



선박 기관시스템 보조기기의 상태기반 고장진단/예측을 위한 고장 모사 데이터베이스 구축

김정영^{1,2}·이태현¹·이승호¹·이종직¹·신동민¹·이원균²·김용진^{1,†}
한국기계연구원 신뢰성평가연구소¹
충남대학교 기계공학부²

A Study on the Development of a Failure Simulation Database for Condition Based Maintenance of Marine Engine System Auxiliary Equipment

Jeong Yeong Kim^{1,2}·Tae Hyun Lee¹·Song Ho Lee¹·Jong Jik Lee¹·Dong Min Shin¹·Won kyun Lee²·Youg Jin Kim^{1,†}
Department of Reliability Assessment, Korea Institute of Machinery and Materials¹
School of mechanical Engineering, Chungnam National University²

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.

This study is to develop database by an experimental method for the development of condition based maintenance for auxiliary equipment in marine engine systems. Existing ships have been performing regular maintenance, so the actual measurement data development is very incomplete. Therefore, it is best to develop a database on land tests. In this paper, a database developed by an experimental method is presented. First, failure case analysis and reliability analysis were performed to select a failure mode. For the failure simulation test, a test bed for land testing was developed. The failure simulation test was performed based on the failure simulation scenario in which the failure simulation test plan was defined. A 1.5TB failure simulation database has been developed, and it is expected to serve as a basis for ship failure diagnosis and prediction algorithm model development.

Keywords : Condition based maintenance(상태기반유지보수), Failure simulation database(고장 모사 데이터베이스), Failure simulation test(고장 모사 시험), Failure simulation scenario(고장 모사 시나리오)

1. 서론

4차 산업혁명의 기술적 변화가 조선 산업분야에도 요구됨에 따라 미래 고부가가치 선박의 핵심으로 자율운항선박이 주목받고 있다. 자율운항선박은 운항과 관리에 대한 정보를 디지털화함으로써, 핵심장비에 대한 실측 데이터를 기반으로 스스로 판단하여 고장여부에 대한 의사결정을 수행하는 자가 진단 선박(self diagnosis ship)기술을 기반으로 개발하고자 한다. 자가 진단 선박 기술은 기존 선원의 경험적 판단에 의해 의존하였던 업무를 인공지능 기반의 자율적 의사결정으로 전환하여 선박의 안전과 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 기대되고 있다 (Korean register, 2020).

과거의 선박 정비기술은 고장이 발생하면 수리하는 사후정비

(corrective maintenance), 고장 유무에 관계없이 일정 기간 동안 사용 후 교체하는 방법인 정기유지보수(planned maintenance system)예방정비 기법에 의존하였다 (Choi, 2013). 하지만 실제 결함수준과 관계없이 정비를 실시하므로 잦은 중단(downtime)과 부품 교체로 높은 비용이 발생한다. 이와 같은 문제점은 많은 산업체에서도 발생하고 있으며, 이를 해결하기 위해 상태기반정비(Condition Based Maintenance, CBM) 기술을 개발 및 도입하고 있다. 이는 필요한 시점에 예측 정비를 수행하여 건전성 관리기술 향상 및 부품 교체 최소화에 따른 유지비용을 절감할 수 있을 것으로 예상된다 (Lee and Youn, 2015).

현재 국내·외 대부분 선박의 고장진단 시스템은 엔진 제작사에 의해 자사 엔진의 모니터링 및 고장진단을 수행하도록 개발되고 있다 (Lee et al., 2009). 자율운항선박은 국제해사기구에

서 정의한 자율화 등급 4단계의 완전자율운항 선박을 목표로 개발되고 있으며, 이를 위해서는 엔진뿐만 아니라 선박 기관 시스템 대부분의 장비에서 고장진단이 이루어져야 한다 (Korean register, 2020). 선박 기관시스템 보조기기는 선박 운항의 안전과 정시 입출항에 핵심이 되는 장비로 이에 대한 CBM 기술은 자율운항선박 구현에 가장 필요한 기술개발 항목임이 자명하다.

이와 같이 선박 기관시스템 보조기기의 고장진단 기술을 개발하기 위해서는 대상 장비의 대량의 실측데이터가 필요하다 (Lee and Youn, 2015). 하지만 기존 선박들은 사후정비 및 정기유지보수를 수행해 왔기에 실측데이터 구축 현황은 매우 미비한 상황이다. 또한, 실제 선박의 데이터 수집은 오랜 시간이 소요되기에 기술 개발에 어려움이 있다. 이를 위한 최선의 방안은 육상 및 실증선 시험을 바탕으로 상태 기반 데이터베이스를 구축하는 것이다.

본 논문에서는 선박 기관시스템 보조기기의 상태 기반 데이터베이스를 구축하기 위해 실험적인 연구를 수행하였다. 선박 기관시스템 보조기기로 사용되고 있는 펌프 및 청정기의 고장 사례분석 및 신뢰성 분석을 수행하여 고착, 마모, 누유, 균열, 피로파괴와 같은 고장 모드 5종을 선정하였다. 고장 모사 시험 방법론에 대한 여러 연구들을 수행하여 고장 모사 시나리오를 도출하였다. 고장 모사 시험을 위해 육상 시험용 테스트베드를 구축하였다. 또한, 성능 모니터링 시스템을 활용하여 실시간 상태 모니터링 및 실측 데이터를 취득하였고, 진동데이터를 활용하여 시간 및 주파수 영역의 데이터 특성 변화를 관찰하였다. 진동, 소음, 운전환경 데이터는 태그 넘버를 부여하여 csv 파일 형태의 데이터베이스로 구성하였다.

2. 고장 모사 시험

2.1 실험 대상 장비

선박 기관 시스템 보조기기는 엔진 작동을 위한 핵심 기관 시스템이다. 그 중 청정기는 원료로부터 물과 이물질을 정제하여 작동유를 추출하고, 펌프는 작동유를 빠르고 안정적인 상태를 유지하며 엔진으로 공급한다. 그로인해 펌프 및 청정기의 고장은 엔진 작동 및 선박 운항에 직접적인 영향을 미치며, 조선, 해운 산업에서는 물류운반 지체 및 운항 손실 비용 증가를 야기한다 (Kim and Jang, 2019). 따라서, 펌프 및 청정기 대상의 고장 모사 시험을 수행하여 대량의 실측데이터를 취득하고자 한다.

본 실험에서 사용되는 펌프 및 청정기는 실선에서 사용하는 기관 시스템 보조기기의 기능 및 구성이 유사한 장비로 선정하였다. 청정기는 Alfa Laval 사의 S805 모델로써 모터 최대 속도 3,600 RPM, 보울 최대 속도 9,307 RPM으로 고속 회전 장비이며, 장비 구동을 위해 5 ~ 8 bar 압력의 공기, 3 ~ 8 bar 압력의 물을 공급한다 (Alfa laval, 2015). 펌프는 KRAL 사의 3축

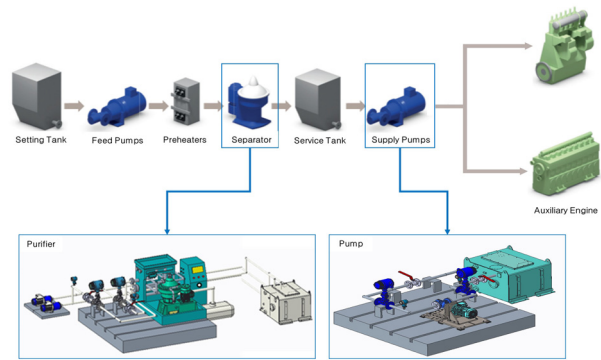


Fig. 1 Types of test target device (Alfa laval, 2018.)

스크류 펌프로 1,770 RPM의 속도로 구동되며, 분당 약 100 L의 정제유를 엔진으로 공급한다 (KRAL, 2019). 선정된 대상 장비는 Fig. 1과 같이 나타내었다.

2.2 고장 사례분석 및 신뢰성 분석

펌프 및 청정기의 핵심 구성품에 대한 고장모드 도출 및 고장에 따른 리스크 도출 등의 기반 분석을 위해 함정장비고장사례집 (Korea coast guard, 2019), Offshore Reliability Data (OREDA, 2009)를 활용하여 대상 장비의 운전 특성 및 성능 요구조건, 고장 발생률에 대한 고장사례분석을 수행하였다.

펌프 및 청정기 핵심 구성품의 고장 원인 및 메커니즘에 따른 고장 모드 발생 여부를 확인하기 위해 고장모드, 영향 및 치명도 분석(Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, FMECA)을 수행하였으며, 이에 대한 결과를 Table 1, 2와 같이 나타내었다. 또한, 잠재적 고장형태와 고장 원인 및 발생과정, 검출 및 관리방법에 대해 위험우선순위를 평가하여 Table 1, 2의 치명도 평가(criticality)로 나타내었다. 이와 같은 신뢰성분석 수행 결과로 베어링 고착, 씰 열화, 커플링 마모, 벨트 장력 변화, 축 오정렬 불량과 같은 고장 모드 5종을 선정하였다.

2.3 육상 시험용 테스트 베드 구축

펌프 및 청정기의 실측 데이터베이스 구축에 관한 연구는 시간적, 재정적인 부분에서 제한된다. 그로인해 선제적 기술 개발을 위한 육상 시험용 테스트 베드를 구축하여, 고장 모사 데이터를 취득하고자 한다. 육상 시험용 테스트 베드는 펌프 및 청정기의 기능적인 부분을 모니터링하기 위해 실선 기관시스템 구성과는 다르게 개별 시스템으로 구축하였다. 이는 제조사의 자문을 바탕으로 시험설비 최적화 및 고도화를 완료하여 고장 모사 시험에 적합성을 검증하였다.

데이터 수집을 위한 시스템 구성은 C#(JYTEK 사)을 활용하여 상태 기반 성능 모니터링 및 Fast Fourier Transform (FFT), Root Mean Square (RMS) 분석 등 취득 신호의 실시간 분석이 가능하도록 구축하였다. 또한, Amadeus S/W(Famtech 사)를

Table 1 Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA) for 5 types of pump failure modes

Pump						
Main parts	Failure modes	Failure causes and mechanisms	Failure effect	Criticality		
				Occurrence	Severity	Detection
Motor/ Pump bearing	Sticking of bearing	Particle injection, Poor lubrication	Occurrence of vibration and noise	5	4	2
Mechanical seal	Leakage	Deterioration, Poor lubrication	Reduced efficiency	5	4	2
Jaw coupling	Elastomer wear	Overload, Overheating	Increase vibration	5	5	3
	Coupling wear	Misalignment	Increase vibration	4	5	2
Rotor	Rotor crack	Cavitation	Occurrence of vibration and noise	5	5	2

Table 2 Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA) for 5 types of purifier failure modes

Purifier						
Main parts	Failure modes	Failure causes and mechanisms	Failure effect	Criticality		
				Occurrence	Severity	Detection
Bearing	Sticking of bearing	Poor lubrication, Surface wear	Occurrence of vibration and noise	4	5	2
Belt	Repeated fatigue load	Tension imbalance, Degradation	Decrease of transmission efficiency	5	5	2
Coupling	Element Wear	Friction between element and hub	Decrease of transmission efficiency	3	4	2
Shaft	Shaft crack	Mass imbalance, Misalignment	Occurrence of vibration	5	3	2
Seal	Leakage	Thermal degradation, Cutting (or Notching)	No output flow	3	5	2

활용하여 고주파 대역의 특성 인자를 실시간 모니터링 및 분석하였고, 이를 Fig. 2(a),(b)와 같이 나타내었다.

센서의 측정 위치는 신호 처리 및 분석 전문가의 자문 및 KS 규격 (KS B ISO 10816-1, 1995; KS B ISO 10816-3, 2001)에

의거하여 선정하였다. 또한, 진동 데이터는 2타입의 3축 가속도계(PCB, Kistler 사)를 활용하여 대량의 빅 데이터를 취득하였다. 데이터 샘플링 레이트는 운전환경 1 kHz, 진동 25.6 kHz, 소음 51.2 kHz로 최대 주파수 대역의 데이터를 취득하여 원신호의 특성을 관찰하였다. 이와 같은 센서의 위치 구성은 Fig. 2(c),(d)에 나타내었다.

2.4 고장 모사 시나리오 및 시험

고장사례분석 및 신뢰성분석의 결과를 바탕으로 고장 모사 시나리오를 도출하였다. 고장 모드 5종의 시험 방법론에 대한 선행 연구를 수행하여 시험 상세계획을 정의하였고, 시험 방법론의 시각화를 위해 고장 모사 다이어그램을 구성하였다 (LUDECA, 2011; Monitoring, S.C., 1994; Naval Surface Warfare Center-Carderock Division, 2010; Hassan and Ali, 2018; Yue, 1992). 이와 같이 도출한 고장 모사 시나리오는 대표적인 고장 모사 시험 2종의 수행 과정과 Table 3, 4에 나타내었다.

Table 3은 펌프의 고장 모사 시나리오를 나타내며, 쇼커플링 탄성체 마모 및 오정렬 불량 시험의 수행과정을 포함한다. 쇼커

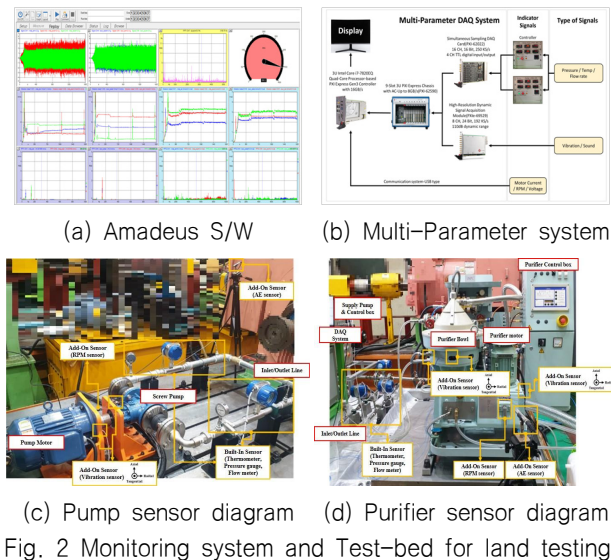


Table 3 Pump failure simulation scenario

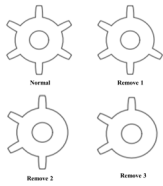
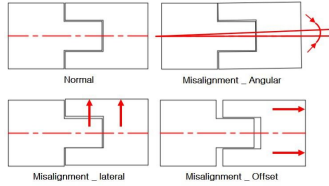
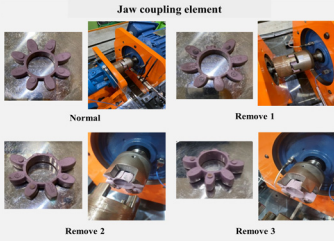
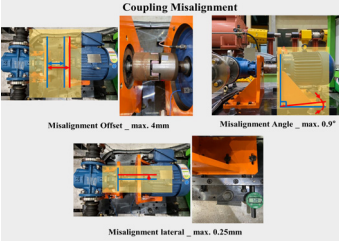
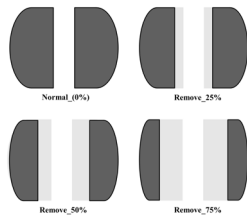
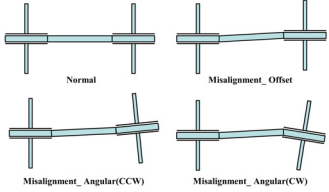
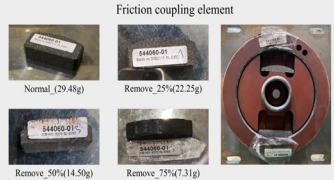
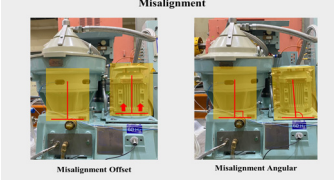
Pump		
Failure modes	Jaw coupling elastomer wear	Misalignment
Failure test plan	Normal : 0 % Remove1 : 25 % Remove2 : 50 % Remove3 : 75 %	Angular : max. 0.9° Lateral : max. 0.25 mm Offset : max. 4 mm
Failure simulation diagram		
Failure simulation test		

Table 4 Purifier failure simulation scenario

Purifier		
Failure modes	Friction element wear	Shaft misalignment
Failure test plan	Normal(0 %) : 29.48 g Remove 25 % : 22.21 g Remove 50 % : 14.74 g Remove 75 % : 7.37 g Remove 100 % : 0 g	Offset : max. 0.6 mm Angular(CW, CCW) : max. 0.9°
Failure simulation diagram		
Failure simulation test		

플링 탄성체는 날개를 최대 3개까지 제거하여 0 %에서 75 % 열화 고장을 모사하였다. Table 4는 청정기의 고장 모사 시나리오를 나타내며, 마찰제 마모 시험 및 오정렬 불량 시험 수행과정을 포함한다. 마찰제 마모 시험은 정상질량 대비 25 %에서 100 %까지 감소시켜 질량 변화를 열화단계로 모사하였다. 펌프 및 청정기의 오정렬 불량 시험의 경우 장비 설계사양 기준 최대 변화를 인가하여 오프셋변화, 각도변화, 평행변화 모사 시험을 수행하였다.

3. 데이터 특성 분석

회전기기의 고장원인은 대부분 진동에 의해 발생한다. 이를 감지하기 위해 많이 사용되고 있는 진단방법은 진동신호 측정이다. 진동신호를 측정함으로써 회전주파수에 따른 진동 크기를 분석하여 고장 원인 도출 및 고장 진단을 수행함에 따라 결함을 조기에 발견할 수 있다 (Lim et al., 2010). 또한, 사전 예측을

효과적으로 수행하기 위해서는 상태에 따른 진동데이터를 수집하는 것이 중요하다. 하지만, 보다 양질의 데이터를 수집하기 위해 진동데이터의 특성 사용이 가능한 분석방법을 고려하여 측정하여야 한다 (Her et al., 2004). 따라서, 본 장에서는 진동 데이터를 활용하여 고장 원인에 따른 특성 변화를 분석하였다.

Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 시간영역의 신호만으로는 정상과 고장을 해석하기 어렵기에, Fast Fourier Transform (FFT) 및 Short Time Fourier Transform (STFT)를 이용하여 시간 영역 및 주파수영역 따른 특성 변화를 관찰하였다 (Kim et al., 2021).

Fig. 4(a),(b)는 펌프의 정상 및 고장상태 진동 데이터를 FFT를 이용해 나타내었다. x축은 주파수, y축은 진폭의 크기를 가속도 값으로 나타낸다. 정상상태 신호는 2.3 k Hz 영역에서 1 m/s² 수준의 진폭이 발생하였으며, 고장상태 신호는 1 k, 2 k, 4 k Hz 영역에서 최대 8 m/s² 수준의 진폭 변화가 발생함을 관찰하였다.

Fig. 4(c),(d)는 청정기의 정상상태 및 고장상태 진동 데이터를 FFT를 이용해 나타내었다. 정상상태 신호는 보울의 고유주파수인 155Hz 영역에서 0.5 m/s² 수준의 진폭이 발생하였고, 고장상태 신호는 1.8 m/s² 수준의 진폭 변화가 발생함을 관찰하였다.

Fig. 5(a),(b)는 펌프의 정상 및 고장상태 데이터를 STFT를 이용해 30초간 분석하여 나타내는 그래프이다. x축은 시간영역, y축은 주파수영역으로 시간에 따른 주파수 영역의 진폭 변화를 나타낸다. 정상상태 신호는 30초 동안 2.3 kHz에서 1 m/s² 수준

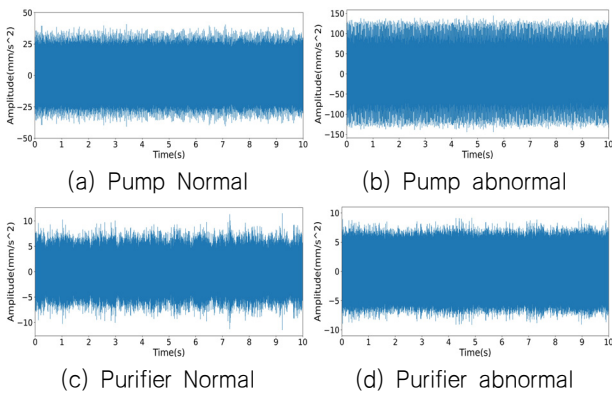


Fig. 3 Pump and Purifier Time domain Vibration data

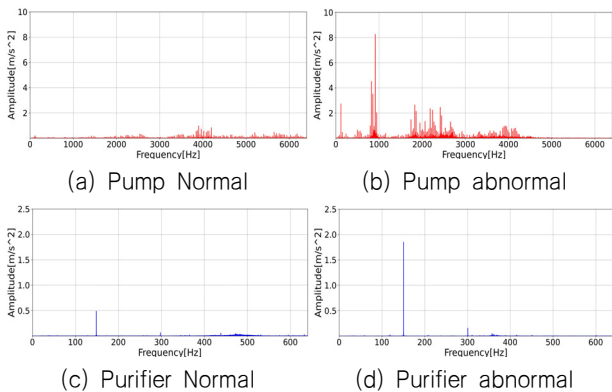


Fig. 4 Pump and Purifier Vibration data Fast Fourier

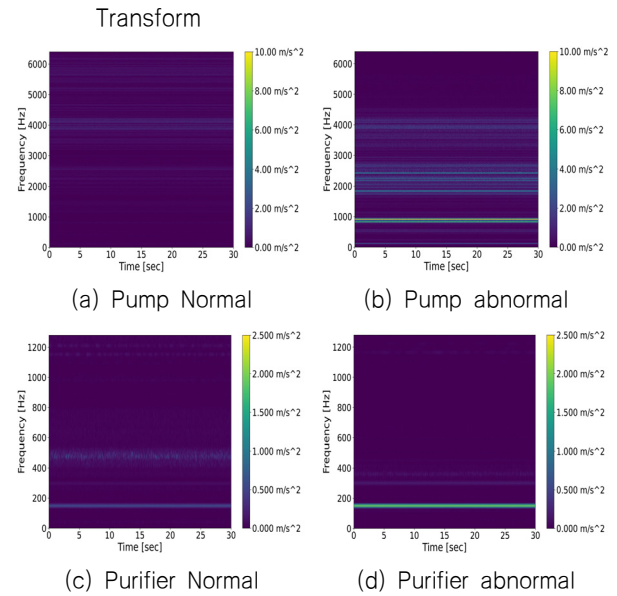


Fig. 5 Pump and Purifier Vibration data Short Time Fourier Transform

의 진폭 변화가 발생하였고, 고장상태 신호는 30초 동안 1 k, 2 k, 4 kHz 영역에서 높은 수준의 진폭 변화가 발생함을 관찰하였다.

Fig. 5(c),(d)는 청정기의 정상 및 고장상태 데이터를 STFT를 이용하여 30초간 분석한 그래프를 나타내었다. 정상상태 신호는 30초 동안 155 Hz 영역에서 진폭 변화가 발생함을 관찰하였고, 고장상태 신호는 30초 동안 155 Hz 영역에서 정상상태 신호보다 높은 수준의 진폭 변화가 발생함을 관찰하였다.

4. 데이터베이스 구축

고장 모사 시험 시간은 장비 구동 조건에 따라 펌프 10분, 청정기 30분 동안 수행하였다. 고장 모사 시험을 수행하여 취득한 데이터는 고장모드, 열화단계, 시편번호, 반복횟수 등의 시험 정보를 포함한 태그를 넘버화하여 csv 파일형태로 저장하였다.

Table 5는 펌프 데이터베이스 현황을 나타낸다. 고장모드 별 최소 4세트 이상 취득하였으며, 정상상태 데이터는 총 5세트 취득하였다. 모터 및 펌프 베어링 고착 고장모드에 대한 데이터는 윤활불량, 이물질 주입 시험을 통해 각 5세트로 총 20세트 취득하였다. 오정렬 불량외의 경우 오프셋 변화에 대한 설계사양 기준 최대 변위 변화가 4 mm이므로 1, 2, 3, 4 mm 변화 데이터를 각 5세트로 총 20세트 취득하였다. 또한, 각도, 좌우 변위 변화에 대한 데이터는 각 6세트로 총 32세트 취득하였다. 또한, 커플링 탄성체 마모 18세트, 메커니컬 씰 열화 5세트, 캐비테이션 변화 4세트, 베어링 가속수명 및 복합고장 25세트 취득하여 총 109세트, 500 GB 용량의 데이터베이스를 구축하였다.

Table 6은 청정기 데이터베이스 현황을 나타낸다. 고장모드 별 최소 3세트 이상 취득하였으며, 정상상태 데이터는 총 15세트 취득하였다. 씰 열화 고장모드에 대한 데이터는 열에 의한

Table 5 Pump database construction status

Device	Components	Failure simulation test	Data acquisition (set)	
Pump	Normal	Normal	5	
	Motor Bearing	Lubrication	5	
		Particle injection	5	
	Pump Bearing	Lubrication	5	
		Particle injection	5	
	Jaw coupling	Misalignment	offset	20
			angular	6
			lateral	6
		Elastomer	remove1	8
			remove2	5
	remove3		5	
	Mechanical Seal	Degradation	5	
	Rotor	Cavitation	4	
Option test	Bearing life test	25		
	Complex failure test			
Total	Built-in data	109		
	Add-on data			
	Noise data			

Table 6 Purifier database construction status

Device	Components	Failure simulation test	Data acquisition (set)	
Purifier	Normal	Normal	15	
	Motor Bearing	Lubrication	5	
		Particle injection	3	
	Friction Coupling	Remove	25 %	5
			50 %	5
			75 %	5
			100 %	4
	Seal	Seal degradation	25 %	1
			50 %	5
			75 %	2
			100 %	4
			300 %	3
			500 %	3
		Seal broken	3	
	Flat belt	Belt tension change	25 %	1
			50 %	1
			75 %	1
			100 %	3
			125 %	1
			150 %	2
	Top Bearing	Lubrication	3	
Shaft	Misalignment	offset	4	
		angular	6	
Total	Built-in data	85		
	Add-on data			
	Noise data			

노화단계 별 시험을 수행하였고, 총 21세트의 데이터를 구축하였다. 커플링 마찰제 마모 시험은 마찰제의 질량 변화에 따른 고장 모사 시험을 수행하여 총 19세트의 데이터를 취득하였다. 또한, 모터 베어링 윤활불량 및 이물질 주입 시험 8세트, 탭 베어링 윤활불량 3세트, 오정렬 불량 10세트를 취득하여 총 85세트, 1TB 용량의 데이터베이스를 구축하였다.

5. 결론

본 논문에서는 선박 기관 시스템 보조기기 펌프 및 청정기에 대한 고장 모사 데이터베이스를 구축하는 실험적인 방법에 대해 연구하였다. 이를 위해 고장 사례 분석 및 신뢰성 분석을 수행하여 베어링, 커플링, 씰, 샤프트, 벨트와 같은 내부 구성품의 고장모드를 선정하였다. 시험 상세 계획을 정의한 고장 모사 시나리오를 도출하였고, 육상 시험용 테스트 베드를 구축하여 고장 모사 시험을 수행하였다. 진동데이터를 활용하여 고장 모드에 따른 신호 특성 분석을 수행하였다.

1) 펌프 및 청정기에 대한 고장 사례 분석 및 신뢰성 분석을 수행하여 베어링 고착, 커플링 마모, 씰 누유, 샤프트 균열, 벨트 피로파괴의 고장 모드 5종을 선정할 수 있었다.

2) 고장 모사 시험을 위해 육상 시험용 테스트 베드를 구축하였다. 실시간 상태 진단 모니터링을 위해 C# 및 Amadeus S/W를 활용한 성능 모니터링 시스템을 구축하였다.

3) 고장 모사 시험 계획 및 고장 모사 다이어그램으로 구성된 고장 모사 시나리오를 도출하여 고장 모사 시험을 수행할 수 있었다. 고장 모사 시험은 베어링 윤활불량 및 이물질 주입, 커플링 탄성체 및 마찰제 열화에 의한 질량 변화, 축 오정렬 불량, 씰 열화, 벨트 장력 변화와 같은 선정된 고장 모드 5종에 대한 시험을 수행하였다.

4) 진동데이터를 활용하여 고장 특성 변화를 분석하였고, 이에 따른 결과는 펌프데이터의 경우 1 k, 2 k, 4 kHz 영역에서 최대 8 m/s²의 진폭변화가 발생하였고, 청정기는 보울의 고유 주파수인 155 Hz 영역에서 최대 1.8 m/s²의 진폭의 변화가 발생함을 확인 할 수 있었다.

5) 고장 모사 데이터베이스는 펌프 정상상태 5세트, 모터 및 펌프 베어링 고착 20세트, 커플링 탄성체 마모 18세트, 오정렬 불량 32세트, 메커니컬 씰 열화 5세트, 캐비테이션 4세트, 베어링 수명 및 복합 고장 상태 25세트로 총 109세트(500 GB)로 구축하였다. 청정기는 정상상태 15세트, 모터 베어링 고장 8세트, 마찰커플링 마모 19세트, 씰 열화 21세트, 벨트 장력불균형 9세트, 보울 탭베어링 고장 3세트, 오정렬 불량 10세트로 총 85세트(1 TB)로 구축하였다.

따라서 본 연구를 통해 구축된 데이터베이스는 향후 특성 인자 도출의 타당성 분석 및 고장 모드 재현 적합성 분석을 통해 신뢰성 입증을 수행할 것이다. 이를 통해 검증된 데이터베이스는 선박의 건전성 관리 기술 향상을 위한 고장 진단 및 예측 알고리즘 모델 개발의 기반이 될 것으로 기대한다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부에서 시행하는 자율운항선박 핵심 기관시스템 성능 모니터링 및 고장예측/진단 시스템 기술 개발 연구(과제번호 : 20011164)의 일환으로 수행되었습니다.

References

Alfa laval., 2015. *Separator manual – Flex separation systems, S-separators 805/815*.

Alfa laval., 2018. *The Alfa Laval Adaptive Fuel Line*.

Choi, J.H., 2013. Introduction prognostics and health management(PHM). *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, 53(7), pp.26–34.

Hassan, A.R. and Ali, K.M., 2018. Diagnosis of pulley–belt system faults using vibration analysis technique. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 26(2), pp.167–180.

Her, J.Y., Park, J.S., and Park, M.K., 2004. A study of equipment reliability improvement for rotary–machine vibration analysis. *Journal of the Korea Safety Management & Science*, 6(2), pp.231–239.

Kim, J. and Jang, H.S., 2019. Technology trends and preparation for an autonomous ship. *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(4), pp.4–7.

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), pp.25–33.

KRAL., 2019. *Operating instructions KRAL screw pumps*.

Korea coast guard., 2019. Naval equipment failure case book. GPRN: 11–1532000–000025–14.

Korean register, 2020. Maritime autonomous surface ships technology development business plan.

KS B ISO 10816–1., 1995. Mechanical vibration–evaluation of machine vibration by measurements on nonrotating parts–part1: General guidelines.

KS B ISO 10816–3., 2001. Mechanical vibration–evaluation of machine vibration by measurements on nonrotating parts–part 3.

Lee, S.H. and Youn, B.D. 2015. The direction of industry 4.0 and prognostics and health management(PHM). *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 25(1), pp.22–28.

Lee, K.D., Choung, K.G., and Kim, W.R., 2009. Studies on the diagnosis system of the high speed diesel engine for the small vessels. *Journal of the Korea Ship Safety Technology Authority*, 26, pp.24–35.

Lim, W.Q., Zhang, D.H., Zhou, J.H., Belgi, P.H. and Chan, H.L., 2010. Vibration–based fault diagnostic platform for rotary machines. *IECon 2010–36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Glendale, Arizona, USA, 7–10 November 2010.

LUDECA., 2011. *Machinery Fault Diagnosis–Empowering Pumps*.

Monitoring, S.C., 1994. *Vibration diagnostic guide*.

Naval Surface Warfare Center–Carderock Division., 2010. *Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment, NSWC–10*.

OREDA., 2009. *Offshore Reliability Data*. 4th Ed.

Yue, M. G., 1992. Belt vibration consideration moving contact and parametric excitation. *Journal of Mechanical Design*, 115(4), pp.1024–1030.

