

경사지 트랙터의 자동 수평기구부 개발 및 응답 특성에 관한 연구

이상식 문정환 이규승 박원엽 이충호 황 현

Development of an Automatic Leveling Mechanism and Response Properties for the Slope Tractor

S. S. Lee J. H. Mun K. S. Lee W. Y. Park C. H. Lee H. Hwang

Abstract

When a slope tractor works on the slope land, it travels usually along the contour and slope line. In that case, the efficiency of work generally decreases and the safety of the operator caused by the overturn of the tractor should be considered. Maintaining the tractor body being horizontal during the travel is crucial to solve problems.

To overcome such a problem, an automatic leveling control system for slope tractor has been developed. The system composed of sensor for measuring rolling and pitching inclination of the slope tractor chassis, controller, hydraulic control system and mechanism. The limit angle of the leveling control was set up to be $\pm 15^\circ$ for rolling, $\pm 7^\circ$ for pitching. The proposed control and hydraulic power system was implemented to the prototype slope tractor. This paper shows results about development of the automatic leveling mechanism and response properties for slope tractor.

Keywords : Slope tractor, Slope land, Leveling control, Rolling, Pitching

1. 서론

건설부의 토지분류(건설교통부, 1981)에 따르면 전 국토면적 중 경사도 5° 미만은 약 21.1%에 불과하다. 그리고 5° 미만의 대부분 평지는 주택 및 공장 용지 등으로 사용되고 있고, 현재 조성되어 있는 농경지마저도 대부분 없어져 가고 있는 실정이다. 그런데 현재 경사도 5° 이상의 토지에서의 농경지 작업은 특용 작물 등을 중심으로 활성화 되고 있는 실정이다. 하지만 경사도 5° 이상의 토양에서 트랙터로 작업 할 경우, 경사로 인하여 작업자의 위험부담이 높아지고 트랙터 작업 효율은 현격히 떨어진다.

일반적으로 트랙터의 경사지 작업에서는 등고선 방향 및 등판 방향으로 작업을 하게 된다. 등판 방향 작업에서는 급경

사에서 후방전도의 위험 증대 및 토양 침식 현상이 발생하는 문제점이 있다. 그리고 등고선 방향 작업에서는 작업 조작성의 저하, 편하중에 의한 견인성능 저하 및 횡전도에 의한 안전성 저하로 인하여 불안감을 증가시키는 문제점이 있다.

이러한 문제점을 보완하여 경사지에서도 트랙터를 경사지에서 사용하기 위한 연구가 일본 및 구미를 위주로 이루어지고 있다(Fumihiki 등, 1975). Tajiri 등(1988, 1889)은 경사지에서 트랙터의 차체 수평을 위하여 전차축은 평행사변형 링크기구 구조이고, 뒷차축은 단축식 링크기구 구조로 설계하여 연구하였다. 특히 임업 분야에서는 스웨덴을 중심으로 이미 상용화되어 작업 현장에서 쓰이고 있는 실정이다(Han 등, 1990).

우리나라와 같은 경사지가 많은 나라는 경사지 작업에서의

This study was supported by the research fund supported by Agricultural R&D Promotion Center. This article was submitted for publication in September 2004, reviewed and approved for publication by editorial board of KSAM in October 2004.

The authors are S. S. Lee, KSAM member, Research Professor, J. H. Mun, K. S. Lee and H. Hwang, KSAM member, Professor at the Sungkyunkwan University, Suwon, Korea, W. Y. Park, KSAM member, Assistant Professor, at the Hankyong National University, Ansong, Korea, C. H. Lee, KSAM member, Research Professor at the Technology Innovation Center, Jeonju University, Jeonju, Korea. The corresponding author is H. Hwang, Professor at the Sungkyunkwan University, 440-746, Suwon, Korea; E-mail : <hhwang@skku.ac.kr>

문제점을 해결할 수 있는 장치가 개발되어야 하겠다. 그러므로 트랙터의 주행 방향에 따른 차체의 경사 정도에 의한 문제점 등을 해결하기 위해서 차체의 수평기구 장치는 필수적이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 평지 작업 및 경사지에서도 항상 차체가 수평으로 유지하는 경사지 트랙터의 수평기구 장치의 링크부를 설계, 제작하였다. 그리고 응답 특성 실험을 위하여 실험 장치를 제작하고, 이를 이용하여 임의의 경사각 변화에 따른 시스템의 동작 상태 및 제어 성능을 알아보았다.

2. 기구부

가. 기구 설계

경사지 트랙터 수평기구 장치의 임의의 승하강, 각도조절 및 자세 제어를 위하여 앞차축은 센터핀 방식으로 기존의 트랙터에 부착된 차축을 적용하였고, 뒷차축은 그림 1과 같은 형태로 설계, 제작되었다. 뒷차축의 기구부는 동력전달 기어, 하우징, 유압 실린더 및 타이어 등으로 구성하였다. 유압 실린더는 변위 센서가 일체형으로 장착되어 있으며 실린더 작동으로 기구가 작동되는 구조이다.

그림 1은 평지에서 수평기구 장치가 초기 수평을 유지한 상태이고, 이때의 기구부의 기구학적 관계식은 다음과 같다.

식 (1)은 유압 실린더의 작동에 의한 각도 α 이다.

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{i^2 + j^2 - (s \pm ds)^2}{2ij} \right] \quad (1)$$

- 여기서 α = 수평링크 AC와 링크 BC와의 사이각(°)
 i = 유압 실린더 고정 힌지점 A와 링크 고정 힌지점 C 사이의 거리(mm)
 j = 링크 BC의 길이(mm)
 s = 유압 실린더 중립 위치의 전체길이(mm)
 ds = 유압 실린더 변위(mm)

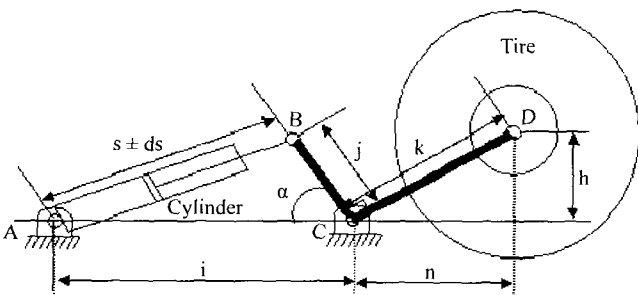


Fig. 1 Schematic view of linkage mechanism for kinematic analysis.

그리고, 뒷차축의 중심에 대한 수평 중심의 높이는 식 (2)와 같다.

$$h = k \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

여기서 h = 타이어의 중심에 대한 수평 중심의 높이(mm)
 k = 링크 CD의 길이(mm)

유압 실린더 변위에 따른 앞차축과 뒷차축과의 축간 거리 변화에 대한 계산은 식 (3)과 같다.

$$n = k \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

여기서 n = 축간 거리 변화량(mm)

따라서 전체 축간 거리는 앞차축과 뒷차축과의 초기 거리에서 식 (3)의 축간 거리 변화량을 합한 값이며 식 (4)와 같다.

$$n_1 = \text{basic distance} + n \quad (4)$$

여기서 n_1 = 전체 축간 거리 변위(mm)

그리고 지면 경사각에 대한 자세 제어는 경사면의 경사각을 측정하여 제어하도록 되어 있으므로, 지면의 경사각은 그림 2에서 보는 바와 같이 기구부가 제어되므로 식 (5)를 구할 수 있다.

$$\tan \theta = \frac{h_1 - h_2}{l} \quad (5)$$

따라서 지면 경사각 θ 는 식 (6)과 같다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{h_1 - h_2}{l} \right) \quad (6)$$

나. 유압 실린더 작용력

유압 실린더에 필요한 유압은 식 (7)에서 보는 바와 같이

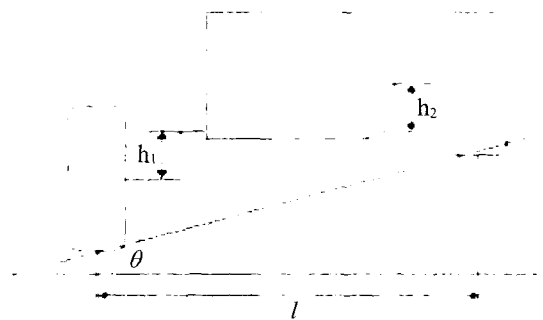


Fig. 2 Schematic view of a slope tractor at the front view.

실린더의 단면적 및 실린더에 작용하는 힘에 의해 결정된다. 그림 3은 실린더에 작용하는 힘에 대한 관계를 보여주고 있고, 운동역학적 관계식은 다음과 같다.

$$p = \frac{F}{A} \quad (7)$$

여기서 p = 압력(kg/cm²)
 F = 실린더에 작용하는 힘(kg)
 A = 실린더의 단면적(cm²)

피스톤에 작용하는 힘 F 는 주로 차체 하중 W 에 의해 발생된다. 본 제어시스템의 기구부는 실린더의 위치 변위 변화($B \rightarrow B'$)에 따라 차륜은 노면에 수평방향($O \rightarrow O'$)으로, 차축 중심은 수직방향($A \rightarrow A'$)으로 이동하며, 실린더를 작동시킨다.

O' 점에 관한 모멘트의 합은 식 (8)에서 보는 바와 같이 0이 되어야 한다.

$$\sum Mo' = 0 \quad (8)$$

따라서, 실린더에 작용하는 힘 F 는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{Xw}{Xp} \times W \quad (9)$$

여기서 Xw = O' 와 A' 사이의 수평거리(mm)
 Xp = O' 과 $B'D'$ 사이의 수선거리(mm)
 W = 500(kgf)

위 식 (9)에서 Xw 및 Xp 는 피스톤의 변위에 의해 결정되고, Xw 는 식 (10), w 는 (11)에 의해서 계산된다.

$$Xw = k \cdot \cos w \quad (10)$$

$$w = -90^\circ + \cos^{-1} \left(\frac{j^2 + k^2 - ds^2}{2jk} \right) \quad (11)$$

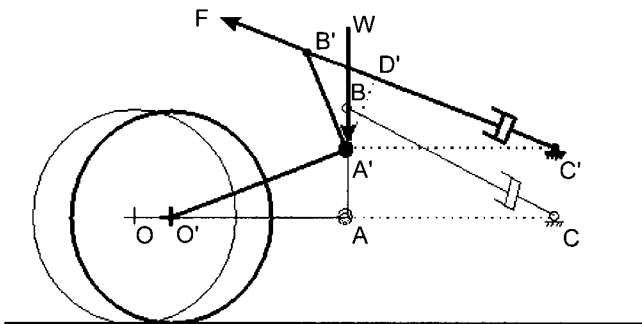


Fig. 3 Operating force of piston displacement and weight.

여기서 w = A' 에서의 수평선과 선분 $A'O'$ 가 이루는 각($^\circ$)

j = 선분 $A'B'$ 의 길이(mm)

k = 선분 $A'O'$ 의 길이(mm)

ds = 실린더의 변위(mm)

그리고 Xp 는 식 (12)와 같다.

$$Xp = i \cdot \cos \alpha' \quad (12)$$

여기서 i = 선분 $A'C'$ 의 길이(mm)

α' = 선분 $A'C'$ 와 선분 $A'D'$ 가 이루는 각($^\circ$)

3. 재료 및 방법

가. 실험장치 및 방법

실험 장치는 크게 경사 실험 장치와 계측장비로 나눌 수 있다. 경사 실험 장치는 제어장치, 제어 판넬, 4개의 안전 보조 실린더, 상판, 유압시스템 및 4개의 제어 실린더 등으로 구성하였다. 계측장비는 실험 데이터를 수집할 수 있는 데이터 레코드, 입출력 값이 정확하게 수집되는 지를 측정하는 오실로스코프 등으로 구성하였다.

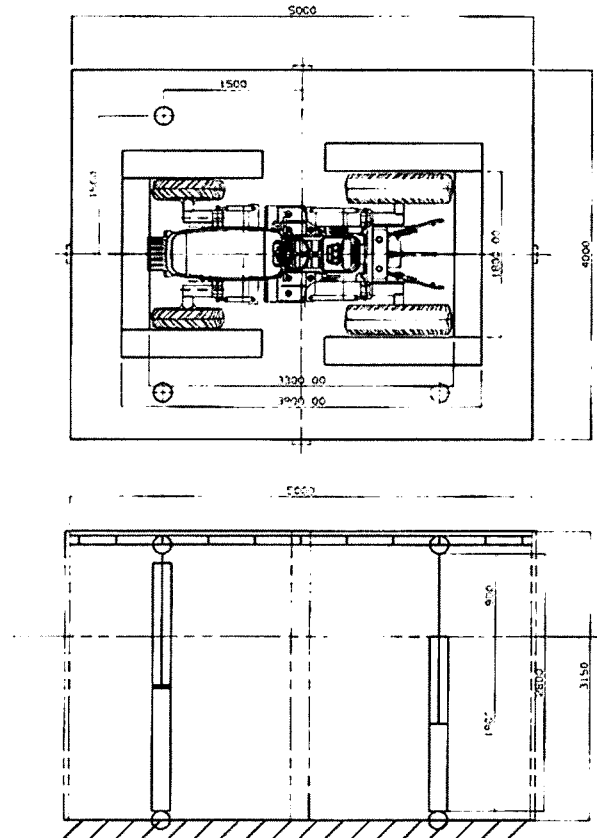


Fig. 4 Schematic view of slope tester.

경사 실험 장치는 그림 4에서 보는 바와 같이 트랙터의 전도각, 각 바퀴의 하중 및 무게 중심을 측정하고, 경사지용 트랙터의 차체 자세 제어 성능을 실험하는 장치이다.

경사 실험 장치의 설계에서 트랙터의 하중이 중요한 인자이고, L사에서 생산하고 있는 트랙터의 최고 하중은 약 3.5 ton이다. 이를 감안하여 기구 장치 및 구조물을 설계하였다. 경사판의 크기는 4 m × 5 m, 경사판의 최대 각속도는 10°/s로 하였고, 임의로 속도 조절이 가능하도록 하였다. 그리고 경사판의 최대 각도는 좌우 경사도는 -50° ~ +50°, 전후 -20° ~ +20°로 설계, 제작하였다.

그리고 실험을 위한 시작기의 실린더 입력 최대 유량은 10 l/min으로 고정하였으며 트랙터 엔진 회전수는 1000 rpm, 2000 rpm, 2700 rpm으로 하였다. 제어 방향은 등고선 방향 입력 각도를 -10°, -5°, 5°, 10°, 등판 방향 입력 각도를 -5°, 5°로 변화 시키면서 실시하였다.

나. 시작기

시작기는 그림 5와 같으며 L사의 GT360D 모델을 사용하

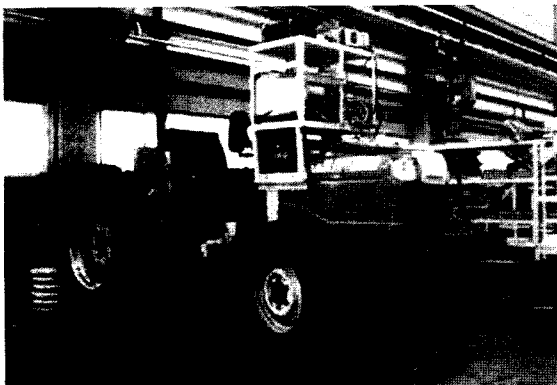


Fig. 5 Proto type of slope tractor.

였다. 최고 속도는 30 km/h, 최대 출력은 36 PS, 유압펌프의 최대 용량은 30 l/min이며 상세제원은 표 1과 같다.

4. 결과 및 고찰

가. 기구부 분석

경사지 트랙터 수평 장치의 기구 작동 범위는 실제 제작된 시작기를 통하여 측정하였다. 그림 6은 좌우 경사 움직임에 대한 실린더 변위의 결과를 보여주고 있으며 선형적으로 변화하는 것을 알 수가 있었다. 지면 경사각에 대하여 차체를 수평 자세로 유지할 수 있는 롤링 최대각은 ±26°이고 피칭 최대각은 ±11°이다. 이 때 실린더 최대 변위는 -100.5 mm에서 +100.5 mm까지 움직이는 것을 알 수가 있었다. 그러므로 작동 여유를 고려하여 시작기의 롤링 제어 각도는 ±15°, 피칭 제어 각도는 ±7°까지 제어되도록 설계하였다.

그림 7은 전후 경사 움직임에 대한 축간 거리 변화를 보여주고 있다. 지면 경사각이 0°인 경우 최대 축간 거리는 좌, 우 차축 모두 2280 mm이다. 그리고 지면 경사각이 +15°인 경우는 계곡측 차륜의 축간거리는 2207 mm, 산측 차륜의 축간

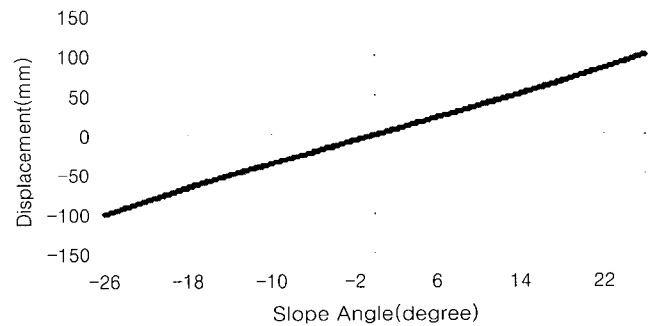


Fig. 6 Displacement of hydraulic cylinder by slope angle.

Table 1 Specification of tractor.

Performance	Speed Draft force	0 - 30 km/hr 250 kgf
PTO	Type Shift	Independent 3
Engine	Type Max. rpm Output	Diesel 2,850 rpm 36PS / 2,700 rpm
Feature	Length × Height × Width	3,450 × 2,050 × 1,400 mm
Tire	Front Rear	8 - 16(4PR) 12 - 24(8PR)
Weight		1,660 kg
Maximum Attitude Control Angle	Rolling Pitching	± 15° ± 7°

거리는 2214 mm이다. 산측 차륜의 축간 거리와 계곡측 차륜의 축간 거리 변화에서의 차이는 ± 7 mm 이내로 트랙터의 제작 및 조립 공차 에러에 의한 것으로 판단된다.

실린더의 변위 변화에 따른 힘 F 사이의 관계는 그림 8과 같다. 임의의 최대 작동 범위 100.5 mm에서의 실린더의 최대 힘은 810 kg이다. 따라서 실린더의 필요 압력 P는 실린더의 단면적이 20.43 cm^2 이므로 39.65 kg/cm^2 이다. 최대 압력에서 안전율 30%를 감안하면 약 52 kg/cm^2 가 된다. 그러므로 시작기에 셋팅된 유압 안전밸브는 최대압력 130 kg/cm^2 이므로 실

린더의 작동 압력은 충분하다고 판단된다.

나. 제어 성능 실험

트랙터의 전도 및 안전성 확보를 위하여, 예비 실험으로 등고선 변화에 의한 수평기구 장치의 작동에서 바퀴 하중의 변화를 측정하여 전도의 안전성 여부를 확인하였다. 그리고 수평기구 장치의 제어성능 실험에서는 경사 실험 장치를 이용하여 성능을 평가하였다.

예비 실험은 경사 실험 장치를 등고선 방향 15° 좌우 변화시켜 바퀴의 하중 변화를 측정하였다. 수평기구 장치가 작동할 때, 4바퀴 하중의 변화는 최대 약 $\pm 10 \text{ kg}$ 이내로 변화하였고, 트랙터의 전체 하중을 고려한다면 전도에 영향을 전혀 미치지 않을 것으로 판단된다.

그림 9는 트랙터를 경사 실험 장치에서 수평기구 장치가 좌우 동작한 상태를 보여주고 있다. 등고선 및 등판의 변화에 의한 제어 시스템의 작동에서 트랙터가 전도되거나 바퀴 하중의 급격한 변화가 없으므로 시스템의 적용이 가능한 것으로 판단된다.

실험 장치를 이용한 좌우 동작한 실험에서는 대표적으로 유량 10 lpm, 트랙터 속도 2000 rpm과 입력 각도 10° 조건하에서 실험 결과를 그림 10에 예시하였다. 그림 10에서 보는 바와 같이 컴퓨터에 의한 제어 신호에 제어 시스템이 작 작동하고 있음을 알 수 있으며, 또한 제어 신호의 입력에 의한 과도 상태에서의 제어 시스템의 응답 특성은 헌팅 없이 단조 증가의 안정된 응답 특성을 보여주고 있다.

제어 시스템은 등고선 방향 제어 입력 신호에 대하여 약 1° 정도의 정상상태 오차를 갖고 있으며, 정착 시간은 $\pm 5^\circ$ 제어에서 약 1.3초, $\pm 10^\circ$ 제어에서 약 2.2초로 나타났다. 5° 동작에서의 정착 시간이 10° 동작 시간과 비교하여 거의 절반으로 반응하지 않은 것은 경사실험 장치의 입력 시간 차이

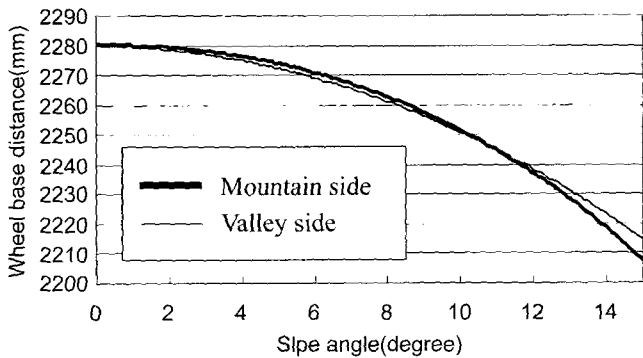


Fig. 7 Wheel base by slope angle.

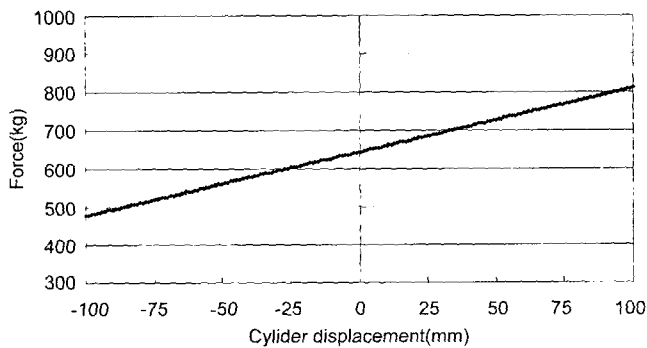
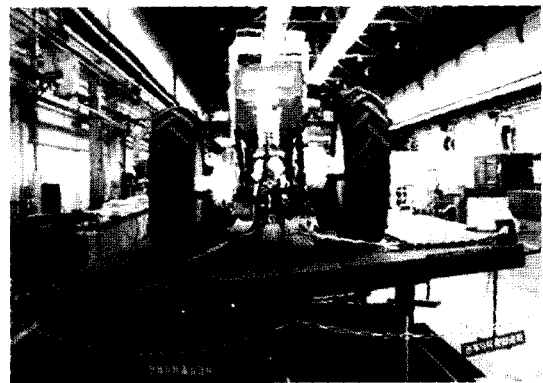


Fig. 8 Result of piston operating force about cylinder displacement.



(a) Front view



(b) Rear view

Fig. 9 Automatic leveling of control system at $+10^\circ$ rolling operation.

에 따른 것이다.

그림 11은 트랙터를 경사 실험 장치에서 전후 수평기구 장치가 작동한 상태를 보여주고 있다.

실험 장치를 이용한 전후 동작한 실험에서는 대표적으로 유량 10 lpm, 트랙터 속도 2000 rpm과 입력 각도 5° 조건하에서 실험 결과를 그림 12에 제시하였다. 그림 12에서 보는 바와 같이 좌우 제어 실험 분석 결과와 마찬가지로 제어 신호의 입력에 의한 과도 상태에서의 제어 시스템의 응답 특성은 헌팅 없이 단조 증가의 안정된 응답 특성을 보여주고 있다.

제어 시스템은 등판 방향 제어 입력 신호에 대하여 약 0.5°

정도의 정상상태 오차를 갖고 있으며, 정착시간은 +5° 제어에서 약 1.2초, -5° 제어에서 약 1.8초로 나타났다. 피치 제어에서 상승과 하강에 따라서 정착 시간에서 차이가 있는 것은 유압 시스템에서 차체의 급격한 낙하 방지를 위한 로드 컨트롤 밸브의 셋팅 조절의 차이 때문이다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 설계, 제작된 기구부에 대하여 분석하였고, 경사 실험 장치를 통하여 제어 시스템 성능을 평가한 그 결과

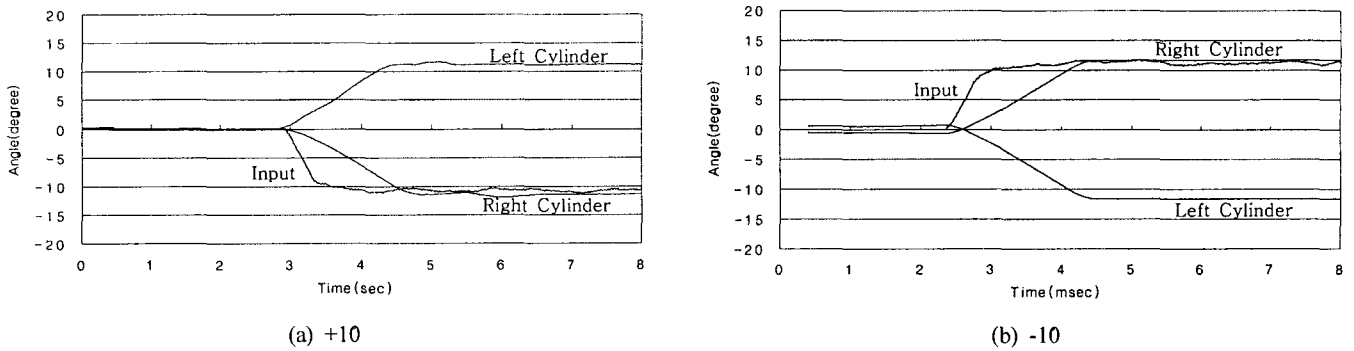


Fig. 10 Result of response test of attitude control system at the flow rate of 10 l/min and the rolling angle of $\pm 10^\circ$.

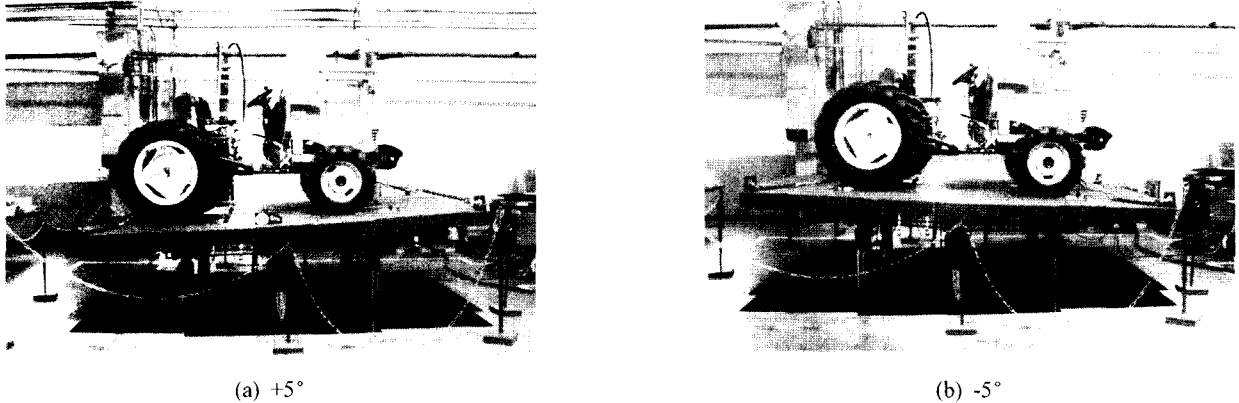


Fig. 11 Automatic leveling of control system at $\pm 5^\circ$ pitching operation.

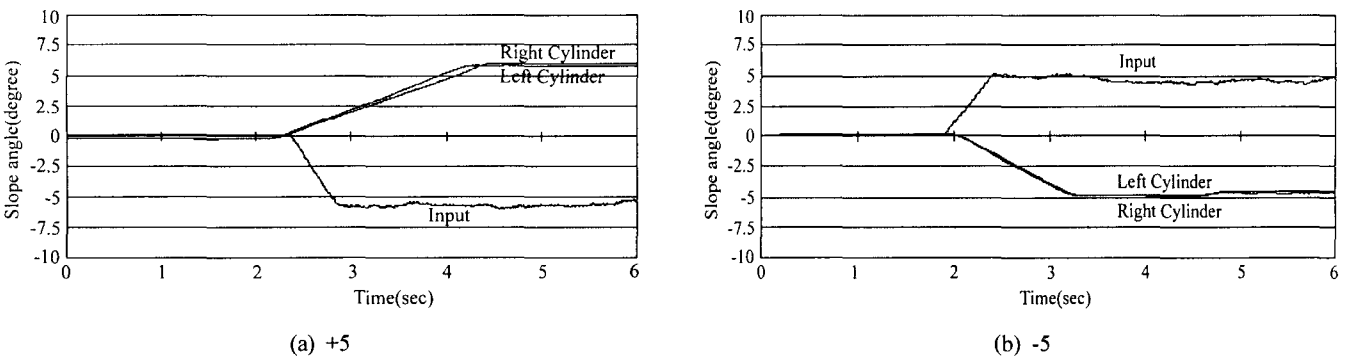


Fig. 12 Results of response test of attitude control system at the flow rate of 10 l/min and the pitching angle of $\pm 5^\circ$.

를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 시작기의 롤링 제어 각도는 $\pm 15^\circ$ 까지 하였고, 피칭 제어 각도는 $\pm 7^\circ$ 까지 제어되도록 설계하였다.
- (2) 등고선 방향 제어 입력 신호에 대하여 약 1° 정도의 정상 상태 오차를 갖고 있으며, 정착 시간은 $\pm 5^\circ$ 제어에서 약 1.3초, $\pm 10^\circ$ 제어에서 약 2.2초로 나타났다. 등고선 방향 제어의 5° 동작에서 정착 시간이 10° 동작 시간과 비교하여 거의 절반으로 반응하지 않은 것은 경사실험 장치의 입력 시간 차이에 따른 것이다.
- (3) 등판 방향 제어 입력 신호에 대하여 약 0.5° 정도의 정상 상태 오차를 갖고 있으며, 정착시간은 $+5^\circ$ 제어에서 약 1.2초, -5° 제어에서 약 1.8초로 나타났다. 피칭 제어에서 상승과 하강에 따라서 정착 시간에서 차이가 있는 것은 유압 시스템에서 차체의 급격한 낙하 방지를 위한 로드 컨트롤 밸브의 셋팅 조절 차이 때문이다.
- (4) 등고선 및 등판의 변화에 의한 수평기구 장치의 작동에서 트랙터가 전도되거나 바퀴 하중의 급격한 변화가 없으므로 트랙터의 수평기구 장치로 적합한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, 1981, 토지분류조사보고서 (1972-1980).
2. Fumihiki S., Naotaka H. and Takemi M. 1975. Study on the Vehicles with Changing Vertical Location of Wheels, Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery -Special Lecture-. 650-658. (In Japanese)
3. Han Fløystad, Øystein Dale. 1990. TOHR 987 S - Terrengeskaper OG Produksjon I Tynning OG Sluttavvirkning. Norwegian Forest Research Institute. 11-32.
4. Tajiri I., Sato K. and Kitani O. 1988. Research on attitude control of tractors for sloping ground (part 1) - a machine manufactured for trial and its behavior-. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery. 50(6):35-44. (In Japanese)
5. Tajiri I. and Sato K. 1989. Research on attitude control of tractors for sloping ground (part 2) - Characteristics of parallel link for front wheels and ground load-. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery. 51(2):57-65. (In Japanese)