

## 자기위치 유지시스템 제어기의 설계변수에 관한 연구

이동연 †\*, 하문근\*\*

삼성중공업 선박연구센터\*, 삼성중공업 조선플랜트연구소\*\*

A Study on the Design Parameters of Controller  
for Dynamic Positioning System

Dong Yeon Lee\* and Mun Keun Ha\*\*

Samsung Heavy Industries Co. Ltd, Samsung Ship Model Basin\*  
Samsung Heavy Industries Co. Ltd, Shipbuilding & Plant Research Institute\*\*

### Abstract

Special purpose vessels such as drillship and ocean research vessels install the DPS(Dynamic Positioning System) to maintain the position and heading for long-time operation. This paper deals with the design parameters for the control theory and filter algorithms of DP system. For the environmental loadings wind forces, current forces and wave forces were considered. In order to estimate the low frequency motions without first-order wave motion, the Kalman filter was used and it was assumed that the first-order wave forces correspond to system noises and first-order wave motions are measurement noises.

In this simulation, the length of research vessel is 65 meters and it has four thrusters to maintain the position. The ability of keeping position and heading was confirmed. For the calculation of thruster input the LQR and LQI control theory were adopted and the effects of gain were investigated.

※Keywords: Dynamic Positioning System(동적 자기위치 유지 시스템), Kalman Filter(칼만필터), First Order Motion(선형운동성분), System Noise(시스템잡음), Measurement Noise(계측기잡음), Ocean Research Vessel(해양조사선)

### 1. 서언

---

접수일: 2001년 7월 11일, 승인일: 2003년 1월 7일

† 주저자, E-mail: letsgo1@samsung.co.kr

Tel: 042-865-4374

정해진 위치에서 지속적인 작업을 수행하는 드릴쉽과 같은 특수선박은 높은 신뢰도를 갖춘 자기위치 유지시스템 (Dynamic Positioning System,

이하 DP시스템)을 장착하고 있다. 또한 해수를 채취하여 해양오염을 조사하고, 해도작성을 위해 수심을 측정하는 해양조사선은 정해진 위치를 유지하면서 작업을 수행하게 된다. 이러한 선박들은 위치센서로부터 현재의 자기위치를 획득하고, 현재 위치에서 정해진 위치로 이동하기 위해 필요한 추력을 계산하여 제어기의 명령에 따라 추진기를 작동함으로써 자기위치를 계속해서 유지할 수 있는 DP시스템의 장착이 요구되고 있다.

DP시스템의 초기설계 단계에서는 선박에 작용하는 외란으로 풍력, 조류력 그리고 파랑표류력을 고려하여 외란의 방향에 따라 선박에 작용하는 외란의 합력을 구하고, 정적해석을 통해 추진기의 용량이 외란을 견딜 수 있는지 조사하여 DP 성능곡선(DP Capability Curves)을 작성한다(이동연 등, 2000). DP 성능곡선을 통해 정해진 추진용량으로 견딜 수 있는 외란의 크기를 알 수 있으며, 정해진 외란상태에서 각 추진기의 사용정도를 파악할 수 있다(Morgan, 1978).

DP시스템의 제어기를 설계하는 상세설계 단계에서는 선박에 작용하는 외란으로 선형파랑하중을 추가하고, 시간영역 해석을 통해 선박의 운동과 각 추진기의 사용량을 조사함으로써 최적의 되먹임 계인과 추정기의 계인을 결정하게 된다.

DP시스템은 선박이 지속적으로 한 방향으로 이동하여 생기는 위치이탈을 제어 대상으로 하며, 선형파랑하중에 의한 운동성분은 한 주기가 지나고 나면 다시 원 위치로 회복되므로 제어 대상에 포함시키지 않는다. 이러한 선형운동까지 제어하는 것은 과도한 추진기 용량이 요구되며, 추진기가 입사파주기에 반응하게 되면, 빠른 회전수변화에 따른 추진기의 피로현상을 일으켜 추진기의 수명을 단축시키게 되므로 추정기를 통해 선형운동 성분을 제거한 저주파수 운동을 추정하는 것이 요구된다(김기훈 등, 2000, 이상무 등, 1989).

제어기법에 대한 기준의 연구로는 다양한 제어기법을 선박의 Auto-Pilot 시스템에 적용하여 최적제어기법을 연구한 서상현/송용규(1994)이 있으며, 박찬욱 등(1994)은 반잠수 쌍동선의 히브와 피치를 제어하기 위하여 LQ이론으로 적용한 바 있다.

본 논문에서는 LQR과 LQI 제어이론을 적용하였으며, 되먹임 계인을 구하기 위해 어떤 물리량을 설계변수로 도입하는 것이 효과적인지 살펴보았고, 설계변수에 따른 제어성능을 조사하였다.

## 2. 대상선박과 시간영역해석

본 논문은 국립해양조사원에서 발주하여 건조 중에 있는 65m급 해양조사선(바다로1호)을 대상으로 하였으며, 주요 제원과 네 개의 추진기 용량은 Table 1과 같다.

Table 1 Main particulars & thrusters

Ship Name : NORI600 Ocean Research Vessel			
LOA	64.5 m	Maximum Thrust (kN)	
LBP (L)	58.0 m	Main 1	155
Breadth (B)	10.5 m	Main 2	155
Draft (T)	3.00 m	Stern T.	29
Mass (M)	1123 ton	Bow T.	38

선박의 이동과 위치유지를 위해 2기의 주추진기를 갖추고 있으며, 선수와 선미에 각각 1개씩 터널형 보조추진기를 갖추고 있다.

선박에 작용하는 외력으로 조류력, 풍력, 선형파랑하중과 평균 표류력을 고려하였으며, 풍하중 계수는 이동연 등(2000)이 1/100 모델로 풍동에서 수행한 실험결과를 이용하였고, 조류력 계수는 해양조사선에 적합한 자료를 구하지 못하여 OCIMF(1994)자료를 바탕으로 사용하였고, 파랑하중은 Zou & Kim(1996)이 작성한 토텐셜 프로그램을 해양조사선에 적용하여 계산한 결과를 이용하였다.

시간영역에서 외란에 따른 선박의 운동을 계산하고, 추진기의 사용량을 조사하기 위하여 DP 시뮬레이션 프로그램을 활용하였다 (Lee et. al, 1999).

DP 시뮬레이션 프로그램의 구성은 Fig. 1과 같으며, 선박의 주요 제원과 외란의 하중계수를 입력하고, 추진기의 최대용량 및 추력 분배 알고리듬을 적용한 후, 현재의 선수각과 외란의 입사각으로부터 선박에 작용하는 외력을 구하였다.

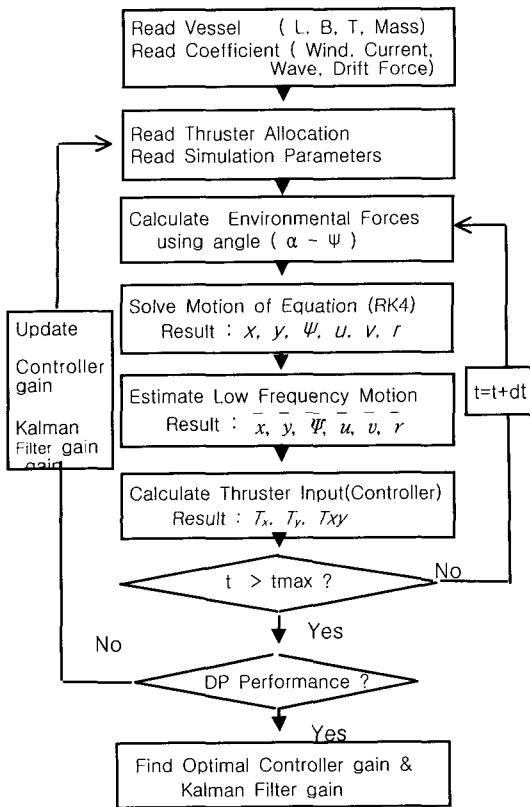


Fig. 1 Flow chart of DP simulation

Runge-Kutta 4차 방법으로 운동방정식을 풀어 선박의 위치와 속도를 구하고, 칼만필터를 이용하여 저주파수 운동성분을 추정한다. 제어이론으로부터 위치오차를 제거할 수 있는 추력을 구해 외력에 추가하는 방법으로 시간영역에서 선박의 운동과 추진기의 사용량을 해석하였다. 되먹임 계인과 추정기의 개인을 변화시키면서 설계자가 원하는 범위안에서 위치오차를 유지하는지 조사하고, 추진기가 최대용량을 초과하지 않으면서 입사파주기로 반응하지 않도록 설계변수를 바꾸면서 시뮬레이션을 반복하였다. 추진기사용량을 기준으로 제어성능을 평가하여 최적의 추정기와 제어기를 설계하였다.

### 3. 제어이론과 필터알고리듬

#### 3.1 제어이론

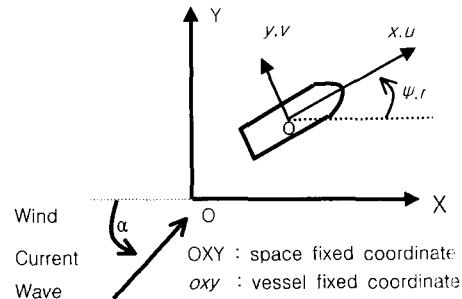


Fig. 2 Coordinate system

선박의 위치와 외란의 입사각에 대한 좌표계는 Fig. 2와 같고, 선박의 현재 위치에서 원하는 위치로 이동하는데 필요한 추력은 LQR제어이론과 LQI제어이론을 적용하여 그 결과를 비교하였다.

#### 3.1.1 LQR 제어 이론

선박의 위치와 속도를 상태변수로 취하고, 추진기의 추력을 제어입력으로 택하여 LQR 제어이론을 적용하면 다음과 같다.

$$\text{state variable: } \mathbf{x} = [u, x, v, y, r, \psi]^T \quad (1)$$

$$\text{control input: } \mathbf{u} = [T_x, T_y, T_{xy}]^T \quad (2)$$

여기서  $T_x$ 는 길이방향으로 필요한 추력,  $T_y$ 는 폭방향으로 필요한 추력이며,  $T_{xy}$ 는 선수각을 유지하기 위해 필요한 추력모멘트를 나타낸다.

이동연/하문근(2001)이 제시한 방법으로 선박의 평면 운동방정식을 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + B\mathbf{u} \quad (3)$$

$$\mathbf{y} = C\mathbf{x} + D\mathbf{u} \quad (4)$$

LQR 제어이론에 따르면, 식(5)와 같이 위치오차와 추진기 사용량의 합이 최소가 되도록 되먹임 계인  $K_R$ (Feedback Gain Matrix)을 결정한다.

$$J = \int (\mathbf{x}^T C^T Q_R C \mathbf{x} + \mathbf{u}^T R_R \mathbf{u}) dt \quad (5)$$

LQR(Linear Quadratic Regulator) 제어기는 설계변수로서 위치오차( $x$ )와 추력( $u$ )에 대한 상대적인 가중치( $Q_R$ 과  $R_R$ )를 조절하면서 되먹임 계인을 결정하게 된다.

제어입력은 식(6)으로부터 구하고,

$$u = -K_R(x - x_{set}) \quad (6)$$

여기서  $x_{set}$ 은 원하는 위치와 속도를 의미한다. 그리고  $K_R$ 은 식(7)로부터 구할 수 있고,

$$K_R = R_R^{-1} B^T P_R \quad (7)$$

여기서  $P_R$ 은 식(8)과 같이 Riccati방정식을 만족하는 해이다.

$$P_R A + A^T P_R - P_R B R_R^{-1} B^T P_R + C^T Q C = 0 \quad (8)$$

한편, 추진기의 제어입력을 구하기 위해 PD제어이론을 적용하는 경우에는 식(9)와 같다.

$$\begin{aligned} T_x &= D_x \dot{e}_x + P_x e_x \\ T_y &= D_y \dot{e}_y + P_y e_y \\ T_{xy} &= D_{\psi} \dot{e}_{\psi} + P_{\psi} e_{\psi} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $D_x, D_y, D_{\psi}$ 는 속도오차계이며,  $P_x, P_y, P_{\psi}$ 는 위치오차비례계이다.

DP제어기를 설계하는 과정에서는 선박의 무게 중심이 선박의 중앙에 있어 운동방정식의 연성효과를 무시할 수 있다고 가정하여 LQR 되먹임 계인( $K_R$ )을 구하면, 식(10)과 같은 형으로 구성된 행렬을 얻을 수 있고, 각 항은 PD 제어이론의 되먹임 계인과 동일한 의미를 갖는다.

$$K_R = \begin{bmatrix} D_x & P_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_y & P_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{\psi} & P_{\psi} \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 3.1.2 LQI 제어 이론

외란으로 고려하는 풍력과 조류력을 한 방향으로 지속적인 누적오차를 발생시키므로 위치오차를 적분한 값을 상태변수로 추가하여 누적오차를 제거할 수 있도록 LQI (Linear Quadratic regulator including error Integration)제어 이론을 적용하면 다음과 같다.

상태변수와 제어입력은 다음과 같고,

$$z = [u, x, v, y, r, \psi, \int e_x dt, \int e_y dt, \int e_{\psi} dt]^T \quad (11)$$

$$u = [T_x, T_y, T_{xy}]^T \quad (12)$$

상태방정식은 다음과 같이 이루어진다.

$$\dot{z} = A_I z + B_I u \quad (13)$$

$$y = C_I z + D_I u \quad (14)$$

여기서  $A_I, B_I, C_I, D_I$ 는 다음과 같다.

$$A_I = \begin{bmatrix} A, 0 \\ C, 0 \end{bmatrix}, \quad B_I = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$C_I = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_I = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

LQR과 마찬가지로 식(17)이 최소가 되도록 되먹임 계인( $K_I$ )을 구할 수 있고, 식(18)을 이용하여 추력을 구한다.

$$J = \int (z^T C_I^T Q_I C_I z + u^T R_I u) dt \quad (17)$$

$$u = -K_I(z - z_{set}) \quad (18)$$

여기서  $K_I$ 는 식(19)로부터 구할 수 있으며,

$$K_I = R_I^{-1} B_I^T P_I \quad (19)$$

$P_I$ 은 식(20)과 같이 Riccati 방정식을 만족하는 해이다.

$$P_I A_I + A_I^T P_I - P_I B_I R_I^{-1} B_I^T P_I + C_I^T Q_I C_I = 0 \quad (20)$$

PID 제어이론의 경우에는 추진기의 제어입력을 식 (21)과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} T_x &= D_x \dot{e}_x + P_x e_x + I_x \int e_x dt \\ T_y &= D_y \dot{e}_y + P_y e_y + I_y \int e_y dt \\ T_{xy} &= D_{\psi} \dot{e}_{\psi} + P_{\psi} e_{\psi} + I_{\psi} \int e_{\psi} dt \quad (21) \end{aligned}$$

여기서  $D_x, D_y, D_{\psi}$  와  $P_x, P_y, P_{\psi}$ 는 PD 제어이론과 같으며,  $I_x, I_y, I_{\psi}$ 는 누적오차개인이다.

운동방정식의 연성효과를 무시하는 경우에는 식 (22)과 같은 항으로 구성된 LQI의 되먹임 게인  $K_I$ 가 얻어지는데, PID 제어이론과 비교하면 동일한 형태임을 알 수 있다.

$$K_I = \begin{bmatrix} D_x & P_x & 0 & 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_y & P_y & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{\psi} & P_{\psi} & 0 & 0 & I_{\psi} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$K_I$ 는 누적위치오차에 대한 가중치행렬  $Q_I$ 와 추진기 사용량에 대한 가중치 행렬  $R_I$ 에 따라 결정되는데, 위치오차에 대한 가중치를 크게 하면, 되먹임 게인이 큰 값을 갖게 되고, 추진기 사용량의 가중치를 증가시키면, 되먹임 게인은 줄어들어 같은 오차에 대해서 추진기 사용량이 감소하게 된다.

앞에서 살펴본 바와 같이 LQR과 LQI의 되먹임 게인은 각각 PD제어이론과 PID제어이론의 되먹임 게인과 같은 형태를 갖게 됨을 알 수 있고, 위치오차와 추진기 사용량에 대한 가중치 행렬을 변화시키면서 되먹임 게인값의 변화를 살펴보고, 이에 따른 제어특성을 조사하였다.

### 3.2 칼만필터 알고리듬

선박의 위치와 속도신호에는 계측기 잡음과 선형파랑하중에 의한 선형운동 성분을 포함하고 있는데, 이러한 성분은 DP 시스템의 제어 대상이 아니므로 추정기를 통해 입사파의 주기에 해당하는 선형 운동성분을 제거한 저주파수 운동만을 추정하는 것이 요구된다.

계측잡음과 시스템잡음을 포함한 선박의 운동방

정식은 다음과 같은 상태방정식으로 표현할 수 있다(Fossen, 1994).

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gw \quad (23)$$

$$y = Cx + Du + v \quad (24)$$

여기서 상태변수와 제어입력은 앞에서 정의한 바와 같으며, 추가된 변수의 의미는 다음과 같다.

$$\text{시스템 잡음 } w = [w_x, w_y, w_{xy}]^T \quad (25)$$

$$\text{계측 잡음 } v = [v_x, v_y, v_{xy}]^T \quad (26)$$

$$\text{추정변수 } \tilde{x} = [\bar{u}, \bar{x}, \bar{v}, \bar{y}, \bar{r}, \bar{\psi}]^T \quad (27)$$

칼만 필터를 설계하기 위해서 필요한 시스템 잡음과 계측 잡음의 공분산(Covariance)행렬은 다음과 같다.

$$Q_k = E(w^T \cdot w), \quad R_k = E(v^T \cdot v) \quad (28)$$

여기서  $E$ 는 시간평균을 의미하며, 칼만 필터의 게인 행렬( $L$ )은 식(29)로부터 구해지며,

$$L = PC^T R_k^{-1} \quad (29)$$

여기서  $P$ 는 식(30)과 같은 리카티 방정식(Riccati Equation)의 해이다.

$$AP + PA^T + GQ_k G^T - PC^T R_k^{-1} CP = 0 \quad (30)$$

추정변수  $\tilde{x}$ 는 다음 식에 따라서 구하였다.

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + Bu + L(y - C\tilde{x}) \quad (31)$$

## 4. 설계변수 결정과 해석결과

### 4.1 외란의 크기와 방향

선박에 작용하는 풍속과 조류의 속도는 일정하다고 가정하였고, 파도는 ITTC 스펙트럼을 따르는

Table 2 Environmental condition

	Wind	Current	Irregular Waves	
			Hs	Tp
Magnitude	10 m/s	1.0 m/s	4.0 m	10.0s
Direction	205 deg	205 deg	205 deg	

불규칙파를 고려하였다. 외란의 크기는 Table 2와 같고, 선박의 좌현 25도 방향에서 모든 외란이 입사한다고 가정하였다.

외란의 크기와 입사각도는 선주의 요구에 따라 결정되며, 선박이 작업할 특정해역의 기상자료를 바탕으로 구하게 된다. 일반적으로 DP시스템을 설계할 때는 모든 외란이 한 방향으로 들어오는 경우가 선박에 미치는 하중이 가장 크다고 생각하여 DP 성능곡선을 작성하고, 해양조사선에 대한 이동연 등(2000)의 결과를 보면, 주어진 추진기용량으로 견딜 수 있는 최대 선수각은 25도로 나타났다. 따라서 모든 외란이 선수 25도방향에서 입사하는 경우를 택하여 DP시뮬레이션을 수행하였다.

선박의 위치는 원점(0,0)을 선수각은 0도를 유지하도록 명령하였으며, 추진기의 사용량과 원점에서 벗어난 위치오차와 선수각의 오차를 기준으로 제어성능을 평가하였다.

#### 4.2 LQR 과 LQI Controller Gain 결정

LQR에서 되먹임 개인을 얻기 위해 가중치 행렬  $Q_R$ 과  $R_R$ 을 가정해야 하는데, 본 논문에서는 예상되는 위치오차와 예상되는 추진기사용정도를 설계 변수로 택하여 가중치 행렬을 구하였다. 즉 위치오차를  $e_{QR} = [\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_\psi]^T$  만큼 허용한다고 가정하고, 추력은  $u_{QR} = [u_x, u_y, u_{xy}]^T$  만큼 사용한다고 가정하여 식(32)와 같이 가중치 행렬을 구하였다.

$$Q_R = \begin{bmatrix} \frac{1}{\epsilon_x^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\epsilon_y^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\epsilon_\psi^2} \end{bmatrix} \quad R_R = \begin{bmatrix} \frac{1}{u_x^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{u_y^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{u_{xy}^2} \end{bmatrix} \quad (32)$$

한편 LQI 제어기의 되먹임 개인을 얻기 위해

가중치 행렬  $Q_I$  과  $R_I$  을 가정해야 하는데, 본 논문에서는 예상되는 위치오차의 누적량과 예상되는 추진기사용정도를 설계변수로 택하였다. 즉 위치오차의 누적을 다음과 같이 허용한다고 가정하고,

$$\begin{aligned} e_{IQR} &= [e_{Ix}, e_{Iy}, e_{I\psi}]^T \\ &= [\int \epsilon_x dt, \int \epsilon_y dt, \int \epsilon_\psi dt]^T \quad (33) \end{aligned}$$

추력은  $u_{QR} = [u_x, u_y, u_{xy}]^T$  만큼 사용한다고 가정하여 가중치 행렬은 식(34)와 같이 구성하였다.

$$Q_I = \begin{bmatrix} \frac{1}{\epsilon_x^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\epsilon_y^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\epsilon_\psi^2} \end{bmatrix} \quad R_I = \begin{bmatrix} \frac{1}{u_x^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{u_y^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{u_{xy}^2} \end{bmatrix} \quad (34)$$

선수각이 0도에서 많이 벗어나면, 외란의 입사각이 커져서 외력의 크기가 갑자기 크게 되어 자세유지가 어려워진다. 따라서 선수각에 대한 누적오차를 위치오차에 누적보다 작게 하도록 하였고, 위치오차는 30초 동안 누적된다고 가정하고, 선수각의 오차는 20초동안 누적된다라고 가정하였다. 누적되는 시간을 같다고 가정한 경우에는 선수각이 0도를 벗어난 상태로 있게 되는 시간이 길어서 외란이 커지고 자기위치를 유지할 수 없게 되었다.

위치오차와 누적위치오차를 Table 3과 같이 변환시키면서 가중행렬  $Q_R$ 과  $Q_I$  을 구하였고, 추력에 대한 가중치 행렬  $R_R$  과  $R_I$  은 여러번의 시뮬레이션 결과에서 얻은 추력사용정도과 터널형 쓰러스터의 최대용량을 고려하여 다음과 같이 가정하였다.

$$R_R = R_I = \begin{bmatrix} \frac{1}{u_x^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{u_y^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{u_{xy}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{20^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{20^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{600^2} \end{bmatrix} \quad (35)$$

최적의 되먹임개인을 얻기 위해서는 다양한 가중치 행렬에 대하여 시뮬레이션을 수행해야 하는데,  $Q_I$ 와  $R_I$ 를 같은 배수로 크게 하면 똑같은 제

Table 3 Case for LQR &amp; LQI controller

LQR Case	$\varepsilon_x$ [m]	$\varepsilon_y$ [m]	$\varepsilon_{\psi}$ [rad]	Thrust Weighting
1	1	1	0.005	common $u_x=20\text{kN}$ $u_y=20\text{kN}$ $u_{xy}=600\text{kNm}$
2	2	2	0.01	
3	3	3	0.015	
4	4	4	0.02	
5	5	5	0.025	
6	6	6	0.03	
7	7	7	0.035	
8	8	8	0.04	
LQI Case	$\int \varepsilon_x dt$ [mrs]	$\int \varepsilon_y dt$ [mrs]	$\int \varepsilon_{\psi} dt$ [radrs]	Thrust Weighting
1	1 · 30	1 · 30	0.005 · 20	common $u_x=20\text{kN}$ $u_y=20\text{kN}$ $u_{xy}=600\text{kNm}$
2	2 · 30	2 · 30	0.01 · 20	
3	3 · 30	3 · 30	0.015 · 20	
4	4 · 30	4 · 30	0.02 · 20	
5	5 · 30	5 · 30	0.025 · 20	
6	6 · 30	6 · 30	0.03 · 20	
7	7 · 30	7 · 30	0.035 · 20	
8	8 · 30	8 · 30	0.04 · 20	

어게인이 얹어진다. 즉, 추력에 대한 가중치 행렬을 2배로 키우면, 위치오차에 대한 가중치 행렬을 2배로 키운 경우와 똑같은 제어개인을 얻게 되므로 R는 고정하고 Q만을 변화시키면서 계산을 수행하였다.

Fig.3에 나타낸 바와 같이 위치오차를 크게 허용할수록 (즉, Case No.가 클수록) x방향에 대한 P개인과 D개인이 감소하여 같은 오차에 대해서는 추력을 덜 사용하게 되며, 이러한 개인의 특성은 y방향과 선수각 방향에 대해서도 같은 경향을 나타낸다.

#### 4.3 되먹임 개인에 따른 제어성능

이러한 되먹임 개인을 이용하여 10분 동안 시뮬레이션 한 결과를 위치오차와 선수각의 오차를 비교하였고, 제어기의 성능을 평가하기 위해 4개의 추진기가 사용한 추력의 합을 시간평균하여 Fig. 4에 나타내었다.

위치오차를 크게 허용할수록 위치오차와 선수각 오차는 증가하고 있음을 알 수 있고, 추력의 사용량은 Case 4까지는 점점 감소하다가 그 이후에 다시 증가하였다. 위치허용오차를 너무 크게 가정

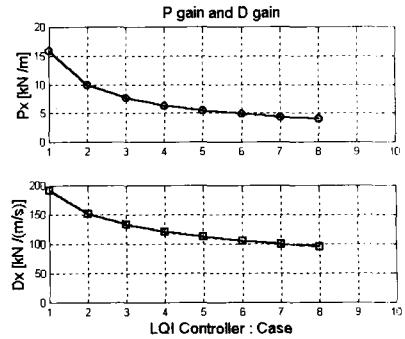


Fig. 3 Px gain and Dx gain of LQI

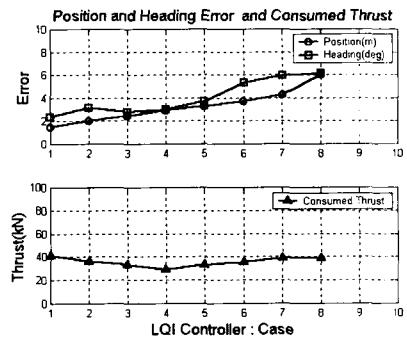


Fig. 4 Position and heading error and consumed thrust for LQI case

한 경우에는 제어개인이 감소하여 위치오차가 작을 때는 작은 추력만으로 자세유지가 가능하지만 지속적으로 위치오차가 커지게 되어 결국에는 더 많은 추력이 필요함을 알 수 있다. 본 연구의 계산 범위 안에서는 Case 4가 최소추력을 사용하는 경우로 판단할 수 있다.

Case 4에 해당하는 LQR 되먹임 개인과 LQI의 되먹임 개인은 식(35)과 식(36)과 같으며, PD 성분은 비슷한 값을 유지하고, K에 I 성분이 추가되었음을 알 수 있다.

$$K_R = \begin{bmatrix} 107 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 112 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.35E5 & 3.00E4 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$K_I = \begin{bmatrix} 121 & 6.3 & 0 & 0 & 0 & 0.17 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 135 & 6.7 & 0 & 0 & 0.17 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0E5 & 1.8E4 & 0 & 1,500 \end{bmatrix} \quad (36)$$

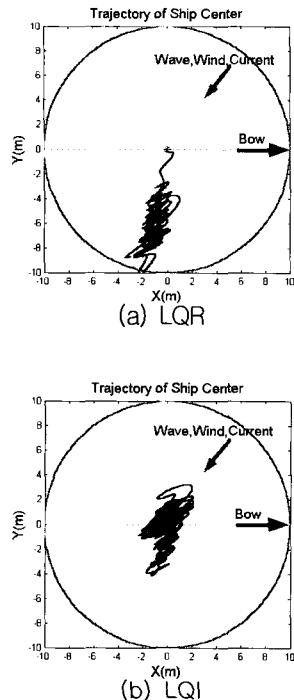


Fig. 5 Trajectory of ship center

이러한 되먹임 계인을 이용한 계산결과 중에서 선박중심의 궤적을 Fig. 5에 나타내었다. LQR의 경우에는 외력에 의해  $-Y$ 방향으로 선박이 밀려가서 ( $-1.0\text{m}$ ,  $-6.3\text{m}$ )만큼 지속적인 오차를 갖고 있으며, LQI는 누적오차가 제거되어 원점에서 자세유지를 하고 있음을 알 수 있다.

이 때 4개의 추진기가 사용한 추력은 큰 차이가 없었으며, 추진기의 최대용량을 초과하지 않으면서 누적오차를 효과적으로 제거할 수 있는 LQI 제어이론이 DP시스템에서는 더욱 적합함을 확인하였다.

#### 4.4 Kalman Filter와 Pole의 위치

칼만 필터를 설계하기 위해서 시스템 잡음과 계측 잡음의 공분산을 적절한 방법으로 가정하여야 한다. DP 시스템의 경우에는 조류력, 풍력 그리고 평균표류력은 시간에 따라서 크게 변하지 않는 정적하중으로 취급할 수 있으므로 선형 파랑하중만을 시스템 잡음으로 가정하고, 이에 따른 선형 운동 성분을 계측 잡음으로 가정하여 공분산 행렬

을 구해 추정기를 설계하였다.

선형파랑하중과 선형운동성분의 표준편차를 식 (37)과 식(38)과 같이 가정하면 공분산 행렬은 식 (39)과 (40)와 같다.

$$\overrightarrow{\sigma(w)} = [\sigma_{wx}, \sigma_{wy}, \sigma_{wxy}]^T \quad (37)$$

$$\overrightarrow{\sigma(v)} = [\sigma_{vx}, \sigma_{vy}, \sigma_{vxy}]^T \quad (38)$$

$$Q_k = \begin{bmatrix} \sigma_{wx}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{wy}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{wxy}^2 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$R_k = \begin{bmatrix} \sigma_{vx}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{vy}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{vxy}^2 \end{bmatrix} \quad (40)$$

해상상태가 정해지고, 선수각이 크게 바뀌지 않으면 선박에 작용하는 선형 파랑하중의 표준편차는 크게 변하지 않으므로 시뮬레이션 과정에서 그 값을 구하여 시스템 잡음에 대한 공분산 행렬은 다음과 같이 가정하였다.

$$Q_k = \begin{bmatrix} \sigma_{wx}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{wy}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{wxy}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 300^2 & 0 & 0 \\ 0 & 300^2 & 0 \\ 0 & 0 & 3000^2 \end{bmatrix} \quad (41)$$

선형 운동성분의 표준편차를 Table 4와 같이 변화시키면서 계측잡음에 대한 공분산 행렬을 갖어하고, 그에 따른 칼만 필터의 Pole의 위치를 구하면 Fig. 6과 같다. 특징적인 Case 1, Case 5, Case 8의 경우만 나타내었고, 다른 경우는 계측 잡음의 크기에 따라 그 사이에 위치한다. 각각의 경우 6개의 Pole을 갖게 되며, 모든 Pole의 실수부는 음수임을 알 수 있고, Pole의 위치를  $a \pm bi$ 라고 할때 허수부의 크기를 기준으로 특성주기를 구하면 식(42)과 같으며, 모든 경우에 대한 추정기의 특성주기를 Fig. 7에 나타내었다.

$$T_{Estimator} = \frac{2\pi}{b} \quad (42)$$

Table 4 Case for kalman filter

Case	$\sigma_{vx}$ [m]	$\sigma_{vy}$ [m]	$\sigma_{v\psi}$ [rad]	System Noise
1	1.0	1.0	0.0333	common $\sigma_{wx} = 300\text{kN}$ $\sigma_{wy} = 300\text{kN}$ $\sigma_{wxy} = 300\text{kNm}$
2	2.0	2.0	0.0666	
3	3.0	3.0	0.10	
4	4.0	4.0	0.1333	
5	5.0	5.0	0.1666	
6	6.0	6.0	0.20	
7	7.0	7.0	0.2333	
8	8.0	8.0	0.2666	

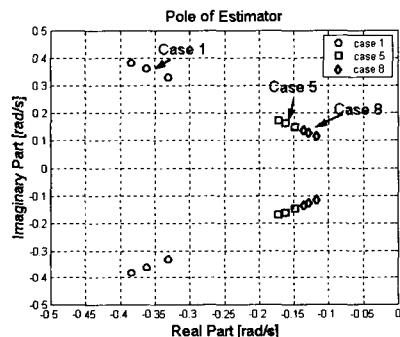


Fig. 6 Pole of kalman filter

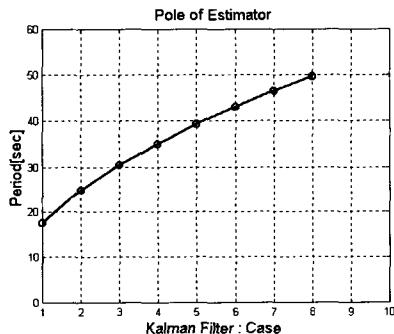


Fig. 7 Characteristic period of estimator

선형 운동성분의 표준편차를 크다고 가정할수록 (즉, 계측잡음의 공분산이 커질수록) 특성주기는

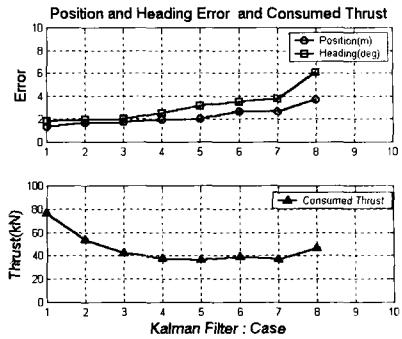


Fig. 8 Position and heading error and consumed thrust for kalman filer

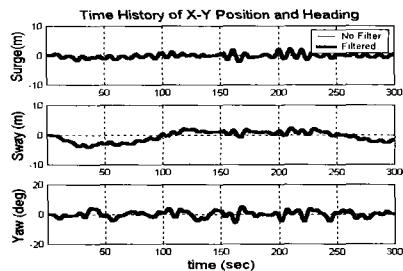
길어지고, 적절한 특성주기를 갖게 될 때 저주파수 운동을 가장 잘 추정하게 된다.

계측잡음의 공분산을 변화시키면서 시뮬레이션 결과를 정리하여 Fig. 8에 나타내었는데, 선형 운동성분의 표준편차가 크다고 가정할수록 위치 오차가 크게 발생하였으며, 4개의 추진기가 사용한 추력의 총합은 점점 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 특성주기가 짧은 경우 (즉, 특성주기가 선박의 임사파의 주기에 가까운 경우)에는 선형 운동성분까지 포함하여 제어하게 되므로 위치오차는 작지만, 추력을 많이 사용하게 되고, 특성주기가 40초인 Case5는 선박의 운동에서 선형 운동성분을 제거한 저주파수 운동에 대해 서만 대응력을 발생하므로 적은 추력으로 자세유지가 가능하였다. 또한 추진기의 작동이 파주기에 해당하는 성분은 거의 없어져, 저주파수로만 작동하게 됨으로 추진기의 피로현상을 방지할수 있다.

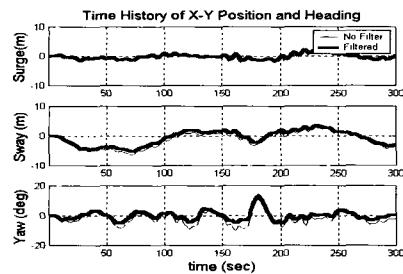
한편 특성주기가 긴 경우에는 저주파수 운동을 제대로 추정하지 못하여 지속적인 오차가 발생하고, 많은 추력이 필요함을 알 수 있다.

#### 4.5 추정기 특성주기와 추정능력

추정기의 특성주기에 따른 저주파수 운동의 추정능력을 비교하기 위하여 Case1 과 Case5의 계산결과를 Fig. 9에서 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 9와 Fig. 10에서 굵은 선은 추정된 선박의 위치와 속도이고, 가는 점선은 추정하기 전의 선박의 위치와 속도를 의미한다.

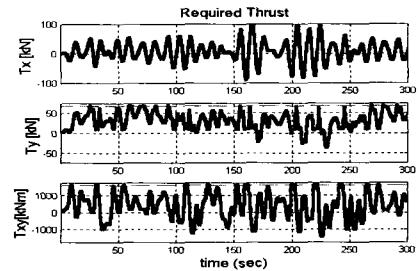


(a) Kalman Filter : Case 1

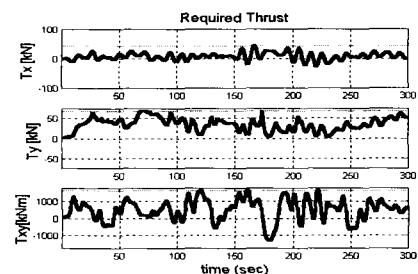


(b) Kalman Filter : Case 5

Fig. 9 Position and heading

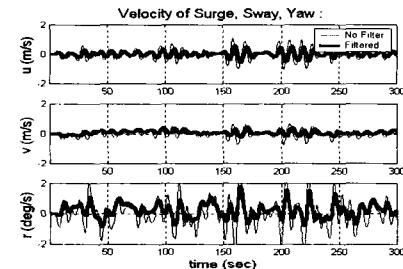


(a) Kalman Filter : Case 1

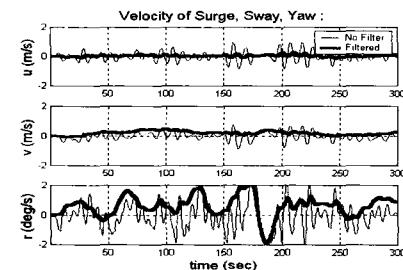


(b) Kalman Filter : Case 5

Fig. 11 Required thrust

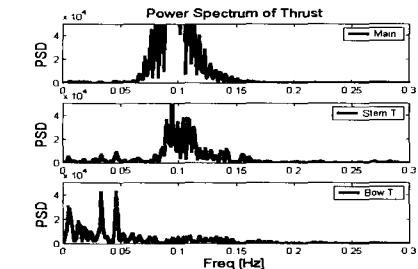


(a) Kalman Filter : Case 1

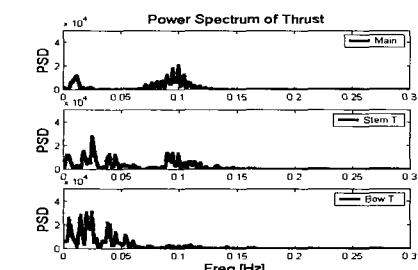


(b) Kalman Filter : Case 5

Fig. 10 Velocity of ship



(a) Kalman Filter : Case 1



(b) Kalman Filter : Case 5

Fig. 12 Power spectrum of thrust

Fig. 9(a)에서 Case1인 경우는 추정된 위치와 원래의 위치가 큰 차이가 없으며, Case5인 경우에는 입사파 주기에 해당하는 위치신호가 제거되고, 저주파수 운동만을 나타내고 있음을 Fig. 9(b)를 통해 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 10에 나타낸 속도성분에 대한 추정결과를 보면 더욱 분명히 알 수 있다.

추력을 비교한 Fig. 11을 보면, (a)는 입사파주기로 추진기가 작동하고 있는 반면에 (b)는 입사파주기에 반응하는 성분은 적고, 저주파수로만 작동하고 있다. 이러한 경향은 Fig. 12에 나타낸 추력의 스펙트럼을 보면 더욱 명확하다. 추정기의 특성주기가 짧은 Case 1은 주로 입사파의 주기로 응답하고 있으며, 특성주기가 40초인 Case5는 저주파수로 주로 작동한다. 즉 Case 1의 경우에는 회전수의 잡은 변화로 인해 추진기의 피로현상이 발생할 가능성이 높으며, Case 5는 추진기 피로현상을 방지할 수 있다. 따라서 추정기의 특성주기가 짧은 경우에는 입사파 주기에 가까워져 입사파 주기에 해당하는 선형운동성분을 효과적으로 제거하지 못하고 있으며, 특성주기가 40초일 때 저주파수 운동에만 주로 반응하면서 가장 적은 추력을 사용하고 있으므로 가장 좋은 추정능력을 갖고 있다고 할 수 있다.

## 5. 결론

자기위치 유지시스템의 제어기 설계에 필요한 적절한 설계변수를 제시하였고, 해양조사선에 적용하여 설계변수에 따른 되먹임 개인의 영향과 제어능력 그리고 칼만 필터를 이용한 추정능력을 비교하였다.

LQR제어와 LQI제어이론은 각각 PD제어와 PID제어이론과 동일한 형태의 되먹임 개인을 이용하고 있으며, 누적 오차를 효과적으로 제거할 수 있는 LQI가 LQR보다 DP시스템에 더욱 적합한 제어이론임을 확인하였고, 위치오차의 허용정도와 추진기 사용정도를 바탕으로 가중치 행렬을 변화시키면서 되먹임 개인을 구하는 것이 가장 효과적이었다.

선형 파랑하중을 시스템 잡음으로 선형 운동성

분을 계측 잡음으로 가정하여 칼만 필터를 설계하였고, 추정기의 특성주기가 40초인 경우, 입사파 주기의 운동성분을 잘 제거한 저주파수 운동성분을 잘 추정하였으며, 추진기의 피로현상을 방지하면서 원하는 위치를 유지할 수 있는 성능을 만족하였다.

## 참 고 문 헌

- 김기훈, 최항순, 흥섭, 2000, “심해자원 개발 용 버퍼의 동적위치 제어기법”, 대한조선학회 2000년 추계학술대회논문집, pp. 235~238.
- 박찬욱, 허보현, 송준태, 1994, “반잠수 쌍동선의 최적운동제어기 설계”, 대한조선학회 논문집, Vol. 31, No. 2, pp. 65~77
- 서상현, 송용규, 1994, “Auto-Pilot 시스템에 적용되는 제어 알고리듬에 대하여”, 대한조선학회 논문집, Vol. 31, No. 2, pp. 38~44
- 이동연, 하문근, 2001, “드릴쉽에 대한 DPS 모형시험 기법개발”, 대한조선학회 논문집, Vol. 38, No. 2, pp. 33~43.
- 이동연, 한용운, 하문근, 2000, “해양조사선의 풍하중 계측실험과 DPS 설계의 적용”, 대한조선학회 2000년 추계학술대회논문집, pp. 88~91.
- 이상무, 이판목, 흥사영, 1989, “자기동조 제어기를 이용한 위치확보 시스템에 관한 연구”, 대한조선학회지, 제26권, 2호, pp. 32~40.
- Fossen, T.I. 1994, Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley & Sons.
- Lee, D.Y., Ha, M.K. and Kim, H.J., 1999, "Development of Dynamic Positioning Simulation Program", 日本關西造船協會紙, Vol. 231, pp. 65~73.
- Morgan, M.J., 1978, Dynamic Positioning Offshore Vessels, The Petroleum Publishing Co.
- OCIMF, 1994, Prediction of Wind and Current Loads on VLCC, OCMF(Oil Companies International Marine Forum).
- Zou, J. and Kim, C.H., 1996, A 3-D

Quadratic Boundary Element Method for  
Computing Wave Force, Final Report,  
Samsung-Texas A&M Univ. Joint Project.



< 이 동 연 >



< 하 문 근 >