

동해 울릉분지 남서 사면지역에서 탄성과 특징으로부터 유추한 가스 수화물의 존재 가능성

최동림* · 홍종국¹ · 유해수¹ · 주형태¹ · 한상준¹

한국해양연구원 장목분원

¹한국해양연구원 해양환경 · 기후연구본부

Gas Hydrate Occurrence in the Southwestern Slope of the Ulleung Basin, East Sea, Inferred from Seismic Evidence

DONG-LIM CHOI*, JONG-KUK HONG¹, HAI-SOO YOO¹, HYEONG-TAE JOU¹ AND SANG-JOON HAN¹

Jangmok Marine Station, KORDI, Koje 656-830, Korea

¹Marine Environment & Climate Change Lab., KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

고해상 Chirp 자료와 다중채널 탄성과 자료를 이용하여 울릉분지 남서 상부대륙사면지역에 가스수화물의 존재 가능성에 대해 분석하였다. Chirp 자료에서 퇴적층내 천부 가스의 분포를 지시하는 음향 혼탁상, 음향 공백상, 그리고 포크마크가 보인다. 가스수화물의 분해와 관련된 것으로 생각되는 사면붕괴 구조도 확인된다. BSR이 수심 750~1130 m 사이 지역에서 해저면 아래 60~110 m 부근에 발달한다. BSR 위의 상부퇴적층은 음향 블랭킹 양상을 보이는데, 이는 퇴적물과 가스수화물의 혼합에 의한 진폭 감소의 결과로 해석된다. 탄성과 자료 속도분석으로부터 계산된 지층의 구간속도는 BSR 위의 퇴적층이 1,650 m/sec이고 아래 퇴적층은 1,080 m/sec을 나타낸다. BSR 상부의 퇴적층 두께가 수심이 증가할수록 얇아지는 양상은 울릉분지의 지열류량이 수심의 증가와 함께 증가하는 발달분포와 매우 밀접한 관계가 있을 것으로 예상된다.

A high resolution Chirp seismic profile and a multichannel seismic reflection profile were analysed to study the possibility of gas hydrate presence in the southwestern upper slope of the Ulleung Basin. The Chirp profile shows acoustic turbidity, acoustic void, and pockmarks, suggesting the presence of shallow gas in the sediments. Slope failures appear to have occurred in association with decomposition of gas hydrated sediments. A bottom-simulating reflector (BSR) is seen in subbottom depths of 60 to 110 m below the seafloor at water depths of 750 to 1130 m. The sediments above BSR are characterized by acoustic blanking probably due to amplitude reduction caused by a mixture of gas hydrate with sediments. The interval velocity above the BSR is 1,650 m/sec and it drops abruptly to 1,080 m/sec below the BSR. The sediment column between seafloor and the BSR thins with increasing water depth, which is very closely related to increasing geothermal gradient with increasing water depth in the Ulleung Basin.

서 론

탄성과 단면도상에서 해저면을 모방한 이상 반사층리인 BSR(bottom-simulating reflector)이 세계 여러 대륙 연변부에 널리 분포하고 있다(i.e., Shipley *et al.*, 1979; Field and Kvenvolden, 1985; Dillon *et al.*, 1993; Lee *et al.*, 1994). BSR은 퇴적층내 속도 차이에 의한 것으로 가스 수화물의 존재를 간접적으로 지시한다(Tucholke *et al.*, 1977; Shipley *et al.*, 1979; Miller *et al.*, 1991). 가스 수화물은 주로 메탄으로 구성된 고체의 에너지원으로서, 퇴적층내 특정한 압력과 온도하에서 형성되는 것으로 보고되었다(Kvenvolden, 1993).

가스 수화물의 존재는 직접적인 채취 자료가 없는 경우에 탄성과 단면도상에서의 이상 반사층리인 BSR 존재와 음향 블랭킹(blanking) 그리고 탄성과 속도 분석 결과 등으로 간접 확인이 된다(Dillon *et al.*, 1993; Lee *et al.*, 1994). 해저 퇴적물내 가스는 대표적 음향특성 즉, 포크마크(pockmark), 음향 혼탁상(acoustic turbidity), 그리고 음향 공백(acoustic void) 등으로 표현되며, 이들의 출현은 가스수화물 존재에 대한 또 다른 증거로 활용된다(Ivanov *et al.*, 1998; Veerayya *et al.*, 1998). 또한 사면지역의 퇴적물 붕괴는 여러 지역에서 가스 수화물의 분해와 밀접한 관련성이 있는 것으로 해석되었다(Paull *et al.*, 1991; Kayen and Lee, 1991; Paull *et al.*, 1996). 해수면 하강시 압력 조건의 불안정성은 가스 수화물 기저부의 강도 약화의 원인이 되며, 이로 인해 퇴적물 붕괴가 발생한다. 연구지역(Fig. 1)의 수심 약 750에서 1130 m 범위의 대륙사면

*Corresponding author: dlchoi@kordi.re.kr

에서 이상 반사층리와 천부가스를 지시하는 음향 퇴적상이 확인되었다. 이는 연구지역의 가스 수화물의 존재가능성을 간접적으로 지시한다. 더불어 대륙사면에 발달한 사태 흔적 구조도 이와 깊은 상관관계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 연구지역에서 획득된 탄성과 자료들을 이용하여 가스 수화물의 존재 가능성을 연구하고자 한다.

지질학적 환경

연구지역을 포함하는 울릉분지 남서 연변부는 동해와 동 중국해를 연결하는 통로로서 넓고 평탄한 대륙붕이 발달하였다(Fig. 1). 그리고 대륙붕에 이어서 급경사의 대륙사면과 2000 m 이상의 평탄한 분지 평원이 북쪽을 향해 나타난다. 이 지역은 신생대 퇴적물이 최대 10 km 정도 쌓여있다(Chough and Barg, 1987).

배호상 분지인 동해 울릉분지의 지구구조 특징은 올리고세에서 중기 마이오세 까지 신장운동에 의해 확장되었고, 이어서 중기 마이오세 말에서 후기 마이오세 초기에 동-서방향의 압축운동에 의해 다시 수축되었으며 이때 쓰시마 단층대 등의 습곡과 드러스트 단층구조가 우세하게 발달하였다(최동림, 1995). 동해의 열림 이후 울릉분지의 퇴적작용은 퇴적물이 주로 남쪽에서 북쪽을 향해 전진 이동하면서 쌓인다(Chough *et al.*, 1997; 최동림, 1998). 제4기 동안 대륙사면에서 분지로의 퇴적물 공급은 질량류 퇴적과정이 매우 중요한 것으로 알려졌다(Lee *et al.*, 1996; Chough *et al.*, 1998). 더불어 사면을 따라 활발한 사태와 함몰 작용은 불규칙한 지형을 형성하는데 주요 원인이 된다.

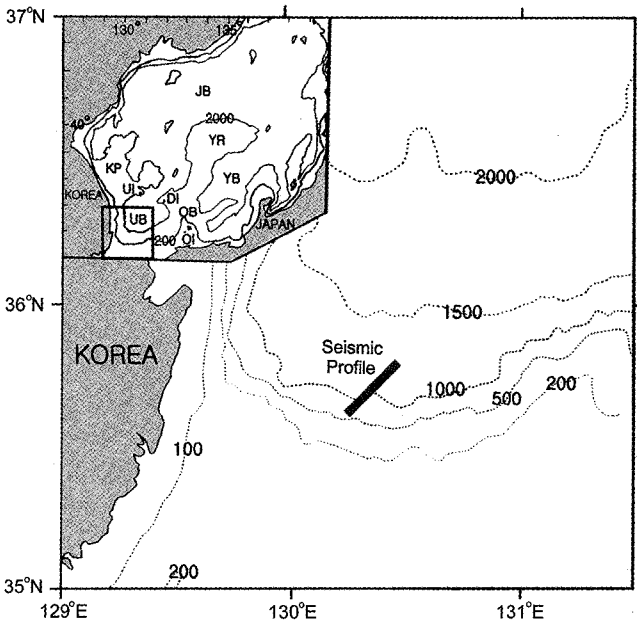


Fig. 1. Map showing the study area with the location of the Chirp profile (Fig. 2) and the multichannel seismic reflection profile (Fig. 3). UB: Ulleung Basin, YB: Yamato Basin, JB: Japan Basin, KP: Korea Plateau, YR: Yamato Ridge, OB: Oki Bank, UI: Ulleung Island, DI: Dok Island, OI: Oki Island.

연구방법

남서 울릉분지 상부 대륙사면에 대해 1997년 한국해양연구원의 해양종합조사선 온누리호를 이용하여 다중 채널 탄성과 탐사와 고해상 Chirp 탄성과 지층탐사를 동시에 병행하였다. 조사선의 항해속도는 약 5 노트를 유지하였으며, 위치는 GPS 시스템을 사용하였다. 고해상 지층탐사는 온누리호에 부착된 BATHY-2000 Chirp 시스템을 이용하였다. 이 시스템은 빨질 퇴적물일 경우 100 m 정도 투과하고 지층 해상도는 약 10 cm 정도로서, 매우 정밀한 내부 지층구조 파악에 도움을 준다. 다중채널 탄성과 탐사는 조사선에 장착된 슬리브건배열, SN358 기록계 및 56채널 스트리머를 이용하였다. 스트리머의 수신간격은 25 m, 발파간격은 50 m를 유지하여 1400%의 중합도를 유지하였다. 자료처리용 소프트웨어로는 CGG사의 Geovecteur와 공개 소프트웨어인 미국 CSM의 SU (Seismic Unix)가 이용되었다.

결과 및 토의

천부 가스의 음향 퇴적상 증거

연구지역에서 획득한 고해상 지층탐사 단면도는 퇴적층내 가스 함유를 지시하는 대표적 음향 퇴적상이 나타난다. 이들은 음향 혼탁상, 음향 공백상, 그리고 포크마크이다(Fig. 2).

음향 혼탁상은 수심 약 1000 m 이상에서 분명하게 분포한다. 이 퇴적상은 퇴적층내 함유된 가스가 음파에너지를 흡수·산란시키면서 형성된다(Hovland and Judd, 1988; Judd and Hovland, 1992). 음향 혼탁상은 음향학적으로 무층리 내지 준 무층리의 상부 퇴적층과 매우 뚜렷한 경계선을 이루며 분리된다. 음향 혼탁상은 천해 해역에서 쉽게 발견되나, 음향 혼탁상을 덮고 있는 상부 퇴적층과의 경계가 매우 불분명하다(최동림 등, 1997; Hovland and Judd, 1982). 연구지역에 나타나는 매우 분명한 경계면은 하부 유리가스(free-gas) 함유 퇴적층과 상부의 고화된 퇴적층 사이의 음향 임피던스 차이에 의한 것으로 해석된다. 가스 수화물 혼합층은 음향 블랭킹(acoustic blanking)현상에 의해 확인된다(Dillon *et al.*, 1993; Lee *et al.*, 1994). 음향 혼탁층 바로 상부의 무층리 퇴적층은 음향 블랭킹의 음향상으로 간주되며, 따라서 상부의 고화 퇴적층은 가스 수화물과 혼합된 것으로 생각된다.

음향 혼탁층을 덮고 있는 퇴적층내 음향공백상이 수직적 형태로 발견된다(Fig. 2). 이러한 음향상은 하위에 존재하는 유리가스가 상부로 이동하면서 생겨난다(Hovland and Judd, 1988). 음향 공백상 지역 바로 아래의 약간 솟아오른 둔덕은 가스의 팽창에 의한 것으로 해석된다.

포크마크 형태의 움푹 파인 크기가 다른 두 개의 함몰지형 발견된다. 큰 것은 깊이와 폭이 각각 50 m와 2400 m 정도이고, 작은 것은 1 m와 240 m 정도이다(Fig. 2). 대형 함몰구조 하위퇴적층이 위로 부풀었는데, 이는 가스가 해저면으로 분출하면서 형성된 구조로 해석된다. 한편 소형의 함몰구조 밑에 위치하는 퇴적층은 아래로 함몰된 양상을 보인다. 이는 가스가 퇴적층에서 탈출한 후 퇴적층이 아래로 함몰하면서 형성된 것으로 판단된다. 이들 특징은 가스가 해저면으로 분출하면서 퇴적층을 제거하면서 형성된 포크마크와 매우 유사하며(Hovland and Judd, 1988; Judd and

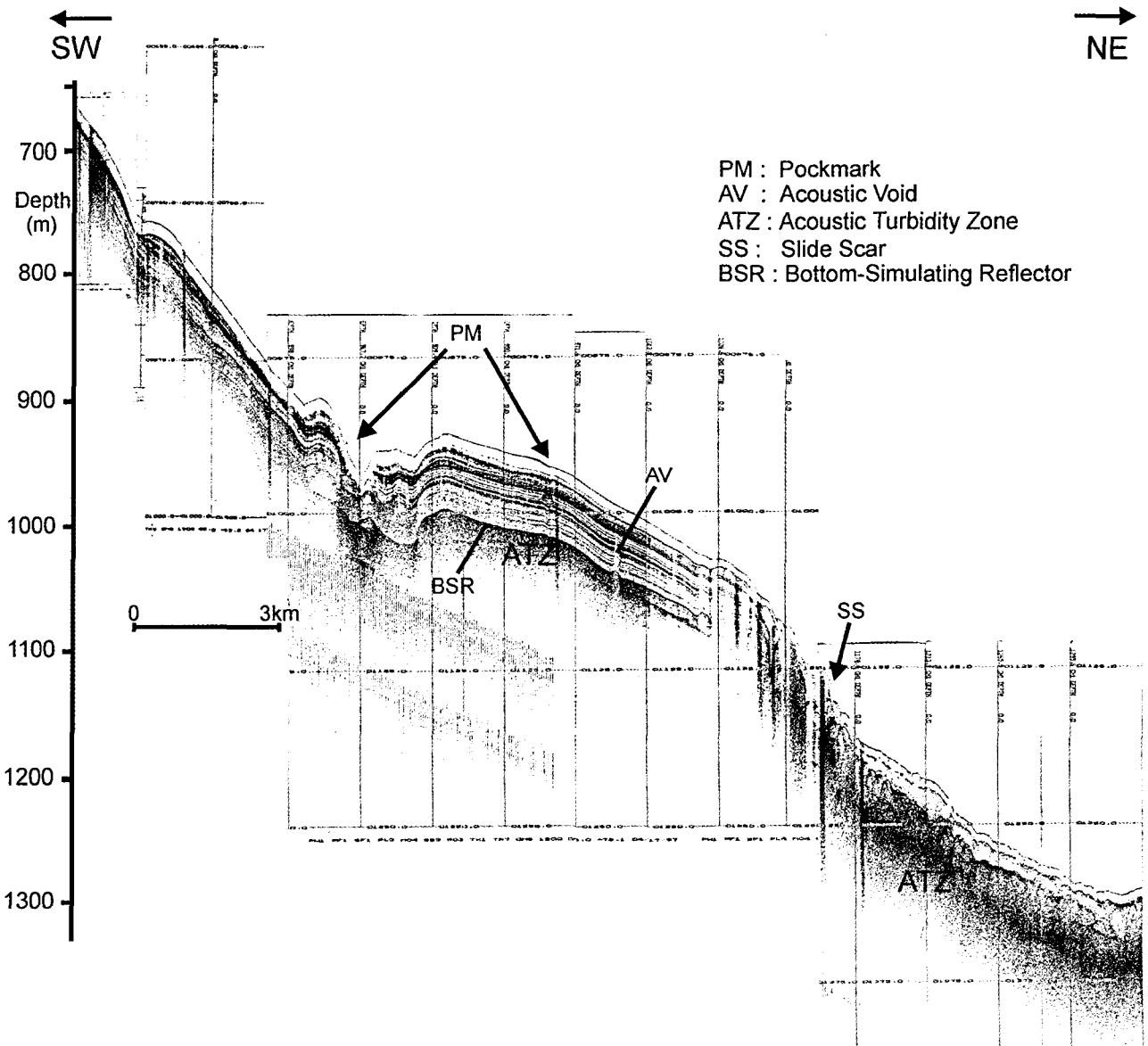


Fig. 2. Chirp profile showing the typical acoustic characteristics of acoustic turbidity, acoustic void, and pockmarks, which are indicative of shallow gas in the sediments. Acoustic blanking zone seen immediately above the acoustic turbidity is about 20 m thick and overlain by the sediment layers showing continuous and parallel reflection.

Hovland, 1992), 따라서 이 함몰지형은 포크마크 구조로 해석된다.

BSR 발달 증거

다중 채널 탄성과 단면도는 해저지형을 닮은 이상 반사층리가 지층내에서 발견되는데, 반사층리의 특징은 음향학적으로 한 개의 강한 진폭과 더불어 좋은 연속성을 보인다(Fig. 3). 이 반사층리는 Chirp 단면도상에서 하부 음향 혼탁층과 상부 무층리 퇴적층사이에 나타나는 선명한 접촉면의 위치와 일치한다. 반사층리는 수심 750 m에서 해저면 아래 약 110 m 깊이에 분포하며, 수심이 깊어지면서 서서히 얕아져 수심 1130 m에서 약 60 m 깊이에 나타난다. 이 반사층리는 한 개의 강한 반사층리로 뚜렷한 BSR의 특징

을 보인다. BSR의 일반적인 특징인 기준 지층을 가로지르는 양상 (Shiple *et al.*, 1979; MacLeod, 1982; Field and Kvenvolden, 1985) 은 연구지역에서 확인되지 않았다. 이는 연구지역의 신세3기 이후 퇴적층이 변형을 안 받고 일정하게 평행 층리로 쌓인 결과로 해석된다(최동립, 1995). BSR 하부에도 평행한 반사층리가 나타난다. 그러나 함몰 지형이 발달한 지역에서는 BSR만 이 함몰지형의 형태를 흉내내고 하부지층은 평행층리를 보인다.

BSR은 하부의 유리가스 충전 퇴적층과 상부의 가스 수화물 혼합 퇴적층의 속도차이에 의해 발생하며, 이는 퇴적층내 가스 수화물의 존재를 지시하는 증거로 활용된다(Shiple *et al.*, 1979; Field and Kvenvolden, 1985; Hyndman and Davis, 1992). BSR 바로 위

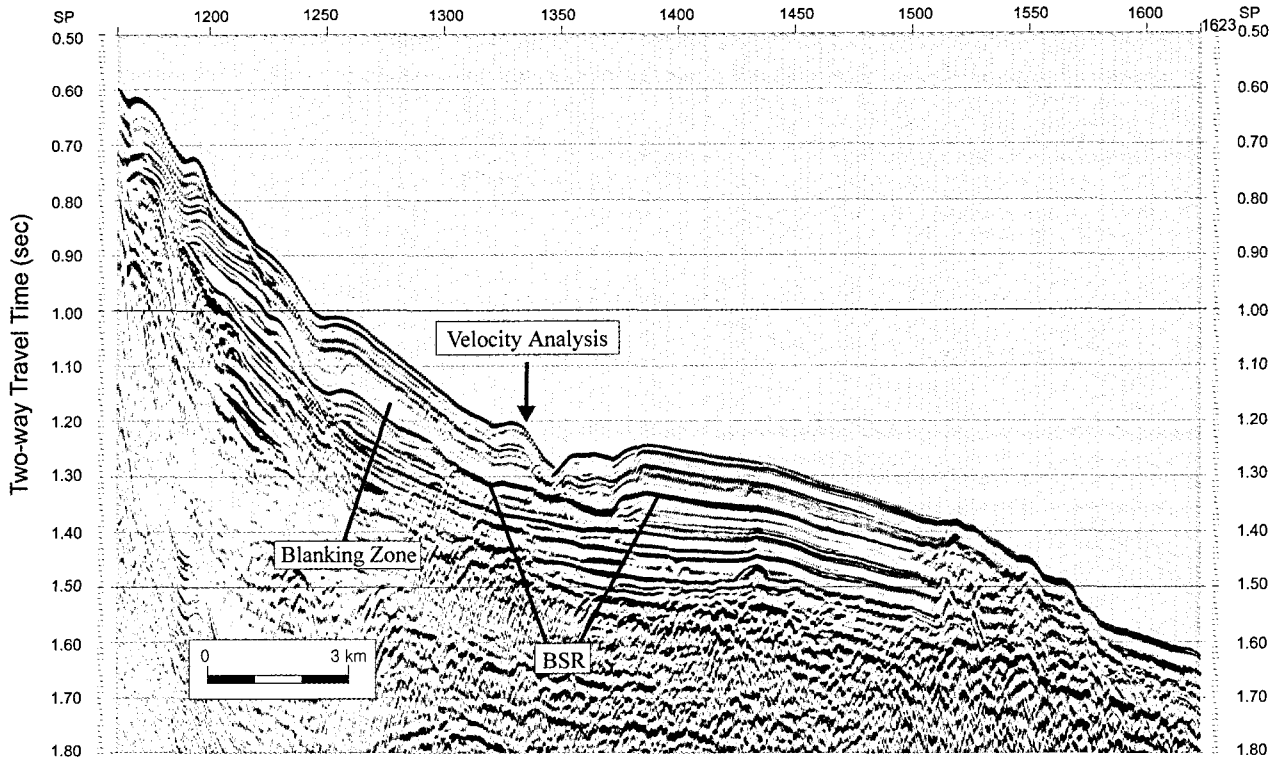


Fig. 3. Multichannel seismic reflection profile showing a BSR which parallels and mimics the seafloor topography. The BSR is located at sub-bottom depth of 60–110 m in area of 750–1130 m water depth. The blanking zone occurs immediately above the BSR. The sediment column between the seafloor and the BSR is thinning with increasing water depth.

의 탄성파 퇴적상은 음향 블랭킹 특징이 나타나는데, 이는 가스 수화물과 퇴적물의 혼합이 진폭감소(amplitude reduction)를 일으킨 때문이다(Miller and von Huene, 1991; Dillon *et al.*, 1993; Lee *et al.*, 1994). Chirp 자료와 다중채널 탄성파 자료 모두에서 음향 블랭킹 양상이 약 20 m 두께로 나타나며, 이를 최상부의 평행층리 퇴적층이 덮고 있다(Fig. 2, 3).

가스 수화물과 관련된 사면 붕괴 구조

Chirp과 다중채널 탄성파 단면도들은 BSR 위의 퇴적층이 수심이 깊어지면서 서서히 얇아지다가, 결국은 수심 약 1130 m에서 사라지는 양상을 보인다(Fig. 2, 3). Chirp 단면도상에서 음향 혼탁상이 상부층의 소멸된 하부 사면에서도 여전히 발달한다. 단지 음향 무층리 퇴적층이 10~20 m 두께로 덮여있다(Fig. 2). 이 상부층은 울퉁불퉁한 굴곡구조(hummocky)를 보인다. 이는 하부의 가스 함유층이 상부로 팽창하여 형성된 구조로 해석된다. 다중채널 단면도의 퇴적상은 혼탁한 퇴적상과 함께 굴곡진 지형을 보이는데, 이는 가스에 의한 탄성파의 흡수와 산란 그리고 지형의 변형 때문으로 생각된다(Fig. 3).

최후 빙기(last glacial maximum) 동안 해수면이 지금보다 약 120 m 낮았을 당시, 정수압(hydrostatic pressure) 감소가 일어났으며, 이로 인해 가스수화물 분포지역의 안정상태를 불안정하게 하여 퇴적물 붕괴를 야기한다(Paull *et al.*, 1991; Dillon *et al.*, 1993; Paull *et al.*, 1996). 세계 여러 대륙 연변부에서 제4기 동안 발생한 퇴적물 붕괴의 원인은 주로 가스 수화물 분해에 의한 것으로

알려지고 있다(Summerhayes *et al.*, 1979; Bugge *et al.*, 1988; Kayen and Lee, 1993; Paull *et al.*, 1996). 동해 울릉분지 대륙사면에서 사태와 함몰에 의한 사면 붕괴 구조가 일반적 특징으로서, 특히 연구지역에 위치한 울릉분지 남쪽 사면은 제4기 동안의 활발한 사태와 함몰 작용으로 인해 불규칙한 해저지형을 형성한다(Lee *et al.*, 1996; Chough *et al.*, 1998). 탄성파 단면도상에서 나타나는 가스 함유퇴적층의 분포와 함께 사면붕괴 구조는 울릉분지 남쪽 사면의 사태 및 함몰작용에 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 따라서 울릉분지 남쪽사면 퇴적물 붕괴는, 최후 빙기동안 해수면이 낮았을 때, 가스 수화물 분해가 주요 원인으로 해석된다.

지층의 탄성파 속도 구조

연구지역에 대한 속도구조를 구명하기 위해 다중채널 탄성파 탐사자료를 속도 분석하여 구간속도를 구하였다. 속도분석시 CDP 자료가 갖을 수 있는 무작위 잡음을 감쇄시켜 신호대 잡음비를 향상시키기 위하여 인접한 두 개의 CDP 자료를 하나로 합한 후 속도유사도(semblance)를 구하였다. 이 경우 CDP 자료의 중합도는 1400%에서 2800%로 향상되었다. Fig. 4a는 BSR로 추정되는 위치상에 존재하는 지점(Fig. 3참조)에 대한 유사도와 선정된 RMS 속도를 나타내고 있다. RMS 속도를 Dix (1955)의 식을 이용하여 구한 구간속도(interval velocity)는 Fig. 4b에 도시하였다. 구간속도를 고찰해보면, 해저면에서 1.236 초까지 지층의 속도가 거의 균일하다가 1.236~1.324 초 사이에 1650 m/s의 속도를 갖는 층

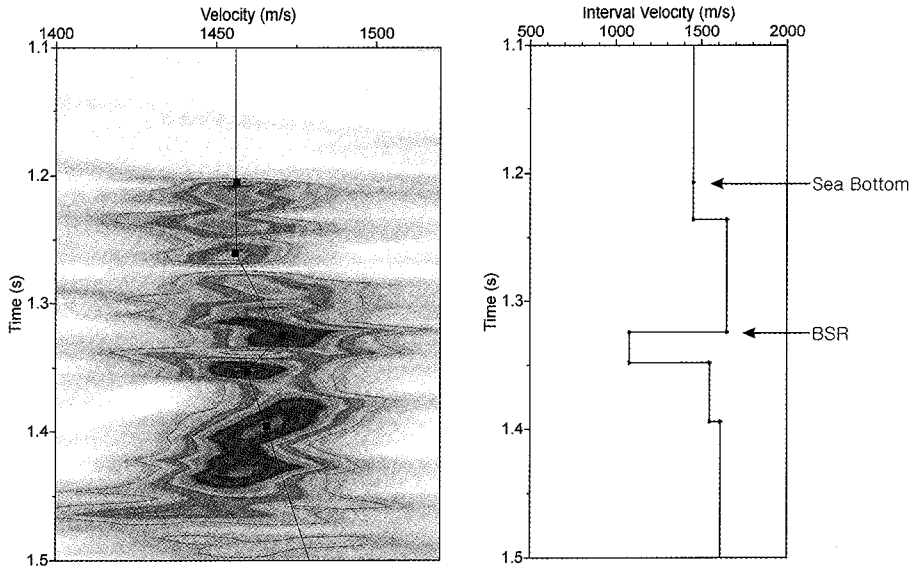


Fig. 4. Velocity analysis panels: (a) velocity semblance, (b) interval velocity.

이 존재하며, 1.348 초까지 1080 m/s를 갖는 저속도층이 존재한다. 저속도층 상부의 경계면은 탄성과 단면 자료를 통하여 밝혀진 BSR의 위치와 일치한다(Fig. 2와 3). BSR을 경계로 상부의 높은 구간 속도는 퇴적물과 가스수화물의 혼합층에 의한 것으로서, 그리고 저속도의 하부층은 유리가스를 포함하는 퇴적층의 존재에 의한 것으로 해석된다(Tucholke *et al.*, 1977; MacLeod, 1982; Lee *et al.*, 1994). 연구지역의 가스수화물 퇴적층 구간 속도는 일반적으로 알려진 1.6~1.9 km/s 음파 속도 범위에 포함된다(Tucholke *et al.*, 1977). 저속도층 하부에는 1612 m/s의 속도를 갖는 지층이 존재하며, 이는 유리가스가 존재하지 않는 퇴적층의 속도로 추정된다.

지열류량

동해의 열류량은 기존의 발표자료를 이용하였다(Langseth and Tamaki, 1992). 울릉분지의 열류량은 연변부에서 90~100 mW/m² 그리고 분지 중심부에서 100 mW/m² 이상이며, 또한 분지 연변부에서 중심부로 가면서 열류량이 증가하는 경향을 보인다(Fig. 5). 이 열류량은 BSR이 분명하게 발달한 지역들(Yamano *et al.*, 1982)과 비교하면 매우 높다.

Field와 Kvenvolden(1985)가 작성한 가스 수화물 상 경계 도면(gas hydrate phase boundary diagram)을 근거로 하여 연구지역의 가스 수화물 안정성 곡선도면을 작성하였다(Fig. 6). 지열경사도 95°C/km 와 수온자료는 ODP(Ocean Drilling Program) 799 시추공 결과자료와 한국해양연구원 자료를 각각 이용하였다(Langseth and Tamaki, 1992; KORDI, 1996). ODP 799의 지열경사도 자료 이용은 연구지역의 열류량 분포범위(Fig. 5)와 거의 일치하기 때문이다. 다른 ODP 시추공들의 지열경사도는 116에서 178°C/km 범위로 매우 높게 나타났다(Langseth and Tamaki, 1992). 이들 자료를 이용하여 도면을 작성한 결과, 수심 750 m 지역에서 약 135 m 지층 깊이 그리고 수심 1100 m에서 약 165 m 깊이에 가스 수화물 기저부가 나타난다. 탄성과 단면상에서, 수심 750 m의 BSR 깊이는 약 110 m로서 약간 얕지만 거의 일치한 반면, 수심 1130 m에서는 약 60 m로서 매우 차이가 난다. 즉 가스 수화물 안정성 곡

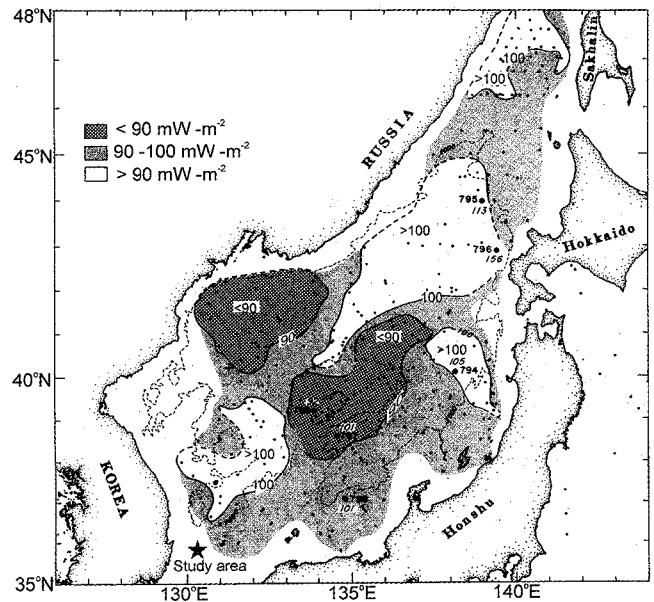


Fig. 5. Map showing the distribution of heat flow of the East Sea. Note that the heat flow of the Ulleung Basin increases with increasing water depth (after Langseth and Tamaki, 1982).

선그림은 수심이 깊을수록 BSR 깊이가 점차 깊어지지만 연구지역은 반대로 수심이 깊을수록 얕아지고 있다. 일반적으로 BSR의 깊이는 수심이 증가할수록 깊어지는데, 그 이유는 압력의 증가와 함께 가스 수화물의 안정지역의 두께가 증가하기 때문이다(Shipley *et al.*, 1979; Field and Kvenvolden, 1985). 그러나 난카이 트러프(Nankai Trough)인 경우, BSR의 깊이가 수심이 증가함에 따라 역으로 얕아지는데, 이는 수심이 증가하면서 열류량의 증가 때문으로 해석하고 있다(Yamano *et al.*, 1982). 연구지역의 BSR의 깊이가 수심이 증가함에서도 얕아지는 주요 원인은 울릉분지 대륙연변부에서 분지 중심부로 가면서 증가하는 열류량의 분포 양상과

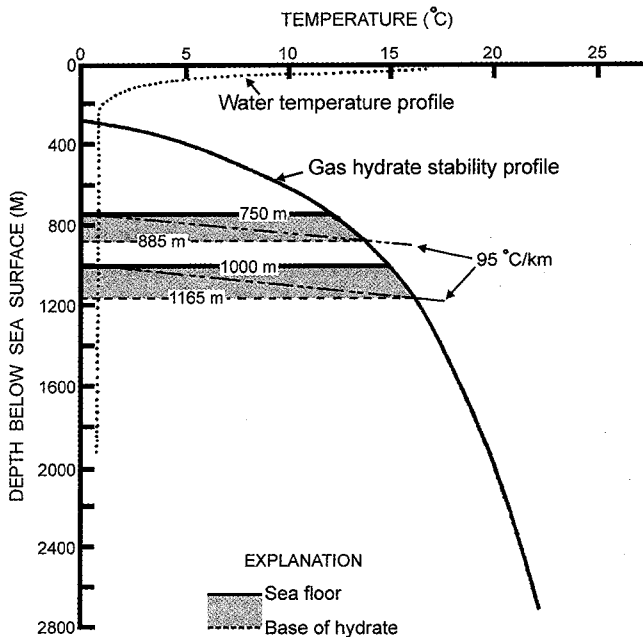


Fig. 6. The gas hydrate stability curve of the study area based on phase boundary diagram of Field and Kvenvolden (1985). By using geothermal gradient of 95°C/km, the depth of the base of gas hydrate occurs in 135 and 165 m at 750 and 1000 m water depth, respectively. Water temperature was from KORDI data (KORDI, 1996). Geothermal gradient of 95°C/km was taken from ODP site 799 data (Langseth and Tamaki, 1982).

매우 밀접한 관련이 있을 것 해석된다. 향후 보다 정확한 원인 규명을 위해서는 직접적인 열류량 측정 조사가 수행되어야 할 것이다.

결론

연구지역에서 획득한 고해상도 'Chirp' 탄성과 단면은 퇴적층내 가스 존재를 지시하는 여러 가지 음향 퇴적상 즉, 음향 혼탁상, 음향 공백상, 그리고 포크 마크 등이 분포한다. Chirp 과 다중 채널 탄성과 자료에서 BSR이 수심 약 750~1130 m 사이지역에서 해석되면 아래 60~110 m 깊이에 나타난다. 더불어 BSR의 상부 퇴적층 두께가 수심이 증가함에 따라 감소하는 특징을 보인다. BSR 위에 나타나는 음향 블랭킹은 가스 수화물로 혼합된 퇴적층의 진폭 감소 때문으로 해석된다. 사태 혼적구조는 최후 빙기의 해수면이 낮았을 때 가스 수화물의 분해에 따른 퇴적물 붕괴현상을 가리킨다. 탄성과 자료를 속도 분석하여 계산된 지층의 속도는 BSR 위의 퇴적층이 1,650 m/sec 이고, 아래 퇴적층은 1080 m/sec을 나타낸다. BSR 상부층의 높은 속도와 하부층의 낮은 속도의 원인은 위·아래 각각 가스 수화물 혼합 퇴적층과 유리가스 함유 퇴적층이 분포하기 때문으로 판단된다. BSR의 깊이와 그 위의 퇴적층의 두께가 수심 증가에 따라 감소하는 것은 울릉분지의 높은 지열류량과 수심의 깊이에 따라 열류량이 증가하는 분포양상과 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다. 가스 수화물의 존재에 대한 보다 정확한 해석을 위해 연구지역을 중심으로 정밀조사가 요구된다.

감사의 글

자료 획득에 도움을 주신 관련 연구원들과 은누리호 승조원들에게 감사를 드립니다. 이 연구는 한국해양연구원의 97년 EEZ 연구과제에 의해 지원되었습니다. 그림정리는 김민지씨가 도와주었습니다. 논문을 면밀히 검토하시고 귀중한 조언을 아끼지 않은 류병재 박사님과 또 다른 심사위원님께 감사드립니다.

참고문헌

최동립, 1995. 동해 울릉분지 남쪽 연변부의 신생대 탄성과 퇴적층서, 지질구조 및 지구조 진화. 인하대학교 박사학위논문, 127 pp.

최동립, 1998. 울릉분지 남서 연변부의 탄성과 시퀀스 층서분석. 한국석유지질학회지, 6: 1-7.

최동립, 오재경, 이치원, 우한준, 1997. 한국 남동 내대륙붕해역의 홀로세 빨길 퇴적층의 고해상도 탄성과 특성. 한국해양학회지 바다, 2: 8-13.

Bugge, T., R.H. Belderson and N.H. Kenyon, 1988. The Storegga slide. *Phil. Trans. R. Soc. London*, 325: 357-388.

Chough, S.K. and E. Barg, 1987. Tectonic history of Ulleung basin margin, East Sea(Sea of Japan). *Geology*, 15: 45-48.

Chough, S.K., S.H. Yoon and S.J. Park, 1997. Stratal patterns in the southwestern margin of the Ulleung Basin off southeast Korea: sequence architecture controlled by back-arc tectonism. *Geo-Mar. Let.*, 17: 207-212.

Chough, S.K., S.H. Lee, J.W. Kim, S.C. Park, D.G. Yoo, H.S. Han, S.H. Yoon, S.B. Oh, Y.B. Kim, and G.G. Back, 1998. Chirp (2-7 kHz) echo characters in the Ulleung Basin. *Geosci. J.*, 1: 143-153.

Dillon, W.P., M.W. Lee, K. Fehlhaber and D.F. Coleman, 1993. Gas hydrate on the Atlantic continental margin of the United States-controls on concentration. In: *The future of energy gases*, edited by Howell, D.G., *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, 1570: 313-330.

Dix, C.H., 1955. Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, 20: 68-86.

Field, M.E. and K.A. Kvenvolden, 1985. Gas hydrates on the northern California continental margin. *Geology*, 13: 517-520.

Hovland, M. and A.G. Judd, 1988. Seabed pockmarks and seepages: impact on geology, biology and the marine environment. Graham and Trotman, London, 293 pp.

Hyndman, R.D. and E.E. Davis, 1992. A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom-simulating reflectors by vertical fluid expulsion. *J. Geophys. Res.*, 97: 7025-7041.

Ivanov, M.K., A.F. Limonov and J.M. Woodside, 1998. Extensive deep fluid flux through the sea floor on the Crimean continental margin (Black Sea). In: *Gas hydrate: relevance to world margin stability and climate change*, edited by Henriot, J.-P. and J. Mienert, *Geol. Soc., London, Spec. Pub.*, 137: 195-213.

Judd, A.G. and M. Hovland, 1992. The evidence of shallow gas in marine sediments. *Cont. Shelf Res.*, 12: 1081-1095.

Kayen, R.E. and H.J. Lee, 1991. Pleistocene slope instability of gas hydrate laden sediment on the Beaufort Sea margin. *Mar. Geotech.*, 10: 125-141.

KORDI, 1996. Oceanographic atlas of Korean Waters: Korea Strait.

- Vol. 3, 154 pp.
- Kvenvolden, K.A., G.D. Ginsburg and V.A. Soloviev, 1993. World-wide distribution of subaquatic gas hydrates. *Geo-Mar. Lett.*, **13**: 32–40.
- Langseth, M.G. and K. Tamaki, 1992. Geothermal measurements: Thermal evolution of the Japan Sea basins and sediments. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Science Results*, **127/128(part 2)**: 1297–1309.
- Lee, H.J., S.K. Chough and S.H. Yoon, 1996. Slope-stability change from late Pleistocene to Holocene in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea). *Sed. Geol.*, **104**: 39–51.
- Lee, M.W., D.R. Hutchinson, W.F. Agena, W.P. Dillon, J.J. Miller and B.A. Swift, 1994. Seismic character of gas hydrates on the southeastern U.S. continental margin. *Mar. Geophys. Res.*, **16**: 163–184.
- MacLeod, M.K., 1982. Gas hydrates in ocean bottom sediments. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **66**: 2649–2662.
- Miller, J.J., M.W. Lee and R. von Huene, 1991. An analysis of a seismic reflection from the base of a gas hydrate zone, offshore Peru. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **75**: 910–924.
- Paull, C.K., W.J. Buelow, Ussler, W., III and W.S. Borowski, 1996. Increased continental-margin slumping frequency during sea-level lowstands above gas hydrate-bearing sediments. *Geology*, **24**: 143–146.
- Paull, C.K., Ussler, W., III and W.P. Dillon, 1991. Is the extent of glaciation limited by marine gas hydrate. *Geophys. Res. Lett.*, **18**: 432–434.
- Shipley, T.H., M.H. Houston, R.T. Buffler, F.J. Shaub, K.J. McMillen, J.W. Ladd and J.L. Worzel, 1979. Seismic evidence for wide-spread possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **63**: 2204–2213.
- Summerhayes, C.P., B.D. Bornhold and R.W. Embley, 1979. Surficial slides and slumps on the continental slope and rise of south West Africa: a reconnaissance study. *Mar. Geol.*, **31**: 265–277.
- Tucholke, B.E., G.M. Bryan and J.I. Ewing, 1977. Gas-hydrate horizons detected in seismic-profiler data from the western North Atlantic. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **61**: 698–707.
- Veerayya, M., S.M. Karisiddaiah, K.H. Vora, B.G. Wagle and F. Almeida, 1998. Detection of gas-charged sediments and gas hydrate horizons along the western continental margin of India. In: Gas hydrate: relevance to world margin stability and climate change, edited by Henriot, J.-P. and J. Mienert, *Geol. Soc., London, Spec. Pub.*, **137**: 239–253.
- Yamano, M. and S. Uyeda, 1989. Heat flow in the western Pacific. In: CRC handbook of seafloor heat flow, edited by Wright, J.A. and K.E. Loudon, CRC Press, Florida, pp. 277–303.
- Yamano, M., S. Uyeda, Y. Aoki and T.H. Shipley, 1982. Estimates of heat flow derived from gas hydrates. *Geology*, **10**: 339–343.

2001년 5월 14일 원고접수

2001년 8월 6일 수정본 채택

담당편집위원: 김대철