

# 서브 트롤리 제어 시스템을 이용한 모바일하버 크레인의 흔들림 억제 제어

## Anti-sway Control of Mobile Harbor Crane using Sub-trolley Control System

김동호†·박영진\*·박윤식\*·김병수\*\*·김은호\*\*

Dongho Kim, Youngjin Park, Youn-sik Park, Byungsoo Kim and Eunho Kim

### 1. 서론

모바일하버는 수심이 깊은 해상에 정박 중인 컨테이너선과 수심이 낮은 항구를 연결하는 움직임은 항구 개념의 선박으로 새로운 해상 컨테이너 운송 수단이다. 모바일하버는 파도, 바람, 조류 등 외부 환경의 의한 영향을 받기 때문에 모바일하버 자체의 롤(roll), 피치(pitch), 히브(heave) 움직임이 지속적으로 발생하게 되어 상하역 작업 시 기존의 안벽 작업과 달리 안정성을 위협받고 작업의 효율이 감소될 수 있다. 따라서 모바일하버 크레인 스프레더의 흔들림을 최소화하는 것이 상하역 작업의 안정성과 효율성 확보에 가장 핵심적인 기술이다.

기존의 크레인은 항만 뿐 아니라 산업계의 여러 용도로 광범위하게 사용되어 왔다. 이러한 크레인들은 주로 이송도중에 의한 흔들림이 큰 문제점으로 대두되어 이를 억제하기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 그러나 모바일하버 크레인은 극한 환경에서 작업을 하기 때문에 기존의 크레인과 달리 외란에 의한 흔들림을 억제시키는 것이 중요하다.

본 연구에서는 KAIST 모바일 사업단에 의해 개발된 D4 크레인 축소 모델에 장착된 서브트롤리 제어 시스템을 이용하여 파도에 의해 야기되는 스프레더의 움직임을 억제하는 제어 알고리즘을 개발하고, 모의 실험을 통해 그 성능을 검증한다.

### 2. 모바일하버 크레인 모델링

D4 크레인은 x 축, y 축 방향으로 미세한 위치 제어가 가능한 서브트롤리 구조로 구성되어 있다. 2 차원 크레인 비선형 모델은 흔들림이 작을 경우 선형 모델로 근사 가능하고, x 축과 y 축에 대한 운동 방정식

은 서로 대칭이며 독립적이므로 그림 1 과 같이 한 축에 대해서만 유도한다. 그림 1 의 크레인 모델에서 줄의 질량을 무시하고 컨테이너를 점 질량으로 가정한 선형화된 운동 방정식은 식 (1)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_l &= \dot{x}_t + l\dot{\theta} \\ ml^2\ddot{\theta} + mgl\theta &= -ml\ddot{x}_t \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $m$  은 스프레더와 컨테이너 질량의 합,  $l$  은 줄의 길이,  $\theta$  는 스윙각,  $x_t$  는 서브트롤리의 변위,  $x_l$  은 컨테이너의 변위,  $g$  는 중력가속도를 의미한다.

크레인에 사용된 구동기는 속도 서보 모터로 동특성이 매우 빠르고, 컨테이너의 흔들림이 크레인의 위치 제어에 미치는 영향이 작다고 가정하면 서브트롤리의 입력이 서브 트롤리의 속도로 간주할 수 있다.

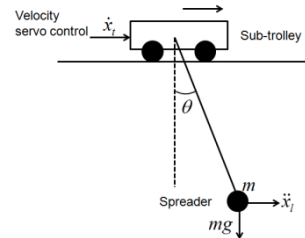


그림 1. 크레인의 동역학적 모델

### 3. 흔들림 억제 제어기 설계

#### 3.1 스프레더 위치 측정 방법

본 연구에서의 흔들림 억제 제어의 목적은 모바일하버 크레인이 상하역 작업 시 스프레더가 원하는 위치에 정지시키는 것이다. 스프레더의 위치 정보는 모바일하버의 흔들림 중심을 전역 좌표계의 원점으로 생각하여 식 (2)와 같이 얻어지며, 이 때 각 변수의 의미는 그림 2 에서 도식적으로 확인할 수 있다.

$$X_l = (X_{t\_main} + X_{t\_sub} + X_{l\_rel}) \cos \theta \quad (2)$$

여기서  $X_{t\_main}$ ,  $X_{t\_sub}$  는 각각 메인트롤리와 서브트롤리에 장착된 모터의 엔코더를 이용해 측정하고,  $X_{l\_rel}$  는 서브트롤리에 장착된 비전센서를 이용해 서

† 교신저자; KAIST 기계공학과

E-mail : kingli@kaist.ac.kr

Tel : (042) 350-3076, Fax : (042) 350-8220

\* KAIST 기계공학과

\*\* KAIST 모바일 사업단

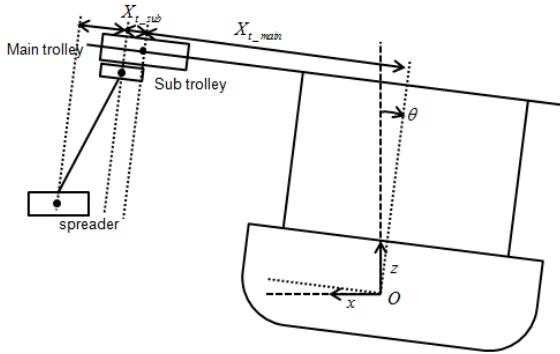


그림 2. 스프레더 위치 측정

브트롤리와 스프레더 간의 상대 변위를 측정한다. 또한  $\theta$  는 모바일하버에 설치된 IMU(Inertia Measurement Unit)센서를 이용해 측정할 수 있다.

### 3.2 흔들림 억제 PD 제어기

그림 2의 전역 좌표계에서의 스프레더 위치 정보를 이용하여 원하는 위치로 추종하는 제어로써, 제어방법으로는 PD 제어를 사용하였다. 페루프 시스템의 구조를 나타내면 그림 3과 같으며 이를 전달함수로 나타내면 식 (3)과 같이 2차 시스템으로 설계할 수 있다.

$$\frac{X_I(s)}{X_{I\_desired}(s)} = \frac{K_D g s + K_P g}{l s^2 + K_D g s + (K_P + 1)g} \quad (3)$$

여기서  $K_P$  는 P 게인값을 의미하고,  $K_D$  는 D 게인값을 의미한다. 스프레더의 목표 위치는 모바일하버가 정지하고 있을 때의 스프레더의 위치로 이는 IMU 센서의 각도 정보를 역기구학 식을 이용하여 계산해 낼 수 있다. 한 축에 대해서 설계된 제어기는 두 축 각각에 적용할 수 있다.

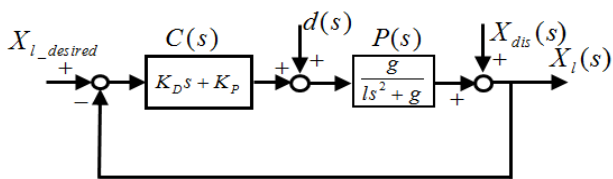


그림 3. 흔들림 억제 제어기의 블록다이어그램

## 4. 모의 실험 결과

설계된 흔들림 억제 제어기의 성능을 확인하기 위하여 D4 축소 모델을 다물체 동역학 시뮬레이션 프로그램인 RecurDyn 을 이용하여 검증하였다. 그림 4의 D4 크레인의 축소 모델에는 진동시험기가 장착되어 있어 과도에 의한 움직임을 모사할 수 있다.

모바일하버는 해상에서 롤과 피치 운동을 제외한 나머지 운동은 미미하여 무시할 수 있으므로, 모의 실험 시 롤, 피치 운동만 한다고 가정한다. 모의 실험 환경에서의 롤, 피치 운동의 주파수는 시연 환경인 0.5Hz, 크기는 0.5°이다. 흔들림 억제 제어 결과는

그림 5와 같으며, 스프레더의 흔들림을 나타내는 x, y 축 각각의 최대변위가 제어하지 않은 경우 보다 95% 감소하였다.



그림 4. RecurDyn 상의 D4 크레인 모델

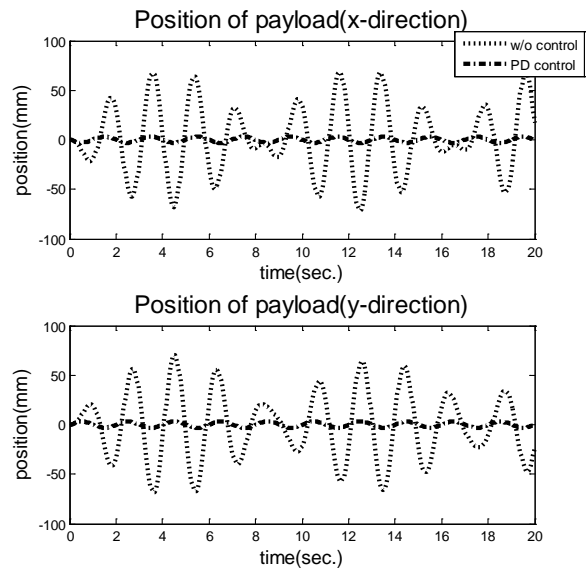


그림 5. 흔들림 억제 제어 결과

## 5. 결론

본 연구에서는 해상에서 상하역 작업을 하게 되는 모바일하버 크레인의 흔들림을 억제시키기 위한 서브트롤리를 이용한 제어 알고리즘을 제안하였다. 여러 가지 센서들을 이용하여 스프레더의 위치 정보를 얻어 목표 위치를 추종하도록 하는 PD 제어기를 설계하였다. 최종적으로 D4 크레인의 축소 모델을 다물체 동역학 시뮬레이션 프로그램인 RecurDyn 을 이용하여 제안된 제어기의 성능을 검증한 결과, 시연 환경에서 흔들림이 95%의 저감효과가 있다는 것을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 모바일하버 원천기술 개발사업과 5 차년도 두뇌한국(BK)21 사업에 의하여 지원되었음.