

# 임베디드 변속기 시뮬레이터를 이용한 진단알고리즘 설계

## Diagnosis Design Using Embedded Transmission Simulator

정규홍 · 김경동

G. H. Jung, K. D. Kim

**Key Words:** Embedded Simulator(임베디드 시뮬레이터), Automatic Transmission(자동변속기), TCU(변속 제어기), On-Board Diagnosis(자기진단), Fail-safe(안전작동)

**Abstract:** Simulator is a development equipment which enables the ECU to operate in normal mode by simulating the interface signal between ECU and mechanical system electrically. Embedded simulator means simulation function is embedded in ECU firmware, hence the electrical signal interface is replaced by the substitution of information at system program level. This paper explains the development of embedded transmission simulator for the verification of TCU firmware function which covers shifting control and on-board diagnosis. The embedded simulation program is executed in TCU processor along with the TCU firmware and it provides TCU firmware with not only the speed information those are appropriate both in driving and shifting conditions, but also the fault detection signals. Experimental results show that the validity of embedded simulator and its usefulness to the TCU firmware development and verification.

### 1. 서론

최근 급속하게 발전하는 자동차 기술의 전자화는 지게차 및 휠로더로 대표되는 건설중장비용 차량으로 응용분야가 확대되고 있는 추세에 있다. 변속제어기(TCU)는 차량에 탑재되는 자동변속기의 동력전달을 초소형 컴퓨터를 이용하여 제어하는 핵심부품으로 환경관련 규제가 강화됨에 따라 연비와 효율뿐만 아니라 주행성능 향상의 설계목적을 동시에 달성하기 위하여 하드웨어와 펌웨어(firmware) 기술에 대한 연구개발이 지속적으로 이루어지고 있다.

현재 지게차와 휠로더에 적용되는 자동변속기는 운전자가 변속레버를 조작함에 따라 작동되는 솔레노이드밸브에 의하여 클러치 압력이 수동적으로 제어되는 파워 시프트(power shift)방식과 TCU에서 변속시점을 결정하고 솔레노이드에 인가되는 전기적 신호로 클러치 압력을 능동적으로 제어하는 전자동 자동변속기로 구분된다. 파워 시프트 자동변속기는 변속기 구조가 간단한 반면에 기계적인 방식으로 형성되는 클러치 압력으로 변속이 이루어지므로 변

속 시 발생하는 충격이 다소 크고 수동변속만이 가능하므로 주행과 동시에 포크(또는, 버킷)를 작동시키면서 단순한 작업을 반복적으로 수행하는 운전자의 편의성은 떨어지게 된다. 이에 비하여 전자동 자동변속기는 TCU에서 다양한 변속조건을 고려하여 능동적으로 압력을 제어함으로써 변속품질이 우수하면서 주행과 작업 상태에 적절한 변속단으로의 자동변속이 가능한 장점으로 인하여 장착율이 증가되고 있으며 소형 중장비에도 적용이 확대되고 있다.

TCU는 변속기에 내장된 제반 센서로부터 작동상태를 파악하고 전기적인 신호로 솔레노이드밸브를 구동함으로써 변속을 제어하는 핵심기능과 더불어 센서 및 액추에이터의 단선과 단락, 기계적인 동력전달장치의 작동오류를 자체적으로 판단하는 자기진단기능(OBD, on-board diagnosis)이 요구된다. 최근에는 정비성 향상과 운행 중인 차량의 배기가스 저감을 목적으로 배기에 영향을 미치는 주요부품의 고장을 감지하여 운전자가 적절한 조치를 취할 수 있도록 하는 자기진단기능이 의무화되는 추세에 있으며 단순고장뿐만 아니라 부품의 노화(aging) 상태까지 진단하는 기능으로 발전하고 있다.

본 연구에서는 독자개발 중에 있는 휠로더 자동변속기를 대상으로 설계된 TCU 운영프로그램의 자기진단기능 검증을 위하여 TCU 펌웨어에 내장되는 임베디드 변속기 시뮬레이터를 개발하였다.<sup>1)</sup> Fig. 1은

접수일: 2010년 6월 4일

정규홍(발표자): 대전대학교 컴퓨터응용기계설계공학과

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

김경동: 엠에스정밀 파워트레인 기술연구소

속도센서신호를 대상으로 실제로 전기적인 신호를 모사하는 기능의 독립형 변속기 시뮬레이터와 TCU 펌웨어에 내장되어 수행되면서 TCU 운영프로그램에 연산된 회전속도정보를 제공하는 임베디드 시뮬레이터의 구조를 나타낸다. 임베디드 변속기 시뮬레이터는 TCU에서 운영프로그램과 동시에 실행되면서 내부정보를 공유하므로 외부 커넥터를 통하여 입출력 신호를 연결해야 하는 독립형 시뮬레이터에 비하여 활용이 간편한 장점이 있는 반면에 TCU에 내장되므로 자체적으로 TCU 펌웨어를 개발하는 경우에만 사용될 수 있다. 개발된 임베디드 변속기 시뮬레이터의 기본 기능은 사용자가 PC에서 수행되는 모니터링 프로그램을 이용하여 직렬통신으로 TCU에 주행조건 및 변속특성을 설정함으로써 다양한 변속상황을 모사할 수 있으므로 설계된 변속제어 알고리즘을 간편하게 검증할 수 있으며, 가상적으로 다양한 작동오류 조건을 부여함으로써 TCU에 구현된 진단 및 안전작동(fail-safe)기능에 대한 점검도 가능하도록 설계하였다. Fig. 2는 상용화된 ZF사 TCU를 대상으로 개발된 독립형 변속기 시뮬레이터를 나타내며, 이 개발된 TCU를 대상으로 작동오류가 발생하는 조건과 안전작동모드에서의 변속특성 분석에 활용하였다.<sup>2-3)</sup>

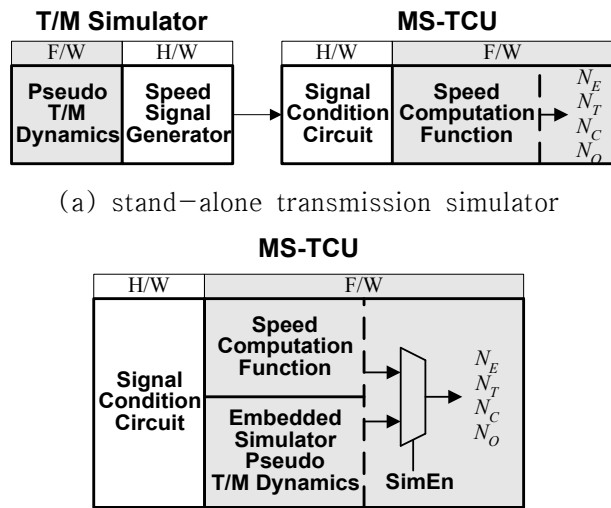


Fig. 1 Simulator structure for speed signals

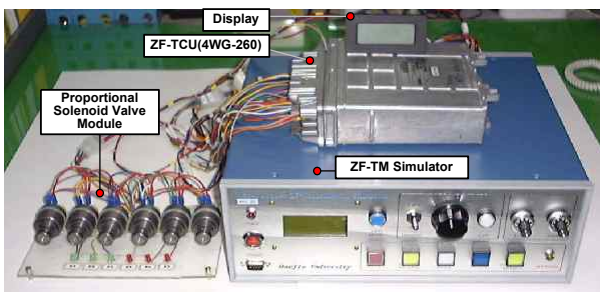


Fig. 2 Stand-alone type ZF-TM simulator

## 2. 변속기 입출력신호

TCU가 적용되는 전자동 자동변속기는 운전자 조작정보와 주행 및 변속상태 파악을 위하여 스위치와 센서신호를 입력받고 변속제어와 내부 작동상태표시를 위하여 액추에이터와 표시장치에 신호를 출력한다. Fig. 3은 TCU 커넥터를 통하여 입출력되는 신호의 종류와 내부 인터페이스를 나타내며 세부적인 신호특성은 다음과 같다.

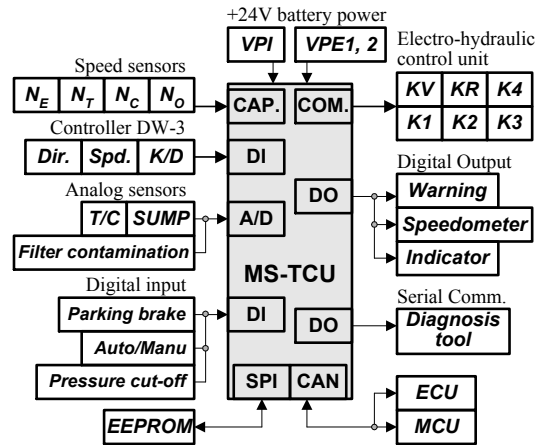


Fig. 3 Wheel loader TCU I/O signals

### 2.1 디지털 입력

운전자가 조작하는 변속레버와 스위치 신호로서 TCU 커넥터를 통해서서는 배터리 기준전압인 +24V와 GND 전압이 입력되고 신호조정회로를 거쳐 TTL 전압레벨로 변환된다. 커넥터 입력은 풀업/풀다운 되어 있으므로 디지털 입력이 연결되지 않은 상태에서는 입력전압이 고정되며 변속레버신호의 경우에는 발생 가능한 입력신호조합으로 단선 등과 같은 오류 여부를 판단한다.

### 2.2 아날로그 입력

토크컨버터와 밸브블록 오일유입구에 장착되는 온도센서와 오일필터 차압센서신호이며 온도와 차압에 따라 저항이 변화되므로 TCU 신호조정회로에서는 전압으로 변환한 후 A/D변환을 통하여 현재 상태를 측정한다. 부가적으로 TCU는 비례제어 솔레노이드 밸브 전류, 전원, 센서와 액추에이터 단선/단락 판정을 위한 내부회로의 전압신호를 A/D변환한다.

### 2.3 속도센서 입력

TCU 커넥터로 입력되는 속도신호에는 엔진, 터빈, 센트럴기어, 출력축속도가 있다. 속도센서는 인덕티브형(inductive type)과 홀형(hall type)에 따라 출력신호가 정현파와 구형파로 발생하지만 어느 경우나 TCU 신호조정회로에서 TTL 레벨의 구형파신호로 변환되고 마이크로 컨트롤러는 캡처(capture)

기능을 이용하여 속도를 연산한다. 회전속도는 작동 상태 파악과 변속제어에 매우 중요한 정보로서 TCU는 A/D 변환을 통하여 단선 및 단락오류를, 기어열 속도관계식을 이용하여 논리적 오류를 판정한다.

**2.4 디지털 출력**

TCU 작동오류가 검출되었을 때 점등되는 경고등과 구형과 신호 주파수로 구동되는 속도계, 현재 변속단을 나타내는 표시장치 구동신호가 있으며 TCU는 출력신호전압을 A/D 변환하여 출력장치의 단선여부를 판단한다.

**2.5 아날로그 전류출력**

비례제어 솔레노이드밸브는 코일에 흐르는 전류에 비례하는 압력을 발생시켜 변속 시 클러치 마찰토크를 제어한다. 마이크로 컨트롤러는 컴패어(compare) 기능으로 발생하는 PWM 신호로 전력 트랜지스터를 이용하여 구동전류를 증폭시키고 전류측정회로 출력전압을 A/D 변환하여 변속 시 기준전류를 추종하도록 제어한다. 아날로그 전류출력에 대한 단선/단락 판정은 전류증폭회로의 PWM 입력과 A/D 변환으로 측정된 구동전류를 비교하거나 비례제어 솔레노이드 밸브 단자전압에 대한 A/D 변환정보를 이용한다.

**2.6 CAN 통신신호**

TCU는 CAN 통신을 이용하여 네트워크 상에 연결된 다수의 전자제어장치와 필요한 정보를 교환하며 통신속도는 SAE J1939에서 규정된 250K bits/sec이다. CAN 통신오류는 네트워크에 연결되지 않거나 통신프로토콜에서 설계된 메시지가 수신되지 않는 경우에 발생된다. 휠로더 TCU에 구현된 CAN 통신은 변속기 작동상태와 관련된 정보의 송신이 주요 기능이므로 CAN 네트워크 연결오류가 발생하여도 변속제어기능에는 영향을 미치지 않는다.

**2.7 기타**

변속 제어와 관련된 작동변수 설정 값과 변속제어 시 기준전류레벨 데이터는 TCU 내부회로에 설계된 비휘성(non-volatile) 메모리인 EEPROM에 저장되며 SPI 통신으로 인터페이스 된다. EEPROM 작동오류는 읽은 데이터의 체크섬(check sum)으로 판정하며 오류가 검출되는 경우에는 변속제어가 불가능하므로 변속기 작동이 정지된다.

**3. 오류코드와 작동모드**

TCU에는 커넥터 입출력신호를 이용하여 자체적으로 작동오류여부를 판정한 후 검출된 오류코드의 특성에 따라 적절한 작동모드로 전환하는 자기진단기

능이 구현되어 있다. 작동오류는 발생 원인에 따라 센서 및 액추에이터 오류와 논리적인 오류로 구분될 수 있다. 전자는 센서 및 액추에이터 단선/단락과 같이 커넥터에 입력되는 단자전압으로부터 신호조정회로를 거쳐 A/D 변환된 결과로부터 오류가 판단되고 후자는 유온이 과도하게 높거나 클러치 슬립과 같이 제반 센서를 이용하여 파악된 변속기 작동상태가 비정상적인 경우에 해당된다. 작동오류의 또 다른 분류는 오류발생 원인이 정상적으로 복원 되었을 때 작동오류의 삭제여부로 구분할 수 있다. 변속레버나 온도센서가 단선되어 검출된 오류는 TCU에서 지속적으로 오류여부를 판단하므로 정상적인 연결 상태로 복원되면 해당되는 작동오류가 삭제되는 복원가능 오류이지만 비례제어 솔레노이드밸브가 단선/단락되어 발생하는 오류는 TCU에서 해당되는 솔레노이드에 대한 전류제어를 중지하므로 전기적인 연결이 복원되어도 오류가 남아있는 복원불능오류이다. 휠로더 TCU 진단알고리즘에서는 발생된 오류를 비휘성 메모리에 저장하지 않으므로 전원 리셋 시에는 이전에 발생되었던 모든 오류가 삭제된다. TCU 작동오류는 1 바이트 숫자로 나타내어지므로 최대 256개를 지정할 수 있으며 Table 1은 상위 4비트(니블)로 분류되는 오류의 종류를 나타낸다.

Table 1 Classification of error code

Code	Fault
1-Hex	digital input signal
2-Hex	analog input signal
3-Hex	speed signal
4-Hex	CAN signal error
5-Hex	CAN signal error
6-Hex	CAN signal error
7-Hex	analog current output signal
8-Hex	analog current output signal
9-Hex	digital output signal
A-Hex	digital output signal
B-Hex	transmission error, clutch error
C-Hex	logical error
D-Hex	power supply
E-Hex	high speed signal
F-Hex	general error

모든 오류는 발생 원인이 변속기 작동에 미치는 영향을 고려하여 안전한 차량 주행이 가능하도록 적절한 작동모드가 설계되어 있으며 휠로더 TCU 안전 작동모드의 종류와 작동특성은 다음과 같다.

(1) 정상작동(normal)

아무런 이상이 없거나 정상작동에 영향을 미치지 않는 오류가 검출되는 경우이다.

(2) 대체클러치 제어(substitute clutch control)

변속 시의 작동조건을 고려한 정상적인 변속제어가 불가능한 경우로 변속 시 클러치 작동 및 해제는 변속시간에 대하여 설계된 일정한 기준전류계적을 따라 개루프 방식으로 제어된다. Fig. 4는 엔진속도 센서가 단선된 대체클러치 제어모드에서 ZF-TCU를 대상으로 독립형 변속기 시뮬레이터를 이용하여 수행된 변속시험결과를 나타낸다. 변속이 개시되는 시점에서 터빈속도가 다른 변속조건에 대하여 동일한 전류계적으로 변속이 진행됨을 알 수 있다.

(3) 비상귀환(limp home)

비례제어 솔레노이드밸브 또는 클러치 슬립오류로 인하여 변속레버에서 설정된 변속단으로 변속이 불가능한 경우이다. 기어변속은 불가하고 출력축 속도가 임계속도보다 작은 경우에 한해서 Table 2에 나타난 바와 같이 비상귀환모드에서 설정된 변속단으로 중립-전후진, 전후진 서틀변속만이 가능하다. Fig. 5는 K2 비례제어 솔레노이드밸브가 단선된 ZF-TCU의 비상귀환모드에서 1단 전후진변속 시의 전류계적을 나타낸다. K4 해제클러치 전류는 변속이 개시됨에 따라 신속하게 저하되고 KR 클러치만이 일정한 기울기를 갖는 기준전류계적에 의하여 결합이 제어됨을 알 수 있다.

(4) 변속기 작동정지(T/M shutdown)

전원 오류와 같이 변속기 작동이 불가한 오류가 검출되는 경우로 TCU는 비례제어 솔레노이드밸브 전원을 차단하고 중립상태를 유지한다. TCU의 디지털 출력과 통신기능은 정상 작동된다.

(5) TCU 작동정지(TCU shutdown)

TCU 작동이 불가한 오류가 검출되는 경우로 비례제어 솔레노이드밸브와 디지털 출력전원을 차단하고 중립기어를 유지한다. ZF-TCU는 시동기에 의하여 전원이 차단될 때 CAN 통신 데이터로 TCU 작동정지 상태를 송신한다.

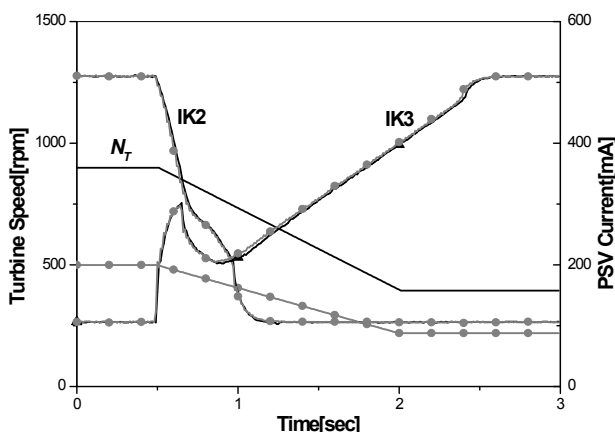


Fig. 4 F2→F3 shift at substitute clutch control

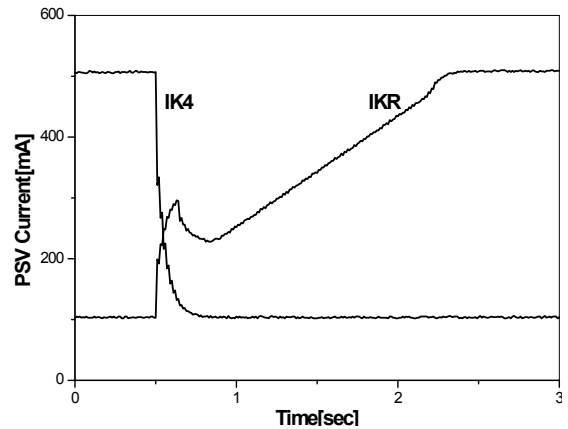


Fig. 5 F41→R1 shuttle shift at limp home

Table 2 Limphome forward gear for clutch error

Dir.		Spd.			Gear	Op. Mode
KV	K4	K1	K2	K3		
○	○	-	○	-	F2	limp home
		○	×	-	F41	
		×	×	○	F3	
		×	×	×	-	
○	×	-	○	-	F2	limp home
		-	×	○	F3	
		○	×	×	F1	
		×	×	×	-	
×	○	-	○	-	F42	limp home
		○	×	-	F41	
		×	×	○	F4	
		×	×	×	-	
×	×	-	-	-	-	T/M shutdown for KR error

4. 임베디드 변속기 시뮬레이터

TCU는 제반 센서신호로부터 파악된 변속기 작동 정보를 바탕으로 변속을 제어할 뿐만 아니라 설계된 자기진단기능으로 오류여부를 판단하므로 TCU가 정상 작동되기 위해서는 정상적인 입출력신호가 연결되어야 한다. 시뮬레이터는 변속기가 배제된 상태에서 TCU를 정상 작동시키기 위하여 주행 및 변속과 도상상태에서의 전기적인 입력신호를 모사하는 장치이며 임베디드 시뮬레이터는 TCU 운영 프로그램과 동시에 수행되면서 입력신호와 관련된 내부변수를 시뮬레이터 변수로 대체하는 개발지원 프로그램이다.

본 연구에서 개발된 임베디드 변속기 시뮬레이터는 고정된 변속단으로 차량이 주행하는 경우와 변속단이 변화되는 과도변속상태에서 TCU가 인식하는 입력정보를 시뮬레이터에서 연산되는 변수로 대체하는 변속모사기능과 자기진단에서 사용되는 센서와 액추에이터 관련정보를 사용자가 지정한 변수 값으

로 대체함으로써 작동오류를 모사하는 기능으로 설계된다. TCU 진단기능의 설계를 위해서는 TCU 커넥터에 입력되는 전기적인 신호를 단선/단락시킴으로써 작동오류를 발생시키고 해당되는 오류의 검출 여부와 발생된 오류에 대한 안전작동모드의 기능을 검증해야하므로 작동오류 상태를 재현시키는 과정이 번거로운 단점이 있다. 이에 비하여 임베디드 시뮬레이터를 활용하는 경우에는 TCU 모니터링 프로그램의 가상오류 시뮬레이션 기능을 활용하여 간편한 개발이 가능하다. 또한 복원불능오류의 경우에 실제 TCU는 전원 리셋에 의해서만 오류코드가 삭제되지만 임베디드 시뮬레이터는 오류삭제기능을 구현하여 사용자 버튼조작으로 복원불능오류의 제거가 가능하다. Fig. 6은 TCU 모니터링 프로그램에서 임베디드 시뮬레이터에 작동오류환경을 제공하는 기능의 사용자 인터페이스 작업창을 나타낸다.

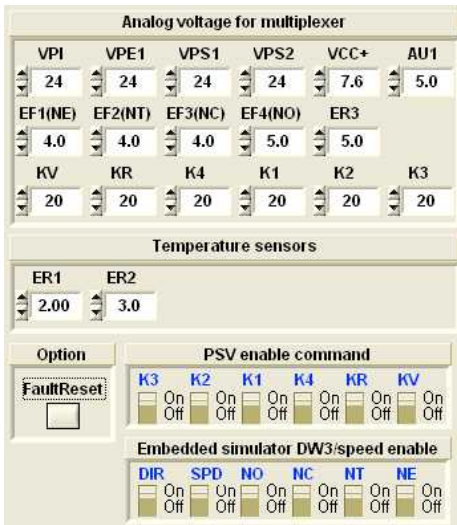


Fig. 6 Embedded simulator command window for virtual error simulation

Fig. 7은 임베디드 시뮬레이터에 구현된 가상오류 시뮬레이션 기능의 예를 나타내는 구조이다. VPI는 TCU 입력전원으로 정상작동을 위해서는 전압이 VPI\_LOW보다 크고 VPI\_HIGH보다 낮아야 한다. 실제 TCU에서는 VPI 전압측정을 위하여  $R_1$ 과  $R_2$ 로 구성되는 분압기 회로를 이용하여 신호를 조정하고 TCU 운영프로그램에서는 AD 변환결과를 나타내는 VPI\_ANA 변수 값으로부터 오류여부를 판단한다. 그러나 TCU에서 수행되는 임베디드 시뮬레이터가 활성화되면 VPI\_ANA 변수는 모니터링 프로그램에서 사용자가 설정하는 전압으로 대체되므로 정상작동 전압범위를 벗어나는 가상 오류상태를 간편하게 구현함으로써 설계된 진단기능을 검증할 수 있다.

Fig. 8은 진단에 이용되는 신호의 오류 누적횟수가

임계값에 도달하는 시점에서 작동오류를 판단하는 진단알고리즘의 오류검출과정을 나타낸다. TCU에서 A/D변환으로 획득하는 아날로그 전압신호는 일시적으로 신호에 유입되는 잡음으로 인하여 정상작동범위를 벗어날 수 있으며 이러한 경우에는 오류가 발생되지 않도록 하기 위한 설계이며 복원가능오류의 경우에는 정상작동상태가 누적된 오류횟수만큼 지속되는 시점에서 해당되는 오류가 삭제된다.

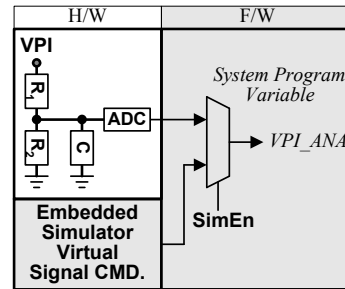


Fig. 7 Diagnosis function of embedded simulator

Error Status	N	N	N	N	N	N	E	E
Error Count	0	1	2	1	2	3	4	5
Signal Status	N	E	E	N	E	E	E	E
Diagnosis Sampling	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Fig. 8 Cumulative error detection process

### 5. 임베디드 시뮬레이터 기능 검증

TCU에 구현된 임베디드 시뮬레이터의 변속기능과 진단알고리즘 개발을 위한 가상오류 시뮬레이션 기능을 검증하기 위한 변속시험을 실시하였다.

Fig. 9는 전진 2속에서 출력축 속도가 300rpm, 엔진과 터빈의 속도 차가 100rpm인 상태로 주행 중에 변속레버를 3단으로 변경하였을 때 발생하는 F2→F3 상향변속결과를 나타낸다. 변속 과도상태에 대한 임베디드 시뮬레이터의 설정조건은 변속시간이 1초이고 변속이 개시된 후 속도가 변화되기 시작하는 변속지연시간은 0.3초이다. TCU에 설계된 변속제어 알고리즘은 변속시간에 따라 미리 설계된 전류제어를 해당되는 비례제어 솔레노이드밸브에 인가하는 개루프 방식과 관성영역에서 터빈각가속도가 목표값을 추종하도록 결합되는 클러치 전류제어를 변화시키는 피드백 제어방식의 2종류이다. 피드백 변속 제어는 클러치 충전영역과 토크영역에서의 전류제어는 개루프 변속제어와 동일하지만 터빈속도가 변화되기 시작하는 관성영역에서는 터빈속도가 변화되는 기울기에 따라 제어전류가 조절된다. 변속시험을 분석한 결과 개루프 변속제어에서는 변속이 진행되는 과정에서의 작동과 해제클러치 전류가 미리 설계된

전류제어를 따라 변화되는 변속특성임을 검증하였고 피드백 변속제어에서는 관성영역에 진입하면서 임베디드 시뮬레이터에서 모사되는 터빈속도의 기울기가 목표터빈 각속도에 근접하게 변화되므로 결합클러치 전류가 일정한 값을 유지하면서 변속이 진행되었다가 변속이 종료되는 시점에서 결합과 해제클러치 전류가 급격하게 변화되면서 변속이 완료되는 변속특성임을 확인하였다.

Fig. 10은 임베디드 시뮬레이터 터빈속도를 영으로 설정한 상태에서 변속레버를 중립에서 전진 2속으로 변화시켰을 때 발생하는 N→F2 변속과정이다. 속도 센서가 차량배선에 연결된 상태에서 변속기에 조립되지 않거나 속도센서 기능불량으로 출력신호가 변화되지 않으면 TCU는 커넥터에 연결된 속도센서의 전기적인 신호가 정상이므로 오류를 검출하지 못하고 속도만을 영으로 연산하게 된다. 그러나 중립에서는 모든 클러치가 해제된 상태이므로 논리적 오류인 클러치 슬립오류진단이 생략되어 Fig. 10의 변속시험에서 TCU는 중립에서 정상작동모드이다. 이 상태에서 전진 2속으로 변속된 후 차속이 일정속도 이상이면 터빈속도가 영이므로 KV 클러치 슬립속도가 오류판정 한계속도보다 크게 되고 오류 누적횟수가 임계값에 도달하는 시점에서 B5 오류코드가 발생하는데 Fig. 10에서는 전진 2속으로의 변속종료 시점에서부터 오류가 발생할 때까지의 시간이 B5 오류판정에 소요되는 시간이다. 오류가 검출되면 TCU는 전진 2속에서 결합된 KV와 K2 클러치를 신속하게 해제하면서 비상귀환모드로 전환하게 되며 운전자가 변속레버를 중립으로 전환하기 전까지는 모든 변속기능이 정지된다.

이와 같은 변속시험을 통해서 임베디드 시뮬레이터를 이용하면 TCU만으로 설계된 변속과 진단알고리즘에 대한 성능검증이 가능함을 확인하였다.

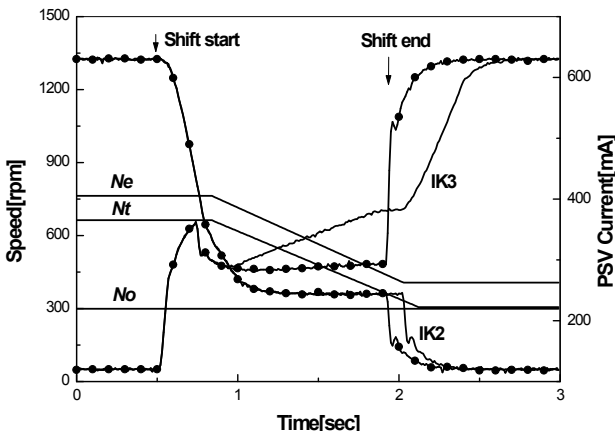


Fig. 9 F2→F3 upshift with open-loop and feedback shift control

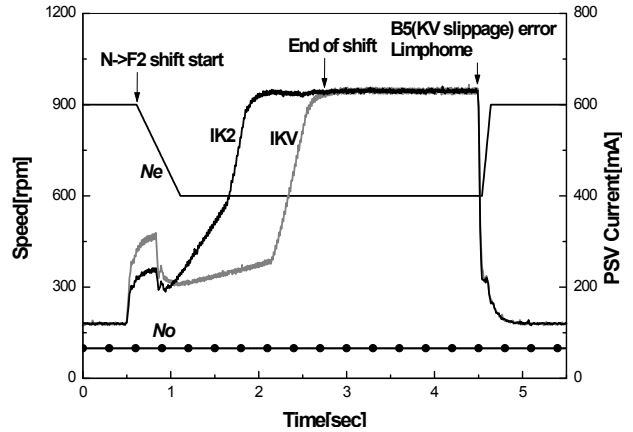


Fig. 10 N→F2 shift at zero turbine speed

### 6. 결론

시뮬레이터는 동적특성을 갖는 기계적인 시스템을 대상으로 설계되는 전자제어시스템의 운영프로그램을 간편하게 개발할 목적으로 제반 센서의 전기적인 신호를 실시간으로 모사하는 기능의 개발지원 장비이며 임베디드 시뮬레이터는 운영프로그램과 동시에 수행되면서 내부변수를 시뮬레이터 변수로 대체함으로써 전자제어장치 단독적으로 설계된 운영프로그램의 기능을 검증할 수 있는 개발지원 프로그램이다.

본 연구에서는 자동변속기 변속제어를 담당하는 TCU 펌웨어의 변속과 자기진단을 검증할 수 있는 기능의 임베디드 시뮬레이터를 개발하였다. 주행과 변속과도상 상태에서 변속기 내부의 회전체 속도변화는 변속기 기어열에 대한 속도관계식을 바탕으로 설계하였고 TCU에서 검출하는 오류의 종류와 발생된 오류에 따른 안전작동모드를 분석하여 사용자 설정에 따라 대부분의 오류상태를 모사하는 가상오류 시뮬레이션 기능을 구축하였다. 개발된 임베디드 시뮬레이터의 기능은 TCU만을 이용한 변속시험으로 검증하였으며 이를 통하여 TCU에 설계된 변속제어 알고리즘과 자기진단기능 설계에 임베디드 시뮬레이터가 활용될 수 있음을 확인하였다.

### 참고 문헌

- 1) 정규홍, 김경동, "임베디드 변속기 시뮬레이터 개발", 2009년 한국자동차공학회 학술대회, KSAE09-A0335, 2009.
- 2) 정규홍, 신상호, 이승일, "휠로더 자동변속기 시뮬레이터 개발", 유공압시스템학회 논문집, 제4권, 제2호, pp. 7~20, 2007.
- 3) ZF-Ergopower Transmission 4WG-260, ZF, 2001.