

ENGINEERING

Analysis of engine load factor for a 90 kW agricultural combine harvester based on working speed

Young-Woo Do¹, Taek-Jin Kim², Ryu-Gap Lim³, Seung-Yun Baek⁴, Seung-Min Baek⁴, Hyeon-Ho Jeon⁴, Yong-Joo Kim^{4,5,*}, Wan-Soo Kim^{1,6,*}

¹Department of Bio-Industrial Machinery Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

²Department of Drive System Team, TYM R&D Center, Iksan 54576, Korea

³Department of Smart Agriculture, Korea Agriculture Technology Promotion Agency, Iksan 54667, Korea

⁴Department of Smart Agriculture Systems, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

⁵Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

⁶Upland Field Machinery Research Center, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

*Corresponding authors: wansoo.kim@knu.ac.kr, babina@cnu.ac.kr

Abstract

This study aimed to evaluate the engine load factor (LF) of a 90 kW agricultural combine harvester. The combine harvester used in this study is equipped with an electronic engine, and real-time engine data (torque and speed) was collected through a controller area network. The speed of the combine harvester during harvesting operation was divided into three levels (4, 5, and 6 km/h) for the representative operation speed range of 4 to 6 km/h. The LF was calculated using the engine load data measured in real time during harvesting. A weight was applied to the LF for each condition based on a survey of the usage. Results of the field test showed that the LF was 0.53, 0.64, and 0.87 at working speeds of 4, 5, and 6 km/h, respectively. The highest engine load factor was recorded at 6 km/h. Finally, based on the weight for the usage applied, the integrated engine LF was analyzed to be 0.69, which is approximately 144% higher than the currently applied LF of 0.48. A study on LF analysis for the entire work cycle, including idling and driving of the combine harvester, will be addressed in a future study.

Keywords: combine harvester, engine characteristics, exhaust emissions, harvesting operation, load factor

Introduction

최근 전 세계적인 기후변화와 환경문제로 인해 대기오염물질 저감에 대한 관심이 증가하고 있다(Savickas et al., 2021). 미국은 Tier-4 Final, 유럽은 Stage V 규제를 시행하는 등 전세계 각국에서는 점차 배기가스 배출량 규제를 강화하고 있는 추세이다. 국내에서도 대기오염



OPEN ACCESS

Citation: Do YW, Kim TJ, Lim RG, Baek SY, Baek SM, Jeon HH, Kim YJ, Kim WS. Analysis of engine load factor for a 90 kW agricultural combine harvester based on working speed. Korean Journal of Agricultural Science 50:617-628. <https://doi.org/10.7744/kjoas.500403>

Received: July 31, 2023

Revised: July 31, 2023

Accepted: September 14, 2023

Copyright: © 2023 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.

물질 배출량 저감을 위해 배출원 부문별로 배출계수에 대한 조사 및 연구를 지속적으로 수행하고 있다(Lee et al., 2022a). 국내 대기오염물질 배출량은 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)을 기반으로 각 분야별로 배출계수와 활동도 자료를 종합하여 산정되며, 해당 자료는 국내 기후 변화 대응 정책에 대한 기초 자료로 활용되고 있다(NAIR, 2020). 다양한 분야 중 농업기계는 비도로이동오염원에 포함되며, 비도로이동오염원의 NO_x 배출량은 2010년 208,878톤 대비 2019년 311,748톤으로 49.2% 증가하였으며, 이는 국내 전체 NO_x 배출량의 28.7%의 수준으로 비도로이동오염원 배출량 관리의 중요성이 높아지고 있는 실정이다(NAIR, 2022a).

환경부 국가미세먼지정보센터에서 발표한 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(V)에서는 배출량 산정시 배출계수 및 부하율(load factor, LF)을 이용하고 있다(NAIR, 2022b). 이때, LF는 엔진의 평균출력사용비율을 의미하며, 이는 배출량 산정 시 중요한 요인 중 하나이다. 하지만, 현행 비도로이동오염원의 대기오염물질 배출량 산정 방법에서는 실 작업 조건에서의 부하 특성을 고려하지 않고 LF를 0.48로 일괄적으로 적용하고 있다(Lee et al., 2023a). 이는 다양한 기종, 출력구간, 작업 조건에 따라 다르게 나타나는 실 작업 조건의 엔진 부하 특성을 반영하지 못하는 한계가 있다(Choi et al., 2010; Yu et al., 2023). 따라서, 주요 작업 조건별로 LF를 세분화하여 수집하고 분석하는 것은 신뢰성 있는 대기오염물질 배출량을 산출하는데 매우 필요하다. 이러한 LF 현행화에 관한 연구는 건설기계 분야에서 많이 수행되어 왔으며, 최근 농업기계 분야에서도 일부 수행되고 있다. Shin 등(2022)은 건설기계 배출량 산정의 세분화 및 신뢰성을 향상시키기 위해 210, 226 kW급 굴착기의 실 작업 시 LF를 분석하였으며 그 결과 LF는 각각 0.42, 0.47로 나타났다고 보고하였다. 농업기계분야의 선행연구에서 Lee 등(2022b)은 67 kW급 트랙터를 이용하여 플라우 및 로터리 작업을 각각 2개의 작업 속도에 대하여 실험을 수행하였으며, 그 결과 두 작업 모두 작업 속도가 높을수록 LF가 증가하는 경향을 보고했다. 또한, Baek 등(2022c)은 67 kW급 트랙터를 이용하여 5.95, 7.60 km/h 작업 속도로 플라우 작업 시 평균 LF를 각각 0.71, 0.76로 나타냈으며, 2.67, 3.66 km/h 작업 속도에서 로터리 작업 시 평균 LF는 각각 0.90, 0.94로 보고하였다. 통합 LF는 주요 농작업별 LF값과 작업별 사용비율을 고려하여 0.75로 나타났으며, 이는 현행 대비 1.56배 높은 수치이다. Baek 등(2022a)은 78 kW급 트랙터 엔진 LF 산출을 위하여 플라우 경운, 로터리 경운, 베일러 작업, 로더 작업에 대한 필드 실험을 수행하였으며, 그 결과 LF는 각각 0.74, 0.93, 0.41, 0.23으로 나타났으며, 각 작업별 사용비율을 고려한 통합 LF를 0.63이라고 보고하였다. 이는 현행 대비 1.31배 더 높은 수치이다. Lee 등(2023b)은 농업용 관리기를 대상으로 경운작업(플라우, 로터리)에 따른 가중치를 적용하여 0.58의 통합 LF 산출하였으며, 플라우 및 로터리 작업 시 작업 속도 3.10 km/h에서의 LF는 1.87 km/h 대비 각각 68, 10% 높은 수준을 나타냈다고 보고하였다. 이처럼 농업기계의 경우에도 다양한 기종과 출력범위가 있으며, 출력범위 및 작업조건별로 LF가 서로 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 국내 배출량 통계 신뢰성을 향상시키기 위해 실 작업 조건에서 계측된 기종별, 작업조건별 LF의 분석 및 평가를 통해 이를 세분화 및 현행화 하는 것이 중요하다. 하지만 아직까지 농업기계분야의 LF 산정에 관한 연구는 주로 트랙터를 중심으로 수행되어 왔으며, 트랙터와 더불어 대표적인 국내 농업기계 기종인 콤바인에 대한 연구는 부족한 실정이다(Cho et al., 2022). 따라서, 신뢰성 있는 농업기계 배출량 인벤토리 구축을 위해서는 콤바인의 엔진 LF 현행화에 대한 추가 연구가 필요한 실정이다.

본 연구는 농업기계 LF의 세분화 및 현행화를 위한 기초연구로써, 실 작업조건에서 작업 속도별로 계측한 데이터를 활용하여 콤바인의 LF를 평가하기 위하여 수행되었다. 세부 연구 목표는 1) 콤바인 엔진 부하 계측 시스템 구축, 2) 벼 수확 작업에 따른 작업 속도별 필드시험 수행 및 데이터 수집 및 분석, 3) 콤바인 통합 LF를 산출하고 국내, 미국, 유럽 등 기준과 선행 연구에서 제시된 타 기종에 대한 결과와 비교 분석을 수행하는 것이다.

Materials and Methods

콤바인

본 연구에서는 실제 작업 조건에서 LF를 분석하기 위하여 Fig. 1과 같이 국내에서 가장 많이 사용되는 90 kW급 농업용 콤바인을 사용하였다. 사용된 콤바인의 크기 및 공차중량은 각각 4,600 (L) × 2,240 (W) × 2,640 (H) mm 및 4,465 kg이다. 사용된 콤바인의 디젤엔진은 Tier-4 규제를 만족하며, 콤바인 엔진의 정격 출력은 2,500 rpm에서 90 kW이며, 최대 토크는 1,700 rpm에서 410 Nm이다. 배기가스 후처리 장치로는 PM (particulate matter)를 저감하는 DPF (diesel particulate filter)와 질소산화물인 NO_x를 저감하는 SCR (selective catalyst reduction) 장치가 부착되어 있다. 콤바인의 상세한 제원은 Table 1과 같다.



Fig. 1. Agricultural combine harvester used in this study.

Table 1. Specifications of 90 kW class agricultural combine harvester used in this study.

Item	Specifications	
Type	In-lined 4 stroke 4 cylinder	
Fuel	Diesel	
Length × width × height (mm)	4,600 × 2,240 × 2,640	
Weight (kg)	4,465	
Engine	Rated power (kW)	90 (@ 2,500 rpm)
	Max. torque (Nm)	410 (@ 1,700 rpm)
After-treatment system	DPF + SCR	
Emission standard	Tier-4	

계측 시스템

본 연구에 사용된 콤바인은 Tier-4 전자엔진이 탑재되어 있으며, CAN (controller area network) 통신을 이용한 엔진 토크 및 회전속도 데이터 수집이 가능하다. 따라서 콤바인 수확작업 시 엔진 토크 및 엔진 회전속도 데이터는 데이터 수집장치(QuantumX MX840B, Hottinger Brüel & Kjær, Germany)를 이용하여 수집하였다.

필드 시험

콤바인 필드시험은 벼 수확작업을 대상으로 Fig. 2와 같이 충청남도 당진시 송산면 금암로(36°55'49.8" N, 126°37'57.3" E)에 위치한 논에서 수행하였다. 실험 대상 벼의 품종은 국내 대표적인 고품질 밥쌀용 벼 품종으로 알려진 삼광이다. 수확작업은 국내 벼 수확작업 시 주로 사용되는 세 개의 작업 속도(4, 5, 6 km/h)에 따라 수행되었다. 또한, 콤바인 엔진 회전속도는 최대 회전속도인 2,700 rpm을 적용하였다.

본 연구에서는 현지 농민들의 작업 패턴을 따라 국내 대표적인 벼 수확 작업 패턴을 적용하였으며, 패턴은 Fig. 3과 같다. 선정된 작업 패턴은 외곽 지역을 우선적으로 작업하면서 필드의 중앙으로 이동하는 방식으로, 상대적으로 선회작업 빈도가 낮은 이점이 있어서 많이 사용된다.

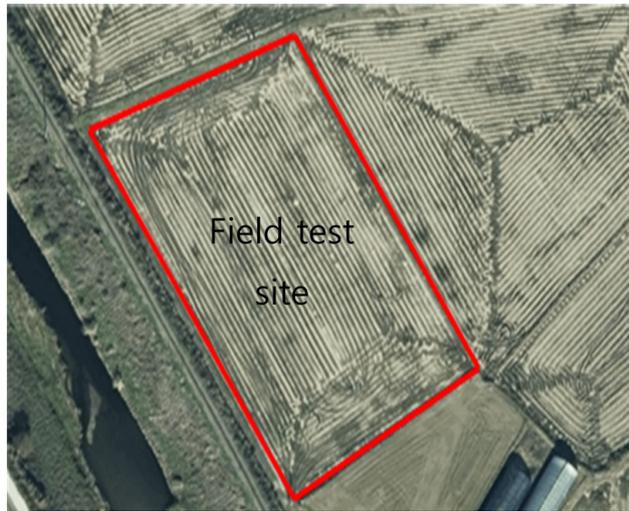


Fig. 2. Field experiment site for LF (load factor) data collection of combine harvester.

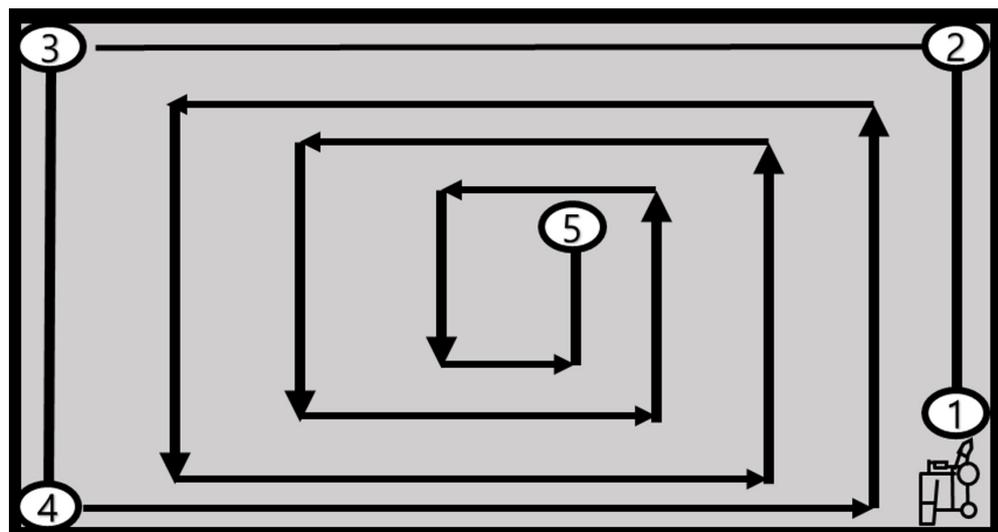


Fig. 3. Representative working patterns of the combine harvester.

데이터 분석 방법

엔진 출력은 계측 시스템을 통해 측정된 엔진 회전속도 및 엔진 토크 데이터를 이용하여 아래 식(1)과 같이 계산하였다. LF는 실제 작업 조건에서 발생하는 실시간 엔진 출력 데이터를 정격 출력으로 나누어 아래 식(2)와 같이 계산하였다 (Baek et al., 2022b). 콤바인의 수확작업의 통합 LF 산정을 위하여 작업별 사용량을 고려한 가중치(W_j)를 적용하였으며, 사용량은 농민 설문조사를 활용하여 산정하였다. 가중치는 수확작업의 4, 5, 6 km/h에 대해 각각 30, 35, 35%로 적용하였다. 콤바인 수확작업의 통합 LF는 아래 식(3)과 같이 가중치가 적용된 각 작업의 평균 LF의 합으로 계산되었다. 최종적으로 Fig. 4와 같이 LF 분석을 위해 수집된 데이터를 분석하는 절차를 진행하였다. 또한, IBM SPSS Statistics (SPSS version 25, IBM Inc., USA)를 사용하여 일원분산분석(one-way ANOVA)을 수행하였으며, LSD(least significant difference)를 통하여 사후 검증을 수행하였다.

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

Where, P_e = Engine power (kW)
 T_e = Engine torque (Nm)
 N_e = Engine rotational speed (rpm)

$$LF = \frac{P_{measured}}{P_{rated}} \quad (2)$$

Where, $P_{measured}$ = Measured engine power (kW)
 P_{rated} = Engine rated power (kW)

$$LF_u = \sum LF_i \times W_j \quad (3)$$

Where, LF_u = Unified load factor
 LF_i = Load factor by each working conditions
 W_j = Weight factor by each working conditions

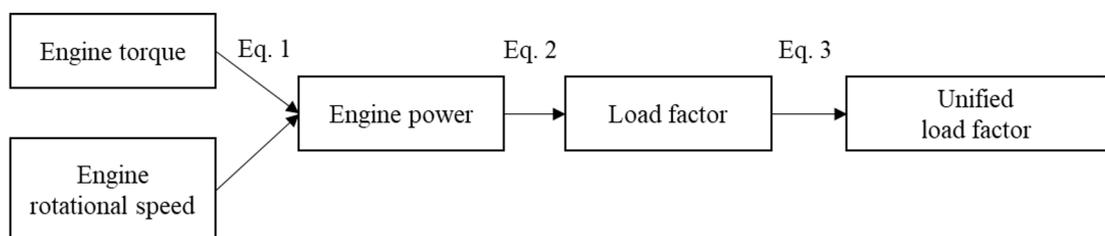


Fig. 4. Succinct schematic illustrating unified LF (load factor) calculation process.

Results and Discussion

작업 속도별 엔진 프로파일 분석

작업 속도 4 km/h의 수확작업 시 엔진 프로파일은 Fig. 5와 같이 나타났다. 엔진 회전속도는 2,562 - 2,622 rpm, 엔진 토크는 132 - 233 Nm, 엔진 출력은 36 - 62 kW의 범위를 보였으며 전반적으로 변동하는 개형을 나타냈다. 작업 속도 5 km/h의 수확작업 시 엔진 프로파일은 Fig. 6과 같이 나타났다. 엔진 회전속도는 2,542 - 2,605 rpm, 엔진 토크

는 160 - 267 Nm의 범위를 보였다. 엔진가동정보를 활용하여 계산된 엔진 출력은 44 - 71 kW의 범위를 나타냈으며, 엔진 토크와 유사한 개형을 나타냈다. 작업 속도 6 km/h의 수확작업 시 엔진 프로파일은 Fig. 7과 같이 나타났다. 엔진 회전속도는 2,495 - 2,549 rpm 범위를 보이며, 엔진 토크는 255 - 338 Nm 범위를 보였으며 엔진가동정보를 활용하여 계산된 엔진 출력은 68 - 88 kW의 범위를 나타냈다. 6 km/h 작업 속도에서 가장 높은 엔진 토크와 출력을 나타냈다. 또한, 엔진 토크와 출력은 위에서 제시한 4, 5 km/h의 결과와 유사하게 작업 중 변동하는 개형을 보이며, 출력은 토크와 유사한 개형으로 나타났다.

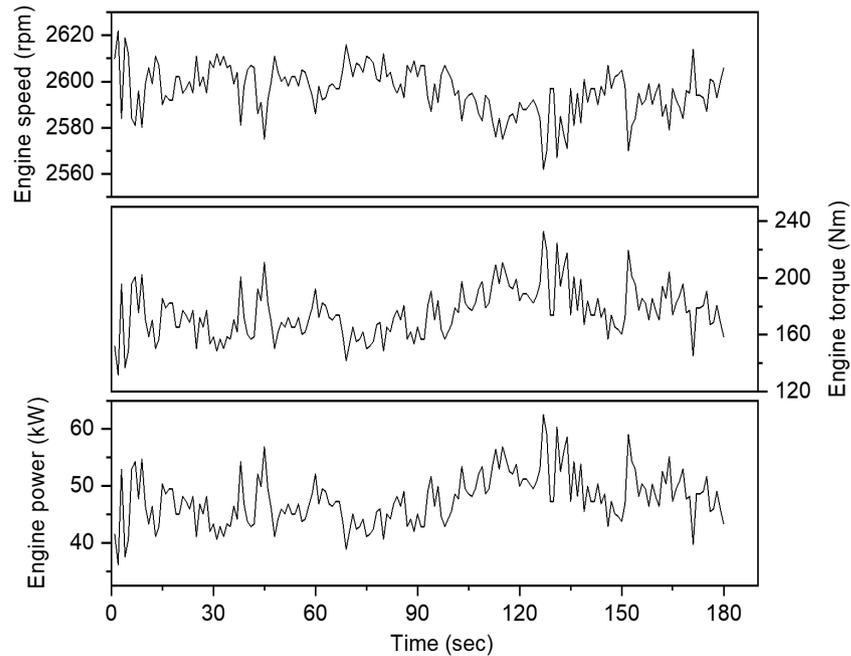


Fig. 5. Engine profile of the combine harvester at working speed (4 km/h).

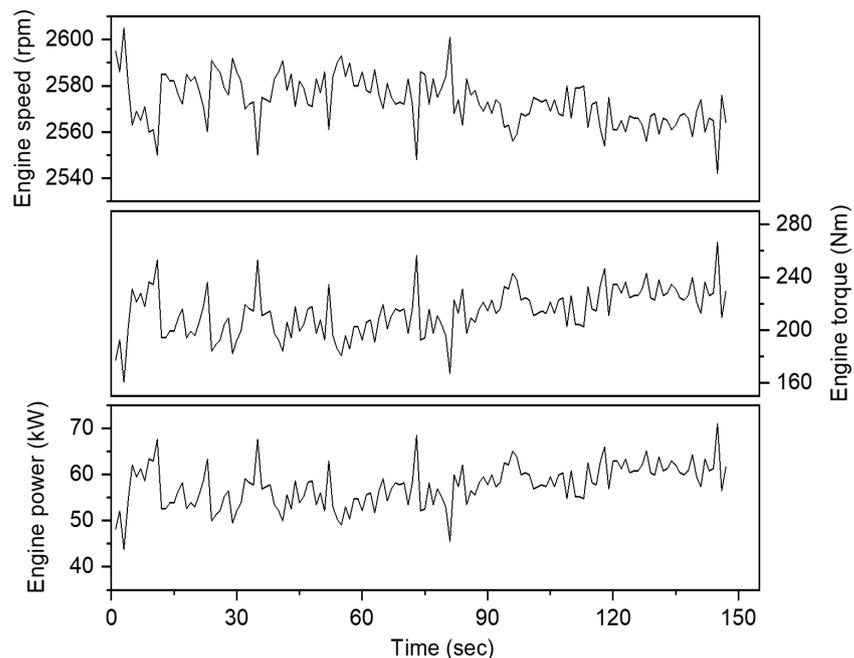


Fig. 6. Engine profile of the combine harvester at working speed (5 km/h).

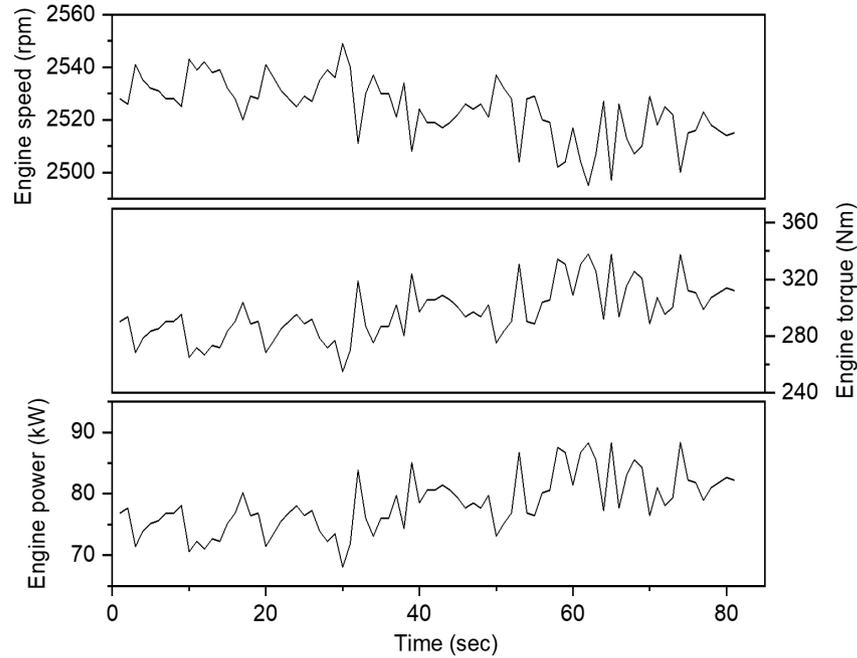


Fig. 7. Engine profile of the combine harvester at working speed (6 km/h).

작업 속도별 수확작업 시 엔진 특성에 대한 기술 통계 분석 결과는 Table 2와 같이 나타났다. 또한, 본 연구에서는 세 가지 작업속도 그룹 간 작업속도가 엔진 특성에 미치는 영향을 미치지는지를 알아보기 위해 엔진 속도, 토크, 출력에 대하여 분산분석을 수행하였다. 작업속도 그룹 간의 집단간 유의성 분석 결과, p 값의 결과에 따라 각 작업속도에 따른 엔진 속도, 토크, 출력은 통계적으로 유의 수준 0.05 내에서 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 평균 엔진 회전속도는 2,596 rpm으로 4 km/h에서 가장 높은 값으로 나타났으며 작업 속도별로 통계적으로 유의한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 콤바인 작업 속도 6 km/h에서의 최대 엔진 토크는 4, 5 km/h 대비 각각 45, 27% 높은 수준을 나타냈다. 엔진 토크는 작업 속도에 따라 통계적으로 유의한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 콤바인 작업 속도 6 km/h의 최대 엔진 출력은 4, 5 km/h 대비 각각 41, 25% 높은 수준을 나타냈다. 최대 엔진 동력은 6 km/h에서 88.4 kW로 가장 높은 값을 나타냈으며, 엔진 출력은 작업 속도가 증가함에 따라 통계적으로 유의한 차이를 보이는 것으로 나타났다.

Table 2. Statistical description of the engine characteristics of a combine harvester.

Working speed (km/h)		Engine speed (rpm)	Engine torque (Nm)	Engine power (kW)
4	Min.	2,562	132	36.2
	Max.	2,622	233	62.5
	Avg ± Std	2,596 ± 10a	176 ± 17c	47.7 ± 4.5c
5	Min.	2,542	160	43.7
	Max.	2,605	267	71.0
	Avg ± Std	2,573 ± 11b	214 ± 18b	57.6 ± 4.6b
6	Min.	2,495	255	68.0
	Max.	2,549	338	88.4
	Avg ± Std	2,524 ± 11c	296 ± 19a	78.4 ± 4.6a

Min., minimum; Max., maximum; Avg, average; Std, standard deviation.

a - c: Means with different letters in each column are significantly different at $p < 0.05$ by LSD multiple range tests.

작업 속도에 따른 LF 분석

90 kW급 콤바인의 작업 속도별 수확 작업에 따라 측정된 엔진 출력은 Fig. 8과 같이 나타났다. 현행 적용중인 LF 값인 0.48은 점선으로 표시하였다. 작업 속도별 LF는 콤바인의 엔진 성능곡선의 선을 따라 최대 LF 지점으로 이동하는 것으로 나타났으며, 작업 속도가 증가할수록 엔진 성능곡선을 따라 엔진 회전속도는 감소하며, LF는 높아지는 것으로 나타났다. LF는 작업 속도 4, 5, 6 km/h에서 각각 0.40 - 0.69, 0.49 - 0.79, 0.76 - 0.98의 범위로 나타났다. 전체적으로 수확작업시 LF는 0.40 - 0.98의 범위를 나타냈으며 이는 현행 적용중인 0.48 수치 대비 84 - 205% 수준의 수치이다.

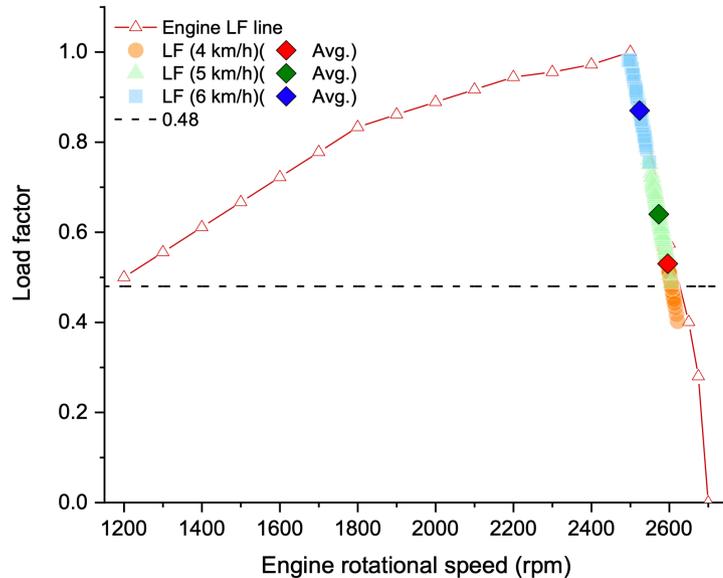


Fig. 8. Result of mapping the LF (load factor) at working speed (4, 5, 6 km/h) to the engine curve. Avg., average.

통합 LF 산출

수확 작업 조건에서 작업 속도별 평균 LF 값은 0.48 이상으로 나타났으며 수확작업에서 작업 속도별(4, 5, 6 km/h) LF는 각각 0.53, 0.64, 0.87 순으로 작업 속도가 증가할수록 평균 LF 값은 증가하는 경향을 나타냈다. 특히, 6 km/h 작업 속도에서 콤바인의 평균 LF는 4, 5 km/h 작업 속도에서의 평균 LF 보다 각각 64, 36% 높은 수치를 나타냈다.

콤바인 수확작업 시 작업 속도에 따라 측정된 엔진 토크 및 회전속도를 기반으로 계산된 평균 LF는 Table 3과 같이 나타났다. 평균 LF는 4, 5, 6 km/h 작업 속도 조건에서 각각 0.53 (@2,596 rpm), 0.64 (@2,573 rpm), 0.87 (@2,524 rpm)을 나타냈다. 작업 속도별 사용비율을 고려한 가중치를 적용할 때 통합 LF는 0.69 (@2,563 rpm)로 산출되었다.

Table 3. Result of engine LF analysis for the combine harvester according to harvesting work.

Working speed (km/h)	LF	Engine speed (rpm)	W_j (%)	Unified LF	Unified engine speed (rpm)
4	0.53	2,596	30	0.69	2,563
5	0.64	2,573	35		
6	0.87	2,524	35		

LF, load factor; W_j , weight factor by each working conditions.

LF 평가

본 연구에서 도출한 콤바인 LF의 평가를 위하여 현행 CAPSS에서 적용중인 LF (0.48)와 선행연구에서 제시한 농업기계(트랙터, 콤바인, 관리기) LF와의 비교 분석을 수행하였다. Fig. 9는 작업 속도별 수확작업에 따른 콤바인의 통합 LF와 현행 적용중인 LF, 그리고 선행 연구 자료에서 발췌한 농업기계 LF를 비교한 결과를 나타낸다. 본 연구에서 도출한 콤바인 수확작업에 따른 통합 LF는 0.69이며, 이는 현행 적용중인 0.48 대비 약 44% 높은 수치이다. 선행 연구에서 미국 환경청(Environmental Protection Agency, EPA)은 다양한 유형의 비도로용 장비에 대한 LF를 산정하였으며 디젤 콤바인에 대한 LF는 0.59로 나타냈다(EPA, 2010). 이는 본 연구에서 산출한 콤바인 통합 LF 대비 14% 낮은 수준이다. 유럽 환경청(European Environment Agency, EEA)은 콤바인의 LF를 0.80로 산정하였으며 이는 본 연구에서 분석한 콤바인의 통합 LF 대비 16% 높은 수준이다(EEA, 2019). Baek 등(2022c)과 Baek 등(2022a)은 67 kW, 78 kW급 트랙터의 통합 LF를 각각 0.75, 0.63으로 산출하였으며, 이는 본 연구의 콤바인 통합 LF 대비 각각 9% 높고, 9% 낮은 수준이다. 또한, Lee 등(2023b)은 농업용 관리기의 주요 작업인 경운작업(플라우, 로터리)을 대상으로 작업별 가중치를 적용하여 0.58의 관리기 통합 LF를 산출하였다. 이는 본 연구에서의 콤바인 통합 LF 대비 16% 낮은 수준이다.

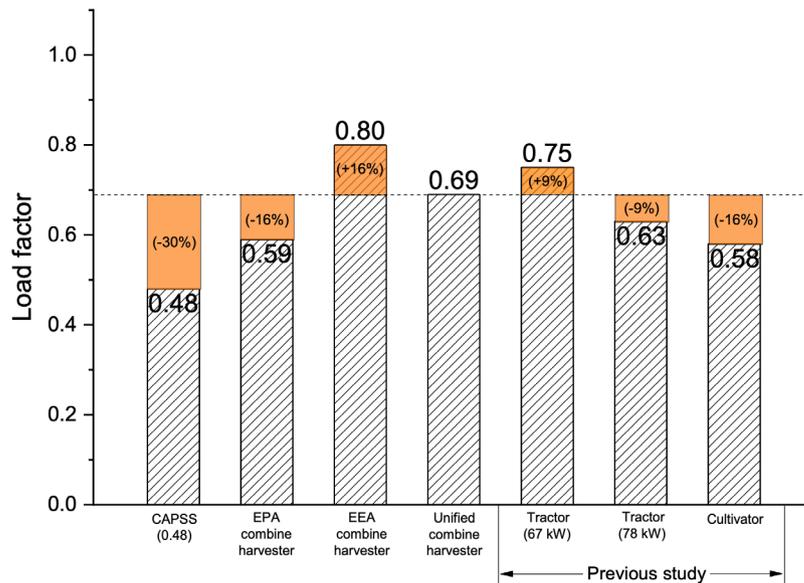


Fig. 9. Comparison between the unified LF (load factor) of the combine harvester derived from this study and the LF of agricultural machinery derived from previous studies. CAPSS, Clean Air Policy Support System; EPA, Environmental Protection Agency; EEA, European Environment Agency.

고찰

본 연구에서 도출한 콤바인 통합 LF 값과 선행연구로부터 수집한 농업기계의 LF 값은 0.58 - 0.75 범위에서 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는, 농업기계 종류별 특성 및 구체적인 농작업별 부하 특성 등에 영향을 받는다. Baek 등(2022c)은 67 kW 급 트랙터의 주행(아스팔트, 토양)과 고부하 작업인 플라우, 로터리 경운 작업에 따른 데이터를 수집하였으며, 이를 기반으로 통합 LF (0.75)를 산출하였다. Baek 등(2022a)은 78 kW 급 트랙터의 LF에 관한 논문에서 앞서 언급한 주행, 플라우, 로터리 작업 외에 추가로 베일러(0.41), 로더(0.23) 등 상대적으로 낮은 LF를 보이는 작업까지 포함하여 통합 LF (0.63)를 산출하였다. 그 결과, 78 kW 트랙터의 LF가 0.63으로, 67 kW 트랙터의

LF인 0.75보다 더 낮은 LF를 보였다. 따라서, 선행연구에서 구체적으로 어떤 농작업 데이터를 활용하여 LF를 도출했는지 면밀히 살펴볼 필요가 있다. 또한, 관리기는 트랙터 및 콤바인과 비교하여 낮은 부하 작업을 수행하며, 이로 인해 관리기의 통합 LF와 다른 기종의 통합 LF를 비교했을 때 상대적으로 낮게 나타나는 것으로 판단된다. 이와 같이 기종별로 LF의 차이를 나타내는 이유는 앞서 언급한 것처럼 주요 농작업 특성이 다르며, 선행연구에서 각기 다른 작업을 대상으로 하고 있기 때문이다.

LF는 농작업 종류에 따라서도 다르게 나타날 수 있다. 높은 토크를 요구하는 고부하 작업인 플라우 및 로터리 작업과 상대적으로 부하가 낮은 작업인 베일러 및 로더 작업 등이 서로 다른 부하 특성을 가지며, 이로 인하여 LF가 다르게 나타나기 때문이다. 또한, LF는 후방 작업기에 동력을 전달하기 위한 PTO (power take off) 사용 유무와, 후방 유압 인출부 사용 유무 등에 따라서도 달라질 수 있다.

콤바인의 주행속도가 증가할 경우, LF가 증가하는 이유는 높은 구동부 회전속도 출력을 위하여 콤바인 변속기에서 더 높은 회전속도 출력을 위하여 유량을 빠르게 회전시키는 것과 동시에, 작업 속도가 높을수록 콤바인으로 유입되는 벼의 양이 증가하게 되어 예취 작업 등에서 필요한 부하가 높아지기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같이 농업기계의 LF는 기종별과 농작업별로 목적에 따라 다르게 나타날 수 있으며, 또한 통합 LF도 작업 조건의 사용비율(작업종류, 작업단수 등)에 따라 다르게 나타날 수 있다.

Conclusion

본 연구는 실 작업조건에서 측정한 데이터를 활용하여 콤바인의 LF 현행화를 위한 기초연구로서, 콤바인의 수확작업에 대해 필드 시험 수행 후 수집된 엔진 LF 데이터를 분석하고 작업 속도별 사용비율을 고려하여 최종적으로 통합 LF를 산출하기 위해 수행되었으며, 주요 결과는 다음과 같다.

1) 90 kW급 콤바인을 활용하여 필드 시험을 수행하였으며, 수확작업 시 CAN 통신을 이용하여 엔진 토크 및 회전속도를 실시간으로 측정함으로써, 수확작업에 따른 실시간 엔진가동정보를 수집하였다.

2) 수확작업 시 콤바인의 작업 속도는 4, 5, 6 km/h 조건으로 설정하였으며, 해당 작업 속도별 데이터를 수집 및 분석하였다. 엔진 출력은 측정된 엔진 회전속도와 엔진 토크 데이터를 기반으로 분석하였다. LF는 실제 작업 조건에서 발생하는 실시간 엔진 출력 데이터를 정격 출력으로 나누어 계산하였으며, 통합 LF는 작업 속도 4, 5, 6 km/h 별 가중치 30, 35, 35%를 적용하여 산정하였다.

3) 수확 작업 시 엔진 LF는 4, 5, 6 km/h 작업 속도에서 각각 0.40 - 0.69, 0.49 - 0.79, 0.76 - 0.98 범위로 나타났다. 이에 따라 작업 속도별 가중치를 적용한 결과, 90 kW급 농업용 콤바인의 통합 엔진 LF는 0.69로 나타났으며, 이는 현행 적용되고 있는 LF인 0.48 대비 1.44배 높았으며, 선행연구에서 제시된 78, 67 kW 트랙터의 통합 LF 대비 0.91 - 1.09배 수준으로 나타났다. 또한, EPA와 EEA에서 제시한 콤바인 LF와 본 연구의 콤바인 통합 LF를 비교했을 때 각각 86, 116% 수준으로 나타났다.

본 연구는 90 kW급 콤바인의 벼 수확작업 시 3개의 작업 속도별 LF 값을 측정 및 분석하였으나, 공회전, 주행작업, 냉간 및 열간 조건 등 전체 농작업 사이클의 다양한 작업조건을 반영하지 못한 한계가 있다. 향후 연구에서는 콤바인의 다양한 작업조건(공회전, 단순 주행 등), 수확작물(벼, 보리 등)을 고려하여 시험을 수행하고 신뢰성 있는 작업조건별 가중치를 반영하여 콤바인 통합 LF를 도출할 예정이다.

Conflict of Interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgements

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 친환경동력원적용농기계기술개발사업(322047-5)과 농림수산식품기술기획평가원의 기술사업화지원사업(821053-03) 지원을 받아 연구되었음.

Authors Information

Young-Woo Do, <https://orcid.org/0009-0004-5943-4521>

Taek-Jin Kim, Department of Drive System Team, TYM R&D Center, Manager

Ryu-Gap Lim, Department of Smart Agriculture, Korea Agriculture Technology Promotion Agency, Team leader

Seung-Yun Baek, Department of Smart Agriculture Systems, Chungnam National University, Ph.D. Candidate

Seung-Min Baek, Department of Smart Agriculture Systems, Chungnam National University, Ph.D. Candidate

Hyeon-Ho Jeon, Department of Smart Agriculture Systems, Chungnam National University, Ph.D. course

Yong-Joo Kim, <https://orcid.org/0000-0002-1212-9018>

Wan-Soo Kim, <https://orcid.org/0000-0001-9669-4761>

References

- Baek SM, Kim WS, Baek SY, Jeon HH, Lee DH, Kim HK, Kim YJ. 2022a. Analysis of engine load factor for a 78 kW class agricultural tractor according to agricultural operations. *Journal of Drive and Control* 19:16-25. [in Korean]
- Baek SY, Baek SM, Jeon HH, Lee JH, Kim WS, Kim YJ. 2022b. Design verification of an e-driving system of a 44 kW-class electric tractor using agricultural workload data. *Journal of Drive and Control* 19:36-45. [in Korean]
- Baek SY, Kim WS, Baek SM, Jeon HH, Park SH, Kim JS, Yoo C, Kim YJ. 2022c. Analysis of the engine load factor for a 67 kW agricultural tractor. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A* 46:301-311. [in Korean]
- Cho SJ, Kim JG, Park JS, Kim YS, Lee DK. 2022. Development of the 80-kW test tractor for load measurement of agricultural operations. *Journal of Drive and Control* 19:46-53. [in Korean]
- Choi M, Kim J, Lee HJ, Jang YK. 2010. Estimation of greenhouse gas emission from off-road transportation. *Journal of Climate Change Research* 1:211-217. [in Korean]
- EEA (European Environment Agency). 2019. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. EEA, Copenhagen, Denmark.
- EPA (Environmental Protection Agency). 2010. Median life, annual activity, and load factor values for nonroad engine emissions modeling. EPA-420-R-10-016, NR-005d. EPA, Washington, D.C., USA.
- Lee DI, Park JH, Shin MH, Lee JT, Park SK. 2022a. Characteristics of real-world gaseous emissions from construction machinery. *Energies* 15:9543.
- Lee JH, Jeon HH, Baek SY, Baek SM, Kim WS, Kim YJ, Lim RG. 2023a. Measurement and analysis of tractor emission during plow tillage operation. *Korean Journal of Agricultural Science* 50:417-428. [in Korean]
- Lee JH, Jeon HH, Baek SY, Baek SM, Kim WS, Siddique MAA, Kim YJ. 2022b. Analysis of emissions of agricultural tractor according to engine load factor during tillage operation. *Journal of Drive and Control* 19:54-61. [in Korean]
- Lee SE, Kim TJ, Kim YJ, Lim RG, Kim WS. 2023b. Analysis of engine load factor for agricultural cultivator during plow and rotary tillage operation. *Journal of Drive and Control* 20:31-39. [in Korean]
- NAIR (National Air Emission Inventory and Research Center). 2020. 2017 National air pollutants emission. NAIR, Cheongju, Korea. [in Korean]

- NAIR (National Air Emission Inventory and Research Center). 2022a. 2019 National air pollutant emission. NAIR, Cheongju, Korea. [in Korean]
- NAIR (National Air Emission Inventory and Research Center). 2022b. National air pollutant emission calculation method manual (V). NAIR, Cheongju, Korea. [in Korean]
- Savickas D, Steponavičius D, Domeika R. 2021. Analysis of telematics data of combine harvesters and evaluation of potential to reduce environmental pollution. *Atmosphere* 12:674.
- Shin DH, Kwon SJ, Kim YJ, Park SH. 2022. Load factor analysis based on actual operation test of 200kW excavator. pp. 84-85. In *Proceeding of the Korean Society of Automotive Engineers 2022 Annual Spring Conference*. [in Korean]
- Yu YJ, An YC, Lee KH, Park JH, Lee D, Lee CH. 2023. Fatigue and severity analysis of drive axle parts according to forklift driving environment. *Journal of Drive and Control* 20:24-30. [in Korean]