

## 동해 울릉분지 남부해역에 분포하는 가스 하이드레이트층의 특성 연구

### Study on the Characteristics of Gas Hydrate Layers Distributed in the Southern Ulleung Basin, the East Sea

허 식 (Sik Huh)\* · 유해수 (Hai-Soo Yoo)\* · 김한준 (Han-Joon Kim)\* ·  
한상준 (Sang-Joon Han)\* · 이용국 (Yong-Kuk Lee)\*

**요 약 :** 한국해양연구원에서는 1996년 이래로 동해 울릉분지에서 가스 하이드레이트층의 부존 확인과 특성을 규명하기 위하여 다중채널 반사파 탐사, 고해상 천부지층 탐사, SeaBeam 등의 지구물리 자료와 12 m 길이의 시추퇴적물 시료들을 획득하였다. 동해 울릉분지 남부 해역에는 대규모 천부 가스층이 배태되어 있는데 고해상 천부 탄성파자료에 나타나는 음향이상인 음향 공백상, 음향 혼탁상 그리고 포크마크 등으로 확인할 수 있다. 이 해역에서 채취된 시추 퇴적물들은 대기 하에서 가스팽창으로 야기된 균열조적을 보이는데, 이는 퇴적물 내 가스함유를 지시한다. 이 시추 퇴적물들은 저해수면 시기에 가스 하이드레이트 해리로 인하여 생성된 사면사태에 의해서 공급된 쇄설류와 질량류 퇴적물들로 구성되어 있다. 탄성파 단면도 상에서는 해저면 모방 반사면 (BSR), 진폭 공백 및 위상 반전 현상 등이 특징적으로 나타난다. 가스 하이드레이트층은 수심 2,100 m 정도에서 해저면하 약 200 m의 깊이에 위치하며 BSR 상부에는 대규모 천부가스가 존재한다. 탄성파 자료 해석에 의하면 가스 하이드레이트층은 시대적으로 플라이스토세와 홀로세층 사이에 존재한다. 이와 같이 울릉분지 남부 해역에서 관찰되는 가스함유 퇴적물, 음향이상, BSR 등은 가스 하이드레이트층의 부존 특성을 보여주고 있다.

**주요어 :** 울릉분지, 가스 하이드레이트, 가스함유 퇴적물, 음향이상, 해저면 모방 반사면

**Abstract :** To identify and interpret the distribution and the characteristics of the gas hydrate layers in the Ulleung Basin, we have surveyed and gathered the multi-channel seismic data, Chirp sub-bottom profiler, SeaBeam and 12 m piston core samples since 1996. In previous works, high-resolution seismic profiles showed acoustic anomalies such as acoustic void, acoustic turbidity and pock mark which indicate the presence of gas-charged sediments. The patterns of horizontal degassing cracks originated from free methane expansion is the strong indicator of shallow gas-charged sediments in the core samples. The observation of submarine slides and slumps from destabilizing the sediments in the southern part of the Ulleung Basin may also point out that the gas had been released from gas hydrate dissociation during lowstand of sea level. The multi-channel seismic data show BSR, blanking and phase reversal. The gas hydrate layers above which large-scale shallow gases are distributed exist at the depth of about 200 m from the sea-floor with water depth of 2,100 m. From the interpretation of seismic sections in the southern Ulleung Basin, gas hydrate layers occur in the Pleistocene-Holocene sediments. These gas-charged sediments, acoustic anomalies and BSR may be all related to the existence of gas hydrate layers in the study area.

**Key words :** Ulleung Basin, gas hydrate, gas-charged sediment, acoustic anomaly, BSR

## 서 론

가스 하이드레이트 (gas hydrates)는 메탄분자가 물분자에 의해 포획되어 형성된 고체상태의 물질로 퇴적물 내에서 얼음과 유사한 결빙 상태의 결정으로 산출된다. 세계적으로 가스 하이드레이트에 대한 연구는 첫째, 청정에너지이며 거대 신자원이라는 점 (예상 부존량은  $10^{12}$  m<sup>3</sup>으로 모든 화석연료를 합친 것의 약 2배), 둘째, 해저에서 자연 방출되는 메탄가스에 의한 해저사태 등 자연발생적인 재난을 사전에 예측할 수 있다는 점, 마지막으로 해양과 대기에서의 메탄가스의 순환경로를 파악하여 지구온난화 연구에 기여할 수 있다는 점 등을 배경으로 이루어지고 있다.

가스 하이드레이트의 존재가 밝혀진 이후 러시아가 베링해와 오

호츠크해 사할린섬 근처에서 피스톤 코어 퇴적물로부터 수 m 내에 존재하는 가스 하이드레이트를 채취하였다 (Ginsburg *et al.*, 1993). 일본도 난카이 해곡 (Nankai Trough)에서 탄성파 탐사 자료와 코어 퇴적물을 취득하여 다량의 가스 하이드레이트가 매장되어 있음을 밝혔다 (Sakai *et al.*, 1992).

한국해양연구원에서는 1996년 이래 지속적으로 가스 하이드레이트에 대한 국내외 연구동향과 탐사방법 등을 조사하고 있으며, 취득된 코어 및 탄성파 탐사자료 분석 등의 다양한 지질과 지구물리 방법을 동원하여 동해에서 가스 하이드레이트 자원을 발견하고 평가하기 위한 연구를 꾸준히 진행시키고 있다. “한국 대수심 해역의 지구적 해저 환경연구” (한국해양연구원, 1997), “동해 분지의 해양환경변화와 지구조 진화 연구” (한국해양연구원, 1998)

\*한국해양연구원 해저환경자원연구본부 (Marine Geoenvironment & Resources Research Division, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan, P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea); sikhuh@kordi.re.kr

및 “배타적 경제수역 해양광물자원 조사” (해양수산부, 2001) 사업 등을 통하여 동해 대륙붕, 대륙사면 그리고 대양저에서 획득한 심부 탄성과 자료와 12 m 피스톤 코아 시료로부터 가스 하이드레이트의 존재 가능성을 확인하였다 (Huh *et al.*, 1997, 2000, 2001, 2002). 탄성과 기록에서 BSR로 추정되는 강한 반사기록을 찾아 속도분석으로 확인하였으며 (해양수산부, 2001), 또한 대륙사면에서의 퇴적물 이동은 가스 하이드레이트로부터 표층으로 방출된 메탄가스에 의한 사태일 가능성이 있다고 해석하였다 (허 식 외, 1999). 그리고 코아 시료에서 가스 하이드레이트로부터 이동한 천부가스에 의한 가스맥 (gas vein)의 발견과 코아 퇴적물의 팽창 등을 관측하였다.

한국지질자원연구원에서는 가스 하이드레이트의 부존 가능성을 규명하기 위하여 1998년 이래로 포항 남동쪽으로 약 200 km 떨어진 해역에서 지구물리 탐사를 수행하고 있다 (류병재 외, 1998). 이와 같이 국내에서도 출연연구소나 대학을 중심으로 가스 하이드레이트의 물성규명, 탐사법 개발, 생산 기술개발, 기후 온난화 모델의 개발 등에 관한 연구가 이루어지고는 있으나 아직은 기초적인 단계에 머물러 있다고 할 수 있다.

가스 하이드레이트가 분해되지 않고 지하에 안정된 상태로 존재하기 위해서는 특정한 온도-압력 조건 (고온-저압)이 필요하므로 (Dillon *et al.*, 1995), 부존 여부를 확인하기 위해서는 평형조건 및 안정영역에 대한 규명이 필수적이다. 울릉분지에 있는 가스 하이드레이트의 잠재성을 확인하기 위해 측정된 해저 수온은 0~1°C, 지온구배율은 3.7~3.9°C/100 m, 해양퇴적물의 평균 열수지는 2.35 HFU로서 다른 분지보다 높은 값을 보이고 있다. 따라서 가스 하이드레이트가 안정상태를 유지하기 위해서는 다른 분지보다 심도가 깊어서 압력조건이 온도조건을 보상에 평형상태를 유지해야 한다 (류병재 외, 1998). 코아 퇴적물에서 측정된 평균 유기탄소 함량은 2~3%로 충분히 메탄을 산출할 수 있는 분량이다.

본 연구에서는 동해 울릉분지 남부 대륙사면의 가스 하이드레이트층의 분포와 특성 등을 기술하고자 한다. 그리고 가스 하이드레이트의 해리작용과 관련되어 있으리라 추정되는 퇴적환경 등을 밝혀 추후 가스 하이드레이트 자원 탐사에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

### 연구방법 및 자료

동해 해역에서 가스 하이드레이트 층의 부존 가능성과 특성을 규명하기 위하여 종합연구선 온누리호로 해저면 탐사, 해저지층 탐사, 다중빔 음향측심 탐사 및 심부 탄성과 탐사 등의 지구물리 자료를 취득하였다. 이러한 탐사자료를 이용하여 주변의 퇴적층과 가스 하이드레이트 층의 물성 차에 의해 나타나는 음향 및 탄성과 특성을 감지하여 부존 가능성과 매장량 등을 추정할 수 있다.

동해 울릉분지 남부 대륙사면과 분지평원에서 제4기 동안의 해수면 변동, 사면사태 등의 퇴적기작과 천부 가스층의 특성 등을 밝히고자 길이 12 m의 피스톤 코아를 사용하였다. 각 시추 퇴적물들은 고해상 천부 탄성과탐사 자료에 의해 해석된 천부가스 부존지역에서 채취되었다 (Fig. 1). 시추 퇴적물들은 울릉분지의

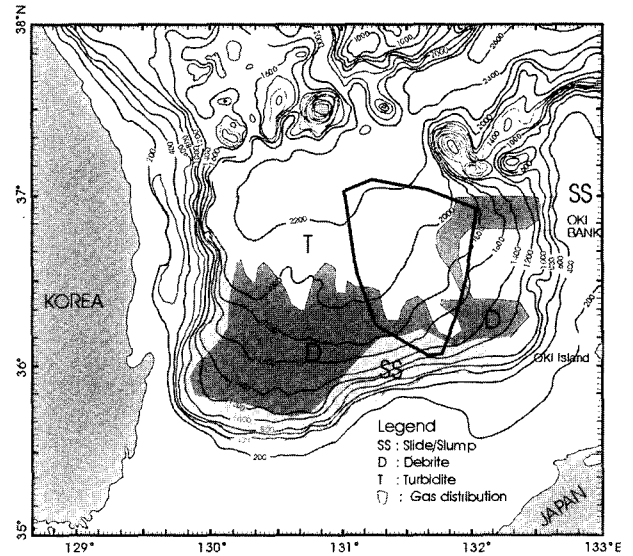


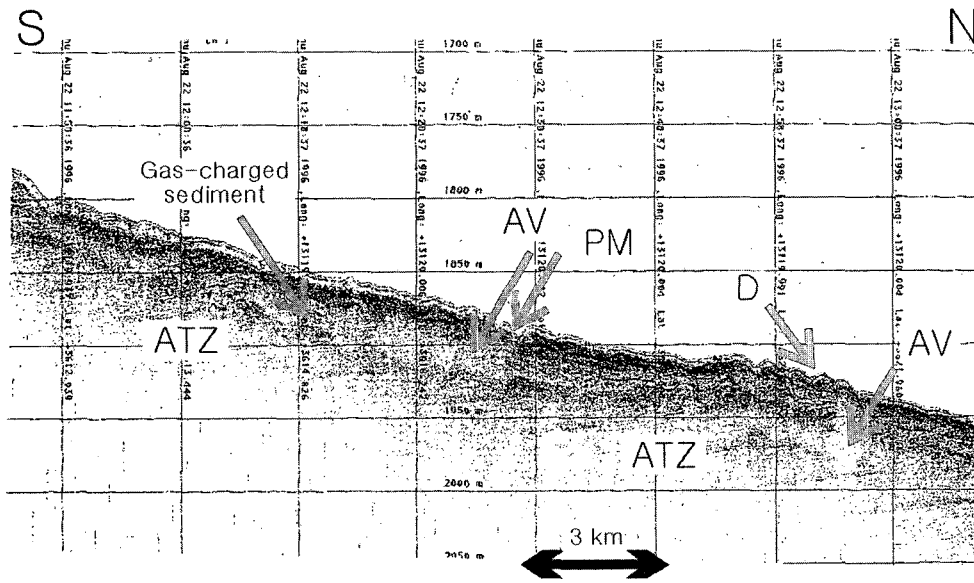
Fig. 1. Distribution of mass flow deposits (Chough *et al.*, 1997) with gas distribution area. Note that the zonal distribution of mass flow deposits follows approximately the bathymetric contours. The area of gas distribution is indicated with a closed boundary line.

남부 하부 대륙사면의 수심 1,500~2,100 m 사이에서 채취되었으며, 해저면으로부터 깊이 860 cm에서 1,100 cm까지의 퇴적물들을 획득하였다. 각 시추 퇴적물들은 현장에서 밀봉된 후에 실험실로 운반되었으며, 퇴적학적 특성 규명을 위하여 실험실에서 양면으로 절개한 후에 색상, 입도, 연X-선 사진, 조성광물과 주요 원소를 분석하였다.

### 울릉분지 남부에 분포하는 대규모 천부 가스층의 특성

가스 함유 퇴적층에서는 탄성과 에너지가 흡수되거나 산란되어 되돌아오는 파의 에너지 약화와 속도의 감소가 일어난다. 그 결과 반사층의 연속성이 불량 (chaotic)하거나 투명한 (reflection free) 음향 혼탁상 (acoustic turbidity)이 나타나게 된다. 해양퇴적물에서 발견되는 가스는 수소, 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>), 질소, 암모니아, 유화수소 (H<sub>2</sub>S) 등으로 구성되며, 이중 가장 중요한 성분은 메탄가스 (CH<sub>4</sub>)이다 (Shubel, 1974). 이러한 메탄가스는 주로 유기물의 생물학적인 분해 (microbial degradation)에 의해 생성된다. 생물기원의 메탄가스는 미생물이 유기물을 분해하는 과정인 이산화탄소의 환원 또는 발효 (fermentation) 과정을 통하여 생성되며, 대부분이 천부지층에 분포한다 (Rice and Claypool, 1981; Dillon *et al.*, 1995). 이러한 천부가스는 퇴적물내의 전단응력 (shear strength)을 약화시켜 각종 해저구조물의 침하현상이나 해저사태를 유발시킬 수 있다. 그리고 심해의 천부 퇴적층에 부존된 메탄가스는 가스 하이드레이트와 깊은 관련이 있는 것으로 보고되었다 (Bouriak and Akhmetjabov, 1998; Long *et al.*, 1998).

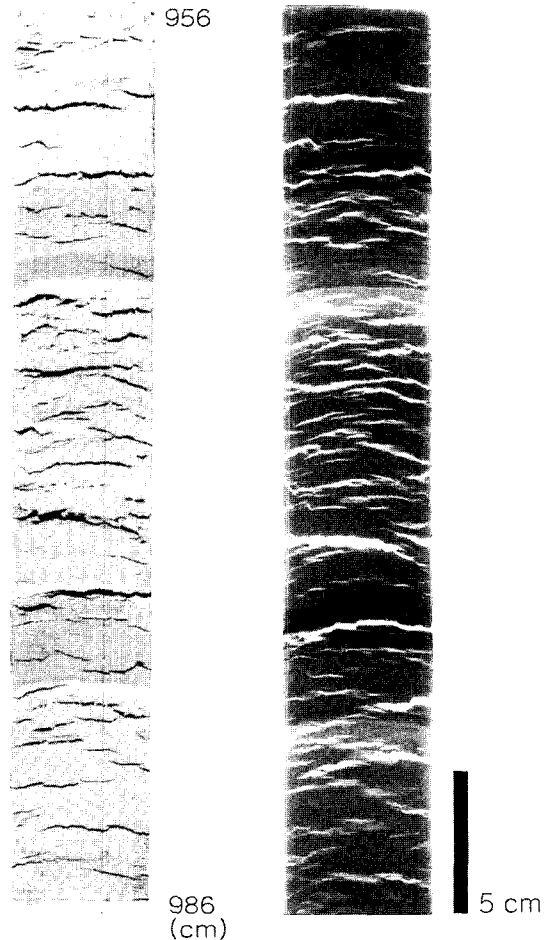
고해상 탄성과 탐사 자료에 의하면 동해 울릉분지 남부에는 대규모 천부 가스층이 수심 1,900 m의 해저면 하부 5~15 m에 부존되어 있다. 이 퇴적층에서는 음향이상 (acoustic anomaly)들이



**Fig. 2.** Sub-bottom profile in the slope of the southern Ulleung Basin showing prominent acoustic maskings due to gas-charged sediments. The acoustic voids (AV) are accompanied by sea-floor doming (D). The movement of shallow gas is accompanied by sliding of the overlying thin layer. The sub-bottom profile also shows an acoustic turbidity zone (ATZ) and pock mark (PM).

흔히 관찰되는데, 이는 퇴적층내의 가스에 의한 것으로 해석된다 (Fig. 2). 연구지역에서 가스 함유 퇴적층에 나타나는 반사면 형태는 음향 공백상 (acoustic void), 음향 혼탁상 그리고 포크마크 (pock mark) 등이 있다 (Ivanov *et al.*, 1998; Veerayya *et al.*, 1998; Woodside *et al.*, 1998).

울릉분지 남부 대륙사면의 음향 공백상은 층리가 잘 발달된 퇴적층 내에서 반사층의 연속성이 불량하게 나타나거나 (chaotic), 에너지가 모두 반사되어 투명한 형태로 나타난다 (Fig. 2). 이러한 반사형태는 음향 혼탁지역에서 가스가 팽창하여 연약한 지역의 상부 퇴적층을 뚫고 이동한 고농도 메탄가스의 집적에 의한 것으로 해석된다. 음향 공백상 주변에는 약간 반구형이거나 위로 둥근 형태의 둔덕 (mound) 모양을 가진 해저면이 나타나는데, 이는 가스의 상승에 의한 팽창으로 생성되었다. 가스 함유층에서 관찰되는 음향 혼탁상은 반사, 흡수, 산란 등에 의한 파의 에너지 약화에 의해서 반사특성 (echo character)이 검고 길게 확산되어 (prolonged) 나타난다. 해저면이 원형으로 움푹하게 파인 형태의 포크마크는 울릉분지 남부 대륙사면에서 다수 확인되었으며 (한국해양연구원, 1996, 1997; 해양수산부, 2001), 이것은 해저면으로의 가스 분출에 의해서 형성된다. 음향 공백상이 해저면 근처까지 발달된 지역은 퇴적층내에 존재하는 가스의 압력이 높아질 때, 가스가 퇴적층을 뚫고 해저면까지 이동한다. 이때 퇴적층내의 가스가 해저면으로 방출되면서 주변 퇴적층과의 밀도차이에 의한 함몰로 포크마크가 형성되며, 일부 해역에서는 기포 (gas bubble)가 나타난다. 가스 하이드레이트의 경우에도 온도와 압력조건이 조금만 변하면 해리가 진행되며 해리된 가스에 의해 해저면에 포크마크가 형성된다. 가스 하이드레이트가 형성되어 부존될 수 있는 지역에서 이러한 음향이상 존재는 간접적으로 가스 하이드레이트의 부존 가능성을 지시한다.



**Fig. 3.** Dense patterns of horizontal degassing cracks that cross original sedimentary structures in the core samples.

플라이스토세 (Pleistocene) 동안의 기후 변동과 관련된 해수면의 변화에 기인한 대규모 사태 (slide)가 다수의 대륙사면 (예를 들어, 알래스카 연해, 노르웨이, 아프리카 등)에서 발생했다 (Shipley *et al.*, 1979; Bouriak and Akhmetjibov, 1998). 가스 하이드레이트 지지층의 하부는 해수면 하강시에 퇴적물내에서의 한계 압력이 감소된다. 이때 가스 하이드레이트는 지지층의 하부를 따라 해리되어 유리가스가 형성되고 공극 압력이 올라간다. 가스 하이드레이트의 해리는 상부 퇴적물의 지지력을 감소시켜 대규모의 사면붕괴 (미끄럼사태, 함몰사태 등)를 일으키는 요인 중의 하나로 작용한다. 동해 울릉분지 남부 대륙사면에서도 사면 붕괴가 관찰되며, 이들 퇴적물들은 대부분이 저해수면 시기에 공급되었음이 밝혀졌다 (Chun *et al.*, 1997). 동해 울릉분지의 남동쪽 하부 대륙사면에서 채취된 시추 퇴적물에서는 가스팽창으로 야기된 균열조직 (gas crack)을 발견하였다 (Fig. 3). 이러한 수평방향의 균열들은 퇴적물 채취 직후에 밀봉했음에도 불구하고 표층으로부터 깊이 350 cm 이하 구간에서 부피팽창에 의해 생성되었으며, X-선 분석 자료상에서는 엷리질 니 (laminated mud) 내에서 가스가 수평으로 흘러 들어가는 형태로 나타나고 있다. 이 시추 코아 시료에서 가스를 포집하여 가스함량, 성분, 탄소 동위원소 및 유기 지화학 분석을 수행한 결과에 의하면 (이영주 외, 1999), 메탄이 주를 이루며 에탄, 프로판, 부탄, 핵산 등이 검출되었다. 또한 육상 유기물 유입이 우세했으며, 열기원 가스가 우세하고 일부는 생물기원 가스와 혼합된 양상을 보이고 있다. 해양환경 및 기후변화 측면에서 동해 해역에 존재하는 대규모 천부 가스층의 성인 분석을 통하여 이를 배태시킨 해양분지의 퇴적변화를 연구하고, 고환경을 재구성 할 수 있다. 현재 동해 울릉분지의 퇴적양상과 해저지형을 연관시켜 볼 때 천부가스 부존지역은 쇄설류 (debris flow)가 우세하고 해저지형이 완만하게 변하는 지역이다. 반면에 천부가스가 없는 지역은 저탁암 (turbidite)이 우세하고 급경사의 해저지형을 가져 하부의 가스 하이드레이트가 저해수면 동안에 방출되었으리라 추정할 수 있다.

### 탄성과 단면도에 나타난 BSR의 특징

1971년에 심해시추 과정 중 가스 하이드레이트가 부존된 지역에서 음향학적 특징인 해저면 모방반사면 (BSR; bottom simulating reflectors)을 발견하였는데 (Stoll *et al.*, 1971), 이는 가스 하이드레이트를 찾는 가장 효과적인 방법이다. 탄성과 단면도 상의 BSR은 평형조건으로 인하여 일반적으로 해저면과 평행하게 발달된다. 가스 하이드레이트의 속도는 보통 해저퇴적물 속도보다 2배 정도로 크기 때문에 (Prensky, 1995), 가스 하이드레이트가 해저 퇴적물과 혼합되어 있는 곳에서는 속도가 높게 나타나 강한 진폭을 보인다. 가스 하이드레이트층 하부에 있는 지층이 단순히 물로 포화된 퇴적층인 경우에 속도가 훨씬 낮게 되므로, 반사계수의 부호는 음이 되어 뚜렷한 속도역전 현상을 보이는 위상반전이 일어난다. 또한 BSR을 경계로 가스 하이드레이트층 내부에는 가스 하이드레이트가 퇴적층의 공극을 채움에 따라 퇴적층 사이의 반사계수가 작아져 반사 이벤트가 거의 보이지 않는 진폭 공백 (amplitude blanking) 현상도 나타난다.

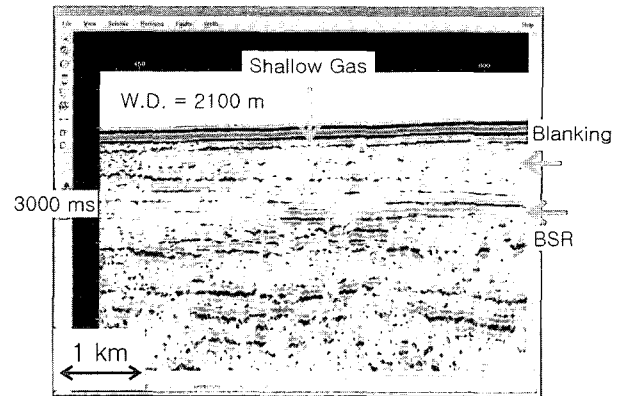


Fig. 4. A multi-channel seismic profile shows a strong bottom simulating reflection (BSR) representing the base of gas hydrate stability zone and a blanking of strata above the BSR in the southern Ulleung Basin.

동해에서 가스 하이드레이트 탐사 해역은 쇄설성 퇴적암으로 이루어진 신생대 퇴적분지로서 음향이상이 발견된 울릉분지 남부 대륙사면을 택하여 수행되었다. 부존되어 있는 가스 하이드레이트는 퇴적층과 가스 하이드레이트 층 사이의 물리적 특성 차이로 임피던스가 다르기 때문에, 탄성과 단면도 상에서는 위상이 반대인 강한 진폭의 이벤트가 해저면과 평행한 반사면으로 나타난다 (Fig. 4). 가스 하이드레이트 층은 수심 약 2,100 m에서 200 m의 깊이에 위치하며 BSR 최상부에는 천부가스가 존재한다. 탄성과 자료의 층서 해석에 의하면 동해에서 가스 하이드레이트 층은 홀로세 (Holocene)와 플라이스토세 사이의 지략류 퇴적층 내에 형성된 것으로 보인다. 그러나 현재 탄성과자료의 축선 간격이 너무 크기 때문에 가스 하이드레이트가 부존된 위치, 매장량 및 부존 상태를 정확하게 파악하는 데는 어려움이 있다.

### 결론 및 토의

동해 울릉분지 남부에 위치한 대규모 천부 가스층은 수심 1,900 m의 해저면 하부 5~15 m에 부존하며, 12 m 피스톤 코아 리로 직접 채취했다. 취득한 시추 코아 시료에서 가스팽창으로 야기된 균열 조직을 발견하였다. 고해상 천부 탄성과자료에 나타나는 음향이상으로서 천부 가스층에 의한 음향 혼탁상은 쇄설류나 층리가 발달한 반사면 하부에 검고 길게 확산된 반사특성을 가진다. 음향 공백상은 주로 베타형으로 나타나며, 천부가스의 상승에 의한 팽창의 결과로 해석된다. 해저면이 원형으로 움푹하게 파인 형태의 포크마크는 울릉분지 남부 대륙사면에서 다수 확인되었으며, 이것은 해저면으로 천부가스 또는 가스 하이드레이트가 분출되어 생성되었으리라 사료된다. 이와 같이 울릉분지 남부 대륙사면에서는 주기적인 제4기 해수면 변화로써 야기된 해침과 해퇴의 영향을 받아 가스 하이드레이트 층이 해리되어 사면사태에 의한 퇴적물 이동을 촉진시키고 있다.

탄성과 단면도 상에서는 가스 하이드레이트 층의 특성을 나타내는 BSR, 진폭 공백, 위상 반전 및 고립된 유리가스 등이 특징적으로 나타난다. 가스 하이드레이트 층은 수심 2,100 m 정도에

서 해저면 하 약 200 m의 깊이에 위치하며 BSR 상부에는 대규모 천부가스가 존재한다. 탄성과 자료 해석에 의하면 동해에서 가스 하이드레이트 층은 홀로세와 플라이스토세 사이의 저탁류 퇴적층 내에 형성된 것으로 보인다. 이와 같이 울릉분지 남부 해역에서 관찰되는 가스함유 퇴적물, 음향이상, BSR 등은 가스 하이드레이트 층의 부존 특성을 보여주고 있다. 울릉분지 남부 사면에 분포하는 광범위한 천부가스의 확인을 토대로 체계적인 해양지질 및 지구물리조사를 실시하여 천부가스의 성질과 기원 그리고 가스 하이드레이트의 특성 (분포, 배태조건, 매장량 등)에 대한 집중적인 연구가 필요하다.

## 사 사

본 연구는 한국해양연구원 기관고유사업인 “동해분지의 해양환경변화와 지구조 진화 연구”와 해양수산부의 “배타적 경제수역 해양자원조사” 사업 결과의 일부이다. 자료처리와 정리에 힘써 주신 한국해양연구원 해저환경·자원연구본부 참여자들, 그리고 은누리호 선장의 전 승조원들에게 감사드린다. 또한 이 논문의 원고를 심사해 주시고 좋은 의견을 주신 전남대 전승수 박사에게 감사드린다.

## 참고문헌

- 류병재 외, 1998, 메탄 하이드레이트의 중요성과 형성 및 부존 조건, 제7회 석유자원탐사 및 개발 심포지움 발표 논문집, 한국자원연구소, 58-74.
- 이영주, 허 식, 광영훈, 김학주, 천중화, 한상준, 유해수, 1999, 울릉분지 남동부 시추 퇴적물내 함유된 천부가스의 특성, 석유지질학회지, 7(1), 35-40.
- 한국해양연구소, 1997, 한국 대수심 해역의 지구적 해저 환경연구 (한상준 외), 657p.
- 한국해양연구소, 1998, 동해분지의 해양환경변화와 지구조 진화 연구 (한상준 외), 558p.
- 해양수산부, 2001, 배타적 경제수역 해양자원조사 (유해수 외), 695p.
- 허 식, 천중화, 한상준, 유해수, 김성렬, 김한준, 최동림, 이용국, 1999, 울릉분지 남동부 천부 가스층의 분포, 특성 및 퇴적환경, 대한지질학회지, 35(3), 201-212.
- Bouriak, S.V., and Akhmetjabov, A.M., 1998, Origin of gas hydrate accumulations on the continental slope of the Crimea from geophysical studies. In: Henriot, J.P. and Mienert, J. (eds.), Gas Hydrate : Relevance to world margin stability and climate change, Geological Society, London, Special Publications, 137, 215-222.
- 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, Y.B., and Back, G.G., 1997, Chirp (2-7 kHz) echo characters in the Ulleung Basin, *Geoscience Journal*, 1, 143-154.
- Chun, J.H., Han, S.J., and Cheong, D.K., 1997, Tephrostratigraphy in the Ulleung Basin, East Sea: Late Pleistocene to Holocene, *Geoscience Journal*, 1, 154-166.
- Dillon, W.P., Fehlhaber, K., and Coleman, D., 1995, Map showing gas hydrate distribution off the East Coast of the United State, US Geological Survey Miscellaneous Field Investigation Map, 228p.
- Ginsburg, G.D., Soloviev, V.A., Cranston, R.E., Lonsenson, T.D., and Kvenvolden, K.A., 1993, Gas hydrate from the continental slope, offshore Sakhalin, Okhotsk Sea, *Geo-Marine Letters*, 13, 41-48.
- Huh, S., Yoo, H.S., Han, S.J., Kim, H.J., Bahk, J.J., and Suk, B.C., 1997, Analysis of gas hydrate potential in the Ulleung Basin, East Sea of Korea, International Gas Hydrate Conference at Stanford University, California, 16-17.
- Huh, S., Han, S.J., Yoo, H.S., Hyun, S.M., and Chun, J.H., 2000, Gas hydrate potential from gas-charged sediments in the Ulleung Basin, East Sea, AGU, Tokyo, Japan.
- Huh, S., Han, S.J., Chun, J.H., Yoo, H.S., Kim, S.R., and Kim, H.J., 2001, Characteristics of gas hydrate layer in the Ulleung Basin, the East Sea, International Conference on Conservation and transformation of the Matter and Energy in the Earth Cryosphere, Moscow, Russia.
- Huh, S., Han, S.J., Yoo, H.S., Kim, S.R., Lee, Y.K., and Chun, J.H., 2002, Origin and depositional environments of gas hydrate layer in the Ulleung Basin, the East Sea, The Fourth International Conference on Gas Hydrates, Yokohama, Japan.
- Ivanov, M.K., Limonov, A.F., and Woodside J.M., 1998, Extensive deep fluid flux through the seafloor on the Crimean continental shelf margin (Black Sea). In: Henriot, J.P. and Mienert, J. (eds.), Gas Hydrate : Relevance to world margin stability and climate change, Geological Society, London, Special Publications, 137, 195-213.
- Long, D., Lammers, S., and Linke, P., 1998, Possible hydrate mounds within large sea-floor craters in the Barents Sea. In: Henriot, J.P. and Mienert, J. (eds.), Gas Hydrate : Relevance to world margin stability and climate change, Geological Society, London, Special Publications, 137, 223-237.
- Prensky, S.E., 1995, A review of gas hydrates and formation evaluation of hydrate-bearing reservoirs, The society of professional Well log analysts, Paris, France, 26-29.
- Rice, D.D., and Claypool, G.E., 1981, Generation, accumulation, and resource potential of biogenic gas, *American Associations of Petroleum Geologists Bulletin*, 65, 5-35.
- Sakai, H., Gamo, T., Ogawa, Y., and Boulegue, J., 1992, Stable isotopic ratios and origins of the carbonates associated with cold seepage at the eastern Nankai Trough, *Earth Planetary Science Letters*, 109, 391-404.
- Schubel, J.R., 1974, Gas bubbles and the acoustically impenetrable, or turbid, character of some estuarine sediments, *Marine Sciences*, 3, 275-298.
- Shipley, T., Houston, M., and Buffler, R., 1979, Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises, *American Associations of Petroleum Geologists Bulletin*, 63, 2204-2213.
- Stoll, R.O. et al., 1971, Anomalous wave velocities in sediments containing gas hydrates, *J. of Geo. Res.*, 76, 2090.
- Veerayya, M., Karisiddaiah, S.M., Vora, K.H., Wagle, B.G., and Almeida, F., 1998, Detection of gas-charged sediments and gas hydrate horizons along the western continental margin of India. In: Henriot, J.P. and Mienert, J. (eds.), Gas Hydrate : Relevance to world margin stability and climate change, Geological Society, London, Special Publications, 137, 239-253.
- Woodside, J.M., Ivanov, M.K., Linonov, A.F., and Shipboard Scientists of the Anaxiprobe Expeditions, 1998, Shallow gas and gas hydrates in the Anaximander Mountains region. In: Henriot, J.P. and Mienert, J. (eds.), Gas Hydrate : Relevance to world margin stability and climate change, Geological Society, London, Special Publications, 137, 177-193.

(2004. 2. 10 원고 접수)

(2004. 9. 20 수정본 채택)