

다변량 관리도를 활용한 선박 메인 엔진의 이상 관리 상한선 결정에 관한 연구

배영목¹·김민준²·김광재^{3,†}·전치혁³·변상수⁴·박개명⁵
SK 하이닉스¹
삼성전자²
포항공과대학교³
현대해양서비스⁴
(사)한국선급⁵

A Case Study on the Establishment of Upper Control Limit to Detect Vessel's Main Engine Failures using Multivariate Control Chart

Young-Mok Bae¹·Min-Jun Kim²·Kwang-Jae Kim^{3,†}·Chi-Hyuck Jun³·Sang-Su Byeon⁴·Kae-Myoung Park⁵
SK Hynix¹
Samsung Electronics²
POSTECH³
Hyundai Ocean Service⁴
Korean Register⁵

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.

Main engine failures in ship operations can lead to a major damage in terms of the vessel itself and the financial cost. In this respect, monitoring of a vessel's main engine condition is crucial in ensuring the vessel's performance and reducing the maintenance cost. The collection of a huge amount of vessel operational data in the maritime industry has never been easier with the advent of advanced data collection technologies. Real-time monitoring of the condition of a vessel's main engine has a potential to create significant value in maritime industry. This study presents a case study on the establishment of upper control limit to detect vessel's main engine failures using multivariate control chart. The case study uses sample data of an ocean-going vessel operated by a major marine services company in Korea, collected in the period of 2016.05-2016.07. This study first reviews various main engine-related variables that are considered to affect the condition of the main engine, and then attempts to detect abnormalities and their patterns via multivariate control charts. This study is expected to help to enhance the vessel's availability and provide a basis for a condition-based maintenance that can support proactive management of vessel's main engine in the future.

Keywords : Condition monitoring(상태 감시), Multivariate control chart(다변량 관리도), Condition-based maintenance(상태 기반 유지보수), Vessel engine(선박 엔진)

1. 서론

해운사의 경영 환경이 지속적으로 악화되면서, 선박의 상태 모니터링에 기반한 경영 환경 정상화에 대한 요구가 가속화되고 있다 (Jang et al., 2011). 선박 상태 모니터링이란 선박 내 설치되어 있는 다양한 장비들의 상태를 주기적으로 점검하여

예기치 않은 상황을 사전에 방지하는 것을 의미한다 (Pillay et al., 2001). 선박의 상태 관리 실패는 선박 운항 중에 큰 사고를 야기할 수 있으며, 이러한 사고는 해운사의 금전적 손실과 신뢰도 감소로 이어질 수 있어 사전에 선박의 상태를 주기적으로 모니터링하는 것은 매우 중요하다 (Lazakis et al., 2016; Gkerekos et al., 2017). 특히 메인 엔진은 선박의 동력을

공급하는 중요한 장비로, 선박 내 장비 중 가장 중요한 역할을 수행하기 때문에 이에 대한 지속적인 모니터링과 유지보수는 매우 중요하다고 알려져 있다 (Lamaris & Hountalas, 2010).

기존 연구에서는 메인 엔진의 상태를 모니터링하기 위해 다양한 방법을 활용해왔다. 가장 직접적이며 단순한 방법으로는 메인 엔진을 직접 분해하여 엔진 내부의 부품 (실린더, 베어링 등)을 직접 살펴보는 것이 있다. 이러한 방법은 정확한 점검이 가능하다는 장점이 존재하나, 점검 비용과 시간이 많이 소요되고, 점검 수행 시 사고 발생 가능성이 존재한다는 단점이 존재한다 (Lee et al., 2012). 다른 방법으로는 메인 엔진의 상태를 나타내는 데이터를 수집하고, 이를 분석함으로써 메인 엔진의 상태를 간접적으로 살펴보는 것이 있다 (Mokashi et al., 2002). 이러한 방법은 메인 엔진을 분해할 필요가 없기 때문에 상대적으로 적은 시간이 소요되며, 안정적으로 모니터링을 수행할 수 있는 장점이 존재한다. 그러나, 메인 엔진의 상태를 면밀하게 살펴보기 위해서 수집되어야 하는 데이터는 그 양이 많고 변수가 다양하기 때문에 높은 비용이 투입된다는 단점이 존재한다.

최근, 정보 통신 기술의 발전으로 선박 메인 엔진의 상태 데이터를 손쉽게 수집할 수 있게 되었다. 이에 따라 데이터 수집 및 분석을 통한 선박 상태 모니터링 방법의 구현이 현실화되고 그 중요성 또한 높아졌다. 기존 연구에서는 데이터에 기반한 상태 모니터링을 수행하기 위해 주로 관리도를 활용한다. 대표적인 연구로는 단변량 관리도를 활용해 선박 메인 엔진 내부의 배기가스 온도를 분석하여, 메인 엔진의 상태를 모니터링한 연구가 있다 (Orosa et al., 2011). 그러나, 이 연구는 하나의 변수만을 활용하여 분석을 수행하였기에 실제 메인 엔진에서 발생하는 문제점을 종합적으로 모니터링할 수 없다는 한계점이 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 Boullosa (2017)은 선박 데이터 내 여러 변수를 종합적으로 분석하는 Hotelling's T^2 다변량 관리도를 활용해 메인 엔진의 상태를 모니터링하였다. 그러나, 이 연구는 메인 엔진의 상태를 나타내는 여러 변수 중 7개 변수만을 활용하여 분석을 수행하였으며, 데이터 수집 주기가 일정하지 않아 선박 상태 변화를 다양한 관점에서 모니터링 할 수 없었다는 한계점이 존재한다.

본 연구는 한국의 대형 해운사에서 실제로 운항하고 있는 선박 한 척의 메인 엔진 상태 관련 데이터를 수집하고, 이를 분석하여 메인 엔진의 상태를 모니터링한 사례 연구 결과를 제시하였다. 본 연구에서 활용한 메인 엔진 상태 데이터는 선박 내 설치되어 있는 다양한 센서로부터 수집되며, 메인 엔진 실린더 내부의 배기가스 온도, 터보차저의 온도 등과 같은 메인 엔진의 상태를 나타내는 다양한 정보를 포함하고 있다. 본 연구에서는 이러한 데이터를 활용해 메인 엔진의 상태 모니터링을 수행하기 위해 통계적 기법인 붓트스트랩 기반의 T^2 다변량 관리도를 활용하였다. 이를 통해 선박의 메인 엔진 모니터링을 위해 주요하게 고려해야 할 변수 그룹 및 변수 그룹별 관리 상한선을 도출할 수 있었으며, 이를 활용해 관리 상한선을 이탈한 샘플들의 잠재 원인에 대해 규명할 수 있었다.

본 연구는 선박 한 척의 실제 상태 데이터를 분석하고, 이에 기반하여 메인 엔진의 상태를 모니터링 했다는 점에 기여가 있다. 특히, 메인 엔진의 상태를 나타내는 145개 변수를 고려하여 분석을 수행하며, 이들의 실제 운항 중의 선박 메인 엔진 관련 상태를 10분 단위로 일정하게 모니터링했다는 점에서 기존의 연구와의 차별성이 존재하였다. 또한, 5개의 변수 그룹 및 7개의 엔진 부하 기준을 나누어 메인 엔진 관련 상태를 분석하였기에 기존의 연구보다 세밀한 모니터링을 수행하였다. 본 연구 결과는 전문가의 의견과 함께 메인 엔진 상태의 문제점 파악을 통계적으로 지원하기 위한 기초자료로 활용되어 선박 엔진 관리자의 유지보수 관련 의사 결정을 지원하는데 기여할 것으로 예상된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 메인 엔진 상태 데이터에 활용 가능한 통계적 모니터링 기법을 살펴본다. 제3장에서는 사례 연구 수행 배경 및 사례 연구에 활용한 데이터에 대해 살펴본 후, 해당 데이터를 활용하여 메인 엔진 상태 모니터링 수행한 결과를 제시하였다. 제4장에서는 본 연구의 기여 사항 및 연구의 결과를 정리한 후 끝으로 추후 연구 과제를 제시하였다.

2. 붓트스트랩 기반의 T^2 관리도를 활용한 상태 모니터링

본 2장에서는 사례 연구에 활용한 붓트스트랩 기반의 T^2 관리도의 특징을 소개하였다. 또한, 관리 상한선을 이탈하는 샘플들의 잠재 원인을 찾는데 활용할 수 있는 Runger's T^2 분해 기법 방법을 소개하였다.

2.1 붓트스트랩 기반의 T^2 관리도

관리도 기법은 통계적 방법을 활용하여 각 품질 특성치의 변동을 예측하고 관리하며, 공정 상태를 유지하고 개선하는데 활용할 수 있는 방법이다 (Shewhart, 1926). 기존에는 단변량 관리도를 활용하여 소수 변수의 변동을 시계열 관점에서 파악하고 공정 과정을 관리하는 연구가 주로 수행되었다. 그러나, 현재는 정보 통신 기술의 발전으로 인해 다수 변수의 정보가 동시에 수집되고 있으며, 이들 간의 상관관계를 고려할 수 있는 통계적 방법인 다변량 관리도의 중요성이 증대되고 있다. 특히, 다변량 관리도는 변수 간 교호 관계로부터 발생하는 시너지 효과를 파악하는 것을 지원하며, 기존의 단변량 관리도 분석만으로는 탐지하지 못하는 공정 이상의 탐지가 가능하기에 (Chongfuangprinya et al., 2011), 메인 엔진 상태 데이터에 적용하기 적합하다.

대표적인 다변량 관리도로 활용되는 Hotelling T^2 관리도는 관리 대상 변수가 두 개 이상일 경우에 활용 가능한 방법이다. 이는 공정 데이터의 평균 벡터 (\bar{X})와 공분산의 역행렬 (S^{-1})을

활용하여 다수의 변수값을 하나의 변수값 (T^2)으로 변환하여 관리도를 만드는 방법이다. Hotelling T^2 관리도는 공정 데이터가 다변량 정규분포를 따른다는 가정하에, 변수의 개수 (P), 총 관측치의 개수 (N), 유의수준 (α)를 활용하여 관리 상한선을 설정한다. 하지만, 데이터가 다변량 정규분포를 따르지 않을 경우 기존의 Hotelling T^2 관리도에서 활용되는 T^2 통계량과 관리 상한선은 부정확한 결과를 초래할 수 있다. 특히, 실제 공정에서 수집된 데이터들은 대부분 다변량 정규분포를 따르지 않기 때문에 (Chen et al., 2004), 기존의 가정으로 설계된 관리 상한선은 False Alarm을 야기하는 등의 오류를 발생시킬 수 있다 (Chou et al., 2001).

이러한 한계를 극복하기 위한 대표적인 방법으로 Phaladiganon et al., (2011)이 제안한 붓트스트랩 기반의 다변량 관리도를 활용할 수 있다. 이는 데이터가 다변량 정규분포를 따르지 않아도 관리도의 관리 상한선을 계산할 수 있는 대표적인 비모수 추정 기법 (Efron & Tibshirani, 1993) 중 하나이다. 붓트스트랩 기반의 다변량 관리도의 관리 상한선 설정 방법은 다음과 같다. 먼저, 데이터를 활용하여 T^2 통계량을 계산하고, 이들에 대한 복원 추출하여 붓트스트랩 표본을 만든다. 다음은 앞서 도출한 붓트스트랩 표본으로부터 $100 \times (1-\alpha)$ 에 해당하는 분위수를 계산한다. 끝으로 분위수의 평균을 계산한 후 이를 관리 상한선으로 사용한다. 본 방법론은 확률 분포에 대한 사전 정보가 없어도 활용할 수 있으며, 관리 상한선을 완화시키기 때문에 오류 경보의 수를 줄일 수 있다는 장점이 있어 본 연구에서 활용하였다.

2.2 Runger's T^2 분해기법

다변량 관리도의 경우 여러 변수값들을 하나의 변수값인 T^2 통계량으로 변환하기 때문에, 관리 상한선을 이탈하는 샘플들의 잠재 원인을 찾는 데 어려움이 있다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 T^2 통계량을 분해하는 방법이 다양하게 연구되고 있지만, 본 연구에서는 이상을 야기하는 변수를 탐지하는 능력이 우수하고 계산 과정이 간결한 Runger's T^2 분해 기법 방법을 활용한다 (Runger et al., 1996). 본 방법은 T^2 통계량을 각각 변수별로 분해를 수행하여 분해한 값이 큰 변수를 이상치 발생의 잠재 원인이라 판단하는 방법이다. 전체 변수가 반영된 T^2 통계량과 개별 변수 i 를 제외했을 때의 T^2 통계량의 차이를 통하여 기여도를 산출한다. 각 변수별 산출된 기여도 값에 근거해, 기여도 값이 큰 변수에 의해 관리 상한선을 이탈했을 확률이 높다고 판단할 수 있다. 예를 들어, 첫 번째 변수의 기여도 값이 다른 변수의 기여도 값보다 상대적으로 큰 값을 가지면, 첫 번째 변수로 인하여 관리 상한선을 이탈했을 가능성이 높다고 판단한다. 하지만 이러한 기여도 값은 관리 상한선을 이탈하는 샘플을 발생시키는 직접적인 원인이 아닌 잠재 가능성을 평가하는 척도이기 때문에, 기여도 값을 기반한 전문가의 추가 해석을 통해 이상의 직접적인 원인을 파악해야 한다.

3. 운항 중인 선박 메인 엔진의 상태 모니터링 사례연구

본 3장에서는 사례 연구에 활용한 메인 엔진의 상태 데이터와 운항 기록 데이터에 대해 소개하고 2.1절에서 소개한 붓트스트랩 기반의 T^2 다변량 관리도를 활용하여 메인 엔진의 상태 데이터를 분석해 메인 엔진 상태를 모니터링한 결과를 제시하였다. 이를 위해 본 연구는 총 4개의 단계로 수행되었다. 단계 1에서는 메인 엔진의 기본 지식 및 데이터의 특징을 고려하여 데이터 전처리를 수행하였다. 단계 2에서는 메인 엔진의 상태를 효율적으로 관리하기 위해 모니터링 대상 그룹을 선정하였다. 단계 3에서는 모니터링 대상 그룹별 다변량 관리도를 작성하였다. 끝으로 단계 4에서는 분석한 결과를 바탕으로 이상치의 잠재 원인을 규명하였다.

3.1 사례 연구 수행 데이터

본 연구에서는 2-stroke 디젤 엔진을 장착한 “6800 TEU 컨테이너” 선박 한 척의 메인 엔진 상태 데이터를 활용하였다. 메인 엔진 상태 데이터에는 메인 엔진 내 실린더 배기가스의 온도, 터보차저의 온도, RPM 등과 같이 메인 엔진의 상태를 나타내는 145개 변수의 정보가 기록되어 있다 (Table 1). 145개 변수는 모두 다른 특성을 갖는 것이 아니라, 기계공학적으로 매우 유사한 변수들도 다수 포함하고 있다. 145개 변수의 정보는 선박의 시동이 꺼졌을 때부터 꺼질 때까지 기록이 되며, 특히 10분 간격으로 일정하게 값들이 저장된다는 특징을 갖는다.

Table 1 Variable information for main engine condition

Code	Variable	Explanation	No. of variable (Total 145)
A1	M/E CYL. EXH. GAS TEMP	Air temperature from cylinder	12
A2	M/E T/C EXH. GAS OUT TEMP	Exhaust gas temperature from turbocharger	2
A3	M/E T/C EXH. GAS IN PRESS	Suction gas pressure from turbocharger	2
A4	M/E T/C EXH. GAS OUT PRESS	Exhaust gas pressure from turbocharger	2
A5	M/E T/C EXH. GAS IN TEMP	Suction gas temperature from turbocharger	2
A6	M/E SCAV. AIR PRESS	Air pressure from scavenger	1
A7	M/E SCAV. AIR IN TEMP	Air temperature from scavenger	12
B1	M/E CYL. LINER EXH. SIDE TEMP	Air temperature from liner in cylinder (exhaust side)	12
B2	M/E CYL. LINER P/P SIDE TEMP	Air temperature from liner in cylinder (pump side)	12
C1	M/E JACKET C.F.W IN PRESS	Pressure of incoming jacket cooling water fresh water	12

Code	Variable	Explanation	No. of variable (Total 145)
C2	M/E J.C.F.W COMMON OUT TEMP	Temperature of outgoing jacket cooling water fresh water (Common)	12
C3	M/E JACKET C.F.W IN TEMP	Temperature of incoming jacket cooling water fresh water	12
C4	M/E J.C.F.W OUT TEMP	Temperature of outgoing jacket cooling water fresh water	12
D1	M/E A/C C.W OUT PRESS	Pressure of outgoing cooling water from air cooler	2
D2	M/E A/C C.W IN TEMP	Temperature of incoming cooling water from air cooler	2
D3	M/E A/C C.W OUT TEMP	Temperature of outgoing cooling water from air cooler	2
D4	M/E A/C C.F.W IN PRESS	Pressure of incoming cooling water from air cooler	2
E1	M/E T/C L.O OUT TEMP	Temperature of lubricating oil from turbocharger	2
E2	M/E T/C L.O PRESS	Pressure of lubricating oil from turbocharger	2
E3	M/E PISTON C.L.O OUT TEMP	Temperature of cooling lubricating oil from turbocharger	12
E4	M/E L.O IN TEMP	Temperature of incoming lubricating oil from main engine	1
E5	M/E T/C L.O IN TEMP	Temperature of incoming lubricating oil from turbocharger	1
E6	M/E MAIN BEARG TEMP	Temperature of bearing from main engine	14

145 variables

Time	Cylinder Exhaust Gas. Temp.			...	Turbocharger Exhaust Gas Temp	
	Cylinder 1	Cylinder 2	Cylinder 3		Turbocharger 1	Turbocharger 2
2016-05-16 0:00	274.3	275.9	277.9	...	47.2	47.2
2016-05-16 0:10	275.7	276	278.2	...	51.5	51.5
...	...	...	...	...	50.9	50.9
2015-05-16 23:50	267.9	248.6	269.6	...	49.25	49.25
...	...	...	...	...	50.55	50.55
2016-07-21 0:01	61.7	65.3	73.7	...	46.9	46.9
...	...	...	...	...	51.55	51.55
2016-07-21 21:11	71.5	73.2	72	...	51.4	51.4

Fig. 1 Example of a main engine condition data

본 연구에서는 2016년 5월 16일 ~ 2016년 7월 21일에 두바이와 상하이 구간을 운항했을 때의 메인 엔진 상태를 다룬다 (Fig. 1). 일반적으로 선박에서 수집된 데이터에는 운항 기록과 운항 외 부가적 활동 중의 기록이 포함되어 있다. 이에 신뢰도 높은 결과를 도출하기 위하여 선박 회사로부터 선박 운항 일지를 입수하고, 운항 일지와 운항 기록 (예: GPS

및 운항 시각)에 기반하여 실제 운항한 시간의 데이터만을 추출해서 분석하였다. 예를 들어, 항해 외 부가적인 활동 (예: 출항 대기, 도착지에 진입 등) 중에 수집된 데이터는 제거하였다. 또한, 통계적 지식과 함께 전문가의 기계공학적인 지식을 활용하여 이상치를 제거하고, 이를 통해 데이터 내 존재하는 노이즈를 최소화하여 분석하였다.

3.2 분석 대상 데이터 준비

본 단계에서는 분석에 활용할 데이터를 준비하기 위해, 데이터 전처리 및 변수 통합을 수행하였다. 데이터의 품질은 관리도 작성 결과에 큰 영향을 미치기 때문에, 관리도 작성 전 전처리를 세심하게 수행하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 데이터 전처리를 위해 선박의 실제 운항 전 다양한 상황 아래 다수의 실험 운항 결과(Result of Sea Trial)를 입수하였다. 이를 통해 메인 엔진이 정상 상태일 때 가져야 할 센서값의 범위 정보 등의 기계공학적인 지식을 수집하고, 이에 기반하여 센서에서 발생한 오류값을 제거하였다 (예: 실린더의 배기가스 온도 정상 범위는 420°C 이하임. 이 값을 초과하는 경우에는 데이터값 제거함). 이와 더불어 센서 이상, 장비의 결손 등의 문제로 인하여 발생한 결측치, Null 값을 가진 센서값을 전문가 자문을 통해 제거하여 전처리를 수행하였다.

본 연구에서는 분석 대상 데이터 준비를 위해 기계공학적인 통계적 특성이 비슷한 변수들 간 통합을 수행하였다. 입수한 데이터 내 145개의 변수에는 기계공학적으로 특성이 유사한 변수들이 다수 기록되어 있다. 예를 들어 메인 엔진에는 12개의 실린더가 존재하기 때문에, 12개의 실린더별 배기가스 온도가 기록된다 (참조: A1 변수). 이 변수들의 값은 기계공학적으로 비슷한 특성을 갖기 때문에 상관관계가 통계적으로 매우 높았다. 이에 본 연구에서는 모니터링의 용이성을 위해 상관관계가 0.73 이상인 변수들을 하나의 변수로 통합하였다 (예: 앞서 소개한 12개의 실린더별 배기가스 온도 정보를 평균을 활용한 하나의 변수로 통합). 이 과정에 있어 상관관계를 살펴봄과 동시에 전문가 의견에 기반한 기계공학적인 특성을 추가적으로 활용하여 실험 결과의 왜곡을 최소화하였다. 본 연구에서는 변수 통합을

No.	Variables	No.	Variables
1	M/E NO.1 CYL EXH. GAS OUT TEMP.	1	M/E CYL EXH. GAS TEMP (A1)
2	M/E NO.2 CYL EXH. GAS OUT TEMP.	2	M/E T/C EXH. GAS OUT TEMP (A2)
3	M/E NO.3 CYL EXH. GAS OUT TEMP.	3	M/E T/C EXH. GAS IN PRESS (A3)
4	M/E NO.4 CYL EXH. GAS OUT TEMP.	4	M/E T/C EXH. GAS OUT PRESS (A4)
5	M/E NO.5 CYL EXH. GAS OUT TEMP.	5	M/E T/C EXH. GAS IN TEMP (A5)
6	M/E NO.6 CYL EXH. GAS OUT TEMP.	6	M/E SCAV. AIR PRESS (A6)
7	...	7	M/E SCAV. AIR IN TEMP (A7)
68	M/E NO.1 J.C.F.W OUT TEMP.	8	M/E CYL LINER EXH. SIDE TEMP (B1)
69	M/E NO.2 J.C.F.W OUT TEMP.	9	M/E CYL LINER P/P SIDE TEMP (B2)
70	M/E NO.3 J.C.F.W OUT TEMP.	10	M/E JACKET C.F.W IN PRESS (C1)
71	M/E NO.4 J.C.F.W OUT TEMP.	11	M/E J.C.F.W COMMON TEMP (C2)
72	M/E NO.5 J.C.F.W OUT TEMP.	12	M/E JACKET C.F.W IN TEMP (C3)
73	M/E NO.6 J.C.F.W OUT TEMP.	13	M/E J.C.F.W OUT TEMP (C4)
74	M/E NO.7 J.C.F.W OUT TEMP.	14	M/E A/C C.W OUT PRESS (D1)
138	M/E NO.7 MAIN BEAR'G TEMP 389	15	M/E A/C C.W IN TEMP (D2)
139	M/E NO.8 MAIN BEAR'G TEMP 390	16	M/E A/C C.W OUT TEMP (D3)
140	M/E NO.9 MAIN BEAR'G TEMP 391	17	M/E A/C C.F.W IN PRESS (D4)
141	M/E NO.10 MAIN BEAR'G TEMP 392	18	M/E T/C LO OUT TEMP (E1)
142	M/E NO.11 MAIN BEAR'G TEMP 393	19	M/E T/C LO PRESS (E2)
143	M/E NO.12 MAIN BEAR'G TEMP 394	20	M/E PISTON C.L.O OUT TEMP (E3)
144	M/E NO.13 MAIN BEAR'G TEMP 395	21	M/E LO IN TEMP (E4)
145	M/E NO.14 MAIN BEAR'G TEMP 396	22	M/E T/C LO IN TEMP (E5)
		23	M/E MAIN BEARG TEMP (E5)

Fig. 2 Data integration

위해 특성이 비슷한 변수들 간의 평균치를 활용하였다. Fig. 2(A)는 현재 수집되고 있는 변수들 중 비슷한 특성을 갖는 변수를 나타낸 것이며, Fig. 2(B)는 해당 변수들 간의 평균치를 활용하여 통합을 수행한 결과이다. 통합 결과 총 23개의 변수를 최종 도출하였다.

3.3 모니터링 대상 선정

선박의 메인 엔진 내에는 다양한 특성을 가진 하위 부품들이 다수 존재한다. 이 부품들은 각기 다른 특성을 갖고 있기 때문에, 특성이 비슷한 부품들을 우선적으로 분류하고, 이를 각각 모니터링하는 것이 필요하다. 특성이 비슷한 부품들을 분류하기 위해 본 연구에서는 앞서 도출한 23개의 변수들을 전문가의 기계공학적 지식을 기반으로 5개의 그룹으로 분류하였다. 분류 결과, 메인 엔진 소기 및 배기가스 관련 변수 (SCAV/EXH),

실린더의 라이너 관련 변수 (MACH), 메인 엔진 재킷 관련 변수 (JACKET), 메인 엔진 에어 쿨러 관련 변수 (A/C), 메인 엔진 윤활유 관련 변수 (L.O)로 분류되었다 (Fig. 3). 본 연구에서는 이 분류 결과를 활용하여 관리도를 작성하였다.

선박 엔진 상태 데이터의 값은 메인 엔진의 부하 (Engine load)에 따라 변동이 심하기 때문에, 관리 상한선을 설정하는데 어려움이 존재하였다. 변동이 크면 정상 범위의 센서값이 관리 상한선을 이탈하거나, 비정상적인 범위의 센서값이 관리 상한선을 이탈하지 않는 것으로 분류될 수 있기 때문이다. 이에 본 연구에서는 엔진 부하 기준을 설정하고, 이 기준별로 데이터를 분류하여 관리도를 작성하였다. 특히 본 연구에서 입수한 데이터는 엔진 부하의 범위가 0~35%이었기 때문에, 5%의 간격을 두고 엔진 부하를 분류하였다 (0~5%; 5~10%; 10~15%; 15~20%; 20~25%; 25~30%; 30% 이상).

3.4 다변량 관리도 작성

본 단계에서는 선박 엔진 데이터를 대상으로, 2.1절에서 소개한 بوت스트랩 기반의 T^2 다변량 관리도를 작성하였다. 본 연구에서는 1000번의 T^2 통계량을 복원 추출하였으며, 유의수준 (α)을 0.01로 지정하였다. 본 논문에서는 서술의 용이성과 중복 내용의 최소화를 위하여, 가장 많은 샘플 (1276개)을 갖는 엔진 부하 20~25%인 경우에 관리도를 작성한 결과를 소개하였다. 관리도 작성 결과는 Fig. 4와 같다. 관리도 작성 결과, 각 변수 그룹의 관리 상한선은 46.18, 9.32, 13.37, 15.90, 53.21로 설정되었다.

관리 상한선을 이탈한 샘플 (이하 이탈 샘플이라 명명)들의 특성을 간단히 확인해보면 다음과 같다. 첫째, 한 변수 그룹 내에서 이탈 샘플로 관측되는 경우 다른 변수 그룹에서의 이탈 샘플로 관측되는 경우가 많다. 예를 들어 Fig. 4의 샘플 1208번은 변수 그룹 1 관리도에서 이탈 샘플로 관측됐을 뿐만 아니라, 변수 그룹

No.	Variables	SCAV/EXH	MACH	JACKET	A/C	L.O
1	M/E CYL. EXH. GAS TEMP (A1)	Subgroup 1				
2	M/E T/C EXH. GAS OUT TEMP (A2)					
3	M/E T/C EXH. GAS IN PRESS (A3)					
4	M/E T/C EXH. GAS OUT PRESS (A4)					
5	M/E T/C EXH. GAS IN TEMP (A5)					
6	M/E SCAV. AIR PRESS (A6)					
7	M/E SCAV. AIR IN TEMP (A7)					
8	M/E CYL. LINER EXH. SIDE TEMP (B1)	Subgroup 2				
9	M/E CYL. LINER P/P SIDE TEMP (B2)					
10	M/E JACKET C.F.W IN PRESS (C1)	Subgroup 3				
11	M/E J.C.F.W COMMON TEMP (C2)					
12	M/E JACKET C.F.W IN TEMP (C3)					
13	M/E J.C.F.W OUT TEMP (C4)	Subgroup 4				
14	M/E A/C C.W OUT PRESS (D1)					
15	M/E A/C C.W IN TEMP (D2)					
16	M/E A/C C.W OUT TEMP (D3)					
17	M/E A/C C.F.W IN PRESS (D4)	Subgroup 5				
18	M/E T/C L.O OUT TEMP (E1)					
19	M/E T/C L.O PRESS (E2)					
20	M/E PISTON C.L.O OUT TEMP (E3)					
21	M/E L.O IN TEMP (E4)					
22	M/E T/C L.O IN TEMP (E5)					
23	M/E MAIN BEARG TEMP (E6)					

Fig. 3 Variables classification

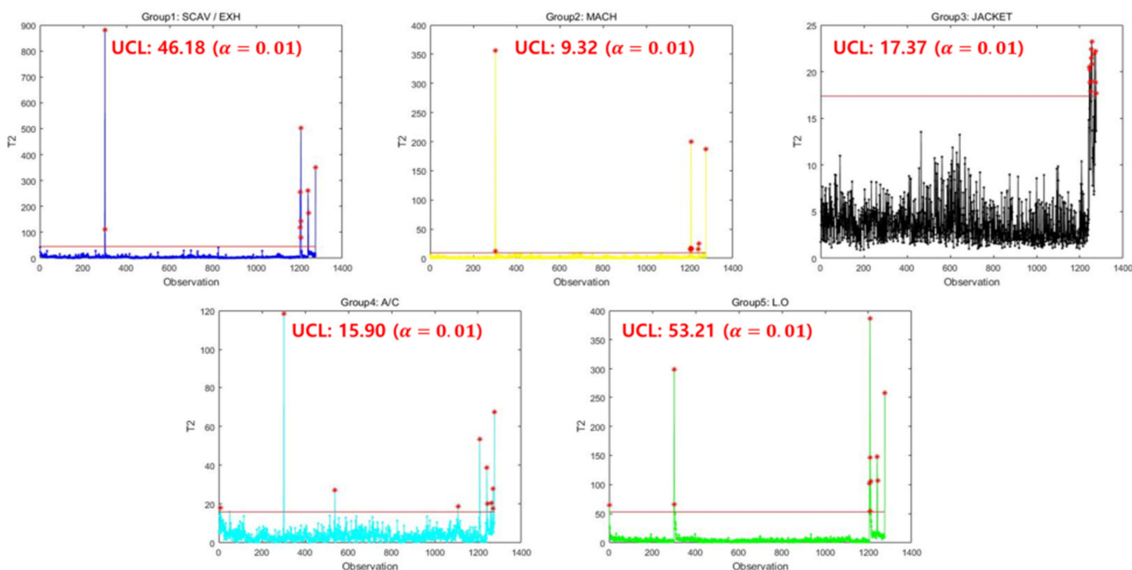


Fig. 4 Creation of control chart (Engine load 20~25%)

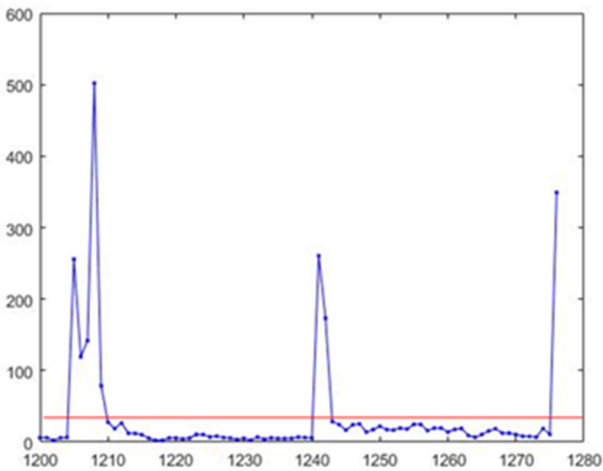


Fig. 5 Sub-control chart for subgroup 1 (Sample No. 1200 - 1276)

2, 4, 5에서도 이탈 샘플로 관측되었다. 이는 메인 엔진의 센서 문제 이상이 아닌, 메인 엔진의 상태 이상으로 관리 상한선을 이탈했을 가능성이 큼을 의미한다. 둘째, 관리 상한선을 이탈 샘플들을 살펴보면, 특정 시간대에 샘플이 연속적으로 이탈하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 Fig. 4 내 변수 그룹 1의 관리도를 확대하여 1200~1276번 샘플의 상태를 나타낸 관리도이다. Fig. 5를 살펴보면, 샘플 1200~1276번에서 총 8개의 샘플이 관리 상한선을 이탈하였으며, 이들 중에서는 연속적으로 이탈한

경우도 존재하였다. 즉, 인접한 시간대에 발생한, 그리고 여러 변수 그룹에서 관측되는 이탈 샘플들이 실제로 메인 엔진의 상태 이상을 일으킬 가능성이 매우 크기 때문에, 이를 우선적으로 살펴 보는 것이 필요하다.

3.5 관리선을 이탈한 샘플의 잠재 원인 규명

이탈 샘플들은 추후 메인 엔진의 고장 발생에 큰 영향을 미칠 수 있으므로, 해당 이탈 샘플들의 잠재 원인을 규명하는 것이 매우 중요하다. 이탈 샘플들의 잠재 원인을 규명하는 방법으로는 여러 방법이 존재하지만, 본 연구에서는 2.2절에서 소개한 Runger's T^2 분해 기법을 활용하여 잠재 원인을 분석하였다. Table 2은 변수 그룹 1에서 발생한 이탈 샘플들에 Runger's T^2 분해 기법을 적용한 결과이다. 변수 그룹 1의 경우 총 1276개의 샘플들 중 10개의 이탈 샘플이 발생하였다. Table 2를 살펴보면, 첫 번째 열은 이탈 샘플들의 번호를 나타내며, 두 번째 열부터 각 열은 두 개의 행을 포함한다. 첫 번째 행은 기여도 값 (d_i), 두 번째 행은 이탈 샘플의 실제 센서 값을 나타낸다. 예를 들어, 이탈 샘플 1241번은 여러 변수들 중 d_i 값이 가장 높은 A1 변수에 의해 관리 상한선을 이탈했을 가능성이 크다고 볼 수 있으며, 그 당시의 A1 변수의 실제 센서값은 비슷한 시간대의 A1 변수값 보다 높은 318.10°C를 가졌다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2 Out of control samples and major contributors

이상치 번호	Type	Subgroup 1						
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
301	Contributor (d_i)	174.95	4.17	0.01	13.07	4.81	1.64	1.20
	Sensor value	224.40	259.50	241.60	109.75	-4.00	0.24	48.00
302	Contributor (d_i)	19.93	1.24	8.49	5.69	4.93	0.13	0.55
	Sensor value	345.10	387.10	325.20	360.55	-5.60	0.53	43.28
1205	Contributor (d_i)	0.42	50.89	86.77	96.94	1.72	7.38	9.92
	Sensor value	341.50	375.60	315.75	273.10	-5.20	0.48	45.36
1206	Contributor (d_i)	9.16	9.00	4.43	14.54	1.64	4.12	69.88
	Sensor value	311.40	353.65	296.75	360.85	-5.30	0.49	50.00
1207	Contributor (d_i)	7.78	13.36	10.87	17.24	4.46	0.56	101.68
	Sensor value	310.80	355.05	298.05	368.25	-5.25	0.51	50.96
1208	Contributor (d_i)	68.89	0.24	44.87	17.91	8.56	0.31	1.14
	Sensor value	310.90	314.40	261.45	179.60	-4.45	0.36	49.10
1209	Contributor (d_i)	30.92	10.99	2.00	23.03	7.53	10.88	28.31
	Sensor value	330.70	381.30	313.65	474.95	-6.45	0.60	44.97
1241	Contributor (d_i)	101.97	20.81	0.00	11.71	0.11	12.98	6.07
	Sensor value	318.10	337.20	282.15	282.45	-4.90	0.41	47.37
1242	Contributor (d_i)	13.12	8.67	23.03	6.39	20.14	12.16	12.91
	Sensor value	345.70	385.50	325.95	328.05	-5.15	0.45	42.16
1276	Contributor (d_i)	0.05	0.76	1.01	44.21	12.24	91.47	0.00
	Sensor value	284.50	307.80	272.55	157.05	-5.30	0.42	47.48

추가로 분석 결과를 살펴보면 두 번째 변수의 d값과 네 번째 변수의 d값이 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 이는 해당 변수로 인해 이상치가 발생할 가능성이 크다는 것을 의미한다. 그러나, d값이 높다고 하여 이상치 발생의 직접적 원인이라 볼 수는 없으며 잠재 원인으로써 이해해야한다. 이에 대한 추가적인 전문가의 해석이 결합되어야 이상치 발생의 직접적인 원인을 파악할 수 있다. 이에 본 연구에서는 분석 결과와 실제 데이터 수집 당시의 상황을 비교한 결과 이상치에 영향을 미치는 환경적 원인이 발견되었다. 변수 그룹 1, 2와 달리 변수 그룹 3, 4, 5는 변수값이 일정 기간 지속적으로 높은 값을 가지는 현상이 나타났다. 특히 변수 그룹 3은 외부 영향에 따라 변동할 가능성이 높은 변수로, 해수 온도의 상승 등 외부 요인으로 인하여 이탈 샘플이 발생되었을 가능성이 매우 높다. 실제 운항 중 수집된 해수 온도를 비교한 결과 해수 온도가 이전과 비교하여 소폭 상승하였음을 확인하였다. 실제 이와 같은 현상이 지속될 경우 원칙적으로는 메인 엔진을 정지하고 메인 엔진 상태를 확인하여야 한다. 하지만, 선박의 메인 엔진 상태는 실제 고장의 빈도가 극도로 적으며 외부 요인에 심히 변동하기에, 이상 샘플 발견 시 전문가의 추가적인 해석을 결합한 모니터링을 통해 추후 조치가 수행되어야 한다.

4. 결론 및 향후 계획

본 4장에서는 앞 장에서 제시한 연구 결과가 선박 산업에서 어떠한 의의와 역할을 갖는지 토의하고 연구 결과의 활용 방안을 제시하였다. 또한, 연구 결과를 정리하고 추후 연구 과제를 제시하였다.

4.1 연구 결과의 의의 및 역할

최근, 정보 통신 기술의 발전으로 선박 산업에서는 선박의 상태를 나타내는 데이터를 실시간으로 수집하거나 저장하는 것이 가능해졌다. 이와 더불어 분석 기술의 발전으로 이러한 데이터를 분석하여 선박의 상태를 모니터링하는 것이 가능해졌다. 기존의 연구들은 센서를 활용하여 장비의 상태가 운영환경의 기준을 넘어갈 경우를 직접 알려주는 것을 목적으로 하거나, 여러 한계점을 갖는 데이터를 활용해 모니터링 연구를 수행했기 때문에, 잠재 변수를 활용한 상태 모니터링에 어려움이 존재하였다. 하지만, 본 연구는 실제 운항으로부터 수집된 145개의 메인 엔진 상태 데이터를 붓트스트랩 기반의 T^2 다변량 관리도를 활용한 통계적 관점에서 분석하여, 이상을 야기할 가능성이 높은 잠재 변수를 통계적으로 선별했다는 점에서 기존 연구와 차별점이 있다. 특히, 본 연구에 활용된 데이터는 정규분포를 따르지 않는 실제 운항 시의 데이터라는 점, 10분마다 일정하게 수집되었다는 점에서 기존 연구에서 활용한 데이터보다 더 많은 정보를 포함하기 때문에, 기존 연구에서 파악할 수 없었던 메인 엔진의 상태의 변화를 세밀히 모니터링할 수 있었다. 실제 운항 중인 선박의 메인 엔진 상태 데이터를 활용하여

메인 엔진의 상태를 모니터링하는 것은 통계적 증거에 기반하여 이탈 샘플 도출, 이탈 샘플의 잠재 원인 규명, 상태기반 유지보수를 수행할 수 있다는 장점이 있다. 데이터 분석 결과에 따라 선박의 특성 및 조건에 맞춤형된 유지보수를 수행할 수 있다는 점이 본 연구의 장점이다. 특히, 본 연구 결과는 전문가의 의사결정을 지원하는 측면에서 활용될 수 있다. 즉, 데이터 분석 결과는 전문가의 의사 결정을 대체하는 것이 아닌, 전문가의 의사 결정을 지원하여 선박의 효율적인 운영에 기여하는 것을 목적으로 하였다. 예를 들어, 본 연구의 선박 메인 엔진의 상태 모니터링 결과는 기존의 안전 관련 이해관계자들의 의견 분석을 보조하고, 더욱 정확하고 현실적인 유지보수를 지원하여 안전사고를 예방할 수 있다.

4.2 연구 결과 활용 방안

본 연구는 붓트스트랩 기반의 T^2 다변량 관리도를 활용하여 선박 메인 엔진의 상태를 모니터링하였다. 해당 과정에서 각 엔진 부하율과 변수 그룹에 따른 관리 상한선을 도출하였고 이를 기반으로 선박 메인 엔진 모니터링의 다양한 시나리오를 상상할 수 있다. 첫째, 선박 관리자가 원하는 수준에 따라 특별한 의미를 내포하는 관리선 도출이 가능하다. 이는 붓트스트랩 표본을 만드는 과정에서 사용되는 유의수준을 조정함에 따라 다양한 용도로 활용할 수 있는 관리 상한선을 도출할 수 있다 (Fig. 6). 예를 들어 유의수준을 크게 설정하여 도출한 관리 상한선은 선박 관리자에게 주의하라는 알림을 주는데 활용될 수 있다. 이와 반대로 유의수준을 작게 설정하여 도출한 관리 상한선은 선박 관리자에게 심각한 경고를 주는 형태로 활용될 수 있다. 즉, 기존의 한 개의 관리선만을 활용하는 관리도가 아닌 경고, 주의 등의 의미를 나타내는 다수의 관리선을 포함하는 관리도를 작성하여 메인 엔진을 통계적으로 모니터링하고 이를 기반으로 전문가의 효율적 유지보수를 지원할 것으로 예상된다. 둘째, 기본적인 모니터링을 빠르게 수행할 수 있다. 새로운 운항을 통해 실시간으로 데이터가 입수되는 경우, 이전에 설정된 관리 상한선을 활용하여 운항 내에 발생한 메인 엔진의 이상을 확인할 수 있다 (예: 이전 유사 항로에서 도출된 관리 상한선이 30이라면, 실시간으로 수집된 데이터 값이 30을

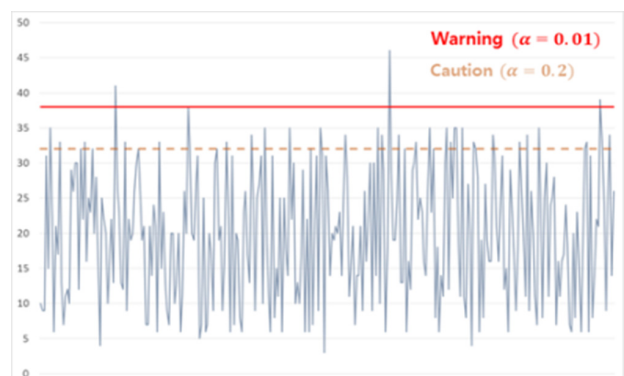


Fig. 6 Utilization of control chart

넘을 경우 해당 데이터를 상세히 살펴봐야 함). 이는 짧은 시간에 선박 메인 엔진의 상태를 파악해야 할 경우 혹은 운항 중 이상이 의심되는 증상이 발견되었을 경우에 활용 가능한 실시간 모니터링에 활용될 수 있다. 특히 위의 시나리오들을 시스템화하여 선박 메인 엔진 상태에 따라 여러 의미의 알람을 전달하거나 선박 메인 엔진의 상태를 실시간으로 파악하여 문제점을 해결하는 등의 기능을 구축할 수 있을 것으로 예상된다.

4.3 추후 연구 과제

본 연구의 추후 과제는 다음과 같다. 첫째, 더욱 많은 상태 데이터를 수집 및 분석해야 한다. 선박 메인 엔진의 상태는 외부 환경 요인 (항로, 날씨 정보 등)에 따라 달라지기 때문에, 선박 메인 엔진의 상태 분석 시 외부 환경을 고려해야 한다. 이를 위해 필요한 추가 데이터 (예: 날씨 정보 데이터)를 수집하고, 이를 고려해 선박 메인 엔진의 상태를 분석해야 한다. 둘째, 본 사례연구의 대상이 된 선박의 메인 엔진 상태 데이터의 경우 선박 내 데이터 수집 시스템의 한계로 10분 단위로 고정되어 수집된 정상 상태의 데이터이다. 본 연구에서는 해당 데이터를 다변량 관리도만을 활용하여 분석하였다. 하지만, 정확한 모니터링을 위해서는 환경 요인 등 추가 정보가 포함된 1초 단위 또는 1분 단위의 데이터를 수집하여야 하며, 고장 데이터를 분석하여 본 방법론으로 도출된 관리 상한선의 정확도를 고도화하여야 한다. 또한, 새로이 수집된 데이터를 기계학습, 주 성분 분석 등의 다른 분석 방법론과 결합하여 활용하면 외부 환경 요인 및 더욱 정확한 모니터링을 지원할 수 있을 것으로 예상된다 (Raptodimos & Lazakis, 2018). 셋째, 선박의 메인 엔진을 안정적인 상태로 유지하기 위해 관리용 관리도를 작성할 필요가 있다. 해석용 관리도는 공정상태가 어떤지 모르는 상황에서 일정 기간의 데이터를 활용하여 관리도를 작성하기 때문에 전체적인 공정 변화를 파악하기 어렵다 (Lowry & Montgomery, 1995). 따라서 보다 많은 상태 데이터를 수집 및 분석을 통해 선박의 메인 엔진을 안정적으로 관리하며 도출한 잠재 원인에 의한 변동 발생 시 쉽게 파악할 수 있는 관리용 관리도 작성이 필요하다.

후 기

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(친환경선박 TCS 시스템 구축).

References

Boullosa, D., Larrabe, J. L., Lopez, A., & Gomez, M. A., 2017. Monitoring through T² hotelling of cylinder lubrication process of marine diesel engine. *Applied*

Thermal Engineering, 110, pp.32-38.

Chen, Q., Kruger, U., Meronk, M. & Leung, A. Y. T., 2004. Synthesis of T² and Qstatistics for process monitoring, *Control Engineering Practice*, 12(6), pp.745-755.

Chongfuangprinya, P., Kim, S. B., Park, S. K. & Sukchotrat, T., 2011. Integration of support vector machines and control charts for multivariate process monitoring, *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 81(9), pp. 1157- 1173.

Chou, Y. M., Mason, R. L., & Young, J. C., 2001. The control chart for individual observations from a multivariate non-normal distribution. *Communications in statistics - Theory and methods*, 30(8-9), pp.1937-1949.

Efron, B. & Tibshirani, R., 1993, An introduction to the Bootstrap, *Chapman & Hall/CRC*, Boca Raton, USA.

Gkerekos, C., Lazakis, I., & Theotokatos, G., 2017. Ship machinery condition monitoring using performance data through supervised learning, *Proceedings of the Smart Ship Technology*, London, UK, 24-25 January 2017, The Royal Institute of Naval Architects, pp.105-111.

Jang, D. H., Moon, H. G., So, S.O., Seo, S. W., Han, S. H., Eun, C. G., & Kwon, J. G., 2011. Development of maintenance system for vessels and plants, *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 39(2), pp.234-243.

Lamaris, V. T., & Hountalas, D. T., 2010. A general purpose diagnostic technique for marine diesel engines- Application on the main propulsion and auxiliary diesel units of a marine vessel. *Energy Conversion and Management*, 51(4), pp.740-753.

Lazakis, I., Dikis, K., Michala, A. L., & Theotokatos, G., 2016. Advanced ship systems condition monitoring for enhanced inspection, maintenance and decision making in ship operations. *Transportation Research Procedia*, 14, pp.1679-1688.

Lee, H., Lee, J.S., & Lee, J. M., 2012. Marine Engine State Monitoring System using DPQ in CAN Network, *Journal of Institute of Control*, pp.13-20.

Lowry, C. A., & Montgomery, D. C., 1995. A review of multivariate control charts. *IIE Transactions*, 27(6), pp.800-810.

Mokashi, A. J., Wang, J., & Verman, A. K., 2002. A study of reliability-centred maintenance in maritime operations. *Marine Policy*, 26(5), pp.325-335.

Orosa, J. A. et al., 2011. *In Applications and Experiences of Quality Control*. Online Ed. InTech.

Phaladiganon, P., Kim, S. B., Chen, V. C. P., Baek, J. G., & Park, S. K., 2011. Bootstrap-based T^2 multivariate control charts, *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 40(5), pp.645-662.

Pillay, A., Wang, J., Wall, A. D., & Ruxton, T., 2001. A maintenance study of fishing vessel equipment using delay-time analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 7(2), pp.118-128.

Raptodimos, Y., & Lazakis, I. (2018). Using artificial neural network-self-organising map for data clustering of marine engine condition monitoring applications. *Ships and Offshore Structures*, pp.1-8.

Runger, G. C., Alt, F. B., & Montgomery, D. C., 1996. Contributors to a multivariate statistical process control chart signal, *Communications in Statistics-Theory and Methods-Policy & Management*, 25(10), pp.2203-2213.

Shewhart, W. A. (1926). Quality control charts. *Bell Labs Technical Journal*, 5(4), pp.593-603.

