

SimulationX를 이용한 트랙터 PST 변속 충격 최소화 연구

Minimization of Shifting Shock of Tractor PST using SimulationX

엄태호¹ · 이철희^{2*}

Tae Ho Eom and Chul-Hee Lee

Received: 22 Dec. 2017, Revised: 09 Aug. 2018, Accepted: 17 Aug. 2018

Key Words : Agricultural Tractors(농업용 트랙터), Powershift Transmission(파워시프트 변속기), Shift Shock(변속 충격), Pressure Control Valve(압력제어밸브)

Abstract: Agricultural tractors require frequent shifting to improve operation efficiency, and PST (Powershift Transmission) is considered as a suitable transmission. However, due to the inherent characteristics of the PST, shocks arise during shifting, which imparts a negative effect on the operator. Therefore, in order to improve the transmission performance of the tractor PST, researches on various methods including the hydraulic system circuit, the engine input speed control, and the mechanical system of the transmission are steadily being conducted. In this study, in order to reduce the impact of PST on a shift based on SimulationX software, we analyzed the characteristics of the input signal of PCV (Pressure Control Valve) through sensitivity analysis and verified the simulation model through actual vehicle test. Optimization was performed for minimizing the shift shock for some of the parameters of the input signal at constant temperature and RPM conditions.

기호 설명

T_f : friction torque, Nm
 μ : friction coefficient
 d_o : clutch outer surface diameter, m
 d_i : clutch inner surface diameter, m
 F_p : press-on force, N
 f_i : approximately reduction of the effective friction torque coefficient
 n_s : number of friction surfaces

1. 서 론

농업용 트랙터는 다양한 농업 분야에 사용되는 차량이며 필요한 견인력에 따라 자동차보다 낮은 RPM 및 높은 토크 전달력이 필요하다. 또한, 트랙터는 빈번한 부하 변동으로 인해 잦은 변속이 요구된다. 따라서 작업 능률을 향상시키기 위해서는 큰 하중을 견인하면서도 정지하지 않고 신속하고 원활하게 차량 속도를 조정할 수 있어야 한다.¹⁾

과거 농업용 트랙터는 주로 수동 변속기를 사용했지만, 최근에 자동 변속기가 장착된 트랙터의 수요가 증가하고 있다.²⁾ 현재 파워 셔틀 변속기가 개발되어 적용되고 있으며, 대형 트랙터에서는 PST (Powershift Transmissions)가 지속해서 개발되고 있다.³⁾ 트랙터 변속기는 변속 상태에 따라 기계식 또는 유압식으로 구분된다. 유압식은 부하 변동이 심한 작업⁴⁾ 시에 능률이 높다는 장점이 있으며 기계식은 동력 전달 효율이 높다는 장점이 있다. 효율성과 작업성을 동시에 고려할 때, PST가 가장 유리하다.⁵⁻⁶⁾

PST의 특성상 변속 시 충격이 발생하며 지속적인 충격은 혈액 공급 및 인체 세포에 나쁜 영향을 미친

* Corresponding author: chulhee@inha.ac.kr

1 Department of Construction Machinery Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

2 Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

Copyright © 2018, 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.

다. 이로 인해 PST의 변속 충격을 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중에서도 PCV (Pressure Control Valve)의 구동 전류를 변경하고 엔진 제어를 통해 변속기 성능을 향상시키는 많은 연구가 진행 중이다.⁷⁻⁹⁾

이 연구의 목적은 SimulationX 소프트웨어를 이용하여 PCV의 입력 파형 변경을 통해 변속 충격을 최소화하는 PCV 구동 전류의 궤적을 효율적으로 찾는 것이다. PST 변속 시스템은 SimulationX를 이용하여 모델링하였으며 시뮬레이션 모델은 실제 차량 실험을 통해 검증하였다. PCV의 입력 파형을 다섯 개의 파라미터로 구분한 후에 민감도 분석을 통해 변속 충격에 가장 영향을 크게 미치는 파라미터를 선정하였다. 그리고 완전요인실험법을 통해 최적의 PCV 입력 파형을 선정하였다.

2. 시뮬레이션 모델링

PST 시뮬레이션 모델링은 Fig. 1과 같은 트랙터 (LS Mtron)를 참고하였다. 시뮬레이션 모델의 구성은 유압 피스톤 모델과 클러치 변속 모델로 구분된다.

트랙터는 변속 시 총 4개의 클러치를 사용한다. (C1, C2, C3, C4) 트랙터의 변속 단수는 16 단수이며, 이 연구에서는 트랙터에서 일반적으로 사용되는 단수인 3-4 단 변속만을 고려하였기 때문에 C1과 C2를 질량 관성으로 취급하고 C3와 C4만 분석하였다.



Fig. 1 LS Mtron Tractor

2.1 유압 피스톤 모델

유압 피스톤 모델은 유압유에 의해 작동하는 클러치 피스톤을 나타낸다. 이 모델에서는 PCV에 의해 제어되는 압력이 마찰판에 작용되는 힘을 계산해준다. 모델은 클러치 스프링, 쉘 마찰, 행정거리 및 피스톤 면적이 포함된다. 피스톤 면적은 유압에 의해 밀리는 클러치 피스톤의 단면적을 나타내며, 마찰판들은 유압유에 의해 함께 움직이기 때문에 마찰판들의 질량을 합하여 시뮬레이션 모델에 입력하였다. 행정거리는 클러치 피스톤의 최대 행정거리를 제한해주며, 클러치 스프링은 클러치 피스톤이 작동을 정지한 후에 초기 위치로 복귀시키는 역할을 한다. 쉘 마찰은 클러치 피스톤이 움직일 때의 마찰력을 나타내며, 마찰력은 윤활 조건, 압력 및 속도에 따라 달라지지만, 피스톤이 작용하는 힘에 비해 매우 작기 때문에 마찰계수를 0.4의 고정값으로 사용하였다.¹⁰⁾ C3 시뮬레이션 모델은 Fig. 2와 같고, C4 모델은 C3와 동일하다.¹¹⁾

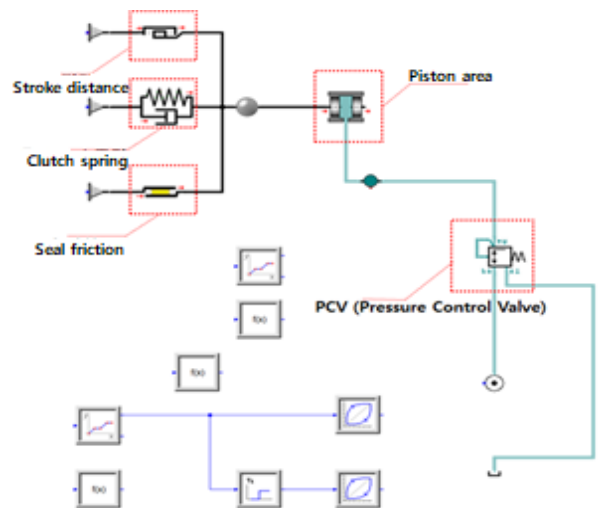


Fig. 2 Simulation model of the hydraulic piston

Fig. 3은 다관 클러치의 개략도를 나타내며 분리판, 마찰판, 쉘, 스프링, 피스톤으로 구성되어 있다. PCV에 의해 다관 클러치에 유압유가 공급되면 압력이 상승하여 클러치 피스톤에 힘이 가해진다. 유압유에 의한 힘이 스프링의 힘보다 커지면 클러치 피스톤이 마찰판과 분리판을 밀게 된다. 마찰판과 분리판이 유압에 의해 서로 접촉하게 되면 슬립이 발생하다가 결국 완전히 맞물리게 된다. 쉘은 클러치 피스톤이 움직일 때 마찰을 일으키고 유압유 누설을 방지한다.

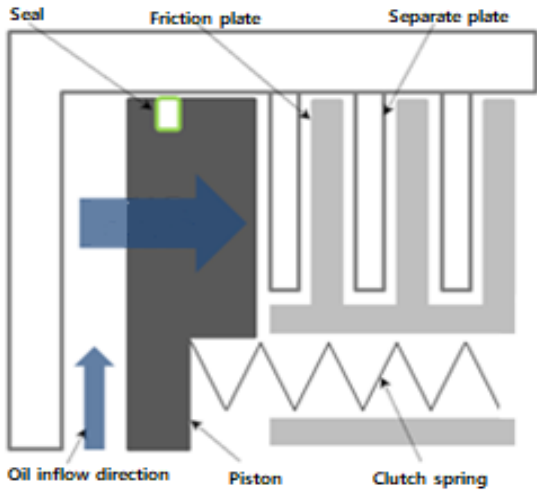


Fig. 3 Schematic of the multi-plate clutch

연구에 사용된 유압 펌프는 기어 펌프이며, 토출량은 23.4 lpm이고 릴리프 밸브에 의해 제어되는

라인압력은 약 18 bar이다.¹²⁾ 실제 기어펌프는 토출량의 변동이 크지만 본 연구에서 펌프 토출량의 유동성이 미치는 영향이 매우 적음에 따라 라인압력은 18 bar로 고정하였다. 결과적으로 PCV의 제어 압력 범위는 0 ~ 18 bar, 작동 전류는 0 ~ 1.2A, 히스테리시스는 ± 3 % 이내이다. 히스테리시스는 값이 이전 변경에 따라 원점으로 돌아가지 않지만 다른 값으로 떨어지는 것을 의미한다. PCV의 입력 신호는 전류값으로 조정하여 압력을 제어한다.

PCV를 통해 입력되는 파형은 Fig. 4와 같은 형상을 가지며, 기능에 따라 세 부분으로 구분된다. I 구간에서는 순간 압력이 증가하여 변속기로 유입되는 유압유의 유량이 증가한다. II 구간에서는 클러치의 마찰판을 유압유에 접촉시켜 갑작스러운 변속 충격을 방지하기 위해 압력이 I 구간보다 낮게 설정한다.

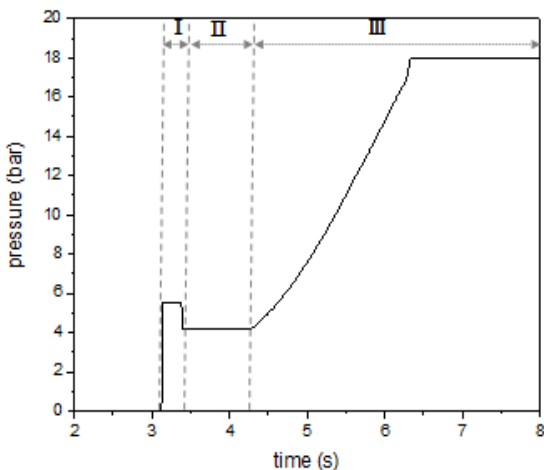


Fig. 4 Engage process of the clutch

III구간에서는 클러치가 완전히 동기화된 후에 최대 압력에 도달시키는 구간이다. 이런 PCV 파형의 파라미터를 조정함으로써 변속 충격과 변속 시간을 감소시킬 수 있다.¹³⁾

2.2 클러치 변속 모델

Fig. 5는 클러치 변속 모델을 나타내며 다관 클러치를 사용하는 변속시스템을 기반으로 모델링하였다. 클러치 변속 모델은 회전관성질량, C3 / C4 클러치 기어비, 타이어 및 마찰 등으로 구성된다. 유압 피스톤 모델에서 피스톤 클러치에 의해 가해지는 힘은 다관 클러치의 마찰판과 분리판을 접촉시켜 토크를 발생시킨다. 트랙터의 속도는 기어비에 의해 결정되고, 타이어 직경, 구동 선의 강성 및 감쇠, 타이어와 지면 사이의 마찰력은 계산하기가 어렵기 때문에 실험을 통해 확인이 필요하다. 또한 모델은 변속시 발생하는 충격 가속도와 변속하는 시간을 자동으로 계산할 수 있는 알고리즘을 포함하고 있다.

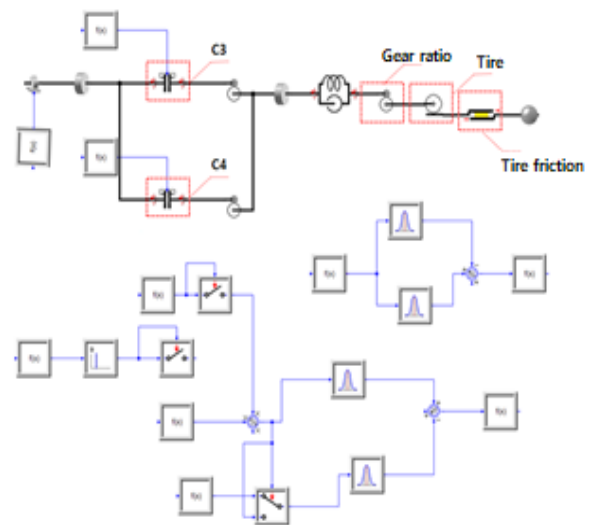


Fig. 5 Simulation model of shift clutch model

3-4단 변속만 고려하였기 때문에 C1 / C2 클러치는 관성질량으로 처리하였고 입력 샤프트에서 클러치판, 클러치 디스크에서 최종 드라이브까지 관성질량으로 나누어 입력하였다. 클러치의 마찰 계수는 온도에 따라 측정된 데이터를 사용하였다. 각각의 기어비는 합쳐서 입력하였고, 타이어의 직경, 타이어와 도로 사이의 마찰도 고려하였다. 측정하기 까다로운 동력전달계의 강성 및 댐핑계수는 실험데이터를 참고하여 시행착오 과정을 통해 결정하였다. 클러치 변속 모델에서, 유압 피스톤 모델에 작용하는 힘은 클

러치 피스톤의 외경, 내경, 마찰판 개수 등의 성분을 통해 다음 식에 의해 계산된다.¹⁴⁾

$$T_f = \mu \frac{d_o^2 - d_i^2}{d_o^2 + d_i^2} F_p \cdot f_i \frac{n_s}{3} \quad (1)$$

$$f_i = 1.01 - \frac{n_s}{100} \quad (2)$$

식 (1)은 마찰판의 수에 따라 변하는 마찰 토크를 계산하는 데 사용된다. 마찰 토크는 마찰판의 개수에 정비례하지 않고 식 (2)의 계수가 사용된다.

3. 실차 실험

실험은 시뮬레이션에서 참고한 것과 동일한 트랙터를 사용하여 실차실험을 진행하였다. Fig. 6은 변속 중에 발생하는 충격량을 측정하기 위해 운전석 하단에 부착한 가속도 센서를 나타낸 것이다. C3, C4의 PCV 입력 신호, 라인 압력 및 RPM은 트랙터 자체에 내장된 압력 센서, 기어 홀센서와 Canalyzer 소프트웨어(Vector)를 사용하여 측정한다. 실험은 흙의 구름 저항을 최소화하기 위해 콘크리트 바닥, 그리고 경사가 없는 평평한 지면에서 수행하였다. 변속 시에 발생하는 충격을 정확하게 측정하기 위해 시동 후 충분한 시간이 지난 후에 변속하고 가속도 값으로 충격량을 계산하였다. 실험은 케이스별로 각각 5번씩 수행하였으며 Chauvenet's criterion¹⁵⁾을 따라 결과를 도출하였다.

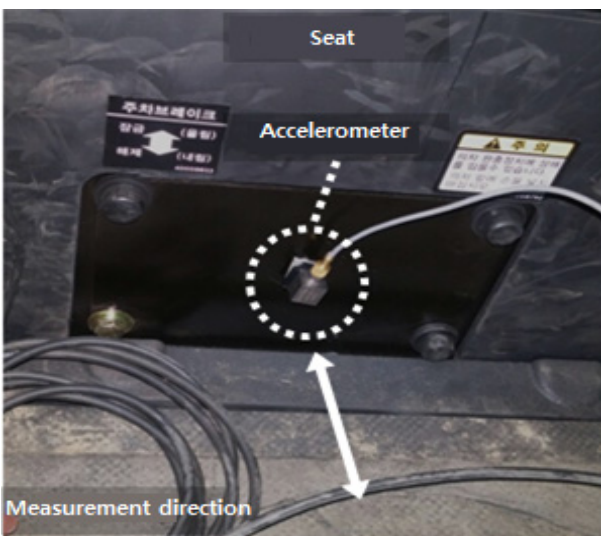


Fig. 6 Acceleration measurement position

Fig. 7은 가속도 센서를 사용하여 변속 충격을 측정한 후 30 Hz의 저역 통과 필터로 필터링한 결과와 변속충격량을 peak-to-peak로 정의한 결과를 나타낸다. 실험은 3단에서 출발하여 4단으로 변속한 후 정지하는 방식으로 진행하였다. 트랙터가 정지한 상태에서도 엔진이 작동하는 동안은 많은 진동이 발생하기 때문에 저역 통과 필터를 사용하였다. 저역 통과 필터의 주파수가 적어도 30Hz 이하일 때 출발, 변속 그리고 정지 상태를 명확하게 식별할 수 있었다.

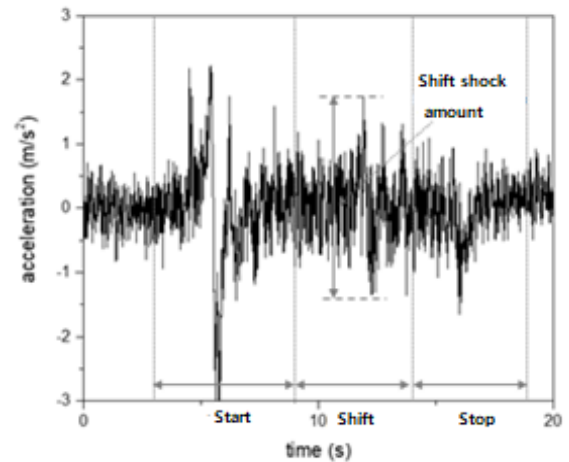


Fig. 7 Definition of shift shock amount and actual vehicle experimental results (Start → Shift → Stop)

유압유의 온도 및 RPM 조건은 30 °C, 60 °C, 90 °C 그리고 850 RPM, 1500 RPM, 2350 RPM이며 조합에 따라 총 9 가지의 케이스로 진행하였다. 트랙터가 일반적으로 사용되는 온도는 보통 30 °C부터 최대 90 °C이다. 또한 RPM은 Idle상태일 때가 850rpm이며 최대 RPM은 2350RPM이다. Fig. 8은 각각의 케이스

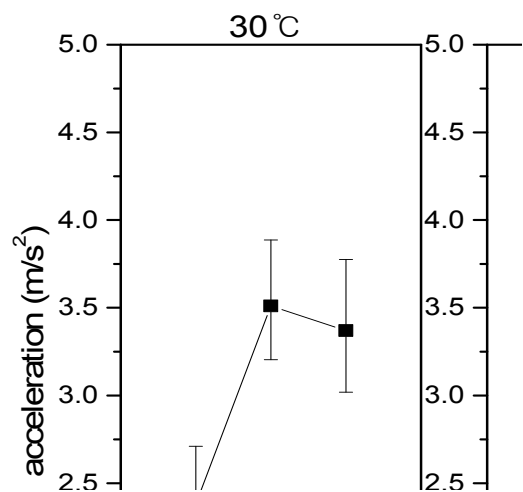


Fig. 8 Experimental results by temperature and RPM

에서 측정된 가속도 값과 5 회 수행된 실험 결과의 최댓값과 최솟값을 표시하였다. 변속 충격량은 RPM 이 높을수록 값이 증가하는 경향이 있었다. 실험 결과를 참고하여 온도 및 RPM에 대한 시뮬레이션 모델의 강성과 댐핑 등을 조절하였다.

4. PCV 입력 파형 최적화

변속 충격을 최소화하기 위해 PCV의 입력 신호를 5 개의 파라미터로 구분한 후 민감도 분석을 통해 변속 충격에 영향을 크게 미치는 파라미터를 선정하여 파형을 수정하였다. Fig. 9는 파라미터에 관한 그림이며 Time interval, pressure I, pressure II, time I, time II로 구분된다. Time interval은 변속 시 분리되는 클러치와 접촉되는 클러치의 시간 차이(s)를 의미하며, pressure 와 time은 해당 위치의 압력(bar)과 시간(s)을 의미한다. 파라미터들은 민감도 분석을 진행하는 데 사용되며, 민감도 분석은 이 5 가지 파라미터를 세 가지 수준으로 나누어 진행하였다. Table 1은 파라미터별로 구분된 수준을 나타낸다. 민감도 분석 및 최적화는 가장 많이 사용되는 온도 및 RPM인 60°C, 2350RPM 케이스만 진행하였다. 파라미터 민감도 분석 수준은 트랙터에서 기존에 사용된 파라미터를 기반으로 변경 가능한 최대, 최소 값을 기반으로 설정하였다.

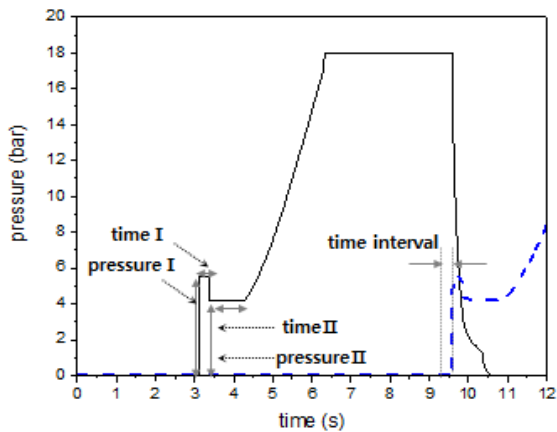


Fig. 9 Sensitivity analysis parameters

Table 1 The parameter change level

No.	Parameter	(-)	Original	(+)
A	time interval(s)	-1	0	1
B	pressure I (bar)	4.69	7.79	11.0
C	pressure II (bar)	0.29	2.59	5.44
D	time I (s)	0.1	0.125	0.15
E	time II (s)	0.1	0.155	0.2

변속 시 클러치의 슬립이 많이 일어나게 될 때도 충격량이 감소할 수 있다. 슬립이 심하게 발생하게 되면 클러치의 수명이 크게 줄어들게 되는데, 슬립 발생량이 증가하면 변속 시간 역시 같이 증가하게 되므로 변속 시간 조절을 통해 클러치의 수명감소를 방지할 수 있다. 일반적으로 변속 충격량과 변속 시간은 반비례 관계이기 때문에 두 가지 모두를 줄이는 것은 매우 어렵다. 클러치가 심하게 손상되지 않는 범위에서 변속 시간을 트랙터 회사에서 일반적으로 규정하는 데이터에 따라 1.2 초로 설정하였다. 이에 따라 민감도 분석 시에 변속 시간이 1.2 초를 초과하는 파라미터는 제외하였으며, Fig. 10은 출발 후 변속할 때의 변속 충격량과 변속시간을 의미한다.

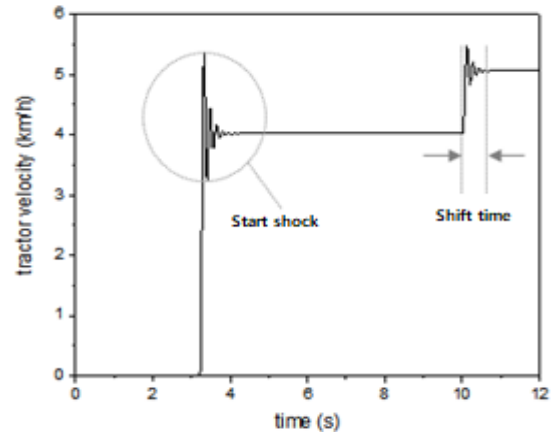


Fig. 10 Tractor velocity and definition for shift time

Fig. 11은 통계 분석에 사용되는 소프트웨어인 Minitab을 사용하여 민감도 분석을 진행한 결과로 가속도 값으로 나타냈다. 이 그림은 기존 값과 (+) 및 (-) 값 총 세 가지 수준을 비교한 것이다. 5개의 파라미터 중에서 변속 시간이 1.2초 이내를 만족하며, 높

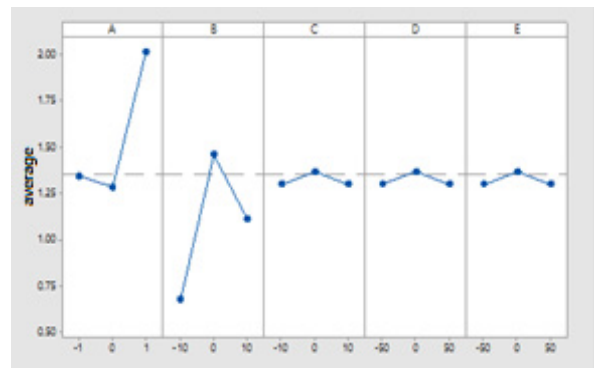


Fig. 11 The results of the sensitivity analysis; A. time interval, B. pressure I, C. pressure II D. time I, E. time II

은 반응성을 가지는 A, B 파라미터를 최종적으로 선택하였다. 나머지 C, D, E 파라미터는 반응성이 거의 없어 최적화 과정에서 제외하였다.

선택된 두 파라미터는 완전요인실험법을 사용하여 100가지 경우로 시뮬레이션을 진행하였다. A는 -1s ~ 1s 범위로 0.2s 간격으로 10가지, B는 0.631 bar 간격으로 4.69 ~ 11.0 bar 범위로 10가지로 총 100가지로 조합하였다. 파라미터의 범위와 간격은 시행착오 방법으로 최적값을 찾는데 적절하다고 판단되는 값으로 설정하였으며, 시뮬레이션 시간이 매우 짧기 때문에 필요 시 더 세세한 간격으로 시뮬레이션이 가능하다. 변속 시 발생하는 충격을 최소화하기 위한 PCV 입력 파형 파라미터 A, B 의 최적화 결과는 Table 2와 같으며, 값은 각각 -0.2s 및 7.01bar이다. Fig. 12는 시뮬레이션 상에서 감소된 충격 가속도의 결과를 나타낸다. 결과는 60 °C, 2350 RPM의 케이스만 표시하였다.

Table 2 The PCV input signal factor for minimizing the shift shock

	Interval (s)	pressure I (bar)
Original	0	7.79
Optimized	-0.2	7.01

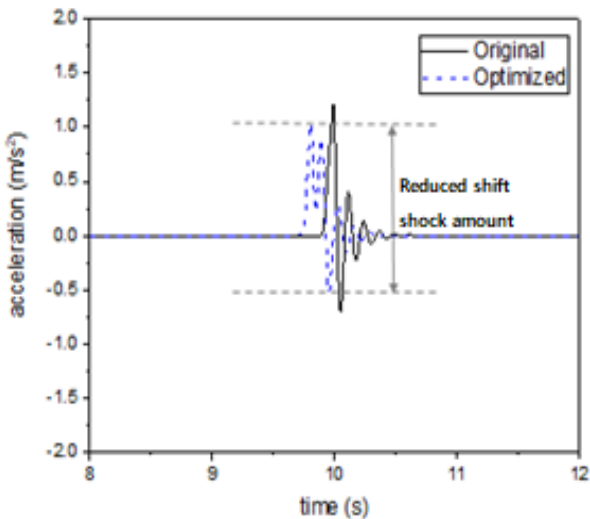


Fig. 12 The results of the optimized acceleration

시뮬레이션 상에서 최적화 시킨 PCV 입력 파형을 실차 실험을 통해 검증하였다. 실험 방법 및 조건은 최적화시키기 이전의 실험과 동일하게 온도는 30 °C, 60 °C, 90 °C, RPM은 850RPM, 1500RPM, 2350RPM

으로 조합하여 총 9가지 케이스로 진행하였고 30Hz의 저역통과필터(Low pass filter)를 사용하였다. 기존 실험과 비교한 PCV 입력 파형을 최적화시킨 실험의 결과는 Fig. 13과 같다.

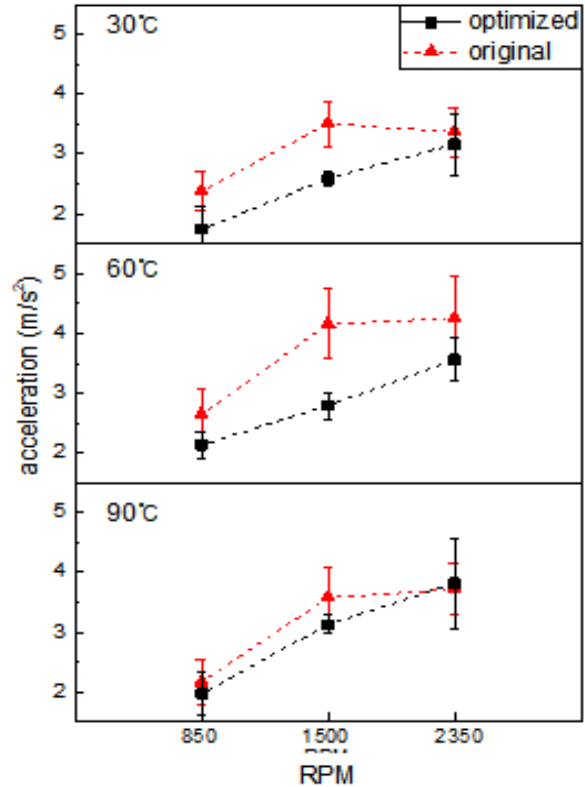


Fig. 13 The results of the experiment for minimizing the shift shock

5. 결론

이 연구의 목적은 트랙터 PST의 시뮬레이션 모델링을 통하여 변속 시 발생하는 충격을 최소화하는 것이다. 실제 실험을 진행하는 것에 비해 시뮬레이션 모델의 장점은 시간과 장소에 제약이 없다는 것이다. 실제 차량을 이용한 실험을 통해 시뮬레이션 모델의 동력전달계 강성, 댐핑 등의 값을 조절하였다. PCV 입력 파형을 5개의 파라미터로 세분화하여 민감도 분석을 진행하였고, 이를 통해 반응성이 큰 2개의 파라미터를 선정하였다. 2개의 파라미터는 완전요인실험법을 통해 최적의 입력 파형을 도출하였다. 시뮬레이션을 통해 결정된 최적의 PCV 입력 파형은 실차 실험을 통해 최종적으로 검증하였다. SimulationX 모델의 장점은 분석 시간이 짧아서 다양한 경우의 시뮬레이션을 짧은 시간 내에 완료할 수 있다는 것과

다양한 곳에 활용할 수 있다는 것이다. 이 연구에서 제작된 시뮬레이션 모델을 이용하여 PCV 입력 파형 뿐만 아니라 유압시스템, 클러치 등 다른 파라미터의 변경을 통해 변속 충격량을 더욱 최소화 할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

이 성과는 2017년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 건설기계 R&D 전문인력양성사업의 지원을 받아 수행되었으며, LS엠트론의 지원을 받아 연구가 수행되었음.

References

- 1) D. C. Kim, "Analysis of Power Shuttle Characteristics of Agricultural Tractor Transmission," ph. D. dissertation, Seoul Nat'l Univ., 2002.
- 2) Z. Zhong et al., "Shifting Control of an Automated Mechanical Transmission without using the Clutch. Int. J. Automotive Technology," Vol.13, No.3, pp487-496, 2012.
- 3) W. S. Hong, "Improvement of Shift Quality of Power Shuttle Transmission by Controlling Input Speed," Master dissertation, Seoul Nat'l Univ., 2016.
- 4) B. J. Cho et al., "Improved Design of Hydraulic Circuit of Front-end Loader for Bump Shock Reduction of an Agricultural Tractor", J. Drive and Control, Vol.13, No.2, pp.10-18, 2016
- 5) Y. S. Nam, "Simulation of Hydraulic Control of Powershift Transmission for Agricultural Tractors," Master dissertation, Seoul Nat'l Univ., 2002.
- 6) D. M. Kim et al., "Jerk Phenomenon of the Hydrostatic Transmission through the Experiment and Anlalysis," Int. J. Automotive Technology, Vol.16, No.5, pp.783-790, 2015.
- 7) Z. Zhong, Q. Lv and G. Kong, "Engine Speed Control for the Automatic Manual Transmission during Shift Process," Consumer Electronics, Communication and Network (CECNet), 2nd inte'l conf., pp.2014-1017, 2012.
- 8) M. Tanelli et al., "Transmission Control for Power-shift Agricultural Tractors: Design and End-of-line Automatic Tuning," Mechatronics, Vol.21, No.1, pp.285-297, 2011.
- 9) G. H. Jung, C. D. Jung and S. H. Park, "Feedback Shift Controller Design of Automatic Transmission for Tractors", J. Drive and Control, Vol.13, No.1, pp.1-9, 2016
- 10) S. C. Kim, "Development of Drag Torque and Heat Transfer Models for a Wet Multi-plate Clutch with a Consideration of Thermal Characteristics," Ph. D. dissertation, Seoul Nat'l Univ., 2016.
- 11) T. H. Eom, T. S. Kim and C. H. Lee, "Shift System and Characteristics Analysis of Agricultural Tractors PST Shift System using SimulationX," The Korean Society for Fluid Power & Construction Equipment 2017 Spring Conf. on Drive and Control, pp67-68, 2017.
- 12) Y. S. Yoon et al., "Analysis Model Development for Hydraulic Component and System Design," The Korean Society of Automotive Engineers, 2011 Fall Conf. Proc., 2011.
- 13) L. Chen, G. Xi and C. L. Yin, "Model Referenced Adaptive Control to Compensate Slip-stick Transition during Clutch Engagement," Int. J. Automotive Technology, Vol.12, No.6, pp.931-920, 2011.
- 14) SimulationX, ITI, Italy, Preset of the Friction Behavior equation
- 15) Harter, W. L. "The Method of Least Squares and Some Alternatives:Part I. International Statistical Review," Vol.42, No.2, pp.147-174, 1974.