

# 트랙터 작업기의 경심 자동제어시스템<sup>+</sup>

## Automatic Depth Control System for Tractor Implement

최창현\*                      나경환\*\*                      김재민\*  
C. H. Choi                      K. W. Na                      J. M. Kim

### Summary

To control depth of tractor implement, an automatic depth control system based upon microcomputer was developed. This system consists of data acquisition system to measure and to record travel speed, draft and depth of the implement, hydraulic system to control the implement depth and 3-point hitch to attach the implement. Program, written in C language, was able to select position control, draft control and mixed control.

To analyze parameters affecting this system, the performance of the system was evaluated through use of computer simulation and verified in soil bin experiments. 3-point hitch was lifted by hydraulic pressure and lowered by implement weight. Dead band was one of the important factors which affect the stability and the accuracy of the system. The system became unstable when the flow rate was increased or when the dead band was decreased.

The position control mode with on-off control showed the great ability to control the implement at the given plowing depth. With the draft control, the tractor load could be reduced, however the plowing depth was changed unexpectedly when the soil was hard and inconsistent. The mixed control could improve the performance of the system to maintain the plowing depth without overload of the tractor.

### 1. 서론

트랙터를 이용한 경운, 정지 작업시 토양의 물리적 상태, 작업기의 경심, 트랙터의 주행속도 등에 따라서 트랙터의 견인효율은 크게 영향을 받는다. 특히 작업기의 경심이 깊게 조정되면 트랙터 견인력의 증가와 타이어의 미끄럼 현상으로 인한 에너지 손실이 발생한다. 반대로 작업기

의 경심을 얕게 조정하면 불완전한 토양 반전과 파괴로 인하여 원하는 작업효율을 얻을 수 없게 된다. 이러한 문제점의 해결 방안으로 농용 트랙터에서는 히치 제어시스템을 장착하여 작업상태에 따라 작업기의 경심을 적절히 조절함으로써 견인효율과 작업효율을 향상시키고 있다.

최근에는 이제까지 주로 이용되어 온 기계유 압식 히치 제어시스템의 보완을 위해 전자유압

+ 본 연구는 1990년도 한국과학재단 연구비지원에 의한 결과임.

과제번호 : 903-1501-003-2

\* 성균관대학교 농업기계공학과

\*\* 대우자동차(주) 기술연구소

식 히치 제어시스템에 대한 연구를 해오고 있으며 대부분의 연구는 시스템의 구성에 중점을 두고 있다. 전자유압식 제어시스템은 트랙터의 주행속도, 작업기의 위치 및 견인력 등을 측정하고 감지된 전기적 신호와 설정된 작업기준을 비교한 후 유압회로를 작동시켜 3점링크 히치를 제어하는 방법이 널리 사용되고 있다. 이 방식의 제어시스템은 제어의 정확성 및 조작성을 향상시켜 작업의 효율을 높이고, 운전자의 조작편이성을 향상시키며, 작업조건에 알맞은 제어가 용이하도록 설계되어 트랙터의 성능 향상에 크게 기여할 것이다. 전자유압식 제어시스템은 작업속도, 작업기의 위치 및 견인력 등을 측정하는 방법, 감지된 신호의 비교 및 처리 방법, 유압회로의 구성, 작업기가 장착된 3점링크 히치의 구조 등에 따라 시스템의 특성 및 성능이 다르게 된다.

제어시스템의 반응속도와 안정성은 작업기가 부착된 링크의 구조, 감지신호에 의한 제어방법, 유압밸브의 특성, 유압모터의 공급유량 등에 의하여 결정된다. Smith 등(1989), Ayers 등(1985)은 불균일한 토양에서 작업기의 운동을 예측하기 위하여 히치 제어시스템의 동적특성을 이론적으로 분석하여 수학적 모델을 구성하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 히치 제어시스템의 성능분석을 하였다. 히치 제어시스템의 성능은 궁극적으로 포장에서 경운 및 정지 작업의 결과에 의하여 평가되어야 한다. Jiang 등(1992)은 로타리 작업기의 위치제어, 견인력제어 및 자세제어를 행할 수 있는 시스템을 구성하여 포장실험을 통하여 시스템의 성능분석을 하였다. 국내에서는 유수남 등(1989)과 류관희 등(1991, 1992)이 제어시스템을 구성하여 포장실험을 통하여 견인력제어 및 위치제어의 성능을 분석하였다.

본 연구는 마이크로 컴퓨터를 이용하여 작업기의 주행속도, 작업위치, 견인력을 측정하여 경심을 자동제어할 수 있는 시스템의 개발에 목적이 있으며 그 구체적인 내용은 다음과 같다.

- 1) 마이크로 컴퓨터를 이용하여 작업기의 주

행속도, 작업경심, 견인력을 측정하고 분석하여 경심을 자동으로 조정할 수 있는 경심 자동제어시스템을 개발한다.

- 2) 컴퓨터 시뮬레이션으로 경심 자동제어시스템의 반응을 분석한다.

- 3) 인공토초에서 경심 자동제어시스템의 실제 작동상태를 검토한다.

## 2. 트랙터 견인력 예측 모델

트랙터의 견인력은 토양의 상태, 작업기의 기하학적 구조, 운행조건에 따라 변화된다. 일반적으로 견인력에 영향을 주는 토양의 변수는 점착력, 내부마찰각, 함수율, 결보기밀도이며 작업기의 변수는 주행속도(V), 작업기의 경폭(L), 경심(D), 중력가속도(g)이다. 콘지수(Cone Index, C)는 토양의 복합적인 변수로서 위에 열거한 토양변수와 상관관계가 있으므로 콘지수를 토양변수로 사용하면 트랙터의 견인력(F)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F=f(L, D, V, g, C) \dots\dots\dots (1)$$

차원 해석법을 이용하여 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{F}{CL^2} = f\left(\frac{D}{L}, \frac{V^2}{gL}\right) \dots\dots\dots (2)$$

작업기의 경폭(L; cm)과 중력가속도(g; cm/s<sup>2</sup>)는 일정하며 토양의 콘지수(C; kPa)는 토양 상태에 의하여 결정되므로 작업시에 조정할 수 있는 변수는 작업기의 경심(D; cm)과 주행속도(V; km/h)이다. 그러므로 일정한 토양에서 작업할 때 트랙터의 견인력(F; N)은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F=K_1+K_2D+K_3V^2 \dots\dots\dots (3)$$

식 (3)의 K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>는 작업기의 기하학적 특성과 토양의 상태에 따라 변화되는 상수이다. Stephens 등(1981)과 Kydd 등(1984)의 연구결과에 의하면 작업기에 의한 견인력은 식 (3)과 같이 작업기의 경심과 트랙터의 주행속도로 부

터 예측할 수 있다. 작업기의 단위면적당 견인력 ( $P$ ;  $N/cm^2$ )을 구하면 트랙터에 작용하는 견인력을 알 수 있으므로 Summers 등(1984)과 Upadhyaya(1984)에 의하면 식 (3)을 변형하여 작업기의 단위면적당 견인력( $P$ )을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P = K_1 + K_2 V^2 \dots\dots\dots (4)$$

작업기의 단위면적당 견인력을 예측할 수 있는 관계식은 많은 연구자들의 실험결과와 동일하므로 별도의 검증실험은 생략하였다. 관계식에 사용된 상수  $K_1$ 와  $K_2$ 는 실험에 사용된 작업기와 토양의 상태를 고려하여 미국농공학회의 표준자료(ASAE D497)에서 2.8과 0.013으로 결정하였다. 본 연구에서는 견인력제어와 혼합제어시 식 (4)에 의하여 예측된 견인력을 경심 제어프로그램의 기준입력으로 사용하였다.

### 3. 경심 자동제어시스템 구성

트랙터의 경심 자동제어시스템은 그림 1과 같이 작업기의 작업속도, 견인력, 경심을 측정하고 원하는 단위로 변환하는 자료 수집장치, 측정된 트랙터의 주행속도, 견인력 및 작업기의 경심을 기준입력과 비교 분석하여 결과를 저장하고 제어신호를 출력하는 마이크로 컴퓨터, 유압 제어 밸브를 작동시켜 작업기의 경심을 조정하는 유압장치, 작업기를 부착하는 3점링크 히치로 구성되어 있다.

#### 가. 자료 수집장치

자료 수집장치는 견인력을 측정하기 위한 하중변환기(Load Cell), 작업기의 주행속도를 측정하기 위한 로터리 엔코더(Rotary Encoder), 작업기의 경심을 측정하기 위한 위치센서, 스트레인 증폭기, A/D 변환기와 계수기(Counter) 등이 포함된 I/O 인터페이스(Interface), IBM-PC AT와 호환성을 가진 마이크로 컴퓨터로 이루어졌다. 작업기의 견인력은 하중변환기에 의하여,

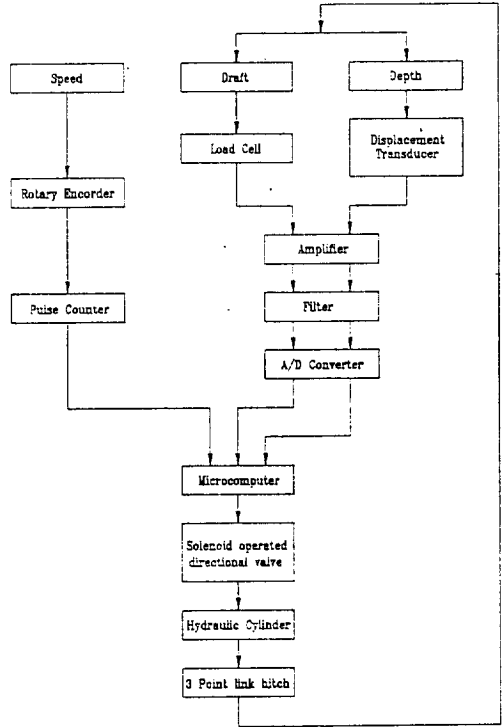


Fig. 1. Block diagram of automatic depth control system

경심은 위치센서에 의하여 각각 전기적 신호로 변환되고 스트레인 증폭기에 의해 증폭된 후 A/D 변환기를 통하여 디지털 값으로 변환되어 컴퓨터에 입력되었다. 작업기의 주행속도는 로터리 엔코더에서 발생하는 펄스를 계수하여 측정하였다. 자료 수집장치의 프로그램은 C 언어를 사용하여 작성되었다.

#### 1) 경심 측정

작업기의 경심 측정을 위하여 日本 共和電業의 위치센서(모델 DT-50A)를 사용하였다. 위치센서는 4개의 스트레인 게이지(Strain Gage)를 사용하며 최대 50mm까지의 위치변화를 감지할 수 있다. 본 연구에서 이용한 인공토조 실험대차에 부착된 3점링크 히치는 작업기를 장착하였을 때 최대 수직변위가 약 850mm 정도이므로, 위치센서는 인공토조의 실험대차에 부착된 3점링크 히치의 히치점 가까이에 설치하였다(그

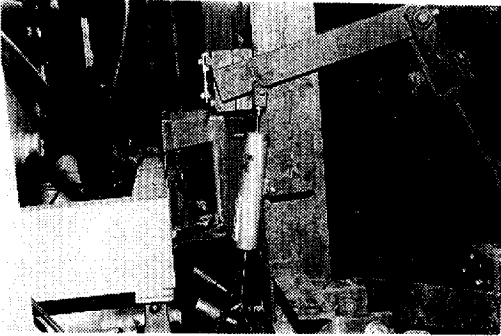


Fig. 2. Position sensor to measure implement depth

림 2).

2) 견인력 측정

인공토조의 실험대차에 설치된 최대용량 4.9 kN의 하중변환기(日本 共和電業 모델 LU-200 KE)는 슬라이딩 베어링의 선형운동에 의하여 작업기에 작용하는 수평방향의 견인력만을 측정하도록 설계되었다. 하중변환기는 4개의 스트레인 게이지가 휘스톤 브리지(Wheatstone Bridge)를 구성하고 있으므로 주위 온도의 변화에 대한 영향은 없으나 일정한 전압의 공급이 필요하다.

3) 주행속도 측정

작업기의 작업속도를 측정하기 위하여 그림 3과 같이 인공토조의 실험대차가 주행하는 레일 하단부에 지름 124mm의 보조바퀴를 설치하고 미국 Disc Instruments의 로터리 엔코더(모델 EC 81-1024-5)를 사용하여 보조바퀴의 회전속도를 측정하였다. 로터리 엔코더는 매 회전시 1,024개의 TTL 펄스(pulse)를 발생하므로 이 펄스의 수를 계수하여 주행속도를 구하였으며 그 관계식은 식 (5)와 같다.

$$V = 3.5156 \times 10^{-6} \pi D N / t \dots\dots\dots (5)$$

여기서,

V : 작업기의 주행속도(km/h)

D : 보조바퀴의 지름(124mm)

N : 계수된 펄스의 수

t : 펄스의 측정간격(sec)

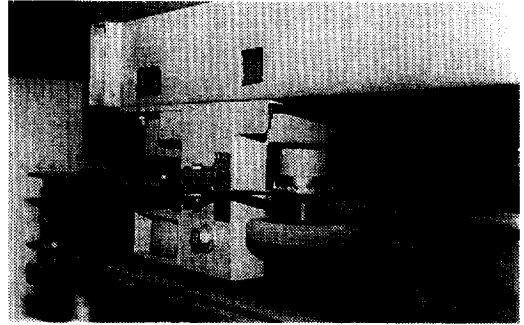


Fig. 3. Rotary encoder to measure travel speed

4) I/O 인터페이스

각 측정센서에서 감지된 신호를 변환하고 제어용 마이크로 컴퓨터에 입력하기 위하여 한도 엔지니어링의 I/O 인터페이스 시스템인 Lab 88 00을 사용하였다. I/O 인터페이스 시스템에는 32 채널의 12비트 A/D 변환기, 2채널의 D/A 변환기, 64채널의 디지털 입출력 포트(I/O Port), 타이머, 3채널의 16비트 펄스 계수기(Pulse Counter)가 포함되어 있다.

하중변환기와 위치센서의 출력신호는  $\mu V$  단위로 매우 미세하므로 스트레인 증폭기(日本 共和電業 모델 DPM-311A)를 통하여 0~5V 사이로 증폭시킨 후 A/D 변환기에 입력되었으며 로터리 엔코더에서 발생한 디지털 신호는 펄스 계수기에 입력되었다. 마이크로 컴퓨터는 측정된 작업기의 주행속도, 견인력 및 경심을 분석하여 작업기에 작용하는 견인력 변화와 경심 변화에 따라 유압장치의 제어밸브를 작동시킨다.

전자조작 방향제어밸브의 좌우 솔레노이드를 구동시키기 위해 2개의 디지털 출력채널에 포토커플러를 연결하여 솔레노이드의 스위치 작용을 할 수 있게 하였으며 컴퓨터의 신호에 의하여 솔레노이드가 작동되어 유압밸브를 조작하도록 하였다.

나. 3점링크 히치 와 유압장치

유압장치의 밸브는 탠덤중앙형, 3위치 4포트, 스프링 작동식, 24V 솔레노이드 작동형을 사용하였다. 탠덤중앙형은 밸브스풀의 위치가 중립

일 때 펌프의 접속구와 오일 탱크의 접속부가 스플의 동공부에 의해 연결되어 펌프가 무부하 상태로 운전되고 실린더의 접속구는 닫혀 실린더는 임의의 위치에 고정된다. 밸브스풀은 좌우 솔레노이드에 의하여 작동되고 스프링에 의하여 중립으로 복원되며 밸브스풀의 위치에 따라 통과 유량을 조절할 수 없는 ON-OFF 형태의 밸브이다.

유압실린더는 단동식으로 공급 유압에 의해 상승되고 작업기의 자중에 의해 하강된다. 유압 펌프와 실린더에 압력 제어밸브를 설치하여 유압의 과도 상승을 방지하였고 작업기의 상승 및 하강시 부하압력에 관계없이 유량을 일정하게 유지하기 위해 압력온도 보상형 체크밸브가 달린 유량제어밸브를 설치하였다. 유압장치의 각 구성품 간의 연결은 직경이 1.22cm(0.5in)인 고압호스를 사용하였다. 유압장치의 회로도에는 그림 4와 같다.

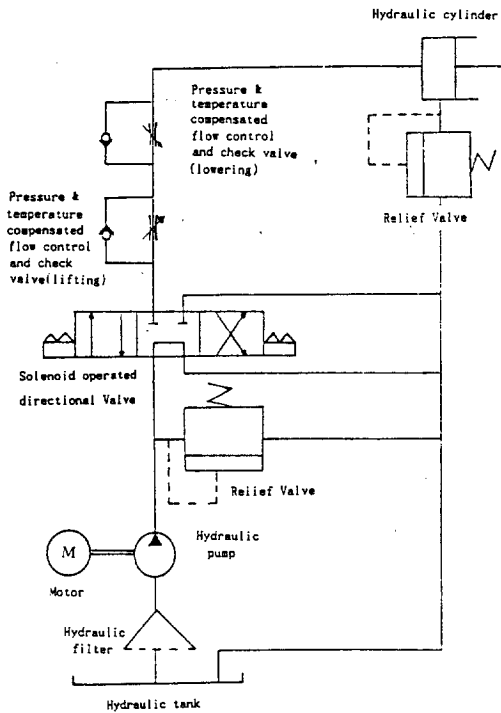


Fig. 4. Hydraulic circuit for hitch control

3점링크 히치는 D사의 28마력 트랙터에 장착된 JS11형을 사용하였고 작업기는 동력경운기용 6마력 쟁기를 사용하였다.

#### 다. 경심 제어프로그램

경심 제어프로그램은 일정한 경심을 유지하는 위치제어, 작업기에 과도한 견인부하가 걸리는 것을 방지하기 위한 견인력제어, 그리고 두 형태가 혼합된 혼합제어 중에서 사용자가 임의로 제어방법을 선택할 수 있도록 작성되었다. 원하는 작업경심, 견인력 예측모델에 의해 결정된 기준 견인력, 오차의 허용범위(Dead band)를 각각 입력하고 자료 수집장치로 작업기의 주행속도, 경심 및 견인력을 측정, 기준입력과 비교하여 신호의 차이가 허용범위 내에 포함되면 작업상태를 적정, 포함되지 않으면 과도 또는 부족으로 나타내고 제어방법에 따라 전자식 방향제어밸브의 좌우 솔레노이드를 구동하였다. 상승시에는 디지털 출력 채널 1만 ON으로, 하강시에는 채널 2만 ON으로, 중립시에는 채널 1과 2 모두를 OFF로 출력하여 솔레노이드를 구동하도록 하였다. 제어프로그램은 C 언어로 작성되었으며 흐름도는 그림 5와 같다.

#### 4. 이론적 분석

작업기의 경심을 조정하기 위하여 유압 제어 밸브를 작동시킬 때 밸브의 특성, 유압모터의 유압 공급량, 작업기가 부착된 링크의 구조, 제어방법에 의하여 경심 자동제어시스템의 반응속도와 안정성이 결정된다. 유압장치의 이론적 분석과 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 시스템의 반응속도와 안정성을 검토하므로써 작업기의 상승 및 하강시 진동없는 정확한 제어를 할 수 있도록 유량의 변화에 따른 허용범위(Dead band)를 결정하였다.

가. 밸브스풀의 변위, 유량과 부하유압의 관계  
 밸브의 부하 유량  $Q$ 는 밸브 변위  $X$ 와 부하 압

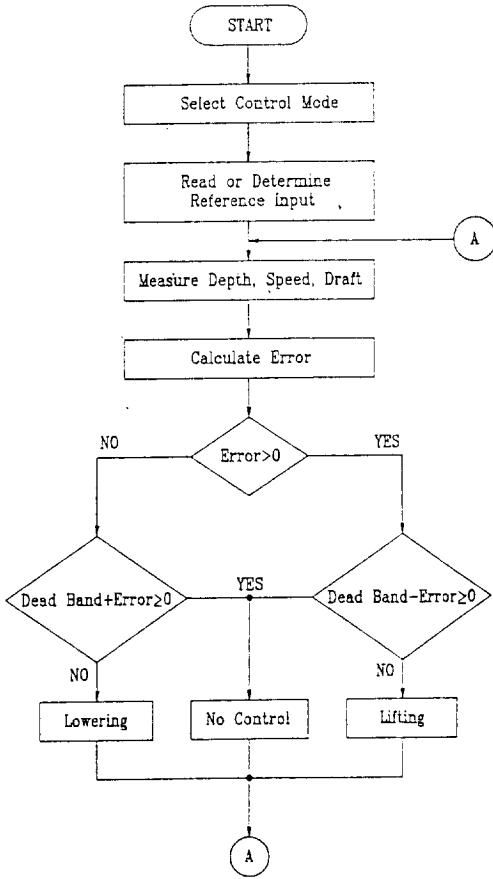


Fig. 5. Flowchart for three-point hitch control

력  $P_L$ 의 함수로 표시된다.  $Q = f(X, P_L)$ 는 일반적으로 비선형 방정식으로 표시되나 밸브의 동특성을 해석하는 데는 방정식을 선형화하여 해석한다. 본 시스템에 사용한 밸브는 밸브스풀의 위치에 따라 유량을 조절할 수 없는 ON-OFF 밸브이고 작업기의 상승 및 하강시 압력온도 보상형 체크밸브에 의하여 부하압력에 관계없이 유량을 일정하게 유지하므로 유량  $Q$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Q = Q_m \text{ sign}(X_v) \dots\dots\dots (6)$$

여기서,

- sign( $X_v$ )    +1 : 상승
- 0 : 중립
- 1 : 하강

$Q_m$  : 무부하 상태의 유량

$X_v$  : 밸브 스푼의 변위

연속 방정식에 의해 유압 피스톤의 운동에 의한 유량, 유압회로 내의 압축 유량, 유압회로의 누출 유량의 합은 밸브를 통과한 유량과 같게 나타난다.

유량의 누출과 압축은 매우 작다고 가정하면, 피스톤의 변위( $X_p$ )는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_p = \frac{Q \text{ sign}(X_v)}{A} t \dots\dots\dots (7)$$

여기서,

$A$  : 피스톤의 단면적( $\text{cm}^2$ )

$t$  : 시간(sec)

나. 피스톤의 변위와 경심

록 샤프트 및 리프트 암, 리프트 링크, 하부 링크, 작업기는 4절 링크기구로서 피스톤의 변위와 경심의 관계를 기구학적 분석에 의해 구할 수 있다.

그림 6은 3점링크 히치의 기구학적 관계를 보이며 표 1은 작업기의 기구학적 분석에 사용된

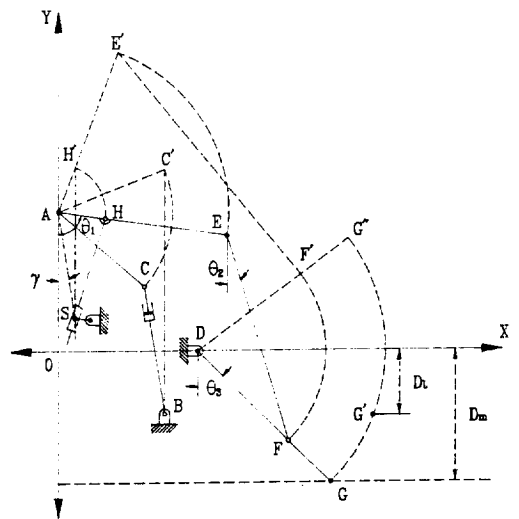


Fig. 6. Schematic diagram of three-point hitch link system

Table 1. Description of symbols and dimension of 3-point link hitch system (when plow is in the lowest position)

Symbol	Definition	Dimension(mm)
A(A <sub>x</sub> , A <sub>y</sub> )	coordinates of hitch hinge point	( 0, 390)
B(B <sub>x</sub> , B <sub>y</sub> )	coordinates of hydraulic cylinder hinge point	( 90, -130)
C(C <sub>x</sub> , C <sub>y</sub> )	coordinates of rockshaft crank point	( 75, 324)
D(D <sub>x</sub> , D <sub>y</sub> )	coordinates of lower link hinge point	(120, 0 )
E(E <sub>x</sub> , E <sub>y</sub> )	coordinates of upper link end point	(288, 357)
F(F <sub>x</sub> , F <sub>y</sub> )	coordinates of lift link end point	(467, -152)
G(G <sub>x</sub> , G <sub>y</sub> )	coordinates of lower link end point	(787, -297)
$\overline{AC}$	length of rockshaft crank	97.9
$\overline{AE}$	length of rockshaft lift arm	289.5
$\overline{BC}$	distance between point B and C	454.2
$\overline{DF}$	distance between point D and F	378.8
$\overline{DG}$	length of lower link	731.9
$\overline{EF}$	length of lift link	539.5
D <sub>m</sub>	maximum depth of implement	
S	position sensor	

기호와 제원을 나타내고 있다. 경심을 토양 표면에서 플라우셔에 끝까지의 수직거리로 정의하고, 토양이 평탄하다고 가정하면 작업기가 하강한 최저위치(G)에서 경심은 최대경심 D<sub>m</sub>이 된다. 유압 피스톤의 변위(X<sub>p</sub>)는 다음의 관계식으로 표시할 수 있다.

$$X_p = \overline{BC'} - \overline{BC} \dots\dots\dots (8)$$

$$(E_x' - A_x)^2 + (E_y' - A_y)^2 = \overline{AE}^2 \dots\dots\dots (9)$$

$$\overline{E'F'} = \overline{EF} = \sqrt{(E_x' - F_x')^2 + (E_y' - F_y')^2} \dots\dots\dots (10)$$

식 (9)와 식 (10)으로부터 E<sub>x</sub>'와 E<sub>y</sub>'를 구할 수 있으며 작업경심 D<sub>L</sub>은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_L = D_m - (G_y' - G_y) \dots\dots\dots (11)$$

식 (8)~식 (11)을 정리하고 유압피스톤 변위와 경심과의 관계를 근사화하여 식 (12)로 표시하였다. 유압피스톤 변위가 0~125mm일 때 하부링크의 작업기 연결부의 수직변위는 0~750mm이다.

$$D_L = D_m - K X_p \dots\dots\dots (12)$$

여기서,

K : 상수(K=750mm / 125mm=6)

다. 작업기의 변위와 경심센서

작업기 끝의 변위에 대한 센서의 변위(L)를 알기 위해 부착된 센서와 상부링크를 4절 링크 기구로 고려할 수 있다. 센서는 시스템에 고정되어 상하운동만을 하도록 설계되어 있다. 센서의 변위 L과 상부링크의 각변위 θ<sub>1</sub>의 관계는 다음과 같다.

$$\theta_1 = \gamma + \cos^{-1} \left[ \frac{R_1^2 + x^2 + h^2 - L^2}{2R_1 \sqrt{x^2 + h^2}} \right] \dots\dots (13)$$

여기서,

L : 센서의 변위(mm)

R<sub>1</sub> : 상부링크의 길이(mm)

x :  $\overline{AS}$ 의 X축 길이(mm)

h :  $\overline{AS}$ 의 Y축 길이(mm)

θ<sub>1</sub> : 수직축과 상부링크(AE)의 사이각

γ : 수직축과 AS 연장선의 사이각

그림 6에서 상부링크의 각변위 θ<sub>1</sub>과 작업기가 부착된 하부링크의 각변위 θ<sub>3</sub>의 관계를 알기 위하여 상부링크와 하부링크 및 리프트 암을 벡터로 표시하면 각 링크 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$R_1 + R_2 = R_3 + R_4$$

$$R_2 = R_3 + R_4 - R_1 \dots\dots\dots (14)$$

여기서,

- $R_1$  : 상부링크  $\overrightarrow{AE}$
- $R_2$  : 리프트 암  $\overrightarrow{EF}$
- $R_3$  : 하부링크  $\overrightarrow{DF}$
- $R_4$  :  $\overrightarrow{AD}$

식 (14)로부터 벡터의 내적을 구하여  $\theta_3$ 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$\theta_3 = \delta + \cos^{-1} \left[ \frac{R_2^2 - R_1^2 - R_3^2 - R_4^2 + 2R_1R_4\cos(\theta_1 - \theta_4)}{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}} \right] \dots\dots\dots (15)$$

여기서,

$$\delta = \tan^{-1} \left[ \frac{K_2}{K_1} \right]$$

$$= \tan^{-1} \left[ \frac{R_4\sin\theta_4 - R_1\sin\theta_1}{R_4\cos\theta_4 - R_1\cos\theta_1} \right]$$

$$K_1 = 2R_3(R_4\cos\theta_4 - R_1\cos\theta_1)$$

$$K_2 = 2R_3(R_4\sin\theta_4 - R_1\sin\theta_1)$$

$\theta_4$  : 수직축과 AD 연장선의 사이각

경심은 Y축의 변위만을 고려하므로 하부링크의 각변위  $\theta_3$ 로 표현하면 다음과 같다.

$$D_L = \overline{DG} \cos \theta_3 \dots\dots\dots (16)$$

식 (13), (15)를 식 (16)에 대입하여 작업기 경심  $D_L$ 과 경심센서의 변위  $L$ 의 관계를 구할 수 있다.

## 5. 제어성능 실험

### 가. 실험장치

포장에서의 실험은 토양상태가 불균일하고 조절하기 어려워 동일조건에서 반복실험이 불가능하며 날씨 등에 의한 실험시기의 제한 및 기타 실험 외적인 환경요인 등에 의해 많은 영향을 받는다. 그러므로 일반포장과 동일한 특성을 가진 토양을 다져 놓은 길이 12m, 폭 1m, 높이 0.7m

크기의 인공토조에서 성능실험을 하였다. 성균관대학교 농업기계공학과에 설치된 인공토조의 실험대차에 유압장치와 3점링크 히치를 부착하여 실험을 행하였다. 실험에 사용된 토양은 국내의 전형적인 밭 토양인 사질토를 채취하여 사용하였다.

실험대차는 10PS 교류전동기, 케이블, 직경 30cm의 윈치드럼, 동력경운기용 변속장치로 구성되어 있는 윈치구동 시스템에 의해 구동된다. 또한 인공토조 시스템에는 토양의 상태를 실험의 목적에 적합하도록 가공하기 위한 로타리 킬러, 표면다짐 롤러, 표층다짐 롤러, 균평기, 살수기로 구성된 토양가공장치가 장착되어 있다.

### 나. 실험 계획

경심 자동제어시스템의 제어성능을 분석하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실제실험을 실시하였다. 제어성능은 샘플링 주기, 유압회로의 유량, 허용범위의 크기, 시스템의 지연시간, 유압배관 및 유압오일의 특성, 유압 피스톤, 작업기 및 3점링크 히치의 제원, 센서의 이득, 토양의 특성 등에 의해 결정된다. 이와 같은 요인중에서 본 시스템의 고정된 특성을 제외한 유압회로의 유량, 허용범위의 크기가 제어성능에 미치는 영향을 구명하기 위해 작업기의 상승속도가 7cm/s, 11cm/s, 16cm/s일 때 기준경심을 16cm로 설정하여 컴퓨터 시뮬레이션과 성능실험을 실시하였다.

계단입력을 주어 작업기의 상승속도에 따라 설정위치에 도달했을 때의 진폭과 설정위치에서 요동하지 않는 경심의 최소 허용범위를 컴퓨터 시뮬레이션으로 구하고 실험결과와 비교하였다. 예비실험 결과를 참조하여 제어장치의 지연시간은 0.2초로 시뮬레이션하였다.

또한, 본 실험에서 작업기의 상승속도 변화에 따른 시스템의 지연시간을 측정하고, 설정위치에 도달했을 때의 진폭과 설정위치에서 요동하지 않는 최소 허용범위를 구하였다. 시스템을 이론적으로 분석하여 유압장치의 공급유량  $Q$ 와 작업기의 상승속도  $V_f$ 와의 관계를 구하였다.



$$Q = \frac{A}{K} V_i \text{sign}(X_i) \\ = 279 V_i \text{sign}(X_i) \dots\dots\dots (17)$$

여기서,

- A : 피스톤 단면적(27.90cm<sup>2</sup>)
- K : 상수(K=75cm/12.5cm=6)
- V<sub>i</sub> : 작업기의 상승속도(cm/s)
- Q : 공급유량(cm<sup>3</sup>/min)
- X<sub>i</sub> : 밸브 스톱의 변위(cm)

주행속도와 제어방법이 제어 성능에 미치는 영향을 검토하기 위하여 주행속도가 1.76km/h, 2.77km/h, 4.25km/h일 때 위치제어, 견인력제어 그리고 혼합제어를 실시하여 경심 자동제어시스템의 작동상태를 분석하였다.

토양강도의 균일성을 유지하기 위하여 매 실험 전에 동일한 방법으로 토양을 가공하였다. 위치제어시는 로타리작업과 균평작업을 각각 1회씩 실시하였고, 견인력제어와 혼합제어시는 위치제어를 적용할 때와 같은 방법으로 토양을 가공한 후 작업구간을 반으로 나누어 앞부분은 표층다짐 롤러작업 1회, 뒷부분은 표면다짐 롤러작업 4회를 실시하여 양쪽의 토양다짐 정도를 다르게 하므로서 견인력의 변화에 대한 경심의 변화를 측정하였다. 토양의 강도는 원추관입시험기를 사용하여 콘지수(Cone Index)를 측정하였다.

제어성능 분석을 위하여 각 제어시 허용범위를 설정하였을 때와 설정하지 않았을 때를 구분하여 실험하였다. 위치제어시 기준경심은 16cm를 유지하였으며 최소 허용범위는 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 참조하여 0.44cm를 적용하였다. 견인력제어시 기준견인력은 경심과 주행속도를 고려하여 견인력 예측모델인 식(4)에서 구하였다. 식(4)는 단위면적당 견인력이므로 쟁기의 경폭과 경심을 곱하면 작업기의 견인력이 된다. 그러므로 작업기의 기준견인력은 다음과 같다.

$$H = (2.8 + 0.013V^2) W d \dots\dots\dots (18)$$

여기서,

- H : 견인력(N)

- V : 주행속도(km/h)
- W : 경폭(23.4cm)
- d : 경심(cm)

견인력은 토양상태의 불균일, 작업상태의 변화 등으로 견인력 예측 모델의 오차는 13%로 나타나므로(ASAE Standards) 견인력의 허용범위는 기준견인력의 13%인 140N으로 설정하였다.

혼합제어시에는 위치제어와 견인력제어시 이 용한 기준입력을 사용하여 3단계의 속도변화에 따른 경심 자동제어시스템의 성능을 검토하였다. 유압장치의 공급 유량을 3.07ℓ/min로 고정하여 작업기의 상승속도를 11cm/s로 일정하게 유지하였으며 약 0.1초 간격으로 자료를 수집하였다.

## 6. 결과 및 고찰

시스템의 지연시간을 측정하기 위해 신호를 출력한 후 작업기가 움직이기 시작하는 시간을 측정하였다. 그림 7은 신호를 출력한 후 작동시간에 따른 작업기의 위치를 나타낸 것이다. 본 제어시스템의 지연시간은 약 0.2초로 측정되었으며 공급 유량에 따라 큰 차이는 없었고 측정된 지연시간에는 밸브의 작동지연, 유압유의 압축

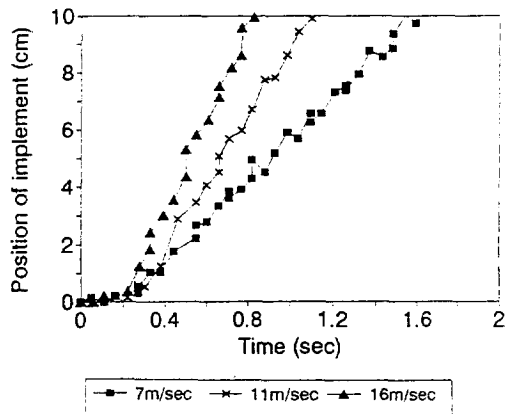


Fig. 7. Relationship between position of implement and operating time

및 누출 유량, 기계적 작동부의 마찰 등에 기인하는 지연과 프로그램에서 제어 알고리즘을 계산하는 시간을 포함하고 있다.

그림 8은 작업기의 상승속도를 11cm/s로 고정하여 허용범위를 설정하지 않고 작업기를 상승시켰을 때 실험과 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 나타낸 것이다. 작업기가 설정위치 근처에서 반복 요동하는 현상을 보이고 있다. 작업기의 상승속도가 각각 7cm/s, 11cm/s, 16cm/s일 때 시뮬레이션에서는  $\pm 1.2\text{cm}$ ,  $\pm 2.0\text{cm}$ ,  $\pm 3.0\text{cm}$ 의 범위에서 변화하였고 실험에서는  $\pm 0.7\text{cm}$ ,  $\pm 1.4\text{cm}$ ,  $\pm 1.8\text{cm}$ 의 범위로 변화하였다.

허용범위가 없으므로 작업기가 설정위치에 이르러서 지연시간 동안 설정위치를 통과하기 때문에 시스템이 지속적으로 요동하였으며 상승속도가 증가함에 따라 진폭의 범위는 증가하였다. 시뮬레이션의 입력값인 시스템의 지연시간과 작업기의 상승속도가 실험도중에 일정하게 유지되

지 않았으므로 시뮬레이션과 실험의 결과는 약간의 차이를 보여주었다. 유량조절밸브를 일정한 위치에 고정시키고 작동하여도 작동시간이 경과함에 따라 유압오일의 온도 상승 등으로 인하여 작업기의 상승속도가 일정하게 유지되지 않았다.

위치제어시 허용범위는 설정위치의 폭을 만들어 지연시간 동안 작업기가 설정위치를 통과하지 못하게 하여 시스템을 안정시키는 역할을 한다. 허용범위가 너무 작으면 지연시간 동안에 작업기는 설정위치의 폭을 벗어나 불안정하게 되고 너무 크면 시스템의 정확성이 떨어지게 된다. 공급 유량이 증가되면 작업기의 상승속도가 증가되며 허용범위도 증가되었다.

허용범위를 설정하여 작업기를 상승시켰을 때 작업기의 상승속도 변화에 따른 실험의 결과를 그림 9에서 보여주고 있다. 안정된 위치제어를 위한 최소 허용범위는 상승속도가 7cm/s, 11cm/s,

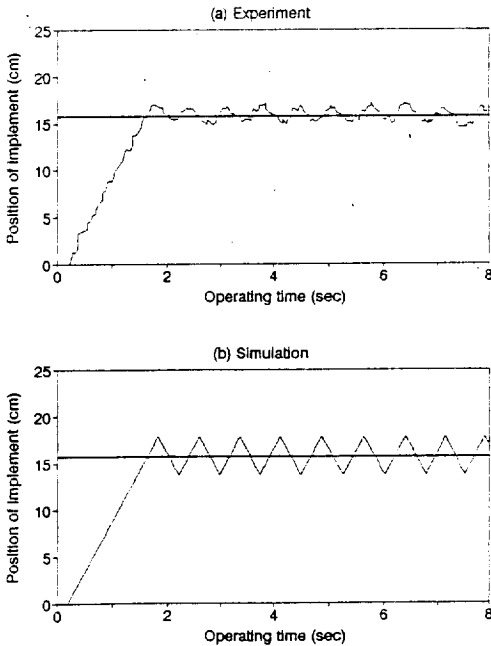


Fig. 8. Step reponse of hitch control system operated on position control mode without dead band when lifting speed is 11 cm/s

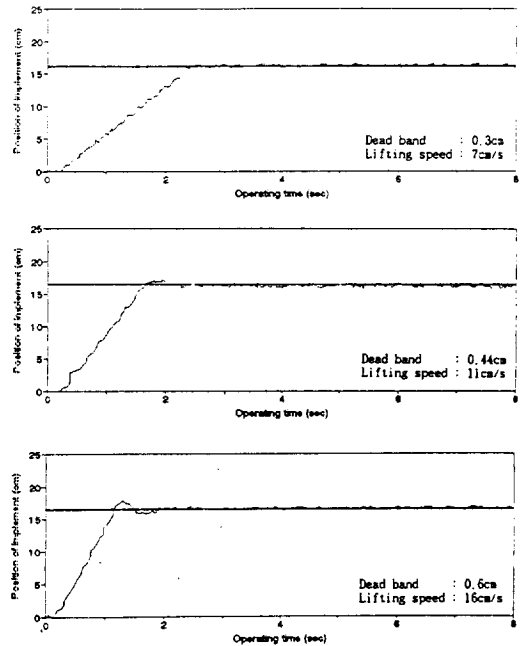


Fig. 9. Experimental result of hitch control system operated on position control mode with dead band when lifting speed are 7 cm/s, 11cm/s and 16cm/s

16cm/s일 때 시뮬레이션 결과는  $\pm 0.7\text{cm}$ ,  $\pm 1.1\text{cm}$ ,  $\pm 1.5\text{cm}$ 이었고 인공토조에서의 실험 결과는  $\pm 0.3\text{cm}$ ,  $\pm 0.4\text{cm}$ ,  $\pm 0.6\text{cm}$ 로 나타났다. 시뮬레이션과 실험 결과가 일치하지 않는 이유는 지연시간의 차이, 진동에 의한 작업기의 위치 측정오차, 유압유의 온도 변화에 의한 상승속도의 불균일 등에 의하여 발생되었다고 판단된다. 그림 9에 나타난 작업기의 미소한 위치변화는 작업기 연결부의 마찰에 의한 위치센서의 오차로 판단된다.

19

작업기가 부착된 3점링크 하치는 유압으로 상승되고 자중으로 하강한다. 공급 유량이 변화되면 작업기의 상승속도는 물론 하강속도도 변화되었다. 허용범위를 설정하지 않고 작업기를 하강시켰을 때 작업기가 설정위치에 이르러서는 진동현상을 보였고, 작업기의 상승속도가 각각 7cm/s, 11cm/s, 16cm/s일 때  $\pm 0.7\text{cm}$ ,  $\pm 1.4\text{cm}$ ,  $\pm 2.2\text{cm}$ 의 범위에서 요동하였다. 작업기의 상승속도가 각각 7cm/s, 11cm/s, 16cm/s일 때 허용범위를

$\pm 0.3\text{cm}$ ,  $\pm 0.44\text{cm}$ ,  $\pm 0.6\text{cm}$ 로 설정하여 작업기를 하강시켰을 경우는 그림 10과 같이 안정된 상태로 제어되었다. 상승시와 유사한 결과를 보여주었으며 최초로 설정위치에 도달했을 때 작업기 중량에 의한 관성력의 영향으로 허용범위를 벗어나는 현상을 보여주었다.

그림 11과 그림 12는 허용범위를 설정하지 않았을 때와 허용범위를  $\pm 0.44\text{cm}$ 로 설정하였을 때 작업기의 주행속도 변화에 따른 작업기의 위치 제어 성능을 보여주고 있다. 작업기의 상승속도는 11cm/s로 고정하였으며, 토양의 강도를 나타내는 콘지수(Cone Index)는 24.5kPa로 측정되었다. 작업기의 평균 주행속도가 1.76km/h, 2.77km/h, 4.25km/h로 변화할 때 허용범위를 설정하지 않았을 때의 RMS 오차는 0.47cm, 0.58cm, 0.62cm로, 허용범위를 설정하였을 때의 RMS 오차는 0.22cm, 0.18cm, 0.17cm로 나타났다. 허용범위를 설정하지 않았을 경우 주행속도가 증가되면 RMS 오차도 증가하였으나, 허용범위를 설정하

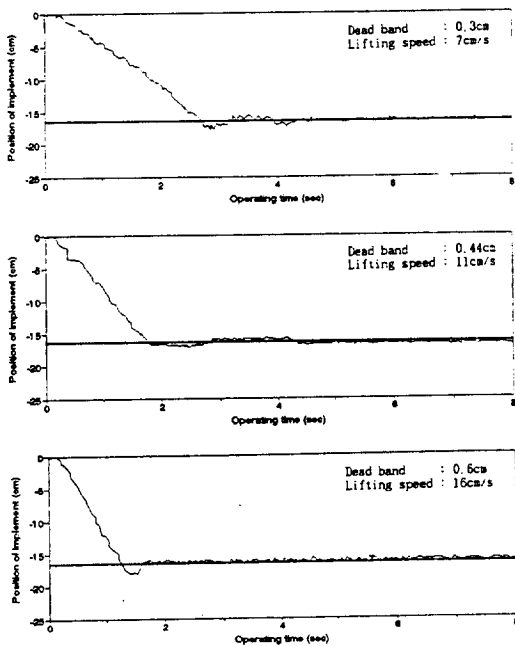


Fig. 10. Result of position control with dead band when implement lowered at 7cm/s, 11cm/s and 16cm/s of lifting speed

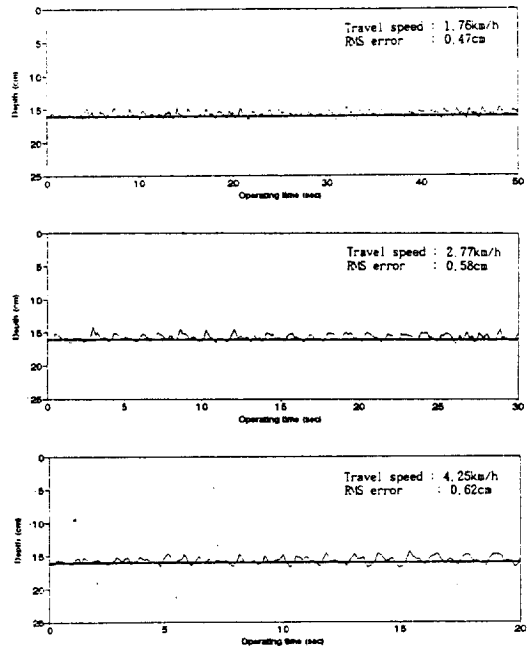


Fig. 11. Result of position control without dead band when travel speeds are 1.76km/h, 2.77km/h and 4.25km/h

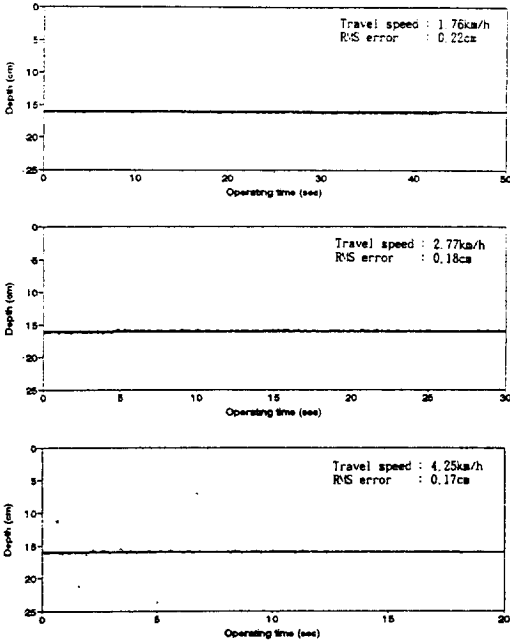


Fig. 12. Result of position control with 0.44cm of dead band when travel speeds are 1.76km/h, 2.77km/h and 4.25km/h

였을 경우는 주행속도의 변화에 대하여 RMS 오차의 변화는 매우 작았다. 허용범위를 설정하였을 때의 RMS 오차는 위치센서의 측정오차를 고려하면 무시할 수 있을 정도로 작으며, ON-OFF 제어방식에 의한 위치제어는 주행속도의 변화에 관계없이 작업기의 경심을 허용범위내에서 일정하게 유지하여 우수한 제어성을 보여주고 있다.

견인력제어시 인공토조의 토양을 전·후반부로 나누어 각각 다르게 가공하였으며 전반부의 콘지수는 29.4kPa로 후반부의 콘지수는 406.7kPa로 측정되었다. 그림 13과 그림 14는 작업기의 상승속도를 11cm/s로 고정하였을 때 견인력제어시 작업기에 작용하는 견인력과 작업경심의 변화를 보여주고 있다. 그림 13에 나타난 것과 같이 허용범위를 설정하지 않았을 때 주행속도에 따른 RMS 오차는 각각 223N, 201N, 191N이며, 단단한 토양에서는 견인력의 변화폭이 매우 크며 작업경심이 알아짐을 알 수 있다. 그림 14

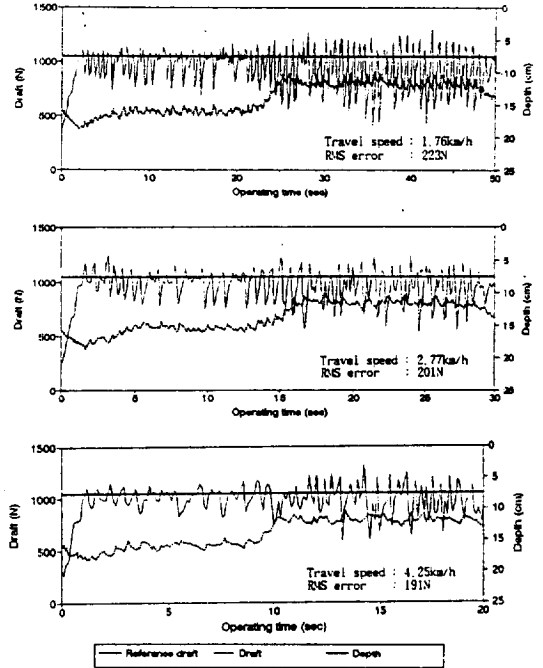


Fig. 13. Result of draft control without dead band when travel speeds are 1.76km/h, 2.77km/h and 4.25km/h

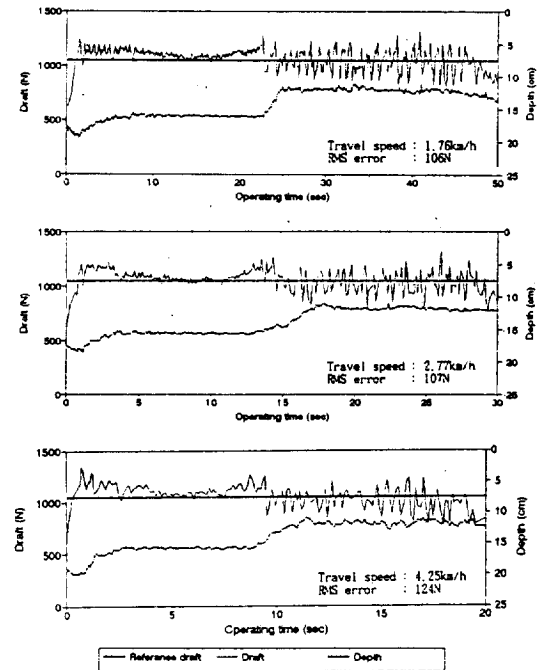


Fig. 14. Result of draft control with 140N of dead band when travel speeds are 1.76 km/h, 2.77km/h and 4.25km/h

에서와 같이 허용범위를  $\pm 140N$ 으로 설정하였을 때 견인력의 변화폭은 감소되었으며 RMS 오차는 각각 106N, 107N, 124N으로 견인력을 허용범위내에서 유지하는 제어성능을 보여주었다. 그림 13과 그림 14에서와 같이 견인력제어는 단단한 토양에서 경심이 크게 변화되므로 원하는 경심으로 경운작업을 수행하기는 어렵다. 토양의 상태가 일정하지 않은 포장에서 견인력제어를 실시할 경우 트랙터의 견인부하는 감소시킬 수 있으나 토양상태, 작업조건 등에 따라 견인력의 변화를 예측하기 어렵다.

그림 15와 그림 16은 혼합제어를 실시하였을 때 경심과 견인력의 변화를 보여주고 있다. 허용범위를 설정하지 않을 경우(그림 15)는 주행속도의 변화에 따른 경심의 RMS 오차는 각각 1.35cm, 1.42cm, 1.46cm로 나타났고, 견인력의 RMS 오차는 284N, 264N, 221N으로 나타났다. 그림 16

은 허용범위를 설정하였을 경우 경심과 견인력의 변화를 나타내고 있다. 이 때 각 속도에서 경심의 RMS 오차는 각각 0.67cm, 0.72cm, 0.76cm로 나타났고, 견인력의 RMS 오차는 204N, 170N, 163N으로 나타났다.

기준경심을 16cm로 설정하여 위치제어와 혼합제어를 실시하였을 때 주행속도의 변화에 대한 작업경심의 RMS오차를 표 2에 나타내었으며, 표 3은 기준견인력을 1.05kN으로 설정하여 견인력제어와 혼합제어를 실시하였을 때 견인력의 RMS오차를 나타내었다. 실험 결과로부터 작업시 일정한 경심을 유지하기 위해서는 위치제어를 행하는 것이 유리하며, 토양상태가 일정하지 않은 포장이나 단단한 토양에서는 위치제어와 견인력제어를 병행한 혼합제어를 실시하는 것이 제어성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

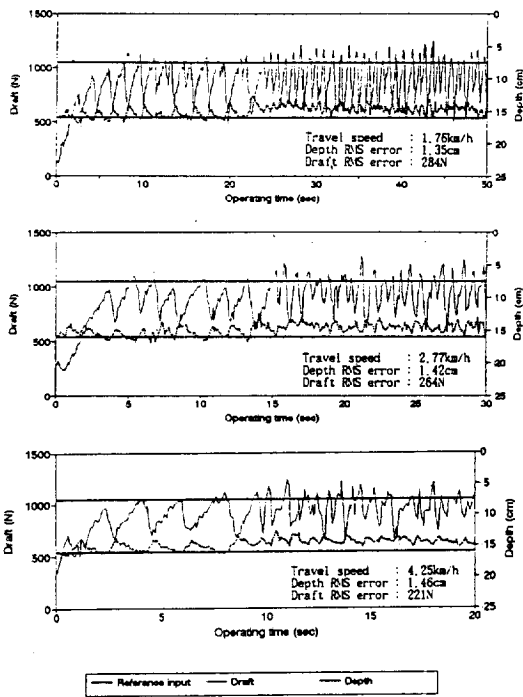


Fig. 15. Result of mixed control without dead band when travel speeds are 1.76km/h, 2.77km/h and 4.25km/h

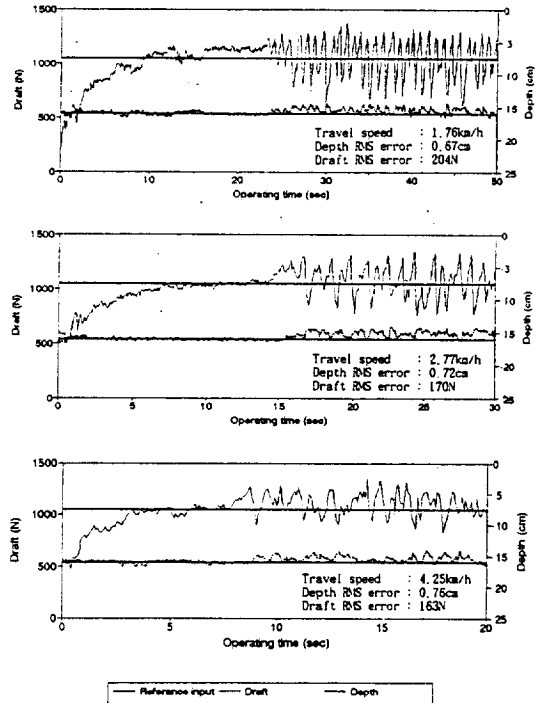


Fig. 16. Result of mixed control with dead band when travel speeds are 1.76km/h, 2.77 km/h and 4.25km/h

Table 2. The comparison of the depth RMS error in position and mixed control. (Reference depth=16 cm)

Remark	Speed (km/h)	Control mode	
		Depth	Mixed
With Dead band (DB=0.44cm)	1.76	0.22	0.67
	2.77	0.18	0.72
	4.25	0.17	0.76
Without Dead band	1.76	0.47	1.35
	2.77	0.58	1.42
	4.25	0.62	1.46

Table 3. The comparison of the draft RMS error in draft and mixed control. (Reference draft = 1.05kN)

Remark	Speed (km/h)	Control mode	
		Draft	Mixed
With Dead band (DB=140N)	1.76	106	204
	2.77	107	170
	4.25	124	163
Without Dead band	1.76	223	284
	2.77	201	264
	4.25	191	221

## 7. 요약 및 결론

트랙터 작업기의 작업효율을 향상시키기 위하여 마이크로 컴퓨터를 이용하여 작업기의 경심을 자동으로 제어할 수 있는 경심 자동제어시스템과 제어용 프로그램을 개발하였다. 트랙터의 경심 자동제어시스템은 작업기의 작업속도, 견인력, 작업경심을 측정하는 자료수집장치, 측정된 트랙터의 주행속도, 견인력 및 작업기의 경심을 분석하고 자료를 저장하는 마이크로 컴퓨터, 유압 제어밸브를 작동시켜 작업기의 경심을 조정하는 유압장치, 작업기를 부착하는 3점링크 히치로 구성되어 있다. 제어프로그램은 사용자가 임의로 위치제어, 견인력제어 및 혼합제어를 선택할 수 있도록 하였으며, C 언어로 작성되었다.

제어시스템의 성능을 분석하기 위하여 인공토조에서 실험을 하였다. 주행속도와 제어방법이 제어성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 인

공토조에서 1.76km/h, 2.77km/h, 4.25km/h의 3단계 주행속도에 대하여 위치제어, 견인력제어, 혼합제어시 경심 자동제어시스템의 작동상태를 검토하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 자료수집장치를 이용하여 작업기의 작업속도, 작업 위치와 견인력을 측정하여 경심을 자동제어하는 시스템을 구성하고 제어용 프로그램을 개발하였다. 경심제어용 프로그램은 C 언어로 작성되었다.

2. 실험을 통하여 제어시스템의 응답성을 분석하였다. 시스템의 지연시간은 0.2초였으며, 작업기의 승·하강속도가 증가하거나 허용범위가 감소하면 제어시스템이 불안정하게 되었다. 작업기의 상승속도가 7cm/s, 11cm/s, 16cm/s일 때, 안정된 위치제어를 위한 경심의 최소 허용범위는  $\pm 0.3\text{cm}$ ,  $\pm 0.4\text{cm}$ ,  $\pm 0.6\text{cm}$ 로 나타났다.

3. 인공토조에서 작업기의 주행속도를 1.76km/h, 2.77km/h, 4.25km/h로 변화하여 위치제어,

견인력제어 및 혼합제어를 실시하였다. 위치제어시 허용범위를 설정하지 않았을 때의 RMS 오차는 0.47cm, 0.58cm, 0.62cm로 나타났으며, 허용범위를 설정하였을 때의 RMS 오차는 0.22cm, 0.18cm, 0.17cm로 나타났다. ON-OFF 제어방식에 의한 위치제어는 작업기의 경심을 허용범위 내에서 일정하게 유지하며 우수한 제어성능을 보여 주었다.

4. 견인력제어시 허용범위를 설정하지 않았을 때 주행속도에 따른 RMS 오차는 각각 223N, 201N, 191N으로 나타났으나 작업기의 연속적인 상승 및 하강으로 인하여 견인력의 변화범위는 매우 크게 나타났다. 허용범위를 설정하였을 때 견인력의 변화범위는 감소되었으며 RMS 오차는 각각 106N, 107N, 124N으로 견인력을 허용범위 내에서 유지하는 제어성능을 보여주었다. 견인력제어는 작업기의 견인부하를 감소시킬 수 있으나 토양상태, 작업조건 등에 따라 경심의 변화를 예측하기 어렵다.

5. 혼합제어시 작업경심과 견인력의 허용범위를 설정하였을 때 주행속도의 변화에 따른 경심의 RMS 오차는 각각 0.67cm, 0.72cm, 0.76cm로 나타났고, 견인력의 RMS 오차는 204N, 170N, 163N으로 나타났다. 허용범위를 설정하지 않았을 경우 경심의 RMS 오차는 각각 1.35cm, 1.42cm, 1.46cm, 견인력의 RMS 오차는 284N, 264N, 221N으로 나타났다. 일정한 경심을 유지하기 위해서는 위치제어를 실시하는 것이 바람직하며, 토양상태가 일정하지 않은 포장이나 단단한 토양에서는 위치제어와 견인력제어를 병행한 혼합제어를 행하는 것이 제어성능을 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다.

### 參 考 文 獻

1. 유수남, 류관희, 박준걸. 1989. 트랙터의 전자유압식 히치 제어시스템에 관한 연구(Ⅰ). -위치제어- 한국농업기계학회지 14(3) : 168-180.
2. 유수남, 류관희, 윤여두. 1989. 트랙터의 전자유압식 히치 제어시스템에 관한 연구(Ⅱ).

- 견인력제어- 한국농업기계학회지 14(4) : 229-241.
3. 김기영, 유수남, 류관희. 1990. 트랙터의 전자유압식 히치 제어시스템에 관한 연구(Ⅲ). -컴퓨터 시뮬레이션- 한국농업기계학회지 15(3) : 168-180.
4. 류관희, 유수남, 윤여두, 坂井純, 김영상. 1991. 농용트랙터의 전자 유압식 경심 제어 시스템 개발. 한국농업기계학회지 16(4) : 225-262.
5. 류관희, 유수남, 김영상, 김기영. 1992. 농용트랙터의 3점히치시스템의 마이크로컴퓨터 제어(Ⅰ). -컴퓨터 시뮬레이션- 한국농업기계학회지 17(1) : 18-26.
6. 류관희, 유수남, 김영상. 1992. 농용트랙터의 3점히치시스템의 마이크로 컴퓨터 제어(Ⅰ). -성능시험- 한국농업기계학회지 17(3) : 223-228.
7. ASAE Standards. 1991. Agricultural Machinery Management Data. ASAE Data : ASAE D497.
8. Ayer, P. D., K. V. Varma and M. N. Karim. 1989. Design and Analysis of Electrohydraulic Draft Control System. Trans. ASAE. 32(6) : 1853-1855.
9. Kydd, H. D., G. E. Frehlich and A. R. Boyden. 1984. Tillage Power Requirements in Western Canada. ASAE Paper No. 84-1027.
10. Smith, D. W. and R. R. Yoerger 1975. Simulation of a Tractor Three Point Hitch Draft Control System. Trans. ASAE 18(3) : 404-408.
11. Smith, J. L. and M. Khalid. 1982. Hitch Position Control for 4WD Tractors. Trans. ASAE. 25(3) : 530-533, 537.
12. Stephens, L. E., A. D. Spencer, V. G. Floyd and W. W. Brixius. 1981. Energy Requirements for Tillage and Planting. ASAE Paper No. 81-1512.

13. Summers, J. D., A. Khalilian and D. G. Batchelder. 1984. Draft Relationships for Primary Tillage in Oklahoma Soils. ASAE Paper No. 84-1024.
14. Upadhyaya, S. K. 1984. Prediction of Tillage Implement Draft. ASAE Paper No. 84-1518.
15. Jiang, Y., Nobuo Honami and Shigeo Umeda. 1992. Microcomputer Control System for Tractor Implements (Part 1). 農業機械學會誌 54(3) : 5-13.
16. Jiang, Y., Nobuo Honami and Shigeo Umeda. 1992. Microcomputer Control System for Tractor Implements (Part 2). 農業機械學會誌 54(4) : 3-10.