

# 천해 환경에서의 전구 음원의 음향학적 특성 연구

## Investigating the Properties of the Light Bulb Source in Shallow-Water Environments

오택환\*, 나정열\*, 이성욱\*, 김성일\*\*, 박정수\*\*

(Taekhwan Oh\*, Jungyul Na\*, Seongwook Lee\*, Seongil Kim\*\*, Joung-Soo Park\*\*)

\*한양대학교 지구해양학과와 해양음향 연구실, \*\*국방과학연구소(진해)

(접수일자: 2005년 5월 2일; 수정일자: 2005년 6월 22일; 채택일자: 2005년 8월 3일)

본 연구에서는 해상 실험 자료를 사용해 저주파 광대역 음원으로서 전구 음원의 음향학적 특성을 연구하였다. 본 연구를 위해 연속 전구 신호 획득이 가능한 전구 음원을 사용하였다. 본 논문에서는 전구 음원 특성 분석 결과를 나타내었으며, 이전 연구 논문과 비교하였다. 연구 결과 전구 신호는 수심이 증가함에 따라 최고 음원 순위와 주 공진 주파수가 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 전구 음원을 사용한 지음향 파라미터 역산 연구와 정합 음원 추적 연구를 통해 전구 음원에 의해 획득된 지음향 파라미터가 수중 음원 위치 추적에서 사용 가능함을 확인하였다.

**핵심용어:** 저주파 광대역 음원, 전구, 지음향 역산

**투고분야:** 수중음향분야 (5)

In this paper, the acoustic properties of the light bulb are presented based on a new light bulb source system of continuously transmitting implosive signal. We describe the results of analysis of bulb signals and comparison with previous works. The results show that peak-source level and primary resonant frequency are increasing with increasing source depth. This bulb source can be used for the purpose of geoacoustic parameter inversion and source tracking in shallow water via matched field processing.

**Keywords:** Low frequency broadband source, bulb, geoacoustic inversion

**ASK subject classification:** Underwater Acoustics (5)

### I. 서론

천해에서 음파전달은 음원과 수신기의 위치와 해수면 파고, 음속구조, 수심변화 및 해저면 특성 등의 해양환경 변동성에 의해 매우 복잡한 것으로 알려져 있다. 수중 소나 시스템의 효과적인 운용을 위해서는 음향학적 변동성을 야기 시키는 파라미터의 특성을 이해하고, 그 영향을 최소화 해야 한다.

최근 해저면의 음향학적 특성 연구를 위해 전구와 같은 저주파 광대역 음원을 사용한 지음향 연구가 진행되고 있다. 전구 음원은 정압 환경에서 광대역 주파수 특성을 나타내고, 신호 길이가 짧아 천해 다중경로 환경에서도 음파의 전달 경로 구분이 가능하다. 또한 음원으로 사용시 폭발성 음원인 SUS에 비해 안전하며, 기타 음원

들에 비해 사용이 편리한 장점이 있다. 그러나 전구의 유리 벽의 두께 및 방수 상태 등에 의해 음원 운용 수심이 제한을 받는 단점이 있다.

전구에 대한 특성 관련 연구는 R. J. Urick (1963), Marshall Orr (1976), Garry J. Heard (1997) 및 Alessandro Ghiotto (2000) 등에 의해 연구 되었다[1-4]. R. J. Urick은 실험실에서 유리병과 유리 구를 사용해 신호 파형을 관측했으며, Marshall Orr는 유리 구의 물리적 특성 변화에 따른 신호 파형 변화에 대한 연구를 수행하였다. Garry J. Heard와 Alessandro Ghiotto는 수심에 따른 전구의 최고 음원순위와 주 공진 주파수 변화 특성에 관한 연구를 수행하였다. 특히 Garry J. Heard는 다양한 종류의 전구를 사용한 여러 수심에 대한 실험을 통해 전구가 수중에서 매우 유용한 음원임을 확인하였다. 전구 신호를 사용한 지음향 파라미터 연구는 N. R. Chapman (1997)과 Patrick Pignot (2001) 등에 의해 거리 독립 해양 환경과 거리 종속 해양 환경에

표1. 전구 종류에 따른 물리적 특성 자료

Table 1. Physical data for various light bulbs(Compiled from Garry J. Heard(1997) ).

Bulb Type	Volume(mL)	Glass Thickness(mm)	Depth(m)	Primary Resonance Frequency(Hz)	Peak Source Level(dB//1μPa@1m)
100W(A19)	150	~0.76	13	225	160(185)
100W(A19)	150	~0.76	16	235	160
100W(A19)	150	~0.76	127	806	214
100W(A19)	150	~0.76	144	826	216
Philips 150W	200	0.43~0.69	12	190	160
Philips 150W	200	0.43~0.69	16	230	161
GE40A/CF/PM CD2	85	0.64~0.89	18.3	385	191
GE40A15/F /PM CD	90	0.64~0.89	18.3	323	192
Can. Tire 40W (A19)	160	0.56~1.07	18.3	223	198

서 수행되었다[5-6].

이와 같은 외국 연구에 비해 국내에서는 전구 음원에 대한 연구가 미진한 상태이다. 최근 한양대학교는 연속 신호 발생이 가능한 전구 음원 시스템을 개발했으며, 국방과학연구소 및 서울대학교와 공동으로 해상 실험을 수행하였다[7].

본 논문에서는 전구 음원을 사용한 해상 실험 자료를 사용해 천해 전구 음원의 음향학적 특성에 관한 연구와 지음향 파라미터 역산 연구 결과를 나타낸다. 본 논문의 제2장에서는 전구 음원의 신호 특성을 간략하게 서술하며, 제4장에서는 해상 실험 통해 획득된 전구 음원 신호의 분석 결과를 나타낸다. 지음향 파라미터 역산 연구 결과는 제5장에서 서술한다.

## II. 전구 음원 특성

정압 (hydrostatic pressure) 환경에서 진공 상태의 물체가 폭발하면 외부 압력에 의해 공기방울과 유사한 진동 신호가 발생한다. 수중에서 진동 신호는 지음향 파라미터 역산과 같은 음향 실험에 유용한 음원으로 사용 가능하다. 진공에 의한 진동 신호를 발생시키기 위해 해양에서는 전구가 사용된다. 전구의 진동신호는 작은 음압력의 신호가 수신된 후에 강한 양 압력의 신호가 수신되는 특징을 가지며, 이후 공기방울에 의한 진동 신호가 수신된다. 신호의 길이는 수 msec 정도 이다. 이와 같은 전구 신호의 특성은 전구 유리 벽 두께, 전구의 크기 및 수심에 의해 변화한다. 전구 음원 신호는 음원 수심이 증가함에 따라 최고 음원 준위와 주 공진 주파수가 증가하는 것으로 알려져 있다.

## III. 해상 실험(MAPLE04)

2004년 5월 동해항 부근 천해 해양환경에서 정합장처리 기술 개발을 위한 해양 환경 조사 및 음향 자료 수집을 목적으로 MAPLE04 (Matched Acoustic Properties & Localization Experiment 2004) 해상 실험이 수행되었다[8]. MAPLE04 해상실험에서 사용된 음원은 저주파 예인형 음원과 전구 음원이 사용되었다. 기존 연구 논문에서 제시된 전구 음원은 한 개의 전구를 장착하여 일회성 신호만을 획득할 수 있다는 단점이 있다. 본 연구에서는 이와 같은 단점을 보완하기 위해 회전식 전구 설치 장치와 전자석을 이용한 충격식 격발 장치를 결합하여, 빠른 시간에 여러 전구 신호를 획득할 수 있는 전구 음원 시스템을 개발하여 사용하였다.

실험 해역의 해양 환경 조사를 위해 CTD와 XBT를 사용해 수온과 염분의 시-공간적 변화를 관측하였으며, 음향 측심기를 사용해 공간적 수심 변화를 관측하였다. 전구 음원 신호는 24채널 수직 선배열 수신기를 사용해 획득되었으며, 음원 신호 특성 (신호 파형, 최고 음원 준위, 주 공진 주파수 등) 분석을 위한 청음기 (B&K 8101, B&K 8104 hydrophone)를 음원 주변에 설치 운용하였다. 선배열 수신기에 수신된 신호는 RF (radio frequency)

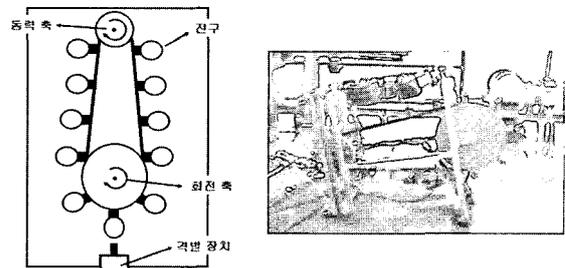


그림 1. 전구 음원 장치  
Fig. 1. Light bulb source system.

표 2. SPECTRO(A19) 전구와 MAPLE04에 사용된 전구의 물리적 특성 비교

Table 2. Physical data comparison between SPECTRO(A19) light bulb and used light bulb in MAPLE04.

Bulb Type	Wattage(W)	Volume(mL)	Glass Thickness(mm)
SPECTRO(A19)	100	150	~0.76
MAPLE04	100	125 ± 25	0.5 ± 0.25

를 사용해 실험선에 전송하였으며, 디지털 레코더(digital recorder)를 사용하여 A/D변환 후 저장하였다.

MAPLE04 해상 실험에서 사용된 전구의 유리 벽 두께는 약 0.5mm이며, 전구 부피는 약 125mL로 Garry J. Heard (1997)에 의해 연구된 전구 중 SPECTRO (A19) 형태의 전구와 유사한 전구이다. 음원 수심과 음원 주변 수온은 음원에 설치된 SBE39 센서를 사용해 관측하였다.

실험 해역의 해양 환경 특성 파악을 위해 CTD와 XBT에 의해 관측된 수온과 염분 자료를 분석하였다. 분석 결과 표층 부근에 혼합층(mixed layer)이 존재하며, 수심 10~20m 부근에 수온 약층(thermocline)이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 천해 장거리 음파 전달시 표층

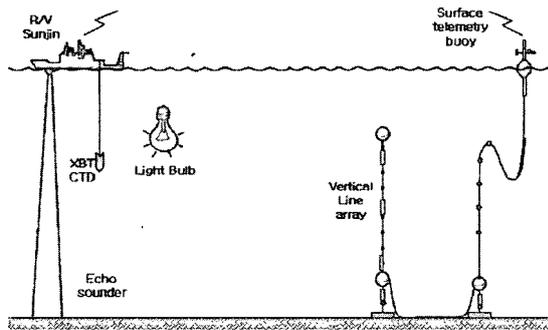


그림 2. MAPLE04 해상 실험 장비 설치 개요도  
Fig. 2. Schematic diagram of system configuration for MAPLE04.

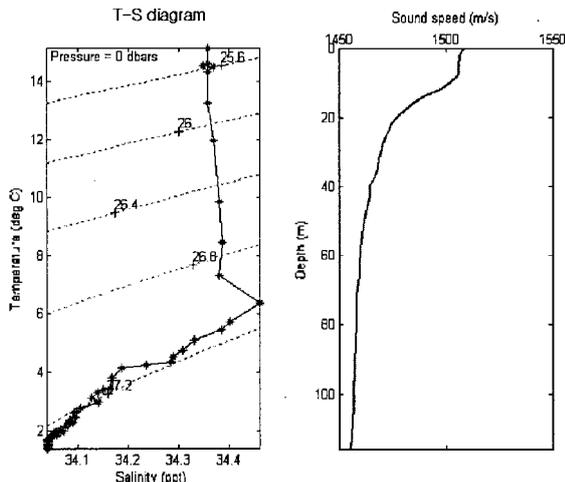


그림 3. 실험 해역의 T-S 다이어그램과 음속 구조  
Fig. 3. T-S diagram and Sound speed profile.

부근에 형성된 수온 약층은 음원으로부터 방사된 음파를 해수면 부근에서 굴절시켜 해저면에 의한 음압 손실을 증대시킨다. 실험 해역의 평균 수심은 약 123m 이다.

## IV. 전구 음원 특성 분석 및 지음향 역산

### 4.1 시간과 주파수 영역에서의 전구 음원 특성

음원 주변에 설치된 청음기로부터 획득된 수신 신호를 사용해 전구 음원 신호의 특성을 시간 영역과 주파수 영역에서 분석하였으며, 과거 발표되었던 연구 문헌과 비교하였다. 일반적으로 전구 음원의 특성은 음원 수심, 전구의 반경, 전구 유리의 두께 및 진공 상태 등에 따라 달라지며, 최고 음원 준위(peak source level; peaks SL)와 주 공진 주파수(primary resonant frequency)는 음원 수심에 의해 변화 한다. 수중 음원으로서 전구는 폭발성 수중 음원인 SUS(signals underwater sound)에 비해 음원 준위는 작지만, 신호의 파형이 일정하며 주파수 영역에서 광대역 스펙트럼 특성을 나타내는 장점이 있다. 또한 펄스 길이가 짧아 천해 해양 환경에서도 다중 경로에 의한 음신 경로를 분해할 수 있을 뿐만 아니라 음원 운용에 있어서도 SUS에 비해 안전하다.

본 논문에서는 수심 변화에 따라 음원 주변에 설치된 청음기로부터 획득된 115개의 수신 신호 중 비교적 수신 상태가 양호한 35개의 수신 신호를 사용해 음원 신호 특성(신호 파형, 최고 음원 준위, 주 공진 주파수 등)을 분석하였다. 본 논문에 사용된 수신 신호의 음원 수심과 획득 수신 신호 수는 표 3에 나타내었다.

음원 주변 청음기 수심 35m와 유사한 수심(음원 수심 40m, 3개 수신신호)에서 폭발한 전구의 수신 신호의 특성 분석 결과 작은 음 압력(negative pressure)의 파형이 수신된 후 강한 양 압력(positive pressure)의 파형이 수신되었으며, 신호 파형이 안정적인 것을 알 수 있다. 수신 수신호로부터 최고 음원 준위는 시간 영역에서 시계열 자료의 최고 음압과 음원과 수신기 사이 거리

표 3. 수심에 따른 수신 신호 수  
Table 3. The number of received signals along various source depths.

수심	수신 신호 수
30m	7
40m	3
50m	14
55m	3
70m	8

에 대한 보상 값을 사용하여 산출 하였으며, 주 공진 주파수는 주파수 영역에서 1Hz 주파수 대역폭으로 환산하여 계산 하였다. 음원 수심 40m에서 획득된 수신 신호로부터 계산된 시간 영역에서의 최고 음원 준위는 약 200.4 dB//1μPa 이며, 주 공진 주파수는 약 433.0Hz 이다. 주파수 스펙트럼 분석 결과 주 공진 주파수 약 433.0Hz를 기준으로 주파수가 감소-증가함에 따라 음압이 감소함을 알 수 있다. 분석결과 전구 음원의 주파수 대역 폭은 약 200~600Hz 사이인 것으로 판단된다.

전구 음원의 최고 음원 준위와 주 공진 주파수는 음원 수심에 따라 변화한다. 음원 수심에 따른 최고 음원 준위와 주 공진 주파수 변화 특성을 분석하였다. 이와 같은 연구는 Garry J. Heard (1997)와 Alessandro Ghiotto (2000)에 의해 수행된 바 있다.

수심에 따른 음원 특성 변화 분석을 위해 음원 수심 30m, 40m, 50m, 55m, 70m에서 수신된 35개 신호를 사용해 최고 음원 준위와 주 공진 주파수를 계산하였다. 음원 수심 40m와 55m의 수신 신호는 B&K 8101 청음기에 의해 수신된 신호이며, 음원 수심 30m, 50m, 70m의 수신 신호는 B&K 8104 청음기에 의해 수신되었다.

음원 수심 30m 에서의 평균 최고 음원 준위는 약 197 dB//1μPa 이며, 음원 수심 40m와 55m에서의 평균 최고 음원 준위는 약 200 dB//1μPa 이다. 음원 수심 30m, 50m, 70m에서 계산된 최고 음원 준위의 편차가 음원 수심 40m와 55m에서 계산된 최고 음원 준위의 편차보다 큰 것은 B&K 8104 청음기의 수신감도가 균일하지 못했기 때문이라 판단된다. 음원 수심에 따른 최고 음원 준위 변화 특성 분석시 이와 같은 오차를 보상하였다.

본 연구에서 사용된 전구와 같은 종류의 전구를 사용해 연구한 Garry J. Heard (1997)의 연구 결과에 의하면 전구 음원의 최고 음원 준위는 전구 음원 수심에 따라 식(1)을 따르며, 주 공진 주파수는 식 (2)의 경향을 나타낸다.

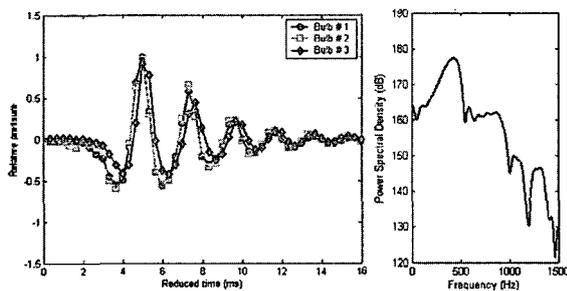


그림 4. 전구 음원 신호 파형(좌)과 파워스펙트럼(우)  
Fig. 4. Source waveform of light bulbs (left) and power spectrum (right).

$$\alpha + \beta \log(h) \tag{1}$$

$$a(g(h+10))^{5/6} \tag{2}$$

여기서  $\alpha$  는 각각 실험 상수 이며,  $\beta$  는 중력가속도,  $h$  는 전구 음원 수심을 의미 한다. 음원 특성 분석 결과 이번 해상 실험에서 사용된 규격의 전구에 대한 음원 수심에 따른 최고 음원 준위는 192.3+3.7log(h) 의 경향을 나타내며, 주 공진 주파수는 2.54\*(g(h+10))<sup>(5/6)</sup> 을 따르는 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과는 Garry J. Heard와 Alessandro Ghiotto의 연구 결과와 비교해 볼 때 최고 음원 준위의 경우 큰 차이를 나타낸다. 그러나 주 공진 주파수의 경우 두 논문의 결과와 비교적 일치함을 알 수 있다. Heard와 Alessandro Ghiotto의 연구 결과를 비교해 보면 수심에 따른 최고 음원 준위는 서로 다른 결과를 나타내지만, 주 공진주파수는 일치한다. 이와 같은 최고 음원 준위의 차이는 음원으로 사용된 전구

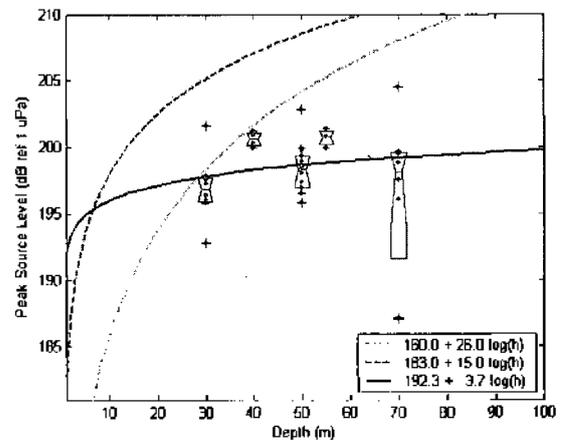


그림 5. 수심에 따른 최고 음원 준위 변화  
Fig. 5. Observed peak source level (SL) as a function of depth.

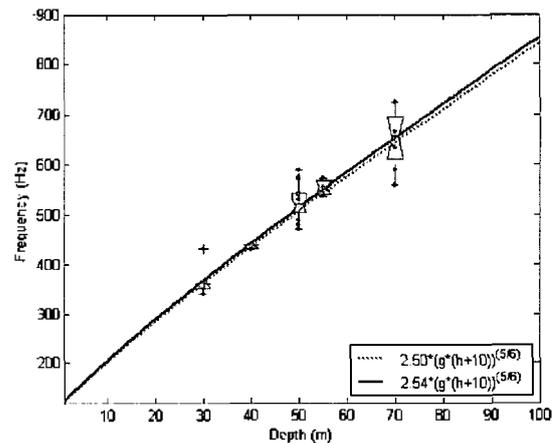


그림 6. 수심에 따른 주 공진 주파수 변화  
Fig. 6. Observed primary resonant frequency as a function of depth.

의 유리 벽 두께와 전구 격발 방법의 차이 때문이라 판단된다. Heard, Alessandro Ghiotto 및 MAPLE04 실험의 수심에 따른 전구 음원 특성은 그림 5- 6에 나타내었다.

4.2 지음향 파라미터 역산

광대역 전구 음원을 사용해 지음향 파라미터 역산이 가능한지 살펴 보았다. 역산에 사용된 전구 신호는 총 11 개 신호이며, 음원과 수신기 사이 거리는 약 1.0 ~ 2.0 km, 음원 수심은 약 50m 이다. 지음향 파라미터 역산을 위해 수직선배열 16개 채널에서 수신된 신호를 13개 중심 주파수를 기준으로 비상관 분석을 하였다[9]. 역산에 사용된 비음합수는 식(3), (4)와 같다. 전구 신호는 고정된 송-수신기의 위치에서 수신되므로, 수신 신호로부터 거리에 따른 전달 손실 정보를 얻을 수 없다. 본 연구에서는 고정된 수신기 위치에서 획득된 N개 주파수 대역별 신호 벡터,  $F_f$  와 정상 모드 이론 음파 전달 모델에 의해 계산된 주파수별 모델 벡터,  $w(r, d, f)$  의 최고 상관치를 갖는 음원의 위치를 추정한 후, 추정된 음원 위치  $E(r, d)$ 와 GPS 음원 위치  $S(r, d)$ 의 통계 거리를 비음합수로 사용하였다. 역산에 사용된 중심 주파수와 수직선배열 센서의 수심은 표 4에 나타내었다.

$$E(r, d) = \arg \max_{r, d} \left( \frac{1}{N_f} \sum_f \left| \frac{w_{(r, d, f)}^T \langle F_f F_f^T \rangle w_{(r, d, f)}}{w_{(r, d, f)}^T w_{(r, d, f)}} \right| \right) \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{N_{ping}} \sum_{ping} \sqrt{(E_{ping}(r, d) - S_{ping}(r, d))^2} \quad (4)$$

지음향 파라미터 역산을 위한 해양 환경 모델은 한국

표4. 중심 주파수 및 센서 수심  
Table 4. frequencies and receiver depths.

Number	주파수(Hz)	센서 수심(m)
1	260	27.67
2	280	37.60
3	300	58.00
4	320	63.00
5	340	68.00
6	360	73.00
7	380	75.50
8	400	78.00
9	420	80.50
10	440	83.00
11	460	85.50
12	480	88.00
13	500	90.50
14	-	93.00
15	-	95.50
16	-	98.00

표 5. 지음향 파라미터 역산 결과

Table 5. Results of the geoacoustic parameters inversion.

			Sound speed (m/s)	Density (g/cm3)	Atten. (dB/wavelength)
Water depth(m)	121.41	Upper	1585.98	1.73	0.26
Thickness (m)	5.91	Lower	1565.30	1.74	0.28

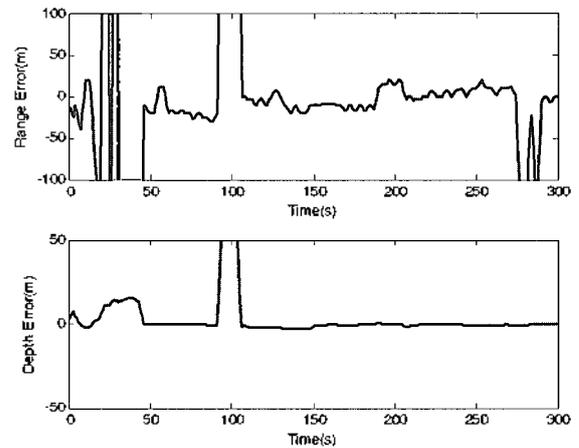


그림 7. 정합 음원 추적 오차

Fig. 7. Errors of the matched field source tracking.

지질자원연구원의 측정 자료를 단순화하여 음속층 밑에 1개 퇴적층이 존재하며, 이후 음향 기반암이 존재하는 것으로 가정하며, 역산 파라미터는 제 1 퇴적층의 상-하부 음속, 퇴적층 두께, 밀도 및 감쇠 등으로 제한하였다. 최적해 산출을 위해 병렬 다중 개체군 유전알고리즘을 사용한 해 탐색을 수행하였다[10]. 지음향 역산 결과는 표 5와 같으며, 역산 결과 검증에 위해 저주파 광대역 음원 신호를 사용하여 정합장 음원 추적 (matched field source tracking) 분석을 수행하였다. 음원 추적 분석을 위해 사용된 신호는 저주파 음원을 예인하며 수신한 신호이며, 음원 수심은 약 60m, 예인거리는 약 500~1,000m 이다. 음원 추적 거리 오차와 수심 오차는 그림 7과 같다. 음원 추적 결과 거리 오차에 비해 수심의 오차가 작은 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문은 해상 실험 자료를 사용해 천해 해양 환경에서의 전구 음원의 신호 특성을 분석하였다. 전구 음원 신호 특성 분석은 음원 수심 변화에 따른 최고 음원 준

위 변화와 주 공진 주파수의 변화로 구분하여 살펴 보았으며, 이를 위해 연속 전구 신호 수신에 가능한 전구 음원 시스템을 사용하였다. 또한 전구 음원을 사용한 지음향 역산 연구도 병행하였으며, 정합 음원 추적 분석을 통해 역산 결과를 검증하였다.

연구 결과 수심 변화에 따른 최고 음원 준위 변화는  $192.3 + 3.71 \log(h)$ 을 따르며, 주 공진 주파수의 경우는  $2.54 \times (g(h+10))^{5/6}$ 의 경향을 나타냈다. 이는 기존 외국 연구 논문들과 비교해 볼 때 주 공진 주파수 변화 특성은 유사하나 최고 음원 준위 변화 특성은 다름을 알 수 있다. 이와 같은 차이는 본 연구를 통해 전해 해양 환경의 고유한 특성 때문인지 전구의 물리적 특성 차이와 격발 방법의 차이 때문인지는 명확하게 판단할 수는 없다. 그러나 차후 전구 음원을 사용해 연구를 수행할 경우 전구 음원 수심에 대한 주 공진 주파수의 특성은 예측 가능할 것으로 판단된다. 또한 정합 음원 추적 분석 결과 전구 신호를 사용한 지음향 파라미터 역산 결과가 수중 운동체 위치 추적에 해양 환경 정보로서 사용 가능함을 확인하였다. 차후 전구 음원 시스템의 보완 연구와 전구 신호의 방향성에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 해상실험에 도움을 주신 국방과학연구소 (제2 체계) 및 신앙기술 여러분들께 깊은 감사를 드립니다.

### 참고 문헌

1. R. J. Urlick, "Implosions as sources of underwater sound," J. Acoust. Soc. Am., **35**, 2026~2027, 1963.
2. Marshall Orr and Michael Schoenberg, "Acoustic signatures from deep water implosions of spherical cavities," J. Acoust. Soc. Am., **59**, 1155~1159, 1976.
3. Garry J. Heard, M. McDonald, N. R. Chapman, and L. Jashke, "Underwater light bulb implosions - A useful acoustic source," proc. IEEE Oceans, 1~8, 1997.
4. Alessandro Ghiotto, and J. D. Penrose, "Investigating the acoustic properties of the underwater implosions of light globes and evacuated spheres," Australian Acoust. Soc. Conference, 1~8, Nov., 2000.
5. N. R. Chapman, L. Jashke, M. A. McDonald, H.

- Schmidt, and M. Johnson, "Matched field geoaoustic tomography experiments using light bulb sound sources in the Haro strait sea trial," IEEE Oceans Eng., 763~768, 1997.
6. Patrick Pignot and N. Ross Chapman, "Tomographic inversion of geoaoustic properties in a range-dependent shallow-water environment," J. Acoust. Soc. Am., **110**, 1338~1348, 2001.
7. 오택환, 김영신, 나정열, 오선택, 전호경, 이창원, 김성일, 박정수, "전구 음원 특성 분석과 지음향 파라미터 역산," 한국음향학회 학술대회 논문집, **23** (2), 381~384, 2004.
8. 김성일, 김영규, 방정수, 도경철, 나정열, 오택환, 성우제, 박철수와 19 명, "MAPLE(Matched Acoustic Properties and Localization Experiment)," 한국음향학회 학술대회 논문집, **23** (2), 377~380, 2004.
9. D. P. Knobles and S. K. Mitchell, "Broadband localization by matched fields in range and bearing in shallow water," J. Acoust. Soc. Am., **96**, 1813~1820, 1994.
10. S. L. Hung and H. Adeli, "A Parallel Genetic/Neural Network Learning Algorithm for MIMD Shared Memory Machines," IEEE transactions on neural networks, **5**, 900~909, 1994

### 저자 약력

#### • 오택환 (Taekhwan Oh)



2000년 2월: 한양대학교 지구해양과학과(이학사)  
 2000년 3월~2002년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 대학원(이학석사)  
 2002년 3월~현재: 한양대학교 지구해양과학과 대학원 박사수로  
 ※주관심분야: 수중음향 병렬 신호처리, 정합장 처리, 해양 음압도모그래피, 수중 통신

#### • 나정열 (Jungyul Na)

한국음향학회지 제21권 5호 참조

#### • 이성욱 (Seongwook Lee)

한국음향학회지 제21권 8호 참조

#### • 김성일 (Seongil Kim)

한국음향학회지 제23권 4호 참조

#### • 박정수 (Joung-Soo Park)

한국음향학회지 제23권 4호 참조