

工學博士 學位論文

통계적 분석기법을 이용한 선박디젤기관의
고장진단 및 예측시스템에 관한 연구

The Fault Diagnosis and Prediction System of Marine
Diesel Engines Using a Statistical
Analysis Method

指導教授 劉 永 昊

2005年 2月

韓國海洋大學校 大學院

制御計測工學科

金 英 一

목 차

Abstract	IX
Nomenclature	XII
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 종래의 연구	3
1.3 연구 목적 및 내용	5
제 2 장 선박용 디젤기관의 계통분류 및 감시데이터 특성	8
2.1 선박용 디젤기관의 계통분류	8
2.2 선박용 디젤기관 계통별 감시데이터 특성분석	11
2.2.1 시운전데이터의 특성	12
2.2.2 실선운행데이터의 특성	13
2.3 시운전데이터와 실선운행데이터의 비교분석	30
제 3 장 이상감지 및 이상진단모듈 설계	36
3.1 이상감지모듈과 이상진단모듈의 구조	36
3.2 전문가에 의한 이상감지와 이상진단	38
3.3 통계적 분석기법을 이용한 이상감지모듈과 이상진단모듈	39
3.3.1 통계적 분석기법	39
3.3.2 통계적 분석기법에 의한 이상감지와 이상진단	41
3.4 통계적 분석기반 이상감지지식베이스와 이상진단지식베이스 ..	64
3.5 전문가지식기반 이상진단지식베이스	67
3.6 고장진단 알고리즘	69

제 4 장 이상감지 및 이상진단 시뮬레이션	72
4.1 통계적분석기반 이상감지 및 이상진단을 위한 실험	72
4.2 실험결과 고찰	84
4.3 실험시스템 구축	88
제 5 장 의사결정모듈의 설계	94
5.1 연소계통의 의사결정모듈	95
5.2 열교환기계통의 의사결정모듈	99
5.3 전동기 및 펌프계통의 의사결정모듈	101
제 6 장 통계적 분석기법에 의한 고장예측모듈	103
6.1 통계적 분석기반 고장예측모듈의 구조	104
6.2 실선운행데이터의 SRA	105
6.3 SRAMD를 이용한 고장예측 실험	112
제 7 장 결 론	117
참고 문헌	119

그림 목 차

그림 1.1 제안된 고장진단 및 예측시스템의 구조	6
그림 2.1 선박 디젤기관실의 계통분류	9
그림 2.2 디젤기관 시운전 성능곡선	14
그림 2.3 부하와 No.1 과급기 회전수의 TSD	17
그림 2.4 부하와 기관회전수의 TSD	17
그림 2.5 부하와 소기공기압력의 TSD	18
그림 2.6 부하와 실린더 평균배기가스온도의 TSD	18
그림 2.7 부하와 소기공기온도의 TSD	19
그림 2.8 부하와 No.1 과급기 배기가스온도의 TSD	19
그림 2.9 No.1/No.2 과급기 배기가스온도의 TSD	20
그림 2.10 No.1/No.2 실린더 배기가스온도의 TSD	20
그림 2.11 Fwd/Aft 소기공기온도의 TSD	21
그림 2.12 No.1 과급기회전수의 분포	22
그림 2.13 소기공기압력의 분포	23
그림 2.14 Aft 소기공기온도의 분포	23
그림 2.15 실린더 평균배기가스온도의 분포	24
그림 2.16 No.1 과급기 배기가스온도의 분포	24
그림 2.17 기관 냉각유체 입·출구 온도의 TSD	27
그림 2.18 냉각수온도와 기관냉각유체입구온도의 TSD	27
그림 2.19 냉각수온도와 No.1 실린더 배기가스온도의 TSD	28
그림 2.20 기관실 온도와 냉각수온도의 TSD	28
그림 2.21 냉각유체 냉각기입구온도와 냉각유체 기관입구온도 TSD ..	29
그림 2.22 냉각유체 냉각기출구온도와 냉각유체 기관입구온도 TSD ..	29
그림 2.23 연료순환펌프 입·출구 압력의 TSD	31
그림 2.24 전동기 전류와 연료순환펌프 출구 압력의 TSD	31

그림 2.25	연료공급펌프 입·출구 압력의 TSD	32
그림 2.26	전동기 전류와 연료공급펌프 출구 압력의 TSD	32
그림 2.27	소기공기압력 STD와 OPD의 TSD	34
그림 2.28	No.1 과급기회전수 STD와 OPD의 TSD	34
그림 2.29	실린더 평균배기가스온도 STD와 OPD의 TSD	35
그림 2.30	No.1 과급기 배기가스온도 STD와 OPD의 TSD	35
그림 3.1	고장진단 및 예측시스템의 구조	37
그림 3.2	전문가에 의한 고장진단 절차	40
그림 3.3	부하의 MVSD에 대한 부하와 소기압력의 CC	47
그림 3.4	부하의 MVSD에 대한 부하와 No.1 과급기 배기가스온도의 CC	47
그림 3.5	부하의 MVSD에 대한 부하와 실린더 평균배기가스온도의 CC	48
그림 3.6	No.1 과급기 배기가스온도의 MVSD에 대한 No.1/No.2 과급기 배기가스온도의 CC	49
그림 3.7	실린더 평균배기가스온도의 MVSD에 대한 실린더 평균배기가스온도 No.1 실린더 배기가스온도의 CC	49
그림 3.8	Fwd 소기공기온도의 MVSD에 대한 Fwd/Aft 소기공기온도의 CC	50
그림 3.9	PCO와 UCO의 관계를 가지는 부하데이터 구간	51
그림 3.10	부하 MVSD의 PCOSDR 구간	51
그림 3.11	No.1 실린더 배기가스온도 MVSD의 PCOSDR 구간	52
그림 3.12	No.1 과급기 배기가스온도 MVSD의 PCOSDR 구간	52
그림 3.13	No.1 과급기회전수 MVSD의 PCOSDR 구간	53
그림 3.14	Fwd 소기공기온도 MVSD의 PCOSDR 구간	53
그림 3.15	부하와 No.1 과급기회전수의 상관관계	54
그림 3.16	부하의 MVSD에 대한 PCO 구간 선정	55

그림 3.17	부하의 PCO 구간에서 과급기회전수와의 CC	57
그림 3.18	통계적 분석기반 이상감지모듈과 이상진단모듈의 구조	63
그림 3.19	고장진단모듈의 전체 흐름도	71
그림 4.1	No.1 실린더 배기가스온도의 TNDRN, PNDRN과 OPD	74
그림 4.2	No.1 과급기 배기가스온도의 TNDRN, PNDRN과 OPD	75
그림 4.3	No.1 과급기회전수의 TNDRN, PNDRN과 OPD	76
그림 4.4	Fwd 소기공기온도의 TNDRN, PNDRN과 OPD	77
그림 4.5	소기공기압력의 TNDRN, PNDRN과 OPD	78
그림 4.6	No.1 실린더 배기가스온도의 FNDRN과 OPD	
	No.3 실린더 배기가스온도 OPD	79
그림 4.7	No.1 과급기회전수의 FNDRN과 No.2	
	과급기회전수의 OPD	79
그림 4.8	No.1 과급기 배기가스온도의 FNDRN과 No.2	
	과급기 배기가스온도의 OPD	80
그림 4.9	Fwd 소기공기온도의 FNDRN과 소기공기압력의 OPD	80
그림 4.10	No.1 실린더 배기가스온도의 기준CC와 FNDRN CC	86
그림 4.11	No.1 과급기회전수의 기준CC와 FNDRN CC	87
그림 4.12	No.1 과급기 배기가스온도의 기준CC와 FNDRN CC	87
그림 4.13	Fwd 소기공기온도의 기준CC와 FNDRN CC	88
그림 4.15	이상감지지식베이스의 설정 및 상태 화면	90
그림 4.16	실시간 데이터감시 화면	91
그림 4.17	실시간 이상감지시스템의 상태 화면	92
그림 4.18	계측항목 및 계통별 이상데이터 고장예측 화면	93
그림 5.1	고장진단 및 예측시스템에서의 의사결정모듈	97
그림 5.2	연소계통 의사결정모듈	98
그림 5.3	열교환기계통 의사결정모듈	100
그림 5.4	전동기 및 펌프계통 의사결정모듈	102

그림 6.1 통계적 분석기반 고장예측모델의 구조	106
그림 6.2 부하에 대한 No.1 과급기회전수의 MADS와 SRA	109
그림 6.3 부하에 대한 소기공기압력의 MADS와 SRA	109
그림 6.4 No.1 실린더 배기가스온도에 대한 No.2 실린더 배기가스온도의 MADS와 SRA	110
그림 6.5 No.1 과급기회전수에 대한 No.2 과급기회전수의 MADS와 SRA	110
그림 6.6 No.1 과급기 배기가스온도에 대한 No.2 과급기 배기가스온도의 MADS와 SRA	111
그림 6.7 Aft 소기공기온도에 대한 Fwd 소기공기온도의 MADS와 SRA	111
그림 6.8 부하에 대한 FNDRN No.1 과급기회전수의 MADS와 SRA	114
그림 6.9 No.1 실린더 배기가스온도에 대한 FNDRN No.2 실린더 배기가스온도의 MADS와 SRA	114
그림 6.10 No.1 과급기회전수에 대한 FNDRN No.2 과급기회전수의 MADS와 SRA	115
그림 6.11 No.1 과급기 배기가스온도에 대한 FNDRN No.2 과급기 배기가스온도의 MADS와 SRA	115
그림 6.12 부하에 대한 No.1 과급기회전수의 구간별 R^2 의 변동추이와 추정 회귀식	116

표 목 차

표 2.1	주기관계통의 분류	8
표 2.2	연소계통 데이터	11
표 2.3	열교환기계통 데이터	11
표 2.4	전동기 및 펌프계통 데이터	12
표 2.5	시운전데이터의 부하에 따른 각 계측항목간의 운전범위	15
표 2.6	연소계통 계측항목들의 운전범위	22
표 2.7	열교환기계통 계측항목들의 운전범위	26
표 2.8	전동기 및 펌프계통 계측항목 운전범위	30
표 3.1	연소계통 계측항목의 PM, PTSD 및 부하와의 PCC	44
표 3.2	각 실린더 배기가스온도 상호간 PCC	45
표 3.3	각 과급기 배기가스온도 상호간 PCC	46
표 3.4	소기공기온도 상호간 PCC	46
표 3.5	연소계통 계측항목 사이의 PCC 분류	45
표 3.6	부하의 PCO구간에 대한 계측항목 사이의 CC	59
표 3.7	실린더 평균배기가스온도의 PCO구간에서 각 실린더 배기가스온도의 CC	60
표 3.8	No.1 과급기회전수의 PCO구간에서 각 과급기 배기가스온도 의 CC	60
표 3.9	Fwd 소기공기온도의 PCO구간에서 Aft 소기공기온도의 CC ...	60
표 3.10	No.1 과급기 배기가스온도의 PCO구간에서 각 과급기 배기가스온도의 CC	61
표 3.11	소기공기압력의 PCO구간에서 소기공기온도의 CC	61
표 3.12	실린더 평균배기가스온도의 PCO구간에서 각 과급기 배기가스온도의 CC	61
표 3.13	실린더 평균배기가스온도의 PCO구간에서	

소기공기온도의 CC	62
표 3.14 실린더 평균배기가스온도의 PCO구간에서 소기공기압력의 CC	62
표 3.15 PCO구간에 대한 계측항목 사이의 CC 분류	62
표 3.16 이상감지지식베이스	65
표 3.17 이상진단지식베이스	66
표 3.18 전문가지식기반 이상진단지식베이스	68
표 3.19 연소계통 계측항목 사이의 MCC 및 FDCC	70
표 4.1 No.1 실린더 배기가스온도의 TNDRN과 PNDRN에 의한 No.2 실린더 배기가스온도의 CC	81
표 4.2 No.1 과급기회전수의 TNDRN과 PNDRN에 의한 No.2 과급기회전수의 CC	81
표 4.3 Fwd 소기공기온도의 TNDRN과 PNDRN에 의한 Aft 소기공기온도의 CC	81
표 4.4 No.1 과급기 배기가스온도의 TNDRN과 PNDRN에 의한 No.2 과급기 배기가스온도의 CC	82
표 4.5 소기공기압력의 TNDRN과 PNDRN에 의한 Fwd 소기공기온도의 CC	82
표 4.6 소기공기압력의 FNDRN에 의한 Fwd 소기공기온도의 CC	82
표 4.7 No.3 실린더 배기가스온도의 FNDRN에 의한 No.1 실린더배기가스온도의 CC	83
표 4.8 No.2 과급기회전수의 FNDRN에 의한 No.1 과급기회전수의 CC	83
표 4.9 No.2 과급기 배기가스온도의 FNDRN에 의한 No.1 과급기배기가스온도의 CC	83
표 6.1 SRA에 의한 계측항목 사이의 기준 R^2 과 기울기	108
표 6.2 FNDRN에 대한 계측항목 예측 변동률	113

The Fault Diagnosis and Prediction of Marine Diesel Engines Using a Statistical Analysis Method

Young-II, Kim

*Department of Control and Instrumentation Engineering,
Graduate School, Korea Maritime University*

Abstract

Recently acceleration of ship automation makes ship's crew decreased and ship's schedule fast. That results in making harbour time short and lack of ship's maintenance time. Therefore prediction maintenance using fault diagnosis system is more important to prevent accidents by shortage of maintenance. While monitoring points for ship machineries were about 600 in 1980's ship, but now over 10,000 points. So almost all systems of ship can be monitored by central control and monitoring system. With this background and circumstance, various kinds of study for fault diagnosis of machineries are carried out.

Almost ship monitoring systems are event driven alarm system which warn only when the signal is over or under set point. These

kinds of system cannot warn while signal is growing to abnormal state until the signal is over or under the set *point* and cannot *play* a role for *preventive* maintenance system. And fault diagnosis is started by *expert* engineer after warning from the monitoring system. There is few study which automatically diagnose the fault from ship's monitored signal. The bigger control and monitoring system is, the more important fault diagnosis and *predictive* maintenance is to reduce damage brought forth by system fault.

This *paper* proposes fault diagnosis and *prediction* system which is able to diagnose and forecast the fault from *present* operating condition by analyzing monitored signals with *present* ship monitoring system without additional sensors. For this all kinds of ship's engine room monitored data are classified with combustion subsystem, heat exchange subsystem and electric motor and *pump* subsystem by analyzing ship's *operation* data. To extract dynamic characteristics of these subsystems, log book data of container ship of H shipping company are used. Even though almost all machineries installed on the ship including main *propulsion* diesel engine and various auxiliary machineries have non linear characteristics and *produce* different output data dependent on the *operating* environment, if those machineries are *operating* under normal condition state, correlation coefficient(CC) between monitored data of related machine each other will be high. From analyzing this data having high CC, correlation level of interactive data can be understood. *Knowledge* base of abnormal detection can be built by referring level of CC(Fault Detection CC, FDCC) to detect abnormal data among monitored data from monitoring system and knowledge base of diagnosis built by

referring CC among interactive data for related machine each other to diagnose fault *part*. Fault *place* can be ascertained by investigating specific data of fault *part* with decision making tree like answer tree. And fault *prediction* can be made by regression analysis of monitored data.

To verifying capability of fault detection, diagnosis and *prediction*, Fault Management System(FMS) is developed by C++. Simulation experiment by FMS is carried out with *population* data set made by log book data of 2 months duration from a large full container ship of H shipping company. For fault detecting and diagnosing experiment from *population* data set, three kinds of random number are generated by computer. One is generated on the base of average and covariance of *population* data set, other on the base of *parts* of *population* data and the other on the base of fault detection range(FDR). In the simulation experiment FMS is ascertained to detect abnormal data from monitored data set including generated random number by abnormal detection module with abnormal detection knowledge base and diagnose the fault by abnormal diagnosis module with abnormal diagnosis knowledge base and also forecast *predictive* fault by fault *prediction* module.

If the FMS is developed to include maintenance manual and ship's inventory database inside near future, the system will be able to recommend how to maintain the diagnosed fault and necessary *spare parts*.

Nomenclature

CC	correlation coefficient
C/R MAmp	circulation motor current[A]
CM	correlation module
Cyl MTexh	cylinder mean exhaust gas temperature[°C]
Cyl Texh	cylinder exhaust gas temperature[°C]
Eng Amb T	engine ambient temperature[°C]
Eng FW Tin	engine fresh water inlet temperature[°C]
Eng FW Tout	engine fresh water outlet temperature[°C]
Eng SPD	engine speed[rpm]
FDCC	correlation coefficient for fault detection
FDS D	fault detection standard deviation
FNDRN	fault normal distribution random number set
FO C/R P'P Pin	fuel oil circulation pump inlet pressure[MPa]
FO C/R P'P Pout	fuel oil circulation pump outlet pressure[MPa]
FO SUP P'P Pin	fuel oil supply pump inlet pressure[MPa]
FO SUP P'P Pout	fuel oil supply pump outlet pressure[MPa]
f1 ~ f15	knowledge base input and output variables
FW	fresh water
H	high
JCFW Tin	jacket cooler fresh water inlet temperature[°C]
JCFW Tout	jacket cooler fresh water outlet temperature[°C]
L	low
M	middle
MA	moving average
MADS	moving average data set

MCC	mean of correlation coefficient
MI	measure item
MVSD	moving standard deviation
MW	moving window
NCO	negative correlation
NCOSDR	negative correlation scatter diagram
NDRN	normal distribution random number
No. 1~No. 10	variables for the identical system classification
OPD	operation data
OPR	operation range
PCC	population correlation coefficient
PCO	positive correlation
PCOSDR	positive correlation scatter diagram
PM	population mean
PNDRN	partial normal distribution random number set
PTR	population range
PTSD	population standard deviation
R1~R6	positive correlation ranges
RL1~RL15	rule number variables in knowledge base
R^2	coefficient of determination
S	slope
Scav air Aft Tin	scavenging air after trunk inlet temperature[°C]
Scav air Fwd Tin	scavenging air forward trunk inlet temperature [°C]
Scav air Pin	scavenging air inlet pressure[MPa]
SD	standard deviation
SDRN	standard deviation range

Seachest T	sea water temperature[°C]
SDCC	standard deviation of correlation coefficient
SDR	scatter diagram
SMA	moving average of moving standard deviation
SMVSD	moving standard deviation of MVSD
SRA	simple regression analysis
SRAMD	simple regression analysis module
STD	sea trial data
SUP MAmp	supply motor current[A]
T	temperature[°C]
T/C SPD	turbocharger speed[rpm]
T/C Texh	turbocharger exhaust gas temperature[°C]
TNDRN	population normal distribution random number set
TSD	time serial data
UCO	uncorrelation
UCOSDR	uncorrelation scatter diagram

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

1980년대 이후 선박의 대형화, 신속한 물류 처리 요구와 자동화 시스템의 발전에 따라 선박의 자동화는 급속도로 가속화되고 있다[1~4]. 이러한 추세에 따라 승조원수가 감소하게 되었으며, 또한 선박운항스케줄이 빨라져 정박시간이 짧아짐으로 인해 정비시간 부족현상도 나타나게 되었다. 따라서 사전 사고방지를 위해 고장진단시스템을 통한 예방정비가 점차 중요시되고 있다. 1980년대 이전의 선박에서는 약 600개 정도의 감시항목이 현재는 10,000개 이상의 감시항목으로 증가함에 따라 시스템의 신뢰성 및 안전성 유지에 대한 관심이 고조되고 있으며, 이를 위한 적절한 고장진단 기법에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다[5~19].

기존선박의 감시시스템은 경보점을 설정하여 설정치보다 높거나 낮음에 따라 경보하는 시스템이 대부분이다. 또한 선박의 자동화는 대부분 이상 경보감시방법으로 감시하고 시퀀스제어기법과 피드백제어기법으로 제어하는 시스템으로 구성되어 있다. 이러한 시스템은 고장이 발생하였을 때만 확실한 경보를 해주는 반면에 이상의 징후가 발생되어 고장으로 발전되어 가는 과정을 예측할 수 없다. 따라서 고장에 대한 조기대응이나 예방정비 계획을 수립하는 데는 부적절하며, 감시항목이 상호 연관되어 복합적으로 발생하는 고장에 대해서 적절한 진단을 행하기가 어렵게 된다. 또한 감시 데이터로부터 이상경향을 감지하여 고장진단하고 세부 고장개소를 확정하는 의사결정 분야는 전문가의 판단에 의존하고 있으며, 전문가를 대신하여 감시데이터를 분석함으로써 자동적으로 진단하는 고장진단기법은 거의 도입되고 있지 않다. 일반적으로 고장이 발생한 시점에서 보수 점검을 행하는 것이 대부분이기 때문에 시스템의 규모가 방대해지고 복잡해짐으로 인해 조기대응 및 예방정비를 하지 않으면 고장발생으로 인한 손실을 커

지므로 시스템의 안정성과 신뢰성을 높이는 예방정비의 필요성이 확대되고 있다.

숙련된 운전자는 기관의 정확한 시스템 모델을 알지 못하여도 자신의 지식과 경험에 의해 감시데이터를 검토하고 분석하여 운전 중인 시스템의 개방점검을 하지 않고도 비교적 정확하게 고장을 진단해낼 수 있다. 하지만 이는 감시데이터가 운전범위를 넘어서 이상상태가 감지되는 시점에 진단을 수행하는 경우로 감시데이터가 운전범위 내에 있으면서 이상상태로 진행되고 있는 경우에는 숙련된 운전자라 할지라도 조기에 발견하는 것이 어렵다. 뿐만 아니라 이러한 숙련된 운전자를 길러내는 데는 많은 비용과 시간이 요구된다. 따라서 숙련된 운전자의 지식과 경험을 체계화하여 고장에 대한 감시데이터 상호간의 상관관계를 정량적으로 표현함으로써 감시데이터가 운전범위를 벗어나지 않는 경우에도 고장을 조기에 발견하고 안정적인 운전을 보장할 수 있는 연구가 필요하다.

1.2 종래의 연구

일반적으로 고장진단은 시스템에서의 오동작 여부를 판단하기 위한 고장감지(Fault detection)단계, 발생한 고장의 종류를 알아내기 위한 고장분류(Fault isolation)단계 및 고장의 정도를 결정하는 고장식별(Fault identification)의 단계로 이루어진다. 기존의 고장감지 및 분류방법은 크게 모델을 기반으로 한 방법과 모델에 기반 하지 않는 방법으로 분류할 수 있다. 전자의 방법은 시스템의 수학적 모델에 의해 제공되는 해석적인 기법을 기초로 하는 것으로서 상태추정 접근법[5]과 파라미터추정 접근법[6,7]으로 나눌 수 있으며, 이 방법에서는 시스템의 정확한 정량적 모델을 필요로 하므로 비선형성이 강하거나 운전환경에 따라 운전상태가 광범위하게 변하는 경우에는 적용이 어렵다는 문제점이 있다.

후자의 방법은 대상 시스템의 측정치, 경험 또는 물리적 검토를 기초로

하며, 시스템의 출력 값이 제한된 범위를 벗어났는지의 유무를 판단하여 고장을 감지해내는 한계치검사 기법, 전문가시스템 기법 및 신경회로망을 이용한 방법[8~11]등이 있으며, 최근에는 학습기법과 입출력데이터로부터 비선형함수 표현이 가능한 신경회로망을 고장진단에 이용한 연구결과가 많이 발표되고 있다. Parlos 등은 이전의 입출력 관측치를 활용하여 시스템 출력상태를 예측하는 다단계예측기법을 사용하였다. 이들은 반복적인 다층퍼셉트론으로 최적화하는 기법을 사용한 동적반복 신경회로망을 구성하였고[12], Sharkey등은 선박 4사이클 디젤기관의 실린더 내 연소에 대한 고장진단을 신경회로망으로 구현하는 방법을 제안하였다[13]. Chandroth 등은 디젤기관의 실린더 내의 압력과 신경회로망에 기초하여 고장진단 하는 방법을 이용하여 개발하였으며[14], Nandi 등은 전기기계에 대하여 상태감시와 고장진단을 행하였다[15]. 또한 천 등은 신경회로망과 퍼지 추론을 이용하여 고장진단 및 예측시스템을 선박디젤기관에 적용한 바가 있으며[16~18], 회전체시스템에 Neuro-fuzzy를 적용하여 이상진단을 수행한 연구도 있다[19].

신경회로망을 이용한 대부분의 연구에서는 발생이 가능한 모든 고장을 미리 예측하여 신경회로망으로 고장모델을 구축한 뒤 고장이 발생하면 구축한 고장모델 중에서 가장 유사한 것을 선택하여 고장을 분류한다. 그러나 사전에 모든 고장에 대한 모델을 구축하는 것은 매우 어렵다는 문제점이 있다[20]. 특히 예상하지 못한 새로운 고장이 발생될 경우에는 가장 유사한 고장모델을 선택함으로써 잘못된 고장진단을 행할 수 있다.

또한 퍼지 전문가시스템으로 시스템을 모델링하고 실제 시스템과의 오차를 이용하여 전력계통에 고장진단을 행하는 방법[21,22]이 연구되었으며, Arefzadeh 등은 디젤기관의 진동을 측정하여 진동해석을 행하고 퍼지 로직을 기반으로 하여 고장진단을 행하는 방법을 제안하였다[23].

이러한 퍼지기법은 파라미터의 변화나 잡음에 대한 민감도가 낮아 견실하며 활용하기 쉽고 범용성이 높다는 장점이 있지만, 시스템이 복잡해짐

에 따라 입력개소의 증가로 퍼지 룰의 개수는 기하급수적으로 증가하므로 제어속도가 떨어지며 비용 면에서 큰 부담으로 작용한다. 또한 전문가의 지식과 경험을 토대로 고장진단하는 기법이 많이 연구되고 있지만, 이는 감시되는 데이터가 운전범위를 벗어나는 시점부터 비정상데이터로 감지되어 진단을 수행하므로 운전범위를 벗어나지 않고 이상상태로 진행되고 있는 경우는 진단을 수행할 수 없는 단점이 있다.

Bonivento 등은 선박 추진계통의 고장 허용제어에 대한 연구에서 프로펠러 피치, 축의 회전수와 디젤기관의 이득 손실을 측정하여 모델링을 행한 후에 모델 된 시스템과 실제시스템과의 차이가 참조값 이상이 되면 고장으로 하는 방법으로 고장진단방법을 제안했다[24]. Sun 등은 시변 소멸계수를 이용한 최소자승추정에 근거한 알고리즘을 이용하는 연구를 수행했으며 이 방법을 이용하여 보일러 증기와 물 계통의 누설감지에 적용하였다[25].

Roemer와 Ghiocel은 통계적 상관관계를 이용하는 센서비교기법을 제안하고 가스터빈기관의 고장진단방법을 개발하였다[26]. 이 등은 비선형시스템에서 발생한 고장을 감지하고 분류하기 위해 신경회로망기반 다중고장 모델과 시계열분석과 회귀분석 등의 통계적기법에 의한 고장진단 방법을 제안하였다[27]. 그리고 비선형성이 포함된 데이터들로 구성된 공정의 모델링이나 제어를 위한 이상감지모델로서 비선형 PLS(Partial Least Square)방법[28~30]을 이용하여 화학공정 이상감지모델에 적용한바 있다[31]. 또한 데이터간의 관계를 도출해내는 방법으로서 다변량 선형회귀분석 기법(Linear regression analysis technique)에 의한 공정의 감시 및 제어에 관한 연구가 있다[32~37].

최근 통계적 분석기법을 이용한 연구가 활발히 이루어지고 있지만 시계열분석과 회귀분석을 통한 예측시스템에 관한 연구가 대부분이며 고장진단에 통계적 분석기법을 도입하여 시스템에 적용하는 연구는 거의 이루어지고 있지 못한 실정이다.

1.3 연구 목적 및 내용

오늘날 선박은 다양한 항목들이 감시시스템에 의해 감시되므로 감시된 데이터와 시운전데이터를 비교하고 또한 감시데이터의 상호관계와 통계적 분석기법으로 시스템의 특성을 파악하면 별도의 센서를 추가하지 않고도 고장진단이 가능한 시스템을 설계할 수 있다. 본 논문에서는 기존의 단순한계치 검사에 의한 고장처리의 한계성과 신경회로망기법 및 퍼지기법에 의한 문제점을 극복하기위해서 숙련된 전문가의 지식을 활용하여 감시데이터의 상호연관성을 검토한다. 또한 검토된 감시데이터 항목사이의 관계를 통계적 분석기법을 이용하여 정량화하고 이상상태를 감지하는 이상감지 지식베이스와 이상감지된 데이터와 서로 높은 연관관계를 가지고 있는 다른 데이터를 조사하여 종합적으로 진단할 수 있는 이상진단지식베이스를 구축한다. 이를 이용하여 이상데이터를 자동으로 감지하고 진단하며, 관련항목들을 세부적으로 조사함으로써 고장진단을 수행하는 고장진단모듈과 고장을 예측할 수 있는 고장예측모듈에 관하여 연구하고자 한다.

이러한 고장진단모듈을 구현하기 위하여 우선 운항하고 있는 선박의 시운전데이터 및 실선운항데이터의 동특성을 정성적으로 비교분석하여 계측항목사이의 상관관계를 알아본다. 이를 통해 선박기관실의 각 계측항목들을 계통별로 분류하며 분류된 항목들의 상호 통계적 특성을 파악하고 상관관계법에 의한 상호관계를 정량적으로 표현하여 이상감지 지식베이스와 이상진단지식베이스를 설계한다.

구축된 이상감지 지식베이스와 이상진단지식베이스를 통하여 고장진단을 수행하고 최종적으로 세부 고장개소를 자동적으로 확정하는 의사결정모듈을 설계한다. 또한 고장진단모듈과 병렬로 분류된 계통의 데이터를 회귀 분석법으로 분석하여 중·장기적으로 고장을 예측하는 고장예측모듈에 대해서 논한다.

이상감지 지식베이스와 이상진단지식베이스 및 의사결정모듈에 의해 수

행된 고장진단 결과와 회귀분석으로부터 고장예측결과를 활용하면 선박의 사전 예방정비에 필요한 계획을 수립할 수 있다. 그림 1.1은 본 논문에서 제안하는 고장진단 및 예측시스템의 구조를 간략히 나타낸 것이다.

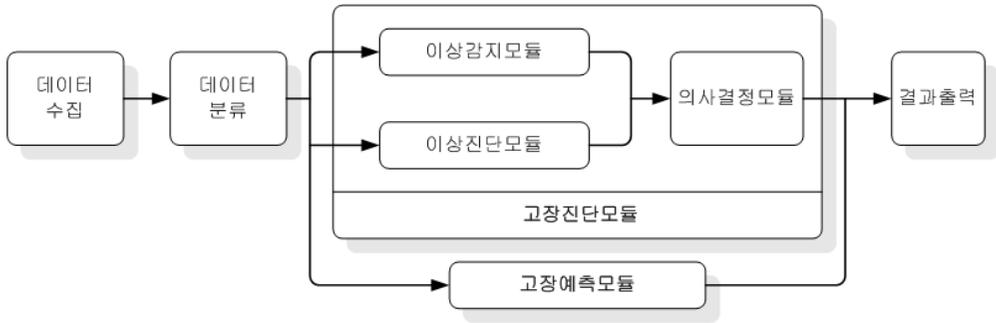


그림 1.1 제안된 고장진단 및 예측시스템의 구조

Fig. 1.1 Structure of the *proposed* fault diagnosis and *prediction* system

본 논문은 전 7장으로 구성되어 있다.

제 2장은 고장진단에 필요한 선박추진기관의 기관실을 구성하는 각종 계통의 종류와 시운전 데이터 및 실선운항 감시데이터를 조사 분석하여 계통별로 분류한다. 분류된 데이터의 동특성을 파악하고 계측항목사이의 상호 연관성을 정성적으로 분석하여 이상감지모듈과 이상진단모듈을 설계하기 위한 기초 자료로 활용한다.

제 3장에서는 이상감지모듈과 이상진단모듈을 설계하기 위해 전문가에 의한 이상감지 및 이상진단 방법과 통계적 분석기법에 의한 이상감지 및 이상진단 방법에 대해서 논한다. 이를 위해 2장에서 분류된 계통별 계측항목사이의 상관관계특성을 바탕으로 상관분석법에 의한 각 항목사이의 상관관계를 검토하여 이상감지 지식베이스를 설계한다. 이를 통해 감시데

이터의 이상상태를 감지해 내고 고장의 원인이 되는 항목을 동일계열간 상관관계와 상호연관성이 높은 계측항목의 상관관계를 검토함으로써 이상상태를 확정하는 이상진단지식베이스의 설계과정에 대해서 논한다.

제 4장은 3장에서 통계적 분석기법에 의해 설계된 이상감지모듈과 이상진단모듈로부터 감시데이터의 고장진단이 원활히 수행되는지의 여부를 확인하기 위해 실선운항데이터와 동일한 통계적 성질을 가진 정규분포난수를 다양한 조건에서 발생시켜 실험을 행하고 그 결과에 대해서 고찰한다. 또한 모델선박으로부터 감시되는 데이터의 상태를 파악하여 실시간 이상감지 및 이상진단과 고장예측결과를 출력할 수 있도록 개발한 고장관리시스템(FMS : Fault Management System)에 관하여 설명한다.

제 5장에서는 3장에서 설계된 이상감지모듈에 의해 이상감지되고 이상진단모듈로부터 진단이 확정되면 관련 데이터를 세부적으로 조사하여 고장결과를 도출하는 의사결정모듈에 관하여 논한다.

제 6장에서는 2장에 분류된 선박기관실의 계통별 감시데이터를 이용하여 고장진단모듈과 동시에 회귀분석기법을 통해 계측항목사이의 회귀분석지표를 작성하는 과정과 이를 통해 중·장기적으로 데이터의 이상상태를 예측하는 고장예측모듈에 대해서 논한다.

마지막으로 제 7장은 결론을 맺고 향후 연구 과제를 알아본다.

제 2 장 선박용 디젤기관의 계통분류 및 감시데이터 특성

2.1 선박용 디젤기관의 계통분류

선박용 디젤기관의 구성은 그림 2.1과 같이 선박의 추진에 필요한 계통과 화물 및 주거에 필요한 계통으로 나눌 수 있다. 여기서 운항 중 고장 진단이 필요한 계통은 추진에 필요한 계통이다. 추진에 필요한 계통은 주기관계통, 발전기계통, 보일러계통으로 구분할 수 있다.

주기관계통은 선박의 추진력을 발생하며 운항 중 가장 주의를 필요로 하는 계통으로서 표 2.1과 같이 여러 부 계통(Sub system)으로 구성되어 있다. 특히 주기관계통은 내연기관으로서 실린더 내부의 연소상태는 출력과 직결되며 상호 연관성이 강한 데이터들로 구성되어 있다.

표 2.1 주기관계통의 분류

Table 2.1 Classification of the main engine system

부 계통명	구성기기
운활유 계통	운활유 펌프
	운활유 냉각기
	운활유 필터
냉각청수 계통	청수 펌프
	청수 냉각기
연료유 계통	연료 부스터 펌프
	연료 가열기
	연료 필터
연소 계통	연료분사밸브
	실린더, 피스톤 등
소·배기 계통	소기 냉각기
	과급기

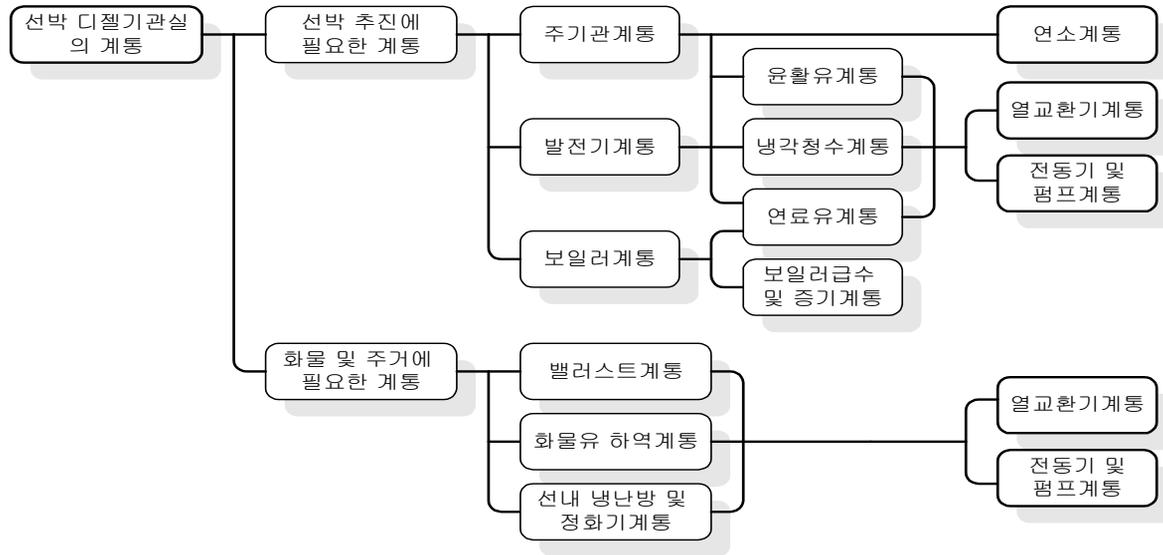


그림 2.1 선박 디젤기관실의 계통분류

Fig. 2.1 Classification of the system in a marine diesel engine room

발전기계통은 선내에서 필요한 전기를 생산하는 계통으로 2대 이상의 발전기를 탑재하여 항상 무정전 상태가 유지되도록 하고 있으며, 주기관과 마찬가지로 디젤기관을 이용하는 것이 보통이다. 운항 중에는 주기관의 배기가스보일러를 이용하여 증기터빈발전기를 가동하는 경우도 있다. 발전기는 주기관과는 달리 윤활유나 냉각수계통을 기관자체구동으로 운전이 되지만 주기관의 각 계통을 축소해 놓은 것으로 볼 수 있어 주기관과 같이 여러 부 계통을 포함하는 계통으로 분류할 수 있다.

보일러계통은 보일러 연료유계통과 보일러 급수 및 증기계통으로 나눌 수 있다. 보일러 연료유계통은 HFO(Heavy fuel oil) 서비스탱크나 침전탱크로 이송된 연료유를 유량계를 통해서 보일러 연료유 승압펌프로 승압시키고, 보일러 연료유가열기에서 가열하여 보일러 버너로 공급하도록 되어 있다. 보일러의 급수계통은 급수필터탱크의 물을 급수펌프로 가압하여 보일러에 공급한다. 보일러의 물이 순환수펌프에 의해 보일러와 배기가스보일러 간을 순환하면서 발생된 증기는 터빈 발전기나 터빈구동펌프를 구동하는데 사용되기도 하고 증기를 감압하여 각종 가열기를 가열하는데 사용하며 기타 취사용이나 난방용으로 사용한다.

주기관계통, 발전기계통 및 보일러계통의 부 계통으로서의 윤활유계통과 연료유 계통은 이송계통과 서비스계통으로 나뉘어 진다. 윤활유 및 연료유 계통의 이송계통 및 서비스 계통은 유체를 가열 혹은 냉각하기 위한 가열기 및 냉각기로 구성된 열교환기계통과 유체의 이송을 위한 펌프계통으로 구성되어 있다.

이와 같이 디젤기관실은 복잡한 부계통으로 구성되어 있지만, 고장진단 모듈을 설계하기 위하여 디젤기관실계통을 기계적 성질에 따라 다시 분류하면 연소계통, 열교환기계통과 전동기 및 펌프계통으로 분류되고 이러한 계통을 고장진단하는 모듈을 설계함으로써 전체 디젤기관실의 고장진단을 행할 수 있다.

2.2 선박용 디젤기관 계통별 감시데이터 특성분석

선박용 디젤기관의 계통별 감시데이터는 이상감지 및 이상진단을 위해 사용되는 주요데이터를 분류하면 표 2.2~2.4와 같다. 표에서 디젤기관실의 계통별 감시데이터들은 대부분 온도 데이터와 압력데이터로 구성되어 있으며, 기타의 열교환기계통의 3방향밸브개도[%] 데이터와 전동기 및 펌프계통에서의 전기데이터로 구성되어 있다. 액위 및 유량시스템의 고장진단에 관하여서는 본 논문에서 제외한다.

표 2.2 연소계통 데이터

Table 2.2 Data of the combustion system

압력 데이터 [MPa]	소기공기압력
	공기냉각기 입·출구압력
	과급기 공기 입·출구압력
온도 데이터 [°C]	소기공기온도
	공기냉각기 입·출구온도
	각 실린더 배기가스 출구온도
	각 과급기 배기가스 입·출구온도
속도 데이터 [rpm]	과급기 속도

표 2.3 열교환기계통 데이터

Table 2.3 Data of the heat exchange system

압력 데이터 [MPa]	소기냉각기 공기 입·출구압력
	냉각수 입·출구압력
온도 데이터 [°C]	윤활유 입·출구온도
	냉각수 입·출구온도
	냉각유체 입·출구온도
	연료유 가열기 입·출구온도
	소기냉각기 냉각수 입·출구온도
밸브개도데이터 [%]	3방향 밸브개도

표 2.4 전동기 및 펌프계통 데이터

Table 2.4 Data of the motor and pump system

압력 데이터 [MPa]	이송유체 입 · 출구압력
	필터 입 · 출구압력
온도 데이터 [°C]	이송유체 입 · 출구온도
전기 데이터	전류 [A]
	전압 [V]

2.2.1 시운전 데이터의 특성

모델이 된 선박은 1992년 9월에 건조된 H해운사의 4,024 TEU FULL CONTAINER CARRIER 선박으로서 그림 2.2는 모델선박의 시운전 데이터(STD)의 운전특성을 보여주는 그래프이다. 그래프에 나타난 항목들은 연소계통의 실린더 배기가스온도, 과급기 입 · 출구 배기가스온도 및 과급기회전수와 소기공기압력으로서 주로 부하의 변화에 영향을 받는다. 그래프에서 부하가 50~100[%]로 증가할 때 각 항목들의 변동추이를 보여주고 있다. 여기서 사용된 STD는 제한된 환경과 일정기간동안 시운전실험을 통해 얻어진 데이터로 다양한 환경변화에 따른 특성을 모두 나타내지는 못한다. 또한 그림 2.2는 부하 50, 75, 90, 100[%]에서 일정시간동안 운전된 운전결과를 평균하여 얻어진 데이터를 연속적으로 그린 것으로 부하 변화에 대해 항목들의 민감한 반응특성을 표현해 주지는 못한다. 하지만 본 논문에서는 STD분석을 통하여 부하변화에 따른 계측항목들의 동특성을 근사적으로 파악하고 계측항목사이의 상관관계를 정성적으로 확인하기 위해 사용된다. 그림에서 과급기회전수와 소기공기압력의 경우에는 부하 변화에 따라 선형에 가까운 변화를 보이고 있으며 실린더 배기가스온도와 과급기 입 · 출구 배기가스온도는 비선형적 특성을 보이고 있다.

표 2.5는 디젤선박기관실의 시운전데이터 운전범위를 부하변동기점(50, 75, 90, 100[%])에 대하여 항목들의 평균값과 운전범위(OPR), 그리고 부

하 75[%]를 기준으로 한 변동량(Max-Min)을 나타낸 것이다. 이 데이터 지표는 시운전당시에 부하변화에 따른 각 계측항목의 동특성과 실제 운항 데이터의 동특성을 비교하기 위해 사용된다. 이를 위해 표 2.5를 이용하여 부하 50[%]~75[%]사이의 STD를 선형화수식으로 표현하고, 구해진 수식에 실선운항데이터의 부하값을 대입하여 각 항목들의 대응값을 구한다. 이를 통해 본 논문에서 활용할 운항데이터집합이 고장상태에서 획득한 데이터가 아니라 정상운항상태에서 획득된 데이터인지를 확인한다.

표 2.5 시운전데이터의 부하에 따른 각 계측항목간의 운전범위
 Table 2.5 OPR of the measure item for load change in the STD
 (MI : measure item)

MI	Load[%]				OPR	Max-Min[%]	
	50	75	90	100	50~100	50~75	75~100
Load Indicator[L/I]	5.7	7	7.7	8.2	5.7~8.2	1.3	1.2
T/C SPD(x10 ³ [rpm])	9.1	11.3	12.5	13.3	9.1~13.3	2.2	2
Scav air Pin[kg/cm ²]	1	1.65	2.2	2.5	1~2.5	0.65	0.85
T/C outlet Texh[°C]	296	280	280	292	280~296	-10	12
Cyl Texh[°C]	329	345	364	388	329~388	16	43
T/C inlet Texh[°C]	380	400	425	455	380~455	20	55
Scav air Tin[°C]	36	39	44	47	36~47	3	8

2.2.2 실선운항데이터의 특성

본 논문에서 사용한 실선운항데이터는 시운전 대상선박과 동일한 컨테이너 선박의 2003년 5월에서 6월까지 2개월간 실제 운항 중 4시간 간격으로 기록된 로그북(Log book)으로부터 수집된 데이터를 사용한다. 일반적으로 선박대기상태(Standby state)는 선박의 입·출항시 주로 부하가 50[%]이하에서 급변하게 운전되는 모드로서 고장진단용 데이터로 활용하기에는 부적절하다. 따라서 본 논문에서는 선박이 항해항행 중 50[%]이상

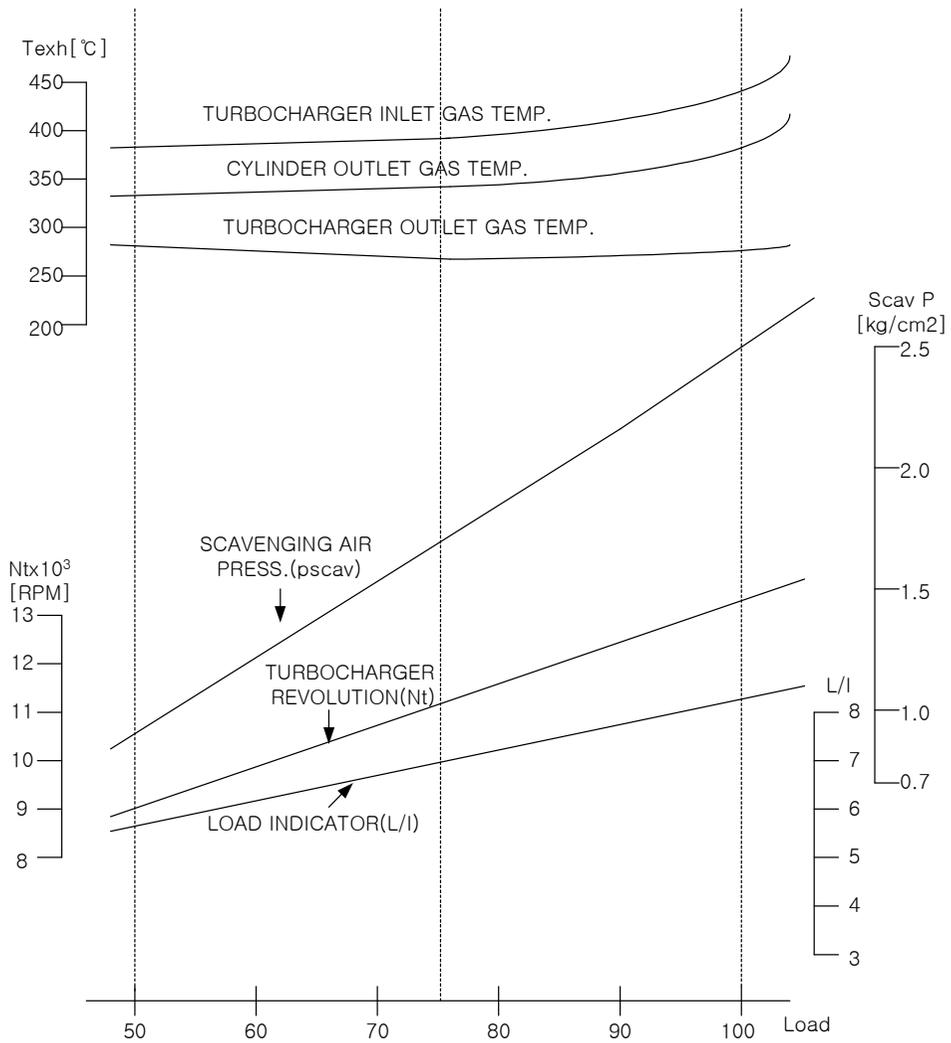


그림 2.2 디젤기관 시운전 성능곡선

Fig. 2.2 Sea trial performance curve of a diesel engine

의 부하조건에서 시간에 따라 순차적으로 수집된 데이터집합을 사용한다. 수집된 데이터집합은 실시간으로 입력되는 감시데이터의 이상상태를 감지하는 이상감지모듈과 이상데이터가 감지되면 이상감지데이터와 상관관계가 높은 계측항목데이터와 상관계수를 계산하여 이상진단을 판단하는 이상진단모듈을 설계하기 위하여 활용되며 실선운항데이터(OPD)로 정의하여 사용한다. OPD에는 선박대기상태의 데이터집합이 포함되어있지 않고, 정상운항 중 50[%]이상의 부하조건이라는 가정으로 인해 시간축에 대하여 연속적인 데이터로 취급할 수는 없다. 하지만 OPD는 위 조건을 만족하는 운항 중 일정시간에 계측된 계측항목의 데이터를 순차적으로 구성한 데이터 집합으로서 각 계측항목에 대하여 대응 값들의 변화정보를 추출하고 이를 통해 계측항목사이의 상관관계를 분석하기 위해 활용된다. 따라서 OPD는 시간의 추이에 대한 계측항목의 변화특성을 분석하는데 사용되지 않고 계측항목사이의 상관관계 특성을 분석하기 위하여 사용되므로 샘플링 간격이나 데이터의 시간적 연속성의 영향을 받지 않는다. 본 논문의 고장진단모듈이 구축되고 난 후에 선박의 감시데이터는 그 시스템에 따라 일정시간마다 실시간으로 수집되므로 실시간 고장진단이 가능해지게 된다. 본 논문에서는 OPD를 시계열데이터(TSD)로 정의하여 사용한다.

(1) 연소계통의 데이터 특성

선박용 디젤기관의 연소계통은 선박의 출력과 직결되며 상호 연관성이 강한 데이터들로 구성되어 있어 계측항목들의 동특성을 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다. 그림 2.3~2.8은 부하의 변동에 대한 각 계측항목의 상호연관성을 확인하기 위한 TSD를 나타낸 것이다. 연소계통의 항목들은 부하변동에 영향을 받는 데이터들로서 선박의 이동특성에 의한 지역적, 계절적, 날씨 등의 외적환경과 기관실내 내적환경의 변화에 따라 같은 부하조건이라도 그 경향은 다르게 나타날 수 있다. 하지만 그림에서 과급기회

전수 및 소기공기압력은 부하변화에 직접적으로 영향을 받는 항목들로서 부하변동에 유사한 거동을 보이고 있다. 디젤기관의 연소계통에 대한 실린더 배기가스온도와 과급기 배기가스온도 등은 부하가 커지면 연료 연소량이 많아지므로 부하에 종속되어 변할 것으로 추정되지만 그림 2.6과 그림 2.7에서와 같이 실린더 평균배기가스온도와 소기공기온도는 부하변동에 따라 전반적인 추세는 유사하지만 부하의 시계열 동특성을 정확히 추종하고 있지 않다. 그림 2.8의 과급기 배기가스온도는 부하변동과 유사한 특성을 가지며 변하지만 부하가 높을 때 낮은 값을 가지며 부하가 낮은 경우 높게 나타나는 부(Negative)의 관계로 거동하고 있음을 알 수 있다.

그림 2.9~2.11은 앞서 그래프분석을 통해 부하와 상대적으로 동특성이 다르게 나타나는 것으로 추정되는 실린더 배기가스온도, 과급기 배기가스온도 및 소기공기온도에 대해서 동일계열 항목사이의 변동특성을 나타낸 것이다. 동일계열이라 함은 예를 들어 실린더 배기가스온도의 경우 No.1 Cyl Texh에서 No.10 Cyl Texh가 있으므로 10개의 실린더 배기가스온도가 있게 되며 이들 10개의 온도데이터를 말한다. 선박용 디젤기관의 연소계통은 모든 항목들이 부하변동에 종속적으로 거동할 것으로 예상되지만 실제로는 부하와의 연관성이 높은 항목과 부하와 연관성이 낮더라도 동일계열사이의 연관성은 높게 나타나는 항목들로 구성되어 있다. 그림 2.9~2.11에서와 같이 부하변화에 대해서 명확한 동특성을 파악하기 어려운 계측항목들은 동일계열 항목사이의 변화특성을 살펴보면 직관적으로도 매우 유사하게 거동하고 있음을 알 수 있다. 따라서 연소계통의 계측항목들은 실선운항데이터를 조사하여 계측항목사이의 상호 연관성을 검토하고 분석하면, 부하와 연관성이 높은 항목과 부하와 연관성은 낮지만 동일계열사이의 연관성이 높은 항목들을 찾아낼 수 있다. 이를 통해 부하와의 상관관계가 높은 항목과 동일계열사이의 상관관계가 높은 항목별로 분류하면, 고장진단을 수행하기 위한 유용한 자료로 활용할 수 있다.

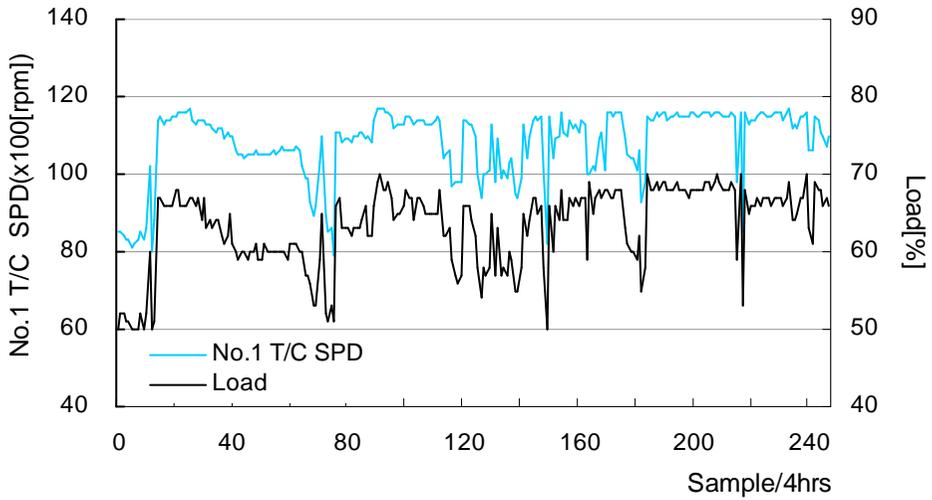


그림 2.3 부하와 No.1 과급기 회전수의 TSD
 Fig. 2.3 TSD of the load and No.1 T/C speed

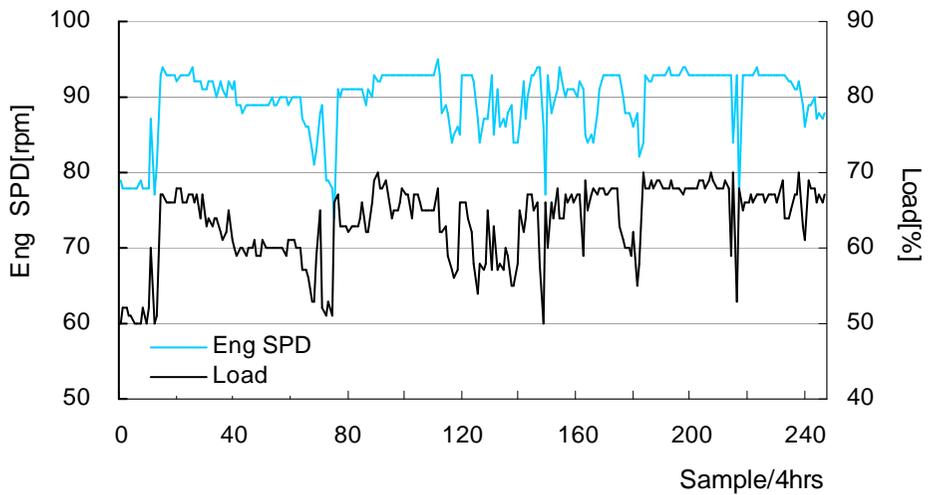


그림 2.4 부하와 기관회전수의 TSD
 Fig. 2.4 TSD of the load and engine speed

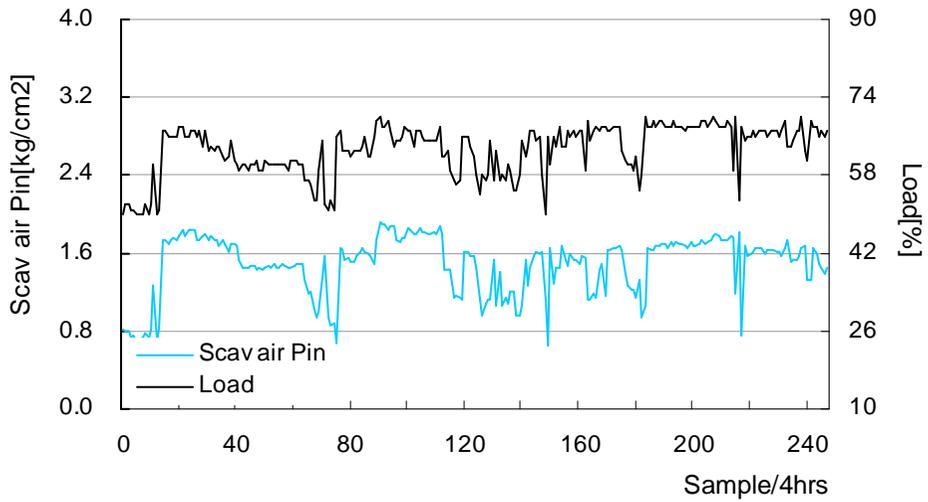


그림 2.5 부하와 소기공기압력의 TSD

Fig. 2.5 TSD of the load and scavenging air pressure

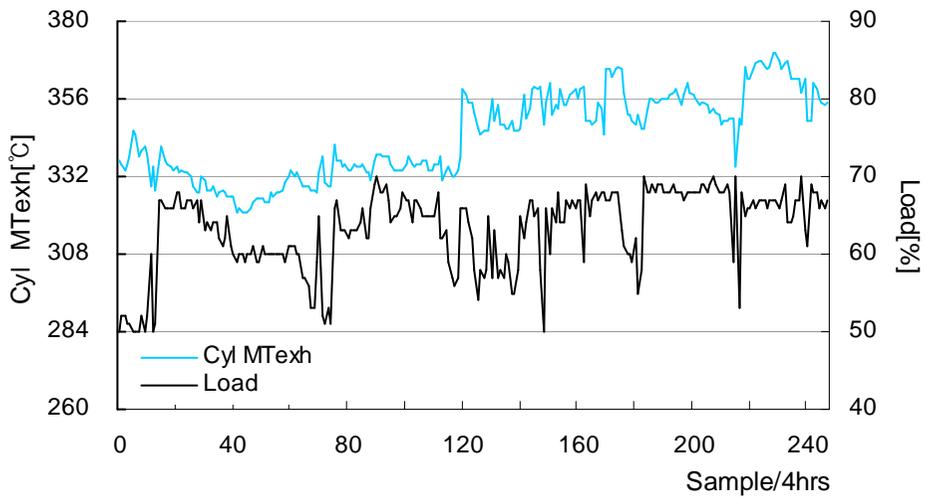


그림 2.6 부하와 실린더 평균배기가스온도의 TSD

Fig. 2.6 TSD of the load and cylinder mean exhaust gas temperature

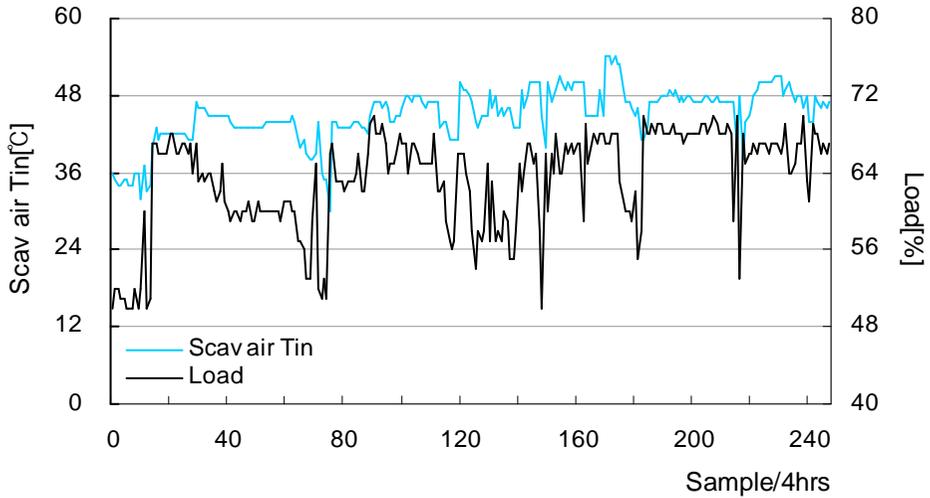


그림 2.7 부하와 소기공기온도의 TSD

Fig. 2.7 TSD of the load and scavenging air temperature

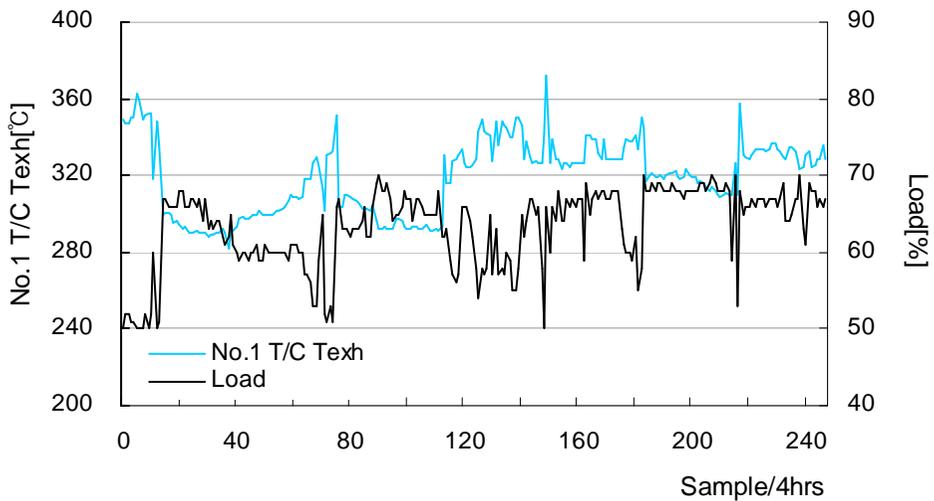


그림 2.8 부하와 No.1 과급기 배기가스온도의 TSD

Fig. 2.8 TSD of the load and No.1 T/C exhaust gas temperature

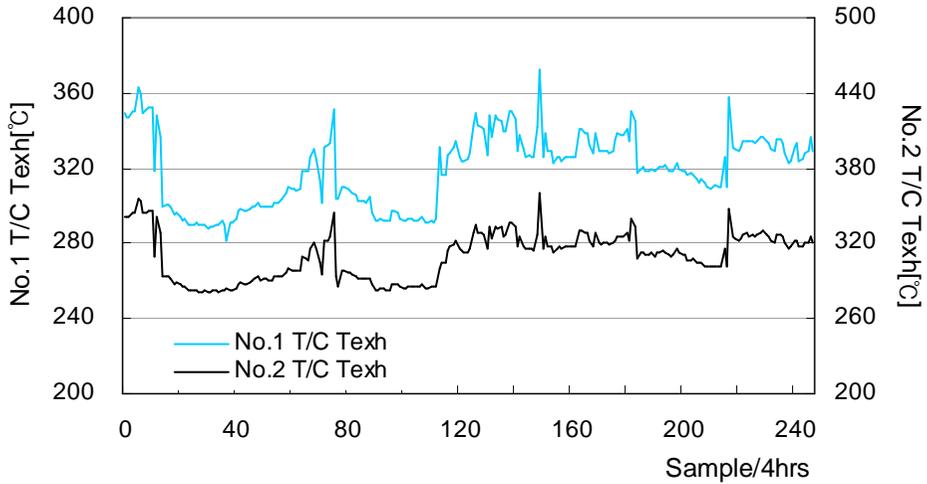


그림 2.9 No.1/No.2 과급기 배기가스온도의 TSD
 Fig. 2.9 TSD of the No.1/No.2 T/C exhaust gas temperature

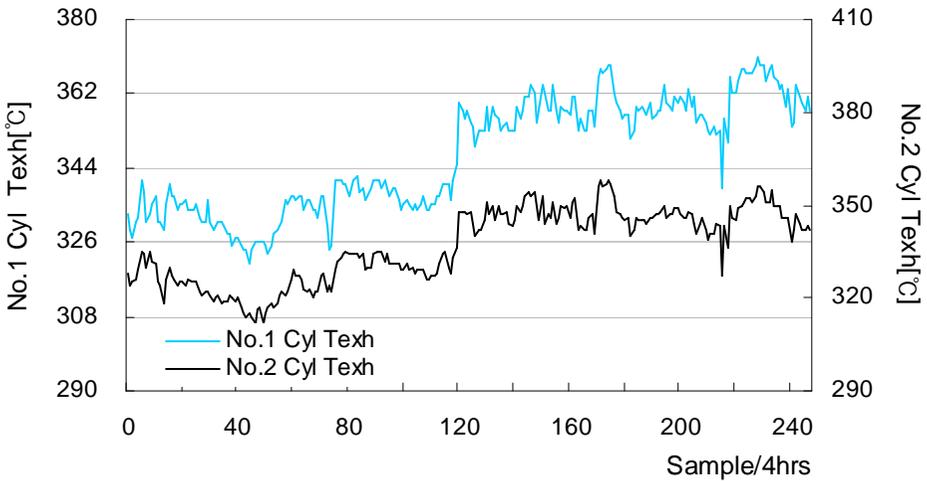


그림 2.10 No.1/No.2 실린더 배기가스온도의 TSD
 Fig. 2.10 TSD of the No.1/No.2 cylinder exhaust gas temperature

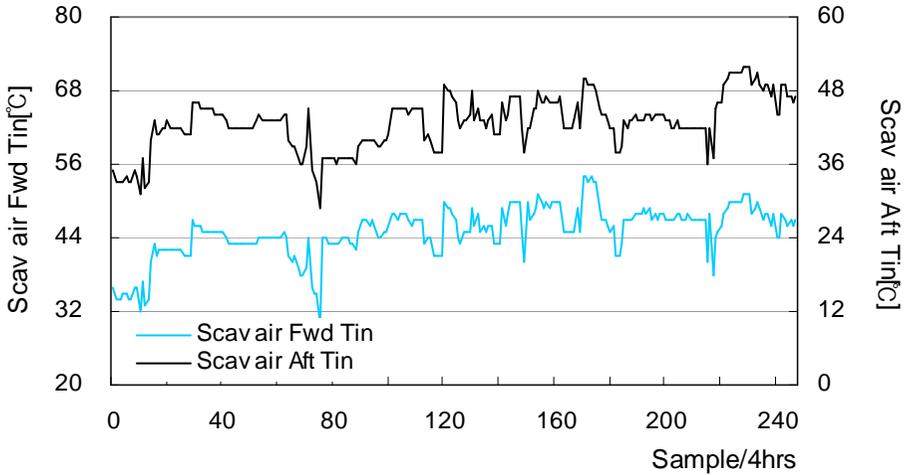


그림 2.11 Fwd/Aft 소기공기온도의 TSD

Fig. 2.11 TSD of the scavenging air Fwd/Aft temperature

그림 2.12~2.16은 부하의 변동에 대한 각 계측항목들의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 ‘Trend’는 부하의 분포에 대한 단순회귀모형으로부터 얻어진 1차 회귀식을 나타낸 것이다. 회귀식이 부하의 변화에 대한 각 항목들의 데이터 분포와 일치하는 정도를 확인하기 위해 0과 1사이의 값을 갖는 결정계수(Coefficient of determination) R^2 값을 사용하여 적합도를 나타내었다. 적합도 R^2 이 1일때 회귀식이 가장 안정적임을 의미하며 자세한 내용은 6장에서 다루기로 한다. 그림 2.12와 2.13의 과급기회전수와 소기공기압력의 경우 R^2 값이 각각 0.929와 0.837로 부하의 변화에 대해 높은 선형성을 유지하고 있다. 하지만 그림 2.14와 2.15의 소기공기온도와 실린더 배기가스온도의 경우 동일한 부하값에 대해 넓은 데이터 분포를 형성하고 있어 R^2 값이 0.6이하로 낮게 나타난다. 이는 부하와의 상관관계를 정확히 규정하기가 어렵다는 것을 나타낸다. 그림 2.16의 과급기 배기가스온도의 경우에도 R^2 값이 0.2로 부하와의 관계를 명확히 규정하기는 어렵

다. 하지만 전반적으로 부하와 부의 관계를 유지하고 있음을 알 수 있다.

표 2.6은 연소계통 계측항목들의 운전범위를 나타낸 것이다. 표에 나타낸 데이터는 동일계열에 대해 기준이 되는 항목(No. 1)을 각각 나타낸 것이다.

표 2.6 연소계통 계측항목들의 운전범위
Table 2.6 OPR of MIs in a combustion system

MI	OPR	Unit
Load	50 ~ 70	%
T/C SPD(x10 ³)	79 ~ 117	rpm
Scav air Pin	0.66 ~ 1.92	kg/cm ²
T/C Texh	282 ~ 372	℃
Cyl Texh	321 ~ 370	℃
Scav air Tin	29 ~ 52	℃

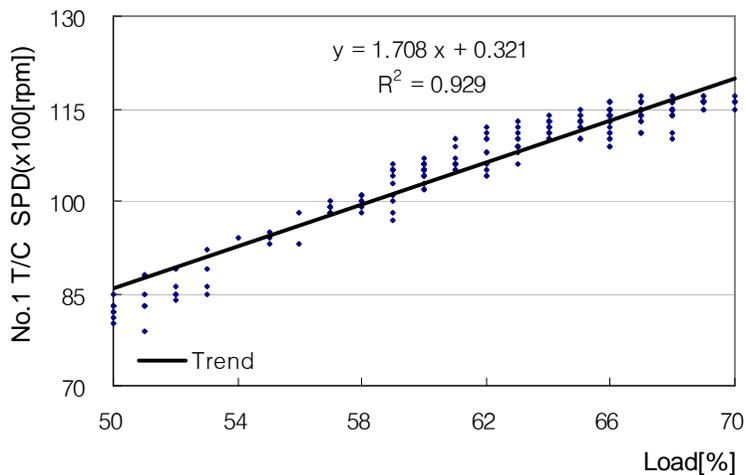


그림 2.12 No.1 과급기회전수의 분포
Fig. 2.12 Distribution of the No.1 T/C speed

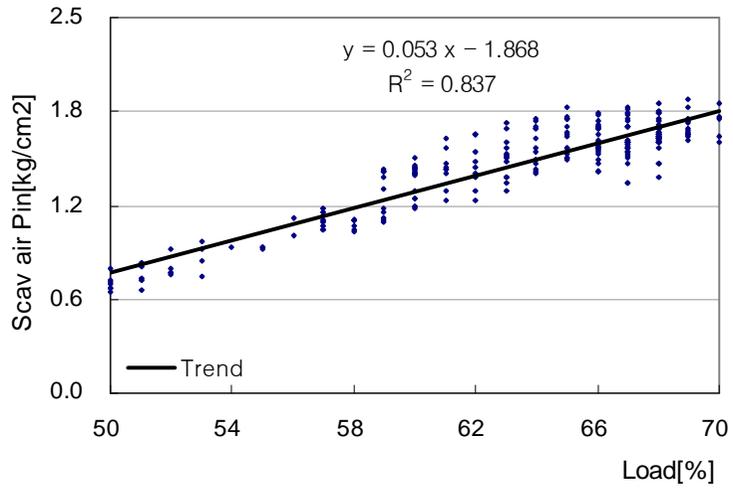


그림 2.13 소기공기압력의 분포

Fig. 2.13 Distribution of the scavenging air pressure

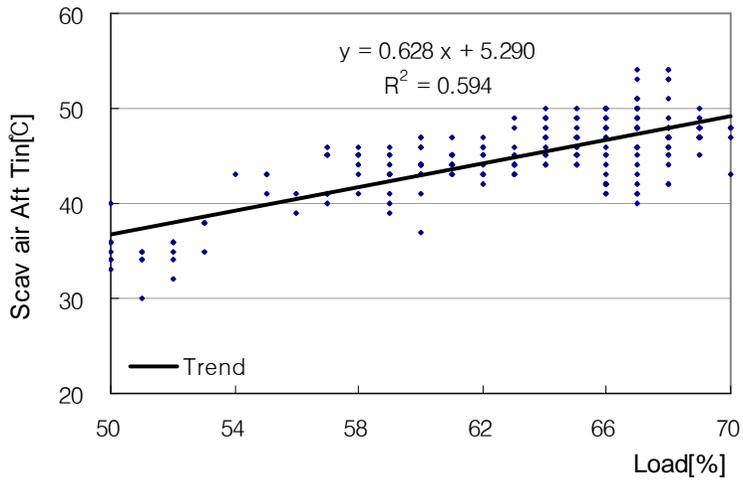


그림 2.14 Aft 소기공기온도의 분포

Fig. 2.14 Distribution of the after scavenging air temperature

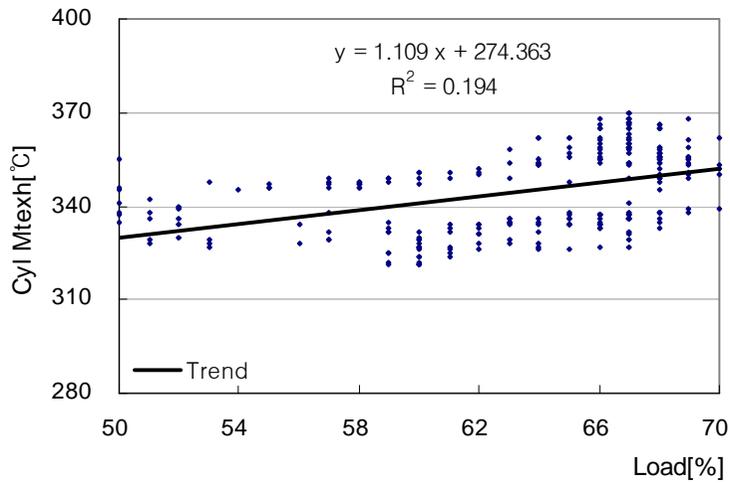


그림 2.15 실린더 평균배기가스온도의 분포
 Fig. 2.15 Distribution of the cylinder mean exhaust gas temperature

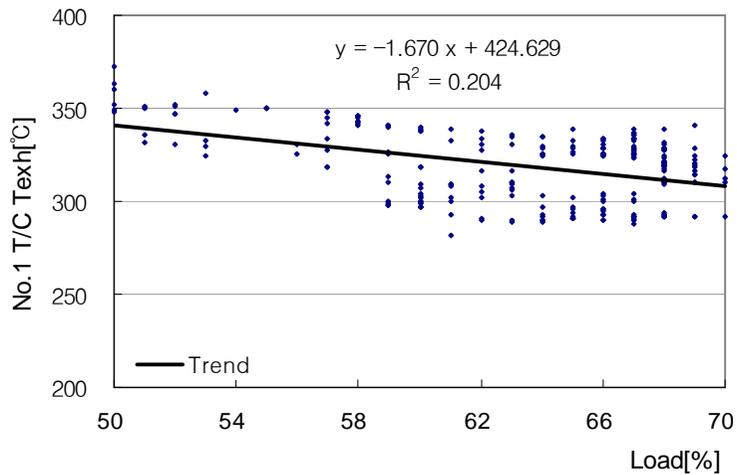


그림 2.16 No.1 과급기 배기가스온도의 분포
 Fig. 2.16 Distribution of the No.1 T/C exhaust gas temperature

(2) 열교환기계통 데이터 특성

열교환기계통은 각각 독립된 제어시스템을 장비하고 있다. 따라서 주기관의 부하가 증가한다 하더라도 항상 일정한 온도를 유지하도록 제어된다. 부하 변동에 따라 증감되는 열량은 온도제어기로 항상 일정한 온도가 되도록 열교환기를 통하는 유체 양과 바이패스(Bypass)되는 유체 양을 조정하는 3방향 밸브의 개도를 조정하여 제어된다. 여기서 열교환기의 데이터 중 냉각기에서 냉각되어지는 유체는 냉각유체라 표현하고 냉각시키는 유체는 주로 해수 또는 청수로 냉각하므로 냉각수로 표현한다. 운항 중에는 부하가 대체적으로 일정한 편이나 냉각수 온도가 변함으로서 열교환기의 냉각열량의 증감이 있을 때에는 온도제어기의 3방향밸브 개도 조정으로 냉각유체의 온도를 일정하게 유지할 수 있다. 즉 열교환기계통의 3방향온도조절밸브의 개도는 유체의 열량변화와 냉각수의 온도변화에 의해서 변하게 되므로 일반적으로 부하에 비례하여 변화하지 않는다.

따라서 열교환기계통은 부하의 변동과 상관없이 계측항목들 간의 시간 추이를 살펴보면 그림 2.17~2.19와 같다. 그림 2.17은 기관에 입력되는 냉각유체의 온도와 기관에서 출력되는 온도와의 관계를 나타낸 것이다. 기관의 냉각유체의 출구온도는 3방향 온도조절밸브에 의해 일정온도로 유지되고 있지만 실제 선박의 온도제어기는 정밀한 제어를 하지 않고 어느 정도의 불감대를 가지고 제어를 하며 또한 주위환경 변화에 대한 신속한 응답 특성을 보이지는 않는다. 하지만 모집단 전체 구간의 TSD를 살펴보면 그림 2.17과 같이 전반적으로 냉각유체의 기관입구온도와 출구온도는 같은 경향을 나타낸다. 그림 2.18은 냉각수의 변화에 따른 기관입구가 부의 상관을 유지하면서 거동한다. 또한 그림 2.19에서와 같이 냉각수의 온도변화에 따라 실린더 배기가스온도가 유사한 거동을 보이고 있다. 이는 냉각수 온도와 실린더 배기가스온도는 모두 기관실온도와 해수온도 등으로 인해 공통적으로 영향을 받고 있어 이의 영향은 공제되어 나타나지 않으므로

이들에 공통적으로 영향을 주는 것은 연소열량뿐이므로 이들의 상관성은 높게 되며 당연히 변화경향은 유사하게 됨을 알 수 있다. 그림 2.20~2.22는 기관실 공기온도와 냉각유체의 기관입구온도와의 관계, 자켓쿨러(Jacket cooler)의 입·출구 온도의 변화와 냉각유체기관입구온도와의 관계를 각각 나타낸 것이다. 그림 2.20에서 냉각수온도의 변화와 기관실온도의 변화가 유사한 거동을 보이고 있지만 열교환기는 자체적으로 온도제어 시스템에 의해 제어되고 있으므로 자켓쿨러의 입·출구온도변화와 냉각유체기관입구온도와의 상관관계를 찾기 어렵다. 표 2.7은 열교환기계통 계측항목들의 운전범위를 나타낸 것이다.

표 2.7 열교환기계통 계측항목들의 운전범위
Table 2.7 OPR of MIs in a heat exchange system

MI	OPR	Unit
Seachest T	3 ~ 32	℃
JCFW Tin	80 ~ 85	℃
JCFW Tout	46 ~ 74	℃
Eng FW Tin	69 ~ 78	℃
Eng Amb T	22 ~ 44	℃

(3) 전동기 및 펌프계통 데이터 특성

열교환계통은 유체를 순환시키기 위해서 전동기 및 펌프계통이 필요하다. 선박 기관실의 각 계통의 순환 시스템은 거의 비슷한 형태로 구성되어 있다. 전동기는 대부분 440[V]용 3상 농형 유도전동기가 쓰여 지고 있다. 유도 전동기는 부하의 증감에 따라 슬립의 변화를 가져오고 또한 전류의 변화도 가져온다. 선박 기관실에 사용되는 펌프는 대부분 유도 전동기로 구동되는 원심 펌프를 사용한다. 전동기와 펌프계통의 데이터는 주로 전동기의 전류, 펌프의 입구압력 및 출구압력 등이 있으며 비교적 관

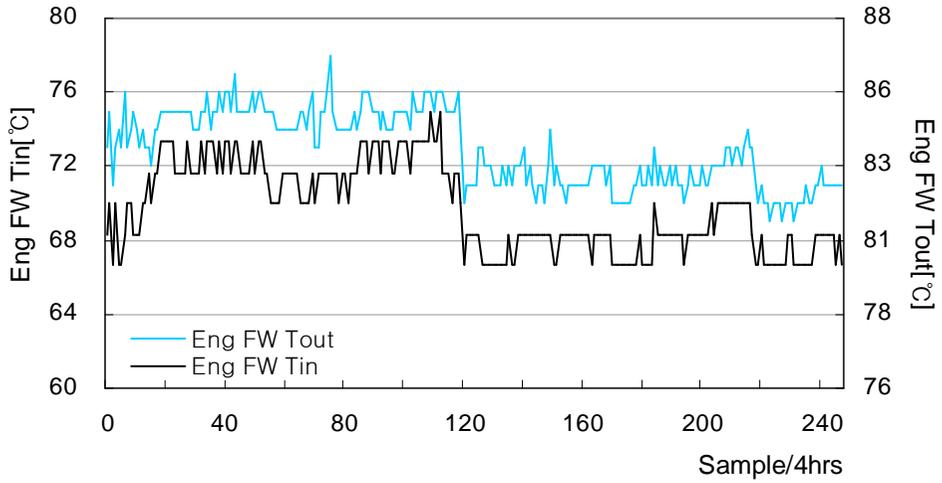


그림 2.17 기관 냉각유체 입·출구 온도의 TSD
 Fig. 2.17 TSD of the FW engine inlet/outlet temperature

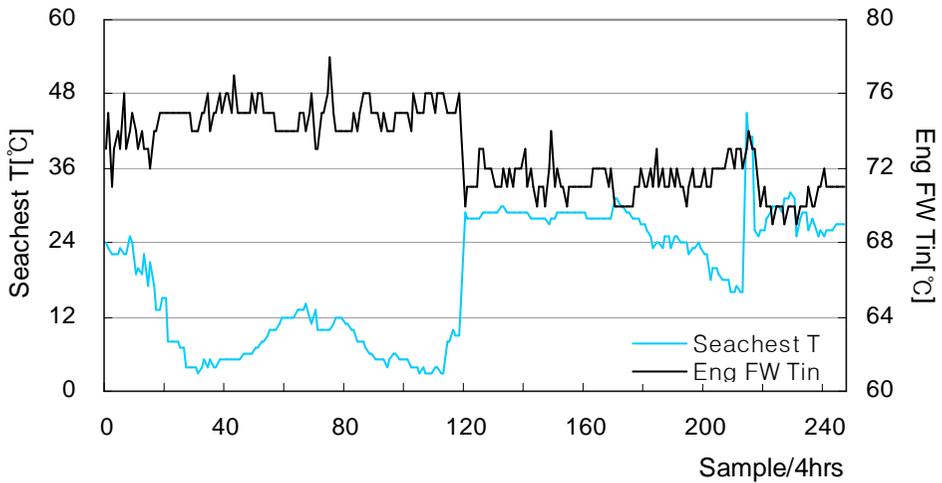


그림 2.18 냉각수온도와 기관냉각유체입구온도의 TSD
 Fig. 2.18 TSD of the FW engine and seachest temperature

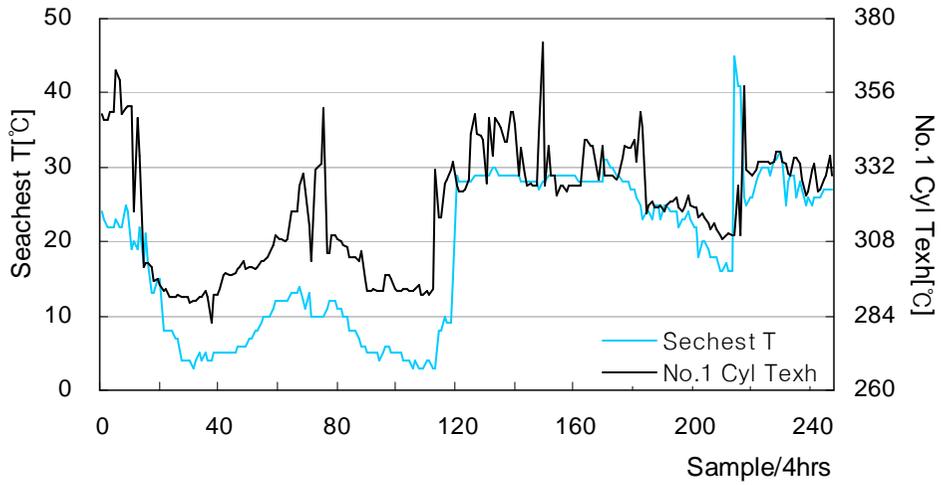


그림 2.19 냉각수온도와 No.1 실린더 배기가스온도의 TSD
 Fig. 2.19 TSD of the seachest and No.1 cylinder exhaust gas temperature

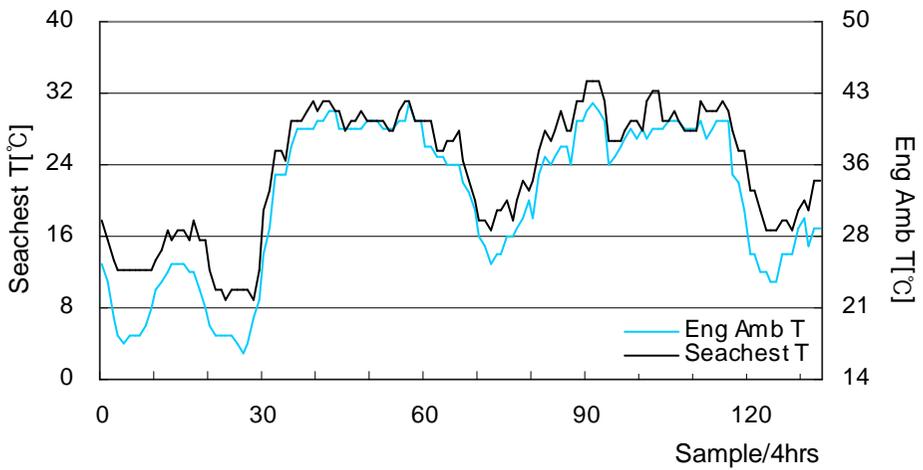


그림 2.20 기관실 온도와 냉각수온도의 TSD
 Fig. 2.20 TSD of the seachest and engine ambient temperature

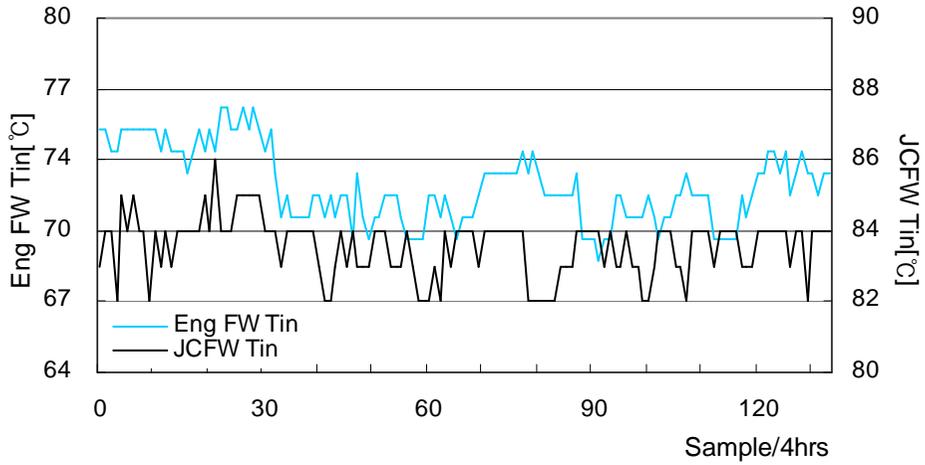


그림 2.21 냉각유체 냉각기입구온도와 냉각유체 기관입구온도 TSD
 Fig. 2.21 TSD of the jacket cooler inlet and engine inlet FW temperature

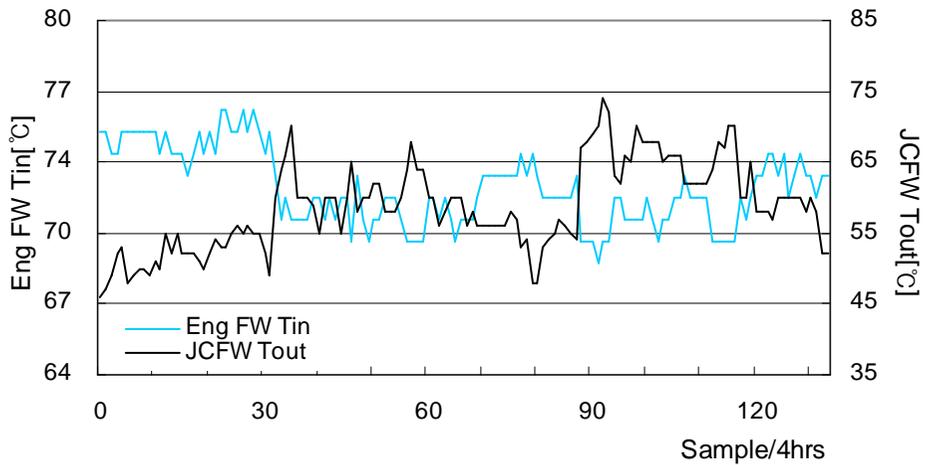


그림 2.22 냉각유체 냉각기출구온도와 냉각유체 기관입구온도 TSD
 Fig. 2.22 TSD of the jacket cooler outlet and engine inlet FW temperature

런되는 데이터 수가 적으므로 다른 계통에 비해 데이터 처리가 간단하다. 펌프의 부하가 변동되면 전동기의 구동토크에 변화가 생겨 전동기의 전류가 변하게 된다.

본 논문에서는 주기관 연료펌프로서 연료순환펌프(FO C/R P'P)와 연료공급펌프(FO SUP P'P)를 모델로 전동기 및 펌프계통의 특성을 확인한다. 그림 2.23~2.26은 연료순환펌프와 연료공급펌프의 입·출구 압력과 전동기 전류에 대한 TSD를 그래프로 나타낸 것이다. 선박이 정상적으로 운항할 때에는 전동기 및 펌프계통의 전동기전류와 펌프의 입·출구 압력은 크게 변동이 없다. 하지만 그림으로부터 미세한 펌프입구압력의 변화에 출구압력 또한 같은 경향으로 변하고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 전류변화에 대한 펌프압력과의 연관성은 낮다. 표 2.8은 모델이 된 연료펌프의 전동기 및 펌프계통 계측항목 운전범위를 나타낸 것이다

표 2.8 전동기 및 펌프계통 계측항목 운전범위

Table 2.8 OPR of MIs in a motor and pump system

MI	OPR	Unit
C/R MAmp	13.2 ~ 13.6	A
FO C/R P'P Pin	4.0 ~ 4.8	kg/cm ²
FO C/R P'P Pout	11.7 ~ 12.8	kg/cm ²
SUP MAmp	3.9~4.1	A
FO SUP P'P Pin	0.77~0.85	kg/cm ²
FO SUP P'P Pout	3.6~4.6	kg/cm ²

2.3 시운전데이터와 실선운항데이터의 비교분석

OPD는 대상선박이 건조된 이후 10년 이상 운항한 선박으로부터 최근에 얻어진 데이터로서 정상운항 상태에서 획득된 데이터인지의 유무를 확인하기 위해 시운전데이터와 비교 분석할 필요가 있다.

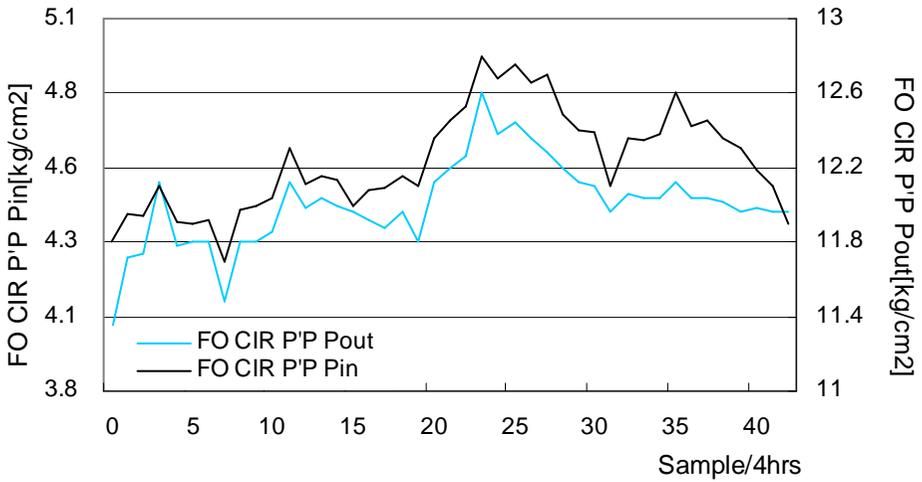


그림 2.23 연료순환펌프 입·출구 압력의 TSD
 그림 2.23 TSD of the FO circulation pump inlet/outlet pressure

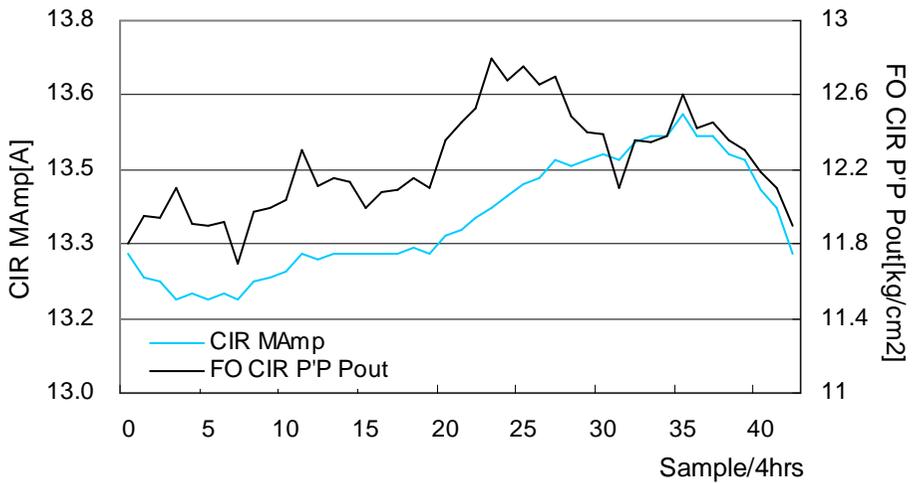


그림 2.24 전동기 전류와 연료순환펌프 출구 압력의 TSD
 그림 2.24 TSD of the F.O circulation pump outlet pressure and motor current

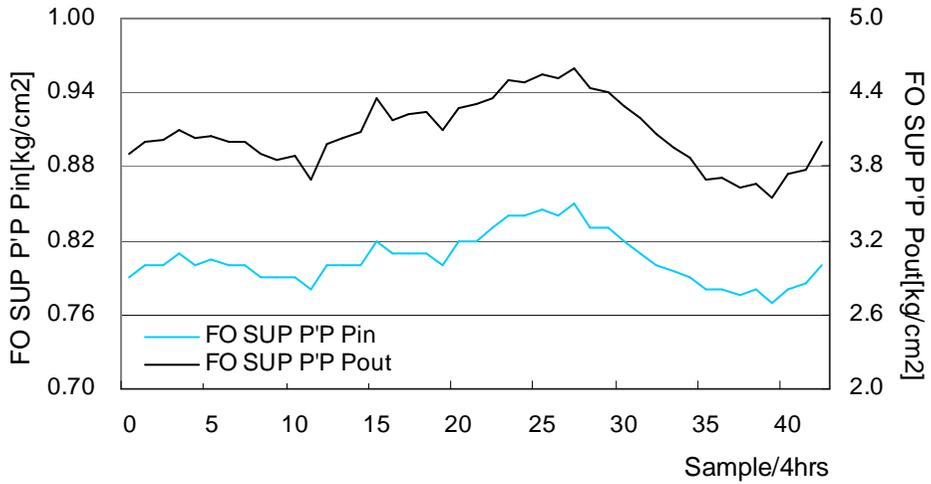


그림 2.25 연료공급펌프 입·출구 압력의 TSD
 그림 2.25 TSD of the FO supply pump inlet/outlet pressure

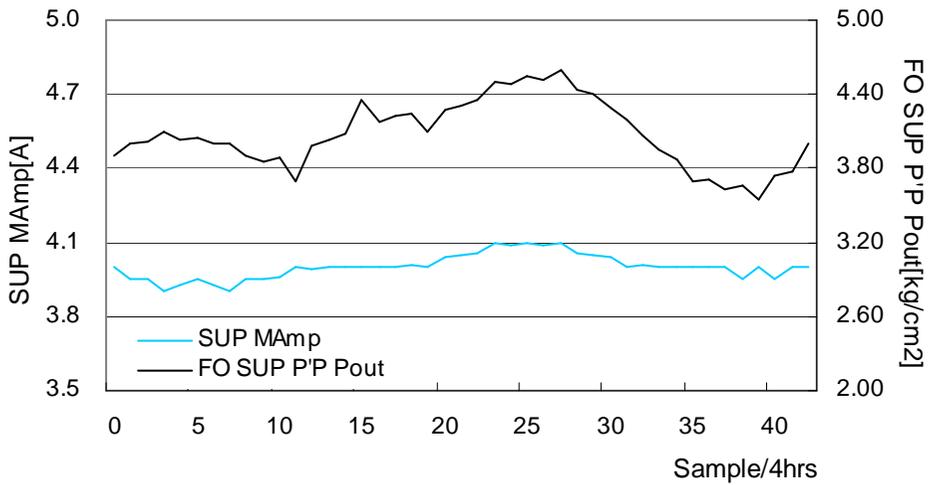


그림 2.26 전동기 전류와 연료공급펌프 출구 압력의 TSD
 그림 2.26 TSD of the FO supply pump outlet pressure and motor current

2.2.1절에서 언급하였듯이 표 2.6으로부터 부하 50~75[%]구간에서 선형식을 구하고, 구해진 식에 OPD 중 부하값을 대입하여 데이터를 얻는다. 선형식을 통해 얻어진 데이터와 OPD의 동일항목과 같이 나타내어 보면 그림 2.27~2.30과 같다. 각 계측항목들의 데이터는 계측기기의 상태변화와 환경적 영향 등에 따라 평균변화량이나 변동범위의 크기에는 차이가 있을 수 있다. 그러나 이를 무시하고 동특성에 대해서만 살펴보면 그림 2.27과 2.28에서 과급기회전수와 소기공기압력 OPD와 STD의 TSD는 유사한 거동을 보이고 있다. 그림 2.29와 2.30에서 실린더 평균배기가스온도와 과급기 배기가스온도 냉각수 온도에 영향을 받는 데이터들이다. 따라서 OPD와 STD의 TSD는 외적환경의 특성차이로 인해 정확한 동특성을 비교 분석하기는 어렵다. 따라서 실린더 평균배기가스온도와 과급기 배기가스온도의 경우는 앞 절에서 동일계열 사이에는 높은 상관관계를 갖고 거동한다는 사실을 근거하면 OPD가 정상운행 상태의 데이터임을 인식할 수 있다. 또한 STD는 시운전그래프의 선형화과정에서 생기는 오차와 시운전당시의 운전조건, 부하조건 및 주변 환경적 영향을 고려하면 OPD와 STD는 유사한 변동추이를 따르고 있음을 알 수 있다.

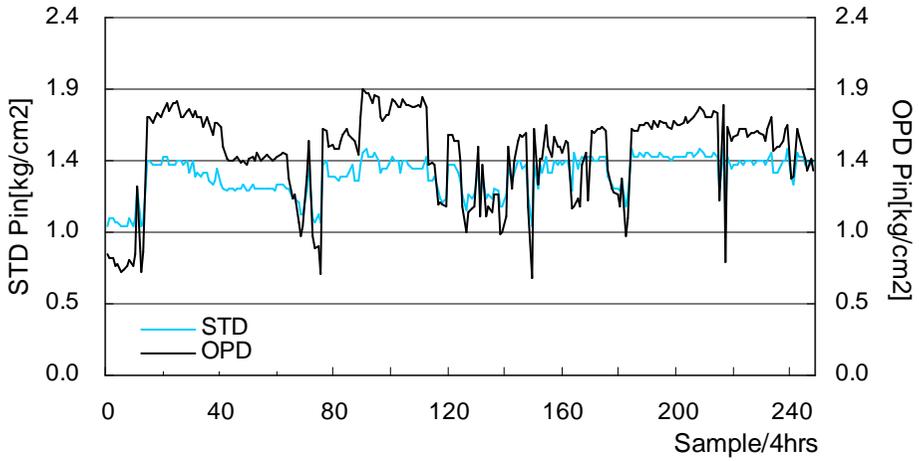


그림 2.27 소기공기압력 STD와 OPD의 TSD

Fig. 2.27 TSD of the scavenging pressure STD and OPD

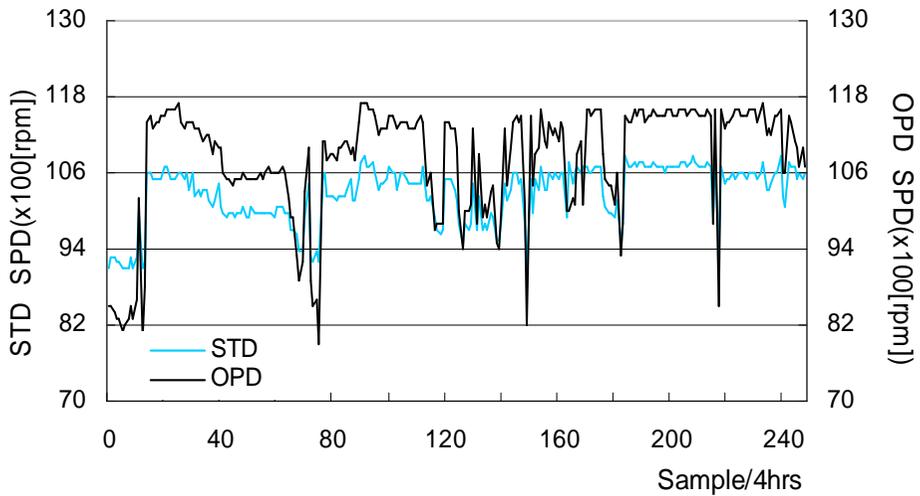


그림 2.28 No.1 과급기회전수 STD와 OPD의 TSD

Fig. 2.28 TSD of the No.1 T/C speed STD and OPD

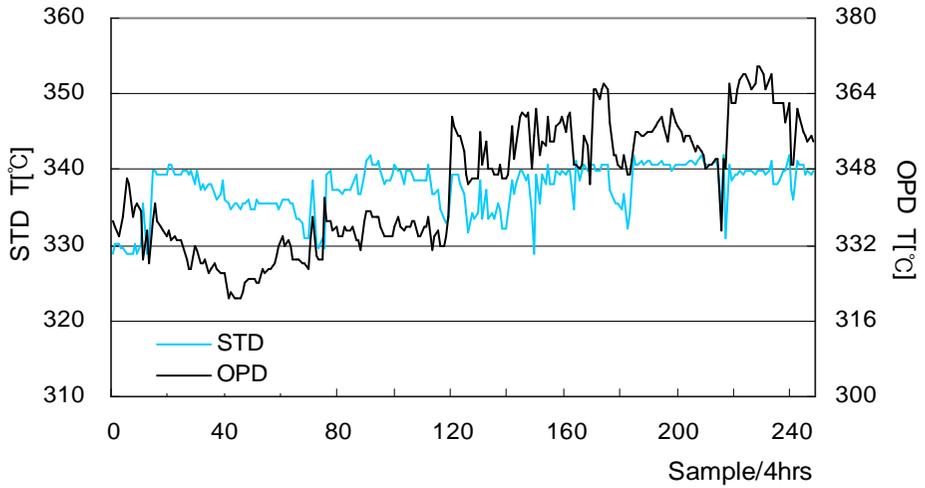


그림 2.29 실린더 평균배기가스온도 STD와 OPD의 TSD
 Fig. 2.29 TSD of the cylinder mean exhaust gas temperature
 STD and OPD

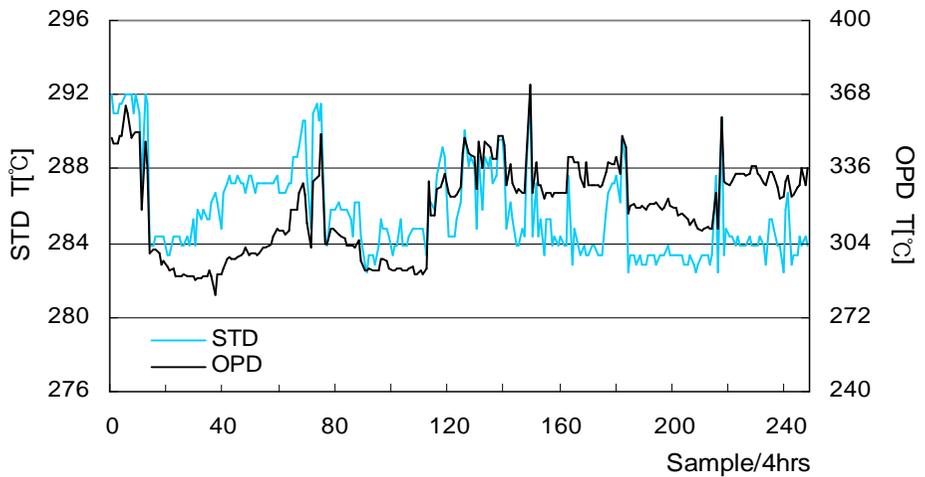


그림 2.30 No.1 과급기 배기가스온도 STD와 OPD의 TSD
 Fig. 2.30 TSD of the No.1 T/C exhaust gas temperature STD and OPD

제 3 장 이상감지 및 이상진단모듈 설계

3.1 이상감지모듈과 이상진단모듈의 구조

일반적으로 전문가 즉 숙련된 운전자는 발생 가능성이 있는 이상상태, 계측항목간의 인과관계, 관찰된 시스템의 동작에 대한 정보로부터 이상의 원인을 찾아낸다[38]. 숙련된 운전자가 고장진단을 행하는 방법은 우선 여러 감시 데이터를 계통별로 분류한다. 분류된 계통별 감시데이터가 정상 운전 범위보다 높거나 혹은 낮은 데이터를 이상데이터로 감지한다. 이상데이터로 감지된 데이터가 확실하게 이상데이터인지를 진단하기위해 이상감지된 데이터가 어떤 항목과 연관성이 높은 항목의 데이터라면 그 연관성이 높은 항목의 데이터와의 연관성을 검토하여 이상 유무를 판단한다. 또한 이상데이터의 세부고장부분을 알기위해 전문가가 가지고 있는 전문 지식에 의해 관련 항목들을 세부적으로 조사하여 최종적으로 고장개소를 발견한다. 이와 같은 전문가의 이상진단 방법은 일반적으로 감시데이터가 운전범위를 벗어나는 시점에 이상데이터로 분류하게 된다. 이를 통해 연관성이 있는 다른 항목들과 비교함으로써 이상유무를 판단한다. 하지만 감시데이터가 운전범위를 벗어나지 않고 이상상태로 진행되고 있는 경우에는 사전에 이상상태를 감지하기가 어렵다. 이를 극복하기위해 본 논문에서는 전문가의 고장진단 방법을 기반으로 하지만 감시데이터가 운전범위를 벗어나지 않은 경우에도 이상상태를 사전에 감지하고 진단할 수 있는 이상감지모듈과 이상진단모듈을 설계하고자 한다. 이를 위해 통계적 분석기법을 이용하여 감시항목사이의 상관관계를 정량적으로 규정한다. 감시항목사이의 정량적 상관관계를 이용하여 이상감지 지식베이스와 이상진단 지식베이스를 설계한다. 그림 3.1은 고장진단 및 예측시스템의 전체구조를 나타낸 것이다. 본 절에서는 고장진단모듈에서 이상감지모듈과 이상진단모듈의 설계에 관하여 논한다.

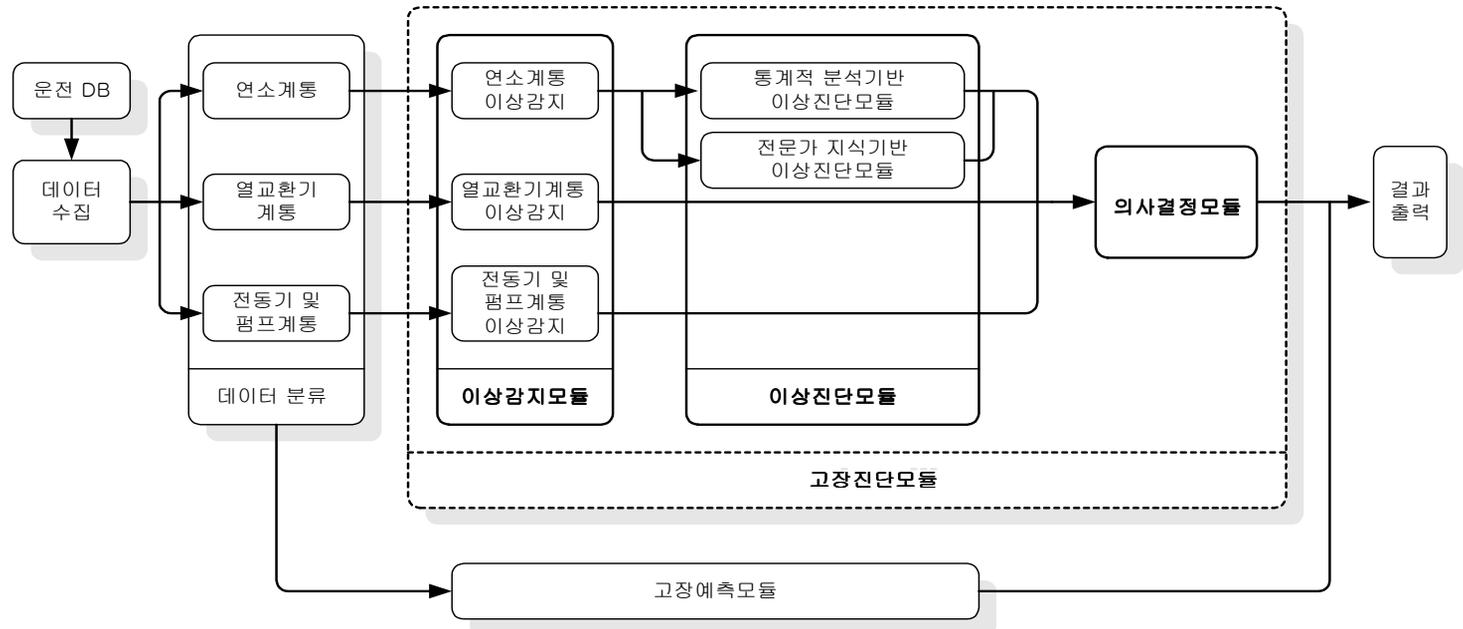


그림 3.1 고장진단 및 예측시스템의 구조

Fig. 3.1 Structure of the fault diagnosis and prediction system

3.2 전문가에 의한 이상감지와 이상진단

숙련된 운전자는 실제 계통을 각각 모델링하지 않고 각종 감시되는 데이터를 분석하여 고장진단을 행하며 여러 감시데이터 중에서 이상이 있다고 추정되는 데이터를 찾아낸다. 데이터에 따라서는 그 데이터 자체이상만으로도 고장진단을 행할 수 있는 데이터와 다른 데이터와의 연관성을 고려하여 고장진단을 해야 할 데이터가 있다. 따라서 어느 한 데이터가 이상데이터라 할지라도 숙련된 운전자는 그 데이터 하나만 가지고 바로 고장으로 진단하지 않고 그 데이터와 연관된 다른 데이터를 조사하여 이상유무를 판단한다. 이상데이터로 분류된 데이터는 다른 데이터와 연관지어 검토해본 결과 이상데이터가 확실하면 숙련자는 고장부분을 찾아내기 위하여 몇 가지 고장에 대한 조사를 하게 된다. 고장조사결과 고장이 확실하면 고장으로 결론을 내리는 것이 숙련자가 고장진단을 하는 방법이다. 예를 들어 No.1 실린더의 배기밸브가 누설하는 고장이 있을 때의 고장진단을 숙련자가 행하는 방법은 다음과 같다. 배기밸브가 누설하면 고온가스가 배기가스 온도계에 접하는 시간이 길어진다. 따라서 온도계에 나타나는 평균배기가스온도는 높게 나타나게 된다. 또한 고압가스가 누설하므로 가스누설음도 들리게 된다. 그러나 가스 누설음은 센서로 감지하지 않으므로 조사를 하기 전까지는 알 수 없다. 숙련자는 배기가스온도가 평상시보다 높은 것을 감지하고 다른 데이터들과 연관지어 검토한다. 다른 실린더의 배기가스온도도 따라서 상승 했는지, 소기공기온도가 상승했는지, 냉각수온도가 상승했는지, 부하가 더 많이 걸렸는지 등의 다른 데이터와의 검토를 하게 된다. 검토 후 이상데이터임이 확실하면 이상데이터로 분류하고 고장조사를 수행한다. 고장상태를 확정하기 위해 각종 데이터로 고장조사를 행하고 원인이 미흡하면 인디케이터를 조사한다. 최고압력이 낮고 출력이 저하되었으면 배기계통 및 연료계통을 조사한다. 배기계통조사 중 배기가스온도가 높고 배기가스 누설음이 들리면 배기밸브의

누설을 고장으로 결정짓는다. 최종적으로 배기밸브가 누설하는 고장상태를 발견하고 숙련자는 기관을 정지하고 수리를 할 것인지, 단시간동안 계속해서 운전을 할 것인지, 아니면 출력을 낮출 것인지를 결정하게 된다.

이와 같이 숙련자가 고장을 진단하는 방법을 기반으로 실선운행데이터의 통계적 분석기법을 통해 고장진단모듈을 설계하기 위하여 본 논문에서는 전문가가 이상데이터를 찾아내는 것을 이상감지지식베이스를 이용한 이상감지모듈이 담당하고, 전문가가 감지된 이상데이터와 연관된 여러 데이터를 조사하여 진단을 확정하는 일을 이상진단지식베이스를 이용한 이상진단모듈이 담당하도록 구성한다. 또한 이상진단이 확정되면 관련 세부 데이터를 조사하여 최종적으로 세부고장개소를 확정하는 것을 본 논문에서는 의사결정모듈이 담당하도록 구성하였다. 그림 3.2는 전문가에 의한 고장진단절차를 순서도로 나타낸 것이다.

3.3 통계적 분석기법을 이용한 이상감지모듈과 이상진단모듈

3.3.1 통계적 분석기법

고장진단을 위한 기존의 방법으로 모델기반 고장진단 방법은 시스템의 수학적 모델에 의해 제공되는 해석적인 기법을 기초로 하는 것으로서 시스템의 정확한 정량적 모델을 필요로 하므로 비선형성이 강한 실제 시스템에 적용하는 것은 거의 불가능하다. 선박용 디젤기관은 계측항목들 간의 상관관계가 높으며 비선형성이 강한 계통들로 구성되어 있다. 따라서 본 논문에서는 고장진단에 필요한 지식베이스 설계를 위해 모델에 근거하지 않는 방법으로 통계적 분석기법을 이용하여 실선운행데이터의 동특성을 분석한다.

통계적 분석기법의 종류로는 분산분석(ANOVA : Analysis of variance), 상관분석(Correlation analysis), x^2 -검정(x^2 -test), t검정(t-test)

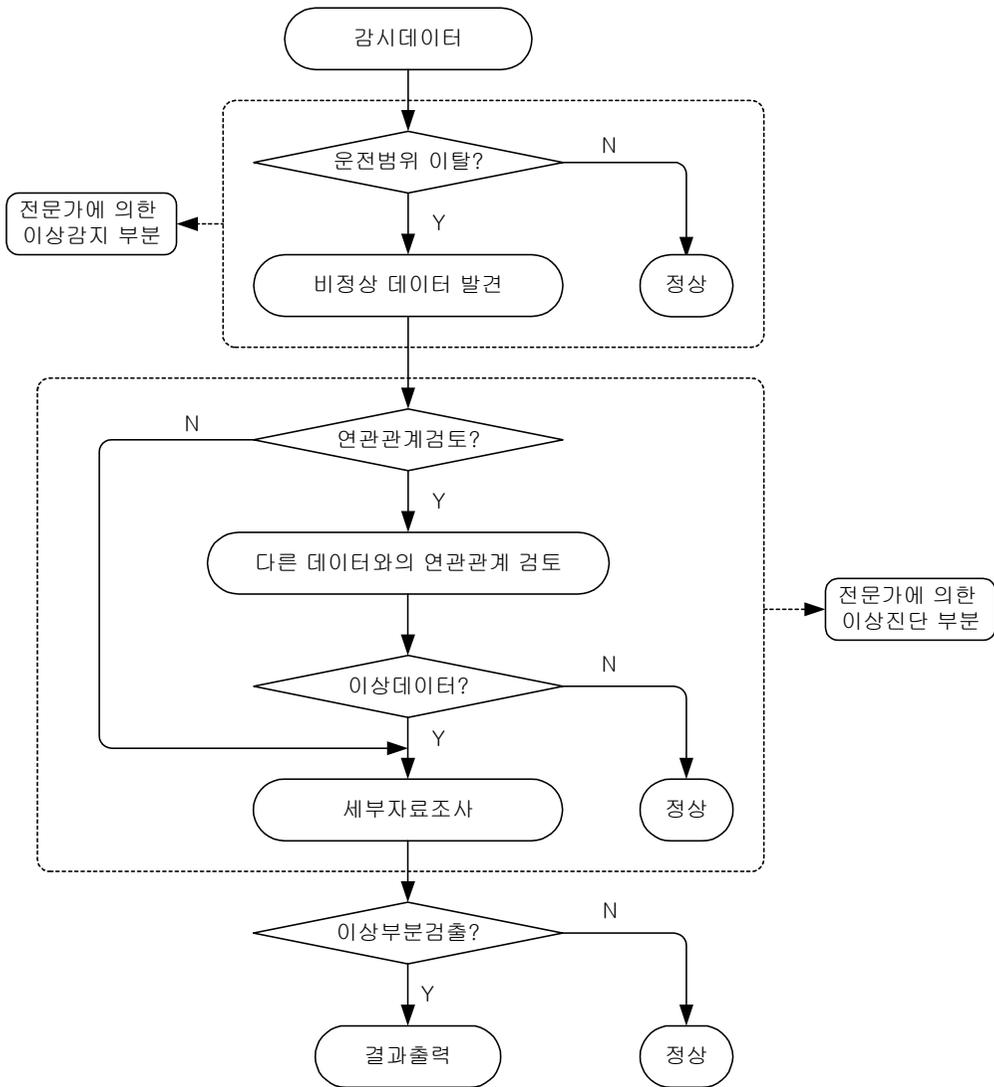


그림 3.2 전문가에 의한 고장진단 절차
 Fig. 3.2 Sequence of the fault diagnosis by a expert

, 회귀분석(Regression analysis), 크론바흐- α 계수, 군집분석(Cluster analysis), 던컨테스트(Duncan's multiple range test), 요인분석(Factor analysis), 만-위트니 U-검정(Mann-whitney U-test), Wilcoxon-순위검정, 교차분석 등이 있다[39,40].

변수와 변수간의 관계를 규명할 때 자주 이용되는 통계적 방법으로 회귀분석과 상관분석이 있다. 회귀분석은 두 변수간의 함수관계를 하나의 식으로 나타낸 회귀식(Regression equation) 혹은 예측식(Prediction equation)으로 표현하는 통계적 기법으로 하나의 종속변수와 여러 개의 독립변수들 사이의 통계적 함수관계를 분석하여 모형화 하는데 이용되고 있다[41]. 또한 회귀분석은 종속변수에 영향을 미치는 중요한 독립변수들의 영향을 추정 및 검정하고 추정된 회귀함수를 이용하여 주어진 독립변수의 값에서 종속변수의 평균변화를 추정 혹은 예측하기 위한 방법으로 사용되지만 두 변수간의 밀접한 정도를 나타내지는 못한다. 따라서 본 논문에서는 회귀분석기법을 고장예측모델의 설계에 활용한다.

선박기관실의 계측항목의 데이터들은 상호간 영향을 주는 항목들로 구성되어 있으며 상호 밀접한 관계를 가지고 거동하고 있다. 따라서 본 논문에서는 계측항목사이의 관계를 상관계수(CC)로서 정량적으로 표현하는 상관분석법을 이상감지모델과 이상진단모델의 설계에 이용한다.

3.3.2 통계적 분석기법에 의한 이상감지와 이상진단

선박용 디젤기관의 이상감지모델을 구축함에 있어 계통별 계측항목들의 동특성을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 계측항목들의 동특성을 파악하기 위해서는 관심 있는 특성들을 관측하고 그것을 정량적으로 표현하여야 한다. 전문가에 의한 계통별 계측항목 고장진단 방법에서 이상데이터를 감지하기 위해서는 감시되는 데이터항목이 운전범위를 벗어나는 경우 그 시점부터 이상데이터로 인지하게 된다. 즉, 사건이 발생한 시점에서 이

상데이터를 감지하고 이상유무를 판단하기 위하여 연관된 다른 계측항목들을 검토하게 된다. 이로 인해 전문가라 할지라도 계통의 감시 데이터항목이 운전범위를 벗어나지 않은 경우에는 이상데이터를 감지하지 못하여 사전 예방정비 시점을 놓치게 되므로 사고발생시 큰 손실로 이어질 수 있다. 하지만 정상범위내에 있다하더라도 비정상으로 진행되고 있는 경우에는 정상일 때는 강한 연관성을 유지하던 항목사이의 상관관계는 비정상적이 되어감에 따라 약해지게 된다.

본 논문에서는 감시데이터가 운전범위를 벗어난 경우뿐만 아니라 운전범위를 벗어나지 않더라도 이상상태를 감지하고 이상유무를 판단할 수 있는 이상감지모듈과 이상진단모듈을 설계하고자 한다.

(1) 감시데이터 항목사이의 상관관계

두 변수의 관계를 하나의 수치로 나타내는 상관분석은 두 변수간의 관계의 강도, 밀접한 정도를 나타내는 CC를 사용하면 상호 연관성을 정량적으로 표현할 수 있다. CC를 구하기 위해서는 두 확률변수의 분포가 결합 확률분포를 이룰 때 그 분포의 분산을 측정하는 공분산(Covariance)을 계산해야 한다. 공분산은 두 변수의 측정단위에 따라서 큰 차이가 나는 문제점으로 인해 상대적인 강도를 나타내는 좋은 지표가 되지 못한다. 따라서 이러한 단위의 문제를 해결하기 위해 두 변수(x, y)의 상관관계를 알기 위해서는 공분산($Cov(X, Y)$)을 각 변수의 표준편차(SD)의 곱으로 나누어 식(3.1)과 같이 $CC(\rho_{xy})$ 를 구한다.

$$\rho_{xy} = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad -1 \leq \rho_{xy} \leq 1 \quad (3.1)$$

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

$$\begin{aligned}
& , \mu_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i , \mu_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \\
& , \sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\mu_x^2 \right) \\
& , \sigma_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu_y)^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n\mu_y^2 \right) \\
& , X: array1, Y: array2
\end{aligned}$$

따라서 디젤기관의 연소계통 각 항목 간의 연관정도는 CC를 이용하면 정량적 지표로 표현할 수 있다. 이를 이상감지와 이상진단에 필요한 지식 베이스 구축에 활용한다.

연소계통을 구성하고 있는 계측항목이 부하와 얼마나 높은 상관관계를 가지고 있는지 알기 위하여 우선 대상선박 관련항목들의 모집단 (Population)에서 모집단평균(PM)과 모집단표준편차(PTSD) 그리고 공분산을 구하고 모집단CC(PCC)를 구해보면 된다. 표 3.1은 부하와 연소계통의 계측항목사이의 PCC를 구한 것이다. 일반적으로 실린더 배기가스온도와 과급기 배기가스온도는 부하와 높은 상관관계를 가지고 있을 것으로 생각되나 PCC는 0.5 이하로 낮게 나타나고, 과급기회전속도와 소기공압력의 PCC가 0.8 이상으로 높은 상관관계가 있음을 알 수 있다. 또한 정상상태에서 동일계열 계측항목의 PCC는 비정상상태의 PCC보다 높게 나타날 것이 분명하다. 표 3.2~3.4는 동일계열 계측항목 상호간 PCC를 나타낸 것으로 소기공기압력의 경우를 제외하고는 모두 0.9 이상으로 높게 나타난다. 표 3.5는 부하와의 PCC가 0.8이상되는 항목과 동일계열 계측항목사이의 PCC가 0.8이상되는 항목을 나타낸 것이다. 표 3.5에서 과급기속도와 소기공기압력은 부하와 높은 상관관계가 있음을 알 수 있다.

표 3.1 연소계통 계측항목의 PM, PTSD 및 부하와의 PCC

Table 3.1 PM and PTSD of the MIs in combustion system, and PCC of the MIs and load

MI	PM	PTSD	PCC
Load	63.218	5.179	1
No.1 Cyl Texh	336.919	11.897	0.399
No.2 Cyl Texh	347.036	13.652	0.453
No.3 Cyl Texh	343.867	14.688	0.449
No.4 Cyl Texh	341.877	14.249	0.372
No.5 Cyl Texh	336.891	11.943	0.379
No.6 Cyl Texh	359.367	12.974	0.391
No.7 Cyl Texh	333.859	26.855	0.523
No.8 Cyl Texh	360.843	13.737	0.481
No.9 Cyl Texh	338.907	11.367	0.347
No.10 Cyl Texh	342.907	13.314	0.458
Cyl MTexh	344.448	13.050	0.440
No.1 T/C Texh	319.065	19.145	0.452
No.2 T/C Texh	309.839	18.664	0.442
No.3 T/C Texh	328.823	18.894	0.408
No.4 T/C Texh	320.492	18.844	0.450
No.1 T/C Spd	108	9.178	0.941
No.2 T/C Spd	105.569	9.005	0.938
No.3 T/C Spd	105.101	8.948	0.944
No.4 T/C Spd	106.847	9.049	0.944
Scav air Pin	1.482	0.303	0.888
Scav air Fwd Tin	42.661	4.367	0.629
Scav air Aft Tin	45	4.222	0.771

표 3.2 각 실린더 배기가스온도 상호간 PCC

Table 3.2 PCC of the cylinder and the identical cylinder exhaust gas temperature

	No.1 Cyl Texh	No.2 Cyl Texh	No.3 Cyl Texh	No.4 Cyl Texh	No.5 Cyl Texh	No.6 Cyl Texh	No.7 Cyl Texh	No.8 Cyl Texh	No.9 Cyl Texh	No.10 Cyl Texh	Cyl M Texh
No.1 Cyl Texh	1	0.968	0.950	0.915	0.910	0.938	0.912	0.932	0.875	0.912	0.957
No.2 Cyl Texh	0.968	1	0.963	0.939	0.918	0.940	0.926	0.939	0.902	0.949	0.972
No.3 Cyl Texh	0.950	0.963	1	0.957	0.928	0.912	0.939	0.945	0.914	0.948	0.973
No.4 Cyl Texh	0.915	0.939	0.957	1	0.934	0.902	0.932	0.936	0.941	0.954	0.968
No.5 Cyl Texh	0.910	0.918	0.928	0.934	1	0.950	0.96	0.963	0.957	0.941	0.973
No.6 Cyl Texh	0.938	0.940	0.912	0.902	0.95	1	0.935	0.954	0.926	0.930	0.965
No.7 Cyl Texh	0.912	0.926	0.939	0.932	0.96	0.935	1	0.978	0.942	0.943	0.975
No.8 Cyl Texh	0.932	0.939	0.945	0.936	0.963	0.954	0.978	1	0.951	0.960	0.984
No.9 Cyl Texh	0.875	0.902	0.914	0.941	0.957	0.926	0.942	0.951	1	0.956	0.963
No.10 Cyl Texh	0.912	0.949	0.948	0.954	0.941	0.930	0.943	0.960	0.956	1	0.977
Cyl M Texh	0.957	0.972	0.973	0.968	0.973	0.965	0.975	0.984	0.963	0.977	1

표 3.3 각 과급기 배기가스온도 상호간 PCC

Table 3.3 PCC of the T/C and the identical T/C exhaust gas temperature

	No.1 T/C Texh	No.2 T/C Texh	No.3 T/C Texh	No.4 T/C Texh
No.1 T/C Texh	1	0.990	0.978	0.967
No.2 T/C Texh	0.990	1	0.990	0.991
No.3 T/C Texh	0.978	0.990	1	0.992
No.4 T/C Texh	0.976	0.991	0.992	1

표 3.4 소기공기온도 상호간 PCC

Table 3.4 PCC of the scavenging air Fwd and Aft temperature

	Scav air Fwd Tin	Scav air Aft Tin
Scav air Fwd Tin	1	0.864
Scav air Aft Tin	0.864	1

표 3.5 연소계통 계측항목 사이의 PCC 분류

Table 3.5 PCC classification of the MIs in combustion system

부하와의 CC(0.8이상)		계열 간 CC(0.8이상)	
MI	CC	MI	MCC
No.1 T/C SPD	0.941	No.1~No.4 T/C SPD	0.985
No.2 T/C SPD	0.938	No.1~No.4 T/C Texh	0.986
No.3 T/C SPD	0.944	No.1~No.10 Cyl Texh	0.943
No.4 T/C SPD	0.944	Scav air Pin/No.1~No.4 T/C Texh	0.955
Scav air Pin	0.88	Scav air Fwd/Aft Tin	0.86

표 3.5의 결과로 부하와 상관관계가 높은 계측항목의 OPD와 STD의 TSD를 2장에서와 같이 살펴보면 OPD와 STD는 유사한 특성을 가지고 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 사용하고 있는 OPD는 디젤기관이 정상적인 상태의 데이터이라는 것이 된다.

선박이 운항되면서 일정시간간격으로 계측되는 부하와 각 계측항목사이의 상관관계는 어떻게 변화하는지를 알아보기 위하여서는 CC의 분포를 알아볼 필요가 있다. 이를 위해 본 논문에서는 부하의 이동평균(MA)에 대한 이동표준편차(MVSD)를 구하여 CC의 분포를 알아본다. MA는 계측항목들의 거동을 잘 나타낼 수 있도록 로그북으로부터 4시간 간격으로 기록된 일일 평균치이며 이동창(Moving window)은 6으로 설정하였다. 그림 3.3~3.8에 각 MA에 대한 MVSD의 그래프와 항목들 사이의 상관관계 그래프를 나타내었다. 그림 3.3은 부하와 상관관계가 높은 소기압력의 CC 분포를 알기 위해 부하의 MVSD에 대한 소기압력의 CC를 나타낸 것이고 그림 3.4~3.5은 표 3.1-3.5에서 부하와 상관관계가 낮지만 일반적으로 부하와 높은 상관관계를 가질 것으로 추정되는 항목에서 부하의 MVSD에 대한 CC를 나타낸 것이다. 그림 3.3에서와 같이 부하와 상관관계가 높은 항목의 CC분포는 1.0에 가까운 경우가 많은 반면에 그렇지 않은 항목의 CC분포는 상대적으로 낮게 나타남을 알 수 있다.

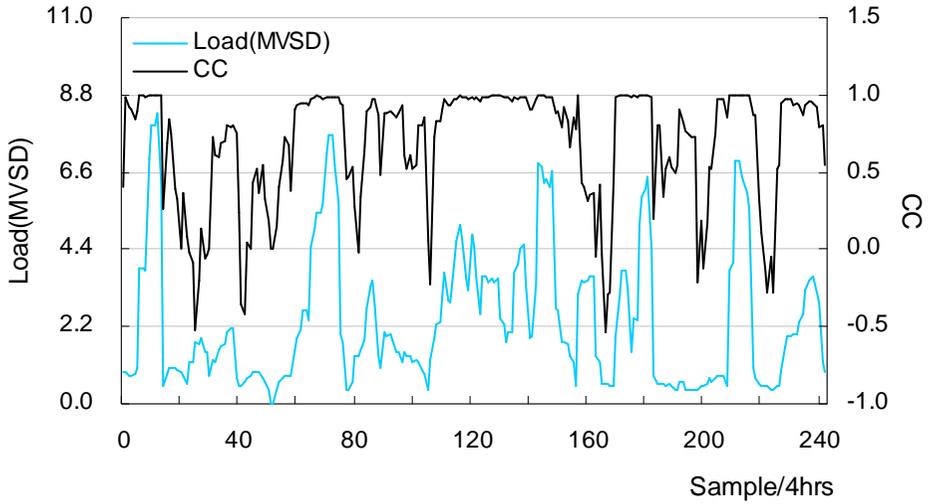


그림 3.3 부하의 MVSD에 대한 부하와 소기압력의 CC

Fig. 3.3 CC of the load and scavenging air pressure by load MVSD

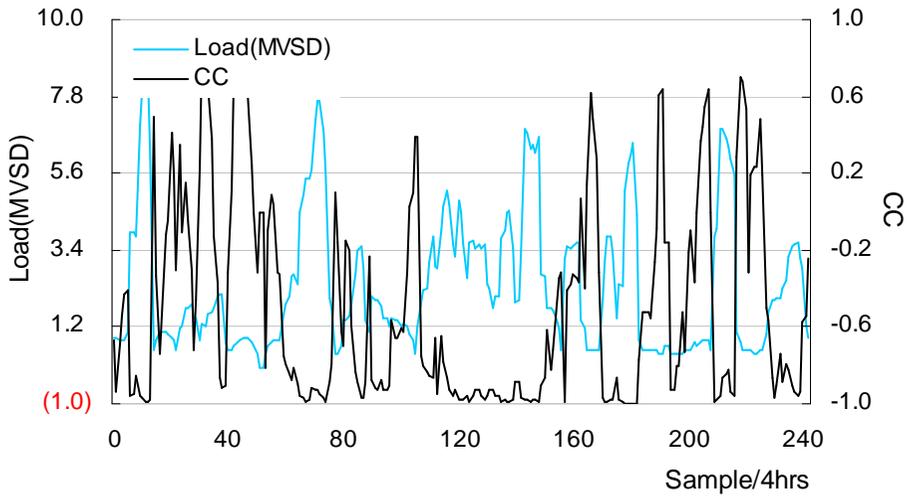


그림 3.4 부하의 MVSD에 대한 부하와 No.1 과급기 배기가스온도의 CC

Fig. 3.4 CC of the load and No.1 T/C exhaust temperature by a load MVSD

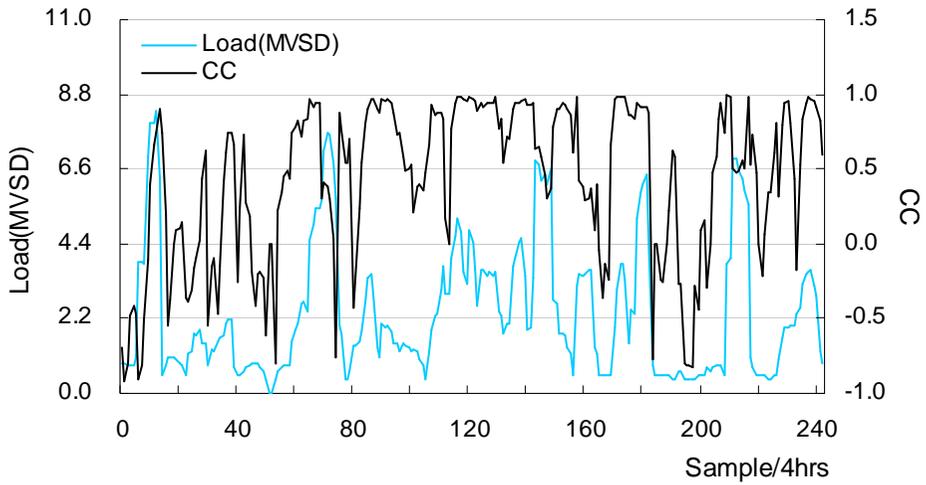


그림 3.5 부하의 MVSD에 대한 부하와 실린더 평균배기가스온도의 CC
 Fig. 3.5 CC of the load and cylinder mean exhaust temperature by a load MVSD

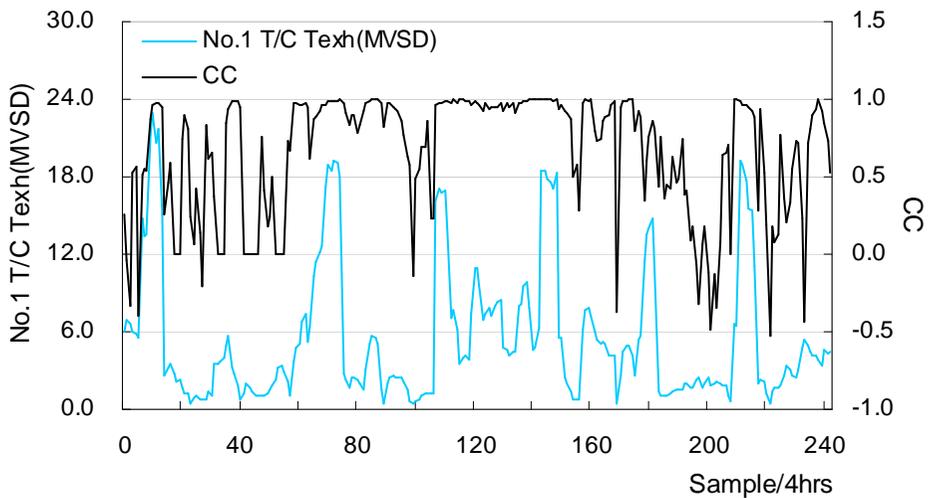


그림 3.6 No.1 과급기 배기가스온도의 MVSD에 대한 No.1/No.2 과급기 배기가스온도의 CC
 Fig. 3.6 CC of the No.1 and No.2 T/C exhaust gas temperature by a No.1 T/C exhaust temperature MVSD

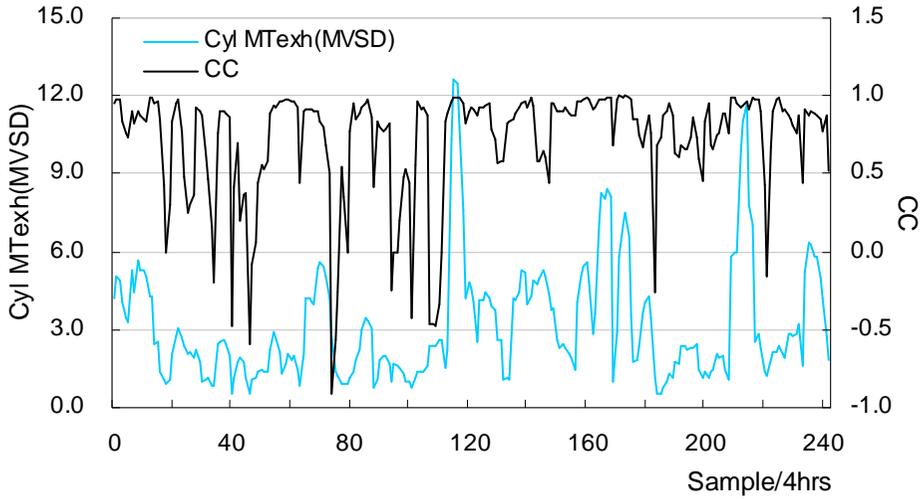


그림 3.7 실린더 평균배기가스온도의 MVSD에 대한 실린더
 평균배기가스온도 No.1 실린더 배기가스온도의 CC

Fig. 3.7 CC of the cylinder mean and No.1 exhaust temperature by a
 cylinder mean exhaust temperature MVSD

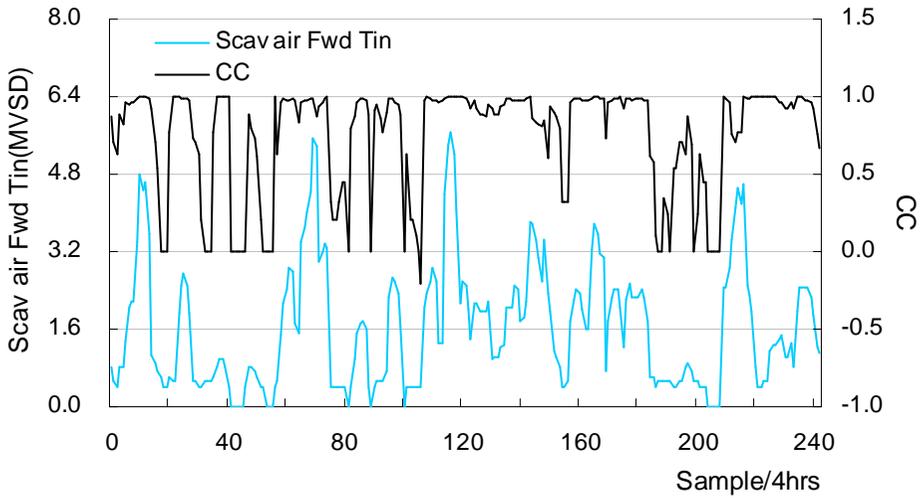


그림 3.8 Fwd 소기공기온도의 MVSD에 대한 Fwd/Aft
 소기공기온도의 CC

Fig. 3.8 CC of the Fwd and Aft scavenging air temperature by a
 scavenging air Fwd temperature MVSD

그림 3.6~3.8은 동일계열의 MVSD에 대하여 CC를 나타낸 것으로 CC의 분포가 1.0에 가까운 경우가 많은 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 부하 및 실린더 배기가스온도 등과 같이 상관관계를 파악하는데 기준이 되는 항목을 독립변수로 정의하여 사용한다. 그림에서 독립변수의 이동평균에 대한 CC, 즉 MACC는 부하의 MVSD 변화에 따라 정의상관(PCO)을 갖는 구간과 무상관(UCO)을 갖는 것이 대부분이나, 그림 3.4와 같이 과급기배기가스온도처럼 부하가 높아지면 과급기배기가스온도가 낮아지는 특성을 가지는 경우에는 CC가 음의 값이 되는 부의상관(NCO)을 갖는 항목들도 있다.

표 3.2에서 부하에 대한 각 항목간의 상관관계는 PCO 산포도(SDR) 및 NCOSDR 그리고 UCOSDR를 포함한 전체의 상관관계를 구한 것으로 모집단 전체에 대한 전반적 상관관계를 예측할 수 있으나 변화하는 데이터 상호간의 상관관계 변화정보를 축출해 낼 수는 없다. 디젤기관의 연소계통이 정상상태라고 한다면 부하가 변할 때에도 부하와 높은 상관을 가지고 있는 계측항목은 여전히 높은 상관관계를 가지고 변할 것이므로 부하가 변하는 구간은 부하의 MVSD 큰 경우이다. 그림 3.9에서와 같이 MA 데이터값이 크게 변할 때는 그림 3.10과 같이 MVSD도 따라서 변화하므로 MVSD가 양으로 변하는 구간에서 CC를 구해 보면 PCOSDR 또는 NCOSDR 일수 있으므로 이 구간을 검출하여 CC를 구하면 두 항목간의 상관관계 정보를 축출해 낼 수가 있다. 또한 부하가 증가할 때 온도가 감소하는 과급기배기가스온도의 경우에는 NCOSDR구간들을 얻을 수 있다. 그림 3.9에서 'A'는 PCOSDR, 'B'는 UCOSDR를 나타낸다.

그림 3.11~3.14는 부하와의 상관관계가 낮은 것으로 판단되는 항목들 중에서 No.1 실린더 배기가스온도, No.1 과급기 배기가스온도, No.1 과급기 회전수, 그리고 소기공기온도의 MVSD에서 PCOSDR과 NCOSDR구간들을 나타낸 것이다.

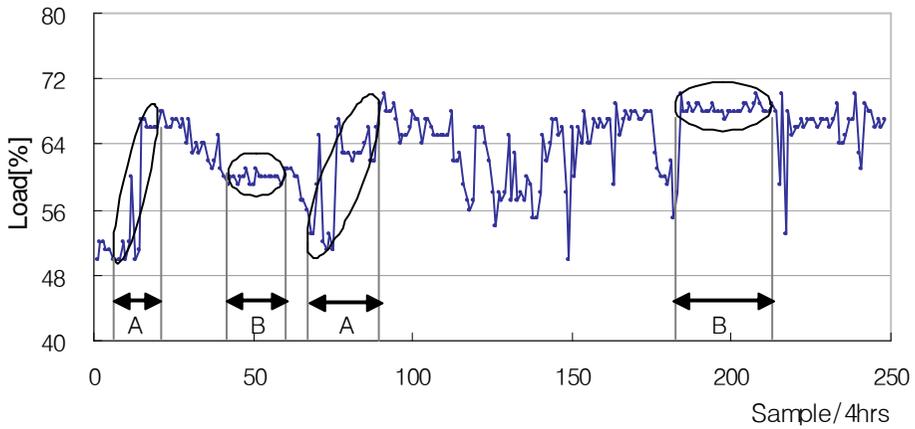


그림 3.9 PCO와 UCO의 관계를 가지는 부하데이터 구간

Fig. 3.9 Load data range with correlation of the PCO and UCO

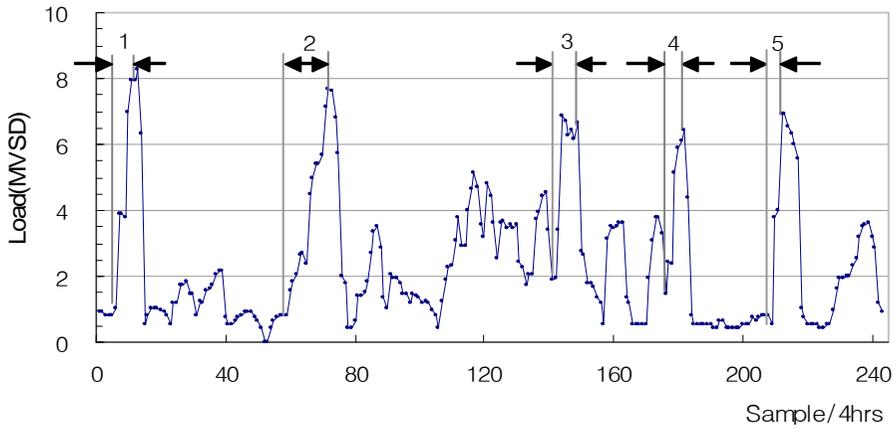


그림 3.10 부하 MVSD의 PCOSDR 구간

Fig. 3.10 PCOSDR range of the load MVSD

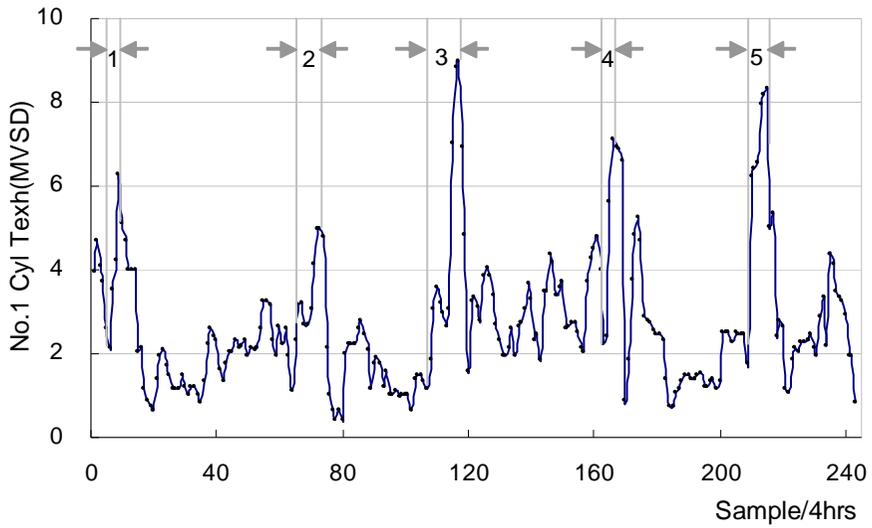


그림 3.11 No.1 실린더 배기가스온도 MVSD의 PCOSDR 구간
 Fig. 3.11 PCOSDR range of the No.1 cylinder exhaust gas temperature MVSD

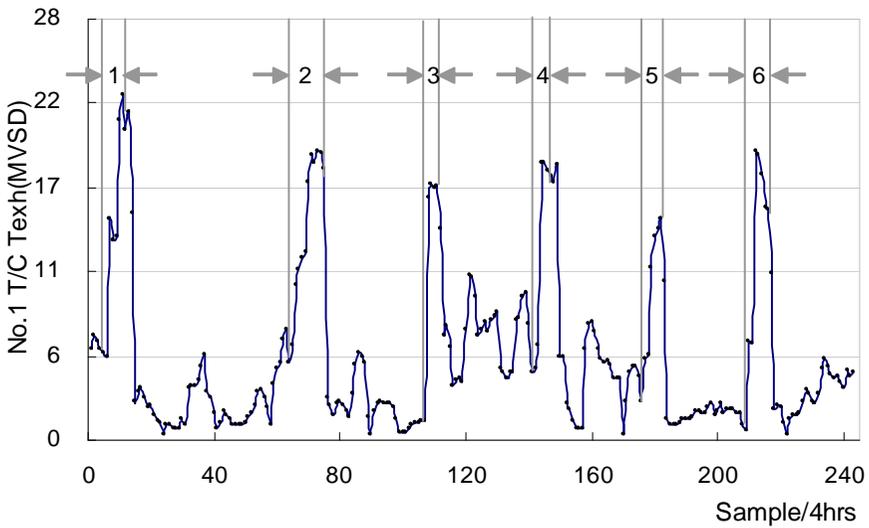


그림 3.12 No.1 과급기 배기가스온도 MVSD의 PCOSDR 구간
 Fig. 3.12 PCOSDR range of the No.1 T/C exhaust gas temperature MVSD

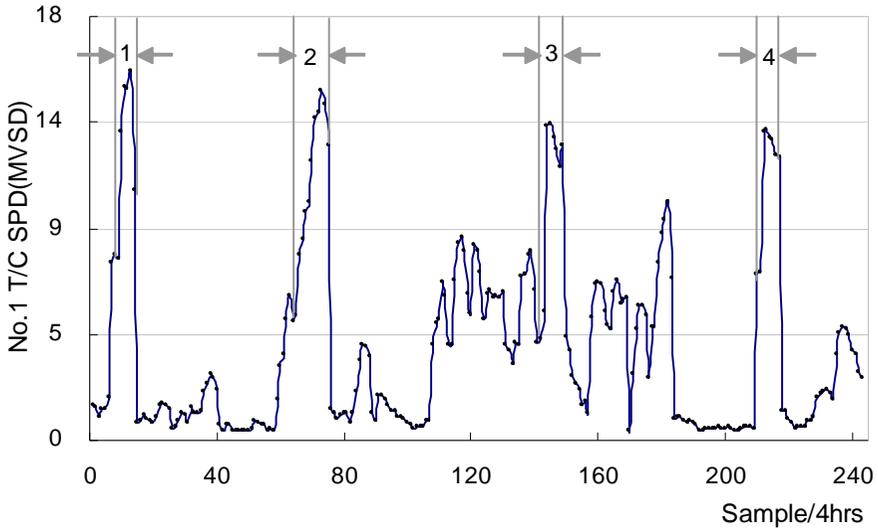


그림 3.13 No.1 과급기회전수 MVSD의 PCOSDR 구간
 Fig. 3.13 PCOSDR range of the No.1 T/C speed MVSD

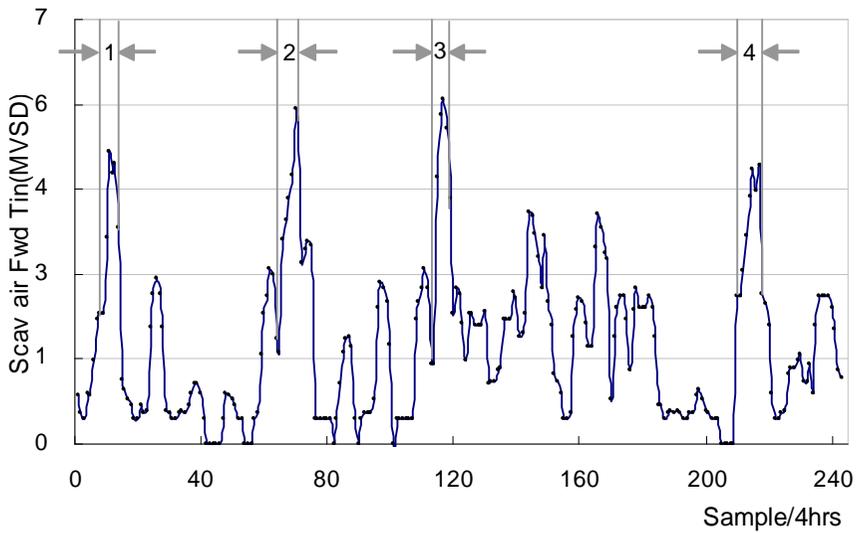


그림 3.14 Fwd 소기공기온도 MVSD의 PCOSDR 구간
 Fig. 3.14 PCOSDR range of the scavenging air Fwd temperature MVSD

그림 3.15는 부하와 No.1 과급기회전수의 TSD그래프와 부하의 MVSD에 대한 No.1 과급기회전수와 CC를 동시에 나타낸 것이며, 부하의 MVSD에 대한 PCOSDR구간에서 CC를 쉽게 확인할 수 있다. 그림 3.15와 같이 MVSD가 증가하는 경우의 CC는 모두 1.0에 가깝다는 것을 확인할 수 있다. PCOSDR구간은 그림 3.16에서와 같이 정상운행데이터의 MVSD를 구하고 MVSD의 SMA(MVSD의 MA를 SMA라 한다)와 SMVSD(MVSD의 MVSD를 SMVSD라 한다)를 구하여 MVSD가 SMA와 SMVSD의 합을 넘는 시점부터 MVSD가 최고의 값을 가지는 구간으로 정해진다. 그림 3.10의 부하의 PCO 5개 구간을 R1~R5라하고 이 구간에 대해서 부하와 과급기회전수에 대한 CC를 나타내 보면 그림 3.17과 같다. 그림에서 PCO 5개 구간에서 CC는 모두 0.95이상의 높은 상관관계를 갖고 거동함을 알 수 있다.

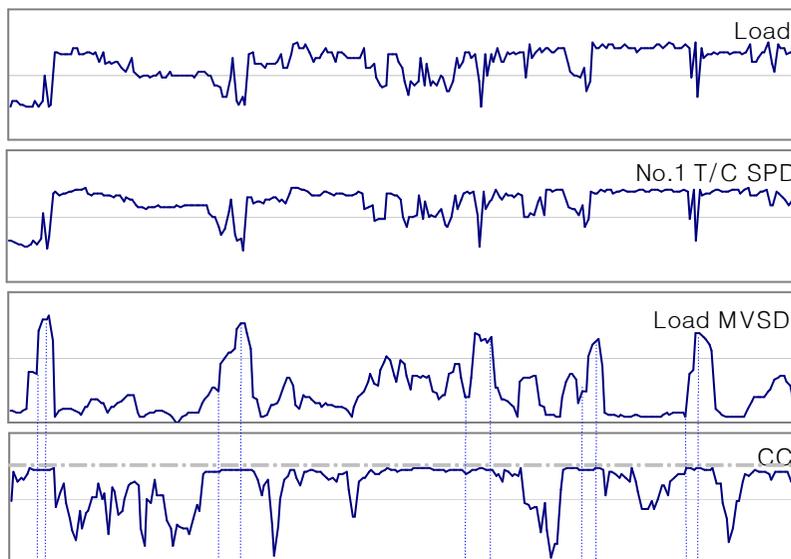


그림 3.15 부하와 No.1 과급기회전수의 상관관계

Fig. 3.15 Correlation of the load and No.1 T/C speed

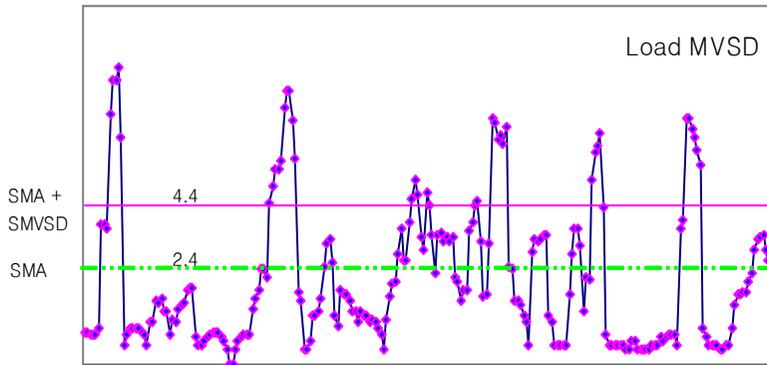
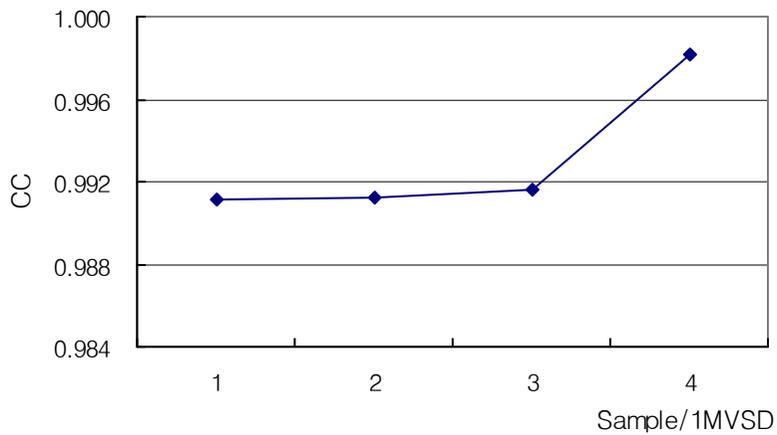


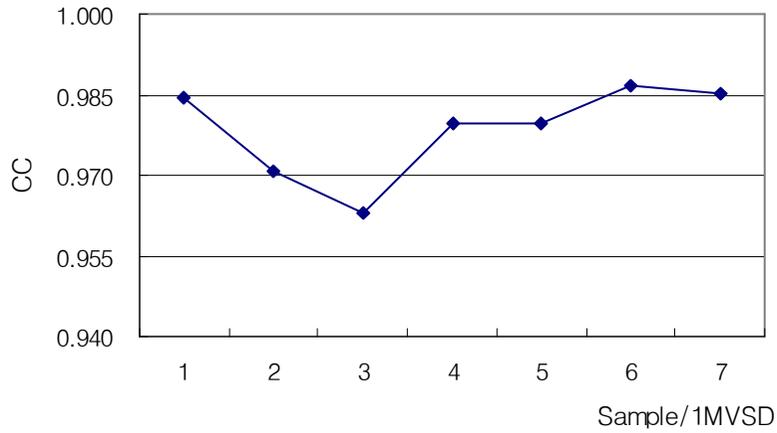
그림 3.16 부하의 MVSD에 대한 PCO 구간 선정

Fig. 3.16 PCO range selection in load MVSD

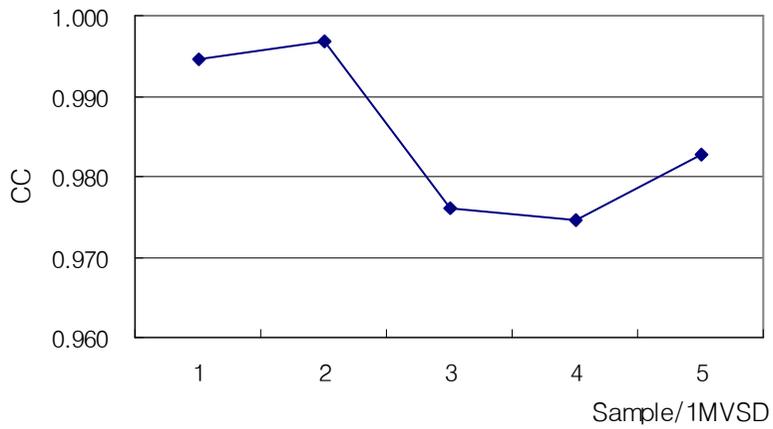


(a) R1구간에서 부하와 과급기회전수의 CC

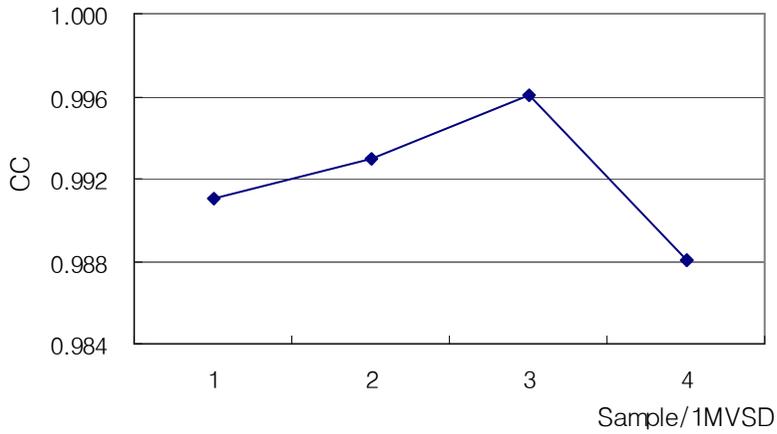
(a) CC of the load and No.1 T/C SPD in R1 range



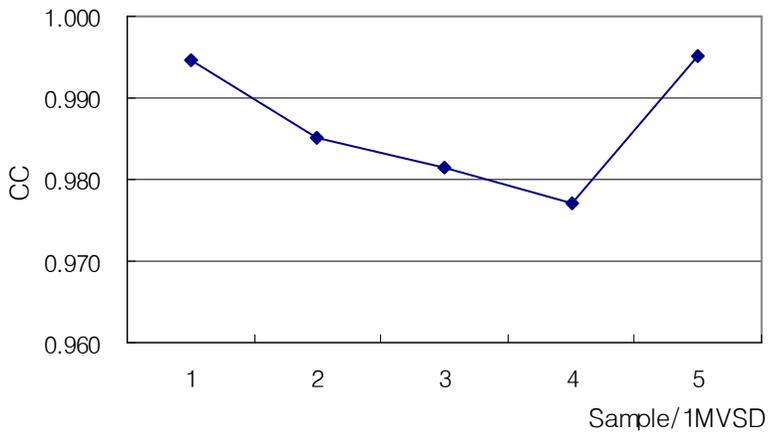
(b) R2구간에서 부하와 과급기회전수의 CC
 (b) CC of the load and No.1 T/C SPD in R2 range



(c) R3구간에서 부하와 과급기회전수의 CC
 (c) CC of the load and No.1 T/C SPD in R3 range



(d) R4구간에서 부하와 과급기회전수의 CC
 (d) CC of the load and No.1 T/C SPD in R4 range



(e) R5 구간에서 부하와 과급기회전수의 CC
 (e) CC of the load and No.1 T/C SPD in R5 range

그림 3.17 부하의 PCO 구간에서 과급기회전수와와의 CC
 Fig. 3.17 CC of the load and No.1 T/C SPD in PCO range

이와 같은 방식으로 부하의 PCO 5개 구간에 대한 각 계측항목사이의 CC를 나타내보면 표 3.6과 같다. 표 3.5의 부하에 대한 PCC와 PCO구간에서의 CC를 비교해보면, 실린더 배기가스온도의 경우는 PCO구간별 CC가 PCC보다는 높게 나타나지만 여전히 PCO구간에서의 CC 변화폭이 크게 나타난다. 또한 CC가 0.8이하로 나타나므로 실린더 배기가스온도에 대해서는 부하와의 상관관계가 높다고 규정하기가 어렵다. 그러나 표 3.5에서 과급기 배기가스온도의 경우 모집단전체구간에 대한 No.1~No.4 과급기의 MCC는 0.44로 PCO이지만, 표 3.6의 구간별 CC에서의 No.1~No.4 과급기 MCC는 -0.95이상의 높은 NCO를 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 과급기 배기가스온도도 표 3.1에서 부하와 상관관계가 높은 항목으로 분류가 가능하다. 또한 표 3.5에서 과급기회전수와 소기공기압력은 PCC가 각각 0.94와 0.88인 반면 표 3.6에서 각각 항목의 MVSD에 대한 PCOSDR구간에서의 CC가 0.99와 0.99로 1.0에 가까운 높은 상관관계를 갖고 거동하고 있음을 알 수 있다. 표 3.7~3.14은 동일계열에 있는 항목과 관련 항목사이의 상관관계를 나타낸 것으로 동일계열의 1호기를 독립변수로 하고 독립변수의 MVSD에 대한 PCOSDR구간을 구하여 PCO구간에서 CC를 구한 것이다. 동일계열의 독립변수에 대한 PCO구간에서의 CC는 PCC에 0.9이상의 높은 상관관계를 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 표 3.1에서의 부하와 상관관계가 높은 항목과 동일계열사이의 상관관계가 높은 항목들 간의 상관관계 표는 MVSD의 PCOSDR구간으로 검토하여 다시 나타내면 표 3.15로 재구성이 가능하다. 표 3.15는 이상감지모듈과 이상진단모듈설계에 필요한 이상감지지식베이스와 이상진단지식베이스 구축을 위한 자료로 활용된다. 표에서 MCC와 SDCC(CC의 SD)는 구간별 CC들의 평균과 표준편차를 나타낸 것으로서 이상감지모듈과 이상진단모듈에서 데이터의 이상상태를 인지하는 지표로 활용된다. 이를 통해 그림 3.18과 같이 상관관계법에 의한 통계적 분석기반 이상감지모듈과 이상진단모듈을 구축할 수 있다.

표 3.6 부하의 PCO구간에 대한 계측항목 사이의 CC

Table 3.6 CC of the MIs in PCO ranges of the load

	Load						
	R1	R2	R3	R4	R5	MCC	SDCC
No.1 Cyl Texh	-0.121	0.783	0.554	0.593	0.741	0.51	0.366
No.2 Cyl Texh	0.553	0.702	0.518	0.857	0.612	0.65	0.136
No.3 Cyl Texh	0.690	0.805	0.797	0.887	0.630	0.76	0.102
No.4 Cyl Texh	-0.081	0.638	0.520	0.456	0.458	0.40	0.278
No.5 Cyl Texh	-0.243	-0.125	0.119	0.885	0.636	0.25	0.488
No.6 Cyl Texh	-0.324	0.341	0.104	0.751	-0.014	0.17	0.403
No.7 Cyl Texh	0.158	0.453	0.701	0.934	0.594	0.57	0.289
No.8 Cyl Texh	-0.353	0.586	0.667	0.883	0.737	0.50	0.491
No.9 Cyl Texh	-0.329	-0.220	-0.044	0.922	0.226	0.11	0.499
No.10 Cyl Texh	0.500	0.244	0.638	0.723	0.375	0.50	0.193
Cyl MTexh	0.060	0.548	0.563	0.938	0.512	0.52	0.312
No.1 T/C Texh	-0.975	-0.936	-0.970	-0.997	-0.960	-0.97	0.022
No.2 T/C Texh	-0.974	-0.937	-0.953	-0.994	-0.956	-0.96	0.022
No.3 T/C Texh	-0.972	-0.875	-0.921	-0.984	-0.930	-0.94	0.044
No.4 T/C Texh	-0.967	-0.882	-0.932	-0.988	-0.932	-0.94	0.041
No.1 T/C Spd	0.995	0.972	0.977	0.989	0.996	0.99	0.011
No.2 T/C Spd	0.995	0.974	0.980	0.990	0.996	0.99	0.01
No.3 T/C Spd	0.996	0.973	0.980	0.993	0.996	0.99	0.01
No.4 T/C Spd	0.995	0.975	0.976	0.989	0.995	0.99	0.01
Scav air Pin	0.996	0.982	0.979	0.992	0.998	0.99	0.009
Scav air Fwd Tin	0.954	0.636	0.875	0.527	0.922	0.78	0.21
Scav air Aft Tin	0.925	0.926	0.967	0.629	0.990	0.89	0.147

표 3.7 실린더 평균배기가스온도의 PCO구간에서 각 실린더 배기가스온도의 CC

Table 3.7 CC of the cylinders exhaust gas temperature in a PCO ranges of the cylinder mean exhaust gas temperature

	Cyl MTexh						
	R1	R2	R3	R4	R5	MCC	SDCC
No.1 Cyl Texh	0.982	0.988	0.99	0.924	0.868	0.952	0.055
No.2 Cyl Texh	0.990	0.976	0.987	0.984	0.958	0.979	0.013
No.3 Cyl Texh	0.992	0.993	0.986	0.979	0.962	0.982	0.013
No.4 Cyl Texh	0.995	0.986	0.993	0.983	0.916	0.974	0.033
No.5 Cyl Texh	0.996	0.996	0.960	0.981	0.952	0.977	0.020
No.6 Cyl Texh	0.991	0.984	0.991	0.969	0.940	0.975	0.022
No.7 Cyl Texh	0.998	0.981	0.990	0.974	0.984	0.985	0.009
No.8 Cyl Texh	0.995	0.982	0.996	0.972	0.974	0.984	0.011
No.9 Cyl Texh	0.996	0.957	0.976	0.985	0.975	0.978	0.014
No.10 Cyl Texh	0.998	0.979	0.984	0.991	0.973	0.985	0.010

표 3.8 No.1 과급기회전수의 PCO구간에서 각 과급기 배기가스온도 의 CC
Table 3.8 CC of the other T/C SPD in a PCO ranges of the No.1 T/C SPD

	No.1 T/C SPD					
	R1	R2	R3	R4	MCC	SDCC
No.2 T/C Spd	0.998	0.998	0.991	1	0.997	0.004
No.3 T/C Spd	1	0.997	1	1	0.999	0.002
No.4 T/C Spd	0.998	0.999	0.992	0.998	0.997	0.003

표 3.9 Fwd 소기공기온도의 PCO구간에서 Aft 소기공기온도의 CC
Table 3.9 CC of the Aft scavenging air temperature in a PCO ranges of the Fwd scavenging temperature

	Scav air Fwd Tin					
	R1	R2	R3	R4	MCC	SDCC
Scav air Aft Tin	0.992	0.973	0.975	0.991	0.983	0.01

표 3.10 No.1 과급기 배기가스온도의 PCO구간에서 각 과급기 배기가스온도의 CC

Table 3.10 CC of the identical T/C exhaust temperatures in a PCO ranges of the No.1 T/C exhaust temperature

	No.1 T/C Texh							
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	MCC	SDCC
No.2 T/C Texh	0.999	0.995	1	0.991	0.943	1	0.988	0.022
No.3 T/C Texh	0.998	0.963	0.918	0.988	0.913	0.994	0.962	0.038
No.4 T/C Texh	0.995	0.944	1	0.988	0.966	0.994	0.962	0.022

표 3.11 소기공기압력의 PCO구간에서 소기공기온도의 CC

Table 3.11 CC of the scavenging air temperature in a PCO ranges of the scavenging air pressure

	Scav air Pin							
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	MCC	SDCC
Scav air Fwd Tin	0.964	0.971	0.982	0.967	0.956	0.997	0.973	0.014
Scav air Aft Tin	0.937	0.9	0.983	0.993	0.934	0.997	0.957	0.04

표 3.12 실린더 평균배기가스온도의 PCO구간에서 각 과급기 배기가스온도의 CC

Table 3.12 CC of the T/C exhaust gas temperatures in a PCO ranges of the cylinder mean exhaust gas temperature

	Cyl MTexh						
	R1	R2	R3	R4	R5	MCC	SDCC
No.1 T/C Texh	0.914	0.956	0.992	0.992	0.874	0.946	0.052
No.2 T/C Texh	0.872	0.954	0.989	0.992	0.864	0.934	0.062
No.3 T/C Texh	0.924	0.942	0.988	0.992	0.869	0.943	0.05
No.4 T/C Texh	0.923	0.956	0.992	0.986	0.892	0.950	0.042

표 3.13 실린더 평균배기가스온도의 PCO구간에서 소기공기온도의 CC
 Table 3.13 CC of the scavenging air temperatures in a PCO ranges of the cylinder mean exhaust gas temperature

	Cyl MTexh						
	R1	R2	R3	R4	R5	MCC	SDCC
Scav air Fwd Tin	0.97	0.956	0.969	0.985	0.959	0.968	0.011
Scav air Aft Tin	0.946	0.945	0.986	0.985	0.925	0.957	0.027

표 3.14 실린더 평균배기가스온도의 PCO구간에서 소기공기압력의 CC
 Table 3.14 CC of the scavenging air pressure in a PCO ranges of the cylinder mean exhaust gas temperature

	Cyl MTexh						
	R1	R2	R3	R4	R5	MCC	SDCC
Scav air Pin	0.857	0.946	0.988	0.995	0.812	0.92	0.081

표 3.15 PCO구간에 대한 계측항목 사이의 CC 분류
 Table 3.15 CC classification of the MIs in a PCO ranges

부하와의 CC		계열 간 CC	
MI	CC	MI	MCC
No.1 T/C SPD	0.99	No.1~No.4 T/C SPD	0.998
No.2 T/C SPD	0.99	No.1~No.4 T/C Texh	0.97
No.3 T/C SPD	0.99	No.1~No.10 Cyl Texh	0.977
No.4 T/C SPD	0.99	Scav air Pin/ No.1~No.4 T/C Texh	0.955
Scav air Pin	0.99	Scav air Fwd/Aft Tin	0.983
No1~No.4 T/C Texh	-0.95	Cyl Texh/T/C SPD	0.946
		Cyl Texh/Scav air Pin	0.92
		Cyl Texh/Scav air Tin	0.968

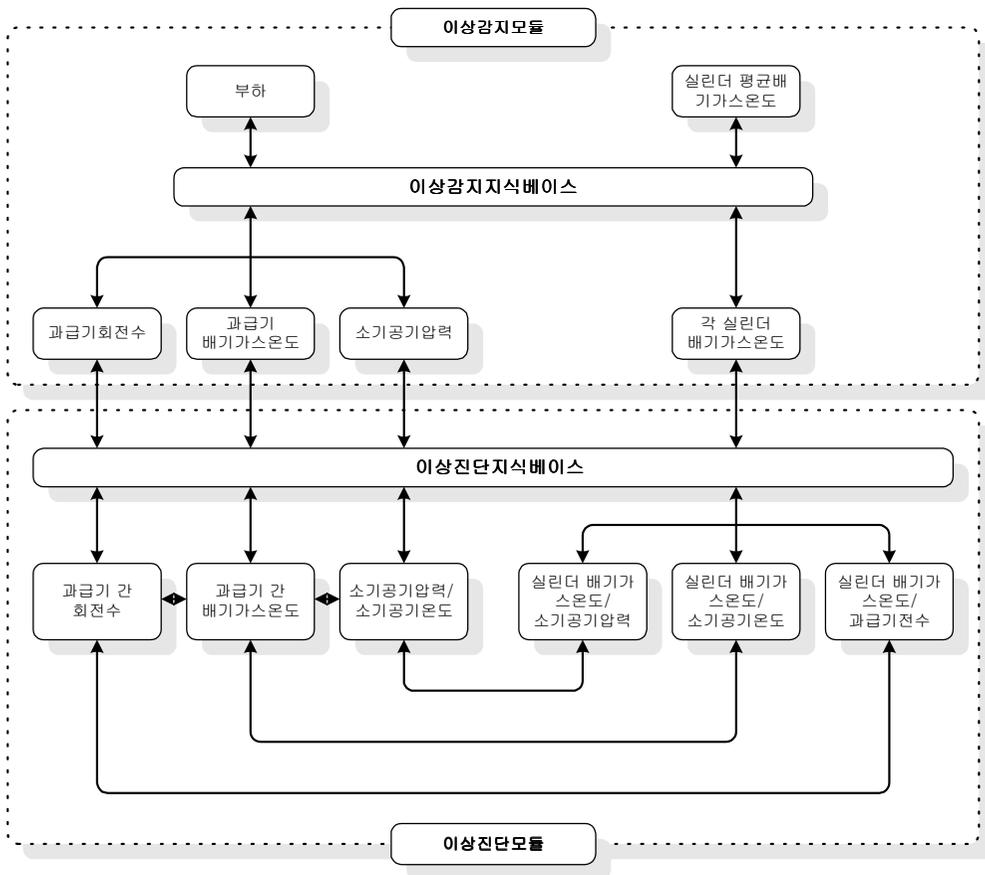


그림 3.18 통계적 분석기반 이상감지모듈과 이상진단모듈의 구조
 Fig. 3.18 Structure of the fault detection and diagnosis module based on statistical analysis

3.4 통계적 분석기반 이상감지 지식베이스와 이상진단 지식베이스

통계적 분석기법에 의한 이상감지모듈과 이상진단모듈을 구축하기 위해 우선 대상선박의 실선운항데이터를 기반으로 각 항목별 CC를 통해 데이터의 상관관계를 규정하였다. 이러한 상관관계를 CC로 규정함으로써 선박운항 중 실시간으로 수집되는 데이터를 감시하고, 계측항목사이의 상관관계의 변화를 검토함으로써 이상상태를 감지할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 표 3.15를 근간으로 감시데이터의 이상상태를 감지하기 위한 지식베이스를 나타내어보면 표 3.16과 같다. 표 3.16은 부하와 상관관계가 높은 항목뿐만 아니라 부하와 상대적으로 상관관계가 낮은 실린더 배기가스온도는 동일계열사이의 상관관계를 동시에 감시함으로써 이상데이터를 감지한다. 표 3.17은 이상감지 지식베이스를 통해 이상데이터가 감지되면 이상부분을 확인하기 위해 서로 상관관계가 높은 계측항목간의 상관관계를 검토함으로써 이상항목을 찾아내는 이상진단 지식베이스를 나타낸 것이다.

이상감지 지식베이스의 구축방법은 다음과 같다. 표 3.16에서 실린더 평균배기가스온도를 f_6 이라하고 f_6 MVSD의 PCOSDR의 변화폭이 FDSD (Fault Detection SD, 이상감지 SD)를 넘으면 FDR(이상감지구간)으로 설정하고, FDR구간에서 임의 실린더 배기가스온도 f_5 의 CC가 FDCC(Fault Detection CC, 이상감지 CC) 보다 낮은 경우 f_5 를 1차 이상상태로 인지하게 된다. FDCC는 감시항목의 FDR에 대한 CC가 정상범위에 있는지의 여부를 나타내는 CC로서 표 3.7~3.14에서 구해진 MCC와 3배의 SDCC의 합으로 각각 정해진다. f_5 와 f_6 의 CC가 FDCC보다 작다고 하여 고장이라고 판단할 수는 없으므로 f_5 와 동일계열인 f_{10} 과 f_6 의 CC가 FDCC보다 크면 f_5 와 f_6 의 CC만 작으므로 f_5 의 이상 확률이 높다고 판단된다. 또한 f_5 와 또 다른 동일계열 상호간 f_{12} 의 CC를 구하여 f_{12} 의 CC가 FDCC보다 크면 f_5 만 다르게 거동하고 있음이 확인되므로 f_5 고장을 확정할 수 있다. 이와 같은 방법으로 연소 관련항목 전체로 확대하여 표를 만들면 표

표 3.16 이상감지 지식 베이스

Table 3.16 Fault detection knowledge base

Rule No.	Rule
RL1	<i>If</i> f1SDRN = f1FDR and f2CC < f1 FDCC then f2=fault
RL2	<i>If</i> f1SDRN = f1FDR and f3CC < f1 FDCC then f3=fault
RL3	<i>If</i> f1SDRN = f1FDR and f7CC < f1 FDCC then f7=fault
RL4	<i>If</i> f6SDRN = f6FDR and f5CC < f6 FDCC then f5=fault
<p>* <i>Input variables</i> - f1 : Load f2 : T/C outlet temperature f3 : Scavenging air pressure f4 : Scavenging air temperature f5 : Cylinder outlet temperature f6 : Cylinders mean outlet temperature f7 : T/C Speed f8 : Other f2 f9 : Other f7 f10 : Other f5 f11 : Other f4 f12 : Another f10 f13 : Another f8 f14 : Another f9 SD : Standard deviation SDRN : SD range CC : Correlation coefficient FD : Fault detection FDCC : CC of FD FDR : FD range</p> <p>* <i>Output variable</i> - f2,f3,f4,f5,f7</p>	

3.16과 같은 이상감지 지식베이스를 구축할 수 있다. f5가 이상데이터로 감지되면 f5의 이상이 다른 항목에 기인하는 것일 수 있으므로 그림 3.18의 이상감지 모듈과 이상진단 모듈의 구조에 따라 표 3.15에서 정의된 실린더 배기가스 온도와 연관성이 높은 것으로 확인된 소기 공기압력(f3) 및 소기 공기 온도(f4) 등의 항목 사이의 상관관계 규칙을 순차적으로 조사하여 이상 원인이 되는 항목을 발견할 수 있게 된다. 이와 같이 연소 관련 항목 전반으로 확장하면 표 3.17과 같은 이상진단 지식베이스를 구축할 수 있다.

이상감지 지식베이스와 이상진단 지식베이스로부터 이상데이터로 분류되면 이상부분을 보다 구체적으로 확인하기 위해서 5장에서 다루게 될 의사결정 모듈을 통해 관련 항목들을 세밀히 조사하고 최종적으로 고장진단 결과를 출력한다.

표 3.17 이상진단 지식베이스

Table 3.17 Fault diagnosis knowledge base

Rule No.	Rule
RL5	If f2CC < f1 FDCC and f8CC ≥ f1 FDCC then f2=fault
RL6	If f2CC < f8 FDCC and f13CC ≥ f8 FDCC then f2=fault
RL7	If f7CC < f1 FDCC and f9CC ≥ f1 FDCC then f7=fault
RL8	If f7CC < f9 FDCC and f14CC ≥ f9 FDCC then f7=fault
RL9	If f5CC < f6 FDCC and f10CC ≥ f6 FDCC then f5=fault
RL10	If f5CC < f10 FDCC and f12CC ≥ f10 FDCC then f5=fault
RL11	If f3CC < f4 FDCC and f11CC ≥ f4 FDCC then f3=fault
RL12	If f5CC < f3 FDCC and f3CC ≥ f6 FDCC then f5=fault
RL13	If f5CC < f4 FDCC and f4CC ≥ f6 FDCC then f5=fault
RL14	If f5CC < f7 FDCC and f7CC ≥ f6 FDCC then f5=fault
RL15	If f4CC < f3 FDCC and f11CC ≥ f3 FDCC then f4=fault

3.5 전문가지식기반 이상진단지식베이스

통계적 분석기법에 의해 구축된 지식베이스는 계측항목의 데이터분포가 MVSD의 PCOSDR구간에서만 관련항목들과 상관관계를 검토하게 된다. 이상감지를 수행하는 구간은 이상의 조짐 및 진행상태를 조사하기위한 구간으로 대체로 감시데이터가 운전범위를 벗어나지 않는 경우가 대부분이지만 운전범위를 벗어나는 데이터도 포함하고 있다. 하지만 감시데이터는 통계적 분석기법에 의한 이상감지를 수행하지 않는 구간 즉, 독립변수에 해당하는 항목들의 감시데이터가 PCOSDR구간에 속하지 않는 구간에서 점진적으로 운전범위를 벗어나는 경우가 발생하게 된다. 이와 같은 경우 대상선박의 정상운행데이터의 단변량(Univariate)통계 분석을 이용하여 표 3.2에서 구해진 계측항목들의 평균과 표준편차를 기준으로 감시데이터의 평균과 표준편차의 변화정도를 조사함으로써 이상감지를 수행할 수 있다.

단변량 통계분석은 확률적인 반응을 가지는 하나의 반응변수(Response variable)를 과거의 데이터를 바탕으로 각각의 변수에 상한과 하한값을 설정해 놓고 새로운 측정변수 값이 지정된 범위를 벗어났는지의 여부를 조사함으로써 이상유무를 점검하는 방법이다[31]. 본 논문에서는 표 3.1로부터 계측항목의 모집단평균(PM)과 2배의 표준편차(PTSD) 합인 범위를 임계치로 설정하고 임계치 이내에 계측값이 존재할 경우 정상으로 판단하고 전문가 지식베이스에서는 M으로 표시한다. 또한 임계치를 높은 방향으로 벗어나는 경우를 H, 낮은 방향으로 벗어나는 경우를 L로 나타낸다. 감시데이터의 평균값이 H혹은 L의 경우에 대해 이상감지를 수행하고 이상데이터로 감지된 데이터는 전문가의 지식과 경험을 통해 구축된 전문가지식베이스를 활용하여 이상진단을 수행한다. 구축된 전문가지식베이스는 연소계통의 연소상태를 가장 먼저 인지할 수 있는 척도가 되는 배기가스온도의 이상감지 유무에 한정되어 설계되었다[17].

표 3.18은 전문가 지식과 경험을 토대로 작성된 전문가지식기반 이상진

단지식베이스를 나타낸 것이다. 표 3.18에서 부하 f_1 이 L, 과급기 배기가스 온도 f_2 가 L, 소기공기압력 f_3 이 M 혹은 H 그리고 소기공기 온도 f_4 가 L인 경우 배기가스계통에 이상이 발생하였음을 출력하게 된다. 이와 같은 방법으로 R14번까지 각 Rule을 수행하여 이상상태를 진단하게 되며 이상상태가 감지되면 의사결정모듈을 통해 관련계통을 조사하여 최종적으로 고장상태를 출력한다.

표 3.18 전문가지식기반 이상진단지식 베이스

Table 3.18 Fault diagnosis knowledge base based on expert knowledge

Rule No.	Rule
RL1	If $f_1=L$ and $f_2=L$ and $f_3=M$ and $f_4=L$, then $u=fault$
RL2	If $f_1=L$ and $f_2=L$ and $f_3=H$ and $f_4=L$, then $u=fault$
RL3	If $f_1=L$ and $f_2=L$ and $f_3=H$ and $f_4=M$, then $u=fault$
RL4	If $f_1=L$ and $f_2=M$ and $f_3=L$ and $f_4=L$, then $u=fault$
RL5	If $f_1=L$ and $f_2=M$ and $f_3=M$ and $f_4=L$, then $u=fault$
RL6	If $f_1=L$ and $f_2=M$ and $f_3=M$ and $f_4=M$, then $u=fault$
RL7	If $f_1=L$ and $f_2=M$ and $f_3=H$, then $u=fault$
RL8	If $f_1=L$ and $f_2=H$ then, $u=fault$
RL9	If $f_1=M$ and $f_2=M$ and $f_3=H$ and $f_4=L$, then $u=fault$
RL10	If $f_1=M$ and $f_2=H$ and $f_3=L$ and $f_4=L$, then $u=fault$
RL11	If $f_1=M$ and $f_2=H$ and $f_3=M$ and $f_4=L$, then $u=fault$
RL12	If $f_1=M$ and $f_2=H$ and $f_3=M$ and $f_4=M$, then $u=fault$
RL13	If $f_1=M$ and $f_2=H$ and $f_3=H$, then $u=fault$
RL14	If $f_1=H$ and $f_2=H$ and $f_3=H$ and $f_4=L$, then $u=fault$
* Input variables - f_1 : Load f_2 : T/C inlet temperature f_3 : Scavenging air pressure f_4 : Scavenging air temperature * Output variable - u : Exhaust gas temperature	

3.6 고장진단 알고리즘

통계적 분석기법을 이용하여 선박추진기관의 이상감지모듈과 이상진단 모듈을 구축하기 위해서는 숙련된 운전자의 지식과 경험과 같은 이상감지를 위한 지식베이스 구축이 필요하다. 본 논문에서는 이상감지를 위한 지식베이스를 구축하기 위해 통계적 분석기법을 이용하여 계통별 계측항목 사이의 상관관계를 규정하였다. 계측항목들의 이상상태를 감지하고 진단하기 위하여 전문가지식기반 지식베이스를 통한 정성적 이상진단 방법과 통계적 분석기반 지식베이스를 이용한 정량적 이상감지 및 이상진단 방법을 동시에 활용할 수 있다. 통계적 분석기반 지식베이스를 통해 이상감지 및 이상진단을 수행하는 과정을 살펴보면 다음과 같다.

선박추진기관의 연소계통에서 다른 계측항목에 영향을 주는 독립변수로 부하를 감시항목으로 선정하고, 부하와 상대적으로 연관성이 낮은 것으로 추정되는 항목들은 연관성이 높은 동일계열에서 대표항목들을 선정한다. 각각의 감시항목에 대해 구간별 평균과 표준편차 및 시간의 추이에 따른 MVSD를 구하고 MVSD의 값이 FSD를 넘는 시점부터 MVSD의 값이 최대가 되는 시점까지를 FDR로 설정하고 이 구간에서의 CC가 PCO이면 PCOSDR로 설정한다. 다음으로 설정된 FDR에 대해 연관성이 높은 항목사이의 CC를 계산하고 이상감지 지식베이스를 통해 항목들의 이상유무를 확인한다. 이 과정이 감시데이터의 이상상태를 감지하는 과정이다. 이때의 이상상태는 선박운항과정에서 외적환경 혹은 내적요인에 의해 일시적으로 계측항목이 비정상일 수 있으므로 이상감지 과정에서 이상으로 단정하기는 어렵다. 따라서 이와 같은 상황이 연속적으로 발생하는지의 여부를 확인하여 정해진 기간동안 지속적인 이상상태로 확인되면 이상상태로 규정한다. 이상데이터로 분류된 데이터는 이상데이터를 진단하기 위해 연관성이 높은 다른 항목에 대해서 이상감지과정과 같은 방법으로 계열사이의 CC를 구하고 이상진단 지식베이스를 통해 이상상태를 확인하는 이상

진단 과정을 거치게 된다. 예를 들면 표 3.4에서와 같이 부하의 PCOSDR 5개 구간에 대해 과급기회전수와의 CC를 구하고 CC들의 평균과 표준편차를 구하면 MCC는 0.989, SDCC는 0.008로 나타난다. 즉, 부하의 FDR에서의 부하와 과급기회전수의 CC가 0.965이상일 확률이 99.7[%]이상임을 나타낸다. 따라서 새롭게 측정되는 데이터의 이상상태를 확인하기 위해서는 부하와 연관성이 높은 항목일 경우 부하와 각 항목의 MVSD의 값이 FDSD를 넘으면 FDR을 설정하고, 설정된 FDR에서 감시항목사이의 CC를 구하여 FDCC를 벗어나는 경우를 확인하여 일정기간동안 연속적인 이상상태로 유지할 경우 이상상태로 규정한다. 본 논문에서는 연속적으로 3회 이상 이상상태로 유지할 경우 이상상태로 규정하였다. 이상상태로 분류된 데이터는 동일계열사이의 CC를 구하여 이상진단지식베이스를 통해 진단과정을 수행한다. 이때 감시데이터가 이상감지과정에서는 이상상태로 분류되었지만, 이상진단과정에서 이상데이터로 분류되지 않는다면 데이터의 상태를 정상상태로 분류 확정한다. 표 3.19는 정상운항 데이터로부터 얻은 항목사이의 CC를 통해 이상감지를 위한 MCC와 FDCC를 나타낸다.

표 3.19 연소계통 측정항목 사이의 MCC 및 FDCC

Table 3.19 MCC and FDCC of the MIs in a combustion system

		Cyl Texh	T/C SPD	T/C Texh	Scav air Pin	Scav air Tin
Load	MCC		0.99	-0.95	0.99	
	FDCC		0.97이상	-0.85이하	0.97이상	
Cyl Texh	MCC	0.97	0.94		0.92	0.96
	FDCC	0.86이상	0.82이상		0.79이상	0.91이상
T/C SPD	MCC	0.94	0.99			
	FDCC	0.82이상	0.98이상			
T/C Texh	MCC			0.97		
	FDCC			0.9이상		
Scav air Pin	MCC	0.92				0.97
	FDCC	0.79이상				0.89이상
Scav air Tin	MCC	0.96			0.97	
	FDCC	0.91이상			0.89이상	

그림 3.19는 이상감지 지식베이스와 이상진단 지식베이스를 이용하여 이상 감지 및 이상진단을 수행하는 절차를 나타낸 것이다.

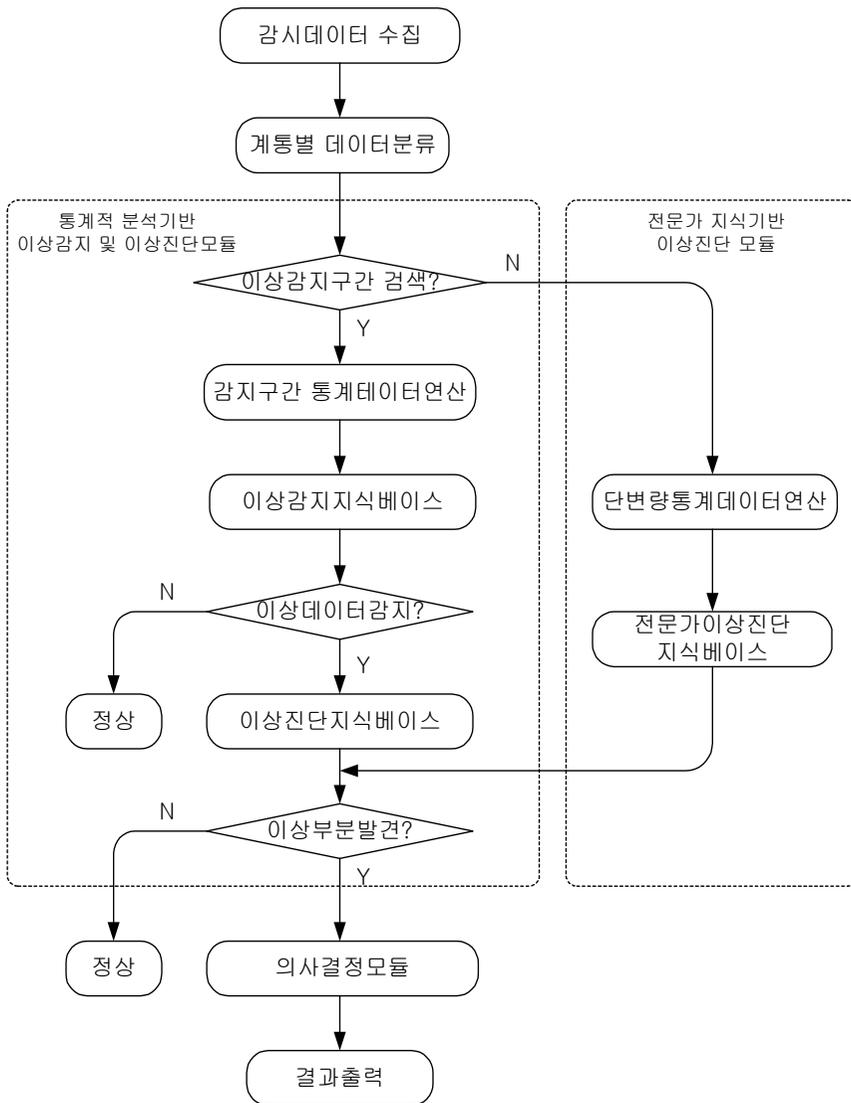


그림 3.19 고장진단모듈의 흐름도

Fig. 3.19 Flowchart of the fault diagnosis system

제 4장 이상감지 및 이상진단 시물레이션

4.1 통계적분석기반 이상감지 및 이상진단을 위한 실험

선박용 디젤기관의 계통별 분류를 통해 계통별 계측항목 간 상관관계를 정량적으로 표현가능하다는 사실을 3장에서 알아보았다. 이를 통해 구성된 이상감지 지식베이스와 이상진단 지식베이스는 과거 정상운항데이터를 기반으로 설계되었으며 실시간으로 수집되는 데이터의 이상상태를 감지하며 이상진단을 수행할 수 있을 것으로 예상된다. 이상감지 및 이상진단 성능을 확인하기 위하여 본 실험에서는 실선운항데이터의 운전범위를 벗어나지 않고 통계적 특성이 유사하도록 발생된 정규분포난수를 포함한 데이터집합을 대상으로 이상감지와 이상진단 실험을 행한다.

본 논문에서 사용하는 운항데이터는 모두 정상상태의 데이터이므로 본 논문에서 제안한 통계적 분석기법을 이용한 이상감지 및 이상진단을 실험하기 위하여서는 비정상적인 데이터를 발생하여야 한다. 따라서 각 계측항목의 모집단과 통계적 성질이 같은 정규분포난수를 발생하여 시물레이션을 행한다. 발생한 정규분포난수는 모집단과 통계적 성질은 같지만 시스템의 특성을 포함하고 있지 않으므로 계측항목과는 상관관계가 낮게 된다. 그러나 통계적 성질은 같으므로 비정상데이터로 구분하기 어려운 데이터집합이다. 정규분포난수(NDRN)는 다음과 같이 3가지 방법에 의해 발생하여 사용하였다.

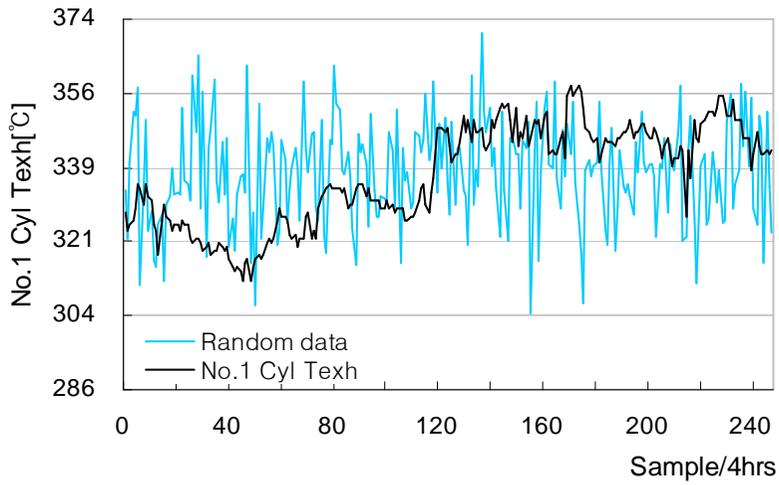
- (1) 모집단 전체구간(PTR)의 평균과 표준편차로 NDRN를 발생.
(TNDRN : Total NDRN으로 정의함)
- (2) 모집단을 임의구간으로 나누고 임의구간의 평균과 표준편차로 NDRN 발생.(PNDRN : Partial NDRN으로 정의함)
- (3) 부하 및 실린더 배기가스온도 등의 독립변수로부터 구해진 감지구간

에서의 MA와 SD로 NDRN 발생.(FNDRN : Fault NDRN으로 정의함)

그림 4.1~4.5는 TNDRN과 PNDRN에 의한 실린더 배기가스온도와 과급기회전수, 과급기 배기가스온도, 소기공기압력 및 소기공기온도에 대하여 발생한 데이터를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 4.6~4.9는 FNDRN에 의한 데이터를 구간별로 발생시켜 나타낸 그래프이다. 그림에서 TNDRN은 PTR에서 얻어진 계측항목의 평균과 표준편차를 이용하여 PTR 전체에 NDRN을 발생시켜 나타낸 데이터 집합을 의미하며, PNDRN은 PTR을 50개 데이터 집합의 구간들로 나누어 각 구간의 평균과 표준편차에 해당하는 NDRN을 발생시켜 나타낸 데이터 집합이다. FNDRN은 3장에서 FDR 구간을 선정하는 알고리즘을 통해 그림 3.17에서와 같은 방법으로 구해진 FDR의 3배로 확장시켜 NDRN을 발생시킨 데이터 집합으로 구성되어 있다. 예를 들면 그림 4.7에서 과급기회전수의 첫 번째 FDR이 10개 데이터로 구성되어 있다고 가정하면 FDR 좌우로, 설정된 FDR만큼 구간을 확장하여 30개의 데이터 구간에 대하여 NDRN을 발생시켜 나타낸 것이다.

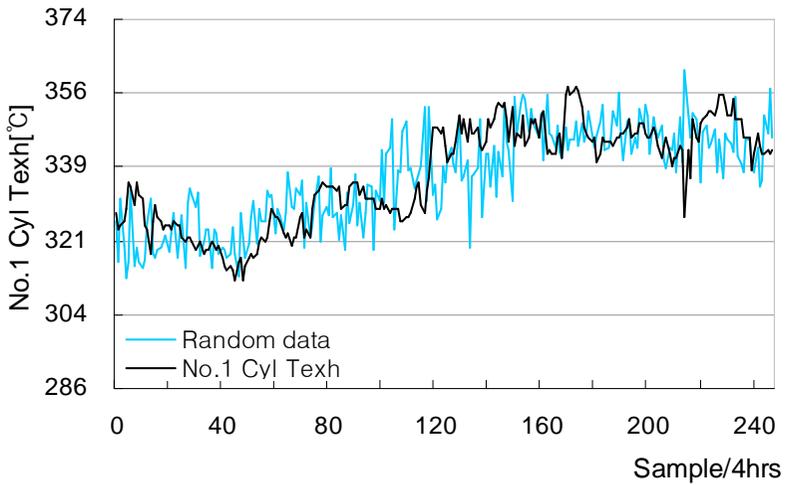
본 실험에서는 이상감지를 위해 부하와 No.1 실린더 배기가스온도 및 평균배기가스온도의 MVSD에 의해 설정된 FDR을 사용한다. 또한 감지된 이상상태를 진단하기 위한 독립변수로서 소기공기압력, No.1 과급기회전수, 과급기 배기가스온도 및 실린더 평균배기가스온도의 MVSD에 의해 설정된 FDR을 사용하였다. 각 독립변수의 FDR구간에서 각각 3가지 방법으로 발생한 정규분포난수, 즉 TNDRN, PNDRN 및 FNDRN로 계측항목간의 CC를 각각 구한다. 구해진 CC는 3장에서 설계된 이상감지모듈에 의해 이상감지가 수행되고, 이상진단모듈에 의해 이상진단이 수행된다.

표 4.1~4.9는 각 독립변수의 MVSD에 대한 FDR에서 실험데이터와의 CC를 나타낸 것이다. 표에서 'Reference CC'는 표 3.19에서 정의된 이상감지 및 이상진단을 위한 FDCC를 나타낸 것이다.



(a) No.1 실린더 배기가스온도의 TNDNRN과 OPD

(a) No.1 TNDNRN and OPD of the cylinder exhaust gas temperature

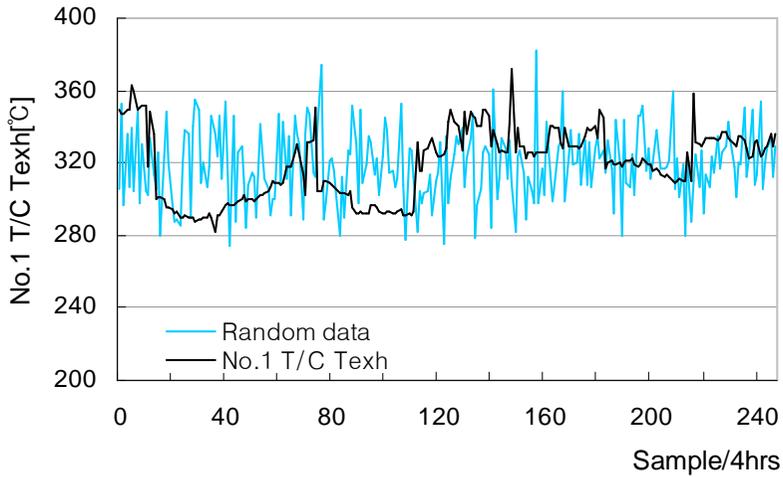


(b) No.1 실린더 배기가스온도의 PNDNRN과 OPD

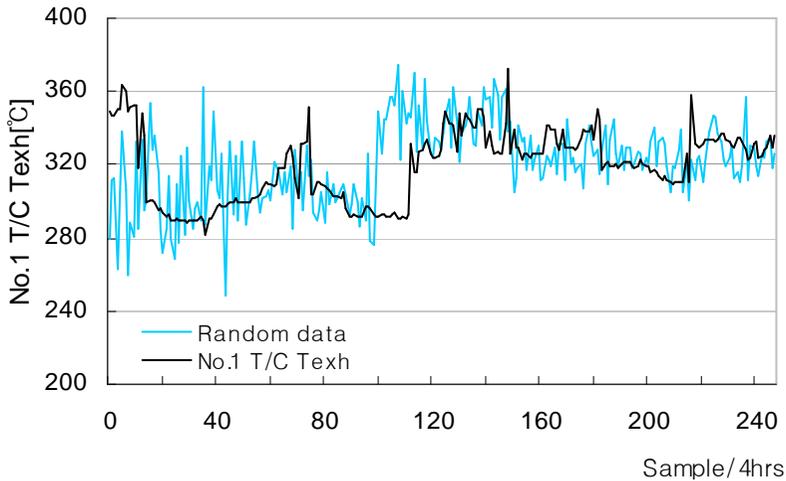
(b) PNDNRN and OPD of the No.1 Cylinder exhaust gas temperature

그림 4.1 No.1 실린더 배기가스온도의 TNDNRN, PNDNRN과 OPD

Fig. 4.1 TNDNRN, PNDNRN and OPD of the No.1 Cylinder exhaust gas temperature

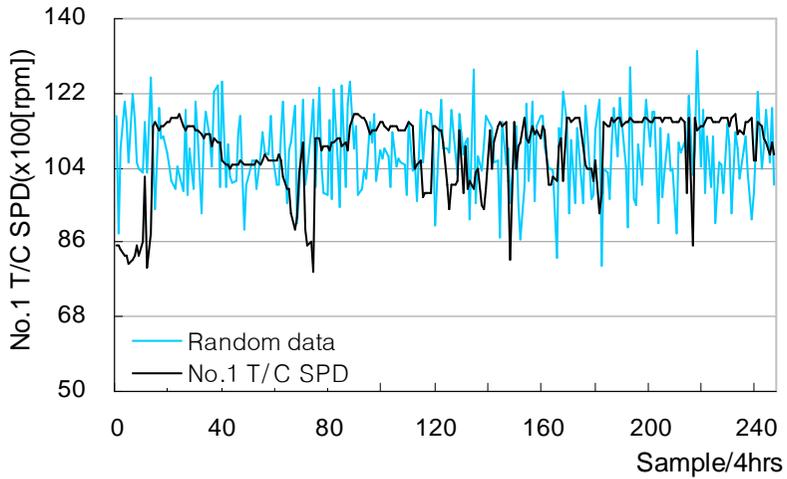


(a) No.1 과급기 배기가스온도의 TNDRN과 OPD
 (b) TNDRN and OPD of the No.1 T/C exhaust gas temperature

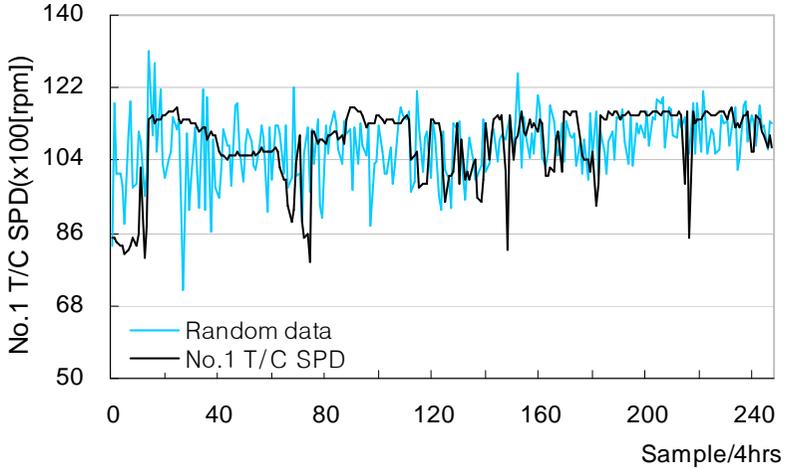


(b) No.1 과급기 배기가스온도의 PNDRN과 OPD
 (b) No.1 PNDRN and OPD of the T/C exhaust gas temperature

그림 4.2 No.1 과급기 배기가스온도의 TNDRN, PNDRN과 OPD
 Fig. 4.2 No.1 TNDRN, PNDRN and OPD of the T/C exhaust gas temperature

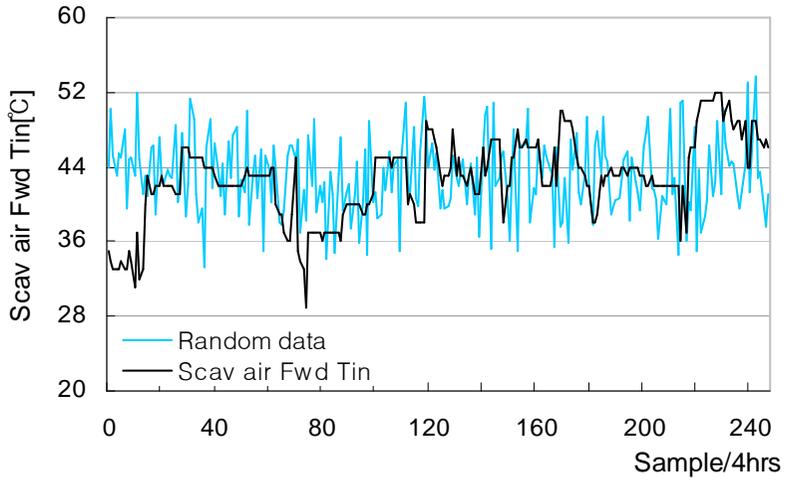


(a) No.1 과급기회전수의 TNRN과 OPD
 (a) TNRN and OPD of the No.1 T/C speed



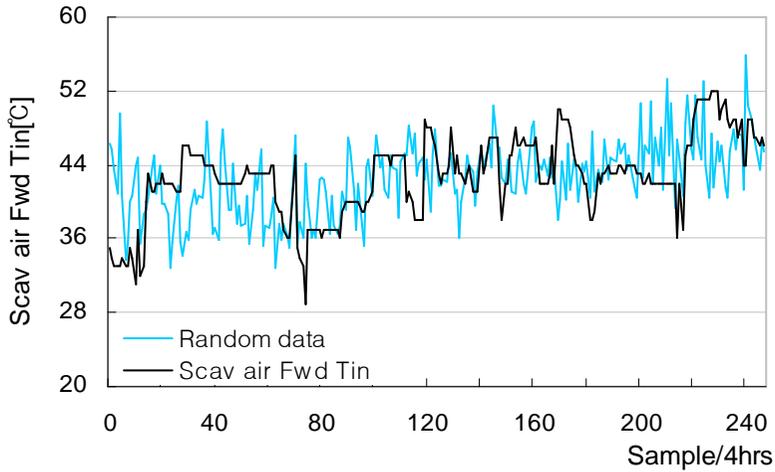
(b) No.1 과급기회전수의 PNRN과 OPD
 (b) PNRN and OPD of the No.1 T/C speed

그림 4.3 No.1 과급기회전수의 TNRN, PNRN과 OPD
 Fig. 4.3 TNRN, PNRN and OPD of the No.1 T/C speed



(a) Fwd 소기공기온도의 TNDRN과 OPD

(a) TNDRN and OPD of the scavenging air Fwd temperature

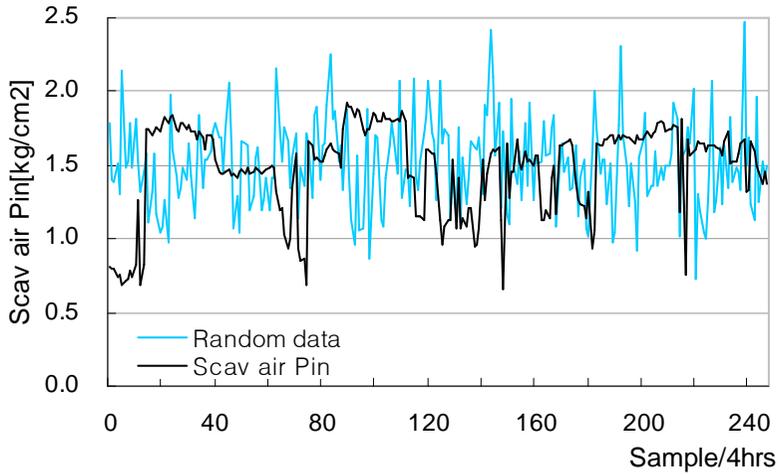


(b) Fwd 소기공기온도의 PNDRN과 OPD

(b) PNDRN and OPD of the scavenging air Fwd temperature

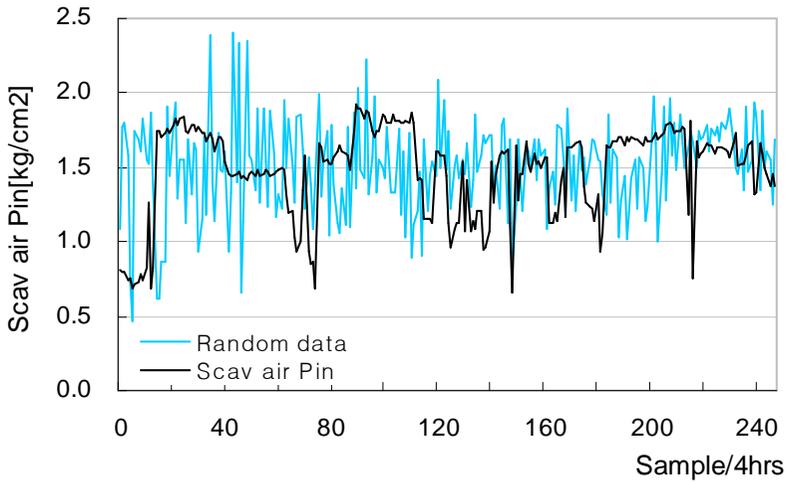
그림 4.4 Fwd 소기공기온도의 TNDRN, PNDRN과 OPD

Fig. 4.4 TNDRN, PNDRN, and OPD of the scavenging air Fwd temperature



(a) 소기공기압력의 TNDRN과 OPD

(a) TNDRN and OPD of the scavenging air pressure



(b) 소기공기압력의 PNDRN과 OPD

(b) PNDRN and OPD of the scavenging air pressure

그림 4.5 소기공기압력의 TNDRN, PNDRN과 OPD

Fig. 4.5 TNDRN, PNDRN, and OPD of the scavenging air pressure

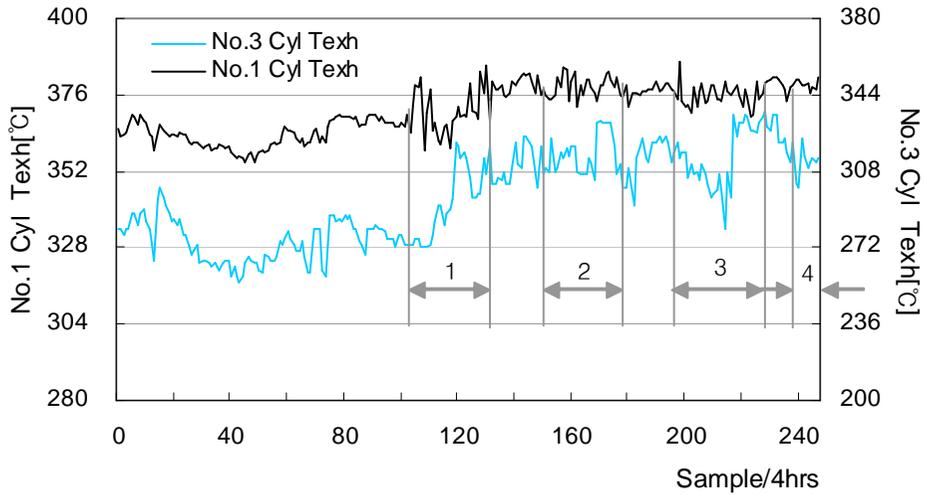


그림 4.6 No.1 실린더 배기가스온도의 FNRN과 OPD No.3 실린더 배기가스온도 OPD

Fig. 4.6 No.3 FNRN of the No.1 cylinder exhaust gas temperature and OPD of the No.3 cylinder exhaust gas temperature

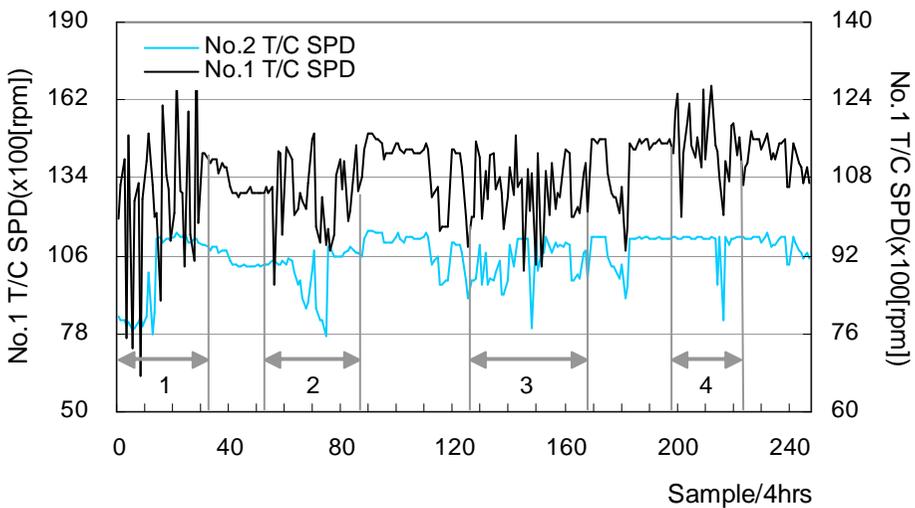


그림 4.7 No.1 과급기회전수의 FNRN과 No.2 과급기회전수의 OPD
Fig. 4.7 FNRN of the No.1 T/C speed and OPD of the No.2 T/C speed

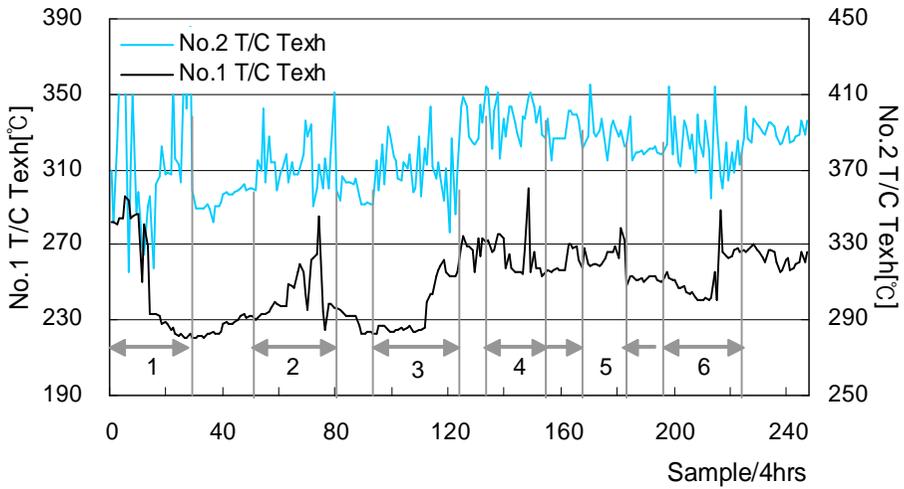


그림 4.8 No.1 과급기 배기가스온도의 FNRN과 No.2 과급기 배기가스온도의 OPD

Fig. 4.8 FNRN of the No.1 T/C exhaust gas temperature and OPD of the No.2 T/C exhaust gas temperature

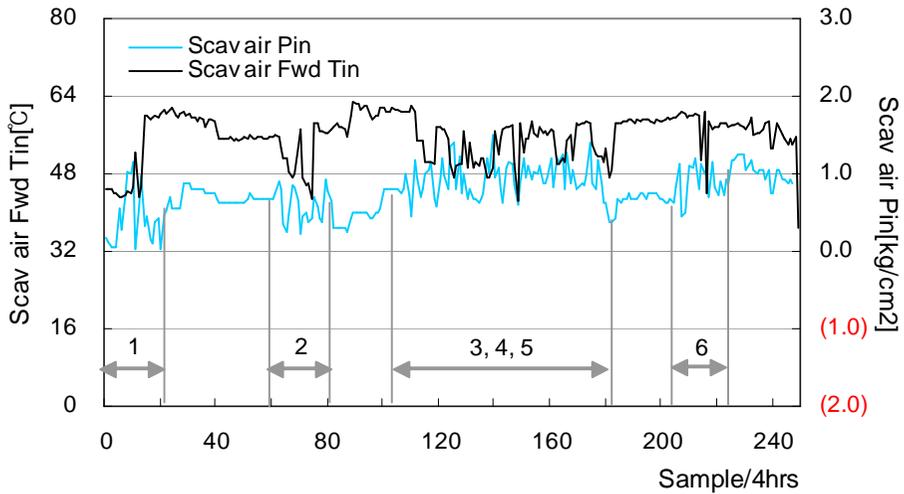


그림 4.9 Fwd 소기공기온도의 FNRN과 소기공기압력의 OPD

Fig. 4.9 FNRN of the scavenging air Fwd temperature and OPD of the scavenging air pressure

표 4.1 No.1 실린더 배기가스온도의 TNDRN과 PNDRN에 의한 No.2 실린더 배기가스온도의 CC

Table 4.1 CC of the No.2 cylinder exhaust gas temperature in a TNDRN and PNDRN of the No.1 cylinder exhaust gas temperature

No.2 Cyl Texh	No.1 Cyl Texh				
	R1	R2	R3	R4	R5
Reference CC	0.998	0.979	0.984	0.991	0.973
TNDRN	-0.565	0.325	-0.365	-0.421	0.510
변동률[%]	-156.6	-66.7	-137.1	-142.5	-47.6
PNDRN	-0.365	-0.066	-0.182	-0.007	-0.191
변동률[%]	-136.6	-106.8	-118.5	-100.7	-119.6

표 4.2 No.1 과급기회전수의 TNDRN과 PNDRN에 의한 No.2 과급기회전수의 CC

Table 4.2 CC of the No.2 T/C speed in a TNDRN and PNDRN of the No.1 T/C speed

No.2 T/C SPD	No.1 T/C SPD			
	R1	R2	R3	R4
Reference CC	0.998	0.999	0.992	0.998
TNDRN	0.091	-0.149	0.075	0.157
변동률[%]	-90.9	-115	-92.4	-82.3
PNDRN	0.770	-0.013	-0.121	0.256
변동률[%]	-22.8	-101.3	-112.2	-74.3

표 4.6 Fwd 소기공기온도의 TNDRN과 PNDRN에 의한 Aft 소기공기온도의 CC

Table 4.6 CC of the scavenging air Aft temperature in a TNDRN and PNDRN of the scavenging air Fwd temperature

Scav air Aft Tin	Scav air Fwd Tin			
	R1	R2	R3	R4
Reference CC	0.992	0.973	0.975	0.991
TNDRN	-0.138	0.266	0.159	-0.304
변동률[%]	-113.9	-72.7	-83.7	-130.7
PNDRN	0.309	0.264	-0.339	0.311
변동률[%]	-68.8	-72.9	-134.8	-68.6

표 4.4 No.1 과급기 배기가스온도의 TNRN과 PNDRN에 의한 No.2 과급기 배기가스온도의 CC

Table 4.4 CC of T/C No.1/No.2 Exhaust T(°C) in TNRN and PNDRN

No.2 T/C Texh	No.1 T/C Texh					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Reference CC	0.998	0.963	0.918	0.988	0.913	0.994
TNRN	0.134	0.014	-0.465	0.108	0.354	0.255
변동률[%]	-86.6	-98.5	-150.7	-89	-61.2	-74.3
PNDRN	-0.283	0.227	-0.189	-0.113	-0.086	0.080
변동률[%]	-128.4	-76.4	-120.6	-111.4	-109.4	-91.9

표 4.5 소기공기압력의 TNRN과 PNDRN에 의한 Fwd 소기공기온도의 CC

Table 4.5 CC of the scavenging air Fwd temperature in a TNRN and PNDRN of the scavenging air pressure

Scav air Fwd Tin	Scav air Pin					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Reference CC	0.964	0.971	0.982	0.967	0.956	0.997
TNRN	-0.253	0.288	0.514	0.167	-0.017	0.210
변동률[%]	-126.2	-70.3	-47.7	-82.7	-101.8	-78.9
PNDRN	-0.937	0.051	0.325	0.392	0.114	-0.036
변동률[%]	-197.2	-94.7	-66.9	-90.5	-88	-103.6

표 4.3 소기공기압력의 FNDRN에 의한 Fwd 소기공기온도의 CC

Table 4.3 CC of the scavenging air Fwd temperature in a FNDRN of the scavenging air pressure

	Scav air Pin					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Reference CC	0.964	0.971	0.982	0.967	0.956	0.997
Scav air Fwd Tin	-0.702	0.021	-0.149	0.432	-0.446	-0.275
변동률[%]	-172.8	-97.8	-115.2	-35.5	-146.6	-127.6

표 4.7 No.3 실린더 배기가스온도의 FNDRN에 의한 No.1 실린더배기가스 온도의 CC

Table 4.7 CC of the No.1 cylinder exhaust gas temperature in a FNDRN of the No.3 cylinder exhaust gas temperature

	No.3 Cyl Texh			
	R1	R2	R3	R4
Reference CC	0.992	0.993	0.986	0.979
No.1 Cyl Texh	0.237	0.385	-0.299	-0.352
변동률[%]	-76.1	-61.2	-130.3	-015.7

표 4.8 No.2 과급기회전수의 FNDRN에 의한 No.1 과급기회전수의 CC

Table 4.8 CC of the No.2 T/C speed in a FNDRN of the No.1 T/C speed

	No.2 T/C SPD			
	R1	R2	R3	R4
Reference CC	0.998	0.998	0.991	1
No.1T/C SPD	0.240	0.297	-0.078	0.387
변동률[%]	-75.9	-70.2	-107.9	-61.3

표 4.9 No.2 과급기 배기가스온도의 FNDRN에 의한 No.1 과급기배기가스 온도의 CC

Table 4.9 CC of the No.2 T/C exhaust gas temperature in a FNDRN of the No.1 T/C exhaust gas temperature

	No.2 T/C Texh					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Reference CC	0.999	0.995	1	0.991	0.943	1
No.1 T/C Texh	-0.096	-0.137	-0.070	0.307	0.068	-0.187
변동률[%]	-109.6	-113.7	-107	-69	-92.8	-118.7

4.2 실험결과 고찰

선박용 디젤기관의 이상감지모듈과 이상진단모듈을 설계하기 위해 3장에서는 정상운행데이터를 기반으로 통계적 특성을 분석하여 계측항목사이의 연관성을 CC로 표현함으로써 이상감지 및 이상진단을 위한 지식베이스를 설계할 수 있었다. 그 결과 부하와 상관관계가 높은 항목들과 동일계열사이의 상관관계가 높은 항목들로 분류할 수 있었다. 이상감지 및 이상진단 성능을 확인하기 위해서는 우선 감시데이터로부터 이상상태를 신뢰성 있게 감지할 필요가 있다. 4.1절의 실험에서는 감시데이터가 운전범위를 벗어나지 않고 다른 항목과 통계적 특성이 유사한 NDRN을 포함한 데이터집합을 발생하여 이상감지실험을 행하였다. 이 경우 운전자는 감시데이터가 운전범위를 벗어나지 않음으로 인해 이상데이터로 감지하기 어려우며 시계열에 의한 그래프분석을 통해서도 통계적 성질이 같으므로 이상상태를 찾아내기가 어렵다. 하지만 실험에서는 정상운행데이터로부터 계측항목사이의 상관관계를 규정한 지식베이스를 이용하여 감시데이터의 감시구간을 선정하고, 이상의 조짐이 있는 데이터 항목을 실시간으로 감시하고 조사함으로써 이상상태가 감지되고 있음을 확인할 수 있었다.

이상감지를 위한 지식베이스는 2장에서 분류된 선박기관실의 계통에 대하여 상관관계가 높은 항목들로만 구성되어 있다. 따라서 상관관계가 높은 계측항목이 실시간으로 계측될 때 계측항목사이의 CC가 감시구간 내에서 FDCC이상을 유지하지 않으면 이상데이터로 분류하게 된다. 예를 들면, 이상감지지식베이스를 통해 감시데이터가 이상상태로 감지되었는지를 확인하기 위하여 표 4.7에 나타낸바와 같이 실린더 배기가스온도의 경우, 실린더사이의 CC는 정상운행데이터의 통계적 분석으로부터 평균 0.95이상의 높은 CC를 가지고 거동한다. 하지만 실험에서 FNDRN로 발생된 데이터가 입력되는 경우에는 FDR구간에서의 CC가 각각 0.237, 0.385, -0.299, 그리고 -0.352와 같이 낮은 PCO와 NCO를 갖는 관계로 나타난다.

이와 같이 CC가 FDCC 이하의 상태에서 3회 이상동안 지속적으로 유지하게 되면 이상데이터로 분류되어 이상감지가 이루어진다. 실린더 배기가스온도 뿐만 아니라 표 4.6, 표 4.8과 표 4.9의 과급기 배기가스온도 및 과급기회전수, 소기공기압력의 경우에도 각 항목 FDR에서의 CC가 3회 이상 FDCC 이하의 값을 유지함으로써 이상감지가 수행됨을 알 수 있다.

감시데이터가 이상감지 지식베이스를 통해 이상데이터로 분류되면 다음 단계로 이상진단 지식베이스에 의해 감지된 이상상태 데이터가 고장인지를 확인하여 이상의 원인이 되는 부분을 찾아내게 된다. 이상진단 지식베이스는 이상감지 지식베이스에서 정의되어 있지 않은 동일계열과 관련계통 항목사이의 상관관계를 구체적으로 규정해 놓은 것으로, 이상감지 지식베이스로부터 분류된 이상데이터는 다른 항목들과의 상관관계를 검토함으로써 자체 이상인지 다른 항목의 문제로 발생한 이상인지 아니면 정상상태인지의 여부가 진단된다.

본 실험에서 이상데이터로 분류된 No.1 실린더 배기가스온도는 그림 3.19에서와 같이 이상진단 지식베이스에서 실린더 배기가스온도와 높은 연관성을 갖는 동일계열 No.2~No.10 및 평균 실린더 배기가스온도와와의 CC를 구하여 이상감지 과정과 동일한 방법으로 이상 유무를 검토한다. 동일계열 No.2~No.10 및 평균 실린더 배기가스온도에 이상상태가 발견되지 않으면 실린더 배기가스온도와 상관관계가 높은 소기공기압력 및 소기공기온도, 과급기회전수와와의 CC를 순차적으로 검토하여 이상의 원인이 되는 지점을 검색하게 된다. 본 실험에서는 표 4.6의 No.1 실린더에 대해서만 난수를 발생하였으므로 이상진단 지식베이스를 통해 진단하면 다른 관련항목들은 감지구간별로 0.9이상의 높은 CC를 지속적으로 유지하고 있으며, 따라서 최종적으로는 No.1 실린더 배기가스온도를 이상상태로 규정하고 이상결과를 출력하게 된다.

FDR 및 이상데이터 지속기간은 다음 절의 프로그램에 의한 실험시스템에서 사용자에게 의해 대상선박의 특성에 따라 설정이 가능하도록 구성되

어 있다. 그림 4.10~4.13은 실린더 배기가스온도, 과급기회전수, 과급기 배기가스온도, 소기공기온도와 소기공기압력의 FDR만을 축출하여 정상상태CC(Reference CC)분포와 FNDRN의 CC를 나타낸 것이다. 그래프에서 정상상태의 CC는 정의된 FDCC이상의 구간에서 거동하며 이상상태의 CC는 FDCC 이하인 것을 확인할 수 있다.

본 실험에서 계측항목사이의 상관관계는 정상운항 시 항상 일정한 CC를 유지하고 있는 사실을 근거로 특정 항목에 NDRN을 발생하여 실험을 해 본 결과 지식베이스로부터 이상데이터로 분류됨을 알 수 있었다. 실제 그래프를 통해 관찰하였을 경우 직관적으로 데이터 이상을 감지할 수 있는 경우와 이상상태를 감지하지 못하는 경우에도 감시데이터가 이상상태로 분류되며 이상진단지식베이스로부터 상관검토를 거쳐 이상상태를 규정할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 최종 의사결정모듈을 거쳐 고장부분을 세부적으로 확인함으로써 고장개소를 발견할 수 있다.

4.3 실험시스템 구축

3장에서 설계된 이상감지지식베이스와 이상진단지식베이스 구축을 위한 알고리즘을 통해 컴퓨터 프로그램에서 자동적으로 고장진단을 수행할 수 있도록 컴퓨터 시뮬레이터 FMS(Fault management system)를 구성하였다. 사용된 프로그램은 마이크로소프트사의 VC++6.0이 사용되었으며 데이터베이스는 동사의 MS Access를 이용하여 구축하였다.

선박운항데이터는 실시간으로 데이터베이스에 기록되며 수집된 데이터는 계통별로 분류되어 해당 데이터베이스 테이블에 재구성되어 저장된다. 계통별 독립변수로부터 이상감지구간을 검색하여, 감지구간에 대한 평균, 표준편차, 이동표준편차 및 선택된 계측항목사이의 상관계수 등과 같은 통계적 분석 데이터들을 계산해 낸다. 이들 데이터는 설계된 알고리즘에 따라 정상운항 데이터로부터 구축된 이상감지지식베이스와 이상진단지식

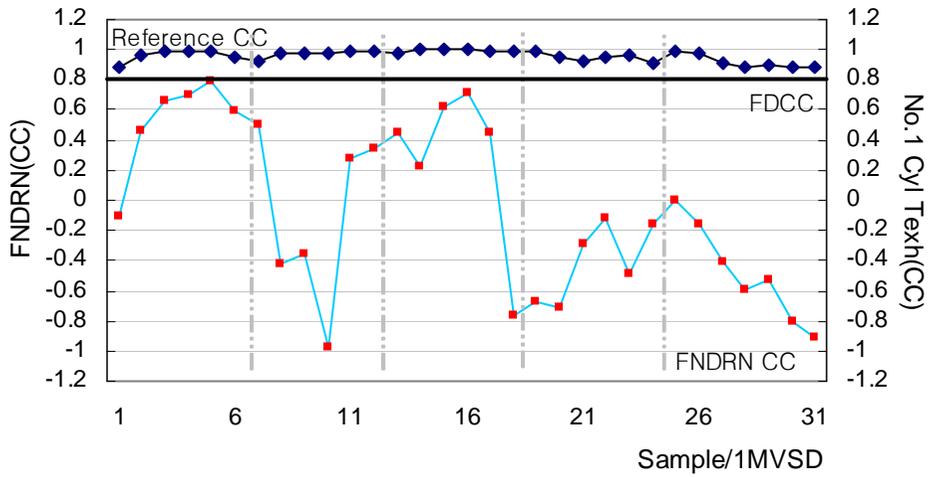


그림 4.10 No.1 실린더 배기가스온도의 기준CC와 FNDNRN CC
 Fig. 4.10 Reference CC and FNDNRN CC of the No.1 cylinder exhaust gas temperature

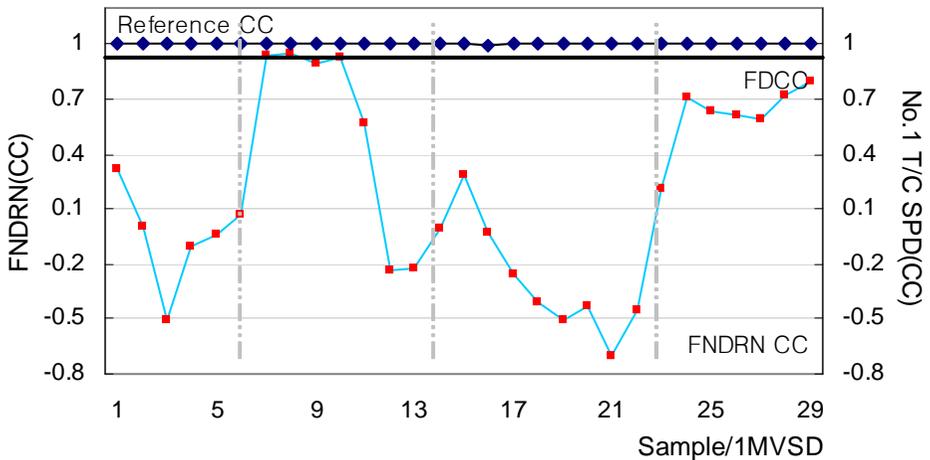


그림 4.11 No.1 과급기회전수의 기준CC와 FNDNRN CC
 Fig. 4.11 Reference CC and FNDNRN CC of the No.1 T/C speed

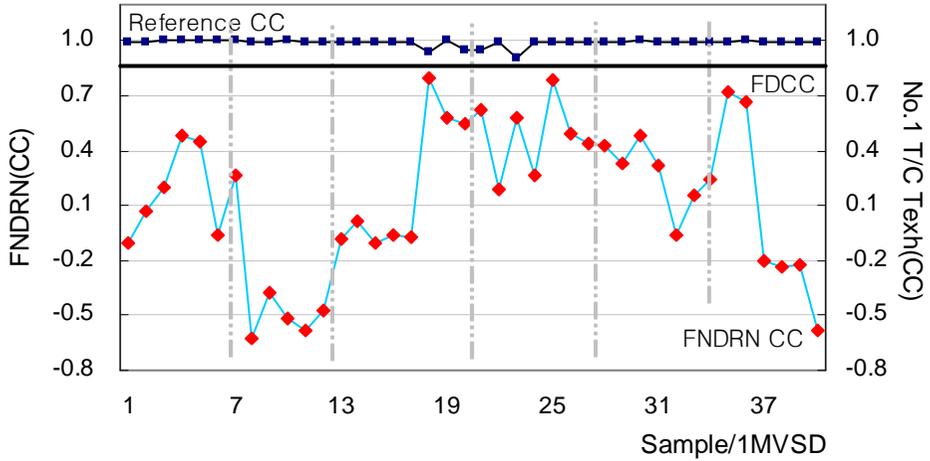


그림 4.12 No.1 과급기 배기가스온도의 기준CC와 FNDNRN CC
 Fig. 4.12 Reference CC and FNDNRN CC of the No.1 T/C exhaust gas temperature

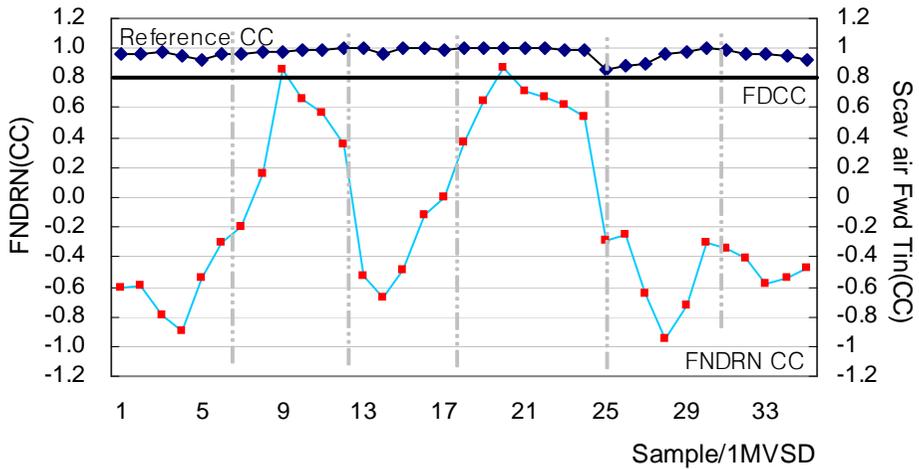


그림 4.13 Fwd 소기공기온도의 기준CC와 FNDNRN CC
 Fig. 4.13 Reference CC and FNDNRN CC of the scavenging air Fwd temperature

베이스를 통해 실시간 감시된다. 감지된 데이터는 이상진단과정을 거쳐 최종적으로 이상유무를 판단하여 화면에 표시하게 된다. 또한 이상상태의 감지 및 진단과정과 결과를 화면에 출력하며 이를 이용하여 예방정비일정에 필요한 기초 자료로 활용 할 수 있도록 구성되어 있다.

이상데이터를 구분하기 위한 각종 파라미터, 즉 FDR설정에 필요한 각 파라미터 및 FDCC는 새로운 정상운항데이터가 입력되면 사용자의 선택에 따라 자동적으로 각 파라미터 값들이 계산된다. 새롭게 계산된 파라미터 값은 이상감지 및 이상진단에 필요한 설정구간을 변경하여 지식베이스를 갱신할 수 있다. 다음은 FMS의 간단한 설명을 나타낸 것이다.

(1) Engine Reference 설정을 위한 화면

그림 4.15는 기관의 초기 참조값의 상태를 표시하거나 운전자에 의해 필요한 기초자료를 설정할 수 있도록 구성된 화면을 나타낸 것이다. 그림에서 'Sea Trial Reference Set'부분에서는 부하의 선형화 구간(50~75[%], 75~100[%])에 따라 Min/Max값을 설정할 수 있도록 구성되어 있다. 'Historical Ref Status for Fault Detection'부분에서는 H해운 선박의 과거 Log Book 데이터로부터 추출된 각 계통별 계측항목들의 통계적 분석데이터(Mean, SD, 및 SMA와 SMVSD, CC 등)를 이용하여 이상감지를 위한 참조값을 나타낸 것이다. 또한 데이터베이스에 저장된 과거 운항데이터 값을 읽어 들여 위와 같은 이상감지를 위한 참조값을 사용자의 선택에 따라 자동으로 계산하며, 갱신된 데이터를 통해 재설정 할 수 있다.

'BackUp File Save Mode'는 운항데이터의 이상 진단과정에 필요한 주요데이터를 설정된 시간에 따라 자동적으로 파일을 저장하거나, 필요한 시점에 수동으로 엑셀파일형태로서 저장할 수 있도록 구성되어 있다. 저장되는 각 계통별 계측항목의 주요데이터는 MA, MVSD, FDR에 의해 감지된 이상데이터 리스트, 그리고 CC 등이 있다.

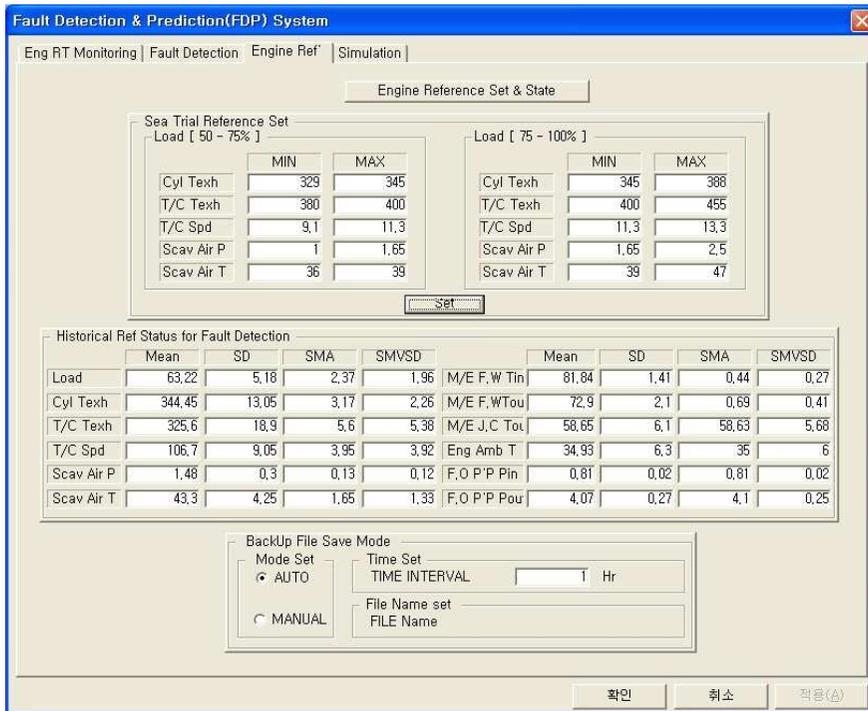


그림 4.15 이상감지 지식베이스의 설정 및 상태 화면

Fig. 4.15 State and parameters set window of the fault detection knowledge base

(2) Real Time Monitoring 화면

그림 4.16은 실시간으로 기관의 계통별 계측항목 데이터의 추이를 확인하기 위한 화면이다. 연소계통의 경우 부하와 상관관계를 알아보기 위하여 계측항목을 선택하면 시계열데이터의 흐름을 그래프로 볼 수 있다. 선택된 연소계통의 계측항목들은 MA와 MVSD가 실시간으로 연산되어 화면에 표시된다. 오른쪽의 열교환기계통과 전동기 및 펌프계통 또한 같은 방식으로 실시간 계측항목의 상태를 확인할 수 있도록 구성되어 있다.

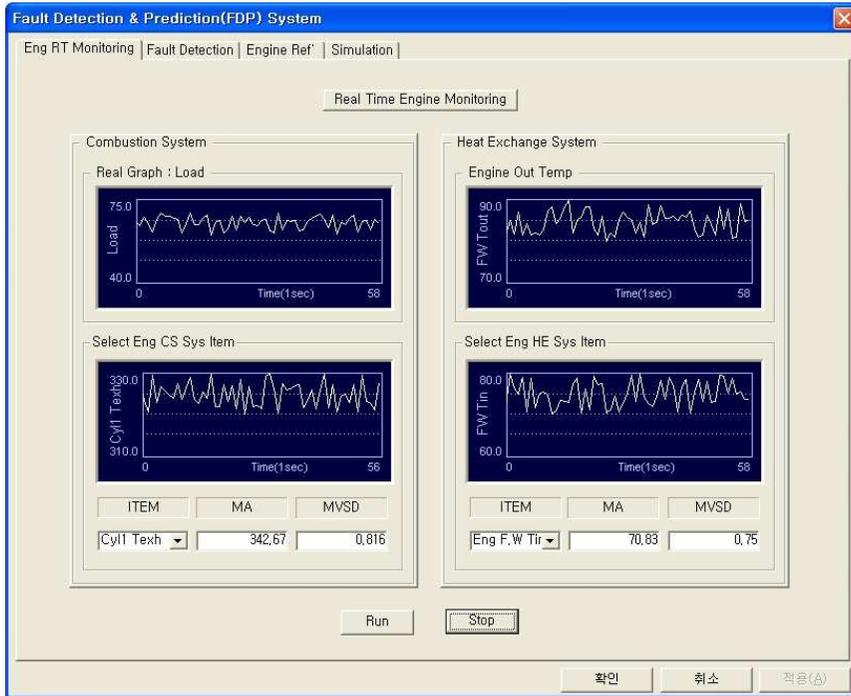


그림 4.16 실시간 데이터 감시 화면

Fig. 4.16 Real time data display window for the monitoring

(3) Real Time Fault Detection 의 상태화면

그림 4.17은 계통별 계측항목사이의 CC를 통해 실시간으로 이상감지와 이상진단을 수행하는 화면이다. 통계적 분석기법에 의해 설정된 이상감지 지식베이스의 주요 데이터지표인 MVSD의 추이를 실시간으로 나타낸다. 각 계통별로 각각 2개의 항목을 설정하여 MVSD에 의해 설정된 FDR에서 계측항목사이의 CC를 실시간으로 계산하며, 이상감지 지식베이스와 이상진단 지식베이스를 통해 각 항목의 이상진단결과를 Fault State창에서 확인할 수 있다. 이상감지모듈과 이상진단모듈로부터 감시데이터의 고장진단결과는 팝업 윈도우를 통해 이상상태 감지내역과 이상진단내역을 화

면에 출력할 수 있도록 구성되어 있으며, 열교환기계통과 전동기 및 펌프 계통에서도 같은 방식으로 이상상태를 감지하고 진단결과를 얻을 수 있다.

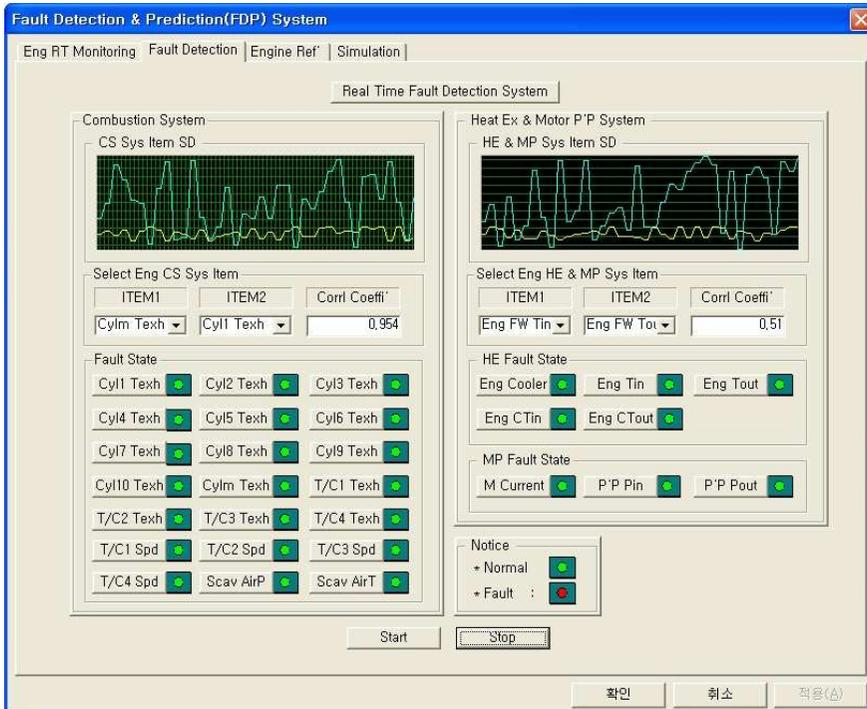


그림 4.17 실시간 이상감지시스템의 상태 화면
 Fig. 4.17 Window of the real time fault detection state

(4) Prediction Management System 화면

그림 4.18은 계측항목별 고장상태를 예측하기 위한 예측관리시스템(PMS)으로서 6장에서 다루게 될 고장예측모듈로부터 고장예측에 필요한 파라미터를 입력하는 부분과 선택된 계측항목의 예측결과를 확인하는 부분으로 구성되어 있다. 파라미터를 입력하는 부분은 회귀분석에 필요한

기초 자료와 전문가의 판단에 의한 고장범위를 설정할 수 있도록 구성되어 있다. 이를 통해 회귀식을 산출하고 새롭게 수집되는 운항데이터와의 회귀분석자료를 비교검토하여 기준이 되는 데이터와의 변동률을 조사함으로써 이상상태의 정도를 예측한다. 또한 일정 시점에 계측항목의 고장진행상태를 예상하고자 할 때 해당 파라미터를 입력하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실행하면 고장예측모듈을 통해 고장상태의 진행률을 예측할 수 있도록 구성되어 있다. 자세한 내용은 6장에서 다루도록 한다.

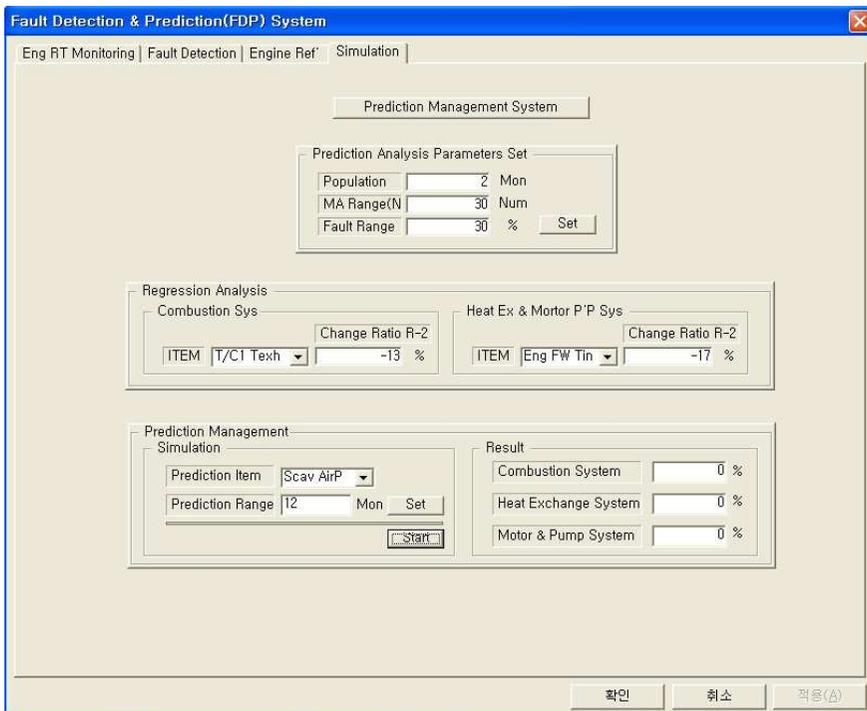


그림 6.13 계측항목 및 계통별 이상데이터 고장예측 화면
 Fig. 6.13 Fault prediction window of the MI and system

제 5장 의사결정모듈의 설계

일반적인 통계자료의 의사결정트리(Decision tree)는 의사결정규칙(Decision rule)을 도표화하여 관심대상이 되는 집단을 몇 개의 소집단으로 분류하여 의사결정하거나 예측(Prediction)을 수행하는 분석방법이다[42]. 의사결정트리분석방법은 많은 방법들이 제안되어 왔으나 CHAID(Chi-squared automatic interaction detection), CART(Classification and regression tree), QUEST(Quick unbiased efficient statistical tree) 등의 방법이 잘 알려져 있다.

3장의 이상감지모듈과 이상진단모듈은 각 계통의 연관관계가 높은 항목들에 대해서 고장진단을 수행한 것으로서 보다 구체적인 고장원인을 파악하기 위해서는 이상진단결과를 가지고 직접 계통을 세부적으로 점검해 볼 필요가 생기게 된다. 즉, 누설음이나 인디케이터등과 같이 연속적으로 감시데이터를 얻기가 곤란한 경우, 숙련된 운전자는 방대한 데이터 중에서 이상이 있는 데이터가 속한 계통과 고장가능성이 있는 계통을 중심으로 조사를 해 나간다. 이 과정에서 실제고장이 발생했는지의 유무를 확인하기 위해 관련항목들을 세부적으로 조사하게 되며 이를 통해 고장결과를 얻어 낸다. 따라서 본 장에서는 이와 같이 숙련된 운전자의 고장조사과정과 유사한 방식으로 실제의 고장상황을 검사하는 의사결정모듈을 구성하고자 한다.

의사결정트리는 해당 계통에 대한 고장개소를 발견하기 위하여 몇 가지 조사를 행하는 것이다. 열교환기계통이나 전동기 및 펌프계통은 데이터 간에 영향을 주는 상호연관데이터의 수가 적다. 따라서 이상진단과정을 거칠 필요 없이 데이터 이상감지모듈에 의해 출력된 결과로부터 이상데이터가 속한 열교환기계통이나 전동기 및 펌프계통의 의사결정트리만을 이용하여 고장유무를 판단할 수 있다. 연소계통은 각 실린더 단위로 고장진단이 이루어지므로 해당되는 실린더의 조사만으로 진단이 가능하며 같은

방법으로 여러 실린더에 적용할 수 있으므로 고장진단방법은 상당히 간략하게 된다. 본 논문에서는 이상감지모듈과 이상진단모듈에 의해 감지된 이상진단결과에 따라 숙련된 운전자에 의해 각 계통별로 미리 만들어진 의사결정트리를 이용하여 고장개소를 세부적으로 발견할 수 있는 의사결정모듈을 구성하였다. 그림 5.1은 고장진단 및 예측시스템에서 의사결정모듈 부분을 나타낸 것이다.

계통의 감시데이터는 계통의 현재상황을 판단하기는 용이하나 계통내부의 상태를 판단하기는 부족할 때가 있다. 예를 들면 실린더 연소계통의 고장진단에 있어서 배기가스온도, 과급기 배기가스온도, 소기공기압력 및 소기공기온도 등의 감시데이터 만으로는 어느 특정실린더 연소계통이 고장이라고 판단하기는 어렵다. 이런 경우는 실린더의 연소상태를 좀더 자세히 알 수 있는 실린더 최고압력, 압축압력, 평균유효압력, 연료분사펌프의 토출시기 분사노즐의 사용시간, 피스톤 분해정비 후 경과된 시간, 실린더 오일의 주유량 등의 다각적인 검토가 필요하게 된다.

5.1 연소계통의 의사결정모듈

그림 5.2는 연소계통의 의사결정모듈을 나타낸 것이다. 연소계통과 같이 연관데이터의 수가 많은 계통의 의사결정모듈은 3장에서 설계된 이상감지모듈과 이상진단모듈을 통해 진단결과가 출력되면, 그림 5.2에서와 같이 관련항목들을 세부적으로 조사하여 고장결과를 출력할 수 있도록 구성되어 있다. 이와 같은 의사결정모듈을 이용하는 방법은 여러 계통을 표준화하여 고장을 확정할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

예를 들어, 실시간으로 입력되는 감시데이터 중에 No.1 실린더 배기가스온도가 이상감지식베이스로부터 이상상태로 감지되었을 경우 다른 실린더는 정상이며 부하는 낮고 과급기입구온도는 중간, 소기공기압력이 중간, 소기공기온도가 낮으며 배기가스 누설음이 나는 상태일 때를 모델로

하여 고장진단을 수행하면 다음과 같다. 데이터 이상감지모듈에서 통계적 분석기법에 의한 이상감지 지식베이스로부터 감지된 이상데이터는 No.1 실린더 배기가스온도가 동일계열사이의 CC분포에 따라 기준이 되는 FDCC를 3회이상 연속적으로 벗어나는 경우 이상데이터로 출력된다. No.1 실린더 배기가스온도의 이상감지상태는 이상진단모듈을 통해 진단 과정을 거치게 된다. 즉, 실린더 배기가스온도와 상관관계가 높은 동일계열 실린더사이의 배기가스온도, 과급기 배기가스온도, 소기공기압력, 소기공기온도와의 상관관계를 이상감지과정과 동일한 방법으로 검토한다. 이상진단모듈을 통한 진단결과 다른 계측항목에서는 이상이 없는 것으로 판단되면 No.1 실린더 배기가스온도에 이상이 있는 것으로 예상할 수 있다. No.1 실린더 배기가스온도의 이상진단 결과를 이용하여 의사결정모듈로 연소계통의 고장을 확정짓는다. 그림 5.2의 의사결정모듈에서 세부적으로 관련항목 고장조사를 수행하고 인디케이터를 조사한다. 인디케이터 조사 결과 출력저하가 없을 경우는 최고압력 조사를 하게 되며, 최고압력이 낮으면 공기부족, 배기밸브누설, 피스톤링 누설 등으로 진단결과를 출력한다. 이어서 배기계통을 조사하여 배기가스 누설음이 들리므로 배기밸브의 소손을 알 수 있다. 이것은 최고압력이 저하되고 누설이 되는 경우이므로 배기밸브 누설 및 소손이 확실시된다. 과급기계통과 소기계통을 조사할 필요가 있지만 이상진단모듈로부터 정상상태로 출력되므로 고장상태의 결과가 배기밸브 쪽으로 압축된다. 연소계통의 의사결정모듈은 데이터 이상감지모듈과 이상진단모듈에서 고장이 있을 것으로 추정되는 것만 조사하게 되므로 많은 데이터에 대해서 모두 조사할 필요는 없다. 데이터 이상감지모듈에서 이상데이터라고 출력된 연소계통의 이상데이터라 할지라도 연소계통 이상진단모듈에서 이상데이터로 출력하지 않는 경우가 생길 수 있다. 이런 경우는 정상적인 상태에서의 데이터 값이 이상적으로 높거나 낮게 나타나는 경우로 계측센서(Sensor)의 이상이나 내·외적 환경변화에 따른 일시적인 현상으로 판단할 수 있다.

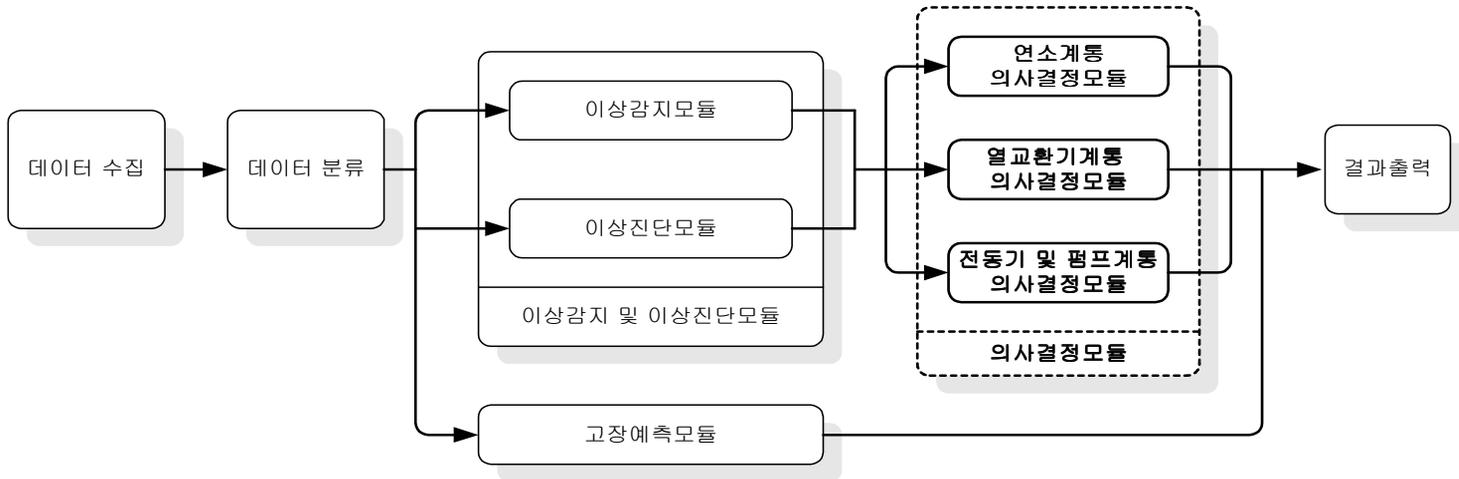


그림 5.1 고장진단 및 예측시스템에서의 의사결정모듈

Fig. 5.1 Decision module in a fault diagnosis and prediction system

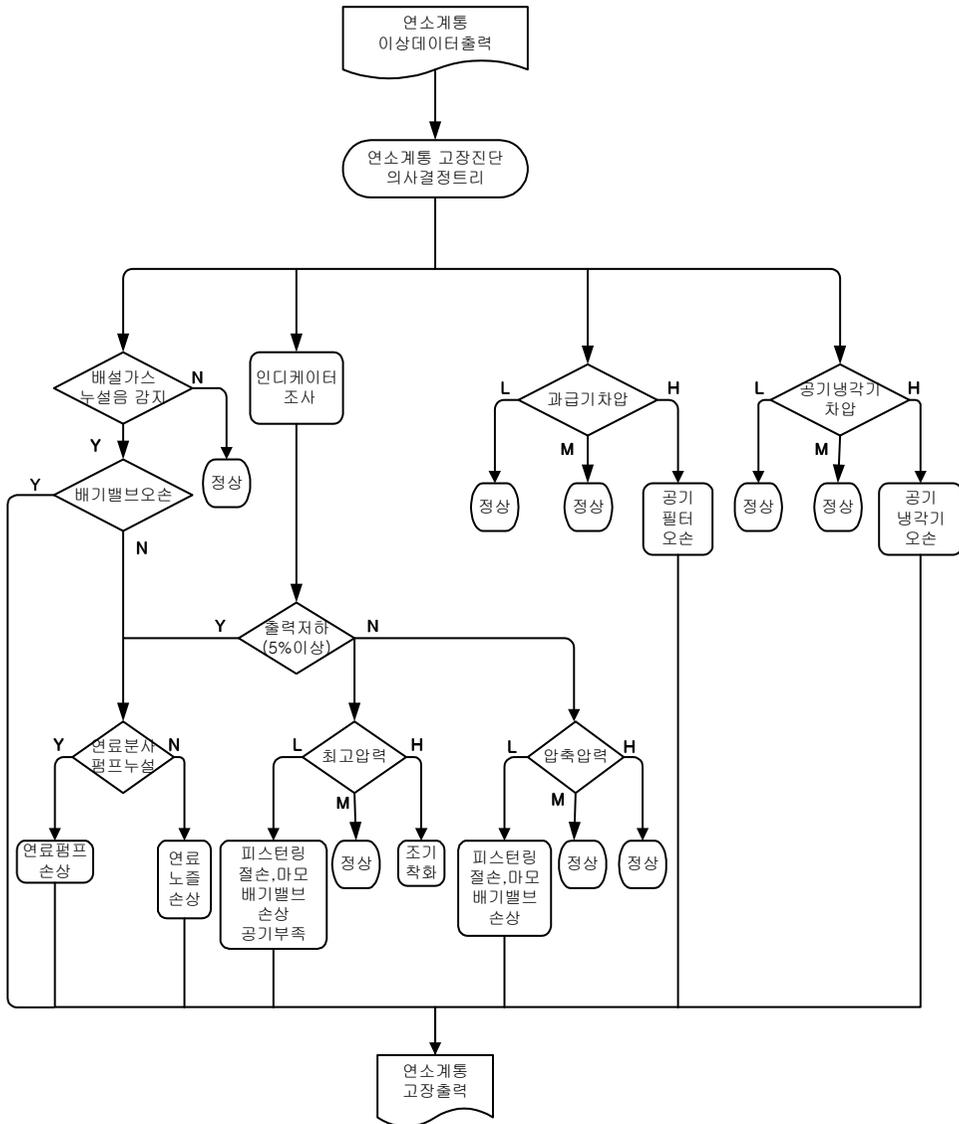


그림 5.2 연소계통 의사결정모듈

Fig. 5.2 Decision module of the combustion system

5.2 열교환기계통의 의사결정모듈

열교환기계통은 연소계통에 비하여 상대적으로 연관데이터의 수가 적어 그림 5.3과 같이 의사결정모듈만을 이용하여 고장을 확정할 수 있다. 열교환기계통은 독립된 제어시스템을 장비하고 있어 항상 적정한 온도의 유체가 공급되도록 되어있다. 부하 변동에 따라 증감되는 열량은 온도제어기로 항상 일정한 온도가 되도록 제어되며 온도제어는 열교환기를 통하는 유체 양과 바이패스되는 유체 양을 조정하는 밸브의 개도를 조정하여 항상 원하는 온도가 되도록 제어한다. 따라서 열교환기계통의 냉각기계통과 가열기계통은 유체의 온도에 따라 온도제어기의 상태를 조사함으로써 고장항목을 찾을 수 있다.

열교환기계통의 의사결정모듈은 우선 이상감지모듈로부터 이상상태가 감지되면 이상데이터가 가열기계통에서 발생하였는지 혹은 냉각기계통에서 발생하였는지를 확인하게 된다. 가령 냉각기계통에서 이상데이터로 감지되었다고 가정하면 냉각기를 통해 흐르는 유체의 온도를 확인한다. 이때 유체의 온도가 정상운전 범위 내에 있으면 정상으로 분류되지만 높게 나타나는 경우에는 온도를 제어하는 밸브의 개도를 조사한다. 조사결과 밸브의 개도가 낮게 나타나면 온도제어기의 작동상태가 정상인지의 유무를 확인하여 온도제어기의 상태가 정상이면 온도를 제어하는 밸브가 고착되어 있는 것으로 판단한다. 하지만 온도제어기가 정상적으로 작동하고 있지 않으면 제어기의 작동상태가 불량인 것으로 고장 결과를 출력하게 된다. 유체의 온도를 제어하는 밸브의 개도가 높은 경우에는 냉각기에 유입되는 유체의 입·출구 온도차를 확인하여 온도차가 크면 냉각수의 유량이 저하되었는지의 유무를 확인하고 그렇지 않은 경우 냉각수의 오염상태를 확인한다. 온도차가 낮은 경우에는 냉각유체의 오염 여부를 조사하여 최종적으로 고장결과를 출력한다. 이와 같이 가열기계통에서도 같은 방식으로 조사하여 고장결과를 얻을 수 있다.

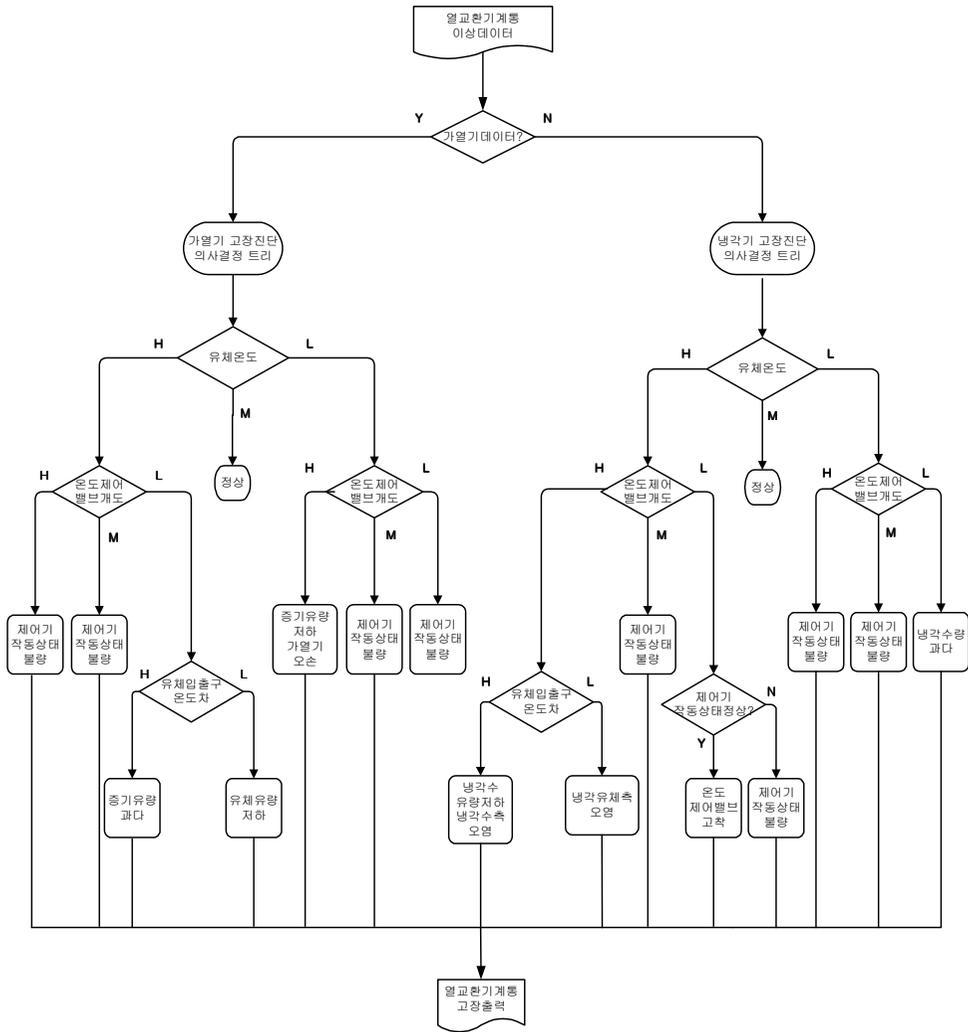


그림 5.3 열교환기계통 의사결정모듈

Fig. 5.3 Decision module of the heat exchange system

5.3 전동기 및 펌프계통의 의사결정모듈

그림 5.4는 전동기 및 펌프계통의 의사결정 모듈을 나타낸 것이다. 전동기와 펌프계통의 데이터는 주로 전동기의 전류, 펌프의 입구압력 및 출구압력 등이 있으며 비교적 관련되는 데이터 수가 적어 열교환기계통과 같이 의사결정모듈만을 이용하여 고장을 확정할 수 있다.

전동기 및 펌프계통의 의사결정모듈은 이상감지모듈로부터 이상상태가 감지되면 이상데이터가 전동기계통에서 발생하였는지 펌프계통에서 발생하였는지의 여부를 확인한다. 가령 감지된 이상데이터가 펌프계통이라고 가정하면 펌프에 유입되는 유체의 입·출구의 압력차를 조사한다. 이때 압력차가 낮은 경우에는 유체의 온도를 조사하여 정상운전 범위보다 높으면 커플링의 손상으로 판단하고 낮으면 마운드 링의 손상으로 정상이면 임펠러 손상으로 최종 고장결과를 출력하게 된다. 하지만 펌프의 압력차가 정상범위 내에서 운전되고 있다면 펌프의 입구압력계에 진동이 발생하고 있는지의 여부를 확인하여 유체의 증발로 인하여 발생하였는지를 확인하고 그렇지 않은 경우에는 정상으로 분류되어 결과가 출력된다.

전동기계통에 이상데이터가 감지되면 전동기에 흐르는 전류를 측정하여 전류가 낮으면 임펠러가 마모되었는지 혹은 유체의 온도가 증가 및 전동기에 공급되는 전압이 저하되었는지를 확인한다. 만약 전동기 전류가 높으면 전동기의 부하증가 유무를 조사하여 부하가 증가하였으면 과부하상태로 그렇지 않은 경우에는 베어링의 손상으로 판단하여 결과를 출력한다. 이와 같은 방식으로 연소계통과 열교환기계통뿐만 아니라 전동기 및 펌프계통에서도 의사결정모듈을 이용하여 세부자료를 순차적으로 조사함으로써 고장의 원인이 되는 지점을 쉽게 찾을 수 있게 된다.

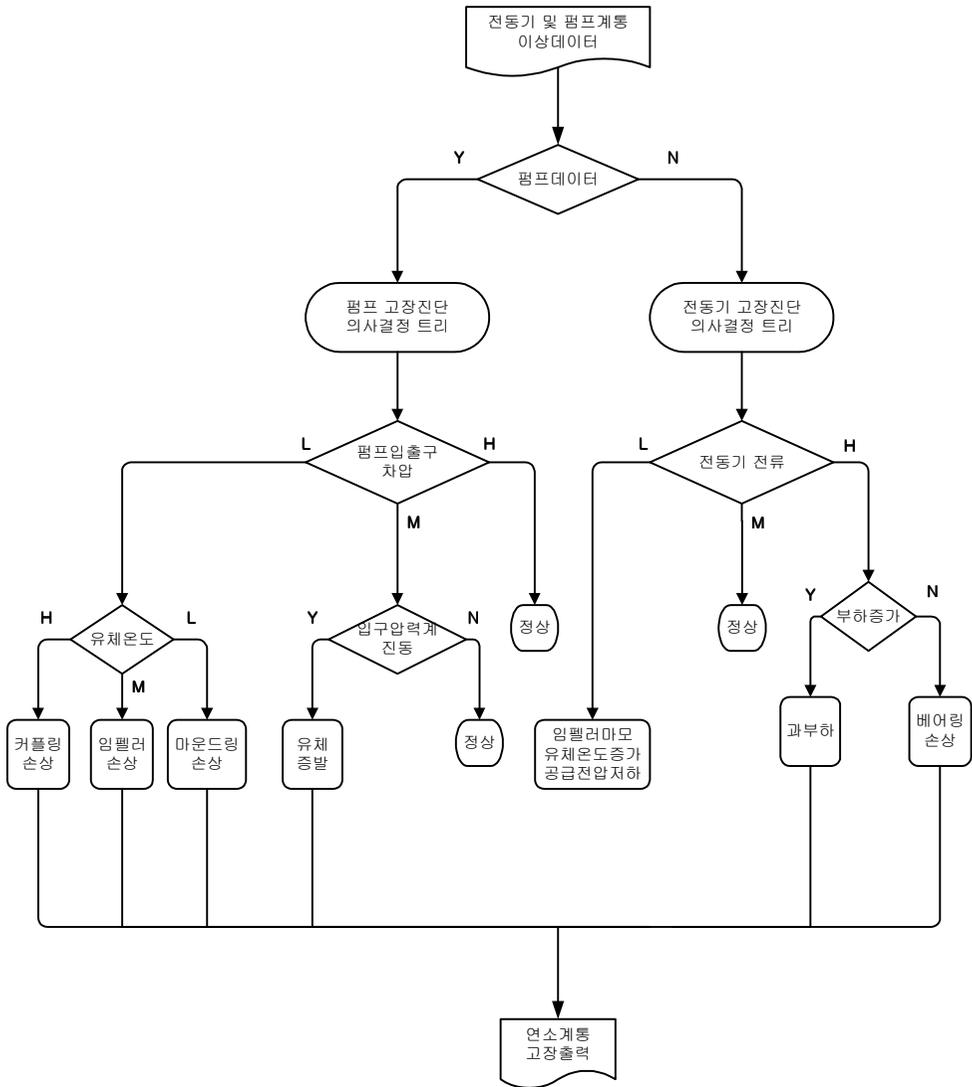


그림 5.4 전동기 및 펌프계통 의사결정모듈
 Fig. 5.4 Decision module of the motor and pump system

제 6 장 통계적 분석기법에 의한 고장예측모델

모델선박으로부터 획득된 운항데이터를 분석하여 정확한 예측이 가능하다면 미래의 불확실성에 대한 불안을 해소하고 현재의 의사결정을 하는데 큰 도움이 될 수 있다. 과거의 데이터를 분석하여 향후 거동을 예측하는 방법으로는 시계열분석(Time serial analysis), 통계학적분석(Statistical analysis)등의 많은 기법들이 사용되고 있다[43~48]. 시계열분석은 예측항목의 시간의 경과에 따른 과거의 동특성이 장래에도 계속된다는 전제하에 예측하는 방법으로서 과거의 시계열경향에 가장 적합한 모형식을 찾아내어 예측하는 방법이다. 하지만 시계열데이터의 대부분이 데이터의 생성과정에 대한 모형을 알 수 없는 불확실성(Uncertainty)이 존재하고 확률적으로 처리되지 않는 특성을 가지고 있기 때문에 시스템의 동특성을 예측하는 것이 어렵다. 통계학적 분석으로는 회귀분석(Regressive analysis)과 ARMA(Auto Regressive Integrates Moving Average)분석 등이 있다. 회귀분석 방법은 시계열의 구성요소가 시간에 의존하지 않는 경우에 적합한 방법이다. 따라서 본 절에서는 수집된 감시데이터를 대상으로 회귀분석을 통해 데이터경향을 분석하여 중·장기적 상태를 예측할 수 있는 예측모델설계에 관해서 논하고자 한다.

앞 장에서 설계된 고장진단모델은 선박추진기관의 계통별 감시데이터를 실시간으로 감시함으로써 이상상태를 감지하는 이상감지모델과 이상의 원인이 되는 항목을 찾아내는 이상진단모델, 그리고 진단결과로부터 관련항목들을 세부적으로 조사함으로써 최종결과를 도출하는 의사결정모델로 구성되어 있다. 이로부터 획득된 정보를 이용하면 현시점 혹은 가까운 미래에 대해서 감시데이터의 상태를 파악할 수 있다. 또한 본 절에서 설계하고자 하는 고장예측모델로부터 얻어진 감시항목의 중·장기적 예측정보를 고장진단모델로부터 얻어진 정보와 같이 활용하면 선박운항에 필요한 예방정비계획을 수립하는데 유용하게 활용될 수 있다.

6.1 통계적 분석기반 고장예측모듈의 구조

일반적으로 회귀분석은 독립변수가 종속변수에 미치는 영향력의 크기를 측정하여 독립변수의 일정한 값에 대응하는 종속변수의 값을 예측하기 위한 방법으로 사용되며, 변수 간 하나의 선형관계에 적합한 회귀선을 추정함으로써 예측을 수행한다. 변수사이의 관계가 비선형적 관계를 갖는 경우에는 곡선회귀(Curvilinear regression)분석이나 다항회귀(Polynomial regression)분석 등의 방법을 통해 적합한 회귀선을 추정하여 사용한다.

선박추진기관은 다양한 계측항목들로 구성되어 있으며 상호 높은 연관성을 갖고 거동하는 비선형시스템이지만, 앞서 2장과 3장에서 감시데이터는 계통별 분류와 상관분석을 통해 계측항목사이의 상관관계가 높은 항목들로 세분화하여 분류할 수 있었다. 즉, 설계된 이상감지 지식베이스와 이상진단 지식베이스는 상관관계가 높은 항목들을 분류하여 개개의 계측항목사이의 CC를 구하여 상호간 관계를 규정해 놓은 것이므로, 계측항목사이의 관계를 하나의 독립변수와 하나의 종속변수에 대하여 상관관계를 구하고 이들 간의 관계를 규정해 놓은 것으로 해석할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 하나의 독립변수와 종속변수의 관계에 대해서 해석하는 단순회귀분석(SRA)을 이용하여 고장예측모듈을 설계한다.

SRA를 통한 고장예측모듈은 실시간 감시되는 데이터의 중·장기적 경향을 파악하고, 감시데이터의 SRA에 의해 획득된 자료를 이용하여 고장예측을 수행한다. 고장예측모듈은 독립변수의 변화에 대해 종속변수의 반응속도나 민감도를 분석하기 위해 사용되지 않으므로 독립변수에 대한 종속변수의 특이점을 제거할 필요가 있다. 이를 위해서는 평활화방법이 필요하며, 본 논문에서는 이동창(MW)을 30으로 설정하여 이동평균을 수행하는 이동평균법을 이용하여 특이점을 평활화 하였다. 또한 이를 통해 생성된 데이터집합을 MADS로 정의하고, 본 논문에서 고장예측모듈설계를 위해 활용한다. 또한 3장에서 계측항목사이의 상관관계를 본 절에서는 상

관관계모듈(CM)로 정의하여 사용하며, CM과 MADS를 이용하여 SRA를 수행한다. 이동평균 구간설정은 4장에서 언급한 실험시스템에서 대상시스템의 특성에 맞게 변경하여 시스템분석에 활용할 수 있다. 본 절에서는 CM과 MADS를 통해 수행된 SRA로부터 고장예측에 활용하기위한 단순 회귀분석모듈(SRAMD)을 설계한다. 실시간 수집된 감시데이터는 SRA를 통해 SRAMD와 비교분석되어 최종적으로 고장예측결과를 출력하게 된다. 그림 6.1은 통계적 분석기법을 기반으로 하는 고장예측모듈의 구조를 나타낸 것이다.

6.2 실선운항데이터의 SRA

일반적으로 회귀분석은 한 개의 독립변수와 한 개의 종속변수간의 관계 분석에 제한되어 있지 않고 여러 개의 변수들 사이의 함수관계를 규명하기 위해 많이 활용된다. 하지만 본 논문에서는 앞 절에서 계측항목사이의 관계를 하나의 독립변수와 하나의 종속변수의 관계로 규정하여 SRA를 수행한다. 모집단으로부터 단순회귀모형을 기반으로 선형식을 추정하면 식 (6.1)과 같은 직선식을 얻을 수 있다.

$$\hat{y} = b_0 + b_1x \quad (6.1)$$

단, b_0 : 표본회귀직선의 절편(*Intercept*)

b_1 : 기울기(*S : Slope*)

일반적으로 식 (6.1)과 같이 표본집합에 적합한 회귀선의 b_0 와 b_1 을 구하는 방법으로 최소제곱법(Least squares method), 최우추정법(Maximum likelihood estimation method)등 다양한 방법이 사용되고 있다. 본 논문에서는 가장 널리 적용되고 있는 최소제곱법을 이용하여, b_0 와 b_1 을 구하였

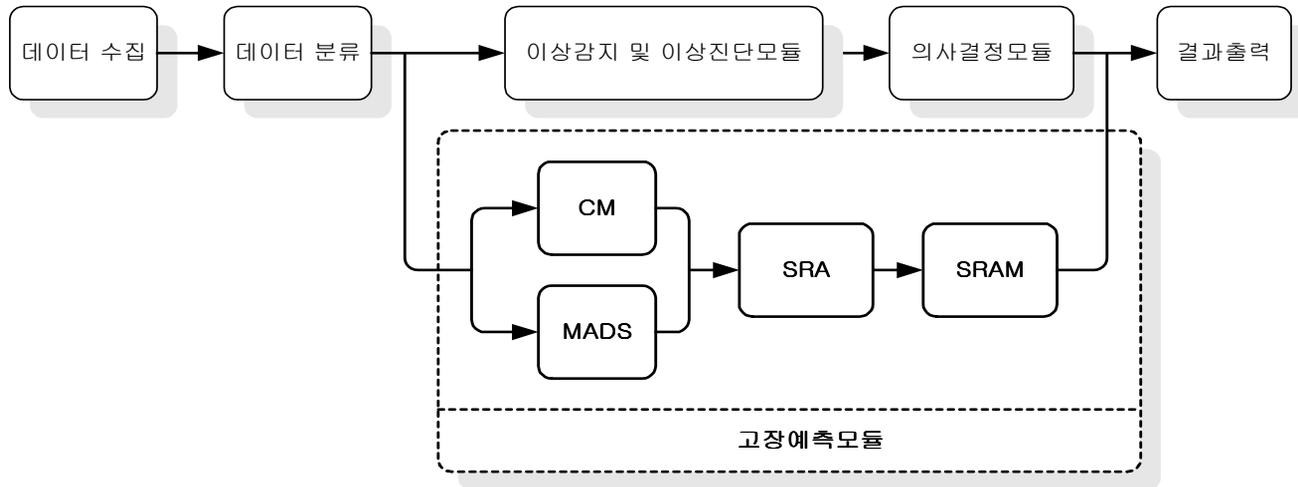


그림 6.1 통계적 분석기반 고장예측모델의 구조

Fig. 6.1 Structure of the fault prediction system based on the statistical analysis method

다. 최소제곱법에 의해 구해진 b_0 와 b_1 은 식 (6.2)와 (6.3)과 같다. 식 (6.2), (6.3)으로부터 추정된 회귀선이 표본자료를 얼마나 잘 표현하는지에 대한 적합도를 측정하기 위한 방법으로 추정의 표준오차를 가지고 평가하는 방법과 결정계수를 이용하여 평가하는 방법이 있다.

$$b_1 = \frac{\sum x_i y_i - \frac{(\sum x_i)(\sum y_i)}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.2)$$

$$b_0 = \frac{\sum y_i}{n} - b_1 \frac{\sum x_i}{n} = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (6.3)$$

단, \bar{x}, \bar{y} : 각 항목 데이터열의 평균

추정의 표준오차에 의한 적합도검정은 그 값이 분석대상변수의 측정단위에 직접적이 영향을 받으므로 여러 개의 적합도를 비교할 수 없게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 점을 해결하기 위해서 결정계수(R^2)를 이용하여 적합도 판정기준으로 사용한다. 결정계수 R^2 은 식 (6.4)와 같다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (6.4)$$

단, $SST = SSR + SSE$: 총제곱합(Sum of squares total)

$SSR = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$: 회귀제곱합(Sum of squares regression)

$SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$: 오차제곱합(Sum of squares error)

식 (6.1)과 (6.4)를 이용하여 실선운행데이터의 MVDS에 대한 회귀선과 회귀식 그리고 R^2 을 그래프로 나타내면 그림 6.2~6.7과 같다. 그림 6.2와 6.3은 부하와 과급기회전수 및 소기공기압력과의 데이터분포에 따른 회귀식과 R^2 을 나타낸 것이다. 과급기회전수의 경우 R^2 가 0.9로 나타나며, 이는 부하와 과급기회전수사이의 관계가 선형에 가까운 관계를 유지하고 있음을 보여주는 것이며, SRA에 의해 구해진 회귀선은 데이터 분포를 잘 표현하고 있음을 나타낸다. 하지만 부하와 소기공기압력과의 회귀식에 대한 R^2 은 0.51로 낮게 나타난다. 이는 계측항목사이의 SRA에 의해 구해진 회귀선이 부하의 변화에 대한 소기공기압력 값의 분포를 표현하는 정도가 낮다는 것을 의미한다. 그림 6.4~6.7은 동일계열 사이의 SRA를 나타낸 것이다. 그림에서 실린더 배기가스온도와 과급기회전수 및 과급기 배기가스온도는 동일계열에 있는 항목사이의 SRA에 의한 R^2 과 기울기를 구해보면, R^2 은 0.95이상이며 기울기 b_1 은 1에 가까우므로 동일계열사이에서는 높은 선형성을 유지하고 있는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 선박운행데이터로부터 연관성이 높은 항목 간 회귀식의 기울기와 R^2 을 이용하여 참조값을 설정하고 이를 이용하여 SRAMD를 설계한다. 이를 통해 새롭게 수집되는 운행데이터와 비교하여 회귀분석 데이터의 변동률을 조사함으로써 이상상태로의 진행상태를 예측할 수 있게 된다. 표 6.1은 선형성이 높은 항목사이의 기울기와 R^2 을 평균하여 나타낸 것이다. 본문에서는 표 6.1을 SRAMD로 정의하여 사용한다.

표 6.1 SRA에 의한 계측항목 사이의 기준 R^2 과 기울기

Table 6.1 R^2 and slope of the MI by a SRA

	Load		Cyl Texh		T/C Texh		T/C SPD	
	R^2	S	R^2	S	R^2	S	R^2	S
Cyl Texh			0.94	1.04				
T/C Texh					0.99	0.93		
T/C SPD	0.9	1.37					0.99	1.01

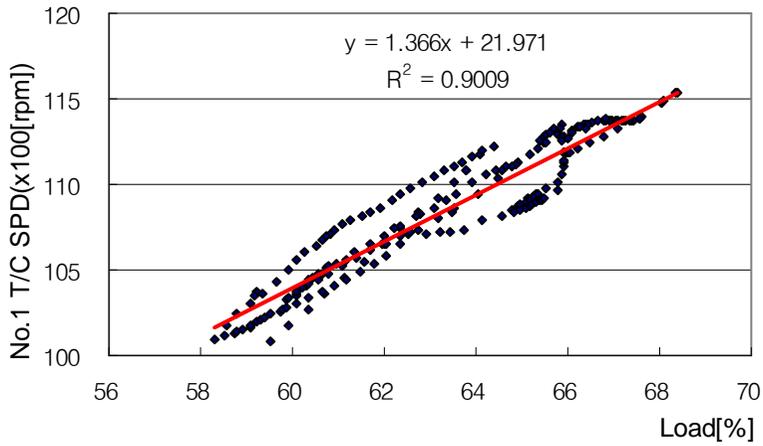


그림 6.2 부하에 대한 No.1 과급기회전수의 MADS와 SRA
 Fig. 6.2 MADS and SRA of the No.1 T/C speed
 corresponded to load

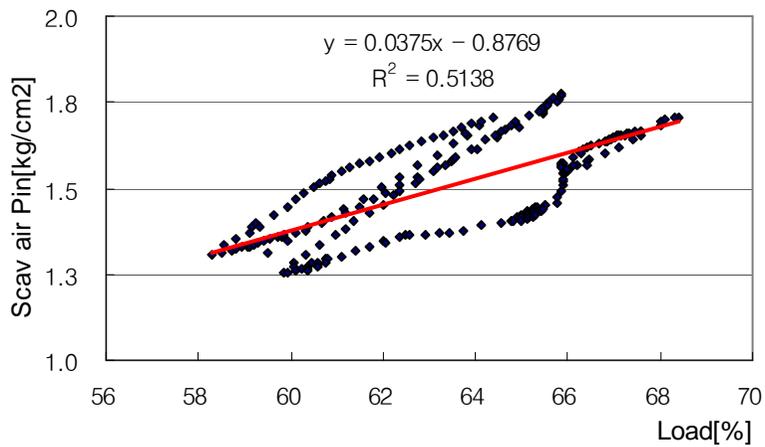


그림 6.3 부하에 대한 소기공기압력의 MADS와 SRA
 Fig. 6.3 MADS and SRA of the scavenging air pressure
 corresponded to load

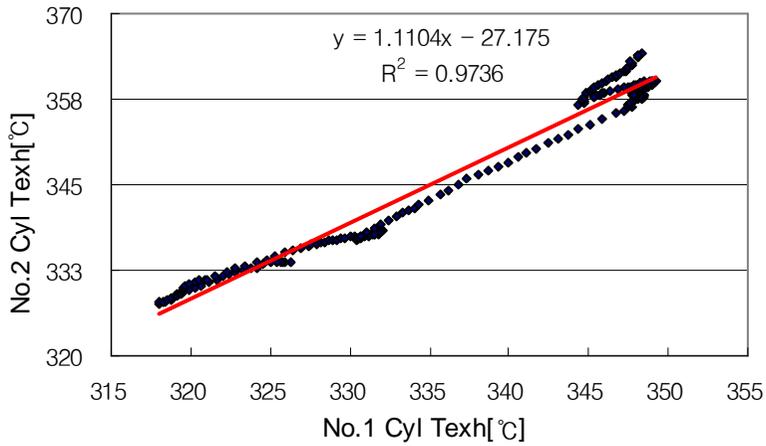


그림 6.4 No.1 실린더 배기가스온도에 대한 No.2 실린더 배기가스온도의 MADS와 SRA

Fig. 6.4 MADS and SRA of the No.2 cylinder exhaust gas temperature corresponded to No.1 cylinder exhaust gas temperature

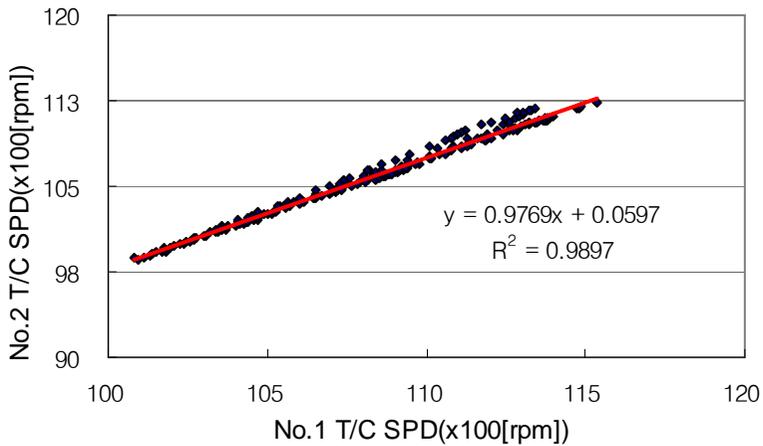


그림 6.5 No.1 과급기회전수에 대한 No.2 과급기회전수의 MADS와 SRA

Fig. 6.5 MADS and SRA of the No.2 T/C speed corresponded to No.1 T/C speed

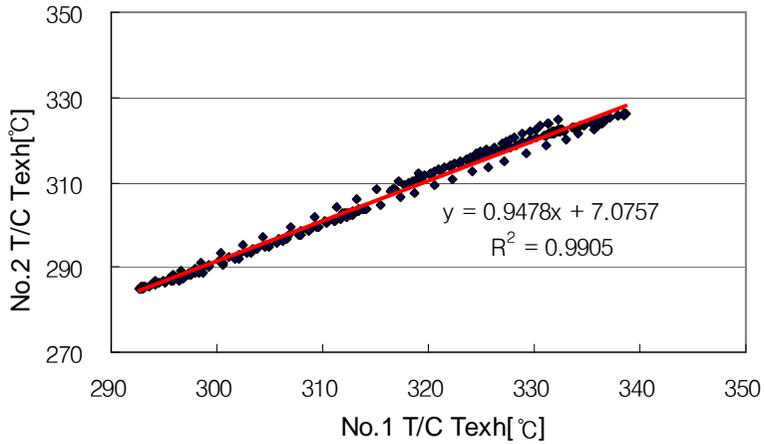


그림 6.6 No.1 과급기 배기가스온도에 대한 No.2 과급기 배기가스온도의 MADS와 SRA

Fig. 6.6 MADS and SRA of the No.2 T/C exhaust gas temperature corresponded to No.1 T/C exhaust gas temperature

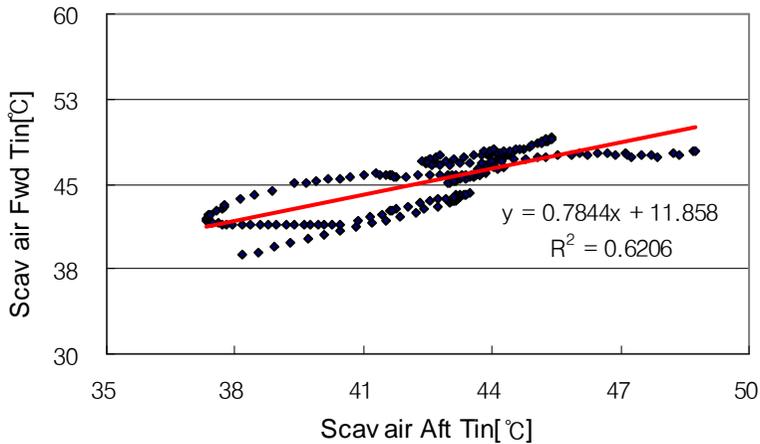


그림 6.7 Aft 소기공기온도에 대한 Fwd 소기공기온도의 MADS와 SRA

Fig. 6.7 MADS and SRA of the scavenging air Fwd temperature corresponded to scavenging air Aft temperature

6.3 SRAMD를 이용한 고장예측 실험

앞 절에서 작성된 SRAMD는 모델선박의 2개월간의 정상운항데이터를 기준으로 작성되었으며, MW구간에 따라 SRAMD에 설정된 값들은 변경될 수 있다. 따라서 SRAMD를 통한 고장예측결과는 다르게 나타날 수 있으므로 4장의 실험시스템에서 고장예측에 필요한 파라미터를 숙련된 운전자의 판단에 의해 설정이 가능하도록 구성하였다. 본 실험에서는 2개월간의 정상운항데이터와 30개구간 이동평균을 통해 산출된 데이터 집합을 사용하였으며 SRAMD를 통한 예측변동률을 이용하여 현재 항목의 이상상태의 정도를 예측한다. 또한 예측변동률과 운항시간을 비교하여 현 추세에 따른 향후 변동률을 계산한다. 실험데이터는 4장에서 사용한 각 계측항목의 FDR구간에 정규분포난수를 발생시킨 데이터집합(FNDRN)을 새롭게 계측된 데이터로 가정하고 실험을 행하였다.

그림 6.8~6.11은 FNDRN에 대한 회귀선과 회귀식 및 R^2 을 나타낸 것이다. 이를 통해 표 6.2와 같은 결과를 얻을 수 있다. 부하와 과급기회전수, 실린더 배기가스온도, 과급기 배기가스온도, 그리고 과급기회전수는 주기관의 운항시간이 35,883~37,336[hr] 즉, 1,453[hr](60.5일)동안 운항한

표 6.2 FNDRN에 대한 계측항목 예측 변동률

Table 6.2 Prediction change ratio of the MIs in a FNDRN

* 운항시간 - 1453[hr](60.5day)		Load	Cyl Texh	T/C Texh	T/C SPD
R^2	Reference	0.9	0.94	0.99	0.99
	Real	0.73	0.86	0.8	0.89
	변동률[%]	-18.9	-8.5	-19.1	-10.1
S	Reference	1.37	1.04	0.93	1.01
	Real	1.13	0.8	0.82	0.7
	변동률[%]	-17.5	-23.1	-11.8	-30.7

데이터들이다. 이들 항목 사이의 R^2 변동률을 구해보면 표 6.2에서와 같이 각각 -18.9[%], -8.5[%], -19.1[%]와 -10.1[%]씩 감소하였음을 알 수 있다. 이는 2개월 전보다 계측항목사이의 선형관계의 정도가 감소하고 있음을 나타낸다. 기울기 또한 -17.5[%], -23.1[%], -11.8[%], -30.7[%]씩 감소하였으며 이를 통해 계측항목의 상태가 진행되고 있는 방향을 예측할 수 있다. 예를 들면, 그림 6.12에서와 같이 부하와 No.1 과급기회전수에 대한 R^2 의 회귀분석 참조값이 0.9일 때 과급기회전수의 FNDRN을 30개 데이터 간격으로 R^2 값을 누적하여 표시하면 R^2 의 변동추이를 관측할 수 있다. 또한 R^2 의 변동추이에 대한 SRA를 수행하여 회귀선을 구해보면 -0.0068의 기울기를 얻을 수 있다. 이와 같은 경향분석을 통해 회귀선을 확장하여 예측범위를 설정하면 회귀식으로부터 25일후 R^2 이 -35[%]로 감소하게 됨을 예측할 수 있다. 회귀식은 계측되는 데이터로부터 계산된 R^2 값 변화에 따라 변하게 되며 이에 따라 예측기간에 대한 예측 값도 실시간 변하게 된다.

본 실험에서는 정상운행데이터로부터 SRA를 수행하여 얻은 SRAMD를 기반으로 계측항목의 FDR에 정규분포난수를 발생시켜 생성된 데이터집합을 대상으로 실험을 행하였다. 이로부터 새롭게 수집되는 계측데이터의 SRA를 통한 회귀분석자료를 설정된 SRAMD와 비교분석하면 고장예측이 가능할 것으로 판단된다. 고장예측모듈을 통해 출력된 결과를 통해 숙련된 운전자는 향후 계측항목의 고장상태를 예측할 수 있으며, 이를 이용하면 선박운항에 필요한 예방정비 일정수립에 필요한 자료로 활용할 수 있게 된다.

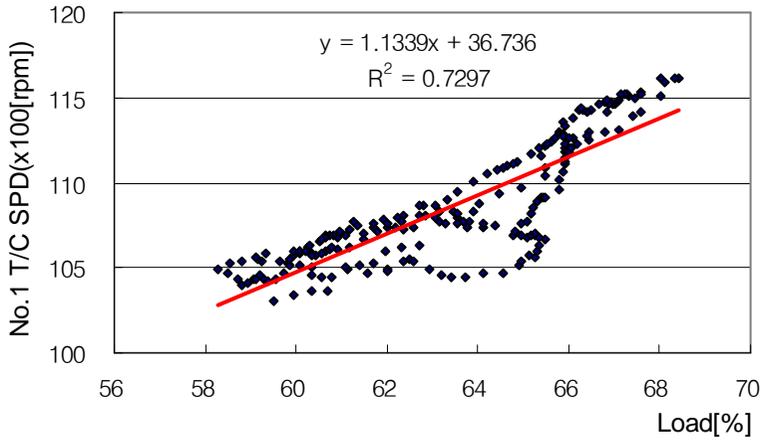


그림 6.8 부하에 대한 FNDRN No.1 과급기회전수의 MADS와 SRA

Fig. 6.8 MADS and SRA of the FNDRN No.1 T/C speed corresponded to load

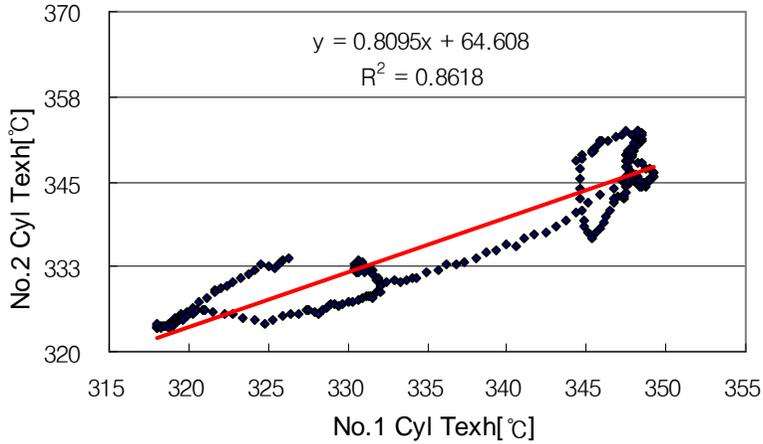


그림 6.9 No.1 실린더 배기가스온도에 대한 FNDRN No.2 실린더 배기가스온도의 MADS와 SRA

Fig. 6.9 MADS and SRA of the FNDRN No.2 cylinder exhaust gas temperature corresponded to No.1 cylinder exhaust gas temperature

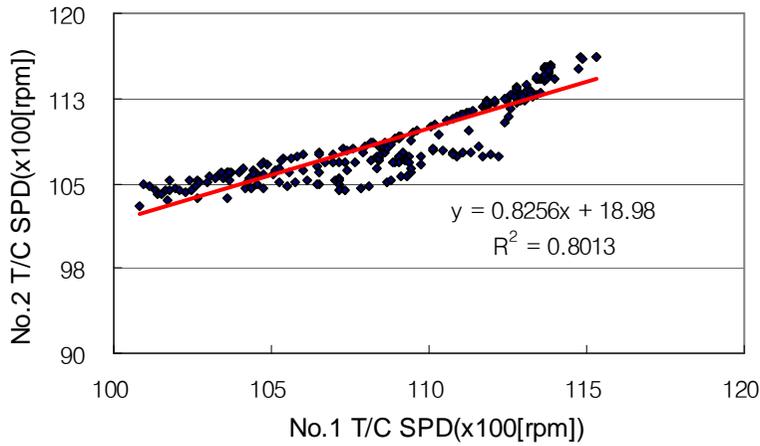


그림 6.10 No.1 과급기 회전수에 대한 FNDNRN No.2
과급기 회전수의 MADS와 SRA

Fig. 6.10 MADS and SRA of the FNDNRN No.2 T/C speed
corresponded to No.1 T/C speed

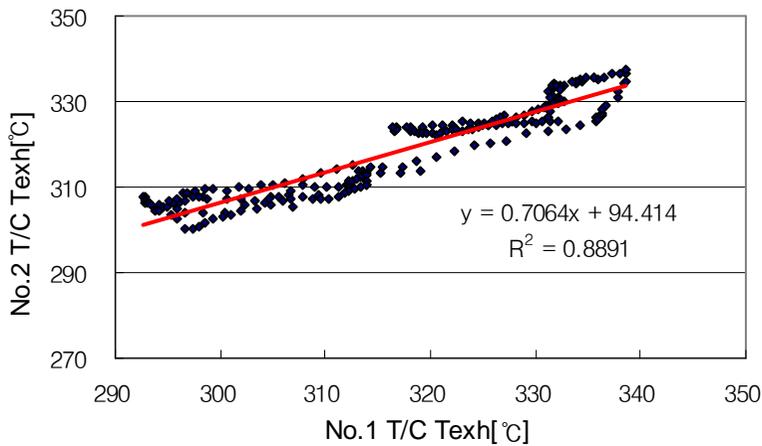


그림 6.11 No.1 과급기 배기가스온도에 대한 FNDNRN No.2
과급기 배기가스온도의 MADS와 SRA

Fig. 6.11 MADS and SRA of the FNDNRN No.2 T/C
exhaust gas temperature corresponded to No.1 T/C exhaust
gas temperature

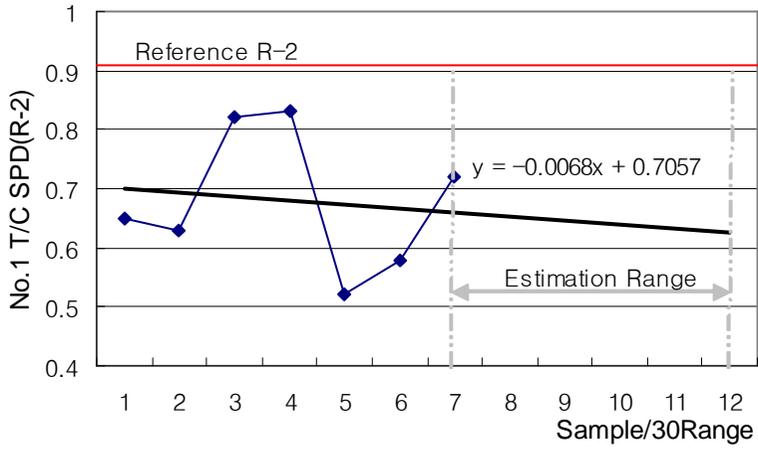


그림 6.12 부하에 대한 No.1 과급기회전수의 구간별 R^2 의 변동추이와 추정 회귀식

Fig. 6.12 Estimate regression equation and R^2 trend of the No.1 T/C SPD corresponded to load

제 7 장 결 론

본 논문에서는 기존의 문제점을 극복하기 위해 통계적 분석기법을 이용하여 운전범위를 벗어나지 않더라도 이상상태를 감지하여 진단할 수 있는 이상감지모듈과 이상진단모듈, 진단결과로부터 관련항목들을 세부적으로 조사하여 고장결과를 출력하는 의사결정모듈을 포함한 고장진단모듈과 중·장기적으로 감시데이터의 고장상태를 예측할 수 있는 고장예측시스템을 설계하였다.

이상감지모듈과 이상진단모듈을 설계하기 위해서 우선 실선운행데이터를 기반으로 선박디젤기관의 특성을 조사하여 연소계통과 열교환기계통 그리고 전동기 및 펌프계통으로 분류하였다. 분류된 계통별 운행데이터의 동특성을 파악하기 위해 실선운행데이터를 이용하여 분석하였다. 선박기관 시스템은 주기관을 포함하여 많은 보조기관들로 구성되어 있는 비선형성이 강한 시스템이지만 계측항목별 상관관계를 검토해 본 결과 상관관계가 높은 항목들로 분류할 수 있었다. 이를 바탕으로 상관분석법에 의한 계측항목사이의 상관관계를 이용하여 정량적으로 구하였다. 이를 통해 숙련된 운전자의 지식과 경험으로 이상을 감지하는 과정과 같이 통계적 분석기반 이상감지 지식베이스와 이상진단 지식베이스를 구축할 수 있었다.

이와 같이 구축된 지식베이스를 이용하여 이상을 감지하고 진단을 행하는 이상감지 알고리즘을 설계하였으며, 또한 전문가지식기반 지식베이스를 설계하여 통계적 분석기반 이상진단모듈과 병행하여 이상상태를 진단할 수 있도록 설계하였다. 설계된 이상감지모듈과 이상진단모듈의 유용성을 확인하기 위해 실선운행데이터의 통계적 특징을 가진 정규분포난수를 모집단전체구간, 임의구간, 그리고 이상감지구간에 각각 발생시켜 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인해 본 결과 데이터의 이상상태가 신뢰성 있게 감지됨을 확인할 수 있었다.

또한 선박추진기관의 계통별 계측항목들은 세분화 과정에서 하나의 독

립변수와 하나의 종속변수의 관계로 정의될 수 있었으며 상호 연관성이 높은 항목은 높은 선형성을 유지하고 있음을 알 수 있었다. 이를 통해 계측항목 사이의 관계를 단순회귀분석법으로 해석이 가능하였으며, 선박운항데이터로부터 상관관계가 높은 항목사이의 단순회귀분석을 통해 고장예측모듈을 설계할 수 있었다. 고장예측모듈을 통해 새롭게 수집되는 데이터의 회귀분석자료를 기준데이터와 비교 검토함으로써 중·장기적 변화량을 측정하여 이상상태로의 변화정도를 예측할 수 있었다. 그리고 모델선박의 실선운항데이터를 실시간으로 이상상태를 감지하고 이상진단을 수행하며 고장예측결과를 출력할 수 있도록 Visual C++ 6.0을 이용하여 구현하고 그 유용성을 확인 하였다.

향후 다양한 선박에 대해 시스템을 적용하여 그 유용성과 신뢰성을 확인할 필요가 있으며, 보다 신뢰성이 높은 고장진단모듈 설계와 각종 이상상태에 대한 정비매뉴얼 및 정비일정을 통해 지능적인 이상감지모듈과 이상진단모듈을 구축할 필요가 있다.

참고 문헌

- [1] MAN B&W Diesel A/S, *Project Guide and S80MC/S80MCE*, Copenhagen Denmark, pp. 1.1-1.20, 1990.
- [2] New Sulzer Diesel Ltd., *Engine Selection and Project Manual*, RTA84(C,T,M), Winterthur Switzerland, pp. 1-9, 1994.
- [3] 中野克彦, 徳岡哲夫, “大型低速 ディ젤機関の現状と展望”, *日本船用機関學會誌*, Vol.29, No.12, pp. 892-899, 1994.
- [4] 本村 收, 宇月祐之, “大型低速 ディ젤機関の現状と展望-三菱UE形機関”, *日本船用機関學會誌*, Vol. 29, No. 12, pp. 900-903, 1994.
- [5] J. Wagner and R. Shoureshi, “A Failure isolation strategy for thermofluid system diagnostics,” *ASME J. Eng. for Industry*, vol. 115, pp. 459-465, 1993.
- [6] R. Isermann, “Process fault detection based on modeling and estimation methods - a survey,” *Automatica*, vol. 20, no. 4, pp. 387-404, 1984.
- [7] M. M. Polycarpou and A. T. Vemuri, “Learning methodology for failure detection and accommodation,” *IEEE Contr. Syst. Mag.*, pp. 16-24, 1995.
- [8] J. C. Hoskins and D. M. Himmelblau, “Artificial neural network models of knowledge representation in chemical engineering,” *Computers Chem. Engng.*, vol. 12, no. 9, pp. 881-890, 1988.
- [9] V.Venkatasubramanian, R.Vaidyanathan, and Y. Yamamoto, “Process fault detection and diagnosis using neural networks -steady state processes,” *Computers Chem.* vol. 14, no. 7, pp. 669-712, 1990.
- [10] E. Eryurek and B.R. Upadhyaya, “Sensor validation for power

- plants using adaptive back propagation neural network," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 37, no. 2, pp.1040-1047, 1990.
- [11] T.Sorsa, H. N. Koivo, and H. Koivisto, "Neural networks in process fault diagnosis," *IEEE Trans. Syst., Man and Cybern.*, vol. 21, no. 4, pp. 815-825, 1991.
- [12] A.G. Parlos, O.T. Rais, and A.F. Atiya, "Multi-step-ahead prediction using dynamic recurrent neural networks," *Neural networks* 13, pp. 756-786, 2000.
- [13] A. J. C. Sharkey, N. E. Sharkey, and O. C. Gopinath, "Diverse neural net solutions to a fault diagnosis problem," Department of Computer science, University of Sheffield, U.K., sep. 30. 1999. *Neural Computing and Applications*, 4, 218-227, 1996.
- [14] G. O. Chandroth, J. C. Sharkey and Noel E. Sharkey, "Artificial Neural Nets and Cylinder Pressures in Diesel Engine Fault Diagnosis," *Neurocomputing & Robotics group*, Department of Computer science, University of Sheffield, Sheffield S1 4DP, U.K.
- [15] Subhasis Nandi and Hamid A. Toliyat, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines - a review," *Electric machines & power electronics laboratory*, Department of electrical engineering, Texas A&M University College Station, TX 77843-3128.
- [16] 천행춘, "신경회로망과 퍼지추론을 이용한 선박디젤기관의 고장 진단 예측시스템," 한국해양대학교 공학박사 학위논문, 2, 2003.
- [17] 천행춘, 유영호, "신경회로망을 이용한 디젤기관의 데이터 이상 감지시스템에 관한 연구," *박용기관학회지*, 제 26권 제 4호, pp. 493-500, 2002.
- [18] 최욱현, "지식표현을 이용한 선박엔진 고장진단시스템의 개발에 관한

- 연구," 한국해양대학교 공학석사논문, 2, 1999.
- [19] 김영진, 김성철, 박제현, "퍼지를 이용한 이상진단 시스템에 관한 연구," 한국과학기술/대한산업공학회, 논문지 pp. 718-721 2001.
- [20] M. A. Karmner and J.A. Leonard, "Diagnosis using backpropagation neural networks-analysis and criticism," *Computers Chem. Engng.*, vol. 14, no. 12, pp. 1323-1338, 1990.
- [21] 김성호, 김정수, 박태홍, 이종렬, 박귀태, "퍼지-신경망 기반 고장진단시스템의 설계," 전기학회 논문지 48A권 10호, pp. 1272-1278, 1999.
- [22] 박영문, 이홍재, "전력 계통의 고장진단에 대한 숙련자 시스템의 적용," 대한전기학회 논문지, vol. 39, no. 10, 1990.
- [23] Shahin Arefzadeh, Paul Burgwinkel, and bernd Geropp, "Diagnosis of diesel engines based on vibration analysis and fuzzy-logic," Aachen University of Technology, Institut Für Bergwerks-und Hüttenmaschinenkunde Wüllnerstr. 2, 52056 Aachen, Germany. pp. 1497-1500, EUFIT, 1996.
- [24] Claudio Bonivento, Andrea Paoli, and Lorenzo Marconi, "Fault-tolerant control of the ship propulsion system benchmark," *Control engineering practice* 11, 2002.
- [25] Xi Sun, Tongwen Chen, and Horacio J. Marquez, "Efficient model-based leak detection in boiler steam-water systems," *Computers and chemical engineering* 26, pp. 1643-1647, 2002.
- [26] M. J. Roemer and D. M. Ghiocel, "A probabilistic approach to the diagnosis of gas turbine engine faults," STI Technologies, Inc., 1800 Brighton-Henrietta Town Line Rd., Rochester, New York 14623.
- [27] 이인수, 조원철, "비선형시스템의 고장진단을 위한 신경회로망 기반

- 통계적 접근법," 한국 퍼지 및 지능시스템 학회, vol. 12, no. 6, pp. 503-510, 2002.
- [28] J. V. Kresta, T. E. Marlin, and J. F. MacGregor, "Development of inferential process models using PLS," *Computers chem. Engng.*, vol. 18, no. 7, pp. 597-611, 1994.
- [29] Mark A. Kramer, "Nonlinear principal component analysis using autoassociative neural networks," *AIChE*, vol. 37, no. 6, pp. 233-243, 1991.
- [30] S. J. Qin and T. J. McAvoy, "Nonlinear PLS modeling using neural networks," *Computers chem. Engng.*, vol. 16, no. 4, pp. 379-391, 1992.
- [31] 유태호, "비선형 부분최소자승법에 기반한 화학공정 이상감지 모델에 관한 연구," 서울대학교 석사학위논문, 2, 2002.
- [32] 홍선주, 한종훈, "다변량 통계적 분석 방법을 이용한 soft-sensor설계 일반," *CASE 기술동향 분석* pp. 7-12, 11, 1998.
- [33] 황대회 외, "분석 기법을 이용한 공정 운전 향상의 방법," *Proceedings of the 12th, KACC*, pp. 1516-1519, 10, 1997.
- [34] Kourti, T. and J.F. MacGregor, "Process analysis mMonitoring and diagnosis using multivariate projection method," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 28.3-21. 1996.
- [35] B.M. Wise, N.L. Ricker, D.F. Veltkamp, and B.R. Kowalski. "A theoretical basis for the use of principal component analysis for monitoring multivariate processes," *Process Control and Quality*. pp. 41-51, 1990.
- [36] G.Chen and T.McAvoy, "Process Control Utilizing Data Based Multivariate Statistical Models," *The Canadian J. of Chem. Eng.*, 74. Dec. 1996.

- [37] A. Santen. *G.I.*, M. Kot and L.C. Zullo. "Statistical data analysis of a chemical plant," PSE97-ESCAPE-7, *Suppl.*, 21. pp. S1123-1128. 1997.
- [38] 이재규 외 5명 공저, "전문가 시스템 원리와 개발," 법영사, 1996.
- [39] 최진석, "연구논문들에서의 통계적기법의 사용에 관하여," 경희대학교 석사학위논문, 2, 1998.
- [40] 박성현, "회귀분석," 민영사, 9, 1998.
- [41] 박성현, 조신섭, 김성수, "통계자료분석," pp. 167-171.
- [42] 최종후, 한상태, 강현철, 김은석, "Answer Tree를 이용한 데이터마이닝 의사결정트리분석," SPSS 아카데미, pp. 15-94, 2000.
- [43] 김원경, "시계열 분석," 경문출판사, 1993.
- [44] 김상락, "비선형 시계열 분석과 예측," 경기대학교 연구교류처, 1997.
- [45] N. H. Packard, J. P. Crutchfield, J. D. Farmer, and R. S. Show, "Geometry from a time series," *Phys. Rev. Lett. A*, 1980.
- [46] V. Srinivasan and C. H. Mason, "Non-linear least squares estimation of new product diffusion models," *Marketing Science*, vol. 5, pp. 169-178, 1986.
- [47] G. E. P. Box and G.M. Jenkins, "Time series analysis: Forecasting and Control," 2nd ed., Holden-Day, San Francisco, 1976.
- [48] 김성곤, "새로운 EA/SCL PMSA 알고리즘을 이용한 비선형 통계 예측기 설계에 관한 연구," 원광대학교 공학박사 학위논문, 2, 2003.