

지게차 변속제어 알고리즘 검증을 위한 임베디드 변속기 시뮬레이터 개발 Development of Embedded Transmission Simulator for the Verification of Forklift Shift Control Algorithm

정규홍^{1*}

Gyuhong Jung

Received: 28 Aug. 2023, Accepted: 10 Oct. 2023

Key Words : Forklift(지게차), Automatic Transmission(자동변속기), TCU(변속제어기), Embedded Transmission Simulator(임베디드 변속기 시뮬레이터), On Board Diagnosis(자기진단)

Abstract: A forklift is an industrial vehicle that lifts or transports heavy objects using a hydraulically operated fork, and is equipped with an automatic transmission for the convenience of repetitive transportation, loading, and unloading work. The Transmission Control Unit (TCU) is a key component in charge of the shift control function of an automatic transmission. It consists of an electric circuit with an input/output signal interface function and firmware running on a microcontroller. To develop TCU firmware, the development process of shifting algorithm design, firmware programming, verification test, and performance improvement must be repeated. A simulator is a device that simulates a mechanical system having dynamic characteristics in real time and simulates various sensor signals installed in the system. The embedded transmission simulator is a simulator that is embedded in the TCU firmware. information related to the mechanical system that is necessary for TCU normal operation. In this study, an embedded transmission simulator applied to the originally developed forklift TCU firmware was designed and used to verify various forklift shift control algorithms.

기호 설명

$\omega_T, \omega_R, \omega_S, \omega_C, \omega_O$: Rotational speed of gear train element, rad/sec

r_I, r_D, r_S : Gear ratios in gear train

N_E, N_T, N_O : Engine, turbine, output speed, rpm

NS_{B1}, NS_{C2} : Slip speed in B1, C2, rpm

CF, BR: Forward clutch, reverse brake

B1, C2: 1st brake, 2nd clutch

PSV: Proportional solenoid valve

$i_{CF}, i_{BR}, i_{B1}, i_{C2}$: PSV current, A

$i_{r_{CF}}, i_{r_{BR}}, i_{r_{B1}}, i_{r_{C2}}$: PSV current reference, A

$(i_{r_{CF}})_{DC}, (i_{r_{BR}})_{DC}$: PSV current reference during shuttle shift, A

i_{max}, i_{min} : PSV current reference for clutch engagement and disengagement, A

$i_{r_{INCH}}$: PSV current reference for direction clutches during inching mode on, A

t_d, t_s : Simulator parameters of delay, shift time, sec

1. 서론

지게차는 유압으로 작동되는 포크(fork)를 이용하여 무거운 중량의 물체를 들어 올리거나 운반하는 산업 차량으로 공장이나 창고에서의 화물 적재와 하역에 필수적인 장비이다. 지게차는 동력원에 따라 LPG, 디젤, 전동식이 있으며 3톤 이상의 지게차는 대

* Corresponding author: ghjung@daejin.ac.kr

1 Department of Mechanical Engineering, Daejin University, Gyeonggi 11159, Korea

Copyright © 2023, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

부분 디젤식이다. 협소한 공간에서 상하차 작업과 주행이 반복되는 디젤식 지게차에는 작업 편의성을 위해 자동변속기가 장착된다. 지게차 자동변속기는 2000년대 초부터 국내 업체에서 국산화 개발을 시도하였으나 1톤급 소형 지게차에 탑재되는 기계식 전후진 1단 외에 전자제어식 다단 자동변속기는 여전히 해외 변속기 전문업체 제품을 채택하고 있으며 국산화가 미흡한 실정이다.¹⁾

지게차 자동변속기는 유체클러치인 토크 컨버터, 기어 맞물림으로 구동력을 전달하는 기어 열, 마찰 요소를 작동시키는 클러치 피스톤과 유압 제어시스템의 기계적인 요소와 변속기 및 운전자 작동상태와 관련된 제반 정보를 바탕으로 변속단을 결정하고 변속 시 발생하는 변속충격이 감소하도록 비례 솔레노이드밸브(proportional solenoid valve, PSV)를 이용하여 변속제어를 수행하는 기능의 변속제어기(transmission control unit, TCU)로 구성된다. 자동변속기의 기계적 구성품은 해외 선진사 제품에 대한 역설계(reverse engineering)를 바탕으로 한 지속적인 기술개발 노력으로 일정 수준에 도달하였으나 마이크로컨트롤러에서 실행되는 펌웨어(firmware)로 구현되는 TCU 변속기능은 소프트웨어에 대한 역설계가 불가능하고 변속제어와 관련된 설계 및 시험개발 능력이 부족한 실정이다.

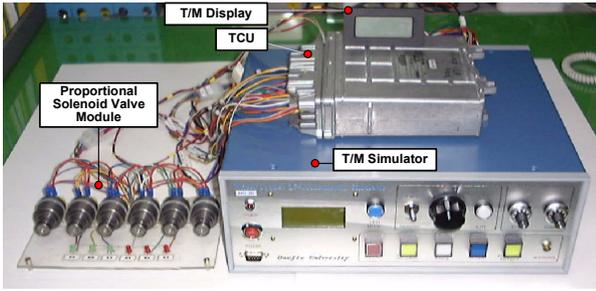
선진사 자동변속기에 적용되는 TCU의 기능 및 설계 사양 분석을 위해서 수행된 연구로는 실차시험 시 TCU 입출력 신호를 실시간으로 분석하는 기능의 TCU 성능분석기²⁾와 변속기가 배제된 상태에서 TCU 입출력 신호를 모사하여 TCU를 정상 작동시키면서 변속순도(shift map), 변속제어 알고리즘과 진단(diagnosis) 및 안전작동(failsafe) 기능을 분석하는 변속기 시뮬레이터^{3,6)}가 있다. 이와 같은 연구를 통해 선진사 TCU 펌웨어에 구현된 변속제어 기능의 일부는 확인할 수 있지만 다양한 작동조건에서 TCU 설계 사양을 완벽하게 파악하는 것은 불가능하다. 따라서 TCU 개발은 독자적으로 설계된 기계적 구성품에 대한 이해를 바탕으로 선진사 TCU 분석자료를 활용하여 변속제어 펌웨어와 시험평가 개발환경을 구축하고 반복적인 변속시험과 변속제어 알고리즘 보완 개발, 펌웨어 수정설계를 통해서 점진적으로 안정된 성능을 확보해야 한다.

펌웨어로 구현된 TCU의 변속제어성능 확인을 위해서는 변속기와 TCU를 결합하여 차량에 장착한 후 실차시험을 하거나 관성부하를 갖는 변속기 동력계

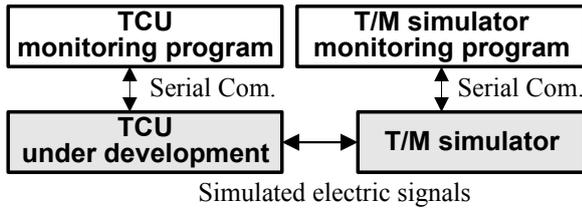
(dynamometer)를 이용한 벤치시험을 수행한다. 동력계를 이용하면 안정된 시험환경에서 동일한 변속조건을 구현할 수 있는 장점이 있으나 변속기 동력계를 보유한 국내 지게차 변속기 개발업체는 없으므로 실차 변속시험에 의존해야 한다. 실차시험을 통한 TCU 펌웨어 개발연구는 시험결과 분석, 변속제어 알고리즘 수정 및 보완, 펌웨어 프로그래밍, 실차 성능시험과 같은 일련의 과정을 반복적으로 수행해야 하며 항상 실차시험을 통해서만 수정 보완된 펌웨어의 성능을 검증할 수 있으므로 성능 확인시험이 번거롭고 검증 시험에 소요되는 시간과 비용이 큰 단점이 있다.

시뮬레이터(simulator)는 동적특성을 갖는 기계적인 시스템을 실시간으로 시뮬레이션하여 시스템에 장착된 각종 센서신호를 모사하는 장치이다.⁷⁻⁸⁾ 최근 다양한 기계 시스템에 전자제어가 확산 적용되면서 펌웨어 개발비용과 시간을 절감하기 위하여 제어대상 기계적인 시스템의 동적특성을 시뮬레이션한 후 센서 출력에 해당되는 전기적인 신호를 전자제어유닛(electronic control unit, ECU)에 제공하는 시뮬레이터 활용이 일반화되고 있다. 변속기 시뮬레이터는 TCU에 연결되는 변속기 작동 및 운전자 조작상태와 관련된 전기적인 신호를 실시간으로 모사함으로써 차량에 탑재된 변속기 없이 TCU가 정상 작동될 수 있도록 하는 기능을 갖는다. 변속기 시뮬레이터를 이용하면 개발 TCU의 펌웨어 성능검증을 간편하게 수행할 수 있는 장점이 있다. Fig. 1은 선진사 휠로더 자동변속기 TCU를 대상을 개발된 변속기 시뮬레이터와 변속기 시뮬레이터를 이용하여 개발 TCU를 작동시키기 위한 시스템 구성도를 나타낸다. 여기서 모니터링 프로그램은 TCU와 변속기 시뮬레이터의 작동상태를 감시하고 조절하는 기능으로 PC에서 수행되면서 직렬통신으로 연결된다.

최근 개발되는 지게차 자동변속기는 변속기와 관련된 운전자 조작신호를 기계적인 연결 없이 모두 전기적인 신호로 감지하여 처리하는 shift-by-wire 방식이다. 이러한 방식의 변속기에서 TCU 펌웨어는 전기적인 신호를 디지털 신호로 변환하여 인식하므로 TCU 펌웨어를 자체적으로 개발하는 경우에는 변속기 시뮬레이터의 기능을 TCU 펌웨어에 내장시키는 임베디드 시뮬레이터(embedded simulator) 설계가 가능하다. 임베디드 변속기 시뮬레이터와 관련된 연구로는 휠로더 자동변속기 TCU 개발 시 기본적인 변속제어기능 확인과 진단 알고리즘 검증에 개발되어



(a) transmission simulator for wheel loader



(b) system configuration

Fig. 1 ECU firmware test with T/M simulator

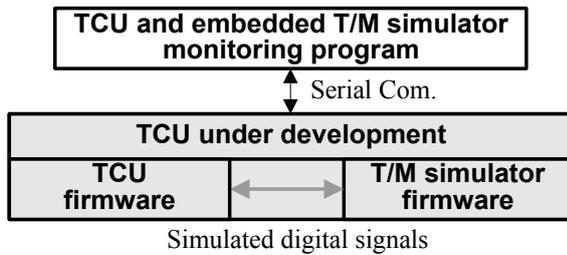


Fig. 2 ECU firmware test with embedded T/M simulator

활용된 바 있다.⁹⁻¹⁰⁾ Fig. 2는 TCU 펌웨어에 내장되는 임베디드 변속기 시뮬레이터의 시스템 구성도이다. 변속제어와 시뮬레이션 기능이 TCU에서 동시에 실행되면서 내부정보를 공유하므로 독립형 변속기 시뮬레이터에서와 같이 외부 커넥터를 통한 신호 연결이 불필요하고 하나의 모니터링 프로그램으로 변속과 시뮬레이터 기능을 감시, 조절할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 4톤 지게차용 자동변속기 TCU에 적용되는 임베디드 변속기 시뮬레이터를 개발하였으며 TCU 펌웨어에 구현된 기능을 검증하는 데 활용하였다. 임베디드 변속기 시뮬레이터는 TCU 펌웨어 개발에 필수적인 도구로 다양한 목적으로 이용되지만 본 연구에서는 핵심적인 TCU 기능검증으로 다음과 같은 활용 예를 제시하였다.

- 피드백 변속제어 알고리즘 검증
- 변속제어 기능 개선안 검증
- 클러치 자동보정 알고리즘 검증

- 진단 알고리즘 검증

2. 변속기 구조

Fig. 3은 토크 컨버터, 유압시스템, 기어 열과 변속 제어기로 구성되는 4톤 지게차용 2단 자동변속기의 동력전달체계를 나타낸다. 엔진동력은 토크 컨버터, 변속기 기어 열을 통해 토크 비가 변환된 후 종감속 기어와 차동기어장치가 내장된 액슬(axle)을 통해 전륜에 전달된다. 유압시스템은 오일펌프와 라인 압력을 조절하는 릴리프 밸브, 각 클러치 압력을 독립적으로 제어하는 직접제어형 비례 솔레노이드밸브(PSV) 4개로 구성되고 TCU가 PSV 전류를 통해서 클러치와 브레이크를 선택적으로 작동시켜 전후진 2단 변속을 제어한다. Fig. 3에서 유압시스템에 표기된 4개 약어는 PSV를, 2단 기어 열에 표기된 4개 약어는 마찰토크를 발생시키는 클러치 및 브레이크를 나타낸다.

Fig. 4는 더블 피니언 단순 유성치차(planetary gear, PG) 2개로 설계된 기어 열 구조를 나타내고 Table 1은 각 변속단에서 작동되는 마찰요소 조합이다. 기어 열은 5개 회전요소로 구성되고 출력축 회전방향을 결정하는 방향 클러치 CF, BR과 기어비를 결정하는 속도 클러치 B1, C2를 하나씩 결합하면 주행방향과 변속비(ω_T/ω_O)가 유일하게 결정된다. 단 운전자 스위치로 작동되는 주차 브레이크에서는 별도의 파킹 브레이크 없이 B1과 C2를 결합하여 출력축이 구속되도록 설계되어 있다. 변속비를 결정하는 기구학적 관계식은 유성치차 속도관계식 2개와 결합되는 2개 마찰요소의 구속조건이며 다음 식 (1), (2)는 방향과 속도 기어 열에 대한 속도 관계식이다.

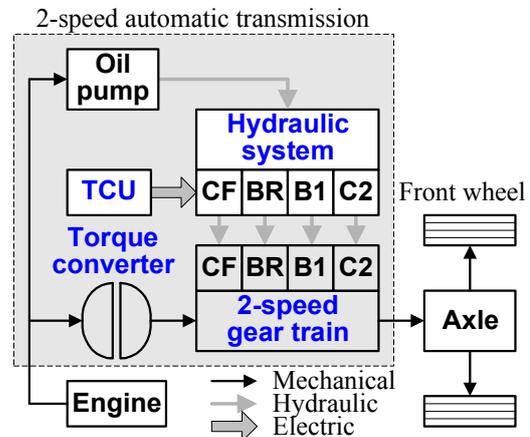


Fig. 3 Power transmission in forklift

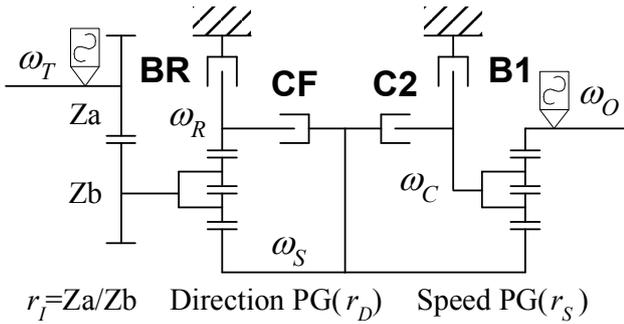


Fig. 4 Stick diagram of gear train

Table 1 Clutch and brake engagement

Gear	CF	BR	B1	C2
P			○	○
N				
F	1	○	○	
	2	○		○
R	1		○	
	2		○	○

$$-\omega_S + r_D \omega_R = (r_D - 1)r_I \omega_T \quad (1)$$

$$-\omega_S + r_S \omega_O = (r_S - 1)\omega_C \quad (2)$$

마이크로컨트롤러 기반으로 설계되는 TCU는 PCB로 구현되는 전기회로 하드웨어와 변속기 제어기능으로 설계된 제어로직과 변속제어 알고리즘을 컴퓨터 프로그램으로 구현한 펌웨어로 구성된다. TCU는 변속기와 관련된 사용자 조작 스위치와 제반 센서로부터 작동 지령과 주행상태를 인식한 후 4개 PSV 전류를 제어하여 변속을 구현한다. TCU로 제어되는 변속기는 유압회로를 단순하게 설계하고 고도화된 변속제어 알고리즘을 프로그램으로 구현한 펌웨어로 변속성능을 향상시키는 방식을 채택하고 있다. 본 연구의 개발 대상 TCU도 운전자 조작을 모두 전기적인 신호로 인식하여 4개 마찰요소의 결합상태를 제어하는 shift-by-wire 방식이며 엔진제어기(ECU), 차량제어기(VCU)와 CAN으로 연결되어 변속제어와 차량운용에 필요한 정보를 주고받도록 설계되어 있다. 변속제어 알고리즘에는 변속단 결정과 변속제어뿐만 아니라 진단 및 안전작동 기능이 포함한다. Fig. 5는 STMicro-electronic사의 ARM7 Cortex-M3 계열 32비트 마이크로컨트롤러인 STM32F103ZC를 기반으로 개발된 TCU이다.



Fig. 5 Transmission control unit(TCU)

3. 임베디드 변속기 시뮬레이터

TCU는 변속과 관련된 사용자 조작 스위치와 변속기에 장착된 센서 신호를 바탕으로 변속제어와 작동 오류를 판정하는 자기진단기능을 수행하므로 TCU 펌웨어가 정상적으로 실행되기 위해서는 정상적인 입출력신호가 연결되어야 한다.

Fig. 6은 연구대상 지게차 TCU의 입출력신호를 나타내며 전기적인 신호의 특성에 따라 마이크로컨트롤러에 내장된 적절한 주변장치를 이용하여 인터페이스되며 전기적인 신호는 모두 펌웨어 내부에서 디지털 신호로 변환된다. 임베디드 변속기 시뮬레이터는 TCU 펌웨어와 동시에 수행되면서 입출력 디지털 신호를 시뮬레이터에서 연산되는 값으로 대체하여 TCU 펌웨어를 정상 작동시키는 개발지원 프로그램이다. 시뮬레이터가 활성화되면 TCU 펌웨어는 입출력 정보를 시뮬레이터에서 모사되는 정보로 대체하는 작동모드로 설정된다. 임베디드 변속기 시뮬레이터에서 모사되는 입출력 신호의 세부적인 특성은 다음과 같다.

3.1 속도신호

지게차 TCU에 입력되는 속도는 엔진(N_E), 터빈(N_T), 출력축(N_O) 속도이며 N_T 와 N_O 는 센서신호로부터 마이크로컨트롤러 캡처(capture) 기능을 이용하여 회전속도를 연산하고 N_E 는 ECU로부터 CAN으로 수신한다. 실제 변속기 속도는 엔진동력과 주행부하에 의한 동특성으로 결정되지만 동적시뮬레이션에는 상당한 연산부하가 요구되므로 시뮬레이터에서는 변속비가 고정된 변속단과 변속과도 상태에서의 기구학적 속도관계식을 이용하여 속도를 모사하였다.

Fig. 7은 1→2 상향변속에 대해 시뮬레이터에서 모사되는 속도 변화궤적을 나타낸다. 변속 개시 전 1단과 변속 완료 후 2단에서는 사용자가 설정하는 N_O 에 변속비를 곱한 값으로 N_T 가 결정되고 엔진토크를 모사하기 위해 설정되는 $N_E - N_T$ 에 의해 N_E 를 연산한다. 변속 중 과도상태에서는 변속이 개시될 때의 N_O 로부터 사용자가 설정한 t_s , 변속시간(shift time) 동안 N_T 가 일정 기율기로 변화되도록 하였다. 여기서 t_d 는 변속지연시간(shift delay time)으로 실제 변속기에서 나타나는 클러치 충전 및 토크영역에 해당되는 시간을 모사하기 위한 설정 변수이다. Fig. 8은 시뮬레이터 작동변수를 설정하는 모니터링 프로그램의 컨트롤을 나타내며 NoRamp는 고정된 변속단에서 N_O 변화 기율기, NeN은 기어 중립에서의 엔진속도를 설정한다.

3.2 디지털 입력

운전자가 조작하는 변속레버의 주행방향과 변속단 신호, 주차 브레이크와 자동모드 스위치는 디지털 입력으로 처리되고 인칭(inching), 자동 홀드(auto hold), 저속주행(creep) 기능 활성화 상태는 지게차 클러스터에서 설정되어 VCU(vehicle control unit)로부터 CAN으로 수신된다. 시뮬레이터는 모니터링 프로그램에서 사용자가 설정한 값으로 TCU 디지털 입력을 대체하며 Fig. 9는 디지털 입력 설정과 관련된 모니터링 프로그램 컨트롤을 나타낸다.

3.3 아날로그 입력

유온 센서와 인칭페달 작동량을 나타내는 포텐시오메터 전압은 가변저항을 이용하여 아날로그 전압을 발생시켜 TCU 커넥터에 연결되므로 임베디드 시뮬레이터와 무관하게 독립적으로 조절된다.

3.4 비례 솔레노이드밸브(PSV)

TCU는 변속제어 알고리즘을 통해 PSV 기준전류를 연산하고 PWM 출력과 shunt 저항 전압 차(voltage difference)를 이용하여 페루프 전류제어를 수행한다. 전류부하 모사 기능은 변속기에 적용되는 실제 PSV를 TCU에 연결해도 무방하지만 시뮬레이터를 이용한 TCU 펌웨어 검증에서는 변속제어 알고리즘에서 연산되는 기준전류가 유용한 정보이므로 TCU가 임베디드 시뮬레이터 모드로 작동하는 상태에서는 실제 전류를 제어하지 않고 PSV 제어전류를 기준전류로 대체하는 방식으로 설계하였다. TCU 시뮬레이터

작동모드에서는 PSV를 구동하지 않으므로 PSV와 관련된 단선, 단락 등의 작동유류 검출기능은 비활성화된다. 이러한 방식의 임베디드 시뮬레이터 설계는 오직 자체적으로 TCU 펌웨어를 개발하는 경우에만 유효하다.

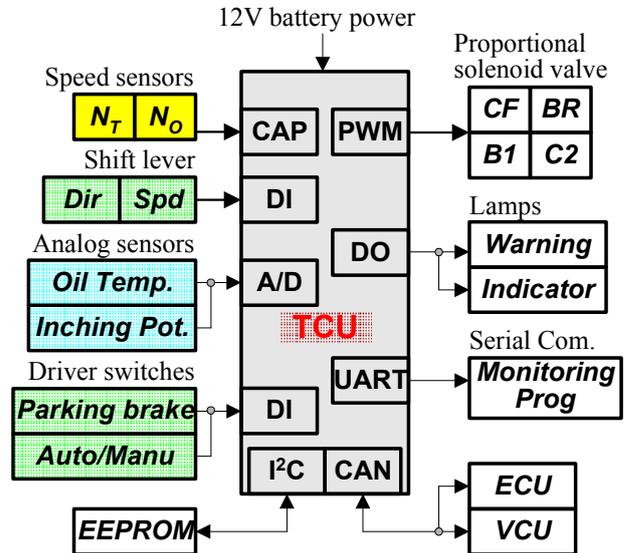


Fig. 6 Forklift TCU I/O signals

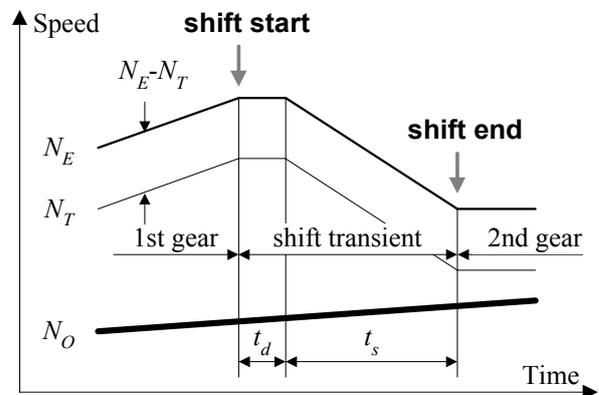


Fig. 7 Speed simulation for 1→2 upshift



Fig. 8 Simulator parameters for speed

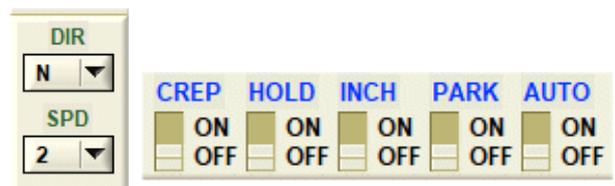


Fig. 9 Simulator switches for digital input

4. 시뮬레이터 기능 검증시험

외부 입출력 신호가 연결되지 않은 상태에서 4톤 지게차 TCU 펌웨어를 단독으로 실행함으로써 간편하게 펌웨어를 개발할 수 있는 환경을 제공하는 임베디드 변속기 시뮬레이터의 기능 검증시험을 실시하였으며 이를 통해 유용성을 확인하였다.

4.1 피드백 변속제어 알고리즘 검증

연구대상 변속기는 모든 변속이 하나의 클러치를 해제하면서 다른 클러치를 결합하는 방식의 클러치대 클러치 변속(clutch to clutch shift)이며 속도변화가 나타나는 관성영역에서는 결합 클러치의 슬립속도(slip speed)가 설계된 목표궤적을 추종하도록 결합 클러치 PSV 전류를 제어하는 피드백 변속제어기능이 적용된다.¹¹⁾

본 연구에서는 시뮬레이터를 이용하여 펌웨어에 구현된 피드백 제어 알고리즘을 검증하였다. Fig. 10은 자동변속모드에서 차속이 일정 기울기로 가속될 때 발생하는 1-2 상향변속 시험으로 시뮬레이터 작동 조건은 다음과 같이 2가지이며 Fig. 10에서 작동조건 ①의 변속은 가는 선으로 작동조건 ②의 변속은 굵은 선으로 나타내었다.

- ① $t_d = 0.2s, t_s = 0.5s, NeN = 100rpm$
- ② $t_d = 0.5s, t_s = 1.5s, NeN = 300rpm$

변속조건 ①에서는 짧은 변속시간으로 변속이 신속하게 진행되어 슬립속도 오차($NS_{REF} - NS_{C2}$)가 양의 값으로 발생하여 관성영역에서 결합되는 C2 클러치 기준전류 ir_{C2} 가 작은 반면에 변속조건 ②에서는 변속지연과 변속시간이 커서 C2 클러치 결합이 지연되어 슬립속도 오차가 음의 값으로 TCU는 이를 보상하기 위해 ir_{C2} 를 증가시킴을 알 수 있다. 어느 경우에서나 $NS_{C2} = 0$ 에 도달한 후 일정 시간이 경과하면 TCU는 변속완료로 판단하여 ir_{C2} 를 최대 전류로 설정하게 된다.

이같이 시뮬레이터를 이용하여 TCU에 설계된 피드백 변속제어 알고리즘에 대한 기능검증이 가능함을 확인하였다. 시뮬레이터는 펌웨어에 설계된 기능 검증만 가능하고 슬립속도 오차에 대해 PSV 기준전류를 연산하는 제어기 이득과 관련된 성능은 실차 변속시험을 통해서만 확인할 수 있다.

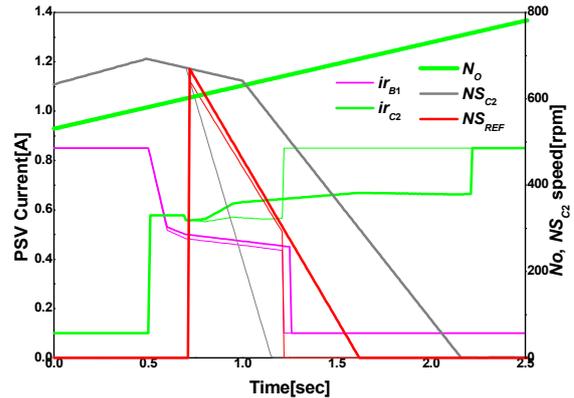


Fig. 10 1→2 upshift with embedded simulator

4.2 변속제어 기능 개선안 검증

실차시험에서 발견된 작동오류나 작동불량을 개선하기 위하여 수정된 TCU 펌웨어의 기능을 시뮬레이터를 이용하여 확인한 후 실차시험에 적용함으로써 펌웨어 프로그램 설계오류로 인해 발생하는 비효율적인 개발과정을 단축할 수 있다.

지게차는 인칭페달을 이용하여 전진/후진 클러치 작동압력을 낮게 조절함으로써 클러치 슬립을 통해 미세한 속도조절이 가능하며 이 기능은 적재물을 섬세하게 상하차하는 작업에 활용된다. Fig. 11은 인칭페달을 밟아 BR 클러치 기준전류가 낮은 상태에서 변속레버를 전진으로 전환하여 셔틀변속이 발생될 때의 변속제어를 나타내는 도식적인 그림이다. 통상적인 셔틀변속 시의 기준전류 ($ir_{BR})_{DC}, (ir_{CF})_{DC}$ 는 인칭제어 기준전류 ir_{INCH} 와 비교해서 큰 경우에는 ir_{INCH} 로 제한되도록 설계하였으며 이에 따라 인칭모드에서의 셔틀변속 시에 클러치 급충전(fast fill) 제어는 적용되지 않도록 설계하였다.

Fig. 12는 인칭모드에서의 셔틀변속 성능불량의 원인을 분석한 후 개선된 변속제어 알고리즘이 적용된 TCU 펌웨어를 시뮬레이터로 검증하고 실차시험으로 개선된 성능을 확인하는 과정을 보여준다. Fig. 12(a)는 인칭페달을 밟은 상태에서 셔틀변속을 진행한 후 다시 인칭페달을 떼면 차속이 발생하는데 전진-후진과 후진-전진 변속의 발진응답이 다르게 나타나는 문제를 나타낸다. 여기서 ipv(inching pedal voltage)는 인칭 퍼텐쇼미터(potentiometer) 전압으로 밟으면 2V보다 작고 떼는 상태에서는 3.3V를 유지한다. 후진-전진 변속 시 차속발생이 지연되는데 이는 후진 시 BR에 대한 ir_{INCH} 보다 전진 시 CF에 대한 ir_{INCH} 가 커서 셔틀변속 후 일정 기울기로 기준전류가 증가할 때

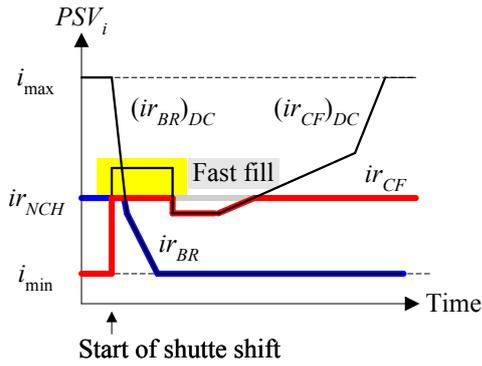


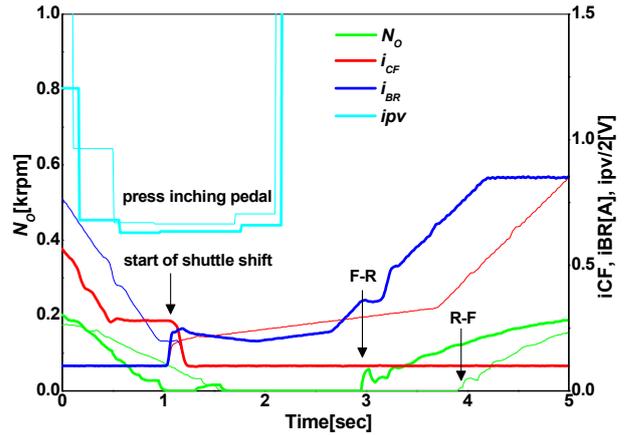
Fig. 11 Shuttle shift logic while inching mode on

클러치가 결합되는 상태의 CF 전류에 도달하는 시간이 길기 때문에 분석되었다. 이를 개선하기 위해서는 인칭모드에서의 셔틀변속 시에도 결합 클러치를 신속하게 작동시키기 위해 급충전 전류제어를 도입하는 것이 필요하였고 Fig. 12(b)는 수정된 펌웨어에 대한 시뮬레이터 시험결과이다. 셔틀변속이 개시되는 초기에 급충전과 완충전 전류제어가 수행된 후 일정 기울기로 인칭제어 기준전류 $i_{r_{INCH}}$ 로 수렴함을 확인하였다. Fig. 12(c)는 시뮬레이터로 검증된 펌웨어를 적용하여 실시된 실차시험 결과를 나타내며 급충전 제어 도입으로 결합 클러치가 신속하게 작동함으로써 양방향 셔틀변속의 발진 응답이 동일할 뿐 아니라 셔틀변속 후 차속이 발생하는 응답시간도 대략 1초가량 단축되었음을 확인하였다.

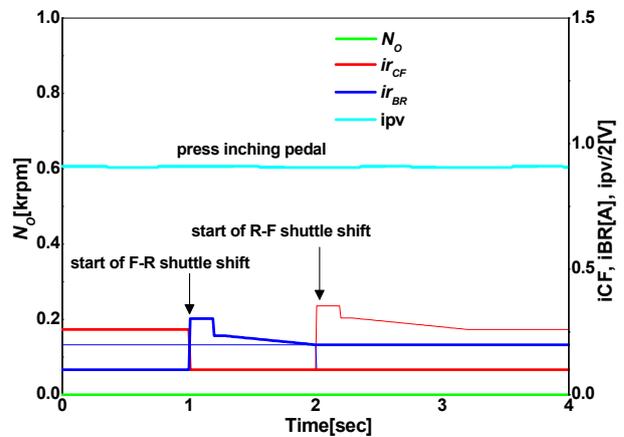
4.3 클러치 자동보정 알고리즘 검증

자동변속기의 클러치 대 클러치 변속은 하나의 클러치를 해제하면서 다른 클러치를 작동시키는 과정으로 변속이 진행되는데 해제와 작동이 동기되지 않으면 오버런(overrun)이나 타이 업(tie-up)에 의해 변속 충격이 발생한다. 유압으로 작동되는 클러치 피스톤은 변속개시와 더불어 빠르게 클러치 플레이트와 맞닿는 지점까지 이동한 후 마찰토크가 완만하게 발생하는 압력을 유지해야 한다. 클러치 피스톤의 작동 초기 운동과 압력제어는 급충전 구간과 완충전 구간에서의 전류로 설정되며 기어 열 속도변화가 없으므로 개루프제어만 가능하다.

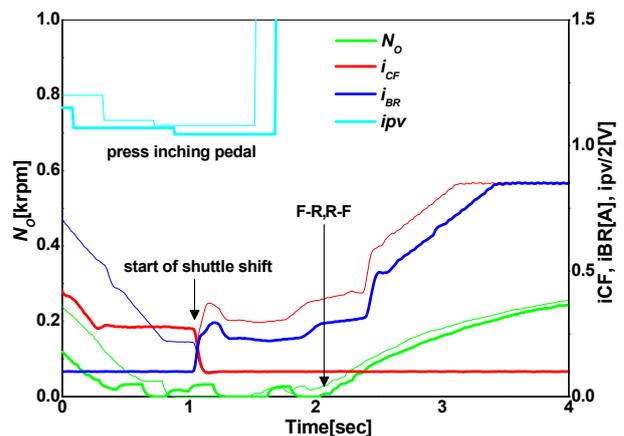
클러치의 마찰 동특성은 누유, 마찰계수 및 클러치 디스크의 평균 여유 틈새(end play) 등과 같은 변수에 의해 결정되며 클러치마다 특성 차이가 존재하므로 우수한 변속성능을 구현하려면 미리 특성을 파악하여 보상하는 제어기법이 요구된다. 자동보정은 TCU가 클러치 피스톤을 순차적으로 작동시키면서 개루



(a) before improvement



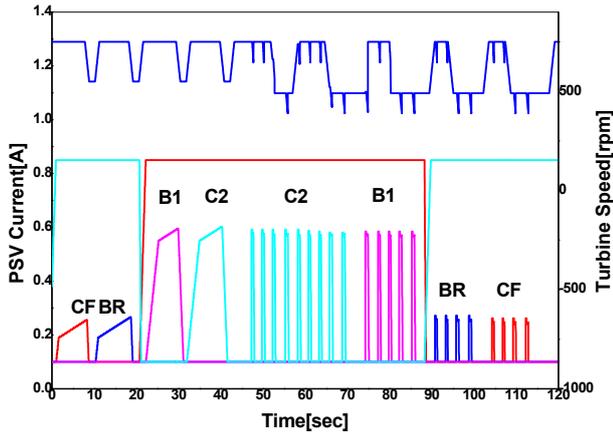
(b) simulator test



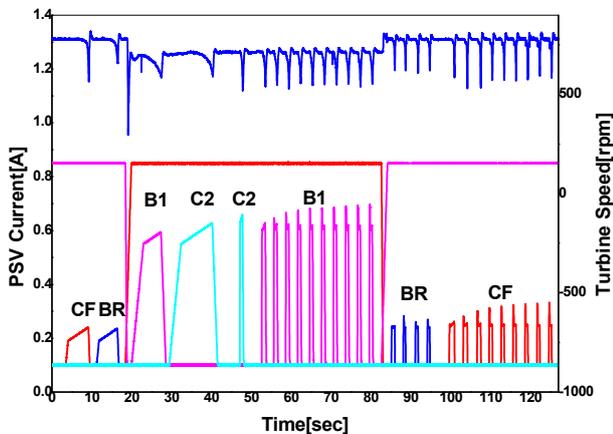
(c) after improvement

Fig. 12 Modified shuttle shift logic verification with embedded simulator

프 변속제어에 적용되는 급충전과 완충전 전류를 적절하게 파악한 후 변속데이터를 갱신하는 기능이다.¹²⁾ 개발 경험이 없는 상태에서는 TCU 펌웨어에 구현되는 다소 복잡한 자동보정 알고리즘의 설계와



(a) simulator test



(b) vehicle test

Fig. 13 Auto calibration

검증을 실차시험으로 수행하는 것이 어려우므로 시뮬레이터를 통해 설계된 로직의 기능을 검증한다면 시험과정을 상당히 단축할 수 있다.

Fig. 13(a)는 임베디드 변속기 시뮬레이터에 설계된 클러치 자동보정 시의 터빈속도 모사기능을 이용하여 수행된 클러치 자동보정 시험이고 Fig. 13(b)는 개발된 자동보정 알고리즘이 구현된 TCU를 이용하여 실차에서 수행된 시험결과를 보여준다. 클러치 자동보정은 PSV에 인가되는 전류에 의해 변화되는 터빈속도로부터 충전전류를 설정하는 기능으로 변속기 시뮬레이터와 펌웨어 개발 장비인 디버거(debugger)를 이용하면 설계된 알고리즘을 면밀하게 검토할 수 있다.

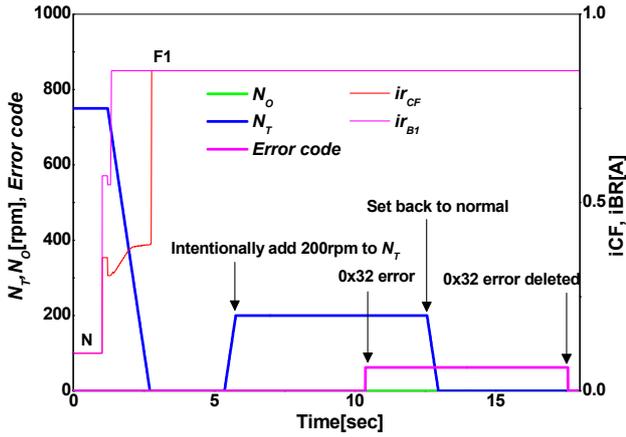
4.4 진단 알고리즘 검증

TCU 펌웨어는 변속제어기능 뿐만 아니라 각종 센서와 PSV의 단선과 단락, 기계적인 동력전달 장치의

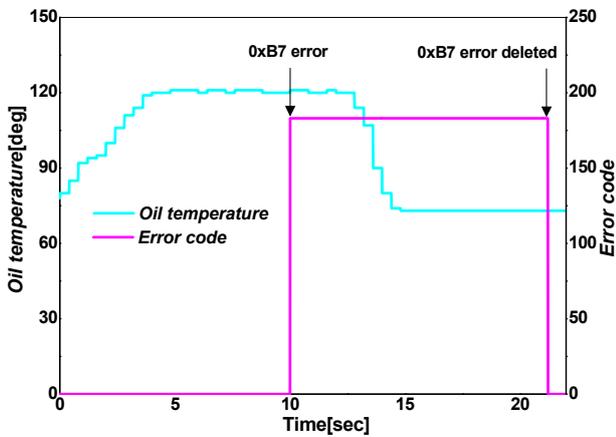
고장 여부를 자체적으로 판정하는 자기진단(on board diagnosis, OBD) 기능을 수행한다. 최근에는 진단기능이 부품의 단순한 고장뿐만 아니라 노화(aging) 상태까지 진단함으로써 정비성 향상을 도모하는 방향으로 발전하고 있다.

본 연구대상 지게차 TCU에도 자체적으로 설계된 진단기능이 펌웨어로 구현되어 있다. 진단기능 설계에 있어서 핵심적인 요소는 오류가 발생하였을 때 신속하면서도 높은 신뢰도로 검출하는 것이며 이를 위해서는 오류 판정조건과 오류로 최종 판정하기 위한 누적 오류 횟수를 적절하게 설정해야 한다. 설계된 진단 알고리즘을 검증하기 위해서는 작동오류에 해당되는 상태를 조성해야 하는데 실제 변속기에서는 인위적인 오류설정이 어려우므로 시뮬레이터 활용이 최적의 대안이다.

Fig. 14는 임베디드 변속기 시뮬레이터를 이용해서 진단 알고리즘의 적합성을 검증한 시험이다. Fig. 14(a)는 고정된 변속단에서 N_O 와 N_T 의 변속비가 설계 값을 벗어나는 클러치 슬립 오류를 검증하는 시험이다. 브레이크 밟아서 $N_O = 0\text{rpm}$ 인 상태에서 F1으로 변속하면 터빈속도가 감소하여 $N_T = 0\text{rpm}$ 인 상태에서 변속이 종료된다. 이후 시뮬레이터에서 N_T 에 인위적으로 200rpm의 속도를 설정하면 TCU는 0.1초 주기로 오류를 검출하고 40회 누적이 반복되는 4초 후에 0x32 오류를 판정한다. 변속비 불일치 오류인 0x32는 복원오류로 시뮬레이터에서 다시 $N_T = 0\text{rpm}$ 으로 설정하면 0.1초 주기로 누적 오류 횟수가 감소하여 4초 후에 0x32오류가 삭제됨으로써 설계된 진단 알고리즘이 정상적으로 작동함을 확인하였다. Fig. 14(b)는 변속기 오일 과열 오류를 나타내는 0xB7에 대해 수행된 시뮬레이터 검증시험이다. 오일 과열 오류는 0.1초 주기로 오일 온도가 110° 보다 높은지 여부를 확인하고 연속적으로 70회 반복되면 7초 후에 0xB7 오류로 판정한다. 시뮬레이터를 이용한 시험에서는 TCU에 가변저항을 연결하여 오일 온도를 약 120° 까지 올려서 지정된 시간 경과 후에 오류 검출여부를 확인하였으며 다시 오일온도를 낮추면 누적 오류 횟수가 감소하여 0xB7 오류가 삭제됨을 확인하였다. 이상과 같이 임베디드 변속기 시뮬레이터를 이용하면 TCU에서 인식하는 센서와 액추에이터 신호에 대한 가상적인 오작동 환경을 모사함으로써 TCU 진단 알고리즘에 대한 검증이 가능함을 확인하였다.



(a) N_o not fit to other speed signals error



(b) over temperature error

Fig. 14 Diagnosis algorithm verification with embedded simulator

5. 결론

지게차는 무거운 화물을 상하차하거나 운반하는 기능의 산업용 차량으로 3톤 이상의 중대형은 대부분 디젤엔진과 자동변속기로 설계된다. 자동변속기는 엔진동력을 차륜에 전달하는 기계적 동력전달장치와 변속제어기능의 TCU로 구성되는데 지게차용 전자식 자동변속기는 국내 업체의 TCU 설계기술 부족으로 국산화 개발이 미흡한 실정이다.

TCU는 운전자 조작 스위치와 변속기 작동상태를 고려하여 변속단을 결정하고 PSV 전류를 통해 클러치 압력을 조절함으로써 부드러운 변속을 제어한다. 또한 기계적 부품이나 센서, 액추에이터의 고장을 진단하고 검출된 오류에 적절한 작동모드로 전환하는 기능을 담당한다. TCU는 변속기 성능과 더불어 지게차 성능을 결정하는 핵심부품이며 변속제어 로직 및

알고리즘, 자기진단 알고리즘은 모두 프로그램으로 설계되는 펌웨어로 구현된다. 설계된 펌웨어의 기능 검증은 동력계나 차량시험을 통해 수행되어야 하고 시험결과를 분석하여 성능을 향상시키는 보완수정을 반복하여 TCU를 개발하는데 검증 시험에 소요되는 시간과 비용이 큰 단점이 있다.

시뮬레이터는 기계적 동특성을 실시간으로 시뮬레이션한 후 TCU에 입력되는 전기적인 신호를 모사하는 기능으로 모사 시험을 통해 TCU 펌웨어 검증을 할 수 있도록 설계된 장치이다. 임베디드 시뮬레이터는 마이크로컨트롤러 내에서 TCU 펌웨어와 동시에 실행되면서 TCU 작동에 필요한 정보를 내부 변수로 제공함으로써 TCU 커넥터에 입출력 신호를 연결하지 않고 TCU를 정상 작동시켜 간편하게 TCU 펌웨어를 검증하는 기능의 펌웨어이다.

본 연구에서는 독자 개발된 4톤 지게차용 자동변속기 TCU 펌웨어의 변속 알고리즘을 검증하기 위하여 임베디드 변속기 시뮬레이터를 개발하였으며 이를 이용한 TCU 펌웨어 검증시험을 통해 시뮬레이터의 유용성을 확인하였다. 관성영역에서의 피드백 변속제어는 과도 변속구간에 대한 시뮬레이터 설정 파라미터를 달리한 변속시험에서 결합 클러치 PSV 기준전류가 슬립속도 오차를 감소시키는 방향으로 제어됨을 확인하였다. 변속제어 기능 개선안 검증에서는 인칭제어 모드에서의 셔틀변속 시 전후진 방향으로의 발진응답이 다르게 나타나는 문제를 해결하는데 시뮬레이터를 이용하였고 시뮬레이터로 검증된 펌웨어가 실차시험에서 개선 효과가 있음을 알 수 있었다. 임베디드 시뮬레이터는 펌웨어 개발 장비인 디버거와 더불어 클러치 피스톤의 마찰특성을 파악하는 클러치 자동보정 알고리즘 설계에 활용하였고 진단 알고리즘 검증에서는 인위적인 오류상태 설정 기능을 이용하여 변속비 불일치와 오일 온도 과열 오류 검출기능이 적절하게 작동함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 임베디드 변속기 시뮬레이터는 설계된 TCU 펌웨어의 기능을 간편하게 연구실 개발 환경에서 검증함으로써 차량시험에 소요되는 노력과 비용을 감소시켜 TCU 양산개발에 있어서 핵심적이고도 필수 장비로 인식되었다. 향후에는 임베디드 변속기 시뮬레이터의 기능을 확장하여 변속성능 향상을 위해 개발되는 다양한 변속제어 알고리즘 검증에 활용할 예정이다.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) G. H. Jung and G. H. Lee, "A Development of Forklift Shift Controller for Dynamometer Test", KFPS Spring Conference Proceeding, pp.143-149, 2007.
- 2) G. H. Jung, S. H. Shin, S. I. Lee and H. J. Kim, "A Development of TCU Analyzer for Wheel Loader Automatic Transmission", KSAE 2006 Autumn Conference, pp.1405-1410, 2006.
- 3) G. H. Jung, S. H. Shin and S. I. Lee, "Development of an Automatic Transmission Simulator for a Wheel Loader," Transactions of KFPS, Vol.4, No.2, pp.7-20, 2007.
- 4) Gyuhong Jung, "Analysis of Diagnosis and Failsafe Algorithm Using Transmission Simulator", Transaction of KSAE, vol.22, No.4, pp.89-97, 2014
- 5) Gyuhong Jung, "Development of Transmission Simulator for High-Speed Tracked Vehicles", Journal of Drive and Control, Vol.14, No.4, pp.29-36, 2017
- 6) Gyuhong Jung, "Analysis of Diagnosis Algorithm Implemented in TCU for High-Speed Tracked Vehicles", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.3, pp.30-38, 2018
- 7) J. S. Choi and Y. S. Lee, "The Implementation of a Hardware-In-The-Loop Simulator for an Inverted Pendulum System Using Open-Source Hardware", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.23, No.2, pp.117-125, 2017.
- 8) H. J. Song et al., "Verification of Algorithm for Real-Time Traversability Analysis of Autonomous Vehicle Using Virtual Simulator", 2017 17th International Conference on Control,
- 9) Gyuhong Jung, Kyungdong Kim, "Development of Embedded Transmission Simulator", 2009 KSAE Autumn Conference Proceeding, pp.1948-1953, 2009
- 10) Gyuhong Jung, Kyungdong Kim, "Diagnosis Design Using Embedded Transmission Simulator", 2010 KFPS Spring Conference Proceeding, pp.56-61, 2010
- 11) Gyu Hong Jung, Chang Do Jung and Se Ha Park, "Feedback Shift Controller Design of Automatic Transmission for Tractors", Journal of Drive and Control, Vol.13, No.1, pp.1-9, 2016
- 12) Gyuhong Jung, "Development of Clutch Auto Calibration Algorithm for Automatic Transmission Shift Quality Improvement", Journal of Drive and Control, Vol.17, No.3, pp.47-56, 2020