

제주분지 제삼기 육성층의 층서 및 퇴적물 기원

Stratigraphy and Provenance of Non-marine Sediments in the Tertiary Cheju Basin

권영인 (Young-In Kwon)*, 박관순 (Kwan-Soon Park)*,
유강민 (Kang-Min Yu)**, 손진담 (Jin-Dam Son)*

요 약

제주도 남쪽지역에 발달한 신생대 대륙붕 주변분지(marginal-continental shelf basin)들은 타이완-신지 융기대 및 오키나와 곡분을 따라서 주로 북동-남서 방향으로 분포하고 있다. 이들 분지중 제주분지의 육성퇴적층에 대한 층서와 조구조적 환경(tectonic setting)을 밝히기 위해 10개 시추공을 연결하는 축선의 탄성파자료와 사암 및 응회암층 시료를 분석한 결과, 본 지역의 층서는 5개의 퇴적층과 기반암으로 설정되었다. 퇴적층 A는 플라이스토세 - 현세 퇴적물로 구성되어있으며 퇴적층 B는 플라이오세 퇴적물로 구성되어있고 하위 퇴적층 C와 경사부정합관계를 갖는다. 하부구간에서는 수로의 발달로 인해 연속성이 매우 불량한 부분이 분지의 북부쪽에서 주로 관찰된다. 분지 남부지역은 하위 퇴적층과는 뚜렷이 구분되었으나 북부지역은 이들 퇴적층이 평행하게 퇴적되어 층간의 경계구분이 어렵다. 초기 마이오세에 해당되는 퇴적층 C의 탄성과 반사면들은 분지의 최남단부에서는 상위층에 경사지계 수렴하나 중-북부에서는 준평행하게 발달된다. 이들 두 지역간의 차이는 분지 남서부를 따라 발달된 주향이동 단층의 영향에 의한 것이며 이들 단층의 활동은 퇴적층 B의 발달이전에 종료되었다. 초기-중기 마이오세의 퇴적층 D내에는 퇴적후의 습곡 및 단층작용이 많이 관찰된다. 본 층은 부분적인 침강에 의해 두께의 변화가 심하다. 올리고세의 퇴적층 E는 하부 기반암 위에 부정합으로 놓여있으며 퇴적초기의 지형에 의한 경사에 의해 기울어져 있고 퇴적이 종료된 후의 구조운동에 의해 습곡되었다. 퇴적층 D 내에 발달된 화산암층의 절대연령은 초기 - 중기 마이오세이며 퇴적층 E 내에 분포하는 응회암층은 회토류 원소 분석 결과 및 고생물 자료 해석에 의하면 Green Tuff Formation 보다 고기의 화산활동에 의한 응회암이다. 탄성과층서 및 퇴적물의 분석결과에 의하면 분지의 형성후 퇴적된 퇴적층 E는 육성퇴적물로 이루어져 있으며 대륙지괴의 근원지로부터 퇴적물이 공급되었음을 지시한다. 퇴적층 E가 형성된후 분지외부의 퇴적물 공급지가 구조적 요인에 의해 융기하였고, 그 결과로서 퇴적물의 유입, 분지의 침강 및 화산활동이 급격히 증가하였으며 이들로 구성된 퇴적층 D는 화산활동을 수반한 반복조산대로부터 유래되었다.

주요어 : 층서, 근원암, 화산암층 대비, 조구조적 환경

Abstract : Seismic reflection profiles and exploratory drilling well samples from the southern marginal-continental shelf basin of Korea delineate that the Tertiary sedimentary sequences can be grouped into five sequences (Sequence A, Sequence B, Sequence C, Sequence D and Sequence E, in descending order). Paleontologic data, K-Ar age datings, correlation with tuff layers and sequence stratigraphic analysis reveal that the sequences A, B, C, D and E can be considered as the deposits of Holocene~Pleistocene, Pliocene, Late Miocene, Early~Middle Miocene and Oligocene, respectively. The sequence stratigraphic and structural analyses suggest that the southern part of the Cheju Basin had experienced severe folding and faulting. NE-SW trending strike-slip movement is responsible for the deformation. The sinistral movement of strike-slip fault ceased before the deposition of Sequence B. Age dating and rare-earth elements analysis of volcanic rocks reveal that the Sequence D was deposited during the Early~Middle Miocene and the Sequence E was deposited earlier than the deposition of the Green Tuff Formation. Sedimentary petrological studies indicate that sediments of the Sequence E came from the continental block provenance. After the deposition of the Sequence E, uplift of the source area resulted in increase of sediment supply, subsidence and volcanic activities. The Sequence D show these factors and the sediments of the Sequence D are considered to be transported from the recycled orogenic belt.

Key Words : stratigraphy, provenance, correlation with volcanic layers, tectonic setting

* 한국자원연구소 석유해저자원연구부
**연세대학교 지질학과

서 언

제주도 남쪽지역에 발달하고 있는 신생대 퇴적분지들은 타이완-신지 융기대 및 오키나와 곡분을 따라서 주로 북동-남서 방향으로 분포하고 있으며, 대륙붕 주변분지 (marginal-continental shelf basin)로 분류된다(Xu and Le, 1988; Kirilova, 1993). 따라서 이들 분지 퇴적물의 특성규명과 층서대비는 대륙붕 주변분지의 분지형성 및 분지발달사를 이해하는데 중요하다.

국내 대륙붕 제5광구 및 한일공동개발광구에 걸쳐있는 제주분지는 타이완분지, 소코트라분지, 제주분지 및 후쿠에분지로 이루어진 동지나해분지에 속하며 북서방향의 한국대지와 남서방향의 타이완-신지 융기대에 의해 경계지워진다(그림 1). 본 분지내에 연구대상 시추공은 총 9개공이며 시추공이 서로 인접해 있고, 올리고세 이후 상부층이 서로 연결되어있는 소코트라분지의 1개공에 대해서도 연구대상으로 하였다.

제주분지에 대한 연구는 석유회사의 보고서와 한국자원연구소의 석유자원 평가연구 보고서가 있다. 각 시추공별 연구를 살펴보면 JDZ VII-1과 JDZ VII-2에 관하여 석유회사의 시추 보고서(HBKS, 1980; HBKS, 1982), 현병구 외(1980), 김승우와 장정해(1981), 김종수 외(1982), 조규장 외(1982), 박영수 외(1988) 등이 있다. JDZ V-1, JDZ V-2와 JDZ V-3공은 석유회사의 시추보고서(Spangler and Tamaki, 1980; Gilchrist, 1984; NOEC, 1986), 현병구 외(1980), 김승우와 장정해(1981), 박영수 외(1987), 이원영 외(1988) 등이 있다. 거북-1, 옥돔-1 및 드래곤-1 공은 석유회사의 보고서(Hadson, 1990; Ultramar, 1991)가 있으며 KV-1공은 텍사코사의 시추보고서(Texaco, 1973), 전희영 외(1986)와 김종수 외(1986)이 있다. 소코트라분지의 PZ-1 공에 대한 연구는 한국석유개발공사-자파타사의

보고서(1983), 광영훈 외(1985), 김종수 외(1985), 전희영 외(1985)와 봉필운 외(1993)가 있다. 그외에 한국남부대륙붕 및 전대륙붕에 대해 김종수 외(1984), 장정해 외(1991)와 한국석유개발공사의 광구 평가 보고서(1991) 등이 있다.

이들 연구중 사암의 광물성분을 정량적으로 기술한 것(X-레이 전암분석법에 의한 연구는 제외)은 김종수 외(1985), 김종수 외(1986), 한국석유개발공사-자파타의 보고서 및 봉필운 외(1993)가 있으나 시료수의 부족과 시료심도의 집중현상이 있었으며 암편의 정밀분석이 이루어지지 못하였다. 탄성과 층서 해석연구는 2~3개의 시추공이 포함되는 부분적인 연구들이며 각각의 연구들간에 층서가 일치하지 않고 있으며 분대기준도 다름을 알 수 있다. 또한 분지전체의 시추공을 연결하는 연구는 수행되지 못하였다(그림 2).

본 연구의 목적은 각각의 시추공의 암석학적 자료 및 고생물학적자료와 탄성과 단면을 이용한 층서대비에 의해 퇴적층을 정밀하게 분류하고 분류된 퇴적층의 암석학적 해석을 통하여 분지의 조구조적 환경과 발달과정을 밝히고 대륙붕 주변분지 사암의 특성을 밝히는데 있다.

지 질

제주분지가 속해있는 대륙주변부의 신생대이전의 기반암은 황해남부융기대를 경계로한 준탁상지 기반암(한중-양자준탁상지)과는 구분되며 JDZ V-1 공 기반암의 K-Ar법 절대연령측정결과 후기 백악기로 확인되었다(John, 1980). 기반암은 변성암 및 중생대 화성암으로 구성되어있으며 기반암내에 북동-남서 방향의 지구(graben) 내지 준지구(semi-graben) 구조가 발달되어있다. 퇴적분지내에는 대부분 사암 및 셰일, 화산성 쇄설물과 갈탄층이 협재되어있다. 분지 중심부의 퇴적층 D에서는 석회암층이 국부적으로 발달되어 있다. 분지내의 퇴적상은 육성환경으로 부터 상부로 가면서 해성환경으로 변화한다(전희영 외, 1985; 장정해 외, 1991). 퇴적 시퀀스(sequence)는 마이오세이전 부터 마이오세의 하성 혹은 호성환경 사암, 역암, 이암 등과 그 위에 놓인 플라이오세의 연안(coastal) 내지 대륙붕 환경 사암, 이암 및 플라이스토세의 대륙붕 환경 사암으로 구성되어 있다. 제주분지를 포함하는 동지나해의 구조적인 발달과정은 Zhou and Yin (1985)에 의해 3단계로 구분되었다. 제1단계는 후기 백악기 부터 올리고세 까지의 단층함몰단계이며 제2단계는 마이오세 부터 플라이오세 까지의 요곡침강단계이다. 올리고세 말의 구조운동으로 단층함몰작용은 요곡침강작용(downwarping)으로 전환되었다. 제3단계는 플라이스토세 부터 현세까지의 광역침강단계이다.

시료 및 연구방법

연구지역내의 5개 시추공에서 총 252개의 박편을 제작하여 입자조직, 교대작용, 입자성분, 화석 등을 관찰하였다. 이들 시료중 모든 퇴적층 구간이 관찰될 수 있는 JDZ VII-1 공의 심도 553 m에서 4407 m 구간의 신선한 사암박편 28개를 대상으로 편광현미경 관찰을 통해 점계수기를 사용하여 광물별 백분비를

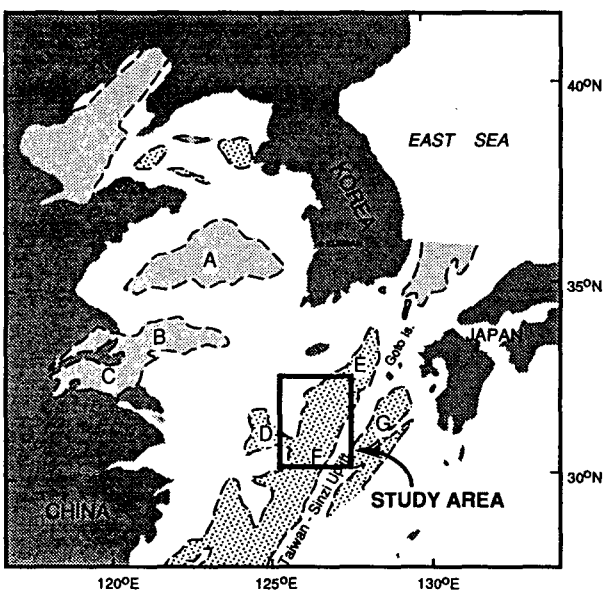


Fig. 1. Location map for sedimentary basins of the Korean Seas. A, Mid-Yellow Sea Basin; B, South Yellow Sea Basin; C, Subei Basin; D, Socotra Basin; E, Domi Basin; F, Cheju Basin; G, Okinawa Trough (for well locations, see Fig. 6).

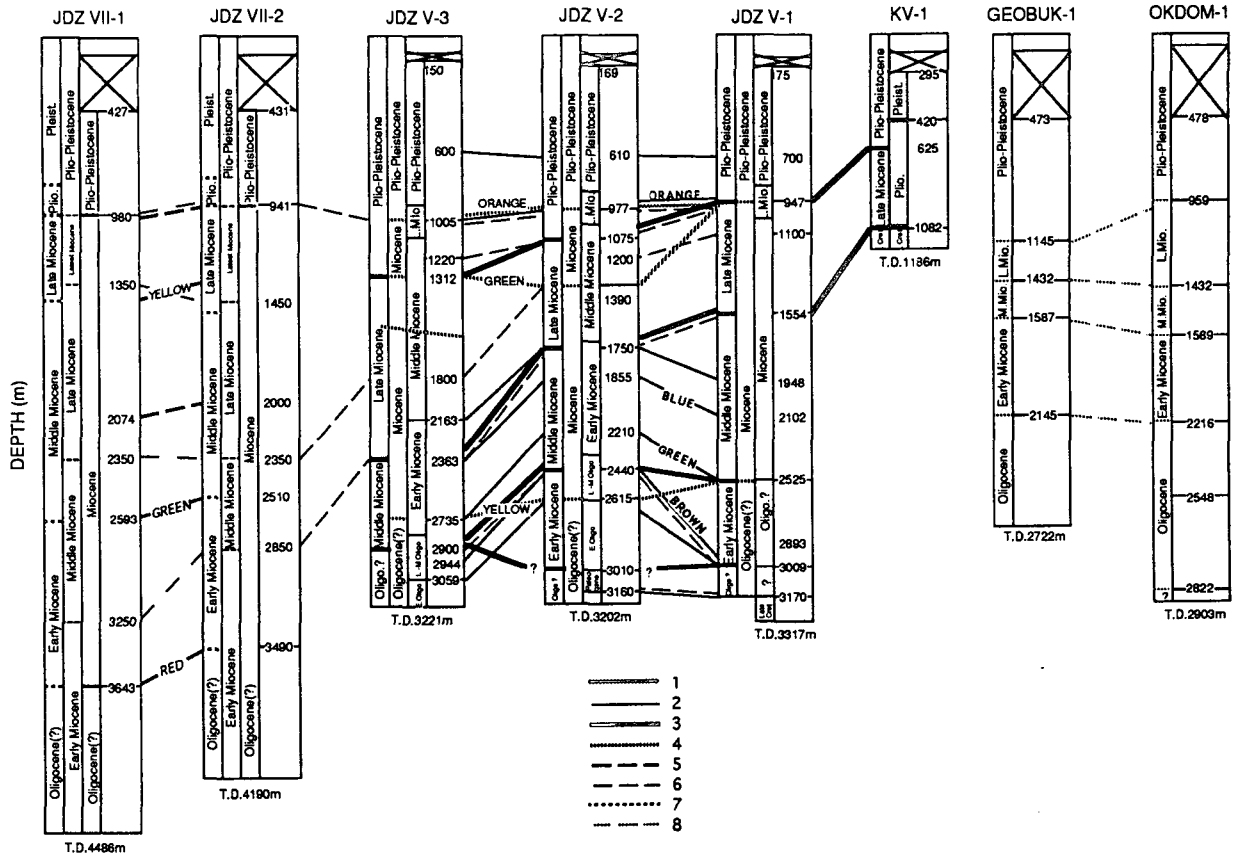


Fig. 2. Correlation of the Tertiary Cheju Basin by lithologic, paleontologic and seismic data. Lines 1-8 are based on consideration of the following accounts: 1, Kim *et al.*(1986); 2, Park *et al.*(1987); 3, Bong *et al.*(1987); 4, Lee *et al.*(1987); 5, Park *et al.*(1988); 6, Chang *et al.*(1991); 7, Chang *et al.*(1991); 8, PEDCO(1991).

구하였다 (단, 석영-장석-암편을 100%로 하였음). 이 자료에 의해 구간별 암석학적 특성을 규명하였다. 그 외에 퇴적층 D와 퇴적층 E에 해당되는 JDZ V-1의 시료 15개, PZ-1 공의 시료 20개 및 JDZ VII-1 공의 시료 19개를 관찰하여 조구조적 환경변화를 밝혔다. 구성광물중 석영은 단결정질 석영과 복결정질 석영으로, 장석은 사장석과 카리장석으로, 암편은 사암에 포함되는 모든 암편을 화산암, 변성암, 퇴적암의 3종류 구간으로 구분하였다. 단일 광물입자의 장경이 0.031 mm 이하의 것은 기질로 처리하였다. 또한 사장석과 카리장석을 구분하기 위하여 소듐 코발트 니트라이트를 이용하여 카리장석을 착색하였다. 퇴적물 입자는 분급도, 원마도, 구형도등의 조적이 관찰되었으며 입자들 사이의 지지정도에 따라 기질우세와 입자우세로 나누었으며 입자우세 사암은 입자접촉 관계에 따라 점접촉, 선접촉 및 불합접촉으로 나누었다.

응회암이 산출되는 3개의 시추공 (JDZ V-1, 거북-1, 드래곤-1)에서는 5개의 신선한 시료를 택하여 회토류원소 분석을 실시하였다. 회토류 원소분석은 중성자 방사화 분석 (Neutron Activation Analysis)법에 의해 8개의 원소가 (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) 계측되었다. 이들 계측값들은 일본의 Green Tuff Formation에서 얻어진 회토류값들 (Nobuyuki Tsuchiya, 1988)과 비교되었다.

퇴적률과 퇴적경향을 알기위해 각각의 사암층의 위아래에

놓인 세일에 의해 경계지워지는 사암층의 두께를 측정하였다. 시층서적인 자료는 고생물 조사 자료와 K-Ar 절대연령을 측정하여 이용하였다. 사암층의 두께 측정시, 층내 실트층이 험재되었거나 잔자갈이 포함되어 있는 경우는 사암층의 두께로 간주하였다. 이들 자료는 시추공상의 위치를 나타내는 x축상의 번호 (하부에서 상부로 번호가 주어짐)위에 사암층의 두께가 막대그래프로 그려졌으며 이들 자료에 의해 분석이 이루어졌다.

침강율을 알기위해 Sclater and Christie(1980)의 이론이 적용된 '침강' 공식이 반압밀작용 (decompaction) 및 이전에 쌓인 퇴적물의 무게를 제거한 역연산에 사용되었다. 도표는 침강율 대 시간의 조건에 대해 그려졌으며 효과적인 침강 (effective subsidence) 혹은 교정된 침강 (corrected subsidence) 으로 그려질 수 있다. 전자는 퇴적물의 무게를 제거하고 압밀작용을 제거하여 계산한 자료이고 반면에 후자는 분지에 퇴적이 시작되는 초기에 기반암을 해수면 높이까지 이동시킨 것이다. 입력되는 자료는 층의 상부와 하부의 깊이, 층 상하부의 시대, 층의 암질 및 공극률 등이다.

탄성과 탐사자료를 각 퇴적층 경계부의 상하관계와 층내 탄성과 반사형태의 형상, 반사면의 연속성, 진폭과 주파수 등의 분류기준에 의해 퇴적층 A, B, C, D 및 E로 규정하였다. 또한 전체적인 분지내 적용가능성을 알아보기 위하여 분지 전반에 걸쳐 분포하는 9개의 시추공을 연결하는 축선을 이들 5개의

퇴적층 층서단위로 나누어 대비하였다. 퇴적층 경계부의 상하 관계는 반사면 끝의 추적에 의해 온랩, 다운랩, 탑랩 및 절단으로 표현되며 이들에 의해 부정합과 정합이 판단되며 이러한 경계부를 퇴적층의 경계로 하였다. 분지형성초기의 분지모양을 유추하기위해 탄성과 자료를 계수화(digitizing)하여 기반암의 3차원적 구조도를 작성하였다.

탄성과 층서와 시추공자료 대비

각 퇴적층별 탄성과 분류기준을 상술하면, 퇴적층 A는 평행한 탄성과 반사형상형태 (seismic reflection pattern)을 갖는다. 진폭은 매우 크며 반사면의 연속성은 매우 양호하다. 이 층의 외형 (external form)은 평상 (sheet) 모양이며 분지의 남부지역이 북부지역 보다 두껍게 쌓였다. 퇴적층 B는 하위 퇴적층 C와 경사부정합관계를 갖는다. 퇴적층 A와 마찬가지로 평행한 반사형상형태를 가지나 연속성과 진폭은 퇴적층 A에 비해 약하다. 또한 하부구간에서는 수로의 발달로 인해 연속성이 매우 불량한 부분이 분지의 북부쪽에서 주로 관찰된다. 퇴적층 C의 반사면 연속성은 상위층에 비해 매우 약하고 하부층에 비해서도 약하며 준평행내지는 S자형 반사형상을 보인다. 이층내의 반사면들은 JDZ VII-1공과 JDZ VII-2공이 위치한 분지의 최남단부에서는 상부층에 경사지게 수렴하나 중·북부에서는 준평행하게 발달된다. 퇴적층 D의 반사면 연속성은 상위 퇴적층 C보다 양호하며 퇴적후의 습곡 및 단층작용에 의한 휘어진 면과 잘린면이 많이 관찰된다. 외형 (external form)은 평상 (sheet) 모양이며 준평행한 반사형상이 주로 관찰된다. 퇴적층 E는 하부 기반암위에 부정합으로 놓여있다. 반사면의 연속성은 상위의 퇴적층 D 보다 약하며 무질서한 (chaotic) 반사형상과 S자형 반사형상이 주로 관찰된다. 선상지 (fan) 모양의 외형이 기반암과의 접촉부에서 부터 주로 발달되었다 (그림 3).

시추공 자료 (퇴적물의 시대, 암상의 특성 등) 검증에 의해 구간별 퇴적층의 탄성과 층준을 상세하게 일치시켜 보면, 퇴적층 A의 특성은 시추공에서 얻어진 퇴적물 자료로 보아 평행하게 잘 발달된 두터운 모래와 점토층의 반복에 의한 결과로 보인다. JDZ VII-1공에서 본층의 하한이 0.51초 (왕복주사) 까지이며 139 측선 및 124X 측선을 따라 0.1초 이내의 변화를 보이며 JDZ VII-2 공까지 이어진다. JDZ V-1 및 JDZ V-2 공에서 0.63초로서 다소 깊어지나 거북-옥돔 공으로 가면서 0.51~0.52초로 얕아진다. 본층의 하한은 KV-1공과 드래곤-1 공에서는 0.33~0.39초 사이에 위치하며 이들공중 KV-1공은 탄성과 단면에서 용기대위에 위치하고 드래곤-1 공은 같은 용기대 위는 아니나 기반암이 다소 상승되어있는 부분에 위치함을 알 수 있다. JDZ VII-2 공에서 이 층의 주구성 퇴적물은 밝은 회색-녹색 점토이며 회색 사암 및 실트가 협재되어있다. 이층의 기저부는 원마도가 좋은 역질사암과 점토의 호층으로 구성되어 있으며 560~600 m 사이에 분포한다. 유공층 및 화분등에 의한 고생물 자료에 의하면 플라이오-플라이스토세에 해당되며 분지의 침강 및 해수면 상승에 의해 형성된 해성 퇴적층이다.

퇴적층 B는 상위층과 달리 모래와 점토층의 두께가 얇아서 탄성과 단면의 연속성이 상위층에 비해 불량하다. JDZ VII-1,

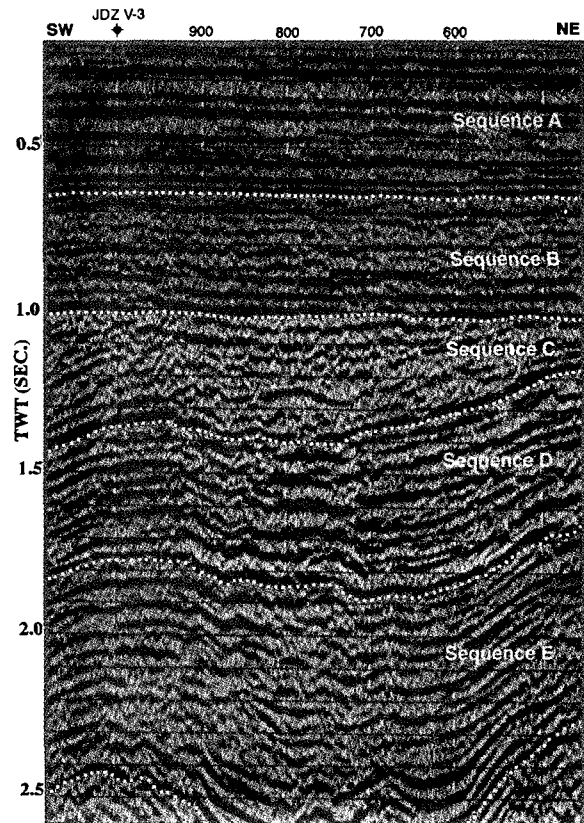


Fig. 3. Seismic reflection section showing criteria for recognition of the sequences. Each sequences shows characteristic reflection attitudes, continuity and sequence boundaries. Section position plotted on Fig. 6.

JDZ VII-2, JDZ V-1, JDZ V-2, JDZ V3, 거북 및 옥돔공에서 본층의 두께는 0.94~1초 내외이나 KV-1 공과 드래곤공에서는 각각 0.65와 0.76초로서 매우 얇아진다. 분지 남쪽의 다섯개 공은 하위 퇴적층 C가 습곡 및 단층에 의한 교란으로 상위층과는 뚜렷이 구분되었으나 거북과 옥돔공 북부로는 이들 퇴적층이 평행하게 퇴적되어 층간의 경계구분이 어렵다. JDZ VII-2 공에서 이 층의 주구성 광물은 점토와 모래이나 상위층에 비해 점토 및 모래의 두께가 얇다. 또한 층의 하부에서는 역질사암이 2매 발달하였다. 이 층은 플라이오-플라이스토세에 해당되며 분지의 가장자리에 분포하는 퇴적층 B의 하부에서는 하성환경의 수로발달이 관찰되기도 한다.

분지의 남부(JDZ VII-1, JDZ VII-2, JDZ V-1, JDZ V-2, JDZ V3)에서 퇴적층 C는 경사진 반사면들을 갖고 있으며 두께의 변화가 매우 심하다. 또한 부분적으로는 침식되어 결층을 이루기도 한다. 이러한 특성은 본층이 다른 층에 비해 심하게 습곡 및 단층작용을 받은 결과로 보여진다 (그림 4). KV-1공, 거북공 그리고 옥돔공 지역에서는 남부지역과는 대조적으로 수평층으로 발달되어있다. 이들 두 지역간의 차이는 분지 남서부를 따라 발달된 주향이동 단층의 영향에 의한 것이며 이들 단층의 활동은 퇴적층 B의 발달이전에 종료되었다. 드래곤 공에서 본층이 두껍게 발달된것은 이 부분이 부분적으로 침강한 결과로 추정된다. 이 층의 JDZ VII-2공 최상부에 녹니석 사암으로 과

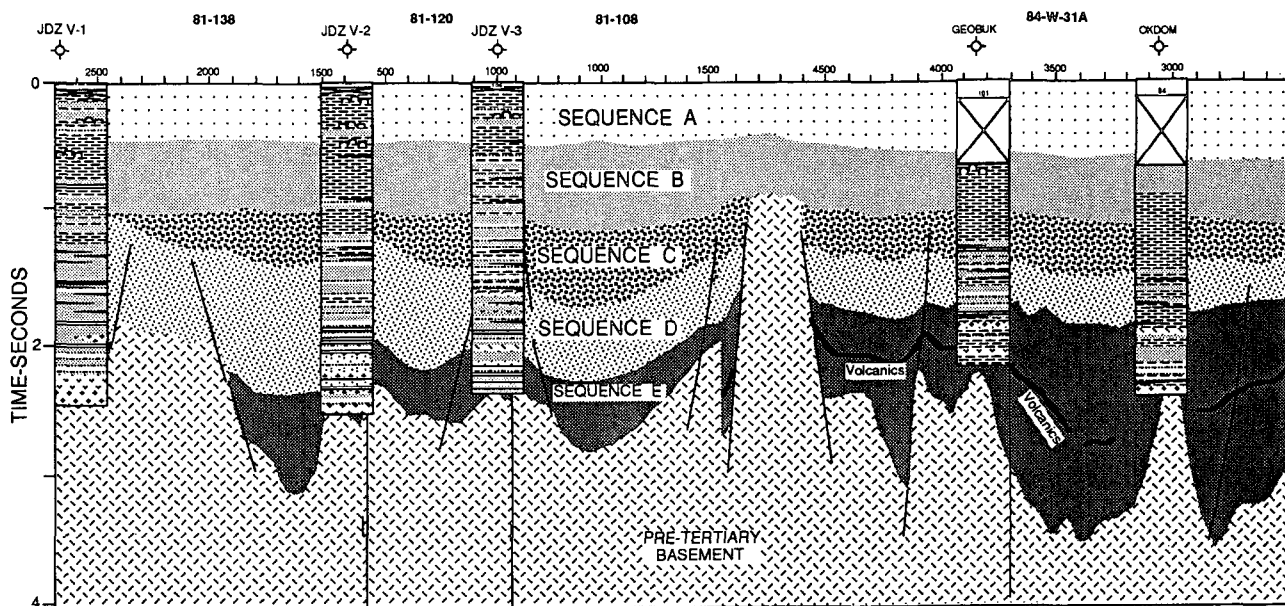


Fig. 4. Interpreted seismic section through 5 wells showing horst and graben structures. Tertiary sequences recognized in seismic sections and confirmed by lithologic and paleontologic data. Note that the volcanic layers had experienced folding and faulting.

Seismic Stratigraphy	Columnar Section	Lithostratigraphy			Biostratigraphy			Age	Environment			
		Unit	Lithology	Mineral Assemblage	Heavy Mineral Assemblage (KIER, 1985)	Calcareous microfossils	Foraminifera			Palynomorphs		
Pl - Pa	1	100	Clean sand	X	Hornblende, Augite, Mica, Glauconite	Gastropod	Inner Shelf	Acritarch Pinacoeae Compositae Alnus	Pleistocene	Shallow marine		
		350	Coquina			Pelocypod					Middle Shelf	Pleistocene
Yellow ss	2	410	Sandstone/Claystone	UNIT I (group B,C)	Rhodochrosite	Ostracod	Inner Shelf to Coastal	Monoleto spores Taxodium	Plio - Pliastocene	Transition		
		625				oolite / pellet					Cherophytk	Pliocene
		655				lignites					Coquina	
M2	3	713	Clst/Ss (Claystone)	UNIT II	Hornblende, Hypersthene, Augite, Magnetite	Ammonia sp.	Inner Shelf to Coastal	Gramineae Persicaria Buxus	Late Mio. - Early Pliocene	Nonmarine		
		810				Claystone (lignite)					860	Middle Miocene
Blue ss	4	880	Sandstone	UNIT III (group A,B1)	UNIT IV (group A,B1,B2)	Mudstone	14.55-1.25Ma	Rutaceae Melicoidites Ceratopteris	Middle Miocene to Early(?) Miocene	Nonmarine		
		940									Basalt	995
M1	5	1085	Mudstone	UNIT III (group A,B1)	UNIT IV (group A,B1,B2)	Mudstone	17.59-0.64Ma	Middle Miocene	Middle Miocene	Nonmarine		
		1028									Mudstone	UNIT IV (group A,B1,B2)

Fig. 5. Age determination by compilation of paleontologic, lithologic and absolute age data. Sequence stratigraphy offers an additional way to subdivide the stratigraphic record, based on the chronostratigraphic significance of sequence boundaries.

거에 기재된 부분이 관찰되는데 이 부분은 현미경 관찰결과 응회암으로 확인되었다. JDZ VII-2 공에서 본층의 하한은 1495 m로 추정된다. 실트와 점토 혹은 실트와 모래의 호층으로 이루어졌으며 하부 구간에서는 두꺼운 역질사암이 발달되었다. 후기 마이오세에 해당되며 하성환경하에서 형성되었고 분지의 융기내지는 해수면 하강에 의해 분지내에서 국부적으로 발달되었다.

퇴적층 D내에는 단층들이 많이 발달되어 있으며 이들 단층은 하위의 퇴적층 E로 부터 연장된다. JDZ VII-1공 부근에서는 본층이 침강 (depression) 되어있고 JDZ V-1, JDZ V-2 및 JDZ V-3 지역에서는 단층 및 습곡에 의해 교란되어있다 (그림 4). 그 외의 지역에서는 큰 변동없이 수평으로 발달한다. 본 층은 부분적인 침강에 의해 두께의 변화가 심하며 KV-1공에서 가장 얇게 분포한다. 시추공과의 대비에 의하면 초기에서 중기 마이오세에 걸쳐 퇴적된 것으로 추측된다.

퇴적층 E는 JDZ VII-1공과 JDZ VII-2공 지역에서는 하한이 인지되지 않으며 고지형의 영향에 의해 퇴적되지 않은 지역도 있다. JDZ V-1, JDZ V-2 및 JDZ V-3 지역에서는 본 층이 기반암 융기대에 의해 연속되지 못하고 있다. 반사면 들은 퇴적초기의 경사지형에 의해 기울어져 있으며 퇴적이 종료된 후의 구조운동에 의해 습곡되었다. 거북공과 옥돔공 지역에서는 본 층내에 응회암층이 발달되었으며 측면 연속성이 좋으나 후기 구조운동에 의해 변형되었다. 이 층은 올리고세 혹은 그이전의 퇴적층으로 사료되며 분지의 열개후 조립질 퇴적물들이 급격히 쌓인

환경에서 부터 호성환경으로 변화하였다.

각 퇴적층의 시대결정은 시추공의 유공층과 화분등에 의한 고생물 자료와 절대연령 측정에 의해 얻어진 자료로 부터 탄성과 층서, 압층서 및 생층서를 종합하여 (그림 5) 분지전체에 적용함으로써 이루어졌다. 이들 결과에 의해 퇴적층 A, 퇴적층 B, 퇴적층 C, 퇴적층 D 및 퇴적층 E가 확립되었으며 (그림 6) 주변분지와와의 층서적인 위치는 표 1과 같다.

퇴적 및 침강작용

각각의 퇴적층별 암질 변화를 시추공 주상도에서 살펴보면 퇴적층 A는 점토암이 우세하고 퇴적층 D와 퇴적층 E는 사암 내지 역질사암이 우세하다. 대부분의 퇴적층에서 측면상 퇴적상 변화 (lateral facies changes)가 크며 분지의 가장자리에 위치할수록 이러한 변화가 커진다 (그림 7). 퇴적층 D와 퇴적층 E의 구간에서 퇴적작용의 반복양상이 갖는 의미를 알아내고 퇴적사건 (sedimentary event)과 퇴적경향을 파악하기 위해 시추공의 심도에 따라 달라지는 사암 단위층의 두께변화를 측정하였다. 이 분야 연구들은 주로 조간대 환경에서 퇴적된 탄산염암의 연구 (Hilnov and Goldhammer, 1991; Goldhammer *et al.*, 1993)가 대부분이나 최근들어 사암의 운회형태에 대한 연구 (Martino and Sanderson, 1992)도 이루어지기 시작하였다. 시추공별 사암층의 두께변화는 분지상의 위치에 따라 절대적인 두께는 변하나 변화경향은 유사함을 알 수 있다. 이러한

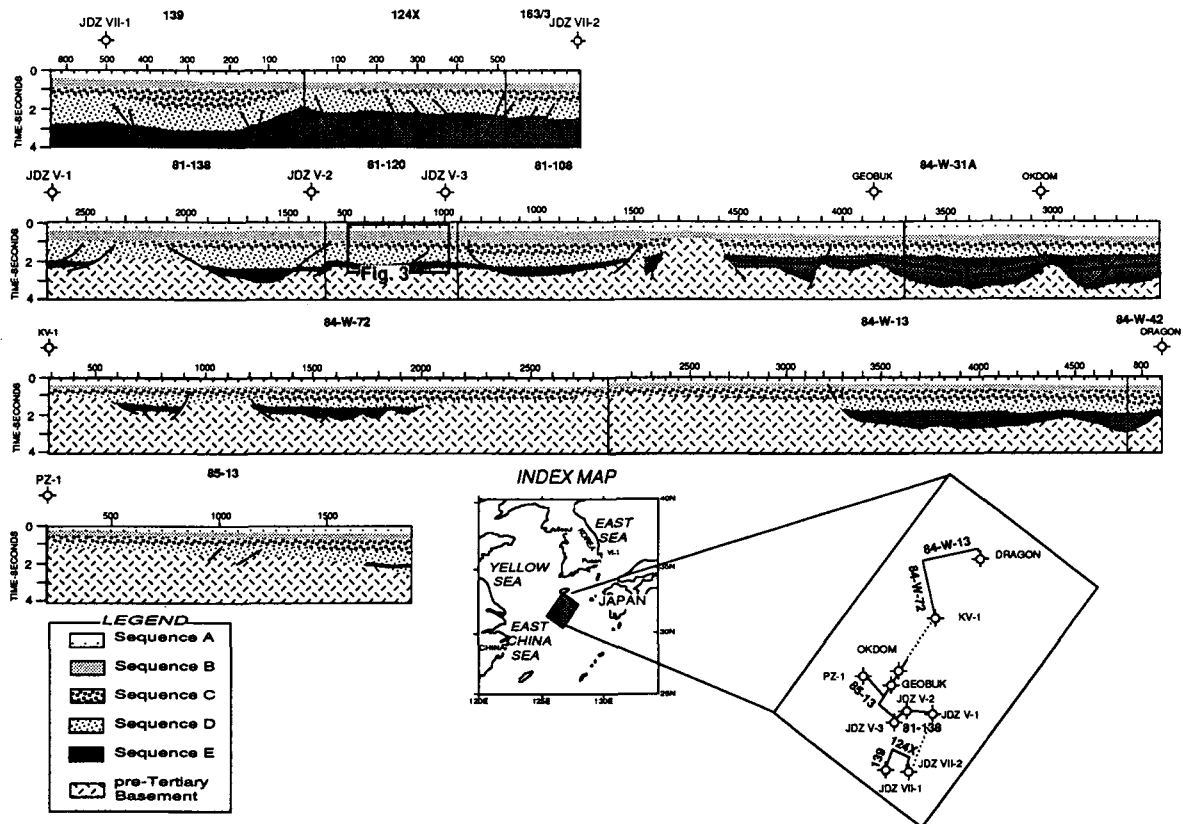


Fig. 6. Schematic stratigraphic cross section reconstructed from a regional seismic sections and well data.

Table 1. Chronostratigraphic correlation of the East China Sea region.

	TAIWANISLAND	EAST CHINA DEA Zhou <i>et al.</i> , 1989	OKINAWA Kimura <i>et al.</i> , 1991	BLOCKY Kim <i>et al.</i> , 1986	POHANG Kim, 1965	CHEJU This Study
QUATERNARY	Toukoshia Fm.	Donghai Gr.	Ryukyu Gr.	Unit O	Umockdong Fm.	Sequence A
Pliocene	Cholan Fm. Chinshui Fm.	Santan Fm.	Shimajiri Gr.			Sequence B
Late Miocene	Kueichulin Fm.	Liulang Fm.		Unit N		Sequence C
E.-M. Miocene	Nanchuang Fm. Nankang Fm. Shiti Fm. Taliao Fm. Mushan Fm.	Yuquan Fm. Longjing Fm.		Unit M	Yeonil Gr.	Sequence D
			Janggi Gr.			
Oligocene	Aoti Fm. Suichoryu Fm.	Huangang Fm.				Sequence E
Eocene		Pinghu Fm. Oujiang Fm.	Kayo Fm.	Unit L		
Paleocene		Lingfeng Fm.				

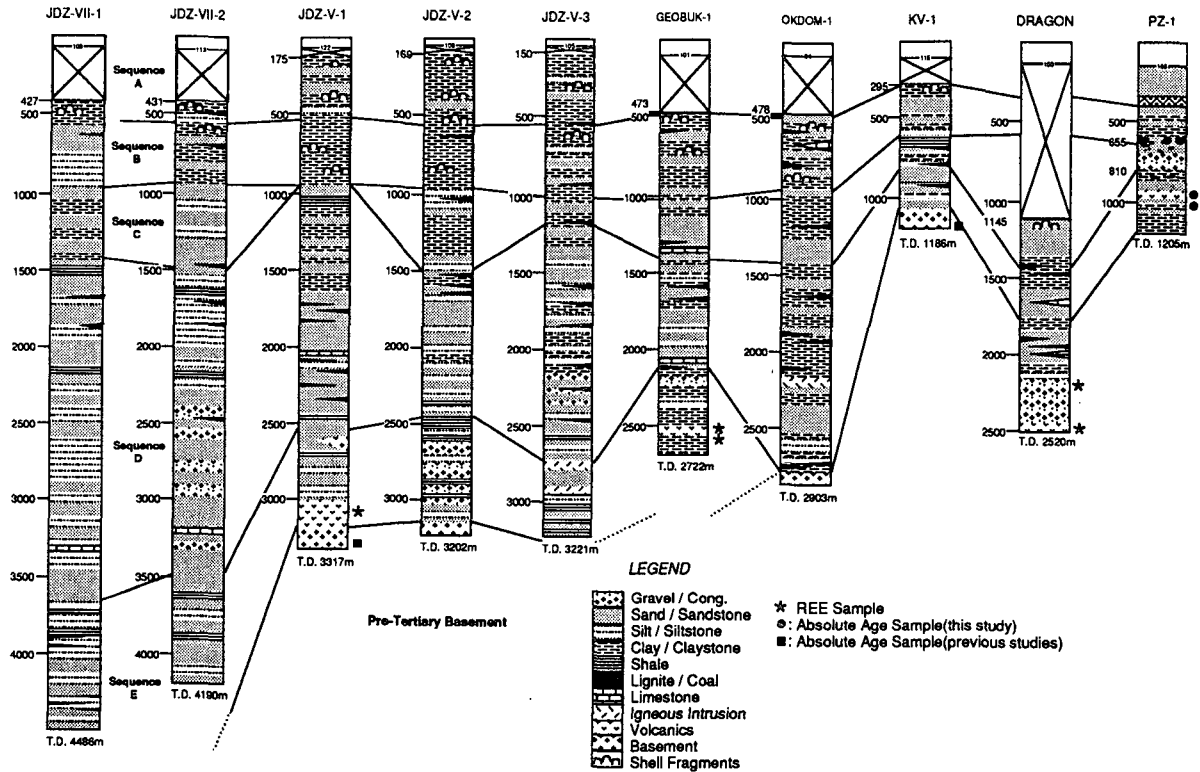


Fig. 7. Columnar sections from the exploratory wells showing sample locations and lateral lithologic changes along each sequences. See Fig. 6 for well locations.

퇴적반복 형태는 특정지역에서의 퇴적사건에 따라 고유의 형태를 나타낸다. 이러한 결과는 퇴적을 진행시키는 사건에 의해 퇴적율과 경향이 바뀌기 때문이다. 즉, 퇴적사건에 의한 퇴적물의 급격한 유입은 시추공에서 두꺼운 조립질 퇴적물로 나타나며 인접한 지역의 시추공에서 퇴적층 두께에는 변화가 있을 수 있으나 퇴적 반복형태는 같은 양상으로 나타난다. 분지의 가장자리에 위치한 옥돔과 거북공은 중심부에 위치한 3개 공들 (JDZ VII-2, JDZ V-3 및 JDZ V-2)에 비해 사암층 두께의 변화폭이 크고 나타나는 빈도가 적다 (거북-1, 87회; 옥돔-1, 200

회; JDZ VII-2, 370회; JDZ V-3, 382회; JDZ V-2, 280회). 또한 KV-1공과 같이 용기부에 위치한 시추공의 사암층 두께는 다른 공에 비해 얇다 (그림 8). 시추공별 퇴적물은 환경요소와 퇴적타입 (조립질 퇴적 혹은 세립질 퇴적)에 따라 변화하며 퇴적물의 공급량은 절대시간에 의해 비교가 되어야 한다. 최대 퇴적사건을 나타내는 최대두께 사암층의 위치는 JDZ VII-2 공의 경우 하부로 부터 147회째의 사암층에, JDZ V-3 공은 241회에, JDZ V-2 공은 38회에, GEOBUK-1 공은 49회에, OKDOM-1 공은 132회에, KV-1공은 71회에 위치한다 (그림 8).

이들의 층서적인 위치는 퇴적층 D에 해당되며 전반적인 퇴적물의 공급량을 퇴적층 B를 370만년, 퇴적층 C를 570만년, 퇴적층 D를 1200만년으로 고려한 절대연령에 비교해 보아도 단위시간당 퇴적물의 유입이 퇴적층 D가 퇴적층 E에 비해 많음을 알 수 있다. 따라서 퇴적층 D 시기에 상대적으로 급격한 조립질 퇴적물의 유입이 분지 전체에 걸쳐서 일어난 것으로 보인다.

이들 사암층의 분포는 퇴적층 전체에 대한 압밀작용 해석시 고려되어야 할 것이다. 퇴적분지의 침강율 (subsidence rate)을 결정하기 위하여 수심, 퇴적물의 하중, compaction, 해수면 변화가 고려되어야 한다(Sclater and Christie, 1980). 실제 침강율을 계산하기 위해 역연산이 사용되었으며 이 계산은 화산암체가 관입한 곳을 제외하고는 중력이상 (gravity anomaly)이 작은 인장성 퇴적분지 (extensional sedimentary basin)에 적합하다 (Fowler and Mckenzie, 1989). 시간의 변화에 따른 상대해수면변화(relative sea-level change)는 구조적인 침강작용(tectonic subsidence)과 관련이 되므로 주변에서 조사된 Li (1984)의 자료를 참조하였다. 또한 고해수면 (highstand) 시기의 해수의 하중은 기반암이 가라앉는 요인으로서 작용할 수도 있다. 그림 9는 제주분지의 침강과정을 보여주고 있으며 곡선들은 보존된 퇴적층들에 의해 나타난 총침강량이다. 본 분지에서의 침강과 해수면 변화를 살펴보면 해수면 변화는 퇴적층 E와 퇴적층 D 시기에 하강하였다가 침강율이 증가하는 퇴적층 B와 퇴적층 A 시기에 상승하였음을 알 수 있다 (Li, 1984; Xu and Le, 1989). 침강율은 각각의 시추공마다 다소 차이는 있으나 대부분 평행하며 퇴적층 D 시기에 분지 중심부가 높았으나 퇴적층 C 시기에 이르면 가장 완만하였고 퇴적층 B 시기에 증가하다가 퇴적층 A 시기에 높아졌음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Zhu(1989)의 견해와도 일치한다.

이들 사암층의 분포는 퇴적층 전체에 대한 압밀작용 해석시 고려되어야 할 것이다. 퇴적분지의 침강율 (subsidence rate)을 결정하기 위하여 수심, 퇴적물의 하중, compaction, 해수면 변화가 고려되어야 한다(Sclater and Christie, 1980). 실제 침강율을 계산하기 위해 역연산이 사용되었으며 이 계산은 화산암체가 관입한 곳을 제외하고는 중력이상 (gravity anomaly)이 작은 인장성 퇴적분지 (extensional sedimentary basin)에 적합하다 (Fowler and Mckenzie, 1989). 시간의 변화에 따른 상대해수면변화(relative sea-level change)는 구조적인 침강작용(tectonic subsidence)과 관련이 되므로 주변에서 조사된 Li (1984)의 자료를 참조하였다. 또한 고해수면 (highstand) 시기의 해수의 하중은 기반암이 가라앉는 요인으로서 작용할 수도 있다. 그림 9는 제주분지의 침강과정을 보여주고 있으며 곡선들은 보존된 퇴적층들에 의해 나타난 총침강량이다. 본 분지에서의 침강과 해수면 변화를 살펴보면 해수면 변화는 퇴적층 E와 퇴적층 D 시기에 하강하였다가 침강율이 증가하는 퇴적층 B와 퇴적층 A 시기에 상승하였음을 알 수 있다 (Li, 1984; Xu and Le, 1989). 침강율은 각각의 시추공마다 다소 차이는 있으나 대부분 평행하며 퇴적층 D 시기에 분지 중심부가 높았으나 퇴적층 C 시기에 이르면 가장 완만하였고 퇴적층 B 시기에 증가하다가 퇴적층 A 시기에 높아졌음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Zhu(1989)의 견해와도 일치한다.

퇴적층별 사암의 암석학적 특징

암석학적 연구는 분지형성 초기의 특성을 나타내는 퇴적층 E와 퇴적층 D 구간에서 주로 수행되었다. 광물조합별 분포상

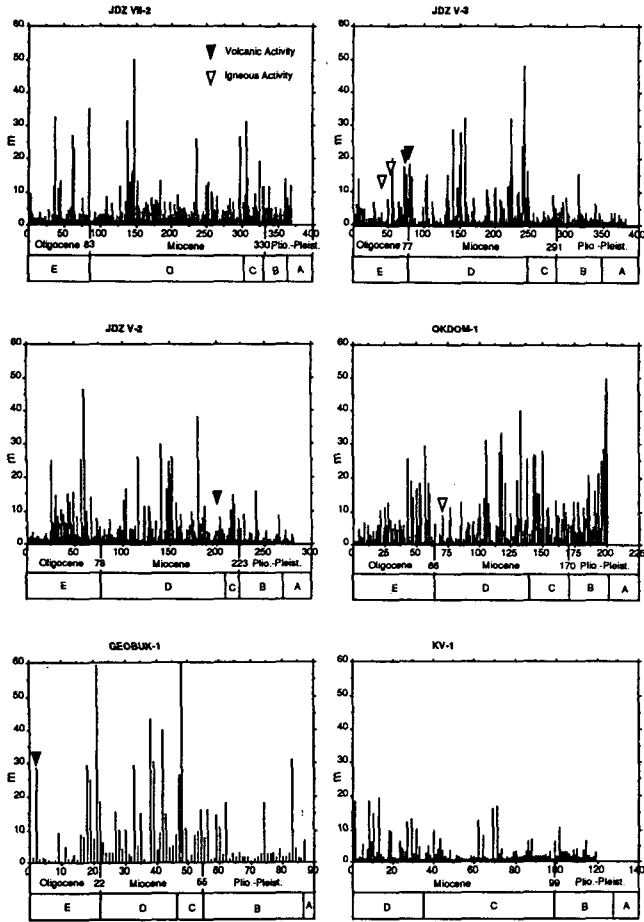


Fig. 8. Histogram showing sand layer thickness plotted against its position in sequence.

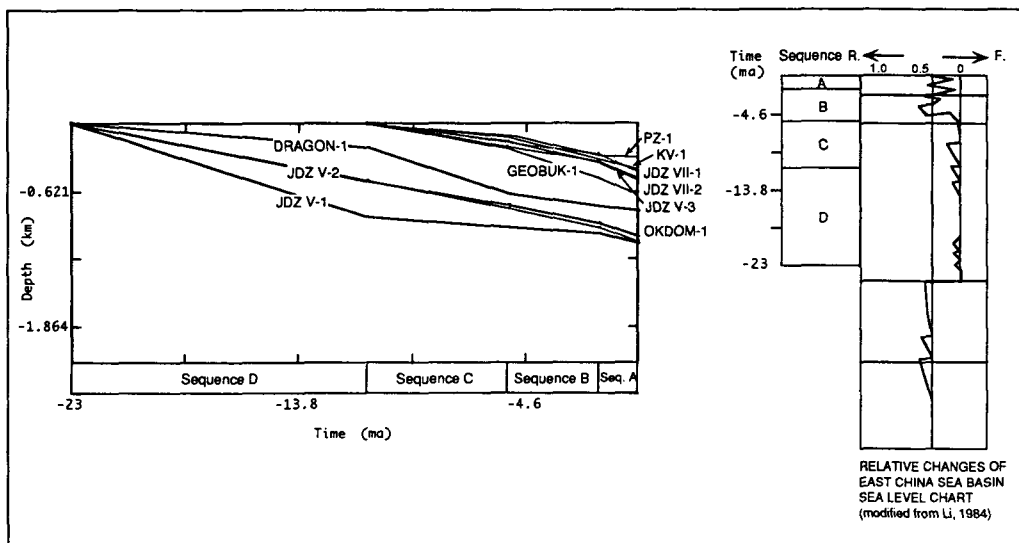


Fig. 9. Comparison of rate of subsidence curves of the exploratory wells with sea-level changes. Subsidence pattern shows parallelism among most exploratory well areas.

태에 의한 퇴적층에서의 사암의 광물조성 변화는 공급지의 조 구조적 배경의 변화를 암시한다. 따라서 생층서나 시층서의 경계와 서로 완전히 일치하지는 않는다. 구간별 사암의 암석학적 특징은 퇴적층 전구간이 관찰될 수 있는 JDZ VII-1 공을 기준으로 기재하였고 제주분지의 경계부에 위치한 PZ-1공과 비교하였다.

퇴적층 A와 퇴적층 B 구간에서는 주로 석영-장석-암편을 100%로 했을때 단결정질 석영이 59.3%이며 복결정질 석영이 18.1% 정도 나타난다. 암편은 퇴적기원이 대부분이며 화산성 및 변성기원도 소량 나타난다. 퇴적층 B의 하부에서 단결정질 석영이 28.5%, 복결정질 석영이 25.7%이며 화산성 기원의 암편이 매우 우세한것과 변성기원 암편이 전무 한것이 특징적이다. 또한 장석은 카리장석이 사장석에 비해 많은 경향을 보인다. 암편은 상부에서는 변성암편이 우세하고 하부에서는 화산암편이 우세하며 변성암편과 화산암편은 양적으로 반비례관계를 보인다. 703 m 층준에서는 천해에서 생성된 것으로 여겨지는 올라이트가 관찰되기도 한다. 본 구간에서는 퇴적입자들의 조직의 급격한 변화는 보이지 않는다. 901 m 층준에서는 응회암층이 발달되어 있으며 이 층준은 JDZ VII-2공의 퇴적층 B 하부 구간에 해당되는 응회암 층준으로 연장된다. 본 구간에서는 탄산염에 의해 교결작용을 받았다.

퇴적층 C 구간에서는 퇴적층 B의 하부특성이 이어지며 단결정질 석영이 우세하고 복결정질 석영이 전무한 경향을 보이며 변성기원 암편도 전혀 관찰되지 않는다.

퇴적층 D 구간중 1771 m 및 2101 m 층준에서 장석이 거의 관찰되지 않는점이 매우 특징적이며 이층준은 퇴적물 입자의 조직이 급격히 변하는 층준과 일치하고 있다. 또한 2101 m 층준에서는 석영의 과성장(overgrowth)이 관찰된다. 2581 m 층준에서는 장석의 양이 급격히 증가했으며 이들은 대부분 방해석에 의해 치환되었다. 3001 m 층준에서는 변성기원 암편과 장석의 양이 같이 증가하고 있다. 본 구간내에서의 급격한 입자조직의 변화는 1492 m/1501 m, 1730 m/1771 m, 2050 m/2101 m 층준에서 관찰된다. 암편은 퇴적기원이 대부분이며 화산성 및 변성기원도 소량 나타난다 (표 2).

퇴적층 E 구간에서는 단결정질 석영이 72.2%, 복결정질 석영이 12.2%, 장석은 7.3%로 구성되어 있으며 퇴적 및 변성기원 암편이 주로 나타난다. PZ-1공의 각 구간별 광물조성상 특징 및 조직을 기술하면 다음과 같다. 퇴적층 B의 사암 구성입자들은 석영 평균 36.5% (단결정질 석영 31.5%, 복결정질 석영 5.1%), 사장석 평균 1.1% , 카리장석 평균 4.9%로 구성된다. 암편은 상부에서는 화산성, 변성기원 암편이 우세하다. 특히 494 m 시료에서는 칼세도닉 석영 (Chalcedonic Quartz)이 관찰되며 석영의 경계부가 3점에서 만나는 것으로 보아 공극충진(pore-fill) 작용이 활발했음을 암시한다. 본 시료에서 세립질 석영(microquartz)의 타원형 부분은 원래의 퇴적물이 실리카에 치환되어 형성되었고 주변 방사상 섬유조직을 보인다.

석영 입자 조직(quartz grain fabric)을 관찰해 보면 직소광하는 단결정질 석영이 주를 이루며 약간의 파동소광을 하는 단결정질 석영도 보인다. 석영내에 포유물을 가지는 석영은 매우 드물게 관찰되고 과성장된 석영은 보이지 않는다. 입자의

조직은 층의 상부에서 하부로 가면서 원마도가 각형-아각형-아원형로 변화하며 기질우세에서 입자우세(matrix supported-grain supported)로 변화한다. 구형도(sphericity)는 낮다가 높아지는 경향을 보인다. 이것은 암밀작용의 영향이기 보다 원마도가 증가하고 점차 기질이 줄어들 것으로 보아 운반과정에서 침식되어 구형도가 증가한 것으로 보인다.

퇴적층 C는 시료수가 적어서 비교하기 힘들지만 상부층에 비해 석영의 양이 증가하였고 퇴적기원암편이 우세하다. 퇴적층 D중 1064 m 층준까지는 석영 평균 41.8% (단결정질 석영 38.0%, 복결정질 석영 3.8%) 사장석 평균 3.3%, 카리장석 평균 4.9% 암편 평균 7.1%로 구성된다. 암편은 화산암 기원 암편이 층의 전구간에서 우세하게 나타난다. 장석입자 중에는 석회석/백운석에 의해 치환된것이 많이 보이며 석영입자의 용리(dissolution) 현상도 관찰된다. 본 구간내에서는 2차적인 성인에 의한 탄산염암들이 분포하는 것이 특징적이다. 석영입자의 조직(fabric)은 석영조각이 shard 형태로 나타나는 것에서 부터 입자내에 고체포유물(solid inclusion)이 포획되어 있는 것 까지 다양하다. 또한 균열된 석영입자 사이로 점토와 방해석 입자가 끼어있는 것이 특징적이다. 이러한 현상은 암밀작용의 영향으로 보여진다. 장석은 부분적으로 치환된 상태가 많이 관찰된다. 입자의 조직(texture)은 흑운모, 견운모와 길쭉한 형태의 장석이 휘어져 있으며 입자의 접촉부 상태로 보아 암밀작용의 영향을 많이 받은 것으로 보여진다. 원마도는 각형-아각형 입자들이 주를 이루고 있는 것으로 보아 공급지에서 먼거리를 이동하지 않았음을 알 수 있다. 분급은 보통~불량하며 구형도는 높음~낮음까지 다양하다.

퇴적층 D의 1067 m~1106 m 사이는 석영 평균 44.9% (단결정질 석영 34.6%, 복결정질 석영 10.3%) 사장석 평균 3.94%, 카리장석 평균 4.0%, 암편 평균 10.1%로 구성된다. 암편은 화산성 암편이 우세하고 퇴적, 변성암편 순이다. 본 구간에서는 복결정질 석영 및 암편이 우세한 것이 특징적이다. 석영입자 내에는 증광물이 포획되어 있는 경우도 보인다. 돌로마이트의 누대구조는 원래의 퇴적입자가 치환된 것이다. 원마도는 각형에서 아원형까지 다양하며 구형도는 높고 분급은 보통이다. 입자들간의 접촉부는 점 내지 선 접촉을 이룬다.

응회암층 대비

퇴적층 E와 퇴적층 D에는 상부층들에 비해 화산성 퇴적물이 많이 공급되며 이들의 분포상태로 보아 화산활동이 이들 퇴적층의 형성시기동안 활발했음을 알 수 있다. 퇴적층 D의 화산암에 대한 지질시대를 추정하기위하여 응회암은 쇠설성 퇴적물과 혼합되어 있어서 시료로 사용되지 못하였고 제주분지와 소코트라분지 사이에 위치하는 PZ-1공의 963.17 m, 993.65 m, 1005.84 m 및 1075.94 m 층준의 현무암에 대해 K-Ar 전암분석을 실시한 결과 상부의 2개 시료는 14.55+ -1.25 M.A.로 추정되었고 하부의 2개 시료는 17.59+ -0.64 M.A.로 추정되었다. 따라서 이지역에서의 화산활동은 전기-중기 마이오세에 있었음을 알 수 있다.

퇴적층 E내에서 산출되는 응회암들의 층서적인 대비를 위

Table 2. Detrital modes of the samples from the Sequence D and the Sequence E.

	Dep. (m)	Mono Qz	Poly Qz	Total Qz	K-feldspar	Plagio- class	Total Feldspar	Volcanic Rock frag.	Sedimentary Rock frag.	Matamorphic Rock frag.	Total Rock frag.
JDZ VII-1	1492	83.7	4.1	87.8	6.2	2.0	8.2	2.0	2.0	0.0	4.0
	1573	80.0	1.5	81.5	4.7	1.5	6.1	4.7	6.3	1.5	12.4
	1771	65.4	21.0	86.4	6.5	0.0	6.5	0.0	5.0	2.2	7.2
	1939	80.5	7.1	87.6	3.6	1.8	5.3	3.6	1.8	1.8	7.1
	2101	71.5	10.7	82.3	1.2	0.0	1.2	9.4	7.1	0.0	16.6
	2203	77.5	8.2	85.7	4.0	3.1	7.1	2.0	5.1	0.0	7.1
	2325	74.3	14.0	88.3	3.9	1.9	5.9	1.9	3.9	0.0	5.9
	2422	77.5	11.3	88.8	1.6	6.4	8.0	0.0	3.2	0.0	3.2
Sequence D	2581	64.7	10.3	75.1	5.9	10.3	16.2	0.0	8.8	0.0	8.8
	2653	64.8	21.5	86.3	3.9	3.9	7.8	0.0	5.8	0.0	5.8
	2710	77.1	5.8	82.8	4.9	2.4	7.4	4.1	4.9	0.7	9.8
	2821	80.4	5.2	85.7	2.6	4.0	6.5	2.6	5.2	0.0	7.8
	2915	83.9	1.5	85.4	2.9	5.9	8.8	1.5	4.4	0.0	5.9
	3001	61.7	10.3	72.0	6.3	3.8	10.2	6.3	2.5	9.0	17.8
	3130	62.4	15.5	78.0	5.1	7.7	12.9	1.5	7.7	0.0	9.2
	3352	76.9	11.2	88.1	3.7	1.9	5.6	0.7	3.7	1.9	6.3
	3430	65.0	10.6	75.7	3.1	1.0	4.2	6.4	10.6	3.1	20.2
	3502	72.7	8.2	80.9	4.1	2.7	6.8	2.7	4.1	5.5	12.3
	3601	80.9	8.5	89.4	1.1	2.1	3.2	1.1	3.2	3.2	7.4
Sequence E	3700	67.3	14.3	81.6	4.2	2.8	7.1	0.0	7.1	4.2	11.3
	4000	75.2	13.2	88.5	2.9	4.4	7.3	1.4	1.4	1.4	4.2
	4407	74.2	9.1	83.2	5.1	2.6	7.7	1.5	6.5	1.0	9.1
JDZ V-1	2379	68.6	7.2	75.8	3.9	3.2	7.1	4.6	9.9	2.6	17.1
Sequence D	2418	79.4	4.7	84.1	5.3	4.0	9.3	3.4	2.6	0.7	6.6
	2515	69.7	16.8	86.6	2.1	2.1	4.1	3.1	4.2	2.1	9.3
	2526	74.5	15.4	89.9	1.4	3.6	5.0	0.7	2.9	1.4	5.0
	2547	73.3	13.1	86.4	3.0	1.5	4.5	3.0	4.6	1.5	9.1
	2574	89.8	2.3	92.1	2.3	2.3	4.5	3.4	0.0	0.0	3.4
	2607	82.5	2.7	85.2	0.9	1.8	2.7	5.5	4.7	1.8	12.1
	2610	76.8	1.7	78.5	5.4	5.4	10.8	5.4	3.6	1.7	10.7
Sequence E	2676	88.0	6.5	94.5	1.6	1.6	3.2	0.0	0.8	1.6	2.4
	2772	83.4	3.7	87.1	0.9	2.8	3.6	6.6	1.8	0.9	9.2
	2805	79.4	8.3	87.7	4.2	2.0	6.2	2.0	2.0	2.0	6.1
	2841	84.0	4.2	88.2	1.7	0.8	2.5	3.3	5.1	0.8	9.3
	2853	74.9	3.4	78.3	4.6	5.7	10.3	3.4	5.7	2.3	11.4
	2940	86.3	6.2	92.5	2.3	1.5	3.8	1.5	2.3	0.0	3.8
	3057	71.5	5.4	77.0	8.2	1.3	9.5	2.7	8.2	2.7	13.6
PZ-1	866	80.1	9.9	90.1	0.0	9.9	9.9	0.0	0.0	0.0	0.0
	963	74.3	5.4	79.7	5.4	4.0	9.4	81.4	2.8	6.6	10.8
	1000	39.9	0.0	39.9	0.0	9.9	9.9	50.1	0.0	0.0	50.1
	1003	76.5	5.1	81.6	6.7	3.2	9.9	5.1	0.0	3.4	8.5
	1006	66.9	16.6	83.4	0.0	0.0	0.0	12.3	4.2	0.0	16.6
	1018	56.7	13.0	69.7	8.7	8.7	17.3	4.3	4.3	4.3	13.0
	1034	70.5	7.3	77.8	7.3	3.6	10.9	3.8	3.8	3.8	11.3
	1037	61.2	5.5	66.6	11.1	11.1	22.2	5.6	5.6	0.0	11.2
	1049	84.0	0.0	84.0	4.0	8.0	12.0	4.0	0.0	0.0	4.0
Sequence D	1058	60.6	2.6	63.2	31.5	5.2	36.8	0.0	0.0	0.0	0.0
	1061	69.0	4.0	73.1	4.0	10.4	14.4	4.2	0.0	8.3	12.5
	1064	67.7	9.9	77.6	7.5	0.0	7.5	9.9	5.0	0.0	14.9
	1067	53.6	20.9	74.5	9.3	4.6	13.9	4.6	0.0	7.0	11.6
	1085	70.5	13.5	84.1	2.6	8.1	10.7	0.0	2.6	2.6	5.3
	1091	32.0	30.0	62.1	5.9	9.9	15.9	3.2	15.7	3.2	22.1
	1095	52.6	15.8	68.4	5.3	15.8	21.1	10.5	0.0	0.0	10.5
	1098	63.9	12.1	76.0	6.0	2.9	8.9	12.1	3.1	0.0	15.2
	1101	63.4	6.7	70.0	6.7	6.7	13.4	9.9	0.0	6.7	16.6
	1104	64.5	14.4	78.9	9.0	1.7	10.6	0.0	5.2	5.2	10.5
	1107	44.5	16.7	61.1	5.5	0.0	5.5	22.3	11.1	0.0	33.4

하여 3개 시추공에서 얻어진 응회암 시료의 희토류원소를 분석하였다. 제주분지 시추공의 분석치들은 일본의 마이오세 화산활동의 산물인 "Green Tuff" 층의 분석치들과 매우 닮음을 알수있다 (그림 10). 또한 가벼운 원소들 부분의 분석치들과는 중복되는 부분이 전혀 없으며 고생물학적인 자료도 퇴적층 E의 시대가 올리고세를 지시한다. 따라서 Spangler와 Tamaki (1980)가 추정하였던 제주분지 응회암층과 "Green Tuff" 층과의 대비는 무리임을 알 수 있다. $LREE = La + Ce + Nd + Sm$ 로 하고 $HREE = Eu + Tb + Yb + Lu$ 일때 $LREE/HREE$ 의 비율은 시추공별 차이는 크지 않다 (표 3). 시추공내 시료들간의 비교 결과, 거북공의 2517 m 시료와 2526 m 시료 및 드래곤 공의 2180 m 시료와 2500 m 시료사이의 $LREE/HREE$ 의 차이는 응회암 입자들의 양에 의해 좌우된 것으로 사료된다. 총REE의 양이 JDZ V-1공과 거북공에 비해 드래곤공의 값이 적은 것은 REE값이 적은 응회암 입자들의 유입에 기인한 것으로 보인다. 분석치들의 전반적인 분포 양상은 JDZ V-1공과 드래곤공이 유사하며 거북공은 La와 Ce 성분이 다른공들의 값과 반비례 관계를 보이며 Sm 원소값이 특히 높다. 이들 결과로 보아 JDZ V-1공의 응회암과 드래곤공의 응회암은 매우 유사한 근원환경에서 유래된 것으로 보인다.

분지형성 초기의 조구조적 환경

열개에 의해 분지내에 퇴적물이 쌓이면서 기반암에 까지 영향이 미친, 인장력에 의한 정단층들이 만들어졌다. 주단층(major fault)이 위치하면서 분지의 형태는 반지구형(half graben type)이 되고 주단층을 따라 분지가 침강하기 시작하여 양방향에서의 인장에 의한 도미노 형태의 정단층들이 분지중심부로 미끌어지면서 listric 단층내지는 tilted fault block들이 만들

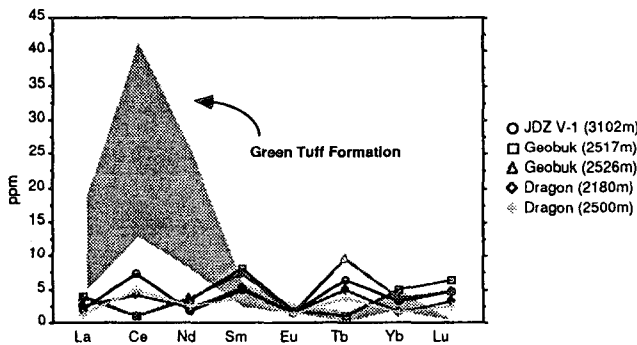


Fig. 10. Comparison plot for the REE content in volcanic sediments from the Sequence E and the Green Tuff Formation.

어졌다. 인장 (stretching)이 발생한 후 침강이 시작되었고 침강이 진행됨에 따라 분지의 가장자리에 층서적 온랩 (onlapping)이 형성되었다. 퇴적층 D가 퇴적되는 시기 부터는 인장력이 매우 미약하게 작용하여 마이오세 이후의 퇴적물내에 이동거리가 긴 정단층이 발견되지 않는다. 시추공 주변지역 이외에도 분지전체적으로 연속적인 정단층들이 많이 발견되는 것은 분지의 형성이 장력조구조운동과 관계가 있다는 Wage-man 외(1970)의 해석과도 일치한다. JDZ VII-1공, JDZ V-1공 및 PZ-1공 사암층 퇴적층 D와 퇴적층 E의 54개 시료에 대한 암석학적 특징(표 3)을 삼각 다이어그램에 투영된 결과, 하부의 퇴적층 D에서 상부의 퇴적층 E로 가면서 변화양상이 뚜렷이 나타난다. 석영-장석-암편 (QFL) 다이어그램에서 Dickinson과 Suczek의 근원지 타입에 의한 분류 (1983)에 비교해 보면 "안정지괴 내부"에서 "재순환된 지구조대"로 근원지가 변화하였음을 암시한다(그림 11). 기존자료(김종수 외, 1986)에 의한 KV-1공의 사암은 본연구결과와 일치하나 일부 시료는 "분화된 호상열도"에서 유래되었음을 보여준다. 조구조적인 영향을 명확히 알기 위해 단결정질석영-장석-암편에 투영해 보면 "안정지괴 내부"로 부터 "재순환된 석영질"로 변화하였으며 일부는 "재순환된 점이대"로 다른 일부는 "혼합"으로 이동하였다. 단결정질석영-사장석-카리장석 (QmPK) 다이어그램에서도 상부층으로 가면서 장석이 증가하는 경향이 뚜렷하다. 이것은 분지의 형성후 대륙지괴에서 퇴적물이 공급되다가 구조적 요인에

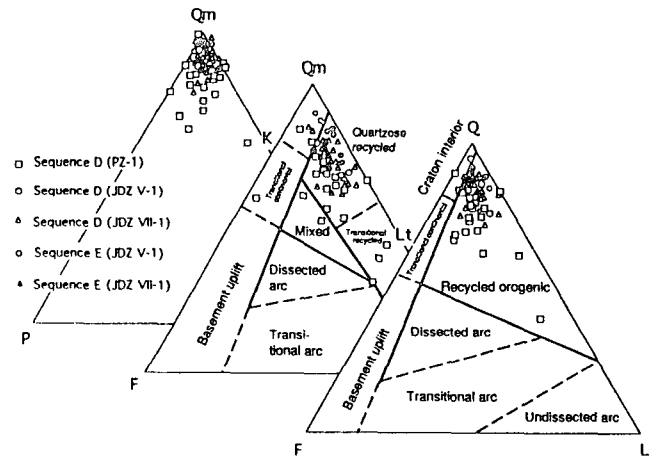


Fig. 11. Q-F-L, Qm-F-Lt and Qm-P-K provenance discriminating diagrams after Dickinson and Suczek (1979) for the Sequence D and the Sequence E. In general, the data fall into two clusters. The age and compositional grouping represents a shift in source areas.

Table 3. REE (p.p.m.) of Volcanics from the Sequence E.

	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	LREE/HREE	Σ REE
JDZ V-1 (3102 m)	1.93	7.47	1.64	4.99	1.43	6.37	3.09	4.74	1.03	31.66
Geobuk (2517 m)	3.9	1.06	3.56	8.16	1.83	1.04	4.89	6.48	1.17	30.92
Geobuk (2526 m)	3.78	1.04	3.76	7.33	1.43	9.52	3.67	4.71	0.82	35.24
Dragon (2180 m)	2.44	4.11	2.3	5.1	1.42	4.83	1.56	3.1	1.28	24.86
Dragon (2500 m)	1.28	4.93	2.48	3.73	1.24	3.67	1.5	2.48	1.4	21.31

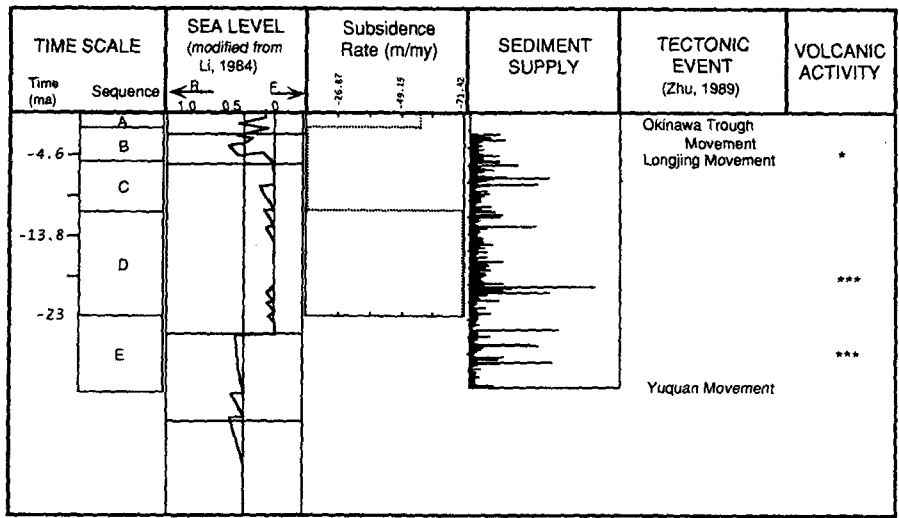


Fig. 12. Summary of the controlling factors of Tertiary sedimentation. Relative sea-level change can be recognized, but the dominant control factors on sedimentation were tectonic movement and volcanic activity.

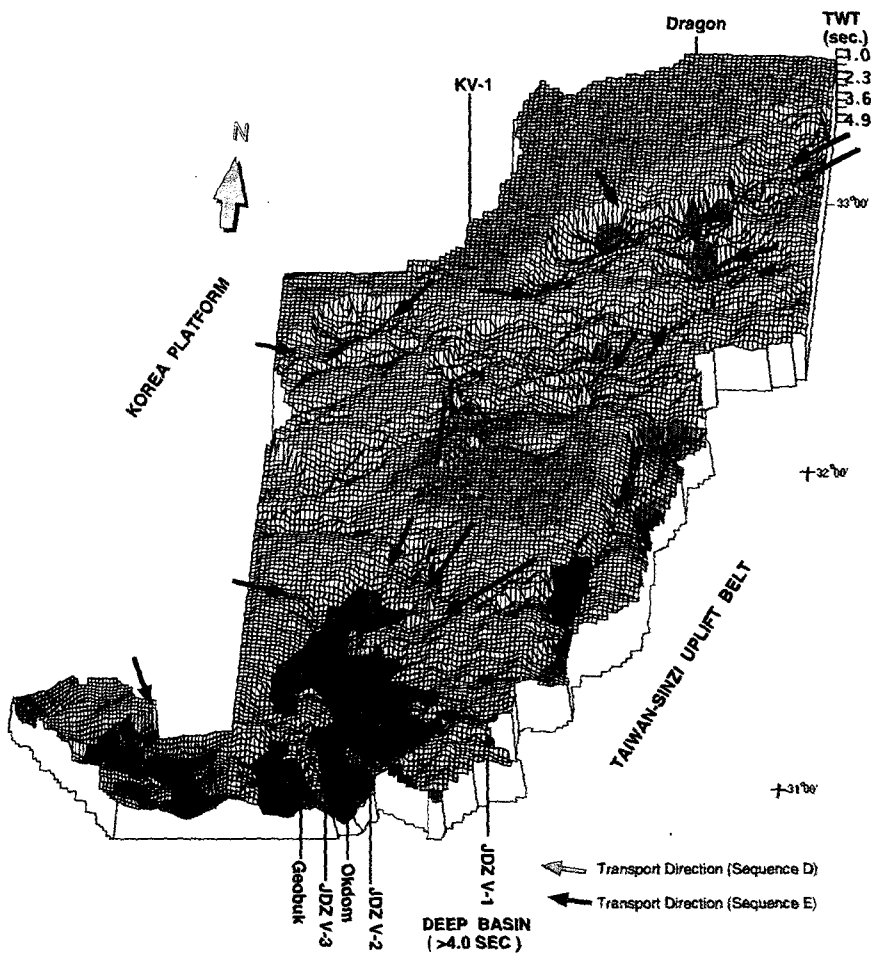


Fig. 13. Three dimensional seismic structure map of Pre-Tertiary basement showing palaeogeomorphology, grabens and fault lines. Note the relationship between the NE-SW trending strike-slip fault and geomorphologic deformation.

의해 화산활동을 수반한 융기된 조산대로 부터 퇴적물이 급격히 공급되었음을 지시한다. 본 분지에서서 화산활동은 퇴적층 D와 퇴적층 E 시기에 활발하였으며 퇴적층 B의 하부 구간에서 응

회암 (과거 녹니석 사암으로 생각하였던 층)이 나타나 인접공으로 연장되는 것으로 보아 퇴적층 B의 초기에도 화산활동이 미약하게나마 있었음을 지시한다. Li(1984)에 의한 해수면 변화

자료는 본 지역의 광역적인 침강시기와 일치하고 있고 퇴적물의 유입량은 퇴적층 D 시기에 급격히 증가한 것으로 보이며 침강 속도는 퇴적층 A와 D 시기에 급격하였음을 보여준다(그림 12). 분지형성 초기의 분지형태는 퇴적물의 성분, 이동방향 및 퇴적물의 공급량등에 영향을 미치므로 고제3기이전의 기반암을 3차원적으로 표현하여 분지해석에 이용하였다. 본 도표로부터 분지 남동부에 발달된 좌수향단층의 발달이 매우 뚜렷이 관찰된다. 이 단층은 퇴적층 C의 시기까지 활동하여 분지의 남부에서 퇴적층 B와 퇴적층 C의 구분이 경사부정합면에 의해 뚜렷이 구분되게 하였으며 분지내에 큰 영향을 주었을 것으로 생각된다. 탄성과 단면 관찰에 의하면 퇴적물이 쌓인 후에도 이 단층선을 따라서 단층이 이동했음을 알 수 있다. 퇴적물의 이동방향은 퇴적층 E 시기에는 여러방향의 근원지로부터 유입되었으나 퇴적층 D 시기에는 북동방향에서 주로 유입되었음을 알 수 있다. 이들 결과는 퇴적물의 두께자료를 등층후선도로 표현하여 대략적인 층후 분포를 확인후, 탄성과 단면도상에서의 전진구축(prograding) 형태에 의해 퇴적물 이동방향을 확인하였다(그림 13).

결 론

1. 제주분지의 탄성과 층서는 광역부정합면 상위의 퇴적층 A와 퇴적층 B, 그 하위의 퇴적층 C, 퇴적층 D, 퇴적층 E 및 기반암으로 분류된다. 퇴적층 A의 퇴적시기는 플라이스토세부터 현재, 퇴적층 B는 플라이오세, 퇴적층 C는 후기 마이오세, 퇴적층 D는 초기에서 중기 마이오세 그리고 퇴적층 E는 올리고세이다. 퇴적층 B는 하부구간에서는 수로의 발달로 인해 연속성이 매우 불량한 부분이 분지의 북부쪽에서 주로 관찰된다. 분지의 최남단부에서 퇴적층 C는 상부층에 경사지게 수렴하나 중-북부에서는 준평행하게 발달된다. 이들 두 지역간의 차이는 분지 남서부를 따라 발달된 주향이동 단층의 영향에 의한 것이며 이들 단층의 활동은 퇴적층 B의 발달 이전에 종료되었다. 본 층은 부분적인 침강에 의해 두께의 변화가 심하다. 퇴적층 E는 하부 기반암 위에 부정합으로 놓여 있으며 퇴적초기의 경사지형에 의해 기울어져 있으며 퇴적된 후, 구조운동의 영향을 받았다.
2. 퇴적층 D의 퇴적시기에 급격한 조립질 퇴적물의 유입(상대적임)이 분지 전체에 걸쳐서 일어난 이유는 화산활동을 수반한 조산작용에 의해 분지주변의 융기된 지역에서 퇴적물이 유입된 결과로 보인다.
3. 퇴적층 E와 퇴적층 D에는 상위층들에 비해 화산성 퇴적물이 많이 공급되어 있으며 이들의 분포상태로 보아 화산활동이 이들 퇴적층의 형성시기동안 활발했음을 알 수 있다.
4. 퇴적층 E 내에 분포하는 응회암층은 "Green Tuff Formation"보다 고기의 화산활동에 의한 응회암으로 추측된다.
5. 퇴적층 D내의 화산암의 분출시기는 절대연령 측정결과 초기-중기 마이오세로 밝혀졌으며 이는 고생물 연대와도 일치한다.
6. 분지의 형성후 퇴적이 시작된 퇴적층 E는 육성퇴적물로 이루어져 있으며 사암의 성분은 대륙지괴의 근원지로부터 퇴적물이 공급되었음을 지시한다. 퇴적층 E가 형성된후 주변의

퇴적물 공급지가 구조적 요인에 의해 융기하였고, 그 결과로서 퇴적물의 유입, 분지의 침강 및 화산활동이 급격히 증가하였으며 이들로 구성된 퇴적층 D는 화산활동을 수반한 "재순환된 지구조대"로부터 유래되었다.

참고문헌

곽영훈, 최현일, 손진담, 한중환, 1985, 대륙붕 제 4 광구의 석유지질 및 지화학적 연구. 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-85-13, 63p.

곽영훈, 최현일, 손진담, 한중환, 1986, 대륙붕 제 5 광구의 석유지질 및 지화학적 연구. 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-86-16, p. 29-60.

김승우, 장정해, 1981, 대륙붕해저지질해석 (JDZ-V-1, JDZ-VII-1 호공). 한국동력자원연구소 연구보고서, 대륙붕-3, 44p.

김종수, 구자학, 양승진, 1969, 황해 동지나해 해상물리탐사 종합보고서. 국립지질조사소 물리탐사보고, 3, 3-19.

김종수, 김승우, 장정해, 1982, 대륙붕해저지질해석 (JDZ-VII-1 호공). 한국동력자원연구소 연구보고서, 대륙붕-5, 42p.

김종수 외, 1984, 한국남부 대륙붕의 석유자원평가. 한국동력자원연구소 용역보고서 (한국석유개발공사).

김종수, 이운오, 공영세, 김주용, 1985, 대륙붕 지질자료 해석연구 (제 4 광구 pz-1호공의 암석학적연구). 한국동력자원연구소 연구보고 85-16, 7-30.

김종수, 박영수, 공영세, 1986, 대륙붕 지질자료 해석연구 (제 5 광구 KV-1 호공의 퇴적상에 관하여). 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-86-16, 7-27.

김종수, 이원영, 김철민, 박근필, 김원식, 신원철, 이호영, 최완실, 최윤경, 김승우, 공영세, 박영수, 최계림, 곽영훈, 손진담, 한중환, 정태진, 손병국, 봉필운, 이호영, 최성자, 전희영, 1987, 한국대륙붕 단독개발광구의 지질 및 석유자원. 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-86-2-22, 대륙붕 자원연구, 7-204.

박근필, 이원영, 김철민, 신원철, 이호영, 최윤경, 1989, 대륙붕 물리탐사 자료해석연구. 한국동력자원연구소 연구보고서 (JDZ 7소구), KR-88-3A-2, 48p.

박근필, 김철민, 박관순, 조규장, 신원철, 이호영, 1990, 대륙붕 물리탐사 자료해석연구. 한국동력자원연구소 연구보고서 (JDZ 8,9 소구), KR-89-3A-2, 40p.

박영수, 공영세, 최계림, 김승우, 1987, 대륙붕 한일공동개발구역 제 5 소구 시추공 지질자료해석 연구. 한국동력자원연구소 연구보고서. KR-87-24, 1-34.

박영수, 공영세, 최계림, 김승우, 1989, 대륙붕 한일공동개발구역 제 7 소구 시추공 지질자료해석 연구. 한국동력자원연구소 연구보고서. KR-89-3A-1, 7-45.

봉필운, 이호영, 권영인, 전희영, 1990, 대륙붕 제 8 소구의 층서고 생물학적 연구. 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-89-3A-1, 33-72.

봉필운, 이호영, 권영인, 1993, 석유자원연구 (I); 소코트라분지의 석유자원평가연구. 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-93-3A-1, 3-234.

이원영, 김철민, 박근필, 김원식, 신원철, 이호영, 최완실, 1988, 대륙붕 물리탐사자료 해석연구 (한일공동개발구역 제 5 소구). 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-87-25, 57p.

장정해, 김종수, 김승우, 이운오, 민건홍, 이치원, 진재화, 방효기, 봉필운, 전희영, 이호영, 권영인, 1991, 대륙붕 지질 및 고생물 연구. 한국자원연구소 연구보고서. KR-91-5B-1, 86p.

전희영, 최덕근, 봉필운, 이호영, 1985, 대륙붕 제 4 광구 PZ-1호공의 미고생물학적 연구. 한국동력자원연구소 연구보고서. 85-16, 31-71.

전희영, 최덕근, 봉필운, 이호영, 1986, 대륙붕 제 5 광구 KV-1호공의 미

- 고생물학적 연구. 한국동력자원연구소 연구보고서. KR-86-16, 61-99.
- 조규장, 이원영, 박관순, 박근필, 한현철, 1982, 대륙붕 석유탐사자료 해석연구 (한일공동개발구역 제 7 소구). 한국동력자원연구소 연구보고서, 대륙붕-6, 58p.
- 현병기, 구자학, 조규장, 권병두, 이당훈, 정승환, 양승진, 김승우, 박관순, 윤혜수, 서상용, 1980, 대륙붕 석유자원 평가연구. 자원개발연구소, 연구보고서, 80-6, 210p.
- Chen, Q.M. and Dickinson, W.R., 1986. Contrasting nature of petroliferous Mesozoic-Cenozoic basins in eastern and western China. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 70, 263-275.
- Chen-Lirong, 1989, A study of mineral assemblages in sediments of the Bohai Sea, the Huanghai Sea and the East China Sea. *Marine Sciences* (Peking, China), 1, 1-13.
- Chen-Lirong, Fan-Shouzhai and Mao-Yanping, 1984, Statistical analysis of the heavy mineral assemblage in the sediments of the East China Sea. *Studia Marina Sinica*, 21, 291-296.
- Chough, S.K. 1983, Marine geology of Korean Seas. International Human Resources Development Corp., Boston, 157p.
- Dickinson, W.R. and Suzcek, C.A., 1979, Plate tectonics and sandstone compositions. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 63, 2164-2182.
- Drake, C. L., 1979, Geology in China. *Geological Society of America Bulletin*, part 1, 90, 1-2.
- Emery, K.O., 1983, Tectonic evolution of the Yellow and East China Sea. *Oceanus*, 26, 26-32.
- Fan, P. R., 1977, Outline of the tectonic evolution of Southwestern China. *Tectonophysics*, 45, 167-261.
- Gilchrist, G.R., 1984, JDZ V-2, Final wellsite geological report (Unpublished).
- Goldhammer, R.K., Lehmann, P.J. and Dunn P.A., 1993, The origin of high-frequency platform carbonate cycles and third-order sequences (Lower Ordovician El Paso Gp, West Texas): constraints from outcrop data and stratigraphic modeling. *Journal of Sedimentary Petrology*, 63, 318-359.
- Hadson, 1990, Basic well data report. (Unpublished).
- HBKS (Hamilton Brothers Korea SDAD, Ltd.), 1980. Final report JDZ-VII-1 exploratory well Subzone VII, Block 7. Rorea /Japan Joint Development Zone, East China sea. (UnPublished)
- HBKS (Hamilton Brothers Korea SDAD, Ltd.), 1982. Final report JDZ-VII-2 exploratory well Subzone VII, Block 7. Rorea /Japan Joint Development Zone, East China sea. (UnPublished)
- Hedberg, Hollis D., 1970, Continental margins from viewpoint of the petroleum geologist: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 54, 3-43.
- Herman, B.M., R.N. Anderson, and M. Truchan, 1978, Extensional tectonics in the Okinawa Trough. In: J.S., Watkins, L. Montadert, and P.W. Dickerson, eds., Geological and Geophysical investigations of Continental Margins. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Memoir 29, 199-207.
- Hill, J., 1980. ESP Final well report, JDZ V-1 (Unpublished). Core Lab. Int. Ltd.. Singapore.
- Hilnov, L.A., and Goldhammer, R.K., 1991, Spectral analysis of the Middle Triassic Latemar Limestone. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61, 1173-1193.
- Houghton, N.M. and Kersey, D.G.. 1984. Petrographic study for Nippon Oil Exploration JDZ V-2 Well, offshore Korea (Unpublished). Core Lab. Inc., Dallas.
- Huang, C.C., 1978, An outline of the tectonic characteristics of China. *Eclogae Geol. Helv.*, 71, 611-635.
- Huang, T.K., 1959, New studies on the geotectonic subdivisions of Eastern China and their characteristics. *International Geological Reviews*, 1, 73-88.
- John, J.W.St., 1980. Age determination and petrographic analysis of core from 3316~3316.5 m, JDZ V-1 Well. In: Spangler and Tamaki, 1980, Final Wellsite Geological Report of JDZ V-1 (unpublished). Chevron Oil Oversea Petroleum Inc. and Nippon Oil Exploration Co., Ltd.
- Kaska, H.V., 1980. Palynostratigraphy, JDZ V-1 Well. In: J.F. Spangler and K. Tamaki, Final Wellsite Geological Report, JDZ V-1, Appendix X (Unpublished).
- Kirillova, G.L., 1993, Types of Cenozoic sedimentary basins of the East Asia and Pacific Ocean junction area. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 105, 17-32.
- Levorsen, A.I., and F.A.F. Berry, 1967, Geology of petroliferous Basins on continental shelf of China. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 68, 913-1003.
- Li, D.S., 1984, Geology Evolution of petroliferous basin on continental shelf of China. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 68, 993-1003.
- Martino, R.L. and Sanderson D.D., 1993, Fourier and autocorrelation analysis of estuarine tidal rhythmites, Lower Breathitt Formation (Pennsylvanian), Eastern Kentucky, USA. *Journal of Sedimentary Petrology*, 63, 105-119.
- Minami, A., 1979, Distribution and characteristics of the sedimentary basin offshore Sanin to Tsushima Island. *Journal of the Japanese Association Petroleum Technology*, 44, 321-328.
- Nobuyuki, T., 1988, Trace element composition of the middle Miocene basaltic rocks in Akita-Yumagata oil fields, Northeastern Japan Arc. *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, 83, 486-491.
- NOEC (Nippon Oil Exploration Co., Ltd.), 1986. Final well report JDZ-V-3, East China Sea (Unpublished).
- PALEXON Geological Consultants Pte. Ltd., 1984. Biostratigraphic Report JDZ V-2, offshore Korea (JDZ S.W. Sector). (Unpublished).
- Polugar, M., 1980, Foraminiferal Analysis, JDZ V-1 Well. In: J.F. Spangler and K. Tamaki, Final Wellsite Geological Report. JDZ V-1, Appendix X (Unpublished).
- Sclater, J.G., and Christie, P.A.F., 1980, Continental stretching: An explanation of the post-mid-Cretaceous subsidence of the Central North Sea Basin. *Journal of Geophysical Research*, 85, 3711-3739.
- Spangler, J.F. and Tamaki, K., 1980, Final wellsite geological report of JDZ V-1 (Unpublished). Chevron Oil Oversea Petroleum Inc. and Nippon Oil Exploration Co., Ltd.
- Sun-Baiyun, 1985, Characteristics of some heavy minerals in sediments of East China Sea and their significance. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 5, 109-116.
- Texaco Korea Inc., 1973, Wildcat KV-1 final geological report, (Unpublished).
- Ujiie, H., 1986, Report on the foraminiferal research of the Well JDZ-V-3. In: NOEC, Final Well Report JDZ-V-3, Appendix 2 (Unpublished).
- Ultramar, 1991, Final geological report. (Unpublished).
- Wageman, J.M., Hilde T.W.C., and Emery K.O., 1970, Structural framework of East China Sea and Yellow Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 54, 1611-1643.
- Xu, Shangwu, 1990, Seismic stratigraphy of East China Sea. *CCOP Technical Bulletin*, 21, 59-72.

- Xu, W. and J. Le, 1989, Structural history of the East China Sea. *China Earth Sciences*, 1, 59-73.
- Zapata Exploration Company, 1983, Final well report PZ-1. (Unpublished).
- Zhang-Yong-chang; Shen-Hua-ti, 1986, Holocene basal boundary of East China Sea Shelf and sedimentary sequence, *Journal of Stratigraphy*, 10, 24-33.
- Zhi, T., 1980, Tectonic features of oil and gas basins of eastern China: (Abs.) *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 64, 807.
- Zhou, Z.W. and Yin, P.L. 1985, A Geological Review of the East China Sea and its Petroleum Potential. *Oil Gas Geol. China*, 6, 1-13.
- Zhu, X., 1989, Chinese sedimentary basins, sedimentary basins of the world. 1 (series edited by Hseu, K.J.), Elsevier, 238p.
- Zhu, X. and H. J. Chen, 1980, Tectonic evolution of Chinese Petroleum Basins. *Revue de l'Institut Francais du Petrole*, 35, 223-230.
- Zhu-Er-qin and Wang-Qi, 1988, Sedimentation on the north shelf of the East China Sea. *Shandong Coll. Oceanogr., Qingdao, China Marine Geology*, 81, 123-136.

1995년 5월 29일 원고접수