

ENGINEERING

# Power analysis of electric transplanter by planting distances

Pa-Ul Lee<sup>1</sup>, Jin-Hwan So<sup>2</sup>, Yo-Sang Nam<sup>2</sup>, Chang-Hyun Choi<sup>3</sup>, Hyun-Seok Noh<sup>4</sup>, Jong-Yeal Shim<sup>5</sup>, Soon-Jung Hong<sup>6\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

<sup>2</sup>TYM R&D Center, Tong Yang Moolsan, Gongju 32530, Korea

<sup>3</sup>Department of Bio-mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

<sup>4</sup>HAN'A ESSE Co., Ltd, Gwangju, 62412, Korea

<sup>5</sup>Agri. Machinery Certification Team, Foundation of Agri. Tech. Commercialization & Transfer, Iksan 54667, Korea

<sup>6</sup>Smart Farming Education Team, Rural Human Resource Development Center, Jeonju 54874, Korea

\*Corresponding author: [hsj43333@korea.kr](mailto:hsj43333@korea.kr)

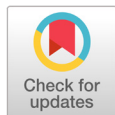
## Abstract

Electric drive technology is continually advanced to improve fuel efficiency in the automobile industry. It could improve the fuel efficiency of automobiles by 50% as well as agricultural machinery. The purpose of this study was to measure and analyze the power and current of an electric transplanter based on the planting distances during field operations. The electric transplanter was constructed by mounting the major components of a motor drive system onto a transplanter. The electric transplanter had a 3 kW motor power, and the major components included an inverter, battery, and a battery management system (BMS). The field tests were conducted by travelling at two speeds (300 and 760 mm/s) and by planting at three distances (260, 420 and 630 mm) with the working speed (300 mm/s), during travelling and transplanting. The results showed that the required power increased when the travelling speed was fast. One-way ANOVA for the planting distance and Duncan's multiple range test at a significance level of 0.05 were used to analyze the motor power using statistical analysis software. In addition, the required power increased when the planting distances were short at every working condition. The results of this study would provide useful information for the development an electric transplanter.

**Keywords :** electric transplanter, power analysis, motor, inverter, battery, battery management system (BMS)

## Introduction

최근 석유 연료의 사용에 따른 대기 오염, 지구 온난화 등 환경에 대한 사회적 관심이 전 세계적으로 높아지고 있는 실정이다(Park and Kim, 2014). 선진국들은 새로운 무역규제 방안의 하나로 그린 라운드(green round)를 채택하고 있으며, 미국은 TIER, 유럽 연합은 STAGE의 배기가스 규제를 지속적으로 확대 및 강화하고 있다(Park and Min, 2016). 이러한 추세에 따라 자동차, 건설 기계 등 다양한 분야에서는 하이브리드(hybrid) 시스템, 전기 구동 시스템 등 관련 연구를 활발히 진행하고 있



### OPEN ACCESS

**Citation:** Lee PU, So JH, Nam YS, Choi CH, Noh HS, Hong SJ. 2018. Power analysis of electric transplanter by planting distances. Korean Journal of Agricultural Science. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20180007>

**DOI:** <https://doi.org/10.7744/kjoas.20180007>

**Editor:** Kyeong Hwan Lee, Chonnam National University

**Received:** September 14, 2017

**Revised:** November 21, 2017

**Accepted:** February 14, 2018

**Copyright:** © 2018 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

다(Kim et al., 2015a).

농업기계 분야에서도 하이브리드 시스템, 전기 구동 시스템 등의 기술을 적용하는 연구가 진행되고 있다(Kim and Park, 2012). Kim et al. (2015b)은 20 kW급의 농기계용 하이브리드 동력시스템을 개발하여 다목적 승용 관리기에 탑재하였으며, 성능 평가는 하이브리드 모드, 엔진 모드, 전동 모드 등 각 모드별로 수행하였다. 그 결과, 하이브리드 동력 시스템은 다른 모드에 비하여 연료의 사용 효율을 높이고, 유해 배기가스를 줄이는데 매우 유용하다고 보고하였다. Kang et al. (2013)은 17 kW급 PHET (Plug-in Hybrid Electric Tractor) 다목적 트랙터를 개발하였으며, 시뮬레이션 모델링을 이용하여 각각의 작업에 적합한 주행 전략 개발 및 작업 능력을 평가하였다. Yoo and Kim (2013)은 ASM (Automotive Simulation Model)을 이용하여 33 kW급 전기 구동 트랙터 시스템을 모델링 후 시뮬레이션 하였다. 이를 통해 트랙터의 동적 특성에 대한 선행 연구 기반을 마련하였으며, 향후 농업기계 전기 구동 시스템 적용 시 설계 가이드라인을 제시하였다.

이식기의 세계농기계 시장 규모는 2013년 10,650백만달러 이었으며, 지속적으로 증가하여 2023년에는 21,500백만달러로 예상된다(KAMICO and KSAM, 2015). 또한, 시설작물 재배면적은 1990년에 44,613 ha에 불과 하였으나 웰빙(well-being)과 신선채소에 대한 관심이 증가함으로써, 2013년에는 86,725 ha로 약 2배 증가하였다(KOSTAT, 2013). 이식기는 일반적으로 시설하우스에서 많이 사용하며, 시설 재배 면적이 증가함에 따라 이식기의 수요도 증가할 것으로 예상된다. 시설하우스의 경우에는 주로 밀폐된 공간에서 작업을 수행하므로 작업자가 매연에 노출되기 쉬우며, 동시에 작물의 2차 오염으로 인체에 유해하므로 전기 구동 시스템 관련 연구가 필요한 실정이다. 하지만, 농업기계 분야에서의 하이브리드와 전기 구동 시스템에 관련된 연구는 대부분 트랙터를 중심으로 수행되었으며, 시설하우스에서 이용되는 이식기에 적용된 사례는 전무한 실정이다.

본 연구는 전기 구동 이식기 개발을 위한 기초연구로써 내연기관 이식기의 엔진을 모터로 대체하여 전기 구동 이식기를 개발하였으며, 전기 이식기의 전체 시스템 성능 평가와 구성 요소별 작업 동력 측정 및 분석하기 위하여 주요 작업에 따른 포장 시험을 수행하였다.

## Materials and Methods

### 이식기

전기 구동 이식기 개발은 다목적 이식기(TVP-1, Tongyang Moolsan Co., LTD., Korea)를 사용하였다. 이식기의 총 중량은 170 kg이며, 크기는 2,170 × 1,220 × 1,300 mm (전장 × 전폭 × 최대 전고)이다. 이식기의 엔진은 공랭식 4행정 OHV (Over Head Valve) 가솔린으로써 정격 출력이 1,800 rpm에서 2.28 kW이다. 주행 변속 단수는 전진과 후진 각각 2단이며, 이식 작물의 주간 거리를 19단계(260 - 630 mm)까지 조절이 가능하다.

### 전기구동 시스템

본 연구에서는 엔진 구동 이식기를 전기 구동 이식기로 대체하여 개발하였으며, 그 구성도는 Fig. 1과 같다. 전기 구동 이식기는 엔진의 동력 대신 모터를 이용하여 구동되며, 이때 모터는 배터리의 동력을 인버터로 변환하여 구동된다. 본 연구에서 개발한 전기 구동 시스템의 자세한 사양은 Table 1과 같다. 전기 이식기 모터로부터의 동력은 클러치를 통과하여 주행부와 이식 작업부에 전달되며, 이때 이식 작업부는 호퍼를 동작하여 묘를 이식하게 된다. 전기 구동 이식기의 모터는 엔진 사양을 고려하여 정격 회전수 2,000 rpm에서 정격 출력 3 kW, 정격 토크 15 Nm를 갖도록 선정하였으며, 이때 모터 구동을 위한 배터리 전압은 48 VDC이다. 또한, 모터 구동 제어 및 배터리 전력 변환을 위한 인버터는 10 kHz의

속도로 모터 출력을 PWM (Pulse Width Modulation) 제어 방식을 이용하여 최대 4 kW, 연속 3 kW의 제어가 가능한 것으로 선정하였다. 배터리는 시설하우스 내에서 작업하는 이식기의 온도와 습도를 고려하여 각각 -20 - 85°C/24시간, 93%/48시간에서 내환경성 평가 기준을 만족하도록 개발하였다. 배터리 용량은 정격 엔진 출력으로 연속 작업 시 약 40 분까지 연속작업이 가능하도록 2 kWh(전류용량 40 Ah)인 리튬 이온(lithium ion) 배터리를 사용하였다. 또한, 배터리는 추가장착을 통하여 연속작업 시간을 증가시킬 수 있도록 모듈형 제품을 사용하였다. 배터리의 SOC (State Of Charge), 배터리 보호를 위한 충전상태 제어 및 인버터와의 통신을 위한 BMS (Battery Management System)는 -20 - 100°C의 범위에서 각각의 셀(cell) 전압과 전류를 각각 -0.7 - 5.2 V와 -100 - 100 A로 측정이 가능한 것으로 선정하였다.

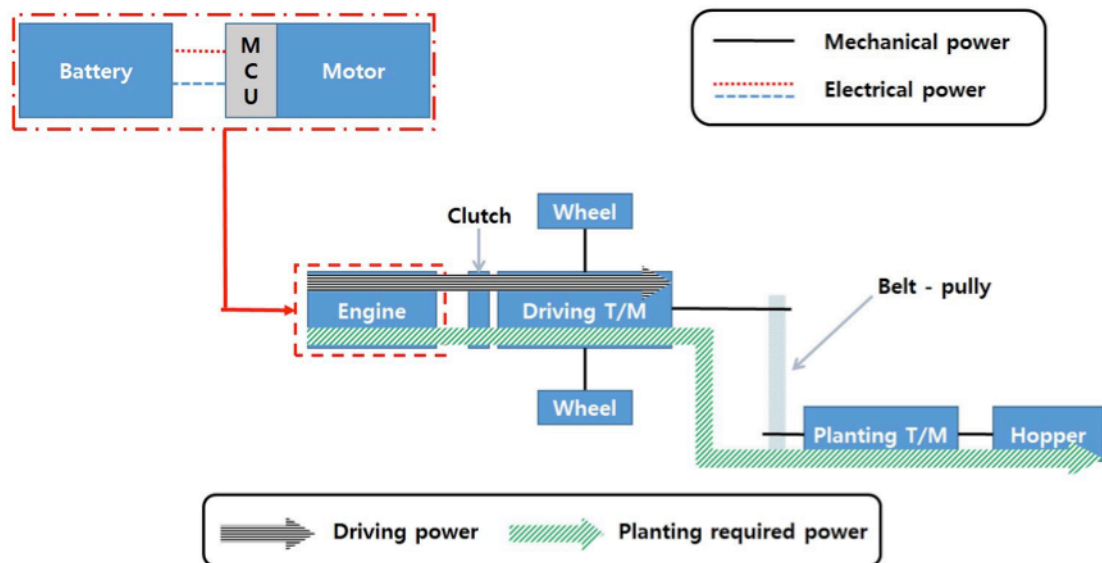


Fig. 1. Drive-line of the electric transplanter used in this study.

Table 1. Specification of electric drive system used in this study.

Items		Specification
Motor	Type	PMSM / BLDC
	Battery voltage	48 VDC
	Rated power	3 kW @ 2,000 rpm
	Rated torque	15 Nm @ 2,000 rpm
Invertor	Input voltage	48 VDC
	Output power	3 kW (Max. 4 kW)
	Output current	80 A (Max. 200 A)
	PWM frequency	10 kHz
Battery	Nominal voltage (V)	48
	Nominal capacity (Ah)	40
	Max. continuous discharge current (A)	120
	Max. continuous charge current (A)	20

PMSM, Permanent magnet synchronous motor; BLDC, Brushless DC electric motor; VDC, Volts age of direct current.

## 동력 측정시스템

본 연구는 내연기관 이식기의 엔진을 모터로 대체하여 전기 구동 이식기 개발하였으므로 기존 이식기의 가솔린 엔진 역할을 하는 모터의 사양 선정이 매우 중요하다. 개발된 전기 이식기의 모터 사양을 분석하기 위하여 주요 작업에 따른 모터의 소요 동력 분석이 필요하다. 하지만 모터의 출력을 직접 측정할 수 없으므로 본 연구에서는 모터의 전류를 측정하여 모터의 출력을 계산하였으며, 전류와 소요 동력을 분석함으로써 선정한 모터의 이식 작업에 따른 성능 평가를 수행하였다. 이때 전류 프로브는 배터리에서 모터를 연결하는 DC+선에 설치하여 구동 전류를 측정하였다. 또한 측정된 구동 전류와 배터리 정격 전압인 48 V를 이용하여 모터의 소요 동력을 계산하였다. 모터 구동 전류는 Fig. 2와 같이 전류 프로브(TCP303, Tektronix, USA)를 이용하여 측정하였으며, 측정된 전류는 오실로스코프(InfiniiVision DSOX- 3024A, Keysight, USA)를 이용하여 데이터 확인 및 저장하였다.

## 포장 시험

전기 이식기의 이식 및 주행 작업에 따른 동력 측정은 충남 공주시 유구읍에 위치한 시설하우스에서 수행하였다. 포장 시험지의 토성 분석은 미농무성(USDA, United States Department of Agriculture)이 제공하는 방법에 의해 수행하였다. 토성 분석 결과, 직경이 0.05 - 0.25 mm 범위에 있는 중간 모래(medium sand) 조건으로 나타났다. 포장 시험 시 작업 거리는 약 10,000 mm로 전진 작업 하였으며, 작업 두둑 폭은 양파 작업 기준인 약 1,200 mm로 두둑 형성기를 통해 작업한 후 포장 시험을 수행하였다. 포장 시험은 전기 구동 이식기의 작업에 따른 소요 동력을 분석하기 위하여 주행, 이식 작업, 주행 동시 이식 작업의 3가지 방법으로 3회 반복 시험하였다.

주행 시 속도는 저속(1단, 300 mm/s)과 고속(2단, 760 mm/s)으로 설정하였으며, 이식 작업 및 주행 동시 이식 작업 시에는 일반적으로 농민들이 사용하는 저속으로 설정하였다. 식부 장치의 주간 거리는 1 - 19 (260 - 630 mm)단 중 처음, 중간, 끝인 260 mm (1단), 420 mm (10단), 630 mm (19단)으로 총 3 수준으로 나누어 작업하였다.

## 분석 방법

전기 이식기의 주간거리에 따라 모터의 소요 동력에 미치는 영향을 분석하기 위하여 통계 분석을 수행하였다. 전기 구동 이식기의 주간 거리에 따른 소요 동력 분석은 통계 분석 프로그램인 SAS 9.4 (Statistical Analysis Institute Inc., Cary,

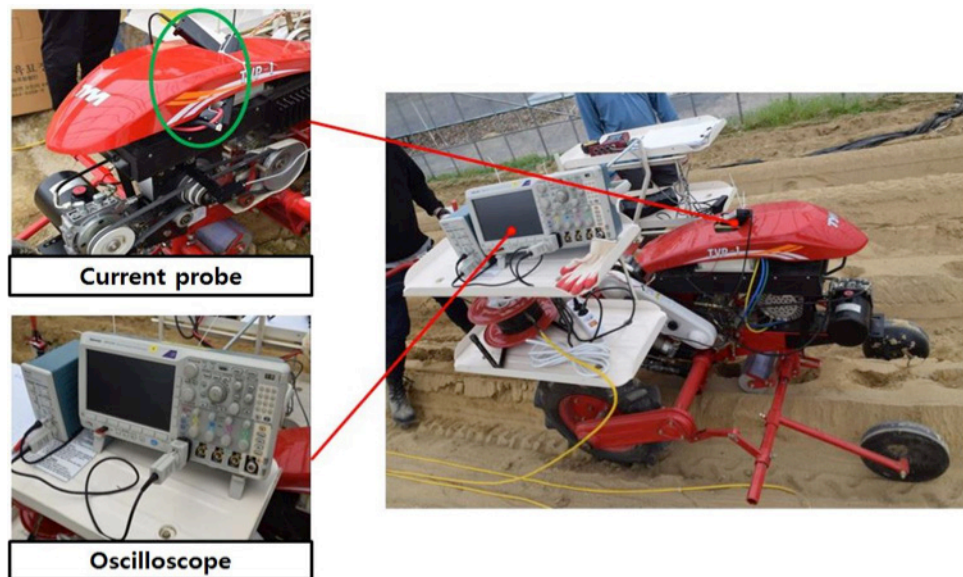


Fig. 2. A current sensor and probe installed on the electric transplanter.

NC, USA)를 이용하여 수행하였다. 통계 분석은 유의수준 5%에서 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)과 Duncan's multiple range test를 수행하였다.

## Results and Discussion

### 전류 측정

주행, 이식 및 주행 중 이식 작업의 3가지 방법에 따른 대표적인 전류 측정 결과는 각각 Fig. 3 - 5와 같이 나타났다. 주행 속도에 따른 소요 전류는 Fig. 3과 같이 고속인 경우 더 높게 나타났다. 이식 작업 시 주간 거리에 따른 소요 전류는 Fig. 4와 같이 주간 거리가 짧을수록 더 크게 나타났다. 주행 중 이식 작업 시 소요 전류는 Fig. 5와 같이 주간 거리가 짧을수록 더 크게 나타났으며, 저속 주행과 이식 단독 작업 보다는 큰 소요 전류를 보여 주었다.

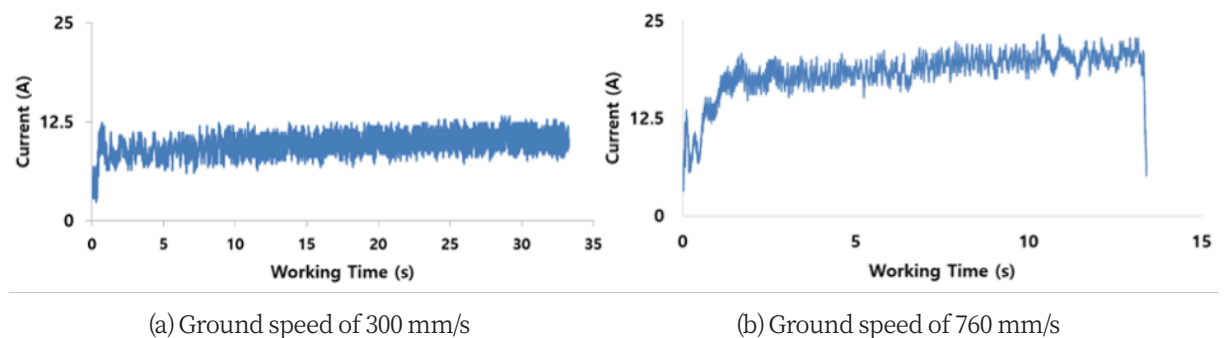


Fig. 3. Measured current at traveling by ground speeds.

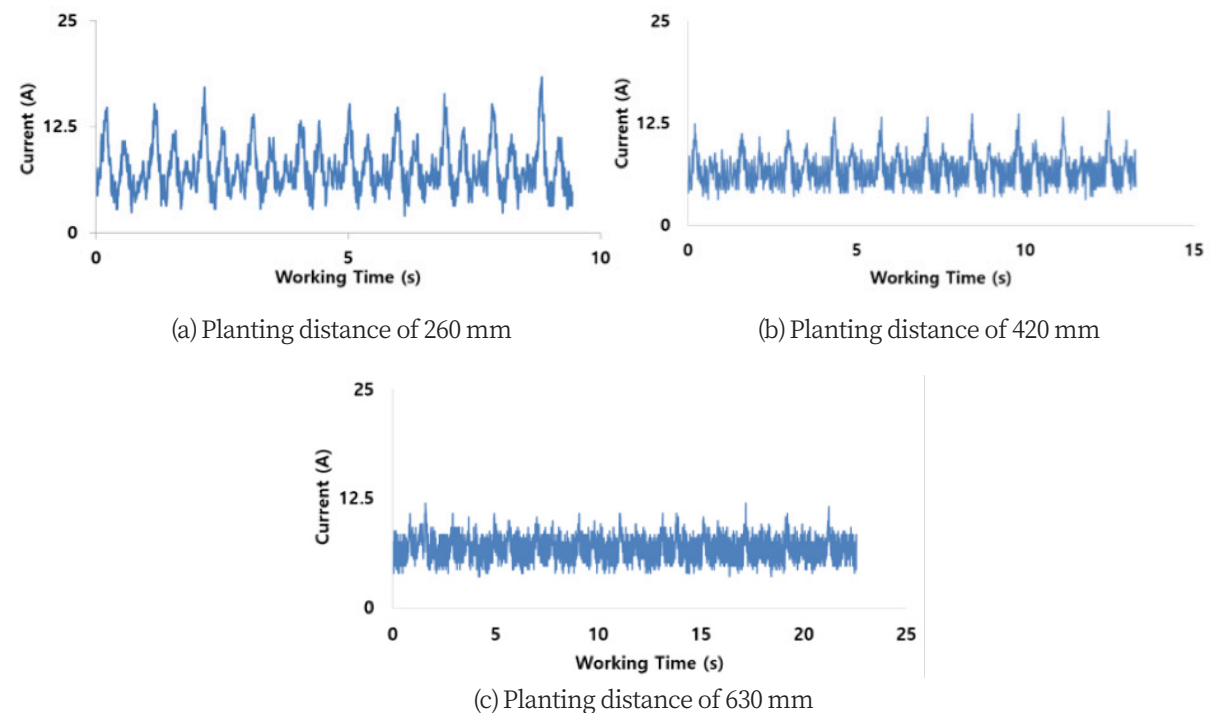


Fig. 4. Measured current at planting by planting distances.

## 동력 분석

포장 작업 조건에 따른 전기구동 이식기의 소요 동력을 분석한 결과는 Table 2와 같이 나타났다. 주행 시 저속과 고속에 따른 평균 전류와 최대 전류는 각각 9.4, 18.8 A와 13.1, 22.7 A로 고속 주행 시 소요전류가 더 큰 것으로 나타났다. 이식 작업 시 주간 거리 260, 420, 630 mm에 따른 평균 전류와 최대 전류는 각각 7.6, 6.7, 6.5 A와 17.3, 13.6, 11.6 A로 주간 거리가 짧을수록 소요 전류가 더 크게 나타났다. 주행 동시 이식 작업 시 주간 거리 260, 420, 630 mm에 따른 평균 전류와 최대 전류는 각각 11.0, 10.8, 9.8 A와 22.5, 19.2, 15.3 A로 이식 작업과 동일하게 주간 거리가 짧을수록 소요 전류가 더 크게 나타났다. 배터리 전압인 48 VDC를 소요 전압으로 가정하고, 측정된 전류를 이용하여 주요 작업에 따른 소요동력

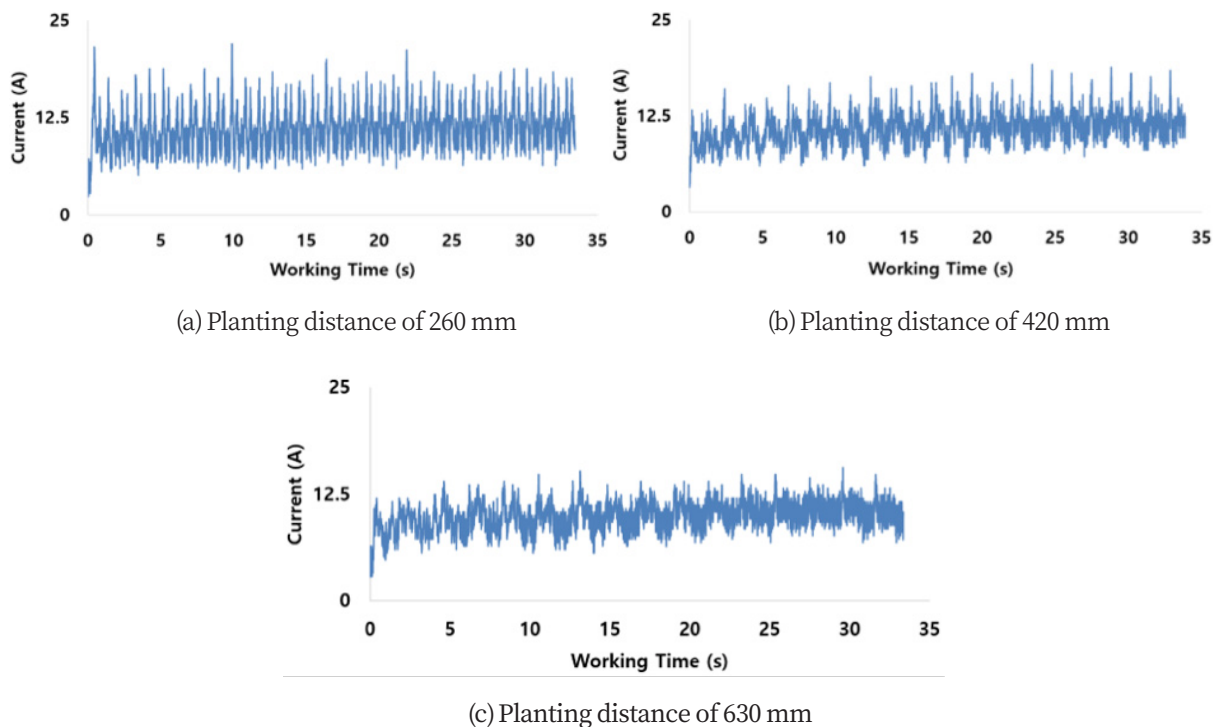


Fig. 5. Measured current at travelling with planting by planting distances.

Table 2. Measured current and analyzed power by fields operation.

Operations	Parameter (mm/s)	Current (A)		Power (kW)	
		Max	Avg. $\pm$ Std.	Max	Avg. $\pm$ Std.
Travel	300	13.07	9.44 $\pm$ 1.31	0.62	0.45 $\pm$ 0.06
	760	22.67	18.82 $\pm$ 2.75	1.09	0.86 $\pm$ 0.13
Planting	260	17.33	7.55 $\pm$ 2.75	0.83	0.36 $\pm$ 0.13
	420	13.60	6.69 $\pm$ 1.73	0.65	0.32 $\pm$ 0.08b
	630	11.60	6.52 $\pm$ 1.31	0.56	0.31 $\pm$ 0.06c
Travelling with planting	260	20.53	11.03 $\pm$ 2.54	0.99	0.53 $\pm$ 0.12a
	420	19.20	10.78 $\pm$ 1.99	0.92	0.52 $\pm$ 0.07b
	630	15.33	9.79 $\pm$ 1.54	0.74	0.47 $\pm$ 0.07c

Avg, Average; Std, Standard deviation.

a - c: Means with different superscript in each row are significantly different at  $p < 0.05$  by Duncan's multiple range.

을 분석하였다. 주행 속도가 300 mm/s에서 760 mm/s로 약 153% 증가하였을 때, 평균 소요 동력은 약 91% 증가하였으며, 전체적으로 최고 주행 속도인 760 mm/s에서의 소요 동력이 평균 0.86 kW, 최대 1.09 kW로 가장 높게 나타났다. 이식 작업 시 주간 거리가 260 mm (1단)에서 420 mm (10단)으로 62% 증가할 때, 평균 동력은 0.36 kW에서 0.32 kW로 약 11% 감소하였으며, 주간 거리가 420 mm (10단)에서 630 mm (19단)으로 50% 증가할 때, 평균 동력은 0.32 kW에서 0.31 kW로 약 3% 감소하였다. 그러므로 이식 작업 시 주간 거리가 짧아질수록 모터의 동력은 증가하는 것을 알 수 있으며, 주간 거리 260 mm에서 420 mm로 증가할 때 모터 동력은 크게 감소하였다. 주행 중 이식 작업 시 소요동력은 주간 거리가 260 mm (1단)에서 420 mm (10단)으로 62% 증가할 때, 평균 동력은 0.53 kW에서 0.52 kW로 약 2% 감소하였으며, 주간 거리가 420 mm (10단)에서 630 mm (19단)으로 50% 증가할 때, 평균 동력은 0.52 kW에서 0.47 kW로 약 10% 감소하였다. 이는 이식 작업 시 소요동력과 유사한 경향을 보여 주었으며, 특히 주간 거리 420 mm에서 630 mm로 증가할 때 모터 동력은 크게 감소하였다. 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)과 Duncan's multiple range test 결과 주간 거리에 따른 소요 동력은 모두 유의수준 5% 이내에서 p값이 0.0001 이하로 나타나 분석된 결과는 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

## Conclusion

본 연구는 전기구동 이식기 개발을 위한 기초연구로써, 내연기관 이식기를 모터로 대체하여 전기 구동 이식기를 개발하였으며, 포장 시험을 통하여 이식기의 주요 작업별 작업 동력을 측정 및 분석하였다. 전기 구동 이식기는 엔진을 대체하는 구동 모터, 인버터, 배터리와 BMS로 구성하였다. 주행 속도에 따른 소요동력을 분석하기 위해 저속(300 mm/s)과 고속(760 mm/s) 주행 시 소요 전류를 측정하였으며, 이식 작업에 따른 소요 전류와 작업 속도 저속으로 주행을 하면서 이식 작업에 따른 소요 전류를 측정하여 소요 동력을 분석하였다. 이때, 식부장치의 주간 거리는 260, 420, 630 mm로 선정하여 시험하였으며, 소요 동력은 통계 분석 프로그램을 사용하여 일원배치 분산분석을 수행하였다.

주행 속도에 따른 소요 동력은 저속 주행 보다 고속 주행 시 더 높게 나타나 주행 속도가 빨라짐에 따라 소요 동력이 크게 발생됨을 알 수 있다. 저속 주행을 하면서 이식 작업을 하는 경우에는 주간 거리가 짧을수록 모터의 소요 전류가 더 크게 나타나 주간 거리가 짧을수록 소요 동력이 더 크게 발생됨을 알 수 있다. 또한, 통계분석 결과, 모두 유의수준 5% 이내에서 p값이 0.0001 이하로써 유의한 차이가 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 내연 기관 이식기를 모터를 이용하여 전기 이식기를 개발하였으며, 이식기의 주요 작업에 따라 원활하게 작업이 가능하였다. 그러나, 전기 구동 이식기 개발을 위해서는 다양한 작업 단수, 포장 시험지 조건 등에 대한 고려가 필요할 것으로 판단되며, 식부부, 주행부 등의 모터 구동을 통하여 이식기의 전동화 및 자동화 시스템을 개발하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

## Acknowledgements

본 연구는 농림축산식품부 첨단생산기술개발사업(과제번호: 114051-3)에 의해 수행되었습니다.

## References

- KAMICO and KSAM (Korea Agricultural Machinery Industry Cooperative and Korean Society for Agricultural Machinery). 2015. Agricultural machinery yearbook republic of Korea. Korean Society for Agricultural Machinery, Suwon, Korea.
- Kang HM, Jung DB, Kim MJ, Min KD. 2013. Study of energy management strategy considering various working modes of plug-in hybrid electric tractor. Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers B 37:181-186. [in Korean]
- Kim DM, Nam YY, Seo JH, Jang JS. 2015a. Development and verification of analytical model of a pilot operated flow control valve for 21-ton electric excavator. Journal of Drive and Control 12:52-59. [in Korean]
- Kim JY, Park YI. 2012. Analysis of agricultural working load experiments for reduction gear ratio design of an electric tractor powertrain. Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers 20:138-144. [in Korean]
- Kim SC, Hong YK, Kim GH. 2015b. Development of an environmental friendly hybrid power system and its application to agricultural machines. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems 21:447-452. [in Korean]
- KOSTAT (Korean Statistical Information Service). 2013. Cultivated area of greenhouse crops. Statistics Korea, Daejeon, Korea.
- Park MJ, Min KD. 2016. Study on the improvement methods of engine efficiency in hybrid excavator. Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers 24:392-400. [in Korean]
- Park YI, Kim YJ. 2014. Technology for the agricultural hybrid tractor. Journal of the Korean Society of Automotive Engineers 36:30-34. [in Korean]
- Yoo IH, Kim BW. 2013. A Study of driving simulation considering the various working modes of electric tractor. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society 14:5357-5365. [in Korean]