

제주도 지하층서

오진용* · 이성숙** · 윤선*** · 고기원⁺ · 윤혜수⁺⁺ · 이종덕⁺⁺⁺

* 충남대학교 기초과학연구소 · ** 한국석유공사 기술실 · *** 부산대학교 지질학과
⁺제주도 수자원개발사업소 · ⁺⁺ 충남대학교 지질학과 · ⁺⁺⁺ 전북대학교 지구환경과학과

요 약

제주도 지하층서의 특성을 밝히기 위하여 각기 다른 분야에서 발표된 기존의 자료들을 종합, 분석하였다. 주요 연구 방법으로 제주도 전역의 심부(<~400 m) 시추공에 의해 파악된 암층서, 생층서, 자기층서 그리고 인접한 제주도 남부 해역에서 실시한 해상 탄성과 반사법 탐사로부터 얻어진 탄성과 층서를 서로 대비하였다. 시추 결과에 의하면 제주도의 기반암은 백악기~신생대 초기의 화강암과 시대미상의 화산쇄설암류와 화산쇄설성 퇴적암류이며 이들을 70~250 m 층후의 미교결 퇴적층인 U층이 덮고있다. U층의 상위에는 패류화석을 포함하는 약 100 m 두께의 고결 또는 준고결의 퇴적층이 분포하는데, 생층서와 자기층서 대비에서 제주도 지표에 분포하는 서귀포층과 동일 시대(1.95~0.78 Ma)로 밝혀졌다. 탄성과 음향퇴적상의 특징을 근거로 할 때 제주도 지하에 분포하는 서귀포층과 U층은 제주도 주변의 해저지층으로 연장된다. 이 결과를 바탕으로 지상 서귀포층과 지하 서귀포층 그리고 U층과 세화리층에 대한 지금까지 알려진 서로 상반된 해석들에 대하여 토의를 하였다. 그리고, 지하 서귀포층 결층의 경계가 되는 제주도 동부의 북촌과 표선을 연결하는 선("북촌-표선 선")의 원인으로 제주 화산섬의 형성 과정에서 일어난 해수준 변화에 따른 침식 작용의 가능성을 제시한다.

주요어: 제주도, 지하층서, 서귀포층, U층, 북촌-표선 선

Jinyong Oh, Songsuk Yi, Sun Yoon, Gi-Won Koh, Hyesu Yun, Jong-Deock Lee, 2000, Subsurface Stratigraphy of Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea. v. 36, no. 3, p. 181-194

ABSTRACT: Based on the previous multi-disciplinary data, we characterize the subsurface stratigraphy of Jeju Island. Key effort is the stratigraphic correlation among the lithostratigraphic, biostratigraphic, magnetostratigraphic results from the deep (<~400 m) drill holes all over Jeju Island and the seismic stratigraphic results from the shallow marine reflection profiles near Jeju Island. According to the drilling data, the basement consists of Cretaceous~Paleogene granite and age-unknown crystalline volcanoclastics and is overlain by the U Formation having uncemented sediment with the thickness of 70~250 m. The overlying average 100-m-thick semi-consolidated or consolidated strata are correlated with the Seoguipo Formation exposed along the southern coast of Jeju Island, which is proved by the calcareous macro- and microfossils studies. From the biostratigraphic and paleomagnetic analysis for the same samples, we determine that the age of the Seoguipo is 1.95~0.78 Ma. Strata of the U and Seoguipo Formations are interpreted to be linked to nearby offshore sediments with the corresponding seismic depositional facies. Consequently, the correlation results of this study can be applied to solve the controversial interpretations about the stratigraphic relationships between the exposed and subsurface Seoguipo Formation as well as between the U and Sehwari formations. We propose an erosional effect by the sea-level fluctuations during the creation of Jeju volcanic island as a possible cause of "the Bukchon-Pyoseon Line." To the east of this line, the Seoguipo does not exist in the subsurface.

Key words: Jeju Island, subsurface stratigraphy, Seoguipo Formation, U Formation, Bukchon-Pyoseon Line

(Research Institute of Basic Sciences, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea; Technical

Department, Korea National Oil Corporation, 1588-14 Kwangyang-dong, Dongan-gu Anyang, Kyungki-do 431-711, Korea; Department of Geology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea; Water Resources Development Office of Jeju Provincial Government, 312-1 Yeondong, Jeju, Jeju-do 690-170, Korea; Department of Geology, College of Natural Sciences, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea; Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Chonju, 561-756, Korea)

1. 서론

제주도의 화산층서는 原口(1930, 1931)에 의하여 처음으로 보고된 후, 1960년대 초 국립지질조사소(현 한국자원연구소)의 서해길 외(1964), 남기영(1966) 등에 의하여 해안지대를 따라 조사가 진행되어 오던 중 (주)한국지하자원조사소의 김옥준 외(1965)와 김옥준 외(1966)에 의하여 제주도 전역에 걸쳐 전반적인 지질조사가 이루어지게 되었다. 그 후 1970년대에 들어서서 (주)한국지하자원조사소의 조사결과를 바탕으로 하여 농업진흥공사(현 농업기반공사)가 광역지질조사를 재실시하여 1:100,000 축척의 지질도(농업진흥공사, 1971, 이하 '71농진지질도'라고 함)를 발간하여 제주도의 지질 특히 화산층서의 기본 자료로 현재까지 사용되어 오고있다. 이 기간 중에 원종관(1975)과 Lee (1982)에 의하여 광역적인 암석화학적 연구가 이루어졌으며, 그 외 국지적인 암석화학적 연구가 수행되었으나 화산층서의 기본 골격에서는 '71농진지질도의 것을 답습하고 있다. 1990년대에 들어서서 제주도의 1:50,000 축척의 지질도(성산도폭, 원종관 외, 1993; 표선도폭, 원종관 외, 1995; 제주·애월도폭, 박기화 외, 1998)가 발간되어 새로운 화산층서를 수립하고자 하였으나 아직 제주도 전역의 조사가 끝나지 않아 미완성으로 남아 있는 상태이다.

'71농진지질도의 기초가 된 김옥준 외(1965)의 지질도는 1) 표선리현무암 이후의 용암들은 모두 한라산 정상에 백록담분화구에서 분출하였으며, 2) 분석구들은 제주도 화산활동의 최후기에 모두 형성된 것이라는 가설을 전제로 하여 작성된 것이다. 그러나, 윤선(1970)은 이 가설은 실제 조사결과와 일치하지 않는다고 주장하였으며, 윤선 외(1995)는 1979년부터 1) 서귀포층의 지하에서의 분포상태, 2) 서귀포층, 성산층 및 신양리층의 층서관계, 3) 백록담분화구에 있어서 백록담현무암과 백록담조면암과의 선후관계, 4) 분석구의 분화시기와 분석구에서 분출된 용암의 분포상태 및 5) 관입암체의 존재여부를 조사하여 그 결과를 기초로 하여 제주도의 화산층서를 재수립하였고, Yoon (1997)은 이를 보완하여 발표하였다.

제주화산암체 하부에서는 패류화석을 포함하는 고결 또는 준고결의 퇴적층 및 미고결 퇴적층이 산출한다. 이 결과는 시추공 자료에 바탕을 둔 것이나 이들 지하층에 대한 서로 상반된 해석이 제기된 바 있다. 본 논문에서는 제주도에 실시된 심부(<~400 m) 시추공자료(고기원, 1997), 고생물학 연구결과(정규귀 외, 1997; Yi *et al.*, 1998), 제주도 인근해상에서 획득한 탄성과 반사법 탐사결과(이치원 외, 1997) 및 자기지전류(magnetotelluric [MT]) 탐사 결과를 기초자료로 하여 제주도 화산암체와 퇴적층의 지하분포를 파악하고자 한다. 그리고, 제주도 조촌읍 함덕리 북촌에서 표선면 표선리의 당포를 연결한 선인 "북촌-표선 선"(고기원, 1977)의 발달양상과 성인을 밝히고자 한다. 북촌-표선 선의 규명은 제주도의 생성 과정을 밝히는 중요한 정보를 제공하며, 제주도 동부 지역의 지하수 해침과 밀접한 관계가 있다.

2. 제주도의 기반암과 화산층서

윤선 외(1995)와 Yoon (1997)에 의하면 제주도의 형성단계는 4단계로 구분되며 그 화산층서는 다음과 같다.

2.1 기반암

제주화산체의 기반암은 지표에 노출된 것은 없고 단지 별도봉의 용암 중에 화강암괴(原口, 1930)가 잡혀 있는 것으로 미루어 기반암은 화강암일 것이라고 추측하여 왔다. 1990년대에 들어서면서 온천수개발을 위한 심부시추가 시행되어 기반암의 시추코어가 채취됨으로써 기반암의 내용이 알려지게 되었다. 제주도화산체의 기반암은 화산쇄설성 사암 및 이암, 용결응회암, 화산력응회암 및 화강암으로 구성되어 있다. 이들 용결응회암과 화산력응회암의 암질은 육안으로 보아 백악기의 유천층군 또는 포항지역에 분포하는 에오세 전기~중기의 왕산층의 암석들과 유사하다. 화강암의 K-Ar 연령은 58.14 ± 1.4 Ma (제3기 초, 안건상 외, 1995) 및 66.4 ± 1.7 Ma (백악기 말, 이상규 외, 1996)이다. 대체로 기반암이 놓여 있는 심도는 해수면하

약 250~300 m이다.

2.2 화산층서

2.2.1 제1단계 - 고제주화산체의 형성

현재까지 확인된 가장 오래된 용암과 관입암은 판포현무암, 돈내코조면현무암과 상호조면암이다. 이 암석 중에서 방사성 동위원소 연대가 측정된 것은 판포현무암이며(2.22 Ma), 현무암질 용암의 분출과 조면암의 관입 등으로 이루어진 고제주화산체가 형성되었다.

· **판포현무암:** 이 암석은 지표에는 분포하고 있지 않으며, '89판포 시추공(고기원, 1997)의 지하 144~152 m의 구간에서 산출되는데 서귀포층의 하위에 놓여 있는 암석이다.

· **돈내코조면암:** 이 용암류는 돈내코계곡의 제주청소년야영장 부근에 분포하고 있다.

· **상호조면암:** 상호조면암은 돈내코조면암을 관입하고 있는 관입암이다. 돈내코계곡의 제주청소년야영장 부근, 서귀포시 입석동, 어리목계곡의 남측계곡 상류 및 구십구계곡의 상류에 분포하고 있다. 치밀하며 비현정질이고 수 mm 내지 수 cm 두께로 판상으로 쪼개지는 특징을 갖고 있다. 상호조면암을 한라산조면현무암군에 속하는 용암들이 덮고 있는데, 이러한 사실들을 종합하여 보면 상호조면암은 한라산 중심부에 원정구로 분포하고 있을 것으로 추정된다. 상호조면암의 역들이 지하에 분포하는 서귀포층에 다량 함유되어 있으므로('89위미 시추공; 고기원, 1997) 서귀포층에 의하여 부정합으로 덮혀 있음을 지시한다.

2.2.2 제2단계 - 고제주화산체의 함몰·해침시기

이 시기에는 제주도의 화산활동은 휴식기에 들어섰으며, 고제주화산체는 함몰하여 퇴적분지로 바뀌었다. 이 퇴적분지에 퇴적된 지층은 하위의 U층과 상위의 서귀포층으로 구분된다.

· **U층:** U층은 지표에는 분포하고 있지 않으며, 온천개발을 위한 심부시추공인 제주온천 1호공에서 최초로 보고되었다(고기원, 1991). 제주도의 지하전역에 걸쳐 기반암과 서귀포층 사이에 또는 서귀포층이 결층되어 있는 동북부 지역에서는 표선리 현무암군과 기반암 사이에 분포하고 있는 양상이 19개의 심부시추공에서 확인되었다(고기원, 1997). 본 퇴적층은 다져져 있지만 입자들이 미교결되어 있어서 미교결층(윤선 외, 1995) 또는 Uncemented

Sediment Formation (Yoon, 1997)이라고 불렀었다. 그 후 고기원(1997)이 U층이라고 명명하였다("U"는 Uncemented 첫글자를 따온 것임). 본 층은 교결되어 있지 않아 시추시에는 물에 풀어져 죽과 같이 되어 코아로서 채취되지 않는다.

상호(돈내코) 심부시추공에서 채취된 본 층의 시료의 성분과 서귀포층의 성분을 비교하여 보면, 서귀포층에는 교결물질인 스펙타이트가 들어 있으나 본 층은 석영과 장석의 미립으로만 되어 있고 스펙타이트는 들어있지 않다. 또한 U층의 상부에 놓인 서귀포층에는 연체동물과 유공충과 같은 탄산염 각을 갖는 화석이 다량 들어있어 이 각으로부터 추출되어 나온 탄산칼슘이 교결물질의 역할을 하고 있으나, U층에서는 연체동물화석이나 유공충의 화석이 발견되지 않는다.

· **서귀포층:** 서귀포층은 서귀포시 천치연폭포 해안 절벽에 높이 약 30 m, 연장 1 km 정도의 규모로 분포하는데 이곳이 표식지이다. 중문조면현무암군(윤선 외, 1995)에 속하는 서귀포조면현무암(윤선 외, 1995; 서귀포용암, 原口, 1930; 서귀포하와이아이트, Lee, 1982)이 부정합으로 서귀포층을 피복하고 있다. 서귀포층은 역질 사암, 사암, 사질 이암 및 이암으로 구성되어 있다. 서귀포층에서 산출되는 화석은 연체동물화석을 비롯하여 석회질 초미화석, 유공충, 완족류, 성게, 개형충 등이 있다. 제주도 지하에는 평균 약 100 m 정도의 두께를 가지고 "북촌~표선 선"의 서측의 내륙 해발고도 400 m 이하에 해안을 따라 대상으로 분포하나 기존 연구에서는 지하와 지표 서귀포층의 동일성에 대한 논란이 있다.

서귀포층의 지질시대는 석회질 초미화석에 의하면 최하부 구간은 1.66 Ma보다 오래된 플라이오세 최후기에 해당하고, 상한은 0.46 Ma보다 오래된 플라이스토세 중기 초이다(Yi et al., 1998). 서귀포층은 해안~외대륙붕의 천해환경에서 퇴적되었으며(김봉균, 1972; Yoon, 1988; Lee, 1990; Yi et al., 1998), 서귀포층의 하부는 한류의 영향이 우세한 환경에서 퇴적되었으나 상부로 갈수록 한류의 영향이 없는 순수한 난류환경에서 형성되었다(Lee, 1990; 정규귀 외, 1997; Yi et al., 1998).

2.2.3 제3단계 - 서귀포층의 응기와 용암대지의 형성

서귀포층이 응기하여 육상으로 노출된 후에 알카리 현무암과 조면현무암의 용암류가 분출하여 용암대지를 이루었는데, 이들 용암류는 크게 3군

으로 분류할 수 있다.

· **중문조면현무암군**: 각수암조면암, 산방산조면암, 중문조면현무암, 서귀포조면현무암 등으로 분류되어 있는 용암들을 총괄하여 중문조면암군이라 하였다(윤선 외, 1995; Yoon, 1997).

· **표선리현무암군**: 표선리현무암과 시흥리조면현무암으로 구성된다(윤선 외, 1995; Yoon, 1997).

· **한라산조면현무암군**: 제주조면현무암, 성판악조면현무암, 한라산조면현무암 등으로 구성된다(윤선 외, 1995; Yoon, 1997).

2.2.4 제4단계 - 한라산정 백록담분화구의 형성

· **백록담조면암군**: 영실에서 한라산 정상에 이르는 지대에 x분포하고 있으며, 영실조면암과 백록담조면암으로 구분된다(윤선 외 1995; Yoon, 1997). 영실원형 계곡의 벽을 이루고 있는 영실조면암은 영실조면암이 원정구를 이루며 솟아 올라 온 것인데, 영실의 원형계곡은 영실조면암의 원정구 형성 후기의 폭발에 의하여 형성된 분화구이다. 백록담조면암은 한라산체를 형성한 화산활동의 최후의 용암분출이다. 백록담조면암의 K-Ar 연령은 0.07 ± 0.01 Ma 이다(玉生, 1990).

3. 연구자료

제주도 지하 층서를 규명하기 위하여 최상부 화산암체를 관통하는 심부 시추공에 대한 암석기재 자료와 시추암편에 대한 고생물 연구결과 및 제주도 인접 해역에서 획득된 해상 탄성과 반사법 탐사자료를 분석하였다. 그리고, 본 연구를 위해 제주과 영역의 MT탐사를 실시하였다.

· **시추자료**: 제주도 지하수 및 온천 개발을 위하여 실시한 시추공 중에서 함패각퇴적층까지 도달하는 심부 시추 자료를 활용하였다. 1989년부터 1996년까지 실시된 132개소의 시추공 중에서 폐류화석 함유층의 존재가 확인된 공은 모두 62개공이며, 일부 공의 지질 추상도는 고기원(1997)이 소개하였다. 그 중에서 그림 1에 선정된 11개소의 시추 위치를 표시하였고 해당 시추공의 지질추상도를 그림 2에 제시하였다. 한편, 이동호(1998)는 6개공의 시추코아에 대하여 고지자기 연구를 수행하였다.

· **고생물자료**: 일부 시추공의 함패각 화석층에 대한 미화석 연구가 수행되었다. 개형층(Paik and Lee, 1984; Lee, 1990), 석회질 초미화석(이상숙 외, 1995; Yi et al., 1998) 및 유공충(정규귀 외, 1997)

이 산출되었으며, 이에 대한 결과의 일부를 그림 3에 도시하였다.

· **해상 탄성파자료**: 제주도 인접 해역에서는 일찍부터 다채널(multi-channel) 해상 탄성과 탐사가 수행되었다. 한국자원연구소는 제주도 인근 해상에서 1979년부터 단일(single) 채널 반사법 탐사를 실시하여 북부해역(김중수 외, 1983; 조규장 외, 1985), 서부 해역(김철민 외, 1990; 김철민 외, 1991) 및 남부해역(이치원 외, 1997)에서 격자형 측선자료를 획득하였다. 그러나, 제주도 동부 해역에는 이에 상응하는 격자형 탄성과 측선은 없다. 제주도 남부 및 서부 해역에서 에어건(air-gun)을 이용한 반사법 탐사를 실시하여 비교적 양호한 해저 지층단면도가 작성되었다(이치원 외, 1997). 비록 작은 축척으로 발표되어서 자세한 해석은 어렵지만 전체 측선이 공개되어 제주도 지하층서의 지질학적인 특성 규명에는 중요한 자료가 된다(그림 1). 이 연구에서는 제주도에 인접하여 기존의 심부 시추공 자료에 대비시킬 수 있는 측선(예: L25, L26, L27)과 북촌-표선 선의 남쪽 연장선상에 위치한 측선(예: L9, L10, L12, L29)에 관심을 두었다.

· **MT탐사자료**: MT탐사는 심부 지각구조를 연구하기 위한 지구물리탐사 방법의 하나이다. 이번 연구에서는 미국 EMI사의 MT-24 장비를 이용한 광대역 주파수 영역의 MT탐사를 실시하여 지하 1 km 이내의 뚜렷한 저비저항대의 존재를 확인하였다. 이는 제주도에서 실시한 기존의 저주파 MT탐사의 결과와 일치한다(송윤호 외, 1993; 권병두 · 이희순, 1997).

4. 층서대비 - 암층서, 생층서 및 탄성파층서

측선의 북단이 서귀포층의 노두에 가장 인접한 L25 측선의 탄성과 단면도와 그에 대한 해석을 그림 4에 제시하였다. 다른 탄성과 측선의 단면도의 해석과 마찬가지로 연장성이 뚜렷한 2개의 반사면인 α 와 β 를 인식하였다. α 와 β 반사면을 경계로 A, B, C의 3개 퇴적단위로 나누었는데, 이 결과는 이치원 외(1997)와 대부분 일치한다. 전체 측선으로 보아 α 반사면은 해저면으로부터 대개 0.01~0.06 초의 하부에 위치한다. 이 반사면은 전진구축형, 산란음향형 또는 하천충진반사형을 보이는 상부층인 퇴적단위 A와 주로 수평평형반사형을 갖는 하부층인 퇴적단위 B를 구분 짓는다. 그러나, α 반사면의 많은 부분은 기포효과(bubble

effect)에 의한 비교적 강한 진폭의 잡음에 가려져 추적에 어려움이 있다. 반면에 하부 경계면인 β 반사면은 해저면으로부터 약 0.06~0.13 초 하부에 발달하며, 퇴적단위 B와 퇴적단위 C를 나누는데, 무반사형(reflection-free pattern)이 대부분인 하부 퇴적단위 C로 인하여 비교적 쉽게 추적할 수 있다(그림 4). 퇴적단위 C는 남쪽 해역에서 비교적 두껍게 발달하며, 그 내부에는 간혹 연속성을 갖는 강한 단속적인 반사면이 여러 축선의 일부 구간들에서 관찰된다. 퇴적단위 B도 대체로 남쪽으로 갈수록 두꺼워지며, 좋은 연속성의 강한 수평 반사면을 갖고 있다. L25 축선처럼 퇴적단위 B는 제주도로 갈수록 얇아지며 음향기반암에 절단되어 나타난다(그림 4).

음향기반암은 퇴적단위 C 아래에 놓이나 강한 진폭의 해저면 다중반사파(multiple) 등의 잡음들로 인하여 인식이 어렵다. 제주도에 인접한 해역에서

는 표층에 분포하는 제주도 화산암류를 탄성과 에너지가 침투하지 못하는 까닭에 음향기반암은 얇다(그림 1; 그림 4). 대체로 기반암의 심도는 남동쪽으로 갈수록 깊어지는 경향을 보인다. 한편, 남쪽 해역의 축선은 과거에 대륙붕 석유자원 탐사를 위해 획득한 다채널 탄성과 자료와 연결된다(박근필 외, 1986). 다채널 자료의 해석에 의하면 남해와 동중국해 대륙붕에는 상부의 천해 퇴적물과 하부의 제3기 육성퇴적층 및 결정질 기반암 사이의 경계짓는 광역부정합면이 발달하는데, L16 축선 부근에서는 약 0.55 초의 깊이에서 관찰된다(그림 1).

이번 연구에서 탄성과 퇴적단위 A, B, C와 제주도의 심부 시추공에서 밝혀진 암층서단위와의 대비를 시도하였다. 해저시추 실적이 없어 직접적인 대비는 못하지만, 다음과 같은 몇 가지 해석을 근거로 퇴적단위 B는 함패류화석의 고결층에, 그

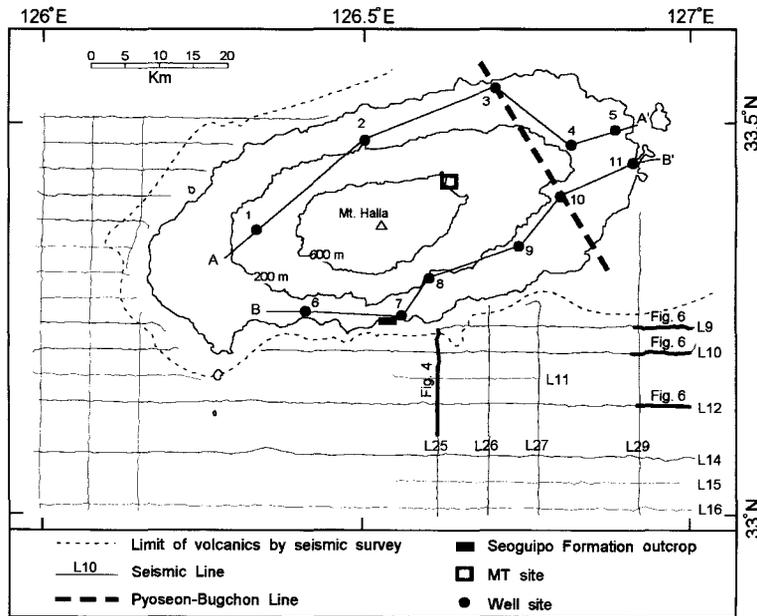


Fig. 1. Seismic lines (solid lines labelled with L1-L29; from Lee *et al.*, 1997) offshore western and southern Jeju Island with the location of 11 deep wells (closed circles labelled with 1-11; from Ko, 1997) and an MT site for this study (open square). Northern tip of L25 is close to the outcrop of the Seoguiipo Formation (closed rectangle). Dotted line around Jeju Island represents the extension of Jeju volcanics represented by Lee *et al.* (1997). The Bukchon-Pyoseon Line is proposed by Ko (1997). Lithostratigraphic profiles A and B along the wells are shown on Fig. 2. Well names: (1) Ishidol-1, (2) Youngdong, (3) Hamdeog-1, (4) Jeju-1, (5) Jongdal-1, (6) Jungmun-1, (7) Cheongjiyeon-1, (8) Hallanonggang-1, (9) Sinheung-1, (10) Seongeup-1, and (11) Seongsan-1.

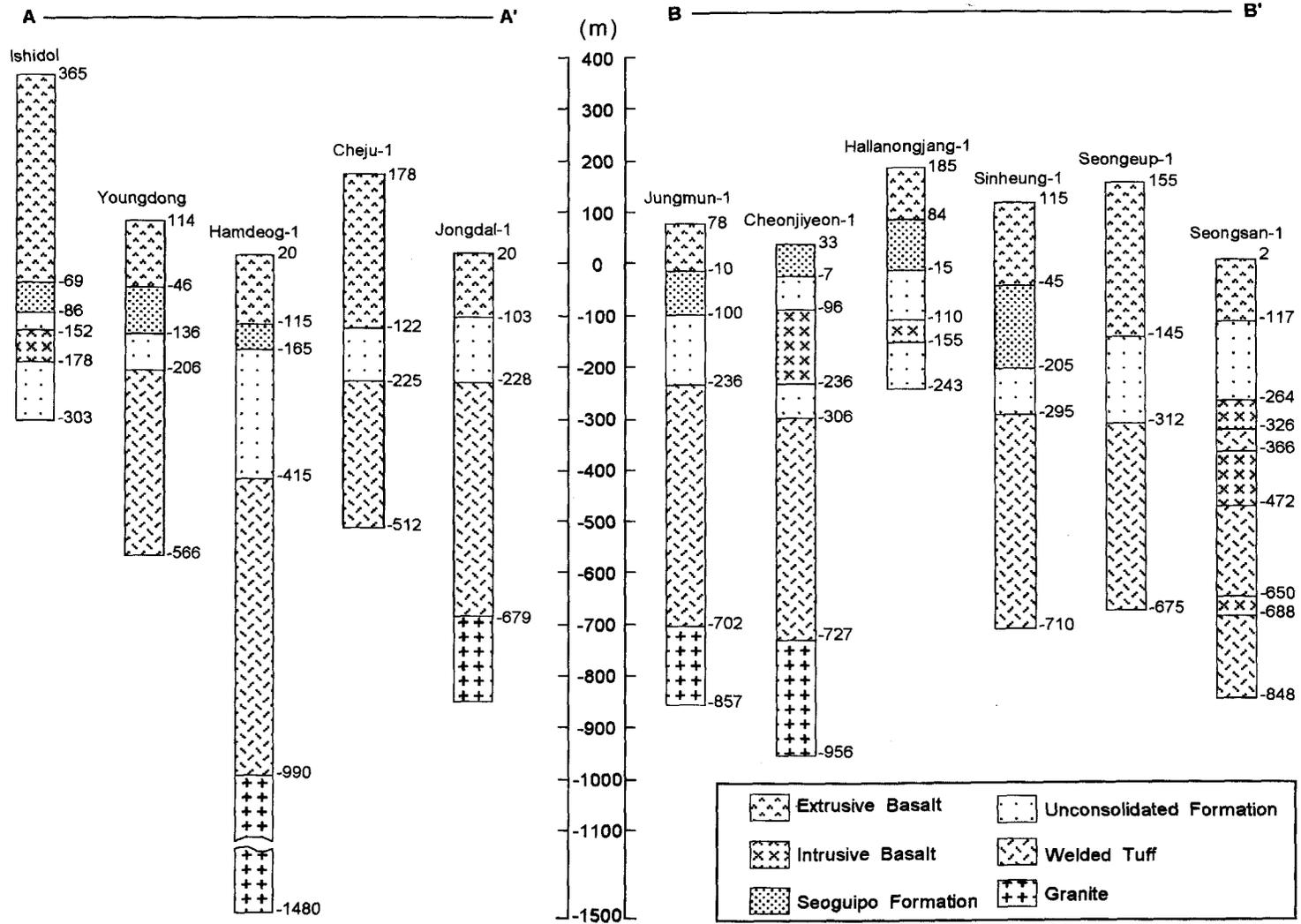


Fig. 2. Lithologic logs of the selected deep wells in Jeju Island (from Ko, 1997). See Fig. 1 for location. Note the absence of the shell-bearing marine sediment from wells in the east of the Bukchon-Pyoseon line.

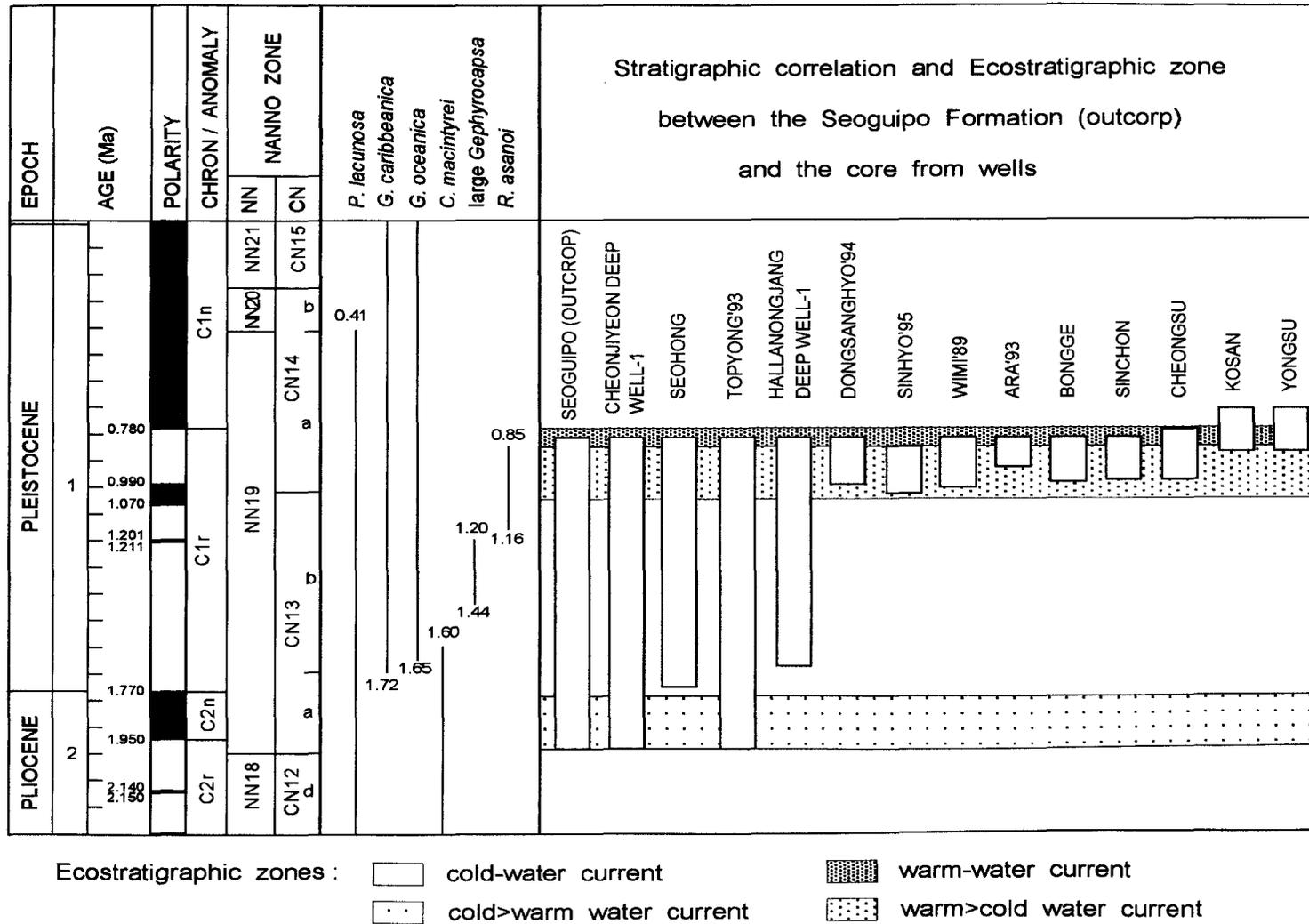


Fig. 3. Biostratigraphic correlation and ecostratigraphic zone between exposed and subsurface Seoguipo Formation by the study of the calcareous nannofossils (modified from Yi *et al.*, 1995; magnetic polarity from Cande and Kent, 1995).

리고 퇴적단위 C는 그 하부의 미교결층에 대비하였다. 퇴적단위 A는 제주도 육상 시추공에서는 나타나지 않는 주로 현생 해양퇴적물로 해석할 수 있다.

첫째, 고결되어있는 함패각퇴적층은 북촌-표선선의 서측 전역에 발달하며, 미화석 연구에 의하여 수평적인 연속성이 확인된다(그림 3; Lee, 1990; 이성숙 외, 1995; 정규귀 외, 1997). 이 층의 하위인 미교결층은 제주도 지하 전역의 심부 시추공에서 산출된다. 따라서, 이들 층이 제주도 지하에서 인접한 해저 지층으로 연장된다는 것은 제주 화산체 형성 이후 대규모 단층에 의한 상하구조운동이 없었다는 점에서 가능한 해석이다. 둘째, 제주도에 인접한 측선에서는 퇴적단위 B와 C의 상부 반사면은 제주도로 갈수록 심도가 점점 얕아지다가 음향기반암의 하부에 놓인다(예; 그림 4). 그러나, 퇴적단위 B와 C는 반사면의 연속성으로 판단하여 천부의 음향기반암에 의하여 만들어진 경계부에서 종료되었다기보다는 음향기반 하부로 연장된다고 해석한다. 제주도 남부 지역의 65개 시추공에서의 함패각퇴적층의 산출 깊이는 해안에서 한라산 쪽으로 갈수록 얕아져 해수면 위의 고도까지 도달하여 이를 뒷받침한다. 퇴적단위 B의 형태와 내부 반사면의 경사방향은 수평 퇴적 이후에 융기와 침식이 있었고 그 위를 제주 화산암체가 덮었음을 보여준다. 셋째, 퇴적단위 C의 대부분이 갖는 무반사형상은 균질한 입자로 구성되거나 층리면이 없는 층의 전형적인 반사특징이다. 그 반

면, 퇴적단위 B에 나타나는 수평반사면은 고결도가 다른 퇴적층의 경계를 의미한다. 따라서, 퇴적단위 C의 무반사형태는 미교결의 천부 해저퇴적층에서 흔히 관찰되는 것으로 보아 시추공의 미교결층의 탄성과 반응과 같다고 판단한다. 넷째, 탄성과 단면도의 해저 퇴적층의 두께와 심도는 시추공에 의한 암층서 결과와 잘 부합된다. 서귀포층 노두에서 300 m 북쪽에 위치한 천지연 시추공에서 함패각퇴적층의 두께는 40 m이며, 미교결층인 U층의 두께는 중간에 140 m 두께의 판입 현무암층을 포함하여 299 m이다. 가까운 L25 측선의 북단에서의 퇴적단위 B의 층후는 약 50 ms로써 이는 탄성과 속도를 1750 m/s (김철민 외, 1991)로 가정할 때 약 44 m에 해당한다(그림 4). 퇴적단위 C의 심도 역시 제주도에서 멀어질수록 깊어지다가 일정하게 유지되는데 그 두께는 하부 반사면이 다중 반사면에 가려져 알 수 없다. 그러나, 일부 다른 측선에서 관찰되는 퇴적단위 C의 층후 분포는 대체로 서쪽과 동쪽해역에서 얇지만 남부로 가면서 두꺼워지는데, 제주도 서쪽 해안에 인접한 L19측선에서는 약 200~250 ms의 두께를 보인다(그림 1).

5. 토 의

층서대비의 결과를 토대로 기존 연구에서 논란이 된 지표의 서귀포층과 시추공의 서귀포층의 대비문제, 세화리층과 U층의 차이점, 그리고 북촌-표선선의 성인에 대하여 살펴본다.

5.1. 지표 및 지하 서귀포층의 동시성

5.1.1 기존 연구의 문제점

제주도 시추 자료의 많은 부분은 1971년부터 실시한 농업진흥공사에 의하여 얻어졌으며, 시추 코아에서 패류화석을 포함하는 고결 퇴적층은 모두 서귀포층으로 기록하였다. 그러나, 그 당시는 생층서 대비가 이루어지지 않은 상태이므로 시추공에서의 서귀포층의 사용에 관하여 논란이 있었다.

윤상규 외(1987)는 지표의 서귀포층의 고도와 근처 시추공의 함패각 퇴적층 심도와 차이가 있음을 지적하고 이들을 서로 다른 층으로 분류하여 지표 서귀포층을 상부에 놓았다. 그리고, 고지자기 측정과 서귀포층을 덮고 있는 조면암의 연대(0.41 ± 0.01 Ma)를 바탕으로 지표 서귀포층의 연대를 0.73~0.41 Ma 즉, Brunnes 정자극기(0.73 Ma ~ 현생;

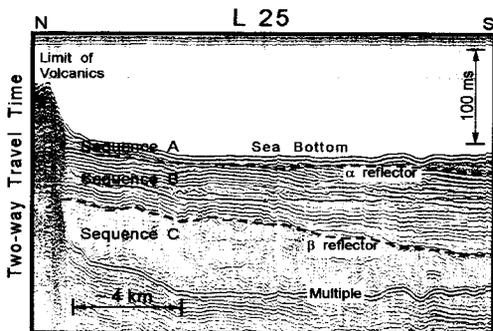


Fig. 4. Seismic profile of L25 near the outcrop of the Seoguipo Formation and its interpretation (modified from Lee et al., 1997). See Fig. 1 for location. Sequence B between α - and β -reflector consists of the continuous parallel reflectors and Sequence C is characterized by the reflection-free pattern. Acoustic basement is masked by the strong water-bottom multiples.

Jacobs, 1994)에 속한다고 추정하였다. 이 결과를 이동영 외(1988), 이상규 외(1994, 1995, 1996), 이문원 외(1994), 원종관 외(1993), 손인석 외(1998) 등이 인용하였다.

그러나, 부분적인 고지자기 층서에 근거한 연대 결정 방법은 그 시료 또는 정합관계의 인접한 시료의 정확한 연대측정 결과가 없으면 신뢰성이 떨어진다. 그 예로서 서귀포층 노두에 대한 고지자기 연구에서 민경덕 외(1986)는 Gauss 정자극기(3.40~2.48 Ma; Jacobs, 1994)에 속한다고 추정한 반면, 이동호(1998)는 생층서 대비를 통해 Matuyama 역자극기(2.48~0.73 Ma; Jacobs, 1994)로 결정하였다.

5.1.2 지표 서귀포층의 연대결정

지표 서귀포층의 연대 결정을 위해 초창기는 연체동물화석이나 유공충 등이 이용되었으나(김봉균, 1972; Yoon, 1988), 그 결과는 다소 차이가 있었다. 최근에 생존기간이 짧아 지질시대 결정에 신뢰를 높여주는 석회질 초미화석의 연구가 서귀포층 노두 전 구간에서 채취한 22지점의 시료에 대하여 Yi et al. (1998)에 의해 수행되었다. 그림 3에 제시된 결과처럼 서귀포층에서는 *G. caribbeanica* (첫출현 시기는 1.72 Ma; Sato and Kamo, 1996)와 *R. asanoi* (절멸시기는 0.85 Ma; Sato and Kameo, 1996)의 석회질 초미화석이 산출된다.

Yi et al. (1998)의 야외자료와 같은 층준의 시료에 대한 고지자기연구(이동호, 1998)에 의하면 서귀포층 최하부층에서 관찰되는 정자극은 Oldvai 부자극기(1.77~1.95 Ma; Cande and Kent, 1995)에 대비되고, 최상부층에서 측정된 역자극은 Brunhes 정자극기의 직하부(0.78~0.99 Ma; Cande and Kent, 1995)에 대비된다(그림 3). 따라서, 생층서과 자기층서의 대비를 종합하면 서귀포층 퇴적시기의 최대 범위는 1.95~0.78 Ma이며 이는 플라이오세 최후기에서 플라이스토세 초기의 시기에 해당한다.

5.1.3 지하 서귀포층의 연대결정

시추공의 패류화석을 포함하는 퇴적층에 대하여 서도 개형층(Lee, 1990)과 저서성 유공충(정규귀 외, 1997) 및 석회질 초미화석(이성숙 외, 1995)의 연구가 있었다. 그 결과 11개 시추공의 함패각퇴적층에 대한 상호 층서 대비는 물론 지표의 서귀포층과의 대비가 확인되었다(그림 3). 따라서, 지하 함패각퇴적층인 서귀포층과 지표의 서귀포층은 같은 시대의 연속된 지층임이 입증되었다.

5.1.4 지하 서귀포층의 분포

시추공의 서귀포층은 내륙 해발고도 400 m 이하에 해안을 따라 대상으로 분포하고 있으며 해발 250 m 이상의 지역에서는 해수면 위에 위치한다. 지구물리탐사 방법 중에서는 저주파를 이용한 MT 탐사에서 지하 서귀포층의 존재가 확인된다(송운호 외, 1993; 권병두·이희순, 1997). 본 연구를 위해 해발고도 600 m 지점에서 실시한 MT탐사에서도 낮은 비저항값의 층을 확인하였는데, 이 결과는 보다 낮은 해발고도에서 실시한 기존의 MT탐사에서 밝혀진 내용과 일치한다(그림 5).

한편, 북촌-표선 선의 동쪽에 위치한 심부(700~900 m) 시추공에서는 결층을 보인다. 따라서, 서귀포층은 북촌-표선 선의 서쪽의 제주도 전역에 분포하리라 판단되며, 탄성과 층서해석에 근거하면 인접한 해역까지 연장된다. 시추공에서 채취되는 서귀포층의 상부의 시료에 유리쇄설암(hyaloclastite)이 들어있음은 서귀포층의 퇴적시기 후기에 국지적으로 화산활동이 해저에서 일어났음을 시사한다.

5.2 U층과 세화리층의 차이점

5.2.1 지층명

시추공의 서귀포층의 하위에 존재하는 미교결층

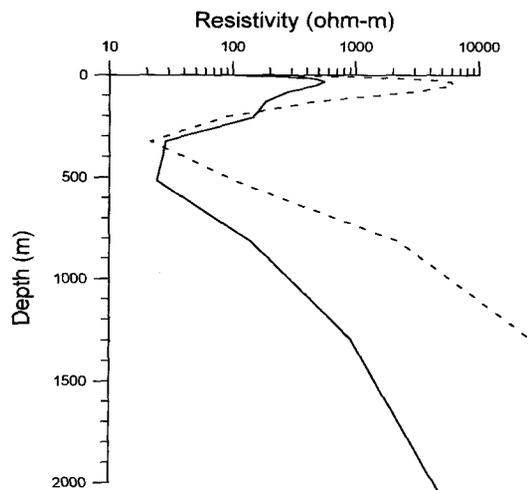


Fig. 5. A resistivity-depth profile of TM mode (dotted line) and TE mode (solid line) resulted from the 1-D inversion for an MT survey at the site with the altitude of ~600 m. See Fig. 1 for location. Field data of wide-range frequency were acquired using a 5-component classical MT system. Note that the prominent low resistivity layer exists, which is ubiquitous for the MT data of the Jeju Island.

은 모래와 실트로 구성되는데 고기원(1991)에 의하여 처음으로 보고되었다. 이 미교결층을 원종관 외(1993)는 성산도폭 설명서에서 세화리층이라 하였지만 제주도 시추공 결과를 종합한 고기원(1997)은 U층으로 명명하였다(그림 2). 개정된 국제 지층구분 지침서(Salvador, 1994)에 따르면 시추공에서 확인된 지하지층도 적절한 자료취득이 이루어진다면 시추공이 위치한 장소를 지층명으로 사용할 수 있다. 그러나, 이 미교결층이 발견되는 모든 시추공으로부터 아직까지도 명확한 고생물학적, 지구물리학적 분석자료를 제공받지 못하고 있을 뿐만 아니라 다음에서 지적한 바와 같이 세화리층은 본질적으로 서귀포층에 해당하므로 본 논문에서는 잠정적으로 고기원(1997)의 명명에 따른다.

5.2.2 세화리층

성산도폭(원종관 외, 1993)에서는 결정질 응회암과 현무암 사이에 존재하는 화산기원의 미교결층을 포함하는 약 100 m 이상 두께의 퇴적층을 세화리층이라 명명하였다. 그 예로 북제주군 초촌읍 신촌리 시추공에서 산출되는 실트질 점토층과 패류화석편을 포함하는 모래층을 제시하였다. 또한, 성읍 시추공의 -220 m 심도에서 채취된 시료에서 유공충화석을 식별하여 이를 플라이오세 후기~현생의 온난한 기후에서 서식했던 것으로 판별하였고, 아울러 세화리층의 지질시대를 이를 덮고있는 현무암의 K/Ar 연대값을 참고하여 플라이오세 후기~1.2 Ma로 추정하였다.

그러나, 원종관 외(1993)가 제시한 신촌 시추공은 서귀포층이 존재하는 북촌-표선 선의 서쪽에 위치하고 있으며 실제로 고기원(1997)은 신촌 시추공에서 함패류퇴적층이 있다고 보고하였고, 이성숙 외(1995)는 석회질 초미화석을 통해 신촌 시추공의 함패류퇴적층을 서귀포층에 대비하였다(그림 3). 한편, 성읍시추공에서 산출된 유공충화석으로는 직접적인 지질연대를 결정하기 어렵고, 오히려 보고된 유공충화석은 서귀포층의 것과 비슷하며, 추정된 온난한 퇴적환경은 서귀포층의 상부층에서도 나타난다. 그리고, 방사능 동위원소측정에 의한 1.2 Ma의 지질시대도 직접 접촉하고 있는 현무암층으로부터 나온 결과가 아니다. 따라서, 명확한 시대구분과 산출암상의 차이가 없는 상태에서 시추공의 함패류퇴적층을 세화리층으로 명명한 것은 재고되어야 한다.

5.2.3 U층

제주도의 19개 시추공에서 확인된 U층은 해수면 아래 15~205 m부터 분포하며 그 두께는 70~250 m에 이른다. 일반적으로 U층의 산출 깊이는 일정하지 않으며 기반암의 심도와도 무관하다. U층의 피복층은 북촌-표선 선의 동부에는 제주화산암체이나 서부는 서귀포층이다. 일부 시추공에서는 감람석과 휘석의 반정을 갖는 현무암질 용암이 관입하여 있는데(그림 2), 해상 탄성과 자료에서도 관입에 의한 구조가 해석된다(고기원, 1997; 이치원 외, 1997).

5.2.4 U층의 분포와 연대

U층은 시추공 자료와 고도 600 m 지점에서의 MT탐사자료의 결과(그림 5) 및 기존의 MT탐사자료의 해석(송운호 외, 1993; 권병두·이희순, 1997)을 종합하면 제주도 지하 전역에 분포하리라 판단한다. 아울러 해상탄성과 자료의 해석에 의하여 제주도 인근 해역으로 연장된다(그림 4). 그러나, 신뢰성있는 시료채취의 어려움 때문에 아직까지 U층에 대한 직접적인 연대측정의 결과는 없다. 한편, 제주도 남쪽의 국내 대륙붕 석유탐사를 위한 시추공에서도 미교결 퇴적층의 존재는 알려져 있다(PZ-1공, 광영훈 외, 1985; KV-1공, 광영훈 외, 1986; 정태진 외, 1997). 미교결층을 포함하는 대륙붕 상부퇴적층의 시대는 플라이오세로 추정된다.

5.3 북촌-표선 선의 성인

5.3.1 북촌-표선 선의 특징

북촌-표선 선의 동쪽 지역은 제주도의 다른 지역과 비교하여 독특한 지질학적 특성을 보인다. 지하수의 해침은 가장 잘 알려진 현상이며(고기원 외, 1992), 서귀포층으로 인정할 수 있는 퇴적층의 존재가 확인되지 않는다(윤선 외, 1992). 그리고 시추공에서 해수면 아래에서 산출하는 화산암류의 두께가 가장 두껍게 분포한다(고기원, 1997). 고기원(1997)은 지하수 부존 형태 연구 및 심부 시추공 자료 분석을 통하여 “북촌-표선 선”을 제안하였다.

이 선의 존재는 기존의 연구에서도 위치에 대한 다소의 차이는 있지만 일찍부터 인식되었다. 북촌-표선 선은 原口(1930)가 주장한 김녕-토산리 선과 Lee *et al.* (1983)이 밝혀낸 부계 중력이상대, 이상규 외(1994)가 제시한 광역 대자울 분포도의 경계선, 그리고 Kwon *et al.* (1995)이 밝혀낸 중력 및

자력이상 등에 대응된다.

5.3.2 기존의 설명

북촌-표선 선에 대한 원인으로써 지구물리탐사 자료의 해석에 의해 단층 존재의 가능성(Kwon *et al.*, 1995; 윤선 외, 1996)과 서귀포층 퇴적시기에 활발했던 해저화산활동에 따른 퇴적층의 침멸에 의해 생겨난 상경계선(고기원, 1997)이라는 해석이 제시되었다. 그러나, 북촌-표선 선의 원인 규명에 대한 체계적인 연구는 아직 이루어지지 않고 있다. 북촌-표선 선을 대상으로 직접적인 물리탐사는 윤선 외(1996)에 의한 자기지전류 탐사가 실시되었으나, 이 자료는 잡음으로 인하여 낮은 분해능을 갖는다(손호웅, 1998, 개인서신).

5.3.3 북촌-표선 선의 해저 연장부

북촌-표선 선을 남쪽으로 연장하면 해상 탄성파 측선 L29의 중앙부 그리고 L9, L10, L12의 서단부와 교차한다(그림 1). 이 부분과 관련된 탄성파 단면도에서 관찰되는 가장 뚜렷한 변화는 그림 6에 나타난 바와 같이 서귀포층에 대비되는 퇴적단위 B의 내부 반사형태의 변화이다. 3측선 모두에서 연속성을 갖는 수평평행층인 퇴적단위 B가 서쪽으로부터 연속되지만 교차부근에서는 경사층에 의한 뚜렷한 전진형 반사면(prograding reflector)이 나타난다. 다만 자료의 제한 때문에 이러한 변화가 동쪽으로 갈수록 어떤 형태 변화를 갖는지 불명확하다. 일반적으로 수평평행반사면은 주로 연속적인 퇴적의 결과이며 전진형 반사면의 대부분은 해수면의 변동에 의한 퇴적 속도의 변화에 따른 결과로 해석된다. 그러나, 그림 6의 전진형 반사면이 급한 경사를 이루는 원인은 단층운동 또는 침식에 의하여 기복이 심한 지형이 형성된 후에 퇴적물이 쌓이는 경우이다. 그림 6의 탄성파 영상은 퇴적단위 B와 C의 퇴적-침식-퇴적에 의한 결과임을 나타낸다.

5.3.4 새로운 제안

본 연구에서는 해상 탄성파 자료의 해석을 바탕으로 북촌-표선 선의 기원을 추정하였다. 기본적인 배경은 제주 화산체는 지판내의 열점(hot spot)과 관련한 화성활동의 산물(Lee, 1982; Lee, 1989)이라는 점이다. 먼저, 국내 대륙붕 석유탐사자료에서 확인된 결과는 마이오세까지 제주도 지역이 지상에 노출되어 침식이 계속되었음을 시사한다(정태진 외, 1997). 오키나와분지(Okinawa trough)의 형

성과 함께 시작된 동중국해 대륙붕에서의 해침(transgression)은 플라이오세에는 황해까지 확장되었고(Yang, 1991), 이때부터 제주도 일대에는 미교결 U층이 쌓이기 시작했다. 그러던 중 열점으로 인하여 지구조적인 융기(uplift)와 뒤이은 화산활동이 시작되었다. 그 결과 2.2 Ma의 판포현무암이 나타난 시기에 일부 화산암체는 지상으로 노출되어 고제주도(Yoon, 1997)를 형성한다. Frazier *et al.* (1976)은 탄성파 및 자력 탐사자료에 근거하여 제주도를 포함하여 중국연안까지 발달하는 동서

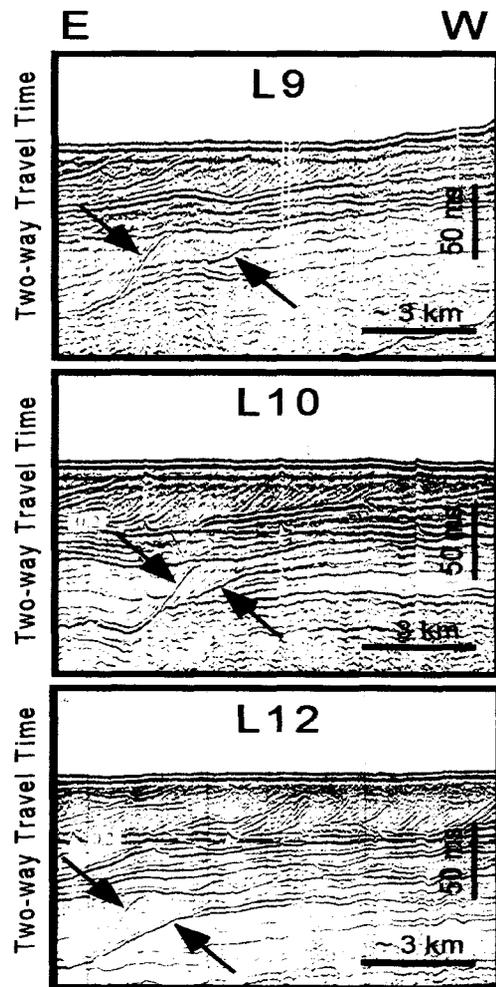


Fig. 6. Prograding reflectors shown along the eastern end of L9 (top), L10 (middle) and L12 (bottom) which are intersected with the southern extension of the Bukchon-Pyoseon Line. Seismic sections are from Lee *et al.* (1997). See Fig. 1 for location.

방향의 제주화산대(Jeju volcanic belt)를 설정하였다. 지속적인 열점의 활동으로 인하여 화산활동이 활발해졌으며 그 결과로 유리쇄설암 및 화산쇄설물을 포함하는 서귀포층이 퇴적되었다.

그런데, 용기의 경계부에 놓인 고제주도 동부해역은 다른 지역에 비해 침식작용이 활발하였고 그 결과 기존의 서귀포층과 U층이 삭박되었다. 삭박 원인으로 해수면변동에 따른 파도에 의한 해안침식, 해류에 의한 침식, 그리고 낮은 해수면 시기에 지상으로 노출되었을 때 하성 침식의 가능성이 있다. Yang (1991)은 황해 남부에서는 제 4기 동안 8번의 해침이 있었음을 지적하였는데 그 중에서 첫 번째 1.67 Ma 이전과 두 번째 0.97~0.73 Ma는 서귀포층의 형성시기인 1.95~0.78 Ma와 관련된다. 한편, 서귀포층은 하부로부터 한류우세의 한류와 난류 혼합-한류-난류우세의 한류와 난류의 혼합-난류의 퇴적환경을 보인다(그림 3; Yi *et al.*, 1998).

해수면이 높을 때는 대한해협에서 남쪽으로 이동하는 동해의 한류 및 북쪽으로 이동하는 따뜻한 구로시오(Kuroshio) 해류가 용기된 고제주도와 만나게 되어 기존의 퇴적물을 깎아 내리게 된다. 반대로 해수면이 낮아지면 고제주도 일대가 지상에 노출되어 대규모의 고황해강(Paleo-Yellow River)이 제주해협을 거쳐 남동쪽으로 흘러가면서 고제주도 동쪽을 침식한다. 이 해석은 제주화산대가 황해입구를 막는 댐의 역할 가능성을 고려한 것으로서 환경적으로 비슷한 마지막 빙하기의 해퇴기간에는 고황해강의 수로는 제주도의 서쪽해역이 아닌 동측해역이라는 것이 이를 뒷받침한다(장순근·정해경, 1987; 김철민 외, 1990; 김철민, 1991). 그리고 중간단계에서는 미고결의 퇴적층이 침식된 공간에 남아있다. 그러나, 0.7 Ma 무렵부터 해퇴환경에서 점성이 낮은 표선리현무암이 분출되기 시작하며(원종관 외, 1998), 그 산출범위가 확장되는 과정에서 고제주도 동쪽의 침식계곡을 메꾸게 된다. 그리고 지속적인 화산활동으로 현재의 제주화산체의 형태를 갖추게 된다.

따라서, 북촌-표선 선은 본질적으로 해수면 변동에 따라 생긴 침식계곡의 서쪽 경계부에 해당한다. 그러므로 북촌-표선 선의 동쪽에는 상대적으로 두꺼운 현무암층이 발달하나 서귀포층은 결층을 보이게 되었다. 그리고 북촌-표선 선 동쪽의 현무암층 아래의 미고결층은 북촌-표선 선 서쪽의 서귀포층 하부의 U층보다 나중에 쌓인 층이 된다.

6. 결론

본 연구는 제주도 지하 층서의 특성을 밝히기 위하여 기존의 발표 자료를 종합하였다. 주된 방법으로 제주도 전역에서 실시한 심부 시추 조사에 의한 암층서 및 생층서 그리고 인접한 남부 해역에서 실시한 해상 탐사로부터 얻어진 탄성과 층서 연구결과를 서로 대비하였다. 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 심부시추 결과 제주화산암체 하부에서 패류화석을 포함하는 고결 또는 준고결의 퇴적층인 서귀포층과 그 하부의 미고결 퇴적층인 U층이 산출하며 기반암으로 화산쇄설암류와 화산쇄설성 퇴적암류가 확인된다.

둘째, 지하의 서귀포층은 생층서 및 자기층서 대비에 따르면 지상의 서귀포층과 같은 시대(1.95~0.78 Ma)이며, 북촌-표선 선의 서쪽 지역의 지하에서는 수평적으로 연속된다.

셋째, U층은 제주도 지하에 광역적으로 분포하며 서귀포층과 같이 인근 해역으로 연장된다. 그러나, U층의 퇴적시기는 명확하게 밝혀지지 않았다.

넷째, 해상탄성과 단면도에서 해석된 퇴적단위 B와 C를 음향퇴적상의 특징, 범위 및 분포에 근거하여 제주도의 심부 시추공에서 밝혀진 서귀포층과 U층에 각각 대비하였다.

다섯째, 북촌-표선 선의 남쪽 연장선에 교차하는 해상 탄성과 단면도에서는 퇴적단위 B의 반사면 형태는 수평평행형에서 전진형으로 바뀐다. 이는 해수면 변화에 따른 침식의 영향을 나타내며 따라서 북촌-표선 선의 원인으로서는 가능성이 있다.

사 사

이 논문은 한국과학재단의 특정과제(과제번호 95-0703-03-01-3)와 한국학술진흥재단의 기초과학연구지원사업(과제번호 1999-015-DP0421)의 연구비에 의하여 일부 지원되었으며 이에 감사드립니다. MT탐사자료의 획득과 처리에 도움을 주신 한국자원연구소의 송윤호 박사과 조성준 석사에게 감사드립니다.

참고문헌

- 고기원, 1991, 제주도 서귀포층의 지하분포상태. 제주대학교 해양연구소 연구보고, 15, 81-91.
고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포

- 층의 수문지질학적 관련성. 부산대학교 이학박사 학위논문, 325 p.
- 고기원, 고흥구, 김성홍, 오상실, 박원배, 윤선, 1992, 제주도 동부지역의 지하지질구조와 지하수위 변동 및 수질특성에 관한 연구. 제주도보건환경연구원보, 3, 15-43.
- 곽영훈, 최현일, 손진담, 한종환, 1985, 대륙붕 제4 광구 석유지질 및 지화학적 연구. 한국자원연구소 연구보고, 85-13, 63 p.
- 곽영훈, 최현일, 손진담, 한종환, 1986, 대륙붕 제5 광구의 석유지질 및 지화학적 연구. 한국자원연구소 연구보고서, KR-86-16, 29-60.
- 권병두, 이희순, 1997, 화산섬의 지구물리학적 및 환경지질학적 특성 비교연구: 제주도와 하와이제도. 한국지구과학회지, 18, 217-237.
- 김봉균, 1972, 서귀포층의 층서 및 고생물학적 연구. 손치무교수 회갑논문집, 1-18.
- 김옥준, 손치무, 이상만, 이대성, 남기영, 윤선, 김영준, 홍충식, 1965, 제주도 지하수탐색지질조사보고서. 건설부, (주)한국지하자원조사소, 82 p.
- 김옥준, 윤선, 김영준, 1966, 제주도 한림지역 공장 분산을 위한 지하수탐색 지질조사보고. 건설부, (주)한국지하자원조사소, 49 p.
- 김중수, 김승우, 장정해, 이지원, 민건홍, 신원철, 조규장, 김원식, 1983, 연근해저 지질조사연구. 한국동력자원연구소 연구보고서, 82-해저자원-1-17, 7-48.
- 김철민, 박근필, 신원철, 이호영, 조철현, 1990, 소흑산도 남동부해역에 대한 해양물리탐사연구. 한국자원연구소 연구보고서, KR-89-3C, 57-119.
- 김철민, 박근필, 신원철, 이호영, 조철현, 김원식, 박관순, 문창배, 김정기, 김상우, 1991, 제주도 서부해역에 대한 해양물리탐사연구. 한국자원연구소 연구보고서, KR-90-5C, 97-176.
- 남기영, 1966, 제주도의 지질과 지하수. 국립지질조사소 지하수원조사보고, 3, 109-133, 2 도판.
- 농업진흥공사, 1971, 제주도 지하수보고서. 381 p. 5 도면.
- 민경덕, 원중선, 황석연, 1986, 제주도에 분포하는 화산암류 및 퇴적암류에 대한 고지자기 연구. 광산지질, 19, 152-163.
- 박근필, 이호영, 이원영, 신원철, 1986, 대륙붕 물리탐사자료 해석연구 제5광구. 한국자원연구소 연구보고서, KR-86-17, 46 p.
- 박기화, 이병주, 조동룡, 김정찬, 이승렬, 최현일, 황재하, 송교영, 최범영, 조병욱, 김유봉, 1998, 제주·애월도폭 지질보고서. 제주도, 한국자원연구소, 290 p., 2 지질도.
- 서해길, 조환익, 남기영, 1964, 제주도 남부 지하수원. 국립지질조사소 지하수원조사보고, 1, 77-111, 1 지질도.
- 손인석, 이문원, 윤정수, 1998, 제주화산도의 해수면하의 층서. 한국지구과학회지, 19, 581-589.
- 송윤호, 조인기, 김정호, 정승환, 전정수, 1993, 제주도에서의 MT탐사. 한국자원연구소 연구보고서, KR-92-1G-5, 31-69.
- 안건상, 이현구, 임현철, 1995, 제주도에 산출되는 화강암에 대한 연구. 자원환경지질, 28, 513-518.
- 원종관, 1975, 제주도의 형성과정과 화산활동에 관한 연구. 건국대학교 응용과학연구소 이학논집, 1, 7-41, 1 지질도.
- 원종관, 이문원, 윤성효, 고보균, 1998, 제주도 남동부 표선 지역 화산암류의 지구화학적 특징. 지질학회지, 34, 172-191.
- 원종관, 이문원, 이동영, 박계현, 1993, 성산도폭 지질도 설명서. 건설교통부, 제주도, 한국수자원공사, 104 p., 1 지질도.
- 원종관, 이문원, 이동영, 윤성효, 1995, 표선도폭 지질도 설명서. 건설교통부, 제주도, 한국수자원공사, 59 p., 1 지질도.
- 윤상규, 한 대석, 이동영, 1987, 제주도 남부지역의 제4기 지질조사 연구. 한국동력자원연구소 연구보고, 86-2-(B)-2, 64 p.
- 윤선, 고기원, 김인택, 1995, 제주도 형성사. 제주도지, 98, 148-164.
- 윤선, 고기원, 박원배, 김호원, 채종일, 1992, 제주도 동부지역의 지하지질구조. 대한지질학회 제47차 정기총회 및 학술발표회(초록), 39-40.
- 윤선, 백광호, 김인수, 손호웅, 1996, 제주도의 종합층서와 지하지질구조. 한국과학재단 특정연구 제1차 중간보고서, 173 p.
- 이동영, 윤상규, 김주용, 김윤중, 1988, 제주도 제4기 지질조사연구. 한국자원연구소 연구보고서, KR-87-29, 233-278.
- 이동호, 1998, 제주도 시주코아와 서귀포층 노두의 자기층서. 부산대학교 이학석사학위논문, 91 p.
- 이문원, 원종관, 이동영, 박계현, 김문섭, 1994, 제주도 남사면 화산암류의 화산층서 및 암석학적 연구. 지질학회지, 30, 521-541.
- 이상규 외 27인, 1994, 제주도 지열자원탐사 및 최적활용방안 연구(I). 상공자원부 931K101-113API, 235 p.
- 이상규 외 25인, 1995, 제주도 지열자원탐사 및 최적활용방안 연구(II). 상공자원부 941K101-113API, 377 p.
- 이상규 외 36인, 1996, 제주도 지열자원탐사 및 최적활용방안 연구(III). 상공자원부 951K101-113AG1, 473 p.
- 이성숙, 윤선, 윤혜수, 고기원, 1995, 제주도 신생대 지층에서 산출된 석회질 초미화석. 한국고생물학회 제11차 정기총회 및 학술발표회(초록), 14-16.
- 이지원, 김승우, 장정해, 김원식, 신원철, 민건홍, 박영수, 이호영, 진재화, 김성필, 김정기, 1997, 해저지질조사연구(제주남부해역). 한국자원연구소 연구보고서, KR-96(C)-30, 247 p.

- 장순근, 정혜경, 1987, 황해 중동부 홀로세의 고환경. 한국해양연구소 연구보고서, BSPE 00087-137-5, 79-82 p.
- 정규귀, 강소라, 윤선, 1997, 제주도 서남부지역 시추코아의 저서성 유공충 화석군집. 고생물학회지, 13, 69-85.
- 정태진, 광영훈, 오재호, 봉필윤, 손진담, 이호영, 류병재, 손병국, 황인걸, 권영인, 이영주, 김학주, 박관순, 박근필, 선우돈, 1997, 남해 대륙붕 분지의 석유자원 평가 연구. 한국자원연구소 연구보고서, KR-96(C)-27, 3-198.
- 조규장, 이원영, 박관순, 김원식, 박근필, 신원철, 한현철, 이호영, 최완실, 1985, 해양물리탐사연구(제주도-진도간해역). 한국자원연구소 연구보고, 85-18, 71-150.
- 玉生志郎, 1990. 韓國濟州島の火山岩のK-Ar年代とその層序的解釋 日本地質調査所月報, 41(10), 527-537.
- 原口九萬, 1930. 濟州火山島. 小川教授還曆記念論文集, 595-649, 1 地質圖. (日文).
- 原口九萬, 1931. 濟州島の地質. 朝鮮總督府 地質調査所, 朝鮮地質調査要報, 10(1), 1-34, 圖版 1-9 (日文); 1-12, 圖版 1 (英文).
- Cande, S.C. and Kent, D.V., 1995, Revised calibration of the geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research*, 100, 6093-6095.
- Frazier, S.B., Choi, S.O., Kim, B.K., Schwart, D., 1976, Marine petroleum exploration of Huksan Platform, Korea. *America Association Petroleum Geologists Memoir*, 25, 268-275.
- Jabos, J.A., 1994, Reversals of the Earth's magnetic field (2nd ed.). Cambridge University Press, Cambridge, 346 p.
- Ko, G.-W., 1997, Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguipo Formation in Cheju Island. Ph.D. thesis, Pusan National University, Pusan, Korea, 325 p., (in Korean with English abstract).
- Kwon, B.-D., Lee, H.-S., Jung, G.-G. and Chung, S.-W., 1995, Investigation of subsurface structure of Cheju Island by gravity and magnetic methods. *Economic & Environmental Geology*, 28, 395-404.
- Lee, C.W., Kim, S.W., Chang, C.H., Kim, W.S., Shin, W.C., Min, G.H., Park, Y.S., Lee, H.Y., Jin, J.H., Kim, S.P., and Kim, J.K., 1997, Marine geological and geophysical study of the continental shelf off southern part of Cheju Island, Korea. KIGAM research report, KR-96(C)-30, 247 p., (in Korean)
- Lee, J.S., 1989, Petrology and tectonic setting of the Cretaceous to Cenozoic volcanics of South Korea: Geodynamic implication on the East-Eurasian Margin. Ph.D. thesis, Universite D'ORLENS, France.
- Lee, K.-H., Jeong, B.I., Choi, K.S., Lee, S.K., 1983, A study of gravity and geomagnetism of Jeju Island, *Journal of Geological Society of Korea*, 19, 1-10.
- Lee, E.H., 1990, Pleistocene ostracoda from the marine sedimentary strata of the Cheju Island. Korea. Unpublished Ph. D. thesis, Korea University, Seoul, Korea, 400 p.
- Lee, M.W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju volcanic island, Korea. The Science Reports of the Tohoku University, Tohoku University, Sendai, Japan, series 3, 15, 177-256.
- Paik, K.H. and Lee, E.H., 1984, Plio-Pleistocene ostracoda assemblage from the Seogwipo Formation, Cheju Island, South Sea of Korea. In: Park, Y.A. et al. (eds.), *Marine geology and physical processes of the Yellow Sea. Proceedings of US-Korea Symposium and Workshop on Yellow Sea*, Korea, 223-234.
- Sato, T. and Kameo, K., 1996, Pliocene to Quaternary calcareous nanofossil biostratigraphy of the Arctic Ocean, with reference to late Pliocene glaciation. In: Thiedem, J., Myhre, A.M., Firth, J.V., Johson, G.L., and Ruddiman, W.F. (eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, College Station, TX (Ocean Drilling Program)*, 151, 39-59.
- Salvador, A. (ed.), 1994, *International Stratigraphic Guide (2nd ed.)*. The Geological Society of America, 157 p.
- Yang, Z., 1991, Evolution of eastern shelf of China in Quaternary and its environmental consequences. In: Liang, M. and Zhang, J. (eds.) *Correlation of onshore and offshore Quaternary in China*, Science Press, Beijing, 20-37.
- Yi, S., Yoon, S., Yun, H. and Ko, G.-W., 1995, Calcareous nanofossils from the Cenozoic strata of Cheju Island. The 11th Annual Meeting of the Paleontological Society of Korea (abstract), 14-16, (in Korean).
- Yi, S., Yun, H. and Yoon, S., 1998, Calcareous nanoplankton from the Seoguipo Formation of Cheju Island, Korea and its paleoceanographic implications. *Paleontological Research*, 2, 253-265.
- Yoon, S., 1988, The Seoguipo molluscan fauna of Jeju Island, Korea. Saito Ho-on Kai Special Publication (Prof. T. Kotaka Commem. Volume), 539-545.
- Yoon, S., 1997, Miocene-Pleistocene volcanism and tectonics in southern Korea and their relationship to the opening of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 281, 53-70.

투 고 일 : 2000년 4월 27일

심 사 일 : 2000년 4월 29일

심사완료일 : 2000년 8월 26일