



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](#)

2016년 2월
박사학위 논문

한반도 남부 해안에 분포하는 주상절리의 형성 메커니즘

조선대학교 대학원
자연과학과(지구과학전공)
손 정 모

한반도 남부 해안에 분포하는
주상절리의 형성 메커니즘

Formation Mechanism of Columnar Joint
on the Southern Coast, Korea

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원
자연과학과(지구과학전공)
손 정 모

한반도 남부 해안에 분포하는 주상절리의 형성 메커니즘

지도교수 안 건 상

이 논문을 이학박사학위 신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원
자연과학과(지구과학전공)
손 정 모

손정모의 박사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	박	천	영	(인)
위원	광주교육대학교	교수	김	해	경	(인)
위원	광주전남연구원	선임연구원	김	동	주	(인)
위원	조선대학교	교수	안	경	진	(인)
위원	조선대학교	교수	안	건	상	(인)

2015년 12월

조선대학교 대학원

목 차

I. 서론	1
1. 연구배경	1
2. 연구동향	3
3. 연구방법 및 연구방향	8
II. 이론적배경	10
1. 주상절리의 형태 및 용어	10
2. 주상절리 형성 이론	12
3. 주상절리 형성에 미치는 요인	16
4. 주상절리의 형태	18
1) 화산암의 산상에 따른 형태	18
2) 화산암의 크기에 따른 형태	18
5. 냉각률에 따른 주상절리 형성	22
III. 연구지역의 지질	24
1. 전라북도 부안	24
2. 전라남도 신안	30
1) 증도	30
2) 지도	33
3) 임자도	36
4) 만재도	38
3. 전라남도 고흥	45
4. 전라남도 여수	53

5. 경상남도 서남부	58
6. 경상북도 동남부	62
IV. 주상절리 형태분석	65
1. 부안지역 주상절리	68
2. 신안지역 주상절리	75
1) 지도지역	77
2) 증도지역	79
3) 임자도지역	87
4) 만재도지역	87
3. 고흥지역의 주상절리	98
1) 도화면일대	98
2) 팔영산일대	113
4. 여수지역 주상절리	115
5. 경상남도 서남부지역 주상절리	119
1) 남해지역	119
2) 사천지역	120
3) 고성지역	128
6. 경북 동남부지역 주상절리	133
V. 암석화학	143
1. 주성분 원소	143
1) 암석의 분류	147
2) 화학조성의 변화	147

2. 미량원소	153
1) SiO ₂ 변화경향	153
2) Spider diagram	157
3. 희토류 원소	158
VI. 연구지역 주상절리의 형성 메커니즘	161
1. 화학조성에 따른 형성 메커니즘	161
2. 산상에 따른 형성 메커니즘	167
1) 전라북도 부안	167
2) 전라남도 신안	169
3) 전라남도 고흥	175
4) 경상남도 남해	180
5) 경상북도 포항	181
3. 주상절리의 형성 메커니즘	181
VII. 토의	185
VIII. 결론	188
【참고문헌】	191

List of Tables

Table 1. Columnar joint site with names, geographical location in the study area	66
Table 2. Measurement of columnar joint in Jeokbyeok site	69
Table 3. Measurement of columnar joint in Ji-do	78
Table 4. Measurement of columnar joint in Jeung-do	80
Table 5. Measurement of columnar joint in Manjae-do	96
Table 6. Measurement of columnar joint in Shinan(Total)	97
Table 7. Measurement of columnar joint in Goheung	114
Table 8. Measurement of columnar joint in Yeosu	115
Table 9. Measurement of columnar joint in West-south Gyeongnam	132
Table 10. Measurement of columnar joint in the East-south Gyeongbuk	136
Table 11. Major elemental analyses(wt%) of columnar joints in study area	144
Table 12. The concentration of trace elements for columnar joints in study area	154
Table 13. The concentration of rare earths elements for columnar joints in study area	159

List of Figures

Figure 1. Location of columnar joint in South Korea	2
Figure 2. Photographs of columnar joint on the Giant's Causeway and Fingal's Cave	4
Figure 3. Location of the study area in Korea	9
Figure 4. Symbols of columnar joint	11
Figure 5. A Schematic illustration of colonnade and entablature	12
Figure 6. Photographs of Columnar joint structure	13
Figure 7. Formation of cracks at cooling surface on thermal contraction model	14
Figure 8. Experiment of used to corn crach	15
Figure 9. Factors in the formation of columnar joint	17
Figure 10. Columnar joint patterns	19
Figure 11. Schematic drawing of the different geological contexts and geometries of columnar joint	20
Figure 12. Schematic geometry of columnar joint for thin lava flow(high viscosity)	22
Figure 13. The geology map of study area	25
Figure 14. The geology map of Gyeokpo-ri in Buan	26
Figure 15. Photographs of Jeokbyeokgang area	27
Figure 16. Microphotographs of rhyolite on the Jeokbyeokgang area	29
Figure 17. The geology map of Shinan-gun	31
Figure 18. Photographs of tuff in Jeung-do	32
Figure 19. Microphotographs of rhyolitic tuff on the Jeung-do area	34
Figure 20. Microphotographs of rhyolitic tuff on the Ji-do area	37
Figure 21. The geology map of Manjae-do in Shinan-gun	39
Figure 22. Photographs of Manjae-do	40
Figure 23. Microphotographs of rhyolitic tuff(SMJ-01)	41
Figure 24. Microphotographs of rhyolitic tuff(SMJ-02)	42
Figure 25. Microphotographs of rhyolitic tuff(SMJ-04)	43

Figure 26. Microphotographs of rhyolitic tuff(SMJ-06)	44
Figure 27. The geology map of Goheung and Yeosu	46
Figure 28. Photographs of welded tuff on the Goheung area	48
Figure 29. Microphotographs of rhyolitic tuff(GH-01)	49
Figure 30. Microphotographs of rhyolitic tuff(GH-02)	50
Figure 31. Microphotographs of rhyolitic tuff(GH-04)	51
Figure 32. Microphotographs of rhyolitic tuff(GH-06)	52
Figure 33. Microphotographs of rhyolitic tuff(YS-01)	54
Figure 34. The geology map of Namhae, Sacheon, Goseong	59
Figure 35. Microphotographs of andesitic thff in Namhae	60
Figure 36. The geology map of Guryongpo in Pohang	63
Figure 37. Microphotographs of andesitic tuff in Guryongpo	64
Figure 38. Geology map of the Jeokbyeokgang showing sample location	68
Figure 39. Photograph from columnar joint in Jeokbyeokgang, Buan	70
Figure 40. Photograph and sketch of measured columnar joint in JB-01	71
Figure 41. Frequency(%) of measurement to columnar joint JB-01	72
Figure 42. Photograph and sketch of measured columnar joint in JB-03	73
Figure 43. Frequency(%) of measurement to columnar joint JB-03	74
Figure 44. Geology map of the Shinan showing sample location	76
Figure 45. Photographs of columnar joint in the Ji-do	77
Figure 46. Frequency(%) of measurement to columnar joint in the Ji-do site	78
Figure 47. Photograph of columnar joint face in Jeung-do	79
Figure 48. Photograph and sketch of measured columnar joint in SJU-02	81
Figure 49. Frequency(%) of measurement to columnar joint in SJU-02	82
Figure 50. Frequency(%) of measurement to columnar joint in SJU-04	83
Figure 51. Frequency(%) of measurement to columnar joint in SJU-04	84
Figure 52. Photograph and sketch of measured columnar joint in SJU-05	85

Figure 53. Frequency(%) of measurement to columnar joint in SJU-05	86
Figure 54. Photograph of columnar joint in Jeung-do	88
Figure 55. Photographs of columnar joint in the Bunamgundo	89
Figure 56. Geology map of the Manjae-do showing sample location	90
Figure 57. Photographs of columnar joint in the Manjae-do	91
Figure 58. Photographs of columnar joint in dike(Manjae-do)	95
Figure 59. Frequency(%) of measurement to columnar joint in SMJ-04	95
Figure 60. Geology map of the Goheung showing sample location	99
Figure 61. Photographs of columnar joint in the Goheung	100
Figure 62. Photographs of columnar joint in GH-04	101
Figure 63. Photographs of columnar joint in GH-05	103
Figure 64. Photographs of columnar joint in GH-08, GH-09	104
Figure 65. Photograph and sketch of measured columnar joint in GH-04	105
Figure 66. Frequency(%) of measurement to columnar joint in GH-04	106
Figure 67. Photograph and sketch of measured columnar joint in GH-05(A)	107
Figure 68. Frequency(%) of measurement to columnar joint in GH-05(A)	108
Figure 69. Photograph and sketch of measured columnar joint in GH-05(B)	109
Figure 70. Frequency(%) of measurement to columnar joint in GH-05(B)	110
Figure 71. Photograph and sketch of measured columnar joint in GH-05(C)	111
Figure 72. Frequency(%) of measurement to columnar joint in GH-05(C)	112
Figure 73. Photographs of columnar joint in GH-03, GH-06, GH-07	113
Figure 74. Photographs of columnar joint in YS-01	116
Figure 75. Photograph and sketch of measured columnar joint in YS-01	117
Figure 76. Frequency(%) of measurement to columnar joint in YS-01	118

Figure 77. Geology map of the Namhae-Sacheon-Goseong showing sample location	119
Figure 78. Photographs of columnar joint in NH-01	121
Figure 79. Photographs of columnar joint in NH-03, NH-05	122
Figure 80. Photograph and sketch of measured columnar joint in NH-03	123
Figure 81. Frequency(%) of measurement to columnar joint in NH-03	124
Figure 82. Photograph and sketch of measured columnar joint in NH-05	125
Figure 83. Frequency(%) of measurement to columnar joint in NH-05 ..	126
Figure 84. Photographs of columnar joint in NH-06	127
Figure 85. Photographs of columnar joint in SC-01	128
Figure 86. Photographs of columnar joint in Goseong	129
Figure 87. Frequency(%) of measurement to columnar joint in GS-01 ..	131
Figure 88. Geology map of the Guryongpo showing sample location ..	133
Figure 89. Photographs of columnar joint in Guryongpo	134
Figure 90. Photograph and sketch of measured columnar joint in PG-01	137
Figure 91. Frequency(%) of measurement to columnar joint in PG-01 ..	138
Figure 92. Photograph and sketch of measured columnar joint in PG-02	139
Figure 93. Frequency(%) of measurement to columnar joint in PG-02 ..	140
Figure 94. Photograph and sketch of measured columnar joint in PG-03	141
Figure 95. Frequency(%) of measurement to columnar joint in PG-03 ..	142
Figure 96. Total alkali vs. SiO ₂ (wt%) diagram(TAS) with analyses of rocks in study area	148
Figure 97. AFM diagram for study area	149
Figure 98. K ₂ O vs. SiO ₂ diagram for the rocks in study area	150
Figure 99. Harker variation diagrams for rocks in study area	151
Figure 100. Variation diagram of trace elements(ppm) for rocks in study area	155

Figure 101. Spidergram of trace element concentration in rock to Primitive Mantle	158
Figure 102. Chondrite normalized REE patterns in rocks	160
Figure 103. Relation of the mean side length L to the mean section area A of the polygons separated by polygon order N	162
Figure 104. Relation of SiO ₂ (wt%) to the mean maximum length frequency (%) of polygon at study area	164
Figure 105. Relation of SiO ₂ (wt%) to the mean section area A at study area	165
Figure 106. Relation of height of outcrop to maximum length frequency(%) of polygon at study area	166
Figure 107. Photograph and sketch of columnar joint structure in JB-03	168
Figure 108. Photograph and sketch of columnar joint structure in SJU-02	170
Figure 109. Photograph and sketch of columnar joint structure in SJU-03	172
Figure 110. Photograph and sketch of columnar joint structure in Manjae-do	173
Figure 111. Photograph and sketch of columnar joint structure in Manjae-do	174
Figure 112. Schematic diagram of the columnar joint in Manjae-do, Shinan	176
Figure 113. Photograph and sketch of columnar joint structure (GH-04)	177
Figure 114. Photograph and sketch of columnar joint structure (GH-02)	178
Figure 115. Photograph and sketch of columnar joint structure(GH-07)	179
Figure 116. Photograph and sketch of columnar joint structure(NH-01)	180
Figure 117. Photograph and sketch of columnar joint structure in Guryongpo	182

ABSTRACT

Formation Mechanism of Columnar Joint on the Southern Coast, Korea

Son, Jeongmo

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

Department of Natural Sciences(Earth Science)

Graduate School of Chosun University

Columnar joints are primary structures formed by the removal of the crack and the expansion of the stress in the process of cooling of the magma and the lava flow. In southern coast of Korea, columnar joints formed from the Mesozoic Cretaceous to Cenozoic Tertiary period volcanic activity are distributed. Columnar joints in the study area have been exposed to seawater erosion on mainly sea-cliffs, and thus achieved beautiful coastal landscape. The size and the shape of columnar joints vary by chemical composition and geological settings of volcanos. We measured the shape and the size of columnar joints of acidic or intermediate rocks in southern Korea, and performed the chemical composition analysis and the morphological analysis. Through this, we tried to identify the formation mechanism of columnar joints in the study area.

The study area is Buan(Jeollabuk-do), Shinan, Goheung, Yeosu in Jeollanam-do, Namhae, Sacheon, Goseong in Gyeongsangnam-do and Pohang(Gyeongsangbuk-do). We measured the size of columnar joints, either acidic or intermediate rock, in the total of 18 sites. Measured values are the number of polygon(N), the length of polygon side(L) and the angle between adjacent edges(θ). The distribution of the number of polygon peaks at $N=5$ (pentagon) by 37.69% in total. Areally, the

distribution of the number of polygon peaks at N=4(tetragon) by 42.31% in Buan, at N=5(pentagon) by 38.75% in Shinan, at N=5(pentagon) by 36.51% in Goheung, at N=5(hexagonal) by 76.47% in Yeosu, at N=4(tetragon) by 43.86% in Namhae and at N=5(pentagon) by 39.81% in Pohang. The distribution of the length of polygon side peaks at 1~10cm by 36.72% in total. Areally, the distribution of the length of polygon side peaks at 11~20cm by 48.95% in Buan, at 11~20cm by 31.35% in Shinan, at 1~10cm by 51.76% in Goheung, at 11~20cm by 62.12% in Yeosu, at 31~40cm by 16.49% in Namhae and at 1~10cm by 91.60% in Pohang. The distribution of the angle between adjacent edges peaks at 81°~90° by 14.41% in total. Areally, the distribution of the angle between adjacent edges peaks at 91°~100° by 17.15% in Buan, at 111°~120° by 16.17% in Shinan, at 101°~110° by 15.52% in Goheung, at 111°~120° by 20.41% in Yeosu, at 81°~90° by 15.67% in Namhae and at 81°~90° by 15.32% in Pohang.

We show TAS through a major element analysis of the rocks that constitute the columnar joints. Buan, Shinan, Goheung, Yeosu, and Goseong are marked at the rhyolite area. Namhae and Sacheon are marked at the trachyandesite area. Guryongpo is marked at the desite area.

Previous studies used to find that the length of polygon side(L) - SiO₂ correlation shows different patterns depending on the geological settings in foreign areas and the basic volcanic rocks in Korea. In contrast, in our study area the same correlation does not depend strongly on the geological settings but shows an almost constant pattern. The length of polygon side(L) correlates with the height of the outcrop with linear proportionality. Through various analyses, we find that the columnar joints in our study area have 4 major formation mechanisms. First, vertically directed columnar joints are formed by the free-fall, welding and cooling

of the pyroclastic material made from volcanism(JB, SJI, SJU, GH YS, NH, GS, PG). Second, horizontally-directed columnar joints are developed in intrusive rocks(SIJ, SMJ-04, GH-07, NH-01, SC-01). Third, columnar joints can develop in the form of a dome(SJU-01, SJU-02, PG). Fourth, columnar joints can form in the lava lake environment(SMJ).

The results of this study can help understanding the formation mechanism of columnar joints formed by acidic or intermediate rocks in areas of Korea other than our study area. This study can also serve as a basic research in understanding the geological settings of volcanic rocks which are widely distributed in southern Korea.

국문초록

주상절리는 화산활동으로 형성되는 일차적인 구조로 용암이 냉각하는 과정에서 응력의 해소와 균열의 확장으로 형성된다. 한반도 남부지역에는 중생대 백악기부터 신생대 제3기까지의 활발한 화산활동으로 형성된 주상절리가 분포하고 있다. 연구지역의 주상절리는 주로 해안 절벽에서 해수의 침식작용으로 노출되어 있으며, 아름다운 해안 경관을 이루고 있다. 주상절리의 크기와 형태는 화학조성과 화산체의 산상에 따라 달라진다. 한반도 남부지역에 분포하는 산성 내지 중성암의 주상절리를 대상으로 형태와 크기를 측정하고, 화학성분을 분석하여 형태학적 분석을 실시하였다. 이를 이용하여 연구지역에 분포하는 주상절리가 형성되는 메커니즘을 규명하였다.

연구지역은 전라북도 부안군, 전라남도 신안군, 고흥군, 여수시, 경상남도 남해군, 사천시, 고성군 그리고 경상북도 포항시 일대이다. 이 지역에서 산성 내지 중성암으로 구성된 주상절리를 대상으로 총 18곳에서 주상절리의 크기를 측정하였다. 측정 수치는 주상절리 단면의 다각형 수(N), 기둥면의 폭(L), 기둥면 사이의 각(θ)이다. 다각형의 수(N)는 전체적으로 5각형이 37.69%로 가장 높다. 지역별로 부안지역은 4각형이 42.31%, 신안지역은 5각형이 38.75%, 고흥지역은 5각형이 36.51%, 여수지역은 6각형이 76.47%, 남해지역은 4각형이 43.86% 그리고 포항지역은 5각형이 39.81%로 높게 나타난다. 기둥면의 폭(L)은 전체적으로 1~10cm가 36.72%로 가장 높다. 지역별로는 부안지역 11~20cm가 48.95%, 신안지역 11~20cm가 31.35%, 고흥지역 1~10cm가 51.76%, 여수지역 11~20cm가 62.12%, 남해지역 31~40cm가 16.49% 그리고 포항지역 1~10cm가 91.60%로 우세하게 나타남을 보인다. 기둥면 사이의 각은 전체적으로 81°~90°가 14.41%로 높은 값을 보인다. 지역별로는 부안지역이 91°~100°가 17.15%, 신안지역이 111°~120°가 16.17%, 고흥지역이 101°~110°가 15.52%, 여수지역이 111°~120°가 20.41%, 남해지역이 81°~90°가 15.67% 그리고 포항지역이 81°~90°가 15.32%로 우세함을 보인다.

주상절리를 구성하는 암석들을 주성분원소 분석을 통하여 TAS도에 도시하

였다. 전라북도 부안, 전라남도 신안, 고흥, 여수, 경상남도 고성 지역은 유문암 영역에 해당한다. 경상남도 남해, 사천은 조면안산암 영역에 해당한다. 경상북도 포항 구룡포는 데사이트 영역에 표시되었다.

SiO₂의 함량에 따른 기둥면의 폭(L)은 기존의 연구에 의하여 산출상태에 따라 서로 다른 패턴을 보여주나, 연구지역은 세계 여러 곳과 우리나라 염기성 화산암과는 달리 기둥면의 폭(L)이 거의 일정한 패턴을 보여준다. 연구지역 노두의 높이에 따른 기둥면의 폭(L) 크기는 정비례 한다. 다양한 분석을 통하여, 연구지역 주상절리는 네 가지 형성 메커니즘을 가진다. 첫째는 화산활동에 의하여 생성된 화산쇄설물이 낙하, 용결, 냉각하는 과정에서 형성된 수직 방향의 주상절리이며(JB, SJI, SJU, GH YS, NH, GS, PG지역), 둘째는 관입암체에서 발달한 수평방향의 주상절리이다(SIJ, SMJ-04, GH-07, NH-01, SC-01지역). 셋째는 돔 형태로 발달한 주상절리이고(SJU-01, SJU-02, PG지역), 넷째는 용암호와 비슷한 환경으로 발달한 주상절리이다(SMJ지역).

본 연구의 결과는 한반도 타 지역의 산성 내지 중성암에서 형성된 주상절리의 메커니즘을 이해하는데 이용될 것이며, 한반도 남부에 넓게 분포하는 화산암류의 산상을 이해하는 기초연구가 될 것이다.

I. 서론

1. 연구 배경

주상절리는 지구조운동의 결과로 형성된 지질구조로서, 지구상 도처에서 다양한 형태로 관찰되고 있다. 주상절리는 주로 화산활동으로 인해 형성되지만 모두 화산활동으로 인해 형성되는 것은 아니다. 우리나라는 지구역사를 거치면서 화산활동과 관입 등 지구조운동이 활발하였지만 주상절리는 매우 제한적으로 나타난다(Fig. 1).

우리나라에서 주상절리가 잘 관찰된 지역은 대부분 현무암의 분출과정에서 형성된 것이다. 신생대 화성활동은 에오세부터 마이오세 말까지 우리나라 곳곳에서 발생하였다. 에오세에 산성 화산암류가 대부분 분출하였고, 이후에 염기성 내지 초염기성 화산암류가 분출하였거나 관입하였다. 특히, 이 기간동안 환동해지역에서 화산활동이 활발하였던 것으로 보고되었다(원종관 외, 2001; 진명식, 2004). 신생대 화산활동 및 관입으로 생성된 주상절리는 강원도 고성 일대, 임진강과 한탄강 일대, 울릉도, 독도, 제주도 일대, 경주 일대, 울산 일대 그리고 거제 팔랑포 등에서 발견되며, 이들에 대한 연구는 제주도와 울릉도, 울산, 경주 등지에 대해 진행되었지만 이들의 형성과정을 밝히기까지는 추가적인 연구가 더 진행되어야 할 것으로 사료된다.

신생대에 형성된 주상절리는 주로 현무암질 암석의 생성과 관련이 있다면, 중생대 주상절리는 주로 유문암질 또는 안산암질 암석의 생성과 관련 있다. 중생대의 화성활동은 쥐라기부터 백악기 초기까지 진행된 대보조산운동이 대표적이며, 북동-남서로의 뚜렷한 방향성을 가지는 대규모 화강암을 수반한 지질운동이다. 이를 전후로 송림변동과 불국사변동 등 크고 작은 화성활동이 진행되었다. 중생대 화성활동으로 형성된 주상절리를 구성하는 암석들은 대체로 백악기 후기 유문암 또는 유문암질 응회암, 안산암 또는 안산암질 응회암으로 구성되어 있다. 이 시기에 형성된 응회암은 경상남·북도, 전라남·북도에 고루 분포한 것으로 보고되고 있다(김해경 등, 2004).

응회암으로 구성된 주상절리를 형성하는 화성활동은 중생대 백악기 후기에



Fig. 1. Location of columnar joint in South Korea.

몇 차례 진행된 화산활동이 있었을 것으로 추정되고 있다. 최근 Lim *et al.*(2015)은 무등산의 주상절리대가 중생대 백악기 후기에 3번 이상의 화산활동으로 생성된 것으로 보고하고 있다. 이 같은 화산활동으로 형성되는 주상절리는 전남 고흥 일대, 전남 여수 일대, 경남 남해 일대, 경남 고성 일대, 신안 입자·지도·중도·만재도 일대 그리고 부안 적벽강 일대에 분포하고 있는 것으로 사료된다.

주상절리는 마그마의 분출 또는 관입 그리고 화산쇄설물의 퇴적과 같은 화산활동으로 형성된 것으로 초기의 고온 상태의 물질이 냉각하는 과정에서 생성된다. 이러한 일련의 과정들이 어떤 방법을 통하여 진행되는지에 대한 연구의 결과물은 학술적으로 큰 가치를 가지게 될 것이다. 더불어 주상절리에 대한 연구를 통하여 지질학을 연구하는 학생들과 중·고등학교 지구과학 분야의 교육과정과 연계하여 화산활동과 관련한 내용에 대한 교육적 효과도 기대할 수 있다. 하지만 이러한 기대에도 우리나라에 분포한 주상절리에 대한 보전은 쉽지 않다. 국가지질공원으로 지정된 제주도의 주상절리대와 무등산의 주상절리대, 각 지방자치단체에서 지정한 지방문화재 등을 제외하고는 그 보전이 요원하며, 수석이나 채석 등으로 훼손이 되거나 사라지고 있는 실정이다.

본 연구는 암석 분석 또는 경관으로서의 주상절리에 대한 연구보다는, 화산활동의 산출물로서의 주상절리에 대한 형태 분석을 통해 주상절리의 생성 과정에서 형성되는 구조적인 메커니즘을 규명하고자 한다.

2. 연구동향

북아일랜드의 Giant's Causeway와 스코틀랜드 스타파섬의 Fingal's Cave는 주상절리의 이상적인 형태인 육각형 모양에 가깝게 만들어진 대표적인 주상절리이다(Goehring, 2008)(Fig. 2). 이외에 미국 캘리포니아의 Devils Postpile, 와이오밍의 Devils Tower, 그리고 아이슬란드의 Reynisfjara도 대표적 사례지역이다. 주상절리는 전 세계의 도처에 다양한 형태로 발견되고 있다. 지구상 대륙별 대표적인 주상절리는 다음과 같다. 아프리카지역은 르완다 루시지지



Fig. 2. Photographs of columnar joint on the (a)Giant's Causeway(from <http://www.giantscausewayofficialguide.com>) and (b)Fingal's Cave(from <http://www.geocaching.com/geocache/GC16BTQ>).

역의 부가라마, 나미비아 트위펠폰테인 근처의 'Organ Pipes'이며, 아시아에
 서는 중국 하이룽장성의 주상절리, 홍콩 주상절리, 인도 말페지역의 'St.
 Mary's Island', 뭄바이 안드헤리의 'Gilbert Hill', 대만 풍관섬과 후징섬의 통
 판 현무암 주상절리, 러시아 루릴열도의 'Cape Stolbchatiy', 이스라엘과 시리
 아 접경지역 골란고원의 'Hexagons pool', 한국 제주도의 대포 주상절리대,
 태국 'Mon Hin Kong', 일본 미야자키 다카치호의 'Takachiho-kyo gorge', 베
 트남 푸옌의 'The Cliff of Stone Plates' 등이다. 유럽에서는 독일의 리네란테-
 팔라티나테지역의 'Linz am Rhrin', 니더 작센지역의 'Hoher
 Hagen(Dransfeld)', 이탈리아 시실리의 'Alcantara River Gorges'와

'Cyclopean Isles', 스페인 지로나의 'Castellofolli de la Roca', 비스카야의 'Fruiz', 알바세테의 'Pitón volcánico de Cancarix', 카나리아제도의 'Los Órganos, La Gomera', 아르메니아 'Garni Gorge', 아조레스의 'Rocha dos Bordões cliffs', 체코의 'Panská Skála', 프랑스 'Saint-Flour', 루마니아의 'Thunderstruck Rocks' 등이다. 북아메리카 지역에서는 캐나다 'North Mountain', 'Cardiff Mountain', 'Mount Edziza Volcanic Complex', 'Kelowna', 'Rouyn-Noranda', 카리브제도의 'Pain de sucre (sugar bread) Îles des Saintes', 멕시코 'Prismas Basálticos in Huasca de Ocampo', 'Salto Chico in Cuernavaca' 등이다. 남아메리카 지역에서는 칠레의 'Ancud Volcanic Complex', 'Mocho Volcano', 아르헨티나의 'Pino Hachado Caldera' 등이며, 오세아니아 지역은 호주의 'Fingal Point', 'Mount Scoria Conservation Park', 'Narooma Basalt', 그리고 'Organ Pipes National Park', 마이크로네시아의 'Pwisehn Malek', 뉴질랜드의 'Blackhead and nearby Second Beach', 'Chatham Islands', 그리고 'The Organ Pipes'이다(Searching in Wikipedia).

국제적으로 주상절리의 형성 메커니즘에 대한 연구는 지금까지 다양하게 진행되어 왔다. 특히 냉각하는 용암을 대상으로 하여 주상절리의 형성을 밝히기는 매우 어렵기 때문에 실험실에서 전분을 이용하여 주상절리의 형성과 관계 깊은 중요한 요인을 찾고자 하였다. 이에 Huxley(1881)와 French(1922)는 물과 전분을 섞은 혼탁액을 건조하여 수축시켰고, 이 혼탁액은 건조되면서 다각형의 기둥을 만들었다. 이 실험은 Müller(1998a)에 의하여 재발견될 때까지 잊혀졌으나, 전분 위에 놓인 램프로 건조 속도를 통제함으로써 전분 건조 실험은 다시 진행되었다. 이 실험은 용암의 확산과정에서 온도변화와 전분 혼탁액의 물 농도를 동일하게 생각하였다. 이러한 전분혼탁액 등을 이용한 실험과 관련한 연구는 최근까지 활발하게 진행되고 있다. Goehring *et al.*(2006)과 Goehring(2008)은 실험을 통하여 전분혼탁액의 증발속도는 램프의 높이와 시간의 상관관계에 있으며, 깊이에 따른 변화와 모두 관계가 있음을 연구를 통해 밝혔다. Toramaru and Matsumoto(2004)는 전분혼탁액을 사용한 실험을 통하여 다각형의 평균 단면적은 냉각속도에 반비례함을 밝혀내었다.

이들 연구는 실험실의 결과물을 바탕으로 수치모델링과 그래픽을 활용하여 시각적으로 도시하고자 하였다. Boot and Murdoch(1983)는 보로노이 다각형을 통하여 균열 패턴을 연구하였으며, Saliba and Jagla(2003)는 팔각형과 사각형을 균열전면에 배치하면서 응력장 계산을 단순화 하여 육각형이 우세하고 크기가 커지도록 설계하였다. 그리고 다양한 연구자들이 주상절리의 냉각 과정을 해석하기 위해 수치해석을 시도하였으며, Computer Graphic을 활용하여 이러한 결과물들을 시각화하는데 노력하였다.

세계적으로 주상절리의 암종은 현무암이 주를 이루며, 주상절리의 형태나 암석학적인 연구 자료 또한 현무암으로 구성된 주상절리가 대부분이다. 하지만 주상절리는 모든 화산암체에서 존재 가능하며, 유문암질과 안산암질 등에 대해서도 연구가 진행되고 있다. Stewart and McPhie(2003)는 그리스 Milos Island의 안산암질 크립토돔에 대한 연구를 통하여 크립토돔에 형성된 주상절리의 구조적인 분석을 하고, Yoshizawa(2005)는 도진보안산암 관입체 산상과 구조에 관한 연구를 하였다.

우리나라의 주상절리에 대한 연구는 매우 제한적으로 이루어졌다. 그래도 몇몇 연구자들에 의하여 우리나라에 분포하는 주상절리들의 형태와 분포, 구성 암석들의 분석을 통하여 그 특징들을 연구하고자 하는 노력이 진행되고 있다. 고성선 등(2005)은 제주도 남부 대포동 해안 일대와 성천포에서 월정동까지 약 3.5km에 해당하는 지샷개 주상절리에 대한 형태와 암석학적 특징에 관한 연구를 통하여, 기둥면의 폭은 90~99cm, 기둥면 사이의 각은 120° ~ 129° 에서 가장 우세한 분포를 보이며, 약 25만년전에 녹하지악 분석구에서 분출한 현무암으로 구성되었음을 밝혔다. 고성선과 윤성효(2005)는 강원도 고성지역의 신생대 현무암 연구를 통하여 고성 일대 주상절리 분포를 기재하였다. 오강호 등(2006)은 전남 신안군 지도에 분포하는 주상절리의 다각형 형태, 직경, 폭, 각도 등의 빈도를 분석하고 다른 주상절리와의 비교연구를 수행하였다. 황상구와 김재호(2009)는 주왕산 국립공원에 대한 지형경관 연구를 통하여 주왕산응회암에서 발달하는 주상절리의 경관적 가치에 대한 연구를 하였다. 진광민과 김영석(2010)은 울산 정자해수욕장과 경주 읍천해안에 분포하는 수평 주상절리의 형태와 발달 방향 등에 대한 분석을 시도한 연구를 통하여,

주상절리를 발달시키는 용암체의 실체를 추적하고자 하였다. 안건상(2010a)은 우리나라의 대표적인 응회암 주상절리인 무등산 주상절리대에 관한 연구를 통해 무등산 도립공원 지질과 경관을 개략적으로 기재하였다. 우현동 등(2013)은 울릉도 국수바위 주상절리에 대한 연구를 통하여, 용암 분출 이후의 냉각과정에 대해 고찰하고, 고온의 암체가 냉각될 때 보이는 전형적인 온도 구배를 모델링하여 국수바위 주상절리의 형성과정에 대한 실마리를 풀고자 하였다. 김화성(2013)은 기존에 연구되었던 강원도 고성지역의 현무암에 대한 체계적인 연구를 진행하면서, 고성지역에 분포하는 주상절리들의 암석학적 특징을 기재하였다. 안건상(2014a)은 남한에서 주상절리의 분포와 암석학적 특징에 대한 연구를 수행하였으며, 또한 안건상 등(2014)은 국립공원 무등산 지질 형성사와 자연경관 연구를 통하여 무등산 주상절리대의 형성사가 언급되었다. 정형은과 안건상(2014), 최원영과 안건상(2014), 손정모와 안건상(2014)은 각각 여수지역과 거제 팔랑포지역, 고흥지역 주상절리의 형태적인 특징에 대한 연구를 진행하였다. 이후 안건상과 손정모(2015)는 전라남도 신안군 증도에 분포하는 주상절리 연구를 통하여, 연구지역에 분포하는 주상절리의 형태적인 특징을 밝혀냈다. Lim *et al.*(2015)은 무등산의 화산활동 과정을 추정하고 주상절리를 이루는 암석을 무등산 응회암으로 명명하였으며, 형태적인 특징과 암석학적 특징을 연구하였다.

이러한 일련의 연구를 통하여 우리나라에 분포하는 주상절리의 분포와 암석학적 연구는 비교적 많이 이루어져 왔다. 그리고 지질학습장과 경관연구 등을 통하여 곳곳에 있는 주상절리의 활용 방안에 대한 연구도 진행되고 있다. 그러나 주상절리의 생성원인이나 이를 통하여 추정 가능한 화성활동 등에 대한 연구는 전반적으로 미흡한 상태이다. 최근 안건상(2014b)은 국외 연구의 흐름을 인지하고, 용어 등의 통일성, 주상절리의 형성과정과 변화과정, 구조적인 메커니즘을 이해하기 위한 연구를 시도하였다.

3. 연구방법 및 연구방향

연구지역은 우리나라 남부지방의 해안에서 발견된 산성 내지 중성암으로 구성된 주상절리를 대상으로 하였다. 연구지역은 행정구역상 전라북도 부안군 적벽강 일대, 전라남도 신안군 지도와 증도, 임자도, 만재도 일대, 전라남도 고흥군 일대, 전라남도 여수시 화양면 비봉산 일대, 경상남도 남해군 양아리와 가인리 일대, 사천시 삼천포 일대, 고성군 상족암군립공원 일대 그리고 경상북도 포항시 구룡포 일대이다(Fig. 3).

주상절리의 전체적인 구조를 파악하기 위해 야외조사시 주상절리의 단면이 관찰 가능한 지역에서 주상절리의 크기와 각도를 측정하였고, 지역별로 주상절리의 크기와 각도를 도식하고 분석하였다. 또한, 주상절리를 구성하는 암석들을 채취하였고, 이들을 박편으로 제작하여 편광현미경하에서 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 원소를 분석하였으며, 미량원소와 희토류 원소 분석은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS; Thermo Elemental X7)를 이용하였다.

측정된 자료와 화학 성분의 분석 자료를 활용하여 연구지역에 분포하는 주상절리에 대해 상호 연관성을 분석하였고, 산출상태 등을 규명하기 위하여 주상절리의 발달 방향 등 구조적인 분석을 수행하였다. 이를 통하여 한반도 남부 해안에 분포하는 주상절리에 대한 형성 메커니즘을 규명하고자 한다.

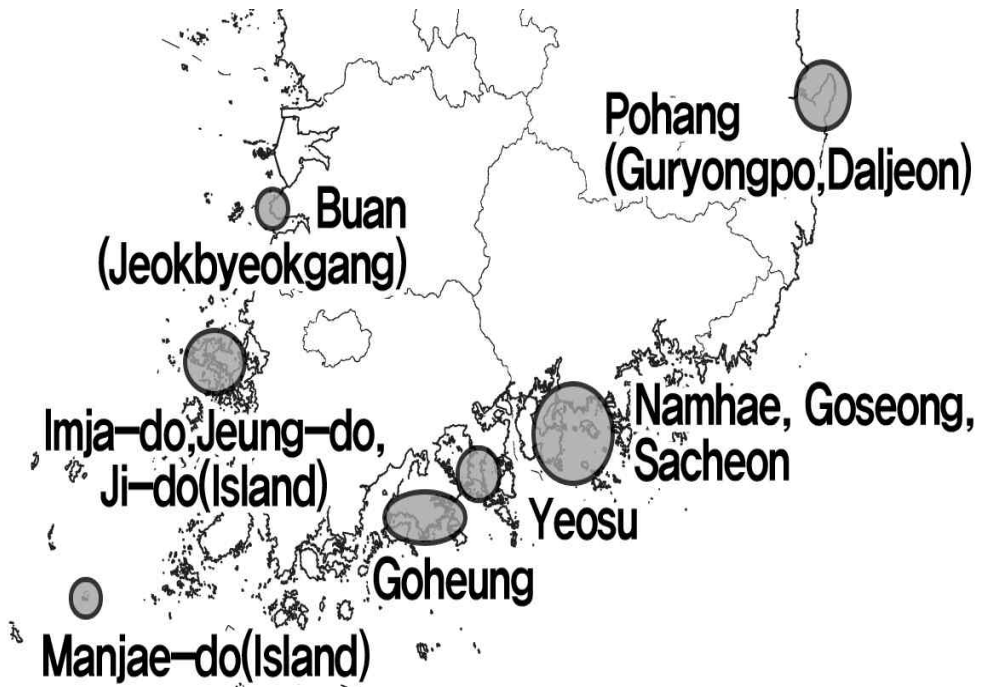


Fig. 3. Location of the study area in Korea.

II. 이론적 배경

주상절리는 일반적으로 화산에서 분출된 뜨거운 용암이 냉각할 때 발생하는 일차적인 구조이며, 주로 두꺼운 용암류에서 발달한다(안건상, 2014). 본 장에서는 주상절리의 형성과 관련하여 최근 국내·외 연구 자료를 토대로 본 연구의 바탕이 되는 주상절리 형성과 관련한 이론을 알아보하고자 한다.

1. 주상절리의 형태 및 용어

본 연구에서 사용된 주상절리에 관한 용어는 Hetényi *et al.*(2012)와 Grossenbacher and McDuffie(1995)의 연구를 토대로 정리된 안건상(2014b)의 연구에서 제시된 용어를 따라 다음과 같이 정리하고자 한다.

주상절리를 이루는 기둥의 높이는 H , 기둥면의 폭(가로넓이)은 L , 다각형의 수를 N , 단면적을 A , 기둥면 사이의 각은 θ , 최대 직경을 D 로 표기하며, 겉보기 직경은 필요에 따라 $D1-D3$ 로 기재하도록 한다(Fig. 4).

주상절리의 구조적인 형태는 크게 3가지이다(Fig. 5, 6). 흔히 주상절리라 말하는 기둥의 구조를 보이는 형태를 컬러네이드(colonnade)라 하며, 용암류 등이 상부의 공기층과 하부의 지표면에 의해 냉각될 때, 표면으로부터 냉각이 시작되며 균열이 생기게 되는데 상부와 하부로부터 시작된 균열이 균일하게 만나게 되면 일반적인 컬러네이드 구조가 완성되지만 갑자기 가운데 또는 다른 부분에서 기둥의 모양이 형성되지 않고 뒤엉킴 구조가 나타나는데, 이러한 형태를 엔테블러처(entablature)라고 한다. 일부지역에서는 주상절리와 함께 판상절리가 나타나는데, 화강암 등 심성암에서 주로 나타나는 판상절리는 압력의 해소로 인한 물리적인 절리임에 반해, 주상절리와 함께 나타나는 판상절리는 다음과 같이 형성된다. 용암류가 굳어지기 시작하는 곳은 공기나 지면과 접하는 곳으로 표면부와 저면부이다. 냉각 중인 용암은 점성이 증가하게 되지만 내부의 용암류는 계속 진행하며 흐르려 하기 때문에 스트레스가 쌓이게 된다. 이러한 부분에 틈새가 생기게 되면 판상절리가 형성되며, 이러한 판상절리는 용암류의 흐름방향과 평행하게 형성하게 된다. 판상절리에 대

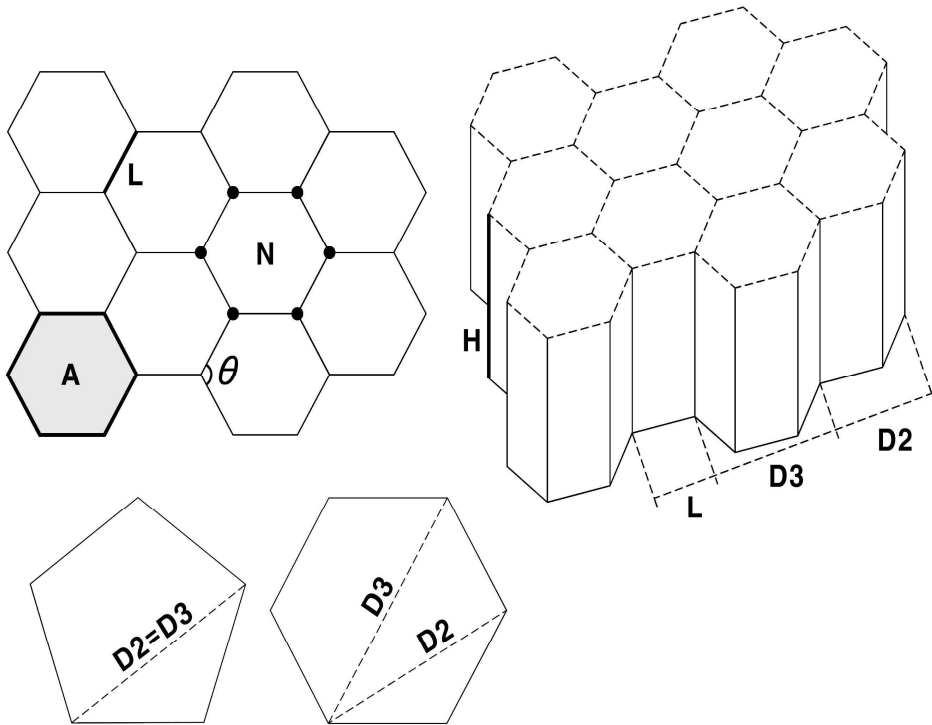


Fig. 4. Symbols of columnar joint(modified Hetényi *et al.*, 2012).

(A: the area of the column in cross section, L: length of a polygon side, θ : angle between the adjacent edges, N: the order of the polygon, H: thickness of the magma body, D2 and D3: the apparent distance between two or three edges of the column in side view)

한 구조적인 연구가 더 진행되면, 주상절리를 형성하게 한 용암류에 대한 정보가 더 많아질 수 있을 것으로 생각된다.

주상절리의 형성은 전체가 일시적인 것이 아닌 온도가 표면에서부터 내부를 향하여 점진적으로 낮아짐에 따라 전파하며 성장한다. 연속적으로 성장하지 않고 단계적으로 성장하게 되면 기둥면에 마디층(striae)이라는 특이한 구조가 형성된다. Goehring and Morris(2008)는 컬럼비아강의 현무암에서 1200개 이상의 마디층 두께를 측정하여 마디층의 두께가 기둥의 직경과 비례하고, 냉각표면에서의 직선상으로 비례한다는 결과를 도출하였다. 즉, 마디층의

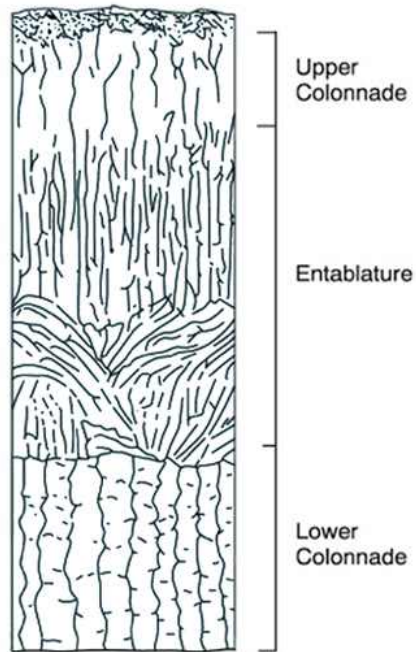


Fig. 5. A Schematic illustration of colonnade and entablature.

두께는 천천히 냉각될수록 커진다. 마디층의 내부에는 깃털무늬가 나타나며, 이런 구조를 깃털구조(plumose structure)라 부른다. 깃털구조는 주상절리가 형성되는 방향을 추정할 수 있는 단서가 되기도 한다.

2. 주상절리 형성 이론

주상절리는 고온에서 급속히 냉각되면서 형성하는 암석에서 주로 발달하는 구조이다. 고온의 용암 또는 이와 비슷한 물질의 냉각이 진행되면서 그에 따른 부피의 감소가 일어나고 이러한 부피 감소의 중심이 되는 곳이 냉각점이다(Fig. 7a). 냉각점은 냉각표면에서 같은 간격으로 형성되고, 이 중심 방향으로 수축하면서 굳어지게 된다. 이 때 수축 중심 사이에 응력이 발생하며, 이 응력이 인장강도를 초과할 때, 균열이 만들어진다(Fig. 7b). 표면의 상태가 전체적으로 동일하다면, 핵은 같은 거리에서 형성되어 수축하기에 Fig. 7(c)와 같은 구조와 가깝게 형성된다(안건상, 2014b).

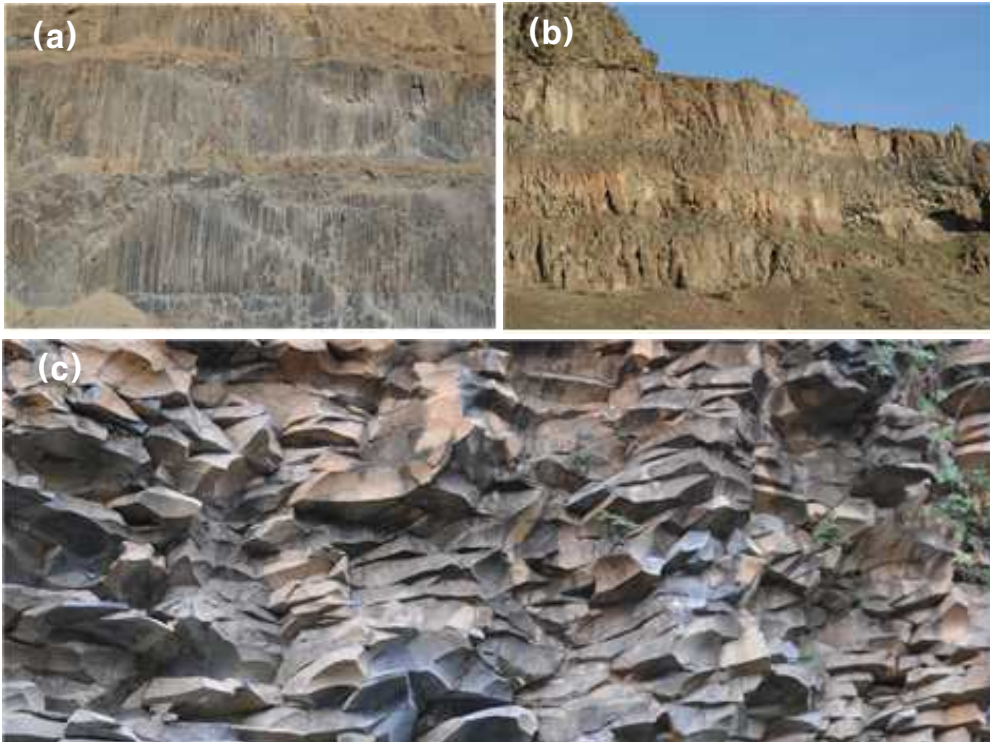


Fig. 6. Photographs of Columnar joint structure. (a)colonnade(Goheung), (b)entablature(Columbia River Basaltic flows, <http://brennanjordan.org/Ewashington.html>), (c)sheeting joint(Hantan-gang)

2차원적으로 균열 길이당 스트레스 방출이 가장 많은 패턴은 6각형이며, 이러한 경향은 에너지를 최소화 한다(Mallet, 1875). 이와 같은 모델을 열 수축 모델이라 하며, 표층의 최상부에서 균열패턴이 비규칙적이기는 하지만, 용암이 냉각되면서 균열은 용암류 내부로 진행되고 패턴은 저에너지인 별집구조 형태로 진화한다는 내용이다. 열 수축 모델은 현재 가장 널리 받아들여지는 주상절리의 형성과정에 관한 이론이다.

주상절리의 크기는 매우 다양하게 형성되고, 직경이 최대 4m에 이르는 경우도 있다. 와이오밍주의 Devil's Tower와 같이 매우 높게 발달한 주상절리도 있다. 이러한 주상절리의 크기를 좌우하는 요인에 대한 이론적 연구가 바로 전분을 이용한 실험이다. 물과 전분을 섞은 혼탁액을 건조하여 수축시키면, 이 혼탁액은 건조되면서 다각형의 기둥을 만들게 된다(Fig. 8). 이 실험은

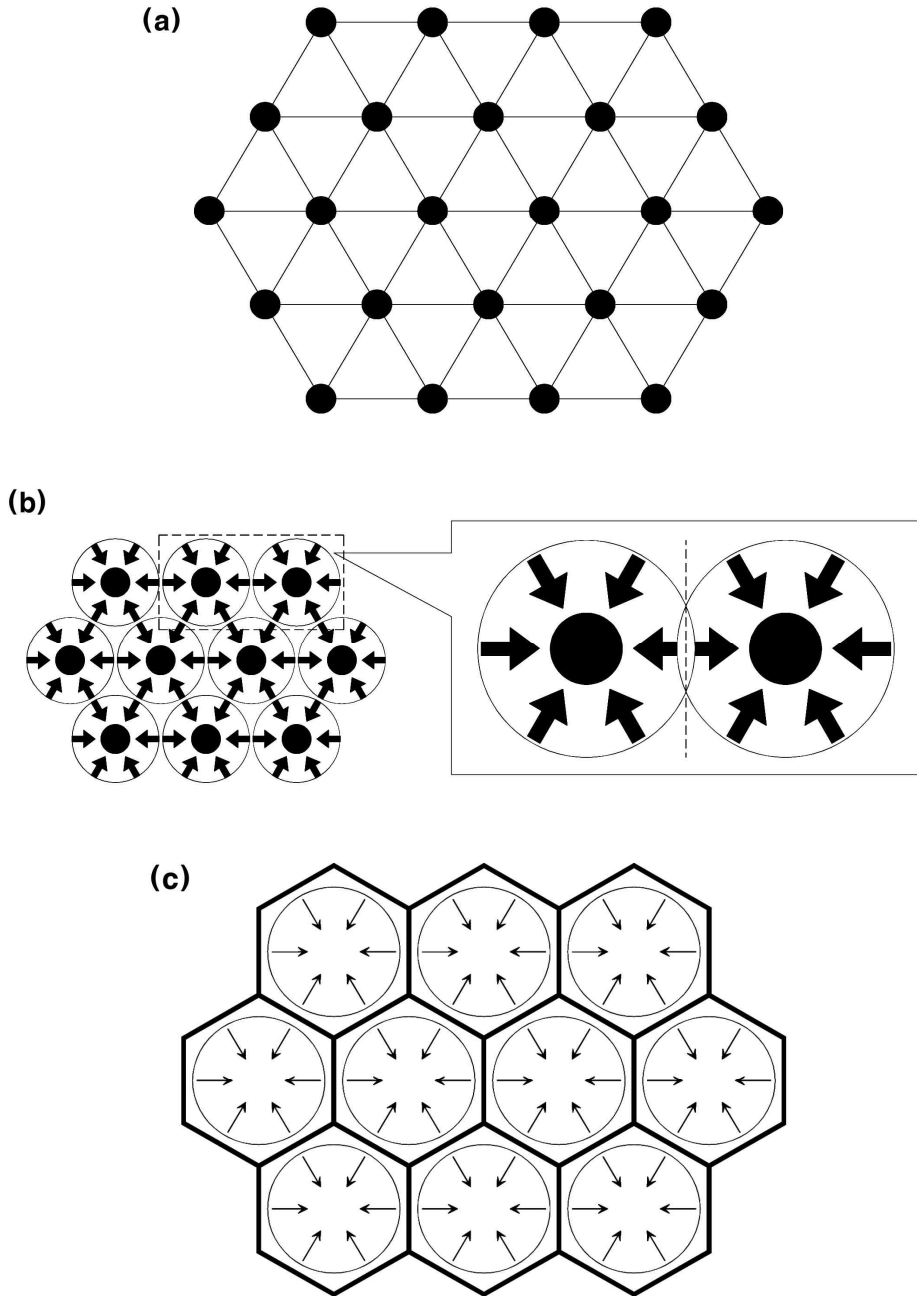


Fig. 7. Schematic formation of cracks at cooling surface on thermal contraction model(modified of Nishiwaki and Hirotsishi, 2009).

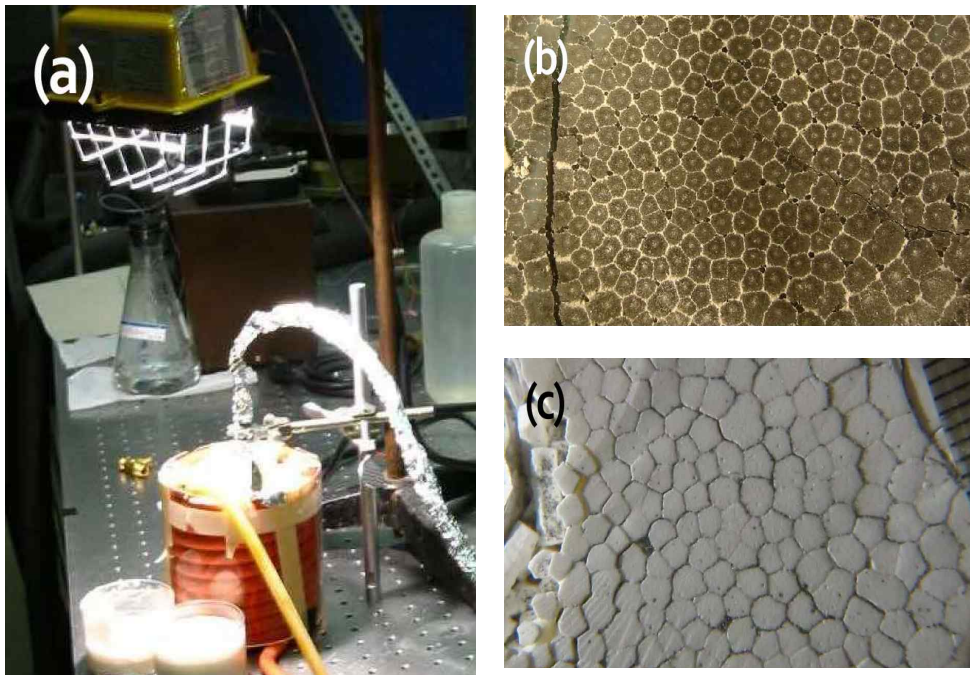


Fig. 8. Experiment of used to corn crach(Goehring 2008).

- (a):Drying setup, (b):Strach counterpart left on glass dish,
- (c):Cross section of partially dissected strach sample.

전분 위에 램프를 이용하여 건조속도 조건을 통제하며 진행된다. 전분 실험은 여러 통제 조건을 통하여 주상절리 형성에 영향을 주는 요소를 찾아가기 시작하는 중요한 실험이다.

냉각속도가 느리면 결정의 크기가 커진다는 사실은 익히 알고 있으며, 불변의 진리와 같다. 이러한 이론을 주상절리의 형성과 접목하여, 기둥의 크기 또한 냉각속도에 따라 영향을 미칠 것으로 예상하였다. Muller(1998b)는 주상절리 형성은 물질의 확산도에 따라 달라질 것이라 생각하였고, 결국 냉각률이 형성되는 기둥의 크기에 영향을 준다고 생각하였다. 결국, 느린 냉각은 기둥의 직경이 굵거나(Grossenbacher and McDuffie, 1995), 단면적이 큰(Toramaru and Matsumoto, 2004) 주상절리를 형성한다. 다르게 설명하면 냉각속도가 빠를수록 면의 개수가 적으며, 건조 속도가 빠르면 오각형이 많고 건조속도가 느리면 육각형이 많아진다는 결론에 도달하게 된다. Goehring *et*

al.(2009)은 매우 얇은 용암류나 매우 천천히 냉각되는 용암의 경우, 주상절리는 전혀 형성되지 않거나 형성되어도 주상절리의 직경은 용암류 두께와 유사하고, 두꺼운 용암류에서는 용암류의 두께와는 상관없이 주상절리가 만들어진다고 결론을 내렸다.

일반적으로 용암의 냉각표면은 수평이고, 표면에 직각 방향으로 안쪽을 향하여 굳어져 간다. 절리는 열 수축에 의해 발생한 스트레스를 해소하는 수단으로, 냉각된 곳으로부터 스트레스를 해소하면서 안쪽으로 진행하게 된다. 균열의 방향은 중력 방향과 무관하며, 표층의 패턴은 불규칙하게 형성되지만, 내부로 진행될수록 정형화되어 간다. 결론적으로 균열의 방향은 중력과 무관하게 냉각표면에 수직 방향으로 배열된다(Goehring, 2008).

Fig. 5에서와같이 상부 켈러네이드와 하부 켈러네이드가 만나는 곳에서 기둥의 형상이 온전치 못하고, 엷히는 곳에서 엔테블러취가 생성된다. Lore *et al.*(2000)은 표층에서 용암 내부로 물이 스며들어 냉각속도가 갑자기 증가하게 되면, 엔테블러취가 생성된다고 보고했다. 물이 침투하는 원인으로 갑작스러운 호우나, 용암류에 의한 강물의 흐름 변화로 인하여 용암류 위로 넘쳐 흐른 것으로 생각할 수 있다. 만약 이러한 환경이라면 주상절리가 형성되는 동안 켈러네이드 사이에 엔테블러취가 몇 번이고 생성될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 이론은 사막에서의 엔테블러취 존재에 대해 증명할 수 없다는 문제를 안고 있다.

3. 주상절리 형성에 미치는 요인

주상절리는 2장에서 설명한 바와 같이 마그마 또는 용암류가 응결과 수축 과정을 통해 형성된다. 주상절리의 형성을 좌우하는 요인은 매우 복잡적이고 다양한 요인에 의하여 통제되며, 통제요인들의 상호작용에 의하여 냉각률과 크기가 결정된다.

Hetényi *et al.*(2012)에 의하면 주상절리 형성에 미치는 가장 큰 요인은 다음 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째는 마그마 또는 용암류의 형상이다. 지표로 노출된 용암류는 지표면의 지형 구조에 따른 흐름을 보여준다. 지형의 형태에 따라 흐르기도 하고 가로 막히면서 용암류의 두께도 달라지게 되며, 이

러한 영향으로 냉각률은 차등을 보이게 된다. 냉각률의 차등은 곧 주상절리의 기둥 크기에 영향을 미치게 되며, 같은 지역에서도 서로 다른 크기와 방향을 가진 주상절리가 발달하게 된다. 둘째는 화학조성이다. 암석의 화학조성에 따라 점도, 결정 등은 달라진다. 주상절리를 구성하는 암석의 점성이나 결정들의 상태에 따라 냉각률은 차등을 보이게 된다. 지표를 흐르는 용암류의 점성이 높을 경우 용암류의 두께는 점차 두꺼워지게 되며, 반대로 점성이 낮을 경우에는 용암류의 흐름이 상대적으로 빠르기 때문에 용암류의 두께는 얇아지게 된다. 이러한 차이는 주상절리 형태를 결정짓는 요인 중 하나인 냉각률에 영향을 주게 되며, 주상절리 기둥의 크기가 서로 다르게 나타나는 결과를 보여준다.

Hetényi *et al.*(2012)는 Fig. 9와 같은 계획으로 주상절리의 크기에 영향을 미치는 요인들에 대해 연구하였으며, 실측한 자료를 바탕으로 검증하였다. 결과적으로 주상절리의 균열, 즉 기둥면의 폭(L)에 직접적인 영향을 미치는 것

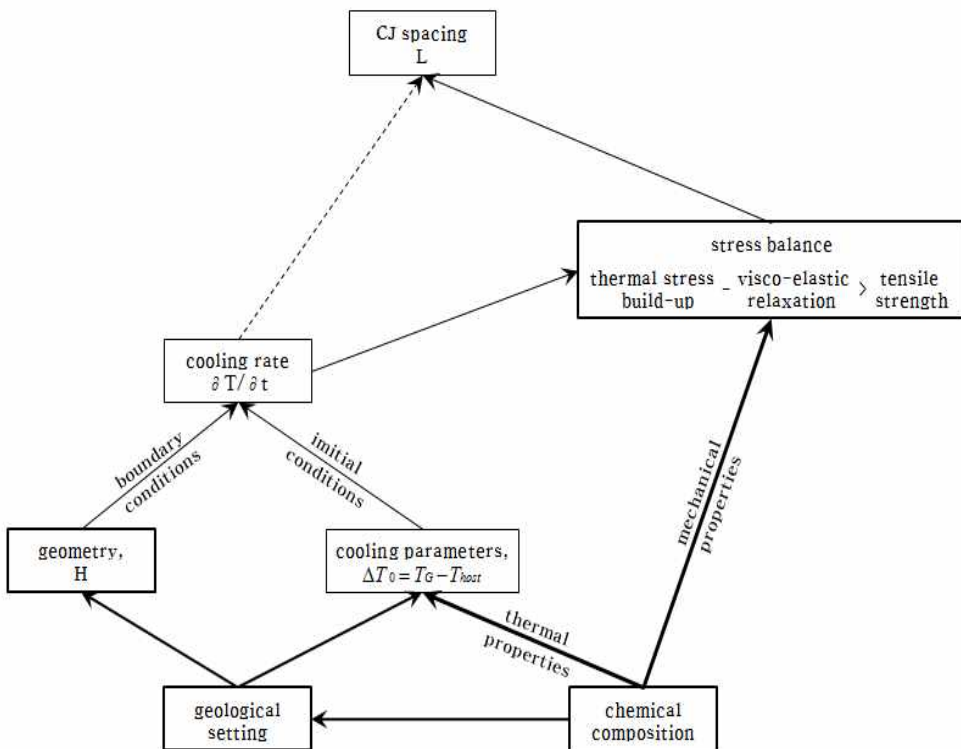


Fig. 9. Factors in the formation of columnar joint(Hetényi *et al.*,2012).

은 응력의 균형이며, 응력은 냉각률에 직접적인 영향을 미친다. 냉각률은 직·간접적으로 기둥면의 폭(L)에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 냉각률은 초기 조건으로 냉각한계와 부수적인 조건으로 기하학적인 구조의 영향을 받는다. 종합하여 보면, 주상절리의 크기는 화학조성과 산출상태에 의하여 결정되며, 이러한 요인이 냉각률과 균열을 형성하게 하는 응력에 영향을 준다.

4. 주상절리의 형태

1) 화산암의 산상에 따른 형태

Nishiwaki and Hirotsishi(2009)는 용암류에서 형성되는 주상절리의 형상을 4가지로 분류하였다(Fig. 10). 네 가지 형상은 쉘브론(chevron), 로제트(rosette), 팬(fan), 배이신(basin)으로 쉘브론 형상은 복수의 냉각면에서 냉각될 때, 주상절리가 각각의 냉각면으로부터 독립적으로 형성된 것이고, 로제트 형상은 한 지점에서 용암이 분출할 때 표면부터 냉각되어 분출지점에서 표면을 향해 구형 내지 반구면의 표면을 향해 생성되는 형상이다. 팬 형상은 용암류가 계곡을 채운 상태에서 대기로부터 냉각되었을 때, 계곡바닥을 향해 생성되는 것이고, 배이신 형상은 등온도면이 완만한 곡선을 이룰 때 생성되는 것으로 알려져 있다.

2) 화산암의 크기에 따른 형태

주상절리는 용암류의 크기와 산상에 따라 다양한 형태로 형성된다. Fig. 11은 용암류의 크기와 산상에 따른 주상절리의 형태를 보여주는 모식도이다. 두께가 약 10m 이내의 단일 용암류의 경우 Fig. 11(a)와 같이 지면이나 공기와의 접촉면에 직각 방향으로 형성된다. 용암류의 점성에 따라 진행의 끝에서 형성되는 주상절리의 형태가 서로 다르게 나타나는데 지면을 따라 퍼져나가는 용암류의 점성이 클 경우에는 진행이 멈췄을 때 끝 부분이 완만한 호를 이루며 부채꼴 모양의 주상절리가 형성된다. 이러한 형성과정을 토대로 추정하면, 경주 읍천이나 울산의 강동 화암 주상절리는 점성이 큰 용암류가 바다를 만나 굳어지며 부채꼴 모양의 주상절리를 형성하였으며, 파도에 의한 침

식 등으로 상부 구조가 없어지며 지금의 모양을 보이고 있을 것으로 사료된다.

두께가 큰 용암류의 경우는 공기와 지면의 두 방향에서 용암류의 중심을 향하여 냉각이 진행되며, 냉각이 진행됨에 따라 절리가 내부를 향하여 형성된다. 이때 상부의 공기층으로부터 냉각되어 형성된 주상절리와 지표로부터 냉각되어 형성된 주상절리가 중심부에서 만나 Fig. 11(b)와 같은 형태의 주상절리가 형성된다. 때에 따라 상·하의 주상절리와는 방향과 크기가 다른 엔테블러취가 형성되기도 한다(Long and Wood, 1986). 점성이 큰 두꺼운 용암류의 경우 상하 방향의 주상절리와 함께 좌우 방향에서도 냉각이 진행되며 수평 방향으로의 주상절리가 형성되기도 한다.

Fig. 11(c)는 용암호에서 나타나는 주상절리의 모식도이다. 용암호에서는 가운데 부분의 깊이가 깊어 천천히 냉각되는데, 이 때 기둥의 굵기와 크기가 큰 주상절리가 형성되고, 호의 가장자리로 갈수록 주상절리의 크기는 작아진

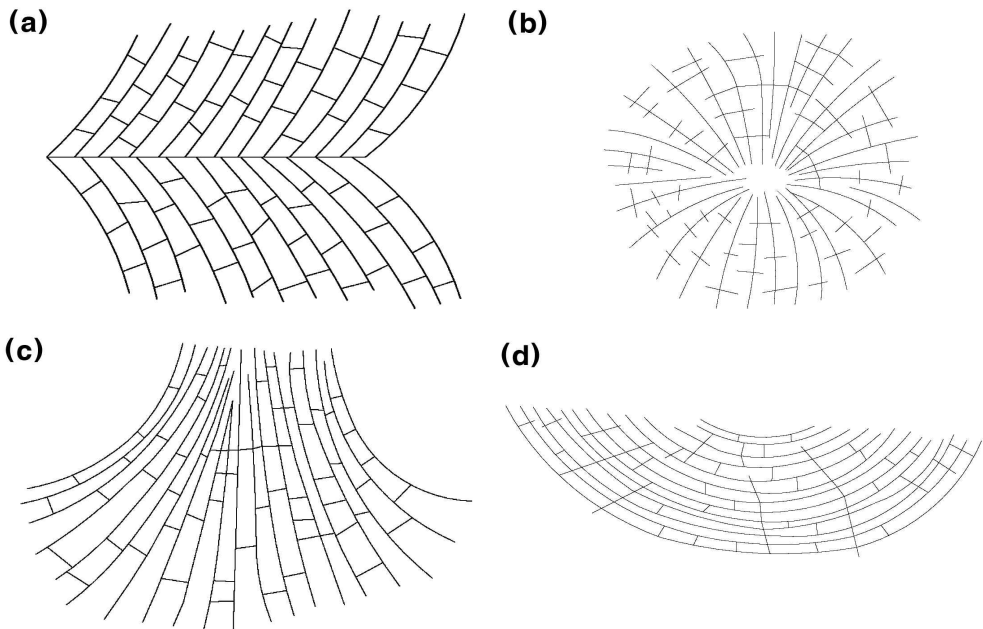


Fig. 10. Columnar joint patterns(Nishiwaki and Hirotsishi, 2009).

(a)chevron, (b)Fan, (c)Rosette, (d)Basin

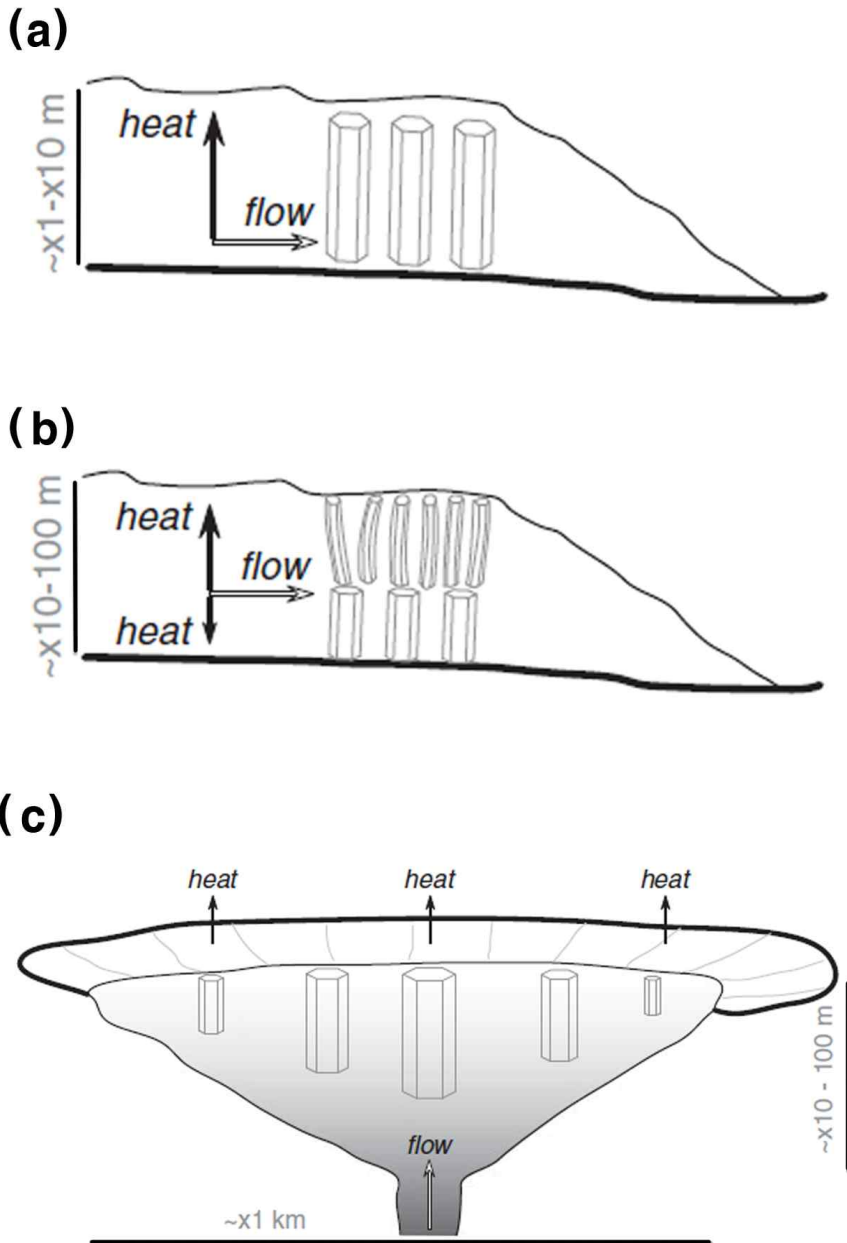


Fig. 11. Schematic drawing of the different geological contexts and geometries of columnar joint (Hetényi *et al.*, 2012). (a) thin lava flow (<math><10\text{m}</math>), (b) thick lava flow (10-100m), (c) lava lake, (d) lava dome, (e) dyke or sill

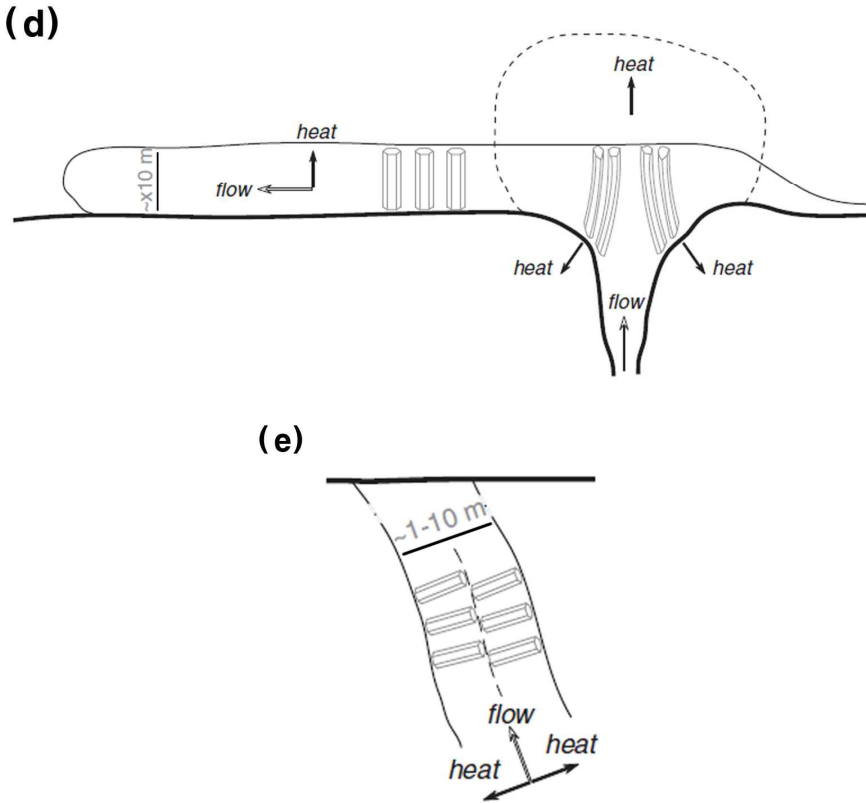


Fig. 11. Continued.

다. 용암돔의 주상절리는 점성이 큰 산성마그마에서 발달하며, 돔의 중심을 향하여 발달하는 특징을 지닌다(Fig. 11d). 암맥에서의 주상절리는 주변의 암석이 이미 굳어 있으므로 접촉면과 수직 방향으로 발달하게 된다. 폭은 대체로 10m 이내로 마치 장작더미를 쌓아 놓은 듯한 모습을 보인다(Fig. 11e).

용암류 또는 화산회류의 점성에 따라 주상절리의 형태도 다르게 나타난다. 점성은 SiO_2 의 함량에 따라 달라지는데, 일반적으로 SiO_2 의 함량이 높을수록 점성은 높아진다. 따라서, 현무암질 용암류는 Fig. 11(a)와 같은 형태로 주상절리가 발달하며, 말단부로 갈수록 크기만 줄어드는 형태를 보이게 된다. 유문암질 용암류 또는 화산회류의 경우 점성이 상대적으로 높으며, 말단부로 갈수록 부채꼴 모양의 형태로 주상절리가 발달하게 된다(Fig. 12).

5. 냉각률에 따른 주상절리 형성

Toramaru and Matsumoto(2004)의 연구에 의해 주상절리 다각형의 평균 단면적은 냉각률과 반비례한다는 사실이 밝혀졌다. 전분혼탁액을 이용한 실험에서 램프의 높이를 달리하며, 냉각률을 조절하여 다각형의 크기가 다르게 나타남을 보여주었고 결과적으로 램프가 가까워지면 빠르게 굳어지며 크기가 작아지고, 램프를 혼탁액과 멀어지게 할수록 다각형의 크기가 커짐을 보여주었다.

이러한 실험의 결과를 바탕으로 주상절리의 크기는 냉각률에 의해 결정된다. 주상절리가 형성할 때, 주변에 급속하게 냉각시킬 수 있는 요인인 수분의 급격한 첨가나 주변의 온도가 매우 낮은 곳에서는 냉각률이 더욱 높아지며 크기가 작은 주상절리를 형성한다.

주상절리의 크기를 결정하는 냉각률은 SiO_2 의 함량과 용암류의 두께에 의하여 지배된다. 일반적으로 산성암류가 염기성암류에 비하여 기둥의 크기가 크게 형성되는 것으로 알려져 있다. SiO_2 의 함량에 따라 분출온도와 점성이 결정되는데 현무암질의 분출온도는 $1,160^\circ\text{C}$ 정도이고, 유문암질의 분출온도는 900°C 정도이며, 점성은 SiO_2 의 함량이 증가함에 따라 높아진다. 이에 따라 용

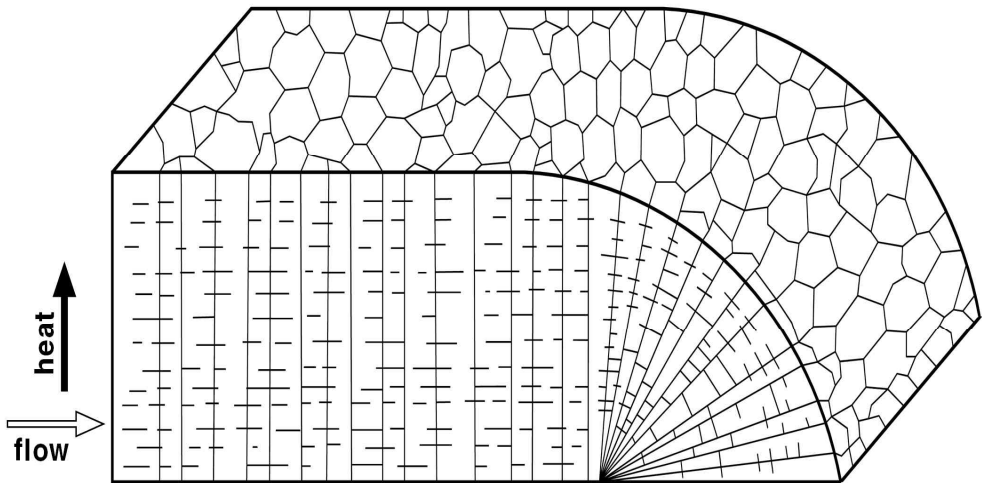


Fig. 12. Schematic geometry of columnar joint for thin lava flow(high viscosity)(modified of Ahn, 2014b).

암류의 두께는 SiO_2 의 함량이 높을수록 두꺼워지고, 진행속도는 느려지게 된다. 따라서, 유문암질 용암류는 초기온도가 현무암질 용암류에 비하여 상대적으로 낮음에도 불구하고, 점성에 의하여 두께가 두꺼워져 현무암질 용암류에서 형성된 주상절리 보다 냉각률이 낮으며, 주상절리의 기둥의 폭은 상대적으로 크게 발달하게 된다. 이는 분출하는 용암류에서 일반적으로 통용되는 이론이며, 지질학적 환경 또는 지형적 환경 등 변수에 의하여 다른 결과가 나타날 수도 있다.

Ⅲ. 연구지역의 지질

본 연구지역은 전라북도 부안군, 전라남도 신안군, 고흥군, 여수시, 경상남도 남해군, 사천시, 고성군 그리고 경상북도 포항시에 이르는 한반도 남부해안 지역이며 1:250,000도폭 광주, 목포, 여수가 이에 해당한다. 1:50,000 도폭은 위도, 자은도, 입자도, 만재도, 소록도, 고흥, 거점도, 외리로, 여수, 개도, 서상, 삼천포, 미조, 구룡포 도폭이 해당되나, 자은도, 이자도, 만재도, 소록도, 고흥, 외리로, 여수, 개도, 미조 도폭은 아직 발간되지 않았다. 한국지질자원 연구원에서 2014년부터 서비스 중인 지질자원종합시스템(<http://mgeo.kigam.re.kr/>)에서도 현재 해당 부분의 도폭 서비스는 없는 실정이다.

연구지역 대부분은 Fig. 13에서 보이는 바와 같이 중생대 백악기의 유문암과 유문암질 응회암 및 안산암과 안산암질 응회암으로 유천층군에 속한다(한국지질자원연구원, 2002). 다만, 구룡포지역은 신생대 지층이 주를 이루고 있다(과학기술부, 1998). 전라북도 부안군 적벽강지역은 중생대 백악기 격포리층과 곰소유문암이 서로 분출 또는 관입의 형태로 혼재되어 있다(한국지질자원연구원, 2013). 경상남도 남해 일부 지역과 삼천포, 고성 일대는 경상계 하양층군의 함안층 내지 진동층으로 기재되어 있다(한국지질자원연구원, 2002).

1. 전라북도 부안

부안지역은 1:50,000 지질도폭 부안, 줄포, 위도·하왕등도, 장자도 도폭에 해당하는 지역으로 주상절리가 위치한 변산반도 서쪽 지역은 위도지역에 해당한다. 최근 부안일대 지질도폭 설명서가 새롭게 발간되었다.

변산반도 일대의 중생대 백악기 지층은 부안화산암으로 명명되어 있다. 부안화산암은 화산분출 유형, 입자크기, 화산쇄설암을 구성하고 있는 광물 조합 및 암편 유형, 산상 등을 근거로 하여 천마산 응회암, 연도응회암, 우동체응회암, 석포응회암, 격포리층, 곰소유문암, 유정재응회암, 변산응회암, 삼예봉응

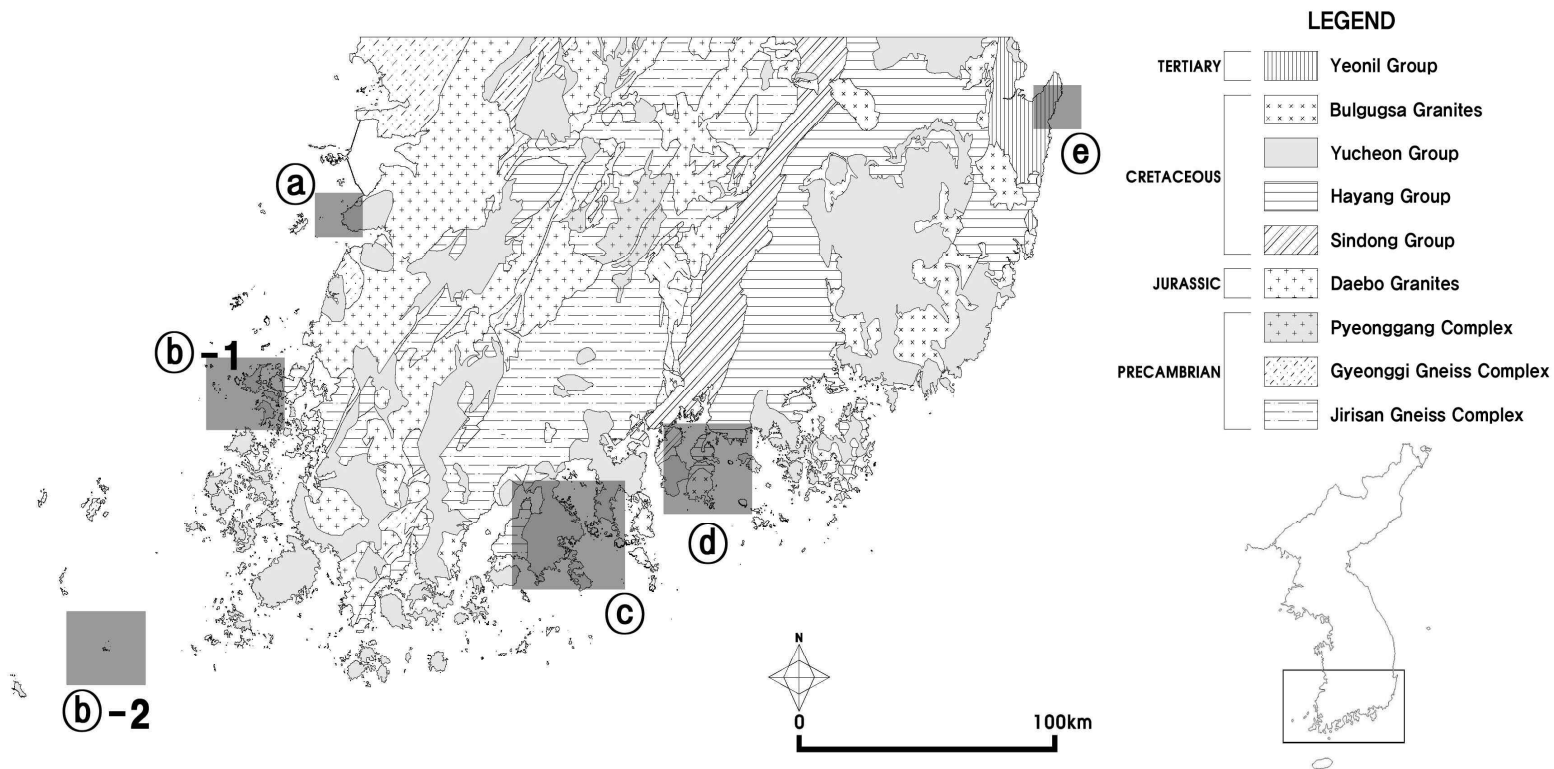


Fig. 13. The geology map of study area. (a) Buan; Jeokbyeokgang, (b)-1 Shinan; Ji-do, Jeung-do, Imja-do
 (b)-2 Shinan; Manjae-do, (c) Goheung-Yeosu, (d) Namhae-Sacheon-Goseong, (e) Pohang; Guryongpo.

회암으로 구분되며, 주상절리가 관찰 되는 지역의 지질은 곰소유문암으로 기재되어 있다.

대상 지역은 격포분지로 선캠브리아기 편마암과 백악기의 석영몬조나이트가 기반을 이루고 있으며, 화산쇄설물이 풍부한 쇄설성 퇴적암인 격포리층이 발달하고 있다(Fig. 14). 그리고 하부에 현무암질이나 안산암질의 유입과 응회암으로 된 화산 복합체가 놓여 있으며, 위로는 산성의 화산분출물이 분포한다(조규성 등, 2012).

산성의 화산분출물은 1:50,000 지질도폭에 곰소유문암으로 명명되어 있으며, 곰소유문암은 석포응회암, 우동제응회암, 연동응회암, 천마산응회암과 격포리층을 덮거나 관입하고 있다. 특히 주상절리가 분포하는 지역은 사암 또는 이암 등을 포함하는 격포리층을 하부로 하여 주상절리가 상부에 위치하거나, 퇴적층을 관입하는 형태로 존재한다(Fig. 15). 암상은 괴상 내지 유상구조를 보이며, 5cm이내의 암편들을 일부 포획하고 있다. 최석원 등(2001)은 곰소유문암 중 주상절리를 이루는 암석을 적벽강유문암으로 구분지었다. 적벽강유문

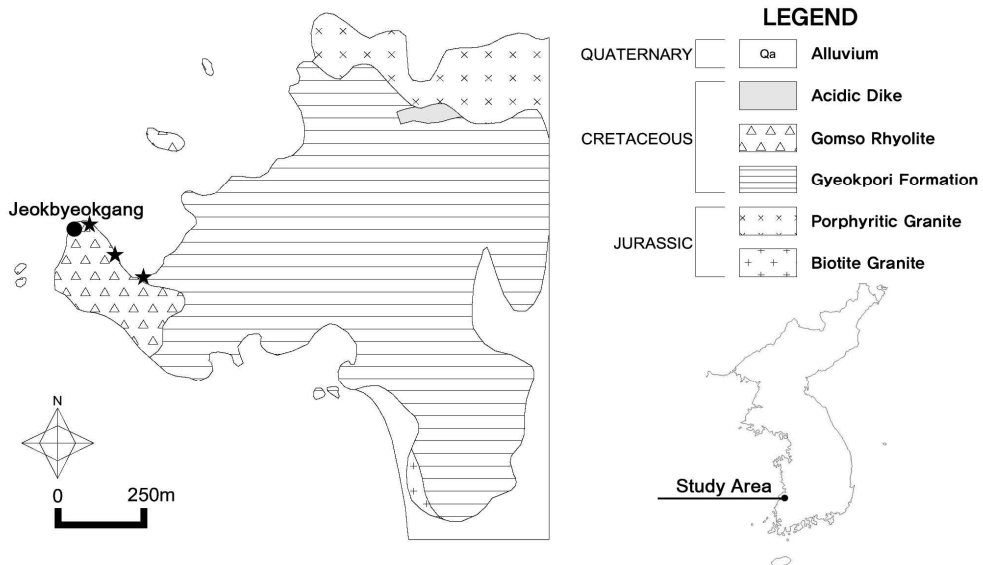


Fig. 14. The geology map of Gyeokpo-ri in Buan.
(★ : Sampling site)

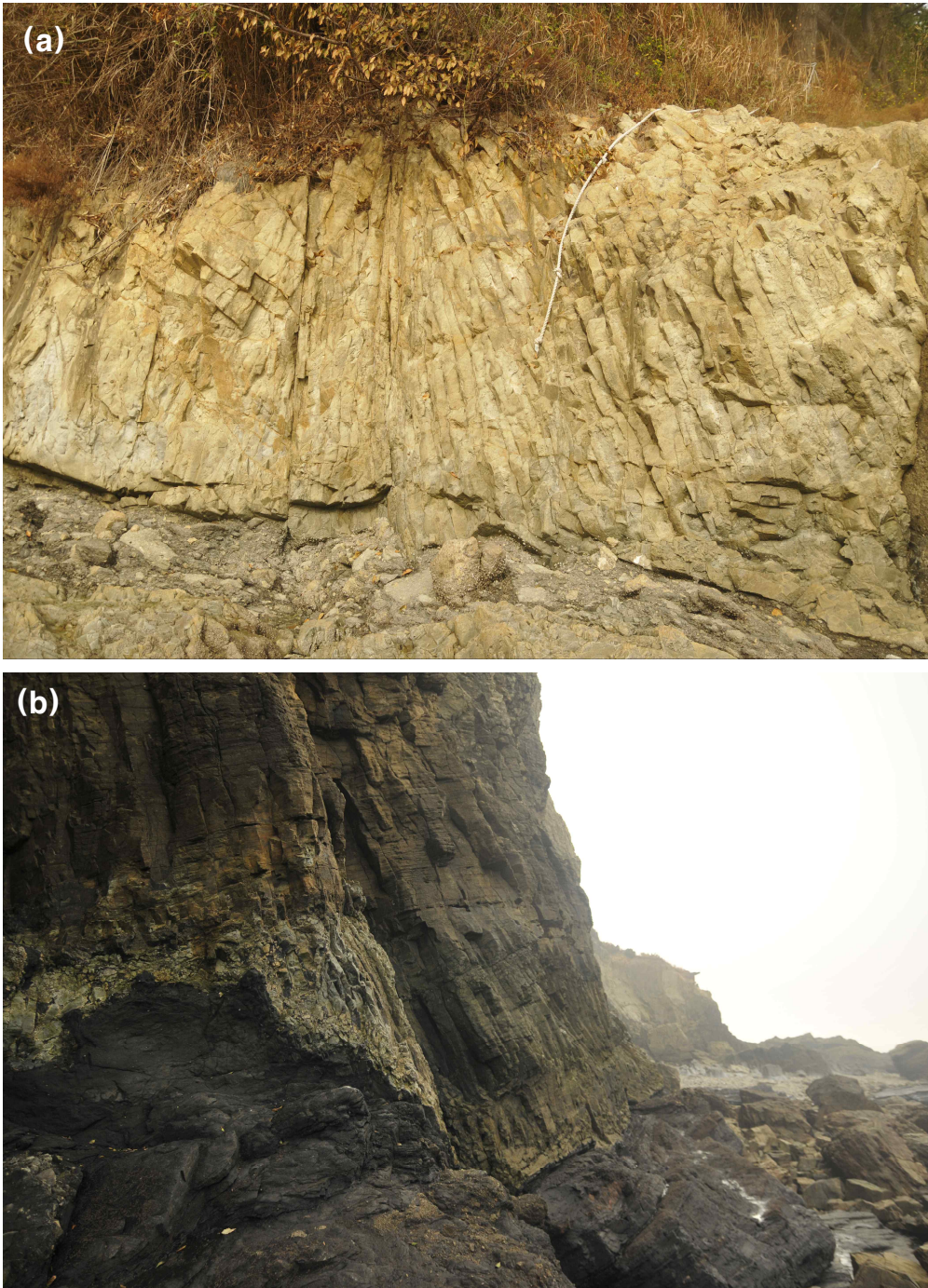


Fig. 15. Photographs of Jeokbyeokgang area.
(a)Gomso rhyolite (b)Gyeokpori formation

암은 반원형의 형태로 주상절리 및 유동구조의 발달 정도와 흑색 퇴적물의 협재 양상을 기준으로 주상절리 발달 유문암(하부유문암)과 유동구조 발달 유문암(상부유문암)으로 나누었다. 하부유문암은 약 1.5~30m의 두께를 가지며 백색이었으나 풍화때문에 담홍색을 띤다. 유동방향에 의해 수직 방향의 주상절리가 발달하며, 주상절리의 틈에 흑색 세일이 유문암편을 포획하여 주입되어 있다. 주입된 세일은 혼펠스화 되어 있으며, 상부로 석영 세맥으로 전이된다(최석원 등, 2001). 그리고 해안을 따라 일부 지역에서 페퍼라이트가 관찰되기도 한다. 이 페퍼라이트는 주상절리가 발달된 유문암의 접촉부에 주로 형성되어 있는데, 규모는 수mm에서 수십m에 이른다. 이곳의 페퍼라이트는 유문암의 관입에 따른 부분적인 수증기 폭발 내지는 수증기-마그마 분출과 관련된 것으로 보인다(조규성 등, 2012).

곰소유문암의 하부층인 격포리층은 격포리 일대의 퇴적암류를 지칭하는 것으로 서쪽과 북쪽은 쥐라기 흑운모화강암과 반상화강암을, 남쪽은 하위 석포 응회암을 부정합으로 피복하고 있다(한국지질자원연구원, 2013). 연구지역에서의 격포리층은 뚜렷하게 층리를 보이고, 단층 등의 지질구조도 관찰이 가능하다. Fig. 15에서 보는 바와 같이 격포리층은 흑색 내지 암회색의 색을 띠고 상부의 곰소유문암과 협재되어 나타난다.

주상절리를 구성하는 암석은 유문암으로 육안으로 표면관찰을 했을 때, 특별한 용결구조를 보이고 있지 않으며, 풍화가 진행되어 담황색의 색을 띠고 있다. 암편은 수 mm에서 약 5cm내외의 크기로 분포하며, 박편제작을 위하여 암석을 절단하고 단면을 관찰했을 때, 암편들의 배열이 일정하지 않고 방향성을 보이지 않은 것으로 보아, 압력에 의한 신장 등과 같은 물리적 힘은 크게 가해지지 않은 것으로 판단된다. Fig. 16는 곰소유문암의 박편사진으로 기질부는 미정질이고, 사장석은 5mm내외의 크기로 존재하여 알바이트 쌍정을 보이며, 정장석 또한 5mm내외의 크기로 일부 변성을 받은 흔적이 관찰된다.

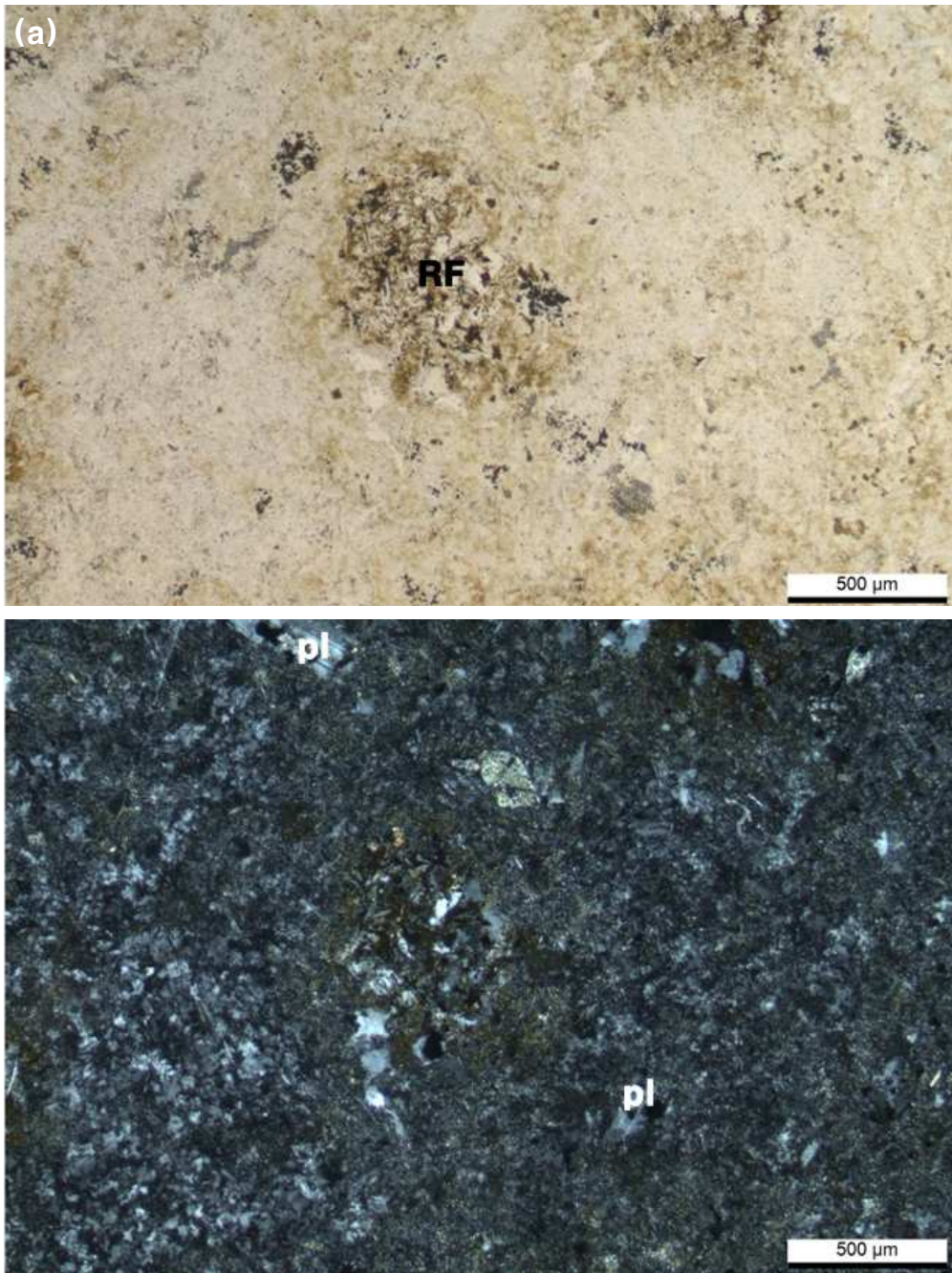


Fig. 16. Microphotographs of rhyolite on the Jeokbyeokgang area.
(RF: rock fragment, pl: plagioclase)
(a): open nicol, (b): cross nicol

2. 전라남도 신안

신안지역은 중생대 백악기에 형성된 암석으로 이루어져 있다. 대부분 백악기 후기 산성화산암류가 분포하고 있으며, 1:250,000 광주 지질도폭 설명서(과학기술부, 1997)에 의하면 도폭의 지역 내에 나타나는 산성화산암류는 대부분 다양한 조직과 구조를 보여주는 응회암 및 응회암질 화산암이고, 일부는 유문암질 암석으로 구성되어 있다. 특히 도폭 내 신안지역에 분포하는 화산암류는 사옥도, 장사도, 재원도, 지도 등지에 분포하며, 주로 응회암과 응회각력암으로 구성되어 있다(Fig. 17).

1:250,000 목포·여수도폭 지질보고서(한국지질자원연구원, 2002)에 의하면, 육지와 비교적 멀리 떨어진 흑산도는 선캠브리아대 편암류 및 편마암류가 분포하고 있다. 편암류는 흑산도, 대장도, 대둔도 일대에 소규모로 분포하고, 주로 사층리가 발달하는 백색 내지 담회색의 분급도가 높은 세립 내지 조립 사암과 역암 기원의 암석으로 구성되어 있다. 흑산도에 분포하는 편마암류는 편암류에 의하여 피복되어 있고, 쥐라기 화강암류에 의하여 관입 당하고 있다.

신안의 서쪽지역인 가거도는 백악기 경상누층군의 퇴적암과 이를 관입또는 분출한 중성화산암류와 산성화산암류 및 제4기 충적층으로 구성되어 있다. 섬 대부분은 중성화산암류가 넓게 분포하며, 데사이트질용결응회암과 유문암질암으로 구성된 산성화산암류가 중성화산암류를 일부 지역에서 피복 또는 관입하고 있다(김진섭 등, 1997).

1) 증도

전라남도 신안군 증도면의 주 섬으로 동경 126°09', 북위 35°00'에 위치하며, 지도와 사옥도를 통하여 육지와 연결되어 있다. 증도는 원래 두 개의 별개의 섬으로 있었으나, 염전개발로 현재 하나의 섬으로 되었다.

Fig. 17과 같이 증도는 전체적으로 중생대 백악기 후기의 유문암 및 유문암질 응회암이 분포하고 있으며, 충적층은 간척으로 인하여 형성된 곳이다. 이 지역에 분포하는 응회암은 크게 두 가지로 래피리 응회암과 용결 응회암이다

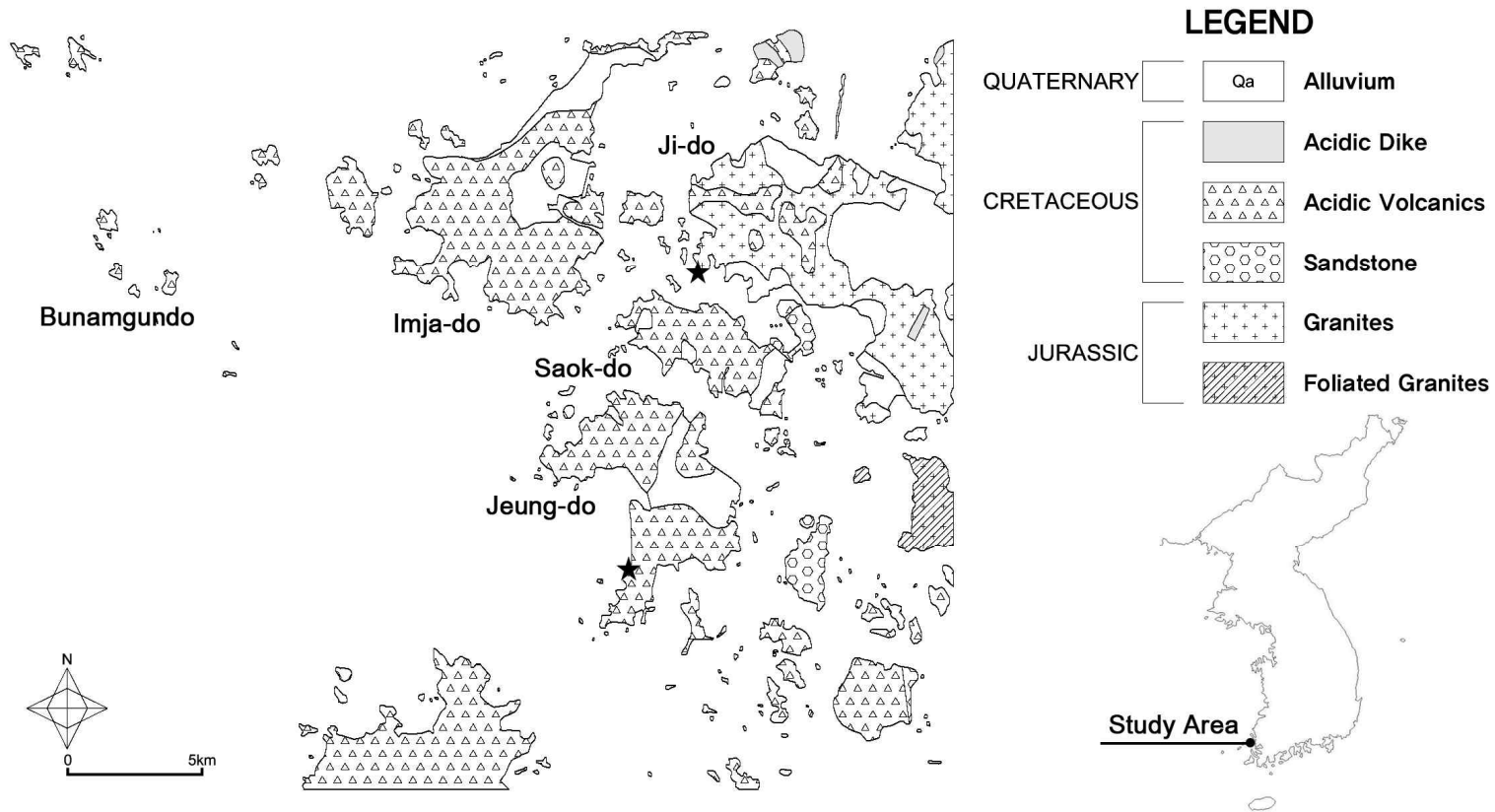


Fig. 17. The geology map of Shinan-gun(★: sampling site).

(Fig. 18). 래피리 응회암은 지도와 증도사이의 해안 절벽과 우전해수욕장 부근에서 관찰되며, 직경 1m 내외의 암괴가 산발적으로 분포하는 특징을 보여 준다(안전상과 손정모, 2015). 용결응회암은 증도 내의 주상절리를 이루는 주

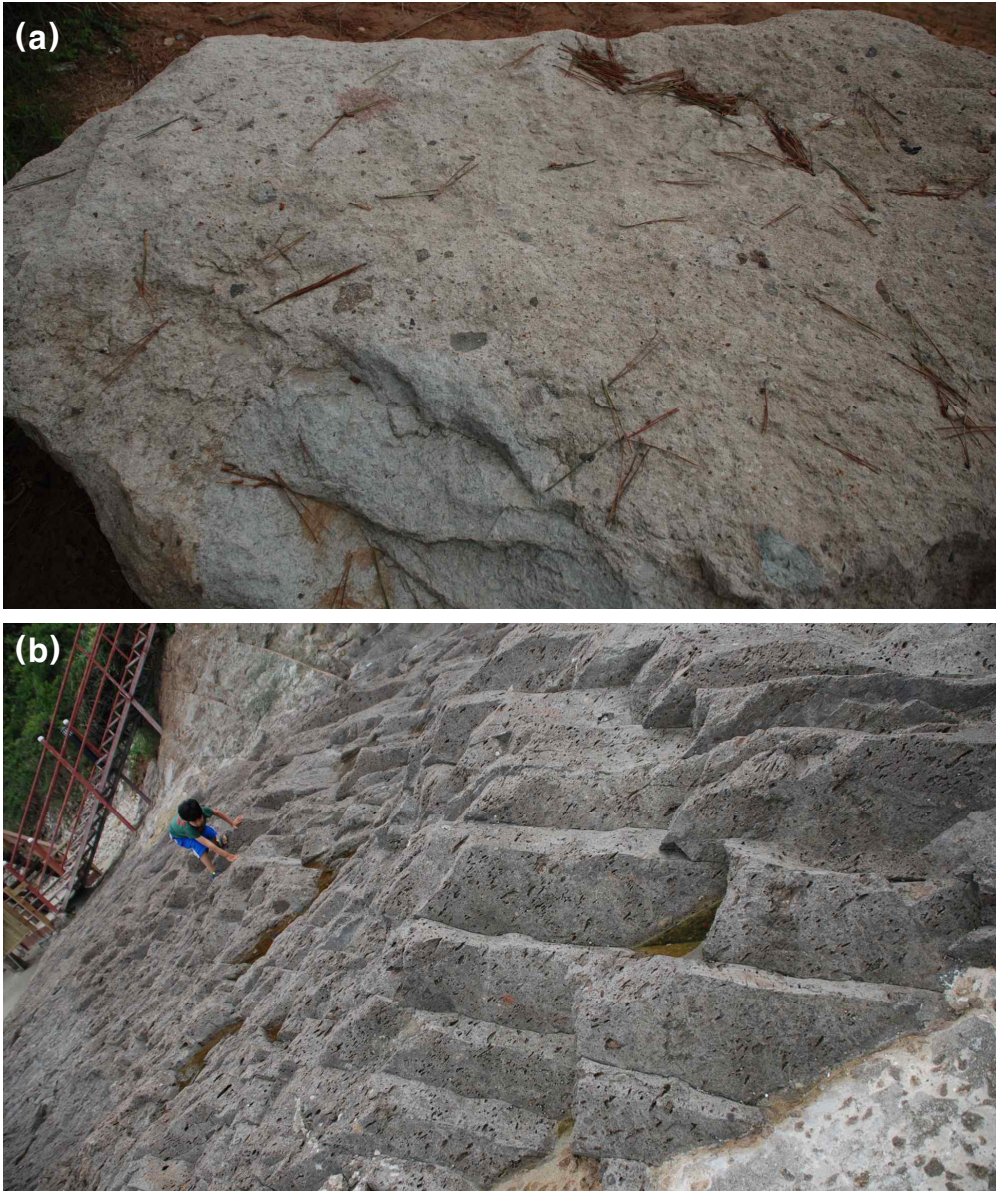


Fig. 18. Photographs of tuff in Jeung-do.

(a): lapilli tuff, (b): welded tuff

암석으로 우전해수욕장 남측 리조트 부근의 파식대지에서 관찰된다. 암편은 두가지 종류가 분포하는데, 하나는 응회암 내부에서 일정한 방향성을 지니고, 상하로 압착되어 신장되어 있으며, 화산활동과 함께 분출된 마그마가 공기 중에서 부분적으로 고결, 강하하여 자체 압력에 의하여 납작하게 눌린 것으로 사료된다. 다른 종류의 암편은 10cm내의 화강암편과 중성암류가 포획된 것으로 이 종류의 암편은 주상절리의 형성에 약간의 영향을 미쳤을 것으로 보고되고 있다(안건상과 손정모, 2015).

본 지역은 섬의 특성상 다양한 지형 및 지질 구조를 보이며, 부분적으로 퇴적암이 화산암류들과 혼재하여 분포하기도 한다. 퇴적암류가 분포하는 지역은 증도의 남부 해안지역으로 이암과 사암, 역암 등이 분포하며, 이 지역에서는 층리, 사층리, 점이층리 등의 퇴적구조 또한 존재한다(김해경과 오강호, 2013). 이 외에 포트홀, 해안타포니 등의 파식작용에 의한 지형구조 또한 관찰되고 있다.

증도에 분포하는 화산암류 중 용결응회암의 시료를 채취, 암편을 절단하여 박편을 제작하였다. 편광현미경하에서 관찰된 용결응회암의 박편은 기질부가 은정질 내지 미정질의 석기에 석영과 장석이 분포하며, 흑운모는 변질되어 녹니석화 되어 있다. 일부 응회암내부에 포획되어 있는 암편에 존재하는 석영들이 신장되어 성장한 모습도 관찰된다(Fig. 19).

2) 지도

지도는 전라남도 신안군 지도읍에 소속된 섬이었으나, 현재는 연륙교로 육지와 연결되어 있다. 동경 126°13', 북위 35°05'에 위치한 본 섬은 도폭상 입자도 도폭에 속해 있으나, 현재까지 1:50,000도폭이 발간되지 않았다. 1:250,000도폭상 광주도폭(과학기술부, 1997)에 포함되어 있다. Fig. 17에서 보는 바와 같이 지도 지역은 중생대 쥐라기 화강암과 백악기 산성화산암체의 지질 구조를 보인다. 지도지역의 주상절리를 구성하는 암석이 백악기 산성화산암으로 유문암질응회암이다. 유문암질의 래피리 응회암은 1cm 내외의 홍색 장석을 포획하고 있다.

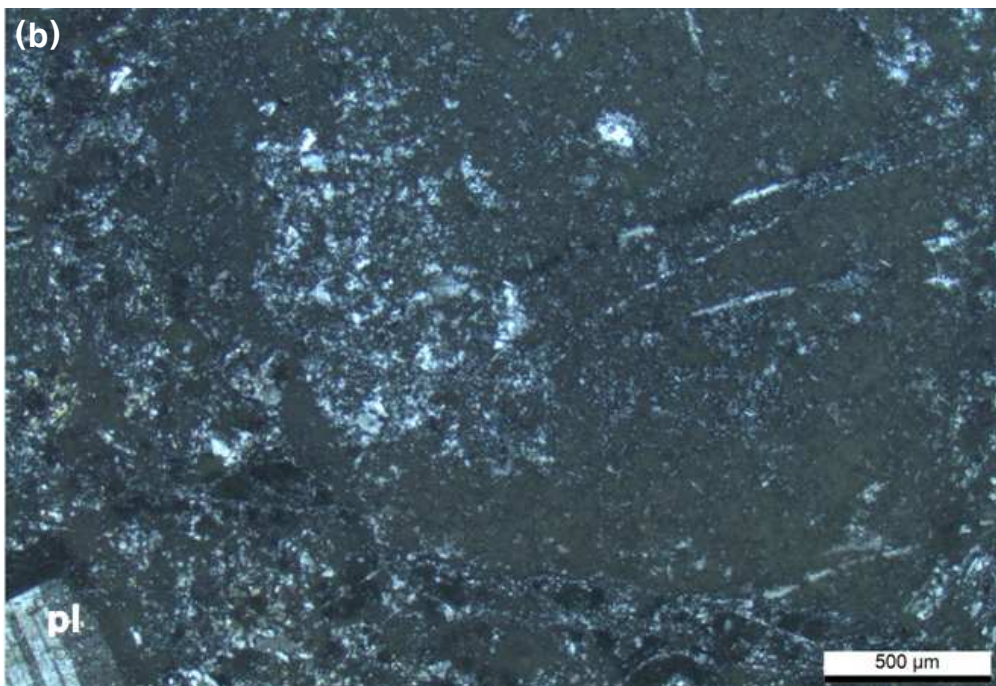
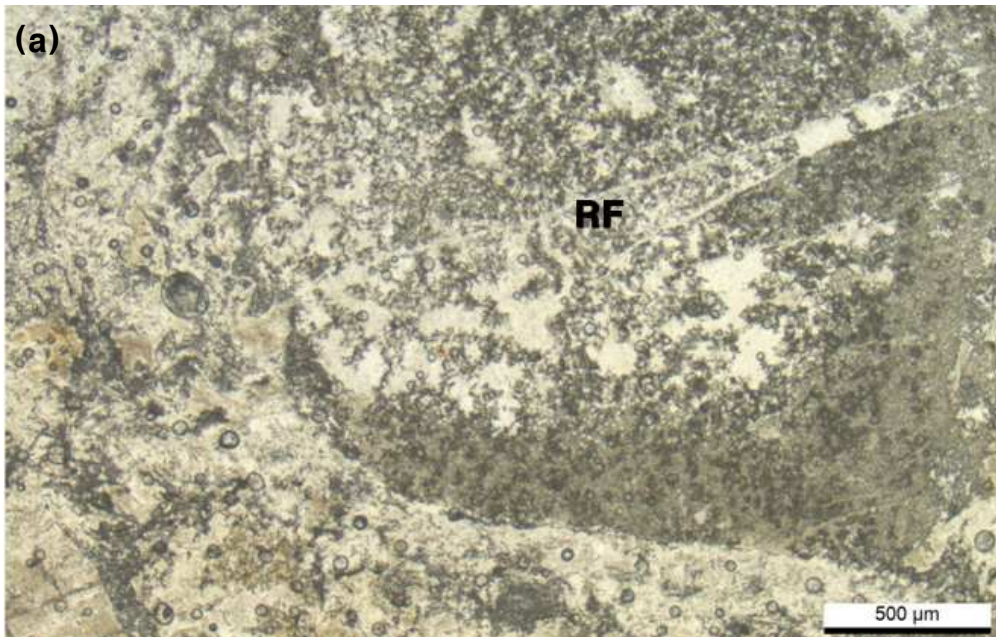


Fig. 19. Microphotographs of rhyolitic tuff on the Jeung-do area.

(RF: rock fragment, pl: plagioclase)

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

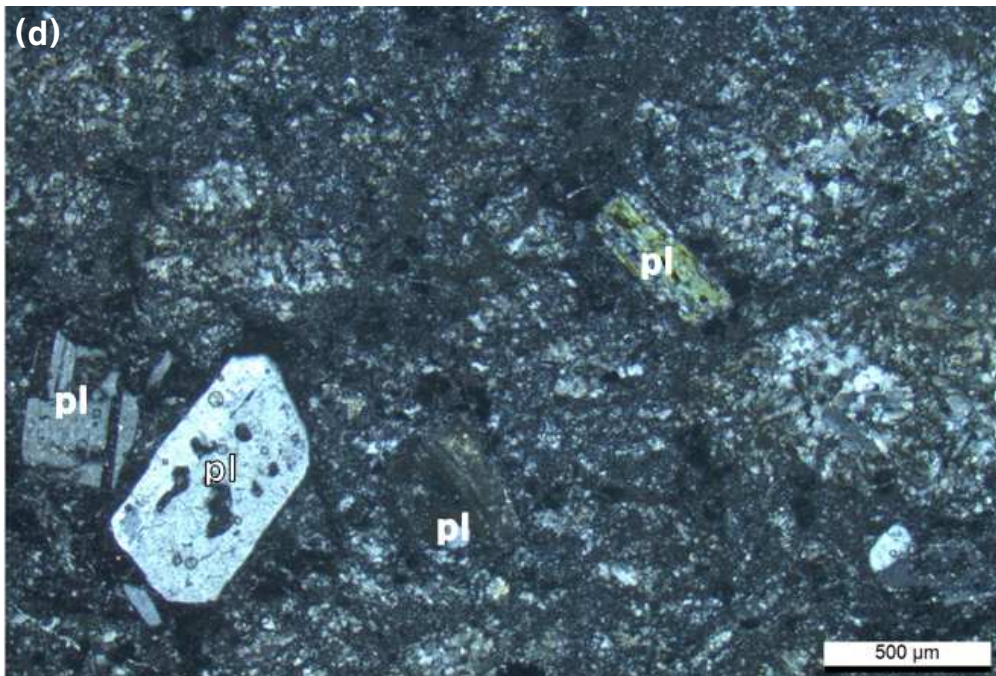
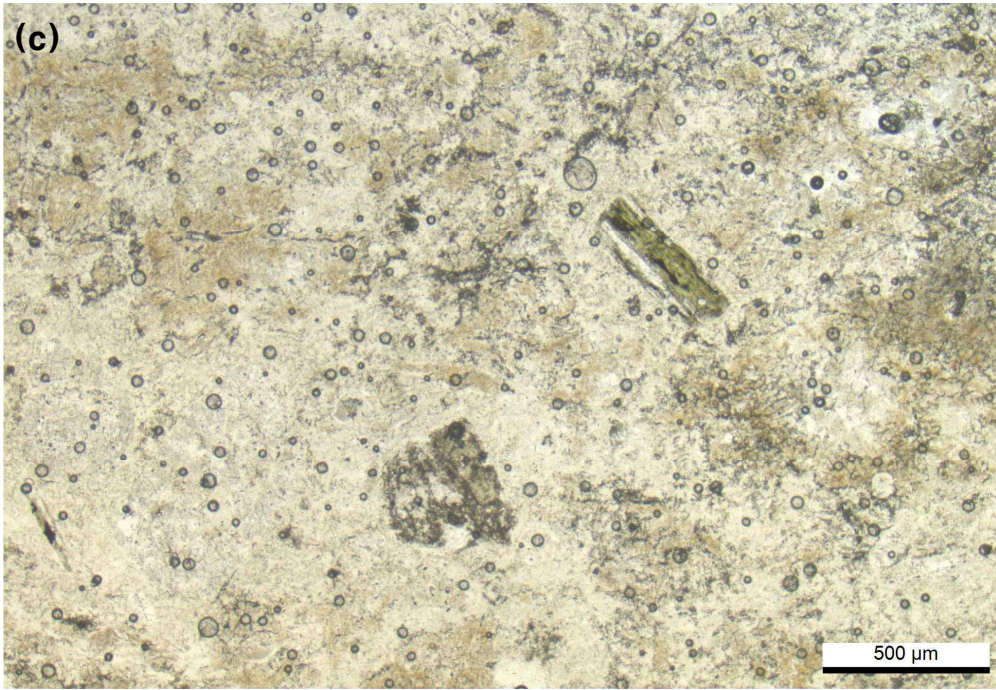


Fig. 19. Continued.

화강암류는 1:250,000 광주 지질도폭(과학기술부, 1997)에서 쥐라기 대보관 입암류 중 최상층인 화강암류로 기술되어 있다. 화강암류에는 육십령화강암, 남원화강암, 광주화강암으로 분류되며, 백악기 유문암질 응회암의 암편으로 포획되어 관찰되기도 한다.

지도에 분포하는 산성화산암체의 암석시료를 절단하여 암편을 제작하고, 이를 편광현미경으로 관찰하고자 박편을 제작하였다. 박편제작에 이용된 시료는 지도 남측의 농공단지에서 발견된 주상절리의 암석을 사용하였으며, 편광현미경 관찰결과 은정질 내지 미정질의 기질부에 타형의 석영과 자형 또는 반자형의 장석들이 분포하였다. 장석의 크기는 1mm 내외의 크기를 가진다 (Fig. 20).

3) 입자도

입자도는 전라남도 신안군 입자면에 속한 본 섬으로 동경 126°05', 북위 34°05'에 위치한다. 입자도에 대한 지형, 생태 등과 관련한 연구는 상대적으로 많으나, 지질학적 연구에 대한 체계적 결과를 접하기는 쉽지 않다.

1:250,000 광주 지질도폭 설명서(과학기술부, 1997)에 의하면 입자도 지질은 중생대 백악기 산성화산암류이다(Fig. 17). 산성화산암류는 대부분이 다양한 조직과 구조를 보여주는 응회암 및 응회암질 화산암과 부분적으로 유문암질 암석으로 구성되어 있다. 특히 도폭 내 신안지역에 분포하는 화산암류는 사육도, 장사도 재원도, 지도 등지에 분포하며, 주로 응회암과 응회각력암으로 구성되어 있다.

입자도 주변 무인도서들은 국토해양부와 환경부에서 무인도서연구를 통하여 지형, 생태, 개발여건 등에 관해 기술하고 있다. 전국 무인도서 환경조사 신안6권역 보고서(환경부, 2011)에 따르면, 입자도에 속한 무인도는 10여 개 내외로 크고 작은 섬들로 구성되어 있으며, 중생대 유천층군의 화산암류를 기반암으로 하고 있다. 특히 입자도 주변의 무인섬들 중 주상절리가 발달된 곳은 부남군도의 입모도와 굴도, 대노록도와 소노록도와 인접

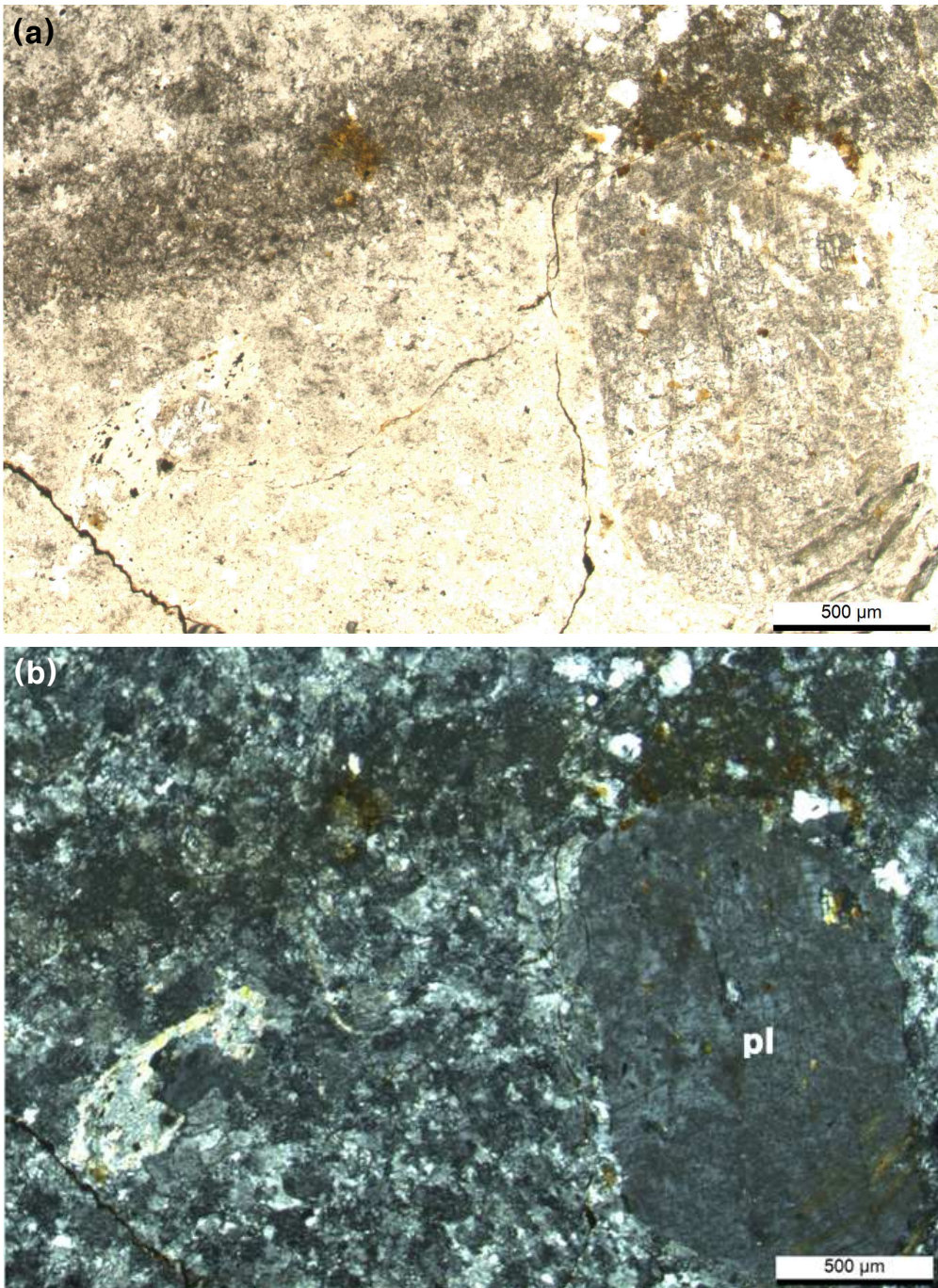


Fig. 20. Microphotographs of rhyolitic tuff on the Ji-do area(pl: plagiocase).
(a)open nicol, (b)cross nicol

한 무명2도이며, 3곳 모두 수직 방향의 주상절리가 아닌 기반암을 관입하여 발달한 수평 방향의 주상절리가 발달하였다. 임자도의 주변 지형은 조석의 차가 심한 해양의 파랑 영향으로 침식지형이 잘 발달하고 있다. 섬의 기반암 표면이 대부분 매우 울퉁불퉁하고, 화학적 풍화에 의한 타포니 등이 많이 분포하며, 차별풍화로 인한 버섯바위 등과 같은 지형구조도 잘 발달하고 있다.

4) 만재도

만재도는 전라남도 신안군 흑산면 만재도리에 속한 섬으로 동경 125°28', 북위 34°12'에 위치하고, 본 섬 주변에 8개 정도의 무인도가 있다.

만재도에 대한 지질학적 연구결과는 없으며, 지질도폭 설명서 또한 발간되지 않았다. 해당지역은 1:250,000 목포지질보고서이며, 특별히 해당되는 내용 또한 기술되어 있지 않다. 김진섭 등(1997)은 인근 가거도 지역에 대한 암석학적 연구를 통해 연구에서 가거도는 대부분 안산암질암으로 구성되어 있고, 일부 지역에서 데사이트질용결응회암과 유문암질암으로 구성된 것으로 보고하고 있다.

앞서 언급했듯이 만재도는 유문암 및 유문암질 응회암이 섬의 모든 지역에 분포하고 있으며(Fig. 21), 극히 부분적으로 층리가 뚜렷한 사질셰일이 관찰된다. 유문암질 응회암은 용결응회암으로 용결구조가 관찰되며, 암편은 1~10cm의 크기로 일정한 방향으로 신장되어 분포한다(Fig. 22). 섬 곳곳에서 샘플링한 시료를 바탕으로 박편을 제작하여 관찰하였다. 모든 박편에서 유상구조가 분명하게 관찰되고 있으며, 기질부는 미정질로 현미경하에서 광물의 판별이 어려울 정도이다. 암편은 장석류와 석영으로 구성되어 있으며, 사장석은 알바이트쌍정이 부분적으로 관찰되고, 크기는 대부분 1mm를 넘지 않는다(Fig. 23, 24, 25, 26). 국도를 포함하여 만재도 주변에 있는 무인도에서도 주상절리가 분포하며, 암종은 본 섬과 같다.

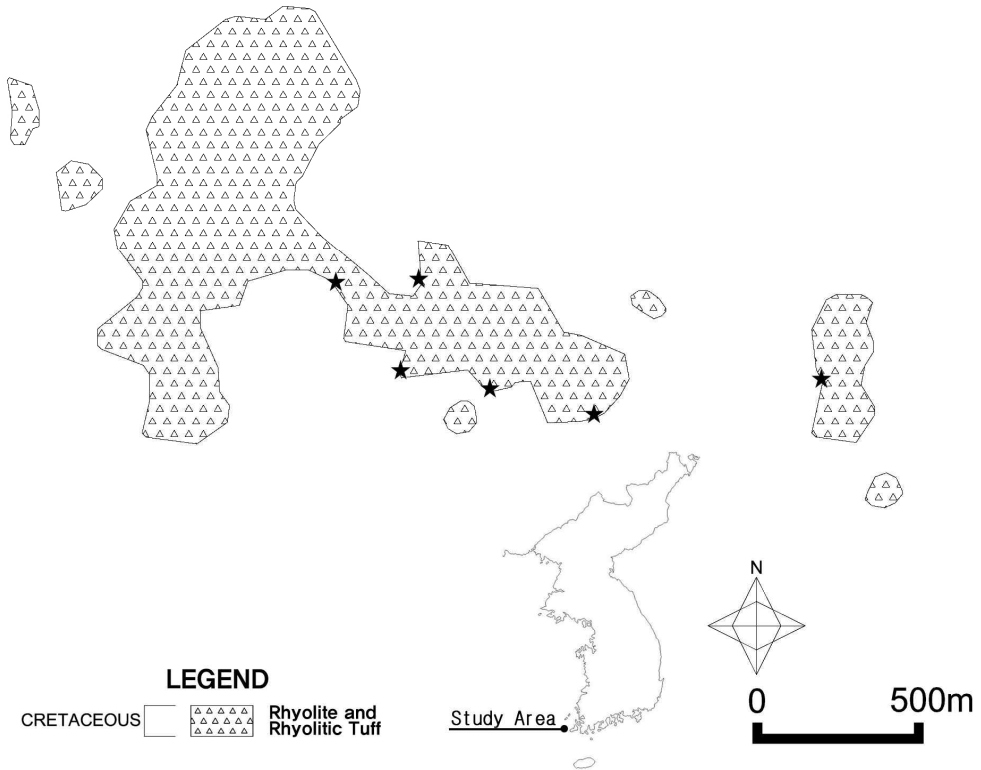


Fig. 21 The geology map of Manjae-do in Shinan-gun(★: sampling site).

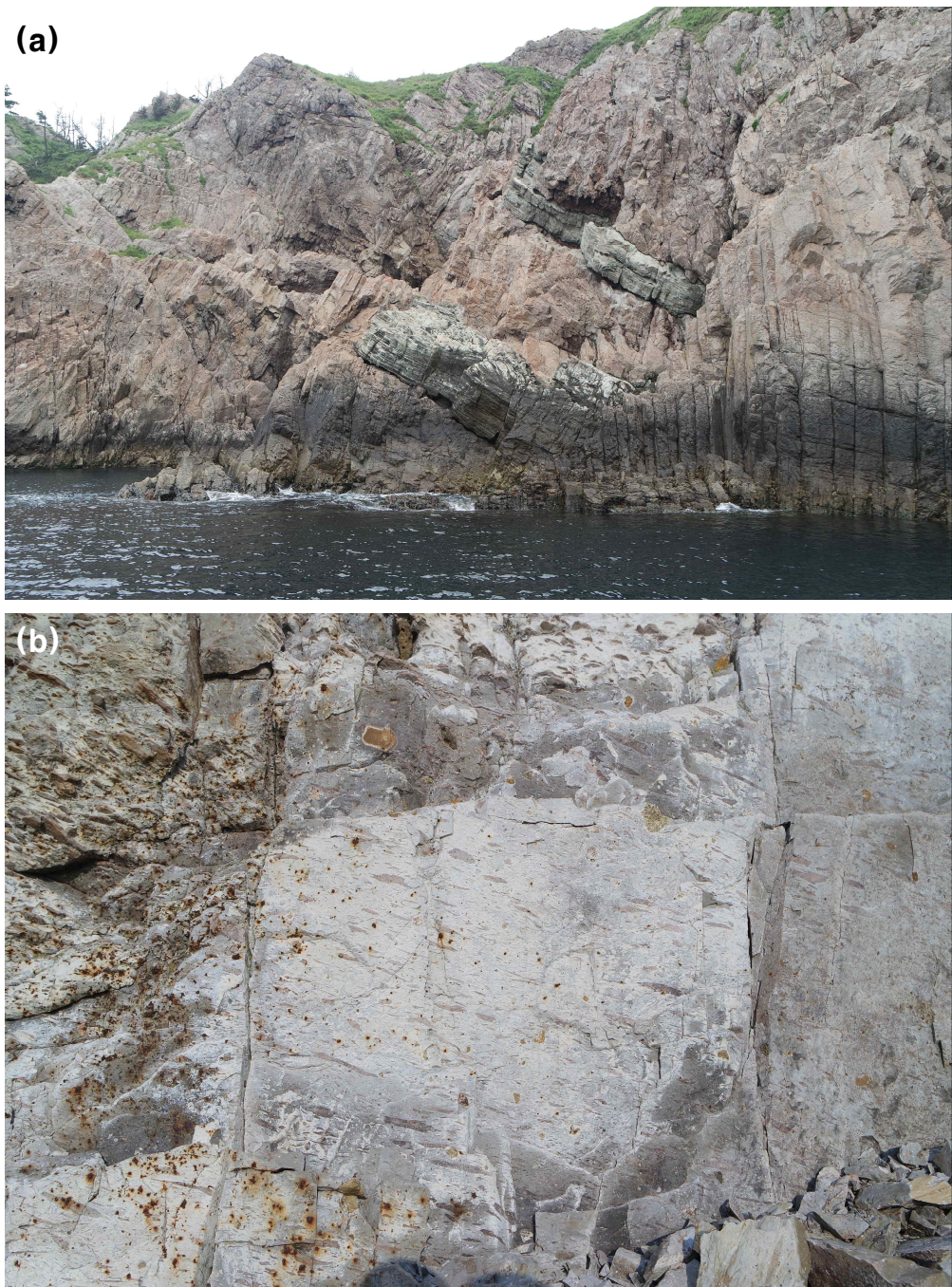


Fig. 22. Photographs of Manjae-do.

(a)sandy shale (b) welded structure

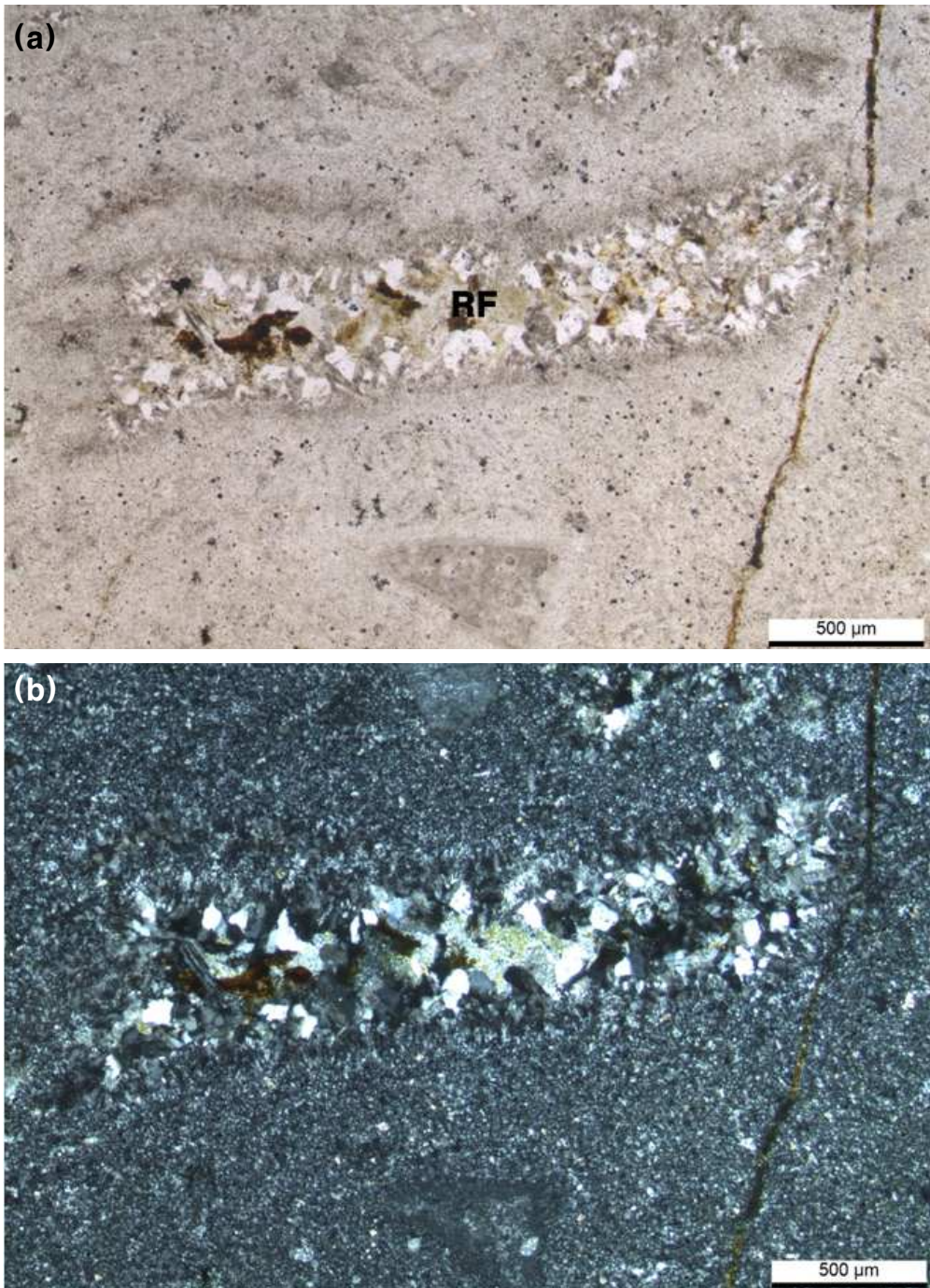


Fig. 23. Microphotographs of rhyolitic tuff(SMJ-01)(RF: rock fragment).
(a)open nicol, (b)cross nicol

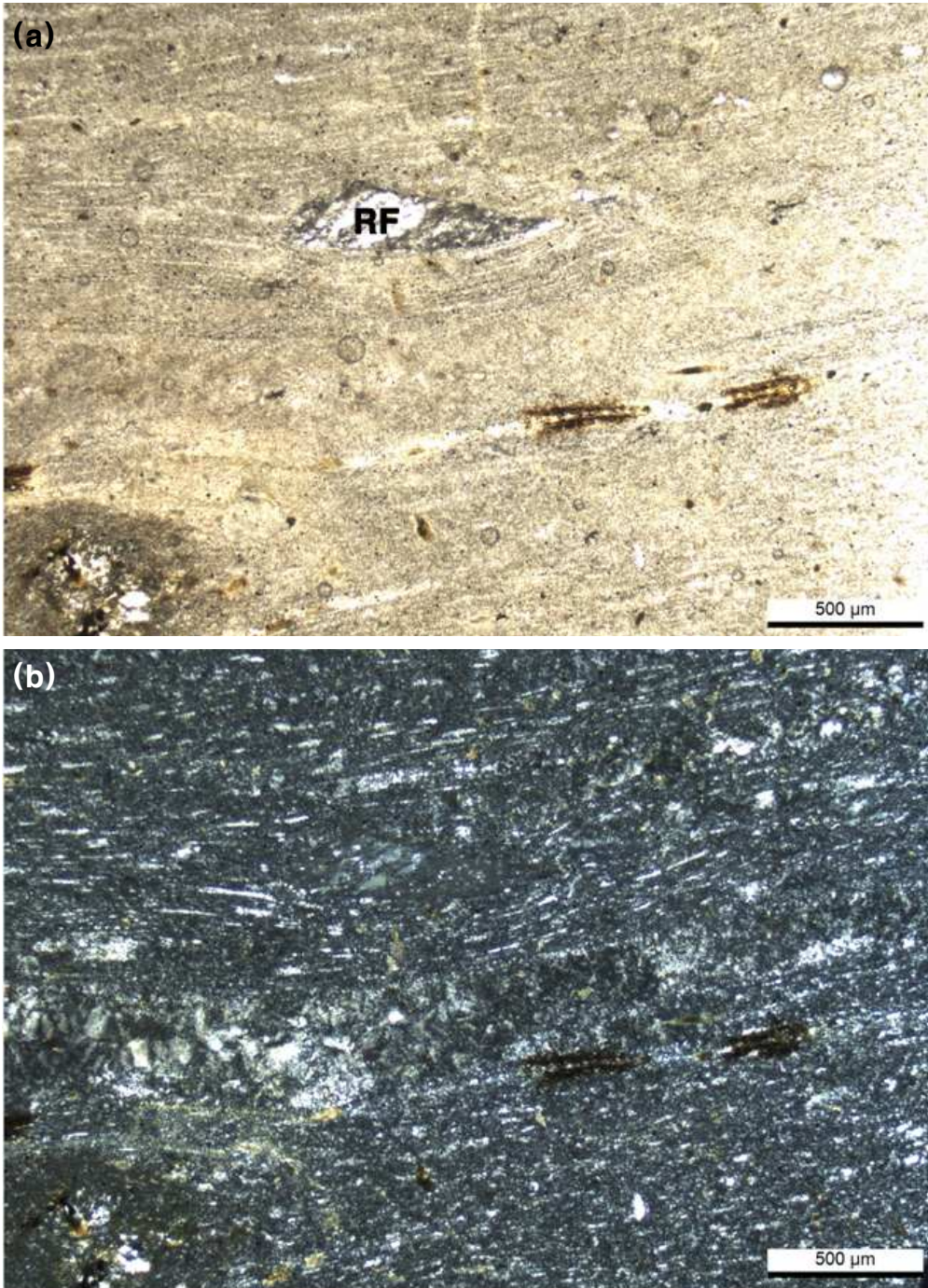


Fig. 24. Microphotographs of rhyolitic tuff(SMJ-02)(RF: rock fragment).
(a)open nicol, (b)cross nicol

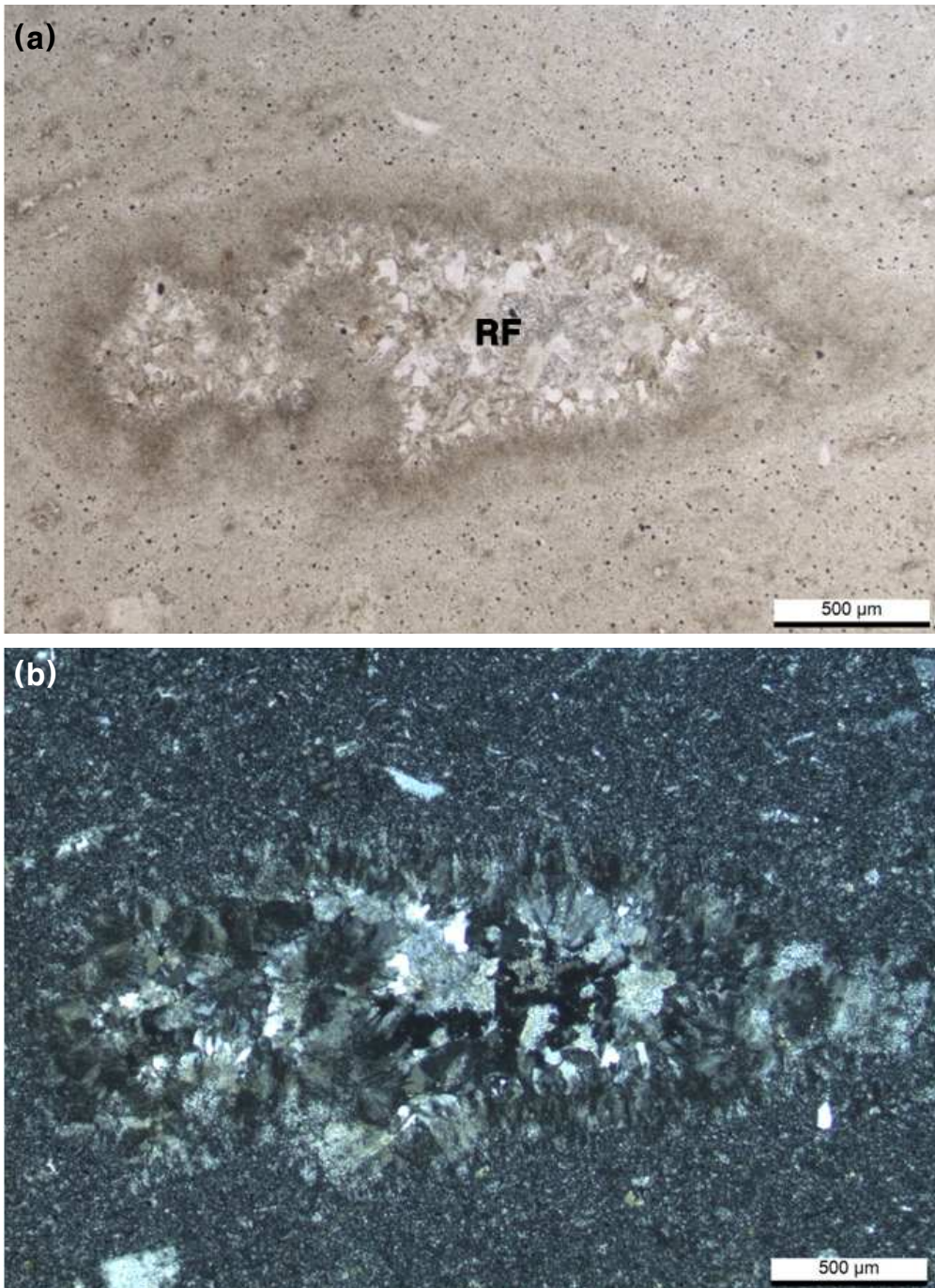


Fig. 25. Microphotographs of rhyolitic tuff(SMJ-04)(RF: rock fragment).
(a)open nicol, (b)cross nicol

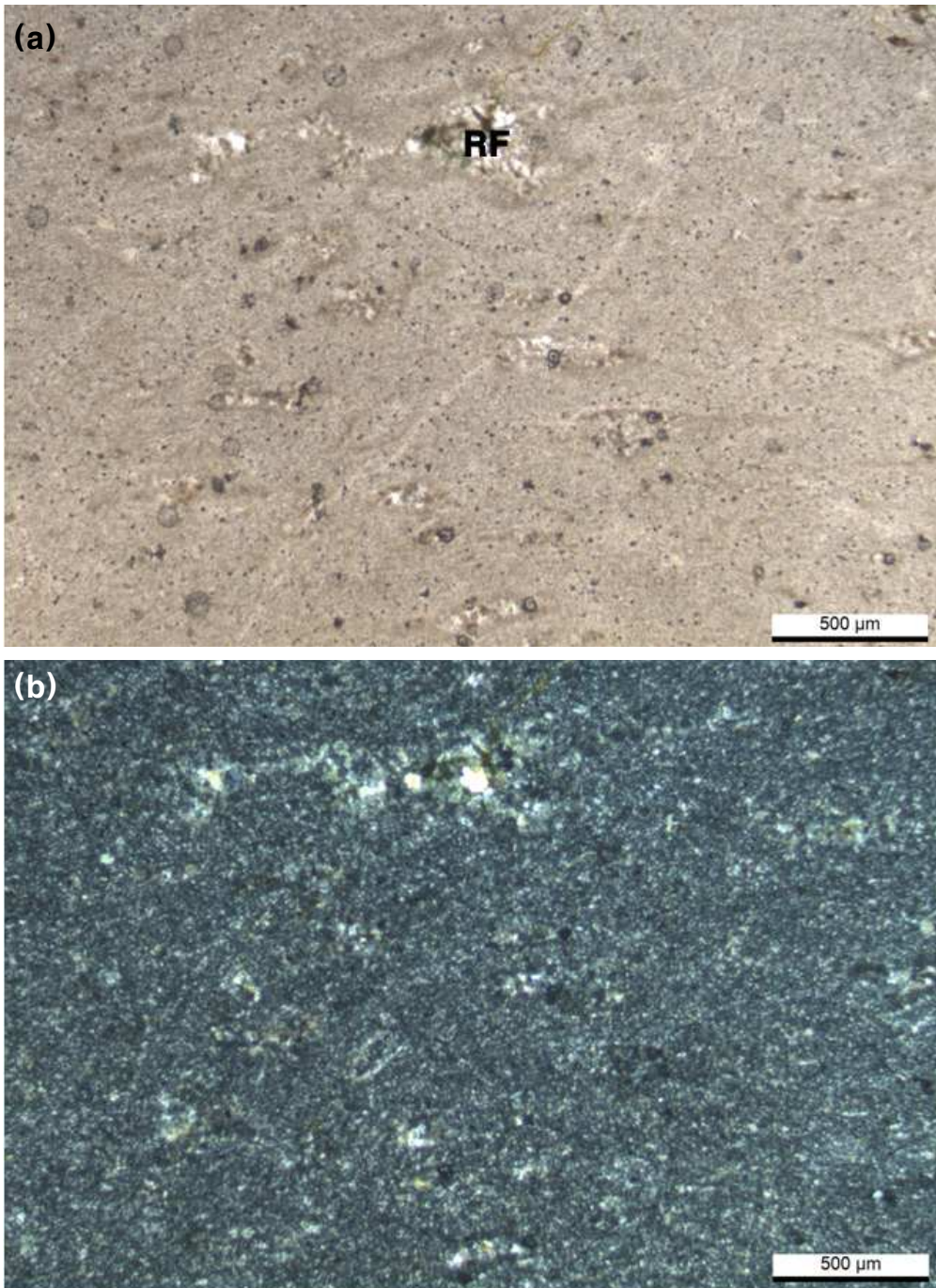


Fig. 26. Microphotographs of rhyolitic tuff(SMJ-06)(RF: rock fragment).
(a)open nicol, (b)cross nicol

3. 전라남도 고흥

고흥지역의 지질은 선캠브리아시대의 편마암인 소백산육괴의 지리산편마암 복합체를 기반암으로 한다. 그리고 중생대 쥐라기 흑운모화강암과 백악기 심성암류, 백악기 안산암 및 안산암질응회암, 백악기 유문암 및 유문암질응회암, 백악기 퇴적암이 상부층을 이루고 있다(Fig. 27).

변성암층인 편마암류는 고흥반도의 북부지역에서 널리 분포한다. 이들 변성암류는 중생대 백악기 퇴적암류와는 부정합관계이며, 화산암류 및 심성암류의 관입 또는 분출로 인하여 피복 당하고 있다. 주로 화강암질 편마암, 반상변정질 편마암, 미그마타이트질 편마암으로 구분된다. 화강암질 편마암은 중립질로 암회색 내지 담회색을 보이고, 유색광물에 의하여 미약하게 엽리를 보이는 특징을 보인다. 구성광물로는 석영, 장석, 흑운모, 백운모, 녹니석, 석류석, 백운모, 저어콘 등이며, 장석류는 미사장석과 퍼사이트, 사장석이 분포한다. 반상변정질 편마암은 중립질로 화강암질 편마암에 비하여 입자가 큰편에 속하며, 반상변정은 장방향의 다수이나 일부 압력을 받아 타원형의 모양을 한 것도 관찰된다. 미그마타이트질 편마암은 네오솜에 의한 엽리가 나타나며 엽리의 방향이 일정하지 않은 특징을 보여준다. 구성광물로는 석영, 정장석, 사장석, 흑운모, 각섬석, 석류석, 백운모, 녹니석, 저어콘, 스펀 등이 포함되어 있으며, 석영이 신장되어 엽리를 보인다. 고흥지역의 편마암류의 모암은 화강섬록암으로 대륙의 동시 충돌형과 후기 및 후 조산대 영역에서 형성되었을 것으로 추정되며, 변성작용은 저압 내지 중압형의 고온 변성작용을 받은 후 저압, 중온의 후퇴변성작용에 의한 것이다(박배영 등, 2004).

중생대 퇴적암층인 두원층은 고흥반도의 북부지역에 분포하며, 행정구역상 두원면 일대와 대서면 남서부 해안, 과역면 서부 해안지역에 해당한다. 기반암인 편마암층을 부정합으로 피복하고 있으며, 화산암류들에 의하여 피복당한 것으로 사료된다. 사암과 역암사이에는 탄질 셰일이 협재되어 있는 것으로 알려져 있다(조석희, 2000). 두원층이 발달한 지역에서는 여러 퇴적구조를 관찰할 수 있으며, 특히 송림해안지역에서 단층, 층리, 사층리, 점이층리, 타포니, 나마 등의 여러 가지 지질학적 지형요소를 관찰할 수 있는 특징이 있다(김경복, 2012).

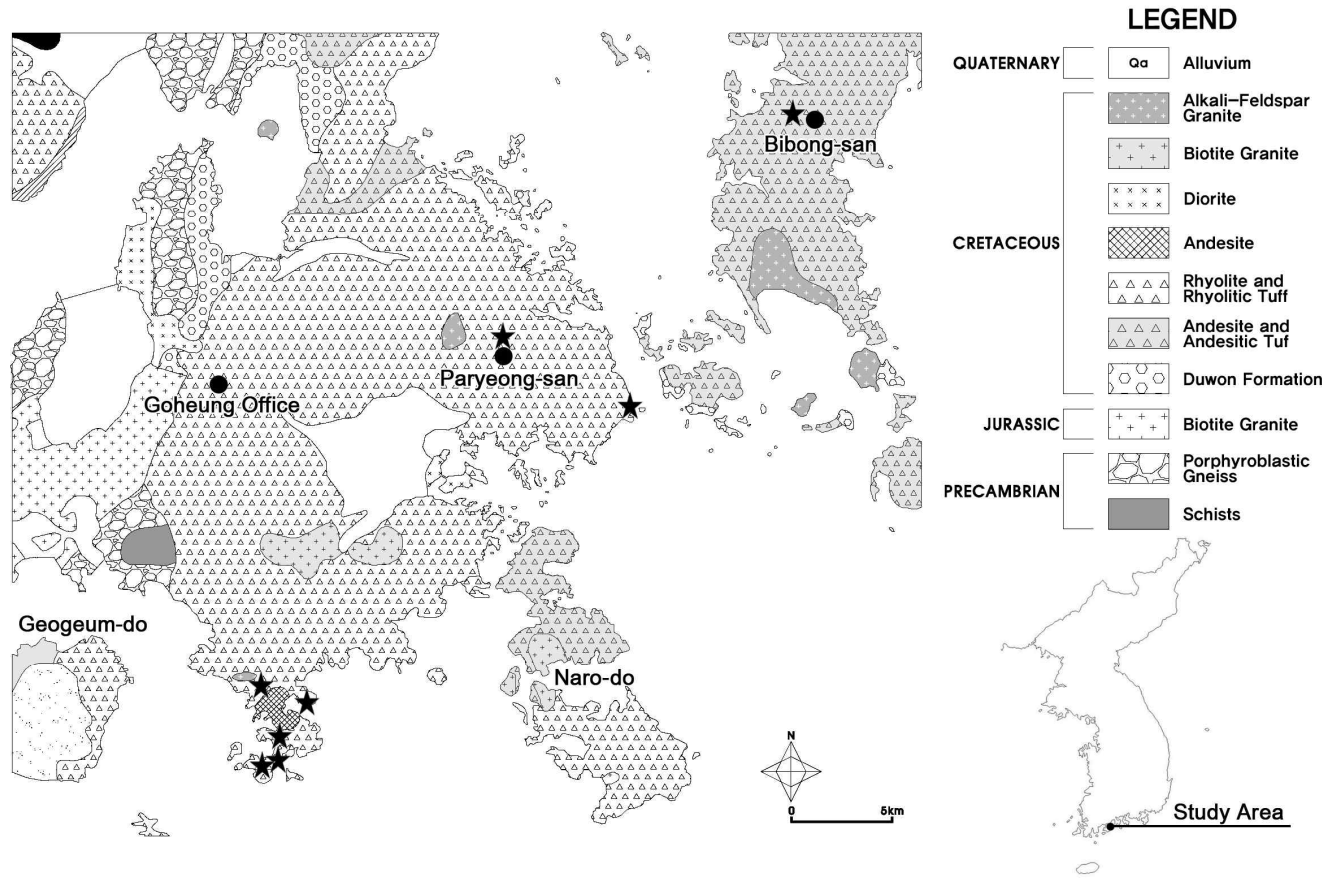


Fig. 27. The geology map of Goheung and Yeosu(★: sampling site).

고흥지역에서 심성암류는 흑운모화강암, 섬록암, 그레노파이어 등이 분포한다. 흑운모화강암은 괴상의 중립 내지 조립질 화강암으로 비봉산과 봉림리 지역에 분포한다. 본 암은 안산암과 안산암질 응회암을 관입하고 접촉부에서 연변상과 변질대가 관찰된다. 석영, 정장석, 사장석, 녹니석화 된 각섬석과 흑운모 등의 광물로 구성되어 있다. 비봉산에 분포하는 화강암류의 K-Ar 절대연령 측정값은 67.0 ± 0.9 Ma이다. 섬록암은 남부 유주산과 서부 울치리 지역에 소규모 암주상 관입암체로 존재하며, 안산암과 화강암질 편마암을 관입하고 있다. 신선한 노두에서 우후질을 띄며 풍화면은 적갈색의 모습을 하고 있다. 유주산에서 채취한 시료에 대해 K-Ar 절대연령을 측정한 결과 70.1 ± 1.9 Ma로 백악기 후기이다. 그레노파이어는 마복산 지역에 맥상으로 분포하며, 괴상의 중립 내지 조립질 담홍색 화강암질암으로 박리작용이 관찰된다. 불규칙한 형태의 공동과 불투명광물 포유 등, 천소관입암의 특징을 갖는다. 마복산 시료의 K-Ar 연대측정 결과 67.2 ± 1.0 Ma의 연대값을 가진다(박영석외, 1997).

본 지역에 분포하는 화산암류는 한반도 남부지역에 고루 분포하는 중생대 백악기 지층이다(김해경 등, 2004). 연구지역의 유문암질 응회암 역시 유천층군에 속한다. 연구지역에 분포하는 유문암질 응회암은 대체로 용결응회암으로 암석의 단면에서 용결구조가 뚜렷하게 관찰된다(Fig. 28). 고흥반도 중앙부에 분포하는 안산암 또는 안산암질 응회암은 고흥 비봉산 일원에서 관찰이 가능하다. 후기 고흥응회암에 피복되며, 흑운모화강암에 의해 관입당했다. 안산암질 응회암은 안산암편과 사장석, 각섬석, 휘석의 반정을 포함하며, 장석은 반자형 내지 자형이며, 알바이트 쌍정과 칼스바드 쌍정이 관찰된다(윤성효와 황인호, 1988).

윤성효와 황인호(1988)의 연구에 의하면 용결응회암인 팔영산응회암의 SiO_2 는 65.69wt% ~ 67.45wt%의 범위를 보이며, 안산암류의 SiO_2 는 50.33wt% ~ 51.43wt%의 범위를 보이고, 흑운모화강암의 SiO_2 는 59.58wt% ~ 60.99wt%의 범위를 보인다.

화산암류들 중 유문암 및 유문암질 응회암의 현미경하에서 암편의 크기는 5cm 내외의 크기로 존재하고, 기질부는 은정질 내지 미정질이다. 주로 석영,



Fig. 28. Photographs of welded tuff on the Goheung area.
 (a): GH-04, (b)GH-06

장석과 소량의 불투명광물이 관찰되며, 장석류는 칼스바드쌍정을 보이는 정장석과 알바이트쌍정을 보이는 사장석이 관찰된다. 기질부의 유상구조가 뚜렷하게 나타나고, 장석으로 구성된 암편들은 유상구조와 상관없이 자형 내지 반자형의 형태이다(Fig. 29, 30, 31, 32).

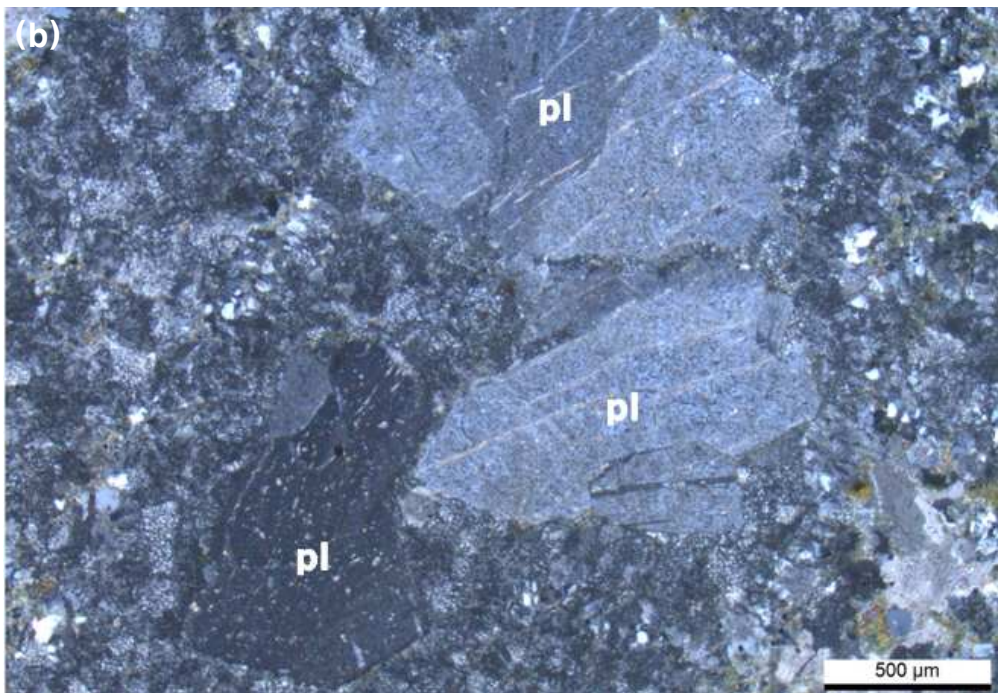


Fig. 29. Microphotographs of rhyolitic tuff(GH-01)(pl: plagiocase).
(a)open nicol, (b)cross nicol

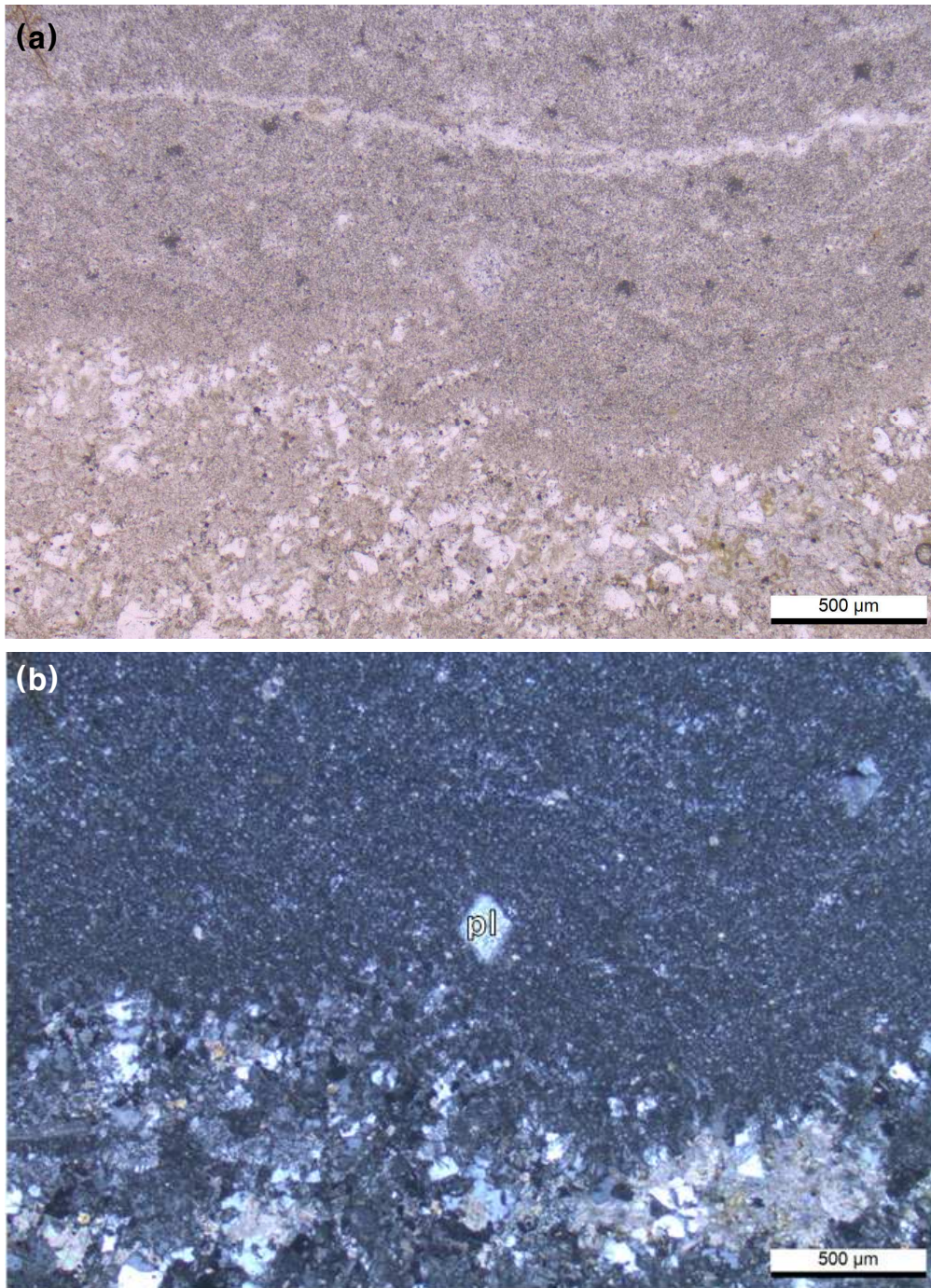


Fig. 30. Microphotographs of rhyolitic tuff(GH-02)(pl: plagioclase).
(a)open nicol, (b)cross nicol

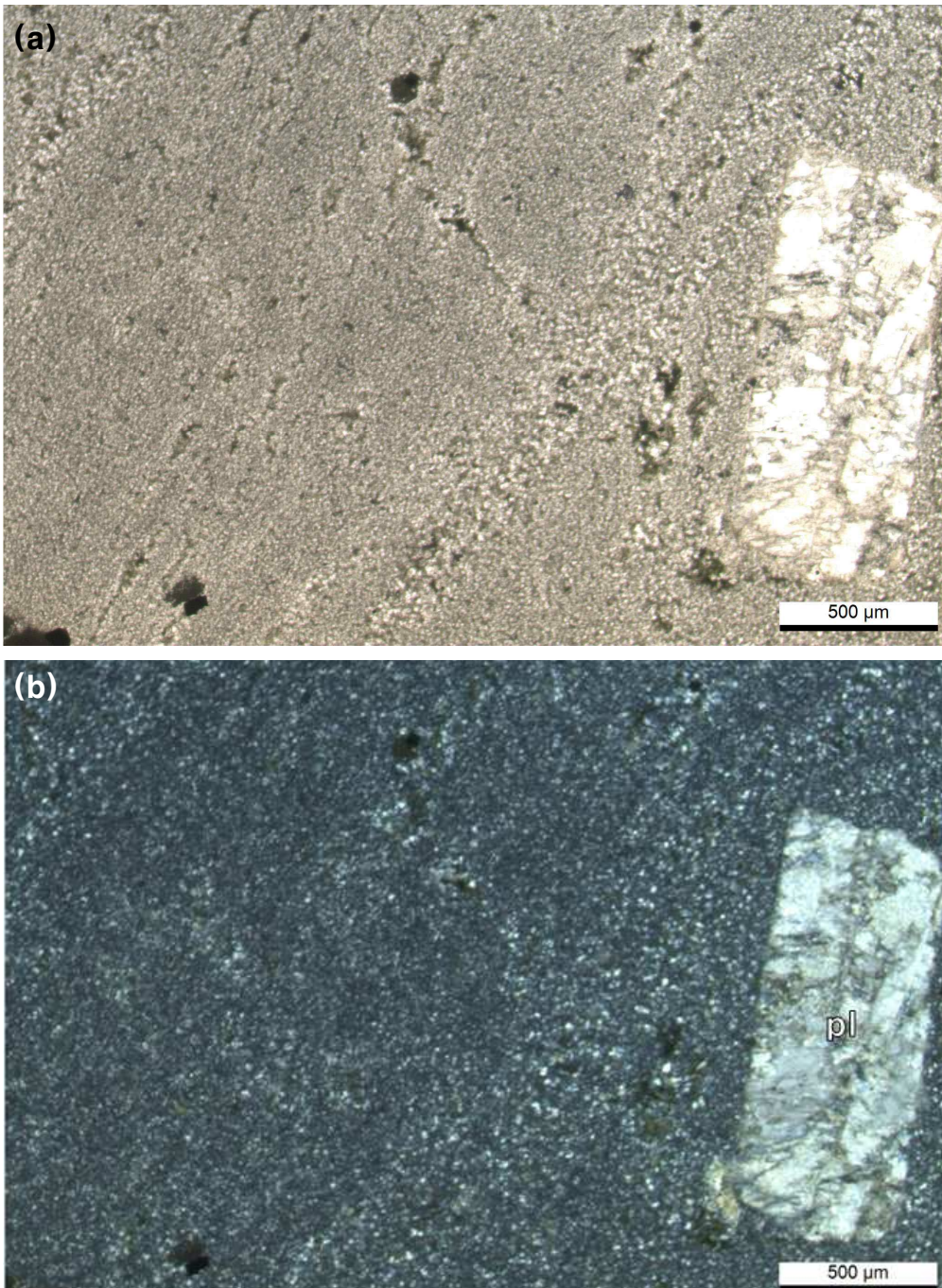


Fig. 31. Microphotographs of rhyolitic tuff(GH-04)(pl: plagioclase).
(a)open nicol, (b)cross nicol

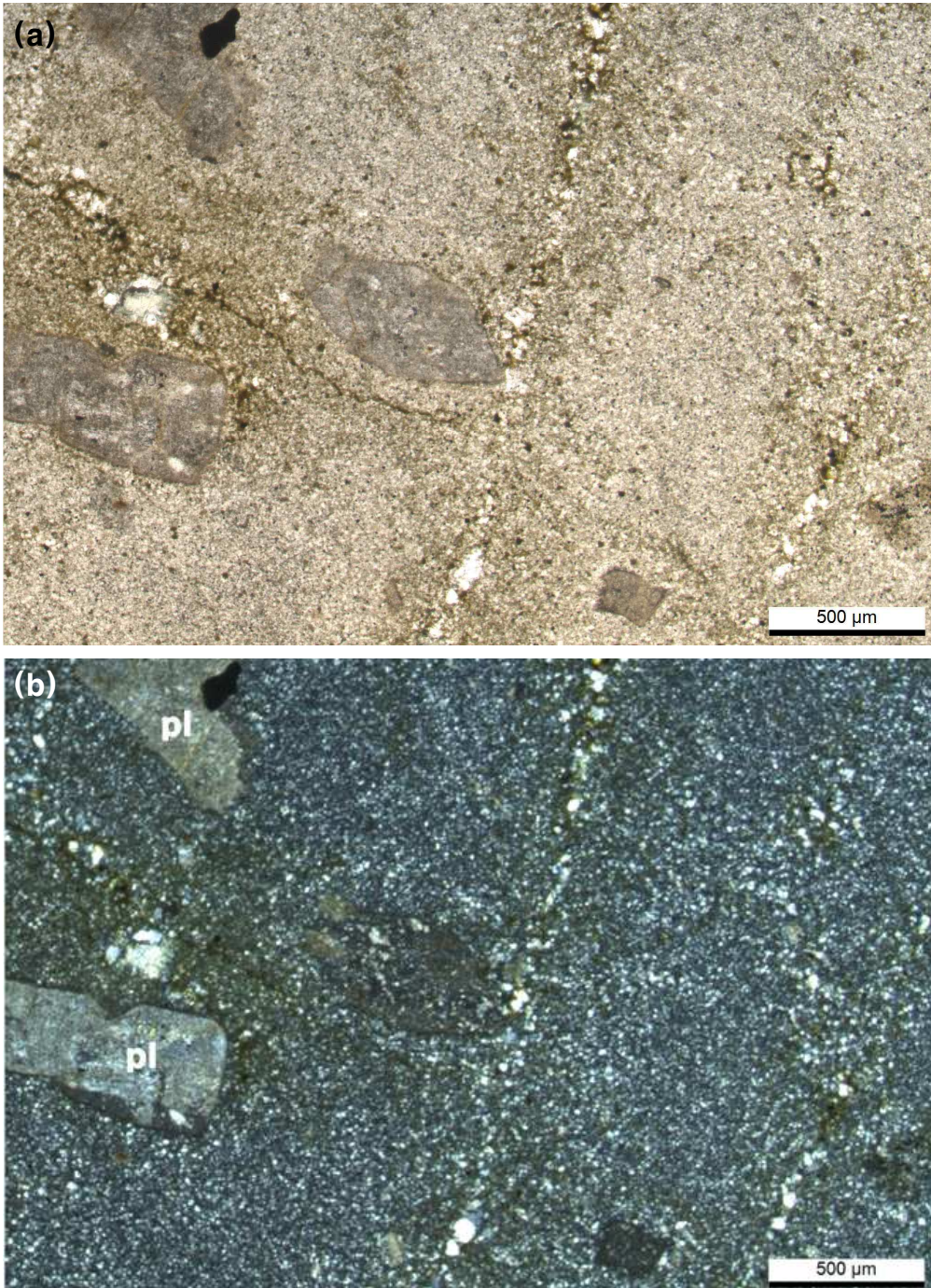


Fig. 32. Microphotographs of rhyolitic tuff(GH-06)(pl: plagioclase).
(a)open nicol, (b)cross nicol

4. 전라남도 여수

여수지역은 1:250,000 여수 도폭에 해당하는 지역으로 본 지역을 포함한 남해안 일대는 백악기에 화성활동이 활발하였고, 화성활동의 산출물인 경상누층군이 넓게 분포하고 있다. 연구지역인 여수반도의 서측부분은 대부분 백악기 안산암 및 안산암질 응회암이 분포하고 있으며, 남부지역에 알칼리장석화강암이 관입하여 분포하고 있다(Fig. 27).

알칼리장석화강암은 $83.6 \pm 4.7\text{Ma}$ 전에 관입한 것으로 백악기 후기에 해당한다(김희남 등, 1994). 알칼리장석화강암은 여수반도 북동부의 상암동과 호명동, 남부의 장수리 일대에 분포하며, 유천층군을 관입한 형태이다. 각섬석 혹은 모노화강암과 미문상화강암, 섬록암으로 구분되어 지며, 칼크알칼리계열의 I-type 화강암류이다(위수민과 김은효, 2009).

여수지역에 분포하는 신동층군은 백악기 퇴적암층으로 낙동층과 하산동층, 두원층, 진주층으로 구분된다(한국지질자원연구원, 2002). 이 중에서 여수지역에 분포하는 퇴적암층은 하산동층으로 여수 동편의 묘도를 중심으로 분포하며, 역암, 역실 사암, 적색사암, 적색세일로 동북방향으로 분포한다.

여수지역의 상당 부분을 차지하고 있는 안산암 및 안산암질 응회암은 유천층군에 속하며, 안산암의 대부분은 보라색을 띠며, 백색의 장석반정과 휘석의 반정이 관찰된다(안건상, 2010).

본 지역과 서측으로 접하는 고흥지역 사이에는 적금도, 낭도, 사도 등의 유·무인도들이 있으며, 앞서 언급한 고흥지역의 유문암 및 유문암질 응회암과 본 지역의 안산암 및 안산암질 응회암이 서로 접하며 분포하고 있다. 적금도 등지에서 주상절리가 관찰되며, 사도는 두원층의 퇴적암의 지질로 공룡발자국 화석이 관찰된다.

화양면 비봉산 주상절리대에서 채취한 암석의 박편사진은 Fig. 33으로 유상구조가 보이며, 기질부는 은정질 내지 미정질로 장석 자형 내지 반자형의 형태로 관찰된다.

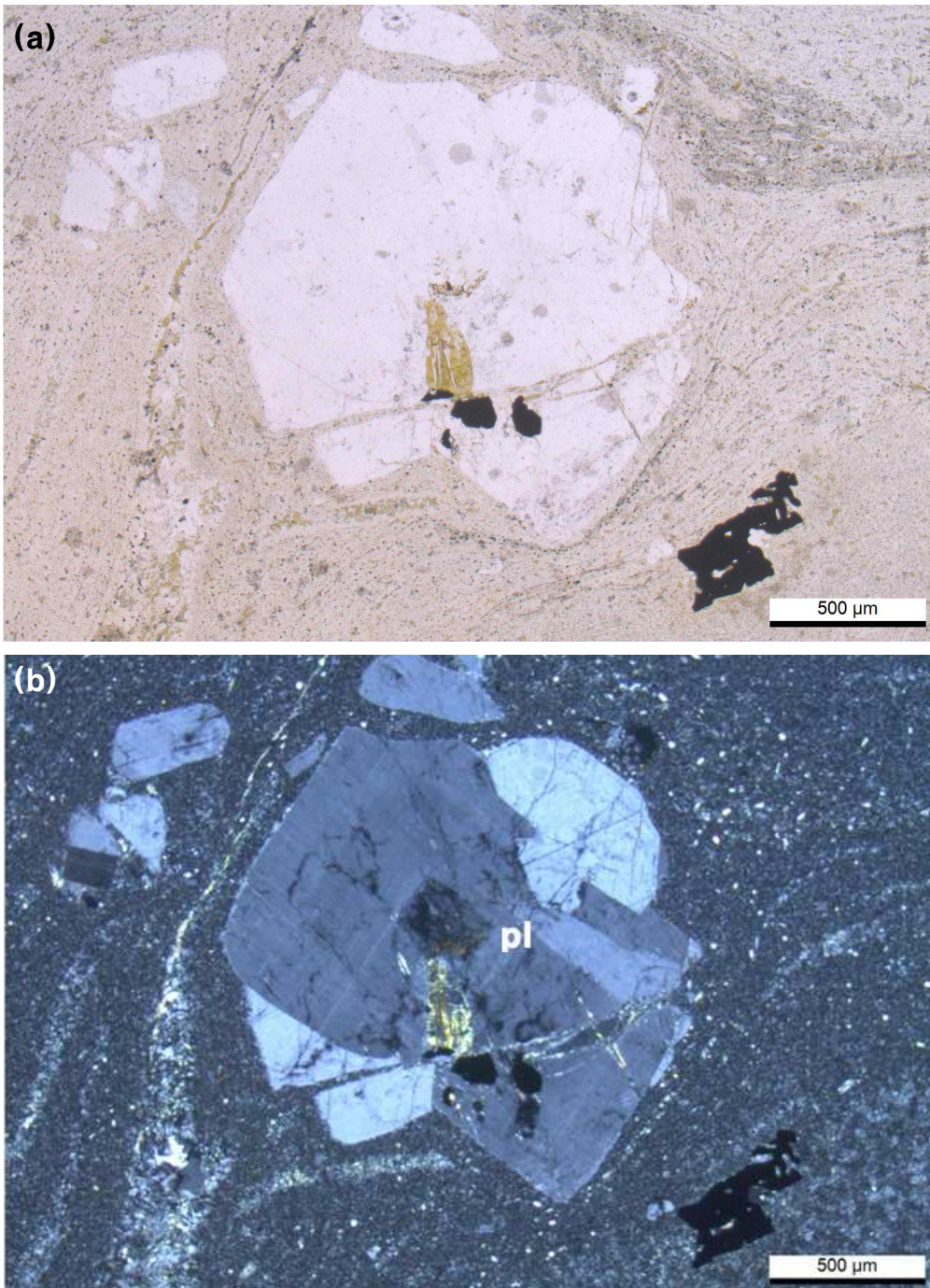


Fig. 33. Microphotographs of rhyolitic tuff(YS-01)(pl: plagioclase).

(a),(c),(e),(g): open nicol, (b),(d),(f),(h): cross nicol

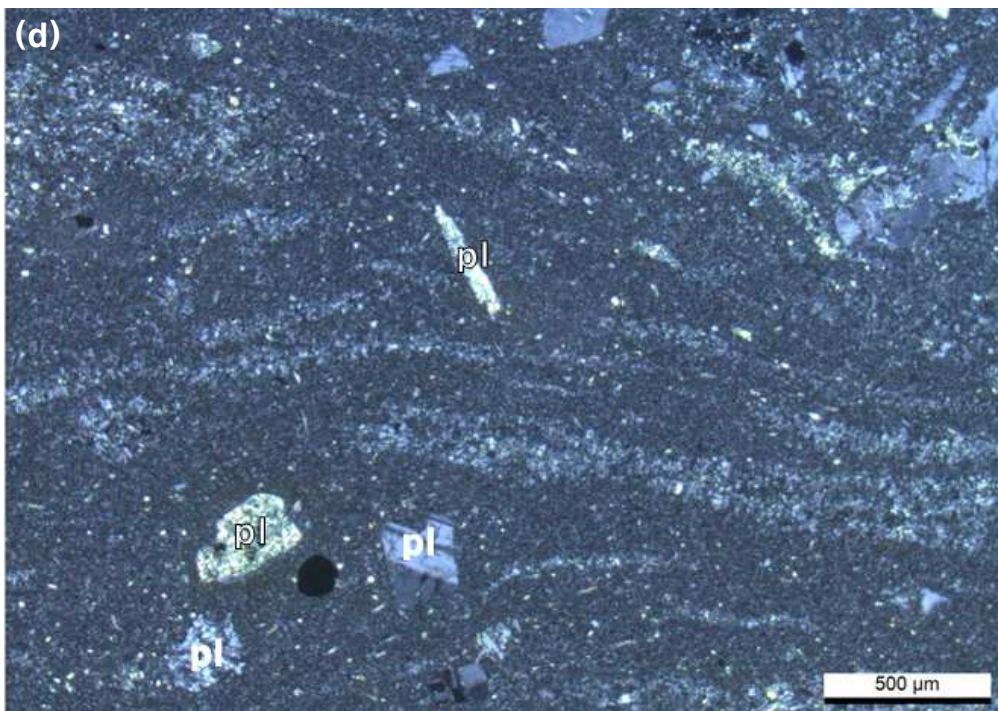
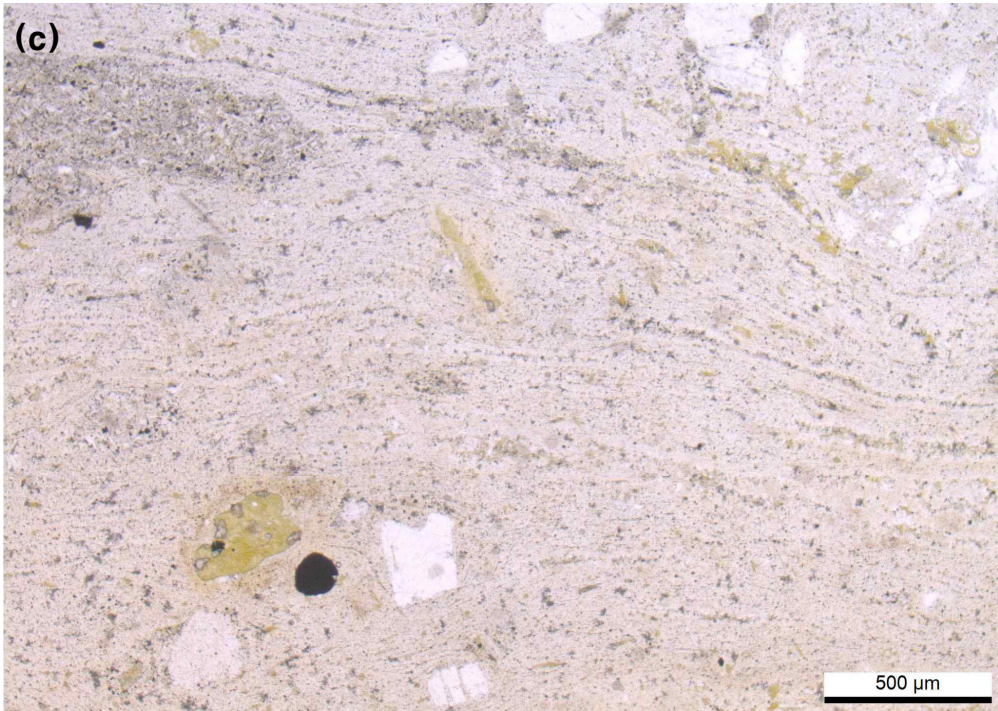


Fig. 33. Continued.

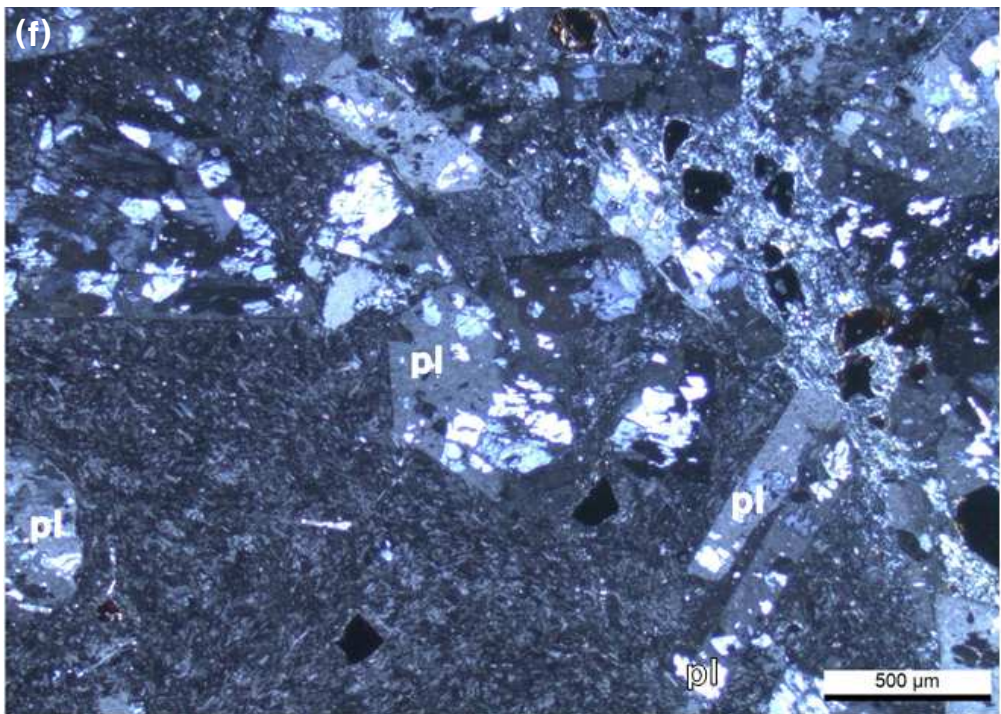
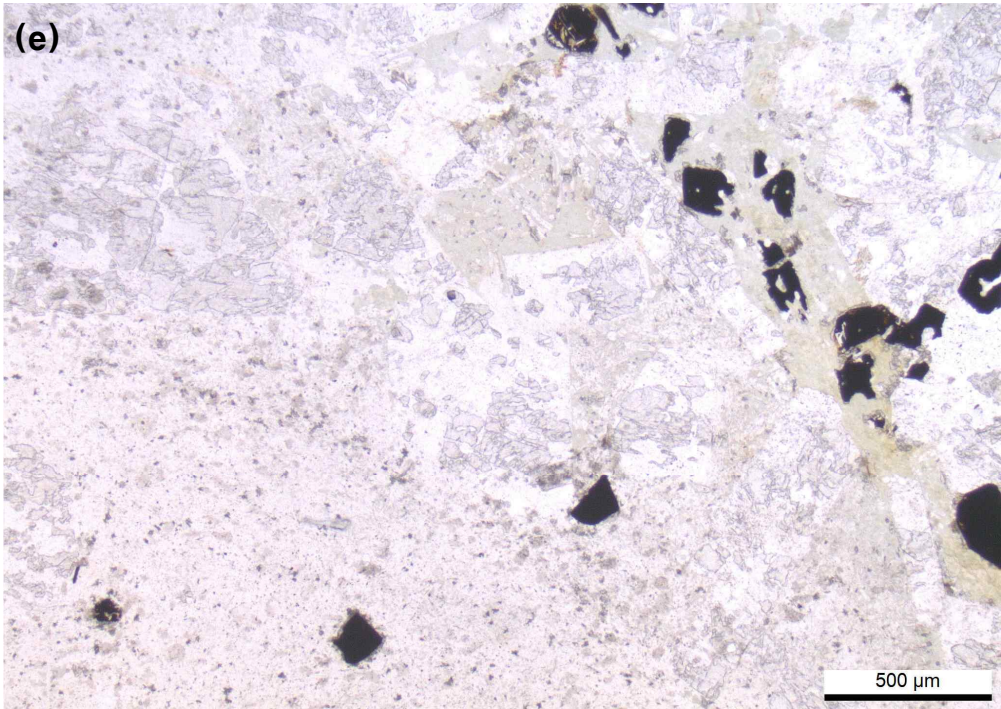


Fig. 33. Continued.

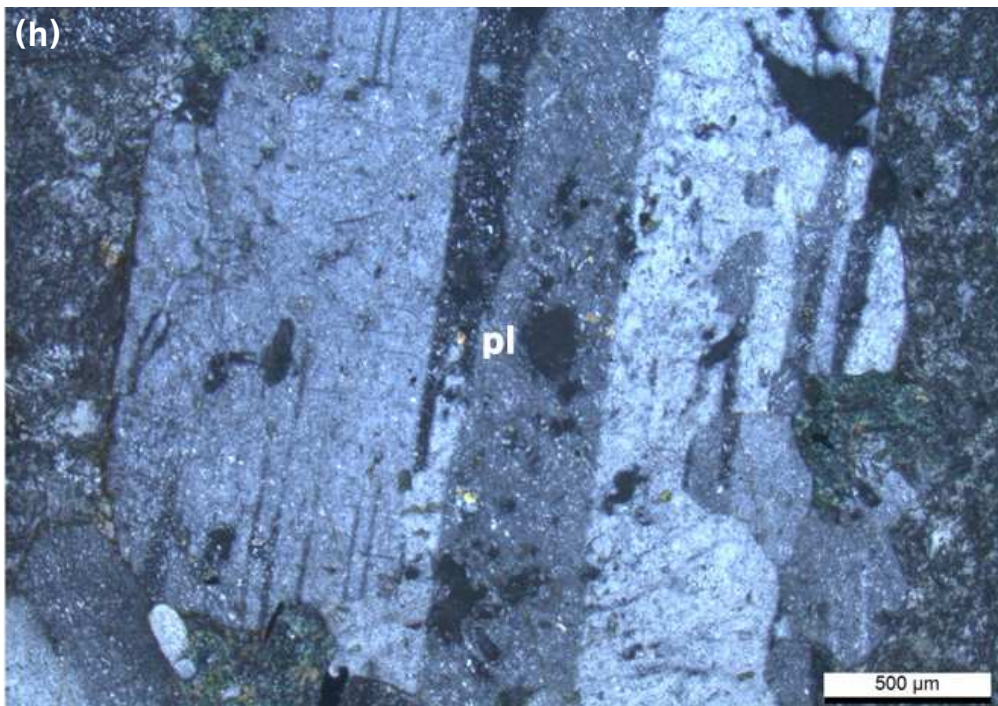
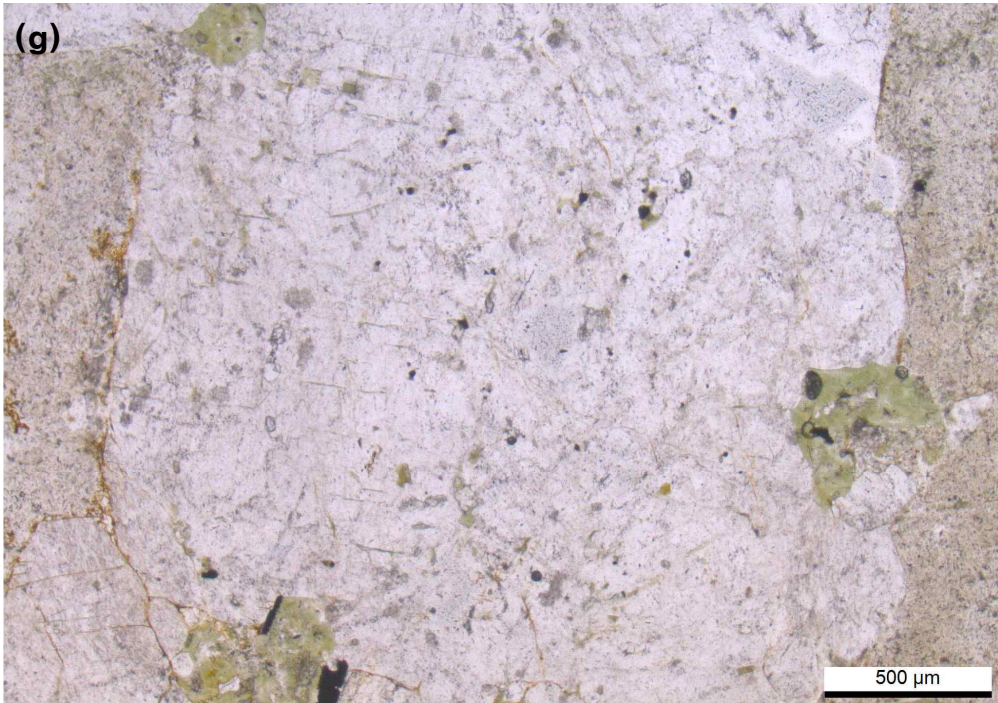


Fig. 33. Continued.

5. 경상남도 서남부

본 지역은 1:250,000 여수도폭에 속하는 지역으로 연구지역은 경상남도 남해시 일대와 사천시 삼천포 주변 및 고성군 하이면 남서부와 고성군 하이면 남동부 주변이다. 여수도폭에 의하면 이 지역은 중생대 백악기 신동층군과 하양층군, 유천층군이 전 지역에 고루 분포하고 있다(Fig. 34).

1:50,000 남해·서상도폭(한국동력자원연구소, 1989)에 따르면 신동층군은 낙동층, 하산동층, 진주층으로 구분된다. 낙동층은 섬진강 하류 하동 남부 지역에 분포하는 조립질 암상으로 담회색의 역암, 함력조립사암, 역암질사암, 조립 내지 중립사암, 사질이암, 회색 내지 녹회색 이암 및 셰일로 구성되어 있다. 하산동층은 낙동층 위에 부정합으로 놓이며, 사천 서포면과 남해 설천면 중북부를 중심으로 남서방향으로 넓게 분포하고 있으며, 유백색 내지 담회색의 중립질 내지 조립질 사암, 함력조립질 사암, 역암, 역질사암, 자색 내지 녹회색의 사질이암, 셰일 및 이질 셰일과 암회색 계일과 실트스톤으로 구성되어 있다. 진주층은 사천 서포면의 동부에서 남해 중앙부를 지나 남서-북동 방향으로 길게 분포하고 있으며, 상위층들과는 대조적으로 적색층이 없는 것이 특징이다. 진주층을 구성하는 암석은 전반적으로 조립 내지 중립사암과 녹회색 내지 암회색의 니질셰일 및 셰일과 호층을 이루고 있다.

하양층군은 칠곡층, 신라역암층으로 구분된다. 칠곡층은 신동층군의 진주층 상위에, 그리고 신라역암층의 하위에 놓인다. 신라역암층은 하부에 칠곡층을 덮고 있으며, 상부는 백악기 후기 유천층군 화산암류에 의해 부정합으로 피복되어 있다.

유천층군은 웅방산층, 신성리층, 당항리층으로 구분된다. 웅방산층은 광양지역의 웅방산을 중심으로 안산암과 소량의 안산각력암으로 구성되어 있다. 신성리층은 웅방산안산암위를 피복하며 봉화산용결응회암에 의하여 피복되어 있는 지층으로 응회암질 사암과 역암으로 구성되어 있다. 당항리층은 웅방산층위에 경사부정합으로 놓였으며, 두꺼운 함력조립사암, 조립사암, 역질사암, 역암 및 미사암으로 구성되어 있다.

Fig. 35는 남해 남부지역에 분포하는 유천층군의 안산암질 응회암의 박편사

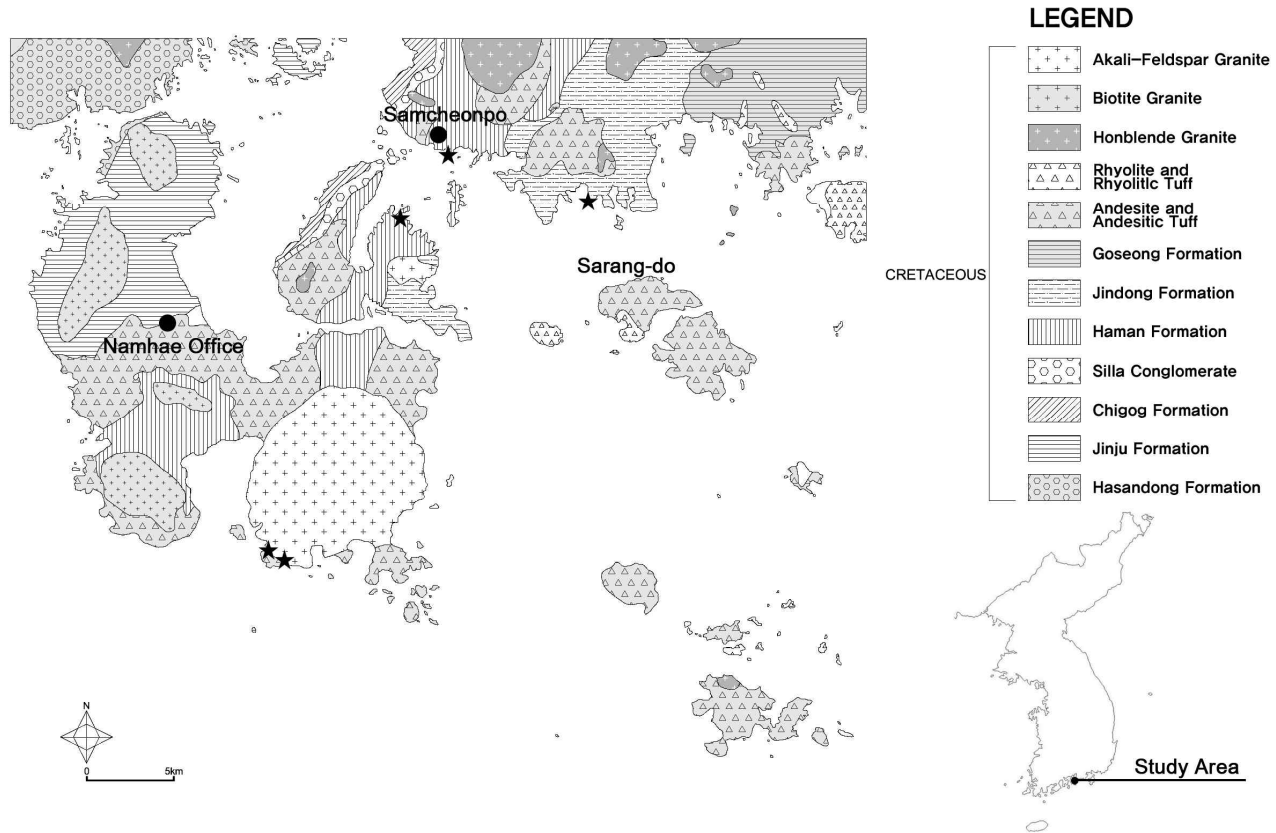


Fig. 34. The geology map of Namhae, Sacheon, Goseong(★: sampling site).

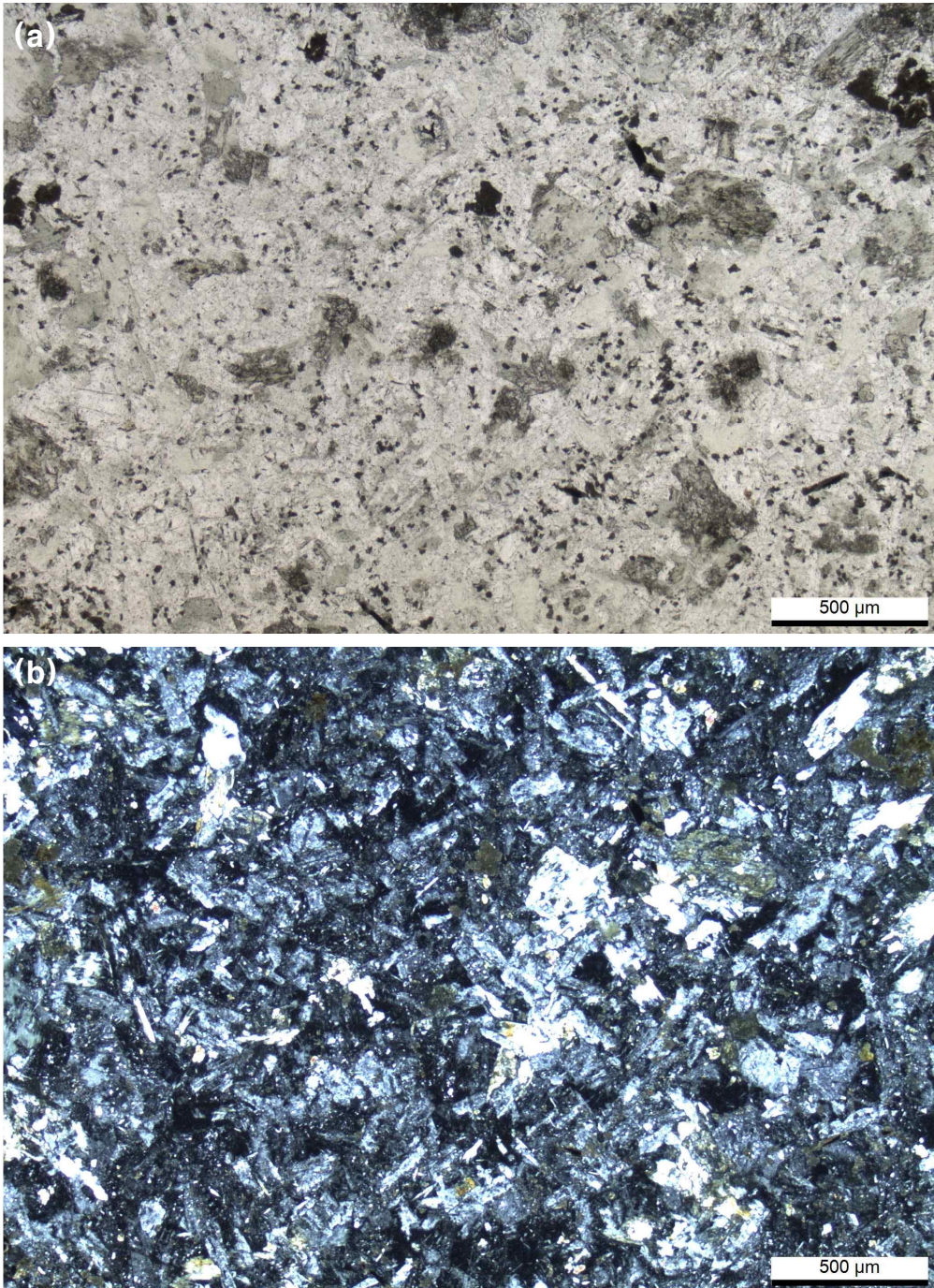


Fig. 35. Microphotographs of andesitic thff in Namhae(pl: plagiocase).

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

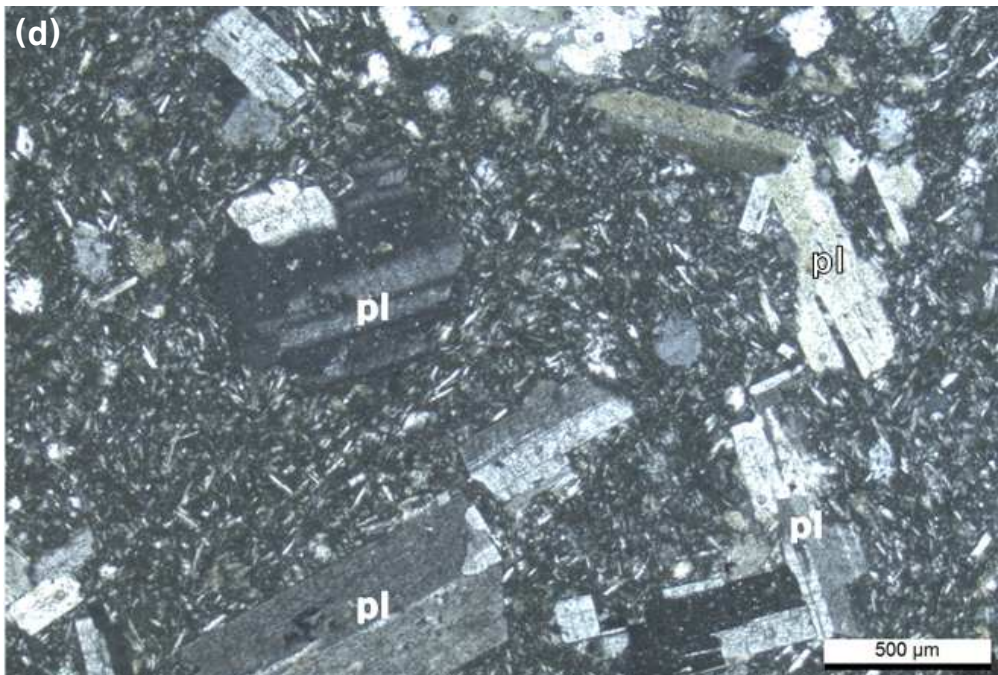
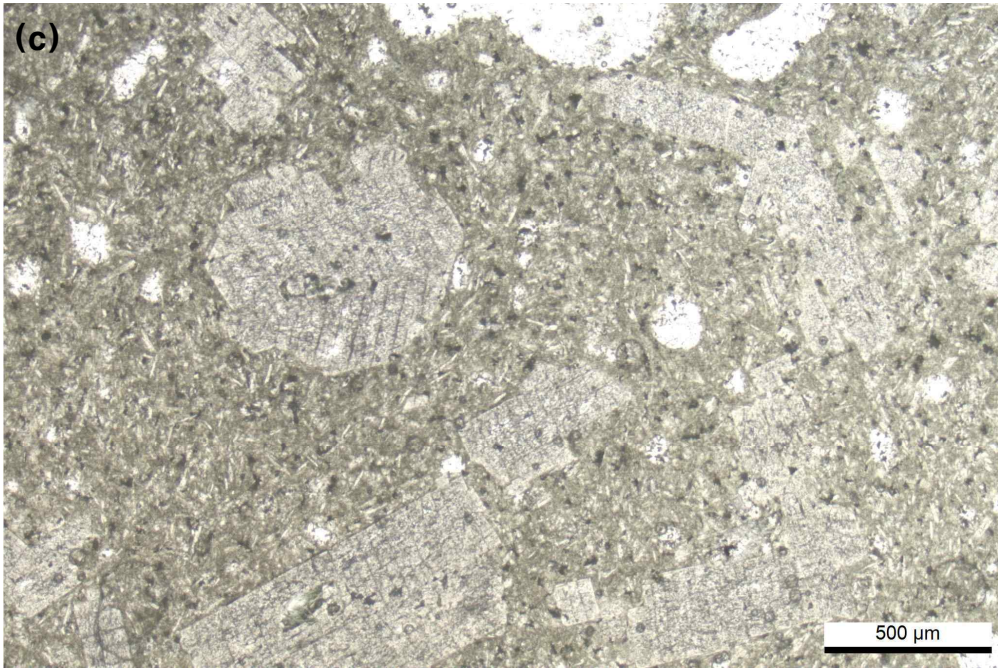


Fig. 35. Continued.

진으로 기질부는 미정질의 석영과 장석으로 이루어져 있으며, 장석은 자형 내지 반자형으로 알바이트 쌍정이 관찰된다.

6. 경상북도 동남부

본 지역은 구룡포항 부근지역에 국한한다. 구룡포항 부근의 지질도폭 설명서로는 1:250,000 안동 지질도폭 설명서(과학기술처, 1996), 1:250,000 부산 지질도폭 설명서(과학기술부, 1998)의 경계부이고, 1922년에 발간된 1:50,000 구룡포도폭에 속한다. 본 지역에 대한 지질 설명은 지질도폭의 발간년도가 오래되어 현재까지 밝혀진 층서와 다른 점이 있어 인근 도폭인 1:50,000 대보도폭 지질조사 보고서(2012)를 토대로 알아보려고 한다.

연구지역의 화산암류로는 늘대리응회암과 구룡포안산암, 연일현무암으로 구성되어 있다. 이들 화산암류는 모두 신생대 지층으로 구룡포 안산암은 제3기, 늘대리회암과 연일현무암은 제4기 지층이다(Fig. 36).

연구지역 대부분을 차지하는 구룡포안산암은 1:50,000 대보 지질도폭의 두 일포안산암과 대비된다. 늘대리응회암은 대부분 강하응회암(fallout tuff)과 회류응회암으로 구성되고 응회각력암과 층회암을 협재한다(한국지질자원연구원, 2012). 연일현무암은 현무암질 용암류로 하부에 각력암을 지닌다. 이 현무암류는 연구지역의 북측에 있는 산 정상부에서 주상절리를 형성하고 그 주상절리의 폭은 10~12cm의 크기를 보인다(한국지질자원연구원, 2012).

구룡포 해수욕장을 포함한 인근에 넓게 분포하는 안산암질 응회암 육안으로 관찰시 장석류들이 불규칙적으로 3mm이내의 크기로 암석에 포획되어 있으며, 기질부는 흑색 내지 회색으로 비현정질이다. Fig. 37은 박편사진으로 기질부는 미정질이며, 사장석이 자형 내지 반자형의 형태를 띠고 있으며, 알바이트 쌍정 구조가 뚜렷하게 관찰된다.

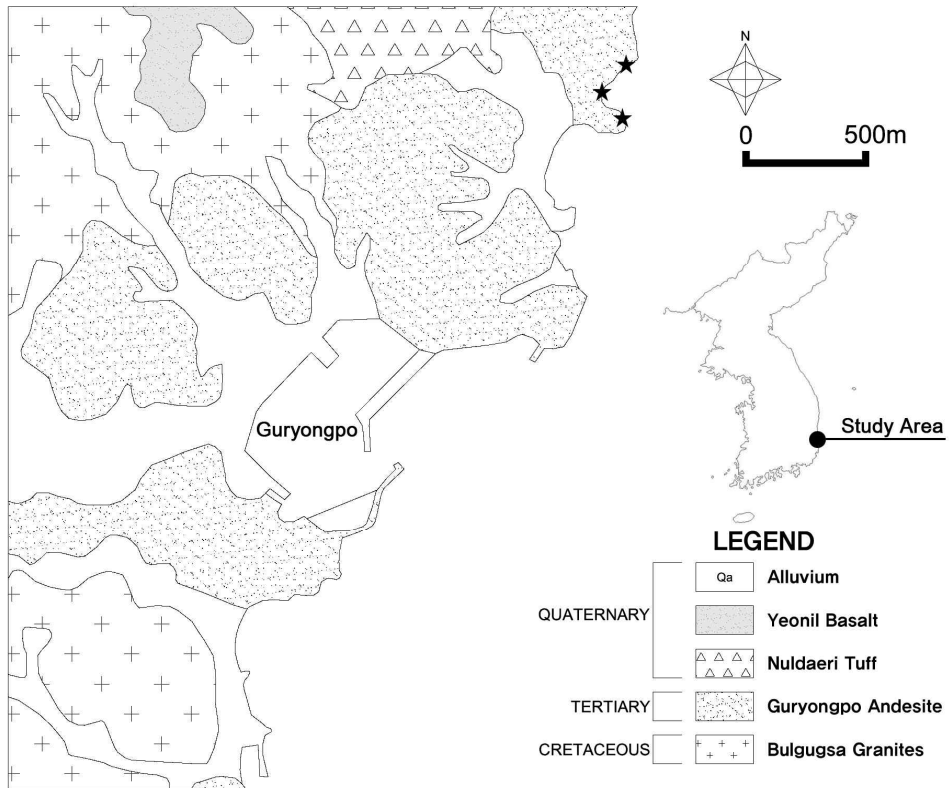


Fig. 36. The geology map of Guryongpo in Pohang(★: sampling site).

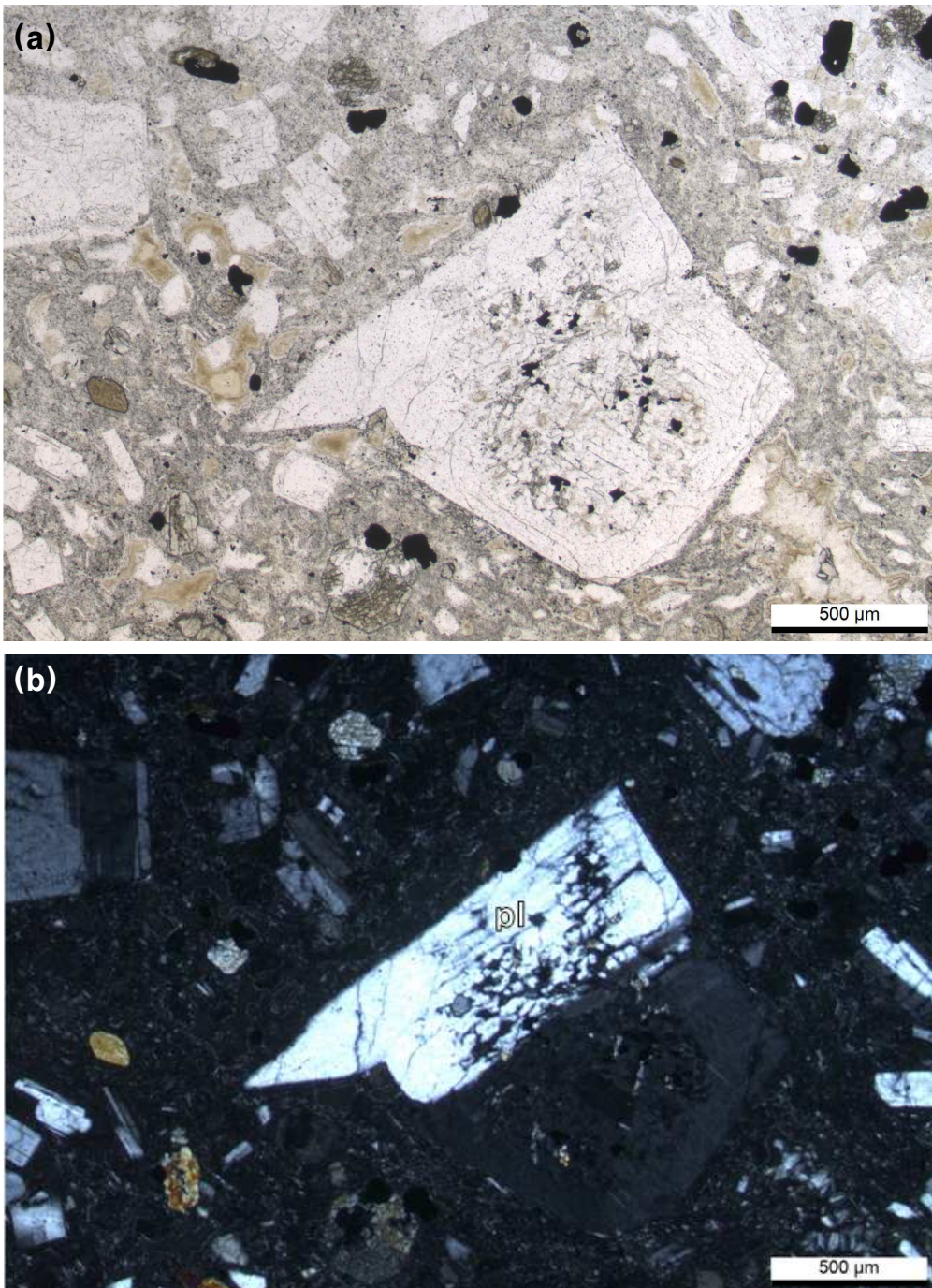


Fig. 37. Microphotographs of andesitic tuff in Guryongpo(pl: plagioclase).
(a)open nicol, (b)cross nicol

IV. 주상절리 형태분석

주상절리의 형태분석을 위하여 18개 지역에 대한 현장조사시 주상절리의 단면이 노출된 곳에 대하여 다각형의 수(N), 기둥면의 폭(L), 기둥면 사이의 각(θ)을 측정하였다(Table 1).

주상절리의 형성과정에서 위의 3가지 요인은 매우 중요하다. 전분실험에 의하면 냉각속도의 빠름과 느림에 따라 다각형의 수가 변화되는 결과를 보인다. 일반적으로 냉각속도가 빠른 표면 부근에서는 오각형 이하의 모양이 많으며, 천천히 냉각하는 내부로 갈수록 육각형의 모양을 띠게 된다(Toramaru and Matsumoto, 2004). 이러한 경향은 기둥면의 폭에서도 같은 결과를 따른다. 지금까지 진행된 다양한 연구에서 기둥면의 폭은 냉각률 함수 $\partial T/\partial t$ 와 관계 있는 것으로 알려져 있다. 느린 냉각률을 보이는 곳에서는 넓은 기둥모양이 만들어지며, 빠른 냉각률을 보이는 곳에서는 좁은 기둥모양을 만든다. 그리고 끌구조(chisel mark)의 폭은 공간적인 온도구배 함수인 $\partial T/\partial x$ 에 의존하기 때문에 주상절리의 기둥과 선은 상호 연관이 있다(Hetényi et al., 2012). 기둥면 사이의 각 또한 마찬가지이다. 주상절리 형성시 냉각이 진행된다면 상부 표면부터 수축하여 블록화하는데, 이 블록은 세 직선에 의하여 분할될 때 에너지가 가장 적게 필요하다. 즉 용암류가 고화되면서 블록으로 나뉘는 균열이 진행된다면 최소 3개의 선으로 분할된다. 냉각률이 높은 표면에서는 균열면 사이의 각 즉, 기둥면 사이의 각은 90° 가 많으나, 냉각률이 감소함에 따라 점차 120° 의 각을 이루며 발달한다. 종합하여 보면, 냉각률이 높은 표면에서는 다각형의 모양이 오각형 이하로 기둥면의 폭은 상대적으로 작고, 기둥면 사이의 각은 90° 에 가깝게 T 형태로 형성되며, 냉각률이 낮을수록 스트레스 방출이 최대화 되므로, 계에서의 에너지가 최소화되는 형태인 육각형의 모양과 완전한 육각형 모양의 사이각인 120° 에 가깝게 형성되고, 기둥면의 폭은 냉각 속도가 낮기 때문에 상대적으로 크게 나타난다.

Table 1. Columnar joint site with names, geographical location in the study area.

Site name	Latitude	Longitude	Administrative district
JB-01*	N35°38'12"	E126°27'42"	Byeonsan-myeon, Buan-gun
JB-02	N35°38'12"	E126°27'42"	Byeonsan-myeon, Buan-gun
JB-03*	N35°38'11"	E126°27'29"	Byeonsan-myeon, Buan-gun
SJI-01	N35°04'24"	E126°09'47"	Jido-eup, Shinan-gun
SJI-02	N34°59'46"	E126°13'56"	Jido-eup, Shinan-gun
SIJ-01	N35°03'48"	E125°55'27"	Imja-myeon, Shinan-gun
SIJ-02	N35°03'25"	E125°55'53"	Imja-myeon, Shinan-gun
SIJ-03	N35°05'37"	E125°58'43"	Imja-myeon, Shinan-gun
SJU-01	N34°57'53"	E126°08'02"	Jeungdo-myeon, Shinan-gun
SJU-02*	N34°57'53"	E126°08'02"	Jeungdo-myeon, Shinan-gun
SJU-03*	N34°57'53"	E126°08'02"	Jeungdo-myeon, Shinan-gun
SJU-04	N34°57'52"	E126°07'58"	Jeungdo-myeon, Shinan-gun
SJU-05*	N34°57'50"	E126°07'58"	Jeungdo-myeon, Shinan-gun
SMJ-01	N34°12'28"	E125°28'02"	Heuksan-myeon, Shinan-gun
SMJ-02	N34°12'26"	E125°28'33"	Heuksan-myeon, Shinan-gun
SMJ-03	N34°12'15"	E125°29'20"	Heuksan-myeon, Shinan-gun
SMJ-04*	N34°12'10"	E125°28'53"	Heuksan-myeon, Shinan-gun
SMJ-05	N34°12'16"	E125°28'38"	Heuksan-myeon, Shinan-gun
SMJ-06	N34°12'25"	E125°27'58"	Heuksan-myeon, Shinan-gun
SMJ-07	N34°12'25"	E125°27'58"	Heuksan-myeon, Shinan-gun

* is measured columnar joint

Table 1. Continued.

Site name	Latitude	Longitude	Administrative district
GH-01	N34°27'18"	E127°19'28"	Dohaw-myeon, Goheung-gun
GH-02	N34°27'18"	E127°19'28"	Dohaw-myeon, Goheung-gun
GH-03	N34°37'49"	E127°25'49"	Jeomam-myeon, Goheung-gun
GH-04*	N34°29'11"	E127°18'39"	Dohaw-myeon, Goheung-gun
GH-05*	N34°26'36"	E127°18'23"	Dohaw-myeon, Goheung-gun
GH-06	N34°38'32"	E127°24'51"	Jeomam-myeon, Goheung-gun
GH-07	N34°35'36"	E127°30'28"	Yeongnam-myeon, Goheung-gun
GH-08*	N34°27'46"	E127°19'10"	Dohaw-myeon, Goheung-gun
GH-09	N34°26'39"	E127°18'53"	Dohaw-myeon, Goheung-gun
YS-01*	N34°43'39"	E127°36'22"	Hwayang-myeon, Yeosu-si
NH-01	N34°42'35"	E127°57'31"	Samdong-myeon, Namhae-gun
NH-02	N34°42'36"	E127°57'28"	Samdong-myeon, Namhae-gun
NH-03*	N34°42'43"	E127°57'18"	Samdong-myeon, Namhae-gun
NH-04	N34°42'43"	E127°57'18"	Samdong-myeon, Namhae-gun
NH-05*	N34°42'43"	E127°57'18"	Samdong-myeon, Namhae-gun
NH-06	N34°53'13"	E128°03'00"	Changseon-myeon, Namhae-gun
SC-01	N34°55'21"	E128°06'13"	Hyangchon-dong, Sacheon-si
GS-01	N34°54'25"	E128°09'38"	Hail-myeon, Goseong-gun
GS-02*	N34°54'09"	E128°09'39"	Hail-myeon, Goseong-gun
PG-01*	N36°00'00"	E129°34'13"	Guryongpo-eup, Pohang-si
PG-02*	N36°00'00"	E129°34'13"	Guryongpo-eup, Pohang-si
PG-03*	N36°00'00"	E129°34'13"	Guryongpo-eup, Pohang-si

JB: Jeokbyeokgang in Buan, SJI: Ji-do in Shinan, SIJ: Imja-do in Shinan,
 SJU: Jeung-do in Shinan, SMJ: Manjae-do in Shinan, GH: Goheung,
 YS: Yeosu, NH: Namhae, SC: Sacheon, GS: Goseong,
 PG: Guryongpo in Pohang

1. 부안지역 주상절리

이 지역의 주상절리는 변산반도 적벽강 해안에 약 600m에 걸쳐 분포한다. 수직방향의 컬러네이드 구조를 보이며, 높이는 최대 10m이다. 주상절리를 구성하는 암석은 곰소유문암으로 기재되어 있으며(한국지질자원연구원, 2013), 하부의 격포리층을 피복하고 있다(Fig. 39).

Fig. 38은 적벽강 일대에서 주상절리가 위치한 지역을 표시한 곳으로 이 중

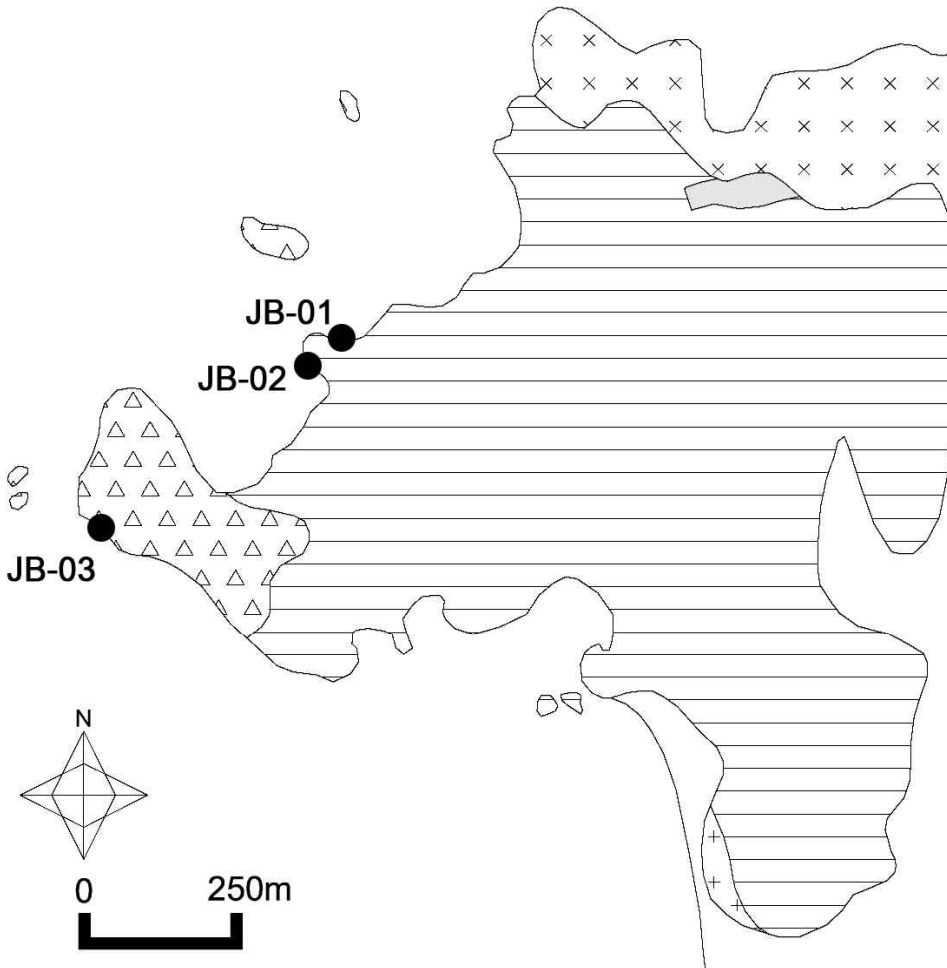


Fig. 38. Geology map of the Jeokbyeokgang showing sample location.

단면의 구조를 잘 파악할 수 있는 곳(Fig. 40, 42)에서 주상절리의 형태를 측정하였다. 주상절리 측정은 2곳에서 총 182개의 단면을 조사하였다.

JB-01지역의 주상절리 다각형의 수(N)는 4각형이 21.62%, 5각형이 59.46%, 6각형이 16.22%, 7각형이 2.70%로 5각형이 절반 이상 차지하며, 기둥면의 폭(L)은 11~20cm가 50.39%의 빈도율로 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 1~10cm가 9.30%, 21~30cm가 33.33%, 31~40cm가 5.43%, 41~50cm가 1.55%의 빈도율을 보인다. 기둥면 사이의 각(θ)는 91°~100°가 18.23%로 가장 높은 빈도율을 보이며, 111°~120°사이가 15.63%, 121°~130°가 13.02%, 81°~90°가 11.98%의 빈도율을 나타낸다(Fig. 41). JB-03지역의 주상절리의 다각형의 수는 4각형이 47.59%로 가장 높게 나타나며, 5각형이 35.86%, 6각형이 11.03%의 빈도율을 보인다. 기둥면의 폭은 대부분 20cm내에 분포하며 11cm~20cm 사이에 28.53%의 빈도율을 보인다(Fig. 43).

JB지역의 측정값을 종합적으로 나타내면 Table 2와 같다. 다각형의 수(N)는 4각형이 42.31%, 5각형이 40.46%의 빈도율을 보이며, 기둥면의 폭(L)은 11~20cm가 48.95%로 가장 높은 빈도율을 보인다. 그리고 기둥면 사이의 각(θ)은 90°~100°가 17.15%로 가장 높은 빈도율을 보인다.

JB-01 지역의 주상절리(Fig. 39(a))는 기둥 방향의 대부분이 수직방향으로 발달하고 있으며, 기둥의 크기가 거의 균일하게 형성되어 있다. 이러한 모양은

Table 2. Measurement of columnar joint in Jeokbyeok site.

N		3	4	5	6	7	8		
		0.55%	42.31%	40.66%	12.09%	2.75%	1.65%		
L		1~10cm	11~20cm	21~30cm	31~40cm	41~50cm			
		37.06%	48.95%	12.24%	1.40%	0.35%			
θ		~70°	71°~80°	81°~90°	91°~100°	101°~110°	111°~120°	121°~130°	131°~141°
		7.88%	9.62%	15.53%	17.15%	12.51%	11.01%	8.57%	8.11%



Fig. 39. Photograph from columnar joint in Jeokbyeokgang, Buan.
(a): JB-01, (b):JB-03

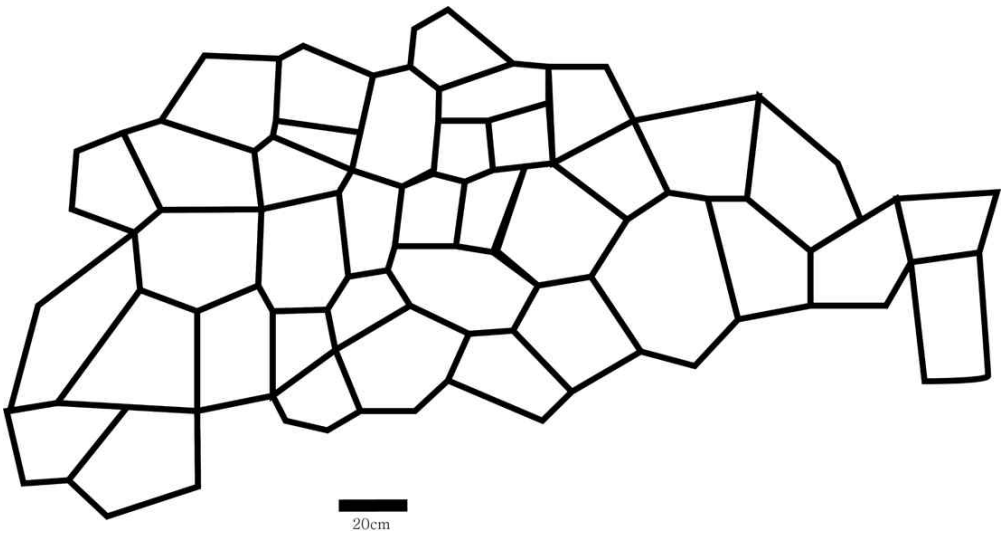


Fig. 40. Photograph and sketch of measured columnar joint in JB-01.

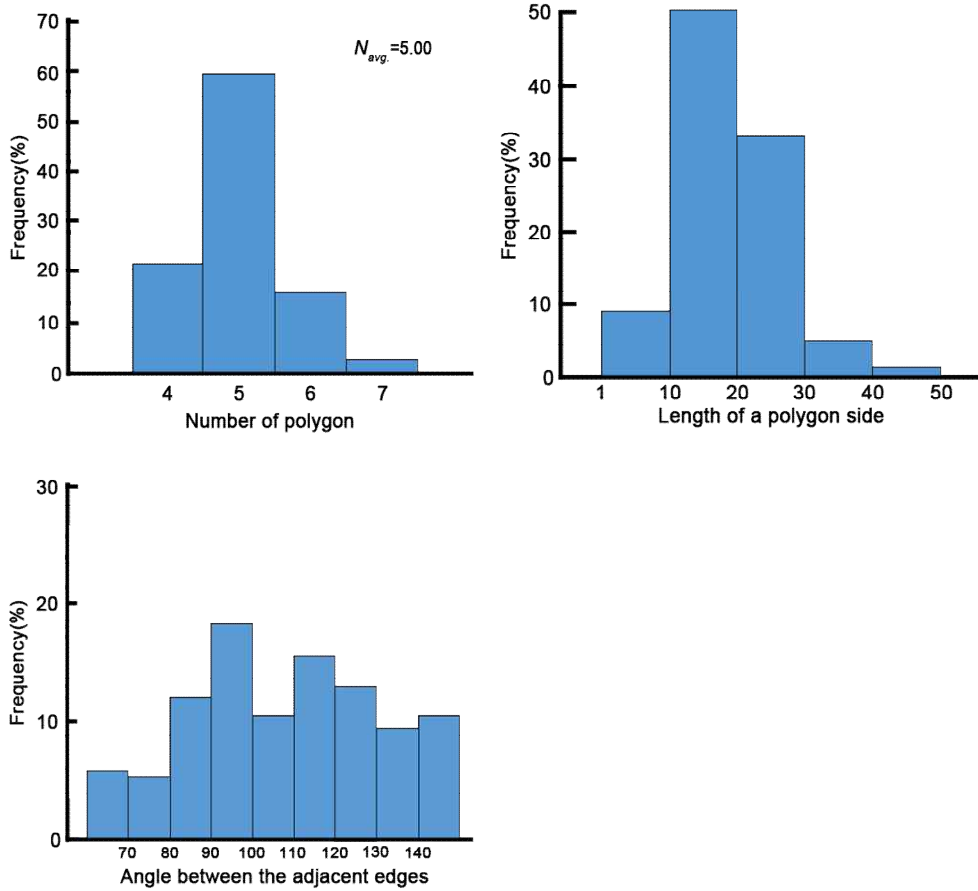


Fig. 41. Frequency(%) of measurement to columnar joint JB-01.

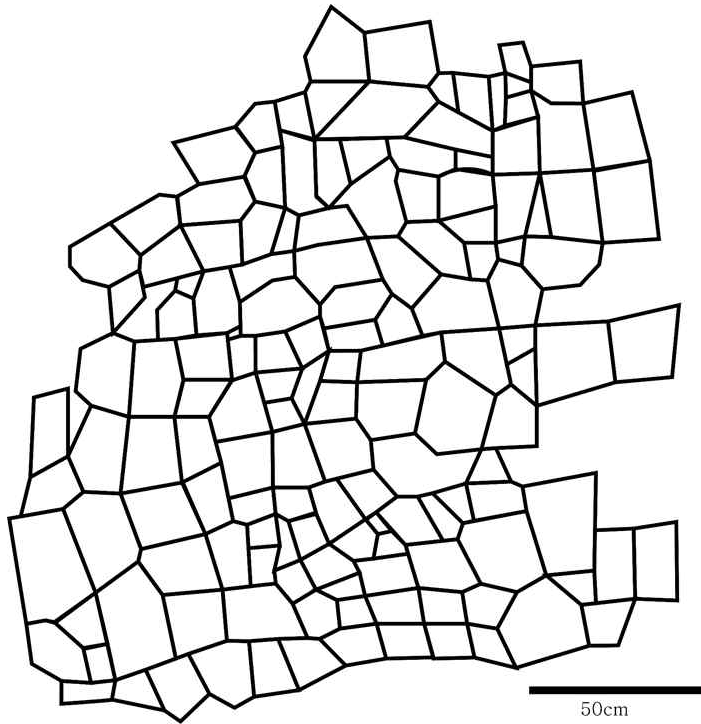


Fig. 42. Photograph and sketch of measured columnar joint in JB-03.

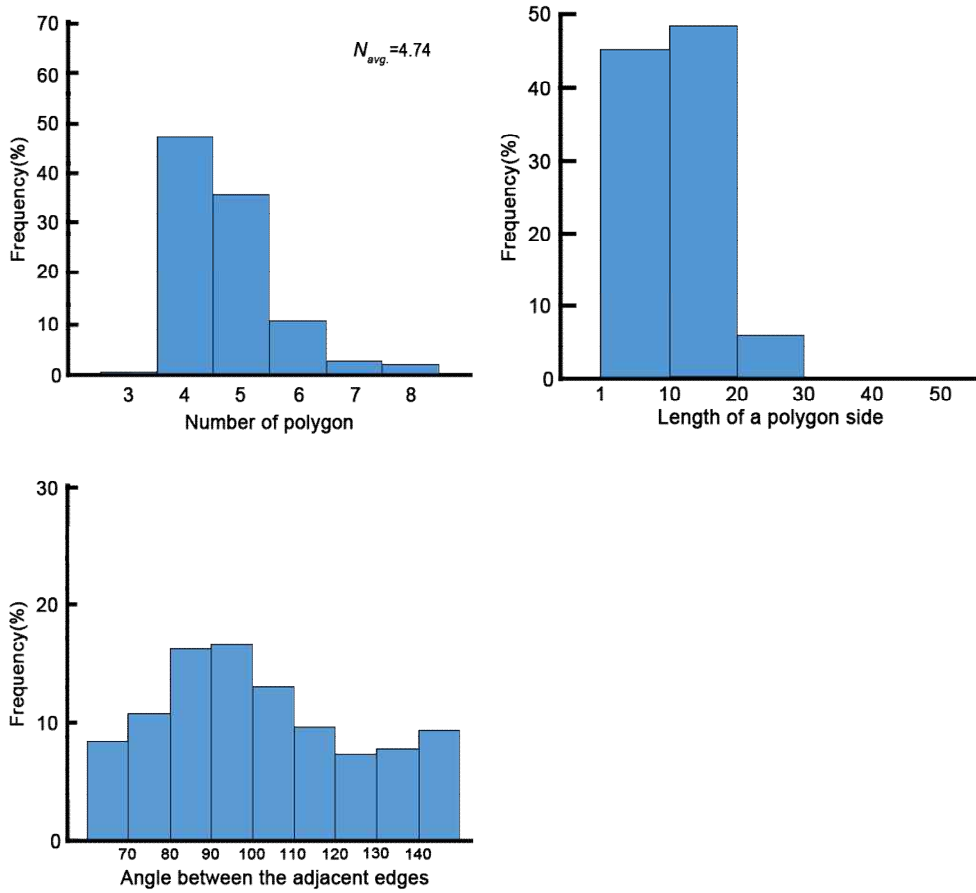


Fig. 43. Frequency(%) of measurement to columnar joint JB-03.

주상절리가 초기에 형성될 때, 등온면이 지표면과 수평하게 형성되었으며, 두께는 두껍지 않아 Fig. 11(a)(thin lava flow)와 같은 형태로 형성되었을 것으로 추정된다. 다만, 하부 격포리층과 맞닿는 부분에서 주상절리의 기둥모양이 명확하게 나타나지 않는 것으로 보아 엔테블러취의 모습을 보이고 있으며, 페퍼라이트가 관찰되는 것으로 보아 격포리층은 주상절리 형성당시 미고결 상태였음을 추정할 수 있다.

JB-03 지역의 주상절리(Fig. 39(b))는 JB-01 지역의 주상절리 구조보다 복잡한 형상을 보인다. 일반적인 주상절리들에서는 지표와 맞닿는 곳의 기둥 크기가 공기층과 맞닿는 곳의 기둥 크기보다 크게 나타난다. 그러나 이 지역의 주상절리는 하부층과 맞닿는 부분에서 기둥의 크기가 매우 작게 나타나고 상부로 갈수록 커지는 모습을 관찰할 수 있다.

적벽강 지역은 일반적으로 보고된 주상절리의 형태를 역전한 모습을 보여 주고 있으며, 주상절리 형성시 하부 퇴적층의 영향을 받아 현재의 모습을 나타낸 것이라 할 수 있다.

2. 신안지역 주상절리

신안군 지역에서 주상절리가 관찰된 지역은 지도, 증도, 입자도, 만재도 등 네 지역이다. Fig. 44는 주상절리가 위치한 곳으로 지도읍 감정리 서쪽 신안 농공단지가 위치한 곳으로 해안을 따라 주상절리가 관찰되어 기연구되었다(오강호 등, 2006). 지도 남측의 울도 남부에 위치한 무인섬에서도 주상절리가 발견되었지만, 이번 연구에서는 배제되었다. 증도 주상절리는 증도면 남쪽 우전리 엘도라도리조트에서 관찰되며 해안선을 따라 파식대지를 형성하고 있다. 입자도의 주상절리는 본 섬의 서쪽에 있는 무인섬인 부남군도의 입모도, 굴도, 무명2도에서 분포하는 것으로 보고되었다(환경부, 2011). 만재도 주상절리는 본 섬 북쪽 사면과 주변의 무인도에서 다수 관찰되었다.

신안지역 주상절리는 총 5곳에서 조사가 진행되었다. 증도 3곳, 만재도 1곳, 지도 1곳 등에서 진행하였으며, 지도의 측정자료는 오강호 등(2006)의 기자료를 인용하여 작성하였다.

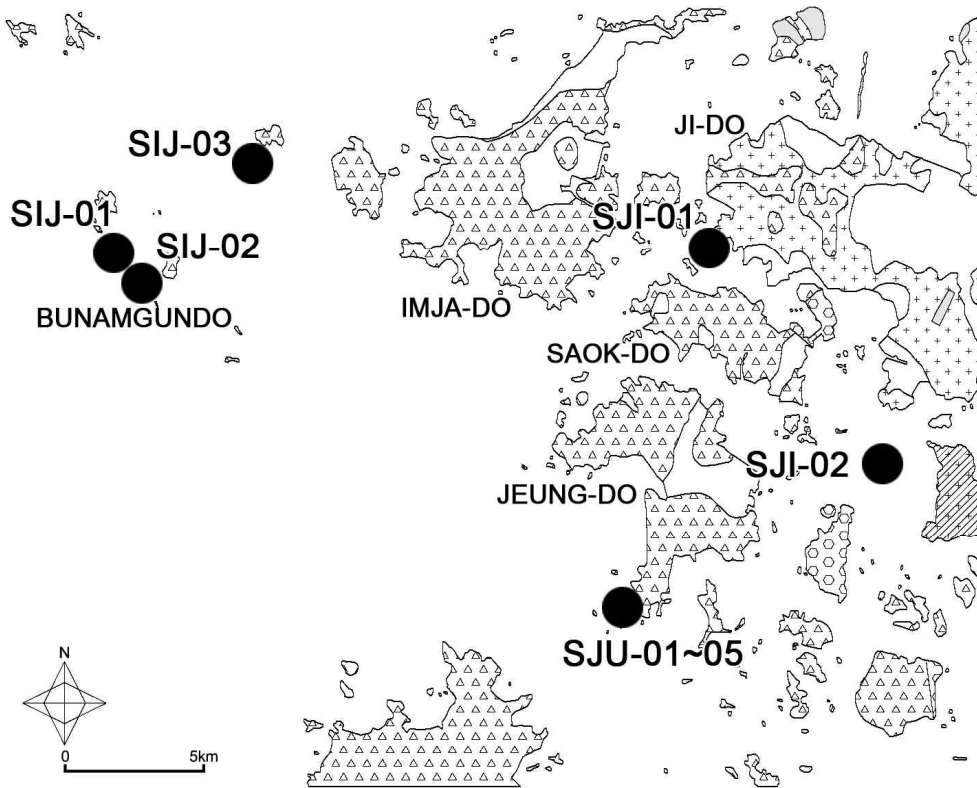


Fig. 44. Geology map of the Shinan showing sample location.

1) 지도지역

이 지역의 주상절리는 오강호 등(2006)의 연구에 보고되었다. 연구 당시 신안농공단지 조상사업으로 인하여, 조성부지 내 해안가 약 20m 구간에서 관찰되었으며, 약 2~5m 높이의 해안절벽이 노두로 노출되어 있다(Fig. 45(a), (b)).

주상절리의 기둥 길이는 2~5m로 보고되었으며, 다각형의 형태는 4각형에서 7각형까지 다양하게 나타나고, 5각형의 형태가 가장 우세하게 나타난다. 기둥면의 폭은 10~20cm 사이가 가장 빈도율이 높으며, 다각형 사이의 각은 120°~130°가 가장 우세한 것으로 나타났다(Table 3).

지도의 남부 울도 남측에 이름 없는 작은 섬에서도 주상절리가 관찰된다. Fig. 45(c)와 (d)는 해당지역의 주상절리를 촬영한 사진으로 추후 추가 조사를 통하여 단면의 크기 측정 등을 진행하여 데이터를 축적할 필요가 있을 것으로 사료된다.

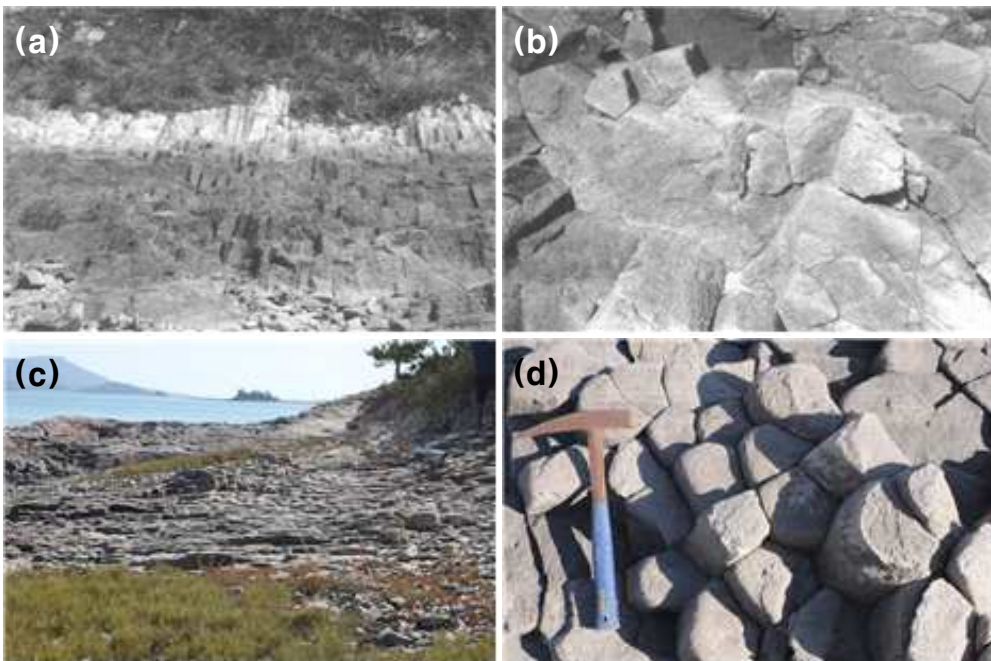


Fig. 45. Photographs of columnar joint in the Ji-do.

(a):columnar joint(Oh *et al.*, 2006), (b):column face(Oh *et al.*, 2006),
 (c):Columnar joint in Yul-do (d):face of columnar joint in Yul-do

Table 3. Measurement of columnar joint in Ji-do(Oh *et al.*, 2006).

N	4		5		6		7		
	21.7%		47.8%		26.1%		4.3%		
L	1~9cm		10~19cm		20~29cm		30~39cm		
	32.7%		54.3%		11.2%		1.7%		
θ	~69°	70°~	80°~	90°~	100°~	110°~	120°~	130°~	140°~
		79°	89°	99°	109°	119°	129°	139°	
	4.9%	6.0%	10.4%	11.3%	9.5%	13.0%	13.7%	9.5%	21.7%

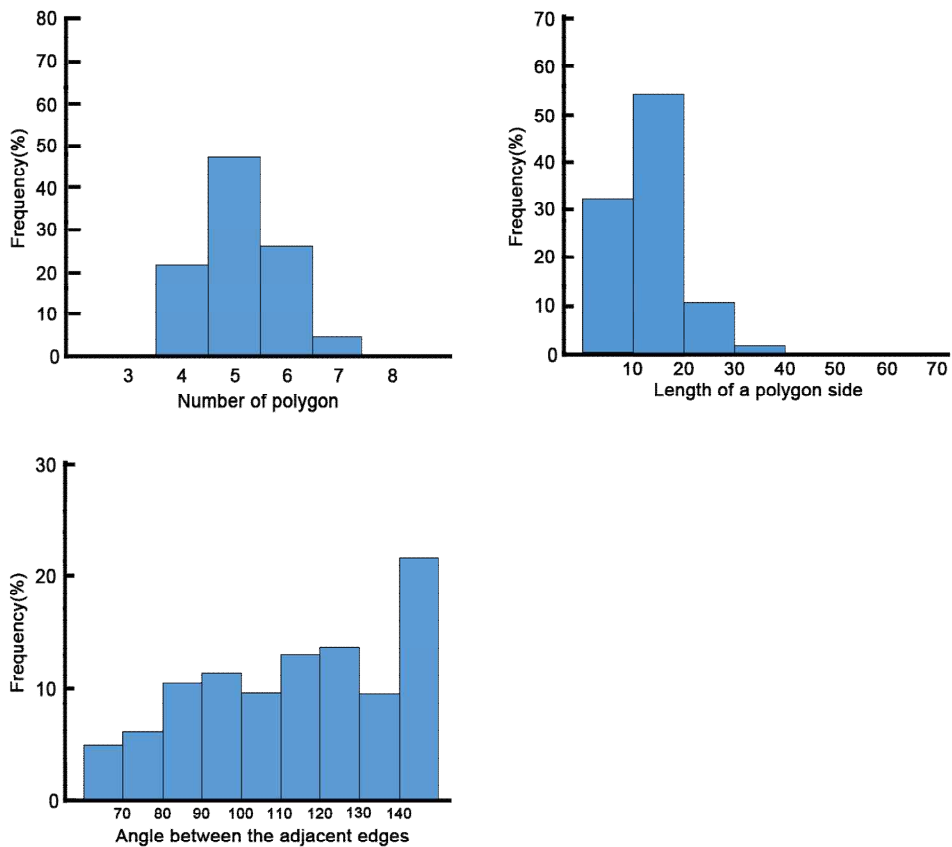


Fig. 46. Frequency(%) of measurement to columnar joint in the Ji-do site.

2) 증도지역

증도지역의 주상절리는 본 섬의 서쪽에 위치한 우전해수욕장의 남쪽 끝에 서부터 시작하여, 북서쪽 약 300m의 연장으로 파식대지에 위치하고 있다(안건상과 손정모, 2015).

주상절리의 형태는 돛구조부터 암맥에 이르기까지 다양한 형태로 나타나고 있다. 내부의 암편은 주상절리의 기둥 발달 방향에 수직방향으로 발달한 것이 아닌 중력 방향에 수직으로 발달하였다. 이는 주상절리의 발달 방향과 중력방향은 무관하며, 주상절리는 냉각면(등온면)에 수직 방향으로 발달하였음을 시사한다(Fig. 47).

증도지역의 주상절리 측정은 총 3개 지역에서 진행하였다. 다각형 281개, 기둥면의 폭 1,020개, 기둥면 사이의 각 1,492개에 대한 측정 결과에 따르면, 다각형은 4각형이 23.13%, 5각형이 37.72%, 6각형이 32.03%, 7각형이 7.12%의 분포를 보인다. 기둥면의 폭은 11~20cm가 54.31%로 가장 높은 빈도율을 보



Fig. 47. Photograph of columnar joint face in Jeung-do.

이며, 1~10cm가 25.20%, 21~30cm가 15.98%의 빈도율을 보인다. 기둥면 사이의 각은 131°~140°가 23.46%로 가장 높은 빈도율을 보이고, 81°~90°가 18.77%, 111°~120°가 17.29%, 121°~130°가 14.48%, 101°~110°가 14.28%의 빈도율을 보인다(Table 4).

지역별로 세분화하면 SJU-02지역에서는 다각형의 수가 평균 5.3각형이며, 5각형이 43.69%로 가장 높은 빈도율을 보였다. 기둥면의 폭은 11cm~20cm가 57.26%의 빈도율을 보이며, 기둥면 사이의 각은 다양하게 분포하나 111°~120° 사이의 각이 18.69%의 빈도율로 가장 높다(Fig. 48, 49). SJU-04지역의 평균 다각형의 수는 4.96개이며, 4각형이 36.17%, 5각형이 34.04%의 빈도율을 보인다. 기둥면의 폭은 11cm~20cm가 38.22%로 가장 높게 나타난다. 기둥면 사이의 각은 80°~140° 범위에서 다양하게 나타나며, 81°~90°가 23.01%로 빈도율이 가장 높게 나타난다(Fig. 50, 51). SJU-05 지역의 평균 다각형 수는 5.28개로 4각형에서 7각형까지 다양하게 고루 나타나며, 35.53%의 빈도율로 5각형이 가장 많이 분포한다. 기둥면의 폭은 1cm~10cm가 23.96%, 11cm~20cm가 57.23%, 21cm~30cm가 16.24%의 빈도율을 보인다. 기둥면 사이의 각은 111°~120°가 16.36%의 가장 높은 빈도율을 보이나, 전체적으로 큰 차이가 없는 경향이다(Fig. 52, 53).

증도에 형성되어 있는 주상절리는 전체적인 구조에서 리조트가 있는 곳을

Table 4. Measurement of columnar joint in Jeung-do.

<i>N</i>		4		5		6		7		
		23.13%		37.72%		32.03%		7.12%		
<i>L</i>		1~10cm	11~20cm	21~30cm	31~40cm	41~50cm	51~60cm	61~70cm		
		25.20%	54.31%	15.98%	3.53%	0.78%	0.10%	0.10%		
<i>θ</i>		~70°	71°~80°	81°~90°	91°~100°	101°~110°	111°~120°	121°~130°	131°~140°	141°~
		0.00%	0.00%	18.77%	11.73%	14.28%	17.29%	14.48%	23.46%	0.00%

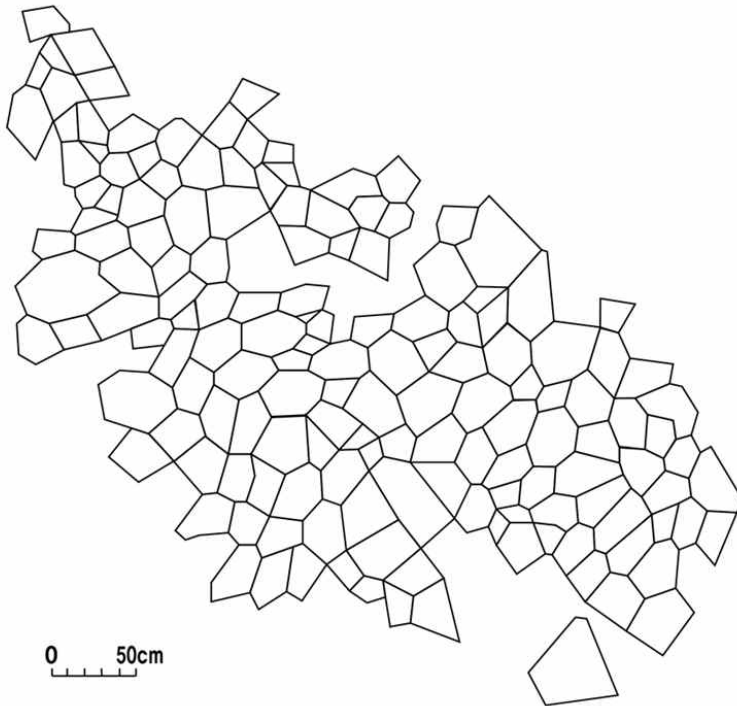


Fig. 48. Photograph and sketch of measured columnar joint in SJU-02.

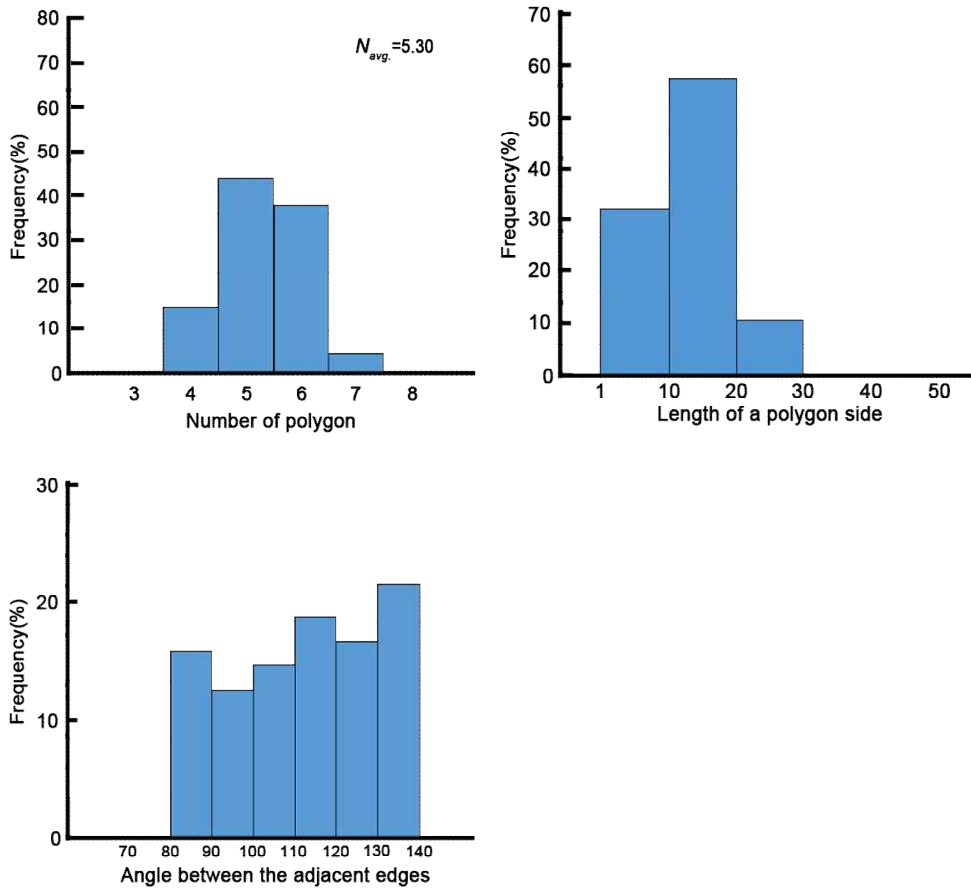


Fig. 49. Frequency(%) of measurement to columnar joint in SJU-02.

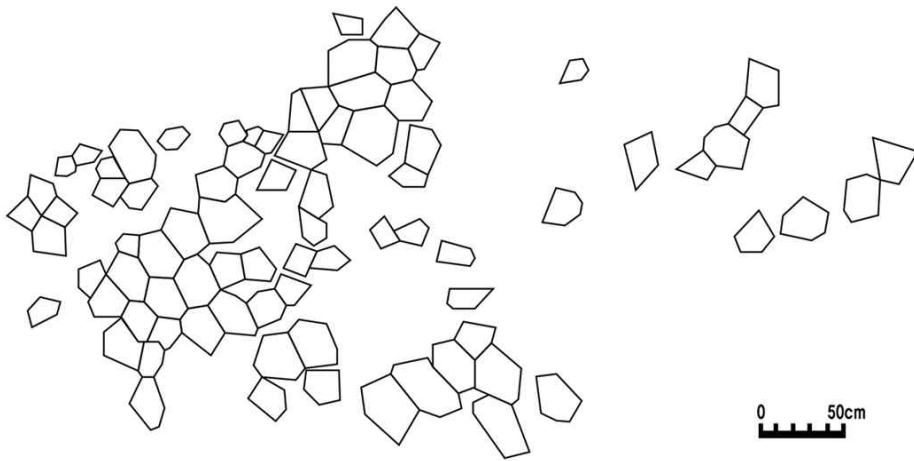


Fig. 50. Photograph and sketch of measured columnar joint in SJU-04.

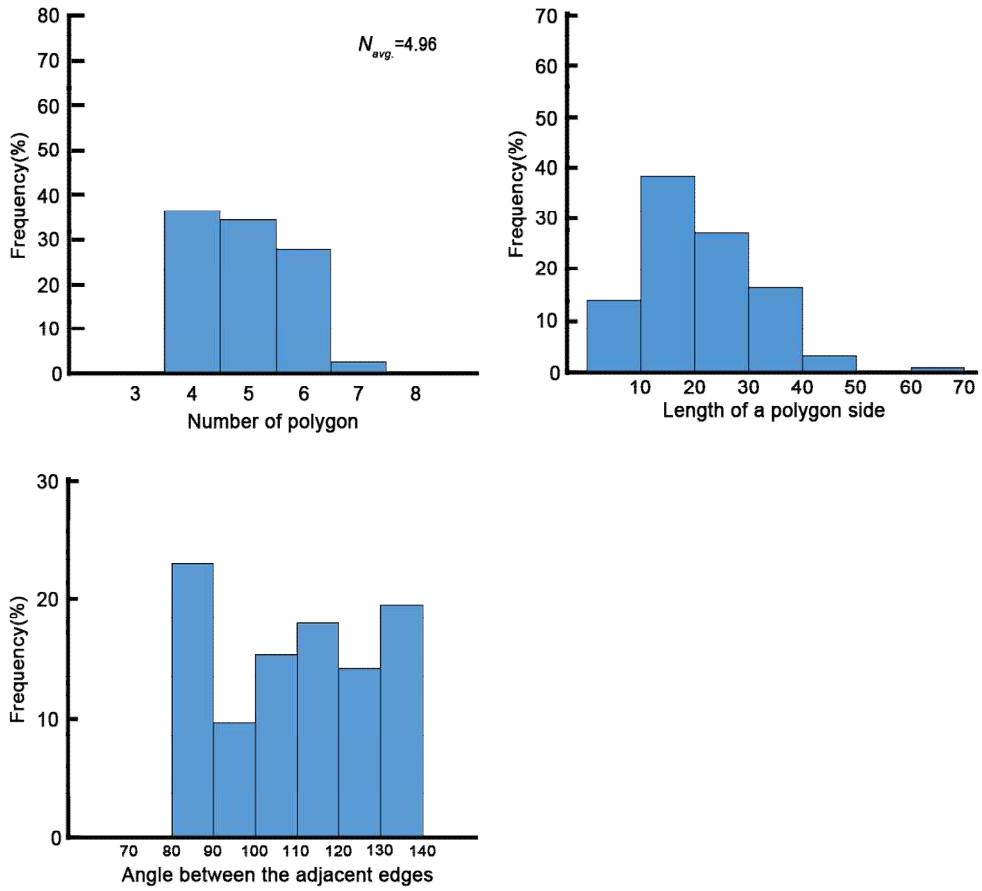


Fig. 51. Frequency(%) of measurement to columnar joint in SJU-04.

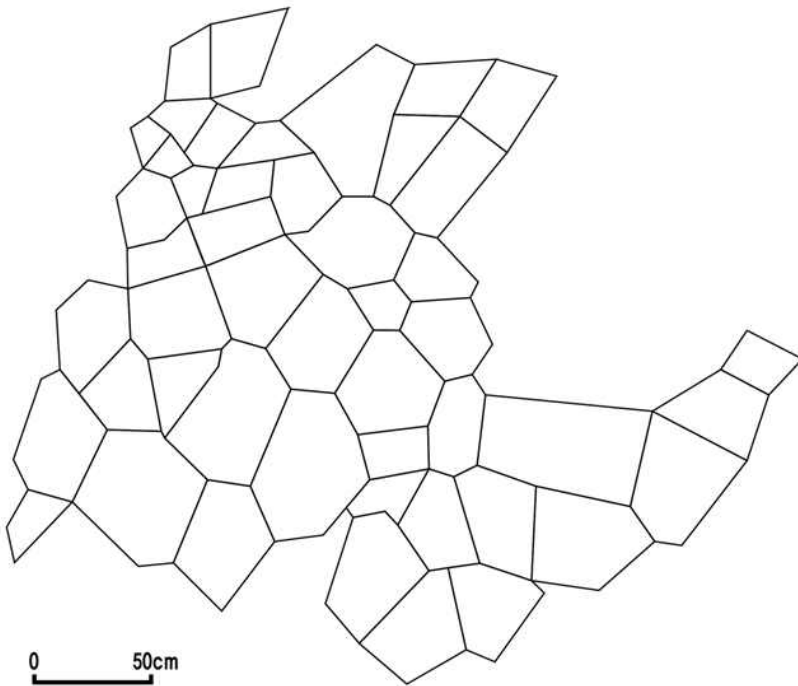


Fig. 52. Photograph and sketch of measured columnar joint in SJU-05.

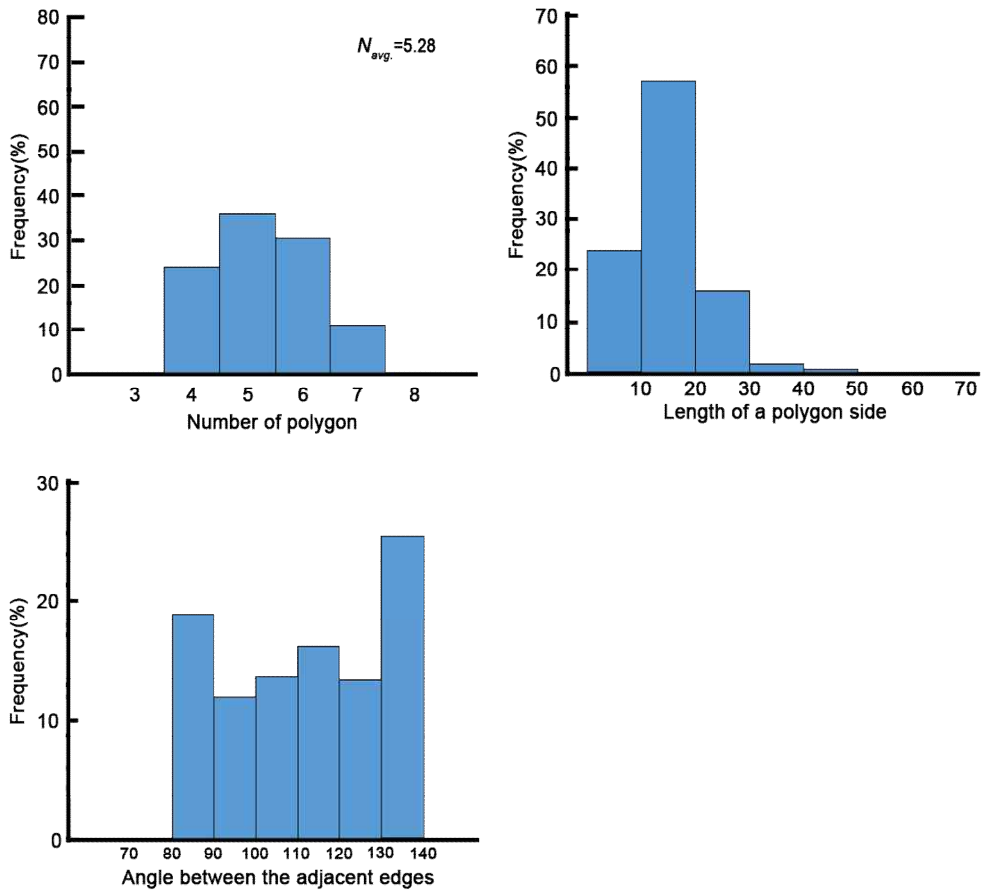


Fig. 53. Frequency(%) of measurement to columnar joint in SJU-05.

냉각의 중심점으로 가정하면, Nishiwaki and Hirotsishi(2009)의 분류에 따르면 (Fig. 10), 팬(Fan)의 형태를 띄고 있다. 리조트에서 바다방향으로 주상절리가 발달하고 있으며, 대부분의 주상절리는 지표면과 수직 방향으로 발달하고 (Fig. 54(a)), 돛 형태의 주상절리가 곳곳에서 존재하고, 암맥에서도 주상절리가 발달하고 있다(Fig. 54(b)).

3) 입자도지역

본 지역은 입자도 재원리 소재 무인도서인 입모도, 굴도, 무명 2도이며, 2011년 환경부와 국립환경과학원에서 발간한 전국 무인도서 자연환경조사 보고서에 따르면 위에 언급한 3곳의 섬에서 지면과 수평 방향의 주상절리가 보고되고 있다(Fig. 55).

입모도는 섬의 북쪽지역에서 해식동과 함께 주상절리가 소규모로 발달하고 있으며, 굴도에서는 섬의 서쪽지역에서 암맥상의 주상절리가 발달하고 있다. 무명 2도에서는 섬의 북쪽편을 가로질러 주상절리가 발달하고 있는 것으로 알려져 있다.

주상절리는 등온선에 수직 방향으로 발달한다. 입자도의 무인도서에 발달한 주상절리는 분출 또는 화산쇄설물들의 강하에 의하여 형성된 것이 아닌, 암맥이 발달한 곳에 생성되었다. 암맥에서의 주상절리 형성은 기존의 암석 사이에서 형성되기에 암맥 발달 방향과 평행하게 등온선이 형성되며 기존 암석에서부터 냉각이 시작되어 양쪽에서 시작된 균열이 서로 만나면 주상절리의 형성이 완료된 것으로 사료된다. 입자도 무인도서에 발달한 주상절리는 암맥의 폭이 그리 넓지 않아 작은 차이는 있지만 거의 동일한 크기의 주상절리가 형성되어 있다.

4) 만재도지역

만재도지역의 주상절리는 본섬과 주변의 무인도들에서 모두 주상절리가 관찰된다. 명확하게 구분되어지는 주상절리를 대상으로 총 6개 지역에서 암석을 채취하였고, 1개 지역의 주상절리 크기를 측정하였다(Fig. 56).

본 연구지역은 전 지역이 유문암 또는 유문암질 응회암지역으로 용결구조

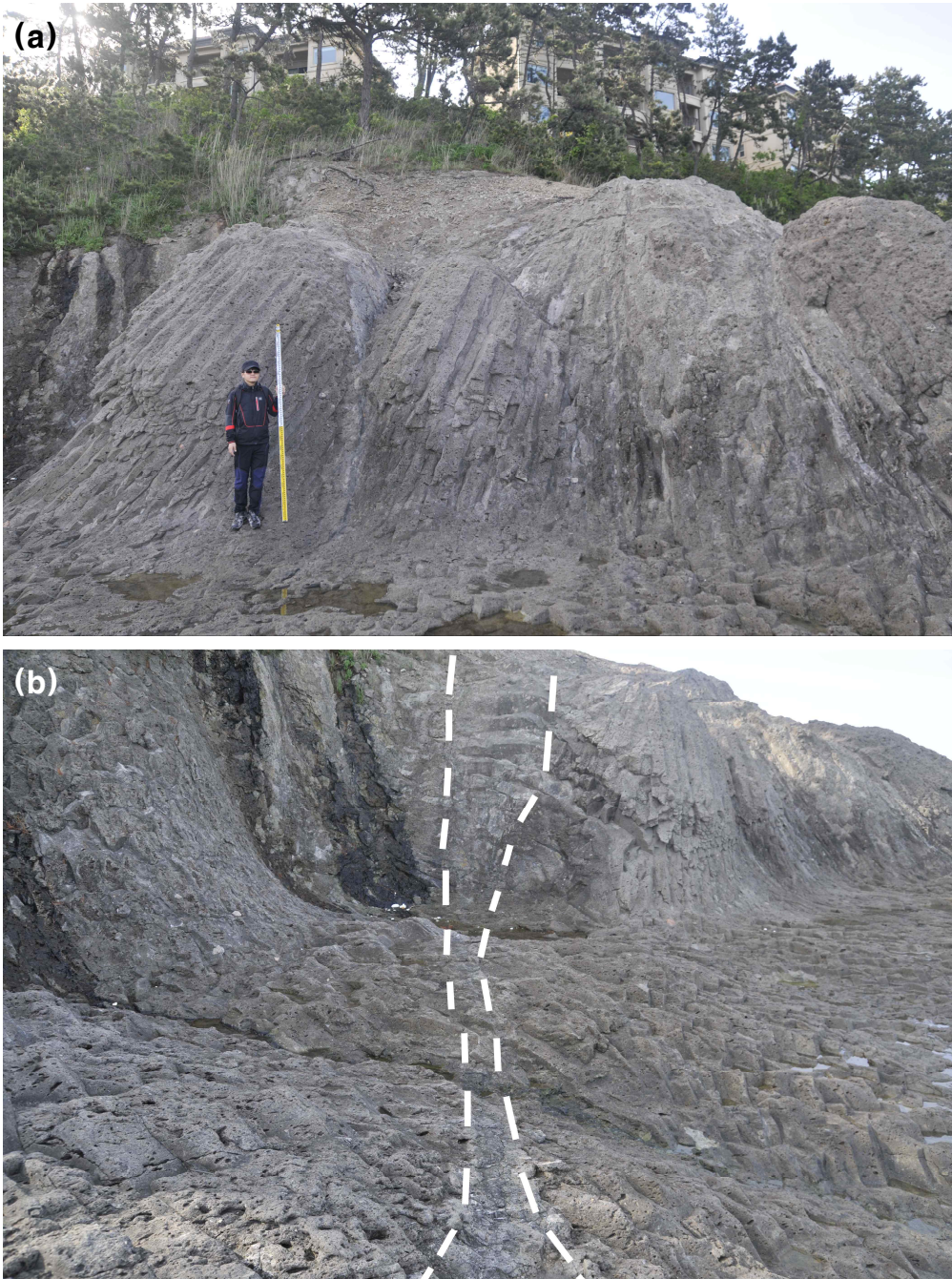


Fig. 54. Photograph of columnar joint in Jeung-do.

(a)vertical direction of columnar joint , (b)columnar joint in dyke.

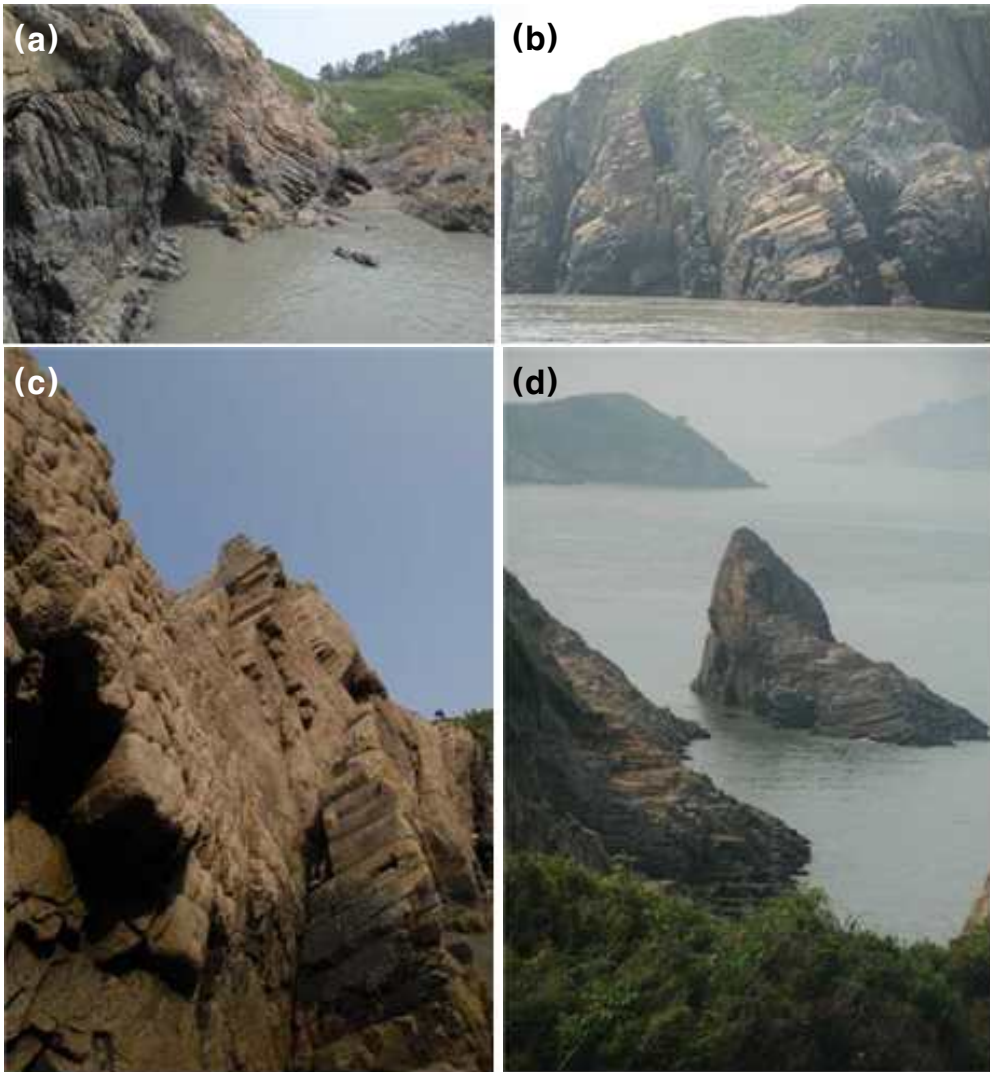


Fig. 55. Photographs of columnar joint in the Bunamgundo(Ministry Environment, 2011).

(a): Ipmo-do, (b):Mumyeonggi-do(nonamed 2 island),
 (c),(d): Gul-do

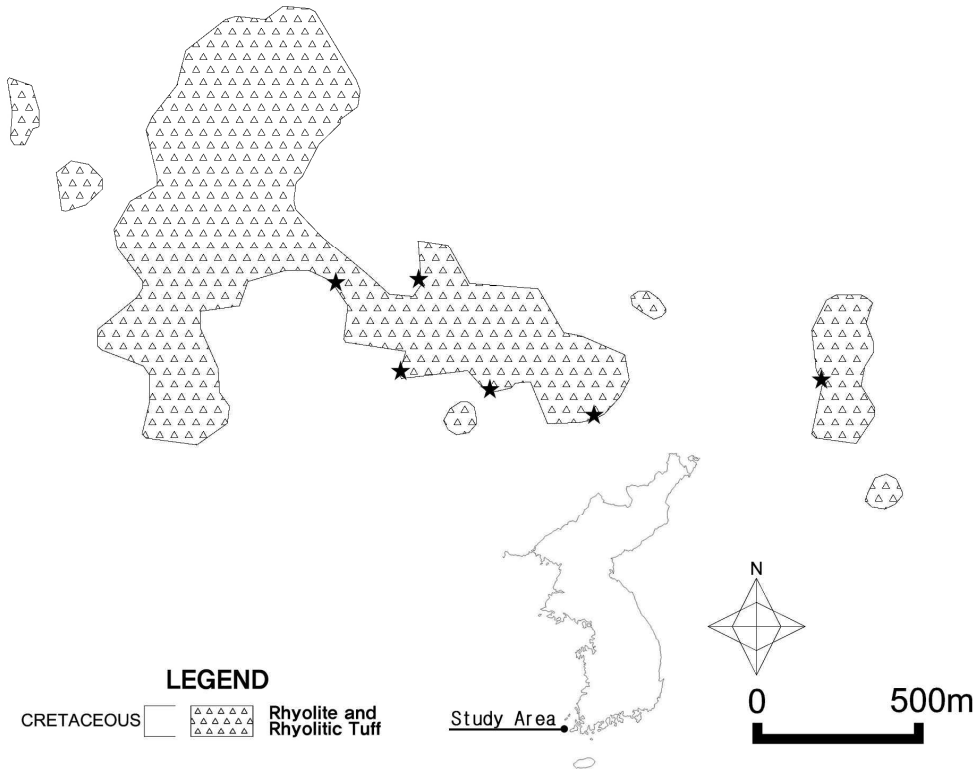


Fig. 56. Geology map of the Manjae-do showing sample location.



Fig. 57. Photographs of columnar joint in the Manjae-do.



Fig. 57. Continued.

(e)



(f)



Fig. 57. Continued.

가 뚜렷하게 나타나는 용결응회암과 래피리응회암들로 구성되어 있다. 만재도에 분포하는 주상절리는 대체로 지표와 수직방향으로 발달하고 있으며(Fig. 57), 이를 관입한 암맥에서 수평으로 발달한 주상절리가 분포하고 있다(Fig. 58). 연구지역의 다른 주상절리들과 달리 주상절리 기둥면의 폭이 넓은 범위에서 나타나며, 최대 4m에 이르는 주상절리도 있다. 앞서 이론에서 설명한 바와 같이, 주상절리의 크기는 냉각율과 화학조성에 의하여 영향을 받는다. 이 지역에 주상절리 형성에 대하여 크게 두 가지 가정을 해 볼 수 있다. 첫째로, 전체적으로 하부에 분포하는 주상절리들에게서 크기가 상대적으로 큰 켈러네이드가 존재하는 것으로 보아 이 지역이 기본적으로 화산활동 후 완전히 냉각하기까지 상당한 시간이 소요되었을 것으로 추정할 수 있다. 둘째는 이 지역에 대규모 화산쇄설물의 강하, 응결 등의 과정이 일어나 커다란 용암호 형태의 구조(Fig. 11(c))가 존재했으며, 오랜 지사 동안에 주변부는 침식되어 없어지고 중심부의 커다란 주상절리 기둥들만 존재했을 것이라는 가정이다. 후자의 가정의 경우 가거도, 하태도, 상태도 등 주변의 섬에서 주상절리가 존재하지 않는 점, 지질이 다른 점 등의 이유로 가능성이 낮다. 만재도 지역의 주상절리를 측정된 결과 다각형의 수는 평균 4.97각형으로 4각형이 31.5%, 5각형이 43.31%의 빈도율을 보인다. 기둥면의 폭은 최소 30cm부터 4m 이상으로 다양하며, 주로 1m~2m 사이의 폭을 보인다. 그리고 기둥면 사이의 각은 70° 이하의 각이 18.30%, 141° 이상의 각이 17.51%의 빈도율을 보인다(Fig. 59, Table 5).

신안지역의 전체적인 측정값은 Table 6과 같다. 주상절리 단면의 다각형 수는 5각형이 39.46%로 가장 높은 빈도율을 보이고, 기둥면의 폭은 만재도 측정자료를 제외하면 대부분 30cm이내의 값에서 정렬된다. 기둥면 사이의 각은 대체로 90°주변의 각이 빈도율이 높은 경향을 보인다.



Fig. 58. Photographs of columnar joint in dyke(Manjae-do).

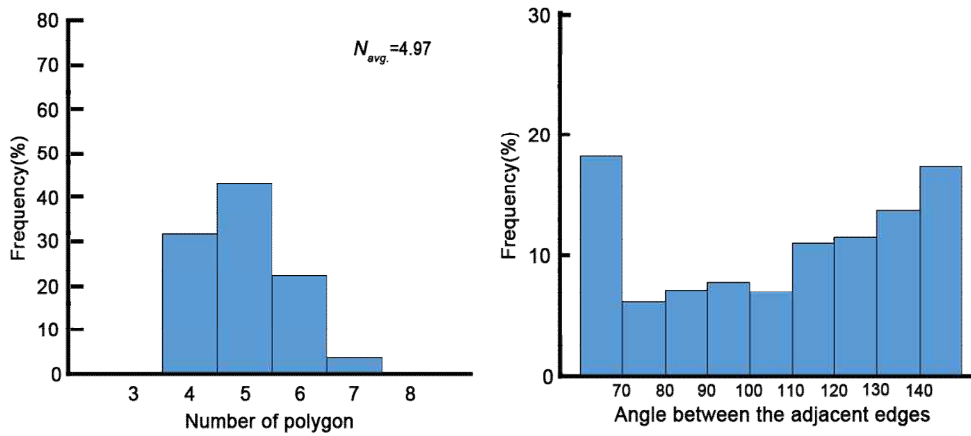


Fig. 59. Frequency(%) of measurement to columnar joint in SMJ-04.

Table 5. Measurement of columnar joint in Manjae-do.

<i>N</i>	4		5		6		7	
	31.50%		43.31%		22.05%		3.15%	
<i>L</i>	1~ 10cm	11~ 20cm	21~ 30cm	31~ 40cm	41~ 50cm	51~ 60cm	61~ 70cm	71~ 80cm
	0.00%	0.00%	0.00%	0.63%	0.63%	1.48%	2.95%	2.32%
	81~ 90cm	91~ 100cm	101~ 110cm	111~ 120cm	121~ 130cm	131~ 140cm	141~ 150cm	151~ 160cm
	3.59%	3.38%	5.06%	3.59%	5.70%	5.70%	4.64%	3.59%
	161~ 170cm	171~ 180cm	181~ 190cm	191~ 200cm	201~ 210cm	211~ 220cm	221~ 230cm	231~ 240cm
	5.91%	5.70%	5.70%	5.70%	3.16%	2.53%	4.64%	4.43%
	241~ 250cm	251~ 260cm	261~ 270cm	271~ 280cm	281~ 290cm	291~ 300cm	301~ 310cm	311~ 320cm
	3.16%	2.11%	1.48%	2.53%	1.27%	1.48%	1.05%	0.63%
	321~ 330cm	331~ 340cm	341~ 350cm	351~ 360cm	361~ 370cm	371~ 380cm	381~ 390cm	391~ 400cm ~
0.84%	0.63%	0.42%	1.05%	0.42%	0.21%	0.00%	0.00% 1.69%	
<i>θ</i>	~70°	71° ~80°	81° ~90°	91° ~100°	101° ~110°	111° ~120°	121° ~130°	131° ~140° 141°~
	18.30%	6.15%	7.10%	7.89%	6.94%	10.88%	11.51%	13.72% 17.51%

Table 6. Measurement of columnar joint in Shinan(Total).

<i>N</i>	4		5		6		7		
	25.74%		39.46%		28.92%		5.88%		
<i>L</i>	1~ 10cm	11~ 20cm	21~ 30cm	31~ 40cm	41~ 50cm	51~ 60cm	61~ 70cm	71~ 80cm	
	17.20%	37.08%	10.91%	2.61%	0.74%	0.54%	1.00%	0.74%	
	81~ 90cm	91~ 100cm	101~ 110cm	111~ 120cm	121~ 130cm	131~ 140cm	141~ 150cm	151~ 160cm	
	1.14%	1.07%	1.61%	1.14%	1.8%1	1.81%	1.47%	1.14%	
	161~ 170cm	171~ 180cm	181~ 190cm	191~ 200cm	201~ 210cm	211~ 220cm	221~ 230cm	231~ 240cm	
	1.87%	1.81%	1.81%	1.81%	1.00%	0.80%	1.47%	1.41%	
	241~ 250cm	251~ 260cm	261~ 270cm	271~ 280cm	281~ 290cm	291~ 300cm	301~ 310cm	311~ 320cm	
	1.00%	0.67%	0.47%	0.80%	0.40%	0.47%	0.33%	0.20%	
	321~ 330cm	331~ 340cm	341~ 350cm	351~ 360cm	361~ 370cm	371~ 380cm	381~ 390cm	391~ 400cm ~ 401cm	
0.27%	0.20%	0.13%	0.33%	0.13%	0.07%	0.00%	0.00%	0.54%	
θ	~70°	71° ~80°	81° ~90°	91° ~100°	101° ~110°	111° ~120°	121° ~130°	131° ~140°	141°~
	5.46%	1.83%	15.29%	10.58%	12.09%	15.38%	13.59%	20.56%	5.22%

3. 고흥지역의 주상절리

본 지역의 주상절리는 고흥군 도화면 유주산 일대, 지죽도 일대, 구암리 일대와 점암면 성기리 일대, 고흥군 영남면 우천리 일대에 분포한다(Fig. 60). 유주산 일대는 현재 채석장으로 개발되고 있는 곳으로 주상절리 구조가 아주 뚜렷하게 관찰되는 곳이다. 연구지역에 분포하는 주상절리는 대부분 켈러네이드 구조가 잘 관찰되나, 유주산의 채석장을 제외하고는 풍화가 진행되거나, 해안에 위치하여 파도에 의한 침식으로 인하여 2차 절리가 생겨 구분이 어려운 면이 있다. 영남면에 위치한 용바위의 주상절리는 암맥상 주상절리로 발달하고 있다.

1) 도화면일대

GH-01, GH-02, GH-04, GH05, GH-08, GH09지역이 이곳에 속하며, 주상절리를 구성하는 암석은 유문암 또는 유문암질 응회암이다. GH-01, 02지역은 하부의 응회암층과 상부의 주상절리층이 분리되어 있으며, 육안상 암석의 특이한 차이는 보이지 않는다(Fig. 61). 생성 시기의 차이로 암상이 분리된 것으로 추정되며, 이는 추가 연구를 통하여 밝혀야 할 내용이다. GH-04지역은 유주산에 위치한 채석장이며, 현재까지 활발하게 채굴이 진행중이다. 사유지인 관계로 접근이 매우 제한적이며, 채굴이 진행중에 있으므로 안전상 매우 위험한 지역이다. 채석장의 노두 크기는 하부지역이 대략 폭 200m, 상부지역은 100m가량 되며, 전체적으로 켈러네이드 구조가 매우 뚜렷하게 관찰된다. 주상절리를 구성하는 암석에서는 용결구조가 관찰되며, 암편은 5cm내외의 크기로 포획되어 있다. 이 곳의 주상절리대는 상부 켈러네이드와 하부 켈러네이드 구조를 구분할 만한 뚜렷한 경계부가 나타나지 않으며, 엔테블러취 등의 구조는 관찰되지 않는다. 그러나 노두의 우측면으로 가면 완만한 경사를 이루며 주상절리가 수평 방향을 향해 발달하는데(Fig. 62), 이러한 경향은 점성이 높은 용암류에서 나타나는 현상과 동일하다.

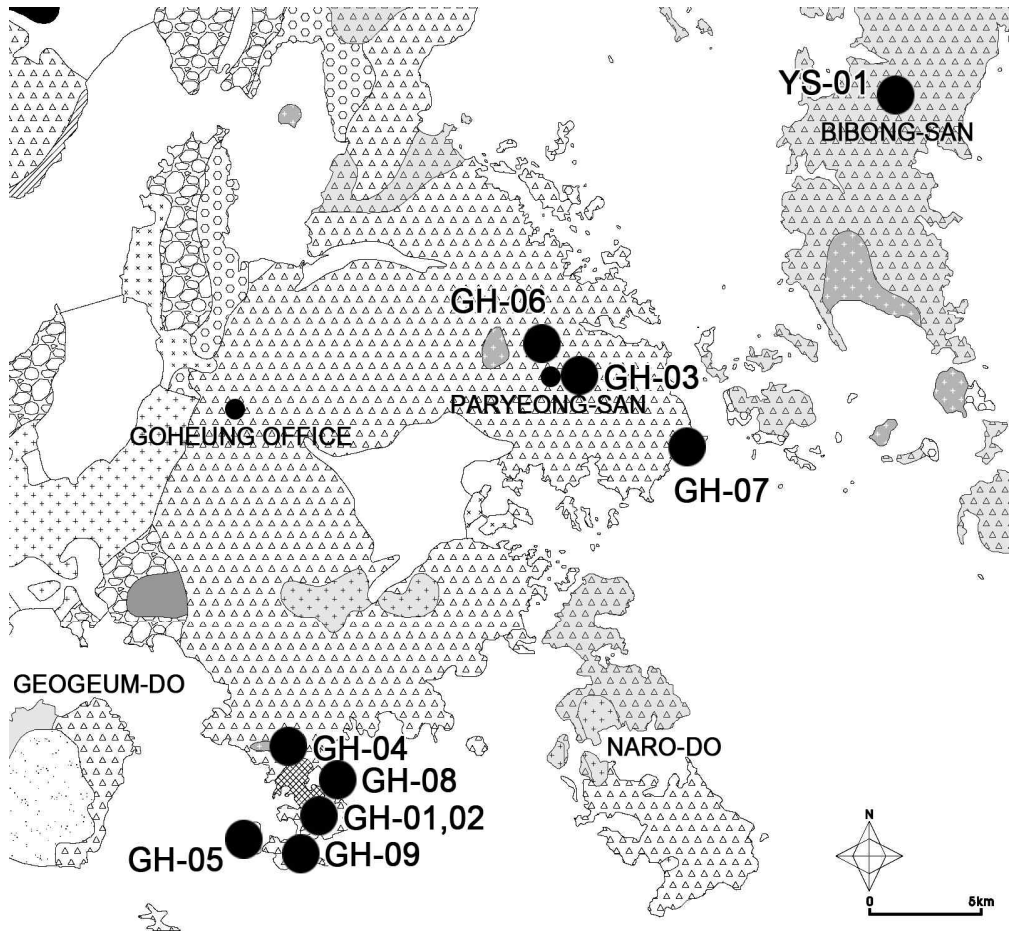


Fig. 60. Geology map of the Goheung showing sample location.



Fig. 61. Photographs of columnar joint in the Goheung.
(a): GH-01, (b): GH-02



Fig. 62. Photographs of columnar joint in GH-04.

GH-04지역의 N_{avg} 값은 4.75이며, 4각형이 42.02%, 5각형이 40.76%의 빈도율을 보인다. 기둥면의 폭은 1cm~10cm가 63.77%, 10cm~20cm가 33.50%의 빈도율을 보인다. 기둥면 사이의 각은 모든 각도에서 다양하게 분포한다(Fig. 66, 67).

GH-05지역은 도화면 남단 지죽도이며 이 지역에서는 단면 측정을 총 3곳에서 진행하였다(Fig. 63). 3곳의 평균 다각형의 수는 5.42각형, 5.90각형, 5.21각형으로 빈도율에서 6각형이 각각 37.50%, 70.00%, 42.42%로 가장 높게 나타난다. 기둥면의 폭은 거의 대부분 20cm 내에 분포한다. 기둥면 사이의 각은 다양하게 고루 분포하는 경향을 보인다(Fig. 67, 68, 69, 70, 71, 72).

GH-08지역은 도화면 구암리지역으로 해안에 위치한 노두이다(Fig. 64a). 해안에 위치한 특성상 관찰시 조석시간을 반드시 확인하고 접근해야 하며, 해수에 의한 침식으로 이차절리가 발달하여 주상절리 특유의 다각형 구조를 관찰하기에는 어려움이 있다. 대체로 고흥의 다른 지역과 비슷한 크기의 주상절리가 해안을 따라 분포하고 있다.

GH-09지역은 지죽도와 연결하는 다리의 상부와 하부의 노두로 규모는 작은 편이다(Fig. 64b). 단면이 많이 드러나지 않아 측정은 불가능 하였으나, 켈러네이드 구조를 잘 나타내고 있으며, 비교적 신선한 암석의 채취가 가능한 지점이다.



Fig. 63. Photographs of columnar joint in GH-05.



Fig. 64. Photographs of columnar joint in the Goheung.
(a)GH-08, (b)GH-09.

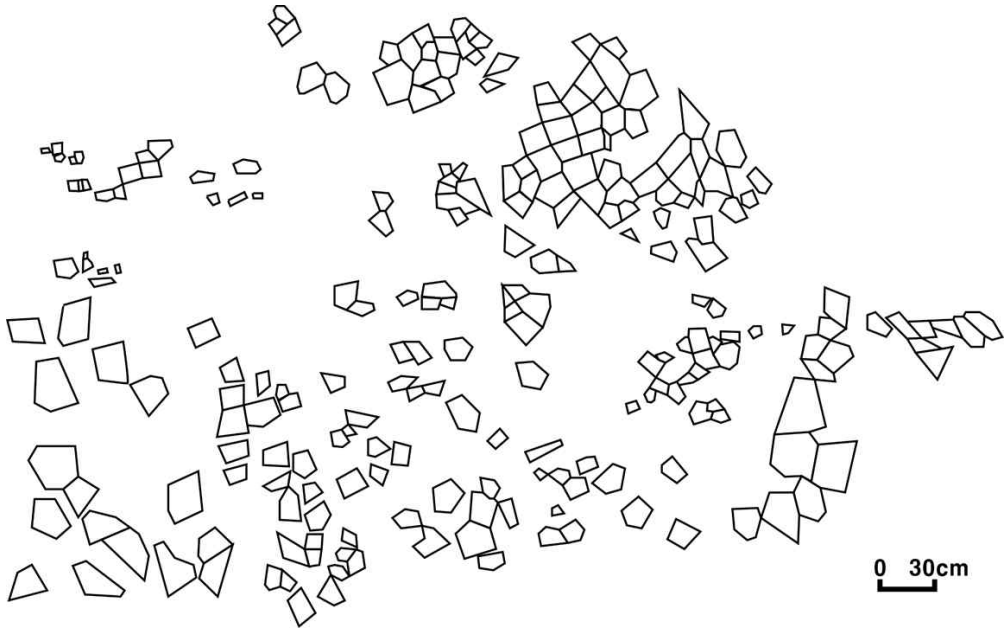


Fig. 65. Photograph and sketch of measured columnar joint in GH-04.

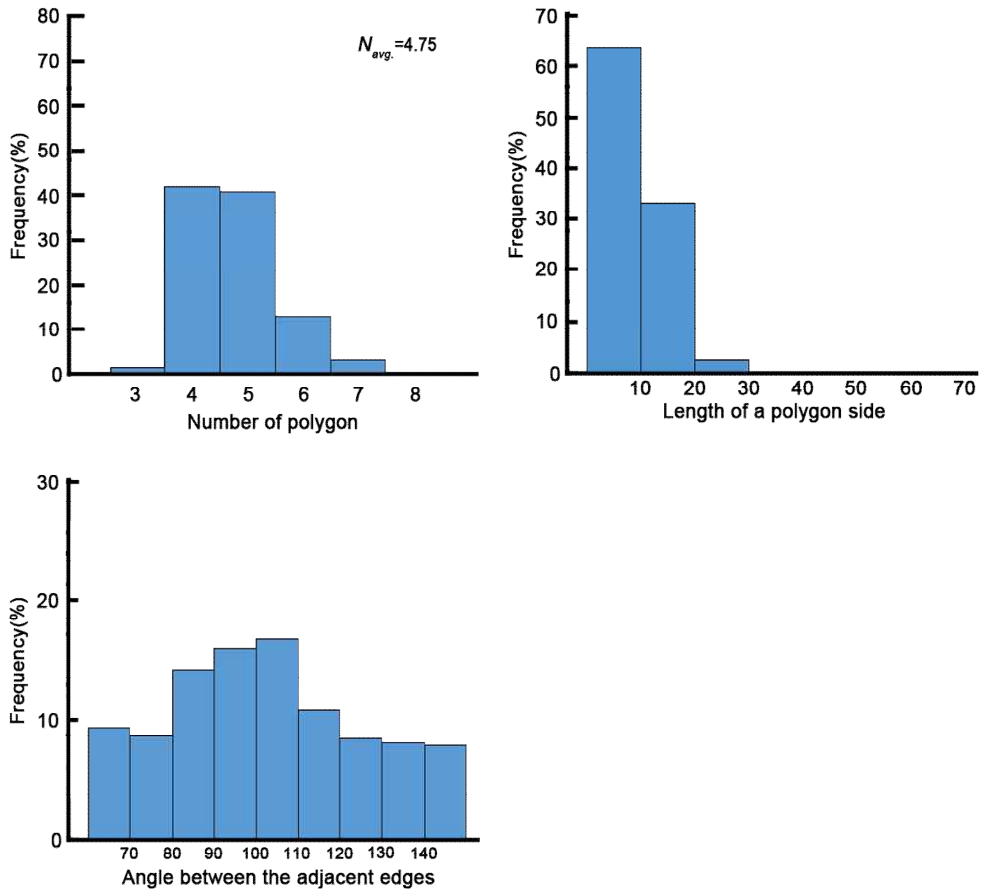


Fig. 66. Frequency(%) of measurement to columnar joint in GH-04.

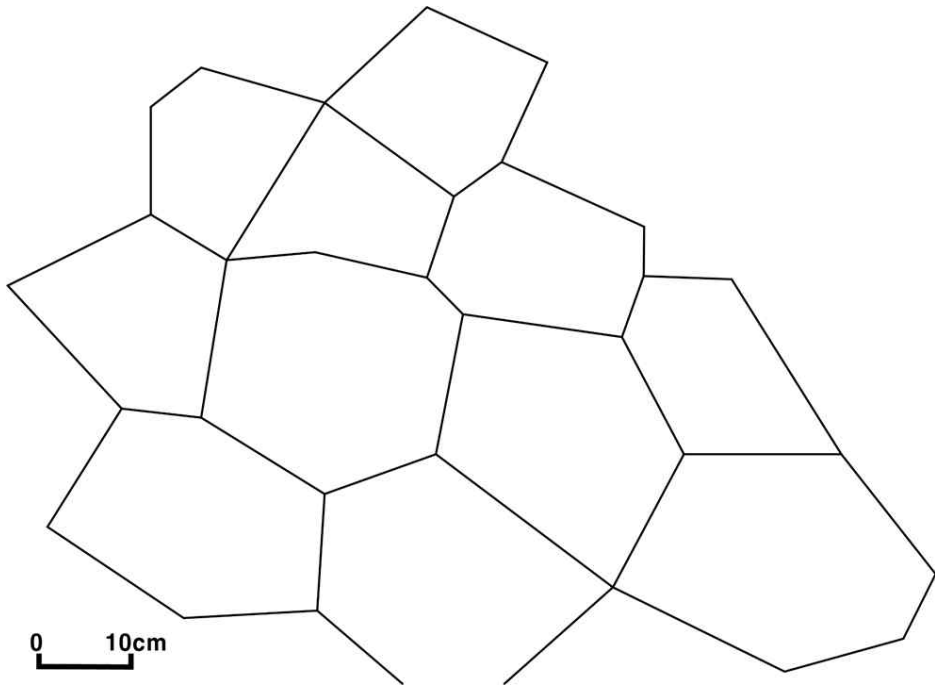


Fig. 67. Photograph and sketch of measured columnar joint in GH-05(A).

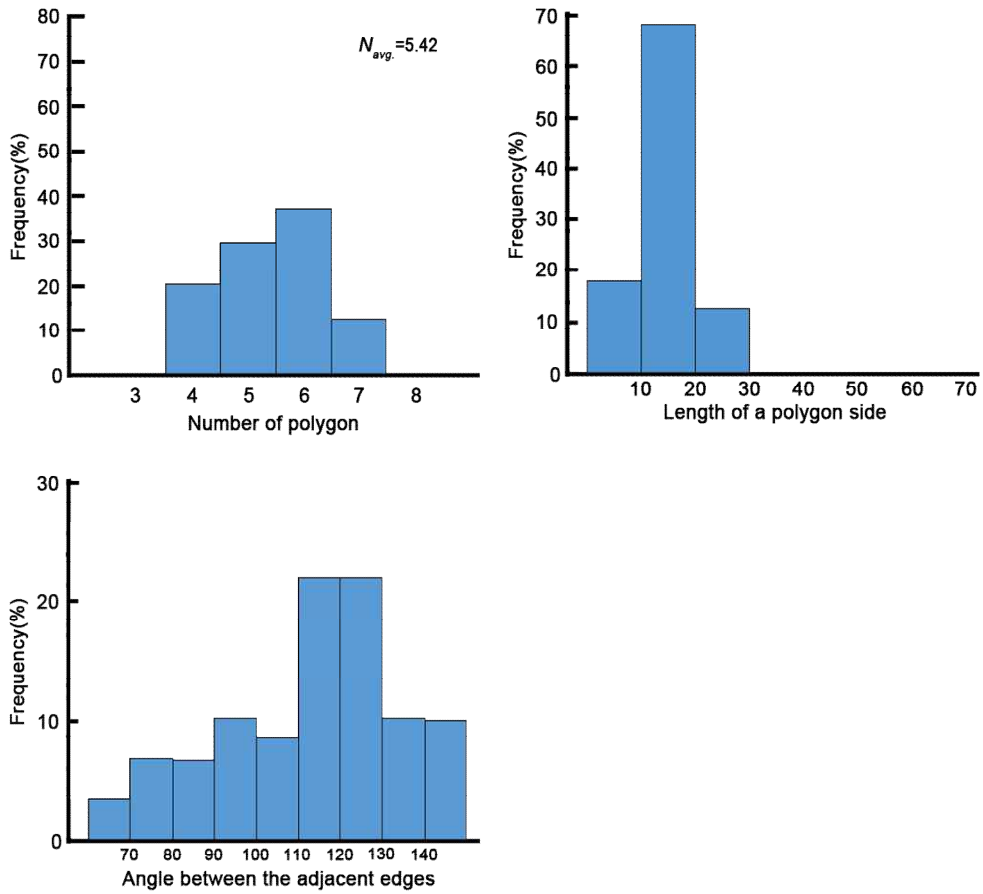


Fig. 68. Frequency(%) of measurement to columnar joint in GH-05(A).

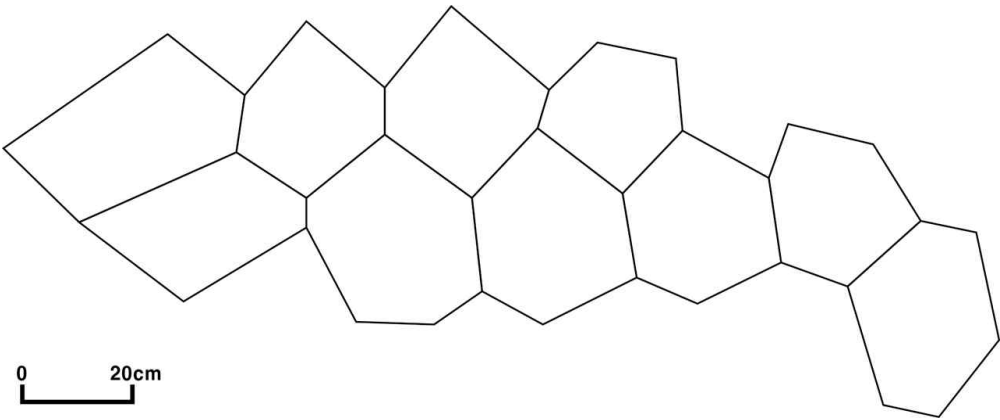


Fig. 69. Photograph and sketch of measured columnar joint in GH-05(B).

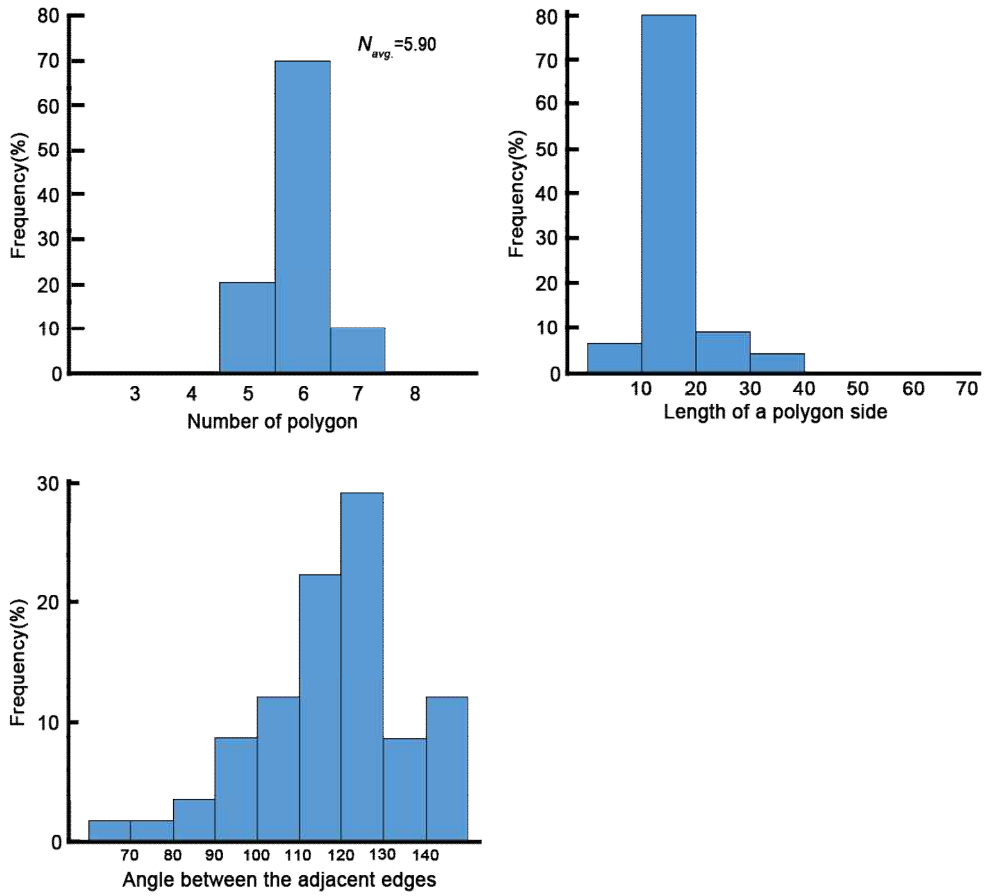


Fig. 70. Frequency(%) of measurement to columnar joint in GH-05(B).

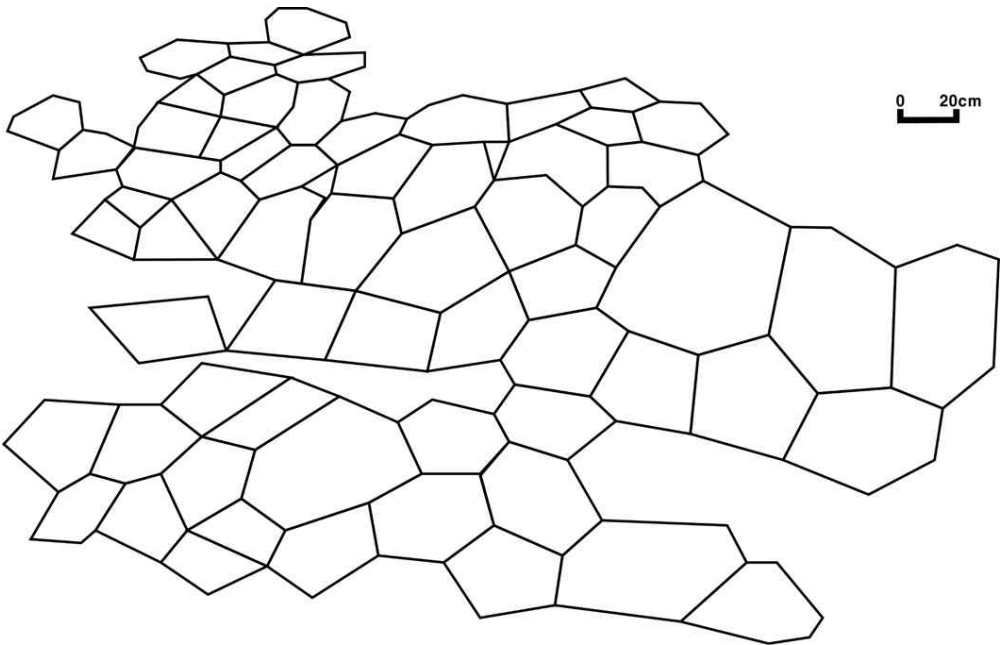


Fig. 71. Photograph and sketch of measured columnar joint in GH-05(C).

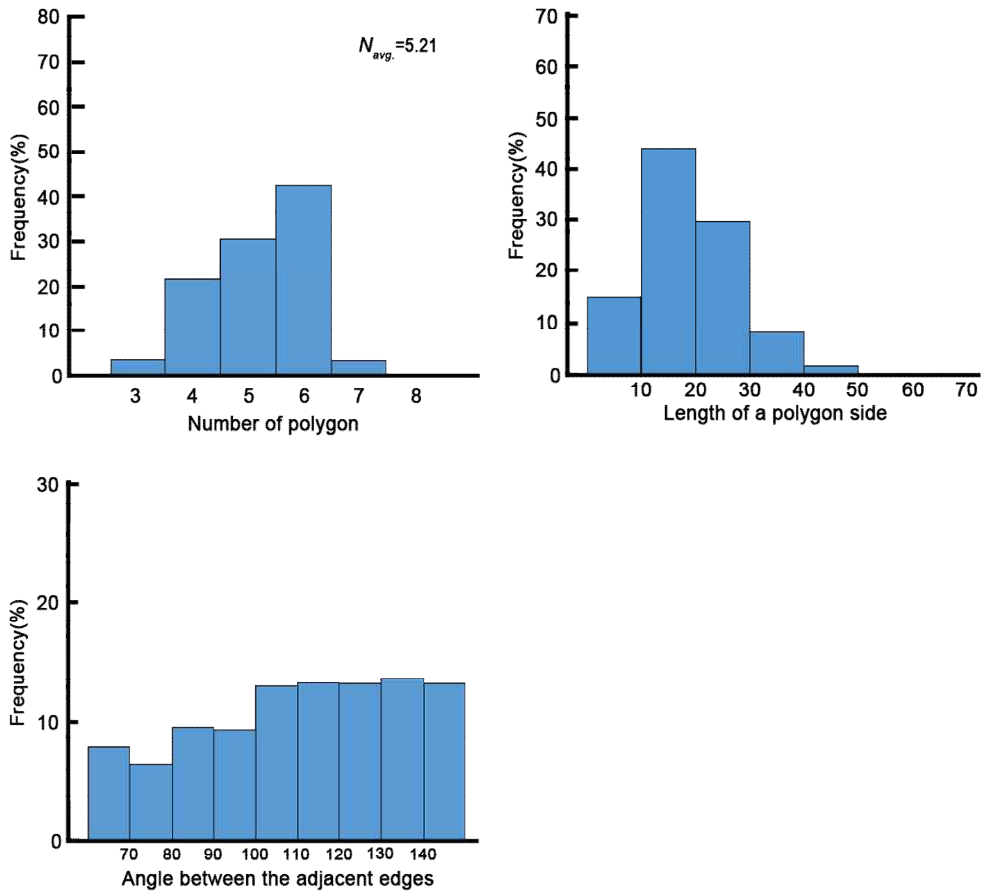


Fig. 72. Frequency(%) of measurement to columnar joint in GH-05(C).

2) 팔영산일대

GH-03, GH-06, GH-07지역이 분포하는 지역으로 팔영산 일대이다. 일부지역에서 용결구조가 보이는 용결응회암이 분포하며, 대체로 래피리응회암이 관찰된다.

GH-03지역은 팔영산 정상부 지역으로 주상절리가 관찰되지는 않는다(Fig. 73(a)). 팔영산 주변에서 주상절리가 관찰됨에 따라 동일 암석임에도 불구하고 팔영산 내부에서 주상절리가 발견되지 않는 원인에 대한 고민이 필요한 지역이다.

GH-06은 팔영산 능가사지구 입구의 점암면 성기리에 위치한 노두로 국립공원관리공단 사무소 건너편에 위치하며(Fig. 73(b)), 노두의 크기는 약 30m 정도로 분포한다. 이 지역의 암석은 용결구조가 뚜렷하게 보이는 용결응회암으로 GH-04의 채석장 지역 암석과는 육안상 색깔과 암편의 크기 등에서 차이가 있다. 본 지역의 용결응회암은 육안상 암갈색의 색을 띠며, 암편은 홍색



Fig. 73. Photographs of columnar joint in the Goheung
 (a)GH-03, (b)GH-06, (c)GH-07.

장석이 1cm 이내의 크기로 분포한다. 단면의 노출이 많지 않아 측정자료를 구축하기 쉽지 않으며, 일부 측정가능한 곳에서 기둥면의 폭을 측정한 결과 2m 내외의 크기를 보이고 있다.

GH-07지역은 용바위 지역(Fig. 73(c))으로 토속신앙에 의해 용이 승천하는 모양을 하는 곳이라 하여 기도를 드리는 장소로 많이 사용되고 있다. 주변의 암석을 가로질러 바다를 향해 발달한 암맥으로 상부에서 하부로 진행할수록 암맥의 폭이 넓어지는 특징을 가지고 있다. 암맥의 암석은 안산암이며, 암맥의 폭은 10m 정도 이다. 기의 차이가 더 설득력이 있는 것으로 생각된다.

고흥지역에 분포하는 주상절리들의 전체 측정값은 Table 7과 같다. 고흥지역 평균 다각형 수는 4.98각형으로 4각형이 33.60%, 5각형이 36.51%의 빈도율을 보인다. 기둥면의 폭은 1~10cm에서 51.76%의 빈도율을 보이며, 기둥면 사이의 각은 전체적으로 다양하게 분포하고 있다.

Table 7. Measurement of columnar joint in Goheung.

<i>N</i>	3	4	5	6	7	8			
	1.32%	33.60%	36.51%	23.54%	4.76%	0.26%			
<i>L</i>	1~10cm	11~20cm	21~30cm	31~40cm	41~50cm	51~60cm			
	51.76%	38.02%	8.02%	1.83%	0.31%	0.08%			
<i>θ</i>	~70°	71°~ 80°	81°~ 90°	91°~ 100°	101°~ 110°	111°~ 120°	121°~ 130°	131°~ 140°	141°~
	8.49%	7.79%	12.54%	14.06%	15.52%	12.16%	10.77%	9.37%	9.31%

4. 여수지역 주상절리

여수지역의 주상절리는 울촌지역과 비봉산지역, 구봉산지역, 돌산도지역에 분포한다(정형은과 안건상, 2014). 이 중 고흥지역과 근접한 비봉산지역에 한하여 연구를 진행하였다(Fig. 60). 여수시 화양면에 위치한 비봉산지역은 대규모로 이루어진 주상절리를 관찰하기는 어려우며, 장작을 묶어놓은 듯한 소규모 주상절리들이 산 곳곳에 분포하고 있다(Fig. 74).

YS-01지역의 N_{avg} 값은 5.76이다. 6각형이 76.47%, 4각형이 11.76%의 빈도율을 나타내며, 기둥면의 폭은 모두 30cm 이내이며, 11cm~20cm가 62.12%로 가장 높은 빈도율을 나타낸다. 기둥면 사이의 각은 다른 지역과 마찬가지로 대체로 다양하게 분포하는 경향을 보인다(Fig. 75, 76, Table 8).

이 지역은 수직방향의 주상절리가 비봉산 정상 부근에서 소규모로 분포하고 있으며, 화산활동에 의한 고온의 화산쇄설물이 낙하, 퇴적, 냉각하여 형성되었다. 다른 지역에 비하여 매우 규모가 작아 구조적인 분석은 어려움이 있다.

Table 8. Measurement of columnar joint in Yeosu.

N	4		5		6		7		
	11.76%		5.88%		76.47%		5.88%		
L	1~10cm			11~20cm			21~30cm		
	36.36%			62.12%			1.52%		
θ	~70°	71°~80°	81°~90°	91°~100°	101°~110°	111°~120°	121°~130°	131°~140°	141°~
	1.02%	2.04%	5.10%	7.14%	18.37%	20.41%	19.39%	15.31%	11.22%



Fig. 74. Photographs of columnar joint in YS-01.

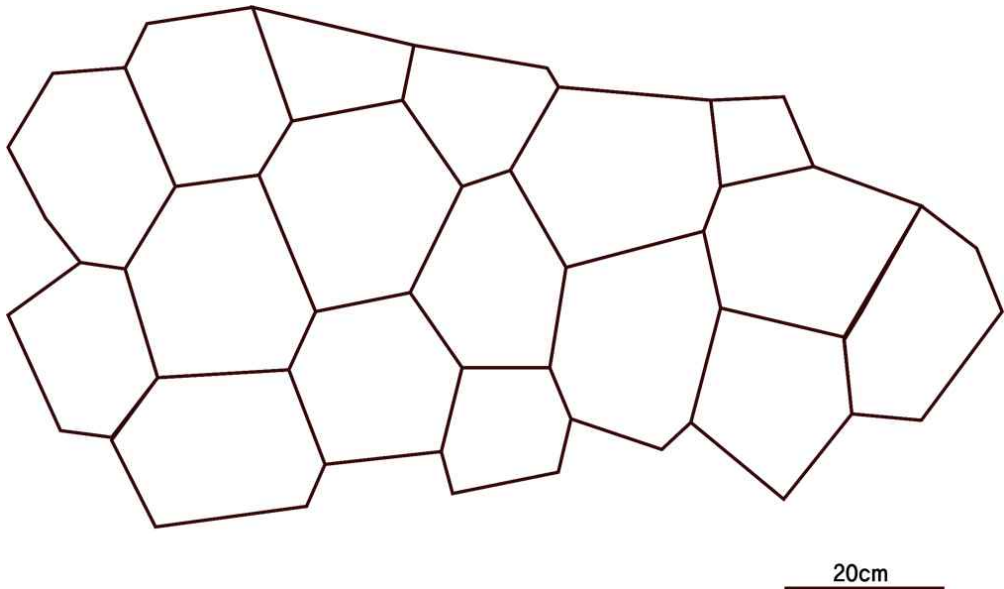
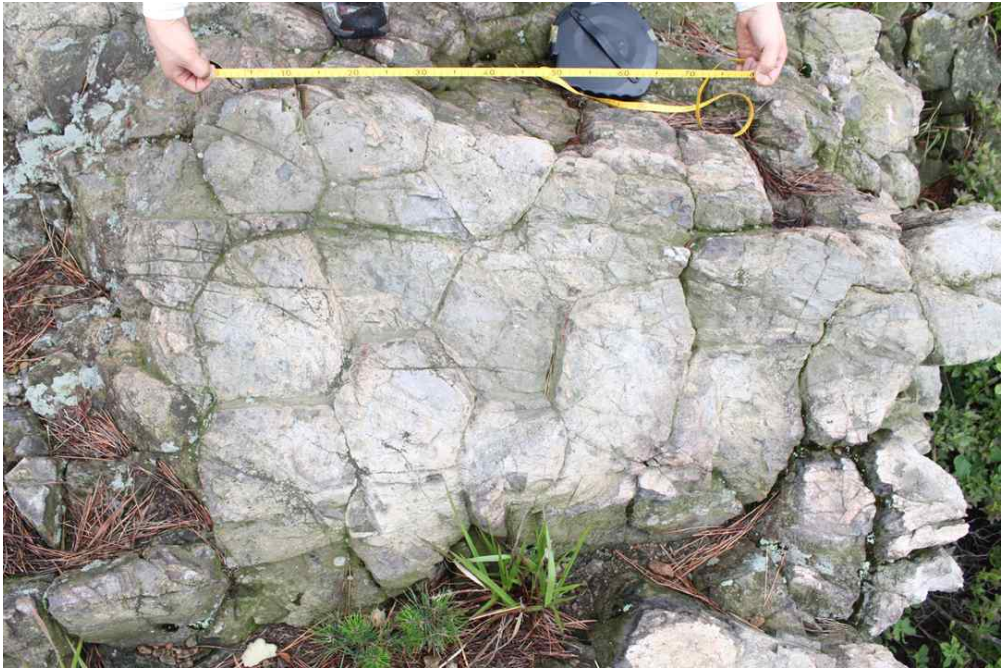


Fig. 75. Photograph and sketch of measured columnar joint in YS-01.

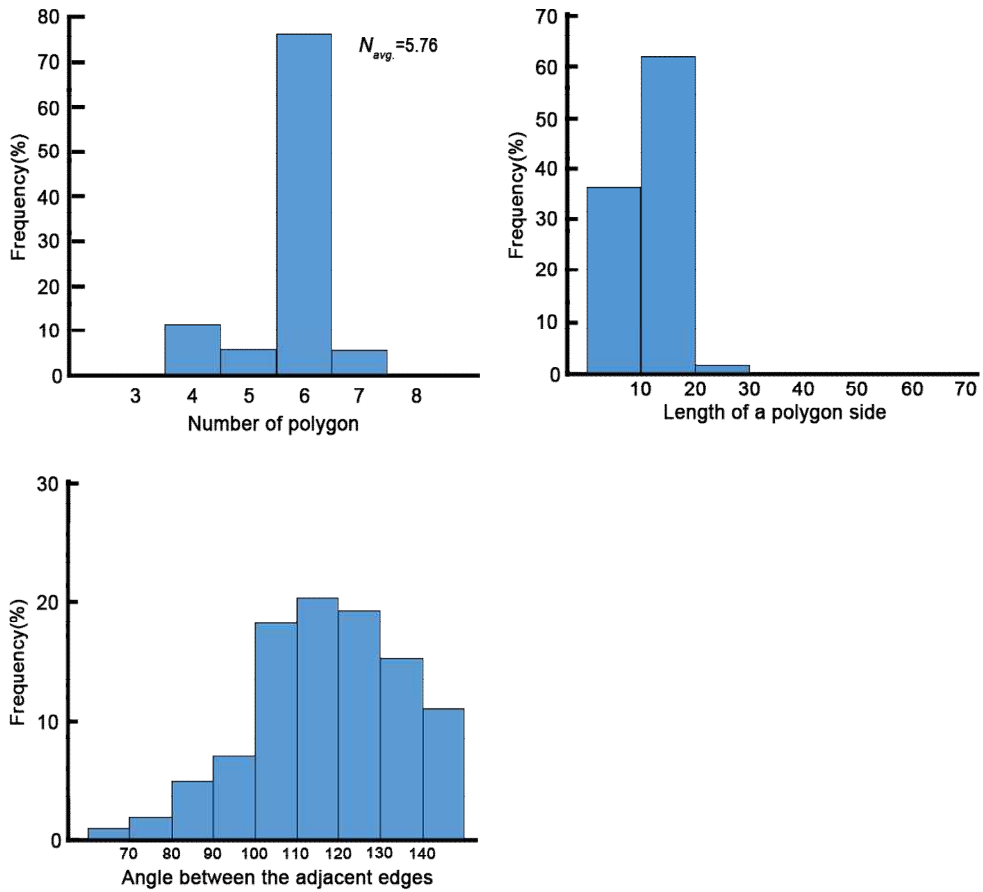


Fig. 76. Frequency(%) of measurement to columnar joint in YS-01.

5. 경상남도 서남부지역 주상절리

경남 서남부 주상절리 연구에 포함되는 지역은 남해군, 사천시 삼천포, 고성군 일부 지역이다(Fig. 77).

1) 남해지역

남해지역의 주상절리는 남해군 삼동면 양아리 일대와 창선면 가인리 일대에 분포한다. 삼동면 양아리 일대는 육로로 접근이 매우 어려워 선박을 이용

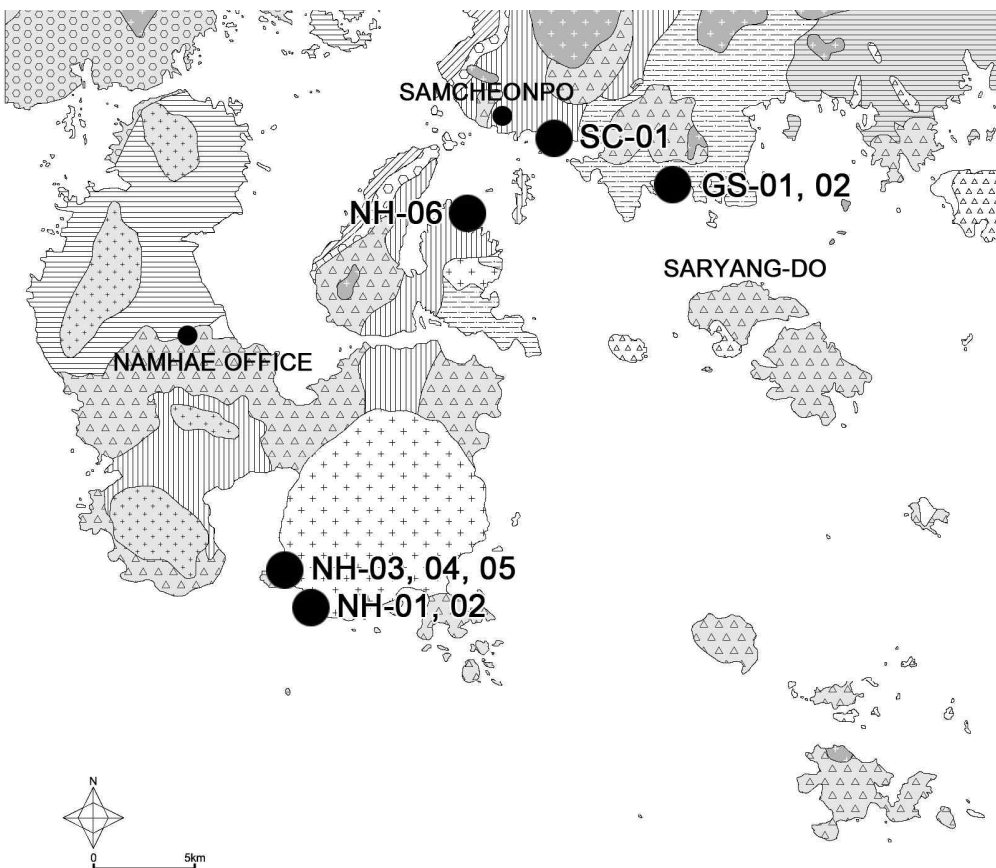


Fig. 77. Geology map of the Namhae-Sacheon-Goseong showing sample location.

하여 접근 가능하며, 상부에서 관찰을 할 경우 남해 바래길 3코스에서 가능하다.

남해군 삼동면 양아리 비룡계곡 근처에서 분포하는 주상절리는 해안선을 따라 약 1km에 걸쳐 발달하고 있다(Fig. 78). 해안에 위치하여 해수에 의한 침식을 당하긴 했지만 비교적 깨끗한 단면을 유지하고 있으며, 이차절리 또한 많지 않아 측정하기에 용이하였다.

NH-03지역은 비룡계곡에서 해안선을 따라 서쪽으로 약 800m에 위치한 곳으로 완만한 해안사면 지역이다(Fig. 79a). 평균 다각형의 수는 4.78각형으로 4각형이 43.75%, 5각형이 37.50%의 빈도율을 나타낸다. 기둥면의 폭은 30cm~70cm까지 고루 분포하고 있으며, 빈도율은 51cm~60cm가 18.69%, 61cm~70cm가 16.82%를 나타낸다. 기둥면 사이의 각은 80°~90°가 17.95%, 90°~100°가 16.03%의 빈도율을 보인다(Fig. 80, 81).

NH-05지역은 지역주민들의 의해 거북섬이라 불리는 곳으로 NH-03지역의 전면에 있는 작은 섬이다(Fig. 79b). 섬 전체가 주상절리로 이루어져 있으며, 침식작용으로 인하여 주상절리들이 떨어져 나가고 남은 모양이 흡사 거북이의 모양을 하고 있다. 측정된 주상절리의 다각형의 수는 4각형이 44%, 5각형이 36%의 빈도율을 보이며, 기둥면의 폭은 21cm~30cm가 24.14%, 31cm~40cm가 19.54%의 빈도율을 보인다(Fig. 82, 83).

창선면 가인리에 분포하는 주상절리는 하부의 퇴적암을 피복하는 형태로 관찰된다(Fig. 84). 주상절리대는 규모가 작은 20m의 범위 내외로 분포하며, 수직방향의 켈러네이드 구조만 관찰된다. 암석은 주변 지질도에 표시된 것과는 다르게 유문암질 응회암으로 보이며, 퇴적암층을 관입하여 형성된 것으로 사료된다.

2) 사천지역 주상절리

사천시 향촌동 향촌농공단지 공사장 부근의 화석이 관찰되는 곳에서 퇴적암들 사이를 관입한 암맥의 형태로 관찰되며, 길이 10m 내외, 폭 1m 내외로 발달하고 있다(Fig. 85). 암상은 육안으로 관찰했을 때, 주변의 세일이나 다른



Fig. 78. Photographs of columnar joint in NH-01.



Fig. 79. Photographs of columnar joint in NH-03(a), NH-05(b).

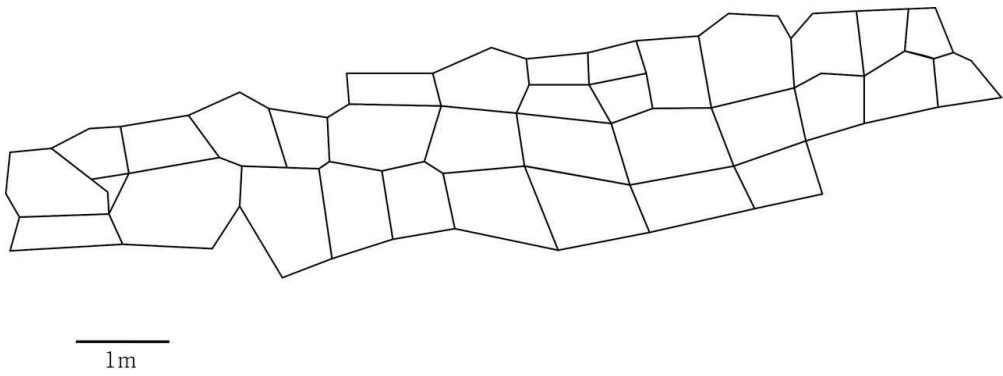


Fig. 80. Photograph and sketch of measured columnar joint in NH-03.

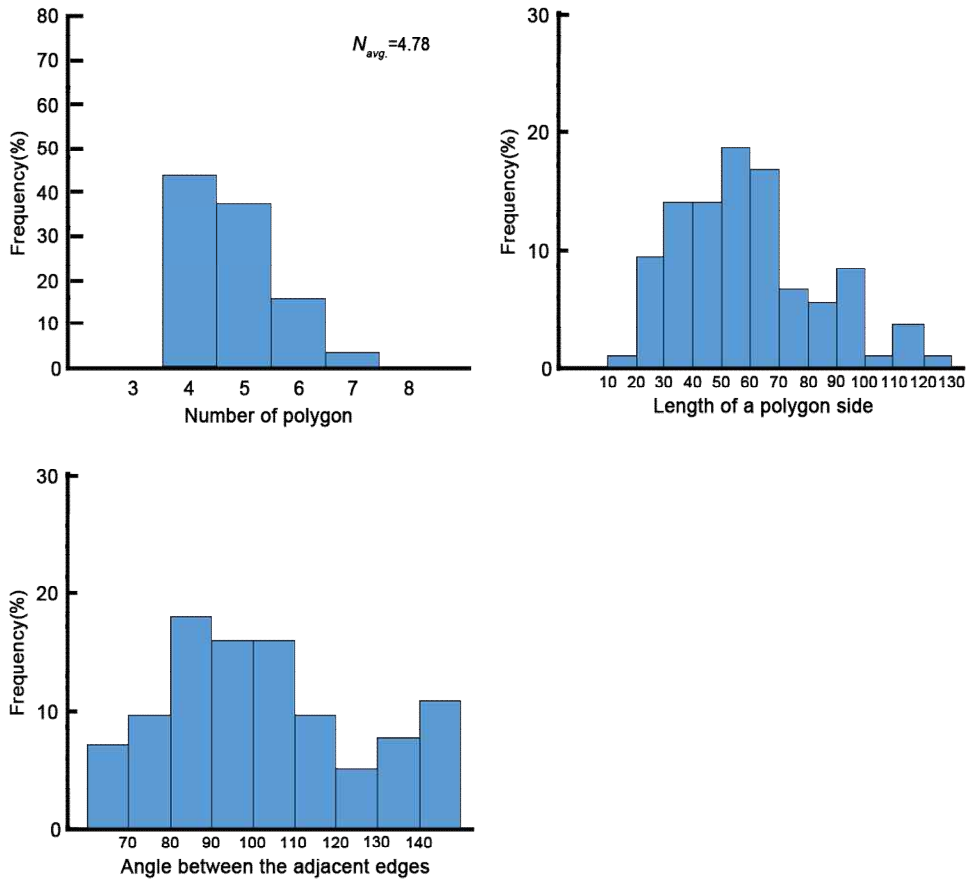


Fig. 81. Frequency(%) of measurement to columnar joint in NH-03.

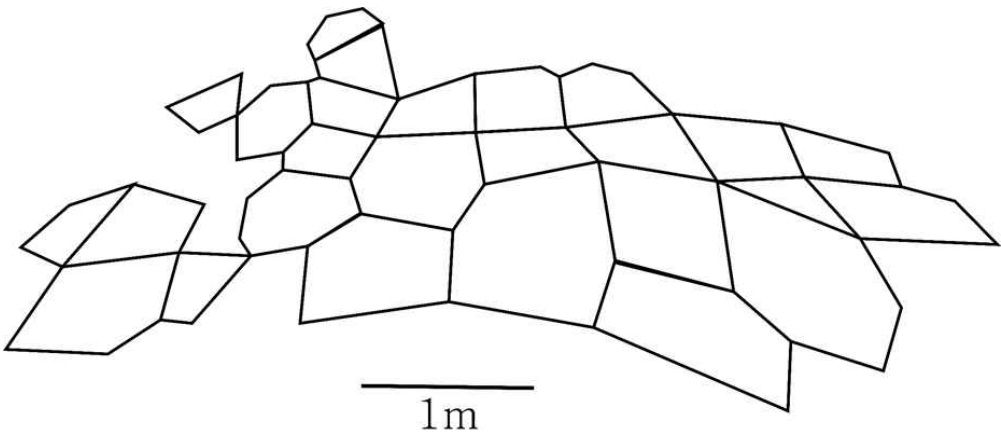


Fig. 82. Photograph and sketch of measured columnar joint in NH-05.

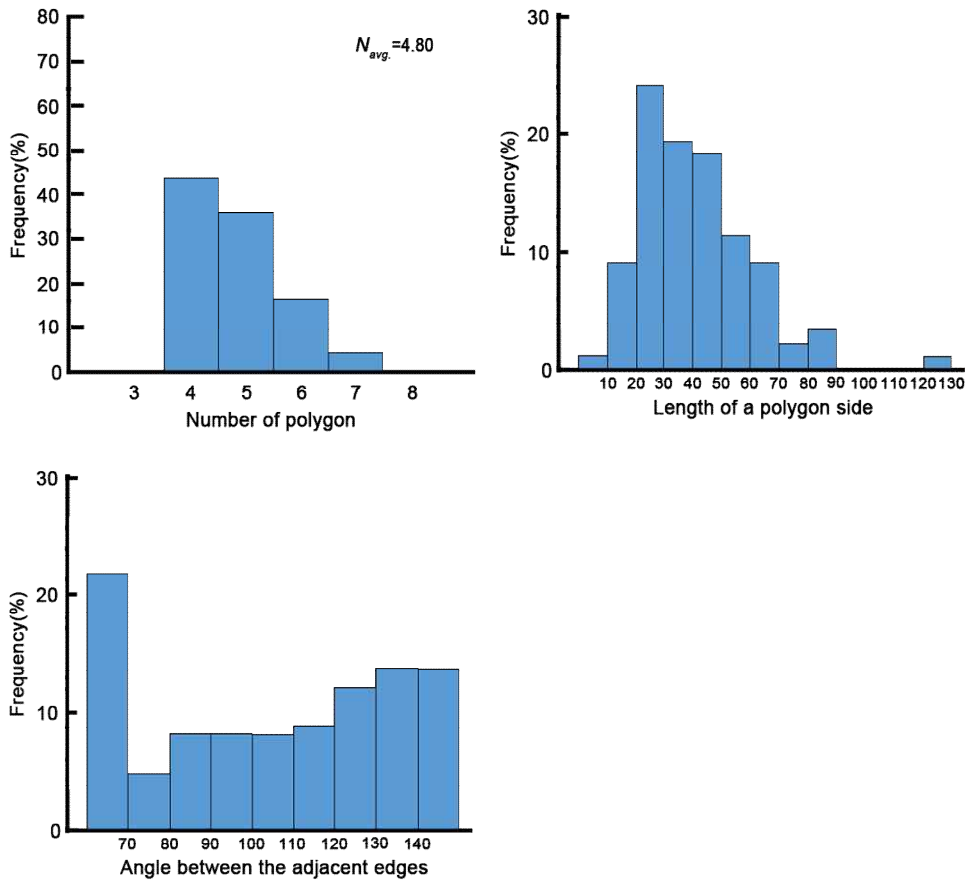


Fig. 83. Frequency(%) of measurement to columnar joint in NH-05.



Fig. 84. Photographs of columnar joint in NH-06.

퇴적암들과는 다른 형태로 기질부가 치밀하여 광물의 판별은 불가능하다. 5mm 이내의 암편을 지니고 있는 것으로 보아 응회암으로 생각된다.

3) 고성지역 주상절리

본 지역의 주상절리는 고성군 상족암 군립공원 부근에서부터 맥전포항까지 분포한다(Fig. 86). 상족암 군립공원의 주차장으르 따라 입안마을 쪽을 이동하면, 왼쪽편에 하부의 세일층을 덮고 있는 수직 방향의 주상절리가 관찰된다. 이 곳에서 30m를 더 이동하면 마을 입구에서 폭 7m 내외의 수직 방향의 주상절리가 관찰되며, 1cm 이내의 암편을 포함하는 유문암질 응회암이 분포한다.

주상절리의 단면을 측정할 수 있는 곳은 병풍바위 뒤편부터 맥전포항에 이르는 구간으로 주상절리의 크기가 측정된 수치는 다음과 같다. 다각형의 수는 4각형이 69.44%, 5각형이 25.00%의 빈도율을 보이며, 기둥면의 폭은 11cm



Fig. 85. Photographs of columnar joint in SC-01.



Fig. 86. Photographs of columnar joint in Goseong.

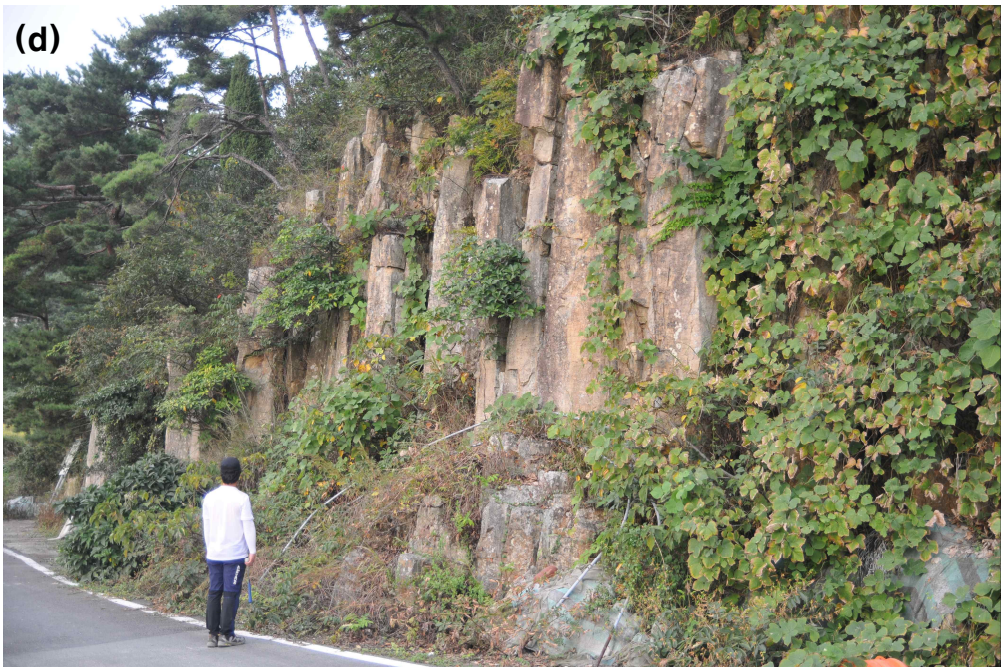


Fig. 86. Continued.

~20cm가 25.00%, 21cm~30cm가 24.19%, 31cm~40cm가 25.00%의 빈도율을 보인다. 기둥면 사이의 각은 80°~90°가 19.35%로 가장 높은 빈도율을 보이며, 나머지 각 범위에서는 균일하게 분포하는 경향을 보인다(Fig. 87).

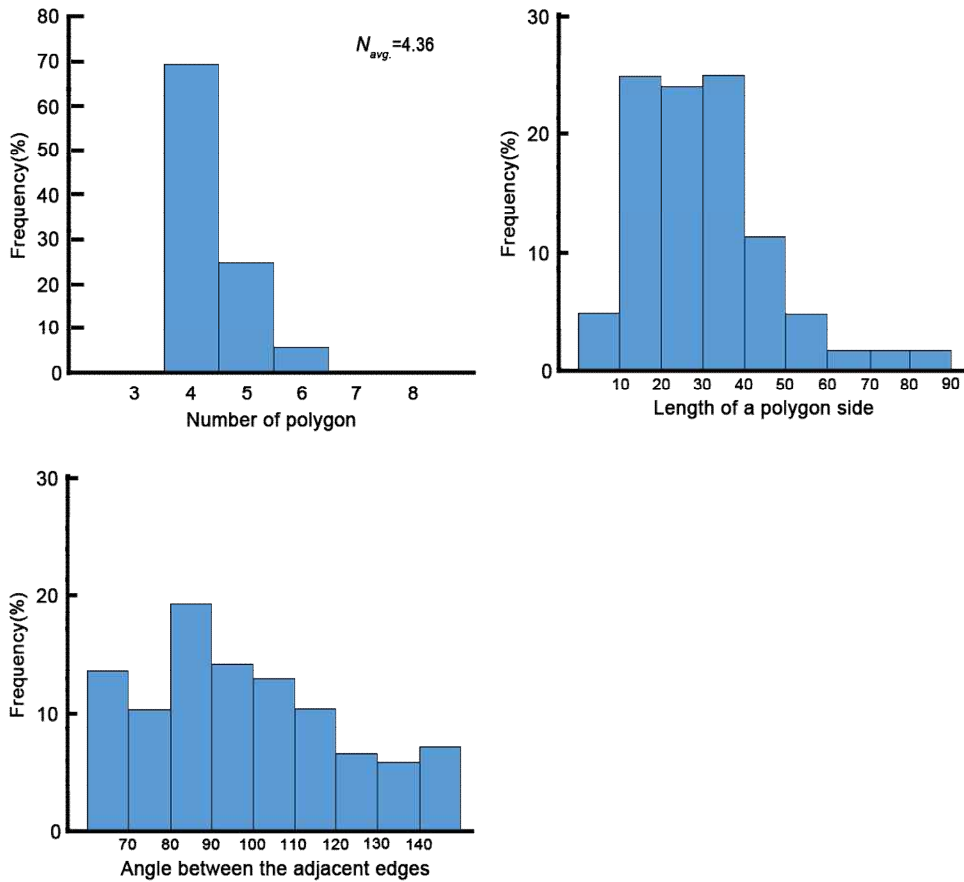


Fig. 87. Frequency(%) of measurement to columnar joint in GS-01.

남해지역 주상절리 측정은 총 3곳에서 다각형 93개에 대한 측정을 하였다. 평균 다각형의 수는 4.62각형으로 4각형이 53.76%, 5각형이 32.26%의 빈도율을 보인다. 기둥면의 폭은 31cm~40cm가 19.18%로 가장 많은 빈도율을 보였으며, 기둥면 사이의 각은 전체적으로 다양한 경향을 보인다(Table 9).

Table 9. Measurement of columnar joint in West-south Gyeongnam.

<i>N</i>	4		5		6		7		
	53.76%		32.26%		11.83%		2.15%		
<i>L</i>	1~10cm	11~20cm	21~30cm	31~40cm	41~50cm	51~60cm			
	2.20%	12.58%	19.18%	19.81%	14.15%	11.32%			
	61~70cm	71~80cm	81~90cm	91~100cm	101~110cm	111~120cm	121~130cm		
	8.81%	3.46%	3.46%	2.83%	0.31%	1.26%	0.63%		
<i>θ</i>	~70°	71°~80°	81°~90°	91°~100°	101°~110°	111°~120°	121°~130°	131°~140°	141°~
	7.66%	10.81%	15.32%	13.16%	12.97%	11.79%	12.18%	6.48%	9.63%

6. 경북 동남부지역 주상절리

연구지역은 포항시 구룡포읍에 위치한 지역으로 구룡포해수욕장 주변이다 (Fig. 88). 신생대 제3기 안산암으로 구성된 이곳은 해안을 따라 주상절리가 잘 발달되어 있다. 구룡포해수욕장의 북쪽 400여m, 남쪽 20여m에서 주상절리들이 분포하며, 최근 구룡포해수욕장 우회도로 개설로 인하여 노출된 절개지에서도 중성암맥을 포함한 주상절리가 발달한다(Fig. 89).

주상절리들의 크기를 측정한 곳은 총 3곳으로 Table 10는 측정값을 정리해 놓은 것이다. 다각형 수는 주로 4각형과 5각형으로 기둥면의 폭은 20cm를 넘지 않았다. 기둥면 사이의 각 또한 다른 주상절리들의 경향과 크게 다르지 않았다. PG-01지역은 4각형이 46.94%로 빈도율이 가장 높으며, PG-02지역은

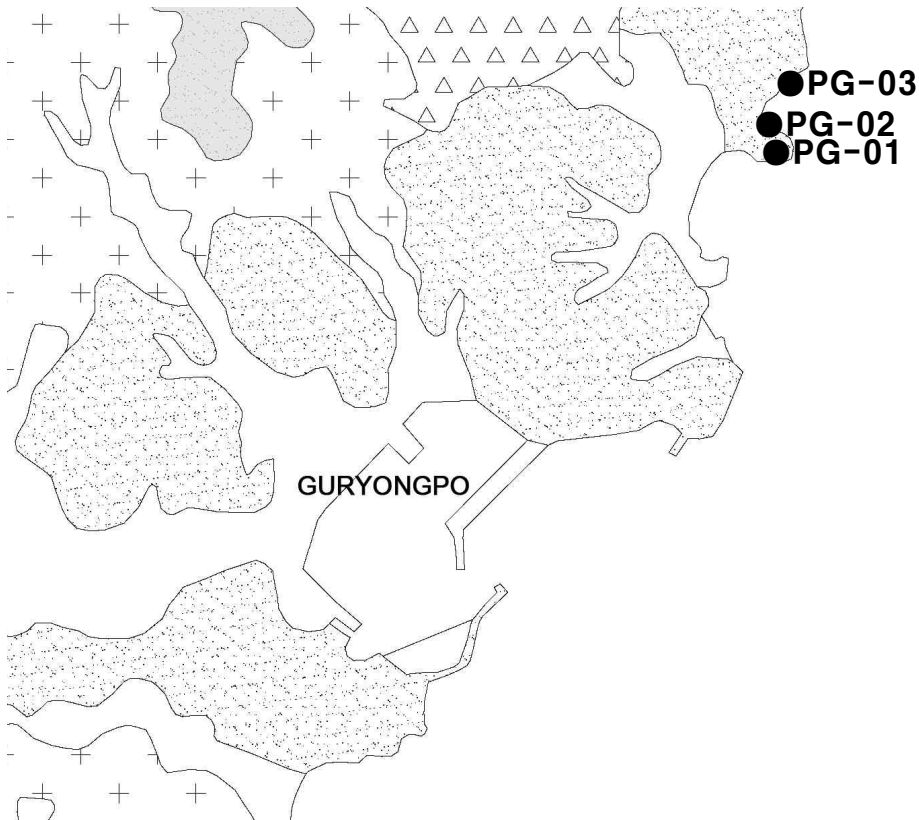


Fig. 88. Geology map of the Guryongpo showing sample location.



Fig. 89. Photographs of columnar joint in Guryongpo.



Fig. 89. Continued.

5각형이 53.57%로 가장 높다. PG-03지역은 4각형이 38.71%, 5각형이 35.48%로 비슷한 편이다. 기둥면의 폭은 모든지역에 걸쳐 20cm이하이며 특히, 10cm를 넘지 않는 빈도율이 매우 높은 편이다. 기둥면 사이의 각 또한 모든 지역에서 특별하게 높은 빈도율이 나오는 경우가 없다(Fig. 90, 91, 92, 93, 94, 95).

Table 10. Measurement of columnar joint in East-south Gyeongbuk.

<i>N</i>		3	4	5	6	7				
		0.93%	38.89%	39.81%	15.74%	4.63%				
<i>L</i>		1~10cm				11~20cm				
		91.60%				8.40%				
<i>θ</i>	~70°	71°~	81°~	91°~	101°~	111°~	121°~	131°~	141°~	
		80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°		
		7.66%	10.81%	15.32%	13.16%	12.97%	11.79%	12.18%	6.48%	9.63%

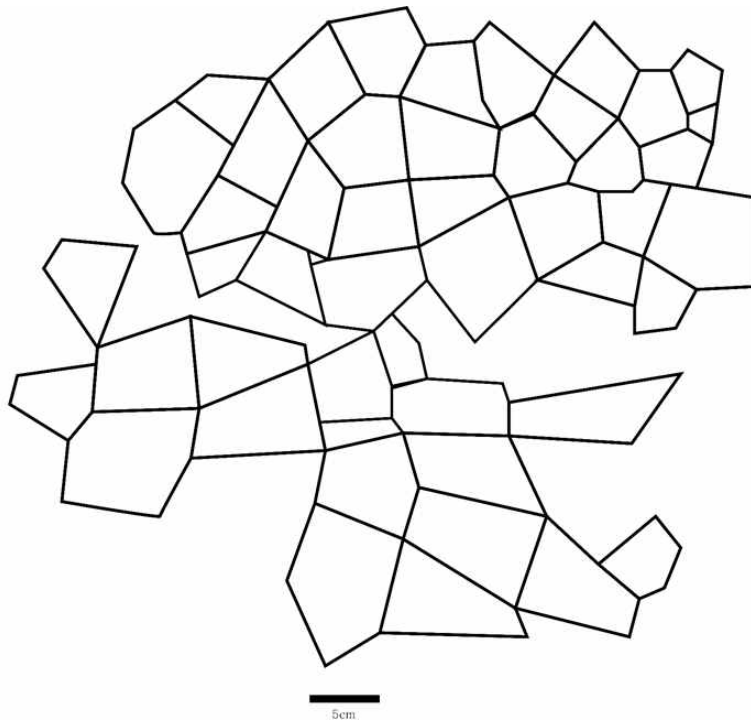


Fig. 90. Photograph and sketch of measured columnar joint in PG-01.

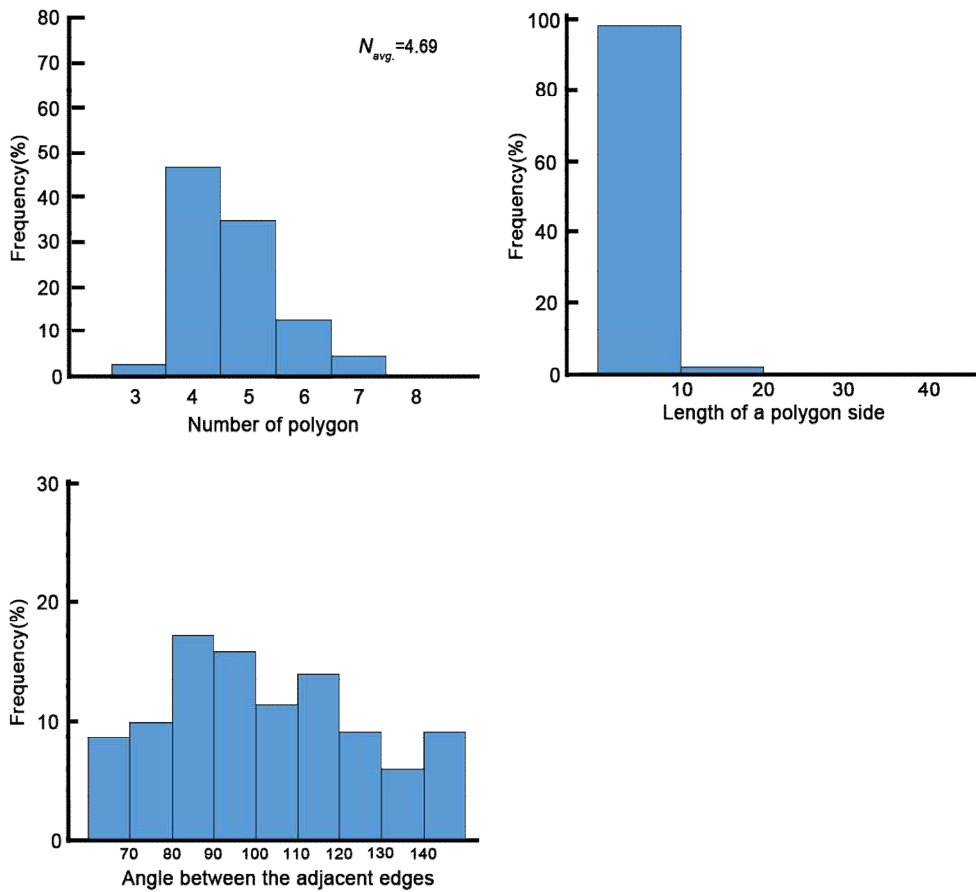


Fig. 91. Frequency(%) of measurement to columnar joint in PG-01.

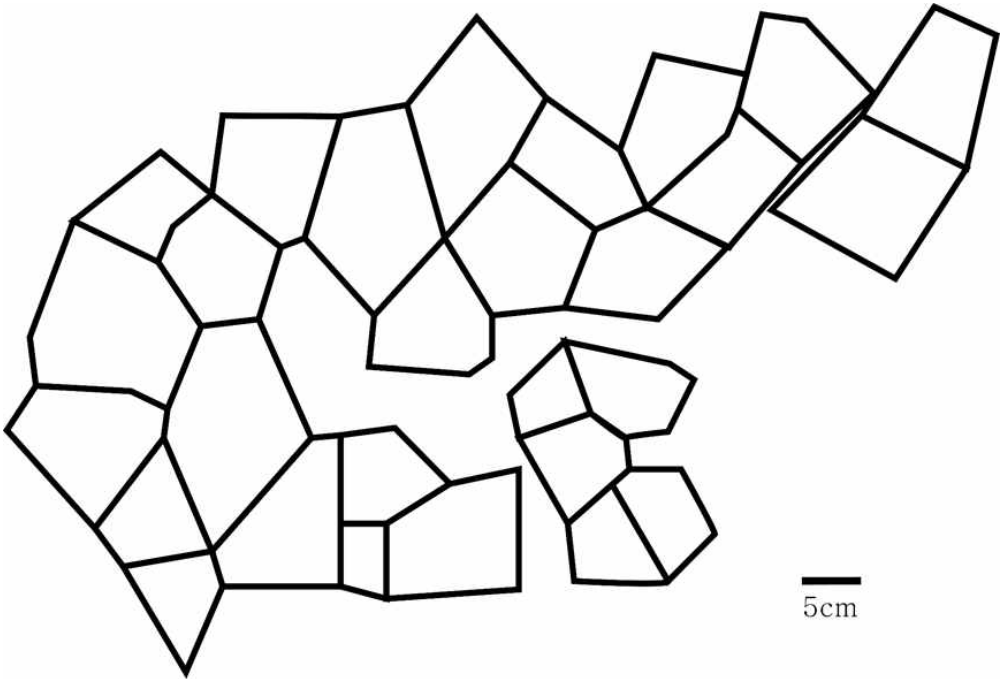


Fig. 92. Photograph and sketch of measured columnar joint in PG-02.

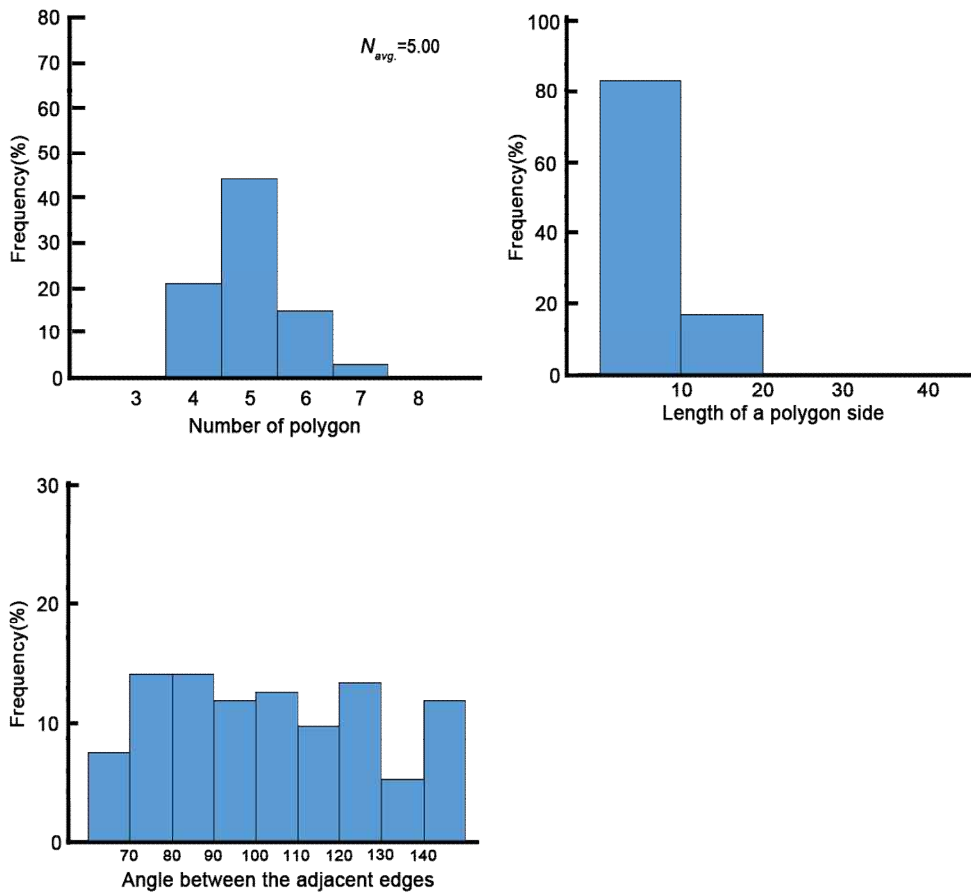


Fig. 93. Frequency(%) of measurement to columnar joint in PG-02.

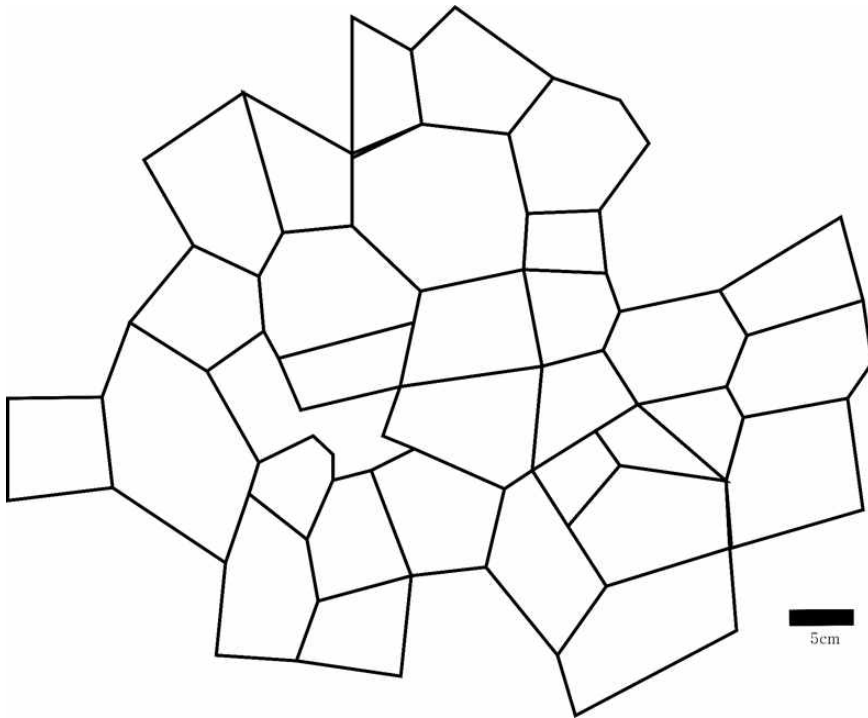


Fig. 94. Photograph and sketch of measured columnar joint in PG-03.

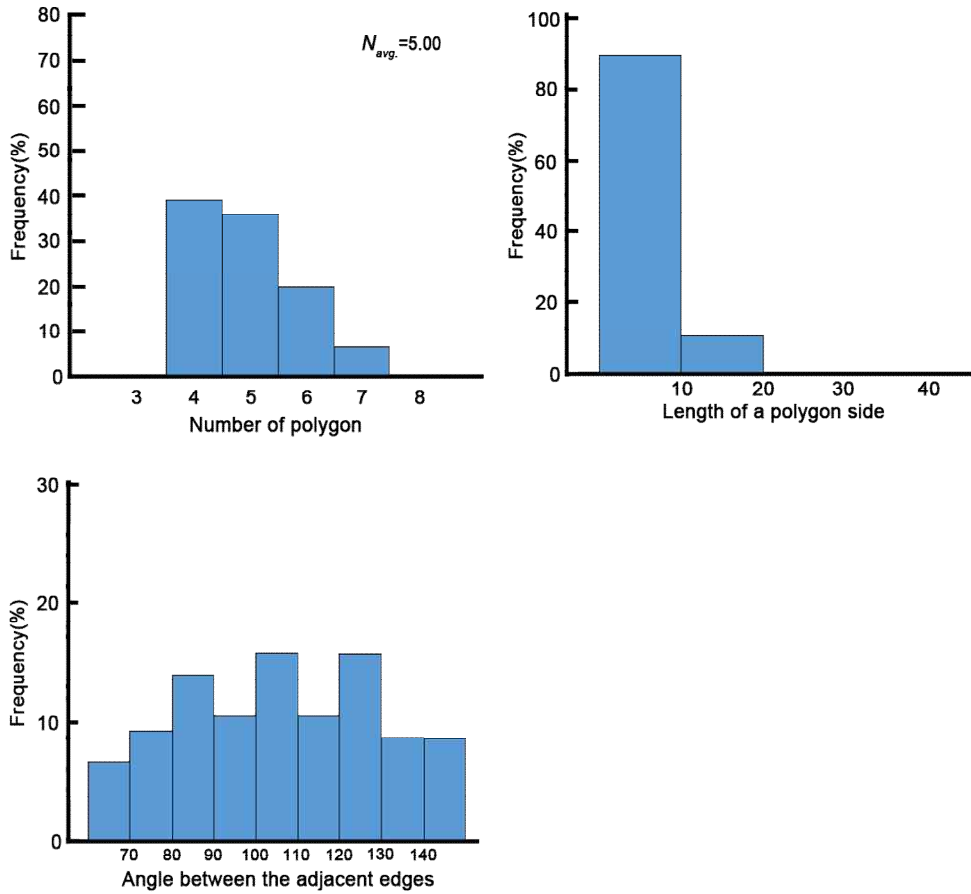


Fig. 95. Frequency(%) of measurement to columnar joint in PG-03.

V. 암석화학

연구지역에서 주상절리를 구성하는 암석들의 암석화학적 특성을 파악하기 위해 총 21개의 암석시료에 대해 주성분원소 분석하였고, 총 10개 시료에 대해 미량원소와 희토류원소를 분석하였다. 주성분원소 분석은 X-선 형광분석기(XRF)를 활용하였고, 미량원소 및 희토류원소 분석은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)를 이용하였다.

1. 주성분 원소

연구지역의 주상절리를 구성하는 암석의 주성분원소 분석결과는 Table 11과 같다. 유문암질암은 SiO_2 의 값이 69.81wt%~78.23wt% 범위이며, 안산암질암은 SiO_2 의 값이 55.54wt%~63.73wt%의 범위를 보인다. 연구지역의 유문암질암과 안산암질암은 SiO_2 , Al_2O_3 , MnO , MgO 에서 뚜렷한 양의 차이를 보인다.

부안 적벽강 지역(JB)은 유문암질암으로 SiO_2 의 값이 71.95wt%~72.78wt%로 서로 근사한 값을 보이며, 신안지역(SJI, SJU, SMJ) 유문암질암에서는 75.48wt%~78.23wt%의 범위로 부안 적벽강(JB)의 것보다 근사하게 높은 수치를 보인다. 고흥(GH)-여수(YS)지역의 경우 중성암맥인 용바위 샘플을 제외하고, SiO_2 의 값은 73.50wt%~74.77wt%의 범위로 부안 적벽강지역(JB)과 신안지역(SJI, SJU, SMJ)의 중간값을 가지며, 지역내에서 서로 분포도가 응집되어 있다. 경남 서남부지역(NH, SC, GS) 중 유문암질암의 SiO_2 값을 보이는 고성지역(GS)은 75.96wt%의 값을 보인다. 안산암질암인 남해(NH)-사천(SC)지역은 SiO_2 의 값이 55.54wt%~60.76wt%, 포항 구룡포지역(PG)은 SiO_2 의 값이 63.73wt%의 값을 보인다.

Al_2O_3 함량에서 유문암질암은 9.74wt%~14.82wt의 범위를 보이며, 안산암질암은 15.05wt%~16.50wt%의 범위를 보여, 유문암질암이 안산암질암보다 낮은 값을 보인다.

Table 11. Major elemental analyses(wt%) of columnar joints in study area.

Sample	JB-01	JB-03	SJI-01	SJU-03	SMJ-02	SMJ-06	GH-01
SiO ₂	72.78	71.95	78.23	75.49	75.48	77.11	74.50
TiO ₂	0.36	0.36	0.09	0.11	0.11	0.10	0.43
Al ₂ O ₃	14.23	14.82	12.06	12.52	13.56	9.74	13.23
Fe ₂ O ₃	5.71	7.17	4.38	5.07	9.64	3.59	9.02
MnO	0.03	0.06	0.06	0.06	0.07	0.03	0.08
MgO	0.40	0.72	0.06	0.19	0.25	0.07	0.31
CaO	0.24	0.64	0.14	0.74	1.58	0.24	1.17
Na ₂ O	3.05	2.89	1.99	3.90	3.35	3.33	3.42
K ₂ O	5.70	5.26	4.90	4.09	3.08	4.48	4.20
P ₂ O ₅	0.12	0.11	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02

JB: Jeokbyeokgang in Buan, SMJ: Manjae-do in Shinan, GH: Goheung, YS: Yeosu, NH: Namhae,
GS: Goseong in Gyeongnam, PG: Guryongpo in Pohang

Table 11. Continued.

Sample	GH-02	GH-03	GH-04	GH-05	GH-06	GH-07	GH-08
SiO ₂	73.89	74.42	74.49	73.50	73.50	70.72	74.77
TiO ₂	0.61	0.44	0.46	0.58	0.49	0.51	0.51
Al ₂ O ₃	13.76	13.55	13.44	13.65	14.33	15.91	14.08
Fe ₂ O ₃	8.58	9.11	9.09	8.68	7.66	12.26	8.32
MnO	0.10	0.08	0.10	0.09	0.08	0.05	0.07
MgO	0.32	0.29	0.34	0.30	0.12	1.22	0.27
CaO	1.13	1.37	1.37	0.64	0.52	4.45	0.57
Na ₂ O	3.55	3.68	3.32	4.36	4.25	1.09	3.73
K ₂ O	3.71	3.79	3.79	3.62	3.86	1.21	3.51
P ₂ O ₅	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.06	0.03

Table 11. Continued.

Sample	GH-09	YS-01	NH-01	NH-06	SC-01	GS-02	PG-01
SiO ₂	73.94	69.81	55.54	60.76	59.33	75.96	63.73
TiO ₂	0.57	0.45	1.13	0.88	0.87	0.11	0.61
Al ₂ O ₃	13.76	12.44	15.37	16.50	15.05	10.44	15.79
Fe ₂ O ₃	9.25	10.87	14.94	16.02	19.17	5.30	15.10
MnO	0.09	0.09	0.15	0.12	0.12	0.03	0.14
MgO	0.25	0.48	7.45	2.55	4.36	0.01	2.89
CaO	0.62	1.47	4.86	3.50	4.13	0.39	5.10
Na ₂ O	3.93	4.79	4.13	7.34	4.00	3.31	3.49
K ₂ O	3.78	3.29	3.51	0.16	2.75	4.86	1.56
P ₂ O ₅	0.02	0.11	0.32	0.28	0.24	0.02	0.16

MnO 함량에서 유문암질암은 0.03wt%~0.10wt%의 값을 보이며, 안산암질암은 0.12wt%~0.15wt%의 값을 보여, 안산암질암이 높은 값을 보인다. MgO의 값은 유문암질암의 값이 0.01wt%~0.72wt%, 안산암질암이 2.55wt%~7.45wt%의 값으로 유문암질암보다 높게 나타난다.

위의 값들을 제외한 TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO, Na_2O , K_2O , P_2O_5 등의 값은 서로 큰 차이를 보이지 않지만 대체로 유문암질암에서 K_2O 함량을 제외하고는 모두 안산암질 암에 비하여 낮게 나타났다.

1) 암석의 분류

주상절리를 구성하는 암석들을 TAS diagram에 도시하였다(Fig. 96). 연구지역의 주상절리를 구성하는 암석은 SiO_2 의 값이 55.54wt%~78.23wt%로 유문암과 조면안산암, 데사이트 영역에 해당한다. 유문암에 해당하는 지역은 부안 적벽강지역, 신안 전지역, 고흥-여수지역, 고성지역이며, 조면안산암 영역에 해당하는 지역은 남해-사천지역이며, 데사이트 영역에 해당하는 지역은 포항 구룡포, 고흥 용바위 암맥이다. 연구지역의 주상절리를 구성하는 암석계열은 TAS성분도에서 일부 남해지역의 분석값이 경계부에 접촉하나, 대부분 Sub-Alkali계열에 도시된다.

연구지역의 암석들이 sub-alkali계열로 분류되기 때문에, 이를 다시 AFM성분도(Fig. 97)에 도시하여 보면, 마그마가 분화되면서 MgO와 Fe_2O_3 가 점진적으로 감소하여 Na_2O+K_2O 쪽으로 수렴하는 경향을 보인다. 이러한 결과는 전형적인 칼크-알칼리계열의 모습이다.

그리고 K_2O 에 대한 SiO_2 분류도(Gill, 2012)에 의하면 대부분의 지역에서 고-K칼크알칼리암 계열로 분류되며, 일부 암맥상으로 발달한 곳에서는 중-K칼크알칼리암계열로 분류된다(Fig. 98).

2) 화학조성의 변화

Table 10의 주성분원소 분석결과를 토대로 SiO_2 의 함량에 따른 주성분 원소의 함량 변화를 도시하였다(Fig. 99).

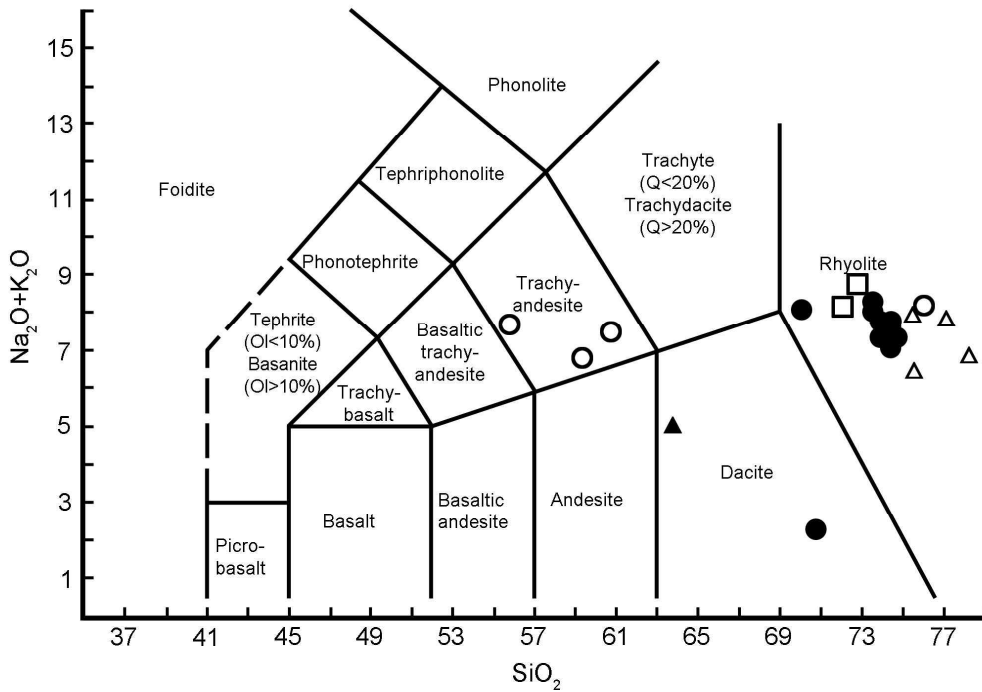


Fig. 96. Total alkali vs. SiO_2 (wt%) diagram(TAS) with analyses of rocks in study area. (○=NH-01, NH-06, SC-01, GS-01; ●=GH; △=SJI-01, SJU-03, SMJ-02, SMJ-06; □=JB-01, JB-03; ▲=PG-01)

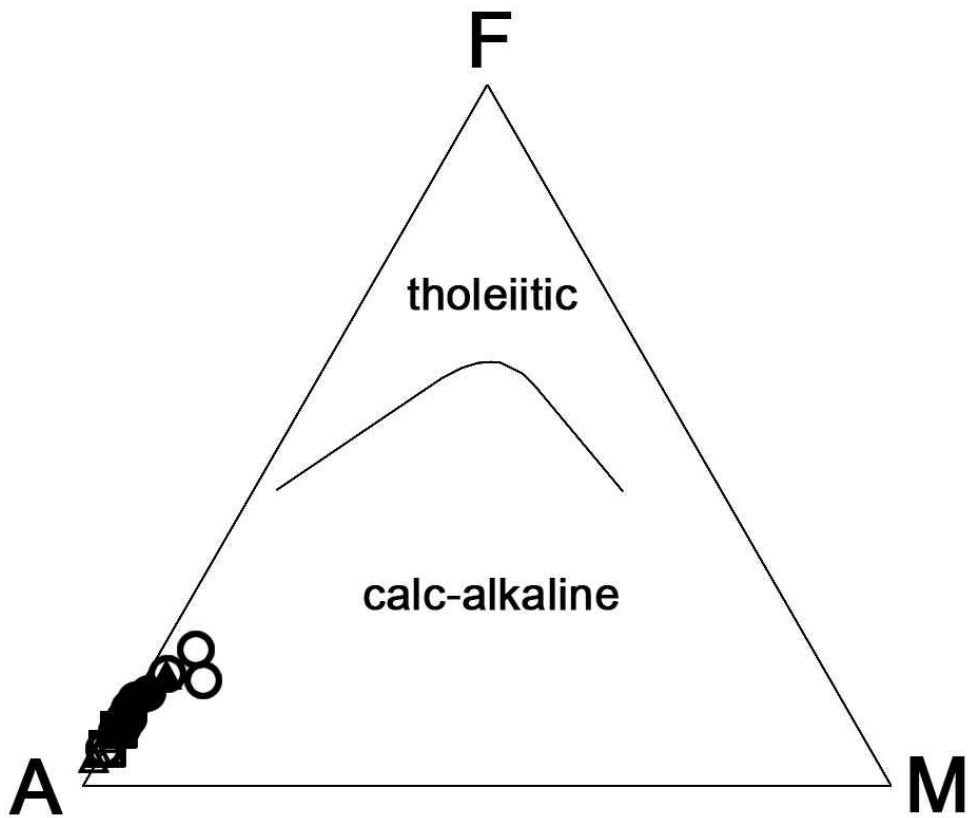


Fig. 97. AFM diagram for study area(Irvine and Baragar, 1971). Symbols are shown in Fig. 96.

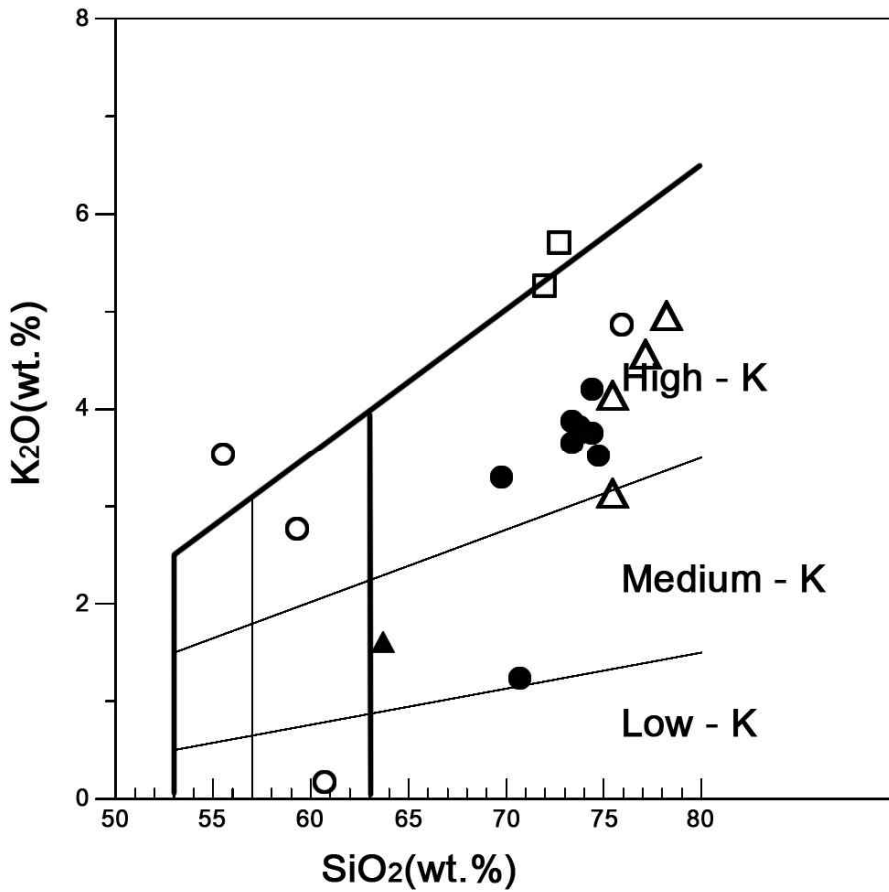


Fig. 98. K₂O vs. SiO₂ diagram for the rocks in study area(Gill, 1981).
 Symbols are shown in Fig. 96.

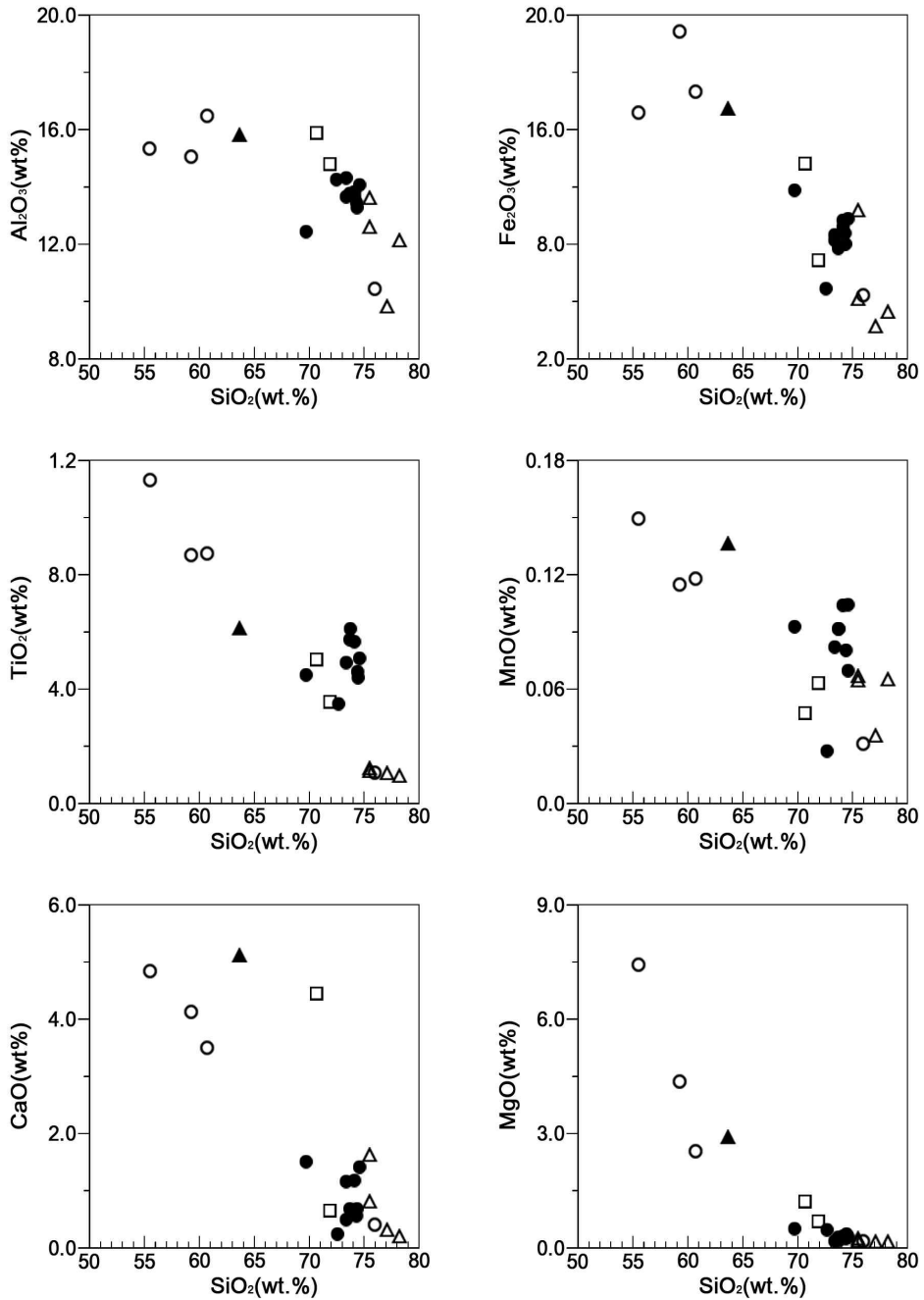


Fig. 99. Harker variation diagrams for rocks in study area. Symbols are shown in Fig. 96.

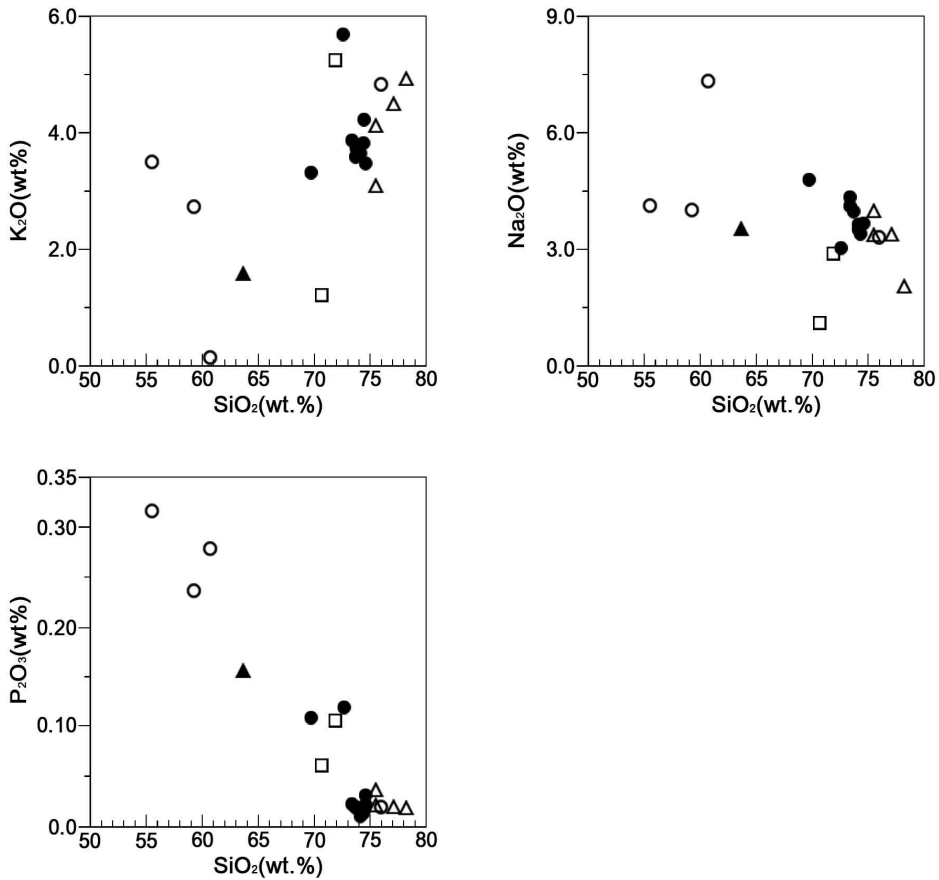


Fig. 99. Continued.

Harker 성분 변화도에서 유문암류의 SiO₂ 성분함량은 69.81wt% ~ 78.23wt%의 범위에 해당한다. 테사이트와 조면안산암 영역에 해당되는 암석들의 SiO₂의 성분함량은 55.54~70.72wt%이다. TiO₂의 함량은 0.09~1.13wt%로서, SiO₂의 함량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. Al₂O₃의 함량은 9.74~16.50wt%의 범위를 보이며, 대체로 SiO₂의 함량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. Al₂O₃의 함량은 암석별로 차이를 설명하기는 어려우나, 지역별로 약간씩의 함량 차이를 보인다. Fe₂O₃의 함량은 3.59~19.17wt%를 보이며, SiO₂의 함량이 증가할 수록 감소하는 경향을 보인다. K₂O의 함량은 0.16~5.70wt%로 SiO₂의 함량이 증가하면서 K₂O의 값도 대체로 증가하는 경

향을 보인다. 그 외 나머지 원소들도 SiO_2 가 증가함에 따라 다소 분산되는 경우도 있지만 대체로 감소하는 경향을 보인다.

SiO_2 의 함량이 증가함에 따라 Al_2O_3 와 CaO 의 함량이 감소하는 이유는 주로 사장석이 정출하기 때문이며, Fe_2O_3 와 MgO 의 함량 감소는 각섬석과 자철석의 정출 진행 때문이다. 위와 같은 주성분원소의 함량 변화는 전형적인 칼크알칼리암 계열의 성분 변화 경향과 비슷한 경향을 나타낸다.

2. 미량원소

미량원소가 주성분 원소와 같은 전하와 비슷한 이온 반지름을 가질 때 이 미량원소가 주성분 원소들을 포함하는 결정격자 속에 위장되어 들어있다고 표현하고, 미량원소가 주성분 원소와 비슷한 이온 반지름을 가지고 주성분 원소보다 이온 반지름이 작을 때 그 미량원소는 주성분 원소를 포함하는 결정격자에 의해 포획되어 있다고 표현한다. 그리고 미량원소가 주성분 원소와 비슷한 이온 반지름을 가지고 주성분 원소보다 전하가 작거나 같을 때 그 미량원소는 주성분 원소를 함유하는 결정격자 속에 허용되어 있다고 표현한다. 즉, 전하가 다른 이온끼리 위와 같은 작용이 일어나면, 결정격자내의 다른 곳에서는 이에 수반되는 치환이 일어나게 된다(이대성과 이문원, 1987).

연구지역의 주상절리를 구성하는 암석들에 대한 미량원소 및 희토류 원소를 분석한 결과는 Table 12와 같다.

1) SiO_2 변화 경향

미량원소는 SiO_2 함량에 따라 Sr, Ba, Zn, Li가 대체로 감소하고, Mo, Pb, Th은 증가하는 경향을 보인다. Cr, Ni, Co, V, Cu 등은 SiO_2 함량에 따른 변화 경향이 불분명하다(Fig. 100).

Sr 함량은 51.4~691.4ppm에 해당되며, SiO_2 함량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. Sr은 크기면에서 Ca이나 K 어느 쪽도 받아 들일 수 있는 성질을 가지는데, 이는 Sr의 반지름이 크기 때문에 Ca를 포함하는 광물에는 허

Table 12. The concentration of trace elements(ppm) for columnar joints in study area.

	SJI-01	SJU-03	SMJ-02	SMJ-06	GH-02	GH-04	GH-06	YS-01	NH-01	NH-06
Sr	51.4	132.8	52.7	42.2	117.87	116.59	94.97	179.97	612.1	691.4
Ba	128.2	274.7	547.1	293.3	813.05	897.15	859.05	685.46	1051.4	501.7
Sc	2.97	4.23	2.82	3.25	25.89	8.88	8.50	12.42	20.00	20.55
S	115.9	229.9	65.5	50.7	190.15	74.99	60.43	156.13	428.0	611.5
Cr	1.48	0.20	3.05	2.92	4.69	1.83	2.23	2.76	144.6	194.1
Ni	1.85	0.29	2.49	2.17	8.28	0.48	1.18	1.03	60.30	61.89
Co	1.18	0.79	1.13	0.77	271.13	16.53	40.30	14.32	23.40	27.67
V	4.89	12.88	4.19	3.57	5.09	3.38	1.46	15.35	125.19	142.54
Zn	40.61	31.07	54.74	58.20	43.95	42.62	41.32	62.86	85.40	67.06
Cu	3.36	0.36	4.40	8.24	71.63	2.36	7.14	4.48	2.64	25.78
Li	16.37	17.91	28.66	14.83	17.52	15.27	11.60	14.15	50.23	35.34
P	83.42	108.30	272.73	75.91	126.87	111.55	63.45	450.38	1884.7	1191.3
Rb	221.68	137.47	109.11	143.60	59.86	137.80	110.19	93.10	127.76	56.65
Y	14.89	10.80	10.40	17.71	27.99	33.20	35.41	36.91	27.71	20.29
Mo	1.31	0.07	2.11	0.81	1.84	0.47	1.40	1.38	0.54	0.18
Cs	5.88	4.10	1.12	2.24	3.26	3.64	4.86	1.25	2.80	4.01
Pb	27.44	10.10	53.66	6177.9	18.73	17.80	19.97	20.51	8.94	11.60
Th	17.05	15.03	14.64	22.80	6.04	11.73	10.00	10.87	3.78	3.14
U	9.26	9.79	1.87	2.64	1.58	2.12	1.92	2.35	3.30	0.64

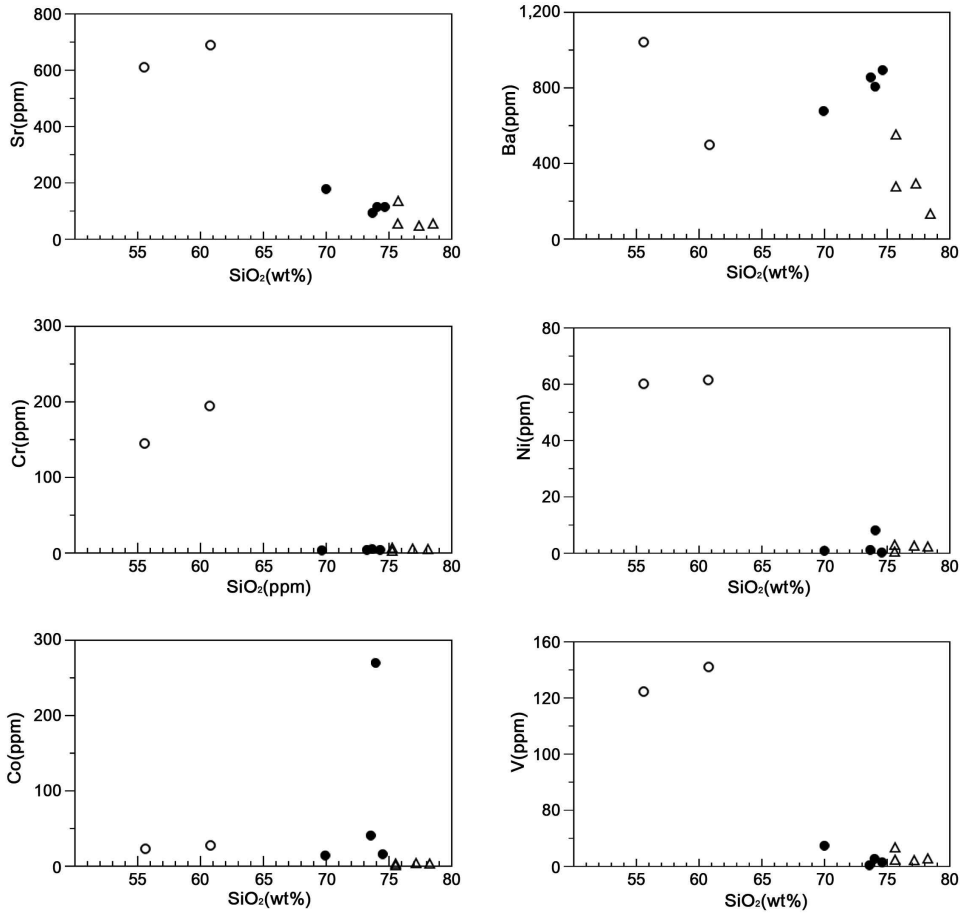


Fig. 100. Variation diagram of trace elements(ppm) for rocks in study area. Symbols are shown in Fig. 107.

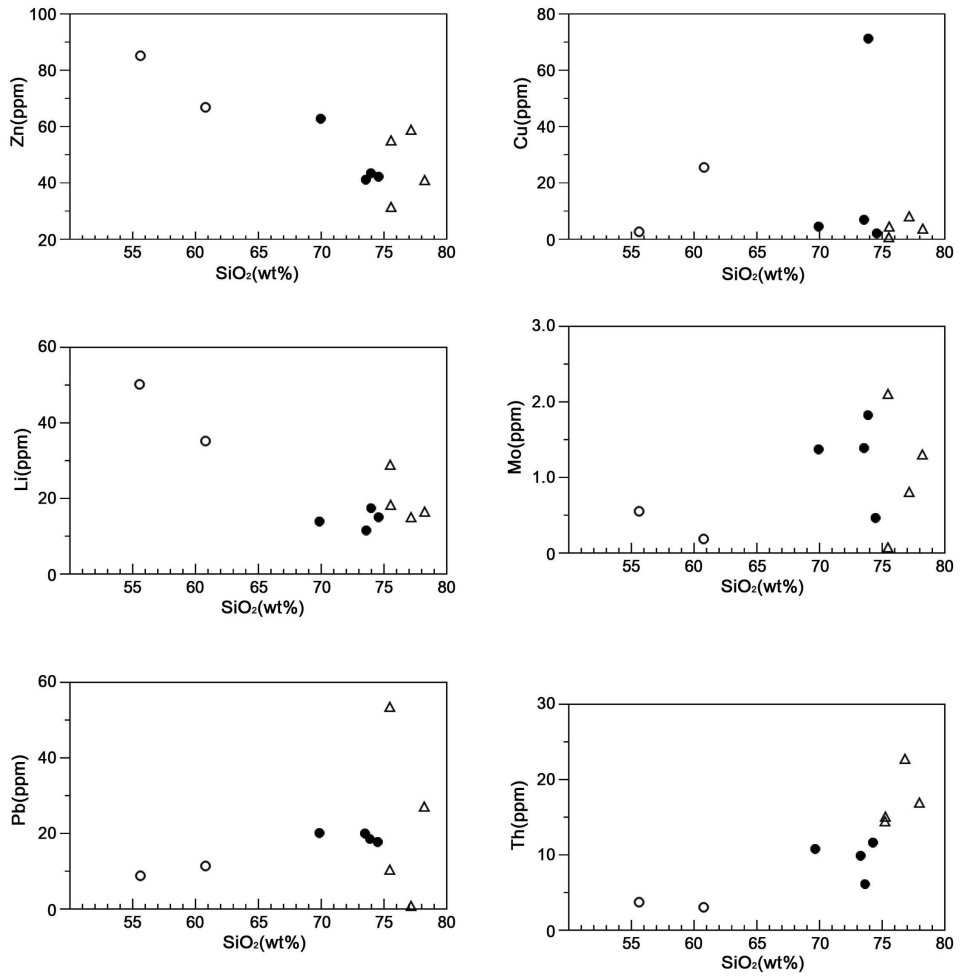


Fig. 100. Continued.

용되고, 높은 전하로 K를 포함하는 광물에는 포획된다. 일반적으로 산성암보다는 염기성암에서 더 높은 값을 보이게 되는데, 이것은 Ca 광물에서 Ca 대신에 Sr이 허용되는 과정이 마그마에서 Sr을 제거하는 주된 원인이 된다.

Ba 함량은 128.2~1051.4ppm로 SiO₂ 함량이 증가함에 따라 감소한다. Ba은 주성분원소 중에서 K만 비교할 수 있다. Ba의 전하는 K보다 크기 때문에 K에 의해서 포획된다. 이에 따라 흑운모와 K-장석에서 나타나며, 이를 많이 포함하고 있는 마그마 분화 후기로 갈수록 Ba 농도는 상대적으로 증가할 수 있다.

Li 함량은 11.60~50.23ppm의 범위로 SiO₂ 함량이 증가함에 따라 감소한다. Li는 화학적 성질을 근거로 마그마의 결정작용 중에 다른 알칼리 금속과 같이 거동한다. 하지만 결정작용에서 중요한 것은 이온의 크기이기 때문에 Li이온이 다른 알칼리 금속 이온보다 훨씬 작아 Mg과 행동을 같이 한다. Li은 휘석, 각섬석, 운모류 등에 들어있으며, 특히 운모류에 많이 함유된다.

2) spider diagram

미량원소를 Primitive Mantle값(Sun and McDonough, 1989)으로 표준화 하여 도시하면 Fig. 101과 같다. Cs, Rb, Ba, Th, U, Pb 등이 부화되어 있으며, Sr, Ti 등이 결핍되어 있는 특징을 나타낸다. 대체로 신안지역의 암석들에서 Eu, Ti 등이 더욱 결핍되며, NH-06 지역에서는 다른 지역과 다르게 K가 결핍되어 있다(Fig. 101).

종합하여 보면, 친석원소(LIL; Large-ion lithophile elements)에 비하여 고장력원소(HFS; High field strength elements)가 결핍된 양상을 보인다. Nb와 Ti의 결핍은 섭입대 화산호 환경에서 형성된 화산암에서 뚜렷하게 나타나는 경향을 보이는데(Gill, 1981), 연구지역의 암석들에게서 Ti의 결핍이 뚜렷하며, 이는 연구지역이 섭입대 화산호 환경임을 간접적으로 나타낸다.

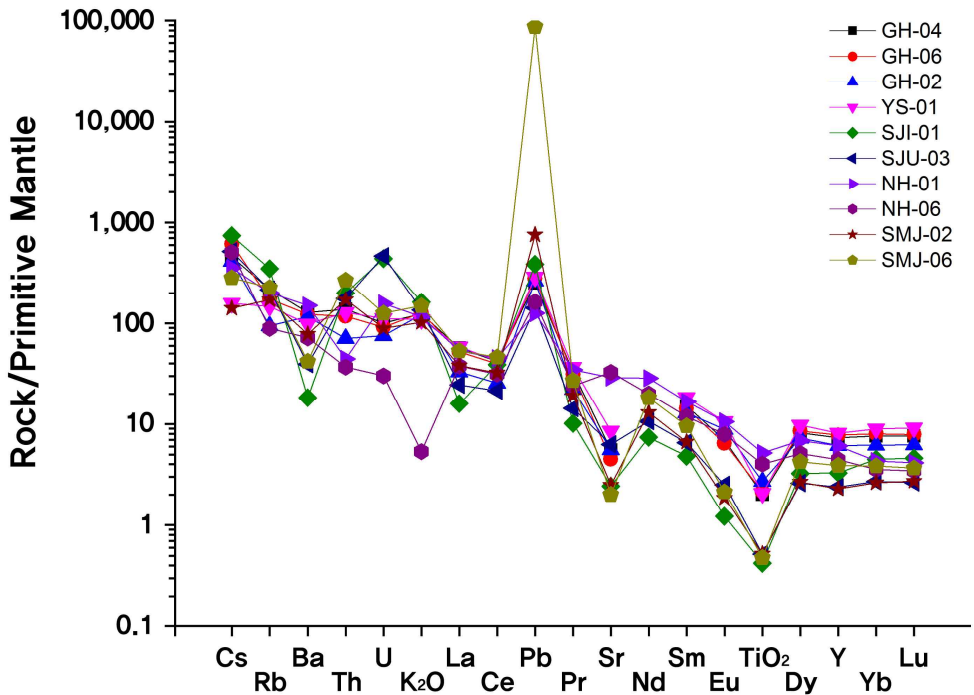


Fig. 101. Spidergram of trace element concentration in rock to Primitive Mantle(Sun and McDonough, 1989).

3. 희토류 원소

희토류원소는 란탄족원소로 이온반경이 큰 La에서 이온반경이 작은 Lu까지의 15개 원소로 구성되어 있다. La에서 Sm까지의 경희토류원소는 불호정성이 높은 편이며, Gd부터 Lu까지의 중희토류원소는 상대적으로 불호정성이 낮은 편이다. 희토류원소는 마그마의 분화과정에서 분별되며, 각 원소의 농도는 우주존재비와 매우 근사한 값을 갖는 것으로 생각되는 콘드라이트내의 각 원소의 존재비로 나눠 표준화하면, 본래의 원소분포상태로부터 분별 정도를 효과적으로 알 수 있다. 분별이 일어난 형태는 대서양 중앙해령(MORB)에서 채취된 해양성 현무암은 콘드라이트 존재비에 비하여 15~25배 정도 고르게 많이 분포하며, 대륙성 암석의 경우 어느 정도 분별된 형태를 취하면서 원자

Table 13. The concentration of rare earths elements(ppm) for columnar joints in study area.

	SJI-01	SJU-02	SMJ-03	SMJ-06	GH-02	GH-04	GH-06	YS-01	NH-01	NH-02
La	10.98	16.90	26.21	36.74	22.64	39.13	36.00	40.18	36.62	25.94
Ce	69.38	38.17	57.38	81.89	45.42	74.47	70.63	76.11	80.03	55.55
Pr	2.80	3.96	5.28	7.49	6.10	9.16	8.63	10.10	9.56	6.61
Nd	10.00	14.41	17.68	24.82	0.00	0.00	0.00	0.00	38.61	27.08
Sm	2.14	2.91	2.95	4.25	5.76	6.75	6.33	8.20	7.41	5.31
Eu	0.20	0.42	0.31	0.36	1.48	1.16	1.09	1.78	1.78	1.33
Gd	1.84	2.21	2.10	3.26	5.24	5.88	5.88	7.22	6.30	4.49
Tb	0.43	0.34	0.38	0.64	0.83	0.93	0.95	1.13	0.86	0.69
Dy	2.39	1.92	1.97	3.12	5.33	6.05	6.29	7.19	5.07	3.77
Ho	0.52	0.37	0.38	0.60	1.10	1.27	1.33	1.50	0.95	0.71
Er	1.83	1.17	1.18	1.83	3.14	3.75	3.99	4.40	2.62	2.04
Tm	0.30	0.17	0.18	0.27	0.46	0.55	0.61	0.67	0.33	0.28
Yb	2.21	1.33	1.29	1.89	3.05	3.77	3.95	4.42	2.12	1.75
Lu	0.34	0.20	0.20	0.27	0.46	0.56	0.58	0.68	0.31	0.26

번호가 증가함에 따라 콘드라이트 존재비는 상대적으로 감소하는 경향을 보인다.

연구지역에 분포하는 주상절리를 구성하는 암석들의 희토류 원소 함량은 Table 13과 같다.

연구지역 암석들의 희토류원소 함량을 콘드라이트로 표준화하면 경희토류(LREE)가 중희토류(HREE)에 비하여 부화된 일반적인 경향을 보여준다(Fig. 102). 변화 경향은 신안지역의 암석들과 고흥-여수-남해지역의 암석들이 변화 경향에서 약간의 차이를 보여주는데, 이는 두 지역의 응회암을 형성한 마그마가 서로 다른 마그마에서 기원했을 가능성이 큼을 나타낸다.

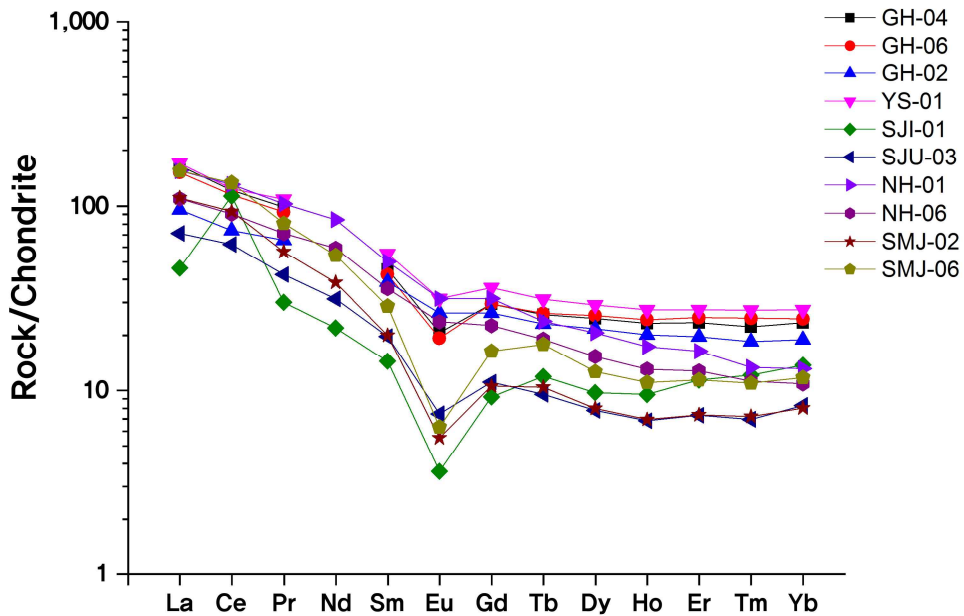


Fig. 102. Chondrite(McDonough and Sun, 1995) normalized REE patterns in rocks

VI. 연구지역 주상절리의 형성 메커니즘

주상절리의 형성 메커니즘을 밝히기 위해 많은 지질학자들이 연구를 진행 중에 있다. 이러한 과정 중 주상절리의 크기를 측정하여 통계적으로 분석하고 화학조성과 주변지질과의 상관관계를 밝히기 위한 노력을 진행 중에 있다. Hetényi *et al.*(2012)는 연구를 통하여 3개 국가 50개의 사이트에서 23,889개의 길이 데이터와 17,312개의 단면을 측정하였다. 주상절리 형성에 있어서 화학조성이 물리적 특성(기계적 특성과 온도적 특성)의 중요한 요소이며, 마그마의 산출상태가 냉각과정과 냉각률에 큰 영향을 준다는 내용에 초점을 맞춰 연구를 진행한 결과, 일반적인 용암류에서는 산성 용암류가 염기성 용암류보다 더 큰 기둥의 모양을 가지게 되며, 마그마의 산출상태(geology setting) 또는 용암류의 두께 등의 요인들이 기하학적인 구조를 제한할 경우, 기둥의 크기는 그것에 강력하게 통제된다. 즉, 마그마의 산출상태 등의 요인이 주상절리의 크기 형성에 큰 영향을 미친다는 사실을 연구를 통해 밝혔다.

1. 화학조성에 따른 형성 메커니즘

연구지역의 주상절리는 총 18개의 사이트(Table 1)에서 4,129개의 길이 데이터와 1,186개의 단면을 조사하였다. 또한 길이데이터와 다각형의 수 데이터를 통하여, 기둥의 전체적인 크기를 가늠할 수 있는 단면적을 구하였다. 단면적을 구하는 식은 Hetényi *et al.*(2012)의 연구에서 측정값의 오류를 검증하는데 사용하였던 이론적인 포물선 계수를 이용하여 계산하였다. 계산식은 다음과 같다.

$$A = N/4 \cdot \tan(\pi/2 - \pi/N) \cdot L^2$$

위의 식에서 N은 다각형의 수를 의미하며, L은 기둥면의 폭이다. 측정된 다각형의 수는 N의 함수로 L과 A의 관계가 어떻게 나타나는지 이론적인 것

과 비교하여 나타낼 수 있다. Hetényi *et al.*(2012)은 위의 식을 이용하여 모든 사이트에서 통계적인 분석을 하였으며, 측정된 값은 Fig. 103의 이론적인 포물선보다 평균 7%아래 도시되었다. 이러한 면적의 감소를 나타내는 수치는 모든 다각형에서 동일하게 나타나며, 추정한 오차보다 크게 나타났다. 이러한 결과는 주상절리에서 균열이 일어나는 메커니즘이 정다각형을 이루었을 때의 에너지를 밀돌았을 것으로 추정하였다.

연구지역의 주상절리들을 위와 같은 데이터를 이용하여 화학조성과 측정값과의 상관관계를 조사하였다. 일반적으로 SiO_2 함량이 증가할수록 기둥면의 폭은 증가하여야 한다. 이는 염기성암이 산성암보다 초기 산출온도가 높지만 점성이 낮기 때문에 확산되는 속도가 빠르며, 이는 노출되는 단면적의 증가

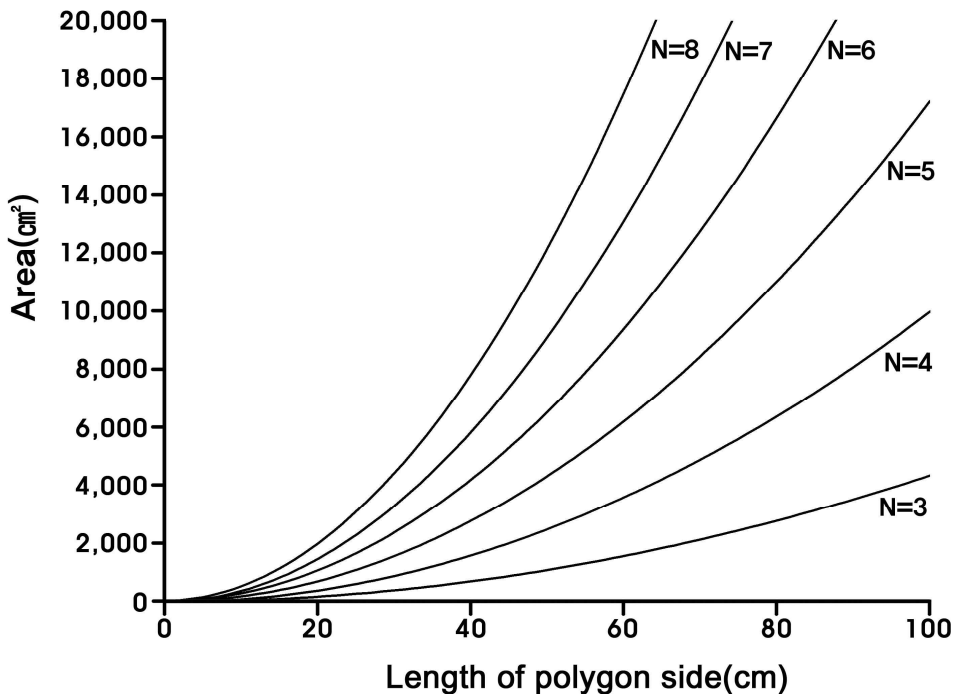


Fig. 103. Relation of the mean side length L to the mean section area A of the polygons separated by polygon order N (numbers). Parabolae show the theoretical curves.

로 냉각률을 커지게 하기 때문이다. 즉, 연구지역의 SiO_2 와 기둥면의 폭 측정 값은 완만한 직선 또는 포물선의 경향을 보여야 함이 일반적이다. 그러나, Fig. 104에서 나타나는 둘 사이의 상관관계는 뚜렷한 경향을 보이지 않는다. 이러한 경향은 다른 연구지역의 사례에서도 명확하게 나타난다. 기 연구된 제주도 지삿개 지역(JD)의 측정자료와 광주 무등산(GM)의 측정자료, 국외 연구 측정자료를 같이 도시하여 본 결과 SiO_2 와 기둥면의 폭(L)의 상관관계는 명확하지 않다. Hetényi *et al.*(2012)의 연구 지역에서 측정된 기둥면의 폭(L)과 SiO_2 의 함량과의 상관관계를 도시한 결과에서 나타난 특징은 SiO_2 의 용암류의 경우는 SiO_2 의 함량이 증가함에 따라 크기 역시 증가하지만, 용암호나 관입암체 등에서는 SiO_2 함량 변화와는 무관한 변화를 보여주고 있다. 이러한 경향은 주상절리의 크기가 화학조성보다는 상대적으로 산출 상태에 더 영향을 받는다는 점을 뒷받침 해준다.

위의 내용과 마찬가지로 SiO_2 와 단면적(A)의 상관관계도 기둥면의 폭의 경우와 같은 경향을 보이는 것이 일반적인 경향이다. 염기성암보다 산성암에서의 냉각률 증가는 기둥의 크기를 커지게 한다. 기둥의 크기가 커진다는 것은 단면적이 증가함을 의미한다. 즉, SiO_2 의 함량이 증가할수록 단면적은 가파르게 증가하거나 포물선의 경향을 보여야 한다. 그러나, 기둥면의 폭과 상관관계에서 밝혀졌듯이 연구지역의 주상절리들의 단면적을 계산한 값과 SiO_2 함량의 상관관계 또한 명확하게 어떠한 경향을 보인다고 할 수 없다(Fig. 105).

그러나, 노두의 크기와 기둥면의 폭이 가장 많이 분포하는 구간과의 상관관계도(Fig. 106)에서는 노두의 크기가 클수록 증가하는 경향을 보인다. 이는 용암류의 두께가 두꺼울수록 냉각률이 작아져 주상절리의 크기가 작아지는 이론과 부합한다. 단, 연구지역의 노두 대부분이 해안에 위치하여 침식이나 풍화 등의 영향으로 생성 초기의 상태라 할 수 없지만, 의미 있는 결과라 할 수 있다.

주상절리의 형성에 있어서 화학조성과 마그마의 산출상태 등의 요인은 매우 중요하다. 일반적으로 용암류에 의하여 형성된 주상절리는 마그마의 SiO_2 성분에 따라 그 크기를 결정한다. 하지만 화학조성의 상태만으로 주상절리의

크기나 형태가 결정되는 것이 아니기때문에 좀 더 복합적인 해석이 필요하다.

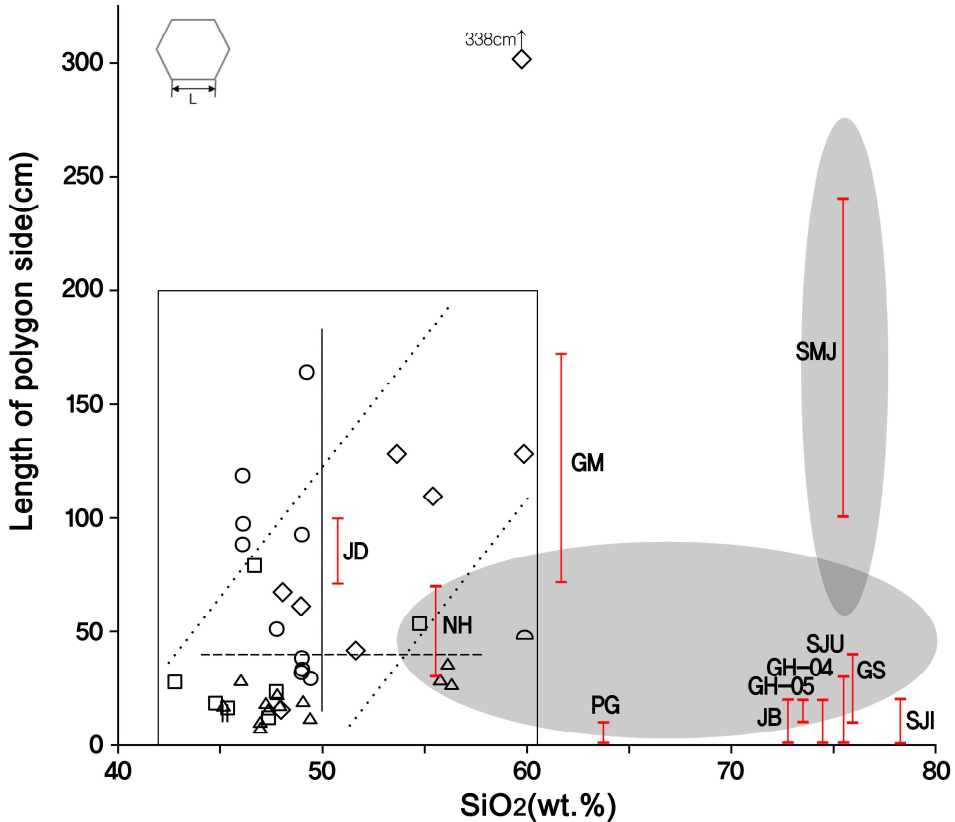


Fig. 104. Relation of SiO₂(wt%) to length of polygon side(cm) at study area(JB: Jeokbyeokgang in Buan, SMJ: Manjae-do in Shinan, GH: Goheung, YS: Yeosu, NH: Namhae, GS: Goseong in Gyeongnam, PG: Guryongpo in Pohang, JD: Jeju Dapodong(Hong, 2005), GM : Gwangju Mudeungsan(Lim *et al*, 2015)). Square box is measurement value in France, Hungary, Iceland(Hetényi *et al*,2012)(○: lava lake, △: intrusion or sub-surface, ||: dyke, ⊖: dome, ◇: SUF, □: MUF). ① is the area indicates a certain pattern. ② is a columnar joint which is formed in an environment similar as lava lake.

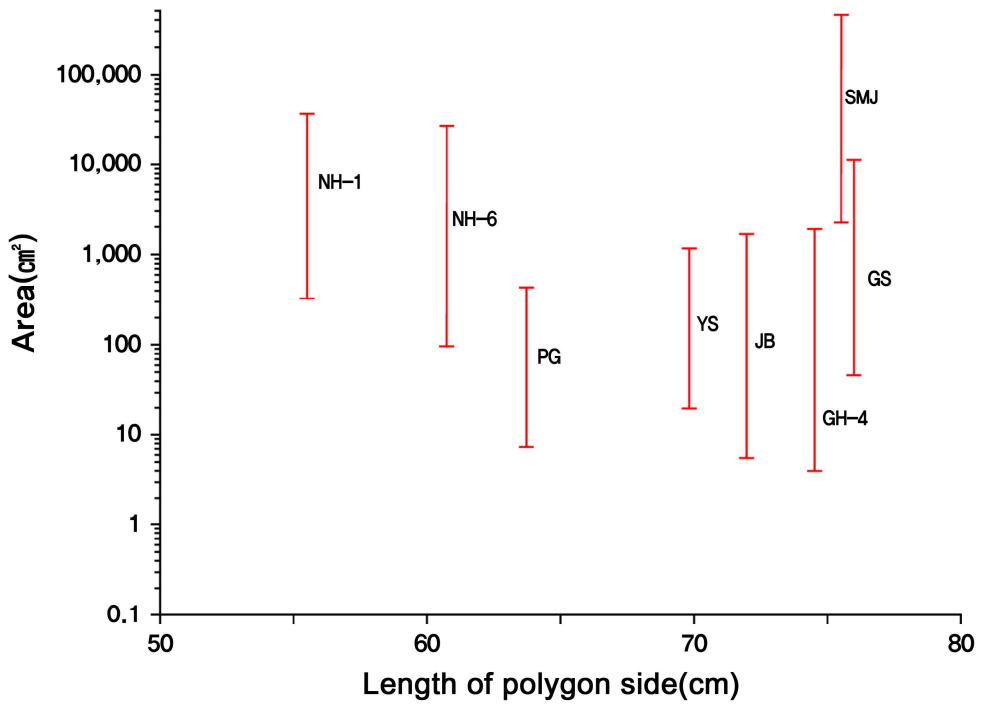


Fig. 105. Relation of SiO₂(wt%) to the mean section area A at study area.
 (JB: Jeokbyeokgang in Buan, SMJ: Manjae-do in Shinan,
 GH: Goheung, YS: Yeosu, NH: Namhae,
 GS: Goseong in Gyeongnam, PG: Guryongpo in Pohang)

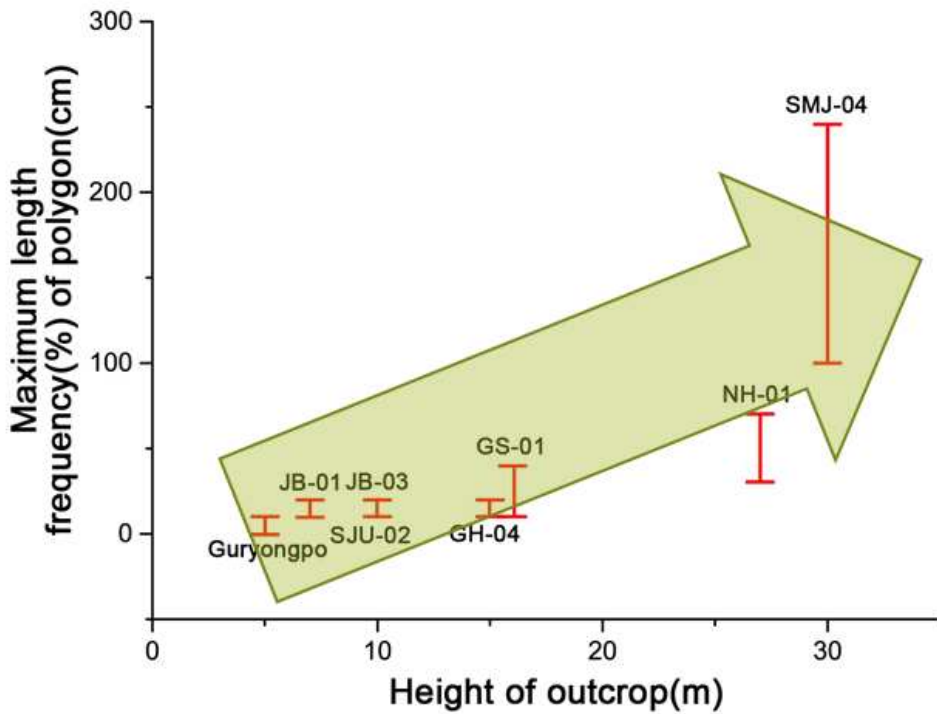


Fig. 106. Relation of height of outcrop to maximum length frequency(%) of polygon at study area.

(JB: Jeokbyeokgang in Buan, SMJ: Manjae-do in Shinan,
 GH: Goheung, YS: Yeosu, NH: Namhae,
 GS: Goseong in Gyeongnam, PG: Guryongpo in Pohang)

2. 산상에 따른 형성 메커니즘

산상의 형태는 화학조성과 더불어 주상절리 형성에 매우 중요한 요인이다. 2장에서 설명한 바와 같이 산상에 따라 주상절리는 다양한 형태로 발달하며, 발달 방향이나 크기 또한 영향을 받는다. 연구지역의 주상절리는 Fig. 11에서 보여지는 형태의 주상절리들이 서로 복합적으로 존재하기 때문에, 본 장에서는 연구 지역 주상절리의 형태를 구조적으로 분석하여 형성 당시의 산상을 추정해 보고자 한다.

1) 전라북도 부안

전라북도 부안에 위치한 적벽강 지역의 주상절리는 수직방향의 켈러네이드가 하부의 세일층을 덮는 구조를 보이고 있다. 기둥면의 폭(L)은 상부에서 하부로 갈수록 크기가 좁아지는 특이한 구조를 보인다. 일반적으로 용암류가 지표층을 따라 흐르며 냉각할 때, 하부는 지표와 상부는 공기와 맞닿게 된다. 상부와 하부에서 냉각이 진행됨에 따라 균열의 발생이 시작되며, 상부와 하부의 냉각률이 큰 차이를 보일 경우 중간에서 엔테블러취가 형성되는 것이 일반적이다. 그러나 이 지역은 상부와 하부 켈러네이드의 크기에 있어 차이는 있지만 엔테블러취로 구분되지는 않는다. 이것으로 보아 냉각하는 과정에서 균일하게 켈러네이드 구조가 성장하는 동안 하부 세일층의 상태에 따라 그 크기가 달라진 것으로 추정된다.

JB-03 지역의 주상절리는 JB-01 지역의 주상절리 구조보다 복잡한 형상을 보인다. 일반적인 주상절리들에서는 지표와 맞닿는 곳의 기둥의 크기가 공기층과 맞닿는 곳의 기둥의 크기보다 크게 나타난다. 그러나 이 지역의 주상절리는 하부층과 맞닿는 부분에서 기둥의 크기가 매우 작게 나타나고 상부로 갈수록 커지는 모습을 관찰할 수 있다. 이는 주상절리의 상부보다 하부에서 냉각률이 높았으며, 앞서 설명한 JB-01 지역과 마찬가지로 하부의 격포리층이 주상절리 형성당시 미고결 상태의 수분을 많이 함유한 상태였다면, 주상절리를 구성하는 암석이 생성 당시 매우 빠른 속도로 냉각되며 주상절리를 형성하였고, 상부로 갈수록 냉각률은 점차 낮아지며 기둥의 크기는 적벽강의 다

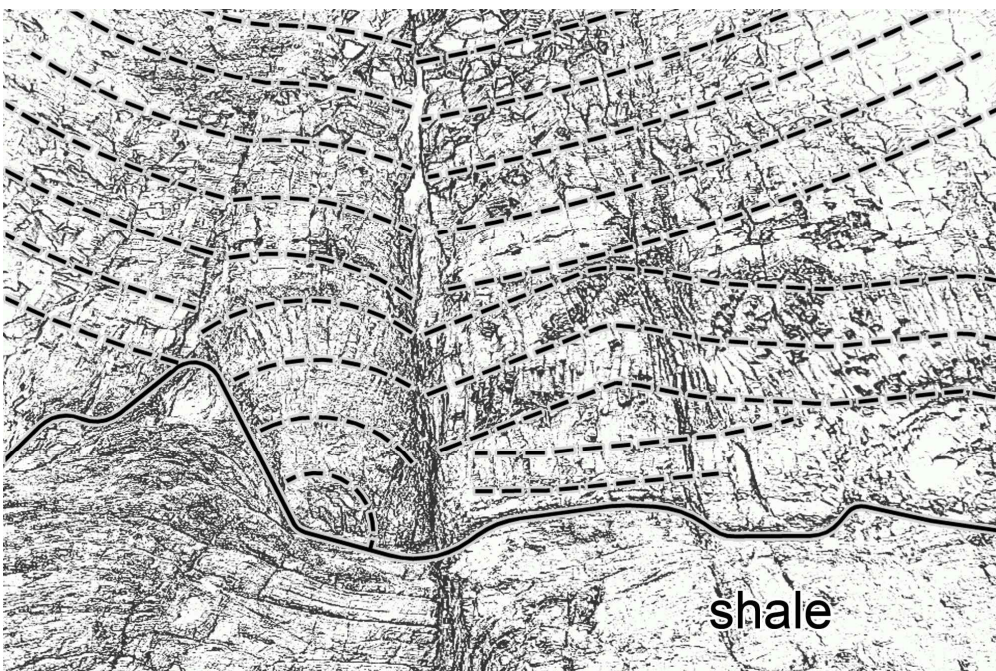


Fig. 107. Photograph and sketch of columnar joint structure in JB-03.
 (dot line: isothermal lines, solid line: boundary line of bed)

른 곳과 비슷한 크기로 형성되었을 것으로 사료된다(Fig. 107).

적벽강 지역은 일반적으로 보고된 주상절리 형태의 반전된 형태로 주상절리 형성시 하부 퇴적층의 영향을 받아 현재의 모습을 나타낸 것으로 추정된다.

2) 전라남도 신안

전라남도 신안지역은 대체로 수직방향의 컬러네이드가 발달한 주상절리가 분포하고 있다. 기둥면의 폭(L)은 지역에 따라 편차가 있지만 대체로 10~30cm의 범위에서 가장 많은 빈도율을 보이고 있으며, 만재도 지역의 경우 최대 4m이상의 크기를 보이고 있다.

지도 지역의 주상절리는 수직방향의 컬러네이드가 발달하고 있으며, 지도 남쪽에 위치한 무명도에서도 수직방향의 컬러네이드 구조가 잘 발달되어 있다. 이는 응회암이 퇴적할 당시 지표와 평탄하게 등온선이 형성되어 쌓였음을 간접적으로 지시하고 있다.

증도지역의 주상절리는 돛 형태의 주상절리와 수직방향의 주상절리, 암맥에서 발달하는 수평 방향의 주상절리가 복합적으로 발달하고 있다. 증도 지역은 고온의 화산쇄설물이 낙하, 용결, 냉각하면서 형성되었다. 형성과정은 리조트를 중심으로 바다방향으로 용결응회암이 형성되면서, 마치 점성이 높은 용암류의 말단부와 같이 돛 형태의 주상절리가 형성되었을 것으로 추정된다. 주상절리의 컬러네이드 구조는 등온선에 수직 방향으로 발달하고, 포획된 암편들은 압축 신장되어 중력방향에 수직 방향으로 압착되어 발달하고 있다. 해안에 발달한 주상절리들은 발달 방향이 돛 형태로 발달한 주상절리의 발달 방향과 일치하는 것으로 보아 현재 남아있는 돛 형태 주상절리의 연장부로 생각된다.

SJU-02 지역은 높이 약 10m의 돛 형태를 보이는 주상절리가 발달하고 있다(Fig. 108). 이 지역에서는 돛 형태의 주상절리 형성시 응력을 해소하기 위하여 돛 방향으로 경사진 2차 절리가 동시에 발달하고 있다. 파도에 의한 침식으로 완전한 돛의 형태를 보이지는 않으나 해안선에 발달한 주상절리를 가상의 선을 연장하여 추정하면 하나의 구조를 보인다.

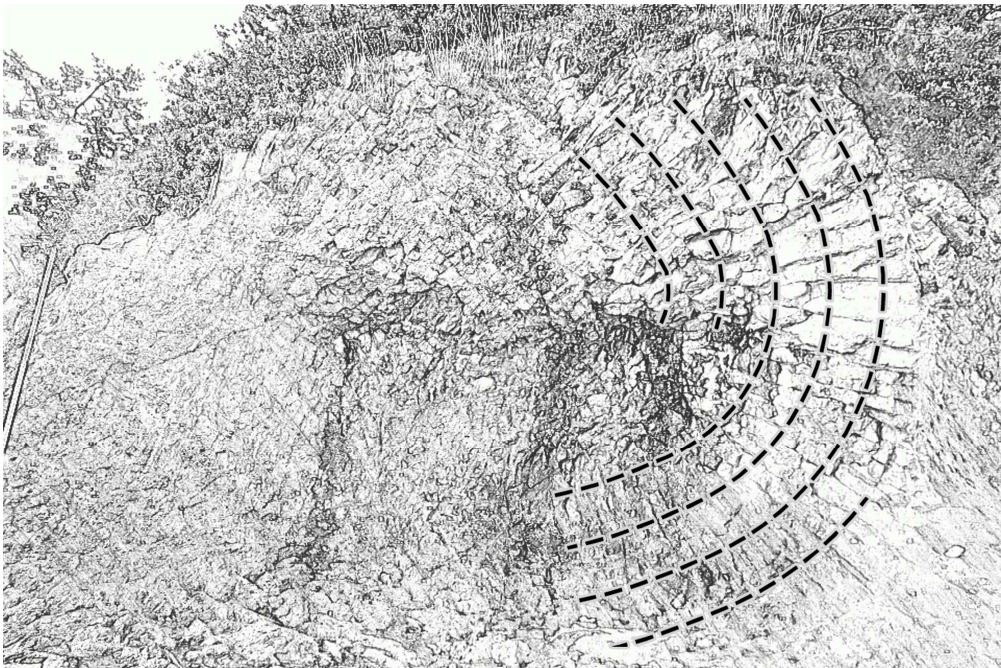


Fig. 108. Photograph and sketch of columnar joint structure in SJU-02.
(dot line: isothermal lines)

SJU-03 지역의 주상절리 또한 돔 형태의 주상절리 구조를 보이고 있으며, SJU-02 지역과 지근거리에 있는 있어 같은 시기에 형성된 것으로 판단된다 (Fig. 109). 노두의 상부에서 돔 형태의 바깥쪽으로 갈수록 주상절리의 발달방향은 변하지 않지만 양파가 한 겹씩 뜯어지듯 아래로 밀려난 듯한 구조를 보인다. 이러한 구조는 앞서 설명한 바와 같이 2차 절리에 의한 영향인 듯하다. 그러나, 이러한 구조적인 모습이 증도 주상절리에서 잘 목격되고 있어 2차 절리에 의한 것인지, 아니면 주상절리 형성과정에서 응력의 해소에 따른 작용에 의한 것인지에 대한 추가적 연구가 필요할 것으로 사료된다.

SJU-05지역 부근에서 발달하는 수평 방향의 주상절리는 증도에 발달하는 주상절리들을 가로질러 북서-남동방향으로 발달하며, 주변의 주상절리 발달방향과는 상관없이 접촉면에 수직방향으로 발달하고 있다.

만재도 지역은 최소 두차례 이상의 화산활동 또는 마그마의 관입이 진행되었다. Fig. 110과 Fig. 111는 주상절리의 구조 메커니즘을 보여주는 그림으로 최소 한차례 이상의 화산활동으로 인한 응회암의 퇴적과 이후 이를 관입한 두차례 이상의 관입암체의 존재가 그 증거이다. 주상절리의 켈러네이드 형성 방향이 등온선에 수직으로 발달하기에 Fig. 110의 하부층은 지표면과 수평하게 등온선이 형성되었으며, 냉각함에 따라 수직 방향의 켈러네이드가 형성되었으며, 상층부 대비 기둥의 크기가 커 주상절리가 형성될 때까지는 상당한 시간이 걸렸을 것으로 생각된다. 이후 상층이 관입 또는 분출로 인하여 다른 주상절리가 형성되었으며, 하층을 피복하며 발달하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 111에서는 최소 세차례의 활동을 보여주고 있다. ①번의 하층이 먼저 형성된 주상절리이며, 이후 ②번 암체의 관입이 진행되었으며, ③번 암체의 관입이 추가로 진행되었다. ③번 암체의 경우 상부와 관입암체가 동일 등온면을 가지는 것으로 보아 동일암체일 것으로 추정된다. ①번 암체의 경우 상당한 시간에 걸쳐 냉각되면 비교적 큰 크기의 켈러네이드가 형성되었으며, ②번 관입암체는 ①번 암체를 관입한 방향과 동일하게 등온면이 형성되며, 접촉면에 수직방향으로 주상절리가 발달하였고, 주상절리 기둥의 크기가 작은 것으로 보아 ①번 암체가 완전히 식은 후 관입이 진행되어 냉각시간이 빨랐음을 지시해 준다. ③번 관입체의 경우도 같은 이유로 ①, ②번의 암체가

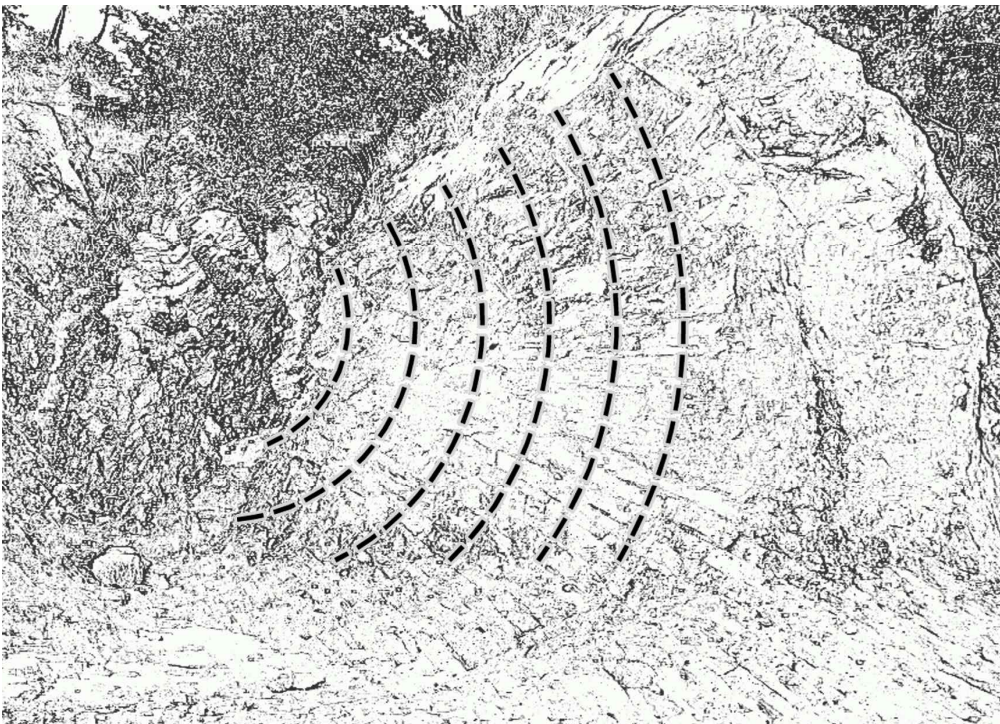


Fig. 109. Photograph and sketch of columnar joint structure in SJU-03.
(dot line: isothermal lines)



Fig. 110. Photograph and sketch of columnar joint structure in Manjae-do.
(dot line: isothermal lines, solid line: boundary line of bed)

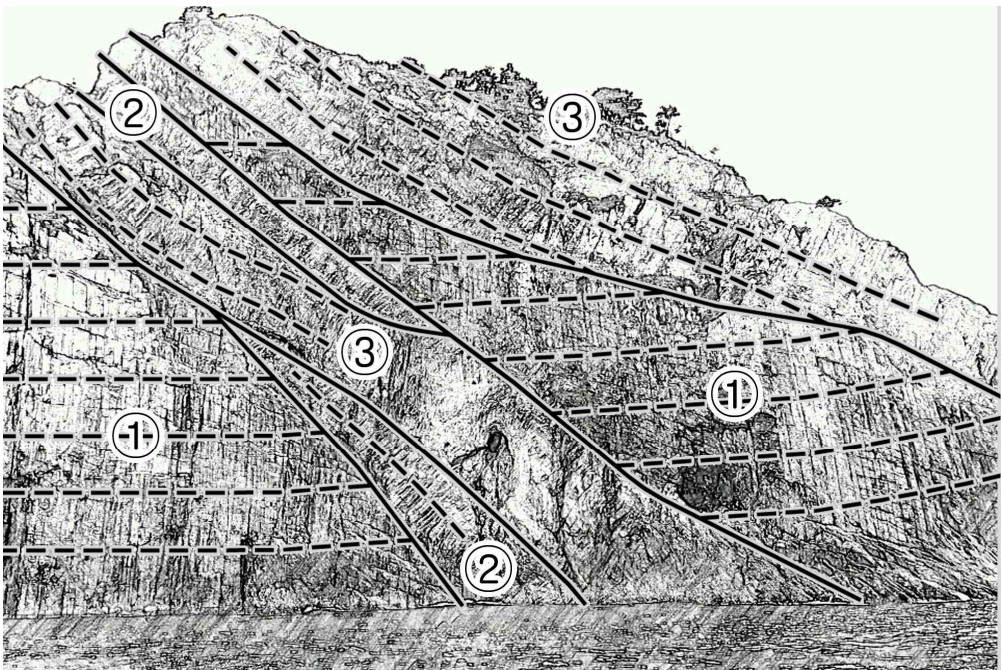


Fig. 111. Photograph and sketch of columnar joint structure in Manjae-do.
 (dot line: isothermal lines, solid line: boundary line of bed)

완전히 형성된 후 관입이 진행되었음을 알 수 있다.

만재도 지역의 전체적인 산상은 Fig. 11(c)와 같은 용암호 형태로 발달하였을 것으로 생각된다. 주상절리가 형성되는 화산활동이 일어났던 시기에 만재도 지역은 보울(bowl) 형태의 분지 지형이었을 것으로 추정된다. 화산활동으로 인한 화산쇄설물들이 분지 지형에 쌓이면서 현재 만재도를 구성하는 응회암을 만들었으며, 이들이 용결, 냉각되면서 주상절리를 형성하였고, 주상절리는 해수면 상승과 함께 침식되거나 바다에 잠겨 현재의 상태를 보이고 있을 것으로 추정된다(Fig 112).

3) 전라남도 고흥

고흥지역은 백악기 말 화산활동에 의한 응회암의 하강, 용결, 냉각하는 과정에서 형성된 수직방향의 주상절리가 전반적으로 분포하고 있다. 이러한 과정에서 형성된 용결응회암은 초기 온도가 매우 높았을 것이다.

GH-04 지역의 주상절리는 상부와 하부의 켈러네이드 크기의 차이가 없고, 지표면과 수직 방향으로 발달되어 있다. 이러한 형태는 Fig. 11a(thin lava flow)에서 보여주는 주상절리의 형성 과정과 비슷하다. 그러나 Fig. 113에서 보이는 바와 같이 채석장의 동쪽 방향으로 갈수록 주상절리의 방향은 지표면과 나란하게 발달하며, 이러한 구조는 마치 점성이 높은 용암류의 흐름이 끝나는 곳에서 둥근 모양으로 만들어 지는 것(Fig. 12)와 양상이 비슷하다고 볼 수 있다. 이 지역은 유문암질 응회암으로 SiO₂의 함량이 높을수록 점성이 높아지는 화성암의 특징과 마찬가지로 초기 용결응회암이 완전히 굳어지기 전에 만들어 졌을 것으로 추정된다.

GH-02 지역은 상부는 수직 방향의 켈러네이드가 잘 발달하고, 하부는 주상절리가 발달하지 않는 특수한 구조를 보인다(Fig. 114). 이 지역의 암석은 유문암질 래피리 응회암으로 상부와 하부의 암석의 차이는 없다. 일반적으로 엔테블러취가 만들어지기 위한 조건은 암체가 냉각하여 균열이 이루어지는 과정에서 갑작스런 수분의 첨가로 인하여 냉각속도가 급격히 증가하거나, 강물 또는 바닷물과의 접촉에 의하여 형성된다. 하지만 이론에서 설명했듯이

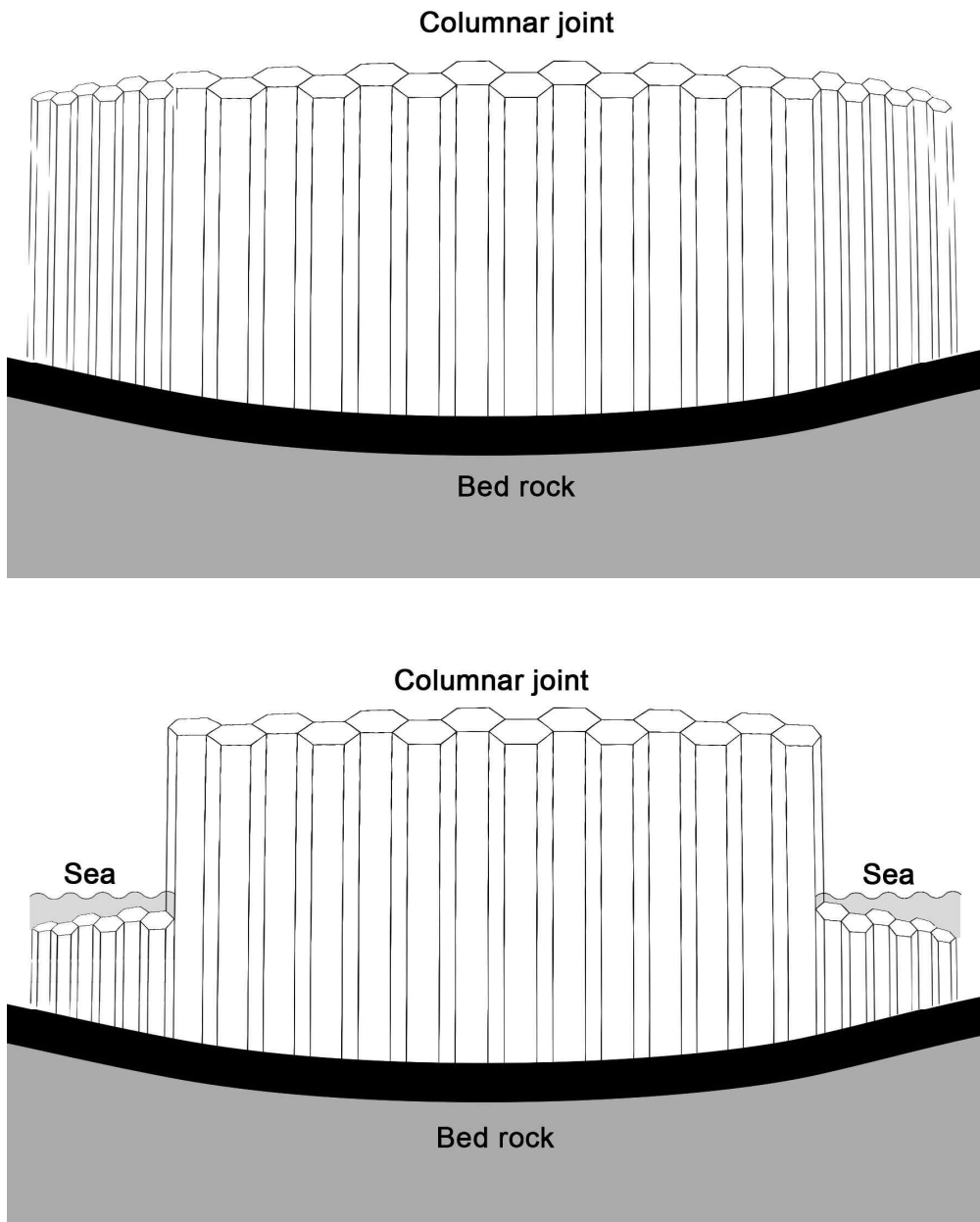


Fig. 112. Schematic diagram of the columnar joint in Manjae-do, Shinan.
 (a)formation of columnar joint initial, (b)present.

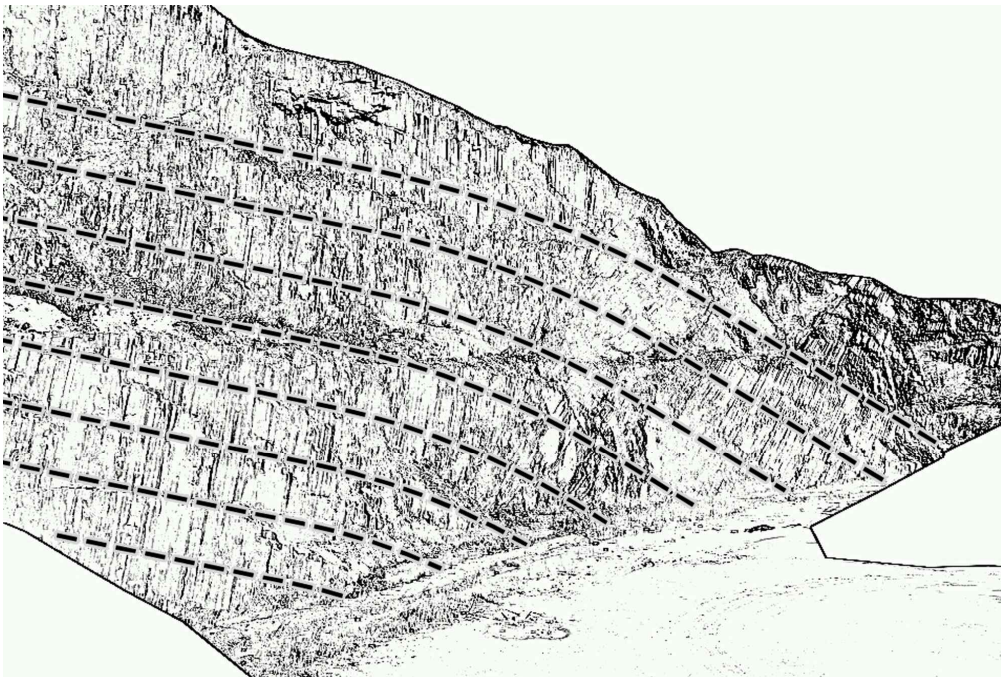


Fig. 113. Photograph and sketch of columnar joint structure(GH-04).
(dot line: isothermal lines)

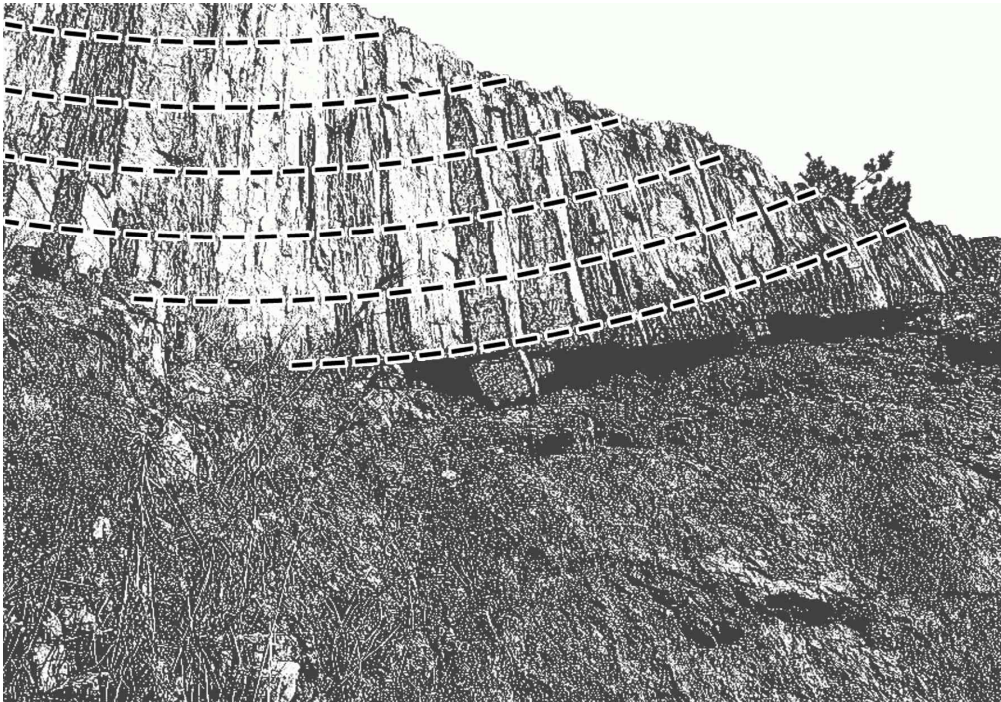


Fig. 114. Photograph and sketch of columnar joint structure(GH-02).
(dot line: isothermal lines)

건조한 기후 조건에서도 엔테블러취가 형성되어 있다는 문제도 있다. 전자의 의견을 따르더라도 이 지역은 바닷가에 위치한 GH-05 지역과 표고차가 상당하며, 지근거리의 GH-01 지역에서 상하 구분의 없는 수직 방향의 컬러네이드가 발달하는 것으로 보아 하부층이 엔테블러취일 가능성은 매우 낮아 보인다. 오히려 상부의 주상절리가 발달한 부분과 하부의 래피리 응회암층이 생성 시기의 차이가 더 설득력이 있는 것으로 사료된다.

GH-07 지역의 주상절리는 암맥에서 발달하는 것으로 주변의 기반암과의 접촉부에 수직 방향으로 발달되어 있어 수평방향의 주상절리가 발달한 것으로 보여 진다. 이러한 구조는 신안 등 다른 지역의 암맥에서 발달하는 주상절리와 형성 메커니즘이 동일하며, 중성암맥이 주변 기반암 사이를 관입하는 동안 냉각하면서 주상절리를 형성하였다(Fig. 115).



Fig. 115. Photograph and sketch of columnar joint structure(GH-07).
(dot line: isothermal lines)

5) 경상남도 남해

남해지역에 분포하는 주상절리는 다른 지역과 마찬가지로 대부분 수직 방향으로 발달하였다. NH-01 지역에서 주상절리들이 해안에 위치함에도 엔테블러취나 냉각이 급격하게 일어났음을 알려주는 어떠한 구조적인 특징이 나타나지 않는다(Fig. 116). 이는 주상절리 형성 당시 주변 환경이 현재와 같이 해안지형이 아닐 수도 있음을 지시한다. NH-06 지역은 JB-03 지역과 같이 하부는 세일층이 상부는 응회암질의 주상절리가 발달함에도 구조적인 차이를 보이는 이유는 세일층의 상태가 다름에 있다. NH-06 지역은 세일층과 맞닿는 부분에서 켈러네이드의 크기가 작아지거나 엔테블러취가 형성되지 않았다. 이는 세일층이 완전히 형성되고 난 후 주상절리가 형성되었음을 알려준다.

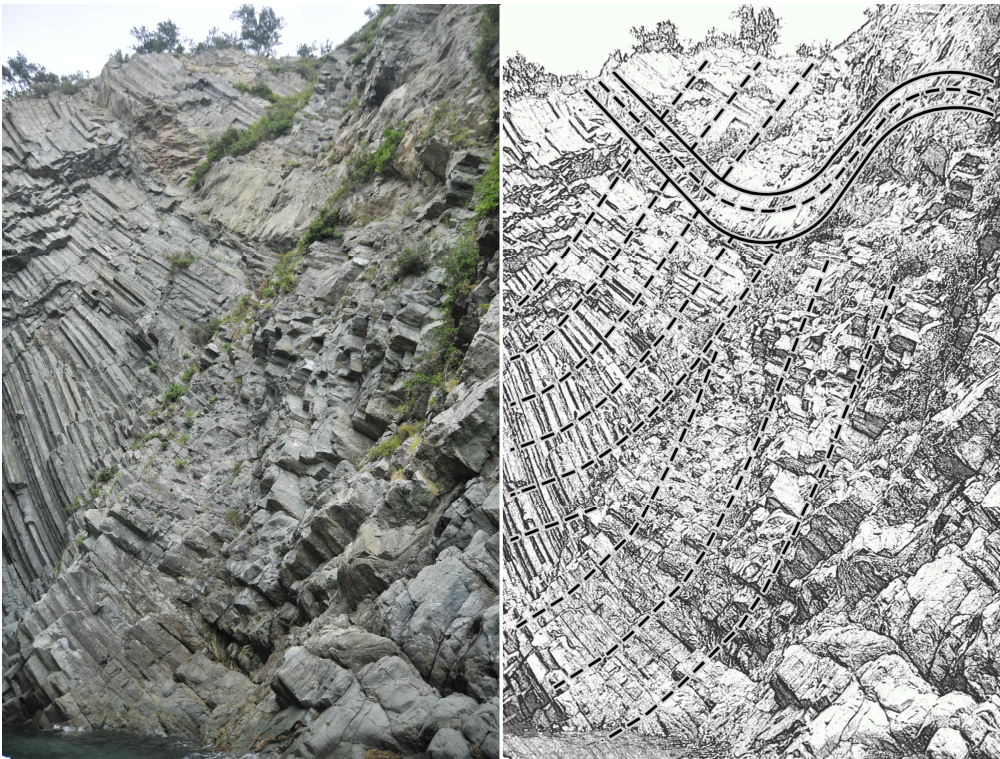


Fig. 116. Photograph and sketch of columnar joint structure(NH-01).
 (dot line: isothermal lines, solid line: boundary line of bed)

6) 경상북도 포항

구룡포일대의 주상절리는 매우 복잡한 구조를 보이고 있다. Fig. 118은 돛 형태의 주상절리가 발달한 지역이다. Fig. 117(a)의 전면부와 후면부의 기둥 발달 방향을 추적하여 등온선을 연결하여 보면 동심원을 그리며 발달하는 모습을 추정할 수 있다. 이 지역은 용암류의 말단부와 같은 형태를 취하고 있으며, 바다방향으로 또 다른 방향의 주상절리가 발달한 것으로 보아 최소 두 차례 이상의 화산쇄설물들의 낙하로 인한 응회암의 퇴적이 시간차를 두고 발생하였을 것으로 추정된다.

Fig. 117(b)에서 추정할 수 있는 것은 돛 형태의 주상절리가 형성과정에서 급격한 냉각으로 인하여 켈러네이드의 크기가 갑자기 작아졌으며, 엔테블러취가 형성되었다. 이 지역에 화산쇄설물들이 낙하, 냉각하는 과정에서 냉각률의 급격한 증가로 인하여 기둥의 크기는 작아지는 모습을 보이고 있으며, 중간에 엔테블러취 구조를 보인다. 이러한 일련의 관찰 증거를 바탕으로 하면, 구룡포 지역은 주상절리 형성 당시에도 현재와 비슷한 해안지역이었을 것으로 추정되며, 화산활동으로 인한 화산쇄설물들이 낙하, 냉각하는 과정에서 바닷물과의 접촉으로 급격한 냉각이 진행되었음을 추정할 수 있다.

3. 주상절리의 형성 메커니즘

본 연구지역의 주상절리의 형성 메커니즘은 네가지로 분류할 수 있다.

첫째는 수직방향으로 발달한 주상절리이다. 용암류에서 발달한 주상절리들이 표면에서부터 중심부로 냉각되면서 형성되는 과정과 마찬가지로 화산쇄설물들이 낙하하여 퇴적되고, 냉각되면서 수직방향의 주상절리가 형성되었다. 용결응회암으로 구성된 주상절리의 경우 낙하, 용결, 냉각과정을 거치며 현재의 주상절리 형태를 보인다. 연구지역 중 전라북도 부안(JB), 전라남도 신안군 지도(SJI), 증도(SJU), 만재도(SMJ), 고흥군(GH), 여수시(YS), 경상남도 남해군(NH), 고성군(GS), 경상북도 포항시(PG) 지역이 이에 해당한다.

둘째는 수평방향으로 발달한 주상절리로서, 이는 암맥에 발달한 주상절리들

(a)



Fig. 117. Photograph and sketch of columnar joint structure in Guryongpo.
(dot line: isothermal lines)



Fig. 117. Continued

과 반구형의 형태를 보이다가 침식 또는 풍화의 영향으로 일부분이 노출되어 수평방향으로 발달된 것처럼 보이는 주상절리들(안건상, 2014b)이 있다. 연구 지역의 수평방향 주상절리는 전자의 경우이며, 전라남도 신안군 임자도(SIJ), 만재도(SMJ-04), 고흥군(GH-07), 경상남도 남해군(NH-01), 사천시(SC-01) 지역이 이에 해당한다.

셋째는 돔 형태로 발달한 주상절리로 용결응회암이 관찰되는 지역에서 잘 발달하고 있다. 용결응회암의 형성 당시 고온의 화산쇄설물이 퇴적되면서, 마치 점성이 매우 높은 용암류에서 나타나는 형상(Fig. 12)을 보인다. 일부 침식과 풍화로 형태가 드러나면서 현재의 돔 형상을 보이고 있다. 이러한 형성 메커니즘을 보이는 지역은 전라남도 신안군 증도(SJU), 경상북도 포항시(PG) 지역이며, 돔 형태는 아니지만 비슷한 메커니즘을 보이는 곳이 전라남도 고흥군(GH-04) 지역이다.

넷째는 용암호와 비슷한 형태를 보이는 주상절리로서 전라남도 신안군 만재도(SMJ) 지역이다. SiO_2 분포와 기둥면의 폭(L)의 상관관계(Fig. 104)에서 나타나듯이 SiO_2 의 함량변화는 크지 않으나 기둥면의 폭(L)은 폭 넓은 범위를 보여주는 특징이 있다. 생성 당시의 지형 구조가 보울(bowl) 형태였을 것으로 추정되며, 가장자리 부분은 침식 또는 풍화에 의하여 해수면 아래에 있을 것으로 사료된다.

VII. 토의

주상절리는 형성 과정에 있어서 화학 조성과 모양의 산출상태에 의하여 크기와 형태가 결정된다. 마그마의 분출로 인하여 형성된 주상절리들의 형태는 기존의 연구결과에 의하여 화학조성과의 상관관계가 어느 정도 밝혀졌다. 용암류에서 발달한 주상절리는 SiO_2 와 주상절리 기둥면의 폭 크기는 비례한다. 이러한 경향은 Single Unit Flow(SUF)와 Multiple Unit Flow(MUF)에서 모두 나타난다. 용암호에서 발달한 주상절리는 주상절리 기둥면의 폭 크기의 분포가 SiO_2 의 경향과는 상관없이 다양하게 분포한다. 이는 용암류의 두께에 의하여 기둥면의 폭 크기가 결정되었다고 사료된다. 암맥에서 발달한 주상절리는 SiO_2 의 변화 경향과는 상관없이 기둥면의 폭 크기가 제한되어 분포하는데, 암맥이 발달함에 따른 폭이 제한되거나 주변에 퇴적암이 분포할 경우 아마도 크기가 제한적으로 발달하는 것으로 추정된다.

연구지역의 주상절리는 화산쇄설물의 낙하, 용결, 냉각에 의하여 형성된 것으로 기존의 연구 결과에 의한 형성 메커니즘으로 설명하기에는 어려움이 있다. 분석된 결과와 기존의 연구를 통하여 연구지역의 형성과정을 지역별로 추정하면 다음과 같다. 전라북도 부안군 적벽강 지역(JB)의 주상절리는 수직 방향으로 발달하며, 하부 세일층과의 접하는 곳에서 켈러네이드의 크기가 급격히 작아지거나 엔테블러취가 발달하며, 페퍼라이트가 관찰된다. 이러한 발달 형태는 용암류에 분포하는 주상절리와 비슷하나 SiO_2 함량에 비하여 주상절리 기둥면의 폭 크기 분포가 기존의 연구 결과에 비하여 작게 나타난다. 이러한 결과는 주상절리가 형성될 때, 세일층과 접촉부분에서 냉각률이 급격히 증가하거나 수분의 첨가가 있었을 것으로 사료된다. 이에 따라 일반적인 용암류에서 나타나는 형태를 역전하는 모습을 보여주고 있다. 전라남도 신안 지역은 전체적으로 유문암질 응회암으로 구성된 주상절리가 수직방향으로 발달한다. 단, 증도지역(SJU)에서는 돛 형태의 주상절리가 발달하는데, 점성이 높은 용암류의 형태와 비슷한 구조를 보이며, 일부가 침식되어 현재의 형태를 보이는 것으로 사료된다. 만재도(SMJ)지역에서는 수직방향으로 발달한 주상절리에 두 차례 이상의 관입이 있었으며, 관입한 암체에서도 주상절리가

발달한다. 화학조성이 유문암질 응회암으로 구성된 타 지역의 주상절리의 크기보다 상대적으로 큰 것은 이 지역이 형성 초기 보울(bowl) 형태의 지형에 화산쇄설물이 낙하하여 용결, 냉각되면서 주상절리가 형성되었으며, 기존의 연구에서 밝힌 용암돔의 형태로 발달하였고, 시간이 흐르면서 주변부가 침식되어 현재의 상태로 되었을 것으로 추정된다. 전라남도 고흥지역(GH)은 전체적으로 수직 방향의 주상절리가 발달하였으며, GH-04지역의 주상절리는 수직 방향의 주상절리가 발달하면서 채석장의 노두를 바라봤을 때, 우측으로 진행될수록 수평절리의 모습을 보이는데, 이는 점성이 높은 단일 용암류의 말단부에서 부채꼴 모양의 주상절리 형태가 나타나는 모습의 단면과 동일한 모습을 보인다. GH-09지역 주상절리는 관입암체로 주변지질과의 경계부가 냉각면이 되며 등온선은 냉각면과 수평방향으로 형성되기 때문에, 지표면과 수평한 방향으로 발달한 주상절리가 나타난다. 경상남도 남해지역(NH)은 전반적으로 수직방향의 주상절리가 형성되어 있으며, 온도 구배에 따라 컬러네이드가 굽은 형태도 나타난다. 수직방향의 주상절리에 산성암맥이 관입하였으며, 관입체에서도 주상절리가 나타난다. 관입암체의 주상절리는 지질경계부와 수직 방향으로 발달한다. 가인리(NH-06)의 세일층 상부의 주상절리는 적벽강의 주상절리와 다르게 접촉부에서 특징적인 지질구조를 보이지 않은 것으로 보아 두 지층은 부정합 관계인 것으로 판단된다. 경상남도 사천지역(SC)의 주상절리는 퇴적암 사이에 중성암맥류가 관입하여 형성되었으며, 주변 지층 경계부에 수직방향으로 발달하였다. 경상남도 고성지역(GS)의 주상절리는 대체로 수직 방향의 주상절리가 발달하였으며, 인근 남해지역(NH)이나 사천지역(SC)과는 다르게 유문암질 암석으로 이루어져 있다. 기반암인 퇴적암류와의 접촉부에서 엔테블러취나 기동면의 크기가 변경되지 않은 것으로 보아 퇴적암의 형성 후 상당 시간이 흐른 뒤 상부에 유문암질 응회암이 퇴적한 것으로 사료되며, 화산쇄설물이 낙하, 냉각되면서 수직방향의 주상절리가 형성된 것으로 추정된다. 경상북도 포항 구룡포지역(PG)의 주상절리는 육지에서 바다방향으로 발달한 주상절리가 구역별로 몇 차례에 걸친 화산쇄설물의 퇴적에 의하여 형성된 복잡한 구조를 보이고 있다. 일부 지역에서 해안 방향으로 진행될수록 기동면의 크기가 작아지고, 엔테블러취 구조를 보이는 형태로 보아 주상절리

형성 과정에서 바닷물의 영향이 있었을 것으로 사료된다. 돛 형태의 주상절리가 발달한 곳은 기존의 연구결과에서 알려진 것처럼 점성이 높은 용암류에서 나타나는 특징을 보여주며, 바깥쪽으로 기존의 방향과 다른 방향으로의 주상절리가 발달하는 것으로 보아 추가적인 화산활동으로 인한 화산쇄설물의 퇴적이 진행된 것으로 추정된다.

수직방향으로 발달한 주상절리는 용암류에서 주로 발달하며 기존의 연구에서 SiO_2 함량과 주상절리 기둥면의 폭 크기는 비례하는 것으로 알려져 있으나, 연구지역에서 수직방향으로 발달한 주상절리들에 대한 SiO_2 함량과의 상관관계에서는 비례관계가 성립하지 않으나 일정한 패턴을 보이고 있음은 분명하다.

암맥에서 발달한 주상절리는 기존의 연구에서 주상절리 기둥면의 폭의 크기가 지형적 요소와 주변 지질의 상태에 의하며 지배될 것으로 추정하였으며, 연구지역 중 암맥에서 발달한 주상절리도 그 크기가 제한적으로 발달하여 기존의 연구결과와 어느 정도 부합하는 것으로 사료되나, 추가적인 연구를 통하여 지배요소와의 상관관계를 밝혀내야 할 것이다.

비록 연구지역에 해당되지 않으나, 한반도 남부지역은 전체적으로 백악기 화산활동이 활발하게 이루어졌음이 기존 연구를 통하여 밝혀졌다. 그러나 모든 지역에 주상절리가 발달하고 있지 않는 것에 대한 연구가 추가로 진행되어야 하며, 이와 연계하여 백악기 화산활동의 메커니즘에 대한 규명도 진행되어야 할 것이다.

Ⅷ. 결론

한반도 남부 해안에 분포하는 주상절리를 연구하기 위하여 전라북도 부안, 전라남도 신안군 지도, 증도, 임자도, 만재도, 고흥군, 여수시, 경상남도 남해군, 사천시, 고성군 그리고 경상북도 포항시에 분포하는 산성 내지 중성암으로 이루어진 것을 대상으로 하였으며, 주상절리들의 형성 메커니즘에 대한 결과는 다음과 같다.

1) 연구지역에 분포하는 주상절리의 형성 메커니즘을 분석하기 위하여, 주상절리를 구성하는 암석들에 대하여 화학분석을 진행하였으며, 단면의 관찰이 가능한 곳에 대하여 주상절리 다각형의 수(N), 기둥면의 폭(L), 기둥면 사이의 각(θ)을 측정하였다.

2) 연구지역에 분포하는 주상절리의 화학분석 결과 SiO_2 함량이 55.54wt%~78.23wt%의 범위를 보이며, TAS diagram에 도시하면 전라북도 부안(JB), 전라남도 신안군(SJL, SJU, SMJ), 고흥군(GH), 여수시(YS), 경상남도 고성군(GS)에 분포한 주상절리 구성암석은 유문암영역, 경상북도 포항시(PG)는 테사이트영역, 경상남도 남해군(NH), 사천시(SC)는 조면안산암 영역에 해당한다.

3) 연구지역에서 측정된 주상절리의 전체 빈도수는 다음과 같다. 다각형의 수(N)는 4각형이 33.98%, 5각형이 37.69%, 6각형이 22.77%의 빈도율을 보인다. 기둥면의 폭(L)은 1~10cm가 36.72%, 11~20cm가 34.97%, 21~30cm가 9.69%의 빈도율을 보인다. 기둥면 사이의 각(θ)은 $81^\circ\sim 90^\circ$ 가 14.41%, $91^\circ\sim 100^\circ$ 가 12.94%, $101^\circ\sim 110^\circ$ 가 13.35%, $111^\circ\sim 120^\circ$ 가 13.12% $121^\circ\sim 130^\circ$ 가 11.54%, $131^\circ\sim 141^\circ$ 가 13.21%의 빈도율을 보인다.

4) 연구지역에 분포하는 주상절리를 산출형태에 따라 분류하면 수직방향으로 발달한 주상절리가 분포한 지역은 용암류에서 분포하는 형태와 유사하게 나타나며, 전라남도 신안군 증도(SJU), 경상북도 포항시 구룡포(PG) 일부지역에서는 돛 형태의 주상절리가 발달한다. 그리고 전라남도 신안군 만재도(SJU) 지역에서는 용암호와 비슷한 형태로 발달하며, 전라남도 신안군 증도 일부지

역, 고흥군 용바위(GH-09), 경상남도 사천시 삼천포 향촌(SC-01) 등은 암맥에서 발달한 수평방향의 주상절리가 발달한다.

5) 이를 통하여 연구지역에 분포하는 주상절리의 형성 메커니즘을 분석하기 위하여 상호연관성을 기존에 연구되어진 SiO_2 와 주상절리 기둥면의 폭(L)의 상호관계를 추정된 결과 용암호 형태로 추정되어지는 신안군 만재도 지역은 기존의 연구결과와 상호 부합하는 것으로 사료되며, 수직방향의 주상절리가 발달하는 지역들에 대하여는 용암류에서 나타나는 경향을 보인다고 하기에 어려움이 있는 것으로 사료된다.

6) 주상절리는 기하학적 형태인 기둥면의 높이(H)에 의해서 기둥면의 폭(L)크기도 변화한다. 연구지역에 따라 일부 풍화 또는 침식의 진행이 이루어진 곳을 제외하고, 비교적 원형을 유지했을 것으로 추정되는 지역에 한하여 측정값을 비교한 결과 노두의 높이와 주상절리 기둥면의 폭(L)의 상호관계는 비례함을 나타낸다.

7) 연구지역의 주상절리를 종합적으로 분석하면 다음과 같은 형성 메커니즘을 보인다. 수직방향으로 발달한 주상절리는 화산활동으로 인한 화산쇄설물의 낙하, 용결, 냉각하는 과정에서 형성되어진 것으로 냉각하는 과정에서 온도 구배에 따라 일부 휘어짐 구조가 나타나며, 접촉부의 환경에 따라 크기의 변화를 보인다. 수평방향으로 발달한 주상절리는 기존 암석을 관입하는 암맥류에서 나타나며, 지층의 경계부에서부터 암맥의 중심방향으로 냉각이 진행되므로 주변 지층과 수평 방향으로 발달한다. 돔 형태로 발달한 주상절리는 점성이 높은 용암류에서 발달한 주상절리의 발달형태와 유사하게 형성되었을 것으로 사료되며, 일부가 풍화되어 노출되면서 수평 주상절리로 관찰되기도 한다. 용암호와 비슷한 형태로 발달한 주상절리는 화산쇄설물이 초기 퇴적될 시기의 지형 구조가 보울(bowl) 형태였으며, 응회암의 퇴적 두께에 따라 주상절리 기둥의 크기는 차등을 보였고 일부 지역의 풍화, 침식으로 현재의 형태만 유지하였을 것으로 사료된다.

본 연구는 주상절리에 대한 기존의 연구는 마그마의 분출로 인한 현무암질 용암류의 냉각과정에서 발달한 주상절리에 대한 것이며, 산성 내지 중성암을

중심으로 화산활동으로 인한 화산쇄설물의 낙하, 용결, 냉각하는 과정에서 형성된 주상절리에 대한 연구이다. 연구를 통하여 나타난 결과는 산성 내지 중성암에서 형성된 주상절리의 메커니즘을 이해하는데 이용될 것이며, 한반도 남부 화산암류의 산상을 이해하는 기초 연구 자료로 활용될 것이다.

앞으로, 이에 따라 추가적인 데이터 수집과 분석을 통하여 한반도 전역에 분포하는 주상절리들의 형성 메커니즘을 규명하여야 한다. 더불어, 주상절리를 형성한 원인이 되는 화산활동에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다.

【참고문헌】

- 고정선, 윤성효, 2005, 강원도 고성군 일대의 후기 마이오세 현무암의 암석학적 연구, 한국지구과학회지, 26(1), 78-92.
- 고정선, 윤성효, 홍현주, 2005, 제주도 대포동현무암에 발달한 지상절리의 형태학 및 암석학적 연구, 암석학회지, 14(4), 212-225.
- 고희재, 권창우, 박승익, 박주언, 기원서, 2013, 줄포·위도·하왕등도도폭 지질조사보고서, 한국지질자원연구원, 81p.
- 국립환경과학원, 2011, 2011 전국 무인도서 자연환경조사-신안 6권역, 환경부, 273p
- 김경목, 2012, 전남 고흥 일대의 야외 지질 학습장 개발 및 초등 교사들의 반응, 광주교육대학교 교육대학원, 석사학위논문, 95p.
- 김동학, 황재하, 박기화, 송교영, 1998, 1:250,000 부산 지질도폭 설명서, 과학기술부, 62p.
- 김진섭, 박맹언, 성종규, 1997, 가거도 (소흑산도) 의 백악기 화산암류에 대한 암석화학적 연구, 암석학회지, 6(1), 19-33.
- 김화성, 2013, 강원도 고성일대에 분포하는 신생대 현무암의 암석학적 연구, 강원대학교 대학원, 박사학위논문, 136.
- 김해경, 고영구, 오강호, 2004, 고흥지역에 분포하는 백악기 응회암의 역학적 특성에 관한 연구, 지질공학회지, 14(3), 273-285.
- 김해경, 오강호, 2013, 신안 증도의 지형 및 지질경관 특성, 한국도서연구, 25(4), 161-173.
- 김희남, 신인현, 안건상, 1994, 돌산지역에 분포하는 화강암체의 암석지화학적 특징과 광화작용과의 관련성 연구, 한국지구과학회지, 15(6), 439-451.
- 박배영, 신상은, 조계복, 2004, 전라남도 고흥 북부지역에 분포하는 편마암류의 변성작용에 관한 연구, 한국지구과학회지, 25(6), 443-473.
- 박영석, 김정빈, 윤정환, 안건상, 1997, 고흥지역에 분포하는 백악기 심성암류의 지질시대와 암석화학적 연구, 한국지구과학회지, 18(1), 70-83.
- 손정모, 안건상, 2014, 고흥지역 주상절리의 분포와 형태, 한국지구과학회, 2014 한국지구과학회 추계학술발표회논문집, 69-71.

- 안건상, 2010a, 무등산 도립공원의 지질과 경관, 암석학회지, 19(2), 109-121.
- 안건상, 2010b, 여수의 암석 분포와 지질경관의 형성, 한국도서연구, 22(4), 199-211.
- 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, 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.
- 원종관, 진명식, 이문원, 윤성호, 이운수, 2001, 한반도의 형성과 화산활동, 원종관교수 정년기념논문, 268p
- 윤성호, 황인호, 1988, 전남 고흥반도에 분포하는 화산암류의 화산 층서 및 암석학적 연구, 광산지질학회지, 21(4), 335-348.
- 위수민, 김은효, 2009, 여수 지역에 분포하는 백악기 화강암류에 대한 지화학적 연구, 한국지구과학회지, 30(3), 267-281.
- 이대성, 이문원, 1987, 지구화학원론, 473p
- 이병주, 김정찬, 김유봉, 조동룡, 최현일, 전희영, 김복철, 1997, 1:250,000 광주 지질도폭 설명서, 과학기술부, 82p.
- 황상구, 김재호, 2009, 주왕산 국립공원의 지형경관과 지질학적 지배 요인: 용결상과 주상절리. 암석학회지, 18(3), 195-209.
- 장기홍, 이영길, 김규한, 1989, 남해·서상도폭 지질보고서, 한국동력자원연구소, 28p.
- 정형은, 안건상, 2014, 전라남도 순천·여수지역 안산암에서 발달된 주상절리, 한국지구과학회, 2014 한국지구과학회 추계학술발표회논문집, 75-76.

- 조규성, 양우현, 신순선, 오재명, 정덕호, 2012, 변산반도 격포 적벽강 일대 야외 지질 학습자료 개발 및 적용, 한국지구과학회지, 33(7), 658-671.
- 조석희, 2000, 전남 고흥 북부 일대에 분포하는 백악기 퇴적분지의 고환경에 관한 연구, 전남대학교 대학원, 박사학위논문, 160p.
- 진광민, 김영석, 2010, 울산 정자해수욕장과 경주 읍천해안에서 관찰되는 수평 주상절리 (와상절리)의 발달특성 및 관광지질자원으로서의 가치 연구, 지질학회지, 46(4), 413-427.
- 진명식, 2004, 한국의 화성활동, 한국암석학회 심포지엄 논문집, 104p
- 최범영, 최현일, 황재하, 기원서, 고희재, 김유봉, 이병주, 송교영, 김정찬, 최영섭, 2002, 1: 250,000 목포·여수도폭 및 설명서, 한국지질자원연구원, 45p.
- 최석원, 이용언, 박기화, 이찬희, 2001, 변산반도 죽막리에 분포하는 페퍼라이트의 산출상태와 생성모델, 지질학회지, 37(2), 297-308
- 최원영, 안건상, 2014, 거제도 동부에 분포하는 주상절리의 형태 및 암석학적 특징, 한국지구과학회, 2014 한국지구과학회 추계학술발표회논문집, 77.
- 황상구, 김유봉, 2012, 대보도폭 지질조사 보고서, 한국지질자원연구원, 67p.
- 황재하, 김동학, 조동룡, 송교영, 1996, 1:250,000 안동 지질도폭 설명서, 과학기술부, 67p.
- Boots, B. N., & Murdoch, D. J. , 1983, "The spatial arrangement of random Voronoi polygons." Computers & Geosciences, 9(3), 351-365.
- French, J. W., 1922, II. "The Fracture of Homogeneous Media. Transactions of the Geological Society of Glasgow." 17(1), 50-68.
- Gill, J., 2012, Orogenic andesites and plate tectonics (Vol. 16). Springer Science & Business Media.
- Goehring, L., Morris, S. W. and Lin, Z., 2006, An experimental investigation of the scaling of columnar joints, Physical Review.

- Goehring, L., 2008, On the scaling and ordering of columnar joints (Doctoral dissertation, University of Toronto).
- Goehring, L., & Morris, S. W., 2008, Scaling of columnar joints in basalt. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978 - 2012), 113(B10).
- Goehring, L., Mahadevan, L., & Morris, S. W., 2009, Nonequilibrium scale selection mechanism for columnar jointing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(2), 387-392.
- 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(2), 457-482.
- Huxley, T.H., 1881, *Physiography: An introduction to the study of nature*, MacMillan and Co., London, UK, 204 p.
- Irvine, T., & Baragar, W., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian journal of earth sciences*, 8(5), 523-548.
- Lim, C., Huh, M., Yi, K., & Lee, C., 2015, Genesis of the columnar joints from welded tuff in Mount Mudeung National Geopark, Republic of Korea. *Earth, Planets and Space*, 67(1), 1-19.
- Long, P. E., & Wood, B. J., 1986, Structures, textures, and cooling histories of Columbia River basalt flows. *Geological Society of America Bulletin*, 97(9), 1144-1155.
- Lore, J., Gao, H., & Aydin, A., 2000, Viscoelastic thermal stress in cooling basalt flows. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978 - 2012), 105(B10), 23695-23709.

- Mallet, R., 1875, XVI. On the origin and mechanism of production of the prismatic (or columnar) structure of basalt. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 50(329), 122-135.
- Müller, G., 1998a, Experimental simulation of basalt columns. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 86(1), 93-96.
- Müller, G., 1998b, Starch columns: Analog model for basalt columns. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978 - 2012), 103(B7), 15239-15253.
- Nishiwaki, H., 2009, Columnar Joints and Landscapes. Introduction to the Landforms and Geology of Japan.
- Saliba, R., & Jagla, E. A., 2003, Analysis of columnar joint patterns from three dimensional stress modeling. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978 - 2012), 108(B10).
- Stewart, A. L., & McPhie, J., 2003, Internal structure and emplacement of an Upper Pliocene dacite cryptodome, Milos Island, Greece. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 124(1), 129-148.
- Toramaru, A., & Matsumoto, T., 2004, Columnar joint morphology and cooling rate: A starch water mixture experiment. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978 - 2012), 109(B2).
- Yasunobu YOSHIZAWA, 2005, Occurrence and structure of the Tojinbo andesitic intrusive body, Mikuni-cho, Fukui Prefecture, Central Japan. 福井市自然史博物館研究報告, 52, 13-27.
- https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_places_with_columnar_jointed_volcanics
- <http://www.giantscausewayofficialguide.com>
- <http://www.geocaching.com/geocache/GC16BTQ>
- <http://brennanjordan.org/Ewashington.html>
- <http://mgeo.kigam.re.kr/>