



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](#)

2021년 8월

석사학위 논문

한반도 중부 한탄강 지역의 주상절리 형태분석

조선대학교 일반대학원

지구과학과

김 태 광

한반도 중부 한탄강 지역의 주상절리 형태분석

Morphological analysis of Columnar joints
at Hantangang river in Central Korean Peninsula

2021년 8월 27일

조선대학교 일반대학원

지구과학과

김 태 광

한반도 중부 한탄강 지역의 주상절리 형태분석

지도교수 안 건 상

이 논문을 이학석사학위 신청 논문으로 제출함

2021년 4월

조선대학교 일반대학원

지구과학과

김 태 광

김태광의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	<u>안 경 진</u> (인)
위 원	조선대학교	교수	<u>박 영 신</u> (인)
위 원	조선대학교	교수	<u>안 건 상</u> (인)

2021년 5월

조선대학교 대학원

목 차

I. 서론	
1. 연구 배경.....	1
2. 주상절리 형성이론.....	4
3. 현무암 주상절리 연구 동향.....	11
4. 연구 방법 및 연구 방향.....	13
II. 연구지역의 지질.....	15
III. 주상절리 형태분석.....	36
1. 직탕폭포 주상절리.....	38
2. 송대소 주상절리.....	50
3. 화적연 주상절리.....	60
4. 교동가마소 주상절리.....	67
5. 구라이골 주상절리.....	75
6. 통현리 주상절리.....	83
7. 명우리 주상절리.....	88
IV. 암석화학.....	93
1. 주성분원소.....	93
1) 암석의 분류.....	93
2) 화학조성의 변화.....	100
V. 결론 및 제언.....	104
【참고문헌】	108

List of Tables

Table 1. Columnar joint site with names, geographical location in the study area.....	37
Table 2. Major elemental analyses(wt%) of columnar joints in study area.....	94
Table 3. Major elemental analyses(wt%) of columnar joints in study area.....	95
Table 4. Columnar joint locations with lava flow unit, structure and polygon cross section columnar joints in the study area.....	104
Table 5. Columnar joint locations with scale, upper colonnade, lower colonnade, entablature in the study area.....	106

List of Figures

Figure 1. Location of columnar joints in South Korea(modified of Kim, 2020).	3
Figure 2. A Schematic illustration of colonnade and entablature(Son, 2016).···	4
Figure 3. Schematic formation of cracks at cooling surface on thermal contraction model(modified of Nishiwaki and Hirotsishi, 2009).·····	6
Figure 4. Drying cracks in a mixture of corn starch and water(Nishimoto et al., 2011).·····	7
Figure 5. Schematic drawing of the different geological contexts and geometries of columnar joint(Hetenyi et al., 2012).·····	9
Figure 6. Symbols of columnar joint(modified Hetenyi et al., 2012).·····	10
Figure 7. Location of the study area in Han-tangang.·····	14
Figure 8. Geological map of the study area in Han-tangang.·····	17
Figure 9. Photographs of amphibolite in Samyul-ri.·····	19
Figure 10. Photographs of Misan formation in Sindab-ri.·····	21
Figure 11. Photographs of Jeoksung formation in Yangwon-ri.·····	22
Figure 12. Photographs of Myeongseongsan Granite in Gwanin-myeon.·····	24
Figure 13. Photographs of tuff in Dongnaro-477.·····	26
Figure 14. Photographs of Baek Ui-ri formation in Baek Ui-ri.·····	29
Figure 15. Photographs of Basalt in Sindab-ri.·····	30
Figure 16. Photographs of Basalt in Jangtan-ri.·····	30
Figure 17. Location of the Quaternary Hantangang River Volcanic Field (modified of Kim, 2020).·····	32
Figure 18. Photographs and sketch of columnar joint in Auraji.·····	33
Figure 19. Photographs of vesicle, cave in Hantangang River.·····	34
Figure 20. Photographs of clinker. pillow lava in Hantangang River.·····	35
Figure 21. Microphotographs of rock in JT-01 on Basalt.·····	41
Figure 22. Geology map of the Jik-Tang Fall showing sample location.·····	42
Figure 23. Photograph of columnar joint in Jik-Tang Fall.·····	42

Figure 24. Photograph and sketch of measured columnar joint in Jik-Tang Fall.....	43
Figure 25. Photograph and sketch of measured columnar joint in Jik-Tang Fall.....	45
Figure 26. Percentage(%) of measurement to columnar joint Jik-Tang Fall.....	49
Figure 27. Microphotographs of rock in SD-01 on Basalt.....	52
Figure 28. Geology map of the Song-da-so showing sample location.....	53
Figure 29. Photograph of columnar joint in Song-da-so.....	53
Figure 30. Photograph and sketch of measured columnar joint in Song-da-so.....	54
Figure 31. Photograph and sketch of measured columnar joint in SD-02.....	58
Figure 32. Percentage(%) of measurement to columnar joint Song-da-so.....	59
Figure 33. Microphotographs of rock in HJ-01 on Basalt.....	62
Figure 34. Geology map of the Hwa-jeok-yeon showing sample location.....	63
Figure 35. Photograph of columnar joint in Hwa-jeok-yeon.....	63
Figure 36. Photograph and sketch of measured columnar joint in Hwa-jeok-yeon.....	64
Figure 37. Percentage(%) of measurement to columnar joint Hwa-jeok-yeon.....	66
Figure 38. Microphotographs of rock in GD-01 on Basalt.....	69
Figure 39. Geology map of the Kyo-dong-gamaso showing sample location.	70
Figure 40. Photograph of columnar joint in Kyo-dong-gamaso.....	70
Figure 41. Photograph and sketch of measured columnar joint in Kyo-dong-gamaso.	
Figure 42. Photograph and sketch of measured columnar joint in GD-02.....	73
Figure 43. Percentage(%) of measurement to columnar joint Kyo-dong-gamaso.....	74
Figure 44. Microphotographs of rock in GR-01 on Basalt.....	77
Figure 45. Geology map of the Guraigol showing sample location.....	78
Figure 46. Photograph of columnar joint in Guraigol.....	79
Figure 47. Photograph and sketch of measured columnar joint in Guraigol..	80
Figure 48. Photograph and sketch of measured columnar joint in Guraigol..	81

Figure 49. Percentage(%) of measurement to columnar joint Guraigol.....	82
Figure 50. Microphotographs of rock in TH-01 on Basalt.....	84
Figure 51. Geology map of the Tonghyeon-ri showing sample location.....	85
Figure 52. Photograph of columnar joint in Tonghyeon-ri.....	85
Figure 53. Photograph and sketch of measured columnar joint in Tonghyeon-ri.....	86
Figure 54. Percentage(%) of measurement to columnar joint Tonghyeon-ri.....	87
Figure 55. Geology map of the Mung-woo-ri showing sample location.....	89
Figure 56. Geology map of the Mung-woo-ri showing sample location.....	89
Figure 57. Photograph of columnar joint in Mung-woo-ri.....	90
Figure 58. Photograph and sketch of measured columnar joint in Mung-woori.....	91
Figure 59. Photograph and sketch of measured columnar joint in Mung-woori.....	92
Figure 60. Total alkali vs. SiO ₂ ((wt%) diagram(TAS) with analyses of rocks in study area.....	99
Figure 61. Harker variation diagrams for rocks in study area.....	100

ABSTRACT

Morphological analysis of Columnar joints at Hantangang river in Central Korean Peninsula

Kim, Tae Kwang

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

Department of Earth Science

Graduate School of Chosun University

The lava field of the Hantangang River extends over Yeoncheon-gun, Gyeonggi-do, Pocheon-si and Cheorwon-gun, Gangwon-do, and extends about 110 kilometers, in the central part of the Korean Peninsula. The purpose of this study is to distinguish the units of magma flow observed in the basalt columnar joint based on the morphological analysis study of basalt distributed in the lava zone of the Hantangang River and to interpret the seven columnar joints observed in the region. The research area is Jik-tang Falls, Song-dae-so, Hwa-jeok-yeon, Gyodong Kamaso, Guraigol, Tonghyeon-ri and Mung-uri in the lava zone of the Hantan River. According to the TAS diagram of the principal components of rock in the study area, SiO₂ was 41.22 wt% to 49.93 wt%, and most of the research areas were in the alkali family of the quaternary basalt. In addition, basalt in the study area is mainly gray, with half a meter of semen under the microscope, and half-phase and opitic tissue are observed.

The flow units of magma observed in the columnar joints in the study area were classified based on the presence of stomata between the columnar joints, weathering soil and cavity, clinker, and pillow lava. Columnar joints observed in seven study areas. Using cross sections, the

observed columnar joint sections correspond to the structure of columnar joint and their sizes were investigated. About 10~45 cm cross section of the entablature observed in the Jik-tang fall, Section observed in Song-dae-so is about 10~50 cm in size and robe, The cross section of the robe observed in the Song-dae-so is about 10~50 cm, entablature cross section observed in Hwa-jeok-yeon is about 10~40 cm, The cross section of colonnade observed at Gyo-dong-gamaso is about 40~105 cm, Cross section of colonnade observed in the Guraigol 30~70 cm, The cross section of the entablature observed in Tonghyeon-ri is about 15~40 cm, Observed from the Mung-uri colonnade section is about 60 cm.

columnar joint consists of an upper and lower colonnade and an entablature located in the middle. In this paper, investigate and interpret the morphological differences between colonnade and entablature in Song-dae-so, Tonghyeon-ri, and Mung-uri regions where the columnar joint set is best observed. As a result, the colonnade showed a difference of more than 20cm in width in each region, but the entablature was observed to be about 40cm in all three areas. colonnade vary in cooling speed due to direct magma flow from the external environment such as the surface or air layer during the formation process, while entablature cools at a similar rate with little impact from the scale factors.

This study is the Hantangang River observed in a columnar joints, and define the standard of the structure of a magma flow mechanism to establish the fundamental study on the formation of a will.

국문초록

한반도 중부에 위치한 한탄강 용암지대는 경기도 연천군과 포천시, 강원도 철원군을 걸쳐 분포하며, 그 연장은 약 110km이다. 이 연구의 목적은 한탄강 용암지대에 분포하는 현무암의 형태학적 연구를 기반으로 한탄강 주상절리대에서 관찰되는 용암류의 단위를 구분하고 연구지역에서 관찰되는 7곳의 주상절리 구조를 해석하는 것이다. 연구지역은 한탄강 용암지대 내의 직탕폭포, 송대소, 화적연, 교동가마소, 구라이골, 통현리, 명우리 7곳에서 관찰되는 주상절리대이다. 연구지역 내 암석에 대해 주성분원소 분석을 진행하여 TAS도에 도시한 결과 SiO_2 의 함량은 41.22wt% ~ 49.93wt%로 연구지역 모두 대부분 알칼리 계열의 제4기 현무암에 해당되었다. 또한 연구지역 내 현무암은 주로 회색이며, 현미경 하에서 0.2mm 내외의 감람석 반정이 주를 이루고, 반상조직과 오피틱 조직이 관찰된다.

연구지역의 주상절리대에서 관찰되는 용암류 단위는 주상절리대 층간에 존재하는 기공의 유무, 공동, 클링커, 베개 용암을 기준으로 구분하였다. 또한 연구지역 7곳에서 관찰된 주상절리 단면을 활용하여 관찰된 주상절리 단면이 주상절리대의 어느 구조에 해당하는지 파악하고 이들의 크기를 조사하였다. 직탕폭포에서 관찰한 엔테블러취의 단면은 약 10~45cm, 송대소에서 관찰한 로브의 단면은 약 10~50cm, 화적연에서 관찰한 엔테블러취의 단면은 약 10~40cm, 교동가마소에서 관찰한 컬러네이드의 단면은 약 40~105cm, 구라이골에서 관찰한 컬러네이드의 단면은 30~70cm, 통현리에서 관찰한 엔테블러취의 단면은 약 15~40cm, 명우리에서 관찰한 컬러네이드의 단면은 약 60cm이다.

주상절리는 상·하부 컬러네이드와 중간부에 위치한 엔테블러취로 구성된다. 본 논문에서는 컬러네이드와 엔테블러취의 형태학적 차이를 주상절리 세트가 가장 잘 관찰되는 송대소, 통현리, 명우리 지역에서 조사하고 해석하였다. 그 결과, 컬러네이드는 각각의 지역에서 20cm 이상의 폭 차이를 보였으나, 엔테블러취는 3지역 모두 40cm 내외로 일정한 폭이 관찰되었다. 컬러네이드는 형성 과정에서 용암 흐름이 지표 또는 공기층과 같은 외부 환경의 영향을 직접 받아 냉각속도가 변화하여 다양하게 정출되는 반면, 엔테블러취는 주상절리 세트 규모의 영향을 거의 받지 않고 비슷한 속도로 급냉하여 40cm 내외의 일정한 폭으로 형성된다.

본 연구는 한탄강 주상절리대 용암류의 기준을 정의하고, 한탄강 일대에서 관찰되는 주상절리 구조의 형성 메커니즘을 규명하는 기초연구가 될 것이다.

I . 서론

1. 연구 배경

주상절리는 화산활동으로 인해 형성되는 형태로서, 형성 기작에 따라 다양한 모습으로 관찰된다. 주상절리는 마그마의 분출, 관입, 화산쇄설물의 퇴적과 같은 활동에 의해 초기의 고온 상태인 물질이 냉각하는 과정에서 생성되나(손정모, 2016), 이러한 활동이 모두 주상절리를 만들어 내지는 않는다. 또한 대부분의 사람들은 수직 방향의 균열이 발생한 절리를 모두 주상절리로 인식하는 경향이 있으며, 이러한 절리의 형성 원인을 구분하는 것은 일반인에게 쉽지 않다.

국외에 분포한 주상절리는 스코틀랜드 Fingal's Cave, 미국 캘리포니아 Devils Postpile, 미국 와이오밍 Devils Tower, 북아일랜드 Giant's Causeway 등 여러 곳에 위치해 있으며, 국내에서도 북한지역을 제외한 최소 68곳 이상에서 분포하는 것으로 알려져 있다(안건상, 2014b). 우리나라에 분포하는 주상절리 중 대표적인 곳은 유네스코 지질공원으로도 지정된 무등산 주상절리대, 제주도 대포동 주상절리대, 청송 주왕산 주상절리대 등이 있으며, 그 외에도 남부지역 전역에 걸쳐 잘 알려지지 않은 주상절리가 곳곳에 분포하고 있다(Fig. 1).

그 중 한탄강에 위치한 송대소, 명우리 협곡 등의 주상절리대에서 보여지는 웅장한 아름다움이 가진 매력은 일반인들로 하여금 주상절리가 가진 경관적 요소가 얼마나 대단한 것인지 느끼게 해주고 있다. 한탄강 일대는 2020년 7월 유네스코 지질공원에 지정되었으며, 국내 13개 국가지질공원 중 하나로, 지질학을 연구하는 연구자 및 대학원생 등에게 흥미를 유발할 수 있는 요소가 가득하다. 그러나 한탄강 주상절리대에 대한 설명은 이들의 매력을 표현하고 흥미를 유발하기에 다소 부족하다. 따라서 본 논문에서는 한탄강 주상절리가 형성된 학술적인 근거를 제시하고 교육적 및 경관자원으로서 가치를 높이고자 연구지역으로 선정하였다.

기존의 한탄강 주상절리대에서 관찰되는 용암류 단위는 명확한 근거 없이

외관을 이용하여 판단되어왔다. 그러나 본 논문에서는 용암류 단위를 판단하는 명확한 근거 즉, 용암류 상하 경계부에 대한 자료를 제시하여 이를 구분하고 해석하였다.

다음으로 주상절리 단면의 형태학적 측정을 통해 켈러네이드-엔테블러취-켈러네이드 주상절리대 세트가 관찰되지 않는 한탄강 일대에서 일부 주상절리만 관찰되더라도 측정 데이터를 기준으로 켈러네이드, 엔테블러취 중 어느 구조인지 해석하였다. 또한 주상절리대 세트 구조가 모두 관찰되는 지역을 비교하여 켈러네이드와 엔테블러취의 형태학적 차이를 해석하였다.

이와 같은 해석은 기존 한탄강 주상절리대의 학술적, 교육적 가치를 높이고 학생들을 동반한 답사 과정에서 단순한 주상절리대를 보여주는 것을 넘어 용암류 단위 및 주상절리 형성에 대한 정보 제공 및 과학적 호기심 증진에 기여할 것이다.

주상절리에 대한 체계적인 연구는 최근에서야 이뤄지고 있으며, 지자체에서도 관광자원으로 활용하고자 과학적인 연구를 최근에서야 지원하고 있다.

주상절리는 화산활동의 직접적인 증거이며, 주상절리의 형성과정 및 형태학적 연구는 학술적으로 큰 가치를 보유한다. 또한 화성활동은 2015개정 교육 과정에 근거한 중학교 과학 ‘지권의 변화’에 포함된다. 따라서 주상절리에 대한 연구가 지속적으로 이루어진다면 중등 교육과정 지구과학 분야와 지질학을 전공하는 학생들을 연계하는 교육적 효과도 기대할 수 있다.

본 연구를 통해 교사이자 연구자로서 도심 인근 지역의 학생들에게 지질학적 현상에 대한 관찰 기회를 제공하고, 교사들의 답사 및 탐구용 자료 제작에 도움을 주고자 한다. 또한 한탄강 주상절리대의 형성을 밝히는 실마리를 제공하기 위해 경기도 연천군과 포천시, 강원도 철원군에 위치한 제4기 현무암 주상절리를 연구주제로 선정하였다. 이에 연구지역인 한탄강 일대에서 야외 지질조사를 실시하여 주상절리 단면 형태를 측정하였으며, 주상절리대 내에서 관찰되는 용암류를 구분하고, 암석 샘플의 전암 분석을 통하여 기존 문헌의 암석 화학적 요소를 서로 비교하였다. 또한 한탄강 주상절리에 대한 형태학적 분석을 기초로 하여 한탄강 주상절리의 구조를 정의하고, 용암류를 해석하여 한탄강 주상절리대의 형태학적 연구에 대한 실마리를 제공하고자 한다.



Fig. 1. Location of columnar joints in South Korea(modified of Kim, 2020).

2. 주상절리 형성 이론

주상절리는 화산분출물이 급격하게 냉각하며 굳어질 때 관찰되는 다각형의 기둥으로 그 구조를 크게 2가지로 구분할 수 있다(Fig. 2). 기둥 구조는 상·하부에 뒤엉킴 구조와 일반적인 기둥 모양의 층이 관찰된다. 전자는 엔테블러취(entablature)이며 후자는 컬러네이드(colonnade)이다. 이와 같은 구조의 원인은 냉각속도 차이에 기인한 것으로 알려져 있다.

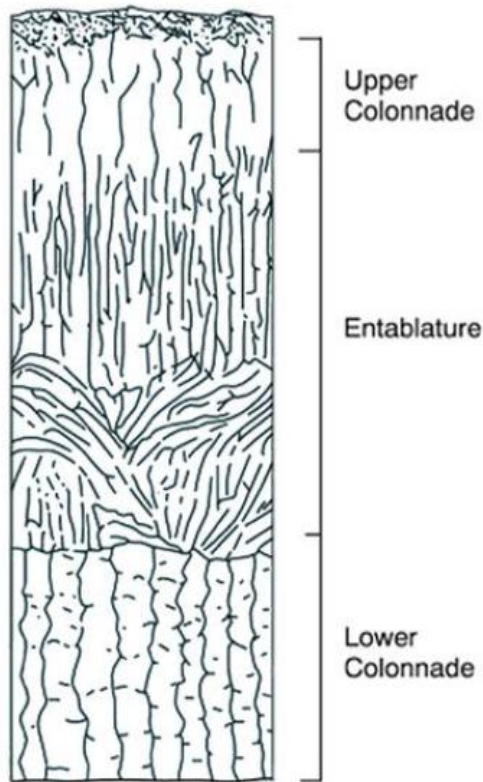


Fig. 2. A Schematic illustration of columnnade and entablature(Son, 2016).

화산분출물이 냉각하는 과정에서 동반되는 열 수축에 의한 응력 해소의 수단으로 주상절리의 균열이 생성된다. 냉각은 시작점으로부터 상대적으로 따뜻한 안쪽으로 진행이 되어간다. 냉각표면에서 수축점은 등간격으로 형성되

며, 중심을 향해 수축 및 고화된다(Fig. 3(a)). 이때 두 수축 중심 사이에 응력이 발생하고 냉각이 점차 진행되면 응력도 함께 증가한다(Fig. 3(b)). 응력은 암석의 인장강도를 초과할 때 해소되며, 균열을 동반한다. 전체적으로 동일한 표면의 상태일 경우, 핵은 같은 거리에서 형성되어 수축하므로 표면에는 별 집 모양의 이상적인 6각형 형태의 균열 전면(fracture front)이 형성된다(Fig. 3(c)). 주상절리가 불연속적으로 성장하면 기둥면에 마디층(striae)이라는 특이한 냉각구조가 형성된다. 이는 수 cm에서 수십cm에 두께를 보이며, 냉각속도가 빠를수록 작아지는 경향이 있다(안건상, 2014b).

화산활동의 대표적 결과물인 주상절리의 형성과정을 해석하기 위한 노력은 끊임없이 진행되어왔다. 주상절리 형성과정을 규명하고자 한 대표 실험은 전분 혼합액을 이용한 건조실험 (Huxley, 1881)이다.

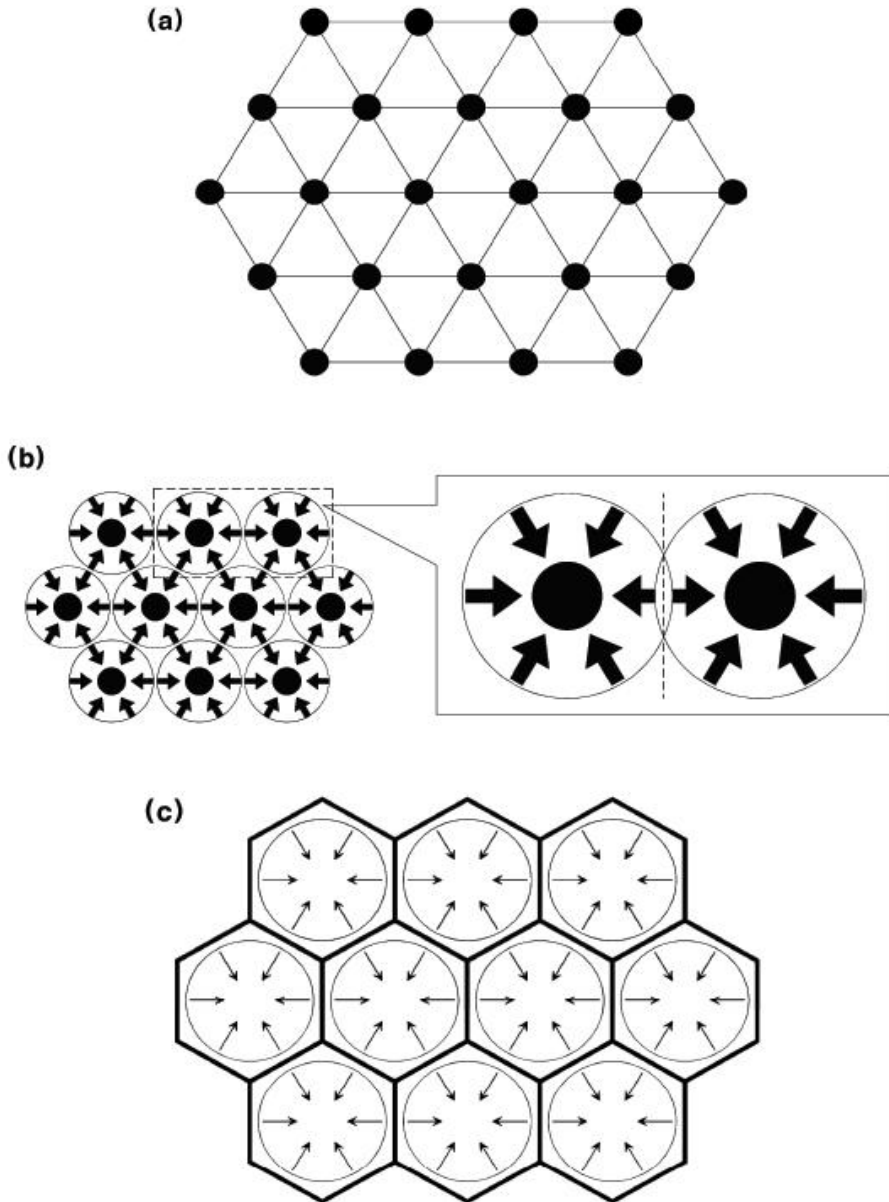


Fig. 3. Schematic formation of cracks at cooling surface on thermal contraction model(modified of Nishiwaki and Hirotsishi, 2009).

전분 혼합액의 건조실험을 응용하여 열원과 거리를 변인으로 설정한 실험을 진행한 결과, 냉각 과정에서 주상절리 기둥 폭의 변화와 엔테블러취 구조가 관찰되었다(Nishimoto et al., 2011; Fig. 4). 이에 앞서 Goehring et al.(2006)과 Goehring(2008)은 램프를 이용한 건조속도를 변인으로 설정하여 주상절리 기둥의 크기 변화를 관찰하였고, 실험 결과 주상절리 기둥 직경과 용암의 냉각 속도 사이의 상관관계를 알아냈다.

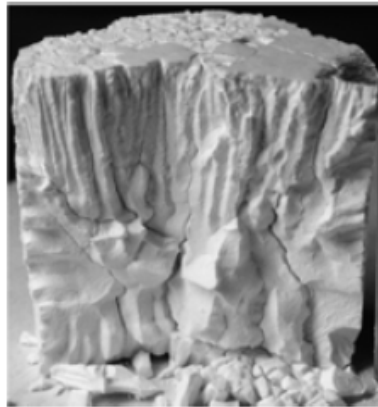


Fig. 4. Drying cracks in a mixture of corn starch and water(height: 5 cm)
 (Nishimoto et al., 2011).

주상절리 기둥 방향은 중력 방향에 무관하게 등온선에 수직으로 생성되며, 용암 내부와 표면은 냉각속도의 차이로 물성이 달라 암석 내부로 가면서 절리의 방향이 휘거나 굽기가 달라진다(안건상, 2014b). 약 10m 이하 두께의 용암류가 냉각될 경우, 지면 또는 공기와 접촉하는 면에 직각 방향으로 주상절리가 형성된다(Fig. 5(a)). 마그마의 점성은 절리의 직경과 패턴에 차이를 유발하는데 용암류의 점성이 큰 경우 끝부분은 호를 이루면서 부채모양의 주상절리를 형성한다(Fig. 5(b)).

또한 10~100m의 두께를 가지는 큰 용암류는 지면과 공기 두 방향에서 냉각이 시작된다. 표면에서 만들어진 절리는 냉각되는 과정에서 내부까지 진행된다. 점성이 큰 용암의 경우 냉각이 전면과 측면에서 이루어져 수평적인 주

상절리가 형성된다. 상하의 냉각표면에서 시작된 절리가 중간에서 만나면 기둥의 두께는 상부와 하부의 열전도가 달라 차이가 발생하는데, 내부에서는 Fig. 5(c)와 같이 상하의 주상절리와 크기 및 방향이 다른 엔테블러처가 발달할 수 있다(Long and Wood, 1986).

주상절리의 형상은 마그마의 화학조성과 휘발성 물질의 함량에 따라 달라질 수 있다. 기둥의 직경(D)은 지질 환경에 따라 달라지는데, 지형에 무관하며 자유롭게 흐르는 용암류의 두께는 화학조성에 따라 달라진다. 그러므로 염기성 마그마는 산성마그마보다 더 얇게 나타난다. 냉각속도는 화학조성보다 기둥의 두께에 더 많은 영향을 미친다. 냉각속도가 느릴수록 두께가 굵어지는데, 용암류의 표면 근처에서는 10~20cm 정도로 가늘고, 중심부에 가까워질수록 50cm~1m의 두께로 굵게 나타난다(Hetenyi et al., 2012).

본 연구에서 사용된 주상절리 형태를 표기한 용어는 Hetenyi et al.(2012)와 Grossenbacher and McDuffie(1995)의 연구를 토대로 정리한 안건상(2014b)의 연구를 참고하여 다음과 같이 정리하고자 한다. 주상절리를 이루는 기둥면의 폭(가로 넓이)은 L, 기둥의 높이는 H, 단면적을 A, 다각형의 수를 N, 최대 직경을 D, 기둥면 사이의 각은 θ 로 표기하며, 필요에 따라 겉보기 직경은 D1-D3로 기재하도록 한다(Fig. 6).

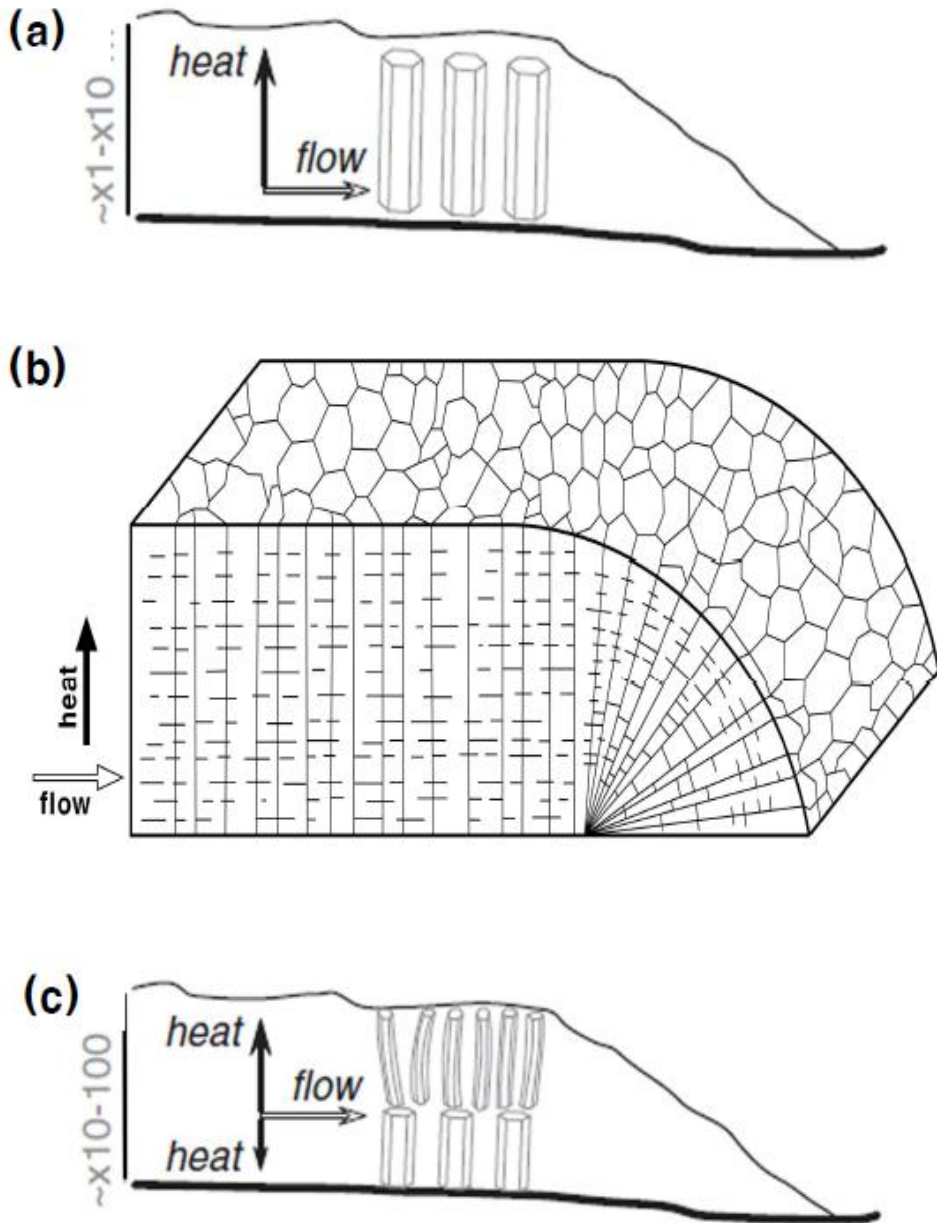


Fig. 5. Schematic drawing of the different geological contexts and geometries of columnar joint(Hetenyi et al., 2012). (a)thin lava flow(low viscosity<10m), (b)thin lava flow(high viscosity, <10m), (c)thick lava flow(10-100m)

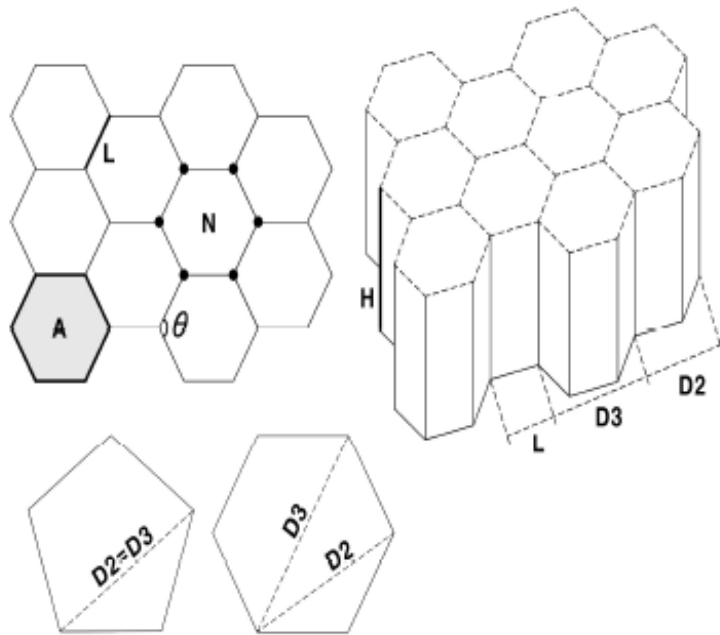


Fig. 6. Symbols of columnar joint(modified Hetenyi et al., 2012).

(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)

3. 현무암 주상절리 연구 동향

세계적으로 분포된 주상절리의 주 구성 암석은 현무암이다. 반면, 주상절리는 화산활동으로 형성된 모든 화산체에서 발견 가능하다. 그리스 Milos Island의 안산암질 주상절리 구조는 Stewart and McPhie(2003)가 분석하였고, 도진보 안산암 관입체의 산출상태와 구조에 관한 연구는 Yoshizawa(2005)가 수행한 것처럼 안산암질 주상절리에 대한 연구 또한 진행 중이다.

주상절리는 크게 형성학적 측면과 형태학적으로 구분하여 연구된다.

형성학적 측면의 연구는 다음과 같다. Huxley(1881)와 French(1922)는 전분과 물을 섞은 혼탁액을 건조시켜 수축되는 과정에서 다각형 기둥을 만들었다. 전분혼탁액을 이용한 실험은 주상절리 형성과정을 이해하기에 매우 유용하므로 최근까지 이와 관련된 연구들이 진행되고 있다. Goehring et al.(2006)과 Goehring(2008)은 이 실험의 변인을 시료 위에 놓인 램프를 이용한 건조속도 조절로 설정하여, 주상절리 직경과 냉각속도 간의 관계를 파악하였으며, 이들의 인과 관계를 분석한 Toramaru and Matsumoto(2004)는 건조속도가 빠르면 단면적이 작아지고, 절리는 건조속도가 임계치에 도달하기 전까지 생성되지 않는다는 것을 규명하였다. 울산시 정자해수욕장과 경주시 읍천리 해안에 분포하는 수평 주상절리의 형태 및 발달 방향 연구 수행한 진광민과 김영석(2010)은 형성 환경에 따른 주상절리 형태를 파악하였다. 울릉도 국수바위 주상절리 연구를 수행한 우현동 등(2013)은 용암 분출 이후의 냉각과정에 대해 고찰하였으며, 고온의 암체가 냉각될 때 보이는 전형적인 온도구배를 광물학적 조직의 차이점을 중심으로 모델링하였다. 안건상(2014a)은 남한에 전반적으로 분포하는 주상절리의 암석학적 특징에 대한 연구를 수행하였다. 또한 무등산 주상절리대의 형성사가 안건상 등(2014b)에서 언급되었다. 손정모(2016)는 한반도 남부 해안에 분포하는 주상절리의 형태학적 분석을 통해 형성 메커니즘을 해석하고자 했다.

형태학적 측면의 연구는 다음과 같다. 제주도 남부 대포동 해안 일대 및 지삿개 주상절리 형태 연구를 수행한 고정선 등(2005)은 다각형의 형태는 육면체가 우세하며, 서로 인접한 다각형 사이의 각도는 $120^{\circ} \sim 129^{\circ}$, 기둥의 최대면 폭은 90 ~ 99cm에서 가장 우세한 분포임을 밝혀내었다. 오강호 등(2006)

은 전남 남서해안에 분포하는 다각형의 형태, 주상절리 기둥의 길이, 주상절리 면 사이 각, 직경과 절리면의 폭 등에 대해 분석하였다. 또한 안건상과 손정모(2016)는 전라남도 고흥 일대에 분포하는 주상절리의 메커니즘 및 형태학적 특징을 연구하였다.

우리나라의 주상절리 분포와 암석학적 연구는 이러한 일련의 연구 과정을 통해 이루어져 왔다. 또한 자연 자체가 탐구의 장인 지구과학의 교과 특성을 반영하여, 주상절리를 지질학습장으로 개발하고 교육적 가치를 부여하는 것에 대한 연구 또한 진행 중이다. 그러나 화성활동 중 하나인 주상절리의 생성에 대한 연구는 전반적으로 미흡하다. 이를 보완하기 위해 안건상(2014b)은 주상절리와 연관된 용어를 명확히 하고 형성과정과 형성 이후 일어난 변화 메커니즘을 추론하기 위한 연구를 시도하였다.

4. 연구 방법 및 연구 방향

연구지역은 경기·강원도 북부지역의 염기성암으로 구성된 주상절리가 관찰되는 한탄강 일대이다. 연구지역은 총 7곳으로 분류된다. 행정구역상으로는 강원도 철원군 내의 동송읍, 갈말읍 일대, 경기도 포천시 내의 영북면, 창수면 중리 일대, 경기도 연천군 내의 고문리, 은대리, 통현리 일대이다(Fig. 7).

한탄강 주상절리의 구조가 가장 잘 관찰되는 아우라지 일대를 기준으로 하여 한탄강 주상절리 세트를 정의하고, 용암류를 관찰하였다.

연구지역에 존재하는 주상절리의 구조 분석을 위해 야외조사를 실시하였으며, 주상절리의 단면이 관찰 가능한 지역에서 그 각도와 크기, 폭을 측정하였고, 주로 관찰되는 다각형의 형태를 정리하였다. 또한 8개의 지점에서 암석을 채취한 후, 박편으로 제작하여 편광현미경 하에 구성 광물 및 조직을 관찰하였으며, 장소에 따라 화학적 분석을 통해 주성분 원소를 파악하였다. 이를 통해 도출한 화학적 분석 자료 및 형태학적 자료를 활용하여 한탄강 일대에 분포하는 주상절리의 구조 및 형태, 크기 등에 대해 분석하였다.

한탄강 일대 주상절리를 구성하는 암석의 화학 분석을 실시하기 위해 경상대학교 공동실험실습관 분석지원실의 파장 분산형 X-ray 형광분석기(Bruker AXS사 WD-XRF, 30kV, 170mA)를 이용하여 주성분 원소를 분석하였다.

한탄강 일대의 주상절리는 신생대 제4기에 분출하여 형성된 현무암 주상절리이며, 연구지역마다 다양한 형태로 관찰된다. 본 연구에서는 한탄강 연구지역에 위치하는 7곳의 주상절리대 용암류 단위를 명확한 기준을 통해 구분하여 해석하고, 다각형 단면 측정을 통해 일부만 관찰되는 주상절리대 구조를 해석하는 기준을 제시하며, 주상절리대를 구성하는 킬러네이드, 엔테블러취의 형태학적 특징을 비교해 보고자 한다.

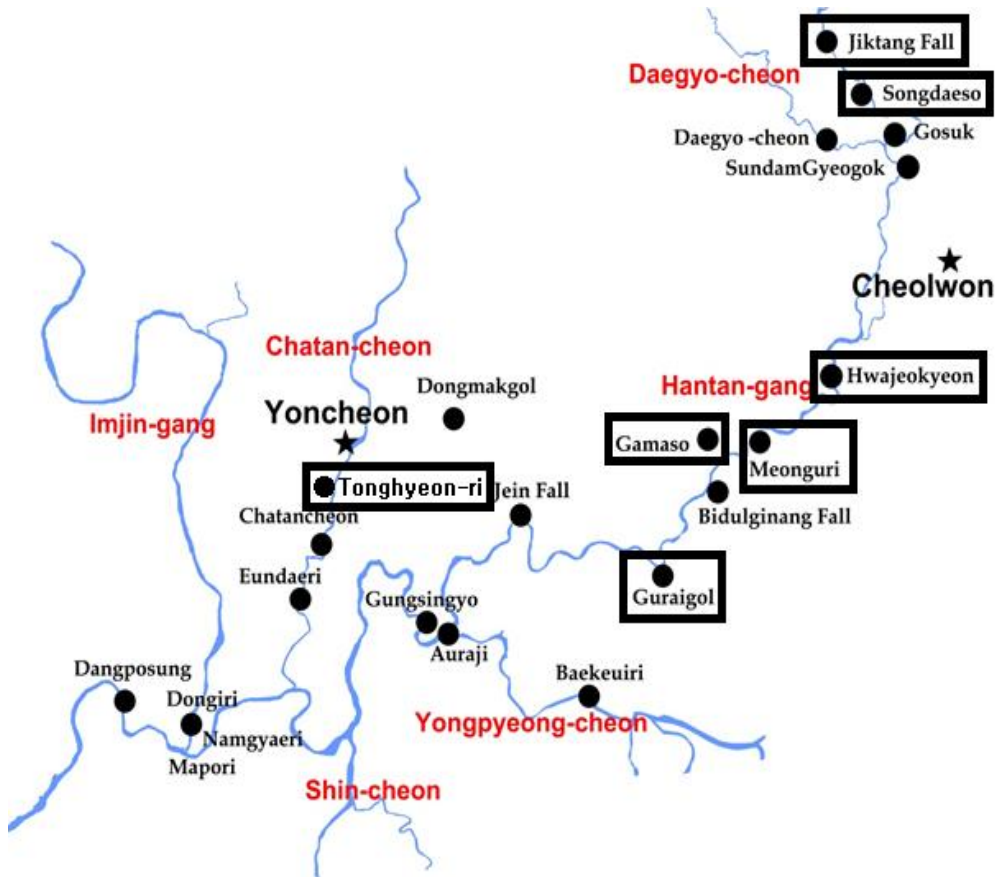


Fig. 7. Location of the study area in Han-tangang

II. 연구지역의 지질

본 연구지역은 한탄강 지류가 흐르는 강원도 철원군 일대, 경기도 포천시 일대, 경기도 연천군 일대이다(Fig. 7). 이 지역은 1:50,000 철원, 연천, 김화, 지포리, 포천도폭에 해당한다.

연구 지역인 한탄강 일대는 지체구조상 추가령 지구대가 통과하는 경기육괴 북서부와 임진강대 남동부의 경계부에 위치한다. 주변의 지질은 크게 선캠브리아대 경기편마암 복합체, 고생대 데본기 연천층군, 중생대 화강암 및 퇴적암, 신생대 제4기 현무암 등으로 구분할 수 있다(Fig. 8).

선캠브리아대 변성암류는 경기편마암 복합체 외에도 고남산각섬암, 감악산 변성섬장암, 엽리상 우백질 화강암 등이 분포한다. 고생대는 연천층군의 미산층, 대광리층, 천덕산층이 분포한다(최위찬 외, 1996; 기원서 외, 2008).

중생대 쥐라기는 김포층군에 속하는 적성층이 대표적이며, 이는 남부에서 변성암류를 부정합으로 덮으며 분포하고, 쥐라기 심성암류는 남동부에서 변성암류를 관입하며 분포한다.

중생대 백악기로 분류되는 명성산화강암은 변성암류 혹은 쥐라기 심성암류를 관입한 형태로 관찰된다. 명성산화강암은 지포리도폭에서 SHIRIMP 저어콘 연대측정에 의해 112 ± 2 Ma의 절대연대를 갖는다고 밝혀졌다(황재하와 김유홍, 2007).

백악기 철원층군 하부에서는 약간의 화산성 퇴적암이 관찰되며, 대부분은 화산암류로 채워져 있다. 이는 상부의 산성 화산암류와 함께 지장봉 산성 화산암류라 묶어 기재하였다(김규환 외 1984).

철원층군에 분포하는 화산암류 전체에 대한 고지자기 연구는 약 83 Ma 전에 분출되었다고 추정하였다(김광호와 송무영, 1995). 층서별로 철원층군의 연대를 알아보면, 궁평층 상부 현무암(좌상마위)의 K-Ar 전암 연대는 94 ± 5 Ma이며, 통현리에서 관찰한 금학산안산암의 K-Ar 전암 연대는 89.5 ± 4.7 Ma(이윤수 외, 2001)이고, 산성 화산암류에서 저콘 피션트랙 연대가 52 ± 2 Ma로 측정되었다(김규환 외, 1984).

백악기 관입암류는 보장산안산암, 화강반암, 산성암맥 등으로 분류된다. 보

장산안산암은 변성암류와 적성층을 관입하며 백악기로 추정된다.

한탄강을 따라 분포하는 제4기 현무암은 영평천 하류와 차탄천 하류 유역을 지나며 용암대지를 이룬다. 전곡 지역 최상위에 위치한 현무암은 K-Ar 전암 연대측정 결과 0.27 Ma로 측정된 바 있다(Choi, 1982). 이 현무암은 대륙지판 내부의 열곡대에서 관찰되는 K-계열의 알칼리암에 해당한다(양교석, 1982; 이대성 외, 1983; 원종관, 1983; 원종관 외, 1990; Wee, 1996).

대표적인 지질구조로는 추가령 지구대를 따르는 북북동-남남서 방향의 담터단층(기원서 외, 2008)과 동송단층(김규환 외, 1984; 이윤수 외, 2001), 동두천단층(김옥준, 1973) 등이 지난다.

한탄강 주변은 편암, 편마암, 각섬암, 화강암, 응회암, 각력암, 현무암 등의 암석이 관찰된다. 이들을 생성 연대를 기준으로 하여 구분하면 다음과 같다.

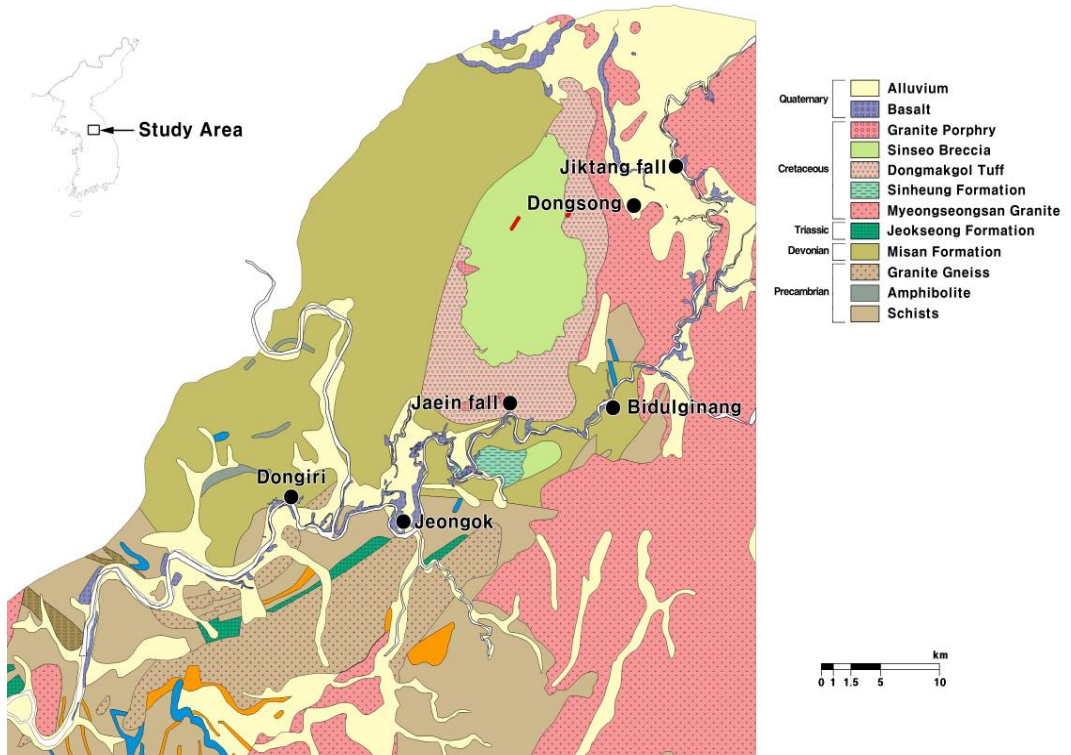


Fig. 8. Geological map of the study area in Han-tangang
(modified of 1:50000 Yeoncheon, Cheorwon Geological map)

1. 한탄강의 지질

1) 편암

편암은 경기육괴를 구성하는 고원생대 지층 중의 하나로서 김옥준(1973)의 장락층군에 속한다. 장락층군 분포지 내에는 신원생대 관입암체(고남산각섬암, 감악산변성암, 화강편마암, 엽리상 우백질 화강암)들이 다수 산출하며, 임진강대의 연천층군과는 단층으로 접하고 있는 것이 수처의 야외노두에서 직접 확인된다(연천도폭 2008).

도폭구역 내의 장락층군은 흑운모편암, 백운모편암, 복운모편암, 견운모석영편암, 석영편암 등의 편암류로 주로 구성되며, 연장성이 비교적 양호한 수매의 규암층과 렌즈상의 회색~유백색 대리암이 협재된다. 그리고 일부지역에

서는 함흑연 석영편암이 산출한다(연천도폭 2008).

편암류는 균질한 판상의 엽리가 뚜렷하게 형성되어 있는 것이 대부분이지만, 일부 지역에서는 미약한 우백대가 불규칙하게 형성되어 있는 것도 관찰된다. 편암은 시료에 따라 구성 광물의 입도와 함량비가 차이가 있으며, 주로 세립 내지 중립질의 석영, 백운모, 흑운모, 알칼리장석, 사장석, 녹니석, 철산화물로 구성된다(연천도폭 2008).

편암층에 협재된 수 개의 규암층은 전곡읍 한탄강 이남 지역 및 미산면 동이리 지역에서 화강편마암의 관입으로 그 연장이 일부 단절되거나 전체적으로 좋은 연장성을 갖는다(연천도폭 2008).

2) 각섬암

각섬암은 연천층군 미산층 중~하부 대부분과 포천시 영북면 및 관인면에 분포하는 고원생대 장락층군에 주로 분포한다. 각섬암 노두는 경기도 포천시 관인면 삼율리 산 181-5 도로변에서 관찰하였다(Fig. 9). 각섬암은 대체로 변성퇴적암의 엽리에 평행 내지 준평행하게 관입한 암상(sill)으로 산출하지만, 미산층 하부 경계부에 산출하는 일부 각섬암은 모암과의 경계가 뚜렷하지 않아 이들의 접촉 관계가 관입 또는 정합적 관계인지가 불분명한 경우도 있다. 각섬암의 입도는 세립질~조립질로 노두에 따라 변화가 크며 세립질인 경우 사장석의 함유량에 따라 녹흑색~녹회색의 변화를 보인다. 석류석 반상변정은 엽리가 발달한 각섬암에서 관찰되며, 반상변정의 크기는 주로 0.5~3mm 이며, 경우에 따라 5mm 이상인 것도 관찰된다(연천도폭 2008).



Fig. 9. Photographs of amphibolite in Samyul-ri.

3) 화강편마암

화강편마암은 연천도폭 지역 남서부의 편암을 관입하며 연천군 미산면 동이리, 전곡읍 고릉리, 청산면 대전리에 분포하고, 일부는 남측의 포천도폭 구역으로 연장된다. 일반적으로 압쇄화강암화된 중립질의 엽리상 화강암이 산출된다. 부분적으로는 알칼리장석이 2~4cm 크기로 관찰된다. 구성 광물은 드물게 석류석이 존재하며, 주로 사장석, 알칼리장석, 석영, 흑운모, 불투명광물 등이 존재한다(연천도폭 2008).

4) 미산층

미산층은 도폭구역 서부를 대부분 차지하고 있는데, 북으로는 연천군 신서면 와초리부터 남으로는 미산면 동이리, 동으로는 군남면 황지리, 연천읍 통현리-고문리, 청산면 장탄리-궁평리-백의리, 포천시 창수면 신흥리-운산리, 관인면 중리에 이르는 넓은 지역에 분포한다. 미산층은 수 cm~수 십 cm 폭의 담회색~담적회색 함흑운모 변성사질암과 수 mm~수 십 cm 폭의 회색~담회색~담녹회색 함투회석 석회질규산염암이 평행하게 교호하는 변성퇴적암이다(연천도폭 2008). 미산층은 경기도 연천군 전곡읍 신담리 궁신교 부근에서 상부 현무암층, 하부 대광리층과 함께 관찰되었다(Fig. 10). 미산층의 변성이질암은 흑운모와 석영으로 주로 구성되어 있고 석류석 반정을 포함하기도 하나, 알루미늄 규산염 광물이 나타나지 않는 점에서 대광리층의 변성이질암과 구분된다. 석류석 반상변정은 흑운모, 석영, 사장석 등을 포유물로 함유한다. 변질을 받은 부분에서는 견운모, 녹니석 등이 나타난다(연천도폭 2008).



Fig. 10. Photographs of Misan formation in Sindab-ri.

5) 적성층

적성층은 연천도폭구역 남부 일대에 분리되어 분포하는 육성기원의 함탄 쇄설성 퇴적층으로 연천탄전(Thomas et al., 1976)을 충전하는 후기 트라이아스기~전기 쥬라기의 김포층군에 속하는 지층이며 문산도폭(최성자 외, 1998)에서 '적성층'으로 명명되었다(연천도폭 2008). 적성층은 경기도 연천군 전곡읍 양원리 산 364에 위치한 지반 공사 지역의 노두에서 중생대 쥬라기 함석류석 화강암체에 의해 관입당한 형태로 관찰되었다(Fig. 11).

육상선상지를 포함한 적성층은 하성-호성환경에서 형성된 함탄 쇄설암층으로, 주로 담회색~암회색 사암, 흑색 셰일, 회색의 역암 등으로 구성된다. 적성층은 중부에 1~3매의 무연탄층을 협재하며 1990년대 초까지 전곡읍 양원리 등지에서 채굴되기도 하였다(연천도폭 2008).



Fig. 11. Photographs of Jeoksung formation in Yangwon-ri.

6) 명성산화강암

명성산화강암은 지포리도폭(황재하와 김유홍, 2007)에서 명명된 화강암체로서 도폭지역 북동부인 관인면 사정리, 초가리, 동송읍 상노리 일대와 남동부인 영중면 영평리, 창수면 오가리 일대에 분포한다. 이 암체는 주로 조립질 괴상의 암체이나 기반암과의 접촉부에서는 냉각 연변과 수 mm 크기의 공동 구조가 관찰되는 것으로 보아 천부 관입암체인 것으로 생각된다(연천도폭 2008). 이는 경기도 포천시 관인면에 위치한 지반 공사 중인 노두에서 관찰하였으며, 폭 약 15m, 높이 약 10m 정도의 크기로 암석 풍화가 진행된 상태로 부서지기 쉬우나, 광물 관찰에는 용이하다(Fig. 12).

최근에 측정된 명성산화강암의 K-Ar 흑운모 연대는 99~101 Ma(윤현수 외, 2006), SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대는 112 ± 2 Ma(황재하와 김유홍, 2007)로 각각 보고되어 인접한 대보화강암류와 다른 백악기 암체임이 밝혀졌다. 연대측정에 이용된 동위원소계와 광물의 폐쇄온도를 고려할 때(저어콘 U-Pb: 700~800°C, 흑운모 K-Ar: 250~350°C), 관입한 이후에 급격한 온도의 하강이 있었음을 알 수 있다(ca. 350°C/10Ma). 주구성광물은 정장석, 사장석, 석영, 흑운모, 각섬석 등이고, 부구성광물로 저어콘, 티타나이트, 금속산화물 등이 있다. 사장석과 알칼리장석은 특징적으로 누대구조를 보이며, 부분적으로 견운모로 치환되었다. 자형의 각섬석이 소량 관찰되며, 암갈색 내지 녹갈색의 흑운모는 부분적으로 녹니석으로 치환되었다(연천도폭 2008).



Fig. 12. Photographs of Myeongseongsan Granite in Gwanin-myeon.

7) 신흥층

신흥층은 철원층군 중에서 최하부층으로서 창수면 신흥리에 소규모 분포하며 미산층 상위에 부정합적으로 놓인다. 신흥층은 하위에 역암대가 분포하고, 주로 담회색~담록회색의 중~조립사암 및 함력사암, 암회색~흑색의 세립사암, 회색~암회색의 세립사암, 이암 및 실트암, 셰일로 구성된다. 이 층은 철원층군 지층들 중 화산성 퇴적물을 전혀 포함하지 않은 유일한 층으로서 본격적인 화산작용 발생 이전에 퇴적된 지층으로 해석된다. 신흥층에서 산출된 화석들에 근거하면, 신흥층의 지질시대는 전기 백악기이며, 퇴적작용은 온대의 담수성 호소환경에서 이루어진 것으로 해석된다(전희영 외, 1995). 신흥층은 경상분지의 진주층에 대비된다(연천도폭 2008). 신흥층 관찰을 위해 경기도 포천시 창수면 고소성리 산 61로 이동하였으나, 군사 보안상의 문제로 모두 촬영이 불가능하였다.

8) 동막골응회암

동막골응회암은 연천읍 와초리를 시작으로 옥산리, 동막리, 고문리를 지나 종자산과 향로봉을 거쳐 관인면 중리 담터계곡까지 넓은 반환상을 이루며 분포한다. 이 암층은 대부분 금학산안산암을 피복하고 고문리에서 미산층을, 중리에서 중리층을 직접 덮는다. 이 암층은 신서각력암에 의해 덮이며 북쪽으로 갈수록 얇아진다. 유문암질의 화학조성을 나타내는 응회암은 주로 회색 내지 회갈색을 띠며, 하부에서는 담회색을 보인다. 또한 소량의 석영 및 사장석 반정과 다량의 부석편 및 소량의 암편을 함유한다. 이 암층에서는 부석편과 샤아드의 용결에 의한 편평화로 생긴 완배열상 석리 및 이에 의한 용결엽리가 흔하게 관찰된다. 용결엽리가 뚜렷한 지역에서는 부석편이 신장되어 평행배열상 석리가 나타난다(연천도폭 2008). 동막골 응회암은 경기 연천군 연천읍 동내로 477 노두에서 관찰할 수 있으며, 육안 관찰을 통해 유리질 암편들이 강한 압력을 통해 렌즈 상으로 변형된 것이 관찰되었다(Fig. 13).

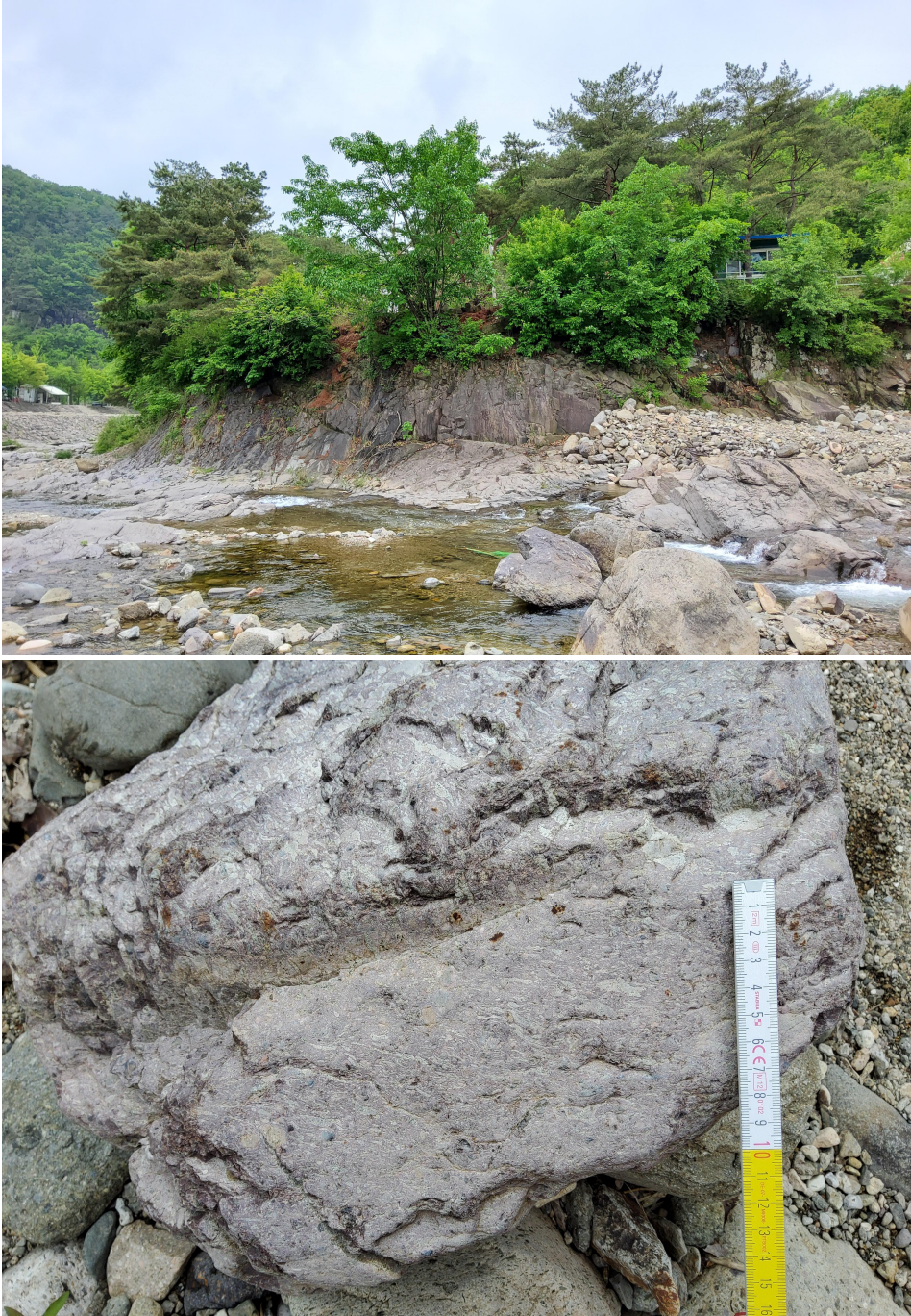


Fig. 13. Photographs of tuff in Dongnaro-477.

9) 신서각력암

신서각력암은 도폭 중북부 신서면 내산리에서 연천읍 동막리를 지나 관인면 담터계곡까지 반원형으로 넓게 분포하며 북쪽 철원도폭으로 넓게 연장된다. 이 암층은 동막골응회암 상위에 놓이고 지장봉응회암에 의해 덮인다. 이 각력암은 안산암, 용결응회암 등의 블록과 라필리에 해당하는 암편을 다량 함유하며 부석을 함유한다. 거력으로는 안산암, 용결응회암, 퇴적암, 편암, 천매암, 대리암, 규암, 유문암 등이 나타나며, 이의 크기는 직경 수 m에서 수십 m이며 수백 m에 달하는 것도 있다. 국지적으로 심원사 동쪽 계곡에는 주로 편암으로 구성된 편암질 각력암이 협재된 경우도 있다. 블록들은 상대적으로 지장봉 부근에서는 용결응회암을, 관인봉 부근에서는 유문암을, 고대산 부근에서는 안산암을 많이 포함한다(연천도폭 2008).

10) 화강반암

화강반암은 소규모 암주로 산출되며 연천읍 통현리 동쪽과 신서면 도신리 남동쪽에 분포한다. 도신리에서는 석영 반정이 풍부하지만 남쪽으로 가면서 석영 반정이 줄어들고 사장석 반정이 많아지는 경향이 있다. 도신리에 관찰가능한 화강반암은 담홍색을 띠며 석영과 사장석 반정을 포함한다. 반정들의 크기는 보통 약 5mm 내외이다. 석기는 주로 석영과 사장석으로 구성되며 세립질의 입상조직을 보인다. 통현리의 화강반암은 담갈색을 띠며 사장석 반정이 우세하고 석영반정은 적게 함유된다. 반정들의 크기는 보통 2mm 내외이지만 8mm에 달하는 것도 있다. 이 반정들은 외측부가 정장석이고 내측부가 사장석으로 둘러싸인 경우가 관찰된다. 석기는 장석과 석영이 세립질 입상조직으로 관찰된다. 그러나 입도가 미정질로 작아질 경우 장석반암으로 점이된다(연천도폭 2008).

11) 백의리층

백의리층은 경기도 연천군 청산면 백의리 일대에서 제4기 현무암 아래 약 60 ~ 90cm 두께로 관찰된다(Fig. 14). 백의리층은 미고결된 하천 퇴적층으로 상부에 배계용암 등과 함께 관찰되며 편암, 편마암, 화강암, 규암 등의 등근 자갈과 모래를 주로 하여 구성되어 있다. 백의리층에서 관찰되는 자갈들의 모습을 통해 과거 한탄강의 흐름 또한 유추할 수 있다.

12) 현무암

현무암은 철원분지 남부의 3지역에 흩어져 분포한다. 장탄리 자살바위에서 산출되는 상부 현무암은 산봉우리부터 하상까지 60m 두께로 산출되며 측방으로 갈수록 얇아진다. 이는 주로 암회색, 회색 내지 암갈색을 띠며 5% 이내의 기공이 관찰된다(황상구 외, 2010; 연천도폭 2008). 제 3기 현무암인 장탄리 현무암은 경기도 연천군 전곡읍 신답리 307 부근에서 관찰하였으며(Fig. 15), 제 4기 현무암은 경기도 연천군 청산면 장탄리 4-3에서 관찰하였다(Fig. 16).

13) 층적층

층적층은 현무암 생성 후에 퇴적된 제4기의 미고결 쇄설성 퇴적층이다. 이 퇴적층은 주로 임진강, 한탄강, 차탄천 주변에 비교적 넓은 분포를 보인다. 또한 연천과 전곡 사이의 용암대지 위에 비교적 얇게 덮여있는 층적층을 전곡층이라고도 한다(원종관, 1983). 이 층은 하천 범람원 퇴적층으로 고기 하천을 때운 용암대지가 형성된 직후에 후기 하천이 발달하기 전 만들어졌다. 산간 곡저 및 평야지에 발달하는 층적층은 모래, 점토, 자갈로 구성되며 구성비는 지역마다 큰 편차를 보인다(연천도폭 2008).

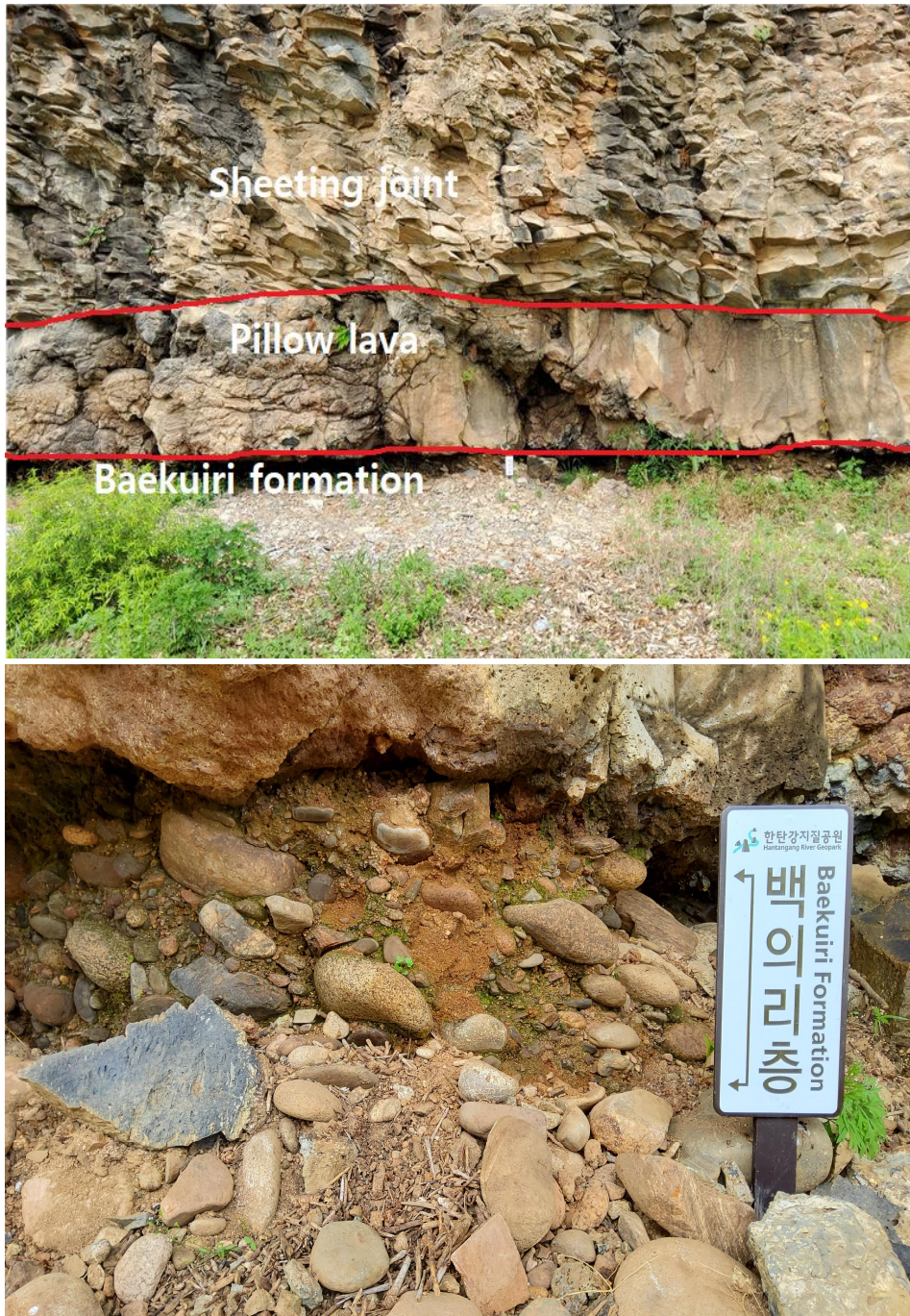


Fig. 14. Photographs of Baek Ui-ri formation in Baek Ui-ri.



Fig. 15. Photographs of Basalt in Sindab-ri.

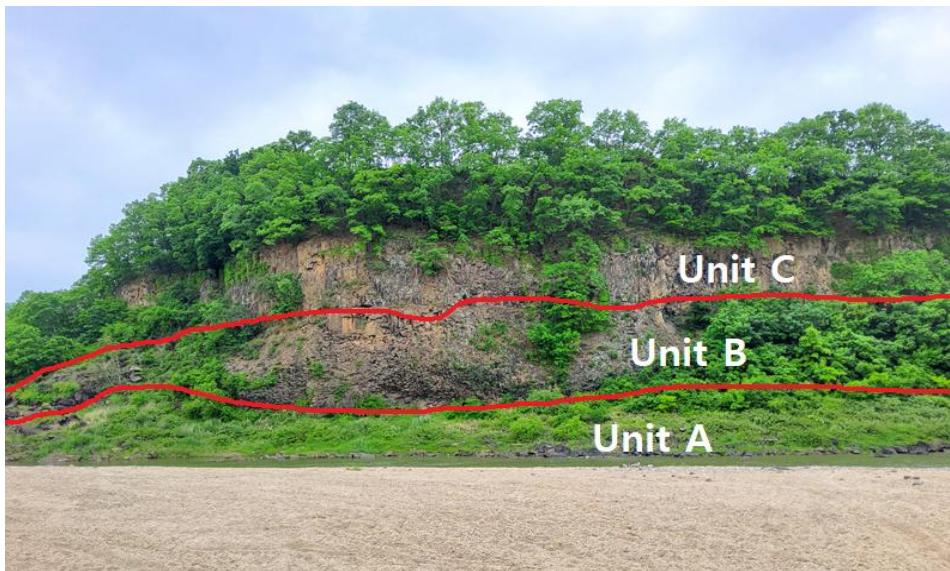


Fig. 16. Photographs of Basalt in Jangtan-ri.

2. 용암대지

한탄강 용암대지는 한반도 중부에 위치한 오리산과 680m 고지를 중심으로 발원하였으며, 북한에서부터 DMZ를 가로질러 약 110km 흘렀다(Fig. 17). 한탄강 용암지대의 흐름은 한반도 남부의 중북부 방향으로 형성된 한탄강 계곡을 따라 형성되어 있다.

한탄강 유로 중 하나인 아우라지는 한탄강에서 관찰할 수 있는 전형적인 주상절리의 모습인 켈러네이드-엔테블러취-켈러네이드의 구조가 모두 관찰된다(Fig. 18). 본 논문에서는 이와 같은 주상절리 구조를 기준으로 하여 연구지역에서 관찰되는 7곳의 주상절리를 해석하고자 한다. 용암류 단위는 기공, 공동, 클링커, 베개용암 등의 관찰여부를 기준으로 하여 구분하고 정의하였다(Fig. 19, 20). 주상절리대 층간에서 발견되는 기공, 공동은 초기 용암이 흐른 후 생성되기까지 충분한 시간적 간격이 필요한 산물이므로, 추후 발생한 용암과 다른 흐름으로 해석하는 근거가 된다. 주상절리대 층간에서 발견되는 클링커는 하나의 용암류 내 상하부의 이동속도 차이로 대기와 접한 용암 상부가 냉각되어 용암 하부 흐름에 비해 느려질 때, 용암 상부 흐름이 둥글게 뭉치며 굳어지고 부서져 형성되는 상부 파편으로 서로 다른 용암류 단위라 해석하는 근거가 된다. 주상절리대 층간에서 발견되는 베개 용암은 용암과 물이 만날 때 형성되는 산물로 주로 기반암과 주상절리대의 경계에서 관찰되며, 서로 다른 흐름 단위로 해석하는 근거가 된다.

아우라지에서 관찰된 주상절리는 높이 약 12m이며 대광리층 위에 분포한다. 아우라지는 베개용암으로 잘 알려져 있으며, 문화재청에도 등재된 바 있다. 아우라지 일대는 용암 흐름이 한탄강 유로를 따라 흐르며 물과 접촉하여 베개용암을 형성하였고, 후에 흘러온 용암은 물이 존재하지 않는 지면에서 냉각한 모습으로 관찰된다. 지면과 맞닿은 용암은 급냉하여 표면부터 고화되었고, 후에 흘러오는 용암 흐름은 고화된 용암과 마찰하며 전단응력을 발생시켜 현재의 관상절리를 형성하였다.



Fig. 17. Location of the Quaternary Hantangang River Volcanic Field(modified of Kim, 2020).

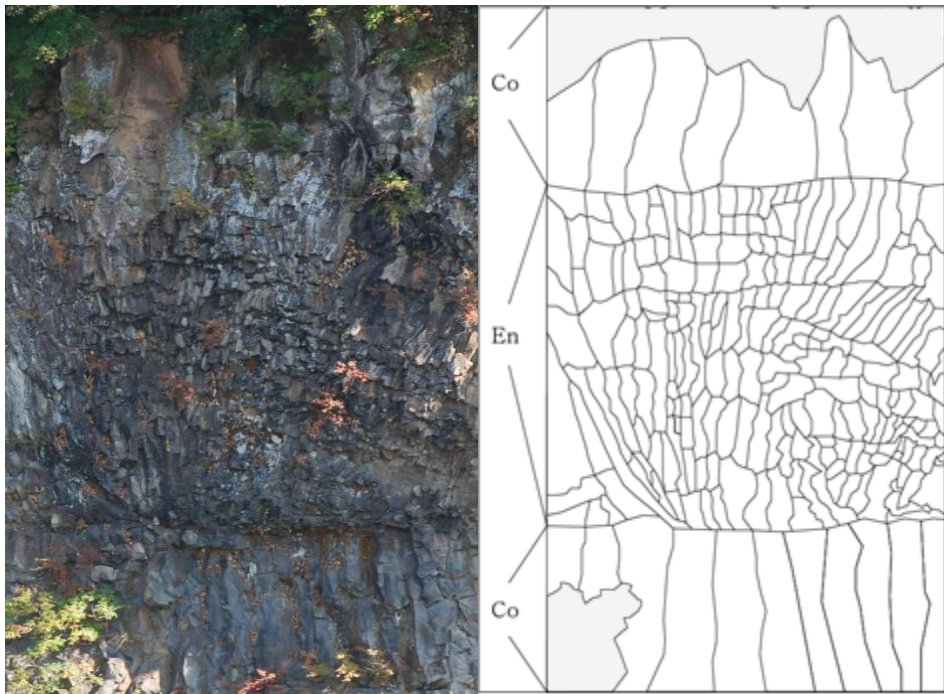


Fig. 18. Photographs and sketch of columnar joint in Auraji.



Fig. 19. Photographs of vesicle layers, cave weathered in Hantangang River.

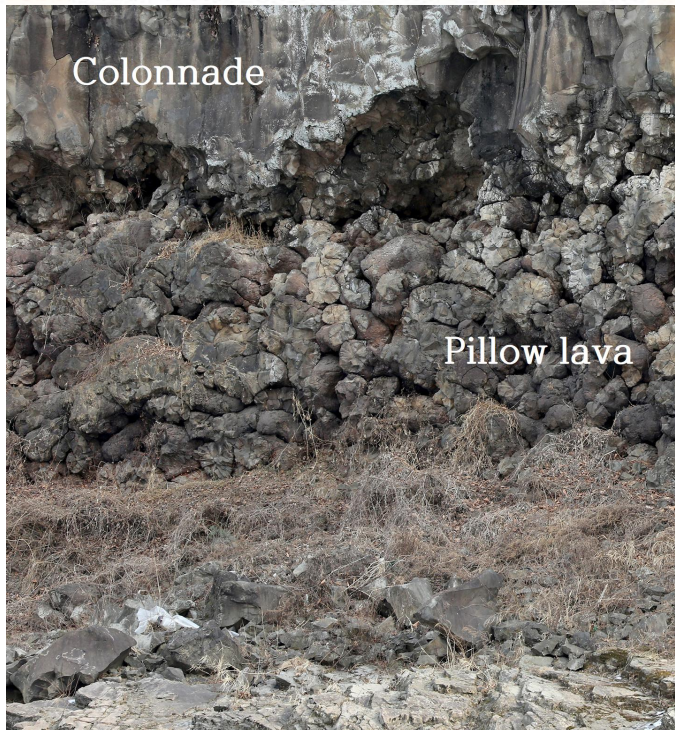


Fig. 20. Photographs of clinker, pillow lava in Hantangang River.

III. 주상절리 형태분석

주상절리 형성을 설명하는 대표적인 모델은 열 수축 모델이다. 용암은 냉각 과정에서 균열이 발생하며, 이는 표면에서부터 중심부를 향해 벌집 모양으로 형성되는 특징을 갖는다. 이러한 특징은 에너지 소모를 최소화하기 위한 과정으로 2차원적 선상 균열 당 스트레스 방출이 6각형 패턴을 보일 때가 가장 많다(Mallet, 1875). 주상절리는 주변 지형, 용암의 점성, 냉각 속도 등에 의하여 다양한 모습으로 발달한다. 화산암의 크기와 산출상태에 따라 Hetenyi et al.(2012)는 단일 용암류 형태, 두꺼운 용암류 형태, 용암호 형태, 용암돔 형태, 암맥상 형태로 분류하였다.

주상절리는 형성적 측면에서 기둥면의 폭(L), 다각형의 수(N), 기둥면 사이의 각(θ)을 이용해 분류가능하다. 전분혼탁액 실험을 통해 냉각 속도에 따라 다각형의 수가 변화되는 결과를 관찰할 수 있다. 냉각속도에 따라 주상절리 모양을 구분하자면, 빠른 냉각이 이루어지는 표면 부분에서는 5각형 이하의 모양이 많고 기둥면 사이의 각 중 90°가 가장 많으며, 느린 냉각이 이루어지는 내부의 경우 6각형 모양과 120°에 가까운 각이 주로 관찰된다(Toramaru and Matsumoto, 2004).

이와 같은 경향성은 주상절리 기둥면의 폭에서도 발견할 수 있다. 현재까지 진행된 연구를 참고하면 낮은 냉각률을 갖는 주상절리의 경우 넓은 기둥 모양을 형성하며, 높은 냉각률을 갖는 주상절리의 경우 좁은 기둥 모양의 경향이 나타난다.

기둥면 사이의 각도 또한 냉각률의 영향을 받는다. 대기와 맞닿은 상부 표면부터 냉각이 진행되며 수축과 동시에 균열이 생성되어 블록 형태가 만들어진다. 이 블록은 최소 에너지를 소모하기 위해 3개의 균열로 나누어진다.

따라서 주상절리 형태 분석을 위해 본 연구지역에서는 야외조사 시 주상절리 노출면에 한하여, 다각형의 수(N)와 기둥면 사이의 각(θ), 기둥면의 폭(L)을 측정하였고, 단면 관찰이 어려운 곳에서는 기둥면의 폭(L)을 측정하였다. 그리고 한탄강 일대에 분포하는 주상절리의 노두 관찰, 수치 측정, 샘플 채취가 이뤄진 지역에 대해 Table. 1로 나타내었다.

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

Site name	Latitude	Longitude	Administrative district
JT-01	N38°20'99"	E127°26'58"	Jangheung-ri, Cheorwon-gun
JT-02	N38°20'97"	E127°26'58"	Jangheung-ri, Cheorwon-gun
JT-03	N38°20'95"	E127°26'60"	Jangheung-ri, Cheorwon-gun
SD-01	N38°20'02"	E127°27'77"	Sangsa-ri, Cheorwon-gun
SD-02	N38°20'05"	E127°27'79"	Sangsa-ri, Cheorwon-gun
SD-03	N38°20'00"	E127°27'80"	Sangsa-ri, Cheorwon-gun
SD-04	N38°19'99"	E127°27'81"	Sangsa-ri, Cheorwon-gun
HJ-01	N38°11'53"	E127°26'37"	Seil-ri, Pocheon-si
HJ-02	N38°11'55"	E127°26'40"	Seil-ri, Pocheon-si
GD-01	N38°09'91"	E127°21'01"	Jung-ri, Pocheon-si
GD-02	N38°09'89"	E127°21'02"	Jung-ri, Pocheon-si
GR-01	N38°06'08"	E127°20'07"	Unsan-ri, Pocheon-si
TH-01	N38°07'45"	E127°06'86"	Tonghyeon-ri, Yeoncheon-eup

* is measured columnar joint

1. 직탕폭포 주상절리

직탕폭포는 1:50000 지질도폭 중 김화도폭에 해당하는 지역으로 강원도 철원군 동송읍 장흥리(경도 127.15.56E, 위도 38.12.34N)에 위치한다. 직탕폭포 일대의 신생대 제4기 지층은 고기하성층으로 구성되어 있으며 하천의 양안과 상부면은 모두 현무암이며, 하부 기반암층은 화강암으로 구성되어 있다. 도폭 서남부 지역인 갈말읍 삼성리 풍진 지역과 내대리와 상사리, 동송읍 장흥리 한탄강변에 수직 절벽 형태로 노출되어있는 대상 지역의 제4기 현무암은 층적층에 피복된 형태로 분포한다. 이 현무암과 추가령 열곡대에 관한 연구는 이대성 외(1983), 김규한 외(1984), 원종관 외(1990), 이형호 외(1992), Wee(1996), 송무영 외(1998), 이윤수 외(2001) 등에 의해 많은 암석학적, 구조 지질학적 연구가 이루어진 바 있다. 직탕폭포에서 관찰되는 현무암은 치밀 혹은 다공질의 암회색 “Alkali olivine basalt”로서, 감람석, 단사회석, Fe-Ti 산화광물의 반정, 같은 종류의 광물과 사장석의 미반정, 그리고 사장석 레쓰가 주를 이루는 석기로 구성된다(한국지질자원연구원, 김화도폭 지질보고서, 송교영 등, 2007). 직탕폭포 일대에서 채취한 암석 박편 사진을 보면 주 구성 광물은 사장석, 휘석, 감람석 등이며 서브오피틱조직을 관찰할 수 있다(Fig. 21). 사장석은 알바이트 쌍정이 잘 관찰된다.

또한 주변의 고기하성층은 근남면 육단리와 잠곡리 사이의 남북방향 하천가에 하안단구로 판단되는 지형적으로 편평한 대지 위에 분포하며, 층적층은 도폭 중부 남대천과 서부 한탄강 주변부 일대의 평야 지대에 매우 광범위하게 분포한다(한국지질자원연구원, 김화도폭 지질보고서, 송교영 등, 2007).

김화도폭에서 발견되는 제4기 층적층은 중부 남대천과 서부 한탄강 주변부 일대의 평야 지대에 광범위하게 분포한다. 한탄강 주변의 층적층은 현무암 용암대지 위를 비교적 얇게 덮으며 분포한다. 층적층의 대부분은 사질물 또는 역질로 이루어져 있으며 점토질 물질은 이에 비하여 소량 분포한다.

직탕폭포 일대에서는 화강암으로 구성된 기반암 위에 분포하는 현무암 주상절리 윗면을 관찰하였으며, 사각형에서 거의 원형에 이르기까지 불규칙한 다각형이 나타난다. 그 크기는 한 변이 수 cm에서 수십cm에 이른다.

이 지역의 주상절리는 직탕폭포에서 태봉대교까지 약 550m에 걸쳐 분포하

며, 수직 방향의 켈러네이드 구조가 주로 관찰된다.

Fig. 22은 직탕폭포와 태봉대교 사이에서 기반암인 화강암을 피복하는 주상절리 단면구조를 잘 파악할 수 있는 곳을 도시한 것이다. 직탕폭포에서 관찰되는 주상절리대는 화강암을 기반암으로 하고 높이 약 8m이며, 1개의 용암 흐름으로 정의할 수 있다(Fig. 23). 주상절리는 하부 켈러네이드와 엔테블러취로 구성되며, 상부 켈러네이드는 풍화되어 관찰되지 않는다. 수면 아래 위치한 하부 켈러네이드의 높이는 약 2m이고, 엔테블러취는 약 6m이다. 이러한 구성은 상부 켈러네이드가 풍화된 형태이며, 용암류 단위를 정의하기 위한 기준 증거가 관찰되지 않았으므로 1개의 용암류로 해석된다. 하부 켈러네이드는 대부분 수면 아래에 위치하며 전체적인 주상절리 세트 구조에서 얇은 두께로 관찰되는 반면, 엔테블러취는 절반 이상을 차지한다. 내부에서는 클링 커나 기공이 관찰되지 않았다. 또한 관찰된 엔테블러취의 다각형 단면의 변은 약 10~45cm의 크기이다.

주상절리 측정은 2곳에서 총 32개의 단면을 1곳에서 측면 형태를 조사하였다.

JT-01 지역의 주상절리 다각형의 수(N)는 5각형이 71%, 6각형이 29%로 5각형이 절반 이상 차지한다(Fig. 24(a)). 단면 사이 내각(θ)은 61°~70°가 3%, 71°~80°가 5%, 81°~90°가 11%, 91°~100°가 22%, 101°~110°가 13%, 111°~120°가 11%, 121°~130°가 19%, 131°~140°가 13%, 141°~150°가 3%의 빈도율로 91°~130°가 65%로 절반 이상을 차지하고 있다.

JT-02 지역의 주상절리 다각형의 수(N)는 4각형이 20%, 5각형이 60%, 7각형이 20%로 5각형이 절반 이상 차지한다(Fig. 24(b)). 단면 사이 내각(θ)은 71°~80°가 4%, 81°~90°가 8%, 91°~100°가 26%, 101°~110°가 20%, 111°~120°가 26%, 121°~130°가 8%, 131°~140°가 4%, 141°~150°가 4%의 빈도율로 91°~120°가 72%로 절반 이상을 차지하고 있다.

JT-03 지역의 기둥면의 폭(L)은 대부분 30~60cm내에 분포한다(Fig. 25(d)).

JT 지역의 측정값을 종합적으로 나타내면 다각형의 수(N)는 5각형이 가장 높은 빈도율을 보이며, 단면 사이 내각(θ)은 91°~130°가 가장 높은 빈도율을 보인다(Fig. 26).

주상절리의 단면은 다양한 크기의 형태로 정출된다. 주상절리의 형태는 외부 요인이 없을 경우, 용암의 냉각속도와 연관 있으며, 용암의 초기 온도가 낮은 경우 지표와의 온도차가 크지 않기에 서서히 냉각하여 큰 모양의 주상절리로 정출된다. 반면 초기 용암의 온도가 상대적으로 고온인 경우 지표와의 온도차가 크므로 급하게 냉각되어 비교적 작은 주상절리의 단면으로 정출된다. 그 외에도 JT-02 지역에서 추가적으로 관찰된 주상절리 단면은 다음과 같다(Fig. 25(a),(b),(c)).

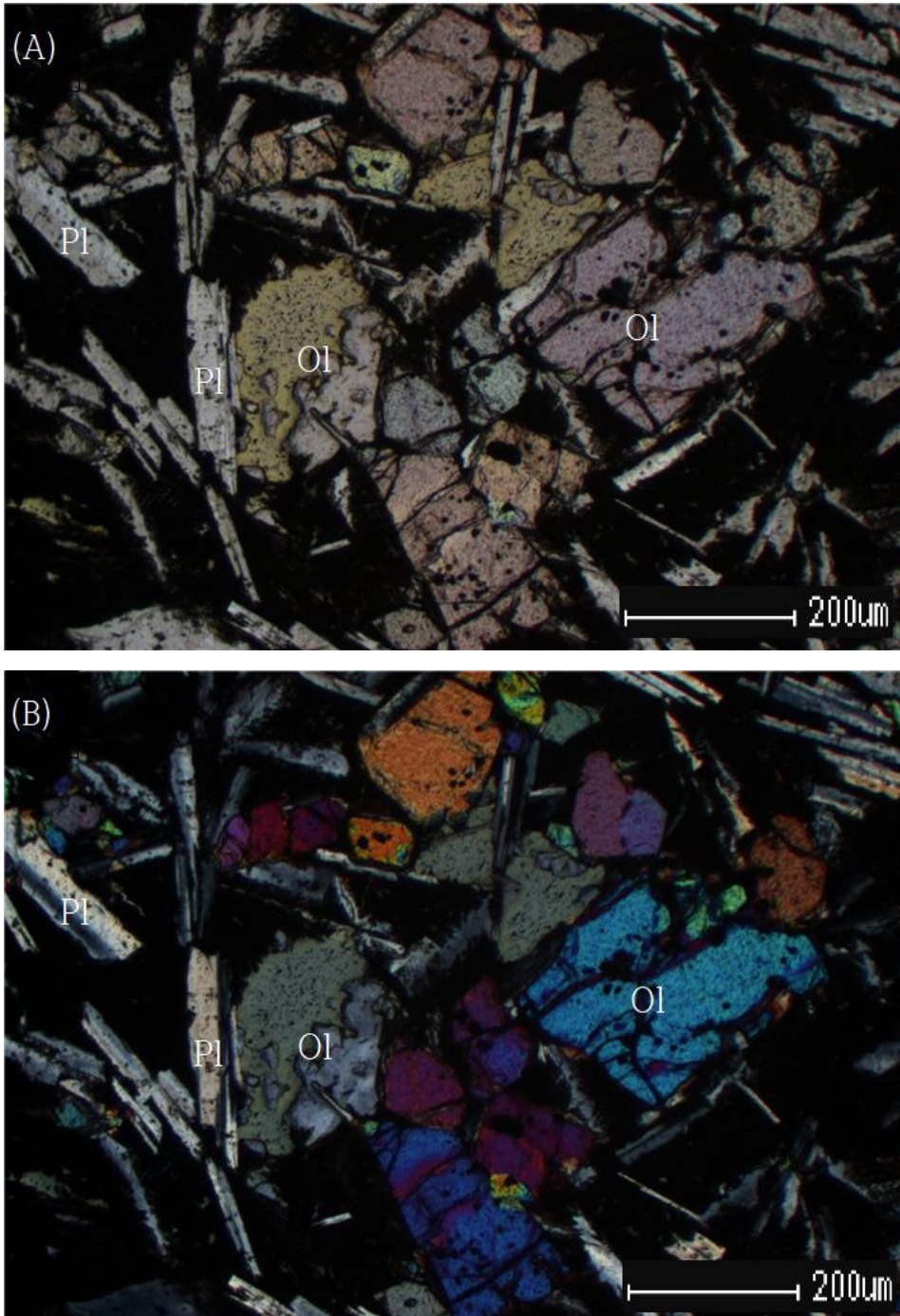


Fig. 21. Microphotographs of rock in JT-01 on Basalt.
(A): open nicol (B): cross nicol.

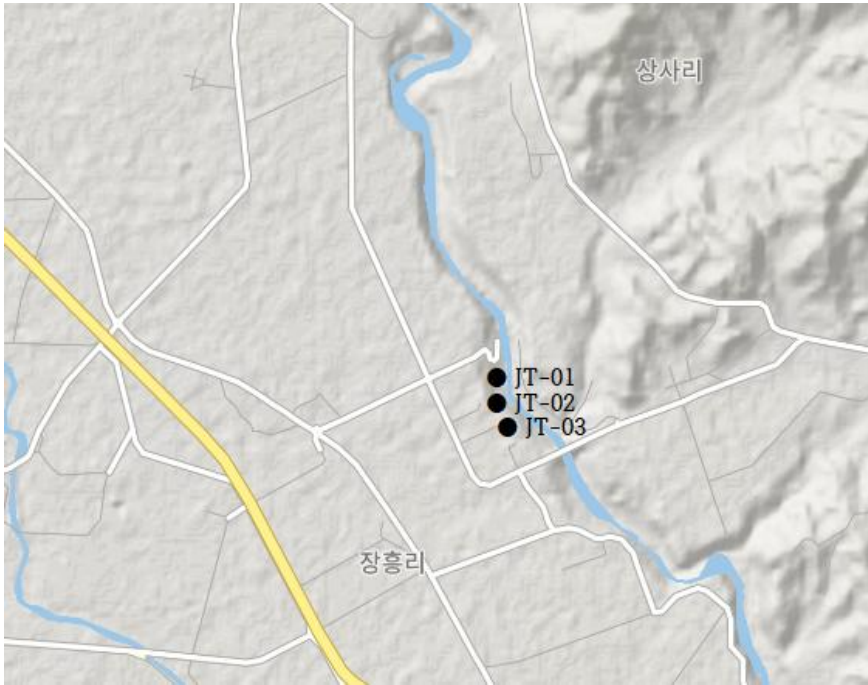


Fig. 22. Geology map of the Jik-Tang Fall showing sample location.



Fig. 23. Photograph of columnar joint in Jik-Tang Fall.

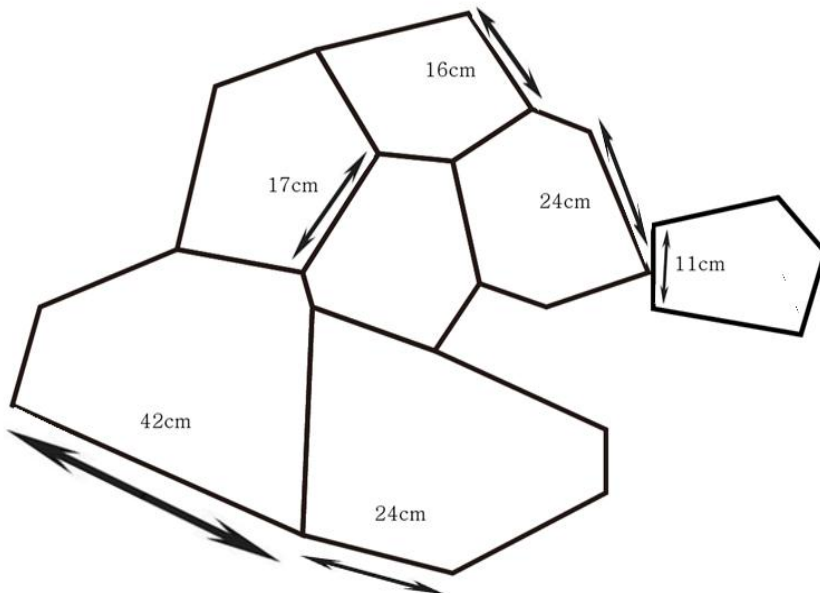


Fig. 24. Photograph and sketch of measured columnar joint in Jik-Tang Fall. (a): JT-01, (b): JT-02

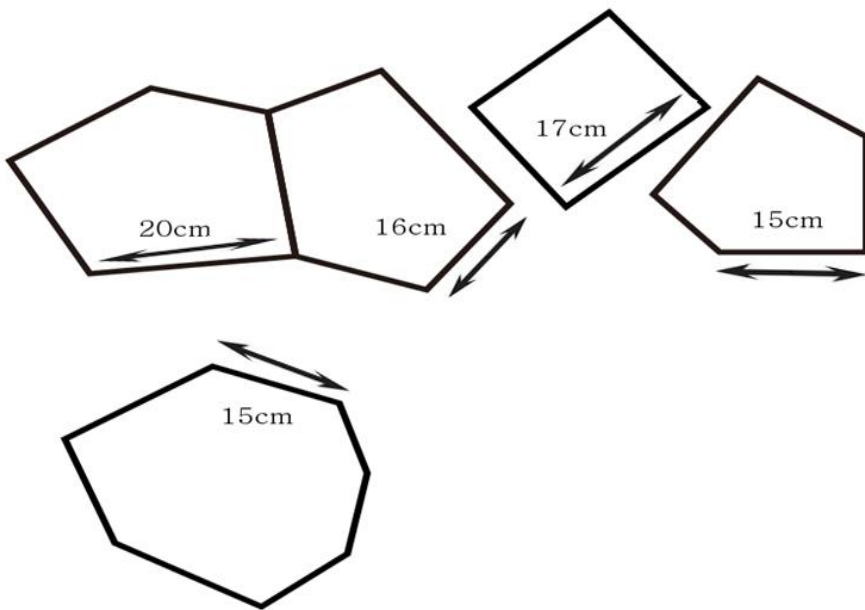


Fig. 24. Continued.

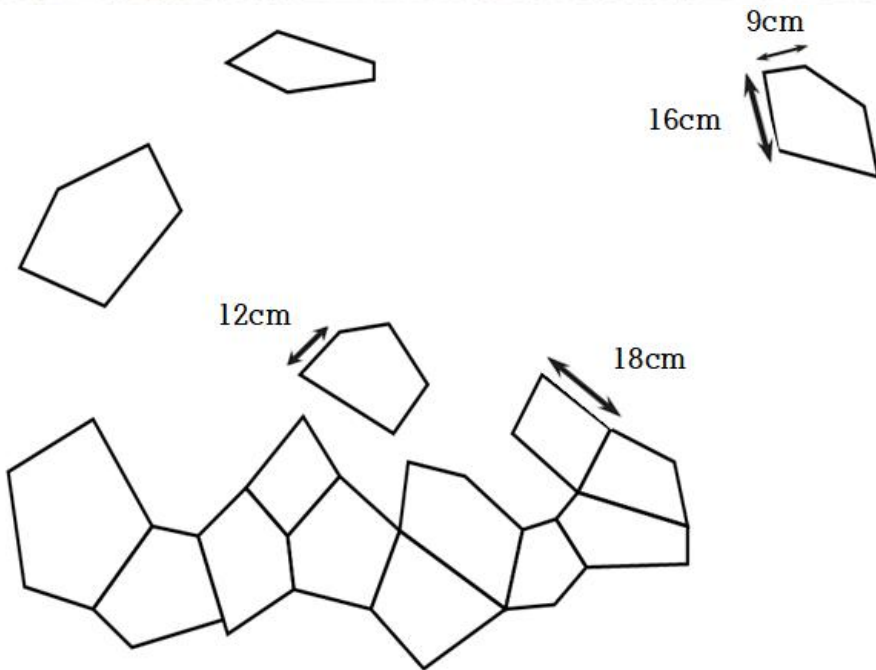


Fig. 25. Photograph and sketch of measured columnar joint in Jik-Tang Fall. (a), (b), (c): JT-02, (d): JT-03

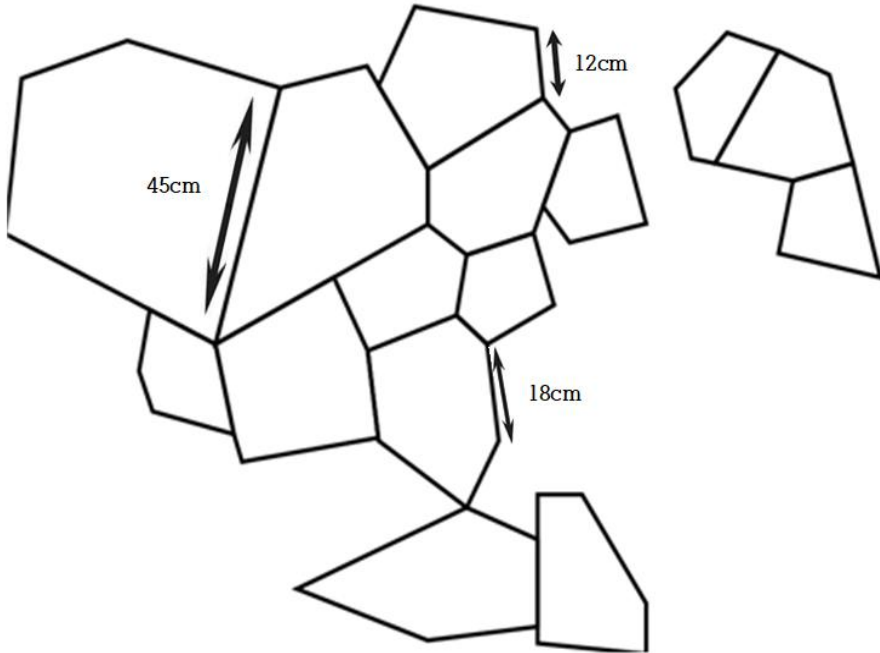


Fig. 25. Continued.

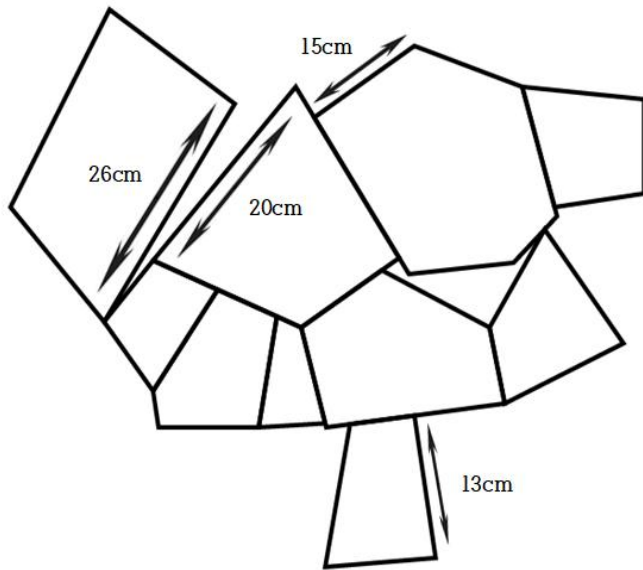


Fig. 25. Continued.

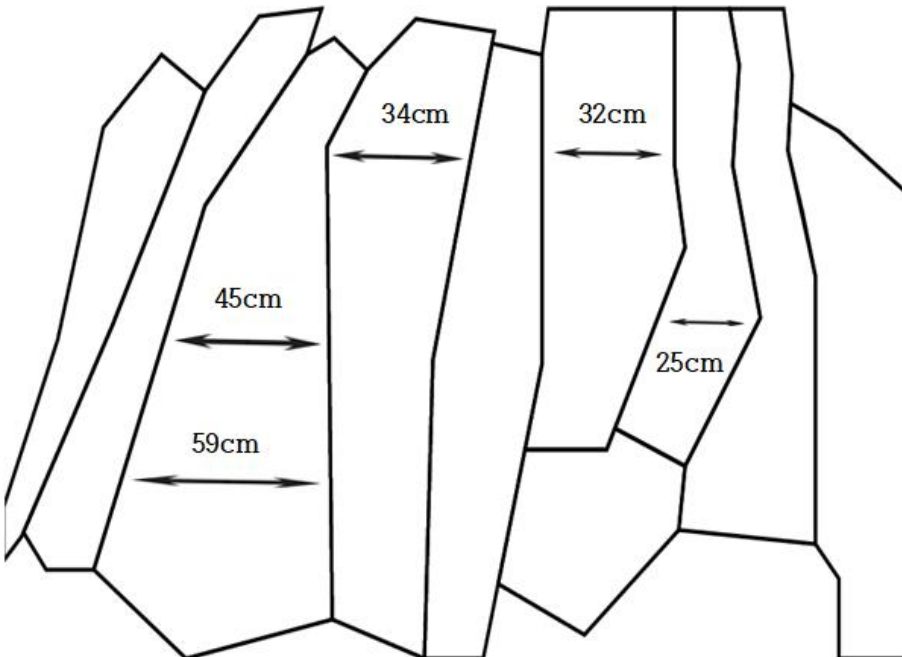


Fig. 25. Continued.

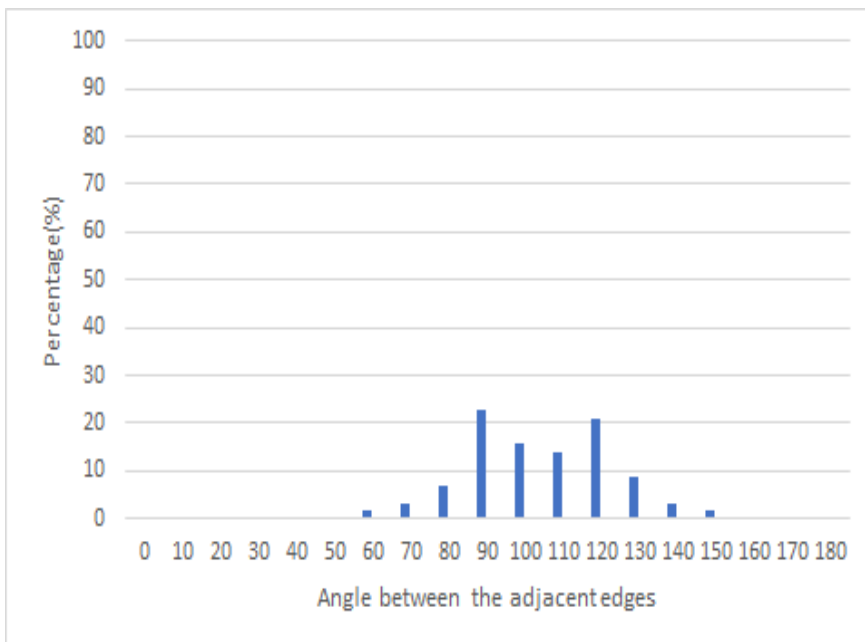
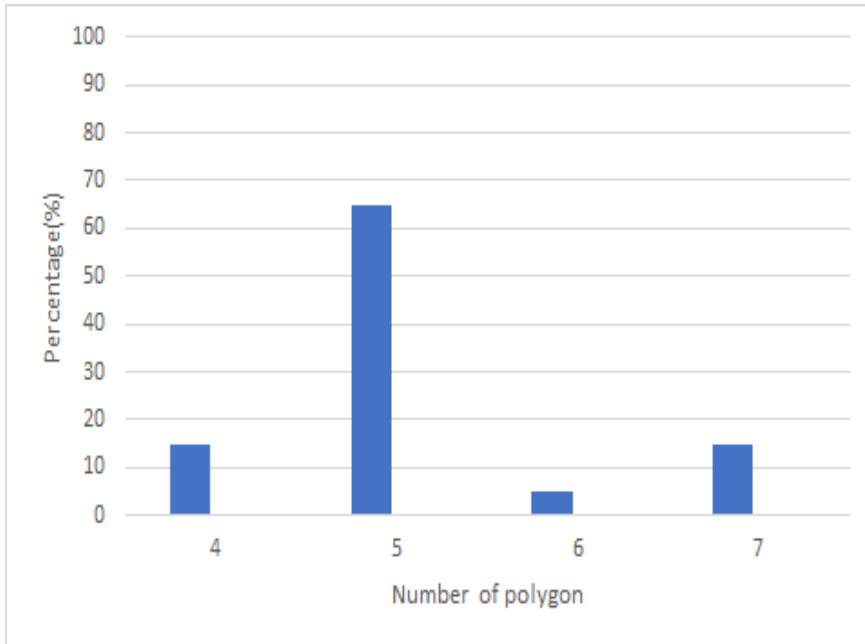


Fig. 26. Percentage(%) of measurement to columnar joint Jik-Tang Fall.

2. 송대소 주상절리

이 지역의 주상절리는 직탕폭포에서 내려오는 한탄강 줄기를 따라 양쪽에 넓게 분포한다. 주상절리를 구성하는 암석은 제4기 현무암으로 기재되어 있으며 기반암은 화강암으로 이루어져 있다. 송대소 일대에서 채취한 암석 박편 사진을 보면 주 구성 광물은 사장석, 휘석, 감람석 등이며 서브오피틱조직을 관찰할 수 있다(Fig. 27). 사장석은 알바이트 쌍정이 잘 관찰된다.

또한 주상절리는 한탄강을 따라 수직 절벽을 이루고 넓은 평야 지대에 충적층에 피복되어 분포한다(한국지질자원연구원, 김화도폭 지질보고서, 송교영 등, 2007). Fig. 28은 송대소 주변에서 기반암인 화강암을 피복하는 주상절리의 단면구조를 잘 파악할 수 있는 곳을 도시한 것이다. 송대소에서 관찰되는 노출된 주상절리대는 높이 약 30m이며, 용암류 단위는 부채꼴의 형태로 뚜렷하게 구분되는 로브와 그 위를 덮고 있는 주상절리 세트로 2개의 용암류로 판단된다(Fig. 29). 하부에서 관찰되는 타원형의 로브는 높이 약 15m로 주상절리가 등온면에 수직으로 발달하는 점을 생각했을 때 타원형의 외곽에 수직 방향으로 절리가 발달되어 있으며, 현재는 선단부가 유수의 침식 작용으로 잘려 나간 형태이다. 로브 위로 관찰되는 주상절리는 약 7m이다. 하부 켈러네이드의 기둥 두께는 약 120cm이며, 엔테블러취의 기둥 두께는 약 30cm이고, 상부 켈러네이드보다 가늘다. 이러한 구성은 전형적인 한탄강 주상절리 세트이며, 로브와의 경계에서 판상절리가 관찰되지 않는 것으로 보아 로브의 충분한 냉각이 진행된 후 발생한 용암 흐름이라 해석된다. 또한 관찰된 로브의 다각형 단면의 변은 대부분 30cm 내외이다.

주상절리 측정은 3곳에서 총 57개의 단면을 1곳에서 측면 형태를 조사하였다.

SD-01 지역의 주상절리 다각형의 수(N)는 5각형이 33%, 6각형이 67%로 6각형이 절반 이상 차지한다(Fig. 30(a)). 단면 사이 내각(θ)은 71°~80°가 5%, 81°~90°가 12%, 91°~100°가 5%, 101°~110°가 24%, 111°~120°가 12%, 121°~130°가 25%, 131°~140°가 12%, 141°~150°가 5%의 빈도율로 91°~130°가 61%로 절반 이상을 차지하고 있다.

SD-02 지역의 주상절리 다각형의 수(N)는 4각형이 12%, 5각형이 40%, 6각

형이 12%, 7각형이 12%, 8각형이 12%, 9각형이 12%로 5각형이 40% 이상 차지한다(Fig. 30(b)). 단면 사이 내각(θ)은 $41^\circ\sim 50^\circ$ 가 2%, $71^\circ\sim 80^\circ$ 가 4%, $81^\circ\sim 90^\circ$ 가 6%, $91^\circ\sim 100^\circ$ 가 13%, $101^\circ\sim 110^\circ$ 가 15%, $111^\circ\sim 120^\circ$ 가 16%, $121^\circ\sim 130^\circ$ 가 4%, $131^\circ\sim 140^\circ$ 가 13%, $141^\circ\sim 150^\circ$ 가 13%, $161^\circ\sim 170^\circ$ 가 2%, $181^\circ\sim 190^\circ$ 가 2%의 빈도율로 $91^\circ\sim 140^\circ$ 가 61%로 절반 이상을 차지하고 있다.

SD-03 지역의 주상절리 다각형의 수(N)는 5각형이 43%, 6각형이 57%로 6각형이 절반 이상 차지한다(Fig. 30(c)). 단면 사이 내각(θ)은 $71^\circ\sim 80^\circ$ 가 8%, $81^\circ\sim 90^\circ$ 가 8%, $91^\circ\sim 100^\circ$ 가 16%, $101^\circ\sim 110^\circ$ 가 22%, $111^\circ\sim 120^\circ$ 가 8%, $121^\circ\sim 130^\circ$ 가 14%, $131^\circ\sim 140^\circ$ 가 16%, $141^\circ\sim 150^\circ$ 가 8%의 빈도율로 $91^\circ\sim 130^\circ$ 가 60%로 절반 이상을 차지하고 있다.

SD지역의 측정값을 종합적으로 나타내면 다각형의 수(N)는 6각형이 가장 높은 빈도율을 보이며, 단면 사이 내각(θ)은 $91^\circ\sim 140^\circ$ 가 가장 높은 빈도율을 보인다(Fig. 32). SD-04 지역의 주상절리(Fig. 30(d))는 기둥 방향이 방사상으로 발달하고 있으며, 기둥의 크기가 비교적 다양하게 형성되어 있다. 그 외에도 SD-03 지역에서 추가적으로 관찰된 주상절리 단면은 다음과 같다(Fig. 31).

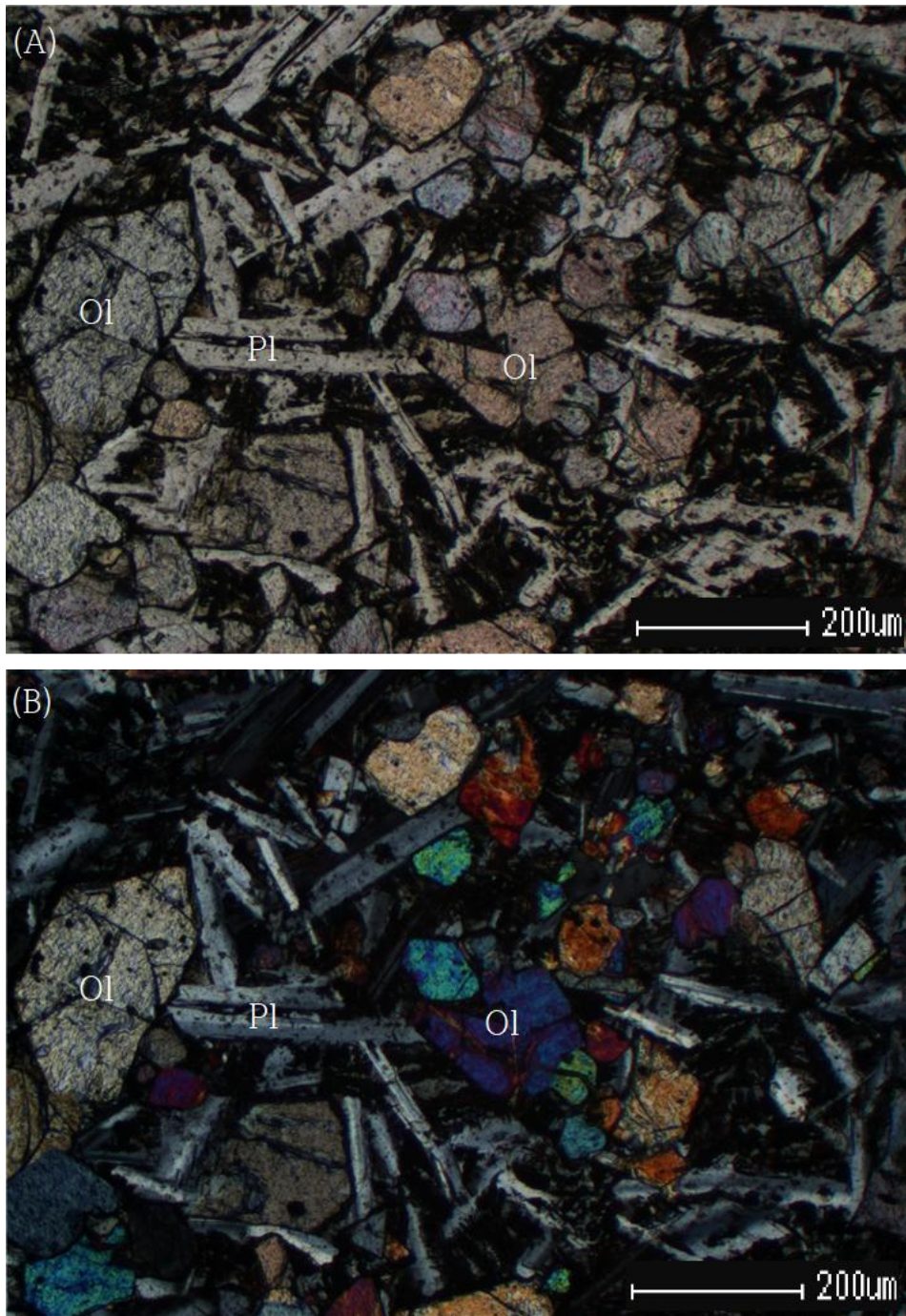


Fig. 27. Microphotographs of rock in SD-01 on Basalt.

(A): open nicol (B): cross nicol.



Fig. 28. Geology map of the Song-da-so showing sample location.

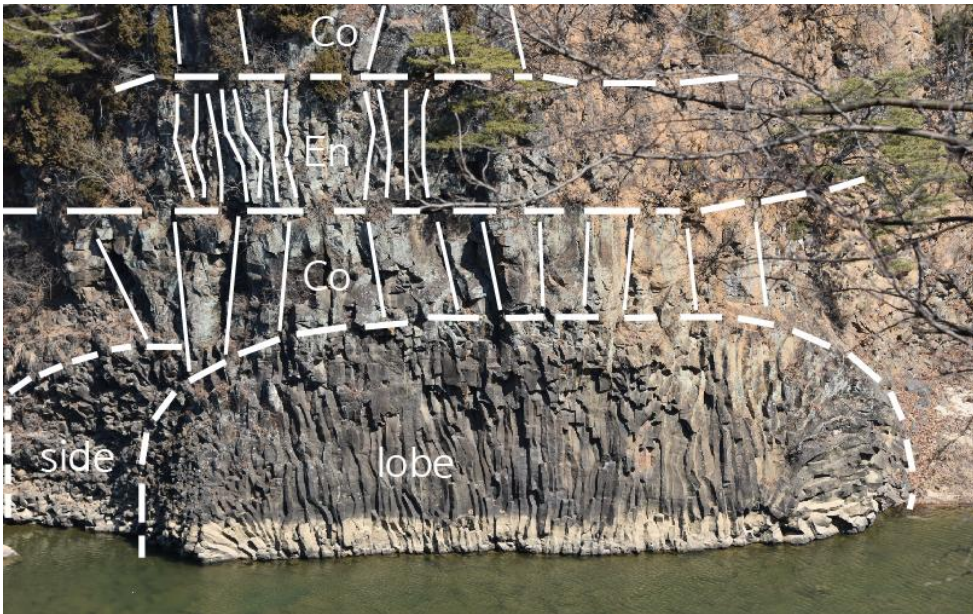


Fig. 29. Photograph of columnar joint in Song-da-so.

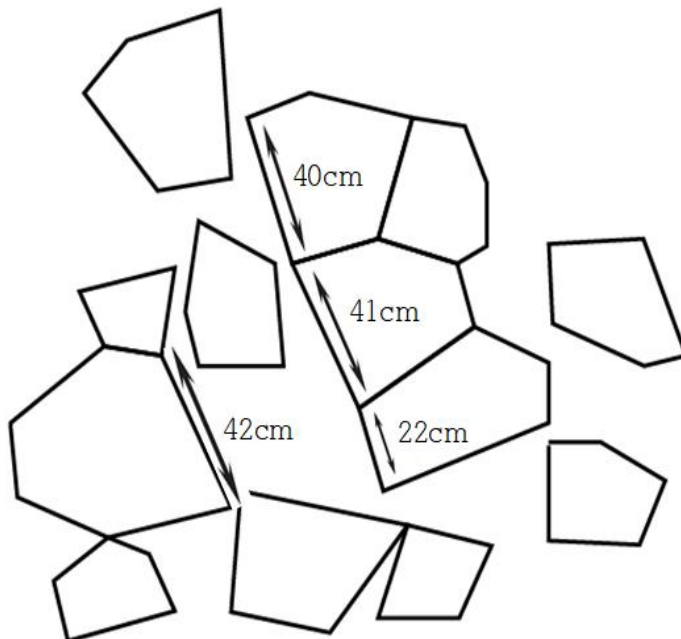


Fig. 30. Photograph and sketch of measured columnar joint in Song-da-so. (a): SD-01, (b): SD-02 (c): SD-03 (d): SD-04

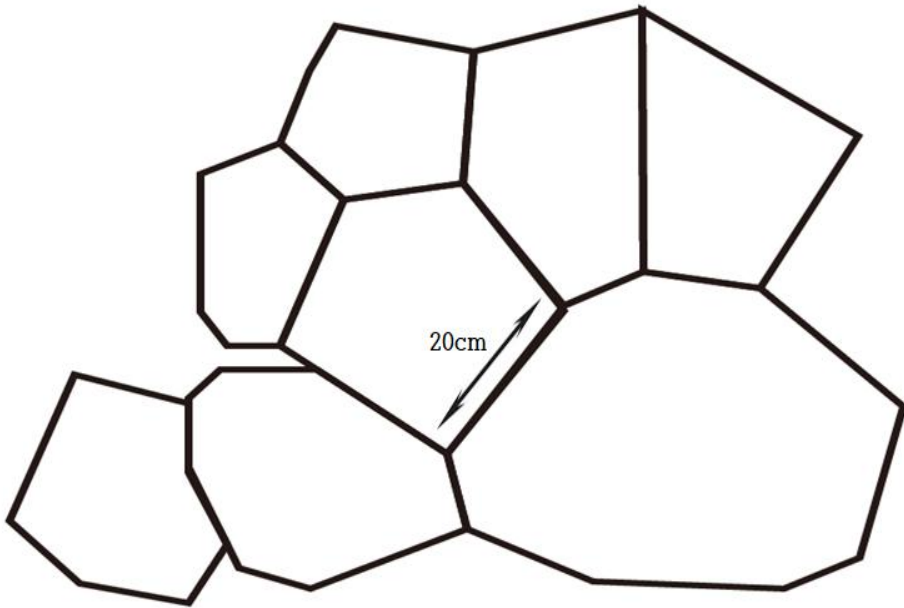


Fig. 30. Continued

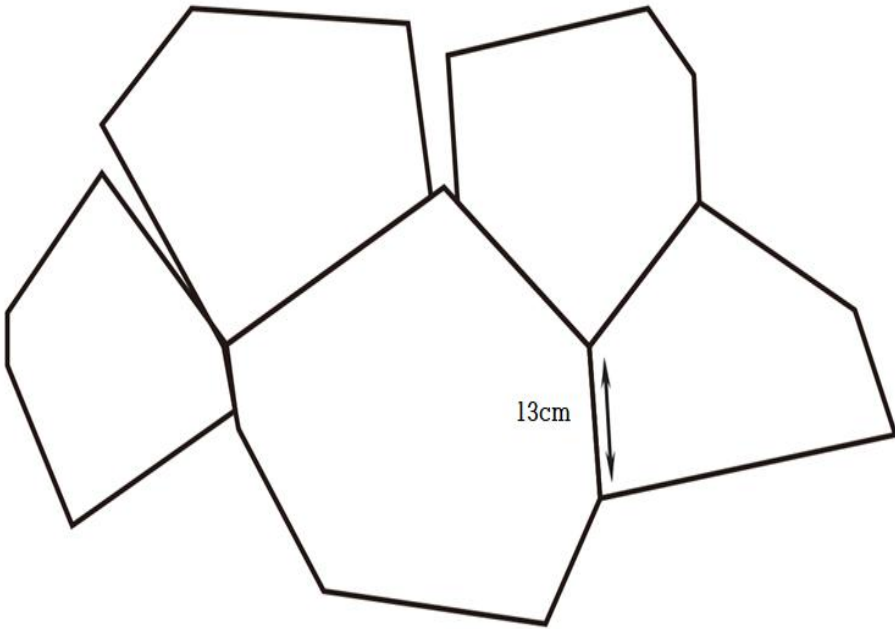


Fig. 30. Continued

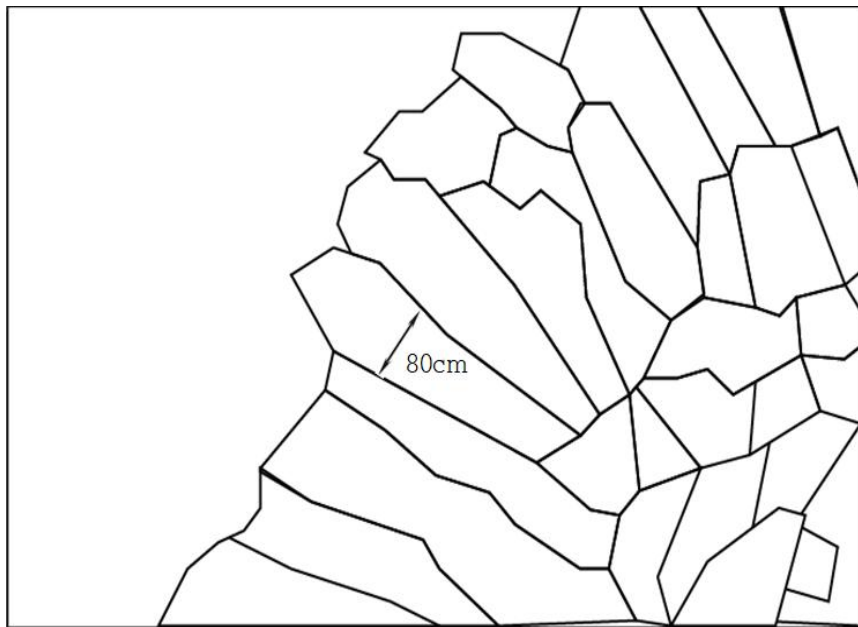


Fig. 30. Continued

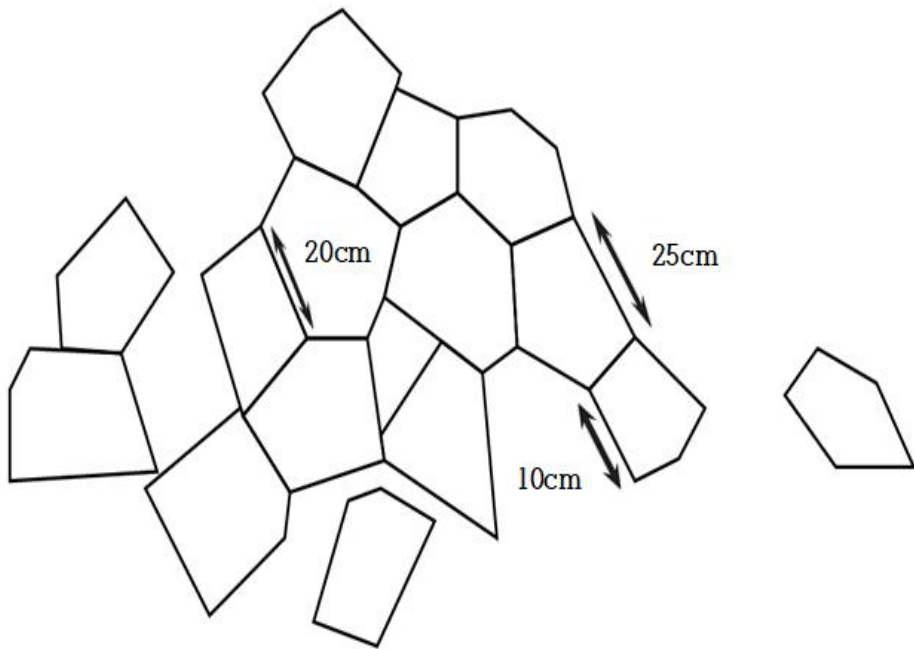


Fig. 31. Photograph and sketch of measured columnar joint in SD-02.

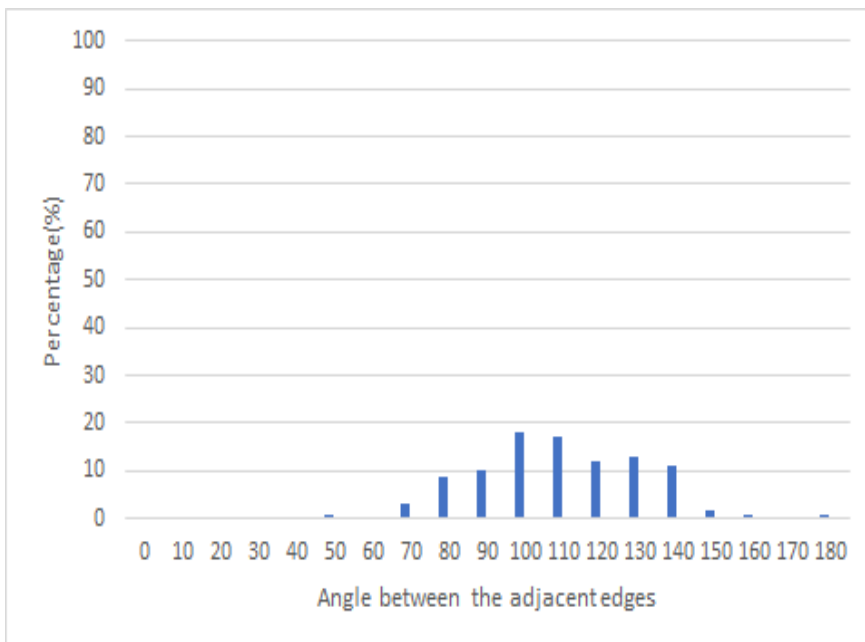
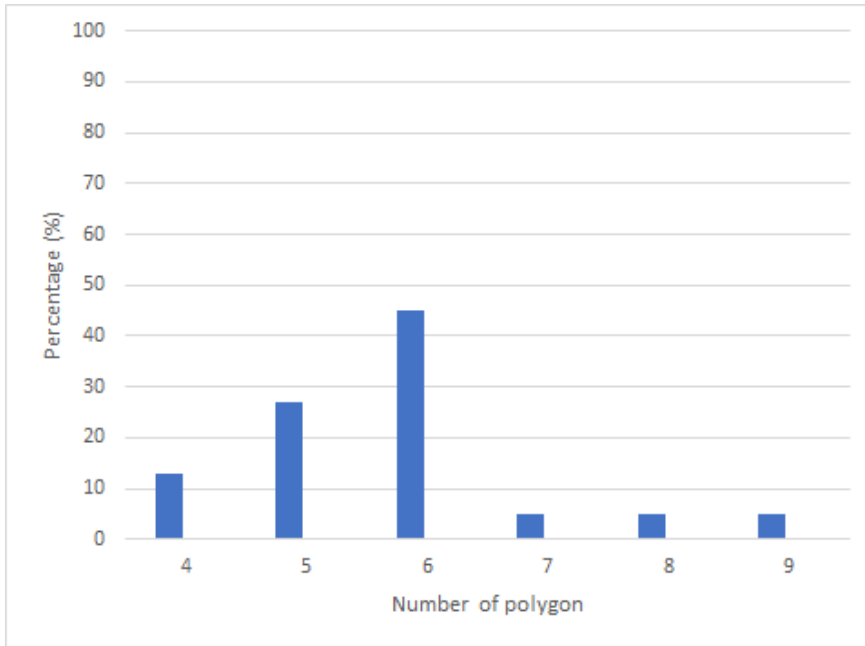


Fig. 32. Percentage(%) of measurement to columnar joint Song-da-so.

3. 화적연 주상절리

이 지역의 주상절리는 한탄강이 곡류하는 가운데 물의 침식작용으로 인해 바위가 깎이며 형성된 커다란 못 주변부 및 한탄강 수로 양쪽에 분포한다. 주상절리를 구성하는 암석은 제4기 현무암으로 기재되어 있으며 기반암은 화강암으로 이루어져 있다. 화적연 일대에서 채취한 암석 박편 사진을 보면 주 구성 광물은 사장석, 휘석, 감람석 등이며 서브오피틱조직을 관찰할 수 있다 (Fig. 33). 사장석은 알바이트 쌍정이 잘 관찰된다. 또한 주변부에는 선캠브리아대의 기반암, 시대미상의 변성퇴적암, 이를 관입한 중생대의 화성암 등이 있다(한국지질자원연구원, 지포리도폭 지질보고서, 황재하 등, 2007).

Fig. 34은 화적연 주변 주상절리의 단면구조를 잘 파악할 수 있는 곳을 도시한 것이다. 화강암으로 구성된 기반암 위에 위치한 화적연 주상절리대는 높이가 약 30m이며, 마그마의 흐름 단위를 정의하기 위한 기준 증거가 관찰되지 않았으므로 하나의 용암 흐름으로 정의할 수 있다(Fig. 35). 하부에서 관찰되는 엔테블러취는 높이가 약 20m이며 풍화로 떨어져 나와 형성된 공동이 관찰된다. 엔테블러취 위로 관찰되는 켈러네이드는 약 10m이다. 화적연 일대는 전형적인 한탄강 주상절리 세트에 비해 풍화 및 식생에 의해 가려져 부분적으로 관찰되는 켈러네이드와 엔테블러취로 구성되며 하나의 용암 흐름이라 해석된다. 또한 관찰된 엔테블러취의 다각형 단면의 변은 대부분 10~40cm이다. 주상절리 측정은 2곳에서 총 47개의 단면을 조사하였다.

HJ-01 지역의 주상절리 다각형의 수(N)는 4각형이 17%, 5각형이 36%, 6각형이 27%, 7각형이 17%, 9각형이 3%로 5각형, 6각형이 절반 이상을 차지한다(Fig. 36(a)). 단면 사이 내각(θ)은 41°~60°가 4%, 61°~70°가 4%, 71°~80°가 10%, 81°~90°가 11%, 91°~100°가 9%, 101°~110°가 9%, 111°~120°가 17%, 121°~130°가 12%, 131°~140°가 8%, 141°~150°가 8%, 151° 이상이 8%의 빈도율로 81°~130°가 58%로 절반 이상을 차지하고 있다.

HJ-02 지역의 주상절리 다각형의 수(N)는 4각형이 7%, 5각형이 31%, 6각형이 39%, 7각형이 23%로 5각형, 6각형이 절반 이상을 차지한다(Fig. 36(b)). 단면 사이 내각(θ)은 41°~50°가 2%, 71°~80°가 7%, 81°~90°가 11%, 91°~100°가 11%, 101°~110°가 7%, 111°~120°가 27%, 121°~130°가 10%, 131°~140°가 14%, 141°~150° 이상이 11%의 빈도율로 91°~130°가 55%로 절반 이상을 차지하고 있다.

HJ지역의 측정값을 종합적으로 나타내면 다각형의 수(N)는 6각형이 가장 높은 빈도율을 보이며, 단면 사이 내각(θ)은 110° ~ 120° 가 가장 높은 빈도율을 보인다(Fig. 37).

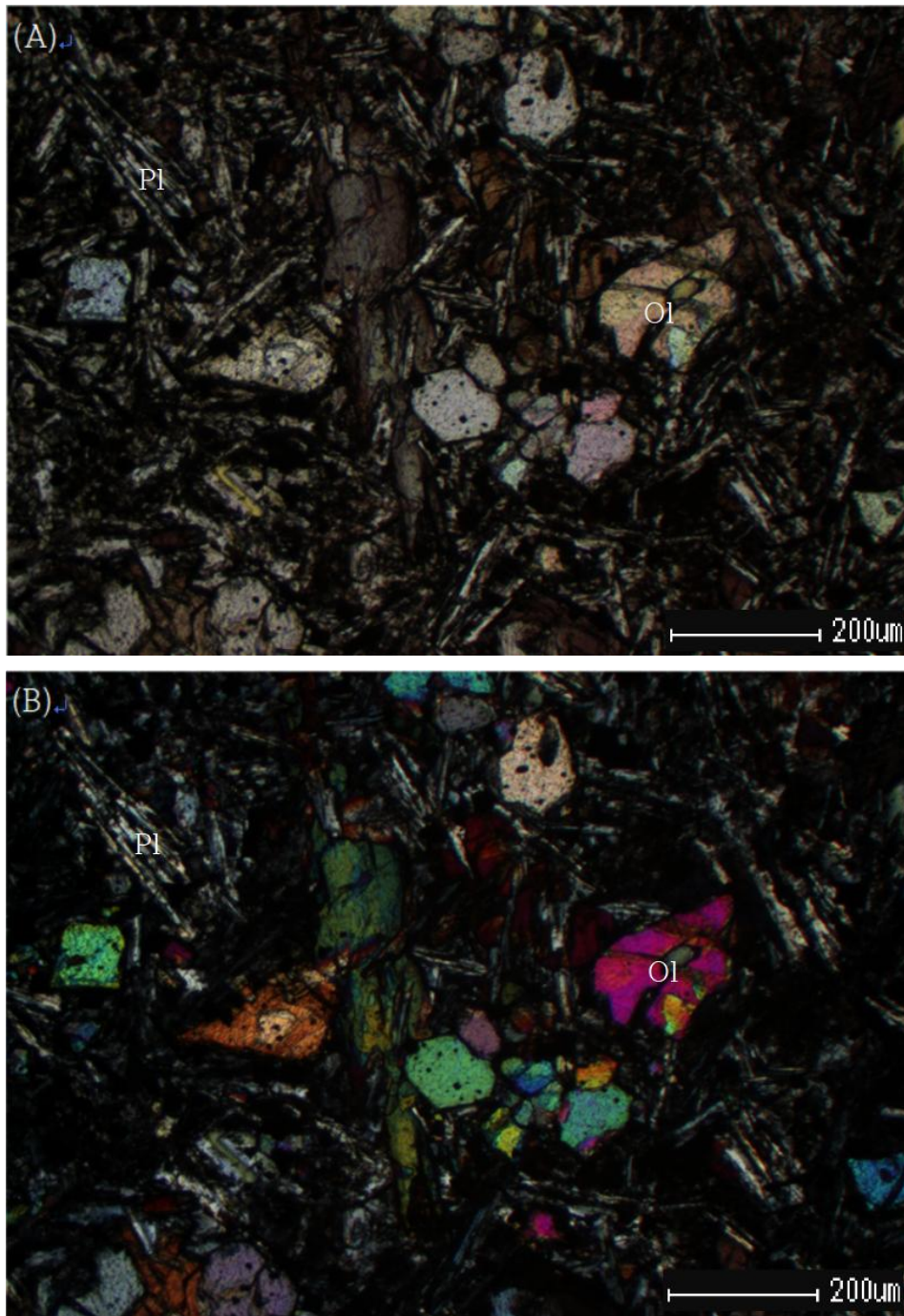


Fig. 33. Microphotographs of rock in HJ-01 on Basalt.

(A): open nicol (B): cross nicol.



Fig. 34. Geology map of the Hwa-jeok-yeon showing sample location.



Fig. 35. Photograph of columnar joint in Hwa-jeok-yeon.

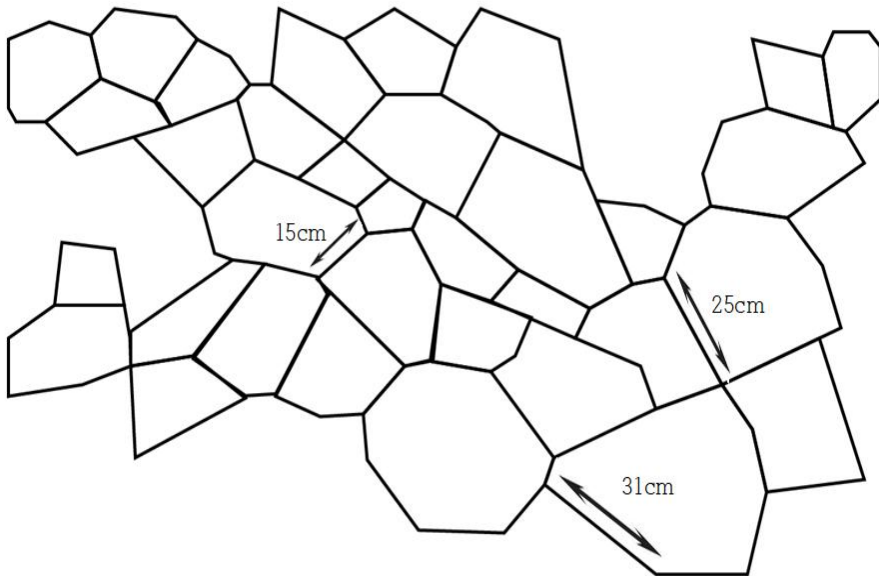


Fig. 36. Photograph and sketch of measured columnar joint in Hwa-jeok-yeon. (a): HJ-01, (b): HJ-02

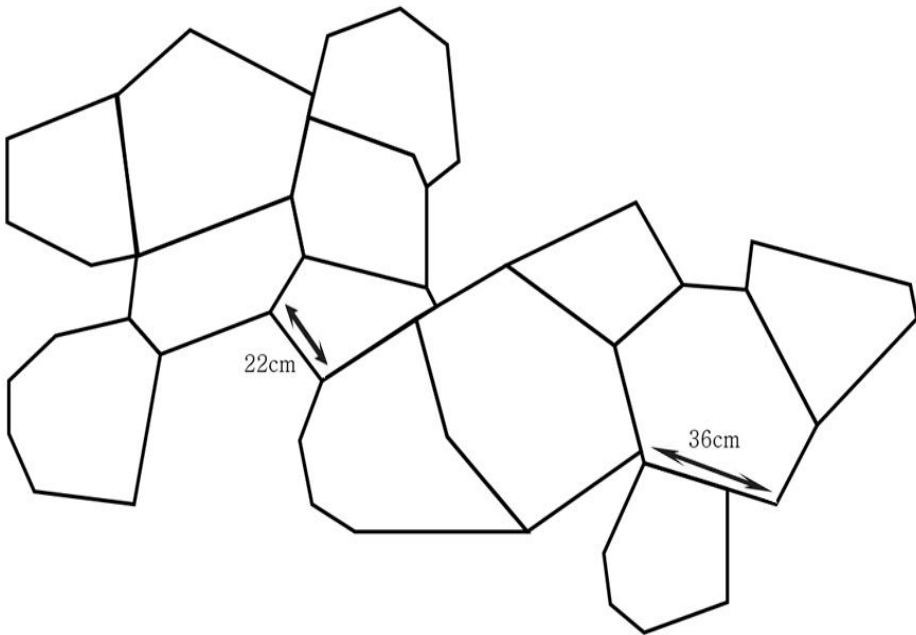


Fig. 36. Continued.

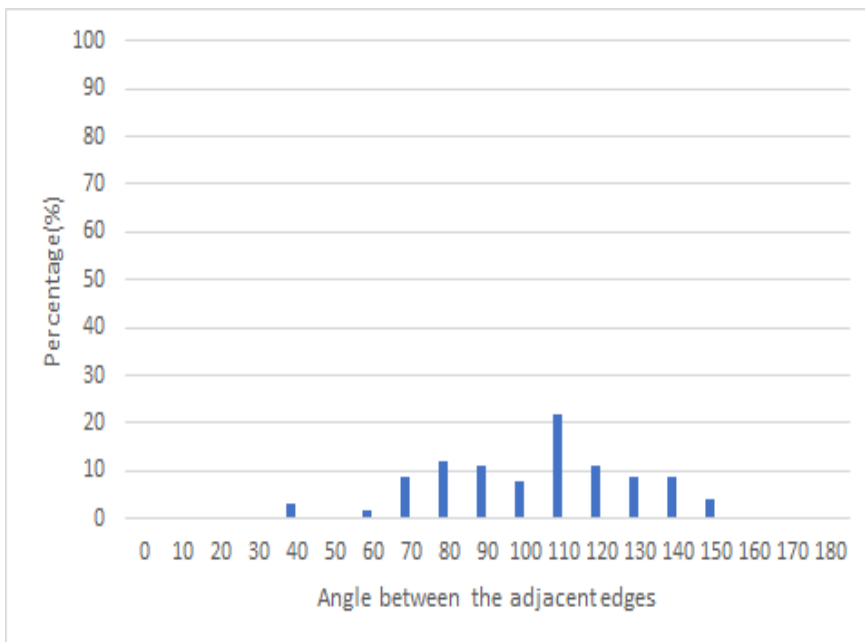
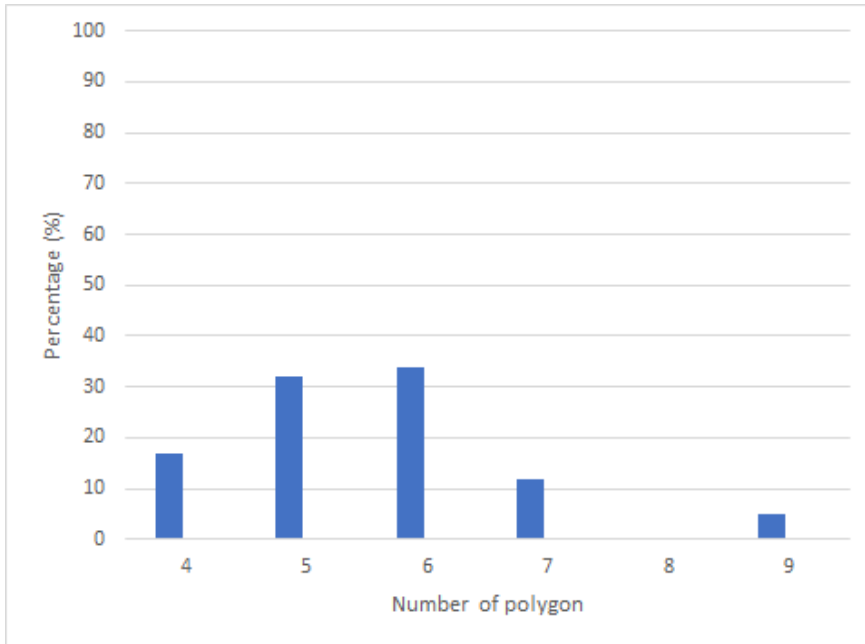


Fig. 37. Percentage(%) of measurement to columnar joint Hwa-jeok-yeon.

4. 교동가마소 주상절리

이 지역의 주상절리는 한탄강의 지천인 건지천의 하류에서 곡류하는 수로 양쪽에 분포한다. 주상절리를 구성하는 암석은 제4기 현무암으로 기재되어 있으며, 채취한 암석 박편 사진을 보면 주 구성 광물은 사장석, 휘석, 감람석 등이며 서브오피틱조직을 관찰할 수 있다(Fig. 38). 사장석은 알바이트 쌍정이 잘 관찰된다. 휘석 내에서는 대각선 방향의 쪼개짐이 관찰된다. 또한 주변부에는 선캠브리아대의 기반암, 시대미상의 변성퇴적암, 이를 관입한 중생대의 화성암 등이 있다(한국지질자원연구원, 지포리도폭 지질보고서, 황재하 등, 2007).

Fig. 39은 교동가마소 주변 주상절리의 단면구조를 잘 파악할 수 있는 곳을 도시한 것이다. 주상절리 측정은 2곳에서 총 17개의 단면을 조사하였다.

교동가마소에서 관찰되는 주상절리대는 단일 켈러네이드로 관찰되며 높이는 약 2m이다. 켈러네이드는 수면과 맞닿아 있으며 다른 연구지역에 비해 두꺼운 폭을 갖고 일부 기공이 관찰된다(Fig. 40). 교동가마소 주상절리는 전형적인 한탄강 주상절리 세트와 비교했을 때 용암류 단위를 정의하기 위한 기준 증거가 관찰되지 않았으므로 하나의 용암류로 정의할 수 있다. 또한 켈러네이드의 다각형 단면의 변은 대부분 40~105cm이다.

GD-01 지역의 주상절리 다각형의 수(N)는 4각형이 33%, 5각형이 34%, 6각형이 33%로 4각, 5각형이 절반 이상을 차지한다(Fig. 41(a)). 단면 사이 내각(θ)은 41°~50°가 7%, 71°~80°가 13%, 81°~90°가 7%, 91°~100°가 13%, 101°~110°가 13%, 111°~120°가 13%, 121°~130°가 27%, 141°~150°가 7%로 101°~130°가 53%로 절반 이상을 차지하고 있다.

GD-02 지역의 주상절리 다각형의 수(N)는 4각형이 60%, 5각형이 40%로 4각형이 절반 이상을 차지한다(Fig. 41(b)). 단면 사이 내각(θ)은 51°~60°가 4%, 61°~70°가 10%, 71°~80°가 14%, 81°~90°가 28%, 91°~100°가 18%, 101°~110°가 4%, 111°~120°가 4%, 121°~130°가 10%, 131°~140°가 4%, 141°~150°가 4%로 이상이 71°~100°가 60%로 절반 이상을 차지하고 있다. 그 외에도 GD-02 지역에서 추가적으로 관찰된 주상절리 단면은 다음과 같다(Fig. 42).

GD지역의 측정값을 종합적으로 나타내면 다각형의 수(N)는 4각형이 가장

높은 빈도율을 보이며, 단면 사이 내각(θ)은 $80^\circ\sim 90^\circ$ 가 가장 높은 빈도율을 보인다(Fig. 43).

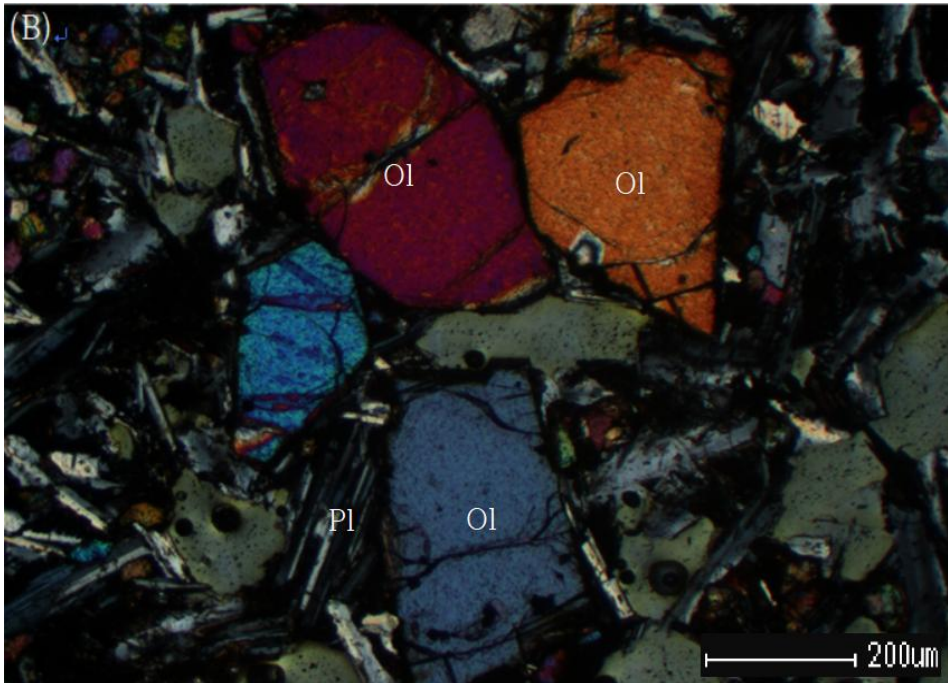
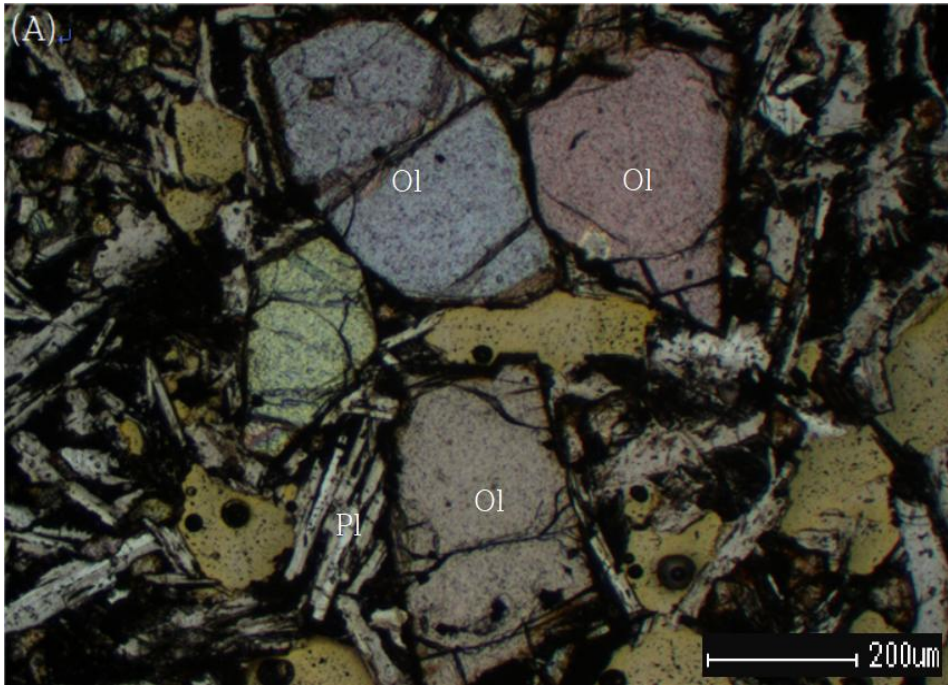


Fig. 38. Microphotographs of rock in GD-01 on Basalt.
(A): open nicol (B): cross nicol.



Fig. 39. Geology map of the Kyo-dong-gamaso showing sample location.



Fig. 40. Photograph of columnar joint in Kyo-dong-gamaso.

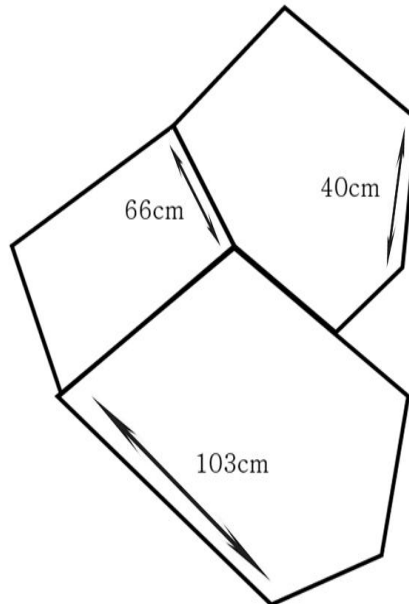


Fig. 41. Photograph and sketch of measured columnar joint in Kyo-dong-gamaso. (a): GD-01, (b): GD-02

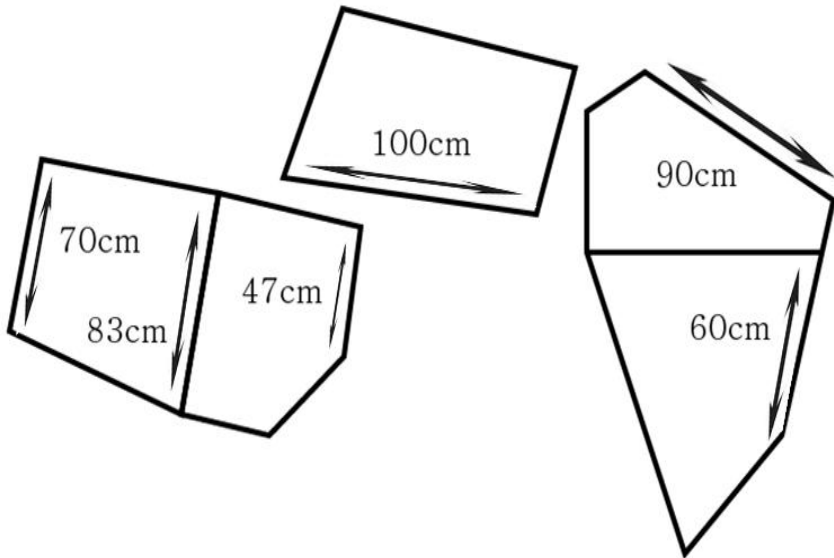


Fig. 41. Continued.

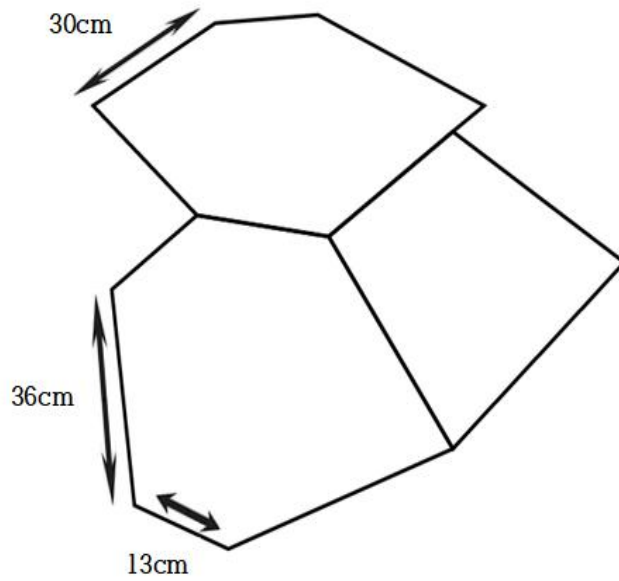


Fig. 42. Photograph and sketch of measured columnar joint in Kyo-dong-gamaso.

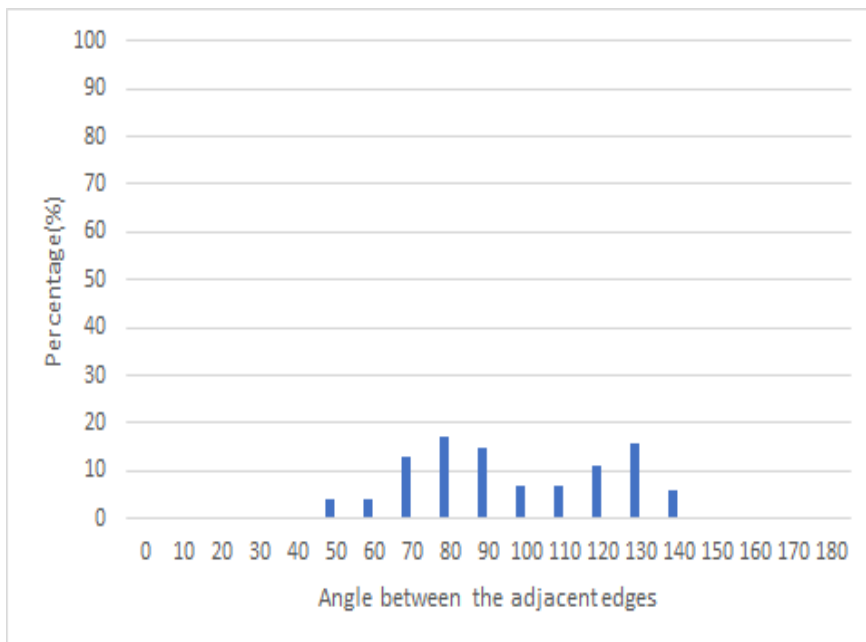
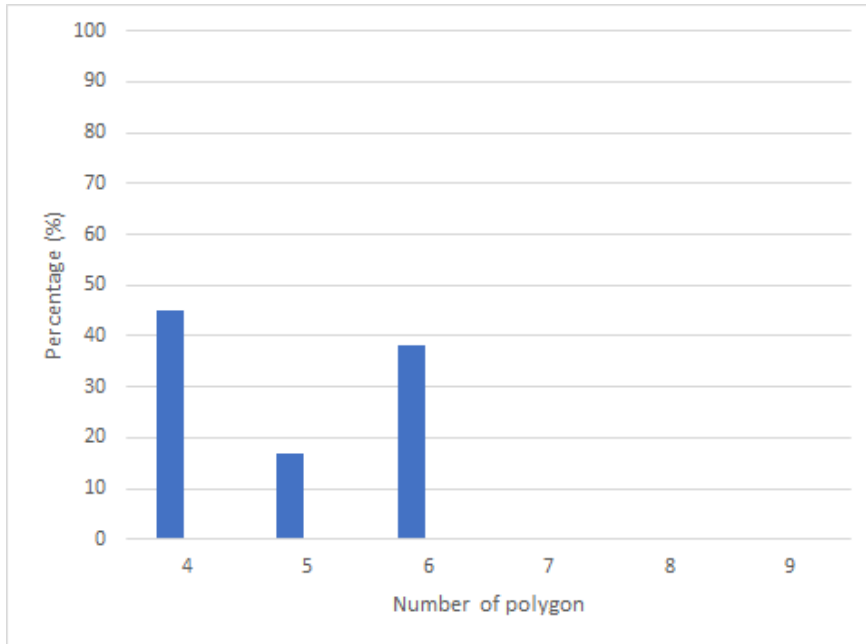


Fig. 43. Percentage(%) of measurement to columnar joint Kyo-dong-gamaso.

5. 구라이골 주상절리

이 지역의 주상절리는 창수면을 흐르는 운산천이 한탄강으로 유입되는 지역에 형성되었다. 이는 약 40m 길이의 주상절리 협곡으로 이루어진 현무암 침식지역이다. 소규모 협곡이지만 침식동굴인 하식동과 침식지형인 하식에 등 대표적인 현무암 침식지형이 관찰된다. 주상절리를 구성하는 암석은 제4기 현무암으로 기재되어 있으며, 구라이골 일대에서 채취한 암석 박편 사진을 보면 주 구성 광물은 사장석, 휘석, 감람석 등이며, 서브오피틱 조직으로 관찰된다(Fig. 44). 사장석은 알바이트 쌍정이 잘 관찰되며, 휘석 외에 감람석 반정도 다수 관찰된다. 또한 주변부에는 경기육괴의 선캠브리아대 기반암, 고원생대의 장락층군 편암층, 쥐라기 대보화강암류 및 백악기 명성산화강암이 있다(한국지질자원연구원, 연천도폭 지질보고서, 기원서 등, 2008).

Fig. 45은 구라이골 주변 주상절리의 단면구조를 잘 파악할 수 있는 곳을 도시한 것이다. 주상절리 측정은 총 18개의 단면을 조사하였다.

구라이골에서 관찰되는 주상절리대는 높이 약 30m이며, 판상절리 주변에서 관찰되는 기공 및 클링커를 기준으로 2개의 용암류로 해석된다(Fig. 46). 최하부에서 관찰되는 켈러네이드는 높이 약 5m이며 판상절리를 포함하고 있다. 이와 같은 구조는 초기 최하부에 흐른 용암이 완전히 냉각되지 않은 상태에서 새로운 용암 흐름이 발생할 때 관찰된다. 두 켈러네이드 사이에서 관찰된 판상절리는 용암류의 속도 차이가 생겨 마찰이 일어날 때 발생하는 전단응력의 의해 형성된다. 또한 판상절리와 켈러네이드 경계에서 관찰되는 기공은 서로 다른 용암류임을 지시한다. 판상절리를 포함하는 최하부 켈러네이드는 약 5m이며, 하부 켈러네이드 약 5m, 엔테블러취 약 10m, 상부 켈러네이드 약 10m의 높이로 분포한다. 최하부 켈러네이드를 덮으며 판상절리와 함께 관찰되는 이러한 구성은 전형적인 한탄강 주상절리 세트이고, 함께 관찰된 기공 및 클링커는 구라이골에서 총 2번의 용암 흐름이 있었음을 지시한다. 또한 관찰된 다각형 단면의 변은 대부분 30~70cm 내외로, 켈러네이드로 해석된다.

GR-01 지역의 주상절리 다각형의 수(N)는 4각형이 33%, 5각형이 34%로 6각형이 33%로 4, 5, 6형이 고른 비율을 보인다(Fig. 47(a)). 단면 사이 내각(θ)은 71° ~ 80° 가 11%, 81° ~ 90° 가 33%, 91° ~ 100° 가 33%, 101° ~ 110° 가 6%,

111°~120°가 6%, 141°~150°가 11%로 81°~100°가 66%로 절반 이상을 차지하고 있다(Fig. 49). 그 외에도 구라이골 지역에서 추가적으로 관찰된 주상절리 단면은 다음과 같다(Fig. 48).

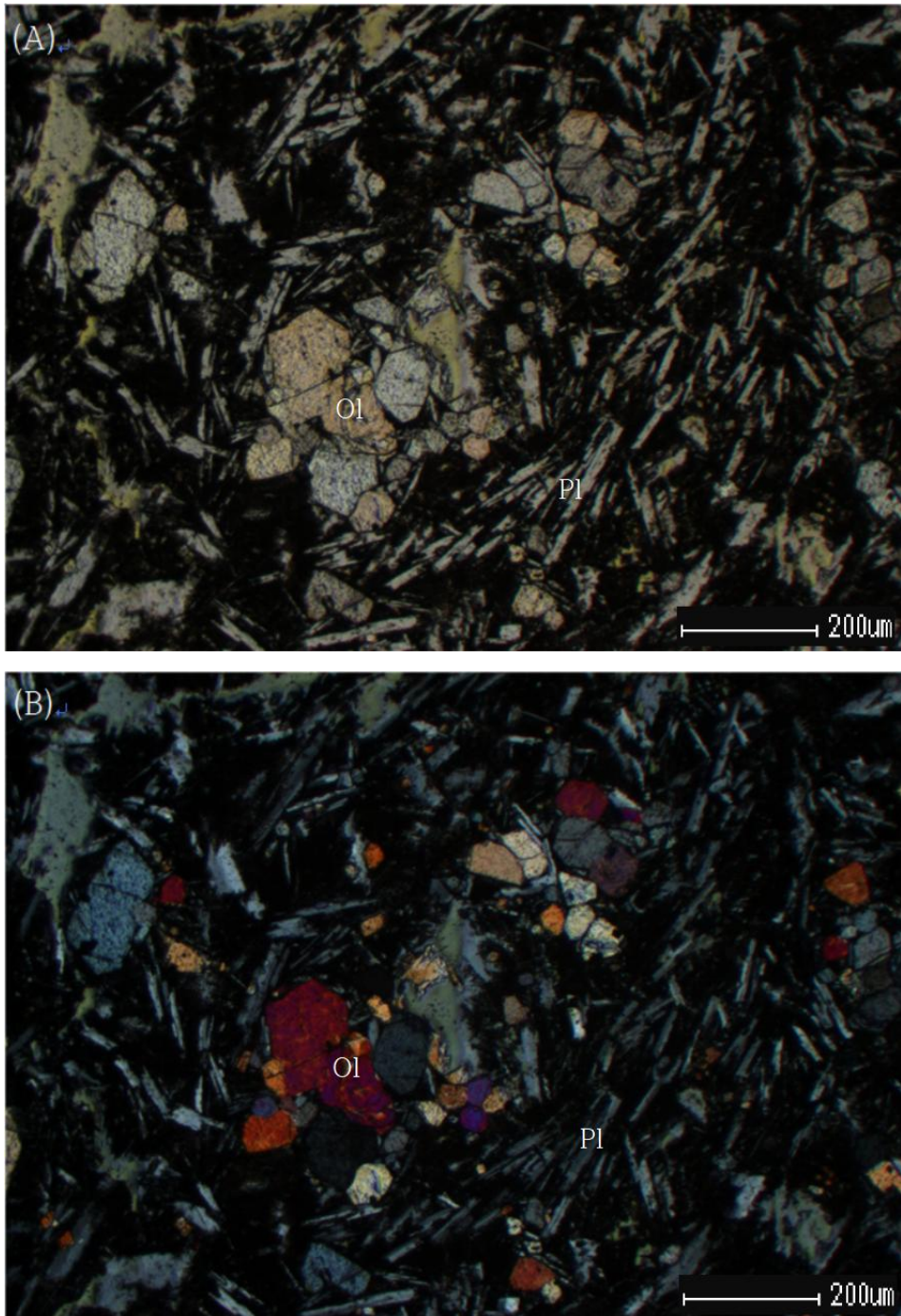


Fig. 44. Microphotographs of rock in GR-01 on Basalt.
(A): open nicol (B): cross nicol.

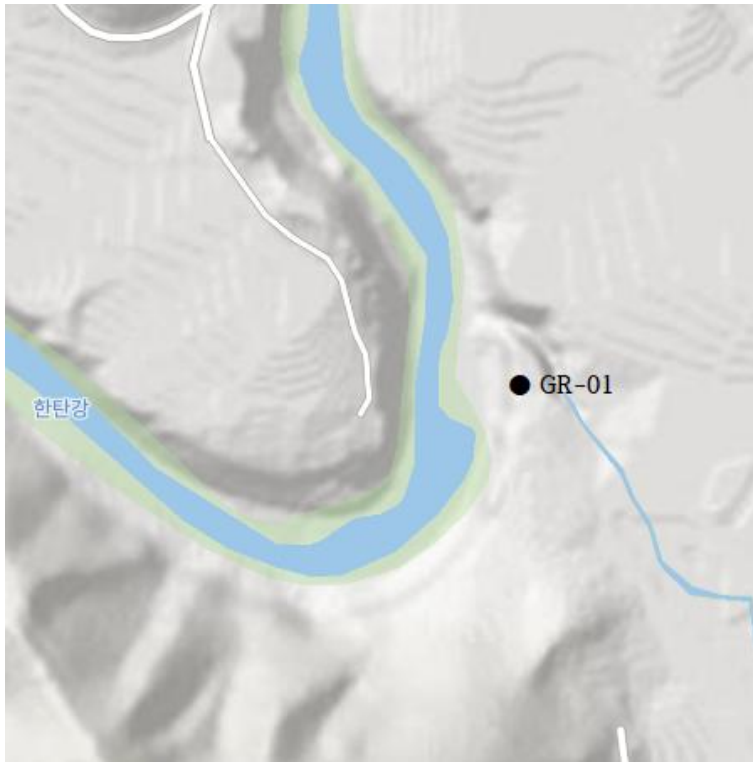


Fig. 45. Geology map of the Guraigol showing sample location.



Fig. 46. Photograph of columnar joint in Guraigol.

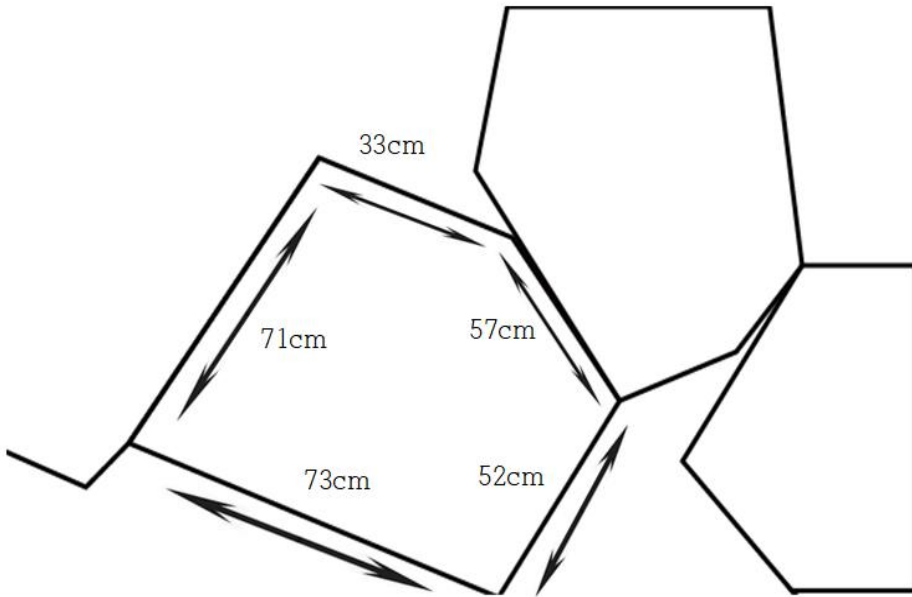


Fig. 47. Photograph and sketch of measured columnar joint in Guraigol. (a): GR-01

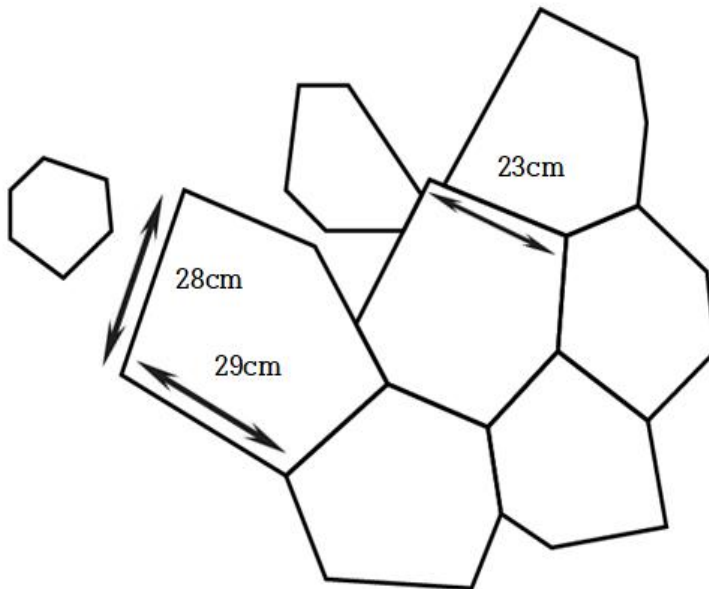


Fig. 48. Photograph and sketch of measured columnar joint in Guraigol.

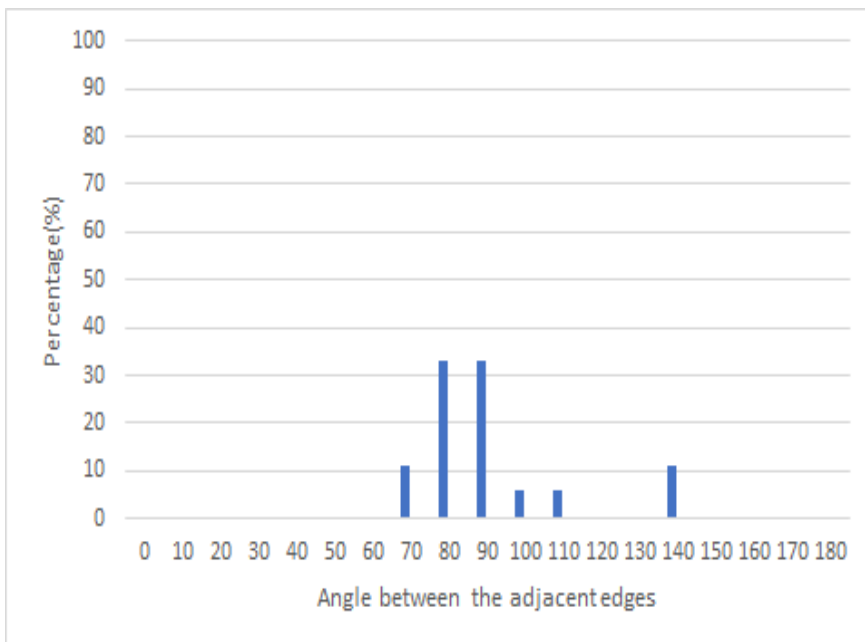
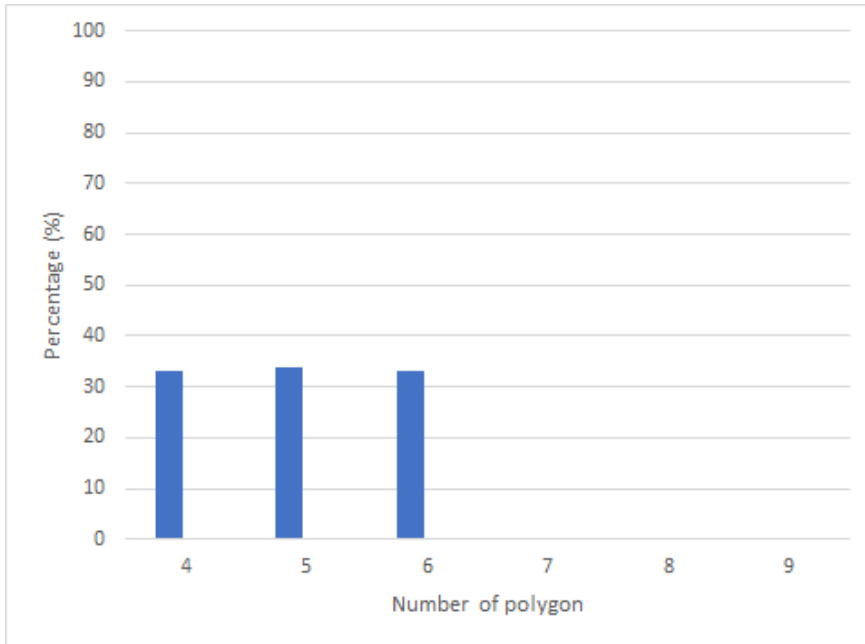


Fig. 49. Percentage(%) of measurement to columnar joint Guraigol.

6. 통현리 주상절리

이 지역의 주상절리는 연천읍 통현리에 위치하며 남으로 흐르는 한탄강 지류가 유입되는 지역에서 관찰된다. 주상절리를 구성하는 암석은 제4기 현무암으로 기재되어 있으며, 통현리 일대에서 채취한 암석 박편 사진을 보면 주구성 광물은 사장석, 휘석, 감람석 등이며 서브오피틱조직을 관찰할 수 있다(Fig. 50). 사장석은 알바이트 쌍정이 잘 관찰된다. 또한 주변부에는 경기육괴의 선캠브리아대 기반암, 고원생대의 장락층군 편암층, 유라기 대보화강암류 및 백악기 명성산화강암과 연천층군의 지층들 중 최하부인 미산층이 광범위하게 분포하고 그 상위층인 대광리층 일부가 있다(한국지질자원연구원, 연천도폭 지질보고서, 기원서 등, 2008).

Fig. 51은 통현리 주변 주상절리의 단면구조를 잘 파악할 수 있는 곳을 도시한 것이다. 통현리에서 관찰되는 주상절리대는 높이 약 30m이며, 하나의 용암류로 정의할 수 있다(Fig. 52). 하부 켈러네이드는 높이 약 3m이며, 엔테블러취는 약 17m로 주상절리 전체의 약 70%를 차지한다. 상부 켈러네이드는 약 10m이며 대부분 식생에 의한 풍화가 진행되어 있다. 이러한 구성은 전형적인 한탄강 주상절리 세트이며, 통현리는 용암류 단위를 정의하기 위한 기준 증거가 관찰되지 않았으므로 1개의 용암류로 해석된다. 주상절리 측정은 총 22개의 단면을 조사하였다. 또한 관찰된 엔테블러취의 다각형 단면의 변은 대부분 15~40cm의 크기이다.

TH-01 지역의 주상절리 다각형의 수(N)는 5각형이 11%, 6각형이 83%, 7각형이 6%로 6각형이 절반 이상을 차지한다(Fig. 53(a)). 단면 사이 내각(θ)은 71°~80°가 1%, 81°~90°가 8%, 91°~100°가 16%, 101°~110°가 16%, 111°~120°가 20%, 121°~130°가 21%, 131°~140°가 8%, 141°~150°가 8%, 151°~160°가 2%,로 101°~130°가 57%로 절반 이상을 차지하고 있다(Fig. 54).

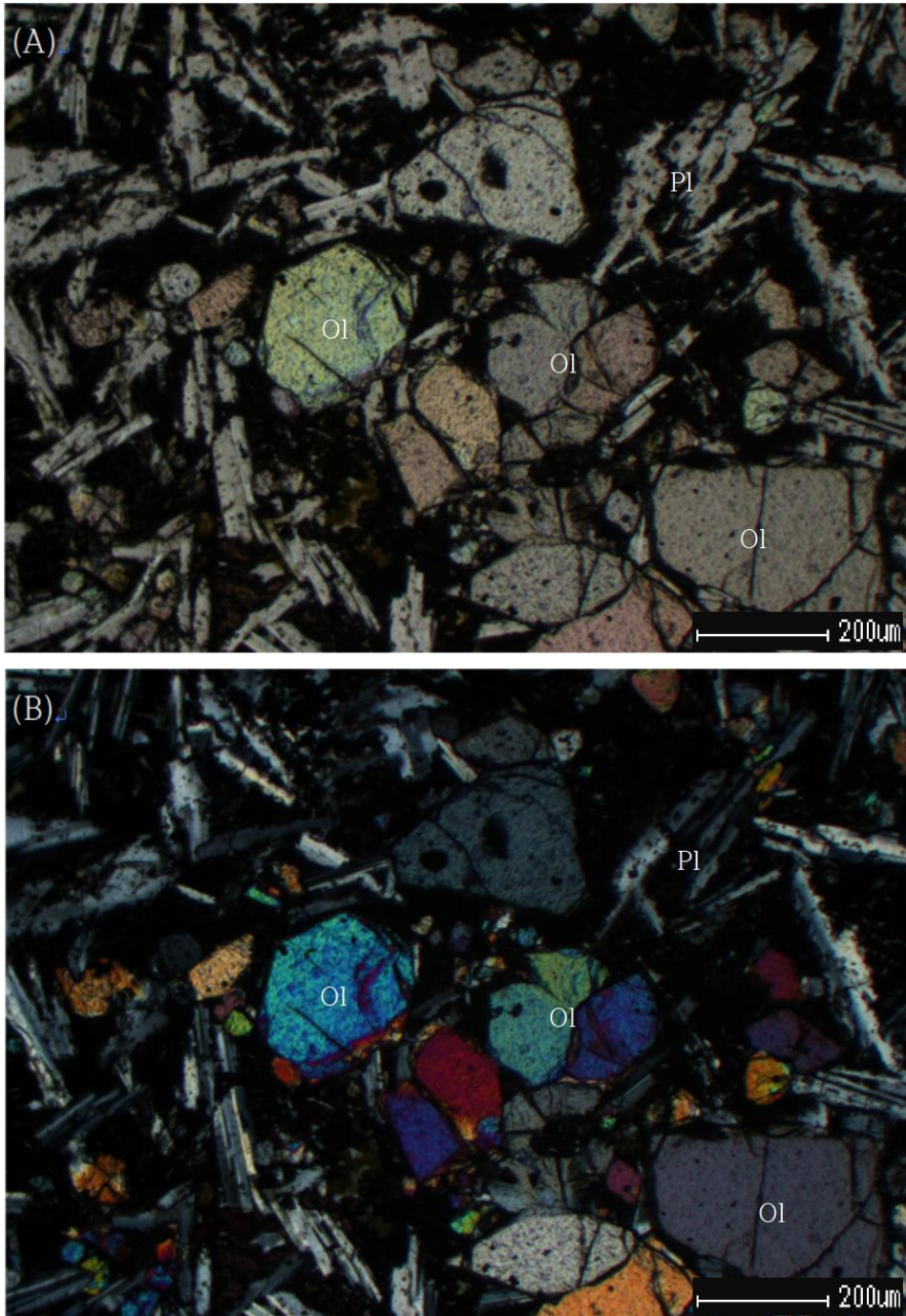


Fig. 50. Microphotographs of rock in TH-01 on Basalt.

(A): open nicol (B): cross nicol.

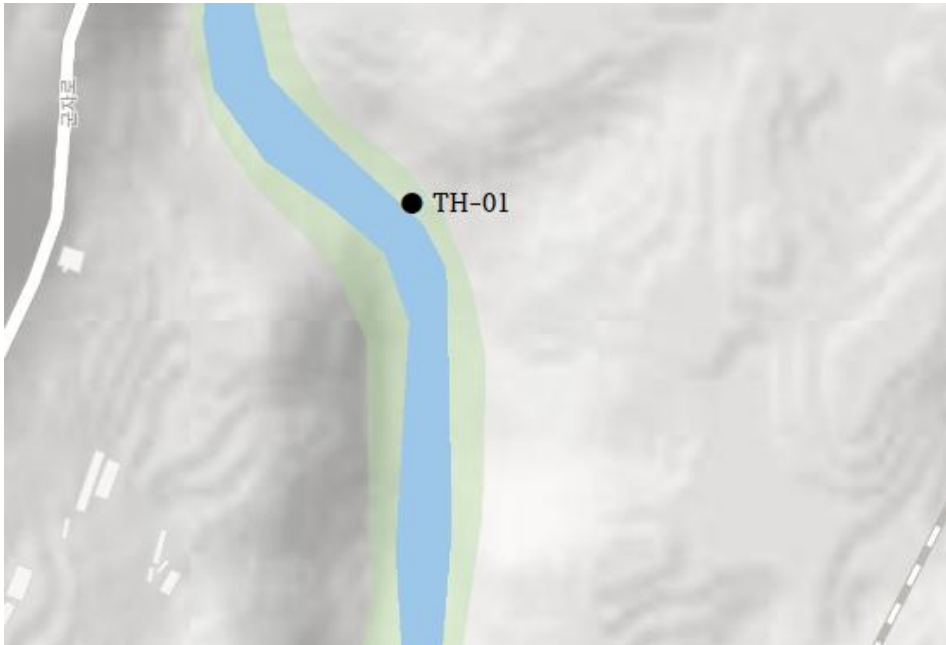


Fig. 51. Geology map of the Tonghyeon-ri showing sample location.



Fig. 52. Photograph of columnar joint in Tonghyeon-ri.

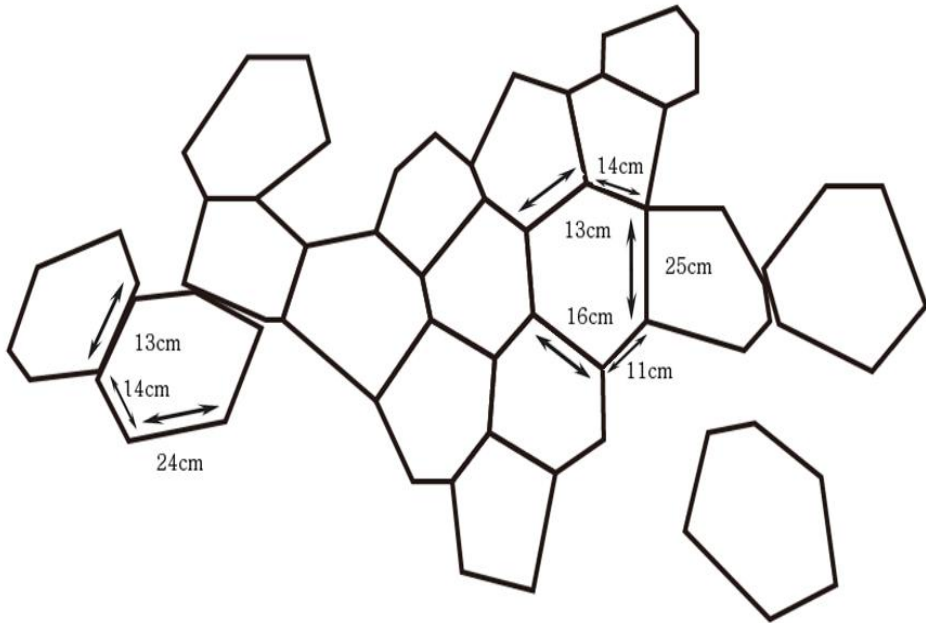


Fig. 53. Photograph and sketch of measured columnar joint in Tonghyeon-ri. (a): TH-01

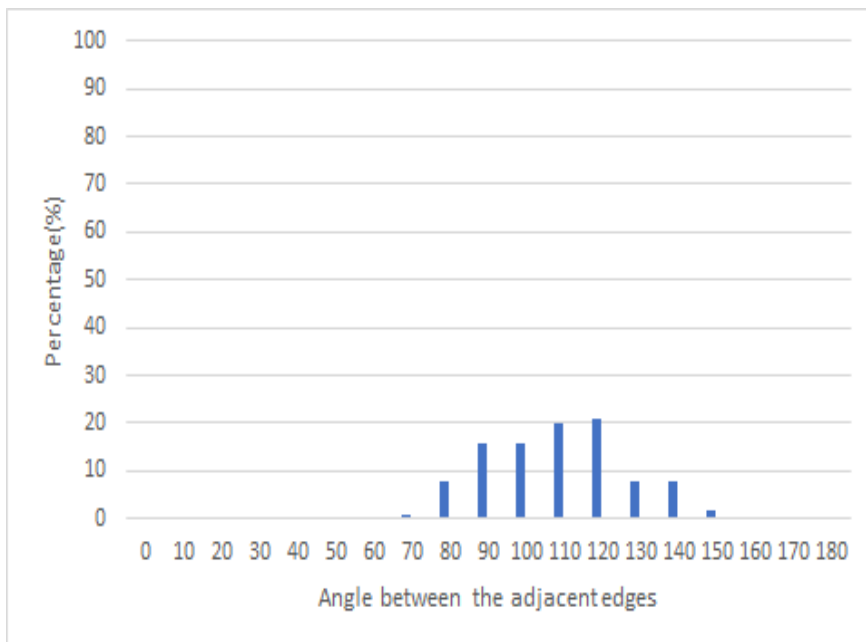
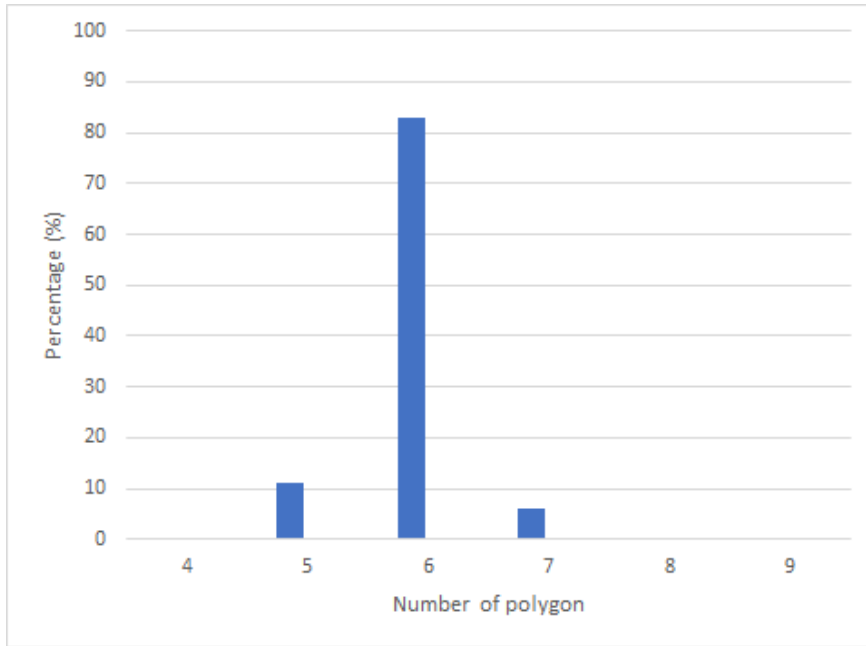


Fig. 54. Percentage(%) of measurement to columnar joint Tonghyeon-ri.

7. 명우리 주상절리

이 지역의 주상절리는 연천읍 통현리에 위치하며 남으로 흐르는 한탄강 지류가 유입되는 지역에서 관찰된다. 주상절리를 구성하는 암석은 제4기 현무암으로 기재되어 있으며, 주변부에는 경기육괴의 선캠브리아대 기반암, 고원생대의 장락층군 편암층, 슈라기 대보화강암류 및 백악기 명성산화강암이 분포한다. 또한 연천층군의 지층들 중 최하부인 미산층 위로 발달한 주상절리가 관찰된다(한국지질자원연구원, 연천도폭 지질보고서, 기원서 등, 2008).

Fig. 55은 명우리 주변 주상절리 노두를 파악할 수 있는 곳을 도시한 것이다. 명우리 일대에서 관찰한 주상절리는 다음과 같다(Fig. 56). 주상절리의 형태 분석을 위해 단면구조를 파악해야 하나, 단면을 관찰할 수 있는 노두가 거의 존재하지 않아 단면의 수와 기둥면 사이의 각 측정이 어렵다. 그러나 기둥면의 폭은 측정 가능하였으며, 그 결과 15 ~ 40 cm의 크기를 보였다(Fig. 57, 58). 또한 관찰 가능한 와상절리는 강 하류에서 상류로 갈수록 얇아지는 특징이 나타난다(Fig. 59).

명우리에서 관찰되는 주상절리대는 높이 약 30m이며, 하나의 용암류로 정의할 수 있다(Fig. 56). 하부 켈러네이드는 높이 약 9m이며 수면과 맞닿아 있고, 엔테블러취는 약 12m로 주상절리 전체의 약 50%를 차지한다. 상부 켈러네이드는 약 9m로 식생에 의한 풍화가 일부 진행되어 있다. 이러한 구성은 전형적인 한탄강 주상절리 세트이며 명우리는 용암류 단위를 정의하기 위한 기준 증거가 관찰되지 않았으므로 1개의 용암류로 해석된다. 또한 관찰된 켈러네이드의 다각형 단면의 변은 약 20~60cm로 비교적 작은 크기이다.

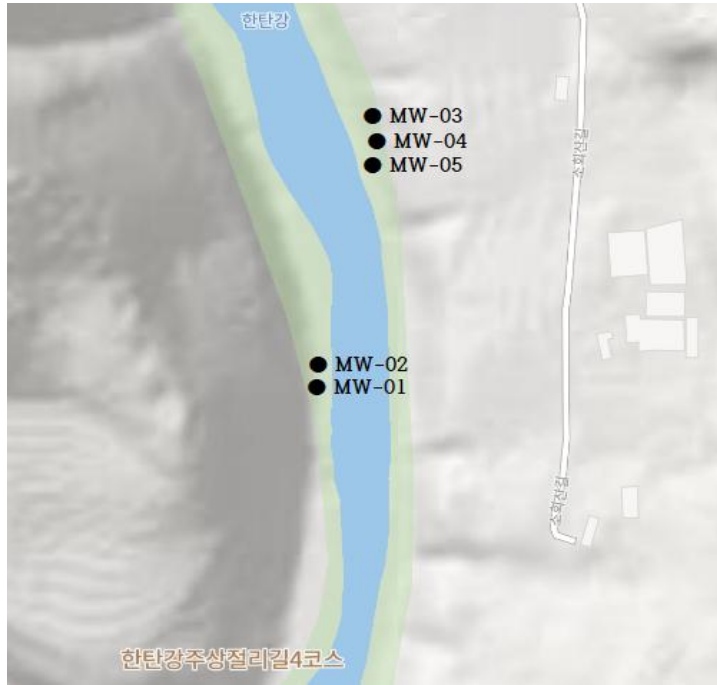


Fig. 55. Geology map of the Mung-woo-ri showing sample location.

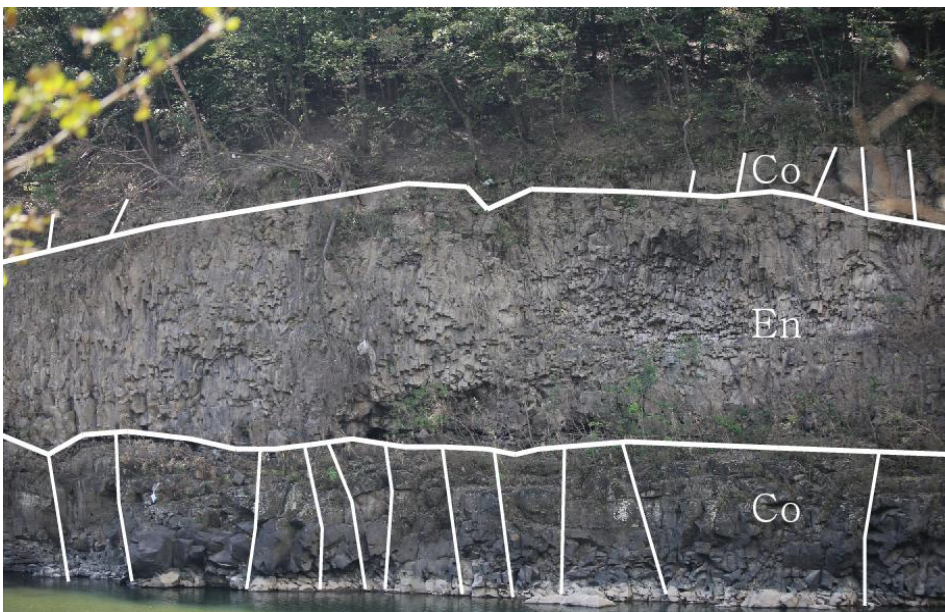


Fig. 56. Photograph of columnar joint in Mung-woori.



Fig. 57. Photograph of measured columnar joint in Mung-woori.
(a): MW-01 (b): MW-02



Fig. 58. Photograph of measured columnar joint in Mung-woori.
(a): MW-03 (b): MW-04



Fig. 59. Photograph of measured columnar joint in Mung-woori.
(a): MW-05

IV. 암석화학

한탄강 일대에서 주상절리를 구성하는 암석들의 화학적 특성을 파악하기 위해 총 8개의 암석시료에 대해 주성분원소를 분석하였다. 주성분원소 분석은 경상대학교 공동실험실습관 분석지원실의 파장 분산형 X-ray 형광분석기 (Bruker AXS사 WD-XRF, 30kV, 170mA)를 이용하여 주성분 원소를 분석하였다.

1. 주성분 원소

한탄강 일대 주상절리를 구성하는 암석의 주성분원소 분석결과는 다음과 같다(Table 2). 직접 관찰한 지역의 암석은 SiO₂의 값이 41.22wt%~48.13wt% 범위를 보인다. 그 외 지역에서 관찰된 암석의 SiO₂ 값은 45.23wt%~49.93wt%로 소폭의 차이를 보인다(Table 3).

송대소(SD), 교동가마소(GD), 구라이골(GR), 통현리(TH), 명우리(MW-01) 지역은 SiO₂의 값이 46.89wt%~48.13wt%, 직탕 폭포(JT), 화적연(HJ), 명우리(MW-04) 지역은 41.22wt%~42.92wt%로 서로 근사한 값을 보인다. 또한 상대적으로 직탕 폭포(JT) 지역이 41.22wt%로 최소값을 가지며 송대소(SD) 지역이 48.13wt%으로 최대값을 보인다.

1) 암석의 분류

주상절리를 구성하는 암석들을 TAS diagram에 도시하였다(Fig. 60). 연구지역의 주상절리를 구성하는 암석은 SiO₂의 값이 41.22wt%~48.13wt%로 현무암 영역에 포함된다.

한탄강 일대는 현무암 영역과 가깝게 도시된다. 연구지역의 주상절리를 구성하는 암석계열은 TAS성분도에서 대부분 알칼리 계열의 경계부에 도시된다.

이러한 결과는 분화의 초기단계로 추정되며, 전형적인 알칼리 계열의 모습으로 판단된다.

Table 2. Major elemental analyses(wt%) of columnar joints in study area.

Sample	JT-01	SD-01	HJ-01	GD-01	GR-01	TH-01	MW-01	MW-04
SiO ₂	41.22	48.13	42.86	47.74	46.89	47.98	47.91	42.92
TiO ₂	1.83	1.86	1.91	1.71	2.15	1.92	1.90	1.81
Al ₂ O ₃	14.48	15.15	14.39	14.88	16.21	15.06	15.33	13.90
Fe ₂ O ₃	20.02	11.41	19.99	12.29	11.87	11.84	11.96	20.19
MgO	8.02	9.05	8.16	9.87	9.09	9.02	8.93	8.13
CaO	8.66	8.50	7.07	8.27	8.22	8.28	8.40	7.36
Na ₂ O	2.49	2.91	2.70	2.67	2.76	2.73	2.99	2.90
K ₂ O	1.56	1.65	1.91	1.51	1.55	1.70	1.63	1.63
P ₂ O ₅	0.36	0.17	0.31	0.18	0.17	0.18	0.18	0.32

JT: Jik-Tang, SD: Song-da-so, HJ: Hwa-jeok-yeon, GD: Kyo-dong-gamaso, GR: Guraigol,
TH: Tonghyeon-ri, MW: Mung-woo-ri

Table 3. Major elemental analyses(wt%) of columnar joints in study area(Won, 1990).

Samp le	J-1-1	J-1-2	J-1-3	J-2-1	J-2-2	J-2-3	J-2-4	J-3-1	J-3-2	J-3-3	J-3-4	0818- 1	0818- 2
SiO ₂	47.32	46.27	45.23	47.12	47.24	47.43	46.90	47.63	47.57	47.01	47.51	47.05	48.69
TiO ₂	2.00	2.02	2.16	1.94	1.88	1.66	1.65	2.04	1.97	1.93	1.75	1.85	2.15
Al ₂ O ₃	15.41	16.16	15.74	15.63	15.91	15.23	15.35	15.40	15.66	15.69	15.94	15.64	15.77
Fe ₂ O ₃	10.52	10.75	10.9	10.82	10.91	10.43	10.99	11.07	11.25	10.59	10.98	11.06	10.56
MgO	9.56	9.38	9.06	8.53	9.24	10.16	10.38	8.40	9.18	9.09	9.05	9.22	6.86
CaO	8.17	8.04	7.18	7.97	8.25	8.33	8.10	7.88	7.99	8.30	8.30	8.08	8.28
Na ₂ O	3.52	2.85	2.39	3.01	3.08	2.73	3.99	3.09	3.38	3.12	3.35	4.03	4.48
K ₂ O	1.92	1.80	1.93	1.58	1.60	1.50	1.68	1.76	1.69	1.91	1.64	1.90	2.14
P ₂ O ₅	0.39	0.41	0.40	0.34	0.33	0.27	0.28	0.35	0.34	0.36	0.30	0.33	0.39

Table 3. Continued(Wee, 1996).

Sample	CB-10	CB-12	CB-20	CB-21	CB-23	CB-29	CB-31	CH-1	CH-2	CH-3	CH-4	CO-1	CO-2	CO-3	CO-6	CO-7
SiO ₂	48.67	47.73	47.80	48.55	47.82	48.47	47.99	47.99	47.99	47.32	48.21	46.84	48.53	48.20	48.13	48.15
TiO ₂	1.92	1.90	2.00	1.87	1.90	1.83	1.83	2.13	1.83	1.78	1.60	2.06	1.91	1.91	1.59	1.79
Al ₂ O ₃	15.68	15.50	15.83	15.35	15.78	15.55	15.51	15.37	15.56	14.80	15.45	16.47	15.62	15.44	15.12	16.66
Fe ₂ O ₃	11.46	11.07	11.40	11.58	11.61	11.18	10.55	11.11	11.14	11.75	11.40	11.72	11.21	11.18	11.65	10.89
MgO	8.73	9.63	8.79	9.15	9.13	8.79	9.93	6.37	9.59	10.43	9.68	8.31	9.31	9.24	10.67	7.82
CaO	8.14	8.30	7.76	8.00	7.99	8.35	8.43	8.41	8.86	8.33	8.40	7.43	7.99	8.08	8.05	8.23
Na ₂ O	2.65	2.35	2.49	2.82	2.26	2.57	2.63	2.59	2.07	2.31	2.49	2.15	2.83	2.91	2.37	2.25
K ₂ O	1.71	1.74	1.90	1.71	1.50	1.70	1.88	1.93	1.25	1.67	1.43	1.94	1.88	1.84	1.46	1.55
P ₂ O ₅	0.54	0.54	0.61	0.51	0.53	0.52	0.57	0.71	0.54	0.52	0.41	0.60	0.57	0.56	0.43	0.63

Table 3. Continued(Hwang, 2010).

Sample	YC601	4 (Yang, 1992)	5 (Yang, 1992)
SiO ₂	49.89	48.80	48.96
TiO ₂	1.12	1.06	1.29
Al ₂ O ₃	16.78	19.57	19.22
Fe ₂ O ₃	10.78	4.46	3.85
MgO	6.05	5.87	8.29
CaO	3.32	6.63	6.51
Na ₂ O	4.22	4.68	2.59
K ₂ O	1.66	1.18	1.84
P ₂ O ₅	0.14	0.01	0.19

Table 3. Continued(Choi, 1996).

Sam- ple	u-1-2	u-2-2	u-3-2	u-4-2	03-1- 1n	03-1- 2n	03-1- 3n	03-1- 4n	k-2-3	k-5-2	j-1-2	j-2-2	5-1-2j	0818- 2
SiO ₂	49.57	48.84	48.16	48.19	49.15	47.91	47.09	47.48	49.93	48.35	48.81	48.71	48.64	48.69
TiO ₂	1.70	1.79	1.78	1.71	1.65	1.63	1.83	1.72	1.68	1.62	1.66	1.64	1.81	2.15
Al ₂ O ₃	15.63	15.29	14.90	14.88	15.61	14.67	15.14	15.06	16.20	15.14	15.29	15.42	15.55	15.77
Fe ₂ O ₃	10.73	11.31	11.08	11.64	11.21	11.68	11.99	11.75	11.02	11.51	11.43	11.02	10.48	10.56
MgO	9.08	10.00	9.23	9.63	8.75	10.34	9.03	9.68	10.87	9.62	8.31	9.76	9.35	6.86
CaO	8.03	7.73	7.71	7.80	8.11	7.61	7.07	7.57	8.38	7.72	7.91	7.99	8.00	8.28
Na ₂ O	3.41	3.16	2.93	2.73	2.90	2.72	2.59	2.85	3.01	2.88	2.90	3.12	3.00	4.48
K ₂ O	1.80	1.77	1.75	1.57	1.52	1.50	1.61	1.56	1.59	1.51	1.56	1.54	1.63	2.14
P ₂ O ₅	0.37	0.39	0.38	0.36	0.33	0.34	0.39	0.35	0.35	0.36	0.34	0.34	0.38	0.39

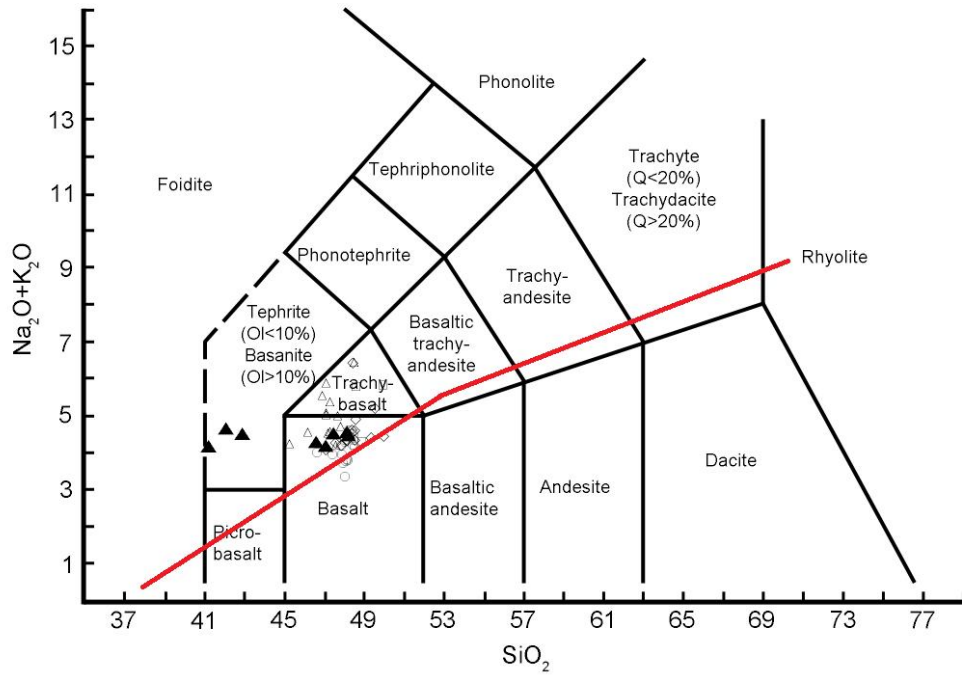


Fig. 60. Total alkali vs. SiO₂(wt%) diagram(TAS) with analyses of rocks in study area.

(▲: This study, ○: Wee, ◇: Choi, □: Hwang, △: Won)

2) 화학조성의 변화

Table 2와 Table 3의 주성분원소 분석결과를 토대로 MgO의 함량에 따른 주성분 원소의 함량 변화를 도시하였다(Fig. 61).

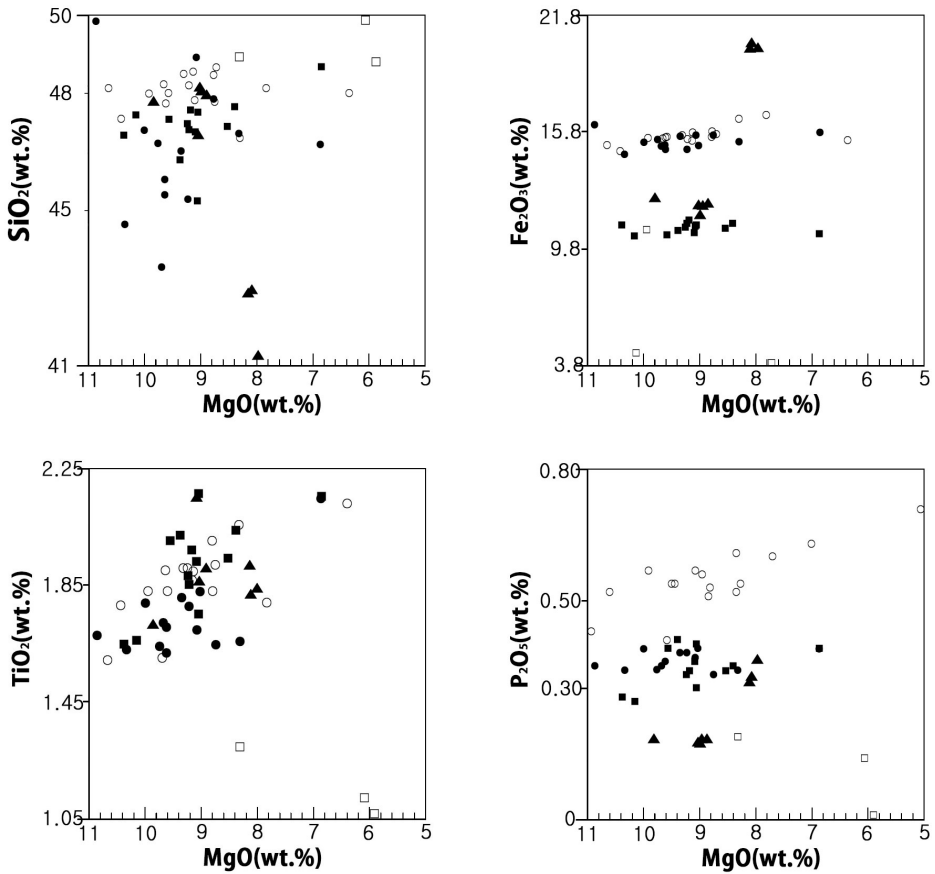


Fig. 61. Harker variation diagrams for rocks in study area.

(▲: Kim, ○: Wee, ●: Choi, □: Hwang, ■: Won)

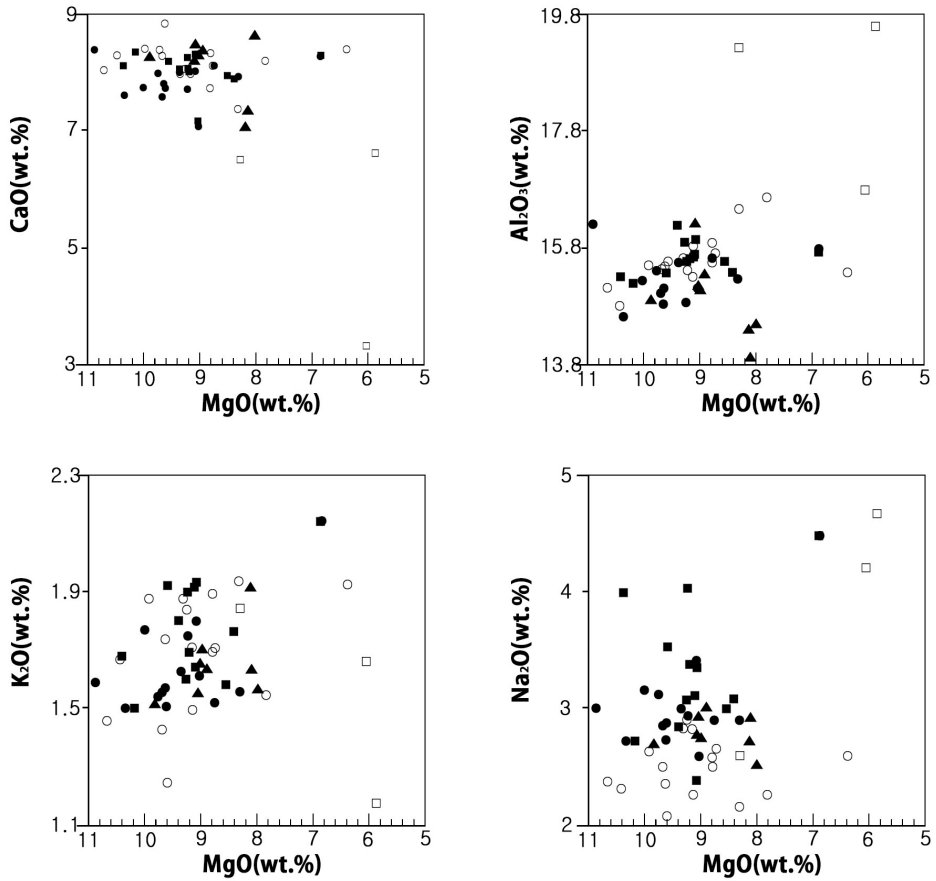


Fig. 61. Continued.

한탄강 주변 화산암류에 대한 주성분원소 분석 결과는 직접 관찰한 Table 2의 자료와 Wee (1996), 황상구 외(2010), 원종관 외(1990), 최상명(1996)의 자료를 참고하여 정리하였다. 위 논문에서 활용한 암석표본은 직탕폭포, 송대소, 화적연, 명우리, 가마소, 구라이골, 통현리에서 8개, 전곡 현무암(Wee, 1996) 16개, 궁평층 현무암에서 3개(양교석 (1982)의 장탄리 현무암 2개를 포함)(황상구 외, 2010), 추가령 현무암 13개(원종관 외 1990), 한탄강 주변 현무암 13개(최상명, 1996)의 총 53개였으며, 이 암석표본을 분석한 자료를 종합하여 Fig. 61에 도시하였다.

주원소 조성을 살펴보면 SiO₂ 조성은 41.22~49.93 wt.%의 좁은 범위를 나타낸다. 각 암층에서 SiO₂ 조성 범위는 직탕폭포, 송대소, 화적연, 명우리, 가마소, 구라이골, 통현리에서 분석한 현무암이 41.22wt%~48.13wt%, 전곡 현무암(Wee, 1996)이 46.84~48.67 wt.%, 궁평층 현무암(황상구 외, 2010)이 48.8~49.89 wt.%, 추가령 알카리 현무암(원종관 외, 1990)이 45.23~48.69 wt.%, 한탄강 현무암(최상명, 1996)이 47.09~49.93 wt.% 범위를 나타낸다. 직탕폭포 현무암에서 최저치를 가지고 한탄강 현무암에서 최고치를 가진다. Table 2, Table 3에 대해 현무암의 특성을 고려하여 MgO 조성에 따른 주원소 하커도(Harker diagram)를 보면 다음과 같다(Fig. 61). MgO 조성이 감소함에 따라 SiO₂, TiO₂, Na₂O, K₂O 조성은 증가하고, Al₂O₃, P₂O₅ 조성은 소폭 증가한다. 또한 MgO 조성이 감소함에 따라 CaO, Fe₂O₃ 조성은 변화 경향성을 보이지 않는다.

이와 같이 주원소의 조성이 MgO에 대해 거의 연속적인 변화를 나타내는 것은 챔버에서 발생하는 마그마 진화를 의미한다. SiO₂ 조성의 경우 증가는 상부로의 층서 변화, 즉 궁평층 현무암에서 금학산 안산암을 거쳐 동막골 응회암, 지장봉 응회암 및 산성 관입암 순의 층서 변화를 나타낸다(황상구 외, 2010). 이와 같은 층서 변화는 시간의 변화를 의미하기 때문에 SiO₂ 조성의 증가는 마그마챔버에서 시간에 따른 마그마 조성변화를 나타낸다(황상구 외, 2010). 그러므로 하커도(Harker diagram)에서 주원소의 직선형의 증감 현상은 마그마챔버에서 분별결정작용에 의한 마그마 분화를 지시하는 것으로 해석된다(황상구 외, 2010). 또한 채취된 용암류의 분화 경로가 지역별로 서로 다르므로 유동 중에 각기 결정분별작용이 일어났음을 추측할 수 있다(최상명, 1996). 이상의 주성분 조성의 변화가 보여주는 변화와 같이 주성분 화학조성의 변화 경로는 매우 분산된 형태이며, 각 화산 단위의 분화경로를 설명하기에는 다소 부족하다(최상명, 1996).

현무암의 분화 정도를 파악하기 위해 상부에서 하부에 이르는 현무암 박편을 제작하여 각층별로 편광현미경하에 관찰하였다(최상명, 1996). 전곡-철원 일대의 추가령 현무암은 감람석, 보통회석, 자철석 및 소량의 불투명 광물로 구성되며 전체적으로 반상조직을 갖는다(최상명, 1996). 반정광물은 주로 피코

타이트를 포유하는 감람석이며, 분화된 암석에서는 감람석 반정과 보통휘석 반정이 나타난다(최상명, 1996). 감람석은 결정형 크기가 매우 다양하며 자형의 결정이 주를 이룬다. 석기는 완정질이며 석기 내의 감람석은 주로 이당사이트화 되어있다(최상명, 1996). 석기는 감람석, 보통휘석, 사장석, 알칼리 장석, 자철석 및 티탄철석이 관찰된다. 사장석은 약한 방향성을 나타내는 침상이며, 알바이트 및 페리클린 쌍정이 관찰된다. 석기를 구성하는 사장석과 후기 정출된 휘석은 오피틱 조직으로 관찰된다(최상명, 1996).

편광현미경하에 관찰한 추가령 알칼리 현무암의 화산층서별 광물 조성 차이는 미미하며, 결정 크기 및 석기를 구성하는 사장석 및 세립 광물의 양 변화가 관찰된다(최상명, 1996). 상부층의 경우 많은 기공이 육안 관찰되며, 이는 박편에서도 동일하게 관찰된다.

V. 결론 및 제언

경기도 연천군과 포천시, 강원도 철원군에 위치한 한탄강 주변 지역에 분포하는 신생대 현무암질 암석의 주상절리를 조사하여 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 한탄강 일대 연구지역은 용암류 단위의 구분이 모호하며 이를 해석한 연구가 미흡하다. 또한 용암류 단위 구분에 있어 명확한 근거 없이 주상절리 외부 형태만을 활용하여 판단하는 오류가 발생하기도 한다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 연구지역 7곳을 선정하여 단일 또는 수차례의 용암류 흐름을 관찰하고 명확한 근거 기준을 제시하여 해석하였다. 이를 해석하기 위한 기준은 주상절리대 층간에 존재하는 기공의 유무, 공동, 클링커, 베개 용암이다. 이와 같은 기준을 활용하여 연구지역의 용암류 단위를 구분한 결과는 Table. 4와 같다.

Table 4. Columnar joint locations with lava flow unit, structure and polygon cross section colomnar joints in the study area.

연구 지역	용암 흐름 수	해당 구조	다각형의 크기
직탕폭포	1매	엔테블러취	약 10-45cm
송대소	2매	로브	약 10-50cm
화적연	1매	엔테블러취	약 10-40cm
교동가마소	1매	컬러네이드	약 40-105cm
구라이골	2매	컬러네이드	약 30-70cm
통현리	1매	엔테블러취	약 15-40cm
명우리	1매	컬러네이드	약 60cm

2) 연구지역에 분포하는 주상절리의 특징 분석을 위해 주상절리를 구성하는 암석들의 화학분석을 진행하였으며, 단면 관찰이 가능한 곳에서 주상절리 다각형의 수(N), 기둥면 사이의 각(θ), 기둥면사이 폭(L)을 측정하였다. 또한 주변 지역 지형과의 연관성을 파악하기 위한 분석을 실시하였다.

3) 연구지역에 분포하는 주상절리의 화학분석 결과 SiO₂ 함량은 41.22wt% ~ 49.93wt% 의 범위를 나타내며, TAS diagram에 도시한 결과 이 53곳은 모두 알칼리 계열의 현무암에 해당한다.

4) 한탄강 일대 연구지역 7곳에서 관찰한 암석은 사장석, 휘석, 감람석 등이 주를 이루는 서브오피틱조직이며, 주성분 원소 분석 결과 전형적인 제4기 현무암의 화학조성과 일치하였다.

5) 연구지역에서 측정된 주상절리의 전체 빈도수는 다음과 같다. 다각형의 수(N)는 4각형이 17.9%, 5각형이 38.9%, 6각형이 34.7%, 7각형이 5.8%, 8각형이 1.2%, 9각형이 1.5%의 빈도율을 보인다. 기둥면 사이의 각(θ)은 41°~50°가 1%, 51°~60°가 0.4%, 61°~70°가 1.5%, 71°~80°가 8%, 81°~90°가 11.5%, 91°~100°가 17%, 101°~110°가 14%, 111°~120°가 15%, 121°~130°가 14%, 131°~140°가 9%, 141°~150°가 8%, 151°~160°가 0.2%, 161°~170°가 0.2%, 181°~190°가 0.2%의 빈도율을 보인다.

6) 연구지역의 주상절리는 5각형이 가장 많고, 최대 직경은 1m 이내의 크기를 보였다. 연구지역 7곳에서 관찰된 주상절리 단면을 활용하여 관찰된 주상절리 단면이 주상절리대의 어느 구조에 해당하는지 파악하고 이들의 크기를 조사하였다(Table. 4). 직탕폭포에서 관찰한 엔테블러취의 단면은 약 10~45cm, 송대소에서 관찰한 로브의 단면은 약 10~50cm, 화적연에서 관찰한 엔테블러취의 단면은 약 10~40cm, 교동가마소에서 관찰한 켈러네이드의 단면은 약 40~105cm, 구라이골에서 관찰한 켈러네이드의 단면은 30~70cm, 통현리에서 관찰한 엔테블러취의 단면은 약 15~40cm, 명우리에서 관찰한 켈러네이드의 단면은 약 60cm이다. 이를 통해 일부 주상절리만 관찰되는 한탄강 일대에서 단면의 크기가 약 40cm 내외이면 엔테블러취, 그 이상이 주를 이룬다면 켈러네이드로 해석가능한 기준을 제시하였다.

7) 연구지역 중 주상절리 세트 구조가 뚜렷하게 관찰되는 지역은 송대소, 통현리, 명우리이다. 이들의 규모와 두께를 비교한 것은 Table. 5와 같다.

Table 5. Columnar joint locations with scale, upper colonnade, lower colonnade, entablature in the study area.

연구지역	주상절리 세트 규모	평균 하부 켈러네이드	평균 엔테블러취	평균 상부 켈러네이드
송대소	약 15m	약 120cm	40cm 내외	약 100cm
통현리	약 30m	약 80cm	40cm 내외	약 100cm
명우리	약 30m	약 100cm	40cm 내외	약 80cm

Table. 5에서 보이는 하부 켈러네이드의 폭은 연구지역 별로 약 20cm 이상의 차이를 보이며, 상부 켈러네이드 또한 이와 유사하다. 반면, 엔테블러취의 폭은 주상절리 세트의 규모 및 연구지역과 관계없이 40cm 내외의 폭으로 관찰된다. 주상절리의 크기는 용암의 냉각속도에 의해 결정된다. 냉각속도는 용암이 굳어지는 초기 환경에 의해 결정되며, 초기 환경이란 용암 하부와 맞닿는 지표의 상태, 상부와 맞닿는 공기층의 상태이다.

켈러네이드는 형성과정에서 외부 환경의 영향을 직접적으로 받으며, 정상적으로 열이 유지, 냉각되는 과정에서 형성된다. 이는 외부 환경마다 냉각속도의 차이가 있음을 지시하고, 켈러네이드의 크기가 다양하게 정출될 수 있음을 의미한다. 그러나 엔테블러취는 다른 양상을 보인다. 용암류의 중간부에서 관찰되는 엔테블러취는 켈러네이드에 비해 얇은 기둥면 폭으로 관찰되며, 용암류의 크랙이나 틈새로 외부의 액체 또는 기체가 침투하여 급냉함으로서 형성된 것이다.

Table 5.의 연구지역 내 엔테블러취의 규모는 송대소 약 7m, 통현리 약 17m, 명우리 약 12m로 다양하게 관찰된다. 엔테블러취는 주상절리 세트의 규모와 뚜렷한 연관성 없이 급냉하여, 40cm 내외의 일정한 폭으로 발달한다 (Table 4, 5). 이는 Table. 5에 표시된 3곳의 연구지역 외에도 엔테블러취의

다각형 단면 크기를 측정된 직탕폭포, 화적연, 통현리에서 유사한 값을 보인다.

현재 한탄강 일대에서 관찰되는 주상절리 특징에 대한 연구는 미흡한 상태이다. 그렇기에 본 연구에서는 한탄강 일대 용암류 단위를 명확한 기준을 제시하여 구분하고, 연구지역 내 다양한 규모의 주상절리대에서 관찰되는 컬러네이드, 엔테블러취의 형태학적 차이를 해석하였다.

8) 위와 같은 결론을 토대로 교육 및 지역사회 측면에서 다음과 같이 제언을 하였다. 연구지역인 한탄강 일대는 2020년 7월 한탄강 유네스코 세계지질공원으로 등재되었으며, 도심 인근 지역의 학생들에게 지질학적 현상에 대한 관찰 기회를 제공하기 매우 적합하다. 그러나 일반인, 학생들에게 제공되는 한탄강 주상절리에 대한 정보는 부족한 상황이다. 이를 해결하기 위해 지역사회는 현대사회의 변화에 맞추어 한탄강 주상절리에서 관찰할 수 있는 다양한 지질학적 개념과 국내 다른 주상절리와의 차이점을 직접 관찰하고 발견할 수 있는 교육 콘텐츠를 2015 개정 교육과정 지구과학 I, II와 연계하여 추가적으로 개발, 보강한다면 전문가뿐 아니라 일반인, 학생들도 더욱 흥미를 가질 수 있을 것이다.

또한 본 논문에서 제시한 연구지역을 기반으로 교육전문가와 함께 교육과정에 근거한 답사 및 탐구용 자료 제작을 도모한다면 지질학 및 지구과학에 흥미 있는 일반인, 학생들에게 현재보다 더욱 매력있는 경관적 및 교육적 가치를 가진 야외학습 공간이 될 것이다.

본 연구를 기반으로 한탄강 주상절리 자체에 대한 이해뿐 아니라, 용암류 단위를 구분하는 기준, 주상절리의 형태학적 연구, 화산암 연구 등이 더욱 상세하게 이루어진다면 한탄강 지질공원이 현재보다 더욱 흥미롭고 유익한 탐구학습의 장으로 거듭날 수 있을 것이다.

VI. 참고 문헌

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.

Sunyoung, Ryu, Miho, Oka, Koshi, Yagi, Tetsuya, Sakuyama, Tetsumaru, Itaya, 2011, 「K-Ar ages of the Quaternary basalts in the Jeongok area, the central part of Korean Peninsula」, 『Geoscience Journal』, 15(1), 1-8.

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』, 52, 13-27.

Youngwoo Kil, Kun Sang Ahn, Kyung sik Woo, Kwang Choon Lee, Yong-Joo Jwa, Woochul Jung, Young Kwan Sohn, 2019, 「Geoheritage Values of the Quaternary Hantangang River Volcanic Field in the Central Korean Peninsula」, 11(1), 765-782.

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.

고정선·윤성효·홍현주, 2005, 「제주도 대포동현무암에 발달한 지상절리의 형태학 및 암석학적 연구」, 『암석학회지』, 14(4), 212-225.

기원서, 임순복, 김현철, 황상구, 김복철, 송교영, 김유홍, 2008, 한국지질도 (1:50000), 연천도폭 지질조사보고서, 한국지질자원연구원, 1-2.

김광호, 송무영, 1995, 「한반도 중서부 지각구조와 물성 연구: 전곡-연천 일대에 분포하는 백악기 화산암류의 고지자기」, 『지구과학회지』, 16(1), 65-73.

김규환, 김옥준, 민경덕, 이윤수, 1984, 「추가령 지구대의 지질구조 고지자기 및 암석학적 연구」, 『대한자원환경지질학회』, 17(3), 197-214.

김옥준, 1973, 「경기육괴서북부의 변성암복합체의 층서와 지질구조」, 『자원환경지질학회』, 6(4), 201-218.

손정모, 2016, 한반도 남부 해안에 분포하는 주상절리의 형성 메커니즘, 조선대학교, 박사학위논문.

손정모, 안건상, 2016, 「전라남도 고흥지역에 분포하는 주상절리에 관한 연구」, 『한국지구과학회지』, 37(6), 332-345.

송교영, 조등룡, 2007, 한국지질도(1:50,000), 김화도폭 지질보고서, 한국지질자원연구원, 32.

안건상, 2014a, 「남한에서 주상절리의 분포와 암석학적 특성」, 『암석학회지』, 23(2), 45-59.

안건상, 2014b, 「우리나라 주상절리에 대한 연구 전략」, 『한국지구과학회지』, 35(7), 501-517.

안건상, 손정모, 2015, 「전라남도 신안군 증도에 분포하는 주상절리의 특징」, 『한국도서학회』, 27(2), 157-173.

양교석, 1982, 「추가령 열곡내 한탄강 하류 지역에 분포하는 화산암류에 관한 연구」, 『한국지구과학회』, 3(1), 13-25.

오강호·문병찬·김해경, 2006, 「전남 남서 해안에 분포하는 주상절리의 특징」, 『한국지형학회지』, 13(3), 55-62.

우현동·박진수·오한솔·장윤득, 2013, 「울릉도 국수바위 주상절리의 형성과정과 자연유산적인 가치」, 『암석학회지』, 22(1), 9-17.

위수민, Wee, Soo-Meen 1996, 추가령 열곡대에 분포하는 전곡현무암의 지화학적 특성, 대한자원환경지질학회, 29(2), 171-182.

이윤수, 민경덕, 황재하, 2001, 「고지자기학적 관점에서 본 추가령단층곡의 생성과 진화」, 『자원환경지질』, 34(6), 555-571.

이대성, 류기주, 김광호, 1983, 「추가령 열곡 지구조적 해석」, 『대한지질학회』, 19(1), 19-38.

원종관, 1983, 「한반도에서 제4계 화산활동에 관한 연구」, 『지질학회지』, 19(3), 159-168.

원종관, 김윤규, 이문원, 1990, 「추가령 알카리 현무암에 대한 지구화학적 연구」, 『대한지질학회』, 26(1), 70-81.

정형은, 2019, 전라남도 구례·순천·여수 지역의 안산암 주상절리 형태분석, 조선대학교 석사학위 논문.

정형은, 안건상, 2014, 「전라남도 순천·여수지역 안산암에서 발달된 주상절리」, 『한국지구과학회』, 한국지구과학회 추계학술발표회논문집, 75-76.

조민호, 2017, 변산반도 국립공원 내 산성화산암에 발달하는 주상절리의 특징, 조선대학교 석사학위 논문.

진광민·김영석, 2010, 「울산 정자해수욕장과 경주 읍천해안에서 관찰되는 수평 주상절리 (와상절리)의 발달특성 및 관광지질자원으로서의 가치 연구」, 『지질학회지』, 46(4), 413-427.

최무장, 1982, Report of the Third Exczvation in Cheon-kok Paleolithic Site, 건국대학교 인문대학논총, 14, 207-238.

황재하, 김유홍, 2007, 한국지질도(1:50,000), 지포리도폭 지질보고서, 한국지질자원연구원, 1-54.

황상구, 김재호, 2010, 「철원분지 동막골응회암의 유형과 공급지」, 『암석학회지』, 19(1), 51-65.