

제주분지 시추시료에 포함된 유기물의 안정동위원소 및 생물표기화합물 특성

정태진¹ · 이영주^{1*} · 김지훈¹ · 오재호¹ · 박명호² · 송훈영²

¹한국지질자원연구원 석유해저자원연구부, ²한국석유공사 석유기술연구원

Stable Isotope and Biomarker Characteristics of Organic Matter from the Drilling Core Sediments, Jeju Basin

Tae-Jin Cheong¹, Young-Joo Lee^{1*}, Ji-Hoon Kim¹, Jae-Ho Oh¹, Myongho Park² and Hoon Young Song²

¹Petroelum and Marine Resources Research Division, KIGAM, Daejeon 305-350, Korea

²Petroelum Technology Institute, KNOG, Anyang 431-711, Korea

Stable isotope and biomarker analyses were carried out for the organic sediments from the exploratory wells in the Jeju Basin in order to understand the characteristics of organic matter. Organic matter in Geobuk-1, Okdom-1, JDZ VII-1 and VII-2 well is predominantly originated from land plants rather than marine algae according to carbon ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$) isotopic compositions. In the Geobuk-1, geochemical characteristics such as carbon ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$), nitrogen ($\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$) and TOC contents are obviously changed by the depth 2,400 m, which is likely due to the change of origin of organic matter, sedimentary process or sedimentary environments. Analysis of the saturated fraction of the bitumen suggests the contribution of migrated oil to the indigenous bitumen from the samples 2,509, 2,833 and 3,163 m of the JDZ VII-1 and 3,253 m of the Geobuk-1 well. However, this characteristics can be derived from the contribution of the original organic matter. Based on the biomarker analysis, the samples from the Okdom-1 and Geobuk-1 appear to represent sedimentary organic matter of similar composition, that is relatively immature, and which was probably deposited in the fluvio-deltaic setting with minor offshore marine influence. The samples from JDZ VII-1 appear to have been deposited in a more terrestrially dominated setting.

Key words : Jeju Basin, Organic matter, Stable isotope, Biomarker

제주분지 시추공 시료에 포함된 유기물의 특성을 파악하기 위해서 시추 시료를 채취하여 안정동위원소 및 생물표기화합물 분석을 실시하였다. Geobuk-1, Okdom-1, JDZ VII-1, VII-2 시추공 유기물의 탄소 및 질소 동위원소분석 결과는 유기물들의 기원이 해양조류 기원보다는 육성식물 기원이 우세함을 보여준다. 또한 Geobuk-1 공에서는 2,400 m를 기준으로 하여 지화학적 지시자들의 뚜렷한 변화가 관찰되는데 이것은 2,400 m에서 유기물 기원이나 퇴적작용 혹은 퇴적환경이 급격히 변화한 것에 기인하는 것으로 추정된다. 비투멘의 포화탄화수소 분석 결과 Geobuk-1공 3,253 m, JDZ VII-1공 2,509, 2,833 그리고 3,163 m 구간의 시료에서는 이동된 석유의 흔적을 나타내지만 이것은 기원 유기물의 특성을 나타내는 것으로 판명되었다. 생물표기화합물에 의하면 Geobuk-1공 3,253 m 구간의 시료를 제외 하면 분석된 Okdom-1, Geobuk-1 시추공 시료는 열적으로 미성숙 상태이고, 해성 기원 유기물의 영향을 약간 받기는 하였으나 대체로 하-호성 환경에서 퇴적된 것으로 나타났다. 반면 JDZ VII-1 시추공 시료는 대부분 Geobuk-1, Okdom-1 시추공 시료보다 육성 환경이 우세한 환경에서 퇴적된 것으로 나타났다.

주요어 : 제주분지, 유기물, 시추시료, 안정동위원소, 생물표기화합물

1. 서 론

한국 남해에 발달하는 퇴적분지에서 지금까지 석유 탐사를 위해서 14개 공이 시추되었다. 기존 자료에 의

하면 이들 중에서 Okdom-1, Geobuk-1, JDZ VII-1 및 JDZ VII-2공 등의 4개 시추 구간에서 석유 근원암의 발달이 가능한 조건을 갖춘 것으로 나타났다. Rock-Eval 열분석, 유기물 원소분석 자료에 의하면 이

*Corresponding author: yjl@kigam.re.kr

들 4개공의 시추시료는 대체로 육성 고등생물 기원의 type III에 비교되는 유기물을 포함하고 있지만 Okdom-1, Geobuk-1공의 시료들은 해상 기원인 type II 유기물이 일부구간에 포함될 수 있는 것으로 나타났다(Lee, 1997). 이 연구에서는 생물표기화합물(biomarker), 케로젠의 동위원소 분석을 시행함으로써 이들 4개 시추공 퇴적물에 포함된 유기물의 특성과 퇴적 환경을 보다 정확하게 평가하고자 하였다. Okdom-1, Geobuk-1, JDZ VII-1 및 JDZ VII-2공으로부터 총 49개의 안정동위원소를 분석하였으며, 시료의 양이 충분치 않은 JDZ VII-2공을 제외한 3개공으로부터 총 20개의 생물표기화합물 분석이 이루어졌다(Tables 1 and 2). 시료는 기존의 분석 결과를 참고로 하여 총유기탄소 함량이 상대적으로 높은 시료를 선택하였다. 안

정동위원소 분석은 서울대학교 농업과학 공동기기센터에서, 그리고 생물표기화합물 분석은 노르웨이의 Applied Petroleum Technology AS에 의뢰하여 수행하였다.

2. 지질개요

전술한 4개의 시추공이 위치하는 제주분지는 동중국해 분지의 북부지역에 위치하며, 대륙붕 4광구, 5광구, 6-2광구 및 한일공동개발광구(Korea-Japan Joint Development Zone: JDZ)를 포함한다. 제주분지는 서쪽으로 쩌민(Zhemin)습곡음기대, 동쪽으로 류큐(Ryukyu) 습곡음기대, 남쪽으로 시후(Xihu) 함몰대와 접한다(Fig. 1), 중력 탐사자료 및 굴절 탄성파 탐사자료에 의한 해

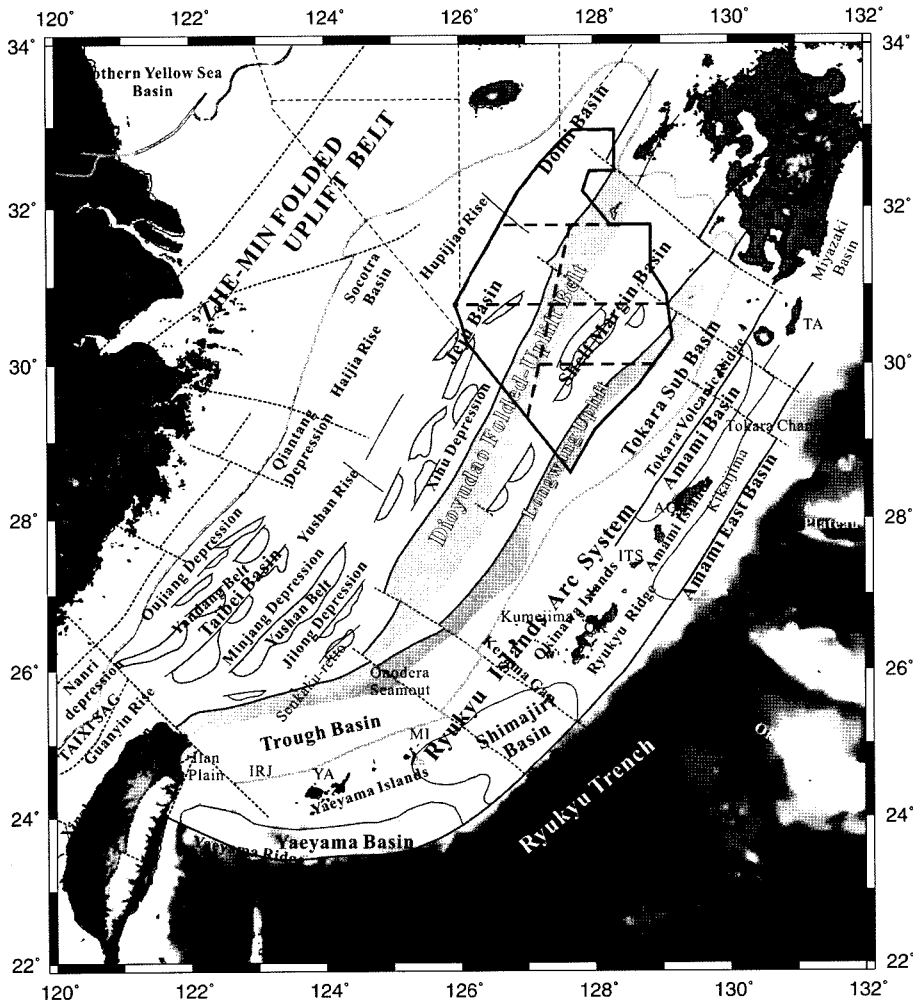


Fig. 1. Basin distribution and structure map of the East China Sea Basin area.

석결과에 의하면 동중국해 대륙붕 분지의 지각 두께는 27 km 내지 35 km로 육성지각에 해당되며, 오키나와 해곡에서의 지각 역시 해곡의 남단을 제외하고는 육성지각의 특성을 보인다(Uyeda and Miyashiro, 1974; Li and Tao, 1992; Geological Survey of Japan, 1994). 또한 이들 자료를 이용하여 분석된 모호불연속면의 심도는 일반적으로 북쪽으로 가면서 깊어지고 남쪽으로 가면서 얕아지는 경향을 나타낸다(Lee *et al.*, 1980; Zhou *et al.*, 1989; Sibuet *et al.*, 1987; Qin *et al.*, 1996).

동중국해 대륙붕 분지에 분포하는 기반암은 원생대 변성암과 이를 피복하는 중생대 화성암으로 구성되어 있다. 화성암류의 지질시대는 절대연령 측정결과 후기 쥬라기-후기 백악기로 밝혀졌다(Honza, 1976; Zhou *et al.*, 1989; Park *et al.*, 1987, 1989; Bong *et al.*, 1993; Oh *et al.*, 1994; Western Atlas and CNOOC, 1994; Silverman *et al.*, 1996; KNOC, 2004). 동중국해 대륙붕 분지의 기반암 위에는 지역적으로 12 km 이상의 쇄설성 퇴적층이 발달되어 있다(KNOC, 2004). 오키나와 해곡분지의 경우에는 기반암 위에 10 km 이상 두께의 퇴적층이 발달되어 있다(Yin and Liu, 1990).

동중국해 대륙붕 분지의 형성은 후기 백악기에 태평양판이 유라시아판 아래로 섭입(subduction) 되면서 확장되기 시작하였으며, 이로 인해 분지에는 많은 지구 또는 반지구가 형성되었다(Ludwig, 1966; Karig, 1971; Zhou *et al.*, 1989; Zhang and Kou 1989; Li and Tao, 1992; KNOC, 2004). 이러한 구조운동은 에오세 말까지 지속된 것으로 보고되어 있다(Zhou *et al.*, 1989; Li and Tao, 1992; Liu *et al.*, 1994). 에오세 말과 올리고세에는 태평양판의 이동방향이 변함에 따라 야기된 압축성 용기운동에 의해 동중국해 대륙붕 분지는 변형을 받았다(SPT, 1993). 올리고세 말에서 초기 마이오세에 동중국해 대륙붕 분지의 서부에서는 습곡을 받은 올리고세 및 선 올리고세 퇴적층들이 다시 습곡, 용기되고 침식을 받아 평평하게 되었다(Zhou *et al.*, 1989). 초기 마이오세에는 동중국해 대륙붕 분지는 침강단계에 접어 들었으며(Zhou *et al.*, 1989), 이 시기에 화산활동이 있었음이 시추공(PZ-1, Okdom-1, Geobuk-1) 자료 분석을 통해 밝혀졌다. 중기 마이오세-후기 마이오세 기간에 동중국해 대륙붕 분지에서는 분지의 침강에 따른 퇴적작용만이 이루어졌다. 후기 마이오세에 오키나와 해곡분지가 형성되기 시작하였으며(Zhou *et al.*, 1989), 해곡분지의 확장과 관련된

화산작용이 일어났다. 후기 마이오세 말 동중국해 대륙붕 분지의 동부에서는 구조 역전이 일어나 기존의 확장성 정단층이 역단층으로 활성화되었으며, 용기와 침식작용이 일어났다(Zhou *et al.*, 1989). 플라이오세와 플라이스토세는 동중국해 대륙붕 분지에서의 광역적인 침강과 오키나와 해곡 분지의 확장으로 특징지어지는 시기이다. 플라이오세부터 동중국해 대륙붕 분지와 오키나와 해곡분지가 세계적인 해수면 상승에 의해 대양과 연결되었다.

3. 연구 방법

3.1. 안정동위원소 분석

퇴적물 내 유기물질의 탄소($\delta^{13}\text{C}$) 및 질소($\delta^{15}\text{N}$) 동위원소를 측정하기 위해서는 무기 탄산염(CaCO_3)과 무기 질소(inorganic nitrogen)를 제거하는 전처리가 필요하다. 일정량의 퇴적물 시료를 비이커에 담아 3N 염산으로 무기 탄산염 및 무기 질소를 24시간 동안 용해하여 제거하고, 4~5회 정도 3차 증류수로 세척하여 70 °C로 건조기에서 24시간 건조하였다. 건조한 시료는 모타르 아게이트(mortar agator)로 분쇄하였다.

분석은 탄소 및 질소 원소 분석기(NA Series 2, CE Instruments, Italy)에 연결된 연속 흐름 안정동위원소 질량분석기(IsoPrime-EA, Micromass, UK)를 이용하였다. 표준물질로는 탄소의 경우 PDB(Pee Dee Belemnite), 질소의 경우는 공기의 질소(atmospheric N_2)가 이용되었다. 탄소 및 질소의 분석 재현성은 각각 <0.1‰과 <0.2‰이다. 퇴적물 내 유기물질의 탄소($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) 및 질소($\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$) 동위원소 분석 시 총 유기탄소함량(TOC) 및 총질소 함량(TN)도 동일한 기기로 측정하였다. 탄소($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) 및 질소($\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$)의 동위원소비는 아래와 같은 식에 의해 계산하였다.

$$\delta(\text{‰}) = (R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}} \times 1000$$

R: 시료 및 표준물질의 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 과 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 비.

3.2. 생물표기화합물 분석

생물표기화합물 분석은 다음과 같은 과정을 거쳐 이루어졌는데, 우선 분석을 위한 시료는 물과 비누로 잘 씻어 이수를 제거하여야 한다. 시료에서 비투멘을 추출하기 위해서는 속스텍(Soxtec Tecator)에서 디클로로메탄(dichloromethane)을 용매로 사용하였으며, 탄화수소를 성분별로 분리하기 위해서는 Iatro-scan MK-5(TLC/FID Analyzer)를 사용하였다. 분리된 탄화수소

성분은 HP 5890 II 기체 크로마토그래피를 사용하여 포화탄화수소의 성분을 분석하였다. 분석시에 칼럼은 CP-Sil-5 CB-MS(60 m×0.25 mm×0.25 μm) 를 이용하였고 온도 프로그램은 50°C에서 시작하여 1분 머문 다음 320°C까지 4°C/min로 승온하여 25분간 유지하였다. 기타 탄화수소 생물표기화합물의 분석을 위해서 Micromass ProSpec 기체 크로마토그래피 질량분석기(GC-MS)를 사용하여 Selected Ion Recording(SIR) 방식으로 분석하였다. 칼럼은 기체 크로마토그래피와 동일한 것을 이용하였으며 온도 프로그램은 50°C에서 시작하여 1분 머문 다음 120°C까지 20°C/min로 승온하고 320°C까지 2°C/min로 승온하여 20분간 유지하였다.

4. 안정동위원소 분석 결과

4.1. 탄소 동위원소비($\delta^{13}C_{org}$)

유기물질의 탄소 동위원소비($\delta^{13}C_{org}$)는 퇴적 후에 질소 동위원소비($\delta^{15}N_{org}$)나 총유기탄소/질소 질량비(TOC/TN)보다 비교적 안정적인 것으로 간주되어 육성 및 해성 기원 유기물 구분에 많이 사용된다. 육성 식물은 광합성의 경로에 따라 Calvin(C_3)과 Hatch-Slack(C_4)으로 구분되며, 이러한 광합성 경로는 탄소 동위원소비에 영향을 준다. C_3 식물들은 전체 식물의 90%를 차지하며 -32‰에서 -21‰의 탄소 동위원소비 범위(평균값: -27‰)를 가지고 있다. C_3 식물들은 대부분 사막기후 지역에서 분포하며, -17‰에서 -9‰의 탄소 동위원소비 범위(평균값: -14‰)를 가진다(Deines, 1980). C_3 에 속하는 담수 조류는 -30‰에서 -26‰의 탄소 동위원소비 범위를 가지며, 해성 조류는 -2‰에서 -16‰의 탄소 동위원소비 범위를 가진다(Lamb *et al.*, 2006). 분석된 탄소 동위원소비 값을 살펴보면 Okdom-1공에서는 -26.96‰에서 -24.85‰, Geobuk-1공에서는 -28.63‰에서 -25.27‰, JDZ VII-1공에서는 -29.53‰에서 -27.10‰, JDZ VII-2공에서는 -29.06‰에서 -26.35‰의 범위를 가진다(Table 1 and Fig. 2). 그러므로 이들 시추공의 유기물 탄소 동위원소비는 시추공의 유기물들이 대체로 육성 기원이고 일부 시료들이 담수 조류 기원임을 보여준다(Fig. 2).

Geobuk-1공에서는 탄소 동위원소비와 유기물의 함량에 따라 크게 두 그룹으로 명확히 구분된다(Table 1 and Fig. 2). 첫 번째 그룹은 심도 2,136 m에서 2,283 m까지의 구간에서 분석된 시료들로서, 탄소 동위원소비가 -25.39‰에서 -25.37‰, 유기물 함량은 2.22 wt%에

Table 1. Analyzed result of TOC, TN, $^{13}C_{org}$ and $^{15}N_{org}$ in the samples from the Okdom, Geobuk, JDZ VII-1 and JDZ VII-2 wells.

Core	Depth (m)	TOC (wt.%)	TN (wt.%)	TOC/TN	$\delta^{13}C$ (‰)	$\delta^{15}N$ (‰)
Okdom-1	2140	0.51	0.109	4.7	-26.96	4.02
	2270	1.86	0.144	12.9	-26.11	5.58
	2310	2.20	0.099	22.2	-26.02	5.60
	2410	2.42	0.117	20.7	-25.80	6.09
	2500	1.81	0.117	15.5	-25.77	5.35
	2590	2.78	0.114	24.4	-26.74	2.80
	2630	2.95	0.112	26.3	-25.67	2.85
	2700	3.00	0.134	22.4	-26.39	3.66
	2800	3.99	0.129	30.9	-24.85	3.53
	2880	2.07	0.091	22.7	-26.94	2.54
Geobuk-1	2136	2.22	0.112	19.8	-25.39	4.00
	2199	2.97	0.149	19.9	-25.27	3.91
	2283	3.14	0.114	27.5	-25.34	3.22
	2490	1.58	0.114	13.9	-27.78	0.18
	2580	1.60	0.112	14.3	-28.01	2.04
	2697	1.49	0.104	14.3	-27.86	1.85
	3253	0.91	0.134	6.8	-28.63	1.98
	JDZ VII-1	1387	0.42	0.057	7.4	-27.46
1573		4.47	0.252	17.7	-28.65	2.55
2191		1.80	0.138	13.0	-28.26	2.29
2323		0.38	0.068	5.6	-27.10	1.34
2419		1.46	0.101	14.5	-28.54	0.58
2509		0.33	0.070	4.7	-27.79	2.51
2593		0.62	0.072	7.9	-28.81	3.90
2683		1.11	0.102	10.9	-28.53	2.53
2719		0.49	0.078	6.3	-27.58	2.56
JDZ VII-1		3013	3.78	0.160	23.6	-28.56
	3073	1.52	0.144	2.2	-29.53	1.71
	3163	0.79	0.100	7.9	-27.80	2.93
	1873	46.36	1.327	34.9	-27.42	3.04
	1873	8.41	0.338	24.9	-28.07	2.66
	2113	13.52	0.461	29.3	-	-
	2383	5.36	0.286	18.7	-27.84	1.82
	2833	6.62	0.252	26.3	-27.34	2.75
JDZ VII-2	2273	1.78	0.118	15.1	-28.51	2.25
	2729	2.23	0.148	15.1	-28.67	2.03
	2747	2.47	0.113	21.9	-29.06	2.38
	2837	1.11	0.088	12.6	-28.93	1.33
	2951	1.82	0.081	22.5	-28.40	2.29
	1915	39.59	0.898	44.1	-27.33	3.48
	1915	6.54	0.247	26.5	-26.79	1.66
	2045	31.14	0.835	28.2	-26.35	1.65
	2045	9.49	0.337	37.3	-27.02	-11.01
	2429	7.70	0.170	45.3	-27.14	1.68
2453	0.15	0.021	7.1	-26.73	-2.04	
2567	0.23	0.056	4.1	-27.85	1.74	

-: not analyzed

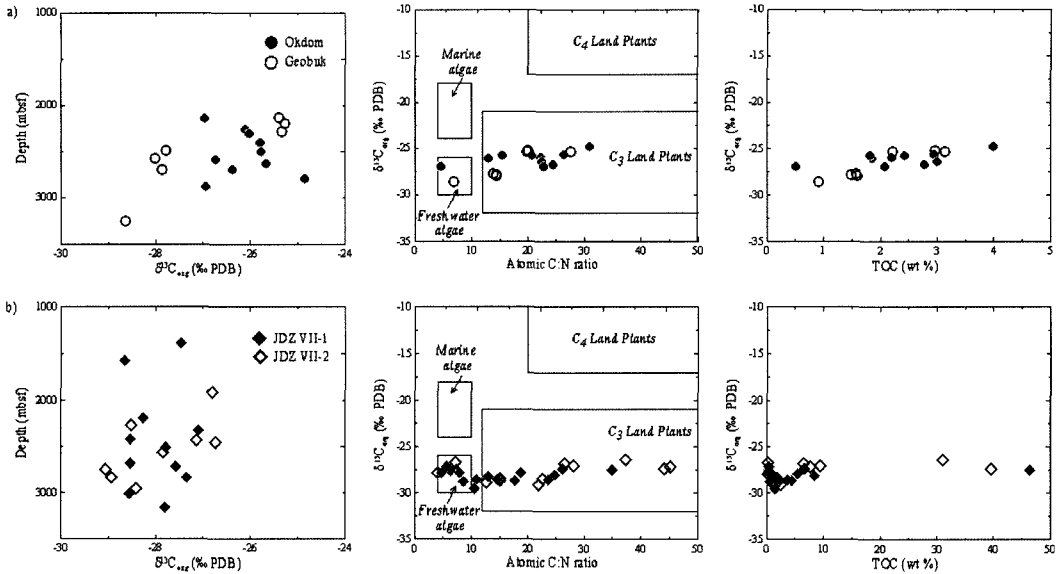


Fig. 2. Plots of profile of $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, atomic TOC/TN ratio vs. $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ vs. TOC (a) for samples from the Okdom-1 and Geobuk-1 wells, (b) for samples from the JDZ VII-1 and JDZ VII-2 wells.

서 3.41 wt%의 범위를 가진다. 두 번째 그룹은 심도 2,490 m 하위 구간에서 분석된 시료들로서 탄소 동위원소비가 -28.63‰에서 -27.86‰, 유기물 함량은 0.48 wt%에서 1.90 wt%의 범위를 가진다. 첫 번째 그룹이 두 번째 그룹보다 유기물의 탄소 동위원소비가 약 2~3‰ 정도 높고, 총유기탄소 함량도 높다. 또한 두

그룹의 총유기탄소/질소 질량비를 비교하면, 첫 번째 그룹에서는 총유기탄소/질소 질량비가 19.8에서 27.5의 값을 가지며, 두 번째 그룹은 6.8에서 16.2의 값을 가져서 전자가 후자보다 상대적으로 높은 값을 가진다. 이상과 같이 Geobuk-1공에서는 2,300~2,400 m 구간을 경계로 하여 지화학적 특징들(탄소 동위원소비, 총

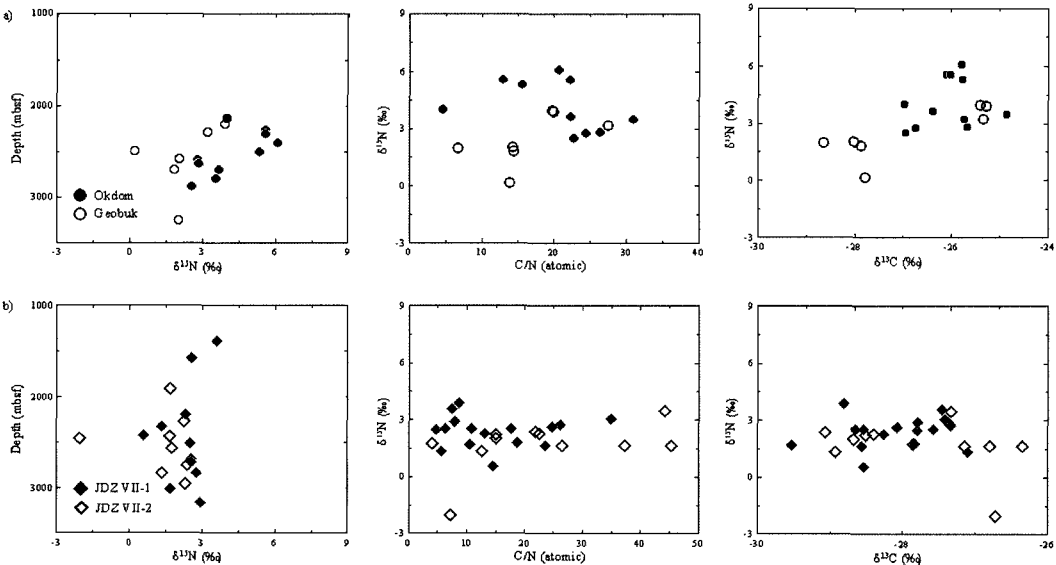


Fig. 3. Plots of profile of $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{15}\text{N}$ vs. atomic TOC/TN ratio, and $\delta^{15}\text{N}$ vs. $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (a) for samples from the Okdom-1 and Geobuk-1 wells, (b) for samples from the JDZ VII-1 and JDZ VII-2 wells.

유기탄소 함량, 총유기탄소/질소 질량비)이 급격히 변화하는데 이것은 이 구간을 경계로 하여 유기물의 기원, 퇴적작용 혹은 퇴적환경이 급격히 변화했던 것을 나타내는 것일 수도 있다.

유기물질의 탄소 동위원소비와 총유기탄소/질소 질량비를 도시하면, Okdom-1공과 Geobuk-1공에서는 대부분이 C_3 식물을 나타내는 영역에 위치하며, 이것은 유기물질이 C_3 광합성 경로를 이용하는 육성 식물 기원이 우세하다는 것을 지시한다(Fig. 2). JDZ VII-1공과 JDZ VII-2공의 경우에는 유기물질은 C_3 광합성 경로를 이용하는 육성 식물 기원이 우세하고 부분적으로 담수 조류 기원을 나타낸다. 유기물의 탄소 동위원소비와 퇴적물의 유기물 함량 사이의 상관관계는 매우 약하다(Fig. 2).

4.2. 질소 동위원소비

일반적으로 육성 식물기원에서는 질소 동위원소비 ($\delta^{15}N$)가 -5%에서 18%(평균값: 3%)의 범위를 가지며(Schoeninger and DeNiro, 1984), 해성 조류 기원은 평균값이 7%에서 10%에 위치한다(Peters *et al.*, 1978). 분석된 질소 동위원소비를 보면 Okdom-1공에서는 2.54%에서 6.09%, Geobuk-1공에서는 0.18%에서 4.0%, JDZ VII-1공에서는 0.58%에서 3.90%, JDZ VII-2공에서는 -11.01%에서 3.48%의 범위를 가진다(Table 1 and Fig. 3). JDZV II-2공의 -11.01%은 다른 시료들과 매우 큰 차이를 보이는 비정상적인

값이기 때문에 해석에서 제외하였다. 대부분의 질소 동위원소비 값들이 3% 부근에 위치하며, 이와 같은 결과는 분석된 시료들의 유기물들이 해성 조류보다는 육성 식물 기원이 우세하다는 것을 의미한다(Fig. 3). 따라서 분석된 질소 동위원소비 값도 탄소 동위원소 분석결과와 마찬가지로 유기물질이 육성 식물 기원이 우세하다는 것을 보여준다. 분석된 질소 동위원소비 값은 깊이나 총유기탄소/질소 질량비, 탄소 동위원소비와 사이에는 어떠한 상관관계도 보이지 않는다.

5. 생물표기화합물

5.1. 이동된 석유의 증거

포화탄화수소 분석된 모든 시료에서 노말알칸이 C_{12} 에서 C_{36} 까지 검출되었다. Geobuk-1공의 시료는 심도 3,253 m의 시료를 제외하고는 모두 뚜렷한 홀수 우세를 보인다(Figs. 4 and 5). 이것은 육성 기원 유기물의 유입이 우세하고 열적 성숙도가 비교적 낮다는 것을 나타낸다(Peters and Moldowan, 1993; Peters *et al.*, 2005). 심도 3,253 m 시료는 다른 시료와 달리 C_{19-20} 노말 알칸이 가장 우세하게 나타나고 홀수 우세를 나타내지 않아서 이동된 석유의 가능성을 보인다. 하지만 이 시료는 이동된 석유보다는 유기물 자체의 특성에 의한 것으로 생각되는데 이것은 유기물이 열적으로 미성숙된 암석에서 비투멘 지수(BI=100×SI/TOC)가 100% 이상인 경우에 이동된 석유의 증거를

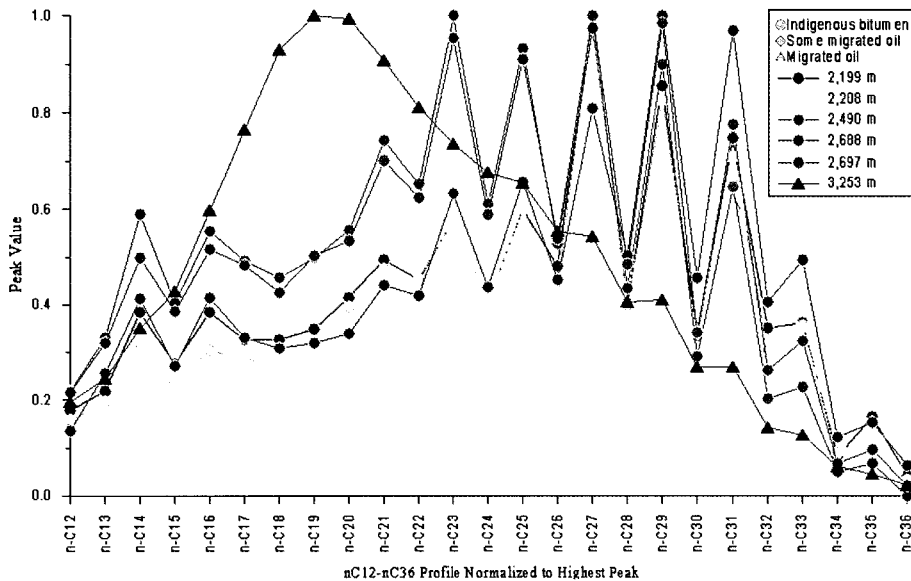


Fig. 4. Distribution of n-alkanes in the samples from the Geobuk-1 well.

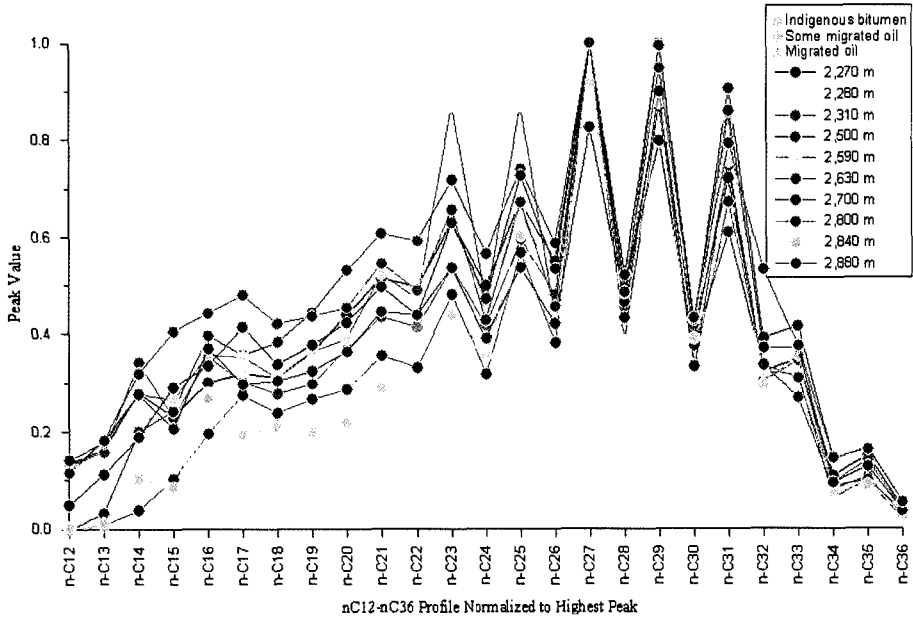


Fig. 5. Distribution of n-alkanes in the samples from the Okdom-1 well.

나타내는 것으로 간주되기 때문이다(Killops and Killops, 2005). Geobuk-1공 심도 3,253m 시료의 경우에는 BI(7) 뿐만아니라 Rock-Eval 열분석 생산지수 (Production Index, PI)도 매우 낮게 나타나서 이동된 석유보다는 유기물 자체의 특성에 의한 것일 가능성이 높다.

Okdom-1공 시료는 대부분 Geobuk-1공 시료와 매우 유사한 노말 알칸 분포 양상을 보인다(Figs. 4 and 5). 즉, 노말 알칸의 홀수 우세가 매우 뚜렷하여 퇴적 당시에 육성 고등식물의 유입이 매우 우세하다는 것을 보여준다. JDZ VII-1공 시료는 Geobuk-1공 및 Okdom-1공보다는 노말 알칸 분포에서 홀수 우세성이

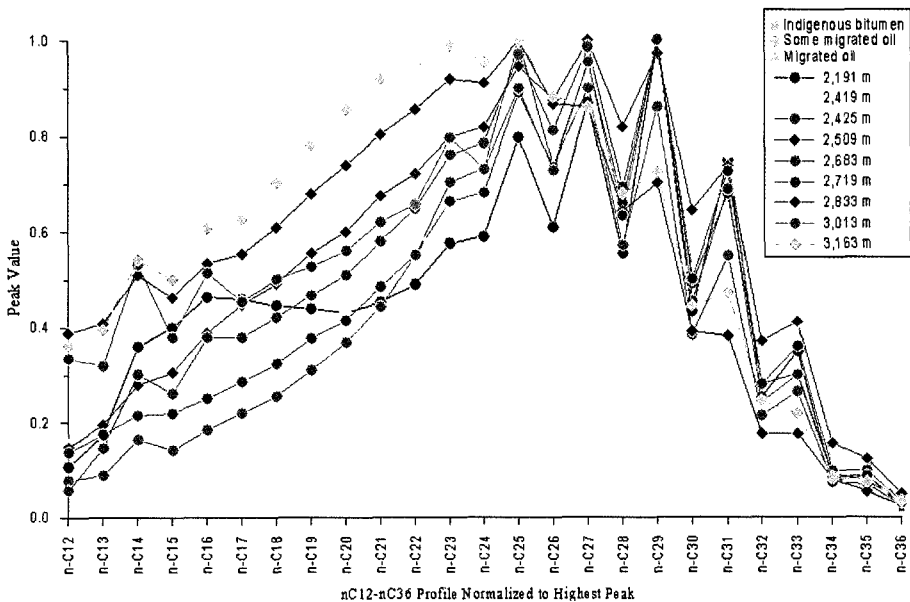


Fig. 6. Distribution of n-alkanes in the samples from the JDZ VII-1 well.

덜 뚜렷하다(Fig. 6). 이것은 육성 유기물의 유입이 적거나 열적 성숙도가 높기 때문에 나타나는 현상이다(Peters *et al.*, 2005). 특히 2,509 m, 2,833 m 그리고 3,163 m의 시료들은 다른 시료들보다 홀수 우세성이 약하므로 이동된 석유의 가능성을 나타내기도 한다. Rock-Eval 열분석 혹은 유기물의 원소분석과 같은 다른 지화학적 분석 결과들은 JDZ VII-1공의 유기물이

육성 기원이며, Geobuk-1공 및 Okdom-1공보다 높은 열적 성숙도를 지시한다. 따라서 JDZ VII-1공의 낮은 홀수 우세성은 유기물의 기원보다는 열적 성숙에 기인한 것으로 생각된다.

5.2. 퇴적환경과 근원 유기물

프리스탄(Pristane)/파이탄(Phytane)과 노말 알칸의 함량 비율을 살펴보면 JDZ VII-1공에서 채취한 시료의 유기물은 산화환경에 노출된 특성을 나타내고 Okdom-1공과 Geobuk-1공의 시료에 포함된 유기물은 산화환경과 환원환경에 걸쳐 있다(Fig. 7; Killops and Killops, 2005). 스테란과 호판의 비율에서도 이와 유사한 특성을 보인다. 스테란과 호판의 비율에서 스테란이 우세할수록 환원환경과 해성 유기물의 특성을 나타내는 반면에 낮은 값을 나타내는 것은 육성 기원 유기물과 산화환경을 지시한다.

C₂₇₋₂₈₋₂₉ 스테란 삼각도표에서 보면 JDZ VII-1공 시료는 삼각주-육상 환경을 나타내고 Okdom-1공과 Geobuk-1공 시료는 대부분 강어귀(estuarine) 환경을 나타내는데 1개 시료(Geobuk-1공 3,253 m)는 해성 환

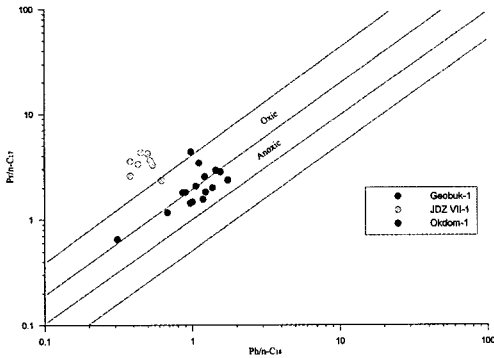


Fig. 7. Isoprenoid parameters of the biodegradation and depositional environment.

Table 2. List of the biomarker analysis samples and GC parameters.

Well	Sample type	depth(m)	Lithology	CPI	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈
Geobuk-1	cuttings	2,199	dark grey mudstone	1.99	1.83	1.23
Geobuk-1	cuttings	2,208	dark grey mudstone	2.05	2.01	1.37
Geobuk-1	cuttings	2,490	dark grey mudstone	2.11	1.80	0.86
Geobuk-1	cuttings	2,688	dark grey mudstone	1.87	1.81	0.90
Geobuk-1	cuttings	2,697	dark grey mudstone	2.06	2.08	1.06
Geobuk-1	cuttings	3,253	dark grey mudstone	1.18	0.65	0.31
JDZ VII-1	cuttings	2,191	dark grey mudstone	1.71	2.36	0.62
JDZ VII-1	cuttings	2,419	dark grey mudstone	1.50	3.62	0.52
JDZ VII-1	cuttings	2,425	dark grey mudstone	1.55	4.32	0.45
JDZ VII-1	cuttings	2,509	dark grey mudstone	1.25	2.59	0.38
JDZ VII-1	cuttings	2,683	dark grey mudstone	1.45	3.25	0.54
JDZ VII-1	cuttings	2,719	dark grey mudstone	1.51	4.23	0.50
JDZ VII-1	cuttings	2,833	dark grey mudstone	1.23	3.55	0.38
JDZ VII-1	cuttings	3,013	dark grey mudstone	1.56	3.33	0.43
JDZ VII-1	cuttings	3,163	dark grey mudstone	1.20	1.25	0.25
Okdom-1	cuttings	2,270	dark grey mudstone	1.77	1.43	0.97
Okdom-1	cuttings	2,280	dark grey mudstone	1.90	1.47	1.00
Okdom-1	cuttings	2,310	dark grey mudstone	1.92	1.56	1.18
Okdom-1	cuttings	2,500	dark grey mudstone	1.66	1.17	0.68
Okdom-1	cuttings	2,590	dark grey mudstone	2.29	2.38	1.74
Okdom-1	cuttings	2,630	dark grey mudstone	1.84	2.83	1.55
Okdom-1	cuttings	2,700	dark grey mudstone	1.93	2.93	1.44
Okdom-1	cuttings	2,800	dark grey mudstone	2.13	2.55	1.21
Okdom-1	cuttings	2,840	dark grey mudstone	2.04	4.40	0.98
Okdom-1	cuttings	2,880	dark grey mudstone	1.88	3.43	1.11

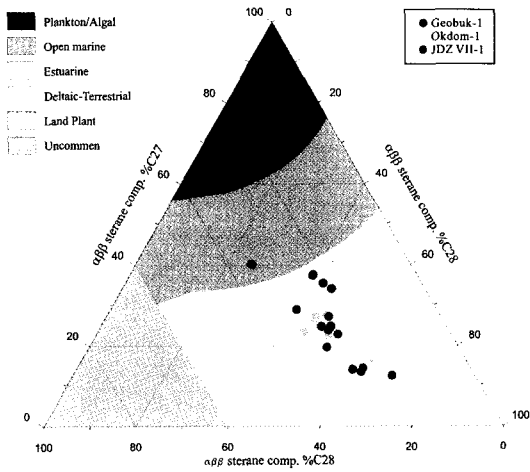


Fig. 8. C27-28-29 sterane ternary diagram showing depositional environment.

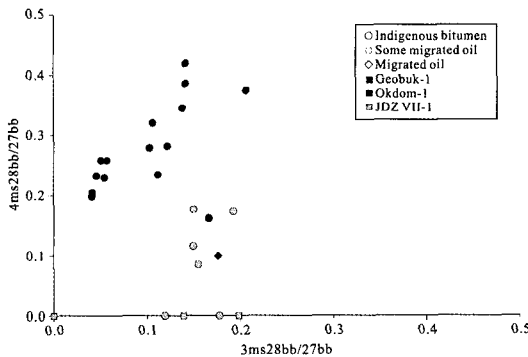


Fig. 9. Distributions of methylsteranes relative to 4-desmethylsteranes.

경을 나타낸다(Fig. 8; Peters *et al.*, 2005). 이러한 결과는 노말 알칸 분석 결과와 일치하는 것이다. 해성 플랑크톤에서 유래된 생물표기화합물인 24-n-Propylcholestanene은 Okdom-1공의 시료와 Geobuk-1공의 2,199 m, 2,208 m, 2,490 m, 3,253 m에서 그리고 JDZ VII-1공의 2,191 m 시료에서 미량 검출되었다(Moldowan *et al.*, 1991). 외편모 조류(Dinoflagellate)로부터 유래된 것으로 알려진 4 α -methylsterane은 Okdom-1공 시료와 Geobuk-1공의 2,490 m, 3,253 m 시료에서 상당량 나타났다(Table 2 and Fig. 9). 피자식물(angiosperm)의 생물표기화합물로 알려진 올레안과 루판 종류의 화합물은 모든 시료에서 검출되어 육성 기원 유기물의 퇴적이 우세했음을 나타낸다(Moldowan *et al.*, 1994; Fig. 10).

5.3. 유기물의 성숙도

홀수 우세 지수를 나타내는 CPI(Carbon Preference

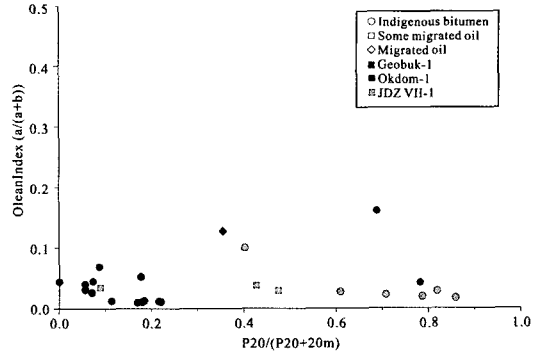


Fig. 10. Oleanane index as higher plant indicators.

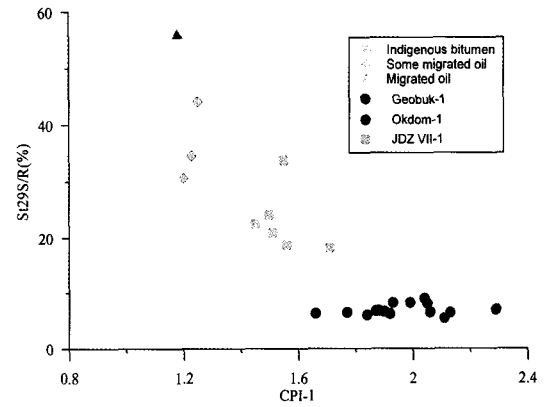


Fig. 11. Maturity indications from n-alkanes and steranes.

Index)는 유기물의 열적 성숙도가 높아질수록 낮아져 1에 가까워지는데 분석된 시료의 CPI를 살펴보면 Geobuk-1공 시료는 1.18에서 2.06의 범위를 갖고 Okdom-1공은 1.77에서 2.29의 범위를 갖는다(Killops and Killops, 2005). 또한 JDZ VII-1 시료의 경우에는 Geobuk-1공이나 Okdom-1공보다는 CPI가 낮아서 1.2 ~ 1.71의 값을 보인다. 따라서 JDZ VII-1공 시료들의 열적 성숙도가 Geobuk-1공이나 Okdom-1공보다 높은 것을 알 수 있다(Table 2 and Fig. 11; Peters *et al.*, 2005). Geobuk-1공의 3,253 m 시료의 CPI가 낮은 것은 열적 성숙도보다는 유기물의 특성에 기인하는 것으로 생각된다. Ph/nC₁₈ 값은 석유 생성이 진행되면서 감소하는 특성을 나타내는데 분석된 시료들의 값을 살펴보면 Okdom-1, Geobuk-1, JDZ VII-1공의 순으로 열적 성숙이 더 많이 진행된 것을 지시하는 것으로 나타난다(Table 2).

20S/(20S+20R) 스테란 자료에 의하면 JDZ VII-1 시추공의 2,509, 2,833, 3,163 m 구간의 시료와 Geobuk-1 3,253 m 구간 시료의 유기물은 주 석유생성

단계에 도달한 것으로 나타냈다(Fig. 11; Peters and Moldowan, 1993).

6. 토 의

탄소 및 질소 동위원소 값은 분석된 시료의 대부분의 유기물들이 육성 고등식물 기원인 타입프(type) III에 비교되고 일부 시료들이 타입프 I에 비교되는 유기물의 기원물질로 알려진 담수 조류(호성)의 지표물 지시하는 것으로 나타났다. 이것은 Rock-Eval 열분석 결과 혹은 유기물의 원소분석 결과가 Geobuk-1공과 Okdom-1공에서 대부분의 시료들이 타입프 III에 비교되는 유기물에 포함된다는 것과 일치한다. 그러나 일부 시료들이 일반적으로 해성 기원 유기물로 이루어지는 타입프 II에 비교될 수 있는 것으로 나타난 것과는 차이를 보인다. 생물표기화합물의 프리스탄, 피탄, 스테란 분석 결과에 의하면 이들 두 시추공에서 분석된 시료들의 대부분이 강어귀 환경과 환원환경을 나타낸다. 스테란 조성은 분석된 시료의 대부분이 강하구 퇴적물임을 나타내고, 1개 시료는 해성 기원 유기물을 포함하는 것으로 나타났다(KNOC, 2006).

안정동위원소 분석과 생물표기화합물 분석 결과를 종합하면 두 시추공에서 분석된 시료들은 대부분 육성 고등식물 기원의 유기물을 포함하며, 일부는 호성 기원 유기물을 포함하는 것으로 볼 수 있다. Rock-Eval 열분석 결과 혹은 유기물의 원소분석 결과에서 일부 시료들이 타입프 II의 특성을 보이는 것은 이들 유기물들이 해성 기원이라기보다는 담수 조류 기원 유기물(타입프 I)과 고등식물 기원 유기물(타입프 III)이 혼합된 것에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 그렇지만 생물표기화합물 분석결과에서 Geobuk-1공의 1개 시료가 해성기원 유기물의 특성을 보이고, 전체적인 퇴적환경이 강어귀 환경으로 나타나므로 해성 기원의 유기물의 영향 즉 해성 환경의 영향을 배제할 수는 없을 것이다.

JDZ VII-1공과 JDZ VII-2공에서 안정동위원소 분석 결과는 고등식물 기원의 유기물이 우세한 가운데 일부 담수 조류 기원 유기물을 나타낸다. JDZ VII-1공의 생물표기화합물 분석결과는 산화환경과 육성환경을 뚜렷하게 나타내고 고등식물 기원의 유기물이 우세함을 보여준다. 반면에 해성 환경 혹은 해성 생물 지표는 거의 나타나지 않는다. 따라서 JDZ VII-1공 혹은 JDZ VII-2공의 퇴적환경은 육성 내지 호성 환경이며, 해성 환경의 영향은 매우 미약한 것으로 해석된다.

7. 결 론

제주분지에서 시추된 Geobuk-1, Okdom-1, JDZ VII-1 및 JDZ VII-2공 시추 시료의 유기물에 대한 탄소와 질소의 안정동위원소 분석결과에 의하면 이 지역 퇴적물 중의 유기물은 육성 고등식물 기원의 우세한 가운데 담수 조류 기원의 유기물이 포함되는 것으로 나타났다. 그리고 생물표기화합물 분석 결과에 의하면 Geobuk-1공과 Okdom-1공 퇴적물의 퇴적환경은 육성-강어귀 환경과 환원환경이 우세하며, 약간의 해성 환경 영향을 받았을 가능성을 보여준다. JDZ VII-1공의 퇴적물의 경우에는 육성 퇴적환경이 우세하며, Geobuk-1공이나 Okdom-1공에 비하여 해성 환경의 영향을 덜 받은 것으로 나타났다.

사 사

이 논문은 2006년도 한국석유공사의 지원에 의하여 수행된 “남해 대륙붕 시추시료의 유기지화학적 특성 연구”의 결과이다. 논문의 일부는 한국지질자원연구원이 수행하는 국제공동해양시추사업(IODP)에서 지원 받았다. 본 논문을 심사하고 조언을 해주신 충남대학교의 윤혜수 교수님, 한국석유공사의 김일수 박사님과 익명의 심사자에게 감사드린다.

참고문헌

- Bong, P.Y., Lee, H.Y., Kwon, Y.I., Son, J.D., Oh, J.H., Kwak, Y.H., Cheon, T.J., Ryu, B.J., Lee Y.J., Son, B.K., Kim, H.J., Hwang, I.G., Park, K.S., Park, K.P., Shin, C.S. and Cho C.H. (1993) Petroleum resources assessment of Sokotra basin, KIGAM Research Report KR-93-4A-1, p. 1-234.
- Deines, P. (1980) The isotopic composition of reduced organic carbon. In: Fritz P. and Fontes, J.C. (Eds.), Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. The Terrestrial Environment, Vol. 1. A. Elsevier, Amsterdam, pp. 329-406.
- Geological Survey of Japan (1994) Magnetic anomaly map of East Asia, 1:4,000,000, 2 maps.
- Honza, E. (1976) Ryukyu island (Nansei-Shoto) arc, GH 75-1 and GH 75-5 cruise January-February and July-August 1975, Geological Survey of Japan, 81p.
- Karig, D.E. (1971) The origin and development of marginal basins in the western Pacific, J. Geophys. Res., v. 76, p. 2542-2561.
- Killops, S. and Killops, V. (2005) Introduction to Organic Geochemistry. Blackwell Science, Oxford. 393p.
- Korea National Oil Company (KNOC) (2004) Study on the biostratigraphy of the Korea-Japan Joint Devel-

- opment Zone, 111p.
- Korea National Oil Company (KNOC) (2006) Organic geochemistry of the southern continental shelf basin, 193p.
- Lamb, A.L., Graham, P. W. and Melanie, J.L. (2006) A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material. *Earth-Sci. Rev.* v. 75, p. 29-57.
- Lee, C.S., Shor, G.G., Bibee L.D., Lu R.S. and Hilde, T.W.C. (1980) Okinawa Trough: Origin of a Back-arc Basin, *Mar. Geol.*, v. 35, p. 219-241.
- Lee, Y.J. (1997) Petroleum geochemistry of organic matter from the Cheju basin, northern part of the East China Sea, PhD thesis, 328p.
- Li, D. and Tao, R. (1992) Petroleum geological characteristics of East China Sea Shelf basin, *Earth Planet. Sci. Lett.* v. 55, p. 299-310.
- Liu, G. (editor) (1994) Atlas of geology and geophysics of China Seas and adjacent regions, Science Press, 94p.
- Ludwig, W.J. (1966) Sediments and structure of the Japan trench, *J. Geophys. Res.*, v. 71, p. 2121-2137.
- Moldowan, J.M., Dahl J., Huizinga B.J., Fago F.J., Hickey L.J., Peakman T.M. and Taylor D.W. (1994) The molecular fossil record of oleanane and its relation to angiosperms. *Science* v. 265, p. 768-771.
- Moldowan, J.M., Fago, F.J., Lee, C.Y., Jacobson, S.R., Watt, D.S., Slougui, N.-E., Jeganathan, A. and Young, D.C. (1991) Sedimentary 24-n-propylcholestanes, molecular fossils diagnostic of marine algae. *Science* v. 247, p. 309-312.
- Oh, J.H., Kwak, Y.H., Cheon, T.J., Ryu, B.J., Son, B.K., Hwang, I.G., Lee, Y.J., Kim, H.J., Park, K.P., Shin, C.S., Cho, C.H., Bong, P.Y., Son, J.D., Lee, H.Y. and Kwon, Y.I. (1994) Petroleum resources assessment of the Cheju basin. KIGAM Research Report KR-94(C)4-1, p. 1-343.
- Park, Y.S., Kong, Y.S., Choi, K.L. and Kim, S.W. (1987) Petroleum geology and geochemistry of the block JDZ-V in Korean offshore, KIGAM Research Report KR-87-24, p. 1-34.
- Park, Y.S., Kong, Y.S., Choi K.L. and Kim, S.W. (1988) Stratigraphy and paleontology of Korea/Japan joint development zone Block VIII, offshore Korean peninsula. KIGAM Research Report KR-89-3A-1, p. 7-45.
- Peters, K.E. and Moldowan, J.M. (1993) *The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Peters, K.E., Walters, C.C. and Moldowan J.M. (2005) *The Biomarker Guide: Second Edition, I. Biomarkers and Isotope in the Environment and Human History*. Cambridge University Press, 471p.
- Peters, K.E., Sweeney, R.E. and Kaplan, I.R. (1978) Correlation of carbon and nitrogen stable isotope ratios in sedimentary organic matter. *Limnol. Oceanogr.* v. 23, p. 598-604.
- Qin, Y., Zhao, Y., Chen, L. and Zhao, S. (1996) Geology of the East China Sea, Science Press, Beijing, China, 357p.
- Schoeninger, M.J. and DeNiro, M.J. (1984) Nitrogen and carbon isotope composition of bone collagen from marine and terrestrial animals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 48, p. 625-639.
- Sibuet, J.C., Letouzey, J., Barbier, F., Charvet, J., Foucher, J.P., Hilde, T.W.C., Kimura, M., Chiao, L.Y., Marsset, B., Muller, C. and Stephan, J.F. (1987) Back arc extension in the Okinawa Trough, *J. Geophys. Res.*, v. 92, p. 14041-14063.
- Silverman, R.E., Wang, Q., Byrd, B.L., Ying, Z.H., Ming, C. and Weimer, P. (1996) 3-D Evaluation of the Ping Hu Field, East China Sea, in AAPG Studies in Geology, 42, edited by Weimer, P. and Davis, T.L., p. 91-101.
- SPT (1993) East China Sea, Petroleum potential of acreage in the 4th offshore licensing round, Report for PEDCO, 7306/11b. 48p.
- Uyeda, S. and Miyashiro, A. (1974) Plate tectonics and the Japanese island : a synthesis : Geological Society of American Bulletin, v. 85, p. 1159-1170.
- Western Atlas and CNOOC (1994) The petroleum geology and hydrocarbon potential of the Xihu Trough, East China Sea, P. R. China : an integrated geophysical and geological study.
- Yin, P.L. and Liu, S.S. (1990) Proceeding of International Symposium on Tectonic evolution and petroleum potential of the East China Sea, Stanford Univ., p. 80-100.
- Zhang, Q. and Kou, C. (1989) Petroleum geology of Cenozoic basins in the northwestern continental shelf, South China Sea, in Chinese sedimentary basins, edited by Zhu, X., Elsevier, p. 197-206.
- Zhou, Z., Zhao, J. and Yin, P. (1989) Characteristics and tectonic evolution of the east China Sea, in Chinese sedimentary basins, edited by Zhu, X., Elsevier, p. 165-179.