

# 세 개의 트랜스폰더로 이루어진 장기선 위치추적장치의 민감도 해석

김시문\* · 이판목\* · 이종무\* · 임용곤\*

\*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

## Sensitivity Analysis of Long Baseline System with Three Transponders

SEA-MOON KIM\*, PAN-MOOK LEE\*, CHONG-MOO LEE\*, AND YONG-KON LIM\*

\*Ocean Development System Laboratory, KRISO/KORDI, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Long Baseline (LBL) System 광대역 위치추적 시스템, Sensitivity 민감도 Position Error 위치오차 Transponder 트랜스폰더

**ABSTRACT:** Underwater acoustic navigation systems are classified into three systems: ultra-short baseline (USBL), short baseline (SBL), and long baseline (LBL). Because the USBL system estimates the angle of a submersible, the estimation error becomes large if the submersible is far from the USBL transducer array mounted under a support vessel. SBL and LBL systems estimate submersible's location more accurately because they have wider distribution of measuring sensors. Especially LBL systems are widely used as a navigation system for deep ocean applications. Although it is most accurate system it still has estimation errors because of noise, measurement error, refraction and multi-path of acoustic signal, or wrong information of the distributed transponders. In this paper the estimation error of the LBL system are analyzed from a point of sensitivity. It is assumed that the error exists only in the distance between a submersible and the transponders. For this purpose sensitivity of the estimated position with respect to relative distances between them is analyzed. The result says that estimation error is small if the submersible is close to transponders but not near the ocean bottom.

### 1. 서 론

수중에서의 위치제어, 탐사 및 관측 등의 수중작업을 수행하기 위해서 정확한 항법시스템이 요구되고 있으며 현재 이용되고 있는 수중 항법시스템은 크게 추측항법 (dead reckoning) 시스템과 수중음향 항법시스템으로 구분할 수 있다 (Milne, 1980). 여기서 추측 항법시스템은 상대적인 위치나 속도, 가속도 등을 측정하여 위치를 계속하는 방법으로 장시간동안 이용하는 경우 누적 오차가 점점 증가하여 정확도가 떨어지는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 도플러 속도계 (Doppler velocity log) 등을 보조센서로 이용한 개선된 항법시스템이 제안되고 있다. 반면 수중음향 항법시스템은 음파속도를 알고 있어야 하는 어려움이 존재하나 절대위치를 바로 예측하기 때문에 장시간 운용해야하는 잠수정이나 관측장비에는 반드시 필요한 항법 시스템이다.

수중음향 항법시스템은 그 사용 범위 및 정밀도에 따라 장기선 (long baseline; LBL), 단기선(short baseline; SBL), 초단기선 (ultra-short baseline; USBL 또는 super-short baseline; SSBL) 시스템으로 구분되어지는데 (Milne, 1980), 이중 USBL 시스템은 센서 어레이에 입사되는 음파의 위상차를 이용하여 잠수정 위치의 각도를 예측하므로 센서에서 멀어질수록 정밀

도가 감소하는 특징이 있으나 센서에 근접한 위치에서는 높은 정밀도로 위치 예측이 가능하므로 수 m 이내의 협소한 범위 내에서만 높은 정밀도를 요구하는 경우에 적합한 시스템이라 할 수 있다. LBL과 SBL 시스템은 넓은 영역에서 다수의 센서를 이용하여 시스템 운용이 복잡하다는 단점이 있는 반면 일정한 정밀도를 잃지 않고 수 km에 이르는 보다 넓은 범위에서 사용할 수 있다는 장점이 있으며 특히 LBL 시스템은 심해에서도 높은 정밀도를 유지할 수 있는 특징이 있다. 최근에는 LBL의 운용을 쉽게 하기 위해 하나의 트랜스폰더만을 이용한 SLBL(Synthetic LBL)에 대한 연구가 진행중에 있다 (Baccou, 2002, Larsen 2000, Scherbaty, 1995).

오차를 발생시키는 요인으로는 측정 오차, 굴절, 다중경로 등이 있으며 랜덤 오차를 최소한으로 하기 위하여 Kalman filter를 이용하거나 (Matos, 1999), 다중 경로의 영향을 고찰한 (Deffenbaugh, 1996) 항법 시스템이 연구되었다. 그러나 LBL 시스템도 정확한 트랜스폰더의 위치를 잘못 알고 있거나 잘못된 음속값으로 인하여 거리의 측정에 오차가 생기는 경우에 예측 위치에 큰 오차가 발생할 것이라는 것을 예측할 수 있다. LBL 시스템에 있어서 여러 파라미터의 오차에 대한 예측위치 오차해석이 수행된 바 있으나 (Cestone, 1977) 특정점에서의 오차에 대한 고찰만을 수행하고 있다. 본 연구에서는 트랜스폰더의 절대 위치를 보정단계를 통하여 정확히 알고 있다고 가정하는 경우 즉 트랜스폰더와 잠수정 사이의 거리 오차만이

제1저자 김시문 연락처: 대전시 유성구 유성우체국사서합23호

042-868-7275 smkim@kriso.re.kr

존재하는 경우에 대한 예측 위치 오차 해석을 3차원 영역에서 수행하고자 한다.

## 2. 기본 이론 해석

### 2.1 기본 가정 및 방정식의 해

트랜스폰더의 개수는 최소한의 필요한 개수인 세 개로 한정 하였으며 같은 깊이( $z=0$ )에 위치에 있다고 가정하였다 (Fig. 1). 이 때 미지수의 개수는 세 개(무인잠수정의 위치  $(x, y, z)$ )

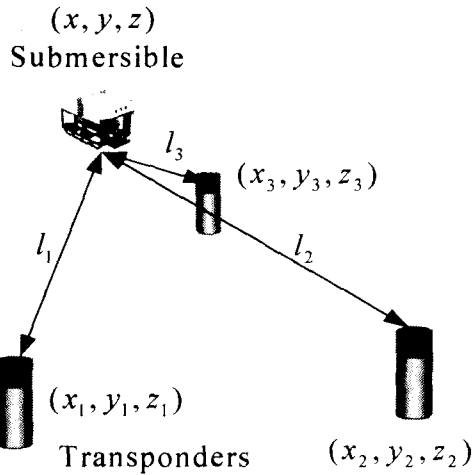


Fig. 1 Long baseline (LBL) system with three transponders

이며 측정 변수도 세 개(트랜스폰더와 무인잠수정 사이의 거리  $(l_1, l_2, l_3)$ )이므로 유일한 해를 얻을 수 있다. 이 경우의 미지수  $(x, y, z)$ 와 측정 변수  $(l_1, l_2, l_3)$ 와는

$$l_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + z^2 \quad (1a)$$

$$l_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + z^2 \quad (1b)$$

$$l_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + z^2 \quad (1c)$$

와 같은 관계식이 존재한다. 이 때 해  $(x, y, z)$ 를 상대 거리  $(l_1, l_2, l_3)$ 와 트랜스폰더의 위치  $(x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3)$ 로 표현하면

$$x = \frac{(x_1^2 + y_1^2 - l_1^2)(y_2 - y_3)}{Dx} + \frac{(x_2^2 + y_2^2 - l_2^2)(y_3 - y_1)}{Dx} + \frac{(x_3^2 + y_3^2 - l_3^2)(y_1 - y_2)}{Dx} \quad (2a)$$

$$y = \frac{(x_1^2 + y_1^2 - l_1^2)(x_2 - x_3)}{Dy} + \frac{(x_2^2 + y_2^2 - l_2^2)(x_3 - x_1)}{Dy} + \frac{(x_3^2 + y_3^2 - l_3^2)(x_1 - x_2)}{Dy} \quad (2b)$$

$$z = \sqrt{l_1^2 - (x - x_1)^2 - (y - y_1)^2} \quad (2c)$$

$$Dx = 2[x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)] \quad (2d)$$

$$Dy = 2[y_1(x_2 - x_3) + y_2(x_3 - x_1) + y_3(x_1 - x_2)] \quad (2e)$$

와 같다. 만약 트랜스폰더간의 거리가 모두  $L$ 로서 정삼각형을 이루고 있다면 (Fig. 2) 각 트랜스폰더의 좌표는 다음 식과 같이 유도된다.

$$(x_1, y_1, z_1) = (0, 0, 0) \quad (3a)$$

$$(x_2, y_2, z_2) = (L, 0, 0) \quad (3b)$$

$$(x_3, y_3, z_3) = \left(\frac{L}{2}, \frac{\sqrt{3}L}{2}, 0\right) \quad (3c)$$

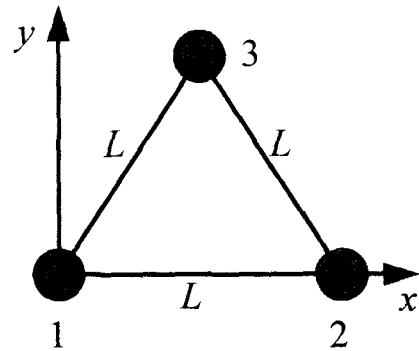


Fig. 2 Configuration of three transponders of the same height ( $z=0$ ) with the same distance  $L$

이 때 잠수정의 위치는

$$x = \frac{L}{2} + \frac{1}{2L}(l_1^2 - l_2^2) \quad (4a)$$

$$y = \frac{L}{2\sqrt{3}} + \frac{l_1^2 + l_2^2 - 2l_3^2}{2\sqrt{3}L} \quad (4b)$$

$$z^2 = \frac{1}{3L^2} \{L^2(l_1^2 + l_2^2 + l_3^2) + (l_1^2 l_2^2 + l_2^2 l_3^2 + l_3^2 l_1^2) - (l_1^4 + l_2^4 + l_3^4)\} - \frac{L^2}{3} \quad (4c)$$

와 같이 유도된다.

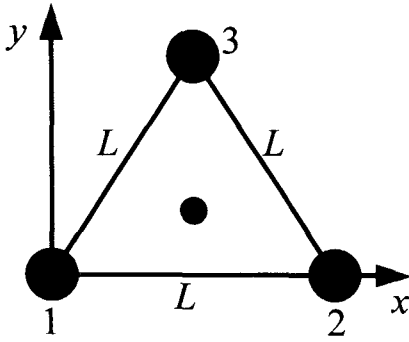
유도된 식의 검증을 위해서 Fig. 3과 같이 잠수정이 트랜스폰더로부터 같은 거리  $l$ 만큼 떨어져 있는 경우와 첫 번째 트랜스폰더 위치에 있는 경우를 살펴보면 다음과 같다.

(Case I) 거리가 같은 경우

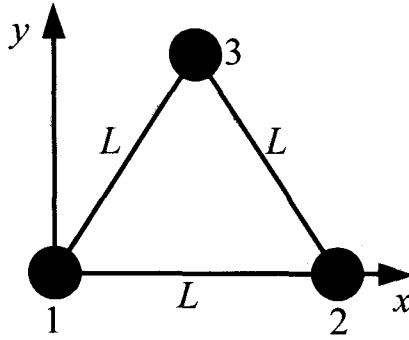
$$l_1 = l_2 = l_3 = l \quad (5)$$

$$x = \frac{L}{2} \quad (6a)$$

$$y = \frac{L}{2\sqrt{3}} \quad (6b)$$



(a) The case where the distances from a submersible to all three transponders are same



(b) The case where a submersible is on the first transponder

Fig. 3 Two examples of positions of a submersible (Large circle: transponders, small circle: submersible)

$$z^2 = l^2 - \frac{L^2}{3} \quad (6c)$$

(Case II) 첫 번째 트랜스폰더의 위치에 있는 경우

$$l_1 = 0 \quad (7a)$$

$$l_2 = l_3 = L \quad (7b,c)$$

$$x = y = z = 0 \quad (8)$$

먼저 (Case I)에서는  $xy$ 평면을 바라보았을 때 트랜스폰더로 이루어진 삼각형의 무게중심에 위치해 있으므로  $x$ 와  $y$  좌표는 식 (6a)와 (6b)로 일정하게 나오며  $z$ 좌표만  $l$ 의 함수로 표현된다. 특히  $l=L$ 인 경우에는 정사면체 구조를 이루고 있으며  $z = \sqrt{\frac{2}{3}}L$ 로서 정사면체의 높이가 나온다.

(Case II)에서는 잠수정이 첫 번째 트랜스폰더의 위치에 있으므로 좌표값은  $x=y=z=0$ 와 같이 모두 0의 값을 얻는다.

## 2.2 민감도 해석

본 논문에서 민감도란 상대위치 변화에 대한 예측 위치 변화의 비로서 상대위치 측정에 오차값에 대한 정량적인 예측위치 오차값을 나타낸다. 이는 수학적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial x}{\partial l_1} = \frac{l_1}{L} \quad (9a)$$

$$\frac{\partial y}{\partial l_1} = \frac{l_1}{\sqrt{3}L} \quad (9b)$$

$$\frac{\partial z}{\partial l_1} = \frac{1}{z} \frac{l_1}{3L^2} (L^2 + l_2^2 + l_3^2 - 2l_1^2) \quad (9c)$$

$l_2$  및  $l_3$ 에 대한 식도 유사하게 얻을 수 있으며 물리적으로 같은 상황이므로 본 연구에서는 제외한다. 식 (9)에서 알 수 있듯이 민감도는  $l_1$ 에 비례하고  $L$ 에 반비례하는 것을 알 수 있다. 이는 잠수정이 트랜스폰더로부터 멀리 떨어져 있는 경우에 큰 오차가 발생한다는 것을 의미하며 또한 트랜스폰더간의 거리가 커질수록 오차가 감소하는 것을 나타낸다. 특히  $z$ 좌표의 오차는  $z$ 에 반비례하는데 이는 잠수정이  $z=0$  평면에 근접할 때 큰 오차를 보이는 것을 의미한다. 이는 USBL의 민감도 해석에서와 같이  $z$ 축 방향의 구경크기(aperture size)가 0이기 때문에 나타나는 현상으로 해저면에 위치한 트랜스폰더만을 이용한 LBL 시스템에서는 피할 수 없는 물리적인 현상이다.

총 민감도는  $x$ ,  $y$ ,  $z$  방향의 민감도에 의하여

$$\begin{aligned} \frac{\partial r}{\partial l_1} &= \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial l_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial l_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial l_1}\right)^2} \\ &= \frac{l_1}{3zL^2} \sqrt{12z^2L^2 + (L^2 + l_2^2 + l_3^2 - 2l_1^2)^2} \end{aligned} \quad (10)$$

와 같이 표현되며 역시  $l_1$ 에 비례하고  $z$ 와  $L$ 에 반비례하는 현상을 얻는다.

### 3. 수치 해석 결과

Figures 4~7은 측정거리 오차에 대한 민감도 해석 결과로서  $l_1/L$ 로 정규화한 값을 나타내고 있다. 각각의 네 그림은  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 축 방향 및 총 민감도를 나타낸다.  $z=10/L$ 의 평면에서는  $x$ 축 및  $y$ 축에 대한 민감도는 작으나  $z$ 축 방향의 민감도가 매우 크게 나오며 이는  $z$ 축 방향으로 큰 오차가 발생할 수 있음을 의미한다. 이러한 이유는 트랜스폰더가 모두  $z=0$

평면상에 놓여 있어  $z$ 축 방향에 대한 해상도가 떨어지기 때문에 발생한다. 따라서 전체 민감도도  $z$ 축 방향에 대한 민감도에 큰 영향을 받는다. Figures 4~7에서 알 수 있듯이  $z$ 값이 커질수록  $z$ 축 방향에 대한 민감도는 감소하고 있으며  $x$ 축 및  $y$ 축 방향에 대한 민감도는 증가하고 있다. 그러나  $z$ 축에 대한 민감도가 지배적이므로 전체적인 민감도는 점점 감소하고 있다.

결론적으로 수평면상( $x$ 축 및  $y$ 축)의 민감도는 트랜스폰더에 가까울수록 감소하고 수직면상의 민감도는  $z$ 값이 증가할수록 적은 민감도를 가지는 범위가 증가하는 것을 알 수 있다.

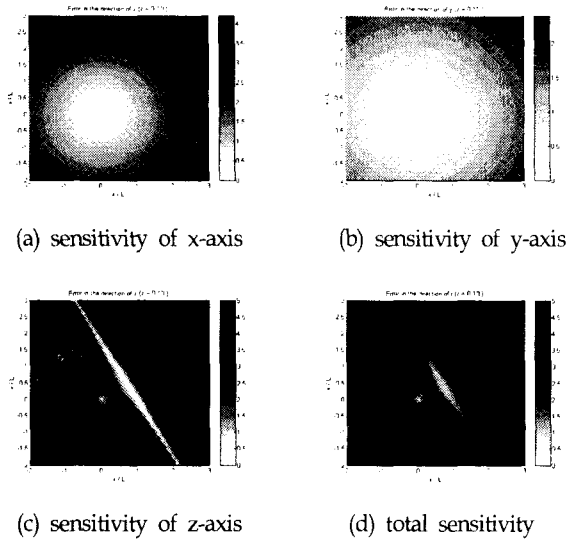


Fig. 4 Sensitivities of the estimated position with respect to  $l_1$  normalized by  $l_1/L$  on the plane  $z=L/10$

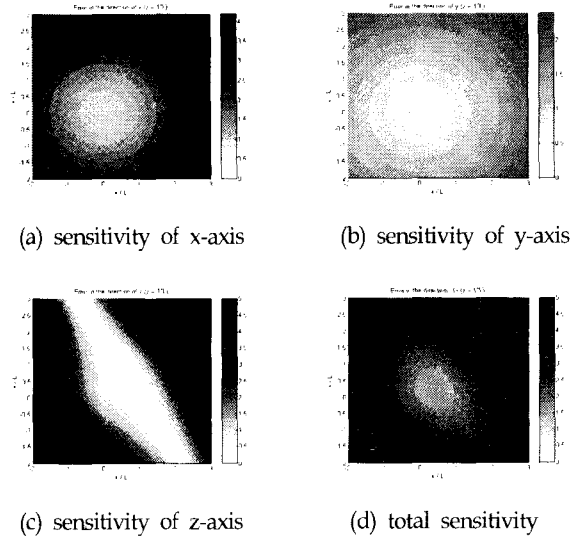


Fig. 6 Sensitivities of the estimated position with respect to  $l_1$  normalized by  $l_1/L$  on the plane  $z=L$

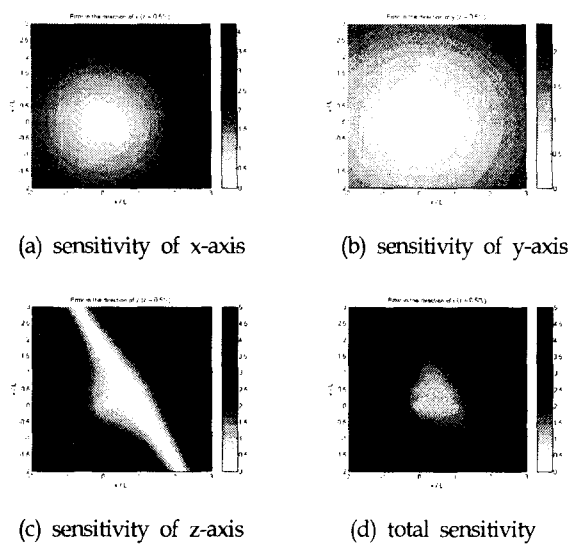


Fig. 5 Sensitivities of the estimated position with respect to  $l_1$  normalized by  $l_1/L$  on the plane  $z=L/2$

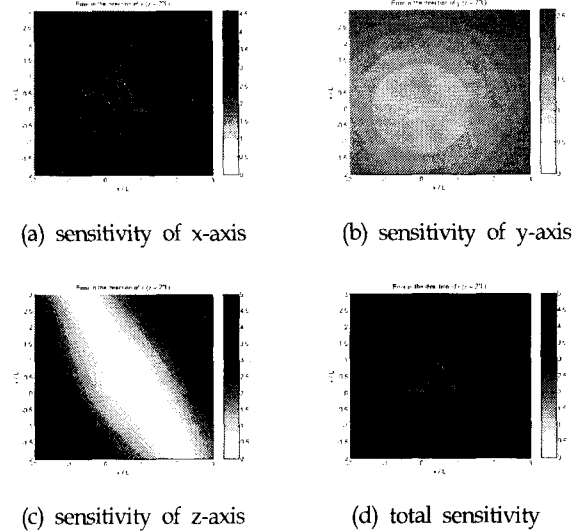


Fig. 7 Sensitivities of the estimated position with respect to  $l_1$  normalized by  $l_1/L$  on the plane  $z=2L$

따라서 전체적인 민감도는 트랜스폰더에서 일정거리 안에 포함되어 있으면 민감도가 작으나  $z=0$  평면에 가까울수록 큰 값을 가지며 따라서 Fig. 8에서와 같이 반구영역에 위치한 경우, 즉  $(0.1L < z < 2L, l_i < 2L)$ 의 범위에서 적은 오차로 LBL 시스템을 적용할 수 있음을 알 수 있다.

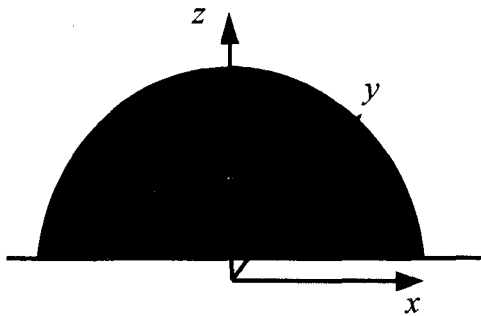


Fig. 7 Zone of small sensitivity of the LBL system

#### 4. 결 론

본 논문에서는 장기선 초음파 항법시스템에서의 예측 오차를 정량적으로 고찰하기 위하여 측정값에 대한 예측위치의 민감도 해석을 수행하였다. 수평면상의 민감도는 트랜스폰더에 가까울수록 감소하고 수직면상의 민감도는  $z$ 값이 증가할수록 적은 민감도를 가지는 범위가 증가한다. 따라서 전체적인 민감도는 트랜스폰더에서 일정거리 안에 위치에 있으며  $z=0$  평면에 먼 영역에서 즉 Fig. 8에서와 같이 반구영역에 위치한 경우에 적은 민감도 값을 얻는다. 예를 들어 트랜스폰더 사이의 거

리가 1km이며 잠수정이 모든 트랜스폰더로부터 약 1km정도 떨어져 있는 경우 0.1%의 측정 오차에 의해서 약 1.4m의 예측 위치 오차를 얻는다.

#### 후 기

본 연구는 해양수산부의 "차세대 심해저 무인잠수정" 사업으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- Baccou, P. and Jouvenel, B., (2002) "Homing and navigation using one transponder for AUV, postprocessing comparisons results with long base-line navigation, ICRA '02, Vol. 4, pp. 4004-4009.
- Cestone, J. A., Cry, R. J., roesler, G. and George, jr., E. St., (1997) "Latest highlights in acoustic underwater navigation", J. Inst. Navigation, Vol. 24, No. 1, pp. 7-39.
- Deffenbaugh, M., Schmidt, H., and Bellingham, J. G., (1996) "Acoustic positioning in a fading multipath environment", Oceans '96, Vol. 2, pp. 596-600.
- Larsen, M. B., (2000) Synthetic long baseline navigation of underwater vehicles, Oceans 2000, Vol. 3, pp. 2043-2050.
- Matos, A., Cruz, N., Martins, A. and Lobo Pereira, F., (1999) "Development and implementation of a low-cost LBL navigation system for an AUV", Oceans '99, Vol. 2, pp. 774-779.
- Milne, P. H., (1980) "Underwater Engineering Surveys", Chap. 3, E. & F. N. Spon Ltd., London.
- Scherbatyuk, A. P., (1995) "The AUV positioning using ranged from one transponder LBL, Oceans '95, Vol. 3, pp. 9-12.