

HST 중립밸브의 해석모델 개발 및 설계변수 민감도 분석

Analysis Model Development and Sensitivity Analysis on Design Parameters of the Neutral Valve for HST

김동명¹ · 장주섭^{2*} · 김수철³

D. M. Kim, J. S. Jang, and S. C. Kim

Received: 18 Jun. 2014, Revised: 01 Aug. 2014, Accepted: 29 Aug. 2014

Key Words : HST(정유압 변속기), Neutral valve(중립밸브), Design sensitivity analysis(설계 민감도 분석), Tractor(트랙터)

Abstract: The neutral valve for controlling the HST is one of the important valves for the vehicle control. Neutral valve takes a role of blocking or transmitting power to the vehicle. The operating principle of the neutral valve was developed through the analysis model. We also investigated the logical validity by analyzing the results of the analysis model. The analysis model was developed by using SimulationX witch is commercial software. The number of holes in the piston was selected as a variable initial compression of the spring, and the magnitude of the pressure pulsations and the diameter of the orifice for the sensitivity analysis were performed to design sensitivity analysis of the neutral valve.

1. 서 론

트랙터와 같은 농업용 기계 등에 주행용으로 사용되고 있는 HST(Hydrostatic Transmission)는 펌프와 모터가 폐회로 시스템으로 구성되어 있고, 유압펌프에 의해 발생된 에너지를 유압모터가 기계적인 에너지로 전환시켜주는 일련의 장치이다. HST의 에너지 발생원인 펌프는 전기모터나 엔진 등에 의해 구동되며, 펌프의 사판 각도에 의해 배제용적을 조절함으로써 입력과 출력 사이의 속도 비와 토크 비를 무단변속 할 수 있다. HST의 유형은 펌프와 모터를 가변식으로 사용하는 방식과 모터는 고정식이고 펌프만 가변식으로 사용하는 방식이 있다.^{1,2)}

HST는 동력밀도가 높고, 소형, 경량화가 가능하며, 고강성이고, 제어성이 탁월하여 건설차량, 하역운반 기계, 농기계 그리고 산업용 차량의 주행용으로 다양하게 사용되고 있다. 하지만, HST는 구조적인 특성상 펌프 맥동에 의해 차량에 진동과 소음이 발생한다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 많은 연구가 진행되었으나 펌프의 맥동 저감과 같은 분야에 주제가 국한되어 있고, 시스템 제어부인 밸브에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 또한, 제어 밸브에 관한 대부분의 연구는 면밀한 기능분석이 되지 않은 상태에서 반복적인 교환과 실험을 진행하는 시행착오 방식으로 문제점을 보완하고 있기 때문에 개발 시간과 비용에 많은 소비가 따르게 된다.^{3,4)}

* Corresponding author: jjs1@gachon.ac.kr

1 D. M. Kim : Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Gachon University, Gyeonggi 461-701, Korea

2 J. S. Jang : Department of Mechanical Engineering, Gachon University, Gyeonggi 461-701, Korea

3 S. C. Kim : LS Mtron, 124 Gongdan-ro Gunpo-si Gyeonggi 435-030 Korea

Copyright © 2014, 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.

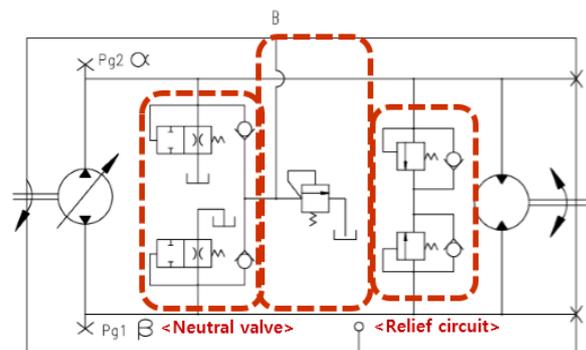


Fig. 1 Hydraulic circuit of the hydrostatic transmission

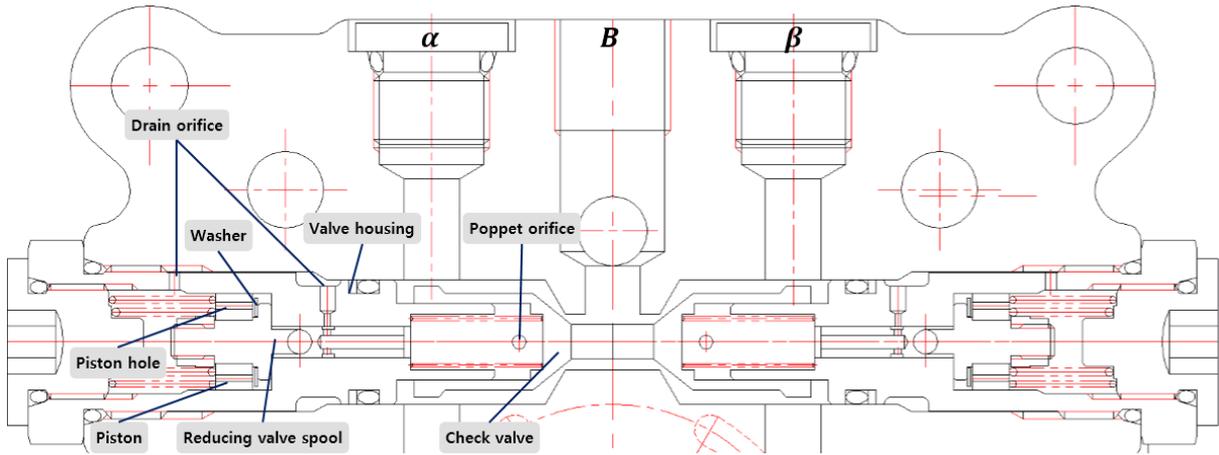


Fig. 2 Schematic diagram of the neutral valve

본 연구에서는 트랙터에 장착되어 있는 HST의 중립밸브의 기능과 작동원리를 파악하고 상용소프트웨어인 SimulationX를 사용하여 해석모델을 개발할 것이다. 또한, 설계변수에 대한 민감도를 분석을 수행하여 각각의 설계변수가 밸브의 중립 범위, 복귀성 그리고 응답성에 미치는 영향을 면밀히 검토하고자 한다.

2. Neutral valve의 구조와 작동원리

Fig. 2는 중립밸브의 구조를 나타낸 것으로 펌프와 모터를 연결해주는 α 그리고 β 라인, 보조공급을 위한 B포트로 구성되어 있다. B포트는 누설유량을 보충하기 위해 압력을 약 0.5~0.7 MPa로 공급하고 있기 때문에 초기 장착조건에서 α , β 라인의 압력도 0.5~0.7 MPa로 유지된다. 중립밸브의 구성부품으로는 포핏 타입의 체크밸브, 감압밸브, 와셔, 스프링 그리고 피스톤 등으로 구성되어있다.

중립상태에서 운전자가 트랙터를 주행하기 위해 페달을 밟는 경우 펌프의 사판 각도가 증가하여 α 라인의 압력이 상승하게 된다. 이에 따라 α 라인에 장착되어 있는 체크밸브가 오른쪽으로 움직여서 체크밸브와 B포트 사이의 개도 면적이 0이 되고, 오른쪽에 장착되어 있는 체크밸브는 양단의 포핏 머리가 접촉하고 있기 때문에 왼쪽 체크밸브에 종속되어 오른쪽으로 움직이게 된다. 체크밸브 포핏이 하우징에 접촉한 후 펌프에서 토출되는 유량은 포핏 오리피스를 통해 체크밸브 내부로 흐르고 감압밸브와 하우징 사이의 드레인 오리피스를 통해 탱크로 귀환된다. 이때 폐회로 내부에서 발생하는 유량손실은 β 라인으로 보충하게 되고, 저압라인에 일정 압력

을 공급함으로써 HST 내부에 진공현상이 발생하는 것을 방지한다. α 라인의 압력이 상승하여 감압밸브의 수압면적에 작용하는 힘이 스프링 저항 힘보다 커지면, 감압밸브의 스톱과 피스톤이 왼쪽으로 움직여서 스톱과 하우징 사이의 드레인 오리피스가 닫히게 된다. 드레인 오리피스가 닫힌 후 펌프에서 발생하는 압력에너지가 유압모터로 전달되어 트랙터가 구동하게 된다. 구동 중 트랙터의 움직임을 멈추기 위해 운전자가 페달을 떼게 되면, 압력에너지가 낮아지고 감압밸브의 수압면적에 작용하는 힘보다 스프링 힘이 더 커지는 부분에서 스톱과 피스톤이 중립 위치로 복귀하게 된다. 이때 중립밸브의 피스톤에 장착되어 있는 와셔가 피스톤 구멍을 차단하기 때문에 밸브의 복귀 특성은 피스톤과 하우징 사이의 간극에 큰 영향을 받는다.

3. 해석모델 개발

Fig. 3은 중립밸브의 해석모델을 나타내며 각각의 설계 변수는 가공 도면을 기준으로 모델링 한 것이다.

Fig. 4은 Fig. 3의 해석모델의 논리적인 타당성을 검토한 해석 결과로 (a)는 β 라인의 회로압력, (b)는 감압밸브 스톱의 변위, (c)는 감압밸브 스톱과 하우징 사이에 있는 드레인 오리피스의 개도 면적 그리고 (d)는 보조 공급 포트와 체크밸브 사이의 개도면적을 나타낸다.

해석결과, 압력을 기준으로 입력한 신호에 의해 오른쪽에 장착되어 있는 체크밸브는 왼쪽(-) 방향으로 움직여서 보조 공급라인이 닫히게 되고, 이와 반대로 왼쪽에 장착되어 있는 체크밸브의 개도면적은

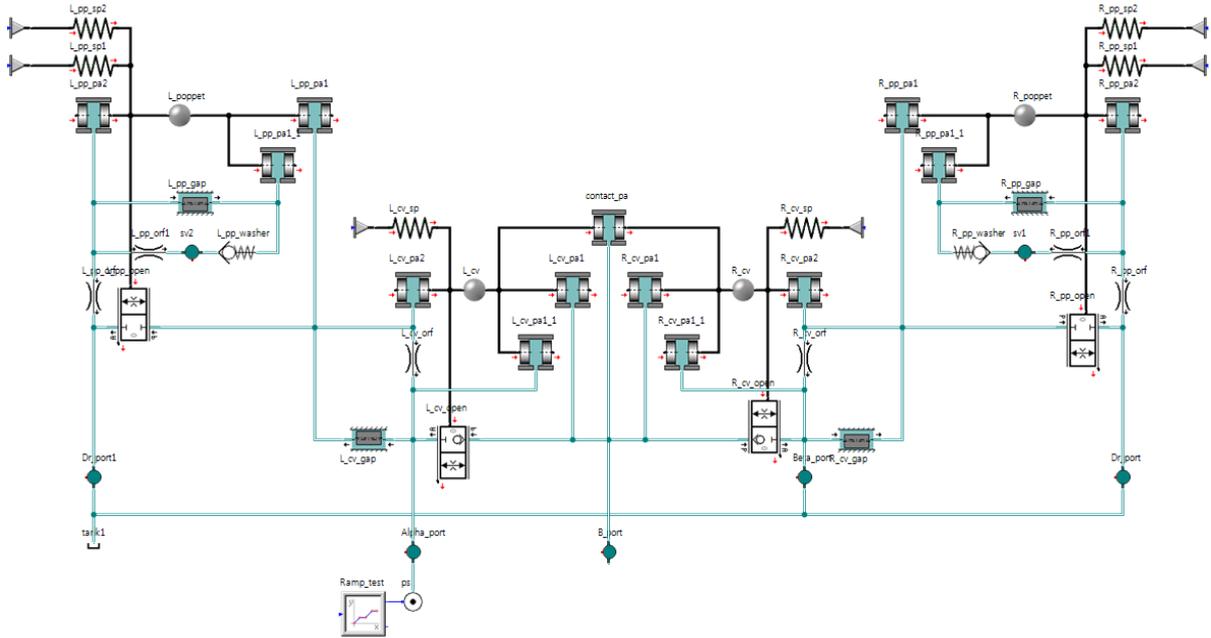
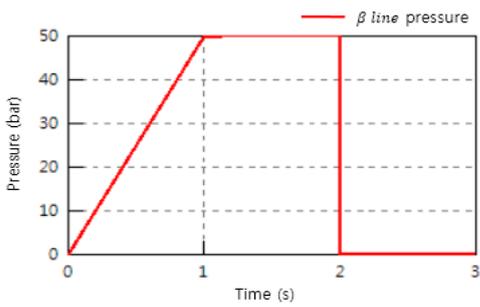
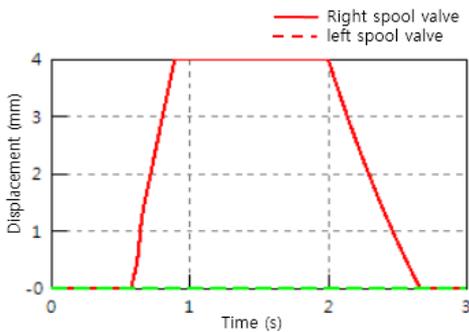


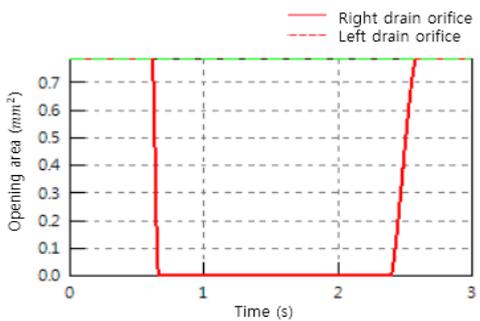
Fig. 3 Simulation model



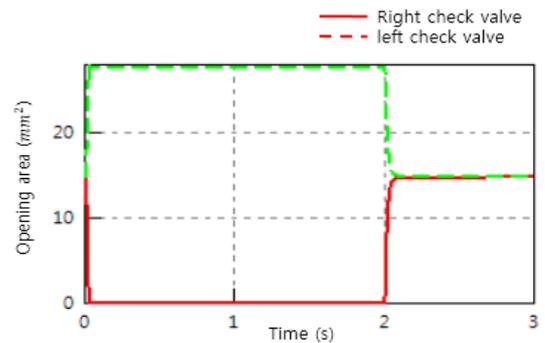
(a) Pressure input signal



(b) Displacement of the spool



(c) Opening area of the drain orifice



(d) Opening area of the check valve

Fig. 4 Simulation results of the neutral valve

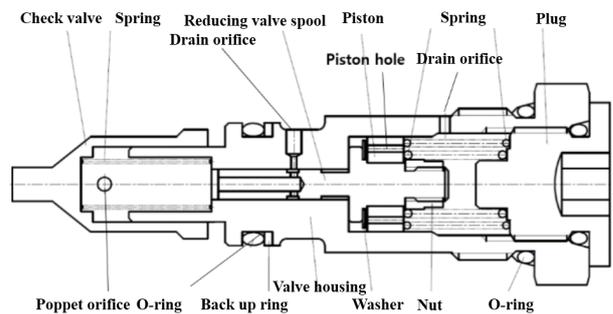


Fig. 5 Structure diagram of the neutral valve

최대가 된다. 회로 압력이 상승하여 감압밸브 수압 면적에 작용하는 힘이 스프링 저항 힘보다 높아지게 되면 스톱이 최대 변위까지 움직이게 되고 하우징과 스톱 밸브 사이의 드레인 오리피스가 닫히게 된다.

4. 중립밸브의 설계변수 및 민감도 분석

4.1 설계민감도 분석의 목적

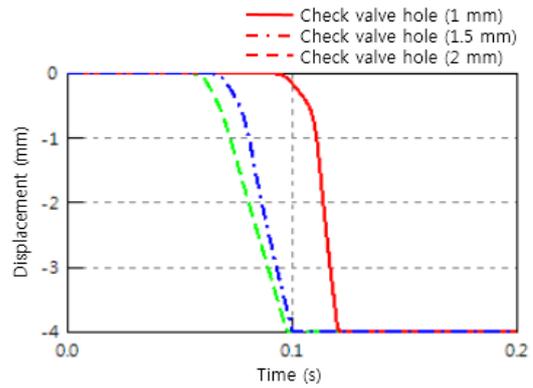
중립밸브는 트랙터에 동력을 공급하거나 차단하는 기능을 수행하는 밸브이며, 밸브의 응답성과 복귀성 그리고 중립범위를 적절하게 설계해야 작업 시 문제가 발생하지 않는다. 만일, 응답성이 둔화될 경우, 트랙터가 페달각도에 반응시간이 지연되는 현상이 발생하며, 복귀성이 빨라지면 HST 내부의 압력 맥동에 감압밸브가 민감하게 반응하여 압력에너지가 급격하게 떨어지게 되며, 이러한 현상에 의해 트랙터에 변속충격이 발생할 수 있다. 또한, 중립범위가 적절하게 설계되지 않으면 트랙터의 페달각도에 민감하게 반응하여 작업 시 트랙터 제어에 어려움이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 사전에 예측하고 밸브를 설계하기 위해 설계변수 민감도 분석을 수행하여 각각의 설계변수가 트랙터의 성능에 어떻게 영향을 미치는지 확인해보고자 한다.

4.2 중립밸브의 설계변수

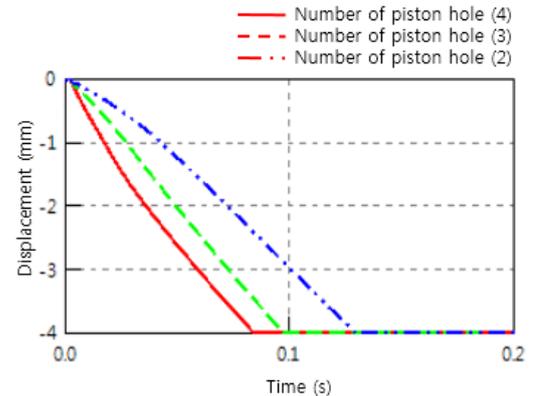
Fig. 5에 중립밸브의 구조와 설계변수를 나타내었다. 체크밸브의 오리피스스는 HST 내부의 압력에너지가 감압밸브에 전달되는 압력의 크기를 결정하고, 스프링밸브와 밸브바디 사이의 오리피스스는 중립범위에 영향을 미치게 된다. 또한, 주행모드 전환 시 트랙터의 응답성은 피스톤에 뚫려있는 4개의 구멍과 드레인 오리피스스의 직경 크기에 영향을 받게 된다. 주행 중 밸브가 복귀할 경우 피스톤에 뚫려있는 구멍은 와셔의 체크밸브 기능에 의해 막히게 되고, 피스톤과 하우징 사이의 간극으로만 유동이 허용되기 때문에 복귀성에 큰 영향을 준다.

4.3 중립밸브의 민감도분석

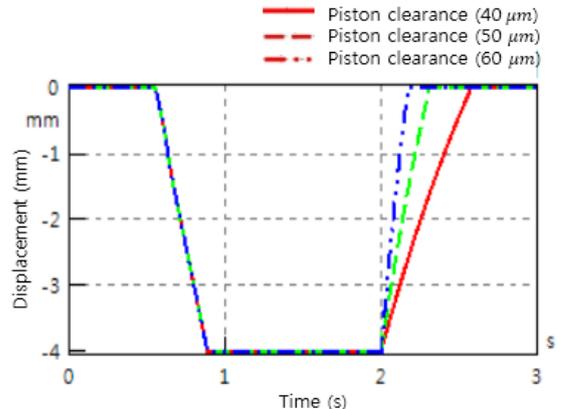
Fig. 6은 설계 변수 변화에 따른 해석결과로 각각의 설계변수 변화에 따른 감압밸브 스프링의 변위를 나타내며, Fig 2에서 왼쪽을 -방향으로 설정하였다. (a)는 체크밸브 오리피스스 변화, (b)는 피스톤의 홀수 변화, (c)는 피스톤과 하우징 사이의 간극 변화 그리고 (d)는 감압밸브 스프링의 초기 압축량 변화에 대한 그래프이다. (a)의 결과에서 체크밸브 오리피스스의 크기가 감소할수록 감압밸브 스프링에 전달되는 압력 에너지의 손실이 증가하기 때문에 스프링의 응답성이 지연되며, (b)의 결과에서 피스톤의 홀의 수를 줄일수록 초반 응답성이 둔화되는 경향을



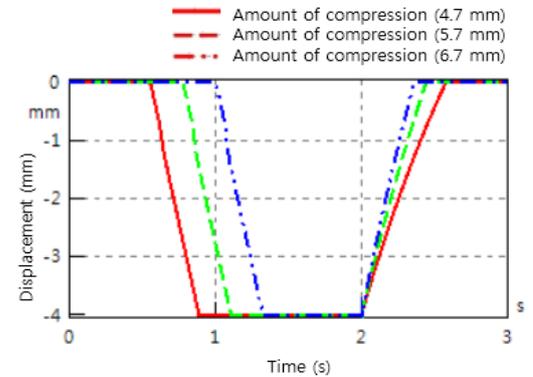
(a) Change of the check valve orifice diameter



(b) Change of the piston hole numbers

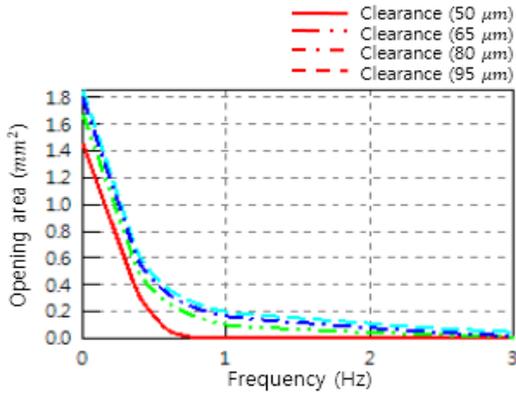


(c) Change of the piston clearance

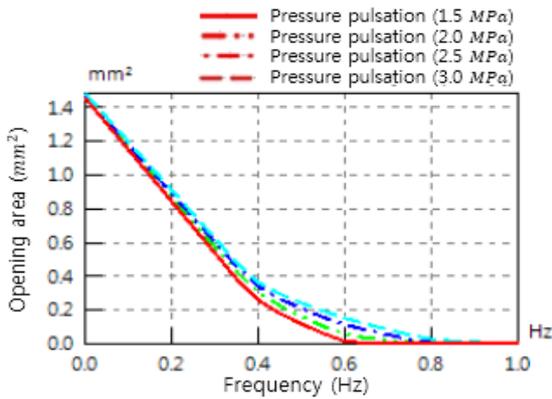


(d) Change of the spring initial condition

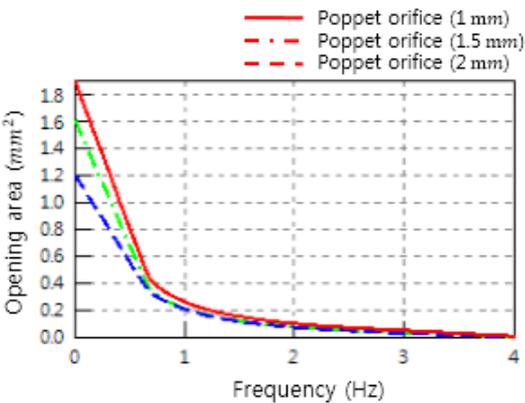
Fig. 6 Sensitivity analysis according to change of the parameters



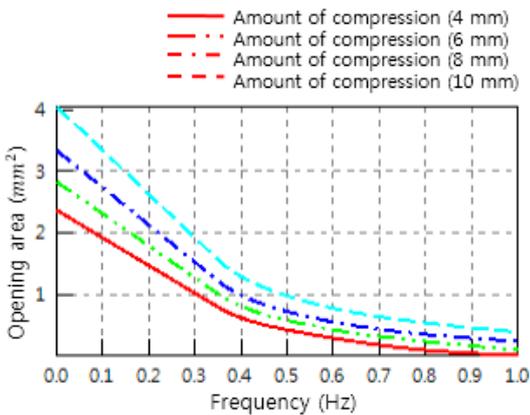
(a) Change of the clearance



(b) Change of the pressure level



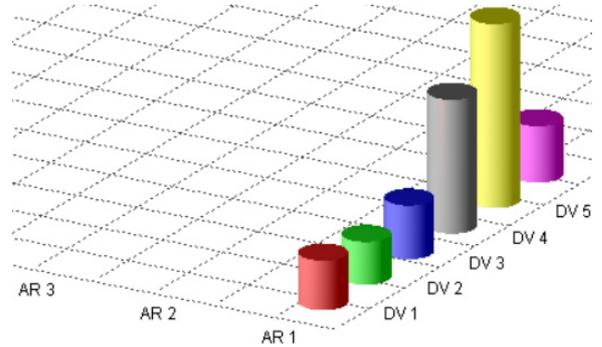
(c) Change of the check valve orifice diameter



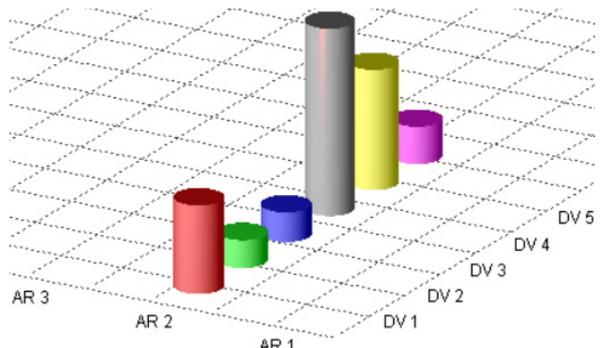
(d) Change of the spring initial condition
 Fig. 7 Results of the sensitivity analysis

DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	EV6
piston hole	clearance	damping orifice	drain orifice	poppet orifice	spring compression
AR1		AR2		AR3	
deadband		Response		Return	

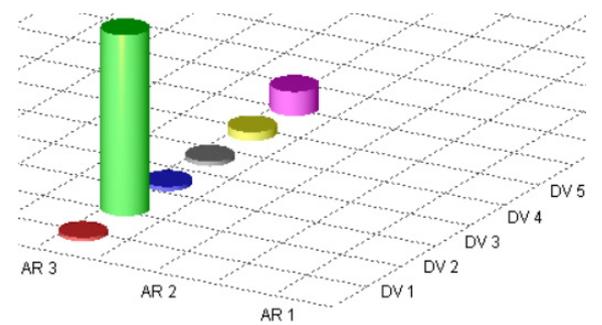
(a) Results and design parameter



(b) Range of the dead band



(c) Response of the vehicle



(d) Neutrality of the vehicle

Fig. 8 Sensitivity of the design parameters

나타낸다. 또한, (c)의 결과에서하우징과 피스톤 사이의 간극이 넓을수록 스프링의 복귀성이 향상되며, (d)의 결과에서 감압밸브 스프링의 초기 압축량이 증가 할수록 차량구동 압력이 높아지고 스프링의 복귀성도 증가한다는 것을 확인 할 수 있었다.

5. 결과 및 고찰

Fig. 7은 민감도 해석 결과를 종합하여 나타낸 결과로 공급압력이 사인파일 때 스톱과 하우징 사이의 오리피스에서 발생하는 개도면적의 변화를 나타낸다. (a)는 피스톤과 하우징 사이의 간극, (b)는 압력 맥동의 크기, (c)는 체크밸브 오리피스의 크기 그리고 (d)는 스프링 초기 압축량 변화에 따른 특성을 나타낸다.

그래프 분석결과 피스톤과 하우징 사이의 간극 증가, 압력맥동의 크기 증가, 체크밸브 오리피스 직경의 증가 그리고 스프링 초기 압축량의 증가에 따라 약 0.8Hz에서 3.2Hz로 감압밸브가 반응하는 주파수 범위가 증가하고, 중립밸브의 복귀성은 피스톤과 하우징 사이의 간극 또는 스프링 초기 압축량이 증가할수록 향상된다. 또한, 체크밸브 오리피스의 크기를 줄여서 감압밸브 스톱에 전달되는 압력에너지가 줄거나 스프링 초기 압축량을 증가시켜 중립 구간을 확보할 수 있다.

Fig. 8은 설계변수 민감도 분석결과로 (a)는 각각의 설계변수와 해석결과를 나타내고, (b)는 중립 범위, (c)는 트랙터의 초반 응답성 그리고 (d)는 중립밸브의 복귀성을 나타낸다. 밸브의 중립 범위와 초반 응답성은 체크밸브 포핏의 오리피스 크기와 스톱과 하우징사이의 오리피스 크기에 지배적이며, 트랙터의 중립성은 피스톤과 하우징 사이의 간극에 지배적이라는 것을 확인 할 수 있었다.

6. 결 론

HST의 중립밸브의 작동원리와 기능을 분석하고 각각의 설계변수에 대한 민감도 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

HST의 주행과 중립을 제어하는 중립밸브의 기능을 파악하고 해석 모델을 개발 하여 다양한 조건에서 설계 변수에 대한 특성을 파악하였다.

밸브를 개발하기 전 단계에서 해석모델을 통해 밸브의 동적거동 및 유동특성을 정량적으로 확인 할 수 있다.

1D 해석모델로 설계변수 민감도 분석을 수행함으로써 밸브의 올바른 설계치를 제안할 수 있을 것으로

판단된다.

중립밸브의 최적화 설계에 해석 모델을 사용함으로써 개발 시간과 비용을 절감 할 수 있을 것으로 판단된다.

중립밸브의 응답성과 중립 범위는 체크밸브 포핏의 오리피스 직경과 스톱과 하우징 사이의 오리피스 직경에 가장 민감한 변수이다.

트랙터의 복귀특성은 피스톤과 하우징 사이의 공차에 지배적이며, 복귀성이 좋아질수록 압력맥동에 민감하게 반응하기 때문에 트랙터에 변속충격이 발생할 수 있다.

향 후 다음과 같은 연구가 필요하다고 판단된다.

- 1) 실험데이터를 통한 해석모델의 신뢰성 확보가 필요하다.
- 2) HST 내부 온도에 따른 중립밸브의 동적거동 분석이 필요하다.
- 3) 최적화 설계 기법을 도입하여 최적화 설계가 필요하다.

References

- 1) J. S. Kim et al, "Power circulation characteristics of hydro-mechanical transmission system in steering", Journal of SAE., Vol.5, No. 2, pp. 13 - 22, 1997.
- 2) D. T. Kim, "Pressure ripple reduction of hydraulic pump-motor in HST", Journal of KSMTE, pp. 117-123, 2003
- 3) S. W. Seo et al., "Development of HST electronic control system for combine(II)", CNU Journal of agricultural science, Vol. 38, No. 1, pp. 121-128, 2011.
- 4) D. H. Sung et al., "Analysis of power characteristics for a hydromechanical transmission considering HSU flow loss", Journal of KSME, Vol. 26. No. 6, pp. 1149-1158, 2002
- 5) J. S. Jang and Y. H. Yoon, "Sensitivity analysis on design parameters of the fuel injector for CRDI engines", Journal of KSAE, Vol. 17, No. 5, pp.107-114, 2009