

자동변속기 변속품질 향상을 위한 클러치 자동보정 알고리즘 개발 Development of Clutch Auto Calibration Algorithm for Automatic Transmission Shift Quality Improvement

정규홍^{1*}

Gyuhong Jung^{1*}

Received: 20 Jul. 2020, Accepted: 21 Aug. 2020

Key Words : Automatic Transmission(자동변속기), Clutch Piston(클러치 피스톤), TCU(변속제어기), Clutch Fill Control(클러치 충전제어), Auto Calibration(자동보정)

Abstract: As a shift control of automatic transmission was managed with the electronic control unit (ECU), shift quality which is a measure of shift shock during gear change has markedly improved. However, the initial clutch pressure control of the clutch filling phase should continue to rely on the predetermined control input since the input and output speeds are unchanged until the shifting process attains the inertia phase. It is critical to minimize the clutch response time and control the clutch pressure accurately at the end of clutch fill to achieve quick shift response and smoothness. Advanced transmission companies have adopted an auto calibration method which establishes the databases for the clutch piston fill-up attributes and the frictional characteristics of the disks. In this study, a distinctive auto calibration algorithm for forklift transmission under development is proposed and verified with the real-vehicle test. The experimental calibration results showed consistent turbine dynamics at the initial stage of shifts with the properly calibrated clutch-fill control parameters. By using this technique, it is necessary to finalize the shift control for the various operation conditions.

기호 설명

X_s : Clutch piston stroke, m
 X_e : Clutch piston end play, m
 x_p : Clutch piston displacement, m
 k_r : Return spring rate, N/m
 F_{pre} : Pre-compression of return spring, N
 A_p : Clutch piston area, m²
 F_f : Clutch piston friction force, N
 p_C : Clutch piston control pressure, N/m²

i_{MIN} : PSV current reference minimum, A
 i_{FF} : Current reference for fast fill, A
 i_{FC} : Current reference for fill compensation, A
 i_{TP} : Current reference for torque phase, A
 t_{FF} : Shift time for fast fill, sec
 t_{FC} : Shift time for fill compensation, sec
 t_{TP} : Shift time for torque phase, sec
 N_T : Turbine speed, rpm
 ΔN_T : Speed drop of turbine, rpm
 t_{SOI} : Time for the start of inertia phase, sec

* Corresponding author: ghjung@daejin.ac.kr

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

Copyright © 2020, 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 엔진동력을 바퀴 구동축에 전달할 때 다양한 종류의 변속장치를 이용해서 차량 주행조건에 적합한 구동력으로 변환하는 기능을 담당한다. 유한한 변속단을 갖는 자동변속기는 변속전후 변속

비 차이에 의해 짧은 시간동안에 엔진속도가 급격하게 변화되므로 불가피하게 어느 정도 변속충격이 발생하는데 최근 개발되는 변속기는 마이크로컨트롤러를 활용하는 전자제어방식 변속제어를 채택함으로써 변속품질(shift quality)이 크게 향상되었다. 특히, 전자제어를 이용하여 해제와 작동 클러치 압력을 적절하게 제어하는 것이 가능하여 일방향 클러치와 같은 기계적인 부품이 배제된 클러치 대 클러치 변속이 일반화되었다.^{1,2)}

국내 승용차용 자동변속기는 80년대 말부터 국산화 개발을 시작하여 현재 기술개발능력은 선진사에 뒤처지지 않는 상당한 수준에 도달하였다. 이에 비하여 건설기계나 농기계용 자동변속기는 자동변속기 장착비율이 높은 수준에 도달하였음에도 기계식 전후진 1단 자동변속기 외에 전자제어식 자동변속기는 여전히 해외 변속기 전문업체 제품을 수입하여 차량에 장착하고 있다. 2000년대 초부터 건설기계와 농기계용 자동변속기 개발과 관련된 국책 연구과제는 다수가 수행되었음에도 불구하고 국산화 개발이 지연되는 이유는 자동변속기 소요수량이 승용차에 비해 매우 적으므로 완성차 업체의 개발의지가 절실하지 않고 실제적인 기술개발을 담당하는 중소기업의 기술개발 역량이 높지 않기 때문으로 분석된다. 그러나 자동변속기는 엔진과 더불어 차량의 핵심적인 부품으로 부가가치가 높고 생산규모가 확대됨에 따라 치열한 국제시장에서 경쟁하기 위해서는 국내개발이 절실한 실정이다.

변속제어기(transmission control unit, TCU)는 변속 제어 기능을 담당하는 전자제어장치로 동력전달장치에 대한 이해를 바탕으로 설계된 변속제어 알고리즘은 임베디드 프로그램(embedded program)으로 구현된다. 자동변속기에서의 변속은 하나의 클러치를 해제하면서 다른 클러치를 작동시키는 과정으로 진행되는데 해제와 작동이 동기되지 않으면 오버런(overrun)이나 타이 업(tie-up)에 의해 변속충격이 발생하게 된다. 부드러운 변속을 구현하기 위한 다양한 방법이 연구되고 시도되었지만 회전속도만을 측정하는 변속제어기는 기구학적 속도변화가 발생되지 않는 클러치 충전구간과 토크영역에서 미리 정해진 제어입력에 의한 개루프 제어를 적용하므로 변속품질 향상에 한계가 있다. 속도변화가 발생하는 관성영역에서의 변속제어는 각가속도 피드백을 통해 성능개선이 가능하며 농업용 트랙터에 적용하여 실차시험으로 확인한 바 있다.³⁾ 그러나 클러치 압력을 제어하는 액추

에이터로 활용되는 비례 솔레노이드밸브는 응답성이 낮으므로 충전구간과 토크영역에서의 변속제어가 불량하면 관성영역에서 성능향상이 어려우므로 관성영역 진입 시의 작동상태를 결정하는 개루프 제어입력 설정이 중요하다.

클러치 충전구간에서의 개루프 제어는 동일한 제어입력에도 기계적 시스템에 존재하는 불확실성에 의하여 안정된 성능이 보장되지 않는 단점이 있다. 클러치 작동시스템에 존재하는 불확실성으로는 클러치 피스톤 씼(seal)에 작용하는 마찰력, 유온에 따른 누유, 점성 및 마찰계수 변화, 클러치 디스크 노화에 따른 평균 여유틈새(end play) 변화 등과 같이 다양한 요인이 있다. 따라서 개루프 방식의 클러치 충전구간에서 안정된 변속성능을 견지하려면 각 클러치에 대한 특성변화를 파악한 후 충전구간제어에 적용되는 변속데이터를 보정하여야 한다.

상용화된 변속제어기에 적용되는 클러치 보정기법은 온라인과 오프라인방식으로 구분된다. 전자는 변속제어기에서 변속결과를 자체적으로 판정하여 스스로 클러치 충전제어에 적용되는 변속데이터를 수정하는 학습제어로서 주로 승용차용 자동변속기에 적용되고 후자는 운전자가 변속제어기에 설계된 클러치 자동보정기능을 수행시키면 변속제어기가 자동보정시험을 통해 자체적으로 파악한 클러치 특성으로부터 변속데이터를 갱신하는 방식으로 건설기계 및 산업용 차량에 적용되고 있다.

본 연구에서는 4톤 지게차 탑재를 목표로 개발되고 있는 독자모델 변속기를 대상으로 양산품의 변속 품질을 안정적으로 확보할 수 있는 클러치 자동보정 알고리즘을 개발하였다. 자동보정 알고리즘은 선진사 자동변속기 기능을 분석한 후 이를 참고하여 설계하였고 자체적으로 개발한 변속제어기에 임베디드 프로그램으로 구현하여 성능시험을 실시하여 양산 적용가능성을 검증하였다.

2. 클러치 작동특성

변속단이 유한한 유단변속기는 유압으로 작동되는 피스톤에 의해 발생하는 클러치 마찰력을 이용하여 변속기 내 회전요소를 구속하거나 결합하는 방식으로 동력전달경로를 변경한다.⁴⁾ 변속 시에는 해제 및 작동클러치에서 발생하는 마찰력이 부드러운 변속의 적도인 변속품질(shift quality)을 결정하므로 작동압력에 따른 클러치 피스톤의 동특성과 클러치 디스크에

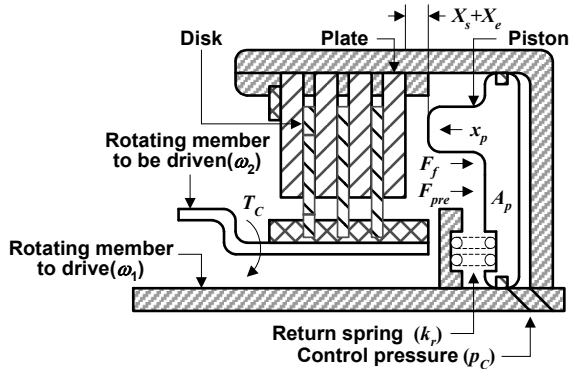


Fig. 1 Hydraulic clutch for automatic transmission

서 발생하는 마찰특성에 대한 이해를 바탕으로 변속 제어가 설계되어야 한다.

Fig. 1은 자동변속기에서 두 회전요소를 결합하는 유압작동 클러치의 내부구조를 나타낸다. 구동요소와 피동요소에 스플라인으로 삽입된 클러치 플레이트(plate)와 디스크(disk)에 유압피스톤이 수직력을 가하면 마찰력에 의하여 두 회전 요소가 결합되어 일체로 회전하는 방식이다. 클러치 결합과정을 살펴보면 유압이 공급되면 클러치 피스톤은 피스톤 행정 X_s 와 디스크와 플레이트의 여유틈새 X_e 에 해당되는 변위만큼 이동한 후 클러치 플레이트에 맞닿아 정지하고 이때부터 압력에 비례하는 마찰력이 발생하여 두 회전요소에 결합토크로 작용한다. 클러치 충전구간은 클러치 피스톤이 운동을 시작하여 클러치 플레이트에 닿기 직전까지의 이동구간으로 충전구간에서는 마찰토크가 발생되지 않는다. 클러치 해제는 클러치 피스톤으로부터 유량이 배출되면 리턴스프링 압축력에 의하여 클러치 피스톤이 클러치 플레이트와 분리된 후 초기 위치로 복귀하게 된다. 해제 시 클러치 피스톤이 회전하면 원심력으로 인하여 신속하게 압력이 저하되지 않으므로 원심유압을 해제하기 위하여 체크밸브 기능의 체크볼(check ball)을 사용하거나 평형피스톤(balanced piston) 방식의 설계가 적용된다.

변속 시 클러치 충전제어의 핵심은 변속응답시간 단축을 위해 신속하게 클러치 피스톤을 이동시키면서 클러치 피스톤이 플레이트에 맞는 순간에 제어압에 의하여 발생하는 초기 마찰토크를 최소화하는 것이다. 이상적인 경우에 토크영역 초기마찰토크는 영이며, 이와 같은 조건이 만족되기 위해서는 $x_p = X_s + X_e$ 일 때 클러치 피스톤 속도는 영이 되어야 한다.

변속이 시작되면 변속제어기는 비례 솔레노이드밸브 전류를 조절하여 작동 클러치 피스톤의 충전제어를

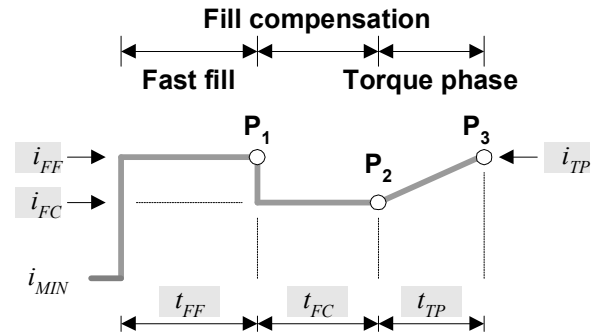


Fig. 2 PSV current reference at initial apply

수행한다. Fig. 2는 기구학적인 변속비 변화가 나타나지 않는 충전영역과 토크영역에 통상적으로 적용되는 비례 솔레노이드밸브 기준전류 궤적이다. 여기서 제어점(control point) P1은 급 충전구간, P2는 완 충전구간의 변속데이터이며 각 제어점의 시간(t_{FF}, t_{FC})과 전류(i_{FF}, i_{FC})가 충전제어 파라미터로 클러치 특성에 적절하게 보정되어야 한다. 변속제어 파라미터는 급 충전구간에서는 유량제어를 통해 클러치 피스톤의 이동속도를 조절하고 완 충전구간에서는 압력제어를 통해 초기 마찰토크를 조절하는 것으로 알려져 있으며 클러치 단품시험을 통해 확인한 바 있다.^{5), 6)} 충전제어 파라미터는 마찰토크가 발생되지 않는 구간에서 클러치 피스톤의 동적특성을 결정하므로 변속기 입력토크와 차속으로 주어지는 변속조건에 무관하게 각 클러치에 대하여 일정한 값이 적용된다.

3. 선진사 자동보정기법 분석

건설기계 및 농기계에 탑재되는 자동변속기의 상용화 개발을 오래 전에 완료한 선진사는 양산되는 변속기의 변속품질 편차를 개선하기 위해 오프라인 방식의 클러치 자동보정기법을 활용하고 있다. 클러치 자동보정에 대한 이론 및 설계기술이 확립되지 않는 상태에서는 선진사 변속기의 자동보정과정을 분석하면 독자적인 자동보정 알고리즘⁷⁾ 개발에 유용하게 활용할 수 있다. 본 연구에서는 선진사 휠로더 자동변속기에 설계된 자동보정기능을 실차시험으로 수집된 시험데이터를 통해 충전제어 파라미터 보정기법을 분석하였으나 보정알고리즘의 세부 내용은 파악하기 어려워 전체적인 자동보정 과정만을 참조하였다.

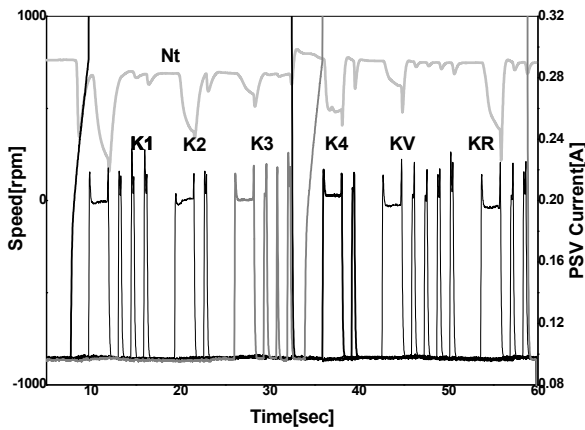
TCU 성능분석기⁸⁾는 휠로더에 장착된 선진사 변속기의 TCU 커넥터 신호를 실시간으로 모니터링함으로써 실차시험을 통해서 변속제어 알고리즘을 분석

하기 위해 개발된 장치이다. TCU 성능분석기를 통해 수집하는 데이터는 엔진, 터빈, 출력축 속도와 6개 비례 솔레노이드밸브 전류이며 자동보정 시 전류변화에 따른 터빈속도가 변화되는 특성으로부터 자동보정기법을 간접적으로 추정할 수 있다. 휠로더 변속기는 전진 4단, 후진 3단의 기어열을 가지며 각 변속단에서는 KV, KR, K3의 방향 클러치와 K1, K2, K3의 속도 클러치를 각각 1개씩 결합하는 방식이다.

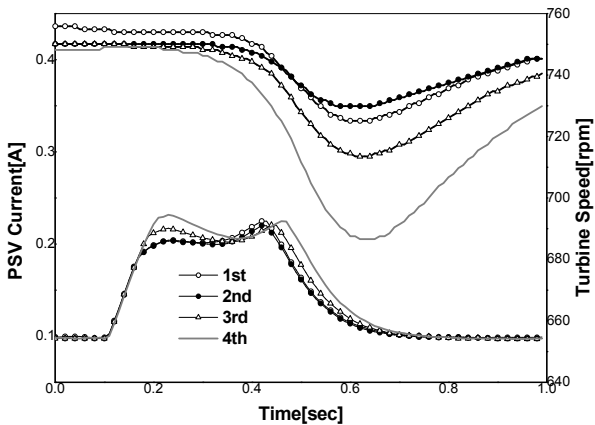
Fig. 3은 클러치 특성을 보정하기 위하여 수행되는 휠로더 변속기 자동보정과정을 TCU 성능분석기로 모니터링한 결과를 나타낸다. Fig. 3(a)는 대략 60초에 걸쳐 진행되는 자동보정 전 과정이다. 자동보정이 시작되면 K4 방향 클러치를 결합한 상태에서 K1, K2, K3의 속도 클러치를 자동보정하고 이후에는 K3 속도 클러치를 결합한 상태에서 K4, KV, KR 방향 클러치를 자동보정하게 된다. 자동보정 알고리즘은 각 클러치에 대해 인가되는 충전영역 전류를 변화시키면서 발생하는 클러치 마찰토크에 의해 저하되는 터빈속도 특성으로 파악하는 것으로 추정된다. Fig.

3(b)는 4회 반복되는 KV 클러치 작동에서 비례 솔레노이드밸브 전류와 터빈속도를 중첩시켜 나타낸 그림이다.

Fig. 2에서 언급된 기준전류궤적의 충전제어 파라미터를 변화시키면 터빈속도가 저하되는 특성이 달라지므로 이를 통해 요구하는 초기 마찰특성을 충족시키는 충전제어 파라미터를 보정하는 것으로 추정되지만 구체적인 보정 알고리즘에 대한 파악은 곤란하였다. Fig. 4는 휠로더 자동변속기 TCU를 대상으로 변속기 시뮬레이터^{9), 10)}를 이용해서 자동보정 전과 후의 F2→R2 전후진 셔틀변속 전류궤적을 비교한 결과이다. 변속이 개시될 때의 입력토크에 따라 관성영역에서 변화되는 전류 기울기가 다르게 나타나지만 자동보정 전과 후의 전류 기울기는 동일하므로 자동보정은 작동 클러치의 초기 충전영역 전류만을 변화시키는 것으로 파악되었다. Fig. 5는 자동보정이 완료된 TCU를 대상으로 F2→R2 전후진 셔틀변속과 N→R1 변속의 전류궤적을 비교한 결과이다. F2→R2와 N→R1은 변속특성이 상이하지만 작동 클러치는 KR로



(a) entire calibration process



(b) overlapped plot of KV calibration process

Fig. 3 Clutch auto calibration

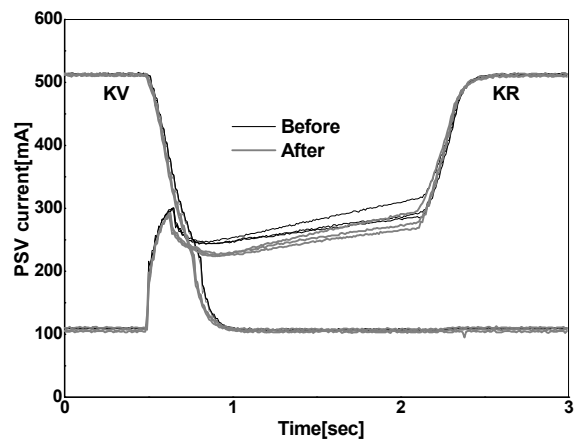


Fig. 4 Effect of auto calibration for F2→R2

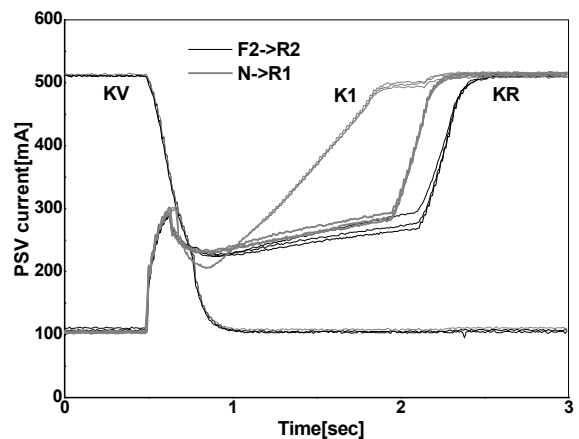


Fig. 5 Comparison of KR current trajectory

동일하므로 변속조건에 무관하게 충전제어 파라미터는 동일하게 제어됨을 확인할 수 있다.

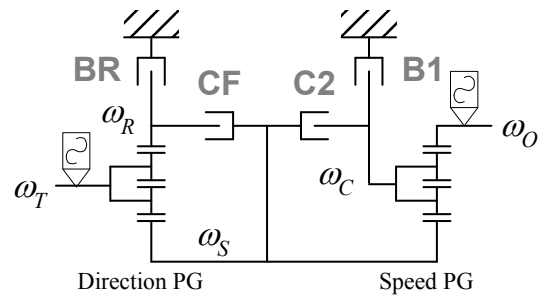
4. 변속기 구조

본 연구대상 자동변속기는 4톤 지게차에 탑재되는 전후진 2단의 전자제어방식 변속기로 국내 독자모델로 개발되고 있으며 토크 컨버터, 기어열, 유압제어 시스템과 변속제어기의 핵심요소로 구성된다.

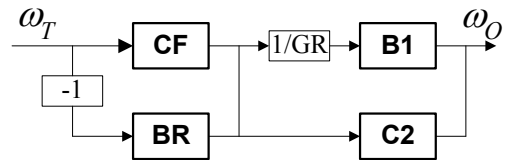
4.1 토크 컨버터 및 기어열

독자모델 변속기는 펌프와 터빈 속도 차에 따라 토크 증배기능을 갖는 토크 컨버터를 발진장치로 채택하고 있으며 펌프와 터빈을 직결시키는 록업(lockup) 기능은 설계되어 있지 않다. 속도비에 따른 토크비와 용량계수로 기술되는 토크 컨버터 정특성을 이용하면 변속기 입력토크를 연산할 수 있으며 변속제어기에서는 입력토크의 변속조건을 고려하여 변속제어를 수행한다.

Fig. 6은 복합유성기어로 설계된 기어열 구조를 나타내고 Table 1은 각 변속단에서 작동되는 마찰요소 조합이다. 통상적인 지게차 변속기는 상시 맞물려 회전하는 기어가 클러치 작동에 의해 회전축에 결합되어 동력을 전달하는 카운터 샤프트(counter shaft)방식으로 설계되지만 독자모델은 단순 유성치차 2개를 결합하여 동력을 전달하는 방식으로 설계하였다. Fig. 6(a) 기어열의 자유도를 살펴보면 회전요소는 $\omega_T, \omega_R, \omega_S, \omega_C, \omega_O$ 로 5개이며 유성치차 속도 관계식 2개와 각 변속단에서 작동되는 2개 마찰요소의 속도 관계식에 의해 1자유도를 가지므로 터빈과 출력축의 속도비가 유일하게 결정된다. Fig. 6(b)는 BR과 B1 브레이크를 클러치 기능으로 표현한 속도 관계식의 블록선도로 여기서 GR은 1단 변속비를 의미한다. 속도센서는 터빈과 출력축에 설치되어 있으며 엔진속도는 ECU에서 송신하는 CAN을 이용하도록 설계되어 있다. 변속기 마찰요소 중 CF와 BR은 positive type으로 클러치 피스톤 압력에 의해 마찰토크가 발생하는 일반적인 방식이지만 B1과 C2는 negative type으로 리턴 스프링 압축력으로 결합된 상태를 유지하다가 클러치 피스톤 압력이 증가하면 해제되는 방식이다. 이는 엔진동력이 공급되지 않는 상태에서 별도의 파킹 브레이크 없이 B1과 C2를 결합함으로써 파킹기능을 구현하기 위한 설계이다. Fig. 7은 전진과 후진 1단에 대한 속도선도를 나타낸다. 속



(a) stick diagram



(b) block diagram for velocity relation

Fig. 6 Gear train

Table 1 Clutch and brake engagement

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

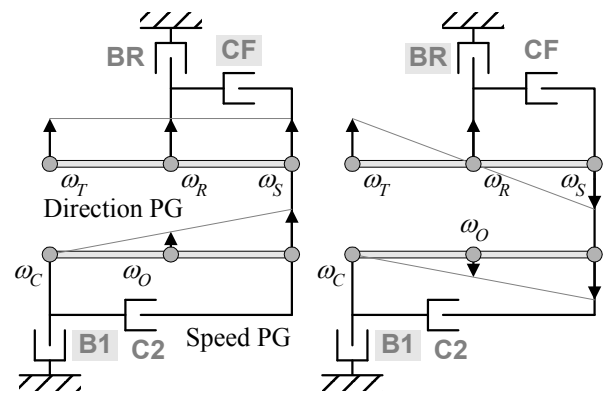


Fig. 7 Velocity diagram

도유성치차(speed PG)에서 B1과 C2를 결합하면 $\omega_C = \omega_S = 0$ 이므로 출력축이 고정됨을 알 수 있다.

4.2 유압제어시스템

클러치와 브레이크 마찰요소에 마찰토크를 발생시키는 클러치 피스톤은 유압으로 작동된다. 엔진 축과

직결되어 회전하는 유압펌프에서 유압시스템 작동에 필요한 유량을 토출하고 릴리프 밸브는 클러치 작동 기준압인 공급압력(p_s)을 일정하게 조절한다. 4개 마찰요소의 클러치 피스톤은 직접제어형 3방향 비례 솔레노이드밸브를 이용하여 구동전류에 비례하는 작동압력으로 제어되는 방식이다. Fig. 8은 변속기에 적용된 HydraForce사의 3방향 비례 솔레노이드밸브 (proportional solenoid valve, PSV)이고 Table 2는 작동 사양이다. 적용된 비례 솔레노이드밸브는 구동 전류에 비례하여 압력이 증가하는 상시 저압(normally low)형으로 최대 제어압은 30bar이지만 릴리프밸브 공급압력이 15bar로 설정되어 클러치 작동 최대압력은 15bar로 제한된다. Fig. 9는 변속제어기를 이용하여 10mA/sec의 기울기로 전류를 변화시키면서 측정된 클러치 제어압을 나타낸다. 약 0.15A에서 압력발생이 시작되고 0.56A에서 15bar로 포화되며 제어압력의 히스테리시스는 최대 4%임을 확인하였다. 이를 바탕으로 변속제어기는 클러치 해제 시 $i_{MIN}=0.1A$, 작동 시 $i_{MAX}=0.85A$ 의 전류를 제어하도록 설계하였다.



Fig. 8 3-way proportional solenoid valve(PSV)

Table 2 Specifications of HydraForce PSV

Item	Unit	Value
Pressure ranges	bar	0-30
Nominal flow@ $\Delta p=9bar$	lpm	23
Coil voltage	V	12
Control current	A	0-1
Coil resistance	Ω	7.2
PWM frequency	Hz	120

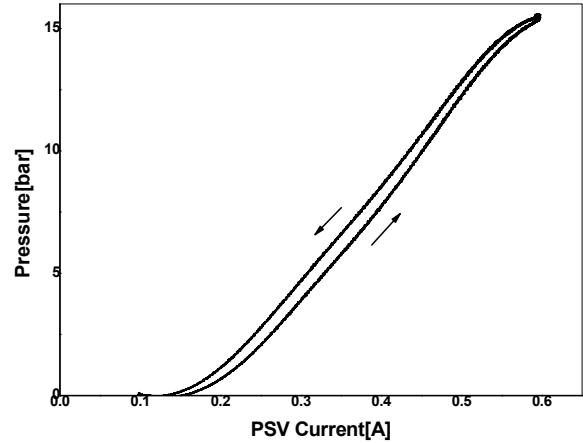


Fig. 9 PSV control pressure for 10mA/sec ramp

4.3 변속제어기

변속제어기는 마이크로컨트롤러 기반의 하드웨어와 임베디드 프로그램으로 구성된다. 하드웨어는 입출력 신호 인터페이스 기능이고 임베디드 프로그램은 운전자가 조작하는 변속레버, 변속기 작동모드와 관련된 스위치 설정신호와 지게차 주행상태를 고려하여 현재 변속단과 작동모드를 결정하고 변속 시 클러치 압력을 제어하는 변속제어기능을 담당한다. 운전자 조작은 변속제어기에서 모두 전기적인 신호로 인식되어 4개 클러치 결합상태를 제어하는 shift by wire 방식이다.

Fig. 10은 ARM7 Cortex-M3계열의 STM32F103ZC로 설계된 변속제어기를 보여준다. 변속제어기 임베디드 프로그램은 회전속도 및 유온측정, 비례 솔레노이드 밸브 전류제어, CAN 통신 등과 같은 기본적인 입출력 기능과 수동/자동모드 변속단 설정, 변속제어, 인칭제어, 파킹/홀딩의 부가기능, 클러치 및 인칭페달 자동보정, 진단 및 안전작동(diagnosis and failsafe)과

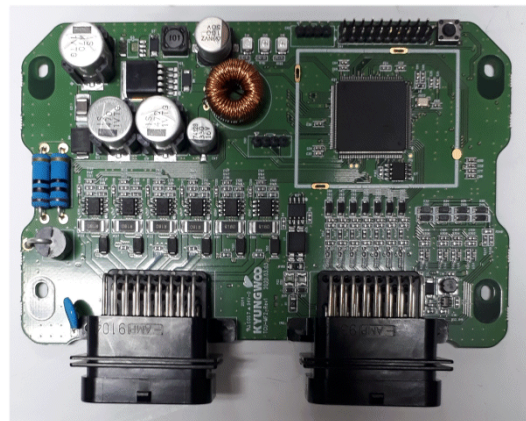


Fig. 10 Transmission control unit(TCU)

관련된 기능을 수행한다. 여기서 인칭제어는 인칭페달로 작동되는 클러치 슬립제어를 통해 구동력을 미소하게 조절하는 기능이고 홀딩은 악셀페달을 밟지 않은 상태에서 차량이 정지했을 때 자동으로 파킹이 작동되는 기능으로 운전자가 필요에 따라 활성화할 수 있다.

5. 자동보정 알고리즘

변속 시 작동 클러치에서 발생하는 마찰토크는 초기 조립상태와 작동시간에 따른 노화에 따라 변화되는 클러치 여유틈새 및 마찰계수에 따라 달라지며 일정한 수준의 변속품질을 유지하기 위해서는 작동 클러치에 적용되는 충전제어 파라미터에 대한 적절한 보정이 필요하다. 충전제어의 핵심은 클러치 마찰토크가 급격하게 발생되지 않도록 클러치 피스톤의 초기 운동을 설정하는 것이며 선진사 자동보정 알고리즘 분석결과를 바탕으로 클러치 마찰특성을 파악할 수 있는 방안을 제시하였다. 독자 자동보정 알고리즘에서는 Fig. 2의 4개 충전제어 파라미터 중 충전 시간(t_{FF}, t_{FC})은 변속 응답시간을 고려하여 일정한 값으로 고정시킨 후 급 충전 및 완 충전 제어전류 (i_{FF}, i_{FC})를 보정하여 요구되는 마찰특성을 충족시키는 방식으로 설계하였다.

5.1 램프(ramp) 클러치 시험

램프 클러치 시험이란 비례 솔레노이드밸브 전류를 서서히 증가시켜서 클러치 마찰토크가 발생하는 완 충전 제어전류 i_{FC} 를 보정하는 시험으로 Fig. 11은 시험과정을 나타낸다. CF, BR 방향 클러치 시험에서는 B1 속도 클러치가 결합된 상태에서 시험대상 클러치의 비례 솔레노이드밸브 전류를 서서히 증가시키면서 터빈 속도 감소량 ΔN_T 가 일정한 값에 도달하는 시점에서의 전류 i_{FCm} 를 측정 후 보정계수를 곱해 i_{FC} 를 결정한다. 터빈속도 감소량 ΔN_T 와 보정계수는 다양한 시험을 통해서 결정하였다. B1, C2 속도 클러치 시험에서는 CF 방향 클러치가 결합된 상태에서 시험한다. 램프 클러치 시험시간 단축을 위해 i_{MIN} 에서 클러치가 결합되지 않는 i_{LMT} 까지는 150mA/sec의 급한 기울기로 전류를 변화시키고 이후에는 10mA/sec의 매우 완만한 기울기로 변화시켜 클러치 피스톤이 플레이트에 닿아 마찰토크를 발생시키는 전류를 측정하게 된다.

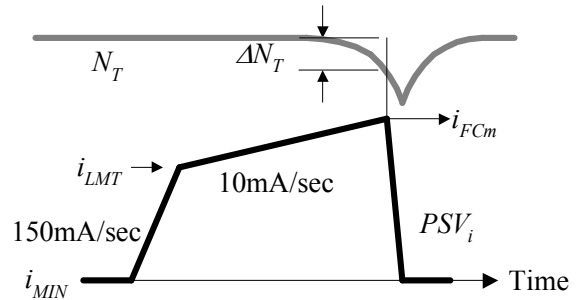


Fig. 11 Ramp clutch test

5.2 궤적(trajecory) 클러치 시험

궤적 클러치 시험이란 Fig. 2의 전류궤적을 비례 솔레노이드밸브에 인가하여 클러치 피스톤의 동적 작동특성을 파악하는 시험이다. 램프 클러치 시험을 통해 보정된 완 충전 제어전류 i_{FC} 가 적용된 기준 전류궤적을 이용해서 급 충전 제어전류 i_{FF} 를 반복적으로 보정하는 시험으로 Fig. 12는 궤적 클러치 시험에서의 전류궤적과 터빈속도 변화를 나타낸다. 궤적 클러치 시험에서도 방향 클러치 시험 시에는 B1 클러치를 결합하고 속도 클러치 시험에는 CF 클러치를 결합한다. 궤적 클러치 시험에서는 초기 기준 전류궤적을 $i_{FF} = i_{FC}$ 로 설정하고 비례 솔레노이드밸브 전류제어를 수행하는데 ΔN_T 의 터빈 속도 감소량이 발생하는 시간 t_{SOI} 가 목표로 설정된 범위 내에 들어오도록 i_{FF} 를 조절하면서 궤적 클러치 시험을 반복한다. 즉, t_{SOI} 가 목표범위보다 작으면 빠른 응답을 나타내므로 i_{FF} 를 감소시키고 반대의 경우에는 증가시키는 방식이다. 여기서 충전영역이후 전류기울기($\Delta i_{TP}/t_{TP}$)와 각 사이클에서 측정된 t_{SOI} 에 따른 i_{FF} 변화량은 시험을 통해서 적절한 값으로 설정하였다. 사이클 반복시험을 통해 터빈속도 감소가 지정된 시간범위 내에 발생하면 클러치 초기 충전제어 특성이 유사하다고 판단할 수 있다.

이상과 같이 설명된 램프와 궤적클러치 시험으로 구성되는 보정 알고리즘은 자동으로 수행되도록 변속제어기로 구현하였다. 자동보정이 시작되면 CF, BR, B1, C2 클러치에 대하여 순차적으로 램프 클러치 시험을 수행하여 완 충전 제어전류 i_{FC} 를 설정한 후 반복적인 궤적 클러치 시험을 통해 급 충전 제어전류 i_{FF} 를 보정하게 된다. 자동보정이 종료되면 각 클러치에 대해 보정된 i_{FC} 와 i_{FF} 는 변속 시에 적용되는 전류궤적에 반영되도록 변속데이터가 자동으로 갱신된다.

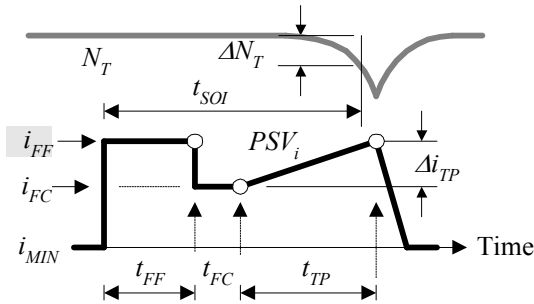


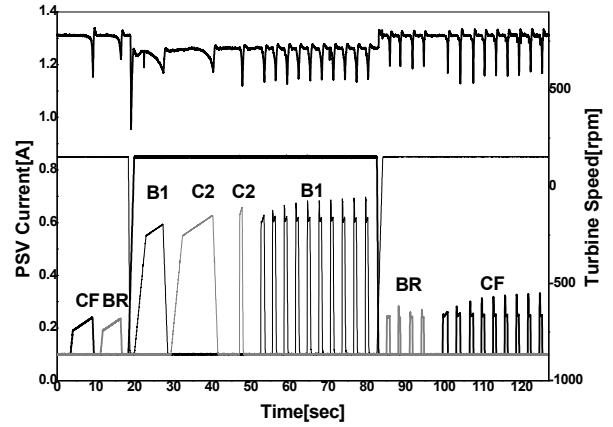
Fig. 12 Trajectory clutch test

6. 실차 성능시험

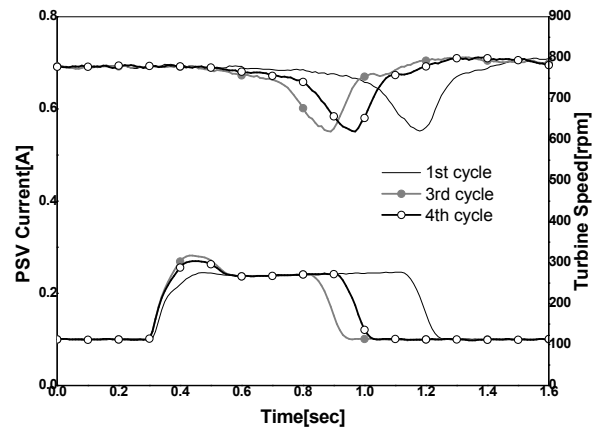
클러치 마찰토크로 인해 저하되는 터빈 속도 특성으로부터 클러치 마찰특성을 파악하는 자동보정기능을 검증하기 위해 실차시험을 실시하였다. 자동보정 실차시험에서는 클러치 작동으로 터빈 속도가 저하될 때 일시적으로 구동토크가 발생하므로 브레이크를 밟은 상태에서 자동보정시험을 해야 한다.

Fig. 13은 1호기 변속기 장착 차량에 대해 실시된 자동보정 시험결과로 자동보정 소요시간은 약 130초였다. Fig. 13(a)는 램프 클러치 시험과 궤적 클러치 시험이 순차적으로 진행되는 자동보정 전 과정을 나타내며 CF, BR 방향 클러치 시험 시에는 B1이 결합되고 B1, C2 속도 클러치 시험 시에는 CF가 결합됨을 알 수 있으며 CF 방향 클러치가 결합되면 터빈축에 작용하는 드래그 토크가 증가하여 아이들 상태에서의 터빈속도가 감소하게 된다. 여기서 B1, C2 속도 클러치는 negative type으로 비례 솔레노이드밸브 전류가 증가하면 해제되는 특성을 갖지만 간편한 분석을 위해 기준전류와 측정된 전류를 역전시켜 나타내었다. 즉, B1과 C2는 최소전류로 표시될 때 실제 제어되는 전류는 최대이다. Table 3은 1호기 변속기에 대한 자동보정 결과이다. C2 클러치는 첫 번째 사이클에서 터빈 속도 감소량 발생시간 t_{SOI} 가 목표범위 내에 있어 궤적 클러치 시험이 종료되었으나 다른 클러치는 4-10회 반복됨을 알 수 있다. 궤적 클러치 시험에서 설정된 t_{SOI} 의 목표범위는 0.6-0.65sec이다. Fig. 13(b)는 4회 반복된 BR의 궤적 클러치 시험으로 3번째 사이클에서는 t_{SOI} 가 목표범위보다 작게 발생하였으며 급 충전전류 i_{FF} 를 감소시킨 4번째 사이클에서 목표범위를 충족시켜 시험이 종료되었다. Fig. 13(c)는 10회 반복된 B1의 궤적 클러치 시험으로 사이클이 반복됨에 따라 급 충전전류 i_{FF} 가 증가하여 10번째 사이클에서 목표범위에 들어오는 시험결

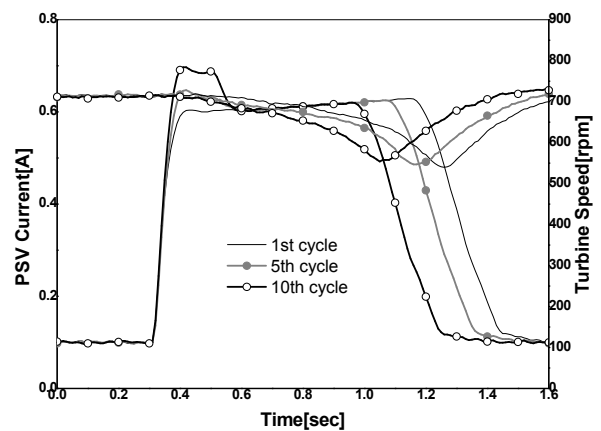
과를 나타낸다. 자동보정을 통해 정해진 ΔN_T 의 터빈 속도 감소량이 발생하는 시간이 일정하게 되도록 각 클러치의 충전제어 파라미터를 보정하였지만 마찰토크에 의해 터빈속도가 저하되는 기울기는 다르게 나타나므로 변속제어 시에는 적절한 관성영역에서



(a) entire calibration process



(b) overlapped plot of BR calibration process



(c) overlapped plot of B1 calibration process

Fig. 13 Auto calibration for #1 T/M

Table 3 Auto calibration results for #1 T/M

Calibration results	CF	BR	B1	C2
$i_{FF}[A]$	0.33	0.26	0.69	0.64
$i_{FC}[A]$	0.25	0.24	0.61	0.64
$t_{SOI}[sec]$ at 1st cycle	1.30	0.81	0.84	0.65
$t_{SOI}[sec]$ at last cycle	0.65	0.60	0.65	-
# of Traj. cycle	9	4	10	1

의 전류제어나 페루프 변속제어를 적용하여 변속 충격을 완화시켜야 한다.

Fig. 14는 2호기 변속기 차량의 BR에 대한 궤적 클러치 시험으로 20 사이클 반복 후에도 터빈 속도 감소량 발생시간 t_{SOI} 가 목표범위를 벗어나 기계적 결합에 의한 자동보정 오류로 판정된 시험을 나타낸다. 궤적 클러치 시험에서 t_{SOI} 는 급 충전전류 i_{FF} 에 의해 변화되는데 클러치 작동특성이 불량하면 i_{FF} 가 변화되어도 t_{SOI} 가 변화되지 않아 사이클이 반복되어도 목표범위에 수렴하지 않게 된다. 자동보정 궤적 클러치 시험의 최대 반복 사이클 수는 20으로 최대 반복 사이클에서 보정완료조건이 충족되지 않으면 클러치 오류로 판정한다. BR 클러치는 급 충전 전류를 변화시켜도 터빈속도의 응답변화도 나타나지 않지만 클러치가 결합될 때 감소되는 터빈속도의 기울기가 매우 급하므로 변속 시 큰 충격이 발생하게 된다.

Fig. 15는 3호기 변속기 장착 차량에 대한 자동보정 시험결과로 궤적 클러치 시험의 사이클 반복횟수가 1호기 보다 적어 약 100초 만에 자동보정이 완료되었다. Table 4의 보정결과를 살펴보면 충전전역 제어전류가 1호기와 다르지만 터빈 속도 감소량 발생시간 t_{SOI} 가 목표범위를 충족시키므로 자동보정을 통해 클러치 마찰특성을 적절하게 파악할 수 있음을 확인하였다.

7. 결론

유단 자동변속기는 변속 시 기어비 변화로 변속 전후의 터빈속도가 급격하게 변화되며 이에 따라 운전자가 느끼는 충격이 어느 정도 발생하게 된다. 이러한 변속충격을 완화시키기 위해 변속기 개발회사에서는 전자제어방식의 변속을 활용하여 변속품질 향상을 시켜왔다. 승용차용 자동변속기는 변속품질이

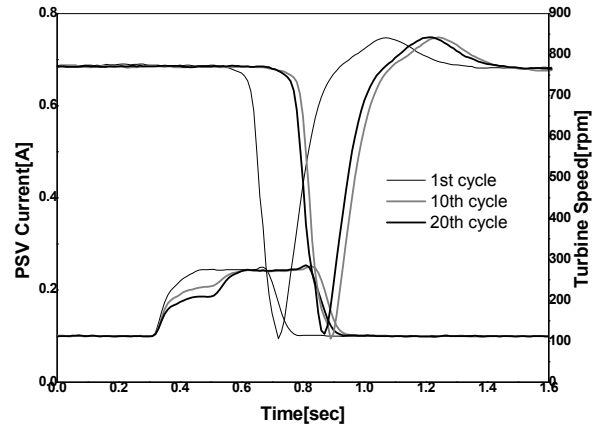


Fig. 14 BR calibration for #2 T/M

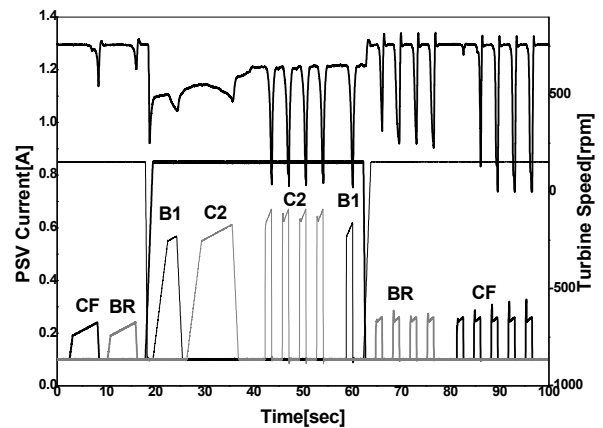


Fig. 15 Auto calibration for #3 T/M

Table 4 Auto calibration results for #3 T/M

Calibration results	CF	BR	B1	C2
$i_{FF}[A]$	0.32	0.27	0.58	0.65
$i_{FC}[A]$	0.24	0.24	0.58	0.63
$t_{SOI}[sec]$ at 1st cycle	1.07	0.89	0.65	0.73
$t_{SOI}[sec]$ at last cycle	0.65	0.60	-	0.64
# of Traj. cycle	5	4	1	4

매우 중요한 성능지표이므로 변속제어기에 구현되는 변속제어 알고리즘과 더불어 다양한 방식의 기계적 동력전달장치를 개발하여 기술적인 성숙기에 진입하였으나 건설기계 및 농기계에 적용되는 변속기는 아직 변속제어와 관련된 기술수준이 그다지 높지 않은 실정이다.

본 연구에서는 4톤 지게차에 탑재되는 독자개발 자동변속기를 대상으로 클러치 마찰특성을 보상할

수 있는 자동보정 알고리즘을 제안하고 변속기와 일체로 개발되고 있는 변속제어기에 구현하여 실차시험을 통해 성능을 검증하였다.

유압작동 클러치를 이용하는 변속기에서는 마찰토크로 인해 터빈속도가 변화되기 직전까지의 충전영역 제어가 변속제어의 핵심이며 구동토크를 측정하지 않는 통상적인 변속제어기는 불가피하게 미리 정해진 입력을 이용하는 개루프 방식을 적용한다. 선진사 변속기에는 충전영역 제어 파라미터를 자동으로 보정하는 기능이 내장되어 있으며 본 연구에서는 수집된 자동보정 시험데이터를 통해 선진사 자동보정 기법을 분석하였으며 이를 참조하여 자체적인 보정 기법을 제안하였다. 선진사 자동보정기법과 제안된 자동보정기법의 큰 차이점은 전자는 궤적 클러치 시험만을 반복하여 충전영역 제어 파라미터를 탐색하는 반면에 본 연구에서는 마찰토크가 발생이 시작되는 정특성을 램프 클러치 시험으로 확인한 후 정특성을 반영한 궤적 클러치 시험으로 동특성을 파악할 수 있도록 설계하였다.

설계된 자동보정은 개발 중인 다수의 지게차를 대상으로 실차시험을 통해 검증하였으며 클러치 조립 상태와 마찰특성이 다른 클러치에 대해서 동일한 터빈속도 변화 응답을 나타내는 충전구간 제어전류 설정이 가능함을 확인하였다. 특히, 궤적 클러치 시험을 통해서 최대 반복 사이클에서 보정되지 않는 클러치의 기계적인 작동불량을 검출할 수 있었다. 자동보정은 클러치 마찰특성을 보정하여 초기 작동특성을 일정한 수준으로 조절하는 기능으로 자동보정 자체만으로는 우수한 변속품질을 보장하지 않으므로 향후에는 자동보정을 바탕으로 다양한 변속조건에서 변속품질을 향상시킬 수 있는 변속제어기법에 대한 연구를 진행할 예정이다.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

1) Philip G. Gott, Changing Gears: The Development of the Automotive Transmission, Society of

Automotive Engineers, Pennsylvania, pp.333~338, 1991.

2) T. W. Megli, M. Haghgoie and D. S. Colvin, "Shift Characteristics of a 4-Speed Automatic Transmission", SAE Technical Paper 1999-01-1060, 1999.

3) 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.

4) G. H. Jung and D. H. Park, "Design of Clutch Piston Test Controller for Automatic Transmission", Proceedings of KSFC 2014 Spring Conference, pp.113-118, 2014.

5) G. H. Jung and D. H. Park, "Experimental Analysis of Clutch-Fill Parameters for Automatic Transmission", Journal of the Korean Society for Fluid Power & Construction Equipments, Vol.11, No.3, pp. 47-54, 2014.

6) G. H. Jung, D. H. Park and D. H. Na, "Experimental Analysis of an Automatic Transmission Clutch Disk Friction Characteristics", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.3, pp.14-20, 2018.

7) G. H. Jung, C. D. Jung and S. H. Park, "Calibration Method for Clutch Fill Phase Shift Data in Automatic Transmission", Proceedings of 2015 Spring Conference on Drive and Control, pp.133-139, 2015.

8) G. Jung et al., "A Development of TCU Analyzer for Wheel Loader Automatic Transmission", Proceedings of KSAE Fall Conference, Vol.III, pp.1405-1410, 2006.

9) G. H. Jung, S. H. Shin and S. I. Lee, "A Development of Automatic Transmission Simulator for Wheel Loader", Transactions of the Korea Fluid Power Systems Society, Vol.4, No.2, pp.7-20, 2007.

10) S. Y. Cheon, S. W. Choi and S. Y. Yang, "Development of Real-time Simulator for Vehicle Electric Brake System", Journal of Drive and Control, Vol.16, No.1, pp.22-28, 2019.