

연구논문

# 원격 로봇선에 의한 운항속도에 따른 수심측량의 정확도 분석 Accuracy Analysis of Sounding Data Caused by Speed of Robot-ship

최병길\* · 박홍기\*\* · 조광희\*\*\*

Choi, Byoung Gil · Park, Hong Gi · Cho, Kwang Hee

## 要 旨

본 연구의 목적은 DGPS와 음향측심기를 장착한 소형의 로봇선을 이용하여 저수지의 수심정보를 획득하고 이를 이용하여 정확도를 분석하는데 있다. 즉 로봇선의 속도를 변화시키고 이에 따른 속도별 수심측정의 정확도를 분석하였다. 현장실험 결과, 로봇선의 속도가 느릴수록 수심측정의 오차가 적었으며, 로봇선의 속도가 5km/hr까지는 정규분포의 신뢰구간인 95% 이내에 포함되는 것을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 디지털에스, 음향측심기, 수심측정, 담수량, 로봇선

## Abstract

This study is aimed to analyze the accuracy of depth information of reservoir using the robot-ship equipped with GPS and echosounder. The accuracy of depth measurements by sounding data was analyzed according to change of robot-ship's speed in the water. The field experiment results showed that as robot-ship's speeds were slow, accuracy of sounding data were increased. Until Robot-ship's speed was up to 5 km/hr, the accuracy of sounding data were included reliable section of normal distribution.

**Keywords** : DGPS, Echosounder, Depth measuring, Water volume, Robot-ship

## 1. 서 론

본 연구의 목적은 DGPS와 음향측심기(Echosounder)를 장착한 소형의 로봇선을 이용하여 획득한 수심정보의 정확도를 분석하는데 있다.

수심정보를 획득하는 방법에는 음향측심측량, 사진측량, 수중측량, 레이저측량 등 다양한 방법이 있으나, GPS(Global Positioning System, 위성측위시스템)와 음향측심기를 이용하여 수면위치 및 수심을 동시에 측정하는 수심측정 방법이 정확성과 경제성 면에서 다양한 연구가 수행되었고 그 실효성이 검증되어 최근에 주로 사용되고 있다. 서용운과 최운수(2000)는 실시간 DGPS 및 음향측심기 데이터를 이용하여 방과제 축조시 투하되는 사석의 물량을 확인하는 연구를 수행하였고, 정영동과 강상구(2002)는 음향측심기와 GPS를 이용한 하천의 수심측량 정확도를 연구하였으며, 박운용 외 2인(2003)은 음향측심기를 이용한 하구하상 측량의 정밀도를 향상시킬 수

있는 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 자동으로 운항하면서 수심정보를 획득할 수 있는 소형의 로봇선의 속도를 변경하면서 저수지의 수심정보를 획득하고, 이를 기존의 유인측량선에 의하여 획득한 수심정보와 비교하여 로봇선을 이용한 수심측량시 최적의 속도를 산출하였다.

## 2. GPS와 음향측심기를 이용한 수심측량

### 2.1 GPS를 이용한 위치정보 획득

GPS를 이용한 이동체의 위치측정에 대한 연구는 국내 외에서 활발히 수행 중에 있다. 본 연구에서는 DGPS 기법중에서 고정밀 실시간 이동측위기법인 RTK OTF(Real Time Kinematic On The Fly, 실시간 동적측위)기법을 사용하였다.

GPS는 여러 가지 오차를 포함하고 있으며 사이클 슬립(Cycle slip)이나 다중경로(Multi-pass) 등 오차를 유발시

2007년 11월 15일 접수, 2007년 12월 18일 채택

\* 정회원·인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 교수 (bgchoi@incheon.ac.kr)

\*\* 정회원·경원대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 (hgpark@mail.kyungwon.ac.kr)

\*\*\* 교신저자·정회원·인천대학교 공학기술연구소 책임연구원 (raphael@incheon.ac.kr)

키는 요인을 잠재하고 있다(Hoffmann-Wellenhof 1997). 그러나 GPS는 시간, 시야, 기후에 제약이 적으며 휴대가 편리하고 상대적인 위치측정이 상당히 정확하기 때문에 이동체의 위치추적에 이용되고 있다. 또한 GPS는 측정초기 시간간격 설정에 의해 1초마다 한 번씩 위치를 측정할 수 있으므로, 이동하는 물체의 경우 이동 경로 및 위치를 확인할 수 있다(차득기, 2000).

기지국을 설치하여 오차발생요인을 파악하고 오차보정정보를 로봇선에 전송하면, 로봇선에서는 보정정보를 이용하여 정확한 위치정보를 획득하게 된다. DGPS 기법에 의해 획득한 로봇선의 정확한 위치정보는 다시 제어국에 전송하여 수치지도 상에 표시하여 실시간으로 이동 경로 및 위치 좌표를 모니터링 할 수 있게 된다.

## 2.2 음향측심기를 이용한 수심정보 획득

수심측량은 계획된 측심선에 따라 수면위치측량과 수심측량을 동시에 실시한다. 수면위치측량 방법에는 최근 GPS 장비의 정확성이 향상되면서 DGPS 방법이 활발하게 사용되고 있다(조홍연, 2003). 수심측정은 대상지역에 따라 수심측정방법이 달라진다. 일반적으로 수심이 얇은 곳에서는 측심봉과 측심추를 이용하고, 수심이 깊은 곳에서는 음향측심기가 이용된다(박운용 외, 2003). 송신음파와 수신음파의 도달시간차  $T$ 를 정확히 측정하고, 수중음속  $V$ 를 알면 수심  $Z$ 는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$Z = \frac{1}{2} VT \quad (1)$$

일반적으로 음향측심기는 가정음속  $V=1,500m/sec$ 를 기준으로 설계되며, 시간차는  $0.003sec$  단위로 관측된다. 따라서,  $\frac{V}{2}$ 를  $K$ 라 하면,  $Z=KT$ 가 되어 시간만의 함수로 표시되므로 음파신호의 도달시간만 알면 수심을 알 수 있다.

실제 수중의 음속은 염분, 수온, 수압 등에 의하여 미소하게 변화하므로 엄밀한 관측값을 구하려면 관측 당시의 실제 음속을 구하여 음속도 보정해 주어야 한다(정영동 외, 2002). 또한 해수의 경우 수심의 기준면과 관측시 해수위 차이를 고려한 조위보정, 수면으로부터 음파송출기까지의 깊이를 고려하는 흡수보정이 필요하며, 선박의 운동, 자료 획득시각 동기화 등에 의한 오차요인에 대하여 보정해주어야 한다.

일반적으로 해수에서의 온도보정은 윌슨의 실험식이 널리 이용되고 있으며 다음 식과 같다(유복모, 2004).

$$V_t = 4.572T - 4.4532 \times 10^{-2}T^2 - 2.6045 \times 10^{-4}T^3 + 7.9851 \times 10^{-6}T^4 \quad (2)$$

정밀수심측량을 수행하는 선박의 음향측심기는 선박의 운동에 영향을 받기 때문에 선박의 운동을 고려한 보정이 필요하다. 특히, 상하운동(Heave), 좌우회전운동(Pitch) 및 전후회전운동(Roll)에 대한 보정은 가장 기본적이고 중요한 인자이다. 일반적으로 선박의 전후운동(Surge) 및 좌우운동(Sway)은 평면위치변화에만 영향을 미치며, 중심축을 따른 선박의 회전운동(Yaw)은 음향측심기가 선박의 중심지점에 설치된 경우 오차는 무시할만한 정도가 된다. 측정시점의 일치에 의한 오차는 측정장비의 측정간격을 조정하면 감소시킬 수 있다.

로봇시스템의 적용지역은 댐, 저수지 등 민물지역이므로 염분, 수압 등의 영향으로 변화하는 음속은 측정결과에 미치는 영향이 미소하다고 판단되어 수온만을 보정하였다. 수온보정은 음향측심기의 자동보정 기능을 이용하여 보정하였으며, 수심측정에 영향을 미치는 회전운동은 GPS 수신기를 로봇선의 중심지점에 설치하여 오차를 최소화하였다.

## 3. 원격수심측정시스템

### 3.1 로봇선

로봇선의 선체는 전복에 따른 위치정보 손실 및 장비의 결손 등을 사전에 방지하고, 안정적인 조항을 할 수 있도록 물리-역학적 측면을 고려하였으며, 선체의 재질은 충격에 강한 FRP(Fiber Reinforced Polyester, 강화 플라스틱 섬유)로 제작하여 파손에 대비하였다. 그림 1은 본 연구에 사용된 로봇선을 보여주고 있다.

### 3.2 GPS 및 에코사운더

연구에 사용된 GPS는 일본 TOPCON 사의 Legacy-H 모델로서 제원은 표 1과 같다. 음향측심기는 호주 BRUTTOUR 사의 CEESTAR 모델로서 제원은 표 2와 같다. 그림 2는



그림 1. 로봇선

표 1. GPS의 제원

항 목	제 원
정확도 (2주파 수신에 의한 RTK일 경우)	수평 10mm±1.5ppm 수직 20mm±1.5ppm
통신속도	최소 300baud ~ 최대 406,800baud
사용시간	7시간(전용 배터리)

표 2. 음향측심기의 제원

항목	제원
주파수	200Khz
음향발신각도	8°
측정 깊이	0.3m ~ 99.99m
정확도	깊이의 2ppm 또는 최대 1cm
통신속도	최소 4,800baud ~ 최대 115,200baud



그림 2. GPS 센서 및 CDMA 무선 모듈



그림 3. 음향측심기 컨트롤러

GPS의 센서 및 통신용 CDMA 모듈이고, 그림 3은 음향측심기의 사진이다.

### 3.3 정보처리모듈

본 연구에서는 GPS 및 음향측심기의 데이터와 모터제어 명령을 동시에 처리할 수 있도록 정보처리모듈을 개발하여 연구에 이용하였다. 정보처리모듈은 하드웨어의 구동을 직접 제어함으로써 데이터의 처리효율을 높이고 데이터의 처리시간을 단축하기 위하여 마이크로 컨트롤러(Micro controller)인 PIC(Programmable Interrupter Controller, 프로그램이 가능한 인터럽트 제어기) 단일기판의 형태로 제작하였다. 시리얼 포트 2개가 지원되므로 하나의 포트는 GPS 및 음향측심기의 신호를 받는데 이용하고, 다른 하나의 포트는 통신포트를 연결하는데 이용하며, 모터는 정보처리모듈에 바로 연결하여 모든 기능을 정보처리모듈에서 수행할 수 있었다. 그림 4는 연구에 사용된 정보처리모듈을 나타낸다.

### 3.4 제어 및 통신 시스템

속도조절 및 조향기의 조작에 필요한 내부 및 외부 파라미터들에 대하여 분석하고, 속도의 증감 및 방향 전환을 정량화하였다. 또한 사용자가 로봇선을 원하는 지점으로 보낼 수 있도록 수동 및 자동화 알고리즘을 개발하고 프로그래밍화하였다.

로봇선과 제어국간의 통신시스템은 이동통신 서비스망을 이용한 무선인터넷과 RF(Radio Frequency, 라디오 주파수) 모듈을 이용한 2채널 보완시스템으로 구성하였다. 연구에 사용된 CDMA 무선모뎀은 국내 Growell 사의 EK-001B 모델이며, RF 모듈은 미국 Free Wave Technologies 사의 Spread Spectra Wireless Data Transceiver 모델이다.

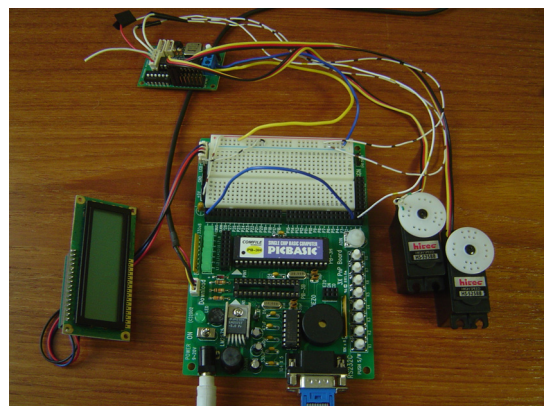


그림 4. 중앙제어보드

### 4. 로봇선을 이용한 원격수심측정

인천광역시 강화군 길상면에 위치한 길정저수지를 대상으로 수심데이터를 획득하였다. 대상지역은 종방향 약 1.6km, 횡방향 약 0.16km로서 남북 방향으로 긴 형태이다. 대상지역의 특성상 종방향 측량계획선을 규칙적으로 배열하기 어려웠기 때문에, 종방향을 3등분하여 분할측정하고 분할된 지역이 중첩되도록 하였다. 원격측정 로봇선의 자동제어 프로그램을 이용하여 자동운항하도록 하였으며, 데이터의 측정 간격은 초당 1회로, 운항계획선의 간격은 10m로 하였다. 그림 5는 로봇선의 운항계획선이다.

속도에 따른 로봇선의 수심측정 정확도를 분석하기 위해서는 정확한 수심데이터가 필요하다. 본 연구에서는 가장 최근인 2003년에 한국농촌공사의 저수지 용적량산정 용역사업으로 수행된 결과를 이용하였다. 유인측정선에 의해 획득한 수심측량 데이터를 정확한 수심정보라고 가정하고 이를 기준으로 속도별 수심측정 정확도를 분석하였다. 그림 6은 유인측량선의 항적도이다.

로봇선의 운항속도는 1km/hr, 2km/hr, 3km/hr, 5km/hr,

10km/hr의 총 5가지 조건으로 하였다. 기존의 수심데이터 및 각각의 조건에서 획득된 수심데이터들은 크리깅 보간법을 이용하여 격자수심도를 작성하고 가장 깊은 수심인 28.5m부터 0.5m 단위로 데이터를 추출하여 수심을 비교하였다. 기존 수심데이터를 기준으로 각 속도별 수심데이터에 대한 오차를 계산하였으며 그 결과는 표 3과 같다.

로봇선의 속도를 1km/hr로 하였을 경우 수심별 오차의 평균은 약 1.5%, 로봇선의 속도를 2km/hr로 하였을 경우 수심별 오차의 평균은 약 2%, 로봇선의 속도를 3km/hr로 하였을 경우 수심별 오차의 평균은 약 4%, 로봇선의 속도를 5km/hr로 하였을 경우 수심별 오차의 평균은 약 4.5%, 로봇선의 속도를 10km/hr로 하였을 경우 수심별 오차의 평균은 약 8.5% 정도인 것을 알 수 있었으며, 표 4 및 그림 7과 같다.

표 4에서와 같이 로봇선의 속도가 느릴수록 물의 저항에 의한 선체의 자세변화가 적기 때문에 수심의 정확도가 높게 나타났으며, 로봇선의 속도가 5km/hr까지는 정규분포의 신뢰구간인 95% 이내에 포함되는 것을 알 수 있었다. 따라서 작업시간을 고려하여 빠른 시간내에 정

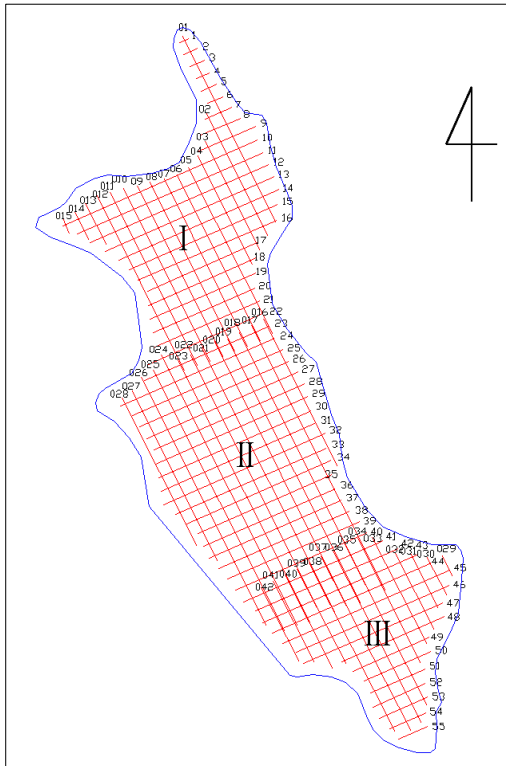


그림 5. 로봇선의 운항계획선

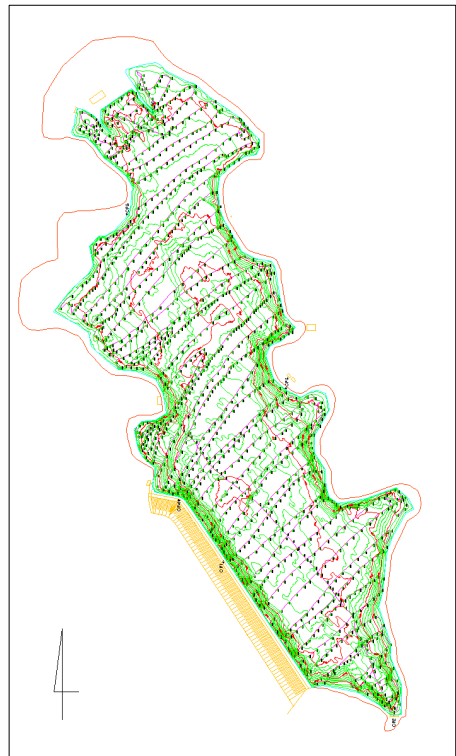


그림 6. 유인측량선의 항적도

표 3. 로봇선으로 획득한 수심데이터와 기존 수심데이터와의 오차

기존 수심 데이터 (m)	로봇선 속도별 수심데이터 및 오차														
	1km/hr			2km/hr			3km/hr			5km/hr			10km/hr		
	수심 (m)	수심차 (m)	오차 (%)	수심 (m)	수심차 (m)	오차 (%)	수심 (m)	수심차 (m)	오차 (%)	수심 (m)	수심차 (m)	오차 (%)	수심 (m)	수심차 (m)	오차 (%)
28.5	28.36	0.14	0.50	28.28	0.22	0.76	27.36	1.14	3.99	27.62	0.88	3.09	26.74	1.76	6.18
28.0	27.37	0.63	2.24	27.77	0.23	0.81	27.49	0.51	1.82	26.91	1.09	3.88	26.17	1.83	6.52
27.5	27.04	0.46	1.68	27.06	0.44	1.61	26.80	0.70	2.53	26.47	1.03	3.74	25.71	1.79	6.50
27.0	26.70	0.30	1.12	26.84	0.16	0.59	26.47	0.53	1.95	26.13	0.87	3.24	25.45	1.55	5.74
26.5	25.93	0.57	2.17	25.75	0.75	2.81	25.61	0.89	3.36	25.65	0.85	3.22	24.89	1.61	6.08
26.0	25.83	0.17	0.67	25.58	0.42	1.63	25.65	0.35	1.36	25.20	0.80	3.06	23.77	2.23	8.57
25.5	25.27	0.23	0.90	24.90	0.60	2.36	24.92	0.58	2.26	24.79	0.71	2.77	23.79	1.71	6.70
25.0	24.38	0.62	2.47	24.35	0.65	2.61	24.24	0.76	3.06	23.61	1.39	5.54	22.75	2.25	8.99
24.5	24.28	0.22	0.91	23.84	0.66	2.70	23.46	1.04	4.26	23.48	1.02	4.14	22.34	2.16	8.82
24.0	23.40	0.60	2.51	23.57	0.43	1.78	22.84	1.16	4.85	23.37	0.63	2.63	22.70	1.30	5.41
23.5	23.46	0.04	0.19	23.00	0.50	2.14	22.64	0.86	3.67	22.82	0.68	2.91	21.65	1.85	7.87
23.0	22.37	0.63	2.74	22.47	0.53	2.31	22.42	0.58	2.51	22.35	0.65	2.83	21.62	1.38	6.00
22.5	21.99	0.51	2.26	22.10	0.40	1.76	21.20	1.30	5.76	21.82	0.68	3.02	21.17	1.33	5.90
22.0	21.80	0.20	0.90	21.77	0.23	1.03	21.08	0.92	4.18	21.29	0.71	3.21	20.01	1.99	9.03
21.5	21.17	0.33	1.53	21.13	0.37	1.71	20.50	1.00	4.67	20.36	1.14	5.29	19.48	2.02	9.40
21.0	20.74	0.26	1.23	20.49	0.51	2.43	20.11	0.89	4.22	19.82	1.18	5.62	19.26	1.74	8.29
20.5	20.05	0.45	2.20	20.17	0.33	1.61	19.98	0.52	2.53	19.68	0.82	4.01	18.79	1.71	8.34
20.0	19.81	0.19	0.93	19.66	0.34	1.69	19.54	0.46	2.28	19.27	0.73	3.64	18.35	1.65	8.25
19.5	19.28	0.22	1.11	19.41	0.09	0.44	18.38	1.12	5.75	18.42	1.08	5.53	18.05	1.45	7.42
19.0	18.74	0.26	1.37	18.67	0.33	1.74	17.78	1.22	6.44	18.50	0.50	2.63	17.34	1.66	8.72
18.5	18.27	0.23	1.24	17.92	0.58	3.11	17.89	0.61	3.30	17.87	0.63	3.39	16.42	2.08	11.27
18.0	17.78	0.22	1.23	17.25	0.75	4.16	17.50	0.50	2.77	17.10	0.90	4.99	15.87	2.13	11.84
17.5	17.47	0.03	0.15	17.33	0.17	0.95	16.66	0.84	4.80	16.07	1.43	8.19	16.21	1.29	7.36
17.0	16.80	0.20	1.17	16.75	0.25	1.48	15.69	1.31	7.70	16.19	0.81	4.74	15.06	1.94	11.43
16.5	16.10	0.40	2.44	15.78	0.72	4.34	16.06	0.44	2.69	15.26	1.24	7.53	15.22	1.28	7.76
16.0	15.93	0.07	0.41	15.81	0.19	1.20	15.16	0.84	5.26	15.21	0.79	4.94	14.52	1.48	9.24
15.5	15.33	0.17	1.11	14.86	0.64	4.10	14.27	1.23	7.97	14.08	1.42	9.15	13.80	1.70	10.94
15.0	14.41	0.59	3.94	14.58	0.42	2.77	14.24	0.76	5.07	13.96	1.04	6.92	13.43	1.57	10.45
14.5	14.36	0.14	0.98	13.79	0.71	4.93	13.62	0.88	6.10	13.43	1.07	7.39	12.85	1.65	11.41
14.0	13.53	0.47	3.38	13.41	0.59	4.19	13.37	0.63	4.47	13.14	0.86	6.15	12.10	1.90	13.54
오차의 합			45.68			65.75			121.56			137.40			253.98
오차의 평균			1.52			2.19			4.05			4.58			8.47

확한 수심데이터를 획득하기 위해서는 로봇선의 속도를 5km/hr로 해야 함을 알 수 있었다.

본 연구에 사용된 로봇선은 실내공간이 협소하여 모션 센서나 관성측정장치(IMU, Inertial Measurement Unit)와 같은 자세정보 보정장비를 탑재하지 못하였기 때문에 오

차가 비교적 크게 나온 것으로 판단된다.

로봇선을 이용하여 획득한 수심데이터는 로봇선의 속도에 관계없이 기존 수심데이터에 비해 전체적으로 낮은 값을 나타냈는데, 이는 2003년 이후에 저수지 바닥에 퇴적물이 쌓였기 때문인 것으로 판단된다.



표 4. 로봇선의 속도에 따른 평균수심오차

로봇선의 속도(km/hr)	수심측정오차의 평균(%)
1	1.52
2	2.19
3	4.05
5	4.58
10	8.47

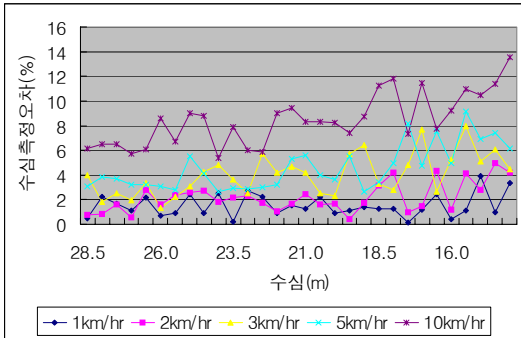


그림 7. 속도별 수심측정 오차

### 4. 결 론

본 연구에서는 자동운항이 가능한 소형의 무인 로봇선의 속도를 변화시키면서 저수지의 수심 정보를 획득하고, 이를 이용하여 속도에 따른 수심측정 정확도를 분석하였다.

로봇선을 이용하여 획득한 데이터와 기존의 유인 에코사운딩을 이용하여 획득한 데이터를 비교 분석한 결과, 속도가 느릴수록 수심측정의 정확도가 높은 것을 알 수 있었으며, 경제적이면서도 정확한 데이터를 획득할 수 있는 속도는 5km/hr인 것을 알 수 있었다.

향후 로봇선에 자세정보 보정장비를 탑재하여 고속에서도 정확한 수심데이터를 획득할 수 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2004년도 인천대학교 자체연구비 지원과제(에코사운딩에 의한 저수지 담수용량 산정에 관한 연구)의 성과 일부로서 연구를 지원해주신 인천대학교에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 김정하, 박일경, 이운성, 1997, "병렬구조형 1/2 Size 차량 운전 모사장치의 설계 및 특성연구", *제어계측·자동화·로보틱스연구회 합동학술발표회*, pp. 49-43.
- 박운용, 김천영, 김용보, 2003, "하구하상 측량 정밀도 향상에 관한 연구", *한국측량학회지*, 한국측량학회, 제 21권, 제 2호, pp. 137-145.
- 서영운, 최윤수, 2000, "실시간 DGPS & Echo-Sounding 데이터를 이용한 방파제사석투하 토공물량 확인", *한국측량학회지*, 한국측량학회, 제 18권, 제 4호, pp. 343-350.
- 이석우, 김근식, 1996, *해양측량학*, 집문당.
- 정영동, 강상구, 2002, "음향측심기와 위성항법을 이용한 하천의 수심측량", *한국측량학회지*, 한국측량학회, 제 20권, 제 4호, pp. 375-381.
- 조흥연, 2003, "연안해역의 정밀 수심측량기법", *한국수자원학회 학술발표회 논문집(I)*, 한국수자원학회, pp. 513-516.
- 차득기, 2000, *실시간 DGPS에 의한 원격측위 및 자동화유도에 관한 연구*, 박사학위논문, 경기대학교 대학원, pp. 35-78.
- Comfile Technology, 2001, *Manual of Servo Motor Controller*, pp. 1-4.
- Comfile Technology, 2000, *PICBASIC 2000 Data Book*, pp. 78-79.
- Hoffmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J., 1997, *Global Positioning System Theory and Practice 4th revised edition*, Springer Wein NewYork.
- Kammerer, E. L. L., 2000, *A New Method for the Removal of Refraction Artifacts in Multibeam Echosounder Systems*, Ph.D. Dissertation, The University of New Brunswick, September.
- Lee, Y. C., 2000, "Application of WADGPS method for Navigation and Acquisition of the Geo-Spatial Information", *Proceedings of Korean Society of Civil Engineer*, Vol. IV, pp. 569-572.
- O'Connor, M. L., 1998, *Carrier-Phase Differential GPS for Automatic Control of Land Vehicles*, Ph.D. Dissertation, Stanford University, December.
- Sohn, H. G., 2000, "A Study on the Improvement of GPS Position Accuracy for Car Navigation System", *Proceeding of Korean Society of Civil Engineer*, Vol. IV, pp. 565-568.
- Stephens, R., 1999, *Visual Basic Graphic Programming*, Wiley.