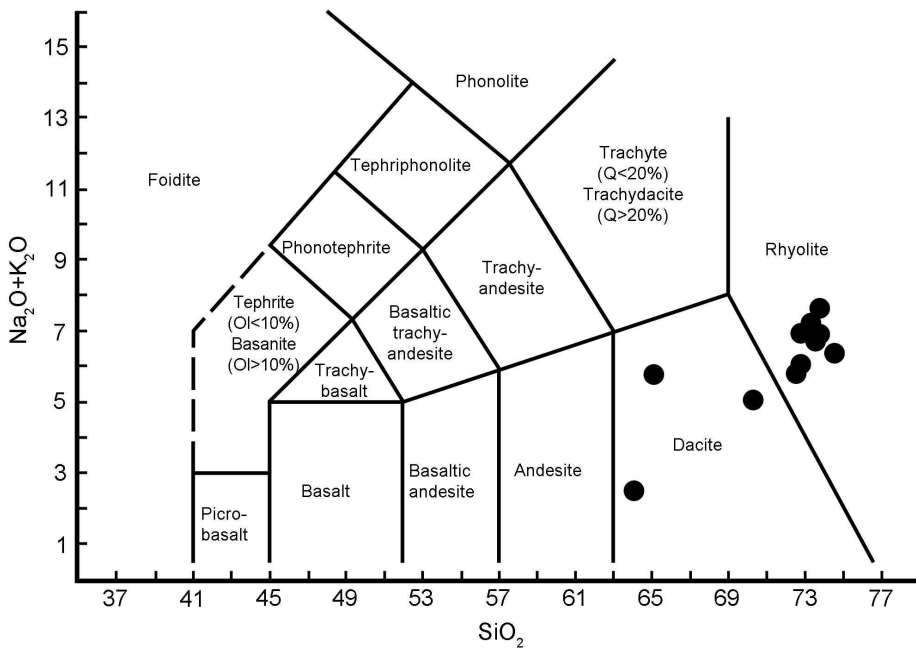


Fig. 61. Total alkali vs  $\text{SiO}_2$  (wt%) diagram(TAS) with analyses of rock in study area.

Table 13. Major elemental analyses(wt%) in study area.

Sample	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6
SiO <sub>2</sub>	73.87	73.07	73.97	73.99	74.83	65.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.43	14.00	14.68	14.04	14.81	15.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.15	2.58	2.23	2.66	2.16	4.41
K <sub>2</sub> O	2.91	3.04	3.27	3.19	3.09	1.91
Na <sub>2</sub> O	3.82	3.90	3.62	3.57	3.26	3.81
CaO	0.04	0.03	0.03	0.07	0.05	0.91
MgO	0.12	0.39	0.09	0.38	0.15	2.91
MnO	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.13
TiO <sub>2</sub>	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.63
Sample	G-7	G-8	G-9	G-10	G-11	G-12
SiO <sub>2</sub>	64.19	73.74	73.99	72.99	72.82	70.57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.90	14.79	14.18	14.45	15.04	13.57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.32	2.52	2.49	1.79	3.21	2.61
K <sub>2</sub> O	1.14	3.41	3.36	2.90	2.97	2.44
Na <sub>2</sub> O	1.18	3.72	4.28	2.97	2.75	2.60
CaO	8.36	0.39	0.19	1.55	0.13	3.30
MgO	1.49	0.07	0.12	0.57	1.35	0.22
MnO	0.15	0.07	0.05	0.05	0.05	0.12
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10	0.01	0.02	0.07	0.05	0.01
TiO <sub>2</sub>	0.54	0.12	0.11	0.26	0.28	0.11

연구지역의 암석들이 모두 sub-alkali계열로 분류되기 때문에 이를 다시 AFM 성분도에 도시하여 보면, GS-07 시료를 제외한 나머지 시료들은 마그마가 분화하면서 MgO와 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 점진적으로 감소하여 Alkali쪽으로 수렴하는 경향을 보인다(Fig. 62).

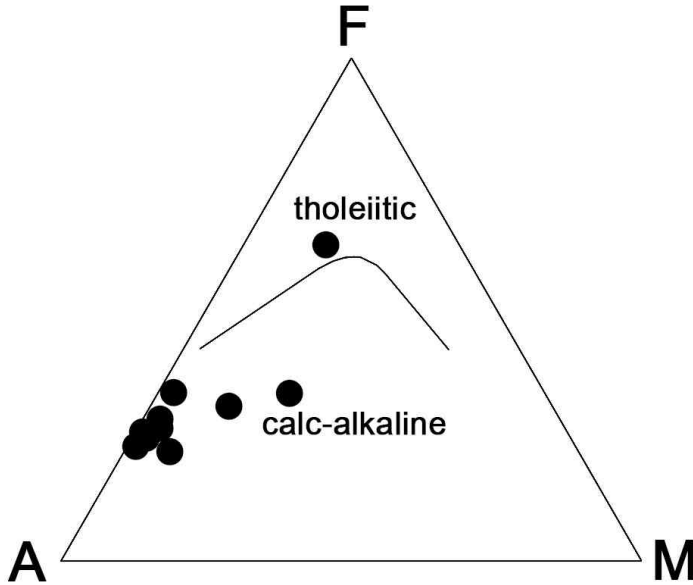


Fig. 62. AFM diagram for study area. Symbols are shown in Fig. 61.

## 2. 미량원소

미량원소는 주성분 원소와 같은 전하가 비슷한 이온 반지름을 지니게 될 때 미량원소는 주성분 원소들을 포함하는 결정격자 속에 위장되어 있다고 표현하며, 미량원소가 주성분 원소보다 이온 반지름이 작을 때 주성분 원소를 포함하는 결정격자에 의하여 포획되어 있다고 표현한다. 또한, 미량원소가 주성분 원소와 비슷한 이온 반지름을 가지고 주성분 원소보다 전하가 작거나 같으면 미량원소는 주성분 원소를 함유하는 결정격자 속에 허용되어 있다고 표현한다. 즉, 전하가 다른 이온끼리 위와 같은 작용을 하게 될 경우 결정격자내의 다른 곳에서는 이에 수반되는 치환이 일어나게 된다(이대성과 이문원, 1987).

연구지역의 암석들에 대한 미량원소를 분석한 결과는 Table 14와 같다. 미량원소는 SiO<sub>2</sub> 함량에 따라 Sr, Sc, Li, P는 감소하고, Rb, Cs는 증가하는 경향을 보인다. 그 외 원소는 SiO<sub>2</sub> 함량에 따른 변화 경향이 불분명하다(Fig. 63).

Sr 함량은 68.2~658.4ppm의 범위에 해당하며, SiO<sub>2</sub>의 함량에 따라 감소하는 경향을 보인다. Sr 함량은 Ca 광물에서 Ca 대신 Sr이 허용되는 과정이 마그마에서 Sr을 제거하는 주된 원인이 되기 때문에 일반적으로 염기성 암석에서 더 높은 값을 보이게 되나, 연구지역의 시료가 산성암이므로 Sr 함량이 감소되는 것이 일반적이다.

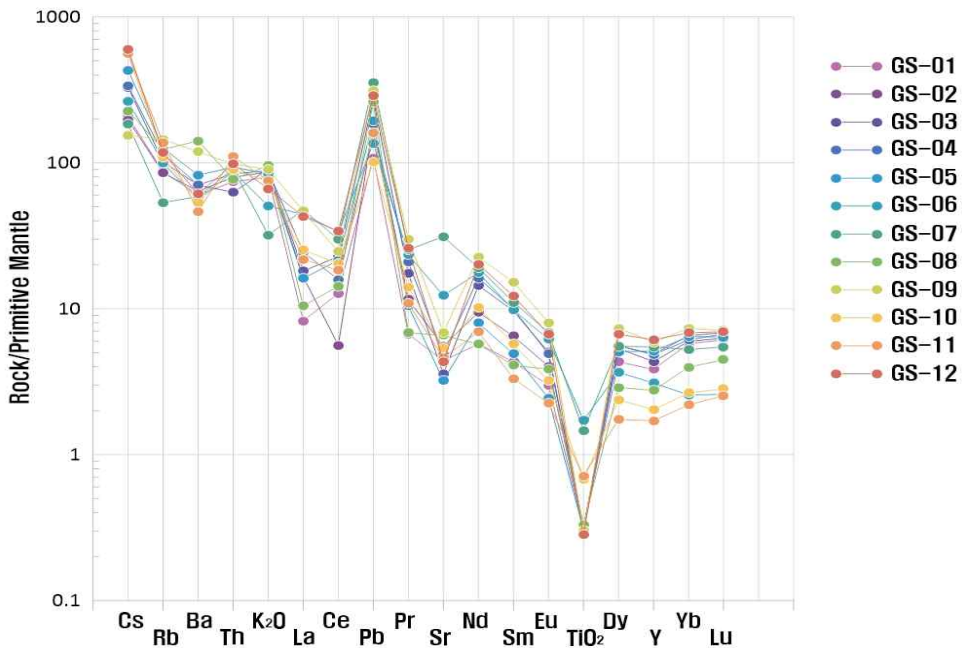


Fig. 63. Spidergram of trace element concentration in rock to Primitive Mantle(Sun and McDonough, 1989).



Table 14. The concentration of trace elements(ppm) in study area.

Sample	GS-01	GS-02	GS-03	GS-04	GS-05	GS-06
Sr	92.7	117.0	75.3	102.6	68.2	259.8
Ba	421.4	447.0	492.0	493.6	574.8	393.0
Sc	5.3	5.8	5.7	6.3	6.2	6.3
Cr	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	30.8
Ni	0.4	0.2	0.5	0.3	0.1	11.4
Co	25.8	29.1	37.2	35.2	12.2	19.9
V	3.5	0.9	5.7	1.8	3.3	103.1
Zn	82.8	77.2	89.8	100.3	66.8	96.3
Cu	2.3	1.0	1.2	1.2	1.9	7.2
Li	22.5	21.0	28.6	25.2	20.4	43.7
P	74.9	77.3	82.0	97.1	56.9	579.7
Rb	55.0	54.1	64.5	72.9	80.0	63.0
Y	17.5	22.2	19.8	22.1	23.3	14.1
Cs	1.6	1.6	2.6	2.7	3.4	2.1
Pb	7.7	13.1	19.3	11.4	13.7	9.6
Th	6.3	6.8	5.3	7.2	7.9	7.4
Sample	GS-07	GS-08	GS-09	GS-10	GS-11	GS-12
Sr	658.4	138.6	144.7	112.9	97.2	91.9
Ba	409.3	987.2	831.9	377.5	325.3	427.5
Sc	10.0	4.6	7.0	1.7	5.9	4.9
Cr	27.8	0.6	0.3	1.0	8.0	0.1
Ni	14.4	0.3	0.3	0.5	8.4	0.3
Co	30.0	16.3	31.3	15.2	16.2	16.1
V	86.3	1.8	3.3	14.1	45.1	0.5
Zn	59.5	83.6	81.5	25.1	47.6	95.6
Cu	2.8	3.2	3.2	3.3	7.5	2.7
Li	30.9	26.9	19.9	14.8	54.1	23.7
P	486.7	54.0	88.0	283.6	224.5	103.2
Rb	33.9	78.4	91.8	68.9	87.0	74.5
Y	24.9	12.5	26.8	9.3	7.8	27.9
Cs	1.4	1.8	1.2	4.5	4.4	4.8
Pb	25.2	18.6	22.1	7.2	11.4	20.4
Th	7.7	6.6	8.3	7.6	9.4	8.3

## VI. 토의

현재까지의 주상절리 연구는 온전한 형태로 남아있는 주상절리를 대상으로 형태학적 분석이나 형성 메커니즘을 해석하였다. 물리적인 힘에 의해 생성된 절리에 관한 연구는 절리의 형태를 절리조로 나누고 교차관계를 통하여 절리들의 상대적인 시간 관계를 추정하거나 간격 특성을 통해 발달 과정을 연구하는 형태로 이루어졌다. 그러나 주상절리와 물리적인 절리는 각각 다른 주제로서 연구가 진행되어 왔으며, 이 둘이 혼재되어 있는 경우에 관한 연구는 거의 진행되지 않았다. 연구지역은 주상절리와 지구조운동의 물리적 힘에 의해 만들어진 구조절리가 중첩되어 나타난다. 앞선 선행연구에선 연구지역 중 맥전포항의 전망대 주변의 절리는 기다란 직사각형으로 그 중 일부는 화산암의 수축절리가 아닐 수도 있다는 가능성을 제시했다(안건상, 2014a).

연구자들은 주상절리와 구조절리가 중첩된 지역에서 주상절리를 해석하는데 어려움을 호소하고 있어, 주상절리를 해석하기 위한 명확한 기준과 방법이 필요하다. 주상절리와 구조절리가 중첩되는 지역에서 구조절리의 영향을 제거하여 주상절리 본연의 모습을 찾는 과정은 다음과 같다.

맥전포항을 비롯한 연구지역에서 진동층 위에 놓인 응회암에 발달한 주상절리는 구조절리에 의해 절단되어 있다(Fig. 64a). 기본적으로는 화산암의 수축작용과 관련이 없는 진동층의 퇴적암에 기록된 구조절리를 측정하여 제거하는 과정이다. 예를 들어 Fig. 64(a)와 같이 6각형의 주상절리와 여러 방향의 구조절리가 중첩되어 있다면, 퇴적암에서 구조절리를 측정한다. 주상절리에 중첩되어 있는 구조절리 중 퇴적암에서 측정한 구조절리와 일치하는 방향의 구조절리를 제거할 때 주상절리의 다각형 형태가 보다 선명하게 드러난다(Fig. 64b). 이후에 작은 규모의 중첩된 구조절리를 제거하면, Fig. 64(c)에서와 같이 화산암이 냉각할 때 형성된 주상절리의 본연의 형태를 파악할 수 있다. 물론 구조운동에 의해 주상절리 다각형은 다소 파괴되거나 흩어질 수 있으므로 세심하게 복원할 필요가 있다.

고온의 화산암이 지면과 나란하게 쌓인 유문암과 달리 관입에 의해 형성된 주상절리는 장작을 쌓아 올린 모습처럼 옆으로 누워있다. 이런 지역에서 구조절리는 주상절리의 기둥을 세로로 자르듯 절단되어 있다. 예를 들어 늑도를 비롯한 무인도에 발달한 수평으로 형성된 주상절리는 구조절리에 의해 절단되는데, 주로 주상절리의 기둥을 절단하는 형태이다(Fig. 65).

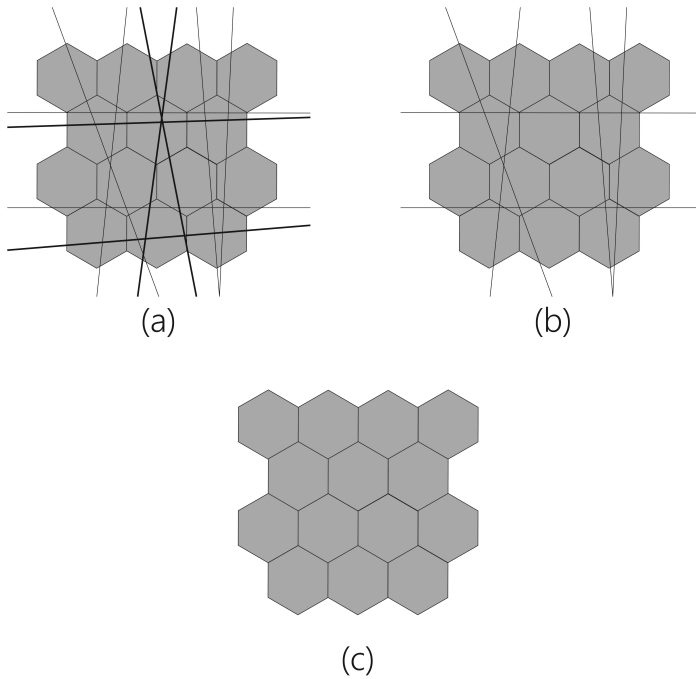


Fig. 64. Columnar joint restoration process with overlapping structural joint. (a) The overlapping structure of columnar joints and structural joints observed in the outcrop of tuff, (b) Removal of structural joints in the direction coincident with the sedimentary rock zone, (c) All structural joints removed

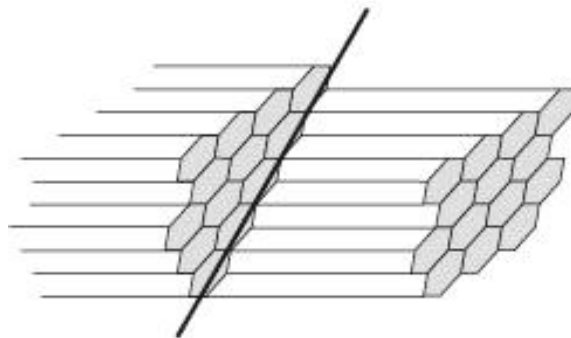


Fig. 65. Structural joint by cutting horizontal columnar joint.

## Ⅶ. 결론

경상남도 고성군 서남부 지역에 분포하는 중생대 백악기 유문암질 응회암 주상절리와 구조절리를 조사하여 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 일반적으로 온전한 형태의 주상절리에 관한 연구는 현재까지 많이 진행되어 왔다. 경상남도 고성군 서남부 지역에 분포하는 주상절리는 구조절리와 중첩되어 있다. 이와 같은 특이한 주상절리에 관한 연구는 해석이 불분명하다는 선행연구만 있었을 뿐 이를 해석하는 방법에 대한 연구는 지금까지 행해진 바가 없다. 마그마의 냉각으로 인한 주상절리 형성 이후 지구조운동으로 구조절리가 형성되었으며, 이로 인하여 주상절리의 온전한 형태 분석이 불분명하다. 이를 해석하기 위해 본 연구에서는 구조절리가 중첩된 주상절리 형태와 이를 뒷받침하기 위하여 구조절리 및 구조절리와 주상절리가 혼재되어 발달한 총 8곳(맥전포항, 용암포항, 동화리마을, 안장섬, 토끼섬, 육섬, 늑도, 장여)의 연구지역을 선정하여 조사하였다.
- 2) 연구지역 8곳을 구조절리와 주상절리 여부로 세분화하면 다음과 같이 분류할 수 있다(Table 15).

Table 15. Classification of structural joints and columnar joints that develop by region among the research area.

구조절리	구조절리+주상절리
동화리마을, 장여	맥전포항, 용암포항, 안장섬, 토끼섬, 육섬, 늑도

- 3) 연구지역에서 측정된 구조절리의 전체 빈도수는 다음과 같다. 북북동 방향의 절리는 NS~N9°E 4.29%, N10°E~N19°E 4.29%, N20°E~N29°E 5.71%, N30°E~N39°E 6.43% 그리고 N40°E~N49°E 2.86%이다. 북북서 방향의 절리는 N11°W~N20°W 2.86%, N21°W~N30°W 11.43%, N31°W~N40°W 4.29%과 N41°W~N50°W 0.71%

이다. 동서 방향은  $N80^{\circ}E \sim N89^{\circ}E$  15.71%와  $N81^{\circ}W \sim EW$  19.29%가 가장 우세하다.

정리해보면,  $N80^{\circ}E \sim N89^{\circ}E$ ,  $N81^{\circ}W \sim EW$ 의 동서방향이 높은 빈도율로 발달하며, 그 다음으로  $N21^{\circ}W \sim N30^{\circ}W$ 의 북북서-남남동 방향,  $N30^{\circ}E \sim N39^{\circ}E$ 의 북북동-남남서 방향 순으로 발달한다.

4) 연구지역에서 측정된 주상절리의 전체 빈도수는 다음과 같다. 주상절리 다각형의 수(N)는 4각형이 7%, 5각형이 29%, 6각형이 43%, 7각형이 20%, 8각형이 1%로 6각형이 가장 높은 비율을 차지한다. 기둥면의 폭(L)은 1~10cm 16.2%, 11~20cm 23.8%, 21~30cm 19.1%, 31~40cm 15.0%, 41~50cm 7.6%, 51~60cm 7.9%, 61~70cm 4.3%, 71~80cm 2.9%, 81cm 이상 3.2%로 11~20cm가 가장 높은 비율을 차지한다. 기둥면 사이의 각( $\theta$ )은  $140^{\circ}$  이상이 23.6%로 가장 높은 빈도율을 보이며,  $100^{\circ} \sim 109^{\circ}$  12.8%,  $120^{\circ} \sim 129^{\circ}$  11.5%,  $90^{\circ} \sim 99^{\circ}$  11.5%,  $110^{\circ} \sim 119^{\circ}$  9.6%,  $130^{\circ} \sim 139^{\circ}$  9.6%,  $80^{\circ} \sim 89^{\circ}$  9.0%,  $70^{\circ} \sim 79^{\circ}$  4.5%,  $69^{\circ}$  이하 3.8%의 빈도율을 보인다.

#### 5) 구조절리와 주상절리

동화리 마을 남부 해안은 진동층군에 해당하는 응회질사암 및 사암층으로 구성되어 있다. 주상절리는 용암류 및 응회질 물질이 쌓여 냉각될 때 형성되는 1차적인 구조이므로 퇴적암지대에서 생성될 수 없다. 즉, 동화리 마을 퇴적암 지대에 발달하는 선구조는 오로지 구조절리만 존재한다고 볼 수 있다.

진동층의 퇴적암에서 측정한 구조절리는 동화리 마을에서  $N81^{\circ}W \sim EW$ (동서 방향),  $N21^{\circ}W \sim N30^{\circ}W$ (북북서-남남동 방향)이 우세하고 장여에서 NS(남북 방향),  $N30^{\circ}E$ (북북동-남남서), EW(동서 방향)이 우세하게 발달한다. 연구지역 중 퇴적암에 발달하는 구조절리의 방향성을 기준으로 주상절리에 중첩되어 있는 구조절리를 분석하였다.

본 연구지역의 퇴적암에서 측정한 구조절리의 방향과 응회암에 발달한 주상절리의 다각형이 중첩된 형태를 모식적으로 나타내면 Fig. 66와 같다. 이들 주상절리의 다각형은 6각형이 전체의 43%로 가장 많고, 다음으로 5각형이 29%의 비율을 차지한다.

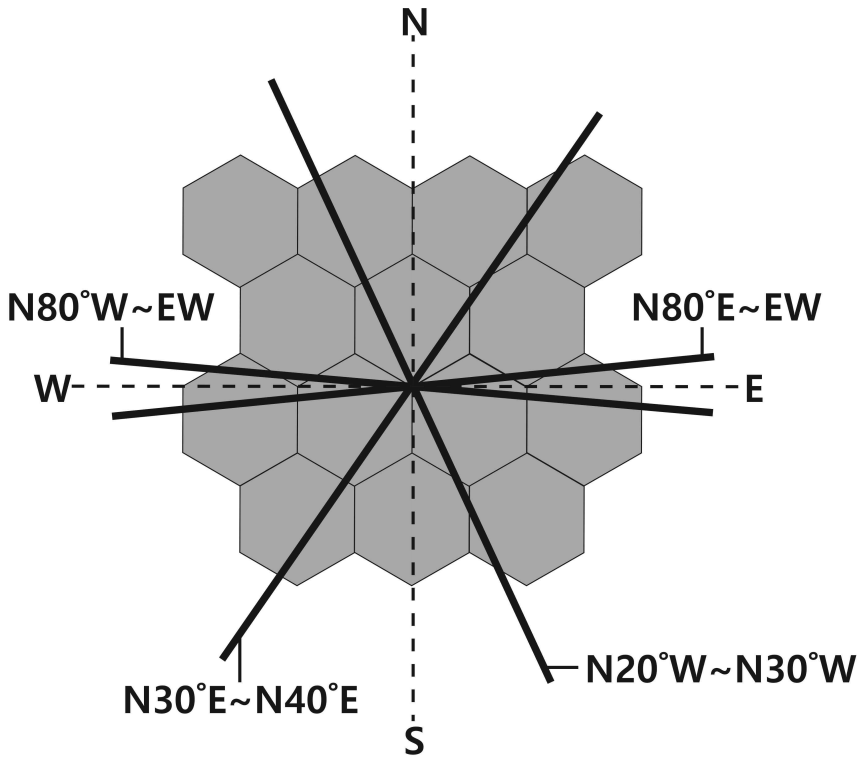


Fig. 66. Structural joints and columnar joints in the study area.

6) 화학성분을 통한 주상절리 비교

화학성분이 유사한 화성암의 주상절리와 비교하기 위한 XRF 분석 결과, 이 지역 암석의 화학성분은  $\text{SiO}_2$ 는 64.19~74.83wt%,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 는 2.32~7.65wt% 범위로 데사이트에서 유문암질의 범위를 보인다. 유문암질 암석에서  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 는 14.00~15.04wt%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 는 1.79~3.21wt%,  $\text{K}_2\text{O}$ 는 2.90~3.41wt%,  $\text{Na}_2\text{O}$ 는 2.75~4.28wt%,  $\text{CaO}$ 는 0.03~1.55wt%,  $\text{MgO}$ 는 0.07~1.35wt%,  $\text{MnO}$ 는 0.01~0.07wt%,  $\text{P}_2\text{O}_5$ 는 0.01~0.07wt%,  $\text{TiO}_2$ 는 0.11~0.28wt%의 범위로 나타난다. 데사이트질 암석에서  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 는 13.57~15.90wt%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 는 2.61~6.32wt%,  $\text{K}_2\text{O}$ 는 1.14~2.44wt%,  $\text{Na}_2\text{O}$ 는 1.18~3.81wt%,  $\text{CaO}$ 는 0.91~8.36wt%,  $\text{MgO}$ 는 0.22~2.91wt%,  $\text{MnO}$ 는 0.05~0.15wt%,  $\text{P}_2\text{O}_5$ 는 0.01~0.13wt%,  $\text{TiO}_2$ 는 0.11~0.63wt%로 나타난다.

남해안에 위치한 지역 중 연구 지역과 같이 유문암 및 유문암질응회암 주상절리가 발달하는 곳은 전라남도 고흥군과 전라남도 신안군 만재도 지역이 있다 (Fig. 67). 연구지역 주상절리의 다각형의 수(N), 기둥면의 폭(L), 기둥면 사이의

각( $\theta$ )을 고흥, 만재도 지역과 비교해보았다.

손정모(2016)에 따르면, 고흥군 도화면 중앙 지역에서 주상절리 다각형의 수는 4각형이 42.02%, 5각형이 40.76%의 빈도율을 보인다. 기둥면의 폭은 1~10cm 63.77%, 10~20cm 33.50%의 빈도율을 보인다. 고흥군 도화면 지죽도 남단 지역에서 주상절리 단면 측정은 총 3곳에서 진행되었다. 다각형의 수는 3곳에서 각각 6각형이 각각 37.50%, 70.00%, 42.42%로 가장 높게 나타난다. 기둥면의 폭은 거의 대부분 20cm 내에 분포하며, 두 지역 모두 기둥면 사이의 각은 다양하게 고루 분포한다.

고흥 지역 전체에 분포하는 주상절리 다각형 수는 4각형이 33.60%, 5각형이 36.51%의 빈도율을 보인다. 기둥면의 폭은 1~10cm 51.76%의 빈도율을 보이며, 기둥면 사이의 각은 전체적으로 다양하게 분포한다. 만재도 지역의 주상절리 다각형의 수는 4각형이 31.5%, 5각형이 43.31%의 빈도율을 보인다. 기둥면의 폭은 최소 30cm에서 4m까지 다양하게 분포하며, 주로 1~2m 사이의 폭이 우세하다. 기둥면 사이의 각은 70° 이하의 각이 18.30%, 141° 이상의 각이 17.51%의 빈도율을 보인다.

대체적으로 연구지역의 유문암질 응회암의 주상절리와 유사한 크기와 다각형을 보이지만, 만재도 지역은 기둥의 폭의 차이가 심한 것으로 보아 냉각 당시 환경의 차이가 있었을 것으로 사료된다.

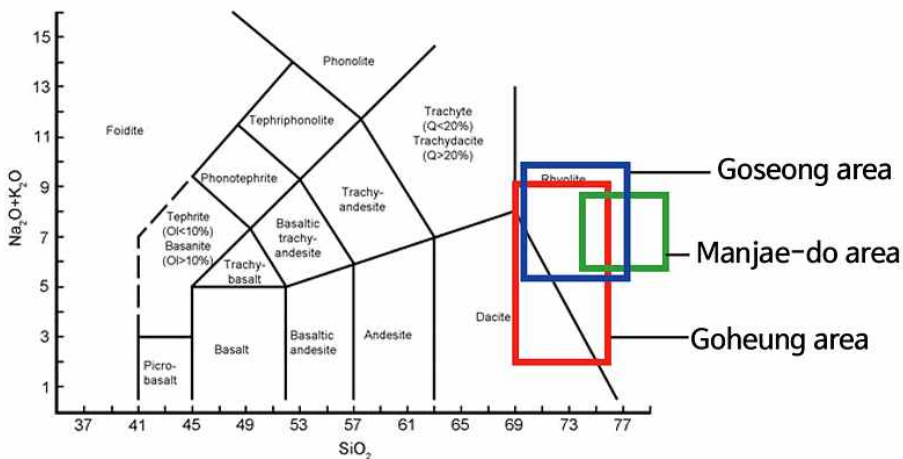


Fig. 67. Total alkali vs SiO<sub>2</sub> (wt%) diagram(TAS) with analyses of rock in Goseong, Manjae-do, Goheung area.

기존의 주상절리 연구는 완벽한 다각형 모양의 단면 내에서 그 형태학적인 측면과 형성 메커니즘을 연구하였다. 본 연구는 일반적으로 존재하는 온전한 형태의 주상절리가 아닌 특이한 형태의 주상절리를 연구하는 방법에 중점을 두었으며, 이를 통하여 남해안에 존재하는 구조절리의 영향으로 인해 주상절리로 판별되지 못하거나 해석하는데 어려움을 가지는 주상절리 형태를 해석하고자 하였다. 그리고 유사한 화학성분을 가지는 다른 지역의 주상절리와 비교하여 형태학적인 특징을 기술하였다. 연구를 통해 나타난 결과는 주상절리와 구조절리가 혼재된 지역을 해석하는 방법을 제시하였으며, 또한 이 결과는 남해안에 존재하는 구조절리와 중첩된 주상절리를 해석하는 기초자료로서 활용될 것이다.



## 【참고 문헌】

- 공달용, 조형성, 김재환, 유영완, 정승호, 김태형, 김종선, 정종욱, 김건기, 권창우, 손문, 2018, 천연기념물 제411호 경남 고성 덕명리 공룡화석 산지 일원 병풍바위의 형성에 관한 암석학적 연구, 문화재, 51(2), 78-91.
- 김영석 역, 2013, 구조지질학, 시그마프레스, 514p.
- 김태광, 2020, 한반도 중부 한탄강 지역의 주상절리 형태분석, 조선대학교 대학원, 석사학위 논문, 1-13p.
- 박강섭, 2007, 경상분지 하양층군 퇴적암 내의 절리 발달, 경북대학교 대학원, 석사학위논문, 1-4p.
- 손정모, 2016, 한반도 남부 해안에 분포하는 주상절리의 형성 메커니즘, 조선대학교 대학원, 박사학위 논문, 190p.
- 손정모, 안건상, 2014, 고흥지역 주상절리의 분포와 형태, 한국지구과학회 추계학술 발표회논문집, 69-71.
- 안건상, 2014a, 남한에서 주상절리의 분포와 암석학적 특성, 암석학회지, 23(2) 49-59.
- 안건상, 2014b, 우리나라 주상절리에 대한 연구 전략, 한국지구과학회지, 35(7), 501-517.
- 안건상, 2019, 제주도 화산암에 발달한 주상절리 크기의 상하부 역전, 한국도서연구, 32(2), 153-178.
- 안건상, 2021, 제주도 애월읍 해안의 염기성 용암류에 발달한 동심원 구조와 방사상 절리, 한국지구과학학회지, 42(2), 185-194.
- 안건상, 손정모, 2015, 전라남도 신안군 증도에 분포하는 주상절리의 특징, 한국도서연구, 27(2), 157-173.
- 오강호, 문병찬, 김해경, 2006, 전남 남서 해안에 분포하는 주상절리의 특징, 한국지형학회지, 13(3), 55-62.
- 우현동, 박진수, 오한솔, 장운득, 2013, 울릉도 국수바위 주상절리의 형성과정과 자연유산적인 가치, 암석학회지, 22(1), 9-17.
- 이대성, 이문원, 1987, 지구화학원론, 교문사, 473p.
- 장기홍, 이윤중, 스키 카즈히로, 박순옥, 1998, 백악기 구산동응회암 저어콘 결정

- 들의 형태, CHIME 연령 및 지사적 의의, 지질학회지, 34(4), 333-342.
- 정형은, 2019, 전라남도 구례·순천·여수 지역의 안산암 주상절리 형태분석, 조선대학교 대학원, 석사학위 논문, 1-11p.
- 조민호, 2017, 변산반도 국립공원 내 산성화산암에 발달하는 주상절리의 특징, 조선대학교 대학원, 석사학위 논문, 1-8p.
- 좌용주, 이용일, Orihashi, Y., 2004, 구산동 응회암과 진동화강암에서 산출되는 저콘에 대한 U-Pb 연대와 진동층 퇴적시기에 대한 고찰, 대한지질학회 학술발표회 초록집, 73.
- 지정만, 김혁시, 오인섭, 김학천, 1983, 삼천포 1:5만 지질도폭, 한국동력자원연구소, 12p.
- 한국지질자원연구원, 2002, 목포 · 여수도폭 및 설명서(1:250,000), 45p.
- 홍현주, 2005, 제주도 지삿개 대포동현무암에 발달한 주상절리의 형태학 및 암석학적 연구, 부산대학교 교육대학원, 석사학위논문, 53p.
- Aydin, A. & Degraff, J. M., 1988, Evolution of polygonal fracture patterns in lava flows. *Science*, 239, 471-476.
- Giants Causeway Guide, 2021, <https://giantscausewayofficialguide.com/>
- Goehring, L., Morris, S. W. & Lin, Z., 2006, An experimental investigation of the scaling of columnar joints, *Physical Review*.  
(<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.036115>)
- Grossenbacher, K. A. & McDuffie, S. M., 1995, Conductive cooling of lava: columnar joint diameter and stria width as functions of cooling rate and thermal gradient. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 69(1), 95-103.
- Hetényi G., Taisne, B., Garel, F., Médard, É., Bosshard, S. & Mattsson, H. B., 2012, Scales of columnar jointing in igneous rocks: Field measurements and controlling factors. *Bulletin of Volcanology*, 74, 457-482.
- Mallet, R., 1875, On the origin and mechanism of production of the prismatic (or columnar) structure of basalt. *Philos Magazine*, 50, 122-135.
- Sun, W. & McDonough, W. F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society London Special Publications*, 42. 313-345.

- Toramaru, A. & Matsumoto, T., 2004, Columnar joint morphology and cooling rate: A starch water mixture experiment. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109, B02205, <https://doi.org/10.1029/2003JB002686>
- Vasseur, J. & Wadsworth, F. B., 2019, The Permeability of columnar jointed lava. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(11), 11305-11315. <https://doi.org/10.1029/2019JB018118>