

濟州道の 火山과 洞窟

일선고등학교 과학교사들의
제 6 회 전국 자연학습탐사보고서
(동아일보사 주최)

權重國(江原·春川高)	李相南(光州·東亞女高)
金惠德(慶南·鎭海女高)	李仁煥(慶北·永川女高)
朴鍾善(忠南·論山女高)	張南錫(全北·全州高)
朴賢在(서울·世宗高)	鄭載燮(京畿·議政府高)
愼卓範(大邱·科學高)	鄭昌滿(全南·潭陽女高)
辛喆煥(忠北·濟州女高)	

(가나다 순)

I. 서론

제주도는 지리적으로 동경 126°08'~126°58', 북위 33°06'~34°00'에 위치하며 비양도, 우도, 상추자도, 하추자도, 횡간도, 가파도, 마라도 등 8개의 유인도와 54개의 무인도로 구성되었으며 행정구역상 2시 2군 6읍 5면으로 되어 있다.

또한 본 도는 한반도의 최남단에 위치하며 환태평양 조산대 즉 호상열도에서 벗어난, 대륙쪽에 위치한 화산도로서 백두산, 울릉도, 연천, 전국 지역 등과 더불어 신생대 화성활동과 그에 수반하여 생성된 화산용암 동굴에 관한 연구조사 지역으로 대단히 의의가 있는 대상이다.

본도에 대한 지질조사는 하라구치(原口九萬 1929. 1931), 이상만(1966), 김봉균(1969), 원종관(1976), 이문원(1982), 정봉일(1983), 민경덕(1986)등에 의해 지표지질, 고생물, 중력, 자력탐사 연구를 통해 주목을 받아온 지역으로 지구조상 환동해 알카리구조구에 해당한다.

본도의 형성은 신생대 제3기말 pleio세부터 제4기 Pleisto세에 이르는 동안 화산활동에 의해 형성되었다. 이러한 화산활동은 유사시대에 들어서도 있었던 것으로 생각되며 「동국여지승람」 제38권에 의하면 1002년, 1007년에 2회의 분화활동이 있어 비양도가 형성되었을 가능성이 있고 「이조열성조 실록」에 의하면 1455년 1월 24일과 1670년 11월 15일 2회에 걸친 강렬한 지진이 있었다는 기록이 있다.

이러한 화산활동에 수반되어 생성된 화산동굴은 이제까지 약 60여개가 발견되었다. 전세계적으로 분포하는 화산동굴이 1,000여개에 불과하며 미국의 서북부에 500여개 이탈리아 에트나 화산지역에 150여개 일본의 후지산 지역에 100여개가 발견되었다. 이와 같은 세계적인 화산 분포와 비교해 볼 때 제주도의 화산분포 밀도가 세계 제1이라는 점은 특기할 만한 사실이다.

금번 일선 고등학교 지구과학 교사들의 자연학습탐사 활동은 제주도의 신생대 퇴적층 및 화성암의 분포와 화성활동에 따라 형성된 동굴과 그 생성원인을 탐구하고 제주도의 자연지리 및 지질학적 의의를 재조명하여 학습활동에 활용하는데 그 뜻이 있다 하겠다.

文敎部가 추천하고 東亞日報의 자매지 「과학동아」와 東亞文化센터, 쌍용그룹이 주최한 一線 高等學校 科學教師들을 위한 「第6回 全國自然學習探査」의 내용을 보고서로 꾸몄다.

東亞日報社와 쌍용그룹은 1987년부터 여름방학과 겨울방학을 이용, 현지 학습의 기회를 갖기 어려운 고등학교 과학교사들을 위해 본 학습탐사를 실시해 왔으며 이 보고서는 1990년 겨울방학 때 「濟州道の 지질」을 탐사한 결과이다.

본 사업이 고등학교 일선 과학교사는 물론 자연과학 발전과 과학문화 창달에 이바지되기를 바라는 마음 간절하다.

지도교수

洪始煥(建國大 理科大 地理學科 教授)

현지지도

申裕泳(제주도 교육위원회 장학사)

현지안내

裴斗安(한국동굴학회 이사)

문교부 연구관

金永宙(文敎部 장학편수실)

참가교사

權重國(江原·春川高)	李相南(光州·東亞女高)
金惠德(慶南·鎭海女高)	李仁煥(慶北·永川女高)
朴鍾善(忠南·論山女高)	張南錫(全北·全州高)
朴賢在(서울·世宗高)	鄭載燮(京畿·議政府高)
愼卓範(大邱·科學高)	鄭昌滿(全南·潭陽女高)
辛喆煥(忠北·清州女高)	(가나다 순)

사진기자

尹恒老(東亞日報社 出版寫眞部長)

◇기간 : 1990년 1월30일~2월3일(4박5일)

◇지역 : 濟州道 일원

II. 탐사 일정

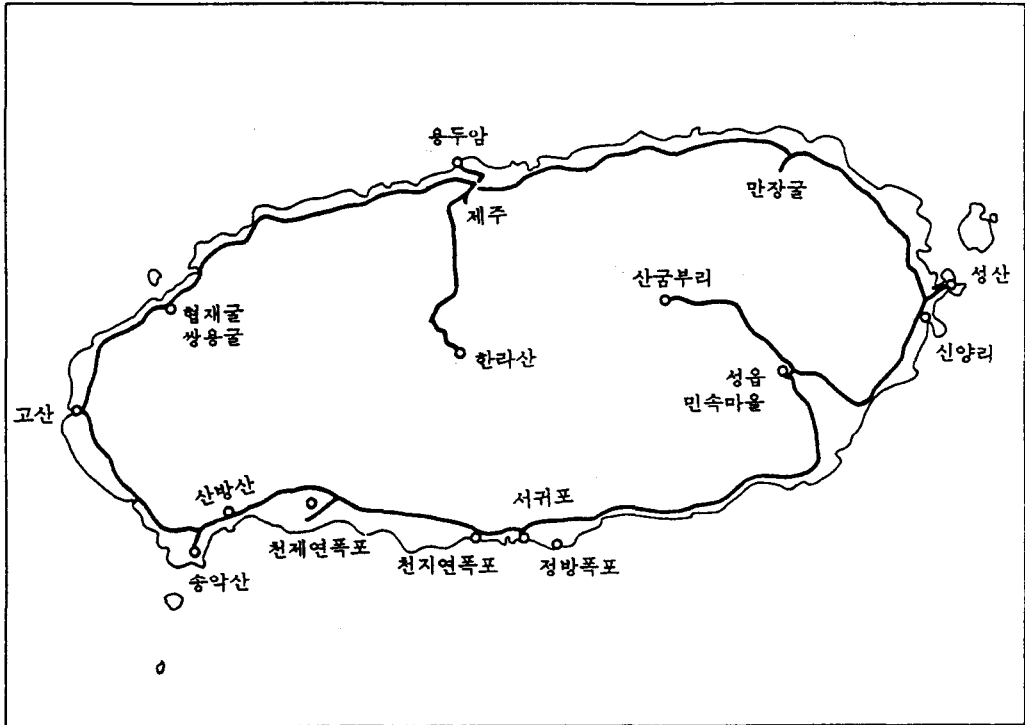
1. 일정

제주도 지질 및 동굴학습 탐사는 1990년 1월 30일 부터 2월 3일까지 실시되었으며 일정 및 활동 내용, 탐사지는 표1, 그림1 같다.

표 1. 탐사일정 및 활동 내용

월 일	활 동 지 역	활 동 내 용
1. 30	제주 자연사박물관	제주도의 개관 및 민속 관찰
1. 31	만장굴 성산포 신양리 산굼부리 정방폭포	용암동굴 관찰, 생성원인 토의 성산퇴적층, 해식애, 육계도 관찰 신양리퇴적층, 화석 관찰 기생화산 및 식생 관찰, 생성원인 토의 현무암 주상절리 관찰
2. 1	서귀포층 산방산 용머리 송악산 고산 협재굴 쌍용굴	서귀포퇴적층의 퇴적구조, 패류화석 관찰 종상화산, 해식동굴 관찰 용머리 퇴적층, 용기 해식지형 관찰 이중 분화구, 화산쇄설물 관찰 화산 퇴적 구조 관찰 복수 동굴의 성인 관찰
2. 2	한라산 사라봉	한라산에 분포하는 화산암 관찰 화산퇴적 지형에 포획된 화강암 관찰
2. 3	용두암 세미나	제주현무암, 화산지형 관찰

그림1. 탐사지



Ⅲ. 지형

1. 특성

본도는 화산도로서 화산지형의 특색을 잘 보여주고 있으며 하식윤희로 보아 유년기에 속하므로 화산 원지형이 잘 보존되어 있다.

제주도의 평면상 모양은 장축 73km, 단축 31km의 타원형이며 장축의 방향은 N 70 E로써 한반도 남해안선과 나란하다. 또한 지형은 한라산을 정점으로 동서 사면은 3~5로 완만하게, 남북방향은 5 내외의 급한 경사를 이룬다. 따라서 전체적으로 Shield 지형에서 볼 수 있는 Aspite 화산이다. 이것은 이 섬을 형성한 화산분출이 초기에는 광역분출을 하였으나 후기에는 백록담을 중심으로 한 화구분출에 기인한 것으로 생각된다.

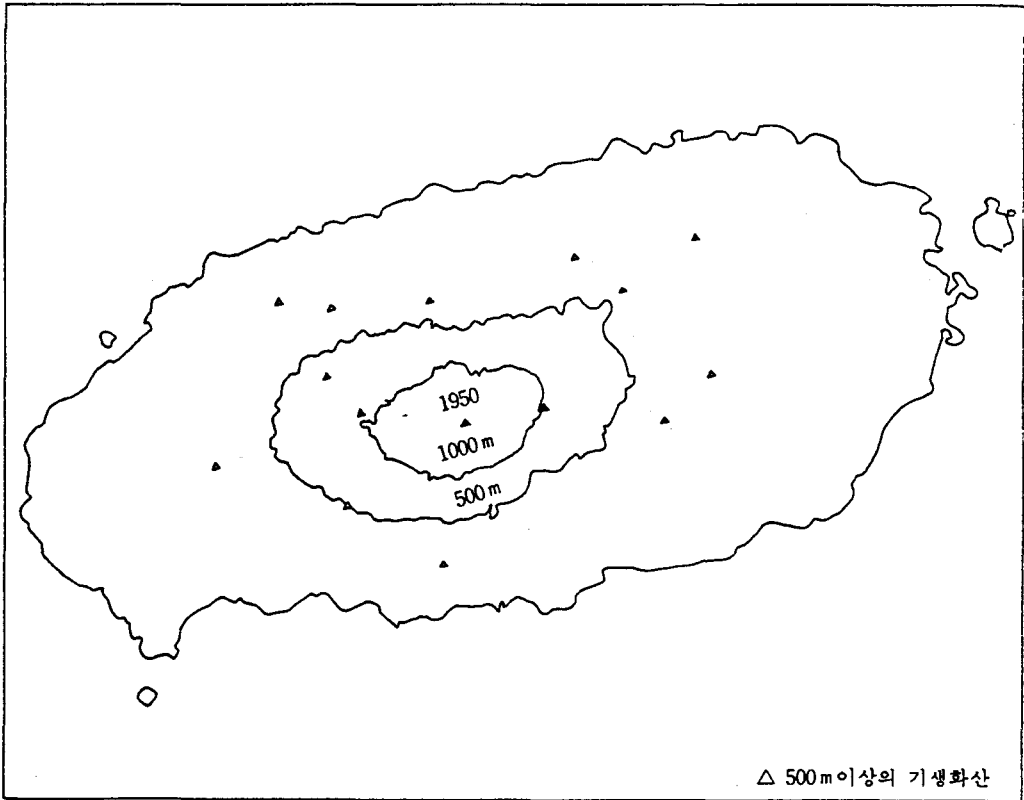
2. 산계

본 도의 중앙에 해발 1,950m의 한라산이 위치하고 「악」, 「오름」, 「봉」으로 불리는 약 360여개의 기생화산이 존재하며 이러한 기생화산의 90% 이상이 噴石丘로서 80m 내외의 높이를 이루며 소량의 용암과 쇄설물의 교대누적으로 호층을 이루기도 한다.

3. 수계

본 도의 지세는 한라산을 정점으로 방패상으로 되어 있어 방사상 수계를 나타낸

그림2. 제주도의 산계도

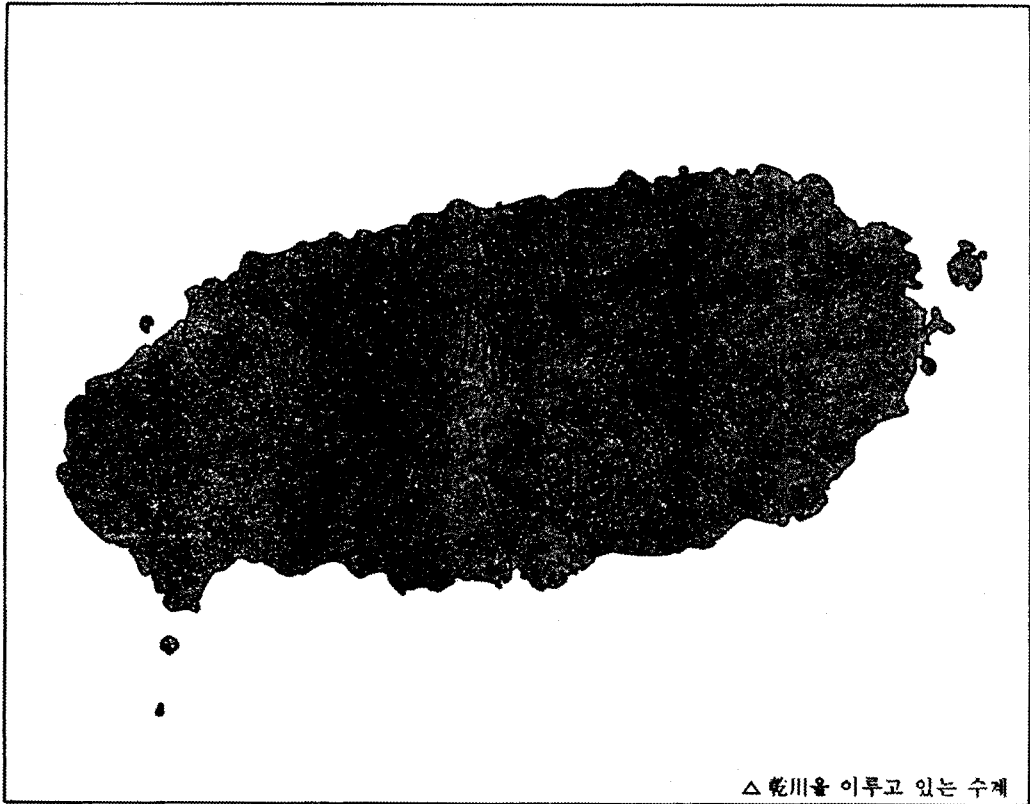


다. 경사가 완만하고 넓은 용암대지가 발달되어 있는 동서쪽에는 수계의 발달이 빈약한 반면 대부분의 하천은 북류, 또는 남류하며 대표적인 하천으로는 도곡천, 마두천, 별인내, 배오내와 같이 북류하는 하천과 효조천, 애이리내, 송천, 안라천, 가시천과 같이 남류하는 하천이 있다.

남사면의 하천들은 하류에서 깊이 20m 내외의 협곡을 형성하고 있는데 비해 북사면의 하천은 3~4m에 불과하다. 이러한 남북 하곡 발달 차이는 제주도 북안에 비해 남안이 용기정도가 현저하고 강수량이 북사면보다 남사면이 많아 활발한 하각작용이 진행되었고 남사면 하류의 하상 및 곡벽은 주상절리가 잘 발달된 조면암질안산암이어서 그에 따른 Blocking에 기인한다고 생각된다.

긴 하천도 그 길이가 30km에 불과하고 대부분 15km 내외이며 이들 각 하천은 빗물이 침투하기 쉬운 다공질 현무암 위로 흐르기 때문에 평소에는 물이 없는 乾川을 이루고 있다.

그림3. 제주도의 수계도



IV. 지질

1. 지질개요

제주도의 지질은 신생대 제3기 플라이오세의 서귀포층, 제4기의 플라이스토세에 속하는 성산층, 화순층, 신양리층 등의 퇴적암층과, 현무암, 조면안산암, 조면암 등의 화산암류, 기생화산에서 분출된 화산쇄설물 등으로 구성된다.

본 도의 기반을 이루는 서귀포층에 대한 고생물학적인 연구결과 본도의 화산활동은 신생대 제3기말부터 시작되었음이 밝혀 졌다(김봉균, 1972).

본 도에서의 화산활동은 크게 5회로 구분되며 79회 이상에 달하는 용암분출도 관찰된다.

화산활동에 있어서 각 분출기는 대체로 다량의 현무암 유출로부터 시작하여 안산암질, 또는 조면암질로 이화되어 용암의 유출은 양적으로 감소되는 것과 동시에 다량의 화산쇄설물을 분출하였다(원종관·이문원, 1976).

360여개에 달하는 기생화산(분석구)은 성산층 및 화순층 퇴적기에 형성된 것과 최후의 화산활동의 산물인 제5기에 속하는 것으로 구분된다.

2. 지질계통

본도의 지질계통은 아래의 표2와 같다.

표 2. 제주도의 지질계통

시 기	분 출 단 계	암 석
Holocene		1002, 1007년의 소규모 화산활동
Pleistocene	제 5 분출기 (분석구, 기생화산 형성)	분석구 퇴적물 백록담현무암
	제 4 분출기 (한라산 동서방향 형성)	한라산조면암질안산암 한라산현무암 성판악현무암 시흥리현무암
	제 3 분출기 (한라산 남북방향 형성)	법정리현무암 하효리현무암 제주현무암
	제 2 분출기 (제주도 형성)	신양리층 산방산조면안산암 중문조면암

		서귀포조면암 표선리현무암
Pleioce	제 1 분출기 (기저용암)	서귀포층 기저현무암
시대미상		화강암

3. 지질각론

(1) 기반암

노두가 지표상에서 발견되지 않지만 제주시 사라봉 부근의 화산분출암내에서 포획암으로 발견되는 시대미상의 화강암이 제주도의 기반암으로 추측된다.

(2) 퇴적암류

1) 서귀포층 : 서귀포 부근 해안을 따라 두께 60 m, 길이 1km의 소규모 분포를 이룬다.

이 지층은 淡黄色 내지 淡褐色의 응회질 사암과 세일로 서로 호층을 이루며, 구성 광물은 감람석, 휘석, 장석, 석영 등이며 층리, 연흔 등의 퇴적구조가 관찰된다. 이 층에 현무암의 亞角礫, 圓礫이 포함되어 본 층의 퇴적뿐만 아니라 그 이전에도 현무암이 유출이 있었을 것으로 추정되어 서귀포층 하부의 기저현무암의 존재를 가능케 하는 증거가 된다.

이 층의 생성시기는 김봉균의(1971) 유공층 등의 화석연구에 의하여 플라이오세로 밝혀진 바 있다.

특히 서귀포 앞 서쪽 삼매봉 앞 바닷가에는 이 층의 학술적 가치를 보존하기 위하여 천연기념물 195호로 지정 보호하고 있다.

2) 성산층 : 성산일출봉 및 동서 해안저지대에 Dome상으로 완만한 경사를 이루며 산재되어 있고 주로 화산쇄설물로 구성된다. 회색, 황갈색 또는 암회색을 띠는 중립-조립질 응회암내에 주먹 크기의 현무암질 화산괴 등이 발견된다. 고결도는 낮으나 침식에 대한 저항력이 강해 성산일출봉, 산방산 앞 용머리에서는 기암절벽의 명승지를 이루기도 한다.

3) 화순층 : 성산에서 신양리에 이르는 해안에 약 10m의 두께로 분포하며 성산층을 부정합으로 덮는다. 적갈색을 띠며 화산회, 사질 및 화산력 등으로 구성된 응회질 암이다. 이 층에서 산출되는 화석연구에 의하여 생성시대가 플라이스토세임이 밝혀져 김봉균교수에 의해 신양리층이라고 명명 됐다. 제주도 서해안의 한경면 고산리 일대의 퇴적층도 신양리층에 대비된다.



신양리층

(3) 화산암류

1) 기저현무암 : 서귀포층내에서 발견되는 현무암의 礫으로부터 서귀포층 하부에 기저현무암이 존재할 것으로 추측되었으며 시추 결과 확인되었다. 이층은 제주도의 기저를 이룬다.

2) 표선리현무암 : 동서해안 저지대에 완경사의 대지상으로 넓게 분포하고 있다. 회색 내지 암회색의 다공질암으로 표면에 Ropy 구조(繩狀構造)와 구갑상 주상절리가 잘 발달되어 있다. 본 현무암은 점성이 작고 유동성이 큰 염기성 현무암으로 제주도의 용암동굴 분포와 매우 밀접한 관계를 갖고 있다. 본 현무암 분포지역에 만장굴(북동부), 와홀굴(북부), 미천굴(남동부), 빌레못굴, 협재굴(서부)과 같은 Lava tunnel 형의 동굴이 존재한다.

3) 서귀포조면안산암 : 서귀포 서귀리에서 중문면 대평리에 걸쳐 분포하며 특히 바다로 직접 떨어지는 정방폭포 부근에서 3매의 요암류가 흘렀음이 발견되었고 해안을 따라 주상절리군이 발달되어 있다.

4) 산방산 조면안산암 : 산방산을 중심으로 남쪽 해안에 분포하며 회색 내지 청회색의 치밀한 암질로 되어있으며 특히 안덕면 사계리의 산방산은 종상화산으로 분류된다.

5) 제주현무암 : 한라산을 중심으로 남북 해안저지대, 중간 산악지대에 분포한다. 회색 내지 암회색의 치밀한 암석으로 감람석, 휘석의 미반정과 감람석 반정을 함유한다.

6) 한라산현무암 : 한라산을 중심으로 고산지대와 산악지대에 분포한다. 다공질로 현저한 반상구조를 나타내며 다른 현무암에 비해 선명한 흑색을 띠는 것이 특징이다.

이 외에 중문조면안산암, 수망리현무암, 하효리현무암, 법정리조면안산암, 시흥리현무암, 성판악현무암, 한라산조면안산암, 백록담현무암 등이 있다.

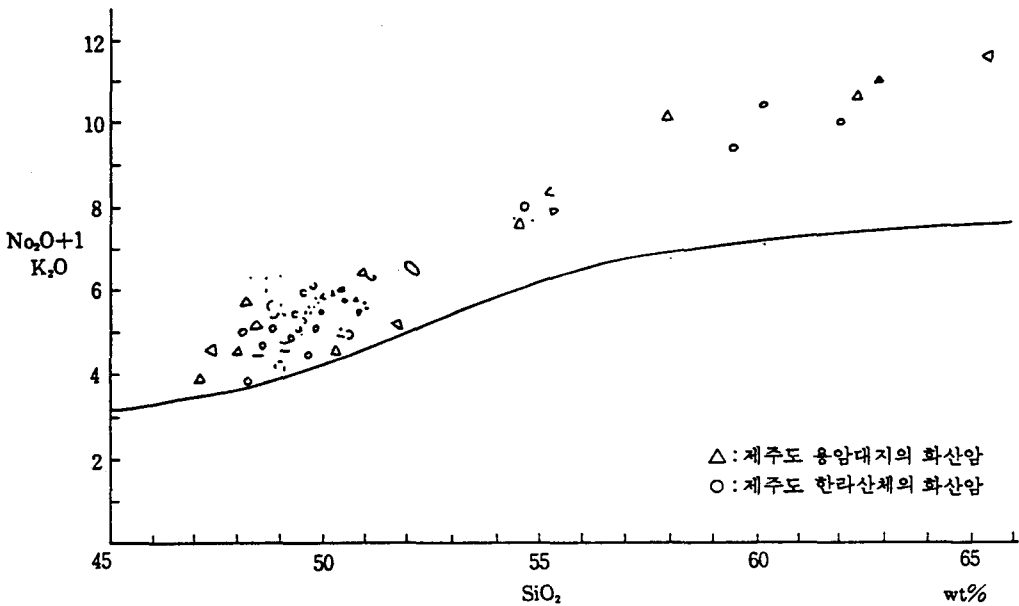
(4) 기생화산 분출물

후화산 활동의 산물로서 전역에 걸쳐 360여개에 달하는 기생화산이 산재되어 있다. 이 중 90% 이상이 噴石丘이며 상당량의 화산피를 함유한다. 이들 분석과 화산피의 대부분은 현무암질 또는 조면암질안산암이며 그중 화산탄, 화산병을 포함한다.

(5) 제주 화산암의 암석화학적 특징

본 도의 화산암은 $(Na_2O-K_2O)-SiO_2$, $Al_2O_3-(Na_2O+K_2O)-SiO_2$ 의 성분 변화분석을 통하여 볼 때 알카리암계에 속한다. 그림 4는 $(Na_2O+K_2O)-SiO_2$ 의 관계를 나타낸 것이다.

그림4. 화산암의 SiO_2 와 Na_2O , K_2O 와의 관계



제주도는 울릉도, 백두산, 전곡 등의 화산암과 더불어 알카리암에 속하고 하와이섬의 알카리암과 같이 K_2O 에 비해 Na_2O 가 많아서 Na계열에 속하며 울릉도의 화산암은 K_2O 가 많아서 K계열에 속한다.

제주화산암은 SiO_2 양에 따라서 알카리현무암(SiO_2 함량 50% 이하) — 조면암질안산암(SiO_2 함량 50% 전후) — 무겨라이트(SiO_2 52~54%) — 조면암(SiO_2 57% 이상) 등으로 구분된다. 제주도 화산암의 95%가 알카리현무암과 조면암질안산암이며 그 나머지가 무겨라이트와 조면암이다.

본 도의 알카리암의 성인이 초생 마그마에 그 기원이 있다고 추정한다면 본 도를 형성한 화산작용은 베니오프대 심부에서 발생된 감람석현무암질 마그마에 기인된 것으로서 일련의 판구조운동과의 관련 가능성을 시사한다 하겠다.

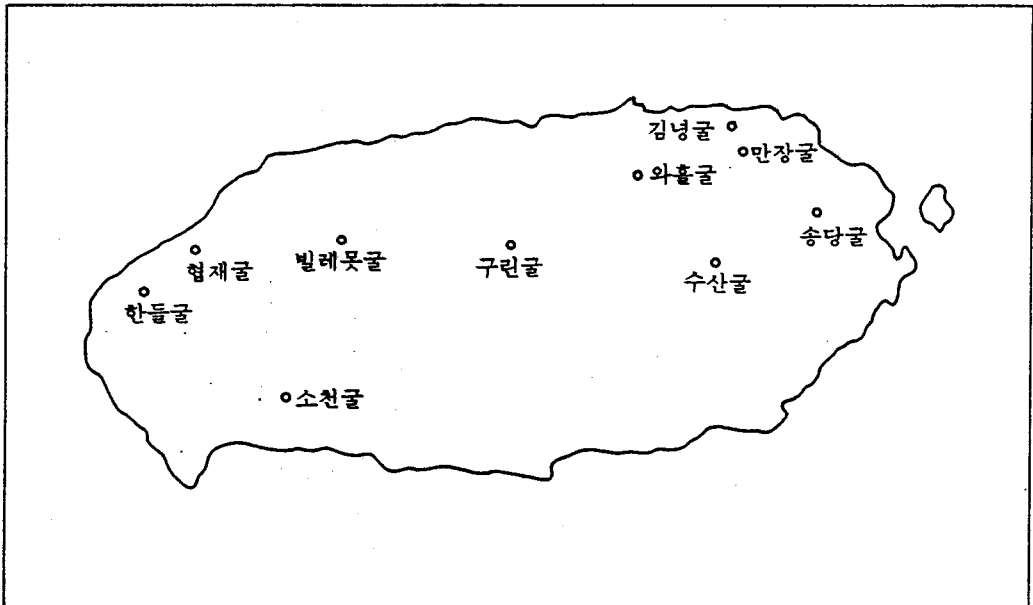
V. 제주도의 화산동굴

금번 자연학습탐사 중 중요했던 관심사는 제주도 화산동굴의 분포, 성인과 동굴의 특수지형에 관한 연구, 조사과정이었다. 동굴과 관련된 지질현상을 평소 소홀히 다루지 않았는가 하는 자성을 하면서 평생을 동굴탐사 연구에 기여하신 洪始煥 지도교수의 설명과 토의를 반복하면서 동굴지질학의 인식을 새롭게 하는 계기가 되었다.

서론에서도 언급한 바와 같이 제주도에서 이제까지 약 60여개의 동굴이 발견되었고 이것이 모두 면적이 좁은 본도에 분포하고 있어 그 분포밀도가 세계적이다. 길이에 있어 세계최대인 빌레못동굴(11,794m), 제4위인 만장굴(8,938m), 11위인 수산굴(4,674m), 17위인 소천굴(2,980m) 등이 있고 이 밖에 길이가 2,000m 이상인 것으로는 와홀굴(2,066m)과 한들굴(1,400m)이 있다. 동굴 속의 지형지물로는 세계 제1위인 용암석주(7.6m)가 만장굴 속에, 세계 제1위인 용암구와 규산주가 빌레못동굴에서, 세계 제1의 Tube in tube 즉 미니동굴이 만장굴에서 발견되어 세계의 주목을 끈 바 있다.

이와 같이 화산지질연구 외에 자연문화재, 관광자원의 보고로서 제주도 화산동굴의 중요성은 아무리 강조한다해도 지나침이 없을 것이다.

그림5. 제주도의 화산동굴 분포도



1. 제주도의 지질과 화산동굴

이미 지질계통에서 언급한 바와 같이 제주도의 화산암은 크게 12종류로 분류된다. 그중 표선리, 한라산, 제주, 와흘굴 현무암은 SiO_2 함량이 적고 점성은 낮으며 유동성이 큰 염기성 현무암으로서 용암동굴의 분포와 매우 밀접한 관계가 있다.

특히 표선리현무암은 제주 동서해안 저지대에 대지상의 넓은 분포를 이루고 있다. 분포지역은 만장굴 등이 발달한 북동지역, 와흘굴 등이 발달한 북부지역, 미천굴 등이 발달한 북동지역, 빌레못굴, 협재굴 등이 발달한 서부지역 등이며 그 특징은 표면에 Ropy lava와 구갑상 주상절리가 잘 나타나며 다공질이다.

하효리현무암은 팽나무굴 등 소규모 굴이 분포하는 삼양-애월 사이, 갯생이굴, 머시멀굴 등이 분포하는 하효리-화순 사이에 분포한다. 제주현무암 지역에는 구린굴, 통피 등 3곳의 동굴이 분포한다.

이밖에 기저현무암, 백록담현무암, 서귀포, 법정리, 중문조면암 등은 동굴의 분포와 무관하다.

2. 제주도동굴의 지역적 분포

제주도에 분포되어 있는 화산동굴은 100여개가 넘는 것으로 추정되나 현재 조사된 것은 60여개 정도이다.

그 지역적 분포는 그림6, 표3과 같다.

지질 계통별로 보면 표선리현무암층에 약 80% 정도가 분포하며 제주, 하효리 한라산현무암층에 각각 7% 정도가 분포한다. 표선리현무암층과 제주현무암층에 분포하고 있는 동굴은 해발 200m 이내의 저지대에 분포하고 있으나 하효리현무암층과 한라산현무암층에 분포하는 동굴은 비교적 높은 중산간지대 내지 고산지에서 국지적으로 분포하고 있다.

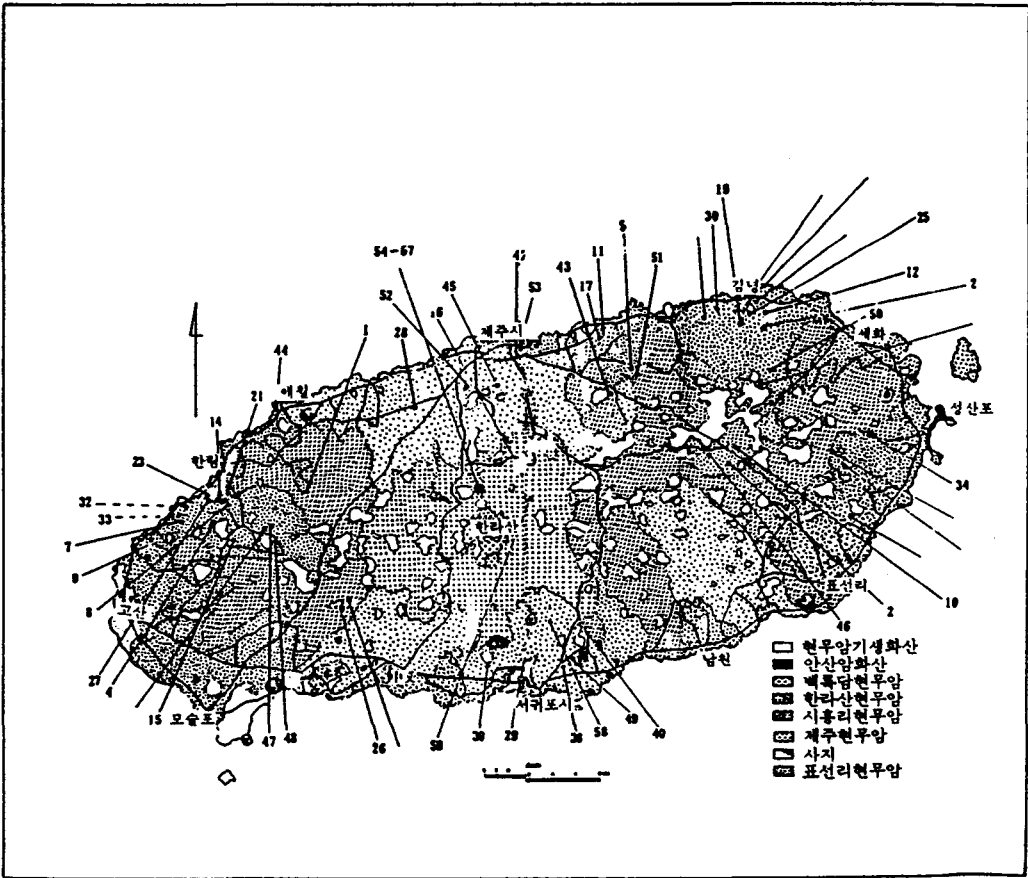
해발고도 별로는 동굴의 입구를 기준으로 할 때 0~50m에 31.3%, 50~100m에 22.9%, 100~150m에 8.3%, 160~200m에 4.2%, 200~300m에 14.8%, 300m이상 지역에 18.8%가 분포하고 있다.

동굴의 해발고도의 길이와의 관계를 보면 대체로 고도가 높을수록 규모는 작고

고도가 낮은 산록지역일수록 그 규모가 커서 협재굴동굴계나 만장굴계와 같이 여러 동굴이 연결된 동굴계를 이루고 있다.

또한 제주도의 화산동굴의 지역적 분포는 크게 두가지 화산동굴군으로 구분할 수 있다. 그 하나는 만장굴을 중심으로 하는 북동 사면대와 또 하나는 소천굴과 협재굴을 중심으로 하는 한림지역 일대를 들 수 있다. 만장굴 일대에는 송당굴, 덕천굴, 사굴, 쾌내기굴, 독나무밑굴, 발굴, 계우셋굴, 계여밑굴, 부종굴 및 조천읍 일대의 와홀굴, 임에머루굴, 고내이슬굴, 육티기굴 등이 있으며 한림읍 협재리, 금릉 중심으로는 협재굴, 조롱굴, 쌍용굴, 큰초깃굴, 황금굴 등이 북동부 및 북서부 해안 저지대에 넓고 크게 발달되어 있다.

그림6. 제주도 지질·동굴 분포도



3. 제주도 동굴의 성인과 특성

우리나라 화산동굴의 분포는 제주도에 국한되어 있다. 제주도는 아스피테식 화산으로 되어 있는데 이는 여러차례의 화산 분출에 기인 한 것이다.

지하의 마그마 챔버(Magma chamber)에 저장되어 있던 마그마가 엄청난 수증기 압력에 의한 분출에 수반하여 화구에서 지표로 밀려 나온 용암(Lava)이 지표면에 흘러 내릴 때 그 용암 속에 용암구(Lava trench)가 되는 것이다. 대개 마그마의 지표 분출 온도는 900℃~1200℃의 고열 상태이나 그 표면이 외부 공기와 접하면 점점 냉각되지만 내부에서는 외부와 같이 냉각되지 않고 고열을 유지한 채로 계속 산사면을 따라 흘러 내려가므로 이 용암의 지층 내부는 텅 비어버린 용암구를 형성하게 된다. 따라서 마치 사람의 창자 내부와 같은 용암동굴(Lava tunnel)을 이루게 된다.

동굴의 형성 과정은 초기, 중간형성, 동굴성장, 붕괴단계를 거치면서 진화하여 간다. 그 각 단계의 특성은 다음과 같다.

가. 형성단계

(1) 초기단계

본도에 분포하는 큰 규모의 동굴은 대부분 표선리현무암층 안에 발달한다. 표선리현무암은 하나의 화산층 두께가 두텁고 유동성이 매우 커서 용암동굴을 형성하는데 좋은 조건을 갖고 있는 현무암이다. 초기단계는 용암류의 표면에 피반이 형성되고 용암의 공급량이 감소하거나 공급이 중단된 시기를 뜻한다.

(2) 중간형성기

동굴이 생긴 후 일정량의 용암이 공급되어 일정 수준을 계속 유지하는 사이에 피반이 생기고 어느 정도 시간이 지나 용암 공급이 줄거나 중단되었을 때를 말한다.

이 때에 하층굴(2층굴)이 생기고 용암교나 용암봉이 형성되기도 한다. 이와 같이 하여 3층굴, 다층굴로 형성되기도 한다.

(3) 성장단계

이 성장기는 단층 또는 다층굴의 형성 후 2차 용암이 동굴 내로 들어와 용암 유출 시에는 용암퇴적으로 동굴이 작아지는 단계를 말한다. 이같이 2차 용암이 스며든 것은 만장굴의 용암주(석주)와 2층굴 내부지역 지점에서 볼 수 있다.

(4) 마지막 붕괴기

이 단계는 동굴이 붕괴되는 시기를 말한다. 용암봉이 차차 붕괴되고 상하층의 천정부가 파괴되어 상하층굴이 연결 형성되는 시기이다. 즉 천정부, 측벽부, 바닥면이 현저히 부서지는 마지막 단계로 상층 피반이 붕괴하면서 동굴이 계속 붕괴되어 가는 시기이다.

용암동굴은 석회동굴과는 달리 붕괴만 있고 용암이 재차 흐르지 않는 한 생성될 수 없다. 따라서 이 최종단계 시기에는 동굴 내의 붕괴만이 아니고 동굴통로까지도 천정이 무너지고 붕락되어 지표면에 이른바 함몰구가 형성된다.



만장굴 내부

나. 동굴의 형태 해석

용암동굴은 SiO_2 (규산)의 함유량이 52% 이하인 염기성현무암류인데 용암동굴의 생성은 赤熱상태인 용암이 분출구로부터 낮은 構造線을 따라 기반암 위에 흘러가는 사이에 외기의 영향에 의해 긴 부분은 정지되고 굳어져 피반을 형성하게 되어 그 속에 熔融상태의 용암류는 계속 흐르다가 상류로부터 용암 공급량이 줄거나 중단되면 내부에 공동이 생긴다.

다시 동굴내의 윗부분이 냉각되어 피반이 생기고 그 밑에 용융상태의 용암이 줄거나 중단되면 하층동굴이 형성된다. 이와 같이 하여 다층 동굴이 형성된다.

굴천정의 구조는 용암동굴의 구조를 말하는데 용암붕과 용암교(Lava bridge)는 洞窟 형성과 그 발달 과정을 잘 밝혀주는 귀한 자료가 된다.

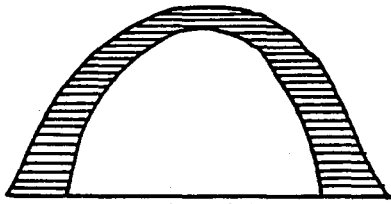
만장굴에는 크고 작은 용암교가 15개 있고 각종 형태의 용암붕을 볼 수 있다. 용암붕은 床面流動의 용암이 체류시간이 길면 상면은 동굴내의 수증기와 가스의 영향으로 고결되는데 측벽부가 먼저 냉각되어 측벽에 돌출부분을 남긴다. 이것이 용암붕이며 이 때 장기간 경과하면 표면이 굳어져 용암교를 형성케 한다. 이같이 유동 용암이 체류시간에 따라 측벽부에 부착한 용암이 두께나 상면이 용암교의 두께를 결정한다. 한편 굴하면의 구조를 살펴보면 밑바닥은 상류로부터 운반된 퇴적물에 의하여 피복되어 있으나 밑바닥이 잔 물결 모양이 있는데 이것은 동굴 형성 당시 용암이 흐른 방향을 알려준다.

그리고 측벽과 굴 바닥이 닿는 곳에 수로와 같이 패여져 있는데 이것은 측면에서 흘러내린 잔류용암이 냉각하면서 밑으로 미는 장력과 내외부의 수축 정도의 차에 의하여 측벽에서 이탈돼 수로를 형성한다.

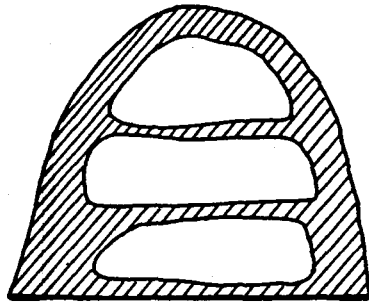
또한 내부 지각 변동 작용에 의한 천정부의 압괴 낙석으로 인해 용암교가 붕괴될 수도 있다. 이 밖에 하층동굴에 유입된 유동 용암이나 혹은 측벽부의 龜裂를 통해 밀고 들어온 2차 용암이 흐른 것을 만장굴에서 볼 수 있으며 용암교의 두께는 약 20~70cm로 대체로 50cm 내외의 얇은 선반을 보여주고 있다.

두께는 4.5m이며 용암교의 두께와 상하층 사이의 두께에 큰 차가 있는 것은 고결기간의 차에 기인 한다고 보겠다.

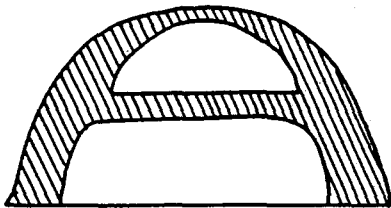
동굴내의 측벽부에는 용암붕 외에 횡으로 條痕을 수평적으로 나타내고 있는데 이것은 용암 수위(Lava level)를 뜻하며 용암류(Lava flow)는 동굴 속으로 스며든



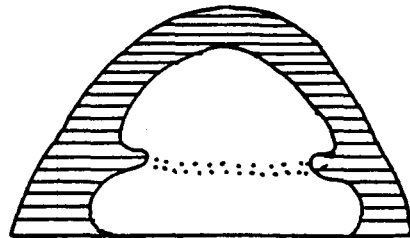
Dome 상의 피각상태



다층구조의 동굴형성



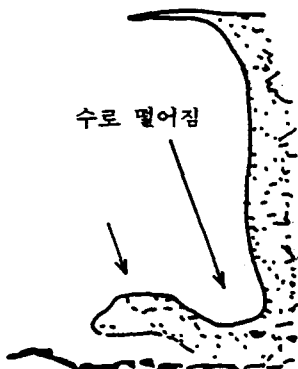
2층동굴의 형성



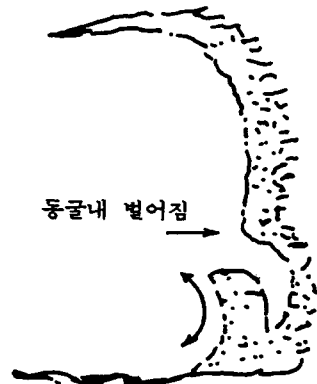
熔岩棚의 형성

용암량이 점차 줄어 틈에 따라 조흔이 생기며 갑자기 조흔격이 넓은 것은 용암량이 급격히 줄어든 것을 말한다.

용암량이 줄어드는 것은 상류에서 공급이 줄거나 유동시 용암 속에 포함된 가스체와 수증기가 빠질 때 나타난다. 동굴내에서 용암 유동시 곡류인 경우 급류인 곳에 조흔이 높게 나타나고 그 반대쪽에 建設 斜面에 용암 퇴적이 이뤄져 경사 조흔이 발달한다.

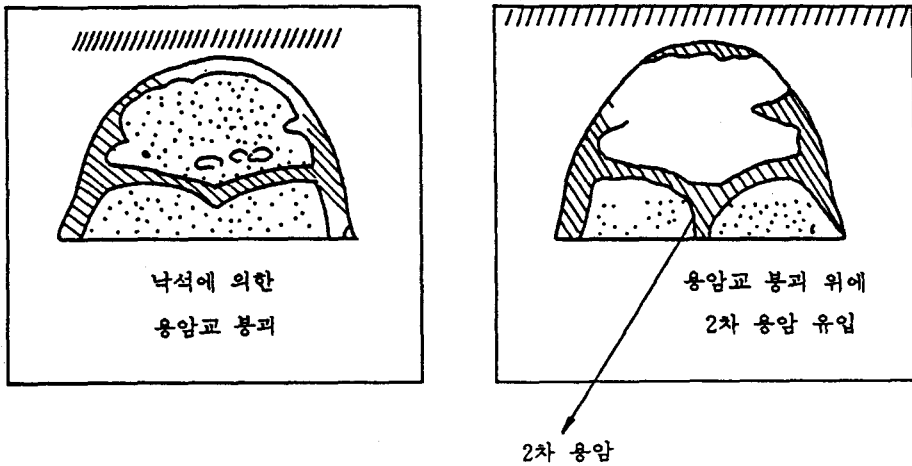


측벽부 피각 탈리에 의한 수로 형성



측벽부 피각의 탈리

막장의 구조는 상부와 하부 막장이 있는데 모두 동굴이 산재되는 곳을 말한다. 대체로 상부 막장은 넓게 급히 막혀 있는데 하부 막장은 동굴이 점차 좁아지고 낮아지면서 용암이나 점토로(빌레못 동굴의 경우) 혹은 외부로부터 유입된 介砂로(사굴인 경우) 막히거나 함몰에 의해 막힌 곳도 있다.



4. 제주도 동굴의 특수 지형

제주동굴은 그 분포밀도, 길이, 규모에 있어서 뿐만 아니라 그 동굴내부에 분포하는 특수한 지형, 지물들까지도 더욱 가치가 있음이 여러차례의 국제동굴합동조사에서 밝혀진 바 있다. 여기에 그 특수 지물을 소개한다.

가. 용암주

용암동굴에서 볼 수 있는 석주는 석회동굴(종유굴)에서 볼 수 있는 것과는 그 성인 면에서 다르다. 즉 석회동굴에서는 대체로 1차로 동굴이 형성된 후에 오랜 시간을

두고 지하수에 溶蝕된 方解石 성분이 퇴적되어 형성되지만 용암주는 1차로 동굴이 형성된 후에 다시 그 상층에 2차로 용암류가 흘러 내릴 때 1차에 형성된 동굴의 천정을 뚫고 흘러 내려온 용암류가 바닥에 흘러 내리면서 그대로 냉각 고결되어 형성된다. 대표적인 것으로는 만장굴 제 2입구에서 제 3입구로 가는 도중 1,000m 지점에 있는 용암주를 들 수 있는데 그 높이가 7.6m로서 세계 최장으로 알려져 있으며 현재는 관광객들에게도 공개되어 관광자원으로서도 커다란 역할을 차지하고 있다. 이의 성인은 천정부에서 흘러 내려온 2차의 용암류가 천정부의 약한 부분을 뚫고 밑으로 흘렀는데 이때에 하층 바닥의 용암위로 덮혀 가고 또 퇴적으로 높아짐에 따라 상하류 두 방향으로 흘렀으며, 그 보다 더 고결되고 거친 용암공급량이 줄어들면서 서서히 쌓여감에 따라 탑상의 용암주가 형성되었다고 생각된다.



용암주

나. 용암구(Lava Ball)

용암구란 용암의 유동이 계속되고 있을 때 천정부에서 떨어진 용암피나 측벽부에 부착되었던 용암선반이 유동하는 용암류 위에 떨어져 흘러가다가 용암량이 줄거나 속도가 느려져서 그대로 냉각 고결된 것이다.

대표적인 예로서는 현재 관광객에 공개된 일명 거북바위(만장굴 소재)가 있으며 이것 외에도 만장굴에는 21개의 용암구가 분포되어 있다. 가장 거대한 것으로는 빌레못동굴내에 있는 것으로 높이 2.5m, 장경 7.2m, 단경 5.2m에 달한다. 이외에도 수산굴, 와홀굴 등에도 다수의 용암구가 분포되어 있다.

다. 용암교(Lava Bridge)

용암이 유동될 때 그 바닥을 이루고 있던 면이 그대로 냉각되어 남게 되는데 다시 용암바닥이 침하되어 상하층의 여러 층을 이룰 때 중간의 냉각된 윗바닥을 용암교라고 한다. 만장굴에는 대소 15개의 용암교가 분포되어 있어 동굴의 형성과정을 말해주는 좋은 자료가 되고 있는데 수산굴 속에서는 길이 140m, 폭이 5m되는 세계 제 1가는 용암교가 발견되었다. 그리고 현재까지 만장굴 속에서는 삼층구조의 용암교가 발견되어 주목을 끌고 있다.

라. 용암석순(Lava Stalagmite)

용암이 흘러내려 동굴이 형성되고 동굴 천정이나 측벽부에서 그 용암의 용액이 점적되어 동굴 바닥위에 쌓여져 석순같이 자란 것을 말한다. 빌레못동굴의 지굴인 미로굴 속에는 길이 77cm의 대형 용암석순이 발견되어 세계 제 1을 자랑하게 되었으며 대체로 10cm이하이다. 만장굴의 제 1입구와 제 2입구사이, 빌레못동굴의 미로굴

마. 용암종유(Lava Stalagmites)

용암이 동굴을 형성하면서 아직도 고온이 계속되고 있을 때 천정부나 측벽부에는 냉각되지 않은 용융체인 용암이 고드름처럼 흘러 내리다가 냉각 고결되는데, 이것을 용암종유라고 한다.

석회동굴에서 볼 수 있는 것보다 그 규모가 작다.

그 형태가 고사리형인 경우와 포도상인 경우 그 밖에 형상에 따라 각각의 명칭이 다르다. 용암종유의 분포는 대체로 용암석순의 분포와 일치하고 있으며 그 규모는 제주도 내의 동굴의 경우는 10cm 내외이나 빌레못동굴의 미로굴에서는 20cm 정도로 길게 자란 것도 관찰된다.

바. 미니동굴(Tube in Tube)

동굴이 형성된 후 동굴 바닥에 다시 2차의 용암이 유입하여 그 표면이 냉각하고 그 속에 가스空洞이나 流動공동을 형성하게 되는데 이와 같은 소형동굴을 「동굴 속의 동굴」이라하여 미니 튜브, 미니 동굴(Tube in Tube)라고 한다. 만장굴에는 내부의 곳곳에서 볼 수 있는데 빌레못동굴에서도 발견된다. 매우 희귀한 微地形으로서 그 학술적 가치가 높은 지형이다.

특히 최근에는 한일합동동굴조사단에 의하여 협재동굴계에 속하는 소천굴 내부에서 길이 240m에 달하는 세계 제일가는 미니동굴이 발견되었다. 더구나 이 미니동굴의 형태가 뚜렷하여 학술가치가 크게 기대되고 있다.

사. 矽酸柱

규산종유가 계속 발달하여 동굴의 바닥까지 연결되어 기둥을 이루었을 때를 말하는데 세계적으로 매우 희귀한 지형이다.

제주도의 동굴 중에서는 빌레못동굴에서 발견되었는데 28cm의 화려하고도 훌륭한 규산주이다. 현재까지 이와 같은 규모의 규산주는 세계적으로 보고된 바 없다.

아. 珪酸華

규산화는 개스 중에 용융되어 있었던 규산이 동굴의 측벽에 부착되어 이루어진 것으로 생각된다. 이러한 것들의 예로는 만장굴의 제 3입구 부근과 빌레못동굴의 미로굴과 지굴에서 버섯형, 꽃잎형, 삼림형, 산호형 등의 발달을 볼 수 있다.

자. 개스볼(噴氣球 · Gas Ball)

만장굴의 하층 막장 부근에는 크고 작은 개스볼이 부착되어 있는데 이것은 용암이 유동함에 따라 가스가 농축되어 연한 용암 입자를 붙어내어 측벽부와 천정에 매달려 있으며 밑바닥에 형성된 개스볼은 용암속에 들어 있는 가스체가 밖으로 나오다 남은 일부가 표면이 냉각되어 갈 때 부풀어 오른 것이다. 개스볼은 표면에 스며 있는 개스의 양과 온도, 암질, 압력 등에 따라 그 형태와 크기가 달라진다. 동굴내의 통로가 낮은 부분에는 개스의 작용이 활발하여 각종 형태의 개스볼을 형성한다. 포도상 용암 증유나 유방상 증유, 針狀, 槍狀, 樹枝型의 증유가 개스볼과 비슷하게 천정이나 측벽에 매달려 있다. 이 때에 증유가 거의 일정 방향으로 비스듬하게 기울어진 것은 동굴내의 개스의 이동 방향을 뜻하며 이러한 것은 빌레못동굴의 입구에서 150cm지점에 잘 발달하고 있다.

차. 로피라바(Ropy Lava)

용암의 유동이 멎고 동굴이 형성된 무렵에 바닥면의 중앙부가 유동이 약하여지고

온도가 낮아짐에 따라 상대적으로 점착성이 높아져서 냉각 고결될 무렵 측벽부에 부착되어 있던 용암이 중력에 의해 밑으로 내려옴에 따라 일면 또는 여러면으로 밀려서 파도가 일듯 포물선형의 주름을 형성하게 되는데 이를 로피라바(Ropy Lava) 라고 한다.

만장굴의 제2입구에서 제1입구로 향한 Point No. 3~4 지점에서 잘 관찰할 수 있으며 마치 새끼를 꼬아 놓은 형태의 암회색 또는 적갈색의 용암으로 서로 엉겨 붙어 있으며 어떤 것은 마치 나무줄기를 서로 엉겨 놓은 형상을 한 것도 있는데 밟으면 쉽게 부서진다.

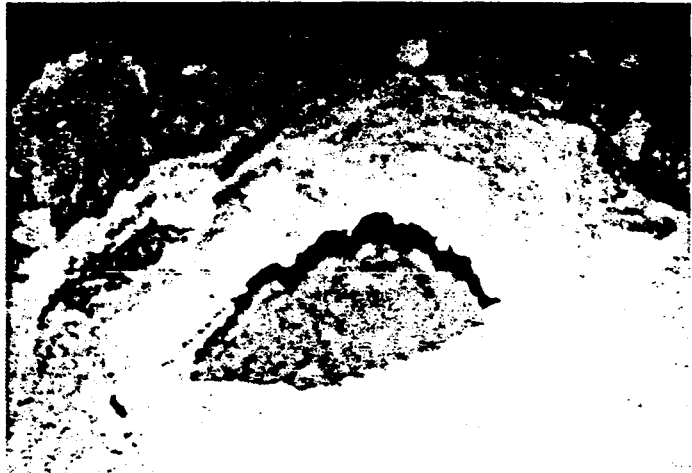
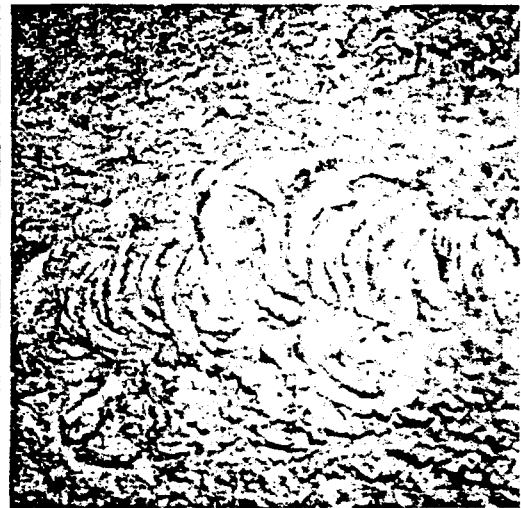


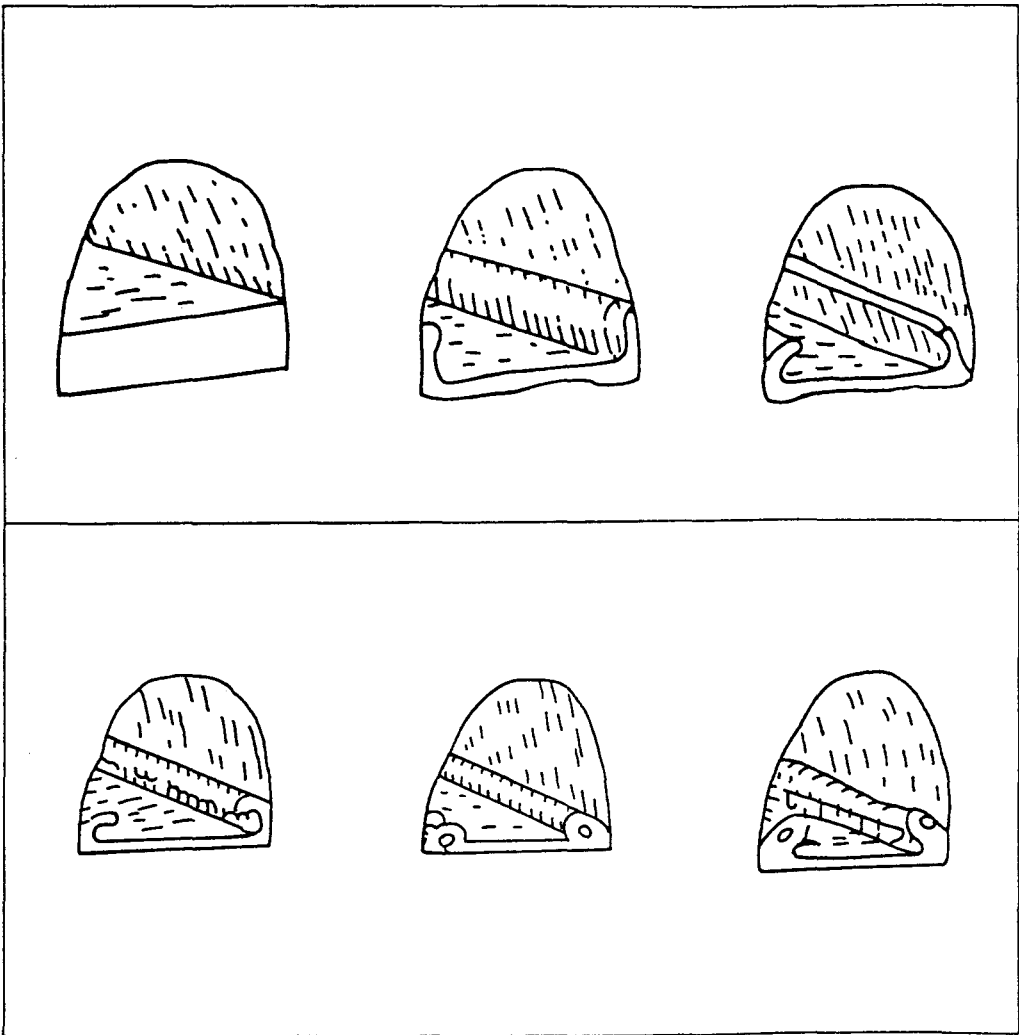
사진 위-미니동굴, 아래 왼쪽
-규산화, 오른쪽-로피라바



카. 용암선반(熔岩棚)

용암선반은 용암이 유동하면서 그 바닥이 냉각되었을 때 바닥면의 일부가 그대로 동굴 벽에 남아서 부착되어 있음을 볼 수 있는데 이것을 용암선반이라고 한다.

이 때 벽면과 바닥에서 남아 있는 선반의 형은 일본의 화산동굴학자인 오가와(小川孝徳)에 의해 A, B, B', C, D 형으로 구분할 수 있는데 제주도의 화산동굴들에는 각종의 용암선반의 형을 그대로 볼 수 있다.



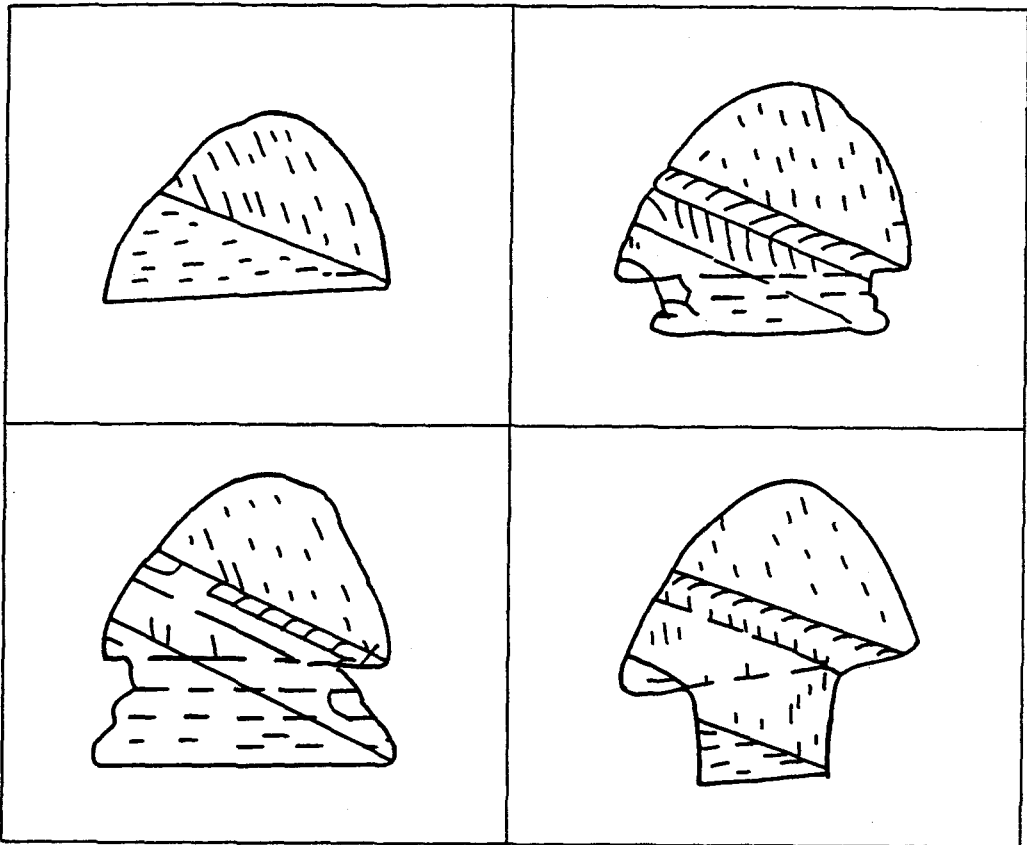
(1) A형 용암선반

유입된 용암류가 측면의 바닥에 흔적을 남기고 침하 유출된다. 그리고 측벽에 얽게 부착한 용암이 삭제되어 몽쳐진 것이 A형 용암선반으로서 경사가 없는 평지의 동굴 안에서 볼 수 있다.

제주도에서는 북제주의 김녕사굴에서 대표적인 것을 볼 수 있으며 다음과 같이 낼 수 있다.

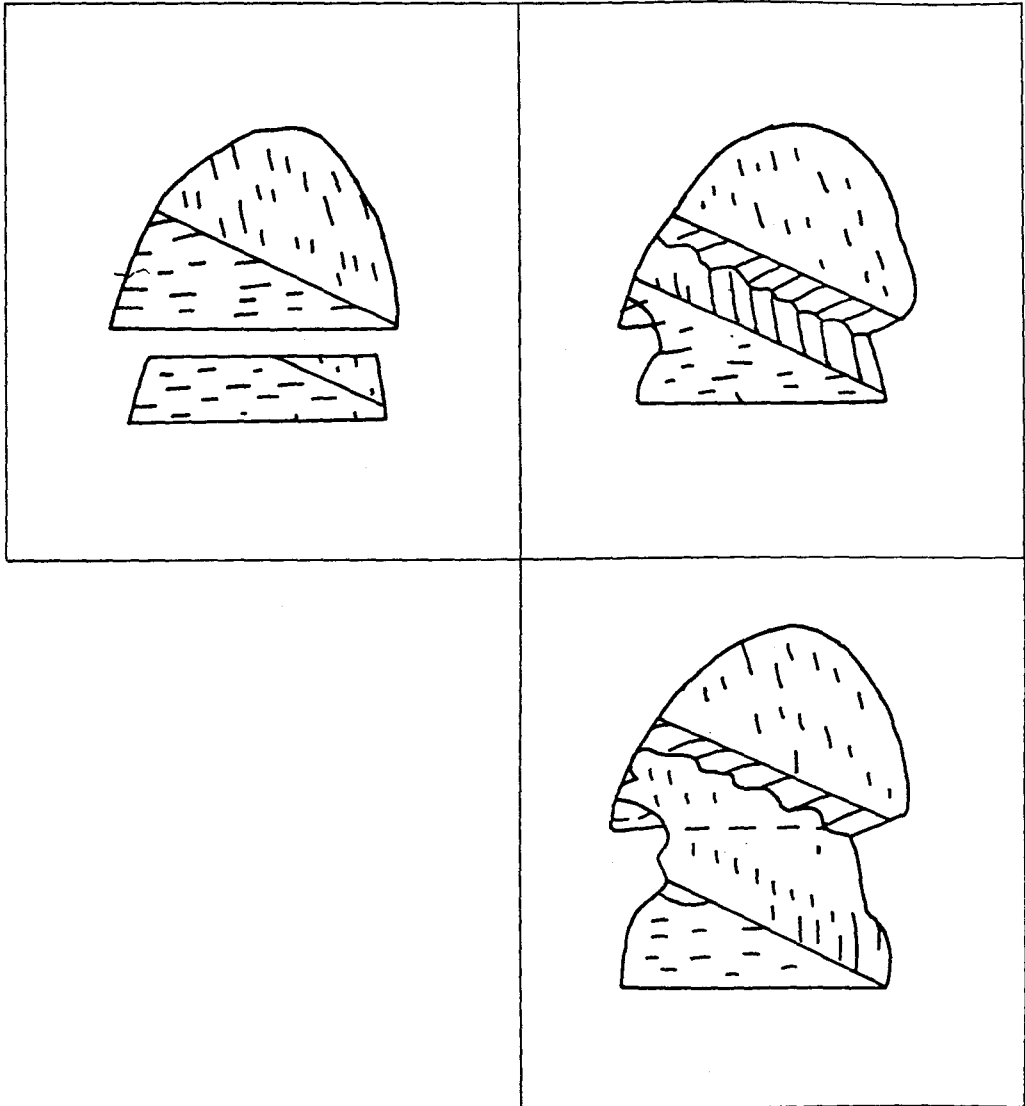
(2) B형 용암선반

A형과 마찬가지로 동굴내에 제2차의 용암류가 유입하여 용암류가 채류하면서 측벽부에 가까운 곳은 빨리 굳지만 중앙부는 바닥의 용암이 유동에 의하여 흘러나간 것으로 아래 그림과 같이 나타낼 수 있다.



(3) B'형 용암선반

이것은 B형의 용암선반과 그 성인이 비슷하다. 그러나 이 경우 바닥면에서의 체류 시간이 길어 일시적인 용암교를 형성하지만 나중에 낙하하여 용암의 흐름에 의하여 빠져 나간 경우의 것으로서 선반의 측면을 자세히 보면 B형과 구분되며, 바닥면의 유동이 없을 경우는 다리(Bridge)가 떨어져 남아 있는 경우도 있다.



No	동굴명	길 이	높이	위 도	경 도	소 재 지	암 석 종
16	구 린 굴	380m	760m	33°24'19"N	126°32'45"E	제주시 오등동	한라산 현무암
17	이모루굴	* 350m	70m	33°31'25"N	126°37'26"E	북제주군 조천면 신촌리	표선리층 현무암
18	덕 천 굴	232m	155m	33°29'52"N	126°45'30"E	구좌읍 송당리	· · ·
19	케네기굴	* 200m	30m	33°32'18"N	126°44'58"E	· · 동김녕리	· · ·
20	개여뱀굴	* 170m	10m	33°32'38"N	126°42'57"E	· · 동복리	· · ·
21	황 금 굴	140m	35m	33°22'59"N	126°14'39"E	· · 한림읍 협재리	· · ·
22	송당굴 2	138m	255m	33°26'39"N	126°45'58"E	· · 구좌읍 송당리	· · ·
23	재암천굴	114m	10m	33°23'18"N	126°50'21"E	· · 한림읍 협재리	· · ·
24	수산굴 2	* 100m	150m	33°25'57"N	126°50'21"E	남제주군 성산읍 수산리	· · ·
25	푼나무밑굴	* 100m	150m	33°32'24"N	126°45'09"E	북제주군 구좌읍 동김녕리	· · ·
26	당오름굴	90.6m	434m	33°19'48"N	126°20'19"E	남제주군 안덕면 동광리	시흥리층 현무암
27	협 재 굴	98.84m	20m	33°22'59"N	126°14'38"E	북제주군 한림읍 협재리	표선리층 현무암
28	송 립 굴	367.4m	30m	33°22'58"N	126°14'44"E	· · 금룡리	제주 현무암
29	관 음 굴	* 80m	280m	33°17'32"N	126°34'43"E	남제주군 서귀읍 토평리	· · ·
30	뚝테폭난굴	* 80m	30m	33°32'45"N	126°43'36"E	북제주군 구좌읍 동김녕리	표선리층 현무암

No	동굴명	길이	높이	위도	경도	소재지	암석종
31	당오름굴1	57.7m	370m	33°19'57"N	126°20'24"E	남제주군 안덕면 동광리	시흥리층 현무암
32	초룡굴	* 50m	30m	33°22'39"N	126°13'39"E	북제주군 한림읍 금물리	표선리층 현무암
33	김녕굴	*	10m	33°23'00"N	126°13'42"E	"	"
34	밭굴	*	* 10m	33°22'58"N	126°13'43"N	성산읍 수산리	표선리 현무암
35	큰아굴	* 100m	350m	33°21'14"N	126°19'42"E	한림읍 영아리	"
36	김녕밭굴	*	10m	33°33'04"N	126°45'26"E	구좌읍 금물리	"
37	김녕절굴	*	10m	33°33'04"N	126°45'21"E	"	"
38	금아산굴1	41.3m	425m	33°17'53"N	126°33'50"E	서귀포시 토평동	제주 현무암
39	개생니굴	* 45m	280m	33°15'33"N	126°30'58"E	서호리	하효리 현무암
40	여우굴	*	* 50m	33°15'41"N	126°36'57"E	토평리	"
41	무명굴	*	* 8 m	33°15'00"N	126°37'00"E	"	"
42	고생이슬굴	*	210m	33°28'42"N	126°36'22"E	제주시 봉개동	표선리층 현무암
43	고대봉굴	*	* 70m	33°27'13"N	126°20'43"E	북제주군 애월읍 고내리	"
44	한담굴	*	* 10m	33°27'37"N	126°19'43"E	애월리	"
45	팽나무굴	*	140m	33°27'33"N	126°27'58"E	제주시 해안동	제주 현무암

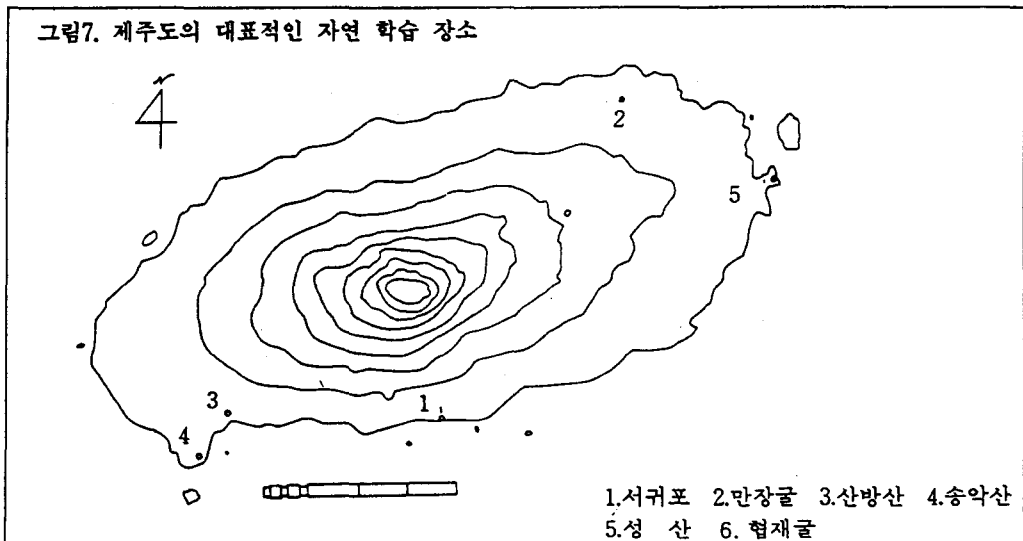
No	동굴명	길이	높이	위도	경도	소재지	암석종
46	부종굴	* 200m	*	33°25'57"N	126°43'00"E	북제주군 구좌읍 송당리	표선리층 현무암
47	수형굴 1	18.5m	350m	33°20'43"N	126°19'58"E	한림읍 영악리	· ·
48	수형굴 2	5.6m	350m	33°20'30"N	126°19'58"E	· · ·	· ·
49	금악산굴2	16.1m	420m	33°17'50"N	126°33'50"N	서귀포시 토명동	제주 현무암
50	무명굴	*	160m	33°29'40"N	126°45'57"E	북제주군 구좌읍 덕천리	표선리층 현무암
51	검은오름굴	25m Dep.	350m	33°27'02"N	126°43'18"E	· 조천읍 교래리	시흥리층 현무암
52	남청불오름굴	* 60m	15m	33°29'54"N	126°27'37"E	제주시 연동	제주 현무암
53	동랑굴	* 70m	15m	33°23'45"N	126°33'45"E	제주시 일도동	· ·
54	상캐굴	*	1,450m	33°24'00"N	126°35'00"E	제주시 오동동	한라산 현무암
55	넓은상캐굴	*	1,700m	·	·	· ·	· ·
56	평캐굴	*	1,600m	·	·	· ·	· ·
57	등터진캐굴	*	1,750m	·	·	· ·	· ·
58	머시멀굴	*	310m	33°17'15"N	126°35'00"E	서귀포시 토명동	· ·
59	봉캐굴	*	1,530m	33°23'00"N	126°34'43"E	제주시 개미목	· ·
60							

VI. 자연학습장으로서의 제주도

제주도는 제주도 그 자체가 자연학습장이다. 특히 신생대 퇴적지층과 화산암, 원형을 그대로 간직하고 있는 화산지형, 제주도의 기반암을 추정할 수 있는 포획암, 세계적인 규모를 갖는 용암동굴 등이 잘 발달 분포되어 있다.

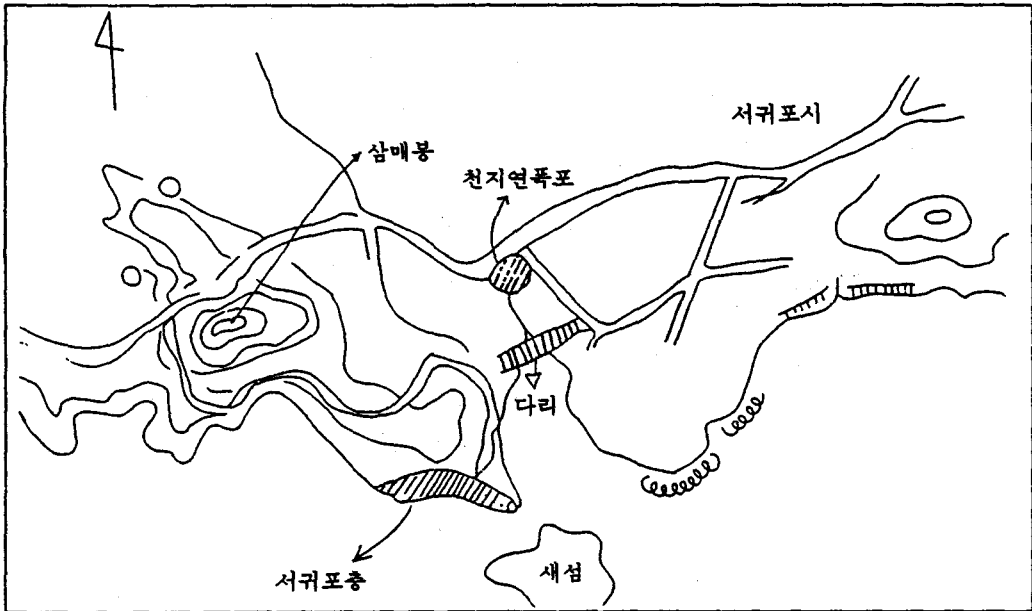
이제 학생, 교사, 부모들에게 있어 제주도는 관광지역으로서 뿐만 아니라 자연학습의 장으로 인식되어야 할 것이다. 자연탐구 학습여행에 도움이 될 중요한 학습내용이 되는 장소와 학습요소를 소개한다.

1. 화산암의 색깔, 조직, 그리고 구성광물의 차이를 관찰할 수 있다.
2. 제주도에 분포하는 여러 종류의 화산암이 마그마의 晶出分化作用에 의해서 만들어진 것임을 설명할 수 있다.
3. 제주도의 전체적인 지형의 특징을 구분하고 각 지형을 이루고 있는 물질과 비교하여 용암의 성분에 따른 지형의 차이를 설명할 수 있다.
4. 용암과 용암사이에 있는 火山碎屑物의 특징을 관찰하여 두 용암사이에 시간적인 간격을 인식한다.
5. 화산탄, 화산재, 용암 등을 분류, 관찰을 통하여 화산분화형식의 구분과 화산분출물에 대해서 설명할 수 있다.
6. 해안지형을 관찰하여 화산지대에서의 해안지형의 특징을 설명할 수 있다.



1. 서귀포층 (西歸浦層)

가. 위치 : 서귀포



서귀포층 패류화석

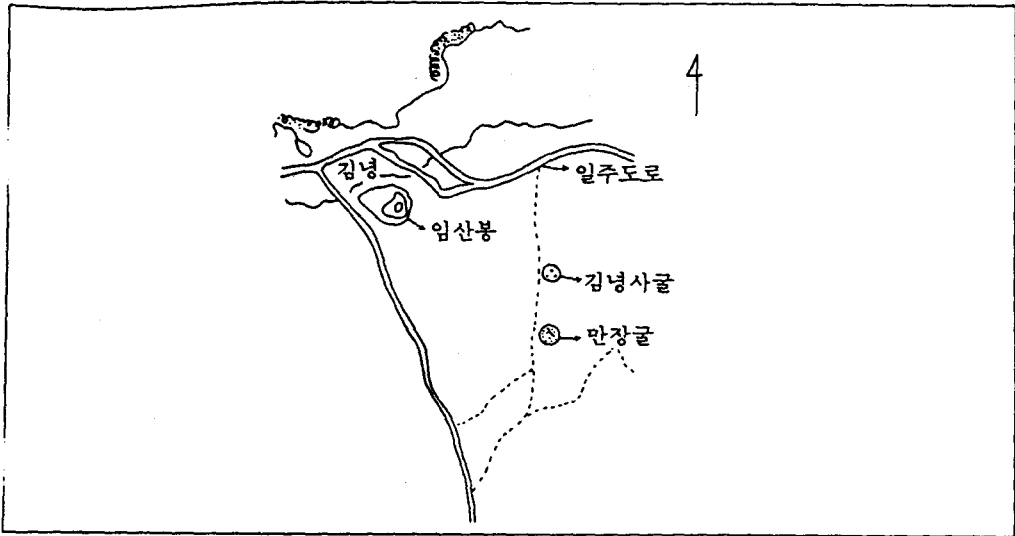


나. 학습내용

- ① 패류화석을 함유한 퇴적층 관찰
- ② 본층을 피복시킨 화와이아이트를 관찰
- ③ 軟體動物化石과 現生 생물을 관찰
- ④ 반정이 없는 치밀한 화와이아이트
- ⑤ 천지연폭포쪽에서 柱狀節理群

2. 만장굴 (萬丈窟)

가. 위치: 구좌읍 김녕리



나. 학습내용

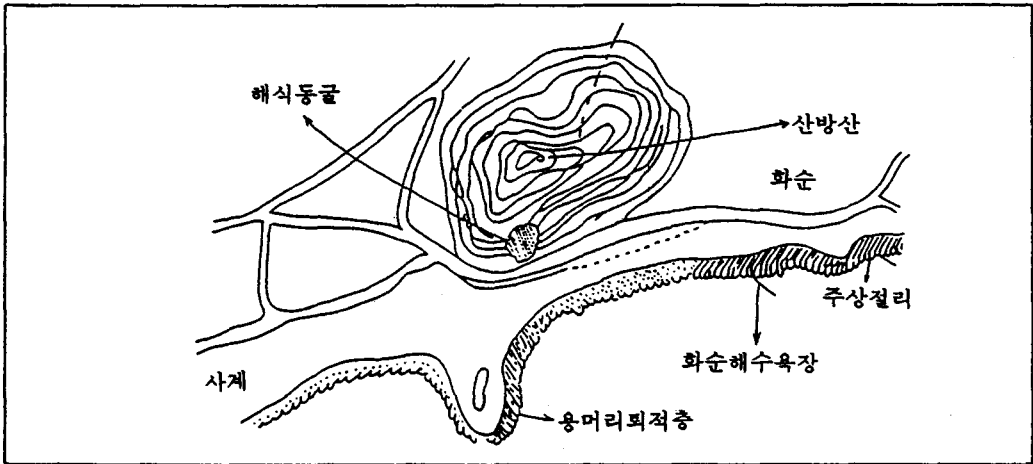
- ① 동굴의 형성과정
- ② 동굴내부의 微構造
- ③ 동굴의 형성과 화산활동과의 관계를 관찰
- ④ 동굴내부에서 2차, 3차 용암류의 공급원을 추정

만장굴 용암주



3. 산방산(山房山)

가. 위치 : 안덕면 사계리



산방산

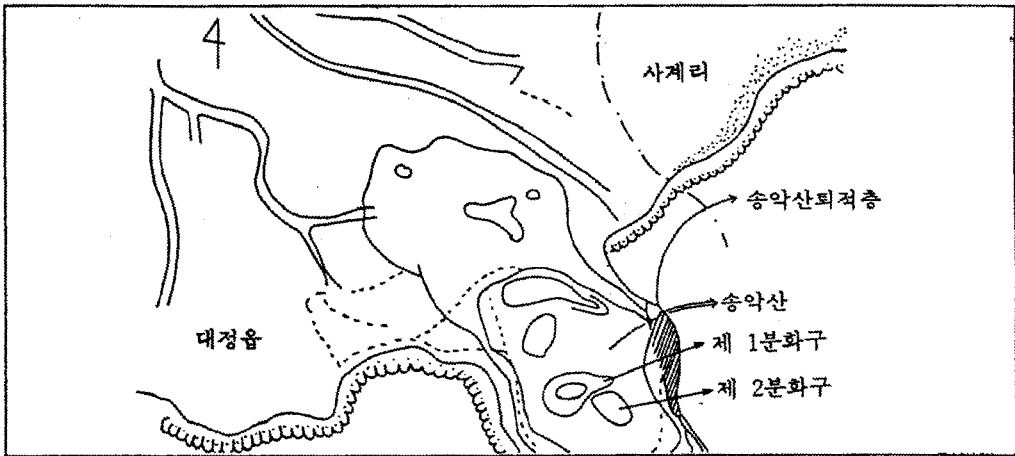
나. 학습내용

- ① 해식동굴관찰
- ② 隆起지형 관찰
- ③ 소규모의 단층을 관찰
- ④ 용머리 퇴적층과 산방산과의 관계를 관찰
- ⑤ 흑사구층과 해식애를 관찰
- ⑥ 주상절리를 관찰
- ⑦ 해식동굴 관찰 모
- ⑧ 소규모적인 단층을 관찰
- ⑨ 화순 흑사구층을 관찰
- ⑩ 산방산과 용머리층과의 형성 순서 관찰



4. 송악산(松岳山)

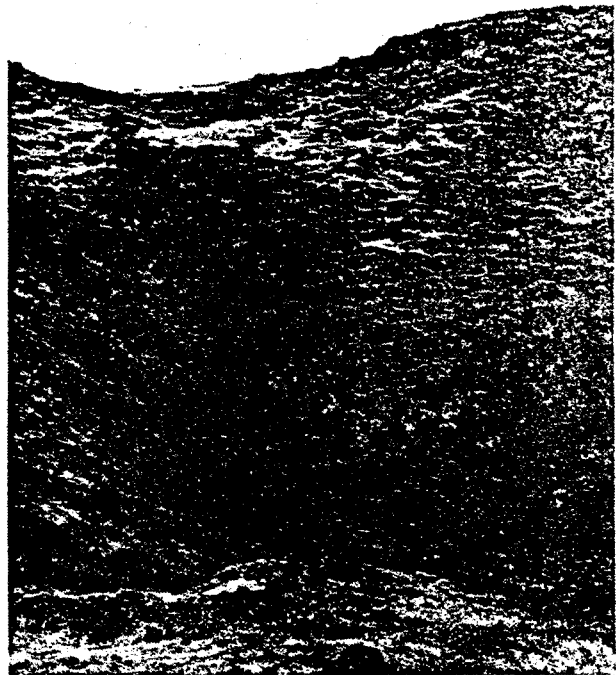
가. 위치: 대정읍 하모리



송악산 2중 분화구

나. 학습내용

- ① 이중화산 관찰
- ② 두 기생화산 噴出時期를 비교
- ③ 용기해안을 관찰
- ④ 배개모양의 용암관찰
- ⑤ 송악산에서 산방산, 서귀포쪽 해안을 바라보며 해안지형의 특징을 관찰 (주상절리, 파식대지)
- ⑥ 火山碎屑物
- ⑦ 화산쇄설물속에 포획된 유문암, 화강암, 기저현무암, 변성암을 관찰

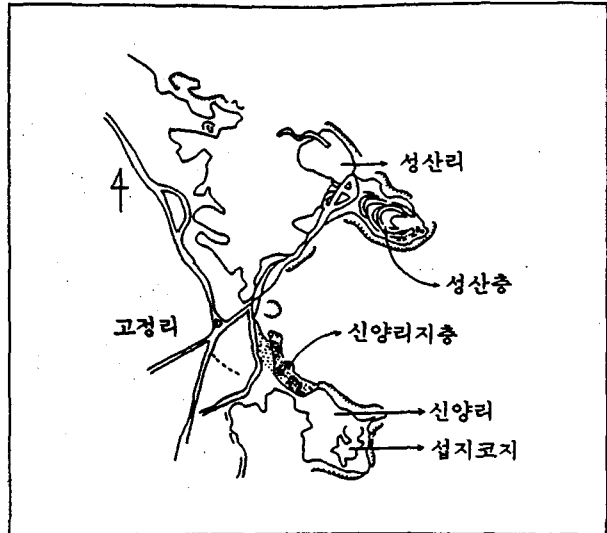


5. 성산(城山)

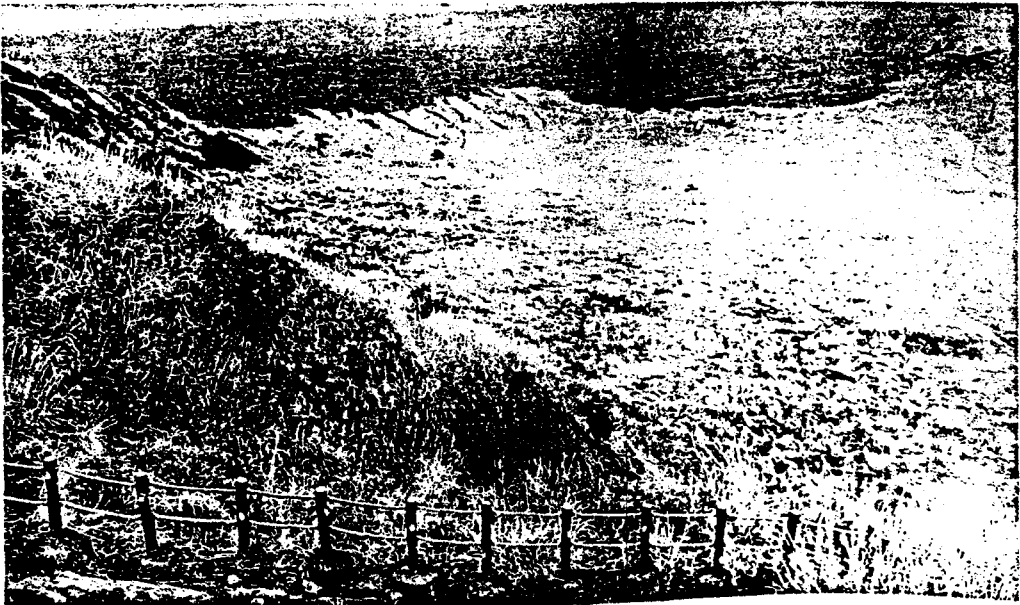
가. 위치: 성산을 성산리

나. 학습내용

- ① 수증화산의 특징관찰
- ② 침식, 풍화정도 관찰
- ③ 地盤隆起를 인식
- ④ 사취발달과 육계도 성산석호의 형성 관찰
- ⑤ 해식에 의해 단애 후퇴과정 관찰
- ⑥ 표선리현무암과 성산층과의 관계 고찰
- ⑦ 신양리층 관찰
- ⑧ 섭지코지의 분석구 파괴 및 분기공에 관한 고찰

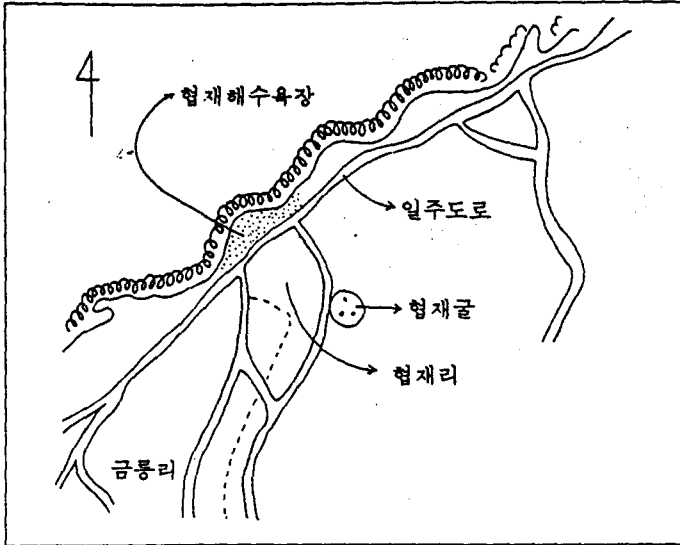


성산일출봉



6. 협재굴 (挾才窟)

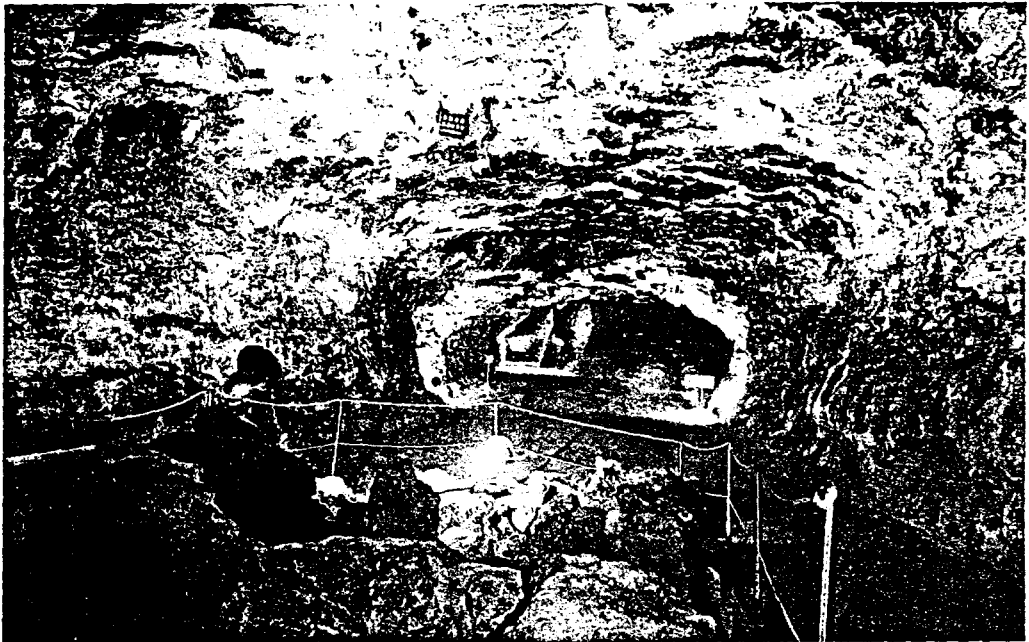
가. 위치 : 한림읍 협재리



나. 학습내용

- ① 동굴입구에서 용암수형을 관찰
- ② 백사가 석회질생물의 遺骸임을 관찰
- ③ 연체동물입에도 불구하고 석순과 종유석이 성장하는 것을 관찰하여 형성 과정에 대해 고찰
- ④ 熔岩樹形地帶를 관찰
- ⑤ 용암동굴과 석회동굴과의 차이점을 비교 검토

협재굴



參 考 文 獻

- 김봉균(1969), 제주도 신양리 및 고산리 지구의 신양리층에 대한 층서 및 고생물학적 연구, 지질학회지 5권 3호.
- _____ (1972), 서귀포층의 층서 및 고생물학적 연구, 손치무박사 송수기념논문집.
- 김상호(1963), 제주도의 자연지리, 대한지리학회지 1호.
- 문공부(1973), 한국의 동굴.
- 민경덕 외(1986), 제주도에 분포하는 화산암류에 대한 고리자기 연구, 지질학회지 19권, 2호.
- 박병수(1981), 제주도 동굴의 성인과 특성, 동굴학회지 6권 7호.
- 손인석(1985), 제주도는 어떻게 생겨났는가?
- 연세대학교 지질학과 동문회(1982), 한국의 지질과 광물자원, 김옥준교수 정년 퇴임기념논문집.
- 원종관(1976), 제주도의 화산암류에 대한 암석화학적 고찰, 지질학회지 12권 4호.
- _____ (1984), 한반도에서 제4계 화산활동에 관한 연구, 지질학회지, 19권 3호.
- 이상만(1966), 제주도 화산암류, 지질학회지 2권 3호.
- 이수진(1981), 제주도의 기생화산의 형성과 분포에 관한 연구, 동굴학회지 6권 7호.
- 정봉일 외(1983), 제주도의 지자기에 관한 연구, 지질학회지 19권 1호.
- 홍시환(1975), 우리나라 동굴의 유형과 특성에 관한 연구, 동굴 1호.
- _____ (1982), 한국의 용암동굴, 한국동굴학회.
- _____ (1986), 제주도 동굴의 지역적 분포, 동굴학회지 13권 14호.
- _____ (1986), 제주도 동굴의 성인과 특성, 동굴학회지 13권 14호.