



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](#)

2017년 2월  
석사학위 논문

변산반도 국립공원 내 산성화산암에  
발달하는 주상절리의 특징

조선대학교 대학원

지구과학과

조민호



# 변산반도 국립공원 내 산성화산암에 발달하는 주상절리의 특징

Characteristics of Columnar Joints on Acidic Volcanic Rocks  
in Byeonsanbando National Park

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

지 구 과 학 과

조 민 호

# 변산반도 국립공원 내 산성화산암에 발달하는 주상절리의 특징

지도교수 안 건 상

이 논문을 이학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

지 구 학 과

조 민 호

## 조민호의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 박 영 신 (인)  
위 원 조선대학교 명예교수 신 인 현 (인)  
위 원 조선대학교 교 수 안 건 상 (인)

2016 년 11 월

조선대학교 대학원

## 목 차

<b>I. 서론</b> .....	1
1. 연구 배경 .....	1
2. 연구 동향 .....	3
3. 연구 방법 및 연구 방향 .....	7
<b>II. 이론적 배경</b> .....	9
1. 주상절리에 관한 용어 .....	9
2. 주상절리 형성 이론 .....	10
3. 주상절리의 여러 가지 형태 .....	12
1) 화산암의 산상에 따른 형태 .....	13
2) 화산암의 크기에 따른 형태 .....	13
3) 냉각률에 따른 형태 .....	15
<b>III. 연구 지역의 지질</b> .....	17
1. 격포리층 .....	17
2. 곰소유문암 .....	19
3. 변산응회암 .....	22
4. 삼예봉유문암 .....	25
<b>IV. 주상절리 형태적 특징 분석</b> .....	29
1. 적벽강의 주상절리 .....	31
1) BS-21, BS-25의 주상절리 .....	31

2) BS-24의 주상절리 .....	37
3) BS-26의 주상절리 .....	38
2. 직소폭포 일대의 주상절리 .....	39
1) 직소천 하류에서 직소폭포까지의 주상절리 .....	41
2) 직소폭포 이후의 노두 관찰 .....	44
3) 직소천 외 지역의 주상절리 .....	45
<b>V. 암석화학</b> .....	48
1. 주성분원소의 분포 .....	48
2. 암석의 분류 .....	50
3. 화학 조성의 변화 .....	52
<b>VI. 연구 지역 주상절리의 형성 메커니즘</b> .....	54
1. 적벽강의 주상절리 .....	54
1) BS-21의 형성 메커니즘 .....	54
2) BS-25의 형성 메커니즘 .....	55
2) BS-26의 형성 메커니즘 .....	55
2. 직소폭포 일대의 주상절리 .....	57
<b>VI. 토의</b> .....	58
<b>VII. 결론</b> .....	61
<b>【참고 문헌】</b> .....	63

## List of tables

Table. 1. The main columnar joints of the world .....	4
Table. 2. Columnar joints sites with geographical location in study area .....	30
Table. 3. Major elemental analyses(wt%) of rocks in study area .....	49
Table. 4. Major characteristics of columnar joints in study areas. ....	61

## List of Figures

Fig. 1. Location of columnar joints in South Korea .....	2
Fig. 2. Photographs of columnar joints on Giant's Causeway and Fingal's Cave .....	4
Fig. 3. Columnar joints found on Mars .....	4
Fig. 4. Location of the study area in Byeonsanbando National Park .....	8
Fig. 5. Symbols of columnar joints and a schematic illustration of colonnade and entablature .....	9
Fig. 6. Schematic formation of cracks at cooling surface on thermal contraction model .....	10
Fig. 7. Experiment of used to corn crash .....	12
Fig. 8. Patterns of columnar joints .....	14
Fig. 9. Schematic drawing of the different geological contexts and geometries of columnar joints .....	14
Fig. 10. Schematic geometry of columnar joints for thick lava flow .....	15
Fig. 11. Geology map of study area .....	18
Fig. 12. Geology map and researched sites in Gyeokpori .....	19
Fig. 13. Photograph of BS-26 in Jeokbyeokgang area .....	19
Fig. 14. Photograph of BS-27-3 in Jeokbyeokgang area .....	20
Fig. 15. Photograph of peperite in BS-21 .....	20
Fig. 16. Microphotographs of rock in BS-27-1 on Gomso Rhyolite .....	21
Fig. 17. Geology map of Junggyeri in Buan .....	22
Fig. 18. Photographs of Byeonsan Tuff(BT) and Seokpo Tuff(ST) .....	23
Fig. 19. Photographs of characterizing Byeonsan Tuff .....	24
Fig. 20. Microphotographs of rock in BS-12 on Byeonsan Tuff .....	26
Fig. 21. Microphotographs of rock in BS-13 on Byeonsan Tuff .....	27
Fig. 22. Microphotographs of rock in BS-01 on Samyebong Rhyolite .....	28
Fig. 23. Photograph of columnar joints in Jeokbyeokgang area .....	31
Fig. 24. Map of researched sites in study area .....	31
Fig. 25. Photographs of measured columnar joints in BS-21 and BS-25 .....	32

Fig. 26. Frequency(%) of measurement to columnar joints in BS-21 and BS-25 -----	33
Fig. 27. Photograph of lower columnar joints in BS-21 -----	34
Fig. 28. Photograph of columnar joints in BS-27-3 -----	35
Fig. 29. Photograph of columnar joints in BS-25 -----	35
Fig. 30. Panorama photograph of BS-25 and assumed process sketch of flow foliation patterns -----	36
Fig. 31. Photograph of columnar joints in BS-24 -----	37
Fig. 32. Photograph of measured columnar joints in BS-24 -----	37
Fig. 33. Frequency(%) of measurement to columnar joints in BS-24 -----	38
Fig. 34. Photograph of columnar joints in BS-26 -----	38
Fig. 35. Map of researched sites in study area -----	39
Fig. 36. Photograph of outcrop in BS-06 -----	40
Fig. 37. Photograph of outcrop in BS-07 -----	40
Fig. 38. Photograph of columnar joints in BS-08 -----	40
Fig. 39. Frequency(%) of measurement to columnar joints in Jiksopokpo(Falls) area -----	41
Fig. 40. Photograph of measured columnar joints in BS-09 -----	42
Fig. 41. Photograph of measured columnar joints in BS-10 -----	42
Fig. 42. Photograph of measured columnar joints in BS-11 -----	42
Fig. 43. Photographs of measured columnar joints in BS-12 and BS-13 -----	43
Fig. 44. Photograph of measured columnar joints in BS-14 -----	43
Fig. 45. Photograph of outcrop in BS-17 -----	44
Fig. 46. Photographs of outcrop in direction toward Jaebaekigogae(Ridge) ---	44
Fig. 47. Photograph of outcrop in BS-18 -----	45
Fig. 48. Photograph of columnar joints in BS-02 -----	45
Fig. 49. Photograph of columnar joints in BS-03 -----	46
Fig. 50. Photograph of columnar joints in BS-04 -----	46
Fig. 51. Photograph of columnar joints in BS-05 -----	46
Fig. 52. Photograph of columnar joints in BS-19 -----	47
Fig. 53. Photograph of columnar joints in BS-20 -----	47



Fig. 54. Photograph of sampling sites in Sajabawi(Rock) of Jeokbyeokgang area	50
Fig. 55. TAS diagram with analyses of rocks in study area	51
Fig. 56. AFM diagram of rocks in study area	51
Fig. 57. Harker's variation diagram of rocks in study area	53
Fig. 58. Photograph of columnar joints in BS-25	55
Fig. 59. Photograph of columnar joints structure in BS-26	56
Fig. 60. Assumed creation process sketch of columnar joints in BS-26	56
Fig. 61. Photograph of columnar joints in Jiksopokpo(Falls)	57
Fig. 62. Photograph and assumed creation process sketch of columnar joints in BS-25	59

## ABSTRACT

### Characteristics of Columnar Joints on Acidic Volcanic Rocks in Byeonsanbando National Park

Cho, Min ho

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

Department of Natural Science(Earth Science)

Graduate School of Chosun University

The columnar joints which had formulated during the Mesozoic era are mainly related to Rhyolite or Andesitic. Particularly, it is expected to proceed several times during the later cretaceous period that the volcanic activity which was composed of tuffs created the columnar joints.

This study aims to provide the basic knowledge of the research for the columnar joints in this area by analyzing the feature of the columnar joints which was results of the volcanic activity throughout the Jeokbyeokgang and Jiksopokpo(Falls) in Byeonsanbando National Park.

This study has measured and analyzed the morphological characteristics of the section of the columnar joints. This study also has implemented a chemical and an optical analysis after collecting the samples of rock from the thirteen different sites. Then, it has researched the condition of the calculation of rocks in order to seize the relation with the surrounding rocks.

Columnar joints of Jeokbyeokgang is distributed throughout six hundred meters long along the seashore. Mainly, almost of columnar joints is seen as vertical direction which is called colonnade structure and the maximum height would be ten meters. And Gyeokpori Fomation is founded underneath of the columnar joints in this area which is comprised Gomso Rhyolite. 125 cases of the length of a polygon side and 139 cases of the angle between the adjacent edges were measured in the

Jeokbyeokgang. As a result of this investigation, it is discovered that the number of a polygon(N) is pentagon possesses almost half of it. The length of a polygon side(L) is 24.8% for 10cm excess less than 15cm. In addition, the angle between the adjacent edges( $\theta$ ) is 19.42% for 120° less than 130°. In comparison with the general formula of columnar joints, the unique feature was revealed that the lower part of lava flow has small colonnade and the upper part of it has big colonnade. Furthermore, in the case of BS-25, the entablature serves to the lower cooling surface. The upper cooling surface interaction the joint can be developed as similar to the onionskin shape.

Study area of Jiksopokpo(Falls) has calculated the various polygon of columnar joints, 136 cases of the length of a polygon side, and 97 cases of the angle between the adjacent edges from the downstream of Jiksopokpo(Falls). As a result of this research, it is discovered that the number of a polygon(N) is 45.45 % for hexagon. The length of polygon side(L) is 26.47% for 20cm excess less than 35cm. In addition, the angle between the adjacent edges( $\theta$ ) is 24.74% for 100° less than 110°. It could be inferred to these following reasons that only the outcrop of columnar joints were shown to in the area from the Misunnamu bridge in Jiksocheon(Stream). First, due to the greater cooling rate the lower, Byeonsan Tuff could not solidify and the upper and Byeonsan Tuff above Jiksopokpo(Falls) also was affected by the greater cooling rate to solidify enough. Second, the columnar joints that had already formed could be disappeared by the corrosion of flowing water.

This study aimed to differentiate from the existing research which mainly focused on the cooling process of the Basaltic lava rather than exploring the columnar joints which were formed by Rhyolitic lava and volcanic clasts during the cooling process. In addition, both the results of this study and suggestion throughout the research will be useful for understanding the formulation of columnar joints which were formed by acidic rock or Rhyolitic lava. It also will contribute to inform the various geographical structure that exists in the area of Byeonsanbando National Park.

# I. 서론

## 1. 연구 배경

주상절리는 화산 활동의 결과로 형성되며, 지구 상 도처에서 다양한 형태로 존재한다. 화산 활동으로 분출된 모든 화성암에서 주상절리가 형성되는 것은 아니다. 우리나라의 지질에서도 오랜 세월이 걸쳐 화산 활동과 관입 등의 지구조운동이 활발하였지만 주상절리는 Fig.1과 같이 매우 제한적으로 나타난다고 할 수 있다.

우리나라에서 잘 알려진 주상절리는 대부분 화산 활동 시 현무암질 용암의 분출이 이루어진 곳이다. 우리나라의 신생대 화성 활동은 곳곳에서 에오세부터 마이오세 말까지 발생하였는데, 이때 생성된 주상절리는 강원도의 고성군 일대, 경기도의 임진강과 한탄강 일대, 경상남도의 경주시, 울산시, 거제도 팔랑포 일대와 한반도에서 떨어진 섬 지역으로 울릉도·독도·제주도 일대 등에서 발견된다.

이 지역들에서 발견되는 주상절리는 주로 현무암질 암석과 관련이 있는 반면에 중생대에 형성된 주상절리는 주로 유문암질 또는 안산암질 암석의 생성과 관련이 있다(손정모, 2016).

중생대의 대표적인 화성 활동은 북동-남서로의 뚜렷한 방향성을 가지는 대보조산운동으로 대규모 화강암을 수반한 지질 운동이다. 이를 전후로 송림변동과 북국사변동 등 여러 화성 활동이 일어났다. 그리고 중생대의 화성 활동으로 형성된 주상절리는 대체로 백악기 후기에 형성된 유문암과 안산암 또는 유문암질 응회암과 안산암질 응회암 등으로 구성되었다. 이시기에 형성된 응회암은 경상남·북도, 전라남·북도에 고루 분포한 것으로 보고된다(김해경 등, 2004).

특히 응회암으로 구성된 주상절리를 형성하는 화성 활동은 중생대 백악기 후기에 몇 차례 진행되었을 것으로 추정된다. 최근의 연구인 Lim *et al.*(2015)에 따르면 무등산의 주상절리대는 백악기 후기에 일어난 3번 이상의 화산 활동으로 생성된 것으로 보고한다. 이와 같이 화산 활동으로 형성된 주상절리는 경상남도 남해 일대, 경상남도 고성 일대, 전라남도 고흥군 일대, 전라남도 여수시 일대, 전라남도 신안군의 임자도·지도·중도·만재도 일대와 본 연구 지역 중 한 곳인 전남 부안군 변산반도의 적벽강 일대에 분포한다.

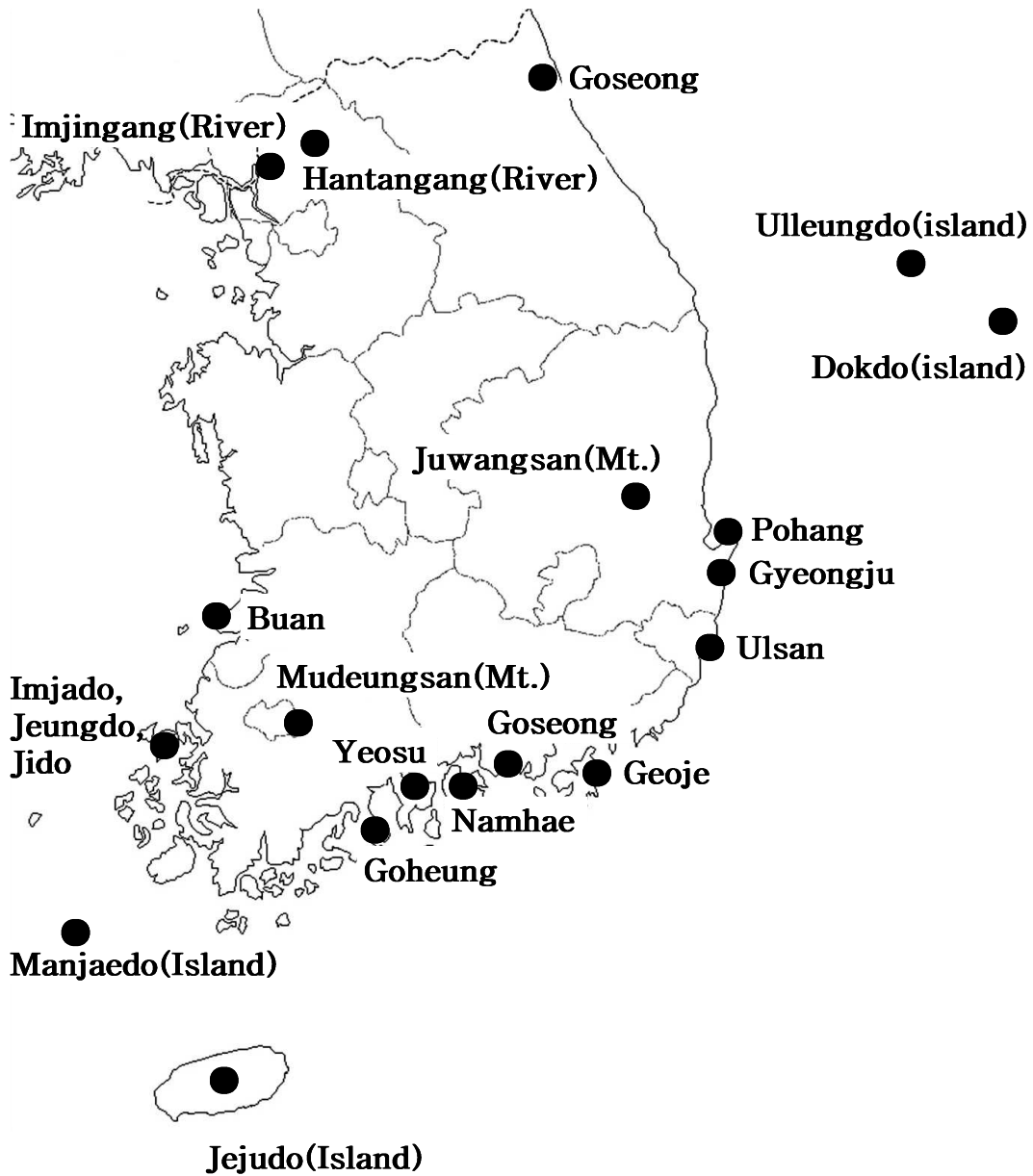


Fig. 1. Location of columnar joints in South Korea(modified of Son, 2016).

주상절리는 마그마의 분출 또는 관입이나 화산쇄설물의 퇴적과 같은 화성 활동으로 형성되는데, 모두 냉각 과정 중에 생성된다는 공통점이 있다. 이러한 주상절리가 형성되는 일련의 과정에 대한 연구와 그 결과물은 화산 활동과 관계되어 학술적으로 큰 가치를 가질 것이다. 그리고 중학교 과학에서 화성 활동은 현재 2009개정교육과정 상 ‘지구계와 지권의 변화’에 포함되고, 2018년부터 적용되는 2015개정교육과정 상 ‘지권의 변화’에서 포함된다. 따라서 주상절리에 대한 연구가 지속적으로 이루어지면 지질학을 연구하는 학생들과 중등 교육과정의 지구과학 분야를 연계하는 교육적 효과도 기대된다. 하지만 이러한 기대가 있음에도 불구하고 우리나라의 주상절리에 대한 보전은 쉽지 않은 실정이다. 세계지질공원인 제주도의 주상절리대, 국가지질공원인 무등산의 주상절리대, 그리고 각 지방자치단체에서 지정한 지방 문화재 등을 제외하고는 주상절리 지역의 보전이 어려워 보이며, 자연현상인 유수에 의한 침식이나 인간의 활동인 채석 등으로 훼손되고 있다.

특히 전라북도 부안군의 적벽강에서는 해침에 의해 유문암의 주상절리가 드러났으며, 본 연구에 등장하는 직소폭포에서도 응회암으로 이루어진 주상절리가 드러난다. 이에 전라북도 부안군은 지난 2014년 7월부터 국가지질공원 선정을 위한 타당성 조사 및 기본계획수립 용역에 들어갔으며, 2015년 하반기부터 학술 용역에 착수했고, 그 결과에 따라 국가지질공원에 대한 신청이 들어갈 예정이다.

## 2. 연구 동향

주상절리의 이상적인 형태는 6각형으로 북아일랜드의 Giant’s Causeway(Fig. 2A)와 스코틀랜드 스타파 섬의 Fingal’s Cave(Fig. 2B)가 이에 해당한다(Goehring, 2008). 이외에 미국 와이오밍주의 Devils Tower와 아이슬란드의 Reynisfjara도 대표적인 주상절리 지역이다. 이와 같이 주상절리는 전 세계의 도처에서 다양한 형태로 발견되는데, 대표별로 대표적인 주상절리는 다음과 같다(Table. 1). 그리고 2007년에는 외행성인 화성에서도 주상절리로 보이는 지형이 화성 정찰위성(MRO)에 의해 발견되었다(Fig. 3).

주상절리 형성 메커니즘에 대해 연구하기 위해 냉각 중인 용암을 대상으로 하기는 매우 어렵기 때문에 전분 혼탁액을 이용하여 주상절리 형성의 메커니즘을 알아내려 했다. 이 방법을 이용한 Huxley(1881)와 French(1922)는 전분 혼탁액을 건조시켜서 수축 현상을 관찰하였고, 그 결과로서 다각형의 기둥이 만들어졌음을 알아냈다.

Table. 1. The main columnar joints of the world(Wikipedia: List\_of\_places\_with\_columnar\_jointed\_volcanics)

Continent	Country	Area
Africa	Rwanda	Bugarama in Rusizi
	Namibia	"Organ Pipes" near Twyfelfontein,
Asia	China	Heiyuhe Columnar Joints, Longchuan River & Black Fish River, Tengchong
	Hong Kong	Basalt Island
	India	St. Mary's Island in Malpe
	Japan	Takachiho-kyo gorge, Takachiho, Miyazaki
	Taiwan	The Whale Cave, on the seashore, in Penghu County
Europe	France	Saint-Flour, Cantal
	Germany	Linz am Rhein, Mendig, Mayen, Rhineland-Palatinate
	Greenland	Qeqertarsuaq, Disko Island
	Italy	Alcantara River Gorges, Sicily
	Spain	Punta Baja, Cabo de Gata-Níjar Natural Park, Andalusia
	U.K	Giant's Causeway, Northern Ireland
	Canada	North Mountain, Nova Scotia
	U.S.A	Devils Tower National Monument, Wyoming
	Mexico	Prismas Basálticos in Huasca de Ocampo, Hidalgo
	Oceania	Australia
New Zealand		Blackhead and nearby Second Beach, Dunedin
South America	Chile	Ancud Volcanic Complex
	Argentina	Pino Hachado Caldera, Neuquén Province



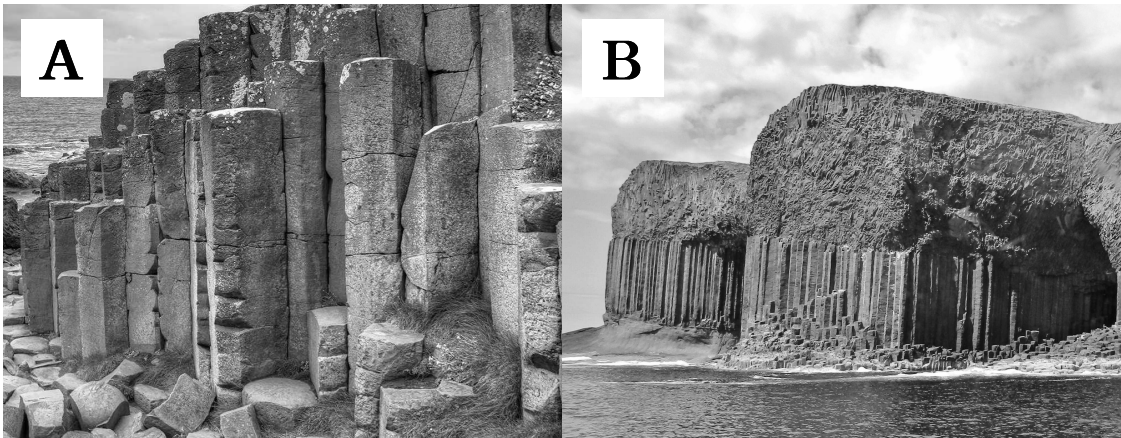


Fig. 2. Photographs of columnar joints on Giant's Causeway(A)(<https://www.flickr.com/photos/>) and Fingal's Cave(B)(<https://www.flickr.com/photos/>).

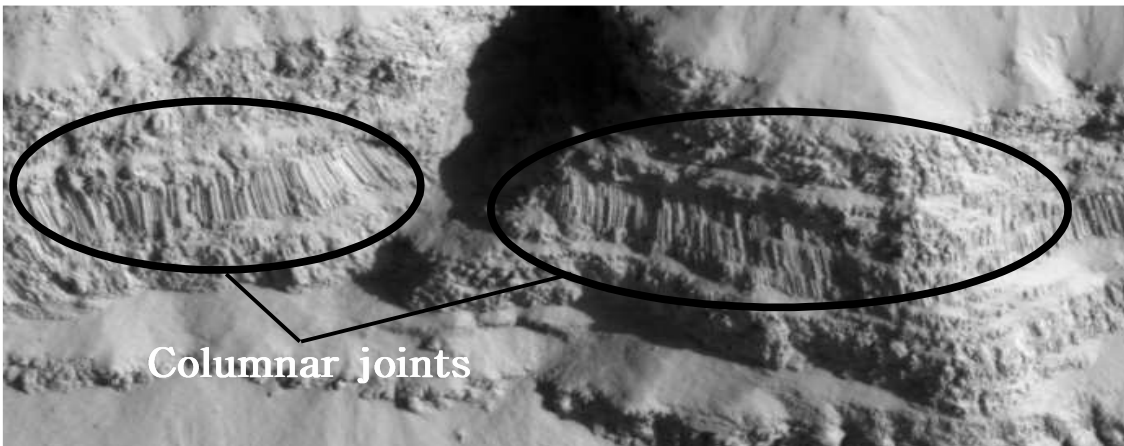


Fig. 3. Columnar joints found on Mars([https://marsed.asu.edu/mep/volcanoes/flood\\_basalts](https://marsed.asu.edu/mep/volcanoes/flood_basalts)).

이 실험은 잊혔다가 Müller(1998a)에 의해 재발견되었는데, 그는 위쪽에서 전분 혼탁액을 비추는 발열 램프로 전분 혼탁액이 건조되는 속도를 통제하면서 실험을 재개하였다. 이 실험에서는 용암의 확산 과정에서 나타나는 온도 변화와 전분 혼탁액의 농도를 동일하게 여겼다. 이러한 실험과 관련 연구는 최근까지 활발하게 진행되었다.

Goehring *et al.*(2006)과 Goehring(2008)에서 실험을 통해 전분 혼탁액의 건조 속도는 램프까지의 거리, 램프의 사용 시간과 상관관계가 있으며, 전분 혼탁액의 깊이에 따른 상태 변화와도 관계가 있음을 밝혔다. Toramaru and Matsumoto(2004)는 전분 혼



탁액 실험을 통해 주상절리 다각형의 평균 단면적이 용암의 냉각 속도에 반비례함을 밝혀냈다.

주상절리를 이루는 암석의 종류에 대해서는 세계적으로 주상절리 대부분이 현무암이며, 형태적 특징 및 암석화학적 연구도 현무암의 주상절리에 대한 것이 대부분이다. 그러나 주상절리는 화산 활동으로 형성된 모든 화산체 또는 지질에서 존재할 수 있는데, Stewart and McPhie(2003)가 그리스 Milos Island의 안산암질 주상절리의 구조를 분석하고, Yoshizawa(2005)가 도진보 안산암 관입체의 산출상태와 구조에 관한 연구를 한 것처럼 현무암질이 아닌 안산암질 주상절리에 대한 연구도 진행 중이다.

한반도에 분포하는 주상절리 특징들을 분석하고자 하는 다양한 연구가 진행 중이다. 고정선 등(2005b)은 제주도 대포동 해안 일대와 지샛개의 주상절리를 연구하여 형태와 암석학적 특징을 밝혔고, 오강호 등(2006)은 전라남도 신안군의 지도에 분포하는 주상절리의 형태적 특징을 분석하는 동시에 다른 주상절리와의 비교하여 주왕산 주상절리의 경관적 가치에 대해서도 연구하였다. 안건상(2010a)은 우리나라의 응회암 주상절리 중 대표적인 무등산 주상절리대에 관해 연구를 하였고, 우현동 등(2013)은 울릉도 국수바위 주상절리에 대한 연구로 형성과정에 대한 실마리를 풀려고 하였다. 안건상(2014a)은 남한 전반에 분포하는 주상절리의 암석학적 특징에 대한 연구를 수행하였으며, 안건상 등(2014b)에서는 무등산 주상절리대의 형성사가 언급되었다. Lim *et al.*(2015)은 연구를 통해 무등산 형성되는 화산 활동의 과정을 추정하고, 무등산의 주상절리를 이루는 암석을 무등산응회암으로 명명하였다.

이러한 일련의 연구를 통해 우리나라 주상절리의 분포와 암석학적 연구가 이루어져 왔다. 그리고 주상절리의 지질학습장으로 이용과 경관에 대해서도 연구가 진행 중이다. 그러나 주상절리의 생성과 관련된 화성 활동에 대한 연구는 전반적으로 미흡하다. 이에 따라 최근 안건상(2014b)는 주상절리 생성에 대한 국외 연구의 패러다임을 포착하고, 주상절리에 관한 용어의 통일성, 형성 과정과 형성 이후 일어난 변화 메커니즘을 알아내기 연구를 시도하였다.

본 논문의 연구 지역의 경우 적벽강 일대에 분포하는 주상절리에 대한 심도 있는 연구는 미진한 형편이다. 그리고 인접 연구 지역인 직소폭포의 경우 경관이나 지질학습장으로서의 연구가 진행되었고, 안산암류의 화산암 복합체로만 판단하였으며(조규성, 2012), 지질도폭 해설서에서 주상절리가 관찰된다고 언급한 적은 있으나(한국지질자원연구원 등, 2013) 직소폭포를 포함하는 직소천과 직소천 서부의 내변산 곳곳에 분포하는 주상절리와 구성 암석에 대한 심도있는 연구는 진행된 것이 없는 실정이다. 또한,

적벽강과 직소폭포 일대의 주상절리가 모두 백악기에 형성되었고, 가까운 거리의 행정 구역에 있음에도 그 특징에 대해 비교하는 연구가 전무하다.

### 3. 연구 방법 및 연구 방향

연구 지역은 전라북도 변산반도의 적벽강과 직소폭포 일대이다. 연구 지역 중 적벽강은 행정구역상 전라북도 부안군 변산면 격포리의 서부 해안 일대에 있으며, 변산반도 국립공원에 속한다(Fig. 4). 그리고 직소폭포는 전라북도 부안군 변산면 중계리의 직소천 상류 일대에 있으며, 역시 변산반도 국립공원에 속한다.

연구 지역에 존재하는 주상절리의 구조를 파악하기 위해 야외 조사 시 주상절리의 단면이 관찰 가능한 지역에서는 주상절리의 형태적 특징을 측정하였다. 또한, 13개 지점에서 암석을 채취한 다음, 화학적 분석을 통해 주성분 원소를 파악하고, 박편으로 제작하여 편광현미경으로 관찰하였으며, 장소에 따라 주변 암과의 관계를 파악하기 위해 상하부의 암들의 산상을 조사하였다. 그리고 측정된 형태적 자료와 화학적 분석 자료를 통해 연구 지역에 분포하는 주상절리에 대해 분석하였고, 산출상태 등을 규명하기 위해 주상절리의 발달 방향 등 구조적인 분석도 수행하였다.

적벽강과 직소폭포 일대의 주상절리는 변산반도 국립공원 내에서 지리적으로 가까울 뿐만 아니라 모두 백악기에 형성되었고, 암상에서도 큰 차이가 없음에도 형태적 특징이 다르게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 각각의 주상절리가 형성된 메커니즘을 파악하여 두 주상절리의 형태적 특징이 다르게 나타나는 이유에 대해 알아보고자 한다. 또한, 지질학습장으로서 학생들이 우리나라에서 일어났던 화성활동에 대한 호기심을 충족시키고, 변산반도의 미적 가치를 높이는 데 필요한 근거를 마련하며, 연구 지역의 주상절리가 가진 관광 자원으로서의 가치를 높임과 더불어 변산반도가 국가지질공원으로 승격되는 데 기여하고자 한다.

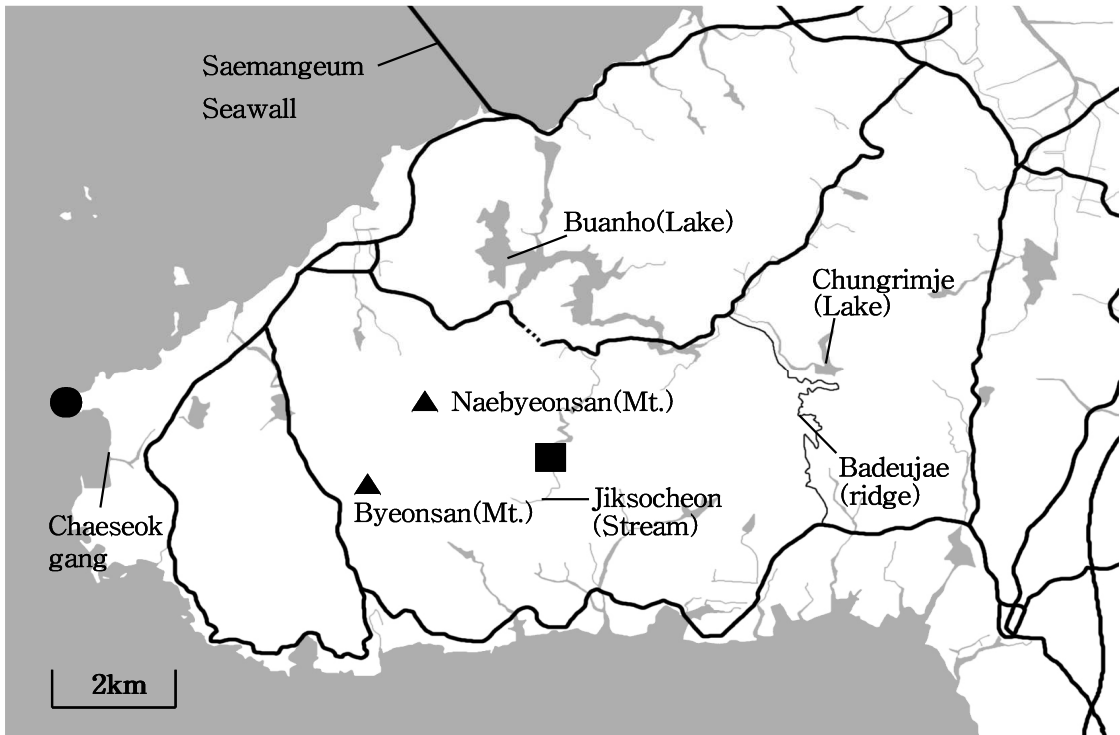


Fig. 4. Location of the study area in Byeonsanbando National Park. (●: Jeokbyeokgang, ■: Jiksopokpo(Falls))

## II. 이론적 배경

주상절리는 일반적으로 분출된 용암이 냉각될 때 형성되며, 주로 용암류가 두꺼울 때 발달한다(안건상, 2014b). 본 장에서는 최근 국내외 연구 자료를 바탕으로 본 연구와 밀접한 주상절리 형성과 관련된 이론을 다루고자 한다.

### 1. 주상절리에 관한 용어

본 연구 내에서 사용되 용어는 Grossenbacher and McDuffie(1995)와 Hetényi *et al.*(2012)를 바탕으로 안건상(2014b)의 연구에서 제시된 것을 다음과 같이 정리한다.

주상절리를 이루는 기둥면의 폭(너비)은  $L$ , 주상절리 1개의 단면적은  $A$ , 다각형의 모서리 수는  $N$ , 서로 다른 두  $L$ 과  $L$  사이의 각은  $\theta$ 로 나타낸다(Fig. 5). 그리고 주상절리의 높이는  $H$ , 직경은  $D$ 로 나타낸다.

주상절리에서 나타나는 구조적인 형태는 크게 3가지인데(Fig. 6). 주상절리의 가장 큰 특징인 기둥의 구조를 컬러네이드(colonnade)라 한다. 용암류의 상부는 공기층과 하부는 지표면과 접촉되어 냉각될 때와 그 경계에서부터 냉각이 시작되며 균열이 생성되는데, 상부와 하부에서 시작된 균열이 서로의 방향으로 진행되어 균일하게 만나면 일반적인 컬러네이드가 형성된다. 그러나 용암류의 전체가 컬러네이드로 형성되지 않고 균열이 뒤엉켜 엔테블러취(entablature)를 형성하기도 한다.

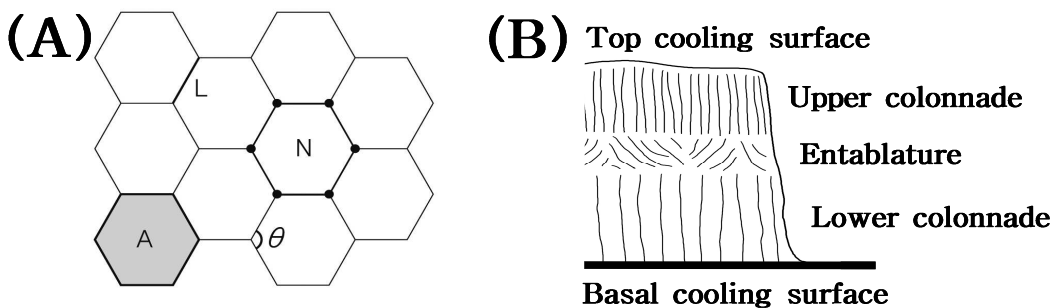


Fig. 5. Symbols of columnar joints(A)(modified of Hetényi *et al.*, 2012)(A: the area of the column in cross section,  $L$ : length of a polygon side,  $\theta$ : angle between the adjacent edges,  $N$ : number of a polygon) and a schematic illustration of colonnade and entablature(B).

## 2. 주상절리 형성 이론

주상절리는 고온의 용암류 또는 그와 비슷한 상태의 물질이 급속히 냉각되어 수축되면서 형성된 암석에서 주로 발달한다. 이러한 수축의 중심이 되는 곳을 냉각점이라 한다(Fig. 6A). 냉각점은 나중에 균열면이 되는 수평 방향의 냉각 표면에서 같은 간격으로 형성되고, 이 냉각점 방향으로 용암류가 수축되며 굳어진다. 이 때 수축 중심인 냉각점 사이에 응력이 발생하며, 이 응력이 인장 강도를 초과하면 균열이 만들어진다(Fig. 6B). 표면의 상태가 전체적으로 균일하다고 가정하면, 냉각점은 같은 간격을 두고 형성되어 수축하기 때문에 Fig. 6(C)와 같은 구조와 가까운 모습으로 형성된다(안건상, 2014b).

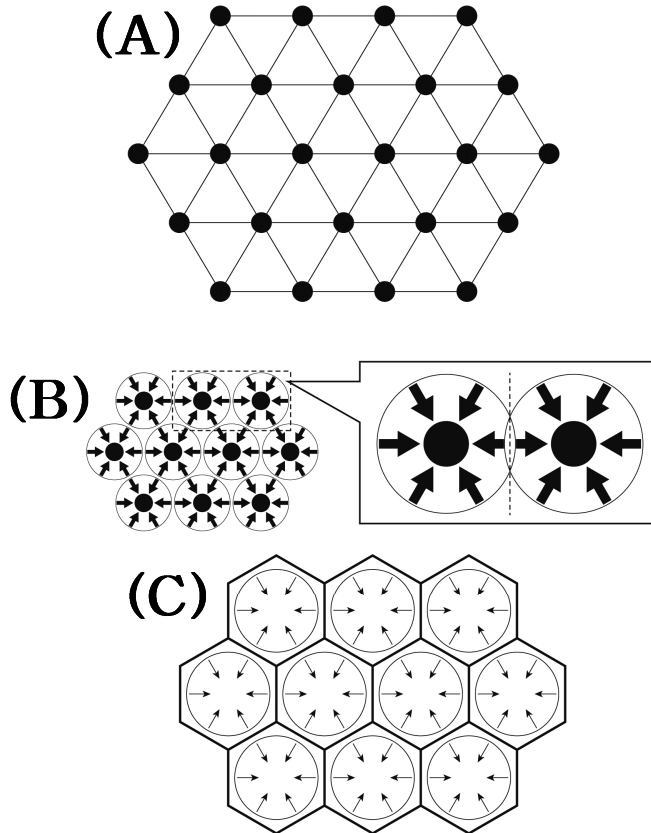


Fig. 6. Schematic formation of cracks at cooling surface on thermal contraction model(modified of Nishiaki and Hirotsishi, 2009).

평면으로 보았을 때 용암류의 균열이 6각형을 이룰 때 에너지를 최소화하면서 냉각된다(Mallet, 1875). 이를 ‘열 수축 모델’이라고 하며, 용암이 냉각되면서 규칙적이지 않은 표층의 균열 패턴이 용암류 내부로 연장되고, 이 균열 패턴은 저에너지인 벌집 형태로 변하는 것을 나타낸 모델이다. 열 수축 모델은 주상절리 형성 과정 이론 중에서 가장 널리 인정받고 있다.

주상절리의 크기는 매우 다양하며, 직경(D)이 4m에 이르는 경우도 있고, 미국의 Devils Tower와 같이 260m 정도로 매우 길게 발달한 것도 있다. 이러한 주상절리의 크기를 좌우하는 요인을 연구한 것 중 하나가 전분 혼탁액을 이용한 실험이다. 전분 혼탁액을 건조시켜 수축하게 만들면 혼탁액에 다각형의 기둥들이 만들어지는데(Fig. 7B), 이 실험에서는 전분 혼탁액 위쪽에 발열 램프를 설치하여 건조 속도 조건을 통제한다. 이 실험은 여러 통제 조건을 조절하여 주상절리 형성에 영향을 미치는 요소를 찾아낸 중요한 실험이다.

용융된 암석 물질의 냉각 속도가 느리면 생성되는 광물 결정의 크기가 커진다는 사실을 주상절리의 형성 과정에 적용하면 주상절리 기둥의 크기도 냉각 속도에 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다. 결국 냉각률이 형성되는 기둥의 크기에 영향을 준다고 생각하였다.

즉, 용암류가 서서히 냉각되면 직경(D)이 크거나(Grossenbacher and McDuffie, 1995), 단면적(A)이 넓은(Toramaru and Mastumoto, 2004) 주상절리를 형성한다는 것이다. 다르게 설명하면 용암류의 냉각 속도가 빠를수록 면(N)의 수가 적으며, 전분 혼탁액의 건조 속도가 빠르면 5각형이 많고, 건조 속도가 느리면 6각형이 많아진다는 결론에 도달한다. Goehring *et al.*(2009)은 용암류가 매우 얇거나 매우 서서히 냉각되면 주상절리가 전혀 형성되지 않거나, 주상절리가 형성되어도 직경(D)이 용암류 두께와 유사해지고, 두꺼운 용암류에서는 용암류의 두께에 영향을 받지 않고 주상절리가 만들어진다고 결론을 내렸다.

일반적으로 분출되어 흐르는 용암류의 냉각 표면은 수평이고, 이 표면의 수직 방향으로 용암류가 굳어 간다. 절리는 용암류 내부에서 열 수축 때문에 발생한 스트레스가 해소되는 수단이며, 냉각되기 시작하는 곳으로부터 스트레스를 해소하면서 균열이 진행된다. 또한, 균열의 형성 방향은 중력 방향이 아닌 냉각 표면에 수직 방향으로 형성된다(Goehring, 2008).

Fig. 5(B)와 같이 상부 컬러네이드와 하부 컬러네이드가 사이에서 엔태블러취가 생성되는데, Lore *et al.*(2000)은 용암류 내부로 물이 유입되어 냉각 속도가 갑자기 증가

하면, 다시 말해 용암류의 내부가 매우 빠르게 식으면 엔테블러취가 생성된다고 보고 했다. 그리고 용암류 내부로 물이 침투하는 원인으로는 갑작스러운 호우나 강물 등과 같은 유수에 접근한 용암류의 흐름 때문이라고 생각할 수 있다.

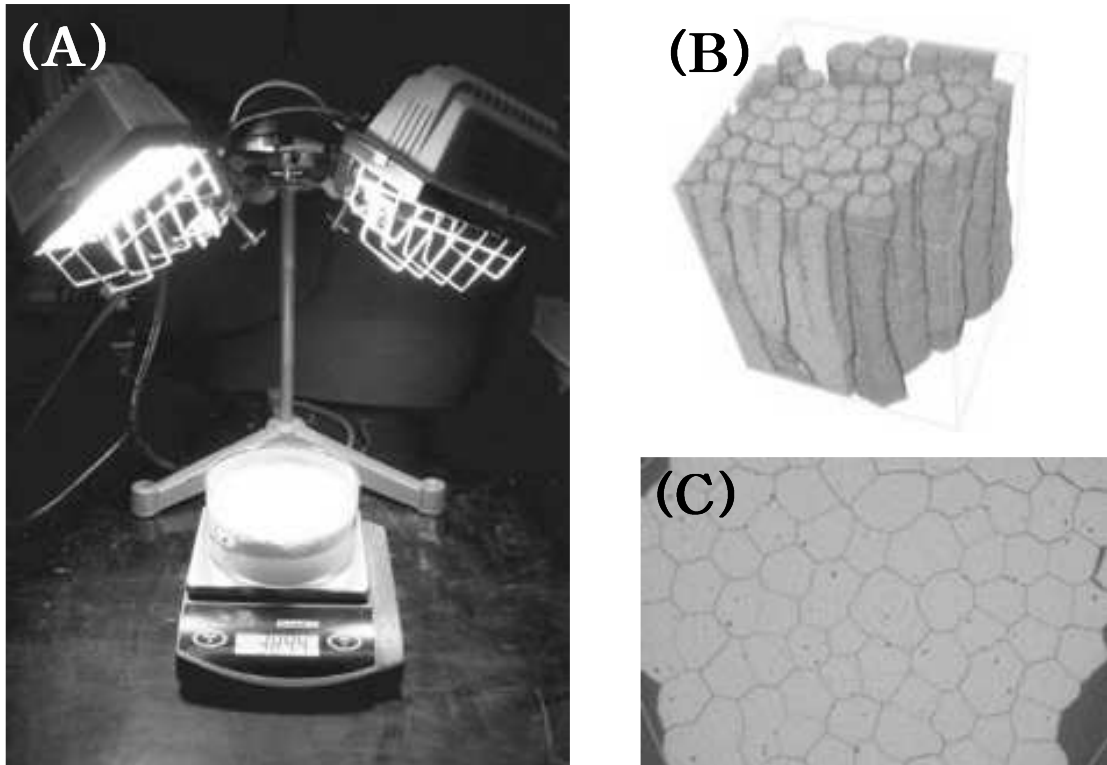


Fig. 7. Experiment of used to corn crash. (A) Drying setup, (B) Starch counterpart left on glass dish, (C) Cross section of partially dissected starch sample. ([http://www.lgoehring.com/M.Sc.\\_files/Goehring\\_MSc.pdf](http://www.lgoehring.com/M.Sc._files/Goehring_MSc.pdf))

### 3. 주상절리의 여러 가지 형태

주상절리는 2장에서 설명한 것처럼 마그마 또는 용암류, 그와 비슷한 상태의 퇴적물 층이 냉각과 응결·수축하는 과정에서 형성된다. 주상절리의 형성에 미치는 요인은 매우 복잡적이고, 통제 요인들의 상호 작용에 의해 냉각률과 형태적 특징이 결정된다. 주상절리 형성에 미치는 가장 큰 요인 두 가지이다(Hetényi *et al.*, 2012).

첫째는 마그마 또는 용암류의 형상이다. 지표로 노출된 용암류는 지표면의 모습에



따라 다양한 흐름을 보인다. 지형에 따라 지속적으로 흐르기도 하고 가로막히기도 하면서 용암류의 두께도 달라지며, 이러한 영향으로 같은 용암류라도 곳에 따라 냉각률의 차이가 나타난다. 냉각률의 차이는 곧 주상절리의 형태적 특징에 영향을 미치며, 같은 지역에서도 서로 다른 형태적 특징을 띠는 주상절리가 발달한다.

두께는 화학 조성이다. 주상절리를 구성하는 암석의 화학 조성에 따라 점성이나 결정들의 상태에 따라 냉각률에서 차이가 나타난다. 용암류의 점성이 높을 경우 느리게 흐르기 때문에 점차 두꺼워지며, 반대로 용암류의 점성이 낮을 때에는 흐름이 상대적으로 빠르기 때문에 두께가 얇아진다. 이 차이는 냉각률에 영향을 주며, 주상절리의 단면적(A)과 높이(H)가 달라지는 결과를 가져온다.

### 1) 화산암의 산상에 따른 형태

Nishiwaki and Hirotsishi(2009)는 용암류에 의해 형성되는 주상절리를 화산암의 산상에 따라 쉼브론(chevron), 팬(fan), 로제트(rosette), 배이신(basin)의 네 가지 형상으로 분류했다.

쉐브론(Fig. 8A)은 용암류가 복수의 냉각면에서 냉각될 때 각각의 냉각면부터 독립적으로 주상절리가 형성된 것이며, 팬(Fig. 8B)은 용암류가 계곡 형태의 지형을 채우고 냉각되었을 때 골짜기 방향으로 주상절리가 형성된 것이다. 로제트(Fig. 8C)는 용암의 분출 지점에서 구형 또는 반구면의 표면을 향해 주상절리가 형성된 것이고, 배이신(Fig. 8D)은 등온도면이 완만한 곡선을 이룰 때 생성되는 주상절리 형상으로 알려졌다.

### 2) 화산암의 크기에 따른 형태

용암류에 의해 형성된 주상절리는 산출상태뿐만 아니라 용암류의 크기에 따라서도 여러 가지 형태로 만들어진다. Fig. 9는 이를 나타낸 것이다.

두께가 약 10m 이내의 단일 용암류는 Fig. 9(A)와 같이 냉각면에서 직각 방향으로 주상절리가 형성된다. 두께가 약 10m를 초과하는 용암류의 경우 위와 아래의 냉각면부터 용암류의 중심 방향으로 냉각이 진행되므로 주상절리도 용암류 내부를 향해 형성된다. 이때 2개의 냉각면에서 부터 냉각되어 형성된 주상절리가 용암류 중심부에서 만나 Fig. 9(B)와 같은 형태를 띠고, 경우에 따라 상부와 하부의 주상절리와는 방향과 크기가 다른 엔테블러취가 나타나기도 한다(Long and Wood, 1986).



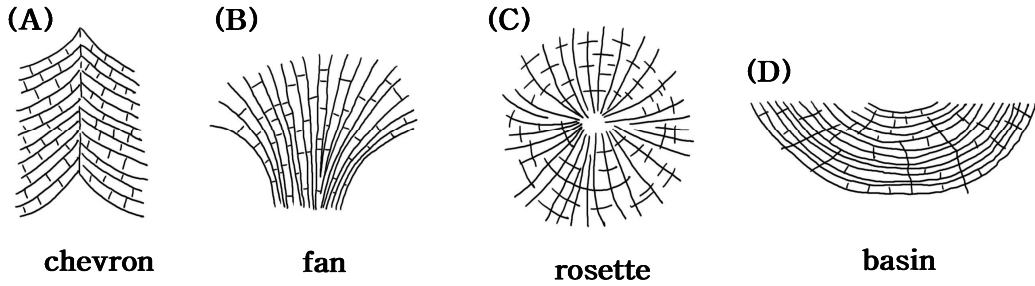


Fig. 8. Patterns of columnar joints(modified of Nishiwaki and Hirotsishi, 2009).

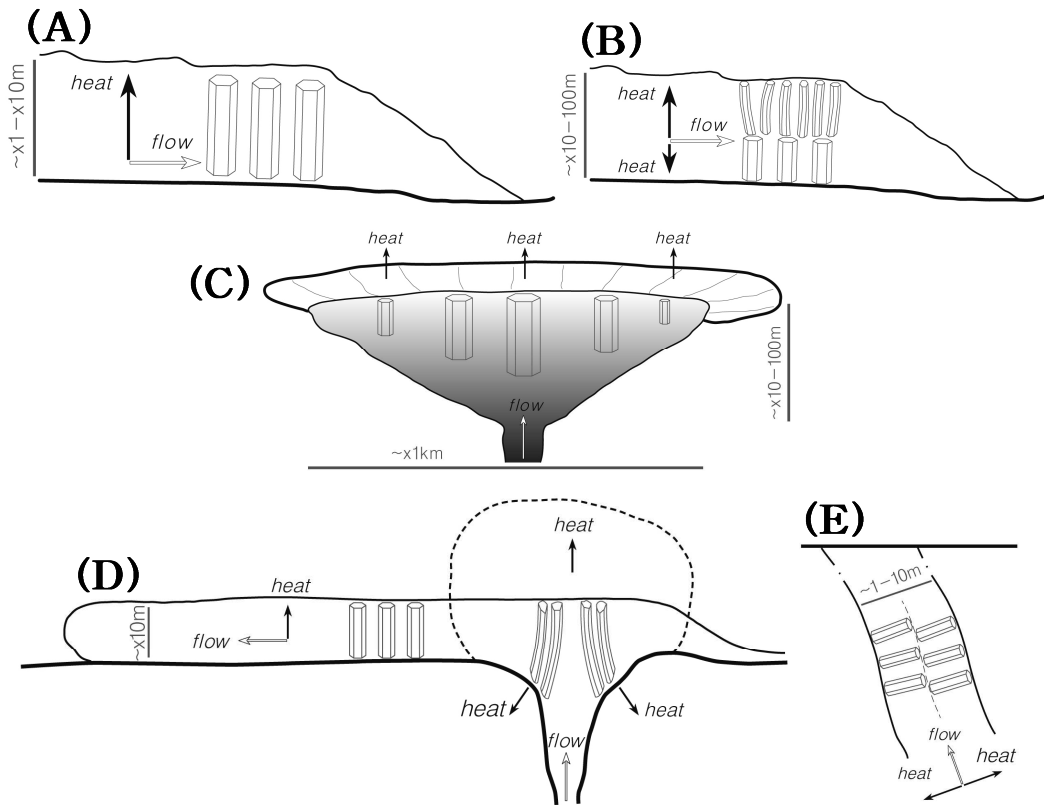


Fig. 9. Schematic drawing of the different geological contexts and geometries of columnar joints(modified of Hetényi *et al.*, 2012). (A) thin lava flow(<10m), (B) thick lava flow(10~100m), (C) lava lake, (D) lava dome, (E) dike or sill

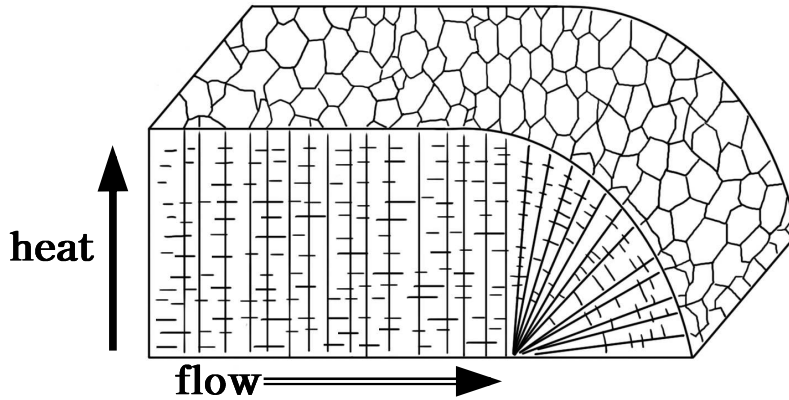


Fig. 10. Schematic geometry of columnar joints for thick lava flow(high viscosity)(modified of Ahn, 2014b)

Fig. 9(C)는 용암 분출 지점에 형성된 용암호의 주상절리를 나타낸 것인데, 가운데 부분의 냉각률은 작아서 큰 주상절리가 형성되고, 가장자리로 갈수록 냉각률이 커서 작은 주상절리가 만들어진다.

Fig. 9(D)는 용암돔에서 형성된 주상절리로 점성이 큰 산성 마그마 기원의 용암류에서 발달하며, 주상절리가 돔의 중심점을 향해 발달한다.

Fig. 9(E)는 암맥에서 형성된 주상절리로 암맥 주변의 기존 암석이 바로 냉각면이 되어 암맥 관입 방향의 수직으로 발달한다. 이 주상절리의 높이(H)는 대체로 10m 이내이며, 마치 장작더미를 쌓아놓은 것과 같은 모습이다.

주상절리의 기원이 되는 물질의 점성에 따라 주상절리도 다른 형태로 나타난다. 현무암질 용암류는 점성이 낮으므로 유동성이 강하므로 얇은 용암류가 되어 Fig. 9(A)와 같은 형태로 주상절리가 발달하고, 용암류의 말단 쪽으로 갈수록 주상절리의 방향성은 유지하면서 크기만 작아진다. 반대로 유문암질 용암류 또는 화산회류는 현무암질 용암류에 비해 점성이 상대적으로 높아 유동성이 낮아 두께가 두꺼우며, 말단부로 갈수록 주상절리가 지면을 향해 눕는 부채꼴 형태로 나타난다(안건상, 2014b)(Fig. 10).

### 3) 냉각률에 따른 형태

냉각률에 따른 주상절리의 형태는 특히 주상절리 각각의 크기(A, H, D)와 관련이 있다. Toramaru와 Matsumoto(2004)에 의해 주상절리의 평균 단면적은 냉각률에 반비례한다는 사실이 밝혀졌다. 전분 혼탁액 실험에서 전분 혼탁액과 램프 사이의 거리를 변

인 통제하여 건조 속도를 조절해 램프가 혼탁액에 가까워지면 빠르게 응고가 일어나 크기가 작은 다각형이 만들어지고, 램프가 혼탁액에서 멀어지면 느리게 응고가 일어나 큰 다각형이 만들어졌다.

이 결과에 의해 주상절리의 단면적은 냉각률에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. 즉, 용암류에 수분이 급격히 첨가되었거나 용암류가 분출한 곳의 온도가 매우 낮을 경우에는 냉각률이 더욱 높아져 작은 크기의 주상절리가 형성된다.

용암류의 냉각률은  $\text{SiO}_2$ 의 함량에도 영향을 받는다.  $\text{SiO}_2$ 의 함량이 낮아 점성이 작은 현무암질 용암 분출 온도는  $\text{SiO}_2$ 의 함량이 높아 점성이 큰 유문암질 용암의 분출 온도보다 높다. 그리고 용암의 점성은  $\text{SiO}_2$ 의 함량이 증가함에 따라 높아지므로 초기 온도가 높은 현무암질 용암의 냉각률이 유문암질 용암의 냉각률보다 낮아야 한다. 하지만 유문암질 용암은 점성이 높아 두꺼운 용암류를 형성하기 때문에 현무암질 용암류의 주상절리보다 냉각률이 낮아서 더 큰 주상절리가 만들어진다. 이에 따라 일반적으로  $\text{SiO}_2$  함량이 높은 유문암질 용암류의 주상절리가 현무암질 용암류의 주상절리에 비하여 기둥의 단면적(A)과 높이(H)가 크게 형성되는 것으로 알려졌다.

### III. 연구지역의 지질

본 연구에 해당하는 지역은 행정구역 상 전라북도 부안군 변산면 격포리의 서부 해안가와 중계리의 남동부 산지이며, 1:250,000 지질도폭 광주에 해당하고, 1:50,000 지질도폭에서는 위도, 줄포에 해당한다. 또한, 지질도폭 상 적벽강의 주상절리가 위치한 변산반도 서쪽 지역은 위도 도폭에 포함되고, 직소폭포의 주상절리가 위치한 변산반도 내륙 지역은 줄포 도폭에 포함된다. 부안 일대 지질도폭 지질보고서는 2013년에 새롭게 발간되었으며(한국지질자원연구원, 2013), 이에 따른 현장 세미나가 2014년에 이루어졌다.

이 지질보고서(한국지질자원연구원, 2013)에 따르면 변산반도 일대의 중생대 백악기 지층은 부안화산암으로 명명되었다. 부안화산암은 화산분출유형, 입자 크기, 화산쇄설암을 구성하고 있는 광물 조합 및 아편 유형, 산상 등을 근거로 하여 천마산응회암, 연동응회암, 우동제응회암, 석포응회암, 격포리층, 곰소유문암, 유정재응회암, 변산응회암, 삼예봉유문암 등으로 구분된다(한국지질자원연구원, 2013)(Fig. 11).

변산반도의 지질은 Fig. 11에서 보는 바와 같이 대부분 변산응회암으로 이루어졌으며, 이를 석포응회암이 둘러싼 형태를 보인다. 동북부 지역에는 기상봉응회암과 삼예봉유문암이 넓게 퍼져있다. 그리고 변산반도 서부 해안에 있는 적벽강 지역은 중생대 백악기 격포리층과 곰소유문암이 서로 분출 또는 관입의 형태로 존재하고(Fig. 12), 직소폭포 지역은 변산응회암으로 이루어졌다(한국지질자원연구원, 2013).

본 연구의 대상 지역인 적벽강과 직소폭포 일대의 주요 지질에 대한 층서별 특징은 다음과 같다.

#### 1. 격포리층

격포리층은 부안화산암 서부의 변산면 격포리에 존재하며, 쇄설성퇴적물과 화산쇄설물이 풍부한 퇴적암으로 이루어졌으며, 백악기의 호수 환경인 격포 분지에서 생성되었다(Chun & Kim, 1995). 그리고 격포리층은 주로 역암, 사암, 이암 등으로 구성되며 뚜렷한 층리를 나타내는데, 특히 이암은 암회색을 띠며 상부의 곰소유문암과 접촉하고 있다(Fig. 13, 14).

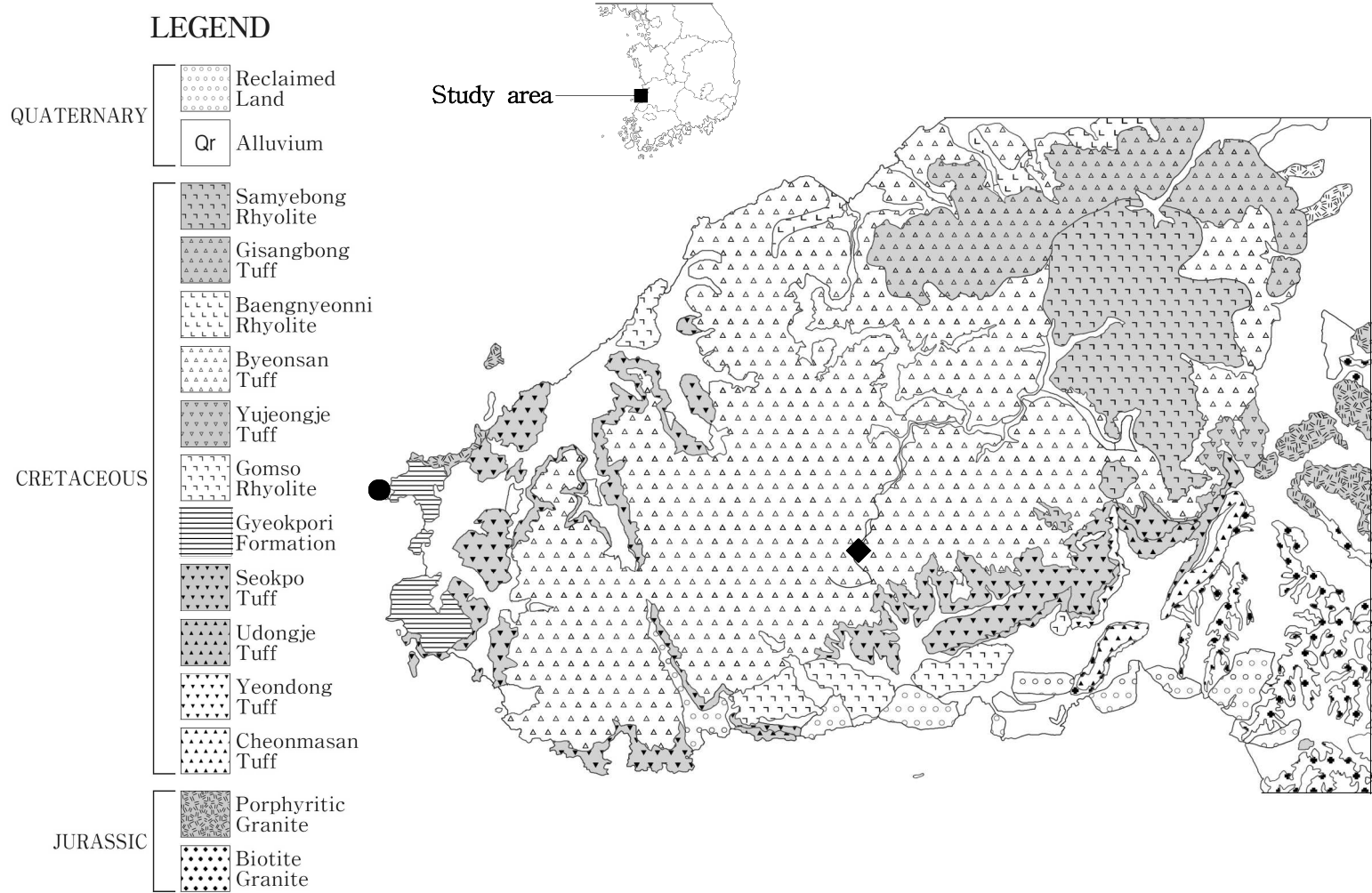


Fig. 11. Geology map of study area. (●: Jeokbyeokgang, ◆: Jiksopokpo(Falls))



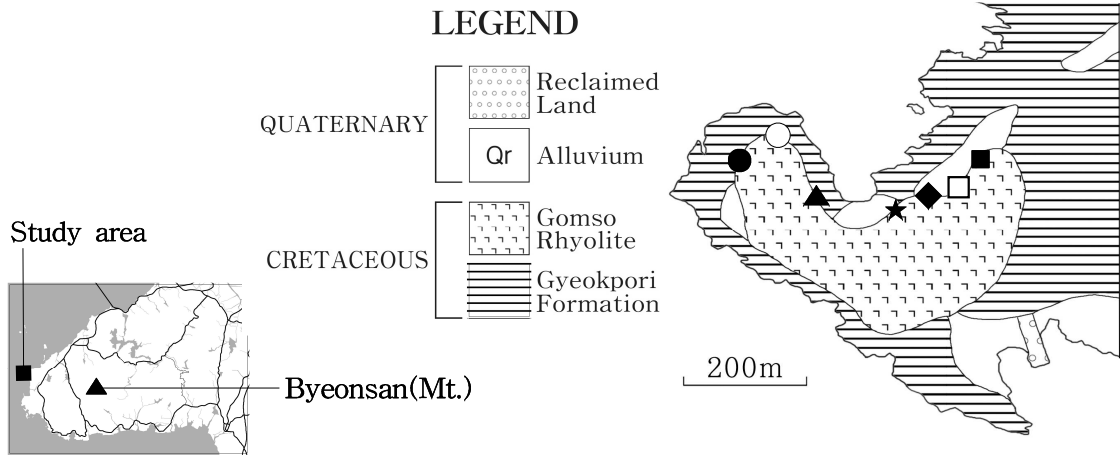


Fig. 12. Geology map and researched sites in Gyeokpori. (■: BS-21, □: 27-1, ◆: BS-27-2, ★: BS-27-3, ▲: BS-24, ○: BS-25, ●: BS-26, 28, 29, 30, 31)

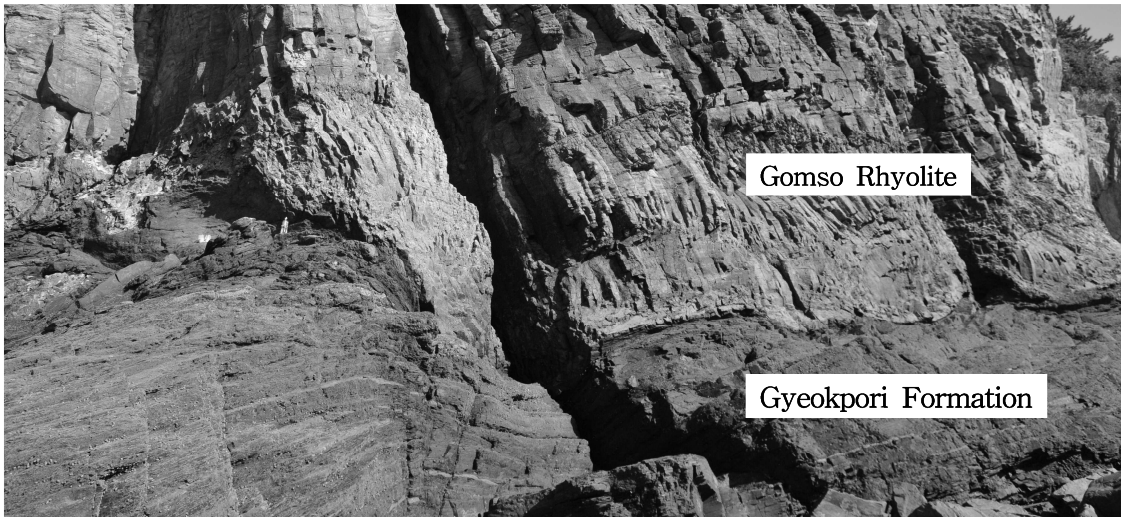


Fig. 13. Photograph of BS-26 in Jeokbyeokgang area.

## 2. 곰소유문암

격포리층의 위로는 산성의 화산분출물이 분포한다(조규성 등, 2012). 이 산성 화산분출물은 1:50,000 지질도폭에서 곰소유문암으로 명명되어 있으며, 곰소유문암은 석포응회암, 우동제응회암, 연동응회암, 천마산응회암과 격포리층을 덮거나 관입하고 있다(한국지질자원연구원, 2013).



Fig. 14. Photograph of BS-27-3 in Jeokbyeokgang area.



Fig. 15. Photograph of peperite in BS-21.

특히 곱소유문암은 연구 지역인 적벽강에서 격포리층의 위에 주상절리로 형성되어 있다(Fig. 14). 이 주상절리에서는 괴상이나 유상구조가 보이며, 포획된 5cm 이내의 암편들도 관찰된다.

적벽강의 해안을 따라 페퍼라이트가 관찰되는데(Fig. 15), 이 페퍼라이트는 주상절리를 이루는 유문암과 하부의 격포리층 접촉부에서 나타나며, 조규성 등(2012)은 이곳의 페퍼라이트가 유문암질 용암의 관입에 따라 퇴적물 내에서 일어난 수증기 폭발이나 수증기-마그마 분출과 관련되었다고 보거나(조규성 등, 2012), 균일하지 못한 크기의 암편이 포함된 페퍼라이트가 관찰되는 것을 보아 격포리층은 유문암질 용암과 접촉할 당시에는 미고결 상태였다고 추정할 수 있다.



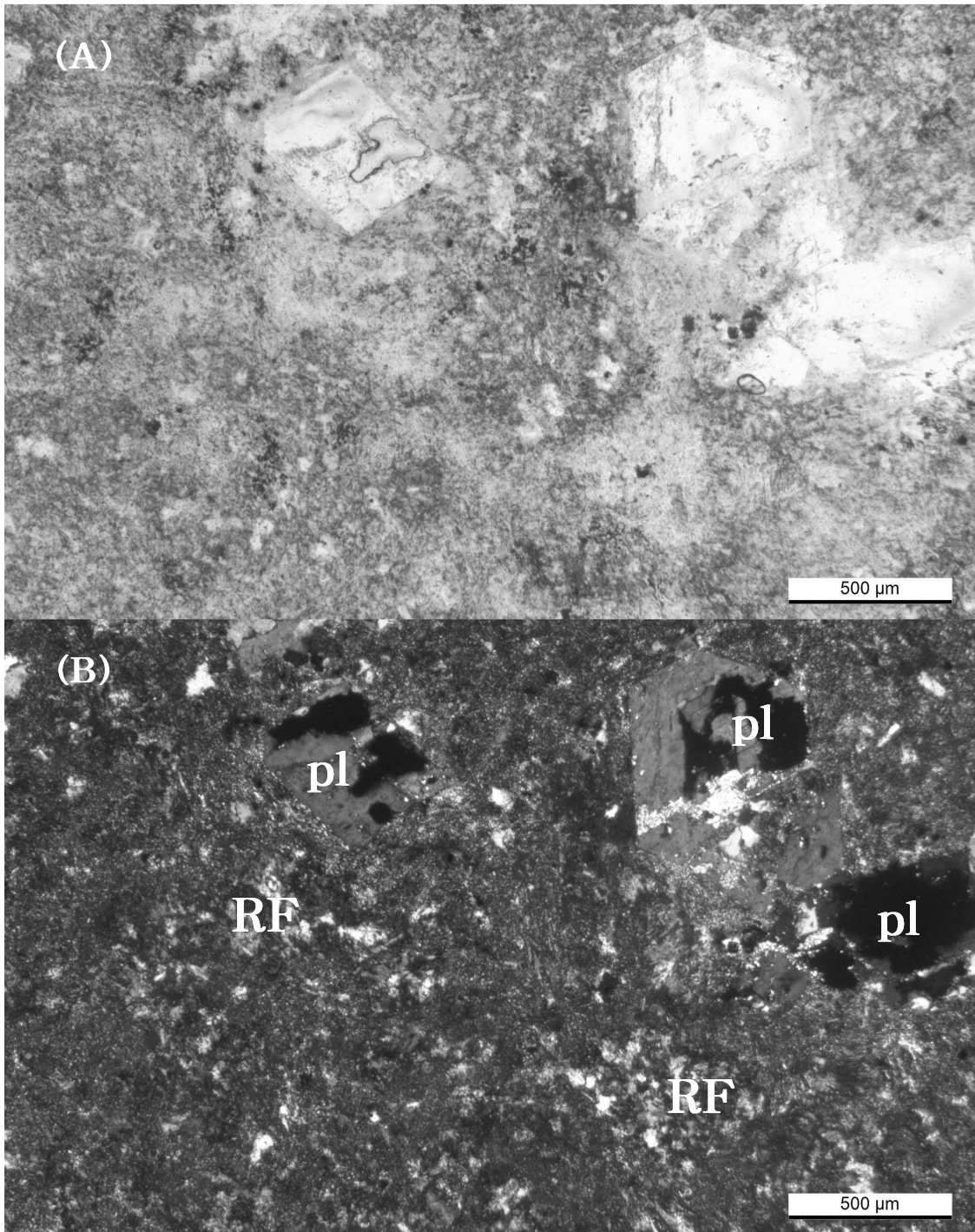


Fig. 16. Microphotographs of rock in BS-27-1 on Gomso Rhyolite. (RF: rock fragment, pl: plagioclase) (A) open nicol, (B) cross nicol.



그리고 곰소유문암의 박편 제작을 위해 암석을 절단하고 단면을 관찰했을 때 풍화로 인해 담황색을 띠었으며, 암편은 수 mm 정도의 크기로 방향성이 없는 배열을 보인다. 즉, 곰소유문암이 형성될 당시에 용암류에 외적인 물리적 힘이 크게 작용하지 않은 것으로 사료된다. Fig. 16은 곰소유문암인 BS-27-1의 박편 사진으로 기질부는 미정질이고, 사장석과 암편이 관찰된다.

### 3. 변산응회암

연구 지역 중 직소폭포는 변산응회암 지질에 위치하며(Fig. 17), 변산응회암은 불안화산암의 대부분을 차지한다(Fig. 11).

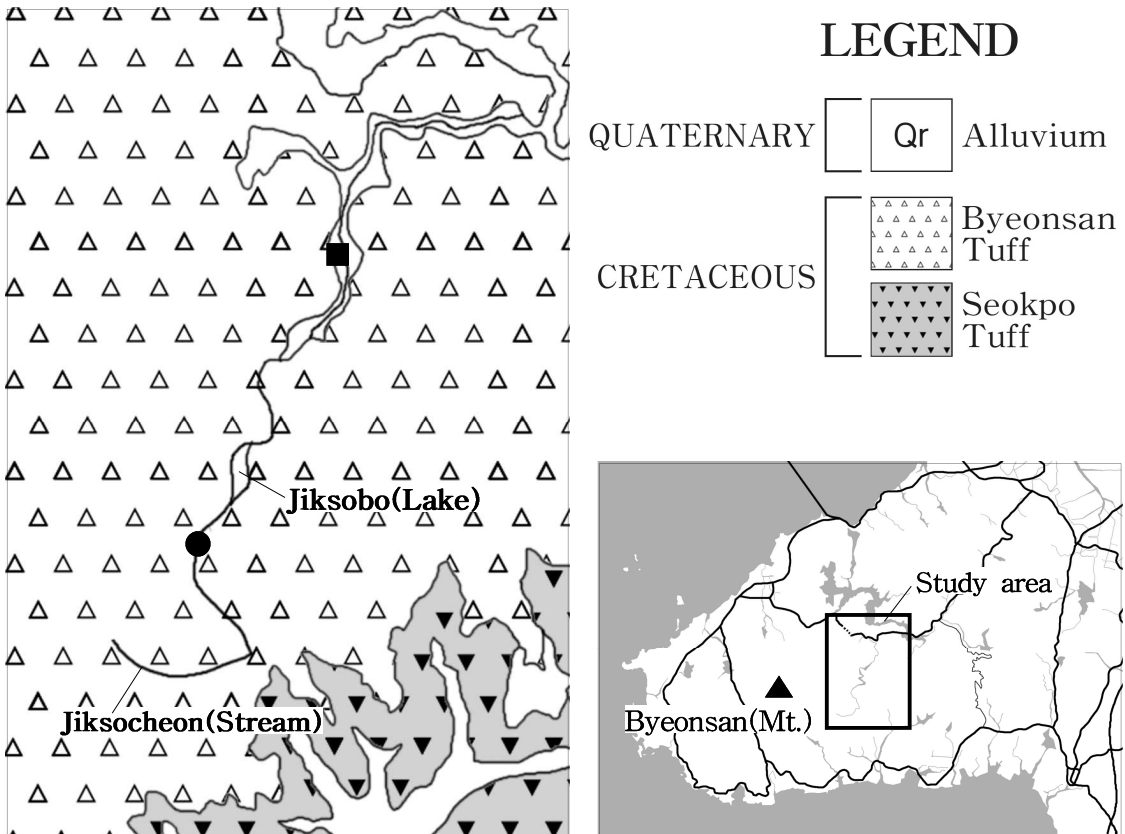


Fig. 17. Geology map of Junggyeri in Buan. (●: Jiksopokpo(Falls), ■: Naeyeonsan ranger station)

변산옹회암은 하부의 유정재옹회암이나 석포옹회암에 비해 부석편과 석영 결정편이 거의 없으며, 부안화산암 중 산사면에 돌출된 고지를 이루고 있다(한국지질자원연구원, 2013)(Fig. 18A). 바드재 남서측 사면과 중계리 중계터널 앞 사면, 그리고 봉래구곡에서 재백이 고개 방향의 등산로를 따라 변산옹회암의 암상 특징이 잘 나타나고, 변산옹회암은 곰소유문암, 유정재옹회암 그리고 석포옹회암을 덮고 있으며, 특히 석포옹회암과 변산옹회암의 경계는 아수직 방향으로 단절한 요지 형태를 보인다(한국지질자원연구원, 2013)(Fig. 18B).

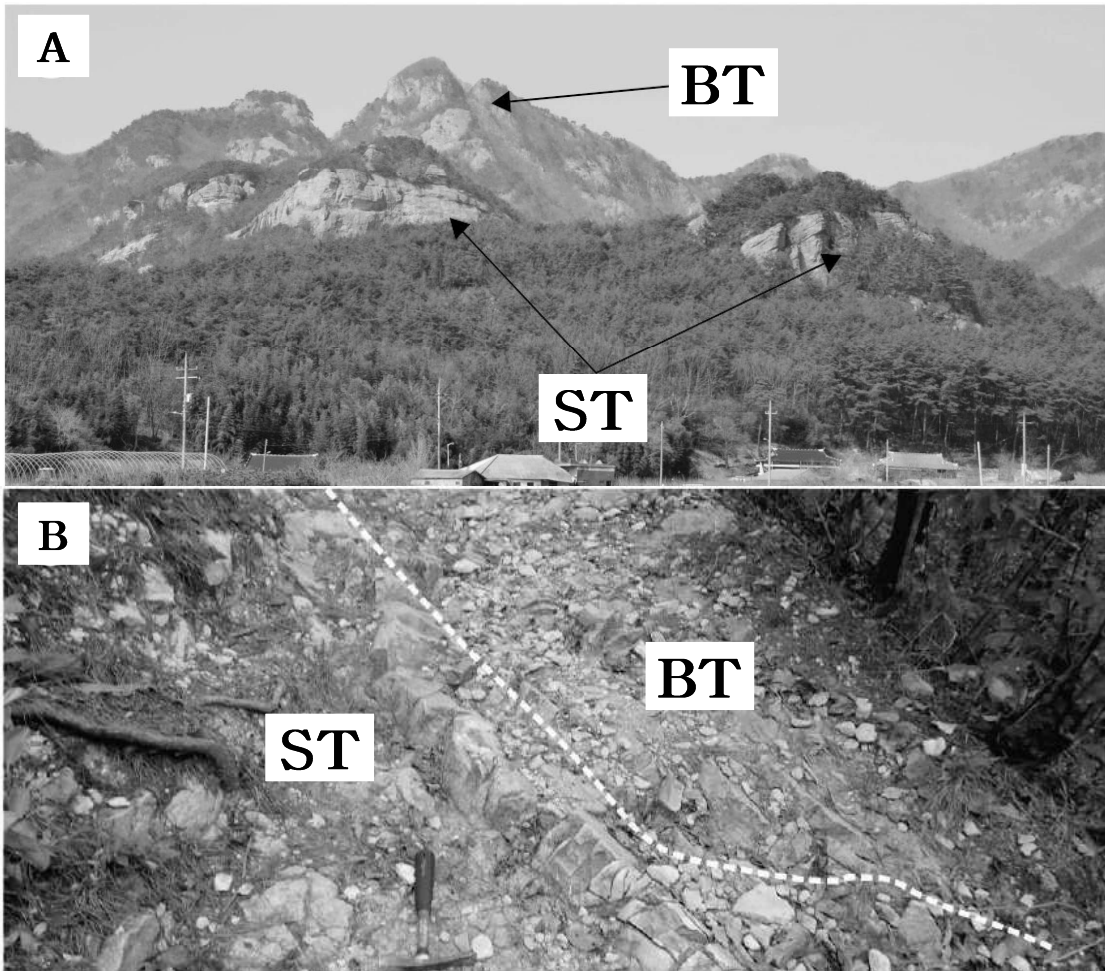


Fig. 18. Photographs of Byeonsan Tuff(BT) and Seokpo Tuff(ST)(modified of KIGAM, 2013). (A: Outcrop of BT and ST , B: Boundaries of BT and ST)

또한, 변산응회암은 부안화산암 동편의 북서-남동 단층을 기준으로 동측의 암상은 괴상 내지 층상이며, 층상 세립질 응회암에 의해 구분된다. 그리고 단층의 서측은 아주 치밀한 괴상을 보이는데, 노두에서 간격이 수 cm에서 수 십 cm에 이르는 좁은 절리(Fig. 19A)와 주상절리(Fig. 19B) 등이 관찰된다(한국지질자원연구원, 2013).

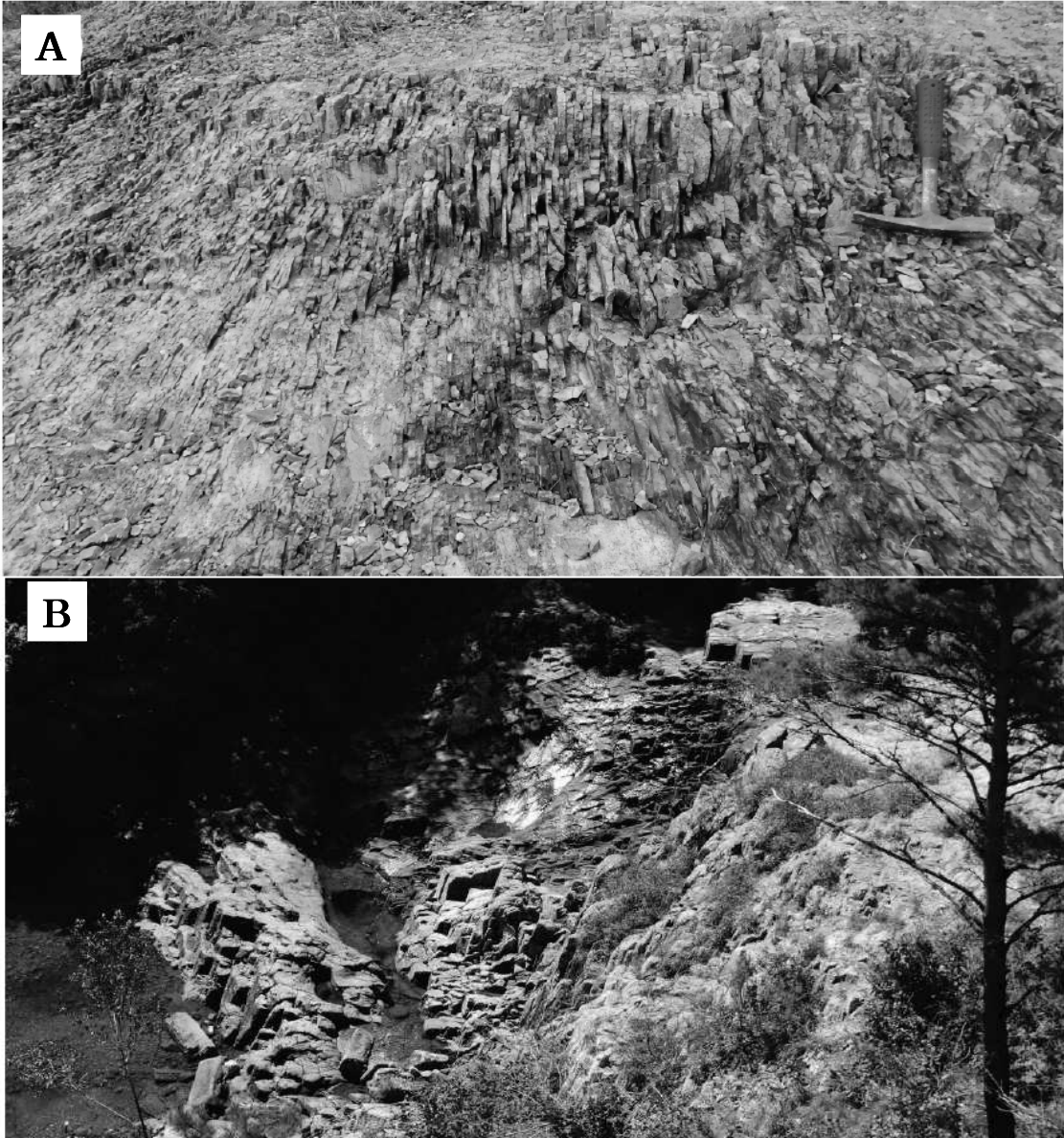


Fig. 19. Photographs of characterizing Byeonsan Tuff(modified of KIGAM, 2013).  
 (A: Narrow gap joints, B: Columnar joints)



변산응회암의 박편을 관찰하기 위하여 채취한 암석시료를 절단하고 단면을 관찰하였더니 암편들이 일정하게 배열되지 않았고, 암편의 배치 또한 방향성이 보이지 않았으며, 용결응회암에서 흐름의 증거로 나타나는 부석편이나 화산유리질 조각이 관찰되지 않는다. 이것은 관찰 지역의 응회암 내에서 용결 과정이 거의 없었기 때문으로 보인다.

변산응회암의 암석시료로 만든 박편을 관찰한 결과 기질부는 미정질이였다. 주상절리를 이루고 있던 BS-12의 암석시료에서는 쌍정이 나타난 사장석이 2~3mm 정도 크기로 관찰되지만, 암편은 거의 보이지 않았다(Fig. 20). 역시 주상절리를 이루고 있던 BS-13의 암석시료에서는 현미경 관찰 시 광물의 판별이 어려우며, 0.5mm 이하 크기의 사장석들이 암편에 둘러싸인 형태로 관찰된다.(Fig. 21).

변산응회암의 일부에서는 응회각력암으로 관찰되기도 하며, 부석편이나 용결조직이 관찰된다고 보고되었으나(한국지질자원연구원, 2013) 본 연구를 위해 채취한 지점의 암석 시료에서는 나타나지 않았다. 이는 부안화산암 대부분의 면적을 차지하는 변산응회암이 지점별로 다른 특성을 나타내기 때문이라고 말할 수 있다.

결론적으로 변산응회암의 주상절리를 이루는 BS-09, BS-12, BS-13, BS-19에서 채취한 암석시료의 박편에서는 뚜렷할만한 특징은 나타나지 않았다.

## 4. 삼예봉유문암

삼예봉유문암은 변산응회암에 피복이나 관입한 형태로 존재하는데, 삼예봉유문암은 돌출된 형태로 고지에 위치하기 때문에 변산응회암보다 풍화와 침식 작용을 받은 흔적이 뚜렷하다. 그리고 부안화산암의 동쪽에 위치한 바드재 인근에서 삼예봉유문암의 피상 노두인 BS-01에서 채취한 암석을 박편으로 만들어 관찰하기 위해 절단하고 관찰하였다. 관찰 결과 암편이 불규칙하게 존재하면서 유상구조가 나타나며, 밝은 담황색을 띠었다.

이는 삼예봉유문암의 기원인 마그마 또는 용암류가 백악기 후기에 부안화산암체 내에 수직 방향으로 관입한 다음, 냉각 과정에서 유상구조가 생성되었음으로 사료된다.

BS-01의 암석시료를 박편을 현미경으로 관찰하면 기질부는 대부분 은미정질 또는 미정질로 이루어졌고, 사장석은 거의 관찰되지 않으며, 변질된 흑운모가 소량 존재함이 관찰된다.

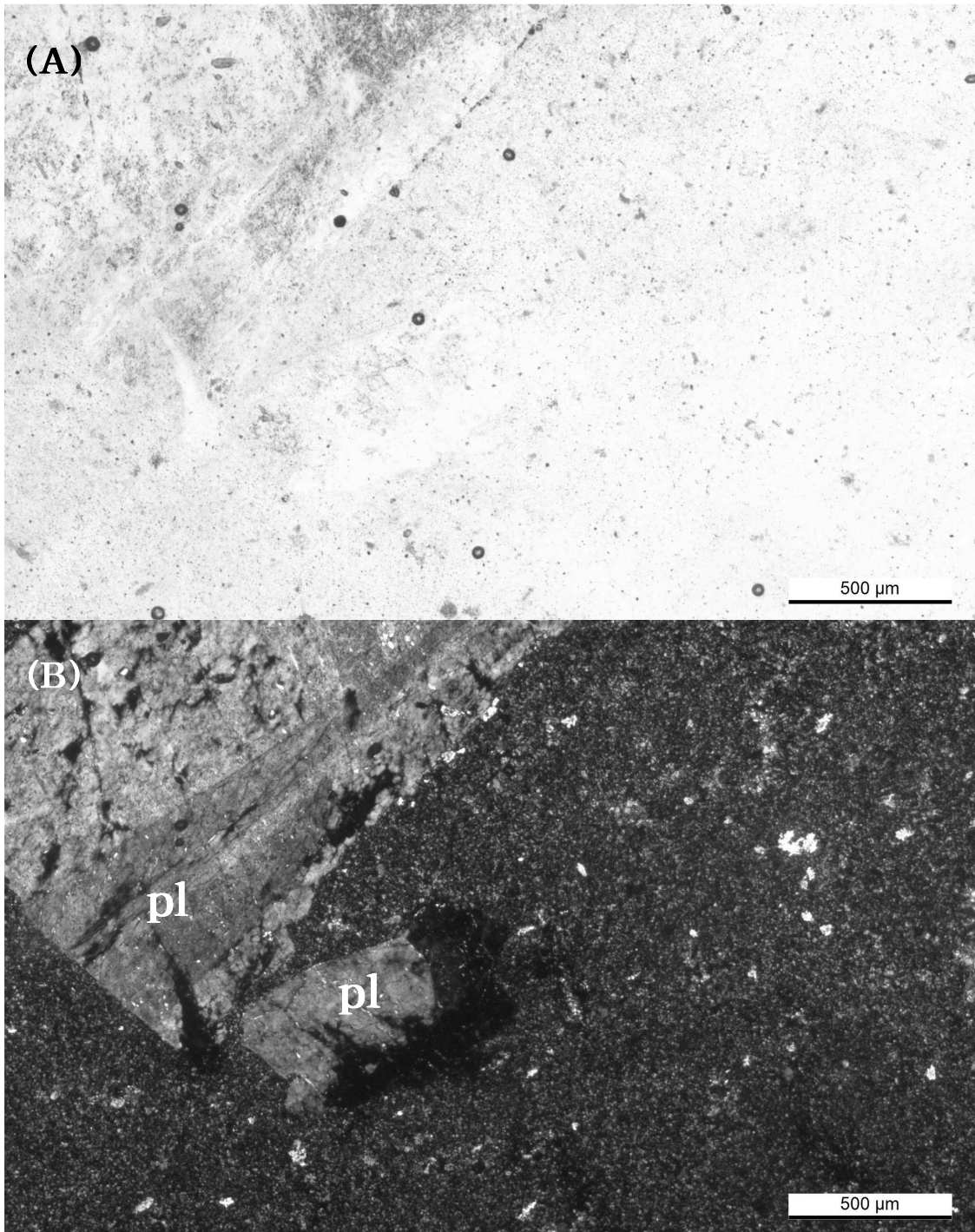


Fig. 20. Microphotographs of rock in BS-12 on Byeonsan Tuff. (pl: plagiocase) (A) open nicol, (B) cross nicol.



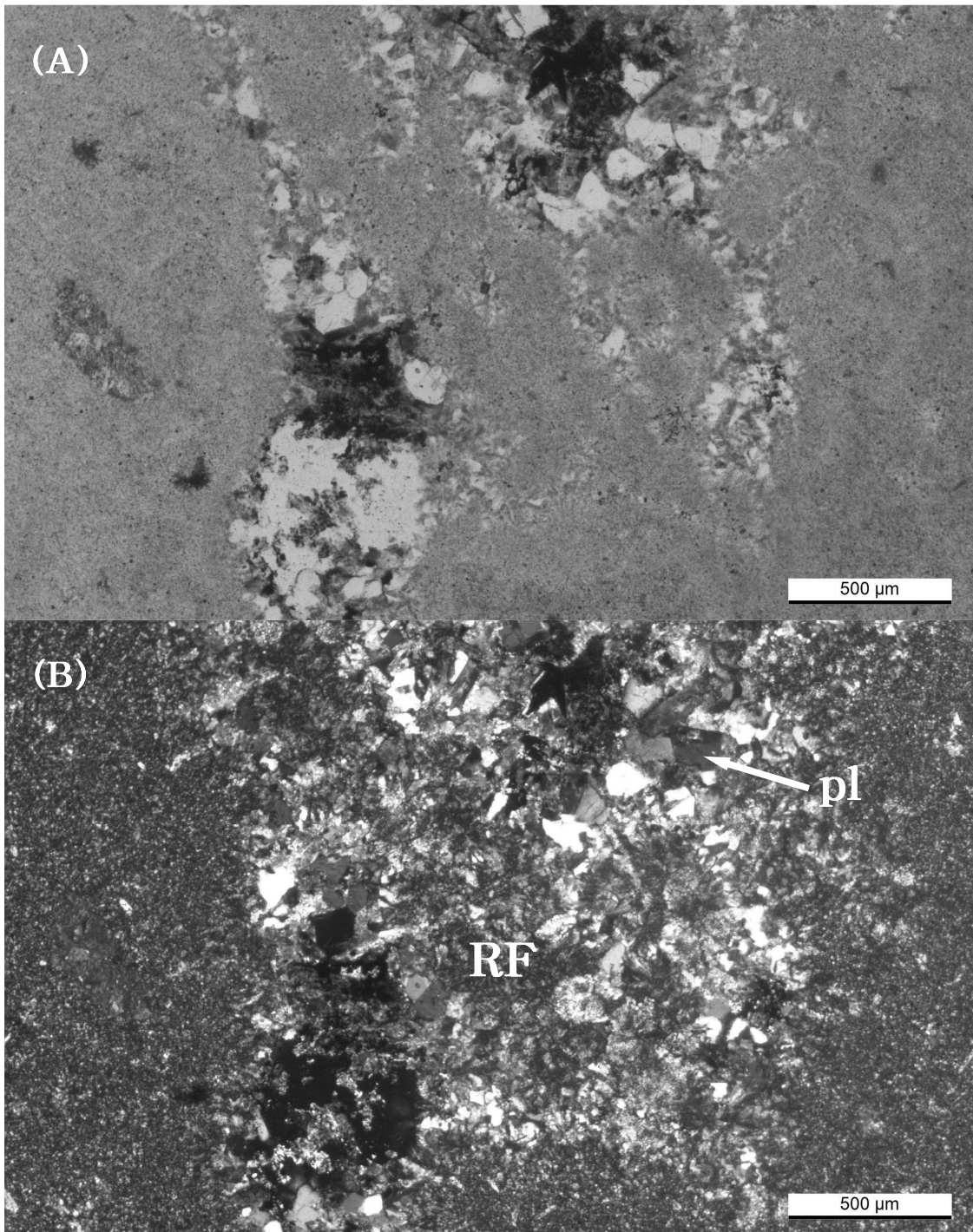


Fig. 21. Microphotographs of rock in BS-13 on Byeonsan Tuff. (RF: rock fragment, pl: plagioclase) (A) open nicol, (B) cross nicol.



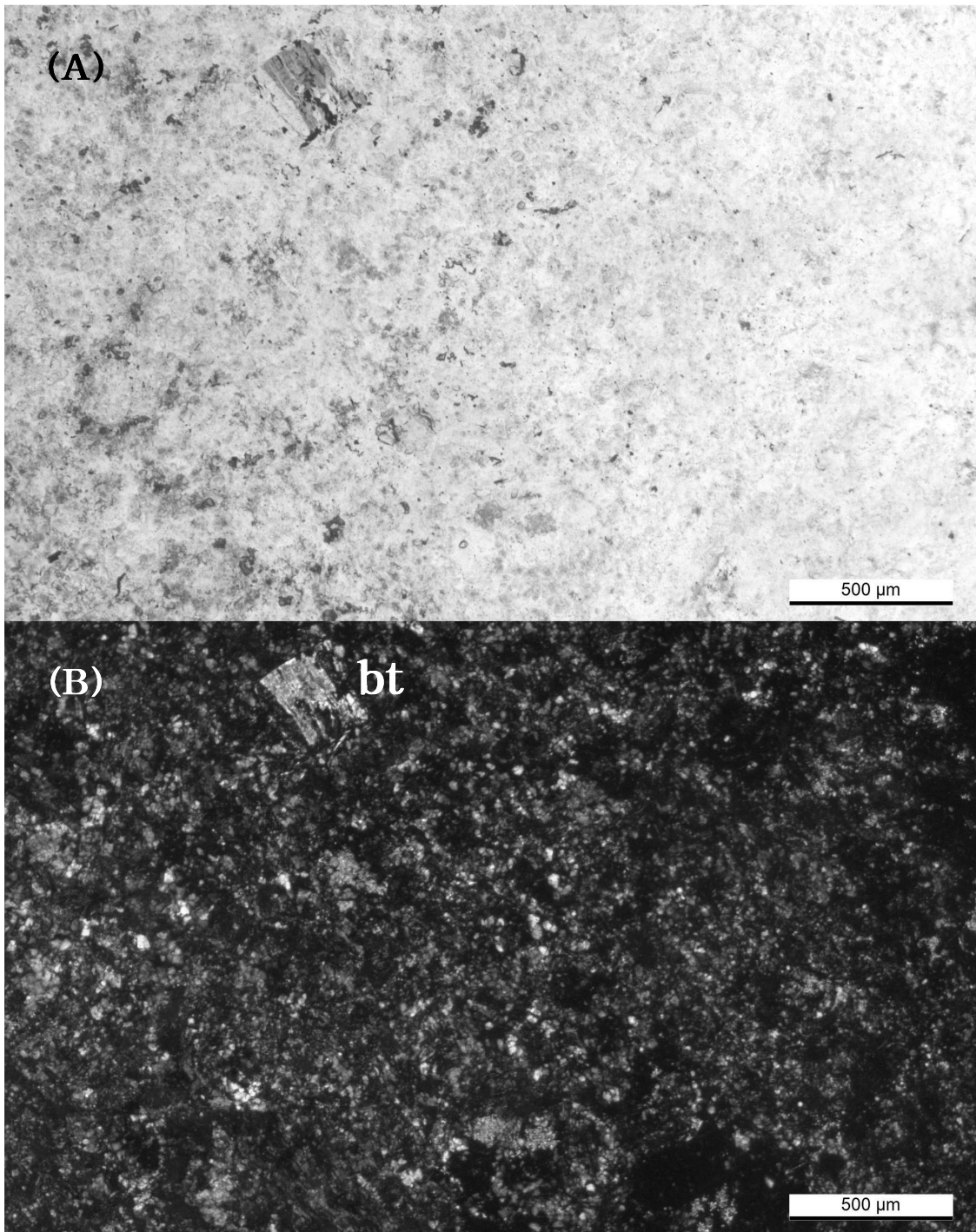


Fig. 22. Microphotographs of rock in BS-01 on Samyebong Rhyolite. (bt: biotite)  
(A) open nicol, (B) cross nicol.

## IV. 주상절리 형태적 특징 분석

주상 절리의 형성 과정에서 다각형의 수(N), 기둥면의 폭(L), 기둥면 사이의 각( $\theta$ )이라는 3가지 요소는 매우 중요한데, 전분 혼탁액 실험에 의하면 냉각 속도에 따라 다각형의 수가 변화되는 결과를 보인다. 일반적으로 냉각 속도가 빠른 표면 부근에서는 5각형 이하의 모양이 많으며, 천천히 냉각하는 내부로 갈수록 6각형을 띤다(Toramaru and Matsumoto, 2004).

이러한 경향은 기둥면의 폭에서도 나타난다. 지금까지 진행된 다양한 연구에서 낮은 냉각률을 보이는 곳에서는 넓은 기둥 모양이 만들어지며, 높은 냉각률을 보이는 곳에서는 좁은 기둥 모양을 만든다.

기둥면 사이의 각도 냉각률에 영향을 받는데 주상절리 형성 시 냉각되며 상부 표면부터 수축이 일어나 균열이 생겨서 블록이 만들어지고, 이 블록은 3개의 균열로 나뉠 때 가장 적은 에너지가 소모된다. 즉 용암류가 굳으면서 블록으로 나뉘는 균열이 진행되면 최소 3개의 선으로 나뉜다. 냉각률이 높아 빠르게 냉각되는 표면에서는 균열 사이의 각, 즉 기둥면 사이의 각 중에  $90^\circ$ 가 가장 많으나, 냉각률이 낮아 서서히 냉각되면 점차  $120^\circ$ 에 가까운 각을 이루며 발달한다.

즉, 냉각률이 높은 표면에서는 기둥면 사이의 각은  $90^\circ$ 에 가깝게 형성되며, 다각형의 모양이 5각형 이하로 기둥면의 폭은 상대적으로 작아진다. 반면에 냉각률이 낮은 표면에서는 스트레스 방출이 커지므로 에너지가 최소로 방출되어 기둥면 사이의 각이 완전한 6각형의 내각인  $120^\circ$ 에 가깝게 형성되고, 기둥 옆면의 너비는 냉각속도가 낮기 때문에 상대적으로 넓게 나타난다.

따라서 본 연구 지역의 주상절리 형태 분석을 위하여 현장조사 시 주상절리의 단면이 노출된 곳에 대해서는 다각형의 수(N)와 기둥면의 폭(L), 그리고 기둥면 사이의 각( $\theta$ )을 측정하였고, 단면이 노출되지 않은 곳에서는 기둥면의 폭(L)을 측정하였다.

그리고 연구 지역 중 주상절리 노두 관찰, 기타 노두 관찰, 수치 측정, 샘플 채취가 이뤄진 곳에 따라 Table. 2에 함께 나타내었다. 이 Table. 2에서 위도-줄포 지역의 지질도폭(한국지질자원연구원, 2013)을 기준으로 BS-01은 바드재 부근 석포옹회암 지역이고, BS-18을 제외한 BS-02부터 BS-20까지는 변산옹회암에 해당하는 지역이며, BS-21부터 BS-31까지는 적벽강의 곰소유문암에 해당하는 지역이다.



Table. 2. Columnar joints sites with geographical location in study area.

Site	Active on site	Latitude	Longitude	Geological setting
BS-01	★▲	35°38' 18"	126°37' 48"	Samyeobong Rhyolite
BS-02	△	35°39' 13"	126°36' 29"	Byeonsan Tuff
BS-03	△	35°39' 00"	126°35' 39"	Byeonsan Tuff
BS-04	△	35°38' 57"	126°35' 21"	Byeonsan Tuff
BS-05	△	35°38' 59"	126°34' 60"	Byeonsan Tuff
BS-06	▲	35°38' 07"	126°34' 27"	Byeonsan Tuff
BS-07	▲	35°38' 06"	126°34' 25"	Byeonsan Tuff
BS-08	△	35°37' 60"	126°34' 24"	Byeonsan Tuff
BS-09	★△	35°37' 56"	126°34' 23"	Byeonsan Tuff
BS-10	△□	35°37' 50"	126°34' 21"	Byeonsan Tuff
BS-11	△□	35°37' 45"	126°34' 24"	Byeonsan Tuff
BS-12	★△	35°37' 43"	126°34' 21"	Byeonsan Tuff
BS-13	★△□	35°37' 41"	126°34' 19"	Byeonsan Tuff
BS-14	△□	35°37' 32"	126°34' 07"	Byeonsan Tuff
BS-15	▲	35°37' 23"	126°34' 14"	Byeonsan Tuff
BS-16	▲	35°37' 14"	126°34' 19"	Byeonsan Tuff
BS-17	▲	35°37' 09"	126°34' 21"	Byeonsan Tuff
BS-18	▲	35°36' 58"	126°34' 39"	Seokpo Tuff
BS-19	★△	35°38' 57"	126°34' 07"	Byeonsan Tuff
BS-20	△	35°39' 24"	126°33' 27"	Byeonsan Tuff
BS-21	△□	35°38' 12"	126°27' 41"	Gomso Rhyolite
BS-24	△□	35°38' 12"	126°27' 34"	Gomso Rhyolite
BS-25	△□	35°38' 15"	126°27' 32"	Gomso Rhyolite
BS-26	★△	35°38' 14"	126°27' 29"	Gomso Rhyolite
BS-27-1	★△	35°38' 13"	126°27' 45"	Gomso Rhyolite
BS-27-2	★△	35°38' 12"	126°27' 44"	Gomso Rhyolite
BS-27-3	★△	35°38' 10"	126°27' 40"	Gomso Rhyolite
BS-28	★△	35°38' 14"	126°27' 30"	Gomso Rhyolite
BS-29	★△	35°38' 14"	126°27' 30"	Gomso Rhyolite
BS-30	★△	35°38' 14"	126°27' 30"	Gomso Rhyolite
BS-31	★△	35°38' 14"	126°27' 30"	Gomso Rhyolite

★: sampling site, △: site of columnar joints observe,

▲: site of another outcrop observe, □: site of columnar joints measure.

# 1. 적벽강의 주상절리

## 1) BS-21, BS-25의 주상절리

적벽강 일대에 분포하는 주상절리는 해안선을 따라 약 600m의 너비이며, 컬러네이드가 수직 방향으로 우세하게 발달하였고, 높이는 최대 10m 정도이다. 이곳의 주상절리는 곰소유문암으로 이루어졌다 기재되었으며(한국지질자원연구원, 2013), 아래에 격포리층이 존재한다(Fig. 23). 그리고 Fig. 24는 적벽강 일대에서 주상절리가 위치한 지역을 표시한 것이다.



Fig. 23. Photograph of columnar joints in BS-21.

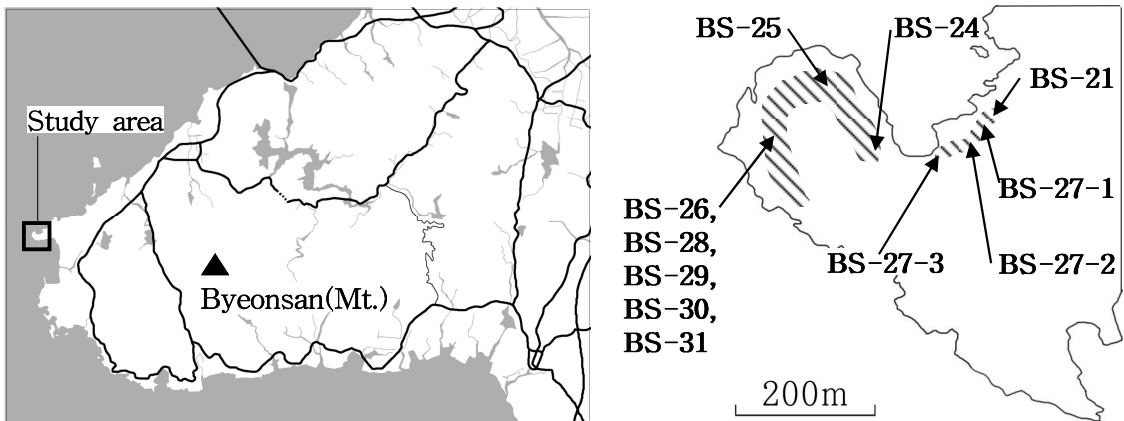


Fig. 24. Map of researched sites in study area. (////: columnar joints area)



적벽강의 조사 지점 중 단면의 구조를 잘 파악할 수 있는 BS-21(Fig. 25A)와 BS-25(Fig. 25B)에서 해침으로 드러난 해식대지의 주상절리 단면 중 125개의 기둥 옆면의 너비와 139개의 기둥면 사이의 각을 측정하였다.

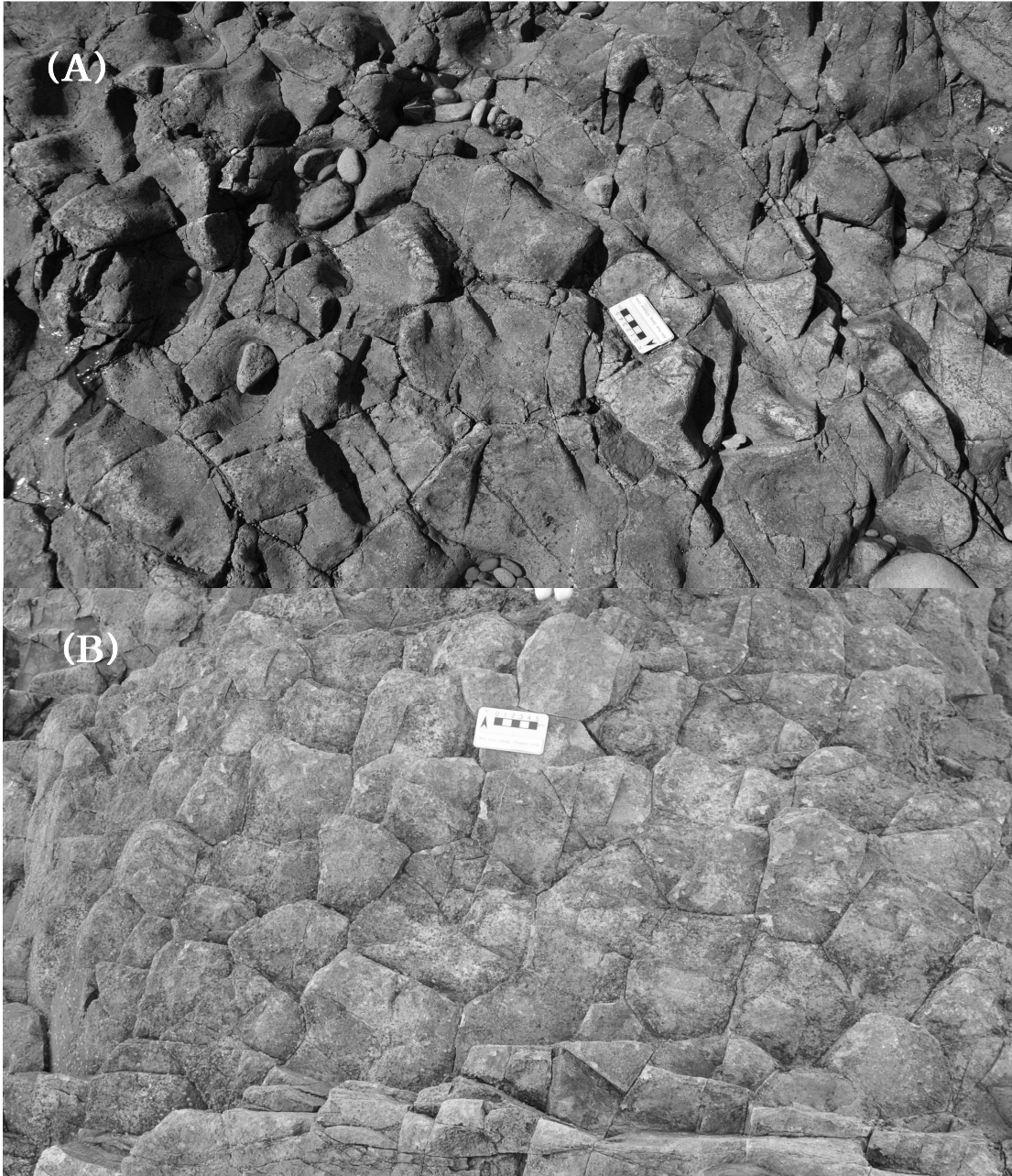


Fig. 25. Photographs of measured columnar joints in BS-21(A) and BS-25(B).

이 지역의 주상절리 다각형의 수(N)는 5각형이 42.86%, 6각형이 28.57%, 7각형이 28.57%로 5각형이 절반 정도를 차지하며, 기둥면의 폭은 5cm 초과 10cm 이하가 46.4%, 10cm 초과 15cm 이하가 24.8%, 15cm 초과 20cm 이하가 3.2%, 20cm 초과 35cm 이하가 합쳐서 4.8%였다. 그리고 기둥면 사이의 각은 80° 이하가 2.88%, 80° 초과 90° 이하가 5.76%, 90° 초과 100° 이하가 10.79%, 100° 초과 110° 이하가 15.11%, 110° 초과 120° 이하가 18.71%, 120° 초과 130° 이하가 19.42%, 130° 초과 140° 이하가 17.27%, 140° 초과 150° 이하가 6.47%, 150° 초과가 3.60%였다(Fig. 26).

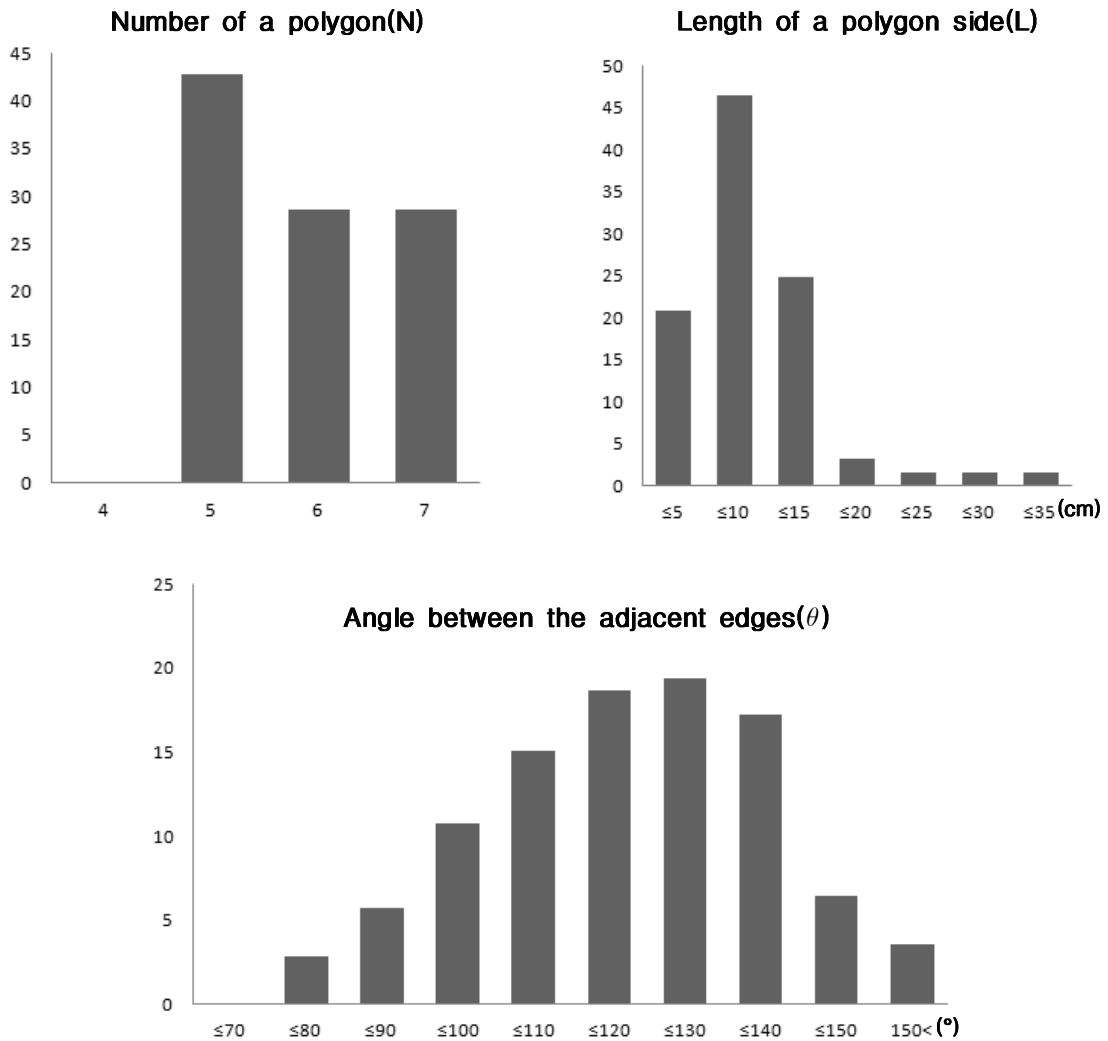


Fig. 26. Frequency(%) of measurement to columnar joints in BS-21 and BS-25.



BS-21 지역의 주상절리(Fig. 23)는 기둥의 크기가 거의 균일하다. 이것은 주상절리가 형성되는 초기에 용암류의 등온면이 지표면과 수평이었고, 용암류가 두껍지 않아 Fig. 9(a)와 같은 형태로 주상절리가 형성되었기 때문으로 추정된다. 다만, 하부 격포리층과 맞닿은 부분에서 주상절리의 기둥 모양이 명확히 않고, 균열이 뒤엉킨 엔테블리체가 나타난다(Fig. 27).

또한, BS-21 지점의 서쪽 해식 절벽에서는 옆으로 휘어진 주상절리를 수직에 가까운 방향의 구조 절리가 가로지르는 모습이 관찰되는데, 이것은 곰소유문암의 주상절리가 형성된 이후에 암상에 지구조적 운동의 힘이 가해져서 생성된 것으로 보인다(Fig. 28).

BS-25 지점의 유문암 내부에서는 불규칙적이면서 좁은 틈으로 깨짐 면이 나타나고, 깨짐 면에 가까운 유문암 조각들이 퍼즐처럼 서로 맞물리는 구조가 관찰된다. BS-25의 곰소유문암 내에서는 다양한 각도의 주상절리들이 마치 겹겹이 쌓인 연꽃잎이 벌어지듯 발달하는데, 주상절리의 윗부분은 수직에 가깝고, 격포리층에 가까울수록 더 심하게 휘어진다(Fig. 29). 이러한 구조가 발달하는 원인을 지질도폭 현장세미나 야외답사 안내서(한국지질자원연구원, 2014)에서는 용암류 내부의 압축과 신장으로 나타나는 유동구조(flow filiation) 때문이라고 추측하였다(Fig. 30).



Fig. 27. Photograph of lower columnar joints in BS-21.

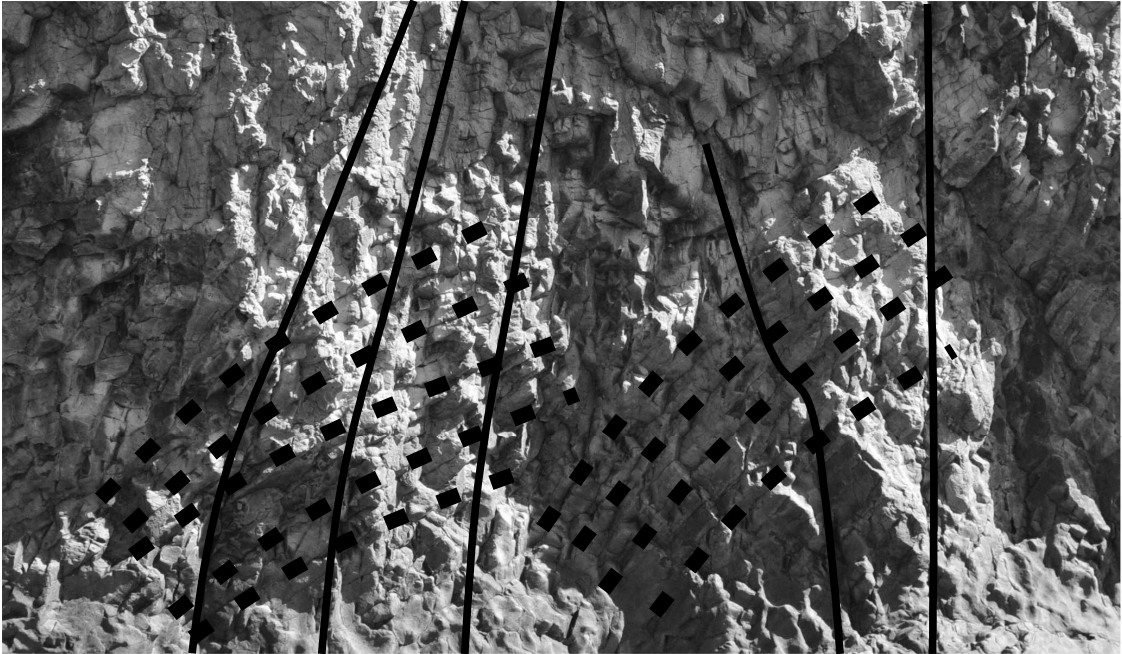


Fig. 28. Photograph of columnar joints in BS-27-3. (·····: Line of columnar joint, —: Line of joint)



Fig. 29. Photograph of columnar joints in BS-25. (Line is joints)



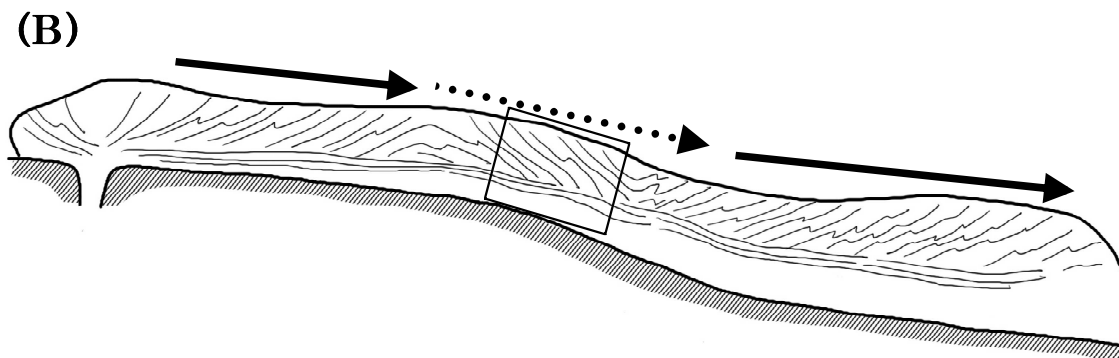


Fig. 30. Panorama photograph of BS-25(A) and assumed process sketch of flow foliation patterns(B)(Modified of Cas and Wright, 1987). (⋯▶: compressional flow, —▶: extensional flow, box: BS-25 area)



## 2) BS-24의 주상절리

적벽강의 조사 지점 중 BS-24는 적벽강 곳의 동쪽 해식 절벽이며 BS-21보다는 주상절리가 잘 발달하진 않았고, 괴상의 노두 사이에 주상절리가 혼재하는 양상을 보인다(Fig. 31). 이곳에서는 주상절리 기둥의 폭을 측정하였다(Fig. 32).

BS-24 지역의 주상절리의 기둥면의 폭은 평균 10.84cm였으며, 대부분 10cm 내외에 분포하고, 5cm 초과 10cm 이하 범위에서 55.56%의 빈도율을 보인다(Fig. 33).



Fig. 31. Photograph of columnar joints in BS-24. (box: massive outcrop)



Fig. 32. Photograph of measured columnar joints in BS-24.

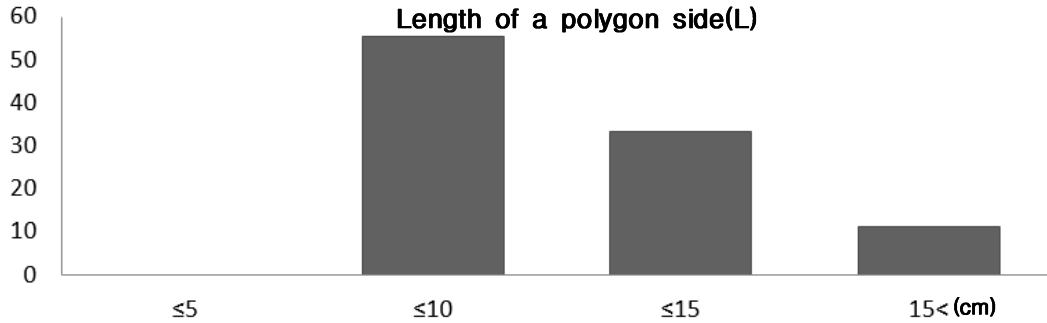


Fig. 33. Frequency(%) of measurement to columnar joints in BS-24.

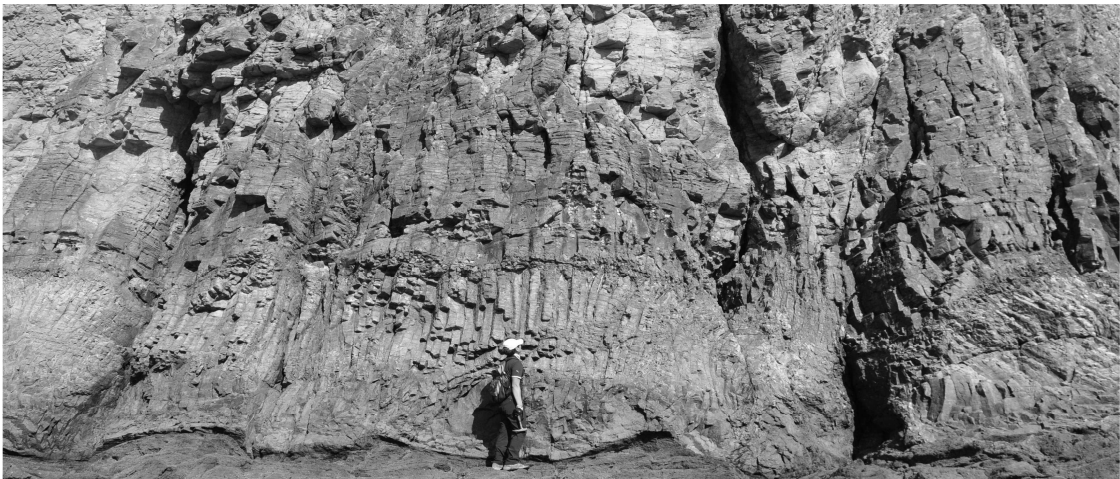


Fig. 34. Photograph of columnar joints in BS-26.

### 3) BS-26의 주상절리

BS-26 지역의 주상절리(Fig. 34)는 같은 곰소유문암인 BS-21나 BS-25의 주상절리 구조보다 복잡한 형태를 띤다. 일반적인 주상절리들에서는 용암류의 냉각면 중 지표면 쪽의 주상절리 크기가 공기면 쪽의 주상절리 크기보다 크게 나타난다. 그러나 이 지역의 주상절리는 오히려 지표면에 해당하는 격포리층 방향의 주상절리가 매우 작게 나타나고, 공기면 쪽에 위치하여 냉각되었을 상부에서 주상절리가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 적벽강 일대에 분포하는 주상절리에서 나타나는 일반적인 경향이며, 지표면과 접촉하여 냉각된 유문암질 용암류의 하부 쪽에 작은 크기의 주상절리가 만들어져 있다.

## 2. 직소폭포 일대의 주상절리

직소폭포 일대의 주상절리는 직소천 하류의 미선나무다리 앞(BS-08)에서부터 직소천 상류의 직소폭포(BS-14)까지 약 2km에 걸쳐 분포하는데, 대부분 수직 방향으로 형성되어 있으며, 높이는 최대 20m이다. 이 지역의 주상절리를 구성하는 암석은 변산응회암이며, Fig. 35는 직소천 일대에서 주상절리가 위치한 지역을 표시한 것이다.

변산반도의 변산응회암 분포 지역 중에서도 내변산의 직소천 주변에서는 하류부터 직소폭포까지의 계곡과 그 부근 산지에서 주상절리가 관찰된다. 봉래교 부근 계곡의 BS-06과 BS-07 지점에서는 구조적 절리만 관찰된다(Fig. 36).

직소폭포 일대 중 주상절리의 단면을 관찰할 수 있는 곳에서 주상절리의 다각형과 136개의 기둥면의 폭(L), 97개의 기둥면 사이의 각( $\theta$ )을 측정하였다(Fig. 40-44).

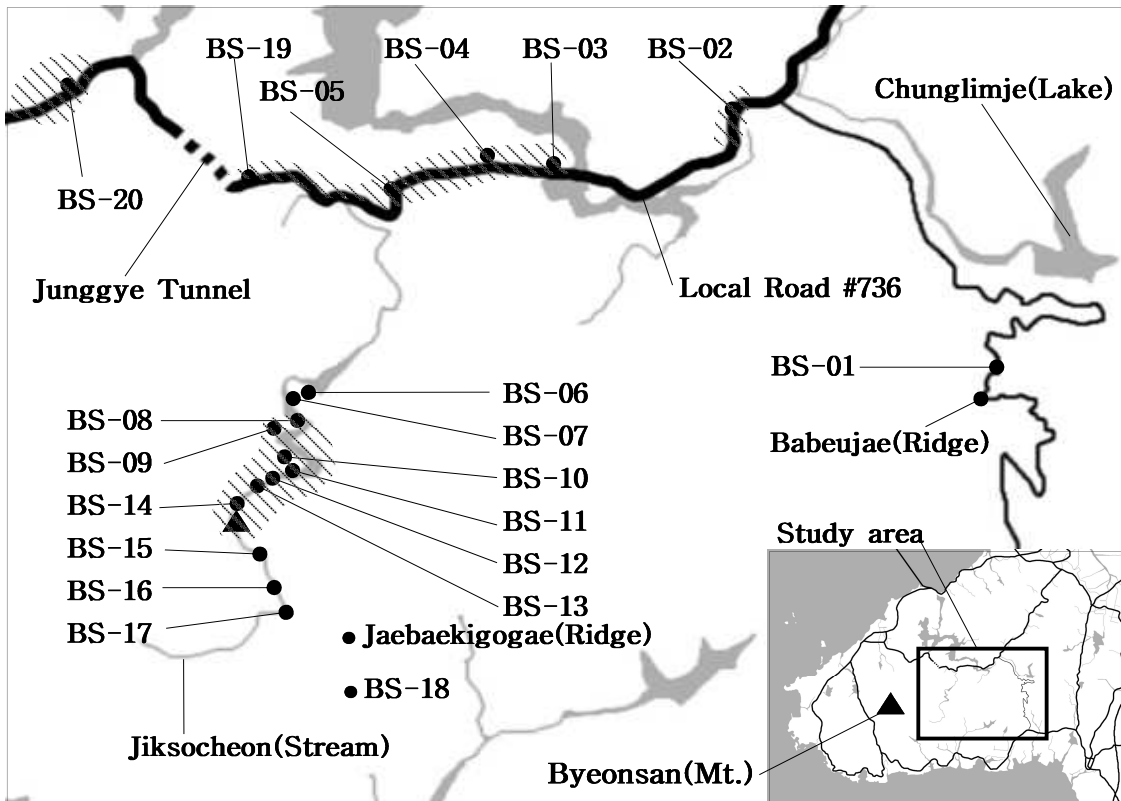


Fig. 35. Map of researched sites in study area. (▲: Jiksopokpo(Falls), ▨ : columnar joints area)





Fig. 36. Photograph of outcrop in BS-06.



Fig. 37. Photograph of outcrop in BS-07.



Fig. 38. Photograph of columnar joints in BS-08.

### 1) 직소천 하류에서 직소폭포까지의 주상절리

직소천 일대의 주상절리의 형태적 특징을 관찰한 결과(Fig. 39), 주상절리 다각형의 수(N)는 4각형이 13.64%, 5각형이 22.73%, 6각형이 45.45%, 7각형이 18.18%로 6각형이 절반에 가깝게 차지하며, 기둥면의 폭(L)은 10cm 이하가 2.94%, 10cm 초과 20cm 이하가 11.76%, 20cm 초과 30cm 이하가 26.47%, 30cm 초과 40cm 이하가 24.26%, 40cm 초과 50cm 이하가 19.85%, 50cm 초과 60cm 이하가 3.68%, 60cm 초과 70cm 이하가 4.41%, 70cm 초과 80cm 이하가 2.20%, 80cm 초과 90cm 이하가 0%, 90cm 초과 100cm 이하가 2.20%, 100cm 초과가 2.20%로 나타났는데, 20cm~40cm의 값이 절반 정도를 차지했다. 그리고 기둥면 사이의 각( $\theta$ )은 70° 이하가 2.06%, 70° 초과 80° 이하가 3.09%, 80° 초과 90° 이하가 5.15%, 90° 초과 100° 이하가 11.34%, 100° 초과 110° 이하가 24.74%, 110° 초과 120° 이하가 18.56%, 120° 초과 130° 이하가 9.28%, 130° 초과 140° 이하가 12.37%, 140° 초과 150° 이하가 6.19%, 150° 초과가 7.2%로 나타났다. 그런데 90° 초과 120° 이하의 빈도율이 약 53%를 차지하는데, 정6각형의 내각이 120°임을 감안할 때 유의미한 결과일 것으로 사료된다.

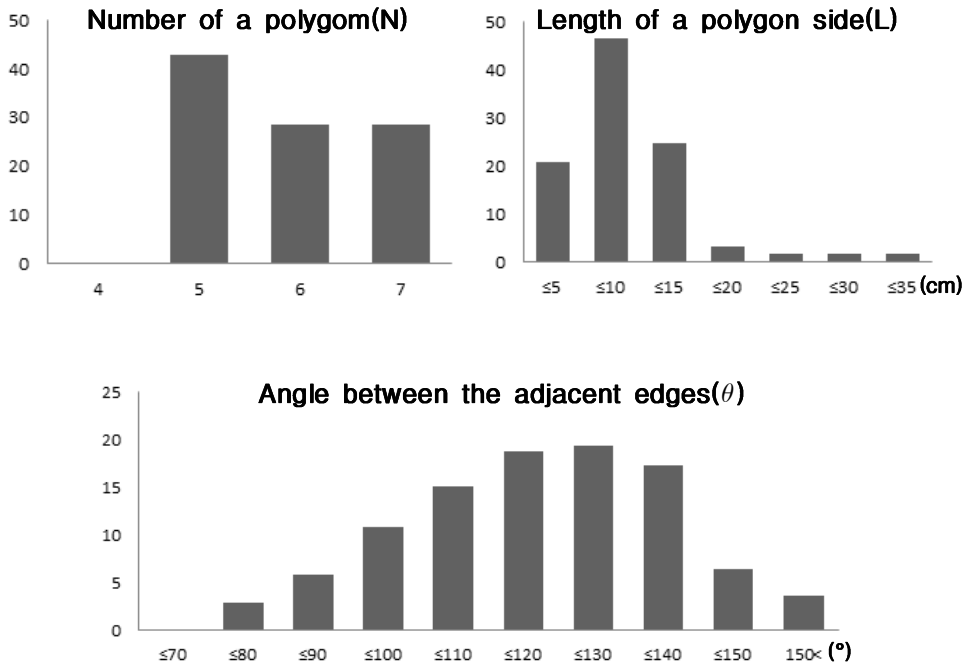


Fig. 39. Frequency(%) of measurement to columnar joints in Jiksopokpo(falls) area.





Fig. 40. Photograph of measured columnar joints in BS-09.



Fig. 41. Photograph of measured columnar joints in BS-10.

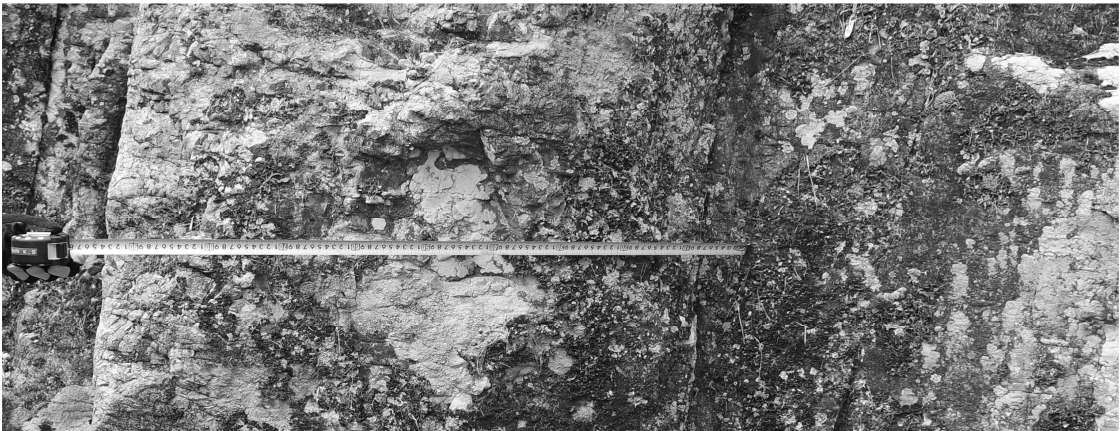


Fig. 42. Photograph of measured columnar joints in BS-11.



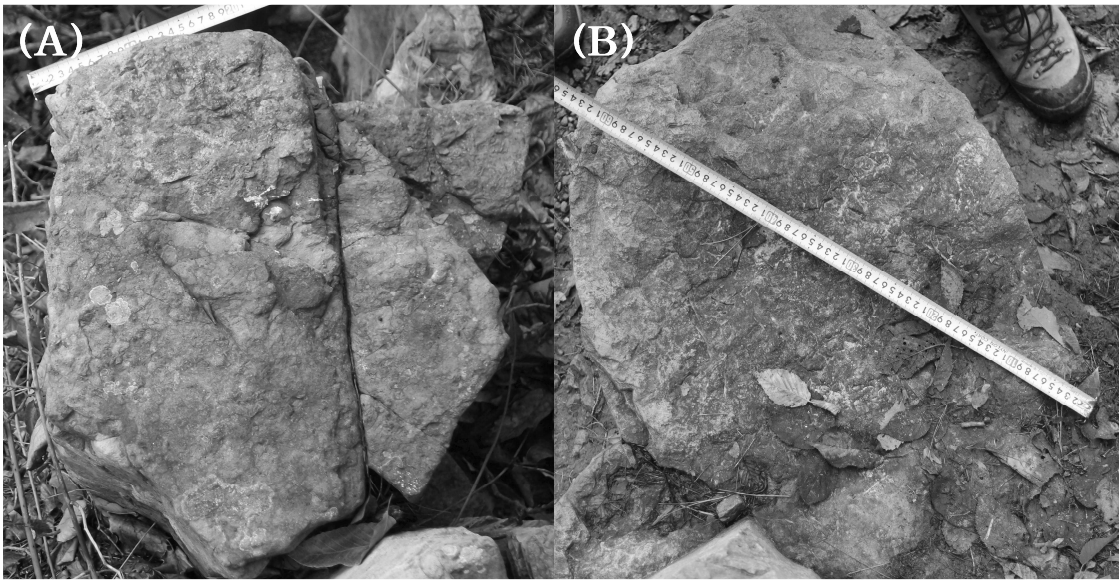


Fig. 43. Photographs of measured columnar joints in BS-12(A) and BS-13(B).



Fig. 44. Photograph of measured columnar joints in BS-14.



## 2) 직소폭포 이후의 노두 관찰

BS-14 지점 이후 직소천 상류를 거슬러 올라가면 BS-17 지점(Fig. 45)의 재백이 다리까지는 노두가 거의 보이지 않으며, 노두가 관찰되어도 주상절리가 나타나지 않는다. 또한, 재백이 다리에서 재백이 고개 방향의 첫번째 노두에서 전형적인 화산암의 깨짐 현상이 나타났고(Fig. 46A), 재백이 고개 방향으로 진행하자 다른 노두에서 각목을 쌓아 놓은 모습의 절리가 관찰되었다(Fig. 46B). 재백이 고개를 넘어 원암 방향으로 가면 BS-18 지점에서 변산응회암을 둘러싸는 석포응회암을 관찰할 수 있다(Fig. 47).



Fig. 45. Photograph of outcrop in BS-17.

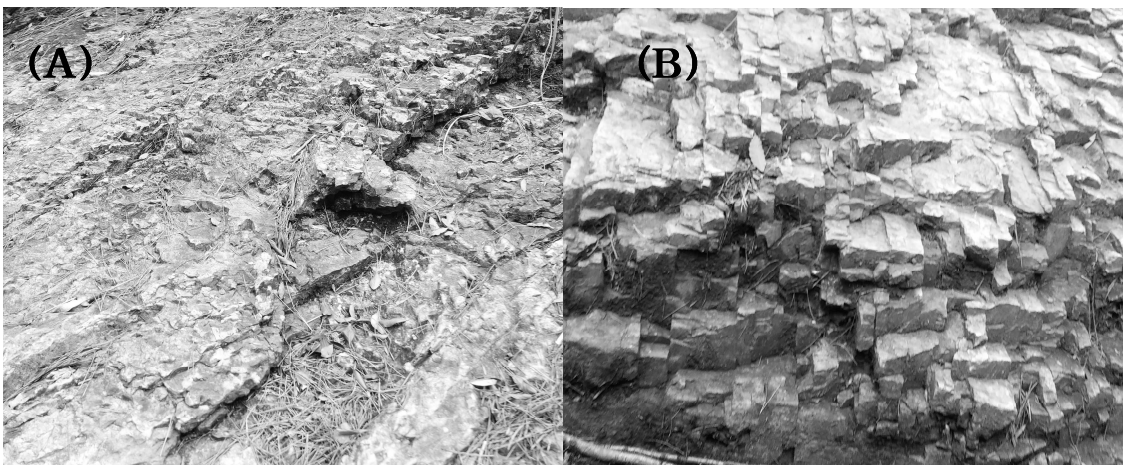


Fig. 46. Photographs of outcrop in direction toward Jaebaekigogae(Ridge). (A) First outcrop, (B) Second outcrop.



### 3) 직소천 의 지역의 주상절리

변산반도 내 736번 지방도로는 변산응회암을 동서로 가로지르고 있으며, 도로의 측면에서 변산응회암의 주상절리 노두들을 쉽게 관찰할 수 있다. 이 노두는 BS-02, BS-03, BS-04, BS-05, BS-19, BS-20에 해당한다. 이 지점들의 주상절리는 직소폭포 부근의 주상절리와 크게 다르지 않은 모습을 보이며(Fig. 48-53), 특히 BS-20 지점에서는 약 60m 폭의 주상절리 노두가 관찰된다(Fig. 53).



Fig. 47. Photograph of outcrop in BS-18.



Fig. 48. Photograph of columnar joints in BS-02.





Fig. 49. Photograph of columnar joints in BS-03.



Fig. 50. Photograph of columnar joints in BS-04.



Fig. 51. Photograph of columnar joints in BS-05.





Fig. 52. Photograph of columnar joints in BS-19.



Fig. 53. Photograph of columnar joints in BS-20.

## V. 암석화학

연구 지역 내 존재하는 암석들의 화학적 특성을 파악하기 위해 총 13개 암석시료를 X-선 형광분석기(XRF)로 주성분원소를 분석하였다.

적벽강의 주상절리를 이루는 곰소유문암의 암석시료는 BS-26, BS-27-1, BS-27-2, BS-27-3, BS-28, BS-29, BS-30, BS-31,에서 채취하였고, 직소폭포 일대의 주상절리를 이루는 변산응회암의 암석시료는 BS-09, BS-12, BS-13, BS-19에서 채취하였다. 그리고 부안화산암을 이루는 다른 암석과의 화학적 비교를 위해 삼예봉유문암의 BS-01에서도 암석시료를 채취하여 분석하였다. 채취한 암석시료의 주성분원소 분석 결과는 Table. 3과 같다.

### 1. 주성분원소의 분포

적벽강의 주상절리를 이루는 암석시료의 주성분원소 함량은  $\text{SiO}_2$ 는 69.3~76.69wt%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 는 14.725~16.929wt%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 는 1.39~2.34wt%,  $\text{MnO}$ 는 약 0.08wt%,  $\text{MgO}$ 는 0.077~1.06wt%,  $\text{CaO}$ 는 0.171~0.839wt%,  $\text{Na}_2\text{O}$ 는 3.074~6.17wt%,  $\text{K}_2\text{O}$ 는 3.34~6.755wt%,  $\text{TiO}_2$ 는 0.348~0.435wt%,  $\text{P}_2\text{O}_5$ 는 0.002~0.126wt%의 범위를 보였다.

직소폭포 일대 주상절리를 이루는 암석시료들의 주성분원소 함량은  $\text{SiO}_2$ 는 73.6~74.4wt%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 는 14.2~14.6wt%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 는 1.16~1.87wt%,  $\text{MnO}$ 는 0.016~0.109wt%,  $\text{MgO}$ 는 0.128~0.248wt%,  $\text{CaO}$ 는 0.317~0.864wt%,  $\text{Na}_2\text{O}$ 는 3.62~4.32wt%,  $\text{K}_2\text{O}$ 는 4.87~5.54wt%,  $\text{TiO}_2$ 는 0.094~0.19wt%,  $\text{P}_2\text{O}_5$ 는 0.014~0.044wt%의 범위를 보였다.

삼예봉유문암 암석시료의 주성분원소 함량은  $\text{SiO}_2$ 는 75.8wt%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 는 13.50wt%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 는 1.18wt%,  $\text{MnO}$ 는 0.04wt%,  $\text{MgO}$ 는 0.15wt%,  $\text{CaO}$ 는 0.10wt%,  $\text{Na}_2\text{O}$ 는 2.77wt%,  $\text{K}_2\text{O}$ 는 5.96wt%,  $\text{TiO}_2$ 는 0.07wt%,  $\text{P}_2\text{O}_5$ 는 0.02wt%이었다. 삼예봉유문암의 주성분원소의 함량은 같은 유문암질인 곰소유문암과 변산응회암에 비해서  $\text{K}_2\text{O}$ 는 많은 편이고,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ 는 적은 경향을 보였다.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ 는 특별한 경향을 보이지 않았다.

이와 같이 채취한 암석시료의 주성분원소 함량 분석을 통해  $\text{SiO}_2$ 의 함량을 기준으로 적벽강, 직소폭포 일대, 바드재 부근에서 채취한 암석시료는 모두 유문암질임을 확인할 수 있다.

Table. 3. Major elemental analyses(wt%) of rocks in study area.

Sample	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total
BS-01	75.80	13.50	1.18	0.04	0.15	0.10	2.77	5.96	0.07	0.02	99.59
BS-09	74.40	14.30	1.19	0.02	0.14	0.37	4.16	5.04	0.09	0.02	99.73
BS-12	74.20	14.60	1.21	0.07	0.14	0.32	3.62	5.54	0.09	0.01	99.80
BS-13	74.20	14.40	1.16	0.09	0.13	0.46	4.32	4.94	0.10	0.03	99.83
BS-19	73.60	14.20	1.87	0.11	0.25	0.86	3.71	4.87	0.19	0.04	99.70
BS-26	69.30	16.00	2.12	0.08	1.06	0.77	6.17	3.34	0.38	0.13	99.35
BS-27-1	70.87	16.93	1.39	-	0.08	0.26	3.76	6.76	0.44	-	100.49
BS-27-2	76.69	14.73	1.19	-	0.13	0.17	3.07	4.09	0.39	-	100.46
BS-27-3	73.98	14.58	2.03	-	0.42	0.33	3.22	5.24	0.35	0.01	100.16
BS-28	74.19	14.76	1.92	-	0.39	0.49	3.26	4.80	0.38	-	100.19
BS-29	73.15	15.06	1.90	-	0.52	0.84	3.33	5.54	0.35	0.01	100.70
BS-30	73.88	15.22	2.06	-	0.61	0.72	3.29	3.89	0.35	-	100.02
BS-31	72.61	15.49	2.34	-	0.52	0.39	3.56	4.63	0.39	0.01	99.94



## 2. 암석의 분류

채취한 암석시료들의 주성분원소 함량을 이용하여 TAS diagram에 도시한 결과(Fig. 55), 유문암에 속하였는데 이는 백악기 화성암의 일반적인 경향과 일치한다. 단, BS-26의 암석시료는 조면암과 유문암의 경계에 도시되었다.

주성분원소 분석을 통해 적벽강의 주상절리를 구성하는 암석은 SiO<sub>2</sub>의 함량에 따라 유문암질에 속함을 알 수 있다. 기존 연구들에서 용암류는 SiO<sub>2</sub>의 함량이 높을수록 점성이 커지므로 두꺼운 용암체를 형성하고, 이에 따라 냉각률이 낮아지기 때문에 주상절리 기둥면의 폭(L), 직경(D)이 커지는 경향을 보이며, 하부 컬러네이드가 상부 컬러네이드보다 직경이 크게 형성된다고 설명하였다.

그러나 적벽강의 고평유문암에서 나타나는 주상절리들의 형태적 특징은 일반적인 경향과 달랐으며, 특히 사자바위에 해당하는 BS-26 지점의 주상절리에서는 하부 컬러네이드가 상부 컬러네이드보다 작았다(Fig. 54). 이것은 적벽강 지역에 분출했던 용암류가 접촉한 격포리층이 많은 수분을 갖고 있었기 때문이며, 이 주상절리의 형태적 특징은 용암류의 화학 조성보다 용암류의 냉각률에 더 크게 영향 받았음을 나타낸다.

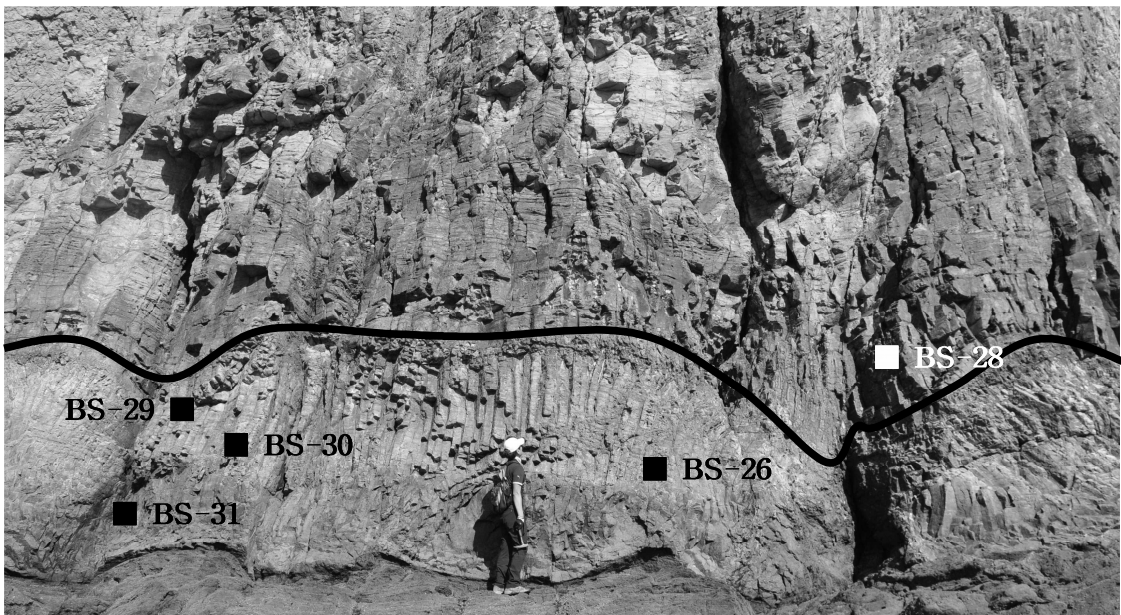


Fig. 54. Photograph of sampling sites in Sajabawi(Rock) of Jeokbyeokgang area.  
 (Line: top and basal cooling surface)



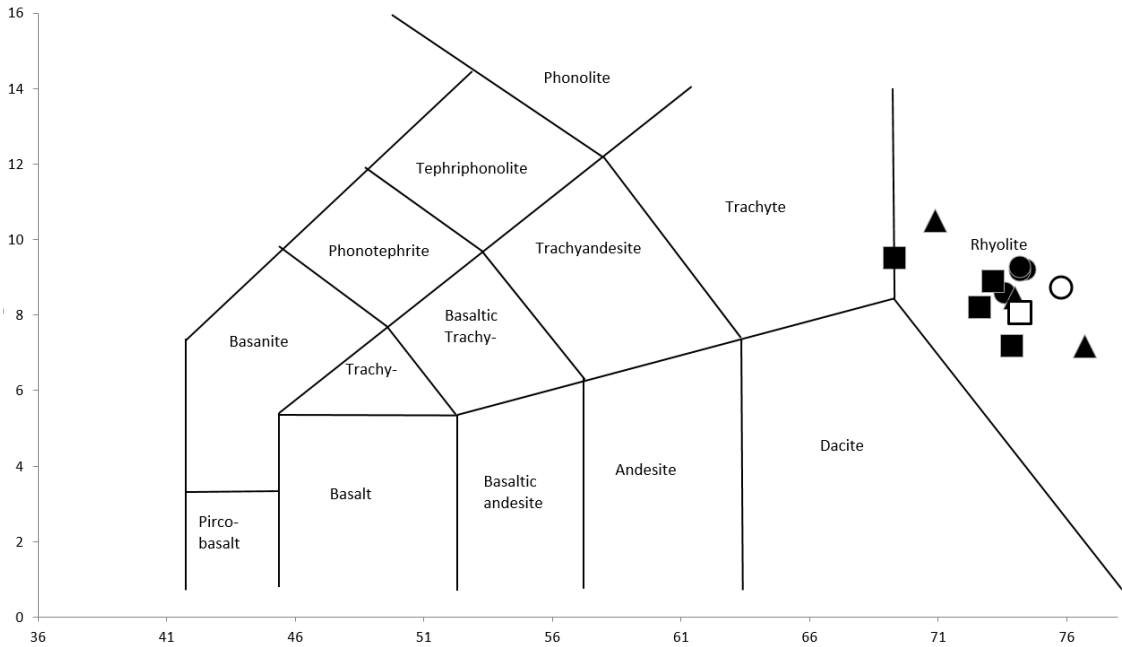


Fig. 55. TAS diagram with analyses of rocks in study area. (○: Samyebong Rhyolite(BS-01), ●: Byeonsan Tuff of Jiksopokpo(Falls)(BS-09, 12, 13, 19), ▲: Gomso Rhyolite of Jeokbyeokgang(BS-27-1, 27-2, 27-3), ■: Lower Gomso Rhyolite of Sajabawi(Rock)(BS-26, 29, 30, 31), □: Upper Gomso Rhyolite of Sajabawi(Rock)(BS-28))

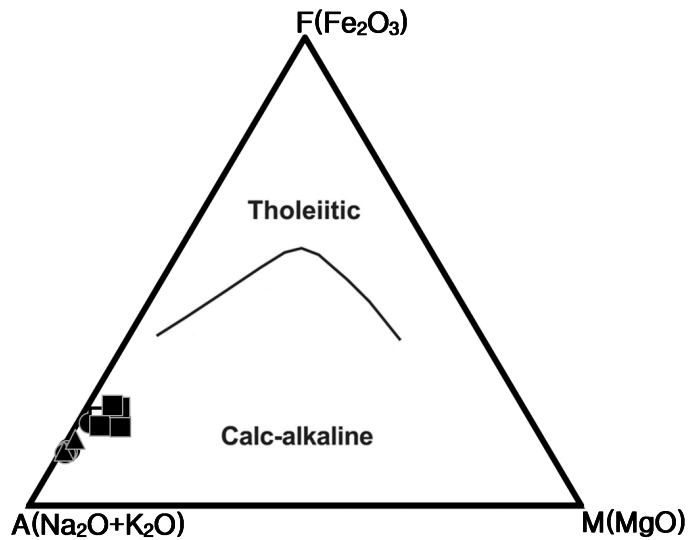


Fig. 56. AFM diagram of rocks in study area(Irvine and Baragar, 1971). (Symbols are shown in Fig. 55)

직소폭포 일대 BS-09, BS-12, BS-13와 직소폭포 외의 장소 중 BS-19에서 이뤄진 변산옹회암의 암석시료의  $\text{SiO}_2$ 의 함량은 유문암에 속하며, 주상절리 기둥면의 폭(L), 직경(D)이 모두 큰 경향을 보인다. 이것은 적벽강 일대에 존재하는 유문암질 용암류에서 생성되는 주상절리의 형태적 특징보다 더 일반적이다.

바드재 인근 BS-01에서 채취한 암석시료  $\text{SiO}_2$ 의 함량은 75.3wt%로 유문암질에 속한다. 하지만 삼예봉유문암의 기원인 용암류가 불안화산암에 관입한 다음, 높은 냉각률로 인해 주상절리가 형성되지 못한 것으로 보인다.

연구 지역의 암석시료들이 반응계열에서 모두 sub-alkali이므로 AFM diagram(Fig. 56)에 도시하면  $\text{A}(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  쪽으로 수렴하는 경향을 보이므로 calc-alkali 계열이다. 그리고 변산옹회암의 암석시료 중 거리상으로 떨어져 있는 BS-19의 기원암을 만든 마그마는 BS-09, BS-12, BS-13의 기원암을 만든 마그마와는 분화 과정에서 약간의 차이를 보이며, 삼예봉유문암에 속한 BS-01의 기원 마그마는 BS-09, BS-12, BS-13의 기원암과 유사한 분화 과정에서 생성된 것으로 해석이 가능하다.

### 3. 화학 조성의 변화

Table. 3의 분석 결과를 바탕으로  $\text{SiO}_2$ 의 함량에 따른 나머지 주성분원소의 함량 변화를 Harker's variation diagram에 나타내면 Fig. 57과 같다.

Harker's variation diagram에서  $\text{SiO}_2$  함량은 69.3wt%에서 76.69wt%까지의 범위를 보인다. 그리고  $\text{SiO}_2$  함량 증가에 따라  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 와  $\text{Na}_2\text{O}$ 는 감소하는 경향이 나타나지만, 나머지 주성분원소의 경향은 뚜렷하지 않았다.

그리고 삼예봉유문암을 제외하고 적벽강의 상하부 곶소유문암과 직소폭포 일대의 변산옹회암으로 구분하여 보면  $\text{SiO}_2$  함량 증가에 따라 주성분원소 중  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 이 감소하는 경향만 공통적으로 나타나고 나머지 주성분원소의 함량에서는 특별한 경향이 보이지 않는다. 이는 두 지역의 주상절리가 모두 화학 조성의 차이보다 냉각률의 차이 때문에 형태적 특징이 다르게 나타났다는 것을 뒷받침한다.

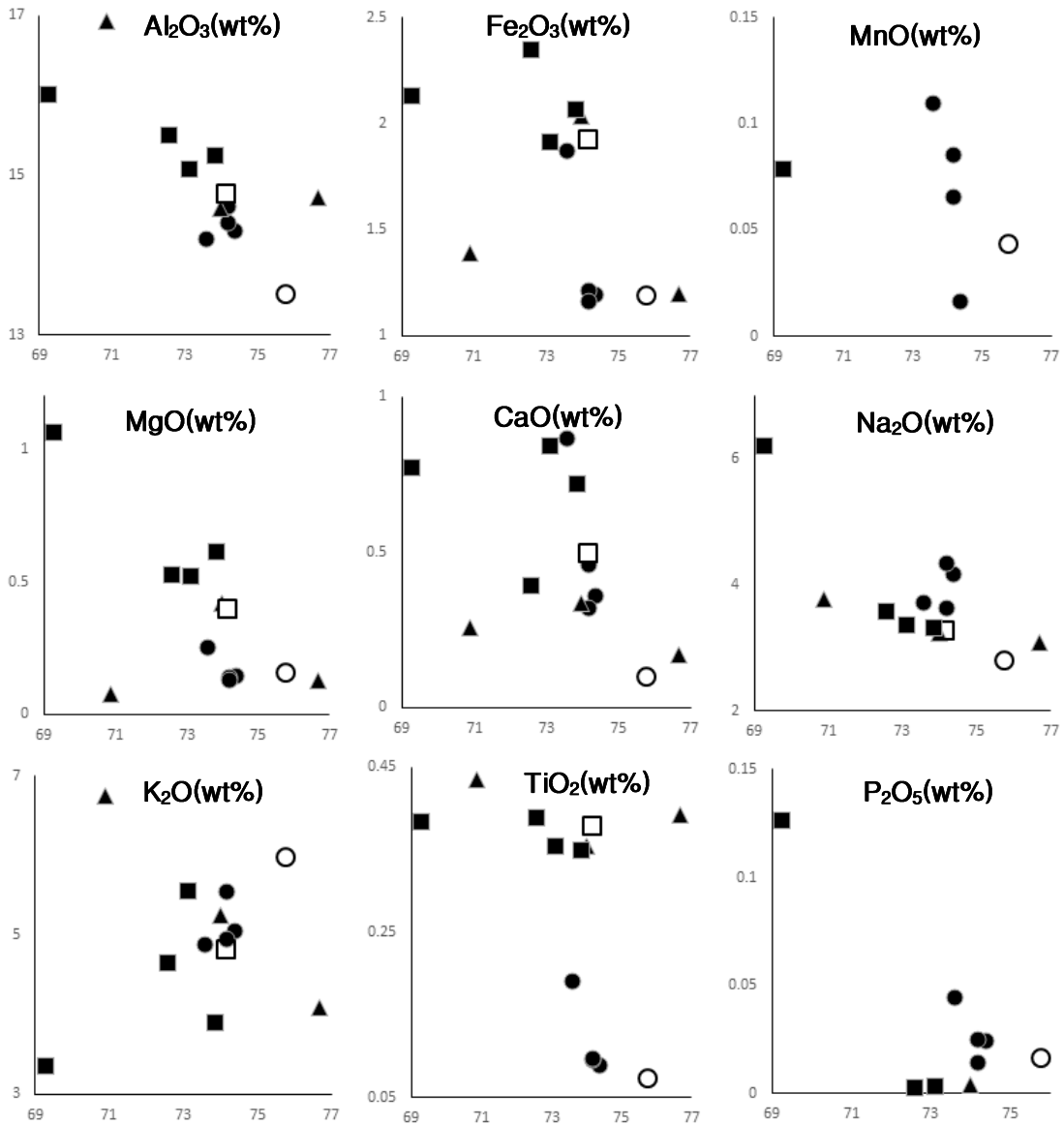


Fig. 57. Harker's variation diagram of rocks in study area. (All width axes are value of SiO<sub>2</sub>(wt%), Symbols are shown in Fig. 55)

## VI. 연구 지역 주상절리의 형성 메커니즘

주상절리가 만들어지는 과정을 밝혀내기 위해 많은 지질학자가 연구를 진행 중이며, 그 과정 중에는 본 연구와 같이 주상절리의 형태적 특징을 측정하여 통계적으로 분석하려는 노력도 포함된다. Hetényi *et al.*(2012)는 일반적으로 산성 용암류에서 만들어진 주상절리보다 염기성 용암류에서 만들어진 주상절리가 더 크며, 마그마의 산출 상태가 주상절리의 크기 형성에 큰 영향을 미친다고 하였다.

그리고 산출 상태와 용암류의 화학 조성은 주상절리의 형태를 결정하는 데 매우 중요하다. 산출 상태에 따라 주상절리는 여러 가지 형상으로 발달하고, 발달 방향이나 크기도 영향을 받는다. 연구 지역에서는 단일 형태의 주상절리만 나타나지 않고 Fig. 9의 여러 가지 주상절리들이 함께 나타난다. 따라서 본 장에서는 주상절리의 형태로 연구 지역의 주상절리의 형성 메커니즘을 추정해 보고자 한다.

### 1. 적벽강의 주상절리

일반적으로 용암류의 하부는 지표와 맞닿고, 상부는 공기와 맞닿는다. 그리고 상부와 하부에서 냉각이 진행되며 균열이 발생하며, 상부와 하부의 냉각 속도가 크게 다를 경우 용암류 중심부에서 엔태블러처가 형성된다. 그리고 상부의 컬러네이드보다 하부의 컬러네이드가 크기 때문에 겉보기에 안정적인 구조를 취한다. 하지만 적벽강 지역의 주상절리들은 다음과 같이 지점마다 각각의 특징을 나타낸다.

#### 1) BS-21의 형성 메커니즘

적벽강 BS-21의 주상절리는 격포리층 위로 유문암질 용암류가 뒤덮은 다음, 격포리층에 포함되어 있던 수분에 의해 용암류 상부의 냉각표면에서보다 하부의 냉각면에서 더 급격한 냉각이 이루어지며 형성되었다. 이에 따라 일반적인 경향과는 다르게 주상절리 하부 컬러네이드의 L보다 상부 컬러네이드의 L이 더 넓거나 상부와 하부의 L이 거의 다르지 않은 특징을 보인다(Fig. 14). 그리고 주상절리 형성 이후에 외부 응력에 의해 구조 절리가 주상절리를 가로지르고 있으며, 격포리층과 주상절리 사이에서 다량의 페퍼라이트가 발견된다(Fig. 15).





Fig. 58. Photograph of columnar joints in BS-25.

### 2) BS-25의 형성 메커니즘

적벽강 BS-25에서 주상절리가 형성된 과정은 기본적으로 BS-21과 유사하다. 그러나 상부 켈러네이드보다 하부 켈러네이드의 L이 확연히 좁으며, 상부 켈러네이드의 L은 BS-21의 상부 켈러네이드의 L보다 3~5배 정도 넓다. 또한, 주상절리가 마치 겹겹이 쌓인 연꽃잎이 벌어지듯 발달하는데, 주상절리의 윗부분은 수직에 가깝고, 격포리층에 가까울수록 더 심하게 휘어진다(Fig. 58). 이러한 구조가 발달하는 원인은 유문암류 내부의 압축과 신장으로 나타나는 유동구조(flow filiation) 때문이라고 추측된다(한구지질자원연구원, 2014).

### 3) BS-26의 형성 메커니즘

적벽강 BS-26의 주상절리는 BS-21, BS-25와 상이한 구조를 가진다. 상부의 켈러네이드는 크고, 하부의 켈러네이드는 작으며, 두 켈러네이드 사이에서 엔테블러처는 존재하지 않는다. 대신 두 켈러네이드 경계에서 주상절리의 냉각면에서 주로 발견되는 아주 작은 크기의 켈러네이드와 괴상 조직이 보인다(Fig. 59).

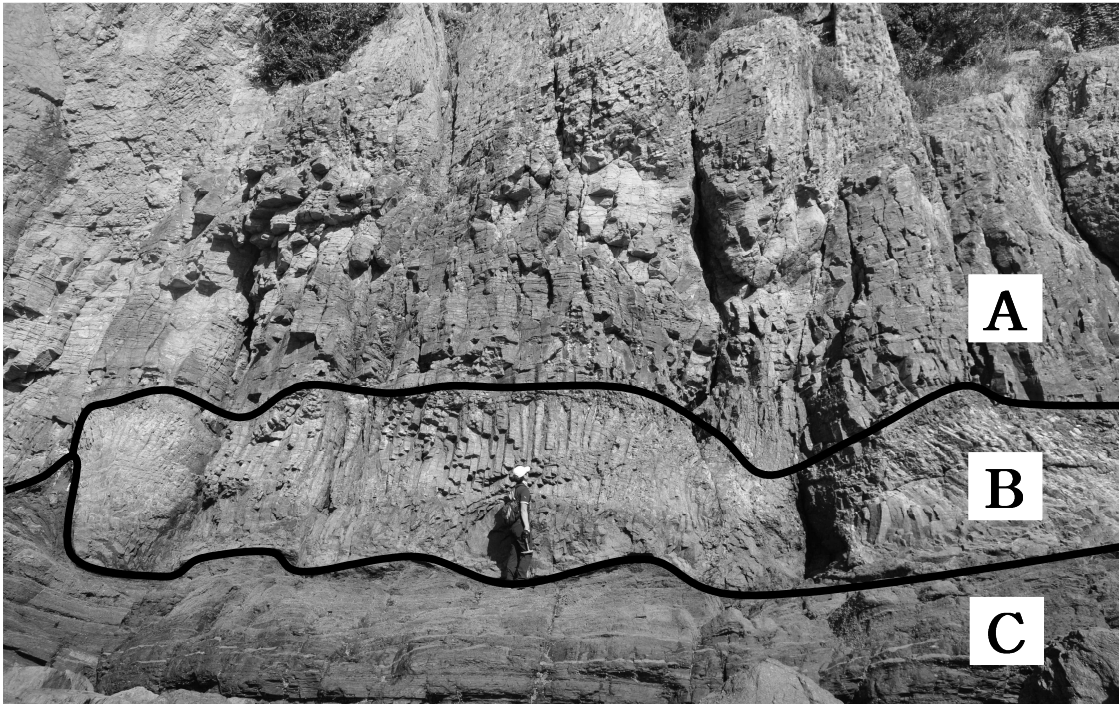


Fig. 59. Photograph of columnar joints structure in BS-26. (A) Upper colonnade from first flow, (B) Lower colonnade from second flow, (C) Shale of Gyeokpori Formation.

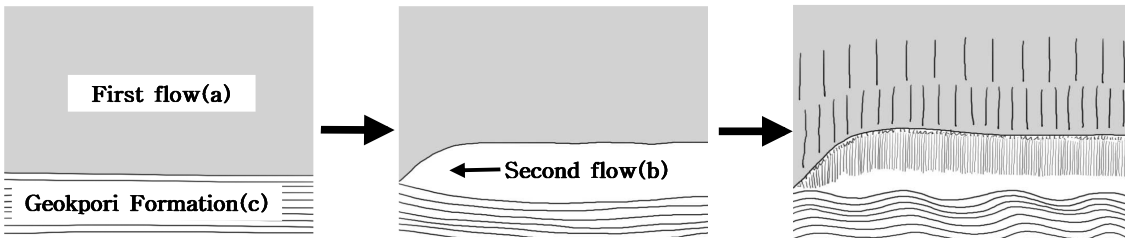


Fig. 60. Assumed creation process sketch of columnar joints in BS-26.

이것은 BS-26에서는 격포리층(Fig. 59C) 위로 유문암질 용암류(상부 유문암층)(Fig. 59A)가 뒤덮은 다음, 이 용암류가 냉각되어 주상절리를 형성하기 전에 유문암질 용암류와 격포리층의 결합이 약한 틈 사이로 새로운 유문암질 용암류 또는 마그마(하부 유문암층)(Fig. 59B)의 관입이 일어났기 때문이다. 그리고 두 용암류의 무게에 의해 격포리층에 불꽃구조가 형성되었고, C와 B 사이, B와 A 사이의 접촉면에서 각각의 냉각이 일어나면서 주상절리가 발달하였다. Fig. 60은 이 과정을 나타낸 모식도이다.



## 2. 직소폭포 일대의 주상절리

변산반도에 존재하는 화산암을 부안화산암이라고 하며, 그 대부분을 차지하는 지질은 변산응회암이다. 변산응회암은 백악기 말에 형성된 마지막 응회암으로 변산반도를 전반적으로 덮고 있다. 그러나 그 변산응회암 속에서 주상절리가 드러난 곳은 대부분 현재까지 직소천 상류와 변산반도 내 736번 지방도로 부근이다.

변산응회암을 이루는 화산회는 두껍게 퇴적되었으며, 점성이 높은 용암류가 주상절리를 형성하듯 직경(D)이 크고, 단면적(A)이 넓은 주상절리가 형성되었다. 그러나 직소천의 미선나무다리부터 직소폭포까지만 주상절리 노두가 보이며, 직소천 주변 고지에서 산발적으로 주상절리가 보이고, 유수의 침식에 의해 변산응회암 내부에 존재하던 비균일한 형상의 주상절리(Fig. 61A)와 수직 방향으로 균일한 주상절리(Fig. 61B) 등이 점점 더 드러나고 있다.

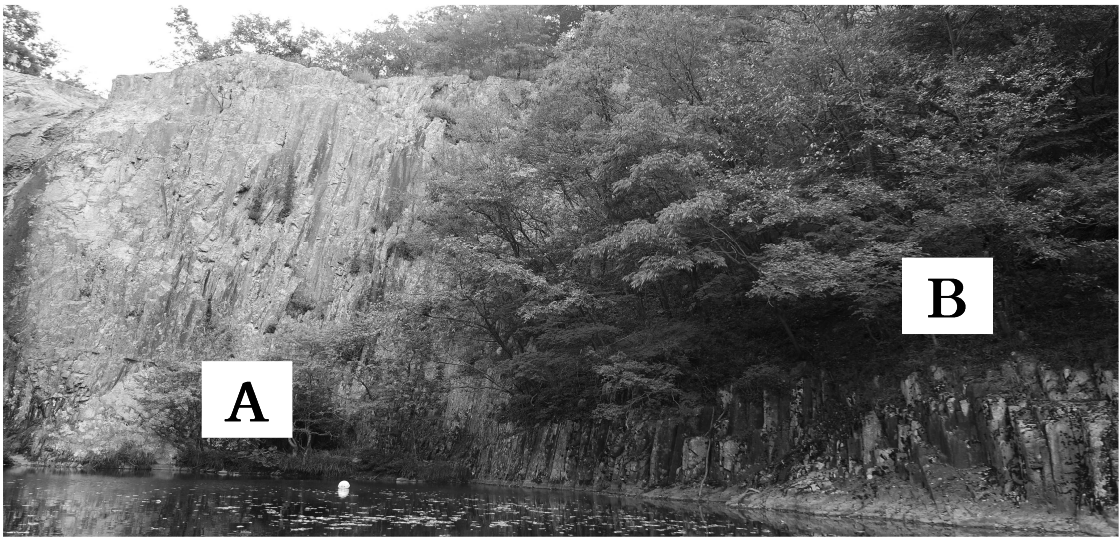


Fig. 61. Photograph of columnar joints in Jiksopokpo(Falls).

## VII. 토의

주상절리는 기원 물질의 화학 조성과 산출 상태에 따라 크기와 형태가 다르게 형성 되는데, 용암류 기원의 주상절리는 화학 조성과 주상절리 형태 사이의 관계가 많은 연구에 의해 밝혀지고 있으며, 특히 용암류에 포함된  $\text{SiO}_2$ 의 함량과 기둥면의 폭이 비례 한다는 것이 특징이다. 그러나 연구 지역 중 직소폭포 일대의 주상절리는 응회암의 주상절리로 기존 용암류 주상절리의 형성 메커니즘과는 상이하다. 분석된 결과와 기존의 연구를 종합하여 연구 지역별 주상절리가 형성된 과정을 추정하면 다음과 같다.

적벽강 지역의 주상절리는 곰소유문암이라는 화성암에서 나타나며, 수직 방향으로 주로 발달하고, 하부 격포리층에 가까운 켈러네이드일수록 크기가 작아지거나 엔테블러처가 발달하며, 격포리층에서는 페퍼라이트가 관찰된다. 이 형태는 대부분의 용암류에 형성된 주상절리와 비슷하다고 할 수 있다. 하지만  $\text{SiO}_2$  함량이 높은 다른 유문암질 주상절리들에 비해 주상절리 기둥면의 폭에 대한 수직 방향 변화 경향이 기존 연구의 결과와 상이하다. 이것은 적벽강의 주상절리가 형성될 때 격포리층과 접하는 용암류의 수분의 첨가 등으로 냉각률이 증가되었기 때문으로 추정된다. 특히 적벽강을 이루는 주상절리 중 BS-25의 주상절리에 형성 과정에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 기존 연구에서는 BS-25에서 하부의 휘어짐이 나타난 주상절리에 대해 유동구조에 의한 것이라고 해석하였다(한구지질자원연구원, 2014). 그러나 본 연구에서는 BS-25 지점에서 나타나는 주상절리의 절리선이 유동구조에 의한 것보다 일정한 방향으로만 나타나며, 엔테블러처 형태의 방사상 주상절리가 나타남(Fig. 63A)에 주목하여 다음과 같은 해석을 제시한다.

모식도로 나타낸 Fig. 63(B)와같이 용암류가 냉각되는 중 큰 틈새(fracture)가 만들어졌고, 물의 침입으로 용암류의 중심부에서 하부 냉각면 방향으로 퍼지는 엔테블러처가 형성된 다음, 용암류 내부의 냉각점 또는 냉각면의 역할을 한 엔테블러처와 상부의 냉각표면과 사이로 양과 꺾질 형태의 휘어지는 절리가 형성된 것으로 사료된다.

직소폭포 일대의 변산응회암을 이루는 화산회는 두껍게 퇴적되었으며, 화산활동에서 분출된 많은 수분을 지니고 있는데다가, 화산회의 기원암이 많은  $\text{SiO}_2$ 의 함량을 띠었다. 따라서 점성이 높은 용암류가 주상절리를 형성하듯 직경이 크고, 단면적이 넓은 주상절리가 냉각표면의 수직 방향으로 형성되었다. 그러나 주상절리가 나타나지 않는 변산응회암 지역은 큰 냉각률에 의해 주상절리가 형성되지 못한 것으로 보인다.



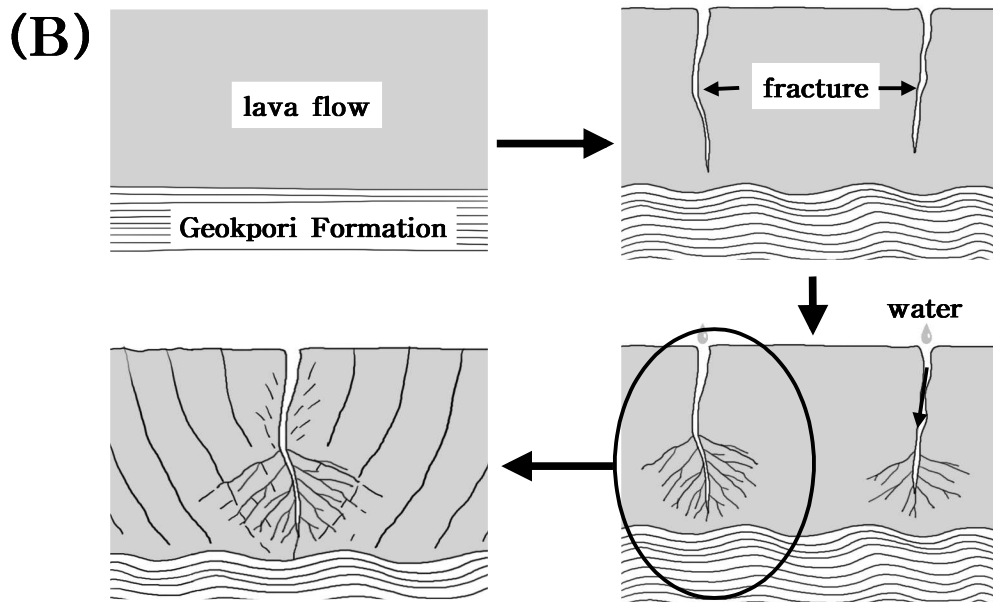


Fig. 62. Photograph(A) and assumed creation process sketch(B) of columnar joints in BS-25.

일반적으로 수직 방향의 주상절리는 용암류에서 나타나고,  $\text{SiO}_2$ 의 함량에 대해 주상절리 기둥면의 폭이 비례하는 것으로 알려졌다. 그러나 본 연구 지역에서 관찰된 유문암질 주상절리들의 기둥면의 폭은  $\text{SiO}_2$  함량과 비례하지 않고, 비교적 균일한 형태를 나타낸다 할 수 있다. 응회암으로 이루어진 주상절리로는 대표적으로 무등산의 주상절리대, 주왕산 주상절리대가 있는데, 변산과 내변산의 변산응회암으로 이루어진 주상절리대의 연구가 지속적으로 이루어지고 타 지역의 응회암 주상절리와 비교하는 더 심화된 연구가 필요해 보인다. 또한, 백악기에 활발한 화산 활동이 이루어졌다 밝혀진 한반도 남부의 지역들에서 반드시 주상절리가 형성된 것은 아닌 이유와 이와 연계하여 백악기 화산활동의 상세한 메커니즘에 대한 연구가 함께 진행되어야 할 것이다.

또한, 변산응회암 분포 지역 내에서 주상절리가 협소한 지역에만 나타남을 인식하고 동일 응회암 내에서 주상절리가 형성될 수 있는 조건에 대한 연구도 필요해 보인다.

## VIII. 결론

변산반도 국립공원 내 산성화산암에 발달하는 주상절리의 특징을 연구하기 위해 격포리 적벽강에 분포하는 곰소유문암의 주상절리와 증계리 직소폭포 주변 변산응회암의 주상절리를 대상으로 분석 하였으며, 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 적벽강 지역에 분포하는 주상절리는 다음과 같은 특징을 지니고 있다.
  - 적벽강 도입부인 BS-21의 주상절리는 굽기 변화가 거의 없거나 컬러네이드 하부가 상부보다 가늘어지는 형태를 보이고, 격포리층과 접하는 하부에서 엔테블러취와 페퍼라이트가 나타난다.
  - 사자바위의 동편인 BS-25의 주상절리는 수직 방향의 중앙선을 중심으로 상부에서 하부로 갈수록 바깥쪽으로 휘어지는 특징을 나타낸다.
  - 사자바위의 서편인 BS-26에서는 상부 유문암층과 하부 유문암층 그리고 격포리층을 접촉부로 하는 서로 다른 크기의 2가지 주상절리가 수직방향으로 발달한다.
- 2) 직소폭포 일대에서는 높이가 수십 미터에 이르는 수직 방향의 주상절리가 발달하였다. 그러나 용암류가 기원인 주상절리에서도 나타나듯이 내부의 온도 구배에 따라 주상절리의 방향이 휘어지는 곳도 일부 존재한다.
- 3) 적벽강과 직소폭포 일대에 분포하는 주상절리의 형태적 특징은 Table. 4와 같이 서로 달랐다. 하지만 두 곳에 분포하는 암석은 모두 유문암질이며 calk-alkaline이고, SiO<sub>2</sub> 함량 증가에 따라 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>만 감소하는 경향이 보인다는 공통점이 있다.
- 4) 따라서 적벽강과 직소폭포 일대의 주상절리가 서로 다른 형태적 특징이 나타내는 이유는 주상절리가 형성될 때 기원물질의 화학 조성보다 냉각률에 더 큰 영향을 받았기 때문으로 보인다.

Table. 4. Major characteristic of columnar joints in study areas.

Characteristics of Columnar Joints Study area	N(Number of a polygon)	L(Length of a polygon side)	$\theta$ (Angle between the adjacent edges)
Jeokbyeokgang	5(42.86%)	5~10cm(46.4%)	120~130°(19.42%)
Jiksopokpo(Falls)	6(45.45%)	20~30cm(26.47%)	100~110°(24.74%)

본 논문은 기존의 주상절리에 대한 연구들이 주로 현무암질 용암류의 냉각 과정에 중점을 두었음에 주목하고, 유문암질의 용암류와 화산쇄설물에서 각각 형성된 주상절리를 함께 연구하고 비교하여 차별화하고자 하였다. 그리고 연구를 통해 나타난 결과와 제언은 산성암 내지 유문암질 응회암에서 형성된 주상절리의 형성 과정을 이해하는데 이용될 것이며, 변산반도 국립공원 내에 존재하는 다양한 형태의 지질 구조를 널리 알리는 데 활용될 것이다.

또한, 본 연구는 주상절리라는 같은 화성활동의 외적 형태가 나타나는 두 곳을 비교하여 비슷한 화학 조성을 띠면서도 서로 다른 형태적 특징을 나타내는 이유에 대해 분석하였다. 특히 곰소유문암으로 이루어진 적벽강에서 다양한 형태적 특징을 가진 주상절리가 나타난 이유를 파악했으며, 그 주상절리들과 접촉한 암석 사이의 관계를 파악하였다. 따라서 본 연구를 중등학교 과학 교육과 연계하여 퇴적암과 화성암의 생성, 화산 활동, 지표의 변화 원인, 암석의 구성 등과 같은 체험 학습 요소를 강조하면 변산반도가 지닌 지질학습장으로서의 가치를 올릴 수 있다. 그리고 주상절리가 가진 고유의 미적 가치를 강조하고, 국립공원인 변산반도 내의 등산로 또는 올레길과 연계하면 관광 자원으로서의 가치를 높여 국가지질공원으로 승격되는 데 기여할 수 있을 것이다.

이에 따라 앞으로 더 많은 암석 시료의 화학 분석과 주상절리 수치 측정이 이루어지고, 그 결과를 분석하여 변산반도 일대에 분포하는 주상절리들의 고유한 특징을 찾아야 한다. 더불어 적벽강의 유문암 주상절리와 직소폭포의 응회암 주상절리의 기원 물질을 공급한 화산활동의 종류와 시기에 대한 연구와 그 화산활동으로 형성된 다른 암석에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다.



## 【참고 문헌】

- 고정선, 윤성효, 홍현주, 2005b, 제주도 대포동현무암에 발달한 지삿개 주상절리의 형태학 및 암석학적 연구, 암석학회지, 14(4), 212-225.
- 고희재, 권창우, 박승익, 박주언, 기원서, 2013, 줄포·위도·하왕등도도폭 지질조사보고서, 한국지질자원연구원, 45-52.
- 고희재, 권창우, 박승익, 박주언, 기원서, 2014, 2014 신규 발간 지질도폭 현장세미나 : 줄포도폭 : 위도·하왕등도도폭 야외답사 안내서, 한국지질자원연구원, 34-35.
- 김해경, 고영구, 오강호, 2004, 고흥지역에 분포하는 백악기 응회암의 역학적 특성에 관한 연구, 지질공학회지, 14(3), 273-285.
- 손정모, 2016, 한반도 남부 해안에 분포하는 주상절리의 형성 매커니즘, 조선대학교, 박사학위논문, 24-28.
- 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), 45-59.
- 안건상, 2014b, 우리나라 주상절리에 대한 연구 전략, 한국지구과학학회지, 35(7), 501-517.
- 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.
- 조규성, 양우현, 신순선, 오재명, 정덕호, 2012, 변산반도 격포 적벽강 일대 야외지질 학습자료 개발 및 적용, 한국지구과학학회지, 658-671.
- Cas, R. A. F. & Wright, J. V., 1987, Volcanic Successions. Modern and Ancient, xviii, 360p.
- French, J .W., 1922. "The fracture of homogeneous media. Transactions of Geological Society of Glasgow." 17(1), 50 - 68.
- Goehring. L, Stephen W. Morris, and Zhenquan Lin, 2006, 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., Stephen W. Morris, 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. *Proceeding 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., Medard, E., 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.
- Huxely, T.H., 1881, *An introduction to the study of nature*, Macmillan and co., London, UK, 204p.
- 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., and 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 Geophysical Research : Solid Earth* (1978-2012), 105(B), 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.

- Nishikawa, H., 2009, Columnar joints and lanscapes. Introduction to the Landform and Geology of Japan.
- 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. L., & Matsmoto, T., 2004, Columnar joint morphology and cooling rate: A starch water mixture experiment. *Journal 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, 東尋坊安山岩質貫入岩体の産状と構造, 52, 13-27.
- <http://ncic.kice.re.kr>: 국가교육과정정보센터
- [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_places\\_with\\_columnar\\_jointed\\_volcanics](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_places_with_columnar_jointed_volcanics): 위키피디아
- [https://marsed.asu.edu/mep/volcanoes/flood\\_basalts](https://marsed.asu.edu/mep/volcanoes/flood_basalts): Mars Education, NASA
- <https://www.flickr.com/photos/>: 플리커
- [http://www.lgoehring.com/M.Sc.\\_files/Goehring\\_MSc.pdf](http://www.lgoehring.com/M.Sc._files/Goehring_MSc.pdf): Dr. Lucas Goehring's Home page





## 감사의 글

먼저 2007년에 대학원에 입학하여 수료 전에 취업하여 7년이란 시간이 지났음에도 불구하고, 부족하기만한 다시 이끌어 주셔서 여러 번의 노력 끝에 본 논문이 완성되기까지 많은 지도와 세심한 배려를 아끼지 않으셨으며, 학부학생 때부터 지금까지 지구과학의 경이로움과 우리나라 지질의 아름다움을 일깨워주신 안건상 지도교수님께 감사드립니다. 그리고 바쁘신 중에도 여러모로 부족한 본 논문을 열성을 다해 심사해주신 심사위원장 박영신 교수님과 심사위원이시자 학부학생 때부터 지질학의 즐거움을 알려주신 신인현 교수님께도 감사의 말씀을 올립니다. 또한, 18년 전의 학부학생 입학면접 때부터 뵈었고, 학부학생과 대학원생을 거치는 시간 동안에 많은 지도와 조언을 아끼지 않으신 김희남 교수님과 류찬수 교수님께도 감사드립니다.

가장 가까이에서는 취업 전선에서 안정되지도 않았는데 저를 믿고 결혼해주었으며, 잦은 이직과 육아, 가사, 뒷바라지로 고생이 많은 아내 장지영에게도 항상 고맙고 사랑한다는 말을 전합니다. 또한, 논문을 쓰고 있다는 이유로 화창한 가을날에도 놀아주지 못한 금쪽같은 내 아들 한결, 딸 한별에게 미안하다는 마음을 전하면서 건강하게 잘 자라달라는 말을 하고 싶습니다. 그리고 낳아주시고 기르는 중에 궂은 뒷바라지도 마다하지 않으셨으며, 현재는 ‘전라도땅’ 운영하느라 매일 새벽같이 일어나 밤늦게 주무시는 어머니 황영자 여사님과 못난 오빠라 해준 것도 없는데 홀로 자신의 길을 개척해가고 있는 여동생 조민화 양에게도 감사의 말을 전합니다. 못난 둘째 사위가 해드린 것도 없는데 찾아뵈면 항상 반갑게 맞아주시고, 장거리 출타로 집을 비울 때면 육아까지 도와주신 장인어른과 장모님께도 감사드립니다.

본 논문이 완성되기까지 오랜 시간 동안 함께 연구 주제를 탐색하고 토론해주었고, 스스로 발표 파는 일도 마다 하지 않았던 주었던 손정모, 최원영 군에게 큰 감사의 말을 전합니다. 그리고 학부학생 때부터 지금까지 교우관계를 유지하며 응원을 마다하지 않았던 안민국, 정희천, 한창규, 조의민, 김영민, 이정준 군에게 감사의 마음을 전하고, 인생의 선배로서 곱고 쓴 말을 마다하지 않았던 강종현 형님, 조현봉 형님께도 감사드립니다. 또한, 산전수전을 함께하다가 이제는 각자의 길에서 최선을 다하고 있는 친구 김영복, 서정호, 이경준 군에게도 고마움을 전하며, 본 논문에 사용된 이미지를 완성하기 위해 거친 스케치를 단정하게 만들어주신 이정준 삽화가와 창비기획의 성숙 팀장님께도 감사의 말을 전합니다.

직장인으로서 석사 과정을 무사히 마칠 수 있도록 많은 이해와 배려를 해주신 해법 에듀 심태완 부문장님과 김태진 팀장님, 천재교육 서강원 차장님께도 감사드립니다. 그리고 또 하나의 교육 현장인 출판사라는 직장에 취업하여 교실에 있지 않아도 현직 교사 못지않은 책임이 있음을 알려주셨고, 사교육 교재 개발자로서 많은 가르침을 주신 비상교육의 양태희, 김희정, 채진희, 오민영 님께도 감사드립니다. 특히 모교의 선배로 취업의 길에 오를 수 있는 기회를 주셨고, 2년 9개월 동안 직장 상사로서 큰 언덕이 되어주셨던 김세희 선배님께 감사드립니다.

더 마지막으로 저를 세상에 태어나게 하셨으며, 남을 부러워하기보다 스스로 당당하게 살아갈 수 있는 용기를 남겨주셨고, 대학원에 진학할 당시 가장 크게 응원해주셨으나 그 빛을 보지 못하신 채 황망한 일 때문에 하늘로 떠나신 아버지께 보고 싶단 말을 전합니다.

이상으로 본 논문이 완성되기까지 조언과 애정을 주신 다른 모든 분께도 감사드립니다. 미처 언급하지 못한 분께도 감사의 말씀 드립니다.