

〈기술논문〉

## 트랙터용 토로이달식 무단변속기 개발(2): 제어 시스템

### Development of Toroidal Type Continuously Variable-Speed Transmission for Agricultural Tractor(2): Control System

김 의 한\*, 이 재 천\*\*  
Eui-Han Kim, Jae-Cheon Lee

#### ABSTRACT

This paper describes the control system of the toroidal traction driver continuously variable-speed transmission(CVT) for a tractor. The instrumentation system, the hydraulic power control system and the principle control scheme were introduced.

Experimental tests in the bench and the tractor were conducted to validate the performance of the CVT utilizing the proposed controller. The speed of the vehicle was continuously changed to follow the speed set by driver under various operating conditions. Given the reduction ratio of the variator from 2.0 to 1.0, the settling time was about just 0.52 seconds which was satisfactory value for working with the tractor. It was also proved that the tractor could work with continuously variable speed under heavy load disturbances.

주요기술용어 : Toroidal(토로이달), CVT(Continuously variable-speed transmission : 무단변속기), Controller(제어기), Variator(가변기), RV(Reduction ratio of variator: 가변기 속도비)

#### 1. 서 론

최근 들어 트랙터에 대한 수요 패턴이 작업 편의성, 작업 효율 향상, 포장 적응 능력을 향상시키는 방향으로 바뀌에 따라, 기존 HST(Hydrostatic Transmission) 및 파워-시프트 변속기<sup>1)</sup>의 단점을 극복하고 포장 적응성이 우수한 트랙터용 무단 변속기를 개발하여야 한다는 필요성이 대두되고 있다.

이러한 필요성에 따라 본 연구진은 1 단계로

트랙터용 무단변속기의 메커니즘을 설계하여 무단변속기를 제작하였고, 실험을 통해 무단변속기 성능을 확인한 바 있다.<sup>2)</sup>

트랙터에 무단변속기를 장착할 경우, 외부 부하변동에 반응하여 운전자가 적정 속도비를 맞추기 위해 레버를 직접 조작하여야 하나, 전자 유압식 제어기를 설치할 경우, 외부 작업부하의 변동에 대해 운전자 대신 제어기가 적절한 속도비를 자동으로 제어하게 되므로 운전자는 매우 편리하게 농작업을 수행 할 수 있다. 또한 작업 부하에 대해 신속하고 적절하게 반응할 수 있기 때문에 부녀자나 고령자들도 쉽게 작업을 수행할

\* 회원, ITEC 대표이사

\*\* 회원, 계명대학교 기계자동차공학부

수 있으며, 작업 효율도 증진될 수 있다.

본 연구의 목적은 기 제작된 무단변속기 메커니즘<sup>2)</sup>을 바탕으로 운전자가 편리하게 운전할 수 있고, 농작업을 효율적으로 수행할 수 있는 전자 유압식 무단변속기 제어기를 개발하는데 있다. 현재까지 반-토로이달 무단변속기의 제어기<sup>3-6,13)</sup>와 벨트식 무단변속기의 제어기<sup>7-10)</sup>에 대해서는 여러 연구 결과가 있었으나, 본 연구의 대상인 전-토로이달 무단변속기의 제어기에 대해서는 가변기제어를 위한 마이크로프로세서 응용 무단변속제어<sup>14,15)</sup>와 유압제어회로 구성<sup>16)</sup> 외에 농업 트랙터용 무단변속기 제어기에 대해서는 거의 연구발표가 없는 실정이다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 제어 시스템 구성

무단변속기 메커니즘을 제어하기 위한 제어기는 Fig. 1과 같이 계측시스템, 구동 시스템 및 제어용 컴퓨터로 구성된다.

무단변속기 제어기는 지속적으로 변화하는 부하와 운전자의 조작 신호에 따라 신속한 제어를 수행하여야 하며, 트랙터 및 작업 환경의 다양한 외란에 의한 영향을 최소화시킬 수 있어야 한다. 이를 위해, 무단변속기의 각종 정보를 수집하기 위한 계측시스템을 구성하였고, 유압을 이용하는 모드(속도 구간) 전환 클러치, 롤러 실린더, 유압 밸브 블록 및 밸브 구동 전자 회로 등으로

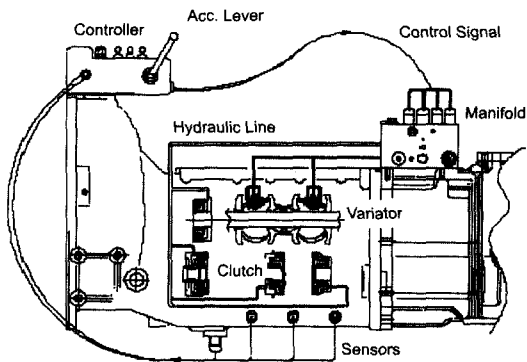


Fig. 1 CVT controller layout

구동시스템을 구성하였다.

각 계측시스템으로부터 자료를 수집하고, 수집된 자료를 기초로 CVT 메커니즘 제어를 위한 제어량을 연산하며, 연산된 제어량을 구동시스템으로 출력하기 위해 산업용 컴퓨터를 이용하였다. 또한 컴퓨터와 각 장치간의 접속을 위해 필요한 기능을 갖춘 인터페이스 보드들도 개발, 장착하였다.

### 2.2 계측시스템

CVT 메커니즘의 제어를 위한 CVT 제어기의 계측시스템을 회전속도 계측시스템, 조작 신호 계측시스템, 유체 온도 계측시스템 그리고 압력 계측시스템 등으로 구성하였다.

#### 2.2.1 회전속도 계측시스템

회전속도 계측시스템은 주행이나, 작업 시에 CVT 트랙터에 인가되는 부하를 간접적으로 계산하고, 변속 알고리즘의 변속 시점을 결정하기 위한 것으로, 엔진 출력 축, 가변기 축, 변속기 출력축의 회전속도를 계측한다.

엔진 출력 축과 가변기 축 회전 속도간의 비로 계산되는 가변기의 속도비(RV)는 제어기의 제어 대상이므로, 부하 극복을 위한 피드백 자료로 활용될 수 있도록 하였다. 또한, 가변기 속도비와 무관한 변속기 출력 축 회전속도는 모드전환을 위한 변속 시점을 결정하기 위해 계측되며, 트랙터의 주행속도로도 계산할 수 있다. 회전속도 계측을 위한 센서로는, 큰 회전 속도를 검출하는데 유리하며, 자동차의 자동변속기 등에 폭넓게 적용되고 있는 마그네틱-픽업을 사용하였다.

#### 2.2.2 조작신호 계측시스템

조작 신호 계측시스템은 운전자가 트랙터의 주행에 필요한 최소한의 운전 정보를 지시할 때, 이를 즉시 제어기가 수집하여 제어에 적용하기 위한 장치이며, 가속 페달 각 변위, 최고 속도 설정 레버 각 변위 등을 계측한다. 또한 전, 후진 설정 스위치 및 급 제동 스위치도 조작 신호 계측시

스텝에 포함되며, 제어가 항상 이들 스위치들을 검사하여 이상 신호가 발생되었을 때, 적절한 조치를 취할 수 있도록 하였다.

### 2.2.3 오일온도 계측시스템

오일 온도 계측시스템은 무단변속기 동력 전달용 오일의 온도를 계측한다. 유압 제어시스템의 오일 온도는 제어 압력과 작동력간의 관계식에 영향을 주기 때문에, 유압 실린더를 통해 가변기 속도비를 제어할 때 고려되었다.

온도 센서로는 다양한 온도 센서 중, 전기 신호의 인출이 가능하고, 냉접점 보상 등의 추가 교정이 필요 없는 백금 축온저항식 온도 센서인 Pt-100을 사용하였다.

### 2.2.4 오일압력 계측시스템

가변기 속도비의 변화는 롤러 실린더 내 압력의 제어를 통해 구현되는데, 이 압력을 계측하여 제어의 피드백 자료로 활용하고, 외부로부터의 부하량을 추정하기 위해 오일 압력 계측시스템을 구성하였다. 유압 계측 센서로는 반도체 스트레인 게이지 형식의 압력 센서를 사용하였다. 본 연구에서 선정된 압력 계측 센서는 신호 처리 회로를 내장하고 있고, 2선식 신호 처리 방식을 채택하고 있으며, 비교적 소형이다.

## 2.3 유압제어시스템

### 2.3.1 시스템 구성

증속, 감속, 변속, 부하 극복 등 무단변속기 메커니즘의 기능을 구현하기 위해, 제어기 구동시스템으로써 모드 전환 클러치, 롤러 실린더, 유압 밸브 블록 및 밸브 구동 전자회로 등을 설계, 제작하였다.<sup>11)</sup> Fig. 2는 유압 제어를 위한 무단변속기 유압 회로를 나타내며, Fig. 3은 유압 회로에 따라 설계 제작된 유압 밸브 블록의 사진이다.

유압 제어 시스템의 가장 핵심이 되는 부분은 가변기 롤러에 힘을 가하기 위해 복동 실린더 양단에 차압(differential pressure)을 주는 한 쌍의 유압 조절 밸브인데, 본 연구에서는 독일 Hydraulic

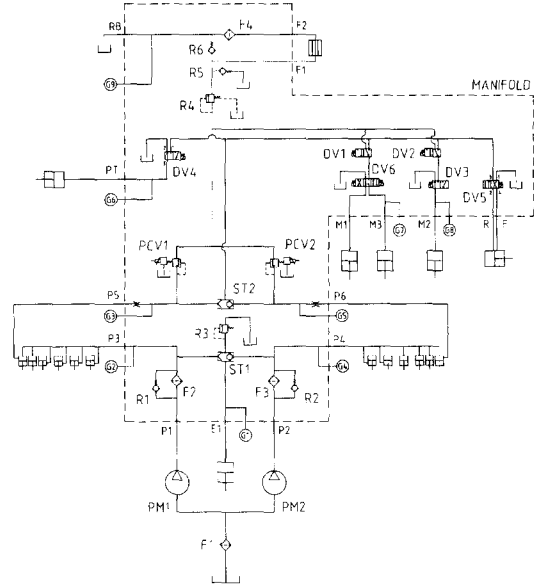


Fig. 2 CVT hydraulic circuit

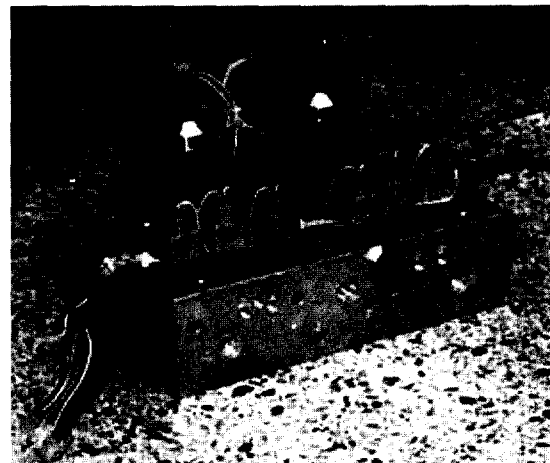


Fig. 3 CVT hydraulic valve block

Ring사의 비례 제어형 릴리프 밸브를 이용하였다. 또한 펄스폭변조(PWM) 신호에 의해 작동하는 비례유량제어밸브<sup>12)</sup>는 본 연구에서 자체 제작한 밸브 구동장치를 이용하였다. 밸브 구동 장치의 출력은 밸브 특성에 맞춰 200Hz, 12V로 설정하였다.

자동차나 산업용 기계의 제어용 컴퓨터는 부피가 작고, 전력 소모가 적으며, 내진동성이 큰

원칩(one chip) 마이컴이 대부분이다. 그러나 본 연구에서는 무단변속기 제어 알고리즘 구현에 중점을 두고, 원칩 마이컴 개발 중 발생할 수 있는 문제점을 배제하기 위해, 산업용 컴퓨터 (Pentium III)를 제어용 컴퓨터로 사용하였다.

### 2.3.2 제어 알고리즘

무단변속기 제어 알고리즘은 Fig. 4와 같이, 메인 루틴(main routine)과 인터럽트(interrupt) 루틴으로 구분되며, 무단변속기 제어 변수 연산을 수행하는 루틴은 메인 루틴에 삽입시켰다.

전체 알고리즘은 초기화 루틴, 키 입력 루틴, 자료 수집 루틴, 목표 속도비 변경 루틴, 유압 밸브 제어 루틴 등으로 구성되며, 각 루틴은 순환 루틴 내에서 선택적으로 수행된다.

무단변속기 제어 알고리즘의 핵심인 목표속도비 변경 루틴은 트랙터에 걸리는 부하를 계산해 내고, 트랙터의 현재 속도를 계산하는 루틴으로, 모드 전환 여부와 비례제어밸브의 제어 여부를 판단한다.

또한, 작업 부하 변동이나 작업자의 가속 페달 변경 등에 대응하여 원활한 작업을 유지하기 위해 실시간으로 목표 속도비를 계산하는 루틴도 포함하고 있는데, 목표 변속비가 변경되면 PID 제어 방식의 속도비 제어 루틴이 작동하여 즉시 변경된 목표 속도비에 현재 속도비를 맞추도록 하였다.

제어 알고리즘의 개발 후 예비 실험을 통해 적정 제어 계수를 찾아내었고, 이를 룩업표(look-up table)로 정리하여 프로그램에 삽입시켰다.

### 2.3.3 CVT 성능시험

본 연구에서 개발된 무단변속기 및 제어기의 성능을 평가하기 위해 상기 설계된 속도와 실제 차속의 변화 비교 시험을 수행하였다. 또한, 유압 시스템의 핵심부품인 압력 비례 제어 밸브의 특성 시험을 수행하였으며, 제어기의 제어 성능을 대표할 수 있는 변속비 계단 응답 시험을 수행하였다. 그리고 개발된 무단변속기를 트랙터에 장착하고, 주행 시험과 작업 시험을 수행하여 CVT 작업 성능을 평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 기본 무단변속 성능시험

무단변속기 장착 트랙터의 대표적인 특징으로 일정 엔진 속도에서 무단 변속에 의해 차량 속도를 점차 증가하게 할 수 있는 기능을 들 수 있다. 이와 같은 성능을 확인하기 위해 입력 축 속도를 1000rpm으로 일정하게 유지한 상태에서 변속 유압밸브 조절에 의해 차량의 속도가 실제 무단 변속하여 원하는 속도까지 변화시키는 시험을 수행하였다.

Fig. 5는 속도비 변화에 따라 차량 속도가 무단 변속에 의해 증가하고 있음을 보여준다. Fig. 5에서 보면, 직선으로 표현된 이론 차속 및 RV에 대하여 실제 차속과 RV값이 작은 오차 범위 내에서 추종하고 있는 것을 볼 수 있다.

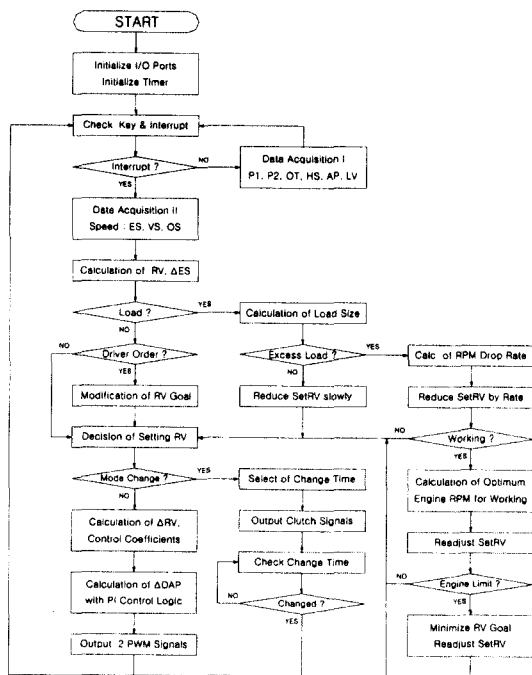


Fig. 4 Algorithm for the CVT controller

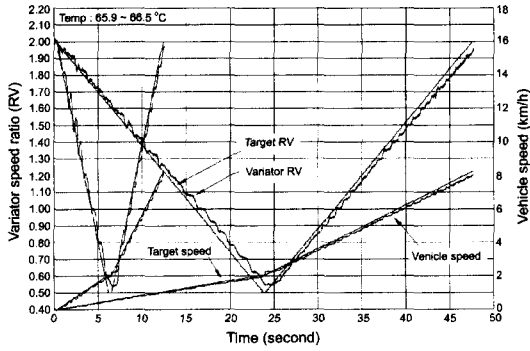


Fig. 5 Speed curves of CVT tractor

### 3.2 핵심부품 특성시험

무단변속기 제어기의 핵심 부품인 비례 제어 밸브의 특성 실험을 수행하였다. Fig. 6은 입력 전압 변화에 따른 가변기 속도비(RV) 변화 형태를 보여 준다. 초기 연구 단계에서, 입력 전압 변화에 따른 RV 변화가 선형적이라 예상했으나, Fig. 6에서 실제 RV 변화 곡선은 'S'자 형태로 나타났다.

RV 변화 형태가 Fig. 6과 같이 나타나는 것은 디스크 사이에서 롤러가 중앙에 위치할 때 안정되게 회전하지 못하고, 약간의 롤러-캐리지(roller-carriage) 작용력, 혹은 외부 부하 변화에 대해 작용력 균형이 깨지면서 어느 한쪽으로 이동하기 때문으로 판단된다. 또한, 다양한 RV 변화 특성 실험을 수행하였고, 그 결과들을 CVT 제어 알고리즘 개발에 이용하였다.

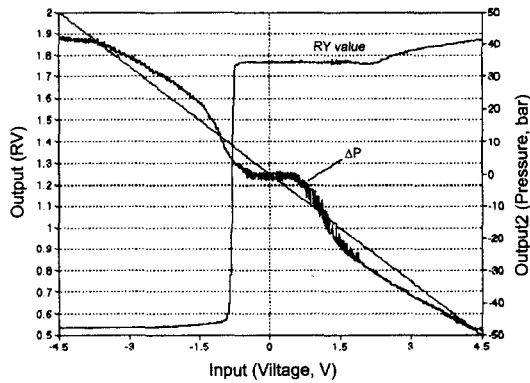


Fig. 6 Variation of Pressure differential( $\Delta P$ ) and RV value

### 3.3 변속비 제어성능시험

본 연구에서 개발한 무단변속기 제어기는 변속비 제어 기법으로 PID 제어 방식을 적용하였다. 비례, 미분, 적분 계수는 반복 실험을 통해 최적의 값을 찾아내었고, 모드 별로 적절한 계수를 적용할 수 있도록 룩업 표를 작성하였다.

특히 가변기 속도비의 중간 값이 아닌 2.0이나, 0.5 값으로의 계단응답 성능시험은 오버슈트를 기계적으로 방지할 수 있기 때문에 각 계수를 최대한으로 하여 실험을 수행하였다.

계단응답 성능시험의 대표적인 예로써, Fig. 7에 속도비 2.0로부터 1.0에 도달하는 성능 시험 결과를 나타내었다.

응답 곡선에서 상승시간은 0.33초로 나타났으며, 정정시간은 약 0.52초로 나타났다. 오버슈트는 없었으나, 상승시간을 줄이기 위해 제어 계수들을 조정하면, 1회 혹은 2회의 오버슈트가 나타나는 결과도 볼 수 있었다.

또한 Fig. 8은 속도비를 1.0에서 0.5로 변화시킬 때의 계단응답 성능시험 결과를 나타낸다. 이 경우는 속도비 변화 범위의 한계점인 0.5로 변화하는 것이기 때문에 비례제어밸브의 신호를 완전히 끊어주어도 오버슈트가 발생하지 않았다.

위와 같은 경우 상승시간을 감소시키기 위해 제어 계수들을 충분히 크게 해보았으나, 약 0.42초 이내로 줄일 수는 없었다. 이는 무단변속기 유압시스템 각 요소부품들의 지연과 가변기 메커

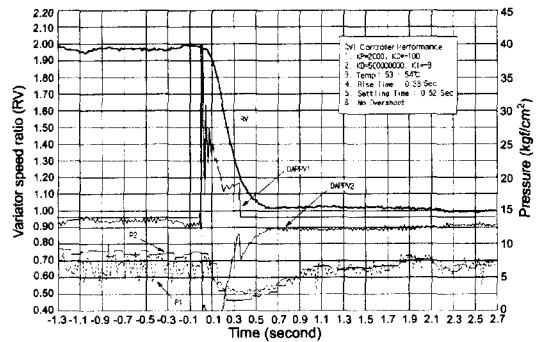


Fig. 7 Step response of the CVT controller (RV: 2.0 → 1.0)

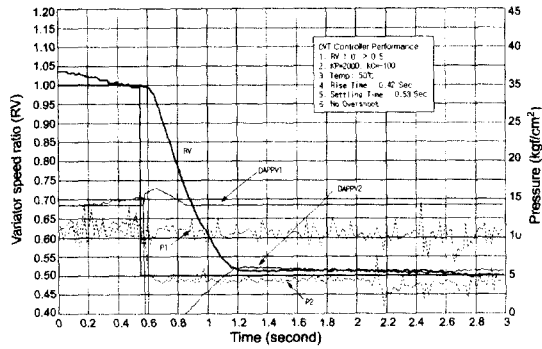


Fig. 8 Step response of the CVT controller (RV: 1.0 → 0.5)

니즘의 특성에 의한 것인데, 이 수치를 본 연구에서 개발한 CVT 제어시스템의 한계 값으로 판단하였다.

제어 성능 시험에서 나타나는 위와 같은 성능지수들은 무단변속기의 주행, 작업등을 수행하기에 충분히 작은 값이다. 따라서 본 연구에서 개발한 무단변속기의 가변기 속도비 제어에 대한 계단응답 성능은 트랙터의 무단변속 기능을 구현하기 위해 매우 우수한 것으로 판단된다.

### 3.4 무단변속 트랙터작업 성능시험

Fig. 9는 운전자가 가속 페달을 밟아 차량을 출발시키고자 할 때, CVT 제어가 차량의 속도를 점차 증가시키는 성능시험 결과를 나타낸다. 그림에서 보듯이, 운전자가 초기에 페달을 일정량 밟고 나서 가속페달에 더 힘을 가하지 않아도,

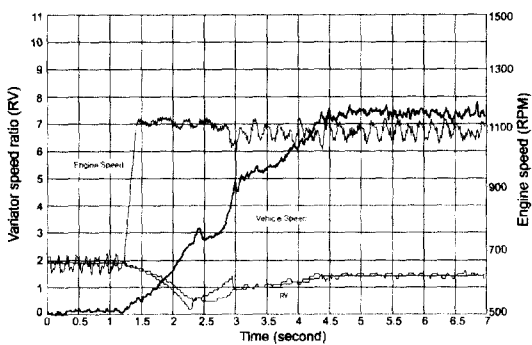


Fig. 9 A result of road test

CVT 제어기는 엔진에 부하가 걸리지 않는 한 계속 무단변속을 수행하여 차량의 속도를 증가시키고 있음을 볼 수 있다.

한편, 무단변속기 메커니즘에 지속적인 견인 부하를 줄 수 있는 작업인 쟁기 작업에 대한 성능 시험 결과는 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10에서 보듯이, 견인부하의 증가에 의해 엔진 회전속도가 감소하면 무단변속기 제어가 이를 감지하여 차량의 속도를 떨어뜨리고, 이에 따라 엔진 회전속도가 회복되면 다시 차량을 증속시키는 기능을 수행하고 있는 것을 확인할 수 있다.

참조로, 실제 트랙터 작업시 부하 변동에 의해 엔진 회전수 변동이 매우 심하기 때문에 일정값의 무반응영역(dead band)을 두어 제어를 수행하였는데, Fig. 10의 48~55초 구간에서 제어가 반응하지 않은 이유는, 이 구간에서 엔진 회전속도가 설정된 값 이하로 떨어지지 않았기 때문이다.

주목할 점은 본 연구의 트랙터용 무단변속기 제어기는 부하가 인가되어 차속이 감소할 때, 엔진의 속도를 제어할 수 없다는 점이다. 이것은 일반 자동차와 달리 농업용 트랙터는 대부분 변속기의 동력인출(PTO : Power-Take-Off) 축에 외부 작업기를 부착하여 사용하는데, 이 장치들이 주행 조건이나 부하의 상태와 무관하게 일정한 엔진 회전수를 요구함으로써, 변속기 시험 중 일정한 엔진 회전속도 유지에 제어의 관점을 맞추었기 때문이다.

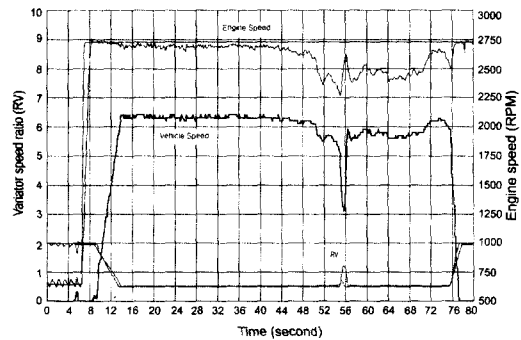


Fig. 10 A result of field test (plowing)

즉, 정상적인 작업 상태에서 부하가 인가되면, 처음에는 가변기의 작동압이 일정한 상태에서 가변기 속도비가 변화되며 차속이 감소한다. 이 때, 제어기는 일정한 차량 속도를 유지하기 위해 작동 압력을 늘려 반응한다. 그리고, 엔진으로 전달되는 부하량은 증가되어 엔진의 속도가 저하되고, 저하량이 일정 값 이내이면 이 상태로 유지된다.

또한 엔진의 회전속도가 작업기 동력인출 축 속도, 작업 속도, 연료 소비율, 최대출력점 등을 고려하여 결정한 작동 범위를 벗어나면, 가변기 제어가 변속비를 변경하여 엔진으로 전달되는 부하량을 감소시켜 엔진의 회전속도를 회복시킨다.

그리고 인가되던 부하가 줄어들면, 엔진으로 전달되는 부하가 감소하여 엔진 회전속도가 상승하며, 가변기 제어기는 엔진으로 전달되는 부하량이 줄뒀 커지는 방향으로 변속비를 바꾸게 된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 농업용 트랙터에 적용하기 위해 개발된 전-트로이달식 무단변속기 메커니즘을 제어할 수 있는 전기유압식 제어 시스템을 개발, 소개하였다.

제어 알고리즘은, 트랙터의 다양한 주행 및 작업 시험을 통해 얻은 PID 제어 계인을 룩업 표로 만들어 활용하였으며, 비례제어형 릴리프 밸브와 펄스폭변조방식의 비례유량제어밸브에 의해 가변기 톨러 부하를 제어함으로써 가변기의 속도비를 제어하였다.

본 연구에서 개발한 트랙터 용 무단변속기는 벤치 실험과 차량시험 결과, 각종 농작업 시 운전자의 조작이나 부하 변동에 대해 운전자가 별다른 조작을 하지 않고서도 원활하게 작업을 수행할 수 있을 정도로 우수한 속도비 제어성능을 보였다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의

지원에 의한 것입니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 강성봉, 트랙터의 기관 속도 및 변속비의 자동제어에 대한 연구, 박사학위논문집, 서울대학교, 1994.
- 2) 김의한, 이재천, "트랙터용 토로이달 무단변속기 개발(1): 변속기 메커니즘," 자동차공학회논문집, 제10권 제3호, pp.218-226, 2001.
- 3) H. Tanaka, T. Ishihara, "Electro-Hydraulic Digital Control of Cone-Roller Toroidal Traction Drive Automatic Power Transmission," Trans. ASME, J. of Dyn. Syst., Measure., Control, Vol.106, pp.305-310, 1984.
- 4) H. Tanaka, "A Speed Ratio Control System for a Half-Toroidal Traction Drive CVT," ASME, Winter Annual Meeting, DSC Vol.13, pp. 371-379, 1989.
- 5) H. Tanaka, "Power Transmission of a Cone Roller Toroidal Traction Drive," JSME Int. J., Ser. III, Vol.32, No.1, pp.82-89, 1989.
- 6) H. Tanaka, H. Machida, "Stability of a Speed Ratio Control Servomechanism for a Half-oroidal Traction Drive CVT," JSME Int. Conf. on Motion and Powertransmissions, pp. 971-976, Hiroshima, Japan, Nov., 1991.
- 7) 성덕환, 김현수, "CVT의 변속 알고리즘과 응답특성," 한국자동차공학회논문집, 제2권 제6호, pp.9-17, 1994.
- 8) 김현수, 김정철, 송한립, "라인압력제어 전자화 CVT 차량의 응답특성," 한국자동차공학회논문집, 제6권 제2호, pp.191-202, 1998.
- 9) 송한립, 김현수, 김정철, "라인압력 전자제어화 CVT의 실험적 연구," 한국자동차공학회논문집, 제7권 제1호, pp.139-147, 1999.
- 10) 김동우, 김현수, "전자 제어 CVT 차량의 변속제어전략," 한국자동차공학회논문집, 제8권 제3호, pp.85-97, 2000.
- 11) James I. B., N. D. Vaughan, "Design and Component Matching of a Pressure Control Circuit," SAE 961854, 1996.
- 12) H. Tanaka, "High Speed Solenoid On/Off Valves," Trans. of JASME, Vol.50, No.457(c),

- 1984.
- 13) T. Osumi, K. Ueda, H. Nobumoto, M. Sakaki, T. Fukuma, "Transient Analysis of Geared Neutral Type Half-Toroidal CVT," JSAE Review, Vol.23, pp.49-53, 2002.
- 14) J. M. Iroside, P. W. R. Stubbs, "Microcomputer Control of an Automotive Perbury Transmission," Proc. Inst. Mech. Eng., Part C, Vol.200, No.81, 1981.
- 15) M. Patterson, "The Full-Toroidal Variator in Theory and in Practice," Proc. Int. Conf. on CVT, pp.95-100, 1996.
- 16) Torotrak Technology Transfer Manual, Vol.1, Chapt. 4, Hydraulic Control, pp.19-21, 1996.