

굴착기 내구시험 모니터링을 위한 작업부하 지표 개발 Development of a Workload Index for Monitoring Durability Test of an Excavator

조재홍¹ · 나선준¹ · 김민석¹ · 박명관^{2*}

Jae-Hong Cho, Seon-Jun Na, Min-Seok Kim and Myeong-Kwan Park

Received: 16 Sep. 2022, Revised: 21 Nov. 2022, Accepted: 24 Nov. 2022

Key Words : Excavator(굴착기), Workload Index(작업부하 지표), Durability Test Monitoring(내구시험 모니터링), Monitoring system(모니터링 시스템)

Abstract: In this paper, we developed a workload index for monitoring the durability test using operation information of an excavator. First, the acceleration and cylinder pressure were selected as load factors by analyzing operation data. Through load correlation analysis according to each load factor, Root Mean Square (RMS) and Work Load Range (WLR) were respectively derived as a load feature representing mechanical load. In addition, the workload index was used to quantify load features. For applying the workload index to monitoring, a real-time monitoring system consisting of sensors and embedded controller was installed on the excavator and the system was integrated with a remote monitoring environment using a wireless network. Results of load monitoring and analysis verified that the developed workload index was effective from the viewpoint of the relative comparison of the workload.

1. 서 론

굴착기는 자동차와는 달리 작업환경과 작업조건이 다양하므로 장비에 작용하는 부하의 종류와 크기를 단순하게 정의하기 어렵다. 이러한 이유로 실 사용 조건에 대한 부하는 장비의 설계 및 평가에 중요한 기준이 되며 실 사용조건에 대한 부하 정보를 수집하고 활용하기 위한 연구들이 수행되었다¹⁾.

일반적인 내구시험 설계는 장비의 실 사용조건을 고려하여 필드 또는 시험장에서 주요 작업모드에 대한 부하 계측을 수행하고 분석된 부하와 듀티 사이클을 조합하여 활용한다. 여기서, 부하 계측은 장비

의 내구성에 영향을 미치는 물리량들을 계측하며 스트레인 게이지, 압력 센서, 가속도 센서 등이 주로 사용된다. 실차 내구시험은 시험장에서 숙련된 운전자에 의해 수행되며 설계된 시험조건과 목표 시간을 준수한다. 이때, 시험조건에서 의도된 부하 수준 대비 시험이 진행되는 동안 장비에 작용하는 부하 수준은 주 관심의 대상이나 일반적인 부하 계측과 같이 다수의 물리량을 직접 장시간 모니터링하는 방법은 센서의 설치와 관리, 데이터 용량 등의 한계가 있다. 특히, 굴착기 작업장치와 같은 구조물의 부하 계측에 주로 사용되는 스트레인 게이지(Fig. 1)는 변형량을 통해 구조물에 작용하는 부하를 직관적으로 확인할 수 있지만, 다수의 게이지를 설치하고 열악한 내구시험 환경에서 이를 보전하는 데는 많은 공수가 요구된다. 따라서, 부하 모니터링을 위해 제한된 센서정보를 바탕으로 부하를 간접적으로 판단할 수 있는 부하지표가 필요하다.

최근 제품의 신뢰성을 확보하기 위하여 고장 예지 및 건전성 관리(PHM)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 관심 대상을 모니터링 또는 진단하기 위

* Corresponding author: mkpark1@pusan.ac.kr

¹ Test and Assessment Technology Team, Hyundai Construction Equipment

² School of Mechanical Engineering, Pusan National University
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.



Fig. 1 Example of strain guage measurement for structural damage

해 수집된 데이터들로부터 이를 판단할 수 있는 특징들을 분석하고 추출하는 연구들이 선행되었다²⁻⁷⁾. 그러나 이러한 특징들은 분석 대상이 처하는 환경, 즉 부하 프로파일을 고려한 분석이 필요하므로 실 사용조건이 고려된 충분한 데이터들이 요구된다.

본 연구는 굴착기 내구시험의 정형화된 표준작업 조건에 대한 작업부하 모니터링을 목적으로 굴착기의 가동정보를 이용하여 작업부하를 정량화하기 위한 부하지표를 개발한다. 먼저, 굴착기의 가동정보 데이터 분석을 통해 가속도와 실린더 압력을 부하 인자로 선정한다. 그리고 부하 인자인 가속도와 실린더 압력에 대해 작업 모드에 따른 부하 상관성을 분석한 결과 Root Mean Square(RMS)와 Work Load Range(WLR)을 각각 부하 특징(Feature)으로 도출하고 이 특징들을 정량화하기 위해 지표화를 수행한다. 다음, 부하지표의 유효성을 평가하기 위해 센서와 임베디드 컨트롤러로 구성된 실시간 모니터링 시스템을 굴착기에 설치하고 무선 네트워크 환경을 이용하여 원격 모니터링 환경과 연동한다. 마지막으로 일련의 부하 모니터링 및 분석결과를 통해서 개발된 작업부하 지표가 굴착기 내구시험 부하 모니터링에 유효함을 검증한다.

2. 작업부하 지표 도출

2.1 가속도 기반 부하 지표

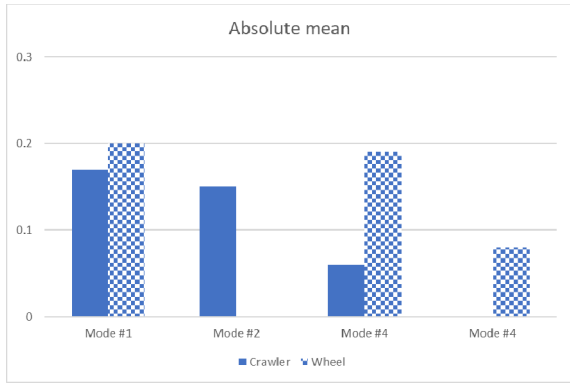
가속도 센서로부터 실시간 측정되는 진동 데이터를 시간역에서 정량화하고 이를 구분하기 위해서 Table. 1 과 같은 통계적 특징들을 이용한다. 이 특징들은 시간에 대한 진동의 평균값인 평균(Mean), 평균값에서 벗어난 신호의 강도인 분산(Variance), 한쪽

으로 치우친 정도인 왜도(Skewness), 정규분포를 기준으로 뽕족한 정도인 첨도(Kurtosis) 그리고 실효치를 나타내는 Root Mean Square(RMS)를 포함한다. RMS는 진동신호의 강도 및 에너지와 직접적인 관련이 있으며 급격한 신호 변동이 있는 고장을 나타내는 데 사용되기도 한다. Impulse factor는 베어링의 고장진단에서 충돌과 관련된 고장을, Shape Factor는 회전체의 정렬 불량을 대표하는 특징으로 사용된다⁸⁻⁹⁾.

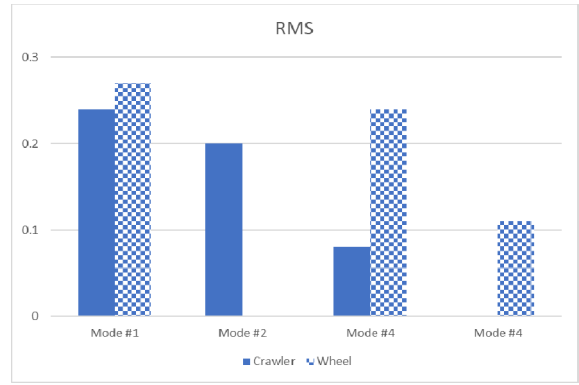
가속도 기반의 부하 특징 분석을 수행하기 위해 크롤러와 휠 타입 중형 굴착기 각 1 모델에 대해 가속도 데이터를 계측한다. 이때, 가속도 센서는 1축(상/하 방향)이 사용되고 각 굴착기 상부의 동일한 위치에 설치된다. 시험 모드는 크롤러 굴착기의 경우 모드 #1, 모드 #2 그리고 모드 #3을 적용하고, 휠 굴착기의 경우 모드 #1, 모드 #3 그리고 모드 #4를 적용한다. 여기서, 일반적인 시험 모드의 가속도는 모드 #1이 가장 크며 순서대로 가속도는 낮아진다. 계측된 가속도 데이터를 이용하여 각 굴착기의 시험 모드에 따른 통계적 특징값을 계산하고 부하 상관성을 비교한 결과는 Fig. 2에서 나타낸다. 이 비교 결과를 통해 Absolute mean, Variance, RMS, RMQ가 해당 시험 모드들에 대한 부하의 상대 비교에 유의함을 확인하였고 그 경향 또한 직관적임을 알 수 있다. 이 4가지 통계적 특징 중 RMS를 가속도 기반의 부하 특징으로 최종 선정하고 이를 정량화하기 위해 RMS의 비율과 빈도를 히스토그램으로 나타낸다. 여기서, RMS 히스토그램의 비율은 작업 부하의 강도를 의미하며 히스토그램의 평균과 산포는 작업부하의 상대 비교에 사용된다.

Table 1 Statistical features

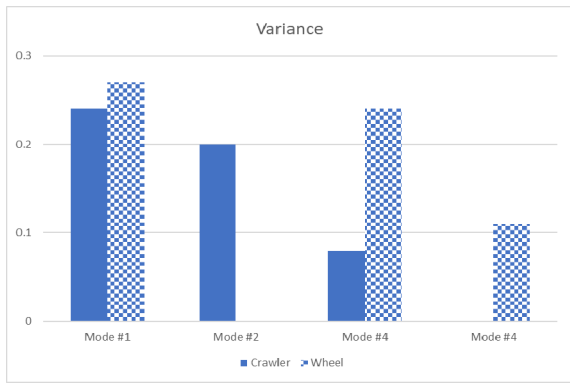
Statistical Features	Formula	Statistical Features	Formula
Absolute mean	$Mean(X_i)$	RMS	$\sqrt{\frac{\sum x_i^2}{N}}$
Variance	$\sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N}}$	RMQ	$\sqrt[4]{\frac{\sum x_i^4}{N}}$
Skewness	$\frac{\sum (X_i - \bar{X})^3}{(N-1)s^3}$	Impulse Factor	$\frac{X_{peak}}{Mean(X_i)}$
Kurtosis	$\frac{\sum (X_i - \bar{X})^4}{(N-1)s^4}$	Shape Factor	$\frac{X_s}{Mean(X_i)}$
RMS	$\sqrt{\frac{\sum x_i^2}{N}}$	Crest Factor	$\frac{X_{peak}}{X_s}$



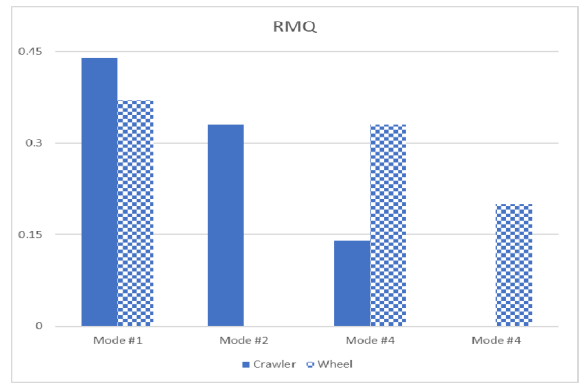
(a) Absolute mean



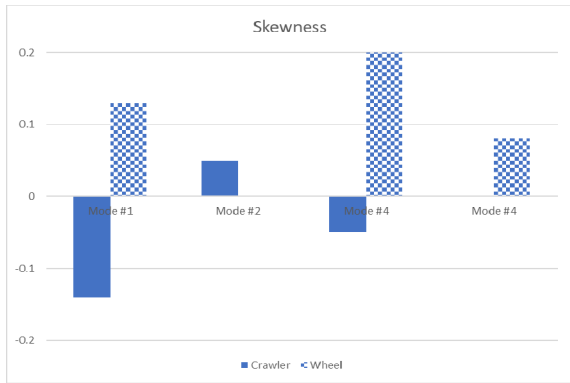
(e) RMS



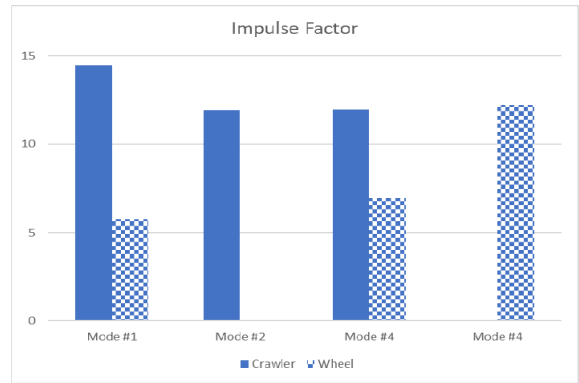
(b) Variance



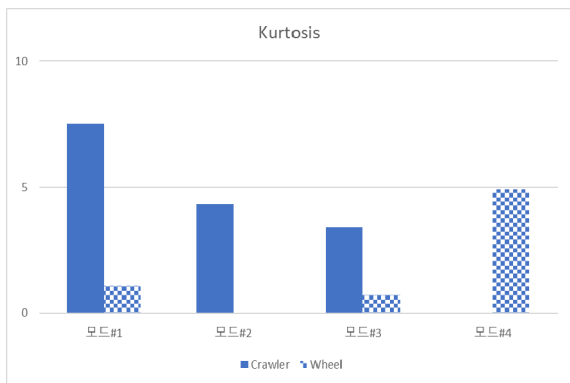
(f) RMQ



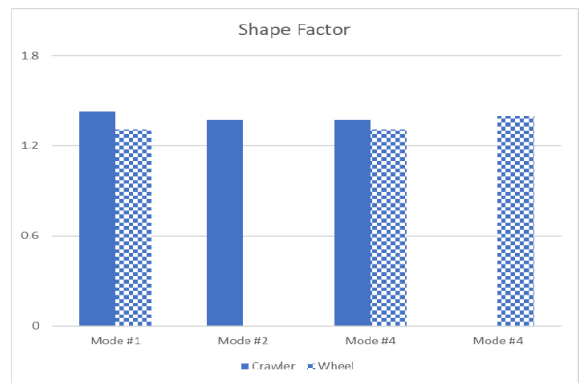
(c) Skewness



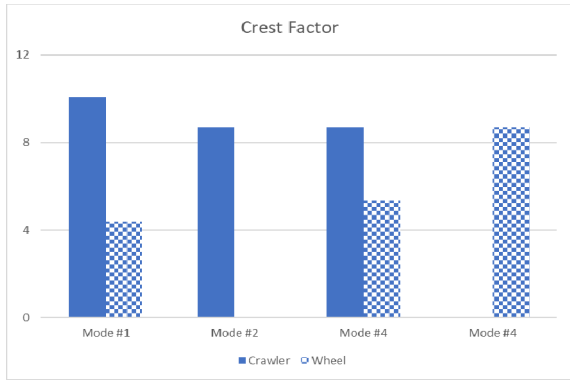
(g) Impulse factor



(d) Kurtosis



(h) Shape factor



(i) Crest factor

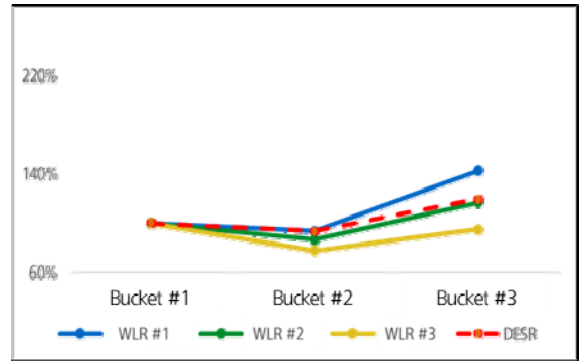
Fig. 2 Comparison of feature values according to test modes

2.2 실린더 압력 기반 부하 지표

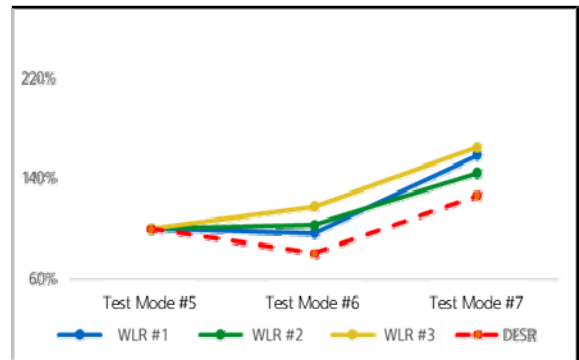
굴착기 작업장치의 실린더 압력을 이용한 부하 특징 분석을 위해 시간 이력에 따른 누적피로손상 (Damage)과 동일한 손상을 발생시키는 응력범위 (Stress Range)인 손상 등가 응력 범위, DESR(Damage Equivalent Stress Range)를 이용한다. 또한, 스트레인 게이지 데이터 기반의 DESR 계산 방법론을 실린더 압력 데이터 분석에 적용하기 위해 WLR(Work Load Range)을 정의한다. WLR은 시간역의 압력 데이터로부터 계산된 힘 정보를 Rainflow Counting Method를 통해 계수한 후 Damage Calculation을 수행함으로써 구해진다¹⁰⁾.

스트레인 게이지 데이터 기반의 DESR과 실린더 압력 데이터 기반의 WLR의 부하 상관성을 비교하기 위해 서로 다른 톤수의 크롤러 굴착기 4 모델로부터 측정된 스트레인 게이지와 실린더 압력 데이터들이 사용된다. 이때, 스트레인 게이지는 붐, 암 그리고 버킷을 포함하는 굴착기 작업장치의 주요 부위에 설치되며 압력 센서는 작업장치의 각 실린더 측에 설치된다. 각 장비는 버킷 종류, 작업물 그리고 시험 모드와 같은 조건을 달리하여 시험이 수행된다.

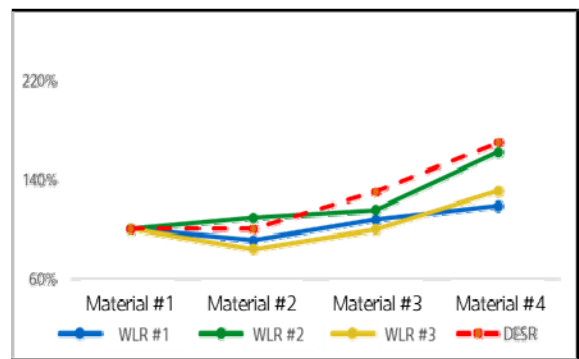
Fig. 3은 굴착기 4 모델에 대해 시험조건에 따른 DESR과 WLR을 상대 비교한 결과를 나타낸다. 여기서, DESR은 작업장치에 설치된 스트레인 게이지들로부터 계산되며 WLR은 실린더 압력으로부터 계산된다. WLR의 경우 기준이 되는 시험조건들의 WLR값의 비율을 100%로 두고 나머지 시험조건들의 WLR값을 비율로 나타낸다. Fig. 3 (a)의 경우 장비 A에 대해 시험조건인 버킷 종류를 달리하여 동일한 모드로 시험을 진행했고 시험 조건에 따른 DESR값과 각 WLR값의 경향을 확인할 수 있다. 이때,



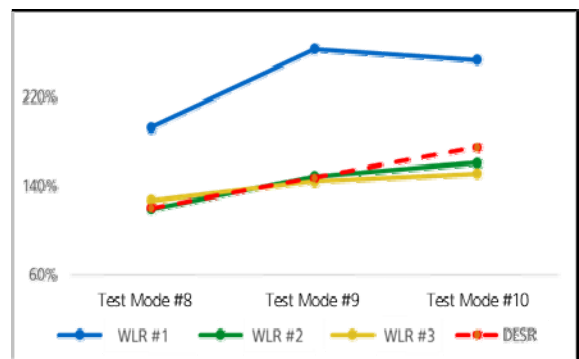
(a) Excavator A, Based on Bucket #1



(b) Excavator B, Based on Test Mode #5



(c) Excavator C, Based on Material #1



(d) Excavator D, Based on Test Mode #8

Fig. 3 Relative comparison of DESR and WLR according to test modes

WLR 값의 비율은 버킷 #1의 WLR 값을 기준으로 하여 버킷 #2와 버킷 #3의 값을 비율로 나타낸다. 여기서, Fig. 3 (d)의 WLR #1을 제외한 나머지 상대 비교 결과들을 통해 DESR과 WLR의 부하 상관관계가 유의함을 알 수 있고, WLR을 이용한 부하 구분이 가능함을 확인하였다. 그 결과, WLR을 실린더 압력 기반의 부하 특징으로 선정하고 이를 정량화하기 위해 WLR의 비율과 빈도를 히스토그램으로 나타낸다. 여기서, WLR 히스토그램의 비율은 작업부하의 강도를 의미하며 히스토그램의 평균과 산포를 이용하여 작업부하를 상대적으로 비교할 수 있다.

3. 가동정보 모니터링 시스템

개발된 작업부하 지표들을 부하 모니터링에 적용하기 위해 굴착기 가동정보 모니터링 시스템이 사용된다. 이 모니터링 시스템은 내구시험을 수행하는 동안 굴착기의 가동정보를 수집하기 위한 센서들과 센서 정보를 실시간 수집, 연산 그리고 저장하기 위한 모니터링 장치로 구성된다. 가동정보를 수집을 위한 센서는 굴착기의 위치 및 속도 정보 수집을 위한 GPS, 메인 펌프와 실린더 압력정보 수집을 위한 압력 센서, 굴착기 상부의 진동정보 수집을 위한 가속도 센서 그리고 ECU(Engine Control Unit) 또는 MCU(Machine Control Unit) 정보 수집을 위한 CAN 통신이 사용된다. 센서들로부터 수집된 가동정보를 실시간 연산하기 위해 FPGA(Field Programmable Gate Array) 기반의 SBC(Single Board Controller)로 구성된 모니터링 장치가 사용된다. 이 장치의 메인 S/W는 LabVIEW Real-time 기반으로 구현되고 Linux Real-time O/S에서 실행된다.

굴착기 내구시험의 효율적인 모니터링을 위해서 시험장 내 무선 AP(Access Point)를 이용하여 원격

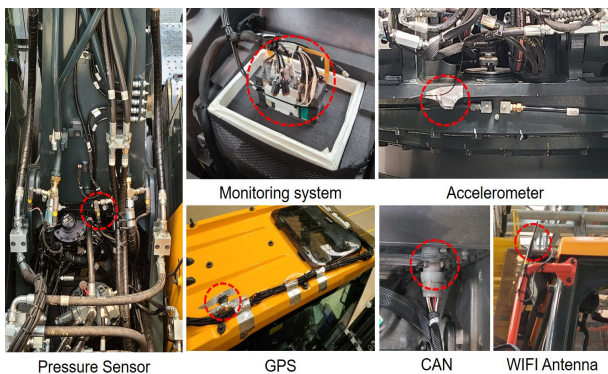
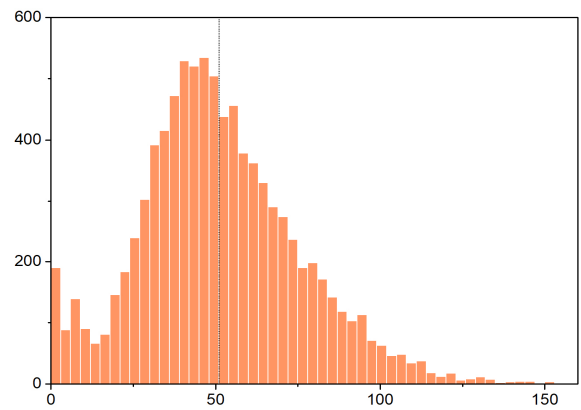


Fig. 4 Sensors for excavator monitoring

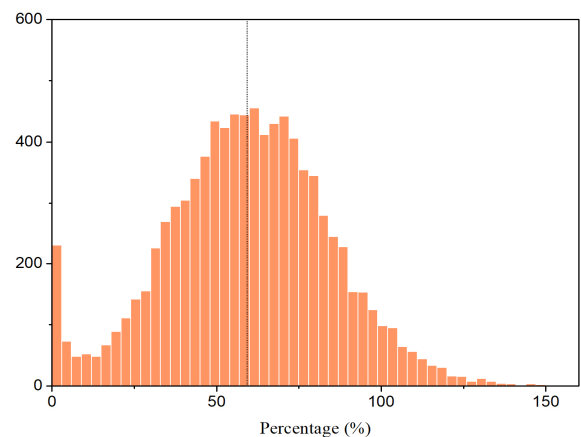
모니터링 환경이 구축된다. 모니터링 서버의 HMI(Human Machine Interface)는 NI LabVIEW와 Python의 Co-simulation으로 구현되며 모니터링 장치로부터 수신된 가동정보 데이터를 이용해 굴착기의 표준작업 모드를 판별하고 작업부하 지표를 적용한 통계분석 연산을 수행한다.

4. 작업부하 지표 평가

개발된 부하지표들의 유효성을 검증하기 위해 중형 굴착기 2 모델에 대해 특정 시간 동안 부하 모니터링을 수행한다. 각 장비에는 가동정보 모니터링을 위한 센서들과 모니터링 장치가 설치된다. 시험 모드인 경우 장비 E는 모드 #5, 장비 F는 모드 #1의 작업이 수행된다. 각 장비에서 수집된 가동정보 데이터는 작업모드 판별을 통해 해당하는 표준 작업 데이터로 분류되고 이를 기반으로 작업부하 지표를 이용한 부하지표 연산이 수행된다.



(a) WLR#2



(b) WLR#3

Fig. 5 WLR histogram according to monitoring the excavator E

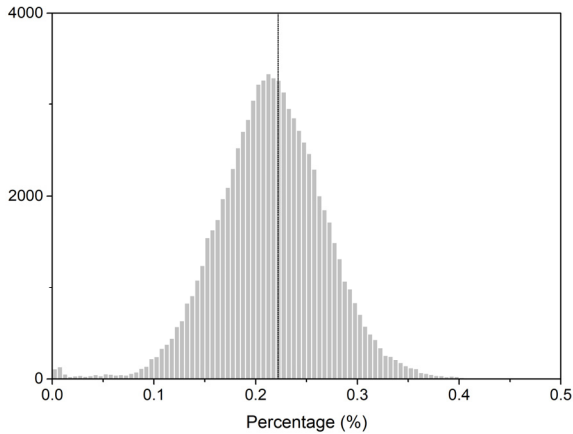


Fig. 6 RMS histogram according to monitoring the excavator F

Fig. 5는 장비 E에 대한 부하 모니터링 결과를 실린더 압력 기반 부하지표인 WLR 히스토그램으로 나타낸다. WLR 히스토그램의 가로축은 WLR의 비율(%), 세로축은 빈도를 나타내며 모니터링 시간 동안 작업 모드 #5로 분류된 가동정보 데이터로 계산된 WLR 값들의 산포를 확인할 수 있다. WLR 비율을 통해 작업부하의 상대적인 강도를 판단할 수 있고 또한, 작업 모드와 모니터링 시간을 기준으로 WLR 히스토그램의 평균과 산포 수준을 이용하여 작업부하를 상대적으로 비교 가능함을 확인하였다.

Fig. 6은 장비 F에 대한 부하 모니터링 결과를 가속도 기반 부하지표인 RMS 히스토그램으로 보여준다. RMS 히스토그램의 가로축은 RMS 값의 비율(%), 세로축은 빈도이며 모니터링 시간 동안 작업 모드 #1로 분류된 가동정보 데이터를 통해 계산된 RMS 값의 산포를 볼 수 있다. WLR과 유사하게 RMS 비율을 통해 작업부하의 강도를 판단할 수 있으며 RMS 히스토그램의 평균과 산포 수준을 이용해 작업부하를 상대적으로 비교하여 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서 굴착기 내구시험 모니터링을 위한 작업부하 지표를 개발하였다. 먼저, 굴착기의 가동정보 데이터 분석을 통하여 가속도와 실린더 압력을 부하 인자로 선정하였다. 그리고 부하 인자인 가속도와 실린더 압력에 대해 시험 모드에 따른 부하 상관성을 분석한 결과 RMS와 WLR을 기계적 부하를 간접적으로 판단할 수 있는 부하 특징으로 각각 도출하였고 이 특징들을 정량화하기 위해 지표화를 수행

하였다. 다음, 각 부하지표들의 유효성을 평가하기 위해 굴착기의 가동정보를 수집하기 위해 개발된 실시간 모니터링 장치가 사용되었다. 모니터링 장치는 내구시험장비 내 설치되고 무선 네트워크 환경을 이용하여 원격 모니터링 환경과 연동되었다. 마지막으로 일련의 부하 모니터링 및 분석결과를 통해서 정형화된 표준작업에 대해 부하지표를 이용한 작업부하의 상대 비교가 가능함을 확인하였고 개발된 작업부하 지표가 굴착기 내구시험 부하 모니터링에 유효함을 검증하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) Y. C. Yoo, S. G. Shin, Su In Kim, Y. H. Cho. "The Design Method of Accelerated Life Testing Using Actual Load Data", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol.43, No.9, pp.667~673, 2019.
- 2) P. Y. Lee, S. U. Kwon, D. H. Kang, S. Y. Han, J. H. Kim. "SOH Estimation and Feature Extraction using Principal Component Analysis based on Health Indicator for High Energy Battery Pack", Trans. of Korean Institute of Power Electronics, Vol.25, No.5, pp.376~384, 2020.
- 3) V. Saxena, N. Chowdhury, S. Devendiran, "Assessment of Gearbox Fault Detection using Vibration Signal Analysis and Acoustic Emission Technique", J. Mech. & Civil Eng., Vol.7, No.4, pp.52~60, 2013.
- 4) H. Cho, K. T. Kim, Y. H. Jang, S. H. Kim, J. S. Kim, K. Y. Park, J. S. Jang, J. M. Kim, "Development of Load Profile Monitoring System Based on Cloud Computing in Automotive", Journal of Korean Society for Quality Management, Vol.43, No.4, pp.573~588, 2015.

- 5) J. H. Jung, K. H. Sun, K. Kim, "Fault Diagnosis Method for Excavator Hydraulic Axial Piston Pumps", Journal of Drive and Control, Vol.18, No.4, pp.98~103, 2021.
- 6) H. S. Baek, J. H. Shin, S. J. Kim. "Development of AI-Based Condition Monitoring System for Failure Diagnosis of Excavator's Travel Device", Journal of Drive and Control, Vol.18, No.1, pp.24~30, 2021.
- 7) S. J. Yoo, D. S. Jang, J. W. Park, J. K. Lee, "Fault Diagnosis of Hydraulic Solenoid Valves using Artificial Intelligence", Journal of Drive and Control, Vol.18, No.4, pp.92-97, 2021.
- 8) S. I. Kim, Y. J. Noh, Y. J. Kang, S. H. Park and B. H. Ahn, "Fault Classification Model Based on Time Domain Feature Extraction of Vibration Data." J. of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol.34, No.1, pp.25-33, 2021.
- 9) V. Saxena,, N. Chowdhury, S. Devendiran, "Assessment of Gearbox Fault Detection using Vibration Signal Analysis and Acoustic Emission Technique", J. Mech. & Civil Eng., Vol.7, No.4, pp.52~60, 2013.
- 10) MM. Pedersen, "Introduction to metal fatigue.", Technical report ME-TR-11, 91, 2018.