

건설기계 굴착기용 MCV HILS 개발 Development of MCV HILS for Construction Machinery Excavators

조민기 · 남윤주 · 신대영

Min Gi Cho, Yun Joo Nam and Dae Young Shin

1. 서 론

유압 시스템은 다양한 기계분야에 사용되고 있으며, 특히 큰 힘을 필요로 하고 야외나 협지에서 작업을 해야 하는 굴착기, 로더, 지게차 등 건설기계에서 필수적으로 사용된다. 대표적인 건설기계인 굴착기의 경우 핵심 유압부품의 대형화, 전장화 및 하이브리드 시스템 적용 등 다양한 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다¹⁾. 이러한 연구개발을 통해 새로운 제어 알고리즘이나 핵심부품 등이 개발되면 반드시 실차시험을 통해 시스템의 성능 및 안전성, 신뢰성 등을 최종적으로 검증해야 한다. 하지만 이 경우 개발품 크기로 인한 공간 제약, 실차시험환경 및 시험 시간, 비용 등 여러 한계로 인해 쉽게 접근하지 못하는 문제가 있다. 그리고 이러한 문제를 해결하기 위한 방법 중 하나로 HILS (Hardware In the Loop Simulation) 가 있다²⁾.

HILS system은 테스트 하고자 하는 부품과 그 부품에 신호나 부하를 모사할 수 있는 시험벤치(부하시플레이터)를 포함하는 하드웨어 파트와 하드웨어를 제외한 전체 시스템 및 시험 환경 등을 모델링 하고 실시간으로 시뮬레이션 할 수 있는 시뮬레이션 파트로 나뉜다. 두 파트는 폐루프로 연계되어 가상의 환경에서 굴착기가 동작 할 때 계산되는 부하를 실시간으로 부하시플레이터에 전달하고, 부하시플레이터가 부품에 부하를 인가하여 나오는 압력이나 유량 등 성능특성을 다시 실시간으로 시뮬레이션에 전달하여 해석과 시험을 동시에 병렬로 진행하는 시험기법이다³⁾. 이러한 HILS system은 자동차 분야에서 많이 연구, 활용되어 왔으나, 국내 건설기계 분야에서는 연구가 미비한 실정이다.

본 논문에서는 20톤급 굴착기용 MCV를 시험할 수 있는 굴착기용 MCV HILS system 개발하고, 이때 HILS시험 결과를 동일한 굴착기의 실차시험 및 전산 해석 결과와 서로 상대 비교하여 굴착기용 MCV HILS system의 성능 및 정확도를 검증하였다.

2. 굴착기용 MCV HILS system

2.1 굴착기용 MCV HILS system 개념

굴착기용 MCV HILS system(이하 HILS)은 Fig. 1과 같이 하드웨어 파트와 시뮬레이션 파트 두 파트로 나눌 수 있다.

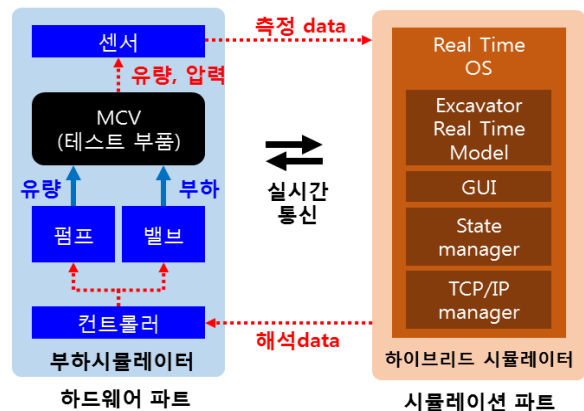


Fig. 1 굴착기 MCV용 HILS system 개념

2.2 하드웨어 파트

하드웨어 파트는 20톤급 굴착기용 MCV(test 부품)와 부하시플레이터로 구성되며(Fig.2), 부하시플레이터는 장착된 MCV에 실제 굴착기가 동작할 때 MCV에 전달되는 유량이나 부하 등을 실시간으로 모사할 수 있는 시험벤치이다.

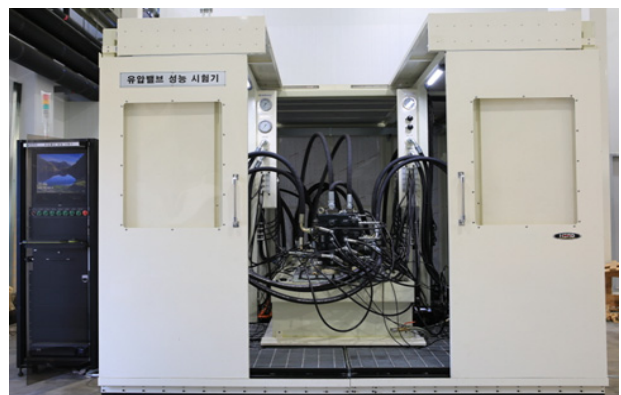


Fig. 2 부하시플레이터

시뮬레이션 파트에서 해석된 MCV의 공급유량, MCV 동작제어 명령(전압, 전류 혹은 파일럿 압력 등), MCV boom, arm, bucket 등 각 밸브 단에 걸리는 부하 등을 실시간으로 전달받아 그대로 모사할 수 있도록 구성하였으며, 시험 시 MCV에 걸리는 압력, 유량 등 센서 값은 실시간으로 시뮬레이션 파트로 보낼 수 있도록 RT module도 구성하였으며, Fig. 3과 같다.

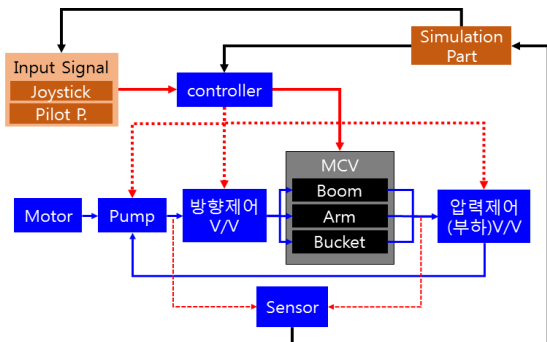


Fig. 3 하드웨어 파트 구성

2.3 시뮬레이션 파트

시뮬레이션 파트는 Fig. 4와 같이 20톤급 굴착기 Real Time 모델 및 HILS의 설정과 제어를 담당하는 GUI 포함하는 Veristand 환경과 실시간 해석 및 통신, 상태 등을 관리하는 PXI 환경으로 구성된다. 그리고 이러한 시뮬레이션 파트를 담당하는 장비를 하이브리드 시뮬레이터(Fig. 5)로 정의한다.

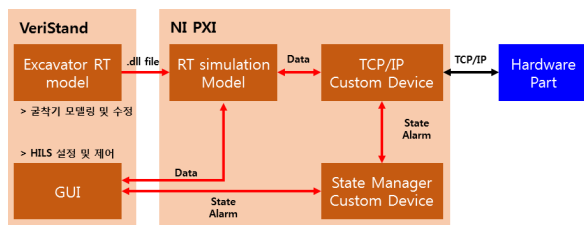


Fig. 4 시뮬레이션 파트 구성



Fig. 5 하이브리드 시뮬레이터

시뮬레이션파트의 굴착기 Real Time 모델은 MCV 모델 대신 하드웨어 파트와 통신하도록 블록 모델로 구성하며 Fig. 6과 같다. 20톤급 굴착기가 가상의 환경에서 특정 동작을 할 경우 작업기에 걸리는 힘과 실린더 부하, 펌프 토출 유량, MCV에 걸리는 하중, 유량 등의 데이터를 실시간으로 계산하여 하드웨어 파트로 보내고, 하드웨어 파트는 해당 유량, 압력, 부하 등을 동일하게 모사하도록 작업을 수행한다. 동시에 작업 시 측정되는 압력, 유량 등 계측값은 다시 시뮬레이션 파트에서 실시간으로 피드백 받아 해석을 수행하는 루프연산을 통해 HILS 시험이 진행된다.

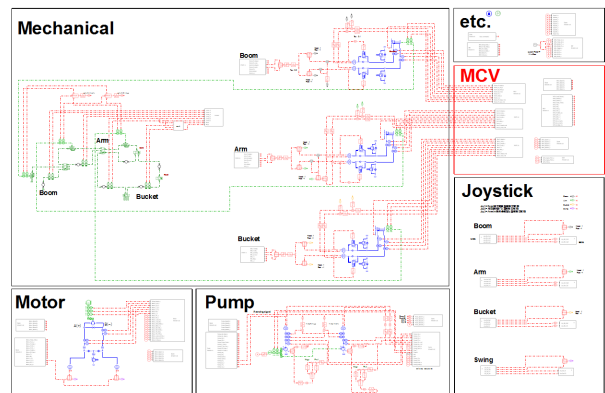


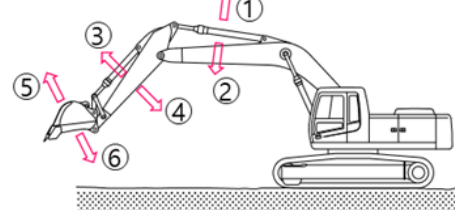
Fig. 6 굴착기 Real Time 모델

3. 굴착기 실차시험 및 전산해석

3.1 20톤급 굴착기 실차시험

A사의 20톤급 굴착기를 대상으로 건설기계기술센터 야외시험장에서 실차시험을 수행하였으며(Fig. 8), 단독동작 및 복합동작 등 약 24개 작업 모드를 선정

표준작업모드 설정



	무부하 조건	Pilot 인가 시간[sec]
단독 동작	① Boom up	6
	③ Arm crowd	7
	⑤ Bucket crowd	8
복합 동작	① ③ ⑤ Bm_up+ Am_cr + Bk_cr	8

Fig. 7 표준 작업 모드 선정

하고, 무부하 및 540kg 부하 두 가지 조건으로 총 48 가지 시험을 수행하였다. 이 중 Fig. 7과 같이 무부하 조건의 표준모드 4개를 선정하고, 이때 결과를 전산 해석 및 HILS 시험결과와 비교하여 정확도를 검증하는데 활용 하였다.

시험에 사용된 DAQ는 HBM사의 eDAQ 48ch를 사용하였으며, 변위 및 압력, RPM, 온도센서 등 총 27 개의 센서를 각각 펌프, 실린더, MCV 등에 장착하여 측정하였으며, 이때 실차시험 결과는 Fig. 9에 나타내었다.



Fig. 8 20톤급 굴착기 실차시험

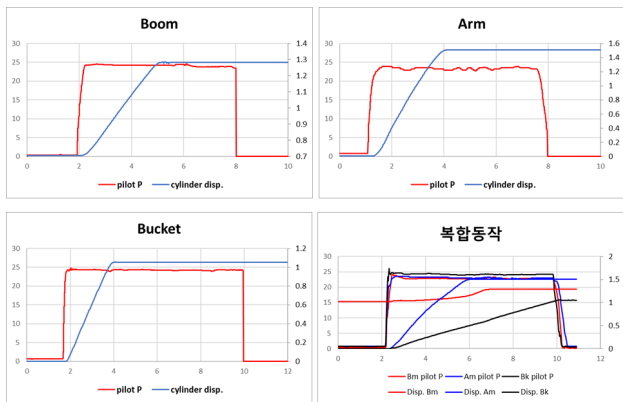


Fig. 9 실차시험 조건 및 실린더 변위 결과

3.2 20톤급 굴착기 전산해석

실차시험에 사용된 20톤급 굴착기와 동일한 모델을 구축 하였으며, 이때 전산해석모델은 Fig. 10과 같이 MCV모델을 포함한다.

또한 해석 시 실차시험과 동일한 표준 동작을 위해 실차시험 시 RCV를 통해 MCV에 입력된 파일럿 압력을 해석모델에 명령 값으로 입력하여 해석을 수행하였다. 이는 HILS시험도 동일하다.

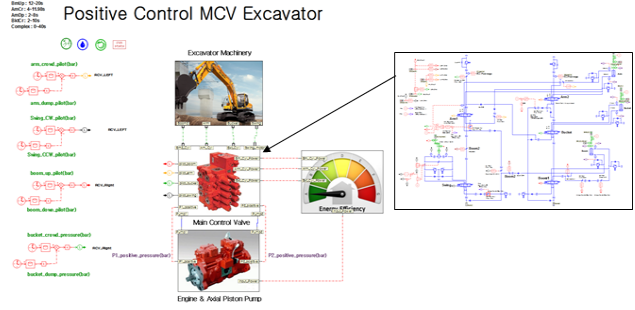


Fig. 10 20톤급 굴착기 전산해석 모델

4. 굴착기용 MCV HILS system 정확도 검증

4.1 정확도 조건 및 방법

표준 작업 모드(단독동작 3개, 복합동작1개)로 실차시험, 전산해석, HILS시험을 동일하게 수행하고, 이때 각각의 실린더 변위를 비교하여 오차 및 정확도를 확인하였다. 실린더 변위 산출구간은 실린더 상승명령 시점(파일럿 압력 입력시점)의 +5% 이후 구간과 실린더 정지시점 -5% 범위를 기준으로 정의하고 이 구간에서의 RMS오차 및 정확도는 식 (1)과 식 (2)에 나타내었다.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{n=1}^n (x_1 - x_2)^2 / n} \quad (1)$$

$$Accuracy = (1 - RMSE/L) \times 100 \quad (2)$$

여기서 $RMSE$ 는 실린더 변위에 대한 RMS오차 [m], x_1 는 기준 실린더 변위 [m], x_2 는 대상 실린더 변위 [m], n 은 변위 산출구간 데이터 수, $Accuracy$ 는 정확도 [%], L 은 실린더 총 행정거리 [m] 이다.

4.2 실차시험 대비 전산해석 정확도

실차시험 대비 전산해석 결과는 단독모드 96.8%, 복합모드 97.7%, 평균 97.3%의 정확도를 가지며 이때 Fig. 11과 같이 복합동작, 단독동작 시 실린더 거동이 유사함을 확인할 수 있다. 이때 실린더 변위에 따른 정확도 계산결과는 Table 1에 나타내었다.

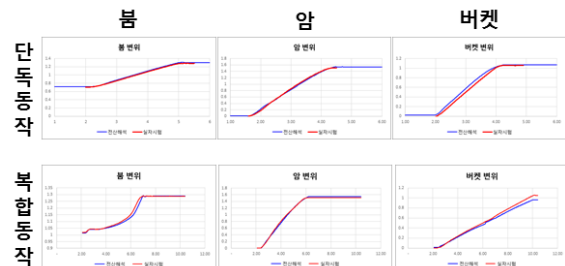


Fig. 11 실차시험 대비 전산해석 실린더 변위 비교

Table 1 실차시험 대비 전산해석 정확도

전산해석 / 실차시험		정확도 [%]	정확도 평균 [%]	
단독 모드	봄	98.7	96.83	97.25
	암	98.3		
	버켓	93.6		
복합 모드	봄	98.7	97.69	
	암	98.2		
	버켓	96.2		

4.3 실차시험 대비 HILS 시험 정확도

실차시험 대비 HILS시험 결과는 Table 2와 같이 단독모드 97.7%, 복합모드 91.7%, 평균 94.6%의 정확도를 가지며, 이때 실린더의 거동은 Fig. 12와 같다.

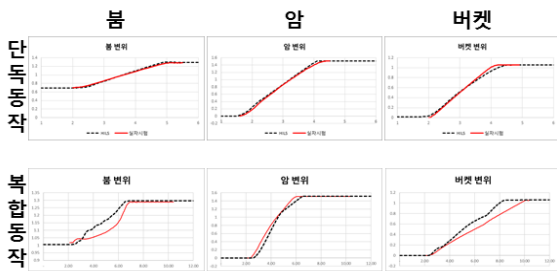


Fig. 12 실차시험 대비 HILS시험 실린더 변위 비교

Table 2 실차시험 대비 HILS시험 정확도

실차시험/ HILS시험		정확도 [%]	정확도 평균 [%]	
단독 모드	봄	98.6	97.75	94.73
	암	97.6		
	버켓	97.0		
복합 모드	봄	94.9	91.71	
	암	92.4		
	버켓	87.9		

복합모드에서 실차시험과 HILS시험 결과가 육안 상 큰 차이가 있다. 원인분석 결과 봄, 암, 버켓을 동시에 구동하는 복합동작의 경우 단독동작 시 작동하지 않는 기능밸브(봄 우선밸브, 암 우선밸브 등)들이 작동을 하게 되며, 이때 기능밸브의 설정압력이나 작동압력, 밸브성능 등의 차이가 있는 것으로 확인되었다. HILS 시험에서 사용된 MCV는 실차시험 시 굴착기에 장착되어있는 MCV를 탈착할 수 없기 때문에 동일 모델로 구매하여 사용했으며, 이때 굴착기에 설치된 MCV의 경우 굴착기의 퍼포먼스에 따라 MCV

각 밸브들의 설정 값들이 일부 튜닝된 것으로 확인되었다.

따라서 HILS시험의 복합동작 정확도를 검증하기 위해 실차시험 대비 전산해석 비교를 통해 검증된 전산해석 모델의 MCV모델을 HILS에 사용된 MCV 설정 값으로 수정하고 이때의 결과 값을 HILS시험 결과와 비교하였다.

4.4 전산해석 대비 HILS 시험 정확도

MCV 기능밸브 설정 값이 수정된 전산해석 대비 HILS시험 결과는 Table 3과 같이 단독모드 97.7%, 복합모드 91.5%, 평균 94.6%의 정확도를 가지며, 실린더의 거동은 Fig. 13에 나타내었다.

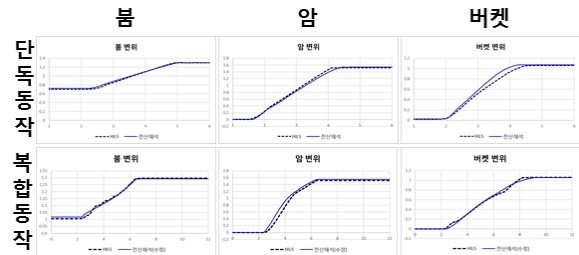


Fig. 13 전산해석 대비 HILS시험 실린더 변위비교

Table 3 전산해석 대비 HILS시험 정확도

전산해석 / HILS시험		정확도 [%]	정확도 평균 [%]	
단독 모드	봄	98.2	96.23	96.23
	암	96.9		
	버켓	93.2		
복합 모드	봄	99.3	96.22	
	암	92.1		
	버켓	97.3		

5. 결 과

실차시험과 전산해석 비교를 통해 단독 및 복합모드 각각 약 96% 이상의 높은 정확도를 확인하였으며, 이를 통해 전산해석모델이 유효함을 검증하였다. HILS시험 또한 실차시험 결과와 비교하여 단독모드의 경우 97% 이상의 높은 정확도를 보여주었다. 다만 복합모드의 경우 실차시험에 사용된 MCV의 기능밸브 튜닝 값이 HILS시험에 사용된 MCV와 다른 것이 확인되어, 검증된 전산해석모델을 이용하여 복합모드의 정확도를 검증하였다.

전산해석모델의 MCV 기능밸브 설정 값을 HILS 시험에 사용된 MCV와 동일하게 수정한 뒤 해석결과를 HILS시험 결과와 비교한 결과 복합모드에서 약 96% 이상의 정확도를 확인하였으며, 이를 통해 건설기계 굴착기용 MCV HILS system의 정확도를 최종적으로 검증하였다.

본 시험결과를 바탕으로 건설기계 굴착기용 MCV HILS system을 통해 MCV의 기능밸브 및 각 밸브단의 설정 값이 굴착기 거동에 어떤 영향을 미치는지, 이를 통해 각 밸브 최적의 튜닝 값을 연구하는데 활용할 수 있음을 확인하였다. 또한 기존 재래식 MCV가 아닌 전자제어 MCV, IMV (Independent Metering Valve) MCV 등 기존에 장착된 MCV가 아닌 다른 종류의 MCV 개발품 등을 HILS시험기를 통해 굴착기에 적용했을 때의 거동특성을 확인하는 등 다양한 분야에서 활용 될 수 있음을 확인하였다.

추후 IMV MCV를 HILS에 적용하여 기존 재래식 MCV가 장착된 굴착기와 성능 및 거동특성 등이 어떻게 다른지 비교하는 연구 등 다양한 연구를 통해 추가 활용사례를 제시 할 예정이다.

참고 문헌

- 1) M. C. Kang, K. S. Kim, D. Y. Lee, J. K. Choi and J. Y. Kang, "A Study on the Method of Fuel Efficiency Measurements for the Verification of the Improved Energy Efficiency of the Excavator with the Idle-Stop Technology", KSFC Conference, 2016.11, 69-72(4 pages).
- 2) T. Y. Lim, H. C. Cho, T. K. Ahn, S. Y. Yang and H. S. Lee, "Development of Hardware In the Loop System(HILS) for Hydraulic Excavator", KSMTE Conference, 2004.10, 468-473(6 pages)

- 3) Qiang Feng, Qingfeng Wang and Wen Gong, "Research On Hardware-In-the-Loop Simulation System Of Hydraulic Excavators", FPS International, Symposium on Fluid Power, OKINAWA 2011, 318-323(6 pages)

[저자 소개]

조민기



E-mail : alsr186@kitech.re.kr

Tel : 053-580-0326

2011년 한국산업기술대학교 기계시스템 설계 석사. 2011년~현재 한국생산기술연구원 건설기계기술센터 연구원. 유압 시스템 해석, 유압부품 성능, 내구 시험 지원 중사. 대한기계학회, 한국정밀공학회, 유공압건설기계학회 등의 회원, 공학석사

남윤주



E-mail : yjnam@kitech.re.kr

Tel : 053-580-0305

2008년 부산대학교 지능기계공학과 박사 과정 졸업. 2008년 (주)한진산업 입사, 2013년 한국생산기술연구원 선임연구원, 2019년 동 연구원 수석연구원, 건설기계 기술센터장, 유공압제어, 유공압부품의 연구에 중사. 유공압 건설기계학회 회원, 공학박사

신대영



E-mail : dyshin@kitech.re.kr

Tel : 032-850-0244

1989년/91년/00년 한양대 정밀기계공학과 학사/석사/박사. 1991년~현재 한국생산기술연구원 유압제어 시스템, 건설기계 설계 등 연구.