



LWD/MWD를 이용한 동해 울릉분지 가스하이드레이트 탐사

김길영^{1*} · 유동근¹ · 김원식¹ · 이호영¹ · 박근필¹

¹한국지질자원연구원 석유해저자원연구부

Gas Hydrate Exploration Using LWD/MWD in the Ulleung Basin, the East Sea of Korea

Gil Young Kim^{1*}, Dong Geun Yoo¹, Won Sik Kim¹, Ho Young Lee¹ and Keun Pil Park¹

¹*Petroleum & Marine Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)*

요약: 가스하이드레이트 개발사업단은 2007년 동해 울릉분지의 가스하이드레이트 탐사를 위하여 5개 정점에 대한 물리검층을 실시하였다. 물리검층은 시추와 동시에 지층의 물성 특성을 실시간으로 측정하는 LWD (Logging While Drilling) 및 MWD (Measurement While Drilling)가 동시에 수행되었다. LWD/MWD에서 취득된 검층자료는 전기비저항, 속도, 밀도, 공극률 및 자연감마와 시추와 동시에 얻어지는 온도, 압력 및 시추공경에 대한 자료 등이다. LWD/MWD에서 얻은 검층자료는 울릉분지에 가스하이드레이트의 존재가능성이 높은 몇 가지 증거를 보여주었다. LWD/MWD에서 취득된 검층자료를 기초로 하여 동해 울릉분지에 가스하이드레이트의 존재 가능성이 높은 3개 정점이 선정되었고, 이 정점에서 직접 시추작업을 수행한 결과 다량의 가스하이드레이트를 채취하는데 성공하였다. LWD를 통해 취득된 다양한 자료들은 향후 가스하이드레이트의 분포 및 매장량을 산정하기 위한 연구에 기초자료로 이용될 것이며, 그외 동해 울릉분지에서의 가스하이드레이트 함유 지층의 퇴적학적 특성과 퇴적환경에 대한 연구에도 유용한 자료로 활용될 것이다.

주요어: 가스하이드레이트, 물리검층, 울릉분지

Abstract: The Gas Hydrate Research and Development Organization (KGHDO) of Korea accomplished successfully geophysical logging (LWD: Logging While Drilling, MWD: Measurement While Drilling) for five sites in 2007, in order to investigate the presence of gas hydrate in the Ulleung Basin, the East Sea of Korea. The logging parameters acquired from LWD/MWD are electrical resistivity, acoustic velocity, neutron density and porosity, and natural gamma. In addition, pressure, temperature, and diameter of borehole were measured. LWD/MWD data showed several evidences indicating the presence of gas hydrate. Based on LWD/MWD data, three coring sites were selected for sampling of gas hydrate. Subsequently, various gas hydrate samples were collected directly from three sites. Therefore, the presence of gas hydrates was verified by coring. LWD/MWD data will be significantly used to estimate the amount of gas hydrate. Also, they will provide important information to elucidate about sedimentologic characteristics of gas-hydrate bearing formation and sedimentary environment of the Ulleung Basin.

Keywords: gas hydrate, geophysical logging (LWD/MWD), Ulleung Basin

서론

지구물리 검층(geophysical well logging)은 일반적으로 우물 검층(well logging) 혹은 시추공검층(borehole logging) 등으로 불리어지며, 이는 시추 후 혹은 시추와 동시에 지층에 대한 여러 가지 물성(전기비저항, 밀도, 공극률, 자연감마, 속도, 자연전위 등) 등을 연속적이고 자세하게 측정하는 것을 말한다(Bryant, 1960; Segesman, 1980; Snyder and Fleming, 1985).

물리검층은 1930년대 슬럼버저에서 자연전위탐사(SP: Spontaneous Potential) 탐사를 실시한 이후 오일이나 가스 탐사, 광물탐사, 지하수탐사, 지질공학적 및 환경탐사 등 다양한 목적으로 이루어지며 최근에는 가스하이드레이트 탐사(Riedel *et al.*, 2006; Hyndman *et al.*, 1999)와 이산화탄소 지중저장을 위한 지층 탐사 및 모니터링 연구에도 이용되고 있다(Carsen *et al.*, 2001; Xue, 2007).

일반적으로 물리검층 방법은 wireline 검층으로서 검층장비를 시추공에 투입하여 하강 또는 상승하면서 장비 자체에서 공급되는 다양한 발생원(source) 즉, 전기적(electrical), 음향학적(acoustic), 방사성(radioactive) 및 전자기(electromagnetic) 등의 발생원이 매질을 통하여 수신기에 수신된 값을 해석하고 또한 매질내에 존재하는 방사능 물질의 함량 정도 등을 측정

2008년 5월 9일 접수; 2008년 8월 7일 채택

*Corresponding author

E-mail: gykim@kigam.re.kr

Address: Petroleum and Marine Resources Division, KIGAM

92 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

하여 원하는 검층값을 구하는 것을 말한다. 대부분의 물리검층 절차는 시추공의 최 하부에서부터 상부로 진행하면서 측정하는 것이 일반적이며 지층에 대한 보다 정확한 자료를 취득하기 위해서는 시추파이프내에서 실시하는 cased-hole log 보다는 시추파이프 제거 후 직접 시추공내에 검층장비를 투입하여 실시하는 open-hole log를 이용하나 이는 시추공벽의 안정성에 가장 크게 좌우된다. 이런 단점을 보완한 것으로 최근에 와서는 시추와 동시에 지층의 물성자료를 직접 획득할 수 있는 LWD (Logging While Drilling)/MWD (Measurement While Drilling)를 일반적으로 수행하며 코어링과 동시에 검층을 실시하는 방법(LWC: Logging While Coring)도 슬럼버저에 의해 개발되어 있다.

우리나라에서는 최초로 가스하이드레이트 개발사업단이 한국지질자원연구원, 한국석유공사, 한국가스공사와 공동으로 동해 울릉분지의 가스하이드레이트 부존 여부에 대한 탐사를 위해서 2007년 9월 21일부터 10월 17일까지 노르웨이의 시추선(RemEtive, 약 4300톤급)을 이용하여 LWD/MWD 탐사가 성공적으로 수행되었다. 본 논문에서는 이 기간에 수행된 물리검층에 대한 전반적인 내용에 대하여 간단하게 소개하며, 향후 이와 유사한 탐사가 실시될 경우 보다 효과적이고 능률적인 작업이 수행될 수 있도록 기초적인 자료를 제공하고자 한다. 따라서 본 조사에서 취득된 자료에 대한 구체적인 후처리 및 분석 결과는 현재 진행 중이기 때문에 향후 소개될 것이다.

LWD/MWD

동해 울릉분지에서의 LWD/MWD는 총 5개 정점(UBGH-01, UBGH-04, UBGH-14, UBGH-09, UBGH-10, Fig. 1)에 대하여 수행되었다. 이 정점들은 그동안 분석된 많은 탄성과 탐사 결과로부터 종합 해석하여 가스하이드레이트의 존재 가능

성을 가장 잘 지시해주는 탄성과적 특성(예, acoustic blanking, enhanced reflector, gas seepage, chimney/vent 등)을 고려하여 선정되었고, LWD/MWD의 깊이는 탄성과 단면을 기초로 계산한 BSR (Bottom Simulating Reflector: 해저모방반사면)의 하부 약 30~50 m까지 물리검층이 이루어져 BSR 상부층의 가스하이드레이트의 안정영역(GHSZ: gas hydrate stability zone)과 BSR 하부층에서 나타나는 자유가스(free gas) 둘 다에 대한 검층이 동시에 이루어져 BSR을 경계로 하는 상부 및 하부의 물성자료를 비교할 수 있는 귀중한 자료를 취득하였다 (Fig. 2). Fig. 2의 경우 울릉분지에서 나타나는 전형적인 탄성과 단면도(한국지질자원연구원, 2007)의 한 예로서 BSR을 경계로 상부층에는 음향공백대(acoustic blanking)가 BSR 하부에는 증폭반사면(enhanced reflector)이 잘 나타나고 있다. LWD/

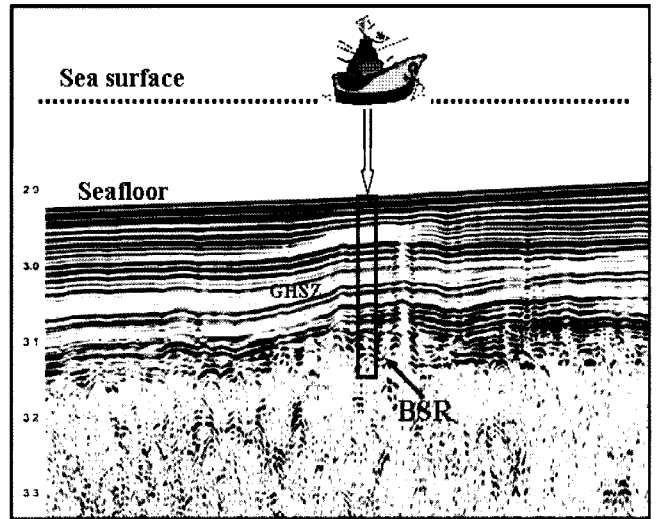


Fig. 2. A seismic section around the Ulleung Basin (KIGAM, 2007). Note clear BSR in the section. Rectangular means the logged depth by LWD. (GHSZ: gas hydrate stability zone), Vertical axis is two-way travel time.

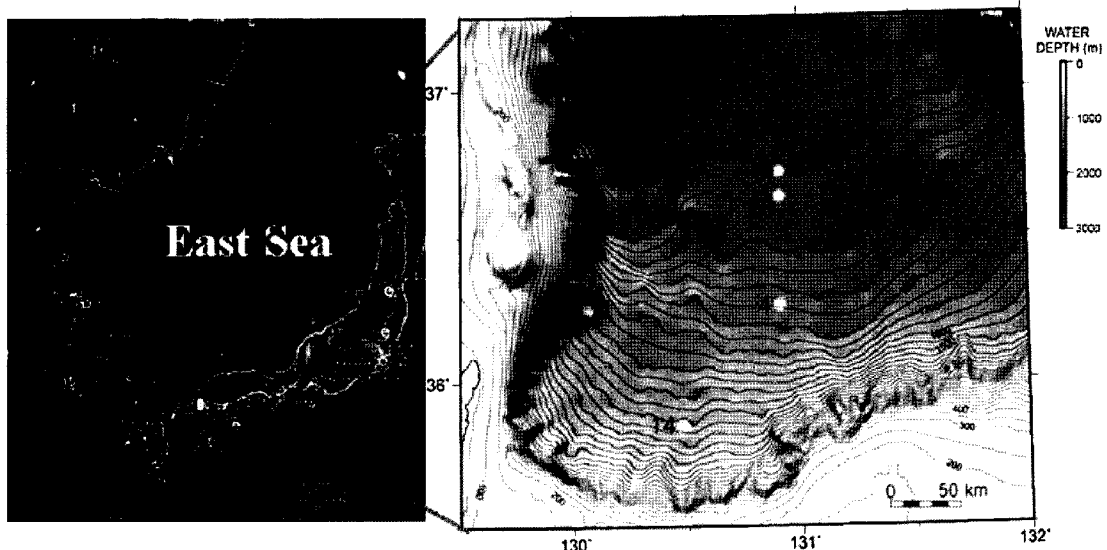


Fig. 1. Physiographic features around the study area and LWD/MWD sites.

MWD가 수행된 정점의 수심과 물리검층 깊이 그리고 물리검층이 수행된 시간과 이용된 장비 등에 대한 자세한 정보는 Table 1에 제시하였다. 그 외 각 장비에 대한 제원 및 취득 변수에 대한 자세한 내용은 슬럼프저의 홈페이지(www.slb.com)를 참고하기 바란다.

LWD/MWD는 자료의 취득형태에 따라 real-time mode와 recorded (memory) mode로 나누어진다(Fig. 3). 즉 MWD는 real-time mode로서 검층장비가 해저면 지층속으로 투입되면서 실시간으로 각각의 검층자료가 검층장비 운영실(logging unit)의 컴퓨터로 직접 전송되는 것을 말한다. 실시간 자료 전송은 PowerPulse에 의해서 시추파이프 내의 이수를 통해 압력 신호가 전기적인 신호로 전환되어 운영실의 주 저장장치에 전달되며 이는 검층과 동시에 검층자료를 직접 관찰하여 그 결과를 가장 신속하게 판단할 수 있도록 해준다. Recorded (or memory) mode는 Fig. 3과 같이 검층이 완료된 후 검층장비를 시추선위로 회수 한 다음 별도의 케이블을 통하여 자료를 컴퓨터로 전송하여 그 결과를 해석하는 시스템을 말한다.

LWD 장비는 리튬 배터리에 의해 작동되며 설치 후에는 배터리의 소모가 시작되기 시작한다. 따라서 배터리 소모가 완전히 되지 않을 때까지 검층작업이 완료되어야 자료의 손실을 방지할 수 있다. 배터리의 사용 시간은 약 100~300 시간 정도 (장비형태, 장비의 조합, 온도 등에 좌우) 가능하나 이번과 같이 수심이 깊은 경우 장비의 셋업에 걸리는 시간이 길어 소모시간을 잘 체크해야 된다. 그러나 real-time mode인 MWD

와 동시에 수행될 경우 MWD를 위한 별도의 터빈이 가동되게 되며 이때 머드펌프 (mud pump)를 이용하여 LWD에 전원을 직접 공급해 줄 수 있기 때문에 배터리의 수명시간을 장시간 연장할 수 있다. 이번 탐사에 이용된 머드펌프의 용량은 300 gpm (gallon per minute)으로 LWD 장비의 용량을 고려하여 결정되었다. 만약 더 많은 검층 장비를 연결할 경우 추가적인 머드펌프의 용량이 필요하다.

LWD/MWD를 이용한 물리검층을 위해서는 기본적으로 각 장비들을 조절하는 공간인 운영실을 우선 설치한 후 검층에 이용되는 컴퓨터를 비롯한 데이터 전송 케이블, 그리고 각종 센서를 체크하고 설치하여야 한다. 필요한 센서는 총 4개로 Signal Pressure Transducer 2개, Clampline Tensiometer 1개 및 Depth Sensor 1개로 구성되어 있다. Signal Pressure Transducer는 MWD에서 수신된 압력신호인 머드펄스(mud pulse)를 전기적인 신호로 전환하여 컴퓨터로 전송하는 역할을 하며, Clampline Tensiometer는 시추파이프의 장력을 측정하고, Geolograph는 검층되고 있는 깊이를 결정하는데 이용된다. 각종 센서의 케이블은 Junction Box로 연결되고 전선을 통하여 운영실에 최종 연결된다.

LWD/MWD의 구성은 검층항목의 목적에 따라 다르게 연결할 수 있으며 이번 탐사에서는 시추기의 비트(drill bit) 하부에서부터 GeoVision → PowerPulse → SonicVision → ADN-Vision 순으로 구성하였다. 장비의 길이 및 구성에 대한 자세한 것은 Fig. 4와 같고 연결된 장비의 총 길이는 26.72 m이다.

Table 1. General description and the tools deployed for LWD/MWD

Well name	Water depth (m)	Logged depth (m)	BSR (m)	Operating time (hr)	Tools deployed
UBGH-01	1,447	218.32	184.8	58.42	GVR6, PowerPulse6, Sonic6, ADN6
UBGH-04	1,842	224.23	194.0	61.60	"
UBGH-14	1,357	214.60	174.4	31.35	"
UBGH-09	2,101	226.90	176.9	35.26	"
UBGH-10	2,078	231.70	181.7	29.14	"

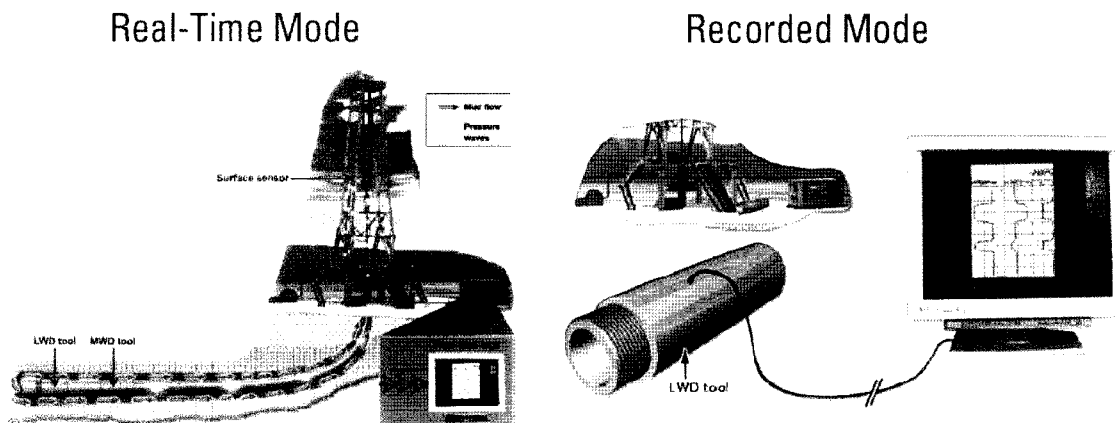


Fig. 3. Two types of LWD (by Schlumberger). LWD is composed of real-time mode (MWD) and recorded mode. Real-time mode is that the logging data is directly transferred from MWD to computer.

연결된 검층장비는 rig floor의 문풀(moon pool)을 통하여 해저로 투입되게 되며 해저면에 도달할 때까지 계속적으로 케이블을 연결하게 된다. Fig. 5는 시추선의 rig floor에서 물리검층을 위해 검층장비를 설치하여 해저로 투입하는 장면이다.

모든 장비의 설치가 완료되면 shallow hole test를 통하여 각종 센서부의 연결에 대한 최종적인 점검이 이루어지며, 그 후 neutron density/porosity를 측정하는데 필요한 R/A source인 방사능물질을 장착하게 되면 검층을 위한 준비가 완료된다. 모든 준비가 완료되면 장비가 해저면으로 하강 하게 되고(Fig. 6 좌), 해저면에 도달한 후 검층이 바로 시작되며 검층자료는 실시간으로 운영실로 전송 된다(Fig. 6우). 본 탐사에서는 ROP (Rate of Penetration)를 40 ~ 50 m/hr로 유지하였고 이때의

memory-mode 자료는 일반적으로 2 ea/ft로 취득되었다. 검층에 따른 ROP의 유지는 양질의 자료를 획득하기 위해서는 필수적이기 때문에 검층이 실시되는 동안 지속적으로 모니터 해야 된다.

취득된 검층자료

LWD/MWD를 통하여 취득된 자료는 자연감마, 공극률, 밀도, 속도, 전기비저항(deep, medium, shallow) 및 물리검층시의 지층의 온도 및 압력과 시추공의 공경(caliper)에 대한 자료 등이다. 각각의 검층변수(logging parameters)에 대한 의미 및 측정 목적 등에 대한 자세한 설명(Krygowski, 2003)은 다음과 같다.

자연감마(natural gamma)는 GeoVision에 설치되어 있고 gamma ray detector가 지층에서 들어오는 포타슘, 우라늄, 토륨 등의 함량을 측정하여 API 단위로 나타낸다. 이는 모래(혹은 사암)나 점토 (혹은 셰일)의 함량을 추정할 수 있어, 저류암의 특성을 해석하거나 지층의 퇴적환경을 유추하는데 기본적으로 이용된다. 또한 지층의 대비, 암상의 결정, 파쇄대의 조사나 혹은 기원암을 결정하는 목적으로도 이용될 수 있다. 공극률의 측정은 ADNVision에 설치되어 있는 neutron source인 Americium-Beryllium이 지층속을 통과한 후 되돌아오는 함량을 측정함으로써 공극률을 계산하는 방법이다. 이는 지층속의 공극안에 포함된 수소(hydrogen)의 함량과 역 비례하는 것으로 지층의 공극률을 알 수 있다. Neutron porosity는 속도 및 밀도자료와의 대비를 통하여 암상을 결정하거나 가스의 존재 유무 판단 및 점토함량 등을 조사하는데도 이용된다. ADN-Vision으로 조사할 수 있는 시추공 주변의 조사 직경은 약 20 cm 내외이다.

밀도도 ADNVision으로 측정되는데 에너지원으로는 세슘(Cesium¹³⁷)이 사용된다. 고에너지 감마가 지층속의 전자와의 상호 작용, 즉 콤프턴 산란 효과(Compton scattering effect)에

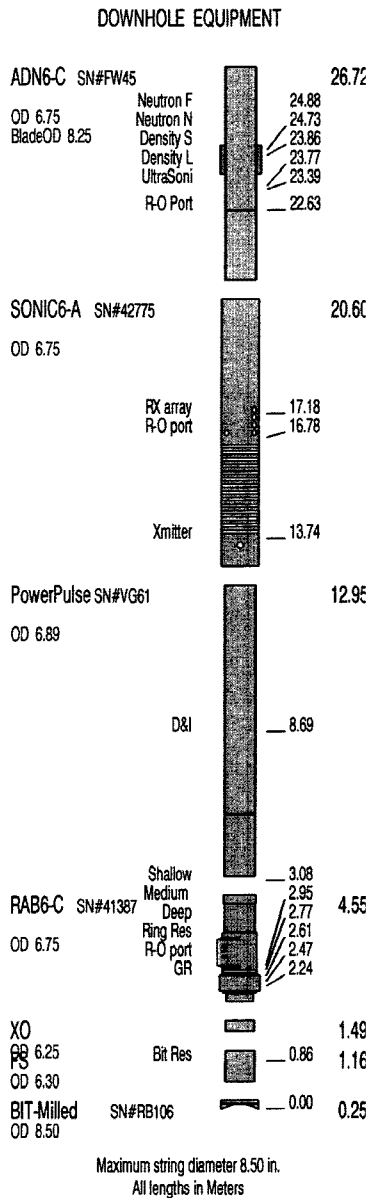


Fig. 4. Bore Hole Assembly (BHA) for LWD in this study (by Schlumberger). LWD tool is composed of Bit, Bit Sub, Crossover, GVR (RAB), PowerPulse, Sonic, and ADN in order from drill bit. Total length of tool is 26.72 m. Unit is meter.



Fig. 5. LWD tool including drill bit before entering into a hole of rig floor (left) and the tool to be deployed (right) on the rig floor.

의해 감소하게 되며(지층내의 전자 밀도에 관련), 이를 이용 밀도값을 계산하게 된다. 동시에 저에너지 감마의 광전효과(photoelectric effect)를 이용 지층의 암상을 결정하게 된다. ADNVision으로 측정된 밀도값은 공극률을 계산할 수 있으며, 속도자료와 함께 synthetic seismogram을 만드는데 이용된다. 그 외 가스의 존재유무나 점토함량을 조사하는데도 활용된다. 시추공내 밀도의 조사 직경은 수 cm 내외이다.

속도는 SonicVision으로 측정되었고 원리는 송신된 음파신호가 지층을 통과하여 다시 수신기에 도달할 때까지의 걸린 시간 즉, 델타 t (Δt)를 측정하여 속도를 계산한다. 실제 물리 검층시에는 slowness ($\mu s/ft$)로 표시되며 이 자료를 간단한 소프트웨어를 이용하여 속도로 변환하게 된다. 특히 속도 검층의 경우 시추동안에 시추장비로 인하여 발생하는 시추공 주변의 지층 교란으로 그 구조가 완화 혹은 파괴되면서 실제 지층의 속도값 보다 느린 경우가 흔하기 때문에 속도값을 해석할 시 많은 주의가 필요하다. 속도검층은 속도값의 측정뿐만 아니라 속도값을 이용한 공극률 계산, 암상의 결정, 탄성계수를 이용한 지층의 압밀특성 조사(시추공의 안정성 평가), 지층에 가해진 추가적인 압력 변화 조사(overpressured zone의 조사), 투수계수의 예측 등 다양한 해석에 이용될 수 있다. 또한 밀도자료와 함께 synthetic seismogram을 만드는데 이용되며 음향임피던스(acoustic impedance)를 계산하여 탄성과 자료와 직접 비교할 수 있는 깊이 및 시간함수로서 나타낼 수 있어 지층의 암상 변화에 따른 반사면의 해석에 이용된다. 속도검층시 시추공 주변의 조사 직경은 약 15 cm 내외이다.

전기비저항은 GeoVision에 의해 측정되었다. 전기비저항의 측정은 Fig. 7과 같이 송신코일(transmitter coil)에서 지층속으로 교류전류(alternating current)를 보내면 수신코일(receiver coil)은 지층에서의 전기적인 반응의 결과 전기신호의 크기(magnitude) 및 상(phase)을 감지하여 기록하게 된다. 이는 지층의 전도도(conductivity: the inverse of resistivity)에 비례하

여 반응하므로 높은 전도도를 갖는 전도체는 낮은 전기비저항 값을 가지게 된다. 이번에 측정된 전기비저항은 three buttons (deep, medium, shallow)와 ring 및 bit resistivity가 측정되었고, 이를 이용하여 GVR image를 작성하였다. 특히 가장 하부에 부착되어 있는 bit resistivity는 검층중에 발생할 수 있는 지층 내에서의 갑작스런 변화에 대한 정보를 가장 신속하게 제공해 준다. 전기비저항 검층의 목적은 지층의 true resistivity 측정, Archie 관계식을 사용한 유체포화도 계산과 geopressure (overpressure)의 조사, 검층으로 인한 시추공 주변의 영향반경, 그리고 지층의 대비 등이다. 이번 물리검층자료에서 취득한 전기비저항 자료의 경우 수평적 측정범위와 수직적인 해상도는 Table 2에 제시한 것과 같다. Table 2에서 보면 bit resistivity가 시추공 주변의 가장 넓은 측정범위(약 82 cm)를 보이는 반

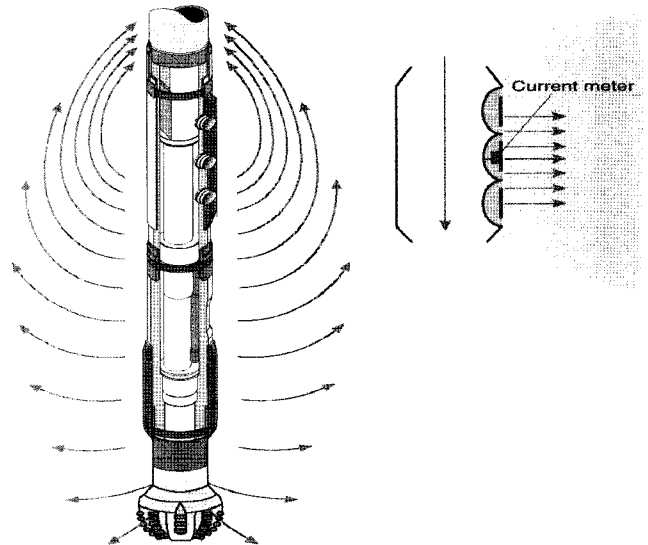


Fig. 7. Cartoon showing resistivity measurement (three buttons, ring, bit resistivity) using GeoVision (by Schlumberger). Arrows show inducing alternating current. Note three buttons and ring in the wall of the tool.

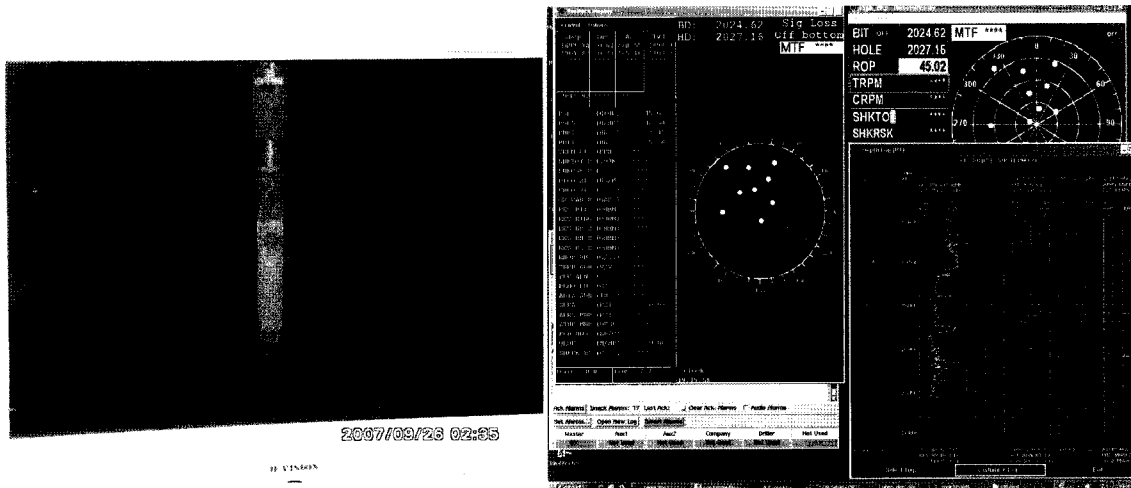


Fig. 6. LWD tool (left) in the water column and the logged data transferred from MWD (right).

면 shallow resistivity가 가장 좁은 범위(27 ~ 40 cm)를 보인다. 따라서 시추공 주변의 지층에 대한 정확한 전기비저항 값인 true resistivity를 예측하기 위해서는 시추동안에 영향을 받지 않는 범위의 uninvasion zone의 deep resistivity와 영향을 가장 많이 받는 flushed zone의 shallow resistivity 값을 서로 잘 비교하여 해석하여야 한다.

시추공의 공경검층에 대한 자료는 검층자료의 품질(quality)을 지시하는 것으로 시추공 환경을 해석하는데 필수적이다. 이번에 실시된 LWD/MWD에서의 공경검층자료를 보면 몇 군데의 경우 검층도중에 wash out에 의해 시추공이 확장된 형태(enlarged hole)를 보여주는 것을 제외하고는 비교적 큰 변화 없이 일정한 공경을 보여주어 자료의 신뢰도가 인정된다고 할 수 있다.

결과 및 토의

이번 가스하이드레이트 탐사를 위해 수행된 LWD/MWD에 대한 종합적인 연구결과는 향후 자료 분석을 통하여 계속 발

Table 2. Diameters of investigation and vertical resolution of resistivity (R_t =resistivity of uninvasion zone (true resistivity), R_{xo} : resistivity of flushed zone)

	Diameter of investigation (cm)		Vertical resolution (cm)	Remarks
	$R_t/R_{xo}=10$	$R_t/R_{xo}=0.1$		
R_{BIT}	81.28	81.28	30.48 ~ 60.96	Bit resistivity
R_{RING}	55.88	63.50	7.62 ~ 10.16	Ring Resistivity
R_{BD}	48.26	60.96	5.08 ~ 7.62	Deep button
R_{BM}	38.10	53.34	5.08 ~ 7.62	Medium button
R_{BS}	27.94	40.64	5.08 ~ 7.62	Shallow button

표될 것이다. 본 논문에서는 단지 동해 울릉분지에서 최초로 실시된 이러한 탐사를 간단한 결과와 함께 논문을 통하여 공식적으로 발표함으로써 관심 있는 여러 분야 전문가들에게 정보를 제공하고자 하는데 의의가 있다. 따라서 연구결과에 대한 내용은 간단하게만 소개하고자 한다.

상기에서 설명한 바와 같이 이번 물리검층은 시추와 동시에 검층자료를 전송받아 그 결과를 직접 관찰하는 real-time mode (MWD)와 메모리에 저장 후 검층 장비를 회수한 후 그 결과를 해석하는 memory mode 방법으로 수행되었다. 이번 탐사에서는 우선 MWD의 real-time mode에서 전송되어오는 자료를 체크하여 지층내에 존재하는 가스나 가스하이드레이트의 부존가능성을 조사하였고, 존재할 경우 그 구간에서는 ROP를 적절히 조절하여 양질의 자료를 취득할 수 있도록 하는 등 물리검층 중 발생할 수 있는 예기치 못한 문제로 인한 자료의 불확실성을 신속하게 해결하고 보완 하도록 MWD를 최대한 활용하였다. 다만 real-time mode는 recorded (memory) mode보다는 획득되는 자료의 수가 부족(1 ca/ft)하기 때문에 해상도가 낮은 게 단점이다. 그러나 본 논문에서 그 결과를 직접 제시하지는 않지만 real-time 자료와 recorded mode 자료의 전반적인 결과를 비교해 보면 아주 유사한 값을 보여주어 MWD에 의한 물리검층자료도 신뢰할 수 있는 것으로 확인되었다. 다만 가스하이드레이트를 함유하는 지층의 두께가 얇거나 암상의 변화가 많은 두께를 가지고 빈번하게 변할 경우는 각 지층을 모두 반영하는 결과를 제시할 수는 없을 것으로 본다. 따라서 최종적인 해석을 위해서는 recorded mode로 취득된 물리검층 자료를 이용하여 해석하는 것이 바람직하며, 이번조사 결과를 발표하는 모든 자료도 recorded mode에서 측정된 자료임을 밝힌다.

울릉분지에서 이번에 실시된 물리검층자료를 보면 기존의

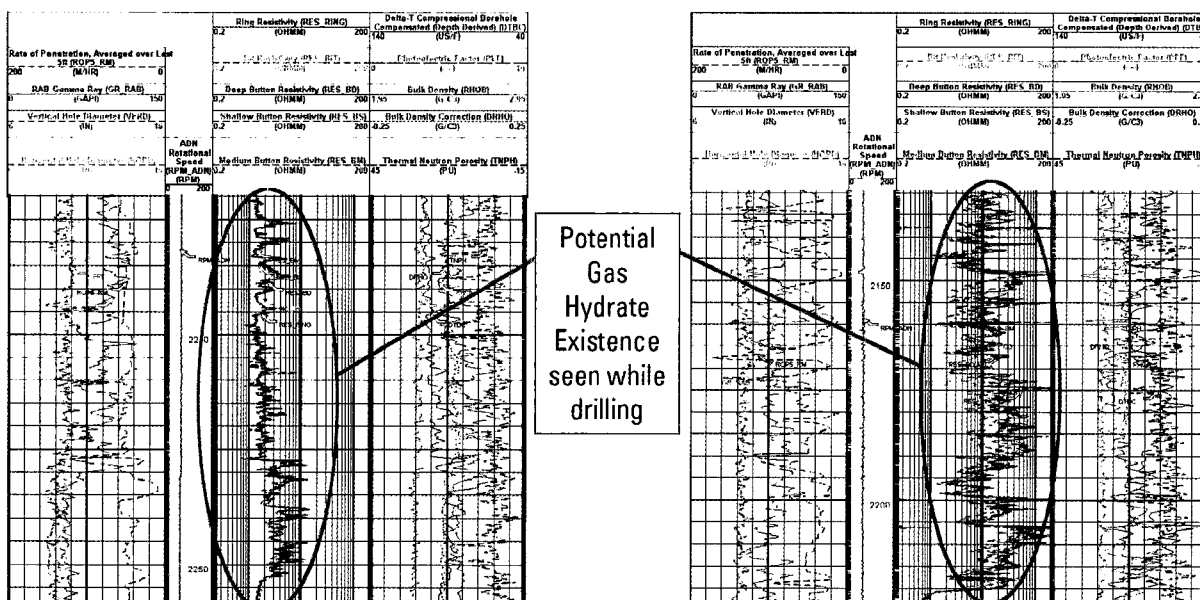


Fig. 8. LWD data at UBGH-09 and UBGH-10. Note high resistivity value in a oval circle.

미고결된 퇴적물에 대해 발표된 결과와는 뚜렷이 다른 값을 보여준다. 특히 동해 야마토 분지와 일본분지에서 본 탐사 깊이와 유사한 퇴적층 깊이에서 취득된 ODP (Ocean Drilling Program) Leg 127/128의 결과(Kim *et al.*, 2007)와 비교하면 아주 높은 전기비저항값은 물론 높은 속도값에 해당한다. 물론 이러한 값은 타 지역의 미고결 퇴적층에서의 값과도 현저히 다른 값이다. 한 예로 UBGH-10의 경우 전기비저항값이 가장 높은 구간은 80 ohm-m 이상이며 속도값도 2000 m/s까지 이른다. 이는 Kim *et al.* (2007)의 실험실 측정 결과인 0.8 ohm-m의 전기비저항값과 1550 m/s의 속도값과는 비교될 수 없을 정도의 높은 값이다. 또한 가스하이드레이트 탐사를 목적으로 수행된 Cascadia margin (Riedel *et al.*, 2006)과 Nankai Trough (Matsumoto, 2004)와의 결과와도 그 차이가 크다. Fig. 8은 이번 탐사중에서 취득된 UBGH-09와 UBGH-10의 검

층자료의 일부로 높은 비저항값을 보여주는 구간은 가스하이드레이트의 부존 가능성을 강하게 지시하는 값이다. Fig. 8의 그림에서와 같이 깊이별 비저항값의 변화가 심하게 나타나는 것은 가스하이드레이트가 퇴적층 전 구간에 균일하게 존재하기 보다는 층내 틈새의 일부 공간에 맥상 혹은 얇은 층상으로 산재해서 분포할 것으로 사료되나 더 정확한 것은 물리검층자료와 실제 코어 시추자료를 비교 검토하여야 정확한 해석이 가능할 것으로 본다. Fig. 9는 UBGH-10에서 취득된 전기비저항 자료를 이용하여 작성된 GVR image로 밝은 색(light color)을 띠는 부분이 높은 전기비저항값을 보여주는 것으로 가스하이드레이트의 존재를 강하게 지시하는 구간이다. 이번 LWD/MWD 이후 물리 검층 자료를 기초로 선정된 가스하이드레이트 채취 정점에서도 물리검층 자료에서 높은 비저항값을 보여주었던 동일한 구간에서 다양한 종류의 가스하이드레이트를

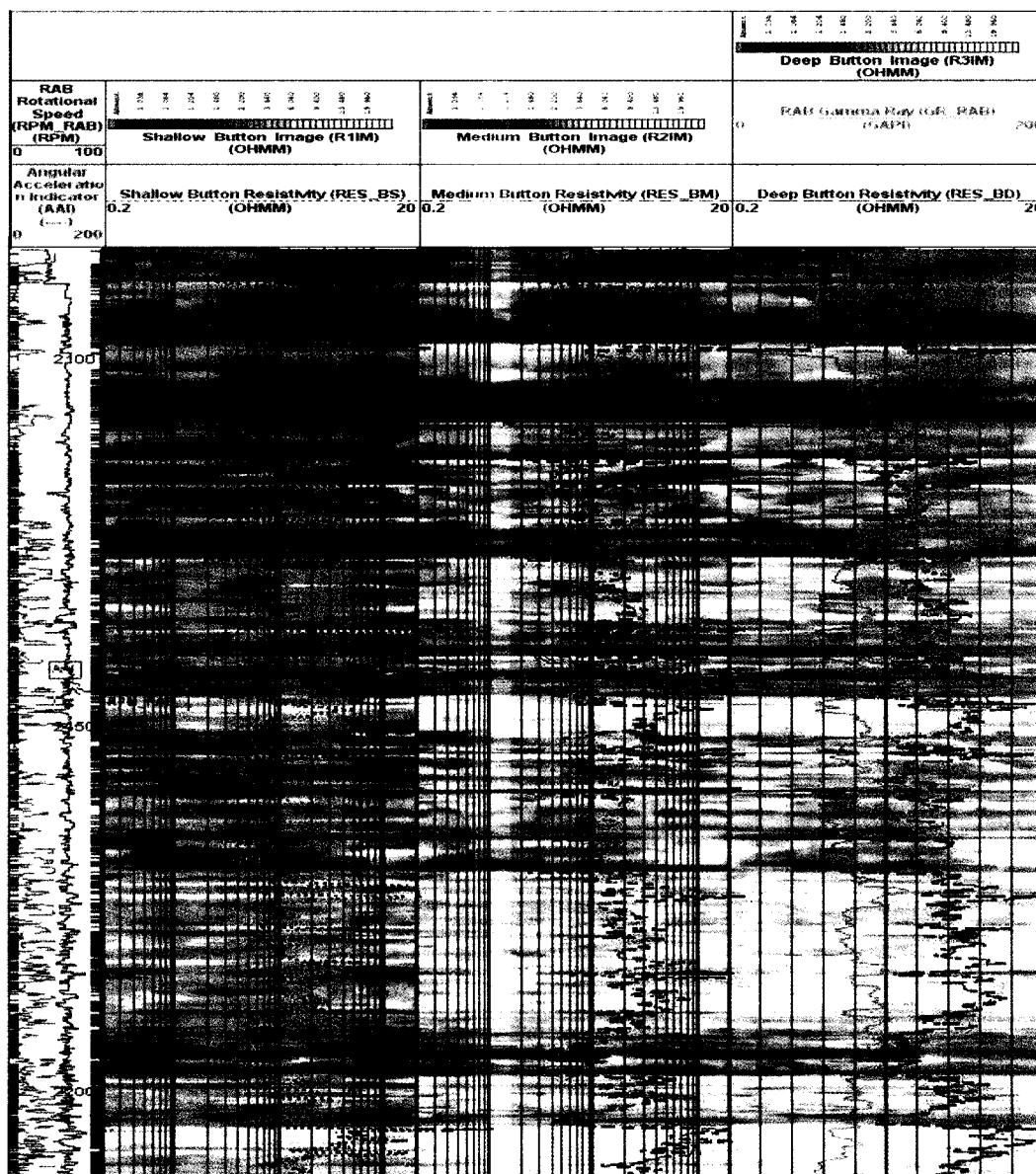


Fig. 9. GVR images (shallow, medium, deep resistivity, gamma ray) over the hydrate intervals (UBGH-10). Note light color at hydrate-bearing intervals.

직접 채취하는데 성공하였다.

본 탐사에서 이용된 LWD/MWD는 기존의 여러 가스하이드레이트 탐사에서도 항상 이용되었듯이 다양하고 유익한 정보를 제공하였음은 물론 양질의 자료를 취득하는데 효과적인 방법이었다고 볼 수 있다. 즉 시추공의 불안정성(instability)과 무관하게 시추와 동시에 연속적인 검층자료를 취득할 수 있었고 불필요하게 발생할 수 있는 시간의 지연이 없었을 뿐만 아니라 실시간으로 자유가스의 존재확인도 물론 BSR의 깊이와 가스하이드레이트 부존구간을 단시간에 결정할 수 있었다. 이러한 장점은 시추공을 이용하여야만 실시 가능한 wireline 검층과의 차이점이라고 볼 수 있다. 그러나 일반적인 물리검층과는 달리 검층 깊이가 미고결 퇴적물에 국한되어 실시되어 퇴적물의 밀도와 구조에 주로 영향을 받는 속도검층은 자료 취득 후 별도의 후처리 과정이 필요하다는 문제점이 제기되었을 뿐만 아니라 후처리된 속도값도 일반적인 wireline의 속도값보다는 신뢰성에 문제가 제기되기도 하였다. 따라서 향후의 속도검층에서는 후처리 없이 자료를 직접 취득하여 현장에서 속도값의 특성을 신속하게 파악할 수 있는 방법으로 개선되어야 할 것으로 보며 또한 자료의 신뢰도 측면에서도 더 많은 보완이 필요할 것으로 본다.

결 론

국내에서는 처음으로 가스하이드레이트 탐사를 위하여 LWD/MWD를 이용한 물리검층이 동해 울릉분지의 5개 정점에 대하여 수행되었다. 물리검층 장비는 슬럼버저사에서 제작한 검층장비가 이용되었고 노르웨이 선박인 RemEtime에서 실시되었다. 물리검층 결과 동해 울릉분지에서 가스하이드레이트의 부존가능성을 강하게 시사하는 특징적인 값을 보여주었고, 검층에서 취득된 자료들은 가스하이드레이트를 채취하기 위한 시추정점을 선정하는데 이용되었으며 그 이후 실시된 실제 시추에서 다양한 종류의 가스하이드레이트를 직접 채취하는데 성공하였다. 금번 가스하이드레이트 탐사와 관련한 물리검층을 성공적으로 수행함으로써 국내의 관련 전문가들이 물리검층에 대한 기술과 정보를 확보할 수 있게 되어 이와 유사한 향후의 연구 및 탐사시에 필요한 노하우를 확보할 수 있게 되었다. 물리검층으로부터 취득한 이번 자료들은 현재 분석 중

에 있으며 향후 울릉분지의 가스하이드레이트 매장량의 계산과 가스하이드레이트 함유 지층의 퇴적학적인 해석은 물론 이 지역의 퇴적환경을 연구하기 위한 귀중한 자료로 활용될 것이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 “가스하이드레이트지구물리탐사연구”의 일환으로 수행되었다. LWD/MWD 탐사 동안에 도움을 주신 한국석유공사, 한국가스공사, 한국지질자원연구원 소속 관련 분들에게 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 한국지질자원연구원, 2007, 가스하이드레이트 지구물리탐사연구, 1단계 최종보고서, 649p.
- Bryant, H. L., 1960, Production well logging techniques, *Geophys.*, **XXV**, 905-927.
- Carsen, I. M., Mjaaland, S., and Nyhavn, F., 2001, Monitoring well scenarios, *SINTEF Report*, Norway, 43p.
- Hyndman, R. D., Yuan, T., and Morgan, K., 1999, The concentration of deep sea gas hydrates from downhole electrical resistivity logs and laboratory data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **172**, 167-177.
- Kim, G. Y., Yoo, D. G., Lee, H. Y., Lee, Y. J., and Kim, D. C., 2007, The relationship between silica diagenesis and physical properties in the East/Japan Sea: ODP Legs 127/128, *J. Asian Earth Sci.*, **30**, 448-456.
- Krygowski, 2003, Guide to petrophysical interpretation, Austin, Texas USA, 147p.
- Riedel, M., Novosel, I., Spence, G. D., Hyndman, R. D., Chapman, R. N., Solem, R. C., and Lewis, T., 2006, Geophysical and geochemical signatures associated with gas hydrate related venting in the northern Cascadia margin, *GSA Bull.*, **118**, 23-38.
- Segesman, F. F., 1980, Well-logging method, *Geophys.*, **45**, 1667-1684.
- Snyder, D. D. and Fleming, D. B., 1985, Well logging-A 25 year perspective, *Geophys.*, **50**, 2504-2029.
- Xue, Z., 2007, Geophysical monitoring of CO₂ sequestration in saline aquifer: Lessons from the Nagaoka pilot scale project, *RITE CCS Workshop*.