



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

회귀분석을 이용한 선박용 디젤 기관
고장진단에 관한 연구

Study of Fault Diagnosis on Marine Diesel Engine
Using Regression Analysis



2017 년 02 월

한국해양대학교 대학원

기관공학과

장 민 국

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii
1. 서 론	1
2. 기존 고장진단시스템에 대한 고찰	
2.1 고장진단시스템의 종류와 특징	4
2.2 고장진단에 관한 국제 표준화 연구	6
2.3 선박용 디젤 기관 고장진단시스템의 예상 효과	9
3. 회귀분석을 이용한 고장진단 이론	
3.1 데이터의 취득	12
3.2 고장 유형의 분류	15
3.3 상관분석	19
3.4 회귀분석	21
3.5 표준편차	22

4. 회귀분석을 이용한 선박엔진 고장진단 적용 결과	
4.1 데이터 취득	24
4.2 고장 분석	26
4.2.1 토크 리치 진단 결과	26
4.2.2 고장 발생 실린더 상세 분석	29
4.3 고장 평가 및 고찰	39
4.3.1 센서 장착 위치의 최적화	40
4.3.2 분석 기법의 고도화	40
4.3.3 고장 유형의 세분화	41
5. 결 론	42
참고문헌	43



List of Tables

Table 3.1 Classification of data acquisition format	15
Table 3.2 Correlation coefficient for real operating ship	20
Table 4.1 The specification of the target engine	24
Table 4.2 Accident report of the vessel	26



List of Figures

Fig.2.1 Expert system	4
Fig.2.2 Neural network	5
Fig.2.3 Diagram of ISO/TC 108/SC 5	7
Fig.2.4 Procedure of closed loop, CBM	8
Fig.2.5 Bathtub curves	10
Fig.2.6 Optimized maintenance time	11
Fig.3.1 Schematic diagram for the system	14
Fig.3.2 Diagram of network onboard	15
Fig.3.3 Classification of fault type	17
Fig.3.4 Interrelationship between engine and propeller	19
Fig.3.5 Regression analysis by example	21
Fig.3.6 Example of the average 50 and 20 of the standard deviation	23
Fig.4.1 Data flow through each equipment	25
Fig.4.2 Daily torque rich of ship management program	27
Fig.4.3 Contrastive analysis of maker guideline and standard deviation 2 applied limit	28
Fig.4.4 Time series analysis for torque rich	29
Fig.4.5 Photo of broken piston ring and damaged cylinder liner	30
Fig.4.6 Contrastive analysis of temperature for scavenge air and scavenge air receiver	31
Fig.4.7 Time series analysis for broken piston ring	32
Fig.4.8 Contrastive analysis of exhaust gas temperature and RPM	33

Fig.4.9 Time series analysis for damaged fuel injection and exhaust valve ...	34
Fig.4.10 Contrastive analysis of temperature for main bearing and thrust pad	35
Fig.4.11 Time series analysis for damaged main bearing	35
Fig.4.12 Photo of nozzles for piston skirt and piston crown	36
Fig.4.13 Contrastive analysis of temperature for piston cooling oil and main bearing	37
Fig.4.14 Time series analysis for degradation of piston ring	38
Fig.4.15 Degradation of piston ring for 5 months	39



Study of Fault Diagnosis on Marine Diesel Engine Using Regression Analysis

Jang, Min Kook

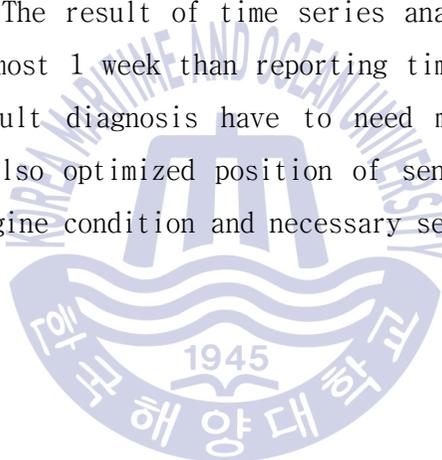
Department of Marine Engineering
Graduate School of Korea Maritime University
(Supervisor : Prof. Choi, Jae Sung)

Abstract

The engine machinery, especially main engine's fault and unplanned stopping cause operational loss and decline the shipping company's reliability in merchant fleet. Therefore, the shipping company invest the facilities for getting qualification for UMA(Unattended Machinery Area) vessel and ship's crew maintain duty system always in order to prevent and minimize loss. The AMS(Alarm Monitoring System) is one of the facility that can grasp operating condition in ECR(Engine Control Room) and getting qualification for UMA Vessel. Sometimes the AMS can combine control function. When the AMS detect abnormal condition, it makes visual-aural alerts and stopping also. Visual-aural alerts are designed for distinguishing abnormal condition and type easily. The method of distinguishing abnormal condition is designated monitoring knowledge of expert without additional sensors.

Also I am supposed to demonstrate the effectiveness. The subject and data of study are damaged piston ring and cylinder liner of main engine data that is collected from may 2015 year to february 2016 that was recorded 1 minute interval. The main engine with low speed(Crosshead type) is made by "W" company.

Contents of collected data are 133 parameter including fuel pressure filter outlet, main bearing pressure, thrust pad bearing lubricating oil pressure, crosshead lubricating oil pressure, turbocharger speed, scavenge air receiver pressure, each cylinder exhaust gas temperature, engine speed, etc. The result of time series analysis is earlier at least 3 day or at most 1 week than reporting time by vessel's crew. These method of fault diagnosis have to need many case study and accumulated data. Also optimized position of sensor is required for confirming exact engine condition and necessary sensor is verified for fault diagnosis.



KEY WORDS: Fault diagnosis, 고장진단 ; Marine diesel engine, 선박용 디젤 엔진 ; Regression analysis, 회귀분석 ; Correlation coefficient, 상관계수

제 1 장 서 론

선박에는 다양한 기관과 기계들이 하나의 시스템으로 존재한다. 기관 시스템 전체 구성에서 각 기관과 기계들은 서로가 서로의 목적과 수단의 관계로 유기적이고 복잡한 관계를 맺고 있다. 또한 선박은 일반적으로 장시간을 운항하므로 그 성능은 점점 열화되고 운전조건 또한 변화되기 때문에 운항 중인 기존선의 운항조건에 최적화된 기관의 운전관리아말로 친환경 및 고 효율화 대책에 실질적이면서도 매우 유익한 대책이 될 수 있다.^[1]

선박은 20~30년의 긴 수명주기로 인해 운영단계 및 유지보수단계에서 건조단계만큼 많은 비용과 노력을 필요로 하고, 사고 발생 시 피해의 정도가 매우 크다. 이러한 이유로 선박관리회사와 선박 소유주는 운용기간 동안 고장을 예방하고 사고를 미연에 방지하기 위해 다양한 노력을 기울이고 있다. 그러한 노력의 일환으로 예방 보전(preventive maintenance and operation)은 현재 선박관리회사에서 시행 중인 보편적인 정비와 운전 형태이다. 이는 장비의 수리 주기를 미리 결정하고 수리 주기까지 사용된 장비는 무조건 수리하는 정기 보전 활동으로 구체화 된다. 그러나 정기 보전 활동은 보전 주기와 기능의 열화 주기가 완전히 일치하지 않기 때문에 잔존 수명에 대한 손실 비용이 발생하고 과잉 보전 활동이 될 수도 있다. 또한 보전 주기 동안 고장이 발생할 수도 있기 때문에 사후보전비용이 발생할 가능성이 항상 존재한다.^[2]

선박에서는 이러한 기관 시스템을 승조원이 항시 감시가 가능하도록 중앙 집중 감시 장치를 별도 설치, 운용하고 있는데 이러한 장치를 모니터링 시스템 또는 감시시스템이라 통칭한다. 모니터링 시스템은 각 기관의 현상을 즉시에 파악 가능하도록 다양한 센서로부터 현재의 상태를 계량화 한 값을 수신하여 승조원에게 기관 운전 정보를 제공할 뿐만 아니라 기관에 장착된 원격 작동기(remote actuator)를 이용하여 원격 제어(remote control)까지도 가능하게 구성

되어 있다. 또한 각 센서 값의 한계치를 High, Low, Abnormal로 설정하여 설정한 한계치에 도달 시 사용자에게 시각, 청각적 경고(alarm)의 방법으로 경고하는 기능도 가지고 있다. 그러나 현재의 모니터링 시스템은 전체 기관 시스템의 유기적이고 예측 불가능한 변화 상황을 고려할 수 없어 단순 감시만 가능할 뿐이며 진단의 개념을 포함하고 있지는 않다. 따라서 수십 개 또는 수백 개에 이르는 기관 시스템의 운전 상황을 종합하여 각 기관 또는 전체 기관 시스템의 상태를 진단하는 것은 오롯이 최종 사용자인 승조원의 몫이며, 기관 시스템의 일부를 제작한 제조사도 기관 전체의 종합적인 진단을 하기는 어려운 것이 사실이다.

기존의 상태 감시(condition monitoring)는 고장이 발생할 때 고장 패턴과 현재 패턴을 비교하여 고장 패턴 일치할 때를 기계의 이상 징후로 포착하였다. 그러나 상태 감시를 위해서는 고장 원인 인자를 파악하기 위한 고가의 센서가 필요하고 분석 장비 또한 복잡하다. 또한 고장 분석이 가능한 대상 역시 주로 회전기계나 펌프, 모터에 국한되어 있기도 하다.

이에 본 연구는 복잡한 선박용 디젤 기관에서도 적용 가능하며 별도로 고장의 원인 인자 감시용 센서를 추가 설치할 필요 없이 기존에 사용 중인 모니터링 시스템에서 이용하고 있는 데이터들을 분석하고 조합하여 고장진단을 할 수 있는 방안에 관하여 연구하고자 한다. 모니터링 시스템의 데이터를 별도의 데이터베이스로 수집, 저장하여 놓고 일정 기간 동안의 정상적인 운전 상태인 데이터를 기준으로 삼아 이를 벗어날 경우를 고장으로 분류함으로써 기관의 정상 상태와 고장 상태를 객관화하고 정량화 하는 방법으로 회귀분석을 사용하는 것이 가능할 것이라고 판단하였다.

본 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

제 2장에서는 일반적인 고장진단시스템의 종류와 특징을 고찰하고 국제 표준화 연구를 참조하여 선박용 디젤 기관에 적용했을 시 예상 효과를 검토하였다.

제 3장에서는 통계 분석 기반 고장진단시스템에 사용되고 있는 통계 기법 중 회귀분석 기법을 단계적으로 세분화하여 검토하였다.

제 4장에서는 3장에서 검토한 회귀분석 기반 선박용 기관 고장진단시스템을 대상 선박에 실제 적용하였으며 사고 사례 확보 후 사고 시점을 역으로 추적하여 분석방법의 유효성을 확인하는 단계로 검토하였다. 그 결과를 통해 회귀분석을 이용한 선박용 기관 고장진단시스템의 고도화를 위해 추가적으로 고려해야 할 요소들을 고찰하였다.

결론에서는 이상의 연구 결과를 요약 정리하였다.



제 2 장 기존 고장진단시스템에 대한 고찰

2.1 고장진단시스템의 종류와 특징

기존의 고장진단시스템은 전문가 시스템, 신경망회로 방식, 상관관계 분석 등을 이용하는 방식이 주를 이루고 있다.

전문가 시스템은 인공지능 연구의 한 분야로써 먼저 전문가가 가지고 있는 지식과 경험들을 컴퓨터 시스템에 입력시켜 지식베이스를 구축하고, 축적된 지식베이스를 이용하여 사용자의 요구를 추론하여, 그 결과를 사용자에게 전달해주는 방식이다.^[4] Fig.2.1은 이를 도식화하여 나타낸 것이다. 지식 베이스는 전문가의 지식을 표현해 놓은 부분이며 지식 표현 방법에 따라 지식 베이스의 성능과 추론 기구의 효율이 달라진다. 추론기관은 지식 베이스에 있는 내용을 탐색하고 추론과 통제를 하는 부분이다.

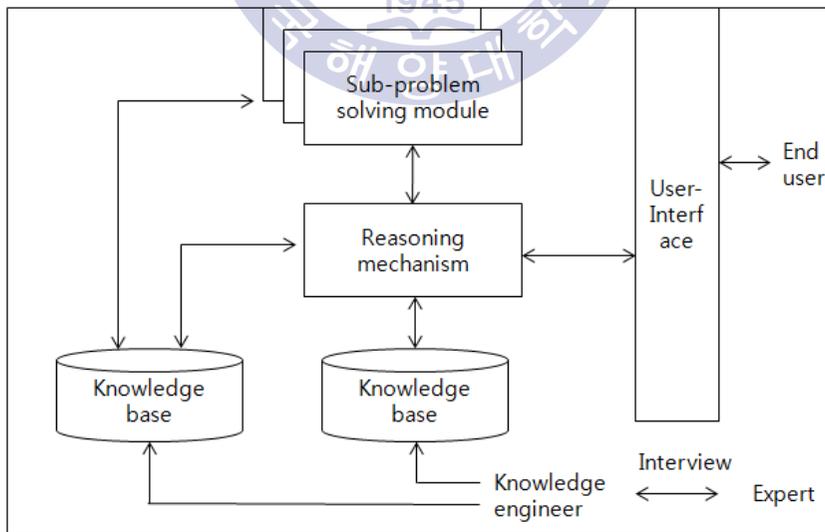


Fig.2.1 Expert system^[4]

신경망회로 방식은 데이터의 정성적인 것과 정량적인 것을 동시에 처리하는 방법으로 부하와의 상대적인 중요도를 이용한다. 데이터의 학습을 통하여 자기 자신의 데이터와 부하간의 상대적 중요도를 출력할 수 있으며, 출력된 데이터가 정상 범위가 이상일 경우 이상 데이터로 판별한다. **Fig.2.2**는 신경망회로 방식을 도식화 하여 나타낸 것이다.

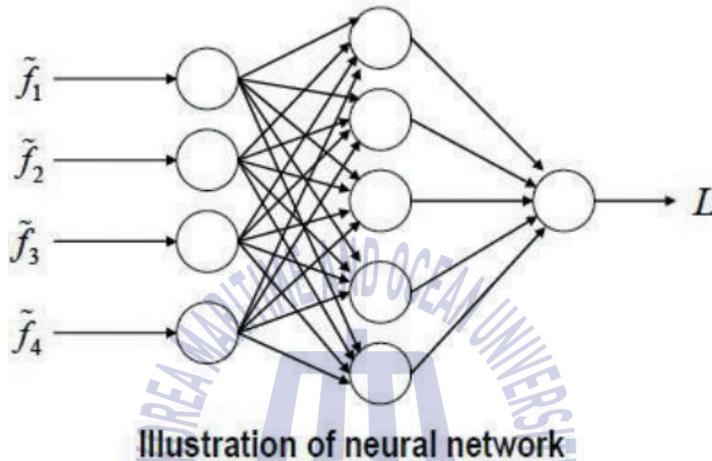


Fig.2.2 Neural network^[6]

상관관계를 이용한 방식은 신경망회로 방식과 비슷하다. 선박의 경우 이동성으로 인하여 데이터 값들은 같은 부하조건이라도 외적환경변화에 따라 다르게 나타난다. 즉 덥고 습한 지역이나 춥고 건조한 지역 등에서의 운전은 같은 부하조건이라도 각종 운전데이터의 경향은 다르게 나타난다. 예를 들어 소기 압력이나 과급기의 배기가스 온도는 부하가 증가함에 따라 높아질 것으로 예상되지만 실제로 그렇지 않은 경우도 발생된다. 그러므로 감시된 값들의 상관관계를 파악하여 상호 연관성을 정량적으로 표현할 수 있는 방법이 요구되는데, 이러한 상호관계를 나타낼 수 있는 방법이 상관분석법이다.^[6]

이 외에도 전통적인 방법으로 성능진단기술과 진동, 음향분석, 금속마모성분의 분석, 스펙트럼 분석, 고장 사전법 등이 있으며 방법에 따라 이용분야가 다르다.

성능진단기술은 설비의 성능이나 효율을 측정하는 것으로 이상을 검출하는 기술이다. 진동, 음향분석은 손상 탐지에 유용하나 기술의 완성도가 높아야하며 높은 수준의 진단기기, 소프트웨어가 필요하다. 금속마모성분의 분석은 작동유, 윤활유의 금속마모성분의 입자를 모니터링 기술을 적용하여 연속적, 주기적으로 확인하는 것을 의미한다. 스펙트럼 분석은 FFT 분석기를 이용하여 주파수 스펙트럼의 변화를 감지하고 이상 여부를 파악한다. 고장 사전법은 미리 상정한 고장 증상과 측정 증상을 비교하여 고장 사전표(troubleshooting table)에 따라 고장 상태를 파악한다.

데이터기반 고장진단 및 예지를 위해서는 방대한 데이터의 양과 많은 센서들로부터 수명주기가 긴 시스템의 정확한 상태를 파악하는 것은 필수적이다. 또한 고장 데이터의 확보가 어렵다. 고장에 대한 정량적 정의가 필요하며, 이를 위해서는 실제 시스템 또는 부품의 고장 시 얻은 데이터가 필요하다. 하지만 선박과 같은 큰 시스템에서 해당 데이터를 얻는 것은 어려운 일이다.

현재 선박용 엔진의 운전감시 시스템은 엔진 제조사에 의하여 자사 엔진의 모니터링 및 고장진단을 수행하도록 개발되어 있다. MAN B&W사는 CoCoS-EDS 시스템을 판매하고 있고, ABB사는 RDS 시스템, Wartsilra사는 Genius services는 시스템을 개발하여 공급하고 있다.

2.2 고장진단에 관한 국제 표준화 연구

고장진단법의 국제 표준화 연구는 ISO 규격에서 찾아볼 수 있다. “ISO 13372 기계의 상태 감시 및 진단-용어“에서는 상태 감시에 사용되는 용어를 정의하고 있으며 “ISO 17359 기계의 상태 감시 및 진단 - 일반적 지침”과 “ISO 13379-1 기계의 상태 감시 및 진단”에서는 그 방법에 대해 구체화하여 설명하고 있다.

ISO/TC 108/SC 5는 기계 및 구조물의 상태감시, 진단 및 예지에 대한 방법, 절차, 교육/훈련에 대한 국제표준을 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. **Fig.2.3**은 ISO/TC 108/SC 5 조직의 구성을 나타낸다.

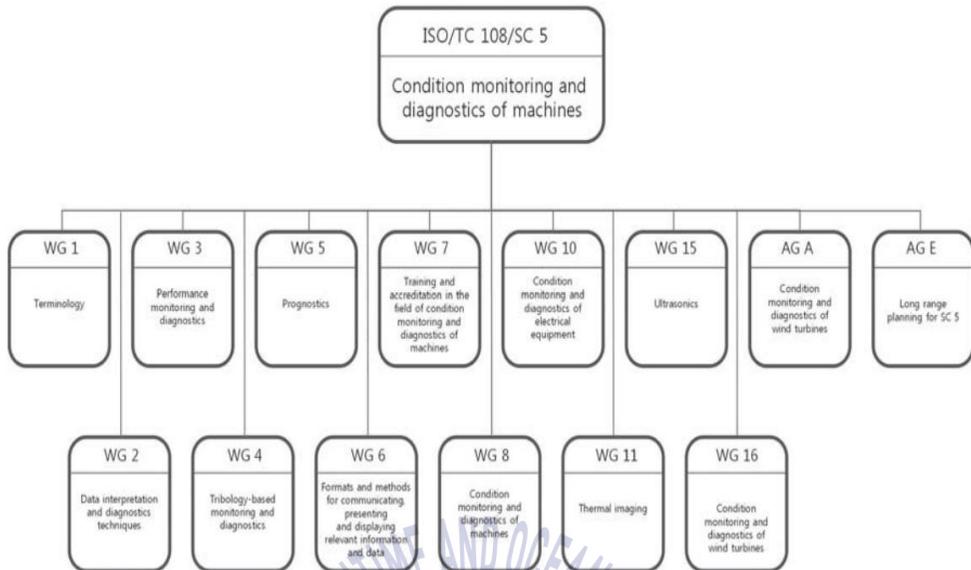


Fig.2.3 Diagram of ISO/TC 108/SC 5^[7]

상태 기반 정비는 센서들에 의해 실시간 혹은 주기적으로 수집되는 기계의 상태 변수의 변화에 의해 심각한 열화 상태를 파악하고 장비 상태를 평가하여 미래의 고장 시점을 예측함으로써 고장이 발생하기 전에 적절한 유지 보수를 실시하는 능동적인 정비 방식으로 풀이된다. 상태 기반 정비를 ISO에서는 CBM(condition based maintenance)으로 표기하고 있으며 다른 이름으로는 PdM(predictive maintenance), PHM(prognostics and health management), DoD, DoE(USA), RBM(risk based maintenance) 등으로 불리운다.^[7]

고장, 즉 Fault는 장비의 일부 또는 전체가 성능저하 또는 비정상적인 성능으로 인해 애초에 요구되는 기능을 만족하지 못하는 상태를 의미한다. 이러한 고장을 정량적인 방법으로 계측하기 위해 기준선(base line)을 기준으로 한계치(threshold)를 초과하는 영역에서 운전 될 때를 고장의 징조로 판단하고자 한다. 여기서 기준선은 다양한 상태에 있는 장비가 정상적인 상태에서 제공하는 기준을 뜻한다.

기계의 상태 감시 및 진단을 위해 ISO에서는 **Fig.2.4**와 같이 다음 6가지의 절

차를 제시한다.

각각의 단계는 다음과 같다.

데이터의 취득은 기준선을 설정하는 것과, 경고 기준, 과거 기록, 유사한 장비의 데이터를 모두 포함한다. 향상된 진단과 예측을 위해서 경고의 기준 재정립과 과거 기록과의 비교, 데이터 수집 주기의 단축 또는 연장, 추가 센서의 측정, 상관관계 기술을 사용한다.

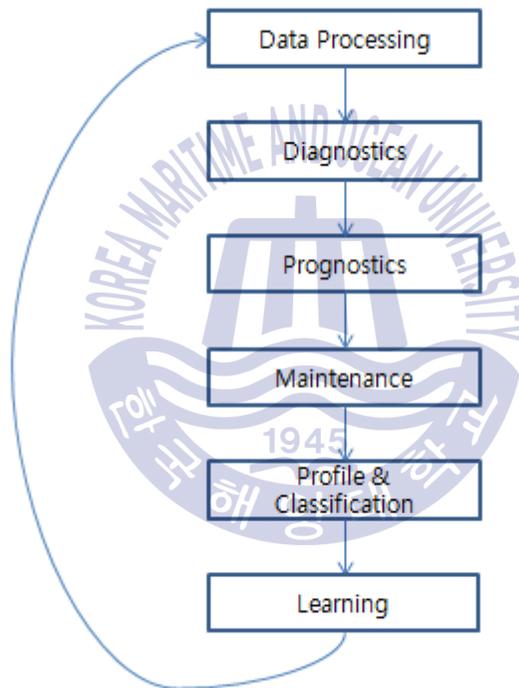


Fig.2.4 Procedure of closed loop, CBM

선박의 경우 입출항을 위한 엔진 부하 변동 폭이 크기 때문에 적절한 데이터의 여과 과정(filtering)을 고려하여야 한다. 또한 선원에 의한 작동으로 엔진 운용이 이루어져 비선형식 데이터가 많으므로 추정값을 사용해서는 안된다.

기계류 장비의 상태 감시와 진단에 관한 국제표준인 ISO 13374에서는 CBM

의 절차를 크게 데이터 취득, 진단, 예지, 제시 및 사후조치, 사후분석으로 구분 지었다. 데이터를 취득함으로써 지속관찰하고 이상 징후를 진단하며 언제 치명적 수준에 도달할 지 예지하여 이를 바탕으로 건전성을 관리하는 것이다.

2.3 선박용 디젤 기관 고장진단시스템의 예상 효과

고장진단시스템을 적용하기 적합한 분야는 갑작스러운 고장 발생 시 치명적 손상이 예상되는 분야, 고안전성을 위해 잦은 예방정비를 함으로 높은 시간비용을 지출하고 있는 분야, 수리를 위해 접근하기 어려운 분야 등이 있다.^[5] 고 위험 화물을 운송하는 천연액화가스 운반선, 케미컬 탱커 선박과 폭발 위험이 높은 천연액화가스를 연료로 사용하는 선박, 정시 운항을 위해 잦은 예방정비를 하는 컨테이너 선박, 해상에서 제한된 인원과 보급으로 인해 수리가 접근하기 어려운 선박 환경을 고려했을 때 고장진단시스템은 선박용 엔진에 적용하기 매우 적합하다고 할 수 있다.

Fig.2.5는 운용 시간 경과에 따른 고장 발생률을 6가지 유형으로 분류하고 각 유형이 전체 고장에서 차지하는 비율을 명시하였다. 가장 많은 손상 사례는 불필요하고 과도한 정비와 부적절한 설치, 설계, 운용, 제작에서 발생하고 있다. 이는 주로 제조 과정에서 발생하는 문제이며 해운 회사와 선박 관리사에서 실질적으로 관리에 중점을 두는 부분은 유형 B, 유형 C에 해당된다. 이는 총 고장의 7%에 해당하며 개선이 가능하면서도 결코 작은 부분이 아님을 알 수 있다. 특히 유형 C는 앞으로 제언하고자 하는 방법과 같이 조금만 더 관심을 기울이고 노력한다면 개선 가능한 부분이라고 판단된다. 유형 B와 유형 C의 경우, 정비 직후 또는 운용 기간 초기 상태의 데이터를 충분히 축적하여 정상 운전 상태로 기준선을 만들고 운용 기간이 증가하면서 변화되는 데이터를 대조 분석한다면 고장 발생 이전에 정상 운전 상태를 벗어났다는 경고가 발생할 것이다.

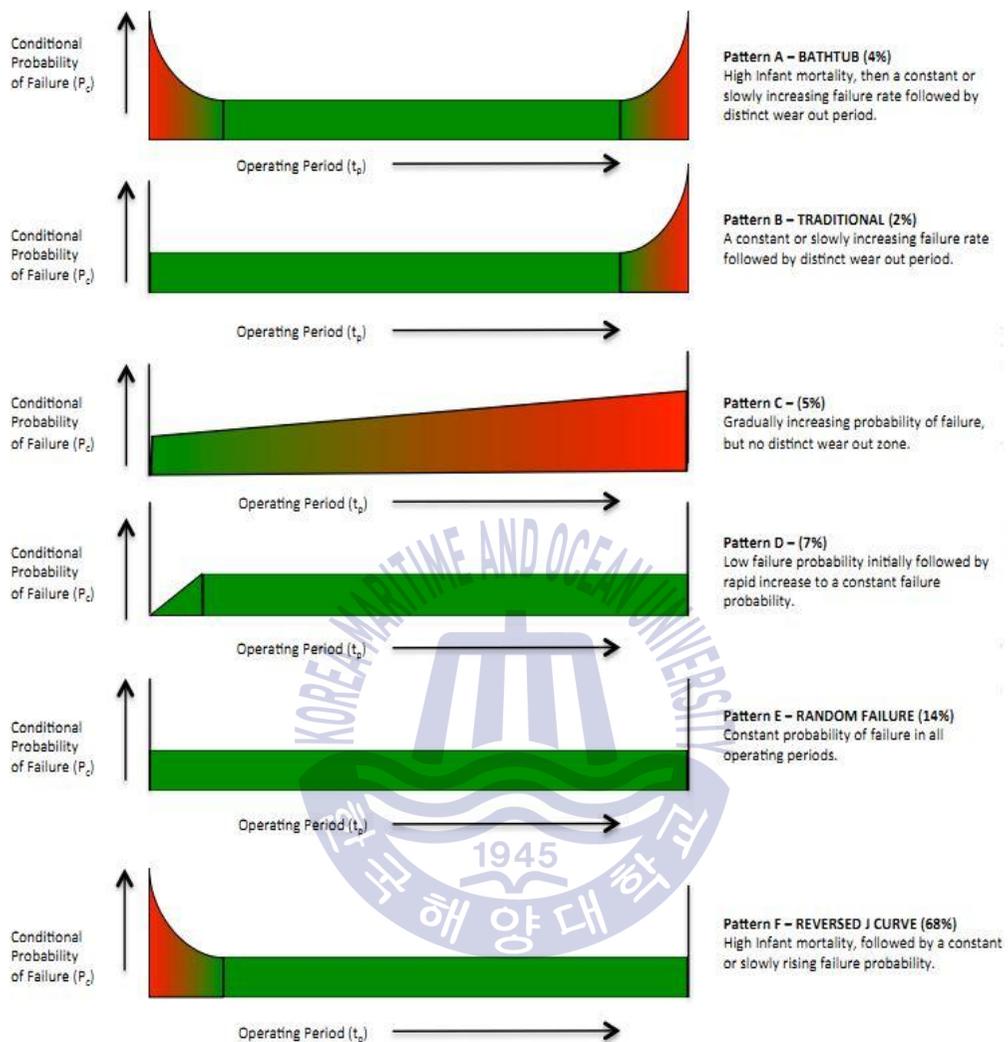


Fig.2.5 Bathtub curves^[8]

Fig.2.6에서 설명하는 최적 정비 시점은 시간이 지남에 따라 증가하는 사고의 심각도와 수리 기간에 의해 지속 증가하는 정비 비용(maintenance cost)과 원래는 더 사용 가능하였던 기계의 수명을 보다 이르게 정비를 시행함으로써 감소하는 기회 비용(opportunity cost)의 합계로써 총 비용이 최소가 되는 시점을 최적 정비 시점으로 판단할 수 있다.

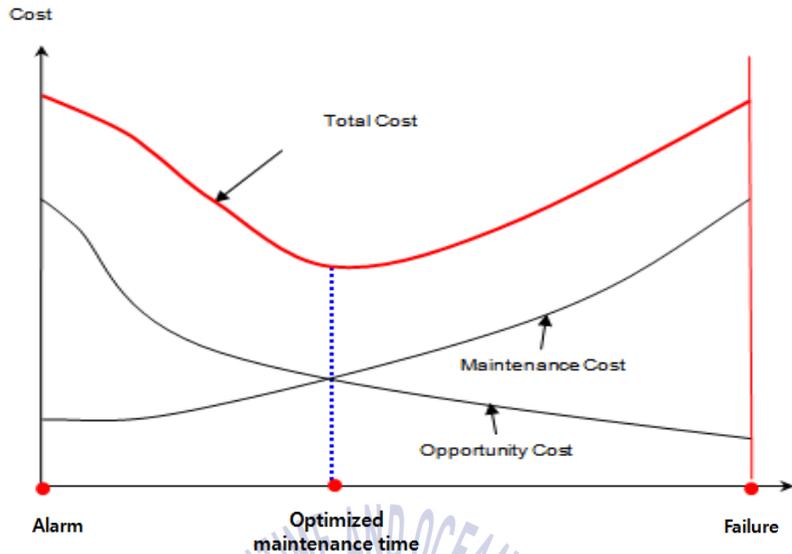


Fig.2.6 Optimized maintenance time^[9]

기존의 계획 정비는 주로 제조사의 기준과 권고를 바탕으로 이루어지고 있으며 실제 운항 중인 선박의 상태가 반영되지 않은, 부족한 정보를 통해 비효율적으로 이루어지고 있다. 더구나 제조사의 기준과 권고는 제조사의 수익 목적으로 기부속 판매와 추가적인 정비 비용 발생을 유도하는 경향이 있으므로 해운회사와 선박 관리사의 비용 증가로 이어지게 된다.

지금껏 살펴본 바와 같이 선박용 기관 고장진단시스템의 개발이 전체 고장의 약 7%를 사전에 예방 할 수 있다면 해운 회사와 선박 관리사의 비용 절감에도 긍정적인 효과를 가져다 줄 수 있다.^[8]

제 3 장 회귀분석을 이용한 고장진단 이론

3.1 데이터의 취득

본 논문에서는 두 종류의 데이터를 사용하였다. 첫 번째로는 엔진에 장착된 센서 데이터, 즉 정형적인 데이터(structured data)와 사고 사례를 사람이 기록, 기억하고 있는 비정형적 데이터(unstructured data)이다. 정형적 데이터는 열과 행으로 구분되어 있고 구조를 변경할 수 있으며 구조에 규칙이 있다. 대표적인 예로 IEC 61162 Formatter를 따르는 VDR(voyage data recorder) 데이터를 들 수 있다. 비정형적 데이터는 계량화 및 수치화가 힘든 데이터를 의미하며 대표적 예로 육해상간 수발신하는 이메일, 사고보고서, 위성전화 통화내용, 선원과 의 인터뷰, 작업일지, 로그북(log-book) 등에서 발췌할 수 있다.

이러한 비정형적 데이터를 근거로 정량적, 정형적인 데이터를 통해 고장을 역 추적하여 보았을 때 어느 시점에 이상 징후를 포착할 수 있는지가 본 연구의 주제라고 할 수 있다. 또한 데이터의 취득은 엔진 제조사에서 권고하고 있는 지침서의 정상 운전 데이터, 비정상 운전 데이터, 섯 다운 데이터를 포함한다.

기준에는 선박에서 발생하는 데이터는 주로 선원에 의해 수기로 작성된 기록에 의존할 수밖에 없었다. 정기적으로 작성하는 로그북은 1일 2회 또는 3회 작성하여 사고 발생 시 사고 원인을 추적하고 정오에 작성하는 정오 보고서(noon report)를 통해 선박 성능을 재고하였다. 그러나 로그북의 경우는 사람에 의해 작성되는 만큼 오기나 누락의 가능성이 있으며 측정 가능한 모든 데이터를 기록하지 않고 중요 기기에 한하여서만 작성하고 있어 그 가치가 높은 데이터라고 할 수 없다. 또한 연속적인 기기의 운전 상태를 반영하기에는 작성 주기가 길어 비교적 짧은 순간에 발생하는 사고에 대해서는 사실상 분석이 불가능하다. 더구나 1주일 이상, 1달 이상의 데이터를 분석하기 위해서 사람이 일일이

과거 데이터를 조회하여 비교하고 대조하는 것은 사실상 불가능에 가까운 일이다.

이처럼 방대한 양의 데이터를 수집하는 일부터 시작하여 분석 가능한 문자 형태의 데이터로 만들어내는 과정에 이르기까지 그 신뢰성을 높이고 신속한 처리를 위해서는 컴퓨터 기반의 분석이 유일한 해법이라고 판단된다.

Fig.3.1은 컴퓨터 기반의 분석을 위해 선박 내 각 장비들의 데이터가 AMS(alarm monitoring system), 항해장비(VDR)를 경유하여 위성통신 V.Sat(very small aperture terminal)를 통해 육상 서버로 전송되고 이를 실시간으로 분석하는 일련의 과정을 개략적으로 나타낸 도식도이다.

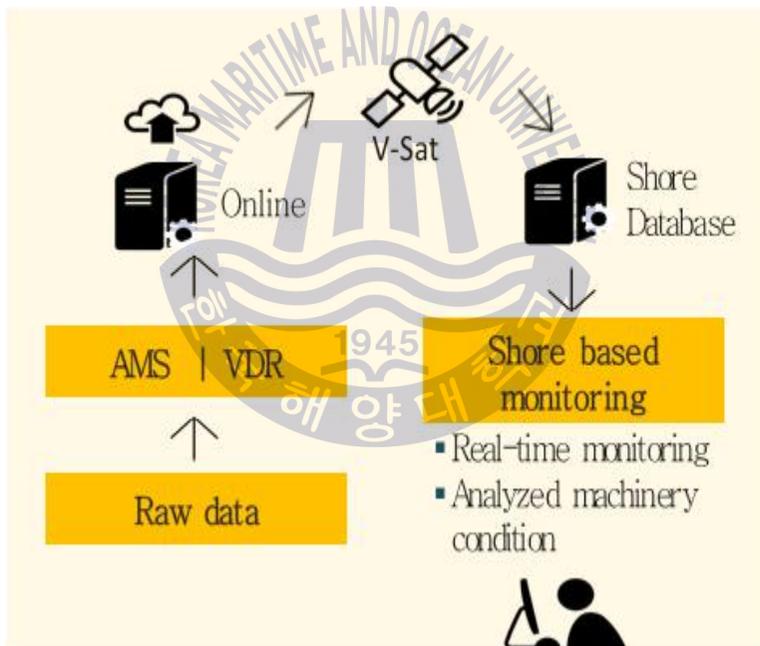


Fig.3.1 Schematic diagram for the system

선박은 이미 선박 내 기기들이 하나의 네트워크로 연결되어 있으며 기기 상호간 통신이 가능하다. 이는 앞으로 AMS 만을 이용하는 것이 아니라 AIS(auto identification System), LRIT(long range identification and tracking), GPS(global positioning system), VDR까지도 데이터의 취득 대상이 될 것이라

는 점을 시사한다. 따라서 선박 네트워크가 갖추어야 할 최소 요건이 지금까지는 선박 내에서 만의 네트워크를 구성하기 위한 성능으로 평가되고 고려되어졌다면 앞으로는 외부로 네트워크가 확장되는 부분에 대한 최소 성능이 도출되어야 한다.

이렇게 수집된 데이터는 별도로 설치한 데이터 저장용 컴퓨터에 저장되고 선내 네트워크를 통해 육상으로 실시간 전송된다. 선내 네트워크 구성을 **Fig.3.2**에 나타낸다.

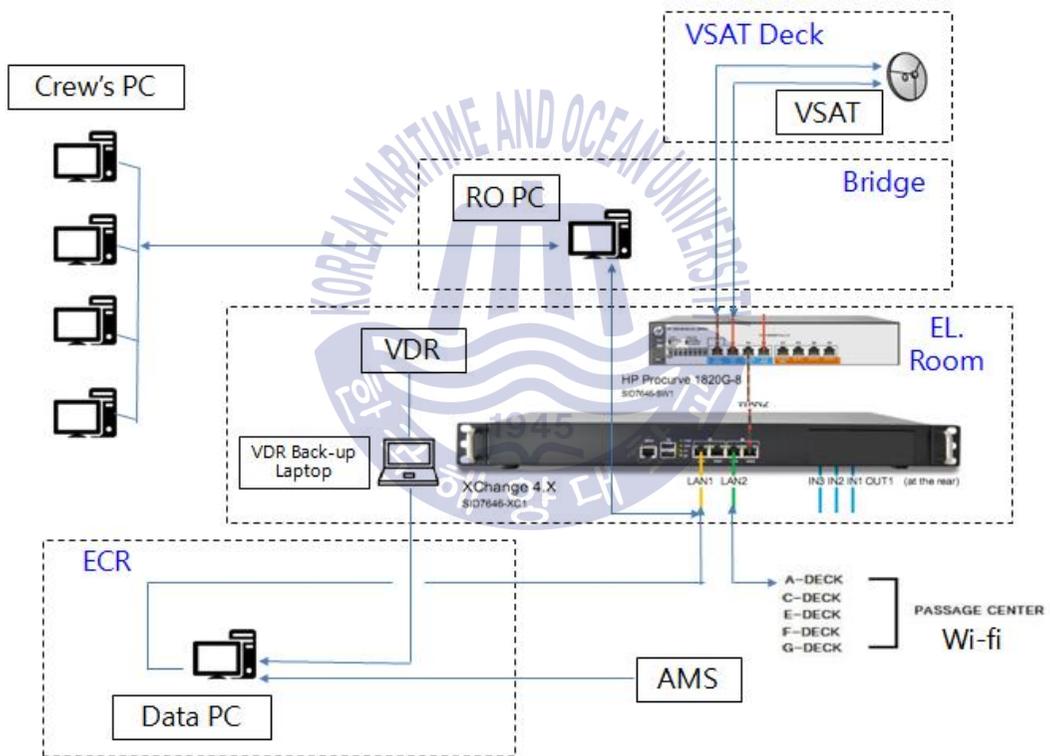


Fig.3.2 Diagram of network onboard

기관 정보를 모니터링하는 AMS와 항해 정보를 기록하는 VDR으로부터 데이터 저장용 컴퓨터에 동일 시간으로 1차 저장하고 저장된 데이터를 V.Sat를 통해 주기적 또는 실시간으로 육상 서버(server)에 전송하여 분석에 사용한다.

데이터의 취득에 관한 그 형식의 분류들을 Jardine 외 2인의 연구^[10]에서 다음 **Table 3.1**과 같이 정리하였다. 선박에서 발생하는 데이터 유형과 운전 데이터, 고장 형태, 고장 원인은 상기 **Table 3.1**에 거의 포함이 되어있으며 활용이 충분히 가능하다고 판단된다.

Table 3.1 Classification of data acquisition format

Item	Techniques
CBM Data type	- Value type, Waveform type, Multi dimensional type - Event data and condition monitoring data
Product status data	- Vibration, Pressure, Electric power, Resistance, Insulation, Abrasion, Displacement, Corrosion, Flow rate, Velocity, Oil debris, Thermography, Spectrometric data etc.
Product operation data	- Mileage, Operator, Operating condition, Mission profile data, etc.
Failure modes	- Clogging, Crack, Damage, Corrosion, Loosening, Missing, Abrasion, Bending, Burning, Short circuit, Low insulation, Disconnection, Malfunction, Leakage, Heat attack
Failure Causes	- Design Cause, Manufacturing Cause, Usage Cause(Ageing Failure, Misuse Failure, Mishandling Failure) - Abrasion, Abuse, Age Deterioration, Bond Separation, Consumable Depletion, Contamination, Corrosion, Dirt, Fatigue, Friction, Operator Negligence, Puncture, Shock, Stress, Temperature Extremes, Vibration, Wear

3.2 고장 유형의 분류

디젤기관을 주기관으로 사용하는 기관 시스템의 구성은 추진에 필요한 계통과 화물, 주거, 주기관을 운용하기 위해 필요한 보조기관으로 구성되어 있다.

여기서 고장진단이 필요한 부분은 추진과 보조기관에 해당되며 주기관, 발전기, 전동기, 열교환기, 전동기, 펌프로 세분화된다. 본 논문에서 다룰 부분은 주기관에 한정하지만 동일한 방법으로 발전기, 전동기, 열교환기 등에도 적용이 가능할 것으로 판단된다. Fig.3.3은 발생 가능한 고장의 유형을 미리 분류하여 놓고 전문가의 경험과 지식을 토대로 한 지식베이스에 의해 연관도가 높은 두가지의 센서 데이터를 조합하여 하나의 고장으로 정의하여 정리하였다.

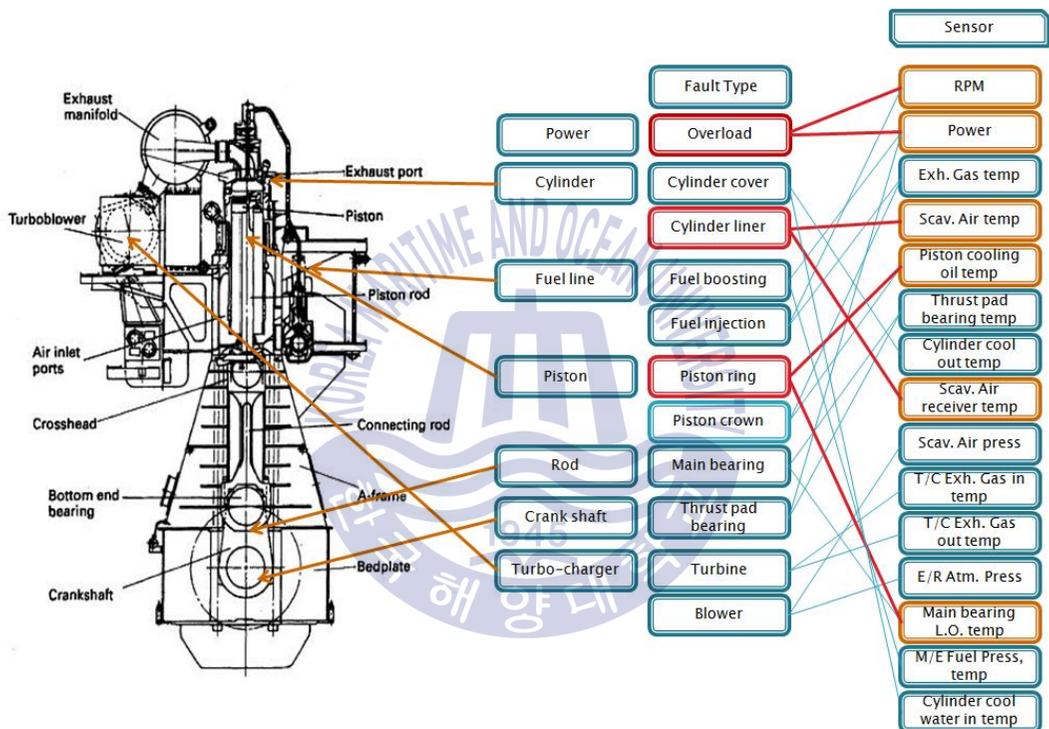


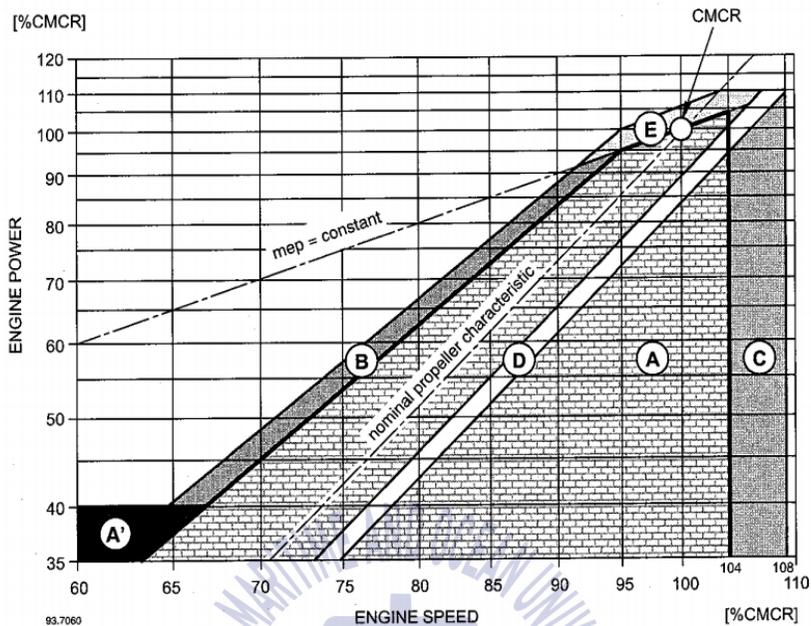
Fig.3.3 Classification of fault type

예를 들면, 연료분사밸브의 고착 시 엔진 회전수(RPM) 대비 배기가스의 온도가 저하된다는 경험적인 사실을 근거로 엔진 회전수 대비 배기가스 온도 저하를 연료분사밸브 고착이라는 또 다른 하나의 관찰 대상으로 만들어낸다. 적절한 수준의 RPM 대비 배기가스 온도를 기준선으로 만들기 위해 엔진 제조사에서 제공하는 한계치와는 별도로 정상적인 운전 상태의 데이터를 일정기간 동안

수집하여 기준선을 작성한다. 이렇게 만들어진 기준선이 바로 고장이 아닌 상태, 즉 기기의 정상상태를 의미하고 이를 일정 수준 이상으로 벗어나게 되면 비정상적인 상태로써 고장 발생 확률이 높은 상태임을 인지할 수 있다.

이러한 사례는 사실 기존에도 우리가 자주 사용하고 있는 방법이라고 할 수 있다. **Fig.3.4**는 엔진 제조사에서 과부하를 회피하기 위해 제공하는 관계도이며 X축은 엔진의 속도(speed), Y축은 엔진의 부하(load)로 구성되어 일정 기준을 제시한다. 기준 이하에서는 일반적인 프로펠러 특성을 추종하는 정상 운전으로 간주하지만 기준 이상에서는 열적 과부하(thermal overload)와 엔진의 손상을 야기할 수 있는 영역으로 간주하여 안전 운전에 활용하고 있다.





A	The portion on the right of the nominal propeller characteristic is the service range without continuous operating restrictions related to the selected CMCR point. The portion on the left of the nominal propeller characteristic is the service range for transient operating conditions (acceleration) and should be avoided for continuous operation.
A'	Maximum permissible engine power 40% CMCR from approx. 50% up to 67% of CMCR speed.
B	Service range with operational time limit, follows a characteristic: $P \approx \eta^{2.45}$ This characteristic originates from the reference point 95% CMCR power and 95% CMCR speed. With longer operating time in this range, thermal overloading and possible resulting engine damage may be expected.
C	Service range with overspeed of 104 to 108% of CMCR speed, only permissible during sea trials to demonstrate the CMCR power in presence of authorized representatives of engine builder. However, the specified torsional vibration limits must not be exceeded.
D	Recommended layout range for fixed pitch propeller, valid for the maximum draught, clean hull under contractual weather and sea conditions.
E	Overload range permissible only for maximum one hour during seatrials in presence of authorized representatives of engine builder.

Fig.3.4 Interrelationship between engine and propeller

3.3 상관분석

앞서 살펴본 바와 같이 두 가지의 서로 다른 데이터 인자를 조합하기 위해서는 전체 데이터 중에서 상관도가 높은 쌍을 찾아야 한다. 이를 위해 다음과 같이 상관분석을 시행한다. 두 변수의 관계를 하나의 수치로 나타내는 상관분석은 두 변수간의 관계의 강도, 밀접한 정도를 나타내며 상관계수 (correlation coefficient, CC)라는 결과로 나타난다. 두 변수간의 상관계수를 구하는 식은 다음과 같이 표시된다.

$$Cov(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \quad (3-1)$$

여기서, $\mu_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

$$\mu_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\mu_x^2 \right)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu_y)^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n\mu_y^2 \right)$$

X,Y : 계측항목 array

σ : 표준편차

μ : 평균값

n : 데이터 수

$$-1 \leq Cov(X,Y) \leq 1$$

Table 3.2는 실제 선박에서 약 6개월간의 AMS 데이터를 상기 식에 의해 계산하여 표로 나타낸 것이다. 계산은 통계 프로그램인 'R'을 사용하였다.

Table.3.2 Correlation coefficient for real operating ship

	M/E NO.1 CYL. EXH GAS OUT TEMP	M/E NO.2 CYL. EXH GAS OUT TEMP	M/E NO.3 CYL. EXH GAS OUT TEMP	M/E NO.4 CYL. EXH GAS OUT TEMP	M/E NO.5 CYL. EXH GAS OUT TEMP	M/E NO.6 CYL. EXH GAS OUT TEMP	M/E ORDER RPM
M/E NO.1 CYL. EXH GAS OUT TEMP	1	0.996433	0.99636	0.991093	0.997101	0.958794	0.953976
M/E NO.2 CYL. EXH GAS OUT TEMP	0.996433	1	0.998506	0.991149	0.99796	0.96383	0.956092
M/E NO.3 CYL. EXH GAS OUT TEMP	0.99636	0.998506	1	0.991814	0.998252	0.963642	0.956174
M/E NO.4 CYL. EXH GAS OUT TEMP	0.991093	0.991149	0.991814	1	0.992413	0.954802	0.949418
M/E NO.5 CYL. EXH GAS OUT TEMP	0.997101	0.99796	0.998252	0.992413	1	0.961059	0.954104
M/E NO.6 CYL. EXH GAS OUT TEMP	0.958794	0.96383	0.963642	0.954802	0.961059	1	0.921808
M/E ORDER RPM	0.953976	0.956092	0.956174	0.949418	0.954104	0.921808	1

일반적으로 통계학에서는 상관계수가 -1.0과 -0.7 사이이면, 강한 음적 선형관계, -0.7과 -0.3 사이이면, 뚜렷한 음적 선형관계, -0.3과 -0.1 사이이면, 약한 음적 선형관계, -0.1과 +0.1 사이이면, 거의 무시될 수 있는 선형관계, +0.1과 +0.3 사이이면, 약한 양적 선형관계, +0.3과 +0.7 사이이면, 뚜렷한 양적 선형관계, +0.7과 +1.0 사이이면, 강한 양적 선형관계로 통용되고 있다. 따라서 -0.7에서 -1.0 사이에 있는 관계와 +0.7에서 +1.0 사이에 있는 센서를 짝으로 지어 고장의 경우로 분류하면 매우 편리하다.

일반적으로 실린더 배기가스온도와 과급기 배기가스온도는 부하와 높은 상관

관계를 가지고 있을 것으로 생각되나 두 배기가스 온도 공히 0.85의 상관계수를 가지어 엔진 회전수와의 상관계수인 0.95보다 그 관계가 약함을 확인할 수 있었다. 심지어 메인 베어링 온도와의 상관계수 역시 평균 0.95로 엔진 부하보다도 상관계수가 큼이 확인되었다.

선박의 기관시스템은 많은 기관과 기계들이 상호 작용을 이루므로 비선형성이 강한 시스템이지만 실제로 분석해보면 상관관계가 높은 항목과 낮은 항목으로 분류가 가능하다. 정상 상태일 경우에는 이러한 상관관계가 유지될 것이지만 비정상 상태일 경우에는 상관관계가 저하 될 것이다.

3.4 회귀분석

회귀분석은 통계분석의 한 부분으로 많은 표본이 모이게 되면 결국에는 모집단의 평균으로 돌아가게 된다는 이론을 이용한 분석법이다. 이를 이용해 회귀 분석은 시간에 따라 변화하는 독립변수를 통해 종속변수를 예측하는데 이용 할 수 있다. 즉, 회귀분석은 두 변수 사이의 모델과 회귀식을 구하는 것을 의미하며 회귀 분석에 사용되는 두 변수 사이의 상관관계가 얼마만큼 강한지를 확인 하는 상관분석 후에 이루어진다. **Fig.3.5**은 회귀분석 모델의 예를 보인다. 양의 상관관계를 가지는 선형회귀 모델과 음의 상관관계를 가지는 선형회귀 모델, 비선형 회귀모델로 각각의 예는 파란색의 데이터들이 모여 빨간색 선의 모델을 만든다.

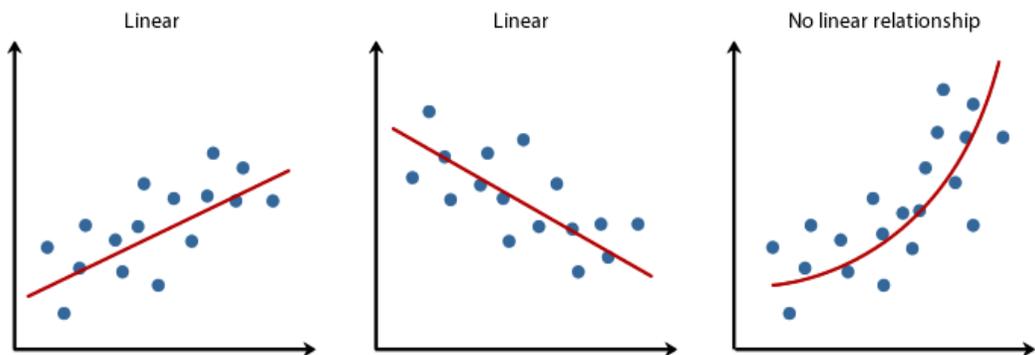


Fig.3.5 Regression analysis by example^[11]

회귀(regress)의 본래 의미는 옛날 상태로 돌아가는 것을 의미한다. 영국의 유전학자 프랜시스 골턴은 부모의 키와 아이들의 키 사이의 연관 관계를 연구하면서 부모와 자녀의 키 사이에는 선형적인 관계가 있고 키가 커지거나 작아지는 것보다는 전체 키 평균으로 돌아가려는 경향이 있다는 가설을 세웠다. 이러한 경험적 연구 이후, 칼 피어슨은 아버지와 아들의 키를 조사한 결과를 바탕으로 함수 관계를 도출하여 회귀분석 이론을 수학적으로 정립하였다. 즉 아버지의 키는 독립변수이며 아들의 키는 종속변수가 되는 것이다.

하나의 종속변수와 하나의 독립변수 사이의 관계를 분석할 경우를 단순회귀분석(simple regression analysis), 하나의 종속변수와 여러 독립변수 사이의 관계를 규명하고자 할 경우를 다중회귀분석(multiple regression analysis)이라고 한다. 본 분석에서는 단순회귀분석에 해당한다.

선박용 기관 역시 시간적 연속성에 있는 데이터는 일정한 두 변수 사이의 모델이 존재하며 많은 표본을 모아 회귀분석으로 모델을 구할 수 있다. 정상적인 상태라면 과거 정상적인 상태의 모델을 크게 벗어나지 않고 회귀할 것이나, 고장이 발생하게 되면 그 모델로 회귀하지 않고 크게 벗어나게 된다.

3.5 표준편차

많은 데이터를 표준화한 하나의 양은 평균값이며, 이 데이터들이 얼마나 평균 주변에 모여 있는지를 나타내는 것은 평균의 차이이다. 평균의 차이가 즉 편차이며 데이터가 많으면 많을수록 편차를 하나하나 계산하는 것은 불가능하므로, 여러 편차들을 대표할 수 있는 하나의 양이 필요하다. 데이터들이 흩어져 있는 정도를 산포도(散布度, dispersion)라 하며 본 논문에서 이용하고자 하는 표준편차는 산포도 가운데 가장 흔히 쓰이는 산포도이다. 표준편차(σ)를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\sigma &= \sqrt{\frac{(x_1 - m)^2 + (x_2 - m)^2 + \dots + (x_n - m)^2}{n}} \\ &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}\end{aligned}\quad (3-2)$$

여기서, $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$: Value

m : 평균값

Fig.3.6은 평균이 50이며 표준편차가 20인 데이터의 예이다. 해당 데이터에서 그 흠어짐의 정도가 표준 편차로써 20의 값을 가지는 산포도이며 표준편차 20은 1시그마(σ)로 표현된다. 2시그마(2σ)는 표준편차 40에 해당한다.

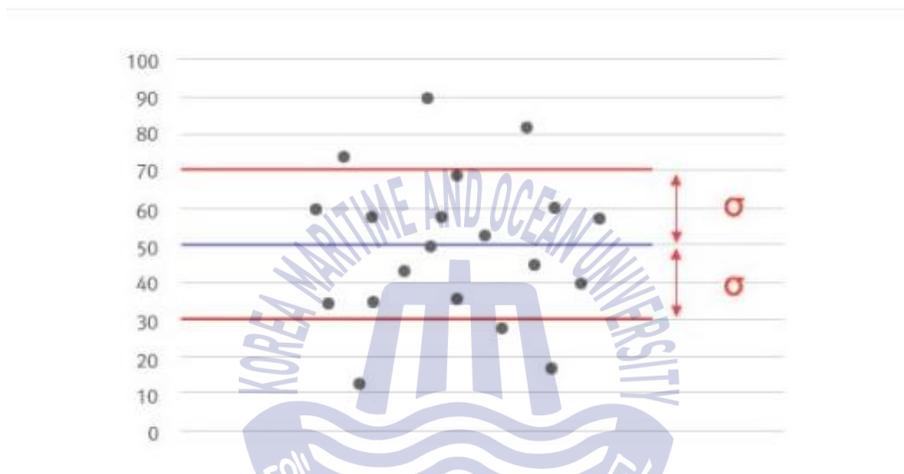


Fig.3.6 Example of the average 50 and 20 of the standard deviation^[12]

본 연구에서는 한계치를 선정하기 위한 방법으로 정상 상태일 때 기준선 (base line) 즉, 평균값을 따라 분포하고 있는 점들의 편차를 표준편차로 나타내고 표준 편차의 2시그마, 3시그마, 4시그마 등으로 적절한 표준 편차를 선정한다. 이렇게 만들어진 각각의 한계치를 상한 한계치(upper threshold)와 하한 한계치(lower threshold)라 칭한다.

선박용 기관의 데이터는 부하변동에 따라 영향을 받으며 선박의 이동 특성으로 인해 환경 변화에 따라 같은 부하 조건이라도 편차가 발생하게 된다. 이러한 편차가 크면 클수록 고장진단에는 불리하게 되므로 가능한 한 편차는 작을수록 좋으며 상관계수가 높으면서도 편차가 작은 쌍을 찾는 노력이 필요하다.

제 4 장 회귀분석을 이용한 선박엔진 고장진단 적용 결과

4.1 데이터의 취득

고장진단 대상 기관의 사양은 **Table 4.1**에 보인다. 대상 기관은 2016.01.01.기준 18,004시간을 운전한 기관으로써 2013.06.에 인수되어 2년 6개월 선령의 선박에 설치되어있다. 6개의 실린더로 구성되어 있으며 'W'사의 전자제어식 디젤 기관이다.

Table 4.1 The specification of the target engine

"W" Two stroke low-speed cross-head type		
Running hour	18,004 hours	
Cylinder bore	mm	820
Stroke	mm	3,375
CMCR	kW	23,900
	rpm	75
	MEP(bar)	17.9
	Pmax(bar)	159
	Mean piston speed(m/s)	8.4

AMS 데이터를 취득하기 위해 AMS 제조사와의 협의를 통해 통신 환경과 프로토콜에 대한 정의가 수반되어진다. 이렇게 확인된 프로토콜로 사람은 인식할 수 없는 기계어를 디코딩하여 사람도 읽을 수 있는 언어와 숫자의 형태로 변환이 가능해진다. 저장 방식은 컴퓨터 하드 디스크에 하루에 하나의 CSV 파일로

자동 저장되는 형태로 설정 하였다. 각 CSV 파일의 1행은 데이터의 이름이고 1열은 초 단위의 등 시간 간격으로 저장되도록 구성되어 있다. 데이터가 1차적으로 저장되는 곳은 엔진 컨트롤룸에 별도로 설치한 컴퓨터이며 저장되는 데이터의 종류는 온도, 압력, 출력(추정치), 회전수이다. 수집 기간은 2015.05.01.부터 2015.12.31.까지로 7개월에 해당한다. 총용량으로는 51 기가 바이트이며 일일 데이터양은 약 45 메가 바이트이다. 아날로그 데이터 360개, 디지털 데이터 713개 중에서 본 연구에서는 주기관과 관련된 아날로그 데이터의 111개를 사용하였다. 선내에 1차로 저장된 데이터는 선박용 위성 안테나를 통해 2차 저장소인 육상 데이터 서버로 전송되고 전송된 데이터는 역시 시간 순서대로 정렬되어 언제든지 분석이 가능한 형태로 저장된다. **Fig.4.1**은 AMS로부터 별도로 설치한 랜 컨버터를 통해 시리얼(serial) 통신으로 변환되고 데이터 수집용 컴퓨터로 전송되는 데이터의 흐름을 나타내었다.

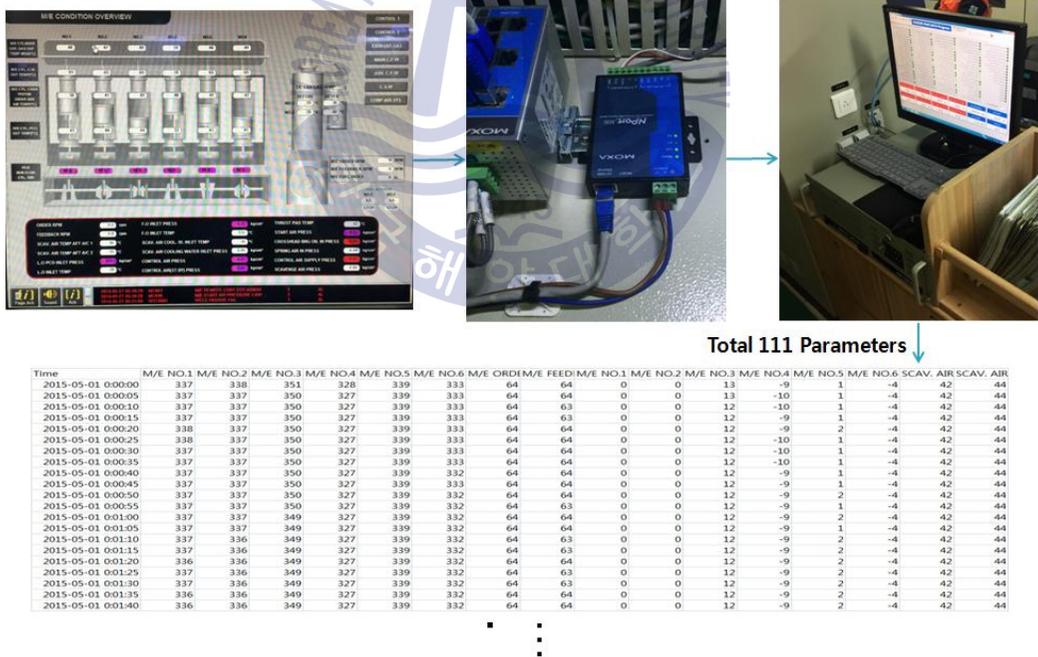


Fig.4.1 Data flow through each equipment

4.2 고장 분석

4.2.1 토크 리치(torque rich) 진단 결과

데이터가 수집되는 기간 중 대상 기관의 실린더 라이너(cylinder liner)와 피스톤 링(piston ring)이 손상되는 사례가 있었다. 이 손상 사고를 회귀분석에 의한 고장진단을 수행하기로 하였다. 목표는 선박의 승조원이 인지하였던 시점, 선박 관리사 육상 부서에 보고된 시점 이전에 회귀분석에 의한 고장진단기법이 이상 상태를 진단하는 것이다. **Table 4.2**는 사고 발생 후 선박에서 육상 부서로 보고한 사고 보고서이다.

Table 4.2 Accident report of the vessel

1. To meet voyage schedule, M/E was operated at overload in the North Pacific in bad weather conditions.
2. When checking piston ring & cylinder liner, We found out No.4,5 Cylinder piston ring peeling and blow-by phenomenon at Seattle, U.S., 2015.12.14. However we just increase cylinder oil feed rate without maintaining due to short port time.
3. We found out broken No.5 Piston ring checking at Tokyo, Japan, 2015.12.28.
4. The limit of cylinder liner measuring is reached at Busan, Korea, 2015.12.31.
5. Renewing No.5 Cylinder liner was scheduled, the result of measuring of No.4 Cylinder liner is worse than No.5 Cylinder, Second calling Busan, Korea, 2016.01.07. Therefore we exchanged not No.5 Cylinder liner but No. 4 Cylinder liner and carried out removing woreed ridge for No.5 Cylinder.
6. We finally exchanged No.5 Cylinder piston ring and cylinder liner at Kwangyang, Korea, 2015.02.12.

진단 결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 회귀분석에 의한 토크 리치 진단 결과와 해운회사에서 사용하고 있는 선박관리프로그램의 토크 리치 관리 지표를 비교하여 보았다.

Fig.4.2는 해운회사에서 사용하고 있는 토크 리치 관리 지표로써 2015년 12월 06일 토크 리치 상태가 발생하였다가 12월 19일부터 23일까지 사흘 연속 토크 리치 상태가 지속되었다. 그 후 이틀 뒤 26일부터 27일까지도 토크 리치 상태로 재 진입하여 2015년 12월 19일부터 27일까지 접수된 사고 보고서와 같이 지속적으로 과부하 운전 영역에 있었음이 확인되었다.

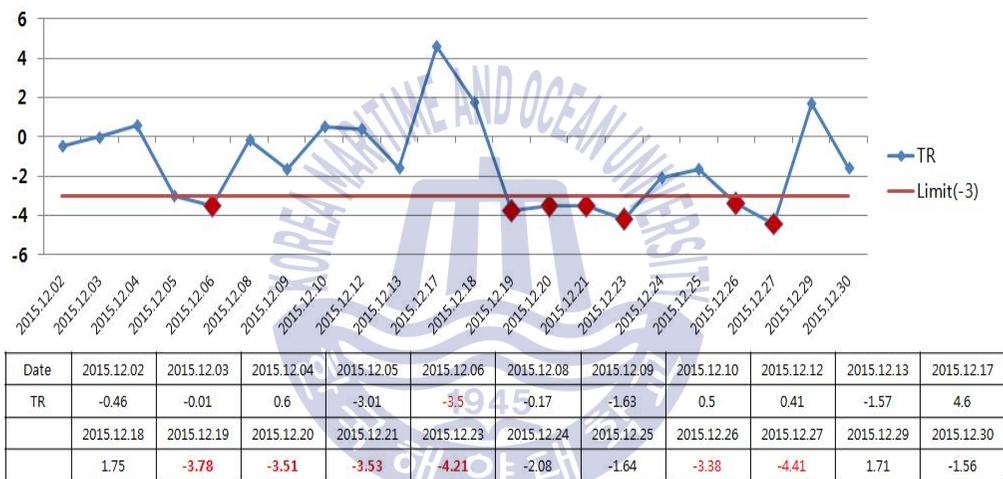


Fig.4.2 Daily torque rich of ship management program

일반적으로 해운회사에서 사용하는 토크 리치 판별법은 1일 평균 분당회전수 (average RPM)와 상용 분당회전수(nominal RPM)의 비를 구한 값과 상용 출력 (Nominal power)의 세제곱 근 선도에서 1일 연료소모량을 연료마력으로 환산하여 해당하는 RPM을 상용 분당회전수와 의 비로 구한 값의 차를 보인다. 그 결과가 -3 이하로 계산되면 토크 리치로 간주하여 그 이상을 유지하도록 관리하고 있다. 다음은 그 식을 보인다.

$$N: \frac{\text{Nominal RPM}}{\text{Current RPM}} \quad (4-1)$$

$$N_n: \left(\left(\left(\frac{\text{Current Power}}{\text{Nominal Power}} \right) \times 10^6 \right)^{\frac{1}{3}} \right) \div 3$$

Torque rich(TR) : $N - N_n \leq -3$

Fig.4.3는 제조사의 부하 운전영역 기준과 본 논문에서 제안하는 방식을 통해 과부하운전 분석을 비교 한 것이다. 좌측 운전영역 기준에서 B Line 이상에서의 운전은 **Fig.3.4**에 언급된 대로 장기간 운전 시 기관의 손상을 초래할 수 있다. 우측은 대상 선박에 2015년 12월 1일부터 31일까지의 추정 출력(estimated power ; RPM×fuel command)와 RPM(%)을 검은색 점으로 산포도를 그렸다. 검은 실선은 2015년 5월 1일부터 9월 1일까지 산포도의 평균값으로 기준선을 의미한다. 파란 실선은 제조사 운전영역의 B Line으로, 붉은 점선은 기준선에서 표준편차 (standard deviation, SD) 3을 적용한 상한 한계치를 표시하여 비교가 가능하게 하였다. 제조사의 B Line과 비교할 때 표준편차 3 적용 상한 한계치는 엔진 회전수 85%까지는 거의 일치하고 그 이상에서는 다소 낮음을 확인할 수 있다.

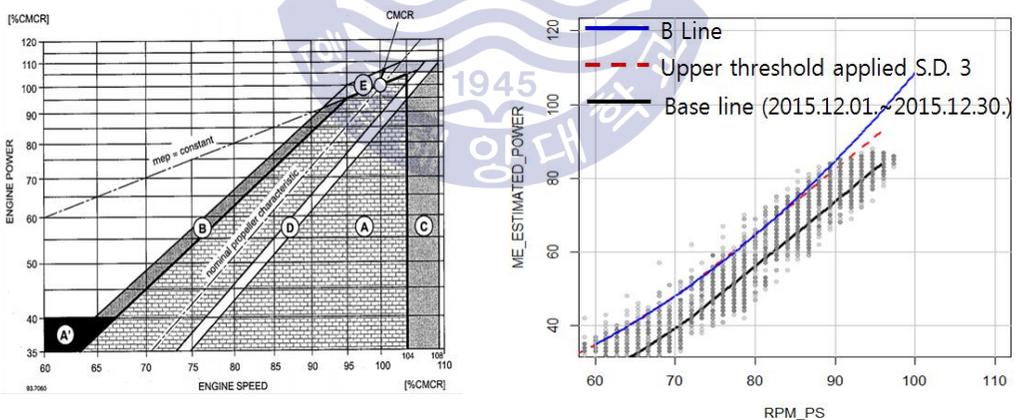


Fig.4.3 Contrastive analysis of maker guideline and standard deviation 2 applied limit

Fig.4.4는 표준편차 3을 적용한 상한 한계치를 시간의 흐름에 따라 분석한 시계열 분석 자료이다. 시계열 분석은 엔진출력(engine power)이 상한 한계치를 초과한 시점을 파악하는데 용이한 분석이다. 분석 결과 12월 19일부터 12월 23일까지 지속적으로 과부하 운전이 이루어 졌음이 확인된다. 이는 해운회사에서 일반적으로 널리 사용하고 있는 토크 리치 확인법과 거의 일치하는 기간으로 본 분석방법에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었으며 초 단위 간격으로 과부하 운전 여부를 확인할 수 있으므로 1일 평균 데이터를 활용하는 현재 토크 리치 확인법보다 개선되었다.

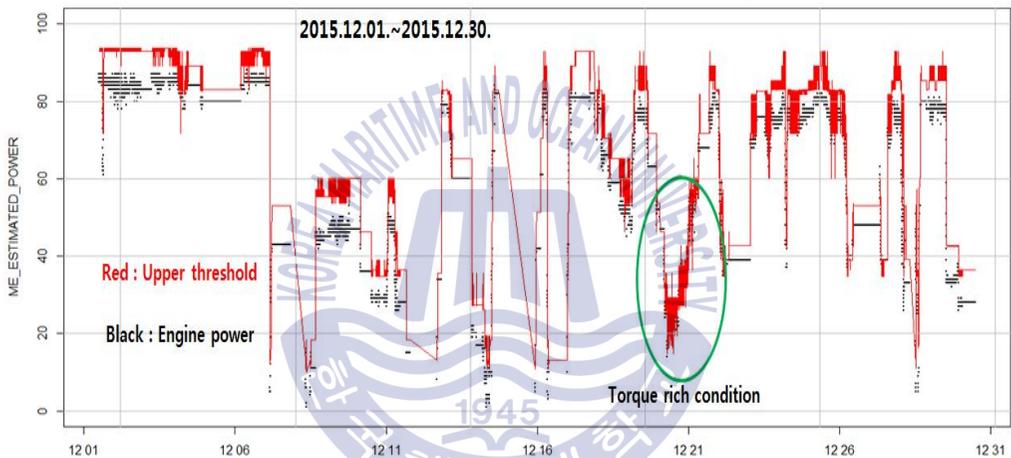


Fig.4.4 Time series analysis for torque rich

4.2.2 고장 발생 실린더의 상세 분석

Fig.4.5는 대상 선박에서 육상 관리 부서로 보고한 사고 보고서에 포함된 손상부 사진을 보인다. 대상 선박은 북태평양 좋지 않은 기상 상태에서 운항 스케줄을 맞추기 위해 무리한 운전을 시행하였고 이후 No.5 실린더의 피스톤 링 절손과 실린더 라이너가 손상되어 신품으로 교환하였다.

Fig.4.5에서 보이듯이 주기관 No.5 실린더의 피스톤 탐 링이 약 7.5 cm 가량 절손되었으며 실린더 라이너 역시 절손된 피스톤 링과 비정상적인 마찰로 손상되었다. 지금까지의 선박관리사는 선박 승조원에 의한 손상 사진은 입수할 수

있었으나 사고 전, 후의 엔진 각 부의 데이터는 얻을 수 없었으며 분석 역시 불가하였다.



Fig.4.5 Photo of broken piston ring and damaged cylinder liner

Fig.4.6은 피스톤 링의 절손 여부를 확인 할 수 있는 No.5 실린더 소기 온도와 소기 리시버의 온도의 분석이다. 피스톤 하부 측에 설치된 소기 온도센서는 각 실린더마다 장착되어 있고 소기 리시버는 터보 차저를 거친 소기가 모이는 하나의 공간으로 1개의 센서가 장착되어 있다. 정상적인 경우라면 소기 리시버를 거쳐 각 실린더별로 유입되는 소기 온도는 중간 과정에 별도의 외부에서 유입되는 열원이 없으므로 거의 같아야 한다. 그러나 피스톤 링의 절손이나 장력

저하로 블로우 바이가 발생하면 고온의 배기가스가 소기 온도 센서가 장착된 피스톤 하부 측으로 누설하게 되므로 온도가 상승하게 된다.

Fig.4.6의 좌측은 2015년 5월 1일부터 9월 1일까지 산포도이며 검은 실선은 기준선을 의미한다. 붉은 점선은 각각 상한 한계치와 하한 한계치로써 정상 상태일 때 산포도가 한계치를 벗어나지 않는 범위로 설정한 표준편차를 따른다. **Fig.4.6**의 우측은 2015년 12월 1일부터 31일까지 산포도이며 정상 상태의 상한 한계치를 벗어난 부분을 녹색 실선으로 표시하였다. 정상적인 경우에는 소기 리시버의 온도가 40℃에서 45℃일 경우 No.5 실린더 소기 온도는 38℃에서 67℃를 유지하여야 하나 2015년 12월 1일부터 31일 기간에는 50℃에서 78℃로 정상 상태보다 온도가 높았음이 확인된다.

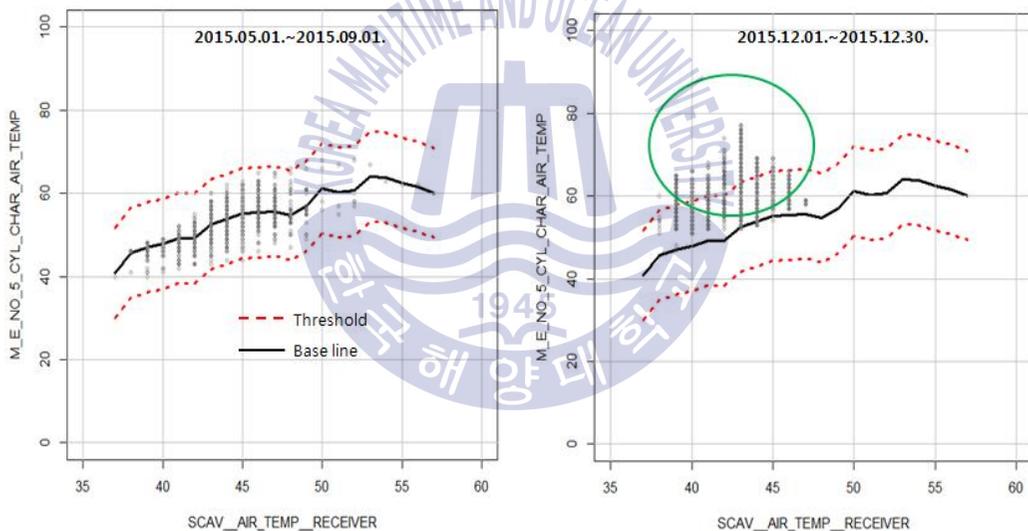


Fig.4.6 Contrastive analysis of temperature for scavenge air and scavenge air receiver

정확한 피스톤 링의 절손 시점을 가늠하기 위해 **Fig. 4.7**과 같이 시계열 분석을 시행하였다. 절손 시점은 No.5 실린더 소기 온도가 상한 한계치를 이탈하는 2015.12.20. 01:20 AM 경으로 판단되며 토크 리치 지속 운전 기간 중 발생하였다. 그러나 제조사에서 권고하는 소기 온도 한계치는 각 실린더 기준으로 화재

경고를 위해 설정한 80℃이며 슬로우 다운 기준은 120℃로 설정되어 있으므로 피스톤 링의 절손 확인이 불가하였다.

Fig.4.7에서 보이듯 No.5 실린더 소기 온도가 12월 20일 이전에는 비교적 상한 한계선과 하한 한계선의 중심에서 잘 유지되고 있다가 급격히 상한 한계선을 초과하는 점으로 미루어보아 피스톤 링 손상을 미리 감지하기에는 적합하지 않은 분석으로 판단되었다. 피스톤 링의 절손은 점진적인 현상이 아니라 순간적인 파쇄로 발생하는 현상이므로 이와 같은 결과는 타당한 분석으로 판단된다.

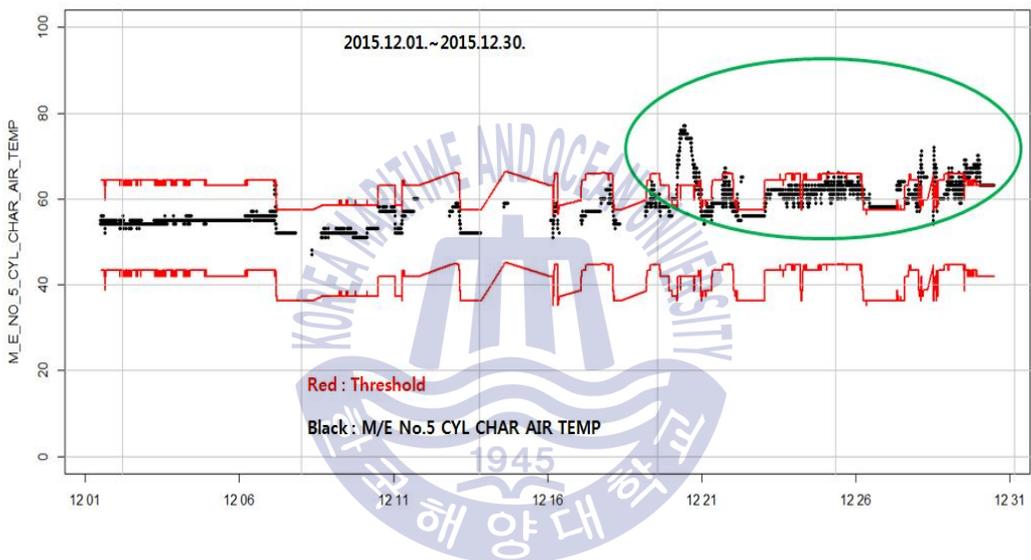


Fig.4.7 Time series analysis for broken piston ring

피스톤 링의 절손 당시 연료분사밸브와 배기밸브는 적절히 작동하였는지를 확인해보기 위해 **Fig.4.8**은 No.5 실린더의 배기가스 출구 온도와 RPM의 경향을 보인다. 연료분사밸브가 누설하게 되면 무화, 관통, 분무 성능이 저하되어 배기가스 온도를 낮추거나 적하 현상에 의해 후연소가 발생하여 배기가스 온도를 높이기도 한다. 배기 밸브 역시 열림 시기와 닫힘 시기가 적절히 행해지지 않으면 배기가스 흐름에 영향을 미쳐 이상 온도를 유발한다. 따라서 배기가스의 온도는 연료분사밸브 또는 배기밸브의 상태를 확인하기에 적절한 센서이다.

Fig.4.8의 좌측은 배기가스와 엔진 회전수의 관계에 따라 2015년 5월 1일부터 9월 1일의 산포도를 벗어나지 않는 한계치를 설정하기 위해 적절한 표준편차를 선정하였다. 우측은 2015년 12월 1일부터 31일 동안의 산포도로 전 영역에서 5월 1일부터 9월 1일 데이터로 설정 해놓은 한계치를 벗어나지 않음을 보인다.

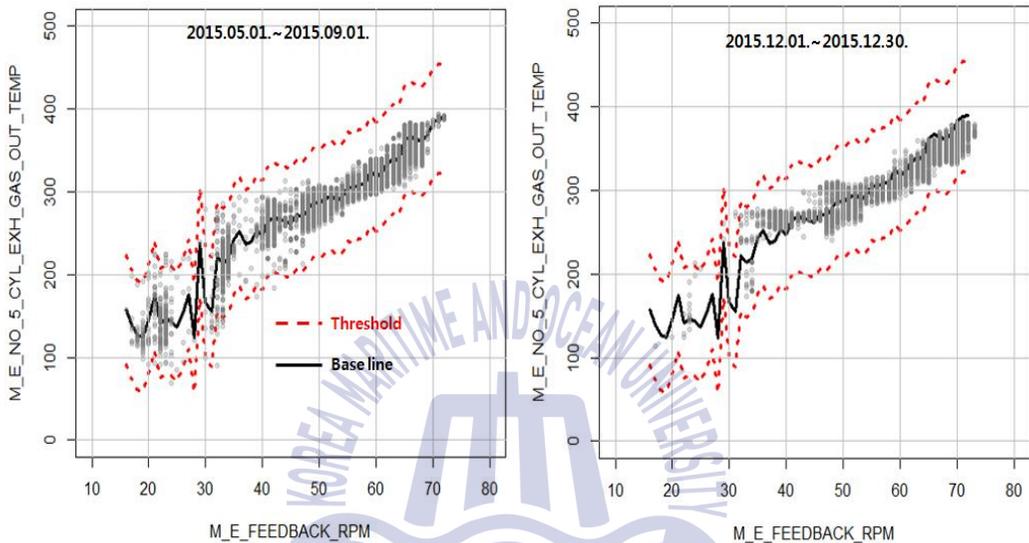


Fig.4.8 Contrastive analysis of exhaust gas temperature and RPM

Fig.4.9와 같이 시계열 분석을 시행한 결과, 피스톤 링이 절손된 12월 20일 경에 연료분사밸브와 배기밸브의 작동은 정상적인 상태였음을 확인할 수 있었고 그 이전과 그 이후 역시 기준선을 따라 정상 상태였음이 확인되었다.

제조사에서는 배기가스의 온도가 515℃를 초과하거나 전체 실린더의 평균 대비 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ 이상 차이가 발생할 경우 경고음(alarm)을 발생시키도록 권고하고 있으나 본 연구에서는 상기와 같이 엔진 RPM에 따라 기준선을 기준으로 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ 가량의 편차로 운전 되고 있음을 보인다.

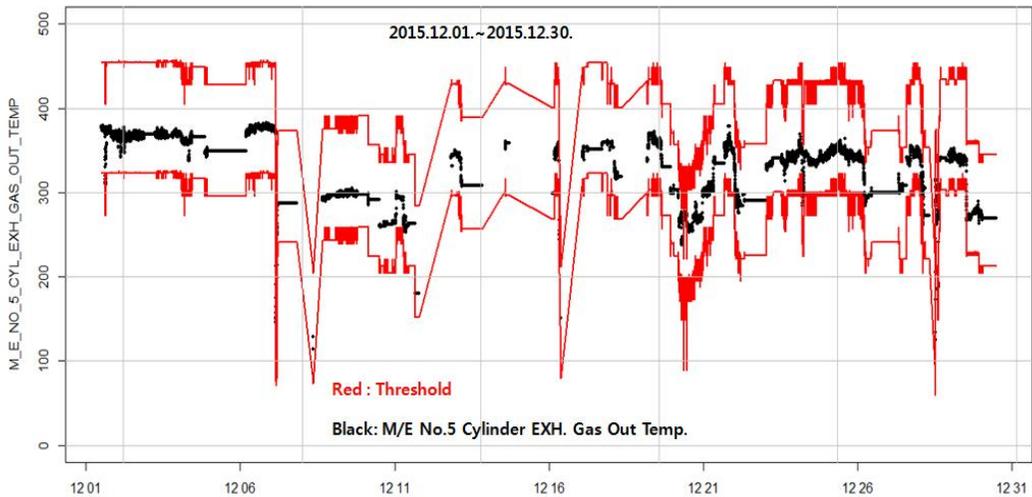


Fig.4.9 Time series analysis for damaged fuel injection and exhaust valve

5번 메인 베어링(No.5 main bearing)의 이상 유무를 확인하기 위해서 5번 메인 베어링 윤활유 출구 온도와 추력 패드(thrust pad) 윤활유 출구 온도의 경향을 분석하였다. 엔진의 부하가 상승함에 따라 각부 윤활유 출구 온도 역시 함께 상승하는데 메인 베어링의 윤활유 출구 온도와 추력 패드 윤활유 출구 온도는 전혀 다른 베어링이지만 하나의 크랭크 축을 지지하는 만큼 높은 상관관계를 보이고 있었다. 따라서 이 두 베어링의 윤활유 출구 온도의 상관계수가 낮아진다는 것은 하나 이상의 베어링에 문제가 생겼음을 의미한다.

Fig.4.10은 5번 메인 베어링의 윤활유 출구 온도와 추력 패드 출구 온도의 경향을 보인다. 선박에서 발송한 사고 보고서에서도 각 베어링에 대한 내용은 언급되어있지 않으며 피스톤 링의 손상과 각 베어링의 손상은 관련성이 없으므로 베어링의 상태는 정상적임을 확인하였다. 다만 사고 당시 선박이 겨울철 북태평양을 향해하고 있었기에 낮은 대기온도와 해수온도로 인해 메인 베어링의 윤활유 온도가 전체적으로 2℃ 가량 낮아졌으나 이는 표준편차 범위 내에서 감소하였으므로 메인 베어링의 이상을 의미하지는 않는다.

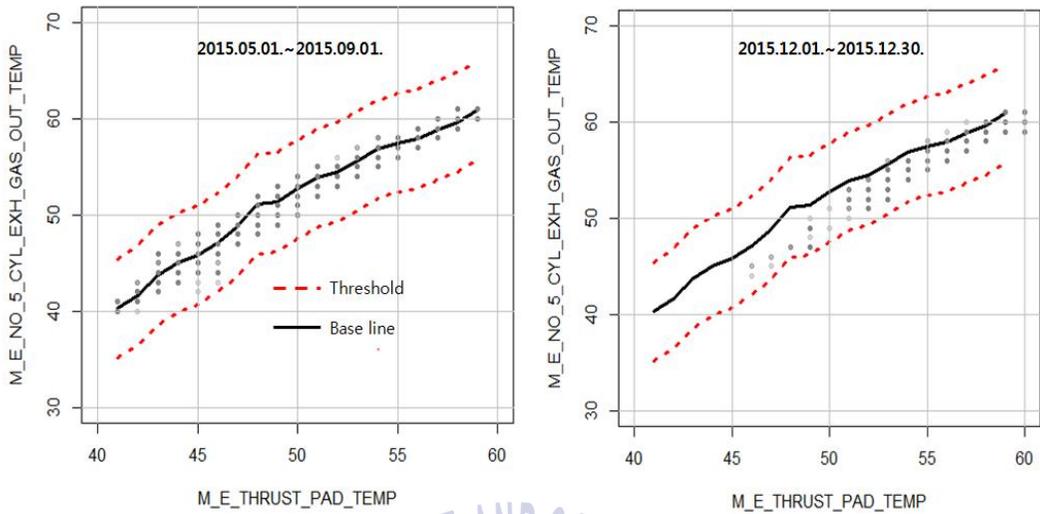


Fig.4.10 Contrastive analysis of temperature for main bearing and thrust pad

5번 메인 베어링의 12월 동안 상태를 확인하기 위해 시계열 분석을 **Fig.4.11**로 보이면 5번 메인 베어링의 윤활유 출구 온도를 나타내는 검은색 점들은 12월 내 한계치 내에서 유지되고 있으며 정상적인 상태를 보인다.

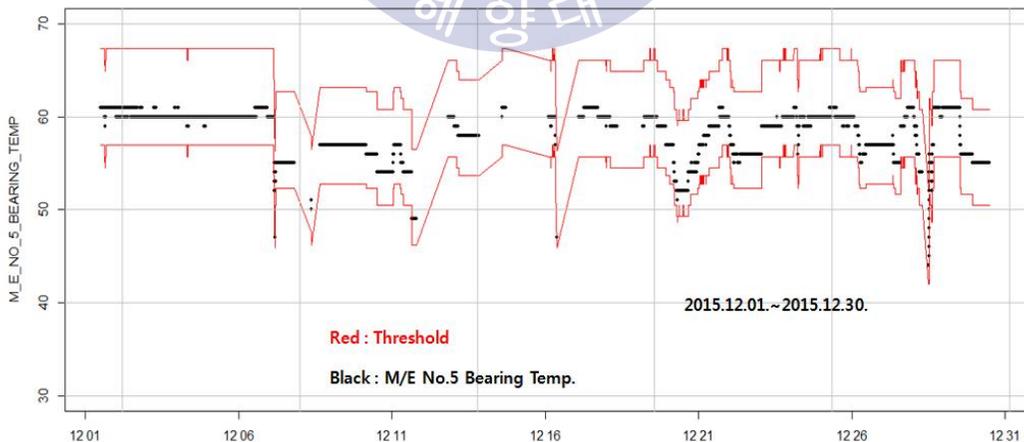


Fig.4.11 Time series analysis for damaged main bearing

피스톤 링과 실린더 라이너의 이상 마찰에 따른 열화를 확인하기 위해 5번 피스톤 냉각유의 출구 온도와 5번 메인 베어링 윤활유 출구 온도를 분석하였다. 피스톤 냉각유는 연소실 내 고온의 배기가스에 노출된 피스톤 크라운과 피스톤 링의 열부하를 낮추기 위하여 주기판 시스템 오일을 강제 급유 방식으로 피스톤 크라운 내부에 급유된다.

Fig.4.12는 피스톤 냉각유를 공급하는 노즐과 피스톤 크라운의 내부 구조를 보여 이해를 돕는다. 급유된 피스톤 냉각유는 노즐을 통해 피스톤 크라운 내부 벽으로 분사되어 연소실 고온의 배기가스와 피스톤 링과 실린더 라이너의 마찰 열을 흡수한다.

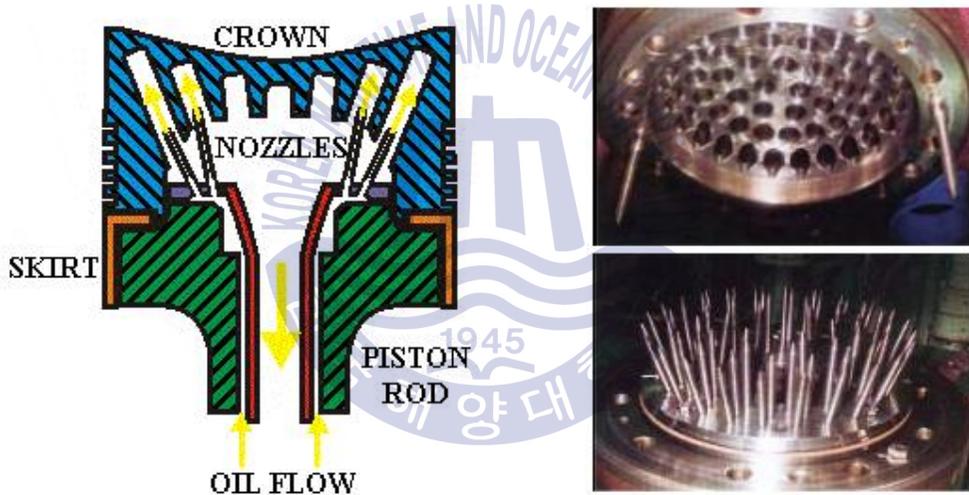


Fig.4.12 Photo of nozzles for piston skirt and piston crown^[13]

Fig. 4.13에서 보이듯이 정상적인 운전 상태였던 좌측 대비 전반적으로 피스톤 냉각유의 출구온도가 높아졌음이 확인된다. 그러나 제조사에서 권고하는 피스톤 냉각유의 경고 값은 80℃이고 슬로우 다운은 85℃로 실질적인 경고가 되지 못했다. 피스톤 냉각유 출구 온도가 60℃일 경우라도 피스톤 링 절손과 실린더 라이너 손상 사고가 발생하였기 때문이다.

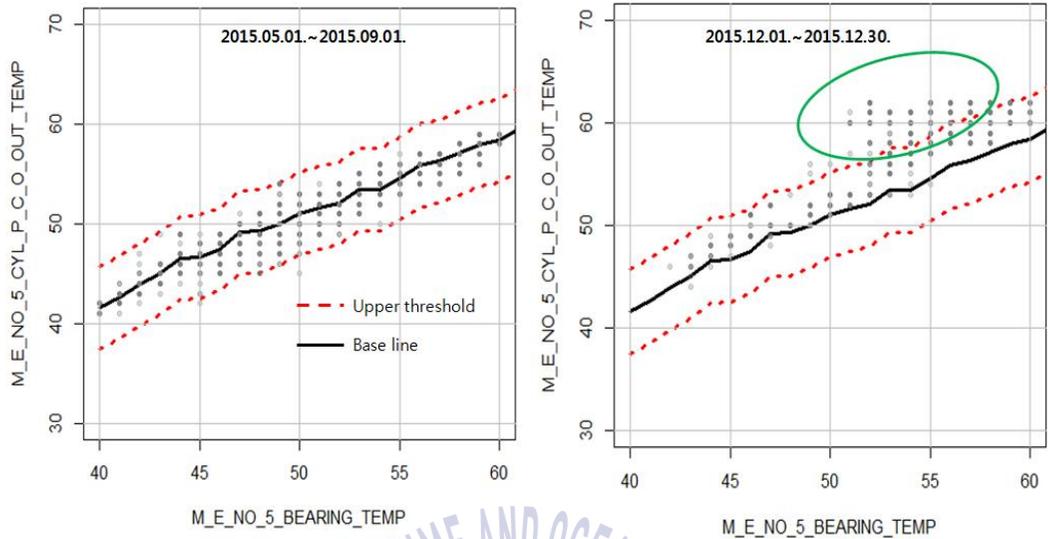


Fig.4.13 Contrastive analysis of temperature for piston cooling oil and main bearing

Fig.4.14에서 보이는 시계열 분석 결과 12월 7일경 이미 상한 한계선을 초과 하였던 구간이 확인되었으며 지속적으로 상한 한계선에 근접한 형태로 운전 중 이었다. 12월 7일경 정상적인 피스톤 냉각유의 출구 온도는 최대 58℃, 최소 51℃ 사이에서 유지되어야 하나 최대 온도를 초과하였으며 12월 11일, 12월 13 일에도 한계치를 초과하였음이 확인되었다.

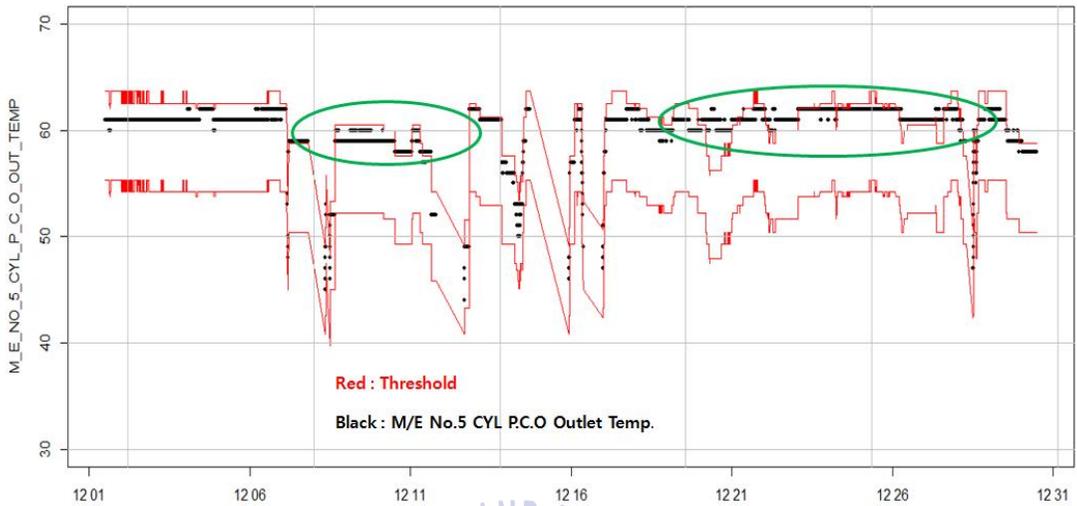


Fig.4.14 Time series analysis for degradation of piston ring

보다 더 긴 구간을 분석하여 피스톤 링과 실린더 라이너가 언제부터 악화되었는지, 수리 후에는 다시 정상 범위로 돌아갔는지 여부를 확인하기 위해 9월 1일부터 2월 1일까지의 구간으로 확대하여 분석하여 보았다. 그 결과는 **Fig.4.15**에서 보인다.

9월 중순까지 정상 상태를 나타내는 기준선에서 데이터가 유지되고 있다가 9월 말경부터 조금씩 상승하기 시작하였다. 지속적으로 데이터는 상승하여 결국 12월 7일 최초로 피스톤 냉각유 출구 온도 상한 한계치를 초과, 12월 20일 경 피스톤 링이 절손되었다. 이 후 2016년 1월 1일 부산항에 입항하여 신품으로 피스톤 링과 실린더 라이너로 교환한 후 다시 2015년 9월 초와 같이 기준선을 유지하는 정상 상태로 확인이 되었다.

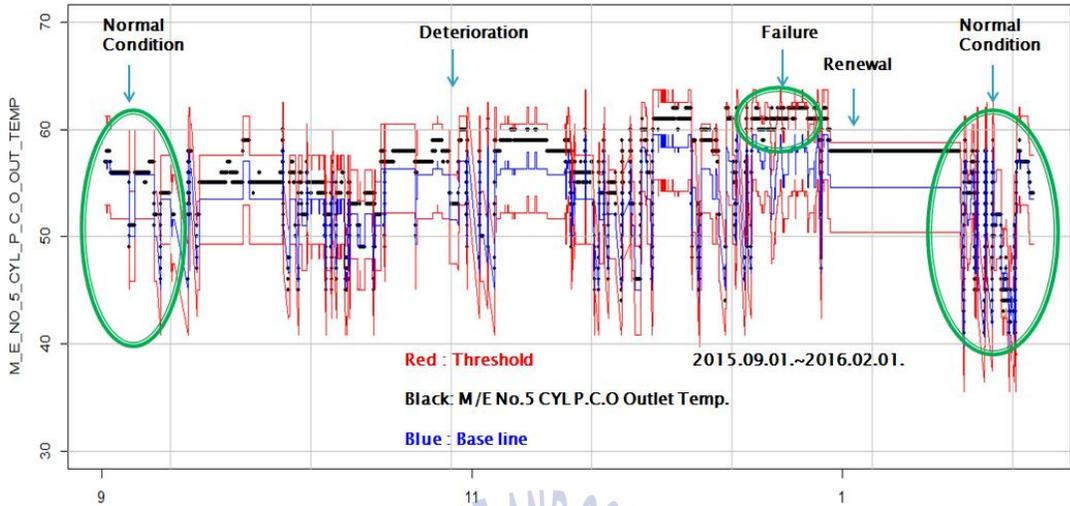


Fig.4.15 Degradation of piston ring for 5 months

4.3 고장 평가 및 고찰

전반적인 분석 결과에 대한 평가는 기존 승조원에 의한 인지 시점인 2015.12.28. 대비 컴퓨터 기반의 고장진단기법을 통해 손상 여부를 21일 전에 인지가 가능했다는 점과, 2015년 9월 말경부터 지속적으로 피스톤 링과 실린더 라이너의 상태가 악화되어 왔음이 확인된다는 점이 중요한 사항으로 보아진다. 또한 손상이 발생한 시기에 엔진의 과부하 운전이 수행된 점이 식별되어 고장의 직접적인 원인으로 작용 하였을 것으로 판단되어진다. 실제로 본 분석에는 포함되지 않았으나 해당 선박에서는 한 달여 뒤 타 기통에서 동일한 손상이 시간차를 두고 발생하였으며 이는 결코 우연한 결과가 아닐 것으로 판단된다.

선박용 엔진의 고장을 자동으로 진단하고 판단하는 것은 쉬운 일이 아니다. 선박의 엔진마다 제조사가 다르며 같은 제조사일지라도 운항하는 지역과 운용하는 항해사, 기관사들이 다르기 때문에 정형화된 모델 기반의 고장진단은 한계가 있다고 판단된다.

4.3.1 센서 장착 위치의 최적화

제언한 방법의 고장진단을 위해서는 기관의 상태를 확인할 수 있는 최적 위치에 센서를 부착하여야 한다. 또한 필수적인 센서의 식별이 요구된다. 만약 연료분사펌프(fuel injection pump)의 고장을 진단하기 위해서는 연료분사펌프의 고장 여부를 확인할 수 있는 토출 압력 또는 롤러 가이드(roller guide)의 온도, 플런저(plunger)의 위치(position) 등 가능한 많은 센서가 장착되어야 한다. 그러나 이는 추가적인 비용을 발생시키기 때문에 최소의 센서로 다양하고 고장 진단이 가능한 장소에 장착하기 위한 최적화가 필요하다.

이를 위해 가장 먼저 판단하여야 하는 것은 대상 엔진에서 가장 결함에 취약한 부분을 찾는 것이다. 잠재 고장 유형에 해당하는 센서의 수를 제한하여 사용하거나 각 고장 유형의 중요도에 따라서 가중치를 부여하여 크기를 계산한다. 이렇게 계산된 크기의 순서에 따라 센서를 장착하는 방법이다.

4.3.2 분석법의 고도화

회귀분석을 잘 활용하기 위해서는 많은 사고 사례에 대한 경험과 데이터의 축적이 반드시 필요하며 분석 기법 역시 고도화 될 필요가 있다. 상한 한계치와 하한 한계치 사이에서 들어오는 현재 센서 값의 증가 추세 또는 감소 추세를 계산하여 각 한계치에 도달 예상 거리를 시간으로 환산한다면 고장 발생 시점을 예측 할 수 있어 보다 안전한 유지 보수가 가능할 것으로 판단된다.

또한 상관분석에 따라 지금은 2가지의 쌍(pair)으로만 고장진단을 시행하였으나 고장진단에 고려가 가능하면서도 상관계수가 높은 변수를 3가지 이상 사용하는 기법에 대해서도 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다. 이와 같은 방법이 고장진단의 정확도를 높일지 아니면 도리어 낮출지에 대해 연구가 필요하며 추가적인 변수를 더 사용하는 것이 정확도를 높인다면 몇 개의 변수를 사용하는 것이 가장 좋은지 역시 최적화 될 필요가 있다고 판단된다.

4.3.3 고장 유형의 세분화

다양한 케이스의 고장 유형과 센서 간의 연결 및 정의는 앞으로도 지속적으로 확인하여야 할 부분이다. 선박 운항 중 발생한 고장 사례를 다수 확보하여 해당 시점을 역으로 추적하는 방법 외에도 사전에 발생 가능한 고장 사례를 열거한 후 진단 가능한 센서들을 선별하여 놓아야 할 것이다.



제 5 장 결 론

본 논문에서는 고장진단시스템의 종류와 특징을 검토하고, 선박용 디젤 기관에 손상 발생 전 이상 징후를 파악하기 위해 회귀분석을 이용하는 방법에 관하여 연구하였다. 이러한 고장진단시스템은 궁극적으로 자원의 최적화된 사용을 의미하므로 앞으로 고장 발생 확률과 고장 발생 시점을 예측 하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

본 논문의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 선박 기관의 고장을 사전에 예측하기 위해서는 다양한 방법이 있지만 그 비용이 과대하고 복잡하여 기존에 설치된 센서를 활용하고 이를 분석하기 위해 회귀분석을 이용해 보았다.

2. 회귀분석을 이용한 진단기법의 신뢰성을 확인하기 위해 해운사에서 사용하고 있는 토크 리치 확인법과 비교하였다. 토크 리치 발생 기간이 일치하였고 초 단위 간격으로 과부하 운전 여부를 확인할 수 있으므로 1일 평균 데이터를 활용하는 현재 토크 리치 확인법보다 개선된 결과를 얻었다.

3. 실제 선박에서 피스톤 링과 실린더 라이너가 손상된 사례를 식별하여 회귀분석을 이용한 고장진단방법을 적용해 보았다. 그 결과 기존 승조원에 의한 인지 시점과 비교하여 컴퓨터 기반의 고장진단기법을 이용하였을 때 손상 여부를 보다 조기에 인지 할 수 있었다.

4. 선박 기관에서 열화 되어가며 고장이 발생하는 경우는 전체 고장의 7%에 해당하며 이를 개선하기 위해 지속적인 열화 사실을 정량적으로 보였다.

고장진단기법을 고도화하기 위해서는 앞으로 설치된 센서의 위치를 최적화하고 분석 기법을 고도화, 고장 유형의 세분화에 대한 연구가 추가적으로 요구된다.

참고문헌

- [1] 정찬호, 노범석, 이지웅, 최재성, 2013. 선박용 디젤기관의 열화성능 예측에 관한 연구. *한국마린엔지니어링학회지 제 37권 제1호*, pp.47-52.
- [2] 조상제, 전홍배, 2014. 해양플랜트 LNG Compressor 장비의 예지.시스템 개발에 관한 연구. *한국 CAD/CAM 학회 학술발표회 논문집*, pp.304-309.
- [3] 이양지, 김덕영, 황민순, 정영수, 2012. 이벤트 기반 지능형 선박엔진 결합분석. *한국산업정보학회논문지 제 17권 제4호(2012.8)*, pp71-85.
- [4] 컴퓨터인터넷IT용어대사전
- [5] 최주호, 2013. 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수. 고장예지 및 건전성관리 기술의 소개. *기계저널 2013.7.. Vol 53, No 7*.
- [6] 이기동, 정광요, 김원래, 2013. 소형선박용 고속디젤기관의 고장 예측 진단 시스템 연구. *선박안전기술공단 선박안전 vol.26*, pp.24-35.
- [7] 김봉기. 2013. 소음,진동 2013년 12월 특집 ISO/TC 108/SC5 표준 제.개정 현황 *한국기계연구원 소음,진동*, pp26~28.
- [8] Kenneth Shakesby, 2016. *White paper in Reliability-Centered Maintenance [m] RCM for the Marine Industry*, Switzerland:K-Marine Consulting
- [9] Begas, 2014.7 *Predictive Maintenanc*, 서울:Begas
- [10] Jardine, A.K.S., Lin, D. and Banjevicm D., 2006, A review on machinery diagnostics and prognosrics implementing condition-based maintenance, *Mechanical system and signal processing. Vol20*, pp.1483-1510.
- [11] Laerd Statistics [Online] Available at: <https://statistics.laerd.com/spss-tutorials/linear-regression-using-spss-statistics.php> [Accessed 23 October 2016]
- [12] 표준편차 [Online] Available at: http://navercast.naver.com/contents.nhn?rid=22&contents_id=844

[Accessed 23 October 2016]

[13] The Learning Resource For Marine Engineers {Online} Available at:
www.marinediesels.co.uk [Accessed 23 October 2016]

