

지능형 굴삭 시스템의 버킷 궤적제어에 관한 연구

A Study on the Bucket Trajectory Control for the Intelligent Excavation System

김기용 · 장달식 · 안현식

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

1. 서론

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-유압 시스템”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 운전자의 안락성 등이 점점 높게 요구되고 있어 현 시스템 으로서는 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 자동 굴삭이 가능하기 위한 수단인 버킷 끝단의 궤적제어에 관한 연구도 매우 중요한 의미를 가진다. 또한 이러한 선행 기술 연구 및 기술을 선점해야 한다.

본 해설에서는 당사에서 진행되고 있는 무인화가 가능한 굴삭기 개발에 필요한 유압 시뮬레이션, 유압 테스트 벤치 구성 및 테스트에 관하여 기술하였다.

2. 지능형 굴삭 시스템의 구성

2.1 MCV 구성

서두에서 언급된 바와 같이 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 전자적인 신호로 제어할 수 있도록 변경하는 장치가 필요하다. 일반적으로 굴삭기와 같은 중장비들은 MCV 내부의 스펴이 움직여서 유로를 제어함으로써 굴삭기 액추에이터인 붐, 암, 버킷의 위치를 제어할 수 있다.

기존 기계식 NFC 방식에서는 MCV 내부의 스펴을 움직이기 위해서 조이스틱에서 발생된 압력을 사용하며, 조이스틱에 의해 발생된 압력은 유압 호스를 통해서 MCV 내부의 스펴로 전달되어 스펴을 움직인다. 그러므로 스펴의 움직임을 전자화로 변경하기 위해서 기존 MCV와 유압 호스 라인을 제거하고 스펴을 전기신호에 의해 동작시킬 수 있는 EPPR(Electronic Proportional Pressure Reduce) 밸브를 설치하였다. EPPR 밸브는 인가되는 전압에 비례하여 압력을 생성해주는 장치이며, EPPR 밸브에 인가되는 전압의 크기에 따라 스펴의 위치를 제어할 수 있다. 이번 연구를 위하여 적합한 EPPR 밸브로는 Thomas Magnete 社에서 생산되는 제품을 사용하였다. 또 EPPR 밸브를 구동하기 위한 컨트롤 드라이버는 검증된 상용 EPPR 밸브 전용 컨트롤 드라이버를 사용하였다.

EPPR 밸브가 설치된 MCV 내부의 스펴이 움직이는 거리를 측정하기 위하여 LVDT(Linear

Variable Displacement Transducer)를 사용하였다. 특히 EPPR 밸브를 통해 스톱에 가압되는 압력 대비 스톱이 움직이는 길이가 선형적이지 않은 구간(Dead Band)이 존재한다. 선형적이지 않은 구간은 스톱 양단에 설치된 스프링에 의해서 발생되며, 이 구간은 스톱 제어에 있어서 중요한 정보이다. LVDT는 시판되고 있는 In-Cylinder 타입을 선정, 사용하였다. 그림 1은 EPPR 밸브 입력 전압 대비 LVDT 출력을 나타낸다. EPPR 밸브 인가 전압이 약 1.5~3.5 부근에서 선형적이지 않은 구간이 있는 것을 알 수 있다.

MCV에 EPPR 밸브 및 LVDT가 장착될 수 있도록 별도의 블록을 설계, 제작하여 MCV 전후에 설치하였다. 그림 2는 EPPR 밸브 및 LVDT가 새로 제작된 블록에 장착되어 MCV에 설치된 모습이다.

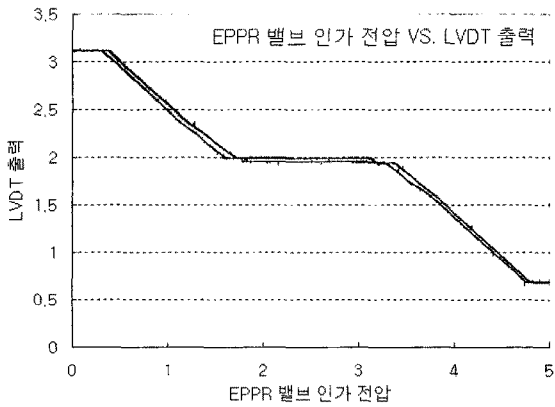
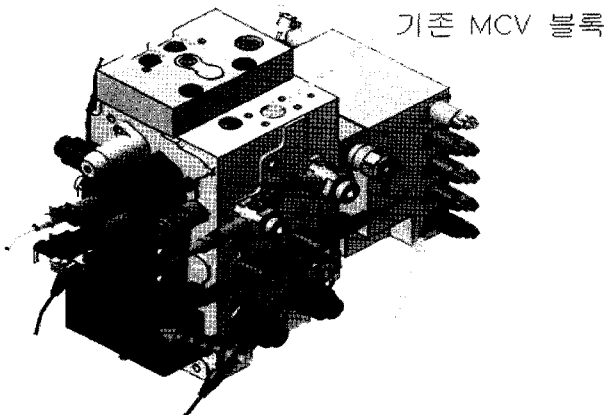


그림 1 EPPR 밸브 인가 전압 대비 스톱 변위량



EPPR 밸브, LVDT 장착을 위한 블록

그림 2 MCV 외관 모습

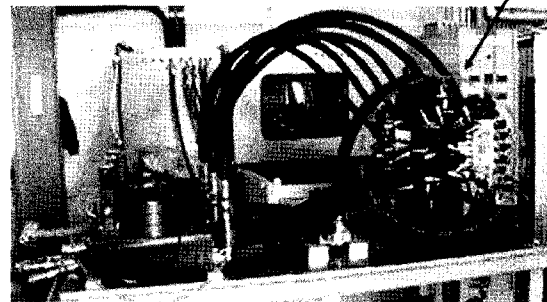
또한 각 액추에이터가 작동할 때 압력을 측정하기 위하여 각 액추에이터 입출력단에 압력계를 설치하였으며, 각 액추에이터로 흘러 들어가는 유량을 측정하기 위해 유량계를 설치하였다.

2.2 벤치 테스트 장비 구성

전기 신호를 바탕으로 구동되는 MCV를 실제 굴삭기에 장착하여 시험하기에 앞서, 장비의 안정성 및 신뢰성을 확보하기 위하여 별도의 벤치 테스트 장치를 구성하여, 기본 특성 시험 및 제어로직 검증 시험을 통하여 신뢰성을 확보하는 시험을 수행한다. 기본 특성 시험으로 각 스톱이 움직임에 따라 MCV 및 각 액추에이터에서 발생하는 상태량(압력, 유량)을 측정하며, 스톱 단독동작 혹은 스톱의 복합 동작 시 발생하는 특성을 파악한다. 이후 장비의 안정성 및 신뢰성이 확보된 후 실제 굴삭기에 적용하여 시험을 진행할 예정이다.

벤치 테스트 장비는 크게 동력부(모터, 펌프), MCV부 그리고 액추에이터부(붐, 암, 버킷)로 구성되어 있다. 그러나 벤치 테스트 장비에서는 각 액추에이터에 해당하는 붐, 암, 버킷 및 각각의 실린더를 설치할 수 없으므로 이에 상응할 수 있도록 릴리프 밸브를 설치하여 부하를 대신하였다. 벤치 테스트로 시험을 진행할 때 실제의 굴삭기 움직임을 알 수 없다. 굴삭기의 움직임을 모사하기 위해서 릴리프 밸브에 흐르는 유량을 측정하는 것이 필요함으로 릴리프 전단에 유량계를 설치하였다. 즉 릴리프 밸브로 흐르는 유량을 적분하여 실린더 단면적으로 나누면 실린더 길이를 계산할 수 있다. 또한 실린더 변위를 바탕으로, 굴삭기 Kinematics를 계산하면 버킷 끝단의 궤적을 알 수 있다. 이를 통하여 벤치 테스트 장비로도 굴삭기 버킷 끝단의 궤적 제어로직을 미리 검증할 수 있다. 그림 3은 벤치 테스트 장비 셋팅 장면을 나타낸다. MCV는 그림의 우측편에 위치하고 있으며, 좌측의 릴리프 밸브와 유압 호스로 연결되어 있다.

MCV, EPPR 밸브, LVDT, 압력계



릴리프 밸브 및 유량계

그림 3 유압 벤치 테스트 장비

2.2 컨트롤러 구성

전자 유압 장치를 구동하기 위하여 벤치 테스트 장비를 구성하였으며, 특히 핵심 요소인 MCV 내부의 스톱 제어를 위하여 소프트웨어 장치를 구성하였다. MCV 내부의 스톱 제어를 위하여 NI 社의 PXI 장비를 사용하여 Real-Time으로 각 액추에이터를 구동하고, 센서 값들을 측정할 수 있으며, LabVIEW 로 컨트롤 프로그램을 제작하여 액추에이터 구동 지령을 생성하고 각 센서로부터 측정된 값을 저장할 수 있다.

LabVIEW 프로그램 구성은 봄, 압, 버킷 개별 제어가 가능하도록 각각의 스톱을 제어할 수 있게 구성되어 있으며, 특히 전자 유압 펌프의 용량을 제어 가능하게 구성하였다. 그리고 각 센서로부터 입력되는 값이 그래프로 표시되며, 입출력 모든 값을 저장할 수 있게 제작하였다. 그림 4는 지능화 굴삭 시스템 소프트웨어 구성을 나타내고 있다. 먼저 호스트 PC에서 스톱에 지령을 내리면 PXI 장비는 지령을 전기적인 신호로 바꿔 EPPR 밸브에 지령을 내린다. 스톱이 움직이면서 발생하는 상태 값들은 각 센서로부터 측정되며, PXI 장비에서 신호를 처리하여 호스트 PC에서 볼 수 있다. 안전을 위하여 In/Out 신호 별로 Isolator를 설치하였다.

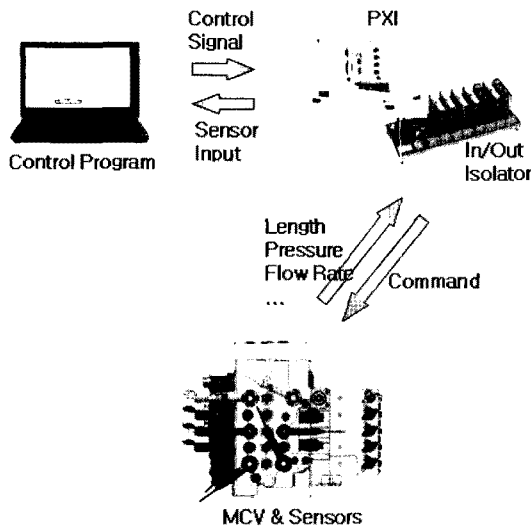


그림 4 컨트롤러 신호 흐름도

또한 벤치 테스트(Bench Test) 시험에서는 실제 굴삭기의 움직이는 모습을 직관적으로 상상하기 힘들기 때문에 굴삭기 실제 모습을 가시적으로 보여줄 수 있게 별도의 프로그램이 제작 되었다. 그림 5는 벤치 테스트 장비를 제어하기 위한 프로그램 중 호

스트 PC에 해당하는 메인 화면을 나타내며, 특히 점선 박스 내부는 실제 굴삭기의 움직임을 알 수 있는 굴삭기 가시화 프로그램 화면을 나타내고 있다. 또한 메인 화면에서는 각종 제어 상수 및 컨트롤 지령 등 여러 가지 상태 값을 입력할 수 있도록 구성되어 있다.

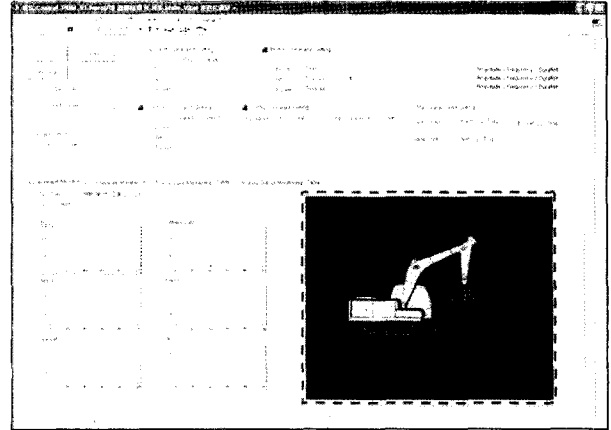


그림 5 벤치 테스트 장비 구동 컨트롤러 메인화면

3. 시뮬레이션을 통한 성능 평가

3.1 굴삭기 모델 구성

버킷 끝단 제어로직 구성을 위해서 유압 시뮬레이션 상용 프로그램인 AMESim을 사용하여 시험과 병행하였다. 시뮬레이션을 통하여 중요 유압 요소의 특성을 미리 파악할 수 있다. 이러한 각 유압 요소별 특성을 고려하여 각 액추에이터 별로 제어로직을 구성하였으며, 이를 통하여 굴삭기 제어로직을 개발할 수 있다. 시뮬레이션 상에서 구현된 최적의 제어로직을 바탕으로 벤치 테스트 장비에서 검증하고, 향후 실제 굴삭기에 적용하여 제어 성능을 평가 비교할 예정이다.

뿐만 아니라 시뮬레이션을 통하여, 현재 NFC 방식에서 PFC 방식으로 변경 시 시스템의 특성 변화를 예측할 수 있으며, 이 결과를 바탕으로 PFC 방식으로 변경 시 발생 예상되는 문제점이나 개선사항을 미리 알 수 있다.

펌프 역시 기존 기계식 펌프에서 전자식 펌프로 변경 시 펌프 제어 방법의 개선이 필요하다. 즉 성능 향상 및 연비 개선을 위해서는 시뮬레이션을 통하여 전자 펌프의 제어방식 개발하여 시험과 비교할 예정이다.

이러한 시뮬레이션을 위해서는 먼저 굴삭기 Kinematics를 이용하여 유압 실린더 길이 변경에 따

큰 버킷 끝단의 위치를 파악할 수 있게 굴삭기 Kinematics를 구성하였다. AMESim에서 굴삭기 Kinematics를 계산하기 위해서 AMESet을 이용하여 굴삭기 모델을 구축하였다. MCV는 각 스펴별로 모델링이 되어 있으며, 실제 시험 데이터를 바탕으로 스펴을 모델링하였으며, 특히 면적선도는 시험 결과를 이용하여 모델링 하였다. 또한 전자 유압 펌프 제어 방식에 따른 성능 변화를 예측할 수 있도록 전자 유압 펌프 모델링이 되어있다. 그림 6은 AMESim으로 모델링된 화면을 나타내고 있으며, 굴삭기 모델, MCV 모델 및 전자 유압 펌프 모델을 나타낸다.

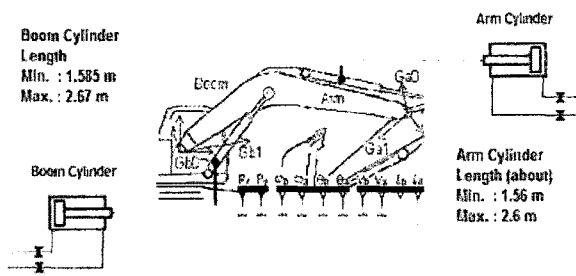


그림 6 (a) 굴삭기 모델

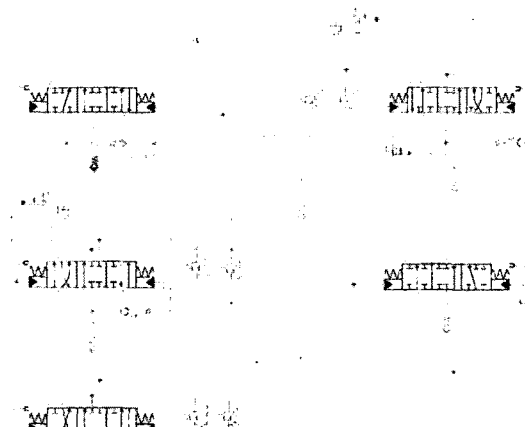


그림 6 (b) MCV 모델

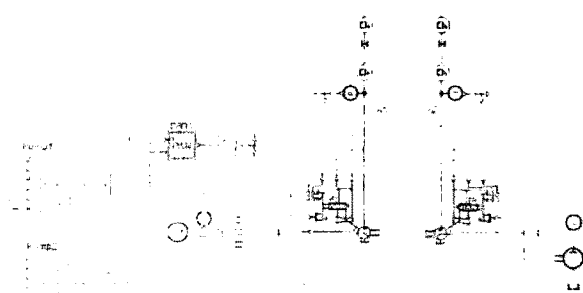


그림 6 (c) 펌프 모델

그림 6 AMESim으로 모델링된 화면

3.2 액추에이터 제어로직 구성

유압 시스템의 경우 많은 비선형성을 포함하고 있기 때문에 최적의 제어로직을 개발하는 것이 필수적이며, 시뮬레이션을 통하여 제어로직을 개발하고 시험을 통하여 제어로직을 검증하는 것이 필요하다. 앞서 모델링된 전체 굴삭기 모델을 바탕으로 굴삭기 액추에이터 제어를 위하여 여러 가지 제어로직을 구성할 수 있으며, 이를 시뮬레이션을 통하여 검증하고 최적화 시킬 수 있다.

제어기의 구성은 크게 분류하면 제어 값 입력부, Inverse Kinematics 부분, Control 부분, Dead-band Compensator 부분으로 나눌 수 있다. Inverse Kinematics 부분은 버킷 끝단 제어기 설계를 위하여 버킷 끝단의 좌표로부터 각 액추에이터의 실린더 길이를 계산할 수 있도록 역 기구학을 계산하는 부분이다. Control 부분은 실제 실린더 길이를 제어하기 위한 제어기가 포함되는 부분이다. 마지막으로 Dead-band Compensator 부분은 EPPR 밸브 입력 전압 대비 실제 스펴 변위에서 발생하는 사용되지 않는 구간(Dead-band)을 보상하기 위한 보상기가 포함되어 있는 부분이다.

향후 최적의 버킷 끝단 제어를 위하여 궤적을 생성하는 부분을 개발할 예정이다. 즉 버킷 끝단이 가야될 경로를 단순히 위치로만 지정하는 것이 아니라 버킷 끝단의 속도를 고려한 궤적을 생성해야한다. 단순히 위치만을 지정하게 되면, 버킷 끝단의 움직임이 자연스럽지 못해 굴삭기 몸체가 흔들려 제어에 나쁜 영향을 미칠 수 있기 때문에 버킷 끝단의 위치 및 속도까지 고려된 궤적의 생성이 필요하다. 그림 7은 굴삭기 제어부 모델링 화면을 나타내며, 각 부분의 기능을 표시하고 있다.

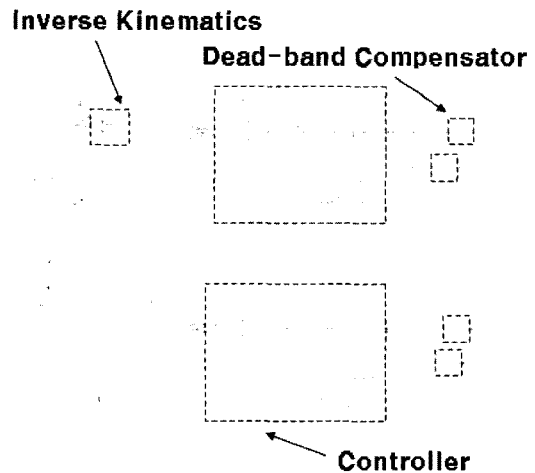


그림 7 제어로직 구성

4. 결 론

본 해설에서는 지능형 굴삭 시스템의 버킷 끝단의 궤적 제어를 위하여 당사에서 진행 중인 사항에 대하여 소개하였다. 굴삭기 궤적 제어의 궁극적인 목적은 무인화 굴삭기 개발이며, 이를 위하여 여러 가지로 연구가 진행되고 있다.

1) 유압 시뮬레이션 상용 프로그램을 이용하여 굴삭기 모델을 수립하였다. 이를 이용하여 시험 이전에 필요한 중요 유압 요소별 특성 파악 및 제어기를 설계하여 새로운 시스템 개발에 사용하고 있다.

2) 과제의 궁극적 목적인 굴삭기 무인화를 위하여 MCV를 전자화 하였으며, 안정성과 신뢰성 확보 및 변경된 시스템에서의 유압 특성 파악을 위해 벤치 테스트 장비를 구축하였다. 향후 실제 차량에 장착하여 성능을 확인할 예정이다.

여러 가지 경제적, 사회적, 기술적 상황으로 볼 때, 무인으로 굴삭이 가능한 굴삭기 개발이 필요하며, 이를 가능하게 할 기술개발이 필요하다. 당사에서는 이러한 기술을 미리 확보하고, 시장에서의 기술적 우위를 선점하기 위하여 기술개발에 힘을 기울이고 있다. 특히 당사는 이러한 기술 확보를 위해 국책 사업(지능형 굴삭 시스템 개발)에 동참하여 여러 기관과 공조해서 연구를 진행하고 있다.

5. 후 기

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

참고 문헌

1) 최중환, 김승수, 양순용, 이진걸, “유압 굴삭기의 궤적 추종을 위한 강인제어”, 제어자동화시스템공학논문집, 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.

[저자 소개]



김기용(책임저자)

E-mail : kiyong.kim@doosan.com

Tel : 031-270-1376

1977년 7월 5일생

2001년 영남대학교 학사 졸업, 2003년 고려대학교 기계공학과 석사 졸업, 두산인프라코어(주) 유압기술팀에서 지능화 굴삭 시스템 개발 업무 수행

[저자 소개]



장달식

E-mail : dalsik.jang@doosan.com

Tel : 031-270-1303

1961년 10월 24일생

서울 대학원 기계설계학과 학사/석사 졸업, 독일 아흐엔(Aachen)대 박사 (Dr.-Ing.) 졸업, 두산인프라코어(주) 기술원 연구 위원 (사)한국 유공압시스템 학회 이사, ISO 전문위원(유공압 부품 및 시스템), (사)기독대학인회(ESF) 이사, 공학박사, 시인

[저자 소개]



안현식

E-mail : hyeonsik.ahn@doosan.com

Tel : 031-270-1358

1972년 11월 27일생

서울대학교 기계설계학과 학사/석사 졸업, 두산인프라코어(주) 유압기술팀에서 지능화 굴삭 시스템 개발 업무 수행, (사)한국 유공압시스템 학회 정회원