

동해 울릉분지의 가스하이드레이트 부존가능성에 대하여

정 갑식, 김성렬, 김한준

한국해양연구원 해양 환경 기후연구본부

경기도 안산시 우체국 사서함 29호 (우) 425-600

1. 서 언

해저 퇴적층내에서 유기물의 미생물과 열변성에 의한 분해 그리고 맨틀로부터 공급되는 천연가스는 열적 평형조건이 충족되는 대륙주변부에서는 어름입자에 충전되어 수화물(Clatrate 또는 Hydrate)형태로 부존할 수 있으며, 이에 부존된량은 $2 \times 10^{16} \text{m}^3$ 로 지구상의 탄화수소 매장량의 두 배에 달한다(Booth et al., 1998; Kvenvolden, 1998). 가스 수화물(충진된 가스가 대부분이 메탄으로 메탄 수화물이라고도 함)의 존재는 70년대부터 탄성과 탐사(예, Stoll et al., 1971)와 세계 다국간 해저굴착사업인 DSDP(Deep Sea Drilling Project)을 통해 알려지기 시작하였으며, 1985년 재개된 ODP(Ocean Drilling Project)는 가스 수화물의 부존을 확인하기 위한 사업이라고 할 수 있을 정도로 집중적으로 실시되어 왔다. 세계 각국이 이에 대해 매우 활발히 탐사와 연구를 진행하는 것은 심부에 위치하는 탄화수소자원의 징후탐지에 매우 용이할 뿐 아니라, 가스 수화물 자체가 차세대 에너지 자원, 해저폭발 등 해난사고의 원인과 지구기후변동에 중요한 역할을 하기 때문이다(Haq, 1998; Kvenvolden, 1998; Grauls, 2001).

탄성과 기록에서 가스 수화물의 부존 여부는 메탄 등의 가스의 성분과 공극수의 염분도 등에 따라 수화물을 형성하는 평형상태의 최대 온도와 압력 조건 즉, 퇴적층내의 최대 깊이(GHSZ, Gas-Hydrate Stability Zone)를 나타내는 반사층인 BSR(Bottom Simulating Reflector)의 존재로 파악된다(Dickens and Quinby-Hunt, 1994). 이론상 BSR은 고체의 가스 수화물이 충전되어 밀도가 높아 탄성과 속도가 빠른 상부 퇴적층과 유리가스가 존재하여 밀도가 낮아 탄성과 속도가 느린 하부 퇴적층간의 경계에 해당하는 탄성파이상반사대(Anomalous Reflection Zone)라고 정의할 수 있다(Hyndman and Spence, 1992). 지열구배가 일정한 지역에서의 BSR은 퇴적층의 암질에 관계없이 해저면과 평행하게 경사진 층리와 사교(斜交)하는 특징을 보여 판독이 용이하다. 그러나, 퇴적층이 해저면과 평행하게 퇴적된 지역과 지열구배의 변화가 심하고 하부로부터 공급되는 가스성분이 다양할 경우에는 탐사기록만으로는 GHSZ의 확인이 극히 어렵다(Milkov and Sassen, 2000). BSR은 전세계 대양의 대륙주변부 거의 모든 지역, 심지어 수심 5000m 이상인 아르헨티나 앞의 대서양 심해저, 지중해와 같은 내륙해나 바이칼호같은 호수에서도 발견된다(Booth et al., 1988). 근래에는 대만의 남쪽 남동지나해의 대륙사면에서도 이의 발견이 보고되기도 한다(McDonnell et al., 2000).

그러나, 해저면에서 퇴적층의 일정깊이까지 가스 수화물이 부존한다고 해도 판독가능한 BSR이 존재치 않는 경우가 흔하다(Bouriak and Akhmetjanov, 1988; Milkov and Sassen, 2000; Vanneste et al., 2001). 동해 일본분지의 Okushiri Ridge(ODP Site 796)의 경우도 좋은 예가 될 것이다(ODP Scientific Party, 1992). BSR은 가스 수화물 형성조건(온도, 압력, 유기물 함량 등)이 충족된다하더라도, 극히 미미한 조건변화에도 민감하게 반응하는 특성으로 말미암아 부존가능지역 중 1% 면적에서만 발견이 가능하다는 보고도 있다(Minert and

Posewang, 1999). 근래의 연구에 의하면, 사면사태에 의한 퇴적층의 제거와 퇴적, 해수면 변동에 따른 압력의 변화에 따라 변동되는 가스 수화물의 평형조건에 따라 BSR이 퇴적층내에서 2개 이상이 존재할 수 있다는 사실이 확인되어, 탄성파자료만으로 가스 수화물 부존을 파악하기가 쉽지 않다는 것을 지시한다(Bugge et al., 1987; Andreassen et al., 1995; Posewang and Mienert, 1996; Minert and et al. 1998).

2. 울릉분지의 가스 수화물 부존 연구사례

일부 언론에 의해 가스 수화물의 부존 가능성이 제기되었던(월간 신동아, 1999) 울릉분지는 퇴적속도가 빠르고, 퇴적물중의 유기물 함량이 높아 가스형 탄화수소의 집적 가능성이 매우 높은 것으로 평가되어 왔다(Schlanger and Comb, 1975). 그동안 일본과 야마토 분지에서는 DSDP와 ODP 굴착을 통해 가스와 가스 수화물의 부존이 밝혀졌으나, BSR은 발견된 적이 없고, 가스 수화물과 전혀 관계없는 Opal-A가 Opal CT로 변환되어 형성된 BSR이 이들 해역에 광범위하게 분포하는 것이 밝혀졌다(DSDP & ODP Scientific Party, 1973a and b; 1990). 그러나, 동해의 Chishima현 앞 사면에서 소규모 BSR를 독자적으로 발견한 적은 있다(Matsumoto et al., 1993). 울릉분지에서는 가스 수화물 부존 가능성에 대해 한국자원연구원이 중점적으로 탄성과 탐사를 수행하여 왔고(유병재 외, 1999), 그 외 Deep-Tow Side-Scan Sonar, Swath Bathymetry 등의 자료, 3.5 kHz 탄성과 자료의 재분석에 의해 그 가능성이 꾸준히 재기되어 왔다.

특히, 한국해양연구원과 미국의 95년 공동조사결과, 조사면적 12,000km²중 1,400 km²(면적 대비 11.6%)에서 약 300개의 가스분출구 Pockmark의 분포, 퇴적물중 7%이상으로 높은 유기탄소량, 깊은 수심과 낮은 심층수온이 파악되어 울릉분지 퇴적층내의 가스 수화물의 부존 가능성이 국제적으로 공인받게 되었다(Gardner et al., 1998). 3.5 kHz 고해상 탄성파기록에 의하면, 최상부 퇴적층은 함유된 다량의 가스로 인해 층리구조가 모호하고, 간혹 가스 Plume들이 확인되기도 하며, 분지내에 대상으로 분포하는 질량류 퇴적물은 해수면 하강시 가스 수화물 평형조건의 파괴로 인하여 발생된 것으로 해석되기도 한다(Jeong, 1983; Lee et al., 2001). 또한 Gravity Corer로 해저면으로부터 9m 깊이까지 채취한 퇴적물중에서 다량의 생물기원과 함께 열변성 기원의 메탄과 에탄을 확인한 바 있다(이영주 외, 2000). 현재까지 가스 수화물 부존의 직접적인 증거인 BSR은 발견된 바 없으나, 고래(VI-1)광구 시추공에서 측정된 지열구배(30.1℃/km)로부터 수심 400~1100m의 사면에서는 BSR이 해저면으로부터 210~480m 깊이에 존재할 것으로 예측되었다(유병재 외, 1998).

3. 탄성파에 의한 가스 수화물 부존 확인

울릉분지에서 탄성과 탐사를 통해 가스 수화물의 부존을 확인하기 위해서는 수화물 형성과 평형상태 유지조건인 1) LGM(Last Glacial Maximum)이후 해수면 상승과 수온변화, 퇴적층의 지열구배 분포, 2) 수화물의 파괴 원인/결과인 사면사태의 시기와 정도(질량류 퇴적작용), 3) 또 다른 BSR인 Opal-A/CT 변환깊이 등이 고려되어야 한다. 그리고, 4) 울릉분지에서는 퇴적물중의 가스 성분이 지시하듯이(이영주 외, 2000), 탄성과 기록상 BSR의 깊이가 예측과 일치하지 않을 수도 있다. 이 경우 수화물에 충전된 가스성분에 의해 BSR의 깊이가 변동하는 정도(Minert et al., 1999; Posewang and Mienert, 1999)를 파악하여 다음조사에 응용하여야 할 것이다.

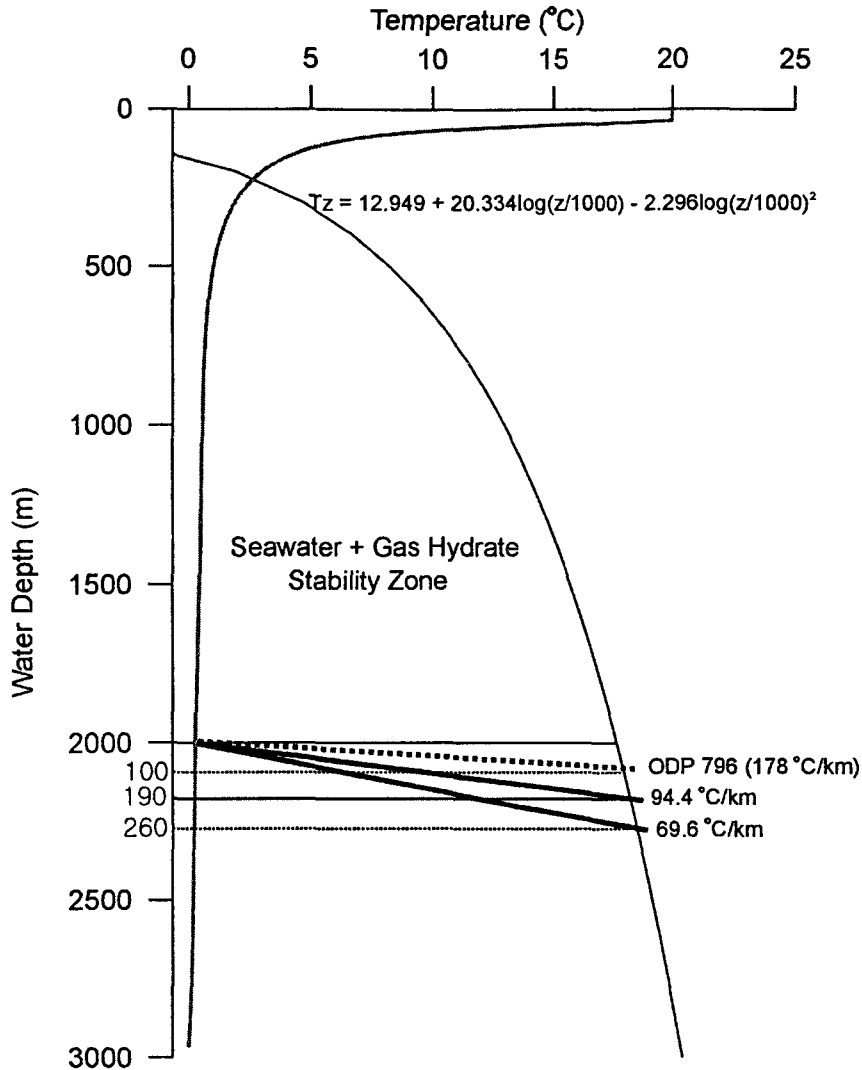
3.1. BSR 깊이의 예측

LGM 이후 해수면 상승에 따른 현재 울릉분지의 조건에서 가스 수화물의 안정도는 퇴적물중에 해수, 메탄, 수화물이 공존한다는 가정하의 P(수심)-T(수온) 곡선에 지열구배를 적용하여 BSR의 존재깊이(Dickens and Quinby-Hunt, 1994)를 예측할 수 있다(그림 1). 울릉분지의 가장 깊은 곳에서 CTD Profiler를 이용하여 구한 수온분포에 의하면, 1000m 이상의 수심에서는 연중 0.2°C 이하의 일정한 온도를 보인다(KORDI, 1999). 이 예측을 위해서는 실제 지열구배 자료가 확보되어야 하나, 울릉분지의 남서 대륙붕 지역(VI-1, 고래)외에 지금까지 굴착을 통해 획득한 자료가 없으므로 해저면에서 측정된 지열자료를 활용할 수 있다. 1993년 한-러 공동으로 측정한 울릉분지 해저면의 지열은 $84\text{--}124\text{ mW/m}^2$ (KORDI, 1993)며, 이를 주변 일본과 야마토 분지에서의 지열구배와 관계식(Langseth and Tamaki, 1992)으로부터 지열구배는 최소 69.6에서 최대 $94.4\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ 로 계산된다.

이로부터 울릉분지에서 가스 수화물은 저층수온이 급격히 감소하는 250m 수심대의 대륙붕단으로부터 전 해저의 퇴적층에 분포할 수 있다(그림 1). 해저평원(2,000m 수심)에 해당하는 지역에서는 해저면으로부터 190m에서 260m깊이까지 가스 수화물이 평형안정역(GHSZ)에 존재할 수 있다. 98m 깊이에서 가스 수화물 시료가 채취된 일본분지 Okushiri Ridge (ODP Site 796)의 지열구배(178°C/km)를 적용하면 약 100m 깊이로 예측된다. 그러나, 이곳은 동해 해양지각판과 일본열도 북부판의 경계부분으로 비정상적인 지열구배를 나타낼 수 있으므로 배제되어야 할 것이다. 30.1°C/km 의 지열구배(유병재 외, 1999)를 적용하면, 가스 수화물은 약 640m 깊이까지 부존할 수 있다. 이 깊이는 일본과 야마토 분지에서 확인된 Opal-A/CT BSR 깊이(210~455m)보다 훨씬 깊다(Kuramoto et al., 1992; Langseth and Tamaki, 1992). Opal-A/CT BSR 분포를 이 BSR 깊이의 온도($36\text{--}51^{\circ}\text{C}$)와 지열구배를 적용하여 추적하면, 울릉분지에서는 94.4°C/km 일 때 390~550m, 69.6°C/km 일 때 550~870m 깊이에 분포한다. 30.1°C/km 을 적용하면, 그 깊이는 1200m 이상이 된다. 일본과 야마토 분지에서 Opal-A/CT BSR이 다량의 규조류가 포함된 후 마이오세 퇴적층에 형성된 것과 비교할 때, 울릉분지에서는 600~700m 두께의 Turbidite 최상부층하에 이 층이 존재하는 것과 층서학적으로 일치한다(Chough et al., 2000). 따라서 울릉분지에서는 69.6°C/km 의 지열구배에 의한 가스 수화물의 BSR깊이(260m) 예측이 가장 타당하다고 여겨진다 (Gardner 등(1998)은 $140\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ 지열구배를 적용하여 200m 이하의 심도에 존재한다는 의견을 제시하기도 한다).

3.2. Double BSR의 분포 가능성

위와 같이, 울릉분지 퇴적층내에 가스 수화물이 부존한다면, 수심 약 2300m에 달하는 울릉도 주변 해저평원에서 획득한 다중채널 탄성파기록에 의하면 이곳의 퇴적층은 3~4개의 반사층에 의해 층이 구분된다(그림 2a). 최상부 반사층은 하부층의 층리를 사교하는 경향이 있으며 왼쪽의 침식면(Ulleung Interplain Channel)에 연결되고 그 상부는 희미한 층리들이 있으나 대체로 음향학 적으로 투명하다(acoustically blanked). 두 번째 깊이의 반사층 역시 불연속적이나 대체로 하부층리들이 이루는 지형과는 일치하여 발달한다. 특징적으로 상부 2개의 반사층 사이의 퇴적층은 거의 음향학적으로 투명하다. 세 번째 반사층은 부분적으로 하부 음파 투명층과 접하여 있으나 대부분이 층리들과 접하여 있고 두 번째와 사이에는 연속성이 양호한 층리들이 존재한다. 이 탄성파 기록으로부터 깊이에 따라 4ms 간격으로 추출한 탄성파신호의 진폭, 이로부터 재계산한 Spike Series, Pseudo-Acoustic Impedance의

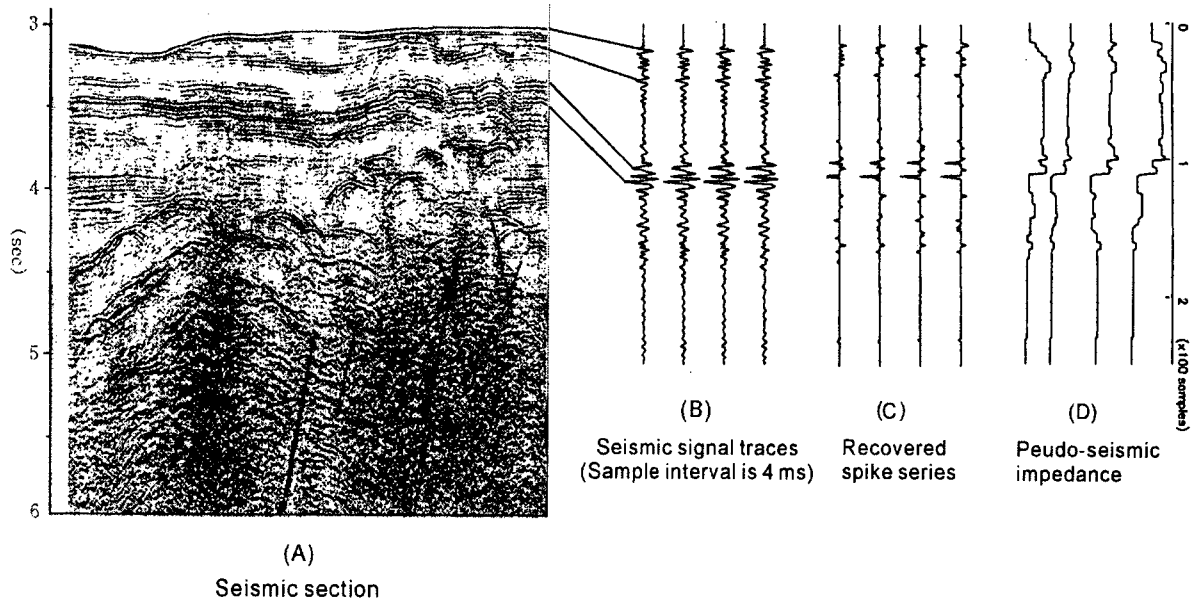


<그림 1> 동해 울릉분지 퇴적층내 가스 수화물 부존 가능깊이 예측.

변화에 의하면, 탄성파의 극성이 음(-)으로 변하는 반사층이 해저면으로부터 약 70m(음파속도, 1500m/s로 가정), 260m, 그리고 300m 깊이에 나타난다(그림 2b-c). 상부 퇴적층을 제거한다면, 하부 2개의 반사층들은 서로 평행하게 분포한다. 또한 Pseudo Impedance는 70m와 300m에서 확연히 변하는 것으로 보아 이 두 깊이사이에는 상당히 균질한 퇴적층이 존재하는 것을 뜻한다(그림 2d). 음의 극성을 띤 탄성파 신호는 반사층 하부에 퇴적층의 밀도와 탄성파 전달속도를 감소케 하는 유리 가스의 존재를 나타낸다(Hyndman and Spence, 1992).

이와 같은 특성은 BSR이 몇 개의 반사층으로 나타날 수가 있음을 시사한다. 이는 기존 BSR에 대한 개념(즉, 거의 해저면과 평행하게 발달한 퇴적층내 반사층)과는 차이가 있지만, 1990년 후반의 탐사 및 연구결과들과는 잘 부합된다. 예를 들어, 인도 서부 대륙주변부에서는 두 개의 BSR(Veerayya et al., 1988), 대서양 동북부에서는 3개까지의 BSR이 보고되고 있다(Mienert et al., 1998; Posewang and Mienert, 1999). 실제로 수 많은 DSDP 및 ODP 시추공을 확인한 결과에 의하면, 가스 수화물은 BSR 존재깊이, 즉 GHSZ내의 퇴적층의 공극을 완전히 채우고 있는 것이 아니라, 덩어리, 또는 수 cm에서 수 m 두께의 층으로 존재

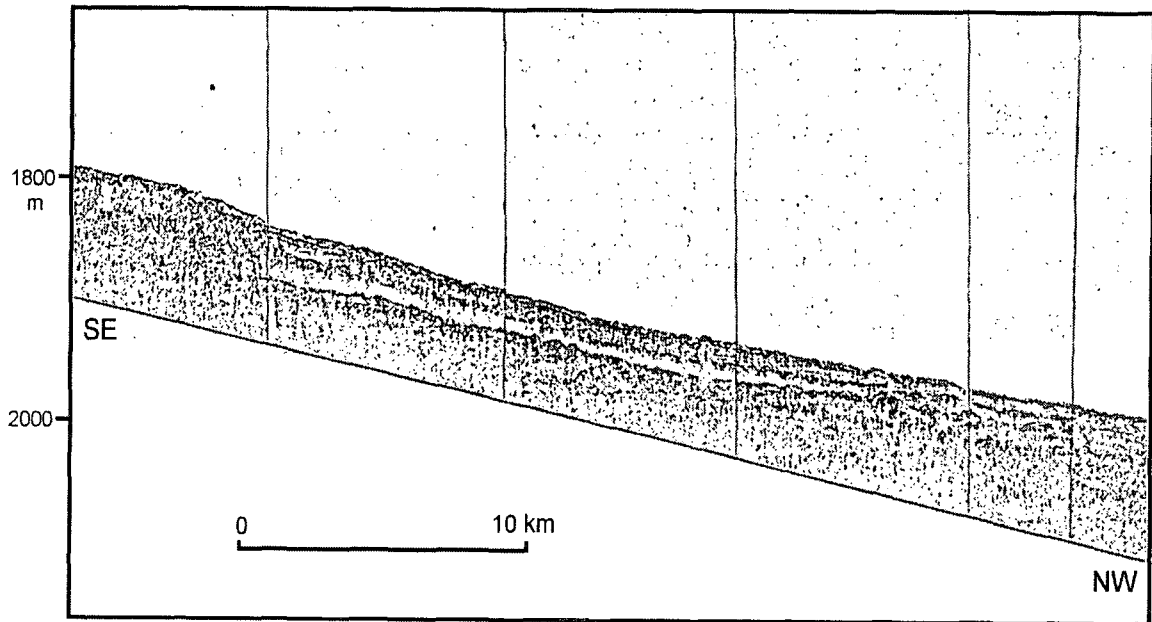
하며 이들 사이에는 유리 가스들이 풍부하게 존재하고 있다(Dickens et al., 1997; Booth et al., 1998).



<그림 2> 울릉분지 퇴적층 내 BSR의 존재 가능한 형태를 나타내는 탄성과 특성.

울릉분지 퇴적층내 가스 수화물의 부존 가능성을 지시하는 반사층들의 분포특성은 Pleistocene 말 LGM시기(20-16ka)까지의 사면사태에 의한 활발한 퇴적과 그 이후의 해수면 상승으로 해석할 수 있다. 최상부 퇴적층은 해수면의 최대 하강(-130m)시기인 LGM까지 울릉분지 주변에서 잦은 지진과 이로 인한 가스 수화물의 폭발로 야기된 사면 퇴적층의 붕괴로 인하여 발생된 Slide, Slump, Debris Flow, Turbidite 등의 질량류에 의해 퇴적된 층으로 해석된다(Jeong, 1983; Chough et al., 1997; Lee et al., 1999). 퇴적층의 연대측정에 의하면 사면사태는 LGM까지만 발생했고, 그 후 울릉분지는 평형상태를 이루어 반원양성퇴적물이 대략 2m 두께로 퇴적되었다(Lee et al., 1996). Pleistocene중 해저평원의 Turbidite의 평균 퇴적을 40cm/kyr(Bahk and Chough, 1983)을 적용하면, 최상부 퇴적층의 두께(약 70m)와 일치한다. 또한 이 최상부 퇴적층의 기저를 이루는 반사층(BSR로 가정한 것의 하부)이 해저면이었다면, 그 하부 2개의 반사층은 이 해저면의 분포형태와 거의 일치하여 최상부 퇴적층이 퇴적되기 전의 GHSZ임을 나타낼 수 있다(Booth et al., 1998). 보다 더 음의 극성이 강한 최하부의 BSR은 해수면 상승과 퇴적물의 집적으로 증가된 압력에 의해 보다 깊은 심도로 GHSZ이 이동하게 된 것으로 볼 수 있다(Posewang and Mienert, 1999). 두 번째와 세 번째 깊이의 BSR간의 깊이차이는 약 25m로 지열구배가 변하지 않았다면, 해수면 상승(130m)에 의해 이동된 깊이계산과 잘 일치한다(Paull et al., 1991; Mienert and Posewang, 1999). 해수면 상승 이외에 고려할 수 있는 요건으로는 가스의 성분변화로, 평형조건상 메탄의 함량이 감소할수록 BSR의 깊이는 깊어진다(Milkov and Sassen, 2000). 최상부 BSR은 Pleistocene중 퇴적층이 퇴적되기 전 GHSZ의 최상부가 퇴적으로 인해 상부로 이동하는 현상을 나타내고 있는 것으로 보인다. 이러한 특징은 위 탄성과 기록 위치와 상당히 먼 거리에 위치한 울릉분지 남서사면 1800~2100m 수심대의 3.5 kHz 탄성과 기록(70m 깊이)에 잘 나타난다(그림 3). 이곳의 최상부 퇴적층은 Turbidite로 반사층의 바로 위 부분은 아마도 기존의 GHSZ로부터 공급된 가스가 충전되어 음향학

적으로 투명한 특징을 보인다. 반사층은 BSR처럼 해저면의 지형변화와 거의 일치하여 해저 평원 쪽으로 갈수록 얕아지고 평원쪽에서는 Patch 모양의 강한 반사파로 연결되는 것으로 보아, 해저면에 존재하는 가스 수화물이 해리되거나 새로이 형성되어 가는 과정을 나타내는 것으로 보인다. 해저면이나 표층 퇴적층 중에 가스 수화물이 노둘이나 Patch형태로 분포하고 있는 것은 흑해(Ivanov et al., 1998), 북해(Egorov et al., 1999), 멕시코만(Milkov and Sassen, 2000) 등에서도 발견된다.



<그림 3> 울릉분지 사면부 최상부 퇴적층 내 기존 GHSZ의 최상부 경계(고 해저면)의 가능성을 나타내는 3.5-kHz 탄성과 기록.

4. 결 론

위와 같이, 울릉분지에서 가스 수화물의 부존을 나타내는 BSR의 존재는 분지사면에서는 사면사태에 의한 퇴적층의 제거와 퇴적에 의한 깊이와 형태의 변화를 예견할 수 있다. 그러나, BSR에 대한 기존개념으로만 탄성과 기록 자체만을 해석할 때에는 GHSZ의 변동에 따른 오류를 범할 수 있어서, 분지의 진화(Tectonic Evolution), Pleistocene과 현세의 퇴적작용, 고환경변화 등을 종합학적으로 파악하여야 할 것으로 생각된다.

분지평원에서는 Pliocene이후 Turbidite가 해저면과 거의 수평을 이루어 600~700m 두께에 달하는 최상부 퇴적층을 이루고 있어서, 이곳에서의 BSR은 이 퇴적층리들과 평행하게 발달할 가능성이 매우 높아 탄성과 기록만으로 확인하기가 매우 어려울 것이 예상된다. 이 지역에서는 해저면에 HF-OBH(High-Frequency Ocean-Bottom Hydrophone)를 설치하여 획득된 자료의 AVO(Amplitude vs Offset), 속도구배, Impedance 등의 전산처리를 통한 확인이 필수적이라 할 수 있다.

또한 가스성분에 의한 BSR 깊이의 변화가 있을 수 있으므로, 최소한 상부 퇴적층의 가스 성분도 조사되어야 할 것이다.

5. 참고문헌

- 월간 신동아,, 한국령 동해에 매장된 천연가스층의 비밀. 1999년 9월호, 414-427.
- 유병재, 선우돈, 장성형, 오진용, 1999. 동해 울릉분지 남서부 해역에서의 가스 하이드레이트 안정영역. *Korean Jour. Petro. Geol.*, 7(1/2): 1-6.
- Bahk, K.S. and Chough, S.K., 1983. Provenance of turbidites in the Ulleung (Tsushima) back-arc basin, East Sea (Sea of Japan). *J. Sediment. Petrol.*, 53: 1331-1336.
- Booth, J.S., Winters, W.J., Dillon, W.P., Clennell, M.B., and Rowe, M.M., 1998. Major occurrences and reservoir concepts of marine clathrate hydrates: implications of field evidence. In: J.P. Henriot and Mienert, J. (Eds.). *Gas hydrates: relevance to world margin stability and climate change*. Geol. Soc. London, Special Publ., 137: 113-127.
- Bouriak, S. and Akhmetjanov, A.M., 1988. Origin of gas hydrate accumulations on the continental slope of the Crimean from geophysical studies. In: Henriot, J.P. and Mienert, J. (eds.). *Gas Hydrates: relevance to world margin stability and climate change*. Geol. Soc., London, Spec. Publ. 137: 215-222.
- Bouriak, S., Vanneste, M., and Saotkine, A., 2000. Inferred gas hydrates and clay diapirs near the Storegga Slide on the southern edge of the Voring Plateau, offshore Norway. *Mar. Geol.*, 163: 125-148.
- Bugge, T., S. Befring, and R.H. Belderson, R.H. et al., 1987. A giant three-stage submarine slide off Norway. *Geo-Mar. Letts.*, 7: 191-198.
- Chough, S.K., Lee, H.J., and Yoon, S.H., 2000. *Marine Geology of Korean Seas*. 2nd Ed., Elsevier, Amsterdam, 313pp.
- Dickens, G.R. and M.S. Quinby-Hunt, 1994. Methane hydrate stability in seawater. *Geophys. Res. Lett.*, 21: 2115-2118.
- Dickens, G., Paull, C., Wallace, P., and The ODP Leg 164 Scientific Party, 1997. Direct measurement of in situ methane quantities in a large gas-hydrate reservoir. *Nature*, 385: 426-428.
- Egorov, A.V., Krane, K., Vogt, P.G., and Rozhkov, A.N., 1999. Gas hydrates that outcrop on the seafloor: stability models. *Geo-mar. Geol.*, 19: 68-75.
- Gardner, J.M., A.N. Shor, and W.Y. Jung, 1988. Acoustic imagery evidence for methane hydrates in the Ulleung Basin. *Mar. Geophysical Res.*, 20(6): 495-503.
- Grauls, D., 2001. Gas hydrates: importance and application in petroleum exploration. *Mar. & Petrol. Geol.*, 18: 519-523.
- Hyndman, R.D. and G.D. Spence, 1992. A seismic study of methane hydrate marine bottom simulating reflectors. *J. Geophys. Res.*, 97(B5): 6683-6698.
- Haq, B. U., 1998. Gas hydrates: searching for the long-term climatic and slope-stability records. In: J.P. Henriot and Mienert, J. (Eds.). *Gas hydrates: relevance to world margin stability and climate change*. Geol. Soc. London, Special Publ., 137: 303-318
- Ivanov, M.K., Limonov, A.F., and Woodside, J.M., 1988. Extensive deep fluid flux through the seafloor on the Crimean continental margin (Black Sea).
- Jeong, K.S., 1983. Mass flow deposits in the Ulleung Basin, East Sea. M.S. thesis, Seoul Nat'l Univ., 122pp.
- Kuramoto, S., K. Tamaki, M.G. Langseth, D.C. Nobes, H. Tokuyama, K.A. Piscotto, and

- A. Taira, 1992. Can opal-A/opal-CT BSR be an indicator of the thermal structures of the Yamato Basin, Japan Sea ? In: K. Tamaki, K. Suyehiro, J. Allen, M. McWilliams, et al. (Eds.), Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 127/128, pt 2: 1145-1156.
- Kvenvolden, K.A., 1998. A primer on the geological occurrence of gas hydrate. In : J.-P. Henriot and J. Mienert (Eds.), Gas Hydrates: Relevance to world margin stability and climate change. Geol. Soc. Spec. Publ., no. 137: 9-30.
- Langseth, M.G. and K. Tamaki, 1992. Geothermal measurements: thermal evolution of the Japan Sea Basins and sediments. In: K. Tamaki, K. Suyehiro, J. Allen, M. McWilliams, et al., Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 127/128, pt 2: 1297-1309.
- Lee, H.J., Chough, S.K., and Yoon, S.H., 1996. Slope-stability change from late Pleistocene to Holocene in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea). Sediment. Geol., 104: 39-51.
- Lee, S.H., Chough, S.K., Back, G.G., Kim, Y.B., and Sung, B.S., 1999. Gradual downslope change in high-resolution acoustic characters and geometry of large-scale submarine debris flow lobes in Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan), Korea. Geo-Mar. Letts.
- Mastumoto, R., Aoki, Y., and Okuda, Y. 1993. Methane Hydrate. 일본 과학사. --
- Milkov, A.V. and Sassen, R., 2000. Thickness of the gas hydrate stability zone, Gulf of Mexico continental slope. Mar. & Petrol. Geol., 17: 981-991.
- Mienert, J. and Posewang, J., 1999. Evidence of shallow- and deep-water gas hydrate destabilizations in North Atlantic polar continental margin sediments. Geo-Mar. Letts., 19: 143-149.
- Paull, C., Ussler, W., and Dillon, W., 1991. Is the extent of glaciation limited by marine gas-hydrates ? Geophysical Res. Letts., 18: 432-434.
- Posewang, J. and Mienert, J., 1999. The enigma of double BSRs: indicators for in the hydrate stability field? Geo-Mar. Letts., 19: 157-163.
- Schlanger, S.O. and J. Comb, 1975. Hydrocarbon potential of marginal basins bounded by an island arc. Geology, 3: 397-400.
- Shipboard Scientific Party, 1973a. Site 299. In: Karig, D.E., J.C. Ingle, Jr. et al. (Eds.), Initial Rpts. of the Deep Sea Drilling Project, 31, Washington, U.S. Gov. Printing Office. 351-402.
- Shipboard Scientific Party, 1973b. Site 301. In: Karig, D.E., J.C. Ingle, Jr. et al. (Eds.), Initial Rpts. of the Deep Sea Drilling Project, 31, Washington, U.S. Gov. Printing Office. 409-437.
- Shipboard Scientific Party, 1990. Site 796. In: Tamaki, K., K. Pisciotto, J. Allen, et al., Proc. ODP Init. Repts., 127 and 128, College Station, TX (Ocean Drilling Program). 242-322.
- Stoll, R.D., Ewing, J. and Bryan, G.M., 1971. Anomalous velocities in sediments containing gas hydrates. Jour. Geophys. Res., 76: 2090-2094.
- 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 margin of India. In: Henriot, J.P. and Mienert, J. (eds.). Gas Hydrates: relevance to world margin stability and climate change. Geol. Soc., London, Spec. Publ. 137: 239-254.