한국산학기술학회논문지
Vol. 11, No. 3, pp. 808-814, 2010

SBL방식을 이용한 무인잠수정의 수중초음파 위치측정시스템 개발

유선철[1], 변승우[2], 김준영[3*]
[1]포항공과대학교 환경공학부, [2]제주대학교 해양시스템공학과
[3]제주대학교 해양시스템공학과 / 제주대학교 해양과환경연구소

Development of Acoustic Positioning System for ROV using SBL System

Son-Cheol Yu[1], Seung-Woo Byun[2] and Joon-Young Kim[3*]
[1]School of Environmental Science and Engineering, POSTECH
[2]Department of Ocean System Engineering, Jeju National University
[3]Department of Ocean System Engineering, Jeju National University / Marine and Environmental Research Institude of Jeju National University

요 약 본 논문에서는 수중에서 이동하는 무인잠수정의 위치를 측정하는 방법 중의 하나인 단기선 방식(SBL)에 의한 무인잠수정(ROV)의 위치측정 실험을 하이드로폰(Hydrophone)과 DAQ(Data Aquisition) 시스템을 이용하여 수조에서 수행하였다. 실험을 위해서 4개의 하이드로폰 센서를 3×3×1.7m의 크기의 수조 벽면에 고정하여 수신 장치로 사용하고, 1개의 하이드로폰 센서는 무인잠수정에 장착하여 송신장치(Pinger)로 사용하였다. 무인잠수정 및 수조 벽에 고정된 센서들이 신호를 송수신함으로써 상호간의 위치추적이 가능하게 하는 실험을 수행하였다. 측정된 신호는 DAQ 시스템을 이용하여 데이터를 취득하였고, LabView 프로그램을 이용하여 실시간으로 무인잠수정의 위치를 계산하여 출력하였다. 위치추정에 사용된 알고리즘은 삼각측량법을 사용하였으며, X, Y방향에 대해서는 비교적 오차가 적은 추정 결과를 나타내었으나 Z방향에 대하여서는 상대적으로 큰 오차를 보여 위치제어용 데이터로 사용할 수 가 없었다. 이에 대한 해결방법으로 무인잠수정에 장착된 수심측정 센서를 이용하여 보완할 수 있을 것으로 본다. 설계된 위치측정 시스템은 추후 실해역 실험을 거쳐 성능시험을 수행하고자 한다.

Abstract In this paper we executed a SBL(Short Baseline) underwater acoustic positioning system that is a kind of underwater position estimation system to estimates the 3-dimensional position of ROV(Remotely Operated Vehicle) using hydrophones and DAQ(Data Acquisition) system in the basin which dimensions are 3x3x1.7(m). For this experiment, we let 4 hydrophones in different positions of the basin for receiver and 1 hydrophone is fixed on the underwater vehicle for transmitting sensor(pinger). These five hydrophones are communicated with each other to find the 3-D positions of the moving ROV in the basin. The measured signals are collected by DAQ system and the positions of the ROV are plotted by LabView program in real-time. To estimate the position of the ROV we used a trigonometric method. In X and Y plane the estimated data has a small errors but in Z plane the estimated data has large errors so we cannot use this data for position control. One solution of this problem is using depth sensor that implemented of the underwater vehicle. Hereafter, we will test in the ocean using designed SBL system.

Key Words : APS(Acoustic Position System), SBL(Short BaseLine), ROV(Remotely Operated Vehicle), Hydrophone, DAQ(Data Acquisition)

이 논문은 2007년도 제주대학교 학술연구지원사업에 의하여 연구되었음.
*교신저자 : 김준영(jkim@jejunu.ac.kr)
접수일 09년 11월 04일 수정일 10년 02월 04일 게재확정일 10년 03월 18일

1. 서론

최근, 육상 자원의 고갈과 더불어 해양 광물자원의 가치가 점차 커지고 있다. 그러나 해양 광물자원은 대부분 심해에 부존해 있기 때문에 자원조사 및 채굴에 있어 많은 어려움이 따른다. 국내의 심해저 광물자원 개발의 경우 최종 개발광구 선정을 위해 대부분의 조사는 수중 비디오카메라에 의존해 왔다. 효율적인 해저 유전 발굴과 수중병기 또는 잠수함의 수중 거동 등을 수상에서 관찰하기 위한 군사적 목적으로 수중탐사에 대한 기반 요소기술이 급격히 발전하면서, 선박 또는 석유시추선의 수상위치뿐만 아니라 수중에서 실제 활동하는 장비 및 사람의 수중위치 파악이 가능한 시점에 와 있다. 또한, 다방면의 관련 기술들이 상업 및 과학용으로 확산되면서 다양한 기법 및 장비들이 폭 넓게 개발되고 있다.

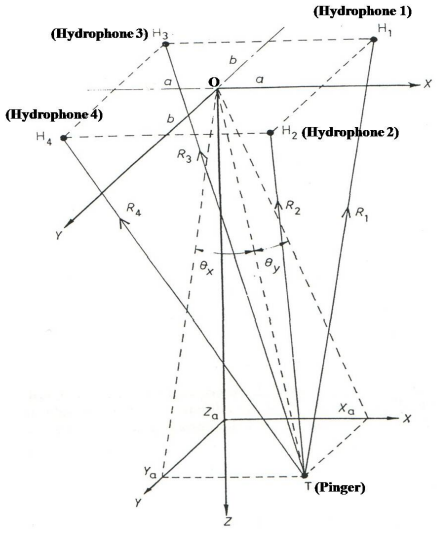
수중 환경 보호 및 자원 개발을 위하여 수중 작업용 로봇 및 무인잠수정 등 많은 장비들이 개발되었거나 연구가 진행 중에 있다[1]. 이러한 연구에 발맞추어 장비들의 수중에서의 위치를 정확하게 파악할 수 있는 기술 개발 또한, 작업 수행 능력 향상 및 장비의 보호 차원에서 꼭 필요한 기술이다. 수중환경에서의 위치추적 기술은 3차원 공간상에서 얼마만큼 이동체의 위치를 정확하게 추정할 수 있는가하는 신뢰성 있는 좌표의 추정이 관점인 것이다[2-5].

수중운동체의 위치를 실시간으로 추적하는 방식은 크게 세가지 형태로 구별된다. 가장 먼저 고안되고 사용되어 그 신뢰도가 검증된 방식인 LBL(Long BaseLine) 시스템은 해저에 수개의 고정된 기준점을 설치한 후 그 영역 내에서 이동하는 물체의 위치를 추적하는 방식이다. 이 방식은 수심에 관계없이 정밀하게 위치정보를 취득할 수 있는 반면 최대 수중통신 거리의 제약 때문에 이동체의 이동범위가 제한된다. 따라서 이 방식은 광역탐사에는 다소 부적합하지만 심해저 우선 채광지역의 정밀조사 등 좁은 영역의 정밀 위치추적에는 권장할 수 있는 방식이라 할 수 있다. 두 번째 방식은 SBL(Short BaseLine) 시스템인데 이는 심해저에 고정된 기준점으로 인한 이동영역의 제약을 없애기 위해 해저에 설치했던 수 개의 기준점을 수상에 위치한 선박으로 옮겨 넓은 해역의 탐사를 지속적으로 빠르게 수행하려는 방식이다. 이 방식을 채택하는 경우 수상선과 수중이동체는 일정 거리 범위 내에서 함께 이동해야 하고, 선박의 운동을 별도로 고려하여야 한다. 이러한 SBL방식을 응용한 세 번째 방식이 SSBL (Super Short BaseLine)이다. 수상선에 설치되는 기준점의 상대거리를 10~50cm로 좁혀 설치 및 운용을 좀 더 용이하게 개량한 방식이다. 이 방식은 현재 세계적으로 상용화 되어 유전개발 지역등에 활용되고 있으나, 짧은 상대거리로 인해 운용 수심에 제약이 있는 상태이다.

본 논문에서는 비교적 제작이 간단하고 설치 및 운용이 용이한 SBL 방식을 이용하여 무인잠수정의 위치를 파악하고자 하며, 특히 삼각측량법의 계산방식[6]과 LabView 프로그램[7]을 적용하여 시스템을 구성하고자 한다.

2. 위치추정 알고리즘

본 논문에서는 4개의 하이드로폰 센서가 고정되어 있으며 이동체와 고정된 센서가 신호를 송수신함으로써 상호간의 위치추적이 가능하게 하였다. 본 논문에서 사용한 SBL의 위치추적의 기하학적 구조는 그림 1[6]과 같다.



[그림 1] Symmetrical planar hydrophone array

무인잠수정에서 신호를 전송하고 고정체에서 신호를 수신하여 잠수정과 고정체 사이의 시간지연을 측정하였을 때 잠수정과 고정체 Rx.1~Rx.4 사이의 시간지연(TOA, Time of Arrival) τi 와 i 번째 고정체에서 잠수정까지의 거리 Ri의 관계는 다음과 같다[8].

$$R_i = c\tau_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} \quad (1)$$

$$x = [(R_3^2 - R_1^2) + (R_4^2 - R_2^2)]/8a \quad (2)$$
$$y = [(R_1^2 - R_2^2) + (R_3^2 - R_4^2)]/8b$$

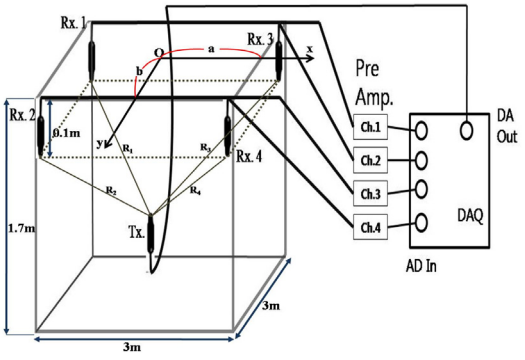
$$z = \{[R_1^2 - (x-a)^2 - (y+b)^2]^{1/2} + [R_2^2 - (x-a)^2 - (y-b)^2]^{1/2} + [R_3^2 - (x+a)^2 - (y+b)^2]^{1/2}\}/4$$

위 식(1)에서 (*x,y,z*)는 잠수정의 좌표를 의미하며, (X_i,Y_i,Z_i) 는 *i*번째 고정체의 좌표 값을, c는 음속(Sound Velocity)을 의미한다. 음속은 여러 요소에 의하여 변화하지만 일반적으로 1500m/s이다. 식(1)에 의해 그림 1의 기준점(O)에서 각 센서사이의 거리 2a, 2b와 각 센서로부터 잠수정까지의 거리 R_i를 이용해 식(2)에서처럼 잠수정의 좌표를 구할 수 있다.

3. 위치추적 시스템의 구성

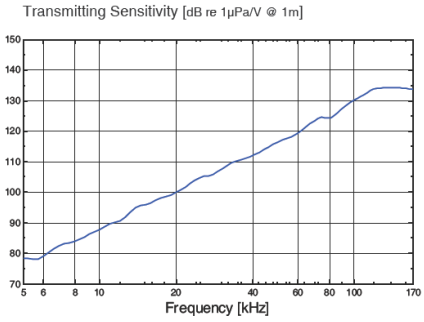
본 논문에서는 제시된 위치추적 알고리즘의 성능 검증 및 수조실험을 위하여 하이드로폰과 DAQ(Data Acqusition) 시스템을 이용하여 하드웨어를 구성하였다. 그림 2는 본 논문에서 사용한 위치추적 시스템의 개념도를 나타낸다.

실험에 사용된 하이드로폰은 RESON사의 TC4013 모델을 사용하였으며, 그림 3의 왼쪽과 같다. 신호의 증폭을 위해 사용된 프리앰프(Pre Amp.)는 그림 3의 오른쪽과 같다. TC4013의 전달감도(Transmitting Sensitivity)는 그림 4와 같으며, 본 실험에서는 그림 5의 방향성테스트에 사용된 100kHz로 신호를 사용하였다. 센서의 수평/수직 방향 방향성은 그림 5와 같이 전방향성(Omni-directional)을 갖는 센서이다[9].

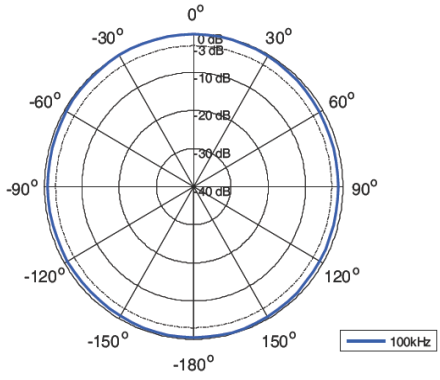


[그림 2] Schematic design of SBL system

[그림 3] TC4013 Hydrophone and Pre-Amp.



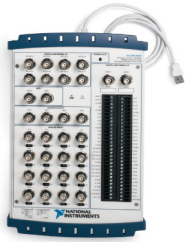
[그림 4] TC4013 Hydrophone Sensitivity



[그림 5] TC4013 Hydrophone horizontal directivity

본 실험에서 사용된 DAQ 시스템은 그림 6과 같으며, National Instrument사의 NI USB-6251 BNC 모델이다. LabView 프로그램과의 최적화된 호환시스템이며, 8개의 아날로그 입력을 가지고 1.25MS/s의 샘플링 시간(Sampling Rate)을 가지고 있다. 또한, 2개의 아날로그 출력단자를 가지고 있으며, 2.86MS/s의 샘플링 시간을 갖는다. ±10V의 입출력 범위를 가지며, 24개의 디지털 입출력 단자를 갖고 있다.

앞에서 언급한 하이드로폰과 프리앰프 및 DAQ를 이용하여 구성한 시스템은 그림 7과 같다.



[그림 6] NI USB-6251 BNC

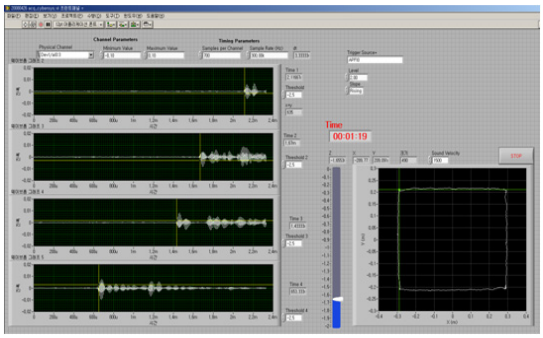
[그림 7] SBL System for basin test

4. 수조실험 결과

구현된 위치추적 시스템의 성능을 검증하기 위하여 그림 8에 보인 제주대학교 해양과환경연구소 내에 설치된 3m×3m×1.7m의 수조에서 실험을 수행하였다.

실험에서는 함수발생기(Function Generator)를 이용하여 100kHz의 버스트(Burst) 신호를 발생하여 핑거(Pinger)를 통해 송신하였으며, 이 신호를 DAQ와 동조하였다. 고정된 4개의 하이드로폰으로 신호를 수신하여 300kHz의 샘플링 주파수로 A/D변환을 하고, 식 (1)과 식 (2)에 의하여 제안된 위치추적 알고리즘을 통하여 무인잠수정의 위치를 추정하였고, DAQ 시스템과 LabView 프로그램을 이용하여 실시간으로 화면상에 위치를 나타내었다.

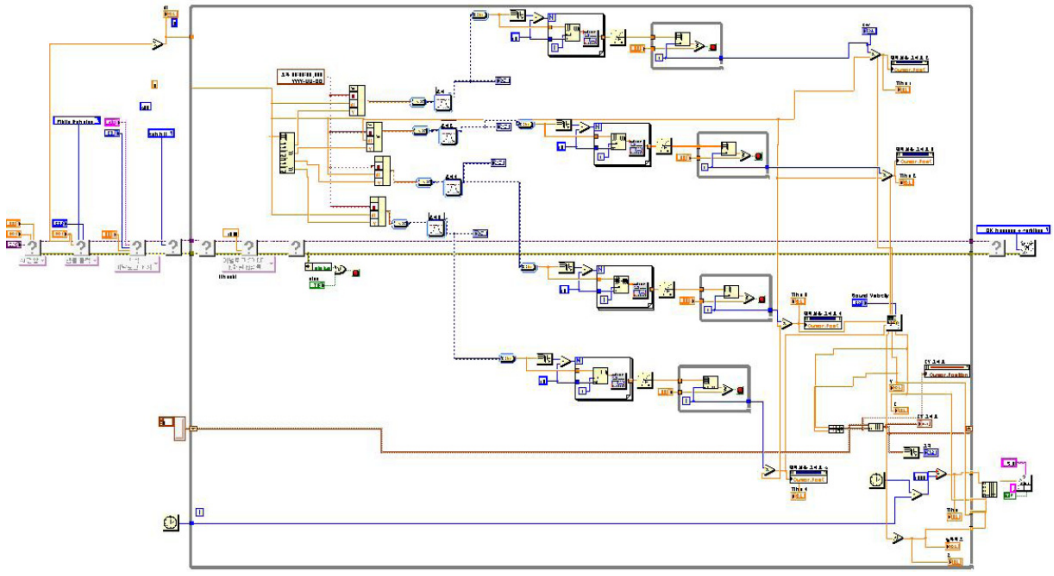
[그림 8] Experimental basin for SBL test (3m×3m×1.7m)



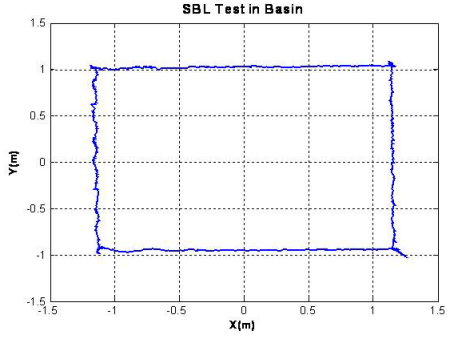
[그림 9] LabView program's front panel

그림 9의 좌측에서와 같이 4개의 하이드로폰 수신기로부터 얻은 신호를 대역통과 필터(Band- pass Filter)를 통과시킨 후 위치추적 알고리즘을 통하여 그림 9의 우측 하단에 보이는 것과 같은 X, Y평면상에서의 위치를 나타내었다. 이때, 사용하는 LabView 프로그램의 구조는 그림 10과 같다. 구성된 프로그램은 4개의 수신센서에서 받아들인 신호 중에서 가장 먼저 들어오는 신호를 검출하고, 식(1),(2)를 이용 각 수신센서와의 거리를 계산해 그림 9의 프론트 패널에 송신센서의 위치를 표시하게 된다.

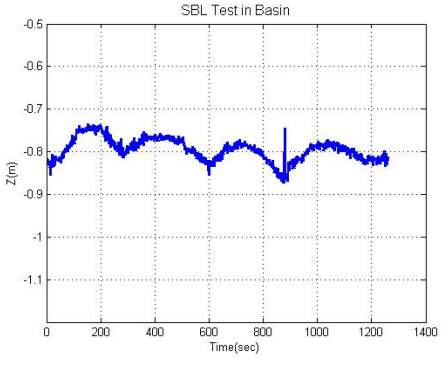
수조실험은 3가지의 경우로 수행했으며, Case 1과 Case 2는 송신센서를 트랙을 따라 이동시켰고, Case 3은 송신센서를 무인잠수정에 장착하여 실험하였다. 그림 11, 12 및 그림 13, 14는 각각 Case 1과 Case 2의 경우이며 수조내부에 파이프를 이용하여 4각으로 송신센서가 움직일 수 있는 트랙을 설치하여 송신센서의 이동속도를 다르게 하여 수행한 위치측정 결과이다. Case 1 (그림 11, 12)은 대략 5cm/s 정도의 속도로 송신센서를 움직인 경우이며, 상당히 정확하게 위치를 측정하였으며 오차범위가 기준 값의 5% 이내의 위치 제어용 데이터로 사용하기 충분한 정도를 갖고 있었다. 또한, Case 2 (그림 13, 14)의 경우 약 10cm/s 정도의 속도로 Case 1의 속도보다 2배 정도 빠르게 움직인 경우인데, 약간의 데이터들이 점프하는 경향을 나타내는 것을 제외하고는 정확하게 위치를 측정하고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 본 논문에서 구현한 단기선 방식의 위치추적 방식은 X, Y평면에 대해서는 비교적 정확한 위치를 나타내었으나 Z방향에 대한 수심 위치 측정은 식(2)에서 계산된 x, y 위치 값을 사용하여 z의 위치를 계산하는 과정에서 오차가 누적되어 수평방향보다 다소 큰 오차를 포함하고 있다.



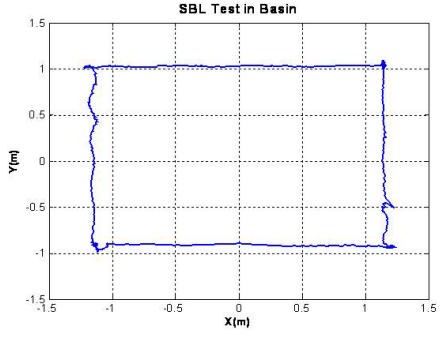
[그림 10] LabView program's block diagram



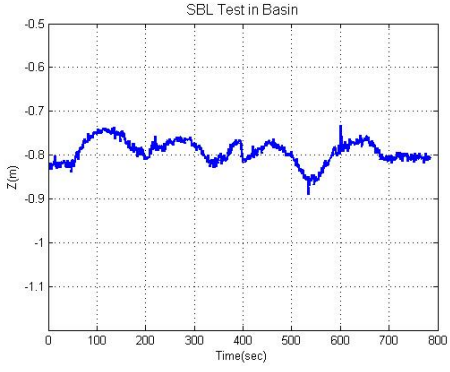
[그림 11] Case1 of SBL system(x-y position)



[그림 12] Case1 of SBL system(z position)



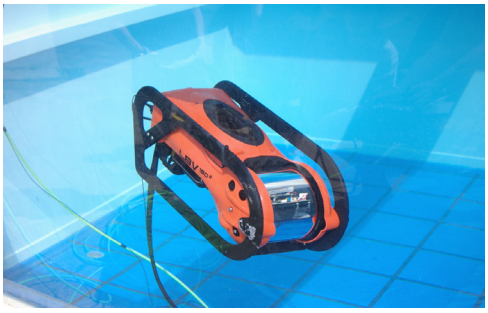
[그림 13] Case2 of SBL system(x-y position)



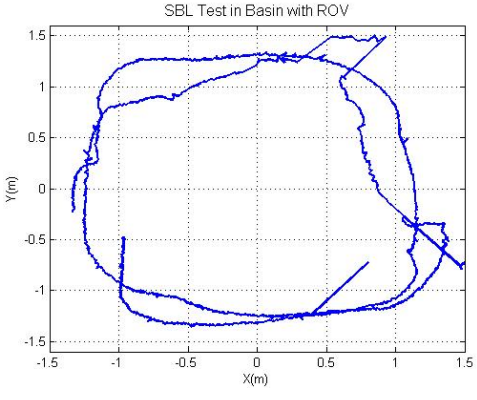
[그림 14] Case2 of SBL system(z position)

다음의 그림 15~17은 Case 3의 경우로, 실제 무인잠수정인 ROV(Remotely Operated Vehicle)에 송신센서를 부착하여 수조내에서 ROV의 이동에 따른 위치측정 실험 사진과 측정된 위치를 나타낸 그래프이다. 그림 15는 실험에 사용된 LBV 150 ROV의 실험장면이며, 그림 16과 그림 17은 ROV가 움직인 궤적을 계산하여 X-Y 평면과 3-D 평면에 도시한 결과이다.

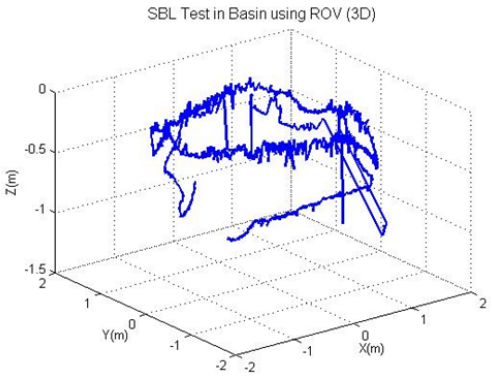
실제 송신센서를 ROV에 장착하여 이동한 경우에는 ROV가 수조벽면에 가까이 접근했을 경우 멀티패스(Multi-path)에 의한 영향과 자체 추진기 작동 소음에 의한 영향을 받아 Case 1과 2의 경우 보다 조금 더 많은 잡음성분을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 그림 16에서 보면 X, Y의 위치는 비교적 정확하게 추정하고 있으며, 무인잠수정의 수평방향 위치제어용 데이터로 사용하기에 충분한 기준 값의 5%이내의 오차 정도를 갖고 있다. 그러나 그림 17에서 보면 수직방향 위치는 Case 1과 Case 2의 경우보다 추진기의 동작 소음등에 의해 오차가 커서 수직방향 위치제어용으로 사용하기에는 다소 부적절하다고 판단된다.



[그림 15] SBL system basin with ROV



[그림 16] Basin test case3 of SBL system



[그림 17] Basin test case3 of SBL system (3-D plot)

5. 결론

본 논문에서는 수중에서 이동하는 무인잠수정(ROV)의 위치를 측정하는 방법 중의 하나인 단기선 방식(SBL)을 이용하여 잠수정의 위치측정을 수행하였고, 실제로 하이드로폰과 DAQ 시스템을 이용하여 수조에서 실험을 수행하였다. 입력된 신호를 이용하여 위치 계산방식으로 삼각측량법을 이용하였고, LabView 프로그램을 이용하여 실시간으로 무인잠수정의 위치를 계산하여 출력하였다. 실험결과, 제안된 알고리즘은 X, Y방향에 대해서는 비교적 정확한 추정 결과를 나타내었고 이를 이용하여 무인잠수정의 수평방향 위치제어용 데이터로 사용하기에 충분하다고 판단된다. 그러나 Z방향에 대하여서는 오차를 포함하고 있어 수직방향 제어용 데이터로 사용하기 힘들다고 판단된다. 이는 무인잠수정의 수심측정 힘들다고 판단된다. 이는 무인잠수정의 수심측정 센서를 이용하여 보완할 수 있을 것으로 본다.

현재의 측정신호는 샘플링 주파수가 장비의 한계로 인해 충분한 용량이 아니며, 송신신호가 미약해 측정에 오차가 있는 상황이어서 추후 이를 보완하여 실 해역 실험에 적용할 예정이다.

참고문헌

[1] J. Yuh, "Development in Underwaer Robotics," Robotics and automation 1995 IEEE International Conference, Vol. 2, pp. 1862-1867, 1995.

[2] 조경남, 서동철, 최항순, "SNU-LBL 시스템의 구성 및 이론적 전개", 한국수중로봇연구회 2005년 춘계워크샵, pp. 63-71, 2005.

[3] 이덕환, 고학림, 임용곤, "수중환경에서 위치추적 시스템의 DSP 구현", 한국음향학회지, 제26권, 제1호, pp. 48-54, 2007.
[4] 이용희, "LBL과 심도계를 결합한 천수역 수중위치추정시스템 개발", 서울대학교 조선해양공학과 석사학위 논문, 2006.
[5] S.M. Smith and D. Kronen, "Experimental Results of an Inexpensive Short Baseline Acoustic Positioning System for AUV Navigation", Oceans '97. MTS/IEEE Conference, pp. 714-720, 1997.
[6] P.H. Milne, "Underwater Acoustic Positioning System", E. & F.N. SPON, London, 1983.
[7] LabView, NI LabView ver.8.5, National Instruments, 2008.
[8] Stockton T.R. and McLennan M.W, "Acoustic Position Measurement, an Overview", Proc. 7th Ann. Offshore Technology Conference, pp. 255-264, 1975.
[9] Hydrophone TC4013 Manual, RESON Inc. http://www.reson.com/graphics/design/Spec%20sheets/Hydrophones%20-%204000%20series/TC4013.pdf

유 선 철(Son-Cheol Yu) **[정회원]**

- 1998년 2월 : 인하대학교 선박해양공학과 (공학사)
- 2000년 9월 : 동경대 환경해양공학과 (공학석사)
- 2003년 10월 : 동경대 환경해양공학과 (공학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 포항공과대학교 환경공학부 교수

<관심분야>
수중로봇 음향신호 및 화상신호 처리

변 승 우(Seung-Woo Byun) **[정회원]**

- 2003년 2월 : 제주대학교 해양계측공학과 (공학사)
- 2007년 2월 : 제주대학교 해양정보시스템공학과 (공학석사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 제주대학교 해양시스템공학과 박사과정

<관심분야>
수중로봇 설계 및 제어

김 준 영(Joon-Young Kim) **[정회원]**

- 1989년 2월 : 인하대학교 선박해양공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 인하대학교 선박해양공학과 (공학석사)
- 1999년 8월 : 한양대학교 정밀기계공학과 (공학박사)
- 2005년 4월 ~ 현재 : 제주대학교 해양시스템공학과 교수

<관심분야>
수중로봇 설계 및 제어