

## CO<sub>2</sub> 가스 기포 누출 탐지 기술 개발을 위한 예비 연구

금병철<sup>†</sup> · 조진형<sup>1</sup> · 신동혁<sup>2</sup>

(Received September 25, 2014 ; Revised October 21, 2014 ; Accepted November 7, 2014)

### A preliminary study on the development of detection techniques for CO<sub>2</sub> gas bubble plumes

Byung-Cheol Kum<sup>†</sup> · Jin Hyung Cho<sup>1</sup> · Dong-Hyeok Shin<sup>2</sup>

**요약:** CO<sub>2</sub> 가스 기포 탐지 기술 개발을 위한 예비연구로 인위적으로 발생시킨 수층의 CO<sub>2</sub> 가스 기포 플룸을 다중빔음향측심기, 단일빔음향측심기 그리고 천부지층탐사기(SBP)를 이용해서 탐지·비교하였다. 인위적으로 발생시킨 기포의 상승속도는 가스 탱크에서 압축된 가스의 강제적인 누출이 영향을 미쳐 기존 자료보다 높게 나타나는 것으로 판단된다. 다중빔음향측심기는 단일빔 음향장비에 비하여 넓은 범위를 탐지할 수 있고 가스 누출 위치 및 수층에서 가스 플룸의 3차원적인 정보를 제공하고 있다. 따라서 다중빔음향측심기는 단일빔의 음향장비 보다 더 뚜렷한 가스 플룸을 탐지할 수 있으나, 상호보완적으로 동시에 운영하면 보다 효과적인 탐지기술을 확립할 수 있다. 향후, 본 연구는 특정가스의 음향학적 특징을 파악하여 정량적, 정성적 탐지 기술 향상에 기여하고자 한다.

**주제어:** CO<sub>2</sub> 가스 기포, 플룸 탐지, 수층 내 영상, 다중빔음향측심기

**Abstract:** As a preliminary study for detection techniques of CO<sub>2</sub> gas bubble plumes, we have conducted a comparative experiment on artificially generated CO<sub>2</sub> gas bubbles plume by using multibeam echosounder (MBES), single beam echosounder (SBES), and sub-bottom profiler (SBP). The rising speed of artificial gas bubbles is higher than references because of compulsory release of compressed gas in the tank. Compared to single beam acoustic equipments, the MBES detects wide swath coverage. It provides exact determination of the source position and 3D information on the gas bubble plumes in the water column. Therefore, it is shown that MBES can distinctly detect gas bubble plumes compared to single beam acoustic equipments. We can establish more effective complementary detection technique by simultaneous operation of MBES and SBES. Consequently, it contributes to improve qualitative and quantitative detection techniques by understanding the acoustic characteristics of the specific gas bubbles.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> gas bubble, Plume detection, Water column image, Multibeam echosounder

## 1. 서론

일반적으로 음파신호가 광학신호(optical signal) 보다 수중 전달시 매우 효과적이기 때문에 소나(sonar)는 해양에서 많은 잠재력을 가지고 있다. 과거 단일빔음향측심기는 수심조사 이외에 잠수함, 고기떼, 또는 가스 기포 와 같은 수층에 있는 물체의 원격탐지 방법으로 이용되었다[1][2]. 그 이후 고정밀 위치 정보 시스템과 다중빔음향측심기술이 발달함에 따라 해저면 자료와 동시에 수층 내 영상(water column image; WCI) 자료를 취득 할 수 있게 되었고 이 기술은 어업[3], 기뢰 탐지[4], 그리고 가스 누출 탐지[5][6] 등에 적용되고 있으며 더 나아가 장애물 회피, 생체음향학 조사,

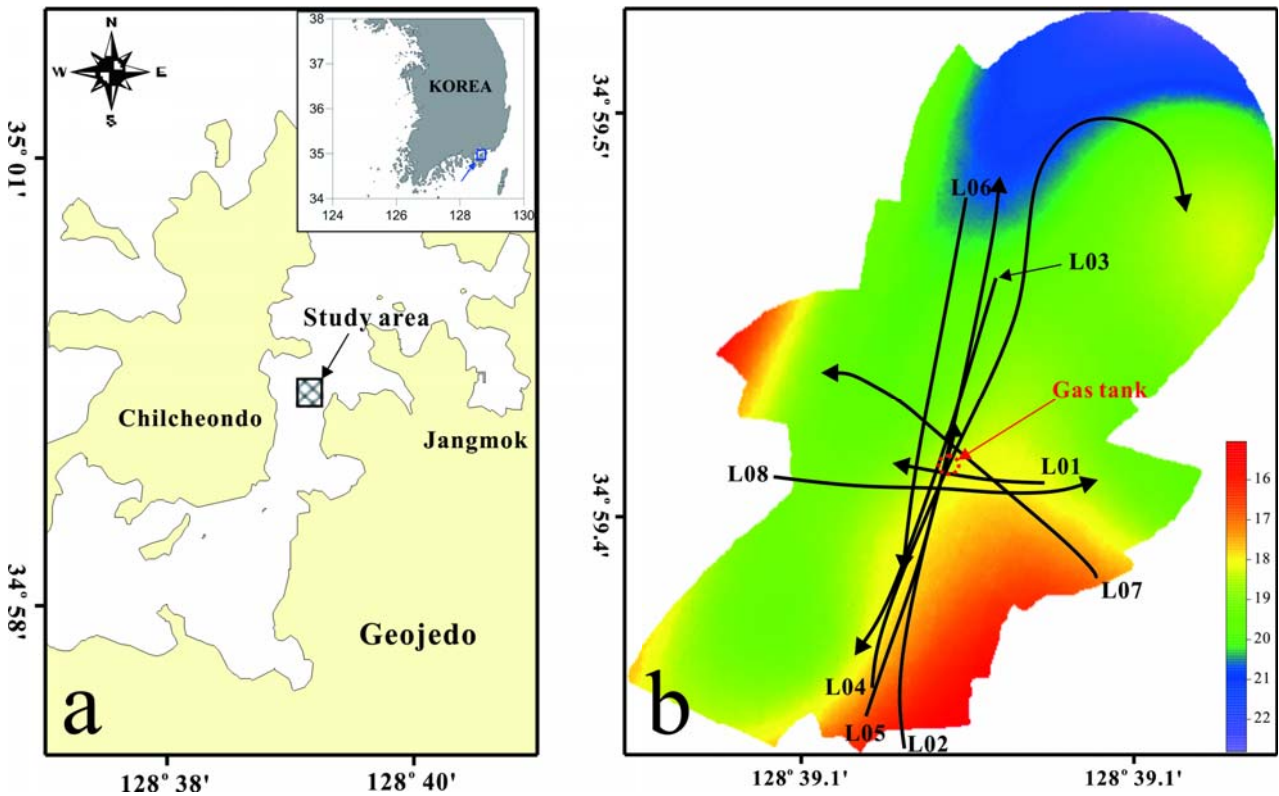
연안 항해 안전에 이용되고 있다[3][7].

천부가스는 일반적으로 해저면에서 수층으로 분출되고 이런 분출은 모든 대륙붕, 하구 그리고 강 삼각주 등 전 세계적으로 발생하고 있으며[8], 우리나라 역시 세립질 퇴적물이 분포하는 연안해역과 동해 울릉분지 사면에 천부가스 존재 가능성이 높다[9]. 또한 천부가스인 메탄은 지구온난화에 크게 영향을 미치는 매우 강한 온실가스이지만 해저면에서 분출되는 천부가스의 양에 대해서 잘 알려지지 않다[10]. 또한, 현재 지구온난화를 위한 온실가스 대량 감축 기술의 하나인 이산화탄소 포집 및 저장기술(Carbon dioxide Capture and Storage; CCS) 중 ‘해저 지질구조 내 CO<sub>2</sub> 저

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1379-2476>): Maritime Security Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, 787 Haeanro, Ansan 426-744 Korea, E-mail: bckum@kiost.ac, Tel: 031-400-6256

<sup>1</sup> Maritime Security Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, E-mail: jcho@kiost.ac, Tel: 031-400-6193

<sup>2</sup> Maritime Security Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, E-mail: dhshin@kiost.ac, Tel: 031-400-6260



**Figure 1.** The map shows as plume detecting point (a) and bathymetry (b) of study area located between Geojedo and Chilcheondo, South Sea of Korea. Figure b shows track lines (solid lines) and ship heading (filled arrow) at the vicinity of artificial CO<sub>2</sub> gas bubble generation tank.

**Table 1.** Vessel speed and heading of survey lines for detecting of CO<sub>2</sub> gas bubble plumes.

Line No.	Vessel Speed (knot)	Heading (°)
L01	2.3	270
L02	0.5~1.7	10
L03	4.0	200
L04	2.0	20
L05	10.0	20
L06	4.4	200
L07	4.5	315
L08	3.2	90

장기술(혹은 CO<sub>2</sub> 해양지중저장기술)에 대한 연구가 진행되고 있다[11]. 이 기술과 관련하여 가스 주입과정 또는 해저 지질구조 내 가스를 저장 한 후 가스 누출에 대한 탐지 기술은 이산화탄소 및 천부가스가 누출시 물리, 화학적 해양환경 또는 생태계에 미치는 영향이 매우 큼에 따라서 중요성이 강조되고 있다[12]. 따라서 이산화탄소 가스 누출 탐지 기술 개발의 일환으로 수층 내 영상 자료를 획득할 수 있는 다중빔음향측심기와 전통적으로 가스 누출을 탐지 해온 단일빔인 음향측심기와 천부지층탐사기를 동시에 운

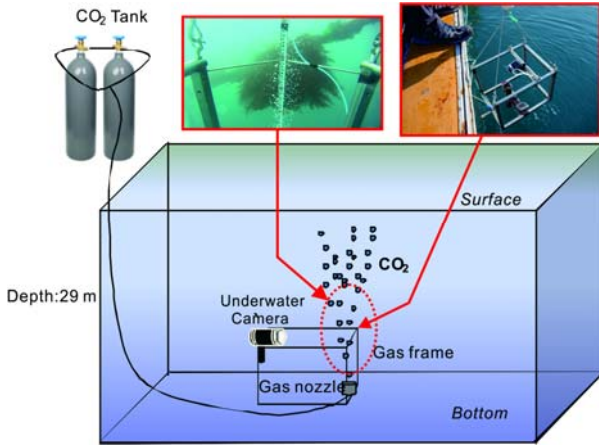
영, 자료를 취득함으로써 탐지 능력을 비교하고 보다 향상된 탐지기법 개발에 활용하고자 한다.

## 2. 자료취득 및 처리

2013년 9월 13일, 수심 15~22 m 범위의 남해 거제도과 칠천도 사이 수로 지역에서 비교실험을 실시하였다(Figure 1). 자연 상태에서 분출하는 천부가스나 이산화탄소 가스는 해역의 환경특성에 따라 장소, 분출강도가 다르게 나타나기 때문에 균질하고 연속적인 가스 플룸을 형성하기 위해서 인위적으로 가스를 발생시켰다.

실험은 가스통에 에어스톤을 연결하고 수심 20 m인 중앙지점 해저면에 설치, 가스 플룸이 발생하도록 하였다. 그 후, 한국해양과학기술원 조사선인 장목1호에 장착되어 있는 단일빔음향측심기, 천부지층탐사기 그리고 다중빔음향측심기를 동시에 운영, 가스 플룸이 올라오는 지점을 중심으로 선속과 방향을 다르게 하면서 가스 플룸 탐지 비교 실험을 실시하였다(Table 1). 조사시 수온은 25.5 °C, 염분, 32.2 ‰ 그리고 음속은 1532.6 m/s를 나타내고 조사시간 동안의 조류는 창조류인 남서류를 보이고 있다.

일반적으로 물속에 존재하는 가스 기포는 물과 가스 사이에 음속과 밀도의 차이, 기포 크기, 주파수 그리고 수심 등에 의해 제어되어 다양한 음향학적 특징을 나타내고



**Figure 2.** Schematic diagram for estimating rising speeds and diameters of CO<sub>2</sub> gas bubble. Video camera and scale bar are deployed on the frame to measure bubble sizes and rising speeds.

있다[13]. 그러나 이번 실험은 짧은 시간(1시간)과 동일한 장소에서 실시하였으므로 음향학적 조건이 같다는 가정 하에 실험을 실시하였다.

### 2.1 CO<sub>2</sub> 가스 기포 크기 및 상승속도 실험

인위적으로 가스 기포를 분출시킴에 따라 자연적으로 발생하는 기포의 크기와 상승속도와 다를 것으로 보여 2013년 2월 20일에 통영 바다목장에서 인위적으로 발생시킨 가스의 기포 크기와 상승속도를 측정하였다. 실험은 프레임에 가스 노즐과 수중카메라(Sony HDR-AS30V; 60 fps)를 설치하여 수심 5 m, 10 m, 20 m 깊이에서 30~60 psi 압력으로 가스를 분출시킨 후, 수중카메라로 동영상 촬영하였다. 그리고 저장된 동영상 프레임에서 기포의 크기 중 대표적으로 직경 3 mm, 6 mm에 대한 상승속도를 계산하였다 (Figure 2). 이때 수온과 염분은 수직적으로 균일하게 10.2~10.3 °C와 34.3 ‰를 각각 나타내고 있다.

### 2.2 장비 제원

가스 누출 탐지방법을 비교하기 위해서 조사선 장목1호에 장착되어 있는 단일빔음향측심기, 천부지층탐사기 그리고 다중빔음향측심기에 대한 제원(Table 2)은 다음과 같다.

단일빔음향측심기: 이 장비는 Kongsberg Maritime사의 단일빔음향측심기인 EA 400으로 두 개의 주파수대역 38 kHz와 210 kHz를 동시에 사용가능하다. EA 400은 모니터를 통해 실시간으로 수심 및 해저면을 관측 할 수 있으며 위경도 좌표값과 수심이 RAW 파일 형태로 저장된다. Ping rate는 최대 20 Hz까지 가능하며 수심 해상도(resolution)는 1 cm이다. 정확도(accuracy)는 음파보정, transducer 깊이 그리고 가장 짧은 pulse length로 가정할 때 210 kHz는 1 cm, 38 kHz는 5 cm를 각각 나타내고 있다[14][15].

천부지층탐사기: 이 장비는 Teledyne Benthos사의 모델 Datasonics CAP-6600 II Acoustic Profiling System으로써, 주

**Table 2.** Specifications of research equipments mounted on research vessel, Jangmok No.1.

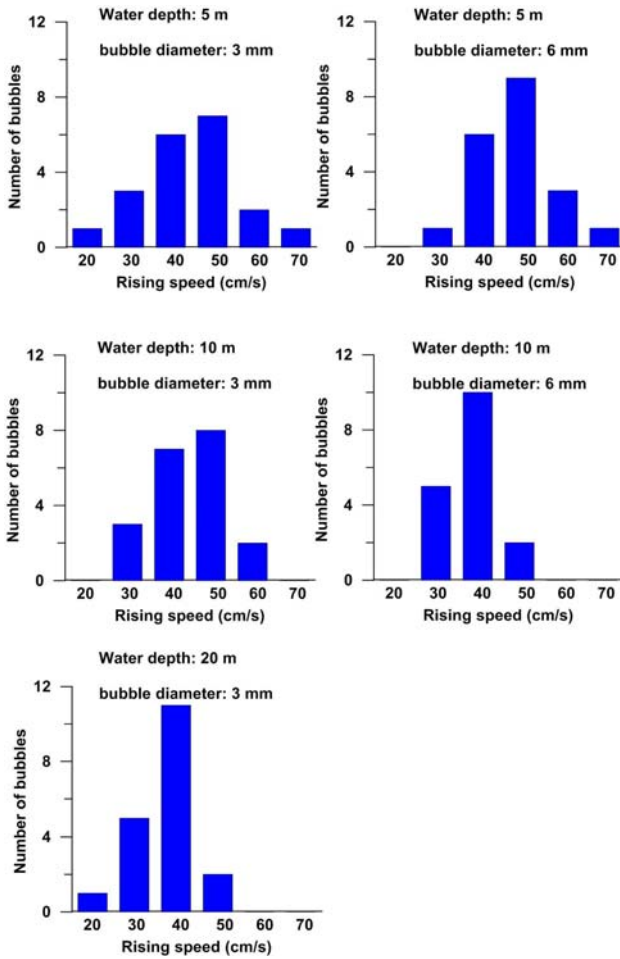
Single beam echosounder (EA 400)	Frequency	38 kHz, 210 kHz
	Ping rate	Max. 20 pr. second
	Resolution	1 cm
SBP	Accuracy	210 kHz: 1 cm 38 kHz: 5 cm
	Frequency	2 ~ 7 kHz (3.5 kHz)
	Operating depth	600 m
Multibeam echosounder (EM 3002)	trigger rate	0.25 s
	Frequency	300 kHz (293, 300, 307 kHz)
	Ping rate	Max. 40 Hz
	pulse length	150 μs
	Angular coverage	130 degree
	Depth resolution	1 cm
	Transducer geometry	Mills cross
Beam No.	160	

파수 대역은 3.5 kHz이다[16]. 최근 천부지층탐사분야에서 수 kHz 대의 대역폭을 가진 다중주파수 음원을 사용한 Chirp II Acoustic Profiling 시스템과 같은 천부지층탐사장비가 많이 사용되고 있다. 현장조사에서는 발파간격을 0.25 s의 등시간 간격으로 하였고 16 bits의 해상도를 가지는 기록장치를 이용하여 약 50 m의 조사심도에 대한 정보를 얻기 위해서 62.5 ms 동안 자료를 기록하였으며 각 ping 당 2,048개의 데이터를 취득하였다.

다중빔음향측심기: Kongsberg Maritime사의 EM 3002를 이용하였다. 주파수는 300 kHz 대역(293, 300, 307 kHz)으로서 ping rate는 최대 40 Hz까지 가능하며 ping당 빔수는 160개이다. 조사 가능한 수심범위는 1~150 m로서 최대 swath width는 200 m 이다. transducer geometry는 Mills Cross 형태이고 빔폭(beamwidth)은 1.5°×1.5°, pulse length는 0.15 ms 이다[17]. 이번 실험을 위해서 EM 3002에 추가적으로 수층내 영상(WCI) 자료를 획득, 저장할 수 있도록 업그레이드를 실시하였다.

### 2.3 자료처리 프로그램

단일빔음향측심기, 천부지층탐사기 그리고 다중빔음향측심기를 통해 획득한 수층 자료는 QPS사의 FMMidwater 프로그램을 이용해서 처리하였다. 이 프로그램은 소나(sonar) 파일에서 적절한 수층 형태를 추출할 수 있도록 디자인된 프로그램으로서 Kongsberg Maritime사의 All/WCD/RAW/EK5 파일과 SEG Y (.seg, .sgy, segy) 파일을 더 많은 자료처리와 시각화를 위해서 Generic Water Column (GWC) 포맷으로 변



**Figure 3.** Histogram of relationship between number of bubbles and rising speed of CO<sub>2</sub> gas bubbles, in case of 3 mm and 6 mm diameters at water depth 5 m, 10 m, and 15 m, respectively.

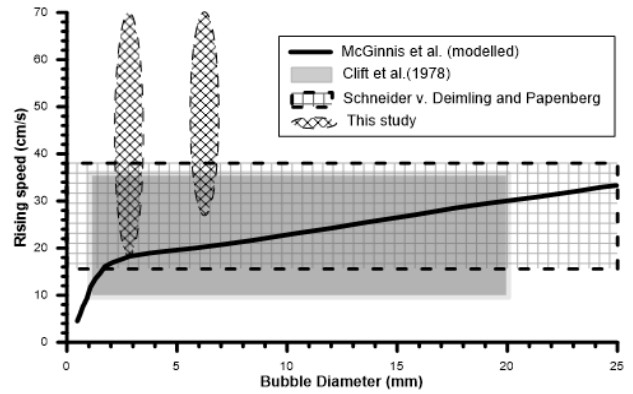
환시킨 후, 다양한 변수의 임계 필터링을 통해서 수층 물체를 추출한다. 또한 추출된 수층 물체를 다양한 각도에서 볼 수 있게 Fledermaus 시각화 객체들로 만들 수가 있다[18].

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 CO<sub>2</sub> 가스 기포의 크기 및 상승속도

인위적으로 발생시킨 이산화탄소 가스 기포의 크기와 상승속도를 측정하기 위해서 각 수심별(5 m, 10 m, 20 m) 기포 상승 동영상을 촬영하였다. 동영상 자료는 동영상 처리 프로그램(Vegas Pro; Sony)을 이용해서 다양한 기포 크기 분포 중 대표적인 3 mm와 6 mm 직경인 기포들에 대한 상승속도를 각각 계산하였다(Figure 3).

수심 5 m에서 3 mm 직경을 가진 기포의 상승속도는 20~70 cm/s의 범위 내에서 50 cm/s가 우세하게 나타나고 있으며, 직경 6 mm 기포의 상승속도는 30~70 cm/s의 범위에서 50 cm/s가 우세하게 나타나고 있다. 수심 10 m의 경우, 가스 기포의 크기가 3 mm일 때 30~60 cm/s의 범위에서 40,



**Figure 4.** Compiled data of rising speed against bubbles size (modified from Greinert *et al.* 2006 [6])

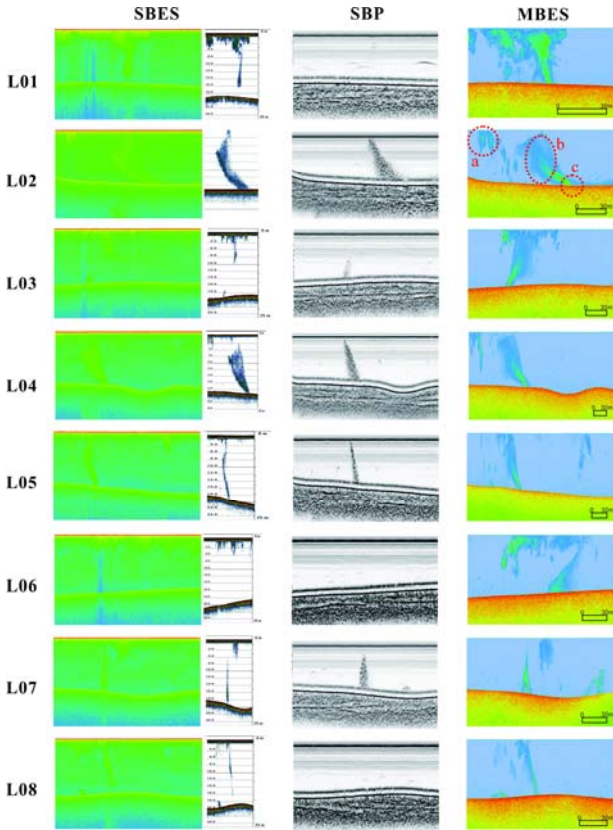
50 cm/s가 우세하며 6 mm 직경의 기포는 30~50 cm/s 범위에서 40 cm/s가 우세하게 나타나고 있다. 20 m 수심에서는 기포의 크기가 3 mm로 균일하게 형성되었으며 상승속도는 40 cm/s가 우세하게 나타내고 있다.

자연적인 가스 누출은 minor와 major 가스 누출로 구분되는데, minor 가스 누출은 각각의 기포 또는 크기 스펙트럼이 좁은 가우시안(Gaussian) 분포를 보이는 기포 그룹을 의미한다[19]. 수심 1,000 m 이상에서 전형적인 기포의 크기는 대략 ~5 mm를 나타내며[19]-[21] 가스 기포의 부력에 의한 종단속도(terminal velocity)는 1~20 mm 크기의 기포일 경우 0.1~0.35 m/s의 상승속도를 나타내고 있다[22]. 반면, 과압력에 의해서 발생하는 major 가스 누출은 0.3~50 mm 범위의 기포 크기를 나타내며 용승류(upwelling flow)에 의해서 2 m/s를 넘어가고 있다[23]. 기포의 크기에 대한 자료가 없지만 수심 24 m의 가스가 충전된 퇴적물에 충격을 가해 발생시킨 기포에 대해서 PIV (Particle Imaging Velocimetry)을 통해 계산된 기포의 상승속도는 최대 38 cm/s, 평균 16 cm/s를 나타내고 있다[21].

본 논문에서 제시된 가스 기포의 크기와 상승속도는 앞에서 제시한 자료보다 약간 높게 나타나고 있지만, 깊은 수심(1,000 m 이상)에서는 수압에 의해서 상승속도가 감소할 수 있다. 그러나 유사한 수심인 Schneider von Deimling and Papenberg [21]보다 상승속도는 상대적으로 높게 나타나고 있는데(Figure 4), 이는 탱크에서 압축된 가스의 인위적인 강제 분출이 영향을 미친 것으로 보인다.

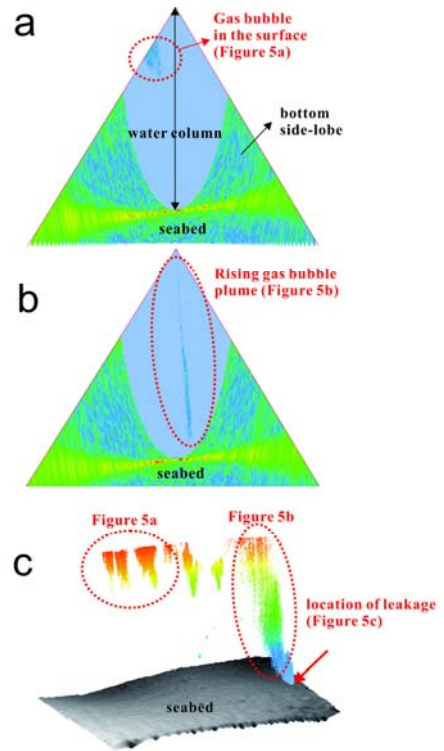
#### 3.2 장비별 CO<sub>2</sub> 가스 플룸 탐지 비교

조사지역 내 수심 20 m이고 인위적으로 이산화탄소 가스를 분출시킨 위치를 중심으로 선속과 방향을 다르게 하면서 총 8 축선의 조사가 이루어졌다(Figure 1b, Table 1). 각 축선별로 단일빔음향측심기(SBES), 천부지층탐사기(SBP) 그리고 다중빔음향측심기(MBES)의 취득한 수층자료를 FMMidwater프로그램으로 처리하여 Figure 5에 나타내었다. 20 m 수심에서 가스 탐지는 다중빔음향측심기, 단일빔음향측심기 그리고 천부지



**Figure 5.** Echograms of single beam echosounder (SBES), SBP, and multibeam echosounder (MBES) of survey lines. Longitudinal scale bar in the stacked echograms of MBES indicates 30 m.

층탐사 순서로 탐지가능이 좋은 것으로 보인다. 각 장비의 주파수는 가스 탐지 가능 수심과 자료 해상도에 영향을 미칠 것으로 보이지만 같은 수심에서 가스 탐지 정도는 주로 각 장비의 ping rate 차이와 선속에 의한 결과로 보인다. 각 장비의 ping rate는 수심에 따라서 자동적으로 바뀌는데 수심이 얕아지면 ping rate는 증가하고 수심이 깊어지면 ping rate는 감소하게 되어있다. 다중빔음향측심기(EM 3002)의 ping rate는 최대 40 Hz, 단일빔음향측심기(EA 400)는 최대 20 Hz를 나타내고 천부지층탐사기(SBP)의 ping rate는 4 Hz를 보이고 있어 상대적으로 다중빔음향측심기 보다 단일빔 음향장비의 수층 가스 플룸 탐지 능력이 상대적으로 감소 될 수 있다. 수심이 20 m로 일정하다고 가정하면 각 장비마다 ping rate는 일정할 것이다. 다중빔음향측심기의 ping rate는 조사시 data display 창에 대략 13 Hz를 나타내고 있으며 천부지층탐사기는 4 Hz 그리고 단일빔음향측심기는 중간 정도의 ping rate를 보였다. 선속이 10 노트로 조사된 L05 측선(Table 1)은 다중빔음향측심기와 천부지층탐사기의 경우 각각 39.6 cm와 128.6 cm 간격으로 자료를 획득한 반면, 선속 0.5~1.7 노트로 조사된 L02 측선(Table 1)은 2.0~6.7 cm와 49.5~51.7 cm 간격으로 각각 자료를 획득된 것이다. 이 차이는 가스 플룸을 탐지할 수 있는 정도의



**Figure 6.** Color-coded backscatter images of L02 recorded by the multibeam echosounder. Gas bubbles are detected close to the sea surface (a), vertically intense gas plume (b), and 3D image of gas plume in the water column. Semi-circular bottom side-lobes are shown around the seafloor in the backscatter images.

차이를 보여주고 있어 선속이 빠르면 같은 ping rate에서 더 빨리 지나가게 됨으로서 가스 분포 면적이 좁아지는(Figure 5, L05) 반면, 선속이 느려지면 같은 ping rate에서 가스 플룸을 천천히 지나감에 따라 더 많은 가스를 탐지할 수 있어 플룸의 폭이 넓게 나타나고 있다(Figure 5, L02, L04).

수층 내 상승하는 가스 플룸 탐지는 단일빔인 음향측심기(SBES)와 천부지층탐사기(SBP) 보다는 다중빔을 가지고 있는 음향측심기(MBES)에서 뚜렷한 형태를 보이고 있다(Figure 5a, b). 이는 단일빔의 음향장비는 비록 상대적으로 빔각도가 넓지만 정확하게 가스 플룸을 지나가야만 탐지가 가능한 반면, 다중빔음향측심기(EM 3002)는 160개의 빔이 동시에 취득하기 때문에 모든 빔이 축적되어(stacked) 더 뚜렷한 가스 플룸을 나타내고 있다(Figure 5, L01, L03 L06, L08). 또한 조사측선을 따라가면서 160개빔에 대한 fan 형태의 직각적인 가스 플룸의 구조(Figure 6a, b)를 확인할 수 있어 수층 내의 가스 플룸의 3차원적인 구조를 파악할 수가 있다(Figure 6c). 그리고 상승하는 가스 기포는 해류에 의해서 영향을 받기 때문에 단일빔인 음향측심기와 천부지층탐사기는 실제적으로 해저면에서 누출되는 정확한 위치를 파악하기는 힘들다. 그러나 다중빔음향측

심기는 좁은 빔간격(1.5°)으로 해저면에서 가스 누출 위치를 정확하게 파악할 수 있고(Figure 5c, Figure 6c), 해저면의 강한 후방산란(back-scatter)에 의한 해저면 마스크(masking)은 기포의 추가적인 지시자로 사용할 수 있다[24]. 또한, 수층과 해저면 자료를 동시에 획득하기 때문에 가스 누출 위치와 pockmarks, mud volcano와 같은 기포 누출과 관계된 지형학적 특징 사이의 명확한 관계를 설명할 수가 있다.

#### 4. 결론 및 향후 연구

천해지역에서의 CO<sub>2</sub> 가스 기포 탐지 기술 개발을 위해 다중빔음향측심기, 단일빔음향측심기 그리고 천부지층탐사기를 이용해서 인위적으로 발생시킨 가스 플룸을 탐지 비교하였다.

수층으로 방출되는 기포의 상승속도는 가스탱크에서 압축된 가스의 강제적인 누출이 영향을 미쳐 다른 자료[19]-[23]보다 상대적으로 높게 나타나고 있다.

다중빔음향측심기는 단일빔 음향장비 보다 더 넓고 뚜렷한 가스 플룸을 탐지할 수 있으며 선속을 느리게 함으로서 상대적으로 탐지 능력을 증가시킬 수가 있다. 또한, 다중빔음향측심기는 해류 등에 영향을 받는 단일빔 음향장비보다 정확한 누출 위치를 확인 할 수 있고 이것은 해저면 지형자료와 함께 가스 누출과 관계된 지형학적 특징을 비교, 분석할 수가 있다. 따라서 다중빔음향측심기는 천해환경에서 천부가나 이산화탄소 해양지층저장(CCS)과 관련해서 가스 누출 탐지에 효과적이고 경제적인 모니터링 방법으로 활용이 가능하다.

향후, 본 연구는 각 해역에서 분출되는 특정(메탄과 이산화탄소) 가스 기포의 주파수별 음향반사강도(acoustic target strength) 등 음향특성을 정립하여 가스 누출 탐지의 정량적, 정성적 기술 향상에 기여하고자 한다.

#### 후 기

본 연구는 “울릉분지 주변 해양 저장 후보지 지질환경 배경 조사사업(PMS266D)”로 수행된 연구결과이다.

#### References

[1] B. S. McCartney and B. M. Bary, “Echo-sounding on probable gas bubbles from the bottom of Saanich inlet, British Columbia,” *Deep-Sea Research*, vol. 12, no. 3, pp. 285-294, 1965.

[2] R. Merewether, M. S. Olsson, and P. Lonsdale, “Acoustically detected hydrocarbon plumes rising from 2-km depths in guaymas basin, gulf of california,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 90, no. B4, pp. 3075-3085, 1985.

[3] L. Mayer, Y. Li, and G. D. Melvin, “3-D visualization for pelagic fisheries research and assessment,” *International Council for the Exploration of the Sea*

*Journal of Marine Science*, vol. 59, pp. 216-225, 2002.

[4] M. L. Wolfson, D. F. Naar, P. A. Howd, S. D. Locker, B. T. Donahue, D. T. Friedrichs, A. C. Trembansi, M. D. Richardson, and T. F. Wever, “Multibeam observations of mine burial near clear-water, FL, including comparisons to predictions of wave-induced burial,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 103-118, 2007.

[5] L. Naudts, J. Greinert, Y. Artemov, P. Staelens, J. Poort, P. van Rensbergen, and M. de Batist, “Geological and morphological setting of 2778 methane seeps in the Dnepr paleodelta, norhtwestern Black Sea,” *Marine Geology*, vol. 227, pp. 179, 2006.

[6] J. Greinert, Y. G. Artemov, V. Egorov, M. de Batist, and M. McGinnis, “1300-m-high rising bubbles from mud volcanoes at 2080 m in the Black Sea; Hydroacoustic characteristics and temporal variability,” *Earth and Planetary Science Letter*, vol. 244, no. 1-2, pp. 1-15, 2006.

[7] F. Gerlotto, S. Georgakarakos, and P. K. Eriksen, “The application of multibeam sonar technology for quantitative estimates of fish density in shallow water acoustic surveys,” *Aquatic Living Resources*, vol. 13, pp. 386-5393, 1994.

[8] A. G. Judd and M. Hovland, *Seabed Fluid Flow*, Cambridge University Press, 2007.

[9] J. H. Kim et al., *Study of Technology for Accumulation and Characterization of Submarine Shallow Gas*, GP2009-017-2011(3), Petroleum & Research Division, Korea Institute of Geoscience And Mineral Resources, 2011 (in Korean).

[10] K. A. Kvenvolden and B. Gogers, “Gaia's breath-global methane exhalations,” *Marine and Petroleum Geology*, vol. 22, pp. 579-590, 2005.

[11] S. G. Kang and C. Huh, “The latest progress on the development of technologies for CO<sub>2</sub> storage in marine geological structure and its application in Republic of Korea,” *Journal of the Korea Society for Marine Environmental Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 24-34, 2008 (in Korean).

[12] C. M. Oldenburg and J. L. Lewicki, “On leakage and seepage of CO<sub>2</sub> from geologic storage sites into surface water,” *Environmental Geology*, vol. 50, pp. 691-705, 2006.

[13] H. Medwin and C. S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, Academic Press, Boston, 1998.

- [14] Kongsberg Maritime, EA 400 Operator Manual, 2006
- [15] Kongsberg Maritime, EA 400 Instruction Manual, 2006
- [16] Teledyne Benthos, Datasonics CAP-660 II Acoustic Profiling System Manual, 1997.
- [17] Kongsberg Maritime, EM 3002 Instruction Manual, 2004.
- [18] QPS, Fledermaus Reference Manual, 2011.
- [19] I. Leifer and J. Boles, "Measurement of marine hydrocarbon seep flow through fractured rock and unconsolidated sediment," *Marine and Petroleum Geology*, vol. 210, pp. 411-424, 2003.
- [20] H. Sahling, G. Bohrmann, Y. G. Artemov, A. Bahr, M. Brüning, S. Klapp, I. Klauke, E. Kozlova, A. Nikolovska, T. Pape, A. Reitz, and K. Wallmann, "Vodyanitskii mud volcano, sorokin trough, Black Sea: Geological characterization and quantification of gas bubble streams," *Marine and Petroleum Geology*, vol. 26, no. 9, pp. 1799-1811, 2009.
- [21] J. Schneider von Deimling, and C. Papenberg, "Technical note: Detection of gas bubble leakage via correlation of water column multibeam images," *Ocean Science*, vol. 8, pp. 175-181, 2012.
- [22] R. Clift, J. R. Grace, and M. E. Weber, *Bubbles, Drops, Particles*, New York, Academic Press, 1978.
- [23] I. Leifer, B. P. Luyendyk, J. Boles, and J. F. Clark, "Natural marine seepage blowout: contribution to atmospheric methane," *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 20, no. 3, pp. 1-9, 2006.
- [24] J. Schneider von Deimling, J. Brockhoff, and J. Greinert, "Flare imaging with multibeam system: Data processing for bubble detection at seeps," *Geochemistry Geophysics Geosystems*, vol. 8, no. 6, Q06004, doi:10.1029/2007GC001577, 2007.