

## 상관분석법에 의한 선박기관실 고장진단 시스템 개발

김영일† · 오현경\* · 유영호\*\*

(원고접수일 : 2005년 10월 20일, 심사완료일 : 2006년 2월 1일)

### The Development of Diesel Engine Room Fault Diagnosis System Using a Correlation Analysis Method

Young-IL Kim†, Hyun-Kyung Oh\*, Yung-Ho Yu\*\*

**Abstract** : There is few study which automatically diagnoses the fault from ship's monitored data. The bigger control and monitoring system is, the more important fault diagnosis and maintenance is to reduce damage caused by system fault. This paper proposes fault diagnosis system using a correlation analysis algorithm which is able to diagnose and forecast the fault from monitored data and is composed of fault detection knowledge base and fault diagnosis knowledge base. For all kinds of ship's engine room monitored data are classified with combustion subsystem, heat exchange subsystem and electric motor and pump subsystem. To verify capability of fault detection, diagnosis and prediction, FMS(Fault Management System) is developed by C++. Simulation by FMS is carried out with population data set made by the log book data of 2 months duration from a large full container ship of H shipping company.

**Key words** : FMS(고장관리시스템), Fault diagnosis system(고장진단시스템)

#### 기호설명

FMS : Fault management system  
FDCC : Fault detection CC  
FDR : Fault detection range  
MCC : mean of correlation coefficient  
MVSD : moving standard deviation  
SMA : moving average of moving  
standard deviation  
SMVSD : moving standard deviation of MVSD

#### 1. 서 론

1980년대 이후 선박의 대형화, 신속한 물류 처리 요구와 자동화 시스템의 발전에 따라 선박의 자동화는 급속도로 가속화되고 있다<sup>(1)-(4)</sup>. 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. 기존선박의 감시

† 책임저자(소나테크(주)), E-mail : youngil@sonartech.com, Tel : 051)403-7797

\* 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과

\*\* 한국해양대학교 IT공학부교수

시스템은 경보점을 설정하여 설정치보다 높거나 낮음에 따라 경보하는 시스템이 대부분이다. 또한 선박의 자동화는 대부분 이상경보감시방법으로 감시하고 시퀀스제어기법과 피드백제어기법으로 제어하는 시스템으로 구성되어 있다<sup>(5)-(10)</sup>. 이러한 시스템은 고장이 발생하였을 때만 확실한 경보를 해주는 반면에 이상의 징후가 발생되어 고장으로 발전되어 가는 과정을 예측할 수 없다. 따라서 고장에 대한 조기대응이나 예방정비계획을 수립하는 데는 부적절하며, 감시항목이 상호 연관되어 복합적으로 발생하는 고장에 대해서 적절한 진단을 행하기가 어렵게 된다<sup>(11)</sup>. 따라서 본 논문에서는 선행 연구된 통계적 분석기법을 이용하여 이상감지 및 이상진단 지식베이스를 구축하고 고장진단을 수행하는 고장관리시스템(FMS)을 개발하여 그 효용성을 확인하고자 한다.

## 2. 선박용 디젤기관의 계통분류

디젤기관을 주기관으로 사용하는 기관실 시스템의 구성은 Fig. 1과 같이 선박의 추진에 필요한 계통과 화물 및 주거에 필요한 계통으로 나눌 수 있다. 여기서 운항 중 고장진단이 필요한 계통은 추진에 필요한 계통이다. 추진에 필요한 계통은 주기관계통, 열교환기계통, 전동기 및 펌프계통으로 구분할 수 있다.

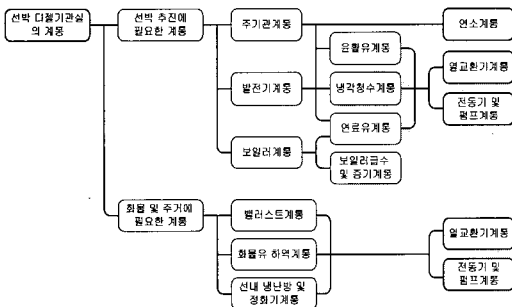


Fig. 1 Classification of the system in a marine diesel engine room

주기관계통은 부하의 변동에 영향을 받는 항목들로 구성되어 있으며, 열교환기계통은 독립된 제어시스템을 장비하고 있어 항상 일정한 온도가 유

지되도록 제어된다. 유체를 순환시키기 위한 전동기 및 펌프계통 또한 일정한 온도와 압력이 유지되도록 제어되므로 각각의 계통별 계측항목간 상호연관성을 검토하여 계통별 이상감지 및 이상감지 모듈을 설계하면 선박기관실 전체의 고장진단 시스템을 구축할 수 있다. Table 1~3은 각 계통별 관련항목들을 나타낸 것이다.

Table 1 Data of the combustion system

압력데이터(MPa)	소기공기압력
	공기냉각기 입·출구압력
	과급기 공기 입·출구압력
온도데이터(°C)	소기공기온도
	공기냉각기 입·출구온도
	각 실린더 배기가스 출구온도
	각 과급기 배기가스 입·출구온도
속도데이터(rpm)	과급기 속도

Table 2 Data of the heat exchange system

압력데이터(MPa)	소기냉각기 공기 입·출구압력
	냉각수 입·출구압력
온도데이터(°C)	윤활유 입·출구온도
	냉각수 입·출구온도
	냉각유체 입·출구온도
	연료유 가열기 입·출구온도
	소기냉각기 냉각수 입·출구온도
밸브개도데이터(%)	3방향 밸브개도

Table 3 Data of the motor and pump system

압력데이터(MPa)	이송유체 입·출구압력
	필터 입·출구압력
온도데이터(°C)	이송유체 입·출구온도
전기데이터	전류(A)
	전압(V)

## 3. 상관분석법에 의한 고장진단 지식베이스의 구조

두 변수의 관계를 하나의 수치로 나타내는 상관분석에서 상관계수  $CC(\rho_{xy})$ 는 다음과 같이 나타난다.

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

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

$$\mu_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \mu_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

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

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

.  $X, Y$  : 계측항목 array,  $\sigma$  : 표준편차

.  $\mu$  : 평균값,  $n$  : 데이터 수

으로 나타낼 수 있으며 위의 식을 이용하여 각 계통별 계측항목사이의 상관관계를 분석하면 Table 4와 같이 각 계측항목사이의 이상감지 및 이상진단 지식베이스 설계를 위한 참조값의 범위를 정의할 수 있다. 이를 통해 연소계통의 이상감지 및 이상진단 지식베이스를 설계하면 Table 5~6과 같다.

**Table 4 MCC and FDCC of the measuring items 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	

이와 같은 연소계통의 이상감지 및 이상진단 지식베이스설계 구조는 열교환기 계통과 전동기 및 펌프계통으로 확장하여 설계가 가능하다.

Fig. 2는 본 논문에서 설계하고자 하는 고장진단 시스템의 전체구조도를 나타낸 것이다. 지식베이스로부터 추정된 진단정보를 통해 최종적으로 세부 고장개소를 자동적으로 확정하는 의사결정모델과 통

계적 분석기법을 이용하여 중·장기적으로 고장을 예측하는 고장예측모델을 활용하면 선박의 사전 예방정비에 필요한 계획을 수립할 수 있다.

**Table 5 Fault detection knowledge base**

Rule No.	Rule
RL1	If f1SDRN = f1FDR and f2CC < f1 FDCC then f2=fault
RL2	If f1SDRN = f1FDR and f3CC < f1 FDCC then f3=fault
RL3	If f1SDRN = f1FDR and f7CC < f1 FDCC then f7=fault
RL4	If f6SDRN = f6FDR and f5CC < f6 FDCC then f5=fault

**Table 6 Fault diagnosis knowledge base**

Rule No.	Rule
RL1	If f2CC < f1 FDCC and f8CC ≥ f1 FDCC then f2=fault
RL2	If f2CC < f8 FDCC and f13CC ≥ f8 FDCC then f2=fault
RL3	If f7CC < f1 FDCC and f9CC ≥ f1 FDCC then f7=fault
RL4	If f7CC < f9 FDCC and f14CC ≥ f9 FDCC then f7=fault
RL5	If f5CC < f6 FDCC and f10CC ≥ f6 FDCC then f5=fault
RL6	If f5CC < f10 FDCC and f12CC ≥ f10 FDCC then f5=fault
RL7	If f3CC < f4 FDCC and f11CC ≥ f4 FDCC then f3=fault
RL8	If f5CC < f3 FDCC and f3CC ≥ f6 FDCC then f5=fault
RL9	If f5CC < f4 FDCC and f4CC ≥ f6 FDCC then f5=fault
RL10	If f5CC < f7 FDCC and f7CC ≥ f6 FDCC then f5=fault
RL11	If f4CC < f3 FDCC and f11CC ≥ f3 FDCC then f4=fault

• Table 5, Table 6 Parameter Description

\* Input variables

- 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

\* Output variable - f2,f3,f4,f5,f7

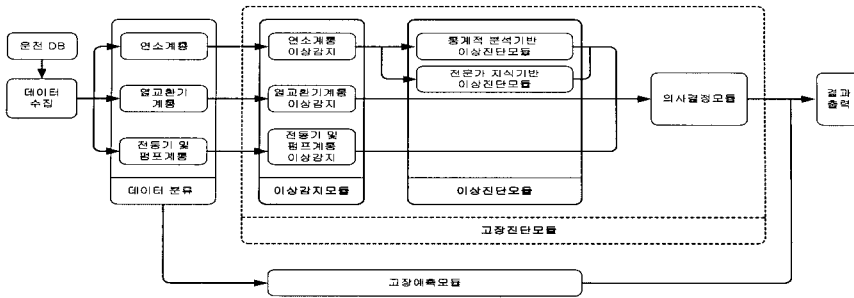


Fig. 2 Structure of the fault diagnosis and prediction system

Fig. 3은 이상감지 지식베이스와 이상진단 지식베이스를 이용하여 이상감지 및 이상진단을 수행하는 절차를 나타낸 것이다.

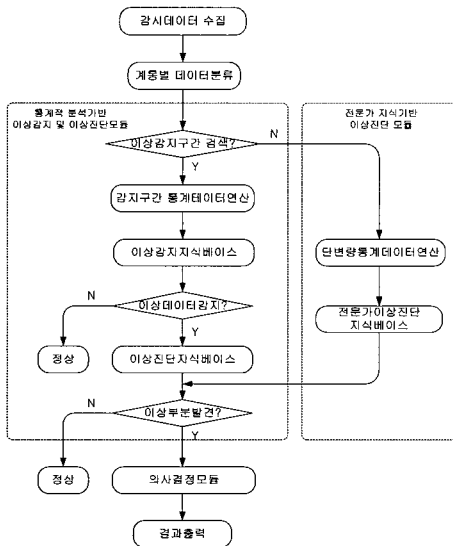


Fig. 3 Flowchart of the fault diagnosis system

#### 4. 실험시스템 구축

3장에서 설계된 이상감지 지식베이스와 이상진단 지식베이스를 구축하고 통계적 분석법을 이용한 고장진단 알고리즘으로 컴퓨터에 의해 자동적으로 고장진단을 수행할 수 있는 FMS를 개발하였다. 사용된 프로그램은 마이크로소프트사의 VC++ 6.0이며 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 상관 분석 데이터들을 계산해 낸다. 이들 데이터는 설계된 알고리즘에 따라 정상운항 데이터로부터 구축된 이상감지 지식베이스와 이상진단 지식베이스를 통해 실시간 감시된다. 감지된 데이터는 이상진단 과정을 거쳐 최종적으로 이상유무를 판단하여 화면에 표시하게 된다. 또한 이상상태의 감지 및 진단과정과 결과를 화면에 출력하며 이를 이용하여 예방정비일정에 필요한 기초 자료로 활용할 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

Fig. 4는 기관의 초기 참조값의 상태를 표시하거나 운전자에 의해 필요한 기초자료를 설정할 수 있도록 구성된 화면을 나타낸 것이다. 그림에서 'Historical Ref Status for Fault Detection' 부분에서는 H해운 선박의 과거 Log Book 데이터로부터 추출된 각 계통별 계측항목들의 통계적 분

석데이터(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.

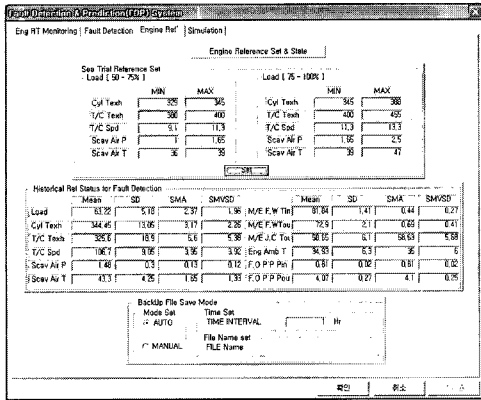


Fig. 4 State and parameters set window of the fault detection knowledge base

(2) Real Time Monitoring 화면

Fig.5는 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.

(3) Real Time Fault Detection 의 상태화면

Fig. 6은 계통별 계측항목사이의 CC를 통해 실시간으로 이상감지와 이상진단을 수행하는 화면이다. 상관분석기법에 의해 설정된 이상감지식베이스의 주요 데이터지표인 MVSD의 추이를 실시간으로 나타낸다. 이상감지모듈과 이상진단모듈로부터 감시데이터의 고장진단결과는 팝업 윈도우를 통해 이상상태 감지내역과 이상진단내역을 화면에 출

력할 수 있도록 구성되어 있으며, 열교환기계통과 전동기 및 펌프계통에서도 같은 방식으로 이상상태를 감지하고 진단결과를 얻을 수 있다.

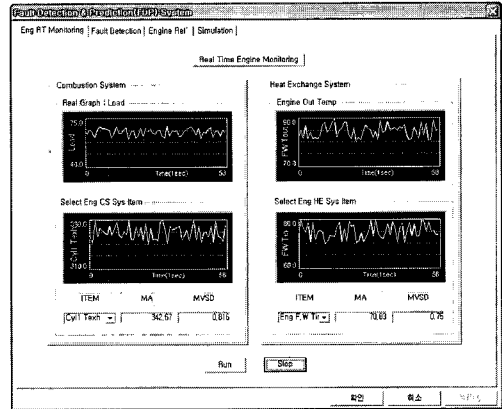


Fig. 5 Real time data display window for the monitoring

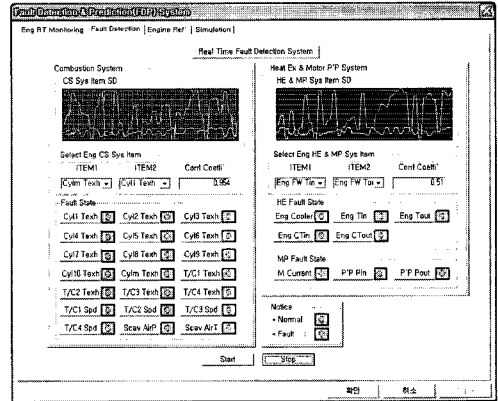


Fig. 6 Window of the real time fault detection state

5. 결 론

본 논문에서는 선박기관실의 상관분석법을 이용하여 고장진단시스템을 개발하였다. 이를 위해서 우선 실선운항데이터를 기반으로 선박디젤기관의 특성을 조사하여 연소계통과 열교환기계통 그리고 전동기 및 펌프계통으로 분류하였다. 선박기관시스템은 주기관을 포함하여 많은 보조기관들로 구성되어 있는 비선형성이 강한 시스템이지만 계측항목별 상관관계를 검토해 본 결과 상관관계가 높

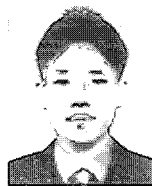
은 항목들로 분류할 수 있었다. 이를 바탕으로 상관분석법에 의한 계측항목사이의 상관관계를 이용하여 정량적으로 구하였다. 이를 통해 숙련된 운전자의 지식과 경험으로 이상을 감지하는 과정과 같이 통계적 분석기반 이상감지지식베이스와 이상진단지식베이스를 구축할 수 있었다.

모델선박의 실선운행데이터를 실시간으로 이상상태를 감지하고 이상진단을 수행하며 고장예측결과를 출력할 수 있도록 Visual C++ 6.0을 이용하여 FMS를 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.

### 참고문헌

- [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機關の現状と展望", 日本船舶機関學會誌, Vol.29, No.12, pp. 892-899, 1994.
- [4] 本村 收, 月祐之, "大型低速 ディ젤機關の現状と展望-三菱UE形 機關", 日本船舶機関學會誌, 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] 천행춘, "신경회로망과 퍼지추론을 이용한 선박디젤기관의 고장진단 예측시스템," 한국해양대학교 공학박사 학위논문, 2, 2003.

### 저 자 소 개



#### 김영일 (金英一)

1972년 1월생, 1998. 2한국해양대학교 제어계측공학과 졸업, 2000.2 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사), 2005.2 한국해양대학교 동대학원 졸업(공학박사), 현재 소나테크(주) 팀장, 정회원



#### 오현경 (吳玄卿)

1978년 3월생 2002.2 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업, 2004.2 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사), 현재 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 박사과정, 학생회원



**유영호 (劉永昊)**

1951년 10월생, 1974년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1986년 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사), 1990년 동대학원 졸업(공학박사), 1급기관사, 1997.12-1998. 12 영국 University of Wales Cardiff Systems Engineering Division 연구교수

1983-1991 한국해양수산연수원 부교수, 1992-현재 한국해양대학교 IT공학부 교수, 종신회원