연구논문

Journal of Drive and Control, Vol.17 No.1 pp.27-36 Mar. 2020
ISSN 2671-7972(print) ISSN 2671-7980(online)
http://dx.doi.org/10.7839/ksfc.2020.17.1.027

농작업 부하 데이터를 활용한 80 kW급 전기구동 AWD 트랙터의 시뮬레이션 모델 개발

Development of a Simulation Model for an 80 kW-class Electric All-Wheel-Drive (AWD) Tractor using Agricultural Workload

백승윤[1] · 김완수[1] · 김연수[1] · 김용주[1*] · 박철규[2] · 안수철[3] · 문희창[4] · 김봉상[5]
Seung Yun Baek[1], Wan Soo Kim[1], Yeon Soo Kim[1], Yong Joo Kim[1*], Cheol Gyu Park[2], Su Cheol An[3], Hee Chang Moon[4] and Bong Sang Kim[5]

Received: 16 Oct. 2019, Accepted: 19 Nov. 2019

Key Words : Electric Tractor(전기구동 트랙터), All-wheel-drive Tractor(총륜구동 트랙터), Agricultural Workload (농작업부하), Simulation Model(시뮬레이션 모델)

Abstract: The aim of this study is to design a simulation model for an electric All-Wheel-Drive (AWD) tractor to evaluate the performance of the selected component and agricultural work ability. The electric AWD tractor consists of four motors independently for each drive wheel, and each motor is combined with an engine generator, a battery pack, and reducers. The torque data of a 78 kW-class tractor was measured during plow tillage and driving operation to develop a workload cycle. A simulation model was developed by using commercial software, Simulation X, and it used the workload as the simulation condition. As a result of simulation analysis, the drive system, including an electric motor and reducers, was able to cope with high load during plow tillage. The SOC (State of Charge) level was influenced by the output power of the motor, and it was maintained in the range of 50~80%. The fuel consumed by the engine was about 18.23 L during working on a total of 8 fields. The electric AWD tractor was able to perform agricultural work for about 7 hours. In the future study, the electric AWD tractor will be developed reflecting the simulation condition. Research on the comparison between the simulation model and the electric AWD tractor should be performed.

기호 설명

NT : Net traction, kN
W : Tire axle load, kN
B_n : Mobility number
s : Slip (0-1)
δ : Tire deflection, m
h : Tire section height, m
b : Tire section width, m
d : Overall diameter, m
CI : Cone Index, kPa
m_p : Weight of platform, kg
γ : Distribution ratio

* Corresponding author: babina@cnu.ac.kr
1 Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea
2 Korea Institute of Industrial Technology, Gyeongsan-si 712-901, Republic of Korea
3 Soosan Heavy Industries, Hwasung-si 18628, Republic of Korea
4 Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Republic of Korea
5 Department of Autonomous Vehicle & Intelligent Robotics Program, Hongik University, Seoul 04066, Republic of Korea
Copyright Ⓒ 2020, 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.

1. 서 론

농업기계의 유류 사용량 증가와 디젤 엔진의 환경

오염 문제에 대한 심각성이 대두됨에 따라[1], 최근 농업기계 분야에서도 전기구동 방식의 동력전달시스템에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.[2] 특히 전기구동 소형 트랙터는 엔진 구동 트랙터보다 CO_2 배출량이 최대 약 70%까지 감소가 가능하다고 보고되고 있어 전기구동 트랙터에 대한 연구는 계속적으로 증가할 전망이다. 전기구동 동력전달 방식에는 크게 직렬형 하이브리드, 병렬형 하이브리드, 전기구동 방식으로 구분할 수 있다.[3] 직렬형 하이브리드에서 엔진은 배터리를 충전하는데에만 사용되며, 엔진 대신 전기모터가 배터리로부터 에너지를 공급받아 차량을 구동한다.[4] 병렬형 하이브리드는 기존 내연기관에 모터를 추가 장착하여 저부하 시에는 전기모터로 차량을 구동하고, 중부하 시에는 엔진을 이용하여 차량을 구동하고, 고부하 시에는 엔진과 전기모터가 동시에 차량을 구동하여 동력을 최적으로 분배한다.[5] 전기구동 방식은 직렬형 하이브리드 방식에서 엔진을 이용한 배터리 충전을 제거하고 회생제동 등을 이용하여 배터리를 충전하고 차량을 구동하는 방식이다.[6] 자동차의 경우에는 직렬형 하이브리드와 병렬형 하이브리드 형태의 차량이 오래전부터 상용화 되었으며, 최근에는 전기구동 방식이 상용화 되고 있다. 그러나 농업용 트랙터의 경우에는 아직까지 전기구동 동력전달 방식이 상용화된 사례가 부족한 실정이다. 이는 직렬형 하이브리드 방식을 트랙터에 적용하기에는 고토크 모터 구동에 관한 기술이 부족하고, 병렬형 하이브리드 방식을 적용하기에는 농작업 시 지속적으로 고부하가 작용하여 적절한 동력분배가 어렵기 때문으로 판단된다. 또한, 전기구동 방식은 직렬형 하이브리드 방식과 마찬가지로 트랙터 구동을 위한 고토크 전기모터 기술이 필요한 동시에 배터리만을 이용하여 농작업을 수행해야 하므로 대용량의 배터리가 필요한 단점이 있어 아직까지 트랙터에 사용하기에는 어려운 실정이다. 최근 전기구동 기술은 고토크 전기모터의 한계를 극복하기 위하여 4개의 모터를 각각 구동부에 장착하는 전기구동 AWD (All-Wheel-Drive) 방식에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.[7] 전기구동 AWD 방식은 기존 엔진 동력을 전기모터로 대체하는 직렬형 하이브리드 방식에 비하여 4개의 전기모터가 각각 구동축에 장착하므로 토크 용량이 작은 전기모터를 이용하여 상용화가 용이하고, 배터리 충전을 위한 별도의 엔진 장착이 가능하여 배터리 용량을 최소화 시킬 수 있는 장점이 있다. 그러므로 AWD 기술은 고마력 트랙터에 적용시 고출력 엔진을 4개의 전기모터로 대체할 수 있어, 농작업 중 엔진을 통해 배터리를 충전하여 고토크 농작업을 연속적으로 수행할 수 있다. 동시에 구동축을 독립적으로 제어함으로써 무단변속이 가능하고 최소한의 회전반경을 가질 수 있는 장점이 있다. 전기구동 AWD 기술에 관한 연구는 자동차 분야에서는 활발히 진행되고 있으나 트랙터 등의 농업기계에 관한 연구는 아직까지 부족한 실정이다.

Kim (2019)은 AWD 독립구동형 플랫폼의 주행 궤적 추종 성능을 향상하기 위하여 시뮬레이션 프로그램을 통해 알고리즘을 적용하고 성능 향상을 검증하였다.[7] Song (2013)은 독립구동 차량의 특징을 전기자동차에 반영함으로써 에너지 효율 및 선회 성능 향상을 위한 연구를 수행하였으며, 시뮬레이션 모델을 구성 및 검증하였다.[8] Kim (2012)은 4륜 구동 하이브리드 차량의 등판 성능을 분석하고, 자동변속기 차량과 성능을 비교하였으며, 백워드 시뮬레이션을 통해 연비 최적화를 위한 최적의 감속비 및 용량을 선정하였다.[9] Song (2015)은 AWD 전기 차량의 승차감 향상을 위한 제어 알고리즘을 개발하였으며, 불규칙적인 주행환경 조건에서 시뮬레이션 모델에 알고리즘을 적용하여 차량의 성능을 개선하였다.[10] Jeon (2008)은 모터 구동 AWD 차량의 스키드 조향개선을 위한 연구를 수행하였으며, 시뮬레이션 프로그램을 통해 제어시스템 구성 및 검증하였다.[11]

특히, 전기구동 AWD는 직접 모터를 이용하여 차축을 구동하므로 전기모터 및 배터리의 용량 등의 선정이 중요하다. 자동차 분야에서는 전기구동 AWD 시스템의 설계 및 요소부품 선정을 위하여 Simcenter AMESim (Ver 16, Siemens, Germany)과 SimulationX (Ver 4.0, ESI ITI GmbH, Germany)등의 1-D 시뮬레이션 프로그램을 이용하고 있다.

Zhang 등(2009)은 AMESim을 통해 하이브리드 차량의 동적 모델을 개발하였으며, 기존의 차동장치를 대체할 커플링 장치 개발에 관한 연구를 수행하였다.[12] Hong 등(2009)은 AMESim을 통해 하이브리드 차량모델을 구성하였으며, 시뮬레이션을 통해 차량의 구동성능을 예측하기 위한 연구를 수행하였다.[13] Hwang 등(2011)은 AMESim을 통해 하이브리드 차량의 변속부를 모델링하였으며, 시뮬레이션을 통하여 엔진 클러치가 작동될 때 하이브리드 차량의 동적 거동을 확인함으로써 토크 제어 전략을 최적화하는 연구를 수행하였다.[14] Wenyong 등(2007)은 SimulationX를 통해 하이브리드 차량 모델을 구성하였으며, 구성

요소 설계 및 하이브리드 제어 전략을 평가하고 하이브리드 시스템 엔진 출력의 최적화에 대한 연구를 수행하였다.[15)]

문헌연구 결과, 시뮬레이션 프로그램을 이용한 전기구동 시스템의 시뮬레이션은 대부분 실차 개발 전에 사양 검토, 성능 예측 등을 위해 수행되고 있다. 그러므로 본 연구는 전기구동 AWD 트랙터 개발을 위한 기초 연구로써, AWD 트랙터 구성 부품의 성능과 농작업 수행 가능성을 평가하였다. AWD 트랙터의 성능 평가는 시뮬레이션 모델을 통해 수행되었으며, 농작업 부하 조건에 따른 AWD 트랙터의 전기모터 출력, 배터리 충·방전 성능을 평가하였다. 이때, 농작업 부하 조건은 엔진 구동 트랙터의 농작업에 따른 부하를 수집하여 작업 모드를 개발한 후에 시뮬레이션 모델에 입력하였다.

2. 농작업 모드

2.1 농작업 부하계측 시스템

트랙터 부하 계측을 위하여 크기 4,225(L) × 2,140(W) × 2,830(H) mm, 무게 3,985 kg의 78 kW급 대형트랙터(S07, TYM Co Ltd., Korea)를 사용하였으며, Fig. 1과 같이 부하 계측 시스템을 구성하였다. 차축 토크의 계측을 위하여 각 휠과 차축 사이에 휠 토크미터(Torque meter, Manner Sensortelemetrie, Germany)를 설치하였으며, 측정한 데이터를 수집하기 위하여 안테나, 신호증폭기 그리고 최대 100 kHz의 sample rate를 가지는 데이터수집장치(CRONOS compact CRC-400-11, IMC, Germany)를 추가로 구성하였다. 휠 토크미터에서 측정한 데이터는 Telemetry 방식으로 안테나를 통해 송신되며, 안테나에 유선으로 연결된 신호증폭기와 데이터수집장치를 거쳐 노트북에 저장된다.

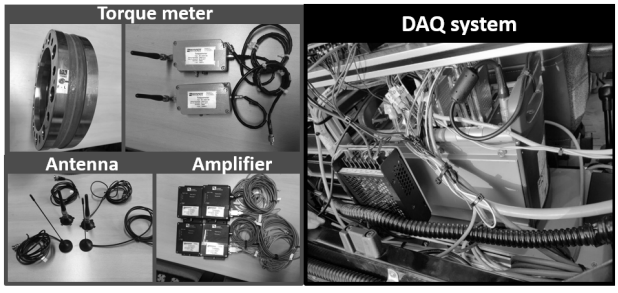

Fig. 1 Configuration of torque data measurement system of 78 kW tractor

2.2 필드 부하 데이터 수집

필드시험은 트랙터 농작업 중 가장 작업 빈도가 높고 큰 견인 부하가 작용하는 쟁기작업으로 선정하여 수행하였다. 작업기는 78 kW급 트랙터에 적합한 2.8 m의 제원을 가지는 8련 쟁기(WJSP-8, Woongjin Machinery Co. Ltd., Korea)를 선정하여 사용하였다. 쟁기작업은 충청남도 청양군에 위치한 논에서 수행하였으며, 국내의 일반적인 포장 크기인 100 × 40 m의 필지에서 수행하였다. 부하 데이터는 작업 종류 및 토양 조건에 따라 큰 차이를 보이기 때문에 쟁기작업, 포장내 이동, 아스팔트 도로 주행으로 구분하여 수집하였다. 작업 단수는 농민을 대상으로, 수요조사를 통해 78 kW급 트랙터에서 주로 사용하는 작업 단수인 쟁기작업 시 M2 Low (5.05 km/h), 포장내 이동 시 M3 Low (7.09 km/h), 아스팔트 도로 주행 시 H2 Low (17.12 km/h)로 선정하였다.

2.3 쟁기작업 모드 개발

작업 모드는 시뮬레이션 조건으로 활용하기 위해 농작업 수행 시 측정한 데이터를 통해 개발하였다. 농작업은 쟁기작업, 로타리작업, 베일작업 그리고 로더작업 등이 있으며, 특히 쟁기작업은 토양 전단력에 의해 큰 영향을 받고 토양에 관입된 작업기에 의해 차축 부하가 크게 발생하기 때문에 농작업 중 가장 큰 동력을 요구한다. 따라서, 작업 모드는 농작업 중 가장 가혹한 조건에서 수행되는 쟁기작업을 대상으로 개발하였으며, Fig. 2와 같이 한 필지에서 쟁기작업(Plow tillage), 포장내 이동(Field driving), 아스팔트 도로 주행(Asphalt driving)의 3단계로 구성하였다. 쟁기의 폭 2.8 m를 고려할 때, 쟁기작업은 한 필지에서 약 14회 수행되며, 작업 완료 후 필드 내의 경로를 통해 시작 지점으로 돌아오기 위한 포장내 이동을 수행한다. 이후 타 필지 작업 수행을 위하여 약 800

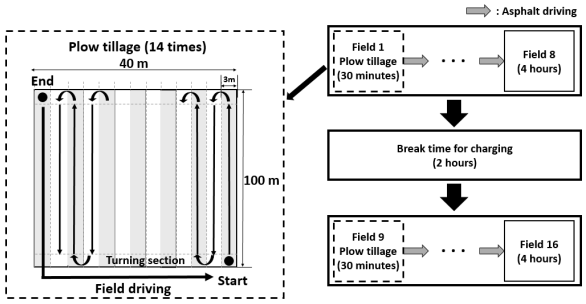

Fig. 2 Development of plow tillage mode for agricultural tractor

m의 아스팔트 구간을 이동한다고 가정하였다. 이때, 작업 시간은 쟁기작업 속도를 고려하여 필지당 약 30분으로, 하루 평균 오전 4시간, 휴식 2시간, 오후 4시간으로 총 8시간 동안 16개의 필지를 작업한다고 가정하였다.

3. 전기구동 AWD 트랙터

3.1 전기구동 AWD 트랙터 설계

현재 상용화된 트랙터는 주로 디젤 엔진 구동방식을 채택하며 동력전달시스템은 크게 엔진, 변속기, 차동장치 그리고 차축과 휠로 구성되어있다. 엔진에서 발생한 동력은 운전자가 선정한 기어비가 적용된 변속기와 차동장치를 통해 각 휠로 전달된다. 본 연구에서 개발한 전기구동 AWD 트랙터는 Fig. 3과 같이 농업용 트랙터의 구동원인 엔진을 4개의 전기 모터로 대체하였으며, 전기 모터의 출력단에 고부하 농작업을 위하여 감속기를 추가로 장착하였다. 각각의 동력전달 시스템은 충전 가능한 배터리를 사용하는 PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) 시스템에 가솔린 발전기를 추가함으로써 농작업 중 지속적으로 전기 에너지를 공급하여 작업을 수행할 수 있도록 구성하였다.

본 연구에서는 최근 지속적으로 그 수요가 증가하고 있는 80 kW급 전기구동 AWD 트랙터 개발을 위하여 정격출력 20 kW급의 전기 모터를 각각의 차축에 장착하였다. 이때, 전기 모터(AC-20, HPEVS, USA)의 제원은 최대 토크 96.4 Nm, 최대 회전속도 8,000 rpm로, 국내에서 수급이 용이한 제품을 사용하였다. 또한, 80 kW급 트랙터의 농작업 시 토크를 분석한 문헌연구의 결과에 따라[16-17], 각각의 차축에 작업 시 최대 약 5,426 Nm, 주행 시 약 2,311 Nm의 토크가 필요한 것을 고려하여 차축에 감속기를 추가로 장착하였다. 이때, 감속기는 너클암과 헬리컬 기어가 결합된 형태로 51.8 대 1의 감속비를 가지는 것으로 적용하였다.

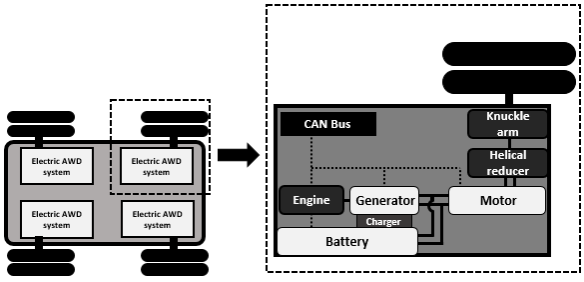

Fig. 3 Schematic configuration of AWD electric tractor

타이어는 주로 80 kW급 트랙터 전륜에 사용되는 380/85R24의 제원을 가진 농용 타이어(AGRIMAX RT 855, BKT, India)를 각각의 차축에 사용하였으며, 전후 동일 지름의 4륜구동형 트랙터를 구현하였다. 전·후륜 타이어의 제원은 식(1)의 순견인력 계산식을 이용하여 견인력을 만족하는 것을 확인 후 선정하였다. 순견인력은 타이어 및 플랫폼의 제원과 토양 조건에 따라 결정되며, 동마력대 트랙터의 최대견인력인 34 kN를 기준으로 계산하였다. 또한, 국내 트랙터의 견인력 시험은 아스팔트 조건에서 최대 15%의 슬립이 발생할 때 측정하는 것을 고려하여, 원추관입지수(CI) 및 슬립(s)는 각각 2,000 kPa, 0.15로 선정하였다. 타이어에 작용하는 수직 동하중(W)은 80 kW급 엔진구동 트랙터와 8련 쟁기의 무게인 6,000, 1,000 kg으로 각각 설정하고, 전륜과 후륜에 동일한 무게 배분비가 작용한다고 가정하여 34.3 kN로 선정하였다. 타이어는 380/85R24의 제원을 고려하여 폭(b), 지름(d), 높이(h)를 각각 0.38, 1.256, 0.3 m로 가정하였으며, 타이어의 변형(δ)은 타이어 단면 높이의 10~30% 범위의 값인 0.07 m로 가정하였다. 순견인력 계산 결과, 전기구동 AWD 트랙터는 선정한 타이어를 통한 견인력이 약 35.9 kN임에 따라 기준 견인력인 34 kN을 만족함을 확인하였다.

$$NT = W(0.88(1-e^{-0.1B_n})(1-e^{-7.5s}) - \frac{1}{B_n} - \frac{0.5s}{\sqrt{B_n}} \quad (1)$$

여기서, NT는 순견인력(kN), W는 타이어에 작용하는 수직 동하중(kN), s는 타이어 슬립, B_n은 타이어 토양 상수를 나타낸다.

$$B_n = \frac{CIbd}{W}\left(\frac{1+5\frac{\delta}{h}}{1+3\frac{b}{d}}\right) \quad (2)$$

여기서, B_n은 타이어 토양 상수, CI는 토양의 원추관입지수(kPa), b는 무부하 상태에서 타이어의 단면 폭(m), d는 무부하 상태에서 타이어의 지름(m), h는 타이어의 단면 높이(m), δ는 타이어 변형(m)을 나타낸다.

$$W = 9.8 m_p \gamma \quad (3)$$

여기서, W는 타이어에 작용하는 수직동하중(kN), m_p는 플랫폼의 질량(kg), γ는 무게 배분비를 나타낸다.

엔진구동형 트랙터는 쟁기작업 시 차축에서 엔진 정격출력의 약 60%를 사용한다는 문헌연구에 따라[16], 전기구동 AWD 트랙터는 20 kW 모터 기준 쟁기작업 시 약 12 kW를 출력한다고 가정하였다. 배터리는 모터의 출력을 고려하여 최소 용량인 14.6 kWh로 선정 하였으며, 70.4 V / 100 Ah 배터리를 병렬로 연결하여 구성하였다. 배터리는 리튬 이온(Lithium-ion) 배터리를 사용하였으며, 에너지 밀도가 무게에 비해 높은 특징을 가지며, 고부하를 대응하기 위한 전력을 지속적으로 공급하기에 적합한 장점이 있다.[18]

발전기는 농작업 중 지속적으로 배터리의 충전 및 모터 구동을 위한 전기에너지를 공급하기 위해 장착되었다. 발전기는 가솔린 구동 엔진(GX690, Honda, Japan)이 탑재된 모델을 사용하였으며, 엔진의 연속 운전시간은 4.8시간이다. 또한, 발전기의 정격 출력은 쟁기작업을 고려하여 13.5 kW인 제품을 선정하였다.

Table 1 Specifications of the components for electric AWD tractor

Item	Specifications	
Electric motor	Rated torque (Nm)	96.4
	Rated power (kW)	20.4
	Max efficiency (%)	92.0
Reducer	Knuckle arm gear ratio	12.05
	Helical reducer gear ratio	4.301
Engine-Generator	Rated power (kW)	13.5
	Continuous operation time (hour)	4.8
Battery	Rated power (kWh)	14.6

3.2 전기구동 AWD 트랙터 모델 개발

전기구동 AWD 트랙터의 시뮬레이션 모델은 상용 해석 소프트웨어인 SimulationX (Ver 4.0, ESI ITI GmbH, Germany)를 이용하여 개발하였다. 시뮬레이션 모델은 Fig. 4와 같이 구성하였으며, 선정한 전기구동 AWD 트랙터 부품의 제원과 성능 곡선을 시뮬레이션에 반영하였다. 엔진-발전기 모델(Engine-Generator), 배터리 모델(Battery), 전기 모터 모델(Electric motor)은 Bus system을 기반으로 연결하여

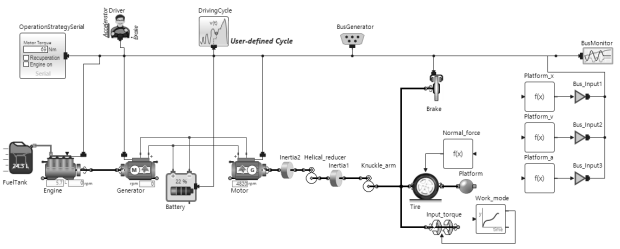

Fig. 4 Simulation model of electric AWD tractor

전기구동 시스템을 구성하였다. 각각의 단품 모델은 Bus system을 통해 배터리 잔여 용량, 모터의 출력 등을 실시간으로 공유 가능하며, 전기 모터는 Bus 입력 모델(Bus input)을 통해 플랫폼의 변위, 속도 그리고 가속도 정보를 실시간으로 공유 받아 적정 출력을 결정한다. Operation Strategy Serial 모델은 엔진의 구동 속도 및 SOC (State Of Charge) level 범위를 설정하기 위하여 구성하였다. 외부 토크 모델(Input torque)은 타이어 모델(Tire)과 최종 감속기 모델(Knuckle arm) 사이에 구성하였으며, 시뮬레이션 조건으로 개발된 농작업 모드를 입력하기 위해 구성하였다. 시뮬레이션 모델에서 전기 모터의 출력 토크는 외부 토크 모델에 입력된 작업 모드와 모터 후단에 위치한 감속기 모델의 기어비로부터 결정된다. 이때, 배터리의 에너지 소모량은 모터 출력에 따라 결정된다. 시뮬레이션은 전기 모터 및 감속기의 구동 토크와 배터리의 충·방전 성능을 확인하기 위해 수행되었다. 구동 토크는 쟁기작업 시 차축에 발생하는 부하를 전기구동 AWD 트랙터가 대응 가능한지 확인하기 위하여 분석하였으며, 배터리의 충·방전 성능은 농작업 가능 시간 및 배터리 SOC level의 안정성을 확인하기 위해 분석하였다.

3.3 전기구동 AWD 트랙터 제어모델

동력전달시스템의 시뮬레이션 모델은 Fig. 5와 같은 방식으로 제어가 이루어진다. 모터의 구동은 입력 부하를 추종하도록 하였으며, 부하가 발생할 경우 입력 부하와 감속비에 따른 모터의 출력 토크를 계산한다. 모터의 토크는 계산된 모터가 Motor map을 기준으로 출력 가능한 범위에 있을 경우 출력된다. 입력 부하데이터의 값이 0일 경우, 전기 모터는 토크가 출력되지 않음에 따라 구동이 정지하게 된다. 배터리는 모터의 구동을 위해 지속적으로 전류를 공급하고, 배터리의 SOC level은 모터 출력에 비례하여 소모된다. 배터리의 내구 수명은 주로 사용하는 SOC level의 범위에 영향을 미친다. 배터리의 내구수명은 SOC

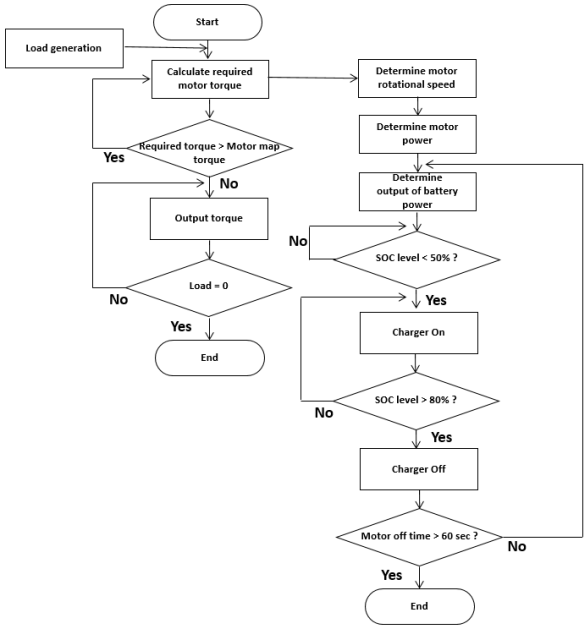

Fig. 5 Flow chart of control model of electric AWD tractor

level의 최솟값을 50% 이상으로 유지함에 따라 증가하는 것으로 나타났다.[19] 리튬 배터리는 SOC level이 80% 이상으로 증가할 경우 내부 임피던스에 영향으로 전력 손실 또한 증가하는 것으로 나타났다.[20] 그러므로, 전기구동 AWD 트랙터에 사용된 배터리는 내구수명의 증가 및 전력 손실을 최소화하기 위해 SOC level 범위를 50~80%로 선정하였다. Charger는 SOC level이 50% 이하가 되면 발전기에서 전력을 공급받아 배터리를 충전하도록 설정하였다. 또한 Charger는 배터리 충전 중에도 SOC level을 지속적으로 확인하며, SOC level이 80% 이상일 경우 작동을 중지하여 배터리 시스템 손상을 방지하였다.

4. 작업 모드 개발 결과

4.1 작업 부하 분석

트랙터 필드시험을 통해 계측한 쟁기작업 부하데이터는 Fig. 6과 같이 나타났다. 쟁기작업은 직진 작업과 선회 작업을 포함하여 총 120 sec동안 수행되었으며, 쟁기작업 시 차축에 발생하는 최대 토크는 5,167 Nm로 나타났다. 포장내 이동은 동일한 필지 내에서 약 50 sec 동안 이루어졌으며, 차축에 발생하는 최대 토크는 3,731 Nm로 나타났다. 아스팔트 도로 주행은 작업 필지에서 타 필지로 이동하여 120 sec 동안 이루어졌으며, 차축에 발생하는 최대 토크는 2,311 Nm로 나타났다. 트랙터 차축 토크의 평균값은 쟁기 작업 시 3,680 Nm로 가장 크게 나타났으며, 포장내 이동과 아스팔트 도로 이동 시 각각 1,902, 1,001 Nm로 나타났다.

Table 2 Results of workload analysis during plow tillage and driving operations

Operations	Averaged Torque (Nm)			
	Max.	Min.	Avg.	Std.
Plow tillage	5,167	2,292	3,680	835
Field driving	3,731	376	1,001	487
Asphalt driving	2,311	994	1,902	149

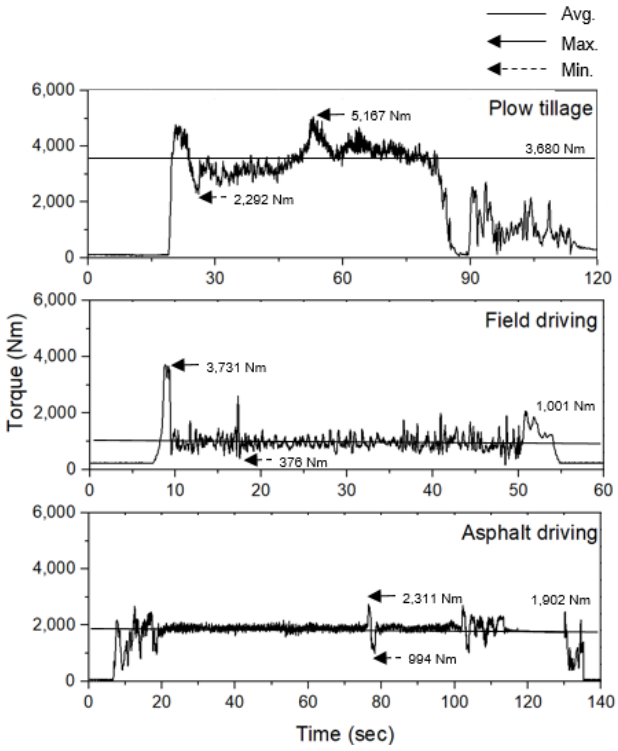

Fig. 6 Averaged axle torque during plow tillage and driving operations of conventional agricultural tractor

4.2 쟁기작업 모드

쟁기작업 모드를 개발한 결과는 Fig. 7과 같이 나타났다. 쟁기작업 모드는 Fig. 7 (a)와 같이 30분간 작업한 1필지의 작업모드를 이용하여 Fig. 7 (b)와 같이 4시간의 8필지 작업모드를 개발하였다. 또한, 개발된 작업모드는 전기구동 AWD 트랙터 모델에 입력하여 전기 모터 및 감속기의 구동 토크와 배터리의 충·방전 성능을 평가하였다.

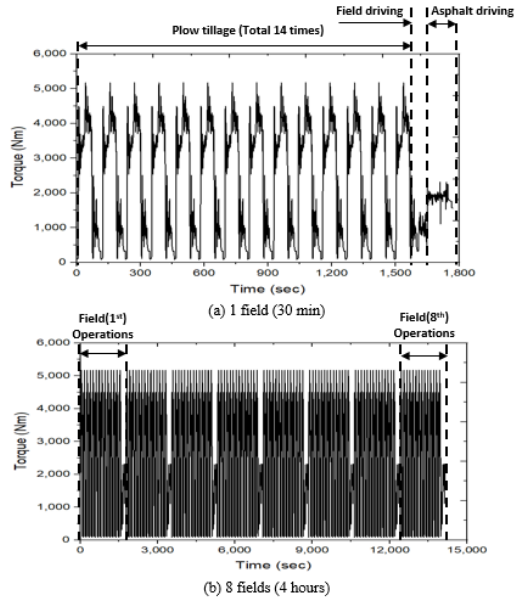

Fig. 7 Workload cycle of plow tillage for electric AWD simulation

5. 시뮬레이션 결과

5.1 전기 모터 및 감속기 구동 토크

시뮬레이션 결과, 전기구동 AWD 트랙터의 핵심 부품인 전기 모터의 구동 토크와 감속기 출력단의 토크는 Fig. 8과 같이 나타났다. 모터의 최대 구동 토크는 약 96 Nm로, 쟁기작업 시 차축에 높은 부하가 발생할 경우 선정한 모터의 최대 토크를 사용하는 것으로 나타났다. 감속기 출력단 토크의 최댓값은 약 5,200 Nm로, 입력 부하 데이터와 유사한 것으로 나타나 전기구동 AWD 트랙터를 이용하여 쟁기작업이 가능함을 알 수 있다. 또한, 쟁기작업이 트랙터 작업 중 가장 부하가 큰 점을 고려하면, 다른 농작업 또한 가능할 것으로 판단된다.

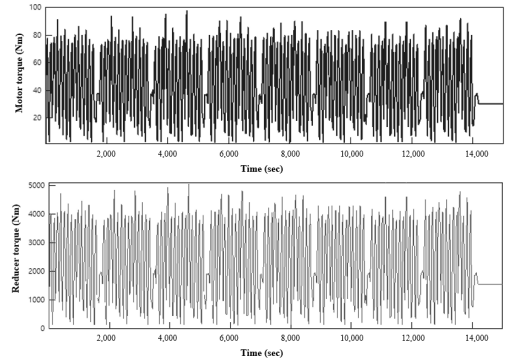

Fig. 8 Simulation results for output torque of electric motor and reducer of electric AWD tractor

5.2 배터리 충·방전

쟁기작업 모드에 따른 전기구동 AWD 트랙터의 배터리 SOC level은 Fig. 9와 같이 나타났다. SOC level은 입력 부하에 따라 시뮬레이션 시작 후 4,000 sec에 50%까지 감소하였으며, 발전기를 통해 6,600 sec 동안 80%까지 충전되었다. 배터리의 SOC level은 80%까지 충전된 이후 2,400 sec동안 다시 50%까지 감소되었다. 입력 부하가 일정한 사이클을 가짐에 따라, 시간에 따른 SOC level의 감소율은 일정하게 나타났다. 쟁기작업과 주행 작업 중 배터리 SOC level의 분당 감소율은 각각 0.9, 0.6%로 나타났으며, 이는 부하의 크기가 배터리 SOC level에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 판단된다. 배터리의 SOC level은 작업 중 50~80%의 범위로 나타났으며, 선정된 배터리의 SOC level은 제어 모델에서 설정한 범위로 유지되었다.

시뮬레이션 결과, 작업 조건 하에서 전기구동 AWD 트랙터 시뮬레이션 모델의 연료 소모량은 4시간 작업 동안 약 18.23 L로 나타났으며, 선정한 연료 탱크 초기 용량 40 L의 약 60.5%를 사용하였다. SOC level이 50%인 4,000 sec부터 SOC level이 80%가 되는 11,600 sec까지 엔진-발전기가 구동되었다. 엔진은 정격 회전 속도로 회전함으로써 발전기를 작동시키

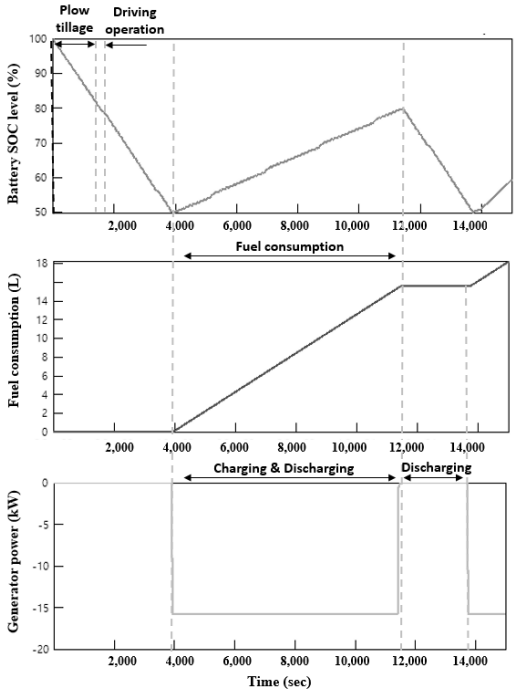

Fig. 9 Simulation results for SOC level, fuel consumption, and generator power of electric AWD tractor under plow mode

고, 발전기는 최대 출력인 15 kW를 출력하여 지속적으로 배터리에 공급하였다. 시뮬레이션 결과, 전기 모터의 구동 가능 시간은 엔진-발전기의 연료를 모두 사용할 경우 약 7시간으로 나타났다. 실조건에서 배터리는 모터를 정격 출력으로 사용할 경우 약 1시간 동안 사용 가능하며, 발전기는 40 L의 연료를 모두 소모한다는 가정 하에 6시간동안 지속적으로 전력 공급이 가능하다. 따라서, 전기 모터의 구동 가능 시간은 정격 출력 조건에서 배터리와 발전기의 제원을 고려했을때 약 7시간으로, 시뮬레이션 결과와 유사하게 나타났다. 그러므로, 선정한 부품들로 구성된 전기구동 AWD 트랙터는 기존 트랙터와 같은 쟁기작업 환경에서 약 7시간 동안 농작업이 가능할 것으로 판단된다. 그러나, 본 연구에서는 배터리의 온도 등의 환경 조건은 고려하지 않았으므로 트랙터의 열악한 환경 조건을 고려한 해석 모델 개발이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구는 총륜구동 시스템이 적용된 전기구동 AWD 트랙터 설계에 대한 기초 연구로써, 시뮬레이션 해석을 통해 선정 부품의 성능 평가 및 농작업 가능 시간을 확인하였다. 동마력대 트랙터에서 계측한 부하 데이터를 활용하여 농작업 모드를 개발하고, 이를 전기구동 AWD 트랙터의 시뮬레이션 모델에 적용하여 해석 결과를 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 쟁기작업 조건에서 선정한 모터와 감속기를 포함한 구동 시스템을 통해 쟁기작업 시 차축에서 발생하는 토크를 대응 가능한 것으로 나타났다. SOC level은 입력 부하 데이터의 크기에 비례하여 감소하며, 엔진-발전기 및 제어 모델을 통해 50~80%의 범위로 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 또한, 전기구동 AWD 트랙터 플랫폼의 연료 소모량은 4시간의 작업 시간 동안 총 18.23 L로 나타났다. 개발한 전기구동 AWD 트랙터는 연료 소모량과 SOC level 범위를 고려하였을 때, 약 7시간 동안 작업이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발한 전기구동 AWD 트랙터의 배터리 성능은 엔진구동 트랙터의 1일 평균 사용시간인 8시간 보다는 낮은 결과를 보여 주었으나, 구동모터의 제어 및 배터리 성능 최적화와 더불어 작업 중간의 휴식 시간 동안의 고속 충전을 통하여 작업 시간 개선이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 전기구동 AWD 트랙터의 해석 모델을 구성하고 동마력대 트랙터의 부하데이터를 입력 조건으로 활용하여 시뮬레이션을 진행함으로써 전기구동 AWD 트랙터의 개발 가능성을 제시하였다. 그러나 본 연구에서 개발한 해석 모델은 AWD 핵심부품의 사양과 입력 부하만을 고려해 시뮬레이션 하여 해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 실차 시험에 따른 분석이 필요하다. 특히, 트랙터는 작업 조건이 열악하므로 온도 조건, 경사지 작업 성능에 따른 전기구동 핵심부품의 신뢰성 확보가 무엇보다 더 중요하다. 또한, 본 연구에서는 하나의 작업 단수에서 트랙터를 구동하였으므로 본 시뮬레이션 결과를 기반으로 다양한 작업 단수 및 환경을 고려한 모델의 확장이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

References

1) D. H. Lee et al., “Evaluation of Tractor Fuel Efficiency using Dynamometer and Baler Operation Cycle”, Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University, Vol.61, No.1, pp.173-182, 2016.
2) D. H. Lee et al., “Development of a Parallel Hybrid Systems for Agricultural Tractors”, Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University, Vol.62, No.1, pp.137-144, 2017.
3) J. W. Ko, G. S. Ko and Y. C. Park, “A Study on Battery Performance of a Motor Driven Local Transportation Vehicle”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol.36, No.4, pp.430-436, 2012.
4) W. Liu, H. He and Z. Wang, “A Comparison Study of Energy Management for A Plug-in Serial Hybrid Electric Vehicle”, Energy Procedia, Vol.88, pp.854-859, 2016.
5) J. K. Park, “Design of Parallel Hybrid Tractor and Evaluation of Charge/Discharge Performance”, Master Thesis, Sungkyunkwan University, 2013.
6) W. Zhao et al., “Energy transfer and utilization efficiency of regenerative braking with hybrid energy storage system”, Journal of Power Sources, Vol.427,

pp.174-183, 2019.

7) B. S. Kim, “Slip detection and control algorithm to improve path tracking performance of four-wheel independently actuated vehicles”, Master Thesis, Hongik University, 2019.
8) H. W. Song, “A study on the improvement of energy efficiency and cornering stability performance for 4WD in-wheel electric vehicle”, Master Thesis, Sungkyunkwan University, 2013.
9) S. M. Kim, “Performance analysis and shifting map design for the development of four-wheel drive hybrid vehicles”, Doctoral Dissertation, Seoul National University of Science and Technology, 2012.
10) C. H. Song, “Development of Motor Control Algorithm of an All-Wheel Drive In-Wheel Electric Vehicle to Improve Ride Comfort”, Master Thesis, Sungkyunkwan University, 2015.
11) D. S. Jeon, “Study about Skid steer of independent 4 wheel drive vehicle”, Master Thesis, Kookmin University, 2009.
12) D. Zhang et al., “Co-simulation with AMESim and MATLAB for differential dynamic coupling of hybrid electric vehicle”, Proceedings of 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.761-765, 2009.
13) J. Hong, S. Kim, and B. Min, “Drivability Development Based on CoSimulation of AMESim Vehicle Model and Simulink HCU Model for Parallel Hybrid Electric Vehicle”, SAE Technical Paper 2009-01-0725, 2009.
14) H. S. Hwang et al., “Torque control of engine clutch to improve the driving quality of hybrid electric vehicles”, International Journal of Automotive Technology, Vol.12, pp.763-768, 2011.
15) W. Li et al., “Hybrid Vehicle Power Transmission Modeling and Simulation with SimulationX”, Proceedings of 2007 International Conference on Mechatronics and Automation, pp.1710-1717, 2007.
16) W. S. Kim et al., “Work load analysis for determination of the reduction gear ratio for a 78 kW all wheel drive electric tractor design”, Korean Journal of Agricultural Science, Vol.46, No.3, pp.613-627, 2019.
17) Y. S. Kim et al., “Analysis of the Load of a 105 hp Class Agricultural Tractor Based on the Tillage Depth Conditions During Plow Tillage”, Proceedings of 2018 KSAM Autumn Conference, Vol.23, No.2, pp.139, 2018.
18) J. L. Choi et al., “Analysis of battery lifetime characteristics with current peak value of boost converter”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol.41, No.7, pp.665-669, 2017.
19) E. Wikner and T. Thiringer, “Extending Battery Lifetime by Avoiding High SOC”, Applied Sciences, Vol.8, No.10, 2018.
20) S. H. Kim et al., “Battery loss analysis according to Li-ion Battery SOC”, Proceedings of the KIIEE Annual Spring Conference 2017, pp.48, 2017.
21) S. J. Lee et al., “Modeling and PID Control of an Electro-Hydraulic Servo System”, Journal of Drive and Control, Vol.16, No.4, pp.16-22, 2019.
22) G. Kim et al., “Driving Performance Prediction for Low-floor Midsize bus Using Simulator”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol.24, No.5, pp.541-547, 2015.
23) H. G. Kim et al., “The Study for development of Seoul city Bus driving cycle”, Proceedings of the Korean Society of Automotive Engineers 2010 Annual Conference and Exhibition, Vol.11, pp.934-939, 2010.
24) H. M. Kang et al., “Study of energy management strategy considering various working modes of plug-in hybrid electric tractor”, Transactions of KSME B, Vol.37, No.2, pp.181-186, 2013.
25) J. Y. Kim and Y. I. Park, “Analysis of Agricultural Working Load Experiments for Reduction Gear Ratio Design of an Electric Tractor Powertrain”, Transactions of KSAE, Vol.20, No.5, pp.138-144, 2012.
26) J. Y. Yun et al., “SOC-based Control Strategy of Battery Energy Storage System for Power System Frequency Regulation”, Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.63, No.5, pp.622-628, 2014.
27) K. Benabdelaziz and M. Maaroufi, “Battery dynamic energy model for use in electric vehicle simulation”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.42, No.30, pp.19496-19503, 2017.

28) K. H. Ryu, Tractor Engineering Principles, Munundang Publishing Co., Seoul, 2004.
29) T. H. Eom and C. H. Lee, “Minimization of Shifting Shock of Tractor PST using SimulationX”, Journal of Drive and Control, Vol.15, No.3, pp.36-42, 2018.
30) W. S. Kim et al., “Development of simulation model for fuel efficiency of agricultural tractor”, Korean Journal of Agricultural Science, Vol.43, No.1, pp.116-126, 2016.
31) W. S. Kim et al., “Effects of Soil Moisture Content on Tractive Performance of Tractor during Plow Tillage”, Proceedings of 2019 KSAM Spring Conference, Vol.24, No.1, pp.453, 2019.
32) W. S. Kim et al., “Load Analysis of 78 ㎾-Class Agricultural Tractor For Constructing Working Load Database During Major Field Operation”, Proceedings of 2019 Spring Conference on Drive and Control, pp.225-226, 2019.
33) D. H. Lee et al., “Study on the Driving Performance Evaluation of Unmanned Tractors Using Carsim”, Proceedings of 2015 KSAM Autumn Conference, Vol.20, No.2, pp.345-346, 2015.
34) Y. Ueka et al., “Study on the Development of the Electric Tractor: Specifications and Traveling and Tilling Performance of a Prototype Electric Tractor”, Engineering in Agriculture, Environment and Food, Vol.6, No.4, pp.160-164, 2013.
35) E. U. Kang et al., "Development of Super-capacitor Battery Charger System based on Photovoltaic Module for Agricultural Electric Carriers", Journal of Biosystems Engineering, Vol.43, No.2, pp.94-102, 2018.
36) M. A. A. Siddique et al., "Determination of PID coefficients for the ascending and descending system using proportional valve of a rice transplanter", Journal of Biosystems Engineering, Vol.43, No.4, pp.331-341, 2018.
37) S. J. Hong et al., "Performance Evaluation of a Driving Power Transmission System for 50 kW Narrow Tractors", Journal of Biosystems Engineering, Vol.43, No.1, pp. 1-13, 2018.
38) T. H. Eom and C. H. Lee, "Minimization of Shifting Shock of Tractor PST using SimulationX", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.3, pp.36-42, 2018.
39) T. J. Kim et al., "Strength analysis of mechanical transmission using equivalent torque of plow tillage of an 82 kW-class tractor", Korean Journal of Agricultural Science, Vol.46, No.4, pp.723-735, 2019.
40) W. S. Kim et al., "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.
41) Y. S. Kim et al., "Effect of tractor travelling speed on a tire slip", Korean Journal of Agricultural Science, Vol.45, No.1, pp.120-127, 2018.