

원추 지수가 트랙터 작업 부하에 미치는 영향 Effect of the Cone Index on the Work Load of the Agricultural Tractor

김완수^{1,2} · 김용주^{1,2*} · 백승민^{1,2} · 백승윤^{1,2} · 문석표^{1,2} · 이남규^{1,2} · 김택진^{1,2} ·
엠디 아부 아유프 시디크^{1,2} · 전현호¹ · 김연수^{1,3}

Wan Soo Kim^{1,2}, Yong Joo Kim^{1,2*}, Seung Min Baek^{1,2}, Seung Yun Baek^{1,2},
Seok Pyo Moon^{1,2}, Nam Gyu Lee^{1,2}, Taek Jin Kim^{1,2}, Md Abu Ayub Siddique^{1,2},
Hyeon Ho Jeon¹ and Yeon Soo Kim^{1,3}

Received: 21 Mar. 2020, Revised: 11 May 2020, Accepted: 14 May 2020

Key Words : Agricultural Tractor(농업용 트랙터), Cone Index(원추 지수), Work Load(작업 부하), Axle Torque(차축 토크), Measurement System(계측 시스템)

Abstract: The purpose of this study was to analyze the effect of the soil cone index (CI) on the tractor work load. A load measurement system was constructed for measuring the field data. The field sites were divided into grids (3×3 m), and the cone index was measured at the center of each grid. The work load measured through the plow tillage was matched with the soil cone index. The matched data were grouped at 600 kPa intervals based on the cone index. The work load according to the cone index was analyzed for engine, axle, and traction load, respectively. The results showed that when the cone index increased, engine torque decreased by up to 9%, and the engine rotational speed and brake-specific fuel consumption increased by up to 5% and 3%, respectively. As the cone index increased, the traction and tillage depth were inversely proportional to the cone index, decreasing 7% and 18%, respectively and the traction and tillage depth were directly proportional to the cone index, increasing 13% and 12%, respectively. Thus, it was found that the cone index had a major influence on the engine, axle, and traction loads of the tractor.

기호 설명

A, B, C : machine-specific parameters

BSFC : brake-specific fuel consumption, g/kWh

D : drawbar pull, kN

F_i : dimensionless soil texture adjustment parameter

FC : fuel consumption, g/h

N_e : engine rotational speed, rpm

n_w : speed of driving axle, rpm

P_e : engine power, kW

r_d : dynamic radius of driving wheel, m

s : slip ratio, %

T : tillage depth, cm

T_e : engine torque, Nm

V_a : actual travel speed, km/h

W : implement width, m

* Corresponding author: babina@cnu.ac.kr

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

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

3 Convergence Agricultural Machinery Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Gimje 54325, 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

농업용 트랙터는 경운, 정지, 파종, 방제, 수확 등 다양한 농작업의 종류에 따라 선정된 작업기를 견인함으로써 농작업을 수행하는 차량이다.¹⁾ 그 중 경운 작업은 농작물 생산을 위한 전주기 과정 중 가장 높은 작업 부하가 발생하며, 에너지 소비가 가장 많은 작업 중 하나이다.^{2,3)}

트랙터 농작업 부하는 변속기 설계 및 수명시험 등 농업기계계의 개발을 위한 기초 자료로 유용하게 사용된다. 특히, 트랙터 제조업체는 효율적인 제품 설계를 위하여 다양한 조건별 작업 부하에 대하여 관심을 기울이고 있다.⁴⁾ 트랙터 작업 부하는 부착 작업기¹⁾, 작업 단수⁵⁾, 토양 조건⁶⁾ 등 다양한 변수에 의해 다르게 나타난다. 특히, 트랙터의 농작업은 주로 토양 노면 조건에서 수행되며, 이는 콘크리트 노면 조건과 달리 불규칙한 비정형 환경의 특성을 갖는다.⁷⁾ 따라서, 토양 조건은 트랙터의 작업 부하에 큰 영향을 미치는 요인 중 하나이다.⁸⁾ 토양은 토성, 수분함량, 벌크밀도, 토양 강도 등과 같은 다양한 물리적 특성을 갖고 있다. 토양 강도는 대표적인 토양 변수 중 하나로서, 주로 토양의 단단함을 나타내는 지표로 사용된다. 토양 강도는 휴대가 용이한 원추관입 시험기(Cone penetrometer)를 이용하여 측정할 수 있으며, 이는 원추 지수(Cone index, CI)라는 지표로 표현된다.⁹⁾ 원추 지수는 기존에 수행된 다수의 선행 연구에 의해서 작업 부하에 큰 영향을 미친다고 보고된 바 있다.¹⁰⁾ Brixius (1987)는 원추 지수와 타이어 변수를 이용하여 Mobility number를 제안하였으며, 이를 이용하여 견인 부하 예측 모델을 개발하였다.¹¹⁾ 개발된 견인부하 예측 모델은 트랙터를 포함한 다양한 노외차량의 견인 성능 예측에 널리 사용되고 있다.¹²⁾ 이때까지 다양한 변수조건에 따른 트랙터 작업 부하에 관련된 연구가 수행되었다. 그 중, 일부 연구들은 Soil bin 테스트를 이용하여 다양한 토양조건별 견인 부하에 대한 연구를 수행하였다.¹³⁻¹⁵⁾ Okyere et al (2019)는 Soil bin을 이용하여 토양 수분함량 및 주행 속도에 따라 견인 부하를 측정하였으며 이를 이용하여 예측 모델을 개발하였다.⁶⁾ 하지만, Soil bin에서 수행된 실험은 실제 트랙터를 이용한 것이 아니라 작업기만을 사용하였기 때문에 트랙터의 작업 부하 분석에 적용하기에는 어려움이 있다. 일부 연구들은 실제 필드에서 원추 지수에 따라 견인 부하 분석을 수행하였다. Park and Lee (2002)는 타이어 공기압

에 따른 견인 성능 및 토양 다짐을 평가하였다. 그 결과, 높은 타이어 공기압은 토양의 원추 지수를 증가시켜 높은 토양 다짐을 야기한다고 보고하였다.¹⁶⁾ Islam et al (2019)는 토성 및 원추 지수에 따라 무굴착 지하 암거관 매설기의 견인 부하를 측정하였다.¹⁷⁾ 그 결과, Silty loam 토양에서 원추 지수가 증가할수록 견인 부하가 증가한다고 보고하였다. Mouazen and Ramon (2006)은 필드 시험지를 10 × 10 m의 격자로 구분하여 심경 쟁기(Subsoiler) 작업에 따른 견인 부하 측정 및 분석을 수행하였다.¹⁸⁾ 위와 같은 선행 연구는 대부분 필드 시험지 내 임의의 지점에서 측정한 원추 지수 값의 평균을 사용하여 분석을 수행하였다. 하지만, 동일한 필드시험지 내에서도 토양 조건이 균일하지 않기 때문에 하나의 원추 지수를 이용하여 전체 포장의 작업 부하를 분석하는 것은 어렵다.¹⁹⁾ 또한, 기존 연구들은 대부분 견인력과 같은 견인 성능 관점에서만 분석을 수행하였으며, 이는 차륜과 토양 사이의 상호작용 등에 의해서 발생하는 차축 부하와 엔진 부하를 직접적으로 설명하기에는 한계가 있다. 따라서, 필드시험지를 격자로 구분하여 원추 지수를 측정하고, 이에 따른 트랙터 작업 부하를 분석하는 것이 필요하다.

본 연구는 플라우 경운 작업 시 원추 지수가 트랙터 작업 부하에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수행되었으며, 주요 목적은 1) 필드 시험지의 원추 지수 측정 및 분석, 2) 작업 부하 데이터 측정 시스템 개발 및 부하 데이터 수집, 3) 원추 지수가 작업부하에 미치는 영향을 분석하는 것이다.

2. 작업 부하 측정 시스템 및 데이터 수집

2.1 트랙터

본 연구에서는 Tier-4 전자엔진을 탑재한 국내 78 kW급 대형 트랙터(S07, TYM Co. Ltd., Korea)를 사용하였다. 트랙터의 제원은 Table 1과 같이 크기 4225×2140×2830 mm (Length×Width×Height), 무게 3985 kg이며, 트랙터의 정격 토크는 정격 회전속도 2300 rpm에서 324 Nm이다. 트랙터는 경운 작업 시 후방 작업기의 견인 부하로 인하여 전차축의 하중이 후차축으로 이동하는 하중전이 현상이 발생한다. 이는 전차축 구동륜의 접지력을 저하시켜 전륜 견인 부하를 감소시키고, 후차축의 경우 과도한 하중으로 인해 견인 부하를 증가시킴과 동시에 토양 다짐 및 차륜 침하를 야기하여 동력 손실을 초래한다. 따라

서, 전차축 및 후차축의 하중을 적절히 배분하여 하중 전이의 영향을 최소화 시키는 것이 중요하다. 본 연구에서는 하중전이의 영향을 감소시키고 전·후차축의 밸런스를 고려하기 위하여 트랙터 전방에 무게 908 kg의 로더(TX105SL, TYM Co. Ltd., Korea)를 부착하였다. 트랙터의 전륜 및 후륜 타이어는 각각 13.6-24 8PR 및 18.4-34 10PR의 사용되었으며, 전륜 및 후륜의 동 반지름은 각각 0.545, 0.740 m이다.

Table 1 Specifications of agricultural tractor used in this study

Item		Specifications
Length×Width×Height (mm)		4225×2140×2830
Weight (kg)		3985
Engine	Rated torque (Nm)	324@ 2300 rpm
	Rated power (kW)	78@ 2300 rpm
Tire	Front	13.6-24 8PR
	Rear	18.4-34 10PR

2.2 부하 계측 시스템

트랙터 농작업 부하 계측 시스템은 Fig. 1과 같이 차축 토크, 차축 회전속도, 주행속도, 작업 경심을 측정할 수 있도록 구성되었다. 차축 토크는 4개의 차축 케이스와 휠 사이에 토크미터를 설치하여 측정하였으며, 전륜 및 후륜에는 각각 최대 15 kNm까지 측정이 가능한 토크미터(MW_15 kNm, MANNER Sensortelemetrie GmbH, Germany) 및 최대 30 kNm까지 측정이 가능한 토크미터(MW_30 kNm, MANNER Sensortelemetrie GmbH, Germany)가 사용되었다. 차축 회전속도는 4개의 차축에 대하여 각각 근접센서(MP981, ONO SOKKI, Japan)를 사용하여 각 차축에 설치된 100개의 기어 잇 수(Tooth)를 검출함으로써 계산하였다. 트랙터 주행속도는 GPS (18x 5Hz, Garmin, USA) 및 Racelogic VBOX (VB3iSL, Racelogic, United Kingdom)를 사용하여 측정하였다. 경운 작업의 경심은 트랙터 후방 3-point hitch에 설치된 Potentiometer를 통해 측정되었다. 경심을 산출하기 위한 Potentiometer의 교정(Calibration)은 트랙터에 플라우를 부착하고 3-point hitch의 상사점과 하사점을 고려하여 수동으로 총 10개의 높이 범위에서 반복 측정된 데이터를 이용하여 Fig. 2와 같이 수행되었다. 이때, 교정 결과는 0.995의 결정계수(R²)를 보여 Potentiometer를 이용하여 경심의 측정이 가능함을

확인하였다. 또한, 트랙터는 Tier-4 전자엔진을 탑재하고 있어 Controller Area Network (CAN) 통신을 이용하여 엔진 토크, 엔진 회전속도, 연료소비율 데이터를 수집하였다. 각 센서에서 출력된 값은 데이터수집장치(CRONOS compact CRC-400-11, IMC, Germany)를 이용하여 계측하였으며, 데이터 수집 속도는 100 Hz로 설정하였다.



Fig. 1 Traction load measurement system for 78-kW class agricultural tractor

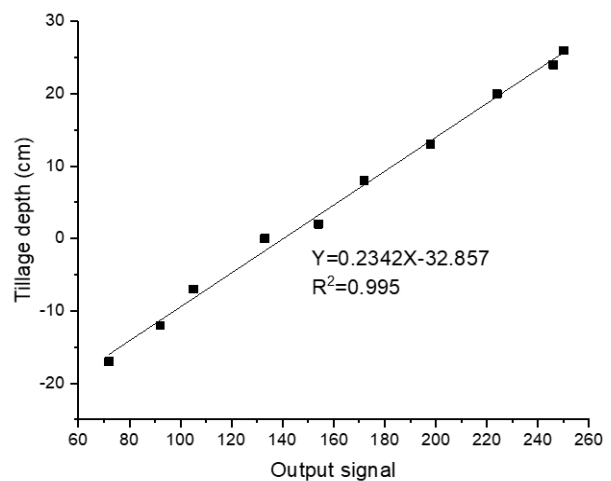


Fig. 2 Calibration result of potentiometer to calculate tractor tillage depth

2.3 필드 시험지

본 연구에서는 필드 시험을 위하여 국내 논 토양 2곳을 선정하였다. 필드 시험은 충청남도 당진시 송산면 금암리 609-9 (36°55'48.3"N, 126°38'00.5"E) 및

경기도 안성시 서운면 송산리 71-6 (36°56'44.9"N, 127°14'30.0"E)에서 수행하였다. 필드 시험지의 토성은 시험지 내 균일한 구간에서 채취한 시료를 이용하여 미농무성(USDA)에서 제시한 토성 삼각도를 기준으로 분류하였으며, 그 결과는 Table 2와 같이 나타났다.²⁰⁾ 국내 논 토양의 토성이 대부분 양토 계열이라고 보고한 선행 연구에 따라²¹⁾, 선정된 필드 시험지는 모두 국내 논 토양의 대표적인 토성인 것을 확인하였으며, 선정된 필드가 모두 농작업에 적합함을 알 수 있었다.²²⁾

Table 2 Soil texture and size of each field sites used in this study

Field	Size	Soil texture*
A (Dangjin)	2970 m ² (33 m×90 m)	Loam (Fine) (S _a : 34%, S _i : 48%, C: 18%)
B (Ansung)	1512 m ² (18 m×84 m)	Clay Loam (Medium) (S _a : 30%, S _i : 38%, C: 32%)

* S_a: Sand, S_i: Silt, C: Clay

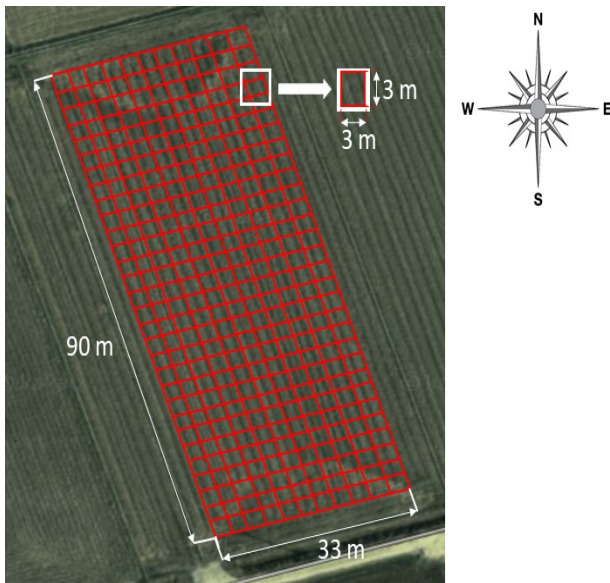


Fig. 3 The representative experimental site separated by a grid of 3×3 m (Field A)

선행 연구에 따르면 동일한 필드 시험지 내에서도 토양 조건이 균일하지 않으므로 원추 지수가 다르게 나타난다.¹⁹⁾ 따라서, 필드 시험지는 크기가 동일한 격자 형태로 구분되었으며, 이때 격자 크기는 트랙터와 작업기의 크기를 고려하여 9 m² (가로 3 m×세로 3 m)로 설정하였다. 필드 시험지의 격자를 구분하기 위

하여, 가로축에는 3 m 간격으로 막대를 설치하였으며, 세로축에는 100 m 줄자를 사용하여 구분하였다. Fig. 3은 Field A의 시험지를 격자로 구분한 예시를 나타내며, Field B에서도 동일한 방식으로 격자 구분 작업이 수행되었다.

2.4 필드 데이터 계측

본 연구는 플라우 경운 작업을 대상으로 수행되었으며, 사용된 작업기는 경폭이 2.8 m인 8련 플라우 (WJSP-8, Woongjin Machinery Co. Ltd., Korea)이다. 작업 단수는 본 연구에 사용된 트랙터의 마력대 및 농작업기의 경폭을 고려하여 실수요자의 설문조사 및 선행 연구 결과를 통하여 M3 Low (7.09 km/h)로 설정하였다.²²⁻²⁴⁾ 이때, 엔진 회전속도는 Full throttle 조건인 약 2510 rpm으로 설정하였다. 작업기 경심은 약 13~17 cm 수준으로 설정하였으며, 작업 시 경심은 작업 부하에 따라 제어가 가능하도록 설정하였다.

2.5 원추 지수 계측

필드 시험지의 토양 원추 지수는 미농공학회(ASABE)에서 제시한 방법을 기반으로 약 30 mm/s의 속도로 Cone penetrometer (SC900, Spectrum Technology, USA)를 사용하여 측정하였다.²³⁾ 원추 지수는 각각의 격자 중앙에서 3회 반복 측정한 값의 평균값을 사용하였으며, 견인 부하 분석 시 주로 사용되는 0~15 cm까지의 평균 데이터를 사용하였다.²⁵⁾

3. 트랙터 작업 부하 분석

3.1 분석 항목 및 방법

본 연구에서는 원추 지수가 트랙터 작업 부하에 미치는 영향에 대하여 분석을 수행하였으며, 이때 작업 부하는 엔진 부하, 차축 부하, 견인 부하에 대하여 각각 분석하였다. 트랙터 엔진은 높은 부하가 발생할 때, 작업 부하를 극복하기 위하여 엔진 성능 곡선을 기반으로 엔진 회전속도를 낮춤으로써 토크를 증가시킨다. 이는, 엔진 회전속도 및 토크뿐만 아니라 연료소비율과도 관련이 있으며, 연료소비율은 트랙터의 효율을 평가하는 지표로 사용된다.²⁶⁾ 따라서, 본 연구에서는 엔진 부하 분석 시 엔진 토크 및 회전속도뿐만 아니라, 단위 출력 당 연료소비율에 대해서도 분석을 수행하였다. 엔진 출력은 엔진 토크 및 회전속도를 이용하여 식 (1)과 같이 계산되었으며¹⁾, 단위 출력 당 연료소비율(BSFC)은 식 (2)와 같이 계산되었다.²⁶⁾

$$P_e = \frac{2\pi T_e N_e}{60,000} \quad (1)$$

$$BSFC = \frac{FC}{P_e} \quad (2)$$

차축 부하는 농작업 시 차륜 휠과 토양과의 상호 작용에 의해서 가장 크게 변동한다.⁸⁾ 따라서, 본 연구에서는 차축 부하의 지표로서 슬립률 및 차축 토크를 선정하였다. 차륜의 구동 슬립률은 토양조건에서 차륜 휠의 미끄러짐 정도를 나타내는 값으로서 차축 부하에 큰 영향을 미친다.²⁵⁾ 슬립률은 Lee et al (2011)의 연구에서 제시된 방법을 이용하여 식 (3)과 같이 차륜의 회전속도, 타이어의 동반경, 실제 주행속도를 이용하여 계산된다.²⁸⁻²⁹⁾ 이때, 실제 주행속도는 GPS에서 측정된 값을 사용하였다.

$$s = \left(1 - \frac{100 V_a}{6} \times \frac{1}{2\pi r_d n_w}\right) \times 100(\%) \quad (3)$$

트랙터의 플라우 경운작업에 따른 견인 부하 분석은 식 (4)와 같이 ASABE standard D497.6에서 제안한 1차 경운 작업기의 견인력 계산 모델을 이용하여 수행되었다.³⁰⁾ 제안된 견인력 예측 모델은 토양조건, 작업기 상수, 작업속도, 경심, 작업기 폭을 이용하여 계산된다. 토성 조정 변수(F_i)는 미농무성(USDA) 기준 ($F_i=1$ for fine, 0.7 for medium and 0.45 for coarse textured soils)을 적용하였으며³⁰⁾, Field A 및 B에서 측정된 데이터에 각각 1 및 0.7을 사용하였다. 작업기 상수는 본 연구에서 사용한 몰드보드 플라우 기준($A: 652, B: 0, C: 5.1$)을 사용하였으며³⁰⁾, 작업기 폭은 본 연구에 사용된 플라우의 폭인 2.8 m를 사용하였다. 경심은 Potentiometer를 통해 측정된 값을 사용하였다.

$$D = F_i [A + B(V_a) + C(V_a^2)] WT \quad (4)$$

3.2 데이터 분류

원추 지수에 따른 트랙터 작업 부하 분석은 Fig. 4와 같은 순서로 수행되었다. 토양 원추 지수가 격자별로 측정된 것과 달리, 트랙터 부하 데이터는 90 m 직진작업에 따라 시간별로 측정되었다. 따라서, 원추 지수에 따른 작업 부하를 분석하기 위해서는 원추 지수와 트랙터 부하 데이터의 매칭 작업이 필요하다.

필드에서 측정된 시간별 작업 부하 데이터는 시작과 종료 지점의 시간 값을 계산하여 30등분으로 나누었으며, 각 등분별 평균값을 산출하였다. 평균값은 각 격자별 작업 부하 데이터로서 사용되었으며, 격자별 원추 지수와 매칭하여 분류되었다. 매칭된 데이터들은 원추 지수 데이터를 기반으로 오름차순으로 정렬되었으며, 원추 지수는 최소 및 최대값의 범위를 고려하여 600 kPa 단위로 300~900 kPa (I), 900~1500 kPa (II), 1500~2100 kPa (III), 2100~2700 kPa (IV)와 같이 총 4개의 그룹으로 구분되었다. 이때, 데이터는 Field A 및 B에서 측정된 데이터를 종합하여 사용하였다. 일원분산분석(One-way ANOVA)은 원추 지수 그룹별 작업 부하의 유의성 분석을 위하여 수행되었으며, LSD (Least Significant Difference)를 통하여 사후 검증을 수행하였다. 이때 분석에 사용된 소프트웨어는 IBM SPSS Statistics (SPSS 25, SPSS Inc., New York, USA)이다.

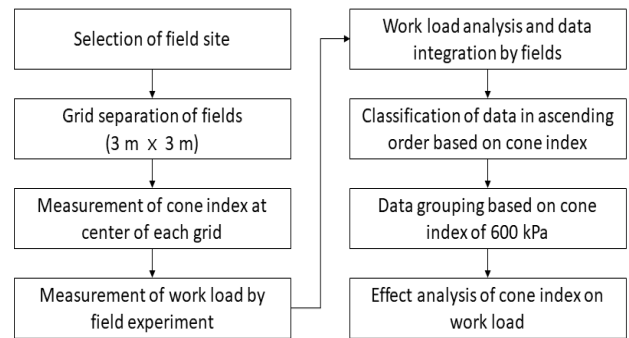


Fig. 4 The entire procedure of the effect analysis of the cone index on the tractor work load

4. 토양 원추 지수 분석

Field A 및 B의 평균 깊이별 원추 지수는 Fig. 5와 같이 나타났다. Field B의 원추 지수는 경운 작업이 수행되는 0~20 cm 범위에서 Field A 보다 더 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서 구분된 원추 지수 그룹별 평균 경심은 300~900 kPa (I), 900~1500kPa (II), 1500~2100 kPa (III), 2100~2700 kPa (IV)에서 각각 0~5 cm, 4~15 cm, 13~18 cm, 17~20 cm로 나타났다. 본 연구에서 수행된 플라우 경운 작업은 평균 약 15~17 cm의 경심을 유지하도록 수행되었으며, 이는 약 1500~2100 kPa (III)의 수준인 것으로 나타났다. Table 3은 원추 지수 범위별 분석에 사용된 데이터를 포함한 ANOVA 분석 결과를 나타낸다. 분석에 사용된 전체 데이터는 498개이며, 그중 원추 지수

900~1500kPa (II)의 범위에서 데이터는 전체의 47%를 차지하여 가장 높게 나타났으며, 2100~2700 kPa (IV)의 범위에서는 7%로 가장 낮게 나타났다. 또한, 그룹별 평균 원추 지수(F=1200.4, p<0.001)는 ANOVA 분석에 따라 신뢰수준 99%를 기준으로 통계적으로 유의한 차이를 보이는 것을 알 수 있었다.

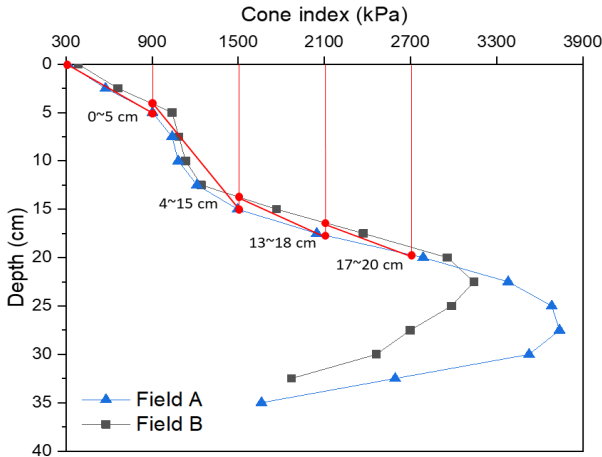


Fig. 5 Cone index by depth for the field sites

Table 3 Results of analysis of variance (ANOVA) according to the range of cone index (N=498)

CI range	Ratio of Number of data (%)	Avg. ± std.* of CI (kPa)	F-value	p-value
I	19	753 ^d ±119	1200.4	<0.001
II	47	1196 ^c ±163		
III	27	1738 ^b ±155		
IV	7	2343 ^a ±160		

* Average±standard deviation

^{a,b,c,d} Means within each column with the same combination of letters are not significantly different at p < 0.01

5. 원추 지수에 따른 트랙터 작업 부하 분석

5.1 원추 지수가 엔진 부하에 미치는 영향

원추 지수에 따른 트랙터 엔진 토크, 회전속도 및 단위 출력 당 연료소비율(BSFC) 분석 결과는 Table 4 와 같다. 원추 지수가 증가할수록 엔진 토크는 감소하는 경향을 보였으며, 원추 지수 300~900 kPa (I)의 범위에서 333.0 Nm로 나타났으며, 원추 지수 2100~2700 kPa (IV)의 범위에서는 303.4 Nm로 나타

났다. 또한, 원추 지수가 증가할수록 엔진 회전속도 및 단위 출력당 연료소비율은 증가하는 경향을 보였으며, 원추 지수 300~900 kPa (I)의 범위에서는 각각 2187 rpm 및 219.7 g/kWh의 값을 보였고, 2100~2700 kPa (IV)의 범위에서 2298 rpm 및 226.5 g/kWh로 나타났다. 원추 지수에 따라 엔진 토크, 속도, 단위 출력 당 연료소비율의 평균 차이가 있는지 분석하기 위하여 ANOVA 분석을 수행하였다. 그 결과, 엔진 토크(F=17.591, p<0.001), 엔진 속도(F=9.152, p<0.001), 단위 출력당 연료소비율(F=16.326, p<0.001)은 신뢰수준 99%를 기준으로 최소 두 개 이상의 원추 지수 범위에서 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. LSD 사후 분석 결과에 따라, 원추 지수 1500~2100 kPa (III) 와 2100~2700 kPa (IV)은 엔진토크(p=0.479), 엔진 속도(p=0.601), 단위 출력당 연료 소비율(p=0.243)에서 유의한 차이를 나타내지 않았으며, 그 외의 원추 지수 범위에서는 유의한 차이를 보이는 것으로 나타났다. Fig. 6은 원추 지수 300~900 kPa (I)을 기준으로 원추 지수에 따른 엔진 부하의 비율을 분석한 결과를 나타낸다. 원추 지수가 증가함에 따라 엔진 토크는 감소하여 원추 지수 2100~2700 kPa에서 최대 9% 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 엔진 회전속도 및 단위 출력당 연료소비율은 증가하며, 각각 최대 5% 및 3% 증가하는 것으로 나타났다.

Table 4 Results of engine torque, engine speed and BSFC according to the cone index

	CI range	Avg. ± std.*	F-value	p-value
Engine torque (Nm)	I	333.0±27.5 ^a	17.591	<0.001
	II	321.0±26.6 ^b		
	III	307.2±29.2 ^c		
	IV	303.4±35.2 ^c		
Engine speed (rpm)	I	2187±182 ^c	9.152	<0.001
	II	2236±139 ^b		
	III	2284±128 ^a		
	IV	2298±146 ^a		
BSFC (g/kWh)	I	219.7±6.2 ^c	16.326	<0.001
	II	221.9±6.1 ^b		
	III	225.1±6.9 ^a		
	IV	226.5±7.6 ^a		

* Average±standard deviation

^{a,b,c} Means within each column with the same combination of letters are not significantly different at p < 0.01

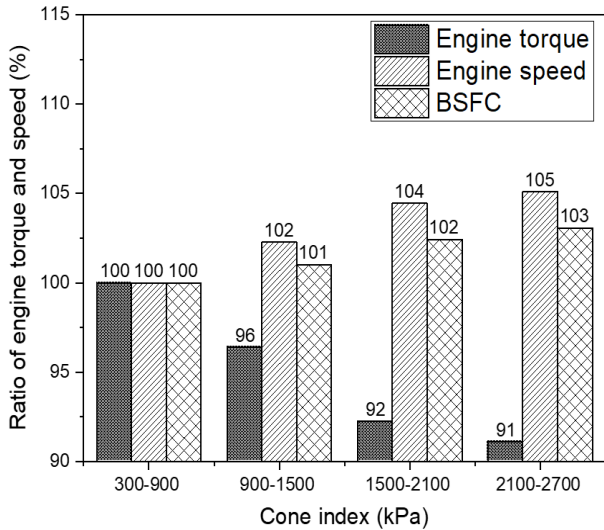


Fig. 6 Ratio of engine torque, engine speed and BSFC according to cone index

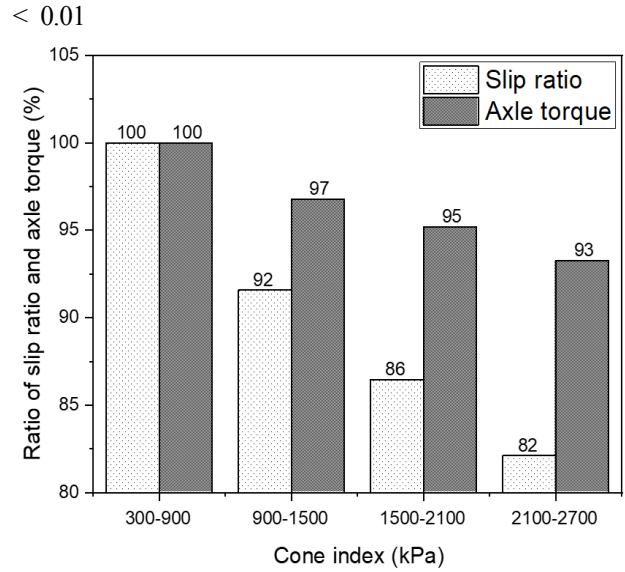


Fig. 7 Ratio of slip ratio and axle torque according to cone index

5.2 원추 지수가 차축 부하에 미치는 영향

Table 5는 원추 지수에 따른 차축 슬립률 및 토크 분석 결과를 나타낸다. 원추 지수가 증가할수록 슬립률 및 토크는 감소하는 것으로 나타났다. 이때, 원추 지수 범위가 300~900 kPa (I)에서 2100~2700 kPa (IV)로 증가할 때, 슬립률은 14.95%에서 12.28%로 감소하였으며, 차축 토크는 20,871 Nm에서 19,468 Nm로 감소하는 것으로 나타났다. 원추 지수별 슬립률 및 차축 토크의 평균 차이가 있는지 분석하기 위하여 ANOVA 분석을 수행하였다. 그 결과, 슬립률 ($F=17.631$, $p<0.001$) 및 차축 토크($F=19.509$, $p<0.001$)는 신뢰수준 99%를 기준으로 최소 두 개 이상의 원추 지수 범위에서 유의한 차이가 있는 것으로 나타

Table 5 Results of slip ratio and axle torque according to the cone index

	CI range	Avg. ± std.*	F-value	p-value
Slip ratio (%)	I	14.95±2.73 ^a	17.631	<0.001
	II	13.69±2.08 ^b		
	III	12.93±2.09 ^c		
	IV	12.28±2.33 ^c		
Axle torque (Nm)	I	20,871±1159 ^a	19.509	<0.001
	II	20,200±1033 ^b		
	III	19,869±1001 ^c		
	IV	19,468±1259 ^c		

* Average±standard deviation

^{a,b,c} Means within each column with the same combination of letters are not significantly different at p

났다. LSD 사후 분석 결과에 따라, 원추 지수 1500~2100 kPa (III) 와 2100~2700 kPa (IV)은 슬립률 ($p=0.118$), 차축토크($p=0.045$)에서 유의한 차이를 나타내지 않았으며, 그 외의 원추 지수 범위에서는 유의한 차이를 보이는 것으로 나타났다. Fig. 7은 원추 지수가 가장 낮은 범위인 300~900 kPa (I)을 기준으로 각 원추 지수의 범위 값을 나누어 비율로 분석한 결과를 나타낸다. 그 결과, 원추 지수의 증가에 따라 차축 슬립률은 최대 18% 감소하였으며, 차축 토크는 최대 7% 감소한 것으로 나타났다.

5.3 원추 지수가 견인 부하에 미치는 영향

원추 지수에 따른 견인력 및 경심은 Table 6과 같이 나타났다. 원추 지수가 300~900 kPa (I)의 범위에서 2100~2700 kPa (IV)의 범위로 증가할 때, 경심은 14.69 cm에서 16.41 cm로 증가하는 것을 알 수 있으며, 견인력은 23.98 kN에서 27.15 kN로 증가하는 것으로 나타났다. 경심은 고 부하 발생 시 트랙터 내에 탑재된 경심제어 기능을 통하여 자동으로 경심을 제어하도록 설정되어있다. 따라서, 낮은 원추 지수 범위에서 고 부하 발생으로 인하여 경심 제어 기능이 작동되었고, 이로 인하여 경심이 낮게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 견인 부하는 경심 기반으로 구성된 예측 모델을 이용하여 계산되었으므로, 경심이 감소함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 원추 지수별 경심 및 견인력의 평균 차이가 있는지 분석하기 위하여 ANOVA 분석을 수행하였다. 그 결과, 경심 ($F=6.361$, $p<0.001$) 및 견인력($F=6.800$, $p<0.001$)은 신

회수준 99%를 기준으로 최소 두 개 이상의 원추 지수 범위에서 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. LSD 사후 분석 결과에 따라, 원추 지수 300~900 kPa (I)와 900~1500 kPa (II)은 경심(p=0.038)에서 유의한 차이를 나타내지 않았으며, 원추 지수 900~1500 kPa (II)와 1500~2100 kPa (III)은 경심(p=0.079), 견인력(p=0.148)에서 유의한 차이를 나타내지 않았다. 그 외의 원추 지수 범위에서는 유의한 차이를 보이는 것으로 나타났다. Fig. 8은 원추 지수 300~900 kPa의 값을 기준으로 원추 지수에 따른 견인력 및 경심에 대한 비율을 분석한 결과이다. 원추 지수가 증가함에 따라 견인력 및 경심은 증가하였으며, 원추 지수 2100~2700 kPa에서 각각 최대 13% 및 12% 증가한 것으로 나타났다.

Table 6 Results of tillage depth and drawbar pull according to the cone index

	CI range	Avg. ± std.*	F-value	p-value
Tillage depth (cm)	I	14.69±2.75 ^c	6.361	<0.001
	II	15.29±2.13 ^{bc}		
	III	15.70±1.92 ^b		
	IV	16.41±1.67 ^a		
Drawbar pull (kN)	I	23.98±4.74 ^c	6.800	<0.001
	II	25.21±3.71 ^b		
	III	25.80±3.34 ^b		
	IV	27.15±2.97 ^a		

* Average±standard deviation

^{a,b,c} Means within each column with the same combination of letters are not significantly different at p < 0.01

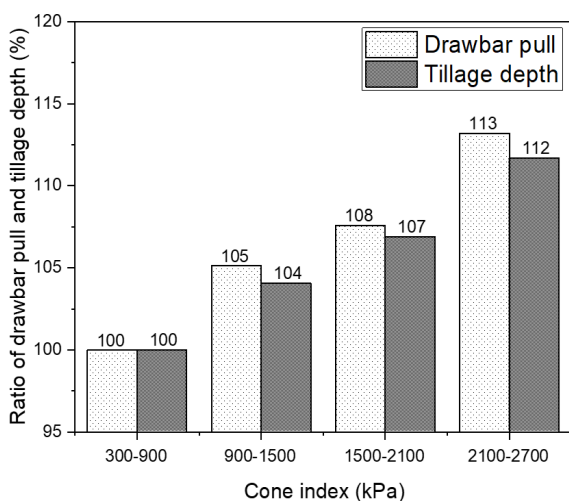


Fig. 8 Ratio of drawbar pull and tillage depth according to cone index

6. 결 론

본 연구는 토양 변수 중 하나인 원추 지수가 플라우 경운 작업에 따른 트랙터 농작업 부하에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수행되었으며, 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 농작업 부하 측정 시스템은 차축 토크미터, 근접센서, GPS, 데이터 수집장치를 이용하여 구성하였다. 필드 시험지는 국내 논 토양 2곳을 선정하여 3 m × 3 m의 격자로 구분하였다. 원추 지수는 각 격자의 중앙 위치에서 측정하였으며, 필드시험을 통하여 부하 데이터를 수집하였다. 원추 지수에 따른 작업 부하 분석을 위하여 원추 지수 600 kPa 단위로 그룹화 작업을 수행하였다.

(2) 원추 지수의 증가에 따라 엔진 토크는 최대 9% 감소하였으며 엔진 회전속도 및 단위 출력 당 연료소비율은 각각 최대 5% 및 3% 증가하는 것으로 나타났다. 차축 슬립률 및 토크는 원추 지수가 증가함에 따라 각각 최대 18%, 7% 감소하는 것으로 나타났으며, 견인력 및 경심은 각각 최대 13%, 12% 증가하는 것으로 나타났다.

(3) 원추 지수가 낮을수록 토양 강도가 약해지기 때문에, 트랙터의 하중으로 인하여 차륜의 침하가 발생할 수 있다. 이는, 차륜의 고 슬립 및 고 부하를 발생시키며, 엔진은 차축에 고 부하를 출력하기 위하여 회전속도를 감소시켜 높은 토크를 출력하게 된다. 또한, 차륜에 고부하가 발생할 경우, 3-point hitch가 제어되어 작업기를 상승시켜 경심을 낮추고, 견인 부하를 감소시킨다. 따라서, 원추 지수는 트랙터의 엔진, 차축, 견인 등의 작업 부하에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 향후 원추 지수뿐만 아니라, 수분 함량 및 토성 등 다양한 토양 환경 조건이 트랙터 작업 부하에 미치는 영향에 대한 분석을 수행할 예정이며, 이는 트랙터 설계 및 수명평가 등에 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 제조기반산업 핵심기술개발사업(생산시스템)의 일환으로 수행하였음(10062546, 트랙터용 농작업 부하 DB 구축 및 동력 전달시스템 시뮬레이션 모델 개발).

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) W. S. Kim et al., "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.
- 2) N. G. Lee et al., "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.
- 3) J. M. Serrano et al., "Tractor energy requirements in disc harrow systems", Biosystems Engineering, Vol.98, pp.286-296, 2007.
- 4) C. E. Goering, Engine and Tractor Power, 3rd ed., American Society of Agricultural Engineers (ASAE), Michigan, 1992.
- 5) 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.
- 6) F. G. Okyere et al., "Analysis of Draft Force Requirement of a Compact Disc Harrow and Model Development for Future Predictions", Journal of Biosystems Engineering, Vol.44, pp.47-56, 2019.
- 7) S. Y. Baek et al., "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.
- 8) N. Regazzi, M. Maraldi and G. Molari, "A theoretical study of the parameters affecting the power delivery efficiency of an agricultural tractor", Biosystems Engineering, Vol.186, pp.214-227, 2019.
- 9) K. S. Lee et al., "Development of a Digital Cone Index Measuring Device", Journal of Biosystems Engineering, Vol.35, No.6, pp.387-392, 2010.
- 10) S. O. Chung and K. A. Sudduth, "Soil failure models for vertically operating and horizontally operating strength sensors", Transactions of the ASABE, Vol.49, No.4, pp.851-863, 2006.
- 11) W. W. Brixius, Traction prediction equations for bias ply tires, ASAE Paper No.87-1622, American Society of Agricultural Engineers (ASAE), Michigan, 1987.
- 12) W. Y. Park and S. S. Lee, "Development of a Tractive Performance Prediction Program of Tractors", Journal of Biosystems Engineering, Vol.37, No.3, pp.131-139, 2012.
- 13) W. Y. Park and K. S. Lee, "A Study on Soil Stress and Contact Pressure of Tire", Journal of Biosystems Engineering, Vol.26, No.3, pp.245-252, 2001.
- 14) H. Taghavifar, A. Mardani and L. Taghavifar, "A hybridized artificial neural network and imperialist competitive algorithm optimization approach for prediction of soil compaction in soil bin facility", Measurement, Vol.46, No.8, pp.2288-2299, 2013.
- 15) P. Farhadi et al., "Finite element modeling of the interaction of a threaded tire with clay-loam soil", Computers and Electronics in Agriculture, Vol.162, pp.793-806, 2019.
- 16) W. Y. Park and K. S. Lee, "The Effect of Tire Inflation Pressure on soil Compaction and Tractive Performance of Tractor", Journal of Biosystems Engineering, Vol.27, No.6, pp.491-500, 2002.
- 17) M. N. Islam et al., "Performance Evaluation of Trenchless Subsurface Drainage Piping Machine", Journal of Biosystems Engineering, Vol.44, pp.218-225, 2019.
- 18) A. M. Mouazen and H. Ramon, "Development of on-line measurement system of bulk density based on on-line measured draught, depth and soil moisture content", Soil Tillage Research, Vol. 86, pp.218-229, 2006.
- 19) B. H. Chong et al., "Mapping of Cone Index for Precision Tillage", Journal of Biosystems Engineering, Vol.30, No.2, pp.127-133, 2005.
- 20) 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.
- 21) MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), "Development of Optimal Tillage System Based on Soil Physical Properties", 2006.
 - 22) 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.
 - 23) Y. S. Kim et al., "Development of a Real-Time Tillage Depth Measurement System for Agricultural Tractors: Application to the Effect Analysis of Tillage Depth on Draft Force during Plow Tillage", Sensors, Vol.20, No.3, 912, 2020.
 - 24) Y. S. Kim et al., "Analysis of Tillage Depth and Gear Selection for Mechanical Load and Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Using an Agricultural Field Measuring System", Sensors, Vol.20, No.9, 2450, 2020.
 - 25) F. M. Zoz and R. D. Grisso, "Traction and Tractor Performance", American Society of Agricultural Engineers (ASAE), St. Joseph, MI, USA, 2003.
 - 26) S. C. Kim and K. U. Kim, "Rating of Agricultural Tractors by Fuel Efficiency", Journal of Biosystems Engineering, Vol.35, No.2, pp.69-76, 2010.
 - 27) Y. S. Kim et al., "Effect of tractor travelling speed on a tire slip", Korean Journal of Agriculture Science, Vol.45, No.1, pp.120-127, 2018.
 - 28) A. Yahya et al., "Mapping system for tractor-implement performance", Computers and Electronics in Agriculture, Vol.69, pp.2-11, 2009.
 - 29) J. W. Lee et al., "Effects of Distribution of Axle Load and Inflation Pressure of Tires on Fuel Efficiency of Tractor Operations", Journal of Biosystems Engineering, Vol.36, No.5, pp.303-313, 2011.
 - 30) ASABE Standards D497.6, "Agricultural Machinery Data", American Society of Agricultural Engineers (ASAE), St. Joseph, MI, USA, 2009.