

인공지능 기반 건전성 예측 및 관리에 관한 국내 연구 동향 분석

정예은* · 김용수**†

* 경기대학교 일반대학원 산업시스템공학과

** 경기대학교 산업시스템공학과

Analysis of Domestic Research Trends on Artificial Intelligence-Based Prognostics and Health Management

Ye-Eun Jeong* · Yong Soo Kim**†

* Department of Industrial Systems Engineering, Kyonggi University Graduate School

** Department of Industrial Systems Engineering, Kyonggi University

ABSTRACT

Purpose: This study aim to identify the trends in AI-based PHM technology that can enhance reliability and minimize costs. Furthermore, this research provides valuable guidelines for future studies in various industries

Methods: In this study, I collected and selected AI-based PHM studies, established classification criteria, and analyzed research trends based on classified fields and techniques.

Results: Analysis of 125 domestic studies revealed a greater emphasis on machinery in both diagnosis and prognosis, with more papers dedicated to diagnosis. various algorithms were employed, including CNN for image diagnosis and frequency analysis for signal data. LSTM was commonly used in prognosis for predicting failures and remaining life. Different industries, data types, and objectives required diverse AI techniques, with GAN used for data augmentation and GA for feature extraction.

Conclusion: As studies on AI-based PHM continue to grow, selecting appropriate algorithms for data types and analysis purposes is essential. Thus, analyzing research trends in AI-based PHM is crucial for its rapid development.

Key Words: Prognostics Health Management, Fault Diagnosis, Prediction, Artificial Intelligence, Deep Learning

● Received 4 April 2023, accepted 29 April 2023

† Corresponding Author(kimys@kyonggi.ac.kr)

© 2023, Korean Society for Quality Management

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.

* 본 연구는 2023학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

1. 서 론

현재 다양한 산업 분야에서는 고장을 예방하여 생산성 증대 및 유지보수 비용의 절감이 가능한 고장 예지 및 건전성 관리(PHM, Prognostics Health Management)의 필요성이 강조되고 있다. IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)가 제시한 정의에 따르면 PHM은 신호, 측정, 모델, 알고리즘을 활용하여 기계나 시설물 등의 감지된 건강 상태를 평가하여 불량 상태 및 고장 진행을 예측하는 유지보수 및 자산 관리 방법이다.

최근 센서와 인공지능 기술이 발전함에 따라 PHM은 엔지니어링 분야에서 주목받고 있으며(Kim et al., 2022), 분석뿐만 아니라 신뢰성 높은 상태진단과 고장 예지를 통한 유지보수가 가능해지고 있다. PHM 분야에 활용되고 있는 인공지능은 인간의 학습 및 추론과 자연어 이해 등을 모방하여 구현된 컴퓨터 프로그램 기술이다(Ha et al. 2020). 시스템의 상태정보에 인공지능 기법을 적용한 PHM은 시스템의 신뢰성을 높이고 시스템 수명의 연장이 가능하며, 정확한 탐지 및 예측, 자동화로 인한 인력 및 비용 절감과 같은 여러 이점이 존재한다.

PHM을 실현하기 위한 두 가지 접근법에는 모델 기반 접근법과 데이터 기반 접근법이 있다(Fink et al., 2020). 모델 기반 접근법은 시스템의 메커니즘을 파악하여 수학적 모델링을 통해 PHM을 구현하며 데이터 기반 접근법은 시스템에서 측정된 데이터를 분석하여 PHM을 수행한다. 최근 모델 기반 접근법은 고장 데이터 수집의 어려움과 산업 시스템의 복잡성 증가로 인해 어려움을 겪고 있다. 반면 데이터 기반 접근법은 인공지능을 활용하여 장비에 대한 도메인 지식과 물리적 이해도가 적어도 분석이 가능하다는 이점이 있어 모델 기반 접근법보다 더 활발한 연구가 이뤄지고 있다. 따라서 낮은 진입장벽과 높은 성능으로 인해 활발히 연구되고 있는 인공지능 기반 PHM의 연구 동향을 파악하는 것의 중요성은 강조된다(Baik, 2020).

산업현장에서 시스템 규모와 복잡도는 증가하고 있으며, 설비들은 물리적 구성품이 복합적으로 묶인 하나의 시스템이므로 한 부품의 고장은 전체 시스템의 손실로 이어질 수 있다(Kim et al., 2017). 이에 따라 산업현장에서는 효율적인 유지보수로 시스템 관리의 신뢰성을 향상시키며 고장으로 인한 시간과 비용을 최소화하는 인공지능 기반 PHM 적용이 필수적으로 요구된다(Kim et al., 2023). 본 연구는 PHM 기술이 활발히 연구되고 있는 산업 분야와 적용된 인공지능 기술을 파악하여, 인공지능 기반 PHM의 연구 동향을 분석하는 것을 목적으로 한다.

인공지능 기반 PHM 기술은 제조업, 항공기, 철도, 발전소, 자동차 등 다양한 산업 분야에서 활용되며, 데이터의 유형, 대상 아이템, 산업 분야, 예측 방법, 사용된 인공지능 기법 등의 기준과 분류체계를 수립하여 분류할 수 있다. PHM 관련 연구는 산업 분야에서 다방면으로 활용되며 다양한 인공지능 기법이 적용되므로 관련 연구의 분류 및 정리된 결과를 통해 전반적인 동향과 특징을 파악할 수 있다. 또한 인공지능 기반 PHM 기술의 연구 동향을 분석하여 국내 산업에서 적용되고 있는 기법들의 현황을 파악하고, 다양한 분야에서 효율적인 연구 방향성을 설정할 수 있다. 이는 국내 사업에서 인공지능 기반 PHM 기술 발전에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 기대된다.

2. 연구방법 및 문헌 분류 기준

2.1 연구 과정

본 연구는 인공지능 기반 PHM의 연구 동향을 파악하고 결론 및 시사점을 도출하는 것을 목표로 Figure 1과 같은 4단계 프로세스를 수행하였다. 먼저 첫 번째 단계는 인공지능 기반 PHM 관련 논문을 수집 및 선별하는 단계이며

검색된 논문 중 목적에 적합한 논문을 선정한다. 두 번째 단계는 논문 분류 기준을 수립하는 단계이며 수집된 논문을 분석하여 연구 목적 및 분류표에 맞게 논문을 분류한다. 세 번째 단계는 분류된 논문을 정량적으로 분석하여 분류된 논문의 분야 및 기법에 따른 연구 동향을 파악하는 단계이다. 네 번째 단계는 분석 결과를 바탕으로 연구 결과를 도출하는 단계이다. 4단계의 과정을 바탕으로 세부적인 연구를 수행하였다.

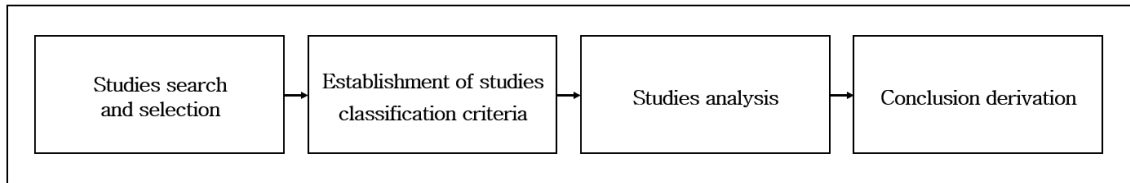


Figure 1. Research Process

2.2 대상 문헌 설정

본 연구에서는 최신 동향을 반영하기 위해 2018년부터 2022년까지 5년 이내 KCI에 등재된 국내 학술논문을 대상으로 DBpia와 RISS를 활용하여 문헌을 수집하였다. 논문 수집은 Prognostic, Health management, Remaining Useful Life, Predictive maintenance, Condition based Maintenance, Anomaly Detection, Fault diagnosis, Anomaly detection과 같은 건전성 예측 및 관리에 관한 단어와 Artificial Intelligence, Machine Learning, Deep Learning, Neural Network, Algorithm과 같은 인공지능 관련 단어를 중심으로 수집하였다. 여러 산업 분야에서 인공지능 기반 PHM이 적용된 제품, 시설물, 공정 등에 대한 논문 수집을 수행하였으며, 의료 분야에서 인간의 질병, 결함에 관한 이상 진단 관련 연구는 제외하였다. 인간의 질병에 관한 이상 진단은 기계 및 시스템적 접근법과는 차이가 있으며, 제조 및 산업 분야에서 필요한 데이터 유형 및 분석 방법과도 차이가 있다고 판단하였기 때문이다.

2.3 문헌 분류 기준 및 설명

수집한 125편의 논문들을 논문명, 연구 대상, 연구 대상 범위, 산업 분야, 연도, 학회지, 주요 기법, 기법이 적용된 단계, 기법 비교 여부, 데이터 유형, 키워드 등에 따라 정리하였고 이를 기반으로 인공지능 기반 PHM 연구의 분류체계를 수립한 결과는 Figure 2와 같다.

인공지능 기반 PHM이 적용된 논문을 진단과 예지로 분류하고, 예지는 고장 예지와 잔여 수명 예지로 구분하였다. 또한 PHM 연구 과정의 단계에서 어떤 인공지능 기법이 적용되었는지 파악하기 위해 데이터 처리, 데이터 증강, 특징인자 추출의 단계별로 분류하여 분석하였다. 진단 과정에서도 인공지능 기법이 진단에만 적용된 경우와 데이터 전처리와 함께 진단에서 적용된 경우를 분류하여 분석하였다. 연구를 분류표에 기반하여 분류한 후 산업 분야, 진동 처리 기법, 연구 대상 등에 따라 세분화하였다.

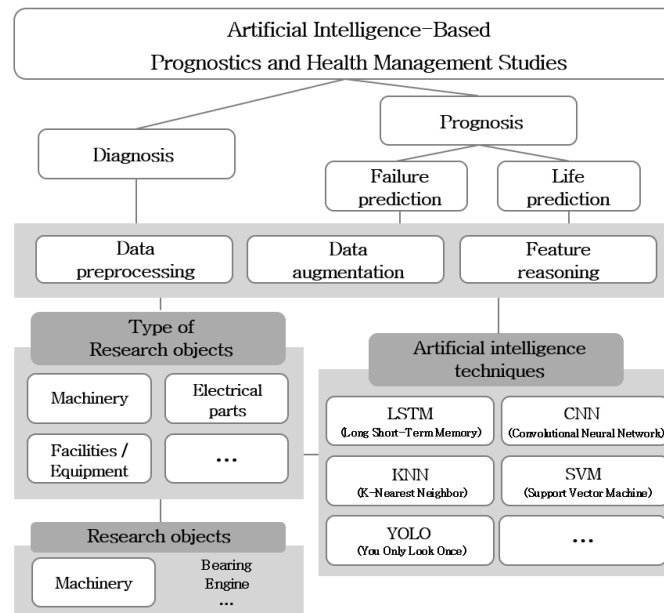


Figure 2. Classification of Collected Artificial Intelligence-Based PHM Studies

3. 인공지능 기반 PHM 문헌 분류 및 연구동향 분석

본 연구에서는 2장에서 수립한 분류표를 기반으로 인공지능 기반 PHM의 세분화된 연구 동향을 분석하였다. Figure 3과 같이 전체 125편의 논문을 진단과 예지로 분류한 결과, 진단으로 분류된 논문이 전체의 70%를 차지하고 고장 예지는 16%, 수명 예지는 14%를 차지하였다.

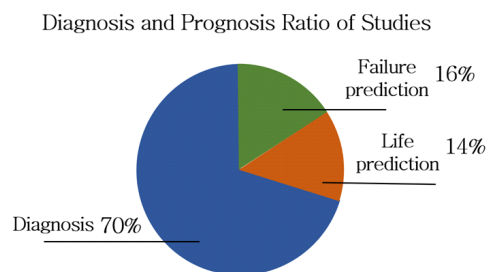


Figure 3. Diagnosis and Prognosis Ratio of Studies

3.1 진단으로 분류된 문헌 분석 및 연구 동향

진단으로 분류된 88편의 논문을 연구 대상과 범위, 진단에 쓰인 기법, 연구 단계에서 쓰인 기법, 기법 비교 여부, 저자, 연도로 분류하여 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Studies Classified by Diagnosis

Type of Research objects	Research objects	AI techniques applied to diagnosis	AI techniques applied at the research stage			Comparison of Techniques	Author	Year
			Data pre-processing	Data augmentation	Feature reasoning			
Machinery	connected Part for Railway Vehicle	CNN	–	–	–	O	Kwon et al.	2020
	Air Compressors	LSTM-AE	–	–	–	–	Kang et al.	2022
	Rotating Machine	CNN	STFT	–	–	–	Kang et al.	2022
	Radiator	LSTM-AE	–	–	–	O	Lee et al.	2020
	Power Driving System	CNN	CWT, t-SNE	–	–	–	Kim et al.	2021
	Chain Sprocket Drive Unit System	ANN	FFT	–	–	–	Back et al.	2020
	Blade	KNN	PCA	–	–	O	Park et al.	2021
	Compressor	SVM	–	–	–	–	Kim et al.	2021
	Electric motor	CNN	FFT	–	–	–	Choi et al.	2019
	Machine tool	CNN (Conv1D)	–	–	–	–	Kim et al.	2019
	Motor	DT-CNN	FFT	GAN	–	–	Han et al.	2020
	Blade	Faster R-CNN	–	–	–	–	Jang et al.	2019
	Bearing	Convolutional LSTM	–	–	–	O	Kim et al.	2022
	Motor	LSTM	–	–	–	–	Lee et al.	2020
	Electric motor	K-means Clustering, CNN	FFT	–	–	O	Choi et al.	2020
	Electric motor	CNN	–	–	–	–	Goh et al.	2020
	Gearbox	KNN	STFT	–	LDA	–	Park et al.	2020
	Bearing	ANN	FFT	–	–	–	Jung et al.	2022
	Chain Transmission System	Convolutional Autoencoder	STFT	–	–	–	Lee et al.	2021
	Propeller	GoogLeNet	Wavelet transform	–	–	–	Baek et al.	2022
	Air Compressors	LSTM	–	–	–	–	Kim et al.	2022
	Centrifugal Pump	Random forest	–	–	–	–	Kim et al.	2021
	Camera	VGGNet	–	–	–	–	Lee et al.	2022

Type of Research objects	Research objects	AI techniques applied to diagnosis	AI techniques applied at the research stage			Comparison of Techniques	Author	Year
			Data pre-processing	Data augmentation	Feature reasoning			
	Engine	Ensemble	K-means Clustering	–	–	–	Kim et al.	2020
	Rotary machine	GAN, Bayesian Neural Network	–	Autoencoder	–	–	Kwak et al.	2022
	Bearing	KNN	FFT	–	–	O	Ju et al.	2020
	Centrifuge	LSTM	Wavelet transform	–	–	O	Lee et al.	2022
	Radar Waveguide	CNN (Conv1D)	–	–	–	–	Kim et al.	2022
	Hydraulic pump	CNN	–	–	–	O	Jung et al.	2021
	Electric motor	One-Class SVM,	Wavelet transform, Autoencoder	–	–	–	Jang et al.	2021
	Air Compressors	Autoencoder	–	–	–	–	Lee et al.	2021
	Bearing	SVM	FFT, PCA	–	–	–	Go et al.	2021
	Valve	CNN (Conv1D)	FCN	–	–	–	Yoo et al.	2021
	Sensor	MobileNetV2	–	–	–	O	Yang et al.	2020
	Gearbox	Naive Bayes	FFT	–	–	–	Hwang et al.	2020
	Rotary machine	Autoencoder, Random Forest	STFT	SMOTE	–	O	Moon et al.	2022
	Valve	CNN	–	–	–	–	Park et al.	2020
	Electric motor	CNN, K-means Clustering	FFT	–	–	O	Choi et al.	2020
	Elevator	SVM	–	–	GA	–	Min et al.	2022
	Rotary machine	CNN	–	–	–	–	Lee et al.	2020
	Rotary machine	K-means Clustering	FFT	–	–	–	Yoon et al.	2022
	Induction motor	KNN	FFT, PCA	–	–	–	Han et al.	2019
	Turbofan engine	Kalman Filter	–	–	–	–	Han et al.	2022
	Pressure regulator	Gradient Boosting	–	SMOTE	–	O	Seo et al.	2020
	Electric motor	CNN	CWT, LRP	–	–	–	Han et al.	2022

Type of Research objects	Research objects	AI techniques applied to diagnosis	AI techniques applied at the research stage			Comparison of Techniques	Author	Year
			Data pre-processing	Data augmentation	Feature reasoning			
	Motor, pump	KNN	–	–	–	–	Kim et al.	2018
	pump	CNN (Conv1D)	–	–	–	–	Kim et al.	2022
	Pipe	SVM	FFT	–	–	–	Kim et al.	2018
	Gearbox	SVM, DNN	DWT	–	–	–	Baek et al.	2021
	Motor	DNN	FFT	DCGAN	–	–	Song et al.	2019
	Bearing	Random forest	DBSCAN	–	–	–	Jung et al.	2018
	Engine	MLP	PCA	–	–	–	Sim et al.	2022
	Bearing	Random forest	–	–	–	O	Wang et al.	2022
	Bearing	ANN	–	–	GA	–	Jeon et al.	2020
	Rotary machine	ANN	STFT	–	–	–	Nam et al.	2020
	Bearing	SVM	FFT	–	GA	–	Kim et al.	2018
	Pipe	SVM	–	–	–	–	Park et al.	2021
	Engine	GMM	t-SNE	–	–	–	Kim et al.	2020
	3D printer	DenseNet	–	–	–	–	Lee et al.	2021
Electrical parts	Multiple Open-Switch	ANN	ADALINE	–	–	–	Kim et al.	2021
	Spin	CNN	–	–	–	O	Yoon et al.	2021
	cable	ResNet18	–	–	–	–	Hyun et al.	2022
	Lithium-ion battery	PCA	–	–	–	–	Lee et al.	2020
Facilities/ Equipment	Structure	DCNN	–	DCGAN	–	–	Jung et al.	2019
	thermal power plant	PCA, fastICA	–	–	–	O	Chae et al.	2021
	linear motion device	CNN	VGG	–	–	–	Yun et al.	2019
	Manufacturing Facility	Autoencoder	–	–	–	–	Kim et al.	2022
	nuclear power plant	Random forest MD	–	–	–	O	Lee et al.	2022
	Structure	Ensemble	–	–	–	–	Shin et al.	2021
	Substation	YOLOv3	–	–	Mobile Net	O	Oh et al.	2020

Type of Research objects	Research objects	AI techniques applied to diagnosis	AI techniques applied at the research stage			Comparison of Techniques	Author	Year
			Data pre-processing	Data augmentation	Feature reasoning			
Infrastructure	Road	Fast R-CNN	–	–	–	O	Shim et al.	2019
	Road	Faster R-CNN	–	–	–	O	Kim et al.	2019
	Railway	YOLOv3	–	–	–	–	Jung et al.	2020
Material/Component	concrete	SGD	–	–	–	O	Shim et al.	2020
	Metal	YOLOv4	–	–	–	–	Lee et al.	2022
	Nut	CNN (Conv1D)	–	–	–	–	Hwang et al.	2022
	Tire	YOLOv3	NCA	–	–	–	Kim et al.	2022
	Metal	YOLOv2_tiny_m	–	–	–	O	Yi et al.	2020
	Rubber Seal	CNN	–	–	–	–	Lee et al.	2022
	Silica Concentrate	Lasso Regression–	TadGAN	–	SHAP	–	Lee et al.	2022
	Circuit Board	Decision Tree	t-SNE	–	–	–	Kim et al.	2022
	Spot Welding	CNN	–	–	–	–	Kim et al.	2020
	concrete	DNN	–	–	–	–	Shim et al.	2021
	IoT device	MD	PCA	–	–	–	Kye et al.	2021
Process	Welding process	YOLOv5s	K-means Clustering	–	–	O	Kim et al.	2021
	Manufacturing process	LSTM	–	–	–	–	Song et al.	2021
Sensor	Sensor	LSTM	–	–	–	–	Lee et al.	2019
	Sensor	SVM, CNN	–	–	GA	–	Yang et al.	2018

3.1.1 연구 대상에 따른 분류

진단으로 분류된 논문에서 가장 많은 연구 대상이 속한 산업 분야를 파악한 결과는 Figure 4와 같다. 특정 분야에 국한되지 않고 다양한 산업 분야에서 적용할 수 있는 연구 대상이 가장 많았으며 시설 및 설비, 제조업, 선박 분야에서 꾸준히 연구되고 있다. 그 외에도 철도, 차량, 발전소, 군사, 도로, 드론, 항공, 공기조화, 배관 등 다양한 산업 분야에서 연구되고 있는 것을 확인할 수 있다.

연구 대상의 범위를 세부적으로 조사하여 Figure 4와 같이 시각화하였다. 기계류가 가장 많이 연구되었으며, 다음으로는 재료 및 부품류와 시설 및 설비류에서 많은 연구가 이루어졌다. 가장 많은 연구가 진행된 기계류의 연구 대상은 베어링, 전동기, 회전기계 등으로 구성된다.

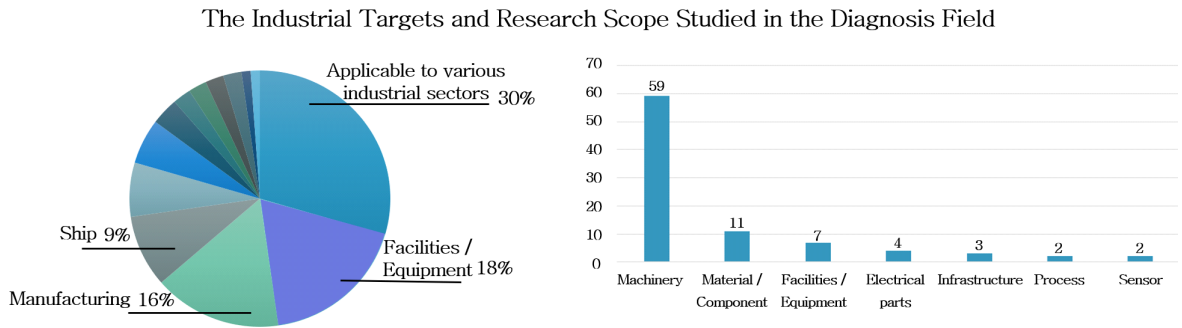


Figure 4. The Industrial Targets and Research Scope Studied in the Diagnosis Field

3.1.2 인공지능 기법이 적용된 단계에 따른 분류

인공지능 기법이 적용된 단계에 따라 상태진단, 데이터 처리, 데이터 증강, 특징추출로 논문을 분류한 결과는 Figure 5와 같다. 상태진단에 인공지능 기법이 적용된 연구와 상태진단 및 데이터 처리에 함께 기법이 적용된 연구가 가장 많았다. 그 외 진단과 함께 데이터 처리, 데이터 증강, 특징추출이 적용된 연구는 전체 진단 연구의 3% 정도로 적은 비율을 차지했다.

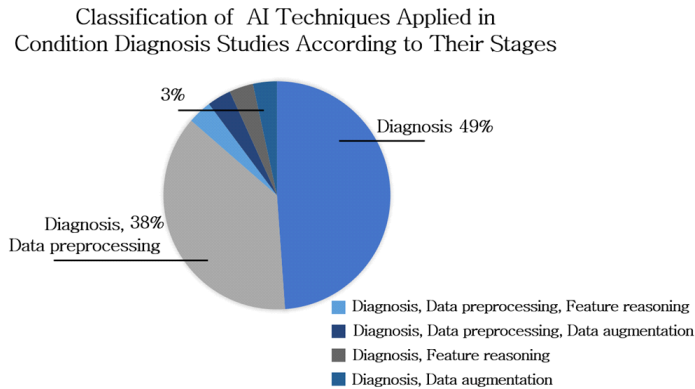


Figure 5. Classification of AI Techniques Applied in Condition Diagnosis Studies According to Their Stages

Table 1에서 상태진단에 적용된 다양한 기법 중 가장 많이 사용되는 인공지능 기법은 CNN임을 알 수 있다. CNN가 적용된 연구 대상의 범위는 모두 기계류였으며 밸브, 펌프, 전동기 등의 연구 대상이 포함된다. 상태진단 및 데이터 처리는 차원 축소, 데이터 성분 크기 추출, 노이즈 제거, 독립성분 개수 결정, 이미지 분할 기법으로 데이터를 처리하고 상태진단을 한다. 상태진단에는 CNN과 KNN이 가장 많이 활용되며 데이터 처리는 상태진단을 위해 PCA, FCN, Autoencoder, LDA 등 다양한 기법으로 데이터를 변환하였다.

Figure 6은 진동 데이터에 적용된 주파수 분석 알고리즘 기법의 비율을 보여준다. FFT는 실시간 처리와 대규모 데이터 처리가 용이하여 가장 높은 비율을 차지하였으나, 최근에는 불규칙한 성분을 추출할 수 있는 CWT, WT, DWT와 같은 웨이블릿 변환 기법이 주목받고 있다. 2021년 이후 웨이블릿 변환을 활용한 연구가 증가하고 있는 것으로 나타났다. 진동 및 센서 데이터를 주파수 분석 알고리즘을 사용하여 이미지로 변환하고 인공지능을 적용하는

방법은 시간 정보와 주파수 정보를 함께 고려할 수 있어 꾸준히 활용되고 있다. 데이터 처리 단계에서는 진동 처리 이외에도 DCGAN 기법을 활용한 이미지 증강, 유전알고리즘 및 MobileNet을 활용한 특징인자를 추출 등 다양한 기법이 적용된다.

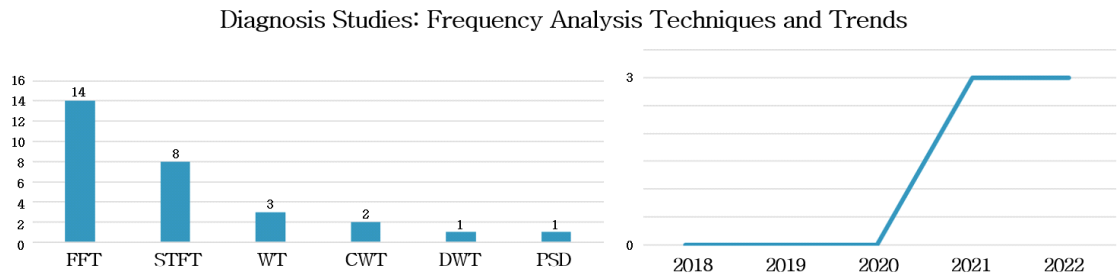


Figure 6. Diagnosis Studies: Frequency Analysis Techniques and Trends

3.2 예지로 분류된 문헌 분석 및 연구 동향

예지로 분류된 37편의 논문 중 고장 예지로 분류된 20편과 수명 예지로 분류된 17편을 연구 대상, 범위, 예지에 적용된 기법, 연구 단계에서 적용된 기법, 기법 비교 여부, 저자, 연도로 분류하여 Table 2와 Table 3에 정리하였다.

Table 2. Studies Classified by Failure Prediction

Type of Research objects	Research objects	AI techniques applied to Failure prediction	AI techniques applied at the research stage			Comparison of Techniques	Author	Year
			Data pre-processing	Data augmentation	Feature reasoning			
Machinery	Bearing	DNN	Wavelet transform	–	–	O	Lee et al.	2019
	Motor	LSTM	–	SMOTE	–	–	Ko et al.	2021
	Bearing	Conv1D, MLP	FFT, PCA	–	–	–	Kim et al.	2022
	Gas Pipe	FOSM	–	GAN	–	–	Kim et al.	2020
	Robot Arm	Seq2Seq	–	–	–	–	Lee et al.	2019
	Motor	KNN	–	–	–	–	Lim et al.	2021
	Vehicle	LSTM-Autoencoder	–	–	–	–	Jang et al.	2020
	Electric motor	DT-CNN	FFT	–	–	O	Han et al.	2020
	Pump	MLP	–	–	–	–	Cho et al.	2022
Electrical parts	SMPS	SVM	PCA	–	–	–	Yoo et al.	2020
	Capacitor	LSTM	–	–	–	O	Park et al.	2020
	Lithium-ion battery	LSTM	–	–	–	O	Kwon et al.	2019

Type of Research objects	Research objects	AI techniques applied to Failure prediction	AI techniques applied at the research stage			Comparison of Techniques	Author	Year
			Data pre-processing	Data augmentation	Feature reasoning			
Facilities/ Equipment	Heavy Oil Combined Heat and Power Boiler	MD	-	-	-	-	Kang et al.	2020
	air conditioning facilities	Markov decision process	-	-	-	-	Park et al.	2022
	switchboard	CNN	-	-	-	-	Lee et al.	2020
	Combustion Gas Analyzers	Autoencoder	PCA	-	-	O	Ko et al.	2022
Material/ Component	filter	DNN	K-means Clustering	-	-	O	So et al.	2019
	filter	LSTM-RNN	-	-	-	-	Lee et al.	2021
	Mooring Line	Holt-Winters	-	-	-	O	Kim et al.	2018
weaponry	Missile	XGBoost, LightGBM, Catboost	-	CTGAN, SMOTE	-	O	Lee et al.	2022

Table 3. Studies classified by Life prediction

Type of Research objects	Research objects	AI techniques applied to Life prediction	AI techniques applied at the research stage			Comparison of Techniques	Author	Year
			Data pre-processing	Data augmentation	Feature reasoning			
Machinery	Turbofan Engine	KNN	PCA	-	-	-	Kim et al.	2021
	Gas Pipeline	FOSM	Decision Tree	-	-	-	Ahn et al.	2021
	Engine	ANN	K-means Clustering	-	-	-	Yun et al.	2019
	Engine	XGboost	-	-	-	O	Yoon et al.	2020
	Turbofan Engine	CNN	-	-	SHAP	-	Yoon et al.	2021
	Electric motor	DTW, KNN	-	-	-	O	Kim et al.	2021
	Pipe	FOSM	-	-	-	-	Kim et al.	2021

Type of Research objects	Research objects	AI techniques applied to Life prediction	AI techniques applied at the research stage			Comparison of Techniques	Author	Year
			Data pre-processing	Data augmentation	Feature reasoning			
Electrical parts	Lithium-ion battery	LSTM	–	–	–	O	Jung et al.	2020
	Lithium-ion battery	LSTM	–	–	–	O	Jeon et al.	2022
	Lithium-ion battery	GPR	–	–	–	O	Yoo et al.	2020
	Oil Transformer	MLP	–	Autoencoder	–	–	Lee et al.	2021
	Lithium-ion battery	CNN, LSTM	EMD	–	–	–	Lim et al.	2022
	capacitor	LSTM	–	GAN	–	–	Udurume et al.	2022
	capacitor	LSTM	–	GAN	GA	O	Udeogu et al.	2022
Facilities/ Equipment	Thermal Observation Device	CNN, LSTM	–	–	–	–	Son et al.	2022
Material/ Component	PLA Specimen	DNN	–	–	–	–	Moon et al.	2022
Infrastructure	Road	DNN	–	–	–	–	Choi	2018

3.2.1 연구 대상에 따른 분류

고장 예지로 분류된 논문에서 가장 많은 연구 대상이 속한 산업 분야를 분석한 결과는 Figure 7과 같다. 특정 분야에 국한되지 않고 다양한 산업 분야에서 적용 가능한 연구 대상이 가장 많았으며 시설 및 설비, 차량, 제조업, 공기 조화 분야에서 연구가 수행되고 있다. 그 외에도 군사, 발전소, 철도 분야 등 다양한 산업 분야에서 연구되고 있다.

연구 대상의 범위를 세부적으로 조사하여 Figure 7과 같이 시각화하였으며 기계류에서 가장 많은 연구가 이루어졌다. 설비 및 시설류, 재료 및 부품, 전장품의 연구는 유사한 수준으로 진행되었으며, 군사류는 다른 분야에 비해 상대적으로 적게 연구되었다. 가장 많은 연구가 진행된 기계류의 연구 대상은 주로 모터와 베어링으로 구성되며, 이외에도 배관, 자동차, 진동기, 펌프, 로봇 등 다양한 대상이 연구된다.

The Industrial Targets and Research Scope Studied in the Failure Prognosis Field

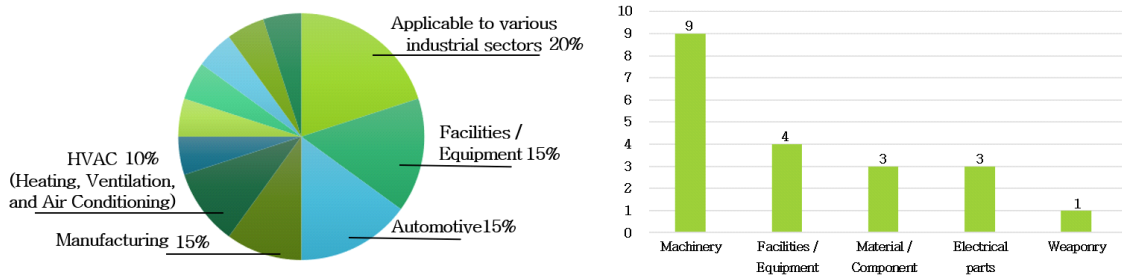


Figure 7. The Industrial Targets and Research Scope Studied in the Failure Prognosis Field

수명 예지로 분류된 논문에서 가장 많은 연구 대상이 속한 산업 분야를 분석한 결과는 Figure 8과 같다. 다양한 산업 분야에서 적용 가능한 연구 대상이 가장 많았으며 항공 분야에서도 꾸준히 연구된다. 나머지 6%는 군사, 도로, 배관, 선박, 제조업, 철도 분야 등 다양한 산업 분야에서 연구된다. 연구 대상의 범위를 시각화하여 Figure 8과 같이 시각화하였으며 주로 기계류와 전장품에서 연구가 이루어졌다.

The Industrial Targets and Research Scope Studied in the Life Prediction Field

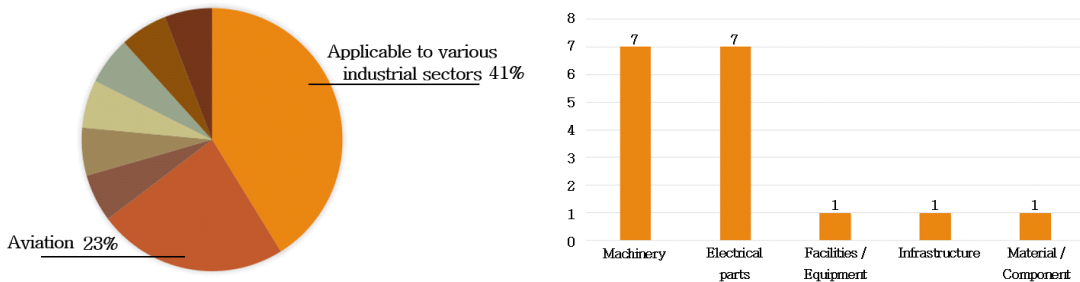


Figure 8. The Industrial Targets and Research Scope Studied in the Life Prediction Field

Figure 9에 따르면 기계류는 대부분 엔진으로 구성되고, 전장품류는 주로 리튬이온 배터리로 구성된 것을 확인할 수 있다. 수명 예지 연구는 데이터 확보가 어려워 대다수 NASA의 오픈 데이터 세트를 활용한 것으로 나타났다.

The Primary Objects Targets in Machinery and Electrical Parts

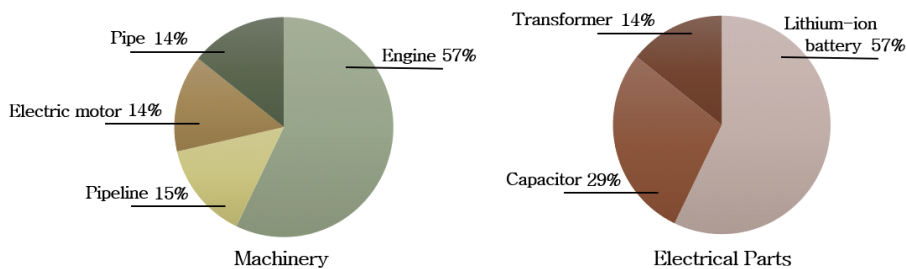


Figure 9. The Primary Objects Targets in Machinery and Electrical Parts

3.2.2 인공지능 기법이 적용된 단계에 따른 분류

인공지능 기법이 적용된 단계에 따라 상태진단, 데이터 처리, 데이터 증강, 특징추출로 논문을 분류한 결과는 Figure 10과 같다. 고장 예지와 수명 예지에 인공지능 기법이 적용된 연구와 예지 및 데이터 처리에 함께 기법이 적용된 연구가 높은 비율을 차지한다. Table 2에서 고장 예지에 적용된 다양한 기법 중에서 가장 많이 사용된 인공지능 기법은 LSTM임을 알 수 있다. LSTM이 적용된 연구 대상은 기계류의 모터와 전장품류의 배터리이다. 고장 예지 및 데이터 처리에 적용되는 기법은 SVM, DNN, Autoencoder, DT-CNN이 있다. 데이터 증강은 SMOTE, CTGAN, GAN과 같은 기법이 활용되며 특징추출에 Conv1D이 적용되었다.

Table 3에서 수명 예지에 적용된 다양한 기법 중에서 가장 많이 사용된 인공지능 기법은 고장 예지와 동일하게 LSTM임을 알 수 있다. LSTM이 적용된 연구 대상 범위는 모두 전장품이며, 주로 배터리와 커패시터로 구성된다. 수명 예지 및 데이터처리에는 CNN-LSTM, KNN, XGBoost, DTW, KNN이 활용되었으며 PCA, K-means Clustering, Decision Tree를 활용하여 데이터를 처리 및 분류하였다. 데이터 증강에는 Autoencoder와 GAN이 사용되었으며 특징인자 추출에는 SHAP, GA가 사용되었다.

Classification of AI Techniques Applied in Prognosis Studies According to Their Stages

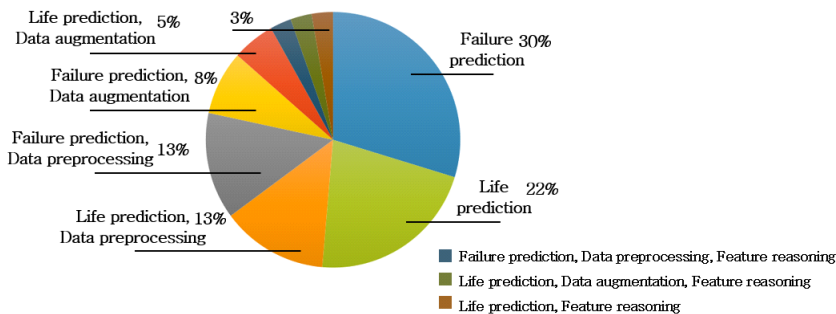


Figure 10. Classification of AI Techniques Applied in Prognosis Studies According to Their Stages

3.3 연도에 따른 문헌 분석 및 연구 동향

Figure 11은 진단과 예지 분야의 논문 수를 연도별로 보여준다. 예지의 논문 수가 진단보다 적은 것을 확인할 수 있다. 예지의 경우 고장 데이터 수집 및 분석이 필요하며 여러 요인이 복합적으로 작용하여 불확실성이 많아 진단보다 연구량이 적은 것으로 판단된다. 연도별 연구량 추이는 2020년부터 급격히 증가하다가 하락하였으나, 2022년에 다시 성장하는 경향을 보인다. 2018년과 2020년을 비교하였을 때, 인공지능 기반 PHM 분야의 논문 수는 5배 증가하였다. 이는 PHM 분야에서 인공지능의 활용이 점차 확대되고 있다는 것을 시사한다. 인공지능의 발전과 여러 이점으로 PHM 분야에서 인공지능의 활용이 증가하면서 관련 연구도 함께 증가하고 있는 것으로 나타난다. 다양한 산업 분야에서 효율적이고 안정적인 유지보수에 대한 수요가 증가하고 있으므로 앞으로도 인공지능 기반 PHM에 대한 활발한 연구가 이어질 것으로 예상된다.

The number of AI-based PHM research studies by year

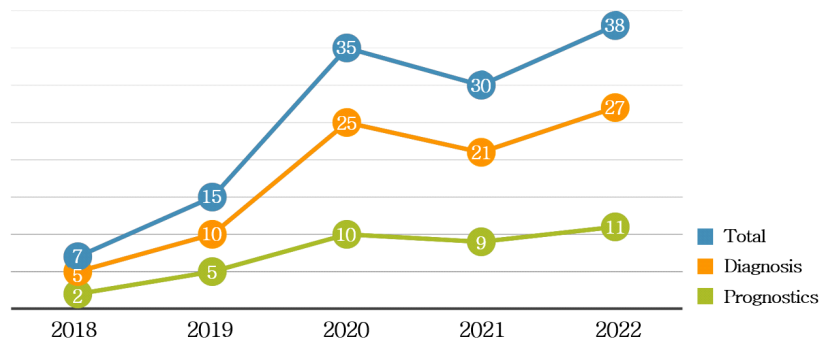


Figure 11. The Number of AI-based PHM Research Studies by Year

4. 결론

본 연구에서는 인공지능 기반 PHM 기술의 동향을 파악하기 위해 국내에서 발행된 125편의 논문을 수집하고 논문을 분류하였다. 분류 결과, 전체 논문 중 70%가 진단 분야 속하며, 고장 예지와 수명 예지는 각각 16%, 14%로 진단과 예지의 논문 수는 2배 이상 차이가 나타났다. 데이터 수집과 정교한 모델링의 어려움으로 예지보다 진단 분야의 연구가 활발히 수행되고 있다. 그러나 효과적인 PHM을 위해서는 잔여 수명을 예지하는 연구가 활발히 진행되어야 한다. 예지 연구가 진행되기 위해서는 다양한 산업 분야에서 고장데이터 수집 방법과 이에 대한 불확실성을 고려한 연구 방법론의 개발이 필요하다. 실제 수명 실험값과 인공지능으로 추정된 값의 비교로 최적값을 도출하는 연구나, 센서 기술의 발전에 따른 새로운 데이터 수집 방법을 연구하는 등의 다양한 연구가 활발히 진행되어야 한다.

논문의 세부 분류 결과, 진단과 예지 모두 특정 분야에 국한되지 않고 다양한 산업 분야에서 적용할 수 있는 연구 대상이 가장 많았다. 연구 범위에서 가장 활발히 연구된 기계류는 모터, 베어링, 엔진, 전동기 등으로 구성된다. 전체 연구에서 인공지능은 주로 진단과 예지에 적용되며, 데이터 처리에도 많이 활용되었다. 상태진단에는 CNN이 가장 많이 활용되며 데이터 처리에는 주파수 분석 알고리즘과 차원 축소 알고리즘이 주로 사용된다. 예지에는 LSTM 기법이 가장 많이 적용되었으며 데이터 증강에는 GAN, 특징 인자 추출에는 GA가 주로 사용된다.

전반적으로 이미지 데이터를 활용한 상태진단 및 예지 연구가 활발히 진행되고 있다. 이미지 분석 연구에서는 주로 CNN이 가장 많이 사용되고 있지만, MobileNet, ResNet과 같은 다른 알고리즘도 활용되고 있으며 객체 감지 분야에서 지속적으로 업데이트된 YOLO를 사용한 연구도 증가하고 있다. 촬영된 이미지 데이터뿐만 아니라 주파수 분석 알고리즘을 이용하여 진동 및 주파수 데이터를 이미지로 변환하고 분석하는 연구도 수행되고 있다.

최근에는 환경 및 데이터의 특성에 따라 다양한 인공지능 기법이 적용되고 있으며 인공지능 기술의 발전으로 정확한 진단 및 예지가 가능해졌다. 따라서 데이터의 유형과 분석 목적에 따라 적절한 알고리즘을 선택하는 것과 인공지능 기반 PHM 기술의 동향을 파악하는 것은 다양한 산업에서 새로운 방향성과 기법을 제공할 수 있다.

본 연구는 국내 연구를 중심으로 연구 동향을 조사하였지만, PHM 분야에서 중요한 영역인 Health Index 수립과 최신 인공지능 기술이 적용된 다수의 해외 연구사례가 있다. 추후 연구로는 해외에서 연구된 인공지능 기반 PHM 기술의 연구 동향을 조사하여 국내와 해외의 연구 동향을 비교 분석 및 보완하여 인공지능 기반 PHM 기술의 발전 방향성을 모색해보고자 한다.

REFERENCES

- Ahn, Y. G., Kim, S. J., Kim, D. H., Kim, C. M., and Kim, W. S. 2021. Remaining Life Prediction Using Gas Pipeline Segmentation Algorithm Based on Decision Tree. *Journal of Applied Reliability* 21(2):173–180.
- Back, J. S., Kim, S. W., Lee, S. K., and Lee, C. H. 2020. Conditioning Monitoring in Chain Sprocket Drive Unit System Based on Artificial Neural Network. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering* 30(3):286–293.
- Baek, H. S., Shin, J. H., and Kim, S. J. 2021. Development of AI-Based Condition Monitoring System for Failure Diagnosis of Excavator's Travel Device. *Journal of Drive and Control* 18(1):24–30.
- Baek, S. D. and Woo, J. H. 2022. Fault Detection of Propeller of an Overactuated Unmanned Surface Vehicle based on Convolutional Neural Network. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea* 59(2):125–133.
- Baik, J. W. 2019. AI Techniques for Prognostics and Health Management. *Journal of Applied Reliability* 19(3):243–255.
- Chae, S. G., Kim, G. R., Bae, B. Y., and Bae, S. J. 2021. Failure Diagnosis and Prediction for a Thermal Power Plant Generator using fastICA. *Journal of Applied Reliability* (Journal of Applied Reliability 21(4):341–351.
- Cho, J. H. 2022. A Study on the Operation Status Monitoring, Diagnosis and Failure Prediction Algorithm of Smart ESP. *Journal of Next-generation Convergence Technology Association* 6(5):775–780.
- Choi, D. J., Han, J. H., Park, S. U, and Hong, S. K. 2020. Motor Fault Diagnosis in Changed Environments using K-Means and CNN. *Journal of Institute of Control, Robotics Systems* 26(5):348–354.
- Choi, D. J., Han, J. H., and Hong, S. K. 2019. Real-Time Self-Complement System of Fault Diagnosis for Induction Motor Using Machine Learning and IoT Technique. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers* 68(5):662–669.
- Choi, D. J., Han, J. H., Park, S. H., and Hong, S. K. 2020. Deep Learning Motor Failure Diagnosis System Considering Small IoT Devices. *Journal of institute of control robotics and systems* 26(11):900–906.
- Choi, S. H., and Do, M. S. 2018. Prediction of Asphalt Pavement Service Life using Deep Learning. *International Journal of Highway Engineering* 20(2):57–65.
- Fink, O., Wang, Q., Svensen, M., Dersin, P., Lee, W. J., and Ducoffe, M. 2020. Potential, challenges and future directions for deep learning in prognostics and health management applications. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 92:952–1976.
- Go, J. I., Lee, E. Y., Lee, M. J., Choi, S. D., and Hur, J. W. 2021. Corrosion Failure Diagnosis of Rolling Bearing with SVM. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* 20(9):35–41.
- Goh, Y. J., Kim, G. N., Kim, Y. H., Lee, B., and Kim, K. M. 2020. Diagnosis Method for Stator-Faults in Induction Motor using Park's Vector Pattern and Convolution Neural Network. *Institute of Korean Electrical and Electronics Engineers* 24(3):883–889.
- Ha, S. and Kim, D. H. 2022. Deep Learning based Semiconductor Wafer Maps Clustering Considering Outliers. *Journal of Applied Reliability* 22(4):342–351.
- Han, D. J., Kim, S. J., and Lee, S. C. 2022. A Realization of Real Time Algorithm for Fault and Health Diagnosis of Turbofan Engine Components. *Journal of The Korean Society Aeronautical and Space Sciences* 50(10):717–727.
- Han, J. H., Choi, D. J., Park, S. U., and Hong, S. K. 2020. A Study on the GAN Algorithm Performance Improvement Method in Motor Failure Diagnosis Using Deep Learning Algorithm. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers* 69(11):1732–1739.
- Han, J. H., Choi, D. J., Park, S. W., and Hong, S. K. 2020. DT-CNN based Motor Failure Prediction Considering

- Outlier Data. *Journal of institute of control robotics and systems* 26(11):932–939.
- Han, J. H., Park, S. W., and Hong, S. K. 2022. Performance Evaluation of the Continuous Wavelet Transformation Data in Motor Fault Diagnosis through XAI Algorithm. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers* 71(7):225–232.
- Han, S. B. 2019. Study on the Development of Diagnosis Algorithm for Induction Motor Using Current and Magnetic Flux Sensors. *Journal of IEEE Korea Council* 23(4):42–50.
- Hwang, G. Y., Jeong, S. M., and Oh, J. S. 2022. Development of Prediction Algorithm Featuring 1-D CNN for Vehicle Wheel Nuts. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering* 32(4):337–345.
- Hwang, S. Y., Lee, J. H., Kim, K. S., Oh, J. W., and Min, C. H. 2020. Development of Real-time Condition Monitoring System Based on Machine Learning for Winch Equipment of Floating Crane. *Journal of Computational Design and Engineering* 25(4):445–454.
- Hyun, D. H. and Lee, S. H. 2022. Defect Detection in Manufacturing System Using Continual Learning. *Korean Journal of Computational Design and Engineering* 27(1):10–18.
- Jang, J. G., Noh, C. M., Kim, S. S., Lee, S. S., and Lee, J. C. 2021. Vibration Data Denoising and Performance Comparison Using Denoising Auto Encoder Method. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety* 27(7):1088–1097.
- Jang, J. W., An, H. J., Lee, J. H., and Shin, S. B. 2019. Construction of Faster R-CNN Deep Learning Model for Surface Damage Detection of Blade Systems. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection* 23(7):80–86.
- Jang, M. H., Park, H. S., Kim, J. I., Oh, J. R., and Jun, H. B. 2020. A Case Study on Predicting the Vehicle Failure Code with Gathered Diagnostic Trouble Code Data. *Korean Journal of Computational Design and Engineering* 25(4):358–365.
- Jeon, H. K., Kim, J. S., Kim, B. J., and Kim, W. J. 2022. A study on the fault diagnosis of rotating machine by machine learning. *The Journal of the Acoustical Society of Korea* 39(4):263–269.
- Jeon, J. H., Cheon, H. J., Chu, Y. J., and Kim, H. S. 2022. Deep-Learning Based Lithium-ion Battery SOH Estimation Using Multi-Channel Charging Profile and Discharge Capacity. *Journal of Korean Institute of Communications and Information Science* 47(6):862–869.
- Ju, Y. J., Kim, M. S., Kim, K. S., and Lee, J. H. 2020. Comparison of Machine Learning Algorithms Applied to Classification of Operating Condition of Rotating Machinery. *Journal of Computational Design and Engineering* 25(1):77–87.
- Jung, H. and Park, M. S. 2018. A Study of Big data-based Machine Learning Techniques for Wheel and Bearing Fault Diagnosis. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 19(1):75–84.
- Jung, J. H., Kim, D. H., Kim, C. S., Oh, R. D., and Ahn, J. H. 2020. Intelligent Railway Detection Algorithm Fusing Image Processing and Deep Learning for the Prevention of Unusual Events. *Journal of Internet Computing and Services* 21(4):109–116.
- Jung, J. H., Sun, K. H., and Kim, K. 2021. Fault Diagnosis Method for Excavator Hydraulic Axial Piston Pumps. *Journal of The Korean Society for Fluid Power and Construction Equipments*. 18(4):98–103.
- Jung, S. J. and Hur, J. W. 2020. Deep Learning Approaches to RUL Prediction of Lithium-ion Batteries. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* 19(12):21–27.
- Jung, S. M. and Choi, W. J. 2022. A Study on Deep Learning-based Fault Diagnosis using Vibration Data of Wind Generator. *Journal of Korean Institute of Information Technology* 20(6):129–136.
- Jung, W. H., Jeong, D. H., Kim, Y. H., Kim, C. H., Lee, H. S., Yu, H. J., Ryu, J. H., and Oh, H. S. 2019. Deep Generative Models to Overcome an Insufficient Data Problem in Structural Health Diagnosis. *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers* 43(3):169–176.

- Kang, M. G., Hyun, Y. H., and Lee, C.B. 2022. "Deep Learning-Based Analysis for Abnormal Diagnosis of Air Compressors." *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* 39(3):209–215.
- Kang, M. Y. and Lee, C. B. 2022. Development of Prognostics and Health Management System for Rotating Machine and Application to Rotary Table. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* 39(5): 337–343.
- Kang, S. B., Lee, H. H., Oh, J. S., and Choi, K. S. 2020. Fault Prediction of a Heavy Oil Combined Heat and Power Boiler Using Machine Learning. *The Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers* 44(5):341–346.
- Kim, D. H., Kim, S. J., Kim, W. S., and Kim, C. M. 2020. A Generative Adversarial Network based Data Generating for Estimation of Remaining Life Distribution in Gas Pipes. *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems* 30(1):80–85.
- Kim, D. H., Lee, J. H., Lee, S. B., and Jung, B. K. 2020. Outlier detection of main engine data of a ship using ensemble method. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology* 56(4):384–394.
- Kim, D. H., Lee, S. B., and Lee, J. H. 2020. Anomaly detection of Vessel Main Engine Big Data using Gaussian Mixture Model. *Journal of the Korean Data Analysis Society* 22(4):1473–1489.
- Kim, H. J., Ha, J. M., Ahn, B. H., Park, D. H., and Choi, B. K. 2018. Failure Classification of Gearbox using Ultrasonic Signal Characteristic. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering* 28(1):57–63.
- Kim, H. J., Kim, K. S., Hwang, S. Y., and Lee, J. H. 2022. The Fault Diagnosis Model of Ship Fuel System Equipment Reflecting Time Dependency in Conv1D Algorithm Based on the Convolution Network. *Journal of Korean Navigation and Port Research* 46(4):367–374.
- Kim, H. S., Ko, D. B., Lee, W. G., and Bae, Y. S. 2022. A Study on Tire Surface Defect Detection Method Using Depth Image. *Proceedings of the Korea Information Processing Society Conference* 11(5):211–220.
- Kim, I. J., Kim, W. S., Kim, J. Y., Chae, H. S., Woo, J. Y., Do, K. M., Lim, S. H., Shin, M. S., Lee, J. E., and Kim, H. N. 2022. Discovering Essential AI-based Manufacturing Policy Issues for Competitive Reinforcement of Small and Medium Manufacturing Enterprises. *Journal of Korean Society for Quality Management* 50(4):647–664.
- Kim, I. S., Lee, M. G., and Jeon, Y. H. 2021. Comparative Analysis of Defect Detection Using YOLO of Deep Learning. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers* 30(6):514–519.
- Kim, J. H., Shin, J. H., and Kim, T. H. 2022. Low-latency Bearing Fault Diagnosis based on Convolutional LSTM Model. *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers* 59(1):124–130.
- Kim, J. M., Hyeon, S. G., Chae, J. H., and Do, M. S. 2019. Road Crack Detection based on Object Detection Algorithm using Unmanned Aerial Vehicle Image. *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transportation Systems* 18(6):155–163.
- Kim, J. S., Lee, G. B., Hwang, H. S., Ahn, J. S., Oh, J. R., Jang, M. H., and Jun, H. B. 2021. A Study on DTW-based RUL Estimation Algorithm of Propulsion Motor: Case Study. *Korean Journal of Computational Design and Engineering* 26(4):386–397.
- Kim, J. T., Seo, Y. W., Lee, S. S., Kim, S. J., and Kim, Y. G. 2021. A Proposal of Remaining Useful Life Prediction Model for Turbofan Engine based on k-Nearest Neighbor. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 22(4):611–620.
- Kim, J. W., Jang, J. S., Yang, M. S., Kang, J. H., Kim, K. W., Cho, Y. J., and Lee, J. W. 2019. A Study on Fault Classification of Machining Center using Acceleration Data Based on 1D CNN Algorithm. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* 18(9):29–35.
- Kim, J. Y., Jeong, I. G., and Kim, J. M. 2018. Acoustic Emission based early fault detection and diagnosis method for pipeline. *Asia-pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology* 8(3):571–578.

- Kim, K. H., Kim, S. M., and Kim, Y. S. 2023. A Study on Optimization of Classification Performance through Fourier Transform and Image Augmentation. *Journal of Korean Society for Quality Management* 51(1):119–129.
- Kim, K. W., Kang, J. H., and Park, S. H. 2021. A Machine Learning-Based Signal Analytics Framework for Diagnosing the Anomalies of Centrifugal Pumps. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* 38(4): 269–277.
- Kim, M. H. and Jin, K. H. 2022. Development of a Deep Learning Algorithm for Anomaly Detection of Manufacturing Facility. *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering* 26(2):199–206.
- Kim, M. J., Cho, H. J., and Kang, C. G. 2022. LSTM-based Anomaly Detection for Screw Air Compressors of Railway Vehicles. *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers* 46(2):195–202.
- Kim, N. J., and Bae, Y. C. 2018. Status Diagnosis of Pump and Motor Applying K-Nearest Neighbors. *Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences* 13(6):1249–1256.
- Kim, S. I., Noh, Y. J., Kang, Y. J., Park, S. H., and Ahn, B. H. 2021. Fault Classification Model Based on Time Domain Feature Extraction of Vibration Data. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea* 34(1):25–33.
- Kim, S. J. 2021. Application of Fuzzy Logic Based Machine Learning to the Assessment of Failure Probability and Remaining Useful Life for Corroded Pipes. *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems* 31(3):185–191.
- Kim, S. J., Choe, B. H., and Kim W. S. 2017. Prognostics for Industry 4.0 and Its Application to Fitness-for-Service Assessment of Corroded Gas Pipelines. *Journal of Korean Society for Quality Management* 45(6):649–664.
- Kim, S. M., Lee, H. Y. L., Hwang, I. S., and Hur, J. W. 2022. Analysis of Fault Diagnosis Algorithm for Thermal Imaging Camera Circuit Board Using Machine Learning. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 23(10):118–124.
- Kim, S. W., An, K. H., Back, J. S., Lee, S. K., Lee, C. H., and Kim, P. G. 2021. Health Monitoring of Power Driving System Using Sound Signal based on Deep Learning. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering* 31(1):47–56.
- Kim, W. J. and Kim, S. H. 2021. ANN-Based Diagnostic Method on Multiple Open-Switch Fault for Three-Phase PWM Converters. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers* 70(5):764–775.
- Kim, Y. G. and Kim, J. W. 2020. Development of Aigorithm for Predicting the Electrode Life of Spot Welding on Automotive Steel Plate. *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology* 22(5):871–876.
- Kim, Y. G., Son, M. J., Noh, S. C., and Kim, S. J. 2022. A Study on Prevention of Condensation and Freezing in Radar Waveguide using Condition Based Maintenance. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 23(7):229–239.
- Kim, Y. J., Shin, J. H., Hwang, H. J., and Jun, H. B. 2018. A Study on Prognostics Approach for Estimating the RUL of Mooring Line. *Korean Journal of Computational Design and Engineering* 23(3):202–214.
- Kim, H. J., Hwang, S. Y., Kim, G. S., Kim, K. M., and Lee, J. H. 2022. Performance of Conv1D Model Considering Both Non-stationarity and the Time Interval Applied to the Condition Diagnosis of Rotary Fuel Pump. *Korean Journal of Computational Design and Engineering* 27(4):550–559.
- Ko, D. H., Choi, W. H., Choi, S. D., and Hur, J. W. 2021. Failure Prognostics of Start Motor Based on Machine Learning. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* 20(12):85–91.
- Ko, H. C., Seok, K. H., Lee, J. H., Park, J. H., and Kim, S. W. 2022. Application of Virtual Sensors for Fault Detection and Back-up of Combustion Gas Analyzers in a Steel Plant Furnace. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* 28(8):708–713.
- Kwak, M. S. and Lee, J. S. 2022. Diagnosis-Based Domain-Adaptive Design Using Data Augmentation and Transfer Learning. *Journal of Mechanical Science and Technology* 46(11):975–986.
- Kwon, S. G., Han, D. H., Park, S. Y., and Kim, J. H. 2019. Long Short Term Memory-Based State-of-Health Prediction Algorithm of a Rechargeable Lithium-Ion Battery for Electric Vehicle. *The Transactions of the Korean Institute*

of Electrical Engineers 68(10):1214–1221.

- Kwon, S. J. and Kim, M. S. 2020. "Flaw Evaluation of Bogie connected Part for Railway Vehicle Based on Convolutional Neural Network." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 21(11): 53–60.
- Kye, H. S. and Kwon, M. H. 2021. PCA-Based Low-Complexity Anomaly Detectio. *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences* 46(6):941–955.
- Lee, B. S. 2021. Development of Deep Learning Model to Estimate Clogging of Stormwater Infiltration Filter. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 22(9):147–155.
- Lee, C. Hun., Lee, S. K., and Kim, P. I. 2021. Fault Detection and Diagnosis of Chain Transmission System Using Convolutional Auto-encoder. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering* 31(5):563–573.
- Lee, D. K., Park, J. W., and Cho, S. H, and Lee, J. S. 2022. Maintainability Prediction of Guided Missile based on Machine Learning using Field Data. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 23(2):518–526.
- Lee, G. H., Lee, Y. D., and Koo, I. S. 2019. An RNN-based Fault Detection Scheme for Digital Sensor. *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication* 19(1):29–35.
- Lee, H. J. and Kim, S. S. 2022. Analysis of Anomaly Diagnosis on Operation Data in Nuclear Power Plant using Mahalanobis Distance and Random Forest. *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems* 32(2):133–138.
- Lee, J. G. and Kim, D. H. 2020. Case Study on Fault Diagnosis of Radiator Using LSTM Autoencoder. *Journal of Korean Institute of Next Generation Computing* 16(26):17–25.
- Lee, J. H. 2021. Experimental Study on Application of an Anomaly Detection Algorithm in Electric Current Datasets Generated from Marine Air Compressor with Time-series Features. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety* 27(1):127–134.
- Lee, J. H., Kwon, M. G., Kim, Y. B., and Hur, J. W. 2022. Failure Diagnostics of Camera Image Sensor For Vehicle Using CNN. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 23(12):877–884.
- Lee, J. H., Yoo, S. Y., Shin, S. C., Kang, D. H., Lee, S. S., and Lee, J. C. 2019. Fault diagnosis of bearings using machine learning algorithm. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering* 43(6):455–462.
- Lee, N. J., Kim, S. M., Jeong, I. J., Sohn, S. M., and Lee, S. C. 2020. Ensemble Method using Rule-based and Deep-learning Algorithms for Rotating-machine Diagnostics. *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering* 30(2):129–135.
- Lee, P. Y., Kwon, S. G., Kang, D. H., Han, S. Y., and Kim, J. H. 2020. SOH Estimation and Feature Extraction using Principal Component Analysis based on Health Indicator for High Energy Battery. *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics* 25(5):376–384.
- Lee, S. H., Kang, S. H., Shin, Y. S., Choi, O. K., Kim, S. J., and Kang, J. Mo. 2022. YOLO-Based Detection of Metal Surface Defects. *Journal of korean institute of Intelligent Systems* 32(4):275–285.
- Lee, S. H., Kim, B., and Lee, H. S. 2021. An Oil Transformer Life Estimation System Using an Autoencoder Based on a Generative Model. *Journal of the korean socity for railway* 24(7):619–624.
- Lee, S. H., Kim, J. Y., Lee, J. J, Kim, Y. J., Kim, S. K., and Lee, T. H. (2022). A Study on the Development of Database and Algorithm for Fault Diagnosis for Condition Based Maintenance of Rubber Seal in Ancillary Equipment of Autonomous Ships. *Journal of Applied Reliability* 22(1):48–58.
- Lee, S. H. and Kim, Y. S. 2022. A Pre-processing Process Using TadGAN-based Time-series Anomaly Detection. *Journal of Korean Society for Quality Management* 50(3):459–471.
- Lee, S. H., Wesonga, S., and Park, J. S. 2022. Classification of Operating State of Screw Decanter using Video-Based Optical Flow and LSTM Classifier. *Journal of the Korean Society of Industry Convergence* 25(2): 169–176.

- Lee, S. I and Ko, D. S. 2020. A Study on the Design of Prediction Model for Safety Evaluation of Partial Discharge. *Journal of platform technology* 8(3):10-21.
- Lee, S. Y. and Huh, Y. J. 2021. A Study on Real-Time Defect Detection System Using CNN Algorithm During Scaffold 3D Printing. *Journal of the Semiconductor & Display Technology* 20(3):125-130.
- Lee, Y. H., Kim, K. J., Lee, S. I., and Kim, D. J. 2019. Seq2Seq model-based Prognostics and Health Management of Robot Arm. *Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology* 12(3):242-250.
- Lee, Y. K., Hong, S. C., and Hong, J. K. 2020. LSTM-based Drone's Anomal Motor Vibration Detection System. *Journal of Information Technology and Architecture* 17(4):315-321.
- Lim, J. K. and Yoon, H. J. 2021. A study on the Feature extraction of the Rolling Stock door using the current value of the motor and the selection of a failure diagnosis prediction algorithm. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers* 70(1):96-101.
- Lim, J. Y., Kim, D. H., Noh, T. W., and Lee, B. K. 2022. Remaining Useful Life Prediction for Litium-Ion Batteries Using EMD-CNN-LSTM Hybrid Method. *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics* 27(1):48-55.
- Min, T. H., Park, D. H., Lee, J. J., Seo, S. Y., Kang, S. W., and Choi, B. G. 2022. Feature-based Analysis on Vibration Signals for Fault Diagnosis of Elevator. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering* 32(6):535-543.
- Moon, H. C., Noh, W. S., Ryu, H. S., and Doh, J. Y. 2022. Deep Neural Network-Based Reliability Assessment on Fatigue Life of PLA Specimens Considering Uncertainty of Additive Manufacturing. *Journal of Applied Reliability* 22(1):37-47.
- Moon, K. Y., Kim, H. J., Hwang, S. Y., and Lee, J. H. 2022. Comparison of Prediction Accuracy Between Classification and Convolution Algorithm in Fault Diagnosis of Rotatory Machines at Varying Speed. *Journal of Korean Navigation and Port Research* 46(3):280-288.
- Nam, J. I. and Park, H. J. 2020. A Neural Network based Fault Detection and Classification System Using Acoustic Measurement. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers* 29(3):10-215.
- Oh, S. T., Kim, H. W., Cho, S. H., You, J. H., Kwon, Y. S., Ra, W. Sang., and Kim, Y. K. 2020. Development of a Compressed Deep Neural Network for Detecting Defected Electrical Substation Insulators using a Drone. *Journal of institute of control robotics and systems* 26(11):884-890.
- Park, H. J., Cho, S. H., Jang, K. H., Seol, J. W., Kwon, B. G., Kwon, J. Y., and Choi, J. H. 2020. Study on Fault Diagnosis of Planetary Gearbox in Unmanned Aerial Vehicle Using Multi sensor Data. *Journal of Applied Reliability* 20(4):332-342.
- Park, J. H., Seok, J. H., Cheon, K. M., and Hur, J. W. 2020. Machine Learning Based Failure Prognostics of Aluminum Electrolytic Capacitors. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* 19(11):94-101.
- Park, J. I. and Kang, U. G. 2022. Design of particulate matter reduction algorithm by learning failure patterns of PHM-based air conditioning facilities. *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, 27(7):83-92.
- Park, J. W., Kim, W., Jung, B. C., Moon, S. J., and Yang, S. J. 2021. SVM-based Damage Detection Technique Using Smart Valves in a Pipeline System. *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology* 45(11):1019-1028.
- Park, S. H., Do, J. S., Choi, S. D., and Hur, J. W. 2021. Fault Diagnosis of Drone Using Machine Learning. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* 20(9):28-34.
- Park, S. M., Ko, J. H., Song, S. G., Park, S. J., and Son, N. R. 2020. Fault Diagnosis Algorithm of Electronic Valve using CNN-based Normalized Lissajous Curve. *Journal of Korean Society of Industry Convergence* 23(5):825-833.

- Seo, C. Y., Suh, Y. J., and Kim, D. J. 2020. Study on Fault Detection of a Gas Pressure Regulator Based on Machine Learning Algorithms. *Journal of The Korea Society of Computer and Information* 25(4):19–27.
- Shim, S. B., Choi, S. I., Kong, S. M., and Lee, S. W. 2020. Adversarial learning for underground structure concrete crack detection based on semi-supervised semantic segmentation. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association* 22(5):515–528.
- Shim, S. B., Choi, S. I., Kong, S. M., and Lee, S. W. 2021. Deep learning algorithm of concrete spalling detection using focal loss and data augmentation. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association* 23(4):253–263.
- Shim, S. B., Chun, C. J., and Ryu, S. K. 2019. Road Surface Damage Detection based on Object Recognition using Fast R-CNN. *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transportation Systems* 18(2):104–113.
- Shin, Y. S. and Min, K. W. 2021. Decentralized Structural Diagnosis and Monitoring System for Ensemble Learning on Dynamic Characteristics. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea* 34(4):183–189.
- Sim, K. C., Lee, K. S., and Byun, S. H. 2022. A study on fault diagnosis of marine engine using a neural network with dimension-reduced vibration signals. *The Journal of the Acoustical Society of Korea* 41(5):492–499.
- So, M. S. and Shin, J. H. 2019. Performance Degradation Prediction of Industrial Equipment using Machine Learning. *Korean Journal of Computational Design and Engineering* 24(3):268–279.
- Son, M. J., Kim, Y. G., Noh, S. C., Kim, M. H., and Kim, K. M. 2022. Exploring the Application of CBM+ in an ISR Weapon System, Thermal Observation Device. *Journal of Applied Reliability* 22(3):240–247.
- Song, H. B. and Jeong, Jun. 2019. The Implementation of Smart Motor Diagnosis. *Journal of Korean Institute of Information Technology* 17(4):27–36.
- Song, Y. U. and Baek, S. J. 2021. Real-Time Fault Detection in Discrete Manufacturing Systems Via LSTM Model based on PLC Digital Control Signals. *Journal of Korean Society of Industrial and Systems Engineering* 44(2):115–123.
- Udeoguw, C. U., Caliwag, A. C., and Lim, W. S. 2022. Remaining Useful Life Prediction for Supercapacitors Using an Optimized End-to-End Deep Learning Approach. *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences* 47(3):482–491.
- Udurumew, M., Udeogu, C. U., Caliwag, A. C., and Lim, W. S. 2022. Synthetic Data Generation Using GAN for RUL Prediction of Supercapacitors. *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences* 47(3):492–500.
- Wang, D. H., Lee, J. H., Kim, S. J., Kim, M. C., and Lee, I. S. 2022. Fault Diagnosis of Induction Motor using an Ensemble Method of Decision Tree and Multilayer Neural Network. *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems* 20(3):47–55.
- Yang, J. W., Lee, Y. D., and Koo, I. S. 2020. Timely Sensor Fault Detection Scheme based on Deep Learning. *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication* 20(1):163–169.
- Yang, J. W., Lee, Y. D., and Koo, I. S. 2018. Sensor Fault Detection Scheme based on Deep Learning and Support Vector Machine. *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication* 18(2): 185–195.
- Yi, K. Y., Jeong, S. J., and Seo, K. S. 2020. Embedded Deep Learning System for Defects Detection. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers* 69(2):325–330.
- Yoo, S. J., Jang, D. S., Park, J. W., and Lee, J. K. 2021. Fault Diagnosis of Hydraulic Solenoid Valves using Artificial Intelligence. *Journal of The Korean Society for Fluid Power and Construction Equipments* 18(4):92–91.
- Yoo, S. W., Shin, Y. B., and Shin, D. I. 2020. Comparison of the Machine Learning Models Predicting Lithium-ion Battery Capacity for Remaining Useful Life Estimation. *Journal of the Korean Institute of Gas* 24(6):91–97.
- Yoo, Y. S., Kim, D. H., Kim, S., and Hur, J. W. 2020. Fault Prognostics of a SMPS based on PCA-SVM. *Journal*

of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers 19(9):47–52.

- Yoon, I. G., Min, H. R., and Lee, S. 2022. Automatic Detection of the Dominant Frequency in Rotating Facilities. *Journal of Mechanical Science and Technology* 46(5):495–502.
- Yoon, S. J., Lee, M. Y., Lee, J. H., Lee, S. H., and Na, J. C. 2021. Fault Diagnosis Using Artificial Intelligence for the Spindle of Machine Tools. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers* 45(5):401–408.
- Yoon, Y. A., Jung, J. H., Lim, J. H., Chang, T. W., and Kim, Y. S. 2020. A study on Data Preprocessing for Developing Remaining Useful Life Predictions based on Stochastic Degradation Models Using Air Craft Engine Data. *Journal of Korean Society of Industrial and Systems Engineering* 43(2):48–55.
- Yoon, Y. A., Lee, S. H., and Kim, Y. S. 2021. A Study on the Remaining Useful Life Prediction Performance Variation based on Identification and Selection by using SHAP. *Journal of Korean Society of Industrial and Systems Engineering* 44(4):1–11.
- Yun, J. P., Kim, M. S., Koo, G. W., and Shin, C. 2019. Fault Diagnosis and Analysis Based on Transfer Learning and Vibration Signals. *IEMEK Journal of Embedded Systems and Applications* 14(6):287–294.
- Yun, Y. R., Kim, S. G., Cho, S. H., and Choi, J. H. 2019. Neural Network based Aircraft Engine Health Management using C-MAPSS Data. *Journal of Aerospace System Engineering* 13(6):17–25.

Appendix

CNN(Convolutional Neural Network), LSTM-AE(Long Short-Term Memory-Autoencoder), MD(Mahalanobis Distance), ANN(Artificial Neural Network), KNN(K-Nearest Neighbors), SVM(Support Vector Machine), DT(Decision Tree), VGGNet(Visual Geometry Group Network), MLP(Multi-Layer Perceptron), GMM(Gaussian Mixture Model), ResNet(Residual Neural Network), fastICA(fast Independent Component Analysis), YOLO(You Only Look Once), SGD(Stochastic Gradient Descent), FOSM(First Order Second Moment), STFT(Short-Time Fourier Transform), CWT(Continuous Wavelet Transform), DWT(Discrete Wavelet Transform), FFT(Fast Fourier Transform), PCA(Principal Component Analysis), FCN(Fully Convolutional Network), LRP(Layer-wise Relevance Propagation), DBSCAN(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise), ADALINE(Adaptive Linear Neuron), NCA(Neighborhood Component Analysis)

저자소개

정예은 경기대학교 대학원 산업시스템공학과에 재학 중이며 주요 관심분야는 신뢰성공학, 통계 및 데이터 마이닝 분야이다.

김용수 KAIST 산업공학과에서 학사, 석사, 박사를 취득한 후 SK텔레콤에서 근무하였다. 현재 경기대학교 산업경영공학과 정교수로 재직중이며, 품질 및 신뢰성, 기능안전, 통계 및 데이터마이닝 분야를 연구하고 있다.