

울릉분지 남서부 심해저 퇴적층에 분포하는 천부 가스의 지화학 및 지구물리 특성

이영주¹ · 유동근¹ · 김일수^{2*} · 류병재¹

¹한국지질자원연구원 석유·해저자원연구부, ²연세대학교 지구시스템학과

Geochemical and Geophysical Characteristics of Shallow Gases in the Deep Sea Sediments, Southwestern Ulleung Basin

Young-Joo Lee¹, Donggeun Yoo¹, Il-Soo Kim^{2*} and Byong-Jae Ryu¹

¹Petroleum · Marine Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Marine Resources, Gajeong-dong 30, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

²Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Shinchon-dong 134, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea

Deep sea core samples were taken in the southwestern part of the Ulleung Basin in order to characterize the properties of shallow gases in the sediment. Amount of shallow gases in the sediments were calculated by head space techniques, and chemical and isotopic compositions of hydrocarbon gases were analyzed. Geochemical analyses were carried out on the gas bearing sediments to find out relationship between natural gas contents and organic characteristics of the sediments. Seismic characteristics of shallow gases in the sediments were also examined in this study. The amount of the hydrocarbon gases in the sediments range from 0.01% to 11.25%. Calculation of volume of gas per volume of wet sediment varies from 0.1 to 82.0 ml HC/L wet sediment. Methane consists 98% of the total hydrocarbon gases except for two samples. Based on the methane content and isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$: -94.31‰ ~ -55.50‰), the hydrocarbon gases from the sediments are generated from bacterial activities of methanogenic microbes. Contents of hydrocarbon gases are variable from site to site. Volume of shallow gases in the sediments shows no apparent trends vs. either characteristics of organic matter or particle sizes of the sediments. Gas concentration is high in the area of seismic anomalies such as blanking zone or chimney structures in the section. Physicochemically the pore water and the formation water systems are saturated with gases in these areas. Concentration of hydrocarbon gases in the sediments in these area shows favorable condition for generation of gas hydrate, as far as the other conditions are satisfied.

Key words : Ulleung Basin, headspace gas analysis, shallow gas, gas hydrate

울릉분지 남서부 심해저 퇴적층에 분포하는 천부 가스의 특성을 파악하기 위해서 피스톤 코어시료를 채취하고 공기층 가스 기법으로 퇴적물 내에 함유된 가스를 포집하여 탄화수소 가스의 함량, 성분 및 탄소 동위원소 분석을 실시하였다. 또한 가스의 함량과 시추 코어 퇴적물의 연관성 및 특성을 파악하기 위해서 가스를 함유하는 퇴적물에 대해서 유기 지화학 분석을 실시하였다. 그리고 가스를 함유하는 퇴적물의 탄성과 특성을 살펴보았다. 퇴적물에서는 탄화수소 가스가 0.01%에서 11.25%까지 검출되었다. 단위 퇴적물내의 탄화수소 가스의 양을 잴은 퇴적물의 부피를 기준으로 정량적으로 계산하면 0.1에서 82.4ml/L wet sediment를 나타냈다. 분석된 탄화수소 가스의 성분은 주로 메탄으로 분석 시료에서 2개 시료를 제외하고는 메탄의 함유비가 98% 이상을 나타냈으며 32개 분석 시료 중에서 15개 구간에서는 메탄만이 검출되었다. 채취된 시료의 메탄 가스의 탄소 동위원소 비($\delta^{13}\text{C}$)는 -94.31‰에서 -55.50‰까지의 범위를 나타내서 분석된 가스의 기원은 메탄 생성 박테리아에 의한 생물 기원 가스인 것으로 판명된다. 연구 지역의 퇴적물내의 탄화수소 가스의 함량은 지역에 따라서 차이를 보인다. 퇴적물내의 가스의 함량은 퇴적물의 지화학적 특성과 퇴적물의 입도와는 뚜렷한 상관 관계를 보이지 않았다. 단지 탄성과 단면상에서 이상대를 나타내는 곳에서는 가스의 함량이 많은 것으로 나타났다. 탄성과 단면상에 보이는 이상대는 현장의 온도 압력 조건에서 공극수에 탄화수소 가스가 과포화 된 곳으로 다른 조건이 만족된다면 가스 하이드레이트를 형성하기에 적합한 것으로 해석한다.

주요어 : 울릉 분지, 공기층 가스 분석, 천부 가스, 가스 하이드레이트

*Corresponding author: ilsookim@yonsei.ac.kr

1. 서 론

천연천연은 연소 시에 석유보다 이산화탄소 배출량이 적기 때문에 청정에너지로 분류된다. 특히 메탄가스는 가장 환경 친화적인 탄화수소 가스이고 최근에는 차세대 에너지인 메탄가스 하이드레이트와 연관되어 주목을 끌고 있다. 메탄가스 하이드레이트는 물분자로 이루어진 격자 안에 메탄이 들어가서 고체상태로 안정되어 있는 것으로 메탄가스 하이드레이트는 전세계에 매장되어 있는 모든 석유, 석탄에 포함되어 있는 탄소의 약 2배 이상의 탄소를 포함하고 있는 것으로 보고되어 있다(Kvenvolden, 1998). 메탄 하이드레이트는 미래형 에너지로서 뿐만이 아니라 해저면 안정성을 결정하는 중요한 요소 중의 하나이다(Snowdon, 1999; Paull and Dillon, 2001). 또한, 메탄 가스는 이산화탄소 보다 20 배 이상 방사성이 강한 것으로 알려져 가스 하이드레이트의 해리에 의한 메탄가스의 자연 배출 및 순환에 대한 연구가 지구의 기후 변동 및 환경 문제와 결부되어 연구되고 있다(Kennett *et al.*, 2000; Henriot and Mienert, 1998; Dickens *et al.*, 2001; Borowski, 1997).

심해저 퇴적물에 포함되어 있는 천부 가스에 대한 연구는 1980년대 후반부터 연구가 되었고 최근에는 메탄 가스 하이드레이트와 연관되어 더욱 연구의 중요성을 더 하고 있다. 국내에서 수행한 동해의 심해저 천부 퇴적층에 존재하는 가스에 대한 연구는 지구물리학적인 탐사를 통해서 BSR을 찾는 연구(류병재 등, 1998; 허식 등, 1999) 및 울릉 분지의 피스톤 코아 시료에서 직접 탄화수소 가스를 채취, 분석하여 특성을 연구 한 바 있다(이영주 등, 1999a; 1999b). 하지만 퇴적층에서 공기층 가스 기법에 의해서 천부 가스를 채취하여 탄화수소 및 비 탄화수소 가스에 대한 정량적인 분석을 하고, 퇴적물을 지화학적으로 분석하여 메탄의 분포와 비교하고 탄성과 자료상의 특성과 결부시켜 해석을 한 연구는 아직까지 이루어진 바 없다. 이번 연구에서는 울릉 분지 남서부 심해저 천부 퇴적층에서 회수된 16개의 피스톤 시추 코아 퇴적물에서 32개의 가스를 포집하여 탄화수소 가스의 특성을 밝히고 탄성과 탐사 자료에 나타난 가스 함유 퇴적층의 특성을 분석하였다. 또한 이를 가스 하이드레이트 생성과 연관하여 고찰하였다.

2. 연구지역

동해의 남서쪽에 위치하고 있는 울릉 분지는 서쪽

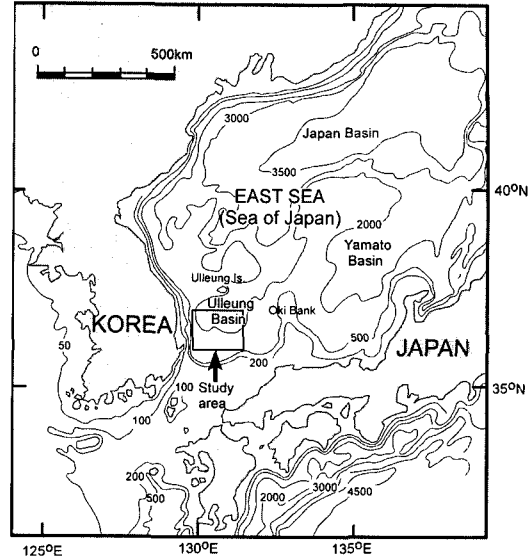


Fig. 1. Physiography of the Ulleung Basin and the surrounding area.

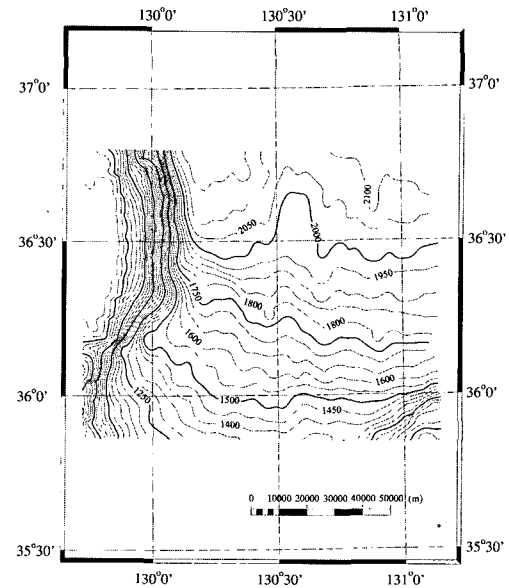


Fig. 2. Detailed bathymetry of the study area(contour interval is 50 m).

및 남쪽에서는 한반도와 일본열도의 대륙사면과 접하며, 동쪽과 북쪽에서는 화산섬으로 이루어진 오키 해령(Oki Ridge) 및 한국대지(Korea Plateau)와 접한다(Fig. 1). 한반도와 접하고 있는 분지의 서측은 좁은 대륙붕과 가파른 경사의 대륙사면과 접하고 있다(Fig. 2). 반면, 남쪽 사면은 완만한 경사를 보여주며 대한 해협과 연결된다. 연구지역은 북동쪽으로 향하면서 수

심이 점차 증가하며 최대 수심이 2,100 m 이상에 달한다. 연구해역에서 취득된 탄성과 자료의 분석결과에 의하면 이 지역 대륙붕 및 대륙사면에는 수 km 이상에 달하는 제 3기 및 제 4기 퇴적층이 발달해 있는 것으로 보고 되고 있다. 그 중에서 천부 퇴적층을 구성하고 있는 제 4기 퇴적층은 주로 질량류에 의한 것으로 해석된다(Chough *et al.*, 1997). 그 중에서도 비교적 경사가 가파른 상부 및 중부 대륙사면 지역은 슬럼프/슬라이드가 우세한 반면 비교적 완만한 경사를 갖는 하부 대륙사면은 쇄설류(debris flow)가 우세하다. 이러한 퇴적 양상은 수심이 증가하는 분지쪽으로 향하면서 저탁류 퇴적상으로 변화한다. 이 저탁류 퇴적상은 쇄설류 퇴적체와는 달리 연속성이 양호한 수평층리의 발달이 특징적이며, 연구해역 중 북쪽과 북동쪽 해역에 넓게 분포한다.

3. 시료 채취 및 분석

울릉분지 남서부 심해저 천부 퇴적층에 분포하는 탄화수소 가스의 특성을 파악하기 위해서 한국지질자원 연구원의 탐해 2호에 장착되어 있는 길이 8 m의 피스톤 코어를 사용하여 수심 846 m~1,970 m 지점에서 16개의 시추 코어를 획득하였다(Fig. 3).

채취한 코아에서 공기층 가스 분석법에 의해서 가스 시료를 포집하기 위해서 선상에서 회수된 퇴적물을 해수와 함께 가스가 새지 않는 지화학 캔을 이용해 채취하였다. 회수된 캔 시료는 실험실로 운반한 후 섀텀과 진공 포집기(vacutainer)를 이용하여 가스를 포집하였다. 포집된 가스시료는 가스분석용 주사기(gas tight

syringe)를 사용하여 휴렛팩커드사(Hewlett Packard)의 HP 5890 II 기체 크로마토그래프에 주입하여 탄화수소 가스와 기타 가스의 함량 및 성분을 분석하였다. 메탄 가스의 탄소동위원소 측정을 위해서 휴렛팩커드사의 6890 기체 크로마토그래프와 휘니간 매트(Finnigan Mat)사의 산화 및 주입장치(GC Combustion III), Delta plus가 연결된 동위원소 질량분석기(IRMS)를 이용하였다.

가스와 가스함유 퇴적물과의 상관관계를 알아보기 위해서 가스를 포집한 후에 캔 시료에서 퇴적물을 채취하였다. 채취한 퇴적물은 냉동 건조기에서 수분을 제거한 뒤 미세 분말로 만들어서 총 유기탄소 및 유기물의 열분석(pyrolysis)을 실시하였고, WR-112 탄소 분석기, CHN-900 분석기(미국 Leco사)를 사용하여 총 탄소, 황 및 질소 함량을 분석하였고 유기 탄소의 성분은 유정분석기(Oil show analyzer: OSA, 프랑스 Vinci 사)를 사용하여 분석하였다.

탄성과 자료의 취득을 위해 노르웨이 Geco-Prakla사의 Trilogy System을 사용하였다. 수진기로는 Geco-Prakla사의 NESSIE-3 디지털 스트리머(digital streamer)를 사용하였으며 채널수는 96이다. 탐사자료는 SEG-D 8015형식으로 IBM 3480 자기 테이프(magnetic tape, 200 MB)에 기록하였다. 음원으로는 299 inch³의 용량을 사용하였다. 선위측정을 위해 DGPS가 사용되었으며 자료 취득시 탐사선의 속도는 5노트를 유지하였다.

4. 분석 결과 및 해석

4.1. 비 탄화수소 가스

비 탄화수소 가스의 정량 성분 분석은 11개 시료를 대상으로 실시하였다. 주요 가스 성분은 질소로 83.13% 내지 93.06%를 차지하였다. 이밖에 비 탄화수소 가스로서 산소가 2.74~6.67%, 아르곤이 1.03~1.17%, 이산화탄소가 0.37~2.42%를 각각 차지하였다(Table 1). 공기층 가스 분석 기술은 코아를 갑판에 올려서 절개한 다음에 시료를 채취하는 방법으로 공기에 의한 오염을 배제할 수 없다. 따라서, 분석된 비 탄화수소 가스는 주로 공기에 의한 오염으로 간주 할 수 있다. 그러나, 분석된 비 탄화수소 가스의 성분과 일반 공기의 성분을 비교하면 분석된 시료는 대부분 질소와 이산화탄소의 함유량이 비교적 높았고 산소의 함량은 적은 것으로 나타났다. 이런 현상은 퇴적물이 퇴적된 이후에 산화 환원 작용, 특히 박테리아 작용에 의한 가스의 생성 및 소멸과 관련이

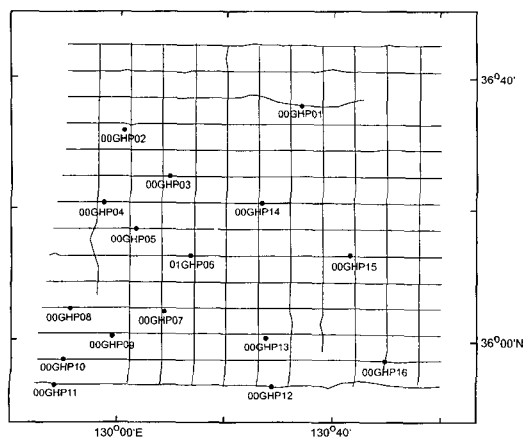


Fig. 3. Track lines of the seismic profiles and locations of piston cores.

Table 1. Hydrocarbon and non-hydrocarbon gases detected from the head space gas analysis.

Sample No.	Hydrocarbon Gases (%)						Non Hydrocarbon Gases (%)			
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C _n	HC total	δ ¹³ C	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂
1-518	11.23	0.03	0.00	99.8	11.25	-78.04	-	-	-	-
1-118	10.14	0.02	0.00	99.8	10.16	-	86.60	2.74	1.07	0.37
2-186	0.01	0.00	0.00	100.0	0.01	-	-	-	-	-
2-586	0.01	0.00	0.00	100.0	0.01	-	-	-	-	-
3-400	0.13	0.00	0.00	100.0	0.13	-	-	-	-	-
3-575	0.11	0.00	0.00	100.0	0.11	-	-	-	-	-
4-400	0.20	0.01	0.00	97.4	0.21	-	-	-	-	-
4-800	0.73	0.01	0.00	98.5	0.74	-	-	-	-	-
5-400	0.95	0.00	0.00	99.7	0.95	-	-	-	-	-
5-800	1.59	0.00	0.00	99.6	1.59	-94.31	92.73	4.77	1.14	0.60
6-400	3.09	0.00	0.00	99.9	3.10	-87.49	93.65	3.14	1.15	0.77
6-800	5.64	0.00	0.00	99.8	5.65	-	-	-	-	-
7-400	8.64	0.01	0.00	99.9	8.65	-	-	-	-	-
7-800	9.58	0.01	0.00	99.9	9.59	-75.33	85.99	3.72	1.06	0.51
8-400	0.17	0.00	0.00	97.9	0.17	-55.50	93.06	5.09	1.17	0.32
8-800	7.24	0.01	0.00	99.8	7.25	-87.02	85.67	6.67	1.12	2.42
9-400	10.11	0.00	0.00	100.0	10.11	-	-	-	-	-
9-800	9.43	0.00	0.00	100.0	9.43	-74.64	86.10	3.41	1.06	0.92
10-400	7.76	0.01	0.00	99.9	7.77	-	-	-	-	-
10-800	8.77	0.00	0.00	99.9	8.77	-	-	-	-	-
11-400	8.13	0.00	0.00	100.0	8.13	-	-	-	-	-
11-800	10.36	0.00	0.00	100.0	10.36	-	-	-	-	-
12-400	7.09	0.00	0.00	100.0	7.09	-	-	-	-	-
12-800	9.34	0.00	0.00	100.0	9.34	-	84.27	3.04	1.04	0.74
13-400	1.83	0.00	0.00	99.9	1.83	-	-	-	-	-
13-800	0.61	0.00	0.00	99.8	0.62	-	-	-	-	-
14-400	0.01	0.00	0.00	100.0	0.01	-	92.85	4.95	1.15	0.18
14-800	0.10	0.00	0.00	98.8	0.10	-	-	-	-	-
15-400	8.64	0.00	0.00	100.0	8.64	-	-	-	-	-
15-800	8.96	0.00	0.00	100.0	8.96	-	83.13	2.62	1.03	1.62
16-400	6.33	0.00	0.00	100.0	6.33	-	-	-	-	-
16-800	7.16	0.00	0.00	100.0	7.16	-	87.29	3.70	1.08	0.84

있는 것으로 설명된다.

비 탄화수소 가스 중에서 질소 가스가 퇴적물이 퇴적된 이후에 생성되는 것은 산소(oxic) 환경과 무산소(anoxic) 환경으로 나누어서 생각할 수 있다. 산소 환경에서는 암모니아 및 질소 성분을 함유하고 있던 유기물이 중금속 산화물(heavy metal oxides)이나 산소에 의해 산화되어 질소 가스가 생성된다(Hunt, 1996). 또한, 무산소 환경에서는 박테리아의 탈질소(denitrification) 과정에 의해서($5\text{CH}_2\text{O} + 4\text{NO}_3^- \rightarrow 4\text{HCO}_3^- + \text{CO}_2 + 2\text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$) 생성되어 퇴적물 내에 집적되는 것으로 알려져 있다(Val Klump and Martens, 1983). 질소의 또 다른 기원은 맨틀에서 분출되는 가스이나 천부 퇴적층에서는 기대하기 어려운 것으로 생각한다.

이산화탄소는 산소 환경에서는 호기성(aerobic) 박테리아의 호흡에 의해서 생성되거나 $((\text{CH}_2\text{O})_x(\text{NH}_3)_y(\text{HPO}_4)_z) + x\text{O}_2 \rightarrow x\text{CO}_2 + x\text{H}_2\text{O} + y\text{NH}_3 + z\text{H}_3\text{PO}_4$ 무산

소 환경에서 혐기성 박테리아의 탈질소화 혹은 질산염 환원(nitrate reduction; $2\text{CH}_2\text{O} + \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{NH}_4^+ + \text{H}_2\text{O}$)에 의해서 생성된다. 그리고, 카르복실기(carboxyl, C=O), 메톡실기(methoxyl, -OCH₃), 페놀계 수산화기(phenolic hydroxyl, -OH) 등 산소를 포함하는 작용기가 있는 부식질(humic) 유기물이 혐기성 박테리아에 의해서 발효(fermentation)되면서 생성되기도 한다(Deming and Baross, 1993). 이런 일련의 이산화탄소 생성과정을 통해서 해저면에서 메탄 생성 지역에 이르기 전까지는 이산화탄소의 함량은 증가하는 것이 일반적인 현상이다. 비교적 최근에는 메탄 가스가 특정 박테리아 및 원시 세균(Archaea)에 의해서 혐기성 산화 작용(anaerobic oxidation) 과정을 거쳐서 이산화탄소 가스가 생성된다는 연구가 발표된 바 있다. 이런 현상은 특히 천연가스 하이드레이트가 해리되면서 메탄의 방출이 비정상적으로 많은 곳에서 활발히 일어나는

것으로 알려져 있다(Boetius *et al.*, 2000). 연구지역에서 이산화탄소 가스의 함량의 수직적 변화를 살펴보면 심도가 비교적 깊은 곳의 이산화탄소 함량은 1.62~2.42%를 나타내는데 비해서 비교적 천부에서 채취한 시료에서는 함량이 모두 1% 미만인 것으로 나타났다. 이산화탄소 가스의 양이 비교적 높게 나타나는 지역은 메탄의 혐기성 산화 작용에 의해서 이산화탄소가 생성되었을 가능성을 지시한다. 하지만, 앞서 밝힌 바와 같이 이산화탄소 가스의 생성경로는 다양하므로 생성 원인을 정확히 밝히려면 해저면 퇴적층의 산화-환원 조건과 혐기성 산화 작용을 일으키는 박테리아 및 원시 세균류에 대한 지화학적, 미생물학적 분석이 필요하다.

산소 가스의 함량이 분석 구간에서 일반적으로 비교적 낮게 나타난 것은 해저면에서 산소가 호기성 박테리아의 호흡 작용, 질소화 작용(nitrification) 및 기타 산화 작용에 의해서 급격히 줄어들었기 때문으로 생각한다(Deming and Baross, 1993).

4.2. 탄화수소 가스

탄화수소 가스는 16개 지점에서 피스톤 코어의 총 심도 위치와 중간 심도에서 각각 1개씩 32개를 분석하였다. 분석한 시료 중 탄화수소 가스의 함량은 0.01%에서 11.25%를 나타냈다(Table 1). 탄화수소 가스의 수직적인 분포의 특징은 총 심도 위치의 시료가 중간 심도의 시료 보다 탄화수소 가스를 많이 함유하는 것으로 나타났다. 즉, 하부 심도의 시료에서 탄화수소 가스의 함량이 높게 나타났다. 혐기성 해저 퇴적환경에서 메탄가스는 황산염 환원지역(sulfate reduction zone)에서 황산염이 모두 환원된 이후에 생성되는 것으로 알려져 있다(Borowski *et al.*, 1999). 연구지역에서 피스톤 코어 회수와 시료 채취시 황화수소 가스의 냄새가 많이 나는 것으로 보아 피스톤 코어를 시추한 심도는 황산염 환원 지역 안에 있는 것으로 생각한다. 그러나, 황화수소는 수 ppm 정도의 소량으로도 냄새가 많이 나는 유독성 가스이므로 자료를 제시하기 위해서는 간극수에서 황화수소 가스를 제거한 후에 황산염을 분석해서 황산염 환원과 메탄 생성 지역의 경계(Sulfate reduction-Methane generation Interface: SMD)를 찾아야 한다. SMI의 특징의 다른 하나는 이곳으로부터 메탄 가스의 함량이 급격히 증가하는 것인데, 총심도와 중간심도의 메탄 가스의 함량이 현저히 차이를 보이는 8번 지점에서는 황산염 환원 구간이 중간 심도와 총 심도의 사이를 지난다고 가정 할 수 있다.

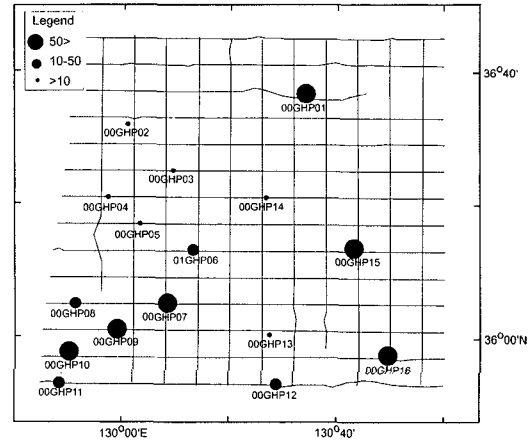


Fig. 4 Amount of gas content at sampling sites by headspace gas analysis technique (unit: ml hydrocarbon / 1L wet sediments).

탄화수소 가스 분포는 지역에 따라 차이를 나타냈고 일관성을 보이지 않는다(Fig. 4). 이는 지역에 따라서 탄화수소 가스의 생성조건, 집적능력 및 이동경로가 다르기 때문에 나타나는 현상이다.

분석된 탄화수소 가스의 성분은 주로 메탄으로 분석 시료에서 2개 시료를 제외하고는 메탄의 함유비가 98% 이상을 나타냈으며 32개 분석시료 중에서 15개 구간에서는 메탄만이 검출되었다. 즉, 분석된 탄화수소 가스는 건성 가스임을 나타낸다. 건성 가스는 저온에서 메탄 생성 박테리아가 유기물을 분해하면서 부산물로 만드는 생물기원 가스이거나, 혹은 석유 생성 단계 중 열적인 진화 단계의 마지막 단계인 메타제네시스 단계에서 생성되는 열기원 건성 가스가 있다. 채취된 시료의 메탄 가스의 탄소 동위원소 비($\delta^{13}C$)는 -94.31‰에서 -55.50‰까지의 범위를 보이므로 분석된 시료는 메탄 생성 박테리아의 작용에 의한 생물기원 가스임을 나타낸다 (Table 1).

4.3. 탄화수소 가스의 정량 분석

공기층 가스 분석이 실시된 32개 시료에 대해서 가스 하이드레이트 형성 조건을 가늠하기 위해서 탄화수소 가스의 함량을 정량적으로 계산하였다(Table 2). 가스 겐의 공기층 부피와 퇴적물의 부피를 기준으로 하여 1L 젖은 퇴적물에 포함되어 있는 탄화수소 가스의 양을 정량적으로 계산하면 0.1에서 82.0 ml HC/L wet sediment를 나타낸다. 계산결과 총 32개의 시료 중에서 19개의 시료는 Sloan(1998)이 제시한 가스 하이드레이트 형성 최소 잔여가스 함량인 10 ml HC

Table 2. Quantitative calculation of the hydrocarbon volume in the wet sediment, southwestern Ulleung Basin.

Sample No.	Total Wt. (g)	Sample Wt. (g)	Sample volume (ml)	Space volume (ml)	Pore water volume (ml)	Sediment volume (ml)	Sediment & pore water volume (ml)	HC gas (v%)	Total HC gas (ml)	HC gas in sediment (ml/L)
1-118	1091.59	631.59	776.16	282.24	189.48	166.84	476.16	10.16	28.68	59.6
1-518	1100	640.00	749.70	308.7	192.00	169.06	449.70	11.25	34.73	77.2
2-186	1102.27	642.27	784.98	273.42	192.68	169.66	484.98	0.01	0.03	0.1
2-586	935.2	475.2	679.14	379.26	142.56	125.52	379.14	0.01	0.04	0.1
3-400	1027.08	567.08	732.06	326.34	170.12	149.79	432.06	0.13	0.42	1.0
3-575	947.28	487.28	661.50	396.9	146.18	128.72	361.50	0.11	0.44	1.2
4-400	1053.53	593.53	758.52	299.88	178.06	156.78	458.52	0.21	0.63	1.4
4-800	1082.38	622.38	776.16	282.24	186.71	164.40	476.16	0.74	2.09	4.4
5-400	1038.22	578.22	749.70	308.7	173.47	152.74	449.70	0.95	2.93	6.5
5-800	1131.67	671.67	793.80	264.6	201.50	177.42	493.80	1.59	4.21	8.5
6-400	1085.71	625.71	784.98	273.42	187.71	165.28	484.98	3.10	8.48	17.5
6-800	1140.83	680.83	837.90	220.5	204.25	179.84	537.90	5.65	12.46	23.2
7-400	1117.64	657.64	829.08	229.32	197.29	173.72	529.08	8.65	19.84	37.5
7-800	989.43	529.43	696.78	361.62	158.83	139.85	396.78	9.59	34.68	87.4
8-400	927.36	467.36	679.14	379.26	140.21	123.45	379.14	0.17	0.64	1.7
8-800	1203.15	743.15	882.00	176.4	222.95	196.30	582.00	7.25	12.79	22.0
9-400	1049.12	589.12	837.90	220.5	176.74	155.62	537.90	10.11	22.29	41.4
9-800	980.52	520.52	705.60	352.8	156.16	137.50	405.60	9.43	33.27	82.0
10-400	1151.97	691.97	864.36	194.04	207.59	182.78	564.36	7.77	15.08	26.7
10-800	919.02	459.02	696.78	361.62	137.71	121.25	396.78	8.77	31.71	79.9
11-400	1097.26	637.26	811.44	246.96	191.18	168.33	511.44	8.13	20.08	39.3
11-800	1053.57	593.57	793.80	264.6	178.07	156.79	493.80	10.36	27.41	55.5
12-400	1109.31	649.31	811.44	246.96	194.79	171.52	511.44	7.09	17.51	34.2
12-800	1042.56	582.56	749.70	308.7	174.77	153.88	449.70	9.34	28.83	64.1
13-400	1220.71	760.71	882.00	176.4	228.21	200.94	582.00	1.83	3.23	5.5
13-800	937.02	477.02	661.50	396.9	143.11	126.01	361.50	0.62	2.46	6.8
14-400	948.25	488.25	635.04	423.36	146.48	128.97	335.04	0.01	0.04	0.1
14-800	1125.01	665.01	837.90	220.5	199.50	175.66	537.90	0.10	0.22	0.4
15-400	1043.74	583.74	749.70	308.7	175.12	154.20	449.70	8.64	26.67	59.3
15-800	1101.34	641.34	811.44	246.96	192.40	169.41	511.44	8.96	22.13	43.3
16-400	1058.54	598.54	749.70	308.7	179.56	158.10	449.70	6.33	19.54	43.5
16-800	919.95	459.95	679.14	379.26	137.99	121.50	379.14	7.16	27.16	71.6

gas/1 L wet sediment를 만족하는 것으로 나타났다.

앞에서 지적한 바와 같이 공기층 가스 분석 기술은 시료 채취 현장(in situ)의 압력과 온도를 유지하지 못하는 상태에서 가스의 양을 측정하는 것이기에 때문에 현장의 가스의 절대 함량을 측정하지는 못한다. 특히, 수심이 깊고 압력이 높은 상태에서는 많은 양의 가스가 해수에 녹을 수 있는데 시추 시에 코어가 갑판에 올라오는 도중에 혹은 올라온 후에 압력이 변화하면서 많은 양의 가스가 새어 나가는 것이 사실이다. 그렇지만 황산염 환원 구간 상부 구간의 퇴적물 내에는 탄화수소 가스의 함량은 비교적 적고 압력도 크지 않기 때문에 비교적 정확하게 양을 측정 할 수 있다. 공기층 가스를 이용해서 측정이 가능한 메탄 가스의 양은 평균 해수의 상압을 기준으로 1.14 mM(Paull and Ussler, 2001)인 것으로 밝혀져 있다. Sloan(1998)이 제시한 잔여 탄화수소 가스 조건(10 mL/wet sediment)은 공기층

가스에서 탄화수소로 과포화된 상태를 지시하는 것으로 생각한다.

4.4. 퇴적물 특성

천부 가스가 함유된 퇴적물의 특성을 파악하기 위해서 32개의 캔 시료에 있는 퇴적물을 채취하여 입도 분석 및 유기 지화학 분석을 실시하였다.

분석 결과 입도는 4.419~11.648 m까지의 범위를 나타내 분석한 시료는 조립 실트 내지는 극세립 샌드로 분류되었다(Boggs, 1992). 14-400 시료에서 입도 분석 결과가 0을 나타낸 것은 이 구간의 시료가 전부 폐각편으로 이루어졌기 때문에 나타난 현상으로 탄소가 모두 무기 탄소가 이루어졌다는 자료가 이를 뒷받침한다.

지화학적 성분의 변화 중 총 탄소는 분석 시료에서 1.14%에서 6.27%까지의 분포를 나타내었고, 유기 탄소의 함량은 0.53~3.74%의 범위를 나타냈다. 또한, 무기

Table 3. Geochemical analyses of the sediments from the southwestern Ulleung Basin.

Sample No.	Grain size (Mic.)	Total Carbon (%)	Total Organic Carbon (%)	Mineral Carbon (%)	C/N	HC gas in sediment (ml/L)
1-118	4.971	3.94	1.91	2.03	7.10	59.6
1-518	4.419	1.65	1.64	0.01	7.70	77.2
2-186	6.442	2.24	1.23	1.01	6.41	0.1
2-586	6.846	2.28	1.57	0.71	7.58	0.1
3-400	6.661	2.35	0.93	1.42	5.05	1.0
3-575	6.538	2.14	1.19	0.95	5.02	1.2
4-400	8.311	4.30	2.32	1.98	7.76	1.4
4-800	7.6	3.63	2.26	1.37	7.87	4.4
5-400	9.125	5.13	2.26	2.87	6.89	6.5
5-800	6.605	1.46	1.20	0.26	6.98	8.5
6-400	5.917	2.87	1.45	1.42	5.87	17.5
6-800	8.339	2.65	2.36	0.29	7.89	23.2
7-400	7.231	4.02	3.62	0.40	9.16	37.5
7-800	5.365	2.52	0.90	1.62	4.62	87.4
8-400	6.012	2.54	1.91	0.63	6.22	1.7
8-800	6.899	3.35	3.74	0.00	8.90	22.0
9-400	5.385	2.63	2.08	0.55	6.17	41.4
9-800	7.608	1.66	0.53	1.13	2.88	82.0
10-400	4.799	2.60	1.80	0.80	5.66	26.7
10-800	4.723	2.76	1.65	1.11	5.06	79.9
11-400	4.584	2.54	1.30	1.24	4.33	39.3
11-800	5.838	2.60	1.53	1.07	5.19	55.5
12-400	7.672	2.43	0.58	1.85	2.97	34.2
12-800	6.439	1.14	0.89	0.25	5.14	64.1
13-400	7.524	2.39	1.40	0.99	5.00	5.5
13-800	9.542	2.31	1.63	0.68	7.55	6.8
14-400	0	6.27	0.01	6.26	0.26	0.1
14-800	6.846	3.20	3.62	0.00	9.81	0.4
15-400	9.972	3.06	1.27	1.79	5.10	59.3
15-800	10.138	2.99	1.21	1.78	4.82	43.3
16-400	11.908	2.83	0.61	2.22	3.33	43.5
16-800	11.648	3.11	2.32	0.79	7.61	71.6

탄소의 함량은 시료에 따라서 차이를 보여 0~6.26% 까지 나타냈다(Table 3). 총 유기 탄소와 총 질소의 비율은 0.26에서 9.81까지의 범위를 나타내서 대부분 10 이하로 퇴적 당시에 일차 생산물(Primary Production)에 의한 현지성 유기물의 퇴적이 우세했음을 나타냈다(Stein, 1991). 유기 탄소의 함량과 유기물의 특성을 고려하면 본 연구지역에서의 메탄가스 생성 환경은 양호한 것으로 나타났다 (Table 3).

분석한 자료에 의하면 퇴적물의 유기 지화학적 특성과 입도 분석 자료는 지역적인 가스의 분포와는 관련이 없는 것으로 보인다. 그러나, 이는 코아당 2개 지점에서 분석을 했기 때문에 분석한 시료의 개수가 적어서 일어난 결과일 가능성도 있다.

4.5. 탄성파상 특성

탄성과 탐사 단면의 음향상 특성에 의하면 연구해역에 분포하는 천부퇴적층은 서로 다른 두 가지 음향상

으로 대별된다. 비교적 가파른 경사를 갖는 대륙사면을 중심으로 하는 분지 주변부의 경우 특정 내부 층리를 볼 수 없는 허모키 혹은 캐오틱한 음향상이 특징적으로 나타난다. 이러한 층은 다양한 규모의 렌즈형태로 발달하며 중첩되어 나타난다(Fig. 5A). 기존의 연구 결과에 의하면, 상기 특성을 갖는 퇴적층은 주로 debris flow에 의해 형성된 것으로 해석되었다(Chough *et al.*, 1997). 반면, 완만한 경사를 갖는 분지 퇴적층의 경우 연속성이 양호한 수평층리의 발달이 특징적이다(Fig. 5B). 이와 같은 분지 퇴적층은 주로 저탁류에 의해 구성되며 연구해역의 북쪽과 북서 해역에 넓게 분포한다. 저탁류 퇴적층 내에는 다양한 규모의 음향 혼탁층이 발달하며 해저면으로의 분출에 의해 형성된 미세한 해저 지형의 불규칙한 특성을 야기시키는 현상들을 쉽게 관찰 할 수 있다. 즉, 퇴적층내에 천부 가스가 함유 됨에 따라 야기되는 여러 가지 지형 특성을 보여주고 있다. 우선 퇴적층의 하부쪽에 위치

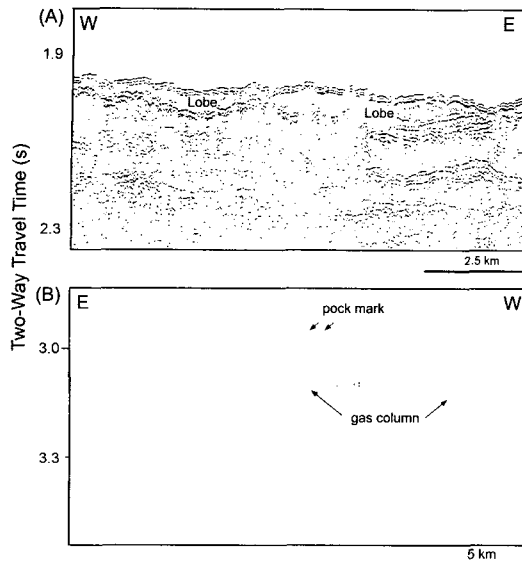


Fig. 5. High-resolution air-gun profiles collected from the southern part (A) and the northern part (B) of the study area showing two distinctive seismic facies.

한 가스가 해지면 근처로 상승하면서 발생하는 가스 칼럼(gas column)을 보여주며 이러한 가스칼럼은 거의 해저면까지 상승한 경우가 있는 반면, 퇴적층 중에 묻혀 있는 형태로 발달하기도 한다. 가스칼럼 구조와 함께 폭마크(pock mark)가 나타나기도 한다. 폭마크 구조는 일반적으로 천부가스 등이 해수층으로 빠져나가면서 함몰에 의해 형성되며 터비다이트가 주로 분포하는 분지 쪽에서 많이 발견된다.

4.6. 메탄 가스 하이드레이트와의 관련성

메탄 하이드레이트는 95% 이상이 메탄으로 구성되어 있고 메탄이 포획된 하이드레이트가 지하에 부존되기 위해서 저온 고압 환경이 필요하다. 그러나, 가스 하이드레이터의 형성 조건 중 다른 무엇보다도 중요한 것은 주변에 혹은 어느 특정한 이동 경로를 통해서 가스의 공급이 이루어져야 한다. 또한, 가스 하이드레이트가 생성되고 보전 되기 위해서는 지속적인 가스의 공급이 있어야 한다고 보고 된 바도 있다(Hyndman and Davies, 1992).

가스 하이드레이트 형성과 관련하여 생물기원 가스와 열기원 가스의 경우 각각의 특징이 있는데 생물기원 가스에 의해서 형성된 가스 하이드레이트의 경우에는 분포가 비교적 넓은데 비해서 열기원 가스 하이드레이트는 지하 심부로 부터 상당한 거리를 이동해야 하기 때문에 지역적으로 분포하는 특징을 나타낸다

(Sloan, 1998). 그러나, 생물기원 가스와 열기원 가스가 혼합되어 가스 하이드레이트를 형성하는 경우도 흔히 발견된다(예, Middle America Trench, Alaska, Russia, Gulf of Mexico 등).

연구지역의 천부 퇴적물내의 탄화수소 가스의 함량은 퇴적물의 유기 지화학적 특성과 입도와는 상관관계를 보이지 않는 것으로 나타났다. 그보다는 탄성과 단면 상에서 이상대(acoustic blanking zone, gas chimney)가 나타나는 곳에 탄화수소 가스의 양이 많은 것으로 나타났다. 탄성과 단면 상에서 가스가 검출되는 것은 천부 간극수에 천부 가스가 과포화 되어 있음을 의미한다. 즉, 시추 위치마다 약간의 차이는 있지만 수심 1,000 m를 기준으로 할 때 600 ml HC/L wet sediment 이상의 가스가 현장에 분포한다는 것을 의미한다. 이는 탄화수소 가스의 양을 기준으로 볼 때에는 가스 하이드레이트를 형성할 수 있는 가스의 양을 만족한다고 할 수 있다. 그러나, 현장의 천부 가스의 함량을 정확하게 밝히기 위해서는 압력 코어 시스템(PCS)을 이용해서 가스의 양을 측정하는 것이 필요하다(Dickens *et al.*, 1997).

5. 결 론

공기층 가스 기술을 사용하여 울릉 분지 남서부 심해저 천부 퇴적층에서 탄화수소 가스의 함유량을 측정 한 결과 탄화수소 가스의 양은 0.01%에서 11.25%까지 함유되어 있었다. 이를 1L 젖은 퇴적물 내의 가스 함유량으로 정량적으로 계산하면 0.1에서 82.0 ml HC/L wet sediment로 나타난다.

분석된 탄화수소 가스의 성분은 주로 메탄으로 분석 시료에서 2개 시료를 제외하고는 메탄의 함유비가 98% 이상을 나타냈으며 32개 분석 시료 중에서 15개 구간에서는 메탄만이 검출되었다. 채취된 시료의 메탄가스의 탄소 동위원소 비($\delta^{13}C$)는 -94.31‰에서 -55.50‰까지의 범위를 나타내서 분석된 시료는 메탄 생성 박테리아에 의한 생물기원 가스임을 나타낸다.

탄화수소 가스의 함량은 지역에 따라서 차이를 보인다. 가스 함량의 차이는 퇴적물의 지화학적 특성이나 입도 등에 따라서 달라지는 것이 아니고 탄성과 단면 상에서 이상대를 보이는 곳에서 많이 나타났다. 탄성과 이상대를 나타내는 심도의 현장 가스의 양은 해수에 대한 메탄의 용해도 이상으로 과포화된 메탄가스가 탄성과 단면상에 나타난 것으로 보인다. 이런 지역 가스 하이드레이트의 형성에 필요한 가스의 공급이 충분

한 지역으로 나타난다.

연구 지역의 가스의 양은 지역에 따라서 탄화수소가스의 집적 능력과 이동 경로에 의해서 달라진다고 생각한다. 즉, 지역적으로 이동 경로가 있어서 가스의 이동이 원활한 곳과 집적 능력이 있는 곳에서 가스가 집중적으로 집적된 것으로 해석된다. 그러나 연구 지역에서의 메탄가스의 생성 및 이동에 대한 연구를 위해서는 탄화수소 가스, 퇴적물 및 공극수를 수직적으로 분석하여 황산염 환원 지역 및 메탄 생성 지역의 심도를 밝히고 퇴적물의 특성을 정밀하게 분석을 해야 한다. 또한, 공기층 가스 기술의 가스 분석의 한계를 극복하기 위해서는 압력 코어를 이용한 가스 분석 기술의 도입을 제안한다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 “가스하이드레이트 탐사 및 개발 연구”의 일환으로 수행되었다. 탐사 자료의 취득과 실험을 위해서 애써 주신 참여 연구원과 탐해 2호 선박 직원들에게 감사를 드린다. 또한, 논문의 질적 향상을 위하여 조언을 주신 고려대학교 유인창 박사님과 한국해양연구원 허석박사님께 심심한 감사를 드린다.

참고문헌

류병재, 정태진, 허대기, 선우돈, 김현태, 김세준 (1998) 메탄 하이드레이트의 부존 가능성과 평형 조건. 한국 석유지질학회지 제5차 학술 발표회 논문집, p. 56-65.
 이영주, 윤희수, 광영훈, 정태진, 오재호, 김학주, 강무희 (1998) 포항 지역 지하수에 분포하는 탄화수소 가스의 지화학. 한국석유지질학회지. 6권, p. 25-36.
 이영주, 정태진, 광영훈, 김학주, 윤희수 (1999) 국내 대륙붕 및 육상에 분포하는 탄화수소 가스의 지화학. 한국 석유지질학회지 제6차 학술 발표회 논문집, p. 40-49.
 이영주, 허 식, 광영훈, 김학주, 천종화, 한상준, 윤희수 (1999) 울릉 분지 남동부 시추 퇴적물내에 함유되어 있는 천부가스의 특성, 한국석유지질학회지. 7권, p. 35-40.
 허 식, 천종화, 한상준, 윤희수, 김성렬, 김한준, 최동림, 이용국 (1999) 울릉분지 남동부 천부가스층의 분포, 특성 및 퇴적환경. 지질학회지, 35권, p. 201-212.
 Boggs, S., Jr. (1992) Petrology of sedimentary rocks, Macmillan Publishing Company, 707p.
 Boetius, A., Ravensschlag, K. Schubert, C.J. Rickert, D. Widdel, F. Giesecke, A. Amann, R. J rgensen, B.B. Witte, U. and Pfannkuche, O. (2000) A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane. Nature v. 407, p. 623-626.
 Borowski, W.S., Paull, C.K. and Ussler, W. (1999) Global and local variations of interstitial sulfate gradients in deep-water, continental margin sediments: Sensitivity

to underlying methane and gas hydrate. Marine Geology, v. 159, p. 131-154.
 Borowski, W.S., Paull, C.K. and Ussler, W. (1997) Carbon cycling with the upper methanogenic zone of continental rise sediments: An example from methane-rich sediments overlying the Blake Ridge gas hydrate deposits. Marine Chemistry, v. 57, p. 299-311.
 Chough, S.K., Lee, S.H. Kim, J.W. Park, S.C. Yoo, D.G. Han, H.S. Yoon, S.H. Oh, S.B. Kim, and Y.B. Back, G.G. (1997) Chirp(2-7 kHz) echo characters in the Ulleung Basin. Geoscience Journal, v. 1, p. 143-153.
 Deming, J.W. and Baross, J.A. (1993) The Early Diagenesis of Organic Matter: Bacterial Activity, in Organic Geochemistry, Engel, M.H. and Macko, S.A. eds, Plenum Press, New York and London, p. 119-143.
 Dickens, G.R., Paull, C.K. Wallace, P. and the ODP Leg 164 Scientific Party (1997) Direct measurement of in situ methane quantities in a large gas-hydrate reservoir. Nature, v. 385, p. 427-428.
 Dickens, G.R. (2001) Modelling the global carbon cycle with a gas hydrate capacitor: Significance for the Latest Paleocene Thermal Maximum. Paull C.K. et al., (ed.) Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection. American Geophysical Union, Washington D.C., p. 19-38.
 Henriert, J.P. and Mienert, J. (1998) Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change. Geological Society. London. Special Publications, 137, 338p.
 Hunt, J.M. (1996) Petroleum geochemistry and geology, W.H. Freeman and Company, 743p.
 Hyndman, R.D. and Davies, E.E. (1992) A mechanism for the formation of methane hydrate and sea floor bottom-simulating reflectors by vertical fluid expulsion. J. Geophys. Res., v. 97, p. 7025-7041.
 Kennett, J.P., Cannariato, K.G. Hendy, I.L. and Behl, R.J. (2000) Carbon isotope evidence for Methane Hydrate Instability during Quaternary Interstitials. Science, v. 288, p. 128-133.
 Kvenvolden, K.A. (1996) A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate, Organic Geochemistry, v. 23, p. 997-1008.
 Kvenvolden, K.A. (1998) A primer on the geological occurrence of gas hydrate. In: Henriert, J.P. and Mienert, J (eds.) Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change. Geological Society. London. Special Publications, v. 137, p. 9-30.
 Paull, C.K. and Dillon, W.P. (2001) Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution and Detection. American Geophysical Union, Washington, D.C., Geophysical Monograph, v. 124, p. 315p.
 Sloan, E.D. (1998) Clathrate Hydrates of Natural Gas. 2nd (ed.), Marcel Dekker, New York, 641p.
 Stein, R. (1991) Accumulation of organic carbon in marine sediments. Springer-Verlag. 217p.
 Snowdon, E.D., Jr. (1999) Clathrate hydrates of natural gases, Marcel Dekker, 705p.
 Val Klump, J. and Martens, C.S. (1983) Benthic nitrogen regeneration. In: Nitrogen in the Environment, E.J. Carpenter and Capone, D.G. (eds.), Academic press, New York, p. 411-457.