大 韓 造 船 學 會 論 文 集
第 36 卷 第 2 號 1999年 5月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 36, No. 2, May 1999

# 조수간만의 차를 고려한 새로운 하역 시스템의 능동 제어

김형석*, 정달도*, 최승복*, 이재욱**

# Active Control of a New Cargo Handling System Adapted for Time-Varying Tide

by

Hyoung-Seok Kim*, Dar-Do Chung*, Seung-Bok Choi* and Jae-Wook Lee**

## 요 약

본 연구에서는 조수간만의 차가 큰 항만에 적합한 새로운 하역 시스템을 제안하였다. 새로운 하역 시스템은 기존의 갑문 이용 방식 대신에 일종의 유압 엘리베이터를 사용함으로써 조수간만의 차에 따라 변하는 선박의 높이로 실시간 제어하여 선적 혹은 하역을 하는 방식이다. 한번에 대량의 컨테이너를 처리하기 위해 컨테이너 팔레트 운송차를 도입함으로써 기존 시스템에 비해 시간당 처리능력을 높일 수 있고, 선적 및 하역의 전 과정을 자동화함으로써 작업 효율을 극대화할 수 있도록 하였다. 새로운 하역 시스템의 개념 입증을 위해 소형 하역 시스템 모델을 설계·제작하였다. 제작된 모델은 컨테이너 팔레트 운송차, 플랫폼과 리프트 칼럼의 복합 구조물, 그리고 전용 운반선으로 구성된다. ER(electro-rheological) 밸브-실린더에 의해 구동되는 플랫폼은 조수간만의 차와 파도에 의해 변하는 선박의 높이를 능동적으로 추적 제어하게 된다. 동적 모델링을 통해 플랫폼의 운동 지배 방정식을 도출하였고, 파도 가진으로 인한 선박의 거동 및 조수간만의 차를 모델링하였다. 선적 및 하역의 자동화와 플랫폼의 정확한 위치 제어를 위해 시퀀스 제어기와 PID(proportional-integral-derivative) 위치 제어기가 연계된 제어 시스템을 구성하였다. 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 하역 시스템의 유용성을 입증하였다.

## Abstract

This paper presents a novel cargo system adapted for a sea port subjected to severe time-varying tide. The proposed system can perform loading or unloading by using a sort of hydraulic elevator associated with real-time position control. As a preliminary phase, a small-sized model of the cargo system is designed and constructed. The model consists of three principal components ; container palette transfer(CPT) car, platform with lifting columns

접수일자 : 1998년 12월 7일, 재접수일자 : 1999년 4월 2일

* 인하대학교 기계공학과,
** 정회원, 인하대학교 선박해양공학과

and cargo ship. The platform activated by the electro-rheological(ER) valve-cylinder is actively controlled to track the position of the cargo ship subjected to be varied due to the time-varying tide and wave motion. Following the derivation of the dynamic model for the platform and cargo ship motions, an appropriate control scheme incorporating time sequence and PID(proportional-integral-derivative) controller is formulated and implemented. Both the simulated and the measured control results are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed cargo system.

## 1. 서 론

조수간만의 차가 큰 인천항은 갑문식 도크를 건설하여 선적 및 하역을 수행하고 있다. 그러나 갑문식 도크를 이용하는 방식은 막대한 초기 투자비를 필요로 할뿐만 아니라, 해수면 높이를 일정하게 유지할 수 있는 내항의 면적이 고정되어 있기 때문에 물동량이 증가하여도 하역 시설을 증설하는데 어려움이 있다. 이로 인하여 시간당 처리 능력의 한계로 인한 극심한 체선 현상이 빚어지고 있다. 조수간만의 차로 인해 발생한 이러한 문제점을 극복하기 위해 본 연구에서는 새로운 하역 시스템을 제안한다. 즉 갑문을 이용하여 내항의 수면을 일정하게 유지하면서 선적 및 하역을 하는 방식이 아니라, 부두와 바다 사이에 리프트 칼럼과 플랫폼으로 구성된 일종의 유압 엘리베이터를 설치하고, 컨테이너를 적재한 차량을 플랫폼 위에 직접 실은 후 이를 선박의 높이 혹은 부두의 높이로 위치 제어함으로써 조수간만의 차에 관계없이 선적 및 하역을 수행할 수 있는 원리이다. 따라서 기존의 컨테이너 운반용 트레일러와 컨테이너선 사이에서 크레인으로 컨테이너를 1개씩 옮기는 방식에 비하여 시간당 처리 능력이 월등히 향상될 수 있다. 뿐만 아니라, 선적 및 하역의 전과정을 자동화함으로써 작업 효율을 더욱 높일 수 있다.

제안된 새로운 개념의 하역 시스템을 실험적으로 성능 및 유용성을 입증하기 위해 먼저 소형 하역 시스템 모델을 설계 및 제작하였다. 제작된 모델은 컨테이너 팔레트 운송차 모델, 일종의 유압 엘리베이터로서 ER 밸브-실린더로 구동되는 플랫폼과 리프트 칼럼의 복합 구조물, 그리고 전용 운반선 모델 등 크게 3가지 주요 부분으로 구성된다. 플랫폼을 구동할 작동기로는 스마트 ER 밸브 브리지 실린더 시스템을 도입함으로써, 기존의 복잡한 유압 서보 시스템과는 달리 전기장의 조율만으로 피스톤 양단의 압력차를 조절하는 간단한 방식으로 연속적인 위치 제어가 가능하다[1]. 소형 하역 시스템 모델은 크게 2개의 수조로 구성되었고, 양수 펌프를 설치하여 조수간만의 차를 구현할 수 있도록 하였으며, 실제 항구에서의 파도를 구현하기 위한 조파 장치도 설치하였다.

동적 모델링을 통해 플랫폼의 운동 지배 방정식을 도출하였고, 파도 가진으로 인한 선박의 거동 및 조수간만의 차를 모델링하였다. 플랫폼을 정확하게 위치 제어하는 동시에 선적 및 하역의 전과정을 자동화하기 위하여 위치 제어기와 시퀀스 제어기가 연계된 형태의 제어 시스템을 구성하였다. 이를 바탕으로 실제 항구에서 일어날 수 있는 다양한 외부 조건을 적용하여 그에 따른 선적 및 하역 과정에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 제작된 소형 하역 시스템 모델을 통한 실험을 수행함으로써 제안된 새로운 하역 시스템의 유용성을 입증하였다.

## 2. 하역 시스템 모델의 구성

### 2.1 하역 시스템의 원리

본 연구에서 제안된 새로운 하역 시스템의 작동원리를 제작된 소형 하역 시스템 모델(Fig.1 참조)을 기준으로 설명하면 다음과 같다. 초기 상태에서 플랫폼은 설정된 높이에 위치하며, 브리지와 윙(wing)은 모두 열려 있는 상태로 놓여 있게 된다. 컨테이너 팔레트 운송차가 부두에 도착하면, 부두 위의 광전 스위치(photoelectric switch)가 이

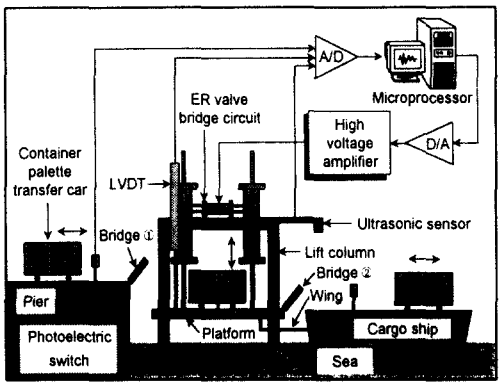



Fig.1 Schematic diagram of the proposed cargo handling system

를 감지하고, 플랫폼은 초기 설정된 높이에서 부두의 높이로 제어된다. 플랫폼이 부두의 높이로 정확하게 제어된 후, 초기 상태에는 열려 있던 부두 위의 브리지 ①이 닫히면서 플랫폼과 부두를 이어주고, 컨테이너 팔레트 운송차가 부두에서 플랫폼으로 이동한다. 이때 부두 위의 광전 스위치는 꺼지면서 잠시 후 플랫폼 위의 광전 스위치가 감지된다. 이것으로 마이크로 프로세서는 컨테이너 운송차가 플랫폼 위에 안전하게 실린 것으로 판단한다. 부두와 플랫폼을 이어주는 브리지 ①은 다시 열려 원상태로 복귀하고 플랫폼은 선박의 높이를 향해 하강한다. 플랫폼은 ER 밸브 브리지-실린더 시스템에 의해 구동되어 상하로 운동하게 되는데, 플랫폼의 높이는 변위센서(linear-variable differential transformer)에 의하여 연속적으로 측정되며, 선박의 높이는 선미 부분을 초음파 센서(ultrasonic sensor)를 통해 연속적으로 측정함으로써 얻어진다. 요구 위치와 실제 위치간의 차이를 오차 신호로 하여 마이크로 프로세서에 의해 위치 제어를 수행하며 플랫폼의 높이를 선박의 높이로 정확하게 추적하도록 제어한다. 컨테이너 팔레트 운송차를 싣고 선박의 높이로 하강하던 플랫폼은 선박 높이와의 오차가 허용 범위에 들게 되면 윙으로 플랫폼을 선박의 후미와 연결한다. 이때 초기에 열려 있던 플랫폼 위의 브리지 ②가 닫히면서 컨테이너 운송차가 선박으로 이동하게 된다. 이때 플랫폼 위의 광전 스위치가 꺼지면서 잠시 후 선박 위의 광전 스위치가 켜지게 되고, 이것으로 컨테이너 운송차가 선박에 안전하게 실렸음을 판단한다. 이로써 선적 과정이 1회 이루어지며, 플랫폼은 자동적으로 윙 및 브리지 ②를 연 후 설정된 초기 위치로 복귀함으로써 선적 과정이 모두 완료된다. 하역 과정은 선적 과정의 역순으로 진행된다.

### 2.2 하역 시스템 모델의 설계 및 제작

제안된 하역 시스템 모델의 가장 핵심 부분은 팔레트 운송차를 싣고 선박의 높이와 부두의 높이 사이를 수직 이동할 일종의 유압 엘리베이터인 리프트 칼럼과 플랫폼의 복합 구조물이다. 운송차 모델의 크기를 고려하여 플랫폼의 크기를 600(가로)×600(세로)mm로 결정하였고, 제작된 플랫폼의 자체 질량과 실린더 피스톤 로드의 질량 및 플랫폼 위에 설치된 부속 장치들을 포함한 총질량은 17kg이다. 리프트 칼럼은 4세트의 선형 가이드로 구성함으로써 플랫폼이 피칭과 롤링 없이 1자유도 상하 운동을 원활하게 할 수 있도록 설계하였다.

플랫폼을 상하로 구동할 작동기로는 기존의 복잡하고 고가인 유압 서보 시스템 대신에 최근 각광받고 있는 스마트 재료의 하나인 ER 유체를 이용한 ER 밸브-실린더 시스템을 도입하였다. ER 유체는 일반적으로 비전도성 용매에 전도성 입자를 분산시킨 콜로이드 용액으로 전기장 무부하시에는 비전도성 용매 중에 분산된 전도성 입자가 자유로이 운동하는 뉴토니안(Newtonian) 유체의 거동을 보인다. 그러나 전기장 부하시에는 입자가 대전됨으로써 체인형 구조를 형성하여 일정한 항복전단응력을 갖는 빙햄(Bingham) 유체의 거동을 보인다. 이러한 거동은 빙햄 모델로서 그 역학적 성질이 표현된다[2].

$$\tau = \tau_y(E) + \eta\dot{\gamma}, \quad \tau_y(E) = aE^{\beta} \tag{1}$$

여기서 $\tau$는 ER 유체의 전단 응력을 나타내고, $\eta$는 ER 유체의 점성계수이며, $\dot{\gamma}$은 전단 속도비(shear rate)를 나타낸다.

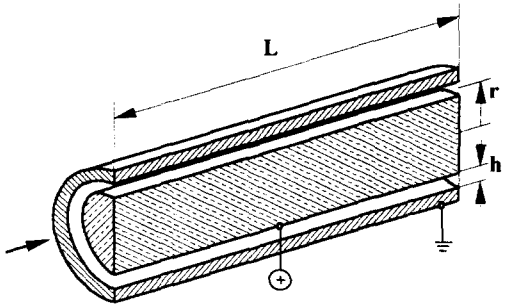



Fig.2 Geometry of a cylindrical ER valve

$\tau_y(E)$는 전기장 부하에 따른 ER 유체의 항복 응력을 표현하는 것으로 전기장의 세기에 따라 지수적으로 증가한다. 비례상수 $\alpha$와 지수 $\beta$는 ER 유체 조성에 사용된 용매와 입자의 종류, 입자의 중량비, 수분 함유량 등에 따라 달라지는 ER 유체의 고유 특성치이다. 이러한 계수는 전기점도계를 사용하여 빙햄특성 실험을 수행함으로써 구해진다. 본 연구에서는 실리콘 오일(점도:30cs)을 용매로 하고 특수 화학 처리된 전분계 입자를 전도성 입자로 사용하여 입자 중량비 30%로 자체 조성한 실리콘계 ER 유체를 사용하였다. 빙햄특성 실험 결과 $144.6E^{1.77}$Pa의 관계가 얻어졌으며, 전기장 $E$의 단위는 kV/mm이다.

전기장 부하시 ER 유체는 빙햄 특성으로 인해 유체의 흐름에 저항하는 특성을 갖게 되며, 이를 이용한 실린더형 ER 밸브의 전극 형상을 Fig.2에 간략하게 나타내었다. 전기장 무부하시, ER 밸브의 압력 강하는 오직 유체의 점성에 의해서만 발생하고, 유량에 비례한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta P_\eta = 12\eta \frac{L}{bh^3} Q_{NE} \tag{2}$$

여기서 $L$은 전극 길이, $b$는 전극의 유효 너비, $h$는 전극 사이의 간극, $Q_{NE}$는 전기장 무부하시 전극 사이를 흐르는 ER 유체의 유량이다. 반면에 전기장을 부하하면, $\Delta P_\eta$ 이외에 ER 유체에 전기장이 가해짐으로써 생성되는 항복전단응력에 의한 압력 강하 $\Delta P_{ER}$이 추가적으로 발생하게

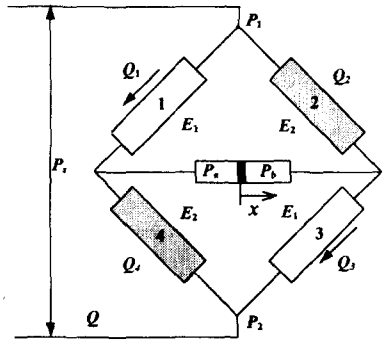



Fig.3 ER valve bridge cylinder system

되며, 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta P_{ER} = 2\frac{L}{h}\tau_y(E) \tag{3}$$

따라서 전기장 부하시 ER 밸브 1개에서 얻어지는 압력 강하 $\Delta P_E$는 유체의 점성에 의한 성분 $\Delta P_\eta$와 전기장 부하에 따른 성분 $\Delta P_{ER}$을 더함으로써 얻어진다.

$$\begin{aligned}\Delta P_E &= \Delta P_{ER} + \Delta P_\eta \\ &= 2\frac{L}{h}\tau_y(E) + 12\eta\frac{L}{bh^3}Q_E\end{aligned} \tag{4}$$

여기서 $Q_E$는 전기장 부하시 전극 사이를 흐르는 ER 유체의 유량이다. 식(4)로부터 알 수 있듯이, ER 밸브의 성능은 부하된 전기장($E$)과 전극 간극($h$), 전극 길이($L$)와 같은 설계 변수에 영향을 받는다. 따라서 소형 하역 시스템 모델에서 플랫폼을 구동하기 위해 요구되는 압력을 기준으로 전기장에 따른 압력 강하를 해석하였고, 이로부터 전극 길이 $L$은 264mm, 전극 간극 $h$는 0.8mm, $r$은 12.5mm로 결정하였다.

ER 밸브에서 얻어지는 압력 강하를 이용하여 실린더 피스톤의 위치를 제어하기 위해서 Fig.3과 같이 ER 밸브 4개를 사용하여 Kirchhoff의 전기회로와 등가인 ER 밸브 브리지 회로를 구성하였다. Fig.3에 나타낸 ER 밸브 브리지를 구성하는 각각의 ER 밸브에 대한 압력 강하식을 식(4)와 같이 구성하고, 각 식에 대해 연속방정식을 적용하여 정리하면, 실린더 피스톤 양단의 압력차 $\Delta P$는

다음과 같이 얻어진다.

$$\Delta P = P_a - P_b$$
$$\frac{d(\Delta P)}{dt} = -\frac{2}{RC}\Delta P - \frac{2A}{C}\dot{x} - \frac{2}{RC}[\Delta P_{ER}(E_1) - \Delta P_{ER}(E_2)] \quad (5)$$

따라서 전기장 $E_1$과 $E_2$의 조율만으로 피스톤의 위치를 제어할 수 있게 된다.

소형 하역 시스템 모델은 크게 2개의 수조로 구분되며, 양수 펌프를 이용하여 수면의 높이를 약 4cm/min의 속도로 조절함으로써 조수간만의 차를 구현할 수 있도록 제작하였다. 수조의 한쪽은 바다 부분으로 플랫폼과 리프트 칼럼의 구조물이 설치되어 있으며, 다른 한쪽은 부두 부분으로서 조수간만의 차를 구현하기 위한 물의 임시 저장소이다. 리프트 칼럼의 앞쪽에는 모형 선박을 제작하여 설치하였으며, 수면 높이의 변화에 따라 수직 운동만을 할 수 있도록 장치하였다. 또 실제 항구에서 일어날 수 있는 조건을 실험 장치에서도 구현하기 위하여 조파 장치를 설치하였다. 그리고 부속 장치로 2개의 브리지와 윙(wing)이 있는데, 모두 공압 실린더로 구동되며, 브리지는 안전 장치의 역할을 하고 윙은 플랫폼과 모형 선박을 고정하여 좌우 운동을 방지하는 역할을 한다. Fig.4는 이러한 설계에 의해 제작된 소형 하역 시스템 모델의 사진을 보여준다.

Fig.4 Photograph of the model of proposed cargo handling system

## 3. 시스템 모델링

Fig.1에 나타난 것과 같이 플랫폼은 상하 1자유도 운동만을 할 수 있도록 리프트 칼럼에 설치되어 ER 밸브 브리지에 전기장을 부하함으로써 발생하는 실린더 피스톤 양단의 압력차에 의해 구동되며, 플랫폼의 위치 제어를 위하여 동적 모델링을 통해 운동 지배 방정식을 구하면 다음의 수식으로 표현된다.

$$M\ddot{x} + Mg + F_f = \Delta P \cdot A \quad (6)$$

여기서 $x$는 플랫폼의 상하 이동 변위, $M$은 플랫폼의 자체 질량과 그 위에 장착된 브리지와 윙, 레일 등의 부가 장치 및 실린더 로드의 질량과 컨테이너 팔레트 운송차의 질량까지 합한 총질량, $F_f$는 시스템에 존재하는 마찰력의 총합, $\Delta P$는 실린더 피스톤 양단에 걸리는 압력차, $A$는 사용된 4개의 실린더 피스톤 램의 총단면적이다. 여기서 마찰력은 관성력의 불확실성과 더불어 위치 제어 시스템의 제어 정밀도를 떨어뜨리는 요인으로서, 정지 마찰력으로 인한 응답 지연 현상과 정상상태에서도 오차가 줄어들지 않는 등의 문제점을 발생시킨다. 따라서 이러한 문제점들의 발생을 최소화하기 위해서 마찰력을 보상해주는 것이 필요하며, 실험적 방법을 통해 마찰력을 모델링하여 앞먹임 제어를 수행함으로써 해결할 수 있다. 일반적으로 마찰력 $F_f$는 속도의 함수로 모델링되며, 동특성 실험을 통해 측정될 수 있다. 즉, 시스템에 일정한 값의 제어 입력 $u_s$를 부하하면 속도가 정상상태에서는 일정한 값 $v_s$로 얻어지며, 이때 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$u_s = F_f(v_s) \quad (7)$$

식(7)의 관계를 이용하여 제어 입력 $u_s$를 다양한 값으로 변화시키면서 $v_s$를 측정하면 마찰력 모델을 실험적으로 측정할 수 있게 된다[3]. 이러한 방법으로 ER 밸브에 부하하는 전기장의 세기를 변

화시키면서 플랫폼의 속도를 측정한 후, 이것을 실린더 피스톤에 작용하는 힘과 플랫폼 속도와의 관계로 변환하면 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$F_f = B\dot{x} + F_{fn}(\dot{x}) \tag{8}$$

여기서 $B$는 점성 마찰계수이고, $F_{fn}(\dot{x})$는 정지 마찰력과 쿨롱 마찰력의 합이다. 마찰력으로 인한 위치 제어 성능의 저하는 주로 마찰력의 비선형 항인 $F_{fn}(\dot{x})$로 인한 것이며, 플랫폼의 위치 제어 성능의 향상을 위해서는 마찰력의 비선형 요소를 앞먹임 제어를 통해 보상해 주는 것이 필요하다.

앞먹임 제어를 통해 마찰력의 비선형 요소를 보상할 수 있다고 가정하면, 플랫폼의 위치 제어를 위한 운동 방정식은 식(6)과 식(8)로부터 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Mg = \Delta P \cdot A \tag{9}$$

제작된 소형 하역 시스템 모델을 통한 실험에 앞서, 본 연구에서 제안한 새로운 하역 시스템의 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 플랫폼의 운동 방정식뿐만 아니라, 선박의 거동 또한 수학적으로 모델링해야 하며, 선박의 거동을 나타내는 개략도를 Fig.5에 나타내었다. Fig.5에서 $A_S$는 수표면에서의 선박의 단면적을 나타내고, $V$는 선박의 물속에 잠긴 부분이 밀어낸 체적이고, $y$는 선박이 수직 방향으로 움직인 변위이다. 본 연구에서는 선적 및 하역이 일어나는 동안의 선박 거동 모델링만이 필요하다.

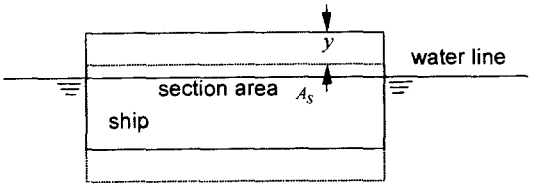



Fig.5 Schematic diagram of the cargo ship motion

따라서 선박이 가질 수 있는 총 6자유도 운동 중 수직 운동(heaving)만 일어나고 가정하였다. 파도의 가진에 따른 선박 거동 모델링에는 유체의 부가질량을 포함해야 하지만[4,5] 선박의 거동에 따른 하역시스템의 제어에 연구의 목적이 있으므로 포함하지 않는다고 가정하였다. 따라서 선적 및 하역시 파도의 가진으로 인한 선박의 거동은 다음의 식으로 나타낼 수 있다[6].

$$\rho(V + V')\ddot{y} + c\dot{y} + \rho g A_S y = F_{wave} \tag{10}$$

여기서 $\rho$는 바닷물의 밀도, $V'$는 적재로 인한 선박의 체적 변화량을 나타내며, $\rho V'$는 적재로 인한 선박의 질량 변화량을 나타낸다. 그리고 $c$는 바닷물의 점성계수, $F_{wave}$는 파도로 인한 가진력을 나타낸다. 일반적으로 배의 길이에 비하여 파도의 주기가 크고, 파도와 파도의 가진력이 정현파라고 가정하면 파도에 의한 가진력은 다음의 식으로 표현될 수 있다[6].

$$F_{wave} = \rho g A_S h_0 \cos\frac{2\pi t}{T_E} \tag{11}$$

여기서 $h_0$는 파도 진폭(wave amplitude)이고, $T_E$는 파도의 산이 선박의 중심부를 지나는 주기를 나타낸다.

본 하역 시스템이 조수간만의 차가 일어나는 동안에도 선적 및 하역 작업을 원활하게 수행할 수 있는지 여부를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하기 위해서는 조수간만의 차 또한 모델링해야 하며, 조수간만의 차로 인한 수면의 높이 $z$는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$z = z_{ave} + \frac{1}{2} H_{tide} \sin\frac{t}{T_{tide}} \tag{12}$$

여기서 $z_{ave}$는 평균 수면 높이, $H_{tide}$는 조수간만의 차, $T_{tide}$는 조수간만의 차가 일어나는 주기이다. 그러나 본 연구에서 수행된 시뮬레이션 및 실험은 제작된 소형 하역 시스템 모델을 기준으로 수행되었기 때문에 시간이 작게 축소되어 표현되고, 수위가 변하는 속도가 일정하다고 가정하면, 식(12)는 다음의 식으로 간략화할 수 있다.

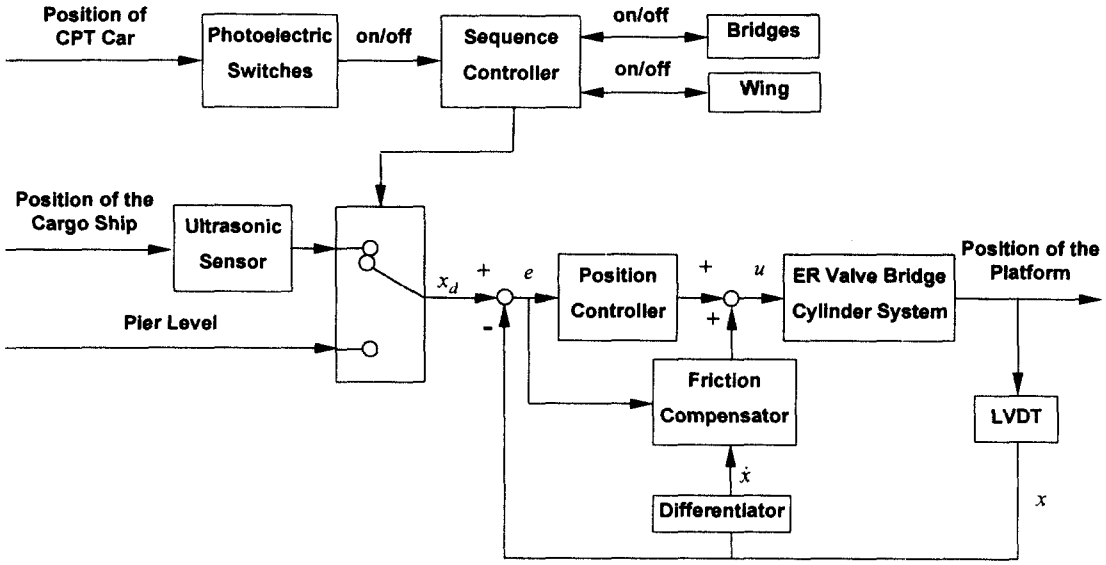



Fig.6 Block-diagram of the control scheme

$$\dot{z} = V_{tide} \tag{13}$$

여기서 $V_{tide}$는 조수간만의 속도이다.

## 4. 제어기 설계

본 연구에서 제안하는 새로운 하역 시스템은 크게 두 가지 방법의 제어로직을 필요로 한다. 하나는 선적 및 하역 과정의 자동화를 위한 제어로직이며, 다른 하나는 플랫폼의 높이를 부두의 높이 혹은 선박의 높이로 정확하게 위치 추적할 수 있는 제어로직이다. 따라서 여기서는 새로운 하역 시스템의 제어기로 선적 및 하역의 자동화를 위한 시퀀스 제어기(sequence controller)와 플랫폼의 높이를 요구 위치에 정확히 추적 제어하기 위한 PID 위치 제어기가 결합된 형태로 설계하였으며, 블록 선도를 Fig.6에 나타내었다.

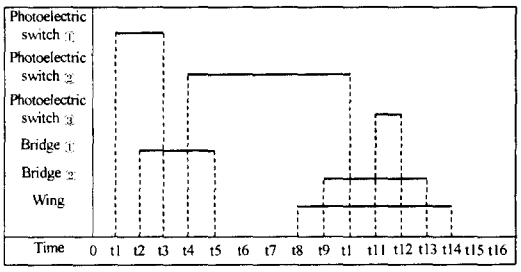
### 4.1 시퀀스 제어기

제작된 소형 하역 시스템 모델을 통한 실험에서 시퀀스 제어에 의한 자동화를 구현하기 위하여 광전 스위치 3개와 브리지 2개 및 윙을 사용하였다. 이들 6개의 센서 및 작동기는 모두 on/off 상태의 값만을 갖는다. 따라서 이들 6개의 on/off 조합으로부터 현재 어떠한 과정이 진행되고 있는지를 알 수 있으며, 이것은 선적 및 하역 과정 중의 각 상태에서 그러한 on/off 조합이 모두 다르기 때문이다. 광전 스위치 3개를 각각 부두, 플랫폼, 선박 위에 설치하여 컨테이너 운송차의 위치를 감지하도록 하였고, 일종의 안전 장치 역할을 할 수 있도록 부두와 플랫폼의 위에 각각 브리지를 설치하여 솔레노이드 밸브로 작동되는 공압 실린더에 의해 on/off 형태로 동작하도록 하였다. 요구 위치가 선박의 높이가 되어 선적 혹은 하역이 이루어질 때, 파도 혹은 컨테이너 운송차의 이동에 따른 진동으로 추적 제어 오차가 갑자기 커지는 것을 방지하기 위해, 선박과 플랫폼을 고정해 주기 위한 윙을 플랫폼에 설치하였으며, 이 역시 공압에 의해 on/off 형태로 작동되도록 하였다.

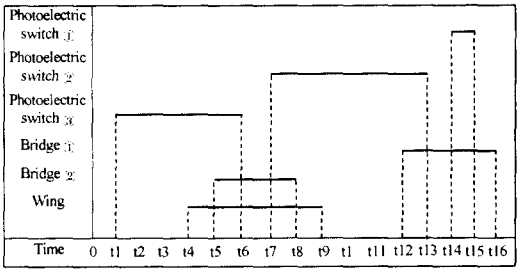
선적 및 하역 과정에서 컨테이너 팔레트 운송차 모델의 이동에 따른 각 시간마다의 위치가 광전 스위치에 의해 감지되고, 그에 따라 시퀀스 제어기에 의해 브리지와 윙이 미리 설정된 형태로 작동되면서 플랫폼의 요구 위치가 스위칭되며, 위치 제어기에 의해 플랫폼이 그러한 요구 위치를 추적 제어하게 된다. 선적 및 하역 자동화를 위해 사용

된 스위치와 작동기가 시간의 흐름에 따라 어떠한 형태로 작동하는지를 나타낸 타임 챠트를 Fig.7에 나타내었다[7]. Fig.7에서 광전 스위치 ①은 부두 위에, 광전 스위치 ②는 플랫폼 위에, 광전 스위치 ③은 선박 위에 설치되었고, 브리지 ①은 부두와 리프트 칼럼 사이에, 브리지 ②는 플랫폼 위에 설치되었음을 나타낸다. 3개의 광전 스위치와 2개의 브리지 및 윙이 각각 작동하고 있는 구간을 실선으로 나타내었으며, 시간이 진행되면서 타임 챠트에 따라 작동기 및 센서가 동작하여 자동화된 선적 및 하역 과정이 이루어지게 된다.

Fig.7의 타임 챠트에 따라 시퀀스 제어기에 의하여 스위칭되는 요구 위치에 대하여 설명하며, 먼저 선적 과정에 대하여 다룬다. 부두의 높이를 기준으로 수직으로 좌표계를 설정하였으며, 부두의 높이를 0으로 하여 위쪽은 양의 값을 갖고 아래쪽은 음의 값을 갖는다. 초기 상태에는 플랫폼의 요구 위치를 -0.1m로 설정하였다. 선적 과정이 시작되어 컨테이너 팔레트 운송차가 부두 위에 설치된 광전 스위치 ①에 의해 감지되면, 플랫폼




(a) time chart for loading motion




(b) time chart for unloading motion

Fig.7 Time chart for sequence controller

의 요구 위치는 부두의 높이인 0으로 바뀌고, 추적 제어 후 브리지 ①이 닫혀 컨테이너 팔레트 운송차가 플랫폼으로 이동한다. 플랫폼에 안전하게 이동하여 광전 스위치 ②에 감지되면, 플랫폼의 요구 위치는 선박의 높이로 바뀌어진다. 선박의 높이는 리프트 칼럼에 평행하게 설치된 초음파 센서에 의해 실시간으로 측정된다. 선박의 높이를 추적 제어한 후 윙으로 선박과 플랫폼을 고정하고, 브리지 ②가 닫힌 후 컨테이너 팔레트 운송차가 선박 위로 이동하면서 광전 스위치 ③에 감지되면, 다시 미리 설정된 높이인 -0.1m로 플랫폼의 요구 위치가 바뀌어 추적 제어가 이루어지며, 그 후 선적의 과정이 1회 끝나게 된다. 하역 과정시에도 마찬가지의 형태로 요구 위치가 스위칭 된다.

### 4.2 위치 제어기

Fig.6에 나타난 것과 같이, 선적 및 하역의 각 과정마다 시퀀스 제어기에 의해 요구 위치가 적절하게 부두의 높이와 선박의 높이로 스위칭 되며, 그러한 요구 위치를 추적 제어하기 위해서는 위치 제어기가 필요하다. 위치 제어기로는 다양한 제어 로직의 적용이 가능하며, 여기서는 PID 제어기를 선택하였다. 제어 이론의 눈부신 발전으로 여러 가지 고성능 제어기들이 많이 제안되었지만, 산업 현장에서는 현재도 PID 제어기가 가장 많이 사용되고 있다. 그것은 PID 제어기가 제어 이득치들을 알맞게 설정하는 것만으로도 비교적 간단하게 우수한 추적 제어 성능을 얻을 수 있는 장점을 갖고 있기 때문이다. 다만 대표적 선형 제어기인 PID 제어기를 사용하여 우수한 제어 성능을 얻기 위해서는, 앞의 모델링 부분에서 언급한 바와 같이 비선형 성분을 제거하여 선형 시스템으로 만드는 것이 바람직하다. 따라서 동특성 실험 결과를 바탕으로 마찰력의 비선형 성분을 앞먹임 제어를 통해 보상하였고, 이로써 시스템의 비선형 성분이 완벽히 제거되었다는 가정하에 PID 제어기를 설계하였다. 실린더 피스톤 양단에 공급되어야 할 압력차 $\Delta P$는 PID 제어기에 의한 제어 입력 $u_{pid}(t)$로 다음과 같이 주어진다.

$$u_{pid}(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (14)$$

여기서 $e(t)$는 요구 위치와 실제 위치의 오차이고, $K_p$, $K_i$, $K_d$는 각각 비례, 적분, 미분 제어 이득치들이다. 따라서 설계된 제어기 $u_{pid}(t)$로부터 ER 밸브에 공급해야 할 입력 전기장은 식(1)과 식(3)으로부터 다음의 조건을 통해 결정된다.

i) when $u_{pid}(t)<0$,

$$E_1 = 0,\ E_2 = \left(\frac{h}{2L\alpha}(-u_{pid}(t))\right)^{1/\beta} \quad (15)$$

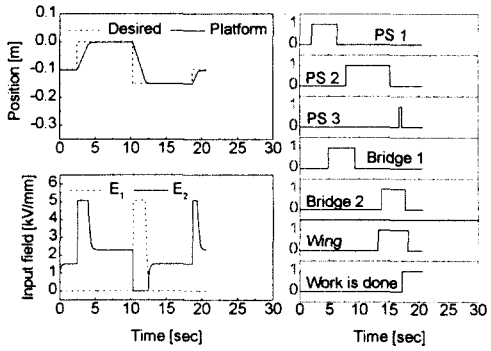
ii) when $u_{pid}(t)>0$,

$$E_1 = \left(\frac{h}{2L\alpha}(u_{pid}(t))\right)^{1/\beta},\ E_2 = 0$$

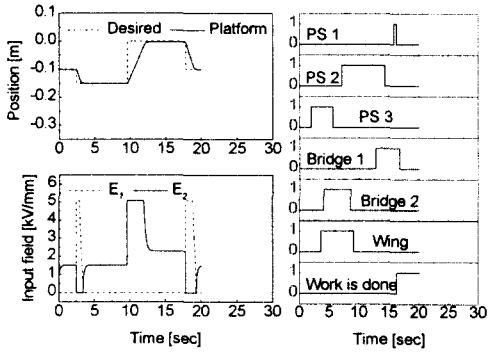
## 5. 제어 결과 및 고찰

본 연구에서 제안한 하역 시스템이 자동화된 공정으로 조수간만의 차에 관계없이 능동적인 선적 및 하역을 수행할 수 있음을 보이기 위하여 수학적 모델링을 통한 컴퓨터 시뮬레이션과 제작된 소형 하역 시스템 모델을 사용한 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 Fig.8~Fig.9에, 실험 결과를 Fig.10~Fig.11에 나타내었다. 결과에 대한 분석에 앞서, 먼저 각각의 그래프의 구성에 대하여 설명하면 다음과 같다. 좌측 상단은 선적 및 하역이 수행되면서 플랫폼이 요구 위치를 추적 제어한 결과를 나타내고, 좌측 하단은 선적 및 하역이 일어나는 동안 ER 밸브 브리지에 입력된 전기장의 세기를 나타낸다. 높은 전기장으로 인한 단락 현상을 방지하기 위하여, 입력되는 전기장의 세기를 최대 5kV/mm로 제한하였다. 요구위치가 초기 위치에서 부두의 위치로 혹은 부두의 위치에서 선박의 위치로 갑자기 변하는 부분에서는 요구 위치와 실제 위치간의 오차가 상당히 크게 발생하기 때문에, 입력 전기장이 최대로 부하됨을 볼 수 있고, 이때 플랫폼이 낼 수 있는 최대의 속도로 상승 혹은 하강하는 것을 볼 수 있다. 우측에 나타낸 7개의 그래프는 자동화를 위해 사용된 광전 스위치 3개와 브리지 2개 및 윙의 on/off된 작동 결과를 나타낸다. 각각의 그래프에서 1은 on을 의미하고, 0은 off를 의미하며, PS 1, PS 2, PS 3은 각각 광전 스위치 1, 2, 3을 나타낸다.

Fig.8과 Fig.10은 조수간만의 차와 파도가 모두 없는 경우에 대한 시뮬레이션과 실험 결과이며, 선박의 높이는 -0.15m로 설정하였다. 이것은 가장 간단한 경우로서, 실험 결과에서 플랫폼의 요구 위치가 급변할 때 약간의 오버슛이 발생하는 것 이외에는 시뮬레이션과 거의 동일하게 추적 제어가 우수하게 이루어지면서 선적과 하역이 수행됨을 볼 수 있다. Fig.9와 Fig.11에는 4cm/min의 속도로 밀물(flow tide)의 효과를 주면서, 파도가 발

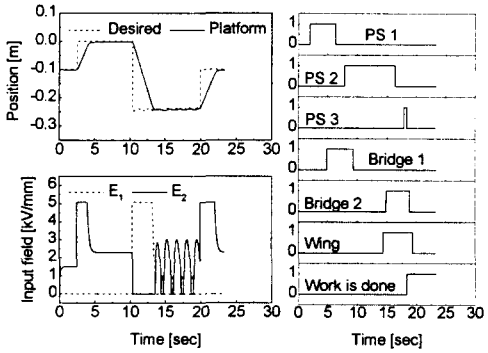



(a) loading

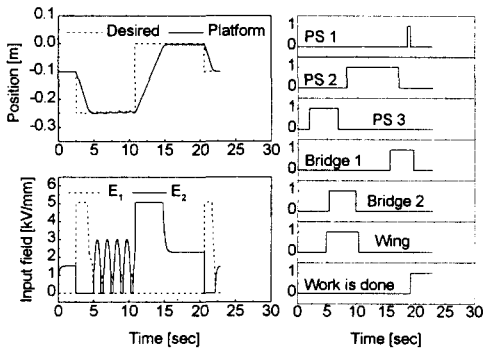



(b) unloading

Fig.8 Simulation result without tide and wave

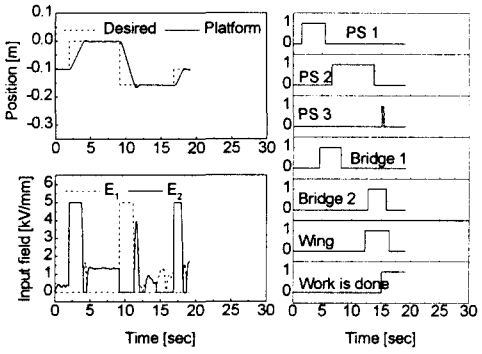



(a) loading

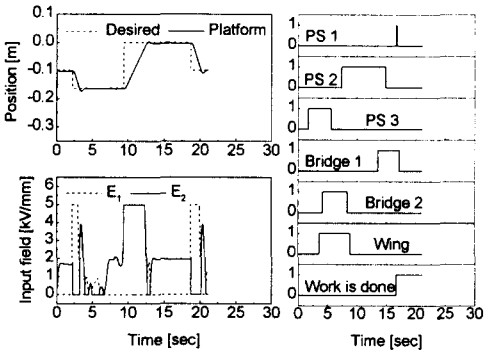



(b) unloading

Fig.9 Simulation result with flow tide and wave

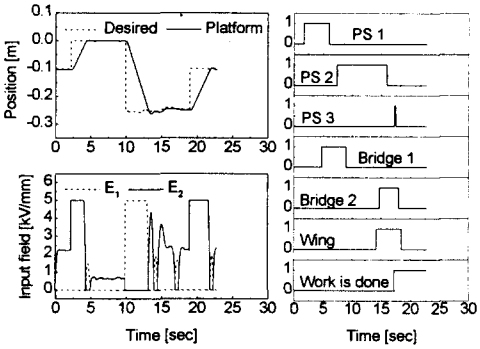



(a) loading

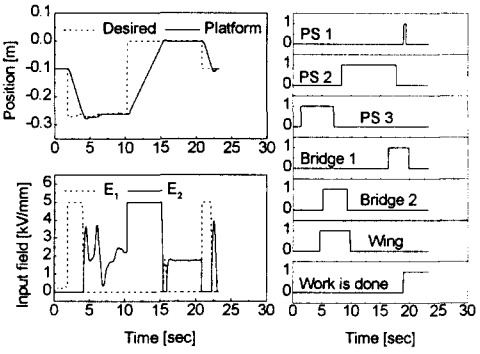



(b) unloading

Fig.10 Experimental result without tide and wave




(a) loading




(b) unloading

Fig.11 Experimental result with flow tide and wave

생할 경우에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과를 나타냈다. 실제 항구의 경우에는 방파제와 같은 시설로 인해 그러한 파도가 발생하지 않지만, 여기에서는 본 하역 시스템이 여러 조건에 따라 변화하는 선박의 높이를 능동적으로 추적 제어하여 선적 및 하역을 수행할 수 있음을 보이기 위해 악조건의 경우를 설정해 보았다. 위치 제어 결과로부터 3~4mm이내의 작은 오차만을 발생하면서 원활하게 선적 및 하역이 수행됨을 볼 수 있으며, 이로써 본 하역 시스템의 효과적인 제어 성능을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 조수간만의 차가 큰 항만에서 조수간만의 차에 관계없이 능동적으로 선적 및 하역 작업을 수행할 수 있으며, 자동화된 시스템으로 인해 작업 효율을 배가할 수 있는 새로운 하역 시스템을 제안하였다. 제안된 하역 시스템의 성능을 실험적으로 보이기 위하여 소형 하역 시스템 모델을 설계·제작하였고, 이를 중심으로 새로운 하역 시스템의 원리를 기술하였다. 시스템을 동적 모델링하여 운동 지배 방정식을 도출한 후, 선적 및 하역의 자동화와 우수한 추적 제어 성능을 얻기 위하여 시퀀스 제어기와 위치 제어기가 연계된 형태의 제어시스템을 구성하였다. 이를 바탕으로 실제 항구에서 일어날 수 있는 여러 조건을 부여하면서 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 수행하였으며, 효율적인 선적 및 하역 과정이 이루어짐을 확인하였다. 따라서, 이러한 개념의 새로운 하역 시스템을 조수간만의 차가 큰 항만에 도입한다면, 조수간만의 차에 구애받지 않으면서 짧은 시간에 많은 컨테이너를 처리함으로써 높은 작업 효율을 가져올 것이다.

현재 보다 우수하며 외란에도 강건한 위치 추적 제어 성능을 위해 슬라이딩 모드 제어기와 같은 강건 제어기 설계가 수행되고 있으며, 본 연구에서 얻은 결과를 바탕으로 조수간만의 차가 큰 항만에 실제로 적용할 수 있는 모델 연구가 진행 중에 있다.

## 후 기

본 연구는 인하대학교 황해권 수송 시스템 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

[1] Choi, S. B., Cheong, C. C., Jung, J. M. and Choi, Y. T., "Position Control of an ER Valve-Cylinder System via Neural Network Controller", Mechatronics, Vol.7, No.1, pp.37-52, 1997.

[2] Adriani, P. M. and Gast, A. P., "A Microscopic Model of Electrorheology", Physics of Fluids, Vol.31, No.10, pp.2757-2768, 1988.

[3] Lee, H. S. and Tomizuka, M., "Robust Motion Controller Design for High-Accuracy Positioning Systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.43, No.1, pp. 48-55, 1996.

[4] 홍사영, 이상무, 홍도천, "콘테이너선의 불규칙파중 운동응답특성에 대한 실험적 고찰", 대한조선학회지, 제24권, 제3호, 1987.

[5] 이상무, 김영환, 홍도천, "최소수면적 쌍동선(SWATH)의 운동특성해석", 대한조선학회지, 제23권, 제4호, 1986.

[6] Muckle, W., Strength of Ship's Structure, Edward Arnold, pp.108-117, 1967.

[7] Levine, W. S., The Control Handbook, CRC Press, pp.345-361, 1996.