

유압구동 백호 작업기 조작 인터페이스개발

A Maneuver Interface Scheme of a Hydraulic Backhoe Manipulator

윤 정 원*, 마누롱 오라리우스, 윤 정 환
(Jungwon Yoon, Manurung Auralius, and Jong-Hwan Yoon)

Abstract: This paper presents an intuitive interface scheme for controlling a hydraulic backhoe, which is a piece of excavating equipment consisting of a digging bucket on the end of a two-part articulated arm, and typically mounted and rotated on the back of a tractor or front loader. The passive levers/joysticks for actuator operations of a hydraulic backhoe are replaced into electric joysticks with a robotic controller, which will generate the end-effector command trajectories of the backhoe through joystick rate control in cylindrical coordinate. The developed backhoe with the hydraulic control system showed the maxim position error of 3 cm with intuitive coordinate operations, which would be helpful for conveniently performing various excavating tasks with natural and effective ways.

Keywords: backhoe, excavator, hydraulic actuators, intuitive interface, joystick

I. 서론

트랙터에 탈·부착이 가능한 백호(backhoe) 작업기[1]는 조작밸브, 붐(boom), 아암(arm or stick), 버킷(bucket), 선회장치(swing)로 구성된 첨단 굴삭기로 토양관리, 발작물수확, 소규모의 건축, 토목등 다목적 작업에 사용 가능하다. 기존의 중장비 굴삭기에 사용되는 작업기와 동일한 동작 구조로 그림 1과 같이 붐, 아암, 버킷을 구동하는 3개의 유압실린더의 변위를 운전 좌석의 조작레버(혹은 조이스틱)를 조절하는 것에 의해 최종적으로 버킷의 위치 및 피치각을 제어하게 할 수 있다. 또한, 메인프레임에 부착된 양단 스윙식(dual swing) 실린더의 조작을 통해 작업기 전체의 선회동작(swing)을 구현할 수 있어 다양한 소형 굴삭 작업을 수행할 수 있게 한다.

중장비 같이 전문자격증을 가지고 오랜 운전 경험을 가진 전문 자격자는 대형 작업기의 조작에 어려움이 없다. 하지만, 노인이나 여성 등을 포함한 일반 사용자가 소형 굴삭작업기를 사용할 경우 중장비의 전문 조작자와 같이 체계적이고 오랜 훈련을 받을 수 없어 작업기의 효율적인 사용이 어렵다. 따라서, 기존의 굴삭기 조작 인터페이스로는 백호작업기를 이용하여 효율적인 굴삭 작업을 수행하는데 한계를 가지게 된다.

조작 작업성 향상을 위해서 전통적으로 유압구동식 백호 작업기 굴삭기의 경우 기계식 레버장치가 사용되었으나, 여러 개의 레버 및 발판의 복잡한 인터페이스로 인해 작업자의 불편함이 크고 쉽게 피곤함을 느껴 최근에는 대부분 유압식 조이스틱 타입을 도입하고 있다. Caterpillar사에서 개발한 조이스틱타입은 2개의 조이스틱을 이용하여 오른쪽 조이스틱의 상하방향은 붐 상승하강으로, 좌우방향은 버킷방향 조절과 매칭되고, 왼쪽 조이스틱의 상하 방향은 암의 상승하강 및 좌우방향은 선회동작조절에 매칭되어 사용되었다. 최근에

나온 미니굴삭기를 포함한 대부분의 작업기는 조이스틱타입을 채용하여 작업기의 조건을 많이 향상시키고 있지만, 조이스틱의 움직임이 각 실린더의 운동과 매칭되어, 사용자 직관적이라고 하기엔 많은 훈련이 필요하다.

최근 굴삭기 연구 경향은 굴삭기용 자동제어장치 개발에 집중되어 있으며, 굴삭기등 기본정보를 입력하면 자동으로 굴삭작업을 수행하도록 하여 작업자의 피로도를 줄이기 위한 방법[2] 및 원격조작을 통한 굴삭기제어 방법[3], 지능제어에 의한 자율제어[4]등이 제시되고 있다. 하지만, 굴삭기의 특성상 굴삭 작업의 복잡성, 작업내용의 변화성, 작업환경의 다양성 등으로 굴삭기의 자동화 및 원격조작을 실제 작업환경에 적용하기는 쉽지 않다.

따라서 굴삭기의 조작 작업성을 향상시키기 위해 직관적 인터페이스를 이용한 굴삭 제어 방법들이 제시되고 있다. 스위치와 레버를 이용한 반자동 제어시스템[5] 및 미리 지정된 궤적의 자동화된 굴삭운동 구현[6]등이 제시되었으나 다양한 작업환경에서 여러 굴삭 작업을 수행하기에는 한계가 있다. 따라서, 직접 제어방식에 의한 조작 인터페이스 방식이 제시되고 있다. 그 예로, 작업기 역기구학을 임베디드 제어기에 삽입하여 조작 레버의 각 방향 운동을 작업기 끝단의 직교좌표운동과 작업레버를 바로 연결시켜 주는 개념들이[7-8] 소개되었으나 실제 구현된 결과는 아직 보고되고 있지 않다. 조이스틱 이외에도 햅틱 인터페이스[9] 및 팔에 착용형 센서를 이용한 직관적 입력장치[10]가 제시되었으나 햅틱장치의 경

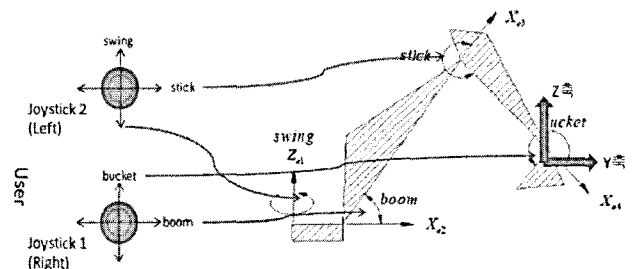


그림 1. 기존 조이스틱 백호작업기 조작방법.
Fig. 1. Common backhoe joystick configuration.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 10. 30., 수정: 2009. 12. 17., 채택확정: 2010. 1. 28.

윤정원, 마누롱 오라리우스: 경상대학교 기계항공공학부 항공기부품
기술연구센터(jwyoona@gnu.ac.kr/auralius@lavabit.com)

윤정환: 대구대학교 자동차산업·기계공학부(jhyoon@daegu.ac.kr)

※ 교육과학기술부 소속 한국연구재단 중점연구소 사업 지원을 받아
수행된 연구임(2009-0094016).

우 작업기와 연동 시 제어의 불안정성을 보였고, 팔의 움직임에 이용한 직관적 입력장치의 경우 운전자가 바뀔 경우 추가 보정(calibration)이 필요할 수도 있다.

주목할 점으로 현재까지 개발된 대부분의 직관적 조작 인터페이스장치는 일반굴삭기를 대상으로 하지만 본 논문에서 개발하고자 하는 백호작업기는 구조적으로 일반굴삭기와는 차별성을 가지고 있다는 것이다. 일반 유압굴삭기는 작업기를 포함하고 있는 베이스가 회전하여 작업자는 항상 작업기를 정면으로 바라보고 있다. 반면 트랙터 등에 부착되는 소형굴삭용 백호작업기는 소형화 및 장착의 편의성 등을 고려하여 사용자 및 베이스를 제외하고 작업기만 회전하는 방식이다. 따라서, 작업자가 항상 작업기 정면을 바라 보지 않아 직교좌표 방식으로는 선회동작 이후의 굴삭 작업을 직관적으로 작업하기에는 어려움이 있다. 또한, 실제 조작장치와 끝단을 연동시키기 위해서는 조작 장치의 입력 값에 따르는 각 유압 실린더의 정밀한 속도제어가 구현되어야 조작기의 입력과 굴삭작업기 끝단이 효율적으로 연동될 수 있지만, 관련 유압 장치의 제어기 구현 내용이 현재까지 제시되고 있지 않다.

본 논문에서는 이상의 문제점들을 개선하기 위하여 유압 구동식 백호작업기 끝단의 움직임을 2개의 전자식 조이스틱을 통해 전통적인 굴삭작업 방식과 유사한 조작 방식을 유지하도록 하면서 원통좌표계(cylindrical coordinate) 매칭을 통하여 백호작업기 구조에 맞는 직관적 조작 방식을 구현하고자 한다. 이를 위해 조이스틱과 실린더제어 밸브 사이에 기구학 및 밸브제어를 포함하는 조작인터페이스회로를 삽입하여 각각 붐, 아암, 버킷실린더 및 선회운동실린더를 조절할 수 있도록 하고자 한다. 또한 조이스틱 입력에 대응하는 끝단의 속도제어가 유압장치 및 각 링크에 연성에 의한 비선형성에 강건 할 수 있도록 위치제어기만 속도제어(rate control) 방식을 채용하는 유압식 백호작업기 조작인터페이스를 제시하고자 한다.

II. 백호조작인터페이스 설계

1. 기구부 설계

백호작업기(backhoe manipulator)는 버킷, 스틱(암), 붐, 스윙의 4자유도로 이뤄져 있으며 버킷, 스틱, 붐은 회전 관절(revolute joint)을 통해서 각각 직렬로 연결되어 있다. 작업기

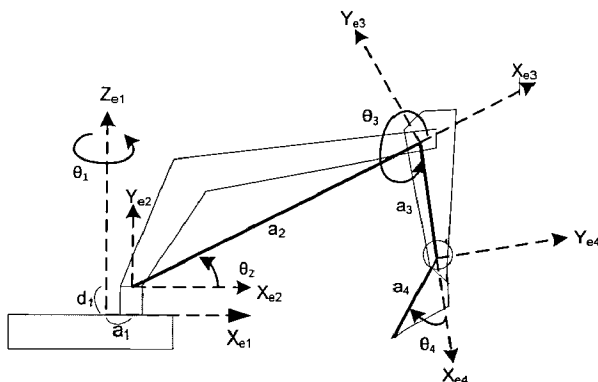


그림 2. 제안된 백호작업기 DH 변수 정의.
Fig. 2. DH parameter definition of the suggested backhoe excavator.

표 1. 백호작업기의 DH변수.

Table 1. D-H parameters of small backhoe manipulator.

| Link | a_i (m) | α_i | d_i (m) | θ_i |
|--------|-----------|------------|-----------|------------|
| swing | -0.045 | 90 | 0.236 | θ_1 |
| boom | 1.1 | 0 | 0 | θ_1 |
| stick | 0.62 | 0 | 0 | θ_1 |
| bucket | 0.331 | 0 | 0 | θ_1 |

표 2. 백호작업기 굴삭성능.

Table 2. Backhoe digging specifications.

| Specifications | 3D Model | Numerical Method |
|----------------|----------|------------------|
| 최대굴삭높이(C) | 1.83m | 1.81m |
| 최대굴삭거리(A) | 1.69m | 1.70m |
| 최대굴삭깊이(B) | 1.02m | 1.01m |
| 최대굴삭반경 | 1.69m | 1.70m |

회전은 운전자 자석이 포함된 고정프레임에 붐이 회전관절로 연결되어 작업자의 회전 없이 작업기만 회전하도록 기구학적으로 설계되어 있다. 각 구동기는 유압식 전자밸브로 제어되는 유압식 실린더에 의해 구동되고, 그림 2는 제작된 백호작업기의 각 변수를 정의하고 있고, 표 1은 이때의 백호작업기의 DH (Denavit-Hartenberg) 값을 나타내고 있다. 제안된 DH 값은 최종적으로 표 2에 나타난 굴삭성능을 만족하도록 선택되었다.

2. 작업공간해석

그림 3(a)는 작업공간 경계점에서의 작업기 형상을 나타내고 있고, 그림 3(b)와 3(c)는 각각 작업공간의 측면도, 평면도를 나타내고 있다. 작업기 각 링크는 스윙은 $\pm 60^\circ$, 붐은 -32° 에서 $+72^\circ$, 스틱은 -143° 에서 -65° , 버킷은 $+11^\circ$ 에서 -113° 의 회전 제한을 가지고 있다. 각 링크의 회전범위 제한 및 3차원 모델링 프로그램(solidworks™)을 이용하여 작업공간 경계점에서의 작업기 형상을(그림 3(a)) 구하였다. 또한 역기구학과 링크 회전범위제한 값을 이용하여 수치적[11]으로 작업공간을(그림 3(b) 및 3(c)) 해석하였다. 수치적으로 구하여진 작업공간 해석 결과의 정확성을 확인하기 위해 3차원 모델링을 통해 확인된 굴삭성능을 표 2와 같이 같이 비교하였고, 성능비교에서 0.5% 이내의 오차를 가지는 것을 확인하였다. 수치적으로 구해진 작업공간은 현재의 끝단위치에서 작업가능한 거리등을 실시간으로 알려줘 지능적으로 작업하는데 도움을 줄 수있다.

3. 좌표계 시스템

기존 작업기 장치에 사용되는 일반적인 조이스틱타입 조작 장치가 그림 1에 나타나 있다. 위 입력장치는 오른쪽 조이스틱의 좌우는 버킷 굴삭 및 버킷 폐도동작으로, 전후는 붐 하강상승동작을 발생시킨다. 왼쪽조이스틱의 경우는 조이스틱 전후는 암을 밀어내고 당기며, 좌우는 선회운동을 발생시키도록 매칭되었다. 하지만 두 개의 조이스틱을 동시에 조작하여 일정각을 갖는 경사면이나 평면을 직선으로 고르는 작업인 일정각 굴삭작업의 경우 두 개의 조이스틱을 동시에 정교하게 조작해야 함으로 작업자의 숙련도에 따라서 작업의 정도와 능률이 크게 차이가 난다. 또한, 숙련된 작업 일지라도 연속반복 작업시 피로에 의해 작업의 정도와 능률이 저

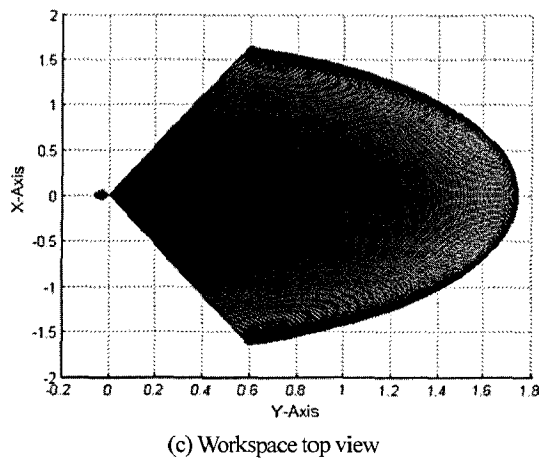
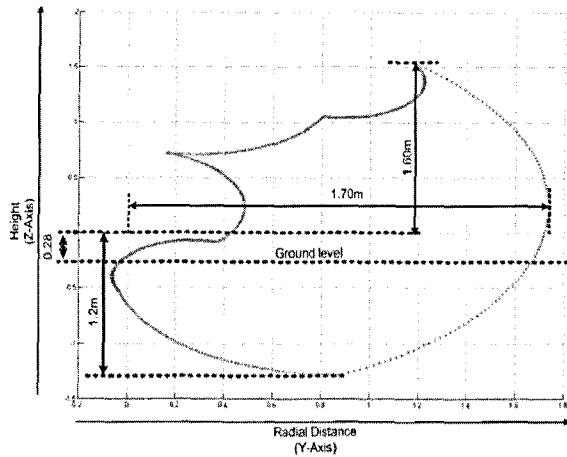
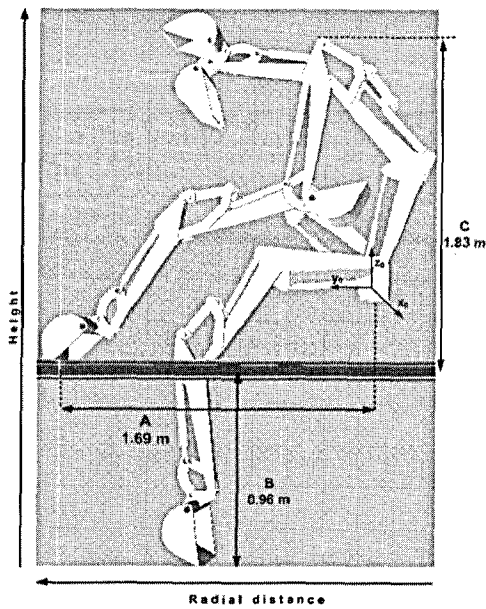


그림 3. 백호작업기 작업공간 (단위: m).
Fig. 3. Workspace of the backhoe excavator.

하될 수 있다.

따라서, 위 문제점들을 해결하기 위해서 조이스틱과 작업기 끝단(end-effector)이 직접적으로 인터페이스 되도록 운전 좌석의 2개의 전기식 조이스틱 움직임이 바로 아암 끝단의

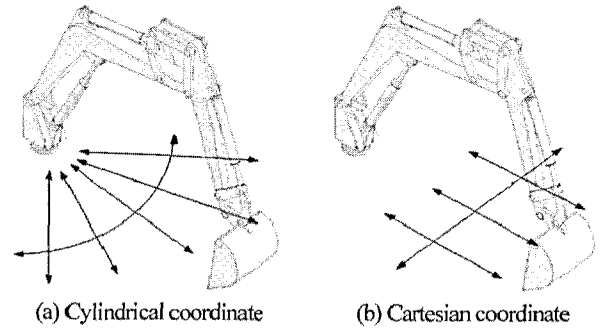


그림 4. 백호작업기 좌표계 비교.
Fig. 4. Comparison of backhoe coordinates.

움직임과 일치하도록 직관적 조작인터페이스 장치를 설계하였다. 그림 4(a)에 나타난 것 같이 운전자 자석과 굴삭작업기가 일체로 되어 선회동작이 동시에 발생하는 일반굴삭기 경우에는 다르게 백호작업기 선회 동작 시 좌석은 고정되어 있고 작업기만 선회동작으로 회전하기 때문에 한 축을 중심으로 대칭해서 움직이는 동작을 발생시키는 원통좌표계를 선택하였다. 백호작업기가 직교좌표계를 사용할 경우 선회동작 이후에 굴삭 작업에서는 거의 사용이 되지 않는 직교좌표 이동을 그림 4(b)와 같이 하게 되어 굴삭 작업에는 적합하지 않게 된다.

따라서 그림 5와 같이 백호작업기 끝단 운동을 원통좌표계 변수들로 표현하고 원통좌표계 백호작업기 끝단 변수 방향과 조이스틱 방향을 일치시켰다. 그림 5(a)는 원점좌표계 원점을 중심으로 원통좌표계반경방향 (r), 원통좌표계회전방향(θ), 원통좌표계 높이방향(z)등 원통좌표계 구성변수(r, θ, z)를 나타내고 있다. 이때 그림 5(b)와 같이 원통좌표계 반경전

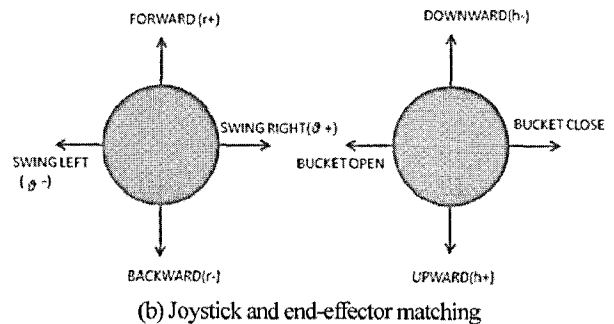
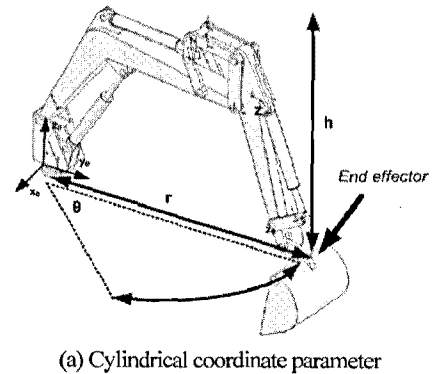


그림 5. 백호작업기의 실린더좌표계 조이스틱 매칭.
Fig. 5. Cylindrical coordinate joystick matching for robotic backhoe.

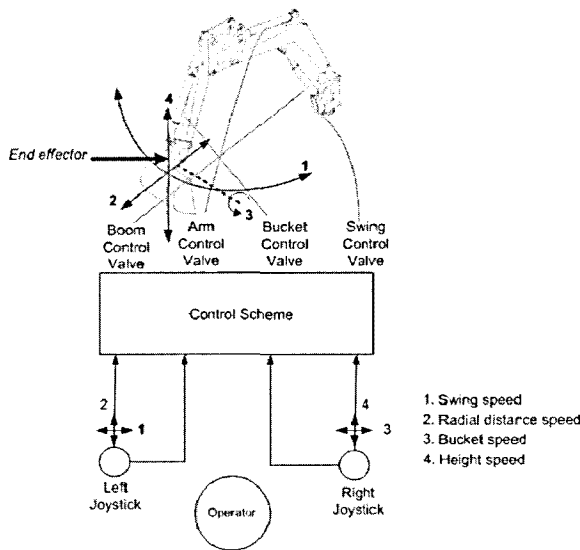


그림 6. 제안된 새로운 백호작업기 조작인터페이스장치 개념.
Fig. 6. Joystick control scheme for robotic backhoe.

진방향은($r+$) 왼쪽조이스틱 전진방향으로, 원통좌표계 반경후진방향은($r-$) 왼쪽조이스틱 후진방향으로 매칭되었다. 원통좌표계 우측회전방향은($\theta+$) 좌측조이스틱 우측방향으로, 원통좌표계 좌측회전방향은($\theta-$) 좌측조이스틱 좌측방향으로 매칭되었다. 원통좌표계 높이 위쪽방향은($z+$) 우측조이스틱 후진방향으로, 원통좌표계 높이 아래쪽방향은($z-$) 우측조이스틱 전진방향으로 매칭하였다. 또한 버킷의 열림은 우측조이스틱 좌측방향으로 버킷의 닫힘은 우측조이스틱 우측방향으로 매칭하였다. 여기서 주의할 점으로 버킷은 상대적으로 선회동작에 비해서 많이 사용되기 때문에 능숙하게 작업기를 효율적으로 사용하기 위해서 우측조이스틱에 배치되었다. 위 조이스틱 매칭방법은 Caterpillar 사에서 사용되고 있는 기존 방법과 최대한 유사하면서 조이스틱과 끝단을 원통좌표계로 인터페이스 되도록 하였다.

따라서 그림 6과 같이 2개의 전기식 조이스틱을 유압식 백호작업기 아암 끝단과 연동되도록 작업자가 각각의 전기식 조이스틱 변위를 조작하여 끝단을 조작할 수 있도록 하였다. 여기서 입력된 조이스틱 변위를 인터페이스하여 작업기 끝단의 실린더좌표계로 제어하기 위하여 조작 인터페이스장치 내에 로봇 기구학을 포함한 제어가 삽입된다. 최종적으로 조이스틱 입력 값에 따르는 끝단의 실린더좌표계 운동을 만족하도록 붐, 암, 버킷, 스윙실린더의 비례제어밸브 입력 전압 값이 출력되어 각 링크의 실린더로 출력되는 백호작업기 조작인터페이스 시스템을 설계하였다.

III. 유압구동 백호작업기 인터페이스개발

1. 하드웨어시스템

기존 유압작업기의 수동식 유압제어시스템은 작업자의 조이스틱 제어에 의해 파이프 압력이 조절되어 컨트롤 밸브의 스펴이 조절되는 방식이다. 따라서 굴삭기의 액츄에이터를 조작하려면 반드시 작업자에 의해 조이스틱이 제어되어야 하고, 수동식 유압방식 구조로는 작업의 자동화가 불가능하다.

그림 7에서는 제안된 전기식 유압시스템 제어방식을 나타

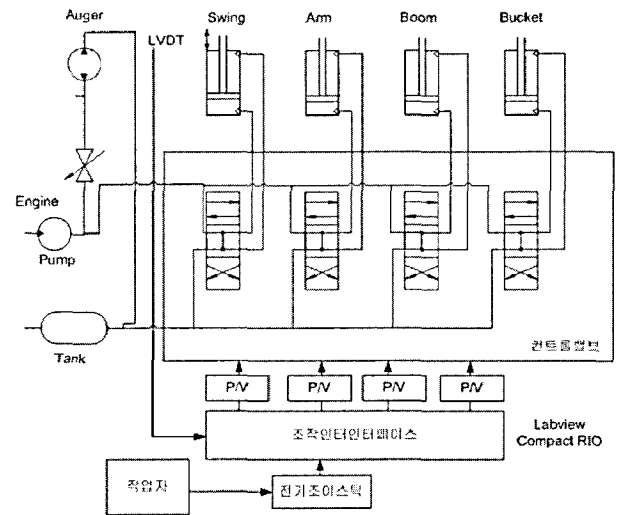


그림 7. 구현된 백호작업기 전자식 유압시스템.
Fig. 7. The electric-hydraulic system of the backhoe.

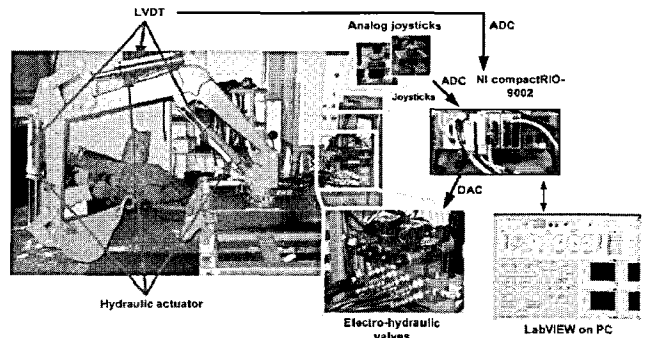


그림 8. 백호작업기 및 전기식 유압시스템이 결합된 조작인터페이스장치.
Fig. 8. Small robotic backhoe prototype.

내고 있다. 작업자가 전기조이스틱을 조작하면 입력된 조이스틱의 위치신호를 받아서 끝단 제어가 가능하도록 비례제어밸브(P/V)를 제어함으로써 요구된 실린더의 동작을 수행하도록 하였다. 제안된 유압제어방식은 기존의 유압시스템의 변경 없이 추가적인 유량비례밸브제어의 삽입으로 조작인터페이스장치의 구현이 가능토록 하였다.

그림 8은 제작된 백호작업기 및 전기식 유압시스템이 결합된 조작인터페이스장치를 나타내고 있다. 전기식 조이스틱 및 전기식 유압시스템의 결합을 위해서 NI사의 compactRIO9002 를 제어기로 사용하였다. ADC를 통하여 조이스틱 4축 및 선형변위센서(LVDT)의 4축이 사용되어 총 8축 값을 측정하고 DAC보드를 통하여 4개의 P/V밸브를 제어하도록 하였다. 또한 CompactRio와 호스트 PC와는 Ethernet 통신으로 데이터통신이 일어나고, 호스트 PC에서는 Labview GUI 인터페이스 프로그램을 이용하여 실시간으로 현재의 제어 상태 파악 및 원하는 제어 모드를 선택 할 수 있도록 하였다.

2. 인터페이스 제어기

그림 9는 전기식 조이스틱 입력에 의한 실린더좌표계 끝단제어방식을 구현하기 위한 제어기 구성도를 나타내고 있다. 그림에서 조이스틱 변위에 비례해서 각 실린더좌표계 축에 대한 사용자 지정 속도를 발생시키는 상위수준제어기, 실

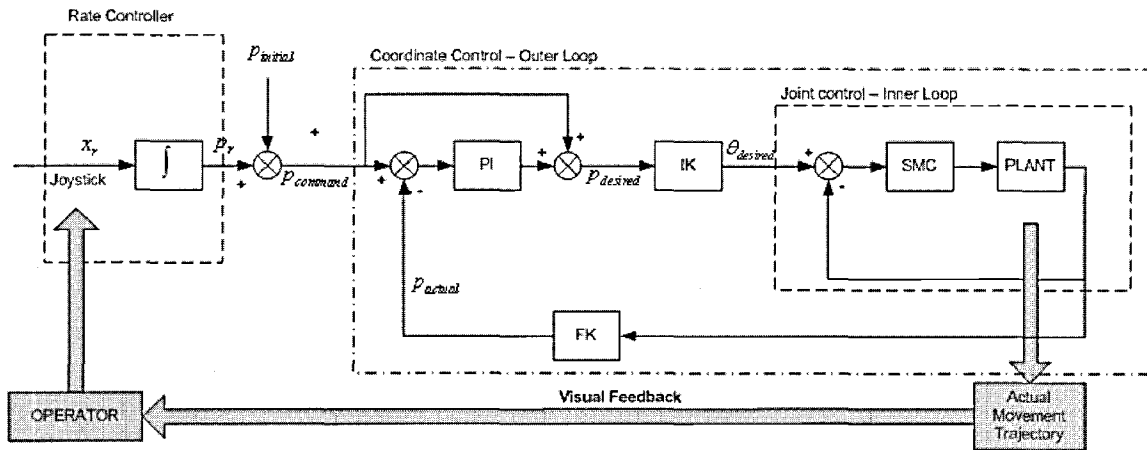


그림 9. 백호작업기 제어시스템 블록다이어그램.
Fig. 9. Control system block diagram of backhoe manipulator.

린더좌표계에서의 피드백제어를 수행하는 중간수준제어기, 구동기를 제어하는 하위수준제어기가 계층적으로 설계되었다. 조이스틱과 작업기 끝단을 매칭시키기 위해서는 각 링크 간의 정확한 속도제어가 구현되어야 한다. 하지만 비례제어 밸브를 이용한 유압실린더 속도제어는 비선형성 때문에 구현하기 어려워, 구현된 제어시스템은 위치제어에 기반하여 조이스틱 변위에 비례하는 작업기 끝단 속도제어기(rate control)를 구현하였다. 또한 작업기 각 링크간의 비선형적인 연성효과를 상쇄하기 위해 끝단 좌표계에서의 서보 위치(outer loop) 피드백제어를 구현하였고, 유압시스템의 비선형성을 상쇄시키기 위해 구동기(inner loop) 강건제어를 구현하였다.

2.1 조이스틱 제어기(상위수준제어)

백호작업기 원통좌표계 끝단을 2개의 2축 조이스틱을 이용하여 끝단의 위치 및 속도를 조절할 수 있도록 제어 명령어를 생성시켜야 한다. 레이트제어기(rate control)[12]는 원적 조작성을 조이스틱을 사용하여 제어하는 일반적인 방법으로 조이스틱의 변위는 실린더좌표계에서의 끝단 속도와 비례하게 된다. 레이트제어기의 장점은 굴삭기와 같이 작업공간이 넓고 상대적으로 속도가 느린 작업기를 제어할 때 효과적이라는 점이다. 레이트제어기 전달함수(transfer function)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$H(s) = G_v/s \tag{1}$$

시간영역에서 방정식(1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y(n) = y(n-1) + G_v T u(n-1) \tag{2}$$

여기서 $u(n)$ 은 입력, $y(n)$ 은 출력, T 는 샘플링을 나타내고, 시간에 대해서 제어기가 입력 값을 축적하는 것을 보여주고 있다. 따라서 현재와 과거의 입력 값 사이에서의 차이가 크면 클수록 출력 값이 증가하게 되고, 조이스틱 위치는 원하는 작업기 속도를 나타내게 된다. 위치제어기반 레이트제어기를 사용할 경우 직접적인 속도제어보다 구현하기 수월하다. 속도제어를 구현하기 위해서는 선형변위 센서를 사용하여 수치적으로 속도를 예측해야 한다. 이때, 많은 잡음이 생성되어 제어에 어려움이 있고, 모델링을 통한 속도 예측(estimation)도 유압시스템의 비선형성 때문에 구현하기 어려운 단점이 있

다. 따라서, 유압시스템의 직접적인 속도 피드백제어보다는 레이트제어기를 상위수준 시스템제어로 사용하였다.

2.2 끝단 좌표계 제어기(중간수준제어)

끝단좌표계 제어가 조이스틱을 이용하여 발생한 실린더좌표계 작업기 생성 궤적을 외란에도 강건하게 추종할 수 있도록 그림 9에 나타난 것 같이 삽입되었다. 끝단 좌표계 제어기는 상위제어기에서 발생한 명령값의 피드포워드 및 PI 제어기가 작업기 비선형성에 대응할 수 있도록 구현되었다. 여기서 IK는 역기구학(inverse kinematics), FK는 순기구학(forward kinematics)을 나타낸다.

2.3 구동기 제어기(하위수준제어)

유압실린더 제어를 위해서 전자식 유압밸브가 사용되었다. 이때, 전자-유압식 서보밸브의 작동 특성은 비선형적이고 정확한 모델링이 어려운 단점이 있다. 따라서 비선형성에도 강건하고, 구현이 간단한 슬라이딩모드 제어기[13]가 유압 실린더구동 제어에 사용되었다.

전자-유압식 서보밸브는 밸브 동력학을 간략히 표현하는 2차 전달함수를 사용하여 표현될 수 있고, 서보밸브 스톱 위치 x_v 와 입력 전압 u 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x_v/u = k_v/(s^2/\omega_v^2 + 2\xi_v/\omega_v + 1) \tag{3}$$

여기서 k_v 는 밸브게인이고, ξ_v 는 서보밸브의 댐핑계수, ω_v 는 서보밸브의 고유주파수이다. 유압구동기에 관해서 슬라이딩 표면은 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma = (d\theta/dt + \lambda)^{n-1} \dot{\theta} \tag{4}$$

여기서 $\theta = \theta_m - \theta_b$, $\dot{\theta}$ 는 추종오차, θ_m 은 실제 측정위치, θ_b 는 입력위치이다. 식(4)에 기반해서 $n=2$ 인 슬라이딩 표면은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = d\dot{\theta}/dt + \lambda\dot{\theta} \tag{5}$$

따라서 최종 제어기는 다음과 같이 정의된다.

$$u = -V \text{sat}(\sigma/\phi) \tag{6}$$

여기서 saturation 함수는 $\text{abs}(s) > \phi$ 인 경우 $\text{sign}(s)$, $\text{abs}(s) < \phi$ 인 경우 s/ϕ 로 각각 정의되고, V 는 전자-유압식 밸브의 최대 전압값을 나타낸다.

IV. 조작인터페이스 장치의 실험결과

본 장에서는 개발된 조작인터페이스장치의 백호작업기에서의 조작성능을 시험 평가하고, 제안된 직관적인 인터페이스의 사용성을 검증하고자 한다. 백호작업기를 조이스틱을 사용하여 실린더 좌표계에서의 반경거리 및 높이방향으로 이동시키면서 실험을 수행하였다. SMC변수는 봄의 경우 $\phi = 0.1, \lambda = 3, V = 2$ 이고, 암의 경우 $\phi = 0, \lambda = 1, V = 2$ 로 세팅 되었고, 끝단 좌표계 PI 피드백제어 변수의 경우 $K_p = 0.3, K_i = 0.1$ 로 선택되었다.

그림 10은 조이스틱 명령 및 실제 끝단 추종케적의 입력 추종능력을 나타내고 있다. 구동기 수준에서의 단위응답에서의 오차 값은 0.01rad 이내였고, 실린더 좌표계에서의 작업기 끝단의 추적오차는 전진 및 상하 방향으로 $\pm 3\text{cm}$ 이내의 오차를 가졌다. 여기서 보다 객관적인 비교를 위해서 전체 이

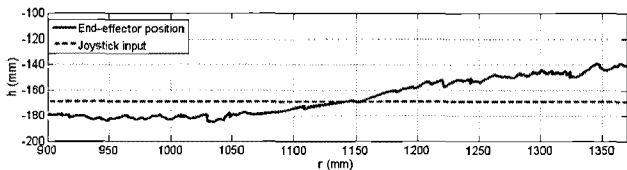
동거리와 그때의 최대 변위오차(deviation)을 비교한 결과 값이 그림 10(a)와 (b)에 나타나 있다. 그림에서 수직 및 수평운동에서 최대오차가 6%이내로 안정적으로 움직이는 것을 확인할 수 있었고, 실험 때의 평균 이동속도는 6m/s였다. 또한 조이스틱의 추종명령에 대해서 경사에서의 작동응답도 비슷한 결과 값을 가졌고, 수직 및 수평운동의 조합으로 다양한 경사운동이 그림 10(c)와 같이 생성될 수 있는 것을 확인하였다.

PI 끝단제어를 포함한 경우와 하지 않은 경우에는 최대 작업 정밀도가 2배이상 ($\pm 6\text{cm}$ 오차) 악화되는 것을 확인하였다. 반면 PID 제어의 D(오차미분) 계인을 추가하였을 경우에는 각 링크관절각 측정값이 아날로그 측정방식이라 잡음을 포함하고 있고 그 값을 수치적으로 미분하여 사용할 경우 잡음이 크게 증대되었다. 따라서 제어 성능을 악화시키는 D 계인은 최종적으로 생략되었다.

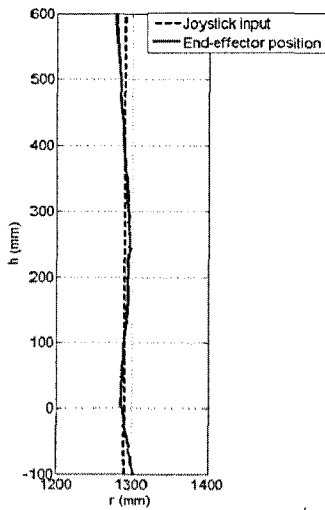
제안된 조작인터페이스 장치를 이용하여 실제 굴삭작업에 적용할 경우 백호작업기 끝단의 추종에러는 사용자의 시각적인 피드백을 통하여 상쇄시킬 수 있어 보다 효과적으로 적용 가능할 것으로 예상된다.

V. 결론

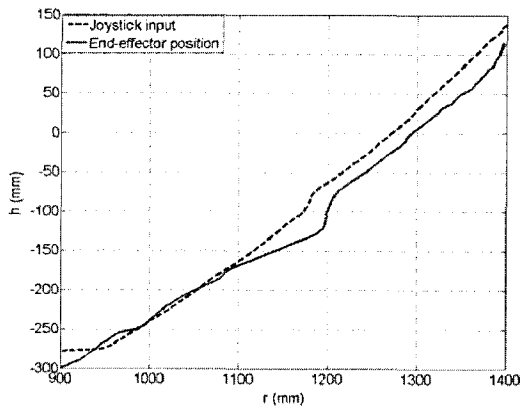
본 논문에서는 원통좌표계(cylindrical coordinate) 매칭 및 2개의 전자식 조이스틱을 이용한 직관적 백호작업기 조작인터페이스 장치를 개발하였다. 기존 수동밸브방식을 조작할 때와 비슷한 조작방식을 가지면서 평탄화 작업같이 동시에 여러 축의 작업을 수행해야만 작업이 가능 한 경우에도 한 축의 조이스틱 조작만으로도 작업 수행이 가능하도록 하였다. 작업기와 조이스틱을 원통좌표계로 인터페이스 시키기 위해서 오른쪽 조이스틱의 전후 운동은 암끝단의 상하운동으로 조이스틱 좌우운동은 버킷의 피치운동으로 매칭되고, 왼쪽조이스틱의 전후운동은 끝단의 전후운동으로, 조이스틱 좌우운동은 선회운동으로 실린더좌표계로 매칭하였다. 또한, 조이스틱과 실린더제어 밸브 사이에 위치기반 레이트 제어가 삽입되어 사용자 직관적으로 초보자도 쉽게 메인프레임, 붐, 아암, 버킷을 제어할 수 있도록 유압구동 백호작업기 조작인터페이스장치를 개발하였다. 실제 구현된 백호작업기의 조작인터페이스를 이용한 성능평가 결과 끝단 정밀도가 3cm 이내로 수렴하고, 다양한 경사면을 직관적으로 생성시킬 수 있는 것을 확인하였다. 개발된 백호작업기 인터페이스를 사용한 굴삭작업의 경우 조작성 증대로 작업 효율성을 향상시킬 수 있고, 기존 조작 방식과 유사하여 기존 사용자도 손쉽게 제안된 조작방법에 적용 할 수 있는 장점이 있을 것으로 예상된다. 하지만 능숙한 굴삭작업자가 제안된 조작인터페이스를 이용하였을 때의 작업효율성에 대해서는 추가 연구가 필요하고, 실제 굴삭작업에서의 안정성을 검증할 필요가 있다. 따라서, 추후 연구과제로 능숙한 굴삭기 작업자 및 초보자를 이용한 사용자평가 연구 및 실제 필드에서의 굴삭성능 검증을 수행할 예정이다.



(a) Horizontal motion(*r*)



(b) Vertical motion(*h*)



(c) Diagonal motion

그림 10. 조작인터페이스장치를 이용한 작업기 끝단 실험.

Fig. 10. Experimental results of End-effector using the developed operation interface.

참고문헌

[1] G Whitaker, Backhoe on track: Mathew Taylor, *Construction week online*, 2009.

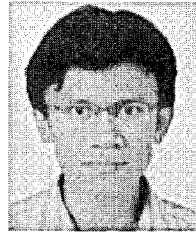
- [2] 이정철, “건설기계의 자동 평탄작업장치 및 방법,” 특허 등록번호: 0021934, 한국, 2000.
- [3] S. E. Salcudean, K. Hashtrudi-Zaad, S. Tafazoli, S. P. DiMaio, and C. Reboulet, “Bilateral matched impedance teleoperation with application to excavator control,” *IEEE Control System Magazine*, vol. 19, no. 6, pp. 29-37, 1999.
- [4] D. A. Bradley and D. W. Seward, “The development, “control and operation of an autonomous robotic excavator,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 73-97, 1998.
- [5] H. Araya and M. Kagoshima, “Semi automatic control system for hydraulic shovel,” *Automation in Construction*, vol. 10, no. 4, pp. 477-486, 2001.
- [6] G. Danko, “Coordinated joint motion control system with position error correction,” US Pat. Application Publication no. 20070168100, 2006.
- [7] 홍예선, “유압굴삭기용 직교좌표형 조작시스템,” 특허등록번호: 0011780, 한국, 1995.
- [8] Hadank et al., “Intuitive joystick control for a work implement, US Patent Application Publication,” no. 5002454, 1990.
- [9] J. Frankel, “Development of a haptic backhoe testbed,” *M.S. Thesis, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology*, 2004.
- [10] D. Kim et al., “Excavator tele-operation system using a human arm,” *Automation in Construction*, vol. 18, no. 2, pp. 173-182, 2009.
- [11] A. Papachristou, H. Valsamos, and A. Dentsoras, “Optimal positioning of excavators in digging processes,” *Innovative Production Machines and Systems Conference*, 2009.
- [12] W. Kim, F. Tendick, S. Ellis, and L. Stark, “A comparison of position and rate control for telemanipulations with

consideration of manipulator system dynamics,” *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 5, pp. 426-436, 1987.

- [13] C. Spurgeon, C. Edwards, and S. Spurgeon, *Sliding Mode Control Theory and Application*, Taylor & Francis Ltd., UK, 1998.
- [14] E. Budny, M. Closta, and W. Gutkowski, “Load-independent control of a hydraulic excavator,” *Automation in Construction*, vol. 12, no. 3, pp. 245-254, 2003.

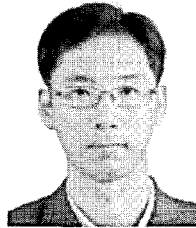
윤정원

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지 제15권 제3호 참조.



마누동 오리리우스

2007년 인도국립대 전자전기공학과(공학사). 2009년~현재 경상대학교 기계항공공학부 대학원. 관심분야는 가상현실, 재활로봇.



윤정환

2003년 포항공과대학교(POSTECH) 기계공학전공 공학박사. 2003년~2004년 두산중공업 기술연구소. 2004년~현재 대구대학교 자동차 · 산업 · 기계공학부. 관심분야는 유압 및 유동제어.