

학습제어를 이용한 지게차 자동변속기 상향 변속품질 개선 An Upshift Improvement in the Quality of Forklift's Automatic Transmission by Learning Control

정규홍^{1*}

Gyuhong Jung

Received: 2 Mar. 2022, Accepted: 16 Mar. 2022

Key Words : Forklift(지게차), Automatic Transmission(자동변속기), TCU(변속제어기), Learning Control(학습제어), Inertia Phase(관성영역), Tie-Up Shift(타이업 변속), Overrun Shift(오버런 변속)

Abstract: Recently, automatic transmissions caused a good improvement in the shift quality of a forklift. An advanced shift control algorithm, which was based on TCU firmware, was applied with embedded control technology and microcontrollers. In the clutch-to-clutch shifting, one friction element is released and the other friction element is activated. During this process, if the release and application timings are not synchronized, an overrun or tie-up occurs and ultimately leads to a shift shock. The TCU, which measures only the speed of the forklift, inevitably applies the open-loop shift control. In this situation, the speed ratio does not change during the clutch fill. The torque phase occurs until the clutch is disengaged. In this study, an offline shift logic of the learning control was proposed. It induced a synchronous shift when the learning control progressed. During this process, the reference current trajectory of the release clutch was corrected and applied to the next upshift. We considered the results of the overrun/tie-up characteristics of the upshift performed immediately before. The vehicle test proved that the deviation in shift quality, which was caused by the difference in the mechanical characteristics of the clutch, could be improved by the learning control.

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

GR_1, GR_2 : 1st and 2nd-speed gear ratio

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

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

T_T : Turbine torque, Nm

AP: Accelerator pedal position, %

CF, BR: Forward clutch, reverse brake

B1, C2: 1st brake, 2nd clutch

iCF, iBR, iB1, iC2: Proportional solenoid valve current, A
(N_O)₁₂: N_O for 1-2 upshift, rpm

(a_{NO})_{max}: dN_O/dt maximum during upshift, rpm/s

t_I, t_S : Start of inertia and slip phase time, sec

Δt_{NS} : N_S changing time during upshift, sec

PSV: Proportional Solenoid Valve

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

* Corresponding author: ghjung@daejin.ac.kr

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

Copyright © 2022, 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

자동변속기는 운전 편의성의 장점으로 수동변속기 대비 높은 가격과 낮은 효율의 단점에도 불구하고

승용차에는 일찍이 보편화되었고 최근 개발되는 건설기계 및 농기계¹⁾에도 대부분 장착되고 있다. 산업용 차량으로 분류되는 지게차도 좁은 공간에서 주행과 작업을 반복 수행하므로 최근 출시되는 차량에는 전량 자동변속기가 장착되고 있다. 자동변속기는 2000년대 초부터 국내 업체에서 국산화 개발을 위해 노력해 왔으나 1톤급 소형 지게차에 탑재되는 기계식 전후진 1단 외에 전자제어식 다단 자동변속기는 여전히 해외 변속기 전문업체 제품을 수입하여 장착하고 있다.²⁾

자동변속기는 짧은 변속시간 동안에 변속비가 변화되어 엔진속도가 급격하게 변화된다. 이는 출력축 토크변화를 유발하고 변속충격으로 나타나 운전자가 불쾌감을 느끼게 된다. 최근 개발되는 자동변속기는 모두 마이크로컨트롤러를 활용한 전자제어식 변속제어를 채택하여 변속품질(shift quality)이 크게 향상되었으나 동력을 전달하는 기계부품 가공 위주의 국내 업체는 고도의 기술이 요구되는 변속제어기(transmission control unit, TCU) 설계와 시험개발 능력이 부족한 실정이다.

TCU 도입으로 미세하고 정밀한 변속제어가 가능해지면서 기계적인 변속기구는 단순해지고 클러치 해제와 작동을 동기시켜 우수한 변속품질을 구현하는 클러치 대 클러치 변속이 일반화되었다.^{3,4)} 클러치 대 클러치 변속에서는 해제와 작동요소가 동기되지 않으면 오버런(overrun)이나 타이업(tie-up)에 의해 엔진속도 변화로 발생하는 토크와는 다른 형태의 변속충격이 나타나게 된다. TCU에서는 변속 시 차속과 변속기 입력토크의 변속 조건을 고려하여 해제와 작동 마찰요소 클러치 압력을 적절하게 제어하는 변속제어 알고리즘이 모두 마이크로컨트롤러에서 실시간으로 실행되는 펌웨어로 구현된다. TCU 펌웨어는 클러치의 기계적인 특성 차이를 보상하는 자동보정(auto calibration), 다양한 조건에서의 변속시험을 통한 변속데이터 보정, 속도 비가 변화되는 관성영역에서의 피드백 제어 등을 통해 변속품질이 향상되도록 개발되고 있다.

자동변속기 학습제어와 관련된 기존 연구로는 전윤식⁵⁾이 학습능력을 갖는 퍼지제어기를 이용해서 변속 시 클러치 압력을 제어하는 알고리즘을 제안하였고 학습이 진행됨에 따라 변속 과도토크가 감소함을 입증한 바 있고 송창희⁶⁾는 학습제어를 통해 DCT에서의 엔진 클러치 전달토크를 보상하는 방법을 제시한 바 있다. 이전 연구는 모두 제안된 학습제어 성능을 시뮬레이션으로만 검증하여 실제 양산차량 TCU

에는 적용될 수 없는 한계가 있었다.

본 연구에서는 국내에서 개발된 4톤 지게차용 자동변속기에 적용되는 TCU의 상향 변속성능 향상을 위한 학습제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 학습제어는 오프라인 방식의 변속제어 로직으로 직전에 발생한 변속특성을 분석하여 유사한 형태의 다음 변속에 적용되는 해제요소 변속데이터를 보상함으로써 학습이 진행됨에 따라 오버런이나 타이업에 의해 발생하는 변속충격을 완화하는 기능이다. 설계된 학습제어는 TCU 펌웨어로 로직을 구현하였으며 실차시험을 통해 학습이 진행됨에 따라 변속품질이 개선되고 학습제어의 성능평가 지표를 만족하는 반복학습 최종 단계에서는 동기변속(synchronous shift)이 구현됨을 확인하였다.

2. 변속기 구조

Fig. 1은 토크 컨버터, 유압시스템, 기어 열과 변속제어기로 구성되는 지게차용 2단 자동변속기의 동력 전달체계를 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(Proportional Solenoid Valve, PSV) 4개로 구성되고 TCU가 비례 솔레노이드밸브 전류를 통해서 클러치와 브레이크를 선택적으로 작동시켜 전후진 2단 변속을 제어한다. Fig. 1에서 유압시스템에 표기된 4개 약어는 비례 솔레노이드밸브를 2단 기어 열에 표기된 4개 약어는 마찰토크를 발생시키는 클러치 및 브레이크를 나타낸다.

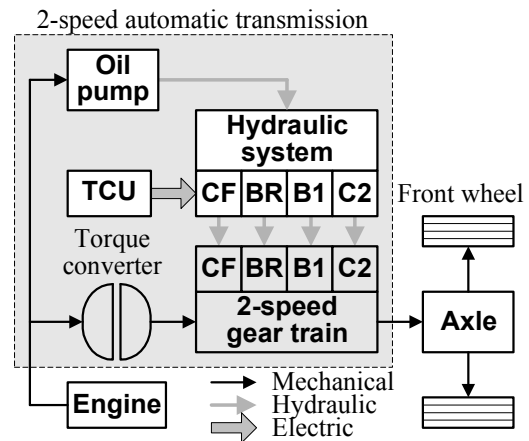


Fig. 1 Power transmission in forklift

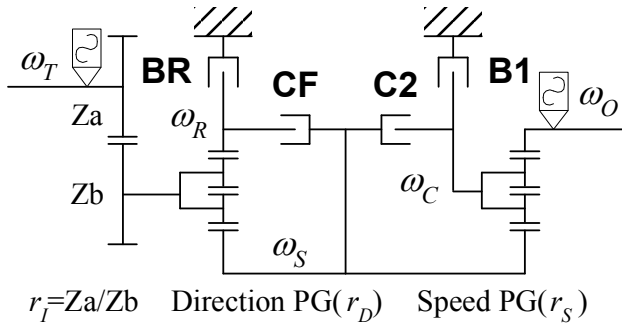


Fig. 2 Stick diagram of gear train

Table 1 Clutch and brake engagement

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

Fig. 2는 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 변속비가 유일하게 결정된다. 변속비를 결정하는 기구학적 관계식은 유성치차 속도관계식 2개와 결합되는 2개 마찰요소의 구속조건이다. 식 (1), (2)는 방향과 속도 기어 열에 대한 속도 관계식이다. 1→2 상향 변속 시 B1, C2에서의 슬립속도를 속도센서를 이용하여 측정되는 터빈과 출력축 속도 N_T, N_O 로 나타내면 식 (3), (4)와 같다. 여기서 $r_D = 2$ 이기 때문에 N_T, N_O 측정속도 부호를 양으로 하면 CF(또는, BR)이 결합된 상태에서 B1, C2 슬립속도 NS_{B1}, NS_{C2} 는 전진과 후진에 동일하게 적용된다. 본 연구에서 B1, C2 슬립속도는 상향변속 시 작동요소 마찰토크에 의해 결합이 시작되는 시점과 관성영역 개시 시점 판단뿐만 아니라 우수한 변속품질의 필요조건인 동기 변속을 판정하는 자료로 활용된다.

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

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

$$NS_{B1} = \left| \frac{r_S}{r_S - 1} \left(\frac{N_T}{GR_1} - N_O \right) \right| \quad (3)$$

$$NS_{C2} = \left| \frac{r_S}{r_S - 1} \left(\frac{N_T}{GR_2} - N_O \right) \right| \quad (4)$$

마이크로컨트롤러 기반으로 설계되는 TCU는 변속기와 관련된 사용자 작동스위치와 제반 센서로부터 주행지령과 주행상태를 인식한 후 4개 비례 슬레노이드밸브 전류를 제어하는 기능을 가지며 PCB로 구현된 하드웨어와 변속제어에 대해 설계된 제어로직과 제어 알고리즘을 컴퓨터 프로그램으로 구현한 펌웨어로 구성된다.

TCU가 도입됨에 따라 최근에 개발되는 변속기는 유압회로를 단순하게 설계하고 고도화된 변속제어 알고리즘이 내장된 펌웨어로 변속성능을 향상시키는 방식을 채택하고 있다. 본 연구에서 개발된 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(diagnosis) 및 안전작동(failsafe) 기능이 포함한다. Fig. 3은 변속제어를 위해 ARM7 Cortex-M3 계열의 STM32F103ZC를 기반으로 개발된 TCU이다.

3. 1→2 상향변속 특성

클러치 대 클러치 변속은 해제요소 전달토크가 작동요소 전달토크로 부드럽게 전이되도록 유압작동 피스톤의 압력을 제어해야만 변속충격을 최소화할 수 있다. 연구대상 지게차 자동변속기의 1→2 상향 변속은 B1 해제와 C2 작동으로 변속이 진행되며 세부적으로 구분된 변속구간에서의 동력전달 및 변속특성에 대한 설명은 다음과 같다.

3.1 변속과정

일반적인 자동변속기 변속과정⁷⁾은 변속개시(start of shift, SOS)와 더불어 유압작동 피스톤을 신속하게 클러치 플레이트와 맞닿는 위치까지 이동시키는 충전영역(fill phase), 작동요소에서 발생하는 토크로 인해 토크 비가 변화하는 토크영역(torque phase), 해제요소가 해제되어 속도 비가 변화하는 관성영역(inertia phase)을 거쳐 작동요소가 완전히 결합되는 변속종료(end of shift, EOS)로 마무리된다.

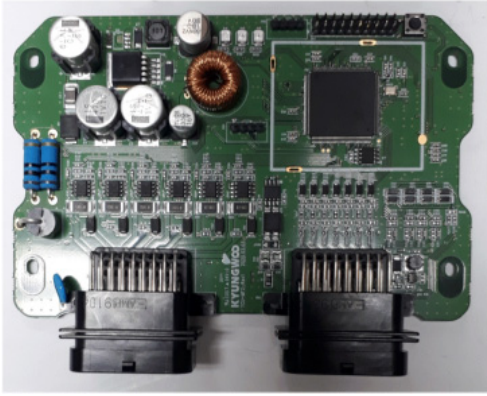


Fig. 3 Transmission control unit(TCU)

Fig. 4는 지게차 자동변속기의 전개도(wide open throttle, WOT) R1→R2 변속 시 양호한 변속품질을 나타내는 시험이다. 자동변속모드에서 출력축 속도가 약 590rpm에 도달하면 TCU는 변속을 개시하여 C2 전류를 미리 설계된 전류계적으로 제어한다. 이론적으로 충전영역은 유압 피스톤이 클러치 플레이트와 맞닿는 시점에서 토크영역으로 전환되지만 TCU는 이를 감지할 수 없으므로 지정된 시간 동안 개루프 방식으로 충전영역 전류를 제어한다. 지정된 시간의 충전영역이 경과하면 변속기 입력토크(T_I)와 차속(N_O)에 따라 적절하게 설계된 B1과 C2 전류계적으로 토크영역에서의 변속제어를 수행하는데 TCU는 토크 비 변화를 감지하지 못하므로 이 또한 개루프 전류제어를 적용한다. 관성영역은 B1이 해제되는 시점에서 시작되는데 TCU는 B1 슬립속도가 임계속도보다 크게 되면 관성영역에 진입하였음을 판정하고 측정 가능한 속도비 변화로부터 C2 결합을 능동적으로 제어하는 피드백 제어를 적용할 수 있다. Fig. 4는 관성영역 피드백 제어가 생략된 변속시험이다.

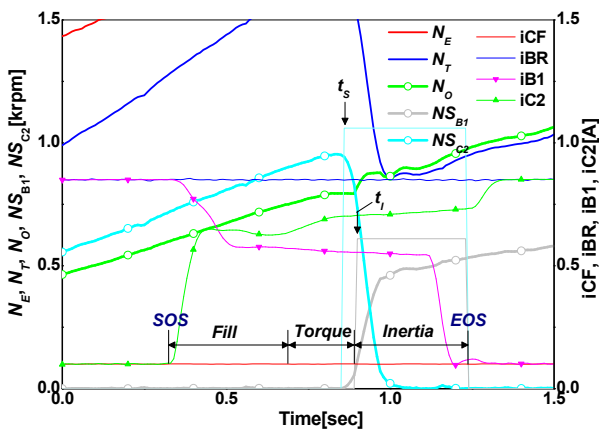


Fig. 4 Favorable shift for WOT R1-R2

C2 마찰토크에 의해 토크 비가 변화되는 토크영역 개시시점은 회전속도만을 측정하는 TCU에서 판정할 수 없지만 C2 마찰토크가 증가하면 어느 시점부터는 C2 슬립속도(NS_{C2}) 감소가 발생하게 된다. 본 연구에서는 NS_{C2} 가 최댓값으로부터 일정량 감소하는 시점(t_s)을 슬립영역(slip phase)으로 새롭게 정의하였다. 슬립영역은 작동요소의 슬립속도 감소가 시작되는 시점으로 해제요소가 결합된 상태에서는 토크영역에 해당되고 해제된 상태에서는 관성영역에 해당된다. Fig. 4에서는 B1이 결합된 상태를 유지하므로 슬립영역은 토크영역에 포함된다.

주행 중 발생하는 다양한 변속조건에 대해 우수한 변속품질을 구현하기 위해 다양한 변속제어기법이 연구되고 시도된 바 있으나 우수한 변속품질을 달성하기 위한 변속제어의 핵심은 충전 및 토크영역에서의 개루프 제어이다. 즉, 유압작동 피스톤 변위나 출력축으로 전달되는 토크를 측정하지 않아 개루프 제어가 불가피한 충전 및 토크영역에서의 전류계적을 변속조건에 적절하게 설정함으로써 관성영역에 진입하는 시점에서의 마찰토크를 차속변화가 급격하게 발생되지 않는 수준으로 제어하는 것이다. 이를 위해 양산차량 개발업체는 변속기 다이노모 또는 실차를 이용하여 다양한 변속조건에서 반복적인 변속시험을 통해 기준전류계적을 최적으로 조정하는 변속데이터 보정을 수행한다.

3.2 오버런과 타이업 변속

클러치 대 클러치 변속에서는 교체되는 마찰요소의 해제와 작동이 동기되어야만 부드러운 변속을 구현할 수 있는데 작동요소 토크가 충분하지 않은 상태에서 해제요소 슬립이 발생하는 오버런 변속이나 해제요소가 결합을 유지한 상태에서 작동요소 토크가 과도하게 발생하는 타이업 변속에서는 변속충격이 발생하여 운전자가 불쾌감을 느끼게 된다. 변속충격은 변속 중 출력축 토크 변화량으로 평가되지만 실차에서는 토크 측정이 어려우므로 운전자가 감지하는 차량가속도(또는, 출력축 속도변화 기울기)로 대신할 수 있다.

Fig. 5는 WOT F1→F2 변속 시 오버런 특성을 나타내는 시험이다. C2 마찰토크가 충분하게 발생되지 않은 상태에서 B1이 해제됨으로써 C2 슬립속도가 일시적으로 과도하게 증가한 후 감소함으로써 출력축 속도변화가 다소 긴 시간에 걸쳐 크게 발생하게 된다. Fig. 6은 B1과 C2가 동시에 해제되는 오버런 변

속에서의 속도선도⁸⁾를 나타내며 B1 슬립속도는 일시적으로 음의 값을 나타내었다가 다시 양의 값으로 복구하게 되므로 Fig. 5에서 슬립영역 시작시점에서의 NS_{B1} 의 부호는 음이고 오버런 변속에서 슬립영역 시작시점은 관성영역에 해당된다. Fig. 5에서 관성영역과 슬립영역이 개시되는 시점의 차 $t_I - t_S = -0.08\text{sec}$ 로 B1이 해제되고 0.08초 동안 C2 마찰토크가 발생하지 않아 구동토크 단절로 차속이 감소하고 이후 C2가 결합되면서 출력축 속도가 급하게 변화되어 다소 큰 변속충격이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7은 WOT F1→F2 변속 시 타이업 특성을 나타내는 시험이다. C2 마찰토크에 의해 슬립영역이 시작된 이후 B1이 해제되는 관성영역 시작이 상당히 지연되어 B1과 C2 구속토크로 차속이 감소하게 되고 관성영역 시작시점에서 출력축 속도가 급하게 증가하면서 변속충격이 크게 발생하게 된다. Fig. 7에서 $t_I - t_S = 0.18\text{sec}$ 로 0.18초 동안 B1이 결합된 상태에서 발생하는 C2 마찰토크로 출력축 속도는 강제적으로 저하되며 타이업 변속에서 슬립영역 시작시점은 토크영역에 해당된다. 이에 비하여 양호한 변속품질을 나타내는 Fig. 4의 변속에서는 $t_I - t_S = 0.04\text{sec}$ 로 짧아 C2가 결합하는 시점에서 B1이 해제되므로 동기변속에 근접하고 이에 따라 출력축 속도변화 기울기가 작게 나타나 변속충격이 거의 발생되지 않는다. 타이업 변속은 구속토크에 의한 출력축 속도저하가 크므로 오버런 변속에 비해 변속충격이 크게 발생한다.

Table 2는 전술된 3가지 WOT 1→2 상향변속 특성을 수치적으로 정리한 결과이며 자동변속모드에서 변속선도로 결정되는 1→2 상향변속이므로 변속이 개시되는 출력축 속도는 모두 같다. 양호한 변속품질은 변속 중 출력축 속도변화가 작아야 하고 이를 위

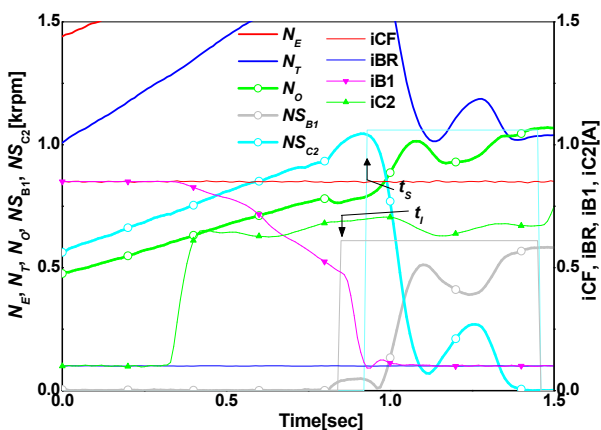


Fig. 5 Overrun shift for WOT F1-F2

해서는 슬립영역과 관성영역이 동시에 시작되거나 슬립영역이 시작된 후 관성영역이 곧 바로 시작되도록 작동과 해제 클러치를 제어해야 함을 확인하였다.

본 연구에서는 TCU에서 1→2 상향변속을 수행한 후 측정된 슬립영역 시작시점 t_S 와 관성영역 시작시점 t_I 으로부터 오버런과 타이업 변속정도를 판정하였으며 이를 바탕으로 해제 기준전류궤적을 조절함으로써 다음에 발생하는 1→2 상향변속 시 변속품질을 개선하는 알고리즘을 제시하였다. 양호한 변속시험 결과를 바탕으로 슬립영역과 관성영역이 시작되는 시차의 목표는 $0 \leq t_I - t_S \leq 0.04\text{sec}$ 로 설정하였다.

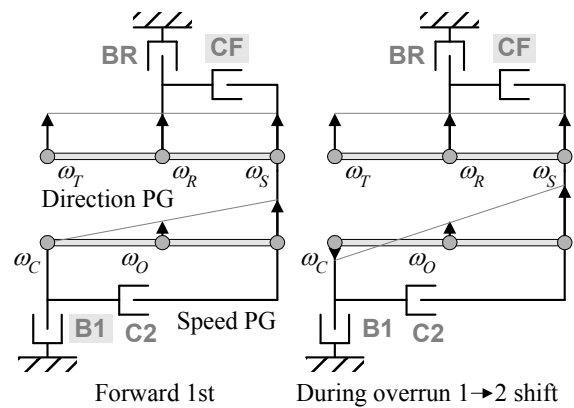


Fig. 6 Lever diagram for overrun shift

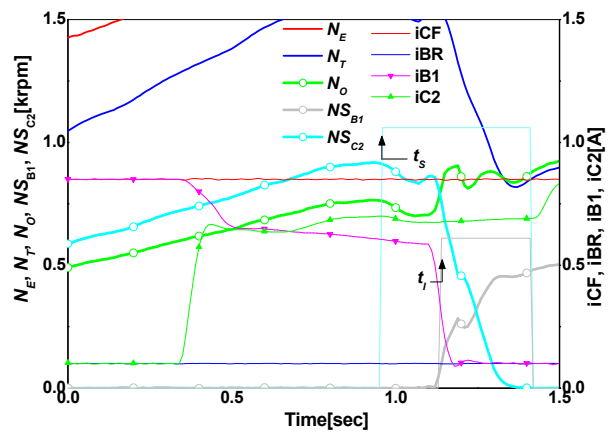


Fig. 7 Tie-up shift for WOT F1-F2

Table 2 Comparison of WOT 1→2 upshift

Data	Unit	Favorable	Overrun	Tie-up
$(N_O)_{12}$	rpm	588	588	587
$(a_{NO})_{max}$	krpm/s	2.3	2.35	5.0
$t_I - t_S$	sec	0.04	-0.08	0.18
Δt_{NS}	sec	0.13	0.20	0.39

4. 변속 제어기법

4톤 지게차 TCU에 설계된 변속제어 기능의 펌웨어에는 다양한 변속조건뿐만 아니라 동력전달 및 제어장치의 기계적인 품질편차를 보상함으로써 우수하면서도 안정된 변속품질을 구현하기 위한 변속제어 로직과 알고리즘이 포함되어 있으며 세부적인 기능과 특징에 대한 설명은 다음과 같다.

4.1 클러치 자동보정(auto calibration)

충전영역이 종료되고 토크영역이 시작되는 시점에서 유압작동 피스톤이 클러치 플레이트를 압착하여 발생하는 마찰토크가 완만하게 발생되도록 반복적인 작동시험을 통해 급 충전(fast fill)과 완 충전(fill compensation) 전류계적을 설정하는 기능이다. 클러치 자동보정⁹⁾은 마찰토크를 발생시키는 유압피스톤의 동특성과 클러치 마찰특성을 보상하여 토크영역 및 관성영역에서의 변속이 원활하게 진행될 수 있도록 하는 필수적인 기능이다.

4.2 변속데이터 보정(calibration)

TCU는 터빈과 출력축 속도만을 측정하는데 변속과정 중 충전영역과 토크영역에서는 속도변화가 나타나지 않으므로 불가피하게 미리 설정된 기준전류계적을 추종하는 개루프 제어를 적용한다. 입력토크와 차속의 변속조건에 대해 설정되는 해제와 작동요소의 기준전류는 반복적인 변속시험을 통해 최적의 변속품질을 갖도록 보정된다. Fig. 8은 특정 차속의 1→2 상향변속에서 입력토크에 따라 적용되는 3개 전류계적 형태를 나타낸다. 지게차 TCU는 2개 차속과 3개 입력토크에 대해 설계된 6개 기준전류계적으로부터 변속 시의 차속과 입력토크에 해당되는 기준전류계적으로 보간하여 변속제어를 수행한다. Fig. 8에서 충전영역 전류에 해당되는 2개 제어점(control point)은 자동보정을 통해 설정되고 6개 전류계적에 동일하게 적용된다. 변속데이터 보정은 개발자가 변속시험 성능을 평가하고 기준전류계적을 수정하므로 변속동특성에 대한 명확한 이해와 오랜 개발경험이 필요하다.

4.3 온라인 오버런/타이업 보상 제어로직

3.2절에서 설명된 상향변속 중 발생하는 오버런이나 타이업을 실시간으로 판정하고 보상하는 제어기법이다. 오버런은 슬립영역이 시작되기 전에 관성영역이 시작되는 경우($t_I - t_S < 0$)로 판정한 후 감소되는 해제요소 전류를 일시적으로 증가시켜 오버런을 방지하게 된다. 또한 타이업은 토크영역에서 증가되는 출력축 속도 기울기가 임계값보다 작으면 타이업으로 판정한 후 작동요소 전류를 일정하게 유지하면서 슬립영역이나 관성영역이 감지될 때까지 대기한다. Fig. 9는 오버런 보상이 적용되는 AP=40% 부근에서의 상향변속 시험이다. 토크영역 제어 중 관성영역 개시가 감지되면 오버런으로 판단하여 감소하는 B1 전류를 일시적으로 증가시킴으로써 B1 슬립속도가 과도하게 발생되지 않는 효과를 나타내었다. 온라인 보상 제어로직은 비례 솔레노이드밸브 제어압력의 응답지연으로 인해 변속품질 개선효과가 제한적이므로 보다 근본적으로는 슬립영역과 관성영역이 발생하는 시차조절을 통해 우수한 변속품질을 구현해야 한다.

역이 시작되는 경우($t_I - t_S < 0$)로 판정한 후 감소되는 해제요소 전류를 일시적으로 증가시켜 오버런을 방지하게 된다. 또한 타이업은 토크영역에서 증가되는 출력축 속도 기울기가 임계값보다 작으면 타이업으로 판정한 후 작동요소 전류를 일정하게 유지하면서 슬립영역이나 관성영역이 감지될 때까지 대기한다. Fig. 9는 오버런 보상이 적용되는 AP=40% 부근에서의 상향변속 시험이다. 토크영역 제어 중 관성영역 개시가 감지되면 오버런으로 판단하여 감소하는 B1 전류를 일시적으로 증가시킴으로써 B1 슬립속도가 과도하게 발생되지 않는 효과를 나타내었다. 온라인 보상 제어로직은 비례 솔레노이드밸브 제어압력의 응답지연으로 인해 변속품질 개선효과가 제한적이므로 보다 근본적으로는 슬립영역과 관성영역이 발생하는 시차조절을 통해 우수한 변속품질을 구현해야 한다.

4.4 관성영역 피드백 제어¹⁰⁾

토크영역에서는 해제와 작동요소에서 발생하는 마찰토크가 출력축 토크에 영향을 미치지만 관성영역

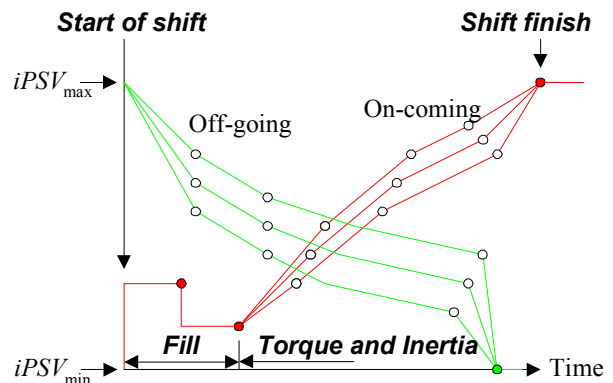


Fig. 8 A set of PSV current references for upshift

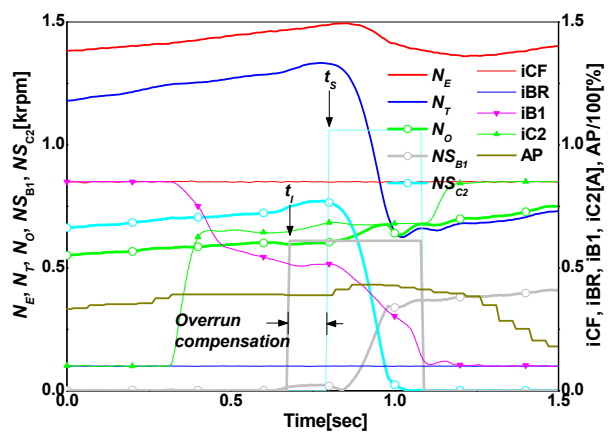


Fig. 9 On-line overrun compensation logic

에서는 작동요소 마찰토크에 의해 속도 비가 변화되므로 작동요소만으로 변속을 제어한다. 관성영역에서 발생하는 출력축 토크는 변화되는 터빈속도 기울기에 비례하므로 목표 터빈속도를 추종하도록 작동요소 전류를 조절하는 방법이 있는데 변속종료 시점에서 터빈속도는 출력축 속도에 따라 변화되므로 본 연구에서는 작동요소 슬립속도가 일정한 기울기를 갖도록 제어하는 방식을 택하였다. 관성영역 피드백 제어는 중립-전후진과 기어변속에 적용된다. Fig. 10은 변속레버를 중립에서 전진으로 전환하였을 때 발생하는 N→F1 변속에서의 피드백 제어이다. N→F1은 CF와 B1을 동시에 작동시키는 변속이며 이 경우에 관성영역의 시작은 터빈속도가 중립상태로부터 일정량 감소하는 시점으로 판정한다. 토크영역에서의 CF 마찰토크가 커서 관성영역 개시 초기에 CF 슬립속도 기울기가 다소 크게 발생하지만 피드백 제어를 통해 CF 전류를 조절함으로써 관성영역에서는 CF 슬립속도가 목표 슬립속도를 추종하게 되어 변속충격이 완화됨을 알 수 있다. 관성영역에서 피드백 제어가 작동요소 슬립속도를 일정한 기울기로 조절함으로써 중립-전후진 변속 시의 변속품질 향상에 기여하지만 비례 슬레노이드밸브 동특성이 충분히 빠르지 않으므로 전달되는 토크가 크고 짧은 시간 동안에 변속이 진행되는 WOT 1→2 상향변속에서는 충분한 효과를 기대하기 어렵다. 따라서 관성영역 진입시점에서의 작동요소 마찰토크가 적절하게 발생되도록 개루프 제어의 변속데이터를 보정하는 것이 필수적이다.

4.5 학습제어

자동변속기용 비례 슬레노이드밸브는 전류에 대한 제어압의 응답지연이 대략 0.1-0.2초이고 히스테리시스 특성으로 인해 제어압의 증감전환이 선형적이지

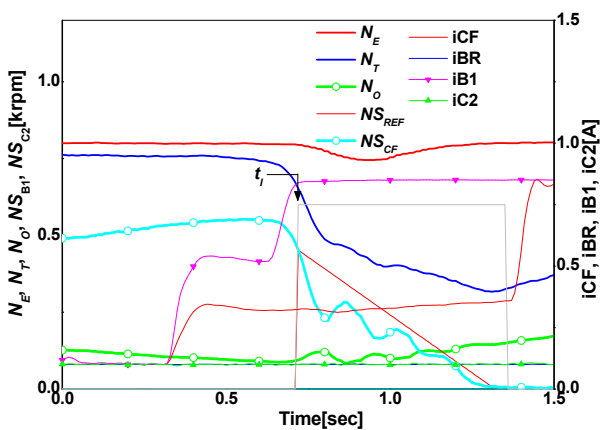


Fig. 10 Feedback shift control algorithm for N-F1

않으므로 토크영역에서의 개루프 변속제어가 양호하지 않으면 1→2 상향변속 관성영역에서의 오버런/타이업 보상제어나 피드백 제어에 의한 변속품질 개선 효과가 크지 않게 된다. 따라서 클러치 자동보정과 변속데이터 보정을 통해 개루프 변속제어에 적용되는 기준전류계적을 적절하게 설계하는 것이 중요하다. 양산 TCU에 적용되는 기준전류계적에서 클러치 충전전류는 자동보정으로 마찰요소의 기계적인 특성을 반영하지만 토크영역과 관성영역에서의 기준전류계적은 클러치 자동보정 결과에 의해서만 변화될 뿐 동력전달장치의 변속 동특성 차이를 반영하지 않으므로 변속기에 따라 WOT 1→2 상향변속의 품질차가 나타날 수 있다. 제안된 학습제어는 1→2 상향변속에서 슬립영역과 관성영역이 발생하는 시차 ($t_f - t_s$)로부터 오버런/타이업의 변속특성을 판정하고 유사한 조건의 다음 변속에서 해제요소 기준전류를 증감시켜 변속품질을 개선하는 기능으로 세부로직은 다음과 같다.

(1) $t_f - t_s < 0$ (오버런)

슬립영역 발생 전에 관성영역에 진입함으로써 토크가 일시적으로 단절되어 출력축 속도가 저하된 후에 급격한 출력축 속도증가로 변속충격이 발생한다. 오버런은 해제요소의 조기 해제가 원인이므로 다음 변속에서 해제요소 전류계적을 일정량 증가시켜 오버런을 방지한다.

(2) $t_f - t_s > 0.04\text{sec}$ (타이업)

작동요소 마찰토크로 슬립영역에 진입한 후에 일정시간 이상 해제요소가 해제되지 않아 구속토크로 인해 출력축 속도가 감소한 후 관성영역에서 다시 급속하게 증가함으로써 변속충격이 발생한다. 타이업은 해제요소의 해제지연이 원인이므로 다음 변속에서 해제요소 전류계적을 일정량 감소시켜 타이업을 방지한다.

(3) $0 \leq t_f - t_s \leq 0.04\text{sec}$ (동기변속)

슬립영역 진입 직후에 관성영역이 개시됨으로써 해제요소에서 작동요소로의 토크전이가 원활하게 이루어져 양호한 변속품질을 나타내므로 해제요소 전류계적을 그대로 유지한다. 여기서 동기변속 판정 시차 0.04sec는 다수의 변속시험 결과로부터 정한 설계 기준이다.

학습제어는 변속데이터 보정으로 확정된 기준전류

레벨에 대해 오버런/타이업 변속특성 판정결과에 따라 해제요소 기준전류를 일정량 증가/감소시키는 방식으로 설계하였다. 해제요소 기준전류 변화는 15단계로 정의된 레벨로 설정되는데 레벨 7은 초기 설정값으로 해제요소 기준전류변화가 없는 상태이다. 이후 학습제어에 의해 1-2 상향변속특성이 오버런인 경우에는 레벨 증가(최대 레벨 14) 타이업인 경우에는 레벨을 감소(최소 레벨 0)시키는 방식으로 해제요소 기준전류를 보상하였으며 전진과 후진 상향변속에 대해 독립적인 학습제어 레벨이 적용된다. 레벨에 따른 해제요소 전류변화량은 반복시험을 통해 적절한 값을 선정하였다.

5. 학습제어 성능평가

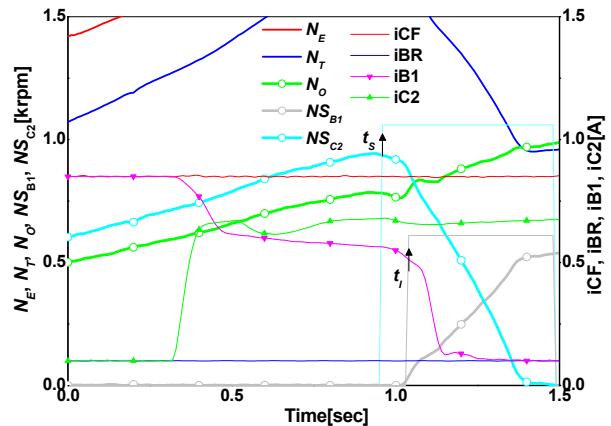
학습제어에 의한 오프라인 보상성능을 평가하기 위해 레벨 7의 초기상태에서 WOT F1→F2 변속을 반복 시험하여 오버런/타이업 변속특성 판정에 따른 레벨변화와 이에 따른 변속품질 개선상태를 분석하였다. Table 3은 오버런/타이업에 따른 학습제어 레벨을 순차적으로 변화시키는 설계를 적용한 시험에서 레벨변화와 변속특성을 요약한 결과이다.

1, 2차 변속에서는 $t_I - t_S > 0.04\text{sec}$ 로 타이업에 해당되어 레벨이 감소하고 이에 따라 출력축 속도변화 기울기가 미세하게 작아지는 효과를 확인할 수 있다. 3차 변속에서는 $t_I - t_S = 0.04\text{sec}$ 로 동기변속에 해당되어 레벨변화가 없지만 동일한 레벨이 적용된 4차 변속에서는 다시 타이업 변속특성으로 변속 충격이 증가하고 레벨이 감소하게 된다. 레벨 4가 적용된 5차 변속에서는 $t_I - t_S = 0.03\text{sec}$ 의 동기변속으로 출력축 속도변화 기울기가 1차에 비해 거의 1/2로 감소하여 변속품질이 개선되었다. Fig. 11은 순차 레벨변화 학습제어가 적용된 변속시험에서 1차와 5차의 변속결과를 보여준다. 1차 변속에서는 타이업 변속으로 변속 중 출력축 속도 변화가 크게 발생하는 반면에 반복학습으로 레벨 4로 변화된 5차 변속에서는 동기변속으로 변속 중 출력축 속도변화가 매우 작게 나타나므로 변속품질이 향상되었음을 알 수 있다. Fig. 11의 변속시험에서는 관성영역에서 C2 슬립속도 피드백 제어를 통하여 변속시간을 증가시켜 변속충격을 완화하였다.

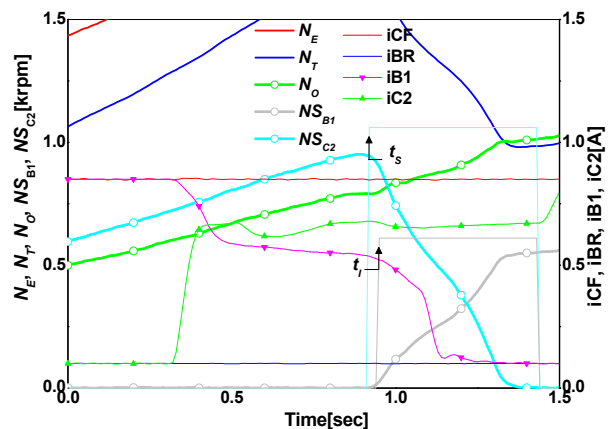
순차 레벨변화는 오버런/타이업의 변속특성에 따라 레벨이 한 단계 증가, 감소하는데 비하여 건너뛴 레벨변화는 슬립영역과 관성영역이 발생하는 시차

Table 3 Shift results for sequential level change

Data	Unit	1st	2nd	3th	4th	5th
Level change	before	7	6	5	5	4
	after	6	5	5	4	4
$(a_{NO})_{\max}$	krpm/s	1.65	1.63	1.43	1.70	0.88
$t_I - t_S$	sec	0.08	0.07	0.04	0.08	0.03
Δt_{NS}	sec	0.46	0.49	0.42	0.45	0.45



(a) 1st shift(Level=7, $t_I - t_S = 0.08\text{sec}$)



(b) 5th shift(Level=4, $t_I - t_S = 0.03\text{sec}$)

Fig. 11 Sequential level change learning control

$|t_I - t_S|$ 정도로부터 한 단계 이상의 레벨변화를 설정함으로써 적은 변속시험으로 동기변속을 구현할 수 있다. Table 4는 레벨 7의 초기상태에서 건너뛴 레벨변화를 적용한 반복시험 결과이다. 레벨변화 단계는 $t_I - t_S = 0.03\text{sec}$ 마다 한 단계가 변화되도록 설정하였다. 1차 변속은 $t_I - t_S = 0.1\text{sec}$ 로 동기변속 기준인 $t_I - t_S = 0.04\text{sec}$ 보다 0.06sec 크므로 레벨 7에서 레벨 5로 변화되어 2차 변속이 진행된다. 2차 변속에서는 $t_I - t_S = 0.07\text{sec}$ 로 한 단계 낮아져 레벨 4로

Table 4 Shift results for skip level change

Data	Unit	1st	2nd	3th	4th
Level change	before	7	5	4	4
	after	5	4	4	4
$(a_{NO})_{max}$	krpm/s	2.97	2.27	1.03	1.45
$t_I - t_S$	sec	0.10	0.07	0.04	0.03
Δt_{NS}	sec	0.36	0.35	0.41	0.29

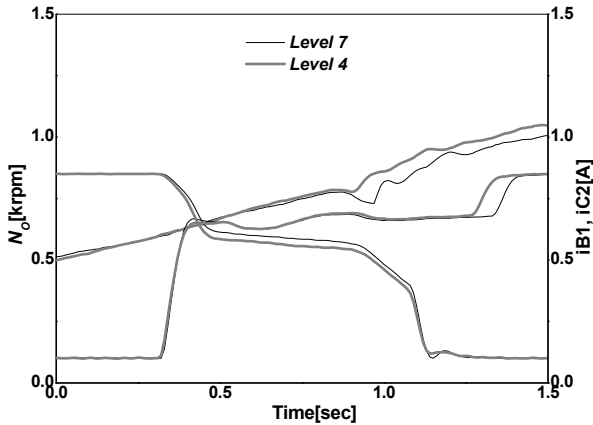


Fig. 12 Comparison of 1st and 4th shift

변화되고 3, 4차 변속에서는 동기변속에 수렴하여 안정된 상태를 유지하였다. Fig. 12는 레벨 7의 1차 변속과 레벨 4의 4차 변속에서 출력축 속도와 비례 슬레노이드밸브 전류를 비교한 그림이다. 4차 변속에서 C2 전류는 1차 변속과 동일하지만 B1 전류가 낮게 작용하여 동기변속을 유도하고 이에 따라 출력축 속도변화가 작아짐으로써 변속품질이 개선되는 결과를 나타내었다.

6. 결 론

최근 마이크로컨트롤러를 활용한 임베디드 제어기술은 기계자동화와 관련된 전 산업분야로 확장되어 발전하고 있으며 지게차용 자동변속기도 고도의 변속제어 알고리즘을 TCU 펌웨어로 구현함으로써 우수한 변속품질을 실현하고 있다.

본 연구에서는 4톤 지게차용 자동변속기의 상향변속에서 변속을 실행하는 클러치의 기계적인 마찰특성 차이에 의해 나타나는 변속품질 편차를 개선하는 학습제어기법을 제안하였으며 실차시험을 통해 성능을 입증하였다. 하나의 마찰요소를 해제하고 다른 마찰요소를 작동시키는 클러치 대 클러치 변속에서는 해제와 작동시점이 동기되지 않으면 오버런이나 타

이업에 의해 변속충격이 발생하는데 클러치 해제와 작동이 개시되기 전까지의 충전 및 토크영역에서는 속도 비가 변화되지 않으므로 개루프 변속제어가 적용된다. 제안된 학습제어는 직전에 수행된 상향변속의 오버런/타이업 특성분석 결과를 바탕으로 유사한 변속조건에 적용되는 해제요소 기준전류계약을 보상함으로써 학습이 진행됨에 따라 동기변속을 유도하는 오프라인 제어로직이다.

학습제어 성능은 실차시험을 통해 검증하였다. 학습제어의 변속성능지표는 슬립영역과 관성영역이 발생하는 시차 $t_I - t_S$ 이며 양호한 변속품질을 나타내는 변속시험결과로부터 0-0.04초로 설정하였다. 학습레벨을 1씩 변화시키는 순차 레벨변화에서는 초기 0.08sec에서 4회 변속 후에 0.03sec로 수렴하였고 학습레벨을 1이상 변화시키는 건너뛰 레벨변화에서는 초기 0.1sec에서 2회 변속 후에 0.03sec에 도달하였으며 학습제어의 최종 단계에서는 모두 동기변속으로 변속품질이 개선됨을 확인하였다.

양산차량 적용을 목표로 개발되는 TCU는 시험대상 자동변속기뿐만 아니라 기계적인 특성에서 차이를 나타내는 양산품에 대해서도 일정 수준 이상의 우수한 변속품질이 보장되어야 한다. 제안된 학습제어는 실차시험을 통해 유용성이 입증되었고 기존에 개발된 변속제어 알고리즘과 더불어 양산 TCU에 적용되어 성능 안정에 기여하고 있다.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) S. M. Baek et al., "Design of the Hydro- Mechanical Transmission for a 55kW-Class Agricultural Tractor", Journal of Drive and Control, Vol.17, No.2, pp.19-27, 2020.
- 2) G. H. Jung and G. H. Lee, "A Development of Forklift Shift Controller for Dynamometer Test", KFPS Spring Conference Proceeding, pp.143-149, 2007.
- 3) P. G. Gott, "Changing Gears: The Development of the Automotive Transmission", SAE, pp.333~338, 1991.

- 4) T. W. Megli, M. Haghgoie and D. S. Colvin, "Shift Characteristics of a 4-Speed Automatic Transmission", SAE 1999-01-1060, 1999.
- 5) Y. S. Jun and H. W. Chang, "Design of Shift Controller Using Learning Algorithm in Automatic Transmission", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A Vol.22, No.3, pp.663-670, 1998.
- 6) C. H. Song et al., "Development of the Learning Control Logic Considering Hysteresis for Internal Resistance in Dry-type Engine Clutch in Parallel Hybrid System", 2015 KSAE Spring Conference, pp.48-48, 2015.
- 7) G. H. Jung and D. H. Park, "Experimental Analysis of Clutch-Fill Parameters for Automatic Transmission", Journal of KFPS, Vol.11, No.3, pp.47-54, 2014.
- 8) H. L. Benford and M. B. Leising, "The Lever Analogy: A New Tool in Transmission Analysis," SAE 810102, 1981.
- 9) G. H. 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.
- 10) G. H. Jung, C. D. Jung and S. H. Park, "Feedback Shift Controller Design of Automatic Transmission for Tractors", Journal of Drive and Control, Vol.13, No.1, pp.1-9, 2016.