

상하동요 감쇠장치 적용을 통한 새로운 다물체동역학 프로그램의 적용성 검토

구 남 국¹ · 하 솔^{1*} · 노 명 일²

¹서울대학교 공학연구소, ²서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소

Study on the Applicability of a New Multi-body Dynamics Program Through the Application to the Heave Compensation System

Nam-Kug Ku¹, Sol Ha^{1*} and Myung-Il Roh²

¹Engineering Research Institute, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

²Department of the Naval Architecture and Ocean Engineering, and Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

Abstract

In this paper, dynamic response analysis of a heave compensation system is performed for offshore drilling operations based on multibody dynamics. With this simulation, the efficiency of the heave compensation system can be virtually confirmed before it is applied to drilling operations.

The heave compensation system installed on a semi-submersible platform consists of a passive and an active heave compensator. The passive and active heave compensator are composed of several bodies that are connected to each other with various types of joints. Therefore, to carry out the dynamic response analysis, the dynamics kernel was developed based on multibody dynamics. To construct the equations of motion of the multibody system and to determine the unknown accelerations and constraint forces, the recursive Newton-Euler formulation was adapted. Functions of the developed dynamics kernel were verified by comparing them with other commercial dynamics kernels. The hydrostatic force with nonlinear effects, the linearized hydrodynamic force, and the pneumatic and hydraulic control forces were considered as the external forces that act on the platform of the semi-submersible rig and the heave compensation system.

The dynamic simulation of the heave compensation system of the semi-submersible rig, which is available for drilling operations with a 3,600m water depth, was carried out. From the results of the simulation, the efficiency of the heave compensation system were evaluated before they were applied to the offshore drilling operations. Moreover, the calculated constraint forces could serve as reference data for the design of the mechanical system.

Keywords : dynamic response analysis, multibody system, hoisting system, heave compensation system

1. 서 론

일반 산업분야에서 실제 제품제작 이전에 제품 자체의 혹은 제품제작 공정에서의 동적인 특성을 미리 파악하고자 시뮬레이션을 수행하는 사례가 늘고 있다. 조선 생산현장에서 도 역시 많은 기계시스템(mechanical system)이 사용되고

있으며, 선박 및 해양 구조물의 설계 및 생산 이전에 동적인 시뮬레이션을 통해 해당 시스템의 동적인 특성을 해석하고자 하는 요구가 발생하고 있다(Ku *et al.*, 2012).

특히, 최근 대형 조선소에서는 해양 구조물의 선체 건조뿐만 아니라 상부 모듈의 엔지니어링 설계에 관심을 갖기 시작하고 있다. 현재 해외 엔지니어링 업체의 설계기술에 의존해

* Corresponding author:

Tel: +82-2-880-7328; E-mail: hasol81@snu.ac.kr

Received June 27 2013; Revised August 5 2013;

Accepted August 6 2013

©2013 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

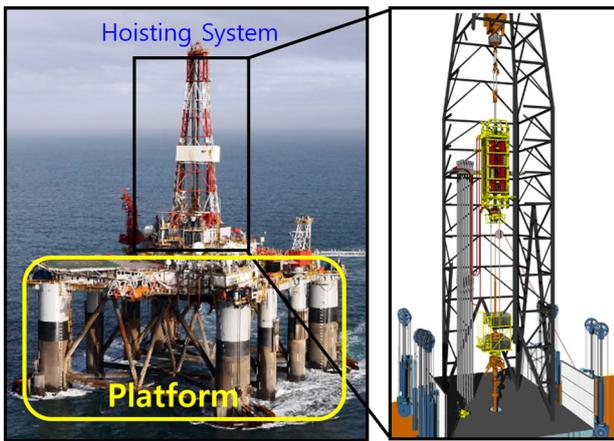


Fig. 1 Offshore drilling rig and hoisting system

오고 있는 상부 모듈의 기구 설계를 수행하기 위해서는 이의 동적인 특성을 파악하는 것이 중요하다.

Fig. 1은 해상 시추선(offshore drilling rig)과 해상 시추선의 선체(platform) 위에 설치되어 있는 hoisting 시스템을 보여주고 있다. Hoisting 시스템은 해상 시추선의 가장 중요한 장비 중 하나로서 시추장비 및 해저 설치용 장비를 올리고 내리며(hoisting), 시추용 날(drilling bit)을 회전시키기(rotating) 위한 시스템을 말한다. 일반적으로 해상 시추선에서 사용되는 hoisting 시스템은 선체의 상하운동(heave motion)이 시추작업에 미치는 영향을 최소화하기 위한 기구 장치를 포함하고 있으며, 본 기구 장치는 유공압 제어를 통해 hoisting 시스템이 들고 있는 중량물이 공간상에서 움직이지 않도록 한다.

본 기구장치를 포함한 hoisting 시스템은 여러 개의 강체로 이루어져 있으며, 본 논문에서는 hoisting 시스템의 동적 거동 해석을 수행하기 위하여 다물체계 동역학 커널을 개발하였다.

2. 관련 연구 현황

Fig. 1의 hoisting 시스템을 이루고 있는 여러 개의 강체는 다양한 형태의 관절로 서로 연결되어 있어, 서로 구속력을 주고 받으며 그 움직임을 서로 제한한다. 이러한 기계 시스템을 다물체계 시스템(multibody system)이라고 하며, 현장에서는 다물체계 시스템의 동적거동 해석을 위해서 다음과 같은 상용 프로그램을 사용하고 있다.

ADAMS(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems)는 범용 다물체계 동역학 시뮬레이션 소프트웨어이다(Orlande *et al.*, 1977; Schiehlen, 1990). 다물체계 운동 방정식 구성에는 augmented formulation을 사용하며 고정식, 회전식, 구형 관절부터 기어 및 스크류 등 다양한 종류의 관절

(joint)을 지원하고 있다. 단순한 외력은 사용자가 직접 입력할 수 있지만, 해양 구조물의 동적거동 해석에 중요한 유체력을 입력하는 기능은 지원하지 않는다.

ODE(Open Dynamics Engine)는 공개용 동역학 엔진 모듈로서 공개 라이브러리 형태이다(Smith, 2006). augmented formulation을 기반으로 하여 운동방정식을 구성하며 고정식, 회전식, 구형 등의 관절을 지원한다. 외력은 사용자가 간단한 함수를 사용하여 입력할 수 있으나, 역시 유체력을 입력하는 기능은 지원하지 않는다.

RecurDyn은 앞서 소개한 다른 동역학 시뮬레이션 소프트웨어와는 다르게 recursive formulation을 기반으로 하여 운동방정식을 구성하였다. 본 소프트웨어 역시 여러 가지 타입의 관절(joint)을 지원한다. 본 소프트웨어 역시 단순한 외력은 사용자가 직접 입력할 수 있지만, 유체력을 입력하는 기능은 지원하지 않는다.

한편 MOSES(Multi-Operational Structural Engineering Simulator)는 유체 정역학 힘과 유체 동역학 힘을 반영하여 유체 중의 단일 물체(single body)의 운동을 해석할 수 있는 시뮬레이션 소프트웨어이다(Nachlinger, 2006). 물체간 연결 관계를 지원하지 않아 구속조건에 의해 연결된 다물체계의 시뮬레이션을 수행할 수 없으나, 외력으로 유체 정역학적 힘(hydrostatic force) 및 유체 동역학적 힘(hydrodynamic force)을 고려한 시뮬레이션이 가능하다. 따라서 바아지 선을 이용한 자켓(jacket) 구조물 설치나 계류된 선박과 같이 조선 해양분야의 시뮬레이션에 주로 사용된다.

본 논문에서는 다물체계 시스템(multibody system)의 구성 요소가 많을수록 계산의 효율성이 좋은 recursive formulation을 이용하여 다물체계 동역학 커널을 개발하였다. 개발한 커널에는 유체 정역학적 힘 및 유체 동역학적 힘을 계산할 수 있는 모듈이 구현되어 있으며, 이를 적용하여 6자유도 운동을 하는 hoisting 시스템의 연성된 동적거동 해석을 수행하였다. 또한 다물체계 시스템의 각 관절에 작용하는 동적 구속력을 계산하였다.

3. 다물체계 동역학 커널 개발

다물체계 시스템의 동적거동 해석을 수행하기 위하여 동역학 커널을 개발하였다. 본 장에서는 동역학 커널의 기능과 다물체계 시스템의 운동방정식 구성을 위해 적용한 recursive formulation, 그리고 동역학 커널에 적용될 외력에 대하여 설명한다.

3.1 기준 좌표계 및 강체의 속성 정의

1장에서 설명한 바와 같이 다물체계 시스템은 여러 개의

강체로 이루어져 있다. 이와 같은 여러 강체의 위치 및 자세를 정의하기 위해서는 공간상에 고정되어 기준이 되는 관성 좌표계(inertial reference frame) 및 각각의 강체에 고정되어, 강체의 위치 및 자세를 대표할 수 있는 물체 고정 좌표계(body-fixed frame)가 필요하다. 또한 운동방정식을 구성하여 동역학 해석을 수행하기 위해서는 각 강체의 질량(mass), 질량 중심(center of mass), 질량 관성 모멘트(moment of inertia)와 같은 강체의 속성들이 정의되어야 한다. 따라서 본 연구에서 개발한 동역학 커널은 기준 좌표계 및 강체의 속성들을 정의할 수 있는 기능을 지원한다(Kreuzer, 1994).

일반적으로 어떤 좌표계를 기준으로 물체의 자세를 정의할 때에는 여러 가지 파라미터(Euler angle, Euler parameter, Rodrigues parameter, Wiener-Milencovic parameter 등)가 사용 된다. 이 중에서 특히 Euler angle을 사용하게 되면 물체의 자세가 과도하게 변 수학적으로 특이점(singularity)이 발생할 수 있다. 하지만 본 논문에서 개발한 동역학 커널은 상대 좌표계와 일반화 좌표(generalized coordinate) 개념을 도입하였다. 즉, 물체의 자세를 정의할 때 관성 좌표계가 아닌 부모 물체의 고정 좌표계에 대한 상대적인 자세를 일반화 좌표를 이용하여 정의하고 있기 때문에 수학적인 특이점이 발생하지 않는다. 예를 들어 Fig. 2의 $i+1$ 번 물체 자세를 정의할 때 i 번 물체와의 상대적인 위치를 나타내주는 q_{i+1} 를 이용하고 있다.

단, 본 동역학 커널은 일반적으로 물위에 떠있는 부유체의 운동에 대해서도 기술을 할 수 있어야 하기 때문에 해당 물체의 경우에 한해서 오일러 각(Euler angle)을 사용하고 있다. 본 논문에서 특이점이 발생할 수도 있는 오일러 각을 사용한 이유는 전통적으로 물위에 떠 있는 부유체의 자세는 횡경사(heel), 종경사(trim), 선수요(yaw)로서 표현을 하고, 이것이 바로 오일러 각이기 때문이며, 일반적인 경우 물위에 떠있는 부유체는 과도운동을 한다고 가정하더라도 180도까지 기울어지는 경우는 극히 드물기 때문이다.

3.2 관절로 연결된 두 강체의 속도 및 가속도 관계

본 연구에서는 다물체계 시스템의 운동방정식을 구성하기 위해서 다물체계 동역학 기반의 recursive formulation을 사용하고 있으며, 본 절에서는 이에 대하여 간략히 설명을 할 것이다.

Fig. 2는 회전 관절(revolute joint)로 연결된 두 링크(link)를 나타낸다. 링크 i 와 링크 $i+1$ 에는 각각 무게중심 G_i, G_{i+1} 을 원점으로 하는 물체 고정 좌표계(body fixed frame) $\{b_{G_i}\}, \{b_{G_{i+1}}\}$ 이 정의되어 있다. 두 링크는 회전 관

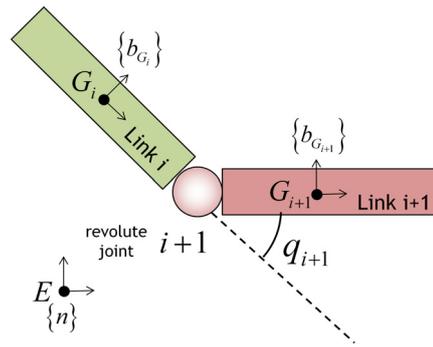


Fig. 2 Two links connected with revolute joint

절 $i+1$ 로서 연결되어 있으며, 회전 관절 $i+1$ 의 관절 값, 즉 링크 $i+1$ 이 링크 i 를 기준으로 얼마나 회전했는지 나타내주는 변수를 q_{i+1} 로 정의한다.

여기서, 관성 좌표계(inertial frame) $\{n\}$ 을 기준으로 각 링크의 무게중심의 병진 속도를 나타낸 벡터를 $v_i^{trans}, v_{i+1}^{trans}$ 라고 정의하고, 각 물체 고정 좌표계 $\{b_{G_i}\}, \{b_{G_{i+1}}\}$ 가 $\{n\}$ 을 기준으로 회전하는 각속도를 v_i^{rot}, v_{i+1}^{rot} 라고 정의하자. 또한, 링크 i 의 무게중심을 기준으로 링크 $i+1$ 의 무게중심의 병진 속도를 나타낸 벡터를 v_{i+1}^{trans} 이라고 정의하고, $\{b_{G_i}\}$ 를 기준으로 한 $\{b_{G_{i+1}}\}$ 의 각속도를 나타낸 벡터를 v_{i+1}^{rot} 라고 정의하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$v_{i+1}^{trans} = v_i^{trans} + v_{i+1}^{trans}(q_{i+1}) \tag{1}$$

$$v_{i+1}^{rot} = v_i^{rot} + v_{i+1}^{rot}(q_{i+1}) \tag{2}$$

여기서, v_{i+1}^{trans} 과 v_{i+1}^{rot} 은 회전 관절의 속도, 즉 관절 값 q_{i+1} 의 미분 값에 따라 달라지므로, 이에 대한 함수로 표현하였다.

각 링크의 가속도를 a 벡터로 표현하고 속도벡터 v 와 같은 첨자를 사용하면 다음과 같은 식을 구성할 수 있으며, 이를 이용하여 가속도 a_i^{trans} 및 각 가속도 a_{i+1}^{rot} 의 계산이 가능하다.

$$a_{i+1}^{trans} = a_i^{trans} + a_{i+1}^{trans}(q_{i+1}) \tag{3}$$

$$a_{i+1}^{rot} = a_i^{rot} + a_{i+1}^{rot}(q_{i+1}) \tag{4}$$

여기에서 병진 속도 및 각속도, 병진 가속도 및 각 가속도를 하나의 벡터로 통합하여 다음 식과 같이 정의하자.

$$v_i = \begin{bmatrix} v_{i+1}^{trans} \\ v_{i+1}^{rot} \end{bmatrix}, a_i = \begin{bmatrix} a_{i+1}^{trans} \\ a_{i+1}^{rot} \end{bmatrix} \tag{5}$$

식 (5)를 사용하면 식 (1), (2)와 식 (3), (4)를 각각 식 (6)과 식 (7)로 표현할 수 있다. 이후 특별한 언급이 없다면 물체의 속도 및 가속도는 물체의 병진 속도, 각속도 그리고 병진 가속도, 각 가속도를 모두 의미하는 것으로 한다.

$$\mathbf{v}_{i+1} = \mathbf{v}_i + \mathbf{v}_{J,i+1}(\dot{q}_{i+1}) \quad (6)$$

$$\mathbf{a}_{i+1} = \mathbf{a}_i + \mathbf{a}_{J,i+1}(\ddot{q}_{i+1}) \quad (7)$$

식 (6)과 (7)을 살펴보면 임의 링크의 속도 및 가속도는 그 전 링크의 속도 및 가속도와, 두 링크 사이의 관절 값의 함수로 표현된 상대 속도 및 가속도로서의 합으로서 표현됨을 알 수 있다.

3.3 Recursive Formulation을 이용한 운동방정식의 구성

아래와 같이 공간 상에 고정되어 있는 기준 강체를 제외하고 총 4개의 강체와 4개의 관절로서 이루어진 다물체계 시스템이 있다. 이 때, 각 관절 $J_1 \sim J_4$ 의 관절 값 $q_1 \sim q_4$ 과, 그 미분 값인 관절의 속도, 그리고 가속도가 주어졌을 때, 주어진 가속도를 발생시키기 위해 각 관절에 가해야 하는 힘을 구하는 문제에 대하여 recursive formulation을 이용하여 운동방정식을 구성해 보자.

우선 주어진 관절 값들을 이용하여 강체의 속도 및 가속도를 계산해 보자. 식 (6)에 의하여 각 강체의 속도 및 가속도는 아래와 같은 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_{J,1}(\dot{q}_1) \quad (8)$$

$$\mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_{J,2}(\dot{q}_2) \quad (9)$$

$$\mathbf{v}_3 = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_{J,3}(\dot{q}_3) \quad (10)$$

$$\mathbf{v}_4 = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_{J,4}(\dot{q}_4) \quad (11)$$

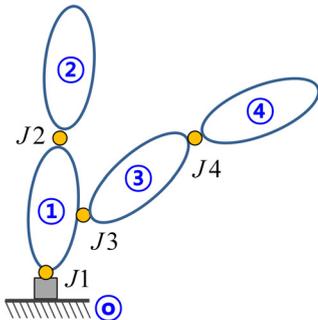


Fig. 3 Multibody system which consists of 4 rigid bodies and 4 joints

$$\mathbf{a}_1 = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_{J,1}(\ddot{q}_1) \quad (12)$$

$$\mathbf{a}_2 = \mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_{J,2}(\ddot{q}_2) \quad (13)$$

$$\mathbf{a}_3 = \mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_{J,3}(\ddot{q}_3) \quad (14)$$

$$\mathbf{a}_4 = \mathbf{a}_3 + \mathbf{a}_{J,4}(\ddot{q}_4) \quad (15)$$

여기서, 주의해야 할 점은 3번 강체는 1번 강체와 연결되어 있기 때문에, 2번 강체의 속도 및 가속도와는 관련이 없다는 것이다. 각 강체가 계산된 속도 및 가속도로 움직이기 위해, 각 강체에 작용해야 하는 총 합력 \mathbf{F}_i 및 모멘트 $\boldsymbol{\tau}_i$ 는 아래의 Newton-Euler equation으로 계산할 수 있다.

$$\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{a}_i^{trans} = \mathbf{f}_i \quad (16)$$

$$\mathbf{I}_i \cdot \mathbf{a}_i^{rot} + \mathbf{v}_i^{rot} \times \mathbf{I}_i \cdot \mathbf{v}_i^{rot} = \boldsymbol{\tau}_i \quad (17)$$

각 강체에 작용해야 하는 총 힘과 모멘트를 하나의 힘벡터 \mathbf{F}_i^{total} 로 표현하면 식 (18)과 같다.

$$\mathbf{F}_i^{total} = [\mathbf{f}_i^T \boldsymbol{\tau}_i^T]^T \quad (18)$$

여기에서 강체 3에 작용하는 힘에 대해서 이야기 해보자. 강체 3이 받는 힘으로는 관절 3으로부터 받은 힘 \mathbf{F}_3^{joint} , 그리고 중력, 유체력과 같은 외력 \mathbf{F}_3^{ext} 가 있다. 이렇게 받은 힘 중 일부는 강체 3이 움직이는데 사용되고(\mathbf{F}_3^{total}) 일부는 관절 4를 통하여 4번 강체로 전달된다(\mathbf{F}_4^{joint}). 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{F}_3^{joint} + \mathbf{F}_3^{ext} = \mathbf{F}_3^{total} + \mathbf{F}_4^{joint} \quad (19)$$

여기서, 우리가 구해야 하는 것은 3번 관절에 가해줘야 하는 힘이므로 아래 식과 같이 정리한다.

$$\mathbf{F}_3^{joint} = \mathbf{F}_3^{total} + \mathbf{F}_4^{joint} - \mathbf{F}_3^{ext} \quad (20)$$

식 (20)에서 등호 오른쪽의 첫 번째 항은 식 (16), (17)을 통해 계산할 수 있고, 세 번째 항은 외력으로서 주어지지만, 두 번째 항은 4번 관절을 통해 4번 강체(다음 강체)로 전달되어야 하는 값으로서 계산되어야 하는 값이다. 이에 다음 강체가 없는 마지막 강체 부터 힘을 계산할 수 있도록 식을 정리하면 아래와 같다.

$$\mathbf{F}_4^{joint} = \mathbf{F}_4^{total} - \mathbf{F}_4^{ext} \quad (21)$$

$$\mathbf{F}_3^{joint} = \mathbf{F}_3^{total} - \mathbf{F}_3^{ext} + \mathbf{F}_4^{joint} \quad (22)$$

$$\mathbf{F}_2^{joint} = \mathbf{F}_2^{total} - \mathbf{F}_2^{joint} \quad (23)$$

$$\mathbf{F}_1^{joint} = \mathbf{F}_1^{total} - \mathbf{F}_1^{ext} + \mathbf{F}_2^{joint} + \mathbf{F}_3^{joint} \quad (24)$$

식 (21)을 통해 관절 4에 가해야 하는 힘을 계산할 수 있고, 다음 식 (22)~(24)를 차례로 풀어 각 관절에 가해야 하는 힘을 계산할 수 있다. 여기서 주의해야 할 점은 강체 1번은 2번 강체와 3번 강체에 힘을 동시에 전달해야 함을 식 (24)에서 고려해야 한다는 것이다(Featherstone, 2008).

이와 같은 방법으로 계산을 수행하면 각 관절에서의 관절 값, 속도, 가속도가 주어졌을 때, 각각의 관절에 가해야 하는 힘을 구할 수 있다. 이와 같은 방법을 역 동역학(inverse dynamics)라고 부른다. 그러나 일반적인 거동 해석 프로그램에서는 다물체계 시스템에 외력이 가해졌을 때, 가속도를 구하는 것이 목적이며, 이를 정 동역학(forward dynamics)라고 부른다. 이 정 동역학 문제를 풀기 위해서는 본 3장에서 설명한 방법의 역순으로서 계산을 수행하면 되며, 이 방법을 이용하여 동역학 커널을 구현하였다.

3.4 동적거동 해석을 위한 외력

3.3절에서 설명한 recursive formulation을 이용하여 운동 방정식을 구성한 뒤에는 외력을 입력하여 동적거동 해석을 수행할 수 있다. 이 때 고려한 외력은 비선형 유체 정역학적 힘(hydrostatic force with non-linear effect), 선형 유체 동역학적 힘(linear hydrodynamic force) 중력(gravitational force)이다. 본 연구에서 개발한 동역학 커널에는 위의 외력들을 계산할 수 있는 모듈이 함께 구현되어 있다(Lee *et al.*, 2010; Ku *et al.*, 2011).

4. 동역학 커널 검증

본 논문에서 개발한 동역학 커널의 기능을 검증하고자, 여러 가지 테스트 예제에 대하여 아래와 같이 비교를 수행하였다.

4.1 다물체계 시스템의 동적 거동 해석결과 비교- 2 link 다물체계 시스템

본 절에서는 2-link 예제(Fig. 4)의 동적 거동을 해석하고 그 해석 결과를 각종 상용 동역학 해석결과와 비교하였다.

Fig. 5는 관절 1, 2의 관절 값 및 관절의 속도를 시간에 따라 출력한 그래프이며, 개발한 커널을 이용한 시뮬레이션

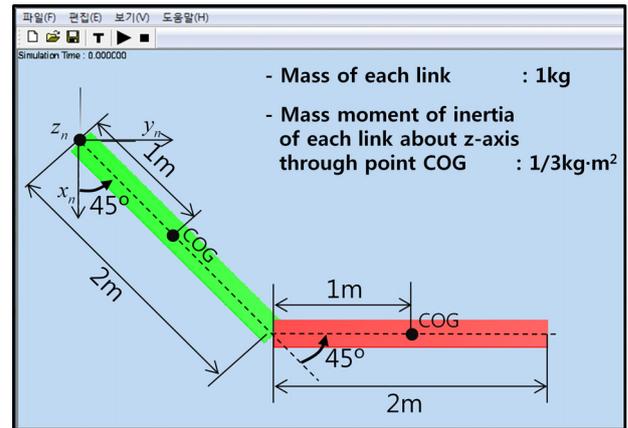


Fig. 4 Test model for verification of developed dynamics kernel - 2 links

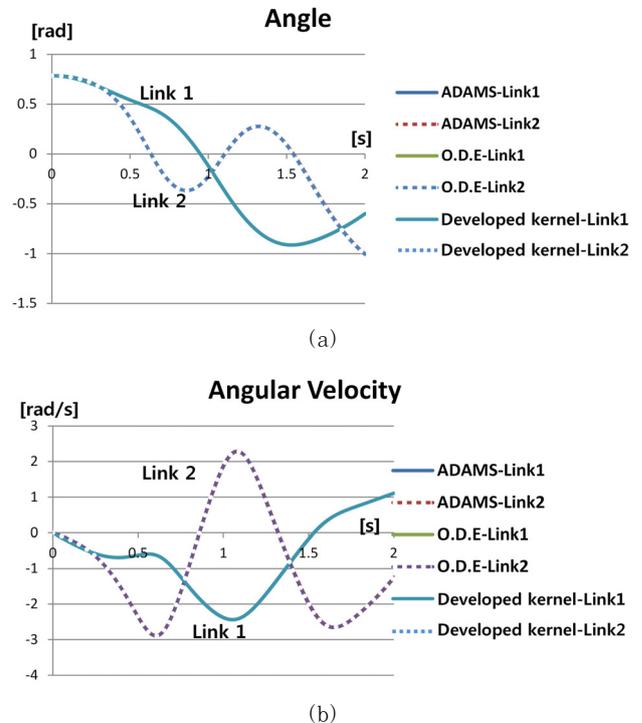


Fig. 5 Comparison of dynamic simulation results for 2-link test model - (a) angle; (b) angular velocity

결과가 ODE나 ADAMS와 동일하여 그래프가 겹쳐 나타남을 볼 수 있다.

4.2 다물체계 시스템의 동적 거동 해석결과 비교- 3 link 다물체계 시스템

Fig. 6은 총 3개의 링크가 4개의 관절로 연결되어 있으며, 총 1개의 닫힌 구조(closed loop)를 포함하고 있는 다물체계 시스템을 보여준다.

Haug(1992)는 본 다물체계 시스템의 동적거동 해석을 수

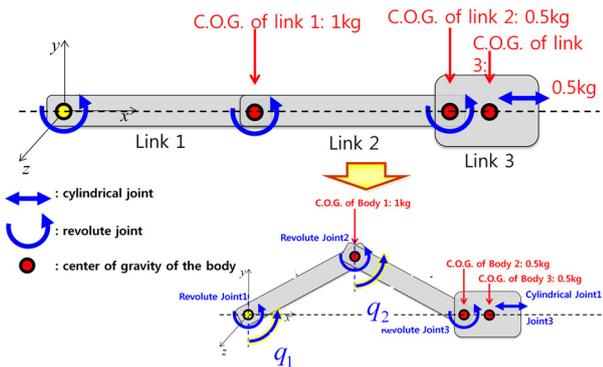


Fig. 6 Test model for verification of developed dynamic kernel - 3 links(Haug, 1992)

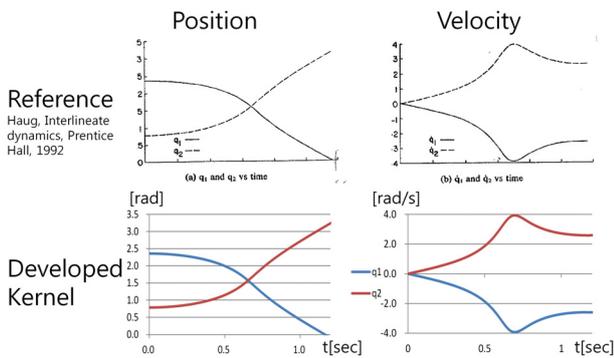


Fig. 7 Comparison of dynamic simulation results for 3-link test model

행 하였으며, 그 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7은 Fig. 6의 오른쪽 아래 그림에서 화살표로 표시된 관절 값 q_1 및 q_2 그리고 그 속도를 시간에 따라 출력한 그래프이다. 개발한 커널을 이용한 시뮬레이션 결과가 Haug(1992)가 수행한 동적거동 해석과 동일함을 알 수 있다.

5. Hoisting 시스템의 동적 거동 해석 수행

4장에서는 기존 상용 동역학 엔진이나, 동역학 해석결과와의 비교를 통하여 본 연구에서 개발한 동역학 커널의 기능이 신뢰성이 있음을 검증하였다. 개발한 커널을 이용하여 다음과 같이 hoisting 시스템을 모델링하였다.

5.1 Hoisting 시스템의 모델링 및 동적거동 해석 수행 결과

Fig. 8은 hoisting 시스템을 포함한 해상 시추선을 개념적으로 재구성한 그림이며, 총 13개의 강체(body)와 18개의 관절(joint)로 모델링을 하였다.

서론에서 이야기한 바와 같이, hoisting 시스템은 중량물의

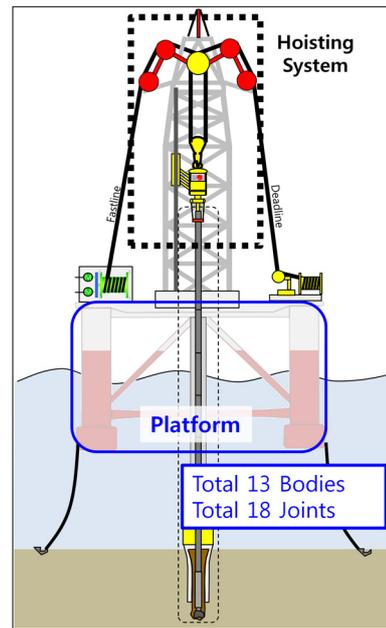


Fig. 8 Configuration of a drill string compensator

상하 운동이 선체의 상하 운동에 영향을 덜 받게 하는 기구 장치인 상하동요 감쇠장치(heave compensation system)를 포함하고 있다. 상하동요 감쇠장치는 공압(pneumatic control) 및 유압(hydraulic control)을 사용하며, 그 동작 원리는 공기압력용기(air pressure vessel)내의 압축공기가 마치 자동차 현가장치(suspension system)의 스프링(spring)과 같은 역할을 하여 플랫폼의 상하 운동을 감쇠하는 것이다.

상하동요 감쇠장치는 일반적으로 수동 감쇠장치(passive heave compensator)와 능동 감쇠장치(active heave compensator)로 구성된다. 수동 감쇠장치는 주로 공압 제어(pneumatic control)를 사용하여 플랫폼의 상하동요(heave motion)로 인한 교란을 85%까지 감쇠하며, 여기에 추가되는 능동 감쇠장치는 유압 제어를(hydraulic control) 사용하여 수동 감쇠장치가 중량물을 지지하는 부분에 양 또는 음의 제어력을 가하여 상하동요로 인한 교란을 총 95%까지, 즉 10%를 추가로 감쇠한다. 본 논문에서는 상하동요 감쇠장치의 유압 실린더와 서보 밸브등에 작용하는 제어력을 유공압 원리를 고려하여 수학적으로 모델링 및 시뮬레이션을 수행한 선행 연구(Jo *et al.*, 2011; 2012)를 적용하여, 주기 10초인 파도가 선체(platform)의 정면에서 입사할 때를 가정하여 동적 거동 해석을 수행하였으며, Fig. 9는 선체 및 hoisting 시스템이 들고 있는 중량물의 동적거동 해석결과 그래프를 보여주고 있다. 6m, 8m, 10m 세가지 파고에 대하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 그래프에 따르면 선체의 진동 폭(Fig. 9(a): 0.8948m, (b): 1.1931m, (c): 1.4915m)에 비하여 중량물의 진동 폭(Fig. 10(a): 0.0294m, (b): 0.0389m, (c):

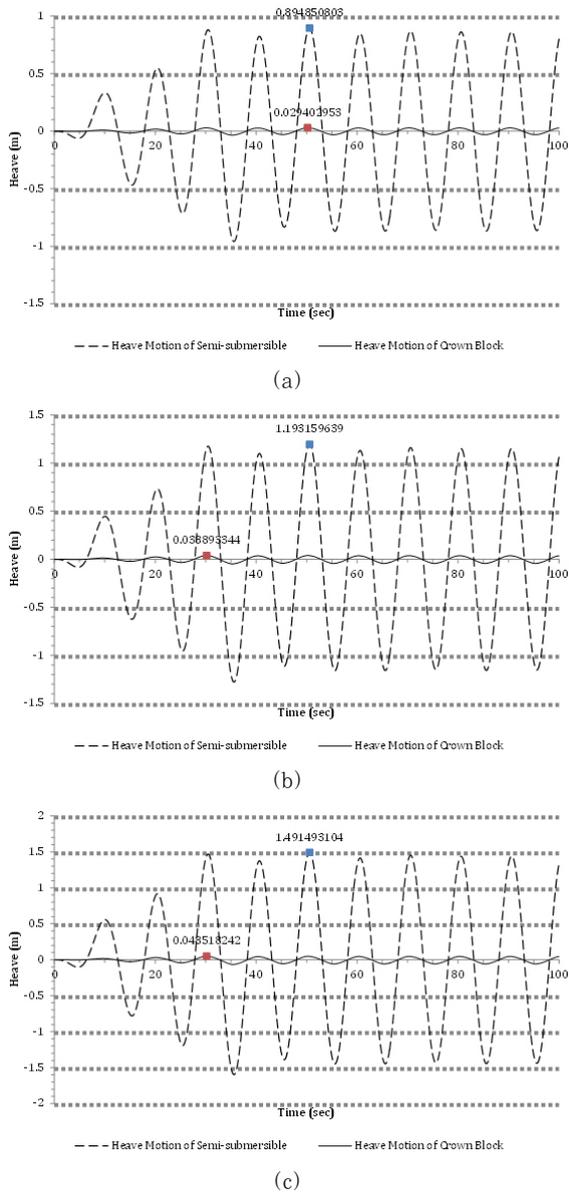


Fig. 9 Results of the dynamic response analysis with wave of (a) 6m amplitude; (b) 8m amplitude; (c) 10m amplitude

0.0485m)이 약 96%~97% 가량 감소된 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 본 연구에서 개발한 동역학 커널을 이용하여 계산한 관절의 구속력 계산 결과이다.

Hoisting 시스템의 여러 관절 중 Fig. 10에 표시되어 있는 회전 관절에 작용하는 x, y, z 방향의 구속력이 선체 및 hoisting 시스템의 시간에 따른 거동에 따라 동적으로 변하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 중력을 받고 있는 z 방향 구속력이 가장 크고, 외력을 받지 않는 y 방향 구속력은 0이 됨을 볼 수 있다. 본 결과는 추후 hoisting 시스템의 실제 기구 설계 시에 고려해야 하는 하중으로서 사용될 수 있을 것이다.

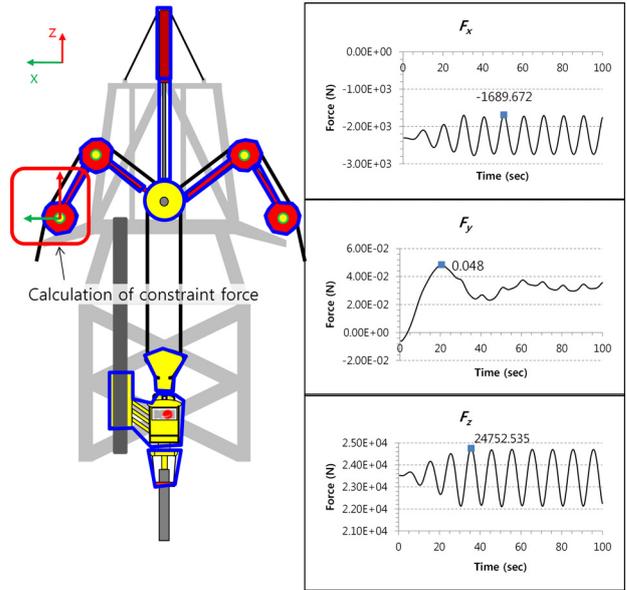


Fig. 10 Results of the constraint force dynamic response analysis

6. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 다물체 시스템의 동적거동 해석을 위한 다물체 동역학 커널을 개발하였다. 개발한 동역학 커널은 다른 상용 다물체 동역학 엔진과 비교를 통해, 그 기능에 문제가 없음을 검증하였다. 또한 개발한 커널을 이용하여 해상 시추선의 hoisting 시스템의 동적거동 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과 다물체 시스템의 동적거동 해석 그리고 각 관절의 구속력 계산이 효과적으로 잘 수행됨을 확인할 수 있었다.

특히 상하동요 감쇠장치의 성능을 평가함에 있어서 여러 가지 과오에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과, 시뮬레이션을 통해 검증한 상하동요 감쇠장치의 성능이 참고문헌을 통해 확인한 성능과 매우 유사한 것을 볼 수 있었다. 이를 응용하면 상하동요 감쇠장치의 유공압 장비 사양을 다양하게 변경하면서 시뮬레이션을 수행하여 감쇠장치의 설계 사양을 결정하는데 많은 도움을 줄 수 있으리라 예상 된다. 또한 본 개발 프로그램을 이용하여 복잡한 구조를 가진 조선해양 분야의 다양한 다물체 시스템에 대한 시뮬레이션을 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 (a) 지식경제부 산업원천기술개발사업(10035331, 시뮬레이션 기반의 선박 및 해양플랜트 생산기술 개발) (b) 서울대학교 공학연구소 (c) 서울대학교 해양시스템공학연구소의 지원을 받아 연구되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Featherstone, R.** (2008) Rigid Body Dynamics, Springer.
- Haug, E.J.** (1992) Interlineate Dynamics, Prentice Hall.
- Jo, A.R., Ku, N.K., Park, K.P., Lee, K.Y.** (2011) Mathematical Modeling and Dynamic Behavior Analysis of Drill String Compensator for Offshore Drilling Operation, Proceeding of the Society of Naval Architecture of Korea Fall Conference, Korea (in Korean).
- Jo, A.R., Ku, N.K., Park, K.P., Lee, K.Y.** (2012) Modeling and Simulation of Heave Compensation System for Offshore Drilling Operation, Proceeding of Society of CAD/CAM Engineers Conference, Korea (in Korean).
- Kreuzer, E.** (1994) Computerized Sysmbolic Manipulation in Mechanics, Springer.
- Ku, N.K., Jo, A.R., Ha, S., Martin Friebe, Cha, J.H., Park, K.P., Lee, K.Y.** (2011) Development of a Multibody Dynamics Kernel for Motion Analysis of a Floating Wind Turbine, The twenty-first International Offshore(Ocean) and Polar Engineering Conference, Hawai(2011 ISOPE).
- Ku, N.K., Rho, M.I., Cha, J.H.** (2012) Calculation of the Dynamic Contact Force between Shipbuilding Block and Wire Rope of a Goliath Crane for Optimal Lug Arrangement, *Journal of Computational Structural Engineering*, 25(5), pp.455~463.
- Lee, K.Y., Cha, J.H., Park, K.P.** (2010) Dynamic Response of a Floating Crane in Waves by Considering the Nonlinear Effect of Hydrostatic Force, *Ship Technology Research*, 57(1), pp.62~71.
- Nachlinger, R.R.** (2006) How Moses Deals with Technical Issues, Technical Report, Ultramarine, Inc.
- Orlandea, N., Chace, M.A., Calahan, D.A.** (1977) A Sparsity-Oriented Approach to the Dynamic Analysis and Design of Mechanical Systems-Part 1 & 2, *Journal of Engineering for Industry*, 99(3), pp.773~779.
- Schiehlen, W.** (1990) Multibody Systems Handbook, Springer, pp.361~402.
- Smith, R.** (2006) Open Dynamics Engine v0.5 User Guide, pp.15~20.

요 지

본 논문에서는 해상 시추작업을 위한 heave compensation system의 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 우선 시뮬레이션을 위하여, 다물체계 동역학 커널을 개발하였다. 다물체계 동역학 커널은 입력 받은 heave compensation system 시뮬레이션 모델의 운동학적 정보를 이용하여 recursive Newton-Euler formulation 방법을 기반으로 운동방정식을 자동으로 구성하고, 수치적으로 해를 계산하는 기능을 한다. 그리고 해상 시추선에 작용하는 외력을 계산하기 위하여 유체 정역학적 힘과 유체 동역학적 힘을 계산하는 모듈을 개발하였다. 이와 같이 개발한 커널과 모듈들을 적용하여 해상 시추선의 hoisting system 동적 거동 해석을 수행하고, 관절에서의 구속력을 계산하였다.

핵심용어 : 동적거동 해석, 다물체계 시스템, 호이스팅 시스템