

# 자주식 시금치 수확장치 해석모델을 활용한 유압시스템 개선 설계 제안

## Improving Hydraulic System Design by Analysis Model of a Self-propelled Spinach Harvester

노대경<sup>1</sup> · 이동원<sup>1</sup> · 이종수<sup>2</sup> · 장주섭<sup>3\*</sup>

Dae Kyung Noh, Dong Won Lee, Jong Su Lee and Joo Sup Jang

Received: 17 Jan. 2022, Revised: 17 Feb. 2022, Accepted: 22 Feb. 2022

**Key Words** : Spinach harvester(시금치 수확장치), Surplus flow(잉여유량), intermittent performance deterioration (간헐적 성능저하), Closed center valve(클로즈센터형 밸브), Unloading circuit(무부하 회로), SimulationX(시뮬레이션엑스)

**Abstract**: This study aimed to develop solutions for the intermittent performance deterioration of self-propelled spinach harvesters through analysis model. The study was conducted in the following manner. First, changes in performance deterioration and surplus flow, which result from oil temperature changes, were analyzed by simulating actual sequential harvesting movements, which involve driving with actuators operated simultaneously, by analysis model developed in a previous study. Second, fundamental solutions for surplus flow problems were presented. Third, the solutions were applied to a virtual environment to present their practicality and quantitative effects. The two solutions based on the study results were as follows. First, a closed center-type directional control valve was applied to the hydraulic circuit. Second, an unloading system was set up through an on-off solenoid valve.

### 1. 서 론

작물의 다양성과 비정형 노면 등으로 스마트팜 기술을 적용하기 어려웠던 노지재배 영역에서도 트랙터의 자율주행을 시작으로 스마트 농업의 기류가 확산되고 있다<sup>1)</sup>. 이제는 트랙터뿐만 아니라 농작물 자동수확장치에도 스마트 농업의 적용을 고려해야 할 시기이다. 무, 양파, 배추, 시금치, 고추 등 농작물 수확 장치는 과거부터 개발이 되어왔으나, 대부분 트랙터 PTO(Power Take Off)에 부착하여 사용하는 형태

이거나<sup>2)~4)</sup>, 자주식이지만 사람이 직접 탑승하여 조향해야 하는 형태를 벗어나지 못했다<sup>5),6)</sup>. 즉, 자동 수확장치 자체에 무인화 기술 적용이 어려운 형태이다. 이에 노지재배 무인화를 목적으로 무선 원격조종이 가능한 자주식 시금치 수확장치를 개발하였으나, 연속작업시간이 길어지면 작업속도가 현저히 저하되는 현상이 발생하였고, 이러한 문제를 해결하기 위하여 선행연구를 수행하였다. 선행연구에서는 직선운동, 회전운동, 유체거동, 전기적신호 등이 복합적으로 구현된 유압시스템 해석모델을 멀티도메인 해석 전문 소프트웨어인 SimulationX를 통해 개발하였고, 다양한 해석 시나리오를 수립하여 유온조건에 따른 성능변화를 살펴보았다. 선행연구를 통해 성능저하의 원인은 작동유 유온 상승에 따른 잉여유량 증가로 규명되었으나, 구체적인 솔루션을 제시하지 못하여 후속 연구로 본 연구를 수행하게 되었다. 과거 농기계 분야에서는 유압시스템의 효율보다는 가혹한 환경에서 내구성 확보를 최우선 목표로 개발하였다. 하지만 이제는 농기계의 고효율화와 내구성을 함께 고려해야

\* Corresponding author: jjs1@gachon.ac.kr

1 Daegu, Gyeongbuk Branch, Korea Institute of Science and Technology Information, Daegu 41515, Korea

2 R&D center, DAESIN ACM, Yecheon 36815, Korea

3 Department of Mechanical Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, 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.

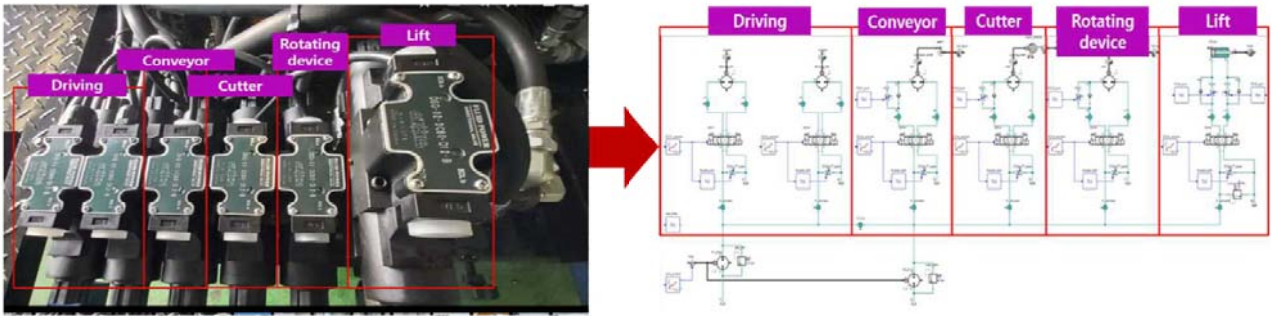


Fig. 1 Multi domain analysis model

Table 1 Chart of directional control valve signal

Operation classification	DCV1 signal	DCV2 signal	DCV3 signal	DCV4 signal	DCV5 signal	DCV6 signal
Driving motors (medium speed)+ Conveyor+Cutting+Rotating	O(50%)	O(50%)	O	O	O	X

시장에서 경쟁력을 갖출 수 있다. 최근 농기계 개발기업에서는 다양한 유압시스템의 비효율적인 에너지 사용에 관심을 갖기 시작하였다. 이와 관련된 연구로는 시뮬레이션을 통해 트랙터의 연비와 작업효율을 분석한 연구가 있으며<sup>7)</sup>, 트랙터 클러치에 투입되는 윤활유량의 효율적 운용 연구가 있다<sup>8)</sup>. 특히, 클러치 윤활유량과 관련된 연구에서는 잉여유량 개선을 목표로 하여 클러치 설계도면의 치수를 미세 조정하였으며, 잉여유량을 상당부분 개선한 결과를 도출하였다<sup>8)</sup>. 앞서 제시된 설계도면의 치수를 조정하는 방법은 잉여유량을 개선할 수는 있지만 근본적으로 해결할 수는 없으므로, 본 연구에서는 설계치수가 아닌 유압회로를 개선하여 잉여유량의 발생을 근본적으로 차단하고자 한다. 연구진행 방법은 다음과 같다. 우선, 해석모델을 활용하여 실제 연속수확 동작을 가상환경에 구현한다. 이후 유온을 저온, 중온, 고온으로 설정하여, 유온 변화에 따른 액추에이터의 성능저하와 잉여유량의 변화를 분석한다. 그리고 유압회로에서 잉여유량의 발생 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 클로스센터형 밸브의 적용방법을 제시하고, 이 방법이 적용될 경우 발생할 수 있는 무부하 조건에서의 시스템 압력 과다 상승문제를 2(port)/2(position) 오픈센터형 솔레노이드 밸브를 적용하여 개선한다. 이를 통해 안정화된 고효율의 유압회로 개선 설계 방법을 제안하는 것이 본 연구의 궁극적인 목표이다. 고효율 유압회로 설계를 위하여 로드센싱 기능을

갖는 IMV(Independent Metering Valve)를 적용한 사례도 있지만 이러한 방법을 시금치 수확장치에 적용할 경우 많은 설계변경이 요구된다<sup>9)</sup>. 본 연구에서는 최소한의 구성밸브 변경을 통해 잉여유량을 차단하여 유압회로의 효율을 높이는 방법을 제안하므로 다른 연구와의 기술적 차별성을 갖는다.

## 2. 주행 · 작업기 동시 작업 분석

시금치 수확기의 연속작업 프로세스는 다음과 같다. 우선 주행모터가 동작하면서 주행이 시작되고, 동시에 회전 장치가 구동되어 흙에 외력이 가해지면서 파헤쳐진다. 이후 진동칼날로 시금치 뿌리 상단을 절단하고, 절단된 작물을 컨베이어로 이송하는 단계로 이어진다. 이에 위와 같은 실제 연속 수확 상황을 해석모델로 구현하여 유온에 따른 성능변화를 살펴보았으며, 사용된 해석모델은 Fig. 1과 같이 선행연구로부터 기 개발된 멀티도메인 해석모델이다. 6개의 솔레노이드밸브에 대한 전기적신호 입력은 Table 1과 같으며, 그 외 가변이 가능한 유량제어 밸브 및 메인릴리프밸브 설정압력, 펌프 배제용적, 전동 모터 회전수(가속 후 1800rpm 유지)는 고정하여 해석을 진행하였다. 온도조건은 저온(30℃), 중온(60℃), 고온(90℃)에 대하여 각각 해석을 진행하였고, 해석에 사용된 솔버는 BDF Method이며, 허용상대오차는 1e-06, 절대오차는 1e-07로 해석을 진행하였다<sup>10)</sup>.

Table 2 Analysis results by temperature (sequential harvesting work)

Oil temperature	Driving motor	Cutter	Rotating device	Conveyor	Surplus flow (Leakage)
30℃	85.17 rpm	2.40 Hz	130.78 rpm	70.69 rpm	33.54 l/min
60℃	75.34 rpm	2.10 Hz	114.06 rpm	61.88 rpm	38.47 l/min
90℃	72.47 rpm	2.00 Hz	109.25 rpm	59.38 rpm	39.86 l/min

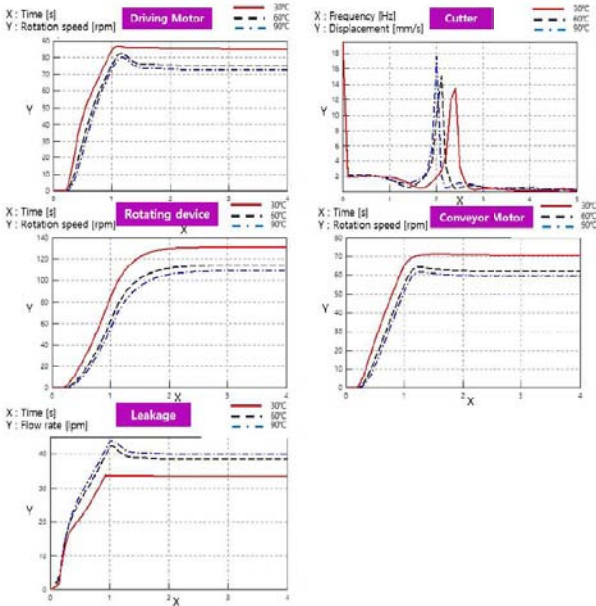


Fig. 2 Analysis results of sequential harvesting work

Fig. 2는 주행모터, 커팅 장치, 회전 장치, 컨베이어, 잉여유량에 대한 해석결과이다. 각 액추에이터 별로 성능변화의 폭은 다르지만 온도가 증가함에 따라 성능이 하락되는 경향은 일치하는 것으로 나타났다. Table 2에 온도별 해석결과를 정리하였으며, 이를 종합하여 보면 다음과 같다. 주행모터는 유온이 저온일 때를 기준으로 중온이 되면 11.54%의 성능(모터 회전속도) 하락이 이루어지고, 고온이 되면 14.91%의 성능저하가 발생한다. 그리고 커팅 장치는 유온이 저온일 때를 기준으로 중온이 되면 12.50%의 성능(칼날 진동수) 하락이 이루어지고, 고온이 되면 16.67%의 성능저하가 발생한다. 회전 장치 역시 유온이 저온일 때를 기준으로 중온이 되면 12.78%의 성능(회전 장치 회전속도) 하락이 이루어지고, 고온이 되면 16.46%의 성능저하가 발생한다. 마지막으로 컨베이어는 유온이 저온일 때를 기준으로 중온이 되면 12.46%의 성능(컨베이어 회전속도) 하락이 이루어지고, 고온이 되면 16.00%의 성능저하가 발생한다. 연속작업 동작에서 솔레노이드밸브에 전기적

신호가 가해지지 않는 방향제어밸브는 리프트에 연결된 밸브이며, 이 밸브의 센터 P-T접속에 의하여 운동에 소요되지 못하고 탱크로 회귀하는 잉여유량은 저온일 때를 기준으로 중온이 되면 14.70% 증가하고, 고온이 되면 18.84% 증가하는 결과를 보여준다.

### 3. 개선설계 제안

앞서 분석한 결과와 선행연구의 결과를 종합해 보면 동시 구동하는 액추에이터의 숫자가 작을수록 유온 상승에 따른 성능 하락의 폭이 큰 것으로 분석되었다. 동시 구동하는 액추에이터의 숫자가 작다는 것은 중립상태의 방향제어밸브가 많다는 것이고, 결국 펌프에서 탱크로 바이패스 되는 유량이 다중으로 개방된 상태라는 것을 알 수 있다. 유압시스템과 같은 용적식 유체전달 시스템을 효율적으로 사용하기 위해서는 기밀성이 가장 중요한 요소로 작용한다. 파스칼의 원리에 따라 유압시스템에서는 고압의 작동유가 액추에이터의 출력으로 작용하게 되는데, 기밀성이 유지되지 못한다면 작동유체는 압력을 형성하기 어려워지기 때문이다. 즉, 누유가 존재하는 상태에서 압력을 원활하게 형성하기 위해서는 더 큰 토출유량의 펌프를 사용하여야 하며, 이는 결국 시스템의 과설계적 요소로 작용하게 되며 시스템 구성비용 측면에서 매우 불리하게 된다. 위와 같은 상황을 고려하여 현재 시금치 수확장치의 시스템을 개선하기 위해서는 잉여유량을 액추에이터 운동에 소요시키는 방법과 시스템 내구측면을 동시에 고려하여야 한다.

#### 3.1 클로즈센터형 밸브 적용을 통한 잉여유량 차단 기술

운동에 사용되지 못하고 탱크로 회귀하는 잉여유량은 동시 구동하는 액추에이터의 숫자가 많을수록

Table 3 Analysis results of using closed center valve (oil temperature of 30°C)

Classification	Driving motor	Cutter	Rotating device	Conveyor
Current	85.17 rpm	2.40 Hz	130.78 rpm	70.69 rpm
Advanced	85.88 rpm	2.40 Hz	131.87 rpm	71.27 rpm
Performance Comparison	0.83 %	0 %	0.83 %	0.82 %

Table 4 Analysis results of using closed center valve (oil temperature of 60°C)

Classification	Driving motor	Cutter	Rotating device	Conveyor
Current	75.34 rpm	2.10 Hz	114.06 rpm	61.88 rpm
Advanced	93.28 rpm	2.50 Hz	141.44 rpm	76.41 rpm
Performance Comparison	23.81 %	19.05 %	24.00 %	23.48 %

Table 5 Analysis results of using closed center valve (oil temperature of 90°C)

Classification	Driving motor	Cutter	Rotating device	Conveyor
Current	72.47 rpm	2.00 Hz	109.25 rpm	59.38 rpm
Advanced	95.72 rpm	2.60 Hz	144.73 rpm	78.17 rpm
Performance Comparison	32.08 %	30.00 %	32.48 %	31.64 %

유온 상승에 따른 증가 폭이 큰 것으로 분석되었다. 분석대상인 시금치 수확장치는 펠드에서 대부분 여러 액추에이터를 동시에 구동하는 작업을 수행한다. 이러한 액추에이터 복합구동을 할 때 누유량이 온도상승에 따라 크게 증가한다는 것은 외기온도의 변화 또는 쿨러 성능의 작은 변동에도 시스템효율이 크게 하락할 수 있다는 것을 말해준다. 즉, 멀티도메인 해석모델에서 유온에 따른 액추에이터 성능과 잉여유량 변화를 분석한 결과 현재 유압회로는 작동유의 온도에 따른 동점성계수 변화에 매우 민감하게 반응하는 시스템임을 알 수 있다. 결국 현재 시스템에서 발생하는 잉여유량을 액추에이터 운동에 모두 소요시키고, 유압시스템이 기밀성을 갖도록 P-T접속형 방향제어밸브는 클로즈센터형으로 교체하는 방안을 제안하는 바이다. Fig. 3은 시스템에 사용되는 방향제어밸브를 모두 클로즈센터형으로 교체하였을 때 유온 30°C 조건에서의 성능변화를 해석한 결과이다. 이를 정량적 수치로 나타내면 Table 3이 된다. 개선 후 중립상태 방향제어밸브의 P-T 접속포트를 통해 빠져나가는 잉여유량이 사라지면서 펌프라인의 압력이 상승하였고, 메인릴리프밸브 설정압력(70bar)에 도달함에 따라 압력 유지를 위해, 메인릴리프밸브가 개방되면서 유량이 빠져나가 성능에는 큰 변화가 없는 결과를 보여준다. Fig. 4는 유온 60°C 조건에서의 성능변화이며, 정량적 수치로 나타내면 Table 4와 같다. 개선 전 P-T 접속포트를 통해 빠져나가는 유량보다, 개선 후 압력유지를 위해

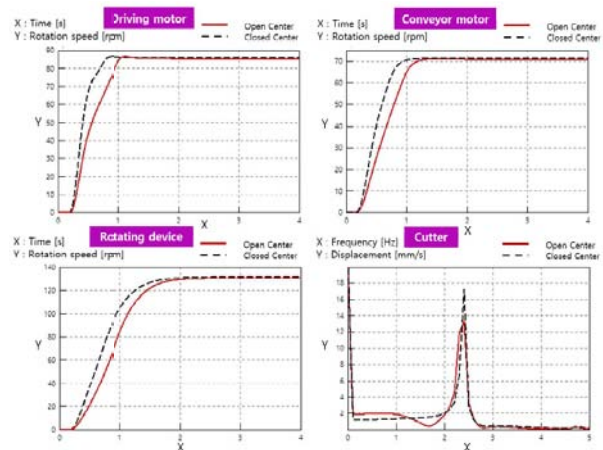


Fig. 3 Analysis results of using closed center valve (oil temperature of 30°C)

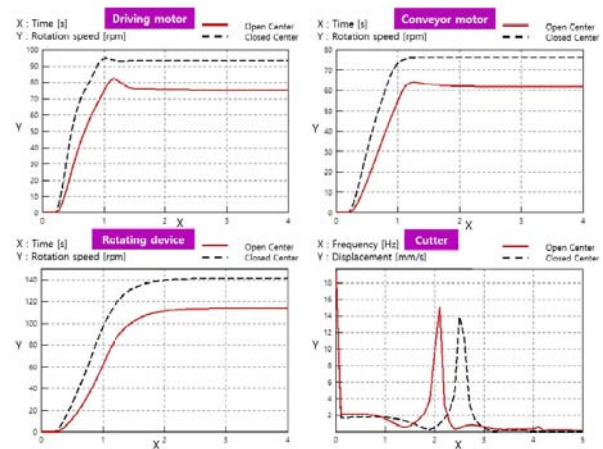


Fig. 4 Analysis results of using closed center valve (oil temperature of 60°C)

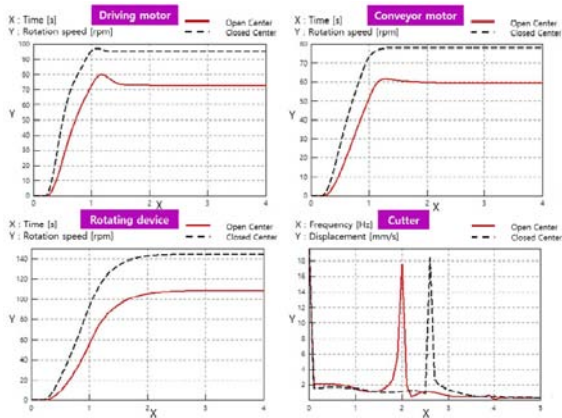


Fig. 5 Analysis results of using closed center valve (oil temperature of 90°C)

개방된 메인릴리프밸브로 빠져나가는 유량이 현저히 적기 때문에 고온조건에서 성능격차가 벌어지는 것을 볼 수 있다. Fig. 5는 유온 90°C 조건에서의 성능변화이며, 정량적 수치로 나타내면 Table 5와 같다. 변화의 경향은 유온 60°C 조건과 동일하다.

적당한 유온 상승은 유압시스템 내에서 작동유의 흐름을 원활(점도 하락)하게 하는 요소로 작용하므로, 동일한 압력조건에서 더 많은 유량을 액추에이터로 공급하게 된다. 즉, 클로즈센터형으로 밸브를 교체하면 적당한 유온 상승이 액추에이터의 성능을 증가시키는 긍정적 요소로 작용할 수 있다는 것이다. 단, 본 솔루션은 현재 시금치 수확장치와 같이 펌프의 토출유량이 충분할 때만 가능하다.

### 3.2 오픈센터형 밸브 적용을 통한 펌프 무부하 시스템 구성 기술

개발기업이 방향제어밸브를 P-T접속형으로 설계한 이유는 엔진의 공회전 상태에서 엔진에 작용하는 부하를 최소화하기 위함이다. 현재 위에서 제안된 클로즈센터형 방향제어밸브를 전체 액추에이터 라인에 적용할 시 성능적인 측면은 개선되지만 엔진의 공회전 상태에서도 메인릴리프밸브 설정압력 (70bar)까지 올라가게 되는 문제점이 발생하게 된다. 즉, 주행이나 작업을 하지 않음에도 불구하고 엔진에 유압시스템 최대 부하가 작용하는 상태가 되며, 이는 시스템 효율과 내구성 측면 모두 불리하게 작용된다<sup>11)</sup>.

위와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 메인릴리프밸브와 밸브블록 사이에 2(port)/2(position) 오픈센터형 솔레노이드 밸브를 설치할 것을 제안하는 바이다. 2(port)/2(position) 오픈센터형 솔레노이드 밸브

는 기존 밸브블록의 솔레노이드 밸브(방향제어밸브)와 전기적 신호를 동시에 작용하게 설정하면 엔진 공회전 시 시스템 부하가 작용하지 않는 무부하 시스템을 구성 할 수 있다.

제안된 방법은 액추에이터가 동작하지 않을 때는 2(port)/2(position) 밸브를 통해 펌프의 토출유량이 모두 탱크로 귀환되며, 작업기나 주행을 위하여 전기적 신호를 주면 2(port)/2(position) 밸브에도 전기적 신호가 전달되어 밸브는 닫히게 되며 펌프의 토출유량이 모두 시스템으로 공급되는 원리이다. 공회전 상태에서 엔진에 작용되는 부하는 밸브와 유로에서 발생하는 압력강하 밖에 없으므로, 실제로 무부하에 근접한 상태라고 할 수 있다.

제안된 방법이 실제로 구현이 가능한 것인지 알아보기 위하여 Fig. 6과 같이 멀티도메인 해석모델에 2(port)/2(position) 오픈센터형 솔레노이드 밸브를 추가 구성하였다. 이후 공회전 상태에서 주행모드로

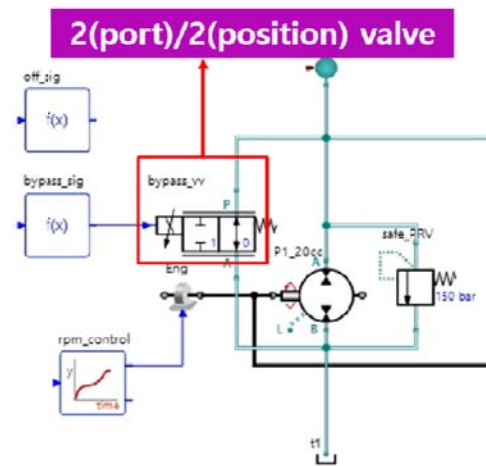


Fig. 6 Setting up pump unloading system

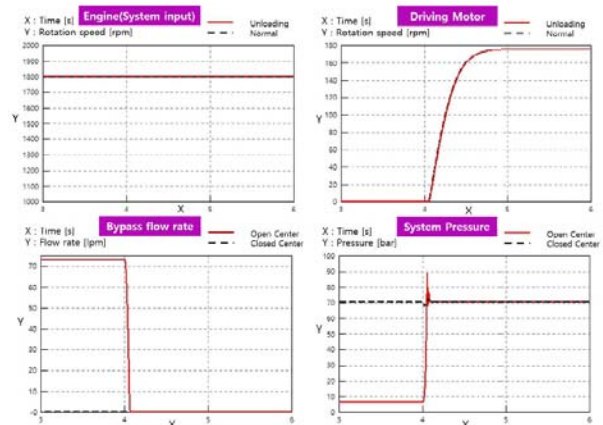


Fig. 7 Comparing analysis results between before and after using unloading system

전환되는 과정의 펌프라인 압력거동을 해석하여 Fig. 7과 같이 개선전과 비교분석 하였다. 잉여유량 활용을 위하여 방향제어밸브만 클로즈센터형으로 교체하였을 때는 공회전 상태에서 메인릴리프밸브 설정압력까지 올라갔으나, 2(port)/2(position) 오픈센터형 솔레노이드 밸브를 추가하였을 경우 무부하 운전이 가능한 것을 볼 수 있다. 이에 제안된 방법은 논리적 타당성을 갖추었다고 할 수 있다<sup>12)</sup>. Fig. 7 우측 하단 그래프에서 검은색 점선이 무부하 회로 적용 전 압력이고, 빨간색 실선이 무부하 회로 적용 후 시스템 압력이다. 무부하 회로 적용 후 엔진의 공회전 상태인 4초까지는 시스템 압력이 6.71bar 수준으로 매우 낮게 형성(작동압력 대비 -90.48%)되는 것을 볼 수 있다. 이는 엔진에 전달되는 유압시스템의 부하가 무부하에 근접한 수준임을 보여주는 결과이다. 그리고 4초 이후 주행모터가 동작할 때는 메인릴리프밸브 설정압력인 70bar 수준으로 올라가서 원활한 주행 장치 구동이 이루어지는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 자주식 시금치 수확장치를 농촌에 원활하게 보급하기 위하여 제조원가를 줄이는 과정에서 발생한 품질문제(작업속도 저하현상)를 해결하기 위한 연구이다. 선행연구에서 개발한 멀티도메인 해석모델을 활용하여 해결방안을 제시하는 목적의 연구이며, 다음과 같은 요약된 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 주행과 작업기가 동시에 작동하는 연속작업 환경을 해석모델에 구현한 결과 중립상태 방향제어밸브의 P-T접속 포트를 통하여 잉여유량이 발생하는 것을 알 수 있었다.
- 2) 이러한 잉여유량 발생 현상은 사용되는 작동유의 온도에 따라 크게 변화하여, 결국 성능편차를 유발하게 되었다.
- 3) 잉여유량 문제를 해결하기 위하여 솔레노이드 작동방식의 방향제어밸브를 오픈센터형에서 클로즈센터형으로 교체할 것을 제안하였고, 교체할 경우 저온조건에서는 교체전과 큰 성능차이가 없으나, 온도가 높아질수록 크게 성능이 개선됨을 알 수 있었다.
- 4) 특히, 고온조건인 90℃에서는 4종류의 액추에

이터 성능이 평균 31.55% 상승하는 결과를 얻었다.

5) 이는 시스템의 압력유지를 위하여 메인릴리프밸브를 통해 빠져나가는 유량이 개선전 중립상태의 방향제어밸브에서 빠져나가는 유량보다 현저히 작기 때문인 것으로 분석되었다.

6) 클로즈센터 방향제어밸브로 교체하였을 때 우려된 시스템의 내구성 문제를 해결하고 아이들(Idle) 상태에서 펌프에 작용하는 부하를 줄이기 위하여 2(port)/2(position) 방향제어밸브를 펌프 토출라인에 부착하는 것을 제안하였고, 해석모델을 통해 구현가능성을 검증하였다.

현재 본 연구에서 제시된 솔루션은 가상환경에서 검증한 내용들로, 솔루션을 실차에 적용하여 정량적 효과를 검증하는 후속연구가 필요하다고 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학기술정보연구원 「수요대응형 지역혁신 생태계 활성화 및 AI 솔루션 실용화 지원 체제 구축」 사업의 지원을 받아 진행되었습니다.

#### 이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

#### References

- 1) S. H. Lim, "Development of a Dynamic Simulation Model of an Autonomous Driving Tractor with Agricultural Workload", Chungnam National University Graduate School Master's Thesis, 2019.
- 2) J. T. Hong et al., "Design Factors for Chinese Cabbage Harvester Attachable to Tractors", J. of the Korean Society for Agricultural Machinery Vol.26 No.4, pp.337-354, 2001.
- 3) J. H. Jang et al., "Analysis of Power Requirement of the Underground Crop Harvester Attached on Agricultural Tractor during Traction Operation", J. of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology, Vol.11, No.2, pp.150-155, 2018.

- 4) J. H. Kim, “Development of a Tractor Attached Root-harvester for Peanut”, Kyungpook National University Graduate School Master’s Thesis, 2008.
- 5) H. Lim et al., “Development of Steering Control System for a Self-Propelled Potato Harvester Using a Displacement Difference Ridge Tracking Method”, The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 70, No.1, pp.213-223, 2021.
- 6) Y. S. Lee, “Structural Analysis of the Transportation Part and Stability Analysis for Design of a Self-propelled and Small-sized Chinese Cabbage”, Chungnam National University Graduate School Master’s Thesis, 2019.
- 7) H. M. Lee, “Analysis of Fuel Efficiency and Working efficiency using Tractor Simulation Model”, Sungkyunkwan University Graduate School Master’s Thesis, 2015.
- 8) D. K. Noh et al., “Lubricant Flow Analysis for Effective Lubrication of Tractor Forward/reverse Clutch”, Heliyon, Vol.3, No.4, e00295, 2017.
- 9) W. Dong, Z. Jiao and S. Wu, “Compound Control Strategy for Independent Metering Directional Valve of Engineering Machinery by Simulation,” Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Tianjin, China, 2014.
- 10) D. K. Noh et al., "Case of Developing Analysis Model for Recoil System for Automatic Gun", Journal of Korea Society for Simulation, Vol.24, No.4, pp.35-41, 2015.
- 11) G. H. Lee et al., "Development of Analysis Model of Pressure-Flow-controlled Swash Plate Type Pump for Evaluating Feasibility of Design", Journal fo the Korea Society for Simulation, Vol.25, No.4, pp.53-63, 2016.
- 12) J. M. Jin, "Development of an Analysis Model Swash Plate Angle-the Load-flow of Swash Plate-type Hydraulic Piston Pump", Gyeongsang National University Graduate School Master’s Thesis, 2017.
- 13) Fluid Power China, Technical data.