

제주도의 형성사와 지질구조

이문원 (강원대학교)

1. 서론

제주도는 유라시아판 가장 자리에 위치하며, 1.2Ma이전부터 0.025Ma년까지 크게 4단계의 화산활동 주기를 거쳐 형성된 섬이다.

제주도의 화산지질에 대한 연구는 일본인 지질학자에 의해 시작된 이후 많은 국내 여러 지질학자가 여러 분야에서 수행하였다. 특히 1960년 이후 제주도 지하수개발을 위한 지표지질 조사가 있었고, 1970년에 와서 지하수 부존상태 조사의 일환으로 섬 전체에 걸쳐 시추가 이루어졌다. 그 결과 1/10만 지질도가 발간되었으며, 제주도의 화산층서 및 형성과정을 밝히는데 필요한 여러 사실이 축적되어 왔다.

1980년대에 와서 제주도 화산암류에 대한 암석학, 지구화학, 연대학 및 고지자기학 면에서의 연구가 여러 연구자에 의해 이루어졌다.

이와 같이 제주도에 관한 많은 지질학적 사실이 축적됨에 따라, 제주도는 비교적 짧은 시간과 좁은 공간에서 있었던 화산활동으로 이루어진 섬이지만, 수 많은 분화구에서 여러 종류의 분출물로 이루어진 섬이기때문에, 지표지질과 하부의 지질구조가 매우 복잡한 사실을 알게 되었다.

그 동안 제주도 형성사와 화산지질의 층서에 관한 여러 논문이 발표되었으나, 그 결과는 섬 전체의 개괄적인 지질의 특징을 지엽적이며, 단편적으로 설명할 뿐이다. 따라서 제주도의 형성사와 화산층서는 아직 해결되지 않은 의문이 많이 있는 상태이다.

따라서 제주도의 형성사와 화산층서에 관한 많은 의문을 해결하기 위해서는 섬 전체에 대해 종합적이고 체계적인 연구가 있어야 할 것이다. 특히 지하수 개발이나 그 밖의 토목사업을 위한 기초자료를 얻기 위한 연구는 그 목적에 맞게 지질학의 여러 분야가 공동으로 체계적이고 정량적으로 이루어져야 할 것이다.

이 논제에서는 제주도 지질에 대해서 연구된 많은 결과 중, 제주도 형성사와 지질구조를 파악하는데 필요한 자료를 정리, 재 해석하여, 제주도의 화산지질에 대한 연구의 방향을 제시하고 지하수와 관련된 지질구조를 해석하는데 도움이 기초자료를 고찰하는데 목적이 있다.

2. 제주도의 형성사에 대한 여러 안

제주도의 형성사에 대한 연구는 일본인 지질학자 原口를 비롯해서 표 1과 같이 여러 지질학자들에 의해 이루어졌다. 각 연구자들은 그 당시의 얻어진 자료와 각자의 전공지식을 배경으로, 기존의 안을 수정, 보완하였거나 또는 새로운 각도의 시도로 형성사에 대한 안을 제시하였다. 이 안들 간에는 사용하는 용어의 정의가 서로 분명하지 않아, 그 본래의 의도가 제대로 전달되지 않는 경우가 있으며, 서로 공통점도 많이 있으나 의견을 달리하는 내용도 있다.

표1. 제주도 형성사에 대해서 연구된 여러안

농업진흥공사 (1971)	원종관 (1976)	동자연 최순학 (1985)	윤선 (1986)
1. 감람석 취석 현무암의 용암대지 2. 서귀포층의 퇴적(Pliocene) 3. 침상 장석 감람석 현무암이 광범위하게 분출, 용암대지 형성 4. 성산층등 기생화산활동 5. 남북 단축방향 조면암 취석 현무암 분출 6. 신양리층 퇴적 7. 현무암류 및 조면암류 분출 중앙 골격 형성 8. 조면암질 안산암이 2회 분출 9. 장석 현무암 분출 10. 후화산 활동	1 단계 : 기반의 형성 서귀포층, 기저 현무암 시대미상의 퇴적암층 및 화강암 2 단계 : 용암대지의 형성 대규모의 광역분출(표선리 현무암), 딸기에 서귀포 및 중문 조면암 분출, 성산 일출봉, 산방산, 고산봉, 단산의 분출 3 단계 : 실드화산의 형성 광역분출에서 점차 백록담 화도 가까이로 20여회의 용암분출 4 단계 : 한라산 정상부의 형성 및 기생화산에서의 용암분출 5 단계 : 기생화산의 형성 및 차지형에로의 변화(북쪽으로 경동)	1 단계 : 열하분출에 의한 현무암 대지의 형성 표선리 현무암 → 서귀포 중문 조면암질 안산암 → 산방산 조면암 2 단계 : 중문화도를 중심으로 실드 화산, 한라산 dome 제주 현무암 → 시흥리 현무암 → 성판악 현무암 → 한라산 조면암 3 단계 : 중심화도 중심분출과 기생화산 한라산 현무암 → 백록담 현무암 → 분암구, 기생 용암	1 단계 : dome상 용기(기저암) 2 단계 : 하와이형 분출(고순상 화산) 3 단계 : 서귀포층·퇴적 4 단계 : 용기 육화(해안퇴적) 5 단계 : volcano형에서 stromboli 형으로 6 단계 : hawaiite에서 조면암 제주화산체 산방산 조면암

표1. 제주도 형성사에 대해서 연구된 여러 안

		Haraguchi (1931)	Taneda, et al. (1970)	Won, J. K. (1976)	Lee, M. W. (1982)	Lee, D. Y. (1986)
Holo- cene	upper	1002, 1007 activities Groups of small basalt cones		1002, 1007 activities	1002, 1007 activities Groups of small basalt cones	1002, 1007 activities
	lower			volcanic cone 1 volcanic cone 2		
P L I S T O C E N E	U P P E R	Suikido basalt Halasan basalt	Halasan basalt	Baegrodam basalt Halasan trachyandesite Halasan basalt Seongpanak basalt	Sinyangri formation Halasan trachyte	Dongnam paleosole
		aphanitic basalt augite basalt	aphanitic basalt augite basalt	Sihungri basalt Beobjeongri trachyte Hahyori basalt Jeju basalt	Halasan Hawaiiite Seongpanak hawaiiite Sihungri hawaiiite Beobjeongri mugearite Hahyori hawaiiite Jeju hawaiiite	Basalt flows along the flanks of Halasan Sinyangri formation
	M I D D L E	Hornblende trachyandesite	Seoguiipo lava			Hornblende mugearite
Sanbansan lava		Sangbansan lava	Sinyangri formation	Sinyangri formation	Sanbansan trachyte	Pyoseonri basalt
L O W E R	Seoguiipo formation		Jungmun trachyte Seongsanpo formation Seoguiipo trachyte Pyoseonri basalt	Jungmun Hawaiiite Seongsanpo formation Seoguiipo hawaiiite Pyoseonri alkali basalt	tuff-rings(Hwas- oon, Dansan) Sanbansan trachyte marine sediments basalt(olivine augite basalt, outcropping under the present sea-level)	
Plio- cene	upper		Seoguiipo formation	Seoguiipo formation	Seoguiipo formation	
	middle	Halasan alkaline trachyte	Halasan alkaline trachyte	basal basalt	basal basalt	
	lower					
older than Plio- cene		granite	granite	granite	granite	granite in the northern park tuff in the eas- tern and southe- rn parts

原口(1931)는 제주도의 화산활동은 고기의 조면암의 분출을 시작으로 조면질안산암이 각처에 종상화산으로 관입 분출하고 그후 다량의 현무암질이 분출하여 고기의 분출물을 덮으며 용암대지를 형성한 것으로 해석하고 있다. 그 당시는 마그마의 생성과 분화에 대한 연구가 거의 없었으며, 마그마 챔버의 상부에는 조면암질이, 하부에는 현무암질로 분화되어, 화산활동이 일어나면 먼저 산성암류의 용암이 분출하고 나중에 염기성암류가 분출하는 것으로 해석하였다. 실제로 제주도 남부해안에서의 화산층서를 지형과 관련시켜 단순하게 보면 산방산 조면암- 서귀포 하와이아이트 - 한라산 현무암 등의 순으로 분포하고 있어, 原口의 주장과 모순이 없다. 그러나 原口가 제안한 안은 절대연령 측정값이 나와, 남쪽 해안 지역에 분포하는 조면암류가 모두 약 70만년의 연대를 내고 그 밖의 용암류는 그보다 더 젊은 것이 확인되면서 근본적인 모순점이 발견되었다. 한편, 原口는 화산분포를 근거로 화산구조선을 제한하였다(그림 1). 이 안은 제주도 화산활동과 지구조환경을 관련시켜 흥미해 볼만한 안이다.

농업진흥공사(1971)는 지하수 개발을 위한 지표조사 및 시추 결과로 얻어진 많은 자료를 근거로, 10여개의 퇴적층 및 용암층의 층서를 토대로 형성과정을 제시하였다. 이 안에서는 제주도의 최하부 용암류가 감람석취석현무암이며, 이것이 용암대지를 형성하였으며, 그 위에 서귀포층이 퇴적되고, 그 위로 소위 표선리 현무암인 침상장석감람석 현무암이 광범위하게 분출하여 용암대지를 형성한다. 그후 화산 활동은 계속되어 여러 종류의 용암류를 분출하여 현재의 제주도를 형성한다. 이 안은 절대연령 자료가 없

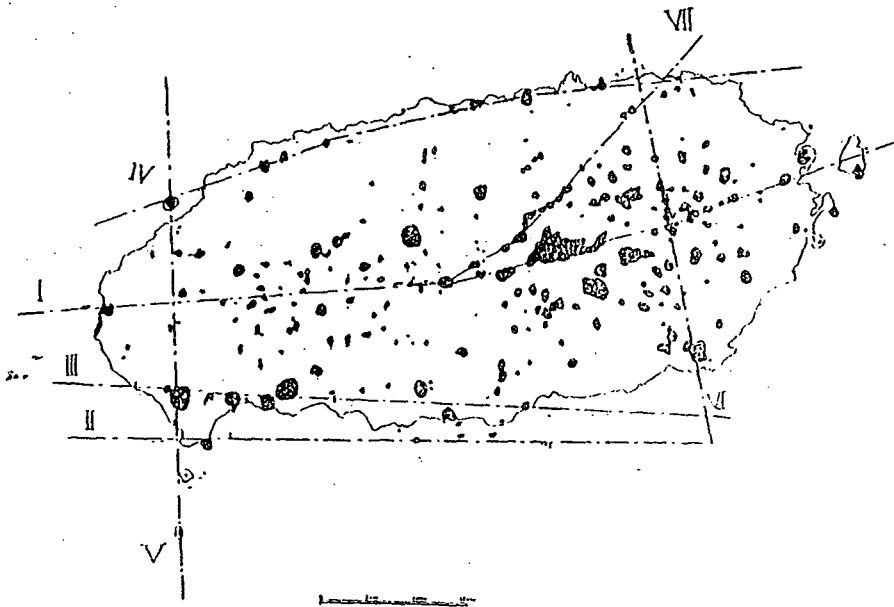


그림 1. 原口가 화산분포를 근거로 제시한 제주도의 화산구조선

는 상태에서 많은 시추자료를 근거로 제주도의 형성과정과 지질구조를 근본적으로 다시 생각하게 하는 계기를 제공하였으며, 그 후에 여러 연구자가 제안한 제주도의 형성사도 이 안을 골격으로 수정 보완한 것에 지나지 않는다.

원종관(1975)은 제주도의 형성사를 제주도의 화산지형의 특징과 관련시켜, 제주도는 5단계의 화산활동으로 형성되었음을 제시하였다. 이 안은 그 후에 제주도에 있었던 화산활동을 연대학, 지구물리학 및 지구화학면에서 연구하는데 근간이 되었다.

이문원(1982)은 원종관의 안을 토대로, 마그마의 분화과정을 관련시켜, 제주도 화산암류의 암석명을 암석학면에서 재정립하면서 수정된 안을 제시하였다.

최순학(1985)은 용암류의 분출시기와 분포 상태를 고려하여, 화산 분출형식과 분출구의 변화에 따라 형성과정을 3단계로 구분하고 있다.

윤 선(1986)은 제주도 기반의 지구조 운동과 그와 관련된 화산활동의 양상의 변화를 고려한 안을 제시하였다. 이 안의 특징은 산방산 조면암을 최후기의 분출물로 놓은 것이다.

이동영(1986)은 하부 기반암을 시추한 자료, 절대연령 자료 및 퇴적층의 연구를 토대로 기존의 안보다는 매우 정리된 수정안을 제시했다. 이 안은 특히 심부 시추자료를 근거로 기반암 및 기저 현무암에 대한 논의를 재정립하는데 기여하고 있다.

3. 제주도 형성사의 재음미

화산활동사를 논의하는데는, 화산분출물을 분출한 분화구, 각 분화구에서 분출한 분출물의 화산층서, 각 분출물의 절대연령 측정값, 암석학 및 지구화학 자료 등이 기본으로 필요하다. 이제까지 제주도에서 연구된 자료는 이러한 조건을 모두 만족한 예가 거의 없어, 제주도 형성사를 논의하는데 장애가 되고 있다. 그 이유는 시추자료는 단지 상대적인 화산층서를 정하는 데는 유용하나, 각 분출물을 분출한 분화구의 위치를 확인하기가 어렵기 때문이다.

이제까지 제주도의 용암류에 대한 절대연령측정은 여러 대표적인 곳에서 이루어졌으며, 이 자료는 제주도의 형성사를 해석하는데 중요한 자료가 된다(표 2, 그림 2).

절대연령이 측정된 용암류의 분포위치, 층서, 연령값과 심부 시추자료 등을 함께 관련지으면서 제주도 하부지질 및 형성사를 다음과 같이 개략적으로 논의, 해석할 수 있다.

1) 제주도의 화산활동 시기

표 2. 제주도 용암류를 절대 측정한 값(K-Ar법)

Sample	Age(Ma.)
한라산 조면암	0.07 ± 0.01 (2)
백록담 하와이아이트	0.47 ± 0.07 (2)
한라산 하와이아이트	0.52 ± 0.03 (2)
서귀포 하와이아이트	0.55 ± 0.04 (3)
표선리 알칼리현무암	0.31 ± 0.04 (3)
백록담 조면암	0.025 ± 0.008 (2)
산방산 조면암	0.747 ± 0.023 (2)
문섬 조면암	0.728 ± 0.034 (2)
숲섬 조면암	0.725 ± 0.038 (2)
표선리 현무암	0.63 ± 0.03
서귀포 조면암질 안산암	0.41 ± 0.01
병악 현무암	0.035 ± 0.014
대흥 현무암	0.63 ± 0.03
현무암 (산방산 기슭)	0.07 ± 0.04
지구 현무암	0.60 ± 0.13
각수바위 조면암	0.893 ± 0.027
	0.917 ± 0.028
법정리 뮤저라이트	0.168 ± 0.017
	0.190 ± 0.019
시오름벤모라이트	0.711 ± 0.021
	0.689 ± 0.021
고근산 현무암	0.097 ± 0.029
	0.079 ± 0.025
한라산 현무암	0.121 ± 0.018
	0.093 ± 0.025
궁산 현무암	< 0.030
지미봉 하와이아이트	0.049 ± 0.010
	0.122 ± 0.012
온평리 현무암	0.63 ± 0.03
	0.60 ± 0.13
덕천리 현무암	0.37
(만장용암 터널 내 측벽)	
덕천리 현무암	0.51 ± 0.05
	0.374 ± 0.03
포획암(현무암)	1.20

제주도의 화산활동은 적어도 1.2Ma년 이전에 시작되어, 약 3만년전까지 용암을 분출하였다. 긴 활동기간중 몇 번의 휴식기가 있었는지는 용암류의 화학조성의 변화, 고토양층의 협재, 전체적인 지형적 특징 등을 고려하여, 제안자마다 그 단계를 달리하고 있다. 그러나 대체로 4단계의 화산활동이 있었던 것이 확인 된다. 역사시대에도 분출된 용암은 확인되지 않으나 화산활동이 있었던 기록이 있다.

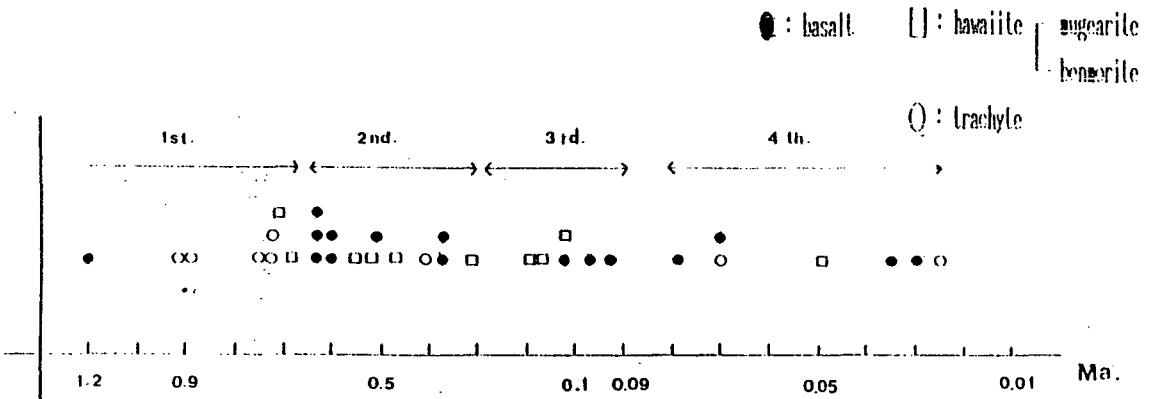


그림 2. 측정된 절대연령값을 시대별로 나타낸 그림

2) 제주도 하부 기반암과 일명 세화리 퇴적층

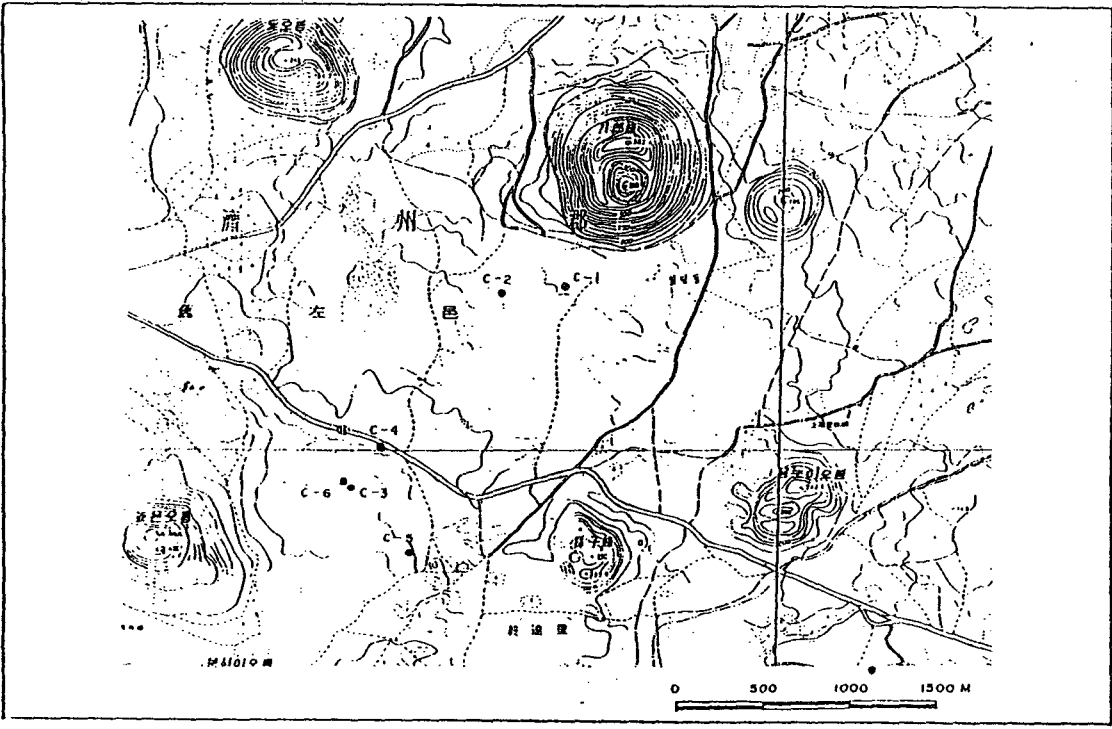
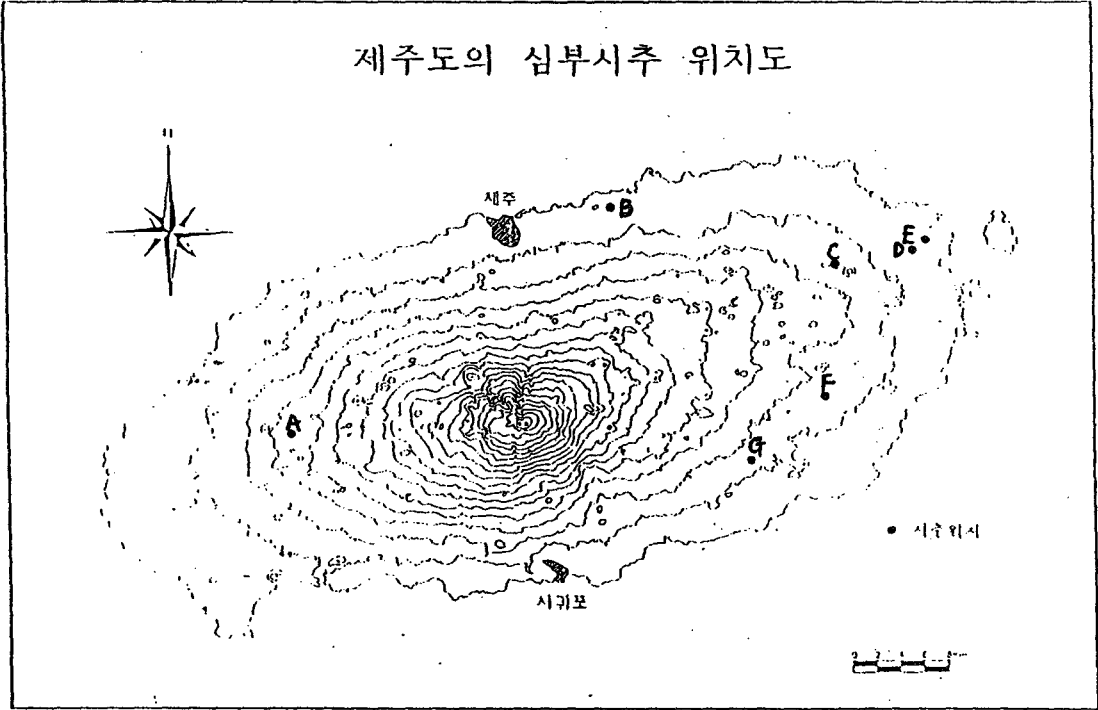
제주도의 하부 기반암은 제주시 부근의 별도봉에서 응회암내에서 발견되고 화강암역을 근거로 불국사 화강암류와 대비되는 화강암류가 분포하는 것으로 알려져 왔다. 최근에 이동영은 심부 시추결과 및 우도 동남해안절벽의 응회암내에 백악기 응회암이 포획암으로 산출하는 것을 근거로 제주도의 기반암이 응회암류도 있음을 확인했다(원종관 외, 1993)(그림 3). 송악산 해안 절벽이나 수월봉 해안 절벽에서는 편마암류의 역도 확인 된다.

심부 시추자료는 제주도 하부의 지질은 백악기 응회암류가 대부분이며, 화강암류 및 변성암류로 구성되어, 한반도 남부와 서남부 해안의 지질과 유사한 것으로 해석된다. 심부시추에서 응회암류가 포획되는 깊이는 깊은 곳이 -317m, 낮은 곳이 -194m정도이며, 그위에 100m-200m 두께의 일명 세화리 퇴적층이라는 미고결 퇴적층이 피복되어 있다(그림 3).

3) 제 1단계의 화산활동과 기저 현무암

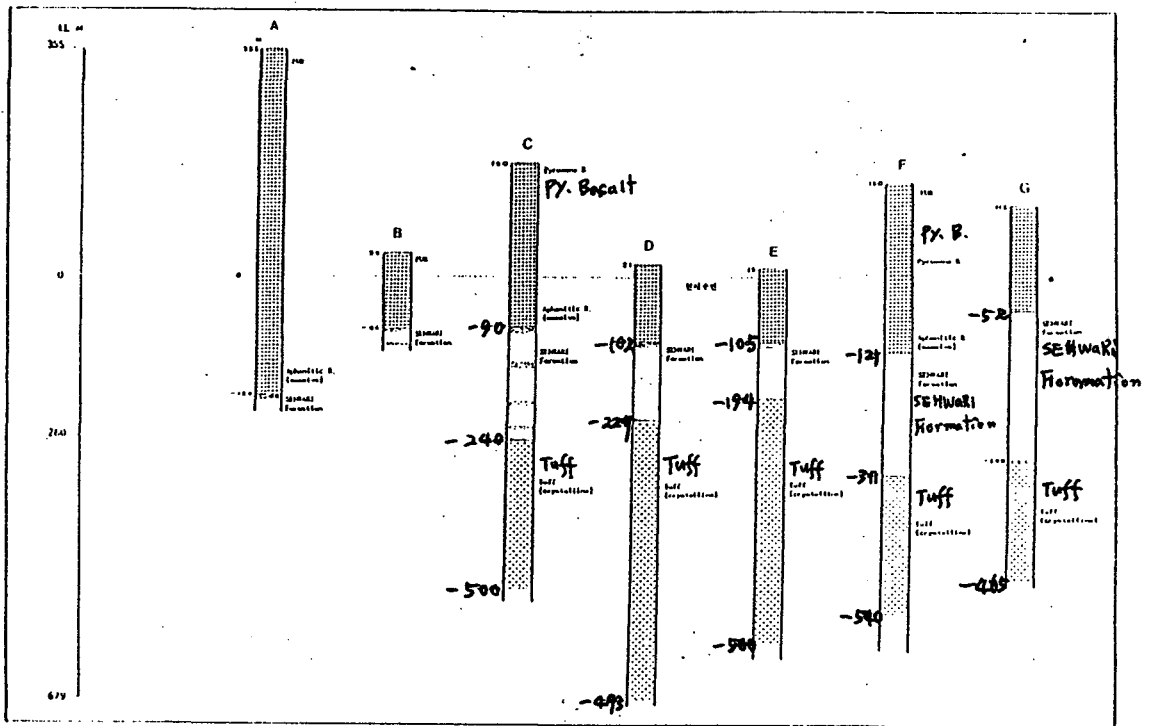
제 1 단계의 화산활동은 기반암을 부정합으로 덮은 화산분출물을 분출한 시기이다. 여기서 단계라는 의미는 한 화산활동이 시작되어 얼마간 화산활동이 지속된 후 활동이

제주도의 심부시추 위치도

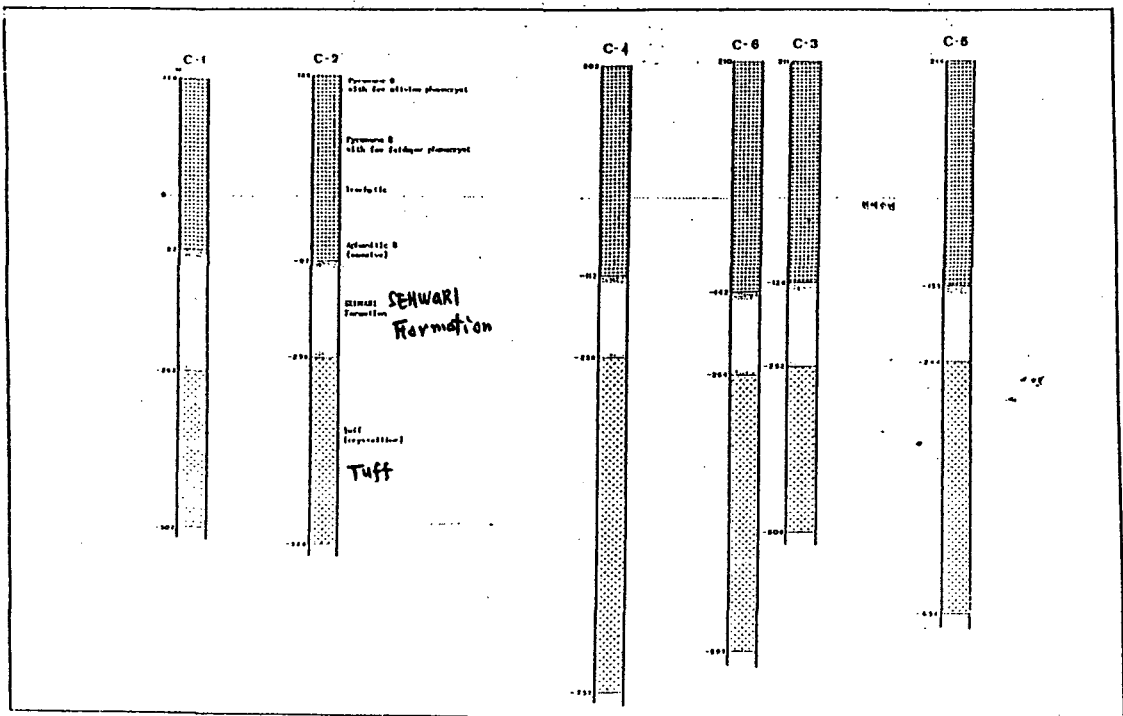


북제주군 구좌읍 세희리 동부지역에서 실시된 심부시추지역 위치

그림 3. 심부 시추를 한 위치와 시추 지점의 주상도



제주도의 여러지역에서 시추경의 제주도의 심부지질은 최하부에 용회입류물 가지로 하여 심도 약 200에서 100m까지는 퇴적층 및 그 상부에는 현무입류물 크게 구분되고 있다.



복제주군 구리읍 세히리 동부지역 시추 주상도

그림 3. 심부 시추를 한 위치와 시추 지점의 주상도

멈추어 긴 휴식기에 들어가기 전까지의 기간을 의미한다. 제주도가 형성되는 과정에는 적어도 4번의 화산활동 단계가 있었던 것이 확인된다. 그림 2에서처럼 1 단계는 1.2Ma-0.7Ma, 2 단계는 0.6Ma-0.3Ma, 3 단계는 0.3Ma- 0.1Ma, 4단계는 0.1Ma-0.025Ma년의 기간으로 구분된다. 한 단계의 기간은 약 50만년-10만년이 지속되었다.

1 단계의 화산활동은 연구자에 따라 여러 용어로 표현되고 있다. 1단계는 감람석 휘석현무암의 용암 대지(농업진흥공사), 1단계 기저현무암(원종관), 1단계 기저 용암대지 형성단계(이문원), 1단계 열하분출에 의한 현무암대지의 형성(최순학), 1 단계 Dome 2 단계 하와이형 분출(윤선) 및 기저현무암-산방산조면암(이동영) 등으로 표현되고 있으며, 기간은 적어도 1.2Ma이전부터 0.74Ma사이이다.

1 단계에서 분출한 현무암류는 해수면위에서 발견되지 않는다. 제주도에 가장 고기의 현무암류는 용머리의 응회암에 포획된 것과 시추공으로 확인된 휘석 감람석 현무암류로 절대 연대는 1.2Ma이다. 그러나 그림 3과 같이 여러 심부 시추지점에서 기반암을 부정합으로 덮고 있는 현무암은 감람석 휘석 현무암이 아니며, 연대가 0.6Ma-0.5Ma년 정도인 무반정의 하와이아이트(성산일대) 또는 일명 표선리 현무암(FOB)과 같은 암상이다.

1 단계의 화산활동은 남부 해안지역에 분포하는 조면암류(산방산, 각수바위, 월라산, 예촌리, 세지기 오름, 등)를 분출하면서 끝난다. 이들 조면암류는 남부 해안선을 따라 거의 직선상으로 분포한다. 그리고 그 밖의 지역에서는 분포하지 않는다. 이러한 사실은 1 단계의 화산활동은 산방산-월라산을 잇는 현재의 남부 해안선 상 주위에서 일어났던 것으로 추정된다. 즉 약 70여만년전의 제주도는 수면위에 산방산, 각수바위 등과 같이 조면암류로 된 종상화산이 분포할 뿐이었고 해수면 가까이 현무암류가 분포하였을 것으로 추정된다. 이러한 사실은 1.2Ma정도를 보이는 기저현무암류의 분포 면적은 매우 적었으며 이 단계의 제주도 모양은 현재의 제주도 모양과는 매우 달랐으며, 그 규모는 매우 작았을 것이다. 1단계 때의 원시 제주도를 추정하면 그림 4와 같다. 산방산-서귀포를 잇는 선상의 지역은 수심이 낮고, 그 밖의 지역은 수심이 더 깊었을 것이다.

4) 제 2단계 화산활동, 서귀포층과 표선리 현무암(FOB)

1단계의 화산활동이 약 73만년전에 끝난후, 2단계 화산활동은 언제 시작되고, 언제 끝났으며 그 때의 분출물은 어디에 분포하고 있는가, 그리고 서귀포층은 언제 어느 곳에 퇴적된 것인가, 또 표선리 현무암(FOB)과 서귀포층과의 층서관계는 어떤가 등의 문제는 제주도 형성사와 하부지질을 규명하는데 매우 중요한 과제이다.

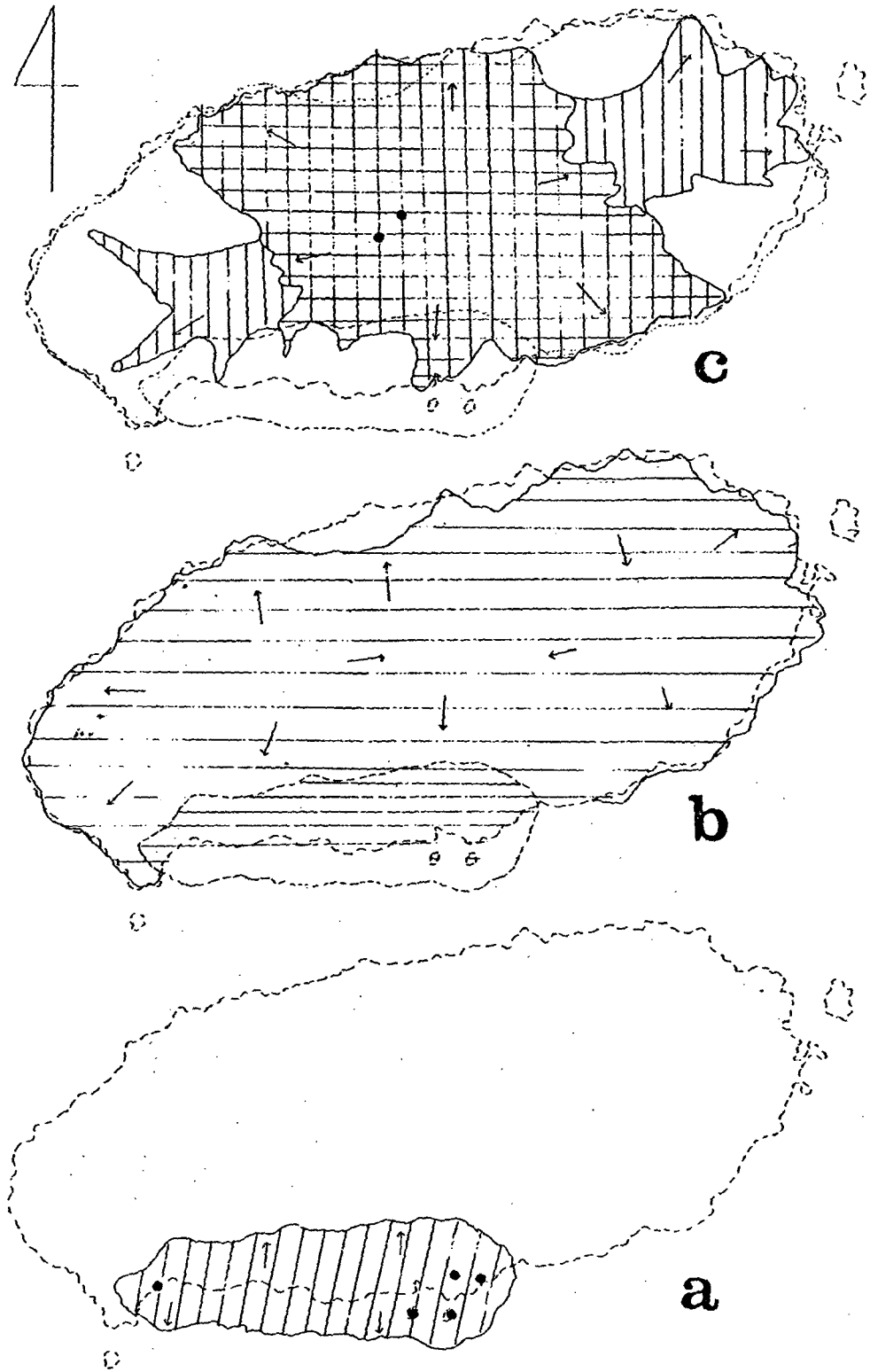


그림 4. 각 단계가 끝났을 때의 제주도 모양

가: 1단계, 나: 2단계, 다: 3,4단계

서귀포층:

서귀포층은 화산층서에서 해수면상의 지층중 가장 하부층으로 간주되어 왔다. 그리고 이 층은 많은 화석을 함유하고 있어, 제주도 용암류의 절대 연령값이 측정되기 전까지는 제주도 화산활동의 시기를 결정하는 데 중요한 역할을 하여왔다. 여러 연구자(Haraguchi, 1931; Taneda, 1970; 김, 1972) 등은 Pliocene 말기의 천해 퇴적층으로 해석하였다. 그러나 서귀포층의 층서위치와 분포에 관해서는 아직 많은 의견이 있다. 제주도 형성사에서, 농업진흥공사(1971), 원종관(1976), 이문원(1982) 등은 서귀포층을 표선리현무암(FOB)의 하부로 정하고 있다. 그러나 최순학(1985), 윤 선(1986), 이동영(1986) 등은 서귀포층을 표선리현무암보다 후기의 것으로 정하고 있다. 서귀포층이 산출하는 서귀포지역에서 이 층의 하부층은 아직 확인되지 않고, 또 표선리 현무암층과 직접 접하는 곳도 확인되지 않는다. 서귀포지역에서 서귀포층의 상부에 직접 피복한 암석은 0.41Ma로 측정된 하와이아이트이다. 이동영(1986)은 서귀포층을 덮고 있는 하와이아이트의 절대연령값과 서귀포층의 고지자기측정값 및 서귀포층의 퇴적학 특징 등을 고려하여, 이 층은 0.60Ma-0.41Ma사이의 Middle Pleistocene에 일어났던 해침에 의하여 형성된 천해저 퇴적층으로 해석하고 있다.

서귀포 층의 분포에 대해서는 두가지 의견이 있다. 하나는 수평적으로 어느 정도 연속성을 가지며, 제주도 해안 하부에 분포한다는 생각과, 다른 하나는 서귀포층은 서귀포 지역에 국부적으로 분포하며, 다른 지역에 분포한다 하여도, 수평적인 연속성은 없이 산발적으로 분포한다는 생각이다. 농업진흥공사 시추자료에서는 제주도 해안의 여러 지역에서 서귀포층이 나오는 것으로 해석하고 있다. 그러나 그러나 시추를 할 때 두꺼운 화산쇄설층이 나오면 서귀포층으로 간주한 시추자료도 여러 곳에서 발견된다. 따라서 농업진흥공사의 시추자료를 근거로 서귀포의 분포를 추정하는 것은 재해석이 요구된다. 제주도 남부 해안 산방산- 서귀포 사이에서의 시추자료(이문원 외, 1993)와 심부시추자료(원종관 외 1993)에서 서귀포층이 수평적인 분포에 연속성이 없는 것이 확인되고 있다.

이동영(1993)은 수월봉부근의 심부 시추자료에서, 지표하 약 70m까지 적어도 10회 이상의 표선리 현무암의 분출이 반복되고, 그 하부에서 두께 약 20m되는 패류를 다량으로 함유하는 사층이 분포하는 것을 확인하였다. 농업진흥공사 보고서에서는 이 층을 서귀포층으로 분류하고 있으나, 이동영은 이층을 퇴적층의 심도, 퇴적상 등을 고려하여, 서귀포층과는 다른 층으로 분류하고 있다. 이제까지 일반적으로 시추자료에서 패류화석을 함유한 퇴적층이 나오면 모두 서귀포층으로 분류하여 왔다. 이동영의 위와 같은 주장은 제주도 하부지질을 논의할 때, 하부 퇴적층으로 통용되어 온 서귀포층에 대한 명명을 재검토되기를 요구하고 있다.

표선리현무암:

표선리현무암은 침상 장석과 감람석이 육안이나 현미경으로 잘 관찰되는 현무암으로 표선리 부근의 해안 저지대를 비롯해서 제주도 해안지대에 넓게 분포한다. 이 암석은 농업진흥공사(1971)가 발간한 지질도(1/10만)에서 층서로서 서귀포층위의 암층으로 제주도 해안지대에 넓게 분포한다. 그러나 이 암층과 서귀포층과의 층서관계는 두 암층이 직접 접하는 곳을 노두나 시추자료에서 확인되지 않아 아직 미정이다.

1/10만의 지질도에서 표선리현무암(FOB)로 분류되었으며, 해수면위에 있는 현무암중 최하위 것으로 확인되는 몇 곳의 연대 측정값은 0.60Ma-0.63Ma이다(이동영, 1993). 한편 성산 일대의 시추자료에서 표선리 현무암과 같은 암상의 현무암이 응회암류의 기반암과 직접 접하고 있으며, 그 현무암은 암상의 변화가 거의 없이 해수면위까지 계속되는 것이 확인 된다. 따라서 심부 시추자료를 근거로 하면, 제주도의 많은 지역은 기반암을 덮고 있는 화산암류는 1단계의 분출물인 휘석 감람석 현무암류가 아니라, 0.63Ma년 정도에서 시작된 2단계의 분출물임을 의미한다(그림 3, 4).

2단계의 화산활동은 다량의 현무암류를 분출하여, 기반암을 덮으며 현재의 제주도 규모로 실질적인 순상형 용암대지를 형성한 시기이다(그림 4). 2단계의 초기에 분출한 용암류는 산방산-서귀포를 잇는 원시 제주도를 제외한 전 지역을 메운다. 2단계의 후기에 오면서 산방산-서귀포를 잇는 원시 제주도위에도 흐른다. 서귀포층을 부정합으로 덮고 있는 일명 서귀포 하와이아이트는 이 단계의 분출물이다. 그러나 이 시기에도 현재 제주도의 해안선과 완전히 일치하지는 않는다. 해안지형중에는 3와 4단계의 화산분출물에 의해 만들어진 곳도 많이 있다.

제주도 형성사에서 모든 연구자들은 순상형의 용암대지형성 단계를 넣고 있으며, 그 시기는 거의 일치한다. 그러나 기반암위를 직접 부정합으로 덮고 있는 현무암류가 어느 단계의 분출물인가에 대해서는 아직 의견이 일치하지 않는다.

2단계 초기에 분출한 표선리 현무암은 남부 해안 산방산-서귀포를 사이 구역을 제외하고 모든 해안 지역에 넓게 분포한다. 만장굴을 형성한 용암류는 침상장석감람석 현무암류로 기존의 지질도에서는 표선리 현무암으로 분류되었으나, 절대 연령은 0.42Ma-0.32Ma년으로 측정된다. 수산리 부근의 현무암도 표선리 현무암과 암상이 유사하며, 연령값은 0.51Ma - 0.37Ma로 측정된다. 또한 화구 주변에서 가장 젊은 것으로 확인된 용암류 중에는 암상이 표선리현무암류와 유사한 것이 있다. 이러한 사실은 침상장석 감람석 현무암류와 같은 암상의 용암류는 약 30만년 기간에 걸쳐 다량으로 분출한 것을 의미한다. 따라서 침상장석감람석의 암상을 근거로 표선리 현무암을 분류하는 것은 큰 오류이다.

그러나 표선리 현무암과 같은 암상의 용암류는 주로 해안 저지대에 넓게 분포하며 0.6Ma - 0.37Ma 년 범위를 나타내는 것이 특징이다. 이러한 사실로 2 단계는 0.6Ma년 정도에서 시작되어 0.3Ma년 정도까지 지속된 것으로 추정된다.

1 단계의 화산활동의 중심은 제주도 남쪽 해안가를 지나는 선상이었으며, 2 단계의 화산활동은 현재 제주도 장축선상에서 주로 일어났으며, 감람석, 휘석 반정을 갖는 현무암류 또는 무반정의 현무암류를 다량으로 열하분출하여, 한라산체를 제외한 제주도 전체 지형의 대부분을 만들었다. 제주도 장축위에 있는 많은 신더콘 중에는 2단계의 시기에 활동했던 분화구가 해안 저지대에 일부 남아 있으며 대부분은 다음 단계의 화산활동 때 활동했던 분화구이다.

2 단계의 마그마 분화물인 조면암류 등은 지표에서 확인되지 않으며, 분출하였다 하여도 후기에 분출한 용암류에 의해 피복되었을 것이다. 산방산-서귀포 사이에 분포하며, 서귀포층을 직접 피복하고 있는 하와이아이트는 2단계에 분출한 용암류이다. 제주도 해안 지형중에서 산방산-서귀포사이에서만 2 단계의 후기에 분출한 용암류의 해안 절벽이 발달한다. 이와같이 이 지역에 2단계 초기의 분출물인 표선리현무암류가 분포하지 않고 2단계 후기의 분출물인 무반정 하와이아이트가 두꺼운 층으로 분포하는 것은 이 지역이 1단계의 화산활동으로 원시 제주도가 형성된 지역임을 뒷받침한다.

5) 제 3단계의 화산활동과 한라산체 형성

절대 연령의 자료에서 0.3Ma-0.1Ma년의 값을 보이는 용암류가 있다. 이들은 주로 한라산체주위의 분화구에서 분출한 용암류이다.

해발고도 약 500m 이상 되는 곳에서부터 한라산 정상까지는 지형적으로 경사가 급해지면서, 창석과 휘석 반정이 많은 현무암류가 분포하는 것이 특징이다. 기존의 지질도에서는 이 현무암류를 FB, PAB 또는 PFB 등으로 분류된 용암류는 모두 이 단계에서 분출된 것이다. 이와같이 창석과 휘석 반정을 많이 갖는 현무암류는 1, 2단계때는 거의 분출하지 않았으며, 분출하였어도 그 양은 극히 적은 양이었다.

이와같이 한라산체 위에 있는 용암류의 암상이 해안가에 있는 용암류와 뚜렷한 차를 보이는 마그마의 생성 및 분화의 심도가 1, 2 단계와는 달랐음을 의미한다. 이러한 관례는 박준범과 권성택(1994)가 지구화학적 연구로 논의하고 있다.

즉, 한라산체를 형성한 화산활동은 주로 장축상의 한라산 주위에 분화구가 위치하며 분출한 것이 특징이다. 이 시기를 3단계로 구분하였다. 한라산체를 이루는 용암류에 창석과 휘석이 많은 것은 이 단계의 마그마 생성과 분화의 깊이가 2단계의 마그마의 깊이보다 얕아졌음을 암시한다.

3단계의 화산활동은 한라산체 주위에 있는 영실과 같은 조면암류를 분출하면서 끝난다. 이 시기는 화산활동의 중심이 한라산체 주위로 옮겨지면서 화산활동 양식도 일출식에서 폭발식으로 바뀌었다. 따라서 이 단계에서 활동한 분화구 주위에는 화산쇄설물이나 화산탄의 분포가 두드러진다.

6) 제 4단계의 화산활동과 젊은 기생화산

한라산 정상부의 백록담 조면암은 절대연령이 0.025Ma이다. 그 밖에 제주도 남서면의 병악 현무암, 공산 현무암 등은 0.03Ma의 연령값을 보인다. 한편 장축선상에 위치하는 많은 기생화산중에서 그 원지형을 그대로 보존하고 있으며, 항공사진에서 분출물이 흐른 방향이 확인 될 정도의 젊은 용암류는 연령이 약 0.1Ma 정도로 측정되고 있다(동쪽 지미봉 현무암, 약 0.1Ma). 이러한 사실은 제주도의 형성과정에서 3 단계에서 중심분출로 한라산체를 형성한 후, 제주도의 여기 저기서 4 단계의 화산활동이 있었음을 시사한다. 제주도의 장축 방향에 위치하는 많은 기생화산 중에는 이 단계에 활동했던 분화구가 많다. 4 단계의 화산활동은 한라산 정상부에서는 백록담 조면암류를 분출하였으나, 그 밖의 지역에서는 장석 반정을 함유하지 않는 현무암질 용암류를 분출하여 2 단계나 3 단계때 분출한 용암류위에 얇고 넓게 분포한다. 1/10만 지질도에서 시흥리 현무암으로 분리된 용암류는 이 단계에 분출된 것이다. 이 단계의 화산활동이 시작할 때는 이미 제주도의 형태가 현재와 거의 같게 되어서, 분출물이 흐른 방향은 한라산 정상 쪽에서 해안을 향하는 방향으로 흐른 것이 특징이다. 해안가에서 표선리현무암류와 암상은 유사하나 무반정으로 아주 신선하며, 새끼구조나 용암듀브 등의 용암류의 조직이 발달한 용암류들은 대개 4단계때 분출한 것이다. 4 단계때, 제주도의 백록담이 만들어 지고(약 2만 5천년전) 현재의 해안지형이 완전히 만들어진 것이다.

4. 지하수와 관련된 지질구조

지하수의 연구에서 지하수의 부존과 관련된 물질은 크게 3가지로 나누어 생각할 수 있다. 즉 1) aquifer, 2) aquifuge, 3) aquiclude 등이다. aquifer는 함수층을 말하며 지하수 그 자체를 물질 속에 함유하기도 하고 투수 시키기도 하는 물질을 말한다. 이것에 대표적인 예로는 사층이나 역층이다. aquifuge는 이수층(離水層)으로 지하수를 투수 시키지도 않고 그 물질 자체내에 지하수를 함유하지도 않는 층을 말한다. 신선한 화강암이 그 대표적인 물질이다. aquiclude는 점토층과 같이 지하수를 그 자체내에 함유하기는 하나 투수 시키는 성질을 갖지 않는 물질을 말한다. 이들 삼자는 지하수 발달에

있어 각각 특수하게 다른 요인으로 작용한다. 즉 aquifer는 풍부한 지하수의 저장소가 될 수 있어 지하수 발달에서 가장 중요시 되는 요인이다. 반면 점토층과 같은 aquiclude는 양호한 함수대의 상부나 하부 또는 상하로 발달한 양 함수대의 중간에 발달하기도하여, 시정할 때 지표면 상부로 지하수가 넘쳐 흐르는 현상을 보여주기도 한다. 또 aquifuge는 양호한 함수대 기저에 넓게 분포하면 aquifer에 함유되는 풍부한 지하수를 보존하는 저수 탱크의 밑바닥의 역할을 하기도 한다.

제주도 지역에서는 층적층의 발달은 극히 빈약하여 층적층에 발달하는 지하수를 기대할 수는 없으며, 제주도는 화산분출물내에 발달하는 지하수가 있을 뿐이다. 따라서 제주도의 지하수와 지질구조를 논의하는데는 제주도를 구성하는 화산분출물층, aquifer, aquifuge 및 aquiclude 등의 역할을 하는 물질은 어느 것이 있으며, 그러한 물질이 어느곳에 어떻게 분포하는지, 또 각 물질들의 분포는 제주도의 형성사와 어떤 관련이 있는지를 밝히는 것이 중요하다. 지하수 부존과 관련된 지질구조는 제주도의 형성사와 관련된 거시적인 화산지질구조와 화산분출물 내에 발달하는 미시적인 지질구조를 논의할 수 있다.

1) 거시적인 화산지질구조와 지하수 부존관계

제주도 지하수 부존은 거시적인 측면에서 제주도의 형성사와 밀접한 관계가 있다. 그림 5는 제주도 지하수 부존도이다. 이 그림에서 지하수의 부존상태를 제주도 해안저지대 지역만을 비교해 보면, 산방산-서귀포사이의 상위지하수가, 제주도 동쪽 표선-성산-조천 일대에는 기저지하수가, 그 밖의 지역은 준기저 또는 상위지하수가 발달하고 있다. 이와 같이 지하수위의 발달이 지역에 따라 다른 것은 거시적인 측면에서 제주도의 형성사와 밀접한 관계가 있다.

산방산-서귀포사이의 지역을 제외한 다른 지역은 기반암위에 2단계의 화산분출물인 현무암류가 넓게 분포하고, 특히 기반암류인 응회암류와 현무암류사이에 총후 100m-200m의 미고결퇴적층이 분포한다. 그러나 산방산-서귀포 사이의 지역은 1.2Ma-0.7Ma년 사이에 1단계 화산활동으로 원시 제주도가 형성된 곳으로 하부의 지질구조가 다른 해안지역과는 매우 다르다. 따라서 산방산-서귀포사이 지역에는 기저지하수가 발달하지 않고 2단계에서 분출한 화산분출물내에서 상위지하수만 발달하고 있다.

이러한 사실은 거시적인 지질구조로 볼 때, 제주도의 지하수 부존은 응회암류의 기반암과 그위에 덮고 있는 미고결 퇴적암 및 2단계의 분출물인 용암류의 분포와 밀접한 관계가 있음을 암시한다. 아마도, 응회암류인 기반암류와 미고결 퇴적층은 제주도 하부 지질의 하부에서, 응회암류는 aquifuge로, 미고결 퇴적층은 aquifer 또는 aquiclude로

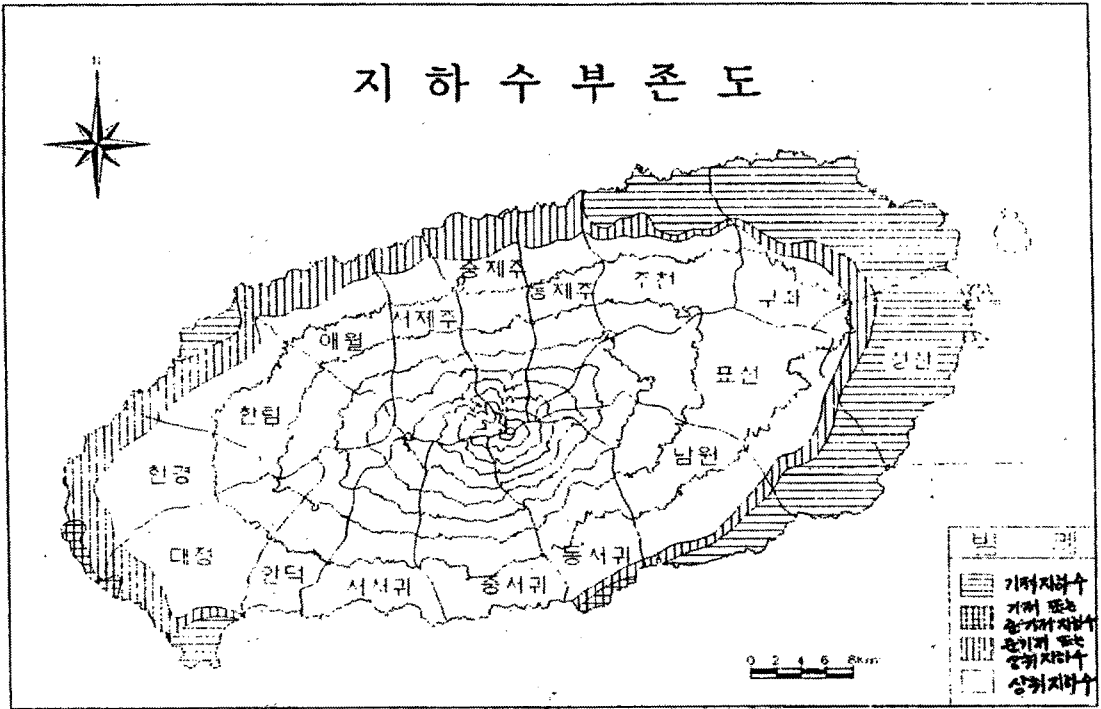


그림 5. 제주도 지하수의 부존도

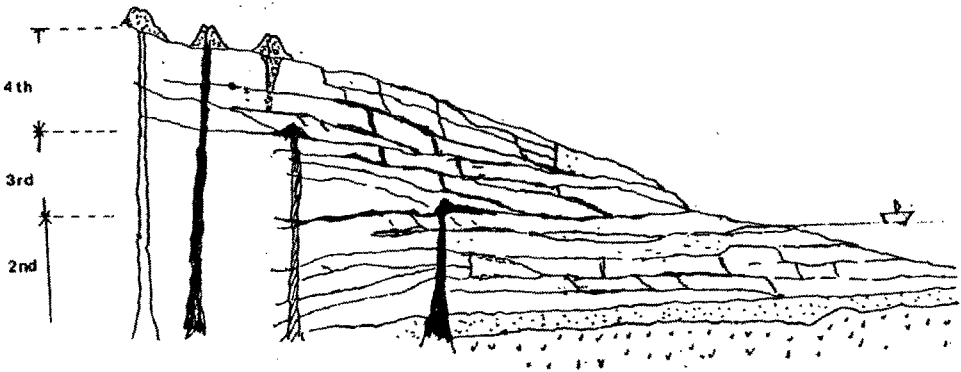


그림 6. 제주도 지하수의 부존과 관련된 지질구조 단면도

역할을 하여, 산방산-서귀포사이 지역을 제외한 제주도 해안지대 하부에 풍부한 지하수를 보존하는 저수탱크의 밑바닥 역할을 하고 있는 것으로 추측된다(그림 6).

2) 미시적인 지질구조와 지하수 부존관계

제주도의 화산분출물중 어떤 암석이나 물질이 aquifer, aquifuge 및 aquiclude로 각각 작용하는지를 밝히는 정량적인 연구는 아직 미흡하나, 지질조건들이 지하수 발달에 영향을 주는 지질 조건은 다음과 같을 추정할 수 있다.

- (1) 용암류의 절리나 균열과 같은 투수성 구조, (2) 용암터널이나 용암튜브
- (3) 화산쇄설물, 크린커로서 스코리아 및 고토양층 등을 협제한 상하 용암층 사이의 접촉면, (4) 기생화산의 분포, (5) 용암의 흐름 방향

(1) 투수성 구조 : 제주도를 구성하는 모든 용암류는 기공이 서로 연결되어 있지 않기 때문에, 기공의 유무 및 과다에 관계 없이 불투수층 역할을 한다. 그러나 기공이 많은 용암류에 균열이나 절리가 발달되어 있으면 양호한 함수층 역할을 할 수 있다. 특히 2단계에 분출한 일렬 표선리 현무암류의 표면에는 기공이 많고 주상절리가 잘 발달되어 있어 투수성구조를 갖는 대표적인 예이다.

(2) 용암터널 및 용암튜브 : 용암터널은 산방산-서귀포사이 지역을 제외한 해안 지역에서 지표하 10여m이내에 발달하며 특히 동, 서쪽 해안 저지대에 넓게 분포하는 2단계의 분출물인 용암류에 많이 발달한다. 만약 이와같은 용암터널이 좀더 깊은 곳에 발달되어 있다면 지하수를 저장하여 상위지하수의 저장소 역할을 할 것이다. 또한 해안 용천수중에는 암석내에 발달하는 용암튜브가 지하수의 용출구로 작용하는 것이 있다. 이러한 사실은 용암터널이나 용암튜브가 지하수의 유로로 작용하고 있음을 의미한다.

(3) 두 용암류의 접촉면 : 두 용암류가 접하는 면에는 대개 화산쇄설물이나 크린커로서 스코리아 또는 드물지만 고토양층이 협제한다. 화산쇄설물이나 크린커로서 스코리아는 때로는 두께가 수 m이상되는 곳도 있어, 이러한 지질조건은 가장 기대되는 함수층이다. 만약 이러한 접촉면 하부에 aquifuge로 작용할 수 있는 암층이 놓인다면, 상부층의 투수성구조를 따라 침하한 지하수는 하강이 저지당하게 되며 접촉면을 따라 해안쪽으로 이동하여 할 것이다. 이와 같이 지하수가 용암류의 접촉면을 따라 이동하는 동안에 접촉면이 지표로 노출되면 높은 지대의 용천수를 형성한다. 두 용암류 사이에서 간혹 발견되는 고토양층은 화산쇄설물이나 스코리아에 비해서 불투수성이어서 aquifuge 역할을 할 것으로 추측된다. 고토양층은 화산활동의 휴식기에 발달한 층으로 제주도의 형

성사를 크게 4단계로 구분한다면 적어도 4 개층이상의 고도양층이 존재해야 할 것이다. 특히 2단계의 순상형의 용암대지를 형성한 시기와 3 단계의 한라산체를 형성한 시기사이에는 고도양층이 분포할 것이다. 해발고도 500m-1000m정도에서는 3단계의 용암류와 4 단계의 용암류사이 수십 cm 두께의 고도양층이 분포하는 곳이 발견된다. 고도양층의 두께는 기존 지형의 굴곡에 따라 다를 것이기 때문에, 수평적인 연속성의 유무나 두께의 변화 등은 앞으로 확인되어야 할 과제이다.

(4) 기생화산의 분포 : 제주도의 지표에는 360여개 이상의 분화구가 있다. 이들은 각 화구에서 많은 양의 화산분출물을 분출한 흔적 중 하나이다. 현재 제주도의 지표에 있는 기생화산은 1단계의 것은 산방산, 월라산 등 조면암의 덩으로 분포하고, 2단계의 기생화산은 해안저지대에 많이 개석된 상태로 드물게 분포하며, 대부분은 3단계와 4단계에서 용암류 및 화산쇄설물을 분출한 후 활동을 멈춘 흔적이다.

따라서 이러한 기생화산의 하부구조가 어떤가에 따라 기생화산이 분포하는 주변지역의 지하수의 부존상태 또는 지하수의 유로방향은 크게 달라질 것이다.

기생화산은 지표가까이는 화산쇄설물로 구성되었으나, 하부구조는 1) 하부의 화도가 비어 있는 경우, 2) 용암류로 메워져 있는 경우, 3) 화산쇄설물로 메워 있는 경우 등을 생각할 수 있다.

기생화산의 하부 구조가 어떤 상태인가에 따라 특히 한라산 정상부근에서 해안지역으로 하류하는 지하수의 유로는 차단되거나, 유로가 변경되어 국지적으로 지하수의 수위 변화에 많은 영향을 줄 것이다.

(5) 용암이 흐른 방향 : 용암이 흐른 방향은 두 용암이 만난 접촉면이 지하수의 유로 역할을 할 때, 매우 중요한 지질조건이 된다. 즉 상하의 용암류가 같은 방향으로 흘렀을 때와 서로 다른 엇갈린 상태로 흘렀을 때, 두 용암이 접하는 면사이에 생기는 유로의 모양은 달라질 것이다. 여러 용암류가 흘렀을 때, 서로 엇갈리게 흐를 때보다 같은 방향으로 흘렀을 때가 더 좋은 유로 역할을 할 것이기 때문이다.

제주도가 형성되는 과정에서 대체적으로 용암의 경사나 흐른 방향은 각 단계에 따라 다르다. 1 단계의 경우는 산방산-서귀포 사이지역에서 활동하여 그 때 분출한 용암류는 전체적으로 현재의 한라산 방향과 가파도 방향으로 흘렀을 것이다. 2단계의 경우는 현재의 제주도 장축선 상에서 주로 활동하여, 특히 동서 지역에서 더욱 활발하여 아령 모양의 제주도를 만들면서 완만한 경사로 각 방향으로 흘렀을 것이다. 3단계의 분출물은 주로 현재의 한라산정상 부근을 정점으로 해안지역을 향해 흐르게 되었다. 4단계의 분출물은 현재의 제주도의 모양과 거의 같게 만들어진 때이므로 용암류는 3단계때와 마찬가지로

가지로 모두 해안지역을 향해 흘렀을 것이다. 따라서 상위 지하수의 분포는 3,4단계의 분출물의 지질 구조의 영향을, 기저 지하수는 기반암과 미고결퇴적층의 분포 및 2단계의 분출물의 지질 구조의 영향을 많이 받고 있는 것으로 해석된다.

5. 결론

- 1) 제주도를 형성한 화산활동은 적어도 1.2Ma년 이전에 시작되어 0.025Ma년 정도까지 있었다.
- 2) 제주도의 기반암은 대부분이 백악기의 용암암류이며 화강암류와 변성암류도 분포하는, 한반도 남부 해안지역의 지질과 유사하다.
- 3) 기반암위에는 미고결상태의 퇴적물이 두껍게 분포하고 그위를 2단계의 분출물이 부정합으로 덮고 있는 곳의 면적이 넓다.
- 4) 서귀포층의 분포는 수평적으로 연속성이 확인되지 않으며, 그 분포 및 암층의 정의가 기존의 연구와 다른 곳이 많이 지적되고 있다.
- 5) 제주도는 크게 4 단계의 화산활동에 의해서 형성되었으며, 1단계는 1.2Ma-0.7Ma, 2단계는 0.6Ma-0.3Ma, 3단계는 0.3Ma-0.1Ma, 4단계는 0.1Ma-0.025Ma년사이이며, 각 단계는 약 50만년-10만년 동안 지속되었다.
- 6) 1 단계에서는 산방산-서귀포를 잇는 선상위가 활산활동의 중심이 되어 열하 분출을 하면서 최후기에 산방산 등과 같은 조면암류를 분출하였다. 1 단계에는 산방산-서귀포를 잇는 선상주위에 작은 규모의 제주도를 형성하였다.
- 7) 2 단계에서는 일명 표선리 현무암과 같은 암상의 용암을 다량으로 분출하여 현재의 제주도의 규모에 가깝운 순상형의 화산도가 형성되었다. 2 단계의 화산활동은 현재 제주도 장축선상이었다.
- 8) 3 단계에서는 한라산체 주위에서 장석과 휘석 반정이 많은 용암류를 분출하여 한라산체를 형성하였고, 4 단계에서는 백록담의 조면암을 분출하면서 백록담이 만들어지고 장축선상 동, 서쪽에서는 장석 반정이 거의 없는 현무암류를 분출하여 현재의 해안선의 지형을 만들었다.
- 9) 제주도 지하수의 부존과 관계가 있는 거시적인 지질구조는 제주도의 형성사와 관계가 있다. 산방산-서귀포 사이 지역에 기저지하수위가 발달하지 않는 까닭은 이 지역의 하부 지질이 원시 제주도가 있던 곳으로 다른 지역의 하부지질과 다르기 때문이다.

10) 제주도의 지하수의 부존과 관계가 있는 미시적인 지질 조건으로는 용암류내에 발달하는 절리, 균열, 그리고 두 용암사이에 협재되는 화산쇄설물, 스코리아 및 고토양층이 있다. 그 밖에 용암 터널이나 튜브, 기생화산의 분포 및 용암이 흐른 방향 등이 있다.

참고 문헌 (다른 분야의 것은 생략하였음)

Won, C. K., (1976) Study of petrochemistry of volcanic rocks in Jeju island., J. Geol. Soc. Korea., 12, 207-226.

Lee, M. W., (1982a) Geology of Jeju volcanic island, Korea., Jour. Japan Assoc. Min. Petrol. and Econ. Geol., 77, 55-64.

Lee, M. W., (1982b) Petrology of Jeju volcanic island, Korea, Part I, Petrography and bulk chemical composition., Jour. Japan Assoc. Min. Petrol. and Econ. Geol., 77, 203-214.

原口九萬 (1931a) 濟州道の地質, 朝鮮總督府地質調査要報, 第10卷第1號.

原口九萬 (1931b) 濟州道火山岩의 岩漿分化에 對하여. 地球, vol. 13, p.245-259.

원종관(1976) 제주도의 화산암류에 대한 암석화학적 연구., 지질학회지, 12, 207-226.

원종관, 이문원, 이동영, 박계헌(1993) 성산도폭 설명서, 제주도청.

윤상규, 한대석, 이동영(1986) 제주도 남부지역의 제 4기 지질조사 연구, 동력자원 연구소, KR-86-2(B)-2.7.

이동영, 김주용(1993) 제주도 화산활동사, 제주도 화산지질에 대한 심포지움, 한라산-백두산 화산비교 연구회.