

# 이상감지 상관계수를 이용한 선박디젤기관의 고장진단시스템에 관한 연구

## The Fault Diagnosis of Marine Diesel Engines Using Correlation Coefficient for Fault Detection

김경엽\*, 김영일\*\*, 유영호\*\*\*

Kyung-Yup Kim\*, Yung-Ill Kim\*\* and Yung-Ho Yu\*\*\*

### 요 약

본 논문은 선박 감시 시스템에서 수집된 데이터를 통계적 분석을 통해 고장유무를 진단할 수 있는 통계적 방법 기반의 고장진단시스템을 제안한다. 이를 위해 선박엔진데이터를 연소계통, 열교환계통, 그리고 전동기 및 펌프계통으로 분류하고 이들 데이터 간 상관계수를 분석하여 고장진단을 위해 필요한 전문가지식기반의 진단테이블을 도출한다. 고장진단성능을 테스트하기 위해 실제 운항데이터에 고장의 원인이 될 수 있는 외란을 삽입하여 고장유무를 판단하며 이를 사용자편의의 인터페이스로 제공하기 위해 VC++로 고장진단시스템을 구현한다.

### Abstract

This paper proposes fault diagnosis system which is able to diagnose 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.

Key words : Correlation Coefficient, Fault Detection, Marine Diesel Engines, Statistical Analysis Method

### I. 서 론

1980년대 이후 IT 기술의 급격한 발전에 따라 선박을 운용하기 위한 각종 시스템들이 점차 자동화되어가고 자동화된 시스템을 통해 운용 중인 장비의 데이터를 실시간으로 감시할 수 있게 되었다. 또한, 센

서기술 및 데이터 취합을 위한 디지털 기술의 발전에 따라 1980년대 이전의 선박에서는 약 600개 정도의 감시 항목이 있었던 것에 비해 현재는 약 10,000개 이상의 항목들을 통합시스템을 통해 감시할 수 있다. 이러한 시스템 감시 기술의 발전은 사용자로 하여금 시스템의 신뢰성 및 안전성 유지에 대한 관심을 고조

\* 한국해양대학교

\*\* 소나테크

\*\*\* 한국해양대학교(교신저자)

· 제1저자 (First Author) : 김경엽 kykimic@naver.com · 교신저자 (Correspondent Author) : 유영호 yungyu@hhu.ac.kr

· 투고일자 : 2011년 1월 25일

· 심사(수정)일자 : 2011년 1월 26일 (수정일자 : 2011년 2월 22일)

· 게재일자 : 2011년 2월 28일

시키고 이를 위한 고장진단기법에 관한 연구를 가능하게 했다.

기존의 선박 감시 시스템은 미리 정해놓은 설정치와 비교해서 이에 도달하거나 혹은 미치지 못한 경우 경보를 발생하는 한계치 검사 기법이 대부분이었다. 하지만, 이러한 감시시스템은 고장이 발생했을 때만 확실한 정보를 제공하는 반면, 최근 관심을 받고 있는 고장에 대한 조기대응이나 예방정비계획을 수립하기에는 다소 부적절하다. 이러한 한계치 검사방법은 일반적으로 고장이 발생한 시점에서 보수 점검을 행하기 때문에 시스템의 규모가 방대해지고 복잡해지는 경우 고장의 원인규명이 용이하지 않고 고장발생으로 인한 손실규모가 더욱 커지게 되므로 시스템의 안정성과 신뢰성을 높이는데 제한이 있어 이를 보완하기 위한 예방정비의 필요성이 주목받게 되었다.

고장 예측과 관련하여 최근에는 학습기법과 입출력 데이터로부터 비선형함수 표현이 가능한 신경회로망을 고장진단에 이용한 연구결과가 발표되어왔다. Palos 등은 이전의 입출력 관측치를 활용하여 시스템 출력 상태를 예측하는 다단계 예측기법을 사용하였고[1], Sharkey 등은 선박 4사이클 디젤 기관의 실린더 내 연소에 대해 고장 진단하는 방법을 이용하여 개발하였으며[2], Chun 등은 Neuro-Fuzzy를 적용하여 선박디젤기관의 이상 진단을 수행하였다[3]. 이러한 신경회로망을 이용한 연구는 학습을 위해 모든 발생 가능한 입출력에 대한 데이터쌍을 확보해야 하는데 사전에 모든 고장에 대한 모델을 구축하는 것이 매우 어렵다는 문제점이 있다. 또한, 퍼지 기법은 파라미터의 변화나 잡음에 대한 민감도가 낮아 견실하며 활용이 쉽고 범용성이 높지만 시스템의 복잡성이 높아짐에 따라 룰이 복잡해지고 제어시간이 길어지는 경향이 있다. 최근에는 통계적인 상관관계를 이용하는 고장진단방법이 제안되기도 하는데 이는 상태 데이터들의 상호 상관관계를 분석하여 데이터간의 관계를 도출해 내는 방법으로 가스터빈기관에 응용된 사례가 있으나, 시스템에 적용하는 연구는 거의 이루어지고 있지 못한 실정이다.

본 연구에서는 운항 중인 선박의 감시데이터를 분석하여 현재의 동작조건으로부터 고장을 진단하고 예보할 수 있는 통계적 방법을 이용한 고장진단 시스

템을 제안하고자 한다.

## II. 선박용 디젤기관의 계통분류 및 감시데이터의 특성

### 2-1 선박용 디젤기관의 계통분류

선박용 디젤기관의 구성은 그림 1과 같이 선박의 추진에 필요한 계통과 화물 및 주거에 필요한 계통으로 나눌 수 있다. 추진에 필요한 계통은 주기관계통, 발전기계통, 보일러계통으로 구분할 수 있다.

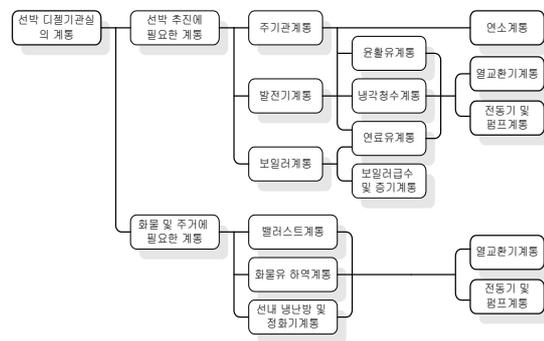


그림 1. 선박 디젤기관실의 계통분류

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

디젤기관은 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 특성 분석

모델이 된 선박은 1992년 9월에 건조된 H해운사의 4,024 TEU FULL CONTAINER CARRIER 선박으로서 본 논문에서 사용한 실선운항데이터는 본 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 고장

진단용 데이터로 활용하기에는 부적절하다. 따라서 본 논문에서는 선박이 항해항행 중 50[%]이상의 부하조건에서 시간에 따라 순차적으로 수집된 데이터 집합을 사용한다. 선박용 디젤기관의 계통별 감시데이터는 이상감지 및 이상진단을 위해 사용되는 주요 데이터로 표 1,2,3과 같다.

표 1. 연소계통 데이터

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
속도데이터[rpm]	과급기 속도

표 2. 열교환기계통 데이터

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
밸브개도데이터 [%]	소기냉각기 냉각수 입·출구온도
	3방향 밸브개도

표 3. 전동기 및 펌프계통 데이터

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]

선박용 디젤기관의 연소계통은 선박의 출력과 직결되며 상호 연관성이 강한 데이터들로 구성되어 있어 그림 2,3과 같은 계측항목들의 동특성을 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다. 그림 2에서는 과급기회전수가 부하변화에 직접적으로 영향을 받는 항목들로서 부하변동에 유사한 거동을 보이고 있다. 그림 3에서는 실린더 평균배기가스온도가 부하변동에 따라 전반적인 추세는 유사하지만 부하의 시계열 동특성을

정확히 추종하고 있지 않다. 그림 4에서는 과급기 배기가스온도가 부하변동과 유사한 특성으로 변하지만 부하가 높을 때 낮은 값을 가지며 부하가 낮은 경우 높게 나타나는 부(Negative)의 관계로 거동하고 있음을 알 수 있다.

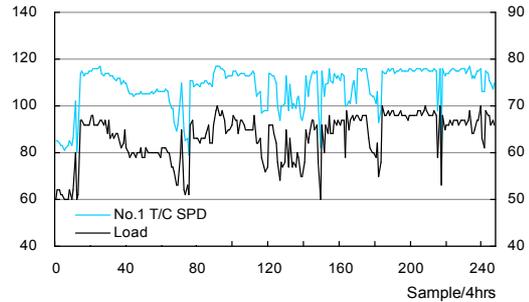


그림 2. 부하와 No.1 과급기 회전수의 시계열데이터  
Fig. 2. Time serial data of the load and No.1 T/C speed.

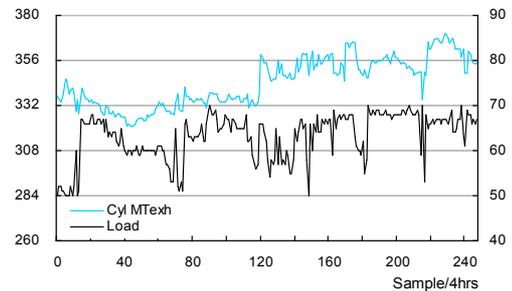


그림 3. 부하와 실린더 평균배기가스온도의 시계열데이터

Fig. 3. Time serial data of the load and cylinder mean exhaust gas temperature.

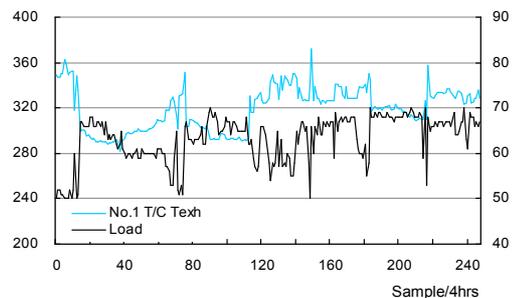


그림 4. 부하와 No.1 과급기 배기가스온도의 시계열데이터

Fig. 4. Time serial data of the load and No.1 T/C exhaust gas temperature.

마지막으로 그림 5는 연료순환펌프의 입·출구 압력과 전동기 전류에 대한 시계열데이터를 그래프로

나타낸 것이다.

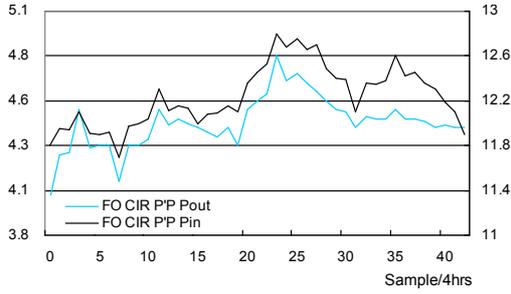


그림 5. 연료순환펌프 입·출구 압력의 시계열데이터  
Fig. 5. Time serial data of the FO circulation pump inlet/outlet pressure.

선박이 정상적으로 운항할 때에는 전동기 및 펌프 계통의 전동기전류와 펌프의 입·출구 압력은 크게 변동이 없다. 그림 5로 부터 미세한 펌프입구압력의 변화에 출구압력 또한 같은 경향으로 변하고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 전류변화에 대한 펌프압력과 의 연관성은 낮다.

### III. 설계 및 모의실험

#### 3-1 통계적 분석기법을 이용한 이상 진단 모듈 설계

선박용 디젤기관은 계측항목들 간의 상관관계가 높으며 비선형성이 강한 계통들로 구성되어 있다. 따라서, 본 논문에서는 계측항목사이의 관계를 상관계수(CC)로서 정량적으로 표현하는 상관분석법을 이상 감지모듈과 이상진단모듈의 설계에 이용하며, 상관 계수를 구하는 과정은 다음과 같다.

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

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

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

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

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

$X$ : array1,  $Y$ : array2

연소계통을 구성하고 있는 계측항목이 부하와 얼마나 높은 상관관계를 가지고 있는지 알기 위하여 우선 대상 선박 관련 항목들의 모집단(Population)에서 모집단평균(PM)과 모집단표준편차(PTSD) 그리고 공분산을 구하고 모집단CC(PCC)를 구한다. 여러 개의 모집단에서 얻은 PCC의 평균을 MCC로 나타내고 이들 MCC의 표준편차를 SDCC로 구하였다. 표 4는 부하와 연소계통의 계측항목사이의 CC를 구한 것이다.

표 4. 부하의 PCO구간에 대한 계측항목 사이의 CC  
Table 4. CC of the MIs in PCO ranges of the load.

	Load					PCC	MCC	SDCC
	R1	R2	R3	R4	R5			
No.1 Cyl Texh	-0.121	0.783	0.554	0.593	0.741	1	0.51	0.366
No.2 Cyl Texh	0.553	0.702	0.518	0.857	0.612	0.399	0.65	0.136
No.3 Cyl Texh	0.690	0.805	0.797	0.887	0.630	0.453	0.76	0.102
No.4 Cyl Texh	-0.081	0.638	0.520	0.456	0.458	0.449	0.40	0.278
No.5 Cyl Texh	-0.243	-0.125	0.119	0.885	0.636	0.372	0.25	0.488
No.6 Cyl Texh	-0.324	0.341	0.104	0.751	-0.014	0.379	0.17	0.403
No.7 Cyl Texh	0.158	0.453	0.701	0.934	0.594	0.391	0.57	0.289
No.8 Cyl Texh	-0.353	0.586	0.667	0.883	0.737	0.523	0.50	0.491
No.9 Cyl Texh	-0.329	-0.220	-0.044	0.922	0.226	0.481	0.11	0.499
No.10 Cyl Texh	0.500	0.244	0.638	0.723	0.375	0.347	0.50	0.193
Cyl MTexh	0.060	0.548	0.563	0.938	0.512	0.458	0.52	0.312
No.1 T/C Texh	-0.975	-0.936	-0.970	-0.997	-0.960	0.440	-0.97	0.022
No.2 T/C Texh	-0.974	-0.937	-0.953	-0.994	-0.956	0.452	-0.96	0.022
No.3 T/C Texh	-0.972	-0.875	-0.921	-0.984	-0.930	0.442	-0.94	0.044
No.4 T/C Texh	-0.967	-0.882	-0.932	-0.988	-0.932	0.408	-0.94	0.041
No.1 T/C Spd	0.995	0.972	0.977	0.989	0.996	0.450	0.99	0.011
No.2 T/C Spd	0.995	0.974	0.980	0.990	0.996	0.941	0.99	0.01
No.3 T/C Spd	0.996	0.973	0.980	0.993	0.996	0.938	0.99	0.01
No.4 T/C Spd	0.995	0.975	0.976	0.989	0.995	0.944	0.99	0.01
Scav air Pin	0.996	0.982	0.979	0.992	0.998	0.944	0.99	0.009
Scav air Fwd Tin	0.954	0.636	0.875	0.527	0.922	0.888	0.78	0.21
Scav air Aft Tin	0.925	0.926	0.967	0.629	0.990	0.629	0.89	0.147

표 5. 실린더 평균배기가스온도의 PCO구간에서 각 실린더 배기가스온도의 CC

Table 5. 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 4와 표 5를 근간으로 계통 계측 항목의 상관관계를 규명하고 이에 전문가 지식과 경험을 추가하여 표 6과 같은 전문가지식기반 이상진단지식베이스를 설계할 수 있다.

표 6. 전문가지식기반 이상진단지식베이스

Table 6. Fault diagnosis knowledge base based on expert knowledge.

Rule No.	Rule
RL1	If f1=L and f2=L and f3=M and f4=L, then u=fault
RL2	If f1=L and f2=L and f3=H and f4=L, then u=fault
RL3	If f1=L and f2=L and f3=H and f4=M, then u=fault
RL4	If f1=L and f2=M and f3=L and f4=L, then u=fault
RL5	If f1=L and f2=M and f3=M and f4=L, then u=fault
RL6	If f1=L and f2=M and f3=M and f4=M, then u=fault
RL7	If f1=L and f2=M and f3=H, then u=fault
RL8	If f1=L and f2=H then, u=fault
RL9	If f1=M and f2=M and f3=H and f4=L, then u=fault
RL10	If f1=M and f2=H and f3=L and f4=L, then u=fault
RL11	If f1=M and f2=H and f3=M and f4=L, then u=fault
RL12	If f1=M and f2=H and f3=M and f4=M, then u=fault
RL13	If f1=M and f2=H and f3=H, then u=fault
RL14	If f1=H and f2=H and f3=H and f4=L, then u=fault
* Input variables - f1 : Load f2 : T/C inlet temperature f3 : Scavenging air pressure f4 : Scavenging air temperature * Output variable - u : Exhaust gas temperature	

3-2 이상감지 및 이상 진단 시뮬레이션

통계적 분석기법을 이용하여 선박추진기관의 이상감지모듈과 이상진단모듈을 구축하기 위해서는 숙련된 운전자의 지식과 경험과 같은 이상감지를 위한 지식베이스 구축이 필요하다. 본 논문에서는 이상감지를 위한 지식베이스를 구축하기 위해 통계적 분석기법을 이용하여 계통별 계측항목사이의 상관관계를 표 7과 같이 규정하였다.

표 7. 연소계통 계측항목 사이의 MCC 및 FDCC

Table 7. 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	

여기서,

MCC : mean of correlation coefficient

FDCC : correlation coefficient for fault detection

MI: measure item

Cyl. Texh : cylinder exhaust gas temperature[°C]

T/C SPD : turbocharger speed[rpm]

T/C Texh : turbocharger exhaust gas temperature[°C]

Scav. air Pin : scavenging air inlet pressure[MPa]

Scav. air Tin : scavenging air inlet Temperature[°C]

각 기관별 상관관계 테이블(표 7)과 고장진단 알고리즘(표 6)을 기반으로 고장진단시스템을 그림 6과 같이 구현하였다.

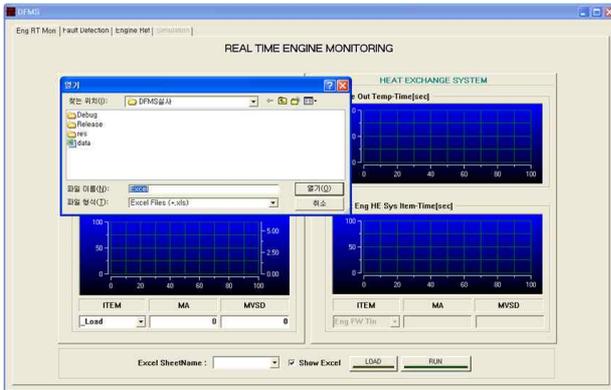


그림 6. 고장진단 시스템용 애플리케이션  
Fig. 6. Application for fault diagnosis system.

실제 정상운항 중인 데이터 중에 일부 구간에서 이상데이터를 삽입하여 강제로 고장모드를 발생하여 이를 감지할 수 있도록 테스트하였다.

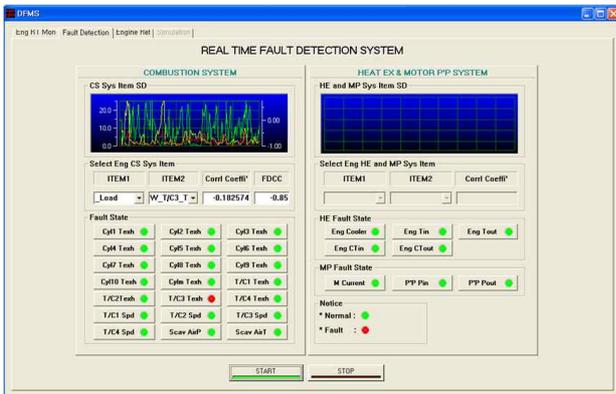


그림 7. 고장진단 결과 알람표시  
Fig. 7. Alarm display for fault diagnosis.

그림 7에서는 비교데이터로서 Load 데이터와 고장 데이터가 포함된 T/C의 배기온도데이터를 선택하였고 고장유무를 판단할 두 데이터간의 상관계수는 표 7에서 보듯이 -0.85 이다. 그림 7에서는 고장데이터를 임의로 삽입한 구간에서 Load 데이터와 T/C의 배기온도데이터사이의 상관관계가 기준값 -0.85보다 작아 고장으로 인식하고 T/C Texh3에 붉은색 LED로 알람을 표시하고 있다.

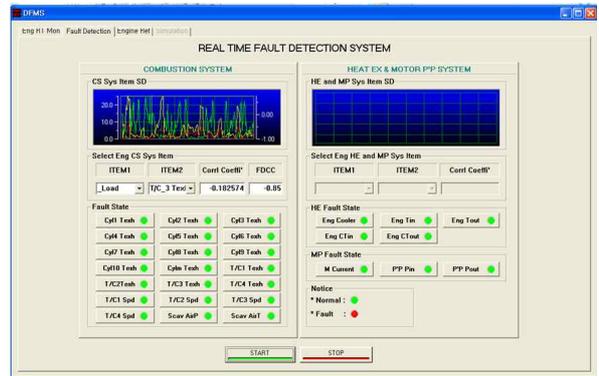


그림 8. 정상데이터를 포함한 T/C Texh data의 고장진단 결과  
Fig. 8. Results of fault diagnosis in case of normal T/C Texh data.

그림 8에서는 다시 Load 데이터와 정상적인 T/C의 배기온도데이터를 선택하여 두 데이터의 상관계수를 비교한 결과, 고장을 나타내는 알람이 녹색 LED를 나타내어 정상동작중임을 알리고 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 통계적 분석기법을 이용하여 운전 범위를 벗어나지 않더라도 이상상태를 감지하여 진단할 수 있는 이상감지모듈과 이상진단모듈, 진단결과로부터 관련항목들을 세부적으로 조사하여 고장결과를 출력하는 의사결정모듈을 포함한 고장진단모듈을 설계하였다. 선박기관시스템을 구성하는 장치 간의 계측항목별 상관관계를 검토해 본 결과 상관관계가 높은 항목들로 분류할 수 있었다. 이를 통해 숙련된 운전자의 지식과 경험으로 이상을 감지하는 과정과 같이 통계적 분석기반 이상감지지식베이스와 이상진단지식베이스를 구축할 수 있었다. 실선운항데이터의 임의구간에서 이상 요소를 발생시켜 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인해 본 결과 데이터의 이상상태가 신뢰성 있게 감지됨을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리

원의 IT핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음.[2008-F-046-01, E-Navigation 대응 IT-선박융합 핵심기술 개발]

### 참 고 문 헌

- [1] A.G.Parlos, O.T.Rais, and A.F.Atiya, "Mult-step-ahead prediction using dynamic recurrent neural networks," *Neural networks* 13, pp.756-786, 2000.
- [2] A.J..C.Sharkey, N.E.Sharkey, and O.C.Gohinath, "Diverse neural net solutions to a fault diagnosis problem," *Neural Computing and Applications*, 4, pp.218-227, 1996.
- [3] 천행춘, "신경회로망과 퍼지추론을 이용한 선박디젤기관의 고장 진단 예측 시스템," *한국해양대학교 공학박사 학위논문*, 2003.
- [4] 김영일, "통계적 분석기법을 이용한 선박디젤기관의 고장진단 및 예측시스템에 관한 연구," *한국해양대학교 공학박사 학위논문*, 2005.

### 김 경 업 (金璟燁)



1999년 2월 : 동아대학교 전기공학과 (공학사)  
 2002년 2월 : 한국해양대학교 제어계측공학과(공학석사)  
 2009년 2월 : 동아대학교 전기공학과 (공학박사)  
 관심분야 : NMEA2000 Stack,

Estimation Algorithm, intelligent control, micro-controller based control system

### 김 영 일 (金英一)



1998년 2월 : 한국해양대학교 제어계측공학과 (공학사)  
 2000년 2월 : 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 (공학석사)  
 2005년 2월 : 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 (공학박사)  
 2006년 ~ 현재 : 소나테크(주) 팀장  
 관심분야 : 고장진단, 디지털거버너, 디지털시스템

### 유 영 호 (劉永昊)



1974년 2월 : 한국해양대학교 기관공학과(공학사)  
 1986년 2월 : 한국해양대학교대학원 제어공학전공(공학석사)  
 1990년 2월 : 한국해양대학교대학원 제어공학전공(공학박사)

1974-1978년 : 승선근무(기관장)  
 1978-1980년 : 한국선급협회 기관감사원  
 1991년 - 현재 : 한국해양대학교 IT공학부교수  
 관심분야 : 선박표준네트워크, e-navigation 시스템, 조선기자재 임베디드시스템화