한국음향학회지 제28권 제5호 pp. 424~431 (2009)

동해 울릉분지 가스하이드레이트 함유 퇴적물의 음파전달속도 특성

Sound Velocity Property of Sediment Containing Gas Hydrate in the Ulleung Basin, East Sea

김 길 영*, 유 동 근*, 류 병 재*
(Gil Young Kim*, Dong Geun Yoo*, Byong Jae Ryu*)

*한국지질자원연구원 석유해저연구본부
(접수일자: 2009년 2월 18일; 수정일자: 2009년 3월 31일; 채택일자: 2009년 6월 11일)

본 연구는 지구물리검층을 통해서 동해 울릉분지의 가스하이드레이트 함유지층과 비함유지층에서의 음파전달속도 (종파)의 특성차이를 규명하였다. 지구물리 검층 자료는 울릉분지의 중앙지역에서 취득하였다. 음파전달속도는 가스하이드레이트 함유지층의 경우 최대 속도값이 약 2200 m/s의 높은 값에서 1600 m/s의 낮은 값을 갖는다. 반면에 비함유지층에서는 약 1500 m/s 내외에서 1400 m/s보다 더 낮은 값을 갖기도 한다. 일반 해양퇴적물에서의 값 (약 1500~1600 m/s)보다 높은 값을 보이는 것은 가스하이드레이트가 퇴적물내에 함유되어 있기 때문이다. 가스하이드레이트 비함유구간중 해수의 속도보다 낮은 값을 보이는 구간은 해저면에서 약 140 m 이하의 해저모방반사면 (Bottom Simulating Reflector)의 하부층에 존재하는 자유가스 때문이다. 전기비저항값도 가스하이드레이트 함유구간에서 최대 150 Ohm-m까지 높게 나타나 비함유구간에서의 값과 차이가 크다. 각 물성간의 상관관계를 보면 가스하이드레이트 함유지층과 비함유지층의 구분이 명확하게 나타나고 있으며 그 상관관계도 일반적인 해양 미고결퇴적물에서 보이는 값과는 상이한 양상을 보여주고 있다. 따라서 가스하이드레이트가 존재하는 지층의 물성과 음향특성을 해석할 때에는 가스하이드레이트의 존재 형태나 함량 등에 대한 연구가 병행되어야 할 것으로 생각된다.
핵심용어: 지구물리검층, 가스하이드레이트, 음파전달속도, 울릉분지
투고분야: 수중음향 분야 (5.3)

This study investigates the difference of sound velocity (compressional wave velocity) between gas hydrate-bearing sediments and nongas hydrate-bearing sediments in the Ulleung Basin, East Sea. We use a dataset measured from one site in the central part of the Ulleung Basin. Sound velocity for gas hydrate-bearing sediment shows the range from 1600 m/s to 2200 m/s. However, the value for nongas hydrate-bearing sediment is mostly around 1500 m/s, being less than 1400 m/s below 140 m subbottom depth. This trend is probably due to the presence of free gas below BSR (Bottom Simulating Reflector). Gas hydrate-bearing sediments show high value (maximum 150 Ohm-m) of resistivity. The physical properties between gas hydrate-bearing sediment and nongas hydrate-bearing sediment are characterized by the different patterns due to the presence of gas hydrate in comparison with those of marine unconsolidated sediments. Therefore, in order to investigate acoustic and physical properties for gas hydrate-bearing sediments, the study for the occurrence type and the amount of gas hydrates should be conducted simultaneously.
Keywords: Geophysical well logging, Gas hydrate, Sound velocity, Ulleung Basin
ASK subject classification: Underwater Acoustic (5.3)

I. 서 론

해양 미고결퇴적물에 대한 음파전달속도는 수중음향학의 측면은 물론 지구물리 자료의 해석을 위해서 많은 연구가 이루어지고 있다 [1-3]. 그러나 천부가스가 함유되어 있거나 [4] 혹은 가스하이드레이트가 함유된 경우의 연구는 최근에 와서야 일부 수행되고 있다. 또한 연구대상 시료를 해저면에서 수 미터 이내에 해당하는 코어 시료를 주로 이용하기 때문에 연구대상 깊이도 상당

책임저자: 김 길 영 (gykim@kigam.re.kr)
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92,
한국지질자원연구원 석유해저연구본부
(전화: 042-868-3166; 팩스: 042-868-3417)

히 제한적이다. 가스 함유 퇴적물은 연안, 만, 대륙붕, 심해 등 다양한 지역에 넓게 분포되어 있다 [5][6]. 가스하이드레이트를 함유하는 퇴적층도 전세계 여러지역에서 발견되고 있으나 이에 대한 음향특성 및 물성에 대한 연구는 제한적이었다.

가스하이드레이트는 물과 천연가스 (주로 메탄)가 결합하여 형성된 얼음과 같은 고체상태의 결정이다. 육지나 바다 어느 곳이든지 자유가스 (free gas)가 충분히 공급된 경우 퇴적물내에서 안정영역 (저온고압: 0℃ 26기압~10℃ 76기압)만 이루어지면 형성될 수 있는데, 이 안정영역을 벗어나게 되면 해리되면서 자유가스로 존재한다 [7]. 따라서 가스하이드레이트는 이러한 안정영역에 존재 하느냐 여부에 따라서 고체와 기체상을 번갈아 가질 수 있다.

해저면 상부층에 존재하는 미고결된 해양퇴적물의 음파전달속도는 퇴적후의 다져짐 작용이나 고화작용과 같은 속성작용에 의한 영향을 받기 보다는 퇴적물의 조직 (texture) 주로 입도에 의한 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다 [8][9]. 그러나 퇴적층의 심도가 증가할 경우는 조직외 물리적인 속성작용 뿐만 아니라 화학적인 속성작용에 의해 Opal-A (Amorphous) → Opal-CT (Cristobalite) → Quartz와 같이 비정질 (amorphous)의 구조가 석영의 형태로 압상이 변하면서 물성 및 음향특성이 크게 변한다 [10][11].

해양 미고결 퇴적물의 음파전달속도는 Birch [12]가 제안한 방법을 이용하여 대부분이 실험실에서 측정되어 왔으며, 일부 제한적으로 현장에서 직접 측정하는 장비가 개발되었으나 측정상의 어려움과 개발 비용문제 등의 이유로 인해 보편적으로 이용되고 있지는 않다. 석유 및 가스탐사와 가스하이드레이트 탐사는 지하 심부를 시추해서 이들의 존재유무를 파악하기 위해서 지구물리검층 (geophysical well logging)이란 방법을 이용하여 음파전달속도는 물론 그 외 다른 물성값에 대한 측정을 한다. 지구물리검층은 시추 후 혹은 시추와 동시에 지층에 대한 여러가지 물성 (전기비저항, 밀도, 공극률, 자연감마, 속도, 자연전위 등) 등을 연속적이며 고해상도의 자료를 취득하는 탐사를 말한다 [13]. 물리검층은 오일이나 가스 탐사, 광물탐사, 지하수탐사, 지반탐사 및 환경탐사 등 다양한 목적으로 이용되어 오고 있으며 최근에는 가스하이드레이트 탐사와 이산화탄소 지중저장을 위한 지층 탐사와 저장후의 거동을 조사하는 모니터링 연구 등 그 적용성이 다양해지고 있다.

본 연구는 2007년 가스하이드레이트 탐사를 위해서 동해 울릉분지에서 취득한 물리검층 자료를 이용하여 가스하이드레이트 함유지층과 비함유지층의 음파전달속도 차이를 알아보고 음파전달속도와 다른 물성값과의 상관관계 분석을 통하여 가스하이드레이트가 음파전달속도에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

II. 재료 및 방법

가스하이드레이트 함유퇴적물의 음파전달속도는 지구물리검층을 통하여 현장에서 직접 취득하였다. 이 검층방법은 해저면 아래의 퇴적층을 시추하면서 동시에 속도를 비롯한 물성값을 측정하는 것 (Logging While Drilling, LWD)이다. LWD는 속도측정뿐만 아니라 퇴적물의 물성 즉 밀도와 공극률은 물론 퇴적물의 구성성분 (특히 점토와 모래함량의 상대적인 비율)을 분별할 수 있는 자연감마 (natural gamma) 값도 동시에 측정할 수 있다. 이러한 물리검층의 경우는 퇴적층을 시추하면서 이루어지기 때문에 시추속도를 일정하게 유지하는 것이 양질의 자료를 취득하는데 중요하다. 따라서 이번 물리검층에서는 일정한 깊이별 자료를 취득하기 위하여 검층 장비의 시추속도를 알려주는 ROP (Rate of Penetration)를 시간당 40~50 m 깊이로 유지하였다.

동해 울릉분지에서의 조사는 가스하이드레이트의 탐사를 목적으로 2007년도에 수행되었으며 이용된 탐사선은 약 4천톤 규모의 노르웨이 국적 RemEtive이고 검층장비는 Schlumberger 사의 것을 이용하였다. 물리검층은 총 5개 정점에 대하여 수행하였지만 이번 연구에 이용된 자료는 연구의 목적상 가스하이드레이트의 함유량이 가장 높은 1개 정점 (그림 1)을 선정하여 그 자료를 이용하였다 [14]. 이 정점은 울릉분지의 중앙에 위치하고 수심은 2,078 m이며 검층이 이루어진 깊이는 해저면에서부터 해저면하 약 230 m까지이다.

음파전달속도 측정에 이용된 검층장비는 Sonicvision이다. 이 장비는 시추와 동시에 각 구간에 대한 음파의 진행시간을 측정하여 slowness (μs/ft)로 기록한다. Sonic tool의 간단한 구성은 그림 2와 같다. 장비의 하부에 송신기, 송신기에서 약 3 m 상부로 4개의 수신기가 부착되어서 수신기 간 시간차로부터 음파전달 속도값을 구한다. 취득된 자료는 그림 3과 같이 진폭이미지, slowness, 파형 등의 형태로 저장하고 이 값은 또 다른 목적을 위하여 재처리가 가능하다. 음파전달속도 자료외에 물성자료는 Adnvision (공극률 및 밀도 자료) 및 Geovision (전기비

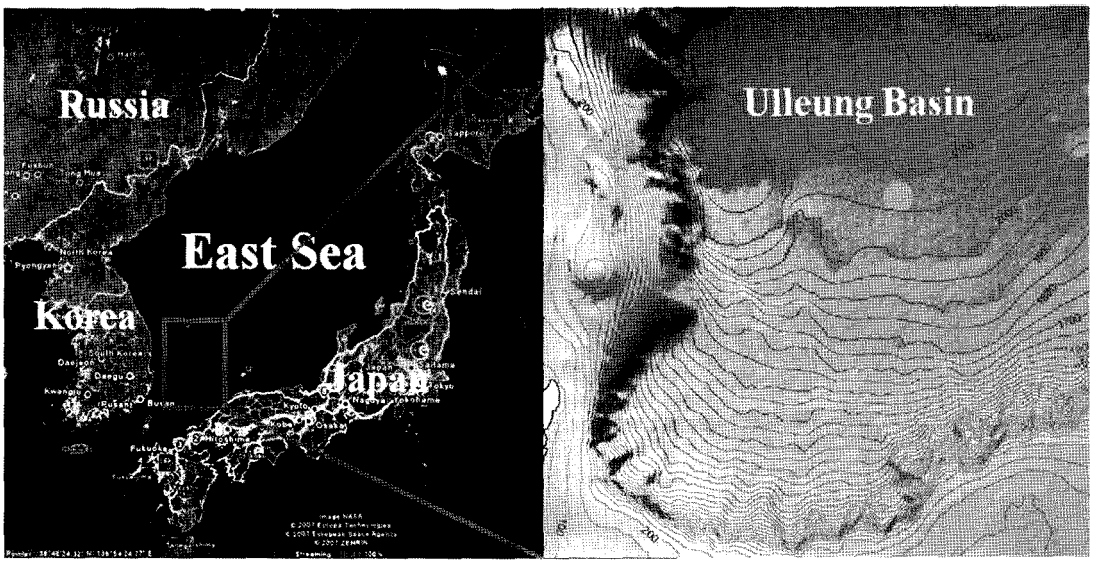

그림 1. 동해 울릉분지내 물리검층 정점 (우)
Fig. 1. Geophysical logging site (right) in the Ulleung Basin, East Sea.

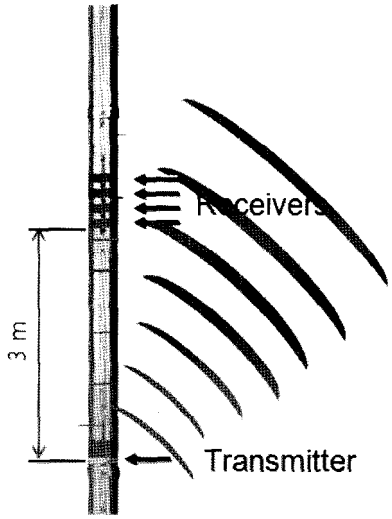

그림 2. 지구물리검층시에 수행되는 음파전달속도측정 장비의 구성
Fig. 2. Sonic tool configuration.

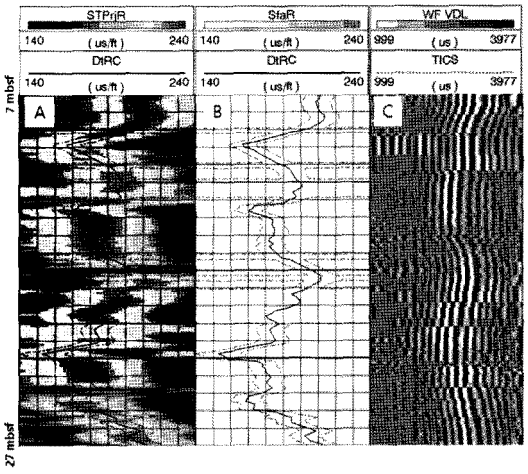

그림 3. Sonicvision으로부터 획득한 음파전달속도 예 (A: 진폭 이미지와 slowness, B: slowness, C: 파형자료)
Fig. 3. Sound velocity data acquired from Sonicvision(A: amplitude image and slowness data, B: slowness, C: waveform data).

저항 자료)을 이용하여 측정하였다 (각 검층장비에 대한 규격은 Schlumberger 홈페이지를 참고하기 바람: www.slb.com).

검층자료는 전기비저항값을 기준으로 하여 가스하이드레이트 함유지층과 비함유지층으로 구분하였다. 전기비저항은 전기전도도의 역수로 매질의 전기적 성질을 의미하는데 매질내의 공극이 물로 포화되어 있을 때보다 가스하이드레이트로 채워진 경우 전기의 흐름을 방해하여 높은 전기비저항값을 보여준다. 일반적인 해양의 미고결 퇴적물의 경우 전기비저항 값은 <1 Ohm-m이하의 값을 보여주는데 특히 동해의 경우도 ODP (Ocean Drilling Program) 시료를 이용하여 측정한 전기비저항은 대부분이 0.5~1 Ohm-m의 범위다 [10]. Hyndman [15]은 전기비저항 값이 1.5 Ohm-m 이상일 경우 가스하이드레이트의 존재 가능성이 있다고 제안하였다. 그러나 이번의 경우 동해의 기존 자료인 실험실 자료 및 물리검층 자료를 바탕으로 하여 1 Ohm-m 이상을 보이는 구간은 모두 가스하이드레이트가 함유되어 있을 것으로 간주하여 가스하이드레이트 함유지층과 비함유지층으로 구분하는 기준으로 하였다. 2007년 울릉분지에 대한 심부시추에서도 1 Ohm-m 이상의 높은 비저항값을 보여주는 구간에서 가스하이드레이트를 채취하거나 혹은 해리된 흔적을 확인하였다.

III. 결과 및 고찰

물리검층 자료는 가스하이드레이트 함유지층과 비함유 지층으로 구분하여 깊이별 변화 단면도와 봄성간의 상관관계를 도시하여 해석하였다. 그림 4는 가스하이드레이트 함유지층과 비함유지층으로 구분하여 깊이별로 음파전달속도 및 전기비저항 값을 도시한 그래프이다. 그림에서 상부층 약 10 m와 140 m 이하에서 1 Ohm-m 이하의 낮은 전기비저항값을 보이고 그 외의 구간에서는 1-150 Ohm-m까지 높은 비저항 값을 보여준다. 따라서 해저면 약 10 m 이하에서부터 140 m 사이에 가스하이드레이트가 포함되어 있는 구간이다. 그러나 상부 약 20 m 부근에서 약 1800 m/s의 높은 속도값을 보이는데 전기

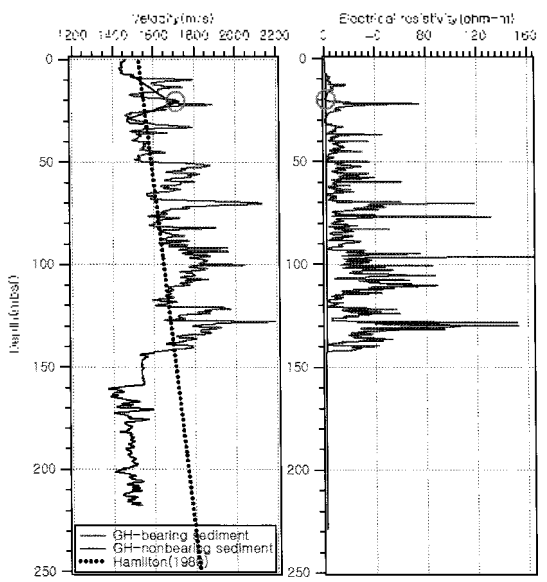

그림 4. 깊이에 따른 음파전달속도 및 전기비저항. 가스하이드레이트 함유층과 비함유층으로 구분

Fig. 4. Sound velocity and electrical resistivity with depth. Note gas hydrate-bearing and nongas hydrate-bearing zones.

비저항값이 1 Ohm-m 이하로 아주 낮은 것으로 보아 가스하이드레이트의 부존보다는 다른 원인 (구성광물의 차이)때문으로 보인다. 일부구간에서 전기비저항값은 높으나 속도값이 낮게 나타나는 경우는 퇴적층내에 자유가스 때문이다. 일반적으로 순수한 가스하이드레이트의 물성값은 포화된 퇴적물과는 많은 차이를 보인다 [2][16]. 순수한 가스하이드레이트의 전기비저항값은 150-175 Ohm-m로 (표 1) 아주 높고 퇴적층내에 산재하여 존재할 경우는 이보다 낮은 값을 보이며 함유량에 따라 다양하다. 음파전달속도값의 경우도 일반 해양 미고결퇴적물에서의 값보다 훨씬 높은 값인 3.3 km/s를 보이는데 이 역시 퇴적층내에 산재하여 존재할 경우에는 이보다 훨씬 낮아진다. 즉, 표 1에서와 같이 순수한 가스하이드레이트와 물로 포화된 해양 미고결퇴적물의 값 (북태평양 대륙붕 및 사면 자료)과는 각각의 물성값이 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 울릉분지 지구물리 검층자료 중 분지의 남서부 사면에 위치하는 정점의 경우 가스하이드레이트 함유 가능성이 가장 낮아 일반적인 해양퇴적물의 경우와 유사한 특성을 가지는 곳으로 이 정점의 전기비저항은 0.5~1.0 Ohm-m의 범위로 해양퇴적물에 함유되어 있는 가스하이드레이트가 퇴적물의 전기비저항에 크게 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

그림 4의 음파전달속도값의 단면도에서 퇴적층 깊이 약 140 m를 기준으로 상부층과 하부층의 값의 차이가 크게 나타난다. 즉, 140 m 하부의 경우 자유가스가 존재하기 때문에 최소 1400 m/s 이하까지 낮은 값을 상부의 경우 가스하이드레이트로 인하여 최대 약 2200 m/s까지 높은 속도값을 보인다. 해저면 부근 ~10 m 상부층도 낮은 속도값을 보이는데 이는 가스하이드레이트의 해리로 인한 자유가스가 퇴적층내에 존재하기 때문으로 생각된다. 결과적으로 본 연구지역의 경우 가스하이드레이트와 자

표 1. 가스하이드레이트와 포화된 해양 퇴적물의 물성값 [1][16].

Table 1. Physical properties of water-saturated sediments and pure gas hydrates [1][16].

Property	Pure hydrate	Water-saturated sediment
Vp (km/sec)	3.3	1.5-2.0
Vs (km/sec)	1.6	0.26-0.41
Velocity ratio Vp/Vs	1.95	3-13
Poisson's ratio	0.33	0.46-0.48
Bulk modulus (GPa)	5.6	3.1-3.3
Shear modulus (GPa)	2.4	0.1-0.3
Bulk density (g/cm^3)	0.912	1.3-1.75
Thermal conductivity (W/m-K)	0.49±0.02	0.6-0.9
Electrical resistivity (Ohm-m)	150-175	0.5-3

유가스로 인하여 Hamilton [2]이 제시한 일반적인 해양 퇴적층의 깊이에 대한 속도값의 변화량과는 많은 차이가 있기 때문에 가스하이드레이트가 함유된 지층의 경우 지음향모델을 이용하여 속도값을 예측하는데 세밀한 주의가 필요하다.

해양 미고결퇴적물의 물성간의 상관관계는 각 지역에 적합한 지음향모델을 구현하기 위하여 상관관계식을 만든다. 이러한 관계식을 이용하여 퇴적물의 조직을 유추하거나 혹은 조직값을 이용해서 물성값을 예측하기도 한다. 또한 이런 관계식을 퇴적과정과 퇴적환경을 해석하는데 이용하기도 한다. 특히 음파전달속도를 결정하는 주요한 변수인 조직, 공극률, 밀도, 그리고 함수율 등과의 관계식을 주로 이용하며 [1][2] 그 외 전기비저항이나 열전도도 등과의 관계식도 해석에 도움이 된다. 그림 5는 음파전달속도 및 공극률과의 관계식이며 가스하이드레이트 함유구간과 비함유구간의 자료를 별도로 도시하였다. 음파전달속도와 공극률과의 관계는 Wood [17]와 Wyllie [18]의 관계식을 이용하여 주로 해석한다. Wood의 경우는 강성률 (rigidity)을 갖지 않으며 입자가 주로 부유상태로 존재할 경우의 관계식이다. 반면에 Wyllie는 매질내의 유체와 입자의 평균음파전달속도에 완전한 강성률을 가지고 있는 퇴적암에 대한 경험식이다. 따라서 이러한 두 관계식은 매질의 음파전달속도 및 공극률사이의 상관관계를 해석할 때 상부 및 하부 경계를 정의하는데 이용된다. 따라서 퇴적물내에 가스하이드레이트가 존재할 경우 이러한 관계식에서 어느 형태를 따르느냐에 따라 일반 미고결퇴적물과 구분이 가능하다. 그림 5와 같이 가스하이드레이트를 함유하지 않은 퇴적층의 값은 주로 Wood의 관계식을 따르고 있고 일부는 Wood 곡선 하부에 존재한다. 일반적으로 세립질 해양퇴적물의 경우 음파전달속도가 해수의 속도보다 낮은 경우가 많은데 이는 공극내의 공극수와 입자를 구성하는 광물의 압축성과 밀도의 차이 때문이다 [8]. 본 연구지역의 경우 공극내에 공극수와 일부 가스가 포함되어 있어 압축성이 증가하여 낮은 속도값을 보이며 따라서 Wood의 곡선보다 하부에 위치하는 것으로 생각된다. 그러나 가스하이드레이트의 함량이 증가하는 구간의 값은 Wyllie의 관계식으로 접근하고 있으며 일부는 더 높은 값을 보이기도 한다. 또한 가스하이드레이트 비함유퇴적물인 북태평양 대륙붕의 자료인 Hamilton [19]의 경험식을 표시한 결과 가스함유지층과 비함유지층의 사이에 위치한다. 이는 본 연구지역의 경우 가스하이드레이트가 퇴적물 속에 포함되어 있어 음파전달속도값에 큰 영향을 미치고 있음을 의미한다. 또한 Hamilton의 곡선도 비함유지층의 음파전달속도값보다 높게 위치한다. 그 이유는 가스하이드레이트 비함유지층의 경우 해리에 의한 가스의 영향과 안정영역 하부에 존재하는 자유가스 때문에 음파전달속도값이 전반적으로 낮기 때문이다.

퇴적물내에 가스하이드레이트가 존재할 경우 함유형태에 따라 음파전달속도값에 서로 다른 변화량으로 영향을 준다 [20]. 즉 그림 6과 같이 조립질 모래의 경우 입자들의 접촉면에 퇴적입자들을 교결시키는 형태 (cementation)와 입자 주위를 둘러싸는 형태 (grain coating)는 가스하이드레이트의 포화도가 증가함에 따라 음파전달속도값이 갑자기 증가하는 곡선의 형태를 보인다. 반면에 공극을 채우는 형태 (pore filling)나 입자들 사이에 고체상태 (solid)로 존재하여 기질이나 입자를 지지하는 형태 (supporting matrix/grain)일 경우는 포화도가 50% 이하에서는 서서히 증가하고 그 이상이 되면 갑자기 증가한다. 본 연구에서는 포화도에 따른 음파전달속도값의 변화를 제시하지 않기 때문에 그림 6의 모델중에서 어떤

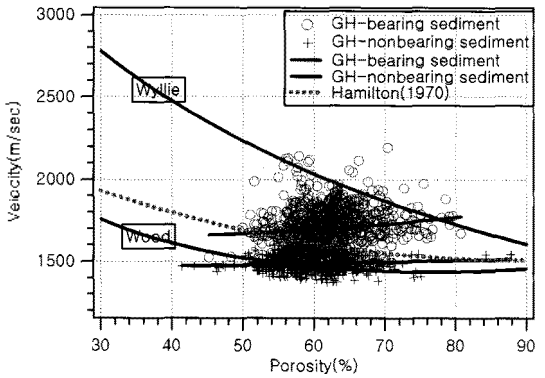

그림 5. 음파전달속도와 공극률과의 상관관계
Fig. 5. Sound velocity versus porosity for gas hydrate-bearing sediment and nongas hydrate-bearing sediment.

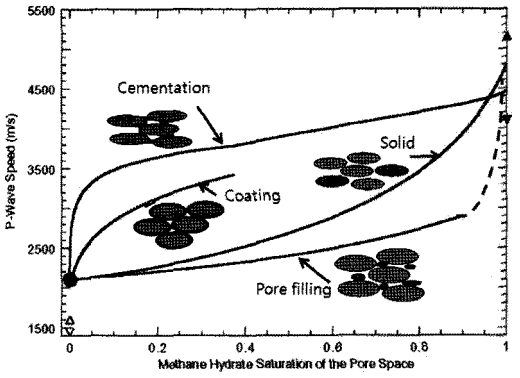

그림 6. 가스하이드레이트 형성과 음파전달속도 변화와의 관계 [19]
Fig. 6. Sound velocity versus hydrate forming [19].

곡선을 따르는지는 알 수 없다. 또한 그림 6의 모델에서 사용한 입자들의 크기는 조립질의 모래로 구성되어 있다. 따라서 본 연구지역과 같이 세립질의 니질로 구성된 경우와는 속도 및 공극률의 차이가 있기 때문에 상이한 결과를 보일수도 있다. 그러나 그림 5에서와 같이 가스하이드레이트 함유지층의 공극률에 따른 속도값의 변화량이 다른 것과 상이한 경향의 기울기를 보이고 있다는 것은 공극내에 존재하는 가스하이드레이트의 존재형태가 속도값의 변화량에 영향을 주고 있음을 의미한다. Hamilton [8][19]의 경험식에 의하면 음파전달속도와 공극률의 상관관계에서 공극률이 75~80%를 최저점으로 하여 공극률이 증가할수록 속도값이 다시 증가한다. 그 이유는 매질이 높은 공극률을 가지면서 매질의 밀도값과 체적탄성율의 변화량이 서로 차이가 나기 때문이다. 본 연구지역의 가스하이드레이트 함유지층의 경우 낮은 공극률에서부터 그 값이 증가할수록 속도값이 증가하는 양상을 보여주는데 이는 공극률이 높을 경우 공극내 포함되어 있는 가스하이드레이트의 함량이 증가하여 속도값이 증가하는 것으로 보인다.

음파전달속도와 밀도와의 상관관계를 보면 (그림 7)가스하이드레이트 함유지층과 비함유 지층의 구분이 뚜렷하게 나타난다. 또한 밀도값의 변화에 따른 음파전달속도값의 변화에서도 가스하이드레이트 함유지층이 비함유 지층의 값과 비교로 도시한 Hamilton의 곡선과도 상이하다. 이 역시 그림 5에서 이미 설명한 바와 같이 가스하이드레이트의 존재형태가 퇴적물의 물성에 다양하게 영향을 주고 있음을 지시한다. 일반적으로 퇴적물의 밀도는 입자를 구성하는 광물성분, 속성작용, 미고생물의 함량 및 종류 등에 따라서 다양한 값을 보이며, 밀도가 증가 할수록 체적탄성율의 증가로 인해 음파전달속도값이 증가한다 [1][2]. 그러나 본 연구지역과 같이 가스하이드레이트가 존재하거나 혹은 자유가스가 존재할 경우 일반적인 대륙붕 지역 해양퇴적물에 대한 연구결과를 바탕으로 제시한 Hamilton의 경험식 [19]은 적용될 수 없으며 새로운 경험식이 필요하다. 즉 밀도가 증가할수록 공극내에 가스하이드레이트의 함량이 감소하는 결과를 초래하기 때문에 속도값이 감소하는 경향을 보이는 것으로 보인다. 그러나 밀도와 공극률의 관계 (그림 8)는 공극률이 증가하면서 밀도가 감소하는 경향을 보인다. 특이한 것은 가스하이드레이트 함유 지층과 비함유 지층의 구분이 다른 물성에 비해서 뚜렷하지 않다는 것이다. 이것은 퇴적물내의 존재하는 가스하이드레이트의 함량이 크지 않을 경우는 밀도와 공극률에 미치는 영향이 음파전달속도에 미치는 영향만큼 크지 않다는 것을 의미한다. 또한 Hamilton의 곡선과 비교해도 밀도값이 훨씬 낮은 값을 보여주고 있다. 이는 가스하이드레트의 경우 일반적으로 점토나 석영과 같은 일반적인 광물성분 보다 낮은 밀도값을 보이기 때문이다 (표 1). 또한 가스하이드레이트 비함유지층의 경우도 낮은 밀도값을 보여준다. 이는 본 연구지역 퇴적물의 광물성분 분석결과에 의하면 입자밀도가 2.7 g/cm^{3}인 점토나 석영의 함량보다는 입자밀도값이 낮은 (약 2.0 g/cm^3) opal의 함량이 30~40% 이상 포함되어 있기 때문이다 [21].

음향임피던스는 매질의 음파전달속도와 밀도의 곱으로부터 계산된다. 이는 음파가 매질을 통과할 때 경계면에서 반사되는 에너지의 양을 결정하는 요소이다. 음향임피던스와 공극률의 관계에서는 (그림 9) 공극률이 증가할수록 음향임피던스가 감소하는 일반적인 경향을 따르고 있다. 그림 9에서 보면 가스하이드레이트 함유지층과 비함유지층의 구분은 있으나 자료가 서로 중첩되어 나타

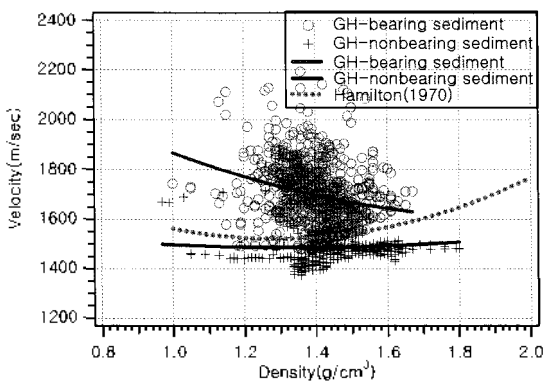

그림 7. 음파전달속도와 밀도와의 상관관계
Fig. 7. Sound velocity versus density for gas hydrate-bearing sediment and nongas hydrate-bearing sediment.

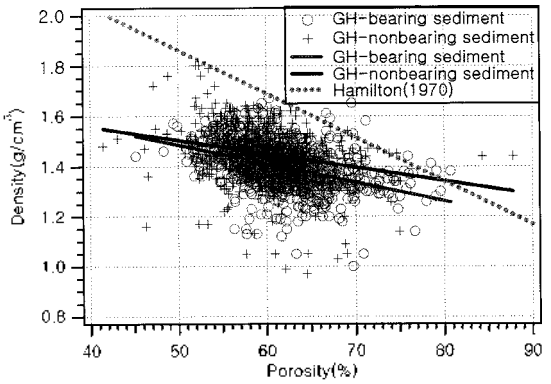

그림 8. 밀도와 공극률과의 상관관계
Fig. 8. Density versus porosity for gas hydrate-bearing sediment and nongas hydrate-bearing sediment.

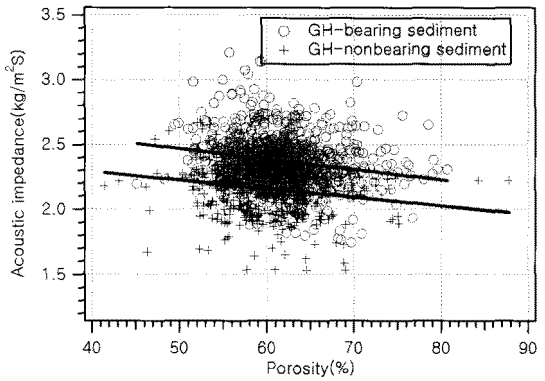

그림 9. 음향임피던스와 공극률과의 상관관계
Fig. 9. Acoustic impedance versus porosity for gas hydrate-bearing sediment and nongas hydrate-bearing sediment.

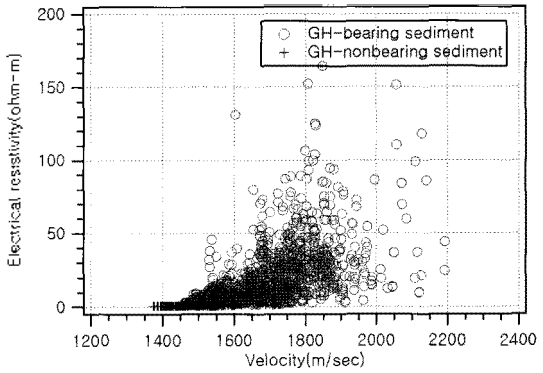

그림 10. 전기비저항과 음파전달속도와의 상관관계
Fig. 10. Electrical resistivity versus sound velocity for gas hydrate-bearing sediment and nongas hydrate-bearing sediment.

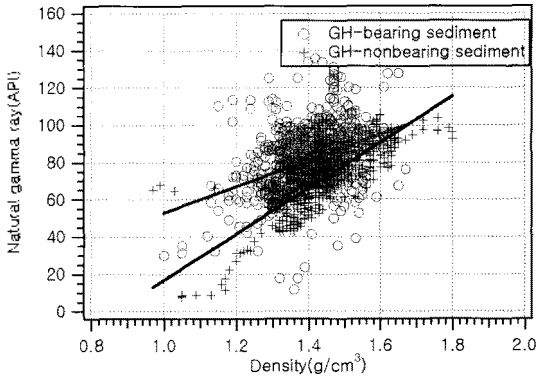

그림 11. 자연감마와 밀도와의 상관관계
Fig. 11. Natural gamma ray versus density for gas hydrate-bearing sediment and nongas hydrate-bearing sediment.

나는 부분도 있다. 이는 가스하이드레이트가 다량 존재할 경우 오히려 낮은 밀도값을 (표 1) 보여주기 때문이다.

전기비저항은 매질에서의 전기전도도를 의미한다. 일반적으로 전기전도도가 높을 경우 낮은 전기비저항 값을 보인다. 즉 퇴적물내 공극에 포함되어 있는 공극수의 양이나 공극을 채우고 있는 물질 예를 들면 석유, 가스, 물, 가스하이드레이트 등에 따라서 전기전도도의 값이 뚜렷하게 다른 값을 가진다. 따라서 지구물리검층을 통해서 자원탐사를 수행할 때 전기비저항은 훌륭한 지시자로 이용된다. 그림 10을 보면 가스하이드레이트 함유지층의 전기비저항값이 훨씬 높은 값을 보여주며 가스하이드레이트 함유지층과 비함유지층의 구분이 뚜렷하다. 또한 음파전달속도값이 증가할수록 전기비저항값이 증가한다. 비함유지층의 경우 대부분이 1 Ohm-m 이하의 낮은 값을 보이나 조립질 퇴적물의 함량이 많거나 혹은 다져짐 작용과 고화작용과 같은 속성작용을 받을 경우는 2-3 Ohm-m의 값을 보이기도 한다.

자연감마는 자층내의 점토나 셰일 함량을 지시하는 지시자이다. 일반적으로 점토나 셰일은 높은 값을 보이며 모래의 함량이 많을 경우 낮은 값을 보인다. 즉 자연감마는 점토나 셰일내에 포함되어 있는 방사성 물질 (포타슘, 토륨 등)의 함량에 의해 결정되기 때문이다. 따라서 자연감마는 이러한 구성성분의 변화를 연속적으로 알 수 있기 때문에 퇴적환경과 퇴적과정의 변화를 해석하는데 결정적인 자료가 된다. 또한 석유나 가스와 같은 저류암을 평가하는데도 유용하게 이용한다. 그림 11은 자연감마와 밀도와의 상관관계를 도시한 것이다. 밀도값이 증가할수록 자연감마가 뚜렷한 상관성을 가지고 증가한다. 그러나 일반적인 해양 비고결퇴적물의 경우 자연감마와 밀성값과의 상관성은 크게 나타나지 않은 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구지역의 경우 두 값과의 상관성이 뚜렷하게 나타난다. 이는 가스하이드레이트와 자유가스로 인해 본 연구지역 퇴적물의 물성특성이 일반적인 해양퇴적물과는 다른 특성을 보이기 때문이다. 그러나 이에 대한 자세한 이유는 더 많은 연구가 필요할 것으로 본다.

IV. 결 론

동해 울릉분지에서 지구물리검층을 통해서 취득한 물성자료를 분석한 결과 가스하이드레이트 함유지층과 비함유지층의 음파전달속도는 물론 물성값이 현저하게 다른 특징을 보여주었다. 또한 각 물성간의 상관관계에서도 일반적인 해양 퇴적물에서 보여주는 관계식보다 다른 양상을 보여주어 가스하이드레이트가 퇴적물의 밀성에 크게 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 이는 일반적으로 퇴적층 깊이에 따른 물성값의 변화보다도 더 크게 작용하

고 있어 가스하이드레이트가 함유된 지층의 물성을 해석할 때는 가스하이드레이트의 존재 형태나 함량 등에 대한 연구가 병행되어야 정확한 물성을 예측할 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

본 연구는 가스하이드레이트사업단에서 지원하는 2009년도 가스하이드레이트 지구물리 연구 사업의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. E. L. Hamilton, "Elastic properties of marine sediments," *Journal of Geophysical Research*, vol. 76, no. 2, pp. 579–604, 1971.
2. E. L. Hamilton, "Geoacoustic modeling of the seafloor," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68, no. 4, pp. 1313–1340, 1980.
3. M. D. Richardson, K. G. Briggs, S. J. Bentley, D. J. Walter, and T. H. Orsi, "The effects of biological and hydrodynamic processes on physical and acoustic properties of sediments off the Eel River, California," *Marin Geology*, vol. 182, no. 1E, pp. 121–139, 2002.
4. G. Y. Kim, D. C. Kim, J. Y. Yeo, and D. G. Yoo, "Acoustic properties of gassy sediments: Preliminary result of Jinhae Bay, Korea," *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, vol. 26, no. 1E, pp. 33–38, 2007.
5. M. D. Richardson, and A. M. Davis, "Modelling methane-rich sediments of Eckernforde Bay," *Continental Shelf Research*, vol. 18, pp. no. 14–15, 1671–1688, 1998.
6. P. Fleischer, *The distribution of shallow-water gassy sediments* NRL-ONR Gassy Sediment Workshop, Bay St. Louis, Mississippi, 2003.
7. E. D. Sloan, *Clathrate hydrate of natural gases*, Marcel Dekker, New York, pp. 705, 1998.
8. E. L. Hamilton, and R. T. Bachman, "Sound velocity and related properties of marine sediments," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68, no. 6, pp. 1891–1904, 1982.
9. G. Y. Kim, and D. C. Kim, "Comparison and correlation of physical properties from the plain and slope sediments in the Ulleung Basin, the East Sea (the Sea of Japan)," *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 19, no. 5,pp. 669–681, 2001.
10. G. Y. Kim, D. G. Yoo, H. Y. Lee, Y.J . Lee, and D. C. Kim, "The relationship between silica diagenesis and physical properties in the East/Japan Sea: ODP Legs 127/128," *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 30, no. 3–4, pp. 448–456, 2007.
11. G. Y. Kim, R. H. Wilkens, D. C. Kim, D. G. Yoo, and Y. J. Lee, "In situ correction of porosity and velocity of pelagic carbonate sediments in the Eastern Equatorial Pacific (Sites 846 and 850, ODP Leg 138)," *Marine Georesources and Geotechnology*, vol. 26, no. 1, pp. 51–65, 2008.
12. F. Birch, "The velocity of compressional waves in rocks up to 10 kilobars," *Journal of Geophysical Research*, vol. 65, no. 4, pp. 1083–1102, 1960.
13. H. L. Bryant, "Production well logging techniques," *Geophysics*, vol. 25, no. 4, pp. 905–927, 1960.
14. 김길영, 유동근, 김원식, 이호영, 박근필, "LWD/MWD를 이용한 동해 울릉분지 가스하이드레이트 탐사," *물리탐사*, 11권, 3호, 263–270쪽, 2008.
15. R. D. Hyndman, T. Yuan, and K. Morgan, "The concentration of deep sea gas hydrates from downhole electrical resistivity logs and laboratory data," *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 172, no. 1–2, pp. 167–177, 1999.
16. S. Prensky, "A review of gas hydrates and formation evaluation of hydrate-bearing reservoirs," *Meeting of the Society of Processional Well Log analysis, Paris, France*, 1995.
17. A. B. Wood, "A textbook of sound", G. Bell, London, 1930.
18. M. R. J. Wyllie, A. R. Gregory, and G. H. F. Gardner, "An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media," *Geophysics*, vol. 23, no. 3, pp. 459–493, 1958.
19. E. L. Hamilton, "Sound velocity and related properties of marine sediments, North Pacific," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 72, no. 23, pp. 1891–1904, 1970.
20. J. Dai, H. Xu, F. Snyder, and N. C. Dutta, "Detection and estimation of gas hydrate using rock physics and seismic inversion: Examples from the northern deepwater Gulf of Mexico," *The Leading Edge*, vol. 23, no. 1, pp. 60–66, 2004.
21. 한국지질자원연구원, "가스하이드레이트 지질지화학 연구" 2008년 연차보고서 (NP 2008-001-2008(1)), 294쪽, 2008.

저자 약력

•김 길 영 (Gil Young Kim)

1982 ~ 1986 : 부경대학교 응용지질학과 (이학사)
1987 ~ 1991 : 부경대학교 해양학과 (이학석사)
1992 ~ 1998 : 부경대학교 응용지질학과 (이학박사)
2001 ~ 2003 : 미해군연구소 (박사후과정)
2003 ~ 2006 : 한국해양대학교 연구교수
2006 ~ 현재 : 한국지질자원연구원 선임연구원

•유 동 근 (Dong Geun Yoo)

1981 ~ 1985 : 충남대학교 해양학과 (이학사)
1985 ~ 1987 : 충남대학교 해양학과 (이학석사)
1992 ~ 1997 : 충남대학교 해양학과 (이학박사)
2006 ~ 2008 : 한국지질자원연구원 해저물리탐사연구센터장
1997 ~ 현재 : 한국지질자원연구원 선임/책임연구원

•류 병 재 (Byong Jae Ryu)

1974 ~ 1980 : 연세대학교 지질학과 (이학사)
1982 ~ 1990 : 독일 Stuttgart 대학교 (이학석사, 이학박사)
1996 ~ 2004 : 가스하이드레이트 연구과제 책임자
1991 ~ 현재 : 한국지질자원연구원 선임/책임연구원