

# 전자식 비례 압력제어밸브 내 오일 오염 입자 제거 제어 알고리즘 검증 Verification of Control Algorithm for Removing Oil Contaminant Factor from Proportional Pressure Control Valve

천수환<sup>1,3</sup> · 박진감<sup>2</sup> · 장경제<sup>3</sup> · 심성보<sup>4</sup> · 장민호<sup>5</sup> · 이진웅<sup>2\*</sup>

Su Hwan Cheon<sup>1,3</sup>, Jin Kam Park<sup>2</sup>, Kyoung Je Jang<sup>3</sup>, Sung Bo Sim<sup>4</sup>, Min Ho Jang<sup>5</sup>  
and Jin Woong Lee<sup>2\*</sup>

Received: 18 Aug. 2021, Revised: 27 Sep. 2021, Accepted: 05 Oct. 2021

**Key Words** : Proportional Pressure Control Valve(비례 압력제어밸브), Pulse Width Modulation(펄스폭 변조), Oil Contaminant Factor(오일 오염 입자), Current Control(전류제어)

**Abstract**: An electro proportional pressure control valve is mainly used to control the clutch of an agricultural tractor's automatic transmission. During transmission, the operating, hydraulic oil is mix with many kinds of contaminants. The contaminants can be trapped between the valve body and spool of the proportional pressure control valve leading to abnormal operating conditions and finally critical damage to the transmission hydraulic system. The present study aimed to verify the valve control algorithm as a basic study of developing control logic that removes contaminants between the spool and the body of the proportional pressure control valve. To develop the algorithm, MATLAB/SIMULINK was used. PWM method was used to control the applied solenoid coil current. The effectiveness of the algorithm was verified by comparing the actual pressure of the normal valve with the actual pressure of the abnormal valve. Based on the present study findings, when the algorithm was applied, the response of the valve pressure according to the current became stable and oil contaminated particles were removed. In the future study, the control algorithm will be optimized for the stability of the proportional pressure reducing valve, and it will be verified in consideration with the driving of the clutch.

## 1. 서 론

$V$  : Coil voltage, V

$R$  : Coil resistance,  $\Omega$

$L$  : Inductance of coil

$N$  : Number of turns

$\mu$  : Permeability

$A$  : Cross sectional area of coil,  $m^2$

$l$  : Coil length, m

$\tau$  : Electrical time constant of RL circuit, s

\* Corresponding author: reallybear@kitech.re.kr

1 Tractor Smart Control Team, LSMtron, Anyang 54325, Korea

2\* Smart Agricultural Machinery R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gimje 54325, Korea

3 Department of Biosystems Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

4 Department in Bio-industrial Machinery Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

5 Department of Biosystems Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

Copyright © 2021, 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. 서 론

비례 압력제어밸브는 PWM 제어방법에 의해 솔레노이드에 인가된 전류에 비례하여 유체압력을 제어하는 밸브로서 농업용 트랙터 분야에서는 주로 Power-Shuttle, Power-Shift와 같은 자동변속기의 유압 클러치를 구동시키기 위해 사용된다. 자동변속기를 구동하게 되면 변속기 내부에 있는 오염입자들 (철,

오일 고착물 등)이 오일과 함께 섞이게 되며, 밸브로 흘러 들어가 스톱과 바다에 끼이게 된다. 이러한 현상을 Silt현상이라 한다. Fig. 1에 나타나는 것처럼 밸브 내 오염 입자가 쌓이게 되면 스톱의 움직임에 마찰력을 증가시켜 밸브 스톱 거동이 불안정해지고 압력제어성이 저하되어 트랙터의 유압클러치에 심각한 손상을 유발하게 된다. 비례제어 압력밸브의 스톱이 장시간 특정 위치에 유지하는 구간에서 오염 입자들은 밸브 내에 침전하게 될 가능성이 높으며 전자 유압 밸브가 오염되었을 때 정특성 시험에서 유량이 최대 90% 감소하게 된다.<sup>1)</sup> 이러한 기술적 문제를 해결하기 위해 비례 압력제어밸브에 플러싱 효과를 줄 수 있는 방안이 필요하게 되었으며, 이를 개발하기 위한 연구가 진행되었다.

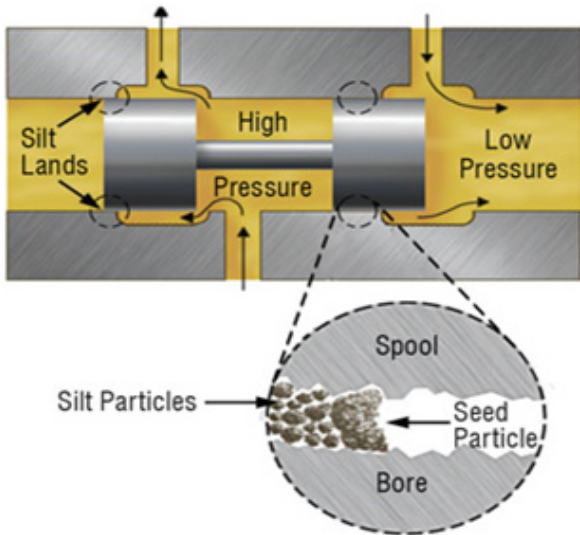


Fig. 1 Silt phenomenon

선행 연구 중 밸브 내 이물질 제거를 위한 방법으로 솔레노이드 밸브의 스톱이 정지한 상황인 차량 중립상태와 주차상태일 때 최대전류를 순간적으로 밸브의 솔레노이드 코일에 인가하여 스톱과 바다 사이에 끼인 이물질을 제거하는 방법을 고안해냈다.<sup>2)</sup> 하지만 이 방법은 차량 상태가 중립, 주차상태일 때만을 고려하여 장시간 주행할 경우에는 고려하지 못했다. 다른 방법으로는 PWM방법에 의해 솔레노이드 밸브에 인가되는 전류에서 추가적으로 100-400Hz 정도의 디더신호를 중첩하여 스톱을 고속으로 빠르게 진동하여 밸브와 몸체사이에 끼인 이물질을 제거하는 방안도 고안되었다.<sup>3)</sup> 또한 솔레노이드 밸브 내 오일 고착물, 금속물질을 제거하기 위한 솔레노이드 밸브 세척기가 개발되었고, 성능을 향상시킬 수 있는

방법을 제시하였다.<sup>4)</sup>

이처럼 다양한 방법으로 솔레노이드 밸브 내의 오염 입자를 제거하는 방법들에 대해 많은 연구가 진행되어져 왔고, 짧고 강한 스톱의 움직임을 이용하여 오일 오염 입자를 제거하는 것이 기술의 흐름이다. 하지만 농업기계에 적용할 수 있는 기술은 미흡한 상황이며 이에 대한 연구가 이루어져야 하는 실정이다.

본 논문에서는 오일 오염 입자가 비례 압력제어밸브의 바다와 스톱사이에 끼이는 현상을 해결하는 제어 알고리즘을 개발하고 알고리즘의 효용성을 검증을 하고자 한다. 구체적인 목표로 1) PWM 제어기법을 이용한 오일 오염 입자를 제거 알고리즘을 개발하였으며 2) 실제 오염원을 밸브에 주입하여 밸브의 상태를 비교 분석하고 알고리즘의 효용성을 검증하고자 한다.

## 2. 비례 압력제어밸브

비례 압력제어밸브는 솔레노이드 ON-OFF 밸브에 비해 클러치 압력의 정밀제어가 가능하고 엔진 토크, 차량의 가속도 등 다양한 피드백 정보를 이용한 강건한 제어 시스템을 구현이 가능한 장점이 있다.<sup>5)</sup> Fig. 2는 비례 압력제어밸브의 단면도를 나타내었다. 비례 압력제어밸브는 크게 솔레노이드 부와 밸브 부로 나누어져 있으며, 솔레노이드 코일, 플랜지, 스톱, 스프링, 각 오리피스들(P, T, A Port)로 이루어져 있다. 비례 압력제어밸브의 원리는 전류를 솔레노이드 코일에 가하면 밸브 내부에 강한 자기력이 발생하는데 이는 플랜지를 자기력과 같은 방향으로 변위하게 되고 이로 인해 스톱도 같이 변위하여 밸브의 유로가 개폐하게 된다. 스톱이 이동한 변위량에 따라 P포트가 열리게 되며 A포트로 입력전류에 비례하는 유압이 발생하게 된다.<sup>6)</sup> 실제 트랙터에서는 TCU(변속 제어기)로부터 클러치 Command Pressure 신호를 명령하면 밸브의 전류-압력 성능곡선에 의해 목표로 삼고 싶은 전류가 산출되고 PID제어기를 통해 PWM제어 기법을 이용하여 적절한 듀티 비를 도출하여 실제 밸브에 입력된다.<sup>7)</sup>

본 연구에서 알고리즘의 효용성을 검증하기 위해 사용된 밸브는 현재 농업용 트랙터에서 많이 사용되고 있는 비례 압력제어밸브이다. Table. 1에 밸브 사양을 나타내었다.

Table 1 Valve specification

Rate voltage ( $V$ )	12[V]
Max current ( $i$ )	1500[mA]
Max Pressure ( $p$ )	60 [bar]
Resistance ( $R$ )	$5.3 \pm 5\%[\Omega]$
Inductance ( $L$ )	40[mH]

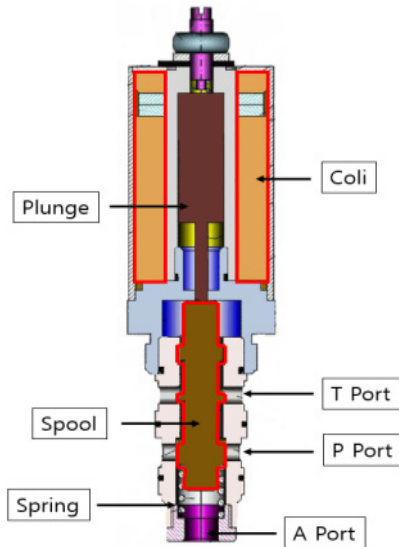


Fig. 2 Proportional pressure control valve structure

### 3. 오일 오염 입자 제거 제어 알고리즘 개발

3.1 PWM 제어로 발생하는 솔레노이드 코일전류 비례 압력제어밸브 바디와 스톱 사이에 있는 오일 오염 입자를 제거하기 위해선 빠르고 강한 스톱의 거동이 필요하다. 순간적인 스톱의 거동을 위해 솔레노이드 코일에 흐르는 전류를 정확하게 제어해야만 한다. 전류를 제어하기 위한 방법으로는 PWM 제어 방법이 있는데 이 방법은 구현이 쉽고 비례 압력제어밸브의 솔레노이드 코일에 흐르는 전류를 제어하는 데 용이하며 보편적으로 많이 활용된다. 본 논문에서도 오일 오염 입자를 제거하기 위한 알고리즘을 개발하기 위해 PWM 제어방법을 채택하였고, PWM 제어방법을 사용할 때는 솔레노이드 코일의 저항 및 전원 전압 등의 전기적 요인을 필수적으로 고려해야 한다.

일반적인 솔레노이드 코일의 구동회로 전압방정식은 다음과 같다.

$$V = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (1)$$

식 (1)에서  $V$ 는 전원 전압,  $L$ 은 솔레노이드 코일의 인덕턴스,  $R$ 은 솔레노이드 코일의 저항,  $i$ 는 솔레노이드 코일의 전류이다.

코일의 인덕턴스는 다음과 같다.

$$L = N^2 \frac{\mu A}{l} \quad (2)$$

식 (2)에서  $N$ 은 솔레노이드 코일의 권선 수,  $\mu$ 는 투자율,  $A$ 는 자기회로의 단면적,  $l$ 은 자기회로의 총 길이이다.

이때 솔레노이드 코일을 통해 흐르는 전류는 식 (3)과 같다.

$$i = \frac{V}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3)$$

식 (3)에서  $\tau$ 는  $L/R$ 로서 시정수 값을 나타낸다. 따라서 PWM Duty ratio 변화에 따라 전류도 같이 변화하는 것을 볼 수 있다.

### 3.2 오일 오염 입자 제거 제어 알고리즘 개요

본 연구에서는 밸브 내 오일 오염 입자를 제거하기 위한 알고리즘의 개발 전략으로 기존 트랙터 유압 클러치의 구동압력 파형을 구현하기 위해 사용되는 제어 로직에서 산출되는 Duty ratio와 사용자가 목표로 정할 수 있는 특정한 주기와 일정한 Duty ratio를 더한 후 밸브의 솔레노이드 코일에 흐르는 전류로 출력을 산출하여 스톱을 순간적으로 빠르게 움직일 수 있는 전략을 구상하였다. Fig. 3은 본 연구에서 고안된 비례 압력제어밸브 내 오일 오염 입자 제거 알고리즘에 적용할 PWM 제어전략 방법을 나타낸 것이며 일반적인 PWM 제어방법에 비해 순간적으로 Duty ratio를 추가하여 오일 오염 입자를 제거하는 알고리즘 전략의 개략도를 보여주고 있다. Fig. 4은 본 연구에서 구상한 개발 전략을 블록다이어그램으로 나타낸 그림이다. 밸브 내 오일 오염 입자 제거 제어 알고리즘의 동작조건을 판단하기 위해 차량의 엔진 속도, 주행상태를 기준을 삼아 판단하였다. 오일 오염 입자가 밸브에 끼이는 현상은 주로 밸브가 개폐를 하지 않을 경우인, 차량이 중립이거나 전진 또는 후진 중일 때만 기능이 동작하게끔 판단하였다. Fig. 5는 밸브 내 오일 오염 입자 제거 알고리즘에 대한 Flow chart를 나타내고 있다. 오일 오염 입자 제거 기능을 구현하기 위해 조건을 먼저 판단한다. 앞서 애

기 했던 것처럼 차량이 시동이 켜져있고, 출발상태가 전진, 후진 또는 중립상태일 때 기능 진입조건이므로 Engine RPM이 300RPM이상이며, CAN정보에 의해 출력되는 차량상태를 판단하여 기능 진입조건을 판단한다. 이후 조건이 만족되면 사용자가 Duty ratio와 Duty applied time을 설정하고 출력 Duty ratio을 산출하게 된다.

밸브 내 오일 오염 입자를 제거하기 위한 알고리즘을 기반으로 개발한 로직은 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 개발하였다. 트랙터 구조 상 전진, 후진을 제어하기 위한 밸브가 2개이기 때문에 전진 Duty

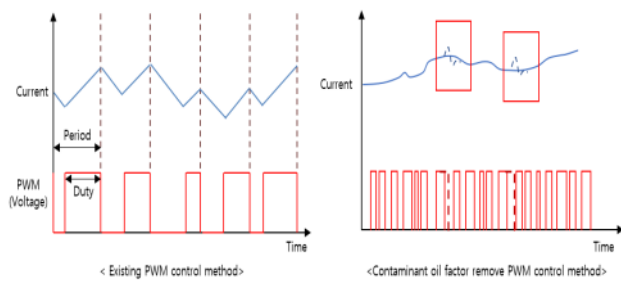


Fig. 3 PWM method schematic

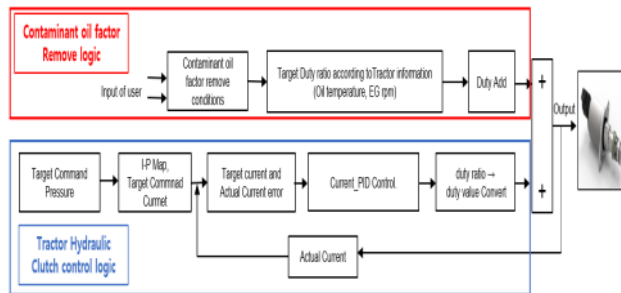


Fig. 4 Block diagram of oil contaminant remove control algorithm

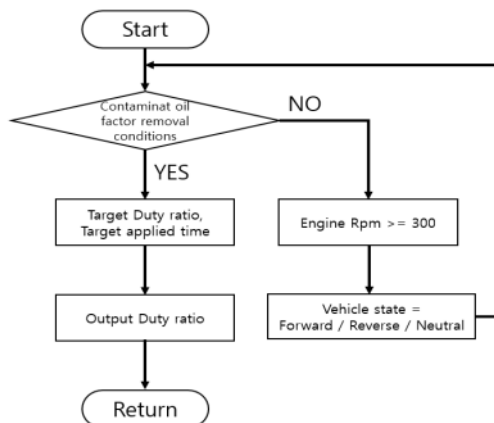


Fig. 5 Flow chart of oil contaminant remove control algorithm

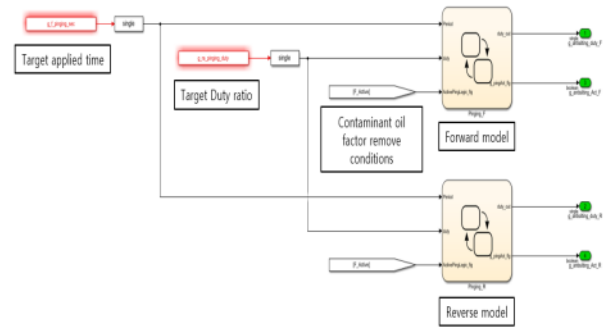


Fig. 6 Oil contaminant factor removal logic

Ratio 산출모델, 후진 Duty Ratio 산출모델로 구성했고, 기능 진입 조건과 목표 Duty ratio, 목표 인가시간을 입력변수로 삼아 실제 출력될 Duty Ratio와 기능 구현 Flag가 출력변수로 나오게 된다. Fig. 6는 Matlab/Simulink로 밸브 내 오일 오염 입자 제거 로직을 나타내었다.

#### 4. 검증시험

##### 4.1 시험장비 구성 및 오염원 선정

비례 압력제어밸브 내 오일 오염 입자를 제거하기 위한 알고리즘의 검증을 위하여 Fig. 7과 같이 유압 펌프, 오일탱크, 비례 전자식 유압/유량제어밸브, 컨트롤 패널, 오염원 주입구, 시험장비 보호를 위한 오일필터를 포함하여 시험장비를 구축하였다. 실험에 사용된 밸브의 반응성을 확인하기 위해 ECU에 개발된 오일 오염 제거 알고리즘을 적용하여 비례 압력 제어밸브의 솔레노이드 코일에 Command 입력전류 신호를 인가하였고 밸브의 출력을 계측하기 위한 장비는 Canalyzer 12.0을 이용하여 DAQ를 구성하였다. 실제의 트랙터 유압라인과 비슷하게 모사하기 위해 실험에 사용되는 밸브와 호환되는 변속기 모듈을 활용하였다. Fig. 8는 시험장비의 유압 회로도를 나타내었다. 시험장비의 유압 시스템의 압력과 유량을 설정하기 위한 비례 전자식 릴리프밸브와 유량제어 밸브를 장착하였고 체크밸브, 압력게이지와 같은 부가적인 부품들을 추가하였다. 유압 회로도를 바탕으로 시험장비는 Fig. 9와 같이 제작되었다.

유압펌프는 전기모터를 원동력 삼아 구동하며 최대 3000rpm까지 구동할 수 있으며 최대 15cc/rev의 용적과 1000rpm에서 3000rpm까지 구동했을 때 유량은 15lpm에서 45lpm까지 조절할 수 있다. 시험 장비 보호를 위해 오염원 주입구 앞에 장착된 오일필터는 최대 25µm까지 오염원을 여과할 수 있고, 시스템 내

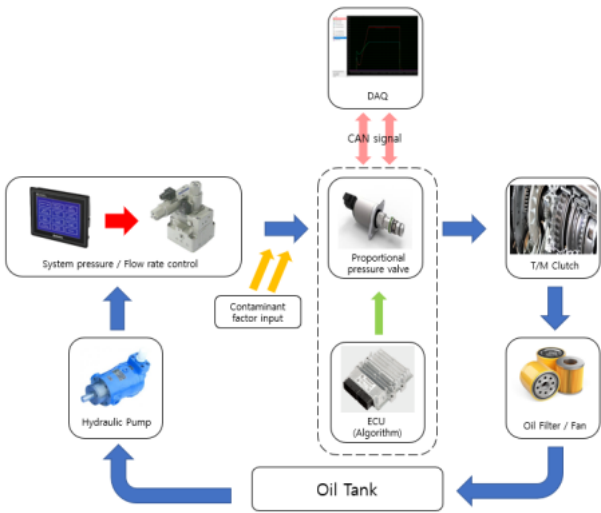


Fig. 7 System structure

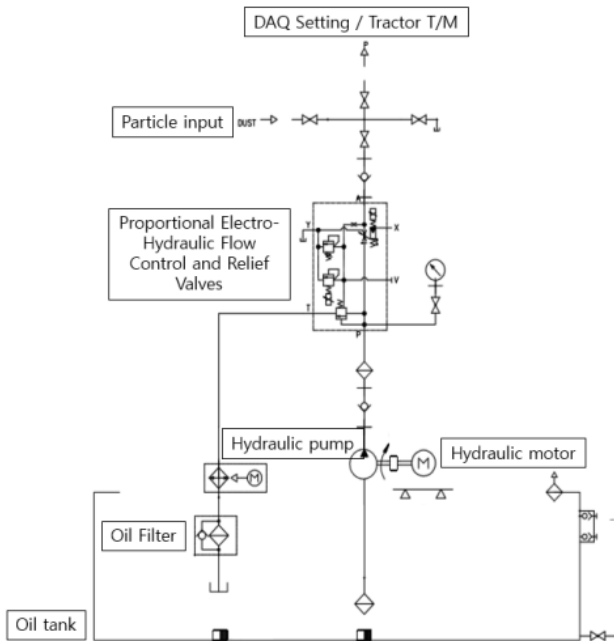


Fig. 8 Hydraulic circuit



Fig. 9 Test equipment

유량과 유압컨트롤 밸브는 최대 사용압력 250bar, 최대 유량 125lpm까지 조절할 수 있고 전자 컨트롤 패넬을 이용하여 제어하였다. 시험장비와 DAQ 시스템에 대한 Specification은 Table. 2와 Table. 3에 명시되어있다.

Table 2 Test Equipment Specification

Equipment	Specification	
Hydraulic motor	Rate voltage (V)	220/380
	Rate power (kW)	5.5
	Speed (rpm)	1775
Hydraulic pump	Type	Gear pump
	Flow (lpm)	15~45
	Capacity (cc/rev)	15.2
Oil tank	Volume (L)	100
Proportional Electro-Hydraulic Flow Control and Relief Valves	Max flow (lpm)	125
	Max Operating Pressure (MPa)	24.5
	Hysteresis (%)	3
Oil filter	Particle (μm)	25

Table 3 DAQ Specification

Channel (Number)	4
CAN Baud Rate (kBaud)	250
Sampling rate (Hz)	1000

오염원은 비례 압력제어밸브 바디와 스펴 사이에 끼일 수 있는 최악의 조건으로 고려하여 유압 유체의 보정과 검증방법에 대한 규격인 ISO11943에 근거하여 자동입자계수기(APC)로 측정된 최대 오염입자 크기보다 더 큰 입자의 크기를 가진 오염원으로 결정했다. 알고리즘 효율성 검증시험에 사용된 오염입자는 창성社의 MF-14으로 Table. 4는 오염 입자의 사양을 나타내고 있는 표이다.

Table 4 Oil contaminant factor Specification

Size	Powder		
	40um	45um	50um
Component ratio	12.8%	34.0%	53.2%
Component	Fe / Si / O		

#### 4.2 알고리즘 검증 시험 및 방법

본 연구에서 개발된 오일 오염 입자 제거 알고리즘의 검증을 위해 앞 절에서 설명한 시험장비를 이용하여 검증시험을 진행하였다. 실제 트랙터와 비슷한 환경을 모사하기 위해 트랙터 유압 시스템과 같은 20bar의 시스템압력과 8Lpm의 유량을 공급하였다. 오염원의 주입 양은 1.5cc를 주입하였다. 밸브 내 오일 오염 입자 제거 로직의 PWM Duty ratio는 15%로 설정하였다. 알고리즘의 효용성을 확인하기 위한 실험절차는 다음과 같다.

- 1) 오염원 주입 전 비례 압력제어밸브의 정상작동을 확인하기 위해 3시간 동안 전진 신호, 중립신호를 반복하여 인가한다.
- 2) 시험장비의 오염원 주입구에 인위적으로 오염원을 주입하여 비례 압력제어밸브의 바디와 스펴 사이에 이물질이 끼이는 현상을 유발하고, 정상적인 비례 압력제어밸브의 압력파형을 기준으로 오염된 비례 압력제어밸브의 압력파형을 비교하여 밸브의 오염 유무를 판단한다.
- 3) 밸브의 오염 유무를 판단 후 오일 오염 입자 제거 알고리즘 적용하여 오염원을 제거하는 효과가 있는지 확인한다.
- 4) 오일 오염 입자 제거 알고리즘을 다시 적용을 안한 상태에서 비례 압력제어밸브의 압력파형이 다시 정상적으로 나오는지 확인한다.

#### 4.3 실험결과

##### 1) 밸브의 정상작동 상태 확인 단계

Fig. 10은 총 3시간 동안 15분당 1번씩 중립신호에서 전진 신호로 인가하며 정상작동상태인 압력파형

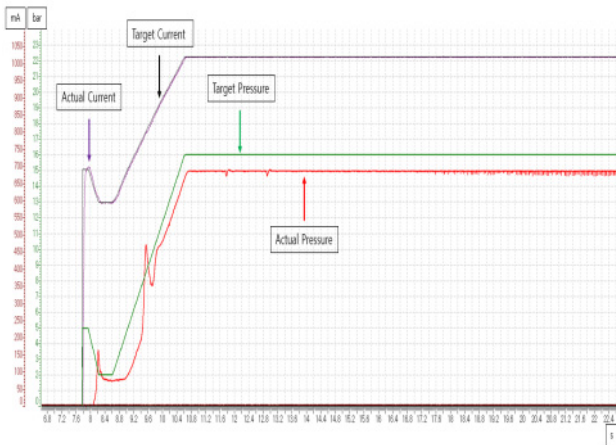


Fig. 10 Normal proportional pressure reducing valve condition

을 나타낸 그래프이다. 유압의 특성에 따라 정확한 Target과 Actual값의 오차는 존재하지만 Target Pressure에 따라 Actual Pressure가 나오고 있는 것을 볼 수 있다.

##### 2) 비례 압력제어밸브 오염유무 확인.

Fig. 11은 오염원을 주입한 후 밸브의 상태를 보여주고 있다. 압력파형의 초반부분 Actual Pressure가 Target Pressure에 도달하지 못하며 출력압력이 발생하지 않고 있으며, 이는 밸브 바디와 스펴 사이에 오염물질이 끼여 Stick 현상이 일어났다고 판단할 수 있다. 이후 추가적인 동작상태에서 압력은 오차가 없는 것처럼 보여지는데 다시 압력파형을 진행시켰을 때 압력이 떨어지지 않는 점을 보아 이는 앞쪽에서 순간적으로 압력이 상승 후 이물질에 의해 스펴이 제자리로 돌아가지 못해 발생한 현상으로 판단되었다.

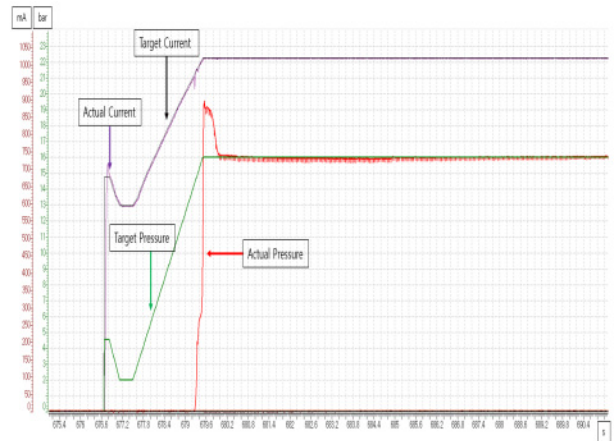


Fig. 11 Contaminated proportional pressure reducing valve condition

##### 3) 오일 오염 입자 제거 알고리즘 적용

Fig. 12은 밸브가 오염원에 오염된 후 오일 오염 입자 제거 알고리즘을 적용했을 때 압력파형을 보여주고 있다. 중립상태일 때 추가 Duty ratio가 인가되면서 오염된 밸브 상태에 비해 압력파형 초반부분 압력이 출력되는 것을 알 수 있고 이후 전진상태인 압력파형의 후반부에서도 추가 Duty ratio가 인가되며 밸브 스펴이 빠르게 개폐하여 플러싱 효과를 내 압력이 정상상태에 근접한 반응처럼 회복되었다.

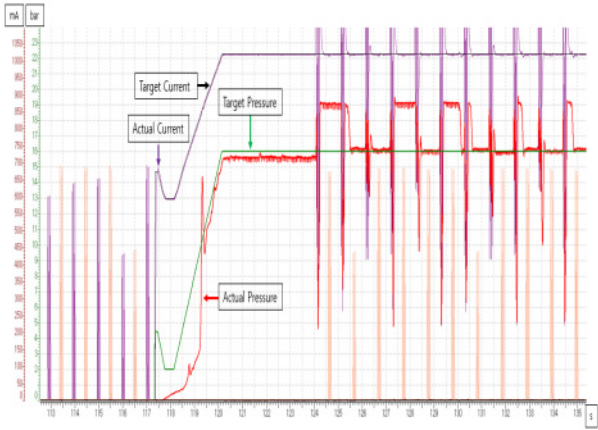


Fig. 12 Proportional pressure reducing valve condition with oil contaminant factor removal algorithm

4) 오일 오염 입자 제거 알고리즘 미적용

Fig. 13은 오일 오염 제거 알고리즘을 미 적용 했을 때 밸브의 압력파형을 나타낸 것이다. 정상적인 밸브의 압력파형과 비교했을 때 결과가 비슷하게 나온 것을 확인할 수 있고 밸브 스펴의 거동이 정상적으로 돌아왔다고 판단했다.

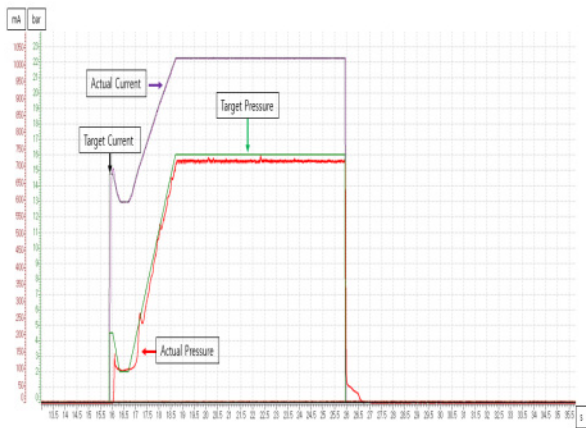


Fig. 13 Proportional pressure reducing valve condition without oil contaminant factor removal algorithm

5. 결론

본 논문에서는 비례 압력제어밸브의 바디와 스펴 사이에 끼인 이물질 제거 방법의 기초 연구로서 밸브 내 오일 오염 입자 제거 알고리즘을 개발하고 효용성을 확인하기 위해 실험을 통하여 알고리즘을 검증하였다. 비례 압력제어밸브를 인위적으로 오염 입

자를 주입하여 밸브의 거동을 비정상적으로 만든 후 제안된 제어전략을 통하여, 비례 압력제어밸브의 슬레노이드에 기존 출력되는 Duty ratio와 오일 오염 입자 제거 알고리즘에 의해 출력된 15%의 Duty ratio를 10ms만큼 추가적으로 인가하여 스펴을 빠르게 움직이게 하였고, 밸브의 출력압력을 비교하여 플러싱 효과를 확인할 수 있었다.

추후 본 논문에서 개발한 알고리즘을 바탕으로 오일의 온도, 클러치의 면압에 대한 Duty ratio의 경향을 고려하여 비례 압력제어밸브 내 오일 오염 입자 제거 알고리즘을 보완할 계획이다.

후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 “트랙터용 다채널 CAN 네트워크 통합 제어 및 진단 모듈 개발(1/1) (kitech JD-21-0009)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) R. Inoue, “Contaminant Effects on Electrohydraulic Control Valves” SAE transactions, 2252-2265, 1982.
- 2) S. W. Jang, G. C. Doh and H. H, "Solenoid Valve Foreign Material Removal Device and Method" Application KR Patent No. 1020090024491, Mar. 2009.
- 3) Y. Yamamoto and T. Kaneda, "Siltng Prevention Controller" US Patent No. 6,592,099, Jul. 2003.
- 4) H. Y. Yang, " Study on Performance Improvement for Solenoid Valve Cleaner for Automatic Transmission", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vo. 23, No. 5, pp.1-8, 2009.
- 5) D. V. Ahn, et al., "Development of Current Control Model of Proportional Control Valve for Agricultural Tractor with Power Shuttle Transmission", Journal of Agriculture & Life Science, Vol. 54, No.3, pp.121-128, 2020.

- 6) H. A. Khan and S.-N. Yun, "Modeling and Simulation of an EPPR Valve Coupled with a Spool Valve", Journal of Drive and Control, Vol.16, No.2, pp.30-35, 2019.
- 7) G. 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.