

# 칼만필터를 이용한 부유체운동의 최적제어<sup>+</sup>

이판목\* · 이상무\* · 홍사영\*

(1988년 10월 31일 접수)

## Optimal Control of Dynamic Positioned Vessel Using Kalman Filtering Techniques

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

**Key Words** : Dynamic Positioning System(자동위치확보장치), Kalman Filter(칼만필터), Optimal Control(최적제어), LQG Controller(LQG 제어기), Shaping Filter(형상필터), Motion Estimate(운동추정)

### Abstract

A dynamically positioned vessel must be capable of maintaining a specified position and direction by controlling the thruster devices. The motions of a vessel are often assumed to the sum of low frequency(LF) motions and high frequency(HF) motions. The former is mainly due to wind, current and second order wave forces, while the latter is mainly due to first order wave forces. In order to avoid the high frequency thruster modulation, the control system must include filters to estimate the low frequency motions from the measured motion signals. This paper presents a control system based on Kalman filtering technique and optimal control theory. Using the combined Kalman filter, LF motion estimates and HF ones are achieved from the motion measurement of the vessel. The estimated low frequency motions are used as inputs to the dynamic positioning system. The thruster modulation is minimized using the optimal control theory ; Linear Quadratic Gaussian(LQG) controller. The performances of the Kalman filter and the dynamic positioned vessel are investigated by computer simulation.

### 1. 서 론

해상에서 작업하는 부유체의 위치확보 개념은 지정 위치에서 작업을 원만히 수행할 수 있도록 부유체에 가해지는 불규칙 외력을 보상하는 반력을 제공하는 것이다. 이러한 목적을 위하여 도입되는 자동위치확보시스템은 추진기를 제어하여 반

력을 제공하는 장치이다. 자동위치확보시스템은 전자공학의 발달에 힘입어 발전을 거듭하고 있으며, 이의 성능에 대한 사양 및 요구 조건이 점점 엄격해지고 있다. 이 시스템은 해저광물탐사선, 석유시추선, 보급선, 해양조사선 등에 광범위하게 이용되고 있으며, 높은 신뢰도를 바탕으로 규모가 작고 단순한 고성능 시스템으로 영역을 확대하고 있다.

+ 1988년도 한국해양공학회 춘계학술대회 발표(1988년 6월)

\*정회원, 한국기계연구소 대덕선박분소 해양기술실

위치확보시스템은 계측시스템, 제어기시스템, 추진기시스템, 동력시스템으로 구성되며<sup>1)</sup>, 본 논문에서는 제어기시스템의 구성과 해석법에 대하여 논하였다. 제어기시스템은 아날로그 또는 디지털 컴퓨터로 구성되며 이들의 조합된 형태가 사용된다. 이 시스템의 주된 기능은 취득된 선수각 데이터 및 위치 데이터를 전기신호로 변환하고, 요구되는 선수각 및 위치신호와 비교하여 오차신호를 생성하며, 오차를 최소화시키기 위한 추진기의 힘모멘트를 최적계산하고, 바람변화에 의해 기대되는 반력 및 모멘트를 순방향 궤환하여, 제어에 필요한 반력 및 모멘트를 각 추진기의 방향 및 회전속도 명령으로 전달한다.

부유체에 작용하는 외력으로서 파랑강제력은 주파수가 높고 진폭이 작은 운동을 유발하며, 조류력, 풍력 및 2차 차수 파랑강제력은 주파수가 낮고 진폭이 큰 운동을 유발한다. 급격한 추진기 변조로 인한 에너지 손실 및 추진기의 마모를 방지하기 위해서, 제어기 시스템은 부유체의 운동신호로부터 저주파수 운동성분을 추정하고 이를 제어함으로써 고주파수 외력에 의한 운동을 구속시키지 않는 것이 필요하다. 고전적인 제어방식을 이용하던 위치확보시스템은 notch filter 또는 wave filter를 사용하여 고주파수 성분의 운동신호를 제거하여 저주파수 운동성분을 구하였으나<sup>2)</sup>, 이 방법은 위상 지연에 의해서 시스템이 불안정해 질 수 있는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 고주파수 운동성분을 교란성분으로 치환하고 칼만필터를 이용하여 운동신호로부터 저주파수 운동성분을 추정하는 방법이 연구되었으며, 전체시스템을 고주파수 시스템과 저주파수 시스템으로 분리하고 두개의 병렬 칼만필터를 구성하여 저주파수 운동성분과 고주파수 운동성분을 각각 추정하는 방법이 있다<sup>3),4)</sup>. 한편 계측된 운동 신호로부터 고주파수 운동을 추정하기 위해 자기동조필터를 사용하기도 한다<sup>5),6)</sup>.

본 논문에서 Fig. 1과 같은 부유체의 운동모델을 저주파수 모델과 고주파수 모델로 분리할 수 있다고 가정하였다. 두개의 병렬 칼만필터를 이용하여 저주파수 운동성분과 고주파수 운동성분을 각각 추정하고, 저주파수 운동추정치를 궤환하여 교란환경에 놓인 시스템에 대한 최적제어(linear quadratic gaussian control)를 수행하였다. 제어시스템 구성을 위하여 부유체의 상태방정식 정립

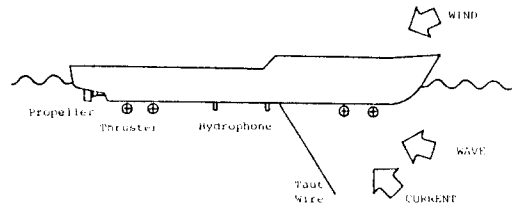


Fig. 1 Basic components in a dynamic positioned vessel

과정을 요약하였으며, 위치확보시스템 시뮬레이션의 대상선을 Wimpey Sealab<sup>7)</sup>으로 선택하였다.

## 2. 부유체의 운동방정식

불규칙 해상에 놓인 부유체는 해상파에 기인한 6자유도 운동을 하게된다. 이 6자유도 운동 중 전후동요, 좌우동요 및 선수동요와 같이 부유체 스스로 복원력을 갖지 못하는 수평면상의 운동의 경우는 파랑표류력, 풍력, 조류력 등에 의해 표류운동을 하게 된다. 해상작업선의 경우 작업수행을 위해서는 일정한 위치를 유지할 수 있는 능력이 요구되며 이러한 요구조건을 만족시키기 위하여 전후동요, 좌우동요 및 선수동요의 제어가 필요하다.

불규칙 해상에서의 표류운동은 변위가 상당히 크고 주기가 파도의 평균주기에 비해 매우 긴 장주기 운동으로 나타나며 파도에 의한 운동은 장주기 운동에 중첩되어 나타나게 된다. 수평면상 운동의 제어를 위하여 부유체의 운동을 진폭이 큰 저주파수 운동과 상대적으로 진폭이 작은 고주파수 운동으로 분리가 가능하다고 가정하였다.

위치제어를 위해서는 부유체의 위치를 측정하여야 하며 그 측정치는 계측오차를 내포하게 된다. 본 연구에서는 위치계측치를 시뮬레이션된 부유체의 운동에 계측오차를 임의로 발생시켜 위치계측치를 생성하였다. 이와같은 작업의 유통도를 Fig. 2에 나타내었다.

### (1) 저주파수 운동방정식

부유체의 운동을 해석하기 위하여 선박의 조종 해석에서와 같이 부유체의 무게중심에 고정된 좌표계를 잡는다. 부유체의 전방향을 양의 x축으로 정하고, 우현방향을 양의 y축으로 정한다. 부유체의 운동방정식은 일반적으로 비선형 미분방정식

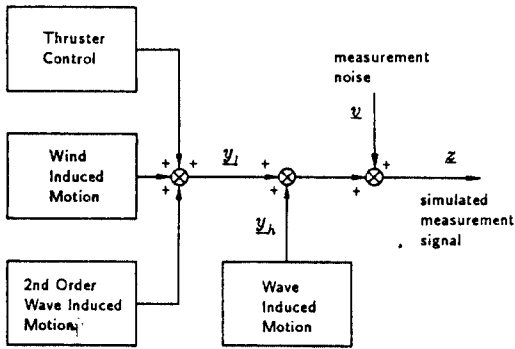


Fig. 2 Signal generation of the vessel's motion and the measured motion

으로 표시되며, 비선형 효과를 나타내는 방법에 따라 약간씩 다르다. 제어시스템 설계를 위해서 운동방정식을 선형화할 필요가 있고 해상상태에 따른 계수의 변화를 고려해야 한다.

부유체의 전후동요 속도를  $u$ 로 표시하고 좌우동요 속도를  $v$ , 선수동요 속도를  $r$ 로 나타내면 비선형 미분방정식은

$$\begin{aligned} (M - a_{ii})\dot{u} - (M + a)vr &= X_A + X_H(u, v, r) \\ (M - a_{ii})\dot{v} + (M - a_r)ru &= Y_A + Y_H(u, v, r) \\ (I_{zz} - a_r)\dot{r} - a'_v &= N_A + N_H(u, v, r) \end{aligned} \quad (1)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $M$ 은 부유체의 질량,  $I_{zz}$ 은 관성모멘트,  $a$ 는 부가질량 및 부가 관성모멘트를 나타낸다.  $X, Y$ 는  $u, v$ 방향의 힘,  $N$ 은  $r$ 방향의 모멘트를 나타내며, 첨자  $A$ 는 파랑 강제력, 계류력, 추진기력, 풍력 등에 의한 부가적인 외력항을 나타내고, 첨자  $H$ 는 부유체의 운동과 물입자 운동의 상대운동에 기인하는 유체력 항을 나타낸다.

English와 Wise<sup>7)</sup>의 근사방법을 도입하고 고차항을 소거하면, 전후동요를 좌우동요 및 선수동요 운동방정식과 분리하여 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 좌우동요와 선수동요가 연성된 운동방정식에 대하여 제어 시스템을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 전후동요에 대해서도 같은 방법으로 해석을 수행할 수 있으나 본 연구에는 포함시키지 않았다.

추진기는 추력장치로서 자동위치확보시스템의 가장 중요한 장비이다. 추진기는 작동형태 및 해상조건, 추진기와 부유체의 상호작용, 추진기와 추진기의 상호작용 등으로 인하여 추진기 모델링은 복잡해진다. 본 연구는 추진기를 1차 차수 시

간지연 모델

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{\nu}(T - g) \quad (2)$$

로 정의하였다. 이 식의  $T$ 는 추진기력이고,  $\nu$ 는 시간지연,  $g$ 는 제어입력이다. 풍하중을 구현하기 위하여 풍속을 평균풍속과 난류유동으로 나누었다. 항력이 수면 윗부분의 면적과 풍속의 제곱에 비례한다고 가정하였으며, 난류유동속도를 Davenport스펙트럼<sup>8)</sup>으로 시뮬레이션하였다. 2차 차수의 파랑강제력은 Pinkster<sup>9)</sup>가 제시한 방법으로 구현되었다. 좌우방향의 속도  $v$ 를  $X_{e1}$ 로, 각 변위를  $X_{e2}$ 로 정의하고, 선수동요 각속도  $r$ 을  $X_{e3}$ 로, 각 변위를  $X_{e4}$ 로 정의하고, 추진기1 및 추진기2에 대한 식(2)의 무차원화된 추진기력을  $X_{e5}$ ,  $X_{e6}$ 라 정의하였다. 외력항을 풍하중  $\eta$ , 2차 차수 파랑강제력항  $W_I$  및 제어입력항  $u$ 로 나누면 확장된 저주파수 상태변수식과 출력식은

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= A_i x_i + B_i u + D_i w_i + E_i \eta \\ y_i &= C_i x_i \end{aligned} \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 각 행렬과 벡터는

$$\begin{aligned} x_i &= (x_{i1} \ x_{i2} \ x_{i3} \ x_{i4} \ x_{i5} \ x_{i6})^T \\ A_i &= \begin{bmatrix} -\frac{Y_{ve}}{1-a_v} & 0 & -\frac{Y_{re}}{1-a_r} & 0 & \frac{1}{1-a_v} & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{N'_{ve}}{k'_{zz}-a_r} & 0 & \frac{N'_{re}}{k'_{zz}-a_r} & 0 & 0 & \frac{1}{k'_{zz}-a_r} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\nu} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\nu'} \end{bmatrix} \\ B_i &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\nu} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\nu'} \end{bmatrix} \\ C_i &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ D_i &= \begin{bmatrix} \frac{1}{1-a_v} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{k'_{zz}-a_r} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ E_i &= \begin{bmatrix} \frac{Y'_{ew}}{1-a_v} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{N'_{vw}}{k'_{zz}-a_r} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

와 같으며 위첨자 '은 무차원화된 값을 나타낸다.

(2) 고주파수 운동방정식

부유체의 고주파수 운동은 1차 차수 파랑강제력

에 기인하며 이 운동은 파도스펙트럼과 시스템 응답 RAO를 이용하여 얻을 수 있다. 다음에 기술되는 것은 고주파수 좌우동요가 파도운동과 같다고 가정하여 고주파수 시스템을 구성하는 방법이다. 주어진 해상상태에 대하여 고주파수 파도스펙트럼  $S(\omega)$ 는 narrow band를 갖는 스펙트럼으로 주어지며, 형상필터를 이용하여 백색잡음을 입력으로 하는 모형화된 스펙트럼  $S(\omega)$ 를 다음식으로 구현할 수 있다.

$$S_o(\omega) = |G(j\omega)|^2 S_i(\omega) \quad (4)$$

$S_i(\omega)$ 는 백색잡음 스펙트럼으로서 크기가 1이다. 전달함수  $G(s)$ 는 분자의 차수가 3차이고 분모의 차수가 4차가 되게 선택하였다.

$$G(s) = \frac{\alpha_5 s^3}{s^4 + \alpha_1 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_3 s + \alpha_4} \quad (5)$$

따라서 함수  $|G(j\omega)|^2$ 이

$$|G(j\omega)|^2 = \frac{k_5 \omega^6}{\omega^8 + k_1 \omega^6 + k_2 \omega^4 + k_3 \omega^2 + k_4} \quad (6)$$

와 같이 얻어진다. Powell의 최적화 알고리즘을 이용하여 파도스펙트럼  $S(\omega)$ 에 대하여 식(6)을 fitting하여  $S_o(\omega)$ 를 구할 수 있다. Laplace영역에서 안정성을 검토하여  $G(s)$ 와  $G(-s)$ 를 분리하고 식(5)의 계수  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_5$ 를 구한다. 모형화된 좌우동요  $Y_n^s(s)$ 와 백색잡음  $W_n^s(s)$ 의 관계에 매개변수  $X_n^s(s)$ 를 도입하여 chain rule을 적용하면

$$G(s) = \frac{Y_n^s(s)}{W_n^s(s)} = \frac{Y_n^s(s)}{X_n^s(s)} \cdot \frac{X_n^s(s)}{W_n^s(s)} \quad (7)$$

두 식으로 분리할 수 있다. 이를 시간영역으로 표시하면 다음과 같다.

$$\underline{x}_n^s = A_n^s \underline{x}_n^s + D_n^s \underline{w}_n^s \quad (8)$$

$$\underline{y}_n^s = C_n^s \underline{x}_n^s$$

여기서,

$$A_n^s = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\alpha_4 & -\alpha_3 & -\alpha_2 & -\alpha_1 \end{pmatrix} \quad D_n^s = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$C_n^s = [0 \ 0 \ 0 \ \alpha_5] \quad \underline{x}_n^s = \{x_1^s \ x_2^s \ x_3^s \ x_4^s\}^T$$

$$\underline{y}_n^s = \{y_1^s \ y_2^s\}^T$$

고주파수 시스템을 무차원화하여 저주파수 시스템과 일관성이 있게 하였다. 유의파고가 6.7m인 해상상태에서 최적화 알고리즘으로 fitting된 형상필터와 Pierson-Moskowitz스펙트럼이 Fig. 3에 비교되었으며, 이때 얻어진 전달함수의 계수가

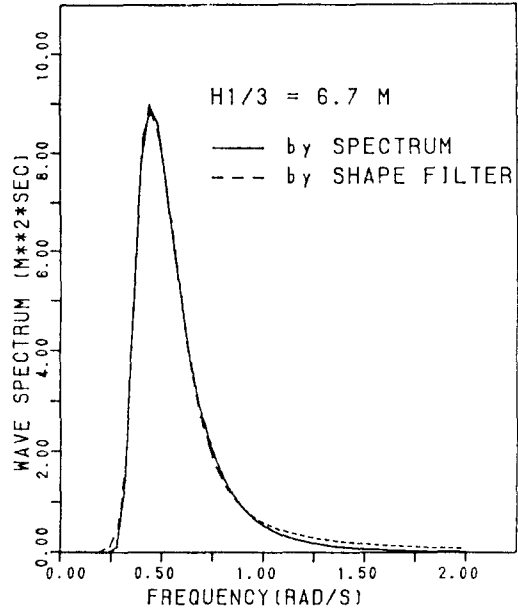


Fig. 3 Wave spectrum and its shape function. ( $H_{1/3} = 6.7m$ )

Table 1에 나타나 있다. Fig. 4는 스펙트럼의 각 주파수 성분을 선형화하여 얻은 시계열과 식(8)을 이용하여 얻은 시계열을 비교하는 것으로서, 형상필터를 이용한 파도 모델링이 적절히 수행되었음을 알 수 있다. 유의파고가 3m일 때에도 같은 방법으로 파도를 모델링할 수 있으며, 전달함수의 계수가 Table 1에 나타나 있다.

고주파수 선수동요에 대해서도 좌우동요와 같은 방법으로 모델링을 수행하고 첨자 y를 사용하여 식(8)과 같은 형태로 표기하면, 좌우동요와 선수동요가 조합된 고주파수 운동모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \underline{x}_h &= A_h \underline{x}_h + D_h \underline{w}_h \\ \underline{y}_h &= C_h \underline{x}_h \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,

$$\underline{x}_h = \{x_1^s \ x_2^s \ x_3^s \ x_4^s \ x_1^y \ x_2^y \ x_3^y \ x_4^y\}^T$$

$$A_h = \begin{pmatrix} A_n^s & 0 \\ 0 & A_n^y \end{pmatrix} \quad D_h = \begin{pmatrix} D_n^s & 0 \\ 0 & D_n^y \end{pmatrix}$$

$$C_h = \begin{pmatrix} C_n^s & 0 \\ 0 & C_n^y \end{pmatrix} \quad \underline{y}_h = \{y_h^s \ y_h^y\}^T$$

Table 1 Coefficients of the shaping filter

	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$
$H_{1/3} = 6.7m$	1.797	6.373	4.421	7.159	0.560
$H_{1/3} = 3.0m$	1.930	7.369	5.489	9.573	0.260

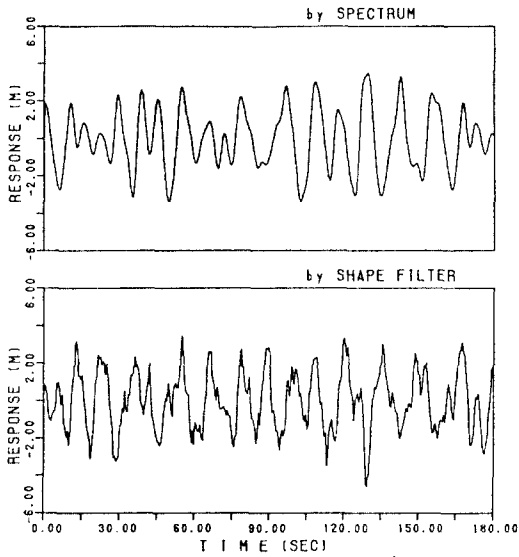


Fig. 4 Realization of the irregular waves by spectrum and by shaping filter( $H_{1/3}=6.7m$ )

### 3. 칼만필터를 이용한 상태변수 추정

위치확보시스템에 응용되는 칼만필터는 칼만이득과 과거의 상태변수를 이용하여 오차가 포함된 계측신호 벡터로부터 현재의 상태변수를 추정하는 필터이다. 식(3) 및 식(9)로 나타나는 저주파수 운동 모델 및 고주파수 운동 모델을 조합하여 부유체의 전체운동 모델을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Dw + E\eta \\ \underline{z} &= Cx + v \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} A_l & 0 \\ 0 & A_h \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} B_l \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} D_l \\ D_h \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} E_l \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [C_l \ C_h] \quad x = \{x_l \ x_h\}^T \quad w = \{w_l \ w_h\}^T$$

시스템의 교란벡터  $w$  및 계측오차벡터  $v$ 는 평균이 영이고 공분산행렬이 각각  $Q_l$ ,  $R_l$ 인 백색잡음이다.

$$E\{w(t)\} = 0, \quad E\{w(t)w(\tau)^T\} = Q_l \delta(t-\tau)$$

$$E\{v(t)\} = 0, \quad E\{v(t)v(\tau)^T\} = R_l \delta(t-\tau)$$

공분산 행렬이 지정되면 칼만필터에 의한 상태변수 추정은 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>10)</sup>

$$\hat{x} = A\hat{x} + K(z - C\hat{x}) + Bu + E\eta \quad (11)$$

즉,

$$\begin{aligned} \hat{x}_l &= A_l \hat{x}_l + K_l \{z - (C_l \hat{x}_l + C_h \hat{x}_h)\} + B_l u + E_l \eta \\ \hat{x}_h &= A_h \hat{x}_h + K_h \{z - (C_l \hat{x}_l + C_h \hat{x}_h)\} \end{aligned} \quad (12)$$

칼만이득 행렬  $K$ 는 Riccati행렬식을 풀어서

$$P = AP + PA^T + DQ_l D^T - KR_l K^T$$

$$K = \begin{bmatrix} K_l \\ K_h \end{bmatrix} = PC^T R_l^{-1}$$

를 구할 수 있다. 칼만이득 행렬  $K$ 는 저주파수 이득과 고주파수 이득으로 분리되며, 두개의 시스템이 병렬로 연결되어 칼만필터를 동시에 작동하는 형태가 된다. Fig. 5는 식(12)로 표시되는 칼만필터 알고리즘을 도식화한 것으로 저주파수 시스템 모델과 고주파수 시스템 모델이 분리되어 작동하는 것을 알 수 있다. 계측치와 추정오차에 칼만이득을 곱하여 시스템 모델에서 새로운 추정치를 만들고 다음시간 단계에서 새로운 계측치와 함께 순환적으로 반복하여 상태변수를 추정한다.

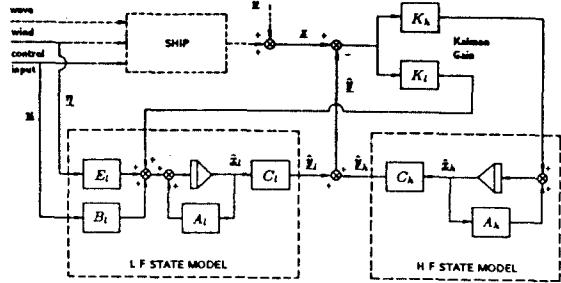


Fig. 5 Kalman filter structure applied to the vessel

### 4. 제어시스템 설계

위치확보시스템은, 부유체의 저주파수 운동성분만을 제어하기 위하여, 칼만필터를 이용하여 얻어진 저주파수 상태변수 추정치를 폐회로 귀환하여 위치제어를 수행한다. 제어기 설계는 식(10)로 주어지는 전체운동모델중에서 식(3)으로 주어진 저주파수 운동에 대하여 최적제어이론을 적용하였다. 위치확보시스템은 백색잡음으로 치환된 교란환경의 시스템으로서 제어시스템 설계를 위하여 linear quadratic gaussian(LQG)제어기를 사용하였다. LQG제어는 칼만필터를 사용하여 제어에 필요한 상태변수를 추정하고 이를 제어입력으로 최적제어를 수행하는 기법이며, 분리원칙<sup>11)</sup>에 의하여 최적제어기와 최적추정기로 분리하여 구성할

수 있다.

저주파수 운동의 최적제어를 수행하기 위하여 다음과 같은 목적함수  $J$ 를 설정하면,

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} E \left\{ \int_{-T}^T [(\underline{x}_t - \underline{r}_t)^T Q_t (\underline{x}_t - \underline{r}_t) + \underline{u}^T R_t \underline{u}] dt \right\} \quad (13)$$

여기서,

$Q_t$ : 상태변수 가중행렬

$R_t$ : 제어변수 가중행렬

$\underline{r}_t$ : 기준좌표

이것을 최소화 하는 최적제어 신호  $\underline{u}(t)$ 는 저주파수 추정변수  $\hat{\underline{x}}_t(t)$ 와 제어이득  $K_c$ 에 따라 결정된다.

$$\underline{u}(t) = -K_c \hat{\underline{x}}_t(t) \quad (14)$$

제어이득  $K_c$ 는 다음의 정상상태 Riccati행렬식을으로 구해진다.

$$A_t^T P + P A_t + Q_t - P B_t R_t^{-1} B_t^T P = 0 \quad (15)$$

$$K_c = R_t^{-1} B_t^T P \quad (16)$$

위치확보시스템은 운동모델 부분, 저주파수 운동과 고주파수 운동을 추정하는 필터 알고리즘 부분, 및 추정변수를 이용하여 최적제어를 수행하는 제어기 부분으로 구성된다. Fig. 6은 위치확보시스템의 구성도를 내며, 제어를 구성할 때 풍속을 계측하여 풍하중이 시스템에 미치는 영향을 고려한다.

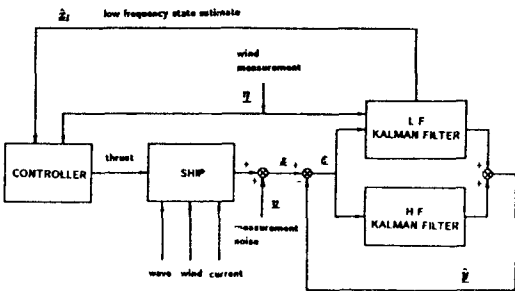


Fig. 6 Block diagram of the dynamic positioning system

### 5. 고 찰

식(10)으로 모델링된 위치확보시스템에 대해서 시스템 교란벡터  $w$ 는 파랑강제력에 의한 교란성분 뿐만 아니라 시스템의 모델링 오차에 의한 효과를 포함하며, 계측오차 벡터  $v$ 는 센서의 정밀도에 따른 오차, 부유체 내부의 진동과 소음 및

추진기의 유체교란에 의한 수중음향 오차성분을 포함한다. 유의파고가 6.7m인 불규칙 해상상태에 대하여 시스템의 계수행렬은 문헌 [6], [12]와 같이하였으며, 시스템 교란 공분산  $Q_t$  및 계측오차의 공분산  $R_t$ 를 무차원량으로

$$Q_t = \text{DIAG}[4 \times 10^{-6} \ 9 \times 10^{-8} \ 4.8 \times 10^{-4} \ 4.8 \times 10^{-4}]$$

$$R_t = \text{DIAG}[1 \times 10^{-5} \ 1.22 \times 10^{-5}]$$

과 같이 정하였다. 계측오차는 좌우동요 방향으로 1/3m, 선수동요 방향으로 0.2도의 표준편차를 갖는다고 가정하였다. 이 조건에서 얻어진 저주파수 칼만이득  $K_t$ 과 고주파수 칼만이득  $K_h$ 는 각각 다음과 같다.

$$K_t = \begin{bmatrix} 0.301 & 0.776 & 0.024 & 0.017 & 0.0 & 0.0 \\ 0.008 & 0.014 & 0.756 & 1.229 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}^T$$

$$K_h = \begin{bmatrix} -0.237 & -0.688 & 0.0 & 3.486 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.046 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ -0.303 & 0.0 & 1.232 \end{bmatrix}^T$$

$Q_t, R_t$ 은 positive definite이어야 하며, Riccati행렬식(15)로부터 Newton-Rapson법을 이용하여 유일해  $P$ 를 구하였다. 제어를 수행하지 않을 경우의 상태변수의 표준편차제곱에 역비례하게  $Q_t$ 를 선택하였으며, 선택된 추진기 최대용량의 절반을 제어입력변수의 표준편차라 가정하고  $Q_t$ 과 동일한 방법으로  $R_t$ 를 선택하였다. 선택된  $Q_t, R_t$ 를 이용하여 제어이득  $K_c$ 를 계산하고 시스템의 안정성을 검토해야 한다. 선택된 가중행렬  $Q_t, R_t$ 은 다음과 같으며,

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

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

정상상태 최적이득  $K_c$ 는 다음과 같다.

$$K_c = \begin{bmatrix} 1.407 & 0.447 & 0.001 & -0.001 & 0.417 & 0.003 \\ 0.018 & 0.001 & 0.486 & 0.447 & 0.003 & 1.674 \end{bmatrix}$$

풍속이 19m/s이고 유의파고 6.7m이고 선수에 대해 60도의 받음각을 가지며 조류가 존재하지 않는 해상환경에서 작업을 수행하는 부유체의 성능을 해석하였다. Fig. 7은 제어를 수행하지 않을 때에 부유체의 좌우동요 시계열 데이터를 나타낸다. 그림에서 시뮬레이션된 위치는 저주파수 운동, 고주파수 운동 및 계측오차가 포함된 계측위치이고 추정된 위치는 칼만필터를 이용하여 얻어진 저주파수 위치를 나타내며, 저주파수 추정이

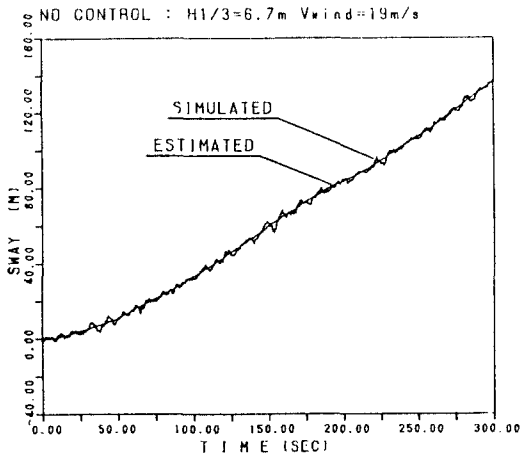


Fig. 7 Measured and estimated sway motion

만족스럽게 수행되고 있음을 알 수 있다. 저주파수 칼만필터와 고주파수 칼만필터를 병렬로 연결하여 각각의 상태변수를 추정하는 방법은 해상조건이 수시로 변화하지 않는 경우에는 자기동조 필터를 이용하는 방법보다 유리하다.

제어시스템 모델 Fig. 6에 의한 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 8은 최적 위치제어를 수행할 때 매순간마다 얻어지는 좌우동요와 선수동요의 저주파수 추정 결과중 시간 150-240초 사이의 값을 점선으로 나타낸 것이다. 실제 해상에서 작업할 때 저주파수와 고주파수 위치를 분리하여 나타낼 수 없으나, 시뮬레이션은 두 운동성분을 분리할 수 있으므로 시뮬레이션된 저주파수 위치를 실선으로 나타내었다. Fig. 8에서 계측치의 변화는 계산치의 변화에 뒤따르는 결과를 나타내고 있으며, 계측오차 성분이 내포된 형태의 결과를 보인다. Fig. 9는 고주파수 운동의 추정치를 Fig. 8에 나타낸 방법과 같은 방법으로 표현한 것이다.

Fig. 10은 좌우동요, 선수동요 및 추진기력 각각에 대하여 시뮬레이션된 계측치가 추정된 저주파수 위치와 비교되어 있다. 해상조건은 제어를 수행하지 않은 경우와 같다. 제어된 좌우동요의 변화량은 거의 1차 파랑운동의 크기로서 작업반경 내에 들어오는 결과를 보인다. 제어된 선수동요의 장주기운동 제어는 만족스럽게 수행되었으나, 시뮬레이션된 저주파수운동 자체가 고주파수 운동값을 많이 포함하고 있어(Fig. 8참조) 추진기 제어에 고주파수 성분이 포함된 결과를 보인다. 추진기 입력은 외력과 방향이 반대이며 평균이 120kN

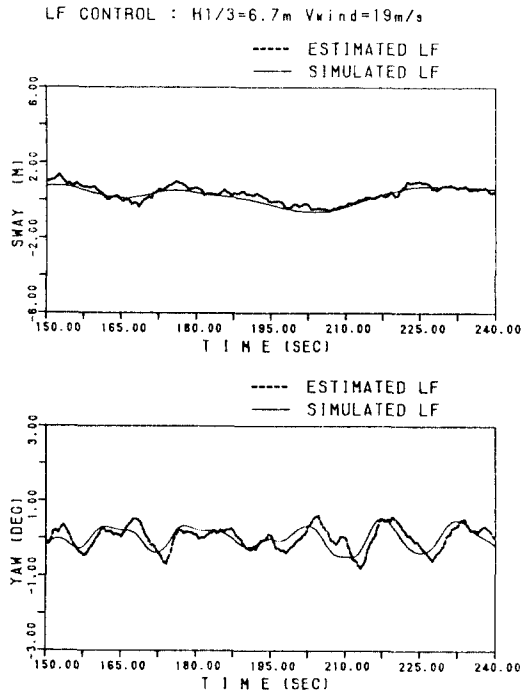


Fig. 8 Low frequency controlled motion components and the estimated ones

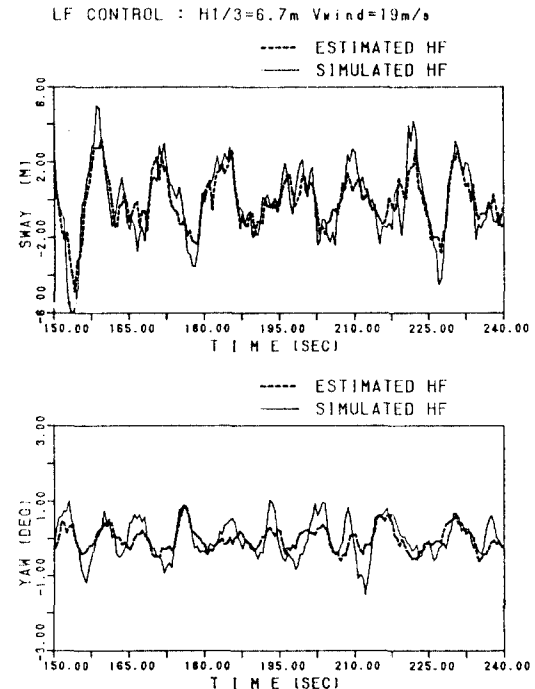


Fig. 9 High frequency motion components and the estimated ones

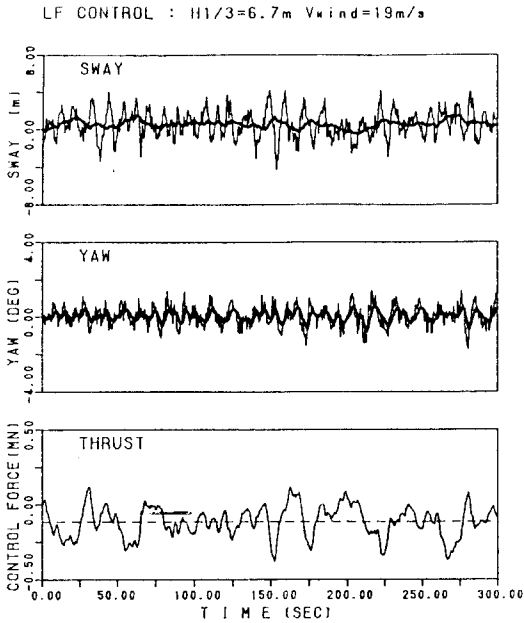


Fig. 10 Controlled sway, yaw, thruster force, estimated low frequency sway and yaw

의 일정 추진기력을 보상하면서 동적인 제어를 수행해야 하는 결과를 보인다. 이러한 결과로부터 선체와 추진기, 추진기와 추진기의 상호작용을 고려하여 이에 맞는 용량의 추진기를 설계해야 한다.

Fig. 11은 자동제어를 수행하지 않고 평균풍속에 의한 일정방향의 풍하중을 추진기력으로 상쇄시킨 결과(no control)와 저주파수 운동 추정을

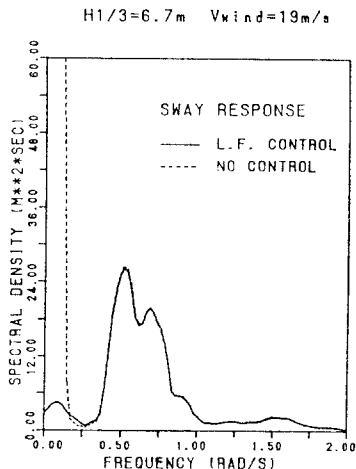


Fig. 11 Spectrum of the sway response with feedforward wind compensation

이용하여 최적제어를 수행한 결과의 시계열 데이터를 스택트럼 처리하여 비교한 것이다. 저주파수 모델과 고주파수 모델에 대하여 병렬 칼만필터를 이용하여 변수를 추정하고 제어하는 방법은 1차 차수 파랑강제력에 의한 운동성분에 거의 영향을 미치지 않으면서 저주파수 운동성분을 소거시킬 수 있음을 Fig. 11로부터 알 수 있다.

Fig. 12는 위치제어를 수행할 경우와 제어를 수행하지 않을 경우의 좌우동요 시계열 데이터를 나타내는 것이며, Fig. 13은 같은 조건의 선수동요 시계열 데이터를 나타내는 것이다. 이 결과는 불규칙 해상에서 작업을 수행하는 부유체의 위치 확보 문제가 매우 중요한 문제이며, 본 연구방법을 통하여 지정 위치에서 작업을 수행할 수 있음을 보인다. 해상상태가 바뀌면 고주파수 시스템 모델의 변수가 변화하므로 새로운 시스템을 구성해야 하는 단점이 있으며, 이를 위하여 확장된 칼만필터를 이용할 수 있으나 이 경우는 계산량이 많아져 데이터 취득시간 간격이 길어지는 단점이 있다. 따라서 해상상태가 일정한 불규칙 해상에서 계류작을 설치할 수 없는 경우 또는 작업위치를 수시로 바꾸어야 하는 경우의 위치확보 문제에 본 연구방법은 유용하게 쓰일 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문은 불규칙 해상에서 작업을 수행하는 부

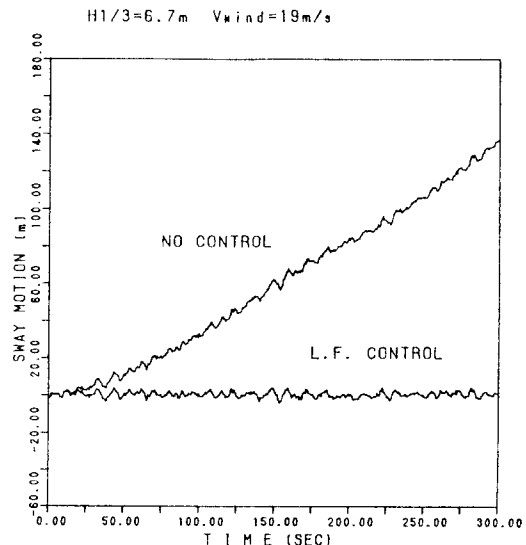


Fig. 12 Uncontrolled and low frequency controlled sway motion



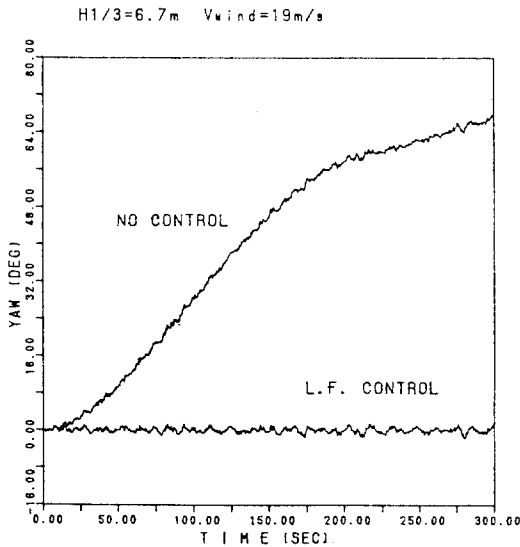


Fig. 13 Uncontrolled and low frequency controlled yaw motion

유체의 위치확보시스템의 시뮬레이션을 위하여 상태방정식의 정식화 과정을 소개하였으며, 풍하중, 파랑강제력, 2차 파랑강제력을 외력으로 하는 시스템을 구성하였다. 교란환경에서 최적제어를 수행하기 위하여 LQG제어기를 도입하였다. 부유체의 저주파수 운동성분만을 제어하기 위하여 시스템을 저주파수 모델과 고주파수 모델로 분리하고, 두개의 칼만필터를 병렬로 연결하여 상태변수를 추정하는 방법이 연구되었다.

시뮬레이션 결과에서 저주파수 운동 추정이 계측신호의 저주파수운동 성분을 정도높게 추적하고 있으며, 이 추정치를 이용하여 제어를 수행한 부유체의 위치가 작업반경에 들어오는 결과를 보여 본 연구의 시뮬레이션 기법이 유효하다는 것을 보였다. 이 방법은 고주파수 시스템의 모델링이 정확히 수행되면 자기동조 필터를 이용한 위치제어 문제보다 효율적인 제어를 수행할 수 있으나, 그렇지 못할 경우에는 시간이 지남에 따라 시스템이 불안정해지는 단점이 있다.

## 7. 후 기

본 논문은 한국기계연구소에서 과학기술처의 1987년 일반출연 연구사업의 일환으로 수행된 "선박의 자동위치확보시스템 해석법에 관한 연구" 과제의 일부임을 밝혀둔다.

## 참 고 논 문

- 1) Morgan, M.J., "Dynamic Positioning of Offshore Vessels", Tulsa, Oklahoma : Petroleum, 1978
- 2) Zuderdorp, H.J., "Dynamic Stationing Systems", Symposium on "Ship Handling", Wageningen, The Netherlands, Nov., 1973
- 3) Grumble, M.J., R.J. Patton and D.A. Wise, "Use of Kalman Filtering Techniques in a Dynamic Ship-Positioning Systems", IEE Proceedings, Vol, 127, Pt. D, No 3, May, 1980
- 4) Balchen, J.G., N.A. Jenssen and Saelid, "Dynamic Positioning Using Kalman Filtering and Optimal Control Theory", in IFAC/IFIP Symposium on Automation in Offshore Oil Field Operation, Amsterdam, 1976
- 5) Fung, P.T. and M.J. Grumble, "Dynamic Ship Positioning Using a Self-Tuning Kalman Filter", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-28, No. 3, Mar., 1983
- 6) 이 상무, 이 판목, 홍 사영, "자기동조 제어기를 이용한 위치확보시스템에 관한 연구", 대한조선학회, '88춘계학술대회, Apr., 1988
- 7) English, J.W. and D.A. Wise, "Hydrodynamic Aspects of Dynamic Positioning", National Physical Laboratory Report Ship 197, May 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) Pinkster, J.A. "Low Frequency Second Order Wave Forces on Vessels Moored at Sea", 11th Symposium on Naval Hydrodynamics, London, 1976
- 10) Gelb, A., "Applied Optimal Estimation", MIT Press, 1974
- 11) Isermann, R., "Digital Control Systems", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1981
- 12) Fotakis, J., M.J. Grumble and B. kouvaritakis, "A Comparison of Characteristic Locus and Optimal Designs for Dynamic Ship Positioning Systems", IEEE Trans. AC-27, No. 6, 1982