

해상크레인과 대형 중량물의 상호 작용을 고려한 탑재 시뮬레이션

차주환*, 이규열**

Erection Simulation Considering Interaction between a Floating Crane and a Heavy Cargo

Ju-Hwan Cha* and Kyu-Yeul Lee**

ABSTRACT

Recently, floating cranes are mainly used to erect heavy blocks or cargos for constructing ships in many shipyards. It is important to estimate the dynamic motion of the heavy cargo suspended by a floating crane and the tension of the wire ropes between the floating crane and the heavy cargo. In this paper, the coupled dynamic equations of motion are set up for considering the 6 degree-of-freedom floating crane and the 6-degrees-of-freedom heavy cargo based on multibody system dynamics. Depending on the cargo weight, the motion of the floating crane would be changed to nonlinear state. The nonlinear terms in the equation of motion are considered. In addition, the nonlinear hydrostatic force, the linear hydrodynamic force, wire rope force, mooring force and gravity force are considered as the external forces. As the result of this paper, we analyze the engineering effect for erecting the heavy cargo by using the floating crane.

Key words : Block Erection, Modeling and Simulation, Floating Crane, Multibody System Dynamics

1. 서 론

해상크레인은 크레인을 탑재한 선박으로, 조선소에 서는 직육면체에 가까운 모양의 바지선(barge ship) 타입을 주로 사용하여 대형 블록이나 구조물의 탑재 및 해상 운송 작업을 수행한다. 해상크레인은 부력의 도움을 받아 매우 무거운 중량물(약 3,600 ton)을 들 수 있으며, 대부분 무동력선이기 때문에 예인선(tug boat)으로 예인한다.

해상크레인은 자체의 구조적인 강성 외에도 부력의 도움으로 약 3,600 ton 가량의 매우 무거운 중량물을 들어 올릴 수 있다. 반면 골리앗 크레인(goliath crane)과 크롤러 크레인(crawler crane)으로 대표되는 육상크레인은 자체의 구조적인 강성으로만 중량물을

지지하여 들어올려야 하기 때문에 약 1,000 ton 이하의 중량물을 들어 올릴 수 있다. 따라서 조선소의 생산성 향상을 위해 해상크레인의 사용 빈도가 급격히 증가하고 있으며, 최근에는 해상크레인을 병렬로 연결하여 약 6,000 ton 이상 되는 블록을 한 번에 탑재하는 공법도 시행되고 있다.

본 논문에서 대상으로 삼고 있는 해상크레인은 Fig. 1과 같이 최대 조양 하중이 3,600 ton인 “대우” 호이다. 길이는 110 m, 폭은 46 m, 깊이는 7.5 m, 홀수는 4.8 m, 경하중량(LWT; Light weight)은 약 9,500 ton이고, 최대 조양 높이는 약 110 m이다. 해상크레인은 해상에서 작업을 수행하기 때문에 해상 상태에 따라 안정성 확보가 매우 중요하다. 특히 대형 블록(일반성을 기하기 위해 이하 대형 중량물이라 함)을 탑재하여 선박을 조립할 때에는 안정성 확보에 더욱 유의하여야 한다. 따라서 이러한 공정을 계획하는 엔지니어는 해상크레인으로 인양하는 대형 중량물의 동적 거동을 예측하고, 해상크레인과 대형 중량물 사이에 연결된 wire rope에 작용하는 장력을 사전에 계산해야 한다.

*정회원, 서울대학교 공학연구소

**중심회원, 서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학 연구소

- 논문투고일: 2009. 06. 16

- 논문수정일: 2010. 01. 12

- 심사완료일: 2010. 01. 13

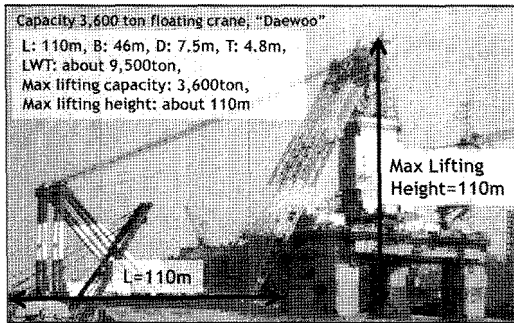


Fig. 1. The floating crane, "Daewoo" focused in this paper⁽¹⁾.

이 때, 다음과 같은 사항을 고려해야 한다. 우선, 해상크레인과 대형 중량물은 wire rope에 의해 서로 구속력을 주고 받기 때문에, 해상크레인의 운동이 중량물의 운동에 영향을 미치게 되고, 중량물의 운동이 해상크레인의 운동에도 영향을 미치게 되는 것이다. 게다가 해상크레인과의 대형 중량물 사이의 wire rope는 인장이 가능한 탄성체로서 동적 하중 차이를 발생시킨다. 또한 해상 상태에 따라 해상크레인이 대진폭 운동을 하는 경우도 있다. 해상크레인의 대진폭 운동은 대형 중량물의 대진폭 운동을 야기 시킨다. 그리고 해상크레인과의 대형 중량물은 각각 3차원 상체로서 X, Y, Z축에 대한 병진과 회전 6자유도 운동을 한다.

본 논문에서는 위의 사항들을 고려하여 해상크레인을 이용한 대형 중량물 탑재 시뮬레이션을 수행하였다. 해상크레인과의 대형 중량물 사이의 wire rope에 작용하는 구속력을 간단하게 표현하면서도 온전히 연성된 운동방정식을 구성하기 위해 다물체계 동역학을 적용하였다. 이 때 wire rope는 인장이 가능한 탄성체로 고려하였다. 또한 해상크레인의 6자유도 운동과 대형 중량물의 6자유도 운동을 모두 고려한 총 12자유도 운동방정식을 구성하였으며, 대진폭 운동을 가정하여 모든 비선형(nonlinear) 성분을 고려하였다. 외력으로는 해상크레인의 자세 및 해양과의 파고가 고려된 비선형 유체정역학 힘과 보멘드(이하 힘이라 함), 선형화된 유체동역학 힘, wire rope에 작용하는 장력과 비틀림 보멘드, 비선형 계류력, 충격을 고려하였다. 해상크레인과의 대형 중량물의 연성된 12자유도 비선형 운동방정식을 수치적으로 계산하는 시뮬레이션을 수행하여 대형 중량물의 동적 거동을 분석하였고, 해상크레인과의 대형 중량물 사이의 wire rope에 작용하는 장력을 계산하였다.

본 논문의 2장에서는 해상크레인과 중량물의 운동에 대한 관련 연구들을 분석하였고, 3장에서는 시뮬

레이션 개요에 대해 설명한다. 4장에서는 다물체계 동역학을 적용하여 해상크레인과의 대형 중량물의 연성된 12자유도 비선형 운동방정식을 구성하였다. 5장에서는 외력 계산에 대해 언급하고, 6장에서는 해상크레인과의 대형 중량물의 운동방정식에 대해 상용 동역학 소프트웨어와의 검증을 수행하였다. 7장에서는 시뮬레이션 결과에 대해 기술하고, 8장에서는 결론 및 향후 연구 계획을 언급하였다.

2. 관련 연구 현황

장승필 등⁽²⁾은 해상크레인 2 기에 의해 매달려 있는 중량물의 운동방정식을 Lagrange 방정식으로 정리하여 유도하였다. 해상크레인 2 기 사이의 유체력에 의한 연성을 고려하였고, 해상크레인 2 기와 중량물 사이의 상호작용 또한 고려하였다. 해상크레인과의 중량물 모두 6자유도 운동을 고려하였고, wire rope의 인장 고려하였다. 해상크레인 및 중량물의 운동을 미소로 가정하여 미소 항들을 소거하여 운동방정식을 정리하였다. Wire rope의 탄성력은 시표면 수직 방향의 변위만을 적용하여 유도하였다. 또한 유체정역학 힘을 선형으로 가정하였다.

Jiang 등⁽³⁾, Schellin 등⁽⁴⁾은 해상크레인과의 매달려 있는 중량물의 운동방정식을 유도하였다. 해상크레인은 6자유도, 중량물은 병진 3자유도를 고려하였으며, 해상크레인과의 중량물의 상호작용 및 wire rope의 인장을 고려하였다. 해상크레인과의 중량물에 작용하는 외력으로는 중력, 유체정역학 힘, 유체동역학 힘, 점성저항력, 계류력, wire rope 탄성력을 고려하였고, 이 중에서 점성저항력과 계류력은 비선형, 나머지는 선형으로 고려하였다. 한편 다물체계 동역학을 적용하였으나 해상크레인이 미소 운동 한다고 가정하여 해상크레인의 운동을 선형화 하였다.

Fillermann 등⁽⁵⁾은 해상크레인과의 중량물의 운동을 2차원(XZ 평면)으로 가정하고, 해상크레인의 상하 동요(heave), 전후 충요(surge), 종 동요(pitch) 운동만을 고려하여 3자유도로 표현하였고, 중량물의 경우에는 진자로 가정하여 1자유도로 표현하였다. 해상크레인과의 중량물의 운동을 대진폭 운동까지 고려하여 다물체계 동역학을 적용함으로써 비선형 운동방정식을 유도하였고, 해석적으로 해를 구하여 비선형성을 고찰하였다. 또한 해상크레인이 받는 외력으로 계류력과 점성저항력을 비선형으로 고려하였고, 유체정역학 힘과 유체동역학 힘은 선형으로 고려하였다. 한편 wire rope의 인장을 고려하지 않았다.

Table 1. The features in this paper compared to the related works^[1]

	본 논문	장승필 등 ^[2]	Ellermann ^[8]	Jiang ^[4,5]	구남국 등 ^[7]
해상크레인 운동	6자유도	12자유도(해상크레인 2기 X 6자유도)	3자유도(Surge, Heave, Pitch)	6자유도	3자유도(Surge, Heave, Pitch)
중량물 운동	6자유도	6자유도	1자유도(진자운동)	3자유도	1자유도(진자운동)
해상크레인과 중량물의 상호 작용	고려	고려	고려	고려	고려
해상크레인의 대진폭 운동 고려 여부	Nonlinear (대진폭 운동)	Linear (미소 운동)	Nonlinear (대진폭 운동)	Linear (미소 운동)	Nonlinear (대진폭 운동)
중량물의 대진폭 운동 고려 여부	Nonlinear (대진폭 운동)	Linear (미소 운동)	Nonlinear (대진폭 운동)	Nonlinear (대진폭 운동)	Nonlinear (대진폭 운동)
Wire rope 인장	고려	고려	고려 안 함	고려	고려
특징	다물체 동역학 적용	해상크레인 2기, Lagrange Eq. 사용	다물체 동역학 적용	다물체 동역학 적용	Tagline을 사용한 중량물 거동 제어

구남국 등^[7]은 해상크레인과 중량물의 운동을 2차원(XZ 평면)으로 가정하고, 해상크레인은 3자유도, 중량물은 1자유도로 표현하였다. 이 논문에서는 tagline을 설치하여 중량물의 거동을 제어하고 실험을 통해 결과를 검증하는 것에 초점을 맞추고 있다.

본 논문에서는 해상크레인 6자유도, 중량물 6자유도 운동을 고려하였다. 또한 해상크레인과 중량물의 운동을 대진폭 운동까지 고려하여 비선형 운동방정식을 유도하였다. 또한 외력으로서 비선형 유체동역학 힘과 선형화된 유체동역학 힘, wire rope 장력 및 비틀림 모멘트, 비선형 계류력, 중력을 고려하였고, wire rope의 인장을 고려하였다. 관련 연구 현황 및 본 논문의 비교 분석은 Table 1에 정리하였다.

3. 해상크레인과 대형 중량물의 상호 작용을 고려한 탑재 시뮬레이션의 개요

해상크레인과 대형 중량물의 상호 작용을 고려한 탑재 시뮬레이션의 구성도 및 시뮬레이션 대상에 대해 설명하고자 한다.

3.1 시뮬레이션 구성도

시뮬레이션의 구성도는 Fig. 2와 같다. 해상크레인과 대형 중량물의 주요 치수가 결정되면, 해상크레인과 대형 중량물의 각 6자유도 연성 운동을 고려한 12자유도 연성 운동방정식에 대입한다. 이 운동방정식은 다물체 동역학을 기반으로 모든 비선형 성분을 고려하고 있다^[1]. 본 논문에서는 해상크레인이 정적인 평형 상태에서 중량물을 탑재하는 작업을 대상으로 하므로 정적 평형 상태를 초기 조건으로 입력하였으며, 따라서 충격 하중은 고려되지 않았다. 유체동역학

힘, 유체동역학 힘, wire rope에 의한 장력 및 비틀림 모멘트, 계류력, 중력이 외력으로 계산되어 운동방정식에 대입된다. 시간 적분을 통해 각 물체의 가속도, 속도, 위치를 계산하고 이를 가시화 한다. 시뮬레이션 커널에서는 시간을 진행시켜 다시 운동방정식 및 외력에 시간을 전달하는 역할을 수행한다^[9,10]. Fig. 2에서 M 은 해상크레인과 중량물의 질량 행렬이고, q 는 해상크레인과 중량물의 위치와 자세를 나타내는 일반화 좌표이다. q_0 는 일반화 좌표의 초기값을 나타낸

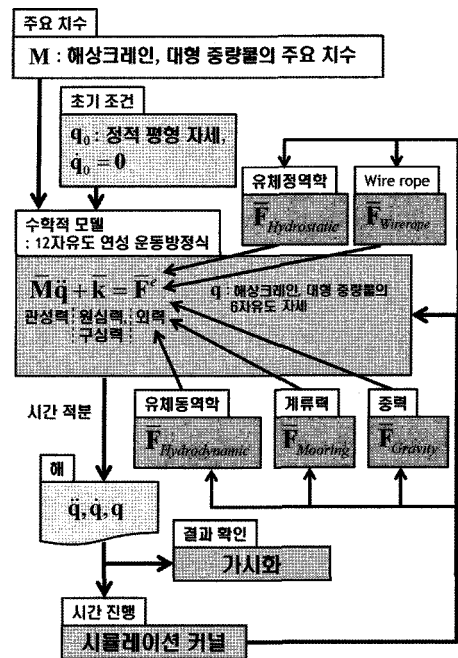


Fig. 2. Configuration of erection simulation considering interaction between a floating crane and a heavy cargo.

다. 운동방정식에 대한 자세한 설명은 4장에서 다루고, 외력에 대한 설명은 5장에서 언급한다.

3.2 시뮬레이션 대상

본 시뮬레이션에 사용된 해상크레인은 1장에서 언급한 바와 같이 최대 조양 하중이 3,600 ton인 “대우”호 해상크레인이다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 길이는 110 m, 폭은 46 m, 길이는 7.5 m이고, boom의 길이는 130 m, boom의 각도는 60도로 고정을 시켜 놓았다. 정적 평형 상태에서 해상크레인의 배수량은 18,150 ton이다. 대형 중량물의 길이는 15 m, 폭은 10 m, 높이는 30 m이고, 질량은 1,300 Mg이다.

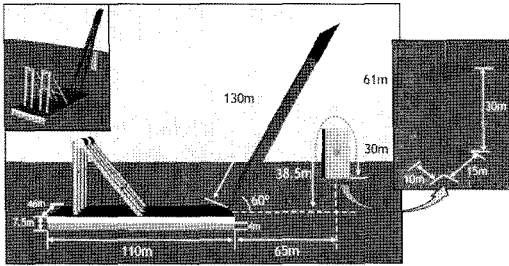


Fig. 3. The principle dimensions of the floating crane and the heavy cargo in the erection simulation.

4. 해상크레인과 대형 중량물의 운동방정식

본 논문에서는 Fig. 4와 같이 해상크레인 and 대형 중량물을 2개의 물체로 바라보고 다물체 동역학을 적용하여 해상크레인과 대형 중량물 사이의 wire rope에 작용하는 구속력을 간단하게 표현하면서도 운전이 완성된 운동방정식을 구성하였다.

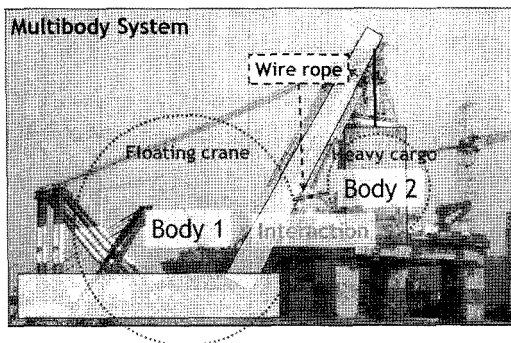


Fig. 4. The multibody system of the floating crane and the heavy cargo.

우선, 다물체계 운동방정식을 유도하는 과정을 간단하게 설명하고^[11-16], 이를 해상크레인 and 대형 중량물에 적용하여 운동방정식을 구성하는 것을 기술하도록 한다.

4.1 다물체계 운동방정식의 유도 과정

외력 및 구속력을 받아 움직이는 물체는 Newton-Euler equation에 따라 다음과 같은 식을 만족한다.

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

여기에서 \mathbf{M} 은 질량 및 질량관성모멘트에 대한 행렬이고, \mathbf{r} 은 물체의 병진 및 회전 운동을 나타내며, \mathbf{F}^e 는 물체에 작용하는 외력과 그에 대한 모멘트, \mathbf{F}^c 는 물체에 작용하는 구속력과 그에 대한 모멘트이다.

물체가 외력과 구속력을 받아서 가상 변위(virtual displacement) $\delta\mathbf{r}$ 만큼 이동할 때의 가상 일(virtual work) δW 을 정리하면 다음과 같다.

$$\delta W = \delta\mathbf{r}^T (\mathbf{F}^e + \mathbf{F}^c - M\ddot{\mathbf{r}}) = 0 \tag{2}$$

식 (2)에서 구속력은 운동 경로에 수직하다는 조건을 적용하여 다음과 같은 D'Alembert's principle을 얻을 수 있다.

$$\delta\mathbf{r}^T (M\ddot{\mathbf{r}} - \mathbf{F}^e) = 0 \tag{3}$$

그런데, 구속 조건에 의해 \mathbf{r} 의 성분이 서로 독립이 아니므로, 서로 독립인 좌표인 일반화 좌표 \mathbf{q} 를 도입하여 식 (3)에서 \mathbf{r} 의 종속 좌표를 소거해야 한다. 이를 위해 일반화 좌표의 속도 성분 $\dot{\mathbf{q}}$ 을 전체 좌표의 속도 성분 $\dot{\mathbf{r}}$ 으로 변환시켜 주는 행렬 \mathbf{J} 을 도입하여 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \tag{4}$$

식 (4)를 시간에 대해 한 번 더 미분하면 가속도에 관계된 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} \tag{5}$$

그리고 시간이 고정되어 있다고 가정하여 변분(variation)을 취하면, 식 (4)를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\delta\mathbf{r} = \mathbf{J}\delta\mathbf{q} \tag{6}$$

이제 식 (5)와 식 (6)을 식 (3)에 대입하여 일반화 좌표 \mathbf{q} 에 대한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\overline{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}} + \overline{\mathbf{k}} = \overline{\mathbf{F}}^e \tag{7}$$

여기에서 $\bar{\mathbf{M}} = \mathbf{J}^T \mathbf{M} \mathbf{J}$, $\bar{\mathbf{k}} = \mathbf{J}^T \mathbf{M} \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}$, $\bar{\mathbf{F}}^e = \mathbf{J}^T \mathbf{F}^e$ 이다. 이를 다물체계 운동방정식이라고 한다. $\bar{\mathbf{k}}$ 는 대표적인 비선형 운동 성분으로서 원심력, 코리올리(Coriolis) 힘 등을 나타낸다.

4.2 해상크레인과 대형 중량물의 다물체계 운동방정식

해상크레인과 대형 중량물에 대해 다물체계 동역학을 적용하여 운동방정식을 구성하는 과정을 설명하면 다음과 같다.

4.2.1 해상크레인과 대형 중량물의 좌표계 정의

물체의 운동을 기술하기 위해 절대 좌표계(Absolute coordinate)를 정의해야 하는데, 본 논문에서는 지구 고정 좌표계(Earth-fixed frame; E-frame)을 절대 좌표계로 정의하였고 형태는 직교 좌표계를 사용하였다. 3차원 강체는 X, Y, Z축에 대한 질량 중심의 병진 운동으로 위치를 표현하고, 회전 각도로 자세를 표현한다. 따라서 해상크레인과 대형 중량물의 위치와 자세는 각각의 질량 중심 G_1 , G_2 의 위치 벡터와 E-frame에 대한 회전 각도로서 다음과 같이 나타낼 수 있다(Fig. 5).

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

따라서 해상크레인과 대형 중량물의 질량 중심의 병진과 회전을 기술하는 좌표 \mathbf{r} 를 다음과 같이 정의한다.

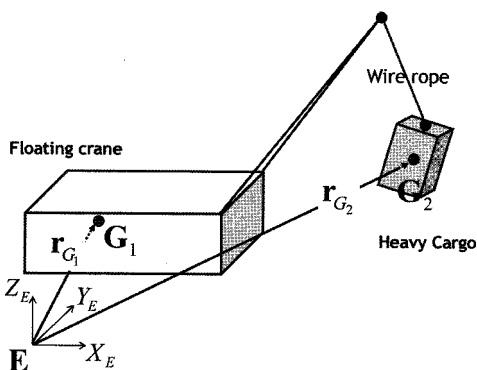


Fig. 5. Coordinate system of the floating crane and the heavy cargo.

$$\mathbf{r} = [x_{G_1} \ y_{G_1} \ z_{G_1} \ \phi_{G_1} \ \theta_{G_1} \ \psi_{G_1} \ x_{G_2} \ y_{G_2} \ z_{G_2} \ \phi_{G_2} \ \theta_{G_2} \ \psi_{G_2}]^T \quad (8)$$

4.2.2 해상크레인과 대형 중량물의 일반화 좌표 정의
일반화 좌표란 물체의 운동을 쉽고 편리하게 기술하기 위해 사용하는 좌표로서, 운동을 효율적이고 간결하게 구성하기 위해 독립 좌표들로 구성하는 것이 좋다. 해상크레인과 대형 중량물의 일반화 좌표를 Fig. 6과 같이 정의할 수 있다. 일반화 좌표를 도입해도 독립 변수의 개수가 줄어드는 것은 아니지만, 구면운동에 대해 구면 좌표계를 사용하는 것이 계산을 간결하게 하는 점을 활용할 수 있다.

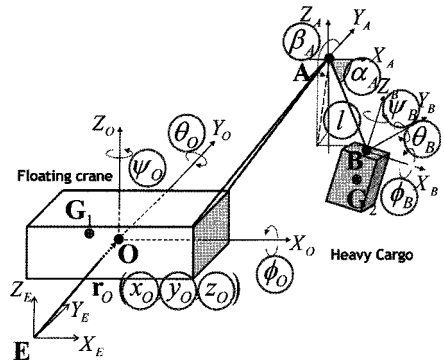


Fig. 6. Generalized coordinates of the floating crane and the heavy cargo.

해상크레인에 고정된 점 O 를 원점으로 하고 해상크레인에 고정되어 같이 이동하는 물체 고정 좌표계(body-fixed coordinate) O-frame을 정의한다. E-frame에 대한 점 O 의 위치 벡터를 \mathbf{r}_O 라 하면, \mathbf{r}_O 의 성분인 (x_O, y_O, z_O) 는 해상크레인의 X, Y, Z축에 대한 병진 3자유도 운동을 나타낼 수 있다. 그리고 E-frame에 대해 O-frame이 회전한 각도를 $(\phi_O, \theta_O, \psi_O)$ 라고 하면, 해상크레인의 회전 3자유도 운동을 나타낼 수 있다. 이번에는 해상크레인의 boom 끝점 A 를 원점으로 하고 E-frame과 항상 평행하게 이동하는 좌표계 A-frame을 정의한다. A-frame에 대해서 wire rope가 회전한 각도를 구면 좌표계로 나타낼 때 위도와 경도를 각각 α_A, β_A 라고 하고, wire rope의 늘어난 길이를 l 이라고 하자. 그리고 wire rope가 대형 중량물에 연결된 점 B 를 원점으로 하고 대형 중량물에 고정되어 같이 이동하는 좌표계 B-frame을 정의하고, E-frame에 대해 B-frame이 회전한 각도를 $(\phi_B, \theta_B, \psi_B)$ 라고 정의하면, 대형 중량물의 6자유도 운동을 나타낼 수 있다. 따라서 일반화 좌표 \mathbf{q} 를 다음과 같이 정

의할 수 있다.

$$\mathbf{q} = [x_O \ y_O \ z_O \ \phi_O \ \theta_O \ \psi_O \ \alpha_A \ \beta_A \ l \ \phi_B \ \theta_B \ \psi_B]^T \quad (9)$$

4.2.3 해상크레인과 대형 중량물의 운동방정식 구성

4.1절에서 언급했듯이 해상크레인과 대형 중량물의 질량 중심의 병진과 회전을 기술하는 좌표 \mathbf{r} 과 일반화 좌표 \mathbf{q} 와의 속도 관계식을 통해서 변환 행렬 \mathbf{J} 를 계산해야 한다.

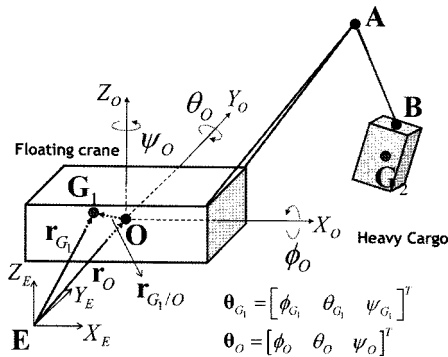


Fig. 7. The relation between the absolute coordinates (E-frame) and the generalized coordinates of the floating crane.

Fig. 7과 같이 E-frame에 대한 해상크레인의 질량 중심 G_1 의 위치 벡터 \mathbf{r}_{G_1} 과 질량 중심 G_1 이 E-frame에 대해 회전한 각도 θ_{G_1} 을 E-frame에 대한 점 O 의 위치 벡터 \mathbf{r}_O , E-frame에 대해 O-frame이 회전한 각도 θ_O , 회전 변환 행렬 \mathbf{R}_O , O-frame에 대한 질량 중심 G_1 의 위치 벡터 $\mathbf{r}_{G_1/O}$ 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r}_{G_1} = \mathbf{r}_O + \mathbf{R}_O \mathbf{r}_{G_1/O} \quad (10)$$

$$\theta_{G_1} = \theta_O \quad (11)$$

여기에서 \mathbf{R}_O 는 각 축에 대한 회전을 오일러 각도 (Euler angle)로 정의하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{R}_O = \begin{bmatrix} \cos \psi_O & -\sin \psi_O & 0 \\ \sin \psi_O & \cos \psi_O & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_O & 0 & \sin \theta_O \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_O & 0 & \cos \theta_O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_O & -\sin \phi_O \\ 0 & \sin \phi_O & \cos \phi_O \end{bmatrix} \quad (12)$$

그리고, $\mathbf{r}_{G_1/O}$ 는 해상크레인에 고정되어 있으므로 상수이다.

식 (10), (11)을 시간에 대해 미분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\mathbf{r}}_{G_1} = \dot{\mathbf{r}}_O + \dot{\mathbf{R}}_O \mathbf{r}_{G_1/O} \quad (13)$$

$$\dot{\theta}_{G_1} = \dot{\theta}_O \quad (14)$$

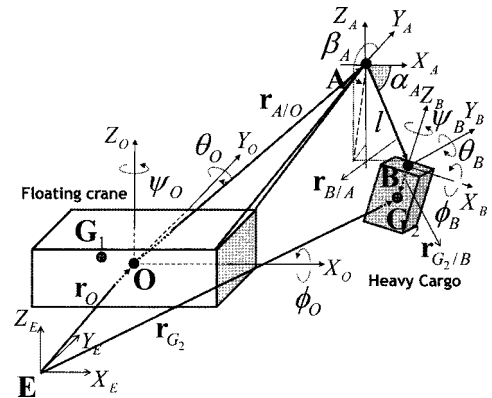


Fig. 8. The relation between the absolute coordinates (E-frame) and the generalized coordinates of the heavy cargo.

그리고 Fig. 8과 같이 E-frame에 대한 대형 중량물의 질량 중심 G_2 의 위치 벡터 \mathbf{r}_{G_2} 과 질량 중심 G_2 이 E-frame에 대해 회전한 각도 θ_{G_2} 을 E-frame에 대한 점 O 의 위치 벡터 \mathbf{r}_O , E-frame에 대해 O-frame이 회전한 각도 θ_O , 회전 변환 행렬 \mathbf{R}_O , A-frame에 대한 점 B 의 위치 벡터 $\mathbf{r}_{B/A}$, 회전 변환 행렬 \mathbf{R}_A , E-frame에 대해 B-frame이 회전한 각도 θ_B , 회전 변환 행렬 \mathbf{R}_B , B-frame에 대한 질량 중심 G_2 의 위치 벡터 $\mathbf{r}_{G_2/B}$ 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r}_{G_2} = \mathbf{r}_O + \mathbf{R}_O \mathbf{r}_{A/O} + \mathbf{R}_A \mathbf{r}_{B/A} + \mathbf{R}_B \mathbf{r}_{G_2/B} \quad (15)$$

$$\theta_{G_2} = \theta_B \quad (16)$$

여기에서 \mathbf{R}_O 는 식 (12)와 동일하고, A-frame은 E-frame과 항상 평행하므로 회전 성분이 없기 때문에 $\mathbf{R}_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 이다. \mathbf{R}_B 는 각 축에 대한 회전을 오일러 각도로 정의하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{R}_B = \begin{bmatrix} \cos \psi_B & \sin \psi_B & 0 \\ \sin \psi_B & \cos \psi_B & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_B & 0 & \sin \theta_B \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_B & 0 & \cos \theta_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_B & -\sin \phi_B \\ 0 & \sin \phi_B & \cos \phi_B \end{bmatrix}$$

그리고, $\mathbf{r}_{A/O}$ 는 해상크레인에 고정되어 있으므로 상수이고, $\mathbf{r}_{G_2/B}$ 는 대형 중량물에 고정되어 있으므로 상수이다.

식 (15), (16)을 시간에 대해 미분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\mathbf{r}}_{G_2} = \dot{\mathbf{r}}_O + \dot{\mathbf{R}}_O \mathbf{r}_{A/O} + \dot{\mathbf{R}}_A \dot{\mathbf{r}}_{B/A} + \dot{\mathbf{R}}_B \mathbf{r}_{G_2/B} \quad (17)$$

$$\dot{\theta}_{G_2} = \dot{\theta}_B \quad (18)$$

식 (13), (17)의 $\dot{\mathbf{R}}_O$ 은 $\dot{\theta}_O$ 으로 표현되어 있고, 식 (17)의 $\dot{\mathbf{r}}_{B/A}$ 은 구면 좌표계를 사용하여 $\dot{\alpha}_A, \dot{\beta}_A, \dot{i}$ 으로 표현할 수 있고, 식 (17)의 $\dot{\mathbf{R}}_B$ 은 $\dot{\theta}_B$ 으로 표현되어 있다. 따라서 식 (13), (14), (17), (18)로부터 일반화 좌표 \mathbf{q} 의 속도 성분에서 해상크레인과 대형 중량물 질량 중심의 병진과 회전을 기술하는 좌표 \mathbf{r} 의 속도 성분으로 좌표계 변환을 하는 Jacobian 행렬 \mathbf{J} 를 계산할 수 있다¹¹⁾. Jacobian 행렬 \mathbf{J} 를 식 (7)에 대입하여 해상크레인과 대형 중량물의 운동방정식을 구성할 수 있다. 외력 $\bar{\mathbf{F}}^e$ 에 대해서는 5장에서 자세히 언급한다.

이와 같이 해상크레인과 대형 중량물의 운동방정식을 구성할 때, 다물체계 동역학을 적용함으로써 구속력을 고려하지 않아도 온전히 연성된 운동방정식을 구성할 수 있었으며, 모든 비선형 성분을 고려하였다.

5. 해상크레인과 대형 중량물에 작용하는 외력

다물체계 운동방정식의 외력 $\bar{\mathbf{F}}^e$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\mathbf{F}}^e = \mathbf{J}^T \mathbf{F}^e \quad (19)$$

여기에서 질량 중심에 대해 작용하는 힘인 \mathbf{F}^e 에 \mathbf{J}^T 를 곱하는 의미는 일반화 좌표에 대해 작용하는 힘인 $\bar{\mathbf{F}}^e$ 으로 변환시켜 주기 위함이다. 따라서 외력 중에 질량 중심에 대해 작용하는 힘으로 정의된 외력은 \mathbf{J}^T 를 곱해야 하며, 일반화 좌표에 대해 작용하는 힘으로 정의된 외력은 \mathbf{J}^T 를 곱하지 않아야 한다. 편의에 따라서 질량 중심에 대해 정의할 지, 일반화 좌표에 대해 정의할 지 정하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 해상크레인과 대형 중량물에 작용하는 외력으로 비선형 유체정역학 힘, 선형화된 유체동역학 힘, wire rope에 작용하는 장력과 비틀림 모멘트, 비선형 계류력, 중력을 고려하였는데, 유체정역학 힘과 유체동역학 힘, 계류력은 계산할 때 일반화 좌표에 대해 계산하는 것이 편리하고, 중력은 질량 중심에 대해 기술하는 것이 편리하다. 그리고 wire rope에 작용하는 장력 및 비틀림 모멘트는 wire rope의 길이 방향으로 작용하는 힘을 제외하고는 운동 방향에 수직인 구속력으로 작용한다. 따라서, wire rope의 장력 및 비틀림 모멘트를 일반화 좌표로 표현하였을 때, 구

속력 성분이 소거되어 간단한 형태로 표현이 가능하다. 이를 종합하여 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{F}}^e = & \bar{\mathbf{F}}_{Hydrostatic} + \bar{\mathbf{F}}_{Hydrodynamic} + \bar{\mathbf{F}}_{Wire rope} \\ & + \bar{\mathbf{F}}_{Mooring} + \mathbf{J}^T \bar{\mathbf{F}}_{Gravity} \end{aligned} \quad (20)$$

5.1 유체정역학 힘

본 논문에서는 파고와 해상크레인의 자세를 고려하여 침수 표면적에 수직하게 작용하는 유체 입자의 압력 성분을 모두 적분하는 pressure integration technique을 사용하여 Fig. 9와 같이 매 단위 시간마다 비선형 유체정역학 힘을 계산하였다¹⁷⁾. 이 때, divergence theorem을 사용하여 유체정역학 힘 계산식을 다음과 같이 침수 부피에 대한 식으로 나타내어 사용하였다.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{F}}_{Hydrostatic} = & \left[0, 0, \rho g \iiint_V dV, \rho g \iiint_V y dV, -\rho g \iiint_V x dV \right. \\ & \left. 0, 0, 0, 0, 0, 0 \right]^T \end{aligned} \quad (21)$$

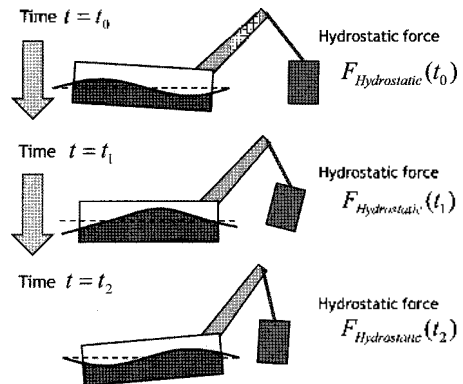


Fig. 9. The calculation of nonlinear hydrostatic force at every time step by considering the attitude of the floating crane and the wave elevation.

5.2 유체동역학 힘

유체동역학 힘은 방사력(radiation force)과 파강제력(wave exciting force)으로 나누어 살펴볼 수 있고, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\bar{\mathbf{F}}_{Hydrodynamic} = \bar{\mathbf{F}}_{Radiation} + \bar{\mathbf{F}}_{Exciting} \quad (22)$$

시간 영역에서의 방사력을 계산하기 위해 다음의 Cummins Equation¹⁸⁾을 사용하였다. 부가질량 $a_{ij}(\omega)$ 및 감쇠 계수 $b_{ij}(\omega)$ 는 DNV의 상용 시스템

WADAM^[1]을 통해 계산된 값을 입력받아 사용하였다.

$$\begin{aligned} \bar{F}_{Radiation,i} &= -A_{ij}\ddot{x}_i - \int_0^{\infty} B_{ij}(\tau) \cdot \dot{x}_i(t-\tau) d\tau \quad (i,j=1,\dots,6) \\ B_{ij}(\tau) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{ij}(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega \\ A_{ij} &= a_{ij}(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^{\infty} B_{ij}(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau \\ \bar{F}_{Radiation,i} &= 0 \quad (i=7,\dots,12) \end{aligned} \quad (23)$$

여기에서 x_i 는 해상크레인의 위치와 자세를 나타내는 6개의 독립 좌표이고, $B_{ij}(\omega)$ 는 retardation function이다.

과광제력 $\bar{F}_{Exciting}$ 은 DNV의 상용 시스템 WADAM^[1]에서 계산된 주파수별 RAO(Response Amplitude Operator)로부터 파고를 고려하여 계산하였다.

5.3 wire rope에 작용하는 장력과 비틀림 모멘트

여러 wire를 감아서 strand를 구성하고, strand를 core 주위로 감아서 wire rope를 구성한다(Fig. 10). 따라서 wire rope는 장력에 의해서 길이 및 회전 변형이 발생하게 되고, 비틀림 모멘트에 의해서도 길이 및 회전 변형이 발생하게 된다. 따라서 이러한 관계를 wire, strand, core를 고려하여 정리하면 다음과 같다^[30,21].

$$\bar{F}_{Wire rope} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -(C_1\varepsilon + C_2\beta), 0, 0, 0] \quad (24)$$

여기에서 ε 은 길이 변형률, β 는 회전 변형률이다. 각 비례 상수 C_1, C_2 는 wire, strand, core의 반지름, pitch(한 바퀴 감아 돌아갈 때 올라가는 높이), 감아 올라가는 각도 등의 특성치로부터 계산될 수 있다.

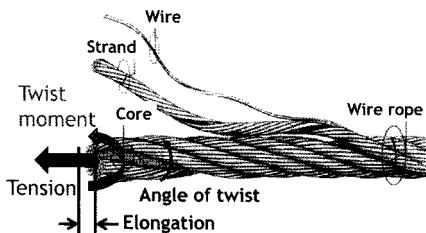


Fig. 10. The configuration of wire rope and the tension and torsion acting to the wire rope.

5.4 계류력

계류력은 다음 식을 사용하고 이 때, 계수 C_{Lj}, C_{Kj}

는 Jiang 등^[4,5], Schellin 등^[6]에서 사용한 실험 데이터를 참고하여 성하였다.

$$\begin{aligned} \bar{F}_{Mooring,i} &= -C_{Lj}x_i - C_{Kj}x_i^3 \quad (i=1,\dots,6) \\ \bar{F}_{Mooring,i} &= 0 \quad (i=7,\dots,12) \end{aligned} \quad (25)$$

여기에서 x_i 는 해상크레인의 위치와 자세를 나타내는 6개의 독립 좌표이다.

5.5 중력

중력은 해상크레인과 대형 중량물의 질량으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{F}_{Gravity} = [0, 0, -m_G \cdot g, 0, 0, 0, 0, 0, -m_{G_2} \cdot g, 0, 0, 0]^T \quad (26)$$

여기에서 m_{G_1} 는 해상크레인의 질량, m_{G_2} 는 대형 중량물의 질량이고, g 는 중력가속도이다.

6. 해상크레인과 대형 중량물의 운동방정식 비교 검증

해상크레인과 대형 중량물의 운동방정식을 검증하기 위해 유체력을 고려한 상용 동역학 소프트웨어인 MOSES(Multi-Operational Structural Engineering Simulator)^[22]와의 시뮬레이션 결과 비교를 수행하였다. 유체력을 고려한 상용 동역학 소프트웨어 MOSES는 유체정역학 힘과 유체동역학 힘을 반영하여 유체 중에 있는 선박 또는 해양구조물의 운동을 시뮬레이션 할 수 있는 상용 소프트웨어이다. 비교 검증을 위해 파고 1 m, 주파수 0.349 /s, 입사각 45도인 해양파를 입력하였다. 해상크레인과 대형 중량물의 상하 동요(heave)와 종 동요(pitch) 운동에 대해 결과를 비교하였다.

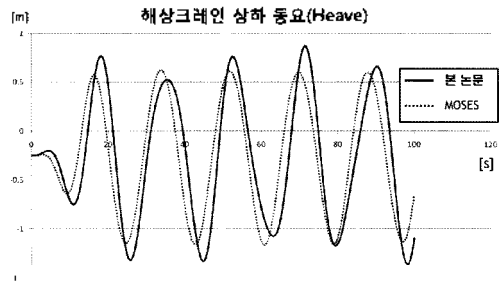


Fig. 11. The comparison between the simulation in this paper and commercial dynamic software MOSES (heave motion of the floating crane).

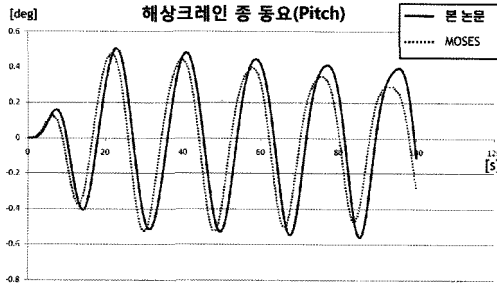


Fig. 12. The comparison between the simulation in this paper and commercial dynamic software MOSES (pitch motion of the floating crane).

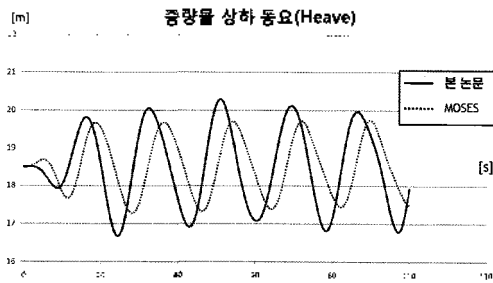


Fig. 13. The comparison between the simulation in this paper and commercial dynamic software MOSES (heave motion of the heavy cargo).

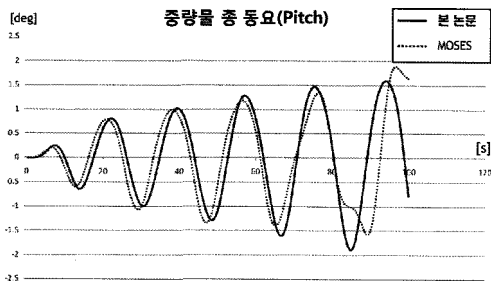


Fig. 14. The comparison between the simulation in this paper and commercial dynamic software MOSES (pitch motion of the heavy cargo).

위의 결과에서 확인할 수 있듯이 본 논문의 시뮬레이션 결과와 유체력을 고려한 상용 동역학 소프트웨어 MOSES의 결과가 거의 유사함을 확인할 수 있다. 따라서 외력에 대한 검증도 수행할 수 있었다.

7. 해양크레인과 대형 중량물의 상호 작용을 고려한 탑재 시뮬레이션의 결과

해양파의 진폭에 따른 비교, 해양파의 주파수에 따른 비교, 해양파의 입사각에 따른 비교를 수행하였다.

7.1 해양파의 진폭에 따른 비교

해양파의 진폭을 0.5, 1.0 m로 변경시켜 가면서 시뮬레이션을 수행하였으며, 주파수는 0.628 /s, 입사각은 45도로 고정하였다.

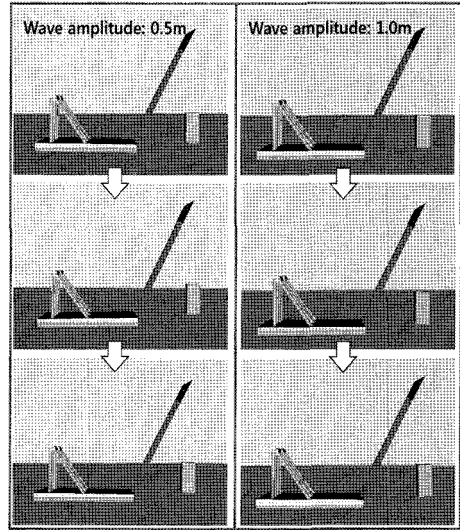


Fig. 15. The motion of the floating crane and the heavy cargo in 0.5 and 1.0m wave amplitudes.

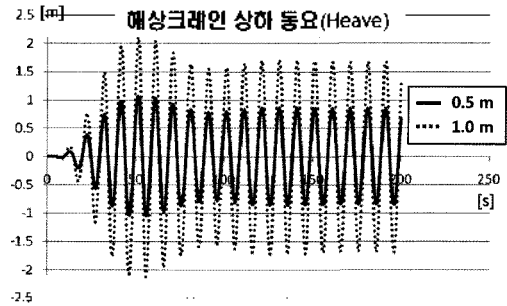


Fig. 16. Heave motion of the floating crane in 0.5 and 1.0m wave amplitudes.

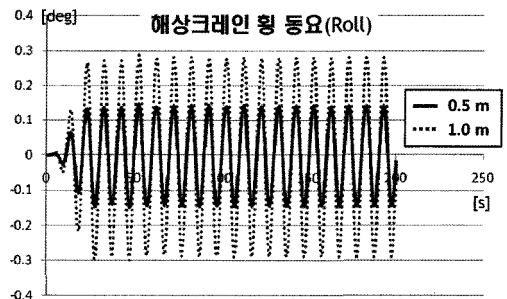


Fig. 17. Roll motion of the floating crane in 0.5 and 1.0m wave amplitudes.

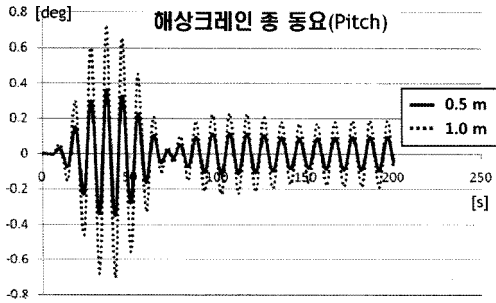


Fig. 18. Pitch motion of the floating crane in 0.5 and 1.0m wave amplitudes.

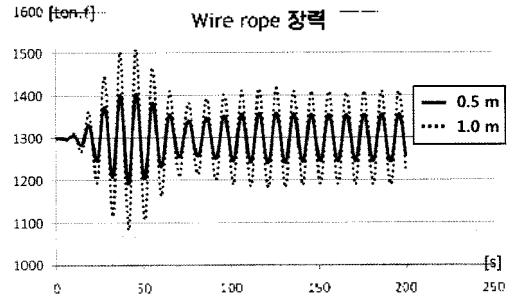


Fig. 22. Wire rope tension between the floating crane and the heavy cargo in 0.5 and 1.0m wave amplitudes.

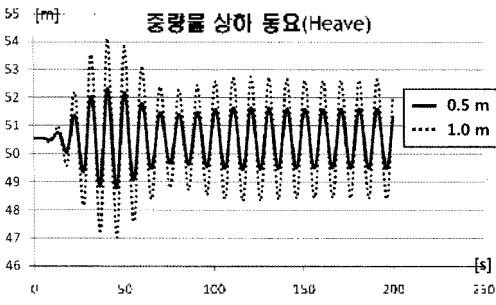


Fig. 19. Heave motion of the heavy cargo in 0.5 and 1.0m wave amplitudes.

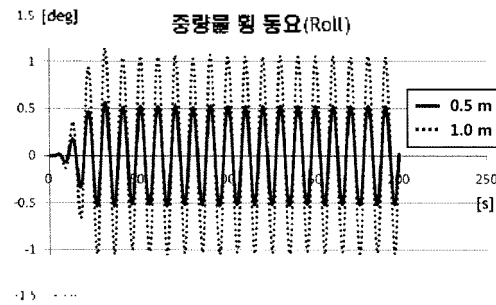


Fig. 20. Roll motion of the heavy cargo in 0.5 and 1.0m wave amplitudes.

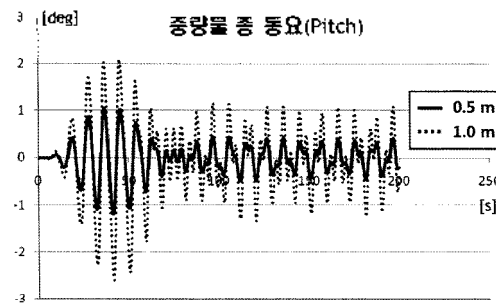


Fig. 21. Pitch motion of the heavy cargo in 0.5 and 1.0m wave amplitudes.

위의 결과에서 확인할 수 있듯이 해양파의 진폭이 커질수록 해상크레인 및 중량물 운동의 진폭, wire rope에 작용하는 장력이 크게 나오는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서 대상으로 하는 “대우”호 해상크레인의 경우 1,300 Mg의 중량물을 탑재하기 위해 총 4개의 hook(여러 wire rope 나발로 연결되어 있음) 중 2개의 hook만을 사용하게 되는데, 안전계수를 고려하면 최대 허용 장력이 약 1,500 ton-f이다. 이와 같은 경우 1.0 m 진폭의 해양파는 위험한 상황을 초래할 수도 있기 때문에, hook들 4개 모두 사용하는 방안이 필요할 것이다.

7.2 해양파의 주파수에 따른 비교

해양파의 주파수를 0.524, 0.628, 0.785 /s로 변화시켜 가면서 해상크레인 및 대형 중량물의 운동을 시뮬레이션 하여, 상하 동요(heave), 횡 동요(roll), 종 동요(pitch), wire rope에 작용하는 장력을 계산하였다. 이 때, 해양파의 진폭은 0.5 m, 입사각은 45도로 고정하였다.

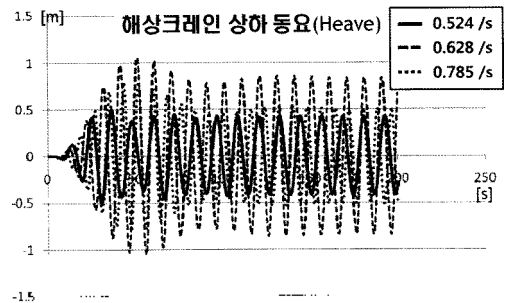


Fig. 23. Heave motion of the floating crane in 0.524, 0.628 and 0.785 /s wave frequencies.

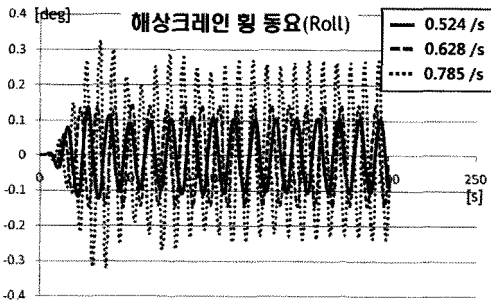


Fig. 24. Roll motion of the floating crane in 0.524, 0.628 and 0.785 /s wave frequencies.

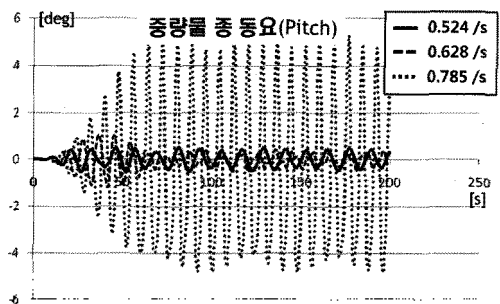


Fig. 28. Pitch motion of the heavy cargo in 0.524, 0.628 and 0.785 /s wave frequencies.

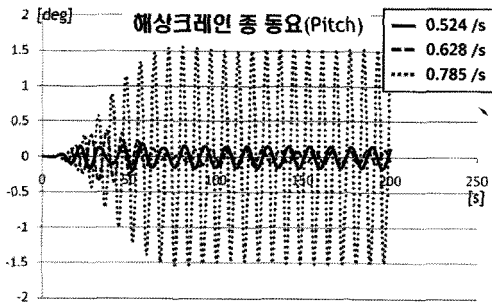


Fig. 25. Pitch motion of the floating crane in 0.524, 0.628 and 0.785 /s wave frequencies.

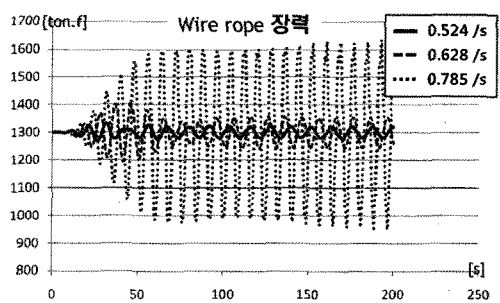


Fig. 29. Wire rope tension between the floating crane and the heavy cargo in 0.524, 0.628 and 0.785 /s wave frequencies.

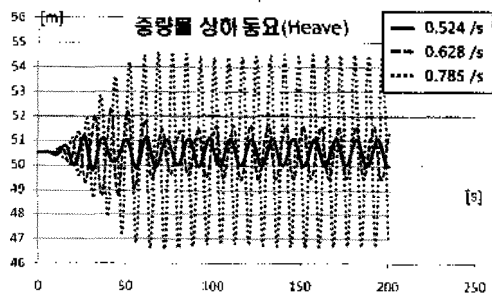


Fig. 26. Heave motion of the heavy cargo in 0.524, 0.628 and 0.785 /s wave frequencies.

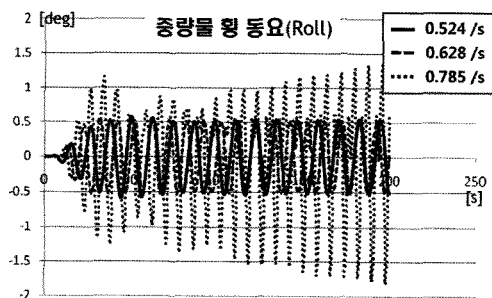


Fig. 27. Roll motion of the heavy cargo in 0.524, 0.628 and 0.785 /s wave frequencies.

위의 시뮬레이션 결과로부터 0.785 /s의 주파수를 갖는 해양파가 다른 주파수에 비해 해상크레인과 중량물의 운동과 wire rope에 작용하는 장력을 크게 증가시키는 것을 볼 수 있다. Wire rope에 작용하는 최대 장력이 1,635 ton.f로서, 이러한 시뮬레이션을 통해 위험한 해양파의 주파수 영역을 유추할 수 있고, 실제 작업 시 이를 반영하여 위험을 감소시킬 수 있을 것이다.

7.2 해양파의 입사각에 따른 비교

해양파의 입사각이 0도, 45도, 90도인 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하여 해상크레인과 대형 중량물의 상하 동요(heave), 횡 동요(roll), 종 동요(pitch) 운동 및 wire rope에 작용하는 장력을 계산하였다. 이 때, 해양파의 진폭은 0.5 m, 주파수는 0.628 /s로 고정하였다.

해상크레인과 대형 중량물은 해양파가 90도로 입사될 때 횡 동요가 가장 크다는 것을 확인할 수 있고, 0도로 입사될 때에는 횡 동요가 거의 없다고 볼 수 있다. 한편 해상크레인은 해양파가 0도로 입사될 때 종 동요가 가장 크다는 것을 확인할 수 있고, 90도로 입

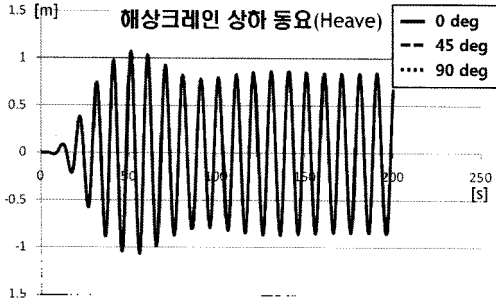


Fig. 30. Heave motion of the floating crane in 0, 45 and 90 deg wave directions.

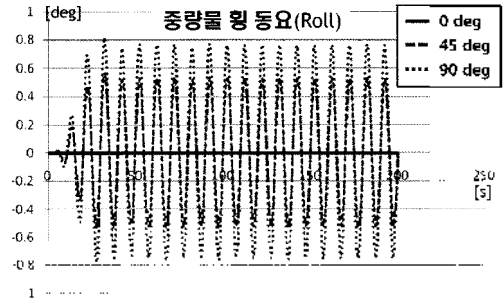


Fig. 34. Roll motion of the heavy cargo in 0, 45 and 90 deg wave directions.

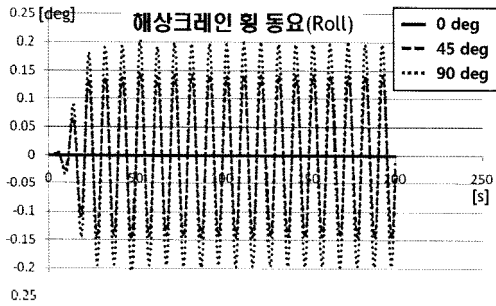


Fig. 31. Roll motion of the floating crane in 0, 45 and 90 deg wave directions.

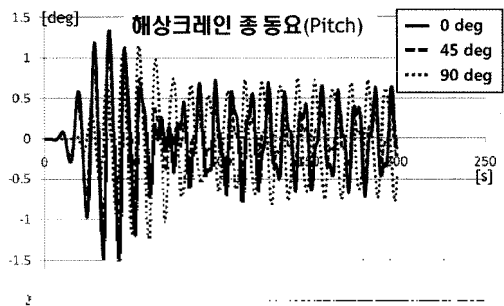


Fig. 35. Pitch motion of the heavy cargo in 0, 45 and 90 deg wave directions.

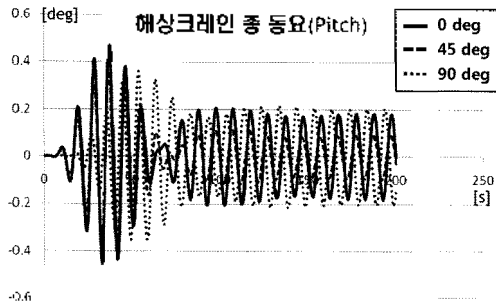


Fig. 32. Pitch motion of the floating crane in 0, 45 and 90 deg wave directions.

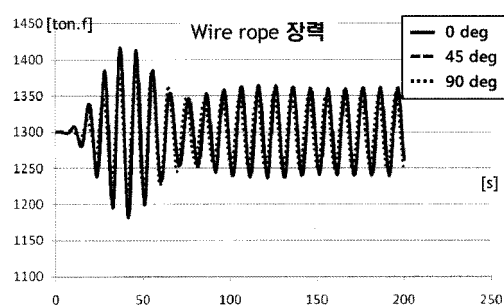


Fig. 36. Wire rope tension between the floating crane and the heavy cargo in 0, 45 and 90 deg wave directions.

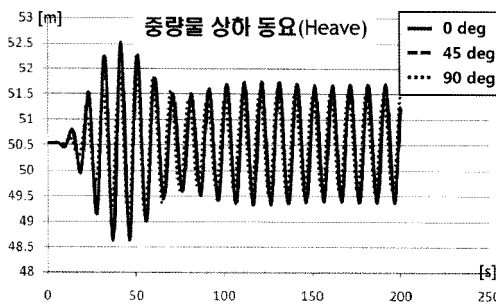


Fig. 33. Heave motion of the heavy cargo in 0, 45 and 90 deg wave directions.

사될 때에도 약간 뒤늦게 종 동요가 발생한다. 이는 해양파가 90도로 입사될 때, 해상크레인이 횡 동요를 하면서 대형 중량물도 횡 동요를 하게 되는데, 대형 중량물이 선수 방향 쪽에 치우쳐 있기 때문에 종방향으로 모멘트를 발생시켜 해상크레인이 서서히 종 동요 하는 것으로 볼 수 있다. 이러한 결과는 해상크레인 외 대형 중량물이 서로 상호 작용을 하고 있다는 것을 나타낸다.

한편, wire rope에 작용하는 장력은 대부분의 입사 각에 대해 비슷한 크기이다.

8. 결론 및 향후 연구 계획

본 논문에서는 해상크레인과 대형 중량물의 상호 작용을 고려한 탑재 시뮬레이션을 수행하여 해상크레인과 대형 중량물의 운동 및 wire rope에 작용하는 장력을 계산하였다. 대형 중량물을 탑재하기 때문에 해상크레인의 운동을 대진폭 운동으로 가정하였으며, 외력 중에 가장 큰 영향을 주는 유체정역학 힘을 미선형으로 고려하였다. 이러한 시뮬레이션을 통해 작업 가능한 해상 상태에 대한 공학적인 지침을 마련할 수 있는데, 예를 들면 wire rope의 최대 허용 장력을 초과하지 않기 위한 해양과의 진폭, 주파수 등을 사건에 계산하여 유추할 수 있다. 한편, 해양과의 입사각에 따라 해상크레인과의 대형 중량물의 상호 작용에 의해 운동이 커질 수 있음을 확인할 수 있었다.

향후에는 실제 현장 데이터와 비교 검증을 수행하고 나아가 해상크레인의 boom을 탄성으로 고려한 연구 및 충격 하중을 고려한 연구를 수행하고자 한다. 또한, 해상크레인을 병렬로 연결하여 수행하는 작업에 대해서도 다양한 시뮬레이션을 수행하여 공학적인 지침을 마련할 수 있어야 한다.

감사의 글

본 연구는

- a) 대우조선해양(주)
- b) 국방과학연구소 수중운동체기술특화센터 SM-11 과제 “수중 운동체의 체계/부체계 기능 및 성능 시뮬레이션을 위한 네트워크 기반의 가상(Virtual) 복합 시스템 모델 구조(Architecture) 연구”
- c) 서울대학교 해양시스템공학 연구소
- d) 서울대학교 BK 21 해양기술인력양성사업단
- e) 한국학술진흥재단(KRF-2008-314-D00494)의 지원을 받아 연구되었음을 밝히며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 차주환, 해상크레인으로 인양하는 대형 중량물의 비선형 동적 응답 및 이산 사건/이산 시간 시뮬레이션, 박사학위논문, 서울대학교, 2008.
2. 함승호, 차주환, 이규열, 노명일, 박광필, 서홍원, “다물체간 상호 작용 및 해양파에 의한 운동 응답을 고려한 해상크레인의 실시간 시뮬레이션”, 2008년도 대한조선학회 춘계학술발표회, pp. 1669-1676, 2008.
3. 장승필, 이기표, 권종근, 박영석, 황철성, 김철, 안성

- 필, Offshore Heavy Lifting시 충격해석 연구, 현대중공업 기술 개발 과제 보고서, 1986.
4. Jiang, T., “Untersuchung nichtlinearer Schiffsdynamik mit Auftreten von Instabilität und Chaos an Beispielen aus der Offshoretechnik”, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, Bericht Nr. 512, 1991.
5. Jiang, T., Schellin, T. E. and Östergaard, C., “Analyse und Bewertung der Arbeitsbedingungen von schwimmenden Offshore-Kranen im Seegang”, in Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, pp. 441-457, 1990.
6. Schellin, T. E., Jiang, T. and Östergaard, C., “Response Analysis and Operating Limits of Crane Ships”, *Journal of Ship Research*, Vol. 37, No. 3, pp. 225-238, 1993.
7. 구남국, 차주환, 권정환, 이규열, “해상크레인에 의해 인양되는 중량물의 거동 감쇠를 위한 Tagline 제어 시스템”, 대한조선학회 논문집, 제46권, 제5호, pp. 527-535, 2009.
8. Ellermann, K., Kreuzer, E. and Markiewicz, M., “Nonlinear Dynamics of Floating Cranes”, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 27, pp. 107-183, 2002.
9. 방경운, 이규열, 차주환, 노명일, 김훈주, “이산 사건과 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 프레임워크의 제안과 조선 블록 탑재 공정에서의 적용”, 2007년도 한국CAD/CAM학회 학술발표회, pp. 297-305, 2007.
10. Cha, J.-H., Roh, M.-L., Ham, S.-H., Lee, K.-Y., Park, K. P. and Suh, H. W., “Development of an Integrated Simulation Framework and Its Application to Shipbuilding Process Planning”, *ICCAS (International Conference on Computer Applications in Shipbuilding) 2007*, pp. 283-290, Portsmouth, UK, 2007.
11. Greenwood, D. T., *Classical Dynamics*, Prentice-Hall, INC., 1977.
12. Holfman, R. L., *Dynamics*, Addison-Wesley Publishing Company, INC., 1962.
13. Kreuzer, E. and Schichlen, W., “NEWEUL – Software for the Generation of Symbolical Equations of Motion”, in *Multibody System Handbook*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 181-202, 1990.
14. Lanczos, C., *The Variational Principle of Mechanics*, 4th edition, Dover Publication, Inc., 1970.
15. Meirovitch, L., *Method of Analytical Dynamics*, McGraw-Hill Book Company, 1970.
16. Shabana, A. A., *Computational Dynamics*, John Wiley & Sons, Inc., 1994.
17. 차주환, 함승호, 이규열, “Pressure integration technique을 이용한 선박유체정역학 힘과 모멘트 계산”, 서울대학교 선박설계자동화연구실 내부 기술 보고서, 2007.
18. Cummins, W. E., “The Impulse Response Function and Ship Motions”, *Schiffstechnik*, Vol. 9, pp. 101-109, 1962.

19. Det Norske Veritas, <http://www.dnv.com>.
 20. Costello, G. A., *Theory of Wire Rope*, 2nd Edition, Springer, 1997.
 21. 차주환, 함승호, 노병일, 이규열, 박광필, 서용위,

“Wire Rope Dynamics 기반의 조선용 탑재 크레인 동역학 시뮬레이션”, 2008년도 한국CAD/CAM학회 학술발표회, 2008.
 22. Ultramarine, Inc. <http://www.ultramarine.com/>.



차 주 환

2002년 서울대학교 조선해양공학과 학사
 2004년 서울대학교 조선해양공학과 석사
 2008년 서울대학교 조선해양공학과 박사
 2008년~현재 서울대학교 공학연구소 연구원
 관심분야: 모델링 및 시뮬레이션, 시뮬레이션 기반 설계, 다물체 동역학, CAD, 음향수 모델링



이 규 열

1971년 서울대학교 공과대학 조선공학과 학사
 1975년 독일 하노버 공과대학 조선공학 석사(Dipl.-Ing.)
 1982년 독일 하노버 공과대학 조선공학 박사(Dr.-Ing.)
 1975년~1983년 독일 하노버 공과대학 선박설계 및 이론연구소, 주정부 연구원
 1983년~1994년 한국기계연구원 선박해양공학연구센터, 선박설계, 생산자동화 연구사업(CSDP)단장
 1994년~현재 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 교수
 관심분야: CAD, CAGD, 선박 설계, 시뮬레이션, CAIS