

## 선박운동제어를 위한 제어력분배 및 제어기설계에 관한 연구

지상원\* · 김영복\*

\*부경대학교 공과대학 기계시스템공학과

### Control Allocation and Controller Design for Marine Vessel based on $H_\infty$ Control Approach

Sang-Won Ji\* and Young-Bok Kim\*

\*Department of Mechanical System Engineering, College of Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Dynamic positioning system DPS, Marine vessel 선박, Control allocation 제어력분배, Robust control 강인제어, Stability 안정성, Control performance 제어성능, Linear Matrix Inequality(LMI) 선형행렬부등식

**ABSTRACT:** In this paper, the authors propose a new approach to the control problem of marine vessels that are moored or controlled by actuators. The vessel control system is basically based on Dynamic Positioning System (DPS) technology. The main object of this paper is to obtain a more useful control design method for DPS. In this problem, the control allocation is a complication. For this problem, many results have been given and verified by other researchers using a two-step process, with the controller and control allocation design processes carried out individually. In this paper, the authors provide a more sophisticated design solution for this issue. The authors propose a new design method in which the controller design and control allocation problems are considered and solved simultaneously. In other words, the system stability, control performance, and allocation problem are unified by an LMI (linear matrix inequality) based on control theory. The usefulness of the proposed approach is verified by a simulation using a supply vessel model.

#### 1. 서 론

해상에서 고정되거나 이동하는 부유체(Floating units)는 목적에 따라 일정위치에서 정지된 상태를 유지해야 하는 경우가 있다. 일반선박은 접안을 위해 대기하거나 접안하여 안벽에 정박하는 경우가 여기에 해당된다. 또한 시추선과 이와 관련된 작업을 하는 특수목적의 해상설비 등은 해양자원을 채굴하기 위해 일정위치에 정지된 상태에서 장기간의 작업을 수행하기도 한다. 이와 관련된 특수목적의 작업선 중에는 Barge선이 있다. Barge선은 원양해역에서 보다 연안이나 항만에서 선박건조작업을 지원하거나 근거리 자재운반 등의 비교적 가벼운 임무를 수행한다. 필요에 따라서는 작업자들이 거주하는 해상공간으로 이용되기도 하나, 작업지원이 그 주된 사용목적이라 할 수 있다. Barge선은 일반적으로 자체 추진장치를 갖지 않고 터그보트 등에 이끌려 작업위치까지 이동한 후 계류용 윈치시스템 등으로 정해진 위치에 억제시킨다. 고정도 위치제어가 필요한 경우에는 사이드스트러트를 장착하기도 한다. 이것은 고정도 위치제어를 통해 특수한 목적을 달성하기 위한 경우에 도입된다. 그러나 작업수행을 위해 Barge선을 해상에서 일정위치에 유지하도록 하는 방법은 와이어나 로우프로 연결되는 앵커(Anchor)를 해저에 던져 고정시키는 것이 가장 보편적인 방법이다. 즉, 앵커링(Anchoring)으로 조류나 바람 등에 의해 해

상설비가 밀려 일정범위를 벗어나는 것을 방지하는 것이다. 앵커링으로 부유체를 해상에서 일정 위치에 고정시키는 것은 단지 Barge선에 한정되지 않는다. Rigs, FPSO 등 석유시추 및 시추 작업 지원을 위한 해상설비 등에는 기본적으로 무어링 윈치시스템이 도입된다. 또한 접안을 위해 대기중인 선박을 앵커링으로 묶어두는 것도 윈치제어를 통한 선박운동제어의 한 부분으로 볼 수 있다. 이와 같이 해상에서 일정위치를 유지하여 주어진 목적을 달성하기 위해서는 윈치 및 보조추진장치의 제어가 필수적인데, 이것은 DPS(Dynamic positioning system) 기술(Holzhtuter, 1997; Nomoto et al., 1957; Im et al., 2006; Jammazi, 2008; Fossen and Berge, 1997; Zhang et al., 1998)을 기반으로 한 것이나 이와 관련된 기초기술조차 확보하지 못한 것이 국내기술의 현실이다.

따라서 본 연구에서는 FPSO 및 Drill Ship 등의 운영에 필수기술인 DPS 기술개발을 위해 윈치 및 보조추진장치를 갖는 선박의 자세 및 위치제어기술을 개발하는 것이 그 목적이다. 즉, 4기 혹은 그 이상으로 이루어지는 액추에이터를 통해 수상운동체의 위치 및 자세를 제어하는 문제를 고려한다. 이와 관련하여서는 이미 Fossen 등이 뚜렷한 연구결과를 도출한 바 있다(Fossen, 2002; Sordalen 1997; Strand, 1999; Bodson, 2002). 그 주된 연구내용 중의 하나가 제어력분배(Control allocation) 문제이다. 이것은

제어기로부터 발생하는 제어신호와 실제 제어대상에 제어력을 전달하는 액추에이터간의 신호전달체계가 일치하지 않는 문제를 다루는 것이다. 간단히 설명하면 제어기에서 발생하는 제어신호와 액추에이터수가 다른 경우가 이에 해당한다. 예를 들어 세계의 제어신호를 4기의 액추에이터에 전달하기 위해서는 약간의 변환이 필요하게 되는데 이것이 제어력분배이다. Fossen 등(Fossen and Berge, 1997; Fossen, 2002)은 우선 제어기를 설계한 후 완전히 독립적으로 제어력을 분배하는 기법을 제안하고 있다. 즉, 제어력분배에 따른 페루프시스템의 안정성과 제어성능 등의 문제에 대해서는 전혀 고려하지 않고 있다. 본 논문에서는 Fossen 등(Fossen and Berge, 1997; Fossen, 2002)의 연구결과와는 달리, 제어력분배, 시스템안정성 및 제어성능 등을 동시에 고려하여 제어기를 설계하는 문제에 대해 고찰한다. 즉, 제어력분배를 포함한 제어기 설계문제를 대표적인 강인제어기법인  $H_\infty$  제어기 설계문제로 변환하여 제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통해 제안한 기법의 유효성을 검증한다.

## 2. 문제설정 및 시스템 표현

제어력분배(Control allocation)는 제어문제에서 입력과 출력 수가 다른 경우에 도입되는 기법 중의 하나이다. 제어이론적인 관점에서는 제어출력수가 제어입력수보다 적거나 같은 것이 바람직하다. 반대인 경우는 상당한 어려움이 따르는 것이 사실이다. 이러한 이론적인 관점에서 뿐만 아니라, 실제 제어대상에 대해 제어기를 설계하고 적용하는 경우에도 이와 같은 문제는 빈번히 발생하게 된다. 예를 들어 4기의 회전형 스러스터를 갖는 경우를 고려하자. 대상선박을 평면상에서 서지(Surge), 스웨이(Sway), 요우(Yaw)방향의 운동을 제어하는 것이 목적이라 가정한다. 이 경우 제어기로부터 발생하는 제어력은 3개이기 때문에 이것을 4기의 스러스터에 적절히 분배해야 하는 문제가 발생한다. 즉, 제어기로부터 발생된 제어신호로부터 스러스터를 얼마만큼 회전시키고 추진력을 발생시켜야 하는 것인가 하는 문제를 제어력분배라 한다. 물론 여기에는 몇 기의 스러스터를 어떻게 배치해야 하는 문제도 포함되어 있다.

제어력분배문제는 이미 Bodson(2002) 등 많은 연구자에 의해 이론적인 결과가 도출되어 있다. 특히 수상 및 수중운동체에 대해서는 Fossen 등(Fossen and Berge, 1997; Fossen, 2002)이 관련연구결과와 적용 및 확장된 연구결과를 보고하였다.

본 연구에서는 제어대상이 수상운동체인 만큼 Fossen 등(Fossen and Berge, 1997; Fossen, 2002)의 연구결과를 기본으로 하여 제어력분배문제에 대한 새로운 접근법과 제어기설계법을 제안한다.

Fossen 등(Fossen and Berge, 1997; Fossen, 2002)이 제안한 제어력분배기법은 다음과 같다. 먼저 일반적인 제어기설계법을 이용하여 제어기를 설계한다. 그리고 설계된 제어기는 고정시켜두고 제어신호를 적절히 분배한다. 즉, 2단계 과정을 완전히 독립적인 과정으로 보고 제어계설계를 완성하는 기법이다. 이렇다 보니 제어력분배 이전에 설계된 제어기가 제어력분배 이후에도 제어기 설계사양을 만족시킨다는 보장도 없고 시스템안정성도 보증되지 않는다.

본 논문에서는 제어기설계와 제어력분배문제를 하나의 일관된 과정을 거쳐 완성하는 제어계설계문제에 대해 고찰한다. 즉, 강인제어기법에 기초하여 제어력을 최적으로 분배하면서 안정성과 제어성능이 보장되도록 하는 새로운 기법을 제안한다.

본 논문에서의 제어대상은 4기의 고정된 액추에이터를 갖는 Fig. 1과 같은 수상선이다. 즉, 4기의 터그보트에 의해 예인되거나, 4기의 무어링윈치에 의해 계류되는 바지선 및 수상선이 그 제어대상이다.

먼저, Fig. 2에 제어력분배문제를 나타내고 있는데, Fig. 2에서  $\tau_c$ 는 제어기로부터 발생하는 제어신호이다. 이 신호는 선박의 서지, 스웨이 방향 힘 및 요우 모멘트를 발생시키는 제어력이다. 위에서 설명하였듯이 이것을 선박에 설치된 4기의 액추에이터(윈치 혹은 스러스터)에 전달하여 외란 등에 의해 운동하고 있는 선박의 3가지 운동을 억제하거나 제어해야 한다. 이를 위해 그림에서와 같이 제어력분배에 의해 각각의 액추에이터가 발생시켜야 할 힘 및 회전각도( $f_i, \alpha_i; i=1, \dots, 4$ )가 결정되게 된다. 앞서 기술하였듯이 Fossen 등(Fossen and Berge, 1997; Fossen, 2002)이 제안하고 있는 방법과는 달리 제어기 설계와 제어력분배문제를 동시에 다룰 수 있는 방법에 대해 고찰한다.

먼저 Fig. 2를 Fig. 3과 같이 액추에이터 다이내믹스를 설계문제에 직접 도입한다. 제어력분배문제에서 가장 기본적으로 일반적인 설계목표로 도입되는 것은 제어기로부터 발생하는 제어

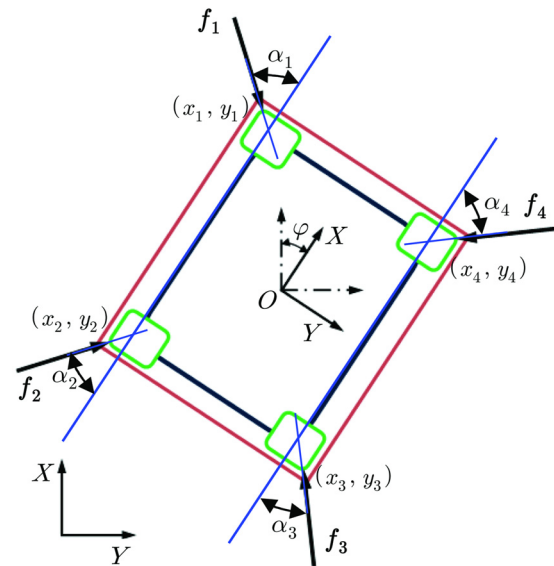


Fig. 1 Controlled system with four actuators

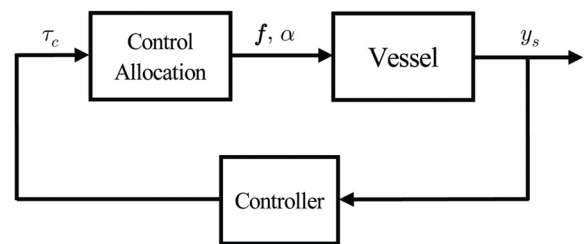


Fig. 2 Control allocation

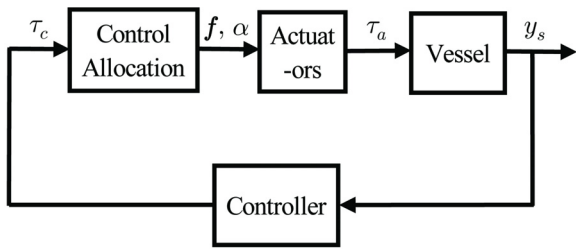


Fig. 3 Extended control allocation problem with actuators

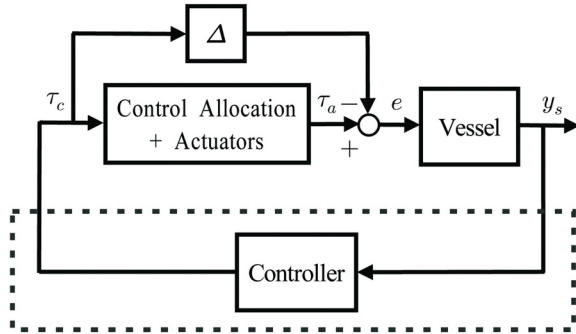


Fig. 4 Extended control allocation problem based on robust control approach

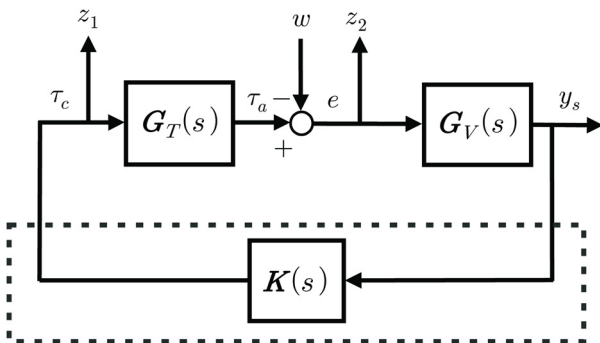
력  $\tau_c$ 와 액추에이터에서 만들어지는 제어력  $\tau_a$ 과의 오차가 가능한 작도록 하는 것이다. 즉,  $\|\tau_c - \tau_a(f_i, \alpha_i)\| < \gamma (> 0)$ 가 하나의 설계표가 될 수 있다.

이 문제를  $H_\infty$ 제어기 설계법에 기초하여 일차적으로 확장하면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있으며 이것을 일반적인 표현법으로 나타내면 Fig. 5와 같다. 이 표현에 따라 강인제어기법을 이용하여 제어력분배와 제어기설계문제를 동시에 해결하도록 한다.

즉, 외란  $w$ 에서  $z = [z_1^T, z_2^T]^T$ 까지의 전달함수  $T_{zw}(s)$ 가 다음 식 (1)의 조건을 만족하는 제어기를 설계하는 문제로 귀착시킬 수 있다.

$$\|T_{zw}(s)\|_\infty < 1 \quad (1)$$

Fig. 5에서 전달함수  $G_T(s)$ 는 제어력분배법칙에 이용되는 변수를 포함한 액추에이터를 나타내며,  $G_V(s)$ 는 제어대상인 선박의 전달함수를 나타낸다. 이것을 다음과 같이 상태방정식으로 각각

Fig. 5 Control system description based on  $H_\infty$  control theory

표현한다.

$$G_V(\text{Vessel}) : \begin{cases} \dot{x}_s = A_s x_s + B_s u_s \\ y_s = C_s x_s + D_s u_s \end{cases} \quad (2)$$

$$G_T(\text{Actuator}) : \begin{cases} \dot{x}_t = A_t x_t + B_t u_t \\ y_t = C_t x_t + D_t u_t \end{cases} \quad (3)$$

그리고,

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_c \\ \tau_a - w \end{bmatrix} \quad (4)$$

로 정의하면 선박 및 액추에이터 상태방정식 (2)와 (3)에서의 입력 및 출력벡터는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_t = \tau_c = z_1 \quad (5)$$

$$y_t = \tau_a$$

$$u_s = y_t - w$$

제어기설계를 위해서는 식 (2) 및 식 (3)에서 제어입력과 제어출력에 대한 정리가 필요하다. 이를 위해 먼저 제어기로부터 제어대상까지의 신호흐름을 살펴본다. 제어대상인 선박이 외란 등의 외력에 의해 운동을 하게 되면 운동상태에 따라 운동을 억제하기 위한 제어신호가 제어기로부터 계산된다. 이 제어신호는 선박에 설치된 액추에이터에 전달되고 액추에이터가 기동하여 선박이 바람직한 상태를 유지하도록 제어력이 선박에 직접 작용하게 된다. 제어기설계문제에서 이와 같은 신호의 흐름은 자연스럽게 이루어지는 것이 일반적이나, 본 논문에서 다루는 문제와 같이 자연스럽게 않은 경우도 있다. 이것은 중요 해당 벡터의 차원을 살펴보면 알 수 있는데, 선박을 표현하고 있는 상태방정식 (2)에서의 입력벡터는  $u_s \in R^3$ , 액추에이터를 나타내는 상태방정식 (3)에서 입력벡터는  $u_t \in R^4$ 이고 제어기에서 계산되는 제어력 벡터는  $\tau_c \in R^3$ 이다. 즉, 각 상관벡터(입력과 출력)간의 차원이 일치하지 않으므로 이를 조절하기 위한 변환이 필요하게 된다.

이러한 문제를 다루기 위해 우선 제어기로부터 계산된 제어신호  $\tau_c$ 와 액추에이터에 전달되는 입력  $u_t$ 간의 관계를 다음과 같이 정리한다.

$$\tau_c = B(\alpha) u_t \quad (6)$$

여기서

$$B(\alpha) = \begin{bmatrix} cs(\alpha_i) \\ sn(\alpha_i) \\ -x_i cs(\alpha_i) + y_i sn(\alpha_i) \end{bmatrix}, \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (7)$$

이며,  $cs(\alpha_i) = \cos(\alpha_i)$ ,  $sn(\alpha_i) = \sin(\alpha_i)$ 를 각각 나타낸다. 여기서 액추에이터 수는 4기라고 가정하고 있다.

식 (6) 및 식 (7)에서  $B(\alpha)$ 가 일반적으로 정칙이 아니므로 Pseudo-Inverse기법(Strand, 1999)을 이용하면 식 (6)을 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$u_t = B^* \tau_c \quad (8)$$

여기서 식 (8)을 만족하는 것으로 다음 식 (9)의 행렬이 하나의 해가 되며, 이것을 이용하면 제어신호와 액추에이터간의 차원문제는 해결된다.

$$B^* = B(\alpha)^T \{B(\alpha)B(\alpha)^T\}^{-1} \quad (9)$$

여기서 주의할 것은  $\{B(\alpha)B(\alpha)^T\}$ 가 정칙(Nonsingular)이어야 하므로 일반적으로 각도  $\alpha$ 에 대한 제약조건이 주어진다.

다음은 액추에이터와 실제 제어대상인 선박과의 문제이다. 제어대상을 표현한 식 (2)에서의 입력벡터는  $u_s \in R^3$ , 액추에이터를 나타내는 상태방정식 식 (3)에서 출력벡터는  $y_t \in R^4$ 이다. 이것은 4기의 액추에이터가 각각 독립적으로 4개의 제어력을 발생시키고, 이 힘이 선박에 작용하여 서지, 스웨이방향 힘과 요우 모멘트를 발생시키게 된다.

따라서, 식 (4)~(9)에 정의한 각각의 관계를 이용하여 상태방정식 (2)와 (3)을 다시 정리하도록 한다.

먼저 액추에이터를 나타내는 식 (3)에서 입력  $u_t$ 에 식 (8)을 대입하여 정리하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다. 단, 액추에이터는 1차계로 고려한다. ( $D_t=0$ )

$$\begin{cases} \dot{x}_t = A_t x_t + B_t B^* \tau_c \\ y_t = B(\alpha) C_t x_t \end{cases} \quad (10)$$

그리고 제어대상인 선박에 대한 상태방정식을 나타내는 식 (2)에서 입력신호로는 외란과 액추에이터로부터의 출력이 함께 들어오게 된다. 즉,  $u_s = y_t - w$ 이므로 이것을 식 (2)에 대입하면 식 (2)는 다음 식과 같이 구해지게 된다.

$$\begin{cases} \dot{x}_s = A_s x_s + B_s B(\alpha) C_t x_t - B_s w \\ y_s = C_s x_s + D_s B(\alpha) C_t x_t - D_s w \end{cases} \quad (11)$$

이것으로부터 입력과 출력간의 차원문제는 해결되었으므로 강인제어기법에 따라 주어진 설계사양을 만족하는 제어기를 설계하기 위해 식 (12)와 같이 일반화 플랜트를 구성한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_p \\ \dot{x}_s \\ \dot{x}_t \\ z_1 \\ z_2 \\ y_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_s & B_s B(\alpha) C_t & -B_s & 0 \\ 0 & 0 & A_t & 0 & B_t B^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & B(\alpha) C_t & -I & 0 \\ I & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_p \\ x_s \\ x_t \\ w \\ \tau_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

위 식을 간략하게 정리하면 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \\ u \end{bmatrix} \quad (13)$$

이때 상태변수  $x = [\eta^T, x_s^T, x_t^T]^T$ ,  $z = [z_1^T, z_2^T]^T$ ,  $y = y_o$

이다. 식 (12)의 표현을 참고하면, 식 (13)의 각 요소행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ 0 & A_s & B_s B(\alpha) C_t \\ 0 & 0 & A_t \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -B_s \\ 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_t B^* \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B(\alpha) C_t \end{bmatrix}, C_2 = [I \ 0 \ 0],$$

$$D_{11} = \begin{bmatrix} 0 \\ -I \end{bmatrix}, D_{12} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, D_{21} = D_{22} = 0$$

그리고 설계해야 할 제어기, 즉 Fig. 5에서  $K(s)$ 를 식 (15)와 같이 정의한다.

$$\begin{cases} \dot{x}_k = A_k x_k + B_k y_o \\ \tau_c = C_k x_k + D_k y_o \end{cases} \quad (15)$$

이것으로부터 Fig. 5에 나타난 전체 시스템표현이 완성되었다. 따라서 Fig. 5의 폐루프계가 안정하고 외란  $w$ 로부터 출력  $z$ 까지의 전달함수가  $\|T_{zw}(s)\|_\infty < 1$ 을 만족하는 식 (15)의 제어기가 존재하는 것은 다음 식 (16)~(18)의 행렬부등식을 만족하는 정정대칭행렬(Positive definite symmetric matrix)  $X, Y$ 가 존재하는 것과 동가이다. (Gahinet, 1994; Gahinet and Apkarian, 1994)

$$\begin{pmatrix} AX + XA^T + B_1 B_1^T - B_2 B_2^T & X C_1^T \\ C_1 X & -I \end{pmatrix} < 0 \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} YA + A^T Y + C_1^T C_1 - C_2^T C_2 & Y B_1 \\ B_1^T Y & -I \end{pmatrix} < 0 \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} X & I \\ I & Y \end{pmatrix} > 0 \quad (18)$$

즉, 부등식 (16)~(18)의 해로부터 식 (15)의 제어기의 각 요소 행렬은 다음과 같이 계산된다.

$$A_k = A + B_2 C_k - B_k C_2 + Y^{-1} C_1^T C_1 - Y^{-1} Q (I - XY)^{-1} \quad (19)$$

$$B_k = Y^{-1} C_2^T, C_k = B_2^T Y (I - XY)^{-1}$$

이때 위 식에서 행렬  $Q$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$Q = YA + A^T Y + Y B_1 B_1^T Y + C_1^T C_1 - C_2^T C_2 < 0 \quad (20)$$

위의 계산과정이 다소 복잡하게 기술되었으나, MatLab LMI Toolbox(Gahinet et al., 1995)에서 설계자가 설정한 조건을 입력하고 명령어 `Hinfric`를 실행시키는 것만으로 식 (15)의 제어기가 간단히 구해진다. 시뮬레이션결과도 이러한 과정을 통해 구해진 제어기로부터 제어성능 등을 평가하게 된다.

### 3. 시뮬레이션

여기서는 선박모델(Fossen, 2002)에 4기의 액추에이터를 설치한 경우를 대상으로 본 논문에서 제안하는 제어기설계법에 따라 제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통해 제안하는 제어기 설계법의 유효성을 평가하도록 한다. Fossen and Berge(1997)와 Fossen(2002)이 이용한 모델을 이용하고 있으나, 티그보트나 윈치에 의해 제어되는 경우를 고려하여 모든 액추에이터는 단 방향의 힘(본 논문에서는 Pushing force 만 발생함)만 발생시킨다.

먼저, 선박과 액추에이터를 나타낸 식 (2)와 식 (3)에서 각각의 행렬은 식 (21) 및 식 (22)와 같다.

$$A_s = \begin{bmatrix} -0.2105 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1729 & -0.0206 \\ 0 & -0.1235 & -1.0351 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$B_s = \begin{bmatrix} 0.0526 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0288 & 0.0206 \\ 0 & 0.0206 & 1.0351 \end{bmatrix}$$

$$C_s = [I]$$

$$D_s = [0]$$

$$A_t = \text{diag}[-2.5, -2.5, -2.5, -2.5] \quad (22)$$

$$B_t = [I]$$

$$C_t = [I] \times 1.5$$

$$D_t = [0]$$

여기서, 선박에 설치되는 각 액추에이터의 위치는 아래 식

(23)과 같다. 그리고 액추에이터로부터 만들어지는 제어력이 선체에 작용하는 각도  $\alpha_i (i=1, \dots, 4)$ 는 일정하다고 가정한다. 이 가정은 터그보트에 의해 예인되거나 로우프에 의해 선박이 계류되는 경우를 고려한 것이다.

$$\begin{aligned} (x_1, y_1) &= (0.5, -0.2), & (x_2, y_2) &= (-0.5, -0.2) \\ (x_3, y_3) &= (-0.5, 0.2), & (x_4, y_4) &= (0.5, 0.2) \end{aligned} \quad (23)$$

이것으로부터 설계조건을 만족하고 Fig. 5의 페루프계가 안정하도록 하는 식 (15)의 제어기를 Matlab을 이용하여 구하였으며, 제어기를 구성하는 각 행렬은 다음과 같다.

$$A_k = \begin{bmatrix} A_{k1} & A_{k2} \\ A_{k3} & A_{k4} \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad (24)$$

$$A_{k1} = \begin{bmatrix} -0.0025 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0049 & 0 & 0.0038 & -0.0035 \\ 0 & 0 & 0.0268 & 0 & 0 \\ 0 & -0.3319 & 0 & 2.2729 & -2.1745 \\ 0 & -0.3362 & -0.0001 & 2.2941 & -2.1931 \end{bmatrix},$$

$$A_{k2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0009 & 0 & 0 & 0 & 0.0001 \\ 0 & 0 & -0.0001 & -0.0007 & 0 \\ -0.5643 & 0.0019 & 0.0247 & 0 & 0.0006 \\ -0.5683 & 0.0019 & 0.0249 & 0 & 0.0005 \end{bmatrix},$$

$$A_{k3} = \begin{bmatrix} 0 & -0.1041 & 0.0012 & 0.7103 & -0.6781 \\ 0 & 0.0055 & -0.0001 & -0.0062 & 0.0059 \\ 0 & 0.0126 & 0.0162 & -0.0862 & 0.0823 \\ 0 & -0.0001 & 2.1789 & 0.0004 & -0.0001 \\ 0 & -2.1850 & 0 & -0.1554 & 0.1455 \end{bmatrix},$$

$$A_{k4} = \begin{bmatrix} -0.1794 & 0.0006 & 0.0077 & 0 & 0.0002 \\ 0.0015 & -0.0034 & -0.0001 & 0 & -0.0001 \\ 0.0213 & -0.0001 & -0.0044 & -0.0002 & 0 \\ -0.0020 & 0 & -0.0089 & -0.0488 & 0 \\ 0.0379 & 0.0038 & -0.0017 & 0 & -0.0216 \end{bmatrix}$$

$$B_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0029 & -0.0024 \\ -0.0138 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0339 & -1.6450 \\ 0 & -0.0335 & -1.6597 \\ -0.0006 & -0.0104 & -0.5139 \\ 0 & -0.0022 & 0.0047 \\ -0.0083 & 0.0013 & 0.0623 \\ -1.1133 & 0 & -0.0003 \\ 0 & 1.1137 & -0.0225 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad (25)$$

$$C_k = [C_{k1} \quad C_{k2}] \times 10^{-3} \quad (26)$$

$$C_{k1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2712 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0031 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0001 & -1.1794 \end{bmatrix},$$

$$C_{k2} = \begin{bmatrix} -1.9732 & 0.0369 & -9.0399 & 1.8496 & 0.0001 \\ -0.0036 & -9.3568 & -0.0374 & 0 & -1.8016 \\ 7.3549 & 0.0002 & -2.4991 & 0.0143 & 0.0356 \end{bmatrix},$$

$$D_k = [0] \quad (27)$$

시뮬레이션 결과를 Fig. 6~Fig. 10에 나타내었다. 시뮬레이션 조건은 선박이 원래 정지위치로부터 이탈해 있다고 가정하고 원래의 위치로 되돌리는 문제를 고려한다. 즉, 위치좌표  $(x, y, \psi)$ 가 정지위치  $(0, 0, 0)$ 에서  $(0.5, -0.5, 0.2)$ 로 이동한 상태에 있

다고 간주하고, 제어력의 작용으로 원래의 위치  $(0, 0, 0)$ 로 복귀시키는 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 6은 설계된 제어기로부터의 계산된 제어신호  $\tau$ 를 나타낸다. Fig. 7은 제어기로부터 발생된 제어신호가 액추에이터에 전달되어 각각의 액추에이터가 만들어 내는 제어력을 나타낸다. 이것으로부터 선박의 서지, 스웨이 요우모우멘트를 억제하기 위한 제어력  $\tau_a$ 가 만들어지는데 이것을 나타낸 것이 Fig. 8이다.

Fig. 9는 초기값 응답(Initial response)을 나타낸 것으로, 위에 기술한 제어력의 작용으로 선박을 원래 위치로 신속하게 복귀시키고 있음을 알 수 있다. 이와는 달리 Fig. 10은 제어력이 작용하지 않는 경우의 시뮬레이션 결과이다. 본 시뮬레이션에서 이용한 액추에이터는 실험을 위해 파일럿 모델선박(Fossen, 2002)에 장착되는 것으로 최대 허용전류는 0.8[A], 최대 추진력은 0.7[N]이다. Fig. 6과 Fig. 7로부터 알 수 있듯이, 액추에이터 허용전류와 추진력에 대한 제약조건을 모두 만족시키고 있으며, 일정시간 경과 후 제어대상 선박을 원래위치로 오차없이 복귀시키고 있음을 확인할 수 있다.

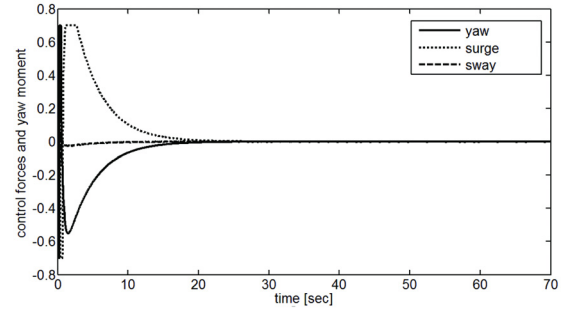


Fig. 6 Control signal from controller ( $\tau$ )

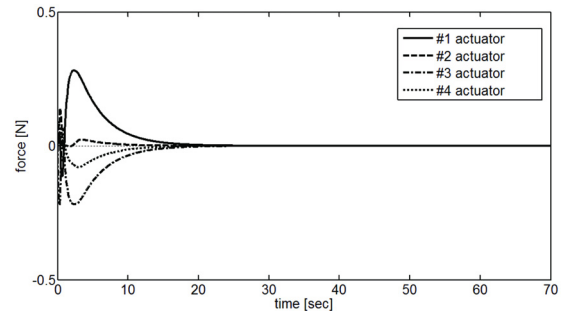


Fig. 7 Control force of each actuator

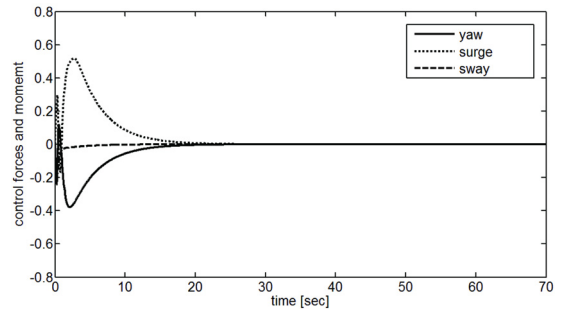


Fig. 8 Control signal from actuators ( $\tau_a$ )



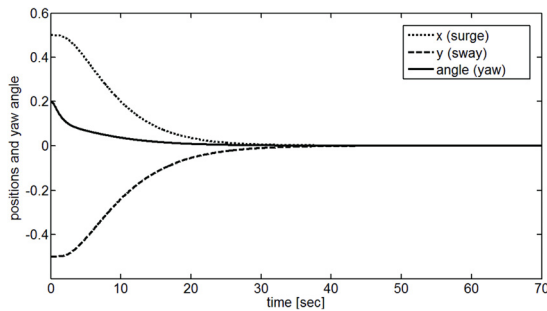


Fig. 9 Initial responses (controlled case)

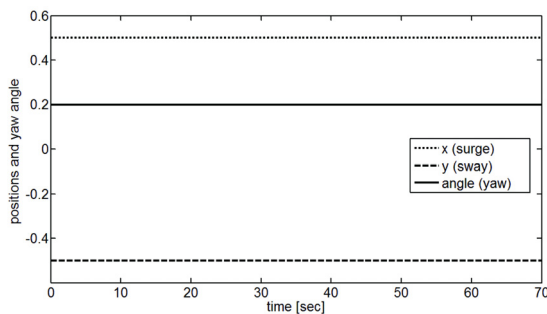


Fig. 10 Initial responses (uncontrolled case)

#### 4. 결 론

본 논문에서는 제어기로부터 계산된 제어신호를 액추에이터 및 제어대상으로 분배하는 제어력분배문제에 대해 고찰하였다. 제어력을 적절히 분배하기 위한 많은 연구결과가 이미 제안되어 있으나 그 대부분이 제어기를 먼저 설계하여 두고 이와는 별도로 독립적인 과정을 거쳐 제어력분배를 위한 전달행렬을 구하는 것이다. 기존의 연구결과가 다소 간단하다 할 수 있으나 제어기설계와 제어력분배를 별도로 다루다 보니 제어계의 안정성 및 제어 성능 등에 대한 해석과 평가가 수행되지 않는 문제가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 제어력분배문제를 강인제어기법으로 변환하여 다루는 방법을 제안하고 시스템 안정성 및 제어성능에 관한 조건 등을 동시에 만족시킬 수 있는 새로운 제어기설계법을 도출하였다. 즉, 그 해법으로 LMI 조건을 제시하고 이것을 만족하는 제어기를 설계하였고 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 유효성을 검증하였다.

#### 후 기

이 논문은 2011년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양플랜트 거주용 부선의 계류위치 제어시스템 개발)

#### 참 고 문 헌

Bodson, M. (2002). "Evaluation of Optimization Methods for

Control Allocation", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol 25, No 4, pp 703-711.

Fossen, T. I. and Berge, S. P. (1997). "Nonlinear Vectorial Backstepping Design for Global Exponential Tracking of Marine Vessels in The Presence of Actuator Dynamics," *Proc. of 36th Conference on Decision and Control*, pp 4237-4242.

Fossen, T.I. (2002). *Marine Control System Guidance, Navigation, Rigs and Underwater Vehicle*, Trondheim, Norway, Norwegian University of Science and Technology.

Gahinet, P. (1994). "Explicit Controller Formulas for LMI-based  $H_\infty$  Synthesis", *Proc. of American Control Conference*, pp 2396-2400.

Gahinet, P. and Apkarian, P. (1994). "A Linear Matrix Inequality approach to  $H_\infty$  control", *Int. Journal of Robust and Nonlinear Control*, pp 421-448.

Gahinet, P., Nemirovski, A., Laub, A. J. and Chilali, M. (1995). "LMI Control Toolbox", Math Works Inc.

Holzhtuter, T. (1997). "LQG Approach for The High Precision Track Control of Ships", *Proc. of IEE Control Theory Applications*, Vol 144, No 2, pp 121-127.

Im, K.H., Chwa, D. and Choi, J. Y. (2006). "Multi Input Multi Output Nonlinear Autopilot Design for Ship to Ship Missiles", *International Journal of Control, Automation, and System*, Vol 4, No 2, pp 255-270.

Jammazi, C. (2008). "Backstepping and Partial Asymptotic Stabilization: Application to Partial Attitude Control", *International Journal of Control, Automation, and System*, Vol 6, No 6, pp 859-872.

Nomoto, K.T., Taguchi, K.H. and Hirano, S. (1957). "On The Steering Qualities of Ships", *Technical report, Int. Shipbuilding Progress*, pp 3554-370.

Sordalen, O.J. (1997). "Optimal Thrust Allocation for Marine Vessels", *Control Engineering Practice*, Vol 5, No 9, pp 1223-1231.

Strand, J.P. (1999). "Nonlinear Position Control System Design for Marine Vessels", Ph.D. Thesis, Dept of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology.

Zhang, R.C., Sun, Z., Sun, F. and Xu, H. (1998). "Path Control of a Surface Ship in Restricted Waters Using Sliding Mode", *Proc. of 37th IEEE Conference on Decision and Control*, pp 4237-4244.

2012년 3월 7일 원고 접수

2012년 5월 24일 심사 완료

2012년 6월 21일 게재 확정