

# 지게차 주행 환경에 따른 드라이브 엑슬 부품의 피로 및 가혹도 분석 Fatigue and Severity Analysis of Drive Axle Parts According to Forklift Driving Environment

유영준<sup>1</sup> · 안영철<sup>1</sup> · 이광희<sup>2</sup> · 박정현<sup>2</sup> · 이대엽<sup>1,2</sup> · 이철희<sup>1,2\*</sup>

Yeong Jun Yu, Young Chul An, Kwang-Hee Lee, Joeng Hyun Park, Daeyup Lee and  
Chul-Hee Lee

Received: 28 Mar. 2023, Revised: 28 Apr. 2023, Accepted: 04 May. 2023

**Key Words** : Forklift(지게차), Drive axle (드라이브 엑슬), Fatigue(피로), Structural analysis(구조 해석), Fatigue analysis(피로 해석)

**Abstract:** This study aimed to analyze the fatigue of forklifts in industrial settings by assessing their stress levels during operation. Strain gauges were affixed to the dynamic components of the forklifts to gather real-time data and enhance the reliability of the analysis. Although monitoring structural loads in harsh testing environments can be challenging, the affixed strain gauges on the dynamic components can provide more precise results and improve the interpretation of data. By creating testing modes that simulate forklift usage environments and performing experiments with selected cargo and driving modes, a comparison of the damage severity of forklift parts under different driving conditions was done. These results can be utilized to forecast the lifespan of forklift parts under extreme driving conditions and assist in the design and optimization of new parts in the future.

## 기호 설명

C : Cycle (N)  
 D : Damage  
 $D_i$  : Damage fraction for load cycle, (i)  
 $n_i$  : Number of cycles applied to load cycle, (i)  
 $N_i$  : Number of cycles available in load cycle, (i)  
 $L_t$  : Life time, (h)  
 I : Infinite life, (N)  
 $t_T$  : Test time, (s)

## 1. 서론

최근 산업 현장에서는 안전과 생산성을 동시에 고려한 작업 환경을 조성하기 위해 다양한 장비와 기술이 도입되고 있으며 건설기계로 등록된 지게차는 1980년 5,934대가 등록된 이후 2020년에는 198,639대가 등록되어 점차 증가하는 추세이다.<sup>1)</sup> 지게차는 주로 운전자가 탑승하여 건설현장, 물류창고 등 산업현장에서 적재물의 운반 등 큰 역할을 하고 있으며, 이에 따라 지게차의 안전성과 성능 향상에 대한 요구가 높아지고 있다.<sup>2,3)</sup> 또한, 다양한 건설장비는 환경 규제 대응 및 동적 부품의 성능 및 향상 등 새로운 부품을 위한 연구개발이 이루어지고 있으며, 이를 위해 다양한 안전성 평가 방법이 연구되고 있다.<sup>4,5)</sup> 하지만, 동적 부품에서의 주행 시 작용하는 응력을 측정하기에 어렵기에 엔진 토크와 기어비를 사용하여 지게차 부품에 작용하는 토크를 예측하는 방법으로 설계를 진행하거나 가상의 신호 및 반복법을 통하여 작용하는 응력을 예측하여 안전성 평가에 대한 연구

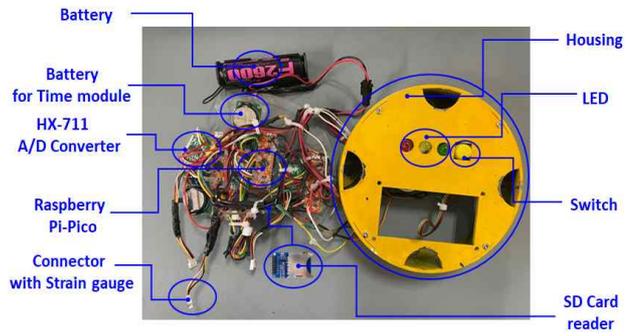
\* Corresponding author: chulhee@inha.ac.kr  
 1 Department of Construction Machinery Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea  
 2 Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea  
 Copyright © 2023, KSFC  
 This is an Open-Access article distributed under the terms 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.

를 진행 해왔다.<sup>6)</sup> 이에 따라 분석의 신뢰성을 향상할 수 있는 동적 부품에서 실제 주행 시 측정데이터를 추출하여 피로 수명 예측 및 힘의 작용 등에 관한 실제 데이터 기반 연구가 필요하다. 스트레인 게이지로 부하 계측을 모니터링 하는 방법은 열악한 내구시험 환경에서 스트레인게이지 및 측정 장비를 보전하는데는 많은 공수가 요구되어 어려움이 존재한다.<sup>7)</sup> 그런데도 정적 부품 및 구조물에서 스트레인 게이지를 사용해서 응력 측정 연구 및 시뮬레이션에 관한 연구는 많이 존재한다.<sup>8-11)</sup> 하지만 동적 부품에서의 측정데이터를 추출한 연구 사례는 부족하다. 지게차 주행 시 측정되는 데이터를 사용하면 해석 시 보다 정확한 결과를 추출할 수 있어 분석의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 부품의 내구검증을 위해서는 지게차 사용환경을 대표하는 시험 모드 개발과 이를 모사하기 위한 시험환경 구축이 필요하다.<sup>12)</sup> 실제 사용환경과 같이 구현하기 위해 화물 2가지, 주행 모드 4가지로 설정하여 실험을 진행하였다. 이 데이터를 기반으로 피로 해석을 진행하여 피로 수명을 통한 지게차 주행 별 부품의 가속도 및 토크와 압축력의 영향력을 비교하였다.

## 2. 지게차 주행 시험

본 연구는 지게차 드라이브 액슬(Drive Axle)의 샤프트-아웃풋(SHAFT-OUTPUT) 부품에 스트레인 게이지를 부착하여 작업 중 발생하는 토크와 축 방향의 압축력을 측정하여 피로 해석을 수행하는 것을 목적으로 한다. 토크, 압축력을 측정하기 위한 실험을 진행하여 추출된 결과값을 기반으로 선형회귀를 통한 캘리브레이션을 실시하였으며 라즈베리파이 피코 기반으로 회로와 케이스를 제작하였다. 측정에 사용된 회로와 케이스 구성은 Fig. 1과 같다. 케이스를 지게차 앞 양쪽 휠 외부에 부착하여 스트레인 게이지의 저항 변화를 감지하여 드라이브 액슬에 작용하는 토크와 압축력을 측정하였다.

지게차 모델의 정격 하중인 3.2톤 화물로 시험 모델을 선정하였다. 3.2톤의 정사각형 모습의 화물을 이용하여 실험하였으며, 실제 사용환경에서 지게차를 통한 화물 이송 시 나무와 같은 화물 등을 해외에서 자주 이송하기에 같은 무게이지만 높이가 낮고 길이가 더 긴 장척화물을 추가하여 총 2가지의 화물 종류로 시험을 진행하였다. 시험에 사용된 화물의 모습은 Fig. 2와 같다.



(a) Circuit and case



(b) Attached measurement module on forklift's front wheels

Fig. 1 Module to measure torque and compressive force



(a) Bulky cargo (b) Cubic cargo

Fig. 2 Type of cargo used in the experiment

지게차 주행 시험은 제자리 좌우 회전, 좌우 회전 후 정지, 급출발 급정거, 필드 모드 총 4가지 시험 모드로 선정하였으며 4가지 시험 모드에 대해 화물 2종류로 실험을 진행하여 총 8회의 시험을 진행하였다. 필드 모드는 주행 시 지게차 마스트의 상하 움직임 및 화물 적재 등 실제 산업현장에서 지게차를 사용하는 환경과 같이 구성하여 실험을 진행하였다. Table 1은 시험 모드 및 화물의 유형을 요약한 것이며, 시험 모드를 기호로 지정하였다.

Table 1 Cargo and test mode during measurement

Symbol	Test mode	Cargo
A	Turning in place	Bulky
		Cubic
B	Sudden brake after turning at corner	Bulky
		Cubic
C	Sudden acceleration and brake	Bulky
		Cubic
D	Field Mode	Bulky
		Cubic

Table 2 Mechanical properties of SCM440H

Material	SCM440H
Poisson's ratio	0.3
Young's Modulus	210GPa
Yield Strength	1232MPa
Tensile Ultimate Strength	1365MPa

### 3. 구조 해석

토크 및 압축력 작용 시 지게차의 드라이브 액슬에 발생하는 등가 응력 및 변형력을 확인하기 위해 ANSYS Mechanical을 사용하여 구조 해석을 진행하였다. 지게차 드라이브 액슬 중 허브 조립체 (HUB Assembly) 부분만 사용하여 해석 시간을 단축하였다. 허브 조립체의 구조는 12개의 볼트와 2개의 핀으로 고정되어 있기에 고정 경계조건인 'Bonded'로 정의했으며,하우징 파이널 드라이브(HOUSING-FINAL DRIVE)부분과 허브 조립체는 회전은 가능하지만 분리되지 않는 'No Separation' 조건을 부여하였다. 또한, 수직 변위 예방을 위해 결합이 되는 부위에 'Frictionless support'의 경계조건을 부여하여 상대운동은 없도록 선정하였다. 구조 해석에 적용된 접촉 및 경계조건은 Fig. 3과 같다.

허브 조립체에 가해지는 힘과 변형을 분석하고 등가 응력 값이 항복 응력 및 극한 응력 한계에 어느 정도 영향력을 미치는지 확인하기 위해서는 구조 해

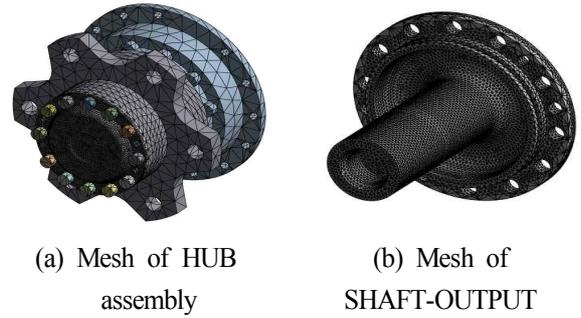


Fig. 4 Mesh of analysis model

석을 진행해야 한다. 구조 해석 시 재료의 물성값을 선정해야 하며, 주요 해석 부품인 샤프트 아웃풋의 기계적 물성값은 Table 2와 같이 사용하였다.<sup>13)</sup> 이 정보는 해석 시 성능을 정확하게 해석하고 평가하기 위해 중요한 정보이다.

해석 시 메쉬는 제품의 크기별로 각각 다르게 적용하였으며 HUB SUB assembly, HOUSING-FINAL DRIVE 와 같이 큰 부품의 메쉬 크기는 10 mm로 설정하였으며, Bolt, Pin 와 같이 작은 부품의 메쉬 크기는 5mm로 설정하였다. 그 중 관심 부위인 샤프트 아웃풋 부품 및 작은 부품들의 메쉬 크기는 2.5mm로 선정하였다. Fig. 4는 메쉬가 적용된 해석모델의 모습이다.

엔진 출력 토크와 기어비에 관한 식으로 작용하는 토크와 압축응력의 힘을 예측하여 두 힘을 대입하여 항복 응력에 비해 어느 정도 수준인지 확인을 위한 구조 해석을 진행하였다. 또한, 이 결과는 지게차 시험 모드 별 주행 시 작용하는 토크와 압축력 실험 결과값을 토대로 작용하는 등가 응력을 예측할 수 있다. 토크와 기어비로 계산된 식에 의해 예측된 토크의 값을 샤프트 아웃풋에 가했을 때, 구조 해석 결과 최대 등가 응력 274 MPa이며, 예측된 축력의 값을 가했을 때는 등가 응력 207 MPa로 두 힘 모두 항복 응력 1232 MPa에 도달하지 못했다. 해석 결과는 Fig. 5와 같으며, 최대 토크 및 압축력 모두 노치 부위에 발생한 것을 알 수 있다.

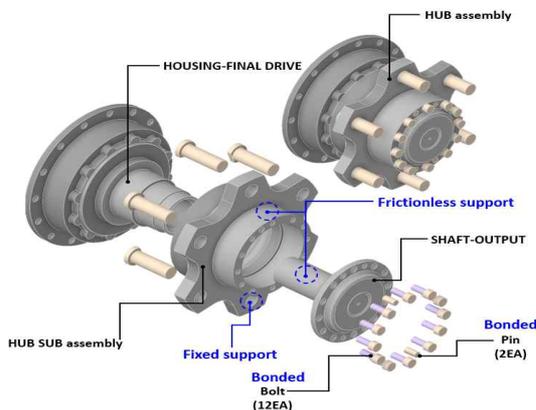
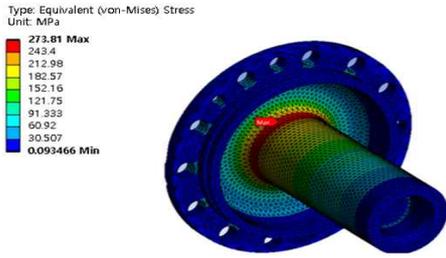
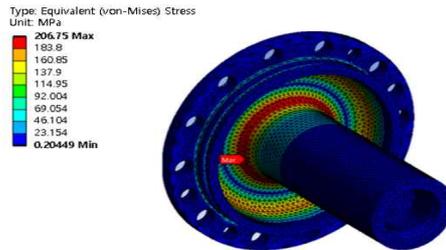


Fig. 3 3D modeling and boundary condition of HUB assembly



(a) Structural analysis results of torque



(b) Structural analysis results of compressive force

Fig. 5 Structural analysis results of SHAFT -OUTPUT

#### 4. 피로 해석

드라이브 액슬 부품의 피로 수명 및 데미지를 확인 후, 시험 모드 및 화물별 가속도를 비교하고자 ANSYS Mechanical을 통해 피로 해석을 진행하였다. 피로 해석은 구조 해석 기반으로 시뮬레이션이 진행되며, 앞선 진행한 구조 해석의 경계조건 등과 같이 동일한 내용을 기반으로 피로 해석을 진행하였다. 피로 해석은 하중의 순서에 무관하다는 이론인 누적손상법(Miner's rule)을 사용하여 토크와 압축력의 피로 해석 결과를 합하여 최종적으로 시험 모드 별로 가속도를 비교할 수 있다.

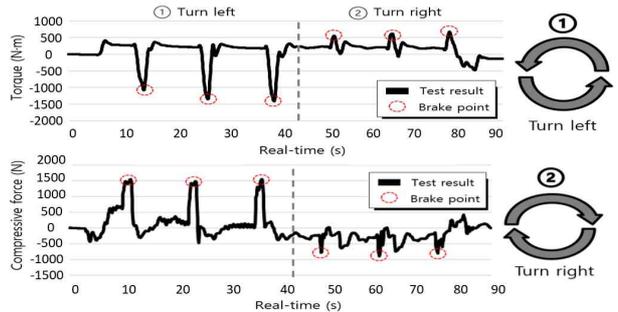
$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \tag{1}$$

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \tag{2}$$

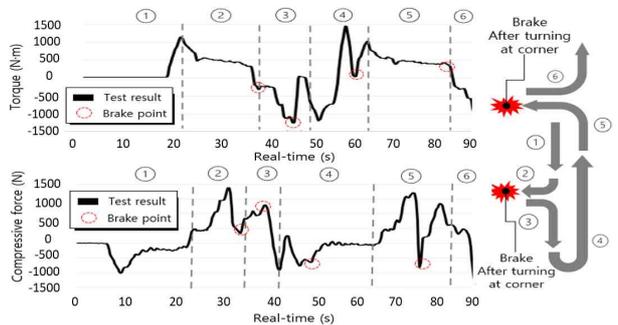
누적손상법을 통해 데미지의 역수와 지정한 무한 수명 사이클을 곱하여 시험 가능한 사이클을 계산할 수 있다. 하지만 시험 모드 별 시험 시간이 상이하기에 시험 시간을 곱하여 최종적으로 정확한 피로 수명을 계산한다. 피로 수명을 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$C = \frac{1}{D} * I \tag{3}$$

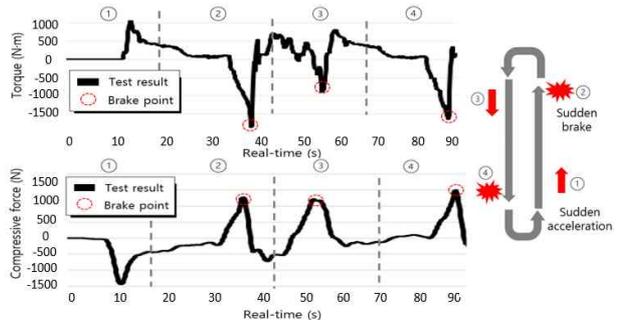
$$L_t = \frac{C * t_T}{3600} \tag{4}$$



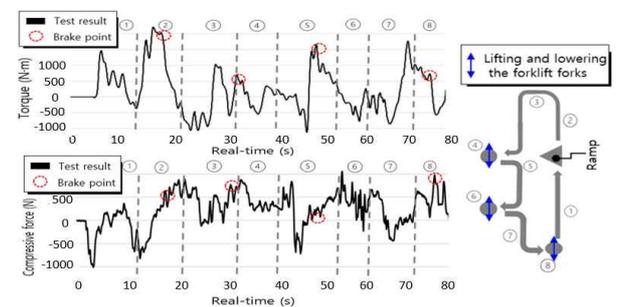
(a) Torque and force data of test mode A



(b) Torque and force data of test mode B



(c) Torque and force data of test mode C



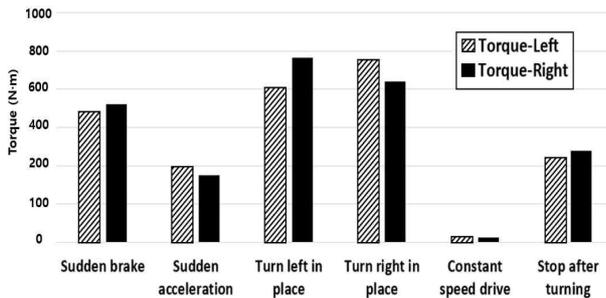
(d) Torque and force data of test mode D

Fig. 6 Torque and force data of test mode

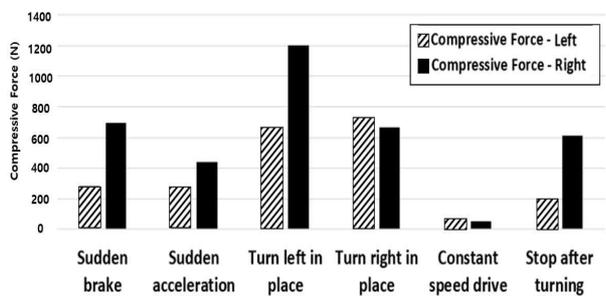
피로 해석을 진행하기 위해서는 응력과 사이클의 관계를 정의하는 그래프인 S-N curve를 가지고 피로 해석을 진행하였으며, 피로 수정 계수 식을 통한 S-N Curve를 수정하였다.<sup>14)</sup> 또한, 피로해석 모델의 무한수명은  $1 \times 10^7$ 로 설정하였다.<sup>15)</sup> 앞선 지게차의 화물 및 주행 모드 별 측정된 스트레인 게이지의 측정 결과를 이용하여 피로 해석을 수행하였다. 피로 해석에서 측정 결과 그래프를 한 사이클로 정의하여 대입 후 해석을 진행하였다. 주행 시 주행 데이터, 분당 회전수 (RPM) 및 브레이크 압력을 비교하여 지게차 주행 특성을 분석하여 신뢰성을 향상하였다. Fig. 6은 지게차 주행 시 시험 모드 별 토크와 압축력 작용 결과이다.

각 시험 모드에서 지게차 동적 부품에 작용하는 토크와 압축력의 시험 결과는 Fig. 6에서 확인할 수 있었다. 이를 기반으로 하여 급정거, 급출발, 제자리 좌회전, 제자리 우회전, 정속주행, 좌우 회전 후 정지 총 6가지 주행환경의 평균값을 계산하여 토크와 압축력을 분석하였다. Fig. 7은 각 주행 시 샤프트 아웃풋에 발생하는 토크와 압축력의 평균값을 나타낸 결과이다.

Fig. 7의 결과와 같이 제자리 좌우회전에서 힘의 값이 크게 작용하기 때문에 피로 해석 결과, 제자리

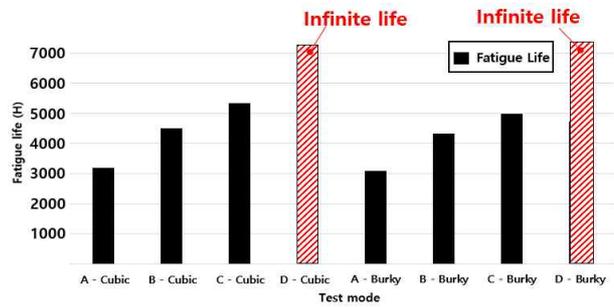


(a) Torque data by each driving environment

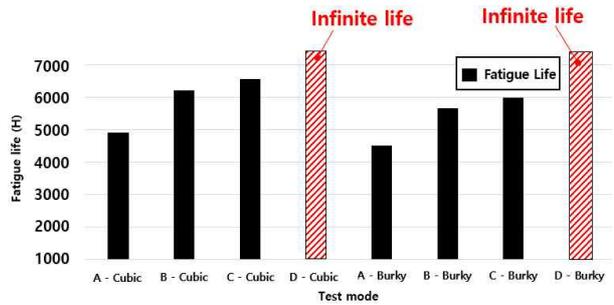


(b) Compressive force data by each driving environment

Fig. 7 Force data by each driving environment



(a) Fatigue life of left SHAFT-OUTPUT



(b) Fatigue life of right SHAFT-OUTPUT

Fig. 8 Fatigue life of SHAFT-OUTPUT

좌우 선회 값에서 수명이 가장 짧은 결과를 보였다. 이는 반경을 작게 회전하는 주행 때문에 원심력에 의한 극한의 주행 조건이 원인으로 추정된다. 기존 화물보다 장척화물에서 화물 길이에 따른 모멘트가 더 강하게 작용하기에 피로 수명이 더 짧은 결과를 나타냈다. 시험 모드 별 좌, 우 피로 해석 결과는 Fig. 8과 같으며 실험 환경 특성상 한 방향으로 주행을 하였으며 양쪽으로 정확하게 힘이 배분되는 것이 아니기에 좌, 우 피로 수명이 상이한 결과를 나타낸다.

## 5. 가속도 비교

피로 해석 결과 지게차에서 장척화물을 싣고 주행한 시험이 대부분 기본 정사각형 화물을 싣고 주행한 것에 비해 피로 수명이 적다는 것을 알 수 있었다. 이를 수치적으로 확인하기 위해 시험 모드 별 장척화물이 정사각형 화물에 비하여 상대적으로 얼마나 가속한지 비교하였다. 가속도 비교는 토크와 압축력이 작용하는 동적 부품에 동일한 시험 모드로 주행 시 장척화물과 정사각형 화물의 가속도를 비교하였다. 가속도 비교 결과를 Table 5, 6와 같이 표로 정리하였으며, 시험 모드는 Table 1 기호에 따라 작성하였다.

Table 5 Comparison of severity by cargo when torque is applied

Test mode	Torque Force	Torque (Left)	Torque (Right)
	Cubic	Bulky	Bulky
A	1	1.16	1.08
B	1	0.93	1.02
C	1	0.98	1.17

Table 6 Comparison of severity by cargo when compressive force is applied

Test mode	Compressive Force	Compressive Force (Left)	Compressive Force (Right)
	Cubic	Bulky	Bulky
A	1	1.39	1.18
B	1	1.09	1.18
C	1	1.02	1.15

Fig. 7의 결과에 따르면, 정속주행 중에는 토크와 압축력이 거의 없는 결과를 나타냈다. 반면, 제자리 좌, 우회전에서의 좌우 회전 시 토크와 압축력 작용이 크게 나타났으며, 이 때문에 피로 수명이 가장 낮게 나온 원인을 알 수 있다. 이러한 결과를 토대로 각 시험 모드 별 주행 시 토크와 압축력의 작용 비율을 분석하여, 토크의 영향력을 확인하였다. Table 7, 8은 각 시험 모드에서 좌측과 우측의 샤프트 아웃풋의 피로 수명에 관하여 압축력 대비 토크 작용 영향력 결과를 나타낸다.

Table 7 Analysis of torque influence on the left of SHAFT-OUTPUT by test mode

Test mode	Cargo	Torque
Turning in place	Bulky	67 %
	Cubic	68 %
Sudden brake after turning at corner	Bulky	51 %
	Cubic	50 %
Sudden acceleration and brake	Bulky	47 %
	Cubic	51 %

Table 8 Analysis of torque influence on the right of SHAFT-OUTPUT by test mode

Test mode	Cargo	Torque
Turning in place	Bulky	69 %
	Cubic	74 %
Sudden brake after turning at corner	Bulky	51 %
	Cubic	55 %
Sudden acceleration and brake	Bulky	52 %
	Cubic	52 %

## 6. 결론

기존 지게차 엔진 토크와 기어비의 관계로 토크를 예측을 통해 설계를 진행했다면 본 연구에서는 지게차 주행 시험 모드와 화물의 종류에 따라 스트레인 게이지를 이용하여 샤프트 아웃풋에서의 토크와 압축력을 측정된 결과를 통해 피로 해석을 진행하였다.

1. 엔진 토크와 기어비 기반으로 계산된 토크, 압축 두 힘 모두 항복 응력에 도달하지 못하는 것을 확인하였다.
2. 토크와 압축 실험 데이터를 통해 피로 해석을 진행하였으며 누적 손상법을 통해 수명과 데미지를 더하여 최종 수명을 계산하였다.
3. 시험 모드 별 주행 데이터, 분당회전수(RPM) 및 브레이크 압력을 통해 주행 특성을 분석하였으며 정속주행 때는 토크와 압축력이 거의 작용하지 않고, 제자리 좌, 우회전에서 토크와 압축력이 크게 작용하는 결과가 나타났다.
4. 화물의 형태에 작용하는 응력이 달라지며 장척 화물이 모멘트가 더 크게 발생하여 정육면체 화물에 비해 더 가혹한 결과를 나타내었다.
5. 시험 모드에서 제자리 좌, 우회전이 반경이 작게 회전하면서 구심력에 의해 피로 수명이 적게 나온 제일 가혹한 결과가 나타났다.
6. 시험 모드 중, 산업현장을 모사한 펠드모드의 피로 해석 결과는 무한수명으로 도출되었으며, 이는 지게차 축 설계 시 충분한 안전계수를 고려하여 제작하여 나온 결과이다.
7. 제자리 좌, 우회전과 같이 회전이 주로 이룬 시험에서는 토크 영향력이 더 컸으며, 나머지 시험에서는 주행특성별 토크와 압축력이 골고루 분포되는 작용 결과가 다르게 나타났다.
8. 피로 해석은 S-N Curve 값에 의해 민감하게 반응하기에 피로 수명이 많이 달라진다. 그렇기에, 재

료에 맞는 적절한 값으로 선정해야 한다.

본 연구는 선행연구를 통한 결과값으로 S-N Curve를 예측하여 피로 해석을 진행하였다. 허나, 추후 피로 시험을 통해 정확한 S-N Curve 및 항복 응력 등 정확한 기계적 물성치 값으로 해석을 진행하게 된다면, 극한 주행 시 지게차 부품의 제품의 수명 주기를 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 피로 해석 및 가속도 비교 결과는 추후 새로운 지게차 부품의 설계, 검증 및 최적화 시에 중요한 참고자료가 될 것이라 기대한다.

## 후 기

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0012769, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)

## 이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

## References

- 1) Y. M. Park., "Disaster Reduction Plan through Forklift Accident Case Analysis", Journal of the Society of Disaster Information, Vol.19, No.1 pp173-183, 2023.
- 2) S. J. Cho, et. al., "Development of the 80-kW Test Tractor for Load Measurement of Agricultural Operations", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.4 pp46-53, 2022.
- 3) Saric, Stephen, et al. "Analysis of forklift accident trends within Victorian industry (Australia)." Safety science 60, pp176-184, 2013.
- 4) D. S. Choi et. al., "An Experimental Study on the Noise Reduction of Cooling Fans for Four-ton Forklift Machines", Journal of Drive and Control, Vol.18, No.1, pp.1-8, 2021.
- 5) G. H. Jung, "Design of Creep Function for Forklift Automatic Transmission", Journal of Drive and Control, Vol.18, No.2, pp.46-55, 2021.
- 6) Zhou, Donglong, et al., "Fatigue Analysis of a Light Truck Rear Axle Based on Virtual Iteration Method.", Shock and Vibration 2022
- 7) J. H. Cho, et al. "Development of a Workload Index for Monitoring Durability Test of an Excavator ", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.4 pp29-35, 2022.
- 8) Shao, Yimin, et al. "Drive axle housing failure analysis of a mining dump truck based on the load spectrum." Engineering Failure Analysis 18.3 pp1049-1057, 2011.
- 9) J. E. Cho, et al, "Analysis of Fatigue Damage at Wheel under Variable Load", Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol.19, No.6 pp753-759, 2010.
- 10) Topac MM, et al. "Fatigue failure prediction of a rear axle housing prototype by using finite element analysis", Engineering Failure Analysis Vol16, pp1474-82, 2009.
- 11) Chu, S. J. "Analysis of lock nut loosening in a forklift drive axle." Journal of Mechanical Science and Technology Vol27, pp375-380, 2013.
- 12) J. H . Choet. al., "Development of an Unmanned Test System Based on Forklift for Mast Operation Durability", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.4 pp70-76, 2022.
- 13) Tazoe, Koki, Shigeru Hamada, and Hiroshi Noguchi., "Fatigue crack growth behavior of JIS SCM440 steel near fatigue threshold in 9-MPa hydrogen gas environment." International Journal of Hydrogen Energy 42.18 pp13158-13170, 2017
- 14) Julie A. Bannantine, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis"
- 15) Oh, M. C., et al. "Microstructural characterization of laser heat treated AISI 4140 steel with improved fatigue behavior." Archives of Metallurgy and Materials 60.2B, pp1331-1334, 2015.