

무어링 윈치 제어시스템 설계에 관한 연구 A Study on Control System Design for Ship Mooring Winch System

강창남* · 정지현** · 김영복****

Chang-Nam Kang*, Ji-Hyun Jeong** and Young-Bok Kim****

(접수일 : 2013년 3월 15일, 수정일 : 2013년 4월 10일, 채택확정 : 2013년 4월 11일)

Abstract: In this paper, the authors consider control system design problem of barge type surface vessel. It is based on the Dynamic Positioning System(DPS) design problem. The main role of barge ship is to carry and supply the materials to the floating units and other places. To carry out this job, it should be positioned in the specified area. Even though sometimes the thrust systems are installed on it, in general the mooring winch system with the rope is used. It may be difficult to compare the control performances of two types. But, if we consider this problem in point of usefulness, we can easily find out that the winch control system is more useful and applicable to the real field than the thrust control system except a special use. Therefore, in this paper we consider a single type mooring winch system and control system design problem in which accurate position control is needed. Because this result can be extended to the general type mooring system in which a number of winch are installed. At first, a mathematical model of winch is obtained and evaluated to verify the usefulness for control system design by experiment. Also, the disturbance model is extracted from experiment data to evaluate the strength of the uncertainty. Based on this results, the robust control system is designed and control performance is evaluated by simulation.

Key Words : Barge Type Surface Vessel, Dynamic Positioning System(DPS), Mooring Winch, Mathematical Model, Robust Control

1. 서 론

해상에서 고정되거나 이동하는 부유체(Floating Units)는 목적에 따라 일정위치에 정지된 상태를 유지해야 하는 경우가 있다. 일반선박은 접안을 위해 내항에 대기하거나 접안하여 안벽에 정박하

는 경우가 여기에 해당된다. 또한 시추선과 이와 관련된 작업을 하는 특수목적의 해상설비 등은 해양자원을 채굴하기 위해 일정위치에 정지된 상태에서 장기간의 작업을 수행하기도 한다. 이러한 수상구조물 및 운동체 등으로 Rigs, FPSO, 드릴쉽(Drill-Ship) 및 Barge선 등이 있다. 이동을 위해서

**** 김영복(교신저자) : 부경대학교 기계시스템공학과

E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197

*강창남 : 제주대학교 기계공학전공

**정지현 : 제주대학교 기계공학전공

**** Young-Bok Kim(corresponding author) : Department of

Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197

*Chang-Nam Kang : Major of Mechanical Jeju National University.

**Ji-Hyun Jeong : Major of Mechanical Engineering, Jeju National University.

는 자체 추진장치를 이용하거나 예인선으로 예인하는 수동적인 방법을 이용하기도 한다. 단, 자원을 채굴하기 위해서나, 지원작업을 수행하기 위해서는 장기간 동안 지정된 위치에 정지해 있어야 하는데, FPSO, 드릴쉽 등과 같이, 경우에 따라서는 정지위치 오차범위가 수 m 이내로 제한되기도 한다. 고정도 위치제어가 필요한 경우를 포함한 대부분의 경우, 위치제어를 위한 기본적인 시스템으로 사이드스러스터 외 무어링 윈치시스템을 도입하고 있다. 무어링 윈치시스템은 적절한 수의 윈치를 수상구조물 및 운동체에 설치하고, 윈치조작으로 로우프의 장력을 제어함으로써 수상 부유체의 자세 및 위치를 제어하는 방법이다. 이와 관련한 많은 연구가 수행되어 왔으나 국내 연구자에 의해 수행된 연구는 그 대부분이 기초연구와 관련된 것들이다. 즉, 윈치설계에 대한 기구학적, 역학적인 분야가 대부분이다.¹⁻⁹⁾ 윈치제어시스템을 통한 수상구조물 및 운동체의 동적 운동제어 분야는 거의 해외 연구자에 의해 연구결과가 대부분이다.^{10,11)} 이러한 현실을 인식하고 새로운 윈치기술을 확보하기 위한 노력이 절실히 필요하다. 따라서 본 논문에서는 무어링윈치 제어시스템을 구축하여 선박용 무어링시스템개발을 위한 기초연구를 수행하고자 한다.

이와 같은 무어링시스템의 구축에는 선박운동을 제어하기 이전에 윈치를 적절하게 제어하기 위한 윈치제어시스템구축이 선행되어야 한다. 그래서 본 논문에서는 무어링윈치시스템이 운영되고 있는 다양한 수상구조물 및 운동체 중, Barge선의 위치제어시스템 구축문제에 대해 고찰한다. 이를 위해 우선 계류되는 선박의 운동특성을 포함한 무어링 윈치시스템의 동적특성을 분석하고 모델링을 수행한다. 구해진 모델에 대해 무어링 윈치시스템을 제어하기 위한 제어계를 설계하고 시뮬레이션을 통해 제안한 기법과 설계된 제어계의 유효성을 검증한다.

2. 시스템표현

Barge선은 일반선박이 해상에서 일정속도로 운

동하는 것과는 달리 추진장치를 갖는 선박(예인선 등)에 의해 저속으로 이끌려 운동하거나 정지해 있는 수상구조물이다. Barge선을 해상에서 일정위치에 계류시키기 위해서는 그 크기에 따라 4~16기 또는 그 이상의 윈치가 설치된다. Barge선은 일반 선박과는 달리 그 구조가 단순하여 운동특성을 분석하기가 용이한 부분도 있으나 여러개의 로우프에 의해 계류되는 경우, 운동특성 및 로우프부하를 추정하는 데는 상당한 어려움이 따른다. 그래서 본 논문에서는 Fig. 1과 같이 하나의 윈치로 구성되는 윈치제어시스템설계문제를 고려한다. 즉, Fig. 1은 선박이 1자유도 운동을 한다고 가정한 것이며, 그림에서와 같이 선박좌측은 로우프(와이어)에 의해 단순 고정되어 있고, 우측은 계류용 로우프를 감고 풀 수 있는 무어링윈치가 설치되어 있다고 가정한 것이다. 이럴 경우 Fig. 1은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, M_s 는 선박 질량, K_s, D_s 는 선박이 갖는 강성 및 점성계수, x 는 평형점으로부터 선박이 이동한 거리, f 는 윈치 등 외적요인에 의해 선박에 가해지는 힘, $m_i (i=1, \dots, m)$

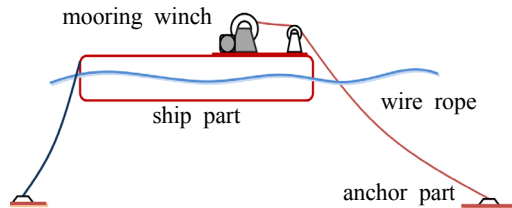


Fig. 1 Schematic of considered winch system

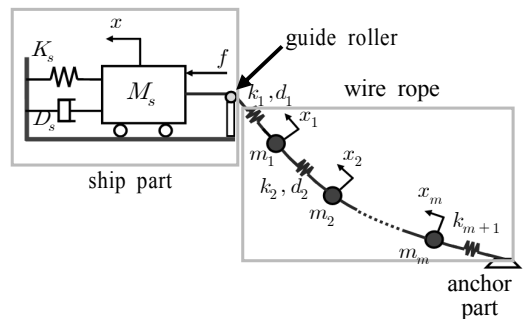


Fig. 2 A schematics of mooring system for dynamic analysis

는 로우프 질점질량, k_i, d_i ($i=1, \dots, m+1$)는 로우프 질점간 강성계수 및 각 질점의 점성계수, x_i ($i=1, \dots, m$)는 각 질점의 이동거리를 나타낸다.

이것으로부터 Fig. 2의 모델은 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 M_s \ddot{x} + D_s \dot{x} + K_s x + b_1 x_1 + k_1(x - x_1) &= f \\
 m_1 \ddot{x}_1 + d_1 \dot{x}_1 + k_1(x_2 - x_1) + k_2(x_2 - x_3) &= 0 \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 m_m \ddot{x}_m + d_m \dot{x}_m + k_m(x_m - x_{m-1}) + k_{m+1}x_m &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

특히 식 (1)에서 외력을 나타내는 $f = f_w + f_d$ 에서 f_w 는 윈치에서 발생하는 인장력, f_d 는 계류용 로우프를 윈치로 감고 푸는 과정에서 발생하는 장력의 가감성분 등 외란을 나타낸다. 단, 여기에는 단순히 윈치운동에 의해서 발생하는 장력변화만을 포함하고 있지는 않다. 즉, 조류변화 등의 외적요인에 의한 성분과, 로우프를 감고 풀 때 발생하는 로우프 자유운동에 따른 장력변화성분이 함께 포함되어 있다고 가정한다.

일반적으로 이러한 장력변화에 대한 주파수 특성, 힘의 크기 등은 알 수 있다 하더라도 그 패턴(자유도)을 예측하는 것은 다소 번거롭다. 즉, 로우프 길이뿐 만 아니라, 조류변화에 대한 정보 등도 주어져야 로우프에 의해 여기되는 다양한 동적특성을 분석하거나 해석할 수 있기 때문이다. 계류용 로우프의 운동특성을 해석하기 위한 다양한 연구결과가 보고되어 있으나¹⁻⁹⁾ 모델링방법이 너무 정적인 관점에서 다루어지고 복잡하여 제어계 설계를 위한 관점에서는 유용한 모델로 사용되지 못한다. 즉, 복잡한 모델은 고차의 제어를 도입해야 하는 부담이 따르기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 실험적인 방법으로 로우프의 운동특성을 분석하고 제어계설계를 위한 적절한 모델을 도출한다. 또한 도출된 모델을 기반으로 외란 특성도 분석하여 외란에 강인하게 대응할 수 있는 제어를 설계한다. 시뮬레이션 및 실험을 통해 제안된 기법의 타당성과 유효성을 검증한다.

3. 실험을 통한 시스템 모델링

3.1 모델링 전략 및 방법

기본적으로는 Fig. 1 및 식 (1)로 표현된 시스템을 제어대상으로 하고, 제어대상에 대한 모델링을 위해 Fig. 2와 같이 선박부(ship part)와 로우프부(ropes and wire part)로 각각 분리하여 모델링을 수행한다.

먼저 Fig. 1과 Fig. 2에서 로우프를 분리시켜 두고, 질량 M_s 를 갖는 선박에 외력을 가할 때의 응답으로부터 강성계수 및 댐핑상수 K_s, D_s 를 추정할 수 있다.(식 (1)의 첫 번째 방정식)

다음으로 로우프를 모델링하기 위해서는 선박부에서 로우프를 분리한 상태에서, 고정된 윈치로 로우프를 감고 푸는 동작으로부터 로우프의 동적특성(장력변화, 진동주기 등)을 분석한다. 즉, Fig. 3에 나타난 것과 같이 윈치로 로우프를 감고 푸는 조작에 따라 다양한 형태의 로우프운동이 발생하게 된다. 이때 로우프 양 끝이 윈치와 앵커에 고정되어 전체 로우프는 일정구간에 구속되어 있기 때문에 로우프 장력도 변하게 된다. 앞서 기술하였듯이 로우프 길이변화와 조류영향 등 물리특성 변화 및 환경변화에 대한 정보가 명확하게 주어지게 되면, 계산에 의해 동적특성을 분석하고 해석할 수 있다.

그러나, 실제 해상 환경조건을 실시간으로 계측하여 정보를 취득하기도 어려우며 심지어 윈치가 설치된 선박운동특성도 부하변동 등에 따라 명확하게 파악하기가 어렵다. 기존 연구에서는 로우프를 설계하는 관점에서 유한요소법(FEM)에 따라 로우프를 모델링하기도 한다.

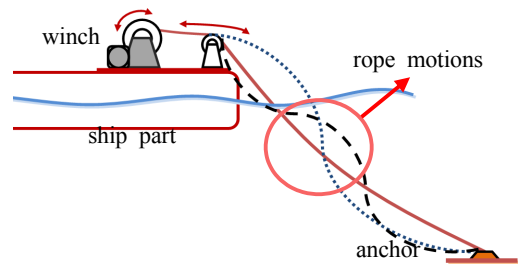


Fig. 3 Various rope motions due to winch operating

또한 제어계설계를 위한 관점에서, 로우프 각 질점간의 특성분석을 위해 로우프의 일정위치에 마크를 부착하고 윈치를 조작할 때 로우프 각 질점의 움직임을 카메라로 계측하는 방법으로 그 운동특성을 분석하기도 한다.¹¹⁾ 그러나 선박을 계류하기 위해 앵커에 연결되는 로우프 길이는 수백미터에서 수킬로미터에 이르기 때문에 이와 같은 단순한 방법으로 이론모델을 실증한다는 것이 사실상 어렵고 실용적인 관점에서도 유용한 방법이 아니다. 본 연구에서는 제어적 관점에서 계류용 로우프의 상세한 모델링보다 전반적인 운동특성을 분석하고, 그것을 기초로 설계한 제어계의 안정성 및 적절한 제어성능을 달성하도록 하는데 중점을 둔다. 즉, 실제상황을 고려하여 적절한 위치에 장력을 계측하기 위한 로드셀을 설치하고, 계단상 혹은 사인파형태로 로우프를 감고 풀 때 각 위치에서의 로우프 장력변화를 측정한다. 이 방법을 도입한 이유는 다음과 같다. 우선 로우프의 명확한 모델링이 현실적으로 어렵다고 가정한다. 특히 강인제어기법에서는 외란 등의 주파수 특성 및 외란의 크기를 파악하는 것이 가장 중요하다. 이러한 사실에 기초하면 명확한 모델보다 로우프에 대한 전반적인 동적특성을 파악하는 것이 보다 유용한 방법이라 할 수 있다.

3.2 실험장치 및 모델링을 위한 실험

3.2.1 실험장치

3.1절에 따라 Fig. 4와 같이 무어링 윈치시스템 독립모듈을 제작하였다.

윈치시스템이 선박에서 운용되는 환경을 모의하기 위해, 윈치 구동용 모터를 포함한 윈치부(winch part)는 슬라이딩 가이드(sliding guide)를 따라 고정 프레임(frame)과 미끄러지도록 설계하였다. 그리고 와이어 로우프가 나와 있는 반대편 윈치부는 고정 프레임과 스프링 및 댐퍼로 연결되어 있다. 이것은 Fig. 1에서 좌측에 표현한 고정용 와이어 로우프에 해당되며, Fig. 2에서 선박부(ship part)의 강성계수(K_s) 및 댐핑계수(D_s) 등을 반영하기 위한 것이다. 따라서 윈치드럼을 구동하여 와이어 로우프를 감으면 윈치부(Fig. 1~2에서의 선

박부에 해당)가 슬라이딩 가이드를 따라 전방으로 이동하게 되고, 반대로 와이어 로우프를 풀면 스프링 및 댐퍼에 의해 원래 위치로 복귀하게 된다.

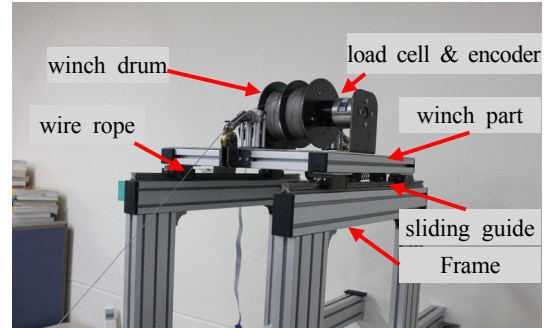


Fig. 4 Single type pilot model of mooring winch system

3.2.2 실험을 통한 모델링

Fig. 4의 실험장치를 이용하여 제어대상에 대한 모델링을 수행한다. 여기서 구해야 할 수학적 모델은 와이어 로우프 및 윈치드럼을 포함한 윈치부이다. 먼저 윈치드럼 및 장력변화에 따른 외란모델을 구한다. 먼저 윈치드럼이 올려져 있는 윈치부가 미끄러지지 않도록 프레임에 고정시키고, 와이어 로우프도 그 끝단을 2[m], 3[m] 거리 단위로 지면에 고정시켰다. 이때 와이어 로우프에는 70[g]의 중량체를 길이에 따라 1개 혹은 2개를 적당한 위치에 매달았다. 이것은 와이어 로우프가 갖는 질점질량에 따른 로우프 운동특성변화를 반영하기 위한 것이다. 이렇게 구성한 후, 적절한 초기장력을 설정하고 윈치드럼을 구동하여 점진적으로 장력을 증가시킨다. 이때 윈치모델과 외란모델을 구하는 과정과 그 방법을 Fig. 5 나타내었다. 윈치드럼 구동신호를 Fig. 5와 같이 스텝상으로 인가하고 그 때의 장력변화, 즉, 드럼에 전달되는 힘의 변화를 구한다. 이때 그 응답은 Fig. 5와 같이 진동적인 응답특성을 나타내게 된다. 여기에는 정적특성과 동적특성(진동적 특성)이 혼재되어 나타난다. 이때 동적인 특성은 윈치드럼구동에 의해 와이어 로우프가 갖는 질점질량 등의 영향으로 흔들리게 됨으로써 발생하는 장력변화이다. 따라서 Fig. 5에

나타낸 응답으로부터 정적특성과 동적특성을 분리하고, 정적특성은 윈치드럼 모델로, 동적특성은 외란모델로 각각 선정하였다. 이러한 방법을 통해 구한 응답을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6은 윈치구동용 모터에 스텝상의 입력신호(전류)를 단계적으로 가했을 때 드럼축에 설치된 로드셀로 계측한 부하변동값을 나타낸 것이다. 즉, 로우프를 유연하게 해둔 상태에서 윈치로 로우프를 감아 장력을 점진적으로 증가시킬때의 부하변동을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 진동적인 특성은 로우프 질점질량에 의해 와이어가 흔들리면서 그것이 하나의 외란적 요소로 작용하였기 때문이다. Fig. 5에 나타낸 실험을 통한 모델링 절차에 따라, 우선 초기 로우프 길이를 2[m], 3[m]로 설정하고, 각각의 조건에서 스텝상 전류신호를 모터에 인가하여 윈치를 감으면서 로우프 장력이 변하는 상태를 관찰하였다. 예상대로 윈치가 멈춘 상태에서도 로우프 흔들림으로 인해 윈치에 걸리는 부하도 변하였다. 로우프 길이 및 초기장력에 따라 부하변동이 포함된 응답특성이 다르게 나타나는데, 이중 대표적인 응답을 선택하고 진동적인 특성이 나타나지 않도록 평균화한 응답을 구하였다. 이것을 공칭모델로 선정하고 윈치모델로 정의하였다.

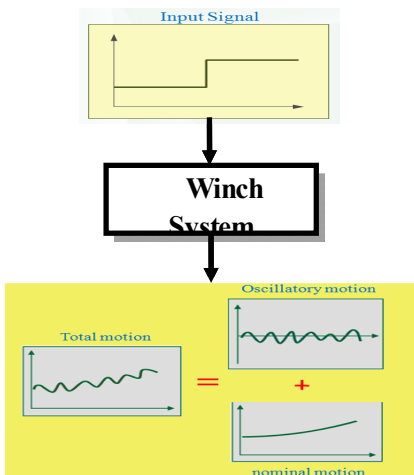


Fig. 5 Motion analyzing process of winch system with disturbance

Fig. 6은 부하변동이 포함된 시스템응답에서 공

칭모델 응답에 해당하는 특성을 제거한 것으로, 외란모델에 해당하는 응답만을 추출하여 나타낸 것이다. Fig. 6의 외란모델에 대한 모든 주파수응답을 Fig. 7에 나타내었으며 이것으로부터 하나의 대표외란모델을 구하였다. 이것은 Fig. 7의 주파수응답에서 실선으로 나타내었다.

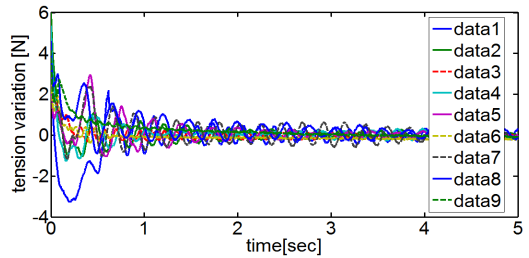


Fig. 6 Tension variations in the wire rope

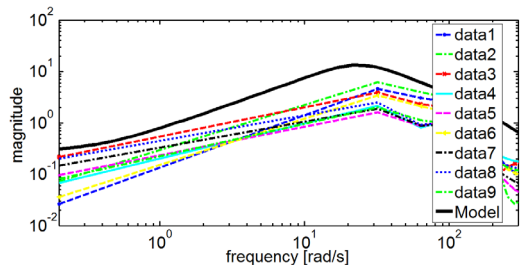


Fig. 7 Frequency responses for wire rope and model(solid line)

이것으로부터 구한 윈치모델($G_w(s)$) 및 외란모델($G_d(s)$)을 각각 아래식과 같이 전달함수로 표현한다.

$$G_w(s) = \frac{10.58}{1 + 0.473s} \quad (2)$$

$$G_d(s) = \frac{7.68 \times 10 s + 3.79 \times 10^3}{s^3 + 27.78 s^2 + 1.64 \times 10^3 s + 1.43 \times 10^4} \quad (3)$$

그리고 윈치드럼을 포함한 윈치부 전체는 Fig. 2로부터 다음 식으로 수식화 할 수 있다.

$$M_s \ddot{x} + D_s \dot{x} + K_s x = f \quad (4)$$

위식을 전달함수로 표현할 때는 $G_v(s)$ 로 나타낸다. 여기서 질량 M_s 는 알고 있는 값이나 댐핑 상수 D_s 및 강성계수 K_s 는 정확한 계산이 곤란한 값이므로 실험을 통해 추정하였다. 즉, 와이어 로우프를 감고 푸는 반복적인 실험을 통해 대표성을 갖는 값을 공칭값(nominal value)로 결정하였으며 각각의 변수에 대한 계산 및 추정값은 각각 다음과 같다.

$$M_s : 6.65[\text{kg}], D_s : 65[\text{Ns/m}], K_s : 302[\text{N/m}] \quad (5)$$

4. 제어기 설계 및 시뮬레이션

본 논문에서는 3장에서 구한 외란모델 및 공칭모델에 기초하여 H_∞ 제어기 설계법에 따라 제어기를 설계한다.

본 논문에서의 제어대상은 윈치드럼과 윈치드럼이 설치되는 플레이트(선박부)로 구성되어 있다. 3장에서 구체적으로 다룬 윈치부 및 외란모델을 고려하여 제어기를 포함하는 전체 페루프시스템을 표현하면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다.

이 문제를 H_∞ 제어기 설계법에 기초하여 일차적으로 확장하면 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 외란모델 $G_d(s)$ 는 불확실성을 나타내는 $\Delta(s)$ 로 정의한다. 이것을 보다 일반적인 표현법으로 나타내면 Fig. 10과 같다. 이 표현에 따라 강인제어기법을 이용하여 외란에 대해 강인하게 대응하고, 주어진 목표치를 오차없이 추종할 수 있는 제어기를 설계하도록 한다. 이때, Fig. 10에서 $W(s)$ 는 외란이 출력에 미치는 영향을 최소화하기 위해 도입한 Weighting 함수이며 다음식과 같이 결정하였다.

$$W(s) = \frac{0.1s+1}{10s+1} \quad (6)$$

결국 Fig. 10에 나타난 제어계설계문제는 외란 w 에서 $z = [z_1^T, z_2^T]^T$ 까지의 전달함수 $T_{zw}(s)$ 가 다음 식 (7)의 조건을 만족하는 제어기를 설계하는 문제로 귀착된다.

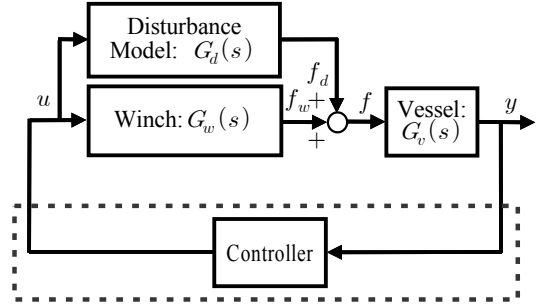


Fig. 8 Feedback system representation

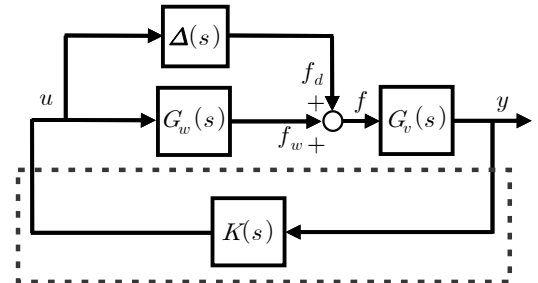


Fig. 9 Feedback system representation based on robust control approach

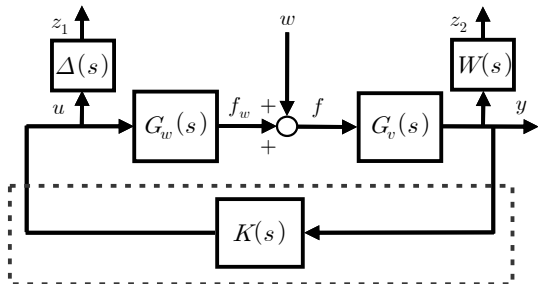


Fig. 10 Generalized control system description based on the H_∞ control framework

$$\| T_{zw}(s) \|_\infty < 1 \quad (7)$$

우선 Fig. 10에 대한 일반화 플랜트(generalized plant)를 구하도록 한다. 이를 위해 먼저, 윈치 ($G_w(s)$), 선박($G_v(s)$), 외란($\Delta(s)$) 및 출력측에 추가되는 필터모델($W(s)$)을 각각 다음과 같이 정의한다.

$$G_w(s) := \begin{bmatrix} A_w & B_w \\ C_w & D_w \end{bmatrix} \quad (8)$$

렬부등식을 만족하는 정정대칭행렬(positive definite symmetric matrix) X, Y 가 존재해야 한다.¹²⁻¹⁴⁾

$$G_v(s) := \begin{bmatrix} A_v & B_v \\ C_v & D_v \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} AX + XA^T + B_1 B_1^T - B_2 B_2^T & X C_1^T \\ C_1 X & -I \end{pmatrix} < 0 \quad (15)$$

$$\Delta(s) := \begin{bmatrix} A_d & B_d \\ C_d & D_d \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} YA + A^T Y + C_1^T C_1 - C_2^T C_2 & Y B_1 \\ B_1^T Y & -I \end{pmatrix} < 0 \quad (16)$$

$$W(s) := \begin{bmatrix} A_o & B_o \\ C_o & D_o \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} X & I \\ I & Y \end{pmatrix} > 0 \quad (17)$$

이것으로부터 구성되는 일반화 플랜트는 다음 식으로 표현된다.

결국 부등식 (15)~(17)의 해로부터 식 (14)의 제어기의 각 요소행렬은 다음과 같이 계산된다.

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

$$\begin{aligned} A_k &= A + B_2 C_k - B_k C_2 \\ &\quad + Y^{-1} C_1^T C_1 - Y^{-1} Q (I - XY)^{-1} \\ B_k &= Y^{-1} C_2^T \\ C_k &= B_2^T Y (I - XY)^{-1} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, $x = [x_v^T, x_w^T, x_d^T, x_o^T]^T$, $z = [z_1^T, z_2^T]^T$, $y = y_v$ 이다. 식 (8)~(11)의 표현을 참고하면, 식 (12)의 각 요소행렬은 다음과 같이 정의된다.

이때 위 식에서 행렬 Q 는 다음과 같이 정의된다.

$$Q = YA + A^T Y + Y B_1 B_1^T Y + C_1^T C_1 - C_2^T C_2 < 0 \quad (19)$$

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} A_v & B_v C_a & 0 & 0 \\ 0 & A_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_d & 0 \\ B_o C_v & 0 & 0 & A_o \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} B_v \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ B_w \\ B_d \\ 0 \end{bmatrix}, \\ C_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & C_d & 0 \\ D_w C_v & 0 & 0 & C_w \end{bmatrix}, C_2 = [C_v \ 0 \ 0 \ 0], \\ D_{11} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, D_{12} = \begin{bmatrix} D_d \\ 0 \end{bmatrix}, D_{21} = D_{22} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

위의 계산과정이 다소 복잡하게 기술되었으나, MatLab LMI Toolbox¹⁴⁾에서 설계자가 설정한 조건을 입력하고, 명령어 `hinfric`를 실행시키는 것만으로 식 (14)의 제어기가 간단히 구해진다.

이에 따라 MatLab을 이용하여 식 (14)의 제어기 $K(s)$ 를 구하였고 이것을 전달함수로 표현하면 아래와 같다.

그리고 설계해야 할 제어기, 즉 Fig. 10에서 $K(s)$ 를 식 (14)와 같이 정의한다.

$$K(s) := \frac{N(s)}{D(s)} \quad (20)$$

$$K(s) : \begin{cases} \dot{x}_k = A_k x_k + B_k y \\ u = C_k x_k + D_k y \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} N(s) &= 0.31s^7 + 2.97 \times 10^4 s^6 + 1.45 \times 10^6 s^5 \\ &\quad + 6.60 \times 10^8 s^4 + 1.45 \times 10^9 s^3 + 9.00 \times 10^9 s^2 \\ &\quad + 4.85 \times 10^7 s - 4.12 \times 10^5 \end{aligned}$$

이것으로부터 Fig. 10의 폐루프계가 안정하고, 외란 w 로부터 출력 z 까지의 전달함수 $T_{zw}(s)$ 가 조건 $\|T_{zw}(s)\|_\infty < 1$ 을 만족하는 제어기 $K(s)$ 존재하기 위해서는, 다음 식 (15)~(17)의 행

$$\begin{aligned} D(s) &= s(s^8 + 5.87 \times 10s^7 + 4.25 \times 10^3 s^6 \\ &\quad + 1.47 \times 10^5 s^5 + 4.23 \times 10^6 s^4 + 7.89 \times 10^7 s^3 \\ &\quad + 4.70 \times 10^8 s^2 + 2.60 \times 10^6 s \\ &\quad - 2.09 \times 10^4) \end{aligned}$$

이것으로부터 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 11~Fig. 13에 나타내었다.

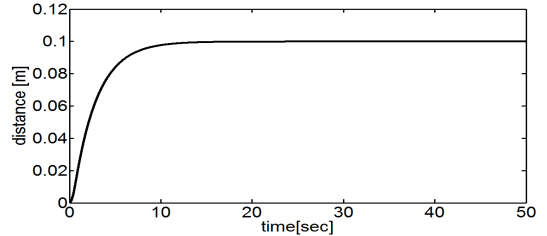
먼저 Fig. 11은 외란이 존재하지 않을 경우의 위치제어 시뮬레이션 결과이다. 목표로 하는 이동거리는 0.1[m]이고, Fig. 11에서 위 그림은 이동거리, 아래는 원치구동모터 제어전류를 나타낸다. 공칭계인 만큼 오차없이 목표치에 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 12는 원치구동 후 약 15[sec] 지점에서 Fig. 13과 같이, 외력의 크기 4[N], 1~15[Hz] 주파수대역에서 지속적으로 변하는 외란이 유입되었을 경우의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. (a)는 위치, (b)는 원치드럼 구동용 모터 입력전류를 각각 나타낸다. 특히 제어입력인 모터 입력전류는 3[A] 내외로 허용 전류값(5[A])을 초과하지 않고 있다. 결과적으로 외란이 존재하더라도 그 영향을 강인하게 억제하면서 설정된 목표치에 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다.

그리고 Fig. 14는 개루프(위) 및 폐루프(아래)의 주파수응답을 나타내고 있다. 주파수응답특성이 개선되어 위치제어계 구성에 필요한 추종성능이 향상되었음을 확인할 수 있다.

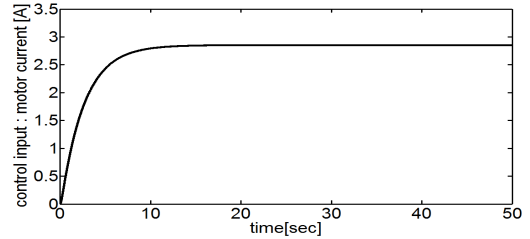
5. 결 론

본 논문에서는 선박 등 해상부유체를 계류하기 위한 계류용 원치시스템의 모델링 및 제어계 설계 문제에 대해 고찰하였다. 계류용 원치는 대상 부유체를 수동적인 관점에서 구속시키기 위한 목적으로 도입한다. 즉, 와이어 로우프 등의 파단조건, 효과적인 계류를 위한 원치배치 및 앵커링 방법등에 관한 연구가 대부분이다. 따라서 본 논문에서는 부유체의 동적특성을 능동적으로 제어할 경우의 원치제어문제에 대해 고찰하였다. 해상구조물의 Heaving 운동제어, 터그보트가 선박을 와이어 로우프로 예인하는 경우가 이 문제에 해당된다. 또한 바지선이 해상 부유체에 접근하여 작업할 경우, 충돌방지를 위해 와이어 로우프를 감고 풀어 일정거리를 유지해야 한다. 이와 같이 원치시스템의 능동적인 조작에 따른 문제를 다루기 위해, 우선 독립적인 원치 모듈을 제작하고, 이것이 와이

어로 구속되는 환경에서 원치구동을 통해 발생할 수 있는 외란 등 외력에 대한 영향을 정식화하였다. 그리고 실험을 통해 원치모델 및 외란모델을 도출하였다. 이 결과를 기초로 강인제어기법에 따

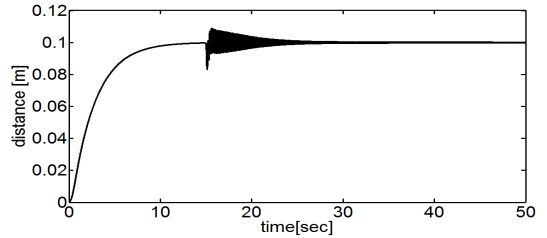


(a) controlled output (distance)

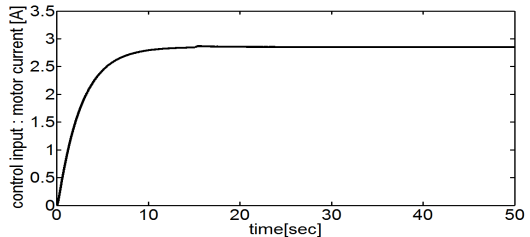


(b) control input (motor input current)

Fig. 11 Controlled output(distance) and control input(current) of nominal system



(a) controlled output (distance)



(b) control input (motor input current)

Fig. 12 Controlled output(distance) and control input(current) of uncertain system

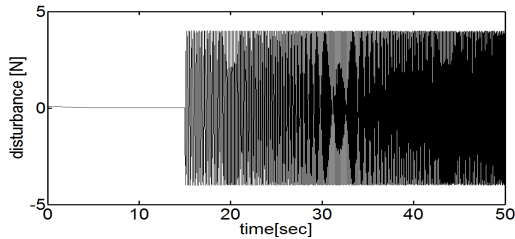


Fig. 13 Disturbance input

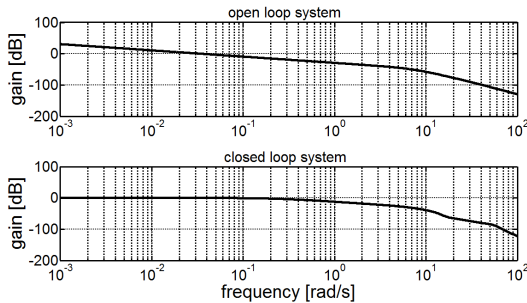


Fig. 14 Frequency responses

라 제어를 설계하고, 시뮬레이션을 통해 대상시스템의 모델링 기법의 타당성 및 설계된 제어기의 유효성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년 : C-D-2013-0424)에 의하여 연구되었음.

References

1. Y. J. An, 2007, "Driving Characteristics Improvement of SRM Winch System Using Torque Sharing Function", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 433-440.
2. J. M. Ha, D. S. Han and G. J. Han, 2008, "The Study for Improve the Braking Power of Mooring Winch Brake", Proceedings of the KSME Conference, pp. 512-517.
3. D. R. Lee and S. H. Chun, 2007,

- "Characteristics of Ship Winches and Their Hydrostatic Drives", Transactions of The Korea Fluid Power Systems Society, Vol. 4, No. 2, pp. 27-34.
4. D. J. Lee, 2004, "Dynamic Characteristic of a Hydraulic Fishing Winch Simulator", Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 37, No. 4, pp. 330-336.
5. S. H. Cho, S. Y. Yang and R. S Park, 2002, "Circuit Design of Drive Control for Winch Drum", Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 5, No. 1, pp. 45-58.
6. D. J Lee, J. K. Kun and B. S Kim, 2000, "Design of an Automatic Winch System for Small Fishing Vessel", Proceedings of the Korean Society of Fisheries Technology Conference, pp. 57-58.
7. W. Dokko and S. Y. Yang, 2000, "Development of a Seaborne Towing Winch System", Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 47-57.
8. J. M. Ha, D. S. Han and G. J Han, 2010, "The Strength Analysis of Mooring Winch according to the Division Angle", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 34, No. 10, pp. 775-780.
9. J. M. Ha, D. S. Han and G. J Han, 2009, "The Strength Analysis of Mooring Winch according to the Division Angle", Proceedings of the Korean Institute of Navigation and Port Research Conference, pp. 181-182.
10. Y. S Lee, T. G Jeong, C. H. Jung and S. W. Kim, 2010, "Conceptual Design for Mooring Stability System and Equipments of Mobile Harbor", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 34, No. 5, pp. 311-317.
11. Bernt J. Leira, Shaoji Fang and Mogens Blanke, 2011, "Vertical Position Control for Top Tensioned Riser With Active Heave

Compensator", ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering Volume 1: Offshore Technology; Polar and Arctic Sciences and Technology, Rotterdam, The Netherlands, June 19 - 24.

12. P. Gahinet, 1994, "Explicit Controller Formulas for LMI-based H_∞ Synthesis", Proceedings of American Control Conference, pp. 2396-2400.
13. P. Gahinet and P. Apkarian, 1994, "A Linear Matrix Inequality approach to H_∞ control", International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 4, No. 4, pp. 421-448.
14. P. Gahinet, A. Nemirovski, A. Laub and M. Chilali, 1995, "LMI Control Toolbox", Math Works Inc.