

간섭계 방식을 이용한 수중지형탐사 방안 연구

Exploration for Underwater Topography using Interferometric Method

김명배¹⁾ · 곽강을²⁾

Kim, Myoung Bae · Kwak Kang Yul

Abstract

To acquire an underwater topographic information is necessary for the design and construction of structures in marine and inland water. It consists of water depth information by bathymetric survey and underwater bottom topography image information can be obtained by side scan sonar in different ways. For the purpose of providing high quality data by means of engineering site survey, it is necessary to apply simultaneous acquisition of two information and carry out the integrated interpretation to each other. The present research aims to obtain information of the underwater topography and water depth at the same time using interferometer technique, and to validate interferometer technique with accuracy estimation.

Keywords : Bathymetric survey, Underwater bottom topography image, Interferometer

초 록

해양이나 내수면 등 수상에서의 공사를 위해서는 수중 지형정보의 확보가 필수적이다. 수중 지형정보는 수심과 바닥면에 대한 지형정보로 구성할 수 있으며, 수심 측량과 바닥면에 대한 음향영상탐사 등을 별도의 탐사 방법으로 실시하여 정보를 취득하고 있다. 공학적 목적으로 양질의 정보를 제공하기 위해서는 두 정보에 대한 동시 획득과 통합적인 해석이 필요하다. 본 연구에서는 간섭계 방식을 이용한 음향영상탐사를 실시하여 수심과 수중 바닥 지형정보를 동시에 획득하였으며, 취득한 수심 정보에 대한 정확도 평가를 통해 간섭계 방식의 수중 지형 탐사 방법에 대한 가능성을 검토하였다.

핵심어 : 수심측량, 수중지형영상, 간섭계

1. 서 론

미지의 해양이나 내수면이 지니고 있는 다양한 환경과 가치에 대한 끊임없는 연구는 인류의 활동 영역과 관심을 육지에서 하천이나 해양으로 확대하게 하였으며, 수중 자원의 활용과 수중 구조물의 시공 및 모니터링을 위해 수중 지형정보 조사에 많은 노력을 기울여 왔다. 수중 지형정보는 수심과 바닥면의 지형정보로 구성할 수 있으며, 주로 음파 탐사를 통해 수심 측량과 수중 지형 영상정보

를 획득하고 있다. 수중이라는 특수한 조건으로 인해 수중 정보의 탐사에는 기술적 한계가 있기 때문에 취득하는 정보에 대한 신뢰성 확보가 필요하다. 현재의 수중 지형탐사는 장비의 발전과 방법의 개선 및 GPS를 이용한 탐사 위치의 결정 등으로 탐사 데이터에 대한 신뢰성을 향상시키고 있으나, 수심정보와 수중 지형정보를 별도로 취득하고 있기 때문에 두 정보간의 조합을 통한 통합적 해석에는 한계가 있다. 이는 수심 측량과 수중 지형 탐사의 방법과 사용 장비의 차이로 인해 발생하는 것이며, 이러한 문

1) 정회원 · 명지전문대학 토목과 교수(E-mail : kimmb@chollian.net)

2) 일반회원 · 명지대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail : kwakky@empal.com)

제의 해결을 위해서는 수심과 바다 지형정보의 동시 획득이 요구된다.

본 논문에서는 간접계 방식의 음향영상탐사 방법을 적용한 수중 지형정보의 동시 획득을 통해 정보의 신뢰성 향상과 함께 고품질의 수중 지형정보 획득 방법을 제시하고자 한다. 이를 위해 DGPS와 연계된 간접계음향영상탐사기를 이용하여 저수지 바닥면에 대한 탐사를 실시하였으며, 취득한 데이터의 모델링을 통해 3차원 수중 지형정보를 획득하였다. 간접계음향영상탐사의 데이터 취득 방식은 기존의 다중빔 음향탐사 및 음향영상탐사 방법과 매우 유사하지만 간접계를 사용하여 수심데이터와 지형 영상을 동시에 취득하는 점이 근본적으로 다르다. 따라서 본 논문에서는 간접계 방식으로 취득한 수심 데이터에 대한 정확성 분석을 위해 탐사 방식이 다르고, 수심 데이터 취득에 있어서 가장 신뢰성이 입증된 단빔 음향탐사기를 통해 수심 데이터를 별도로 취득하였다. 실험 및 분석 결과를 토대로 간접계음향영상탐사 방법에 대한 타당성을 검토하였다.

2. 수중 지형정보 획득

수중 지형정보 탐사에서 가장 기본적인 사항은 수심의 측정이다. 최초의 조직적인 측심은 1800년대 초기 로스가 제시한 수중 바닥에 긴 로프를 달아 사진을 촬영하는 방법을 이용하였고, 이 후 수중 바닥면에서 반사하는 음파의 특성을 이용하는 음향탐사방법을 활용하고 있다. 수심 측량을 위한 음향탐사는 단빔음향탐사기(Single-beam Echo Sounder)와 다중빔 음향탐사기(Multi-beam Echo Sounder)를 이용하는 방법이 있으며, 수중 바닥에 대한 지형 정보는 음향영상탐사기(Side Scan Sonar)를 사용하여 영상정보를 취득하는 것이 일반적이다.

2.1 단빔 음향탐사

단빔 음향탐사기에 의한 방법은 최초의 수심 측정 방법으로서 장치가 단순하며 작업이 비교적 용이하다. 배 아래에 장착된 탐사기에서 수면과 수직으로 특정 주파수의 음파를 방사하고 수중 바닥면에 맞고 되돌아오는 시간을 측정해서 수심을 구하는 방식으로서 원리는 그림 1과 같으며, 수심은 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$\text{수심}(D) = \text{음파속도}(V) \times 1/2\text{시간}(T) \quad (1)$$

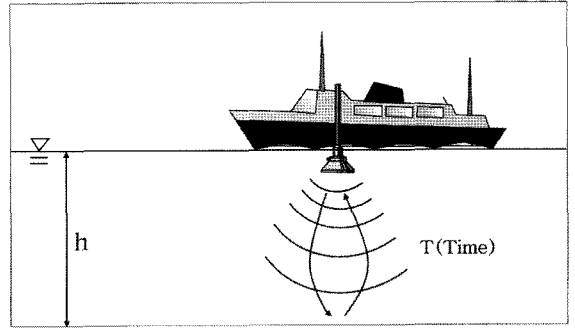


그림 1. 단빔 음향탐사에 의한 수심 측량

단빔 음향탐사는 수면에 수직으로 방사한 음파가 도달한 수중 바닥의 한 지점에 대한 수심만을 측정하는 대표적인 점 단위 탐사 방식이다. 따라서 다수의 음파를 측면으로 방사하는 다중빔 음향탐사 방식에 비해서 정확도의 측면에서 가장 신뢰할 수 있는 수심 측량 방법이다. 수심은 탐사선의 탐사 경로별로 취득하며 배의 이동 경로를 따라서만 수심 성과를 얻을 수 있다. 그러나 그림 2에서 볼 수 있듯이 탐측선 이동 경로 사이에 탐사가 되지 않는 영역의 발생과 수중 바닥 지형의 굴곡으로 인해 방사된 음파 에너지의 일부가 바다 물질에 의해 흡수되는 단점이 있기 때문에 수중 바닥의 모든 영역에 대한 수심 정보 획득에는 한계가 있다. 따라서 탐사 영역에 대해 정밀한 성과를 얻기 위해서는 탐사 경로 간격을 최대한 조밀하게 구성하여야 하는 등 탐사에 많은 시간이 요구된다.

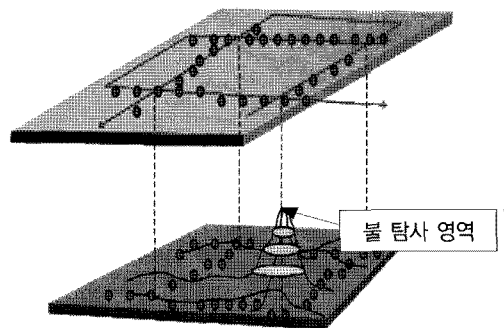


그림 2. 단빔 음향탐사의 측정 한계

2.3 간접계 방식의 수중 탐사

간접계 방식(Interferometer Side Scan Sonar : ISSS)의 수중 탐사는 음파를 이용한 수중 바닥의 수심과 영상을 동시 확보가 가능한 탐사 방법으로서, 수중 바닥의 기본 정보를 얻기 위하여 수중에서 반사되는 음파간의 위상차를 계

산하는 간접 기법을 적용한다. 이는 음향영상탐사기에 별도로 2개의 수신 채널을 추가하여 수중 바닥에 방사된 음향 에너지 중 반사되는 음파의 발원지 각도를 결정하기 위해 수신 음파간의 위상차를 계산하는 방식이다. 그림 3에서와 같이 동위상축에 있는 탐사 점은 위상차(β)값이 0이며 동위상축을 벗어난 탐사 점에서는 위상차가 있음을 알 수 있다. 여기서 β 값을 구할 수 있기 때문에 각 탐사 점에 대한 수심을 알 수 있다. 간접계 시스템에서 방사된 음향 에너지가 수중 바닥에 도달하면 여러 방향으로 산란되며, 이 중 일부가 배에 장착된 수신기로 반사된다. 반사 음파의 도달 시간과 반사각 각도의 위상차를 이용하여 고해상도의 음향영상과 위상영상을 획득하여 정확한 수심을 측정할 수 있으며 그림 4는 간접계 소나 시스템에서 취득할 수 있는 초기 영상의 한 예이다.

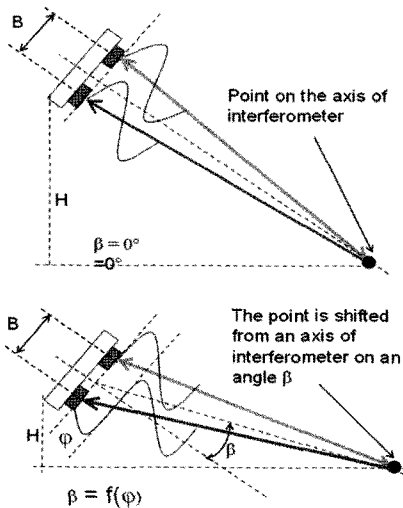


그림 3. 간접계 음향영상탐사기법의 원리

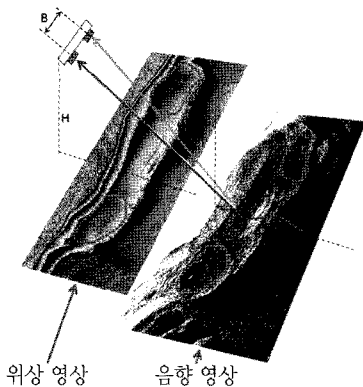


그림 4. 간접계 음향영상탐사의 취득 영상

음향 에너지는 배의 진행 방향에 대해 수직으로 방사되어 부채꼴 형태로 수중 바닥 정보를 취득한다. 특히 간접계 음향영상탐사 방법은 동일 탐사지점에 대한 음파의 위상차에 의해 영상을 구성하므로 수심의 변화에 관계없이 탐사 점간 간격을 균일하게 유지하며 데이터를 확보할 수 있다. 또한 취득할 수 있는 음파의 주사 폭이 수심의 약 10~15배에 달하기 때문에 넓은 영역에 대해서 고해상도의 자료를 획득할 수 있다

3. 수중 탐사 실험

본 연구에서는 간접계 방식의 음향영상탐사를 활용한 수중바닥 음향영상과 수심 데이터의 동시 획득과, 수심 데이터에 대한 정확도 평가의 목적으로 단빔 음향탐사기에 의한 수심 측량을 각각 실시하였다. 실험 대상은 경상북도 울진군의 대수호중 일부 영역을 선정하였다. 수중 바닥 지형에 대한 반영 정도의 검토와 유속의 변화에 따른 유속 변화의 분포를 측정하기 위해 바닥 지형과 유속의 변화가 심한 영역을 대상으로 하였다. 탐사 영역은 그림 5와 같으며, 크기는 종 방향 약 140m, 횡 방향 약 170m정도이고, 수심은 최소 3m에서 최대 27m까지의 분포를 이루고 있다.



그림 5. 실험 대상 지역

표 1. 단빔음향탐사기 및 ISSS 주요 제원

항 목	제 원	
	단빔음향탐사기	ISSS
제작사	러시아NIP사	러시아NIP사
모 델	Neman ES	Neman ISSS 250
주파수	195kHz	250kHz
음향발신	6°	0.5° × 45°
탐사심도	최대 200m	깊이 80m 경사 340m
분해능		4cm

실험에 사용된 단빔 음향탐사기와 간섭계 방식의 음향 영상탐사 장비에 대한 주요 제원은 표 1과 같다.

탐사 시스템은 안테나, 전원장치, 송수신기 등의 기본적인 장비와, 탐사선의 측위와 탐사각 방향의 결정과 보정 및 탐사대상지역의 음속을 측정하여 빔의 굴절에 대해 보정해줌으로써 탐사성가에 대한 정확도 및 신뢰도를 크게 향상시키기 위한 DGPS 및 방위각계, MRU 센서 및 음속 단면측정기 등의 보조장비로 구성하였으며 주요제원은 표 2와 같다. DGPS는 DSM132 모델로서 위치 정확도는 ± 1m 이하이며, 사용데이터 취득 및 처리용 S/W는 탐사장비제작사에서 제공하는 Hyscan 및 Hyplot을 사용하였다.

표 2. 주요 보조 장비 제원

항 목	주요 제원	
모션센서 (MRUz)	각의 방향범위	45°
	해상도	0.001°
	정확도	0.1° RMS
Heading Sensor (Azimuth 1000)	정확도	± 0.5°
	사용온도	(0 -100) %
음속단면측정기 (SVR 15)	측정범위	1350-1600m/sec
	해상도	0.1m/sec
	정확도	± 0.25m/sec
	측정깊이	200m(0.5m단위)

실험 대상 영역에 대한 탐사는 그림 6과 같이 7개의 경로를 설정하여 실시했으며 데이터가 서로 중첩 될 수 있도록 탐사 경로간 간격을 20m로 설정하였다. 탐사 경로의 길이는 경로 7이 약 150m로 가장 길고 경로 3이 약 70m로 가장 짧은 구간이다.

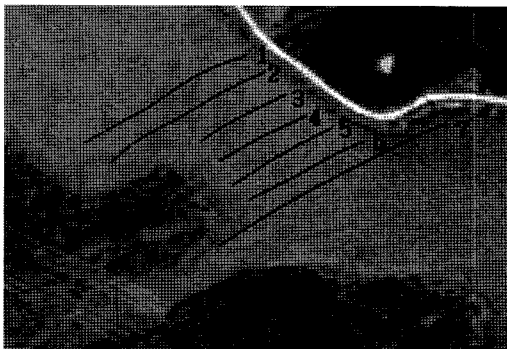
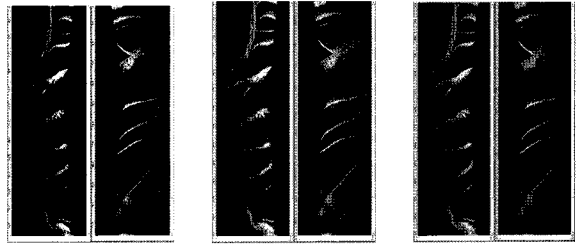


그림 6. 탐사 경로

탐사선은 4knot 이하로 운행하였고, 데이터 취득은 단

빔 음향탐사의 경우 52ms로 하였고, 간섭계 음향영상탐사는 왼쪽 42ms, 오른쪽 32ms로 하였다.

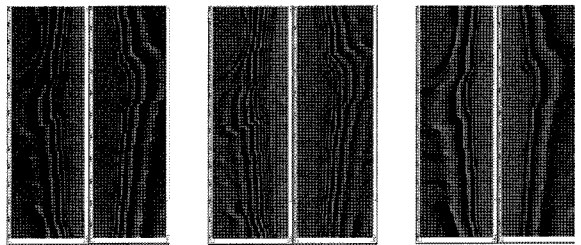
실험에서 사용한 간섭계 방식 음향영상탐사기에는 음파 송·수신용 안테나 1개와 수신용 안테나 2개 등 3개의 안테나가 부착되어 있으며, 탐사 경로별로 각 수신 안테나(채널)별 음향 영상과 위상 영상을 각각 취득하였다. 그림 7은 경로 1에 해당하는 초기 음향영상이다.



(a) 채널1 (b) 채널2 (c) 채널3

그림 7. 채널별 음향 영상(탐사경로1)

채널별로 취득한 음향영상은 동일한 것으로 보이지만 각 수신 채널 간 위상차 해석을 한 위상영상에서는 차이점이 나타나고 있으며 그림 8의 탐사 경로 1에 대한 위상영상에서 확인할 수 있다.



(a)채널1-채널2 (b)채널1-채널3 (c)채널2-채널3

그림 8. 채널간 위상 영상(탐사경로1)

탐사된 음향 영상은 Hyscan프로그램을 이용하여 영상 데이터로 변환시킨 후 DGPS에 의한 WGS84좌표 데이터 및 방위각계에 의한 자료 등을 동시에 저장하여 탐사지역의 위치와 일치되도록 하였다. 정밀한 수중 탐사 데이터를 얻기 위해서 MRU를 이용한 탐사선의 Heaving, Rolling, Pitching에 대한 보정 정보와 방위각계를 통한 Heading 정보를 획득하였다.

수중에서 음파는 약 1,500m/s의 속도로 진행하는 것을 기준으로 해석하고 있으나, 수중에서는 수심에 따라 음속이 다르기 때문에 음파도 유속에 따라 굴절하여 진행한다. 따라서 정밀한 수심 데이터를 취득하기 위해서는 수

심별 음속을 측정하여 빔의 굴절 조정하여야 한다. 본 연구에서는 음속단면측정기를 이용하여 수심별 음속을 측정하였으며, 속도 구간은 1,440m/s~1,520m/s 로 나타났다. 그림 9는 실험 영역에 대한 음속 측정 결과이다.

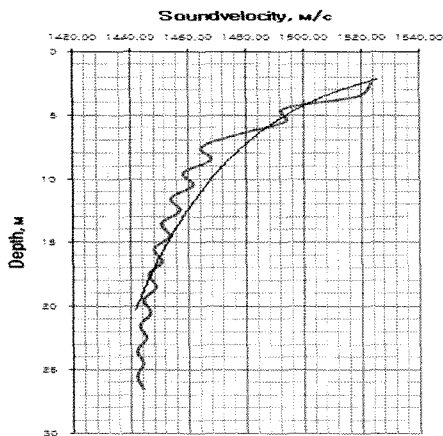


그림 9. 음속 단면도

4. 실험 결과 및 분석

4.1 간접계 음향영상 데이터 처리

탐사 데이터에는 음향 영상파일과 위상데이터, 탐사선

D030.NAV		탐사선		
좌표(E)	좌표(N)	방향(D)	속도(S)	
0004	14:54:26	\$PCGA,055446,00,3705.542924,N,12918.982788,E,2,07,1.3,71.41,M,23.95,M,2.0,0.73h+7C	\$GPRD,235.88,1.94,-0.11	
001	0010	14:54:27	\$PCGA,055447,00,3705.542953,N,12918.982789,E,2,07,1.3,71.41,M,23.95,M,3.2,0.73h+75	\$GPRD,237.78,2.13,-0.04
002	0020	14:54:28	\$PCGA,055448,00,3705.542856,N,12918.981162,E,2,07,1.3,71.42,M,23.95,M,3.0,0.73h+73	\$GPRD,238.78,2.35,-0.14
003	0030	14:54:29	\$PCGA,055449,00,3705.542856,N,12918.980145,E,2,07,1.3,71.42,M,23.95,M,2.0,0.73h+77	\$GPRD,237.48,2.33,-0.10
004	0040	14:54:30	\$PCGA,055450,00,3705.542198,N,12918.979133,E,2,07,1.3,71.39,M,23.95,M,3.2,0.73h+72	\$GPRD,236.78,2.00,-0.22
005	0050	14:54:31	\$PCGA,055451,00,3705.542117,N,12918.978113,E,2,07,1.3,71.38,M,23.95,M,3.0,0.73h+71	\$GPRD,236.80,2.31,-0.22
006	0060	14:54:32	\$PCGA,055452,00,3705.542117,N,12918.977122,E,2,07,1.3,71.41,M,23.95,M,2.0,0.73h+72	\$GPRD,236.70,2.40,-0.37
007	0070	14:54:33	\$PCGA,055453,00,3705.540688,N,12918.976079,E,2,07,1.3,71.40,M,23.95,M,3.2,0.73h+78	\$GPRD,236.80,2.05,-0.42
008	0080	14:54:34	\$PCGA,055454,00,3705.540153,N,12918.975085,E,2,07,1.3,71.53,M,23.95,M,3.0,0.73h+76	\$GPRD,237.48,1.91,-0.47
009	0090	14:54:35	\$PCGA,055455,00,3705.539657,N,12918.973854,E,2,07,1.3,71.52,M,23.95,M,2.0,0.73h+78	\$GPRD,237.60,2.40,-0.47
010	0100	14:54:36	\$PCGA,055456,00,3705.539214,N,12918.972739,E,2,07,1.3,71.43,M,23.95,M,3.2,0.73h+75	\$GPRD,237.18,2.26,-0.58
011	0110	14:54:37	\$PCGA,055457,00,3705.538718,N,12918.971693,E,2,07,1.3,71.42,M,23.95,M,3.0,0.73h+75	\$GPRD,236.80,1.97,-0.55
012	0120	14:54:38	\$PCGA,055458,00,3705.538199,N,12918.970662,E,2,07,1.3,71.44,M,23.95,M,2.0,0.73h+70	\$GPRD,236.80,2.12,-0.68
013	0130	14:54:39	\$PCGA,055459,00,3705.537784,N,12918.969594,E,2,07,1.3,71.46,M,23.95,M,3.2,0.73h+78	\$GPRD,234.28,2.05,-0.72
014	0140	14:54:40	\$PCGA,055460,00,3705.537213,N,12918.968544,E,2,07,1.3,71.45,M,23.95,M,3.0,0.73h+79	\$GPRD,235.57,2.16,-0.69
015	0150	14:54:41	\$PCGA,055461,00,3705.536721,N,12918.967523,E,2,07,1.3,71.42,M,23.95,M,2.0,0.73h+70	\$GPRD,235.68,1.75,-0.83

그림 10. 음향데이터, GPS, MRU 및 Heading sensor의 동기화된 파일

의 측위를 결정하는 GPS 데이터, MRU 및 Heading 데이터가 있으며, 그림 10은 이러한 모든 항해정보 데이터를 동기화시킨 결과를 보여주고 있다. 항해 정보와 음속 정보 등의 데이터를 이용하여 취득 데이터에 대해 보정을 실시하였고 바닥선의 처리, 위상처리 및 기록파일 생성 등의 데이터를 처리하였다.

탐사시 설정된 해상도는 4cm 였으나 데이터 처리에서는 15cm로 설정하였다. 그림 11은 탐사 경로 1에서 취득한 데이터의 처리 결과의 일부를 예로 든 것이다. 탐사 경로별로 취득한 데이터에 대한 보정과 데이터 처리를 수행한 결과를 이용하여 그림 12와 같은 탐사 경로별 등고선도, 수심기복도 등의 정밀 수심 데이터를 생성하였다. 또한 탐사 경로별로 획득한 음향 영상을 모자이크 하여 그림 13과 같이 실험 영역 전체에 대한 모자이크 영상과 수심 성과를 작성하였다.

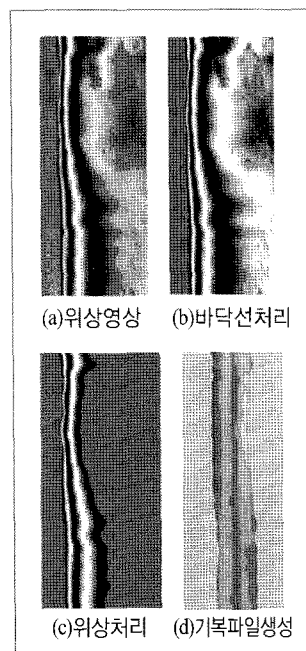


그림 11. 데이터의 처리(탐사경로1)

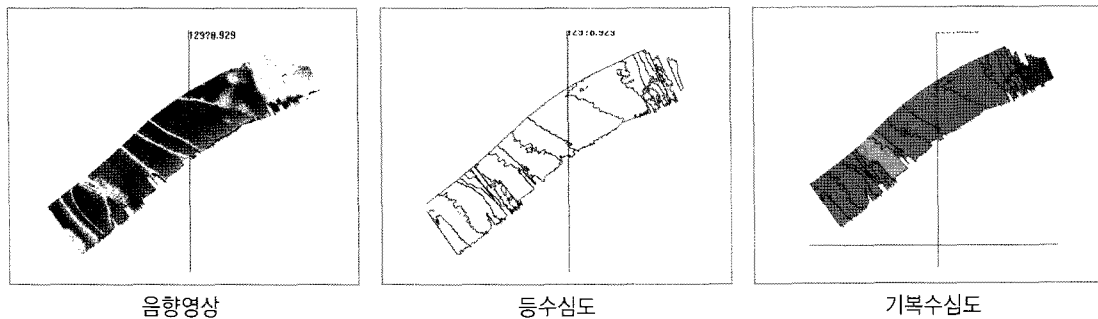


그림 12. 정밀 수심 데이터(경로1)

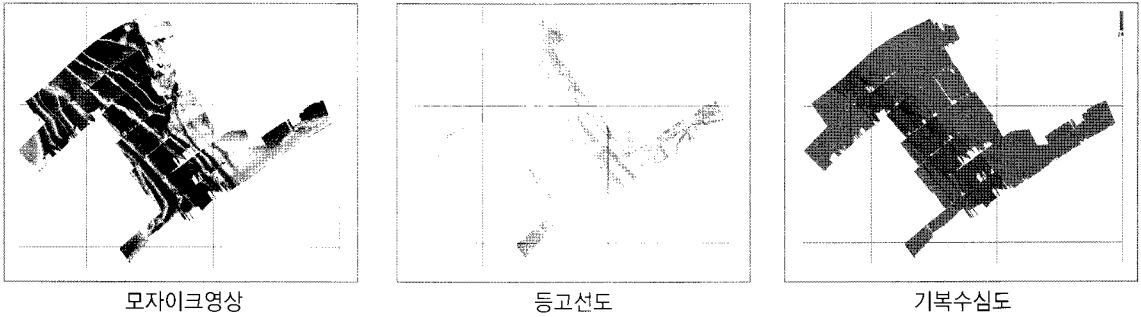


그림 13. 실험 영역 전체에 대한 정밀 수심 데이터

4.2 결과 분석

수심 정확도 분석은 단빔 음향탐사 데이터를 기준으로 하였으며, 보다 정밀한 분석을 위해 단빔 음향탐사 데이터는 보간을 통한 계산 값을 사용하지 않고 취득 데이터 자체를 활용하여 탐사 경로별로 비교 분석을 하였다. 검사점 구성은 단빔 음향탐사 점을 기준으로 최근린의 간섭계음향영상탐사 점을 선정하였으며, 탐사 경로당 평균 10m 간격으로 10점씩을 구성하여 총 70점을 선정하였다.

실험 영역의 수심에 대한 경로별 평균수심을 산출한 결과는 표 3 및 그림 14와 같이 단빔음향탐사 결과와 간섭계음향영상 탐사 결과가 거의 유사함을 알 수 있다. 표 4는 단빔 음향탐사 데이터를 기준으로 각 경로별 검사

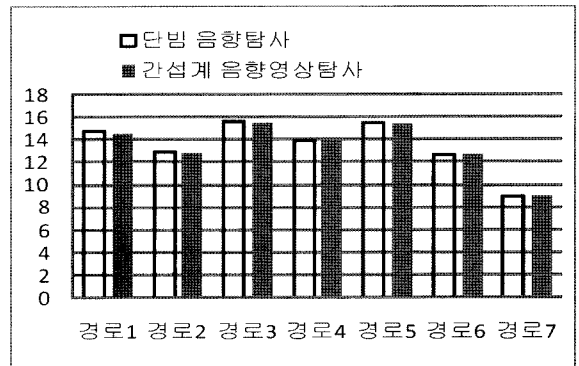


그림 14. 경로별 평균 수심

표 3. 탐사 방법에 따른 경로별 평균 수심(단위 : m)

탐사 방법	경로1	경로2	경로3	경로4	경로5	경로6	경로7
단빔 음향	14.69	12.91	15.63	13.94	15.50	12.66	8.96
간섭계 음향영상	14.58	12.89	15.59	13.97	15.44	12.72	8.97

표 4. 단빔음향탐사 데이터와 간섭계음향영상탐사 데이터와의 경로별 수심 오차(단위 : m)

검사점	경로1	경로2	경로3	경로4	경로5	경로6	경로7
1	0.09	0.20	0.04	0.04	0.18	0.09	0.08
2	0.15	0.11	0.14	0.19	0.17	0.10	0.01
3	0.15	0.20	0.03	0.17	0.15	0.22	0.09
4	0.09	0.08	0.20	0.12	0.02	0.20	0.08
5	0.03	0.11	0.12	0.11	0.05	0.06	0.19
6	0.17	0.12	0.14	0.08	0.13	0.20	0.00
7	0.23	0.00	0.15	0.04	0.09	0.08	0.06
8	0.13	0.06	0.22	0.14	0.18	0.09	0.12
9	0.18	0.10	0.13	0.17	0.18	0.01	0.16
10	0.18	0.07	0.15	0.15	0.17	0.08	0.04
평균	0.14	0.11	0.13	0.12	0.13	0.11	0.08
RMSE	±0.057	±0.061	±0.060	±0.054	±0.059	±0.070	±0.061

점에 대한 수심 오차를 계산한 결과이며 오차 값은 절대 값으로 표현하였다. 과대 오차는 수중이라는 점을 감안하여 4σ 를 기준으로 설정하였으며, 각 경로별로 분석한 결과 모두 허용치를 만족하는 것으로 나타났다. 검사점 전체에 대한 오차의 평균은 0.12m이며 RMSE는 $\pm 0.060m$ 이다. 그러나 경로 1, 3, 5에서는 특정 지점에서 발생 오차 값이 상대적으로 크게 발생하였고, 오차의 평균 값이 전체 평균보다 크게 나타났다. 이러한 현상은 간접계음향영상탐사 데이터 취득시 발생한 오류 때문이다.

또한 단빔 음향탐사와 간접계음향영상탐사 데이터를 이용하여 그림 15와 같은 3차원 모델링을 실시하였다. 간접계음향영상탐사 데이터는 수중 바닥 지형의 굴곡과 특징 요소들을 전체적으로 상세하게 반영하고 있음을 알 수 있었다.

의 수심 정보와 수중 바닥의 지형 정보를 동시에 취득하였고, 수심 데이터에 대한 정확도 분석과 3차원 모델링을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

첫째, 간접계 방식의 음향영상탐사에 의한 데이터를 단빔 음향탐사에 의한 데이터와 비교 분석한 결과 실험 영역의 데이터는 4σ 를 허용 오차라고 할 때, RMSE는 $\pm 0.060m$ 임을 알 수 있었다.

둘째, 취득 데이터를 이용한 3차원 모델링 결과 단빔 음향탐사에 의한 결과보다 수중 바닥의 지형에 대해 세밀하게 반영이 되어 지형자료로서의 활용가치가 보다 높을 수 있을 있다고 판단한다.

이상과 같이 간접계 방식의 음향영상탐사를 이용한 수심과 수중 바닥 지형정보의 동시 획득이 가능함을 알 수 있었으며, 향후 탐사 오류의 발생 유형별 원인과 해결 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 판단한다.

참고문헌

김성렬, 이용국, 정백훈 (2006), "Side Scan Sonar 실무이론과 현장조사에 적용", 한국마린엔지니어링학회 전기 학술대회 논문집, pp. 201-204

노정식, 최운수, 윤하수, 이유정 (2009), 멀티빔 (MBES)의 오차보정에 관한 연구, 한국GIS학회지, 한국GIS학회, 제17권, 제3호, pp. 351-359.

이종출, 문두열, 김대현, 서동주 (2004), "측면주사음탐기를 이용한 연안지역 해저지형탐사", 한국측량학회춘계 학술발표회 논문집, pp. 539-540

이재기 (2007), 해양지적 3차원 등록방안 연구, 박사학위 논문, 명지대학교, pp. 40-69.

정영동, 강상구 (2002), 음향측심기와 위성측법을 이용한 하천의 수심 측량, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제20권, 제4호, pp. 375-381.

Ghedhban, S. (2010), A Study of Prediction in Seabed Mapping, PhD dissertation, University of Wales Institute, Cardiff, pp. 17-61.

Xavier Lurton (2000), Swath Bathymetry Using Phase Difference, J. Oceanic Eng., VOL. 25, NO. 3, pp. 351-363.

J. S. Bird (2005), Analysis of Swath Bathymetry Sonar Accuracy, IEEE. J. Oceanic Eng., VOL. 30, NO. 2, pp. 372-390.



그림 15. 실험 영역에 대한 3차원 모델링

5. 결론

본 연구에서는 간접계 음향영상탐사 방법으로 저수지