

제주도 동부지역 제4기 신양리층의 지화학적 특성 연구

박명호^{1,*} · 김지훈² · 서광수³

¹충남대학교 기초과학연구소

²한국지질자원연구원 석유해저자원연구부

³공주대학교 지질환경학과

요 약

이 연구의 목적은 제주도 동부지역에 분포한 제4기 신양리층의 지화학적 특성과 고환경적 의미를 밝히는 것이다. 신양리층은 왕모래와 잔자갈로 구성된 암갈색의 준고결 층으로서, 하부부터 평행층리 사암상, 역암상 및 사층리 사암상 순으로 이루어져 있다. X선 형광분석에 의하면, 신양리층 내에 들어 있는 현무암 역들은 성산일출봉과 인접한 북서쪽 분석구들의 성분과 아주 유사한 것으로 보아, 이들 지역에서 기원된 것으로 추정된다. Rock-Eval 열분석에 의하면, 신양리층의 총유기탄소(TOC) 함량은 대부분 낮았으며(0.01~2.38 wt. %), T_{max} 값은 425°C 이하로서, 유기물이 미성숙단계에 놓여있다. 총유기탄소와 총질소(TN)의 비율(평균 4.9)은 신양리층의 유기물이 육성 기원보다 해양성 기원이 상대적으로 우세함을 가리킨다. 또한 총유기탄소와 총황(TS)의 비율은 신양리층을 형성한 내만의 환경이 일시적으로 정체되었음을 가리키고 있으나, 이에 대해서는 추가적인 실험이 필요하다. 이밖에 총유기탄소와 S_2 피크, T_{max} 값과 수소지수(HI)의 대비에서도 신양리층의 유기물이 부분적으로 육성 기원임을 보여주고 있다.

주요어: 신양리층, 제4기, 유기탄소, Rock-Eval 열분석, 제주도

Myong-Ho Park, Ji-Hoon Kim and Kwang-Soo Seo, 2005, Geochemical characteristics of Quaternary Shinyangri Formation in the eastern Jeju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 41, no. 1, p. 19-33

ABSTRACT: The purpose of this study is to identify the geochemical characteristics of Quaternary Shinyangri Formation in the eastern coast of Jeju Island and their paleo-environmental implications. The Shinyangri Formation, composed of fine to coarse grained sandstones, is characterized by three lithofacies: parallel laminated sandstone facies, conglomerate facies and cross-stratified sandstone facies in ascending stratigraphic order. X-ray fluorescence (XRF) analyses imply that most of basaltic grains in the Shinyangri Formation have been originated from the Ilchungbong and/or other adjacent NW cinder cones. The results of the Rock-Eval pyrolysis show that total organic carbon (TOC) contents in the Shinyangri Formation are usually low (0.01~2.38 wt. %), and T_{max} is lower than 425°C, indicating that organic matter is in the immature stage. The ratios of TOC over total nitrogen (TN) show that the Shinyangri Formation contains more organic matters of marine origin than those of terrigenous origin. In addition, TOC over total sulphur (TS) ratios imply that the embayment off the Shinyangri coast was temporarily euxinic. Besides, TOC vs. S_2 peak and T_{max} vs. Hydrogen Index (HI) plots indicate that organic carbon in the Shinyangri Formation is partly of terrigenous origin.

Key words: Shinyangri Formation, Quaternary, organic carbon, Rock-Eval pyrolysis, Jeju Island

(Myong-Ho Park, Research Institute of Basic Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea; Ji-Hoon Kim, Petroleum and Marine Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea; Kwang-Soo Seo, Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea)

* Corresponding author: Tel. +82-42-821-7566, E-mail. myongho@cnu.ac.kr

1. 서 언

한반도 남단에 위치한 제주도는 제3기 플라이오세(Pliocene) 이후로 수차례에 걸친 화산활동에 의하여 형성된 섬이지만, 현재는 후화산(post-volcanic) 활동의 양상을 전혀 볼 수 없는 하나의 휴화산으로 이루어진 섬이다(원종관, 1976). 한라산을 정점으로 제주도의 대부분은 화산암으로 덮여 있으며, 퇴적암은 부분적으로 발달해 있다. 제주도의 신생대 퇴적지층으로는 서귀포층, 화순층, 성산층, 신양리층 등의 퇴적암층이 있으며, 섬의 북동쪽을 중심으로 사구(sand dunes)와 같은 해변퇴적물(beach sediments)이 분포해 있다(김봉균, 1974; 윤정수, 1986). 제4기 지층 중에서 신양리층은 제주도 동부지역의 신양리 해안을 따라 굽은 모래와 잔 자갈로 구성된 층으로 분포하고 있다(Fig. 1).

신양리층에서 발견되는 화석을 이용하여 형성 시기의 퇴적환경(depositional environment)을 간접적으로 유추하는 연구가 가능하였다. 예를 들면, Kim(1969)은 유공충 연구를 통하여 신양리층의 퇴적환경이 천해(shallow water)의 환경이었음

을 밝혔으며, 손영중(1989) 등은 천해이면서 내만(embayment)과 같은 환경으로 추정하였다. Yi et al.(1995)은 초미화석을 이용하여 보다 구체적으로 퇴적환경을 언급하였는데, 초미화석의 종 조성(floral composition)이 난류의 영향 하의 얇은 내만환경을 지시한다고 밝혔다. 덧붙여, Kim et al.(1999)은 당시의 난류가 현재보다 약 7~8°C 높았음을 산소동위원소의 분석결과를 이용하여 밝힌 바 있다.

그러나 퇴적환경 복원을 위한 이전의 몇 가지 고생물학적 및 퇴적학적 연구방법들은 서로 상반된 결과를 빚기도 하였다. 게다가 신양리층을 구성하고 있는 퇴적 입자와 기질 성분의 지화학적 특성을 이용하여 퇴적환경을 복원하는 연구는 그동안 이루어지지 않았다. 따라서 이 연구에서는 신양리층을 구성하고 있는 암상의 일반적인 특성과 함께 신양리층의 지화학적 성분에 대해 주로 다루었다. 또한 신양리층에 포함되어 있는 유기물의 종류가 어느 정도 해양성이고 어느 정도 육성인지도 함께 체크하였으며, 이에 대해 토의하였다.

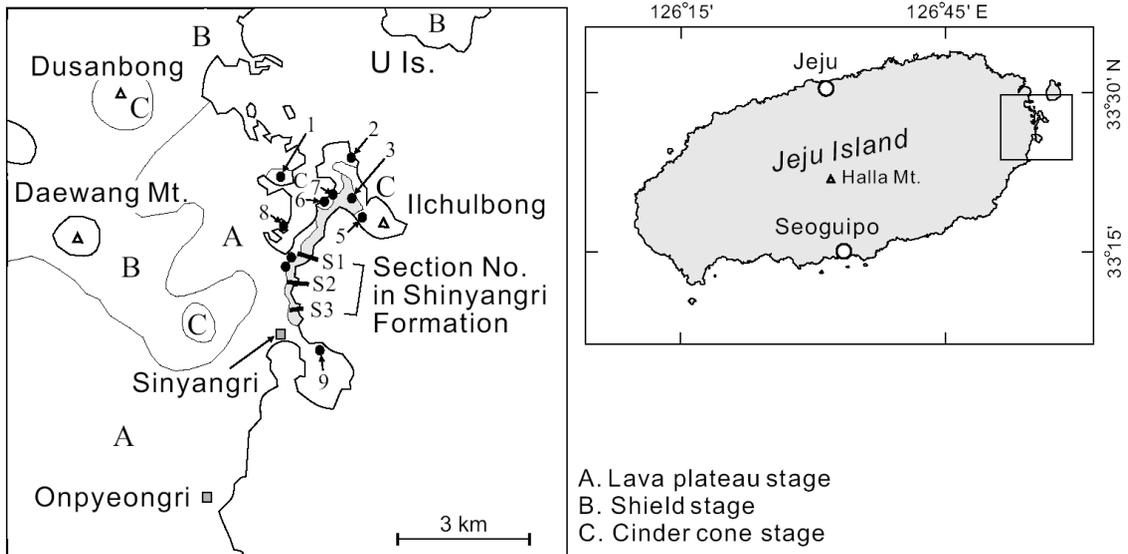


Fig. 1. Location of the study area with sampling sites and studied sections. Numbered sites indicate that the location of volcanic rock samples for major element analyses.

2. 연구지역의 지질개요

제주도 동부지역에는 현무암류와 화산쇄설성 퇴적물로 구성된 응회구(tuff-cone)와 응회환(tuff-ring) 그리고 해안을 따라 분포하는 퇴적층과 사구가 분포하고 있다. 그러나 대부분의 지역은 현무암류가 덮고 있는데, 신양리층 하부에는 표선리 현무암 또는 한라산 조면암이 신양리층과는 부정합 관계로 놓여 있다(윤상규 외, 1987; Kim *et al.*, 1999). 표선리에서부터 성산읍까지 넓은 지역을 덮고 있는 표선리 현무암은 3~5° 이내의 작은 경사를 갖고 있어 거의 평탄한 지표를 이루고 있으며(윤상규 외, 1987), 제주도의 동부지역은 이와 같은 평탄한 지형에 지미봉(165.3 m), 두산봉(145.9 m), 일출봉(182 m), 석산봉(60.2 m), 대수산봉(137.4 m), 소수산봉(53 m) 등의 크고 작은 분석구들이 솟아나 있는 모습을 하고 있다. 특히 플라이스토세 중기에 형성된 일출봉은 천해에서 화산폭발에 의해 형성된 거대한 응회구로서, 젖은 쇄설물의 계속적인 퇴적이 결국 경사각이 큰 응회구를 형성할 수 있었으며, 이것은 후에 화산쇄설물의 주기적인 붕괴(periodic slope-failure)의 주요 원인이 되기도 하였다(Sohn, 1996; Sohn and Chough, 1992).

일출봉으로부터 깎여나간 화산쇄설물의 많은 양은 주위 해안에 다시 퇴적되어 신양리층을 형성하였다(박기화 외, 2003). 신양리층은 주로 화산쇄설물, 현무암력, 패각과 lithic tuff로 구성되어 있다(한상준 외, 1987). Kim(1969)은 48종의 저서성 유공충과 2종의 부유성 유공충을 기재하였고, 이들 유공충 화석들을 기준으로 층의 형성시기를 플라이스토세로 추정하였다. Yi *et al.*(1995)은 신양리층으로부터 9속 15종의 초미화석을 기재하였고, 층이 NN21(73~85 ka)에 해당된다고 하였다. 그러나 Yoon *et al.*(1995)는 신양리층이 플라이스토세 때 형성된 지층이 아니라 홀로세 때 형성된 현생 퇴적지층이라고 해석하였다. 반면 Kim *et al.*(1999)은 스트론튬 비($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)에서는 약 40 ka의 플라이스토세 후기의 나이로, 탄소연대(radiocarbon) 측정에 의하면 약 1.6~4.4 ka의 홀로세 지층으로 방법에 따라 각기 다른 실험 결

과를 얻은 바 있다.

신양리 지역의 제4기 해안단구에 대한 연구결과에 의하면(최성자 외, 2004), 신양리층은 이후 일련의 화산작용과 지진 등의 지구조운동에 의하여 수 m 융기하였으며, 이에 따라 해안을 따라 만조 시 잠기지 않는 해안단구(T1)가 지층 위로 형성되어 있다.

3. 분석재료 및 연구방법

이 연구를 위해 일출봉 남쪽지역에서부터 신양리 부근까지 남북방향으로 길게 노출된 신양리층 중에서 층서적인 관계 및 노두의 상태가 상대적으로 좋은 세 지역을 선택하여 Section을 잡았으며, 각 Section 별로 지층의 구조 및 특징을 기재한 후 5~10 cm 간격으로 시료를 채취하였다. 시료 채취 시에는 층의 표면을 1 cm 이상 뜯어낸 다음 신선한 시료를 채취하였다. 신양리층 이외에, 층서적으로 신양리층의 하부에 놓이는 주변지역의 현무암 시료와 사구 및 기타 해빈퇴적물 시료를 채취하여 분석하였다(Fig. 1).

신양리층과 화산암류 성분을 정량분석하기 위해 X선 형광분석(XRF: X-ray Fluorescence)을 실시하였다. 신양리층에 대해서는 왕모래(granule) 이상의 커다란 역들을 제외한 입자와 기질을 분석하였으며, 층의 중간부분에 협재되어 나타나는 소위 현무암 역암상(basaltic conglomerate facies)에서는 역의 정확한 화학성분과 공급지를 유추하고자 추가로 분석을 실시하였다. 사용한 기종은 서울대학교 공동기기에 있는 Shimadzu XRF-1700 Sequential X-ray Fluorescence Spectrometer이 있으며, 전류와 전압은 40 KV, 30 mA이었고, Rh target을 사용하여 X선을 주사하여 분석하였다. Glass bead 시편은 시료 0.6 g과 용제(lithium tetraborate, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) 6 g을 혼합하여 제작하였다. LOI(Loss Of Ignition)은 950°C에서 시료를 태운 후의 무게를 측정하여 태우기 전의 무게에서 얼마나 감소하였는지에 대한 무게 퍼센트(wt. %)이다. $\text{LOI} = \frac{[(\text{도가니} + \text{시료})_{\text{LOI전}} - (\text{도가니} + \text{시료})_{\text{LOI후}}]}{(\text{시료무게})} * 100$.

원소 및 열분석을 위하여 시료를 건조시킨 다

음, 분말로 분쇄하였다. 시료 내 총탄소(TC: total carbon) 및 총질소(TN: total nitrogen) 함량은 한국지질자원연구원이 보유하고 있는 LECO사의 CHN-900으로, 총황(TS: total sulphur)의 함량은 LECO사의 SC-132로, 총유기탄소(TOC: total organic carbon) 함량 및 열분석은 VINCI사의 Rock-Eval 6로 분석하였다. 실제, Rock-Eval 6은 크게 열분해(pyrolysis) 부분과 산화(oxidation) 부분으로 나누어져 있다. 열분해 부분에서는 유기탄소를 주로 측정하고, 산화 부분에서는 일부 유기탄소 및 무기탄소를 측정한다. 열분해하는 동안에는 유리 탄화수소(free hydrocarbon) 및 잠재 탄화수소(potential hydrocarbon)가 불꽃이온검출기(FID: Flame Ionization Detector)에 의하여 검출되어 나타나는 것으로, 크게 S_1 과 S_2 로 나눈다. S_1 피크는 오븐의 온도가 200°C에서 300°C로 높아질 때 암석 내의 액상 유리 탄화수소가 휘발되어 검출되는 것이고, S_2 피크는 케로젠(kerogen)이 300°C에서 650°C 사이에서 열분해되어 나타나는 것이다. 여기서 S_1 과 S_2 의 단위는 mgHC/gRock, 즉 1 g의 암석이 생성했거나 생성할 수 있는 탄화수소의 양을 나타낸다. 열분해 하는 동안에 생성되는 일산화탄소(승온 온도: < 500°C) 및 이산화탄소(승온 온도: < 400°C)는 적외선검출기로 정량화하여 계산한다. 또한 Rock-Eval 분석 시 T_{max} 값도 얻게 되는데, 이를 이용하여 유기물의 성숙도를 체크할 수 있다. 열분석 시 오차율은 각각 $TOC(\%) = \pm 0.14$, $S_1 = \pm 0.07$ mg/g, $S_2 = \pm 0.50$ mg/g, $T_{max} = \pm 2$ 이다.

4. 결 과

4.1 신양리층의 암상

Kim(1969)에 의하여 명명된 신양리층은 왕모래와 잔자갈(pebble)이 호층을 이루면서 구성되어 있는 암갈색의 준고결(semi-consolidated) 층으로서, 일출봉에서 신양리 해수욕장의 최남단의 부근까지 연속적으로 분포하고 있다(Fig. 2a). 지층의 주향은 거의 남북방향이며(N10°E~N5°W), 경사는 바다 쪽으로 약 2~5° 기울어진 구조를 보이고 있다. 주로 해안을 따라 발달한 신양리층은 내륙 쪽

으로는 후기에 형성된 사구가 덮고 있어 지표에서 직접적인 관찰이 불가능하지만(Fig. 2b; 윤상규 외, 1987), 썰물 시에는 바다 안쪽으로 상당한 거리까지 물 위로 드러난다.

지표에 노출되어 있는 신양리층 중에서 최하부를 구성하고 있는 암상은 세립질과 조립질의 박층이 규칙적으로 교호하며 평행층리(parallel bedding)를 보이는 암상(“평행층리 사암상”)이다(Fig. 2c). 노두에서의 관찰에 따르면, 세립질의 박층은 2 cm 이하의 두께를 보인다. 반면 조립질의 박층은 2 cm 이상의 두께를 보이며, 모래~왕모래의 입자 크기를 갖는다. 대부분의 입자들은 암흑색의 현무암이며, 일부는 패각류의 껍질물로 이루어져 있다.

평행층리의 사암상 바로 위로는 암흑색의 현무암 역들이 발달한 암상(“역암상”)이 나타난다(Fig. 2d). 암상의 두께는 보통 25~30 cm이나, 북쪽으로 갈수록 층의 두께가 두꺼워진다. 역의 크기도 지역에 따라 차이를 보이지만, 관찰한 역들은 대개 4~12 cm 크기이다. 역의 원마도는 양호한 편이고, 약간 납작하고 길쭉한 모양의 역은 층리 방향과 평행하게 놓여 있다(Fig. 2e). 역들 사이에는 모래 크기의 화산재와 패각 껍질물로 채워져 있으며, 전체적으로 역-지지(clast-supported)의 조직 상태를 보이고 있다.

신양리층의 최상부는 최하부와 마찬가지로 사암으로 구성되어 있으나, 평행층리보다는 사층리가 발달한, 약 1.8 m 두께의 암상(“사층리 사암상”)을 보인다(Fig. 2f). 해안의 노두에서 관찰된 암상들은 대부분 분급상태가 별로 좋지 않으며, 입자는 세립질의 모래에서 중립질의 모래 크기를 보인다. 암질은 화산껍질물로 구성되어 있으며, 부분적으로 현무암 역이나 패각류의 껍질물들이 불규칙하게 나타난다. 상부의 암상에는 바닷물에 의한 물결무늬나 파식에 의한 홈(groove), 돌개구멍(pothole) 등이 관찰된다.

참고로 본 논문에서는 현무암 역암상을 일반적인 방식과는 달리 편의상 Section 깊이의 기준점으로 잡았다(Fig. 3).

4.2 X선 형광분석 결과

신양리층을 정량분석하기 위하여 XRF 분석을

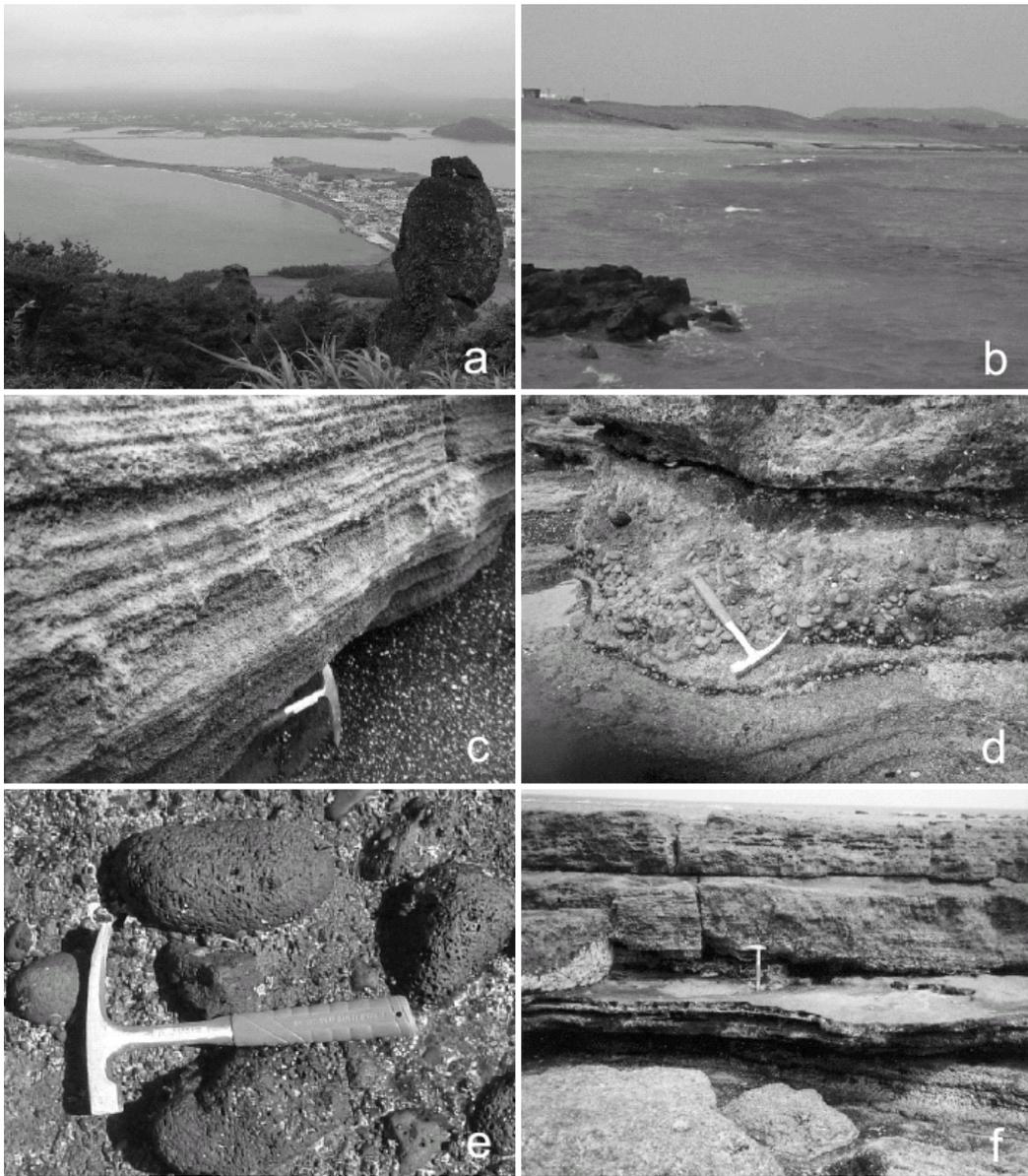


Fig. 2. (a) Shinyangri beach in the eastern Jeju Island, which is present as a tombolo. (b) Sand dunes in the Shinyangri beach. (c) Parallel-bedding sandstone in the lower part of the Shinyangri Formation. (d) Clast-supported basaltic conglomerate in the middle part of the formation. (e) Bedding plane view of the basaltic conglomerate. (f) Poorly sorted fine to medium sandstone in the upper part of the formation.

실시하였다(Table 1). 신양리층으로부터 5개의 시료를 채취하여 분석하였으며, 주위의 화산암지역으로부터는 10개의 시료를 채취하여 분석하였다. 특히 신양리층에서 발견되는 커다란 현무암 역의 성분이 주위의 화산암지역에서 발견되는 현무암과

어떤 관련이 있는지 비교하고자, 신양리층의 역암상에서 발견된 2개의 현무암 역을 추가로 분석하였다.

지금까지의 연구결과에 의하면(Lee, 1982; 박준범, 권성택, 1991), 제주도를 구성하고 있는 화산

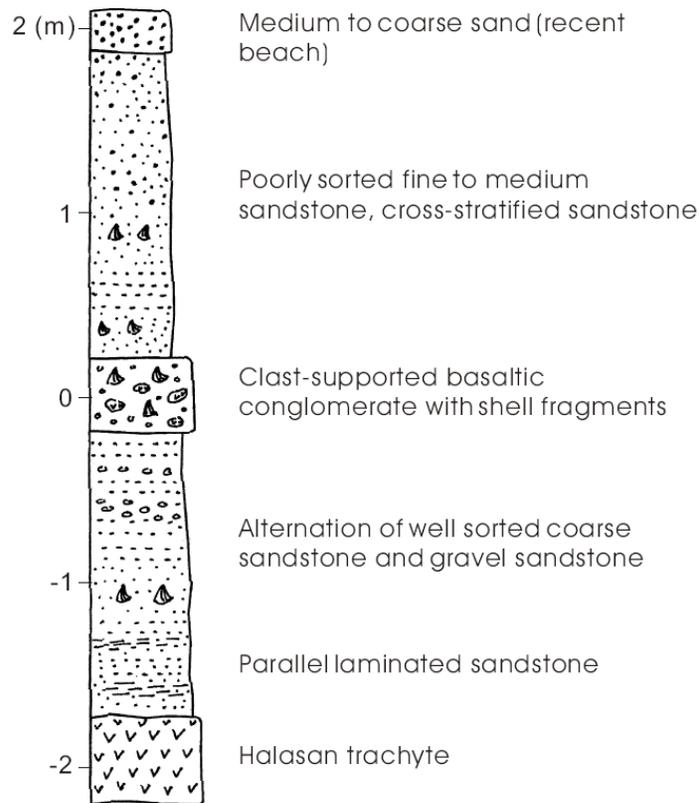


Fig. 3. Stratigraphic section showing the main lithologic changes throughout the Shinyangri Formation. Slightly modified from Han *et al.*(1987) and Kim *et al.*(1999).

Table 1. Major element composition of the Shinyangri Formation and basaltic rocks in the adjacent areas. Volcanic stages from Lee *et al.*(1982). For the sample location (No. 1~9) see Fig. 1.

Sample No.	SiO ₂ (wt.%)	Al ₂ O ₃ (wt.%)	TiO ₂ (wt.%)	Fe ₂ O ₃ (wt.%)	MgO (wt.%)	CaO (wt.%)	Na ₂ O (wt.%)	K ₂ O (wt.%)	MnO (wt.%)	P ₂ O ₅ (wt.%)	LOI (wt.%)	Total (wt.%)	Volcanic stage/sample location
1	45.71	13.58	2.64	12.85	8.84	7.75	2.19	1.62	0.13	0.76	3.07	99.13	Cinder cone
2	45.95	14.10	2.63	12.93	9.28	8.63	2.20	1.24	0.17	0.59	1.68	99.39	Lava plateau
3	30.45	18.05	2.89	17.96	6.08	2.81	0.48	0.12	0.22	0.57	21.21	100.84	Cinder cone+soil
5	49.49	14.27	2.26	12.09	7.71	8.40	2.96	1.59	0.15	0.47	0.18	99.58	Cinder cone
6	51.11	14.66	2.12	11.95	6.81	8.74	2.71	0.74	0.15	0.32	0.43	99.73	Lava plateau
7	34.58	8.41	1.45	15.73	16.84	10.66	1.21	0.45	0.13	0.33	10.21	100.00	Sand dune
8	47.20	13.11	2.22	12.12	10.24	8.88	2.32	1.28	0.16	0.42	1.35	99.30	Lava plateau
9	45.58	13.78	2.06	11.97	9.67	8.62	2.61	0.70	0.08	0.44	4.37	99.88	Lava plateau
10	36.92	13.63	2.06	12.45	9.38	9.55	2.22	1.04	0.15	0.35	12.16	99.91	Section 3
11	50.70	13.91	2.28	11.89	7.50	8.50	2.63	0.87	0.07	0.38	0.49	99.20	Section 3(congl.)
13	40.35	16.42	2.78	14.49	4.26	3.62	2.83	1.15	0.18	0.24	14.65	100.96	Section 2
15	41.51	11.78	2.00	14.74	11.85	6.30	1.56	0.74	0.08	0.37	10.01	100.95	Sand dune
16	27.55	12.69	2.73	16.81	15.29	4.59	1.53	0.41	0.21	0.34	17.58	99.72	Sand dune
17	49.63	13.63	2.16	12.03	8.27	8.74	2.59	0.68	0.15	0.36	0.99	99.22	Section 1(congl.)
18	27.20	13.83	2.30	13.89	14.84	5.87	1.89	0.52	0.18	0.30	18.83	99.66	Section 1

암류로 알칼리현무암(alkali basalt), 하와이아이트(hawaiite), 뮤저라이트(mugearite), 조면암(trachyte) 및 소량의 솔리아이트(tholeiite) 등이 발견되고 있다. 또한 제주도의 화산층서를 화산분출시기에 따라 분류하면, 전기의 용암대지 형성기(lava plateau stage)와 후기의 한라산체 형성기(shield stage)로 구분할 수 있다(Lee, 1982; 박준범, 권성택, 1993). 이 중에서 신양리층 주변의 화산암은 대부분 용암대지 형성기에 형성된 암석이거나 후기에 형성된 분석구(cinder cone)의 화산암으로, 현무암 내지 조면현무암의 분화를 보이고 있다(Lee, 1982). XRF 분석결과에 의하면, 주변지역에서 발견되는 화산암의 성분은 SiO₂가 45.5~49.5 wt. %, Al₂O₃가 13.1~14.7 wt. %, (Na₂O+K₂O)가 3.3~4.5 wt. %이다(Table 1). 반면 신양리층의 성분은 SiO₂가 27.2~40.4 wt. %, Al₂O₃가 13.6~16.4 wt. %, (Na₂O+K₂O)가 2.4~4.0 wt. %이다. 신양리층의 역암에서 채취한 현무암 역의 분석결과(시료번호 11, 17)는 신양리층의 북동쪽과 북쪽에 위치한 분석구에서 채취한 샘플(시료번호 1, 5)의 분석결과와 아주 유사한 값을 보여주고 있다(Table 1). 이밖에 사구에서 채취한 샘플(시료번호 7, 15, 16)의 분석결과는 주요 성분의 값이 주변 화산암과 신양리층의 값보다는 상대적으로 낮지만, LOI의 값(10~17.6 wt. %)은 매우 높음을 보여주고 있다.

4.3 탄소, 질소 및 황-원소분석 결과

상기한 바와 같이, 연구지역은 신양리층 하부의 “평행층리 사암상”서부터 상부의 “사층리 사암상”을 거쳐 본 층과는 부정합으로 놓이는 사구 또는 해변퇴적물까지의 층서를 갖는다(Fig. 3). 이 같은 지층의 층서에서 원소별 성분의 변화를 파악하기 위하여 총탄소(TC), 총질소(TN) 및 총황(TS)의 원소분석(elemental analyses)을 실시하였다(Tables 2~3).

Section 1에서 관찰된 신양리층의 총탄소 값은 0.77~2.0 wt. %(평균 1.19 wt. %)이며, 하부(평행층리 사암상)의 총탄소값은 평균 1.06 wt. %, 상부(평행층리 사암상)의 총탄소값은 그보다 약간 높은, 평균 1.28 wt. %이다(Fig. 4). Section 1에서

제일 높은 총탄소 값을 보인 곳은 현무암 역암상의 깊이이며(Section 깊이= 0 cm), 약 2.0 wt. %의 값을 보였다. 반면 사구에서의 총탄소 값은 0.5~3.2 wt. %이며, 해변퇴적물에서의 총탄소 값은 이보다 낮은, 0.04~0.06 wt. %의 값을 보였다. 총질소 값은 전반적으로 낮아, 신양리층의 평균값이 0.051 wt. %(0.018~0.079 wt. %)이었으며, 상·하부에서 비슷한 값을 보여주었다. 그러나 총황의 값은 하부에서 큰 폭으로 변했으며, 역암상의 깊이에서는 거의 0의 값을 보였으나 다시 상부에서는 하부와 비슷한 양상을 보여주었다. 사구의 하부에서 0.98 wt. %의 총황 값을 보여주었으나, 상부에서는 대체로 매우 낮은 값(0.004~0.05 wt. %)을 보여주었다.

Section 2에서 총탄소 값은 Section 1보다 약간 낮은, 평균 1.02 wt. %를 보여주었으며, 1.1~1.2 m의 깊이에서 2.6~3.0 wt. %의 높은 값을 보여주다 상부로 가면서 값이 떨어져서 0.1~0.24 wt. %

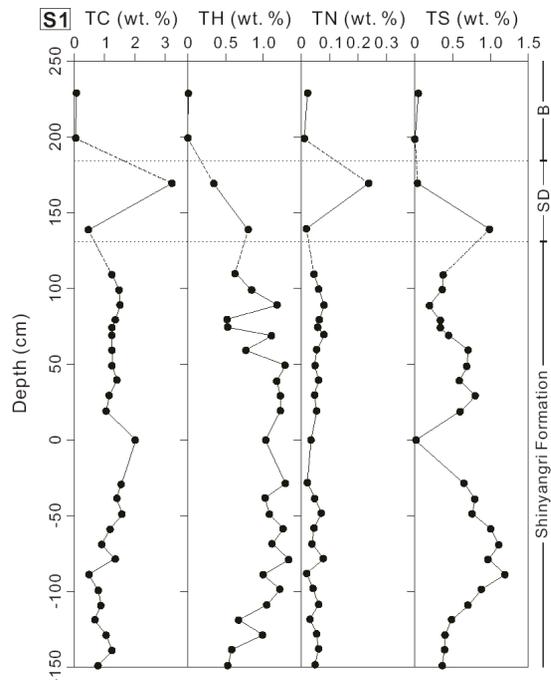


Fig. 4. Variations in total carbon (TC), total hydrogen (TH), total nitrogen (TN) and total sulphur (TS) of samples from Section 1 (S1). For the location see Fig. 1. SD=sand dune; B=beach.

Table 2. Results of geochemical analyses of the Shinyangri Formation (upper part) in the eastern Jeju Island. *S* section number, *D* depth (cm) in section, *TS* total sulphur, *TC* total carbon, *TH* total hydrogen, *TN* total nitrogen, *HI* hydrogen index, *OI* oxygen index, *TOC* total organic carbon, and *MC* mineral carbon.

S	D	TS	TC	TH	TN	S ₂	T _{max}	HI	OI	TOC	MC
	109	0.37	1.24	0.63	0.04	0.16	345	64	2532	0.25	0.85
	99	0.36	1.46	0.85	0.06	0.29	412	91	2141	0.32	1.06
	89	0.19	1.51	1.19	0.08	0.36	364	103	2117	0.35	0.91
	79	0.34	1.33	0.53	0.06	0.21	365	84	2032	0.25	0.79
	74	0.33	1.25	0.54	0.06	0.26	408	84	2113	0.31	0.89
1	69	0.44	1.24	1.12	0.08	0.21	362	75	2450	0.28	0.65
	59	0.71	1.24	0.77	0.05	0.19	357	61	2532	0.31	0.85
	49	0.68	1.24	1.29	0.05	0.16	347	55	2476	0.29	0.78
	39	0.59	1.40	1.19	0.06	0.17	355	68	2656	0.25	0.81
	29	0.80	1.13	1.24	0.05	0.14	414	50	2804	0.28	0.68
	19	0.60	1.02	1.23	0.05	0.19	401	73	2742	0.26	0.64
	194	0.08	0.18	0.92	0.02	0.07	352	64	1745	0.11	0.08
	184	0.02	0.14	0.76	0.02	0.06	344	86	2271	0.07	0.05
	174	0.03	0.16	0.44	0.02	0.05	346	71	1971	0.07	0.05
	164	0.02	0.11	0.74	0.02	0.05	381	125	2325	0.04	0.03
	154	0.03	0.10	0.27	0.02	0.04	350	80	1380	0.05	0.03
	144	0.02	0.12	0.02	0.01	0.06	346	200	1467	0.03	0.04
	134	0.01	0.07	0.00	0.02	0.05	376	250	1100	0.02	0.02
	124	0.00	2.61	0.71	0.04	0.16	426	52	2371	0.31	2.05
	115	0.12	2.87	0.47	0.04	0.18	410	78	2191	0.23	2.16
2	109	0.17	3.06	0.85	0.04	0.34	429	83	1880	0.41	2.73
	99	0.45	1.42	1.04	0.04	0.21	380	75	2336	0.28	0.70
	89	0.31	1.35	1.28	0.05	0.19	420	54	2257	0.35	1.33
	79	0.45	1.36	1.09	0.03	0.16	411	57	2436	0.28	2.18
	69	0.03	1.94	1.08	0.08	0.23	398	68	2203	0.34	2.04
	59	0.45	1.13	0.65	0.03	0.10	399	56	2511	0.18	1.82
	49	0.41	1.07	0.48	0.04	0.13	343	65	2235	0.20	1.53
	39	0.51	2.64	0.43	0.05	0.13	418	68	2047	0.19	2.27
	29	0.00	1.63	0.32	0.04	0.15	335	83	1911	0.18	1.76
	19	0.29	1.55	0.05	0.06	0.44	409	152	979	0.29	1.58

Table 3. Results of geochemical analyses of the Shinyangri Formation (lower part) in the eastern Jeju Island. *S* section number, *D* depth (cm) in section, *TS* total sulphur, *TC* total carbon, *TH* total hydrogen, *TN* total nitrogen, *HI* hydrogen index, *OI* oxygen index, *TOC* total organic carbon, and *MC* mineral carbon.

S	D	TS	TC	TH	TN	S ₂	T _{max}	HI	OI	TOC	MC
1	-39	0.80	1.39	1.03	0.05	0.14	387	58	2396	0.24	0.95
	-49	0.76	1.57	1.09	0.07	0.20	414	74	2344	0.27	0.85
	-59	1.00	1.18	1.27	0.04	0.09	413	50	2739	0.18	0.64
	-69	1.10	0.90	1.12	0.04	0.12	413	52	2704	0.23	0.61
	-79	0.96	1.34	1.34	0.08	0.27	411	100	2370	0.27	0.80
	-89	1.19	0.48	1.00	0.02	0.08	333	67	3250	0.12	0.31
	-99	0.88	0.78	1.22	0.04	0.12	410	75	2638	0.16	0.42
	-109	0.70	0.88	1.05	0.06	0.17	406	85	2220	0.20	0.48
	-119	0.48	0.68	0.68	0.03	0.10	339	59	2718	0.17	0.37
	-129	0.40	1.03	0.99	0.05	0.16	401	80	2600	0.20	0.46
	-139	0.40	1.23	0.58	0.06	0.15	347	62	2475	0.24	0.63
	-149	0.36	0.77	0.53	0.05	0.14	346	74	2668	0.19	0.41
2	-19	0.72	0.43	0.55	0.03	0.15	401	88	2094	0.17	0.30
	-29	0.79	0.94	0.82	0.05	0.34	430	113	1757	0.30	0.65
	-39	0.04	0.28	0.16	0.02	0.09	367	112	1725	0.08	0.15
	-49	0.09	0.57	0.03	0.03	0.11	347	110	1890	0.10	0.34
	-59	0.06	0.89	0.01	0.04	0.12	347	120	1090	0.10	0.32
	-69	0.06	0.40	0.00	0.03	0.06	340	75	1475	0.08	0.27
	-79	0.06	0.21	0.00	0.03	0.09	333	150	1333	0.06	0.15
3	-19	0.06	1.44	0.79	0.06	0.19	359	73	2162	0.26	0.61
	-24	0.07	0.92	0.50	0.05	0.14	358	61	2474	0.23	0.49
	-31	0.03	2.59	0.25	0.05	0.13	360	65	2095	0.20	1.32
	-39	0.06	1.19	0.39	0.05	0.14	358	64	2182	0.22	0.61
	-44	0.06	0.66	0.25	0.02	0.12	349	63	2284	0.19	0.76
	-49	0.08	1.33	0.56	0.04	0.12	363	67	2361	0.18	0.59
	-56	0.07	0.62	0.18	0.03	0.08	341	67	2283	0.12	0.33
	-64	0.08	0.59	0.19	0.03	0.09	356	69	2885	0.13	0.35
	-74	0.09	0.63	0.21	0.03	0.06	353	86	2243	0.07	0.15
	-84	0.07	0.86	0.19	0.04	0.11	349	100	2736	0.11	0.37
	-94	0.05	0.37	0.07	0.02	0.09	350	100	2789	0.09	0.23
	-104	0.07	0.39	0.09	0.03	0.07	356	88	2775	0.08	0.20
-114	0.03	0.48	0.14	0.04	0.12	348	86	2386	0.14	0.27	
-124	0.06	0.65	0.27	0.05	0.14	343	93	2493	0.15	0.37	

의 매우 낮은 값을 보여주었다(Fig. 5). Section 2에서의 총황 값은 Section 1에 비하여 평균 1/3 정도의 낮은 값을 갖고 있으며, 특히 하부보다는 상부에서 낮은 값(0.01~0.08 wt. %)을 보여주었다. 최상부에서의 낮은 값은 하부의 평행층리 암상에서도 보여주고 있으며, Section 3에서도 비슷한 양상을 보여주고 있는데, 이 부분에서 평균 0.063 wt. %의 총황 값을 보여주고 있다(Fig. 5).

4.4 Rock-Eval 열분석 결과

Rock-Eval 열분석은 퇴적암에서 나타나는 유기물질의 특성을 분석하는 방법이다. 이 방법은 Espitalié *et al.*(1977)에 의하여 석유의 근원암을 처음으로 분석한 이후, 현재는 주로 해양기원의 퇴적물을 연구하는데 이용되고 있다. 이 논문에서도 신양리층 내에 들어있는 유기물질의 특성을 파악하고자 Rock-Eval 열분석을 실시하였다(Figs. 6~7, Tables 2~3).

분석결과에 의하면, Section 1에서 총유기탄소의 함량은 0.01~2.38 wt. %(평균 0.3 wt. %), Section 2와 3에서는 0.02~0.41 wt. %(평균 0.2

wt. %)로, Section 2와 3에서 상대적으로 약간 낮은 함량을 보인다. 사구와 해변퇴적물에서 총유기탄소가 낮은 이유는 퇴적물에서 유기물이 침식작용 등에 의하여 대부분 빠져나갔기 때문인 것으로 보인다. 신양리층의 총유기탄소 함량은 해양성 천부퇴적물의 그것과 비교하면 낮은 편이다(예: 김일수 외, 2004).

수소지수(HI: Hydrogen Index)는 총유기탄소의 함량 중 탄화수소의 양을 의미한다. 수소지수는, 해변퇴적물의 수치를 전체의 평균값 계산에서 제외시킨다면, 세 Section에서 거의 비슷하게 나타난다. Section 1에서는 29~500 mgHC/gTOC (평균 87 mgHC/gTOC), Section 2에서는 52~250 mgHC/gTOC(평균 97 mgHC/gTOC), Section 3에서는 61~100 mgHC/gTOC(평균 77 mgHC/gTOC)로 측정되었다. Section 1과 2에서 평균값이 Section 3에 비해 약간 높은 이유는 Section 1과 2에는 해변퇴적물이 포함되어 계산되었기 때문이다. 그러나 해변퇴적물의 총유기탄소의 함량은

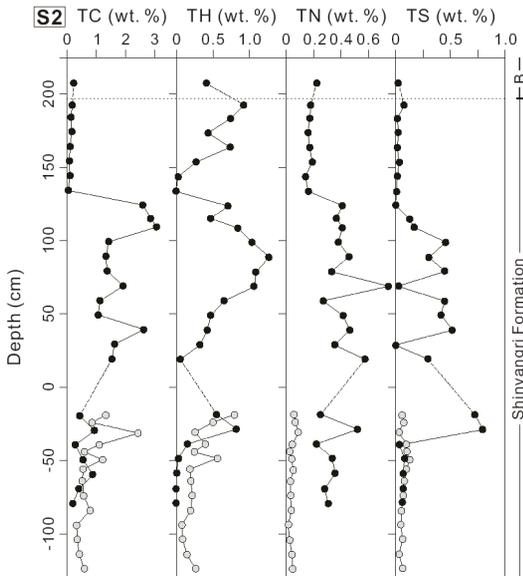


Fig. 5. Variations in total carbon (TC), total hydrogen (TH), total nitrogen (TN) and total sulphur (TS) of samples from Section 2 (S2; closed circles) and Section 3 (S3; shaded circles).

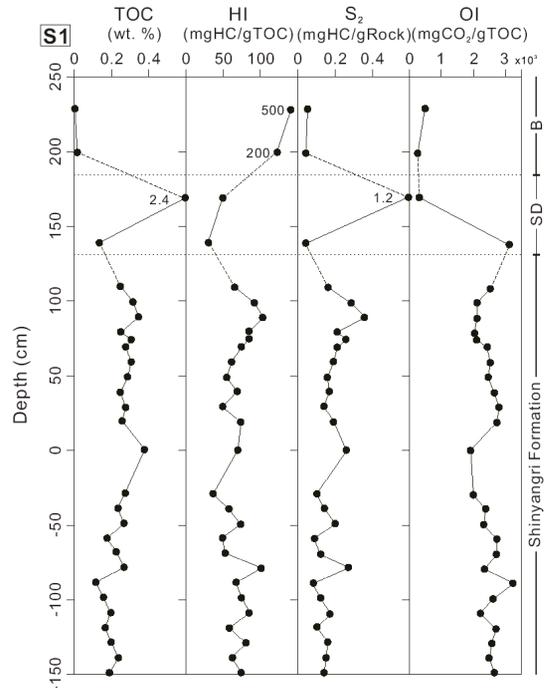


Fig. 6. Variations in total organic carbon (TOC), hydrogen index (HI), S₂ and oxygen index (OI) of samples from Section 1 (S1).

매우 낮기 때문에 이로부터 계산된 수소지수의 값은 그 의미가 매우 적다.

T_{max} 값은 유기물의 생성온도를 간접적으로 지시할 수 있는 온도로서, Section 1에서 평균 383°C, Section 2에서 평균 376°C, Section 3에서 353°C로 측정되었다(Tables 2~3). 즉 신양리층의 하부구간(Section 3의 전체구간, Section 1과 2의 하부구간)에서 T_{max} 값이 낮아지는 양상을 보인다. 이밖에 S_2 값은 열분해를 통해 생성되어진 탄화수소의 양을 의미하는 것으로, Section 1에서 평균 0.2 mgHC/gRock, Section 2에서 평균 0.14 mgHC/gRock, Section 3에서 평균 0.11 mgHC/gRock으로 측정되었으며, 산소지수(OI: Oxygen Index)는 Section 1에서 평균 2,270 mgCO₂/gTOC, Section 2에서 평균 1,890 mgCO₂/gTOC, Section 3에서 평균 2,430 mgCO₂/gTOC로 각각 측정되었다.

5. 토 의: 신양리층 내 유기물의 기원

성산일출봉의 화산기원 물질들은 파도와 해류

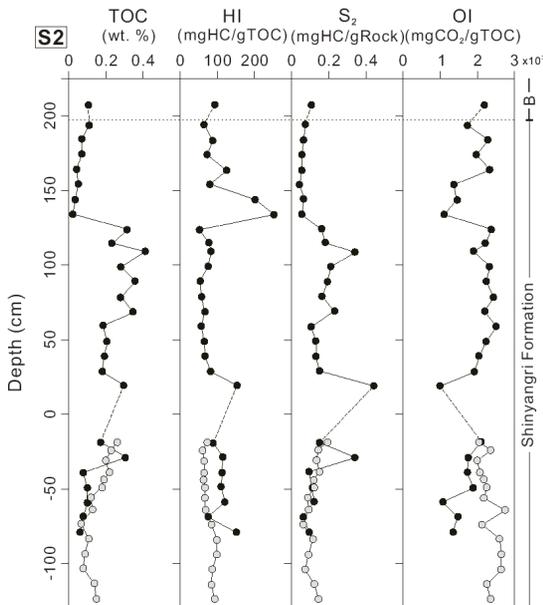


Fig. 7. Variations in total organic carbon (TOC), hydrogen index (HI), S_2 and oxygen index (OI) of samples from Section 2 (S2; closed circles) and Section 3 (S3; shaded circles).

의 작용을 받으며 퇴적되어 신양리층을 형성시켰다(박기화 외, 2003). 노두에서 암상을 관찰한 결과에서도 신양리층을 구성하는 퇴적입자들이 대부분 화산기원의 현무암질 암편임을 쉽게 알 수 있었다. 신양리층의 암편을 XRF로 분석한 결과에서도 그 기원이 성산일출봉일 가능성이 높음을 앞에서 이미 언급한 바 있다. 그러나 신양리층 내에는 화산기원의 입자 이외에 생물기원의 파편은 물론 기타 여러 종류의 작은 입자(fine grains)와 기질(matrix)을 구성하는 미세 성분들이 섞여 있다. 이 중에서 퇴적물 내 유기물의 기원을 밝히는 일반적인 방법으로, 총유기탄소(TOC)와 총질소(TN)의 비율을 이용할 수 있다. 기존 연구에 의하면(Hedges *et al.*, 1986; Emerson and Hedges, 1988; Jasper and Gagosian, 1990; Meyers, 1994), 총유기탄소와 총질소의 비율이 4~10까지를 해양성 기원의 유기물로 보고, 15 이상을 육성 기원의 유기물로 본다. 이런 해양성 및 육성 기원의 구분 방법은 조류(algae)에는 셀룰로오스(cellulose)가 결합되고, 육성 기원의 관다발식물(vascular plants)에는 그 양이 많은 데서 기인한다. 또한 해양성 기원의 유기물은 육성 기원의 유기물에 비해 질소를 함유하는 단백질(nitrogenous protein)이 상대적으로 풍부하기 때문이다. 신양리층에서의 총유기탄소와 총질소의 비율은 평균 4.9이다. 이와 같이 낮은 비율은 분석한 시료 내에 육성 기원의 유기물보다 해양성 기원의 유기물이 상대적으로 많이 포함되어 있음을 의미한다(Fig. 8a). 그러나 총유기탄소의 값이 0.5%보다 낮은 경우에는 총질소 중에서 무기질소(inorganic nitrogen)의 비율이 클 수 있으며, 이 경우 무기질소는 대개 점토광물(예: 일라이트)에 암모늄으로 결합되어 있다(Stevenson and Cheng, 1972; Müller, 1977). Fig. 8a에서 보듯이, 총유기탄소의 값이 0인 경우($x=0$) 총질소의 축에서 추세선의 값(N_{bou})은 0.02이다. 추세선의 값(N_{bou})이 0.1보다 작은 경우에는(신양리층의 경우에는 $N_{bou}=0.02$) 무기질소의 함량이 그리 높지 않음을 의미하므로, 신양리층에서 총유기탄소와 총질소의 비율을 이용하여 대체적인 유기물의 기원을 유추해 내는 일이 가능하다(Rossak *et al.*, 1999).

반면 총유기탄소와 총황의 비율에 있어서 대부분의 분석시료는 일반적인 해양(open ocean)의 퇴적환경이 갖는 비율의 범위 내에 들었지만, 일부 시료는 높은 총황의 값으로 인하여 정체(euxinic) 환경의 범위에 놓였다(Fig. 8b; Berner and Raiswell, 1983). 특히 신양리층의 하부구간에서 채취한 일부 시료에서 총황의 값이 상대적으로 높게 나타났다. 따라서 이것은 신양리 지역의 내만이 일시적으로 정체된 환경이었을 수 있음을 의미한다. 그러나 실제로 신양리 지역이 일

시적으로 정체 환경이었는지, 아니면 총유기탄소와 총황의 비율을 이용하는 방법의 자체 문제인지, 특히 총유기탄소의 값이 높지 않을 경우 생길 수 있는 분석방법의 한계인지는, 추후의 추가적인 실험을 통하여 해결해야 할 문제이다(Stein and Macdonald, 2004).

총유기탄소와 총질소 및 총황의 비율 이외에, 유기탄소가 풍부한(OC>0.5%), 미성숙단계의 퇴적물을 분석할 때, Rock-Eval 자료(S₂ 피크, 수소지수 및 산소지수)도 유기물의 기원을 밝히는 데에

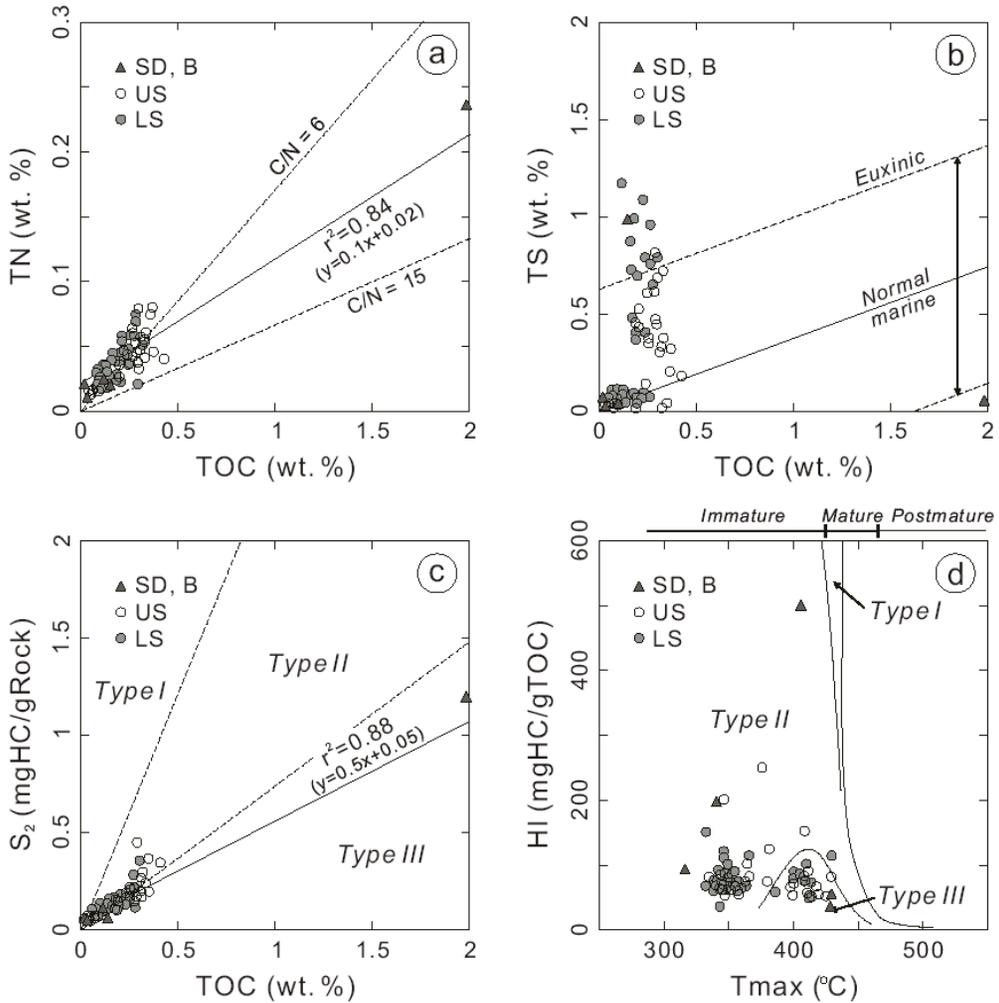


Fig. 8. Discriminant diagrams of organic-matter types based on crossplottings of (a) TN and TOC, (b) TS and TOC, (c) S₂ and TOC, and (d) HI and T_{max}. Triangle indicates sand dune (SD) and beach (B), whereas open and closed circles represent the upper (US) and lower (LS) Shinyangri Formation.

유용하게 이용될 수 있다(Tissot and Welte, 1984; Stein, 1991). 수소지수는 일반적으로 미성숙단계의 퇴적물에서 100 mgHC/gTOC 보다 높은 값을 보이던 전형적인 해양성 기원의 유기물로 추정할 수 있는 반면, 그 이하일 경우에는 육성 환경의 영향이 점차 커지는 것으로 볼 수 있다(Tissot and Welte, 1984). 분석한 시료의 전체 평균 수소지수의 값은 약 90 mgHC/gTOC이다. 즉 전체 평균값은 해양성 기원의 유기물에 일부 육성 기원의 유기물이 섞여 있음을 가리킨다. 이와 같은 결과는 총유기탄소와 S₂ 피크, T_{max} 값과 수소지수의 비율에서 보여준 결과와 매우 유사하다(Fig. 8c, d). 특히 T_{max} 값이 425°C 이하이면 미성숙단계의 퇴적물이라 말할 수 있는데(Stein and Macdonald, 2004), 분석시료들은 평균 374°C이었고, 거의 대부분이 425°C 이하의 값을 보여주었다. 또한 T_{max} 값과 수소지수의 비율에서는 분석된 시료들은 대부분 “케로젠 유형(kerogen type) II”의 영역에 놓였으며, 적지 않은 시료는 “케로젠 유형 III”의 영역에도 위치해 있었다(Fig. 8d). 즉 상기한 다른 결과들과 마찬가지로 T_{max} 값과 수소지수의 대비는 신양리층의 시료들이 대부분 해양성 기원의 유기물에 일부 육성 기원의 유기물이 함께 섞여 있음을 보여주고 있다.

사실 상기한 결과들은 분석 전에 예상했던 것보다 많은 양이 육성 기원의 유기물로 해석된 것이다. 물론 보다 더 정밀하게 유기물의 기원과 그의 정량을 파악하기 위해서는 퇴적물 내의 유기물에 대한 탄소동위원소(¹³C) 분석과 알케인(*n*-alkane) 사슬의 종류 및 분포를 연구해야 한다(예: Schubert and Stein, 1996; Twichell *et al.*, 2002). 그러나 이 연구에서 이용된 원소분석과 Rock-Eval 열분석만으로도 유기물의 기원을 충분히 추정할 수 있었으며, 그 결과들은 신양리층 내의 유기물이 주로 해양성 기원이었고, 동시에 신양리층은 적은 양이나마 육성 기원의 유기물을 끊임없이 받으면서 퇴적·형성되었음을 보여주고 있다. 이 같은 결과들은 내륙(제주도)에 인접한 신양리층의 지리적 위치와도 밀접하게 관련된 것으로 보인다.

6. 결론

(1) 신양리층은 왕모래와 잔자갈이 호층을 이루면서 구성되어 있는 암갈색의 준고결 층으로서, 지층의 주향은 거의 남북방향이며, 경사는 동쪽으로 약 2~5° 기울어진 구조를 보이고 있다. 지표에 노출되어 있는 신양리층 중에서 최하부를 구성하고 있는 암상은 세립질과 조립질의 박층이 규칙적으로 교호하며 평행층리를 보이는 “평행층리 사암상”이다. 그 위로는 암흑색의 현무암 역들이 발달한 “역암상”이 나타나며, 최상부에는 최하부의 암상과 같은 사암으로 구성되어 있으나, 평행층리보다는 사층리가 발달한 “사층리 사암상”을 보인다.

(2) 신양리층의 역암에서 채취한 현무암 역의 분석결과는 지층의 북동쪽과 북쪽에 위치한 분석구에서 채취한 시료의 분석결과와 아주 유사한 값을 보여주고 있다. 이는 신양리층의 현무암 역들이 성산일출봉이나 근처의 바로 인접한 분석구에서 유래했음을 가리킨다.

(3) 신양리층의 총유기탄소(TOC) 함량은 0.01~2.38 wt. %이다. 이와 같은 함량은 동해의 해양성 천부 코어퇴적물의 그것과 비교하면 낮은 편이다. T_{max} 값은 425°C 이하로서, 유기물이 미성숙 단계에 있음을 지시한다.

(4) 신양리층에서의 총유기탄소(TOC)와 총질소(TN)의 비율은 평균 4.9이다. 이 같은 비율은 분석한 시료 내에 육성 기원의 유기물보다 해양성 기원의 유기물이 상대적으로 많이 포함되어 있음을 의미한다. 반면 총유기탄소(TOC)와 총황(TS)의 비율에 있어서 대부분의 시료는 C/N 비율과 같은 결과를 보여주었지만, 일부 시료는 높은 총황의 값으로 인하여 정체 환경의 범위에 놓였다. 따라서 이것은 신양리 지역의 하부 퇴적환경이 일시적으로 정체되었을 가능성을 지시한다.

(5) 분석한 시료의 전체 평균 수소지수의 값은 약 90 mgHC/gTOC이다. 즉 전체 평균값은 해양성 기원의 유기물에 일부 육성 기원의 유기물이 섞여 있음을 가리킨다. 이와 같은 결과는 총유기탄소와 S₂ 피크, T_{max} 값과 수소지수의 비율에서 보여준 결과와 매우 유사하다.

사 사

심사에 유익한 조언을 주신 윤석훈 교수(제주대)와 익명의 심사위원께 감사드립니다. 이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의해 수행되었다(KRF-2003-037-C00036).

참고문헌

김봉균, 1974, 제주도에 발달하는 사구층의 고생물학적 연구. 지질학회지, 10, 95-108.

김일수, 박명호, 유강민, 류병재, 2004, 울릉분지 북서부해역 코어퇴적물의 지화학적 특성: 고환경 변화. 지질학회지, 40, 1-12.

박기화, 이봉주, 한만갑, 김정찬, 기원서, 박원배, 김태운, 2003, 제주도 지질여행. 한국지질자원연구원 · 제주발전연구원 펴냄, 179 p.

박준범, 권성택 (1991): 제주도 화산암의 암석화학적 진화(2): 제주 동부 월라봉부근의 시추코어 연구. 요약문, 지질학회지, 27, 531.

박준범, 권성택 (1993): 제주도 화산암의 지화학적 진화: 제주 북부 지역의 화산층서에 따른 화산암류의 암석기재 및 암석화학적 특징. 지질학회지, 29: 39-60.

손영중, 1989, 제주도 신양리층의 유공충에 관한 미고생물학적 연구. 전남대학교 대학원, 석사학위논문, 30 p.

원종관, 1976, 제주도의 화산암류에 대한 암석화학적인 연구. 지질학회지, 12, 207-226.

윤상규, 한대석, 이동영, 1987, 제주도 남부지역의 제4기 지질 조사 연구. 한국동력자원연구소, 연구보고서 KR-86-2-(B)-2, 64 p.

윤정수, 1986, Socotra 암초의 지질 및 주변해역 퇴적물에 대한 연구. 지질학회지, 22: 123-134.

최성자, 최위찬, Walter, C.R., 2004, 제주도 홀로세 해안단구의 Reconnaissance와 제주 발자국화석의 소고 대한지원환경지질학회 춘계 학술발표회 논문집, p. 307-309.

한상준, 윤호일, 박병권, 1987, 제주도 신양리층의 연안퇴적환경. 한국해양학회지, 22, 1-8.

Berner, R.A. and Raiswell, R., 1983, Burial of organic carbon and pyrite sulphur in sediments over Phanerozoic time: a new theory. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, 855-862.

Emerson, S. and Hedges, J.I., 1988, Processes controlling the organic carbon content of open ocean sediments. *Paleoceanography*, 3, 621-634.

Espitalie, J., Laporte, J.L., Madec, M., Maruis, F., Leplat, P., Paulet, J. and Boutefeu, A., 1977, Methode rapide de caracterisation des roches meres de leur potential petrolier et de leur d'evolution. *Revue de l'Institut Francais de Petrole*, 32, 23-42.

Hedges, J.I., Clark, W.A., Quay, P.D., Richey, J.E., Devol, A.H. and Santos, U.D.M., 1986, Composition and fluxes of particulate organic material in the Amazon River. *Limnology and Oceanography*, 31, 717-738.

Jasper, J.P. and Gagosian, R.B., 1990, The sources and deposition of organic matter in the Late Quaternary Pigmy Basin, Gulf of Mexico. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 1117-1132.

Kim, B.K., 1969, A stratigraphic and paleontologic study of the Sinyangri Formation in the vicinity of Sinyangri and Gosanri, the Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 5, 103-121.

Kim, K.H., Tanaka, T., Nakamura, T., Nagao, K., Youn, J.S., Kim, K.R. and Yun, M.Y., 1999, Palaeoclimatic and chronostratigraphic interpretations from strontium, carbon and oxygen isotopic ratios in molluscan fossils of Quaternary Seoguipo and Shinyangri Formations, Cheju Island, Korea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 154, 219-235.

Lee, M.W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju volcanic Island, Korea. *Tohoku Univ., Sci. Rept. 3rd Ser.*, 15, 177-256.

Meyers, P.A., 1994, Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 114, 289-302.

Müller, P.J., 1977, C/N ratios in Pacific deep-sea sediments: effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41, 765-776.

Rossak, B.T., Kassens, H., Lange, H. and Thiede, J., 1999, Clay mineral distribution in surface sediments of the Laptev Sea: Indicator for sediments provinces, dynamics and sources. In: Kassens, H., Bauch, H., Dmitrenko, I., Eicken, H., Huberten, H.W., Melles, M., Thiede, J. and Timokhov, L. (eds.), *Land-Ocean Systems in the Siberian: Dynamics and History*. Springer, Berlin, p. 587-600.

Schubert, C.J. and Stein, R., 1996, Deposition of organic carbon in Arctic Ocean sediments: terrigenous supply vs marine productivity. *Organic Geochemistry*, 24, 421-436.

Sohn, Y.K., 1996, Hydrovolcanic processes forming basaltic tuff rings and cones on Cheju Island, Korea. *Geological Society of American Bulletin*, 108, 1199-1211.

Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 1992, The Ilchulbong tuff cone, Cheju Island, South Korea: depositional processes and evolution of an emergent, Surtseyan-type tuff cone. *Sedimentology*, 39, 523-544.

Stein, R., 1991, Accumulation of organic carbon in marine sediments. *Lecture Notes in Earth Sciences* 34, Springer, Heidelberg, 217 p.

Stein, R. and Macdonald, R.W., 2004, *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean*. Springer, Berlin, 363 p.

- Stevenson, F.J. and Cheng, C.N., 1972, Organic geochemistry of the Argentine Basin sediments: Carbon-nitrogen relationships and Quaternary correlations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 36, 653-671.
- Tissot, B.P. and Welte, D.H., 1984, *Petroleum Formation and Occurrence: A New Approach to Oil and Gas Exploration*. Springer, Berlin, 699 p.
- Twichell, S., Meyers, P.A. and Diester-Haass, L., 2002, Significance of high C/N ratios in organic-carbon-rich Neogene sediments under the Benguela Current upwelling system. *Organic Geochemistry*, 33, 715-722.
- Yi, S., Yun, H. and Yoon, S., 1995, Late Quaternary calcareous nanofossils from the Sinyangri Formation of Cheju (Jeju) Island, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 11, 146-158.
- Yoon, S., Koh, G.W. and Kim, I.T., 1995, Development history of Cheju Island, Chejudo. *Bull. Cheju-do Prov. Govern.*, 98, 148-164.
-
- 투 고 일: 2004년 9월 15일
 심 사 일: 2004년 11월 9일
 심사완료일: 2005년 3월 4일