

휠로더 자동변속기 시뮬레이터 개발

Development of an Automatic Transmission Simulator for a Wheel Loader

정규홍 · 신상호 · 이승일

G. H. Jung, S. H. Shin and S. I. Lee

Key Words : Wheel Loader(휠로더), Automatic Transmission(자동변속기), Transmission Simulator(변속기 시뮬레이터), TCU(변속제어기), Shift Control Algorithm(변속제어 알고리즘)

Abstract: TCU is a shift controller for automatic transmission of which major functions are to determine the shift point and manage the shifting process based on the various input signals. As the recent digital control technologies advance, it plays a key-role to improve a transmission performance and its algorithm becomes more complicated. This paper describes the development of transmission simulator for wheel loader that enables a TCU for normal stand-alone operation by the real-time emulation of TCU interface signals. It can be utilized for the analysis of shift control algorithm implemented in a commercial TCU as well as for the development of brand new TCU.

기호 설명

- N_E : 엔진 회전수(engine speed)
 N_T : 터빈 회전수(turbine speed)
 N_{C1} : 센트럴 기어 회전수(central gear speed)
 N_O : 출력 회전수(output speed)
 N_P : 펌프 회전수(pump speed)
 r : 속도비(speed ratio)
 T_P : 펌프토크(pump torque)
 T_T : 터빈토크(turbine torque)
 TR : 토크비(torque ratio)
 K : K-factor

1. 서 론

휠로더는 전방에 장착된 직사각형의 버킷을 사용하여 건설현장에서 모래나 흙을 트럭에 상하차하거나 각종 건설자재 운반에 이용되는 건설 중장비이다. 채석장을 비롯하여 다양한 토목건설현장 뿐만 아니라 복잡한 도심에서 이루어지는 건설 작업장에서도

유용하게 사용되고 있는 휠로더는 점차적으로 수요가 증대되는 추세에 있다.

Fig. 1과 같은 형태의 휠로더는 바퀴로 구동되므로 궤도차량에 비하여 신속한 기동성의 장점을 가진다. 엔진 구동력을 주행부하에 적절한 토크로 변환하여 차축에 전달하는 변속기는 정유압 변속장치를 이용하는 무단변속방식과 기어열을 이용하여 변속비를 선택하는 방식이 있으나 전달효율이 우수한 기어열 방식의 휠로더 변속기에는 운전자의 변속레버조작으로 변속단이 결정되는 수동변속기와 차량의 주행상태를 파악하여 자동으로 변속비가 변화되는 자동변속기가 있으나 버킷과 붐을 조작하면서 동시에 전후진 변속을 수행하는 휠로더 작업특성으로 인하여 최근에는 자동변속기가 장착된 휠로더가 일반화되고 있다.

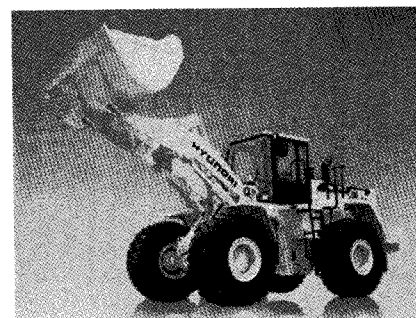


Fig. 1 Wheel loader

접수일 : 2007년 3월 20일

정규홍(책임저자) : 대전대학교 컴퓨터응용기계설계공학과

E-mail : ghjung@daejin.ac.kr, Tel : 031-539-1974

신상호, 이승일 : (주)엠에스정밀

기어열 형태의 휠로더용 자동변속기는 전진뿐만 아니라 후진 시에도 요구되는 기동성을 충족시키기 위하여 다수의 후진 변속단이 존재하고 건설현장에서의 작업 시 빈번하게 발생하는 전후진 주행전환이 신속하게 이루어지도록 중립을 거치지 않는 전후진 변속이 가능하도록 설계된다. 자동변속기에서의 변속 과정은 유압피스톤에 의하여 클러치가 작동됨으로써 기어열을 구성하는 회전요소의 결합상태가 변화되어 자동변속기 입력과 출력축 사이의 기어비가 변화된다. 자동변속모드에서의 변속단 결정과 변속 중 발생하는 충격저감을 위한 변속제어는 모두 마이크로 컨트롤러로 설계된 변속제어기(TCU, Transmission Control Unit)에 의하여 이루어진다.

자동변속기는 동력을 전달하는 기어, 유체클러치인 토크컨버터, 맞물려 회전하는 기어의 결합상태를 변화시키는 기능의 마찰요소인 클러치, 마찰요소를 작동시키는 유압제어시스템과 변속시점을 결정하고 변속제어를 수행하는 TCU 등의 여러 부품으로 구성되므로 우수한 성능의 자동변속기 개발을 위해서는 제반 부품에 대한 개발능력뿐만 아니라 동력전달특성에 대한 이해를 바탕으로 변속제어 알고리즘을 설계하는 기술이 필요하다.

현재 휠로더는 Komatsu, Volvo, Kawasaki, John Deere 등과 같이 세계 유수의 중장비 제조사에서 다양한 모델이 개발되어 판매되고 있으며 국내 건설장비 제조업체에서도 독자적으로 개발한 모델을 생산하고 있으나 차량에 탑재되는 자동변속기는 설계기술과 개발경험 부족으로 인하여 외국의 자동변속기 전문생산업체로부터 전량 수입하여 장착하고 있는 실정이다. 그러나 최근 들어 휠로더 시장규모가 확대되고 치열한 시장경쟁에서 부가가치가 높은 부품에 대한 국산화 필요성이 대두됨에 따라 자동변속기에 대한 연구개발이 시도되고 있다.

자동변속기 개발을 위해서는 기어열, 토크컨버터, 클러치, 유압시스템 뿐만 아니라 변속제어를 담당하는 기능의 TCU 설계가 필수적이다. 특히, TCU는 설계된 변속 알고리즘에 의하여 변속성능과 내구성능이 매우 크게 달라지는 핵심적인 요소이다. 우수한 성능의 TCU 개발에는 변속동특성에 대한 엄밀한 이해와 풍부한 개발경험이 요구되지만 상용화된 제품에서는 변속 알고리즘이 펌웨어(firmware)의 형태로 구현되므로 설계내용분석이 거의 불가능하다.

시뮬레이터는 동적특성을 갖는 기계적인 시스템을 모사할 수 있는 장치이다. 최근 전자제어를 이용한 자동차 기술이 급속히 발전하면서 개발비용 및 시간

절감과 동시에 시험 안전성을 확보하기 위하여 플랜트의 특성을 근사적으로 모사할 수 있는 시뮬레이터가 일반화되고 있다. 자동차 개발 분야에서 활용되는 시뮬레이터로는 차량 주행 시뮬레이터, ABS, TCS 시뮬레이터를 비롯하여 다양한 종류가 있으나 자동변속기와 관련되어서는 연구 개발이 활발하게 이루어지지 않아서 아직까지 시뮬레이터 개발이 보고된 바 없다.^{1,2)}

본 연구에서는 상용화된 ZF사 TCU를 이용하여 다양한 조건에서 변속시험을 실시한 후 분석된 시험결과를 자체적으로 개발 중인 휠로더 자동변속기의 변속 알고리즘 설계에 반영하기 위하여 변속시험장치 없이 TCU를 정상적으로 작동시킬 수 있는 시뮬레이터를 개발하였다. ZF사는 승용차를 비롯하여 다양한 종류의 차량에 적용되는 변속기를 전문적으로 개발하여 공급하는 업체이며 국내에서 생산되는 휠로더에는 기어열 방식으로 설계된 ZF사의 전자동 자동변속기가 장착되고 있다. 개발된 시뮬레이터에는 ZF사 자동변속기의 내부구조분석을 바탕으로 설계된 TCU 입출력 신호의 실시간 모사기능과 변속 알고리즘분석에 필요한 TCU 내부신호 모니터링 기능이 구현되어 있다. 본 연구에서 개발된 시뮬레이터는 상용 TCU의 변속선도(shift map), 변속제어 알고리즘, 진단 및 오류검출 알고리즘 등의 분석에 활용될 수 있으며 자체 개발예정 TCU의 시스템 프로그램 개발과 기능검증에도 응용될 수 있을 것으로 예상된다.

2. 자동변속기 내부구조

Fig. 2는 최대 전달동력이 270kW(362마력)인 ZF사 4WG-260 모델의 자동변속기 외형을 보여준다.

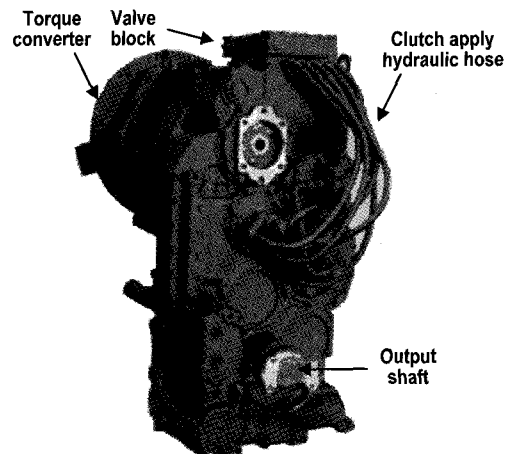


Fig. 2 Wheel loader automatic transmission

엔진 축은 토크컨버터의 펌프 축과 연결되며 변속기 내부에 설계된 기어열을 통하여 엔진동력이 출력축으로 전달된다. 맞물려 회전하는 기어의 동력전달 경로는 클러치 결합상태로 결정되고 변속기 하우징에 설치된 밸브블록에서 제어되는 유압이 유압호스를 통하여 클러치를 작동시키도록 설계되어 있다.

Fig. 2의 휠로더 자동변속기는 기어열, 토크컨버터, 유압제어시스템, TCU의 주요 부품으로 구성되어 있으며 각 구성요소에 대한 특징을 간략하게 살펴보면 다음과 같다.

2.1 기어열

휠로더 자동변속기의 기어열은 승용차용 자동변속기에 일반적으로 적용되는 복합유성기어 방식이 아니고 수동변속기의 동력전달구조와 유사하게 상시 맞물려 회전하는 기어가 클러치 작동에 의하여 회전축에 결합됨으로써 동력을 전달하는 카운터 샤프트(counter shaft)방식으로 설계되어 있다. 카운터 샤프트 방식의 기어열 설계는 구조가 단순한 반면에 일방향 클러치가 포함되지 않아 모든 변속이 클러치대 클러치의 비동기 변속으로 이루어지므로 변속시 발생하는 충격을 저감시키기 위한 변속제어가 다소 어려운 단점이 있다. Fig. 3은 휠로더 자동변속기 기어열의 내부구조를 보여주고 Fig. 4는 기어회전체를 회전축에 결합시키는 클러치 팩의 외형을 나타낸다.

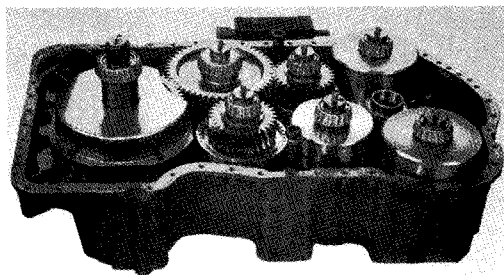


Fig. 3 Gear train of wheel loader A/T

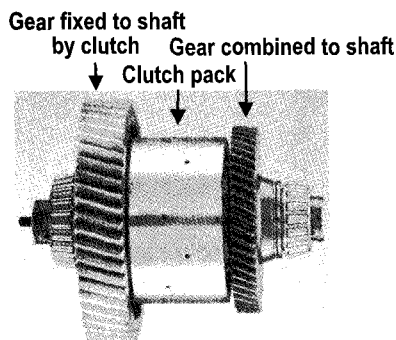


Fig. 4 Clutch pack in wheel loader A/T

Fig. 5는 4WG-260 자동변속기 기어열의 도식적인 구조를 나타내고 각 변속단에서 작동되는 클러치 상태는 Table 1과 같다. 전진 4단, 후진 3단으로 설계된 기어열은 터빈기어열, 센트럴기어열, 출력기어열로 구분되고 5개 회전축이 상시 맞물려 회전하는 기어로 연결되며 엔진과 출력축을 제외한 3개 회전축에 2개 클러치가 배치된 이중 클러치 설계방식이다. 센트럴기어열을 중심으로 배치된 방향 클러치군(KV, KR, K4)과 속도 클러치군(K1, K2, K3)에서 각각 1개씩의 클러치가 결합되어 변속비가 결정되는 구조이다. 이중 클러치 방식설계에서는 방향 클러치군과 속도 클러치군이 동일한 회전축에 배치되므로 하나의 회전축에 하나의 클러치를 배치하는 단일 클러치 방식설계에 비하여 회전축의 수가 줄어드는 대신 축 방향으로 변속기 길이가 늘어나는 특징이 있다.

결합되는 2개 클러치에 대한 구속조건을 고려하면 각 변속단에서 모든 회전요소의 속도를 터빈속도로 나타낼 수 있으며 속도분석에서는 Fig. 6과 같은 속도선도를 이용하면 회전요소의 상대적인 속도부호와 동력전달경로에 대한 파악이 편리하다. 속도선도에서는 기어회전체의 회전속도가 수평막대 상의 노드로 표현되고 각 노드의 속도는 화살표의 시작점에 연결된 다른 노드의 속도에 기어비를 곱한 값으로 기술된다.

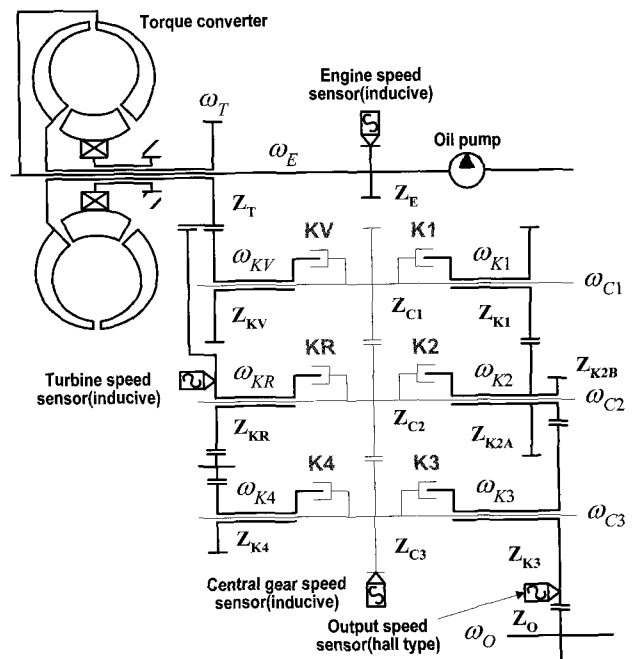


Fig. 5 4WG-260 gear train diagram

Table 1 Clutch engagement for each gear

Gear	Direction			Speed		
	KV	KR	K4	K1	K2	K3
N						
F	1	○		○		
	2	○			○	
	3	○				○
	4			○		○
R	1		○	○		
	2		○		○	
	3		○			○

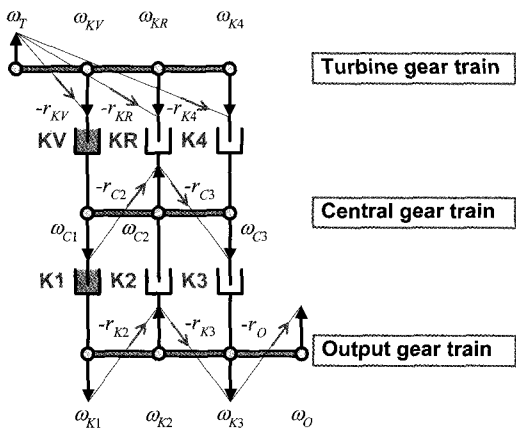


Fig. 6 4WG-260 gear train velocity diagram

2.2 토크컨버터

펌프, 터빈, 스테이터의 3요소 1상으로 구성되는 토크컨버터는 펌프와 터빈의 속도 차에 따라 토크증배기능을 가지는 휠로더 자동변속기의 발전장치이다. 스테이터는 역방향 회전을 허용하는 일방향 클러치 없이 하우징에 고정되어 있으므로 토크컨버터는 항상 컨버터 영역에서 작동되고 펌프와 터빈을 직결시키는 록업(lockup)장치는 설계되어 있지 않다. 이러

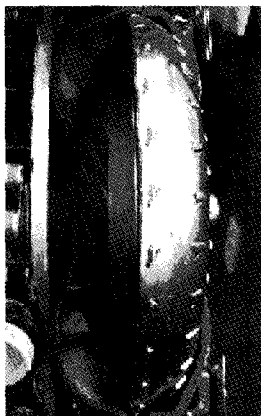


Fig. 7 Torque converter

한 방식의 토크컨버터 설계는 휠로더가 대부분 제한된 공간에서 반복적인 작업을 수행하여 작동영역이 저속에서 많이 이루어지므로 일방향 클러치의 자유회전(freewheeling)에 의한 클러치역역에서의 효율향상이나 록업 클러치를 작동시켜 펌프와 터빈을 직결시킴으로써 얻을 수 있는 동력손실저감 효과가 그다지 크지 않기 때문으로 분석된다.

2.3 유압제어시스템

상시 맞물려 회전하는 기어회전체는 유압피스톤에 의하여 작동되는 클러치에 의하여 회전축에 결합되어 동력을 전달하며 변속은 결합되는 클러치 조합을 변경함으로써 이루어진다. 변속은 2초 이내의 짧은 시간동안에 이루어지므로 출력축 속도변화는 거의 발생되지 않고 토크컨버터 터빈과 엔진 축의 속도가 급격하게 변화되어 관성력에 의한 변속충격이 발생된다. 휠로더 자동변속기는 변속 시 결합되는 클러치와 해방되는 클러치의 압력을 능동적으로 제어함으로써 우수한 변속품질뿐만 아니라 견실한 내구성능을 구현하고 있다.

Fig. 8은 펌프에서 토출되는 유량으로부터 변속 시 요구되는 압력을 발생시키는 기능의 밸브블록 단면을 보여주고 Fig. 9는 유압회로의 기능을 도식적으로 나타낸 블록선도이다. 엔진 축과 직결되어 회전하는 크레슨트(crescent)형 내접기어는 유압시스템 작동에 필요한 유량을 토출하고 릴리프 밸브에서는 클러치에 작용하는 기준압인 라인압력을, 감압밸브에서는 압력제어모듈의 작동에 필요한 기준압력을 발생시킨다. 클러치 피스톤을 작동시키는 제어압력은 2방향 비례제어 솔레노이드와 제어유량을 증폭시키는 기능의 감압밸브로 구성되는 압력제어모듈에서 발생되며 동일하게 설계된 6개의 압력제어모듈이 6개 클러치

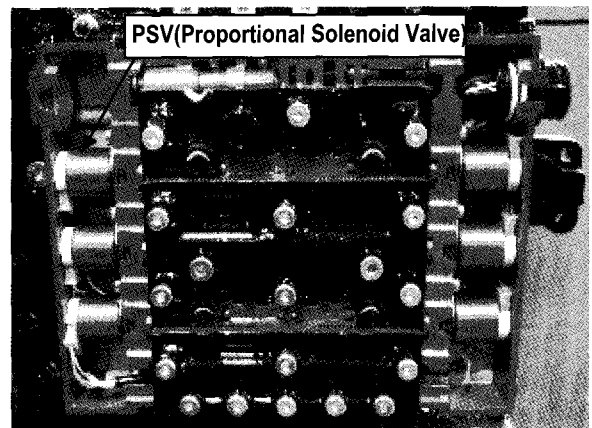


Fig. 8 Valve block

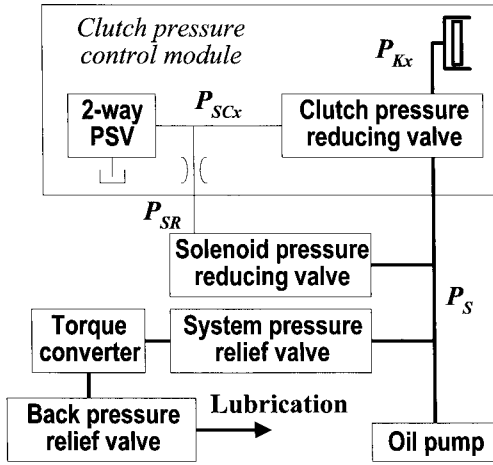


Fig. 9 Wheel loader A/T hydraulic system

피스톤의 압력을 독립적으로 제어함으로써 유압회로가 단순하게 설계되어 있다. 1kHz PWM 신호로 구동되는 비례제어 솔레노이드밸브는 구동전류에 비례하여 제어압이 발생하는 상시 저압형이며 자체적으로 제어압이 피드백되는 구조로 유온에 따른 제어압의 변화가 최소화되고 TCU에서는 전류제어를 통하여 배터리 전원 및 온도에 따라 변화되는 솔레노이드 저항의 편차를 보상하도록 설계되어 있다.

2.4 TCU

자동변속기는 차량의 주행상태에 적절한 기어비로 변속이 자동적으로 이루어지는 기능이 구현된 변속기이며 휠로더 자동변속기에서는 마이크로 컨트롤러로 설계된 TCU에서 차량 주행상태와 관련하여 획득된 정보를 바탕으로 변속시점을 결정하고 변속 중 발생하는 충격을 저감시키기 위하여 클러치 압력을 조절하는 변속제어기능을 담당한다. 승용차용 자동변속기는 가속페달 조작신호로부터 운전자 의지를 반영하여 변속시점을 결정하는 반면에 휠로더 자동변속기는 변속기 입력토크와 차속을 고려하여 설계된 변속선도로부터 변속점이 결정된다. Fig. 10은 ZF사 휠로더 TCU를, Fig. 11은 전후진방향과 기어위치를 선택하는 변속레버의 외형을 나타낸다. 휠로더 TCU의 변속모드는 변속레버의 위치에 의하여 변속단이 결정되는 수동변속모드와 지정된 변속단 범위 내에서의 변속이 자동적으로 이루어지는 자동변속모드가 있으며 운전자가 조작하는 변속레버는 모두 전기적인 신호로 인식되어 6개 클러치의 결합상태를 제어하는 shift by wire 방식이다. Fig. 12는 TCU 입출력 신호의 종류를 나타내고 주요기능을 요약하면 다음과 같다.

1) 변속시점 결정

: 차량의 주행속도와 변속기 입력토크를 고려하여 설계된 변속선도로부터 결정한다.

2) 변속 제어

: 변속 시 유압제어시스템의 압력제어모듈을 통하여 클러치의 결합과 해방을 제어한다.

3) 비례제어 솔레노이드 밸브 전류제어

: 구동전압에 따른 제어압의 변화를 보상하기 위하여 비례제어 솔레노이드밸브 구동전류를 측정하여 인가되는 PWM 듀티율을 조절한다.

4) 유온보상 알고리즘

: 유온에 따른 유압제어시스템의 특성변화를 보상하여 안정된 변속품질을 도모한다.

5) AEB calibration 기능

: 클러치 간격과 마찰계수 변화를 보상하기 위한 off-line 방식의 학습제어기능이다.

6) 진단 및 오류인식기능

: 제반 센서와 액추에이터의 작동상태를 파악하고 이상 발생 시 해당되는 작동모드로 전환한다.

7) CAN 통신기능

: 휠로더에 장착되는 엔진 제어기(ECU), 차량제어기(MCU)와 필요한 정보를 교환한다.

8) 진단장비와의 통신기능

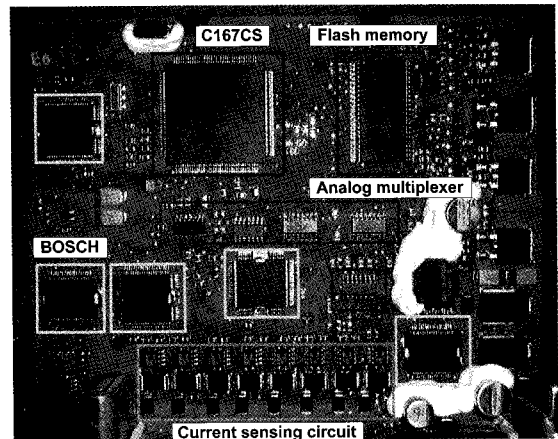


Fig. 10 ZF transmission control unit

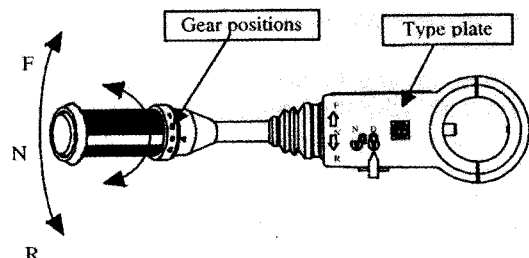


Fig. 11 Select lever(controller DW-3)

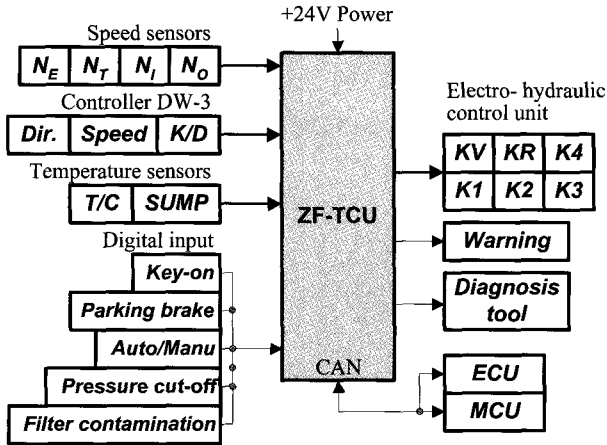


Fig. 12 TCU signal connection diagram

3. 휠로더 자동변속기 시뮬레이터 설계

자동변속기에서 변속은 클러치의 결합상태를 변화시키기 위하여 전달되는 동력의 크기를 고려하여 클러치 작동피스톤의 압력을 제어함으로써 이루어진다. 유압밸브를 사용하여 변속기 입력토크를 간접적으로 측정하고 오리피스나 어큐뮬레이터와 같은 수동요소를 이용하여 압력을 제어하는 순수 유압식 변속제어는 다양한 변속상황에 적절한 능동적인 압력제어가 불가능하므로 더 이상 적용되지 않고 있다. 근래에 개발된 자동변속기는 각종 센서를 통하여 변속기의 작동조건을 파악하고 솔레노이드 밸브를 이용하여 전기적인 신호로 압력을 변화시킬 수 있도록 설계되어 있으며 센서 입력신호로부터 솔레노이드 밸브 구동신호를 연산하는 변속제어 알고리즘은 마이크로 컨트롤러에서 수행되는 시스템 프로그램으로 구현된다.

이와 같이 전기적인 입출력 신호를 처리하는 회로와 소프트웨어로 구성되는 변속제어기능의 TCU는 자동변속기의 성능을 결정하는 핵심부품이다. TCU는 내장된 시스템 프로그램에 구현된 변속제어기능과 더불어 제반 작동조건을 진단하는 기능으로 인하여 요구되는 입출력 신호에 오류가 존재하는 경우에는 정상적으로 작동되지 않도록 설계되어 있다. 따라서 상용화된 자동변속기에 장착되는 TCU의 변속성능 분석을 위해서는 실차, 또는 다이내모 시험기에 장착된 상태에서만 시험이 가능하며 이와 같은 시험분석방법은 많은 비용과 시간이 소요되므로 상용 TCU의 변속 알고리즘 분석에 적합하지 않다.

변속기 시뮬레이터는 차량에 장착된 자동변속기에서 발생하는 센서신호와 운전자 조작신호를 모사하

여 자동변속기가 배제된 상태에서 TCU가 정상적으로 작동될 수 있도록 함으로써 간편하게 TCU의 제반성능을 평가할 수 있는 시험 장치이다. 시뮬레이터를 설계하기 위해서는 자동변속기의 내부구조와 TCU 입출력 신호사양 분석을 바탕으로 TCU에서 감지되는 오류가 발생되지 않도록 실제 작동상태와 유사한 입출력 신호조건을 구현하여야 한다.

변속기 시뮬레이터는 변속 중 속도센서가 장착된 내부 기어회전체의 회전속도를 모사하는 방식에 따라 속도시뮬레이터(speed simulator)와 동적시뮬레이터(dynamic simulator)로 구분될 수 있다. 전자는 기어열에 대한 속도분석결과만을 이용하여 변속 중 변화되는 회전속도의 과도특성을 선형적으로 근사하는 방식이며 후자는 엔진, 토크컨버터, 기어열, 유압시스템, 주행부하 등 모든 동력전달요소에 대한 동특성 모델을 실시간으로 시뮬레이션하여 측정되는 속도를 모사하는 방식이다. 동적시뮬레이터가 보다 실제에 근접한 과도특성을 모사할 수 있고 속도 피드백 알고리즘이 적용된 TCU에 활용될 수 있지만 변속기 전체 요소에 대한 동특성 모델은 매우 복잡할 뿐만 아니라 실시간 시뮬레이션을 구현하는 설계도 쉽지 않다. 이에 비하여 속도시뮬레이터는 기어열에 대한 속도분석만을 바탕으로 간단하게 설계될 수 있고 연구대상 상용 TCU의 변속 알고리즘분석을 위한 변속 조건 설정 시에도 편리하므로 본 연구에서는 속도시뮬레이터를 개발하였다.

Fig. 13은 ZF-TCU 성능분석기, 속도신호 발생기, PC에서 수행되는 사용자 인터페이스 프로그램으로 구성되는 4WG-260 자동변속기 시뮬레이터의 기능적 블록선도를 나타내고 Fig. 14는 개발된 시뮬레이터의 구성과 내부회로를 보여주는 사진이다. 시뮬레이터의 작동개요를 살펴보면 TCU 입력신호는 인터페이스 보드와 속도신호 발생기에서 생성되고 TCU

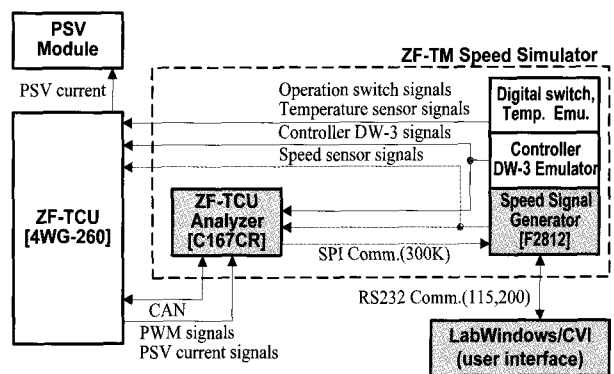
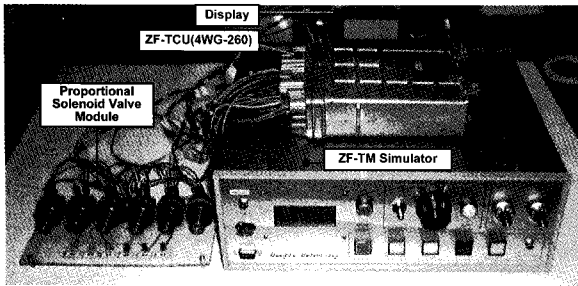
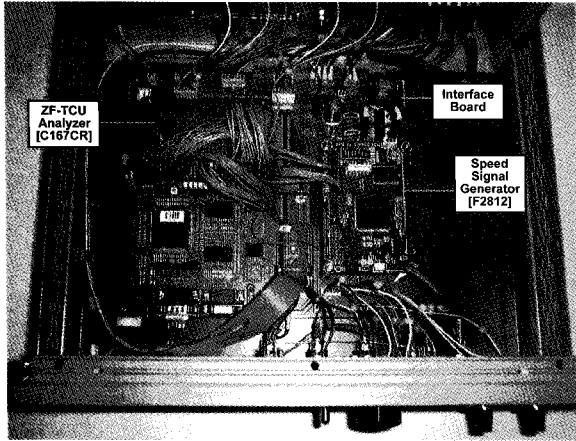


Fig. 13 ZF-TM simulator block diagram



(a) system configuration



(a) inside view of ZF-TM speed simulator
Fig. 14 Photos of ZF-TM speed simulator

에서 구동하는 비례제어 솔레노이드밸브는 실제 부품을 이용하여 전류부하를 구현하였다. ZF-TCU 성능분석기는 변속 시 TCU에서 출력하는 PWM 신호의 듀티율과 구동전류를 측정하고 TCU의 내부 작동 상태를 나타내는 CAN 통신 데이터의 획득기능을 담당한다. 속도시물레이터에서 수집된 변속시험 데이터와 작동지령은 직렬통신으로 송수신되어 PC에 저장된다.

3.1 ZF-TCU 성능분석기

TCU는 변속기에 장착된 속도 및 온도센서 신호와 운전자 조작신호를 감지하여 6개 비례제어 솔레노이드밸브의 전류만을 제어할 뿐 내부 작동상태를 나타내는 출력장치는 설계되어 있지 않다. ZF-TCU 성능분석기는 시물레이터를 이용한 변속시험에서 변속성능관련 데이터를 획득하여 SPI 직렬통신을 이용하여 속도신호 발생기로 송신하는 기능을 수행한다. Infineon사의 C167CR 마이크로 컨트롤러를 기반으로 설계된 성능분석기 운영프로그램은 10ms의 샘플링 주기로 실행되고 주요 기능을 요약하면 다음과 같다.

1) 변속레버(Controller DW-3) 신호인식
: 운전자가 조작하는 변속레버 신호로부터 선택된 주행방향과 변속단을 파악한다.

2) 4채널(N_E, N_T, N_{C1}, N_O) 속도연산
: 속도신호 발생기에서 모사되는 속도센서신호로부터 회전속도를 연산한다.

3) 비례제어 솔레노이드밸브에 인가되는 PWM 신호의 듀티율 및 반송주파수, 구동전류 측정
: 연구대상 자동변속기에 적용되는 비례제어 솔레노이드밸브의 제어압은 구동전류에 비례하므로 TCU는 Fig. 15와 같이 전류를 피드백 하여 기준전류레적을 추종할 수 있도록 설계되어 있다. 따라서 변속 시 변화되는 전류와 PWM 듀티율을 측정하면 변속제어 특성분석에 유용하게 활용할 수 있다. PWM 듀티율은 TTL 레벨의 TCU 출력신호로부터 측정되어야 하고 비례제어 솔레노이드 밸브 구동전류는 TCU에 설계된 차분증폭기 출력전압으로부터 A/D 변환되어야 한다. 본 연구에서는 TCU 내부회로를 분석하여 해당되는 신호 파악한 후 점퍼선을 이용하여 TCU 성능분석기에 연결하여 필요한 데이터를 획득하였다.

4) CAN 통신 데이터 모니터링
: 분석대상 TCU는 ECU 및 MCU와 CAN 통신 네트워크를 구성하며 CAN 통신 메시지는 성능분석에 유용한 정보가 포함되어 있다. SAE J1939 규격을 바탕으로 TCU와 관련된 CAN 통신 프로토콜을 분석하였고 결과를 Table 2에 나타내었다. 여기서, VC(vehicle controller), ZTD1(ZF-TCU data 1), ZTD2는 SAE J1939에 제조업체에서 정의하여 사용하는 데이터규격으로서 ZF-TCU에서 연산하는 속도, 유온, 변속레버위치, 현재 및 차기 변속단, 오류코드 등의 정보를 포함한다.

5) SPI(serial peripheral interface) 통신
: 변속레버 위치, 연산된 4채널 속도와 CAN 통신으로 획득된 TCU 내부정보를 10ms 주기로 300K baudrate의 SPI 통신을 이용하여 속도신호 발생기로 전송한다.

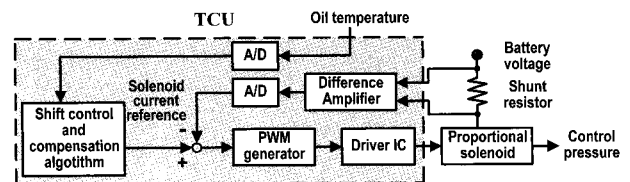


Fig. 15 PSV current feedback block diagram

Table 2 ZF-TCU CAN message object

PG	PGN	SA	Update rate
VC	65281	23	0.1sec
TSC1	0	3	0.01sec
ETC1	61442	3	0.01sec
ETC2	61445	3	0.1sec
ER	15	3	0.05sec
ZTD1	65310	3	0.1sec
ZTD2	65311	3	0.1sec

3.2 속도신호 발생기

TCU는 변속기 내부 기어에 장착된 속도센서 신호로부터 회전속도를 연산하여 변속기의 작동상태를 파악하고 이상여부를 진단한다. 속도센서 출력신호를 모사하는 기능의 속도신호 발생기는 TI사의 F2812 DSP로 설계하였으며 ZF-TCU 성능분석기에서 수집된 비례제어 솔레노이드밸브의 구동전류로부터 현재 변속단과 변속이 시작되는 시점을 파악하여 기어회전체의 속도를 연산한다.

연구대상 자동변속기에는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 유도형(inductive type)과 홀형(hall type)의 4개 속도센서가 있으며 유도형 속도센서는 회전속도에 따라 출력 전압신호파형의 크기가 변화되지만 속도신호 발생기에서는 모든 회전속도범위에서 TCU가 오류로 인식하지 않는 구형파 전압신호로 속도신호를 모사하도록 설계하였다. 속도센서 신호의 주파수는 회전속도에 비례하며 DSP에 내장된 타이머의 한계로 인하여 매우 낮은 속도에서의 저주파 신호 발생은 제한된다. Table 3은 속도신호 발생기에서 모사 가능한 최소 회전속도와 ZF-TCU에서 연산 가능한 최소 회전수의 특성을 나타내며 모사되는 최소 회전수가 ZF-TCU에서 연산되는 최소 회전수보다 작으므로 설계조건을 만족함을 알 수 있다. 여기서, ZF-TCU의 연산속도는 CAN 통신 데이터로 확인하였으며 센트럴 기어속도는 제공되지 않으므로 최저 연산속도를 확인할 수 없으나 다른 속도의 연산특성을 고려하였을 때 시뮬레이터 작동에 문제가 없다고 판단된다. 본 연구에서 설계된 속도신호 발생기의 주요 기능을 요약하면 다음과 같다.

1) 속도신호 모사기능

: Fig. 16은 상향변속 시 속도발생기에서 모사되는 속도궤적의 특성을 나타낸다. 모사되는 출력축 속도는 변속이 시작될 때의 값으로 일정하고 엔진과 터

빈속도는 변속 중 변화되어 변속이 완료되는 시점에서는 변화된 변속비와 일치하는 속도를 유지한다. 속도신호 발생기에서는 엔진속도변화율(dN_E/dt), 토크컨버터 속도 차($N_E - N_T$), 변속시간을 조절하여 변속조건에 따라 TCU의 변속특성을 분석할 수 있도록 설계하였다.

2) SPI 통신기능

: ZF-TCU 성능분석기에서 획득된 데이터를 수신 받아 ZF-TCU의 작동상태를 파악한다.

3) RS232 통신기능

: 속도신호 발생기의 작동상태 정보와 ZF-TCU 성능분석기로부터 SPI 통신으로 수신된 변속데이터를 PC에서 수행되는 사용자 인터페이스 프로그램으로 전송하고 시뮬레이터 작동상태와 관련된 지령을 수신한다.

Table 3 Speed characteristics

Item	N_E	N_T	N_{Cl}	N_O
Number of teeth	60	59	91	66
Speed signal generator Min. output speed	18	19	12	17
ZF-TCU analyzer Min. speed	20	21	14	19
ZF-TCU Min. speed	200	60	-	20

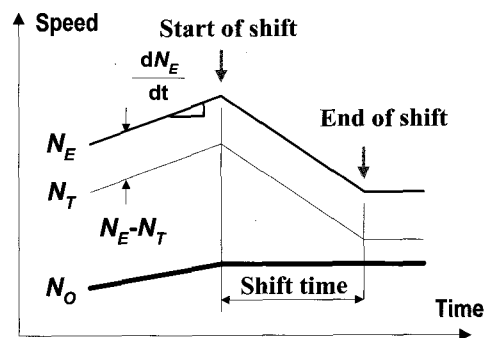


Fig. 16 Typical speed response during upshift

3.3 인터페이스 보드

휠로더 TCU는 운전자 조작신호와 변속기 내부에 장착된 2개 유온센서신호를 인식하여 자동변속기의 작동상태를 결정한다. 인터페이스 보드는 변속기 시뮬레이터 전면부에 설치된 조작스위치와 온도센서를 모사하는 가변저항의 조작상태에 따라 TCU 입력신호를 발생시키는 회로로 설계되며 주요 기능은 다음과 같다.

1) Controller DW-3

: 전진, 중립, 후진의 주행방향과 1-4단 기어를 선택하는 기능의 변속레버는 3위치 스위치(주행방향)와 4위치 로터리 스위치(1-4단 기어)를 이용하여 디코더 및 엔코더 IC로 구성되는 회로에서 모사되고 K/D 신호는 풀업저항에 연결된 버튼으로 설계된 회로에서 발생되도록 설계하였다.

2) Operator switches and warning lamp

: 운전자가 조작하는 신호는 시뮬레이터 전면에 설계된 스위치를 이용한 회로에서 모사되며 각 스위치의 기능은 다음과 같다.

- KEY-ON: TCU 전원공급 시동키이다.
- PARKING RELEASE: 전후진 변속을 가능케 하는 파킹 브레이크 해제 스위치이다.
- AUTO/MANUAL: 자동 및 수동변속모드 선택스위치이다.
- FILTER CONTAMINATION: 자동변속기에 설치된 필터의 오염상태를 나타내는 신호이다.
- PRESSURE CUTOFF: 장비를 구동하는 유압시스템에 전달되는 동력을 증가시키기 위하여 자동변속기를 중립상태로 전환시키는 스위치이다.
- WARNING LAMP: TCU 작동오류가 발생하는 경우에 점멸한다.

3) Temperature sensors

연구대상 4WG-260 자동변속기에는 밸브블록의 오일 흡입구와 토크컨버터 출구 측에 유온센서가 장착되어 있다. 유온센서는 온도에 따라 저항이 변화되는 특성을 가지며 TCU에서 송신하는 CAN 데이터에는 유온정보가 포함되어 있으므로 가변저항을 이용하여 저항을 변화시키면서 TCU에서 인식하는 유온을 기록하면 장착된 유온센서의 특성을 파악할 수 있다.

Fig. 17은 가변저항을 이용해서 분석된 유온센서의 특성을 나타낸다. 쉘프 측 유온센서는 온도 증가에 따라 저항이 선형적으로 증가하는 RTD형이고 토크컨버터 측 유온센서는 온도 증가에 따라 저항이 지수함수의 형태로 감소하는 NTC형 서미스터로 파악되었다. 이와 같은 시험결과를 바탕으로 유온센서는 적절한 저항 값을 갖는 포텐시오메터를 이용하여 모사하였다.

Fig. 18과 19는 변속기 시뮬레이터 전면부에 설치된 변속레버 스위치, 온도센서를 모사하는 포텐시오메터와 작동스위치를 보여준다.

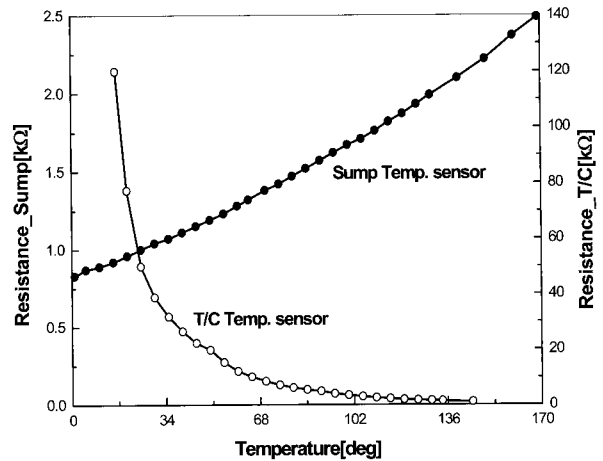


Fig. 17 Temperature sensor characteristics

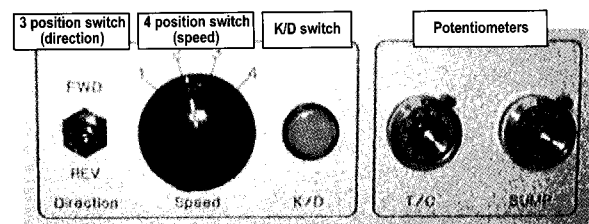


Fig. 18 Shift lever and temperature sensors

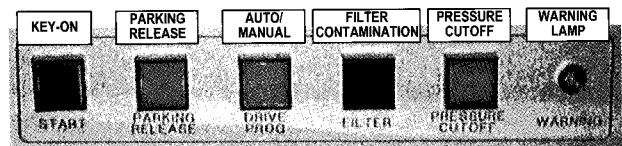


Fig. 19 Operator switches and warning lamp

3.4 사용자 인터페이스 프로그램

변속기 시뮬레이터 전면에 설계된 스위치는 변속기 작동상태를 결정하는 반면에 차량 주행상태와 관련된 변속조건의 설정과 수집된 변속시험 데이터를 PC화면에 표시 및 분석하고 저장하는 기능은 LabWindows/CVI로 작성된 운영프로그램에서 담당한다. 사용자 인터페이스 프로그램은 속도신호 발생기와 115,200 baudrate의 RS232 통신으로 작동지령을 송신하고 10ms 주기로 수집된 데이터를 수신하여 실시간으로 처리한다. Fig. 20은 사용자 인터페이스 프로그램의 주 화면을 보여주고 설계된 주요 기능은 다음과 같다.

1) 엔진 속도변화를 설정기능

: 차량의 가감속 상태를 모사하는 기능이다.

2) 토크컨버터 속도 차 설정기능

: TCU에서는 변속 시 입력토크의 크기를 고려하여 클러치 제어압을 조절하며 토크컨버터에서 펌프와

터빈속도 차는 변속기 입력토크의 크기를 나타내므로 입력토크에 따른 변속 알고리즘분석이 가능하다.

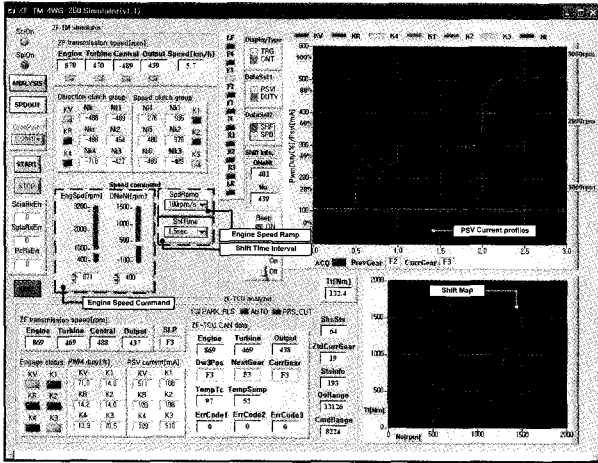


Fig. 20 User interface program main window

3) 변속시간 설정기능

: 변속 시 변화되는 터빈속도의 기울기를 설정함으로써 변속과도상태를 조절하여 TCU의 변속특성을 분석할 수 있다.

4) 변속시험 데이터 트리거 및 분석기능

: 변속이 시작되는 시점으로부터 0.5초 이전 데이터와 2.5초 동안의 이후 데이터를 수집하여 화면에 나타내고 커서위치의 데이터를 표시한다.

5) 변속시험 데이터 표시기능

: 회전속도, 비례제어 솔레노이드밸브 구동전류, PWM 듀티율, 변속레버 위치, 유온, 오류코드 등의 다양한 데이터를 숫자 표시기나 그래프에 나타내고 후처리 연산을 통하여 클러치 결합상태와 변속선도상에 주행점을 표시한다.

4. 시뮬레이터를 이용한 변속 알고리즘 분석

휠로더 자동변속기 시뮬레이터는 차량 주행 시 TCU에 입력되는 신호를 실시간으로 모사함으로써 정상적인 TCU 작동을 가능케 하는 시험 장치이다. 본 연구에서는 시뮬레이터를 이용하여 다양한 변속 조건 하에서 수행된 변속시험을 통하여 상용 TCU에 구현된 변속 알고리즘을 분석하였다.

4.1 변속선도 분석

자동변속모드에서 휠로더 TCU는 변속기 입력토크와 출력축 속도로 설계된 변속선도에 의하여 자동변속기능을 수행한다. 휠로더에서는 스로틀 개도를 측

정하지 않으며 변속선도에도 포함되지 않으므로 운전자의 가속의지는 반영되지 않는다.

변속선도는 엔진과 터빈의 속도 차를 일정하게 유지시킨 상태에서 엔진속도를 10rpm/sec로 매우 서서히 변화시키면서 변속이 발생하는 출력축 속도를 기록하여 파악하였다. 변속기 입력토크의 크기에 따라 변화되는 변속시점은 토크컨버터 속도 차를 변화시키면서 변속이 발생하는 출력축 속도로 파악할 수 있으며 변속기에 장착된 토크컨버터 정특성 데이터를 이용하면 엔진과 터빈속도 차로부터 다음과 같이 입력토크를 계산할 수 있다.

■ 토크컨버터 정특성

· 토크비: $TR(r) = T_T / T_P$ (1)

· K-factor: $K(r) = N_P / \sqrt{T_P}$ (2)

여기서, $r = N_T / N_P$: 속도비

N_P, N_T : 펌프, 터빈속도

T_P, T_T : 펌프, 터빈토크

■ 변속기 입력토크

· $T_T = TR(r)[N_P / K(r)]^2$ (3)

Fig. 21은 시뮬레이터를 이용하여 분석된 전진 4단, 후진 3단 휠로더 자동변속기 TCU의 전진 변속선도를 나타낸다. 후진 변속선도는 전후진 1, 2, 3단의 기어비가 동일하므로 전진 변속선도와 동일하다. 파악된 변속선도에서는 변속기 입력토크가 낮은 경우에는 2-1 하향변속이 발생하지 않으며 역구동의 시에는 입력토크가 영인 출력축 속도를 적용한다.

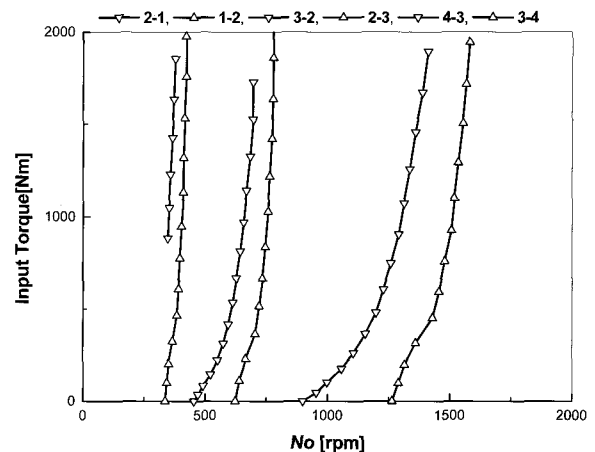


Fig. 21 Identified 4WG-260 shift map

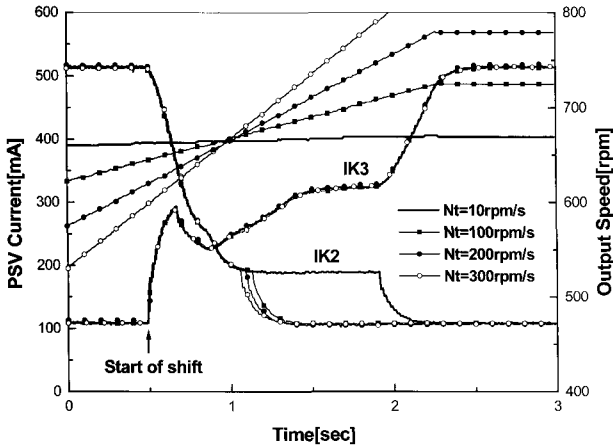


Fig. 22 Shift point variation

Fig. 22는 토크컨버터 속도 차를 200 rpm으로 유지한 상태에서 엔진속도의 변화율이 다를 때 발생하는 출력축 속도의 변화를 나타낸다. 동일한 입력토크에서도 엔진속도의 변화율이 클수록 변속점이 앞당겨짐을 알 수 있으며 이는 주행부하가 작은 경우에 앞당겨 상향변속을 함으로써 가속성능을 향상시키는 설계로 분석된다.

4.2 비례제어 솔레노이드밸브 구동 알고리즘

휠로더 자동변속기에 적용되는 비례제어 솔레노이드밸브는 구동전류에 비례하여 제어압이 발생하며 솔레노이드를 구동하는 배터리전압과 자체발열과 유온에 의한 코일저항의 변화를 보상하기 위하여 TCU에서는 솔레노이드 전류를 제어한다.

Fig. 23은 TCU의 전류제어특성을 살펴보기 위하여 정상 변속 시의 전류제적과 변속 중 스위치를 이용하여 2개의 비례제어 솔레노이드밸브를 병렬로 연결하여 부하저항이 1/2로 작게 되는 외란을 발생시

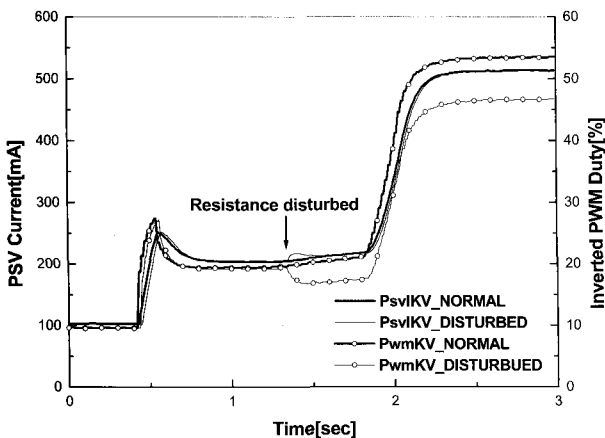


Fig. 23 PSV current control during shift

켰을 때의 전류제적을 나타낸다. 스위치 조작에 의하여 부하저항이 1/2로 작아지는 순간에 이를 보상하기 위하여 TCU는 PWM 듀티율을 낮춰 솔레노이드 구동전류는 정상 변속 시의 전류제적을 추종하게 된다.

4.3 변속제어 알고리즘

변속기 시뮬레이터는 실차 주행상황에서 발생될 수 있는 다양한 변속조건 설정이 가능하므로 이를 이용하면 상용 TCU에 구현된 변속 알고리즘에 대한 분석이 가능하다.

1) 변속기 입력토크에 따른 변속제어특성

: Fig. 24는 자동변속모드에서 토크컨버터 속도 차에 따른 F2→F3 상향변속 시험결과이다. 엔진과 터빈의 속도 차가 클수록 변속기 입력토크는 증가되며 이에 따라 TCU는 변속 중 작동 및 해제되는 클러치의 비례제어 솔레노이드밸브 구동전류제적을 높게 제어함을 알 수 있다.

2) 속도 피드백 알고리즘

: Fig. 25는 시뮬레이터에서 변속시간을 다르게 설정하였을 때 발생하는 수동변속 F1→F2 시험결과를 나타낸다. 변속시간이 감소할수록 변속 중 변화되는 터빈속도의 기울기가 커지지만 전류제적에는 변화가 없으며 단지 회전속도로 판단하는 변속종료 시점에서 기준입력 전류제적이 완전 결합된 상태로 변화됨을 알 수 있다. 따라서 ZF-TCU는 변속 중 변화되는 속도는 피드백 하지 않고 개루프 방식으로 전류를 제어하면서 변속완료 여부만을 확인하여 변속을 종료하는 것으로 판단된다.

3) 진단 및 오류검출 알고리즘

: Fig. 26은 변속시간을 5초로 설정하였을 때 자동변속모드에서 발생하는 F1→F2 상향변속 시험결과를

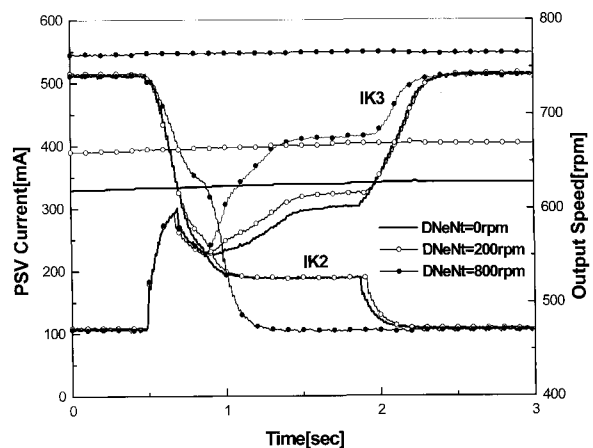


Fig. 24 PSV controlled current vs. input torque

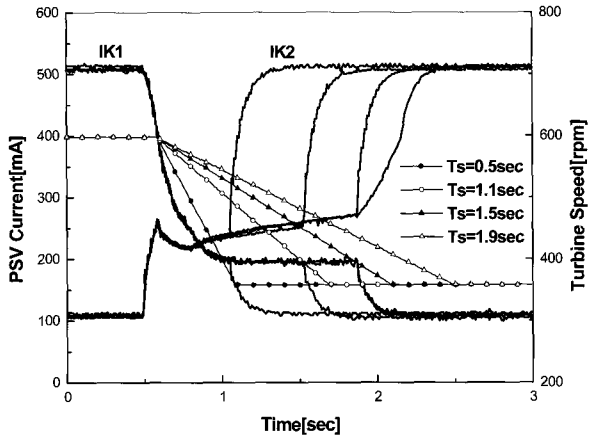


Fig. 25 End of shift point variation

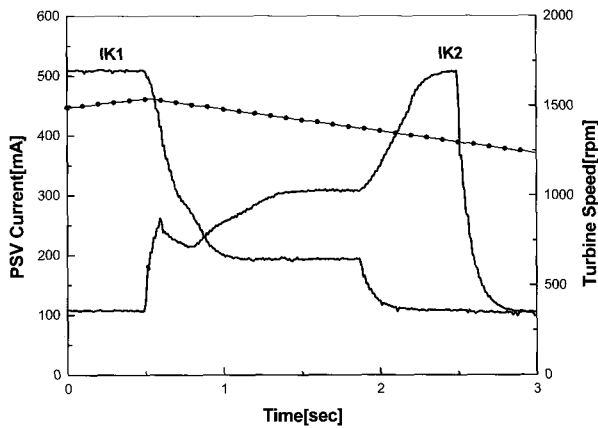


Fig. 26 Clutch error detection at shift end

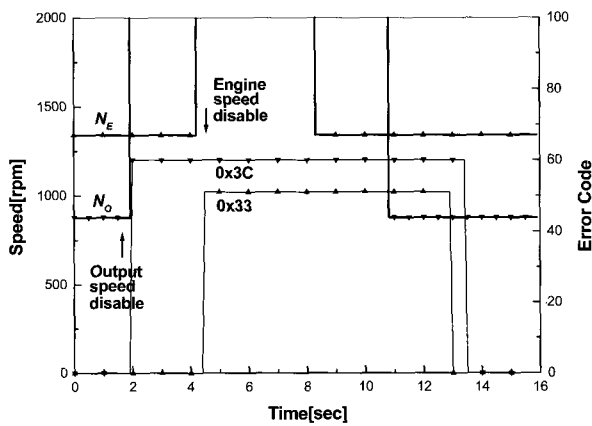


Fig. 27 Error detection and recovery

나타낸다. TCU는 설계된 전류계측을 따라 변속제어를 한 후 측정된 회전속도로부터 클러치가 결합되지 않았다고 판단되면 오류로 인식한 후 모든 비례제어 솔레노이드밸브의 구동전류를 영으로 만들어 변속기를 중립상태로 전환한 후 작동을 중지한다. Fig. 26의 변속시험에서 발생하는 오류는 0xB2로 K2 클러

치 작동오류를 나타낸다. Fig. 27은 전진 1속의 주행 상태에서 시뮬레이터에서 모사하는 엔진과 출력축 속도신호를 강제적으로 비 활성화시켰을 때 TCU에서 인식하는 오류를 나타내며 속도신호가 다시 정상화되면 검출된 오류가 제거되고 정상작동상태로 복귀한다.

4.4 변속종류 분석

전진 4단, 후진 3단의 휠로더 자동변속기는 중립을 거치지 않는 전후진 변속이 가능한 반면에 건너뛰 변속(skip shift)이 허용되지 않으므로 모든 변속은 2개 클러치의 결합과 해방으로 이루어진다. 그러나 3단 이상의 속도기어에서 전후진 변속 시에는 건너뛰 변속이 허용되고 이 경우에는 2개의 클러치를 동시에 결합하고 다른 2개의 클러치를 해방시키는 이중 클러치 대 클러치 변속(double clutch-to-clutch shift)이 이루어진다.

Table 4는 변속기 시뮬레이터를 이용하여 확인된 전후진 변속과정에서 이루어지는 이중 클러치 대 클러치 변속의 종류를 나타내고 Fig. 28은 전진 3속에서 변속레버를 후진위치로 변경시켰을 때 발생하는 변속시험결과이다. F3→R3 변속은 F3에서 R2로 변

Table 4 Types of double clutch-to-clutch shift

Shift	Sequence	Double shift	
		Release	Apply
F3→R3	F3 →R2→R3	KV,K3	KR,K2
R3→F3	R3 →F2→F3	KR,K3	KV,K2
F4→R3	F4 →R2→R3	K4,K3	KR,K2
R3→F4	R3→ F2 →F4	KV,K2	K4,K3

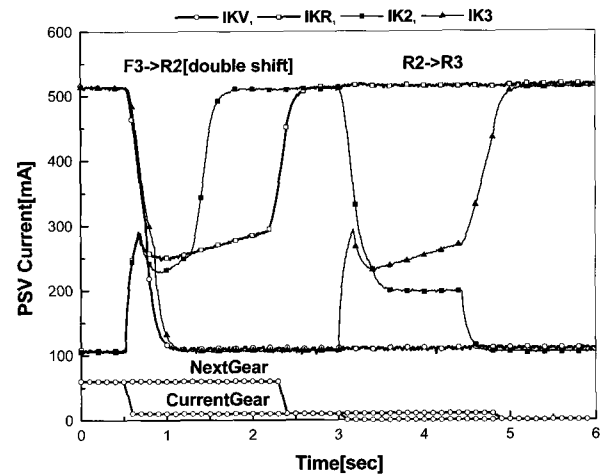


Fig. 28 Double clutch-to-clutch shift(F3→R3)

속이 완료된 후 다시 R2에서 R3로 변속이 이루어지는 두 번의 변속으로 진행되며 F3에서 R2 변속 시에는 KV와 K3클러치를 해제하면서 KR과 K2 클러치를 작동시켜야 하므로 이중 클러치 대 클러치 변속이다.

시뮬레이터를 이용하여 파악된 휠로더 자동변속기의 변속종류는 Table 5와 같이 모두 32가지이며 변속 시 결합 및 해제되는 클러치의 압력특성을 고려하면 다음과 같이 변속형태를 5가지로 분류할 수 있다.

Table 5 Classification of wheel loader A/T shift

NG CG	R3	R2	R1	N	F1	F2	F3	F4
R3	×	R3→ R2	×	R3→ N	×	R3→ F2	×	×
R2	R2→ R3	×	R2→ R1	R2→ N	×	R2→ F2	×	×
R1	×	R1→ R2	×	R1→ N	R1→ F1	×	×	×
N	N→ R3	N→ R2	N→ R1	×	N→ F1	N→ F2	N→ F3	N→ F4
F1	×	×	F1→ R1	F1→ N	×	F1→ F2	×	×
F2	×	F2→ R2	×	F2→ N	F2→ F1	×	F2→ F3	F2→ F4
F3	×	F3→ R2	×	F3→ N	×	F3→ F2	×	F3→ F4
F4	×	F4→ R2	×	F4→ N	×	×	F4→ F3	×

註) CG(Current Gear), NG(Next Gear)

■ 중립-전후진변속(neutral into gear shift)

중립에서 전진 1, 2, 3, 4단(또는 후진 1, 2, 3단)으로의 변속으로 해당되는 방향클러치와 속도클러치를 결합하여야 한다.

■ 전후진-중립변속(gear into neutral shift)

전진 1, 2, 3, 4단(또는 후진 1, 2, 3단)에서 중립으로의 변속으로 해당되는 방향클러치와 속도클러치를 해방시켜야 한다.

■ 기어변속(gear change shift)

전진(또는 후진) 상태에서의 기어변속으로 2개 속도클러치의 결합과 해방을 제어하여야 한다.

■ 전후진 셔틀변속(shuttle shift)

속도기어가 고정된 전후진 변속으로 2개 방향클러치의 결합과 해방을 제어하여야 한다. 속도기어가 3단 이상의 경우에는 이중 클러치 대 클러치 변속과

기어변속의 2단계로 이루어진다.

■ 이중 클러치 대 클러치 변속(double shift)

2개 클러치를 해방하면서 다른 2개 클러치의 결합을 제어하여야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 휠로더 자동변속기를 대상으로 작동원리와 내부구조를 분석하고 이를 바탕으로 TCU 입출력 신호모사를 모사하여 변속기가 배제된 상태에서 상용 TCU를 정상적으로 작동시키는 기능의 변속기 시뮬레이터를 개발하였다. 설계된 시뮬레이터를 구성하는 요소의 주요 기능과 특징을 요약하면 다음과 같다.

1) ZF-TCU 성능분석기

TCU에서 제어하는 6개 비례제어 솔레노이드밸브 구동전류와 PWM 듀티율을 측정하고 CAN 통신 데이터에 대한 모니터링 기능을 갖는다.

2) 속도신호 발생기

휠로더 주행상태에 따라 변속기 내부 기어열의 회전속도를 연산하고 속도센서 출력신호를 모사하는 기능을 갖는다. 설정된 가속조건 및 변속시간을 반영하여 모사되는 속도신호는 연구대상 TCU의 변속선도 및 변속특성분석에 활용될 수 있다.

3) 인터페이스 보드

운전자가 조작하는 변속레버 및 제반 작동스위치 신호와 2개 유온센서 출력신호를 모사함으로써 간편하게 운전자의 조작상태와 작동조건을 설정할 수 있도록 설계하였다.

4) 사용자 인터페이스 프로그램

차량 주행상태와 관련된 변속조건을 설정하고 수집된 변속데이터를 PC 화면에 표시하는 기능으로 LabWindows/CVI로 설계하였다.

개발된 시뮬레이터의 제반기능은 변속시험을 통하여 검증하였으며 다양하게 설정된 변속조건 하에서 수행된 변속시험으로부터 TCU의 변속 알고리즘을 분석하였다. 변속기 시뮬레이터는 기 개발된 TCU의 변속 알고리즘 분석뿐만 아니라 향후 진행될 독자 TCU 개발에도 활용할 예정이다.

참고 문헌

1) 김성수, 정상운, 이창호, “주행 시험 데이터를 이

- 용한 저가형 차량시뮬레이터의 조향감 재현 장치 구현”, 한국자동차공학회논문집 제13권 제2호, pp. 37-43, 2005.
- 2) 김중배, “ABS(Anti-Lock Brake System)의 실시간 시뮬레이터 개발”, 한국자동차공학회논문집 제7권 제7호, pp.229-241, 1999.
- 3) ZF-Ergopower Transmission 4WG-260, ZF, 2001.
- 4) 정규홍, 이교일, “건설차량용 자동변속기의 변속제어기 개발연구”, 한국자동차공학회논문집 제10권 제2호, pp.234-242, 2002.
- 5) 정규홍, 신상호, 이승일, 김형준, “휠로더 자동변속기용 TCU 성능분석기 개발”, 한국자동차공학회 2006년도 추계학술대회 논문집, pp.1405-1410, 2006.
- 6) 정규홍, 신상호, 이승일, 황광진, “휠로더 자동변속기 기어열 구조분석”, 유공압시스템학회 2006년도 추계학술대회 논문집, pp. 104-110, 2006.