

지능형 굴삭 시스템의 버킷 끝단 위치제어에 관한 연구

A Study on the Bucket Tip's Position Control for the Intelligent Excavation System

김기용 · 장달식 · 안현식

K. Y. Kim, D. S. Jang and H. S. Ahn

Key Words : Position Control(위치제어), Anti-Windup(앤티와인드업), MCV(메인 컨트롤 밸브), EPPRV(전자 비례 감압 밸브)

Abstract: For the bucket tip position control of the excavator, a traditional hydraulic excavator system was exchanged into an electro-hydraulic one. EPPR valves are attached to the traditional MCV and hydraulic joysticks are replaced by electronic ones to develop the electro-hydraulic system. To control the electronic pump with a good performance, the control logic for the pump is deduced from the AMESim simulation and the experimental method on the test bench. To get a good position control performance of the excavator bucket tip, PI+AntiWindup controller is selected as a position controller. The experimental results showed the good controllability for the electro-hydraulic excavator system on the test bench.

기호 설명

U : 제어 입력
 K_p : 비례 제어 이득
 K_i : 적분 제어 이득
 T_s : 샘플링 시간[sec]
 Q : 유량[mm³/sec]
 A : 면적(mm²)
 e : 오차

Subscripts

$rodA$: 실린더 내경
 $rodB$: 실린더 로드 외경

1. 서 론

현재 국내의 건설산업은 숙련공 부족, 고령화, 안전상의 문제로 인한 노무 생산성 저하, 임금상승으로 인한 채산성 악화, 품질의 균일성 및 안전성 확보의

어려움 및 시공기술 경쟁력의 약화 등으로 어려움을 겪고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로, 인력 대체형 무인화 굴삭기에 대한 필요성이 대두되고 있다.^{1,2)}

또한 기술적으로 굴삭기는 크게 Positive Flow Control (PFC) 방식과 Negative Flow Control (NFC) 방식으로 분류된다. 특히 NFC 방식은 Center Bypass 유량에 따라 펌프 유량을 기계식으로 제어하는 굴삭기 “기계-유압시스템”의 한 방식이며, NFC 방식은 굴삭 모드가 주종을 이루던 과거에는 높은 안정성과 차량 튜닝을 통해 VOC(Voice of Customer)에 어느 정도 대응해 왔다. 그러나 최근 들어 굴삭 기능 이외에 크레인모드라고 하는 미세 제어가 요구되며, 연비 절감과 운전자 안락성 등이 점점 높게 요구되고 있어 현 시스템으로서는 이를 만족시키는데 한계가 존재한다.

그러므로 여러 가지 경제적, 사회적, 기술적 상황으로 볼 때, 위와 같은 무인화 굴삭이 가능한 ‘지능형 자동 굴삭시스템’의 개발 및 적용은 필수적이다. 지능형 굴삭 시스템 개발에 있어서 중요 부품인 붐(Boom), 암(Arm), 버킷(Bucket) 실린더 및 MCV(Main Control Valve) 등의 특성 파악 및 개별 제어 로직 개발이 필요하다. 또한 유압 시스템은 비선형성이 강한 시스템으로 제어로직 구성 시 이 점을 고려하여 적절한 제어기 설계가 필수적이며, 나아가 무인

접수일 : 2008년 10월 29일
 김기용(책임저자) : 두산인프라코어
 E-mail : kiyong.kim@doosan.com,
 Tel : 031-270-1376
 장달식, 안현식 : 두산인프라코어

자동 굴삭이 가능하기위한 수단인 버킷 끝단의 위치 제어에 관한 연구도 매우 중요한 의미를 가진다. 또한 이러한 선행 기술 연구 및 기술을 선점해야한다.

본 논문에서는 현재 진행되고 있는 무인화가 가능한 굴삭기 개발에 필요한 유압 시뮬레이션 유압 테스트 벤치 구성 및 테스트에 관하여 기술하였다.

2. 전자 MCV 설계

지능화 굴삭의 기본 개념은 무인화 굴삭이 가능한 시스템이다. 즉 지능화 굴삭이 가능한 시스템을 위해서는 기존의 기계식 NFC 방식의 시스템을 전자화 시스템으로 변경해야 무인화 시스템으로 개발이 가능하다.

굴삭기의 전자화에 가장 중요한 부분은 MCV이며, MCV 내부의 스펴(Spool)의 움직임을 유압 신호가 아닌 전자적인 신호로 제어할 수 있도록 변경이 필요하다. 그러므로 스펴의 움직임을 전자화로 변경하기 위해서 기존 MCV의 유압 호스 라인을 제거하고 스펴을 전기신호에 의해 동작시킬 수 있는 EPPRV (Electronic Proportional Pressure Reducing Valve)를 설치하였다. EPPRV는 밸브로 인가되는 전압에 비례하여 압력을 생성해주는 장치이며, EPPRV에 인가되는 전압의 크기에 따라 스펴의 위치를 제어할 수 있다. 또한 스펴이 움직이는 거리를 측정하기 위하여 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 장착하였다.

MCV에 EPPRV 및 LVDT 설치를 위하여 별도의 블록을 설계, 제작하여 기존 양산 되는 MCV 전후에 설치하였다. 블록은 EPPRV에서 생성된 압력을 전달할 수 있는 내부 유로를 포함하고 있다. Fig. 1은 블록 중 MCV 앞단에 장착되는 블록의 내부유로를 나타낸다. Fig. 2는 EPPRV 및 LVDT가 새로 제작된 블록에 장착되어 MCV에 설치된 모습이다.

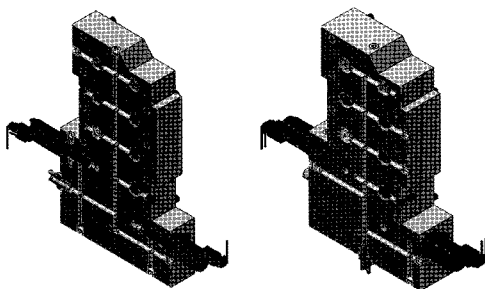


Fig. 1 Internal flow path in the new block
(Left : tank line, Right : pilot line)

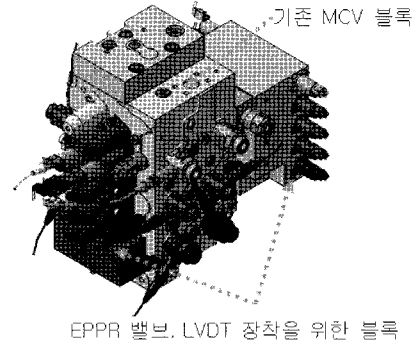


Fig. 2 Figure of E-MCV

3. 지능형 굴삭기 벤치 테스트 장비 설계

실제 굴삭기에 전자화된 MCV를 장착하여 시험하기 전에 시스템 안정성 평가 및 새로운 MCV가 적용된 시스템의 특성을 파악하기 위하여 벤치 테스트 장비를 구성하였다. Fig. 3은 실제 벤치 테스트 장비를 나타낸다. 있다. 벤치 테스트 장비는 크게 동력부(모터, 펌프), MCV부 그리고 액츄에이터 부(붐, 암, 버킷)로 구성되어 있다. 그러나 벤치 테스트 장비에서는 각 액츄에이터에 해당하는 붐, 암, 버킷 및 각각의 실린더를 설치할 수 없으므로 이에 상응할 수 있도록 전자비례 릴리프(Relief) 밸브를 설치하여 부하를 대신하였다.

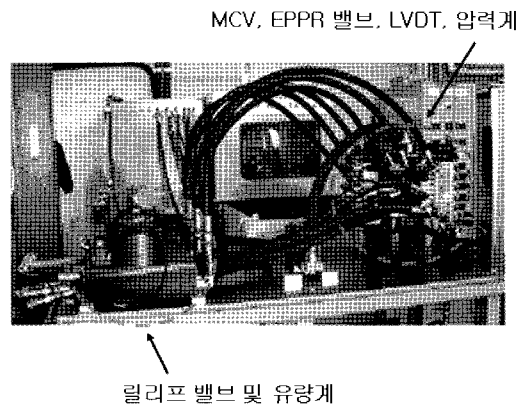


Fig. 3 Figure of bench tester

EPPRV 구동 및 각종센서(LVDT, 압력계, 유량계) 측정을 위하여 소프트웨어 장치를 구성하였다. 굴삭기 벤치 테스트 장비의 제어를 위하여 NI社의 PXI 장비 및 LabVIEW 프로그램을 사용하여 Real-Time으로 각 액츄에이터를 구동하고, 센서 값들을 측정할 수 있는 프로그램을 제작하였다. Fig. 4는 지능화 굴삭 시스템 소프트웨어 구성을 나타내고 있다 먼저 호스트 PC에서 스펴에 지령을 내리면 PXI 장비는

지령을 전기적인 신호로 바꿔 EPPRV에 지령을 내린다. 스펴이 움직이면서 발생하는 상태 값들은 각 센서로부터 측정되며, PXI 장비에서 신호를 처리하여 호스트 PC에서 볼 수 있다. 안전을 위하여 In/Out 신호별로 Isolator를 설치하였다.

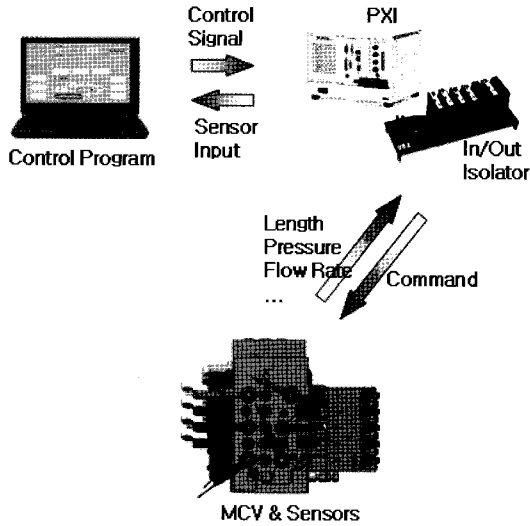


Fig. 4 Schematic diagram of control signal

현재 NFC 방식의 굴삭기 펌프 사판각 제어는 각 MCV 내부의 바이패스(By-Pass) 라인에서 생성되는 압력에 반비례하도록 사판각이 제어된다. 그러나 전자화 MCV 에서는 이러한 바이패스 라인이 없으므로 별도의 전자 펌프 및 전자 펌프의 제어로직이 필요하다. 두 개로 구성된 펌프 사판각 제어를 위해서 각 펌프가 담당하는 액추에이터의 조이스틱 입력을 조합하여 펌프 제어로직을 개발하였다.

펌프 제어로직은 기존의 시스템의 특성을 추종하면서 펌프의 유량 및 압력 손실을 줄이는 방향으로 설계를 하였다. 펌프 제어로직 설계는 유압 시뮬레이션 프로그램인 AMESim을 이용하여 펌프 제어로직을 시뮬레이션을 통하여 개발하였다. 이를 바탕으로 최적의 EPPRV 입력 전압 대비 파일럿 압력 식을 찾은 후 실제 테스트에 적용하였다. Fig. 5는 AMESim으로 계산된 붐 모드에 대한 시뮬레이션 결과와 실제 시험 결과를 나타내고 있다. 스펴 변위에 대한 펌프에서의 유량으로 두 가지 결과가 유사한 것을 알 수 있다. 붐 모드에 이외의 모드에서도 시뮬레이션과 시험의 결과가 유사하게 나타난다.

굴삭기 실린더 길이 제어를 위하여 서두에 언급한 바와 같이 PI 컨트롤러에 Anti-Windup 제어를 추가하였다. 시간영역에서 PI 제어식은 식 (1)과 같이

표현되고 이를 라플라스변환(Laplace transform)한 것은 식 (2)으로 표시되고 실제로 구현하기 위한 디지털 표현식은 식 (3)과 같다. PI 제어의 경우 Real Time 시스템을 통하여 실시간 제어가 수행되기 때문에 이산화된 PI 제어를 적용하였으며, 디지털 PI 제어기는 후진 차분 방법(backward rectangular rule)을 사용하여 식 (3)과 같은 식을 얻을 수 있다.³⁾

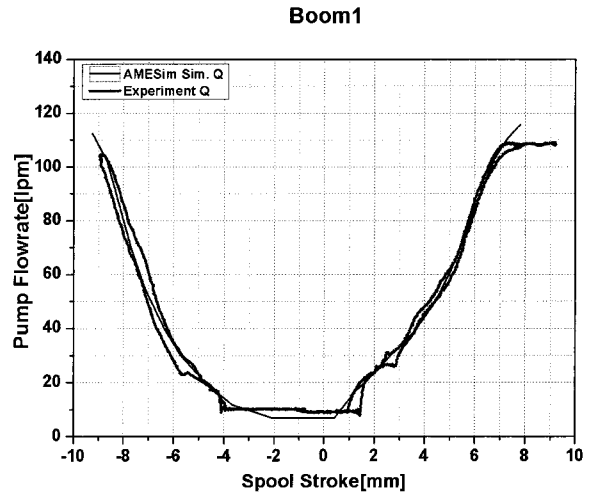


Fig. 5 Pump flow rate when spool displacement was changed

$$U(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T} \int e(t) dt \right) \quad (1)$$

$$= K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2)$$

$$\frac{U(k) - U(k-1)}{T_s} = K_p \left[\frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \right] + K_i e(k) \quad (3)$$

$$\therefore U(k) = U(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) T_s$$

Anti-Windup 제어기는 잘 알려진 바와 같이 제어 입력 값이 액추에이터의 포화 값을 벗어났을 때는 에러를 적분을 하지 않게 함으로써, 초기에 발생하는 큰 오차 값에 의한 오버슛(Overshoot)을 감소시켜 안정화 시간이 짧아진다. Fig. 6은 PI 제어기에 Anti-Windup 제어기가 적용된 블록다이어그램을 나타낸다.

특히 유압 시스템과 같이 응답 속도가 늦은 시스템에는 안정 상태에 이르는 시간이 오래 걸리기 때문에 에러의 적분에 의하여 오버슛 및 안정화 시간이 더욱 나빠진다. Fig. 7은 PI 제어 상수를 적용하였을 때 실린더 길이 변화를 나타낸다. 앞서 설명한

것과 같이 PI + Anti-Windup 제어기의 경우 단순히 PI 제어만 수행하는 것 보다 오버슈트가 작고 안정 상태로 진입하는 시간이 길어진다. 물론 PI 계수 값을 조절하면 오버슈트는 줄일 수 있지만 시스템의 응답성이 느려질 것이다.

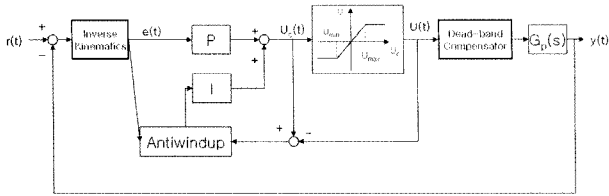


Fig. 6 Block diagram of PI + AntiWindup controller

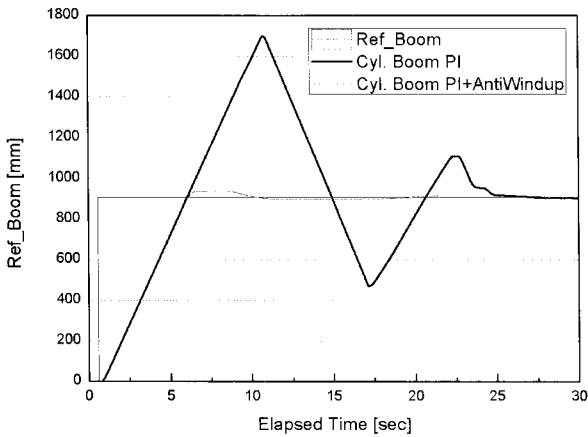


Fig. 7 Test result of PI, PI-Anti-Windup controller

4. 지능화 굴삭기 성능 시험 결과

4-1 정특성 시험 결과

EPPRV에 0.025[Hz]의 삼각파형을 입력하였을 때 스톱의 변위, 유량 등의 값을 확인함으로써, 전자 MCV의 특성을 알 수 있다. 특히 유압 시스템은 EPPRV 입력에 따라 Hysteresis가 존재하기 때문에 기본 성능 시험을 통하여 위의 Hysteresis 현상을 파악하고 줄일 수 있고, 제어 성능을 향상시킬 수 있다. Hysteresis는 정특성 시험에서 나온 Hysteresis 값을 측정하여 EPPRV 지령이 증감함에 따라 일정한 값을 더하거나 감함으로써 Hysteresis를 저감하였다.

Fig. 8은 주행 모드에 대한 결과로 EPPRV 지령에 따른 스톱 변위 및 유량을 나타낸다. 기존 시스템에 비하여 EPPRV 지령에 따른 스톱 변위 및 유량의 Hysteresis가 저감된 것을 알 수 있으며, Dead band 또한 감소한 것을 알 수 있다. Table 1은 각 모드별

Hysteresis를 개선 결과를 나타낸다. 모든 모드에 대하여 스톱 변위는 평균 42.5[%] 감소되었으며, 유량은 평균 73.3[%] 감소하였다.

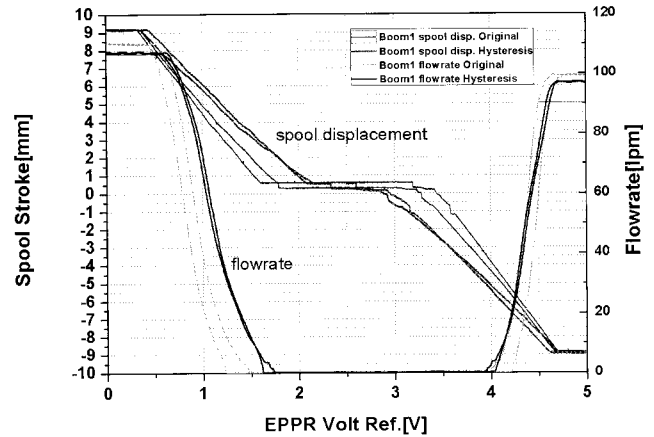


Fig. 8 Test result of basic performance test at travel mode

Table 1 Test result of basic performance test

	Spool Hys. [mm]			Flowrate Hys. [lpm]		
	기존	개선	Diff. [%]	기존	개선	Diff. [%]
Boom1	0.602	0.28	53.5	13.8	2.8	79.7
Boom2	0.488	0.174	64.3	37.2	3.5	90.6
Arm1	1.11	0.752	32.3	22.2	5.4	75.7
Arm2	1.143	1.046	8.5	21.1	7.7	63.5
Bucket	0.427	0.283	33.7	20.9	3.6	82.8
Swing	1.434	0.625	56.4	27.2	9.8	64.0
Trevel Left	0.461	0.2	56.6	18.8	10.9	42.0
Trevel Right	0.404	0.131	67.6	18.7	4.3	77.0
Avg	0.758	0.436	42.5	22.5	6	73.3

전자 펌프의 사판각 제어는 스톱과 동일한 EPPRV로 제어가 됨으로 Hysteresis가 존재하며, 스톱과 동일한 방법으로 Hysteresis를 저감할 수 있다. 표 4-2는 펌프의 Hysteresis 개선 결과를 나타낸다. 전자 펌프의 Hysteresis는 평균 94[%] 감소되었다.

Table 2 Test result of the pump performance

	Pump Angle [deg]		
	기존	개선	Diff.
Pump 1	1.059	0.037	96.5
Pump 2	1.098	0.094	91.4
Avg	1.078	0.065	94.0

4-2 버킷 끝단 위치 제어 시험 결과

EPPRV 입력에 대한 Hysteresis 개선 및 조이스틱의 입력에 대한 전자 펌프 제어로직에 의해 시스템 제어 성능을 향상시켰다. 이를 바탕으로 버킷 끝단의 위치 제어를 수행하였다. 버킷 끝단의 위치 제어를 위해서 PI+AntiWindup 제어기를 사용하였다.

벤치 테스트 장비의 특성상 실제 굴삭기의 실린더가 없다. 그러므로 실린더에 해당하는 자리에 유량계를 설치하여 유량을 측정함으로써 실린더 길이를 간접적으로 측정할 수 있다. 본 시험에서 사용한 유량계는 유체의 양은 측정하지만 방향은 측정하지 못하기 때문에 실린더가 어느 방향으로 움직일지 알 수가 없다. 하지만 MCV 내부의 스펴 움직임을 측정하여 유체가 흐르는 방향을 간접적으로 결정할 수 있다. 유량을 계산할 때 실린더의 경우 단동실린더이므로 유량 계산에 유의해야 한다.

if $Spool\ Displacement \geq 0$

$$CylLength_n = CylLength_{n-1} + \int \left(\frac{Q}{A_{rodA}} \right) dt$$

else

$$CylLength_n = CylLength_{n-1} - \int \left(\frac{Q}{A_{rodA} - A_{rodB}} \right) dt$$

본 논문에서는 버킷과 선회를 제외한 붐과 암 실린더를 제어하여 버킷 끝단의 위치를 제어하는 연구를 수행하였다. 굴삭기의 작업 가능한 영역 중 임의의 한 지점으로부터 다른 지점으로 이동하는 지령에 대하여 벤치 테스트 상에서 버킷 끝단의 위치 제어 시험을 수행하였다. 굴삭기 버킷 팁의 위치가 정해지면 굴삭기 앞부분의 기구학적 형태에 의해서 실린더 길이가 정해지게 된다. 즉 시작점과 끝점이 결정되면 기구학적 형태에 따라 실린더 길이의 변화의 지령이 생성이 된다. 그리고 굴삭기의 진행 방향을 X축, 굴삭기 높이 방향을 Y축으로 설정 하였다. Fig. 9, Fig. 10은 임의의 한 점(X : 4.05, Y : 0.589)에서 X 축으로 1[m] Y 축으로 -1[m] 이동하는 명령에 따른 시험 결과를 나타낸다. X, Y축 모두 약간의 오버슈트 존재하지만 응답성이 빠르고, 안정 상태에서의 신속하게 오차가 작아지는 특성을 나타냄을 알 수 있다. Fig. 9와 Fig. 10에서 Y축 응답이 X축과 상이한 결과는 붐 실린더의 응답특성이 암 실린더와 다르기 때문이며, 특히 붐 실린더에서 오차 값이 작더라도 버킷 끝단에서는 기구학적 특성 때문에 상대적으로 오차가 증가하기 때문이다. 또한 Fig. 11, Fig. 12는 위의 지령에 따른 실린더 변위를 나타낸다. 붐, 암

실린더 모두 약간의 오버슈트 존재하지만, 응답성 및 안정 상태 오차의 관점에서 우수한 성능을 나타낸다. Table 3은 위 시험의 정상상태에서의 오차 값을 표시하고 있다.

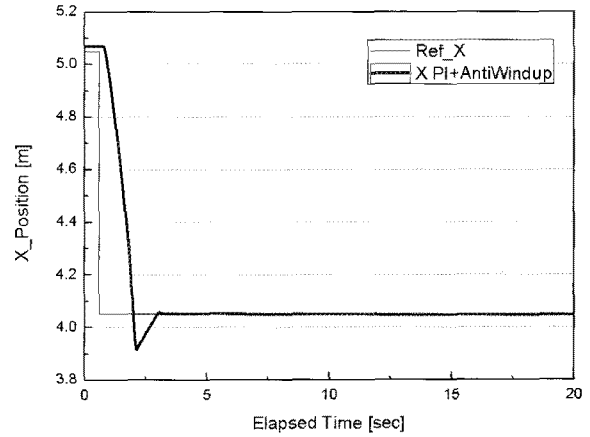


Fig. 9 Test result of bucket tip's X position

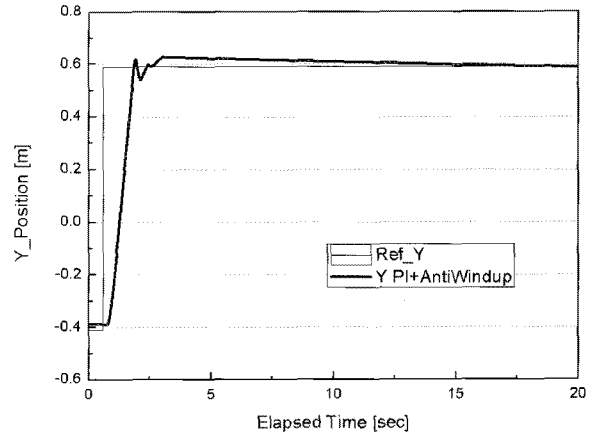


Fig. 10 Test result of bucket tip's Y position

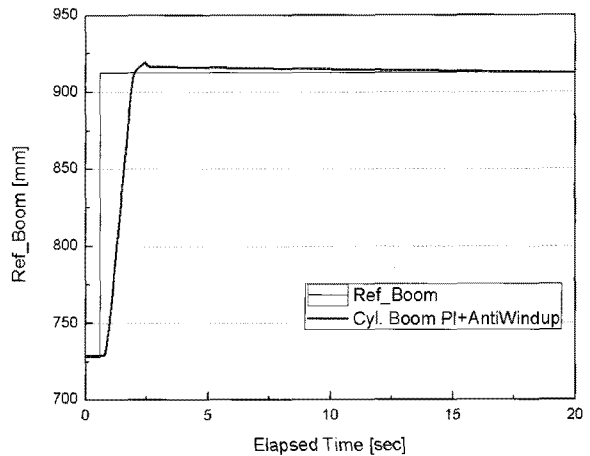


Fig. 11 Test result of boom cylinder displacement when bucket tip's position was changed

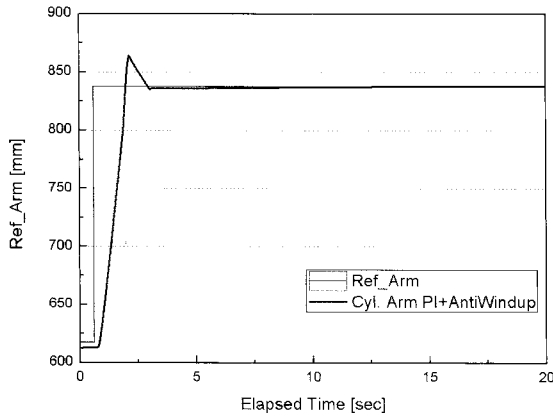


Fig. 10 Test result of arm cylinder displacement when bucket tip's position was changed

Table 3 Steady-state error when bucket tip's position was changed

	steady-state error [mm]	rate[%]	working range [mm]
X direction	1.6	0.02	7,240
Y direction	1.5	0.01	12,630
Boom Cyl.	0.1	0.01	1,040
Arm Cyl.	0.3	0.03	1,085

5. 결 론

본 논문은 기존의 기계식 유압시스템으로 설계된 굴삭기를 전자식 유압시스템 굴삭기로 재설계하고 굴삭기 버킷 끝단의 위치제어를 위한 제어기를 설계 검증하였다. 하지만 본 논문에서는 실제 굴삭기가 아닌 굴삭기를 모사한 테스트 벤치에서 시험이 진행되었다.

먼저 전자 신호를 이용한 굴삭기 제작을 위하여 굴삭기 MCV 내부 스플 제어를 기존 유압라인에서 EPPRV를 사용하였으며, EPPRV를 장착하기 위한 블록을 설계, 제작하여 장착하였다. 그리고 전자 MCV를 시험할 수 있는 테스트 벤치 및 Real Time 으로 구동되는 소프트웨어 장치도 제작되었다.

펌프 제어로직을 시뮬레이션과 시험을 통하여 기존의 시스템 특성을 추종하면서 펌프의 유량 및 압력 손실을 줄이는 방향으로 설계하였다. 또한 시스템의 특성 파악 및 성능 향상을 위하여 기본 성능 시험을 벤치 테스트 상에서 진행하였으며, 이를 통하여 시스템의 Hysteresis를 저감하였다.

이렇게 새로 개발된 전자 굴삭기 시스템에서 굴삭기 끝단의 위치제어를 위하여 PI+AntiWindup 제어기를 사용하였다. 그 결과 굴삭기 작동영역 중 임의의 지점에서 X, Y축 방향으로 1[m] 이동시 정상상태 오차가 각각 1.6[mm], 1.5[mm]로 나타났다. 이는 굴삭기가 운전 가능한 영역을 기준으로 볼 때 0.02[%] 이하에 해당되는 우수한 제어 성능을 나타낸다.

후 기

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(06첨단융합C01)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 1) 최종한, 김승수, 양순용, 이진걸, “유압 굴삭기의 제적 추종을 위한 강인제어”, 제어 자동화 시스템 공학논문집, Vol. 10, No. 1, pp. 22~29, January 2004.
- 2) W. Richardson-Little and C. J. Damaren, “Piston accommodation and compliance control for robotic excavation” IEEE conference on control applications, August 2005.
- 3) 임동연, “인버터 열펌프 제어시스템의 제어 알고리즘 구현 및 제어 특성에 관한 연구”, 고려대학교 대학원, 서울, p. 24, December 2000.