

잡음에 대한 초단기선(SSBL) 음향위치 시스템의 정도 개선

박 해 훈 · 윤 갑 동

부산수산대학교 수산물리학과

(1993년 4월 20일 접수)

Improvement of the Accuracy of Supershort Baseline Acoustic Positioning System in Noise Conditions

Hae - Hoon PARK and Gab - Dong YOON

Department of Fisheries Physics, National Fisheries University of Pusan

(Received April 20, 1993)

Underwater acoustic positioning systems have been extensively used not only in surface position fixing but also in underwater position fixing. Recently, these systems have been applied in the field of installation and underwater inspection of offshore platforms etc. But in these systems are included the fixing errors as results of a signal with additive noise and irregular motion of vessel by ocean waves.

To improve the accuracy of the position fixing a Kalman filter is applied to the supershort baseline(SSBL) acoustic positioning system with beacon mode in noise conditions. The position data obtained by the Kalman filter is compared with raw position data and it is confirmed in the simulation that the former is more accurate than the latter. And an indicator monitoring the filtering effect is described while ship's moving.

1. 서 론

수중음향 위치시스템은 항해나 해양 조사 및 해양을 개발하는데 있어서 수중 위치를 구할 때 사용되고 있다. 즉, 해저에 설치된 트랜스폰더나 비컨 같은 기준점을 이용하여 해면과 수중 물체와의 상대적인 위치를 구할 수 있다. 이러한 음향위치 시스템은 1960년대 전후에 미사일의 낙하 지점을 파악하거나, 실종된 미국 핵잠수함 Thresher호

를 찾기 위해 사용된 것으로 처음 보고되었으며, 최근에는 외해의 플랫폼용 검사나 파이프 라인의 설치, 동적 위치측정(Dynamic positioning), 다이버 및 무인잠수정을 이용한 해양 작업 분야 등에 이용되고 있다(Mile, 1983). 또 해양 조사나 작업 때 줄을 사용하게 되는데, 줄의 양끝점 사이의 상대위치를 이용하여 수중 줄의 장력을 측정하는 데도 응용될 수 있다(Park, 1993).

트랜스폰더나 비컨을 이용하면 세 개 이상의 센

서로써 3차원상의 상대적인 위치를 결정할 수 있는데, 이때, 센서간의 기선 길이에 따라 단기선(short baseline : SBL), 초단기선(supershort baseline : SSBL) 및 장기선(long baseline : LBL) 위치시스템이 있고, 위치를 구하는데 있어서 단기선과 장기선 위치 시스템에서는 시간차를 이용하고, 초단기선 시스템에서는 위상차를 이용한다. 세 개 이상의 센서들의 설치는 단기선과 초단기선 시스템에서는 선체에 설치하고(초단기선 시스템의 경우는 세 센서가 한 케이스 속에 들어 있다). 장기선 시스템에서는 해저에 설치한다. 기선의 길이가 넓을수록 위치의 정도는 좋아지나, 단기선 시스템의 경우는 선체의 길이와 폭에 의해 기선의 길이가 제한받으므로 위치 정도에 영향을 받는다. 위치의 정도는 장기선, 초단기선, 단기선 시스템의 순서로 좋지만, 사용의 간편함과 기동성에서는 초단기선과 단기선 시스템이 편리하다. 왜냐 하면, 장기선 시스템의 경우 해저에 설치되는 트랜스폰더의 상호 간의 위치를 교정하는데 상당한 시간이 소요되기 때문이다. 위치의 정도를 높이기 위해 이들 시스템들을 결합하여 사용하기도 한다 (Milne, 1983 ; 中西, 1988 ; Roberts, 1985 ; Vestgaard and Hansen ; 1978).

그러나, 이들 시스템으로 위치를 구할 때, 잡음이 섞인 수신 신호, 측정 때 가정한 음속 및 파랑에 의한 선체의 운동 등으로 인하여 위치오차를 포함하고 있다. 이 위치오차를 개선시키기 위해 단기선 및 초단기선 음향위치 시스템에 칼만 필터가 적용된 바 있다(PARK and YOON, 1990 ; 박과 윤, 1992, 1993). 본 연구에서는 여러 가지 잡음상태에 대해 비컨 방식의 초단기선(SSBL) 음향위치 시스템에 칼만 필터를 적용해서 최적 위치를 구하는 것을 시뮬레이션을 통해 살펴보고자 한다.

2. 비컨 방식의 초단기선(SSBL) 음향위치 시스템

비컨 방식의 초단기선 음향위치 시스템의 개요를 Milne(1983)로부터 간단히 소개하면 Fig.

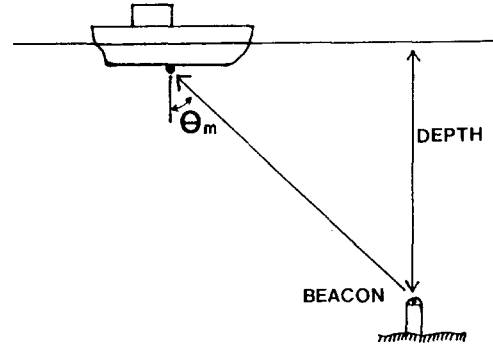


Fig. 1. The SSBL system with beacon mode.

1과 같다.

Fig. 2에는 비컨으로부터 수신된 신호의 주파수가 f , 수중 청음기 케이스 내의 두 센서의 간격이 b 일 때, 전기적 위상차 dT 와 입사각 θ 와의 관계가 나타나 있다.

입사각은 음원과 두 센서가 이루는 평면상에 있으며, 만약 기선의 길이 b 가 음원에 대한 거리보다 훨씬 작을 때 입사 음파는 평면파로 간주할 수 있으며, 두 센서에 의해 수신되는 음파 신호($g_1(t)$, $g_2(t)$)와 위상차(dT) 및 입사각(θ)의 관계는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} g_1(t) &= a e^{j(\omega t - kr)} \\ g_2(t) &= a e^{j(\omega t - k(r+dr))} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 dr 은 음파가 진행하는 방향에 수직되는 두 센서간의 거리차인데, 위상차 dT 정보를 포함하고 있으며, 위상차 dT 와 입사각 θ 와의 관계는 식(2)와 같다.

$$dT = \beta \cos \theta \quad (2)$$

단, β 는 stiffness factor($2\pi fb/c$)이고, c 는 수중 음속이다.

식 (2)을 θ 에 대해서 풀면 입사각은 위상차의 함수로 주어진다. 즉,

$$\theta = \cos^{-1} dT/\beta. \quad (3)$$

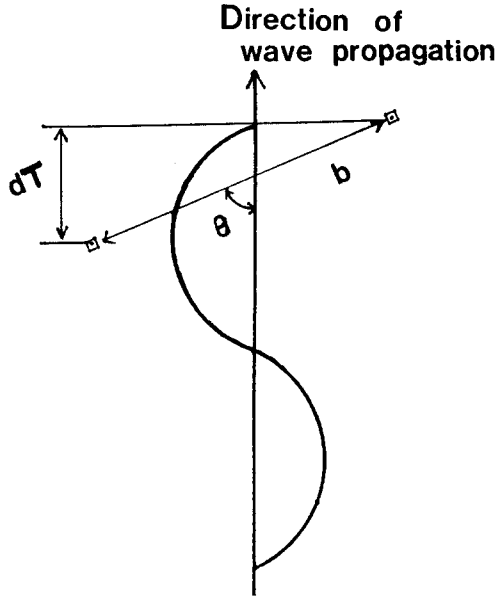


Fig. 2. Phase delay of acoustic wave as a function of mechanical angle of incidence at the hydrophone.

이 θ 는 두 센서의 기선에 의해 형성된 원추형의 정점각이다. 만약 수중청음기의 세 센서가 두 개의 직교한 기선으로 놓였을 때, 음파 신호의 방향은 정점이 일치하고, 입사각이 θ_{mx} , θ_{my} 인 두 원추면의 교점에 놓이게 될 것이다. 3차원상의 비컨의 위치를 결정하기 위하여 수중 청음기와 비컨 사이의 수직거리 h 는 알아야 한다. Fig. 3의 기하

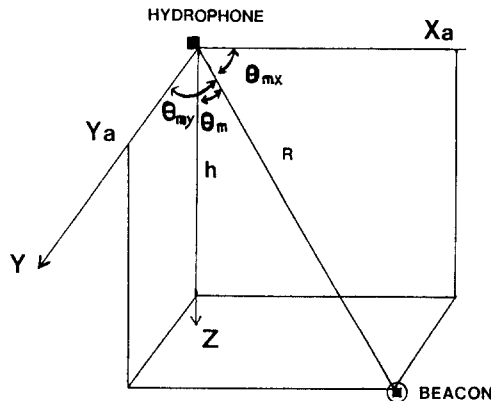


Fig. 3. Geometry of the beacon/transponder position reference.

학적 형상으로부터 선박과 비컨의 상대위치 Xa , Ya 는 다음 식으로 주어진다.

$$Xa = \frac{h \cos \theta_{mx}}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_{mx} - \cos^2 \theta_{my}}}$$

$$Ya = \frac{h \cos \theta_{my}}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_{mx} - \cos^2 \theta_{my}}} \quad (4)$$

3. 칼만 필터에 의한 위치의 최적 추정

식 (4)에서 보는 바와 같이 θ_{mx} , θ_{my} 의 측정으로부터 위치가 구해진다. 비컨이나 트랜스폰더에 의한 신호로부터 결정되는 수중 표적과의 상대 위치는, 잡음이 섞인 수신 신호, 측정 때 가정된 음속 및 해양파에 의한 선박의 불규칙한 운동 때문에 일반적으로 오차를 포함하고 있다. 이 절에서는 잡음 상대하에서 구해진 비컨 방식의 상대위치 Xa , Ya 의 오차를 줄이기 위해 적용된 칼만 필터에 대해 기술한다.

x , y 직교 좌표상에서 해저 기준점에 대한 선박의 위치, 속도, 가속도를 나타내는 신호 변수로서 시간 n 때의 신호를 열벡터 $X(n)$ 으로 정의하고, 식 (4)의 관측위치 Xa , Ya 를 열벡터 $Y(n)$ 으로 표시하자. 선박이 2차원 평면상을 등속도 운동을 한다고 가정하면, 이의 동역학은 다음의 6차 선형 방정식을 쓸 수 있다(Usagawa et al., 1987 ; 張, 1988).

$$\text{상태방정식 : } X(n) = A X(n-1) + w(n-1)$$

$$\text{관측방정식 : } Y(n) = C X(n) + v(n) \quad (5)$$

상태 방정식에서 계수 A 는 천이행렬을 나타내며, $w(n)$, $v(n)$ 는 잡음으로서 Gauss분포를 한다고 가정한다. 그리고,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{w}(n) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w1(n) \\ 0 \\ w2(n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{v}(n) = \begin{bmatrix} v1(n) \\ v2(n) \end{bmatrix}$$

T = 샘플링 간격 (sampling interval).

위의 상태 방정식에 대한 칼만 필터의 알고리즘은 다음 식으로 나타내진다(Bosic, 1979).

$$\text{추 정 기 : } \mathbf{X}(n) = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{X}(n-1) + \mathbf{K}(n) [\mathbf{Y}(n) - \mathbf{C}\mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}(n-1)] \quad (7)$$

$$\text{필터이득 : } \mathbf{K}(n) = \mathbf{P1}(n) \mathbf{C}^T [\mathbf{C}\mathbf{P1}(n) \mathbf{C}^T + \mathbf{R}(n)]^{-1} \quad (8)$$

$$\text{단, } \mathbf{P1}(n) = \mathbf{A}\mathbf{P}(n-1)\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}(n-1)$$

$$\text{오차 공분산 행렬 : } \mathbf{P}(n) = \mathbf{P1}(n) - \mathbf{K}(n) \mathbf{C}(n) \mathbf{P1}(n) \quad (9)$$

$$\text{단, } \mathbf{R}(n) = \mathbf{E}[\mathbf{v}(n) \mathbf{v}(n)^T]$$

$$\mathbf{Q}(n) = \mathbf{E}[\mathbf{w}(n) \mathbf{w}(n)^T]$$

$$\mathbf{P}(n) = \mathbf{E}\{[\mathbf{X}(n) - \hat{\mathbf{X}}(n)] [\mathbf{X}(n) - \hat{\mathbf{X}}(n)]^T\}$$

\mathbf{T} = 전치 행렬

$\mathbf{E}[\] = [\]$ 의 기대값

$\hat{\mathbf{X}}(n) = \mathbf{X}(n)$ 의 추정값.

4. 시뮬레이션 결과

Fig. 4는 칼만 필터에 의해 선박의 위치가 잡음

섞인 측정값으로부터 어떻게 최적으로 추정되는가를 나타내는 개략도이다.

각각의 청음기에서 신호의 위상각(α)은 시간 신호의 푸리에 변환으로부터 구해질 수 있고, 위상차는 두 센서에서 수신한 위상각의 차로부터 구해질 수 있다. 시간 신호를 $g(t)$, 이의 푸리에 변환을 $G(w)$ 라 하면 위상각(α)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G(w) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp(-j\omega t) dt = \text{Re} + j \text{Im} \quad (10)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}}{\text{Re}} \right] \quad (11)$$

위의 $G(w)$ 는 이산 형태로 바꾸어 고속 푸리에 변환(FFT)을 이용하여 구할 수 있다(黃과 李, 1989; Brigham, 1974).

바다에서 일정한 속도로 전진하는 선박은 6자유도 운동을 하게 된다. 이 선체의 움직임은 세 개의 병진 성분(surge, sway, heave)과 세 개의 회전 성분(roll, pitch, yaw)으로 구성되어 있다. 선체가 좌우 대칭인 일반적인 선체에 대해서 종운동(surge, heave, pitch)은 횡운동(sway, roll, yaw)에 대해 연성운동을 하지 않기 때문에(Beck, 1989), 칼만 필터에서 \mathbf{X} , \mathbf{Y} 방향의 오차는 이 경우에 서로 독립인 잡음으로 취급할 수 있다. 한편, 회전하는 지구 위에서 움직이는 물체는 Coriolis 효과를 일으킨다. 이것은 북반구에서 전진하는 선박을 오른쪽으로 편향시킨다. 특수선(공

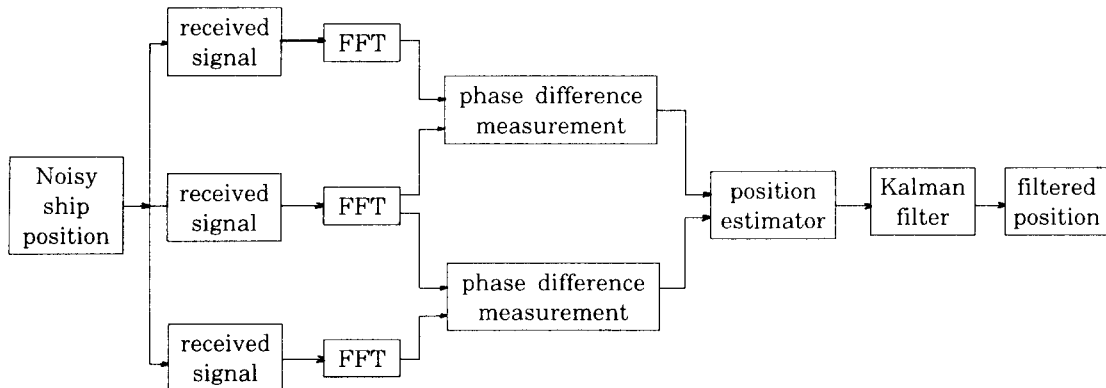


Fig. 4. Block diagram of the simulation.

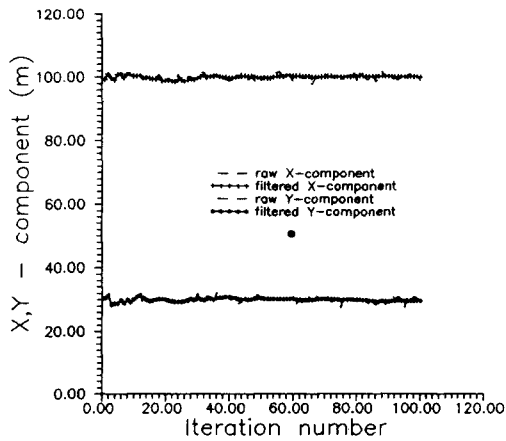
잡음에 대한 초단기선(SSBL) 음향위치 시스템의 정도 개선

기 부양선, 하이드로포일형선 등)이 아닌 일반적인 선박인 경우 저위도에서 그 영향은 매우 적으므로 여기서 무시한다(박, 1987). 그리고, 선체의 동요(rolling)와 횡요(pitching)에 의한 영향은 기기에 의해 보정시킬 수 있으므로, 본 연구에서는 평면 위치와 관련된 surge와 sway 운동만을 위치 오차 요인의 대상으로 삼는다.

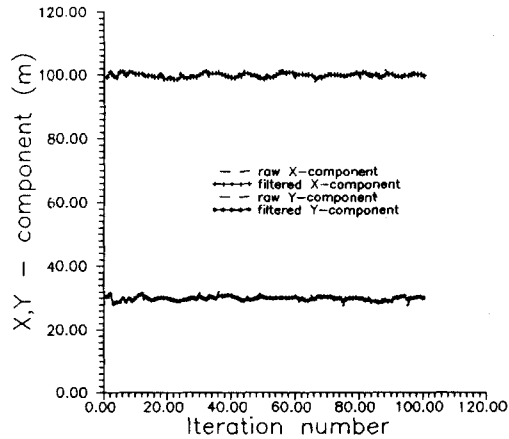
여기선 잡음 $w(n)$ 과 $v(n)$ 의 각 성분은 서로 독립이며, 평균이 0인 Gauss 분포를 한다고 가정하였다. 수중 표적에 대한 선박의 위치가 [100, 30, 170]이고, 앞의 칼만 필터에서 공분산 행렬값

인 process잡음 Q 와 관측잡음 R 을 점차 크게 변화시켰을 때의 시뮬레이션 결과가 Fig. 5에 나타나 있다(단, Q 는 6×6 행렬, R 은 2×2 행렬). 또, Fig. 6에는 선박의 속력(v)이 x 축 방향으로만 $10m/s$ 인 경우의 결과가 나타나 있다.

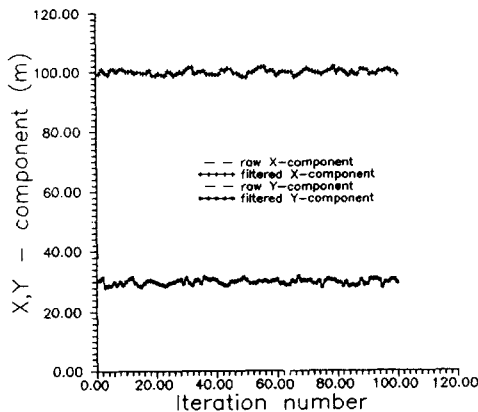
Fig. 5는 각각의 공분산 값에 대해서 원래의 잡음 섞인 위치와 필터를 통한 위치를 보이고 있다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 반복횟수가 증가할수록 필터 처리된 위치는 위치오차가 감소하면서 평균 위치에 접근하고 있다. 관측 잡음이 적을 때 그 차이는 별로 나타나지 않으나, 잡음이 클 때



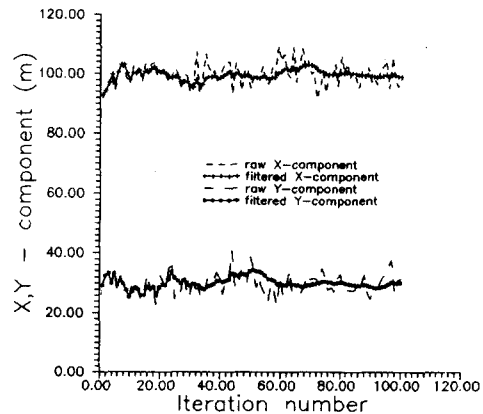
(a) $Q_{33}=10^{-10}$, $Q_{66}=10^{-10}$, $R_{11}=0.89$, $R_{22}=0.86$



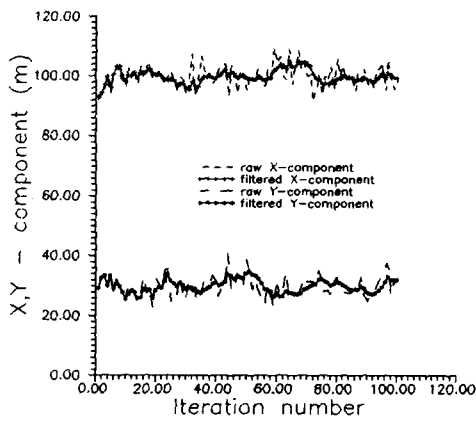
(b) $Q_{33}=10^{-4}$, $Q_{66}=10^{-4}$, $R_{11}=0.89$, $R_{22}=0.86$



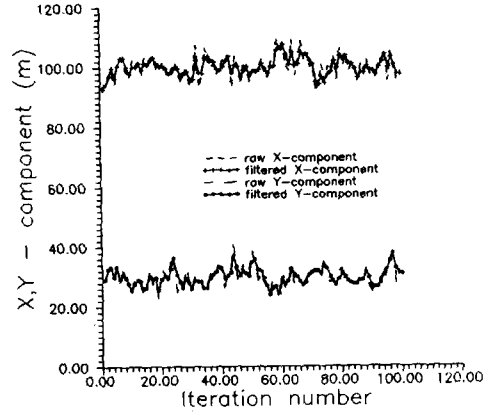
(c) $Q_{33}=10^{-1}$, $Q_{66}=10^{-1}$, $R_{11}=0.89$, $R_{22}=0.86$



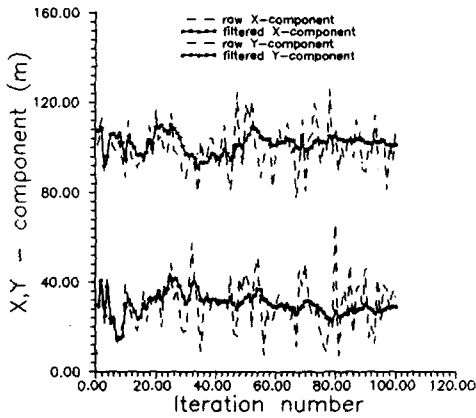
(d) $Q_{33}=10^{10}$, $Q_{66}=10^{10}$, $R_{11}=14.28$, $R_{22}=11.42$



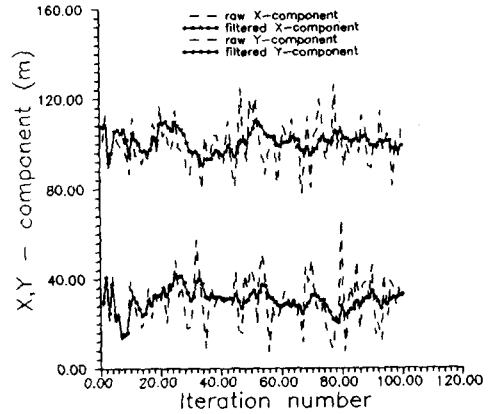
(e) $Q_{33}=10^{-4}$, $Q_{66}=10^{-4}$, $R_{11}=14.28$, $R_{22}=11.42$



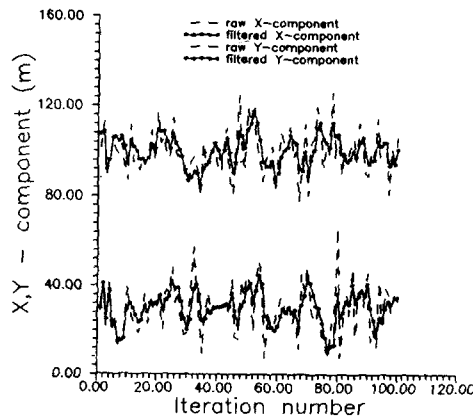
(f) $Q_{33}=10^{-1}$, $Q_{66}=10^{-1}$, $R_{11}=14.28$, $R_{22}=11.42$



(g) $Q_{33}=10^{-10}$, $Q_{66}=10^{-10}$, $R_{11}=94.30$, $R_{22}=124.0$



(h) $Q_{33}=10^{-4}$, $Q_{66}=10^{-4}$, $R_{11}=94.30$, $R_{22}=124.0$



(i) $Q_{33}=10^{-1}$, $Q_{66}=10^{-1}$, $R_{11}=94.30$, $R_{22}=124.0$

Fig. 5. Simulation results in cases of various covariances of Q and R .

잡음에 대한 초단기선(SSBL) 음향위치 시스템의 정도 개선

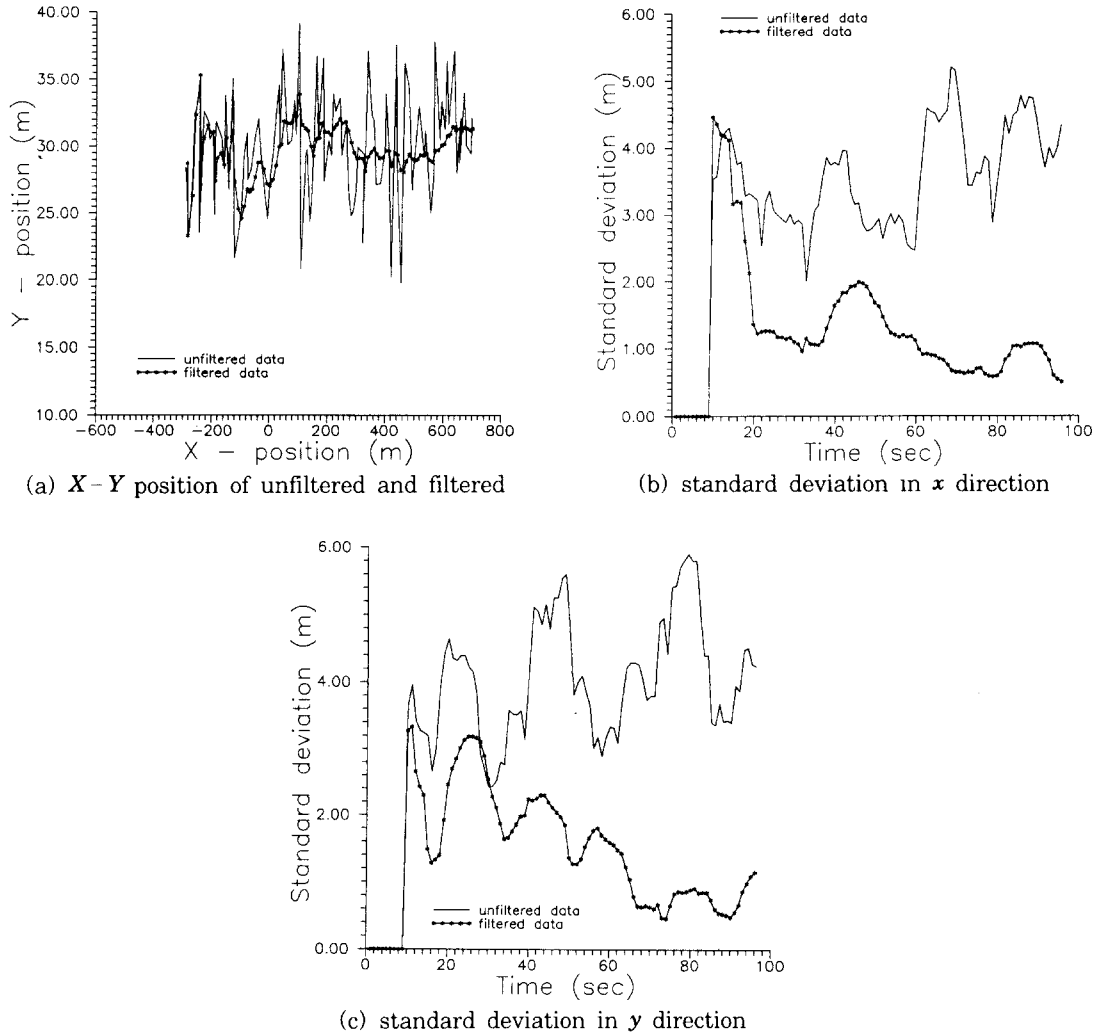


Fig. 6. Simulation results in case of $v=10m/s$ in x direction.

필터 효과가 나타남을 알 수 있으며 또, process 잡음이 클수록 필터효과가 감소되는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서는 x 축방향으로 선박이 진행하는 경우에 필터 처리가 진행되면서 위치오차의 표준편차를 나타내고 있다. 이것은 선박이 이동하면서 필터링 상태를 파악하는 한 기법이 된다.

5. 결 론

해저의 기준점을 이용한 수중음향 위치시스템은 항해나 수중 물체의 상대적인 위치를 구하는

데 쓰인다. 이것은 수신 신호에 섞인 잡음, 측정 때 가정된 음속 및 불규칙한 파도에 의한 선체의 운동으로 인하여 측정 위치에 오차가 포함되어 있다. 이 위치의 정도를 개선시키기 위해 여기서는 비컨 방식의 초단기선 음향위치 시스템에 여러가지 잡음에 대해 칼만 필터를 적용하여 위치를 최적추정하였다. 필터를 통한 위치는 원래의 잡음 섞인 위치보다 정도가 개선됨을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 관측 잡음이 적을 때 그 차이는 별로 나타나지 않으나, 잡음이 클 때 뚜렷한 필터 효과가 나타나며, process 잡음이 클수록 필터 효과

가 감소되는 것을 알 수 있다. 또한, 선박이 이동하면서 필터링 상태를 파악하는 한 기법을 나타내었다. 다음의 연구로서는 공분산 행렬값에 관하여 특정한 선박을 설정한 후 해상 상태에 따라 음향 위치 시스템에 의한 실제 측정값으로부터 본 연구 결과를 적용하는 것이다.

사 의

몇 가지 조언을 주신 심사위원들께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 박해훈(1987) : 선체에 미치는 Coriolis 효과. 釜山水産大學校 自然科學 研究報告. 27(2), 61 - 64.
- 2) 박해훈, 윤갑동(1992) : 2단 칼만 필터를 이용한 초단기선(SSBL) 음향위치 시스템. 韓國音響學會誌, 11(5), 12 - 17.
- 3) 박해훈, 윤갑동(1993) : 단기선(SBL) 음향위치 시스템의 정도 개선. 韓國航海學會誌, 17(1), 99 - 104.
- 4) 張允碩(1988) : Kalman 필터 알고리즘을 이용한 수중 이동 음원의 궤적추정. 釜山水産大學校 碩士學位論文.
- 5) 中西俊之(1988) : 6500m 潛水調査船システム用水中音響航法裝置について. 航海 98, 84 - 95.
- 6) 黃秉元, 李周信(1989). 디지털 신호처리. Ohm사. 서울. 335.
- 7) Beck, R.F.(1989) : Motions in Waves and Controllability. *In* Principles of Naval Architecture, Vol. III, Second revision, V.L. Lewis ed., The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 41 - 45.
- 8) Bozic, S.M.(1979) : Digital and Kalman Filtering. Edward Arnold, London, 115 - 119.
- 9) Brigham, E.O.(1974) : The Fast Fourier Transform. Prentice-Hall, Engle Cliffs, NJ, 252.
- 10) Milne, P.H.(1983) : Underwater Acoustic Positioning Systems. Gulf Publishing Company, Houston, 284p.
- 11) Park, H.H. and G.D. Yoon(1990) : Improvement of the Accuracy of Supershort Baseline Acoustic Positioning System by Kalman Filter. Bull. Korean Fish. Soc. 23(6), 451 - 456.
- 12) Park, H.H(1993) : A Tension Measurement Method of a Towing Cable or a Buoy Cable. Ocean Engineering (U.K.), Vol. 20(2), 163 - 170.
- 13) Robert, J.L.(1985) : A Multimode Acoustic Position Indicator for Greater Accuracy and Reliability. Proc. 17th Ann. Offshore Technology Conference, Houston, 313 - 321.
- 14) Usagawa, T., S. Nishimura, M. Ebata and J. Okda(1987) : Analysis of a moving sound source - Orbit estimation using microphone array -. J. Acoust. Soc. Jpn.(E) 8, 23-28.
- 15) Vestgaard, K. and K. Hansen(1978) : Super Short Baseline Hydroacoustic Navigation System. Proc. 10th Ann. Offshore Technology Conference, Houston, 449 - 454.