

필드 부하 분석을 이용한 정/역회전 로타베이터의 소요 동력 예측

김정길*, 박진선*, 조승제*, 이동근*, 박영준**,***,****, 문상곤****, #

*한국생산기술연구원 지능형농기계연구그룹, **서울대학교 바이오시스템공학과, ***서울대학교 농업생명과학연구원, ****서울대학교 융합전공글로벌스마트팜, *****한국기계연구원 스마트산업기계연구실

Prediction of Power Consumed By Forward and Reverse Rotation Rotavator using Field Load Analysis

Jeong-Gil Kim*, Jin-Sun Park*, Seung-Je Cho*, Dong-Keun Lee*,
Young-Jun Park**,***,****, Sang-Gon Moon****, #

*Smart Agricultural Machinery R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology

**Department of Biosystems Engineering, Seoul National University

***Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

****Convergence Major in Global Smart Farm, Seoul National University

*****Department of Smart Industrial Machinery, Korea Institute of Machinery & Materials

(Received 21 June 2021; received in revised form 07 July 2021; accepted 05 July 2021)

ABSTRACT

In this study, we installed forward and reverse rotation rotavators on a tractor to measure the load in the field and analyze the power consumed. The rotavator is attached to the rear of the tractor and transmits the power applied from the power take off (PTO) of the tractor to the rotating shaft of the rotavator, and it plows or reverses the soil according to the rotational direction of the rotating shaft. Depending on the rotational direction of the rotavator, the power consumed in the tractor engine and the power transmitted to the tractor axle and rotavator also vary, thus, research of load and power is an essential factor in designing the system. As a field test results, 84.1-93.5% power was consumed by the forward rotation rotavator, and 37.8-57.5% power was consumed by the reverse rotation rotavator. In addition, depending on the rotation direction of the rotavator, the power consumed by the tractor was in the order of PTO and axle. Based on the research results, development of reliable rotavator systems would be possible in the future research.

Key Words : Rotavator(로타베이터), Forward/Reverse Rotation(정/역방향 회전), Field Load(필드 부하)

1. 서 론

로타베이터는 트랙터 후방에 위치한 3점 히치부에 장착되며, 트랙터 후방의 동력 취출 장치(PTO, power take-off)와 로타베이터 기어박스를 연결하여 트랙터의 동력이 로타베이터에 전달된다. 전달된 동력은 로타베이터의 회전축에 연결된 여러 로타리

Corresponding Author : sgmoon@kimm.re.kr

Tel: +82-42-868-7978, Fax: +82-42-868-7477

날(경운날)을 회전하여 토양을 쇄토하고 반전한다. 로타베이터의 로타리날의 회전 방향에 따라 정방향 회전 로타베이터와 역방향 회전 로타베이터로 구분된다^[1]. 정방향 회전 로타베이터는 딱딱하고 큰 흙덩어리를 잘게 쇄토하는 작업에 주로 사용되며, 역방향 회전 로타베이터는 돌과 같이 무겁고 딱딱한 흙덩어리를 토양 하부에, 부드러운 흙을 토양 상부에 위치하도록 토양을 반전하는 작업에 주로 사용된다. 로타베이터의 회전 방향(작업 용도)에 따라 트랙터의 차축, 로타베이터에 인가되는 동력이 달라지며, 이는 트랙터 및 로타베이터의 설계에 있어 중요한 인자로 시스템의 신뢰성에 영향을 준다.

이전 연구에서 Kim 등은 트랙터를 활용하여 디스크 플라우 작업과 로타리 작업에 대한 부하를 계측하고 가속도를 확인하였다^[2]. 이를 통해 디스크 플라우 작업보다 로타리 작업의 가속도가 큼을 확인하였으며, 낮은 주행 단수 및 동력 취출 장치 단수를 사용하는 것이 동력 취출 장치의 수명 측면에서 유리함을 보였다. Park 등은 로타리 작업에서 경운 피치를 변화시키면서 동력 취출 장치의 동력을 확인하였다^[3]. 이를 통해 경운 피치가 클수록 동력 취출 장치의 동력이 높게 나타남을 확인하였다. Back 등은 트랙터 변속기의 내구성 향상 및 최적 설계를 위하여 부하 수준이 높은 로타리 작업에 따른 등가 토크를 측정하여 분석하였다^[4]. 이를 통해 작업 시, 직진 구간의 로타리 작업보다 선회 구간의 로타리 작업이 부하가 큼을 보였다. Myung 등은 트랙터를 활용하여 로타리 작업 시, 로타리날을 개발하기 위한 기초자료로 활용하기 위해 로타리 작업에 소요 되는 동력을 측정하였다^[5]. 이를 통해 미경운 상태의 논에서 소요 동력이 가장 작으며, 미경운 상태의 밭에서 소요 동력이 가장 크게 나타났다. Kim 등은 로타리날의 개량 연구를 위하여 형상이 다른 3종의 로타리날을 활용하여 부하 특성을 분석하였다^[6]. 이를 통해 로타리날의 회전 반경이 작음에 따라 최대 토크가 작으며, 형상각이 커짐에 따라 최대 토크 및 평균 토크가 감소함을 확인하였다. Kim 등은 트랙터 변속기의 최적 설계를 위해 계측형 트랙터를 활용하여 로타리 작업, 쟁기 작업을 수행하였다^[7,8]. 이를 통해 실부하를 활용함으로써 신뢰성 있는 변속기의 설계가 가능할 것으로 판

단하였으며, 로타리 작업 시에는 트랙터 차축의 소요 동력보다 동력 취출 장치의 소요 동력이 큼을 확인하였다.

기존 연구들에서는 플라우와 로타리 작업의 하중 비교, 로타리 작업 시 경운 피치 변화, 로타리날의 형상 변화에 따른 소요 동력 변화, 트랙터 부착형 작업기를 활용한 시스템의 소요 동력을 비교 분석하였다. 그러나 로타베이터의 로타리날 회전 방향에 따른 시스템의 소요 동력 변화에 대한 연구는 미비한 실정이며, 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 계측형 트랙터를 활용하여 정방향 회전 로타베이터와 역방향 회전 로타베이터를 장착하여 필드에서 부하를 계측하고 회전 방향에 따른 소요 동력을 분석하고자 한다.

2. 부하 계측을 위한 시스템 구성

계측형 트랙터는 동양물산의 TX 58모델을 활용하여 시스템을 구성하였으며, Fig. 1에 나타내었다. 트랙터의 각 바퀴에서 휠과 차축 사이에 휠 토크미터와 스플라인 형상의 원판을 장착하였다. 휠 토크미터를 활용하여 작업 시에 각 바퀴에 걸리는 토크를 계측하였으며, 스플라인 형상의 원판과 수직 방향으로 근접 센서를 장착하여 각 바퀴의 회전수를



Fig. 1 Configuration of the tractor system

계측하였다. 또한 트랙터 후방의 동력 취출 장치(PTO)와 로타베이터 사이에 PTO 토크미터를 장착하여 로타베이터에 인가되는 토크 및 회전수를 계측하였다. 이와 관련하여 트랙터의 제원 및 계측시스템은 Table 1에 나타내었다. 트랙터의 전방에는 한일공업의 HIT 400L모델의 로더가 장착되어 있

며, 로더의 중량은 515kg이다. 트랙터의 후방에는 그린맥스의 NA 185모델의 정방향 회전 방식의 로타베이터와 동일 회사의 KG 170모델의 역방향 회전 방식의 로타베이터를 각각 장착하여 소요 동력을 분석하였다. 로타베이터의 형상은 각각 Fig. 2와 3에, 제원은 Table 2와 3에 나타내었다.

트랙터 및 로타베이터의 소요 동력 계측을 위한 시험 포장지는 전북 김제와 익산이며, 시험 포장지의 면적은 각각 1,925m²와 2,366m²이다.

Table 1 Specifications of the tractor system

Item	Specification
Tractor	- Model / Company / Nation : TX58 / Tongyang Moolsan / Korea - Length×Width×Height : 3,695×1,840×2,560 mm - Wheelbase : 2,155 mm - Weight : 2,615 kg
Engine	- Power : 42 kW/2,200 rpm - Displacement : 3,695 cc
Transmission	- Gear shift : F24 / R24
PTO	- Stage(Revolutions per minute) : 1(540) / 2(750) / 3(1,000)
Wheel torquemeter	- Model/Company/Nation : RF-15000-275 / MANNER Sensortelemetrie / Germany - Nominal load: 25 kN·m - Measuring range: -25 ~ 25 kN·m - Accuracy: 0.1%
Proximity sensor	- Model/Company/Nation : CYGTS211B / ChenYang Technologies GmbH&Co. KG / Germany - Response frequency: 1Hz ~ 20kHz - Sensing distance: 3 mm
PTO torquemeter	- Model/Company/Nation : MW_B_5kNm_PCM16/MANNER Sensortelemetrie/Germany - Nominal load: 5kN·m - Measuring range: -5~5 kN·m - Maximum speed: 2,000 rpm - Accuracy: 0.1%
Data acquisition system	- Model/Company/Nation : Q. brix//Gantner instruments / Austria



Fig. 2 Forward rotation rotavator

Table 2 Specifications of forward rotation rotavator

Item	Specification
Model/Company /Nation	- NA185 / Greenmax / Korea
Length × Width × Height	- 900 × 2,050 × 1,060 mm
Weight	- 460 kg
Tillage width	- 1,800 mm



Fig. 3 Reverse rotation rotavator

Table 3 Specifications of reverse rotation rotavator

Item	Specification
Model/Company /Nation	- KG170 / Greenmax / Korea
Length × Width × Height	- 1,820 × 1,720 × 1,013 mm
Weight	- 574 kg
Tillage width	- 1182 mm

로타베이터의 실사용 조건을 고려하여 시험 조건은 트랙터 변속기의 주/부변속 단수 기준으로 L3, L4, M1, M2이며, 동력 취출 장치 단수 기준으로 1, 2로 선정하였다. 시험은 포장지의 면적을 고려하여 8개 조건에 대해 각 단수별로 2회 시험을 수행하였다.

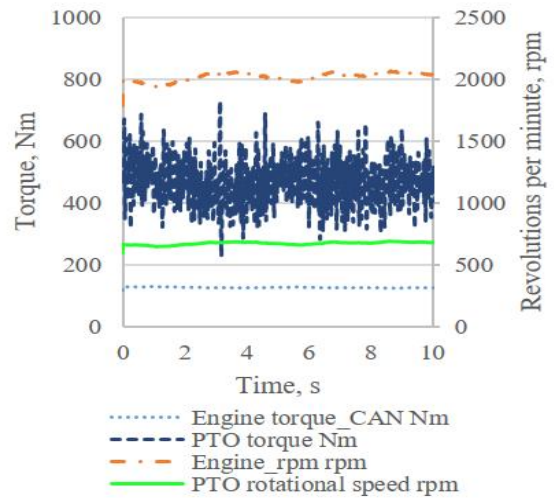
3. 회전 방향에 따른 로타베이터의 부하 계측 및 분석

계측형 트랙터 및 로타베이터를 활용하여 선정된 시험 조건에 따라 트랙터의 엔진 회전수는 정격회전수(2,200rpm)에 설정하고 경심은 트랙터에 히치 레벨을 동일하게 설정한 상태에서 부하를 계측하였다. Fig. 4와 5는 시험 조건 L4-PTO2에서 정방향 회전 로타베이터와 역방향 회전 로타베이터의 부하 계측 데이터 그래프를 나타낸 것이다. 그래프는 엔진, 차축, 동력 취출 장치의 토크 및 회전수로, 차축 토크 및 회전수에서 FR, RR은 첫 글자인 F와 R은 전방 차축과 후방 차축을 의미하며, 다음 글자인 R은 좌측 바퀴와 우측 바퀴 중에 우측 바퀴를 의미한다. 계측 데이터는 좌측과 우측 바퀴를 모두 계측하였으며, 그래프의 표기를 간단하게 보여주기 위하여 좌측 바퀴의 데이터는 표기하지 않았다.

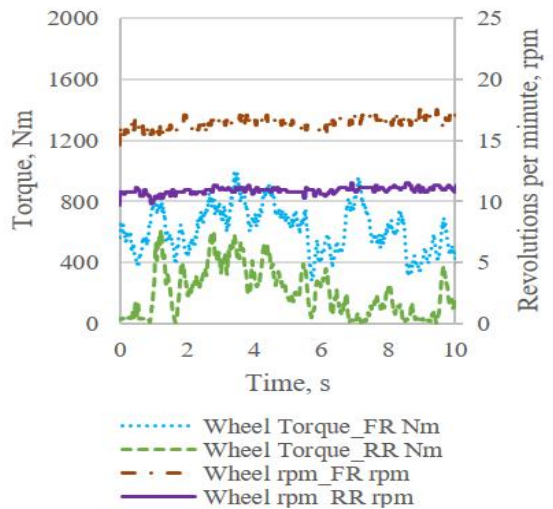
계측 데이터를 활용하여 하중 기간 분포(Load duration distribution) 방법을 활용하여 등가 토크 및 등가 회전수를 분석하였다^[7,9,10]. 등가 토크와 등가 회전수는 식 (1)에 나타내었다.

$$T_{eq} = \sqrt[p]{\frac{\sum T_i^p \times n_i}{N}} \quad N_{eq} = \frac{1}{T_{eq}^p} \sum h_i n_i T_i^p \quad (1)$$

여기서, T_{eq} 는 등가 토크, [N·m], T_i 는 계측 데이터의 i 번째 토크, [N·m], p 는 Wohler curve의 기울기, n_i 는 계측 데이터의 i 번째 토크에 해당하는 회전수, [rpm], N 은 계측 데이터의 회전수에 대한 총합, [rpm], N_{eq} 는 등가 회전수, [rpm], h_i 는 계측 데이터의 i 번째 토크에 해당하는 시간, [s]을 의미한다.



(a) Engine and PTO



(b) Wheel

Fig. 4 Load measurement graph of forward rotation rotavator

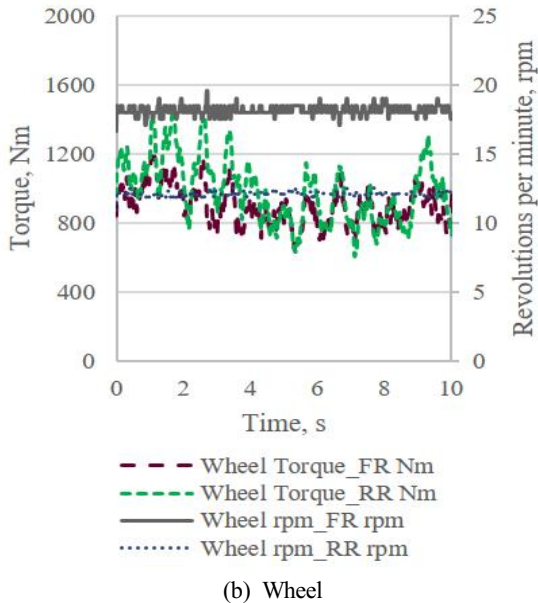
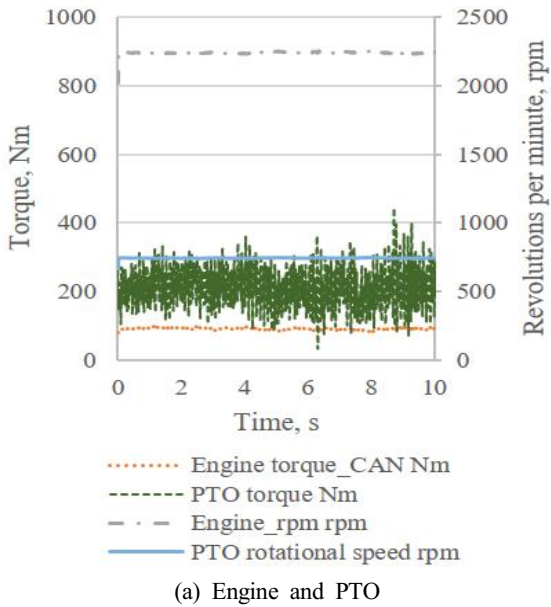


Fig. 5 Load measurement graph of reverse rotation rotavator

Fig. 6과 7은 로타베이터의 부하 분석 결과로, 정방향 회전 로타베이터 작업에서는 엔진에서 발생한 동력이 로타베이터에 동력을 전달하기 위한 동력 취출 장치에 가장 큰 동력이 전달되며, 엔진

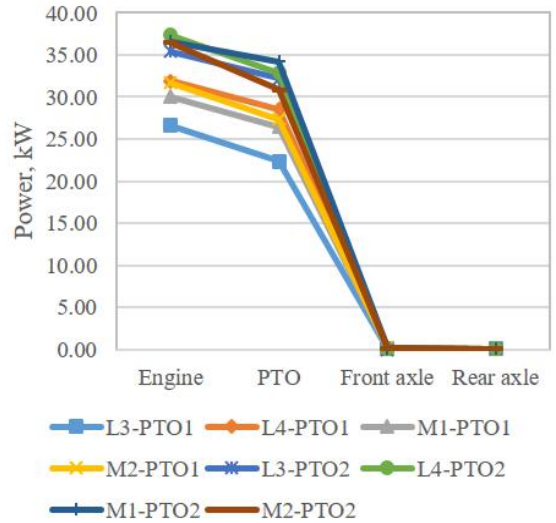


Fig. 6 Load analysis result using forward rotation rotavator

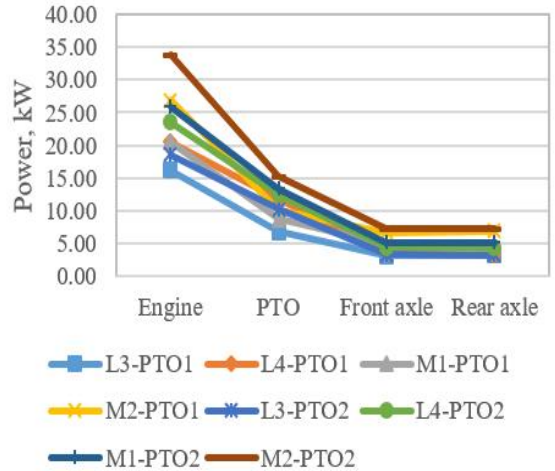


Fig. 7 Load analysis result using reverse rotation rotavator

소요 동력 대비 동력 취출 장치의 소요 동력 비율은 84.1~93.5%로 나타났다. 차축에 전달되는 동력은 미미한 것을 확인할 수 있으며, 엔진 소요 동력 대비 전차축에서 0.1~0.8%, 후차축에서 0.1~0.2%의 동력이 소요되었다. 또한 엔진 및 동력 취출 장치의 소요 동력은 동력 취출 장치 1단보다 2단의 소요 동력이 큰 것을 확인할 수 있다. 정방

향 회전 로타베이터 작업과 동일하게 역방향 회전 로타베이터 작업도 엔진의 소요 동력이 동력 취출 장치에 가장 크게 전달되며 차축에 가장 작은 동력이 전달되었다. 역방향 회전 로타베이터 작업 시에 엔진 소요 동력 대비 각 부품의 소요 동력 비율은 동력 취출 장치에서 37.8~57.5%, 전차축에서 17.7~25.0%, 후차축에서 16.0~25.6%로 나타났다. 정방향 회전 로타베이터 작업에 비해 역방향 회전 로타베이터 작업에서 동력 취출 장치에 전달되는 동력의 비율이 상대적으로 적은 것을 확인할 수 있었다. 이는 정방향 회전 로타베이터는 트랙터 작업 진행 시, 진행 방향과 동일한 방향으로 로타베이터의 로타리날이 회전하여 로타베이터가 트랙터를 뒤에서 밀어주어 차축에는 동력이 미미하게 소요되며, 동력 취출 장치에서 큰 동력이 발생된 것으로 판단된다. 이와 반대로 역방향 회전 로타베이터는 트랙터 작업 진행 시, 진행 방향과 반대 방향으로 로타베이터의 로타리날이 회전하여 트랙터가 로타베이터를 견인하여 차축과 동력 취출 장치에 동력이 배분된 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 계측형 트랙터를 활용하여 정방향 회전 로타베이터와 역방향 회전 로타베이터를 장착하여 회전 방향에 따른 소요 동력을 비교 분석하였다. 이를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 정방향 회전 로타베이터의 소요 동력은 엔진 소요 동력 대비 84.1~93.5%, 역방향 회전 로타베이터의 소요 동력은 엔진 소요 동력 대비 37.8~57.5%로 정방향 회전 로타베이터에 비해 역방향 회전 로타베이터의 소요 동력이 적게 나타났다.
2. 정방향 회전 로타베이터는 작업 시에 트랙터를 뒤에서 밀어 주는 역할을 하며, 역방향 회전 로타베이터는 작업 시에 트랙터가 견인하는 것으로 판단된다.
3. 로타베이터의 회전 방향이 달라도 트랙터의 소요 동력 크기 순서는 동력 취출 장치, 차축 순으로 동일함을 확인하였다.
4. 필드 부하 분석 결과는 트랙터의 차축, 변속기 및 로타베이터의 설계 시 설계 하중으로 활용이 가능하

며, 이러한 필드 부하 축적을 통하여 보다 신뢰성 있는 제품 개발이 가능할 것을 판단된다.

후 기

본 논문은 중소벤처기업부의 재원으로 중소기업 기술정보진흥원의 공동수요기술 R&D사업의 지원을 받아 연구되었음(과제번호 : S3035716).

REFERENCES

1. Kim, J. G., Lee, D. K., Cho, S. J., Oh, J. Y., "Load Measurement and Analysis for Gearbox Design of Reverse Rotation Rotavator," Proceedings of the KSPE 2021 Spring Conference, pp. 201, 2021.
2. Kim, W. S., Kim, Y. J., Park, S. U., Hong, S. J. and Kim, Y. S., "Evaluation of PTO Severeness for 78 kW-Class Tractor According to Disk Plow Tillage and Rotary Tillage", Journal of Drive and Control, Vol. 16, No. 4, pp. 23~31, 2019.
3. Park, S. H., Kim, Y. J., Im, D. H., Kim, C. K., Jung, S. C., Kim, H. J., Lee, J. S. and Kim, S. S., "Characteristics of Tractor PTO Power and Work Loads", Journal of Biosystems Engineering, Vol. 35, No. 1, pp. 15~20, 2010.
4. Baek, S. M., Kim, W. S., Park, S. U. and Kim, Y. J., "Analysis of Equivalent Torque of 78 kW Agricultural Tractor during Rotary Tillage", Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 359~365, 2019.
5. Myung, B. S. and Lee, H. D., "Research on the Actual Condition of Rotary Tilling & Rotary Power Requirement in the Central Area", Journal of The Korean Society of Industry Convergence, Vol. 12, No. 2, pp. 79~83, 2009.
6. Kim, S. S., Lee, Y. S. and Woo, J. K., "Study on the Improvement of Rotary Blade - Tilling Load Characteristic Analysis of the Three Kinds

- of Rotary Blade”, Journal of KSAM, Vol. 22, No. 4, pp. 391~400, 1997.
7. Kim, J. G., Park, J. S., Choi, K. J., Lee, D. K., Shin, M. S., Oh, J. Y. and Nam, J. S., “Analysis of Agricultural Tractor Transmission using Actual Farm Work Load,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 11, pp. 42~48, 2020.
 8. Kim, J. G., Lee, D. K., Oh, J. Y. and Nam, J. S., “Gear Analysis of Hydro-Mechanical Transmission System using Field Load Data,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No. 5, pp. 111~120, 2021.
 9. International Electrotechnical Commission (IEC), “Wind Turbines-Part 4: Design Requirements for Wind Turbine Gearboxes,” IEC 61400-4, 2012.
 10. International Organization for Standardization (ISO), “Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 6 : Calculation of service life under variable load,” ISO 6336-6, 2007.