

배경잡음이 존재하는 얇은 수조 내에서의 USBL 위치추적 알고리즘 적용 가능성 연구

김시문* · 이판목* · 이종무* · 임용곤*
*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

Study on an USBL Positioning Algorithm in a Shallow Water Tank in Noisy Conditions

SEA-MOON KIM*, PAN-MOOK LEE*, CHONG-MOO LEE*, AND YONG-KON LIM*
*Ocean Development System Laboratory, KRISO/KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Multi-Frequency Shift Keying (MFSK) 다주파수 천이 변조, Ultra Short Baseline(USBL) 초단기선, Underwater Vehicle 잠수정, Signal to Noise Ratio 신호대잡음비, Shallow Water Tank 얇은 수조

ABSTRACT: It is well known fact that acoustic positioning systems are absolutely needed for various underwater operations. According to the distances between their sensors they are classified into three parts: long baseline(LBL), short baseline(SBL), and ultra-short baseline(USBL). Among them the USBL system is widely used because of its simplicity, although it is the most inaccurate. Recently, in order to increase the positioning accuracy, various USBL systems using broadband signal such as MFSK(Multiple Frequency Shift Keying) are produced. However, their positioning accuracy is still limited by background noise and reflected waves. Therefore, there is difficulty in applying the USBL system using MFSK signal in a shallow water with noisy conditions. In order to examine the effect of the noise and wave reflections this paper analyze position errors for various conditions using numerical simulations. The simulation results say that the SNR must be greater than 20dB and errors in the vertical direction are slightly increased by wave reflections by upper and lower boundaries.

1. 서론

수중 이동체의 위치추적, 수중위치제어, 수중탐사 및 관측, 해양자원 채집 등의 수중작업을 수행하기 위해서 정밀한 항법 시스템이 요구되고 있으며 관성센서를 이용한 관성 항법시스템과 수중음향 항법시스템으로 구분된다 (Milne, 1980). 이중 수중음향 항법시스템은 음파속도를 알고 있어야 하는 어려움이 존재하나 절대위치를 바로 예측하기 때문에 장시간 운용해야 하는 잠수정이나 관측장비에 반드시 필요한 항법 시스템이다.

현재 한국해양연구원의 해양개발시스템연구본부에서는 심해진수장치(launcher), 원격무인잠수정(remotely operated vehicle; ROV), 자율무인잠수정(autonomous underwater vehicle; AUV)으로 이루어진 차세대 심해용 무인잠수정 개발을 진행 중에 있으며 수중 초음파 항법시스템으로 초단기선(super-short baseline; SSBL 또는 ultra-short baseline; USBL) 시스템을 사용할 예정이다. 또한 AUV는 심해에서 임무 수행 후에 AUV의 앞부분에 장착예정인 USBL 시스템을 이용하여 심해진수장치에 도킹하여 회수할 예정이다 (Fig. 1) (이판목 외, 2002).

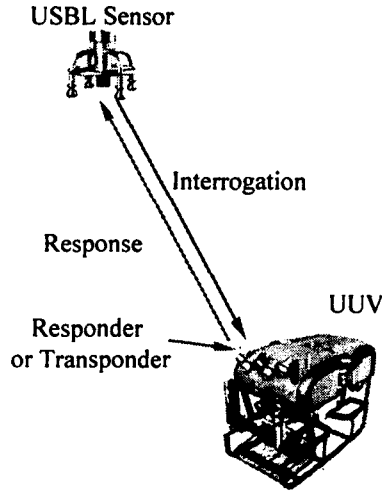
USBL 시스템은 다른 수중음향 항법시스템인 장기선 (long

baseline; LBL)이나 단기선 (short baseline; SBL) 시스템과 비교하여 볼 때 센서 어레이에 입사되는 음파의 위상차를 이용하여 각도를 예측하므로 외부 잡음에 민감하며 센서에서 멀어질수록 정밀도가 감소하는 특징이 있으나 센서에 근접한 위치에서는 높은 정밀도로 위치 예측이 가능하므로 특정한 범위 내에서만 큰 정밀도를 요구하는 경우에 적합한 시스템이라 할 수 있다(Vickery, 1998).

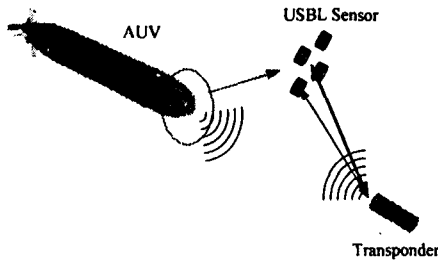
USBL 시스템의 성능 향상에 대한 연구가 꾸준히 진행되었으며 (Jourdan and Brown, 1997, Watson et. al., 1998) 실험에서의 보정방법에 대한 연구도 수행되었다 (Opderbecke, 1997). 이와 동시에 단일주파수를 이용하는 방법에서 벗어나 침(chirp) 신호나 MFSK신호 등의 넓은 주파수 성분을 이용하는 스프레드 스펙트럼 방법도 제시되었으며(Austin, 1994) 상용제품도 나오고 있는 실정이다 (Nautronix, Ixsea-Oceano). 특히 스프레드 스펙트럼 방법은 넓은 주파수 범위를 사용하므로 코딩된 데이터의 전송이 용이하다는 장점이 존재하여 잠수정의 위치 추적을 위해 널리 사용되고 있다. 최근에 MFSK의 여러 변수의 변화에 따른 USBL 시스템의 예측 위치 정밀도 해석이 수행된 바 있으나 (김시문 외, 2004) 반사파 및 잡음에 대한 영향을 고려하지 않은 문제점이 존재한다.

본 연구에서는 해양연구원이 보유하고 있는 해양공학수조 내에서 Fig. 2와 같이 십자형으로 구성된 USBL 시스템을 이용

제1저자 김시문 연락처: 대전시 유성구 유성우체국사서함23호
042-868-7275 smkim@kriso.re.kr



(a) USBL system for the acoustic navigation of the UUV



(b) USBL system for the docking of the AUV

Fig. 1 UUV's USBL navigation systems

하여 AUV의 위치추적 가능성을 살펴보고자 한다. 이를 위해 먼저 MFSK 신호를 이용한 USBL 시스템의 위치추적 알고리즘에 대해서 간략히 정리하고 반사파가 발생하는 조건과 배경잡음의 영향을 고려하여 위치추적 오차를 계산하는 수치해석을 수행하고자 한다. 이때 반사파는 표면 및 바닥면에서 한번 발생한다고 가정하고 있으며 배경잡음의 영향을 고려하기 위하여 신호대잡음비를 변화시켜 가면서 오차해석을 수행하고 있다.

2. 기본 이론

USBL 알고리즘을 이용한 위치추적은 USBL 배열센서까지 도달하는 시간차를 계측하여 방향을 예측하고 이와 동시에 시간지연을 계측하여 거리를 예측하는 방법을 사용한다. 본 연구에서는 시간차 및 시간지연을 계측하기 위한 음향신호로 주파수 대역폭이 넓어 시간상의 분해능이 우수한 MFSK 신호를 사용한다.

2.1. MFSK 신호의 정의 및 특성

MFSK는 주파수 천이 변조방식으로서 본래는 디지털 통신에서 정보전달을 위해 사용되는 변조기법 중의 하나이다

(Proakis, 2001). MFSK 신호는 여러 주파수를 갖는 순음 성분의 조합으로 이루어져 있으며 이를 수식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$p(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f_1 t + \phi_1) & t_0 < t < t_1 \\ \sin(2\pi f_2 t + \phi_2) & t_1 < t < t_2 \\ \vdots & \vdots \\ \sin(2\pi f_N t + \phi_N) & t_{N-1} < t < t_N \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서 알 수 있듯이 MFSK 신호의 특성을 대표하는 변수로는 주파수 성분의 개수 N , 각 성분의 주파수 f_1, f_2, \dots, f_N 및 각 성분의 신호길이 $T_i = t_i - t_{i-1}$ 등이 있다. 이때 MFSK 신호의 중심주파수 f_c , 주파수 폭 f_{band} 총 펄스길이 T 는

$$f_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i \quad (2)$$

$$f_{band} = N \times \Delta f \quad (3)$$

$$T = \sum_{i=1}^N T_i \quad (4)$$

와 같이 표현된다.

MFSK 신호가 위치추적 시스템에 사용되는 주된 이유는 바로 자기상관함수 $R(\tau)$ 의 값이 $\tau=0$ 에서 작은 폭으로 가장 큰 값을 가져 높은 분해능을 가진 시간지연의 측정이 용이하기 때문이다. 즉 같은 파형을 갖는 두 개의 신호가 τ_0 의 시간차를 갖는 경우 상호상관함수의 최대값은 $\tau=\tau_0$ 에서 얻어지므로 시간지연의 예측이 가능하다 (Bendat and Piersol, 1986). USBL 알고리즘의 정밀도는 시간지연 예측 성능에 좌우되며 각 특성변수에 따른 특성해석 연구가 진행된 바 있다. (김시문 외, 2004). 본 연구에서는 동일한 특성변수를 가진 MFSK 신호를 이용한 해석을 수행하고자 한다.

2.2. 시간차 예측 알고리즘 (김시문 외, 2004)

수중이동체에 장착되어 있는 송신 센서에서 $p_0(t)$ 의 MFSK 신호가 발생되며 송신 센서로부터 각각 r_1 과 r_2 만큼 떨어져 있는 두 개의 USBL 수신센서에서의 음향신호 $p_1(t)$ 과 $p_2(t)$ 는

$$p_1(t) = p_0(t - r_1/c) \quad (5)$$

$$p_2(t) = p_0(t - r_2/c) \quad (6)$$

과 같다. 이때 $p_1(t)$ 과 $p_2(t)$ 의 상호상관함수 $R_{12}(\tau)$ 는

$$R_{12}(\tau) = \int p_1(t) p_2(t + \tau) dt = R_0(\tau + r_1/c - r_2/c) \quad (7)$$

과 같이 $p_0(t)$ 의 자기상관함수 $R_0(\tau)$ 로서 표현할 수 있다. $R_0(\tau)$ 는 $\tau=0$ 에서 최대값을 가지므로 $R_{12}(\tau)$ 는

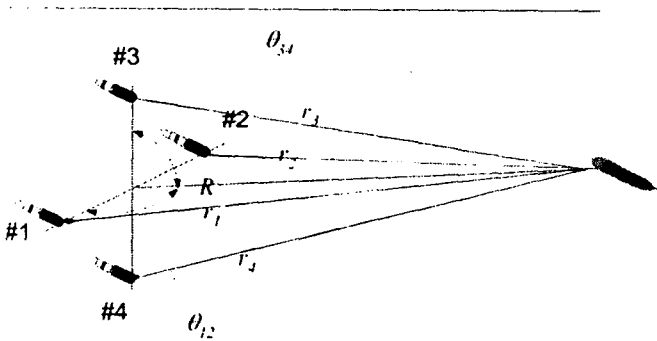
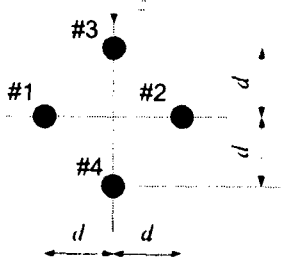
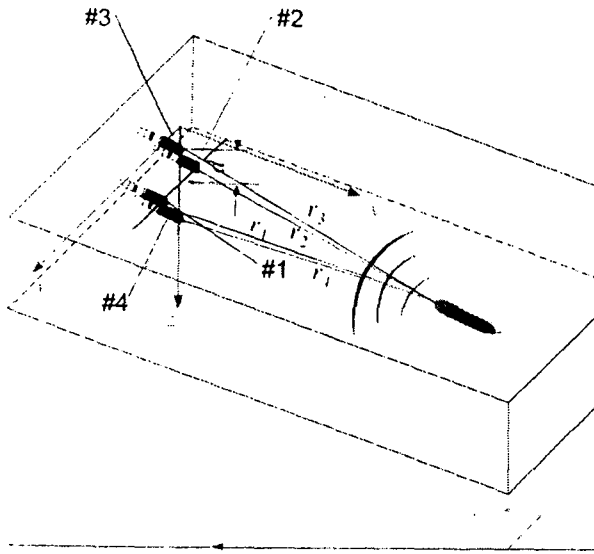


Fig. 2 Configuration of the USBL system in the shallow water tank

$\tau_{12} - r_1/c + r_2/c = 0$ 에서 최대값을 가지며 따라서 $p_1(t)$ 에 대한 $p_2(t)$ 의 시간지연 τ_R 은

$$\tau_R = (r_2 - r_1)/c = \tau_{12} \quad (8)$$

과 같이 표현된다. 또한 상호스펙트럼 $S_{12}(f)$ 는

$$S_{12}(f) = P_1^*(f)P_2(f) = S_0(f)e^{i2\pi f(r_2 - r_1)/c} \quad (9)$$

와 같이 $p_0(t)$ 의 자기스펙트럼 $S_0(f)$ 로서 표현이 가능하므로 위상의 변화를 측정하여 시간지연 예측이 가능하다. 즉 주파수 f_1 과 f_2 에서의 위상을 각각 ϕ_1 과 ϕ_2 라 하면 $p_1(t)$ 에 대한

$p_2(t)$ 의 시간지연 τ_S 은

$$\tau_S = (r_2 - r_1)/c = -\frac{\phi_2 - \phi_1}{2\pi(f_2 - f_1)} \quad (10)$$

과 같이 구해진다. 단, 상호스펙트럼으로부터 얻을 수 있는 위상의 범위가 0° 부터 360° 사이이므로 거리차 $r_2 - r_1$ 이 매우 커서 360° 범위 내에서 표현할 수 없는 경우 심각한 오차를 초래한다. 이와 같은 문제는 상호상관함수를 동시에 이용함으로써 해결이 가능하다. 즉 상호상관함수에 의한 시간지연 τ_R 과 상호스펙트럼에 의한 시간지연 τ_S 와는

$$\tau_R \approx \tau_S + 2\pi M \quad (M \text{은 정수}) \quad (11)$$

의 관계가 있으므로 식 (11)로부터 M 을 구한 후 보정된 위상 τ_S' 를

$$\tau_S' = -\frac{\phi_2 - \phi_1}{2\pi(f_2 - f_1)} + 2\pi M \quad (12)$$

와 같은 관계식에 의해서 구할 수 있다. 송신센서와의 시간지연은 $p_1(t)$ 과 $p_2(t)$ 신호 대신에 $p_0(t)$ 와 $p_1(t)$ 또는 $p_0(t)$ 와 $p_1(t)$ 사이의 상호상관함수 및 상호스펙트럼을 이용하여 예측값을 얻을 수 있다.

2.3. USBL 위치 예측 알고리즘

수중 이동체의 위치는 앞절에 기술된 과정을 통해 시간차 및 시간지연만 측정된다면 다음과 같은 기하학 원리를 이용하여 직교좌표로 쉽게 계산된다. 양의 y 축 및 양의 z 축과의 사각을 의미하는 입사각 θ_{12} 와 θ_{34} 는

$$\theta_{12} = \cos^{-1}(-c\tau_{12}/2d) \quad (13)$$

$$\theta_{34} = \cos^{-1}(-c\tau_{34}/2d) \quad (14)$$

와 같이 표현되며 거리 R 및 입사각으로부터

$$y = R\cos(\theta_{12}) \quad (15)$$

$$z = R\cos(\theta_{34}) \quad (16)$$

$$x = \sqrt{R^2 - y^2 - z^2} \quad (17)$$

와 같이 3차원 직교좌표를 얻을 수 있다.

3. 수치해석 및 결과

3.1. 수치해석 조건

수조의 깊이는 한국해양연구원의 해양공학수조의 수심과 유사한 4m로 가정하였으며 USBL 수신센서는 모두 4개로 십자 형태를 이루고(Fig. 2) 수심 2m의 yz 평면에 위치해 있다고 가

정하였다. 이때 마주보는 센서사이의 간격은 50cm($d=25\text{cm}$)로 설정하였다. 이동체의 위치는 Table 1에서 보는 바와 같이 총 5개의 궤도를 따라 움직인다고 가정하였다. 사용된 궤도는 각각 USBL 수신센서와의 거리가 일정한 궤도, x 축을 따라 이동하는 궤도, 수직방향으로 이동하는 궤도, y 축과 평행한 궤도, 비스듬한 타원궤도를 나타내고 있다 (Fig. 3).

Table 1 Cartesian coordinates of the five track paths for the acoustic positioning simulations

| Track # | x [m] | y [m] | z [m] | |
|---------|-----------------|--------------|--------------|-------------------------|
| 1 | $20\cos\phi$ | $20\sin\phi$ | 2 | $-\pi/2 < \phi < \pi/2$ |
| 2 | 1~40 | 0 | 2 | |
| 3 | 20 | 0 | 0~4 | |
| 4 | 20 | -20~20 | 2 | |
| 5 | $20+15\cos\phi$ | $15\sin\phi$ | $2+\cos\phi$ | $-\pi < \phi < \pi$ |

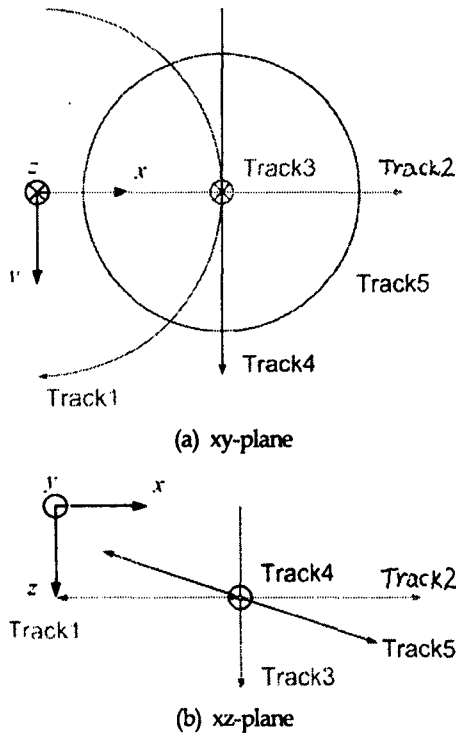


Fig. 3 Visual diagrams of the five track paths for the acoustic positioning simulations

MFSK 신호는 15kHz의 중심주파수와 2.5kHz의 간격을 갖는 총 4개의 주파수 성분으로 이루어져 있으며 각 성분의 길이는 5ms로서 총 20ms의 길이를 갖도록 하였다. 반사파는 표면 및 바닥에서 각각 한번 발생하며, 표면 반사파는 압력 해지 조건 (pressure release condition)으로서 위상이 180° 반전되어 나타나고 바닥에서는 강제벽 조건(rigid condition)으로서 위상 변화 없이 반사된다고 가정하였다. 반사파와 함께 성능을 감소시키는 잡음 성분을 추가하였으며 이는 직접파에 대한 신호대 잡음비(signal to noise ratio: SNR)를 0~20dB 변화시켜 가면서 수치해석을 수행하였다.

3.2. 수치해석 결과

Fig. 4의 두 그림은 $(x, y, z) = (20, 0, 2)$ 의 위치에서 신호대 잡음비가 각각 0dB, 20dB인 경우의 음압을 나타낸다. 반사파의 영향으로 인하여 직접파와 겹쳐지는 부분에서 상쇄 또는 보강이 되어 신호 크기가 변화하는 것이 관찰된다.

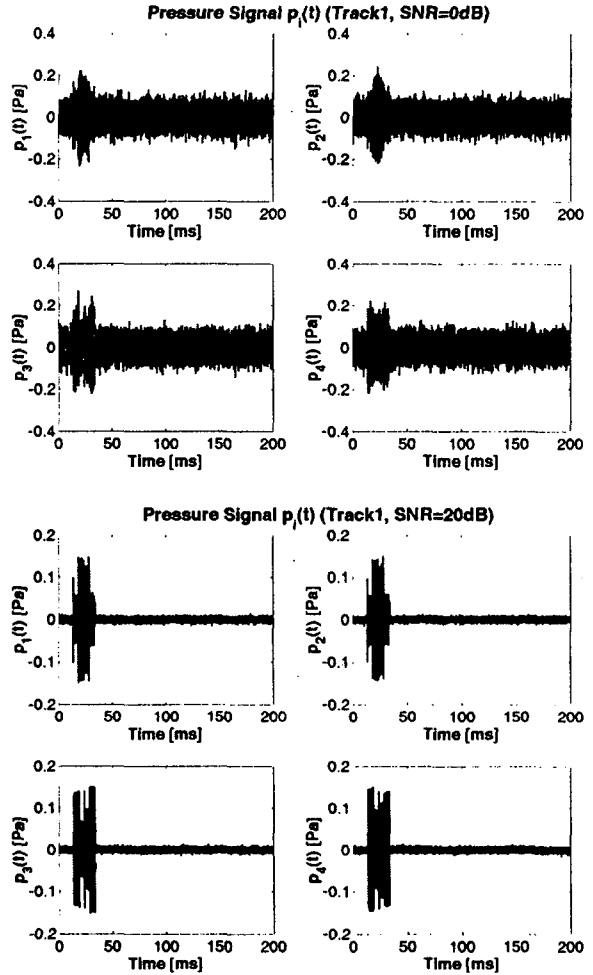


Fig. 4 Pressure signal when the source is located at $(x,y,z)=(20\text{m},0,2\text{m})$ (a) SNR=0dB (b) SNR=20dB

Fig. 5는 Fig. 4로부터 계산된 음압레벨을 나타내며 원래 MFSK 신호성분인 12.5, 17.5, 22.5, 27.5kHz에서 큰 에너지가 존재하는 것을 알 수 있다. 그 외의 주파수에서도 잡음 성분으로 인하여 일정한 레벨을 보이고 있으며 신호대잡음비가 작은 경우에 더 큰 잡음 레벨을 갖는다. MFSK가 존재하는 주파수에서는 주파수 및 위치에 따라 표면 및 바닥 반사파의 상쇄 또는 보강 간섭으로 인하여 레벨에 차이가 있음을 보여주고 있다.

Fig. 6은 수신센서 1번과 2번, 3번과 4번 사이의 상호상관함수(correlation)를 나타내고 있다. 이론적인 시간지연값이 두 경우 모두 0s이므로 시간지연이 0인 경우에 가장 큰 값을 가지는

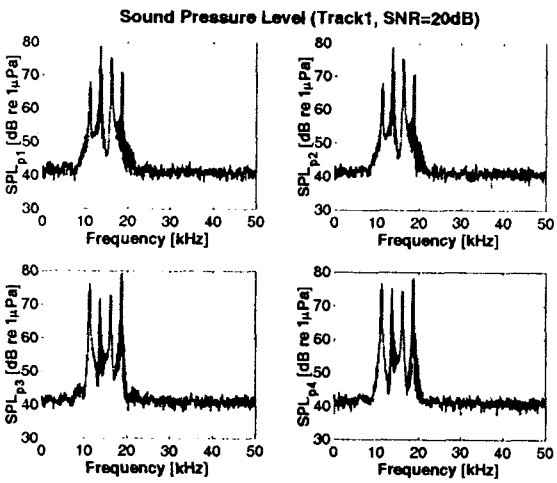
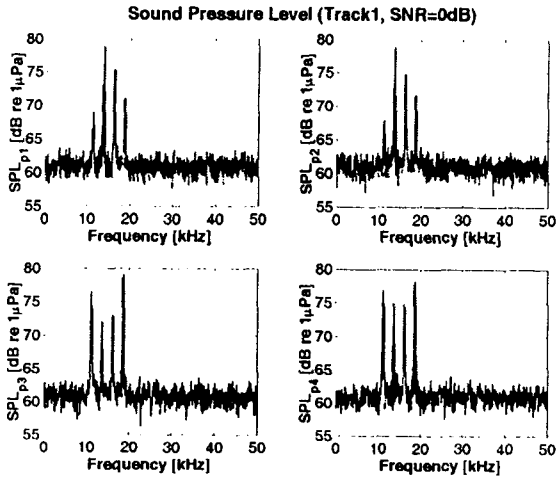


Fig. 5 Sound pressure level when the source is located at $(x,y,z)=(20m,0,2m)$ (a) SNR=0dB (b) SNR=20dB

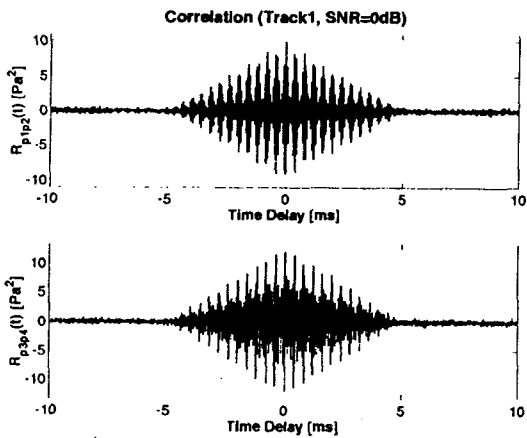


Fig. 6 Correlation of pressure signals when the source is located at $(x,y,z)=(20m,0,2m)$ and SNR=0dB (a) between $p_1(t)$ and $p_2(t)$ (b) between $p_3(t)$ and $p_4(t)$

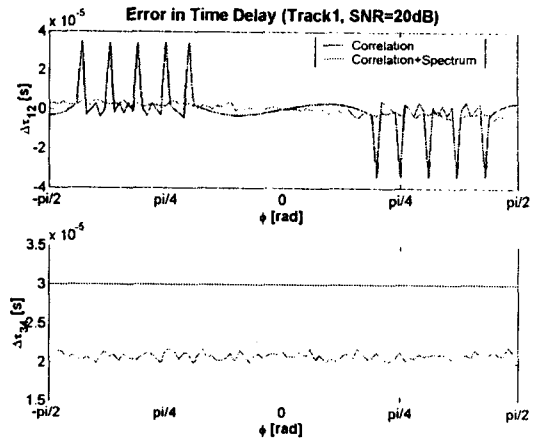


Fig. 7 Error in time delay for Track1 when SNR=20dB

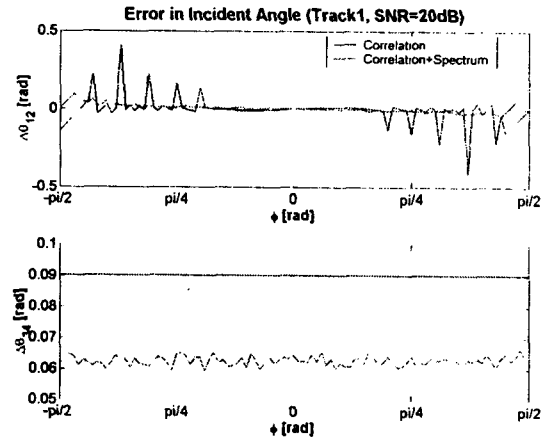


Fig. 8 Error in incident angle for Track1 when SNR=20dB

경향이 나타난다. 실제로는 잡음 및 반사파의 영향으로 인하여 오차가 발생한다.

Fig. 7은 예측된 시간 지연의 오차를 나타낸다. 각도 ϕ 가 0° 에 가까운 경우에 오차가 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 센서의 배열형상의 특성상 중심에 위치할수록 오차가 작기 때문에 나타나는 결과이다.

Fig. 8은 시간지연으로부터 얻는 입사각 θ_{12} 와 θ_{34} 의 오차를 나타낸다. Fig. 7과 마찬가지로 각도 ϕ 가 0° 에 가까울수록 작은 오차가 발생한다.

Figs. 9와 10은 각각 xy 평면에서의 궤적과 위치오차를 나타내고 있다. x 및 y좌표의 오차는 ϕ 가 적을수록 작으며 z좌표의 오차는 각도에 관계없이 고르게 나타나고 있다. 이는 표면 및 바닥면의 반사파 영향으로 나타나는 결과이다.

Fig. 11은 5개의 궤적에 대해서 신호대잡음비의 변화를 0~20dB로 변화시켜가면서 얻은 x, y, z좌표의 제곱평균(RMS) 오차를 나타내고 있다. 전체적인 경향은 x좌표 > z좌표 > y좌표의 순으로 큰 오차가 발생하고 있으며 신호대잡음비가 5~20dB 이상에서 포화상태가 됨을 알 수 있다. 따라서 MFSK를 이용한 USBL 알고리즘을 적용하기 위해서 신호대잡음비가

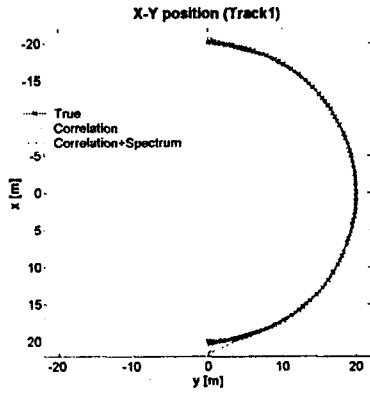


Fig. 9 x-y position of Track1 when SNR=20dB

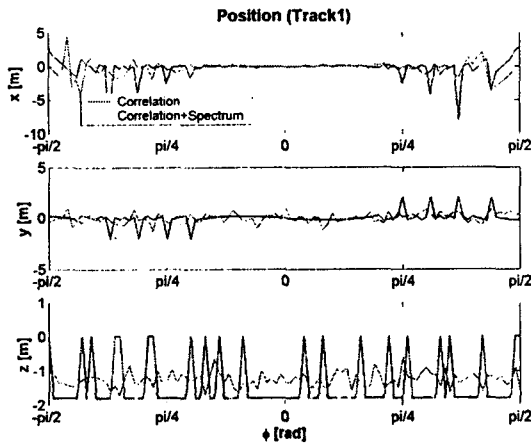


Fig. 10 Error in Cartesian coord. for Track1 when SNR=20dB

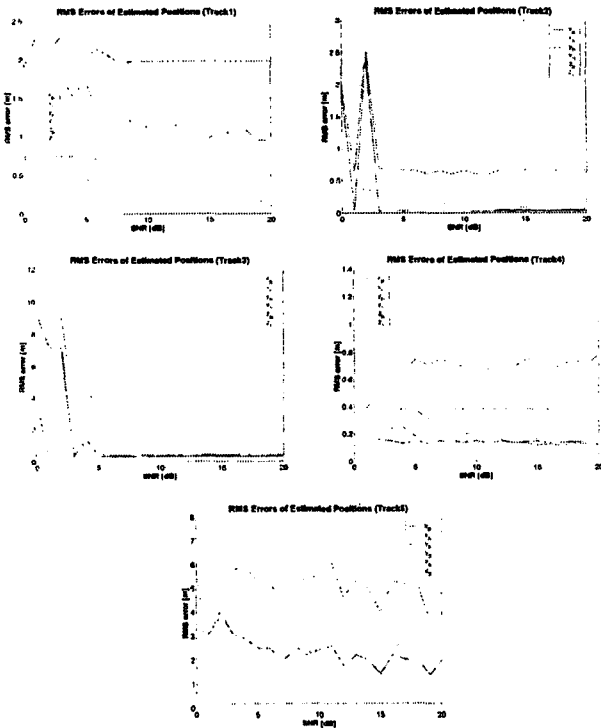


Fig. 11 Estimated RMS errors w.r.t. SNR for all five tracks

최소 20dB 이상은 되어함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 한국해양연구원의 해양공학수조에서 AUV와 같은 수중이동체의 위치추적을 위해 MFSK신호를 이용하는 USBL 시스템의 사용 가능성에 대하여 살펴보았다. USBL 수신 센서 배열 특성상 x좌표의 오차가 가장 크게 발생하며 표면 및 바닥에서의 반사파에 의해서 z좌표 예측값이 y좌표 예측 값보다 큰 오차가 발생한다. 여러 궤적에 대한 신호대잡음비의 변화에 따른 오차의 제곱평균값을 살펴본 결과 최소 20dB 이상의 신호대잡음비를 가져야 함을 알 수 있었다.

결론적으로 현 조건으로는 수평면에서 수 m의 오차가 발생할 수 있으며 보다 향상된 수cm 이내의 위치추적 오차를 갖기 위해서는 주파수의 증가, 수신배열센서의 구조 변경 등의 방법이 요구된다.

5. 후기

본 논문은 해양수산부의 지원으로 한국해양연구원에서 수행한 "차세대 심해용 무인잠수정 개발" 연구결과와 한국해양연구원에서 기본연구사업으로 수행중인 "해양개발을 위한 설계 엔지니어링 기술고도화" 사업의 일부임을 밝힌다.

참고 문헌

김시문, 이판목, 이종무, 임용곤, (2004). "MFSK를 이용한 잠수정의 거리 및 방향 예측 알고리즘 구현", 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 249-256.

이판목 외, (2002). 차세대 심해저 무인잠수정 개발, 한국해양연구원 연구보고서 UCM0250-2368.

Austin, T. C., (1994). "The application of spread spectrum signaling techniques to underwater acoustic navigation," Proceedings of 1994 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, pp. 443-449.

Bendat, J. S. and Piersol, A. G., (1986). "Random Data - Analysis and Measurement Procedures", 2nd Ed., pp. 118-120, John Wiley & Sons, Singapore.

Ixsea-Oceano, (2004). Posidonia 6000 User's Manual Rev. 2.0

Jourdan, D. and Brown, B. (1997). "Improved navigation system for USBL users," IEEE Oceans Proceeding, pp. 727-735.

Milne, P. H., (1980). "Underwater Engineering Surveys", Chap. 3, E. & F. N. Spon Ltd., London.

Nautronix, AST II Manual

Opderbecke, J. (1997). "At-sea calibration of a USBL underwater vehicle positioning system," IEEE Oceans Proceeding, pp. 721-726.

Proakis, John G., (2001). "Digital Communications", Chap. 4, McGraw-Hill, New York.

Vickery, (1998). "Acoustic Positioning System: a practical overview of current systems", Oceans 1998, pp. 5-17.

Watson, M., Loggins, C. and Ochi, Y. T., (1998). "A new high accuracy super-short base line (SSBL) system," Proceedings of the 1998 International Symposium on Underwater Technology, pp. 210-215.