

大韓造船學會誌
第26卷 第2號 1989年 6月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 26, No. 2, June 1989

자기동조 제어기를 이용한 위치확보 시스템에 관한 연구

이 상 무*, 이 판 목*, 홍 사 영*

Analysis of Dynamic Positioning System Based on Self-Tuning Control by

Sang M. Lee*, Pan M. Lee* and Sa Y. Hong*

요 약

자동위치 확보시스템은 선박이 불규칙 해상에서 작업을 수행할 때 선체의 위치 및 선수를 일정한 작업반경 내에서 유지할 수 있도록 추진기를 자동제어하는 방법이다. 위치확보시스템의 구성은 제측시스템, 제어기시스템, 추진기시스템 및 동력시스템으로 구성된다. 본 논문은 최적제어 기법과 필터링 기법을 이용한 제어기시스템 구성에 관하여 논하였고, 제어시스템 구성을 위한 상태방정식의 정립과정을 서술하였다. 선체의 평면운동은 저주파수 운동과 고주파수 운동 성분으로 구성되었다고 가정하였다. 저주파수 운동은 추진기에 의한 외력, 조류력 및 2차차수 파랑강제력에 기인하며 고주파수 운동은 1차 차수 파랑강제력에 의해 유기된다. 해상에서 계측되는 신호에는 선체의 운동 성분 이외에도 계측오차 성분이 포함된다. 자기동조필터 및 칼만필터를 이용하여 계측신호로부터 저주파수 운동성분과 고주파수 운동성분을 각각 독립적으로 추정하고, 추정된 저주파수 운동성분을 제거하여 제어를 수행하였다. 제어기는 교란환경 속의 최적제어기인 LQG제어기를 이용하였다. 시뮬레이션을 수행하기 위하여 Wimpey Sealab의 테이타를 이용하였다.

Abstract

Dynamic ship positioning (DP) system is used to keep the position and heading of a ship, or a floating platform, above a pre-selected site on the seabed by using thrusters. This paper presents a control system based on filtering technique and optimal control theory. The planar motions of a vessel are assumed to consist of low frequency (LF) component and high frequency (HF) one. The former is mainly due to thrusters, current, wind and second order wave forces, while the latter is mainly due to first order oscillatory component of the wave force. Furthermore position measurement signals include the noise. By means of self-tuning filter and Kalman filter techniques, LF motion estimates and HF ones are separately achieved from the position measurements of the vessel. The estimated LF motions are used as input to the feedback loops. The total thruster power is minimized using the Linear Quadratic Gaussian control theory. The performance of the vessel with the DP system is investigated by computer simulation.

접수일자 : 1988년 9월 30일, 재접수일자 : 1989년 3월 8일

* 정회원, 한국기계연구소 대덕선박분소

1. 서 언

해상에서 작업하는 부유체는 수시로 변하는 환경에 존재하므로 회전하거나 이동하게 되는 외력을 받게 된다. 이러한 부유체에 있어서 일정한 위치를 확보하는 것은 작업의 안정성, 효율성 및 경제성에 가장 중요한 인자이다. 위치확보의 개념은 선체에 가해진 외력을 보상할 수 있는 반력을 능동적으로 발생시켜 전체시스템이 평형상태에 있게 하는 것이다.

자동위치확보시스템(Dynamic Positioning System: DPS)은 추진기를 제어하여 작업위치를 확보하는 방법으로 컴퓨터의 발달 및 제어공학의 발달에 힘입어 발전을 거듭하고 있다. 이것은 광물 및 석유자원 탐사선, 보급선, 운반선, 해저작업선, 해저파이프 설치선 등에 광범위하게 이용되며 소규모화, 경량화, 단순화가 이루어지고, 북극해나 남빙양 등 극지에까지 적용 영역이 확대되어 가고 있다.

일반적인 위치확보시스템의 주요 구성요소가 Fig. 1에 도시되어 있으며, 계측시스템, 제어기시스템, 추진기시스템, 동력시스템 등 4가지 요소로 나눌 수 있다[1]. 계측시스템은 해상외력에 대해 제어기 및 추진기가 필요로 하는 해상정보를 정확하고 충분히 빠른 속도로 취득할 수 있어야 한다. 위치확보시스템의 목적이 선박의 위치와 선수를 일정한 상태로 유지하는 것이므로 선박의 위치, 선수각을 측정해야 한다. 측정 방법으로는 초음파 위치측정장치, 자이로콤파스, 인공위성을 이용한 측정방법 등 여러 방법이 있다. 이밖에도 바람의 방향과 속도, 조류, 파도, 선박에 작용하는 압력등을 측정한다. 제어기시스템은 아날로그 또는

디지털 컴퓨터로 구성되며 이들의 조합된 형태가 사용된다. 제어기의 주된 기능은 다음과 같다.

- 취득된 선수각 메이타 및 위치메이타 변환
- 요구되는 선수각 및 위치를 비교하여 오차신호 생성
- 오차를 영으로 감소시키기 위한 반력 및 모우먼트 계산
- 반력 및 모우먼트를 각 추진기의 방향, 회전속도 명령으로 전달

추진기 시스템은 선박의 종류와 요구조건에 따라 선택되며, 일반적으로 위치 확보시스템에 사용되는 추진기는 저속이다. 추진기 설계의 중요한 인자는 응답속도, 추진기 출력, 신뢰성, 효율, 수리용이도, 소음레벨 등이다. 한편, 동력시스템은 추진기의 선택에 따라 그 용도에 맞는 시스템으로 구성된다.

선체에 작용하는 외력중에서 파랑강제력은 주파수가 높고 진폭이 작은 운동을 유발하지만 조류력, 풍하중 및 2차 파랑표류력은 저주파수이나 진폭이 큰 운동을 유발한다. 계측시스템에서 얻어지는 위치측정치는 고주파수 운동과 저주파수 운동성분이 합성되어 있을 뿐만 아니라 계측오차가 내포되어 있다. 제어시스템은 급격한 추진기 조작으로 인한 에너지손실 및 추진기의 마모를 방지하기 위해서 저주파수운동 성분을 분리하여 추정하고 제어할 필요가 있으며, 이에 따라 필터문제가 적용되어져야 한다.

본 연구에서는 위치확보시스템의 해석법을 연구하는 것이 주목적이므로, DP시스템을 갖춘 선박의 상태방정식 정립과 해상외력의 정식화, 저주파수 운동성분추정 및 제어기 구성에 관하여 논하였다. DP시스템의 시뮬레이션을 위하여 대상으로 Wimpey Sealab[2]을 선택하였다. 계측신호에서 고주파수 운동을 추정하기 위하여 자기동조필터[3, 4]를 이용하였으며, 칼만필터[5]를 이용하여 교란환경속에서의 저주파수운동을 분리하여 추정하였다. 제어시스템은 Linear Quadratic Gaussian(LQG) 제어기[6]를 사용하였다.

2. 운동 방정식

선체의 운동을 해석하기 위하여 Fig. 2와 같은 좌표계를 도입한다. 일반적으로 선박의 조종운동 해석에서와 같이 무게중심에 좌표의 원점을 두고, 선수방향을 x 축, 우현을 y 축, 수직하방을 z 축으로 정하였다. 수면에 떠 있는 부유체의 운동을 해석하기 위하여 도입되는 운동방정식은 비선형 효과를 나타내는 방법에 따라

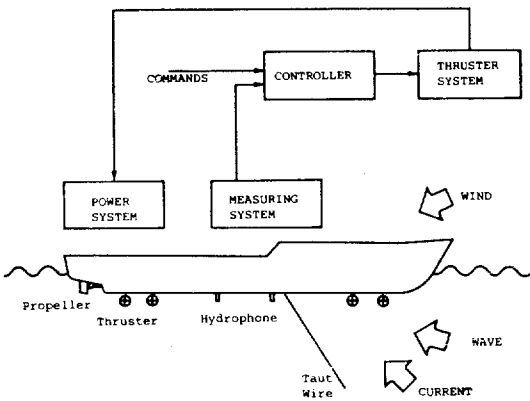


Fig. 1 Basic components in a dynamic positioning system.

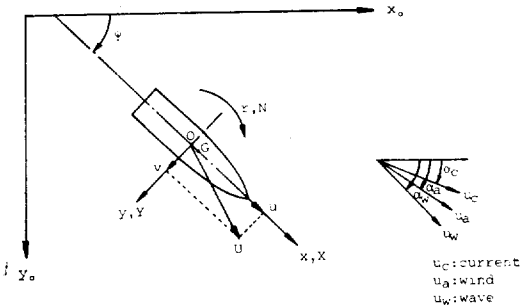


Fig. 2 Coordinate system

약간씩 다르다.

본 논문에서는 English와 Wise[2]의 근사방법을 도입하여 운동방정식을 정의하였다. 그들은 조류방향을 변화시키면서 선체에 걸리는 힘과 모멘트를 측정하여, 그 결과로부터 근사식을 유도하였다.

$$\begin{aligned}
 (m - X_A)\dot{u} - (m + Y_{vr})vr &= X_A + X_{vv}v^2 + X_{uu}u \\
 (m - Y_b)\dot{v} + (m - X_{ru})ru &= Y_A + Y_vv + Y_{vvv}v^3 \\
 &\quad + Y_{r|v}|r| \\
 (I_{zz} - N_r)\dot{r} - N_b\dot{v} &= N_A + N_vv + N_{uv}uv + N_{r|v}|r|
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 u 는 전후동요의 속도를 v 는 좌우동요의 속도, r 은 선수동요의 속도이다. m 은 선체질량, I_{zz} 는 수직축에 대한 극관성 모멘트이다. X_A 는 전후동요강제력, Y_A 는 좌우동요강제력, N_A 는 선수동요 강제모멘트를 의미하며, 첨자 A 는 파랑강제력, 계류력, 추진기에 의한 외력 및 풍력 등을 포함한다. 아래 첨자 $\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, vr, ru, v, vv, vvv$ 가 붙어 있는 항은 동유체력 계수를 의미하며, 유체력 계수는 선체 속도 $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ 의 함수이다.

(1) 파랑강제력

파랑강제력은 파고에 비례하는 힘과 파고의 제곱에 비례하는 2차차수의 힘(장주기 표류력)의 두가지 성분으로 구성된다. 파랑강제력은 스펙트럼 형태로 표시하여 계산에 적용하는 것이 좋다. 1차차수의 파랑강제력 스펙트럼은 아래식으로 표현된다.

$$S_F(\omega) = (\rho g V / L) F_i^2(\omega) S_\zeta(\omega)
 \tag{2}$$

여기서 $S_\zeta(\omega)$ 는 파도스펙트럼을 의미하고 $F_i(\omega)$ 는 주파수 ω 에 대한 i 번째 운동형의 강제력을 $\rho g V / L \zeta$ 로 무차원화시킨 값을 의미한다. 여기서 ζ 는 입사파의 진폭이다. 이 값은 기존의 strip이론이나 Morison식 등 여러가지 방법으로 계산된다. 2차차수의 강제력 스펙트럼은 Pinkster[7]에 의하여 간단히 추정하는 방법이

개발되었다. 그는 시간평균표류력 계수로부터 장주기 파랑표류력을 근사시켰다.

평균표류력 :

$$\bar{F} = \rho g L \int_0^\infty S_\zeta(\omega) R^2(\omega) d\omega$$

장주기 파랑표류력 스펙트럼 :

$$S_i(\mu) = 2(\rho g L)^2 \int_0^\infty S_\zeta(\omega) S_\zeta(\omega + \mu) R^4(\omega + \mu/2) d\omega$$

여기서 $R^2(\omega)$ 는 규칙파중의 평균표류력을 $\frac{1}{2} \rho g L \zeta^2$ 으로 무차원화시킨 값이다.

(2) 풍력

바람은 보통 평균풍속과 난류유동의 두가지 성분으로 나뉘어진다. 바람에 의한 항력이 수면 윗부분의 면적과 풍속의 제곱에 비례한다고 가정하면 이 힘은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_{wind} &= 1/2 \rho_a K A V^2(t) \\
 &\cong 1/2 \rho_a K A V_{mean}^2 + \rho_a K A V_{mean} v(t)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

여기서 K 는 비례상수로서 형상과 Reynolds수에 따라 달라진다. 식 (3)의 우변의 첫째항은 평균풍하중을 둘째항은 시간변동하중을 나타낸다. 난류유동 속도 $v(t)$ 는 스펙트럼 형태로 주어진다[8].

(3) 추진기력

추진기는 자동확보시스템에서 가장 중요한 역할을 하는 부분으로서 회전수를 임의로 변화시켜 추력을 제어하는 방법과 프로펠러의 피치를 변화시켜 추력을 제어하는 방법이 있다. 회전수를 변화시킬 때 프로펠러의 관성 효과가 작용하게 되므로 추진기의 수학적 선형 모형은 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{k} (T - q)
 \tag{4}$$

여기서 k 는 시간지연(time-lag) 상수이며, q 는 제어입력이다. 추력 T 는 회전수에 비례한다고 가정하였다. 추진기의 모형을 보다 정밀하게 해석하려면 추진기에 관련된 여러가지 상호작용을 함께 고려해야 한다.

(4) 상태방정식

제어이론을 도입하여 시스템 해석을 시도하려면 시스템의 지배방정식을 선형화하는 것이 필요하다. 식(1)은 비선형 방정식이며 이 방정식은 여러가지 방법으로 선형화 할 수 있다. 그런데, 선형화된 방정식은 조류의 방향과 선수각, 해상상태에 따라 달라지므로 모든 조건에 부합되는 선형방정식은 존재하지 않는다. 따라서 조건이 달라지면 다른 선형방정식을 사용해야 한다.

유체의 점성에 기인하는 항력은 상대속도의 비선형 함수이며, 항력계수 또한 Reynold수의 함수이다. 불규칙으로 변하는 속도가 정규분포를 가진다고 가정할

때 오차의 편차를 최소화하는 방법으로 선형화하는 방법은 아래와 같다[9].

$$bv|v| \cong b_e v$$

$$b_e = 2\sqrt{2/\pi} b \sigma_v \quad (5)$$

σ_v 는 v 의 표준편차를 의미하고, b_e 는 선형 등가계수를 의미한다.

식(5)를 이용하여 운동방정식(1)을 선형화하고 횡파 중 전후동요를 무시하고 무차원화하면 아래와 같다.

$$(1 - Y'_e)\dot{v}' + Y'_{ve}v' + Y'_{re}r' = Y'_e$$

$$(k'^2_{zz} - N'_e)r' + N'_{ve}v' + N'_{re}r' = N'_e \quad (6)$$

여기서

$$v' = v / \sqrt{gL} \quad r' = r / \sqrt{L/g} \quad t' = t \sqrt{g/L}$$

$$\dot{v}' = \dot{v}/g \quad \dot{r}' = \dot{r}L/g \quad k'_{zz} = k_{zz}/L$$

$$Y'_e = Y_e/(mg) \quad N'_e = N_e/(mgL)$$

L 은 선체길이, g 는 중력가속도, k_{zz} 는 관성반경을 나타내며, Y_e 및 N_e 는 파랑기진력, 풍력, 제어입력에 의한 추진기력 등의 유효외력 및 모멘트를 의미한다. 윗첨자 '은 무차원화된 값을 의미한다.

식(6)을 상태방정식으로 변화하고 '을 생략하면 다음과 같은 형태로 쓸 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_{11} \\ \dot{x}_{12} \\ \dot{x}_{13} \\ \dot{x}_{14} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-Y_{ve}}{1-Y_e} & 0 & \frac{Y_{re}}{1-Y_e} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{N_{ve}}{k^2_{zz}-N_e} & 0 & \frac{-N_{re}}{k^2_{zz}-N_e} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{Y_e}{1-Y_e} \\ 0 \\ \frac{N_e}{k^2_{zz}-N_e} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6a)$$

여기서 x_{11} 은 좌우동요의 속도, x_{12} 는 좌우동요의 변위, x_{13} 는 선수동요의 각속도, x_{14} 는 선수동요의 각변위를 나타낸다. 추진기의 효과를 제어입력으로 분리하기 위하여 윗식의 마지막 벡터에서 추진기력을 분리하고, 파랑기진력 및 풍력을 시스템의 교란성분으로 정의하면 상태방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}_1(t) = A_0 x_1(t) + B_0 u(t) + D_0 w(t) \quad (6b)$$

A_0, B_0, D_0 는 시스템의 계수행렬이고, $x_1(t), u(t), w(t)$ 는 각각 상태변수 벡터, 제어입력벡터, 교란벡터이다.

3. 필터를 이용한 운동추정 및 제어시스템

(1) 운동추정기

위치확보시스템 제어를 위하여 저주파수 운동과 고

주파수 운동을 분리하여 구할 수 있으며 전체운동은 이들의 합으로 이루어진다고 가정한다. 위치확보 문제는 예측된 선체위치 $z(t)$ 가 주어질 때 저주파수운동성분을 제어하는 것이다. 다음에 설명되는 것은 저주파수운동 x_1 의 추정을 위한 상태추정자 설계 방법이다. 추정자는 기상조건 변화에 따라 변하는 고주파수 부시스템 S_h 의 변화에 적응할 수 있어야 한다. 저주파수 운동시스템 S_l 이 완전한 관측과 제어가 완전가능하며 시불변 이산화 상태방정식(discrete time invariant)으로 나타낼 수 있다고 가정한다[10].

$$S_l : x_1(t+1) = A_l x_1(t) + B_l u(t) + D_l w(t)$$

$$y_l(t) = C_l x_1(t)$$

$$z_l(t) = y_l(t) + v(t) \quad (7)$$

$x_1(t)$ 는 상태변수 벡터로서 운동변위와 속도를 나타내며, $u(t)$ 는 제어입력 벡터, $w(t)$ 는 저주파수 교란벡터, $y_l(t)$ 는 저주파수 출력벡터이며, $z_l(t)$ 는 교란성분이 포함된 저주파수 관측벡터이다. A_l 은 전이행렬이고 B_l, C_l, D_l 은 취득시간 간격에 따라 일정한 기지의 계수라고 가정한다. 관측된 시스템 출력은 파랑강제력에 의한 교란신호 $y_h(t)$ 를 포함하고 있으며 실제시스템의 예측신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z(t) = z_l(t) + y_h(t) \quad (8)$$

고주파수 교란은 다음과 같은 다변수ARMA(auto-regressive moving average) 모델로 나타낼 수 있다.

$$S_h : A_h(z^{-1})y_h(t) = C_h(z^{-1})\xi(t) \quad (9)$$

이것은 고주파수 부시스템 S_h 가 점근적으로 안정하다고 가정한 것이다. $\xi(t)$ 는 독립적이고 평균이 영인 불규칙 벡터이고, $v(t)$ 와 $w(t)$ 에 연관되지 않으므로 다항식 행렬 $A_h(z^{-1})$ 과 $C_h(z^{-1})$ 은 대각행렬이며 다음과 같은 형태를 갖는다고 가정한다.

$$A_h(z^{-1}) = I + A_1 z^{-1} + A_2 z^{-2} + \dots + A_{n_h} z^{-n_h}$$

$$C_h(z^{-1}) = C_1 z^{-1} + C_2 z^{-2} + \dots + C_{n_h} z^{-n_h}$$

여기서 z^{-1} 은 backward shift operator이고, 다항식 행렬의 차수는 알려져 있으나 계수행렬 $\{A_i\}$ 와 $\{C_j\}$, $i=1, 2, \dots, n_h, j=1, 2, \dots, n_h$ 는 해상조건에 따라 파도스펙트럼이 서서히 변화하므로 미지수로 처리된다.

(2) 필터링 알고리즘

변수추정을 위한 칼만 필터 알고리즘은 다음과 같다

$$\text{Predictor} : \hat{x}_i(t|t-1) = A_i \hat{x}_i(t-1|t-1) + B_i u(t-1)$$

$$\hat{y}_i(t|t-1) = C_i \hat{x}_i(t|t-1) \quad (10)$$

$$\text{Corrector} : \hat{x}_i(t|t) = \hat{x}_i(t|t-1) + K_i \varepsilon(t)$$

$$\hat{y}_i(t|t) = C_i \hat{x}_i(t|t) \quad (11)$$

식(11)에서 필요한 저주파수 innovation 신호 $\varepsilon(t)$ 는

$$\varepsilon(t) = A_{n_h}^{-1} D_{n_h} \varepsilon(t) \quad (12)$$

으로 구할 수 있다. A_n, D_n 는 고주파수 모델 매개변수이고, $D_k(z^{-1})$ 은 spectral factorization으로 결정되며 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$D_k(z^{-1}) = I + D_1 z^{-1} + D_2 z^{-2} + \dots + D_n z^{-n}$$

$$\varepsilon(t) \text{는 고주파수 교란신호이다. 시간 } t-1 \text{에서 예측된 출력 } \hat{y}_i(t|t-1) \text{이 주어지므로 } \bar{m}_k(t) \text{가}$$

$$\bar{m}_k(t) \equiv z(t) - \hat{y}_i(t|t-1)$$

$$= A_k(z^{-1})^{-1} D_k(z^{-1}) \varepsilon(t) - \bar{y}_i(t|t-1) \quad (13)$$

와 같이 계산될 수 있다. \bar{y}_i 는 서서히 변화하는 신호이므로 짧은 시간 간격 동안은 일정 상수로 처리할 수 있다[3]. 여기서 innovation 신호 모델은 매개변수 추정을 위한 통상적인 형태로 표시될 수 있으며, 선박 위치확보 문제에 있어서 고주파수 교란은 연성되어 있지 않다고 가정할 수 있으므로 변수 $A_k(z^{-1})^{-1} D_k(z^{-1})$ 은 대각행렬이고 각 채널의 매개변수는 분리되어 추정될 수 있다. 이러한 사실로부터 standard extended recursive least squares(ELS) 혹은 recursive maximum likelihood parameter identification(RML) 알고리즘[4, 11]을 사용한다. 따라서 i 번째 채널에 대하여 innovation signal 모델을 독립적으로 표기할 수 있다

$$\bar{m}_k(t) = \phi_i(t) \theta_i + \varepsilon_i(t) \quad (14)$$

여기서

$$\phi_i(t) = [-\bar{m}_k(t-1), \dots, -\bar{m}_k(t-n_a); \varepsilon_i(t-1), \dots, \varepsilon_i(t-1), \dots, \varepsilon_i(t-n_d); 1]$$

$$\theta_i = [a_{i1}, \dots, a_{in_a}; d_{i1}, \dots, d_{in_d}; s_i]^T \quad (15)$$

순환적인 필터 알고리즘[10]은 다음과 같이 된다. 아래에서 변수의 위첨자 \wedge 은 오차항을 포함한 추정치를 의미한다.

1) θ_i 와 각 채널의 파라미터 공분산을 초기화하고 forgetting factor β 를 지정하고 상태변수추정을 초기화한다. 여기서 β 는 과거 상태변수 중에서 최근의 상태변수에 주는 가중치의 정도를 나타내며 $0 < \beta \leq 1$ 이다.

β 가 1이면 과거의 모든 상태변수를 이용하여 새로운 상태변수를 추정하는 것을 의미한다.

2) 식(10)을 사용하여 칼만필터추정 $\hat{x}_i(t|t-1)$ 과 $\hat{y}_i(t|t-1)$ 을 생성한다.

3) 식(13)을 이용하여 $\bar{m}_k(t)$ 를 계산하고 $\hat{\phi}_i(t)$ 를 구성한다. $\hat{\phi}_i(t)$ 는 식(15)에서 ε_i 대신에 $\hat{\varepsilon}_i$ 으로 대치된 근사값이다.

4) 매개변수를 update한다.

$$\hat{\theta}_i(t) = \hat{\theta}_i(t-1) + K_i(t)(\bar{m}_k(t) - \hat{\phi}_i(t)\hat{\theta}_i(t|t-1))$$

5) 공분산과 이득을 update한다.

$$P_i(t) = \{P_i(t-1) - K_i(t)(\beta + \phi_i(t)P_i(t-1)\phi_i^T(t)K_i(t)^T)/\beta$$

$$K_i(t) = P_i(t-1)\phi_i(t)(\beta + \phi_i(t)P_i(t-1)\phi_i^T(t))^{-1}$$

6) innovation 신호를 update한다.

$$\hat{\varepsilon}_i(t) = \bar{m}_k(t) - \hat{\phi}_i(t)\hat{\theta}_i(t)$$

7) 식(12)를 이용하여 $\varepsilon(t)$ 를 계산하고 채널수 만큼 단계 3)~7)을 반복한다.

8) 식(11)을 이용하여 상태변수 $\hat{x}_i(t|t)$ 를 생성한다.

9) 추정된 $\hat{y}_i(t|t-1)$ 을 계산하고 평활화 한다.

10) 위치추정을 교정하고 시간스텝을 증가시켜 단계 2)로 순환한다.

(3) 제어시스템

제어기 설계는 식(7)로 주어지는 저주파수 운동 모형에 대하여 최적제어 이론을 적용하였다. LQG제어는 칼만필터를 사용하여 제어에 필요한 상태변수를 추정해 내어 제어를 수행하는 기법으로 최적제어와 최적추정기로 분리하여 구성할 수 있다[6].

목적함수 J 를 다음과 같이 정의하면

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} E \left\{ \int_{-T}^T [(x_1 - r_1)^T Q_1 (x_1 - r_1) + u^T R_1 u] dt \right\} \quad (17)$$

여기서

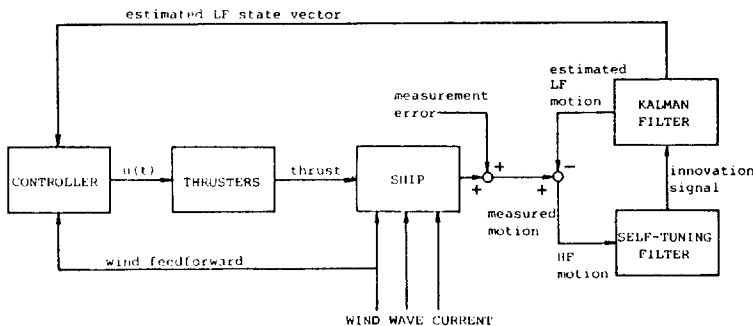


Fig. 3 Kalman and self-tuning filter state estimate feedback control system

Q_i : 상태변수 가중행렬

R_i : 제어변수 가중행렬

r_i : 저주파수 운동의 기준좌표

이것을 최소화하는 최적제어 신호 $u(t)$ 는 저주파수 추정변수 $\hat{x}_i(t)$ 와 가중행렬에 따라 변화하는 제어이득 K_c 로 얻어진다.

$$u(t) = -K_c \hat{x}_i(t)$$

위치확보시스템은 운동모델부분, 저주파수 운동을 분리하는 필터 알고리즘부분 및 추정변수를 이용하여 최적제어를 수행하는 제어기부분으로 나눌 수 있으며, Fig. 3은 개략도를 나타낸다[3].

4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

식(6b)의 운동방정식에서 교란성분으로부터 추진기 추력과 풍하중을 분리시켜서 저주파수 상태방정식을 구성하였다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_i x_i(t) + B_i u(t) + D_i w(t) + E_i \eta(t) \\ y_i(t) &= C_i x_i(t) \end{aligned} \quad (18)$$

$x_i(t)$ 는 상태벡터, $u(t)$ 는 제어입력벡터, $w(t)$ 는 선체에 가해지는 불규칙 교란성분, $\eta(t)$ 는 바람의 교란성분을 나타낸다. 무차원화된 시스템 행렬 A_i , B_i , C_i , D_i , E_i , 시스템교란 공분산 Q_f , 계측오차의 공분산 R_f 및 최적제어 가중행렬 Q_i , R_i 가 부록에 나타나 있다. 계측교란의 표준편차를 1/3 m, 0.2도로 가정하였다.

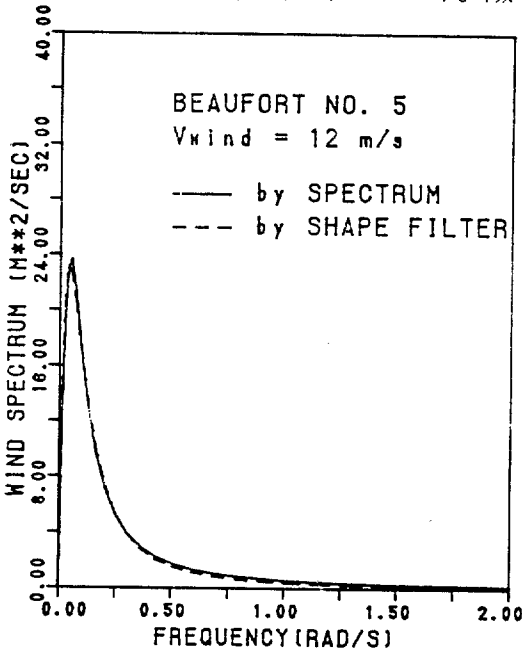


Fig. 4 Spectrum of wind turbulence

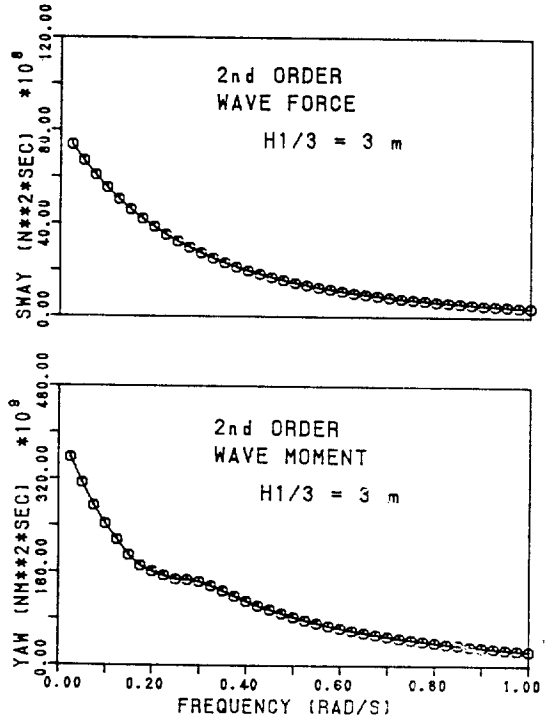


Fig. 5 Spectrum of 2nd order wave force and moment

선체운동을 유발하는 파랑강제력의 외력 스펙트럼이 주어지면 이로부터 형상필터를 설계함으로써 외력을 백색잡음으로 치환할 수 있으며, 스펙트럼의 fitting은 최적화 알고리즘을 이용하였다. 풍하중에 관하여 풍속 12 m/s일 때의 Davenport 스펙트럼[8]을 2차의 전달 함수

$$G(s) = \frac{a_3 s}{s^2 + a_1 s + a_2}$$

로 fitting하여 형상필터를 구하였다. a_1, a_2, a_3 는 각각 0.1338, 0.00195, 0.6449로 얻어졌으며, Fig. 4에 fitting된 함수와 풍하중 스펙트럼을 도시하였다. 2차 함수만으로도 거의 일치하는 결과를 얻었다. 파도에 의한 고주파수 외력 및 2차 파랑강제력에 의한 저주파수 외력의 형상필터는 각각의 스펙트럼 특성에 부합하는 전달 함수를 4차 함수로 선택하여 풍하중 경우와 같이 구하였다. Fig. 5는 유의파고 3m일 때 2차 파랑강제력에 의한 좌우동요 및 선수동요 강제력의 스펙트럼을 나타낸 것으로서 Pinkster가 제시한 방법으로 얻어진 결과이다.

풍속 12 m/sec이고 유의파고 3m이며 선수에 대해 60도의 받음각을 가지며 조류가 존재하지 않는 해상환경

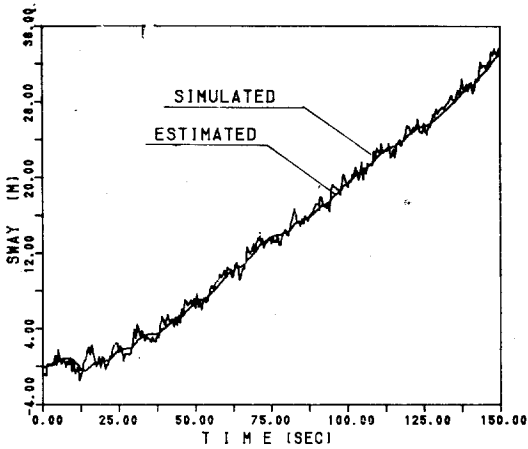


Fig. 6 Measured sway and estimated one

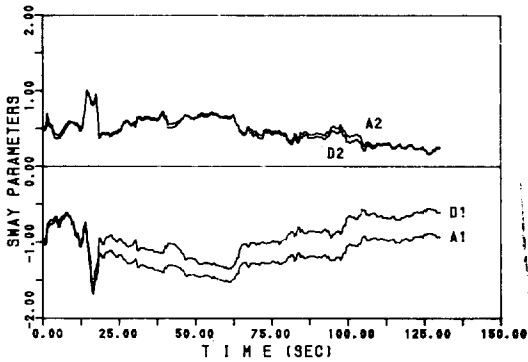


Fig. 7 Estimated parameters of self-tuning filter

에 놓여 있는 경우에 대하여 위치확보시스템의 성능을 해석하였다. Fig. 6은 위치확보를 수행하지 않을 때에 좌우동요의 시계열 데이터를 보인 것으로서 시뮬레이션된 좌우동요와 추정된 저주파수운동이 함께 도시되었다. 저주파수 운동추정은 위치제어를 수행하기 위하여 필요한 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 기록된 전체 시간 범위에서 좋은 결과를 나타내고 있다. 여기서 저주파수 운동추정이 곧바로 제어작용에 관여하므로 추정의 결과가 제어명령에 미치는 영향을 고려해야 한다. 3절에서 기술된 forgetting factor β 는 최근의 데이터에 더 큰 가중치를 부가하는 역할을 한다. 자기동조 필터로 운동추정을 수행함에 있어서 β 를 작게 ($\beta=0.95$) 정하면 고주파수 운동 추정이 빨라지고 결과적으로 저주파수 운동추정은 느린속도 변화를 보이며, β 를 크게 ($\beta=0.9999$) 정하면 고주파수 운동추정이 느린 변화를 갖게 되어 전자의 경우보다 상대적으로 고주파수 성분이 더 포함되게 된다. Fig. 6은 β 가 0.99일 때의 결과

이다.

Fig. 7은 이 경우의 좌우동요 고주파수 모델의 파라미터 추정결과를 나타내며, 계수 A_1, A_2, D_1 및 D_2 는 $A_k(z^{-1}), D_k(z^{-1})$ 값이다. 이들 행렬의 초기파라미터는 안정성 판단기준에 근거하여 설정할 수 있다. 두 다항식은 모두

$$f = 1 + x_1 z^{-1} + x_2 z^{-2} = (1 + m_1 z^{-1})(1 + m_2 z^{-1})$$

형태로 나타낼 수 있다. z 는 단위원 안에 들어와야 안정하므로 $|m_1| < 1, |m_2| < 1$ 이다. 따라서 $-2 < m_1 + m_2 < 2, -1 < m_1 m_2 < 1$ 이고 m_1, m_2 가 영보다 작다면 $A_1 = -1, A_2 = 0.5$ 일때가 가장 좋은 초기치가 된다. 오차성분의 초기 공분산은 커야 하나, $\hat{\epsilon}(t)$ 의 초기 공분산은 작아야 한다[4]. Innovation신호의 초기치는 통상 영 ($\epsilon(0)=0, \epsilon(1)=0$)으로 놓는다. 행렬 $P(t)$ 는 순환적이므로 초기 $P(0)$ 를 적절히 선택한다. $P(0)$ 의 선택을 단위행렬에 상수를 곱한 αI 로 하며 α 가 크면 (10^4) $P(0)$ 의 값을 거의 신뢰하지 않게 되며, α 가 작으면 서서히 변하게 된다. 본고에서는 α 를 100으로 선택하였다.

Fig. 3의 제어시스템에 의한 시뮬레이션 결과가 Fig.

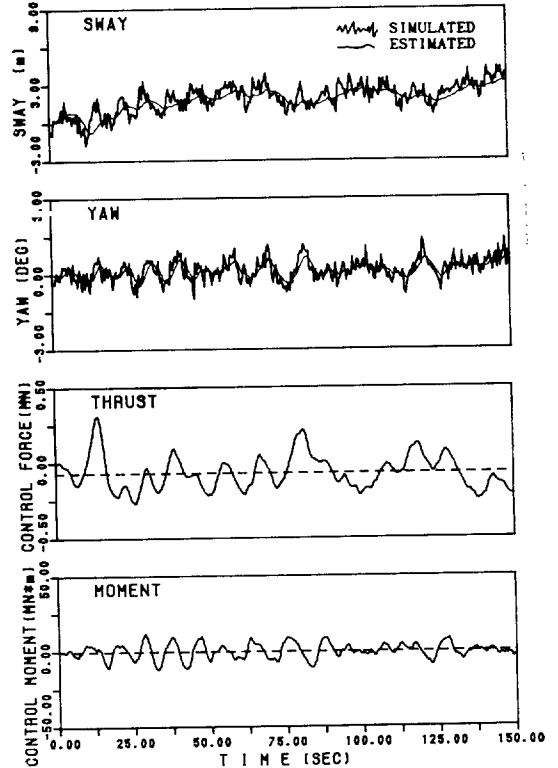


Fig. 8 Controlled total sway, yaw and thruster force with estimated low frequency sway and yaw

8에 나타나 있다. 제촉치의 시물레이션은 추정된 상태 변수에 의한 최적제어 추진기입력, 2차 파랑강제력 및 풍하중에 지배적인 영향을 받으며, 1차 파랑강제력 및 선체모델의 비선형에 의한 시스템 응답을 고려하고 여기에 제촉센서의 오차성분을 포함하여 제촉신호를 생성하였다. Fig. 8의 좌우동요, 선수동요 및 추진기력 각각에 대하여 시물레이션된 제촉치가 추정치와 비교되어 있다. 선체는 평균풍속 12 m/s의 풍하중 및 2차 파랑강제력에 의하여 일정한 표류력을 받는다. 제어된 좌우동요의 변화량은 거의 1차 파랑운동의 크기 정도로서 작업반경내에 들어오는 결과를 보인다. 선수동요는 제어가 훌륭히 수행되었으나, 파랑운동에 의한 선수동요 성분이 제어를 하지 않을 때 보다 약간 커지는 결과를 보였다. 추진기입력은 외력과 반대방향이고 평균이 영이 아닌 값을 나타내고 있으며, 이는 일정 표류력을 보상하면서 동적인 제어를 수행한 결과이다. 제어를 위해서는 설치된 추진기의 합력이 300 kN 정도는 되어야 하며 추진기 출력은 선체와 추진기, 추진기와 추진기의 상호작용, 효율, 회전수 및 피치 등에 따라 결정되어야 한다.

Fig. 9는 제어를 수행하지 않은 경우의 선체운동의 시계열 데이터에서 평균변화 경향(trend)을 소거하여

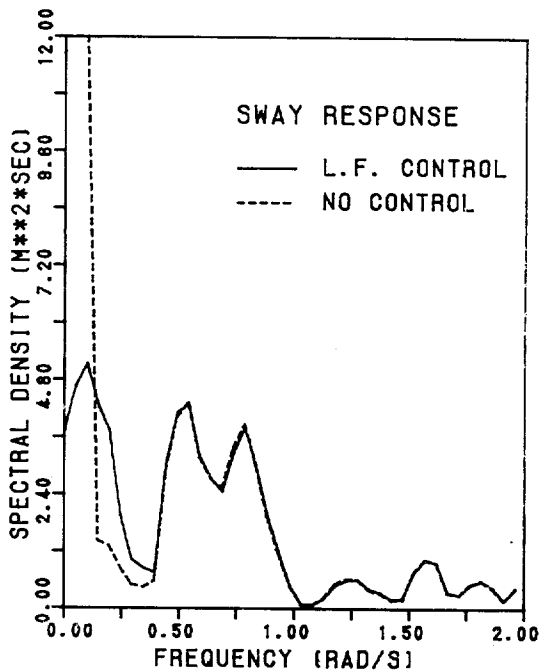


Fig. 9 Spectrum of sway response with feedforward wind compensate

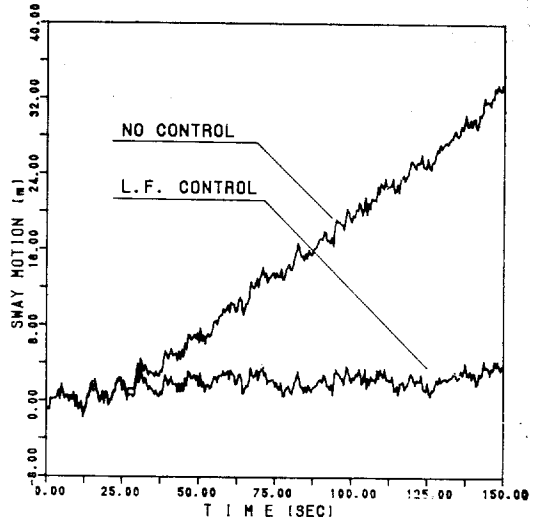


Fig. 10 No controlled sway motion and low frequency controlled one

스펙트럼을 구하고 제어된 시계열 데이터의 스펙트럼과 비교한 결과이다. 실제로 선박에서는 풍향 및 풍속을 수시로 제촉하여 평균풍속에 의한 영향을 순방향 제어하여 소거시키고 있다. 그림에서 모두가 자기동조 필터와 칼만필터를 이용한 제어를 수행하여 파랑강제력에 의한 운동성분에 전혀 영향을 미치지 않으면서 저주파수 운동만을 소거시킬 수 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 제어를 수행한 결과와 제어를 수행하지 않은 결과의 시계열을 나타내는 것이다.

기상이 변하거나 작업위치가 바뀔때 선박에 가해지는 외력 및 교란성분이 변화하며, 칼만필터와 자기동조 필터를 이용한 제어시스템은 이에 따른 시스템의 동조를 수월하게 진행 할 수 있으며 계산시간도 짧은 이점이 있다.

5. 결 론

본 논문은 자동위치확보시스템의 시물레이션을 수행하기 위하여 풍하중, 파랑강제력, 2차 파랑표류력 등이 형상함수를 이용한 백색잡음으로 치환되었으며, 추진기력의 출력을 최소화하는 제어기를 구성하였다. 자기동조 필터를 이용하여 고주파수 운동추정을 수행하는 자동위치확보시스템은 계산이 간단할 뿐만 아니라 고주파수 모델에 대한 시스템 교란 분산 및 제촉오차 분산을 정의할 필요가 없다. 저주파수 운동추정이 제촉신호의 저주파수 성분을 정도높게 추적하고 있으며,

이 추정치를 이용하여 최적제어를 수행한 결과가 작업 반경 범위 내에 들어오는 결과를 보여 본 연구의 시뮬레이션기법이 유용하다는 것을 보였다. 최적제어의 제어이득은 시스템의 동특성과 추진기의 응답특성 및 출력 등에 영향을 받는다. 따라서 보다 정확한 시스템 모델 및 추진기 모델에 대한 연구가 요구되며, 위치확보시스템의 모형시험법을 개발하여 위치확보 성능을 검토할 필요성이 있다.

6. 후 기

본 논문은 한국기계연구소에서 과학기술처의 1987년 일반출연연구사업의 일환으로 수행된 “선박의 자동위치확보시스템 해석법에 관한 연구”과제의 결과임을 밝혀둔다.

부 록

계산 선형 Wimphey Sealab의 저주파수 시스템 행렬

$$A_I = \begin{pmatrix} -0.0546 & 0 & 0.0016 & 0 & 0.5435 & 0 \\ 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0573 & 0 & -0.0695 & 0 & 0 & 9.785 \\ 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.55 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.55 \end{pmatrix}$$

$$B_I = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1.55 & 0 \\ 0 & 1.55 \end{pmatrix} \quad C_I^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$D_I = \begin{pmatrix} 0.5435 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 9.785 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad E_I = \begin{pmatrix} 0.348 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 6.92 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

시스템 공분산의 공분산 Q_f 및 계측교란의 공분산 R_f :

$$Q_f = \begin{pmatrix} 4 \times 10^{-6} & 0 \\ 0 & 9 \times 10^{-8} \end{pmatrix}$$

$$R_f = \begin{pmatrix} 1 \times 10^{-5} & 0 \\ 0 & 1.22 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

가중행렬 Q_I, R_I :

$$Q_I = \text{DIAG}[3 \times 10^2 \ 1 \times 10^4 \ 3 \times 10^2 \ 1 \times 10^4 \ 1 \times 10^3 \ 1 \times 10^3]$$

$$R_I = \text{DIAG}[5 \times 10^4 \ 5 \times 10^4]$$

참 고 문 헌

- [1] Morgan, M.J., "Dynamic Positioning of Offshore Vessel." Tulsa, Oklahoma, Petroleum, 1978.
- [2] English, J.W. and Wise, D.A., "Hydrodynamic Aspects of Dynamic Positioning", National Physical Laboratory Report Ship 197, May 1976.
- [3] Fung, P.T. and Grimble, M.J., "Dynamic Ship Positioning Using a Self-Tuning Kalman Filter", *IEEE*, Vol. AC-28, No. 3, Mar. 1983.
- [4] Harris, C.J. and Billings, S.A., "Self-Tuning and Adaptive Control: Theory and Applications", Peter Peregrinus Ltd, 1981.
- [5] Gelb, A., "Applied Optimal Estimation", MIT Press, 1974.
- [6] Athans, T., "The Role of Use the Stochastic Linear Quadratic Gaussian Problem in Control System Design", *IEEE*, Vol. AC-16, No. 6, Dec., 1971.
- [7] Pinkster, J.A. "Low Frequency Second Order Wave Forces on Vessels Moored at Sea", 11th, Symposium on Naval Hydrodynamics, London, 1976.
- [8] Davenport, A.G., "Wind Structure and Wind Climate", in "Safety Structures Under Dynamic Loading", by Holland, I. et al. (ED), Vol. 2, 1978.
- [9] Triantafyllou, M.S., "Preliminary Design of Mooring Systems", *J. of Ship Research*, Vol. 26, No. 1, 1982.
- [10] 이상무·홍도천·이관목·홍사영, "선박의 자동 위치확보 시스템 해석법에 관한 연구", 한국기계연구소 연구보고서 UCE 342-1086.D 1987.
- [11] Issermann, R., "Digital Control Systems", Springer-verlag Berlin, Heidelberg, 1981.