

해상크레인으로 인양하는 중량물의 Tagline 제어를 위한 다물체계 동역학 시뮬레이션 및 실험

구남국¹ · 이규열² · 권정환¹ · 차주환^{3*} · 함승호⁴ · 하 솔¹ · 박광필⁴

Multibody Dynamics Simulation and Experimental Study on the Tagline Control of a Cargo Suspended by a Floating Crane

Nam Kug Ku · Kyu Yuel Lee · Jung Han Kwon · Ju Hwan Cha · Seung Ho Ham · Sol Ha · Kwang Phil Park

ABSTRACT

This paper describes tagline PD control for reduction of motion for the heavy cargo(load) suspended by a floating crane. The equations of motion are set up considering the 6-degree-of-freedom floating crane and the 6-degree-of-freedom load based on multi-body system dynamics. The tagline mechanism is applied to floating crane to control motion of the heavy cargo(load). The winch, mounted on the deck of floating crane, is used to control the tension of tagline. To generate control force, PD control algorithm is applied. Numerical simulation and experiment is executed to verify the tagline control mechanism. The numerical simulation and experiment shows that the tagline control mechanism reduces the motion of the load suspended by a floating crane.

Key words : Floating Crane, PD Control, Tagline System

요약

본 논문에서는 해상 크레인으로 인양하는 중량물의 운동 감쇠를 위하여 Tagline을 이용한 PD제어를 수행하였다. 해상 크레인 및 중량물을 각각 6자유도 운동을 하는 강체로 가정하고 뉴턴의 제 2법칙에 따라 운동 방정식을 유도하였다. 중량물의 운동을 감쇠하기 위한 제어 메커니즘으로 Tagline을 사용 하였고, 해상 크레인의 Deck에 설치한 Winch로 Tagline의 장력을 조절하였다. 장력을 조절하는 제어 알고리즘으로는 PD제어를 사용 하였다. 이를 바탕으로 수치적 제어 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 1/100 Scale의 모형 해상 크레인을 제작하고 실험을 통해 제어 시뮬레이션의 결과를 검증 하였다. 제어 시뮬레이션과 모형 시험 수행 결과 Tagline을 이용한 제어가 중량물의 운동을 감쇠시키는데 효과가 있음을 알 수 있었다.

주요어 : 해상 크레인, 비례-미분 제어, Tagline

* 본 연구는 a) 대우조선해양(주), b) 국방과학연구소 수중운동체기술특화센터 SM-11과제 “수중 운동체의 체계/부체계 기능 및 성능 시뮬레이션을 위한 네트워크 기반의 가상(Virtual) 복합 시스템 모델 구조 연구”, c) 서울대학교 해양 시스템 공학 연구소, d) 서울대학교 BK 21 해양기술인력양성사업단]의 지원으로 이루어진 연구 결과의 일부임을 밝히며, 이에 감사 드립니다.

2009년 4월 17일 접수, 2010년 3월 4일 채택

- 1) 서울대학교 조선해양공학과 대학원
- 2) 서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소
- 3) 서울대학교 공학연구소
- 4) 대우조선해양 선박해양기술연구소

주 저 자 : 구남국
교신저자 : 차주환
E-mail: jhcah79@snu.ac.kr

1. 서 론

해상 크레인은 크레인을 탑재한 대형 바이지선으로서 현재 조선소나 건설 현장에서 널리 쓰이고 있으며, 해상 크레인은 육상에서 사용되는 골리앗 크레인보다 무거운 블록을 들어올릴 수 있기 때문에 그 활용도가 증가하고 있다.

그러나 해상 크레인은 육상크레인과 달리 해상에 떠서 작업을 하기 때문에 작업 중 해양과의 영향으로 인해 운동할 수 있다. 해상 크레인의 운동으로 인해 해상 크레인이 인양하고 있는 중량물이 운동하게 된다. 따라서 중량물의 안정적인 인양을 위하여 해상 크레인과 중량물의 운동을 해석하고, 중량물의 운동을 제어하여 흔들림을 최소화 할 필요가 있다.

우선, 크레인과 중량물의 거동을 해석하기 위하여 크레인과 중량물이 서로의 거동에 미치는 영향에 을 고려하여 모델링을 해야 한다. 본 논문에서는 해상 크레인과 매달려 있는 중량물의 운동 방정식을 다물체계 운동 방정식을 이용하여 유도를 하였으며, 해상 크레인과 중량물 모두 강체(Rigid Body)로 가정 하였다.

해상 크레인과 중량물에 작용하는 외력으로는 (1)중력에 의한 힘, (2)과도한 자세 변화에 따른 비선형 유체정역학적 힘, (3) 유체동역학적 힘, (4) Wire rope에 의해 작용하는 힘을 고려 하였다. (차주환 2008, 함승호 2008)

크레인과 중량물의 거동을 분석한 후에, 중량물의 거동 감쇠를 위한 제어 메커니즘을 해상 크레인 모델에 적용할 필요가 있다. 본 논문에서는 제어 메커니즘으로서 해상 크레인과 중량물을 연결하는 Tagline을 적용 하였다. 그리고 Tagline을 적용하지 않았을 때와 Tagline을 적용하였을 때를 각각 시뮬레이션하여 그 결과를 비교 하였으며,



Fig. 1. Example of operation of a floating crane

해상 크레인의 축소 모형을 이용한 실험을 통하여 시뮬레이션 결과를 검증 하였다.

본 논문의 2장에서는 해상 크레인이 인양하는 중량물의 운동 감쇠를 위한 제어 모듈의 관련 연구 현황을 살펴 보고, 본 논문과의 차이점을 언급하였다.

3장에서는 Newton의 제 2법칙을 이용하여 해상 크레인과 중량물의 다물체계(Multi-body system) 운동 방정식을 모델링 하였다.

4장에서는 중량물의 운동 감쇠를 위한 제어 메커니즘으로서 해상 크레인의 Deck에 설치된 Winch와 중량물을 Tagline으로 연결하고 PD제어 알고리즘을 이용하여 장력을 조절 하였다.

5장과 6장에서는 Tagline 메커니즘을 적용한 1/100 Scale의 모형 해상 크레인을 제작하고, 수치적 시뮬레이션과 모형 실험을 통해 제어 모듈 적용 전후의 중량물의 운동을 비교하였다.

마지막으로 7장에서는 결론 및 향후 연구 계획에 대하여 기술하였다.

2. 관련 연구 현황

Balachandran(1999)은 Hoist line과 중량물 사이에 Mechanical filter를 설치하여 중량물의 들림을 최소화 하였다. 이 논문에서 사용한 방법은 크레인 이외에 부가물을 설치하여 제어함으로써 크레인 자체의 자유도가 한정(Luff, Hoist) 되어 있는 해상 크레인에 응용 가능하다.

Agostini(2002)와 Masoud(2004)가 사용한 방법은 모두 크레인 자체를 구동하여 중량물의 거동을 제어하는 방법으로써, 크레인 자체의 자유도가 한정(Luff, Hoist)되어 있는 해상 크레인에 적용하기는 쉽지 않다.

Ito(2008)는 선박 위에 설치된 회전식 크레인(Rotary crane)을 이용하여 중량물을 이송할 때 발생하는 중량물의 흔들림을 최소화하기 위한 방법을 제시하였다. 이 때 회전식 크레인은 3자유도(Yaw(Slew), Pitch(Luff), Heave(Hoist))로 가정하고, 이를 이용하여 중량물을 운반한다. 이 때 중량물에 원심력이 작용하지 않도록 하기 위하여 회전식 크레인의 3 자유도를 “적절하게” 제어하여 중량물이 직선 운동을 하도록(STT - Straight Transfer Transformation) 하였다.

Parker(2008)는 선박의 갑판 상에 설치된 회전식 크레인을 이용하여 중량물을 이송할 때 발생하는 중량물의 흔들림을 최소화 하기 위해, 회전식 크레인과 중량물을 연

Table 1. The factors analyzed in this study compared with related works

	해상 크레인 모델링	중량물 모델링	유체력	중량물 운동 감쇠 방법	검증 방법
Balachandran(1999)	1자유도	질점 3자유도	고려없음	Mechanical filter	시뮬레이션
Agostini(2002)	3자유도	질점 3자유도	고려없음	Command shaping	시뮬레이션
Masoud(2004)	3자유도	질점 3자유도	고려없음	Time delayed control	시뮬레이션 실험
Parker(2008)	3자유도	질점 3자유도	고려없음	Tagline mechanism	시뮬레이션
Ito(2008)	3자유도	질점 3자유도	고려없음	STT	시뮬레이션
본 논문	3자유도	강체 3자유도	고려함	Tagline mechanism	시뮬레이션 실험

결하는 Tagline을 설치하였다. 그리고 해상 크레인 및 중량물의 위치를 이용한 역기구학식을 통해 Tagline에 전달할 제어력을 계산 하였다. Tagline이라는 부가물을 설치하는 방법은 크레인 자체의 자유도가 한정(Luff, Hoist)되어 있는 해상 크레인에도 응용 가능하다.

본 논문에서 대상으로 하는 해상 크레인은 크레인 자체의 자유도를 이용하는 것이 쉽지 않으므로 Parker(2008)가 사용했던 Tagline mechanism을 적용하였다. 단, 본 논문에서는 Tagline에 전달할 제어력을 PD제어를 이용하여 계산하였으며, 이는 4장에서 상세히 기술할 예정이다. 또한 다른 논문에서는 고려하지 않았던 유체력이 해상 크레인에 미치는 영향을 고려하였고, 중량물을 질점이 아닌 강체로 가정 하였다.

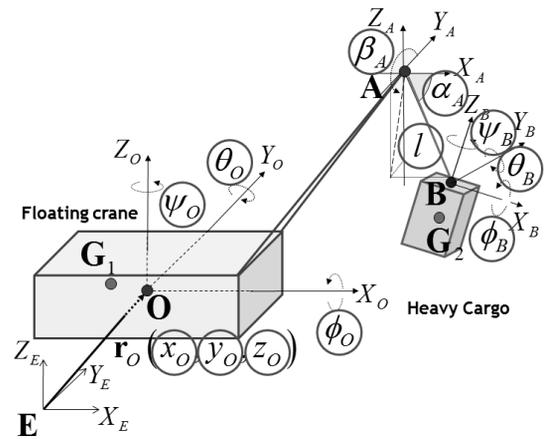


Fig. 2. Generalized coordinates of the floating crane and the heavy cargo (3-dimension)

3. 해상 크레인과 중량물의 수학적 모델링

수치적 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 해상 크레인 과 중량물이 외력을 받았을 때 어떠한 거동을 하는지 기술할 수 있는 수학적 모델과 시스템에 작용하는 외력의 계산이 필요하다. 따라서 본 장에서는

- 다물체계 운동 방정식을 이용한 해상 크레인과 중량 물의 수학적 모델의 유도 과정을 설명하고
- 해상 크레인과 중량물에 작용하는 외력에 대하여 기술할 것이다.

3.1 다물체계 운동 방정식의 유도

해상 크레인과 중량물의 질량 중심의 병진과 회전을 기술하는 좌표 \mathbf{r} 을 다음과 같이 정의한다.

- 해상 크레인의 위치 : $\mathbf{r}_{G_1} = [x_{G_1} \ y_{G_1} \ z_{G_1}]^T$
- 해상 크레인의 자세 : $\boldsymbol{\theta}_{G_1} = [\phi_{G_1} \ \theta_{G_1} \ \psi_{G_1}]^T$

- 중량물의 위치 : $\mathbf{r}_{G_2} = [x_{G_2} \ y_{G_2} \ z_{G_2}]^T$
 - 중량물의 자세 : $\boldsymbol{\theta}_{G_2} = [\phi_{G_2} \ \theta_{G_2} \ \psi_{G_2}]^T$
- $$\mathbf{r} = [x_{G_1} \ y_{G_1} \ z_{G_1} \ \phi_{G_1} \ \theta_{G_1} \ \psi_{G_1} \ x_{G_2} \ y_{G_2} \ z_{G_2} \ \phi_{G_2} \ \theta_{G_2} \ \psi_{G_2}]^T$$

Newton의 제 2법칙에 의하면 물체에 가해지는 힘과 질량, 가속도는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}^e + \mathbf{F}^c \tag{1}$$

(\mathbf{F}^e : 외력, \mathbf{F}^c : 구속력, \mathbf{M} : 질량, $\ddot{\mathbf{r}}$: 가속도)

여기서 해상 크레인의 위치와 자세를 일반화 좌표인 \mathbf{q} 로서 표현하면 다음과 같은 다물체계 운동 방정식으로 정리 된다(Fig. 2 참조).

$$\mathbf{q} = [x_o \ y_o \ z_o \ \phi_o \ \theta_o \ \psi_o \ \alpha_A \ \beta_A \ l \ \phi_B \ \theta_B \ \psi_B]^T$$

$$\overline{M}\ddot{q} + \overline{k} = \overline{F}^e \quad (2)$$

$$\overline{M} = J^T M J, \overline{k} = J^T M \dot{J} \dot{q}, \overline{F}^e = J^T F^e$$

\overline{M} : 질량 및 질량 관성 모멘트

\overline{k} : 원심력, Coriolis force 성분

\overline{F}^e : 일반화 좌표계에 작용하는 외력

J : 전체 좌표계의 속도벡터 $\dot{\mathbf{r}}$ 과 일반화 좌표계의 속도벡터 $\dot{\mathbf{q}}$ 의 관계를 나타내주는 Jacobian 행렬

위 식에 대한 상세한 유도는 참고문헌 차주환(2008b), 함승호(2008)를 참고한다.

3.3 해상 크레인과 중량물에 작용하는 외력

해상 크레인과 중량물에 작용하는 외력으로는 (1)중력에 의한 힘(Gravity force), (2)유체 정역학적 힘(Hydrostatic force), (3)유체 동역학적 힘(Hydrodynamic force), (4)Wire rope에 의해 작용하는 힘(Wire rope force)을 고려하였다 (차주환(2008b), 함승호(2008) 참고).

(1) Gravity force, $F_{g,1}$, $F_{g,2}$

해상 크레인과, 중량물에 각각 작용하는 중력에 의한 힘을 고려하였다.

(2) Hydrostatic force, $F_{hydrostatic}$

해상 크레인에 작용하는 유체 정역학적 힘은 과도한 자세변화를 고려할 수 있도록 매 시간 수선면의 면적 및 면적 1차, 2차 모멘트를 계산하여, Heave, Pitch방향의 힘과 모멘트를 계산하였다.

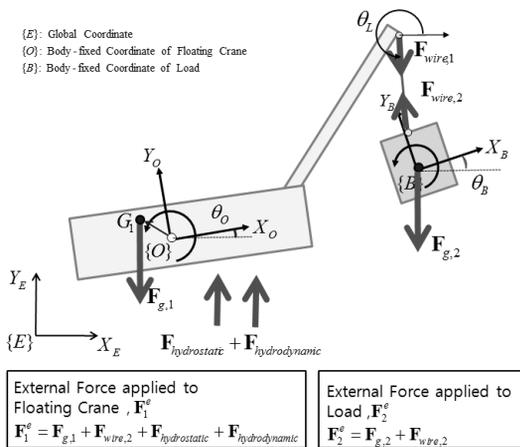


Fig. 3. External force applied to floating crane and load

(3) Hydrodynamic force, $F_{hydrodynamic}$

해상 크레인에 작용하는 유체 동역학적 힘은 크게 Wave excitation force와 Radiation force로 나누어 고려하였다.

Wave excitation force는 해상 크레인이 고정되어 있을 때, 입사하는 파와 표면에서 산란하는 파에 의해 작용하는 힘을 나타낸다. Radiation force는 시간 영역에서의 해석을 수행하기 위해 Cummins equation을 사용하였다. 부가질량 및 감쇠 계수를 구하기 위해서 주파수 계열에서 구한 유체력 계수를 사용하였다.

(4) Wire rope force, $F_{wire,1}$, $F_{wire,2}$

Hooke의 법칙에 따라 Wire rope의 신율을 고려하여 스프링 상수 k를 구하고, 이를 Wire rope의 늘어난 길이와 곱하여 Wire rope에 의해 작용하는 힘을 구하였다. Wire rope에 의해 발생하는 힘은 해상 크레인과 중량물의 위치와 자세에 의해 계산되며, 또한 해상 크레인과 중량물에 동시에 영향을 준다.

4. Tagline 메커니즘과 PD제어를 이용한 중량물 거동 감쇠 제어

중량물의 거동을 감쇠하기 위해서 Parker(2008)가 제안한 Tagline mechanism을 적용하였다. Tagline이란 Figure 4에서 보는 바와 같이 해상 크레인과 중량물 사이를 잇는 Line을 의미하며, 해상 크레인이 설치되어있는 Winch를 이용하여 Tagline의 장력을 조절할 수 있다. 본 논문에서는 장력 $T_{tagline}$ 을 제어하기 위하여 PD제어 방

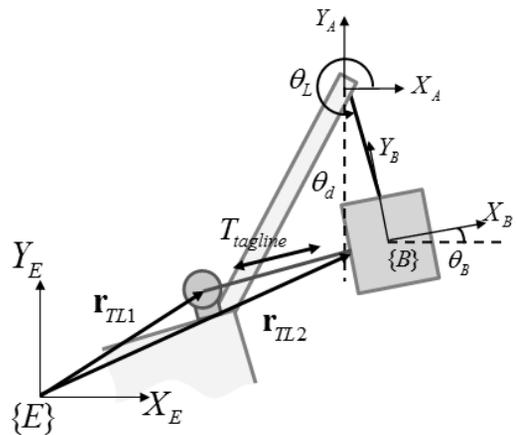


Fig. 4. The floating crane and the load with tagline system

법을 적용 하였으며, 제어 목표는 Wire rope의 각도 θ_L 을 일정한 목표 값 θ_d 로 유지하도록 하는 것이다.

Tagline에 의해 발생된 힘 $T_{tagline}$ 역시 외력이므로 식 (2)의 우변에 제어력 \mathbf{F}^u 로 가해지게 되며, 운동 방정식은 다음과 같이 변경 된다.

$$\overline{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}} + \overline{\mathbf{k}} = \overline{\mathbf{F}}^e + \overline{\mathbf{F}}^u \quad (3)$$

$$(\text{where, } \overline{\mathbf{M}} = \mathbf{J}^T \mathbf{M} \mathbf{J}, \overline{\mathbf{k}} = \mathbf{J}^T \mathbf{M} \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}, \overline{\mathbf{F}}^e = \mathbf{J}^T \mathbf{F}^e,$$

$$\overline{\mathbf{F}}^u = \mathbf{J}^T \mathbf{F}^u)$$

여기서 장력 $T_{tagline}$ 를 계산하는 PD제어 방법은 Tagline의 종류에 따라서 달라지게 되며, 본 논문에서는 Tagline을 두 가지 종류로 가정하고 설계를 하였다.

4.1 Tagline을 Wire rope로 가정하여 설계

Tagline을 Wire rope로 가정하게 되면 장력 $T_{tagline}$ 은 양의 힘(당기는 힘)은 발생 가능하나 음의 힘(미는 힘)은 발생시킬 수 없다. 따라서 다음 3가지 경우로 분류하여 제어 한다.

Fig. 5-A는 중량물이 해상 크레인으로부터 멀어지며 ($\dot{\theta}_L \geq 0$), 기준 각도에서 벗어나고 있는 경우($e_\theta \geq 0$)를 나타낸다. 이때는 Hoist line의 각도(θ_L)가 기준 각도(θ_d)에서 멀어지고 있으므로, 기준 각도에서 벗어난 에러 값($e_\theta = \theta_L - \theta_d$)에 비례 상수 K_p 를 곱하여 복원력을 생성한다(Proportional Control / 비례 제어). 제어력으로서 복원력만 생성 하면 중량물이 계속 진동을 하게 되므로, 현재 Hoist line이 목표 각도로 접근하고 있는 속도($\dot{e}_\theta = \dot{\theta}_L - \dot{\theta}_d$)에 상수 K_d 를 곱하여 감쇠력을 생성한다(Derivative Control / 미분 제어). 이와 같은 방법으로 생성한 제어력은 다음과 같이 식 (4)로 표현할 수 있다.

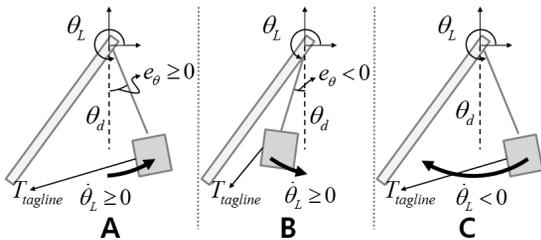


Fig. 5. Classification of load states to generate control force

if ($\dot{\theta}_L \geq 0$ and $e_\theta \geq 0$)

$$T_{tagline_wire} = K_p \cdot e_\theta + K_d \cdot \dot{e}_\theta \quad (4)$$

Fig. 5-B는 중량물이 해상 크레인으로부터 멀어지며 ($\dot{\theta}_L \geq 0$), 기준 각도로 향하는 경우($e_\theta < 0$)를 나타낸다. 이미 Hoist line은 목표 각도로 움직이고 있기 때문에 복원력을 가지지 않는다. 그러나 중량물의 진동을 억제하기 위하여 미분 제어를 이용하여 감쇠력을 생성한다. 이와 같은 방법으로 생성한 제어력은 다음과 같이 식 (5)로 표현할 수 있다.

if ($\dot{\theta}_L \geq 0$ and $e_\theta < 0$)

$$T_{tagline_wire} = K_d \cdot \dot{e}_\theta \quad (5)$$

Fig. 5-C는 중량물이 해상 크레인으로부터 멀어지고 있는 경우($\dot{\theta}_L < 0$)를 나타낸다. 이 경우에는 물체의 속도를 감소시키는 방향으로 힘을 가할 수 없으므로 제어력을 생성하지 않으며 이를 다음과 같이 식 (6)으로 표현할 수 있다.

if ($\dot{\theta}_L < 0$)

$$T_{tagline_wire} = 0 \quad (6)$$

4.2 Tagline을 Spring과 Wire rope로 가정하여 설계

Tagline을 Wire rope로 가정하게 되면 Fig. 5-C와 같이 중량물이 해상 크레인으로부터 다가오는 경우에 대하여 제어력을 생성할 수 없으며, 거동이 심해질 경우 중량물과 해상 크레인이 충돌할 위험이 있다. 따라서 4.1의 Tagline

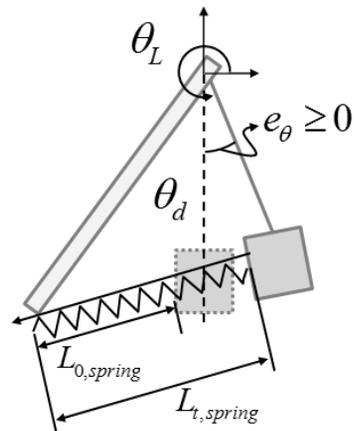


Fig. 6. Tagline system composed with spring and wire rope

제어 시스템에 Spring을 추가로 설치한다.

스프링을 사용하여 제어력을 생성하면 중량물이 해상 크레인으로 다가오는 거동을 막을 수 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$T_{tagline_spring} = K_p \cdot e_{spring}$$

(where, $e_{spring} = L_{t,spring} - L_{0,spring}$) (7)

그리고 Fig. 6에서 보는 바와 같이 Spring과 함께 Wire rope도 동시에 사용하므로 4.1절에서 계산하였던 감쇠력도 동시에 생성 가능하다.

단, Spring에 의한 제어력과 Wire rope에 의한 제어력을 동시에 사용할 때, 4.1절에서 사용하였던 Wire rope에 의한 복원력 $K_p \cdot e_\theta$ 를 스프링에 의한 복원력 $K_p \cdot e_{spring}$ 으로 교체하면 장력 $T_{tagline}$ 은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$T_{tagline} = K_p \cdot e_{spring} + K_d \cdot \dot{e}_\theta$$
 (8)

위의 장력을 이용하여 제어력을 생성하면 최종적으로 다음과 같은 운동 방정식을 유도할 수 있다.

$$\overline{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}} + \overline{\mathbf{k}} = \overline{\mathbf{F}}^e + \overline{\mathbf{F}}^u$$
 (9)

(where, $\overline{\mathbf{M}} = \mathbf{J}^T \mathbf{M} \mathbf{J}$, $\overline{\mathbf{k}} = \mathbf{J}^T \mathbf{M} \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}$, $\overline{\mathbf{F}}^e = \mathbf{J}^T \mathbf{F}^e$,

$$\overline{\mathbf{F}}^u = \mathbf{J}^T \mathbf{F}^u$$
)

$$\ddot{\mathbf{q}} = [\ddot{x}_O \ \ddot{y}_O \ \ddot{z}_O \ \ddot{\phi}_O \ \ddot{\theta}_O \ \ddot{\psi}_O \ \ddot{\alpha}_A \ \ddot{\beta}_A \ \ddot{\gamma}_B \ \ddot{\phi}_B \ \ddot{\theta}_B \ \ddot{\psi}_B]^T$$

$$\mathbf{F}^e = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{hydrostatic} + \mathbf{F}_{hydrodynamic} + \mathbf{F}_{wire}$$



Fig. 7. 1/100 Scale floating crane model

$$\mathbf{F}^u = [F_{1,x}^u, F_{1,y}^u, M_1^u, F_{2,x}^u, F_{2,y}^u, M_2^u]^T$$

$$F_{1,x}^u = (K_p \cdot e_{spring} + K_d \cdot \dot{e}_\theta) \cdot \cos \theta_{tagline}$$

$$F_{1,y}^u = (K_p \cdot e_{spring} + K_d \cdot \dot{e}_\theta) \cdot \sin \theta_{tagline}$$

$$M_1^u = r_{TL1,x} \cdot F_{1,y}^u - r_{TL1,y} \cdot F_{1,x}^u$$

$$F_{2,x}^u = (K_p \cdot e_{spring} + K_d \cdot \dot{e}_\theta) \cdot \cos(\theta_{tagline} - \pi)$$

$$F_{2,y}^u = (K_p \cdot e_{spring} + K_d \cdot \dot{e}_\theta) \cdot \sin(\theta_{tagline} - \pi)$$

$$M_2^u = r_{TL2,x} \cdot F_{2,y}^u - r_{TL2,y} \cdot F_{2,x}^u$$

$$\theta_{tagline} = \arctan\left(\frac{r_{TL2,x} - r_{TL1,x}}{r_{TL2,y} - r_{TL1,y}}\right)$$

(where, $e_\theta = \theta_L - \theta_d$, $e_{spring} = L_{t,spring} - L_{0,spring}$)

5. 모형 해상 크레인 및 제어 모듈 제작

3장과 4장에서 유도한 운동 방정식을 사용하면 수치적 시뮬레이션이 가능하다. 이렇게 얻어진 시뮬레이션 결과가 실제 현실 모델에도 적용 가능한지를 검증하기 위하여 해상 크레인의 축소 모형과 제어 모듈을 제작하였다.

5.1 모형 해상 크레인

1800ton급 해상 크레인을 1/100 Scale의 축소하여 모형을 제작하였다. 모형 해상 크레인의 주요 제원은 다음과 같다(Fig. 7, Table. 2 참고).

모형 해상 크레인은 2차원 평면상에서 Heave 및 Pitch 운동만 가능하고, 나머지 자유도(Surge, Sway, Roll, Yaw)는 구속된 치구 장치에 설치하였다.

Table 2. Particulars of 1/100 scale floating crane model

Particulars	Model
Length [m]	0.83
Breathe [m]	0.36
Depth [m]	0.046
Draft [m]	0.033
Displacement [kg]	10.6
Boom Length [m]	0.87
Boom Angle [°]	51
Load Weight [kg]	1.0

5.2 제어 모듈

Tagline의 장력을 제어하기 위해 모형 해상 크레인의 선수부 Deck에 Winch를 제작하여 설치하고 중량물과 Winch를 Wire로 연결하였다. Winch는 20W급 DC모터를 이용하여 구동한다(Fig. 8 참고).

5.3 해상 크레인 및 중량물의 자세 계측 및 Control board 제작

해상 크레인 및 중량물의 자세를 계측하기 위하여 기울기 센서(해상 크레인 Pitch각 및 Wire 회전각 계측) 및 Potentiometer(해상 크레인 Heave 변위 계측)를 모형 해상 크레인과 Heave 및 Pitch 자유 치구 장치에 설치하였다.

Sensing data를 수집하여 PC로 전달하고, 이를 이용하여 제어 모듈을 구동하는 제어력을 생성하기 위하여 AVR 기반의Control board를 제작하고 모형 해상 크레인에 설치하였다.

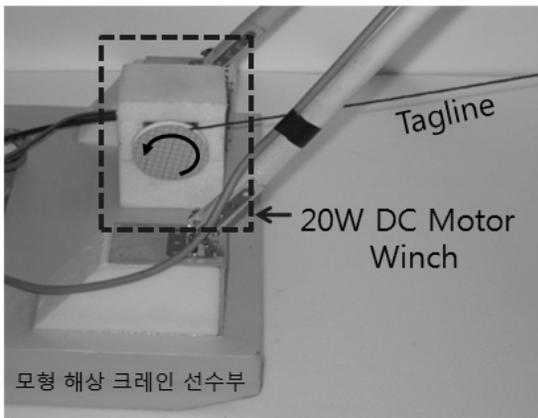


Fig. 8. Control module using a DC motor winch

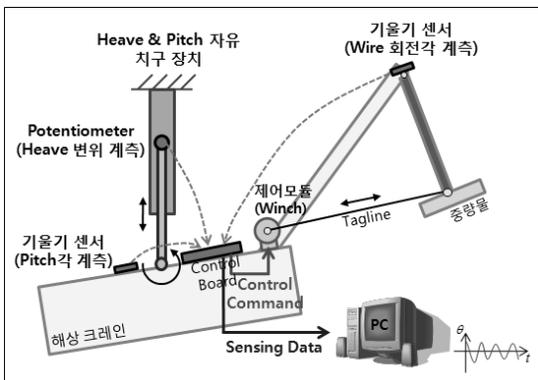


Fig. 9. Scheme of sensing and control

6. 수치적 시뮬레이션 및 모형 실험 결과

본 장에서는 3장과 4장에서 유도한 해상 크레인과 중량물의 운동 방정식을 수치적으로 계산한 결과에 대해 설명하고, 모형 실험 결과와 비교한다.

6.1 수치적 시뮬레이션 수행 결과

해상 크레인의 1/100 Scale 모형의 주요 재원(Table. 1)을 바탕으로 수치적 시뮬레이션을 수행 하였다. Amplitude는 0.01m, 주기는 1.1초인 해양파를 가정하였으며, 그 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

Fig. 10은 Tagline 제어를 하지 않았을 때 해상 크레인의 Heave, pitch 그리고 중량물 흔들림 각도의 수치적 시뮬레이션 결과이다. Heave는 약 0.024m(최대: 0.012m, 최소: -0.012m)의 진폭으로, Pitch는 약 7.5°(최대: 4°, 최소: -3.5°)의 진폭으로, 그리고 중량물의 흔들림 각도는 약 14°(최대: 8°, 최소: -6°)의 진폭으로 운동 하는 결과를 얻을 수 있었다.

이 중 본 논문에서 관심이 있는 것은 중량물의 흔들림 각도이다. 따라서 Tagline을 이용한 제어를 통해 중량물의 흔들림 각도가 어떻게 변화 되었는지 비교 하였다.

Fig. 11은 Wire rope를 이용하여 Tagline을 설계하고 이를 PD 제어 했을 때의 중량물 흔들림 각도에 대하여 수치적 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 흔들림 각도는 정상 상태인 15초의 값을 사용 하여 비교하였다. Tagline을 이용하여 제어하고 있는 경우(진폭: 11.5°)에는 그렇지 않은 경우(진폭: 14°)보다 중량물의 흔들림 각도가 약 2.5°가량

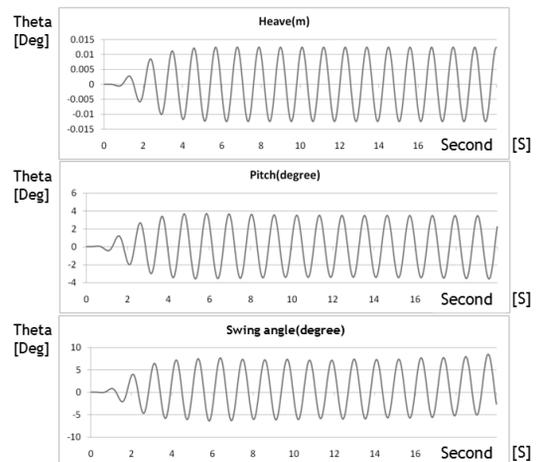


Fig. 10. Numerical simulations of the heave, pitch of the floating crane and swing angle of the load

더 작게 나타남을 알 수 있다(약 17.8% 감쇠). 그리고 Tagline을 이용하여 제어하고 있는 경우 중량물이 진동하는 중심은 해상 크레인 방향으로 가까워 졌는데, 이는 Tagline이 중량물을 당기고 있기 때문이다.

Fig. 12는 Wire rope와 Spring을 모두 이용하여 제어했을 때의 중량물 흔들림 각도에 대하여 수치적으로 시뮬레이션을 수행한 결과이다. Wire rope만 사용한 경우에 비해 중량물이 해상 크레인 방향으로 다가오는 것을 효과적으로 방지하며, 중량물의 흔들림 각도 또한 작아짐을 알 수 있다.

6.2 모형 실험을 통한 해상 크레인에 매달려있는 중량물 거동의 해석

Fig. 13은 해상 크레인 모형을 이용하여 실험한 결과이다. 제어를 한 경우와 하지 않은 경우의 진폭을 비교하였다. 흔들림 각도는 정상상태인 50초 주변의 값을 사용하였다. 단, 실험의 경우에는 여러 가지 외력에 의하여 진폭의 변동이 시뮬레이션보다 크기 때문에 40초와 62초 사이 20개의 주기에 대한 진폭을 각각 구하고 그 평균을 계산하였으며, 계산 결과는 다음과 같다.

위의 결과에서 보는 바와 같이 Tagline을 이용하여 제어한 경우의 흔들림 각도가 제어를 하지 않았을 때의 흔들림 각도보다 8.5% 작다는 것을 알 수 있다.

6.3 수치적 시뮬레이션과 모형 실험 결과의 비교

Wire rope를 이용하여 Tagline을 설계하고 제어한 경우에 대하여 시뮬레이션 결과와 모형 실험 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 시뮬레이션과 모형 시험 결과 모두 중량물의 흔들림 각도가 감쇠 되었다.
- 2) 시뮬레이션과 모형 시험 결과 모두 Tagline이 중량물을 당기고 있기 때문에 중량물 흔들림 진폭의 중심이 해상 크레인 방향으로 가까워졌다.
- 3) 시뮬레이션의 경우 17.8%의 감쇠율을 보였으나, 모형 실험 결과는 8.5%의 감쇠율을 보였다. 이는 해상 크레인 모형에 설치한 모터의 용량(20W)이 작기 때문이며, 향후 연구에서는 적절한 용량의 모터를 선정하여 좀더 개선된 제어 성능을 확보해야 한다.
- 4) 시뮬레이션의 중량물 흔들림 진폭(11.5°~14°)과 모형 실험의 중량물 흔들림 진폭(20.37°~22.26°)이 다르다. 이는 시뮬레이션 상태는 이상적인 상황을 가정하는 반면, 모형 실험의 조건은 이상적인 상황이 아닐 수 있기 때문이다. 그리고 실험자가 미처 파악하지 못한 영향이 실험의 결과에 영향을 미칠 수 있다.

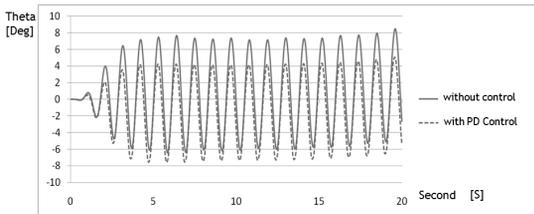


Fig. 11. Numerical simulations of the load swing angle by using tagline PD control

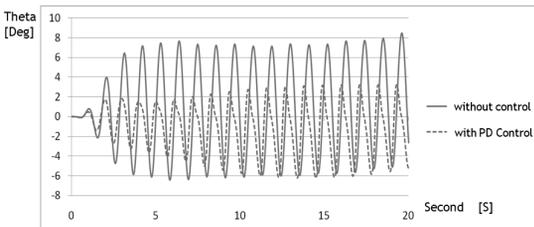


Fig. 12. Numerical simulation of the load swing angle by using tagline PD control and spring

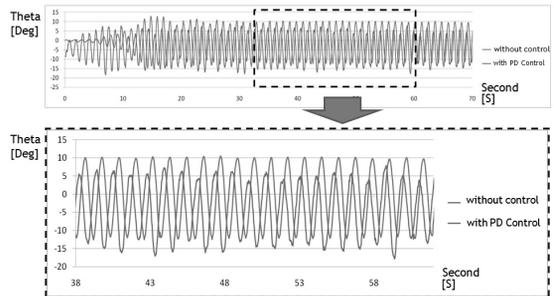


Fig. 13. Experimental verification of the load swing angle by using tagline PD control

Table 2. Mean swing angle of the load with and without tagline control

Case	20개 주기의 평균 진폭
제어를 하지 않은 경우	22.26°
제어를 한 경우	20.37°

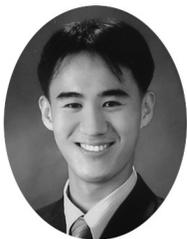
7. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 해상 크레인과 중량물의 운동 방정식을 세우고, 외력으로 중력, 유체 정역학적 힘, 유체 동역학적 힘, Wire rope에 의해 작용하는 힘을 고려 하였다. 그리고 중량물의 운동 감쇠를 위하여 해상 크레인과 중량물 사이에 Tagline을 설치하였고, 제어력을 생성하였다. 이에 대하여 수치적 시뮬레이션과 모형 실험을 수행하였으며, 시뮬레이션과 모형 실험을 통한 Tagline 제어의 결과는 유사한 경향을 보인다는 것을 알 수 있었다.

그러나 시뮬레이션과 모형 실험의 결과의 절대적인 값이 일치하지 않고 있으며, 이는 향후 여러 가지 경우에 대하여 연구를 수행하면서 개선해야 할 것이다. 또한, 해상 크레인 모형에 설치한 제어 모듈 내의 적절한 용량의 모터 선정과, 개선된 제어 알고리즘의 적용으로 중량물의 흔들림 감쇠 성능을 향상시켜야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 차주환, “해상크레인으로 인양하는 대형 중량물의 비선형 동적 응답 및 이산 시간/이산 시간 시뮬레이션,” 서울대학교 조선해양공학과 박사학위 논문, 2008b.
2. 차주환, 노명일, 조두연, 함승호, 이현진, 이규열, 박광필, 서흥원, “이산 사건 및 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 커널과 동역학 및 가시화 모듈의 통합 방안을 적용한 블록 탑재 시뮬레이션 개발,” 2007년도 대한조선학회 춘계학술발표회, pp. 1507-1515, 2007a.
3. 차주환, 이규열, 노명일, 함승호, 서흥원, 박광필, “조선 공정 시뮬레이션을 위한 동역학 모듈과 가시화 모듈의 통합 방안 연구,” 2007년도 한국CAD/CAM 학회 학술발표회, pp. 385-391, 2007b.
4. 차주환, 함승호, 노명일, 이규열, 박광필, 서흥원, “Wire Rope Dynamics 기반의 조선용 탑재 크레인 동역학 시뮬레이션,” 2008년도 한국CAD/CAM학회 학술발표회, 2008a.
5. 함승호, 차주환, 이규열, 노명일, 박광필, 서흥원, “다물체 간 상호 작용 및 해양파에 의한 운동 응답을 고려한, 해상 크레인의 실시간 시뮬레이션,” 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1669-1676, 2008.
6. Agostini, M. et al., “Command Shaping and Closed-Loop Control Interactions for a Ship Crane,” Proceedings of the American Control Conference, pp. 2298-2304, 2002.
7. Balachandran, B. et al., “A mechanical filter concept for control of non-linear crane-load oscillations,” Journal of Sound and Vibration, vol. 228, no. 3, pp. 651-682, 1999.
8. Ito, R. et al., “Modeling and Straight Transfer Transformation Control of Shipboard Crane Considering Ship Sway,” 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, pp. 16057-16064, 2008.
9. Masoud Ziyad N. et al., “Pendulation Reduction on Small Ship-mounted Telescopic Cranes,” Journal of Vibration and Control, 10: 1167-1179, 2004.
10. Parker, G. et al., “Reducing Crane Payload Swing Using A Rider Block Tagline Control System,” OCEANS 2007-Europe, pp. 1-5, 2008.



구 남 국 (knk80@snu.ac.kr)

2004 서울대학교 조선해양공학과 학사
2004~현재 서울대학교 조선해양공학과 석/박 통합과정

관심분야 : 용접로봇, 선박의장, 다물체 동역학, Optimization



이 규 열 (kylee@snu.ac.kr)

1975 독일 하노버공과대학교 조선공학 석사
1982 독일 하노버공과대학교 조선공학 박사
1983~1994 한국기계연구원 선박해양공학연구센터 생산자동화 연구사업(CSDP) 단장
1994~현재 서울대학교 조선해양공학과 교수

관심분야 : 모델링 및 시뮬레이션, 선박 설계, CAD, CAGD, CALS, Optimization, 다물체 동역학, 탄성 역학



권 정 환 (jkwon@snu.ac.kr)

2008 서울대학교 조선해양공학과 학사
2010 서울대학교 조선해양공학과 석사
2010~현재 대우조선해양 선박해양기술연구소

관심분야 : 용접로봇, 선박의장, 다물체계 동역학



차 주 환 (jhcha79@snu.ac.kr)

2002 서울대학교 조선해양공학과 학사
2004 서울대학교 조선해양공학과 석사
2008 서울대학교 조선해양공학과 박사
2008~현재 서울대학교 공학연구소 연구원

관심분야 : 모델링 및 시뮬레이션, 다물체계 동역학, CAD, 음함수 모델링



함 승 호 (shham81@dsme.co.kr)

2007 서울대학교 조선해양공학과 학사
2009 서울대학교 조선해양공학과 석사
2008~현재 대우조선해양 선박해양기술연구소 정보기술R&D팀 연구원

관심분야 : 모델링 및 시뮬레이션, 다물체계 동역학



하 슨 (hasol81@snu.ac.kr)

2003 서울대학교 조선해양공학과 학사
2003~현재 서울대학교 조선해양공학과 석/박 통합과정

관심분야 : 모델링 및 시뮬레이션, 용접 로봇, 선박 의장



박 광 필 (phil@snu.ac.kr)

1997 서울대학교 조선해양공학과 학사
1999 서울대학교 조선해양공학과 석사
1999~현재 대우조선해양 선박해양기술연구소 정보기술R&D팀 연구원
2008~현재 서울대학교 조선해양공학과 박사과정

관심분야 : 모델링 및 시뮬레이션, 다물체계 동역학, 탄성역학