

# 트랙터 로타리 작업기용 자세 제어 시스템에 관한 연구

## Study on Attitude Control System of Rotary Implement Attached on Agricultural Tractor

이 제 용*	고 완**	심 재 설*	신 현 철**
정회원	정회원		
J. Y. Lee	W. GO	J. S. Shim	H. C. Shin

### ABSTRACT

In Korea, rotary implements are mainly utilized in the tillage operation. The attitude control system for rolling phenomenon of tractors, which is caused due to uneven ground surfaces and sinkage of tractor wheels, is one of the most important control systems in agricultural tractors.

The attitude control system of a rotary implement, attached on tractors, was designed and fabricated in this study. The control system was largely composed of four main units; a setting unit, a detection unit, a controller and a hydraulic unit. The implement was controlled by control signals from a computer proportional to controlled errors, on/off action of two directional solenoid valve and lift cylinder on the right lift rod.

Response characteristic experiments for the control system fabricated in this study were carried out indoors and outdoors. The results of experiments showed the response characteristics sufficient to use as the attitude control system of rotary implements for agricultural tractors.

**주요용어(Key Words):** attitude control, detection unit, control unit, hydraulic unit, lift cylinder solenoid valve

### 1. 서 론

농용 트랙터에 의한 농작업에 있어서 작업 정도 및 조작성 향상을 위한 작업기 제어는 일반적으로 3점 링크 지지 장치를 제어함으로써 행해지고 있으

며, 기본 제어 시스템은 위치 제어, 견인 제어 및 복합 제어 시스템으로, 주로 플라우 작업기를 대상으로 하는 제어 시스템이다. 이들 제어 시스템에 관한 연구는 Hobbs와 Hesse(1980), Dobrinska(1981), Boe와 Bergene (1989)에 의해 보고되었다.

\* LG전선(주)기계CU 메카트로닉스 연구소

\*\* LG전선(주)기계CU 농기계개발실

한국과 일본에서는 경운 작업에 있어 로타리 작업기가 주로 이용되고 있으며, 로타리 작업기의 경우에 있어서는 경심 및 자세 제어 시스템이 주로 이용되고 있다. 또한, 최근 전자기술의 발달과 함께 종래의 기계식 제어 시스템이 전자식 제어 시스템으로 대체되어지고 있다. 특히, 로타리 작업의 경우에는 트랙터 차체의 롤링 현상에도 불구하고 작업기를 수평으로 유지해주는 자세 제어 시스템이 필요하며, 이러한 트랙터 차체의 롤링 현상은 불균일한 포장면 및 차륜의 침하 등으로 인해 발생한다.

이에 대한 연구는 경운 작업을 위해 로타리 작업을 주 작업으로 하는 일본에서 많이 이루어졌으며, 일본에서는 이미 상용화되어 농작업에서 널리 이용되고 있다. 현재 일본에서 상용화되어 경운 작업에 이용되고 있는 자세 제어 시스템은 주로 유량 제어의 방법을 채용하고 있다. Yi 등(1992)은 경운 작업기의 경심, 자세 및 복합 제어 기능을 갖는 트랙터의 마이크로컴퓨터 제어 시스템에 관한 연구를 행했다. 이들은 피드백 정보를 트랙터 차체에 의존하고, 전자방향전환 밸브의 PWM 구동에 의해서 작업기를 제어하는 복합 제어 시스템을 구성하여, 실내 실험과 포장 실험을 통한 제어 시스템의 실용 가능성을 보고하였다. 한국농업기계화연구소의 이 등(1995)은 피드백 정보를 작업기쪽에 의존하는 자세 및 경심 제어가 가능한 제어 시스템에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구는 피드백 정보의 차체 의존에 의한 작업기의 범용성 확보, 솔레노이드 밸브의 on-off 제어에 의한 제어 시스템의 단순화, 마이크로 컴퓨터 및 소프트웨어에 의한 유연성 및 고정밀도의 제어가 가능한 작업기 자세 제어 시스템을 구성하여 실내외 실험을 통한 제어 시스템의 응답 특성 및 실제 포장에서의 응용 가능성을 평가하는 데에 목적이 있다.

## 2. 제어 시스템의 개요

### 가. 기본 개념

트랙터의 주행 로면에 대한 로타리 작업기의 자세 변화는 주로 불균일한 주행 로면, 차륜의 침하 등에 의한 차체의 롤링 현상에 의해서 발생되며, 작업기의 자세각(경사각)은 식 (1)과 같이 차체 롤링각 및 리프트 실린더 변위의 함수로서 나타낼 수 있다.

$$\theta = \theta_{\text{rolling}} + \theta_{\text{cylinder}} \dots\dots\dots (1)$$

여기에서,  $\theta$  : 작업기의 자세각  
 $\theta_{\text{rolling}}$  : 트랙터 차체의 롤링에 의한 작업기의 자세각  
 $\theta_{\text{cylinder}}$  : 리프트 실린더의 변위 변화에 의한 작업기의 자세각

로타리 작업기에 의한 경운작업중 작업기의 자세를 항상 작업면에 대해 수평 또는 설정 자세각으로 유지하기 위해서는 트랙터 차체 롤링에 의한 작업기의 자세각 변화분 만큼 리프트 실린더를 상·하강시켜줌으로써 보상해 줄 필요가 있다.

### 나. 제어 시스템의 하드웨어 구성 및 제어 알고리즘

그림 1에 제어 시스템의 하드웨어 개요도를 표시하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 제어 시스템의 하드웨어는 크게; 1) 작업기의 자세각 및 불감대 설정을 위한 설정부, 2) 트랙터 차체의 롤링각 및 유압 실린더의 변위 검출을 위한 검출부, 3) 센서로부터의 신호 및 각종 연산 처리 등을 행하고, 출력 포트를 통해 솔레노이드 밸브 구동 회로에 제어 신호를 출력 솔레노이드 밸브를 제어하기 위한 전자 제어부, 4) 리프트압과 연결되어 있는 유압 실린더의 구동을 위한 솔레노이드 밸브 및 유압 회로, 5) 제어

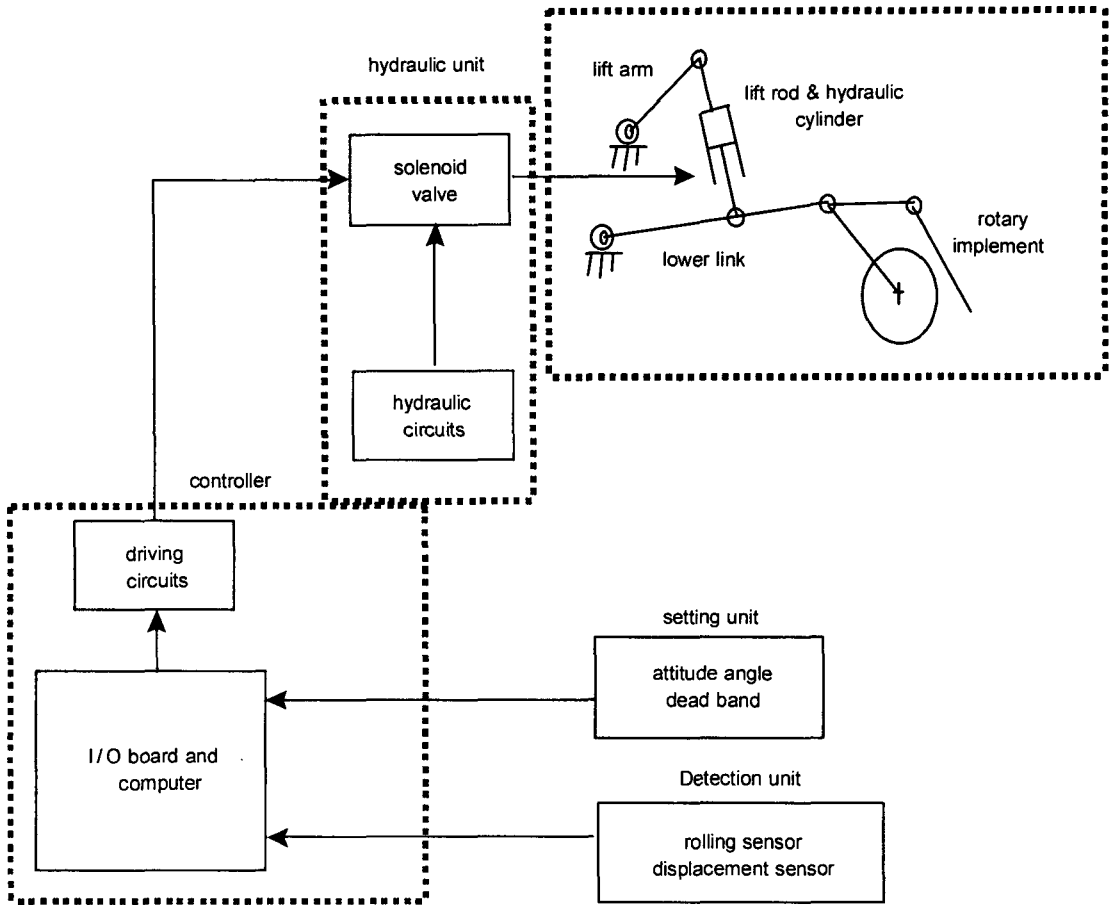


Fig. 1 Schematic diagram of control system.

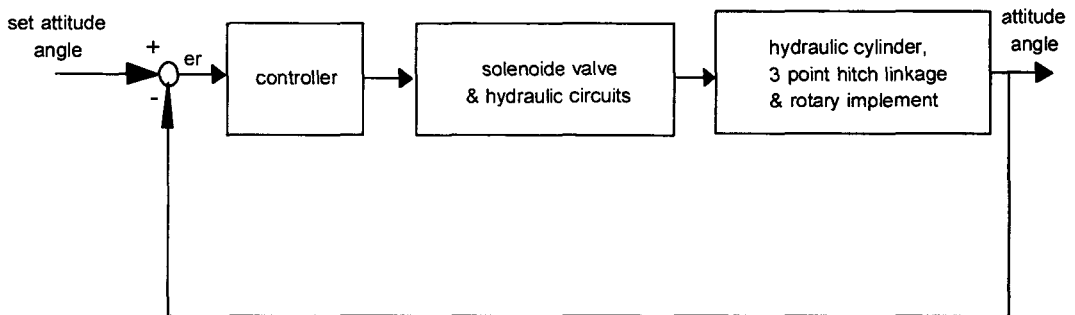


Fig. 2 Block diagram of control system.

대상인 유압 실린더, 3점지지 장치 및 작업기의 5 요소로 구성되어 있다.

제어 시스템의 블록 선도와 흐름도를 그림 2, 3에

표시하였다. 그림 2, 3에서 보는 바와 같이 본 제어 시스템은 일정 시간 간격으로 컴퓨터에 의해 리프트 실린더상의 변위 센서 및 롤링 센서로부터의 신호

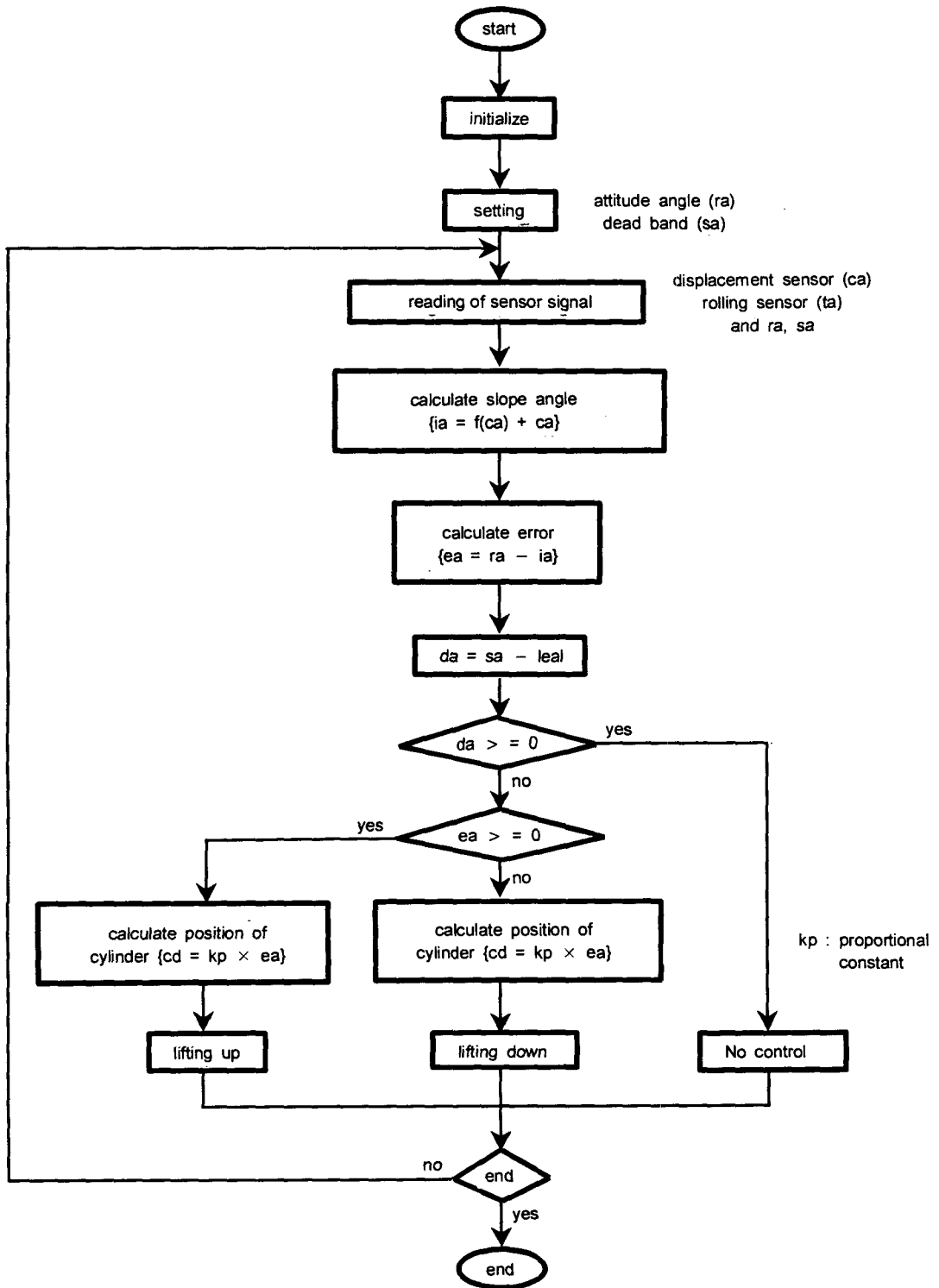


Fig. 3 Flow chart of control system.

를 읽어드려 식 (1)에 의거해서 작업기의 자세각을 연산 처리하고, 이를 설정 자세각과 비교하여 편차를 계산한 후, 편차에 비례한 제어 신호를 컴퓨터의 출력 포트를 통해 솔레노이드 밸브 구동회로에 출력하고 솔레노이드 밸브를 간접 제어함으로써 3점 링크 장치의 리프트 로드와 장착되어 있는 유압 실린더의 피스톤을 상·하강시켜 작업기를 항상 설정 자세각으로 유지하게 한다.

### 3. 재료 및 방법

실내 및 실외 포장 실험을 하기 전에 공시 트랙터의 엔진 회전수와 유압 회로를 구성하고 있는 유압 실린더의 응답성과의 관계를 규명하기 위한 예비 실험이 실내에서 행해졌다.

예비 실험 후, 제어 시스템의 시간 및 주파수 영역에서의 응답특성 평가를 위한 실내 실험 및 포장에서의 적응성 평가를 위한 포장 실험이 행해졌다.

#### 가. 공시 트랙터

실험에 사용된 트랙터는 L사 제품으로 주요 사양은 표 1과 같다.

Table 1 Main specification of tractor and rotary used in experiments

Model name	LT470D
Rated output	45 ps/2,500 rpm
Driving type	4WD
Size (mm)	3,620 × 1,655 × 2,410
Weight (kN)	244.4
Rotary size (mm)	925 × 2,020 × 990
Rotary weight (kN)	41.7

#### 나. 예비 실험

실내 및 포장실험 전에, 엔진 회전수의 변화와 유압 회로를 구성하고 있는 유압 실린더의 응답성과의 관계 규명을 통해 필요 유량, 안전 밸브의 압력 등을 설정하기 위한 예비 실험이 행해졌다. 실험은 4종류의 엔진 회전수 (1,000, 1,500, 2,000 및 2,500 rpm)의 조건하에서 유압 실린더의 변위를 2, 4, 6, 8 및 10cm로 컴퓨터에 의해 스텝 변화시키면서 행해졌다. 실험중의 각종 센서로부터의 전압 신호는 다체널 아날로그 데이터 기록기에 기록되어, 실험이 끝난 후 컴퓨터에 의해 A/D 변환 및 데이터 처리가 행해졌다.

#### 다. 실내 실험

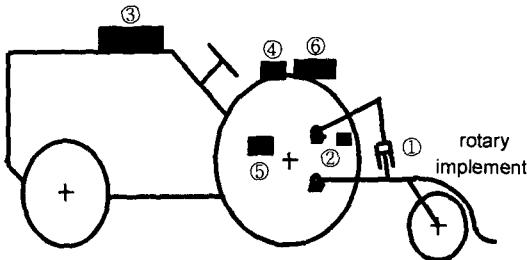
제어 시스템의 시간 및 주파수 영역에서의 응답특성을 평가하기 위한 과도 및 주파수 응답 실험이 실내에서 행해졌다. 실내 실험에서의 실린더에의 입력 유량은 예비 실험의 결과로부터 설정되었으며, 로타리 작업기는 3점지지 장치에 의해 공간에 지지되어 토양 저항과 같은 부하 및 외란은 고려되지 않았다.

##### 1) 과도 응답 실험

제어 시스템의 속응성과 안정성을 평가하기 위한 과도 응답 실험이 3 종류의 엔진 회전수(1,500, 2,000 및 2,500 rpm)의 조건하에서, 발전기의 방향과 출력을 이용하여 제어 시스템의 설정 입력각을 스텝 변화시키면서 행해졌다. 이 실험에서의 설정 입력각의 스텝 변화는 약  $\pm 2.5^\circ$  및 약  $\pm 5.0^\circ$  였다. 실험중의 각 센서로부터의 신호는 다체널 아날로그 데이터 기록기에 기록되어, 실험이 끝난 후 컴퓨터에 의해 A/D 변환 및 데이터 처리가 행해졌다.

##### 2) 주파수 응답 실험

주파수 영역에서의 제어 시스템의 응답 특성을 평가하기 위한 주파수 응답 실험이 실내에서 행해졌다. 실험은 대표적으로 2종류의 엔진 회전수(1,500, 2,500 rpm) 및 2종류의 진폭( $\pm 2.5^\circ$  및 약  $\pm 5.0^\circ$ )의 조건하에서, 입력 주파수를 0.1Hz에서 5.0Hz까지 0.1Hz (1Hz 이상에서는 1Hz 간격) 간격으로 변화시키면서 설정 자세각의 정현파상 변화에 대한 시스템의 응답 특성을 조사하였다. 실험중의 각 센서로부터의 신호는 다채널 아날로그 데이터 기록기에 기록되어, 실험이 끝난 후 컴퓨터에 의해 A/D 변환 및 데이터 처리가 행해졌다.



1. lift cylinder & displacement sensor
2. rolling sensor
3. computer for control & data recorder
4. solenoid valve driving circuit
5. solenoid valve
6. power generator

Fig. 4 Schematic drawing of experimental apparatus.



Fig. 5 Tractor used in field experiments.

## 라. 포장 실험

설계된 제어 시스템의 실제 포장에서의 적응성 평가를 위해 포장에서의 차체 롤링각 스텝 입력에 의한 과도 응답 실험이 행해졌다.

### 1) 실험 장치

그림 4 및 그림 5에 실험장치의 개요도 및 공시 트랙터를 표시하였다. 실린더의 변위는 로터리 포텐시오미터(2 k $\Omega$ )와 링크 기구를 이용하여 피스톤 로드의 움직임을 실린더 블록에 고정된 포텐시오미터로 검출하게 되어 있다. 트랙터의 롤링각 검출을 위한 롤링각 센서(2 : Midori, PMP-10TA-V1)는 차체의 후부에 장착하였다. 실험 중 실험 장치에 필요한 전원 공급을 위한 발전기(6) 및 각종 센서로부터의 신호를 기록하기 위한 다채널 아날로그 데이터 기록기(3)를 트랙터에 장착하였다.

### 2) 실험 포장의 형상 및 방법

그림 6에 실험 포장의 개요도를 나타내었다. 실험

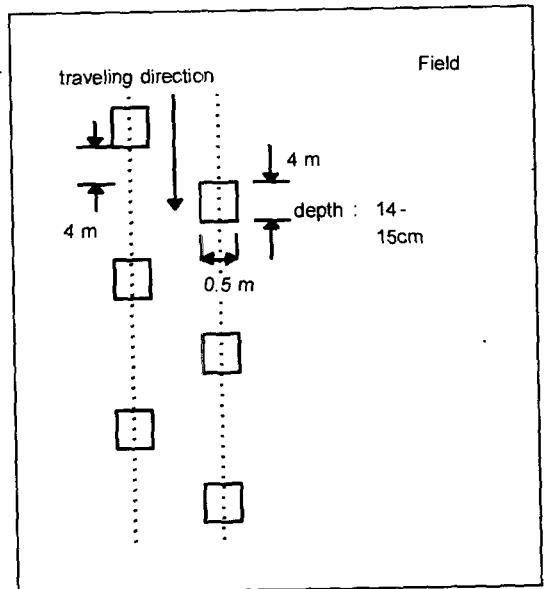


Fig. 6 Configuration of experimental field.

용 포장은 실험중 작업기에 걸리는 작업 부하를 일정하게 유지하고, 또한 포장면도 수평으로 유지하기 위해 실험전에 로타리 작업기에 의해 로타리 작업이 행해졌다. 실험은 4종류(1, 2, 3 및 3.4 km/h)의 주행 속도하에서, 인위적으로 롤링각 스텝 입력을 가하기 위해 그림 6에서 보는 바와 같이 트랙터의 주행 방향에 대해 좌우 4m 간격으로 구덩이를 만들었다. 구덩이의 규격은 길이(4m) × 폭(0.5m) × 깊이(0.15m)로 하였고, 길이와 폭은 차륜크기 및 축거를 고려하여 정했으며, 깊이는 차륜의 토양 침하량을 고려한 것이다. 실험중의 각 센서로부터의 출력 신호를 다 채널 아날로그 데이터 기록기에 기록하여, 실험 후 컴퓨터에 의해 A/D 변환 및 데이터 처리를 행했다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 가. 예비 실험

4종류의 엔진 회전수 (1,000, 1,500, 2,000 및 2,500 rpm)의 조건하에서 유압 실린더의 변위를 2, 4, 6, 8 및 10cm로 스텝 변화 시켰을 때의 유압 실린더의 변위 변화에 대한 실린더의 응답 시간을 그림 7에 표시하였다.

그림 7의 실험 결과로부터 유압 실린더의 상승(Up) 및 하강(Down)시, 엔진 회전수의 증가와 함께 실린더에의 입력 유량의 증가로 실린더의 응답 속도도 증가하는 것을 알 수 있다.

그러나 2,000 rpm 이상의 엔진 회전수에서는 응답성에 큰 차이가 보이지 않는다. 이는 경운 작업이 주로 2,000 rpm 이상의 엔진 회전수에서 행해지므로 높은 회전속도에서 필요 이상의 유량이 실린더에 공급되어 시스템이 불안정하게 되는 것을 방지하기 위해 기초 실험의 결과로부터 유압 회로의 공급 유량을 프라이어티밸브(priority valve)를 사용하여 제어했기 때문이다. 포장에서의 차체 롤링각(약  $\pm 10^\circ$ ) 및 작업 속도 등을 고려할 때 실험 결과는 총

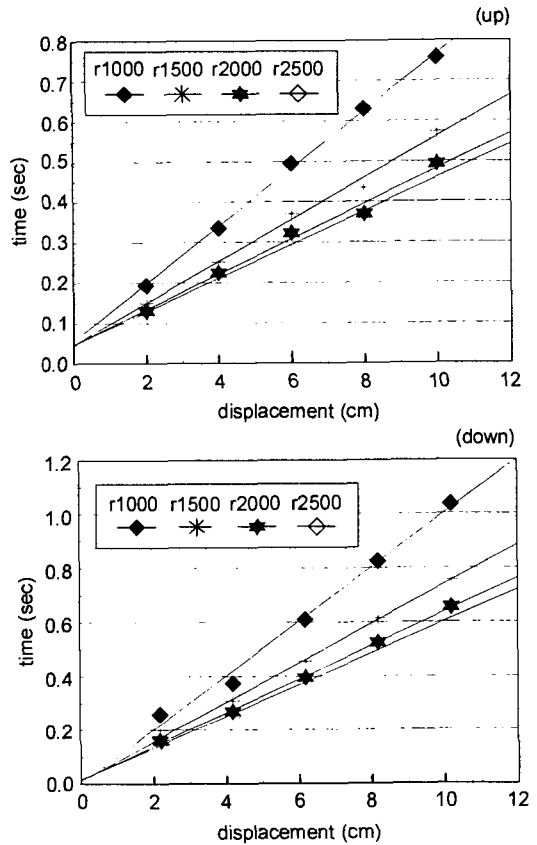


Fig. 7 Relationship between engine rpm and response time of hydraulic cylinder.

본한 응답성(약  $\pm 10^\circ$  에 0.3 sec)을 보여주고 있다고 생각된다.

그림 8에 엔진 회전수를 변화시키면서 실린더 변위의 스텝 변화에 대한 유압 회로의 응답 특성 실험 결과중 대표적으로 엔진 회전수 2,000 rpm에 대한 결과를 예시하였다.

그림 8의 실험 결과로부터 컴퓨터의 제어 신호에 대해 솔레노이드 밸브 및 구동 회로가 잘 동작하고 있음을 알 수 있으며, 유압 실린더의 과도 상태에서의 응답 특성도 단조 증가의 안정된 특성을 보여주고 있으며, 또한 정상 상태에서의 정상 편차도 무시 가능한 범위내에 있음을 알 수 있다. 그러나 구동 회로에 의한 솔레노이드 밸브에의 ON/OFF 제어 신호

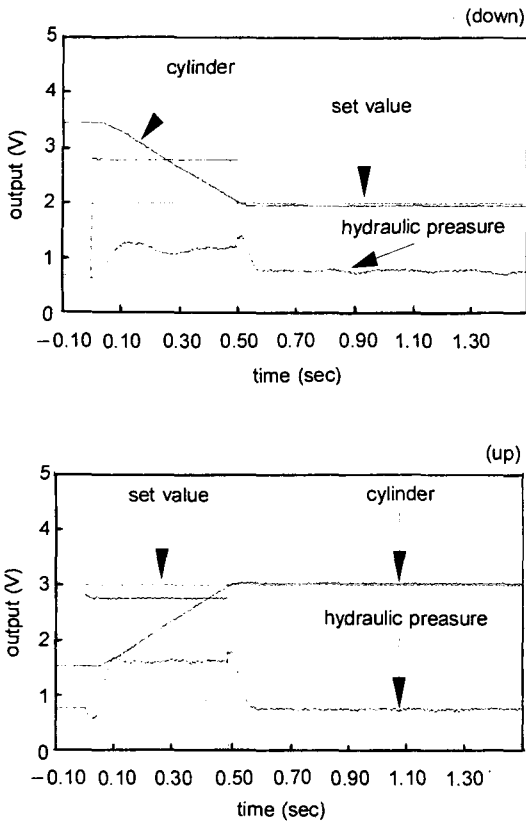


Fig. 8 Response characteristics of hydraulic cylinder at 2,000 rpm.

에도 불구하고 실린더가 응답하지 않는 40 msec의 불감대가 관측되었다. 이러한 현상은 솔레노이드 밸브의 응답 특성에 의한 것으로 실포장에서의 트랙터의 작업 속도 등을 고려할 때 무시 가능한 범위 내라고 생각된다.

나. 실내 실험

1) Step 응답 실험

3종류의 엔진 회전수 (1,500, 2,000 및 2,500 rpm) 및 2종류의 진폭(약  $\pm 2.5^\circ$  및 약  $\pm 5.0^\circ$ ) 의 조건 하에서 설정 입력각의 스텝 변화에 대한 실험이 행해졌으며, 그림 9에 대표적으로 엔진 회전수 1,500, 2,500 rpm 에서의 진폭 약  $\pm 5.0^\circ$  대한 실험 결과를 표시하였다.

그림 9의 실험 결과로부터 제어 시스템의 응답 특성에 예비 실험의 결과에서와 같이 컴퓨터로부터의 제어 신호에도 불구하고 실린더가 작동하지 않는 약간의 불감대(40 msec)가 관측되었으나, 제어 시스템은 설정 입력각의 스텝 변화에 대해 엔진 회전수의 변화에 관계없이 안정된 응답 특성을 보여주고 있음

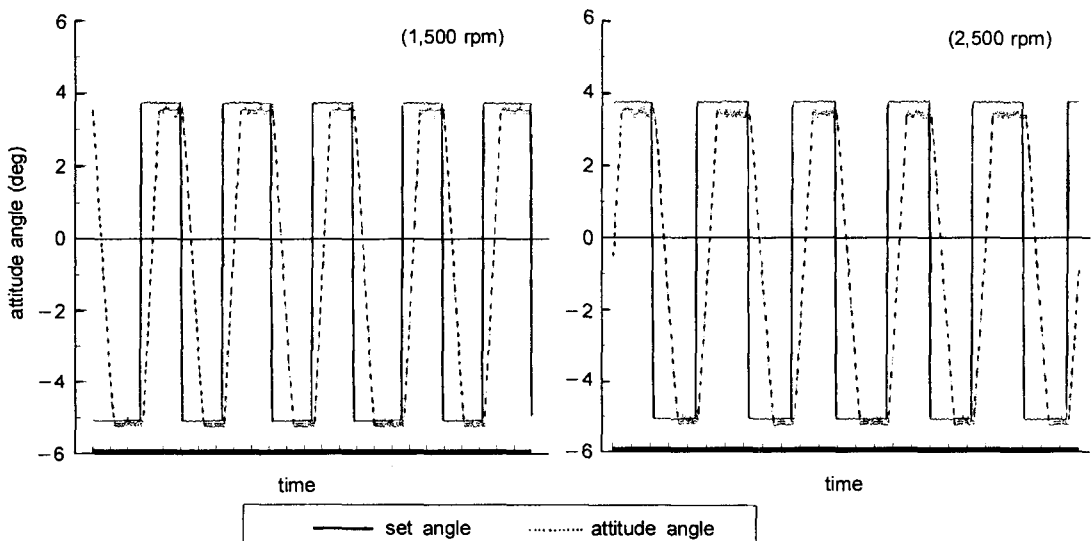


Fig. 9 Result in step response experiments of control system at about  $\pm 5.0^\circ$  of amplitude, 1,500 and 2,500 rpm.



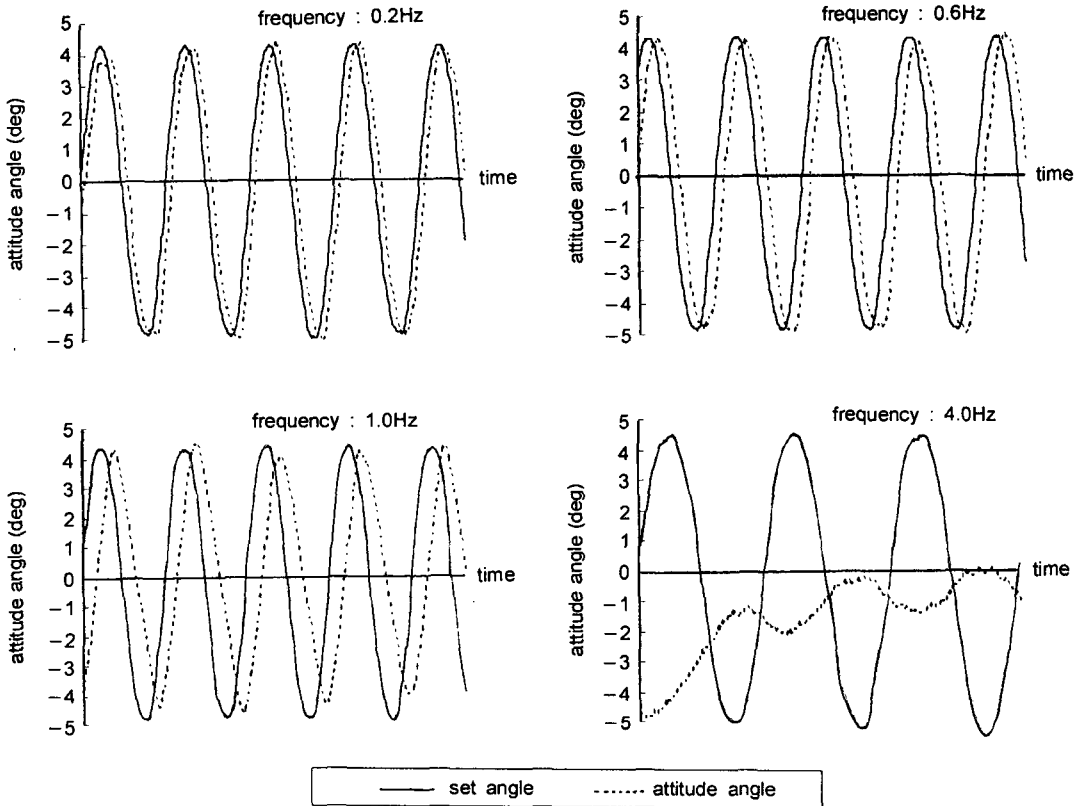


Fig. 10 Results in frequency response experiments of control system at about  $\pm 5.0^\circ$  of amplitude, 2,500 rpm of engine revolution.

을 알 수 있다. 또한 정상 상태에서의 설정치에 대한 편차인 정상 편차(약  $\pm 0.3^\circ$ )도 거의 무시 가능한 범위 내에 있음을 알 수 있다.

## 2) 주파수 응답 실험

그림 10에 대표적으로 엔진 회전수 2,500 rpm, 진폭 약  $\pm 5.0^\circ$  및 입력 주파수 0.2, 0.6, 1.0, 4.0Hz에 대한 실험 결과를 예시하였다.

그림 10의 실험 결과로부터 입력 주파수 0.6Hz까지는 약간의 위상차가 관측되었으나, 제어 시스템이 입력 신호에 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 입력 주파수 1.0Hz에서는 약간의 이득 저하와 함께 커다란 위상차가 관측되었다.

4.0Hz의 입력 주파수에서는 입력 신호에 대한 제

어 시스템의 추종성은 전혀 인정되지 않음을 알 수 있다.

그림 11에 대표적으로 엔진 회전수 1,500, 2,500 rpm에 대한 이득, 위상 선도를 나타내었다.

그림 11의 결과로부터 이득의 경우 입력 주파수 1Hz까지는 이득 저하가 거의 관측되지 않았으나, 위상의 경우는 입력 주파수의 증가와 함께 위상차도 크게 증가함을 알 수 있다.

## 다. 포장 실험

대표적으로 설정 자세각  $\pm 0.0^\circ$  (수평 상태)에 대한 시작기에 의한 실포장에서 적용성 실험 결과를 그림 12에 예시하였다. 작업기의 자세각(제어각)은

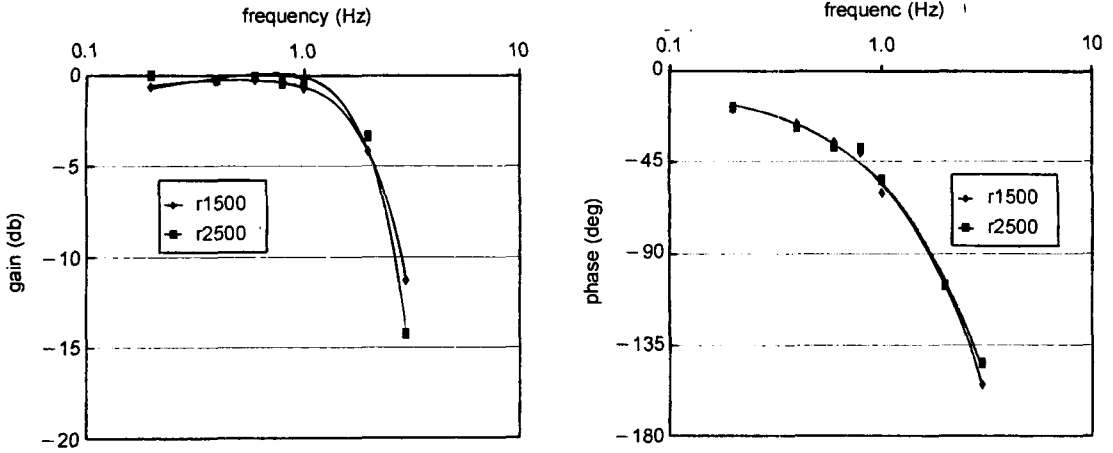


Fig. 11 Gain and phase diagram of control system.

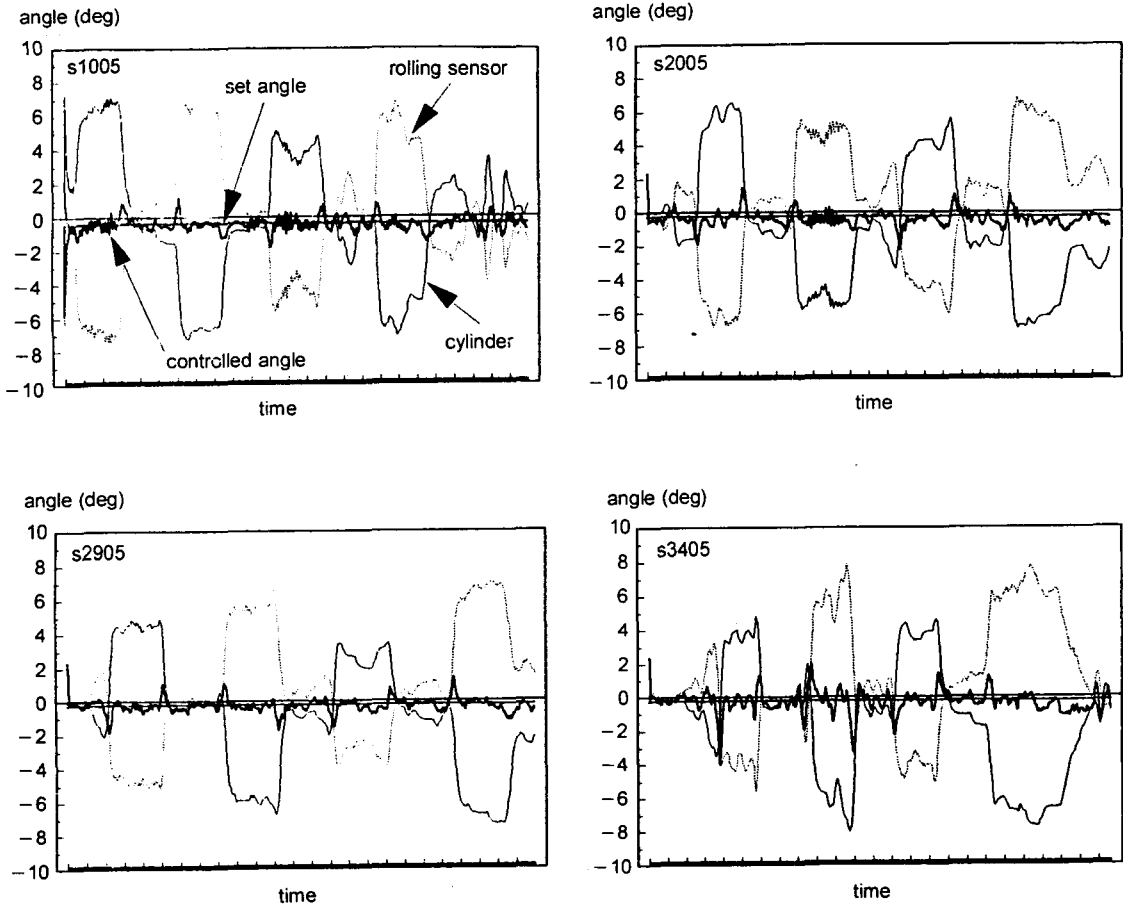


Fig. 12 Results in field experiments at 1.0, 2.0, 2.9 and 3.4 km/h of ground speeds.

실린더 변위센서 및 차체의 롤링 센서로부터의 신호에 의해서 계산되었다.

그림 12의 실험 결과로부터 제어 시스템은 트랙터의 주행 속도 3.4 km/h의 범위내에서는 인위적으로 가해진 차체의 롤링에 의한 작업기의 자세 변화에 대해  $\pm 1.0^\circ$ 의 편차 범위 내에서 제어되고 있음을 알 수 있다. 그러나 3.4 km/h의 주행 속도에서 트랙터의 차륜이 실험을 위해 파 놓은 구덩이에 들어가고, 나오는 순간 약간의 헌칭(hunting) 현상이 관측되었다. 이러한 현상은 제어 시스템이 가지고 있는 응답 지연에 의한 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

불균일한 포장면 및 차륜의 침하 등으로 인해 트랙터 차체에 롤링 현상이 일어나며, 3점 지지 장치에 의해 차체와 연결되어 있는 로타리 작업기의 자세에 변화가 발생된다. 이러한 롤링 현상에도 불구하고 작업기의 자세를 항상 수평 또는 설정각도로 유지하기 위한 자세 제어 시스템을 설계하고, 실내에서의 응답 특성 실험 및 실외 포장 실험을 통해 제어 시스템의 실포장에서의 적응성을 검토하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) 예비 실험의 결과로부터 유압 실린더에의 입력 유량에 대한 응답성은 실린더 변위  $\pm 5\text{cm}$  (자세각: 약  $\pm 10.0^\circ$ )에 대해 약 0.3초의 응답성을 보여주었으며, 응답 특성도 헌칭 없이 안정된 단조 증가의 경향을 보여주었다. 그러나, 컴퓨터에 의한 제어 신호에도 불구하고 실린더가 응답하지 않는 40 msec의 불감대가 관측되었다.

2) 제어 시스템의 과도 응답 특성은 헌칭없이 안정된 특성을 보여주었으며, 정상 상태에서의 정상 편차(약  $\pm 0.3^\circ$ )도 거의 무시 가능한 범위내에 있음을 알 수 있다.

3) 0.6Hz의 입력 주파수 범위내에서는 입력 신호

에 대한 응답성에 약간의 위상차가 관측되었으나 제어 시스템이 입력 신호에 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 0.6Hz 이상에서는 입력 주파수의 증가와 함께 이득 저하 및 위상차의 증가가 관측되었으며, 특히 4Hz 이상에서는 추종성이 전혀 인정되지 않았다.

4) 포장 실험 결과로부터, 작업기의 자세는 주행 속도 3.4 km/h에서 실험을 위해 파놓은 구덩이에 차륜이 들어가고 나오는 순간에 약간의 헌칭 현상이 관측되었으나, 전체적으로는 약  $\pm 1.0^\circ$ 의 편차 범위내에서 제어 시스템에 의해 제어되었다.

5) 결론적으로, 설계된 자세 제어 시스템은 실내외 실험의 결과로부터 실포장에서의 로타리 작업기의 자세 제어 시스템으로서 위에서 보듯이 충분히 적용 가능한 응답 특성을 보여주었다.

## 참 고 문 헌

1. Doi, J. and Y. Yasuda. 1964. Dynamics of 3 points link hitch (1) - position of hitch point and orientation of hitch plane. JSAM 26(3):149-155.
2. Hobbs, J. and H. Hesse. 1980. Electronic/hydraulic hitch control for agricultural tractors. SAE paper No. 801018.
3. Dobrinska, R. and R. Jarboe. 1981. The development and application of electro-hydraulic control system for Case 4WD tractors. SAE paper No. 810941.
4. Yoshiaki Misao. 1983. Tractor seat with automatic inclination compensation by using microcomputer. JSAM 45(2):239-244.
5. Thomas, B. E. and M. A. Bergene. 1989. Tractor three point hitch control system. SAE paper No. 891835.
6. Yi Jiang, Nobuo Honami and Shigeo Umeda. 1992.

- Microcomputer control system for tractor implement(part 1) – constitution of programable control system for three point linkage by electro-hydraulic method. JSAM 54(3):5-13.
7. Yi Jiang, Nobuo Honami and Shigeo Umeda. 1992.

- Microcomputer control system for tractor implement(part 2) – controls for tilling depth, load and attitude angle of rotary tilling. JSAM 54(4):5-13.
8. CQ출판사. 1994. 특집 실용전자회로설계메뉴얼 (2). 트랜지스터기술 No. 37:84-85.