

주파수 의존형 LQR 설계법에 의한 무어링 윈치 제어시스템 설계

구자삼* · † 김영복

*부경대학교 조선해양시스템공학과 교수, † 부경대학교 기계시스템공학과 교수

Mooring Winch Control System Design Based on Frequency Dependent LQR Control Approach

Ja-Sam Goo * · † Young-Bok Kim

*Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

† Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

요 약 : 본 논문에서는 무어링윈치시스템 제어를 위한 제어계 설계법에 대해 고찰하고 있다. 특히 무어링윈치의 동적운전이 로우프에 부가하는 급격한 부하변동을 억제함으로써 로우프 피로하중을 감소시키고 선박운동제어에 있어서의 바람직한 제어성능을 달성할 수 있도록 하는 제어계 설계법을 제안하고 있다. 최적제어이론에 기반하여, 평가함수에 주어지는 중량행렬(weighting matrix)에 주파수 특성을 부여함으로써, 고주파 모드가 포함된 제어입력이 불안정한 특성을 여기시키지 않도록 하는 것이 제어계 설계 목표이며, 이것은 곧 로우프에 급격한 부하변동을 발생시키지 않게 되는 결과를 얻게 된다. 설계된 제어기는 저차이면서도 외란에 대한 강인성 뿐 만 아니라 제어성능 또한 보장하는 유용한 기법이며 시뮬레이션 및 실험을 통해 그 유효성을 검증하고 있다.

핵심용어 : 바지선, DPS, 무어링윈치, 강인제어, LQ 제어, 주파수 의존형 중량행렬

Abstract : In this paper, the author consider control system design problem of the surface vessel where any types of floating units are included. To keep their motion/position, the Dynamic Positioning System(DPS) is equipped in. Even though sometimes the thrust systems are installed on them, in general the mooring winch system with the rope/wire is used. Therefore, in this paper we consider a single type mooring winch control problem to keep the vessel's position. For this, we introduce an easy and useful control approach which is based on LQ control theory. In this approach, we introduce the frequency dependent weighting matrices which give the system filters to shape frequency characteristics of the controlled system and guarantee the control performance. Based on this, we will show that the proposed approach works well.

Key words : barge type surface vessel, dynamic positioning system(DPS), mooring winch, robust control, LQ control, frequency dependent weighting matrix.

1. 서 론

일반선박을 포함하여, 해상에서 운용되는 부유체(Floating Units)는 목적에 따라 일정위치에 정지된 상태를 유지해야 하는 경우가 있다. 일반선박은 접안을 위해 대기하거나, 항만에 접안하여 안벽에 정박하는 경우가 여기에 해당된다. 또한 시추선과 이와 관련된 작업을 하는 특수목적의 해상설비 등은 해양자원을 채굴하기 위해 일정위치에 정지된 상태에서 중장기간의 작업을 수행하기도 한다. 이러한 수상구조물 및 운동체 등으로 Rigs, FPSO, 드릴쉽(Drill-Ship) 및 Barge선 등이 있다. 해저로부터 자원을 채굴하기 위해서나, 작업지원을 위해 장기간 동안 지정된 위치를 유지해야 할 경우도 있다. 이때

FPSO, 드릴쉽 등은 목적에 따라서는 정지위치 오차범위가 수 미터 이내로 제한되기도 한다. 고정도 위치제어가 필요한 경우를 포함한 대부분의 경우, 위치제어를 위한 기본적인 장치로 사이드스러스터나 무어링 윈치시스템을 도입하고 있다. 무어링 윈치시스템은 적절한 수의 윈치를 수상구조물 및 운동체에 설치하고, 윈치조작으로 로우프 장력을 제어함으로써 수상 부유체의 자세 및 위치를 제어하는 방법이다. 윈치 자체를 제어할 수도 있고, 경우에 따라서는 보조 액추에이터(실린더형 액추에이터)를 사용하기도 한다. 윈치구동은 기본적으로 로우프를 감고 풀어 그 장력을 조절하게 되고, 이것으로부터 부유체 운동을 제어하게 된다.

로우프 장력제어는 부유체의 수평운동뿐 만 아니라, 수직운

* 연희원, jsgoo@pknu.ac.kr, 051)629-6615

† Corresponding author : 연희원, kpjiwoo@pknu.ac.kr 051)629-6197

주) 이 논문은 "Frequency Shaped LQ Control Design for Mooring Winch System"이라는 제목으로 "Proceedings of Asia Navigation Conference 2013 (한국해양수산연수원, 2013.10.24-26, pp. 189-197)"에 발표되었음.

동(heaving motion)을 제어하기 위한 방법으로도 이용된다. 즉, 드릴쉽에서 드릴링 작업을 수행할 경우, 수직운동을 적절히 제어함으로써 작업안정성을 도모할 수 있다. 이와 관련된 연구는 거의 선진기술에 지배되고 있으며, 국내 연구자에 의해 수행된 연구결과는 기초연구와 관련된 것들이 대부분이다 (An, 2007; Cho et. al, 2002; Dokko et. al, 2000; Ha et. al, 2008, 2009, 2010; Lee, 2004; Lee et. al, 2000; Lee et. al, 2007). 즉, 윈치설계에 대한 기구학적, 역학적인 분야에 한정되어 있다고 할 수 있고, 수상구조물 및 수상 운동체의 동적제어 분야는 거의 해외 연구자에 의해 수행된 것이 대부분이다. (Bernt et. al, 2011; Lee et. al, 2007) 따라서 이러한 현실을 인식하고 새로운 윈치기술을 확보하기 위한 노력이 절실히 필요하다. 그래서 본 논문에서는 직간접적으로 관련되거나, 보다 진보된 윈치기술 확보를 목표로, 무어링 윈치를 이용하는 해상 부유체 중 Barge선의 위치제어시스템 구축문제에 대해 고찰하고자 한다. 즉, 윈치제어를 통해 로우프 또는 와이어 장력을 제어함으로써 Barge선의 운동을 제어하기 위한 제어시스템 구축문제를 다룬다. 이를 위해, 우선 계류되는 선박의 운동 특성을 포함한 무어링 윈치시스템의 동적특성을 실험적으로 분석하고 모델링을 수행하는 방법에 대해 고찰한다. 그리고 구해진 모델에 대해 무어링 윈치시스템을 제어하기 위한 제어기를 설계한다. 제어기 설계문제에 대해서는 이미 저자가 강인제어기법에 기반한 제어기 설계법을 제안한 바 있다(Kang et. al, 2013). 강인제어기법의 특성상 차수가 높은 제어기가 구해진다는 문제점이 있고, 결국 이것은 실험 등의 적용상에 상당한 부담으로 작용한다는 것은 잘 알려져 있는 사실이다. 그래서 본 논문에서는 최적레귤레이터이론에 기초하여 외란 등에도 강인하게 대응할 수 있는 제어기 설계법을 제안한다. 제안된 설계기법은 외란을 제거하기 위한 필터 이외는 제어기 차수를 증가시키는 요인이 없어 저차의 제어기를 구할 수 있게 된다. 결국 강인제어기법의 최대 단점인 고차의 제어기에 따른 실용상의 부담감을 최소화함과 동시에 제어성능도 보장되는 제어기 설계법이다. 제안된 기법의 유효성을 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증한다.

2. 시스템 표현

일반선박이 해상에서 일정속도로 운동하는 것과는 달리 Barge선은 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. 단, 본 논문에서는 Fig. 1과 같이 하나의 윈치로 구성되는 윈치제어시스템 설계문제를 고려한다. 표현상의 문제일 뿐, Fig. 1의 시스템을 다수의 윈치로 구성되는 경우로 확장하는 데는 아무런 문제가 없다. Fig. 1은 선박이 1자유도 운동을 한다고 가정하는 것이며, 그림에서와 같이 Barge선 좌측은 로우프로 단순

고정되어 있고, 우측에는 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 외부로부터 선박에 가해지는 힘, $m_i (i=1, \dots, m)$ 는 로우프가 갖는 질점질량, $k_i, d_i (i=1, \dots, m+1)$ 는 로우프 질점간 강성계수 및 각 질점의 점성계수, 그리고 $x_i (i=1, \dots, m)$ 는 각 질점의 이동거리를 나타낸다. 이것으로부터 Fig. 2의 모델은 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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 등의 외란을 나타낸다. 단, 여기에는 단순히 윈치운동에 의해서 발생하는 장력변화만을 포함하고 있지는 않다. 즉, 조류변화 등의 외적요인에 의한 성분과, 로우프를 감고 풀 때 발생하는 로우프 운동에 따른 장력변화성분이 함께 포함되어 있다고 가정한다.

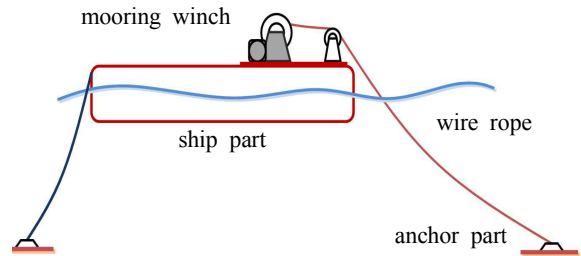


Fig. 1 Schematic of considered control system

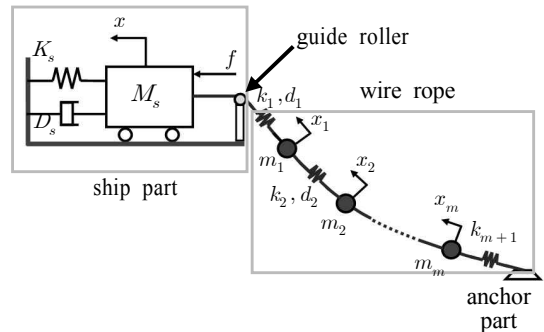


Fig. 2 A schematics of mooring system for dynamic analysis

일반적으로 이러한 장력변화에 대한 주파수특성 및 힘의 크기 등은 알 수 있다 하더라도 그 운동패턴(자유도)을 예측하는 것은 상당히 어렵다. 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 많은 연구결과(An, 2007; Cho et. al, 2002; Dokko et. al, 2000; Ha et. al, 2008, 2009, 2010; Lee, 2004; Lee et. al, 2000; Lee et. al, 2007)가 보고되어 있으나, 너무 정적인 관점에서 모델링이 수행되었고, 구해진 모델 또한 복잡하여 제어계 설계를 위한 관점에서는 유용한 결과라 할 수 없다. 결국 복잡한 모델은 고차의 제어기를 도입해야하는 부담이 따르기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 실험적인 방법으로 주파수특성 기반의 로우프 운동특성을 분석하고 제어기 설계를 위한 적절한 로우프 모델을 도출한다. 또한 도출된 모델을 기반으로 외란 특성도 분석하여 외란에 강인하게 대응할 수 있는 제어기를 설계하고, 시뮬레이션 및 실험을 통해 제안된 기법의 타당성과 유효성을 검증한다.

3. 선박 및 로우프 운동특성 분석

기본적으로는 Fig. 1 및 식 (1)로 표현된 시스템을 제어 대상으로 하고, 제어대상에 대한 모델링을 위해 Fig. 2와 같이 선박부(ship part)와 로우프부(ropes and wire part)로 각각 분리하여 모델링을 수행하였다. 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 선박부를 고정시켜두고, 윈치로 로우프를 감고 풀면 다양한 형태로 로우프가 흔들리게 되고, 이것은 곧 로우프 양 끝단에서의 장력변화로 나타나게 된다. 앞서 기술하였듯이 로우프 길이변화와 조류영향 등 물리특성 및 환경변화에 대한 정보가 명확하게 주어지게 되면, 계산에 의해 동적특성을 분석하고 해석할 수 있다.

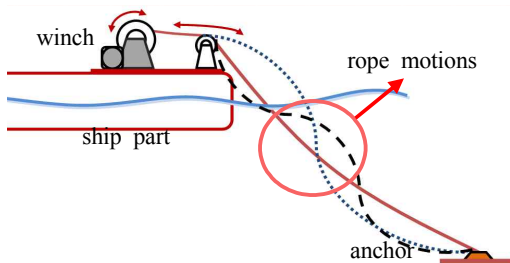


Fig. 3 Various rope motions due to winch operating

그러나 실제 해상환경을 실시간으로 계측하여 정보를 취득하기도 어려우며, 심지어 윈치가 설치된 선박운동특성도 부하 변동 등에 따라 명확하게 파악하기가 어렵다. 기존 연구에서는 로우프를 설계하는 관점에서 유한요소법(FEM)에 따라 로우프를 모델링하기도 하였다.(Bernt et. al, 2011; Lee et. al, 2007)

그러나 선박을 계류하기 위해 앵커에 연결되는 로우프 길이는 수백미터에서 수킬로미터에 이르기 때문에 이와 같은 방법으로 이론모델을 구하고 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, 실제 적용환경을 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 크기에 대한 정보가 얻어지면 설계된 제어계의 안정성과 제어성능이 확보되기 때문에 이러한 접근법이 더욱더 유용하다. 이러한 사실에 기초하면 명확한 모델보다 로우프에 대한 전반적인 동적특성을 파악하는 것이 보다 효과적이라 할 수 있다.

그래서 Fig. 1에 주어진 제어대상을 모의하기 위해 Fig. 4와 같이 무어링 윈치시스템 독립모듈을 제작하였다. 여기서 윈치시스템이 선박에서 운용되는 환경을 모의하기 위해, 윈치 구동용 모터(3)를 포함한 윈치부(winch part)는 슬라이딩 가이드(5)(sliding guide)를 따라 미끄러지도록 구성하였다.

그리고 와이어 로우프가 나와 있는 반대편 윈치부는 고정 프레임에 댐퍼(1) 및 스프링(2)으로 연결하였다. 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 선박부에 해당)가

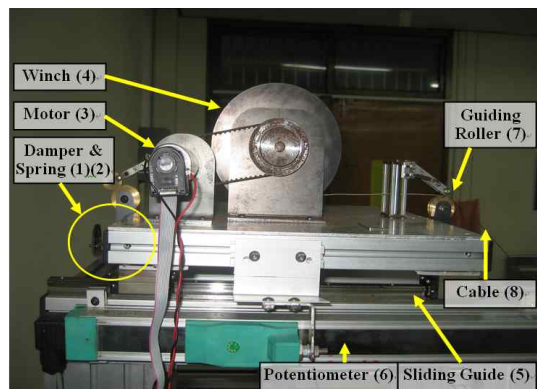


Fig. 4 Single type pilot model of a mooring winch

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

Fig. 4의 실험장치를 이용하여 윈치드럼 및 로우프 모델을 구한다. 먼저 윈치드럼이 놓여 있는 윈치부가 미끄러지지 않도록 프레임에 고정시키고, 로우프도 그 끝단을 적절한 거리 단위로 지면에 고정시키면서 윈치를 구동시켰다. 윈치드럼 구동신호는 스텝상으로 인가하고 그 때의 장력변화, 즉, 로드셀이 설치된 로우프 양 끝단에 전달되는 힘의 변화를 구한다. 이때 로우프의 길이는 2~3m로 변화시켰고, 이때 그 응답은 Fig. 5와 같이 진동적으로 나타내게 되는데, 이것은 윈치드럼 구동에 의해 로우프가 흔들리게 됨으로써 발생하는 장력변화이다. 이것을 주파수응답으로 나타낸 것이 Fig. 6이다. 이 중 흑색 실선은 9회에 걸쳐 획득한 실험결과를 모두 반영할 수 있도록 선택한 로우프 대표모델이다. 이것을 전달함수식으로 표현하면 식 (2)와 같다. 동시에 반복적인 실험을 통해 구한 윈치모델의 전달함수는 식 (3)과 같으며, 이때 입력은 모터 입력전압[V]이며, 출력은 토크[N]이다.

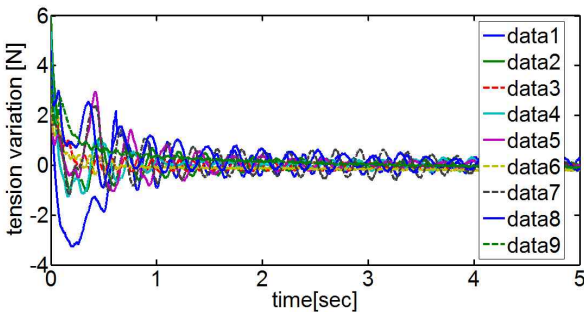


Fig. 5 Tension variations appeared in the wire rope

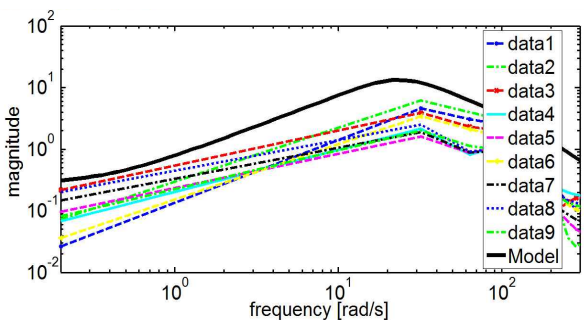


Fig. 6 Frequency responses of the wire rope and the rope model(solid line)

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

$$G_w(s) : \begin{cases} \dot{x}_w = A_w x_w + B_w u_w \\ y_w = C_w x_w + D_w u_w \end{cases} \quad (3)$$

그리고 윈치드럼을 포함한 윈치부 전체(선박부에 해당)는 Fig. 2로부터 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$G_v(s) : \begin{cases} \dot{x}_v = A_v x_v + B_v u_v \\ y_v = C_v x_v + D_v u_v \end{cases} \quad (4)$$

여기서 상태 $x_v = [x_s, \dot{x}_s]^T$ 이며, x_s 는 선박부의 변위를 나타낸다. 입력 $u_v = f$, 즉 선박에 가해지는 외력을 나타내며, 식 (4)에서 각 계수행렬은 다음과 같이 정리된다.

$$A_v = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K_s}{M_s} & -\frac{D_s}{M_s} \end{bmatrix}, B_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M_s} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C_v = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, D_v = [0]$$

여기서 질량 M_s 는 알고 있는 값이나 댐핑상수 D_s 및 강성 계수 K_s 는 정확한 계산이 곤란한 값이므로 실험을 통해 추정하였다. 즉, 로우프를 감고 푸는 반복적인 실험을 통해 대표성을 갖는 값을 공칭값(nominal value)으로 결정하였으며 각 변수에 대한 계산값 및 추정값은 각각 다음과 같다.

$$M_s : 6.65[\text{kg}], D_s : 65[\text{Ns/m}], K_s : 302[\text{N/m}] \quad (6)$$

4. 제어기 설계

본 장에서는 3장에서 구한 외란모델 및 공칭모델에 기초하여 제어기를 설계하도록 한다.

3장에서 분석한 로우프 운동특성은 외란의 하나로 간주할 수 있다. 이것은 윈치조작에 따라 발생하는 로우프 흔들림에 의해 선박에 가해지는 부수적인 외력이기 때문이다. 따라서 식 (2)를 외란모델로 가정하면 이것은 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있고, 이것은 기초로 저자는 H_∞ 제어기 설계법에 따라 제어기를 설계하였다.(Kang et. al, 2013) 이 때 구해진 제어기 차수는 9차이었고, 다수의 액추에이터로 구성할 경우 실현상 상당한 부담으로 작용하였다. 그래서 본 논문에서는 가능한 저차이면서도 우수한 제어성능이 보장되는 제어기 설계법을 도입하도록 한다.

Barge선의 위치제어를 위한 제어력은 윈치조작에 의해 발생하는 로우프 장력에 의해 만들어진다. 그러나 위치제어를 위해 필요한 장력은 가능한 정적특성을 가져야 하며, Fig. 6과 같은 진동적 특성은 바람직하지 않다. 이러한 제어력에는 외란도 함께 로우프를 통해 Barge선에 전달되고, 결국 바람직하지 않은 동적응답이 나타나므로 이를 억제할 수 있는 전략이 필요하다. 예를 들어 제어대상이 구조물인 경우에 이러한 문제가 수반되게 되면, 잔여모드가 여기되어 스피로우버 현상

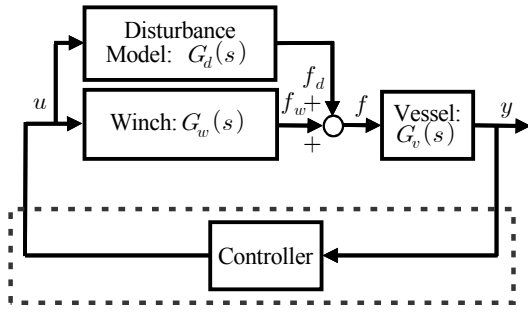


Fig. 7 Feedback system representation[Kang et. al, 2013]

이 생기는 등 고주파특성을 갖는 불확실성으로 인해 제어계가 불안정하게 되는 경우가 발생한다.

이에 대한 해결책으로 제어입력에 잔여모드 및 불확실성이 갖는 고주파성분을 갖지 않도록 제어기를 설계하면 된다. 이것은 필터설계 등 주파수특성을 개선하는 방법으로 해결할 수 있다. 예를 들어 폐루프계의 주파수특성을 개선하기 위한 방법으로, LQ 제어기법에서 도입되는 평가함수에 주파수특성을 부여하는 것이다. 즉, 중량행렬(weighting matrix)에 주파수특성을 갖는 평가함수를 도입하여 최적제어입력을 구하는 방법을 고려할 수 있다. 이에 따라 첫 번째 단계로 파스발의 정리(Parserval's formula)를 이용하여 기존 평가함수식을 주파수영역에서 표현하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [\hat{x}^T(-j\omega) Q \hat{x}(j\omega) + \hat{u}^T(-j\omega) R \hat{u}(j\omega)] d\omega \quad (7)$$

여기서 \hat{x} , \hat{u} 는 상태 x , 제어입력 u 의 푸리에변환을 나타낸다. 이것으로부터 중량행렬 Q, R 에 주파수특성을 부여하여 $Q(j\omega), R(j\omega)$ 로 나타내고, 위 식 (7)의 평가함수를 이용하여 최적제어입력을 계산한다. 이를 위해 우선 주파수영역에서 시간영역으로 전환하여 주파수 의존형 중량행렬 $Q(j\omega), R(j\omega)$ 의 클래스로

$$Q(s) = C^T(\bar{s}) C(s), \quad R(s) = D^T(\bar{s}) D(s) \quad (8)$$

와 같이 표현되는 것을 고려한다. 여기서 $C(s)$ 는 안정 및 proper인 유리함수행렬, $D(s)$ 는 정칙이고 그 역행렬 $D^{-1}(s)$ 가 안정 및 proper인 유리함수행렬이다. 이와 같이 정의된 중량행렬의 분해를 통해 새로운 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\hat{w}(j\omega) = C(j\omega)\hat{x}(j\omega), \quad \hat{v}(j\omega) = D(j\omega)\hat{u}(j\omega) \quad (9)$$

이것을 이용하면 식 (7)의 평가함수는

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [\hat{w}^T(-j\omega)\hat{w}(j\omega) + \hat{v}^T(-j\omega)\hat{v}(j\omega)] d\omega \quad (10)$$

와 같이 나타낼 수 있고, 파스발의 정리를 이용하면 다음과 같이 시간영역으로 다시 표현할 수 있다.

$$J = \int_0^{\infty} [w^T(t)w(t) + v^T(t)v(t)] dt \quad (11)$$

여기서 \hat{w}, \hat{v} 는 w, v 의 푸리에변환이다. 이 평가함수를 최소화하기 위해서는 새로운 변수 w, v 의 관계를 알지 않으면 안된다. 그래서 먼저 $C(s), D^{-1}(s)$ 의 상태방정식을 각각 다음과 같이 나타낸다.

$$C(s) : \begin{cases} \dot{z}_1(t) = F_1 z_1(t) + G_1 x(t) \\ w(t) = H_1 z_1(t) + M_1 x(t) \end{cases} \quad (12)$$

$$D^{-1}(s) : \begin{cases} \dot{z}_2(t) = F_2 z_2(t) + G_2 v(t) \\ u(t) = H_2 z_2(t) + M_2 v(t) \end{cases} \quad (13)$$

여기서 윈치 $G_w(s)$ 를 표현한 식 (3)과, 선박부 $G_v(s)$ 를 나타낸 식 (4)를 하나의 상태방정식으로 정리하면 다음 식과 같다.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (14)$$

그리고 식 (14)의 각 계수행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$A = \begin{bmatrix} A_w & 0 \\ B_v C_w & A_v \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_w \\ B_v D_w \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$C = [D_v D_w \quad C_v], \quad D = [D_v D_w]$$

이것으로부터 식 (12)~(14)를 조합하면 변수 w, v 의 관계는 다음과 같이 표현된다. (Fig. 8 참조)

$$\begin{cases} \dot{z}_1(t) \\ \dot{x}(t) \\ \dot{z}_2(t) \end{cases} = \begin{bmatrix} F_1 & G_1 & 0 \\ 0 & A & B H_2 \\ 0 & 0 & F_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(t) \\ x(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B M_2 \\ G_2 \end{bmatrix} v(t) \quad (16)$$

$$w(t) = [H_1 \quad M_1 \quad 0] \begin{bmatrix} z_1(t) \\ x(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix}$$

Fig. 8의 확대계(augmented system)에서 $[z_1^T \ x^T \ z_2^T]^T$ 를 상태벡터, v 를 새로운 입력벡터라 두고 상태에 대한 중량행렬을 다음 식 (17)과 같이 정의한다.

$$\begin{bmatrix} H_1^T \\ M_1^T \\ 0 \end{bmatrix} [H_1 \quad M_1 \quad 0] \quad (17)$$

만일 입력에 대한 중량행렬을 단위행렬로 두게 되면 통상의 최적레귤레이터 문제로 귀착된다.

따라서 식 (11)의 평가함수를 최소로 하는 최적제어입력은 아래 식 (18)과 같이 계산된다.

$$v(t) = - [K_{z1} \ K_x \ K_{z2}] \begin{bmatrix} z_1(t) \\ x(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

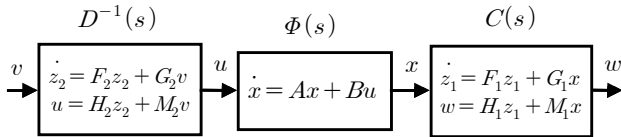


Fig. 8 Augmented system

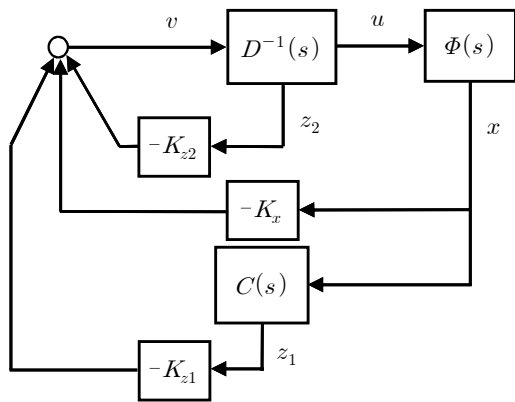


Fig. 9 Frequency-shaped optimal regulator system

그런데 제어대상에 실제 인가되는 제어입력은 v 가 아니라 u 이지만 이것은 v 의 입력에 대한 출력으로 주어지게 된다.

이상을 정리하면 주파수의존형 평가함수에 대한 최적레귤레이터문제의 구성은 Fig. 9와 같이 표현된다. 결국 상태 x 로부터 입력 u 사이에 전달함수 $C(s)$ 와 $D^{-1}(s)$ 가 포함된 필터가 들어가 있는 형태가 되며, 최적제어입력과 이득은 각각 다음 식으로 주어진다.

$$\hat{u}(s) = -K(s)\hat{x}(s) \quad (19)$$

$$K(s) = D^{-1}(s)[I + K_{z2}(sI - F_2)^{-1}G_2]^{-1} \cdot [K_x + K_{z1}(sI - F_1)^{-1}G_1] \quad (20)$$

본 논문에서는 제어입력으로 하여금 제어대상의 고주파성분이 여기 되지 않도록 하는 것을 제어계 설계사양으로 설정한다. 이 경우는 Fig. 8 및 Fig. 9에서 $D^{-1}(s)$ 만 고려하면 된다는 것을 의미한다. 이와 같은 설정아래 유리함수 행렬 $D^{-1}(s)$ 로 식 (13)의 계수행렬로 구성되는 것을 이용한다. 여

기서 유리함수행렬 $D^{-1}(s)$ 는 앞서 기술하였듯이 로우프 운동 및 조류영향 등에 의해 발생된 고주파성의 외란이 로우프를 통해 Barge선에 전달되는 것을 억제하는 것이 그 주된 역할이다. 즉, 식 (2) 및 Fig. 6으로 표현된 운동특성을 억제하는 것으로 정의할 수 있다. 그래서 Fig. 10과 같이 2[rad/s] 영역에서부터 이득이 점진적으로 감소하여 그 이상의 고주파성분이 제어대상에 전달되지 않도록 하는 필터특성을 부여하였다. 결국 식 (13) $D^{-1}(s)$ 의 각 계수 행렬은 다음과 같이 구해졌다.

$$F_2 = \begin{bmatrix} -1.04 & -1.178 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad G_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$H_2 = [8.9448 \times 10^{-2} \quad 1.168],$$

$$M_2 = [8.9843 \times 10^{-3}]$$

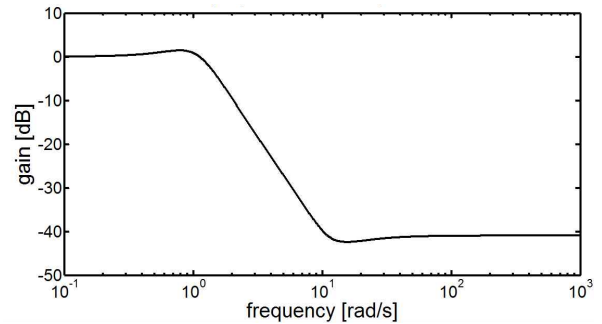


Fig. 10 Frequency response of designed filter

이것으로부터 식 (16)의 확대계는 자동적으로 구해지며, 식 (11)의 평가함수를 최소로 하는 식 (16)의 이득 중 K_x, K_{z2} 는 다음과 같이 각각 계산되었다.

$$K_x = [0.3284 \quad -0.0412 \quad -0.45], \quad (22)$$

$$K_{z2} = [0.7530 \quad 1.0536]$$

이때 평가함수에서, 입력과 출력에 대한 중량행렬 Q_a 및 R_a 는 각각 다음과 같이 선택하였다.

$$Q_a = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R_a = I \quad (23)$$

5. 시뮬레이션, 실험 및 고찰

본 장에서는 4장에서 설계한 필터 식 (21) 및 제어기 식 (22)를 이용하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

앞서 기술하였듯이 본 논문에서는 제어입력이 제어대상의 고주파 특성(고주파 특성을 갖는 외란 등)이 제어성능에 영향

을 미치지 않도록 하는 것을 제어계 설계의 기본적인 사양으로 설정하고 시뮬레이션을 수행하였다.

비교평가를 위해, 먼저, 외란의 영향을 고려하지 않고 공칭계(nominal system)를 기준으로 일반적인 평가함수를 최소화하는 LQ 레귤레이터를 적용한 경우의 초기값 응답특성을 Fig. 11에 나타내었다. 외란이 존재하지 않기 때문에 원래의 위치로 오차없이 수렴하고 있다. 이때 초기값은 선박부의 위치가 평형점에서 0.4[m] 이동한 것으로 설정하였다.

여기에 Fig. 12와 같이 주파수가 0.1~200[rad/s]까지 지속적으로 변하는 특성을 갖는 외란이 제어입력에 추가적으로 인가될 경우의 응답을 나타낸 것이 Fig. 13이다. 평형상태로 수렴하려 하고 있으나 외란의 영향이 그대로 출력에 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 특히 로우프 장력이 과도하고 급격하게 변하고 있음을 확인할 수 있는데, 이러한 응답은 로우프의 피로하중 증가에 의한 로우프 파단현상을 초래할 수 있으며, 결국 불안정한 선박운동을 발생시키는 주된 요인이 된다.

이에 대해 제안된 제어기 설계법에 따라 설계된 제어계의 응답특성을 Fig. 14에 나타내었다. 외란에 대한 적절한 주파수 분석을 통해 필터를 설계하고, 이것을 기반으로 최적제어기법에 따라 주어진 평가함수를 최소화 하는 제어기를 구하고 적용하였기 때문에 외란의 영향을 억제하면서 원점으로 오차없이 복귀하고 있음을 알 수 있다. 또한 완만한 로우프 부하변동이 나타나고 있으므로 Fig. 13에 나타난 현상으로 인한 바람직하지 않은 응답특성을 효과적으로 개선할 수 있을 것이다.

시뮬레이션결과를 기초로 실험을 수행하였다. 실험장치는 Fig. 4에 나타난 것과 같고, 선박이 일정한 위치에 정지해 있는 상태에서 외란이 존재하더라도 그 위치를 강인하게 유지할 수 있는지를 평가하는 것이다.

실험결과를 Fig. 15와 Fig. 16에 나타내고 있다. Fig. 15는 임의의 위치에서 선박위치를 변하게 하는 외란이 인가되었을 경우의 위치유지성능을 나타내고 있다. 이때 외란으로, 15[sec]~45[sec] 구간에서 로우프에 부가 장력을 발생시켜 선박위치를 이동시키는 외력을 지속적으로 인가하였다. 이와 같은 외란에 적절히 대응하면서 초기위치를 강인하게 유지하고 있음을 Fig. 15의 실험결과로부터 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 16은 위치보정을 위해 제어기로부터 발생하는 제어입력을 나타내고 있다.

이상과 같이 시뮬레이션 및 실험결과로부터 설계된 제어기의 유효성을 확인하였다. 즉, LQ 제어이론에 기초한 주파수 성형기법을 이용하면 고주파특성을 갖는 제어력 등에 의한 시스템의 불안정성과 제어성능을 체계적으로 개선할 수 있음을 확인하였다. 이것은 평가함수에서의 중량행렬로 정계수 형태로만 주어질 때의 여러 가지 불안정한 부분을 개선할 수 있다는 것에 그 유용성을 찾을 수 있을 것이다.

본 논문에서는 레귤레이션문제에 대해서만 다루고 있으나, 이 결과를 기초로 하면 위치제어 등의 서보계 설계문제로도 용이하게 확대 적용할 수 있다.

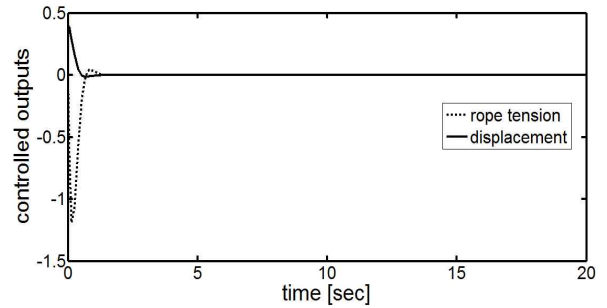


Fig. 11 Rope tension[N] and controlled output (displacement[m]) of nominal system with general LQ control system

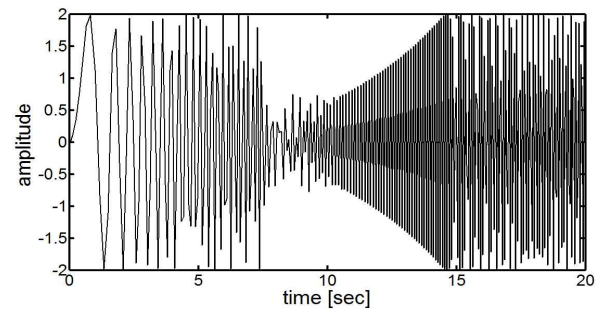


Fig. 12 Disturbance input[N]

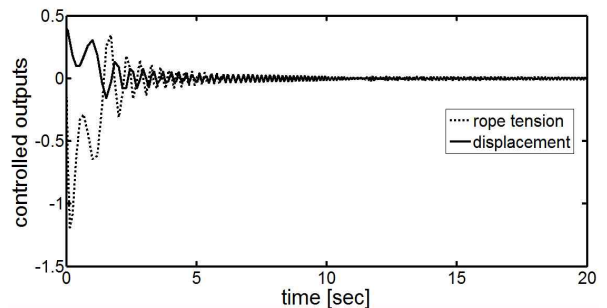


Fig. 13 Rope tension[N] and controlled output (displacement[m]) of a general LQ control system with disturbance

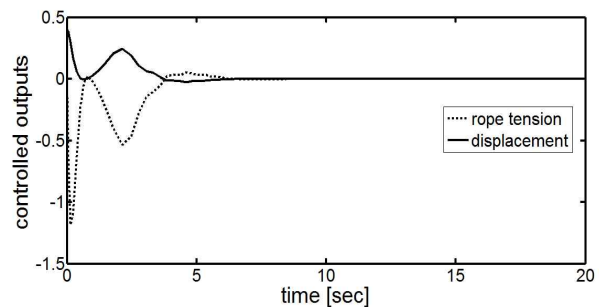


Fig. 14 Rope tension[N] and controlled output (displacement[m]) of proposed frequency dependent LQ control system with disturbance

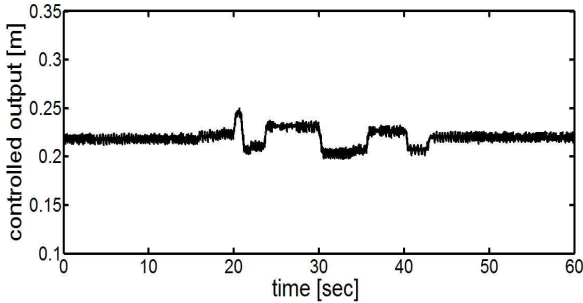


Fig. 15 Controlled output (displacement[m]) with disturbance : experiment result

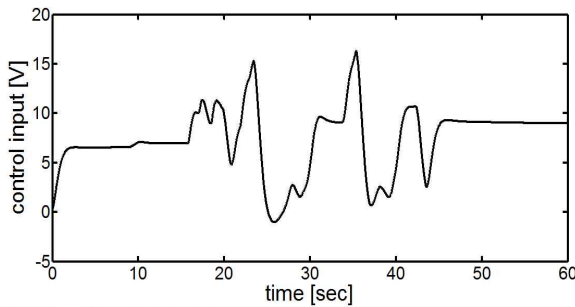


Fig. 16 Control input coping with disturbance : experiment result

6. 결 론

본 논문에서는 선박 등 해상부유체를 계류하기 위한 계류용 윈치시스템의 모델링 및 제어계 설계문제에 대해 고찰하였다. 계류용 윈치는 부유체를 수동적인 관점에서 구속시키기 위한 목적으로 도입된다. 그러나 목적에 따라 능동적인 제어를 통해 적절한 운동제어성능을 얻을 수 있다. 이때 유의해야 할 점은, 능동적인 운동제어를 위한 제어입력이 로우프에 과도한 부하로 작용하게 되어 로우프의 파단 및 선박에도 바람직하지 않은 운동을 유발시킬 가능성이 있다는 것이다.

이와 같이 로우프의 동적특성을 고려한 관련분야 연구결과는 대부분 선진연구자들에 의해 수행되어 왔다. 국내 연구자에 의해 수행된 연구결과는 와이어 로우프 등의 파단조건, 효과적인 계류를 위한 윈치배치 및 앵커링 방법 등 수동적인 관점에서 접근한 경우가 대부분이다. 따라서 본 논문에서는 윈치시스템을 이용하여 부유체의 동적특성을 능동적으로 제어할 경우의 제어계 설계문제에 대해 고찰하였다. 특히 제어기 설계에 있어, 기존의 LQ 제어기 설계법에 도입되는 평가함수에 주파수 특성을 부여하고, 그 평가함수를 최소로 하는 제어기를 구하는 방법을 이용하였다. 이 방법은 제어계의 주파수 특성을 체계적으로 개선하고자 하는 것으로, 제어입력 및 부가적인 외부입력신호에 의해 제어대상의 고주파특성이 여기되지 않도록 하여, 주어진 설계사양을 체계적이고 용이하게 만족시킬 수 있다는 것을 그 특징으로 들 수 있다. 예를 들어 H_2/H_∞ 등의 제어기 설계법을 통해 얻을 수 있는 제어성능 등

을 간단한 접근법으로도 달성할 수 있음을 확인하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통해 제안된 제어기 설계법의 유효성과 유용성을 검증하였다.

후 기

이 논문은 2013년 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양플랜트 거주용 부선의 계류윈치 제어시스템 개발). 또한, 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012R1A1A2039012).

References

- [1] An, Y. J. (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] Bernt, J. L., Fang, S. and Blank, M. (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.
- [3] Cho, S. H., Yang, S. Y. and Park, R. S. (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.
- [4] Dokko, W. and Yang, S. Y. (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.
- [5] Ha, J. M., Han, D. S. and Han, G. J. (2008), "The Study for Improve the Braking Power of Mooring Winch Brake", Proceedings of the KSME Conference, pp. 512-517.
- [6] Ha, J. M., Han, D. S. and Han, G. J. (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.
- [7] Ha, J. M., Han, D. S. and Han, G. J. (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.
- [8] Kang, C., Jeong, J. and Kim, Y. (2013), "A Study on Control System Design for Ship Mooring Winch System", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 89-98.

- [9] Lee, D. J. (2004), "Dynamic Characteristic of a Hydraulic Fishing Winch Simulator", Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 37, No. 4, pp. 330-336.
- [10] Lee, D. J., Kim, J. K. and Kim, B. S. (2000), "Design of an Automatic Winch System for Small Fishing Vessel", Proceedings of the Korean Society of Fisheries Technology Conference, pp. 57-58.
- [11] Lee, D. R. and Chun, S. H. (2007), "Characteristics of Ship Winches and Their Hydrostatic Drives", Transactions of The Korea Fluid Power Systems Society, Vol. 4, No. 2, pp. 27-34.
- [12] Lee, Y. S., Jeong, T. G., Jung, C. H. and Kim, S. W. (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.

원고접수일 : 2013년 7월 29일

심사완료일 : 2014년 2월 3일

원고채택일 : 2014년 2월 10일