

고속 이앙기의 유압 수평 제어 장치 개발에 관한 연구

Development of a Hydraulic Level Control System for High-speed Rice Transplanting Machines

정연근 정병학 김경욱
정회원 정회원 정회원
Y. K. Jung B. H. Chong K. U. Kim

ABSTRACT

This study was conducted to develop a hydraulic level control system for high speed rice transplanting machines. The control system includes a sensor detecting the tilt angle of the seedling bed, a micro-controller and a hydraulic system consisting of a double acting cylinder, a four-way three-position solenoid valve, a relief valve and a hydraulic pump. The levelling system shared the pump with the existing steering control, resulting in a tandem center circuit for the steering and levelling control systems. Using the input signal from the sensor, the micro-controller determined and generated the output signal to control the cylinder through the solenoid valve to keep the seedling bed always parallel to the water surface regardless of soil unevenness during the transplanting operations.

Both an ON/OFF and a PWM control schemes were tested. When the flow rate was more than 1 l/min in the ON/OFF control, the system showed unstable rolling. However, in the PWM control, the system worked stably although the flow rate was more than 1 l/min. The PWM control showed a better performance when a large difference between the angle and the dead band of the control system occurred. The characteristics of the system response to given tilt angles were predicted by a computer simulation. Both the ON/OFF and the PWM control systems worked well providing that the operating and waiting times were properly adjusted.

Keywords : Rice transplanter, Levelling control, On/off control, PWM control.

1. 서 론

농업 인구가 급격히 감소함에 따라 영농 규모의 확대와 농작업의 규모화 및 대형화의 필요성도 더욱 증대되고 있다. 이러한 경향은 최근 영농회사의 임작업 수탁 경쟁으로 더욱 가속화되고 있는 실정이다. 일반적으로 이앙전 로터리 작업은 성지와 균평 정도가 낮기 때문에 대규모 포장에서는 포장 표면을 완전한 수평 상태로 만들기 어렵다. 더구나, 같은 포장 내에서도 경반의 깊이가 다르

기 때문에 이러한 포장에서는 이앙기의 식부장치를 항상 수평으로 유지할 수 없다. 또한, 이앙기에서는 묘 공급을 위한 베드부가 좌우로 횡운동을 하기 때문에 베드부의 이동 방향에 따라 식부장치가 한쪽으로 기울어진다. 따라서, 한쪽은 묘를 깊게, 다른 한쪽은 묘를 얇게 심어 결주, 뜯묘 등의 원인이 된다. 특히, 대형 이앙기를 이용한 고속 이앙 작업에서는 기체의 좌우 불균형으로 인하여 식부 상태가 더욱 불량해질 수 있다.

이앙 작업의 대형화와 고속화를 위해서는 이러

This study was supported by Technology Development Program for Agriculture and Forestry, Ministry of Agriculture and Forestry, Republic of Korea. The paper was submitted for publication in November 2001, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in December 2001. The authors are Y. K. Jung, B. H. Chong, Graduate Student and K. U. Kim, Professor, Seoul National University. The corresponding author is B. H. Chong, Graduate Student, Agricultural Machinery Engineering Major, Seoul National University, 441-744 Suwon Korea e-mail: <nicebh@hanmail.net>.

한 문제를 해결하여야 한다. 즉, 본담에서는 일정한 균평도를 유지하기 위한 정지 작업의 방법이 개발되어야 하며, 이앙기에서는 식부장치를 항상 수평으로 유지할 수 있는 수평 제어 방법이 개발되어야 한다.

본 연구는 경사각 센서를 이용하여 이앙기의 절대 경사를 검출하고, 이 경사도를 이용하여 식부장치가 항상 수평을 유지할 수 있는 유압 수평 제어 장치를 개발하기 위하여 시도되었으며, 본 연구의 구체적인 목적은 다음과 같다.

1) 경반의 깊이와 포장의 균평도에 관계없이 항상 식부장치를 수평으로 유지할 수 있는 이앙기의 수평 제어 장치를 개발한다.

2) 컴퓨터 시뮬레이션 및 실내 실험을 이용하여 개발한 수평 제어 장치의 성능을 평가하여 실용화 가능성을 평가한다.

2. 연구사

현재 국내에서 생산되고 있는 일부 승용 이앙기에도 식부장치를 수평으로 유지하기 위한 제어장치가 채택되고 있다. 대동공업의 승용 이앙기(S2-600R)에서는 좌우 폴로트와 지면 사이의 높이를 링크 조합장치로 감지하고, 이 링크와 연결된 방향 제어 밸브를 이용하여 묘탑재대가 한쪽으로 기울어지면 그 반대 방향으로 유압 실린더를 작동시켜 항상 지면과 평행한 상태를 이루도록 하고 있다. 즉, 지면 추종형 제어장치를 채택하고 있다. 그러나, 기계식 링크로써 방향제어 밸브를 작동시키기 때문에 구조가 복잡하고 작동 시간이 길다는 단점이 있다. 동양물산의 승용 이앙기(P600)에서는 경사각 센서를 이용하여 묘탑재대의 경사도를 감지하고, 이를 이용하여 전기 모터를 작동시켜 묘탑재대를 항상 수평으로 유지한다. 작동기로서 전기 모터를 이용하기 때문에 제작 단가가 비싸고, 유압식에 비하여 작동 시간이 길다는 단점이 있다. 국제종합기계의 이앙기(RR600DX)에서는 경사각 센서와 유압 실린더를 사용하여 묘탑재대가 지면의 경사에 관계없이 항상 수평 상태를 유지할 수 있도록 하였다. 그러나 일본 안마사의 기술제휴로써 생산되고 있으며 가격도 비싼 편이다. 국내 이앙기의 수평 제어 장치는 대부분 기술 제휴선인 일본 업체의 모델로서 일본에서 생산되고 있는 승용 이앙기의 수평 제어장치와 같은 형태이다. 보다 고급화된 수평 제어 장치는 경사각 센서

와 가속도 센서를 이용하여 이앙기의 경사도를 검출하고, 이 경사 신호를 이용하여 식부장치를 수평으로 제어하는 방식이다. 이러한 방식은 포장에 대한 적응성이 높고, 묘의 식부심을 일정하게 유지할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 이앙기에 대한 수평 제어 기술은 대부분 특허로 보호되어 있기 때문에 이를 모방하여 개발하기는 어려운 실정이다.

농업기계에 수평 제어 기술을 도입한 국내의 연구로서는 트랙터의 부착 작업기를 수평으로 유지하기 위한 연구가 있다. 이 등(1994)은 경사 검출용 센서로서 로터리 포텐쇼미터를 이용하여 로터리 수평 제어 장치와 경심 자동 제어장치를 개발한 바 있으며, 차 등(1997)은 PWM 제어 방식을 채택하여 트랙터 3점 히치에 부착된 작업기를 수평으로 제어할 수 있는 수평 제어 장치를 개발한 바 있다.

3. 재료 및 방법

가. 수평 제어 장치 개발

(1) 수평 제어 메카니즘

본 연구에서 개발한 수평 제어 장치의 기본 원리는 경사각 센서를 이용하여 이앙기의 절대수평 경사각을 검출하고, 이를 이용하여 마이크로 콘트롤러로써 솔레노이드 밸브를 전자제어하여 유압 실린더가 식부장치를 수평으로 제어토록 하는 것이다. 절대수평 상태는 지면의 기울기와 관계없이 항상 포장의 수면과 평행한 상태를 나타낸 것이다. 제어 방식은 식부장치의 경사각이 절대수평 상태를 나타내는 불감대 영역을 벗어나는지 벗어나지 않는지에 따라 솔레노이드 밸브를 작동 또는 정지시키는 ON/OFF 제어방식과 불감대 영역을 벗어나는 정도에 따라 솔레노이드 밸브의 작동 시간을 조정하는 PWM 제어 두 가지 방식으로 하였다.

(2) 제어 알고리즘

그림 1은 ON/OFF 제어방식을 적용한 수평 제어 시스템의 제어 순서를 나타낸 것이다. 수평 제어 시스템이 작동하면 설정된 기준 전압과 불감대의 크기를 검출하고, 경사각 센서를 이용하여 묘탑재대의 경사각을 검출한다. 경사각 센서로부터 전압 형태로 입력된 경사각 신호는 마이크로 콘트롤러에 내장된 A/D 컨버터에 의하여 디지털로 변환된

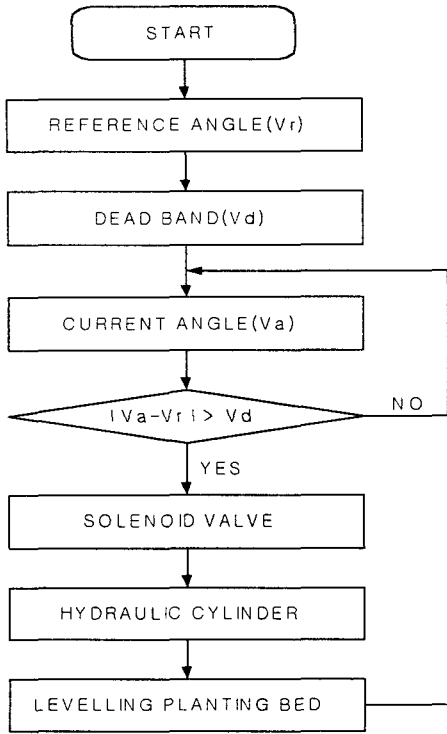


Fig. 1 Sequence of ON/OFF control.

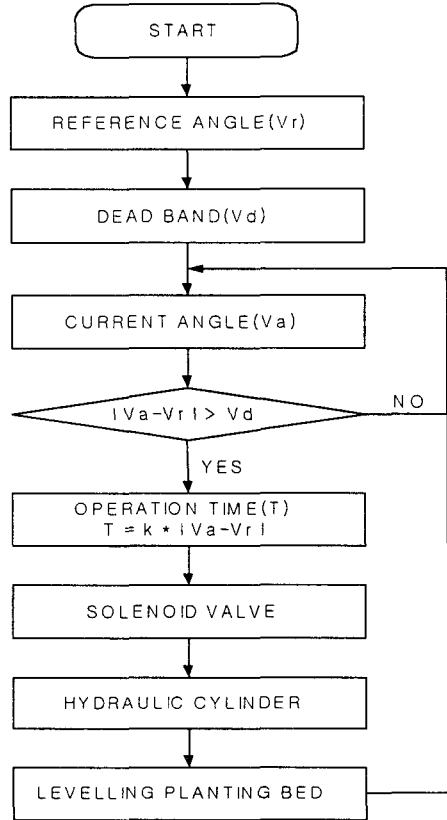


Fig. 2 Sequence of PWM control.

다. 마이크로 콘트롤러에서 검출된 경사각을 기준 전압과 불감대의 크기와 비교하여 솔레노이드 밸브를 ON/OFF 제어하며, 솔레노이드 밸브의 작동 모드에 따라 수평 실린더가 작동하여 묘탑재대가 수평을 유지하게 된다.

그러나, ON/OFF 제어 방식에서는 실린더로 유입된 유량이 일정 수준을 넘는 경우에는 수평 제어가 이루어지지 않고 묘탑재대가 물렁하는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 유압 회로의 유량 수준과 식부장치의 경사 정도에 따라 솔레노이드 밸브의 작동 시간을 제어할 수 있는 PWM 제어 방식을 함께 적용하였다. 그림 2는 PWM 제어 방식을 적용한 수평 제어 시스템의 제어 순서를 나타낸 것이다.

(3) 이앙기

수평 제어 장치를 설치할 이앙기는 L사의 승용 6조 이앙기로 하였으며, 성능 시험을 수행하기 위하여 구조의 일부를 다음과 같이 개조하였다.

식부장치의 상하부 링크를 고정하는 링크 홀더에 유압 실린더를 장착하였다. 링크 홀더는 이앙기 본체에 고정되어 있기 때문에 유압 실린더도

본체에 고정된다. 묘탑재대 양단에 스프링을 걸 수 있는 프레임을 설치하여 오른쪽 프레임의 스프링은 복동 유압 실린더의 오른쪽 로드와 연결하고, 왼쪽 프레임의 스프링은 왼쪽 로드와 각각 연결하였다. 묘탑재대는 피벗축을 중심으로 이앙기 본체에 대하여 회전할 수 있기 때문에 본체에 대한 묘탑재대의 상대 회전각이 증가되면 회전 방향과 반대 방향에 있는 스프링이 작용하여 묘탑재대의 회전을 억제한다. 따라서, 스프링은 묘탑재대의 상대 회전 운동에 대한 억제 역할을 하며, 수평 제어의 보조 역할을 하는 장치라고 할 수 있다.

그림 3은 복동 유압 실린더와 실린더의 양단과 좌우 프레임을 연결한 스프링을 나타낸 것이다. 실린더가 설치된 가운데 부분은 링크 홀더로서 이앙기 본체에 고정되어 있다. 따라서 링크 홀더가 기울어진 것은 이앙기 본체가 기울어진 상태를 나타낸 것이고, 이앙기 본체와 묘탑재대 사이에 상대 각변위가 있을 때 수평 제어 시스템이 작동하게 된다. 또한, 묘탑재대의 경사 방향과 반대 방향

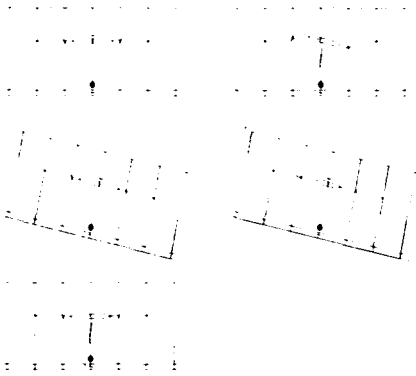


Fig. 3 Spring used for level controlling.

Table 1 Specifications of the experimental rice transplanter

Items	Specifications
Model	GPR 680P
Overall size, cm	295×210×166
Weight, kN	3.43
Rated output, kW/rpm	4.41/1800
Driving mechanism	4WD
Steering mechanism	Front wheel str.
Transmission	For. 4/ Back. 2
Travelling speed, m/s	0.5~2.4
Wheel size, F/R mm	620/800

으로 유압 실린더를 작동시키면 스프링에 복원력이 발생되어 묘탑재대가 수평을 유지하게 된다. 표 1은 본 연구에서 사용된 시험용 승용 이앙기의 제원을 나타낸 것이다.

(4) 유압 회로

시험에 사용된 이앙기에는 동력 조향을 위한 유압 펌프가 설치되어 있기 때문에 이를 이용하여 동력 조향과 직렬로 수평 제어를 수행할 수 있도록 유압 회로를 설계하였다. 그림 4는 수평 제어와 동력 조향을 병행한 제어장치의 유압 회로를 나타낸 것이다. 유압회로를 구성하는 각 장치는 다음과 같이 결정하였다.

(가) 유압 펌프

수평 제어 시스템의 동력은 시험 이앙기의 구조와 기능에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 조향용 유압 펌프에서 얻도록 설계하였다. 시험 이앙기에는 승하강용 유압 펌프와 조향용 유압 펌프 2

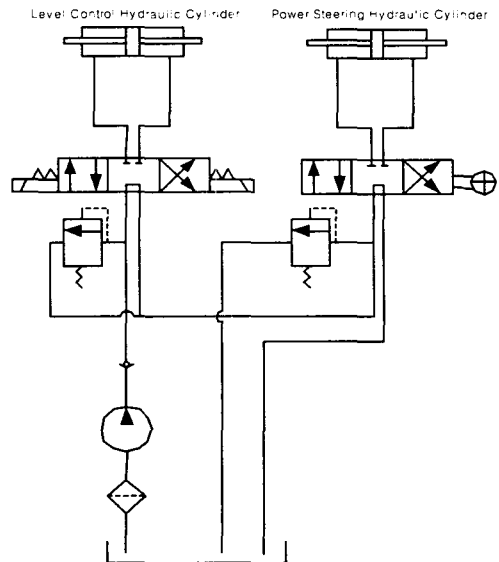


Fig. 4 Hydraulic circuits for the level control and power steering.

개가 있으나, 승하강용 유압 펌프는 묘탑재대를 들어 올리고 내리는 역할뿐만 아니라 이상시 승하강 제어를 함께 수행할 수 있도록 승하강 제어용 유압 밸브와 일체형으로 되어 있기 때문에 사용하기가 어렵다. 그러나, 동력 조향 방식은 기계식과 유압식을 혼합한 형태이므로 조향용 유압 펌프에서 공급되는 유량을 먼저 수평 제어 시스템에서 사용하고, 다음에 리턴되는 유량을 조향 제어에 사용하더라도 유압 시스템에는 무리가 없을 것으로 판단되었다. 조향용 유압 펌프를 이용하여 수평 제어 시스템과 조향 유압 시스템을 직렬로 연결할 경우, 별도의 수평 제어용 유압 펌프가 필요 없으며 제어 시스템이 간단하고 제작비용도 줄일 수 있는 이점이 있다. 표 2는 동력 조향용 유압 펌프의 제원을 나타낸 것이다.

Table 2 Specifications of the steering pump

Items	Specifications
Type	Gear pump
Displacement	7.67 cm ³ /rev
Flow rate	4~11.4 l/min.
Rated pressure	20.6 MPa at 1800 rpm
Max. pressure	24.5 MPa

(나) 유압 실린더

유압 실린더는 좌우 경사를 모두 제어하기 위하여 복동 양로드형을 채택하였으며, 치수는 묘탑재대가 최대로 묘를 탑재한 상태에서 최대로 기울어졌을 때 최소한의 복원 토크를 얻기 위한 작용력과 이 작용력을 기준으로 한 실린더의 유효 면적을 이용하여 결정하였다. 묘탑재대를 복원하는데 필요한 최소한의 복원 토크는 600 N.m이었으며, 실린더를 묘탑재대의 피봇축 상부 400 mm되는 지점에 설치하였을 때 필요한 작용력은 1500 N이었다. 이때 피스톤에 작용하는 유압을 4.91 MPa로 가정하여 유압 실린더의 유효 면적을 구하면 305.5mm²이 된다(정, 2001). 유압 실린더는 보통 로드와 면적에 대한 헤드의 면적비로 나타내므로, 실린더가 설치될 공간과 로드와 안정성을 고려하여 유효 면적비가 1.45인 표준 실린더를 채택하였다. 또한 실린더를 제작할 때의 가공성을 고려하여 실린더와 로드와 직경은 각각 25 mm, 15 mm로 결정하였다. 이때 실린더의 유효 면적은 314.2 mm²가 된다. 실린더를 설치한 높이에서 실린더의 최대 작동 길이는 207.9 mm이었으므로 한계 작동 시간으로서 0.5초를 고려하면 실린더의 최대 작동 속도는 415.8 mm/s가 된다. 그러나 순간적으로 좌우 경사를 모두 제어하는 경우는 실제로 많지 않기 때문에 한쪽 경사만을 고려하여 최대 작동 속도를 210 mm/s로 결정하였다. 실린더의 유량도 한쪽 경사만을 고려하여, 최대 작동 속도를 얻기 위한 최소의 유량은 다음과 같이 결정하였다.

$$Q = 314.2 \times 210 = 65982 \text{ mm}^3/\text{s} \\ = 3.96 \text{ l/min}$$

표 3은 이상에서 결정한 유압 실린더의 주요 제원을 나타낸 것이다.

Table 3 Specifications of hydraulic cylinder

Items	Specifications
Type	Double acting two rod
Cylinder diameter	25 mm
Rod diameter	15 mm
Effective area	314.2 mm ²
Working storke	210 mm
Working speed	210 mm/sec
Min. flow	3.96 l/min

(다) 방향 제어 밸브

복동 양로드형 실린더를 적절하게 작동시키기 위해서는 중립, 좌측, 우측 3가지 작동 모드를 가진 밸브가 요구된다. 따라서 3방향 4포트 방향 제어 밸브를 사용하였으며, 마이크로 컨트롤러와의 연결을 고려하여 솔레노이드 밸브로 결정하였다. 이 솔레노이드 밸브는 중립 상태에서 A, B 포트가 모두 닫혀 실린더에 외력이 작용하더라도 실린더가 움직일 수 없는 즉, OFF 상태가 되며, 중립 상태에서 유량이 탱크로 순환하는 텐덤 센터 방식의 회로를 구성하였다. 스펴이 좌측 또는 우측으로 움직이면 방향 제어 밸브와 연결된 실린더도 이에 따라 좌측 또는 우측으로 작동하는 ON 상태가 된다. 이때 스펴의 위치는 스펴 좌우의 솔레노이드에 인가되는 전압의 ON/OFF 상태에 따라 결정된다. ON/OFF 제어 방식과 PWM 제어 방식에서 솔레노이드의 ON/OFF 여부는 마이크로 컨트롤러에서 검출되는 묘탑재대의 경사각과 절대 수평 상태를 나타내는 기준 경사각을 비교하여 결정한다.

(라) 릴리프 밸브

유압 실린더의 로드가 끝까지 이동한 상태에서 유압 펌프가 계속 작동하면 유압이 급격히 상승한다. 이러한 유압 상승으로부터 시스템을 보호하기 위하여 릴리프 밸브를 설치하였다. 릴리프 압력은 수평 제어 시스템이 안정적으로 작동할 수 있는 6.87 MPa보다는 높고, 조항용 유압 펌프의 최고 유압인 24.53 MPa보다는 낮은 수준인 7.85 MPa로 설정하였다.

(5) 경사각 센서

LG 전선에서 수행한 이양기의 식부 깊이 분포 자료(김 등, 2000)에 의하면 보통 눈에서 좌우 식부 깊이의 최대 차이는 70 mm이었다. 이 때 묘탑재대의 경사각은, 묘탑재대의 피봇축에서 좌우 모서리까지의 수평 길이가 750 mm이므로, $\sin^{-1}(70/750)=5.36^\circ$ 가 된다. 따라서 보통 눈에서 묘탑재대의 최대 경사각을 5° 로 가정하고, 경사각 센서는 최대 측정 범위가 12° 인 것을 선정하였다.

$-12^\circ \sim 12^\circ$ 의 경사 범위에서 경사각 센서의 0~5 V DC 출력은 묘탑재대의 경사각과 선형적인 관계를 나타내었다. 경사각 센서의 입력 전압은 12 V로서 이양기의 축전지를 이용하였다. 표 4는 선정한 경사각 센서의 주요 제원을 나타낸 것이다

Table 4 Specifications of the angle sensor

Items	Specifications
Output	DC 0~5 V
Operating temperature	-20 to 80 °C
Time constant	0.3±0.05 sec
Power requirement	DC 12 V
Range	-12° to 12°

(6) 선형 포텐쇼미터

실린더 로드의 변위를 검출하기 위하여 선형 포텐쇼미터를 사용하였다. 센서의 출력 전압은 센서에서 인가된 전압과 비례하기 때문에 DC 5 V의 전압을 인가하여 0~200 mm의 변위 범위에서 0~5 V의 전압을 선형적으로 출력할 수 있도록 하였다.

나. 수평 제어 장치의 성능 시험

(1) 컴퓨터 시뮬레이션

설계·제작된 수평 제어 시스템의 성능을 안정된 실험 조건에서 평가할 뿐만 아니라 다양한 작동 조건에서도 그 성능이 만족할만한 수준인지를 파악하기 위하여 성능 실험을 수행하였다.

이(1997)의 분방제기의 수평제어장치 개발의 실험 결과에 의하여 논 토양의 경사는 최대 진폭은 실험에서 사용한 경사각 센서의 측정 범위 수준보다 작은 ±10°이고, 주파수는 0.1~0.3 Hz이다. 따라서 이 수준 내에서 묘탑재대의 경사에 대한 주파수 및 진폭에 해당하는 입력 신호를 컴퓨터에서 발생시키고, 수평 제어장치의 제어부로 입력시켜 수평 제어 시스템을 작동시켰다. 그 후 제어부에 입력된 신호와 묘탑재대에 부착된 경사각 센서의 신호와 비교하여 수평 제어 시스템의 동적 응답 특성을 구명하였다.

(2) ON/OFF 제어 성능 시험

기준 경사각과 불감대를 일정 수준으로 설정한 후 묘탑재대를 일정 수준의 경사도까지 기울이고 ON/OFF를 수행하여 시스템의 안정성을 평가하였다.

(3) PWM 제어 성능 시험

일정 수준 유량이 공급될 경우 PWM 제어를 수행하기 위해서는 최대 작동 시간과 대기 시간을 적정 수준으로 설정하여야 안정된 응답 특성을 얻

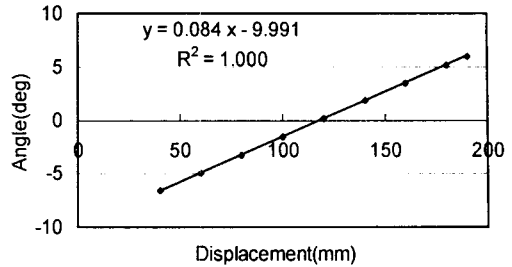


Fig. 5 Displacement of rod vs. tilt angle of seedling bed.

을 수 있다. 따라서 대기 시간과 최대 작동 시간의 수준을 변화시키며, 시스템의 안정성을 평가하였다.

4. 결과 및 고찰

가. 경사각과 실린더 로드 변위의 관계

그림 5는 정적인 상태에서 선형 포텐쇼미터를 이용하여 측정된 실린더 로드의 변위와 경사각 센서를 이용하여 측정된 식부장치의 경사각 사이의 관계를 나타낸 것이다. 실린더 로드의 작동 범위 내에서 변위와 경사각은 선형적인 관계를 나타내었다.

나. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 제어 성능 시험

(1) 계단 응답

그림 6은 불감대를 4 mm, 작동 유량을 9.57 l/min 로 설정하고, 로드의 변위를 계단식으로 85.9 mm에서 177.1 mm로 증가시켰을 때 ON/OFF 제어장치의 응답 곡선을 나타낸 것이다. 유압 실린더는 변위가 입력되었을 때 0.03초 후부터 0.19 초 동안 작동하였다. 즉, 계단 입력에 대한 유압 시스템의 총 응답 시간은 0.22초이었다. 기준 변위가 입력되었을 때 실린더 로드 끝의 위치는 85.7 mm에서 174.6 mm로 증가되었으며, 총 작동거리는 88.9 mm이었다. 실린더 로드의 총오차는 2.41 mm로서 설정한 오차 한계 범위 내인 것으로 나타났다.

실린더의 유효 작동 면적이 314.2mm²이므로, 평균 유량, 실린더 로드의 총 작동거리, 실린더의 유

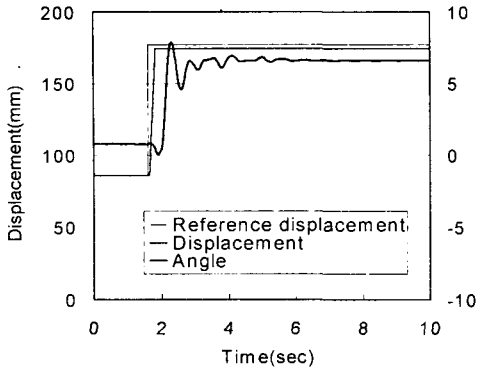


Fig. 6 Response to a step input of linear potentiometer.

효 작동면적을 이용하여 이론적인 작동 시간을 구하면

$$t_{op} = \frac{d_{op}A}{Q}$$

$$= \frac{88.9 \times 314.2}{9.57 \times 10^6} = 0.175 \text{ sec}$$

여기서, t_{op} = 작동 시간, sec

d_{op} = 작동 거리, mm

A = 실린더의 유효 면적, mm^2

Q = 유량, l/min

가 된다. 그러나, 시스템의 실제 작동 시간은 0.19 초이었다. 이는 유압 실린더의 내벽과 피스톤 사이의 누유 및 마찰 등으로 인한 오차로 판단된다.

묘탑재대에 장착한 경사각 센서는 유압 실린더가 작동을 시작한 후 0.11초부터 출력이 변화되기 시작하였다. 이는 경사각 센서의 시정수 및 실린더 로드 양끝에 장착되어 있는 스프링, 롤링부의 마찰 등의 영향 때문인 것으로 판단된다. 경사각 센서의 내부에 충전된 실리콘액의 관성과 실린더 로드 양단에 부착된 스프링의 영향으로 급격한 변화에 대한 유압 실린더의 과도 응답은 크게 일어나지 않았으며, 최대 오버슈트는 입력값의 1.2배 정도이었다.

(2) 주파수 응답

그림 7~그림 9은 실린더 로드의 변위를 주파수가 각각 0.2, 0.3, 0.4 Hz이고 최대값과 최소값이 각각 5.9 mm, 177.0 mm인 사인 함수로써 입력하였을 때 ON/OFF 제어 시스템의 응답 특성을 나타낸 것이다.

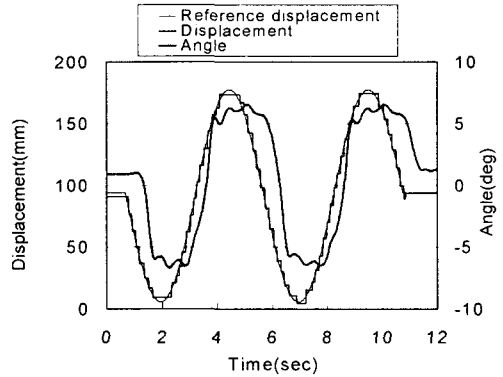


Fig. 7 Response to a sine wave of 0.2 Hz.

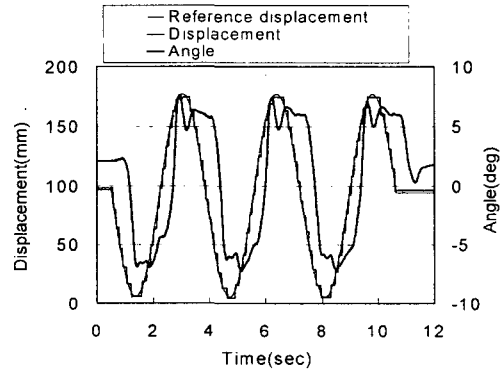


Fig. 8 Response to a sine wave of 0.3 Hz.

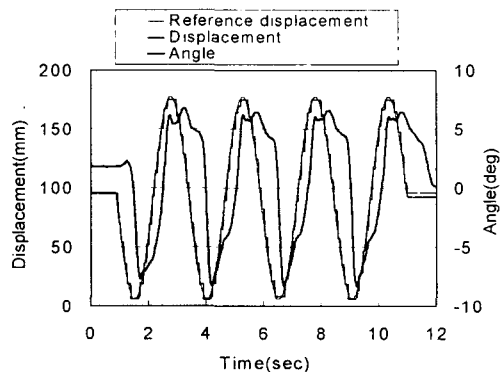


Fig. 9 Response to a sine wave of 0.4 Hz.

사인 함수의 변위 입력에 대한 경사각 센서의 출력은 유압 실린더가 작동을 시작한 후 0.2 Hz의 경우 0.44초, 0.3 Hz의 경우 0.43초, 0.4 Hz의 경우 0.37초부터 변화되기 시작하였으며, 전반적으로

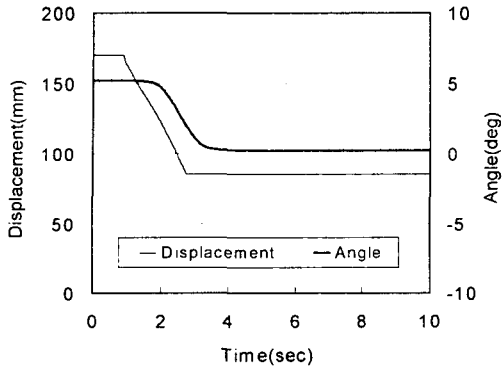


Fig. 10 Response to a tilt angle of 5° with a dead band of ±0.48°, a flow rate of 0.85 l/min and an average oil pressure of 1.25 MPa.

0.27~0.49초의 시간 지연을 두고 선형 포텐쇼미터의 신호를 추종하였다. 따라서 경사각 센서는 묘탑재대의 경사각을 일정 시차를 두고 출력하므로 이앙기의 주행 속도가 일정 속도 이상일 때는 제어 성능이 크게 떨어질 것으로 예상되었다. 또한, 경사각 센서의 응답에서 나타난 오버슈트는 입력 주파수가 클수록 크게 나타났다.

다. ON/OFF 제어 성능 시험

그림 10은 불감대를 ±0.48°, 실린더의 유입 유량을 평균 0.85 l/min, 작동 유압을 평균 1.25 MPa로 설정하였을 때, 경사도가 5°인 묘탑재대가 수평을 회복하는 과정을 나타낸 것이다. 유압 실린더가 작동을 시작한 후 0.71초부터 경사각 센서의 출력이 변화되기 시작하였으며, 유압 실린더가 작동을 멈춘 후 0.58초까지 경사각 센서의 출력이 나타났다. 이때, 유압 실린더 로드의 작동 거리는 82.7 mm이었으며, 작동 시간은 1.85초이었다. 이는 이론적인 시스템 작동 시간 1.83초와 0.02초 정도의 차이이었으며, 실린더의 누유와 마찰로 인한 오차인 것으로 판단되었다.

유량을 증가시키며, 시스템의 안정성 즉, 경사진 상태에서부터 수평을 회복한 후 계속 수평 상태를 유지하는 정도를 평가하였을 때, 실린더에 유입되는 유량이 1.0 l/min 이상이면 수평 제어 시스템에서 롤링 현상이 발생하였다. 이러한 롤링 현상의 원인은 ON/OFF 제어인 수평 제어 시스템이 작동할 때 유압 실린더의 작동 시간이 경사각 센서의 응답 지연 시간보다 작기 때문에 경사각 센서가 묘탑재대의 경사각을 정확히 검출하지 못하기

때문인 것으로 판단된다.

라. PWM 제어 성능 실험

시정수가 0.3초인 경사각 센서를 이용하여 묘탑재대의 경사각을 검출하고 ON/OFF 제어를 수행할 경우 실린더의 작동 유량은 1.0 l/min 보다 작아야 한다. 이 유량에서 작동 시간은, 실린더의 최대 작동 길이를 207.9 mm로 하면

$$t_{op} = \frac{207.9 \times 314.2}{\frac{1 \times 10^6}{60}} = 3.92 \text{ sec}$$

로 제한된다. 이보다 빠른 수평 제어 시스템을 구현하기 위해서는 유량을 증가시켜야 하나 시스템의 불안정 때문에 증가시킬 수 없다. 따라서, 유량이 1.0 l/min 이상인 경우에도 안정적으로 제어를 수행할 수 있는 PWM 제어를 적용하였다.

(1) 작동 시간 결정

조항용 유압 펌프의 유량 범위는 4~11.4 l/min 이다. 따라서 유량이 11.4 l/min 일 경우 최대 작동 시간은 0.34초가 될 수 있다. 즉,

$$t_{op} = \frac{207.9 \times 314.2}{\frac{11.4 \times 10^6}{60}} = 0.34 \text{ sec}$$

이다. 유압 시스템은 유체의 압축성과 내부 마찰 등으로 인하여 일정 크기의 시간 지연을 갖는다. 본 연구에서 개발된 수평 제어 시스템에 대한 작동 지연 시간은 솔레노이드 밸브에 전기적 신호를 주어 실린더에 유량이 흐르게 한 후 실린더 로드의 위치 변화를 측정하여 이 두 신호 사이의 시간 차를 수평 제어 시스템의 시간 지연으로 결정하였다. 이 방법으로 결정한 시스템의 시간 지연은 0.05초이었다. 따라서, 묘탑재대의 경사각에 대한 시스템의 작동 시간은 다음과 같이 결정된다.

$$t_{op} = t_{max} \frac{|A_c - A_r|}{A_{max} - A_r} + t_d$$

- 여기서, t_{op} = 작동 시간, 초
- t_{max} = 최대 작동 시간, 초
- t_d = 시스템 지연 시간, 초
- A_c = 현재 경사각, 도
- A_r = 기준 경사각, 도
- A_{max} = 최대 경사각, 도

만약 최대 작동 시간이 유량에 의하여 결정된 값보다 작게 설정될 경우에는 수평 제어 시스템의 응답 시간은 증가하게 된다.

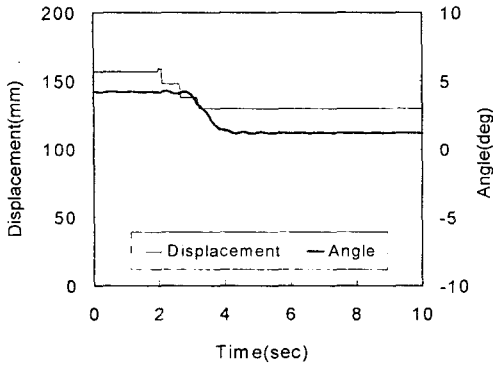


Fig. 11 Response to a tilt angle of 4.2° with the max. working time of 0.2 sec and a waiting time of 0.5 sec.

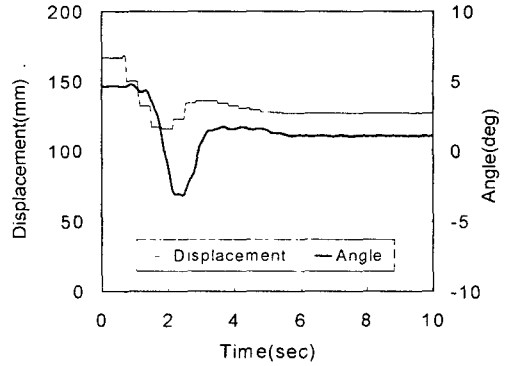


Fig. 12 Response to a tilt angle of 4.6° with the max. working time of 0.2 sec and a waiting time of 0.3 sec.

(2) 대기 시간 결정

경사각 센서의 신호는 유압 실린더가 작동한 후 일정 시간이 지나서 출력된다. 따라서 PWM 제어를 수행하고 난 후 경사각 센서가 신호를 출력하는 데는 일정 시간, 즉 대기 시간이 요구된다. 선형 포텐쇼미터를 이용한 계단 응답 시험에서 지연 시간은 0.4초 이상인 것으로 나타났다.

(3) 대기 시간의 영향

PWM 제어에서 대기 시간의 영향을 구명하기 위하여 최대 작동 시간을 0.2초, 불감대를 $\pm 1.2^\circ$ 로 설정하고 다음 실험을 수행하였다.

그림 11과 12는 각각 묘탑재대를 4.2°, 4.6° 경사지게 한 후 수평이 회복되는 과정을 나타낸 것이다. 이때 최대 작동 시간은 0.2초, 대기 시간은 각각 0.5초, 0.3초이었으며, 실린더에 유입된 유량은 각각 평균 6.1 //min, 7.3 //min이었다. 시스템의 대기 시간을 0.3초로 설정하였을 경우 묘탑재대를 수평으로 유지하는데 필요한 시간은 4.45초이었으며, 대기 시간을 0.5초로 설정하였을 경우에는 1.23초이었다. 최대 작동 시간을 0.2초로 설정하고, 실린더로 유입되는 유량에 따라 적절한 시스템의 대기 시간을 설정하였을 때 묘탑재대가 최초로 기울어진 방향과 반대 방향으로 기울어진 후 다시 수평을 회복하였다. 그러나, 유량을 6.1 //min로 줄이고, 대기 시간을 0.5초로 증가시켰을 경우에는 이러한 현상이 발생되지 않았으며, 수평 제어도 원활히 수행되었다. 따라서 평균 유량을 6.1 //min 정도로 할 경우, 최대 작동 시간을 0.2초로 설정하면, 안정적인 수평 제어를 수행하기 위해서는 0.4초 이상의 대기 시간이 필요한 것으로 나타났다.

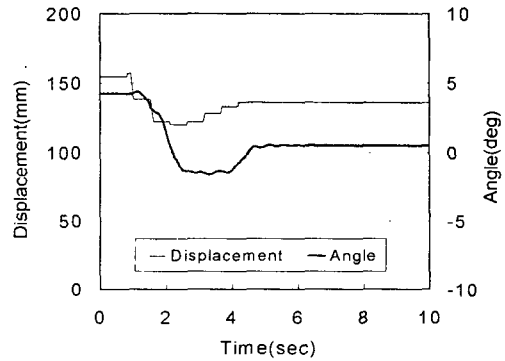


Fig. 13 Response to a tilt angle of 4.2° with the max. working time of 0.4 sec and a waiting time of 0.5 sec.

(4) 최대 작동 시간의 영향

최대 작동 시간과 대기 시간의 상관 관계를 구명하기 위하여 작동 시간과 대기 시간을 변화시키며 실험을 수행하였다. 이때, 불감대는 $\pm 1.2^\circ$ 로 설정하였다.

그림 13은 최대 작동 시간을 0.4초, 대기 시간을 0.5초로 설정하고, 묘탑재대를 4.2° 기울어지게 한 후 수평이 회복되는 과정을 나타낸 것이다. 이때, 실린더로 유입된 유량은 평균 4.7 //min이었으며, 응답 특성은 최대 작동 시간을 0.2초, 대기 시간을 0.3초로 설정하였을 때와 같이 묘탑재대가 최초로 기울어진 방향과 반대 방향으로 기울어진 후 다시 수평을 회복하였다. 또한 작동 시간은 3.38초이었다. 따라서, 평균 유량이 4.7 //min 일 경우, 최대 작동 시간을 0.4초로 설정하면, 안정적인 수평 제

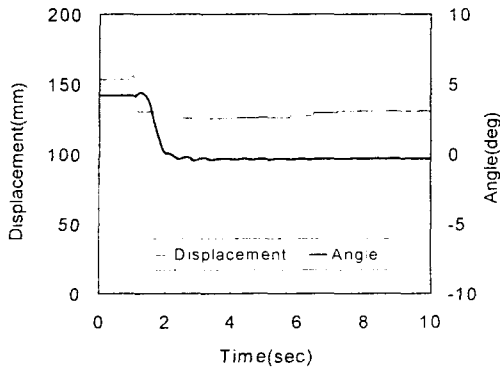


Fig. 14 Response to a tilt angle of 4.2° with the max. working time of 0.5 sec and a waiting time of 0.7 sec.

어를 수행하기 위해서는 0.6초 이상의 대기 시간이 필요한 것으로 나타났다.

그림 13은 실린더에 유입되는 유량을 평균 4.9 //min, 최대 작동 시간을 0.5초, 대기 시간을 0.7초로 설정하고, 묘탑재대의 4.2° 기울어지게 한 후 수평 상태가 회복되는 과정을 나타낸 것이다. 이 경우에는 유압 실린더가 작동한 후 경사각 센서가 적정값을 출력할 때까지 대기하는 시간이 충분하여 최초의 경사와 반대 방향으로 기울어지는 현상은 나타나지 않았으며, 작동 시간은 1.0초이었다. 최대 작동 시간을 0.2초로 하였을 경우와 비교하면, 대기 시간이 증가하였음에도 불구하고 수평을 유지하는데 필요한 작동 시간은 단축되었다. 따라서 최대 작동 시간과 대기 시간을 적절히 조절하여 PWM 제어를 수행하면 유량이 큰 경우에도 수평 제어를 수행할 수 있을 것으로 판단되었다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 고속 승용 이앙기의 묘탑재대를 수평으로 유지하는 데 필요한 적절한 수평 제어 장치를 개발하기 위하여 수행되었으며, 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 이앙기 본체에 고정된 링크 홀더에 복동 양로드형 유압 실린더를 설치하고, 묘탑재대의 좌우 양단과 유압 실린더의 양 로드를 연결하는 스프링을 설치하였다. 이 스프링은 본체에 대한 묘탑재대의 상대 운동을 억제하고 수평 제어 시스템을 보완하는 역할을 하였다.

2) 절대 수평을 나타내는 기준 경사각과 묘탑재대의 경사각을 비교하여 솔레노이드 밸브를 ON/

OFF 제어 또는 PWM 제어함으로써 식부장치를 수평으로 유지할 수 있었다.

3) 선형 포텐쇼미터를 이용하여 수평 제어 장치를 시뮬레이션하였을 때, 수평 제어가 수행되는 동안 경사각 센서의 출력은 유압 실린더가 작동한 후 0.37초부터 변화되기 시작하였으며, 과도 응답시 최대 오버슈트는 입력값의 1.2배 정도 이었다.

4) 0.3 Hz의 사인 함수를 제어 시스템에 입력하였을 때, 경사각 센서의 출력과 묘탑재대의 경사각은 0.34~0.47초의 위상 차이가 있는 것으로 나타났다.

5) 경사각 센서의 출력을 이용하여 ON/OFF 제어할 경우 롤링 현상이 일어나지 않고 안정적인 수평 제어를 수행하기 위해서는 작동 유량을 1.0 //min 이하로 유지하여야 한다.

6) 작동 유량이 1.0 //min 보다 큰 경우에는 PWM 제어가 보다 안정적이었다.

7) PWM 제어에서 평균 유량이 6.1 //min 일 때, 최대 작동 시간을 0.2초로 설정하면, 안정적으로 수평 제어를 수행하는 데 필요한 대기 시간은 0.4초 이상이었다.

8) PWM 제어에서 평균 유량이 4.7~4.9 //min 일 때, 최대 작동 시간을 0.4초 또는 0.5초로 설정하면 안정적으로 수평 제어를 수행하는 데 필요한 대기 시간은 0.6초 이상이었다.

9) 최대 작동 시간과 대기 시간을 조절하여 PWM 제어를 수행하면 유량이 큰 경우에도 적절한 수평 제어가 가능한 것으로 판단되었다.

10) 이상의 결과로써 본 연구에서 개발된 수평 제어 시스템은 실제 포장 실험에서도 유효한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

참고 문헌

1. 김희수, 남주현. 2000. 이앙 자세 실태 조사. I.G 전선.
2. 노현권. 1997. 수도작용 붐방제의 수평제어장치 개발에 관한 연구. 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
3. 이운용, 정도호, 박우풍, 김상철, 권혁태, 윤영일. 1994. 트랙터용 로타리 수평·경심 자동 제어 장치 개발. 농업기계화연구소.
4. 정연근. 2001. 고속 이앙기의 수평제어장치 개발. 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
5. 차진팔, 박우풍, 김상철, 정인규, 정선옥. 1997. 트랙터 작업기의 수평 제어 알고리즘 개발. 한국농업기계학회 하계학술대회 논문집. 2(2):32-40.