

트랙터용 무단변속기 개발 (Ⅱ)⁺

- 무단변속기 컨트롤러 -

Development of a Continuously Variable Transmission (CVT) for Agricultural Tractor (Ⅱ)

- CVT Controller -

김효중*	김의한*	류관희**
정회원	정회원	정회원
H.J. Kim	E.H. Kim	K.H. Rhyu

1. 서론

향후 트랙터에 대한 수요 패턴이 작업 편의성, 작업 효율 향상, 포장 적응 능력을 향상시키는 방향으로 바뀌게 될 것에 대비하여, 기존 HST(Hydrostatic transmission) 및 파워-쉬프트 트랜스미션의 단점을 극복하고 포장 적응성이 우수한 트랙터용 무단 변속기를 개발하여야 한다는 필요성이 대두되고 있다.

이러한 필요성에 따라 본 연구진은 1 단계로 트랙터용 무단변속기의 메커니즘을 설계하여, 무단 변속기를 제작하였고, 실험을 통해 무단변속 기능을 확인한 바 있다.

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

본 연구의 목적은 제작된 무단변속기 메커니즘을 바탕으로 운전자가 편리하게 운전할 수 있고, 농작업을 효율적으로 수행할 수 있도록 하기 위한 전자 유압식 무단변속기 컨트롤러를 개발하는 데 있다.

2: 재료 및 방법

가. 제어 시스템 구성

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

무단변속기 컨트롤러는 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

+ 본 연구는 농림부 첨단기술개발과제 연구비 지원에 의해 수행되었음.

* LG전선(주) 기계연구소, 산업기계사업본부

** 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

모드 전환 클러치, 롤러 실린더, 유압 밸브 블록 및 밸브 구동 전자 회로 등으로 구동시스템을 구성하였다.

각 계측시스템으로부터 자료를 수집하고, 수집된 자료를 기초로 CVT 메커니즘 제어를 위한 제어량을 연산하며, 연산된 제어량을 구동시스템으로 출력하기 위해 산업용 컴퓨터를 이용하였다.

컴퓨터와 각 장치간의 접속을 위해 필요한 기능을 갖춘 인터페이스 보드들도 개발, 장착시켰다.

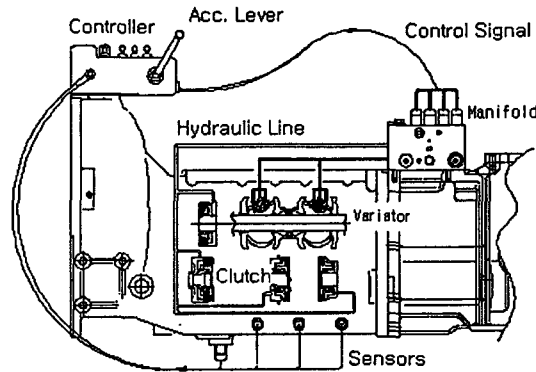


Fig. 1. CVT Controller Layout

나. 계측시스템

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

1) 회전속도 계측시스템

회전속도 계측시스템은 주행이나, 작업 시에 CVT 트랙터에 인가되는 부하를 간접적으로 계산하고, 변속 알고리즘의 변속 시점을 결정하기 위해 개발하는 것으로 엔진 출력축, 베리에이터축, 변속기 출력축의 회전속도를 계측한다.

엔진 출력축과 베리에이터축 회전 속도간의 비로 계산되는 베리에이터의 속도비는 컨트롤러의 제어 대상이므로, 부하 극복을 위한 피드백 자료로 활용될 수 있도록 하였다. 또한, 베리에이터 속도비와 무관한 변속기 출력축 회전속도는 모드전환을 위한 변속 시점을 결정하기 위해 계측되며, 트랙터의 주행속도로도 계산될 수 있다. 회전속도 계측을 위한 센서로는 큰 회전 속도를 검출하는데 유리하며, 자동차의 자동변속기 등에 폭넓게 적용되고 있는 마그네틱-픽업을 사용하였다.

2) 조작 신호 계측시스템

조작 신호 계측시스템은 운전자가 트랙터의 주행에 필요한 최소한의 운전 정보를 지시할 때, 이를 즉시 컨트롤러가 수집하여 제어에 적용할 수 있도록 하는 장치이며, 가속 페달 각변위, 최고 속도 설정 레버 각변위 등을 계측한다. 또한 전, 후진 설정 스위치 및 급제동 스위치도 조작 신호 계측시스템에 포함되며, 컨트롤러가 항상 이들 스위치들을 검사하여, 신호가 발생되었을 때, 적절한 조치를 취할 수 있도록 하였다.

3) 유체 온도 계측시스템

유체 온도 계측시스템은 무단변속기 동력 전달용 오일의 온도를 계측한다. 유압 제어시스템의 유체 온도는 제어 압력과 작동력 간의 관계식에 영향을 주기 때문에, 유압 실린더를 통해 베리에이터 속도비를 제어할 때 고려되었다.

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

4) 유체 압력 계측시스템

베리에이터 속도비의 변화는 롤러 실린더 내 압력의 제어를 통해 구현되는데, 이 압력을 계측하여 제어의 피드백 자료로 활용하고, 외부로부터의 부하량을 추정하기 위해 유체 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.

다. 유압 제어 시스템

증속, 감속, 변속, 부하 극복 등 무단변속기 메커니즘의 기능을 구현하기 위해, 콘트롤러 구동시스템으로써 모드 전환 클러치, 롤러 실린더, 유압 밸브 블록 및 밸브 구동 전자회로 등을 설계, 제작하였다. 유압 제어를 위한 무단변속기 유압 회로를 그림 2에 나타내었고, 그림 3에 유압 회로에 따라 설계 제작된 유압 밸브 블록의 사진을 나타내었다.

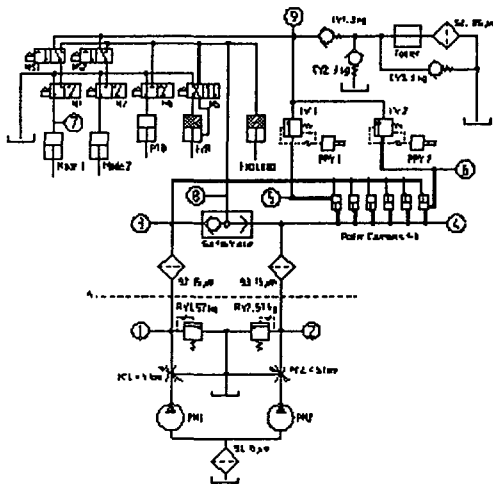


Fig. 2. CVT Hydraulic Circuit

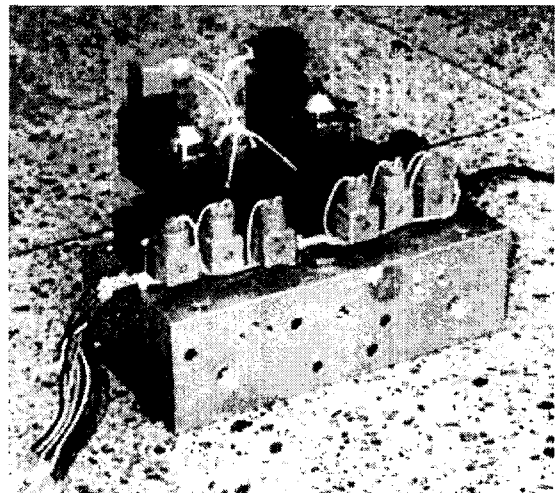


Fig. 3. CVT Hydraulic Valve Block

유압 제어 시스템의 가장 핵심이 되는 부분은 베리에이터 롤러에 힘을 가하기 위해 복동 실린더 양단에 압력차를 주는 한 쌍의 비례 제어 밸브인데, 본 연구에서는 독일의 Hydraulic Ring 사 밸브를 구입하여 사용하였다. 일반적으로 비례제어밸브는 펄스폭변조(PWM) 신호에 의해 작동하게 되므로, 본 연구에서도 자체 제작된 밸브 드라이버를 이용하였다. 밸브 드라이버의 출력은 밸브 특성에 맞추어 주파수 200 Hz, 출력 전압 12V로 설정하였다.

라. 무단변속기 제어용 컴퓨터

일반적으로 자동차나 산업용 기계 등을 제어하기 위한 콘트롤러에 적용되는 컴퓨터로는 부피가 작고, 전력 소모가 적으며, 내진동성이 큰 원칩 마이컴이 대부분인데, 본 연구에서는 무단변속기 제어 알고리즘 구현에 중점을 두고, 원칩 마이컴 개발 중 발생할 수 있는 문제점을 배제하기 위해, 산업용 컴퓨터(PC급)를 제어용 컴퓨터로 사용하였다.

라. 무단변속기 제어 알고리즘

무단변속기 제어 알고리즘은 그림 4와 같은 메인 루틴과, Interrupt 루틴으로 구분되는데, 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 목표 속도비 변경 루틴은 트랙터에 걸리는 부하를 계산해 내고, 트랙터의 현재 속도를 계산하는 루틴으로, Mode 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 맞추게 되어 있다.

제어 알고리즘의 개발 후 예비 실험을 통해 적정 제어 계수를 찾아내었고, 이를 표로 정리하여, 프로그램에 삽입시켰다.

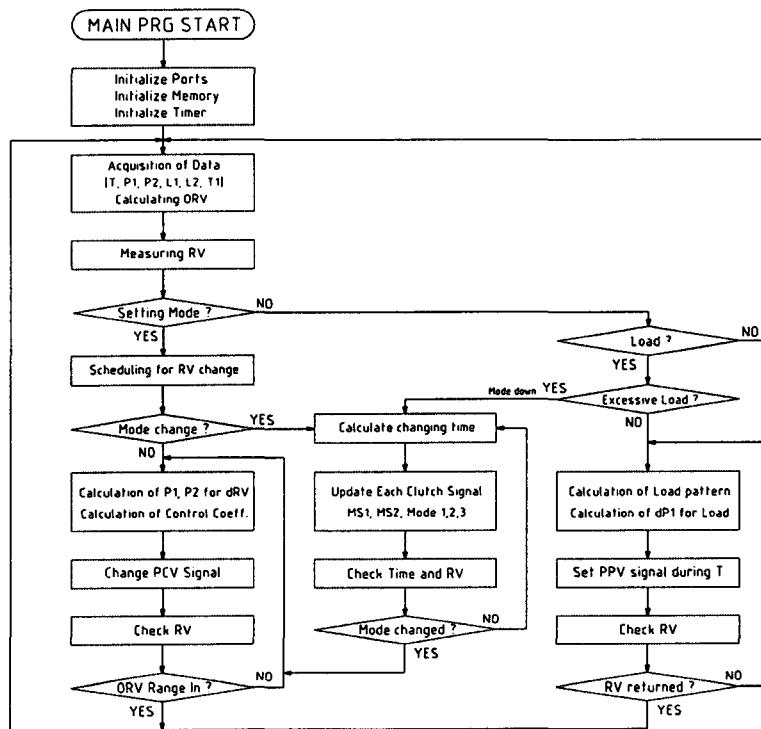


Fig. 4. Algorithm for the CVT Controller

바. 컨트롤러 성능 시험

본 연구에서는 개발된 무단변속기 컨트롤러의 성능을 평가하기 위해 속도비 제어 성능을 대표할 수 있는 계단 응답 시험을 수행하였다.

또한 개발된 무단변속기를 트랙터에 장착하고, 주행 시험과 작업 시험을 수행하여 컨트롤러의 제어 성능을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 속도비 제어 성능

본 연구에서 개발한 무단변속기 컨트롤러는 속도비 제어 기법으로 PID 제어 방식을 이용하였는데, 이때 비례, 미분, 적분 계수는 여러 번의 반복 실험을 통해 최적의 값을 찾아내었고, 각 범위별로 적절하게 다른 계수를 적용할 수 있도록 하였다.

특히 베리에이터 속도비(RV) 중간 값이 아닌 2.0 이나, 0.5 값으로의 계단응답 성능시험은 오버슈트를 기계적으로 방지할 수 있기 때문에 각 계수를 최대로 하여 실험을 수행하였다.

계단응답 성능시험의 대표적인 예로 그림 5에 속도비 2.0 상태에서 속도비 1.0에 도달하는 성능시험 결과를 나타내었다. 응답 곡선에서 입상시간은 0.33 초로 나타났으며, 정정시간은 약 0.52 초로 나타났다. 오버슈트는 없었으나, 입상시간을 줄이기 위해 제어 계수들을 조정하면, 1회 혹은 2회의 오버슈트가 나타나는 결과도 볼 수 있었다.

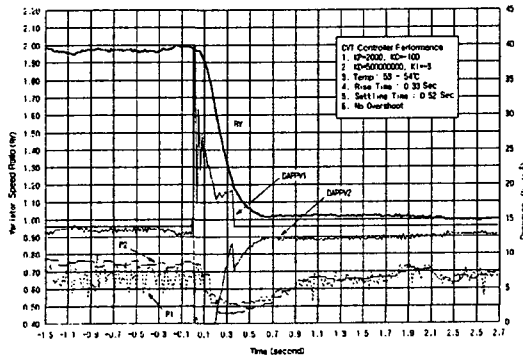


Fig. 5. Step Response of the CVT Controller [RV2.0→1.0]

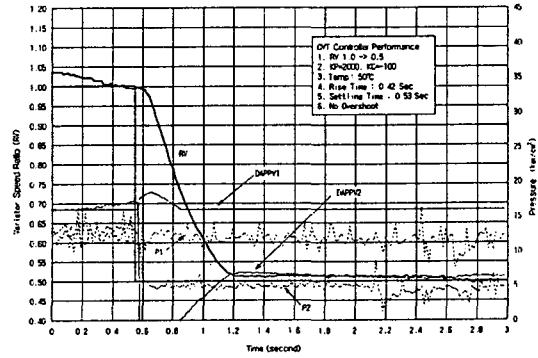


Fig. 6. Step Response of the CVT Controller [RV1.0→0.5]

그림 6에는 속도비 1.0 상태에서 0.5로 변화시킬 때의 계단응답 성능시험 결과를 나타내었다. 이 경우 속도비 변화 범위의 한계점인 0.5로 변화하는 것이기 때문에 비례제어밸브의 신호를 완전히 끊어주어도 오버슈트가 발생하지 않았다. 위와 같은 경우 입상시간을 감소시키기 위해 제어 계수들을 충분히 크게 해보았으나, 약 0.42초 이내로 줄일 수는 없었다. 이는 무단변속기 유압시스템 각 요소부품들의 지연과 베리에이터 메커니즘의 특성에 의한 것인데, 이 수치를 본 연구에서 개발한 CVT 제어시스템의 한계값으로 판단하였다.

제어 성능 시험에서 나타나는 이러한 수치는 무단변속기의 주행, 작업등을 수행하기에 충분히 작은 값이기 때문에, 베리에이터 속도비 계단응답 성능이 CVT 트랙터 무단변속 기능을 구현하기 위해 매우 우수하다고 판단되었다.

나. 주행 및 작업시 변속비 제어 성능

그림 7에 운전자가 가속 페달을 밟아 차량을 출발시키고자 할 때, CVT 컨트롤러가 차량의 속도를 점차 증가시키는 성능시험 결과를 나타내었다. 그림에서 보면, 운전자가 초기에 페달을 일정량 밟고 나서 가속페달에 더 힘을 가하지 않아도, CVT 컨트롤러는 엔진에 부하가 걸리지 않는 한 계속 무단변속을 수행하여, 차량의 속도를 증가시키고 있음을 볼 수 있다.

무단변속기 메커니즘에 지속적인 견인 부하를 줄 수 있는 작업인 쟁기 작업에 대한 성능 시험

곡선을 그림 8에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 견인부하의 증가에 의해 엔진 회전속도가 감소하면 무단변속기 컨트롤러가 이를 감지하여, 차량의 속도를 떨어뜨리고 이에 따라 엔진 회전속도가 회복되면, 다시 차량을 증속시키는 기능을 수행하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

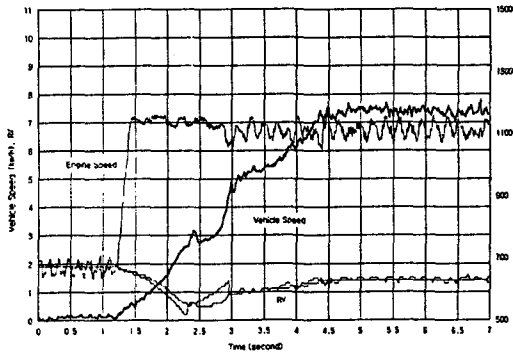


Fig 7. A result of road test with the CVT controller

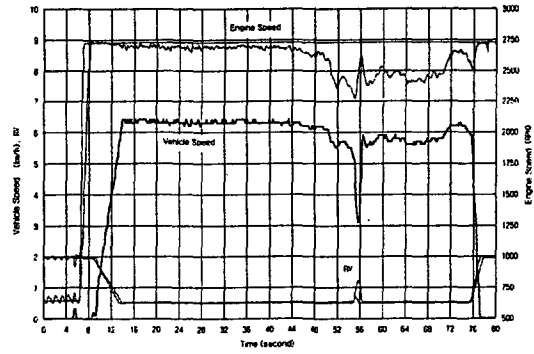


Fig. 8. A result of field test(plowing) with CVT controller

4. 요약 및 결론

본 연구는 1단계 연구에서 개발된 무단변속기 메커니즘을 운전자가 편리하게 운전할 수 있고, 또한 농작업을 효율적으로 수행할 수 있도록 하는 전용 컨트롤러를 개발하기 위하여 수행되었다.

변속기의 각종 정보를 제측하기 위한 운전 정보 제측시스템, 유압 구동 시스템, 제어용 컴퓨터 등의 하드웨어를 개발하였고, 이를 운용하기 위한 무단변속기 제어 알고리즘을 개발하였다.

컨트롤러의 개발 후 실내 실험을 통해 변속기 제어 성능 시험을 수행 한 결과 속도비 2.0 상태에서 속도비 1.0 상태로 변화시키는 계단응답 시험에 대해 정정시간이 약 0.52 초로 나타났다. 이는 각종 농작업 시 운전자의 조작이나 부하 응답에 대해 속도비 제어를 충분히 빠르게 수행할 수 있는 응답 성능인 것으로 판단되었다.

또한 실내 실험 후 무단변속기를 트랙터에 탑재하여 Field Test를 수행하였는데, 작업 부하의 변동에 대해 운전자가 별다른 조작용을 하지 않고서도 원활하게 작업을 수행할 수 있음을 확인하였다.

현재 본 연구의 결과를 상용화하기 위해 내구성 증진 시험을 수행하고 있으며, 농작업자가 보다 원활히 작업할 수 있도록 제어 소프트웨어의 개선 연구도 진행 중에 있다.

5. 참고문헌

1. 강성봉, 1994. 트랙터의 기관속도 및 변속비의 자동제어에 관한 연구. 서울대학교. 박사학위논문
2. Funatsu, K., H. Koyama and T.Aoki, 1996. Electronic Control System of Honda for CVT. Proceedings of the Inter. Conference on Continuously Variable Transmissions, 95-100
3. Gui. X. Q., C. E. Goering and N. L. Buck. 1988. Theory of Optimal Tractor Operation Control. ASAE Paper. 88-106.