한국정보전자통신기술학회논문지(jkiiect)'22-10, Vol.15 No.5
논문 22-15-05-349 http://dx.doi.org/10.17661/jkiiect.2022.15.5.349

자동 조향 트랙터용 비례제어밸브의 동특성 분석

민이서*, 김용주**, 김완수***

Analysis of dynamic characteristics of proportional control valve for auto-steering tractor

Yee-Seo Min*, Yong-Joo Kim**, Wan-Soo Kim***

요 약 본 연구는 자동 조향 트랙터용 비례제어밸브의 국산화를 위한 기초연구로써 다양한 트랙터 조향 조건에 따른 조향 비례제어밸브 동특성 계측 및 분석을 위해 수행되었다. 동특성 데이터는 유량 및 압력 계측 시스템을 통해 수집되었으며, 수집된 유량 및 압력 데이터를 이용하여 동력을 분석하였다. 실험 조건은 트랙터 엔진 회전속도와 조향각을 주요 변수로 선정하였으며, 실험은 우레탄 노면 조건에서 수행되었다. 그 결과, 트랙터 엔진 회전속도 및 조향각이 증가함에 따라 비례제어밸브 유량, 압력, 동력이 모두 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 동일한 엔진회전속도에서 조향각이 증가함에 따라, 유량, 압력, 동력은 각각 최대 190%, 172%, 273% 증가하는 경향을 보였으며, 동일한 조향각에서 엔진회전속도가 증가함에 따라, 유량, 압력, 동력은 각각 최대 161%, 122%, 168% 증가하는 경향을 보였다. 이를 통해, 조향각이 엔진 회전속도보다 비례제어밸브의 동특성에 더 높은 영향을 미치는 것을 확인하였다.

Abstract The aim of this study is to analyze the dynamic characteristics of proportional control valves according to various working conditions as a basic study for developing proportional control valves for auto-steering tractors. The dynamic characteristics of proportional valves were measured using hydraulic characteristics measurement system, and the power was analyzed using measured flow rate and pressure data. As the experimental conditions, the tractor engine speed and steering angle was selected as the main variables, and the experiment was performed on urethane road conditions. As a result, it was found that the flow rate, pressure, and power of the proportional control valve increased as the tractor engine speed and steering angle increased. In particular, as the steering angle increased at the same engine speed, the flow rate, pressure, and power tended to increase by up to 190%, 172%, and 273%, respectively. Similarly, as the engine speed increased at the same steering angle, the flow rate, pressure, and power tended to increase up to 161%, 122%, and 168%, respectively. Therefore, it can be seen that the steering angle has a higher influence on the dynamic characteristics of the proportional control valve than the engine speed.

Key Words : Agricultural tractor, Steering system, Proportional control valve, Flow rate, Hydraulic power, Pressure

1. 서론

전 세계적인 농업인구의 고령화 및 여성화로 인하여 농가의 노동력 문제가 대두되고 있다[1]. 자율주행 기술은 이러한 농촌 노동력 문제 해결과 동시에 고효율

This work was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through Advanced Production Technology Development Program, funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (321062-02).
*Department of Bio-Industrial Machinery Engineering, Kyungpook National University
**Department of Biosystems Machinery Engineering & Department of Smart Agriculture Systems, Chungnam National University
***Corresponding Author : Department of Bio-Industrial Machinery Engineering, Kyungpook National University (wansoo.kim@knu.ac.kr)
Received September 21, 2022 Revised October 03, 2022 Accepted October 18, 2022

농작업을 가능하게 할 수 있는 핵심 기술 중 하나이다[2]. 특히, 센서 및 통신 기술의 발전으로 스마트 농업의 발전이 가속화 되면서[3], 자율주행 농업기계의 개발이 용이해졌다[4]. 이러한 자율주행 기술은 국내 주요 농업기계 기종 중 사용 비율의 71.8%를 차지하고[5], 연간 작업시간이 139.9시간으로 가장 높은 비율을 차지하는 트랙터를 중심으로 빠르게 개발되고 있다[6].

국내외 농업기계 분야 연구자들은 자율주행 트랙터 기술 개발 및 상용화를 위한 다양한 기술 개발을 추진하고 있다[7]. 자율주행 시, 트랙터는 높은 작업 효율을 위해 자동으로 생성된 경로를 안정적으로 추종해야 한다[8]. 경로 추종을 위해 조향 시스템은 적절한 시점에 조향 제어를 수행하여야 하며 그렇지 못하는 경우 경로 이탈 등의 문제가 발생한다[9]. 특히 대형 트랙터는 작업 특성상 부하 변동이 큰 조건에서 작동됨으로 전기모터식 조향장치 대신 유압식 조향장치가 사용되는데[10], 전자제어식 유압 조향장치의 조향 성능은 비례제어밸브 (Proportional Control Valve)의 성능에 좌우된다[11]. 비례제어밸브는 코일에 인가된 전류에 비례하여 생성된 전자기력으로 스풀의 위치를 제어해 밸브를 통과하는 유량을 제어하는 밸브이며, 솔레노이드밸브에 비해 정밀한 제어가 가능하고, 밸브가 완전 개폐 상태가 아니어도 안정성이 유지되는 장점이 있다[12]. 따라서, 트랙터 자동 조향 시스템의 작업 안정성과 효율성을 위해 고성능 비례제어밸브의 개발이 필요하다.

고성능 비례제어밸브 개발을 위한 연구는 제어기법 개발[13] 및 제어 알고리즘 개발[12]을 통해 제어계의 응답속도 및 강인성을 발전시키는 연구가 대부분 진행되었다. 비례제어밸브 특성 분석을 위해 Jung(2019, 2020)은 굴착기용 IMV (Independent Metering Valve)에 사용되는 비례제어밸브의 정특성을 해석하였다[14]. 선행 연구에서 개발한 IMV 모델을 실물 굴착기에 적용하여 궤적제어를 수행함으로써 작동성능에 대한 시험을 검증하였다[15]. Shin 등(2020)은 조향 시스템 효율 향상을 위해 전기-유압 구동 모듈의 해석 모델을 개발하고 수치 해석을 수행하였다[16]. Huh(2021)는 유압 제어 시스템의 비선형성 및 외란 감소를 위한 선형화 기법이 적용된 상태 피드백 제어기를 개발하였다[17]. 그러나 농업용 트랙터에 적용할 수 있는 트랙터 작업 시 비례제어밸브 성능에 대한 연구는 부족한 실정이다. Hua 등(2018)은 농업용 트랙터의 자동 조향을 위한 유압식 조향 시스템을 설계하고, 수학적 모델을 개발해 입력 전압 및 부하 압력에 따른 비례제어밸브 정특성 및 동특성을 시뮬레이션 하였고 실차 시험으로 신뢰성을 검증하였다[18]. Lee 등(2021)은 트랙터 자동 조향 정밀도 및 응답속도 향상을 위한 조향 알고리즘을 개발하고 HIL (Hardware In the Loop) 방식의 유압식 조향계 시뮬레이션 모델을 개발하여 실물 비례제어밸브를 연결해 조향 성능을 평가하였다[10]. 하지만, 아직까지 비례제어밸브의 성능 및 신뢰성 등의 문제로 자동 조향 트랙터에는 대부분 외국 제품이 적용되고 있는 실정이다. 따라서, 자동 조향 트랙터에 적용 가능한 비례제어밸브의 국산화를 위한 연구개발이 요구되며, 이를 위해서는 실제 트랙터 조향에 따른 비례제어밸브의 유량 및 압력과 같은 동특성을 분석하는 것이 필요하다.

본 연구는 자동 조향 트랙터용 비례제어밸브의 국산화를 위한 기초연구로써, 다양한 트랙터 조향 조건에 따른 비례제어밸브의 동특성을 분석하기 위하여 수행되었다. 세부 연구 목표는 1) 트랙터 비례제어밸브 유량 및 압력 계측 시스템 개발, 2) 트랙터 조향 조건(엔진 회전속도, 조향각)에 따른 유량, 압력 특성 계측, 3) 조건별 비례제어밸브 동특성을 분석하는 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시 트랙터

본 연구에서는 트랙터 조향 시 비례제어밸브 동특성 데이터 수집을 위하여 표 1과 같이 4륜 구동 농업용 트랙터(PX1300, Daedong Co. Ltd., Korea)를 사용하였다. 트랙터의 크기는 4,290 (L) × 2,250 (W) × 2,770 (H) mm이며, 공차 중량은 4,070 kg이다. 트랙터의 엔진 정격출력은 2,200 rpm에서 93.2kW이다. 유압 펌프는 엔진 직결 방식이며, 스티어링 펌프의 배제용적 및 정격유량은 각각 21 cc/rev, 46.5 LPM (@2,200 rpm) 이다.

표 1. 트랙터 제원
Table 1. Specifications of the tractor used in this study

Item		Specifications
Length×width×height (mm)		4,290×2,250×2,770
Weight (kg)		4,070
Engine rated power (kW)		93.2@2,200rpm
Steering pump	Displacement (cc/rev)	21
	Flow rate (LPM)	46.5

2.2 트랙터 유압 시스템

본 연구에 사용된 트랙터의 유압 시스템은 일반적인 트랙터의 유압식 조향 시스템과 유사하게 엔진-기어펌프-밸브-조향 실린더로 구성되어있으며, 그림 1과 같다. 이때, 기어펌프와 조향 실린더 사이에 위치한 밸브는 트랙터의 자동 조향을 위하여 방향 및 유량 제어가 가능한 비례제어밸브가 적용되었다. 본 연구에 사용된 비례제어밸브는 그림 2와 같이 트랙터에 설치되었다. 사용된 트랙터의 조향장치는 논로드 리액션 타입의 전유압식이며 기계적 연결 구조 없이 유압 시스템에 의해서 작동된다. 이는, 일반 사용차에 사용되는 로드 리액션 타입과 달리, 별도의 휠 조작 없이는 자동으로 복귀되지 않아 농작업에 더 유리한 특성을 갖는다.

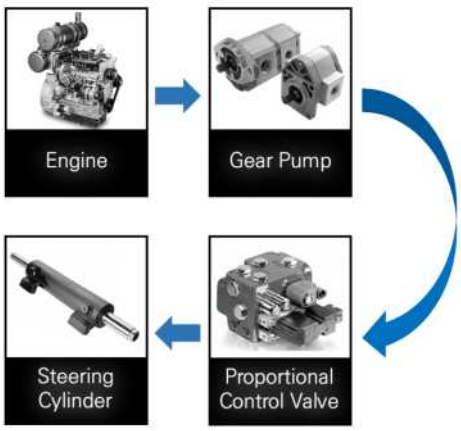

그림 1. 트랙터 조향 시스템 구성도
Fig. 1. Schematic diagram of tractor steering system

그림 2. 트랙터 자동조향용 비례제어밸브
Fig. 2. Proportional valve for auto-steering tractor

2.3 계측 시스템

트랙터 조향에 따른 비례제어밸브의 동특성을 분석하기 위해서는 좌 조향(Left-turn steering, LS) 및 우조향(Right-turn steering, RS)에 따른 유량 및 압력 데이터가 필요하다. 본 연구에서는 조향 시스템의 동특성 데이터 수집을 위하여 그림 3과 같이 압력센서, 유량센서, 데이터 수집 장치를 이용하여 비례제어밸브 동특성 계측 시스템을 구축하였다. 압력센서(Hysense PR130, Hydrotechnik, Limburg an der Lahn, Germany)와 유량센서(Hysense QG 100, Hydrotechnik, Limburg an der Lahn, Germany)는 각각 비례제어밸브의 포트 A와 B에 설치하였으며, 측정된 데이터는 데이터수집장치(Q.brixx A107, Gantner, Nuziders, Austria)를 통해 수집하였다.

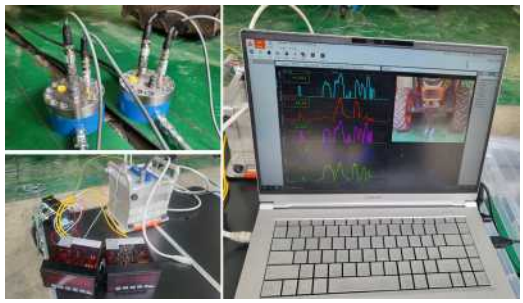

그림 3. 유량 및 압력 데이터 수집을 위한 계측 시스템
Fig. 3. Measurement system for collecting the flow rate and pressure data

2.4 실험 방법

트랙터 유압 시스템 동특성 분석을 위하여 조향(LS and RS)에 따른 유량 및 압력 데이터 수집 실험을 수행하였다. 실제 트랙터가 작업을 수행하는 토양 노면 조건에서 데이터를 수집하면 실제 동특성을 정확히 반영할 수는 있으나, 불규칙한 토양 노면 조건에 의한 영향이 높게 나타날 수 있다[19]. 따라서, 본 연구에서는 토양 노면 조건의 영향을 최소화하고 다양한 실험변수(엔진 회전속도, 조향각)에 따른 동특성을 분석하기 위하여 그림 4와 같이 ㈜대동 연구소 시험장의 우레탄 노면 조건에서 실험을 수행하였다. 실험 시 트랙터는 정지상태였으며, 트랙터 바퀴 조향각 0°에서부터 목표 조향각에 도달할 때까지 데이터를 계측하였다. 계측 실험은 트랙터 조향방향(LS and RS)을 구분하여 각각 수행하였으며, 총 실험 조건은 총 24개 작업조건(조향방향 2수준 × 엔진회전속도 4수준 × 조향각 3 수준)이다. 이때, 엔진 회전속도는 본 연구에 사용된 트랙터에 탑재된 엔진의 주요 작동회전속도 지점(Idle, 최대토크, 정격 회전속도, 최대 회전속도)을 고려하여 4 수준(900, 1400, 2200, 2400 rpm)으로 선정하였다. 조향각은 트랙터 최대 조향각 54°를 고려하여, 3수준(16, 38, 54°)으로 선정하였다. 각 작업조건별 비례제어밸브의 유량 및 압력을 계측하고, 수집된 데이터를 통해 유압 동력을 환산하였다.

그림 4. 트랙터 조향에 따른 유압 데이터 수집을 위한 실험
Fig. 4. Experiments for collecting hydraulic data according to tractor steering

2.5 분석 방법

엔진회전속도 및 조향각에 따라 트랙터 조향용 비례제어밸브의 동특성 분석을 수행하였다. 조향에 요구되는 동력을 분석하기 위하여 수집된 조건별 유량과 압력을 이용하여 다음 식 (1) 을 통하여 유압 동력을 산출하였다. 이때, 유압 효율은 선행 연구 결과를 고려하여 90%로 적용하였다[20]. 엔진 회전속도와 조향각이 트랙터 유압 시스템의 동특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 IBM SPSS Statistics (SPSS 25, SPSS Inc., New York, USA)를 사용하여 일원분산분석 (One-way ANOVA)을 수행하였으며, LSD (Least Significant Difference)를 통하여 사후 검증을 수행하였다.

$$Power_{hydraulic} = \eta_v \times \frac{P \times Q}{600} \quad (1)$$

Where, $Power_{hydraulic}$ = Power (kW)

η_v = Efficiency (%)

P = Pressure (bar)

Q = Flow rate (LPM)

3. 결과 및 고찰

3.1 유량 분석 결과

3.1.1 LS에 따른 유량 분석 결과

트랙터 LS에 따른 비례제어밸브 유량 특성은 트랙터 엔진 회전속도 4수준 및 각 엔진 회전속도에서의 조향각 3수준에 대하여 그림 5와 같이 나타났다. 동일한 엔진 회전속도 조건에서 트랙터의 조향각이 증가할 때 비례제어밸브의 유량은 증가하는 경향을 보였으며, 이는 조향각이 증가할수록 스티어링 실린더에 공급되어야 하는 유량이 높기 때문이다. 또한, 동일한 조향각 조건에서 트랙터의 엔진 회전속도가 증가할 때 비례제어밸브의 유량이 증가하는 경향을 보였다.

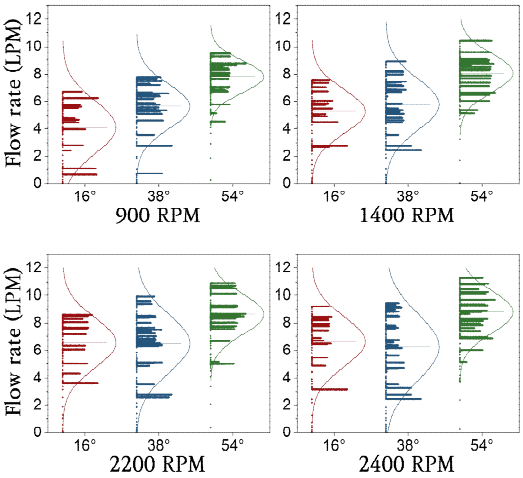

그림 5. LS 제어에 따른 비례제어밸브 유량 계측 결과
Fig. 5. Results of flow rate measurement for proportional valve by LS control

트랙터 LS에 따른 비례제어밸브 유량 특성 분석 결과는 표 2와 같다. 엔진 회전속도 900 rpm 조건에서 조향각 16°에서 38° 및 54°로 증가 할 때, 각각 유량은 137%, 190% 증가했다. 가장 높은 엔진 회전속도인 2400 rpm 조건에서는 조향각 16°에서 38° 및 54°로 증가 할 때, 각각 유량은 108%, 135% 증가하였다. 낮은 엔진 회전속도 조건에서 조향각이 증가함에 따른 유량의 증가폭이 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 조향각 16°조건에서 엔진회전속도 900 rpm에서 1400, 2200, 2400 rpm으로 증가할 때, 각각 유량은 129%, 159%, 161% 증가했다. 가장 높은 조향각인 54° 조건에서는 엔진회전속도 900 rpm에서 1400, 2200, 2400으로 증가할 때, 각각 유량은 104%, 112%, 114% 증가했다. 낮은 조향각 조건에서 엔진 회전속도 증가에 따른 유량 증가폭이 더 높게 나타났다. 또한, 동일한 엔진 회전속도 조건에서 조향각 차이에 따른 유량 특성은 모든 조건에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 반면에, 동일한 조향각 조건에서 엔진 회전속도 차이에 따라서는 일부 조건(조향각 16° 에서 엔진 회전속도 2,200 rpm 및 2,400 rpm)에서 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다.

표 2. LS 제어에 따른 비례제어밸브 유량 분석 결과
Table 2. Results of flow rate analysis for proportional valve by LS control (Unit : LPM)

E/G (rpm)	Steering Angle (°)		
	16	38	54
900	4.1±1.9^{c}	5.6±1.6^{d}	7.8±1.2^{d}
1400	5.3±1.6^{b}	6.2±1.7^{c}	8.1±1.4^{c}
2200	6.5±1.9^{a}	7.0±1.9^{b}	8.7±1.5^{b}
2400	6.6±2.1^{a}	7.1±1.9^{a}	8.9±1.5^{a}

1) Average ± standard deviation.
2) Means with different superscripts (a,b,c,d) in each column are significantly different at $p < 0.05$ by LSD multiple range tests.

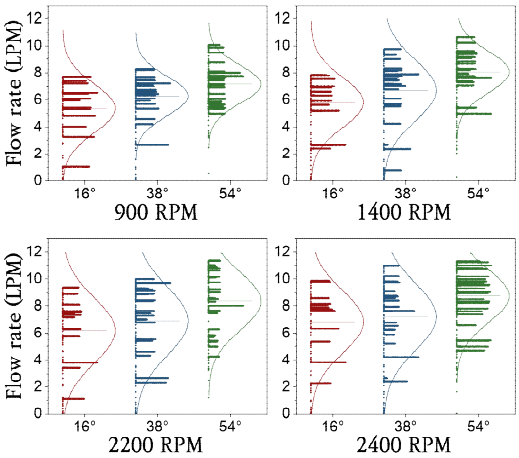

그림 6. RS 제어에 따른 비례제어밸브 유량 계측 결과
Fig. 6. Results of flow rate measurement for proportional valve by RS control

3.1.2 RS에 따른 유량 분석 결과

트랙터 RS에 따른 비례제어밸브 유량 특성은 그림 6과 같이 나타났다. 전반적으로 LS에 따른 유량 특성과 유사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 동일한 엔진 회전속도 조건에서 조향각이 증가할 때 비례제어밸브 유량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 조향각 조건에서 엔진 회전속도 증가가 증가할 때도 비례제어밸브 유량이 증가하는 것으로 나타났다.

트랙터 RS에 따른 비례제어밸브 유량 특성의 통계적

분석 결과는 표 3과 같다. 엔진 회전속도 900 rpm 조건에서 조향각 16°에서 38° 및 54°로 증가 할 때, 각각 유량은 117%, 131% 증가하였다. 가장 높은 엔진 회전속도인 2400 rpm 조건에서는 조향각 16°에서 38° 및 54°로 증가 할 때, 각각 유량은 115%, 137% 증가하였다. RS 제어 시 조향각 증가에 따른 유량 증가폭은 엔진 회전속도 조건에 따른 차이가 미비한 것으로 나타났다. 또한, 조향각 16°조건에서 엔진회전속도 900 rpm에서 1400, 2200, 2400 rpm으로 증가할 때, 각각 유량은 107%, 115%, 126% 증가하였다. 가장 높은 조향각인 54° 조건에서는 엔진회전속도 900 rpm에서 1400, 2200, 2400 rpm으로 증가할 때, 각각 유량은 117%, 127%, 131% 증가하였다. 엔진 회전속도 증가에 따른 유량 증가폭은 조향각 조건에 따른 차이가 미비하거나 조향각 54° 조건에서 더 높은 것으로 나타났다. 또한, 엔진 회전속도 및 조향각 조건별 모든 조건에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다.

표 3. RS 제어에 따른 비례제어밸브 유량 분석 결과
Table 3. Results of flow rate analysis for proportional valve by RS control (Unit: LPM)

E/G (rpm)	Steering Angle (°)		
	16	38	54
900	5.4±1.8[d]	6.3±1.4[d]	7.1±1.4[d]
1400	5.8±1.9[c]	6.8±2.2[c]	8.3±1.3[c]
2200	6.2±2.4[b]	7.4±2.3[b]	9.0±1.8[b]
2400	6.8±2.3[a]	7.8±1.9[a]	9.3±1.6[a]

1) Average ± standard deviation.
2) Means with different superscripts (a,b,c,d) in each column are significantly different at $p < 0.05$ by LSD multiple range tests.

3.2 압력 분석 결과

3.2.1 LS에 따른 압력 분석 결과

트랙터 LS에 따른 비례제어밸브 압력 특성은 트랙터 엔진 회전속도 4수준 및 각 엔진 회전속도에서의 조향각 3수준에 대하여 그림 7과 같이 나타났다. 압력 특성 또한 동일한 엔진 회전속도 조건에서 조향각이

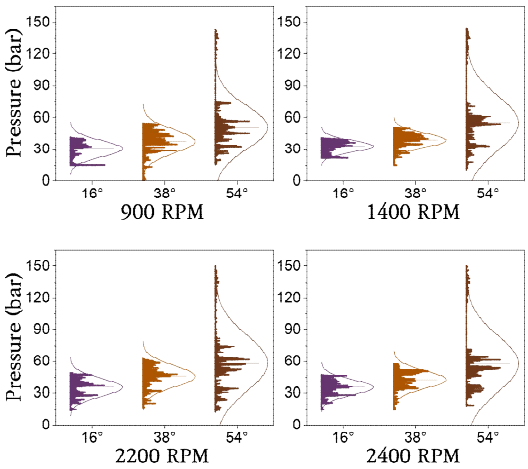

그림 7. LS 제어에 따른 비례제어밸브 압력 계측 결과
Fig. 7. Results of pressure measurement for proportional valve by LS control

증가할 때 비례제어밸브의 압력도 같이 증가하는 것으로 나타났으며, 동일한 조향각 조건에서 엔진 회전속도가 증가할 때 압력도 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 압력은 엔진 회전속도 조건과 관계없이 최대 조향각인 54°에 도달할 때, 급격히 상승하는 특성을 보인다. 이는 중립 상태에서 최대 조향각 까지 회전하는 전체 조향 구간에서 매우 짧은 시간 동안 발생하며, 릴리프 밸브 압력인 약 150 bar 까지 상승하는 것으로 나타났다.

트랙터 LS에 따른 비례제어밸브 압력 특성의 통계분석 결과는 표 4와 같다. 동일한 엔진 회전속도 조건에서 조향각 16°에서 38° 및 54°로 증가할 때, 엔진 회전속도 900rpm 조건에서 각각 압력은 125%, 172% 증가하였고, 엔진 회전속도인 2400 rpm 조건에서 각각 압력은 123%, 153% 증가하였다. 더 낮은 엔진 회전속도 조건에서 조향각이 증가함에 따른 압력의 증가폭이 더 높게 나타났다. 또한, 동일한 조향각 조건에서 엔진 회전속도가 900 rpm에서 1400, 2200, 2400 rpm으로 증가할 때, 조향각 16° 조건에서 각각 압력은 105%, 119%, 122% 증가하였고, 조향각 54° 조건에서는 각각 압력이 102%, 106%, 108% 증가하였다. 더 낮은 조향각 조건에서 엔진 회전속도 증가에 따른 압력 증가폭이 더 크게 나타났다. 동일한 엔진 회전속도 조건에서 조향각에 따른 압력 특성은

통계적으로 유의한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 반면에, 동일한 조향각 조건에서 엔진 회전속도에 따른 압력 특성은 대부분 통계적으로 유의한 차이를 보였으나, 일부 조건(조향각 54° 에서 엔진 회전속도 900 rpm 및 1,400 rpm)에서 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다.

표 4. LS 제어에 따른 비례제어밸브 압력 분석 결과
Table 4. Results of pressure analysis for proportional valve by LS control (Unit : bar)

E/G (rpm)	Steering Angle (°)		
	16	38	54
900	29.6±7.2^{d}	37.1±9.1^{d}	50.8±20.4^{c}
1400	31.0±6.0^{c}	38.2±6.9^{c}	51.9±21.4^{c}
2200	35.3±9.0^{b}	46.5±11.5^{a}	53.6±22.8^{b}
2400	36.0±9.5^{a}	44.1±9.0^{b}	55.0±22.8^{a}

1) Average ± standard deviation.
2) Means with different superscripts (a,b,c,d) in each column are significantly different at p 〈 0.05 by LSD multiple range tests.

3.2.2 RS에 따른 압력 분석 결과

트랙터 RS에 따른 비례제어밸브 압력 특성은 그림 8과 같이 나타났다. 동일한 조향각 조건에서 엔진 회전속도가 증가할 때 압력은 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 엔진 회전속도 조건에서 조향각이 증가할 때 압력이 증가하는 것으로 나타났으며, 트랙터 조향각이 최대 조향각 54°에 인접할 때 동일한 압력 급증 현상이 나타났다. 이러한 현상은 엔진 회전속도 조건과 관계없이 조향각에 따라 발생하며, 유압 회로 내 릴리프 밸브 압력인 약 150 bar 까지 빠르게 증가하는 것으로 나타났다. 또한, LS 제어에 따른 비례제어밸브 압력 특성과 마찬가지로 전체 조향 제어 구간의 매우 짧은 구간에서만 발생하였다.

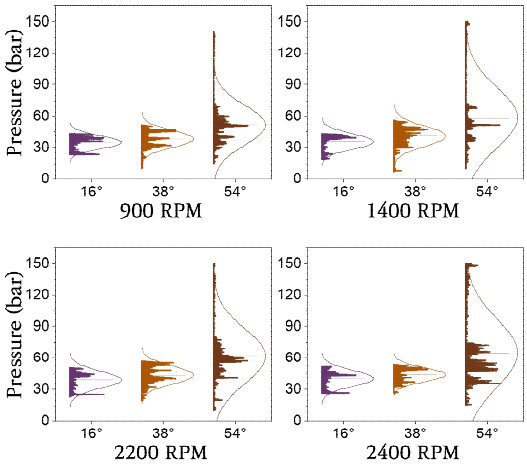

그림 8. RS 제어에 따른 비례제어밸브 압력 계측 결과
Fig. 8. Results of pressure measurement for proportional valve by RS control

트랙터 RS에 따른 비례제어밸브 압력 특성의 통계적 분석 결과는 표 5와 같다. 동일한 엔진 회전속도 조건에서 조향각이 16°에서 38° 및 54°로 증가할 때, 엔진 회전속도 900 rpm 조건에서 각각 압력은 113%, 154% 증가하였고, 엔진 회전속도인 2400 rpm 조건에서 각각 압력은 112%, 137% 증가하였다. 더 낮은 엔진회전속도 조건에서 조향각 증가에 따른 압력 증가폭이 더 크게 나타났다. 또한, 동일한 조향각 조건에서 엔진회전속도가 900 rpm에서 1400, 2200, 2400 rpm으로 증가할 때, 조향각 16° 조건에서 각각 압력은 106%, 118%, 121% 증가하였고, 조향각인 54° 조건에서는 각각 압력은 107%, 112%, 108% 증가하였다. 더 낮은 조향각 조건에서 엔진 회전속도 증가에 따른 압력 증가폭이 더 크게 나타났다. 또한, 동일한 엔진 회전속도 조건에서 조향각에 따른 압력 특성은 모든 조건에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 반면에, 동일한 조향각 조건에서 엔진 회전속도에 따른 압력 특성은 대부분 통계적으로 유의한 차이를 보였으나, 일부 조건(조향각 38° 일 때 엔진 회전속도 2,200 rpm 및 2,400 rpm 조건과 조향각 54° 일 때 엔진 회전속도 1,400 rpm 및 2,400 rpm)에서는 통계적으로 유의한 차이가 보이지 않았다.

표 5. RS 제어에 따른 비례제어밸브 압력 분석 결과
Table 5. Results of pressure analysis for proportional valve by RS control (Unit : bar)

E/G (rpm)	Steering Angle (°)		
	16	38	54
900	33.5±7.4[d]	38.4±7.9[c]	51.6±18.8[c]
1400	35.6±7.6[c]	41.1±6.7[b]	55.3±26.1[b]
2200	39.4±7.9[b]	45.4±7.6[a]	57.9±24.3[a]
2400	40.7±7.5[a]	45.5±5.5[a]	55.8±23.8[b]

1) Average ± standard deviation.
2) Means with different superscripts (A,B,C,D) in each column are significantly different at p < 0.05 by LSD multiple range tests.

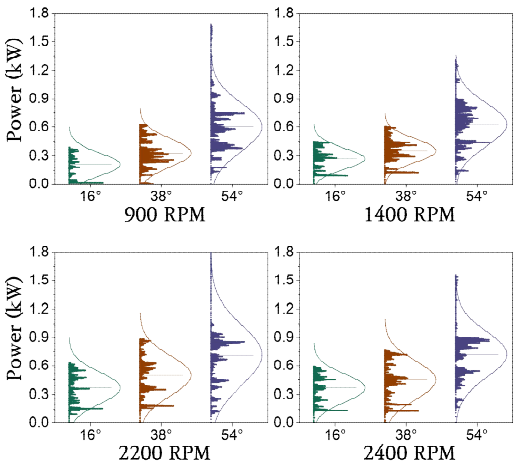

그림 9. LS 제어에 따른 비례제어밸브 동력 계측 결과
Fig. 9. Results of power measurement for proportional valve by LS control

3.3 동력 분석 결과

3.3.1 LS에 따른 동력 분석 결과

트랙터 LS에 따른 비례제어밸브 동력 특성은 트랙터 엔진 회전속도 4수준 및 각 엔진 회전속도에서의 조향각 3수준에 대하여 그림 9와 같이 나타났다. 트랙터 엔진 회전속도 및 조향각 증가에 따라 동력 또한 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 트랙터 조향각이 최대 조향각인 54°에 인접할 때 동력이 급증하는 현상을 보였으며, 최대 1.3~1.8 kW 까지 증가하였다.

트랙터 LS에 따른 비례제어밸브 동력 특성의 통계적 분석 결과는 표 6과 같다. 동일 엔진 회전속도에서 조향각이 16°에서 38° 및 54°로 증가 할 때, 엔진 회전속도 900 rpm 조건에서 각각 동력은 141%, 173% 증가하였고, 엔진 회전속도 2400 rpm 조건에서 각각 동력은 130%, 195% 증가하였다. 조향각 증가에 따른 동력 증가폭은 엔진 회전속도 조건에 대한 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한, 동일 조향각 조건에서 엔진 회전속도가 900 rpm에서 1400, 2200, 2400 rpm으로 증가할 때, 조향각 16° 조건에서 각각 동력은 127%, 155%, 168% 증가하였고, 조향각 54° 조건에서 각각 동력은 105%, 120%, 120% 증가하였다. 더 낮은 조향각 조건에서 엔진회전속도에 따른 동력 증가폭이 더 크게 나타났다. 또한, 트랙터 LS 제어시의 유량, 압력, 동력 특성 중 동력 특성이 엔진 회전속도 및 조향각에 따른 변동폭이 가장 크게 나타났다. 또한, 동일한 엔진 회전속도 조건에서 조향각 차이에 따른 동력 특성은 모든 조건에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 반면에, 동일한 조향각 조건에서 엔진 회전속도에 따른 동력 특성은 일부 조건(조향각 54° 에서 엔진 회전속도 2,200 rpm 및 2,400 rpm) 에서는 통계적으로 유의한 차이가 보이지 않았다.

표 6. LS 제어에 따른 비례제어밸브 동력 분석 결과
Table 6. Results of power analysis for proportional valve by LS control (Unit : kW)

E/G (rpm)	Steering Angle (°)		
	16	38	54
900	0.22±0.10[d]	0.31±0.12[d]	0.60±0.25[c]
1400	0.28±0.13[c]	0.36±0.12[c]	0.63±0.22[b]
2200	0.34±0.18[b]	0.50±0.17[a]	0.72±0.32[a]
2400	0.37±0.15[a]	0.48±0.18[b]	0.72±0.24[a]

1) Average ± standard deviation.
2) Means with different superscripts (a,b,c,d) in each column are significantly different at p < 0.05 by LSD multiple range tests.

3.3.2 RS에 따른 동력 분석 결과

트랙터 RS에 따른 비례제어밸브 동력 특성은 트랙

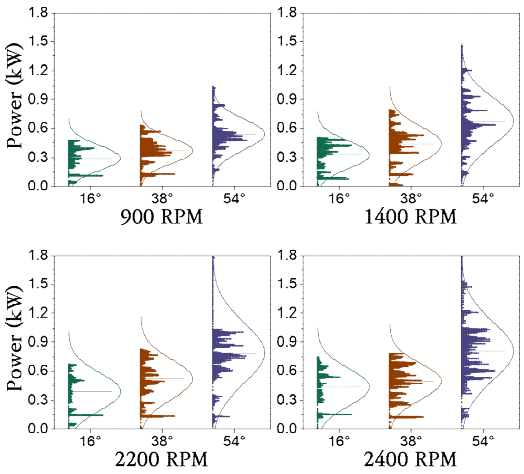

그림 10. RS 제어에 따른 비례제어밸브 동력 계측 결과

Fig. 10. Results of power measurement for proportional valve by RS control

터 엔진 회전속도 4수준 및 각 엔진 회전속도에서의 조향각 3수준에 대하여 그림 10과 같이 나타났다. 트랙터의 엔진 회전속도 및 조향각이 증가함에 따라 비례제어밸브 동력이 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 최대 조향각 54°에서 급격한 동력 증가가 발생하였다. 동력은 최대 1.0~1.8 kW까지 증가하는 것으로 나타났다.

트랙터 RS에 따른 비례제어밸브 동력 특성의 통계적 분석 결과는 표 7과 같다. 동일 엔진 회전속도 조건에서 조향각이 16°에서 38° 및 54°로 증가 할 때, 엔진 회전속도 900 rpm 조건에서 각각 동력은 123%, 180% 증가하였고, 엔진 회전속도 2400 rpm 조건에서 각각 동력은 123%, 179% 증가하였다. 조향각 증가에 따른 동력 증가폭은 엔진 회전속도 조건에 따른 차이가 미미한 것으로 나타났다. 또한, 동일 조향각 조건에서 엔진회전속도 900 rpm에서 1400, 2200, 2400 rpm으로 증가할 때, 조향각 16° 조건에서 각각 동력은 107%, 130%, 143% 증가하였고, 조향각 54° 조건에서 각각 동력은 126%, 146%, 143% 증가하였다. 엔진 회전속도 증가에 따른 동력 증가폭은 조향각 조건에 따른 차이가 크지 않으며, 더 높은 조향각에서 동력 증가폭이 더 크게 나타나는 것으로 보였다. 또한, 트랙터 RS 제어시의 유량, 압력, 동력 특성 중 동력 특성이 엔진 회전속도 및 조향각에 따른 변동폭이 가장 크게 나타났다. 또한, 동일한 엔진 회전속도 조건에서 조향각 차이에 따른 동력 특성은 모든 조건에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 반면에, 동일한 조향각 조건에서 엔진 회전속도에 따른 동력 특성은 일부 구간에서(조향각 54° 에서 엔진 회전속도 2,200 rpm 및 2,400 rpm) 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다.

표 7. RS 제어에 따른 비례제어밸브 동력 분석 결과

Table 7. Results of power analysis for proportional valve by RS control (Unit : kW)

E/G (rpm)	Steering Angle (°)		
	16	38	54
900	0.30±0.13^{d}	0.37±0.13^{d}	0.54±0.16^{c}
1400	0.32±0.14^{c}	0.44±0.18^{c}	0.68±0.25^{b}
2200	0.39±0.19^{b}	0.52±0.20^{b}	0.79±0.31^{a}
2400	0.43±0.19^{a}	0.53±0.15^{a}	0.77±0.29^{a}

1) Average ± standard deviation.
2) Means with different superscripts (a,b,c,d) in each column are significantly different at $p < 0.05$ by LSD multiple range tests.

4. 결론

본 연구는 대형 트랙터용 비례제어밸브의 국산화를 위한 기초연구로써, 트랙터 엔진 회전속도 및 조향각과 같은 다양한 작업조건에 따른 비례제어밸브의 동특성을 계측 및 분석하기 위하여 수행되었으며, 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 트랙터 계측 시스템은 조향용 비례제어밸브 동특성 계측을 위하여 개발되었다. 작업 조건별 비례제어밸브의 동특성 분석을 위하여 유량센서 및 압력센서를 비례제어밸브에 설치하였다. 이를 통해 수집된 유량 및 압력 데이터를 이용하여 동력을 계산하였으며, 각 조건별 동특성에 대하여 분석하였다.

(2) 트랙터 비례제어밸브 동특성 분석을 위하여 계측 시험조건을 엔진회전속도 4수준(900, 1400, 2200, 2400 rpm) 및 조향각 3수준(16, 38,

54°)으로 설정하고, 작업조건별 데이터 수집을 수행하였다.

(3) 데이터 분석 결과, 트랙터 엔진회전속도 및 조향각이 증가함에 따라, 비례제어밸브의 유량, 압력, 동력이 증가하는 것으로 나타났다. 통계분석 결과 조향각에 따라서는 비례제어밸브 특성이 모든 구간에서 유의한 차이를 보였다. 반면에, 엔진회전속도에 따라서는 대부분 유의한 차이를 보였으나 일부 구간에서 유의한 차이를 보이지 않았다. 따라서, 조향각이 엔진 회전속도 대비 비례제어밸브의 동특성에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

(4) 본 연구에서 제시한 동특성 데이터는 트랙터 자동 조향 시스템용 비례제어밸브의 국산화를 위한 설계 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 조향시스템의 신뢰성 평가와 제어 알고리즘 개발 등 다양한 분야에 활용될 수 있을 것으로 보인다. 이러한 이점에도 불구하고, 본 연구는 몇 가지 한계를 가지고 있다. 실험은 노면 변수에 의한 요인을 통제하기 위하여 우레탄 노면 조건에서 수행되었으나, 이는 실제 트랙터가 거동하는 토양조건과 큰 차이가 있을 것으로 판단된다. 또한, 자율주행 트랙터를 이용한 농작업 시 불규칙한 노면에 따라 단 시간내에 실시간으로 조향을 제어하지만, 본 연구에서는 이를 반영하지 못하였다. 이와 같은 연구는 향후 연구에서 지속적으로 수행할 계획이다.

REFERENCES

[1] J. H. Jo, S. S. Lee. “A Study on Structural Analysis for Improving Driving Performance of Agricultural Electric Car”. Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology, Vol. 13, No. 6, pp. 556-561, 2020.

[2] D. S. Seo, J. H. Won, C. J. Yang, G. H. Kim, K. D. Kwon, K. C. Kim, Y. K. Hong, H. S. Ryu, "Development of Boundary Detection Methods Based on Images for Path Following of Autonomous Tractor", The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 46, No. 11, pp. 2078-2087, 2021.

[3] W. S. Kim, W. S. Lee, Y. J. Kim, “A review of the applications of the internet of things (IoT) for agricultural automation”, Journal of Biosystems Engineering, Vol. 45, No. 4, pp. 385-400, 2020.

[4] X. Z. Han, H. J. Kim, H. C. Moon, H. J. Woo, J. H. Kim, Y. J. Kim, "Development of a Path Generation and Tracking Algorithm for a Korean Auto-guidance Tillage Tractor", Journal of Biosystems Engineering, Vol. 38, No. 1 pp. 1-8, 2013.

[5] KAMICO (Korean Agricultural Machinery Industry Cooperative), KSAM (Korea Society for Agricultural Machinery), “Agricultural Machinery Yearbook Republic of Korea”, 2017.

[6] NIAS (National Institute of Agricultural Sciences), “2019 Survey on utilization status of agricultural machinery”, 2019.

[7] Y. T. Kim, Y. H. Kim, S. M. Baek, Y. J. Kim, "Technology Trend on Autonomous Agricultural Machinery", Journal of Drive and Control, Vol. 19, No. 1, pp. 95-99, 2022.

[8] X. Z. Han, H. J. Kim, C. W. Jeon, J. H. Kim, "Simulation Study to Develop Implement Control and Headland Turning Algorithms for Autonomous Tillage Operations", Journal of Biosystems Engineering, vol. 44, no. 4 pp. 245-257, 2019

[9] D. H. Seo, I. H. Seo, S. O. Chung, K. D. Kim, “Development of Steering Control System based on CAN for Autonomous Tractor System”. Korean Journal of Agricultural Science, Vol. 37, No. 1, pp. 123-130, 2010.

[10] C. Lee, C. W. Jeon, X. Z. Han, J. H. Kim, H. J. Kim, “Application of Electrohydraulic Proportional Valve for Steering Improvement of an Autonomous Tractor”. Journal of Biosystems Engineering, Vol. 47, pp. 167-180, 2022.

[11] S. H. Hwang, H. S. Kim, S. J. Heo, “Effects of Design Parameters of Power Steering System for Passenger Cars on the Vehicle

Steering Characteristics", Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 4, No. 4, pp. 38-45, 1996,

[12] G. H. Jung, "Auto Tuning of Position Controller for Proportional Flow Control Solenoid Valve". Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 36, No. 7, pp. 797-803, 2012.

[13] K. B. Kim, I. S. Kim, Y. S. Kim, J. S. Kim, "Motion Analysis and LQG/LTR Control of a Proportional Solenoid Valve". Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 35, No. 12, pp. 1607-1612, 2011.

[14] G. H. Jung, "Liner Analysis of IMV Proportional Flow Control Valve Static Characteristics", Journal of Drive and Control, Vol. 16, No. 4, pp. 56-64, December, 2019.

[15] G. H. Jung, "Trajectory Control of Excavator Actuators Using IMV", Journal of Drive and Control, Vol. 17, No. 2, pp. 45-54, 2020.

[16] M. S. Shin, J. W. Cho, J. G. Kim, S. M. Lee, K. H. Lee, Y. S. Jeong, J. Y. Oh, "Development of Analytical Model of the Steering System for Construction Equipment Using the Electro-Hydrostatic Actuator", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 44, No. 12, pp. 979-985, 2020.

[17] J. Y. Huh, "Position Control of an Electro-hydraulic Servo System with Sliding Mode", Journal of Drive and Control, Vol. 18, No. 3 pp. 16-22, 2021.

[18] H. Bo, W. Liang, D. Yuefeng, S. Zhenghe, M. Enrong, Z. Zhongxiang, "Design and experiment on integrated proportional control valve of automatic steering system", IFAC-PapersOnLine, Vol. 51, No. 17, pp. 389-396, 2018.

[19] D. H. Lee, K. S. Lee, W. Y. Park, "A Study on Traction Prediction of Agricultural Tractor by Empirical Method", Journal of Biosystems Engineering, Vol. 34, No. 5, pp. 297-304, 2009.

[20] W. S. Kim, Y. S. Kim, T. J. Kim, S. U. Park, Y. Choi, I. S. Choi, Y. K. Kim, Y. J. Kim, "Analysis of Power Requirement of 78 kW Class Agricultural Tractor According to the Major Field Operation", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 43, No. 12, pp. 911-922, 2019.

저자약력

민 이 서 (Yee-Seo Min) **[학생회원]**

- 2018년 3월 ~ 현재: 경북대학교 농업토목·생물산업공학부 생물산업기계공학전공 학부과정

〈관심분야〉 생물산업기계, 농업인포매틱스, 디지털농업

김 용 주 (Yong-Joo Kim) **[정회원]**

- 2004년 2월: 성균관대학교 바이오메카트로닉스학과 (공학박사)
- 2013년 1월 ~ 2014년 2월: LS엠트론 중앙연구소 동력기계 기술그룹 그룹장
- 2014년 3월 ~ 현재: 충남대학교 바이오시스템기계공학과 교수

〈관심분야〉 농업 모빌리티, 농업 동력 및 트랙터, 부하계측 및 분석, 친환경 농업기계 설계

김 완 수 (Wan-Soo Kim) **[정회원]**

- 2021년 2월: 충남대학교 농업기계공학과 (공학박사)
- 2021년 3월 ~ 2022년 2월: 충남대학교 농업과학연구소 연구교수
- 2022년 3월 ~ 현재: 경북대학교 농업토목·생물산업공학부 생물산업기계공학전공 조교수

〈관심분야〉 농업인포매틱스, 디지털농업, 농업 동력 및 트랙터