

화물 상차 로봇 시스템의 안전성 확보를 위한 신뢰성 기반 MTTF 도출 및 부품소요량 예측 연구

김 명 성* · 김 영 민*
*아주대학교 시스템공학과

On a Study of Reliability-Based MTTF Derivation and Parts Requirement Prediction for Securing Safety of Robot-Based Cargo Loading System

Myung-Sung Kim* · Young-Min Kim*

*Department of Systems Engineering, AJOU University

Abstract

In modern society, the delivery service market has grown explosively due to rapid changes in social structure and the recent COVID-19 pandemic. Therefore, various problems such as injury to workers and an increase in human accidents are occurring due to the loading and unloading of parcels. In order to solve this problem, domestic company n is developing a “robot-based cargo loading and unloading system”. In developing a new technology system, quantitative reliability targets should be set for efficient operation and development. In this paper, reliability analysis was conducted through field data for the pneumatic gripper of the “robot-based cargo loading system”. The reliability of the failure data was analyzed to estimate the distribution parameters and MTTF. Random data was derived for the probability of occurrence of a failure with the estimated value. By repeating the simulation to predict the number and year of failures according to the estimated parameters of the probability distribution, it was proposed as a method that reflects realistic probabilities rather than calculating with simple arithmetic using the average MTTF previously used in the field.

Keywords : Part Requirement, Reliability Analysis, Robot-based Cargo Loading System, MTTF

1. 서 론

1.1 연구배경

최근 현대 사회에서는 사회구조의 급격한 변화와 코로나 19 팬데믹으로 인해 비대면 및 배송 서비스 시장이 폭발적으로 성장하였으며, 2020년 3월 온라인 쇼핑 지출비중이 60.7%로 오프라인 시장을 넘어서고 있다[1]. 물류의 급격한 증가로 인해 택배시장의 규모 및 매출액이 증가

하였지만, 갑작스러운 물류량의 증가로 인프라 및 인력의 부족이 적나라하게 드러나는 실정이다[2]. 특히, 택배 물류 작업은 아직 인력으로 직접 분류를 진행하고 화물 상하차 작업을 사람이 직접 수행하고 있다. 택배 물류량의 증가로 인해 작업자는 부상 및 사망사고 사례가 증가하고 있으며[3], 이를 해결하기 위한 기술이 빠르게 마련되어야 하는 실정이다.

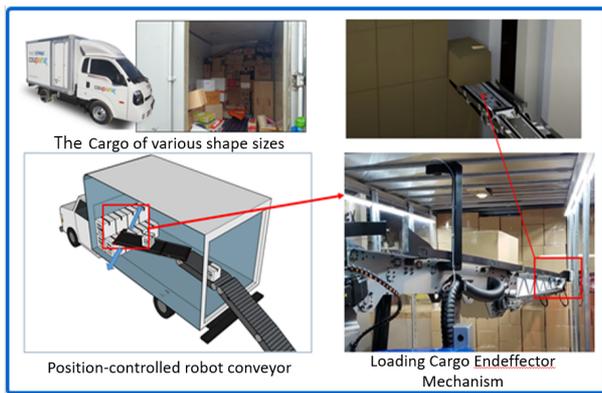
[†]본 연구는 국가교통과학기술진흥원의 국가연구개발사업의 연구비 지원으로 수행되었음(21HCLP-C162730-01).

[†]Corresponding Author : Young-min Kim, Systems Engineering, AJOU UNIVERSITY, 206, World cup-ro, Suwon-si, E-mail: pretty0m@ajou.ac.kr

Received February 1, 2023; Revision March 13, 2023; Accepted March 13, 2023

1.2 문제 정의

늘어난 택배 물동량을 인력에 의존하고 있는 현대에서는 택배 상하차 작업으로 인하여 작업자들의 부상 및 인명 사고, 피로도의 증가 등의 여러 가지 문제가 발생되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 국내 N사에서는 “로봇 기반 화물 상차시스템”을 개발 중에 있다. “로봇 기반 화물 상차시스템”은 화물의 선출 순서를 계산하고 크기 및 무게로 적재 위치를 결정하여 로봇암을 통해 화물차량에 효율적으로 적재하는 자동 시스템으로 아래의 [그림 1]과 같이 화물의 순로를 관리하고 화물인식을 통해서 엔드이펙터로 화물을 전달하면 엔드이펙터가 화물을 차량에 적재하는 시스템이다. [그림 1]은 이를 도시한다.



[Figure 1] Concept of Robot-Based Cargo Carriage System

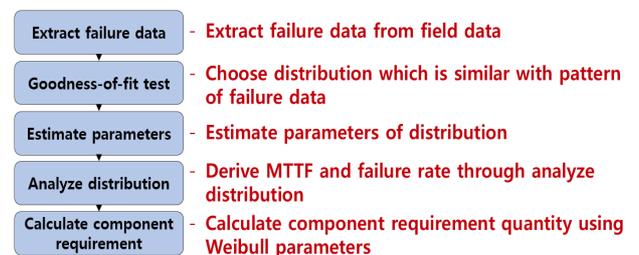
이러한 신기술 시스템을 개발하는데 있어, 정량적인 신뢰성 목표가 설정되어야 한다[4]. 정량적인 신뢰성 목표는 향후 시스템이 개발되고 나서 유지보수 비용 및 연간 비용과 부품 소요량을 산출하는데 도움이 되며, 정량적인 목표를 맞추어으로써 효율적인 운용 및 개발을 가능하게 하기 때문이다.

기존에 존재하지 않는 신기술 시스템은 설계단계를 거치면서 여러 가지 수정이 발생하게 된다. 특히 실제 개발하는 단계인 세부 설계 단계에서 수정이 발생하게 되면, 이는 프로젝트의 금전적 손실 및 기간연장에 따라 계획에 차질이 생길 수 있다. 따라서 개념설계 단계에서부터 체계적으로 운용이 예측가능한 설계가 완성되어야 효율적인 설계가 이루어진다고 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 고장수명주기와 부품 교체시기를 제시함으로써 제품의 파손으로부터의 상품안전 및 작업자의 안전성을 확보를 통해 전체 시스템 신뢰성 확보하는 연구를 제안하였다.

1.3 관련 선행연구

박찬규, 마정목은 공군의 유도탄을 대상으로 저장신뢰도 분석을 진행하였다. 본 연구의 결과로, 유도탄의 고장 데이터를 MTTF와 MTBF 두가지 모델로 나누어 고장률을 예측하여 두 모델중 실제 고장률과 가장 유사한 비율을 찾아 미래 고장률 예측에 더 적합한 비율을 제안했다[5]. 조형준 외 8은 자동 전환 계폐기를 대상으로 신뢰성 분석을 통해 신뢰성을 향상하는 연구를 진행하고자 하였으며 현장의 고장 데이터로 고장유형을 분석하여 고장의 원인을 도출하였다. 본 연구의 결과로, 고장 원인을 줄이기 위해 설계 데이터를 변경하여 개선된 자동 전환 계폐기를 신뢰성 시험을 통해 MTTF를 비교하여 기존의 부품보다 신뢰성이 향상된 것을 확인하였다[6]. 한재현 외 2는 전동차의 인버터 구동용 전해콘덴서의 신뢰도 예측과 수명은 연구하였다. 현장에서 사용되었던 고장데이터와 가속수명 시험을 통해 얻은 수명 데이터로 신뢰성 분석을 진행하여 고장 분포의 특성치 및 MTTF를 산출하였다. 본 연구의 결과로, 산출된 MTTF 및 모수 추정치를 통해 기대수명을 산출하여 콘덴서의 적정 수명범위를 제시하였다[7]. 박대근 외 3은 철도 선로의 레일 체결시스템에 사용되는 레일 패드의 기대수명을 예측하기 위하여 가속 열 노화 시험을 통해 수명 데이터를 추출하고 와이블 분포를 통하여 수명 데이터에 따른 모수를 추정하였다. 마지막으로, 추정된 모수에서 Bx 수명을 예측하여 레일패드의 수명을 예측하였다[8]. 김종학은 서울도시철도공사(SMRT : Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation) 7·8호선 전동차 주공기압축기(Main compressor)의 현장고장데이터(Field failure data)를 활용하여 확률적으로 정한 주기검사를 수행하는 고정 주기에 일괄적으로 교환하고 있는 주공기압축기의 신뢰도를 평가하였다. 통계적 절차에 의거하여 수명분포분석(Life distribution analysis) 대한 평가를 수행하였다[9].

1.4 연구수행절차



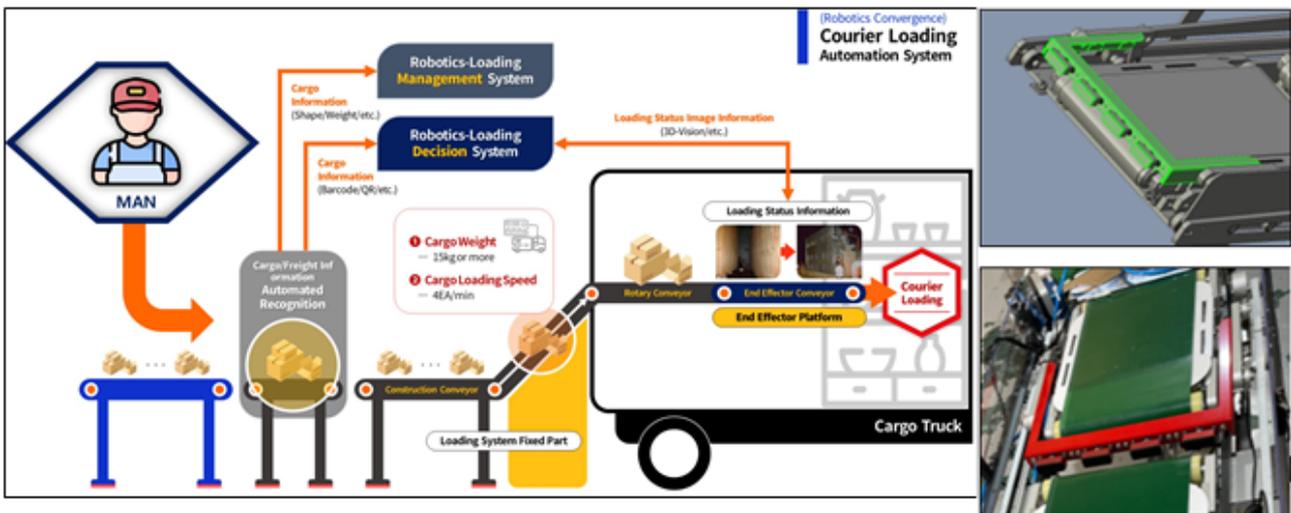
[Figure 2] Overall Process Diagram

[그림 2]는 논문의 전체적인 구성을 나타내고 있다. 먼저 대상인 상차 시스템의 공압 그리퍼를 대상으로 현장의 정비이력 데이터에서 고장 데이터를 추출하였다. 다음으로는 수명데이터의 고장 패턴과 유사한 고장 분포를 Anderson-Darling 적합도 검증을 통해 고장 분포로 적절한 Weibull 분포를 선정하였고, 그에 따른 분포의 모수를 최대 우도법(Maximum Likelihood Estimation)을 통하여 추정하였다. 마지막으로, 본 연구의 결과인 추정된 형상 모수와 척도 모수를 사용하여 신뢰성 있는 부품소요량을 산출하였다.

2. 로봇 기반 화물 상차 시스템 개요 및 신뢰성 분석 프로세스 구축

2.1 상차시스템 구성

본 장에서는 “로봇 기반 화물 상차시스템”의 핵심장비 및 시스템의 개요에 대해서 설명한다. “로봇 기반 화물 상차시스템”은 현재 주식회사 N사에 개발하고 있는 장치로써, 화물을 식별하여 선출 순서의 계산 및 크기와 무게를 고려한 적재위치를 선정한다. 다음 컨베이어를 통하여 이송된 화물은 적재 순서가 되면 엔드이펙터로 전달이 되어 엔드이펙터에서 화물에 적절한 적재위치에 화물을 적재하



[Figure 3] Conceptual Diagram of Robot-based loading Cargo System and Pneumatic Gripper

<Table 1> Core Equipments Hierarchy of Robot-based loading Cargo System

System	Robot-based loading Cargo System								
Sub-system	Main controller	Endeffector	Conveyor	Cargo information recognizer	Sequential sorting machine	Loading decision making	Loading Task Management System	Sensing	Prediction Maintenance
Component	Loading System Controllers	Endeffector Loading status Confirmation imaging device Endeffector Conveyor	Rotation Conveyor Vertical Conveyor Fixed unit of loading system	Image-based Cargo information recognition device Vertical Conveyor Freight distributor	Sequential sorting machine Sequential algorithm	Cargo Imaging Damage status recognition device Loading status analysis device decision-making device	Cargo Information serch device Loading system monitoring machine	Danger detection Sensors Fault detection Sensors	Parts History Maintenance Management device Fault management device Data-driven predictive maintenance device

는 시스템이다. [그림 3]은 이러한 개념도를 도시하였다. 이러한 신기술 시스템을 운용하는데에는 메인 컨트롤러, 엔드이펙터, 컨베이어, 화물정보인식부, 순로구분기, 적재 의사결정시스템, 상차작업관리시스템, 센싱시스템, 예지 정비시스템과 같은 핵심 장비 및 서브시스템으로 구성되어 있으며, <표 1>에서 이를 도시하였다. 본 논문에서는 엔드이펙터 서브시스템의 컴포넌트인 공압 그리퍼에 관하여 신뢰성 분석을 진행하였다.

2.2 로봇 기반 화물 상차 시스템 현장 데이터 정제 및 추출

<표 2>와 같이 N사에서 받은 공압그리퍼의 고장이력 데이터를 취합하였다. 취합된 데이터는 2020년 1월 9일부터 2023년 1월 2일 까지의 완전데이터이다. 취합된 데이터에서 공압그리퍼의 주기능인 공압 기능의 이상을 분석하기 위해 'Low pressure' 고장코드를 고려하여 공압그리퍼의 정비이력을 정제하였고 14개의 데이터를 도출하였다.

<Table 2> Pneumatic gripper failure status

No.	Failure status	Task	Operate time (h)
1	Low pressure	Replacement	24376.1
2	Low pressure	Replacement	10195.7
3	Low pressure	Replacement	22397.7
4	Low pressure	Replacement	29894.7
5	Low pressure	Replacement	15036.1
6	Low pressure	Replacement	27349.0
7	Low pressure	Replacement	29545.8
8	Low pressure	Replacement	24286.1
9	Low pressure	Replacement	19521.2
10	Low pressure	Replacement	25679.6
11	Low pressure	Replacement	22531.4
12	Low pressure	Replacement	32337.8
13	Low pressure	Replacement	22775.7
14	Low pressure	Replacement	16426.4

2.3. MTTF와 부품소요량의 관계 및 도출 방안

시스템을 운용하는데 있어서 운영사는 시스템을 유지하는데 필요한 부품소요량을 산출하는 것이 시스템의 가용도 측면에서 유리하다. 예비품이 없으면 부품의 고장으로 인해 서비스가 중단되므로 고장에 대비한 예비품을 마련해놓는 것이 효율적인 운영이 될 수 있다. 이러한 부품소요량을

산출하기 위해서 보통 현장에서는 운용시간/MTTF로 부품 소요량 및 예비품수량을 계산하고 있다[10]. 하지만 MTTF는 어디까지나 평균적인 수치로 나타나기 때문에 오차가 발생하기 쉽고, 세밀한 분석이 어렵다. 본 논문에서는 이를 개선하기 위해서 현장에서 사용된 고장데이터를 이용하여 모수를 추정하고, 추정된 모수로 랜덤 데이터를 생성하여 발생할 수 있는 정해진 기간에 따라 고장 횟수 및 부품의 소요량을 구하는 연구를 진행하였다.

3. MTTF 및 부품소요량 도출 절차 및 산출물

3.1 미니탭 신뢰성 분석을 통한 MTTF 도출

<표 2>와 같은 14개의 고장 데이터를 대상으로 상용 통계 패키지인 Minitab을 사용하여 신뢰성 특성을 분석하였다. 공압그리퍼의 고장 데이터를 바탕으로 와이블분포, 대수정규분포, 지수분포, 대수로지스틱분포 모형을 대상으로 적합도 검정을 수행하였다. 적합도 검정 결과는 [그림 4] 및 <표 3>과 같다. Anderson Darling 통계량은 와이블 분포와 대수로지스틱 분포가 가장 적합한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 기계 피로에 의한 고장률의 증가하는 메커니즘을 고려할 때 이러한 현상에 일반적으로 널리 사용되는 와이블 분포를 공압그리퍼의 고장을 설명하는 모형으로 선정하였다.

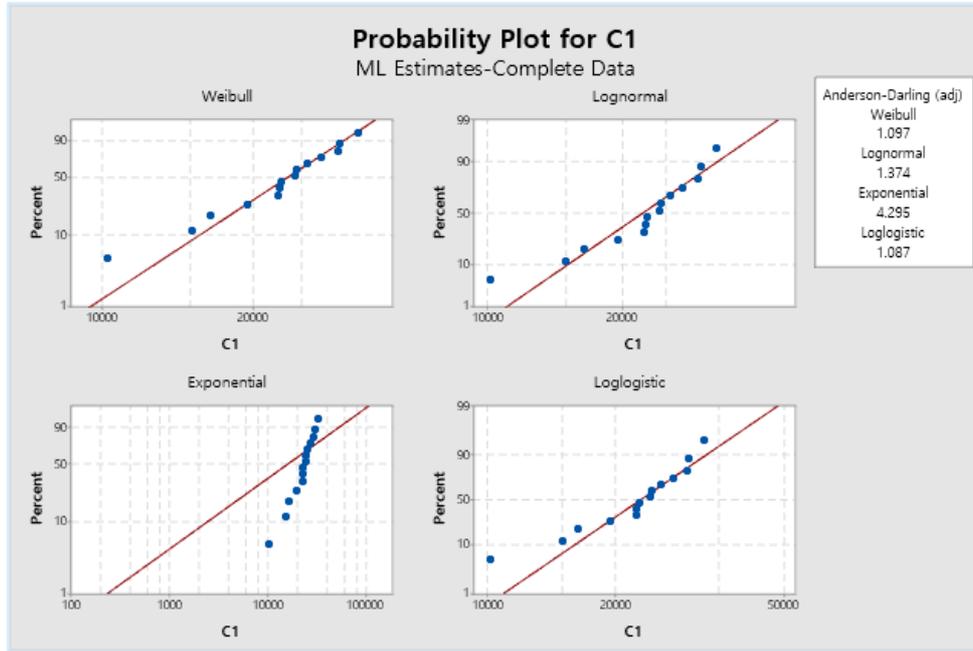
<Table 3> Pneumatic gripper failure data goodness-of-fit test results (1)

Distribution	Anderson-Darling (adj)
Weibull	1.097
Lognormal	1.374
Exponential	4.295
Loglogistic	1.087

적합도 검정을 통해 선택된 와이블 분포에 대해서 최우 추정법(The method of maximum likelihood)을 사용하여 모수를 추정하였다. 형상모수(α) 및 척도모수(β)에 대한 추정결과는 다음의 <표 4>와 같다.

<Table 4> Pneumatic gripper weibull parameter estimates

Parameter	Estimate	Standard Error	95.0% Normal CI	
			Lower	Upper
Shape	4.65014	1.01242	3.03489	7.12506
Scale	25236.9	1520.76	22425.6	28400.7



[Figure 4] Pneumatic gripper failure data goodness-of-fit test results (2)

추정된 와이불분포의 신뢰성 특성값은 <표 5>와 같다. <표 5>에 의하면 공압그리퍼의 고장은 평균 23074.4시간(h)에 한 번씩 발생하며, 이에 대한 표준오차는 5646.68시간(h)이다. 신뢰수준 95%로 보수적으로 해석하면 20307시간(h)에 한 번씩 고장이 발생할 것으로 예측할 수 있다.

<Table 5> Pneumatic gripper weibull Characteristic value

	Estimate	Standard Error	95.0% Normal CI	
			Lower	Upper
Mean(MTTF)	23074.5	1504.13	20307	26219
Standard Deviation	5646.68	999.560	3991	7988
Median	23324.2	1572.81	20436	26619
First Quartile(Q1)	19305.3	1846.32	16005	23285
Third Quartile(Q3)	27073.3	1557.87	24185	30305
Interquartile Range (IQR)	7768.02	1468.98	5362	11253

3.2 평균치를 구하여 신뢰성기반 부품소요량 산출

확률 분포를 이용한 부품소요량의 산출은 추정된 고장 분포의 모수에 따라 난수를 이용하여 확률적인 고장 발생 시점을 랜덤 데이터로써 예측하고 또 그 고장 발생 시점부

터 다음 고장 시점을 예측하는 방식을 반복한다. 확률 분포의 추정된 모수에 따라 고장이 발생하는 횟수와 연도를 예측하는 시뮬레이션을 5번 반복하여 그 평균치를 이용하므로 확률 분포를 이용한 부품소요량 계산은 평균치인 MTBF를 이용하여 단순 산술로 계산하는 방법보다 더 현실적으로 고려한 방법이라고 할 수 있다. 단, 확률 분포 함수는 와이불 분포만을 사용하며 아이템이 수리할 경우 완전 수리로 가정한다. 각 구성품 별 고장분포 함수와 모수를 알고 있는 경우에만 사용이 가능하다. 확률 분포를 이용한 부품소요량 예측 절차는 다음과 같다.

아이템의 고장시간을 산정하기 위해 우리가 원하는 고장 확률 분포를 활용하기 위해서 연속형 확률변수를 X, 그의 분포함수를 F라 하자.

여기에서 F는 $(0 < F(x_1) \leq F(x_2) < 1, x_1 < x_2)$ 가 된다. 그러면 다음의 절차는 분포함수 F를 가지는 확률변수 X를 발생하게 된다.

- (1) $U[0,1)$ 의 난수를 발생한다.
- (2) $X = F^{-1}(U)$ 로 놓고 계산한다.
(F^{-1} 은 F의 역함수, $0 \leq U < 1$)

여기에서 F의 범위가 $U[0,1)$ 이기 때문에 $F^{-1}(U)$ 는 항상 존재한다[11]. 이 식을 와이불 분포에 적용시키면 다음과 같은 고장 시간 t를 발생하는 공식이 만들어진다.

$$t = -\beta \ln(1 - U)^{\frac{1}{\alpha}}$$

(α : 형상모수 β : 척도 모수)

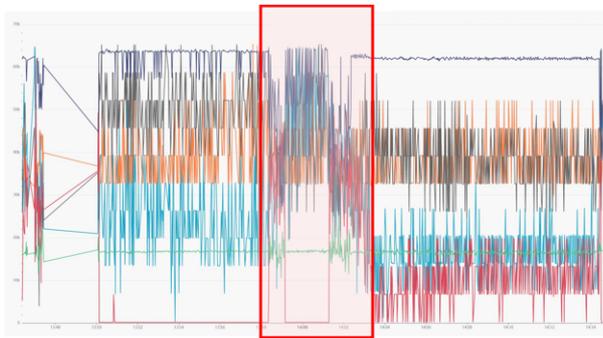
<Table 6> Pneumatic gripper parts requirement estimation results

year /no.	1yr	2yr	3yr	4yr	5yr	6yr	7yr	8yr	9yr	10yr
1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
2	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
4	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
5	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
Sum	2	1	0	2	2	1	2	2	1	1
Avg	0.4	0.2	0	0.4	0.4	0.2	0.4	0.4	0.2	0.2

위 공식을 사용하여 분포 분석을 통하여 추정된 형상모수 4.65014, 척도모수 25236.9를 대입하여 랜덤 데이터를 추출하고, 10년 동안의 기간에서 시뮬레이션을 5번 수행하여 부품소요량의 발생 횟수를 예측하였다. 예측된 결과는 합산하여 년도별 평균 부품소요량을 추정하였다. 결과는 <표 6>과 같이 산출되었다.

3.3 LSTM 모델기반의 MTTF 데이터 검증

본 연구에서는 MTTF 추정 결과를 검증하기 위하여, LSTM 모델을 활용하였다. LSTM 모델은 딥러닝 기반으로 시계열데이터의 특징을 추출하는 모델로써, 범용적으로 예지정비에 활용되는 모델이다. 본연구에서 활용한 데이터 또한 하나의 시계열 데이터라고 간주할 수 있기 때문에, 난수 추출 데이터를 활용한 예지정비 인공지능 기법인 LSTM 모델을 기반으로, Low pressure에 대한 이상 데이터 감지를 수행한 결과, 22301.2시간에 해당하는 결과를 얻었다. 따라서, 본 연구결과인 23074.4시간과 비교하였을 때 유사하므로 유의미하다는 결과를 얻었다고 판단된다. [그림 5]는 LSTM 모델을 사용하여 분석하는 결과를 보여준다.



[Figure 5] Analysis of life data based on LSTM model

4. 결론

현대 사회에서는 사회구조의 급격한 변화와 최근 코로나 19 팬데믹으로 인해 비대면 및 배송 서비스 시장이 폭발적으로 성장하였다. 늘어난 택배 물동량을 인력에 의존하고 있는 현대에서는 택배 상하차 작업으로 인하여 작업자들의 부상 및 인명사고, 피로도의 증가 등의 여러 가지 문제가 발생되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 국내 n사에서는 “로봇 기반 화물 상차시스템”을 개발 중에 있다. “로봇 기반 화물 상차시스템”과 같은 신기술 시스템을 개발하는데 있어, 정량적인 신뢰성 목표가 설정되어야 향후 시스템이 개발되고 나서 유지보수 비용 및 연간 비용과 부품 소요량을 산출하는 데 도움이 되어 효율적인 운용 및 개발을 가능하게 하기 때문이다.

본 논문에서는 “로봇 기반 화물 상차시스템”의 공압 그리퍼를 대상으로 현장 데이터를 통해 신뢰성 분석을 진행하였다. 고장 데이터와 유사한 분포를 적합도 검정을 실시하고 분포의 모수와 MTTF를 추정하였다. 추정된 모수와 분포의 특성치를 통하여 확률적인 고장 발생 시점을 랜덤 데이터로써 예측하고 또 그 고장 발생 시점부터 다음 고장 시점을 예측하는 방식을 반복한다. 확률 분포의 추정된 모수에 따라 고장이 발생하는 횟수와 연도를 예측하는 시뮬레이션을 5번 반복하여 그 평균치를 이용하여 기존에 현장에서 사용되던 평균치 MTTF를 이용하여 단순 산술로 계산하는 방법보다 현실적인 확률을 반영한 방법으로 제안하였다. 마지막으로 부품소요량의 시뮬레이션 결과를 표로 도시하였다. 고장수명주기와 부품 교체시기를 제시함으로 제품의 파손으로부터의 상품안전 및 작업자의 안전성을 확보를 통해 전체 시스템 신뢰성을 확보하는 방안을 제시하였다.

5. References

- [1] T. H. Park, M. R. Lee(2020), "The effectiveness of shopping search ads: The role of result type and product assortment of advertising." Korean Journal of Consumer and Advertising Psychology, 21(4): 633-656.
- [2] H. G. Park, C. H. Min(2021), "A study on factors affecting competitiveness of cold chain logistics." Journal of Management & Economics(MERI), 43(4):135-155.
- [3] S. G. Kim(2019), "플랫폼 노동과 산업보건-특수형태근로종사자의 안전보건실태_1. 택배기사." Korea Industrial Health Association, 374:13-26.
- [4] J. Y. Cho, B. Y. Song(1992), "신뢰성 보증을 위한 관리체계." The Journal of Korea Institute of Electronics Engineers, 19(2):23-32.
- [5] C. K. Park, J. M. Ma(2020), "A study on the prediction of failure rate of Airforce OO guided missile based on field failure data." Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 21(7): 428-434.
- [6] H. J. Cho, et al.(2016), "Reliability improvement of an auto transfer switch." Journal of Applied Reliability, 16(2):162-170.
- [7] J. H. Han, C. H. Bae, J. S. Koo(2014), "A study on the reliability prediction and lifetime of the electrolytic condenser for EMU inverter." Journal of the Korean Society of Safety, 29(1):7-14.
- [8] D. G. Park, J. H. Kim, J. T. Lee, Y. J. Kang(2013), "Prediction of future lifetime using reliability analysis method about rail rubber pad." Spring Conference of the Korean Society for Railway, 47:41-48.
- [9] J. H. Kim(2016), "A study on the minimum cost replacement policy for the main compressors of SMRT Lines 7 and 8." Doctoral dissertation, Department of Railroad Systems, Graduate School of Railroad, Seoul National University of Science and Technology.
- [10] H. J. Lee, K. K. Jung, J. H. Kim, J. S. Lee, M. J. Lee(2016), "Study of optimal Maintenance Float(M/F) calculation method." Journal of Applied Reliability, 16(3):192-201.
- [11] Y. S. Kim, Y. B. Chung(2012), "Life testing simulation for reliability prediction." Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering, 35(1):124-131.

저자 소개



김 명 성

현 아주대학교 시스템공학과 석사과정.
관심분야: 모델기반 시스템공학, 신뢰성 공학,
신뢰성 분석 등.
주소: 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206 아
주대학교 성호관 244호.



김 영 민

현 아주대학교 시스템공학과 교수.
관심분야: 자율주행자동차 안전 시스템 구축,
첨단 자율 운송 시스템, 첨단 교통시스템 및 스
마트시티, 스마트물류체계 구축 등.
주소: 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206 아
주대학교 성호관 243호.