

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.5.367>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

전지형 크레인 조향제어 알고리즘 개발 및 연성해석 기반의 성능평가[§]

서자호^{*†} · 이근호^{**} · 오광석^{***}

* 충남대학교, ** 한국기계연구원 *** 호남대학교

Development of Steering Control Algorithms for All-terrain Crane and Performance Verification Based on Real-time Co-simulation

Jaho Seo^{*†}, Geun Ho Lee^{**} and Kwangseok Oh^{***}

* Dept. of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National Univ.,

** Dept. of System Reliability, Korea Institute of Machinery and Materials,

*** Dept. of Automotive Engineering, Honam Univ.

(Received August 22, 2016 ; Revised January 7, 2017 ; Accepted January 10, 2017)

Key Words: All-terrain Crane(전지형 크레인), Steering Control(조향제어), Co-simulation(연성해석), Real-time Simulator(실시간 시뮬레이터), Performance Verification(성능평가)

초록: 본 연구의 목적은 120톤급 전지형 크레인의 조향성능 향상을 위한 제어 알고리즘의 개발이다. 이를 위해 AMESim 소프트웨어를 이용하여 전지형 크레인의 유압조향시스템을 모델링하고, PID 기반의 조향제어용 제어기를 MATLAB/Simulink 환경에서 설계하였다. 설계된 제어기의 성능은 실시간 시뮬레이터를 활용한 유압 및 제어 모델간 연성해석을 통하여 검증하였다.

Abstract: The goal of this study was to develop control algorithms to improve the steering performance of a 120-ton all-terrain crane. To accomplish this, a hydraulic steering system for the crane was modeled using AMESim software, and a PID steering control algorithm was designed in the MATLAB/Simulink environment. The performance of the designed controller was verified through multiphysics co-simulations based on a real-time simulator.

- 기호설명 -

Q_L : 부하 유량

K_q : 밸브 유량계수

x_v : 밸브 변위

K_c : 밸브 유량-압력 이득

P_L : 부하 압력

A_p : 실린더 단면적

x_p : 실린더 변위

V_e : 양쪽 챔버 총부피

β_e : 오일 유효체적탄성계수

C_{tp} : 총 누설계수

Q_{lad} : 추가 누설유량

M_t : 실린더 및 부하 총 질량

β_p : 점성감쇠계수

K_s : 스프링 상수

F_L : 외란 하중

δ_v : 밸브 감쇠비

ω_v : 밸브 고유진동수

K_a : 비례 앰프 계수

K_v : 스톱 변위-전류 이득

u : 밸브 제어 신호

§ 이 논문은 대한기계학회 IT융합부문 2016년도 춘계학술대회(2016.5.19.-20., 서울시립대학교) 발표논문임.

† Corresponding Author, seojaho@cnu.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

건설현장에서 널리 활용되고 있는 전지형 크레

인은 고하중의 자재 인양작업 및 고속주행이 가능한 이동형 크레인으로서, 차축 별 독립조향이 가능한 특징이 있다.⁽¹⁾ 또한 작업의 특성상 고하중을 견디기 위해 차체의 크기, 질량 및 회전관성이 크기 때문에 주행 시 안정적인 조향제어가 매우 중요하다.

Wang⁽²⁾은 3축 대형차량의 조향성능 향상을 위하여 차량 질량중심에서의 zero side-slip angles 활용한 MATLAB기반의 비례제어기법을 제안하였다. Fei⁽³⁾의 연구에서는 Ackerman 이론과 Skid steering method를 결합하여 다축차량의 조향성능 향상을 위하여 yaw moment의 영향과 분배에 대한 연구를 수행하였다. Noh⁽⁴⁾는 Ackerman 이론을 바탕으로 고속주행 모드에서 다축전지형 크레인의 조향 안정성을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. Oh⁽⁵⁾는 Model Predictive Control(MPC) 기법을 이용하여 다축 전지형 크레인의 최적조향제어 전략을 제안하였다.

상기 연구들에서 제안된 다축조향제어 전략들은 시뮬레이션 기반으로 검증되었으나, 실시간(real-time)으로 검증된 것은 아니며, 조향시스템 성능에 큰 영향을 미치는 유압적 특성이 면밀히 고려되지는 않았다.

이를 위해 본 연구에서는 120톤급 전지형 크레인의 5축 조향제어를 위해 유압모델링 및 해석 상용툴인 AMESim을 이용하여 유압조향시스템을 모델링하고, MATLAB/Simulink 기반의 제어알고리즘을 설계하여 그 성능을 실시간 연성해석을 통해 평가하였다.

본 논문의 내용은 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 전지형 크레인의 유압조향시스템의 모델링에 대해서 기술하고, 3장에서는 조향제어를 위한 제어기 설계에 대해 설명한다. 4장에서는 설계된 제어기의 성능평가를 위한 실시간 시뮬레이터 플랫폼 구성 및 성능 검증결과에 대해 기술한다. 5장에서는 결론 및 향후 연구에 대해 기술한다.

2. 유압조향시스템의 모델링

2.1 유압조향시스템의 수학적 모델링

전지형 크레인의 유압조향시스템은 유압펌프, 조향실린더, 실린더의 유량 공급을 제어하는 비례 제어밸브, 조향링크로 구성된다. 아래의 방정식들을 활용하여 유압조향시스템은 수학적 모델링이 가능하다.

- 밸브 유량방정식

$$Q_L = K_q x_v - K_c P_L$$

- 실린더 유량 연속방정식

$$Q_L = A_p \frac{dx_p}{dt} + \frac{V_e}{4\beta_e} \frac{dP_L}{dt} + C_{ip} P_L + Q_{lad}$$

- 실린더 부하방정식

$$A_p P_L = M_t \frac{d^2 x_p}{dt^2} + \beta_p \frac{dx_p}{dt} + K_s x_p + F_L$$

- 비례제어밸브 운동방정식

$$\frac{d^2 x_v}{dt^2} + 2\delta_v \omega_v \frac{dx_v}{dt} + K_a K_v = \omega_v^2 u$$

상기 방정식들을 기반으로 MATLAB/Simulink 소프트웨어를 활용하여 유압조향시스템을 아래와 같이 모델링하였다(Fig. 1). 비례제어밸브의 경우 Rexroth사 제품의 사양(4WRA 6 E1-30-2X/G24K4/V250bar, Fig. 2)을 기반으로 전압범위 -10V~10V, 전류 범위 4mA~20mA(불감대(deadzone): 20%)의 특성을 모델링에 반영하였다. 실린더의 경우 현재 개발 크레인에 장착된 실린더의 스펙을 적용하였다.

Fig. 1에서 보듯, 가장 왼쪽의 블록(block)에서 실린더의 기준행정(reference stroke) 신호가 인가되며 해당 행정신호는 등가의 전압신호로 변환된다. 이어서 밸브의 불감대 특성(20%)이 감안된 전류신호로 전환되어 비례제어밸브의 스톱 변위를 제어한다. 제어된 밸브 스톱의 변위에 따라 실제 실린더 행정이 제어된다.

실제 유압조향시스템에서 제어변수는 조향각이지만 조향각과 실린더 행정의 관계를 활용하여 조향각 제어가 가능하므로, 본 연구에서는 실린더

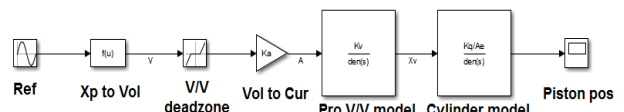


Fig. 1 MATLAB / Simulink simulation model for hydraulic steering system

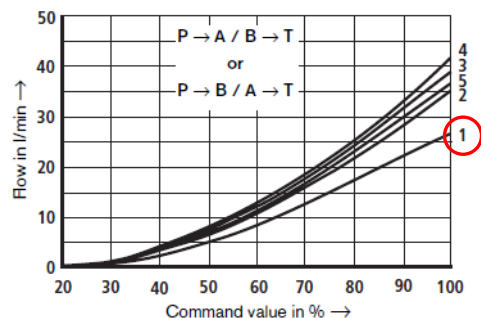


Fig. 2 Valve characteristic curve⁽⁶⁾

행정을 실질적인 제어변수로 고려하였다.

2.2 AMESim을 이용한 유압조향시스템의 모델링

2.1에서 언급된 유압조향시스템은 다물리 모델링이 가능한 AMESim(ver. 14.1) 소프트웨어로 모델링 되었다. AMESim의 경우 유압, 공압, 제어, 전기, 전자, 자장, 열, 기어 등 복잡한 다물리 시스템의 모델링을 위한 라이브러리가 제공되기 때문에 2.1의 수학적 모델링에 비해서 유압조향시스템을 정확히 모델링할 수 있는 장점을 지니고 있다. 이러한 라이브러리를 통해 유압시스템의 동특성, 비선형적인 특성, 유체의 특성 등을 모델링에 반영할 수 있고, 카탈로그 혹은 실험결과를 기반으로 한 사양(파라미터 값 등)을 모델링에 반영하기 편

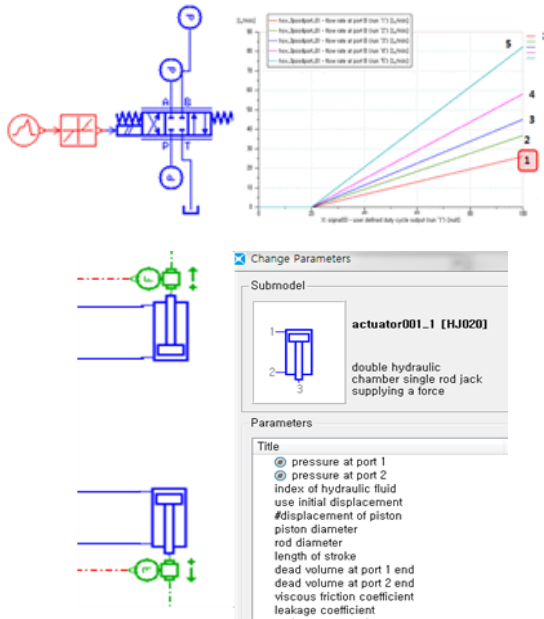


Fig. 3 Valve (a) and cylinder (b) modeling using AMESim

리한 기능을 제공한다. 이러한 장점을 토대로 유압시스템의 회로도 구성은 물론 부품 및 시스템 설계과정에서 성능검증 및 최적화 설계가 가능하다. 본 연구에서는 유압조향시스템의 핵심 단품인 비례제어밸브 및 실린더에 대한 단품 모델링을 AMESim을 통해 아래와 같이 진행하였다.

Fig. 3(a)의 왼쪽 그림은 Rexroth사 제품의 사양(4WRA 6 E1-30-2X/G24K4/V250bar, Fig. 2)을 반영한 비례제어밸브의 모델링을 나타낸다. Fig. 3(a)의 오른쪽 그림은 밸브의 사용압 10 bar(line 1~5중 1)에서 제어입력과 유량(LPM)간의 관계를 나타낸다. 해당 곡선은 카탈로그에서 제시한 성능곡선(Fig. 2)과 거의 일치하여 밸브 단품 모델링의 신뢰성이 확보됐다고 할 수 있다. Fig. 3(b) 그림은 현 개발 크레인에 장착된 실린더의 사양을 적용하여 모델링된 실린더의 AMESim 모델이다.

Fig. 4는 Fig. 3의 단품모델과 펌프 및 마찰모델을 추가한 AMESim 기반의 전체 유압조향시스템 모델을 나타낸다. 마찰모델은 축별 양쪽 타이어나 지면과의 정지 및 운동 마찰력을 고려한 모델로서 실제 조향 거동의 특성을 반영하기 위하여 추가된 모델이다. 아울러 AMESim에서 제공하는 Planar library를 이용하여 조향링크를 모델링함으로써 유압모델과 연동하는 링크의 거동 특성도 파악하였다(Fig. 5).

3. 제어기의 설계

유압조향시스템의 조향제어를 위한 제어기로서 산업현장에서 일반적으로 사용되는 PID 제어기를 선정하였다.

우선 제어기가 적용되지 않은 유압조향시스템(open-loop system)의 응답성을 확인하였으며, 그 결

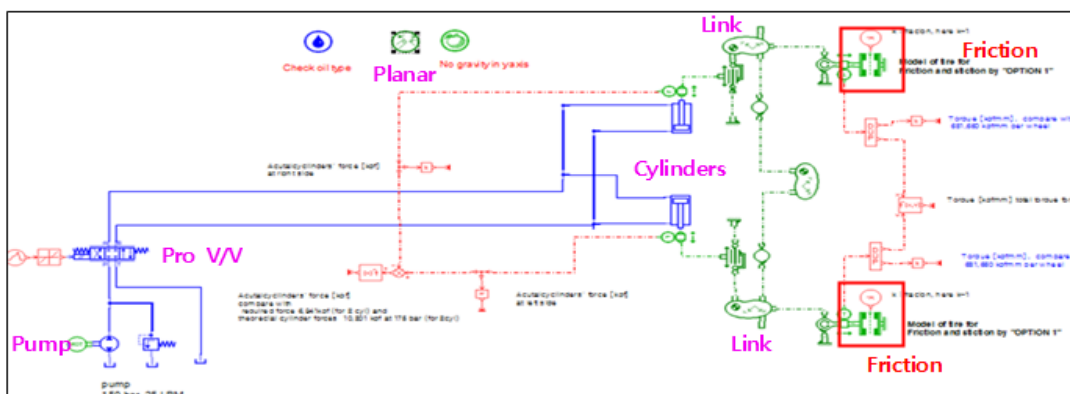


Fig. 4 Entire hydraulic steering system modeling using AMESim

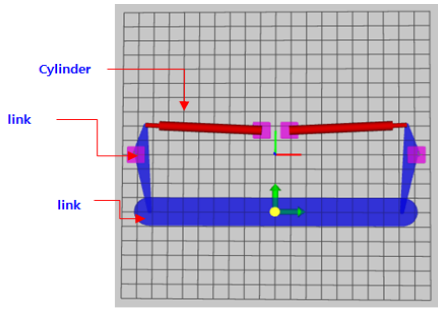


Fig. 5 Planar model of steering linkage using AMESim

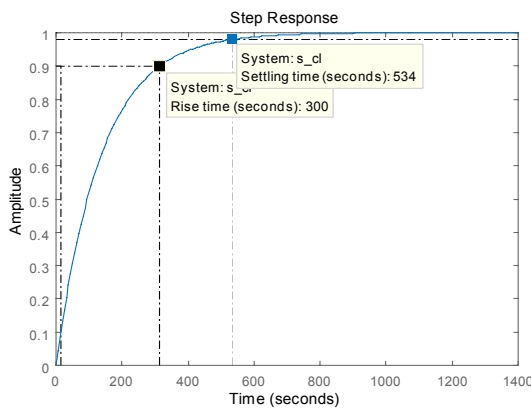


Fig. 6 Open-loop response of hydraulic steering system

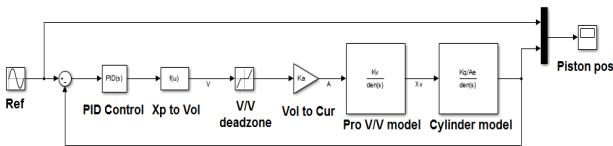


Fig. 7 Hydraulic steering control system with PID

과는 Fig. 6과 같다. 그림에서 보듯, 기준값 1에 대해서 상승 시간(rise time)과 안정화 시간(settling time)은 각각 300 sec 및 534 sec이어서 시스템의 응답성이 매우 느림을 확인할 수 있으며 이를 통해 제어기 설계의 필요성을 확인할 수 있다.

설계된 PID 제어기의 경우 피드백 제어기의 형태를 갖고 있으며, K_p (비례항), K_i (적분항), K_d (미분항)의 제어파라미터들로 구성되어 비례-적분-미분 제어기로도 불린다. K_p 의 경우 현상상태에서 오차값의 크기에 비례한 제어작용을 하고, K_i 는 정상상태(steady-state)의 오차를 줄이는 역할을 하며, K_d 는 출력값의 급격한 변화에 제동을 걸어 overshoot을 줄여 안정성을 향상시킨다. 해당 제어 파라미터들은 MATLAB/Simulink에서 제공하는 parameter tuning function을 이용하여 각각의 최적값을 도출하였다.

설계된 PID 제어기가 추가된 유압조향시스템의

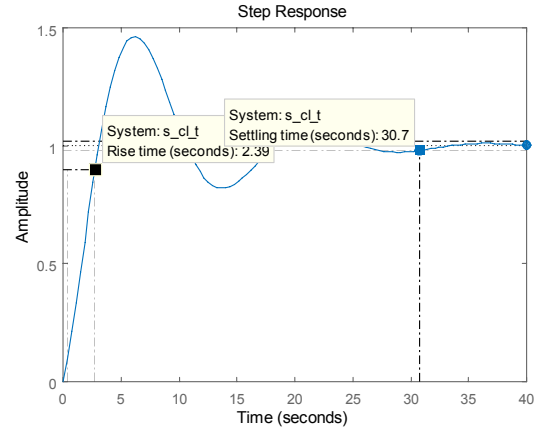


Fig. 8 Closed-loop response of hydraulic steering control system

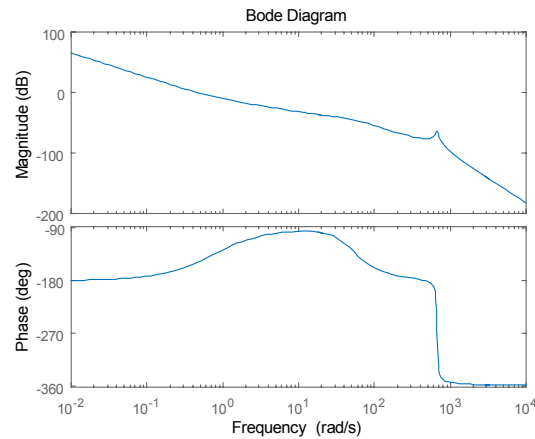


Fig. 9 Stability analysis of hydraulic steering control system using bode plot

MATLAB/Simulink 모델은 Fig. 7과 같으며, 해당 시스템의 응답성 검증 결과는 Fig. 8과 같이 나타난다.

그림에서 상승 시간과 안정화 시간은 각각 2.39 sec 및 30.7 sec이며, Fig. 6의 결과와 비교할 때 PID 제어기 적용으로 인하여 시스템 응답성이 크게 향상됨을 확인할 수 있다.

상기 PID 제어기 기반의 유압조향시스템의 안정도를 Bode diagram을 통해 Fig. 9와 같이 분석하였다. 그림에서 보듯, 진폭(gain margin)과 위상각(phase margin)은 각각 76.2 dB 및 32 deg로서 시스템이 안정됨을 확인할 수 있다.

4. 실시간 시뮬레이터를 이용한 제어성능 평가

4.1 실시간 시뮬레이터 플랫폼의 구성

제어기의 성능검증을 위한 해석은 CPU time 보

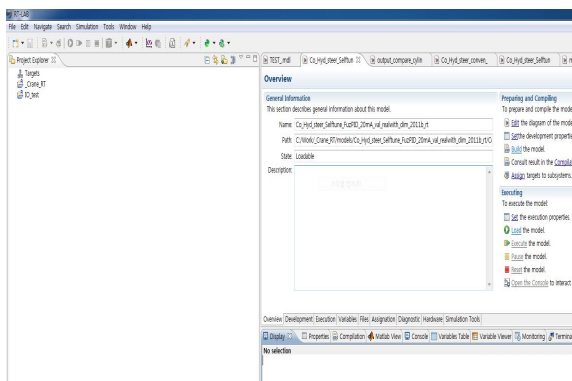
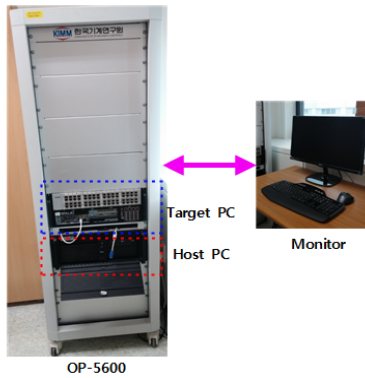


Fig. 10 Configuration of real-time simulator platform (a) : HW (b) : SW

다는 제어알고리즘이 탑재될 하드웨어 제어기의 샘플링 시간 기준(실시간)으로 수행될 때, 보다 현실적인 성능검증이 가능해 진다.

따라서 본 연구에서는 제어알고리즘의 실시간 검증을 위해서 실시간 플랫폼을 활용한 해석시험 환경(real-time simulator platform)을 Fig. 10과 같이 구축하였다.

그림에서 보듯 해당 시뮬레이터 플랫폼은 크게 복수의 PC 및 모니터로 구성된 하드웨어(Fig. 10(a))와 RT-LAB(ver. 10.4)라는 소프트웨어(Fig. 10(b))로 구성된다. 하드웨어 내 복수의 PC는 host PC와 target PC를 의미한다. Host PC는 RT-LAB이 설치되는 sub-PC이며, target PC는 Simulink 및 AMESim에서 설계된 모델의 연산을 위해서 사용되는 sub-PC이다. Target PC에는 3개의 CPU core가 내장되어 있어 원활한 실시간 연산이 가능하다. Host PC와 target PC는 이더넷(Ethernet)으로 연결되어 데이터를 주고 받는다.

RT-LAB은 실시간 제어를 위해 사용되는 OPAL-RT사의 산업용 소프트웨어로서 HILS(Hardware-in-the-loop simulation) 장비 구성은 물론 시스템 설계검증, 최적화 및 ECU 개발 등에 사용이 가능하다. Fig. 10(b)는 RT-LAB의 인터페이스(interface)를

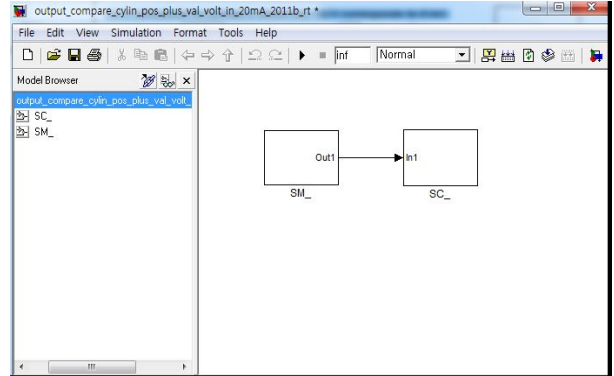


Fig. 11 RT-LAB Simulink model

나타내며, 이를 통해 Simulink 모델의 import, edit, compile (build) 및 run 기능을 수행할 수 있다.

RT-LAB을 이용한 시뮬레이션 수행을 위해서는 Simulink 모델이 RT-LAB의 규칙(convention)에 따라서 설계되어야 한다.

Fig. 11은 RT-LAB의 규칙에 따라 설계된 Simulink 모델을 나타내고 있다. 그림에서 보듯, SM_의 접두사(prefix)를 가진 블록은 연산용 target PC로 컴파일(compile) 될 유압조향시스템(plant) 및 제어기 모델을 담고 있다. SC_의 접두사를 가진 블록은 실시간 동안 출력되는 데이터의 모니터링 및 파라미터 검증용으로 사용된다. SM 블록과 SC 블록간의 데이터 통신을 위해서 RT-LAB에서 제공되는 Simulink용 Opcomm 블록 라이브러리(library)를 사용하였다.

4.2 유압조향시스템의 수학적 모델과 AMESim 모델간 비교

2.1에서 설명된 유압조향시스템의 수학적 모델을 기반으로 설계된 PID 제어기가 실제 시스템의 특성을 보다 정확하게 반영하는 AMESim 기반의 유압조향시스템(2.2장 참조)에서도 정상 작동하기 위해서는 수학적 모델과 AMESim 모델간의 비교검증이 선행되어야 한다. 즉, 비교검증을 통해서 동일한 입력 신호에 대한 양 모델의 출력이 동일하다면 수학적 모델 기반으로 설계된 PID 제어기의 성능이 AMESim 기반의 시스템에서도 확보될 수 있다.

Fig. 12는 유압조향시스템의 수학적 모델과 AMESim 모델간의 실시간 비교검증을 위해 RT-LAB의 규칙에 맞게 설계된 Simulink 모델(SM 블록)이다. 그림에서 보듯 파란 점선 박스내 모델은 2.2에서 설명된 AMESim 기반의 유압조향시스템으로서, 실시간으로 연산될 수 있도록 모델 간소

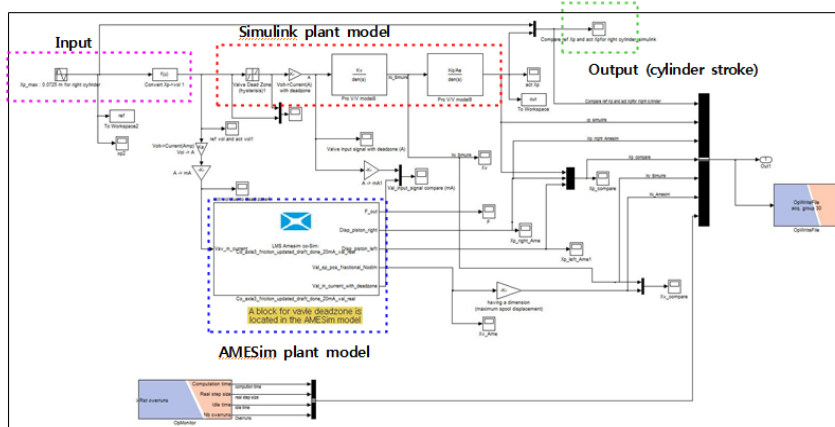


Fig. 12 Real-time co-simulation model for comparison between mathematical and AMESim models

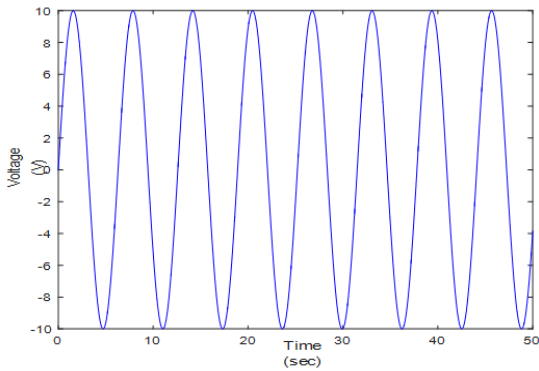


Fig. 13 Proportional valve's voltage input

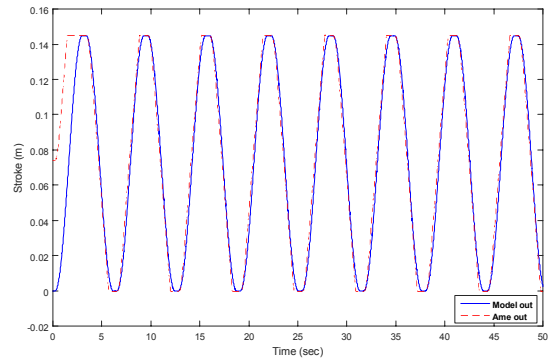


Fig. 14 Output comparison between mathematical and AMESim models

화(model simplification) 과정 (예, 기존 배관 모델을 등가의 오리피스 모델로 교체)을 거친 AMESim 모델이다. 빨간 점선 박스 내 모델은 2.1의 수학적 모델을 기반으로 설계된 MATLAB/ Simulink 시뮬레이션 모델이다.

실시간 모델 검증에 위해서 동일한 비례제어밸브 전압 입력신호에 대해서 두 모델간의 출력(실린더 행정)을 비교하였다. 시뮬레이션이 진행되는 동안에 AMESim 모델에서 출력된 파라미터 값들은 Simulink 환경으로 export 되어 Simulink 모델과의 연성해석(co-simulation)이 가능해진다. 이러한 연성해석 기능을 활용하여 궁극적으로는 Simulink 기반에서 설계된 제어기와 AMESim 기반의 유압조향시스템(plant)을 결합하여 제어기의 성능을 검증할 수 있게 된다(4.3장 참조).

Fig. 13의 동일한 밸브 전압 입력신호가 인가되었을 때, 실시간으로 출력되는 유압조향시스템의 수학적 모델과 AMESim 모델의 출력값(실린더 행정)은 Fig. 14와 같이 나타난다. 해당 시뮬레이션을 위해서 설정된 샘플링 시간은 0.1msec이다. 그림

에서 보듯 동일한 입력신호에 대해서 두 모델간의 출력값은 거의 동일하기 때문에 수학적 모델은 AMESim 모델을 잘 대변한다고 말할 수 있으며, 따라서 수학적 모델 기반으로 설계된 제어알고리즘이 AMESim 모델에서도 정상 작동할 것이라 예상할 수 있다.

4.3 실시간 연성해석을 통한 조향제어 성능검증
설계된 PID 제어기를 AMESim 기반의 유압조향시스템에 적용시킨 후(Fig. 15 참조), 시뮬레이터 플랫폼을 이용하여 제어성능을 실시간으로 검증하였다. 제어성능은 제어 정밀도와 반응시간의 관점에서 검증하였다. 실시간 연성해석의 샘플링 시간은 0.1 msec로 설정하였다.

Fig. 16 및 17은 실시간 연성해석 결과를 나타낸다. Fig. 16의 상단 그림은 0 ~ 50 sec까지 기준 행정(파란색 점선) 대비 유압조향제어시스템의 출력(실린더 행정, 빨간색 실선)의 변화를 나타낸다. 그림에서 보듯이 설계된 PID 제어기는 추종 정밀도 및 추종 속도면에서 좋은 성능을 보여주고 있다. Fig.

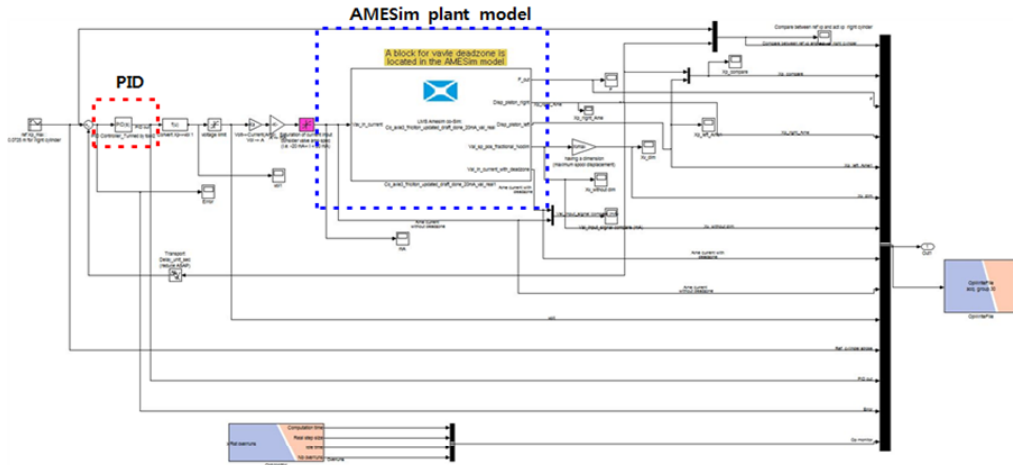


Fig. 15 Real-time co-simulation model with PID and AMESim plant model

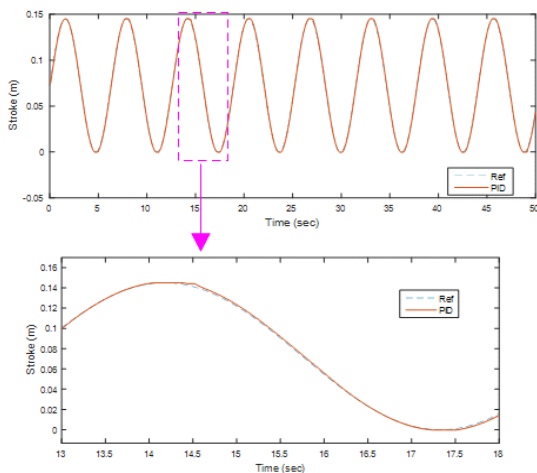


Fig. 16 Control performance verification through co-simulations with the real-time simulator

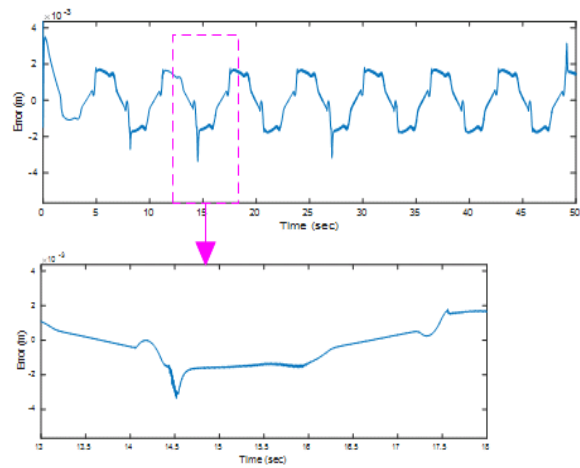


Fig. 17 Stroke error during the real-time simulation

16의 하단 그림은 전체 시뮬레이션 시간 중 13~18sec 구간만을 발췌하여 확대한 그림이다. 출력의 최대 및 최소 지점에서(즉 조향 링크의 방향이 좌→우 및 우→좌로 바뀌는 시점) 약간의 오차가 발생하나 오차범위는 $-0.0032\text{m}(-2.17\%) \sim +0.0017\text{m}(+1.17\%)$ 로 무시할 만한 수준이므로 설계된 제어기의 정밀도는 우수하다고 할 수 있다(Fig. 17 하단 그림 참조).

5. 결론

본 연구의 목적은 120ton급 전지형 크레인의 조향제어를 위해 제어 알고리즘을 개발하고, 그 성능을 실시간으로 평가하는 것이다. 이를 위해 AMESim과 Matlab/Simulink를 활용하여 유압조향 시스템 모델링과 제어기 설계를 각각 수행하였다.

개발된 제어알고리즘의 성능검증을 위하여 실시간 시뮬레이터 플랫폼을 구성하고 연성해석을 진행하였다. 해석결과를 통해 제안된 제어기는 조향제어의 정밀도 및 수렴속도 관점에서 성능이 우수함을 확인하였다. 본 연구를 통해 설계된 제어알고리즘은 향후 실차에 적용하여 실험을 통해 성능검증을 진행할 예정이다. 본 연구에서 제안된 실시간 연성해석 기법 및 플랫폼 구성방법은 실차적용 이전 단계에서 다양한 조향제어 알고리즘의 성능평가는 물론 크레인을 포함한 모바일 건설 및 농기계의 조향제어 성능향상에 도움이 될 것이라 판단된다.

후기

본 연구는 지식경제 기술혁신 사업(산업융합원천기술개발사업, 과제번호: 10044999)의 지원을 받

아 수행되었으며, 아울러 전진CSM 관계자 분들의 기술적 도움에 깊이 감사드립니다.

참고문헌
(References)

- (1) Lee, H., Jo, M., Cha, Y., Shin, D., Choi, S. and Kim, J., 2013, "Development Prospect of a Traveling Crane," *Journal of the Korean Society for Fluid Power & Construction Equipment*, Vol.10, No.3, pp. 41~46.
- (2) Wang, S., Zhang, J. and Li, H., 2008, "Steering Performance Simulation of Three-Axle Vehicle with Multi-Axle Dynamic Steering," *IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1~5.
- (3) Gao, F. and Li, X., 2014, "Turning Characteristic Study of Multi-Axle Compound Steering Vehicle," *Transp. Electr. Asia-Pacific*, pp. 1~5.
- (4) Noh, H., Song, J., Lee, G. and Kim, C., 2015, "A Study on Turning Stability for the Multi-Axle Steering Vehicle with Ackerman Angle in High Speed Running," *Proceedings of 2015 KSME CAE-Applied Mechanics Division Spring Conference*, pp 231~232.
- (5) Oh, K., Seo, J., Kim, J. and Yi, K., 2015, "An Investigation on Steering Optimization for Minimum Turning Radius of Multi-Axle Crane Based on MPC Algorithm," *Proceedings of 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2015)*, pp. 1974~1977.
- (6) www.tecnicalimpianti.com/pdf/re29055_2005-10.pdf
- (7) <http://www.opal-rt.com>
- (8) Situm, Z., Zilic, T. and Essert, M., 2008, "Electrohydraulic System Design and Control," *Proceedings of 12th International Research/Expert Conference*, pp. 533~536.
- (9) Totten, G. and De Negri, V., 2011, *Handbook of Hydraulic Fluid Technology*, CRC Press, pp. 1~52.
- (10) Dong, J. and Ren, S., 2010, "Research of Synchronization Control System Based on Electro-Hydraulic Proportional Valve," *Proceedings of 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM)*, Vol. 10, pp. V10-377~V10-380.
- (11) Dan, W., Jinguo, J. and Jietao, W., 2010, "The Model and Simulation of an Asymmetric Valve-controlled Cylinder Velocity Control System Based on PID," *Proceedings of 2010 Second International Workshop on Education Technology and Computer Science (ETCS)*, Vol. 3, pp. 499~502.