

제주도의 지질구조선과 함덕-표선 지구대

부성안¹⁾ · 정교철^{*2)} · 김혜빈¹⁾ · 김경수³⁾ · 우명하¹⁾ · 이병호⁴⁾

¹⁾농업기반공사 농어촌연구원

^{*2)}안동대학교 지구환경과학과

³⁾한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

⁴⁾농업기반공사

Geological Structural Lines and Hamdeok-Pyoseon Graben in Jeju Island

Seong-An Booh¹⁾ · Gyo-Cheol Jeong^{*2)} · Hye-Bin Kim¹⁾ · Kyeong-Su Kim³⁾

Myoung-Ha Woo¹⁾ · Byoung-Ho Lee⁴⁾

¹⁾Groundwater research lab., Rural Research Institute, KARICO

^{*2)}Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

³⁾Geological & Environmental Hazards Div., Korea Institute of Geoscience
and Mineral Resources

⁴⁾Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation

지구조 운동에 의한 지질구조선의 생성과정을 추정한 결과 화강암체 융기 후 2회, 미고결퇴적층 퇴적 후 2회 등 모두 4회의 침강작용으로 대규모 지질구조선이 생성되었으며 침강작용은 동북동-서남서 방향의 인장응력과 북북서-남남동 방향의 압축응력에 의해 일어났다. 함덕과 신흥지역의 응회암 및 미고결퇴적층이 인접한 동-서지역보다 70~140m 정도 더 깊이 분포하고 화강암도 50~500m 정도 더 깊이 분포하는 것은 함덕지역에서부터 신흥리를 포함한 표선지역까지 3회의 차별 침강작용에 의해 함덕-표선 지구대가 형성되었기 때문으로 해석된다.

주요어 : 제주도, 지질구조선, 함덕-표선 지구대

According to the inference results of formation process of the tectonic lineament, totally four events of subsidence including two events after upheaval of granite body and two events after sedimentation of unconsolidated sedimentary layer formed the macroscopic tectonic lineament. The subsidence was occurred by tensional stress oriented ENE-WSW direction and compressional stress oriented NNW-SSE direction. The deeper distribution of tuff and unconsolidated sedimentary layer as much as 70-140m and that of granite as much as 50-500m at Hamdeok and Shinheung than those of the eastern and the western area around Hamdeok and Shinheung is due to the Hamdeok-Pyoseon Graben by three events of differential subsidence from Hamdeok to Pyoseon including Shinheung.

Key words : Jeju Island, geologic structural lines, Hamdeok-Pyoseon Graben

* Corresponding author: jeong@andong.ac.kr

서 론

제주도에 나타나는 지질구조선에 대한 연구는 Haraguchi(1931)가 단순히 현재 나타나 있는 화산의 분포를 근거로 하여 7개의 지질구조선을 제안한 것이 시초이다. 이후 고기원(1991)은 1990년까지 이루어진 지하수 및 심부시추공 자료를 분석, 구좌와 표선을 연결하는 선 동쪽지역에는 서귀포층이 존재하고 있지 않음을 밝혔으며, 그 후 추가적인 조사를 실시하여 서귀포층의 경층 경계선을 북촌-표선선으로 수정하였다(고기원, 1997). 그는 또한 북촌-표선선이 하라구치의 김녕-토산리선에 해당한다 라고 하였으며 해저화산활동에 따른 퇴적상의 침멸에 의해 생겨난 상경계선으로 해석하였다.

Kwon et al.(1995)은 중력과 자력이상도 모두에서 나타나는 동부 지역의 남북방향의 이상현상을 지질도상에서는 확인되지 않는 단층 또는 파쇄대에 의한 것일 가능성이 있다고 하였다. 부성안(1999)은 지표에서 400m 이상 시추한 공 중에서 서귀포층 하위의 미고결 퇴적층, 화성쇄설암류 및 화강암체의 산출심도를 분석한 결과 함덕지역에서부터 표선지역을 연결하는 북북서-남남동방향으로 이들의 산출심도가 인접한 동서지역보다 많이 깊은 것을 발견하고 이 지역을 「함덕-표선 침하대(Hamdeok-Pyoseon Subsidence Zone)」로 명명한 바 있으며, 이후의 연구에서 본 침강지역의 형태가 침하대라기 보다는 단층 사이의 지괴가 떨어진 지구대가 더 적합한 것으로 추정하고 이 지역을 북쪽과 남쪽지역의 지명을 사용하여 「함덕-표선 지구대(Hamdeok-Pyoseon Graben)」라 하였다(Booh et al. 2001). 최근에 오진용 외(2000)는 제주도 지하층서의 특성을 분석한 결과, 북촌-표선선의 생성원인은 고제주도 동부해역이 다른 지역에 비해 침식작용이 활발하게 일어났으며 그 결과 기존의 서귀포층과 U층(미고결퇴적층)이 삭박되어 생성된 것으로서, 이 선은 해수면 변동에 따라 생긴 침식곡곡의 서쪽 경계부에 해당한다고 하였다.

이 연구는 '70년 이후부터 2003년까지 농업기반공사 개발한 373공의 공공관정 및 '70년에 조사한 시추조사공 중 퇴적암층과 기저에 감암석회석현무암이 나오는 5공의 시추 조사공, 표고나 개발심도가 400m 이상인 사설관정-온천시추 및 개발공 중에서 검층 가능한 지질주상도가 확보된 19공의 고심도공의 지하지질 분포상태를 분석하여 제주도에 나타나는 지질구조선과 함덕에서 표선지역으로 나타나는 지구대의 생성

원인을 규명해보고자 하였다.

연구지역의 지형 및 지질

연구지역은 제주도 본섬 일대로서, 제주도는 동경 126°08' 45" ~ 126°58' 25", 북위 33°06' 26" ~ 34°00' 00" 에 걸쳐 있으며, 목포에서 남쪽으로 약 140km 지점에 위치하는 국내 최대의 화산섬으로 화구가 잘 발달되어 있다. 면적은 1,828.3km²(기타 도서를 제외한 면적)로서 한라산을 정점으로 하는 북동동-남서서 방향의 장축의 길이가 약 75km, 단축인 남북방향이 약 33km의 타원형 모양을 하고 있으며 장축은 동쪽으로 약 75° 기울어져 있다. 전체지형은 해발고도에 따라 크게 EL200m 이하 지역을 해안지역, EL200~600m 지역을 중산간지역, EL600m 초과 지역을 산악지역으로 구분하는데, 평균 경사도는 8% 정도이고 그 중 경사 5% 미만의 평탄지역이 도 면적의 약 절반가량인 43.6%이다. 산계는 한라산(EL1,950m)을 정점으로 원추형의 순상화산(shield volcano)의 양상을 나타내며 동부와 서부는 거의 평탄한 대지를 형성하고 남부와 북부는 비교적 경사가 급한 편이며, 지형은 침식유희상 유년기에 해당된다.

제주도는 주라기 중기에 생성 융기한 화강암과 제3기 초에 분출된 화성쇄설암을 기반암으로 하여 초기 모양을 갖춘 후, 제3기말의 플라이오세 중기에서부터 제4기 플라이스토세 말까지 크게 6단계의 화산활동으로 형성이 완료된 화산도로서 제주도는 약 1.72억년 전에 기반이 생성되었고 이후 590만년 정도에 걸친 화산활동으로 형성되었다고 할 수 있다.

제주도의 지질은 대체로 기반암인 화강암과 화산분출암인 현무암류, 조면암류, 조면암질안산암류 그리고 화성쇄설물과 퇴적암, 사구 등으로 구성되어 있고 미고결퇴적층과 주로 응회암으로 구성된 화성쇄설암이 분포하고 있다(Table 1).

제주도 지하지질 분포 및 지질구조선

지하지질 분포

Fig.1~3은 지하지질을 파악하기 위하여 시추자료를 이용하여 장축 및 단축 방향으로 각각의 지질단면도를 작성한 것이다. 지질단면도는 397공의 공공관정, 시추공 및 고심도공의 지질주상도를 검층하여 GMS(groundwater modeling system, V5.0) 프로그램을 이

Table 1. Volcanic sequence and sedimentary stratigraphy in Jeju Island.

Stratigraphic			Age(Ma)	Stage	Volcanic stratigraphy	Sedimentation		
Era	Period	Epoch						
Ceno-zoic	Quater-nary	Holocene		0.01		1002, 1007 activities	Sand dunes	
		Pleisto-cene	U		0.025±0.008	6th	tuff cones/cinder cones Feldspar basalt Trachyandesites Basalts/Trachytes	
						5th	cinder cones	SYF
						Trachyte/FB		
		M	0.073~0.085		4th	tuff cones UFOB/Trachytes	SSF	
					L	0.15~0.31 0.41±0.01	3rd	tuff cones LFOB
		OAB						
	Terti-ary	Plio-cene	U	0.67±0.03	2nd	submarine eruption	USF	
			M		0.94±0.05 1.2±0.04 1.66			
			L					
		Miocene	1.70					
		Oligocene						
		Eocene						
		Paleocene						
		1st	Tuffs					
Meso-zoic	Cretaceous				Granite			
	Jurassic		5					
			24					
			36	58.14±1.4				
			55	66.4±1.7				
			66	172.4±5.2				
			140					
			210					

※ FB; Feldspar, UFOB; Under feldspar olivine basalt, LFOB; Lower feldspar olivine basalt, OAB; Olivine augite basalt, SYF; Sinyangri formation, SSF; Seongsan formation, SGF; Seoguiipo formation, USF; Unconsolidation sedimentary formation

용하여 작성하였다.

제주도의 지층은 크게 분류하면 하위로부터 화강암, 화성쇄설암류, 미고결퇴적층, 서귀포층 및 현무암류로 형성되어 있다. Fig.2~3 및 Fig.7~8을 보면 각 지층의 산출심도와 두께가 지역에 따라 다르게 나타난다. 제주도 장축방향인 Fig.2 및 Fig.7(E)를 보면 서측인 a지역은 평균적으로 화강암체가 EL(-)630m, 화성쇄설암류는 EL(-)350m, 미고결퇴적층은 EL(-)100m, 서귀포층은 EL(-)50~110m 정도에서부터 나타나고 있으며, 중앙부인 b지역은 각각 EL(-)490~(-)450m, EL(-)210~(-)180m, EL(-)30~0m, EL110~180m에서부터 나타나며, 동측인 c지역은 각각 EL(-)990m, EL(-)350m, EL(-)170m, EL(-)100m에서부터 나타나고, d지역은 화강암체가 EL(-)950m, 화성쇄설암류는 EL(-)230m, 미고결퇴적층은 EL(-)100m에서부터 각각 나타나나 서귀포층은 산

출되지 않는다.

Fig.3 및 Fig.8(C)를 보면 북측인 h지역은 평균적으로 화강암체가 EL(-)610m, 화성쇄설암류는 EL(-)330m, 미고결퇴적층은 EL(-)140m, 서귀포층은 EL(-)50~20m 정도에서부터 나타나고 있으며, 중앙부인 i지역은 각각 EL(-)490~(-)450m, EL(-)210~(-)180m, EL(-)30~0m, EL110~180m에서부터 나타나고, 남측인 j지역은 EL(-)730m, EL(-)310m, EL(-)20m, EL(-)20~150m에서부터 각각 나타나고 있다.

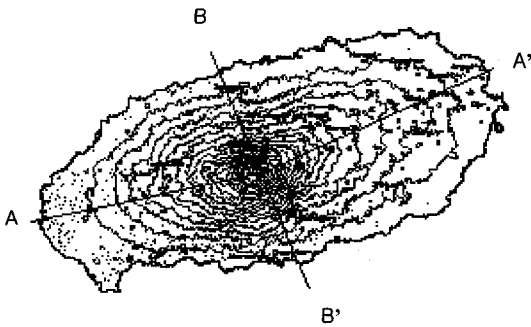


Fig. 1. Cross-section lines in Jeju Island.

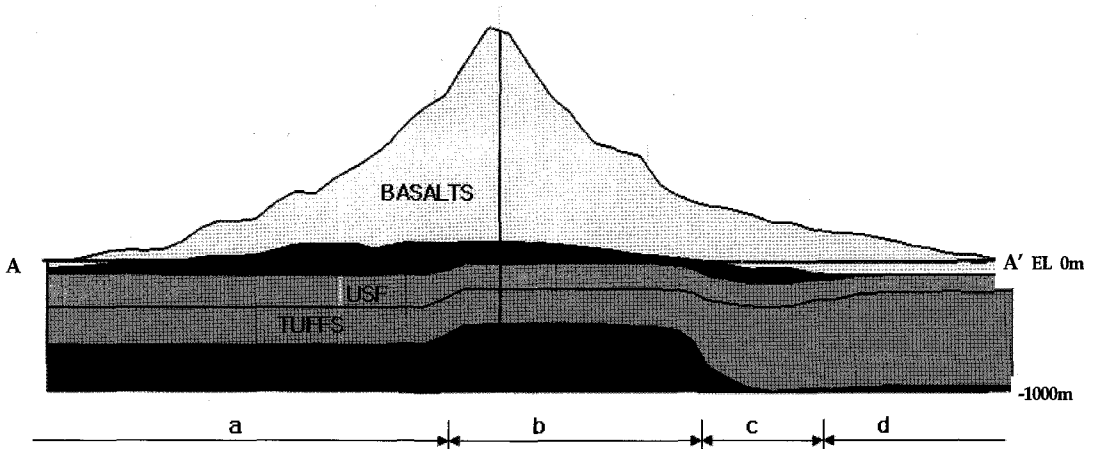


Fig. 2. Geological structure of east-west(A-A') cross-section in Jeju Island.

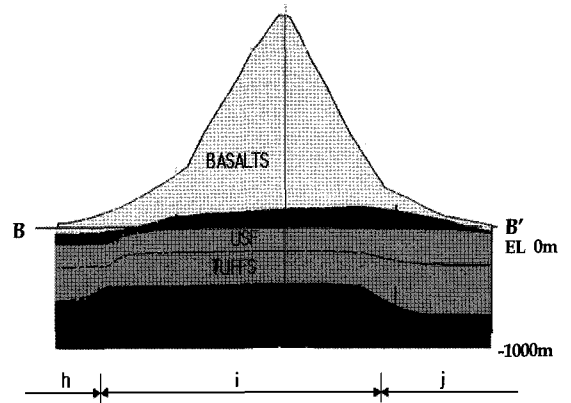


Fig. 3. Geological structure of north-south(B-B') cross-section in Jeju Island.

지하심부에서 추정되는 지질구조선

Fig.4는 GMS 프로그램을 이용하여 지하심부에서 산출되는 미고결퇴적층, 응회암 및 화강암의 분포 형태를 분석 추정한 지질구조선이다. 구조선의 방향은 미고결퇴적층에서 N66~67E 및 N20~34W, 화성쇄설층에서 N61~74E 및 N20~34W이고 화강암체에서 N80E 및 N20~34W로 추정된다. 이들 각 지층에 나타나는 구조선의 위치와 방향성은 특히 동부지역에서 매우 유사하게 대응하고 있다.

지표에 나타나는 지질구조선과 선구조

Fig.5는 제주도 지표에서 추출된 지질구조선과 선구조를 중첩 도시한 것이다. I~VII 구조선은 Haraguchi(1931)가 단순히 현재 나타나 있는 화산의 분포를 근거로 하여 제안한 7개의 지질구조선이며, 북

고 긴 점선은 RADARSAT SAR 영상자료를 이용하여 추출한 선구조 (Won et al., 1998)이고 청색의 짧은 점선은 TM 영상자료를 이용하여 추출한 선구조(건설부의, 1993)이며 검은 2점선은 농업기반공사 보유 SPOT 위성 영상자료를 이용하여 금번 연구에서 추출한 선구조이다.

3개 영상자료로 추출한 선구조를 대비해보면 방향성은 N28~52W 및 N5~50E가 우세하고 N80~88E 및 N82~N88W가 다음으로 나타난다. Haraguchi(1931)의 지질구조선과 선구조를 대응해보면 IV번과 V번 지질구조선을 제외하고는 서로 중첩되거나 인접하여 유사한 방향성을 갖고 나타나고 있다. 이것은 화산활동이나 지구조 운동이 연약대를 따라 발생한 결과로 볼 수 있다.

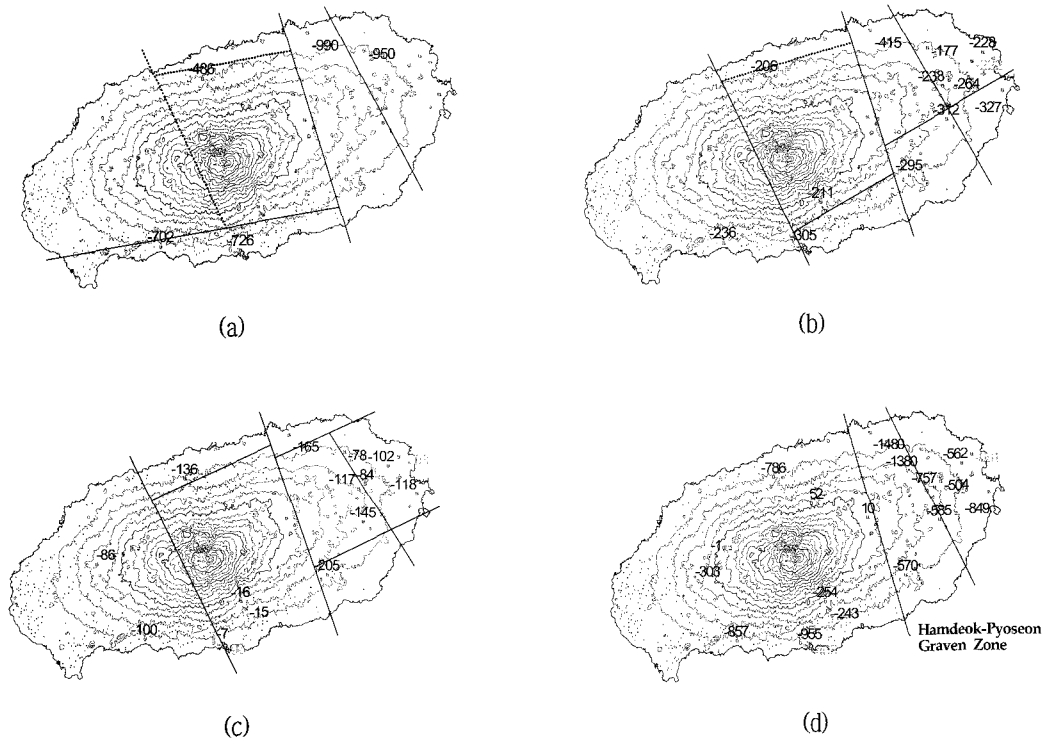
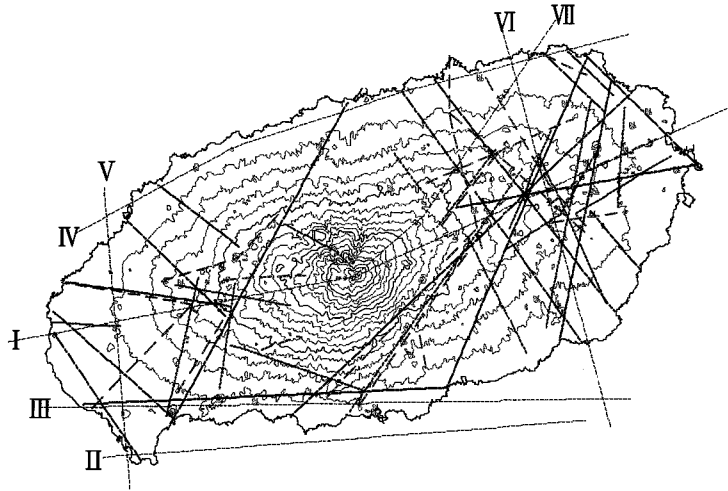


Fig. 4. Geological structure line inferred by borehole core samples; (A)Granite (B)Tufts (C)Unconsolidation Sedimentary Formation (D)Hamdeok-Pyoseon Graven Zone (dotted lines of B and C: inferred geological structure lines, numbers in A and C: depth of core samples in boreholes, numbers in D: depth of bottom of borehole, Unit: m)



(I ~VII ; Haraguchi's geological structure lines, — ; Lineament (RADARSAT SAR image),
 ; Lineament (TM image), - · - · - ; Lineament (SPOT image)

Fig. 5. Geological structure lines and lineament showing in surface.

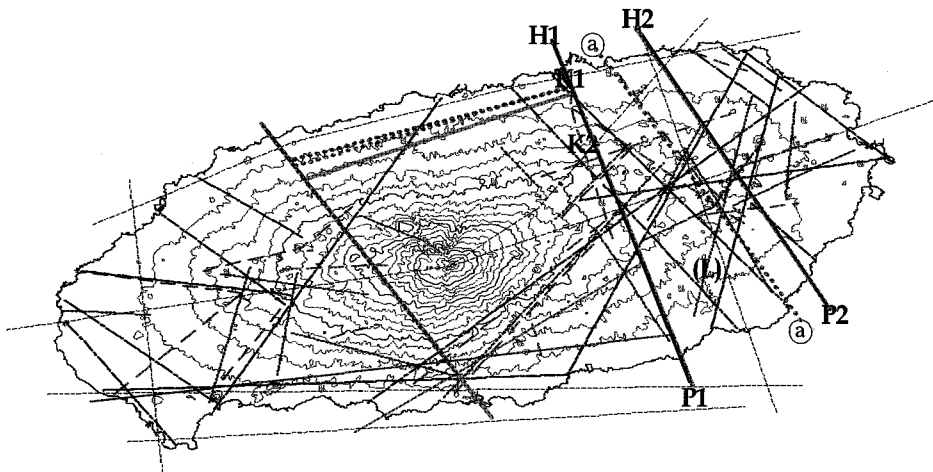


Fig. 6. Overlap map of geological structure lines and lineament.

지질구조선의 대비

Fig.6은 지하심부에서 추정되는 지질구조선 Fig.4와 지표에 나타나는 지질구조선 Fig.5를 중첩 비교한 것이다. 지하심부에서 추정되는 지질구조선은 규모가 큰 단층에 해당하며 지표에 나타나는 지질구조선은

소규모 지층 변위를 나타낸다고 할 수 있다.

이들 구조선은 함덕-표선 지구대를 중심으로 동부 지역에서 우세하게 나타나며 북부 및 남부지역에서도 심부 지질구조선을 따라 나타나고 있다. 그러나 서부 지역에서는 유사성을 보이지 않고 있는데 이것은 미 고결퇴적층 퇴적 후에 발생한 서부지역 침강 이후에

서부지역에서 지구조 운동이 활발히 일어난 결과라 할 수 있다.

제주도 형성과정과 지구조운동

제주도 형성과정을 규명하기 위하여 앞서 분석한 지층자료를 이용하여 화산활동 단계별로 분포형태를 추정하였으며 이 과정을 Fig.7~8에 도시하였다.

제주도가 형성된 과정을 살펴보면 화산활동과 구조운동의 영향을 크게 받았으며 여기에 침강과 용기가 반복되면서 퇴적과 침식을 수반하여 현재의 모양을 갖추었다고 할 수 있다. 가장 먼저 류라기 중기부터 제3기초까지 해저에서 화강암체가 올라와 서부지역의 일부가 없는 형태로 현재 제주도의 기본 형태를 갖추었다. 이는 시추조사에서 채취된 화강암편의 산출 심도가 가장 하부에 있고 산출 지역을 보면 서부지역과 동부지역 일부를 제외하고도 전역에서 산출되는 것으로 보아 알 수 있다(Fig.4(C)). 제주도 서부지역은 화강암체의 용기가 다른 지역보다 덜 되어 더 깊은 심도에 존재하고 있었을 것이며 이후 전도에 걸쳐 계속 용기하여 지표에 노출되었을 것이다. 화강암의 K-Ar 연대를 보면 별도봉 퇴적암내 포획암은 $172.4 \pm 5.2\text{Ma}$, 덕천시추공의 EL.(-)1200m 및 (-)970m에서 채취된 시추코어는 각각 $66.4 \pm 1.7\text{Ma}$ (이동영, 1996) 및 $58.14 \pm 1.4\text{Ma}$ (안건상 외, 1995)로서 류라기 중기부터 제3기초에 해당한다. 이후 제주도 동부지역에서 2차례의 차별침강이 있었는데 1차로 Fig.7의 c 및 d지역이 약 360m 정도가 침강한 후 2차로 d지역에서 약 100m 가 더 침강하여 계단식단층 형태를 이루었다. 이 때 남부의 Fig.8j지역도 약 140m 정도 침강하였다.

제1차 화산활동은 제3기 초 팔레오세에 분출 퇴적된 응회암류로서 이때 형성된 모양은 현재의 제주도 동부지역 거의 끝에서의 시추공에서 산출되는 것으로 보아 화강암체 보다 좀 더 동쪽까지 퇴적되어 전체적으로 현재와 거의 같은 모양을 갖추었다. 퇴적된 두께는 약 300m 정도이나 동쪽의 c, d지역은 660~760m 나 되면서 섬 전체가 수평의 상태로 퇴적되었다. 이후 동중국해 대륙붕에서 시작되어 플라이오세에는 황해까지 확장된(Yang, 1991) 1차 해침으로 인하여 섬 전체가 해수면 아래로 깊이 가라앉게 되었는데 플라이오세 초까지 오랜 시간 동안 상부가 침식되었다.

제2차 화산활동은 플라이오세 후기에 해저폭발이 일어나 미고결퇴적층이 기반암을 따라 섬 전역에 두께 약 500m 정도로 광범위하게 퇴적된 시기이다(Fig.7(B)). 이후 해퇴로 인하여 해안변을 따라 침식이

일어났는데 중앙부를 제외한 섬 주변부에서 좀 더 많이 일어났다. 침식이 일어난 후 한반도에 일어났던 지구조활동의 영향으로 세 번째 침강이 일어났으며 동부의 c지역과 서부의 a지역에서 동시에 약 140m가 침강하였다(Fig.7(C)). 세 번째 일어난 c지역의 침강으로 인하여 지구대가 형성되었는데 그 폭이 7~12km나 되었다. 본 지구대 형성 시기는 서귀포층 퇴적 이전으로 플라이오세 최후기인 1.70Ma 정도일 것이다. 이후 남과 북에서 네 번째의 침강이 일어났는데 북부의 h지역은 약 120m 정도, 남부의 Fig.8j지역은 약 100m 정도 침강하였다(Fig.8(B)). 특히 북부지역의 침강 형태는 남에서 북으로 약 10도 정도의 경사를 갖고 미끌어진 형태(Fig.8(C))를 보여주고 있다. 침강 후 약 100m 정도의 해퇴가 일어났고 서부의 a지역과 남부의 j지역은 약 70~80m 정도 미고결퇴적층이 추가 퇴적되면서 동부와 서부는 높이가 비슷하게 되었고 남부는 동·서부보다 약 60m 정도 높게 되었으며 북부 h지역은 계속적인 침식이 일어나 동·서부보다 약 40m 정도 낮게 되어 남쪽이 높고 북쪽이 낮은 형태(Fig.8(C))를 이루게 되었다. 그러나 동부 c지역은 침강된 지구대를 따라 미고결퇴적층도 함몰되어 있는 형태를 그대로 유지하고 있었다. 이후 2차 해침으로 섬 전체가 다시 바다 속으로 가라앉아 버렸다.

제3차 화산활동은 제주도 중앙부에서 남북방향으로 급격한 해저 화산폭발이 일어나면서 플라이스토세 중기까지 서귀포층이 퇴적된 시기이다. 이번의 폭발과 퇴적은 서귀포지역을 중심으로 하여 일어나 남에서 북으로, 또 서와 동으로 퇴적이 진행되었으며, 남부지역이 다른 지역보다 약 60~95m 나 높은 지역이었으므로, 서귀포층의 상부는 서귀포지역이 다른 지역보다 더 높게 되었다. 그러나 서귀포층의 퇴적은 c지역 지구대의 영향으로 동측의 구좌, 성산지역까지 미치지 못하여 동측의 일부지역에 본 층이 분포하지 않게 되었다. 서귀포층이 퇴적 중인 플라이스토세 초 및 중기에 감람석회석현무암(Olivine augite basalt, 이하 OAB)의 분출과 하위 침상장석감람석(Feldspar olivine basalt, 이하 FOB)의 분출이 각각 있었다. OAB는 제주도 서부지역과 동북부지역을 중심으로 분출되었는데 서부지역에서 더 광범위하게 일어났다. 본 암은 시추조사시 서귀포층 하부에서 발견되며 산방산 이남 용머리, 수월봉 및 사계층의 암편에서 포획암으로 발견된 OAB 암편의 절대연령(1.20 ± 0.05 , 1.20 ± 0.04 , $0.94 \pm 0.05\text{Ma}$) 등을 종합하여 볼 때 미고결퇴적층 퇴적 이후 서귀포층 퇴적 중에 분출된 것으로 볼 수 있다(5개 공의 시추 조사 시 OAB층을 관통한 것이 없어 층

두께의 확인은 불가능함). 이후 침강과 3차 해침이 일어나면서 해안쪽의 서귀포층이 차별침식을 받아 중심부보다 해안변이 낮은 형태가 되었다. 이로써 제주도 화산체에 가장 광범위하게 퇴적된 미고결퇴적층과 서귀포층의 퇴적작용이 완료되었다.

제4차 화산활동은 서귀포층의 퇴적 중과 이후에서

귀포지역을 제외한 제주도 전 지역에 FOB가 광범위하게 분출되어 용암대지를 형성한 시기이다. 이로써 제주도는 현재 모양과 거의 유사한 형태를 이루게 되었다. 특히 상부 침상장석감람석의 분출은 서귀포층 퇴적이 완료된 후 해퇴환경에서 분출되었다. FOB의 분출로 용암대지가 형성된 이후에 제주도 전 지역에서

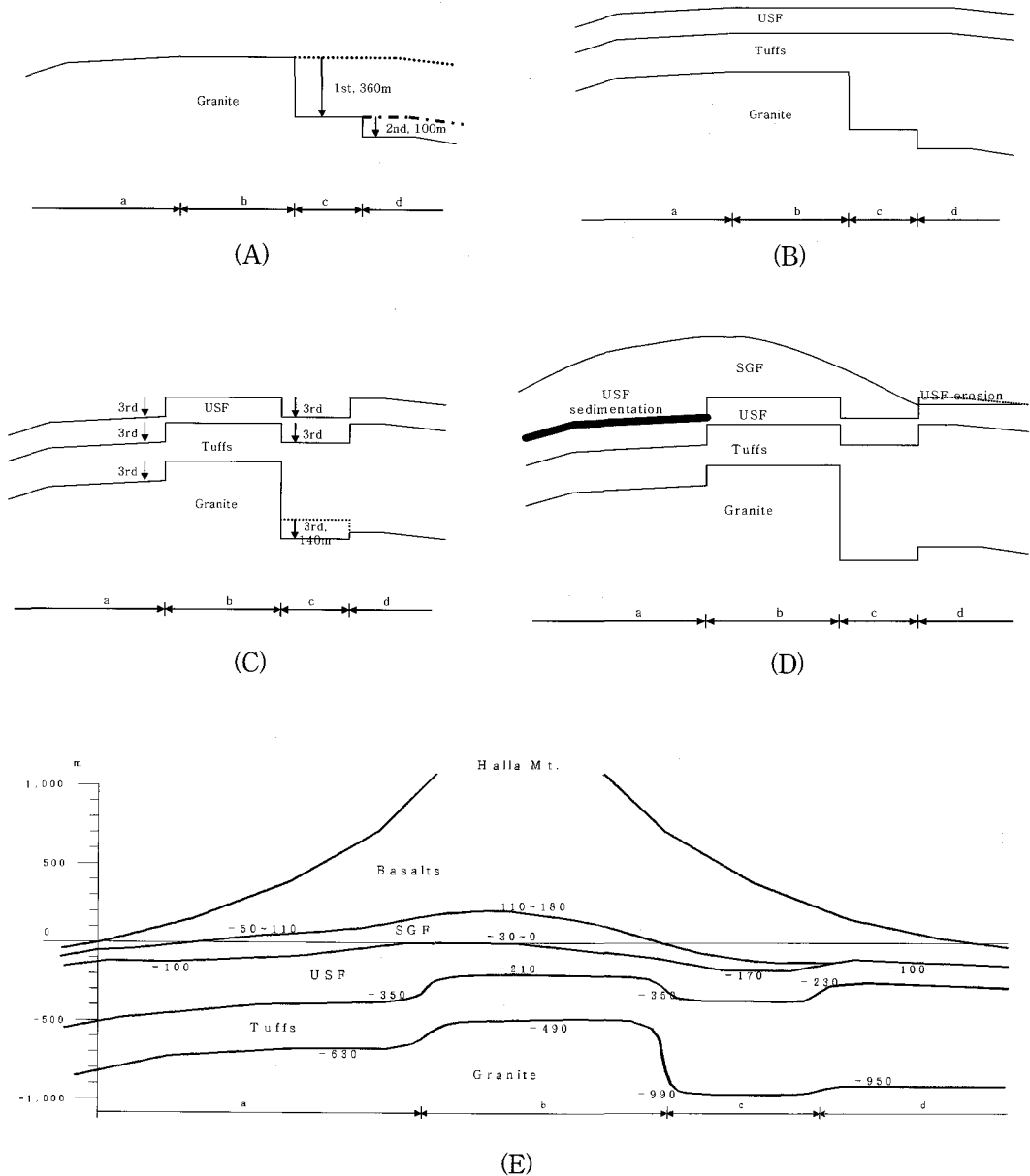


Fig. 7. Schematic diagram of tectonic movement and formation process(A-B-C-D-E) in east-west axis of Jeju Island.

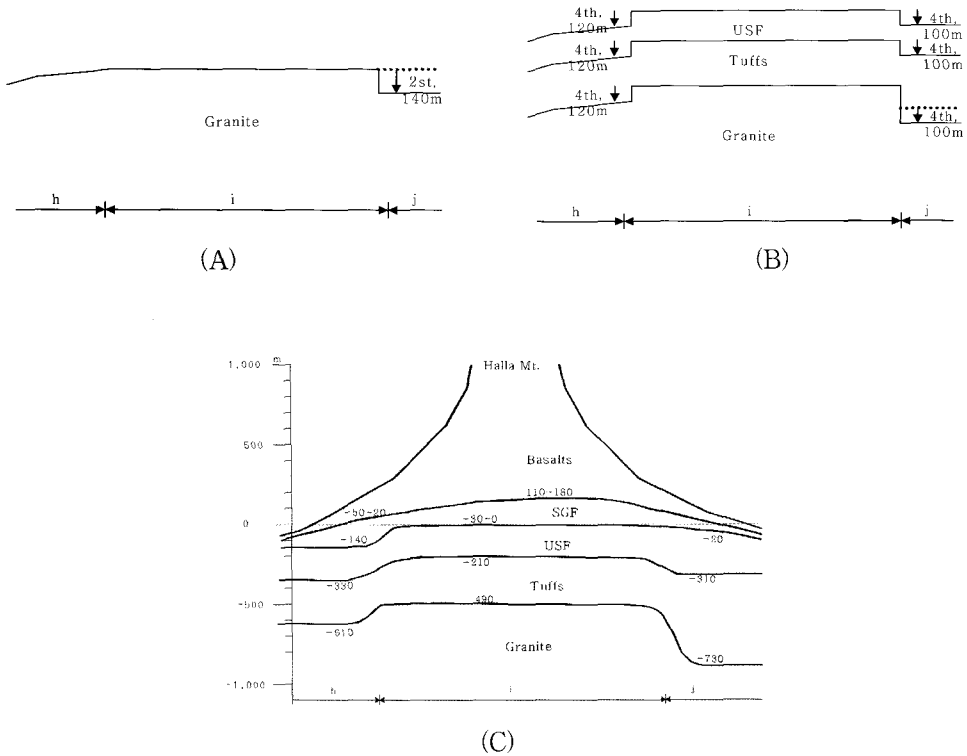


Fig. 8. Schematic diagram of tectonic movement and formation process(A-B-C) in south-north axis of Jeju Island.

국부적인 화산활동이 일어나 플라이스토세 중기 말에 성산층을 퇴적시켰는데 화산활동은 성산층 퇴적과 동시 또는 퇴적 후에 연이어 있었을 것이다. 성산층 퇴적 이후 조면암(trachyte) 및 장석현무암(feldspar basalt)이 분출한 제5차 화산활동으로 제주도 기저부의 현재 지형이 형성되었다. 이후 동부와 북부 해안이 네 번째 해침 되면서 플라이스토세 후기에 신양리층이 동부와 북부지역 일부에 국부적으로 퇴적된 것으로 추정된다. 신양리층 퇴적 후인 제6차 화산활동 시기에 현무암류(basalts) 및 조면암류의 분출로 도 중앙부를 제외한 골격이 형성되었고, 장석현무암의 분출로 제주도의 골격 형성이 완료되었다.

제5차와 제6차 화산활동에 의하여 한라산체 정상이 형성되었으며 이로 인하여 도 중심부는 해안변보다 융기된 형태를 보여주고 있으며 서귀포층 퇴적 이전에 이루어진 해안변의 침식작용과 복합되어 각 지층은 도 중심부가 해안변보다 높이가 분포한다. 제주도 전역에 분포하는 분석구와 응회구는 368개(제주도, 1997)의 오름이라고 부르는 기생화산으로서, 각 용암들이 분출될 때와 중앙화구에 의한 화산활동에 뒤이

은 후화산활동에 의해 도 전역에서 몇 회에 걸쳐 시기를 달리하여 형성되었을 것이며, 주로 화성쇄설물로 구성되어 있다. 이들은 서귀포층의 퇴적 후기에서부터 생성되었으나 후화산활동에 의해 가장 많이 형성되었다.

화산활동이 완료된 후인 홀로세에 사구(sand dune)가 발달되었으며 제주도에는 화산활동이 완전히 멈추지 않고 몇 차례 더 일어났는데, 1002년에는 비양도에서, 1007년에는 군산에서 화산폭발이 있었고, 1455년과 1570년에 화산폭발이 일어났으며 이후 사화산이 되었다.

함덕-표선 지구대의 생성과 동부지역에서의 서귀포층 결층

함덕-표선 지구대의 생성원인

Booh et al.,(2001)은 Fig.2의 c지역에서 나타나는 침강의 형태가 단층 사이의 지괴가 떨어진 지구대로 추정하고 함덕-표선 지구대(Hamdeok-Pyoseon Graben)라 하였다(Fig.4(D)). 지구대의 침강은 함덕지역에서부

터 표선지역까지 N20W 및 N34W의 북북서-남남동 방향으로 단층지괴가 떨어진 형태로서, 폭은 7km(합덕)~12km(표선)나 되며 이 구간의 서귀포층 하위층들이 주변보다 약 100~550m 정도 낮게 분포하는 형태를 이룬다.

Fig.7 및 Fig.8에서 지역별로 각 지층의 높이가 다른 이유는 지구조 작용에 의한 지괴의 차별 침강이 원인 일 것이다. 지구조 작용의 발생 시기는 화강암체 용기 후와 미고결퇴적층 퇴적 후에 각각 일어났는데 만약 각 지층의 형성 단계에서 지구조 운동이 일어났거나 서귀포층 퇴적 이후에 지구조 운동이 일어났다면 Fig.2 와 Fig.3과 같은 지층형태가 나타날 수 없게 되며 미고결퇴적층처럼 동부 해안변 대부분의 지역에서도 서귀포층이 산출되었을 것이다.

Lee et al.,(1983)은 제주도의 중력 및 지자기에 대한 연구를 통하여 안덕지역에 나타나는 북서방향의 높은 부계(Bouguer) 이상은 섬의 차별상승과 연관되었을 것으로, 한라산 부근에서 남북방향으로의 낮은 부계 이상은 지구(graben) 형의 침강과 자화가 더 높은 volcanic plug의 존재를 시사한다고 추정하였다. 그러나 이 연구에서 동부지역의 구좌에서 남원으로 이르는 낮은 부계 이상은 언급하지 않았는데 이상대를 표기해보면 Fig.6의 H2에서 시작하여 P2쪽으로 가다가 선구조(L)을 만나면 이를 따라서 표선지역으로 향하는 원호형태로 형성되어 있어 낮은 부계 이상지역이 합덕-표선 지구대 내에 위치하게 된다. 그러므로 이 지역에 나타나는 낮은 부계 이상 역시 침강의 증거임을 시사해준다고 볼 수 있다.

Kwon et al.,(1995)은 중력 및 자력 탐사자료를 이용하여 제주도 지질구조를 연구하였는데 중력과 자력이 상도 모두에서 나타나는 동부 지역의 남북 방향의 이상을 지질도 상에서는 확인되지 않는 단층 또는 파쇄대에 의한 것일 가능성이 있다 하였다. 이상대는 Fig.6의 (K1)과 (K2) 선구조를 잇는 선(붉은 긴 점선)과 거의 유사한데 이는 북촌-표선 지구대의 서쪽 경계부에 해당하는 H1-P1 선과 대응된다 할 수 있다.

제주도 신생대 화산암류들은 신생대 이래 이 지역에 널리 작용하고 있는 광역적인 지구조적 팽창환경과 관련되어 생성된 것으로 알려져 있으며(박준범 외, 1996), 제4기 초 이후의 광역적 혹은 국부적 지구조 운동에 의해 단층이 생성된 것으로 알려져 있다(황재하 외, 1994). 이 구조 운동은 한반도 남부지역에 광역적으로 발생한 것으로 동북동-서남서 방향의 신장응력이 주로 작용하였으며 그 지질시대는 하부 플라이스토세 이후라 하였는데 그 이유는 제주도의 형성이 제4기초의 화산활동

에 의한 것이므로 지구조현상이 모두 제4기초 이후의 것이라 하였으며, 또한 신장응력을 지시하는 단층들이 현무암질응회암뿐 아니라 그 상위의 조면암질 고기산록층(생성연대 0.87Ma)까지 변위시키고 있으므로 이들 단층과 관련된 신장응력기의 지질시대가 하부플라이스토세 이후라 하였다. 고정선 외(2003)는 제주도 장축방향이 지난 200만 년 전부터 지속되어온 현생 지구조에서의 최대주응력축에 평행하고, 단축방향(N17W)이 최소주응력축과 일치하고 있는 것은 200만 년 전부터 계속되어 왔던 화산활동이 현생 지구조 응력장과 관련되며 이때 생성된 열극(fissure)은 구조선에 해당하며 이 열극을 따라 마그마 분출이 일어나 분석구가 형성된 것으로 해석하고 있다.

그러나 제주도 화산활동은 약 590만 년 전인 팔레오세 후기부터 일어났으며 시추조사 자료를 이용하여 지층을 분석한 결과 단층을 생성시킨 지구조 활동은 화강암체 관입 후부터 일어난 것을 알 수 있다. 즉, 화강암체 관입 후 동북동-서남서 방향의 인장응력과 북북서-남남동 방향의 압축응력에 의한 차별침강과 변위가 두 차례 일어났으며 응회암층 및 미고결퇴적층이 퇴적된 이후에 또 다시 두 차례의 침강작용이 일어났다. 이후의 화산활동에 의해 심부지층들이 모두 덮여버렸으므로 지하심부에서의 지구조 활동 양상은 육안으로 보이지 않게 되었을 뿐이다. 다만 화산활동과 함께 제4기에 일어난 지구조 운동으로 인하여 상부지층에서도 단층이 생성된 것으로 볼 수 있다. 즉, 서귀포층 퇴적 전에 일어난 지구조 운동은 침강작용을 수반하여 합덕-표선 지구대를 생성시킬 정도의 대규모 운동이었으며 제4기에 일어난 단층작용은 소규모의 지구조 운동에 의해 생성된 것이라 할 수 있다.

동부지역에서의 서귀포층 결층

제주도 동부지역에서 서귀포층이 나타나지 않는 원인을 고기원(1997)은 해저화산활동에 따른 퇴적상의 침멸에 의해 나타나지 않는 것으로 보았으며 그 경계가 상경계선인 북촌-표선선(Fig.6, ①-①')이라 하였다. 또한 오진용 외(2000)는 고제주도 형성 이후 계속된 열점의 화산활동으로 서귀포층이 퇴적되었으나 용기경계부인 고제주도 동부는 침식이 활발히 일어나 미고결퇴적층과 서귀포층이 삭박되었는데 북촌-표선선이 침식계곡의 서쪽 경계부에 해당한다고 하였다. 이처럼 많은 연구자가 서귀포층 결층 원인을 침식에 의한 것으로 주장하고 있다.

본 연구에서 지층자료를 검증하여 분석한 결과 서

귀포층은, 2차 해침 이후 일어난 제3차 화산활동(급격한 해저 화산폭발)으로 인하여 퇴적되었는데, 남에서 북으로 또 서와 동으로 퇴적이 진행되었으나 본 층의 퇴적이 동측의 구좌, 성산지역까지 미치지 못하였기 때문에 Fig. 6의 H2-P2 선 동측에서 본 층이 분포하지 않게 된 것이다. 퇴적이 이 지역까지 미치지 못한 이유는 분화구에서 거리가 가장 멀고, Fig. 2의 c지역인 함덕-표선 지구대가 침강된 깊이가 동측인 d지역보다 100~150m 정도나 깊고 또한 지구대의 폭이 7~12km로 매우 넓었으므로 이곳을 넘어 동쪽으로 서귀포층 퇴적물이 이동하지 못한 것이 원인이라 할 수 있다.

결 론

제주도는 쥐라기 중기에 생성 용기한 화강암과 제3기 초에 분출된 화성쇄설암을 기반암으로 하여 초기 모양을 갖춘 후, 제3기말의 플라이오세 중기에서부터 제4기 플라이스토세 말까지 크게 6단계의 화산활동으로 형성이 완료된 화산도로서 제주도는 약 1.72억년 전에 기반이 생성되었고 이후 590만년 정도에 걸친 화산활동으로 형성되었다고 할 수 있다.

감람석휘석현무암의 분출 시기는 시추조사와 K/Ar 연대측정 결과를 종합하여 볼 때 1.20±0.05 ~ 0.94±0.05Ma 인 서귀포층의 퇴적 중인 플라이스토세 초 및 중기에 분출된 것으로 추정된다.

3개 영상자료로 추출한 선구조를 대비해보면 방향성은 N28~52W 및 N5~50E가 우세하며 이들 선구조는 함덕-표선 지구대를 중심으로 동부지역에서 우세하게 나타나고 있다.

지층의 층서 및 시추조사 결과를 종합하여 지구조 운동에 의한 지질구조선의 생성과정을 추정한 결과 화강암체 용기 후 2회 및 미고결퇴적층 퇴적 후 2회 등 모두 4회의 침강이 일어남으로써 대규모 지질구조선이 생성되었는데, 제주도 동부는 3회, 서부는 1회, 남부 및 북부는 각각 2회에 걸친 침강운동이 일어났다.

침강작용은 동북동-서남서 방향의 인장응력과 북북서-남남동 방향의 압축응력에 의해 일어났다. 함덕과 신흥지역의 응회암 및 미고결퇴적층이 인접한 동서지역보다 약 70~140m 정도 더 깊이 분포하고 화강암도 약 50~500m 정도 더 깊이 분포하는 것은 함덕지역에서부터 신흥리를 포함한 표선지역까지 3회의 차별 침강작용에 의해 지구대가 형성되었기 때문으로 해석된다.

「함덕-표선 지구대」는 깊이 약 190m, 폭 7~12km의 단층 지구대로서 서귀포층 퇴적 이전인 플라이오

세 최후기인 1.70Ma 정도에 생성되었다. 또한 함덕-표선 지구대 동측에서 서귀포층이 나타나지 않는 이유는 분화구에서의 거리가 먼 것과 함께 지구대의 깊이가 깊고 폭이 넓어 지구대를 넘어 동쪽으로 서귀포층 퇴적물이 이동하지 못하였기 때문이라 생각된다.

참고문헌

- 고기원, 1991, 제주도 서귀포층의 지하분포와 지하수와의 관계 (요약), 대한지질학회 제46차 학술발표회, p.552
- 고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 박사학위논문
- 고정선, 윤성효, 강순석, 2003, 제주도 한라산 분화구 일대 화산암류의 암석학적 연구, Jour. Petrol. Soc. Korea 12(1), pp.1-15.
- 박준범, 박계현, 정창식, 1996, 제주도 화산암류의 Sr-Nd-Pb 동위원소 연구, Jour. Petrol. Soc. Korea 5(1), pp.89-107
- 부성안, 1999, 제주도 지하수 부존특성 및 이용 가능량 산출에 대한 연구, 안동대학교 석사학위 논문
- 안건상, 이현구, 임현철, 1995, 제주도에서 산출되는 화강암에 관한 연구, 자원환경지질학회지 28(5), pp.513-518.
- 오진용, 이성숙, 윤선, 고기원, 윤혜수, 이종덕, 2000, 제주도 지하층서, 지질학회지 36(3), pp.181-194.
- 이동영, 1996, 제주도 지열자원탐사 및 최적 활용방안 연구 (III), pp.23-28.
- 황재하, 이병주, 송교영, 1994, 제주도의 제4기 지구조 운동, Econ. Environ. Geol. 27(2), pp.209-212.
- 제주도, 1997, 제주의 오름
- 건설부, 제주도, 한국수자원공사, 1993, 제주도수자원 종합개발계획수립보고서
- Booh, S.A., Chung, H.J., Jeong, G.C., 2001, The Study of Hamdeok-Pyoseon Graben in Jeju Island, The 3rd Joint Meeting of Japanese and Korean Structure and Tectonic Research Groups, pp.7-11.
- Halaguchi, 1931, 濟州道の 地質, 朝鮮地質調査要報 10(1), pp.1-34.
- Kwon, B.D., Lee, H.S., Jung, G.G., Chung, S.W., 1995, Investigation of Subsurface Structure of Cheju Island by Gravity and Magnetic Methods, Econ. Environ. Geol., 28(4), pp.395-404.
- Lee, K.H., Jeong, B.I., Choi, K.S., Lee, S.K., 1983, A Study of Gravity and Geomagnetism of Jeju Island,

- The Journal of the Geological Society of Korea, 19(1), pp.1-10.
- Won, J.S., Ryu, J.H., Chi, K.H., 1998, RADARSAT SAR Investigations of Lineament and Spring Water in Cheju Island, Journal of the Korean Society of Remote Sensing, 14(4), pp.325-342.
- Yang, 1991, Evolution of eastern shelf of China in Quaternary and its environmental consequences, Correlation of onshore and offshore Quaternary in China, Science Press, Beijing, pp.20-37.

투 고 일	2005년 11월 23일
심 사 일	2005년 11월 24일
심사완료일	2005년 12월 20일

부성안
 농업기반공사 농어촌연구원 수리시험연구실 지하수 연구팀
 426-170, 경기도 안산시 사동 1031-7
 Tel : 031-400-1850
 E-mail: booh2700@karico.co.kr

정교철
 안동대학교 지구환경과학과
 760-749 경북 안동시 송천동 388
 TEL: 054-820-5753
 FAX: 054-823-1627
 E-mail: jeong@andong.ac.kr

김해빈
 농업기반공사 농어촌연구원 수리시험연구실 지하수 연구팀
 426-170, 경기도 안산시 사동 1031-7
 Tel : 031-400-1855
 E-mail: rhyolite@karico.co.kr

김경수
 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
 305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
 Tel: 042-868-3054
 Fax: 042-861-9723
 E-mail: kks@kigam.re.kr

우명하
 농업기반공사 농어촌연구원 수리시험연구실 지하수 연구팀
 426-170, 경기도 안산시 사동 1031-7
 Tel : 031-400-1723
 E-mail: woomh@karico.co.kr

이병호
 농업기반공사 환경지질사업처
 437-703, 경기도 의왕시 포일동 487
 Tel : 031-420-3119
 E-mail: bhlee@karico.co.kr