

하구하상 모니터링 정밀도 향상에 관한 연구

The Study on Accuracy Improvement of Estuary Riverbed Monitoring

박운용* · 김용보** · 백기석***

Park, Un Yong · Kim, Yong Bo · Back, Ki Suk

要 旨

최근 GPS는 기준점 측량을 비롯한 각종 정밀측량과 항법 등에 그 효율성이 점점 증대되고 있다. 또한 구조물의 변위해석, 해양조위관측, 하천수위관측 및 수심측량 장비와의 조합에 의한 해저, 하상 지형의 모니터링 등에도 널리 이용되고 있다. 본 논문은 DGPS, RTK-GPS와 Echo Sounder 조합 해석에 의해 하구, 하상 모니터링 시 그 효율성을 높이기 위한 연구이다. 이를 위해 기초 실험으로 하구 지질특성을 고려한 수조 실험을 통해 Echo Sounder의 오차 보정량을 산출하고, 하구, 하상 3차원 모니터링을 위한 S/W를 개발하여 현장 실험에 적용, 제반 문제점을 보완하였다. GPS와 Echo Sounder의 조합에 의한 하구, 하상 지형 해석시 측량선의 유동에 의해 수면과 송수파기간의 거리변화에 대한 흡수에 의한 오차는 기하학적인 재배치를 통해 제거할 수 있었고, $z = BM + SAH - DBR_{(t)} - DRT - ED$ 의 보정식을 산출하였다. 또한 Echo Sounder와의 하구, 하상 지질 특성에 대한 수심측정 오차는 실험 수조를 이용하여 평균 입경 - ES잔차 관계를 파악하고 회귀분석을 통해 $Y = -0.00474 * \ln(X) - 0.0045$ 의 보정식을 산출하여 적용 가능성을 검증하였다.

Abstract

Currently, the efficiency of GPS has been increased in the various precise survey like as the control survey and the navigation etc. Also, it is widely used in the deformation analysis of the structure, the measurement of the marine tides, the measurement of the river level and the topographic monitoring of seabed or riverbed by combined the measurement equipment for depth. In this study, we intend to increase in efficiency of the topographic monitoring of seabed or riverbed by combined with DGPS, RTK GPS and echo sounder. For this study, we defined the error correction of the echo sounder with the experiment of water tank, which is considered the characteristic of estuary riverbed and then we developed the s/w for 3-dimensional monitoring of estuary riverbed and applied the s/w to field test and improved the various problems. On analyzing topography of estuary riverbed by combined GPS with echo sounder, the draught error which is yielded to change of length from the water surface by the movement of survey vessel to the end of the transducer was eliminated by geometrical rearrangement and we defined the correction formula, $z = BM + SAH - DBR_{(t)} - DRT - ED$. The sounding error about the echo sounder and characteristic of estuary riverbed was found by understanding the relation of average diameter and residual error and we defined correction formula, $Y = -0.00474 * \ln(X) - 0.0045$ by the regression analysis. and then we verified applicability of correction formula.

1. 서 론

가. 연구목적 및 배경

최근 Echo Sounder와 GPS의 조합에 의한 3차원 지형 측량은 최근 해양 및 하천에서의 구조물 설치, 준설 및 매립, 해저 및 하상 지형변화 관측 등 그 활용도가 높아지고 있다. Echo Sounder와 GPS의 조합에 의한 3차원 지형 측량은 위성 측위시스템을 이용한 지상부의 3차원

위치를 결정하고, GPS와 Echo Sounder의 이격거리 (Offset)를 결정하고, Echo Sounder의 수심측정값을 고려하면 해저나 하상의 지형 측량이 가능해진다. 그러나, 이 경우 다음과 같은 문제점이 있다. 첫째, Echo Sounder의 수심측정 정확도에 관한 문제이다. Echo Sounder의 수심측정 정확도에 영향을 미치는 것은 먼저 보정 가능한 수온, 염분도, 수압에 의한 음파 수중속도의 변화에 의한 오차가 있고, 음파의 반사면인 해저, 하상의

* 정회원 · 동아대학교 토목해양공학부 교수

** 동아대학교 토목공학과 박사과정 (drako@daunet.donga.ac.kr)

*** 동아대학교 토목공학과 박사과정

지질 상태에 의한 오차가 있다. 둘째, Echo Sounder와 GPS의 조합에 있어 두 기기의 구조적인 조합형태, 선박의 유동에 의한 Echo Sounder의 반사면과의 수직각 변화 등에 의한 오차가 발생한다³⁾. 그러나 Echo Sounder와 GPS 조합에 의한 하상 및 해저 지형측량시 이러한 오차들에 대한 검정없이 측량의 성과를 이용하게 되면 해양 및 하천에서의 구조물 설치, 준설 및 매립 등 공사는 물론 해저 및 하상 지형의 정확도와 효율성이 매우 저하된다.

본 연구에서는 하구 지역에 있어 Echo Sounder와 GPS의 조합에 의해 발생하는 문제점을 해결하고, 하상 3차원 측량시 우수한 정밀도와 효율성을 획득할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

이를 위해 먼저 Echo Sounder와 GPS의 조합측량시 정밀도 향상은 Echo Sounder의 하상 지질상태에 따른 오차, 조합시 측량선 유동에 의한 오차를 실험에 의해 산출하고 이에 대한 보정값과 보정식을 제시하고자 한다.

또한 실험을 통해 획득한 보정값과 보정식을 적용한 Echo Sounder와 GPS 조합에 의한 지형측량용 프로그램을 개발하고자 한다. 그리고 정밀 지형측량 성과와 작성한 프로그램을 이용한 측량성과와 비교하여 3차원 하상 측량시 획득한 보정식과 이를 적용한 프로그램의 효율성 및 활용가능성을 제시하고자 한다.

나. 연구내용 및 방법

해양이나 하천에 있어 해도 및 지형도 작성이나 선박의 항법 등에 있어 최근 GPS와 Echo Sounder를 주로 사용하여 그 작업의 효율성이 매우 향상되고 있다. 그러나 해양이나 하천의 특성에 적합한 측위 GPS 기법과 Echo Sounder의 정밀도에 대한 상세한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 하구하상 지질특성에 따른 Echo Sounder 정확도 분석 및 보정식 개발을 위해서는 실제 자연 하구하상 지질 입도별 Echo Sounder의 오차를 구해야 한다. 그러나 실제 하천에서 수심의 참값을 측정하는 것이 불가능하므로 본 연구에서는 2.5m(H)×1.8m(B)×1.0m(L) 규격의 인공수조를 제작하여 실험을 수행하였다. 제작된 인공수조는 Echo Sounder의 측심봉의 위치를 고정할 수 있으며 투명한 아크릴 재질로 제작하여 실험시 용이성을 고려하였다.

인공수조 실험을 위해 먼저 연구대상지인 하구지역에서 총 20개의 시료를 채취하여 입도분석을 실시하고 평균입경에 대해 대표적인 6개의 시료를 선택하였다. 선택된 시료들을 인공수조에서 하구하상 지질면을 재현하였다.

그리고 각 시료별로 자료취득 간격을 1초로 설정하여 약 3시간동안 10,200회씩 Echo Sounder 수심측정 실험을 수행하였다. 여기서 각 시료에 대해 Echo Sounder에 의한 수심 측량의 오차를 파악하기 위해 먼저 각 시료에 대해 Bar Checker기에 의한 정밀 수심측량을 반복 실시하여 최확치를 얻었다. 이 측정치는 수면에서 지질이 시작되는 지점까지 거리를 의미한다. 여기서 정밀 수심측량의 측정치는 수조내에 유속이 존재하지 않고, 인공수조내의 조건이므로 최확치라 할 수 있다.

따라서 Echo Sounder 측정치와 앞서 얻은 최확치와의 차를 Echo Sounder 잔차(이하 ES잔차)로 하고, 이는 실제 지질이 시작되는 지점에서부터 하상지질의 입경별로 Echo Sounder의 음파가 반사되는 지점까지의 거리이다.

파악된 평균입경-ES잔차 관계의 수학적 모형을 얻기 위해 회귀분석을 실시하였다.

선형회귀분석, 로그회귀분석, 지수회귀분석을 실시하여 회귀분석에서 구한 결정계수에 의해 평균입도-ES잔차에 대한 수학적 모델식을 구하여 이를 하구하상 지질 특성에 따른 Echo Sounder 보정식으로 제안하였다. 그러나 이 보정식은 자연 하구하상 지질을 채취하여 실험한 것으로 채취과정과 재현과정에서 상당한 교란이 발생하여 실제 자연상태의 지질층에 대해 획득할 수는 없다. 따라서 수조실험에 의해 획득한 지질특성에 따른 Echo Sounder의 보정식에 대한 검증이 필요하다.

이를 위해 본 연구에서는 수심을 재래식 방법에 의해 정확하게 측정할 수 있는 수심이 얇고, Echo Sounder의 거치시 유동이 전혀 발생하지 않는 거치대가 존재하고, 점토질과 모래로 하상지질이 구성된 조건을 갖춘 실험대상지를 선정하였다.

그리고 교란이 없는 자연상태의 하상지질에 대해 Echo Sounder 수심측정 실험을 수행, 결과를 획득한 후 시료를 채취하여 인공수조에서 다시 재현하여 동일하게 실험을 수행하여 그 결과를 획득하였다.

각각의 결과를 이전에 구한 하구하상 지질특성에 따른 Echo Sounder 보정식과 비교 분석하여 보정식을 검증하였다.

그리고 하천의 유동에 의한 수면과 Echo Sounder의 측심봉까지의 거리변화에 의한 홀수 보정식의 개발을 위해 먼저 기존 연구성과들을 통해 지금까지 사용하는 방법들의 단점을 파악하고 이를 보완하고자 하였다. 본 연구에서는 GPS의 z값과 Echo Sounder 측심봉과의 기하학적 재배치를 이용하여 측량선 유동에 의한 홀수 오차를 제거하고자 하였다. 즉, 측량선에 장치된 GPS 안테나와 수중의 Echo Sounder 측심봉까지의 거리를 고정하면 측량선의 유동이 발생하더라도 이 값이 고정되어 있으며

로 홀수 오차를 제거 할 수 있다. 이를 이용하여 본 연구에서는 홀수 보정식을 개발하였다.

위 두 보정식을 적용하여 본 연구에서는 GPS와 Echo Sounder 조합에 의한 하구하상 모니터링을 위한 시스템을 구축하고자 한다. 이를 위해 평면 위치는 GPS를 이용하고, 수심 자료는 Echo Sounder에 의하며 여기에 앞서 실험과 연구에 의해 구한 지질특성에 따른 Echo Sounder 수심측정 보정식과 홀수 보정식을 적용하여 시스템을 구축하였다. 구축된 시스템은 Visual Basic으로 구현하였다. 개발된 시스템을 이용하여 하구하상 지형모니터링을 수행하여 하구하상 모니터링에 있어 개발된 시스템에 의한 활용가능성을 검토하였다.

2. Echo Sounder에 의한 수심측량 정밀도 향상

Echo Sounder를 이용한 수심측량에 있어 정밀도 향상을 위해 전술한 바와 같은 여러 가지 요인에 의한 오차의 제거가 필수적이다. 실제 수심측량에서 고정밀도의 결과를 취득하기 위해서는 각각의 오차의 요인에 대해 기계 오차 보정, 홀수 보정, 강하 및 복항(伏航)보정, 음속도 보정, Heave, roll, pitch, heading에 대한 보정이 필요하다²⁾.

본 논문에서는 음속도 보정은 바-체크에 의해 선행하고, 강하 및 복항에 의한 오차는 RTK GPS 기법을 사용하여 측량선의 위치를 실시간으로 결정하여 최소화 하였다. 따라서 본 연구에서는 홀수 보정에 대해서 측량선의 유동에 의한 홀수 변화를 Echo Sounder와 RTK GPS 이동국 안테나와의 기하학적인 관계를 이용하여 홀수 보정식을 개발하고, 기계오차 보정에 대해서는 반사면인 지질의 특성에 의한 오차를 고려하고 있지 않으므로 수조 실험에 의해 하구하상 지질 입경과 ES잔차에 대한 관계식을 구하였다. 그리고 이를 검증하기 위해 현장 및 수조 실험을 수행하였다.

가. 홀수(Draft) 보정식 개발

일반적인 수심측량은 평균해수면에 대한 해도나 지형도 작성을 위한 측량과 매립, 준설공사를 위한 해저 및 하상 3차원 측량이다. 이 두 측량은 수심측량 후 조위에 의해 보정하여 평균해수면에 대한 값으로 환산해야 한다. 기존 홀수 보정식은 실시간 조위변화를 시간대별로 입력하여 보정하고 있다. 이 경우 그림 1과 같이 수심과 평면위치의 관계를 결정한다. 즉, 평면위치좌표 x, y 는 GPS와 TS를 이용하고, 수직위치좌표 z 는 식 (1)과 같은 방식으로 산출할 수 있다.

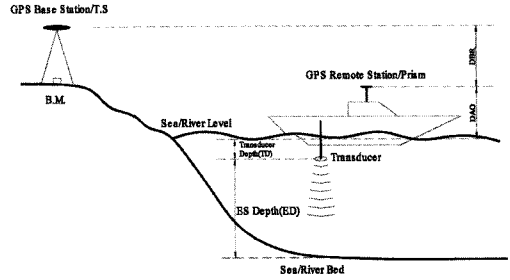


그림 1. 식 (1)에 의한 수심측량

$$z = ED + TD \pm TC \tag{1}$$

ED : Echo Sounder 측정치(m), TD : 수면과 Echo Sounder 측심봉까지의 거리(m), TC : 시간별 조위 보정치(m)이다.

이 경우 TD 를 고정하여 계산하므로 파도, 측량선의 유동에 의한 변화를 고려하지 못하므로 실제로 매우 큰 오차를 발생시킨다. 또한 시간별 조위 보정치도 고려해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 본 논문에서 그림 2와 같이 수심과 평면위치의 관계를 결정하고 새로운 공식을 개발하여 홀수 오차를 최소화 하였다.

즉, 평면위치좌표 x, y 는 RTK GPS에 의한 이동국 평면 위치좌표인 x_{GPS}, y_{GPS} 를 사용하고, 수직위치좌표 z 는 이동국의 안테나와 Echo Sounder의 측심봉간의 거리가 고정되어 있으므로 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$z = BM + SAH - DBR_{(t)} - DRT - ED \tag{2}$$

BM : 기지국 표고(m), SAH : 기지국의 안테나 고(m), $DBR_{(t)}$: 기지국의 수직좌표 - $z_{GPS(t)}$ (m), $z_{GPS(t)}$: RTK-GPS 이동국 수직좌표(m), DRT : GPS 안테나와 Echo Sounder 측심봉간의 거리(m), ED : Echo Sounder 측정치(m)이다.

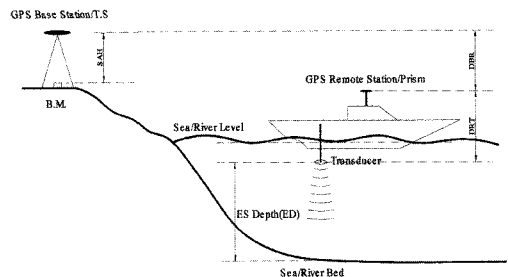


그림 2. 식 (2)에 의한 수심측량

식 (2)에서 z 의 값을 계산하기 위해 z_{GPS} 를 이용하기 때문에 수심측정치에 위성측량에서의 수직오차가 누적 이 되지만 DRT 는 파도나 측량선의 유동 등에 의한 변화에 대해 불변하므로 측량선의 유동, 이동 등에 의한 홀 수 오차를 최소화 할 수 있어 정밀한 수심측량이 가능할 것이다.

나. 지질 특성에 따른 측심기 보정식 개발

1) 수조실험

Echo Sounder의 반사면인 실제 해저, 하상의 지질 특성에 따라 측심의 오차가 발생한다. 이 지질특성에 따른 Echo Sounder의 오차를 구하기 위해서는 실제 자연상태의 지질에서 실험을 행하여 그 값을 취득해야 하지만 일반적인 하천이나 해상에서는 불가능하므로 자연상태에 대한 오차는 구할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 인공수조를 제작하여 하구하상 지질면을 재현하여 Echo Sounder로 관측하여 최확치에 대한 측심의 ES잔차와 지질 상태와의 관계를 평균입경-측심ES잔차의 관계로 나타내고 회귀분석을 통해 지질특성에 대한 보정식을 구하고자 한다.

2) 실험 장비

실험 수조는 채취한 시료를 재현하고 수조 상부에 Echo Sounder를 거치하여 실험을 실시하여야 하기 때문에 다음과 같은 조건을 만족하도록 수조를 제작하였다.

여러 지형조건을 동시에 구현할 수 있는 형태, 실험자가 수조내에서 작업가능한 형태, 수조내 입·수배수가 용이한 형태, 내부가 보이는 형태로 제작하여야 하며, 수조 상부에 Echo Sounder 이동 거치대를 설치하였다. 그림 4는 수조의 실제 모습이다. 수조 도면에서 수조 하부의 격자를 이용 총 3가지의 시료를 재현할 수 있도록 설계하였고 수조 상부의 이동 거치대는 하부의 격자로 나누어진 각 시료에 대해 이동, 고정할 수 있도록 설계하였다. 또한, 실험에 사용된 Echo Sounder는 Marimtech사의 E-Sea sounder 103으로 측정정밀도는 표 2와 같다.

표 1. 채취시료의 좌표와 평균입경

No.	X(m)	Y(m)	Average grain size(mm)
6	179060.2964	195741.2070	0.311
8	179088.7714	195501.5595	0.019
9	179205.2602	195519.6944	0.008
11	179018.8783	195878.5181	0.285
15	179121.1293	196030.0791	0.006
20	179228.5577	196050.8053	0.005

표 2. Accuracy and Resolution of Echo Sounder

Accuracy(Frequency)	Resolution
1cm±0.1% of Depth value(200kHz)	1cm
4cm±0.1% of Depth value(50kHz)	
5cm±0.1% of Depth value(33kHz)	

3) 실험 결과분석

제작된 실험수조는 수조내에 격막을 설치하여 한 번에 3가지 종류의 시료를 재현할수 있도록 제작 하였다. 실험은 먼저 채취한 시료를 일정한 두께로 수조에 재현하고 Echo Sounder를 장치한 이동거치대를 한 시료에 대해 고정하고 자료취득 간격을 1sec로 설정하여 약 3시간 동안 10,200회씩 6개의 시료에 대해 측심하였다. 측심된 약 60,000개의 자료로부터 평균입경-ES잔차에 대한 그래프를 도시하면 그림 4와 같다. 그림 4에서 횡축은 평균입경(mm)이고, 종축은 각 평균입경에 대해 10,200회 수심측정 자료와 최확치간의 차, 즉 ES잔차(m)를 나타낸 것이다.

그리고 총 6개의 평균입도에 대해 약 60,000개의 측정 자료를 표현한 것이다. 또한 결과자료를 이용하여 평균 입도-ES잔차의 수학적 모형을 얻기 위해 회귀분석을 실시하였다.

먼저 선형회귀분석을 수행한 결과는 그림 5과 표 3, 로 그회귀분석을 수행한 결과는 그림 6과 표 4, 지수회귀분석을 수행한 결과는 그림 7과 표 5로 나타내었다. 회귀

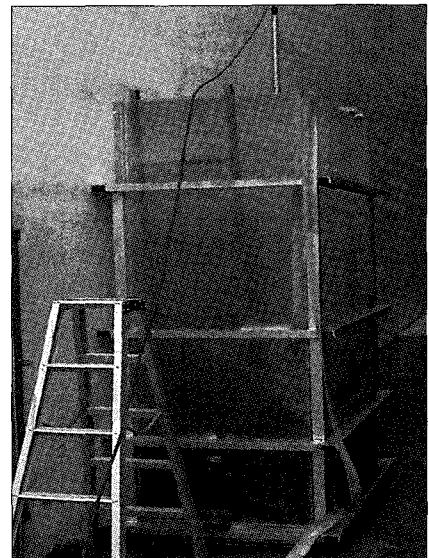


그림 3. 실험 수조

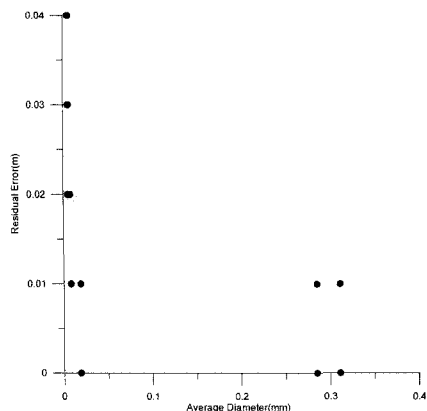


그림 4. 평균입경과 ES잔차와의 관계

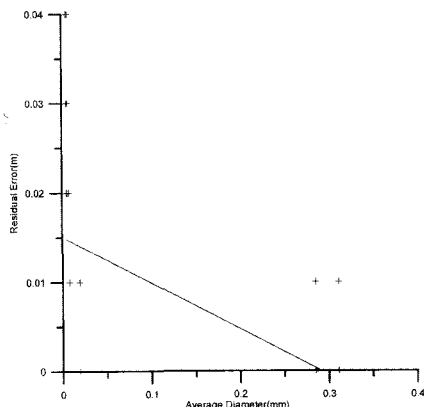


그림 5. 선형회귀분석 결과

분석의 결과표는 먼저 회귀방정식, 회귀분석에 사용된 자료의 갯수, Y 평균값, ES잔차 제곱합, 회귀 제곱합, 결정계수, 평균잔차 제곱을 나타낸 것이다.

각 3종류의 회귀분석을 수행하여 각각의 회귀모형을 구하였고 회귀모형의 적합도를 검토하기 위해 회귀분석에서 구한 결정계수(Coefficient of Determination 또는 R^2)에 의한 방법을 사용하였다.

회귀분석결과 얻은 회귀방정식에서 X는 평균입경(mm)이고 Y는 오차(m)이다. 구한 각각의 회귀모형의 적합도를 검증하기 위해 본 논문에서는 결정계수를 사용하였다. 결정계수는 1에 가까울수록 회귀선이 잘 적합함을 나타내고 그렇지 않으면 0에 가깝게 나타난다. 그림 8은 회귀분석 방법별 결정계수를 비교한 것이다. 횡축은 각 회귀분석방법을 나타낸 것이다.

따라서 추정된 회귀선들 중 결정계수가 가장 높은 로그회귀분석에 의해 구한 회귀선식은 식 (3)과 같다.

$$y = -0.00474224032 * \ln(x) - 0.004512776986 \quad (3)$$

y : ES잔차(m), x : 평균입경(mm)

그리고 식(3)에서 측량의 성과에 영향을 미치는 유효

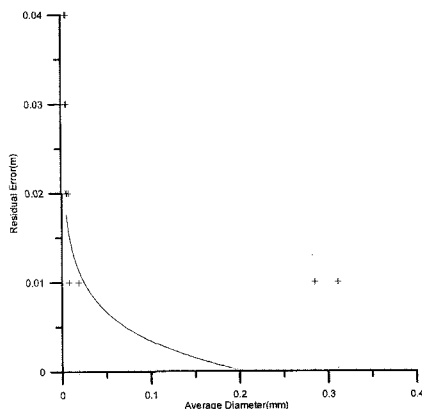


그림 6. 로그회귀분석 결과

자리수를 고려하여 다음 식(4)를 하구하상 지질특성에 따른 Echo Sounder의 보정식으로 채택하였다.

$$y = -0.00474 * \ln(x) - 0.0045 \quad (4)$$

본 연구에서 구한 하구하상 지질특성에 대한 Echo Sounder 보정식은 하상 지형측량 시 측량대상지의 지질

표 3. 선형회귀분석 결과

Regression Equation	$Y = -0.05176394831 * X + 0.01507144899$
Number of data points used	60897
Average Y	0.00968685
Residual sum of squares	3.16277
Regression sum of squares	2.98776
Coef. of determination, R-squared	0.485773
Residual mean square	5.19381E-05

표 4. 로그회귀분석 결과

Regression Equation	$Y = -0.00474224032 * \ln(X) - 0.004512776986$
Number of data points used	60897
Average Y	0.00968685
Residual sum of squares	2.00107
Regression sum of squares	4.14946
Coef. of determination, R-squared	0.674651
Residual mean square	3.2861E-05

표 5. 지수회귀분석 결과

Regression Equation	$Y = \exp(-13.20873517 * X) * 0.02014334541$
Number of data points used	30859
Average ln(Y)	-3.98911
Residual sum of squares	2121.27
Regression sum of squares	99.0379
Coef. of determination, R-squared	0.0446055
Residual mean square	0.0687452

상태를 사전 조사, 사전 측량하면 Echo Sounder의해 발생된 오차의 크기를 추정하여 보정하는데 사용될 수 있다. 단, 보정식은 계산에 의해 입경 입력치가 0.386mm 이상의 경우 보정치가 -값을 가지므로 경계조건에 입경 입력치 0.386mm 이상일 경우 보정치는 0을 사용하도록 해야한다.

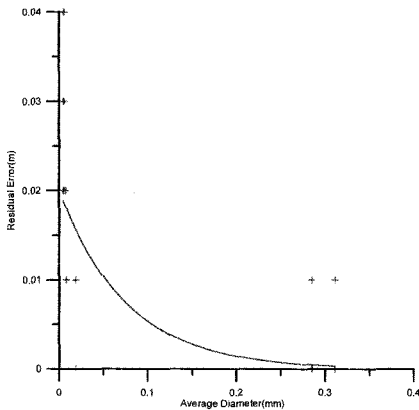


그림 7. 지수회귀분석 결과

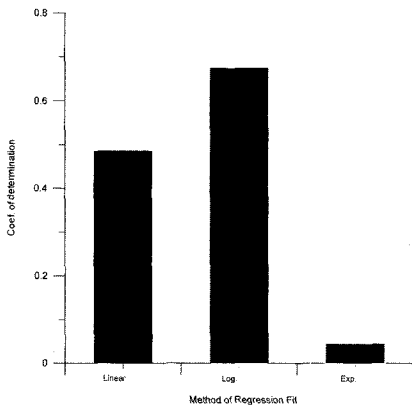


그림 8. 회귀분석방법별 결정계수 비교

3. 개발 보정식의 검증 및 분석

수조 실험에 의해 획득한 지질특성에 따른 Echo Sounder의 보정식은 실제 자연상태의 하구하상 지질층에 대해 얻을 수는 없다. 그 이유는 수조 실험에 있어 재현된 시료는 현장에서 교란 없이 채취하는 것은 불가능하고 재현시에도 교란되기 때문이다. 따라서, 수조 실험에 의해 획득한 하구하상 지질특성에 따른 Echo Sounder의 보정식에 대한 검증이 필요하다.

가. 연구 대상지 선정

본 검증 실험을 위해 실험 대상지는 인공 수조와 거의 같은 방법으로 Echo Sounder의 오차를 검출할 수 있는 조건을 갖추어 있는 곳이어야 한다.

먼저, 수심이 비교적 얇아 수중에서 지질층의 시작점을 육안으로 확인할 수 있어 재래식 정밀 수심측량이 가능한 곳이며, Echo Sounder를 유동 없이 거치 할 수 있어야 하고, 물 흐름이 비교적 완만해야 하며, 수질이 양호하여 하상지질 상태를 육안으로 확인할 수 있는 조건을 갖추어야 한다. 그림 9, 10은 연구 대상지의 전경이다.



그림 9. 대상지(I)

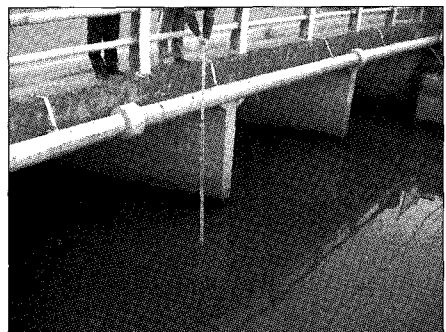


그림 10. 대상지(II)

그림 9의 연구 대상지(I)은 지질이 점토질로 구성되어 있으며, 그림과 같이 수면과 근접해 있는 교량이 있어 Echo Sounder를 유동 없이 거치할 수 있다.

그림 10의 연구 대상지(II)는 지질이 사질로 구성되어 있으며, 아래와 같이 Echo Sounder를 유동 없이 거치할 수 있는 구조물이 존재하고 있다.

나. 현장 적용 내용 및 방법

본 실험은 각 연구 대상지에서 자연상태의 지질에 대해 Echo Sounder에 의해 수심을 1초 단위로 약 3시간동안 취득한 후, Sounding을 수행한 지점의 수심을 재래식으로 정확하게 측정하였다. 재래식 수심측량은 표척(Staff)과 표척의 수직을 유지하기 위하여 2대의 데오들라이트를 이용하였고, 측정시에는 육안으로 표척의 하부가 지질면에 정확하게 닿은 것을 확인하여 실시하였다.

또한 측정후에 입도분석 및 수조 실험을 위해 실험 대상지에서 시료를 채취하였다.

그림 11은 연구 대상지(I)에서 재래식 방법에 의한 수심측량을 수행하는 모습이다.

그림 12는 점토질의 실험 대상지에서 Sounding에 의한 측심을 수행하는 모습이다. 교량상부에서 Echo Sounder가 유동하지 않도록 고정한 모습이다.

그림 13은 하상 지질이 사질인 연구 대상지(II)에서 그림 11과 동일한 방법에 의해 재래식 수심측량과 Sounding 실험을 수행하였다.

다. 현장 적용 결과 및 분석

실험 대상지(I), (II)에서 재래식 수심 측정과 Sounding 실험을 수행한 결과를 통해 수조실험에서 구한 지질 특성에 따른 Echo Sounder 보정식을 검증하고자 한다. 표 6은 실험 대상지(I), (II)의 재래식 수심측정과 Sounding 실험의 결과와 채취한 시료의 평균입경을 나타낸 것이다.

실험 결과로부터 각 평균 입경을 이용하여 이미 구한 지질 특성 보정식에 적용하여 보정식에 의한 ES잔차를 구하여 비교한 결과는 표 7과 같다.

표 6. 대상지(I), (II)에 대한 결과

	대상지(I)	대상지(II)
재래식 수심측정(A)	0.948m	2.140m
Echo Sounder 수심측정(B)	0.970m	2.140m
잔 차 (A-B)	0.022m	0 m
평균 입경	0.004mm	0.5mm

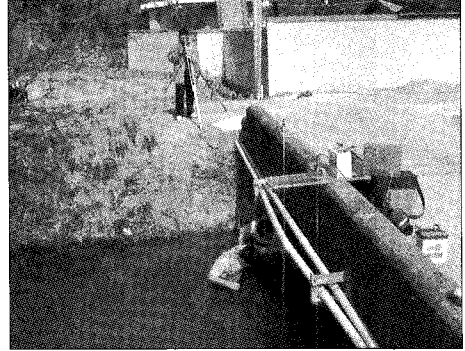


그림 11. Staff and Theodolite에 의한 재래식 측정

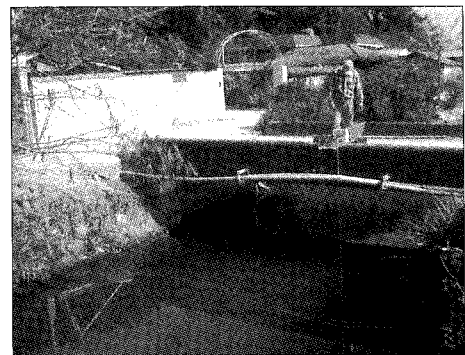


그림 12. Sounding 시험(대상지(I))

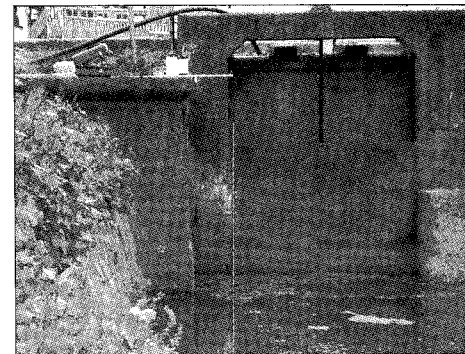


그림 13. Sounding 시험(대상지(II))

표 7. 현장시험과 보정식에 의한 값 비교

	실험 대상지(I)	실험대상지(II)
현장실험에 의한 ES잔차	0.02200m	0m
보정식에 의한 ES잔차	0.02167m	0m
비교	0.00033m	0m

수조 실험에 의해 구한 지질특성에 대한 보정식을 현장 실험과 비교한 결과 점토질인 실험 대상지 (I)의 경우, 현장 실험에 의한 값과 보정식에 의한 값의 차이가 0.00033m로 매우 적게 나타났으며, 실험대상지(II)의 경우 보정식의 경계조건을 초과하는 입경에 대한 것으로 그 차이가 없는 것으로 나타났다.

라. 수조실험의 확인 검정

실험 대상지(I), (II)에서 Echo Sounder 측심봉을 중심으로 잠수를 하여 시료를 채취하여 각각의 평균입경을 구하여 실험수조에 일정한 두께로 수조에 재현하여 보정식을 산출할 때와 동일한 방법으로 Echo Sounder를 장치한 이동거치대를 한 시료에 대해 고정하고 자료취득 간격을 1초로 설정하여 실험 대상지(I), (II)에서 채취한 시료에 약 3시간동안 10,200회씩 측정하였다.

10,200회 측정된 수심값들을 평균하여 측정값을 확정하였고, 최확치와 비교하여 ES잔차를 구하였다.

표 8은 현장실험, 현장실험에서 얻은 시료에 의한 수조실험 그리고 기 보정식에 의한 ES잔차를 나타내었다.

평균입경은 실험 대상지(I)에서는 0.004mm였으며 실험 대상지(II)는 0.5mm였다.

실험 대상지(I), (II)에서 채취한 시료를 교란 상태로 수조에 재현하여 수조실험을 수행한 결과, ES잔차가 실험대상지(I)의 경우는 0.02287m, 실험대상지(II)의 경우 0m를 얻었다. 여기서, 보정식에 의한 보정치와 비교하였을 때 자연상태의 시료를 이용한 현장실험과 교란된 시료를 이용한 수조실험에서 얻은 ES잔차는 점토질의 실험대상지(I)의 경우 0.0012m, 모래질인 실험대상지(II)의 경우 0m로 나타나 그 결과가 거의 동일한 것을 알 수 있었다. 따라서, 하구하상 지질특성에 따른 Echo Sounder의 오차 보정식은 특정한 조건을 갖춘 현장에서의 교란된 시료에 대한 실험과 현장실험 후 시료를 채취하여 교란후 인공수조에서 실시한 실험에 의한 결과를 통해 검증할 수 있었다.

표 8. 현장 비 교란 시험과 수조 교란시험 결과비교

	평균입경	현장실험	수조실험	보정식
대상지(I)	0.004mm	0.02200m	0.02287m	0.02167m
대상지(II)	0.5mm	0m	0m	0m

4. GPS와 Echo Sounder 조합에 의한 시스템 구축

하구하상 모니터링용 소프트 웨어 개발에 있어 측량선의 위치를 결정하는 방법, 수심을 측정하는 방법에 따라 시스템 구축방법이 결정된다. 또한 오차의 요인을 분석하여 소프트웨어 내에서 고려할 수 있도록 시스템을 구축하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 측량선 위치 자료는 위성 측위와 TS에 의한 자료를 이용할 수 있도록 하고, 수심 자료는 Echo Sounder에 의한 자료를 사용할 수 있도록 하였다. 또한 본 연구에서 개발한 보정식을 적용하여 해상 및 하천에서 측량선의 유동에 의한 오차, 측량지역의 지질을 분석하여 지질특성에 따른 오차를 보정할 수 있도록 설계하였다.

가. 3차원 위치좌표 산출

각 측위별로 측정된 측량선의 위치성가들을 프로그램의 입력자료로 받아들이기 위해 각 측위방법별 성과의 형식을 파악하고, 좌표변환과정을 거쳐 측량선 위치성과는 평면직교좌표로 통일하였다. 또한 측량선의 위치성과를 EXCEL등과 같이 Worksheet형식으로도 입력 가능하도록 설계하였다.

나. Echo Sounder에 의한 자료 산출

Echo Sounder에 의한 자료는 기종, 사용 상용프로그램 등에 따라 여러 가지 방법에 의해 획득할 수 있으나 주로 제공되는 Interface는 RS-232C data format, DESO-25 등이다. 본 논문에서는 MS-Windows의 Hyper Terminal을 이용하여 RS-232C 형식을 사용하여 수심자료를 취득하였다. RS-232C 자료 형식의 구성은 표 9와 같다.

표 9. RS-232C 자료 형식

Default serial setting	column	Description
Baud rate : 4800	1	quality figure between 0-9
Stop bits : 2	2	Always zero
Parity : none	3~7	Depth in mter in the form ddd.dd
Terminator : <LF>(line feed)	8	always zero
	9	Terminatio<LF>

다. Echo Sounder의 측정오차의 조정

1) 지질 특성에 따른 Echo Sounder 측정오차의 조정
 수조 실험에 의해 획득한 자료로부터 회귀분석을 통해 얻은 회귀모형을 측정값에 보정한다. 즉, 입력값으로 측량구역의 평균입경을 입력하고, 프로그램 내부에 회귀모형함수를 호출하여 입력값에 해당하는 오차량을 측정값 계산에 적용하게 된다.

본 논문에서 사용한 회귀모형은 평균입경-ES잔차의 함수로 수조 실험을 통해 획득한 값이고 함수는 식 (4)와 같다.

2) 흡수 보정

일반적인 수심측량은 크게 두 가지 목적에 의해 이루어진다. 먼저 평균해수면에 대한 해도나 지형도 작성을 위한 측량과 매립, 준설공사를 위한 해저, 하상 지형측량이다. 이 두 측량은 현재 수심측량 후 조위에 의해 보정하여 평균해수면에 대한 값으로 환산해야 한다. 기존 측정성과는 실시간 조위변화를 시간대별로 입력하여 보정하고 있다.이 경우 평면위치좌표 x, y 는 GPS와 TS를 이용하고, 수직위치좌표 z 는 식 (1)과 같은 방식으로 산출한다. 이 경우 TD 를 고정하여 계산하므로 파도, 측량선의 유동에 의한 변화를 고려하지 못하므로 큰 오차를 발생시킨다. 본 연구에서는 앞장에서 설명한 아래 보정식에 의해 수심과 평면위치의 관계를 결정하여 프로그램에 적용하였다. 즉, 평면위치좌표 x, y 는 RTK GPS에 의한 이동국 평면 위치좌표를 사용하고, 수직위치좌표 z 는 식 (2)과 같이 x_{GPS}, y_{GPS} 계산하였다.

라. 시스템 설계와 S/W 개발

1) 시스템 설계

본 연구에서는 이상의 요소들을 고려하여 GPS와 Echo Sounder 조합에 의한 하구하상 모니터링 시스템을 구성하였다. 시스템의 설계 및 Program 구성은 그림 15와 같다.

그림 14에서 입력자료로는 기지국의 좌표, GPS 안테나고, 수준점 성과 그리고 하구하상의 지질특성 즉, 평균입경과 이동국 GPS와 Echo Sounder 측정봉끝단간의 거리를 입력하고, 측량선의 위치는 이동국 GPS, 수심은 Echo Sounder에 의하고 이동국 GPS의 z 값과 수심측정값을 저장한다. 그런 후, 하상지질면의 표고를 결정하기 위해 흡수보정식과 하구하상 지질에 따른 Echo Sounder 오차보정식을 입력자료에서 평균입경값에 따라 함수를 호출하여 보정한다. 그리하여 이동국의 x, y 값과 두 보정식에 의해 보정된 z 값을 저장하여 출력한다.

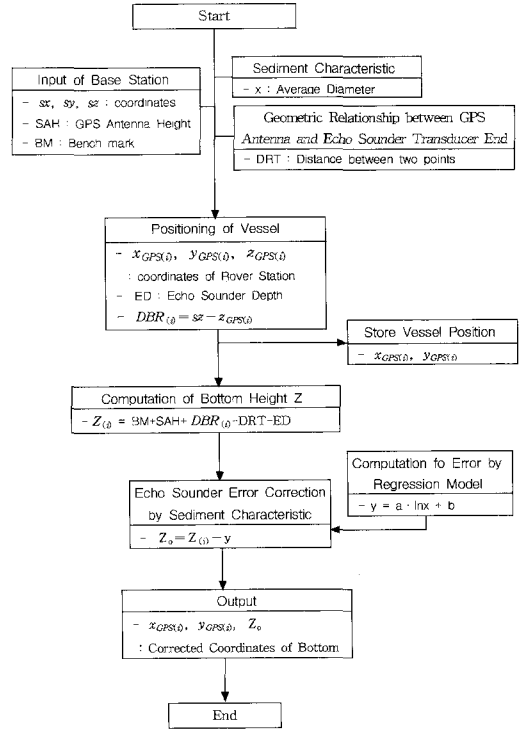


그림 14. 시스템 흐름도

2) Software 구성

하구하상 모니터링 시스템 설계 후 Microsoft-Visual Basic 6.0을 이용하여 소프트웨어를 작성하였다. 그림 15는 작성된 프로그램의 작동 화면이다.

소프트웨어의 구성은 먼저 기지국 입력창에서 기지국의 x, y, z 좌표값, 안테나고 그리고 수준점 성과를 입력하도록 되어 있다. 그리고 지질보정창에서 사전 조사된

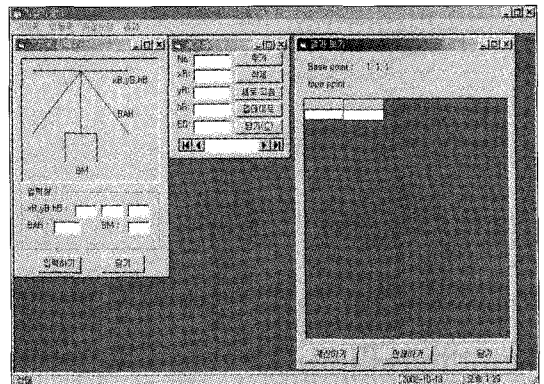


그림 15. 프로그램 작동

모니터링 대상지의 평균입경을 입력하여 프로그램을 수행하면 측량선의 이동국 GPS와 Echo Sounder의 자료를 저장하여 흘수보정과 하구하상 지질보정을 수행하여 각 측점에 대한 3차원 좌표를 출력하도록 설계하였다.

5. 개발 시스템을 이용한 하구 하상 지형 해석

개발된 시스템을 이용하여 하구하상 지형모니터링을 수행하여 하구하상 모니터링에 있어 개발된 시스템에 의한 활용가능성을 검토하고자 한다.

가. 기준점 측량

연구 대상지에 대한 RTK GPS 측량이 있어 기지국 설치에 위한 기준점 측량이 필수적이다. 본 연구에서는 국립지리원에서 운용하는 상시관측소인 대구와 진주 그리고 실험대상지의 4점을 선정하여 기선해석과 3차원 망조정을 통해 기준점 측량을 실시하였다. 표 10은 기준점 측량을 통해 얻은 결과이다.

나. 하구하상 지형측량

동일 연구 대상지에 대해 각 측위 기법별 하구하상 지형해석을 수행하여 측위기법별 지형측량의 효율성을 제고하고, 앞 장에서 Echo Sounder의 오차요인 중 하구하상 지질특성에 대한 오차와 측량선의 유동에 의한 수면과 송수파기간 거리변화에 의한 오차에 대해 제시된 보정식을 이용하여 동일한 연구대상지에 대해 먼저 고정밀로 수행한 TS와 Bar Checker 조합에 의한 하구하상 지형해석 성과를 획득하였다.

또한 RTK GPS와 Echo Sounder, DGPS와 Echo Sounder의 조합에 의해 하구하상 지형해석을 실시하였다. 연구대상지역에서 미리 채취하여 분석한 지질특성치를 각각의 채취 Site별로 구분하고, 본 연구에서 개발한 GPS와 Echo Sounder 조합에 의한 하구하상 지형모니터링 시스템을 적용하여 RTK GPS와 Echo Sounder, DGPS와 Echo Sounder의 조합에 의해 3차원 지형측량 성과를 본

연구에서 개발한 GPS와 Echo Sounder 조합에 의한 하구하상 지형해석을 실시하였다.

개발한 시스템에 의한 지형해석 성과는 하구하상 지질특성에 대한 보정과 흘수보정을 수행한 결과이다.

1) TS와 Bar Checker 조합에 의한 하구하상 지형해석

본 방법에 의한 지형해석은 측량선의 위치는 측량선에 프리즘을 설치하여 Total Station을 이용하고, 수심측정은 Echo Sounder의 수심측정 검점 장비인 Bar Checker를 이용하였다. 실험 방법은 한 측점에 대해 측량선의 맞을 내리고 위치를 고정한 후, 측량선의 위치를 측정하고 수심측정도 동일지역에서 5회 반복 관측하여 고정밀도의 성과를 획득하였다. 실무에 있어 이러한 방법에 의한 지형해석은 시간효율성과 작업효율성이 매우 저하되어 현실적으로는 불가능한 방법이다. 그림 16은 측량선 궤적을 나타낸 것이고, 그림 17은 획득된 성과에 의해 작성된 3차원 지형도이다.

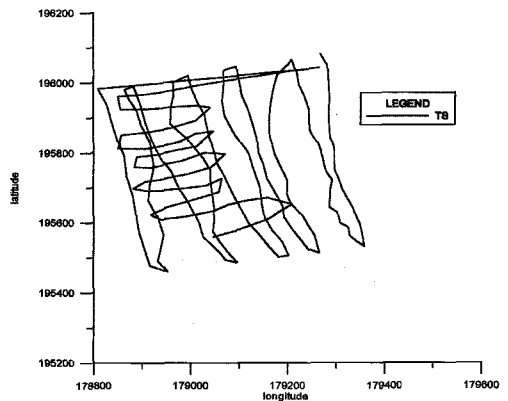


그림 16. TS에 의한 측량선 궤적

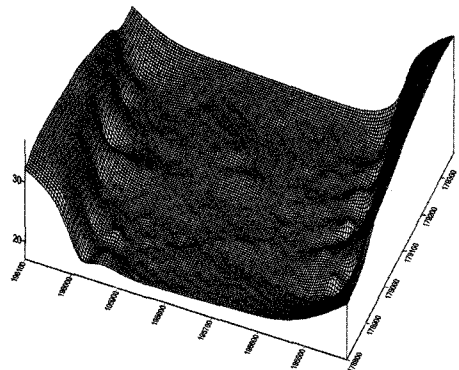


그림 17. TS와 Bar Checker 3차원 지형도

표 10. 6개측점 좌표(WGS-84)

Station	Latitude	Longitude	Height
a	35°06' 48.59677"	128°57' 04.51693"	39.21250
b	35°06' 33.78200"	128°57' 01.23242"	39.22152
c	35°06' 30.17722"	128°57' 25.30849"	38.14437
d	35°06' 45.00162"	128°57' 28.53087"	37.90938
JINJ	35°10' 23.05938"	128°02' 58.85033"	127.55913
TEGN	35°54' 22.64624"	128°48' 07.10262"	112.01631

2) RTK GPS와 Echo Sounder 조합에 의한 3차원 지형해석

기준점 측량에 의해 획득한 성과를 가진 기지점에 RTK GPS의 기지국으로하고 측량선에 이동국 안테나와 전송 모뎀 안테나를 고정하고 신호수신 간격은 1초로 하여 관측하였다. Echo Sounder도 수면과 송수파기까지의 거리를 측정하고 측심 자료 수신 간격을 1초로 하여 측량선을 서행하면서 전 연구 대상지에 대해 지형해석을 수행하였다. 그림 18은 RTK GPS에 의한 측량선 궤적을 도시한 것이고, 그림 19는 RTK GPS와 Echo Sounder 조합에 의해 획득된 3차원 지형도이다.

3) DGPS와 Echo Sounder 조합에 의한 하구하상 지형해석

DGPS에 의한 측위는 RTK GPS 측위와 동일조건을 가지도록 동일한 선박에 두 대의 수신기를 탑재하여 실험을 실시하였다. DGPS는 1초로 데이터를 수신하고, 기지국의 데이터를 이용하여 후처리하였다. 그림 20은

DGPS에 의한 측량선의 궤적이고, 그림 21은 DGPS와 Echo Sounder 조합에 의해 획득된 3차원 지형도이다.

4) 개발된 시스템을 이용한 RTK GPS와 Echo Sounder 조합에 의한 하구하상 지형해석

앞장에서 실시한 RTK GPS와 Echo Sounder 조합에 의한 측량 성과를 지질특성에 대한 오차, 수면과 송수파기 거리변화 오차를 고려한 시스템에 적용하였다. 그림 22는 RTK GPS와 Echo Sounder에 보정치를 고려하여 획득한 3차원 지형도이다.

5) 개발된 시스템을 이용한 DGPS와 Echo Sounder 조합에 의한 하구하상 지형해석

RTK GPS의 경우와 동일하게 DGPS와 Echo Sounder 조합에 의한 측량 성과를 지질특성에 대한 오차, 수면과 송수파기 거리변화 오차를 고려한 프로그램에 적용하였다. 그림 23은 DGPS와 Echo Sounder에 보정치를 고려하여 획득한 3차원 지형도이다.

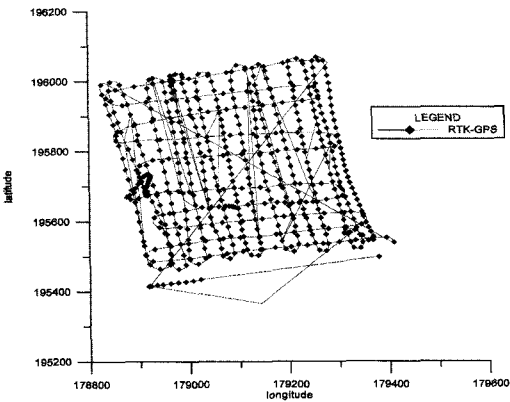


그림 18. RTK GPS에 의한 측량선 궤적

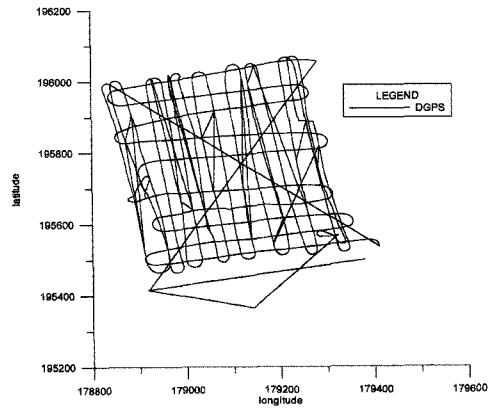


그림 20. DGPS에 의한 측량선 궤적

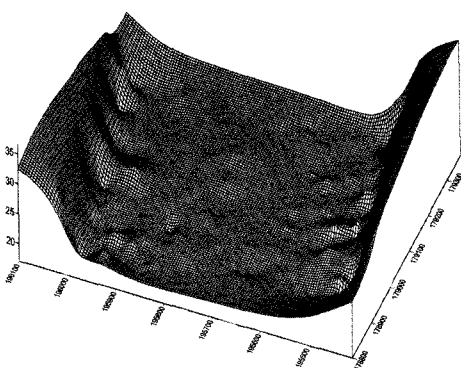


그림 19. RTK GPS와 Echo Sounder에 의한 3차원 지형도

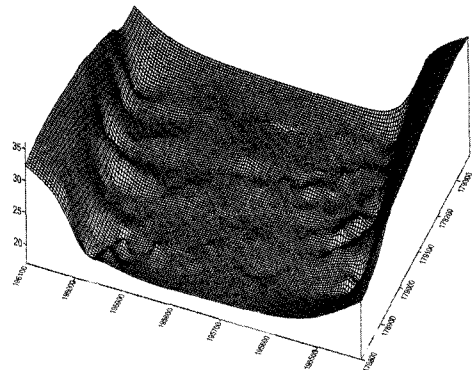


그림 21. DGPS와 Echo Sounder에 의한 3차원 지형도

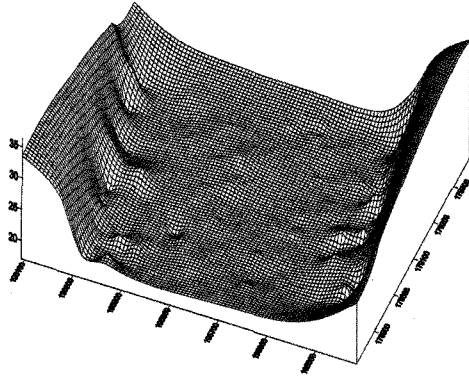


그림 22. RTK GPS와 Echo Sounder에 의한 3차원 지형도(개발 시스템적용)

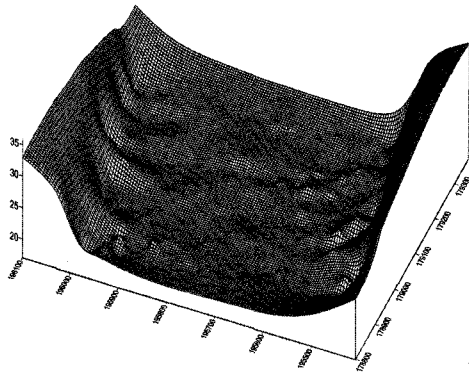


그림 23. DGPS와 Echo Sounder에 의한 3차원 지형도(개발 시스템적용)

6. 결 론

본 연구는 GPS와 Echo Sounder 조합에 의한 하구하상 지형해석의 효율성을 높이기 위해 오차 보정식을 개발하고 이 오차보정식을 이용하여 GPS와 Echo Sounder 조합에 의한 하구하상 지형해석 프로그램을 Visual Basic으로 구현하여 활용 가능성을 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. GPS와 Echo Sounder의 조합에 의한 하구하상 지형 해석시 측량선의 유동에 의해 수면과 송수파기간의 거리 변화에 대한 흡수에 의한 오차는 기하학적인 재배치를 통해 제거할 수 있었으며, 보정식은 다음과 같다.

$$z = BM + SAH - DBR_{(t)} - DRT - ED$$

2. Echo Sounder의 하구하상 지질특성에 대한 수심측정 오차는 실험수조를 이용하여 평균입경과 ES잔차의 차이 등을 파악하고, 회귀분석을 통해 다음과 같은 평균 입경(X)-ES잔차(Y) 보정식을 구하였다.

$$Y = -0.00474 * \ln(X) - 0.0045$$

3. Echo Sounder 오차 보정식을 검증하기 위해 수조와 동일한 실험조건을 갖춘 현장 실험과 보정식을 비교한 결과, 차이값이 점토질의 경우 0.00033m, 사질의 경우 0m 이었고, 동일 현장에서 채취한 교란시료에 대한 수조실험과 보정식을 비교한 결과, 차이값이 점토질의 경우 0.0012m, 사질의 경우 0m를 얻었으므로 하구하상 지질면에 따른 Echo Sounder 보정식의 적용가능성을 검증할 수 있었다.
4. 이상의 오차요인을 고려한 GPS와 Echo Sounder 조합에 의한 하구하상 모니터링 시스템을 구축하여 Visual Basic으로 구현하여 사용자의 편의성을 제고하였다.
5. 실 적용실험을 통해 하구하상 지형해석시 정밀도와 효율성을 향상시켰으므로, 본 연구를 통해 제시한 오차보정량 모델은 하구하상 지형해석시 유용하게 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 박운용(2000), 응용측량학, 형설출판사, pp. 141-178.
2. IHO annual report, June 2000, pp. 47-55.
3. 이석우외(1984), 해양측량학, 집문당, pp. 235-328.
4. Richard B. Phelan(1997), OTF DGPS for Estrarine Dredging and Sounding Surveys.
5. 김정동(2000), 실시간동적 GPS 측량에 의한 해안 지형 해석, 박사학위논문, 동아대학교.
6. James R. Clybch(2000), GPS Marine Position Improvement in the Post SA Era, ION GPS 2000, Salt Lake City, UT, 19~22 September 2000, pp. 1421-1426.
7. 박요섭(1996), "다중빔 음향측심 자료처리를 위한 해저면 맵핑시스템 개발", 인하대학교 대학원 석사학위논문.
8. 서용운, 최윤수(2000), 실시간 DGPS & Echo-Sounding 데이터를 이용한 방파제사석투하 토공물량 확인, 한국측량학회지, 제 18권 제4호, pp. 343-350.
9. 수로측량업무규정(1999).
10. 정영동, 강상구(2002), 음향측심기와 위성 항법을 이용한 하천의 수심측량, 한국측량학회지, 제20권 4호.
11. 조규전, 차득기, 강봉서(2000), DGPS에 의한 해양측량 조위보정에 관한 연구, 한국측량학회지, 제18권 3호.

(접수일 2003. 8. 1, 심사 완료일 2003. 8. 16)