

제주도 서귀포층의 퇴적상과 퇴적환경

윤석훈^{1,*} · 조성권²

¹제주대학교 해양과학대학 해양과학부/해양과환경연구소

²서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부

요 약

서귀포 해안단애를 따라 약 30 m 두께로 노출되어 있는 플라이오/플라이스토세의 서귀포층은 암상, 퇴적구조, 침식경계면, 생물교란 및 화석포함여부 등을 기준으로 할 때, 10개의 화석포함 층단위와 4개의 화석비포함 층단위로 구분된다. 이들 층단위에서는 역질모래, 모래, 니질 모래, 니로 분류되는 조직특성과 생물교란, 괴상, 점이층리, 평행층리, 연흔 및 언덕사층리 등의 퇴적구조를 조합하여, 총 12개의 퇴적상이 구분된다. 퇴적상 분석과 기존의 고생물 자료를 종합한 결과, 서귀포층은 육상 화산쇄설물이 재동되어 유입되고 폭풍의 영향이 우세한 연안 환경에서부터 니질 외대륙붕까지 다양한 천해환경에서 형성된 것으로 해석된다. 하천에 의해 운반된 육상의 화산쇄설물은 삼각주를 형성하면서 급격히 연안으로 유입되었고, 간헐적으로 해류나 해파에 의해 다시 재동되면서 교호하는 괴상, 점이층리, 평행층리, 사층리 사암과 이에 협재하는 박층의 균질 이암이 퇴적되었다. 주로 생물편으로 이루어진 생물교란 역질 사암과 니역질 사암은 해안으로 접근하는 폭풍쇄류의 영향으로 연안에 형성된 생물편 बैं크에서 퇴적되었으며, बैं크를 관통하는 조수로에서는 거대연흔이나 모래파, 또는 수로벽이 이동하면서 대규모 사층리와 평행층리의 역질사암이 집적되었다. 미고화의 두꺼운 생물교란 사질층은 외해역에 집적되어 있었던 퇴적물이 해류나 해파에 의해 지속적으로 재동된 후 연안 내지 내대륙붕으로 이동됨으로써 형성되었다. 생물교란 니질 사암은 생물편 बैं크의 내해 쪽 만이나 해파나 조류의 영향이 크지 않았던 연안 내지 내대륙붕에서 퇴적된 것으로 보인다. 한편, 두꺼운 균질 이암은 해류나 해파의 영향이 작은 니질 외대륙붕에서 세립질 부유퇴적물이 침전되어 형성된 것으로 해석된다.

주요어: 제주도, 서귀포층, 폭풍퇴적층, 재동화산쇄설물, 천해퇴적작용

Seok-Hoon Yoon and Sung-Kwun Chough, 2006, Sedimentary facies and depositional environment of the Seoguipo Formation, Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea. v. 42, no. 1, p. 1-17

ABSTRACT: The Plio-Pleistocene Seoguipo Formation crops out along the sea cliff of Seoguipo city, where it comprises about 30-m-thick shallow marine sequences. The outcrop section is subdivided into 10 fossil-bearing and 4 fossil-free sequence units which are distinguished either by sharp erosional surfaces or distinct changes in lithology, fossil occurrence, grain size and sedimentary structures. In these sequence units, 12 sedimentary facies are recognized based on two-tier classification scheme of grain size (i.e., gravelly sandstone, sandstone, muddy sandstone and mudstone) and sedimentary structures (i.e., bioturbated, homogeneous or massive, graded, parallel-stratified or laminated, and cross-stratified or laminated structures). Analyses of the sedimentary facies combined with previous paleontological studies suggest an interplay of a variety of depositional settings including storm-dominated shoreface with an input of reworked inland volcanoclastic sediments, sandy nearshore to inner shelf, and mud-dominated outer shelf. The reworked volcanoclastic sandstones with various current-induced sedimentary structures reflect deltaic sedimentation fed by streams passing the unconsolidated tuff areas. Bioturbated (muddy) gravelly sandstones consisting mainly of biogenic clasts are interpreted to be a storm deposits, accumulated in nearshore skeletal banks which were open to the direct influences of storms. The gravelly sandstones with parallel- and cross-stratifications appear to be a result of the migration of megaripples and sandwaves at the tidal channels across the skeletal banks. The unconsolidated thick sand bed with intense bioturbation seems a reworked sand deposit transported by sustained waves and/or ocean currents in a nearshore to inner shelf setting. On the other hand, the bioturbated muddy sandstone and mudstone facies were most likely deposited in the nearshore to inner shelf, and the outer shelf, respectively.

* Corresponding author: Tel. +82-64-754-3436, E-mail. shyoon@cheju.ac.kr

Key words: Jeju Island, Seoguiipo Formation, storm deposit, reworked volcanoclastics, shallow marine sedimentation

(Seok-Hoon Yoon, Faculty of Ocean Science/Marine and Environmental Research Institute, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea; Sung-Kwun Chough, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea)

1. 서 언

제주도는 신생대 후기에 일어난 80여 회 이상의 화산 분출과 홀로세 해수면 상승에 의해 형성된 화산 섬으로서, 용암분출에 의한 두꺼운 화산암과 소량의 화산쇄설암(응회암) 및 퇴적암으로 구성되어 있다(Won, 1975, 1976; 한국자원연구소, 2000). 제주도 지역 시추자료에 따르면, 용암류 화산암은 해수면 하 50~120 m까지 분포하며, 그 하부에는 퇴적층인 서귀포층과 U층이 나타나는 것으로 알려져 있다(고기원, 1997; 손인석, 1997; 오진용 외, 2000; Sohn and Park, 2004).

특히, 제 3기 플라이오세말에서 제 4기 플라이스

토세에 형성된 것(김봉균, 1972; Kim, 1969; Yi *et al.*, 1998)으로 추정되고 있는 서귀포층은 주로 제주도 중부와 서부 지역의 지하에 분포하는데(고기원, 1997), 그 일부가 서귀포 해안절벽을 따라 1.5 km 정도 거리에 걸쳐 지상에 노출되어 있다(Fig. 1). 서귀포층의 유일한 표식지로 알려져 있는 이곳은 다양한 암상 변화와 함께 연체동물, 유공충, 완족류, 개형충, 초미화석, 성게, 산호 등의 해양화석을 다량 포함하고 있기 때문에, 신생대 후기 한반도 남부해역의 고해양환경을 파악하는 데 매우 중요한 장소로 인식되고 있다.

서귀포층 노두에서는 1923년 일본인 지질학자 요코야마에 의해 최초로 27종의 연체동물 화석이 보고된 이후, 최근까지 수많은 고생물학적인 연구(Kim,

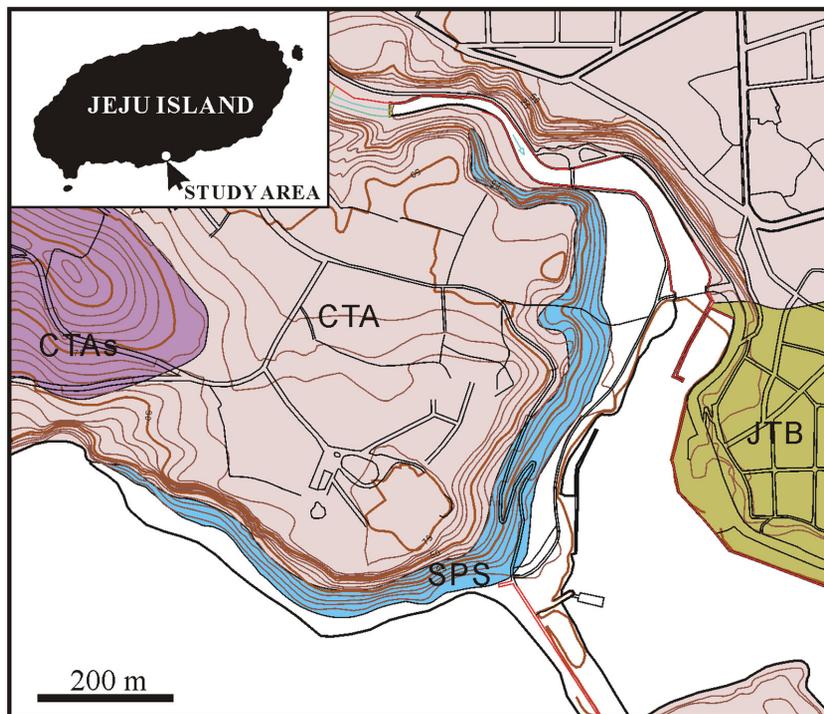


Fig. 1. Location and geological maps of the study area. Modified from Jeju (2000). CTA(s): Cheongiyeon trachyan-desite or scoria, JTB: Jeongbangdon trachyandesite, SPS: Seoguiipo Formation.

1965; 김봉균, 1972; Paik and Lee, 1984, 1986; 박근배 외, 1986; 유환수 외, 1986, 1987; Yoon, 1981, 1988; Lee, 1990; Kang, 1995; Yi *et al.*, 1998; Li *et al.*, 1999)가 수행되어 형성연대와 고해양환경에 대한 상당한 연구성과가 축적되어 왔으나, 이에 비해 층서 및 퇴적압상에 대한 정보는 아직까지도 충분치 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 서귀포층 노두의 세부층서와 퇴적학적 특징을 상세히 기재하고 퇴적상 분석을 통하여 본 층의 퇴적환경을 규명하고자 한다.

2. 지질 개요

서귀포층 노두는 서귀포시 천지연 폭포 입구에서 서쪽으로 약 1.5 km에 걸쳐 남성리 해안단애를 따라 약 30 m 두께로 나타난다(Fig. 1). 층의 주향은 약 N10°E이며 3°~8°NW의 경사를 보인다. 주로 역질 사암, 사암, 사질이암, 이암 등으로 이루어져 있으며, 다양한 종류의 해양 체구화석(body fossil) 및 흔적 화석(trace fossil)과 함께 평행(엽)층리, 점이층리, 연흔 및 언덕사층리 등의 퇴적구조를 보인다(Yoon and Chough, 1990; 김정률·허원혁, 1995; 윤석훈·조성권, 1995). 서귀포층의 상부에는 약 30 m 두께의 화산쇄설성 이암과 각력암(혹은 집괴암)이 나타나며, 그 위를 제4기 화산암류인 천지연조면안산암(혹은 서귀포조면암)이 피복하고 있다(고기원, 1997; 제주도, 2000).

서귀포층의 형성연대는 산출화석의 대비와 고지자기 연구를 통해 제시되었는데, 그 결과는 다소 상이하게 나타난다. 초창기 화석 연구자들은 주로 연체동물이나 유공충 화석을 이용하여 형성시기를 플라이오세 후기에서 플라이스토세 후기까지 다양하게 해석하였다(김봉균, 1972; Yoon, 1981, 1988; Paik and Lee, 1986; Lee, 1990). 그러나 최근 Yi *et al.* (1998)은 석회질 초미화석의 연구를 통해 서귀포층의 형성시기를 Nannofossil Zone NN19에 해당하는 플라이오세 후기-플라이스토세 초기(180만년 전 ~ 85만년 전)로 제안하였으며, Li *et al.* (1999)은 부유성 유공충 분석을 통해 하부 서귀포층은 최소 40만년 전 이상의 중기 플라이스토세에, 상부 서귀포층은 최대 61만년 전 이후에 형성된 것으로 해석한 바 있다. 한편, 고지자기 연구 결과로 민경덕 외(1986)는 플라이오세 후기에서 플라이스토세 초기에 해당하

는 가우스 정자극기(Gauss normal chron)로, 윤상규 외(1986)는 플라이스토세 중기의 브뤼넬 정자극기(Brunhes normal chron)로 해석한 바 있으며, 김인수·이동호(2000)는 초미화석 연대와 연계한 고지자기 분석을 통하여 최고 188만년의 연령(Olduvai normal subchron)을 갖는 것으로 제안하였다.

다양한 해양화석을 포함하고 있어서 천연기념물 제195호로 지정되어 있는 서귀포층 노두에서는 1923년 일본인 지질학자 Yokoyama가 최초로 27종의 연체동물 화석을 보고하였으며, 본층을 서귀포층이라 명명한 Haraguchi (1931)는 연체동물, 완족류, 극피동물, 산호, 어류치아 등의 화석을 기재하였다. 1965년과 1972년에 김봉균은 72종의 저서성 유공충과 18종의 부유성 유공충을 기재하고, 온난한 외해(open sea)와 접한 연안(littoral) 환경에서 퇴적된 것으로 제안하였다. Yoon (1981)은 부족류(이매패), 복족류 및 완족류 등을 보고하였으며, 온난한 천해환경에서 형성된 것으로 주장하였다. Paik and Lee (1986)와 박근배 외(1986)는 개형층군에 대한 분석결과에 의거하여 형성시기를 플라이오세에서 플라이스토세, 형성환경을 온난해류의 영향을 강하게 받는 만에서부터 외해 환경까지 다양하게 나타나는 것으로 해석하였다. 또한 유환수 외(1987)는 11종의 미화석을 추출하였으며 천해 및 외해 환경에서 퇴적된 것으로 보고하였다. 최근에 Yoon (1988)은 54종의 연체동물 화석을 기재하고, 플라이오세 말기에 온난수 및 냉수의 영향을 혼합적으로 받는 연안의 천해 환경에서 퇴적된 것으로 제안하였다. 한편, Yi *et al.* (1998)은 서귀포층의 하부는 한류의 영향이 강한 환경에서 퇴적되었으며, 중부에서는 한류의 영향이 다소 약화되었고, 상부는 한류의 영향이 감소된 난류환경에서 퇴적된 것으로 해석하였다.

3. 연구 방법

본 연구에서는 야외지질조사를 통해 서귀포층 노두의 육안적 특징(형태, 입도특성, 퇴적구조, 구성입자성분, 생흔구조 등)을 기술하고, cm-스케일의 상세한 지질주상도를 작성하였다. 아울러 암석 시료를 채취하여 편광현미경 하에서 구성광물을 분석하였으며, 미고화 사질층에서는 입도분석(체질법)과 X-선 사진을 이용한 퇴적구조분석도 실시하였다.

4. 퇴적상

서귀포층을 구성하고 있는 퇴적암에서는 퇴적구조 및 입도를 퇴적상 구분의 주요기준으로 할 때, 12개 퇴적상을 구분할 수 있다(Table 1).

4.1 생물교란 역질사암(GS1) 및 니역질사암(mGS1)

퇴적상 GS1은 생물교란을 심하게 받은 탄산염암 층으로서, Dunham (1962)의 석회암 분류기준에 따르면 입자암(grainstone) 내지 팩스톤(packstone)에 해당된다. 개별 퇴적상은 대부분 수 십 cm에서 1 m 사이의 단독 혹은 융합(amalgamation)된 층으로 나타난다. 퇴적물은 주로 이매패류나 산호 등의 파편으로 이루어져 있으며, 원마도가 비교적 양호한 화산암편(왕모래-잔자갈 크기)을 일부 포함하고 있는데, 층의 하부에 집중되어 전체적으로 점이층리의 양상을 띤다. 패류화석은 종류와 크기가 다양하며, 아래로 오목하게(concave down) 놓여있는 것이 우세하다. 일부에서는 하위 층에서 뜯겨진 반고화 상태의 니질사암편이 나타나기도 한다. 생물교란은 층 전반에 걸쳐 있으나, 특히 층의 상부에 집중적으로 나타난다. 한편, 퇴적상 mGS1은 니질 함량이 다소 높아 왁스톤(wackestone) 또는 팩스톤으로 분류되며, 조직 특성을 제외하면 퇴적상 GS1과 거의 동일하다.

전반적인 점이층리를 보이는 GS1 및 mGS1 퇴적

상은 다양한 종류의 생물골격 및 그 파편 그리고 원마도가 비교적 양호한 화산암편, 그리고 일부 고화되지 않은 위로 뜯긴 암편(rip-up clast)이 불규칙하게 혼재하는 층으로서 태풍이나 폭풍 등의 강한 해수운동, 즉 폭풍쇄류(storm surge)에 의해 유동되어 급작스럽게 퇴적된 폭풍퇴적층(storm deposit)과 암상과 조직이 매우 유사하다. 현생의 폭풍에 의해 형성된 연안 폭풍퇴적층은 일반적으로, 하부경계면이 뚜렷하고, 생물파편 등 조립의 입자들이 집중되어 전반적으로 상향세립화의 조직적 특성을 보이며, 층의 상부에서는 퇴적 후의 생물교란구조나 해초류 생장 흔적이 발달하고, 짧은 기간에 유동되어 퇴적되기 때문에 화석의 보존가능성이 높다(Aigner, 1985). 이러한 폭풍퇴적층은 퇴적된 후 환경조건이 퇴적당시의 조건과 다르기 때문에, 재동(reworking)되는 것이 일반적이는데, 융합되어 나타나는 본 퇴적상들 사이에 협재하는, 아래로 엮어진 연체동물 패류화석(주로 10~20 cm 크기의 Pectenid)들은 이러한 폭풍 후의 호기상조건(fair-weather condition)하에서 집적된 것으로 추정된다.

4.2 평행층리 역질사암(GS4) 및 사암(S4)

퇴적상 GS4는 판상의 평행층리를 보이는 화산암편과 생물파편(주로 패류화석)으로 이루어진 역질사암층이다. 구성입자는 대부분 중간 원마도를 갖는 왕

Table 1. Sedimentary facies classification scheme for Seoguiipo Formation.

Class GS:	Gravelly sandstone (gravel 5-20%; sand 80-95%; mud <20%)
Facies GS1:	Bioturbated gravelly sandstone
Facies mGS1:	Bioturbated muddy gravelly sandstone
Facies GS4:	Parallel-stratified gravelly sandstone
Facies GS5:	Cross-stratified gravelly sandstone
Class S:	Sandstone (gravel <5%; sand >80%; mud <20%)
Facies S1:	Bioturbated sandstone
Facies S2:	Massive sandstone
Facies S3:	Graded sandstone
Facies S4:	Parallel-laminated sandstone
Facies S5-1:	Ripple cross-laminated sandstone
Facies S5-2:	Hummocky cross-laminated sandstone
Class MS:	Muddy sandstone (gravel <5%; sand 48-80%; mud 48-20%)
Facies MS1:	Bioturbated muddy sandstone
Class M:	Mudstone (gravel <5%; sand <20%; mud >80%)
Facies M2:	Homogeneous mudstone

모래 크기의 역과 조립 내지 중립의 모래로서, 퇴적상 GS5(대규모 사층리 역질사암)와 같고 동일한 층단위 내에서 관찰된다. 층리는 서로 다른 입도의 사질 혹은 역질 입자의 평행한 배열이 교호하여 이루어진다. 그러나 층리 간의 입자분급(grain segregation)이 불량하여 수평연장성과 층리의 명확성은 그다지 좋지 않으며, 수직적인 층리 두께의 변화도 체계적이지 못하다. 평행층리 역질사암에는 화석은 많이 포함되어 있으나 생물교란구조는 거의 관찰되지 않는데, 패류화석이 포함되어 있는 경우에는 대부분 아래로 오목하게 놓인 채 층리에 평행하게 배열되어 있다. 한편, 평행층리 사암(퇴적상 S4)은 1~5 cm 두께의 세립 내지 조립의 사암으로서, 역질사암에 비해 층리의 수평연장성이 양호하고, 상하 경계면은 비교적 뚜렷하고 평탄하다.

사암에 나타나는 평행층리는 퇴적물이 평탄한 퇴적면을 유지하면서 집적될 때 형성된다. 일반적으로 평탄층(flat bed)은 유속이 빠르고 얇은 수심 조건의 상부 유권(upper flow regime)에서 빠른 수류의 저면유동(traction)에 의해 형성되는 것으로 알려져 있다(Collinson and Thompson, 1982). 평탄층은 하천류나 조류와 같은 일방향성 유수에 의해서도 형성되지만, 해안에서는 파도와 같은 양방향성 유수에 의해서도 형성될 수 있다. 한편, Reineck and Singh (1980)은 상부 유권에서 평행층리가 형성되는 것이 일반적이지만, 조립질 모래의 경우에는 하부 유권에서도 충분한 퇴적물 공급이 이루어진다면 평행층리가 형성될 수도 있다고 제안하였다.

4.3 대규모 사층리 역질사암(GS5)

퇴적상 GS5는 대규모 사층리를 보이는 화산암편과 생물파편으로 이루어진 역질사암층으로서 입자 지지(clast-supported) 되어 있다. 구성입자는 대부분 중간 정도의 원마도를 갖는 왕모래 크기의 역과 조립 내지 중립의 모래이며, 니질 퇴적물은 거의 포함되어 있지 않다. 퇴적구조로는 대규모의 판상 또는 곡형의 사층리 구조가 나타나는데, 사층리 세트(set)의 두께는 5~30 cm이며, 사층리의 각도는 5~30°로 다양하게 나타난다. 사층리의 이동방향은 관찰노두에 따라서 단일방향 또는 양방향이며, 사층리면을 따라 두께 1 cm 이하의 니질 또는 세립사질 퇴적물 켜(lamina)가 협재하거나, 패류화석이 아래로 오목하게

배열되어 있다. 생물교란구조는 거의 관찰되지 않는다.

대규모의 사층리는 일반적으로 거대연흔, 모래파, 연안사주 등의 퇴적면 구조가 해류의 영향으로 전진하면서 형성되거나, 또는 수로(channel)가 이동할 때, 경사진 수로의 측면이 수평이동 되면서 형성되는 것으로 알려져 있다(Reineck and Singh, 1980; Collinson and Thompson, 1982).

4.4 생물교란 사암(S1)

퇴적상 S1은 일차 퇴적구조가 거의 관찰되지 않는 반고화의 사암층으로서 융합되어 나타난다. 구성 입자의 90% 이상이 분급이 양호한 세립질 또는 극세립질 모래(평균입도 약 3Φ)이며 니의 함량은 대부분 5% 이하이다. 모래입자의 상당부분이 각형의 석영 입자이며, 반면 화산암편은 거의 관찰되지 않는다. 층 전반에 걸쳐 나타나는 생물교란은 전반적으로 *Skolithos*가 우세하며, 수 개의 층준에서 Pectenid 화석과 수평의 *Planolite* 흔적화석이 나타나지만, 일차 퇴적구조는 X-선 사진에서도 관찰되지 않는다.

세립의 모래로 이루어진 본 퇴적상은 니질 퇴적물의 함량이 8%이하로 매우 적고, 분급이 양호하며, 구성퇴적물의 상당량이 석영인 점을 고려하면, 주로 염기성 화산암으로 구성된 당시 제주도 내륙지역으로부터의 퇴적물 유입이 극히 제한된 조건 또는 환경에서 형성된 것으로 보이며, 장기간에 걸쳐 해류나 해파에 의해 니질 퇴적물이 재동되어 버리고 남은 퇴적층으로 해석된다. 해류나 해파에 의해 퇴적물이 재동될 경우에는, 물리적인 퇴적구조가 형성될 수 있는데, 이는 생물의 활발한 교란작용에 의해 지워져 버린 것으로 추정된다.

4.5 괴상 사암(S2)

퇴적상 S2는 비교적 분급도가 양호한 세립 내지 조립의 모래로 구성된 사암으로서 내부 퇴적구조가 없는 것이 특징이다. 단위 퇴적상의 두께는 1~5 cm로 비교적 얇지만 수평연장성은 비교적 양호하다. 상의 경계면은 뚜렷하거나 점이적이며 비교적 평탄하다. 조립 입자로 구성된 퇴적상은 원마도가 불량한 화산암편으로 이루어져 있으며, 이에 비해 세립 입자의 퇴적상은 화산암편의 함량이 매우 적다.

내부 퇴적구조가 나타나지 않는 괴상의 사암의 퇴적기구로서 Pickering *et al.* (1986)은 강한 해류나 해

파에 의한 체질작용(winnowing)을 제안하였으며, 이를 잔류퇴적층의 한 특성으로 보고하였다. 또한 좀 더 두께가 작은 층내의 괴상구조는 퇴적물을 많이 포함하는 일반 해류나 고농도 저탁류가 급속히 감소될 경우, 밀집 또는 뜬짐으로 운반되던 입자들이 급작스럽게 퇴적되어 형성될 수도 있다(Collinson and Thompson, 1982).

4.6 점이층리 사암(S3)

퇴적상 S3은 극세립 내지 극조립의 모래로 구성된 사암으로서 정점이층리를 특징적으로 보인다. 층의 두께는 보통 5~10 cm이며, 간혹 희미한 박층리를 보이기도 한다. 층의 하부 경계면은 평탄한 침식면이지만, 조립 또는 중립 모래로 구성된 연흔사층리 구조 위를 덮을 경우의 경계면은 매우 점이적이며, 파형으로 나타난다.

점이층리는 퇴적물을 운반하던 해류가 운반능력(유속)이 감소함에 따라 퇴적물이 침전되는 경우, 퇴적물 입자의 침전속도에 의한 수직적인 입자별 분급이 일어나서 형성되는 퇴적구조이다. 이러한 구조는 저탁류 퇴적층에서 전형적으로 보고되는데, 이 경우, 점이층리는 단독으로 나타나거나, 그 위에 수평층리, 연흔층리 등의 순차적인 퇴적구조를 동반한다(Pickering *et al.*, 1986). 한편, 점이적인 경계면을 갖고 사층리의 상부에 나타나는 경우의 정점이층리는 해류의 속도가 감소되면서 유권의 변화에 의해 연흔의 수평이동이 멈추고, 뜬짐으로 이동되던 퇴적물들이 침전되면서 형성된 것으로 해석되며, 이는 전형적인 저탁류 퇴적층에서와는 양상이 다르다.

4.7 사엽층리 사암(S5)

퇴적상 S5는 세립에서 조립의 모래로 구성된 사암으로서, 사층리의 형태에 따라 연흔사층리(ripple cross-laminated) 사암과 언덕사층리 사암(hummocky cross-laminated sandstone)으로 구분할 수 있다.

4.7.1 연흔사층리 사암(S5-1)

연흔 사층리 사암은 세립 내지 조립질 모래로 구성된 사암으로서, 연흔의 수평이동에 의해 형성된 상승연흔(climbing ripple) 사층리가 나타난다. 사층리 세트의 외형은 판상(tabular)이며, 두께는 2~3 cm이다. 연흔의 파장은 15~20 cm이며, 노두에서의 높이는

2 cm 내외이다. 연흔사층리 사암은 단독으로 나타나거나 혹은 소규모 언덕사층리 사암으로 전이된다.

연흔사층리는 연흔의 수평이동에 의해 후사면(lee-side)의 경사진 층리가 보존되면서 형성된다. 한편, 퇴적물 공급이 풍부하고 재동의 영향이 약한 조건에서는 후면뿐만 아니라 연흔의 오르막사면(stoss-side)에서도 퇴적이 일어나면서 층리가 보존되기 때문에 상승연흔사층리가 발달하게 된다.

4.7.2 언덕사층리 사암(S5-2)

세립 내지 중립의 모래로 구성된 언덕사층리 사암에서는 완만하게 굴곡이 진 대칭 또는 비대칭의 파형(파장 15~20 cm)의 층리가 관찰된다. 또한 층의 경계면과 저각도(약 15° 이하)를 이루며, 상위에 연속적으로 놓이는 층의 층리에 의해 상부가 부분적으로 침식되어 형성된 재활성면(reactivation surface)이 나타난다.

언덕사층리는 일반적으로 태풍이나 폭풍에 의해 형성된 퇴적층에서 특징적으로 보고되고 있는데, 강한 파도와 수류가 복합적으로 작용되어 생기는 파형해류(oscillatory flow)에 의해 형성되는 것으로 해석되고 있다(Myrow and Southard, 1990). 본 퇴적상에서 관찰되는 언덕사층리의 파장은 15~20 cm로서, 일반적으로 보고되고 있는 언덕사층리의 파장 1~6 m보다는 매우 작으며, 비대칭적인 층리의 특성으로 보아 파형의 퇴적면구조가 수평방향으로 점차 이동되면서 집적되어 형성된 것으로 추정된다. 서귀포층의 소규모 언덕사층리는 연흔 사층리에서 점이적으로 변형되거나, 연흔사층리와 자주 함께 나타나는 것으로 보아, 연흔의 형성조건과 유사한 하부유권에 속하는 파동류(oscillatory current)에 의해 형성된 것으로 보인다.

4.8 생물교란 니질사암(MS1)

퇴적상 MS1은 니질 퇴적물을 포함하는 분급이 다소 불량한 사암층으로서, 두께는 50~80 cm로 비교적 두껍게 나타난다. 층 전반에 걸쳐 생물교란을 심하게 받았으며, 주로 수직의 *Psilonichmus* 흔적화석상이 나타난다.

4.9 균질 이암(M2)

내부 퇴적구조가 없는 균질 이암은 실트 또는 실

트질 점토로 이루어진 층으로서, 사암층 사이에 1 cm 이하의 얇은 켜로 나타나거나, 미화석을 포함하며 수 cm에서 1.5 m의 두께로 나타나는데, 침식된 부분을 제외하고는 수평적인 두께의 변화가 거의 없다. 박층의 균질 이암은 얇은 사암층과 교호하면서 나타나는데, 경계면이 비교적 뚜렷하며, 층 전체 혹은 부분적으로 침식되어 있다. 두꺼운 이암층의 경계는 비교적 점이적이며, 부분적으로 생물교란구조가 관찰된다.

균질한 이암은 뜬짐으로 이동되던 세립의 입자들이 저에너지 환경조건에서 침전되어 형성된 것으로 해석된다. 특히 두꺼운 이암은 이류(mudflow) 등과 같은 질량류에 의해서도 단기간에 퇴적될 수도 있으나, 서귀포층의 두꺼운 이암은 부분적으로 생물교란되어 있기 때문에 이러한 퇴적기구가 적용되지는 않을 것으로 보인다.

5. 층서

야외조사를 통해 기재된 약 30 m 두께의 서귀포층 노두는 암상, 화석포함 여부, 경계면 특성 등을 고려할 때, 총 14개의 층단위로 세분된다. Fig. 2는 3개의 야외조사 정점의 노두를 종합한 서귀포층의 표준지층단면(type section)으로서 10개의 화석포함 층단위와 4개의 화석비포함 층단위(III, IX, XI, XIII)로 구성된다.

5.1 층단위 I

층단위 I은 생교란된 반고화의 니질사암층(퇴적상 MS1)으로 구성되며, 서귀포층 노두의 최하부에 해당된다. 구성 입자는 대부분 중립 모래 크기이며, 탄산염 생물파편이 우세하게 나타난다. 층단위 II와의 상부 경계면은 비교적 뚜렷하게 나타난다(Fig. 2). 본 층단위의 전반적인 특성은 층단위 VII과 매우 유사하다.

5.2 층단위 II

층단위 II는 분급이 불량한 생물교란 역질 사암(퇴적상 GS1)으로 구성되어 있다. 다양한 종류와 크기의 해양화석(Pectenid, 따개비, 굴 등)과 소량의 원마도가 양호한 현무암편(역 또는 모래 크기)이 혼재되어 나타나며, Dunham (1962)의 석회암 분류기준에

따르면 입자암 내지 팩스톤에 해당된다(Fig. 3a). 이들 입자들은 중립 내지 세립 모래 크기의 생물파편 기질(matrix)로 충전되어 있다. 패류화석들은 대부분 아래로 오목하게 놓여 있으며, 상당수 화석들이 부서지거나 마모되어 나타난다. 층단위의 최상부에서는 10여 cm 두께의 분급이 비교적 양호한 세립질 괴상 사암(퇴적상 S2)이 점이적으로 하부 역질사암층을 덮고 있다(Fig. 2).

5.3 층단위 III

층단위 III은 뚜렷한 상하부 경계면을 보이는 약 2 ~ 2.5 m 두께의 화석비포함층으로서 주로 화산기원 퇴적물로 구성되어 있다. 두께 10 cm 이하의 얇은 사암층과 이암층이 교호하면서 뚜렷한 층리(bedding)를 형성하고 있으며(Fig. 3b), 상부로 갈수록 협재되는 이암의 두께가 얇아지고 교호되는 횡수도 적어져서 사암이 두껍게 융합되어 나타난다(Fig. 2). 대부분의 사암과 이암은 황갈색 내지 갈색을 띠지만, 일부 암회색을 띠는 사암은 주로 원마도가 불량한 화산암편으로 구성되어 있다. 층단위를 이루는 개별층들은 수평연장성이 비교적 양호하며, 두께의 변화도 거의 나타나지 않는다. 사암층에서는 괴상(S2), 점이층리(S3), 평행층리(S4), 연흔사층리(S5-1) 등이 관찰되는데, 점이층리 사암은 주로 층단위의 하부에, 연흔사층리 사암은 상부에 우세하게 나타난다. 연흔은 비대칭적이며 파장 10 ~ 15 cm, 높이 1 cm 이하로서 고화되는 동안 수직방향으로 상당히 압축된 것으로 보인다. 평면상에서 연흔 정선(crest line)은 직선형 또는 파형으로 나타나며, 내부 사층리 방향으로부터 남쪽으로 이동하는 수류에 의해 형성되었음을 추정할 수 있다(Table 2). 층단위의 상부경계부는 불규칙한 침식면으로 되어 있으며, 층단위 IV에서 시작된 생물서식구조에 의해 부분적으로 교란되어 있다.

5.4 층단위 IV

약 1 m 두께의 층단위 IV는 생물교란을 심하게 받은 녹회색의 탄산염 니질사암(퇴적상 mGS1과 MS1)으로서, 왁스톤에 해당된다. 주로 생물파편으로 구성되며, 화산암편과 비교적 온전한 형태의 패류화석을 소량 포함하고 있다. 생물교란은 거의 층단위 전체에 걸쳐 관찰되며, 주로 *Pylonichmus* 흔적화석상이 우세하다(Fig. 2). 패류화석은 층경계면에 경사지

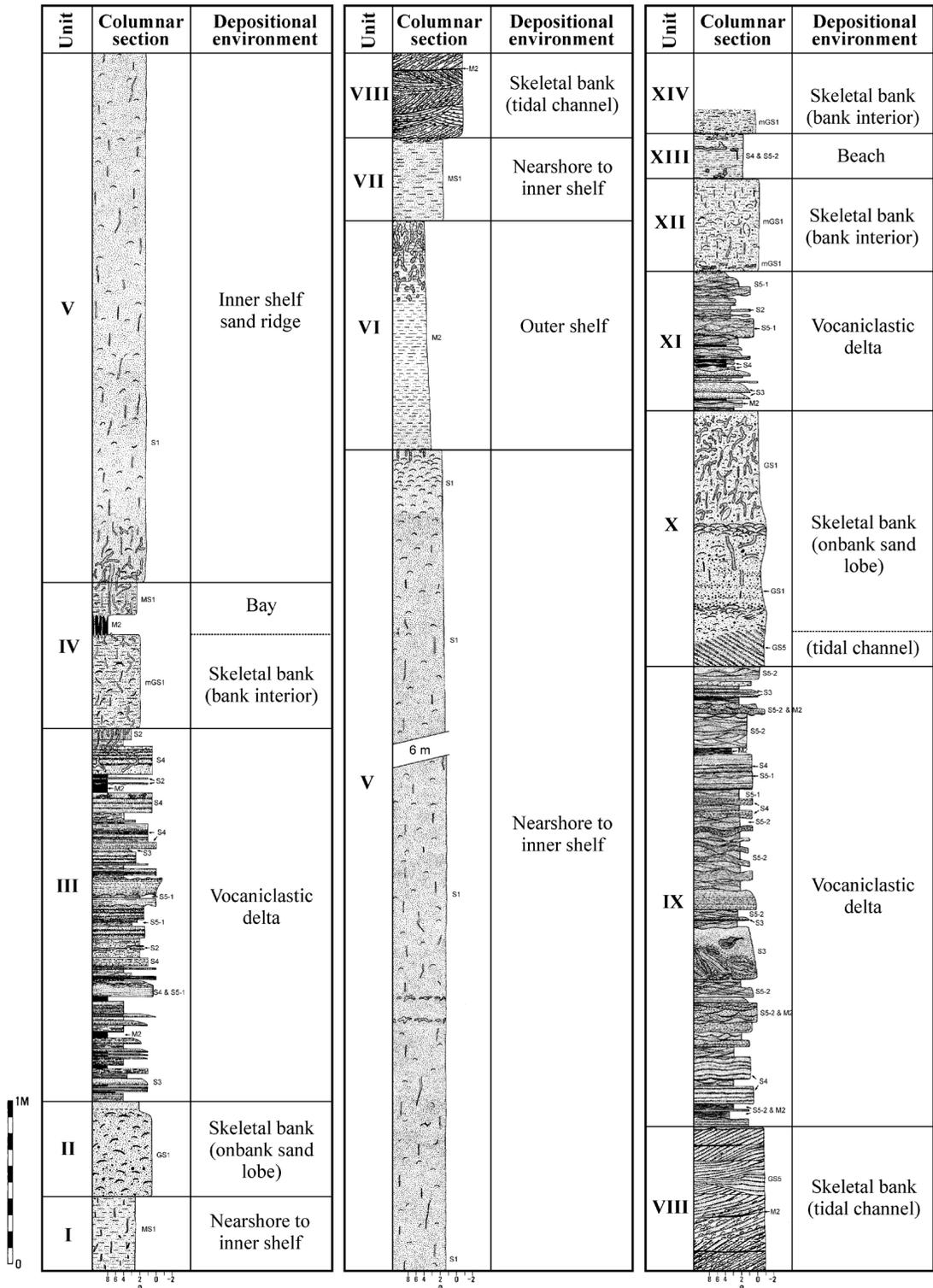


Fig. 2. Columnar section of Seoguipo Formation showing stratigraphy, sedimentary facies and depositional environment. For sedimentary facies code, see Table 1.

Table 2. Paleocurrent data measured from ripple forms and cross-stratification.

Seq. unit	Sed. facies	Sedimentary structure	Direction of paleocurrent
III	S5-1	Current ripple	S30°E
III	S5-1	Current ripple	S27°E
III	S5-1	Current ripple	S46°W
VIII	GS5	Planar cross-stratification	N70~80°E, N20~30°E
IX	S5-1	Current ripple	S10~20°W
X	GS5	Planar cross-stratification	N82°E
XI	S5-1	Current ripple	S37°E
XI	S5-1	Current ripple	S13°E

거나 또는 불규칙하게 놓여 있는데, 심한 생물교란의 영향으로 추정된다. 층단위의 중간에는 약 10 cm 두께의 균질 이암층(M2)이 협재하며, 생물교란에 의해 층경계면이 부분적으로 변형되었다.

5.5 층단위 V

층단위 V는 미고화의 생물교란 사암층으로서 구성입자의 90% 이상이 분급이 매우 양호한 세립질 모래(평균입도 2.2~3.1Φ)이며(Table 3), 석영입자가 우세하게 나타난다. 두께가 15 m에 달하는 두꺼운 층단위이지만, 층리(bedding)나 기타 퇴적구조는 전혀 관찰되지 않는다(Fig. 2). 층단위 전반에 걸쳐 균일하지는 않지만 수직의 생물서식구조인 *Ophiomorpha* (지름 1.5~2 cm, 길이 10~15 cm)가 관찰되며(김정률·허원희, 1995), 대부분 아래로 오목하게 놓인 패류 화석은 본 층단위의 하부에서 우세하게 산출된다. 아울러 수평의 생물서식구조와 2~3 cm 크기의 이매 패류로 구성된 화석집중대가 다수의 층준에서 관찰되기도 한다(Fig. 2). 층단위의 상하부 경계면은 침식

면은 아니지만 비교적 뚜렷하게 나타난다.

5.6 층단위 VI

고화되어 있지 않은 층단위 VI은 두께 1.3~1.5 m의 균질 이암층(M2)이다. 구성 퇴적물의 평균 입도는 약 8Φ이며 모래입자의 함유량이 5% 이하로 매우 적고(Table 3), 상부로 가면서 약간의 세립화 경향을 보인다(Fig. 2). 전반적으로 층단위 최상부를 제외하면 뚜렷한 생물서식구조가 나타나지 않지만, 층단위의 중간에는 수 cm 크기의 Pectenid 패류화석이 얇은 렌즈상으로 협재되어 나타나기도 한다. 층단위 최상부 50 cm 구간에서는 상위의 층단위 VII에서 시작된 수직 생물서식구조가 나타나며, 이들은 모두 사질 퇴적물로 충전되어 있다. 상하부 층경계면은 침식면은 아니지만 비교적 뚜렷하고 평탄하다.

5.7 층단위 VII

층단위 VII은 0.4~0.5 m 두께의 미고결 니질사암층(퇴적상 MS1)으로서, 생물교란을 심하게 받았으

Table 3. Results of grain size analysis.

Sample No.	Seq. unit	Sedimentary facies	Size distribution (%)				Sediment type	Mean size (phi)	Sorting
			Gravel	Sand	Mud				
GS-1	V	S1	1.6	96.1	2.3	Sand	2.23	0.52	
GS-2	V	S1	0.0	98.5	1.5	Sand	2.57	0.30	
GS-3	V	S1	0.0	92.9	7.1	Sand	3.11	1.70	
GS-4	V	S1	0.3	96.3	3.3	Sand	2.67	0.48	
GS-5	VI	M2	0.8	5.0	51.7	42.5	Mud	7.69	2.70

며 전반적으로 황갈색을 띤다. 모래입자는 중립질이며, 염산반응을 하는 것으로 보아 생물기원 입자가 상당량 포함되어 있는 것으로 보인다. 층단위 VI과의 경계면은 생물의 활동에 의해 심하게 교란되어 불규칙하게 나타난다(Fig. 2).

5.8 층단위 VIII

층단위 VIII은 1~1.5 m 두께의 기질지지 역질사암층으로서 화산암편의 역과 비교적 온전한 형태의

패류와 복족류 화석을 포함하고 있다. 층단위의 하부 경계면은 비교적 불규칙한 침식면으로 나타난다(Fig. 2). 본 층단위에서는 층리가 다소 불명확한 수평 평행층리(퇴적상 GS4)와 저각도 혹은 고각도 사층리(퇴적상 GS5)가 관찰되는데, 서귀포층 노두의 동부에서는 주로 사층리 역질사암이 우세하고(Fig. 3c), 서부로 가면서 점차 평행층리 역질사암으로 대체된다. 생물교란구조는 거의 관찰되지 않지만, 다양한 화석이 포함되어 있는데, 사층리 역질사암에 포함된

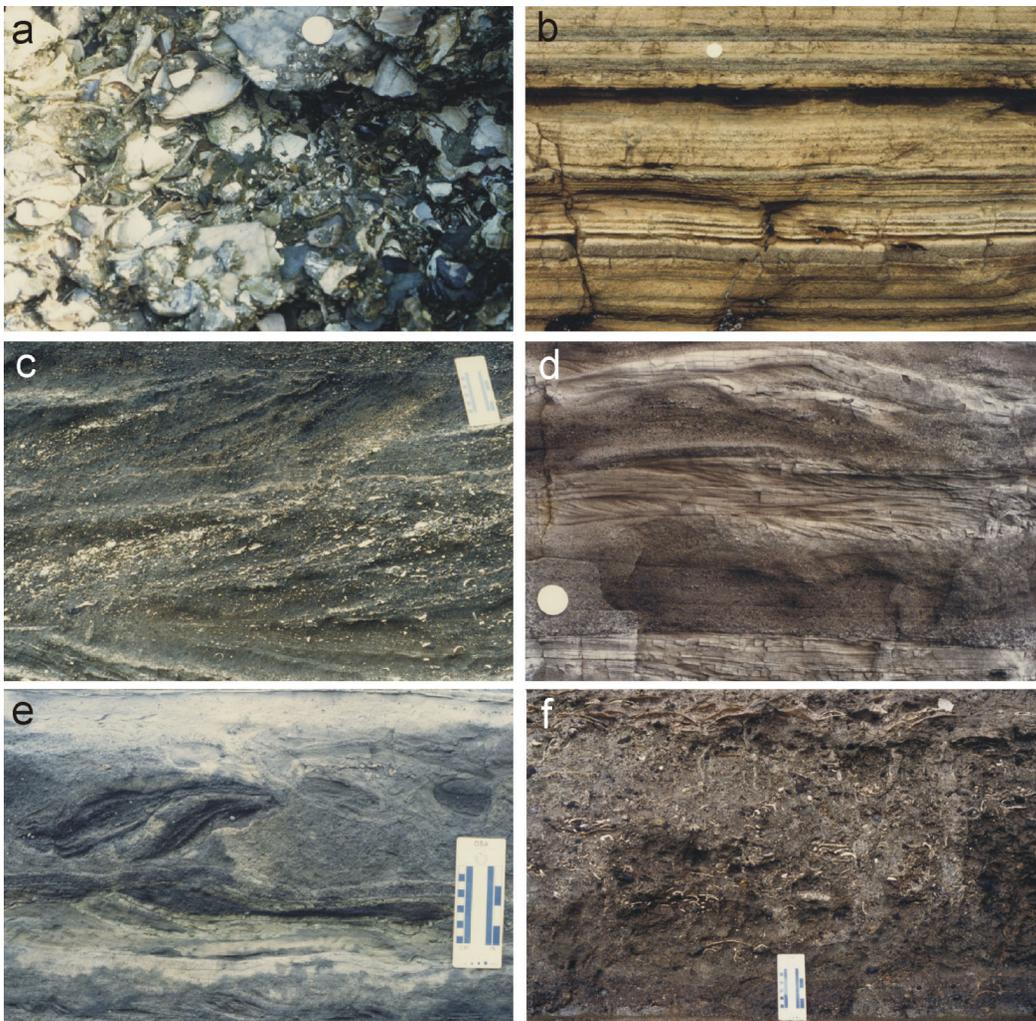


Fig. 3. (a) Sequence unit II consisting of molluscan shells tightly cemented by disarticulated biogenic fragments. (b) Unit III characterized by parallel stratification and absence of fossils. (c) Unit VIII showing planar to trough cross-stratification. (d) Unit IX showing alternation of cross-laminated fine-sand layers and massive to graded coarser sand layers. (e) Convolution structure as a result of slumping in unit IX. (f) Unit X consisting of amalgamated shell beds.

화석에 비해 평행층리 역질사암에 포함된 화석이 보존상태가 양호하며 이들은 대부분이 아래로 오목하게 놓여 있다.

사층리 세트는 5~30 cm 두께이며 곡형(trough) 또는 판상형(tabular)으로 나타나는데, 층단위 하부에서 상부로 가면서 세트의 두께가 다소 감소하고 형태는 곡형에서 판상형으로 바뀐다. 패류화석은 *Glycymeris* sp.와 *Pectenid*가 우세하며, 아래로 오목한 상태로 사층리면과 평행하게 배열되어 있다. 일부 두께 1 cm 내외의 니질 켜(layer)가 층리를 따라 협재하기도 한다. 다양한 층으로 구성된 패류화석은 주로 층단위의 하부에 집중되어 있으며, 상부로 갈수록 양이 감소하고 대신 화산기원의 퇴적물이 우세하게 관찰된다. 층단위 상부를 구성하는 역 또는 모래 입자는 일부 산화되어 나타난다.

5.9 층단위 IX

층단위 IX는 이암과 사암의 교호층으로서 화석이 전혀 나타나지 않는다(Fig. 2). 층단위의 두께는 2.6~2.8 m로서 1 km에 이르는 조사지역 내에서의 수평적 층후의 변화는 20 cm 이하로 매우 작으며, 이암과 사암의 수평연장성도 매우 양호하다. 본 층단위의 특성은 조립질의 화산암편이 우세한 사암과 화산암편이 적은 세립질 사암층의 교호이며(Fig. 3d), 수 mm 두께의 실트질 또는 점토질 켜가 자주 협재하며, 이 켜는 1 km 이상 떨어진 노두에서도 대비될 만큼 수평연장성이 양호한 경우도 있다. 사암에서는 점이층리(S3), 수평평행층리(S4), 연흔사층리(S5-1), 소규모 저각도 사층리 또는 언덕사층리(S5-2) 등의 다양한 퇴적구조를 보인다(Fig. 2). 특히 층단위의 중간에는 사태(slump)에 의한 것으로 해석되는 회선구조(convolution)를 보이는 층이 동부노두에서 30~40 cm 두께로 나타나며(Fig. 3e), 이 층은 서쪽으로 가면서 점차 얇아져서 서부 노두에서는 5 cm 이하의 점이층리를 보이는 층으로 연결된다. 비대칭 연흔의 형태로부터 측정된 고수류의 이동방향은 북쪽에서 남쪽이었던 것으로 보인다(Table 2). 층단위의 상부로 가면서 원마도와 분급이 불량한 화산암편으로 구성된 사암층이 우세하게 나타나며, 화산재가 공중에서 핵을 중심으로 달라붙어 형성된 약 0.5 cm 크기의 부가화산력(accretionary lapilli)이 수 개의 층준을 따라 수평으로 배열되어 있다. 층단위 상부경계면은

뚜렷한 침식면이며, 생물 활동에 의해 형성된 천공구조(boring)가 집중적으로 나타난다. 한편, 층단위의 하부경계면은 비침식면으로서, 일부에서는 하위 층단위 VIII에서와 유사한 얇은 역질사암층이 한 두 차례 협재하는 경우도 관찰된다.

5.10 층단위 X

서귀포층 노두에서 패류화석이 가장 풍부하게 산출되는 층단위 X은 두께가 1.5~2 m이며, 생물교란 역질사암(퇴적상 GS1)으로 구성된 다수의 층이 융합되어 나타난다(Fig. 2). 대부분 조립질 생물파편으로 이루어져 있어서, 입자지지(clast-supported)의 입자암 내지 팩스톤으로 분류되며(Fig. 3f), 원마도가 비교적 양호한 화산암력을 소량 포함하고 있다. 산출되는 화석은 이매패류, 완족류, 복족류, 산호 등 종류와 크기가 다양하며, 온전한 상태로 보존되어 있는 것들은 대부분 아래로 오목하게 놓여있으나 그 외의 방향으로 불규칙하게 놓인 것들도 다수 관찰된다. 층단위 중간에는 대형 *Pectenid*들이 집중적으로 쌓여 수평연장성이 양호한 *Pectenid*층(약 10 cm 두께)을 이루고 있다(Fig. 2). 생물교란구조는 층전반에 걸쳐 관찰되는데, *Pectenid*층 하부에는 주로 *Ophiomorpha*나 *Skolithos*와 같은 수직의 생물서식구조들이 대부분 *Pectenid*층을 시점으로 하여 하부로 발달되어 있다. *Pectenid*층 상부의 생물교란구조는 불규칙한 양상을 띠며 층전반에 걸쳐 산재하는데, *Psilonichnus* 흔적화석상과 관련된 수직의 생물교란구조가 우세하게 나타난다. 한편, 본 층단위 최하부의 일부 노두에서는 최대 30 cm 두께의 판상(planar) 사층리 역질사암층(퇴적상 GS5)이 렌즈형태로 협재하기도 한다(Fig. 2). 이 역질사암층은 대부분 원마도가 보통 또는 비교적 양호한 화산암력 또는 모래로 구성되어 있으며 탄산염물질로 고결되어 있다. 그러나 육안으로 확인할 수 있는 화석은 거의 나타나지 않는다. 이 사층리 역암의 하부 경계는 뚜렷한 침식면인 반면, 상부 생물교란 역질사암층으로의 변화는 매우 점이적이어서 경계면이 뚜렷하지는 않다.

5.11 층단위 XI

층단위 XI은 약 1 m 두께의 화석비포함층으로서 다양한 1차 퇴적구조를 보이는 이암 및 조립질, 세립질 사암의 교호층이다. 조립질 사암은 원마도가 불량

한 화산암편이 우세하며, 세립질 사암은 화산암편의 양이 상대적으로 적다. 이암은 동부 노두에서 층단위의 하부에 다수 협재되나, 서부 노두에서는 나타나지 않는다. 본 층단위의 사암층에서는 괴상(S2), 점이층리(S3), 평행층리(S4) 사암과 함께 상승연흔사층리(S5-1)가 특히 층단위의 상부에서 우세하게 관찰된다(Fig. 2). 이들의 이동방향은 대략 남동방향으로서 여러 층준에서 유사한 이동방향을 보인다(Table 2). 층단위의 하부경계면은 뚜렷하고 평탄한 면이나 침식의 증거는 발견되지 않는다. 상부경계면은 불규칙한 침식면으로서 생물 서식구조인 튜브형의 천공구조가 밀집되어 나타난다.

5.12 층단위 XII

층단위 XII는 화석을 포함하는 역니질 사암층(퇴적상 mGS1)으로서 대부분 생물파편(악케스톤 내지 팩스톤)에 해당된다. 소량의 화산암 역과 모래를 포함하고 있으며, 층후는 55~70 cm이다(Fig. 2). 화석은 층단위 X에서와 유사한 연체동물 패류와 산호 등이 산재하는데, 패류화석이 놓여 있는 방향은 아래로 오목한 것들이 우세하지만, 위로 오목하게 뒤집어진(concave up) 것이나 수직으로 선 것들도 다수 관찰된다. 또한 층단위 전반에 걸쳐 심한 생물교란과 다양한 생교란구조가 관찰되는데, 이 가운데 특히 수직의 *Skolithos*가 비교적 뚜렷하게 인지된다. 층단위의 하부 경계는 불규칙한 침식면으로 나타나는데, 하위 층단위 XI에서 뜯겨진 것으로 보이는 수 십 cm 크기의 황갈색 이암편 또는 니질사암편이 층단위 최하부에 집적되어 있다(Fig. 2). 이들 암편들은 뒤틀림과 같은 변형을 거의 받지 않았고 경계부가 뚜렷하며. 층단위 XI 최상부에서 관찰되는 것과 같은 생물서식구조인 튜브형 천공구조를 포함한다.

5.13 층단위 XIII

30~35 cm 두께의 층단위 XIII은 희미한 수평평행층리, 언덕사층리, 파형층리 등을 보이는 황회색의 니질사암(퇴적상 S4, S5-2)으로 이루어져 있다. 구성 퇴적물은 대부분 중립 내지 세립 모래 크기의 변질된 화산암편으로, 육안으로 구분되는 화석은 없으며, 기존 연구에서도 미화석이 보고된 적은 없다. 하부경계는 급격한 압상의 변화로 뚜렷하며 불규칙한 면으로 이루어져 있으나, 침식 및 결층의 여부를 확인하기는

곤란하다. 층단위의 중간에는 상위 층단위 XIV에서 시작된 것으로 보이는 생물서식구조가 관찰되며, 내부는 상위 층단위의 퇴적물로 충전되어 있다.

5.14 층단위 XIV

층단위 XIV는 약 1 m 두께의 화석을 포함하는 층으로서 주로 생물파편으로 된 악케스톤(퇴적상 mGS1)으로 이루어져 있다(Fig. 2). 전체적인 특징은 층단위 XII와 유사하나 니질 퇴적물의 함량은 다소 많은 편이다. 심한 생물교란이 나타나며, 흔적화석은 *Psilonichmus*로 분류될 수 있는 것들이 우세하게 관찰된다.

6. 퇴적 환경

6.1 화산쇄설물 삼각주(volcaniclastic delta)

서귀포층 노두의 상당부분은 패류화석을 포함한 다양한 해양생물기원의 입자로 이루어져 있지만, 이들 생물기원 퇴적층 사이에는 층단위 III, IX, XI, XIII 등 총 4개의 화산쇄설성 퇴적층이 나타난다. 이들 층단위들은 공통적으로 생물기원 입자를 거의 포함하지 않으며, 대부분 원마도가 불량하고 변질되지 않은 다공질의 현무암질 입자로 구성된다. 그러나 층단위 내에서는 연흔사층리, 언덕사층리, 평행층리, 점이층리 등 유수에 의한 다양한 퇴적구조가 나타난다. 이는 입도나 퇴적구조의 변화가 수평적으로는 매우 체계적으로 나타나지만, 수직적으로는 변화가 단조롭거나 거의 나타나지 않는 육상의 화쇄난류(pyroclastic surge)에 의한 응회암층(Sohn, 1996)과는 그 특성이 상이하다. 또한 이들 층단위의 상하부에는 해양화석을 포함하는 해성층이 나타나는데, 특히 하부 해성층과의 경계면은 뚜렷하지만 비침식면으로서, 해양퇴적의 연속성을 지시한다. 따라서 이들 층단위는 인근 육상의 응회암층으로부터 재동된 화산쇄설물이 바다로 유입되어 연안에 집적된 해성층으로 해석된다.

그러나 이들 층단위 내에는 패류화석을 포함한 해양생물기원 입자가 거의 전무하며, 상부 층단위에서 시작된 생흔구조를 제외하고는 생물활동의 증거도 거의 발견되지 않는다. 이는 비교적 단기간에 걸쳐 많은 양의 화산쇄설성 퇴적물이 지속적으로 공급되어 집적되었음을 반영하는 것으로서, 당시 해안 근처에 형성된 응회구(환)의 미고결 사면에 한시적으로

발달한 하천이 주요 운반 매체로서의 역할을 했던 것으로 추정된다.

한편, 층단위 XIII을 제외한 비화석 층단위들에서는 층단위의 하부에서 상부로 가면서 전반적으로 조립질 입자층의 두께와 출현빈도의 증가가 관찰되며, 이는 상향천해화(upward-shallowing)를 지시하는 것으로서, 하천에 의해 공급된 화산쇄설물들이 해류나 해파 등 해양작용에 의해 효과적으로 재동되지 못하고 하구 근처에 집적됨으로써 삼각주와 같은 외해로 전진하는 퇴적체를 형성하였던 것으로 추정케 한다(Fig. 4). 따라서 층단위 하부에 우세하게 나타나는 점이층리나 층단위 IX에서 관찰되는 사태층은 이러한 삼각주의 전면(delta front)에서 야기된 소규모 합물사태에 기인한 것으로 해석된다. 그러나 화산암편 함량이 적은 언덕사층리 사암(퇴적상 S5-2)이 층단위 IX와 XI에 협재하여 나타나는 것으로 보아, 화산쇄설성 삼각주는 간헐적으로 파도나 해류 등 해양작용의 영향을 받았던 것으로 보인다.

층단위 XIII에서는 언덕사층리 혹은 평행층리가 우세하게 나타난다. 이러한 퇴적상들은 대체적으로 강한 폭풍이나 해류의 작용을 지시하는데, 니질 퇴적물이 거의 없고, 생물교란이 관찰되지 않는 것으로 보아 지속적으로 강한 에너지조건이 유지되는 퇴적 환경에서 형성된 것으로 보인다. 따라서 본 층단위도 육상의 화산쇄설물이 하천에 의해 재동되어 바다로 유입되었다는 것을 전제로 한다면, 화산쇄설성 삼각주의 퇴적물이 연안류에 의해 다시 운반되어 해안에 집적된 해변(beach) 퇴적층으로 추정된다(Fig. 4).

6.2 생물편뱅크(skeletal bank): 폭풍퇴적층

풍부한 패류화석을 포함하고 있는 층단위 II, IV, X, XII, XIV에서는 폭풍퇴적층으로 해석되는 생물교란 역질 사암 혹은 역니질 사암(퇴적상 GS1과 mGS1)이 융합되어 나타난다. 천해 퇴적환경에 미치는 폭풍의 영향은 크게 폭풍파(storm wave)에 의한 해수의 왕복운동, 강한 바람과 파도에 기인한 폭풍쇄류, 그리고 기압 하강과 폭풍쇄류에 의한 연안 해수면 상승을 보상하기 위해 발생하는 이안 해저류(seaward-returning bottom current) 등 세 가지 현상으로 요약할 수 있다(Aigner, 1985). 폭풍파에 의한 해수의 왕복운동은 해저면에 언덕사층리와 같은 독특한 퇴적 구조를 형성시키는데, 해파기저면 상부의 구조는 폭

풍이 지나간 후 해파에 의해 대부분 소멸되지만, 해파기저면 하부에 형성된 것들은 퇴적층 내에 보존된다(Reading, 1996). 한편, 약 100 cm/sec 내외의 속도로 이동하는 이안 해저류는 연안의 퇴적물을 외해로 운반하여 저탁류와 유사한 점이층리 퇴적층을 형성시키는 것으로 알려져 있다(Hamblin and Walker, 1979). 반대로 연안으로 접근하는 폭풍쇄류는 외해의 퇴적물을 재동하여 연안으로 운반하는데, 이 때 생물생산성이 높은 해역에서는 재동된 생물기원 입자와 소량의 쇄설성 입자들이 뒤섞여 해안 근처에 집적됨으로써 생물편 뱅크가 형성되며(Aigner, 1985), 구성 퇴적물의 성분, 조직, 퇴적구조 등은 서귀포층 노두에서 발견되는 폭풍퇴적층과 매우 유사하게 나타난다.

생물편 뱅크는 사주섬(barrier island)과 유사하게 육지와 분리되어 해안선에 평행하게 발달하지만, 뱅크의 대부분은 평균해수면 하에 위치하며 간조 시에만 정상부의 일부가 노출되는 여울(swale)의 일종이다(Fig. 4). 대표적인 생물편 뱅크인 미국 플로리다 남동 연안의 Safety Valve(Fig. 5)는 지형적으로 폭풍쇄류의 영향을 직접 받는 뱅크 전면(onbank sand lobe, offbank spillover lobe), 뱅크의 내해 쪽 저지대에 해당하는 뱅크 후면(bank interior), 그리고 뱅크를 관통하는 깊이 2~4 m의 조수로(tidal channel)로 구성된다(Wanless, 1969). 뱅크 전면에는 폭풍쇄류에 의해 형성된 다수의 뱅크 로브퇴적체(onbank sand lobe, offbank spillover lobe)가 발달되어 있는데(Fig. 4), 중립사 내지 역 크기의 생물편이 우세한 입자암 혹은 팩스톤으로 구성되며, 상향 세립화, 부분적인 층리, 폭풍 후 조류나 해파에 의한 재동구조 등을 보이는데(Aigner, 1985), 층단위 II 및 X가 이와 매우 유사한 것으로 보인다(Fig. 2).

뱅크 후면은 뱅크 전면에서 재동된 세립질 입자들을 포함하기 때문에 전면 퇴적물에 비해 기질의 양이 다소 증가된 왁케스톤으로 구성되며, 심한 생물교란으로 1차 퇴적구조는 거의 나타나지 않는다(Aigner, 1985). 서귀포층 노두에서는 역니질 사암 혹은 팩스톤 내지 왁케스톤으로 분류되는 생물교란 층단위인 IV, XII, XIV가 이와 같은 생물편 뱅크의 후면에서 형성된 것으로 판단된다(Fig. 2). 한편, 층단위 IV의 중상부는 하부에 비해 조립질 입자의 함량이 매우 감소되어 나타나는데(퇴적상 MS1 및 M2), 여기서 산

출되는 개형층 화석은 종다양성이 낮은 만(bay)타입의 종으로서, 외해의 영향이 적은 환경에서 서식했던 것으로 분석된다(Lee, 1990). 따라서 층단위 IV는 초기에 생물편 뱅크의 후면 환경을 유지하다가 점차 저에너지 조건의 만 환경으로 전이되면서 형성된 것으로 추정된다.

생물편 뱅크의 전면층으로 해석되는 층단위 X의 최하부에도 고각도의 사층리를 보이는 최대 30 cm 두께의 렌즈상 역질사암층(퇴적상 GS5)이 협재하는데(Fig. 2), 상위에 오는 뱅크 전면층과의 경계가 점이적이라는 사실은 이들 두 퇴적환경이 인접하여 있었음을 지시한다. 이와 같은 대규모 사층리 역질사암은 층단위 VIII에서 두껍게 나타나며(Fig. 2), 측면으로 가면서 평행층리 역질사암(퇴적상 GS4)으로 전이되기도 한다. 대규모 사층리는 양방향성을 보이며, 국부적으로 얇은 세립퇴적물 커(퇴적상 M2)가 협재하는데, 이는 조류의 영향을 반영하는 것으로 해석된다(Reineck and Singh, 1973; Dalrymple *et al.*, 1990). 또한 생물편을 제외한 입자들은 대부분 중간 정도의 원마도를 갖는 화산암편들로서, 이들 퇴적물들은 육상으로부터 직접 이동되어 퇴적된 것은 아니고, 다른 장소에 1차적으로 집적된 후에 다시 재동되어 본 층단위를 구성한 것으로 보인다. 이와 같은 특징들을 종합해볼 때, 층단위 VIII과 X의 사층리 역질사암은 생물편 뱅크의 조수로에서 형성된 퇴적층으로 해석된다(Fig. 3). 조수로에서는 강한 조류의 영향으로 조립질 입자로 구성된 모래파(sandwave), 거대연흔(megaripple) 등이 형성되는데, 이들이 이동하거나 수로 자체가 측면이동할 경우 대규모 사층리가 형성된다(Kumar and Sanders, 1974; Walker, 1984). 한편 수로의 깊이가 얇은 경우에는 유속이 증가되면서 평탄면이 형성되고 이들이 중첩되어 평행층리가 형성되는 것으로 보고되고 있다(Kumar and Sanders, 1974). 층단위 VIII에 나타나는 사층리의 경사로부터 추정된 고수류의 방향은 N70~80°E 및 N20~30°E로서(Table 2), 대체로 외해에서 연안 쪽으로 이동하는 창조류의 영향 하에 있었음을 지시한다.

6.3 연안 및 내대륙붕(nearshore to inner shelf)

Lee (1990)는 층단위 V에서 산출되는 개형층의 조 조합에 따라 3개의 생물대(biotope)를 구분하였다. 층단위 V의 최하부 약 1 m 구간에 해당되는 하부 생

물대에서는 외해의 직접적인 영향이 거의 차단된 만과 같은 폐쇄환경에 서식하는 종들이 우세하게 산출된다. 층단위 V의 중하부에 해당하는 중부 생물대에서는 개방형 해안에 서식하는 종과 만과 같은 폐쇄형 해안에 서식하는 종들이 혼재되어 나타난다. 한편, 층단위 V의 중앙부와 상부에 해당하는 상부 생물대에서는 개방형 연안(nearshore)에 서식하는 종들이 우세하게 나타난다. 그러나 만과 같은 폐쇄형 환경에 서식하는 종들을 포함하고 있는 하부 및 중부 생물대는 사질 입자의 함량이 90% 이상으로 퇴적물 분급이 양호하며(Table 2), 이러한 특성은 니질 입자의 함량이 우세한 만과 같은 저에너지 환경의 퇴적물 특성과는 매우 상이한 것이다. 따라서 층단위 V의 하부에서 산출되는 개형층 화석들은 대부분 재동된 것으로 추정되며, 층단위 V는 전반적으로 해파나 해류의 영향이 우세한 연안의 사질 퇴적환경에서 형성된 것으로 판단된다.

층단위 V를 구성하고 있는 분급이 양호한 석영 모래는 비교적 강한 해류나 파도의 작용에 의해 형성되었을 것으로 추정된다. 현생의 연안 혹은 대륙붕 환경에서 분급이 양호한 모래 퇴적층의 기원은 대략 네 가지로 요약할 수 있다(Reading, 1996). 첫째, 조류에 의해 대륙붕에 사퇴(tidal sandridge)가 형성되는 경우로서, 분급이 양호하고 패각편을 포함하는 중립 내지 세립질 모래가 퇴적되며, 여기에는 저각도의 사층리와 소형 연흔사층리가 우세하게 관찰된다. 둘째, 파도가 우세한 환경에서는 주로 폭풍 시에 형성되는 이안 해저류에 의해 전안의 사질퇴적물이 외해로 운반되어 집적될 수 있다. 이 경우에는 언덕사층리를 포함하여 폭풍과 관련된 퇴적구조들이 체계적으로 나타난다. 셋째로, 해수면이 상승하는 경우에는 연안의 사주섬 혹은 해빈과 같은 사질퇴적층이 해안선 후퇴에 따라 육지 쪽으로 이동하면서 연안 및 외해역에 해침사질퇴적체(transgressive sand sheet)를 남길 수 있다. 마지막으로 바람이나 해양순환과 관련된 해류에 의해 기존의 연안 또는 대륙붕 퇴적물이 재동되어 사퇴나 여울과 같은 사질 퇴적체를 형성하기도 한다.

현무암질 용암의 분출이 우세했던 당시 제주도 화산활동의 특성을 감안해보면, 석영입자가 우세한 층단위 V의 퇴적물은 현무암질 입자나 혹은 생물기원 입자가 우세하게 집적되어 있던 연안으로부터 공급

되었을 가능성은 매우 낮아 보인다. 따라서 층단위 V는 이미 외해역에 집적되어 있었던 비현무암질 쇄설성 퇴적물이 강한 해류나 해파에 의해 재동된 후 현재의 위치로 이동되어 형성된 것으로 판단된다. 제주도 시추조사 결과에 따르면 서귀포층 하위에는 70~250 m 두께의 미고결 U층이 분포하는데(고기원, 1997), 이 층은 사질 내지 실트질 퇴적물로 구성되며

미립의 석영과 장석을 포함하고 있다. 아직 미고결 U층에 대한 상세한 광물학적 특성이 파악되어 있지는 않지만, 서귀포층 석영모래의 기원지 중에 하나일 수도 있다.

한편, 층단위 VII은 심한 생물교란은 받은 니질 사암(퇴적상 MS1)으로 구성되는데, 이 층단위 역시 일차 퇴적구조가 나타나지 않는다. 층단위의 하위에는

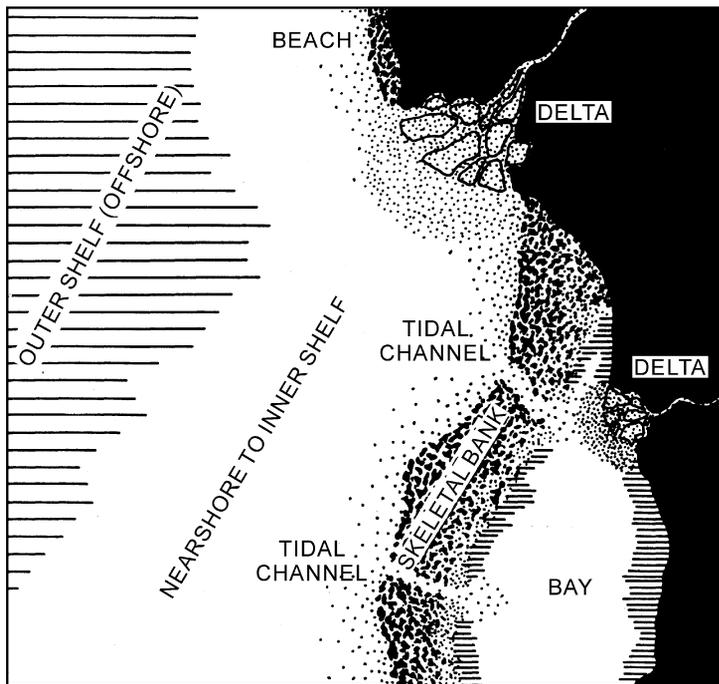


Fig. 4. Depositional environments of the Seoguiipo Formation.

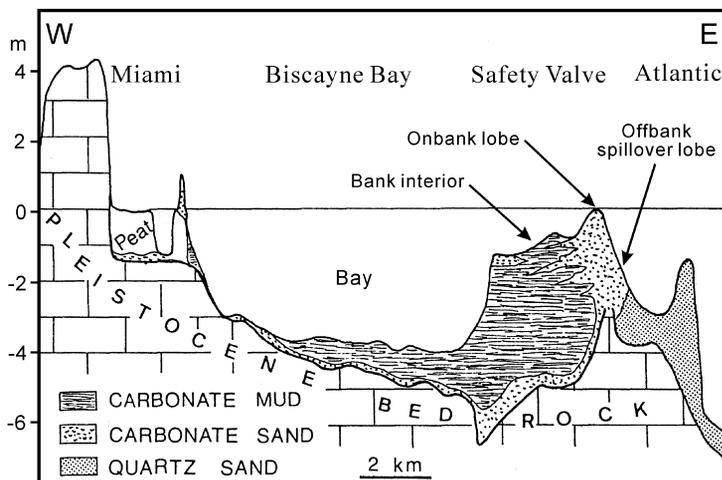


Fig. 5. Geologic section of Safety Valve and Biscayne Bay, Florida, USA. Modified after Aigner (1985).

외대륙붕에서 형성된 니질 퇴적층이 놓여 있는데 (Fig. 2), 두 층단위의 경계는 비교적 뚜렷하지만 침식면은 아니며, 하위 층단위에 비해 사질 입자의 함량이 높다는 점으로 보아, 층단위 VII 역시 외대륙붕과 수평적으로 인접한 육지 쪽의 연안 또는 내대륙붕에서 형성되었을 것으로 판단된다(Fig. 4). 또한, 층단위 I의 전반적인 특성도 층단위 VII과 매우 유사하여 동일한 퇴적환경에서 형성되었을 것으로 추정된다.

6.4 외대륙붕(Outer shelf)

층단위 VI를 구성하는 이암은 뜬짐으로 이동되던 세립퇴적물이 침전되어 보존된 것으로 보이는데, 이암층이 재동되어 버리지 않고 두껍게 보존되기 위해서는 해류나 해파의 영향을 비교적 적게 받는 저에너지 환경조건이 장기간 동안 유지되어야 할 것이다. 이러한 퇴적환경으로서 연안의 만이나 폭풍해파기 저면 하부의 외해(offshore)를 들 수 있다. 본 층단위에서 산출되는 개형층의 동정 결과는 본 층단위가 수심 50~100 m 정도의 외대륙붕에서 퇴적되었음을 지시한다(Lee, 1990).

7. 결론

서귀포층 노두는 암상, 퇴적구조, 침식경계면, 생물교란 및 화석포함여부 등을 기준으로 할 때, 4개의 화석비포함 층단위와 10개의 화석포함 층단위 등 총 14개의 층단위로 구분된다. 이들 층단위를 구성하는 퇴적암은 역질모래, 모래, 니질 모래, 니 등의 퇴적물의 입도와 생물교란, 괴상, 점이층리, 평행층리, 연흔 및 언덕 사층리 등의 퇴적구조를 기준으로 하여, 총 12개의 퇴적상으로 구분할 수 있다. 퇴적상의 구조 및 조직의 해석과 기존의 고생물 분석 결과를 종합하면, 서귀포층은 육상의 화산쇄설물을 재동하여 바다로 공급하는 삼각주, 폭풍쇄류에 의해 형성된 연안의 생물편 뱅크, 연안 및 대륙붕 등 다양한 천해퇴적환경에서 형성되었던 것으로 해석된다.

사 사

본 연구는 2003년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었다. 자료분석에 많은 도움을 주신 이희준, 박장준 박사님께 감사드리며, 아울러 논문심사과정에

서 유익한 조언을 주신 양우현 박사님과 익명의 심사 위원께도 사의를 표한다.

참고문헌

- 고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성. 부산대학교 박사학위논문, 326 p.
- 김봉균, 1972, 서귀포층의 층서 및 고생물학적 연구. 손치무교수기념논문집, 169-187.
- 김인수, 이동호, 2000, 제주도 서귀포층과 서귀포조면암층 노두의 자기층서와 대차율. 지질학회지, 36, 163-180.
- 김정률, 허원혁, 1995, 제주도에 분포하는 서귀포층의 퇴적구조와 생흔 화석의 고환경적 의미. 한국지구과학회지, 16, 232-246.
- 민경덕, 원중선, 황석연, 1986, 제주도에 분포하는 화산암류 및 퇴적암류에 대한 고지자기 연구. 광산지질, 19, 153-163.
- 박근배, 이의형, 백광호, 1986, 제주도 서귀포층(플라이오-플라이스토세)산 개형층의 균질분석 및 고환경 해석. 고려대학교 이학논문집, 27, 133-147.
- 손인석, 1997, 제주화산도의 암석층서 및 연대층서. 제주대학교 박사학위논문, 231 p.
- 윤희수, 고영구, 김주용, 1986, 제주 서귀포층의 미고생물학 및 퇴적암석학적 연구. 전남대학교 논문집(자연과학편), 31, 127-136.
- 윤희수, 고영구, 김주용, 1987, 제주 서귀포층의 미고생물학 및 퇴적암석학적 연구. 전남대학교 논문집(자연과학편), 32, 23-35.
- 윤상규, 한대석, 이동영, 1986, 제주도 남부지역 제4기 지질조사 연구. 한국동력자원연구소, 연구보고 KR-86-2(B)-2, 64 p.
- 윤석훈, 조성권, 1995, 제주도 서귀포층의 층서 및 퇴적환경. 한국석유지질학회-한국퇴적학연구그룹 야외지질답사 안내서, 30 p.
- 제주도, 2000, 서귀포-하효리도폭 지질보고서(1:50,000). 제주도, 163 p.
- 한국자원연구소, 2000, 제주(백아도, 진남포) 지질도폭 설명서(1:250,000). 한국자원연구소 연구보고서(KR-00(B)-01), 59 p.
- Aigner, T., 1985, Storm Depositional Systems. Lecture Notes in Earth Sciences, Springer-Verlag, 3, 174 p.
- Collinson, J.D. and Thompson, D.B., 1982, Sedimentary Structures. George Allen and Unwin, London, 194 p.
- Dalrymple, R.W., Knight, R.J., Zaitlin, B.A. and Middleton, G.V., 1990, Dynamics and facies model of a macrotidal sand-bar complex, Cobequid Bay-Salmon River Estuary (Bay of Fundy). Sedimentology, 37, 577-612.
- Dunham, R.J., 1962, Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W.E. (ed.),

- Classification of Carbonate Rocks. Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. 1, 108-121.
- Hamblin, A.P. and Walker, R.G., 1979, Storm-dominated shallow marine deposits: the Fernie-Kootenay (Jurassic) transition, southern Rocky Mountains. *Can. J. Earth Sci.*, 16, 1673-1690.
- Haraguchi, K., 1931, Geology of Cheju Island. *Bull. Geol. Surv. Korea*, 10, 1-34.
- Kang, S.S., 1995, Reconstruction of the paleoenvironment and molluscan assemblage of the Lower Pleistocene Sogwipo Formation, Cheju Island, Korea. Ph.D. thesis, Niigata University, Niigata, Japan.
- Kim, B.K., 1965, The stratigraphic and paleontologic study on the Tertiary (Miocene) of the Pohang area. *Seoul Nat. Univ. Jour. Sci. and Techno. Ser.*, 15, 32-121.
- Kim, B.K., 1969, A stratigraphic and paleontologic study of the Sinyangri Formation in the vicinity of Sinyangri and Gosanri, the Jeju Island. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 5, 103-121.
- Kumar, N., and Sanders, J.E., 1974, Inlet sequence, a vertical succession of sedimentary structures and textures created by lateral migration of tidal inlets. *Sedimentology*, 21, 491-532.
- Lee, E.H., 1990, Pleistocene Ostracoda from the Marine Sedimentary Strata of the Cheju island, Korea. Ph.D. thesis, Korea University, Seoul, Korea, 436 p.
- Li, B., Park, B.K., Kim, D. and Woo, H.J., 1999, The geological age and paleoenvironment of the lower Seogwipo Formation, Cheju Island, Korea. *Geosciences Journal*, 3, 181-190.
- Myrow, P.M. and Southard, J.B., 1991, Combined-flow model for vertical stratification sequences in shallow marine storm-deposited beds. *Jour. Sed. Petrol.*, 61, 202-210.
- Paik, K.H. and Lee, E.H., 1984, A Plio-Pleistocene ostracod assemblage from the Seoguipo Formation, Cheju Island, South Sea of Korea. *Proceedings of US-KOREA Seminar and Workshop on Yellow Sea (1984, Seoul)*, 223-234.
- Paik, K.H. and Lee, E.H., 1986, Ostracode fauna from the Seogwipo Formation, Cheju Island. *The Memoirs for Prof. Bong-Kyun Kim's Retirement*, 375-389.
- Pickering, K., Stow, D.A.V., Watson, M. and Hiscott, R., 1986, Deep-water facies, Processes and models: a review and classification scheme for modern and ancient sediments. *Earth-Science reviews*, 23, 792-810.
- Reeding, H.G. (ed), 1978, *Sedimentary Environments and Facies (1st ed.)*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 557 p.
- Reineck, H.-E. and Singh, I.B., 1980, *Depositional Sedimentary Environments*. Springer-Verlag, Heidelberg, 579 p.
- Sohn, Y.K., 1996, Hydrovolcanic processes forming basaltic tuffings and cones on Cheju Island, Korea. *Geological Society of America Bulletin*, 108, 1199-1211.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 2004, Early-stage volcanism and sedimentation of Jeju Island revealed by the Sageye borehole, SW Jeju Island, Korea. *Geosciences Journal*, 8, 73-84.
- Walker, R., 1984, *Facies Models*. Geoscience Canada, 119-140.
- Wanless, H.R., 1969, Sediments of Biscayne Bay - distribution and depositional history. *Inst. Mar. Atmos. Sci. Univ. of Miami, Technical Report 62-6*, 260 p.
- Won, C.K., 1975, Study of geologic development and the volcanic activity of the Jeju Island. *Jour. Sci. Kun Kook Univ.*, 1, 7-48
- Won, C.K., 1976, Study of petro-chemistry of volcanic rocks in Jeju Island. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 12, 207-226.
- Yi, S., Yun, H. and Yoon S., 1998, Calcareous nannoplankton from the Seoguipo Formation of Cheju Island, Korea and its paleoceanographic implications. *Paleontological Research*, 2, 253-265.
- Yoon, S., 1981, The Seoguipo fauna (Mollusca) of the Jeju Island, Korea (abstract). *Proc. 6th Internat. Work. Group Meet. IGCP-114*, 149.
- Yoon, S., 1988, The Seoguipo Molluscan Fauna of Jeju Island, Korea. *Saito Ho-on Kai Special Publication*, 539-545.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1990, *Field Excursion Guide: The Seoguipo Formation, Cheju Island (Korea)*. Hallim Publishers, Seoul, 42 p.

투 고 일 : 2006년 2월 13일

심 사 일 : 2006년 2월 17일

심사완료일 : 2006년 3월 21일