

RESEARCH ARTICLE

쟁기 작업에 따른 차축 토크를 활용한 47 kW 급 농업용 트랙터의 가속수명시험 방법 개발

이민하¹, 강호준², 전현호², 백승민³, 백승윤³, Md. Abu Ayub Siddique³, 박민종², 박종대², 양철우², 박민재²,
김용주^{1,2,3*}

¹충남대학교 농업기계공학과, ²충남대학교 스마트농업시스템학과, ³충남대학교 친환경 수소 전기 농기계 연구소

Development of accelerated life testing method for a 47 kW class agricultural tractor using axle torque during plow tillage

Min-Ha Lee¹, Ho-Joon Kang², Hyey-Ho Jeon², Seung-Min Baek³, Seung-Yoon Baek³, Md. Abu Ayub Siddique³, Min-Jong Park², Jong-Dae Park², Cheol-Woo Yang², Min-Jae Park², Yong-Joo Kim^{1,2,3*}

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

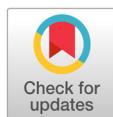
²Department of Smart Agricultural Systems, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Republic of Korea

³Eco-friendly Hydrogen Electric Tractor & Agricultural Machinery Institute, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Republic of Korea

*Corresponding author: babina@cnu.ac.kr

Abstract

Due to the ongoing shortage of rural labor and the aging farming population, the farm size per farmer has increased, demanding durable and reliable agricultural equipment. In response to this demand, an accelerated life test (ALT) technique for the tractor axle was developed based on measured load data during actual field operations. Robust axle systems were required for high torque at low speeds of tractors, particularly during high-load operations such as plow tillage. In this study, axle torques and rotational speeds were measured for both the front and rear axles using telemetry torque sensors. The measured data were segmented into torque ranges, and a Load Duration Distribution (LDD) was analyzed. Equivalent torque was calculated by applying the Palmgren-Miner linear damage rule, and a fatigue damage exponent was assumed as 8.738. The equivalent torque was obtained as 6,310.99 Nm. The applied torque was approximately 8,170.08 Nm, which is 1.2 times the rated torque. The acceleration factor was calculated as 9.545, which reduced the durability test time from 3,000 to 314.3 hours. The proposed technique provides a quantifiable and efficient method for evaluating axle fatigue life under actual working conditions. It was expected that this technique could be adapted to other equipment in future research, contributing to enhanced drivetrain reliability, shortened product development cycles, and reduced maintenance and production costs of the agricultural machinery.



OPEN ACCESS

Journal of Agricultural Machinery Engineering
5(4):111-118

DOI: <https://doi.org/10.12972/jame.2025.5.4.1>

Received: October 23, 2025

Revised: November 20, 2025

Accepted: November 22, 2025

Copyright: © 2025 Korean Society for Agricultural Machinery



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.

Keywords: Accelerated Life Test, Agricultural Tractor, Agricultural Operation, Load Duration Distribution, Reliability

Introduction

농업인구의 지속적인 감소 및 고령화로 인하여 농촌의 노동인구 부족 현상이 심화되고 있다. 2024년 전국 농가는 97만 4,000가구로 전년 대비 2만 5,000가구(2.5%) 감소하였다(Park, 2025). 이에 따라 1인당 경작면적은 약 0.698 ha에서 0.751 ha로 7.6% 증가하였다(KASS, 2024). 1인당 경작 면적의 증가는 농업 기계의 사용 강도와 작동 시간의 증가를 초래하며, 이에 따라 장비의 장기적인 신뢰성 확보에 대한 요구도 높아지고 있다. 이와 같은 필요성에 대응하여 다양한 농작업 데이터 기반의 연구가 수행되고 있다.

Baek et al. (2019)는 로타리 작업에 따른 78 kW급 농업용 트랙터의 엔진 토크를 CAN 통신으로 엔진 토크를 수집한 뒤 작업 부하를 등가 토크로 변환하여 분석하였다. 등가 토크는 대표적인 누적 손상법인 Palmgren-Miner 식으로 작업 및 선회 구간에 대하여 계산되었으며, 최적 설계를 위해 실제 작업 토크를 고려하는 것이 필요할 것으로 판단하였다.

Kim et al. (2022)는 옥수수 수확기 기어박스의 피로 수명을 향상시키기 위해 실제 작업 부하 데이터를 기반으로 부하 지속 분포(Load Duration Distribution, LDD)를 구축하고 변속기 설계 상용 소프트웨어 Romax(2021, Romax Technology, UK)의 시뮬레이션을 통해 설계를 개선하였다. 초기 설계에서 출력축 베어링과 기어는 목표 수명을 충족하지 못하고 접촉 응력 안전계수가 낮아 파손 위험이 있었다. 이에 베어링 배열을 오버행 방식에서 스트래들 방식으로 변경해 축 처짐을 감소시키고, 기어의 리드 크라운과 리드 슬로프를 최적화하여 하중 분포를 개선한 결과, 베어링 수명과 기어 안전계수가 목표 수준 이상으로 향상되어, 실제 작동 데이터 기반의 시뮬레이션을 활용한 설계 개선이 농기계 내구성 향상에 효과적임을 입증하였다. Moon et al. (2020)는 78 kW급 농업용 트랙터를 이용하여 쟁기 경운, 로타리 경운, 베일러, 랩핑 작업 후 부하 데이터를 수집하고 이를 기반으로 등가 부하를 산출·분석하였다. 이를 위해 작업기 구동 펌프에 압력센서를 설치하고, 유량은 이론 토출량과 엔진 회전속도를 이용해 계산했으며, 등가 부하 계산에는 역승 모델을 적용하였다. 분석 결과, 작업별 부하 특성이 서로 상이하게 나타났으며, 특히 베일러 및 로타리 작업에서 상대적으로 높은 등가유량이 발생하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 실제 작업 조건을 반영한 등가 부하 산출이 농기계 구성품의 내구성 평가에 필수적임을 보여준다.

Kim (2019)은 82 kW급 트랙터를 이용해 부하 계측 시스템을 구성하고, 쟁기 작업을 통해 차축·PTO·엔진 등의 부하 데이터를 수집하였다. 계측된 데이터를 바탕으로 50 kW급 트랙터의 주변속 기어를 대상으로 등가 토크와 회전수를 산출했다. 기어 강도 해석 상용 소프트웨어인 KISSsoft (Version 2017, KISSsoft AG, Switzerland)로 사용빈도별 토크 조건과 최대 토크 조건에서 기어 강도 해석을 수행하였다. 굽힘 및 접촉 응력, 안전율을 비교·분석하였다. 연구 결과, 기존의 최대 토크 기반 설계는 과설계 우려가 있으며, 트랙터 설계 시 최대 토크가 아닌 실제 작업 토크를 반영한다면 보다 신뢰성 있는 제품 개발이 가능할 것으로 판단하였다.

본 연구는 트랙터 변속기의 성능 평가 및 최적 설계 등을 위한 기초 자료를 확보하기 위하여 수행되었으며, 47 kW급 트랙터의 쟁기 작업을 대상으로, 전·후륜 차축 토크를 실측하여 LDD를 구축하고, 이를 기반으로 등가 토크를 산출하여 가속 수명시험 시간을 정량적으로 도출한 데에 차별성을 지닌다. 트랙터 차축에 텔레메트리 토크 센서와 근접센서를 장착하여 데이터를 수집하였고, LDD로 부하를 구간별 지속시간으로 분석하였다. 이를 통해 실제 작동 환경을 고려한 등가 토크, 가속수명시간을 도출하였다.

Materials and Methods

농업용 트랙터

본 연구에는 Fig. 1의 47 kW급 농업용 트랙터(MT-4, LSmtron, Korea)를 사용하였다. 주요 제원은 Table 1과 같으며, 크기는 3,770(L)×1,907(W)×2,690(H) mm, 중량은 2,735 kg이다. 변속기는 전진/후진 각각 28단의 파워셔틀 방식이다.



Fig. 1. A photo of 47 kW class agricultural tractor

Table 1. Specifications of a 47 kW class agricultural tractor used in this study

Item	Specification
Length × Width × Height (mm)	3,770×1,907×2,690
Weight (kg)	2,735
Engine	Rated power (kW)
Transmission	Type
	Gear stage
	47 (@2,500 rpm)
	Power shuttle
	Forward 28 / Reverse 28

부하 계측 시스템

등가 토크 산정과 가속수명시험 설계를 위한 시험 데이터를 확보하고자 전·후륜 차축의 토크와 회전속도를 측정하였다. 차축의 토크 및 회전속도는 전륜 토크 미터, 후륜 토크 미터, 근접센서를 설치하여 측정하였으며, 주요 제원은 Table 2와 같다. 각 센서는 Fig. 2와 같이 설치하였으며, 토크 미터는 무선 텔레메트리 방식을 이용하여 데이터 수집을 하였다. 근접센서는 차축에 설치된 100개의 톱니를 가진 원판을 감지하여 차축의 회전속도를 측정할 수 있도록 하였다. 차축의 구동 토크 및 회전속도를 분석하기 위해 총 2개의 신호(차축 토크, 회전속도)를 측정할 수 있도록 데이터 수집 장치(QuantumX MX840, HBM, Germany)를 선정하였으며, 해당 측정 장치를 토크 미터와 근접센서에 연결하여 데이터를 수집하였다.

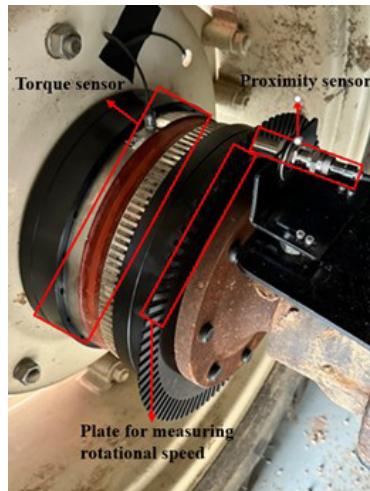


Fig. 2. The torque sensor for measuring torque on axle and the plate for measuring rotational speed of axle

Table 2. Specifications of the sensors used in this study

Item	sensor		
Company	MANNER Sensortelemetrie GmbH	MANNER Sensortelemetrie GmbH	ONO SOKKI CO., Ltd
Model	MW-15 kNm	MW-20 kNm	MP-981
Rated Capacity	15 kNm	20 kNm	20,000 rpm

부하 계측 및 작업 조건

트랙터 필드 시험은 충남 당진시 금암로 171-24(36.930347, 126.632808)에 위치한 100 m × 40 m 크기의 논에서 수행하였다. 필드 시험지 논의 토성은 미국 농무부(USDA)법을 이용하여 측정하였으며, 토성의 성분은 미사 58% 이상과 점토 16 – 20%를 함유한 미사질(silt loam)양토이다. 트랙터 주요 농작업 중 차축에 가장 높은 구동 저항이 발생하는 쟁기 작업을 선정하여 수행하였다(Kim et al., 2011). 농작업기는 Fig. 3와 같이 47 kW급에 적합한 6면 쟁기(WJSP-6, Woongjin machinery, Korea)를 선정하였으며 세부 제원은 Table 3와 같다. 작업 속도와 단수는 6.37 km/h (M2단)에서 수행하였다.



Fig. 3. A photo of attached implement used in this study

Table 3. Specifications of the attached plow used in this study

Item	Specification
Company	Woongjin Machinery Co., Ltd
Model	WJSP-6
Length × Width × Height (mm)	1,930 × 2,100 × 1,235
Working width (mm)	2,100
Weight (kg)	380
Recommended Tractor Power (kW)	45 - 60

등가부하, 가속계수, 가속수명시간 수식

가속수명시험 시간은 Palmgren-Miner의 선형 누적손상 법칙에 따라 산정하였다. 누적손상 D 는 각 조건에서 작동한 시간이 그 조건의 파괴 수명에서 차지하는 비를 합산한 값으로 식 (1)과 같이 정의되며, 본 연구에서는 시간-토크 이력으로 만든 LDD에서 각 구간의 지속시간 Δt_i 와 대표 토크 T_i 를 추출하였다. 등가 토크 T_{eq} 는 LDD가 제공하는 Δt_i , T_i , t_{total} 을 사용해 등가 조건 식 (2)를 만족하도록 정해지며, 이를 정리하면 각 구간의 시간비율 $r_i = \Delta t_i/t_{total}$ 로 가중해 계산되는 하나의 등가 토크 수준으로 식 (3)과 같이 계산된다(Kim et al., 2002). 여기서 피로 손상 지수 X 는 재료의 S-N 곡선 기울기를 반영하는 경험적 지수로서 Basquin 방정식에서 사용되며, 본 연구에서는 8.738의 피로 수명 지수를 사용하였다(Baek et al., 2019). 따라서, 목표 수명 t_{real} 을 특정 시험 토크 T_{test} 로 재현할 때의 단축 비율(가속계수)은 식 (4)로 정의되며, 필요한 가속수명시험 시간은 목표 수명을 AF (Acceleration factor)로 나누어 식 (5)와 같이 산정한다.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

where,

n_i : Number of operations or duration under condition i

N_i : Number of times or time required for destruction under condition i

D : Total accumulated damage

$$\sum \Delta t_i \times T_i^X = t_{total} \times T_{eq}^X \quad (2)$$

$$T_{eq} = (\sum r_i T_i^X)^{\frac{1}{X}} \quad (3)$$

where,

Δt_i : Duration of section i

T_i : Torque at condition i

X : Fatigue damage exponent

t_{total} : Total duration

T_{eq} : Equivalent torque

r_i : $\Delta t_i/t_{total}$

$$AF = \left(\frac{T_{test}}{T_{eq}} \right)^X \quad (4)$$

where,

AF : Acceleration factor

T_{test} : Test torque used in ALT

$$t_{Alt} = \frac{t_{real}}{AF} \quad (5)$$

where,

t_{Alt} : Required accelerated life test time

t_{real} : Target life time

Results and Discussion

농작업 부하 계측 결과

트랙터를 이용한 쟁기 계측 시험은 약 412 초 수행되었다. 부하 계측 결과는 Fig. 4와 같이 전륜은 평균 2,363 Nm, 최대 2,715 Nm, 최소 374 Nm로 나타났으며, 후륜은 평균 3,697 Nm, 최대 4,247 Nm, 최소 585 Nm로 나타났다. 회전속도 계측 결과, 전륜은 평균 21.6 rpm, 최대 32 rpm, 최소 0.3 rpm으로 나타났으며, 후륜은 평균 15.3 rpm, 최대 22.6 rpm, 최소 0.2 rpm으로 나타났다.

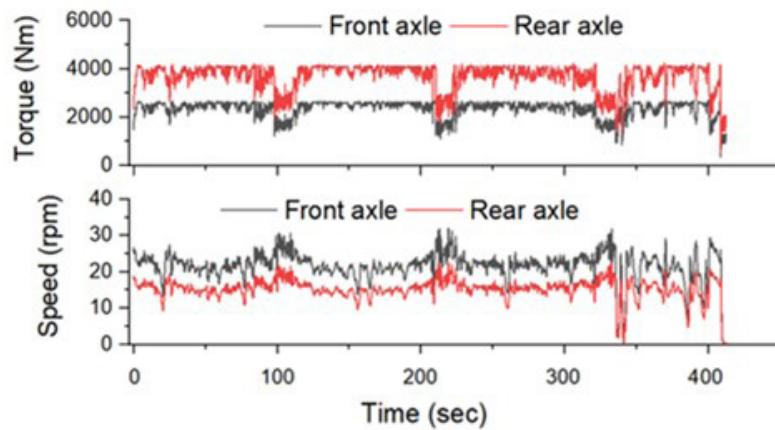


Fig. 4. The results of axle load data for 47 kW class agricultural tractor during plow tillage

쟁기 작업에서의 차축 데이터 분석

가속수명 계산에 적용하기 위하여 계측 시간, 차축 토크 데이터를 총 7개의 구간으로 나누어 LDD를 수행하였으며, Table 4는 구간별 토크 결과(최대, 최소, 평균)와 지속시간을 나타낸다. LDD 결과, 고토크 영역에 지속시간이 집중되었다. 특히 7 구간(6,105.29 Nm - 6,962.86 Nm)은 평균 토크 6,547.33 Nm로 최댓값이며 지속시간도 266.8 s로 가장 길어 등가 토크 산정에 지배적으로 기여했을 것으로 판단된다.

Table 4. Results of load conditions and torque duration according to plow tillage

Load Case	Torque (Nm)			Duration (s)
	Minimum	Maximum	Average	
1	959.82	1,817.39	1,434.58	0.10
2	1,817.39	2,674.97	2,498.46	1.84
3	2,674.97	3,532.55	3,163.04	5.46
4	3,532.55	4,390.13	4,046.37	20.68
5	4,390.13	5,247.71	4,745.11	34.30
6	5,247.71	6,105.29	5,821.42	82.93
7	6,105.29	6,962.86	6,547.33	266.80

가속수명 시간 도출

선정한 피로 수명 지수를 8.738을 수식 (3)에 적용하여 계산하면 등가 토크 값은 6,310.99 Nm가 된다. 시험토크는 일반적인 엔진의 최대 토크인 정격 토크의 1.2배로 설정하였다(Kim et al., 2009). 정격 토크 6,808.4 Nm의 1.2배인 8,170.08 Nm를 식 (4)에 대입하면 가속계수는 9.545이며, 이에 따라 가속수명시험 시간은 314.3시간으로 산정되었다. 따라서 쟁기 작업 중 트

트랙터 차축의 신뢰도 보장을 위한 실험 결과는, 목표 무고장 작업 시간 10년(3000시간) Kim et al. (2002)을 정격 토크의 1.2배 시험 토크로 시험하는 경우의 가속 계수 9.545를 적용하여 314.3시간의 시험으로 대체할 수 있다.

Conclusion

본 연구는 농작업 환경에서 실측된 부하 데이터를 바탕으로, 47 kW급 농업용 트랙터의 차축에 작용하는 부하에 대한 등가 부하 산출 및 47 kW급 트랙터에 적용 가능한 가속수명시험 절차를 정립하는 것을 목적으로 하였다. 47 kW급 트랙터를 대상으로 실제 농작업(耩기 작업) 중 차축 토크 및 회전속도를 측정하였다. 측정 시스템은 전차축에 15 kNm급, 후차축에 20 kNm급 토크 센서를 적용하였고, 근접센서를 통해 회전속도를 측정하였다. 계측된 데이터를 7개 하중 구간으로 분류하고, Palmgren-Miner 선형 누적 손상 이론을 적용하여 등가 토크를 산정한 결과, 6,310.99 Nm로 계산되었다. 이를 바탕으로 피로 수명 지수 8.738, 정격 토크 6,808.4 Nm의 1.2배인 시험 토크 8,170.08 Nm를 적용하여 가속 계수는 9.545로 산출되었으며, 목표 수명 3,000시간 기준으로 가속수명시험 시간은 314.3시간으로 단축할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 차축 부하 조건을 정량적으로 반영한 실 부하 기반 수명 예측 방법을 제시함으로써, 트랙터 설계 시 신뢰성을 향상시키고 검증 시간을 단축시키는 시험 프로세스를 제공한다. 이는 향후 농업기계의 부품 최적 설계 및 개발 기간 단축, 유지 보수 비용 절감에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 연구는 제한된 작업 조건(耩기 작업)에만 기반하고 있어, 작업조건(작업기, 토양)에 따라 LDD 상위 구간의 시간비가 변하면 등가 부하와 가속계수를 재산정 해야 하므로 수치 같은 대상 작업의 부하 스펙트럼에 의존적이다. 향후 연구에서는 로타리, 베일러, 로더, 트레일러 등 다양한 작업기 조건에서의 부하 데이터를 추가 확보하고, 이를 기반으로 한 통합 가속수명시험 코드 개발 및 시뮬레이션 모델 연구를 수행할 예정이며, 다양한 하중 분석 기법을 적용하여 정확도를 비교할 예정이다.

Acknowledgements

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 노지스마트농업 활용모델개발사업(RS-2025-02305211)과 산업통상자원부 및 한국산업기술평가원의 기계장비산업기술개발사업(RS-2025-16063239)의 지원을 받아 연구되었음

References

- Baek SM, Kim WS, Park SU, Kim YJ. 2019. Analysis of equivalent torque of 78 kW agricultural tractor during rotary tillage. Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology 12:359–365. [in Korean]
- Kim DC, Lee GH, Kim HE. 2002. Development of Accelerated Life Test Method for Mechanical Part Using Cumulative Damage Theory. Korea Institute of Machinery & Materials 32:35-43. [in Korean]
- Kim DC, Kang YS. 2009. Case Study of Accelerated Life Test Method for Agricultural Tractor Transmission. Journal of Biosystems Engineering 34:325-330.
- Kim TJ. 2019. Strength analysis of driving gear of 50 kW class tractor considering to usage ratio. MS. dissertation, Chungnam National Univ., Daejeon, Korea [in Korean]

- Kim JT, Lee HS, Park JH, Woo JK, Choi IS, Kim YK, Cho SJ, Ha CS, Park YJ. 2022. Maize harvester gearbox design modification for improved fatigue life. *Journal of Scientific Reports* 12:15576(2022).
- Kim YJ, Chung SO, Park SJ, Choi CH. 2011. Analysis of Power Requirement of Agricultural Tractor by Major Field Operation. *Journal of Biosystems Engineering* 36:79–88. [in Korean]
- Moon SP, Baek SM, Chung SO, Park YJ, Han TH, Kim YJ. 2020. Development of an accelerated life test procedure considering the integrated equivalent load of an implement working pump for an agricultural tractor. *Korean Journal of Agricultural Science* 47:1123–1134. [in Korean]
- Park HW. 2025. The realization of rural extinction Farmers population of 2 million chin-ups. *Newspaper of Korean Agricultural*. 22 Apr. 2025. [in Korean]
- Top 100 statistics for agri-food. 2024. A cultivated area. Accessed in <https://kass.mafra.go.kr/newkass/kas/sts/stbl/mafraStblList.do?menuId=0010739672934&statsSrvcClsId=1010&sysId=0010739&utm>