



소형 크레인의 지능형 공유압 자동화 시스템과 동강성 평가를 위한 통합 시뮬레이션

Integrated Simulation for Intelligent Hydro-Pneumatic Automation System and Dynamic Stiffness Evaluation of Small Cranes

김진광*†

Jin-Kwang Kim*†

(Received 11 July 2018, Revision received 10 September 2018, Accepted 12 September 2018)

Abstract: The purpose of this study is to present an integrated simulation model for small cranes based on a multiphysics coupling approach that combines an electrohydraulic control circuit model, rigid body dynamics model and a flexible-rigid multibody dynamics model. The proposed model is able to evaluate the dynamic response characteristics of the intelligent hydraulic automation system operation according to the on/off signals of the electrical control and predict the dynamic stiffness of each link member during crane operation. Therefore, this simulation approach is expected to significantly reduce development costs and time by minimizing physical prototyping in the development of new products for small cranes.

Key Words : Integrated simulation model, Intelligent hydro-pneumatic automation system, Coupling analysis, Control circuit model, Flexible-rigid multibody analysis

1. 서 론

소형 크레인(crane)은 중량물의 손쉬운 인양작업이 가능하고 좁은 공간에서 탁월한 성능을 발휘함에 따라 일반 제조 산업뿐만 아니라 선박, 농기계 등의 수리 센터에서 널리 사용되고 있으며, 또한 1톤 트럭에 장착하여 다목적으로 사용할 가능한 기증기이다.

일반적으로 크레인의 유압장치는 전기-유압식 회로에 의해 제어가 이루어지는 복잡한 메카트로닉 시스템(mechatronic system)으로 구성되어 있다.

이러한 이유로 전기, 유압, 구조의 다중 물리현상들에 의한 복잡한 작동 메커니즘을 분석하고, 그 설계 타당성을 평가하기 위해서는 유압회로 모델과 다중 물리해석 모델이 융합된 통합 시뮬레이션 기술이 요구된다. 따라서 이와 같은 유압 시스템을 분석하기 위한 연구로 Lee¹⁾ 등은 다중 물리해석 소프트웨어를 활용하여 유압회로해석과 강체동역학해석이 서로 연성된 선박용 로딩암의 해석적 평가방법을 제시된 바 있으며, 크레인의 제어용 PLC(programmable logic controller) 프로그램을 개발하기 위해 Kim²⁾은 크레인의 외형 설계도

*† 김진광(교신저자) : 타이코에이엠프
 E-mail : jink3872@naver.com, Tel : 053-850-0303

*† Jin-Kwang Kim(corresponding author) : Tyco electronics
 AMP Korea.
 E-mail : jink3872@naver.com, Tel : 053-850-0303

와 내부 유압회로도들 바탕으로 유압회로해석과 강체동역학해석을 결합한 연성 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 Pedersen³⁾, Chu⁴⁾, Bak⁵⁾ 또한 연성해석 시뮬레이션 기술들을 활용하여 실시간으로 유압 크레인의 동특성들을 분석하였다. 하지만 이러한 연구결과들은 유압회로 모델과 강체동역학해석 모델을 서로 연계한 다중 물리 연성해석 기술들에 기반을 둔 것으로 크레인 구조부재들의 동강성을 검토하기 위한 응력과 변형 상태들은 평가할 수가 없다. 반면에 Oh⁶⁾와 Kim⁷⁾ 등은 유압 장치의 응답특성을 제어회로 모델로 평가하지 않고, 변형체-강체 다물체 구조해석 모델의 피스톤 로드와 직접 설계 추력을 인가하여 유한요소해석을 통한 설계 타당성을 검토하고, 전체 유압 기계 장치의 구조안전성을 평가한 바 있다.

본 연구에서는 소형 크레인의 지능형 공유압 자동화 시스템의 응답특성과 구조안전성 평가를 위해 공유압 제어회로 모델과 강체동역학해석 모델에 기반을 둔 다중 물리 연성해석뿐만 아니라 변형체-강체 다물체 구조해석을 융합하여 유압 시스템의 제어조건에 따른 응력변화 상태를 평가할 수 있는 통합 시뮬레이션 모델을 제시하고자 한다. 이러한 연구결과로부터 설계 주기의 초기단계에서 지능형 유압 자동화 시스템의 적합성 및 그 구조적 안정성을 보다 정확하게 예측 가능해짐에 따라 시제품 제작을 통한 시험평가로부터 감지할 수 없는 설계 문제점들을 사전에 파악할 수 있으므로 제품성능을 극대화하고 제품 출시 소요시간을 단축할 수 있을 것으로 기대된다. 현재 국내 기업들은 이러한 소형 크레인의 연구개발에 거의 투자하지 않고 있는 실정이므로 본 연구결과는 국내 소형 크레인 제작업체에 좋은 참고자료가 될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 통합 시뮬레이션 모델

본 연구에서는 전자기, 구조, 열-유동 및 제어회로 해석을 수행할 수 있는 ANSYS 프로그램들을 사용하였다.^{8,9)} 본 연구의 목적은 소형 크레인의 유압장치 내 펌프, 밸브, 실린더 등의 구성부품들

에 대한 유압제어회로 모델을 구축하고, 3차원 CAD 어셈블리 모델에 기초한 구조해석 모델들과 융합시켜 유압제어 시스템의 구동조건에 따른 설계인자들을 분석함과 동시에 소형 크레인의 동강성을 예측할 수 있는 통합 시뮬레이션 모델을 제안하는 것이다.

Fig. 1은 통합 시뮬레이션 방법의 개략도를 나타낸 것이다. 중력장에 놓여 있는 크레인의 초기 자세에서의 질량분포 상태를 고려하여 Fig. 1 (a)의 유압제어회로 모델로부터 결정된 실린더 피스톤에 작용하는 부하는 Fig. 1 (b)의 강체동역학해석 모델에 입력 하중값으로 전달되고, (b) 모델에서 결정된 크레인의 자세 변화량은 다시 (a) 모델에 입력값으로 전송되어, 두 모델 간의 실시간 상호작용에 따라 연성해석이 이루어질 수 있도록 모델링하였다. 또한 (a) 모델에서 출력되는 실린더 피스톤의 시간-변위 이력값을 Fig. 1 (c)의 변형체-강체 다물체 구조해석 모델의 피스톤에 입력시켜 소형 크레인의 구조부재들에 발생하는 응력과 변형률 상태를 실시간으로 평가할 수 있도록 모델링하였다.

소형 크레인은 Fig. 1 (b)에서와 같이 크레인 몸체(body), 붐(boom), 확장-붐(extension-boom) 및 유압 실린더(hydraulic cylinder)로 이루어져 있다. 그리고 최대 작업반경은 1580 mm이고, 작업높이는 2120 mm이며, 정격하중은 0.5 ton으로 하였다.

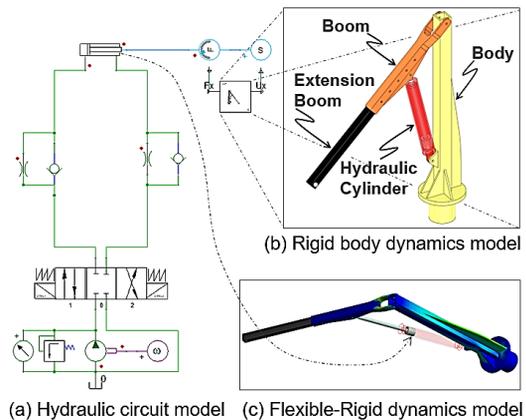


Fig. 1 Schematic of integrated simulation model

2.1 유압제어회로 모델

소형 크레인의 유압 시스템을 제어하기 위한 유압회로 모델은 Fig. 2와 같고, 그 주요 구성요소인 유압펌프와 실린더의 주요 변수들을 Table 1에 나타내었다. 유압펌프 ①는 모터 회전속도에 비례하는 유량을 토출하는 기능으로 배제용적 D_p 가 일정한 고정용량형 펌프에서 토출유량 Q_p 는 펌프 입구와 출구 사이의 압력차 ΔP_p 와 모터회전속도 ω_p 에 따른 체적효율 η 를 고려하여 다음 식으로부터 결정할 수 있다.

$$Q_p = D_p / (2\pi) \cdot \omega_p \cdot \eta / 100 \quad (1)$$

그리고 펌프의 모터 출력토크 T_p 는 다음과 같다.

$$T_p = D_p \cdot P_p / (2\pi) \quad (2)$$

방향제어밸브 ①는 피스톤 로드의 전진과 후진 및 정지 운동상태들을 만족하도록 4포트 3위치의 양솔레노이드 밸브를 사용하였다. 밸브가 0위치에 있을 때는 중립상태로 유압펌프로부터 공급되는 고압의 작동유를 탱크로 복귀시키고, 1위치에 있을 때는 전진상태로 복동실린더에 유량이 공급되어 피스톤 로드가 전진하면서 작업물체를 들어 올리게 된다. 그리고 2위치에 있을 때는 후진상태로 피스톤 로드를 후진시켜 중량물을 내리는 동작을 하게 된다. 이러한 구동과정에서 작업물체의 자중에 의한 피스톤 로드의 자유낙하운동을 방지하기 위해 실린더 내의 유압저항으로부터 하강속도를 제어할 수 있도록 카운터밸런스밸브 ③를 Fig. 2에서와 같이 사용하였고, 유량제어밸브 ④를 활용하여 피스톤 로드의 속도를 제어하였다. 또한 하강 운동과정압력이 발생하므로 이러한 충격압을 방지하기 위해 릴리프밸브 ⑤를 Fig. 2와 같이 설치하였다. 한편 복동실린더 ①의 피스톤 헤드측 포트에 압력 P_1 의 유량이 공급되면, 피스톤이 전진하게 되어 로드측포트에 압력 P_2 의 작동유가 토출되게 된다. 이러한 구동상태에 대한 운동방정식은 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.¹⁰⁾

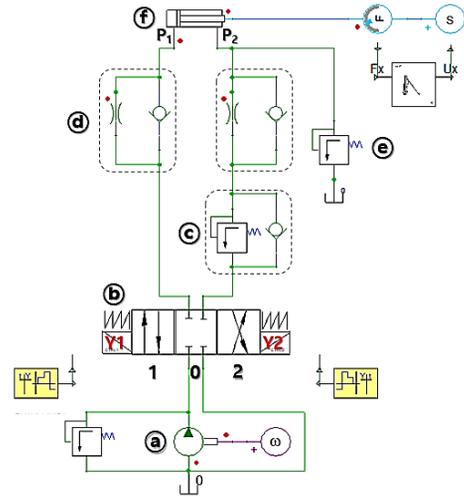


Fig. 2 Schematic of integrated simulation model

Table 1 Simulation parameters of hydraulic system

Pump	Volumetric displacement	15 cm ³
	Maximum pressure	6 MPa
	Pressure relief valve	5 MPa
	Angular velocity of motor	1800 rpm
Cylinder	Piston diameter	80 mm
	Piston rod diameter	35 mm
	Piston stroke	480 mm
	Viscous friction coefficient	100 Ns/m
	Slip friction force	0 N
	Coulomb friction force	0 N

$$M\ddot{x} - K_V \dot{x} - F_S - F_C - F_L = P_1 A_1 - P_2 A_2 \quad (3)$$

여기서 M 은 피스톤의 질량이며, K_V 는 점성저항계수, F_S 는 정지마찰력, F_C 는 쿨롱마찰력을 의미한다. 그리고 F_L 은 피스톤에 가해지는 부하를 나타내고, A_1 과 A_2 는 각각 피스톤의 헤드측 단면적과 로드측 단면적이다.

2.2 구조동역학해석 모델

소형 크레인의 강체동역학해석 모델은 Fig. 3(a)와 같다. 각 관절부의 연결은 회전 자유도를 1개만 갖는 회전조인트 (Revolute joint: RJ) 요소와

회전 및 병진운동에 관한 2자유도를 갖는 실린더 조인트 (Cylindrical joint: CJ) 요소 및 2개의 병진 자유도만 구속한 일반조인트 (General joint: GJ) 요소를 사용하였다. 모델의 전체 링크수가 5개로 구성되어 있고, 회전조인트 2개, 실린더조인트 1개, 일반조인트 1개 그리고 2개의 고정조인트로 이루어져 있다. 그 중에 몸체의 밑바닥 기둥은 그라운드(Ground)에 고정된다. 따라서 총 자유도 수는 30개이고 구속식의 수는 28개로 2개의 자유도만을 가지고 있는 강체 동역학해석 모델을 구성하였다. 2개의 자유도는 각각 회전운동성분 1개와 조인트 2번의 피스톤 로드에 대한 병진운동성분을 의미한다.

Fig. 2에 나타난 유압제어 시스템의 구동조건에 따라 3차원 강체동역학해석 모델의 피스톤이 전진 혹은 후진하게 되면 크레인의 자세가 바뀌게 되어 질량분포가 달라지고, 그 자세 변화량이 유압회로에 반영되어 식 (3)에 의해 중력장을 고려한 실린더에 작용하는 부하가 결정된다. 그 결과 값은 다시 Fig. 3 (a)의 강체동역학해석 모델에 입력 하중값으로 전달되어 연성해석이 실시간으로 수행된다.

Fig. 3 (b)에 나타난 변형체-강체 다물체 구조해석 모델의 각 링크 부재들의 요소망은 3차원 구조요소로 8 절점에 의해 하나의 요소를 구성하도록

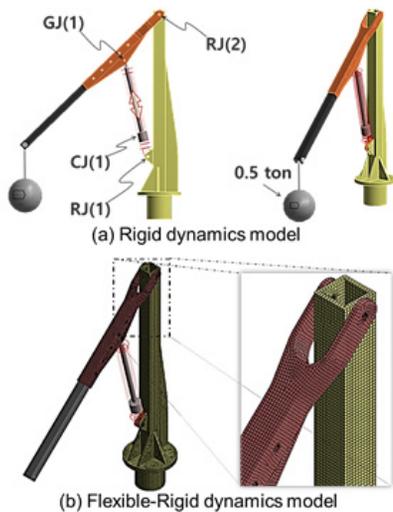


Fig. 3 Dynamics models of small crane

하였다. 각 링크 부재들의 질량과 재질은 Table 2에 표시하였고, 그에 대한 기계적 성질을 Table 3에 나타내었다. 소형 크레인 본체와 붐 구조부재들을 변형체로 모델링하였고, 실린더와 확장-붐을 강체로 묘사한 변형체-강체 다물체 구조해석 모델을 구성하였다. 소형 크레인의 전체 링크 구조물들을 변형체로 가정하여 해석하면 격자망의 요소수가 너무 많이 생성되어 해석이 장시간 소요되므로 구조안전성 평가를 위한 구조부재들만 탄성체로 가정하여 모델링하였다.

3. 시뮬레이션 결과

소형 크레인이 정격하중 0.5톤의 작업물체를 최대 작업영역 경로를 따라 구동할 수 있도록 유압 회로 모델을 제어하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2의 방향제어밸브 ⑥는 양쪽 솔레노이드 Y1과 Y2의 온-오프(on-off) 동작에 따라 그 위치가 결정된다. 즉 전기적인 신호에 의해 솔레노이드 코일이 여자되면 스펴을 밀고, 코일이 소자되면 압축된 스펴의 탄성력에 의해 스펴이 원위치로 복귀하게 된다.

Fig. 4 (a)와 (b)는 각각 방향제어밸브의 솔레노이드 코일 Y1과 Y2의 전기적인 온-오프 상태를 도시한 것이다. 1단계는 소형 크레인의 최저높이 자세에서 1초간 밸브의 0위치(중립상태)를 유지하고, 2단계에서 솔레노이드 Y1의 코일을 여자시켜

Table 2 Masses and materials of each part

Part name	Weight [kg]	Material
Body	105.54	GCD450
Boom	16.92	GCD450
Extension boom	9.48	GCD450
Cylinder assy	25.79	STEEL
Total	157.73	

Table 3 Material properties of small crane

Material	Elastic modulus	Poisson's ratio
GCD450	163 GPa	0.3
Steel	200 GPa	0.29

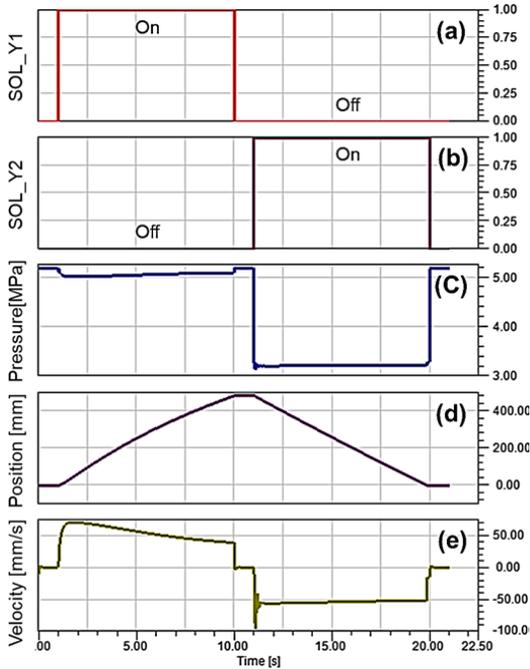


Fig. 4 Response characteristics of hydraulic system by control of electric signal

1위치(전진상태)로 변경한 후 9초간 유지하였다. 2단계 동안 유압제어밸브로 피스톤의 전진속도를 제어하여 크레인이 최대높이 자세에 도달하도록 하였다. 3단계에서는 Y1 코일을 소자시켜 다시 중립상태를 1초간 유지한 다음, 4단계에서 Y2 코일을 여자시켜 2위치(후진상태)를 9초간 유지하였다. 4단계 동안 피스톤이 후진하여 다시 최저높이 자세가 되도록 후진속도를 제어하였다. 마지막 5단계에서 Y2 코일을 소자시켜 다시 중립상태를 1초간 유지하였다.

이와 같이 전기신호의 제어에 의해 방향제어밸브가 작동하면 Fig. 4 (c), (d), (e)와 같이 1초 후에 유압펌프의 작동압력 5.18 MPa이 실린더에 공급되어 피스톤의 전진운동이 개시된다. 크레인의 자세가 높아지는 동안 작동압력은 5.0 MPa로 낮아지고, 피스톤 로드가 49 mm 전진할 때까지 속도는 69.8 mm/s로 상승하며 피스톤이 480 mm만큼 전진하는 동안 서서히 그 속도가 줄어들어 38 mm/s로 나타났다. 4단계에서 크레인의 자세가 낮

아지는 동안 작동압력은 3.2 MPa로 일정하게 유지되고, 후진 속도 또한 53 mm/s로 거의 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다.

유압제어회로 모델과 연성된 소형 크레인의 강체동역학해석 모델의 각 조인트에서 발생하는 반력이력 값들을 분석하였다. Fig. 5는 실린더와 몸체 사이의 RJ(1)에서 발생하는 반력이력과 붐과 몸체 사이의 RJ(2)의 반력이력을 함께 도시한 것이다. RJ(1)과 RJ(2)의 최대 반력의 합력값은 각각 24.1 kN과 17.6 kN으로 11.1초 부근에서 발생하였다.

Fig. 4 (d)의 유압제어회로 모델에서 출력되는 피스톤의 시간-변위 이력값을 변형체-강체 다물체 구조해석의 피스톤에 연결시켜 소형 크레인의 구조안정성 평가를 위한 통합 시뮬레이션을 수행하였다. 강체동역학해석과 변형체-강체 다물체 구조해석으로부터 도출된 RJ(1)과 RJ(2)의 각 조인트에서의 반력 이력값들을 Fig. 6에 도시하였다. 변형체-강체 다물체 구조해석에 의한 응답 반력값들이 강체동역학해석에 의한 값을 기준으로 진동하고 있음을 알 수 있고, 구동 시작의 1초와 11초 및 정지할 때의 10초, 20초에 부근에서 큰 진동이 발생한 후, 감쇠에 의해 서서히 줄어들고 있음을 볼 수 있다.

소형 크레인의 구동 중에 발생하는 최대 등가 응력 이력값을 Fig. 7에 나타내었다. 최대 등가 응력값은 붐 구조부재에서 최대높이에 도달한 후 정지상태에서 다시 하강하는 순간인 11.36 s 부근에서 약 162.4 MPa로 나타났으며, 소형 크레인이 구동을 시작하고 정지하는 시점 부근에서 비교적 큰 등가응력값이 발생함을 확인할 수 있었다. 이는 Fig. 6에 나타낸 반력 이력들에서 각 조인트에

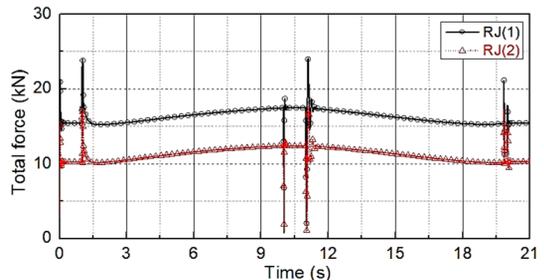


Fig. 5 Reaction forces of RJ(1) and RJ(2)

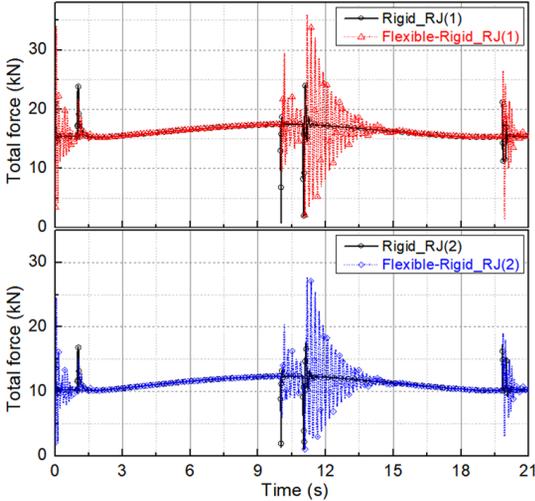


Fig. 6 Comparison of reaction forces by rigid dynamics and flexible-rigid dynamics analyses

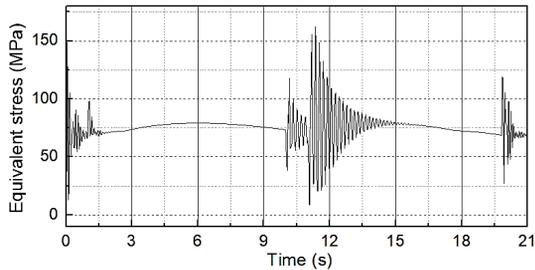


Fig. 7 Maximum equivalent stress occurring during operation of small crane



Fig. 8 Equivalent stress contour of small crane at 11.4 sec

서의 최대 반력값들이 도출된 시점과 일치한다. Fig. 8은 붐에서 발생한 최대 등가응력 분포도를 나타낸 것이다. 최대 등가응력값인 162.4 MPa은 붐의 GCD450 재료의 인장강도 420 MPa의 절반 이하수준에 해당하는 값으로 소형 크레인의 최대 반경 작업조건에서 동강성을 충분히 확보하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 소형 크레인의 유압 시스템 및 구조 안전성 평가를 위해 유압제어회로 모델과 강체동역학해석 모델에 기반을 둔 다중 물리 연성해석 뿐만 아니라 변형체-강체 다물체 구조해석을 융합한 통합 시뮬레이션 모델을 제시하였다. 이러한 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 전기신호의 온-오프 동작에 따른 유압제어회로 모델과 3차원 CAD 어셈블리에 기반한 강체동역학해석 모델을 활용한 다중 물리 연성해석을 통해 소형 크레인의 다양한 구동상태에 대한 유압 시스템의 동적 응답특성들을 평가할 수 있음을 보였다.
- 2) 변형체-강체 다물체 구조해석으로부터 평가된 각 조인트에서의 반력이력들은 전체적으로 강체 동역학 해석에 의한 반력이력값을 기준으로 진동하는 것을 확인하였고, 구동 시작과 정지 시에 큰 진동이 발생함을 알 수 있었다.
- 3) 소형 크레인의 구동과정에서 발생하는 응력 변화 상태를 변형체-강체 다물체 구조해석으로 평가한 결과 구조부재가 갖는 항복강도의 절반수준 이하임을 확인할 수 있었다.

References

1. D. H. Lee, D. K. Noh, G. H. Lee, S. S. Park, and J. S. Jang, 2017, "Convergence analysis technology for ship loading arm", JKOSME, Vol. 41, No. 3 pp. 258-268.
2. H. S. Kim, 2010, "Study on developing PLC

- program for control of Deck Crane", Master's thesis, Hanyang University.
3. M. M. Pedersen, M. R. Hansen, and M. Ballebye, 2010, "Developing a Tool Point Control Scheme for a Hydraulic Crane Using Interactive Real-time Dynamic Simulation", Modeling, Identification and Control, Vol. 31, No. 4, pp. 133-143.
 4. Y. Chu, V. Æsøy, H. Zhang and Ø. Bunes, 2014, "Modeling and simulation of an offshore hydraulic crane", 28th European Conference on Modelling and Simulation, in press.
 5. M. K. Bak and M. R. Hansen, 2013, "Analysis of offshore knuckle boom crane - part one: modeling and parameter identification, Modeling, Identification and Control", Vol. 34, No. 4, pp. 157-174.
 6. J. W. Oh, C. H. Min, C. H. Lee, S. Hong, H. W. Kim, T. K. Yeu and D. S. Bae, 2015, "Hydraulic Cylinder Design of Lifting Pump Mounting and Structural Safety Estimation of Mounting using Multi-body Dynamics", JKSOE, Vol. 29, No. 2, pp. 120-127.
 7. J. K. Kim, H. J. Ko, K. B. Park, T. G. Kim and Y. G. Jung, 2010, "Estimation on Heavy Handling Robot using Flexible-Rigid Multibody Analysis," JKSPPE, Vol. 27, No. 4, pp. 46-52.
 8. Swanson Analysis Systems, Inc., 2015, ANSYS User's and Theory manual Version 18.
 9. ANSYS-Simplorer User's and Theory manual Version 18, 2015.
 10. Y. G. Jung and I. Y. Lee, 2000, "Dynamic Behaviour Analysis of a Hydraulic Control System for Vehicle Active Suspension", J. KSPSE, Vol. 4, No. 1, pp. 51-59.