

지게차용 엔진식 드라이브 액슬 수명평가를 위한 가속수명시험 선정 연구 Accelerated Life Test Selection Study for Life Evaluation of Engine Type Drive Axle for Forklift

김준영¹ · 유영준² · 이철희^{1,2*}

Jun-Young Kim, Yeong Jun Yu and Chul-Hee Lee

Received: 21 Aug. 2023, Revised: 21 Aug. 2023, Accepted: 26 Aug. 2023

Key Words : Industrial Vehicle(산업차량), Forklift(지게차), Drive Axle(드라이브 액슬), Powertrain(동력전달장치), Accelerated Life Test(가속수명시험)

Abstract: In this paper, the selection of a reliable accelerated life test code for a 2-ton forklift was accomplished by choosing the driving resistance coefficient failure-free test time based on a 10,000-hour B_{10} life. The overall life and average equivalent load of the vehicle were then calculated based on actual driving test conditions using the selected driving resistance coefficient. The gear train's accelerated life test code was selected by adjusting the equivalent load to a torque and rotation speed that did not exceed 125%(about 75HP) of the vehicle rated power. The safety of the test standards was validated by conducting an actual accelerated life test utilizing the proposed test method in this study and comparing the test result with the corresponding theoretical value. It is anticipated that the reliability of the accelerated life test in this paper will be enhanced, by incorporating actual driving performance data collected directly from the forklift and adjusting the conditions used in developing the accelerated life test code.

기호 설명

t_n : Zero failue test time, hrs

B_{100p} : Life, $B_{10}=10,000$ hrs

CL : Confidence level, %

N : Number of sample

p : Reliability function

β : Weibull parameter

$F_{rolling}$: Rolling resistance, kg

μ_{tire} : Rolling resistance coefficient

$W_{vehicle}$: Vehicle weight, kg

$F_{Acc.}$: Acceleration resistance, kg

α : Acceleration, m/s^2

ΔW : Vehicle inertial mass, kg

g : Gravitational acceleration, $9.8m/sec^2$

R_t : Total running resistance, kg

P_m : Mean dynamic equivalent load, $kg_f.m$

$P_1 \sim P_n$: Dynamic equivalent load applied for

$t_1 \sim t_n$ hours at rotation speed

$n_1 \sim n_n$, $kg_f.m$

$\sum n_n t_n$: Total rotation in hours

p : Bearing coefficient for roller bearing,

$p = 10/3$

n_m : Mean rotation speed, rpm

AF_T : Acceleration torque coefficient

$T_{Ttq.}$: Test input shaft torque, $kg_f.m$

$T_{Etq.}$: Equivalent load torque, $kg_f.m$

* Corresponding author: chulhee@inha.ac.kr

1 Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Republic of Korea

2 Department of Construction Machinery Engineering, Inha University, Incheon, 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.

n : Acceleration index
 AF_N : Acceleration number of rotation coefficient
 n_{Tn} : Test input shaft number of rotation, rpm
 n_{En} : Equivalent load number of rotation, rpm
 AF : Acceleration coefficient
 t_{na} : Accelerated life test time, hrs

1. 서론

2톤급 산업용 엔진식 지게차의 경우 좁은 실내 및 험한 노면조건을 갖는 야외작업장에서 화물을 적재 및 하역하고 운반하는 역할, 기동성과 작업효율을 높일 수 있도록 포크 전면에서부터 차량 후미 끝단까지의 전장을 짧게 하고 무게중심을 차량 후방의 낮은 위치에 두고 있다.^{1,2)} 그중 드라이브 액슬은 포크 마스트의 장착을 위하여 컴팩트하며, 고부하 작업시 중량물의 무게를 견뎌내야 하고 운전부하의 90%를 견뎌야 한다.

이렇듯 완성차의 치명적인 고장을 일으킬만한 부품에 대해서 제품의 결함으로 인한 부적합 및 고장 발생을 예방하기 위해 일반적으로 제품 개발단계에서 사용조건을 가속수명시험을 통해 고장 데이터를 수집하고 수명에 관한 품질특성을 파악하여 부적합 및 고장을 발생시키는 위험인자를 미리 제거한다. 하지만 보통 신뢰도가 높은 제품에 대해서 가속수명시험을 진행하는 경우 많은 비용과 시간이 소요되므로 현실적이지 않다. 따라서, 열악한 작업환경에서 운전자를 배제하고 시험의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 시험 방법론이 요구된다. 이러한 경우 가속수명시험이 제품 수명에 관한 품질 특성치를 짧은 시간동안에 얻을 수 있는 효과적인 방법이 될 수 있다.^{1,5)}

이에 본 연구에서는 2톤급 산업용 엔진식 지게차에 적용되는 드라이브 액슬을 이용하여, 지게차의 주행성능을 고려한 등가부하를 계산하고, 계산된 등가부하를 통하여 기어트레인에 대한 가속수명시험 기준을 선정하고, 선정된 시험 기준을 통하여 드라이브 액슬의 신뢰성 및 안전성을 검증할 계획이다.

2. 가속수명시험 선정 연구

드라이브 액슬의 시험은 설계된 데이터의 설계 검증과 장치의 내구성 및 기능평가를 위해 매우 중요한 절차이다. 장치의 합리적인 내구성 평가를 위해서는 드라이브 액슬이 장착되어 수행될 차량의

특성 및 주행성능을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 본 연구는 지게차의 장비 특성 및 주행 성능을 고려한 가속수명시험기준을 선정하는데 있다.

2.1 무고장 시험시간 산정

수명시험에서 드라이브 액슬내의 부품들이 고장이 날 때까지 시험하는 것은 시간이 너무 오래 걸린다. 때문에 무고장 시험을 주로 이용하며, 무고장 시험은 어떤 시간까지 시험하여 고장이 발생되지 않으면 제품이 신뢰성 시험의 요구조건을 만족한 것으로 판정하는 시험방법이다. 여기서 무고장 시험시간의 계산식을 구하기 위해서는 먼저 제품의 수명분포를 파악하여야 한다. 기계류 부품은 일반적으로 와이블 분포를 따르는 것으로 알려져 있다.⁵⁾ 또한 와이블 분포의 형상모수 β 는 유압기계에서 일반적으로 사용하는 2.0인 와이블 분포를 이용하며, 보증수명 B_{100p} 수명인 경우의 무고장 시험 시간 계산식은 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 t_n &= B_{100p} \times \left[\frac{\ln(1-CL)}{N \times \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \\
 &= 10,000 \times \left[\frac{\ln(1-0.7)}{1 \times \ln(1-0.1)} \right]^{\frac{1}{2.0}} \\
 &= 33804.1 \approx 33,804.1 \text{ 시간}
 \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 차량 운행조건 및 부하

주행성능은 고객 사업장의 작업특성 및 운전자의 습관에 따라 크게 달라진다. 수많은 변수에 의한 다양한 작업환경을 모두 설계에 반영할 수는 없으므로, 일반적인 작업환경에서의 조건을 기준으로 극한 조건 사용 시 발생할 수 있는 여러 조건들에 대한 기준으로 차량의 사용조건을 토대로 저항계수를 검토하였다.

2.2.1 구름저항

구름저항은 바퀴가 수평노면을 굴러가는 경우 발생하는 저항으로 노면의 굴곡, 타이어의 접지 부 변형, 타이어와 노면의 마찰 손실에서 발생하는 것으로 차량 하중에 비례한다. 구름저항은 여러 가지의 원인에 의해 발생하기 때문에 바퀴에 걸리는 하중, 노면 상태 및 주행속도에 따라 변하지만 일반적으로 하중에 비례하며 속도에 영향은 받지 않는다.⁶⁾ 다음 Table 1은 노면 별 일반적인 주행 저항 값이다.

Table 1 Rolling resistance coefficient

Conditions	Coefficient
Loose sand	0.25
Newly pebbles road	0.13
Stony unpaved road	0.08
Well-maintained unpaved road	0.03
Concrete or asphalt	0.015

지게차 차량의 경우 구름저항 계수는 0.015를 적용하였으며, 구름저항 계산식은 다음 식 (2)와 같다.

$$F_{rolling} = \mu_{tire} \times W_{vehicle} \quad (2)$$

2.2.2 등판저항

등판저항은 차량중량에 등판각도의 sin값을 취한만큼 발생하므로

$$F_{grade} = W_{vehicle} \times \sin\theta \quad (3)$$

이다. 그러나 보통 도로의 경사구배는 tan값인 %로 표현하며, 일반적인 도로의 경사구배는 5%이하이다. 이 경우는 tanθ와 sinθ가 거의 유사하므로, 경사구배로 표현하면 다음 식 (4)와 같다.

$$F_{grade} = W_{vehicle} \times \text{경사구배}(\%) / 100 \quad (4)$$



Fig. 1 Forklift max. grade ability

본 연구에서 등판저항 계수는 최대 등판능력 26%인 0.26을 적용하였다.

2.2.3 가속저항

차량의 주행 속도를 변화시키는데 필요한 힘을 가속저항 또는, 차량 관성을 이기는 힘을 관성저항이라고도 하며, 다음 식 (5)와 같다.

$$F_{Acc.} = \alpha \times (W_{vehicle} + \Delta W) / g \quad (5)$$

가속시 구동부 회전체에서 가속되는 정도에 따라 일시적으로 무게가 증가하는 효과가 나타나는데 이

를 회전부의 관성모멘트라 하고 모멘트의 증가율을 중량증가 계수라 하며, 중량증가 계수와 차체에 주어지는 가속도양의 곱(m/sec²)에 비례해서 가속저항이 발생한다.

2.2.4 전주행저항

전주행저항은 차량이 주행하면서 차량의 운동에 대항하여 발생하는 개별 저항의 총합을 말하며 계산식은 다음 식 (6)과 같다.

$$R_t = F_{rolling} + F_{grade} + F_{Acc.} \quad (6)$$

2.3 등가부하

평균 수명을 고려한 설계 기준을 찾는 작업은 설계 과정의 중요한 작업이며, 향후 제품의 수명을 판단하는 기준으로 모든 설계의 기본 데이터를 설정하는 작업이라 할 수 있다. 따라서 이론상의 주행모드를 통해 계산된 값들을 이용하여 가속수명시험 코드를 개발하고 개발된 시험 코드를 통하여 제품의 완성도를 높이는 작업을 진행할 필요가 있다.

2.3.1 테스트 코스(C-course)

Fig. 2는 지게차 주행시험 기준 테스트 코스이다.

A&B는 전진 공차 상태의 주행구간이다. 구간 사이에 등판로가 설치되어 있다. C&D는 주행을 멈추고 화물을 들어 올리는 작업 구간이다. 화물의 중량은 3.5톤이며, 2~3회 상, 하 리프팅 작업을 한다. E는 화물을 적재한 지게차가 방향 전환하며 후진으로 주행하는 구간이다. F&G는 화물을 적재한 지게차가 전진으로 방향 전환 후 주행하는 구간이다. 구간 사이에 등판로가 설치되어 있으며, 등판 중 중간 지점에서 정지 후 다시 출발하는 주행하는 구간이다. H&I는 주행을 멈추고 화물을 내려놓는 작업 구간이다. J&K는 화물을 내려놓은 지게차가 방향을 전환하며 후진으로 처음 주행을 시작한 자리로 돌아오는 구간이다.

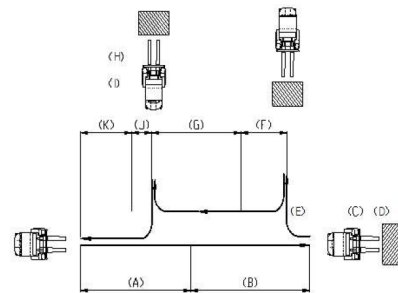


Fig. 2 Forklift c-course

Table 2 Driving status and external conditions

Step	Time (sec)	Input torque	rpm	rpm × time	Equiv. TQ.
A	3	150.9	0	475.3	626.2
B	5	75.5	0	199.6	275.1
B(+)	3	75.5	754.5	142.6	972.5
B-Stop	7	0	0	0	0
B(+)	8	150.9	1006	89.1	1246.0
B(-)	5	-75.5	0	270.9	195.4
C	15	75.5	0	38.0	113.5
C-Stop	10	75.5	0	213.9	289.3
D	7	0	0	0	0
E	5	255.9	0	338.5	594.4
E-Stop	10	255.9	0	169.3	425.2
F	5	255.9	0	483.6	739.5
G	5	127.9	0	241.8	369.7
G(+)	5	127.9	1279.5	96.7	1504.2
G-Stop	13	0	0	0	0
G(+)	8	255.9	1706	84.6	2046.5
G(-)	10	-127.9	0	86.4	41.6
H	14	127.9	0	265.9	393.9
I	10	127.9	0	0	127.9
I-Stop	10	0	0	0	0
J	5	142.6	100.6	142.6	394.1
K	10	142.6	100.6	142.6	318.6
K-Stop	7	305.5	100.6	305.5	481.6

1 사이클 시간은 143초이며, 중립 시간은 37초로 1 사이클을 180초로 가정하였다. 앞서 설명한 계산식 (1)~(6)을 이용하여 구간별 차량의 운전 상태 및 외부 조건을 계산한 값을 Table 2에 나타내었다.

2.3.2 등가부하 계산

휠드의 차량은 여러 주행상태에 따른 토크 및 시간의 함수를 고려해야 한다. 계산 방식은 베어링의 수명평가에서 사용되는 방식으로 전체 장비사용 시간에 대한 각 부분 부하 사용 조건의 등가평균을 구하여 차량의 전체 수명에 대한 평균부하 및 사용시간을 계산하는 방식으로 식 (7)과 같다.

$$P_m = \sqrt[p]{\frac{P_1^p n_1 t_1 + P_2^p n_2 t_2 + \dots + P_n^p n_n t_n}{n_1 t_1 + n_2 t_2 + \dots + n_n t_n}} \quad (7)$$

평균 회전속도 계산식은 다음 식 (8)과 같다.

$$n_m = \frac{n_1 t_1 + n_2 t_2 + \dots + n_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (8)$$

다음은 Table 3에서 각 구간별 운전상태 및 외부 조건 등을 계산한 데이터를 식 (7), (8)을 이용하여 등가부하를 계산한 값을 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Equivalent load calculation

Step	Time (sec)	Input torque	rpm	rpm × time	Equiv. TQ.
A	3	12.5	663	1989	9080867
B	5	5.5	1790	8949	2633161
B(+)	3	19.5	2453	7358	14795839
B-stop	7	0	1326	9281	0
B(+)	8	24.9	331	2652	120010227
B(-)	5	3.9	829	4143	390253
C	15	2.3	1724	25853	397575
C-stop	10	5.8	994	9943	3462531
D	7	0	0	0	0
E	5	11.6	464	2320	8203264
E-stop	10	8.3	464	4640	5369087
F	5	14.8	663	3314	26349597
G	5	7.4	1657	8286	6535528
G(+)	5	30.1	2121	10606	899201222
G-stop	13	0	1127	14650	0
G(+)	8	40.9	331	2652	627389069
G(-)	10	0.8	431	4309	2337
H	14	7.9	1127	15777	15369084
I	10	2.6	729	7292	167346
I-stop	10	0	0	0	0
J	5	7.7	331	1657	1488927
K	10	6.2	1326	13258	5865417
K-stop	7	9.4	994	6960	12200599

Table 4 Operation time and load factor

	F1	F2	F3	R1	R2
TQ.	29.2	9.1	3.8	7.7	9.0
rpm	970	1197	1031	862	682
Time	24	32	50	20	17
Time ratio	13.3%	17.8%	27.8%	11.1%	9.4%
TQ. ratio	1.2	0.4	0.2	0.3	0.4
Equiv. T.R.	0.7	Equiv. T	16.3	$T_{e=0.6Max}$	25.1
Equiv. rpm	788.7	Equiv. time	2348	$rpm_{e=0.6}$	1207

또한 1 사이클의 평균 등가부하를 이용하여 드라이브 액슬의 가속수명시험 조건을 유추할 수 있다.

F1은 전진 이동시 등판구간, F2는 전진 이동시 평지에서 가속하는 구간, F3는 전진 이동시 감속하는 구간, R1은 차량이 후진 이동시 평지에서 가속하는 구간, R2는 후진 이동시 감속하는 구간의 평균 토크와 평균 rpm 및 총 시간을 나타낸 것이다.

계산 결과 3.5톤 차량은 약 2,348시간 시험 시 목표수명인 10,000시간 사용 조건과 상당하는 수명을 예측 할 수 있다.

2.4 가속수명시험 코드

차량 주행 시험으로 약 2,348시간을 진행 할 경우 비교적 정확하고 확실한 시험을 할 수 있는 장점이 있으나, 장비의 개발에 있어 비용 상승 및 제품 출시를 상당기간 늦추게 되어 현실성이 없다. 그러므로 시험 하중을 제품이 감당할 수준까지 끌어올려 제품의 시험기간을 최대한 줄이며, 정확한 시험 결과를 유추하는 것은 제품의 개발과 함께 매우 중요한 작업이라 할 수 있다. 무고장 시험시간을 단축하여 가속수명시험을 진행하기 위해서는 가속계수의 산출이 필수이며, 가속계수 산출 계산식은 다음과 같다.

$$AF_T = \left(\frac{T_{Tq}}{T_{Etq}} \right)^n = \left(\frac{25.1}{16.3} \right)^{6.6} = 17.7 \quad (9)$$

$$AF_N = \frac{n_{Tn}}{n_{En}} = \frac{1207}{788.7} = 1.5 \quad (10)$$

$$AF = AF_T \times AF_N = 17.7 \times 1.5 = 27.1 \quad (11)$$

$$t_{na} = \frac{t_n}{AF} = \frac{33804.1}{27.1} = 1247.8 \approx 1248 \text{시간} \quad (12)$$

결과적으로 본 기어트레인에 대한 가속수명시험은 Table 5과 같이 3.5톤급 차량의 토크컨버터와 엔진 성능이 매칭되는 토크컨버터 성능도표의 토크컨버터 속도비 기준 0.6과 만나는 토크와 회전수를 기준으로 전진방향 약 864시간, 후진방향 약 384시간으로 총 약 1,248시간 동안 시험된다.

그러나 가속수명시험을 약 1,248시간 시험하는 것은 개발기간만 늦추고 비용만 발생하는 일이므로, 차량 정격 출력 60HP의 125%(약 75HP)를 초과하지 않는 선에서 부하 및 rpm을 증가시켜 최종적으로 Table 6과 같이 전진방향 약 93시간, 후진방향 약 47시간으

Table 5 Accelerated life test code

Step	Time ratio	Input TQ. (kgf.m)	Input rpm	Test time (hrs)
F1	26.1%	25.1	1207	325
F2	23.0%	25.1	1207	287
F3	20.1%	25.1	1207	251
R1	10.8%	25.1	1207	135
R2	10.0%	25.1	1207	125
R3	10.0%	25.1	1207	125
Total	100%			1,248

Table 6 Final accelerated life test code with increased load and rpm

Step	Input TQ (kgf.m)	Input rpm	ACC. rate	Test time (hrs)	Test HP
F1	52.0	565	57.7	6	41.0
F2	40.8	750	15.4	19	42.7
F3	30.6	1200	3.7	68	51.2
R1	30.6	1200	3.7	37	51.2
R2	40.8	750	15.4	8	42.7
R3	53.0	552	63.9	2	40.8
Total				140	

로 총 약 140시간 시험이 진행되는 기어트레인의 가속수명시험 코드를 선정하였다.

3. 가속수명시험 검증

3.1 시험 절차

시험 진행시 RS B 0113의 신뢰성 규격을 참고하였으며, 시험기 구성은 Fig. 3과 같이 구성하였다.

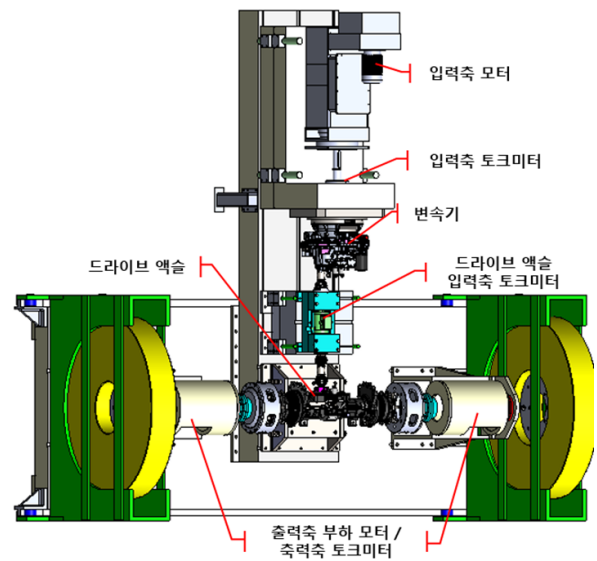


Fig. 3 Drive axle accelerated life test layout

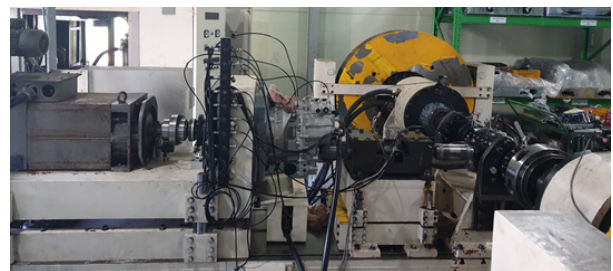


Fig. 4 Drive axle accelerated life test

최종적으로 선정한 Table 6의 가속수명시험 코드로 단계별 조건 조정 시 출력 축 유압 모터의 부하율을 조절하며 드라이브 액슬 입력 축 rpm과 토크를 맞추어 시험을 진행하였다.

3.2 가속수명시험 검증 및 결과

시험 진행 간 누유, 소음, 파손, 진동 등 특이사항 없이 시험 완료하였으며, 시험 전 동력전달 효율 92%였으며, 각 단계별 시험 완료 후 측정 결과 약 86~90%로 나왔다. 이는 기어 및 베어링 등의 제품 길들이기로 인한 변화로 판단된다. 또한 가속계수 계산에 사용되는 가속지수 값을 확인한 결과 6.4~6.9로 계산되었는데 이는 시험 완료 후 계측된 토크를 식 (9)를 역으로 계산하여 확인하였다.

Table 7 Power transmission efficiency and acceleration index

Step	Efficiency(%)	Acceleration index
F1	86	6.7
F2	87	6.4
F3	90	6.9
R1	89	6.7
R2	90	6.5
R3	87	6.6

4. 결론

본 연구에서는 지게차 분야에서 활용도가 높은 2톤급 엔진식 지게차의 핵심부분인 드라이브 액슬의 가속수명시험 기준을 선정하는 연구를 진행하였다.

1) 지게차 테스트 코스를 이용하여 이론적인 주행 성능 값을 파악 할 수 있었으며, 장비 특성 및 주행 성능을 고려한 등가부하를 선정하여 가속수명시험 기준을 선정하였다.

2) 선정된 시험기준으로 단계별 시험 종료시 동력 전달효율을 확인한 결과 86~90%가 나왔으며, 동력전달효율 기준 85%이상을 만족하였다.

3) 시험 데이터 상 가속지수는 6.4~6.9로 이론값 6.6과는 3~5% 차이가 남으로 유사함을 확인하였으며 시험기준에 대해 검증을 하였다.

선정한 가속수명시험을 통하여 드라이브 액슬의 신뢰성을 검증하고, 시험 기준에 대한 체계적인 계산

법을 수립하였다. 향후 이론적인 주행성능 값에서 지게차의 실제 주행성능 데이터를 직접적으로 수집한 값으로 수정하여 신뢰도 높은 가속수명시험 코드로 보완하여 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

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

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) 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
- 2) Y. H. Choi, et. al., "Thermal Flow Analysis of an Engine Room using a Porous Media Model for Imitating Flow Rate Reduction at Outlet of Industrial Machines", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.1 pp62-68, 2022
- 3) Y. B. Lee, et. al., "A Study on the Acceleration Durability Test of In-Wheel Drive Gearbox for Military Special Vehicles", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.3 pp32-38, 2022
- 4) 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
- 5) J. H. Lee. "A Study on Structural Analysis and Application of Accelerated Life Test for Steering Axle of Electric Forklift" Kyungsang National University, Masters Thesis, 2019.
- 6) K. B. Yang. "A study for the enhancement of the fuel efficiency of eco-marathon vehicle" Kunsan National University, Masters Thesis, 2003.