

농작업 부하데이터를 활용한 44 kW급 전기구동 트랙터의 E-driving 시스템 설계 검증

Design Verification of an E-driving System of a 44 kW-class Electric Tractor using Agricultural Workload Data

백승윤¹ · 백승민¹ · 전현호¹ · 이준호¹ · 김완수³ · 김용주^{1,2*}

Seung-Yun Baek, Seung-Min Baek, Hyeon-Ho Jeon, Jun-Ho Lee, Wan-Soo Kim and Yong-Joo Kim

Received: 16 Sep. 2022, Accepted: 09 Nov. 2022

Key Words : Design Verification(설계 검증), Electric Tractor(전기구동 트랙터), Agricultural Workload(농작업 부하), Load Factor (부하율), E-driving System (E-드라이빙 시스템)

Abstract: The aim of this study was to verify an E-driving system of a 44 kW-class electric tractor using agricultural workload data. Workload data were acquired during field test (plow tillage, rotary tillage, loader operation, field driving, asphalt driving) using a conventional tractor with a load measurement system. These workload data were converted to data of a 44 kW-class tractor based on the load factor of the engine. These data were used to verify the design of the E-driving system of an electric tractor. High-load operations such as plow tillage, rotary tillage, and loader operation could be performed at stage L and stage M. High-speed operation (asphalt driving) could be effectively performed at stage H using a rated rotational speed of the motor. As a result, the E-driving system of the electric tractor was possible to perform all major agricultural operations according to gear stages of range shift. Based on results of this research, we plan to develop an electric tractor equipped with an E-driving system and conduct research on actual vehicle verification in the future.

기호 설명

LF : load factor

EP_O : engine power during operation (kW)

EP_R : rated engine power (kW)

MP : motor power (kW)

MP_{max} : maximum motor power (kW)

MS : motor speed (rpm)

TS : travel speed (km/h)

r : wheel radius (m)

γ : gear ratio

MT : motor torque (Nm)

1. 서론

최근 국제 유가 상승 문제와 더불어 디젤 엔진에 대한 배기 규제가 강화됨에 따라 농업기계 분야는 새로운 방향으로 나아가고 있다.¹⁻²⁾ 또한, 기존 농업기계의 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 배출량 기여도는 비도료이동오염원의 약 8.2%를 차지하며 환경오염 문제의 심각성이 대두되고 있다.³⁻⁴⁾ 이에 따라, 농업기계 분야는 기존 내연기관을 대체 가능한 친환경 기술인

* Corresponding author: babina@cnu.ac.kr

¹ Department of Smart Agriculture Systems, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

² Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

³ Department of Bio-industrial Machinery Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, 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.

전기구동 방식의 동력전달시스템에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다⁵⁻⁸⁾. 농업용 트랙터의 공급대수는 농업기계의 약 59.2%로 가장 높은 비율을 차지하고 있어⁹⁾, 전기구동 트랙터는 개발 시 환경오염 문제 해결에도 기여할 수 있을 뿐만 아니라 보급 및 상용화에 유리할 것으로 전망된다.

최근에는 농업기계의 전동화 관련하여 전기모터와 변속기의 조합을 통해 작업 부하를 대응하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다.¹⁰⁻¹¹⁾ 전기모터는 저rpm 구간에서도 최대 토크를 출력할 수 있어 경운 작업에 유리하며¹²⁾, 사용 가능한 회전속도 범위가 넓어 다양한 농작업을 수행할 수 있는 이점이 있다. 또한 전기모터는 무단 변속이 가능하여 변속기를 최소화할 수 있어, 설계 시 공간 확보를 통해 기존 플랫폼을 활용할 수 있는 이점이 있다.

농업용 트랙터는 작업 시 발생하는 부하의 변동폭이 크기 때문에 농작업 부하를 고려한 구동부 설계가 필수적이다.¹³⁻¹⁴⁾ 하지만 전기구동 트랙터는 국내 상용화 사례가 전무하여 설계데이터 및 부하데이터 확보가 어려운 실정이다.

Chen et al (2019)은 MATLAB/Simulink를 통해 전기구동 트랙터 파워트레인의 다이내믹 시뮬레이션 모델을 구성하였으며, PSO (Particle Swarm Optimization) 알고리즘을 통한 최적화 설계방법을 제시하였다.¹⁵⁾

Wei et al (2021)은 MATLAB 및 AMESim을 통해 전기구동 트랙터의 서스펜션 시스템을 설계하였으며, 시뮬레이션을 통해 경심 제어 성능을 검증하였다.¹⁶⁾

Wen et al (2022)은 Adams 및 Simulink를 활용한 Co-simulation을 통해 전기구동 트랙터의 듀얼 모터 파워 커플링 구동 시스템을 설계하고 구동 효율 증가 및 에너지 소모량 최적화 방안을 제시하였다.¹⁷⁾

문헌 연구 결과, 최근 전기구동 트랙터와 관련된 선행연구는 모델링 및 시뮬레이션을 활용한 설계 가이드라인 제시 및 검증과 관련된 연구로, 트랙터의 작업별 부하데이터를 활용한 전기구동 트랙터의 설계 검증에 대한 연구는 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구는 44 kW급 전기구동 트랙터를 개발하기 위한 기초 연구로써, 1) 기존 트랙터를 통해 농작업별 부하데이터를 수집하고 2) 부하데이터를 부하율 기반으로 변환하고 3) 전기구동 트랙터의 단수에 따른 농작업 가능 여부를 판단함으로써 E-driving 시스템의 설계 검증을 위해 수행되었다.

2. 전기구동 트랙터

2.1 동력전달흐름도

현재 상용화된 트랙터는 디젤 엔진 구동 방식이며, 동력전달시스템은 크게 엔진, 주변속부, 부변속부, 스파이럴-베벨기어, 최종감속부, 드라이빙 샤프트, 휠로 구성되어 있다. 본 연구에서 개발 대상으로 하는 전기구동 트랙터는 엔진과 주변속부를 모터로 대체하였다. 모터는 전류 방향에 따라 정회전 및 역회전이 가능하여 별도의 변속기 없이 트랙터의 전·후진 주행이 가능하다. 부변속부는 높은 기어비를 통해 농작업 중 발생하는 넓은 범위의 부하를 대응하고, 변속을 통해 주행작업 중 휠에 요구되는 회전속도를 대응하기 위해 기존 내연기관의 부변속부를 그대로 사용하였다. 전기구동 트랙터의 동력전달흐름도는 Fig. 1과 같으며, 모터에서 출력된 동력은 PTO (Power take-off) 부와 부변속부로 분기하여 전달된다. 부변속장치는 총 3쌍의 헬리컬 기어로 구성되어 있으며, L단에서는 A1 기어와 B1 기어, M단에서는 A2 기어와 B2 기어, 3단에서는 A3 기어와 B3 기어가 연결되어 부변속 피동축을 회전시킨다. 스파이럴-베벨 기어는 부변속 피동축으로부터 전달받은 동력을 휠에 전달하기 위해 구성하였으며, 동력은 최종감속부를 거쳐 후륜으로 전달된다. 드라이빙 샤프트는 트랙터의 4륜구동을 위한 장치로, 최종감속부를 거쳐 전륜에 동력을 전달한다. 전기구동 트랙터의 4륜구동 제어는 농작업 시 견인력 및 작업효율 증가를 위해 필요에 따라 ON/OFF 가능하도록 구성하였다.

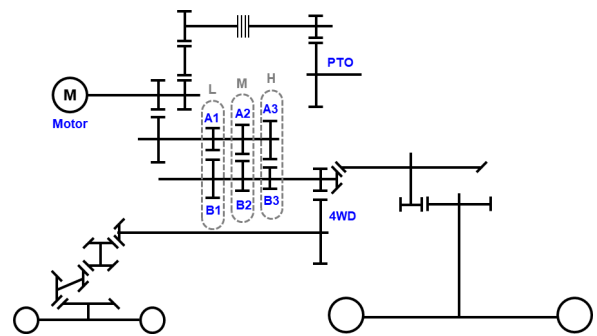


Fig. 1 Power transmission system of the electric tractor

2.2 핵심 부품

전기구동 트랙터의 구동을 위한 핵심 부품은 모터 및 트랜스미션이며, 정격출력 44 kW급의 전기모터 및 기존 트랙터의 부변속단 이하의 변속 시스템으로

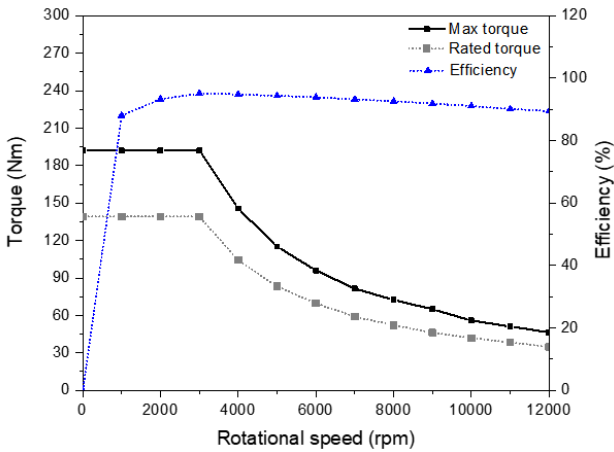


Fig. 2 T-N curve of the electric motor used in this study

구성되었다. 전기모터는 IPMSM (interior permanent magnet synchronous motor) 타입이며, 고속 회전이 가능하고 출력 밀도와 효율이 높은 장점이 있다. 전기모터의 T-N 선도는 Fig. 2와 같으며, 최대 회전속도 12,000 rpm, 최대 토크 190 Nm의 자체 개발 제품을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 모터는 380 V의 전압 시스템을 사용하며, 이를 통해 전력 공급의 안정성 향상 및 고효율 작업과 같은 이점을 가질 수 있도록 구성하였다. 전기구동 트랙터의 트랜스미션은 부변속부, 스파이럴-베벨기어, 최종감속부로 구성된다. 부변속부의 기어비는 L단에서 4.4, M단에서 2.1, H단에서 1.2이며, L단에서 고부하 작업을 수행하고 H단에서 고속 작업을 수행할 수 있도록 구성하였다. 스파이럴-베벨기어의 감속비는 4.1이며, 최종감속부는 전륜과 후륜 각각 25.1, 15.3이다. 최종감속부는 차축 토크 및 타이어 크기에 비례한 휠 속도를 구현하기 위해 타이어 제원을 고려하여 설계하였다.

3. 농작업 부하데이터

3.1 계측용 트랙터

트랙터 부하 계측을 위하여 크기 4,225(L) × 2,140(W) × 2,830(H) mm, 무게 3,985 kg의 계측용 트랙터(S07, TYM Co Ltd., Korea)를 사용하였다. 부하 계측 시스템은 Fig. 3과 같이 구성하였으며, 휠 토크, 휠 회전속도, 주행 속도 데이터를 실시간으로 수집하였다.

휠 토크는 각 휠과 차축 사이에 휠 토크미터 (MW_15 kNm & 30 kNm, Manner Sensortelemetrie, Germany)를 설치하여 계측하였다. 휠 회전속도는 근

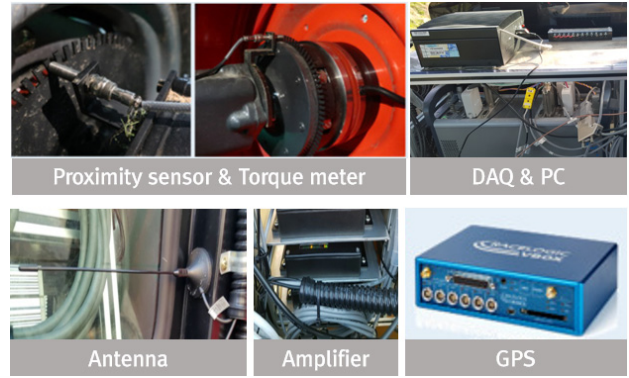


Fig. 3 Measurement system of the conventional tractor used in this study

접 센서(PR12-4DN, Autonics, Korea)를 통해 시간당 휠의 회전수를 계측하였다. 주행속도는 GPS (Global Positioning System) 장치(VBOX 3i, VBOX Inc, USA)를 통해 실시간으로 계측하였으며, Sampling rates는 100 Hz로 설정하였다.

측정한 데이터를 전송 및 저장하기 위하여 안테나, 앰플리파이어, 데이터수집장치(CRONOS compact CRC-400-11, IMC, Germany)를 추가적으로 구성하였다. 휠 토크미터에서 측정한 데이터는 외부 요인에 의한 노이즈 발생 및 파손 방지를 위해 텔레메트리 방식으로 안테나를 통해 송신되도록 하였으며, 안테나에 유선으로 연결된 앰플리파이어와 데이터 수집 장치를 거쳐 노트북에 실시간으로 저장된다.

3.2 필드시험

트랙터는 다양한 농작업을 수행하며, 토양 조건 및 작업기에 따라 부하 프로파일이 다르게 나타난다. 따라서, 본 연구에서는 전기구동 트랙터의 구동부 설계 검증을 위하여 Fig. 4와 같이 주요 농작업으로서 플라우 경운, 로타리 경운, 로더 작업, 주행 작업을 선정하였다. 본 연구에서는 국내 토양 중 대부분을 차지하는 양토(Loam) 성분(MAFRA, 2006)을 갖는 청양군에서 플라우 경운, 로타리 경운, 필드 주행 작업을 수행하였으며, 충청북도 공주시에 위치한 논에서 로더 작업을 수행하였다. 플라우 경운 작업과 로타리 경운 작업은 17 cm의 경심을 일정하게 유지하여 수행하였으며, 작업기는 경폭 280 cm의 8륜 플라우 (WSJP-8, Woongjin Machinery Co., Ltd., Korea) 및 경폭 250 cm의 로타리(E260, Celli Co., Ltd., Italia)를 사용하였다. 이때, 플라우 경운 및 로타리 경운 작업의 단수는 각각 M3 Low (7.09 km/h), L3 High (2.83 km/h)로 설정하였다. 로더 작업은 M2 Low (5.05

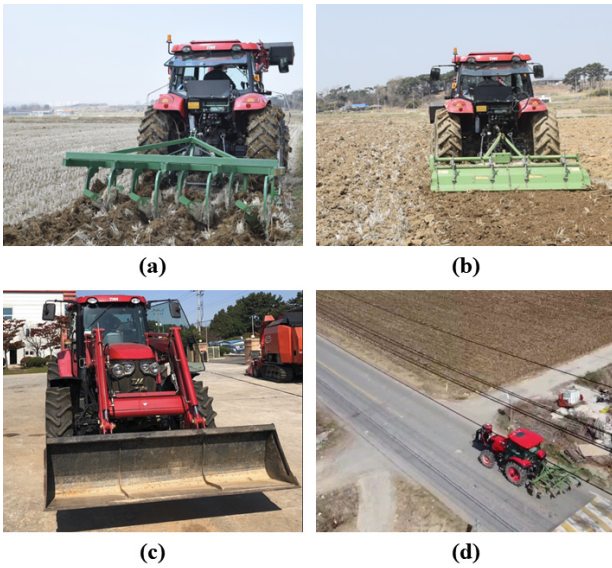


Fig. 4 Photos of field test using conventional tractor (a) plow tillage; (b) rotary tillage; (c) loader operation; (d) asphalt and field driving operation

km/h) 단수에서 1,300 kg의 흙을 적재 후 로딩, 로더 상승, 직진 및 후진, 로더 하강, 언로딩 순으로 진행하였다. 이때, 작업기는 1,873 kgf의 리프트 용량을 갖는 로더(TX105SL, TYM Co., Ltd., Korea)를 사용하였다. 필드 주행 작업은 M3 Low (7.09 km/h) 단수로 직진 주행을 수행하였으며, 아스팔트 주행 작업은 H3 Low (24.02 km/h) 단수로 포장도로를 주행하였다. 모든 작업은 동일한 조건에서 5회 반복 수행하였으며, 그 중 가장 높은 부하가 발생한 데이터를 선정하여 사용하였다.

3.3 부하데이터 변환

부하 계측 시스템을 통해 획득한 데이터는 44 kW 급 전기구동 트랙터의 설계 검증용 데이터로 변환하여 사용하였다. 계측 데이터는 엔진 부하율을 통해 변환하였으며, 작업별 부하율은 식 (1)과 같이 엔진 정격출력 대비 실사용 출력을 통해 계산 가능하다.

$$LF = \frac{EP_O}{EP_R} \quad (1)$$

모터 출력은 식 (2)와 같이 모터의 최대 출력과 부하율을 통해 계산하였으며, 모터 회전속도는 식 (3)과 같이 작업 속도, 전기구동 트랙터의 휠 제원 및 감속 기어비를 통해 계산하였다.

$$MP = MP_{max} \times LF \quad (2)$$

$$MS = TS \times \frac{1,000}{2 \times \pi \times r} \times \frac{1}{60} \times \gamma \quad (3)$$

모터 토크는 식 (4)와 같이 부하율 및 작업 속도를 통해 계산한 모터 출력과 회전 속도를 통해 계산하였다.

$$MT = \frac{MP \times 60,000}{2 \times \pi \times MS} \quad (4)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 계측용 트랙터 엔진 부하율

계측용 트랙터의 플라우 경우, 로타리 경우 작업에 대한 엔진 부하율은 Fig. 5와 같다. 엔진 토크 및 회

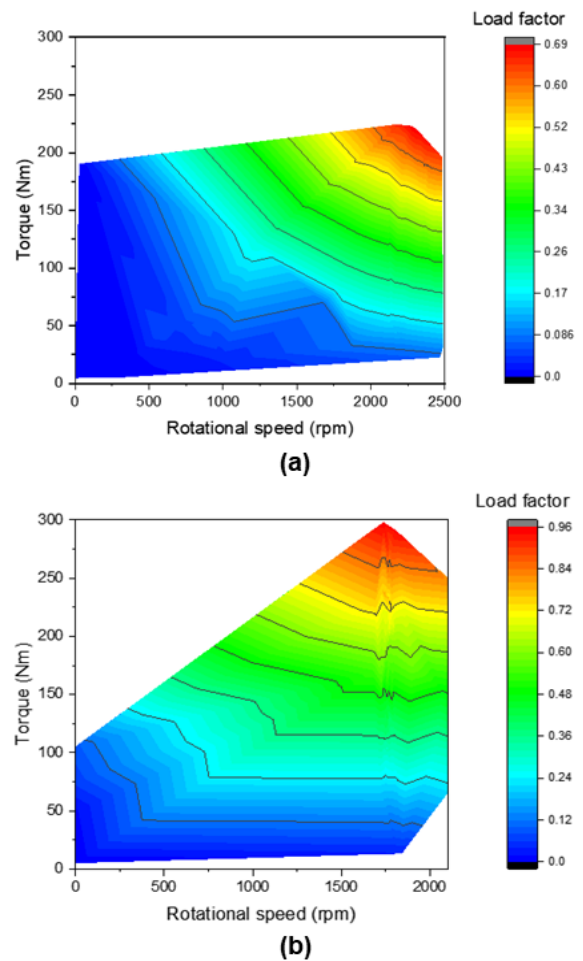


Fig. 5 Engine load factor and torque according to rotational speed of the agricultural operations (a) plow tillage; (b) rotary tillage

Table 1 Engine load factor of the tractor according to the agricultural operations

Item	Plow tillage	Rotary tillage	Loader operation	Field driving	Asphalt driving
Max.*	0.69	0.96	0.23	0.25	0.62
Avg. ± Std.**	0.46 ± 0.21	0.51 ± 0.20	0.09 ± 0.08	0.17 ± 0.03	0.38 ± 0.14

Note. * Maximum

** Average ± Standard deviation

전속도는 차축 토크 및 회전속도와 각 작업단수의 기어비를 통해 계산하였다. 기어비는 플라우 경운 작업 시 전륜과 후륜에서 각각 67.1, 94.2이며, 로타리 경운 작업 시 전륜과 후륜에서 각각 167.8, 204.6이다. 플라우 경운 작업 시 최대 엔진 부하율은 2,200~2,500 rpm의 회전속도 범위에서 0.69로 나타났다. 로타리 경운 작업 시 최대 엔진 부하율은 1,700~1,900 rpm의 회전속도 범위에서 0.96으로 나타났다. 농작업 시 트랙터의 작업별 엔진 부하율은 Table. 1과 같다. 엔진 부하율의 최대값은 로타리 경운(0.96), 플라우 경운(0.69), 아스팔트 주행(0.62), 필드 주행(0.25), 로더 작업(0.23) 순으로 높게 나타났다. 엔진 부하율의 평균값은 로타리 경운(0.51), 플라우 경운(0.46), 아스팔트 주행(0.38), 필드 주행(0.17), 로더 작업(0.09) 순으로 높게 나타났다. 농작업 시 평균 부하율은 최대 부하율 대비 약 39.3~67.6%의 범위로 나타났다.

4.2 44 kW급 트랙터 부하데이터 분석

전기구동 트랙터 설계 검증을 위한 부하 데이터는 플라우 경운, 로타리 경운, 로더 작업, 필드 및 아스팔트 주행 작업에 대해 계산하였다. 플라우 경운 작업 시 44 kW급 트랙터의 휠 토크는 Fig. 6과 같으며, 전·후륜을 구분하여 계산하였다. 플라우 경운 작업은 선회 작업을 포함하여 약 100 sec 동안 수행되었다. 작업 중 출력 토크는 전·후륜에서 각각 최대 2,400.7, 5,253.4 Nm로 나타났으며, 평균 1,383.0, 3,466.8 Nm로 나타났다. 플라우 경운 작업은 후방 작업기의 중량 및 작업에 따른 하중 전이로 인해 후륜에서 높은 토크가 발생하였다. 휠 토크는 약 90 sec 이후 선회 작업 시 전·후륜에서 각각 최대 1,231.1, 3,009.1 Nm로 나타났으며, 평균 586.5, 792.2 Nm로 나타났다.

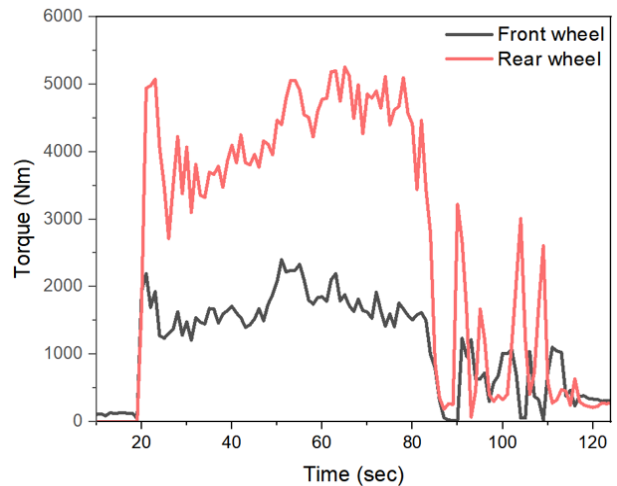


Fig. 6 Torque of front and rear wheel of the 44 kW class tractor according to working time during plow tillage

로타리 경운 작업 시 44 kW급 트랙터의 휠 토크는 Fig. 7과 같으며, 전·후륜 및 PTO를 구분하여 계산하였다. 로타리 경운 작업은 총 140 sec 동안 수행되었다. 작업 중 출력 토크는 전·후륜 및 PTO에서 각각 최대 1,560.9, 3,230.9, 341.2 Nm로 나타났으며, 평균 1,050.2, 370.2, 169.7 Nm로 나타났다. 로타리 경운 작업은 후방에서 작업 진행 방향으로 회전하는 작업기 특성에 따라 전륜에서 높은 토크가 발생하였다. 최대 토크는 경운 작업 이후 작업기를 상승하였을 때 하중 전이로 인해 후륜에서 발생하였다.

로더 작업 시 44 kW급 트랙터의 휠 토크는 Fig. 8과 같으며, 전·후륜을 구분하여 계산하였다. 로더 작업은 로딩, 언로딩, 전·후진 작업을 포함하여 약 55

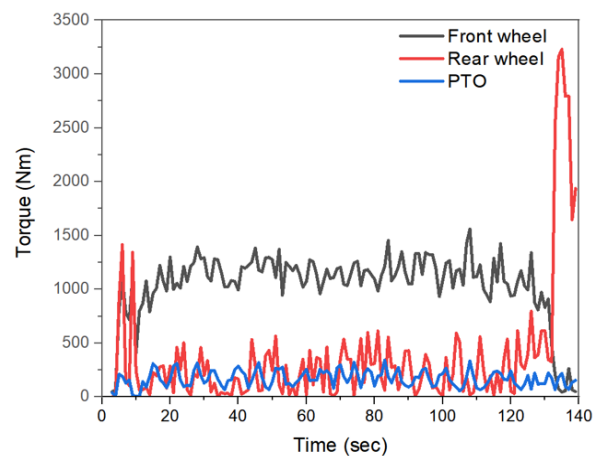


Fig. 7 Torque of front and rear wheel and PTO of the 44 kW class tractor according to working time during rotary tillage

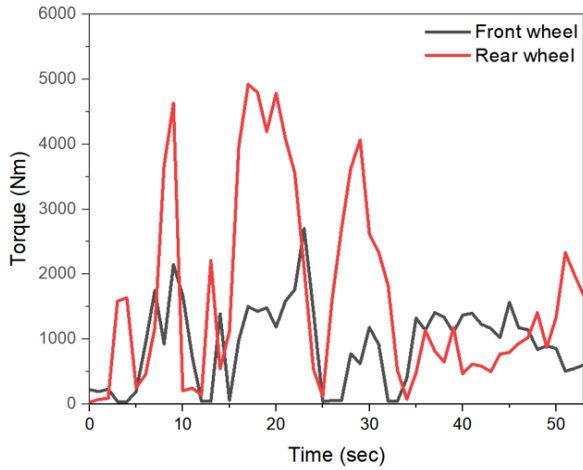


Fig. 8 Torque of front and rear wheel of the 44 kW class tractor according to working time during loader operation

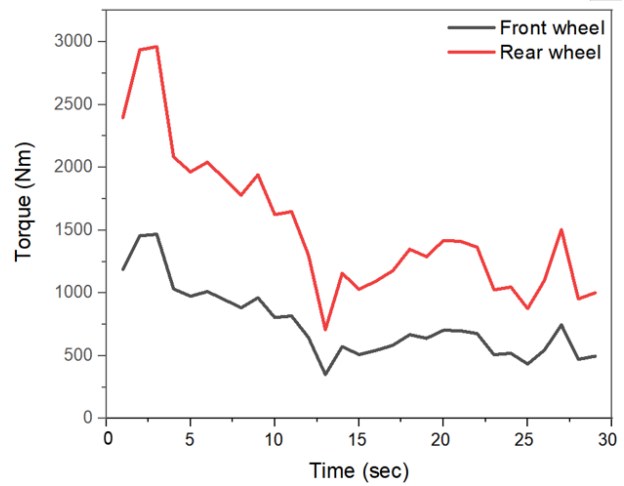


Fig. 10 Torque of front and rear wheel of the 44 kW class tractor according to working time during asphalt driving

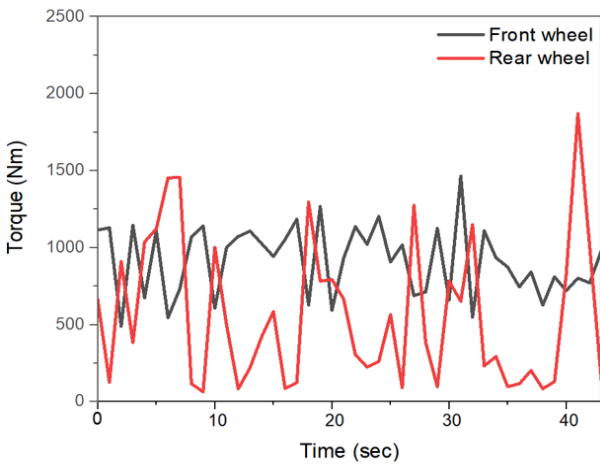


Fig. 9 Torque of front and rear wheel of the 44 kW class tractor according to working time during field driving

sec 동안 수행되었다. 작업 중 출력 토크는 전·후륜에서 각각 최대 2,701.8, 4,921.2 Nm로 나타났으며, 평균 897.6, 1,656.5 Nm로 나타났다. 로더 작업은 트랙터 전진 및 후진 시작 시 구동을 위한 최대 토크 출력이 필요하며, 후륜 구동으로 작업을 수행하여 해당 구간에서 후륜에 높은 부하가 발생하였다. 트랙터는 후방 작업기를 장착한 채로 흙이 적재된 로더를 추가하였으므로 약 9 sec, 20 sec, 30 sec를 전후로 토양 경운과 유사한 수준의 고부하가 발생하였다.

필드 주행 작업 시 44 kW급 트랙터의 전·후륜 토크는 Fig. 9와 같다. 필드 주행 작업은 후방 작업기를 상승한 조건에서 약 45 sec 동안 수행되었다. 작업 중 출력 토크는 전·후륜에서 각각 최대 1,464.1, 1,870.6 Nm로 나타났으며, 평균 919.0, 563.3 Nm로

나타났다. 필드 주행 작업은 작업기의 토양 관입 없이 주행만을 수행하여 타 농작업에 비해 낮은 부하가 발생하였다.

아스팔트 주행 작업 시 44 kW급 트랙터의 전·후륜 토크는 Fig. 10과 같다. 아스팔트 주행 작업은 후방 작업기를 상승한 조건에서 약 30 sec 동안 수행되었다. 작업 중 출력 토크는 전·후륜에서 각각 최대 1,467.9, 2,962.6 Nm로 나타났으며, 평균 753.5, 1520.8 Nm로 나타났다. 아스팔트 주행 작업은 최초 구동 시 가장 높은 부하가 발생하였으며, 주행 중에는 아스팔트의 낮은 구름 저항으로 인해 출력 토크가 낮아지는 것으로 나타났다.

4.3 전기구동 트랙터 설계 검증

전기구동 트랙터 설계는 모터의 T-N 선도와 기어비가 적용된 44 kW급 트랙터의 부하데이터를 통해 검증하였다. 전기구동 트랙터의 변속기는 기존 트랙터의 부분속부를 사용함에 따라, L단, M단, H단에서의 기어비를 부하데이터에 적용하였다. 모터의 T-N 선도 및 작업단수 L단에서의 부하데이터의 관계 그래프는 Fig. 11과 같다. 플라우 경운은 주로 3,100~3,300 rpm의 모터 회전속도 범위에서 수행되며, 모터의 최대 토크는 184.3 Nm로 나타났다. 로타리 경운은 주로 1,000~1,200 rpm의 모터 회전속도 범위에서 수행되며, 모터의 최대 토크는 125.8 Nm로 나타났다. 로더 작업은 주로 1,000~1,150 rpm의 모터 회전속도 범위에서 수행되며, 모터의 최대 토크는 169.7 Nm로 나타났다. 필드 주행 작업은 주로

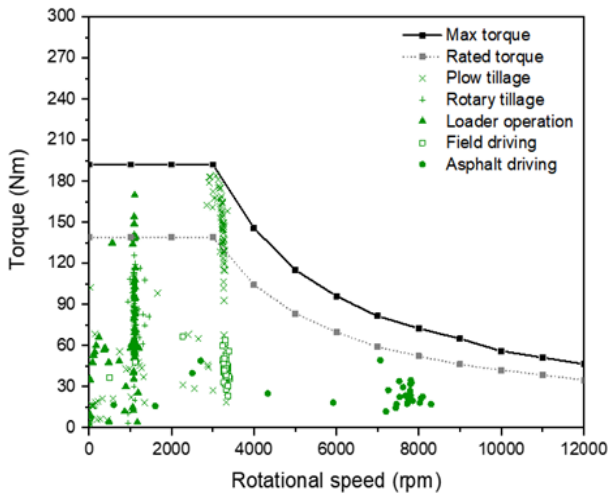


Fig. 11 T-N curve of the motor and load data of 44 kW tractor with gear ratio (stage L) applied

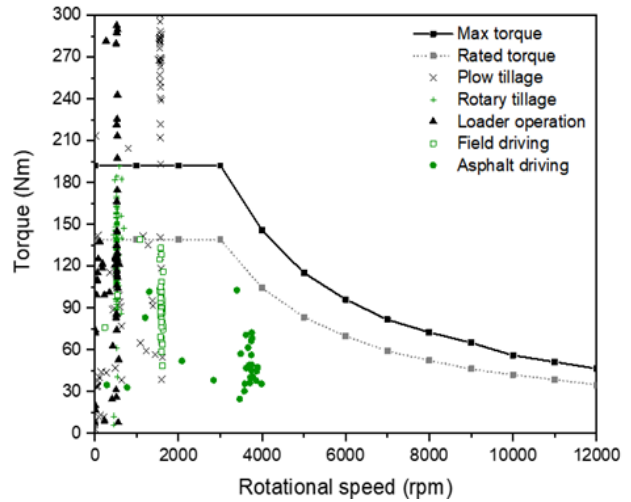


Fig. 12 T-N curve of the motor and load data of 44 kW tractor with gear ratio (stage M) applied

3,250~3,400 rpm의 모터 회전속도 범위에서 수행되며, 모터의 최대 토크는 66.8 Nm로 나타났다. 아스팔트 주행 작업은 주로 3,000~10,000 rpm의 모터 회전속도 범위에서 수행되며, 모터의 최대 토크는 49.2 Nm로 나타났다. 플라우 경운 및 로더 작업은 작업단수 L단에서 모터의 최대 토크 범위 내에서 수행되었으며, 로타리 경운, 필드 및 아스팔트 주행 작업은 모터의 정격 토크 범위 내에서 수행되는 것을 확인하였다.

모터의 T-N 선도 및 작업단수 M단에서의 부하데이터의 관계 그래프는 Fig. 12와 같다. 플라우 경운은 주로 1,500~1,600 rpm의 모터 회전속도 범위에서 수행되며, 모터의 최대 토크는 384.0 Nm로 나타났다. 로타리 경운은 주로 450~550 rpm의 모터 회전속도 범위에서 수행되며, 모터의 최대 토크는 191.5 Nm로 나타났다. 로더 작업은 주로 400~550 rpm의 모터 회전속도 범위에서 수행되며, 모터의 최대 토크는 353.6 Nm로 나타났다. 필드 주행 작업은 주로 1,550~1,650 rpm의 모터 회전속도 범위에서 수행되며, 모터의 최대 토크는 139.1 Nm로 나타났다. 아스팔트 주행 작업은 주로 1,500~5,000 rpm의 모터 회전속도 범위에서 수행되며, 모터의 최대 토크는 102.5 Nm로 나타났다. 플라우 경운 및 로더 작업은 작업단수 M단에서 모터의 최대 토크 범위 외에서 수행되어 작업이 불가능한 것으로 나타났다. 로타리 경운 작업은 모터의 최대 토크 범위 내에서 수행되었으며, 비교적 부하가 작게 발생한 필드 및 아스팔트 주행 작업은 정격 토크 범위 내에서 수행되었다.

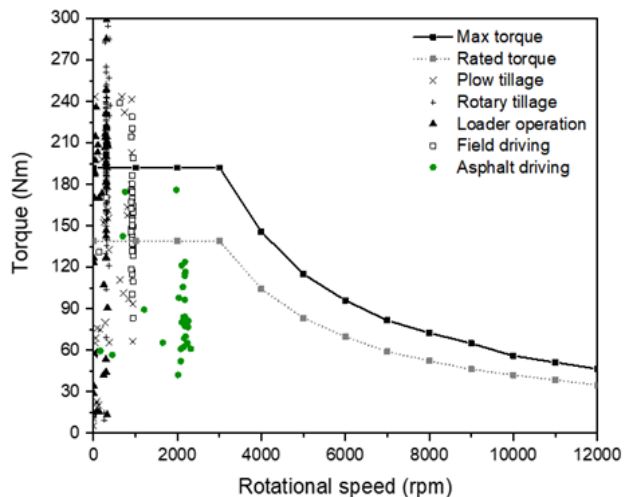


Fig. 13 T-N curve of the motor and load data of 44 kW tractor with gear ratio (stage H) applied

모터의 T-N 선도 및 작업단수 H단에서의 부하데이터의 관계 그래프는 Fig. 13과 같다. 플라우 경운은 주로 800~950 rpm의 모터 회전속도 범위에서 수행되며, 모터의 최대 토크는 659.4 Nm로 나타났다. 로타리 경운은 주로 270~320 rpm의 모터 회전속도 범위에서 수행되며, 모터의 최대 토크는 294.7 Nm로 나타났다. 로더 작업은 주로 250~350 rpm의 모터 회전속도 범위에서 수행되며, 모터의 최대 토크는 606.4 Nm로 나타났다. 필드 주행 작업은 주로 900~1,000 rpm의 모터 회전속도 범위에서 수행되며, 모터의 최대 토크는 238.8 Nm로 나타났다. 아스팔트 주행 작업은 주로 500~3,000 rpm의 모터 회전속도 범위에서

수행되며, 모터의 최대 토크는 176.1 Nm로 나타났다. 아스팔트 주행 작업을 제외한 모든 작업은 작업단수 H단에서 모터의 최대 토크 범위 외에서 수행되어 작업이 불가능한 것으로 나타났다. 아스팔트 주행 작업은 대부분 모터의 정격 토크 범위 내에서 수행되었으며, 트랙터의 정지 후 재가속 등 최대 정지마찰력이 작용하는 시점에서 최대 토크를 사용하는 것으로 나타났다.

부변속부 기어비에 따른 전기구동 트랙터의 농작업 가능 여부는 Table 2와 같다. 부변속 L단은 가장 높은 부하가 발생하는 플라우 경운 작업을 포함한 모든 농작업이 가능한 것으로 나타났다. 하지만 아스팔트 주행과 같은 고속 작업은 모터 정격 회전속도(2,000~3,000 rpm)에 비해 높은 8,000 rpm 구간에서 수행되어 모터의 고효율 구동이 불가능할 것으로 판단된다. 부변속 M단은 타 작업에 비해 높은 부하가 발생하는 플라우 경운 및 로더 작업을 제외한 모든 작업이 가능한 것으로 나타났다. 특히, 필드 및 아스팔트 주행 작업은 부변속 L단에 비해 고효율 구간에서 수행 가능한 것으로 나타났다. 부변속 H단은 아스팔트 주행 작업만을 안정적으로 수행 가능한 것으로 나타났으며, 고속 작업 시 모터의 정격 회전속도를 사용함으로써 고효율 구동이 가능할 것으로 판단된다. 따라서, 고부하 작업(플라우 경운, 로타리 경운, 로더 작업)은 부변속 L단이 적합한 것으로 나타났다. 필드 주행 작업 및 아스팔트 주행 작업은 각각 부변속 M단 및 H단에서 수행될 경우 모터의 정격 회전속도 구간에서 수행됨에 따라 고효율 구동이 가능할 것으로 판단된다.

Table 2 Workability of agricultural operations according to the gear ratio of the range shift of the electric tractor

Operations Stage (gear ratio)	Plow tillage (7.09 km/h)	Rotary tillage (2.83 km/h)	Loader operation (5.05 km/h)	Field driving (7.09 km/h)	Asphalt driving (24.02 km/h)
Stage L (4.4)	○*	○	○	○	○
Stage M (2.1)	X**	○	X	○	○
Stage H (1.2)	X	X	X	X	○

Note. * Able to work in all sections

** Unable to work in some sections

5. 결론

본 연구는 44 kW급 전기구동 트랙터 개발을 위한 기초연구로써 농작업 부하데이터를 활용하여 E-driving 시스템을 검증하기 위해 수행되었으며, 주요 결과는 다음과 같다.

1) 농작업에 따른 엔진 부하율의 평균값은 로타리 경운(0.51), 플라우 경운(0.46), 아스팔트 주행(0.38), 필드 주행(0.17), 로더 작업(0.09) 순으로 나타났다.

2) 44 kW급 트랙터의 농작업 데이터는 부하율을 통해 계산하였으며, 휠 토크는 플라우 경운, 로더 작업, 로타리 경운, 아스팔트 주행, 필드 주행 순으로 높게 나타났다. 농작업 데이터는 전기구동 트랙터의 E-driving 시스템을 검증하는데 사용하였다.

3) 부변속 작업단수 L단의 경우 플라우 경운 및 로더 작업은 모터의 최대 토크 범위 내에서 수행되었으며, 로타리 경운, 필드 및 아스팔트 주행 작업은 모터의 정격 토크 범위 내에서 수행되었다.

4) 부변속 작업단수 M단의 경우 플라우 경운 및 로더 작업은 모터의 최대 토크 범위 외에서 수행되어 작업이 불가능한 것으로 나타났다. 로타리 경운 작업은 모터의 최대 토크 범위 내에서 수행되었으며, 필드 및 아스팔트 주행 작업은 정격 토크 범위 내에서 수행되었다.

5) 부변속 작업단수 H단의 경우 아스팔트 주행 작업을 제외한 모든 작업들은 모터의 최대 토크 범위 외에서 수행되어 작업이 불가능한 것으로 나타났다.

따라서, 플라우 경운 및 로더 작업과 같은 고부하 작업은 작업단수 L단에서 수행할 경우 부하 대응이 가능하며, 아스팔트 주행과 같은 고속 주행 작업은 작업단수 H단에서 수행할 경우 모터의 정격 회전속도를 사용하여 고효율 작업이 가능하다.

결과적으로, 모터와 기존 트랙터의 부변속단 이하의 변속 시스템을 결합한 E-driving 시스템은 변속단수에 따라 44 kW급 트랙터의 주요 농작업들을 모두 수행 가능한 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 본 연구결과를 바탕으로 E-driving 시스템이 탑재된 전기구동 트랙터를 개발하여 실차 검증에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 첨단농기계산업기술개발사업(321061-2)

및 기술사업화지원사업(821014-03)의 지원을 받아 연구되었음

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) D. H. Lee, C. H. Choi, S. O. Chung, Y. J. Kim, E. Inoue, and T. Okayasu, "Evaluation of tractor fuel efficiency using dynamometer and baler operation cycle", *J. Fac. Agric. Kyushu Univ.*, Vol. 61, No. 1, pp.173-182, 2016.
- 2) S. M. Baek, W. S. Kim, S. Y. Baek, H. H. Jeon, D. H. Lee, H. K. Kim, Y. J. Kim, "Analysis of Engine Load Factor for a 78 kW Class Agricultural Tractor According to Agricultural Operations", *Journal of Drive and Control*, Vol. 19, No. 1, pp. 16-25, 2022.
- 3) Y. M. Kim, 2020. "2017 National air pollutants emission", National Air Emission Inventory and Research Center, pp.1-141, 2020.
- 4) S. Y. Baek, S. M. Baek, H. H. Jeon, W. S. Kim, Y. S. Kim, T. Y. Sim, K. H. Choi, S. J. Hong, H. G. Kim, and Y. J. Kim, "Traction Performance Evaluation of the Electric All-Wheel-Drive Tractor", *Sensors*, Vol. 22, No. 3, pp. 785-801, 2022.
- 5) O. Lagnelöv, G. Larsson, D. Nilsson, A. Larsolle, and P. A. Hansson, "Performance comparison of charging systems for autonomous electric field tractors using dynamic simulation", *Biosyst. Eng.*, vol. 194, pp. 121-137, 2020.
- 6) S. Y. Baek, W. S. Kim, Y. S. Kim, Y. J. Kim, C. G. Park, S. C. An, H. C. Moon, B. S. Kim, "Development of a Simulation Model for an 80 kW-class Electric All-Wheel-Drive (AWD) Tractor using Agricultural Workload", *Journal of Drive and Control*, Vol.17, No.1, pp. 27-36, 2020.
- 7) Y. Ueka, J. Yamashita, K. Sato, and Y. Doi, "Study on the development of the electric tractor-Specifications and traveling and tilling performance of a prototype electric tractor", *Eng. Agric. Environ. Food*, Vol. 6, No. 4, pp.160-164, 2013.
- 8) Z. Wu et al., "Modelling and verification of driving torque management for electric tractor: Dual-mode driving intention interpretation with torque demand restriction", *Biosyst. Eng.*, Vol. 182, pp.65-83, 2019.
- 9) KAMICO and KSAM, "Agricultural Machinery Yearbook Republic of Korea", Korea, 2020.
- 10) J. Y. Kim and Y. I. Park, "Analysis of Agricultural Working Load Experiments for Reduction Gear Ratio Design of an Electric Tractor Powertrain", *Trans. Korean Soc. Automot. Eng.*, Vol. 20, No. 5, pp.138-144, 2012.
- 11) W. S. Kim, S. Y. Baek, T. J. Kim, Y. S. Kim, S. U. Park, C. H. Choi, S. J. Hong, and Y. J. Kim, "Work load analysis for determination of the reduction gear ratio for a 78 kW all wheel drive electric tractor design", *Korean J. Agric. Sci.*, Vol. 46, No. 3, pp.613-627, 2019.
- 12) S. Y. Baek, Y. S. Kim, W. S. Kim, S. M. Baek, and Y. J. Kim, "Development and Verification of a Simulation Model for 120 kW Class Electric AWD (All-Wheel-Drive) Tractor during Driving Operation", *Energies*, Vol. 13, No. 10, pp.2422-2436, 2020.
- 13) N. G. Lee, Y. J. Kim, W. S. Kim, Y. S. Kim, T. J. Kim, S. M. Baek, Y. Choi, Y. K. Kim, I. S. Choi, "A Study on the Improvement of Transmission Error and Tooth Load Distribution using Micro-geometry of Compound Planetary Gear Reducer for Tractor Final Driving Shaft", *Journal of Drive and Control*, Vol.17, No.1, pp. 1-12, 2020.
- 14) S. M. Baek, W. S. Kim, Y. S. Kim, S. Y. Baek, N. G. Lee, S. P. Moon, H. H. Jeon, Y. S. Choi, T. J. Kim, and Y. J. Kim, "Strength analysis of the driving shift gears for a 67 kW class agricultural tractor according to tire type", Vol. 47, No. 4, pp.1147-1158, 2020.
- 15) Y. Chen, B. Xie, Y. Du, and E. Mao, "Powertrain parameter matching and optimal design of dual-motor driven electric tractor", *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, Vol. 12, No. 1, pp.33-41, 2019.

- 16) W. Zhang, M. Liu, L. Xu, X. Zhao, and X. Fu, “Simulation of Hydraulic Suspension System of Electric Tractor Based on Matlab-AMESim”, J. Phys. Conf. Ser., Vol. 1903, No. 1, 2021.
- 17) C. K. Wen, S. L. Zhang, B. Xie, Z. H. Song, T. H. Li, F. Jia, and J. G. Han, “Design and verification innovative approach of dual-motor power coupling drive systems for electric tractors”, Energy, Vol. 247, p. 123538-123559, 2022.