

지게차 인칭 제어 알고리즘 개발 Development of Inching Control Algorithm for Forklift

정규홍^{1*}

Gyuhong Jung

Received: 22 Aug. 2024, Revised: 7 Nov. 2024, Accepted: 9 Nov. 2024

Key Words : Forklift(지게차), Automatic Transmission(자동변속기), TCU(변속제어기), Inching Control(인칭 제어), Proportional Solenoid Valve(비례 솔레노이드밸브), Inching Target Current(인칭 목표전류)

Abstract: Forklifts used for loading and unloading and transporting heavy objects have an inching function that adjusts the driving force by clutch slipping inside the automatic transmission according to the operator's needs. Inching allows movement of a forklift to be controlled at ultra-low speeds, similar to a continuously variable transmission. It is used for precision positioning of goods in tight spaces. In automatic transmissions with TCU, inching is performed by a control algorithm implemented with TCU firmware to evaluate performance. To achieve excellent inching control, a control algorithm must be designed based on an understanding of the power transmission process within the transmission, the structure of the hydraulic system that generates clutch operating pressure, and friction torque characteristics by clutch piston pressure. In this study, an inching function applied to a newly developed 4-ton forklift automatic transmission. The developed inching function compensates for differences in directional clutch characteristics using clutch fill phase parameters identified through clutch auto calibration. In addition, it could implement inching performance appropriate to the operator's characteristics through automatic compensation of the inching pedal and adjustment of inching control parameters in a target current map. The inching control algorithm developed in this study has undergone performance verification. It is being applied to commercial forklifts. Its performance improvement will continue to accommodate consumer's requirements.

기호 설명

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

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

GR: Transmission gear ratio

T_{DRV} : Maximum clutch torque, Nm

F_{BRK} : Braking force, N

ipv : Inching pedal voltage, V

IPV_RLS, IPV_IEN, IPV_BRK, IPV_DE: Inching pedal voltages for control mode change, V

it, ir : PSV target, reference inching current, A

it_H, it_L : High and low PSV target current, A

ir_{CF}, ir_{BR} : PSV reference current for CF, BR, A

i_{CF}, i_{BR} : PSV current for CF, BR, A

i_{FF}, i_{FC} : PSV current for fast fill, fill compensation phase, A

i_{max}, i_{min} : Maximum and minimum PSV current, A

iOn, iTr: TCU status bit for inching mode

* Corresponding author: ghjung@daejin.ac.kr

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

Copyright © 2024, 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.

1. 서론

최근 보급이 확산되고 있는 대부분의 전기자동차

(electric vehicle)는 동력원으로 하나 또는 다수의 전기모터와 구동력 증가를 위한 감속기만으로 동력전달체계가 구성되어 내연기관 차에 필수적인 변속기(transmission)는 적용되지 않는다. 그러나 휠로더로 대표되는 건설중장비나 트랙터의 농기계, 지게차와 같은 산업용 차량은 친환경을 위해 전기구동이 연구 개발되고 있으나 단순 주행뿐만 아니라 다양한 종류의 고강도 부하 작업을 병행해야 하는 장비의 특성상 디젤엔진과 자동변속기로 구성되는 기존 동력전달장치에 마이크로컨트롤러를 이용한 디지털 제어를 활용하여 기능과 성능을 고도화한 상용제품이 일반적이다.

지게차는 좁은 공간에서 무거운 중량의 적재물을 상하차하거나 이송하는 작업차량이며 인칭(inching) 기능은 작업자가 조작하는 인칭 페달을 이용해서 매우 낮은 속도로 차량을 이동시켜 위치를 미세하게 조정함으로써 좁은 공간에서 적재물을 정밀하고 안전하게 다룰 수 있는 기능이다. 인칭 기능은 지게차 작업 시 요구되는 미세 속도제어를 위해 모든 엔진이나 전동식 지게차에 필수적으로 설계되며 동력전달 특성에 적절한 방식으로 구현되고 있다. 마찰 클러치 방식 변속기를 적용하는 지게차에서의 인칭 제어는 자동변속기 내의 클러치를 미소 슬립시켜 구동력을 조절하며 작업자가 조작하는 인칭 페달 작동량에 따라 신속하면서도 안정적인 구동력 제어가 핵심 설계목표이다. 변속제어기(transmission control unit, TCU)는 비례 솔레노이드밸브(proportional solenoid valve, PSV)를 이용하여 클러치 압력을 제어하며 변속과 인칭제어를 포함하여 변속기와 관련된 모든 성능은 마이크로컨트롤러에서 실행되는 펌웨어(firmware)에 의해 결정된다. 우수한 인칭제어를 구현하기 위해서는 변속기 내에서의 동력전달과정, 클러치 작동압력을 발생시키는 유압시스템의 구조, 클러치 피스톤 작동압력으로 발생하는 마찰토크 등에 대한 이해를 바탕으로 제어 알고리즘을 설계해야 한다.

지게차는 동력원에 따라 LPG, 디젤, 전동식이 있으며 3톤 이상의 지게차는 대부분 디젤식이다. 협소한 공간에서 상하차 작업과 전후진 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 전

문업체 제품이 탑재되고 있으며 국산화가 미흡한 실정이다. TCU가 적용되지 않는 기계식 1단 자동변속기에도 인칭 기능이 설계되어 있다. 그러나 단순하게 인칭 페달 작동량에 따라 비례 솔레노이드밸브 전류가 소프트웨어가 아닌 전기회로에 의해 조절되는 방식으로 기계적인 변속기 성능과 전진과 후진 주행 시 작동되는 클러치 특성 차이에 대한 보상이나 가속페달 작동에 따른 응답성능 향상, 작업자 기호에 맞는 맞춤형 인칭 성능 조정 등의 기능은 구현할 수 없다.

국내에서 생산되는 지게차에 장착되는 해외 선진사 자동변속기에는 성능이 입증된 인칭 기능이 구현되어 있으나 이와 관련된 설계자료는 공개하지 않을 뿐 아니라 자동변속기의 기계적 동력전달구조와 변속 제어방식이 다르므로 역설계가 곤란하다. 그러므로 독자개발 지게차 자동변속기는 시장에서 판매되는 선진제품의 기능과 성능을 참조하여 인칭 기능을 설계해야 한다. 지게차 자동변속기 관련 기존 연구로는 비례 솔레노이드밸브 압력제어를 이용하여 변속 시 발생하는 변속충격을 감소시키는 변속 제어는 다수 수행¹⁻⁵⁾된 바 있으나 상용제품에 적용되는 기술이 아니고 특히, 본 연구에서 다루는 인칭 기능은 연구된 바 없다. Kaneko⁶⁾가 제안한 지게차 인칭 제어 특허는 유압펌프와 유압모터로 구동되는 정유압변속기를 대상으로 가변 용량형 펌프를 제어하는 방식으로 클러치 방식 변속기가 탑재되는 지게차와는 다른 제어 방식이다.

본 연구에서는 독자 개발된 4톤 지게차 자동변속기에 적용되는 인칭 기능을 개발하였다. 개발된 인칭 기능은 클러치 자동보정을 통해 식별된 충전제어 파라미터를 이용하여 방향 클러치 특성 차이를 보상함으로써 전진과 후진 시 동일한 인칭 성능을 구현하였다. 또한, 인칭 페달 자동보정과 인칭 페달 작동량에 따른 비례 솔레노이드밸브 목표 전류 조정을 통해 작업자 특성에 적절한 인칭 성능 구현이 가능하도록 설계하였다. 설계된 인칭 제어 알고리즘은 TCU에 펌웨어로 구현하여 실차시험을 통해 신속한 응답성과 안정된 성능을 확인하였다.

2. 지게차 자동변속기

Fig. 1은 연구대상 4톤 지게차용 2단 자동변속기의 동력전달 흐름 체계를 보여준다. 엔진은 토크 컨버터와 오일펌프를 상시 구동하며 발전 기능의

토크 컨버터에 전달된 동력은 기어 열을 거쳐 토크 비가 변환된 후 차동기어장치와 중감속 기어가 내장된 액슬(axle)을 통해 전륜에 전달된다. 기어 열은 4개 클러치 결합상태에 따라 구동방향과 기어 비가 결정되며 TCU는 각각의 클러치 압력을 독립적으로 제어하는 비례 솔레노이드밸브 4개를 이용하여 변속제어와 지게차 자동변속기에 설계된 인칭, 초저속 주행(creeping)⁷⁾, 자동감속(auto retardation) 등의 보조기능을 구현한다. Fig. 1에서 유압시스템의 4개 약어는 비례 솔레노이드밸브를, 2속 기어 열의 4개 약어는 동력을 전달하는 클러치와 브레이크를 나타낸다.

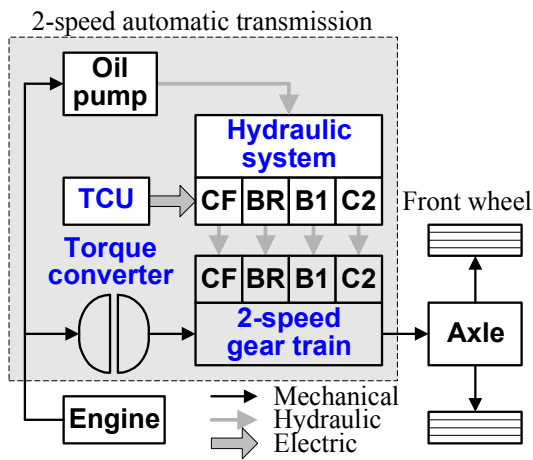
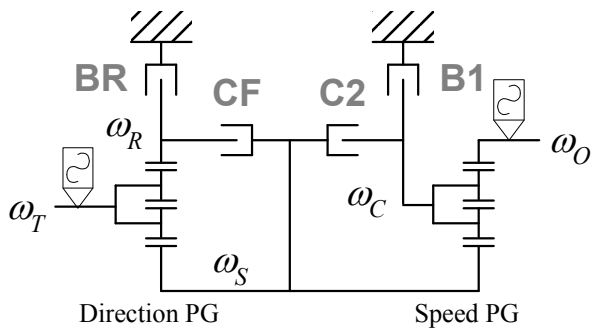
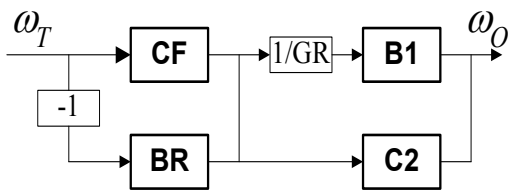


Fig. 1 Power transmission flow in forklift



(a) stick diagram



(b) schematic diagram for velocity relation

Fig. 2 Forklift 2-speed gear train

Table 1 Clutch and brake engagement

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

Fig. 2는 전후진 2단 자동변속기의 기어 열 구조와 입출력 속도관계식을 나타내는 도식적인 그림이며 각 변속단에서 결합되는 마찰요소 조합은 Table 1과 같다. 기어 열은 2개 더블 피니언 단순 유성치차 (planetary gear, PG)를 결합하여 5개 회전요소로 구성되며 각 유성치차에서의 속도관계식 2개를 고려하면 2개 마찰요소가 결합되어야 변속비(ω_T/ω_O)가 결정된다. Fig. 2에서 CF, BR은 방향 클러치로 차량의 주행 방향을 결정하며 B1, C2는 속도 클러치로 변속비를 결정한다. 방향 클러치는 클러치 피스톤 압력에 마찰토크가 비례하는 포지티브 형인 반면에 속도 클러치는 압축된 스프링에 의해 결합상태를 유지하다가 클러치 피스톤 압력에 의해 해제되는 네거티브 형이다. 이는 별도의 주차 브레이크 없이 엔진정지 상태에서 B1, C2 결합으로 주차 브레이크 기능을 대체하기 위한 설계이다. 인칭 기능은 전진 또는 후진 변속단에서 방향 클러치 압력을 낮춰 클러치 슬립으로 발생하는 구동력으로 미세하게 차량속도를 조절하는 기능이다.

Fig. 3은 독자개발 자동변속기에 적용되는 TCU를 보여준다. TCU는 변속기 작동상태 파악을 위해 장착되는 각종 센서 출력 신호처리 회로와 PWM을 이용한 비례 솔레노이드밸브 전류 구동회로의 PCB 하드웨어와 마이크로컨트롤러를 이용하여 변속 알고리즘을 실시간으로 실행하는 펌웨어로 구성된다. 최근 개발되는 자동변속기는 변속제어의 핵심부품인 비례 솔레노이드밸브의 성능이 향상되고 가격이 낮아짐에 따라 클러치 압력을 독립적으로 제어하는 방식으로 유압시스템을 단순화하는 대신 변속제어 기법 고도화를 통해 성능향상을 도모하고 있다.

본 연구대상 지게차 자동변속기는 독립제어형 유압시스템을 기반으로 운전자가 조작하는 변속레버, 인칭 페달, 각종 스위치를 모두 TCU가 전기적인 신호로 인식한 후 적절하게 비례 솔레노이드밸브 전류

를 제어하는 shift-by-wire 방식이다. TCU 펌웨어는 학습과 피드백 제어⁸⁻⁹⁾가 적용된 기본적인 변속기능과 인칭을 비롯한 변속기 보조기능, 클러치 자동보정 기능¹⁰⁾으로 구성되고 ECU 및 VCU와 CAN 통신, 자기진단(diagnosis)과 안전작동(failsafe) 기능¹¹⁾을 포함한다.

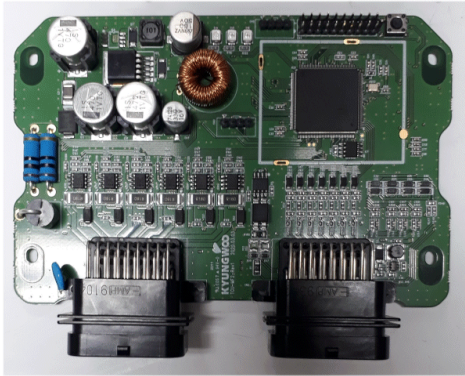


Fig. 3 Transmission control unit(TCU)

3. 인칭 제이기 설계

지게차 자동변속기 인칭은 작업자가 조작하는 인칭 페달 작동량을 감지하여 방향 클러치 압력을 낮춤으로써 지게차 구동력을 감소시키는 기능이다. 인칭 페달 작동에 따른 구동력 감소를 적절하게 설계하기 위해서는 인칭 제어 시스템의 작동구조와 비례솔레노이드밸브 구동 전류에 따른 방향 클러치 마찰토크에 대한 특성분석이 선행되어야 한다.

3.1 인칭 제어 시스템

브레이크 페달 좌측에 설치된 인칭 페달은 작업자가 왼발로 밟는 작동량을 퍼텐쇼미터로 측정하고 일정량 이상 밟으면 브레이크 페달과 연동되어 차량 제동력이 발생하는 구조이다.

인칭 페달 작동량에 따라 변화되는 방향 클러치 최대 전달토크(T_{DRV})와 차량 제동력(F_{BRK})의 관계를 도식적인 그림으로 나타내면 Fig. 4와 같다. 인칭 페달 전압(inching pedal voltage, ipv)은 IPV_RLS로부터 밟을수록 낮아지며 $ipv < IPV_{IEN}$ 에서 인칭이 활성화되고 $ipv < IPV_{DE}$ 에서 클러치가 해제된다. 인칭 페달과 연동된 브레이크 페달은 $ipv < IPV_{BRK}$ 에서 제동력이 발생하여 인칭 페달 작동량에 따라 증가한다. 여기서 T_{DRV} 는 TCU에서 측정된 ipv 에 따라 PSV 전류를 조절함으로써 형성되는 궤적이고 F_{BRK} 는 브레이크 페달 작동으로 발생하는 제동력으로

TCU와 무관하다.

통상적인 인칭 제어는 도로 경사에 무관하게 차량 속도를 능동적으로 조절하기 위해 T_{DRV} 와 F_{BRK} 가 중첩되도록 설계해야 하며 클러치 슬립이 발생하는 $IPV_{DE} < ipv < IPV_{IEN}$ 구간에서의 기준전류계적 기울기는 클러치 특성을 고려해서 적절하게 설정해야 한다.

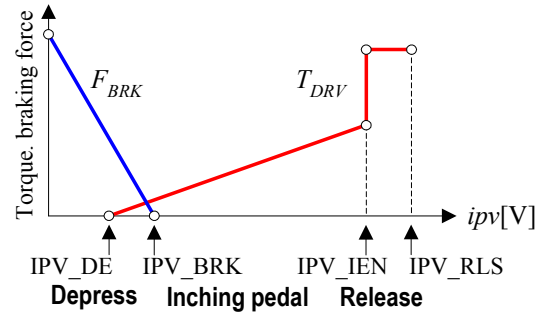
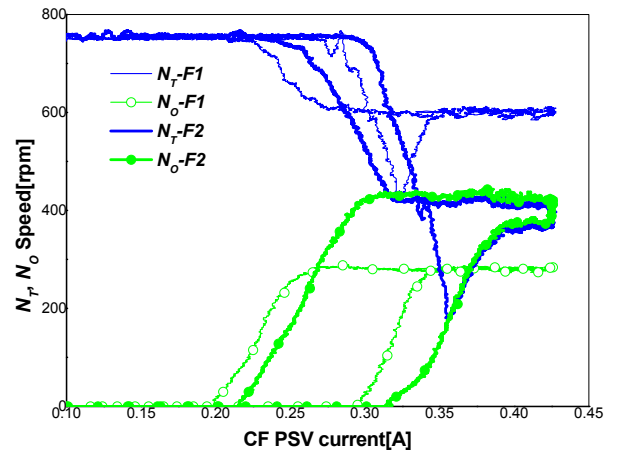
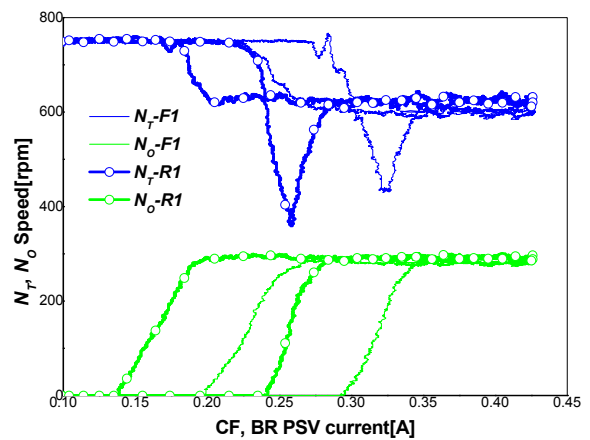


Fig. 4 Clutch torque and braking force in inching



(a) Forward 1st and 2nd gear



(b) Forward and reverse 1st gear

Fig. 5 Vehicle speed response for PSV current

Fig. 5는 PSV 전류에 따른 방향 클러치 마찰특성을 실차에서 시험한 결과이다. Fig. 5(a)는 B1(1속), C2(2속) 속도 클러치를 결합한 상태에서 CF 방향 클러치 전류를 0.1A에서 0.43A까지 0.01A/s의 작은 기울기로 증가/감소시키면서 출력축 속도를 측정된 결과이다. 1, 2속 모두 지게차가 출발하고 정지하는 PSV 전류에 약 0.1A의 히스테리시스 특성이 있음을 알 수 있다. 아이들 상태에서 지게차 최대 주행 속도는 1단에서 3.2km/h($N_o=290rpm$), 2단에서 4.9 km/h(440rpm)이다. Fig. 5(b)는 1속 속도 클러치를 결합한 상태에서 CF와 BR 방향 클러치에서 발생하는 마찰토크 특성 차이를 확인하는 시험이다. CF는 0.3A에서 지게차가 발진하지만 BR은 0.25A에서 차량 운동이 시작되어 방향 클러치 결합이 시작되는 기준 전류에 다소 큰 차이를 나타내었다.

인칭은 인칭 페달 작동량에 따라 클러치 전달토크를 감소시켜 차량 구동력을 조절하는 기능으로 기본적으로 ipv 에 대해 설계된 PSV 기준전류계측을 적용하는 개루프제어이다. 본 연구에서 설계된 인칭 제어는 Fig. 5(a)의 클러치 마찰토크 히스테리시스 특성 보상은 고려하지 않았으나 Fig. 5(b)의 전후진 방향 클러치 마찰특성 차이는 클러치 자동보정을 통해 식별된 완충전 영역(fill compensation phase) PSV 전류를 이용하여 보상함으로써 전진과 후진 시 동일한 인칭 페달 작동량에서 유사한 차량 구동력이 발생하도록 설계하였다.

3.2 인칭 제어 알고리즘

인칭 제어 알고리즘은 ipv 에 따른 인칭 목표전류 it 설정, 인칭 작동모드에 따라 다른 변화율로 인칭 기준전류 ir 연산, 주행 방향과 변속 상태에 따른 방향 클러치 PSV 기준전류 설정으로 구분된다.

(1) 인칭 목표전류 it 설정

인칭 목표전류는 작업자가 밟는 인칭 페달 작동량 즉, ipv 에 따른 PSV 목표전류로 Fig. 6과 같은 선도로 설계하였다. 여기서 i_{max} 은 클러치 결합 시 PSV 작동전류이고 i_{FC} 는 클러치 자동보정에서 식별되는 완충전 영역 PSV 전류이다. 인칭 목표 전류 선도는 인칭 제어가 시작되는 IPV_EN 전압과 이 상태에서의 목표전류 it_H , 목표전류가 포화되는 IPV_DE 전압과 최소 목표전류 it_L 의 4개 설계 인자로 구성된다. 목표전류 선도 설계 인자의 기본 설정은 IPV_RLS=3.3V, IPV_IEN=3.2V, IPV_DE=2V이며 it_H

와 it_L 는 i_{FC} 를 기준으로 설계 경험식으로 결정하였다. 목표전류 설계 인자는 인칭 제어 파라미터 설정을 통해 인칭 특성에 대한 작업자 기호에 적합한 형태로 조정이 가능하다.

(2) 인칭 기준전류 ir 연산

Fig. 6 선도로 결정되는 인칭 목표전류는 인칭이 개시될 때 계단파형으로 변화되고 ipv A/D 변환 잡음의 영향으로 인칭 제어 시 급격하고 불안정한 구동력 변화가 발생할 수 있다. 이를 보완하기 위해 PSV 제어전류를 연속적으로 변화시키면서 신속하면서도 안정된 응답을 얻기 위하여 인칭 기준전류를 도입하였다. 인칭 기준전류는 인칭 목표전류를 추종하는데 인칭모드에 따라 다른 변화율이 적용된다. TCU에서 인칭모드는 iOn과 iTr의 2개 비트로 정의되고 인칭모드 상태와 전환조건에 대한 설명은 다음과 같다.

- iOn(inching on)

0이면 인칭모드 해제, 1이면 인칭모드를 나타내며 인칭 페달을 밟아서 $ipv < IPV_IEN$ 이면 0→1이고 iOn=1에서 인칭 페달을 떼었을 때 $ipv > IPV_IEN$ 이고 인칭 기준전류가 클러치 결합전류 i_{max} 과 같아지는 시점에서 1→0이다.

- iTr(inching transient)

인칭모드 시작 초기에 인칭 기준전류가 목표전류를 추종하는 변화율을 크게 설정하기 위한 과도상태를 나타내며 $ipv < IPV_IEN$ 이면 0→1이고 iOn=iTr=1에서 기준전류와 목표전류가 같아지는 시점에서 1→0이다.

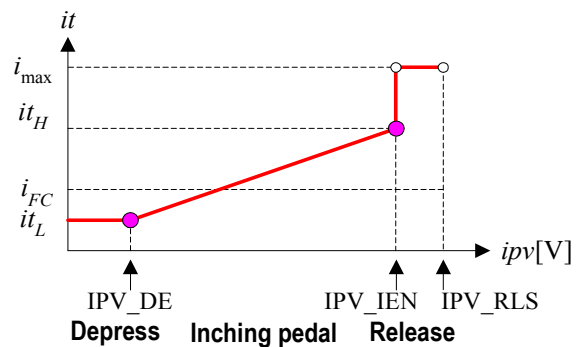


Fig. 6 PSV target current map for ipv [V]

Table 2는 iOn과 iTr 조합에 따른 인칭 제어모드와 인칭 기준전류 변화율 dir/dt 설정을 나타낸다. 인칭 제어는 iOn=iTr=0인 상태에서 인칭 페달을 밟으면 iOn=iTr=1인 인칭 제어 과도모드로 전환되어

600mA/s의 높은 변화율로 기준전류가 목표전류를 추종하고 기준전류가 목표전류와 일치하는 시점에 $i_{On}=1, i_{Tr}=0$ 의 인칭 제어모드로 전환되어 기준전류 값에 따라 400mA/s와 150mA/s의 작은 기울기로 기준전류가 변화한다. 인칭 페달을 떼면 400mA/s의 변화율로 기준전류가 증가하여 방향 클러치를 결합하고 $i_r = i_{max}$ 에서 인칭모드가 해제된다.

인칭모드에서 방향 클러치에 적용되는 인칭 기준전류 i_r 은 방향 클러치 CF와 BR의 i_{FC} 가 다르므로 주행 방향에 따라 i_{rF}, i_{rR} 의 다른 값을 갖는다.

Table 2 Inching reference current rate of change

i_{On}	i_{Tr}	Inching mode and dir/dt
0	0	Idle mode
0	1	Never occur
1	0	Inching control mode if $i_r > 1.2i_{FC}$, $dir/dt=400mA/s$ if $i_r \leq 1.2i_{FC}$, $dir/dt=150mA/s$
1	1	Inching control transient mode $dir/dt=600mA/s$

(3) 방향 클러치 PSV 기준전류 설정

인칭모드에서 연산된 기준전류 i_r 은 현재 변속단과 변속 여부(변속 중, 변속 완료)에 따라 다음과 같이 CF 또는 BR 방향 클러치 PSV 기준전류 i_{rCF}, i_{rBR} 에 적용되며 변속레버 중립에서는 적용되지 않는다.

- 변속이 완료된 상태

전진 변속단에서는 $i_{rCF} = i_{rF}$ 이고 후진 변속단에서는 $i_{rBR} = i_{rR}$ 이다. 즉, 방향 클러치 PSV 기준전류는 인칭모드 기준전류로 대체된다.

- 변속 중

인칭모드 중 변속은 변속레버 조작에 의해 수동변속으로 중립-전후진 변속과 셔틀변속, 기어변속이 있다. 기어변속은 속도 클러치 전환으로 변속이 진행되므로 인칭모드와는 무관하며 인칭모드 중립-전후진과 셔틀변속에서 방향 클러치 기준전류는 변속상태에 따라 다음과 같이 설정된다.

• 급충전과 완충전 구간

변속 초기에 신속한 클러치 작동을 위해 변속제어 알고리즘에서 연산되는 기준전류를 결합되는 작동

클러치 기준전류로 설정하여 통상적인 변속제어와 동일하게 진행된다.

• 토크 및 관성영역

변속제어 기준전류와 인칭 기준전류를 비교하여 작은 값을 방향 클러치 기준전류로 적용한다.

Fig. 7은 후진 변속단에서 인칭페달을 밟아 BR 클러치 PSV 기준전류 i_{rBR} 이 낮은 상태에서 변속레버를 전진으로 전환하여 셔틀변속이 발생될 때의 PSV 기준전류 변화를 나타내는 도식적인 그림이다.

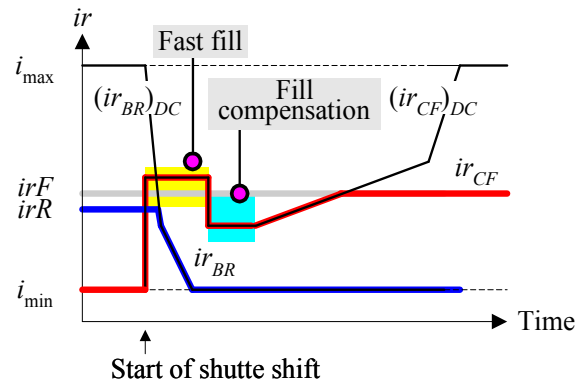


Fig. 7 Shuttle shift logic during inching mode on

$(i_{rBR})_{DC}$ 와 $(i_{rCF})_{DC}$ 는 셔틀 변속 시 PSV 기준전류이고 i_{rR} 과 i_{rF} 는 전진과 후진 시 인칭 기준전류를 나타낸다. 변속이 개시되면 CF 기준전류 i_{rCF} 는 급충전과 완충전 영역에서 변속제어 기준전류 $(i_{rCF})_{DC}$ 가 적용되고 이후에는 i_{rF} 와 $(i_{rCF})_{DC}$ 중 작은 값으로 제어된다. i_{rF} 는 변속이 개시될 때 CF 인칭 목표전류 i_{rF} 로 초기화되고 인칭모드에서 설정된 기울기로 변화된다. 변속 중 BR 기준전류 i_{rBR} 은 i_{rR} 과 $(i_{rBR})_{DC}$ 중 작은 값을 적용하여 BR 클러치를 해제한다.

3.3 인칭 제어 파라미터

인칭 기능은 인칭 페달 조작량에 비례하여 구동력이 감소되고 전진과 후진 주행에서 동일한 응답특성을 나타내는 것이 요구될 뿐 정량적인 목표성능 지표는 제시되지 않는다. 이는 작업자가 인지하는 인칭 페달 조작량과 구동력 감소 특성이 미세하게 다르기 때문이다. 본 연구에서는 Fig. 8에 도시된 바와 같이 인칭 목표전류 선도를 조정할 수 있는 다음과 같은 4개의 인칭 제어 파라미터를 통해서 인칭 제어특성을 가변할 수 있도록 하였다.

- IpFP(inching pedal free play)
- IrSpan(inching current span)
- IpLOs(inching pedal low offset)
- IrBase(inching current base offset)

상기 인칭 제어 파라미터에서 IpFP와 IpLOs은 인칭이 유효한 인칭 페달 작동량 범위를 조절하는 기능으로 IpFP와 IpLOs을 증가시키면 인칭이 개시되고 동력전달이 차단되는 인칭 페달 작동량이 크게 된다. IrBase를 증가시키면 인칭 페달을 깊게 밟았을 때 PSV 전류가 증가하므로 클러치 동력전달이 증가하는 효과를 나타내고 IrSpan을 증가시키면 동력이 차단되는 인칭 페달 작동량이 커지는 효과를 나타낸다. 인칭 제어 파라미터를 조정하면 작업자가 느끼는 인칭 개시와 동력 감소 인칭 페달 작동량이 변화된다.

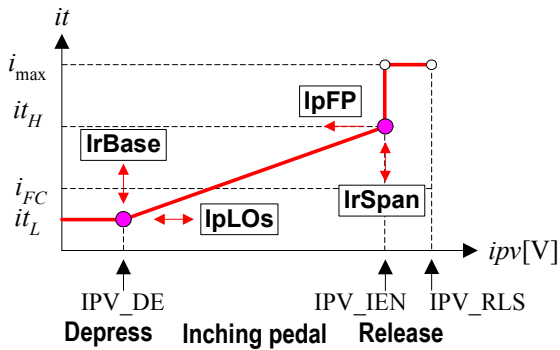


Fig. 8 Inching control parameters

인칭 제어 파라미터는 PC에서 수행되는 모니터링 프로그램을 TCU와 직렬통신으로 연결하여 설정할 수 있고 변경된 인칭 제어 파라미터는 TCU 비활성 메모리에 저장되어 TCU 기동 시 복원된다.

3.4 인칭 페달 자동보정

TCU는 작업자의 인칭 페달 조작량을 인칭 페달과 연동되어 회전하는 인칭 퍼텐쇼미터 출력전압으로 측정하는데 완성된 양산 차량은 조립 오차로 인해 인칭 페달을 밟지 않은 상태에서의 출력전압 IPV_RLS가 일정하지 않다. 모니터링 프로그램을 이용하면 인칭 페달 자동보정을 통해 인칭 페달 해제 시 IPV_RLS를 3.3V로 설정할 수 있으며 보정 파라미터는 TCU 비활성 메모리에 저장된다. 지게차 양산 차량은 전술된 인칭 페달 자동보정과 각 클러치 충전영역에 대한 변속데이터 자동보정 시험 후 출고된다.

4. 인칭 제어 성능시험

4톤 지게차를 대상으로 설계된 인칭 제어 알고리즘을 TCU 펌웨어로 구현한 후 변속기가 배제된 상태에서 TCU 펌웨어를 단독으로 실행할 수 있는 환경을 제공하는 임베디드 변속기 시뮬레이터¹²⁾를 이용하여 인칭 제어의 기본 기능을 확인한 후 실차시험을 통해 성능을 검증하였다.

실차시험은 충분한 사전 운전을 통해 변속기 유온을 정상상태로 유지한 후 평지에서 포크 무부하 상태에서 실시하였으며 무보정 인칭 제어 파라미터의 작동조건을 적용하였다.

4.1 변속기 시뮬레이터 검증시험

Fig. 9는 변속기 시뮬레이터를 이용하여 전진과 후진 변속단에서 인칭 페달 작동에 따른 인칭 기준전류 변화특성을 확인하는 시험이다. 변속기 시뮬레이터에서 ipv 는 불륨 형 가변저항으로 모사하였고 TCU에서 연산하는 CF, BR PSV 기준전류로 설계된 변속제어 알고리즘을 검증하였다. TCU 제어주기는 100Hz이고 모니터링 프로그램을 통해 저장되는 PSV 전류는 100Hz, ipv 는 10Hz이다.

인칭 페달을 밟아서 $ipv < IPV_IEN$ 이면 $iOn=iTr=1$ 의 인칭 제어 과도모드로 전환되어 600mA/s의 변화율로 인칭 기준전류가 변화하고 인칭 기준전류가 목표전류와 일치하는 시점에서 $iOn=1, iTr=0$ 의 인칭 제어모드로 전환된 후 기준전류 값에 따라 400mA/s와 150mA/s의 작은 기울기로 변화한다. 서서히 인칭 페달을 해제하는 상황을 모사하기 위해 ipv 를 완만하게 증가시키면 인칭 기준전류는 완만하게 증가하다가 $1.2i_{FC}$ 보다 큰 영역에서는 큰 기울기로 변화하고 PSV 결합전류 $i_{max} = 0.85A$ 에 도달하면 $iOn=iTr=0$ 으로 전환하여 인칭모드가 해제됨을 알 수 있다. TCU 변속데이터에 설정된 CF 클러치의 i_{FC} 는 330mA이고 BR 클러치는 235mA이었으며 전후진 주행 시의 인칭 기준전류 최솟값은 이를 반영하여 설정된다. Fig. 9의 시뮬레이터 검증시험을 통해서 TCU 인칭 펌웨어는 설계된 변속제어 알고리즘을 적절하게 반영하여 구현되었음을 확인하였다.

4.2 인칭 작동 성능시험

변속기 시뮬레이터로 기능이 확인된 인칭 제어 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 실차시험을 실시하였다. Fig. 10은 전진 1단 주행 중 인칭 페달을 최대

로 밟아서 차량을 정지시킨 후 신속하게 인칭 페달을 해제하는 작동조건에 대한 시험결과를 나타낸다. 인칭 제어 과도모드에서 CF PSV 전류는 빠르게 저하되어 CF 클러치를 해제함으로써 신속하게 차속이 감소하는 응답을 나타내었고 순간적으로 인칭 페달을 해제하면 인칭 제어 알고리즘에서 설계한 150mA/s의 기울기와 400mA/s의 2단계 변화율로 CF PSV 전류가 증가하여 CF 클러치 결합이 이루어짐을 알 수 있다. CF 클러치 마찰토크에 의한 차량 발진은 완만한 PSV 전류 기울기를 갖는 구간에서 발생하므로 지게차는 변속충격 없이 부드럽게 출발하게 된다.

Fig. 11은 인칭 작동으로 차량이 정지된 상태에서 인칭 페달을 급속하게 떼었을 때 전진과 후진변속단에서의 지게차 발진 응답을 비교 시험한 결과이다. 인칭 목표전류는 CF와 BR 클러치 자동보정을 통해 식별된 완충전 영역 전류 i_{FC} 를 기준으로 설정되므로 전진과 후진 주행에서의 인칭 작동 최소 기준전류가 다르나 인칭 기준전류가 증가할 때 클러치 결합에 의하여 발생하는 마찰특성은 유사하므로 전후진 모두 차량은 약 1.5초 후에 부드럽게 출발함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 인칭 제어 알고리즘은 전후진 방향 클러치 특성 차이를 효과적으로 보상함을 확인하였다.

4.3 인칭 모드 서틀변속 시험

방향 클러치가 슬립되는 상태의 인칭 제어모드에서 서틀변속은 결합되는 클러치의 급충전과 완충전 영역에서의 PSV 기준전류를 인칭 제어와 무관하게 변속제어 알고리즘에서 연산되는 기준전류로 대체함으로써 작동 클러치의 신속한 응답을 확보할 수 있도록 설계하였다.

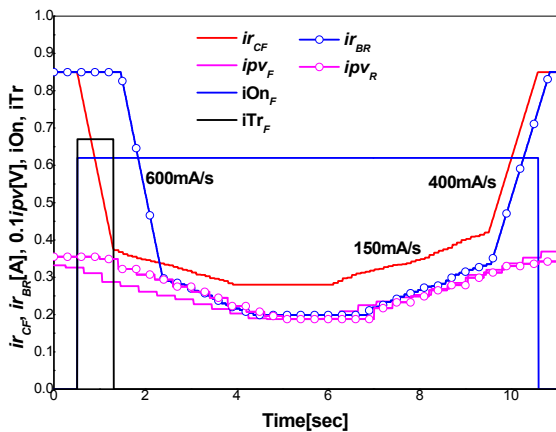


Fig. 9 Inching control with embedded simulator

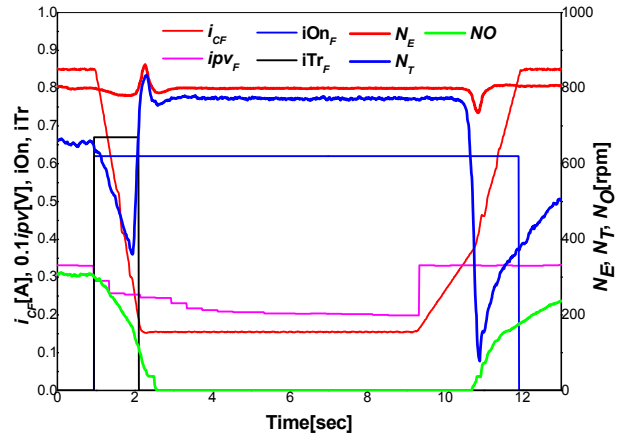


Fig. 10 Inching vehicle test in F1

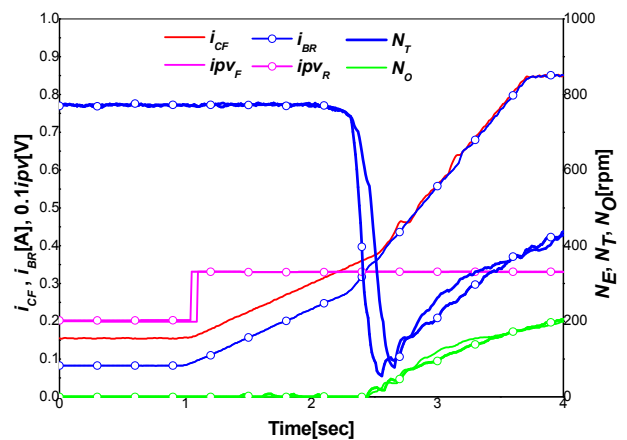


Fig. 11 Inching release response in F1 and R1

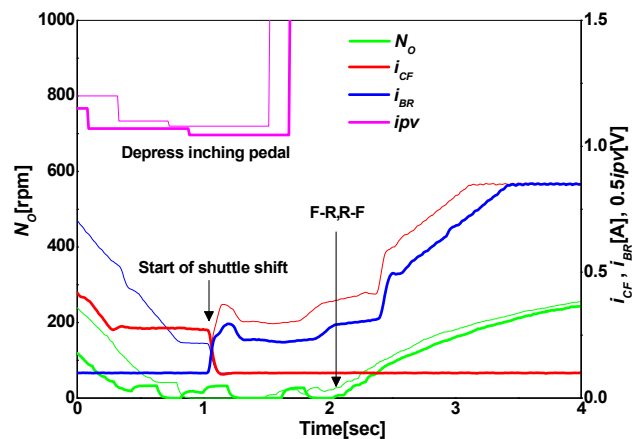


Fig. 12 Shuttle shift during inching control mode

Fig. 12는 인칭 페달을 밟아 차량이 정지한 상태에서 변속레버 방향전환에 의해 서틀변속이 진행된 후 다시 인칭 페달을 급속하게 떼었을 때의 지게차 발진 응답 시험으로 F→R과 R→F 서틀변속 응답 비교를 위하여 변속개시 시점을 1초에 트리거하여 나타

낸 그림이다. 0.5초의 충전제어 종료 후에는 인칭 기준전류를 유지하다가 인칭 페달이 급속 해제됨에 따라 다시 변속제어 기준전류로 변속이 진행되면서 차량이 발진함을 알 수 있다.

인칭모드 해제에 따른 차량발진에서 Fig. 11은 인칭 기준전류에 의한 클러치 결합이고 Fig. 12는 변속제어 기준전류에 의한 클러치 결합으로 발진응답 시간에서는 다소 차이를 나타내었으나 전진과 후진 변속단에서 응답은 유사함을 확인하였다.

5. 결 론

중량물 상하차와 운반작업에 활용되는 지게차는 작업자의 필요에 따라 동력을 전달하는 자동변속기 내부 클러치를 미소 슬립시켜 구동력을 조절하는 인칭 기능을 갖는다. 인칭을 이용하면 무단변속기와 유사하게 지게차 운동을 초저속으로 조절할 수 있어 좁은 공간에서 정밀하게 적재물을 상하차하는 작업에 활용된다. 현재 국내에서 생산되는 엔진식 지게차는 소형 1톤 지게차에 장착되는 기계식 1단 자동변속기만이 국내 개발품이고 TCU를 이용한 변속 전자제어가 적용되는 다단 자동변속기는 모두 수입된 선진사 제품이다.

본 연구에서는 4톤 양산 지게차에 탑재되고 있는 독자개발 전후진 2단 자동변속기에 적용되는 인칭 제어 알고리즘을 개발하였다. 인칭 관련 설계자료나 연구논문은 매우 제한되어 선진제품의 기능과 성능을 참조하여 인칭 기능을 설계하였으며 숙련된 지게차 운전자의 실차시험 후 평가 요구사항을 반영하여 보완하였다. 인칭 제어 알고리즘에 대한 엄격한 설계와 검증은 동력전달장치에 대한 수학적 모델을 바탕으로 수행되어야 하지만 정해진 양산 일정으로 인해 본 연구에서는 설계자의 경험을 기반으로 개발되고 수정 보완되었다. 보다 향상된 지게차 인칭성능 개발을 위해서는 인칭 동적시스템에 대한 이론적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

운전자가 조작하는 인칭 페달에 따라 방향 클러치를 통해 전달되는 구동력을 감소시켜 차량 속도를 조절하는 인칭은 빠른 응답성과 인칭 페달 전압 A/D 변환 잡음의 영향을 최소화하는 안정성이 요구된다. 개발된 인칭 제어 알고리즘에서는 방향 클러치 PSV 전류에 따른 클러치 마찰특성을 실차시험으로 파악하고 클러치 자동보정에서 식별되는 완충전 영역 전류를 고려하여 인칭 페달 전압에 대한

방향 클러치 PSV 목표전류를 설정하였으며 작동상태에 따라 다른 변화율로 목표전류를 추종하는 기준전류 개념을 도입하여 인칭 제어 응답성과 안정성을 확보하였다.

설계된 인칭 제어 알고리즘은 변속제어 기능의 TCU 펌웨어에 구현하였다. 실차시험에 앞서 변속기 시뮬레이터를 이용하여 인칭 페달 전압에 따른 방향 클러치 PSV 기준전류 응답을 시험하여 인칭모드 전환, 인칭모드에서의 기준전류 변화율, 전후진 방향 클러치 완충전 영역 PSV 전류 보상이 적절하게 이루어짐을 확인하였다. 실차 성능시험에서는 전진 주행 시 인칭 페달 작동으로 차속을 감소시켜 정지상태를 유지하다가 급속하게 인칭 페달을 해제하여 차량을 출발시키는 시험을 수행하였다. 전진과 후진 클러치 특성 차이로 전후진 주행 인칭모드에서 제어되는 PSV 최소전류는 다른 값을 나타내지만 인칭 페달 작동으로 차량 정지 시에는 약 0.7초, 인칭 페달 해제로부터 차량 발진에는 약 1.5초의 지연이 동일하게 발생하여 클러치 완충전 영역 PSV 전류를 고려한 인칭 제어 알고리즘이 효과적임을 확인하였다. 인칭 페달을 밟은 상태에서 변속레버 방향 전환으로 발생하는 서틀변속은 변속 초기 급충전 및 완충전 영역에서의 작동 클러치 PSV 기준전류를 변속제어 알고리즘에서 연산되는 값으로 대체함으로써 신속한 클러치 결합으로 변속지연을 방지할 수 있으며 방향 클러치 자동보정을 고려한 인칭과 변속제어로 F→R, R→F 서틀변속이 유사한 특성을 나타내는 효과를 거두었다.

본 연구에서 개발된 인칭 제어 알고리즘은 선진제품에 구현된 기능과 성능을 벤치마킹하여 독자 개발하였으며 성능검증을 거쳐 양산 지게차에 적용되고 있으며 향후 소비자 요구사항을 반영하여 성능개선을 지속할 예정이다.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) Joo Young Oh, Geun Ho Lee and Chang Sub Song, "The Hydraulic System Modeling and Analysis of the Clutch Direct Control of an

- Automatic Transmission for a Forklift Truck”, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol.16, No.1, pp.112-119, 2008.
- 2) Y. M. Jung, “A Study on Improvement of Shift Sensitivity for Small Forklift Transmission using Direct Control Method”, Doctoral Thesis, Ulsan University, 2015.
 - 3) G. H. Jung and G. H. Lee, “A Development of Forklift Shift Controller for Dynamometer Test”, KFPS Spring Conference Proceeding, pp.143-149, 2007.
 - 4) G. H. Jung, et al., "A Development of TCU Analyzer for Wheel Loader Automatic Transmission", KSAE 2006 Autumn Conference, pp.1405-1410, 2006.
 - 5) 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.
 - 6) Shinji, Kaneko and Oyama-shi, “Forklift and Inching control Method of Forklift”, United States Patent Application Publication, US2015/0033718A1, 2015.
 - 7) Gyuhong Jung, “Design of Creep Function for Forklift Automatic Transmission”, Journal of Drive and Control, Vol.18, No.2, pp.46-55, 2021
 - 8) 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.
 - 9) Gyuhong Jung, “An Upshift Improvement in the Quality of Forklift’s Automatic Transmission by Learning Control”, Journal of Drive and Control, Vol.19, No.2, pp.17-26, 2022.
 - 10) 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.
 - 11) Gyuhong Jung, “Analysis of Diagnosis Algorithm Implemented in TCU fo High-Speed Tracked Vehicles”, Journal of Drive and Control, Vol.15, No.4, pp.30-38, 2018.
 - 12) Gyuhong Jung, “Development of Embedded Transmission Simulator for the Verification of Forklift Shift Control Algorithm”, Journal of Drive and Control, Vol.20, No.4, pp.17-26, 2023.