

해군 무기체계 한국형 상태진단시스템 발전방향 연구

오경원^{1,*}¹해군사관학교

Development of Korean Condition Based Maintenance Systems to Monitor Naval Weapon Systems

Kyungwon Oh^{1,*}¹Republic of Korea Naval Academy

Abstract

The primary aim for using a Korean Condition Based Maintenance (CBM) system is to maintain military operational readiness using Interactive Collection Analysis Systems (ICAS) installed on naval vessels. Other aims are to preemptively provision maintenance and supply functions, to guarantee economical management of logistical assets, and to implement data driven equipment life cycle management. In order to accomplish these aims, it is necessary to establish standard system conditions. However, because manufacturers do not provide the technology necessary for maintenance management, it is required to retain component performance maps for each piece of equipment, and to accumulate data about frequently occurring fault patterns. This study confirms the validity of component performance maps using micro gas turbines and provides accumulated data on machine break downs. This would allow real time equipment performance checks and present performance trends. Then analysis would provide solutions for maintaining the best machine operating conditions with detailed maintenance manuals for operators. This study is a basis for further research to investigate additional ways to develop CBM using data obtained from naval vessels used in actual military operations.

초 록

한국형 상태기준정비는 현재 한국해군 함정에 설치된 ICAS를 최대한 활용하여 전투준비태세를 완비하고, 선제적 정비/보급 지원과 군수자산의 경제적 운용, 데이터 기반 장비수명관리를 위한 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 장비상태의 기준을 설정해야 하는데 이는 제작사에서 원천적인 기술을 제공하고 있지 않아 각 장비별 성능 맵 확보가 필요하고 고장패턴 등의 자료 축적이 필요하다. 본 연구에서는 소형 가스터빈엔진을 활용하여 가스터빈 성능 맵을 확인하고 고장정보를 축적하여 실시간으로 장비성능 확인과 성능 경향을 나타내게 하였고 이를 통해 운용자의 행동지침과 정비자의 검사 절차등을 명시하여 최적의 장비상태가 유지 될 수 있도록 솔루션을 개발하였다. 본 연구를 기반으로 실제 함정의 데이터를 이용한 상태진단기법 발전에 활용할 예정이다.

Key Words : ICAS(통합상태조건평가시스템), CBM(상태기준정비)

1. 서 론

군의 전투태세 능력 향상을 위해서는 군수지원의 최적화가 핵심적인 요소이다. 군수는 전쟁의 동맥이라

할 수 있다. 이에 해군은 정보화 발전 추세에 맞는 군수업무의 효율성 및 효과성을 증대하기 위해 2015년 ‘군수업무 빅데이터 기술 적용’연구를 수행하였다. 현재까지 해군은 경험에 기반한 정비수행(표준정비항목 이외 정비)에 따른 예측정비 미흡으로 장비고장이 빈번하게 발생하였고, 정비관리자 수기에 의한 수리부속(전투교환 구성품, 창정비 필수품) 소요산정으로 수리부속 소요산정 및 평가체계가 미흡하여 국방소요계획

Received: Nov 07, 2016 Revised: Dec 13, 2016 Accepted: Dec 14, 2016

† Corresponding Author

Tel: +82-10-6276-7035, E-mail:oh.kyungwon@gmail.com

© The Society for Aerospace System Engineering

상 수리부속 소요 과대/과소 산정이 발생하였다. 또한 각종 장비 운용정보(센서정보)의 체계적인 수집 및 관리, 환류가 미흡하였다. 장비 운용정보(DELIIIS/N), 군수운용정보(정비/보급 실적등)는 있으나 단순 현황 관리 수준으로 예측정보가 미착출 되었다. 이처럼 해군의 군수분야는 Jim Davis의 정보의 진화 5단계 중에서 Level 3단계 ‘Integrate’로 통합DB 구축, 정보생산, 관리체계 진입, 조희성 정보제공, 개인별 분석도구를 제공하는 단계로서 점차 Level 4단계인 ‘Optimize’ 단계로 취합, 축적된 정보를 가공하여 예측 등의 고급정보를 생산하는 단계[1]로 발전을 모색하고 있다. 본 논문은 상태기준정비의 기술개발 동향과 함정의 주 추진기관인 가스터빈엔진의 한국형 상태기준정비 방안에 대해 기술하였다.

2. 상태기준정비 기술개발 동향

2.1 상태진단시스템 국외 기술 동향

상태진단시스템을 구축하기 위해서는 운용장비의 센서데이터를 축적/통합/관리 체계 구축이 필요하고 이를 원격으로 통신할 수 있는 통신체계가 필요하다. 미해군은 1967년 ONR(Office of Naval Research) 예하 기계 고장 예방작업 그룹(Mechanical Failure Prevention Group)에서 장비고장 예방 연구를 통해 상태진단시스템을 적합한 준비(Right Readiness), 적합한 비용(Right Cost), 정확한 시간(Right Time)에서 원격감시체계(Remote Monitoring)로 발전시키고 있다. Figure 1은 미 해군 NAVSEA(Naval Sea Systems Command)에서 2002년에 실시한 전투전단급 상태기반 관리운용 프로그램 개발 네트워크를 보여준다. 여기서 ICAS(Integrated Condition Based Assessment System : 통합상태조건평가시스템)를 기반으로 데이터 무선통신과 RCM(Engineering Knowledge Base built on Reliability Centered Maintenance), FMEA(Failure Mode Effects Analysis), Configuration Data Set(List of Equipment, Alarm Thresholds, Logsheets, Failure Modes, Rules Based Diagnostic System, Event Capture, Trends) 등 시험/평가 하였다. 이를 통해 ICAS의 야전 운용 성능에 대해 평가와 위성을 이용하여 전구작전 함정의 실시간 장비상태 진단 평가 가능성을 입증하였다. Figure 2는 ICAS 운용현황을 나타낸 것으로 다음과 같은 자료를 제공하고 있다.

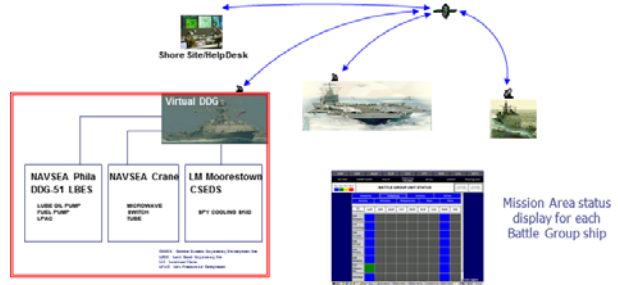
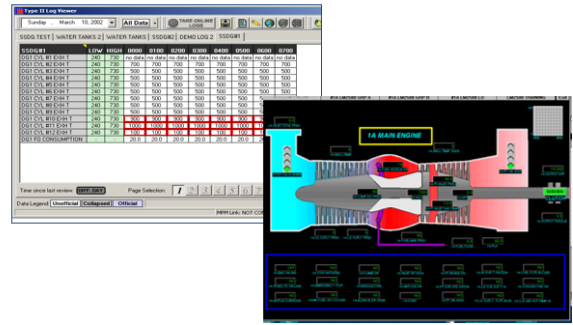


Fig. 1 Wireless Enhancement of ICAS(WEI) evolution from Battle Group - Automated Maintenance Environment(BG-AME)

Data Logging / Situational Awareness



Continuous Analysis

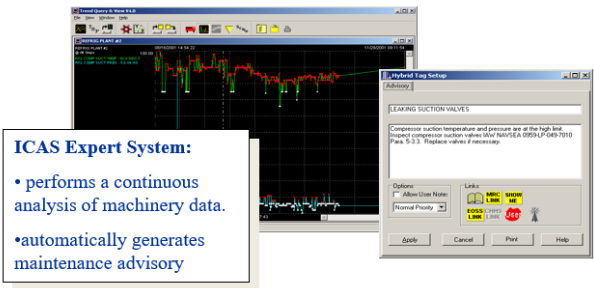


Fig. 2 ICAS Capabilities

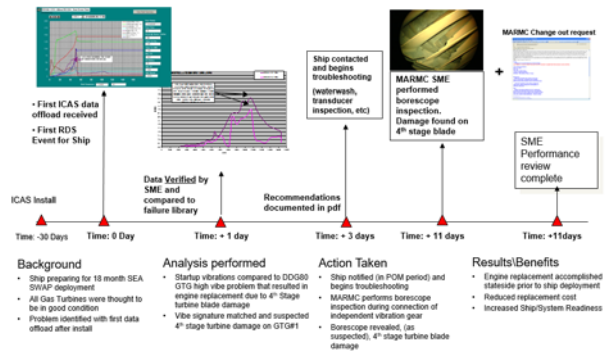


Fig. 3 DDG-81 Case Study Timeline (GTG High Startup Vibrations)

- CBM implementation tool
 - Machinery Data Trending
 - Rules based expert system
 - Vibration Analysis
- Troubleshooting Aid
 - Rules based expert system
 - Event capture
- Operational Assessment
 - Material Assessment
 - Plant Situational Awareness
 - Assessment Visit Support (Availability Planning)
- A tool to enable reduced manning
- ILS
 - Access and linkage to PMS, EOSS and IETMs
- Electronic Logsheets

ICAS는 실시간 장비성능 측정데이터를 저장/평가 후 결과를 분석하여 잠재적 고장요소에 대해 적합한 정비를 권고하는 시스템으로 구축되어 있다. Figure 3은 미 해군 DDG-81 함정의 GTG(Gas Turbine Generator) 고장진단에 대한 사례를 나타낸 것이다.[2]

ICAS 설치된 후 진동수치가 급격히 증가하였고 그 결과를 정비자에게 전달되어 정밀검사를 실시하여 예방정비한 사례로 ICAS의 예방정비 운용목적을 보여준

대표적 사례가 되었다. 또한 획득된 데이터를 분석하여 엔진성능을 측정함에 따라 적기에 정비유지를 통해 최적의 연료소비를 유도하여 효율적으로 장비운용이 가능하게 되었다. 미 해군은 이러한 시스템을 CG-47 클래스 함정 27척에 적용하여 연간 약 12,744천불(472천불/척당) 예산을 절감하였다.[2]

가스터빈 제작사에서도 이러한 유지보수 중요성과 시장성이 확대됨에 따라 적극적인 투자에 나서고 있다. 롤스로이스社(Rolls-Royce)는 생산된 가스터빈이 약 500개의 항공사에서 매일 4,000개가 가동되고 있고, 매일 6만 5,000시간 분량의 엔진 가동 데이터를 수집/분석하여 엔진 수리 및 부품 교체 여부를 결정하는 유지보수 서비스를 제공하고 있다. 이러한 항공, 선박 엔진의 서비스를 통해 고장 가능성을 사전 탐지하여 영업이익률 2.5배 증가 하였다. GE의 경우 최근 10억 달러를 투자하여 데이터 분석 소프트웨어 센터를 개조하였고, 비행기 엔진, 발전 플랜트, 의료기기 등의 분야에 예방보수, 원격 모니터링 등의 서비스를 제공하고 있다.

2.2 상태진단시스템 국내 기술 동향

국내에서도 상태진단기법에 대한 개발은 각 산업계에서 활발하게 진행되고 있다. 그중 가스터빈엔진에

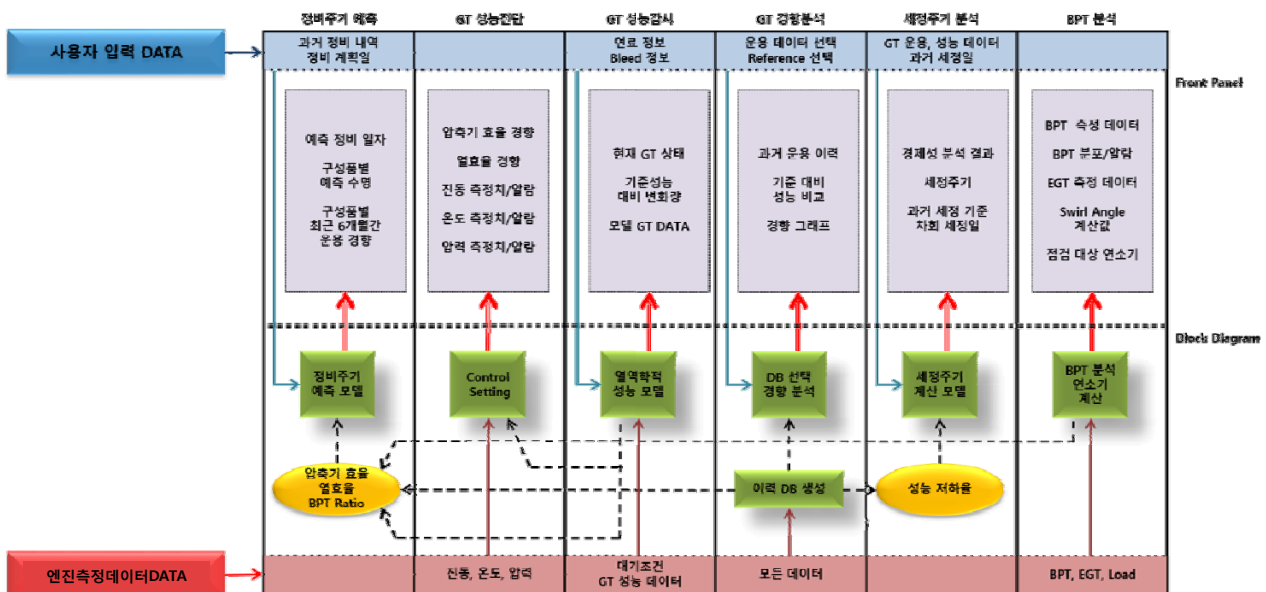


Fig. 4 Configuration of 6 Modules and Data Flow

대한 상태진단기법 개발은 한국에너지기술연구원 지원으로 산업용 가스터빈의 정비 의사결정을 지원하기 위한 시스템을 ㈜EGT에서 개발하고 있다. 상태진단을 위해 대상 가스터빈의 기준 성능 모델을 개발하고, 정비 의사결정에 필요한 Fig. 4와 같이 정보 솔루션을 제공하고 있다. 현재 개발된 EMAS(Easy Maintenance Assistant Solution)는 군산 복합 발전소에 설치되어 시험 운용 중에 있으며 적용된 엔진은 Mitsubishi사(MHI)에서 개발한 MHI501G 모델이다. Figure 5는 EMAS에서 가스터빈 상태모니터링 부분의 화면이다. EMAS에서 제공되는 모듈은 6가지로 구분되어 가시화 하고 있다.

- 실시간 성능감시 모듈
 - 주요 구성품의 실시간 계측 성능 Display
 - 현 운용 조건에서의 기준 성능 계산
 - 기대 성능 대비 실제 운전 성능 차이 분석
 - 임의 운용 조건(대기, 연료 조성비, 부하, 2차 흐름 성능 등) 변화에 대한 성능 예측
- 가스터빈 성능진단 모듈
 - 압축기 효율 및 열효율의 추이 분석
 - 주요 구성품 및 부품의 진동, 온도, 압력 계측값의 실시간 모니터링
 - 정상 운용범위 이탈 알람
- 경향 분석 모듈
 - 임의 운영 기간 동안의 주요 성능 변화 출력
 - 특정 기간 사이의 성능 비교를 위한 데이터 저장
 - 시간 대비 성능 변화 및 O/H 대비 성능 변화 비교
- BPT(Blade Path Temperature) 감시 모듈
 - 실시간 BPT 분포도 출력
 - 출력 대비 Swirl Angle 계산
 - 블레이드 별 측정 온도 및 분포도 출력
 - 실시간 배기가스 온도 감시
 - 배기가스 (Nox) 분석
- 압축기 세정주기 관리 모듈
 - 시스템 운용에 따른 압축기 성능 변화
 - 전력 생산 비용 및 수익 등 다양한 변수를 고려한 압축기 온/오프라인 세정주기 예측
 - 압축기 성능 변화 실시간 Display
- 정비주기 관리 모듈
 - 오버홀 대상 주요 정비 구성품의 성능 변수

최근 경향 추이 분석

- 현 성능 변화율을 반영한 주요 구성품 수명 저하율 예측
- 계획 오버홀 일자 대비 최적 예측 오버홀 일자 비교
- 차회 오버홀까지 잔여 일수 Display
- 3년간 오버홀 계획 일자 Display

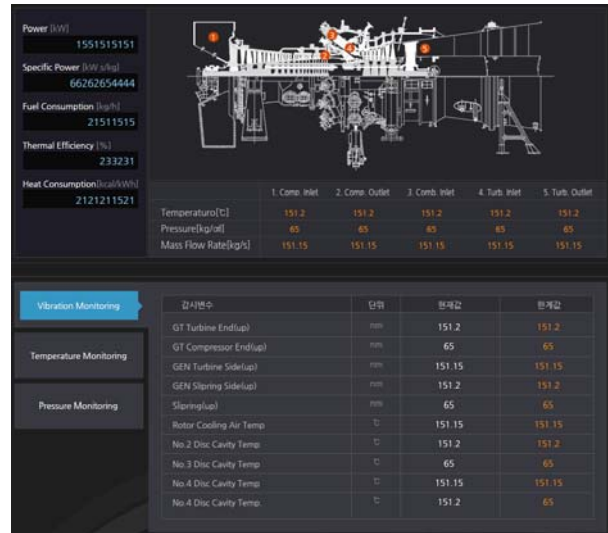


Fig. 5 GT Condition Monitoring Display

2.3 한국해군 무기체계 상태진단시스템 적용현황

한국해군은 2006년 ICAS를 대표적인 무기체계라 할 수 있는 DDG(세종대왕급)에 최초 설치하여 상태기 준정비 수행개념을 목적으로 설치되었다. 실시간 장비 상태를 감시하여 돌발고장을 방지하고 장비성능의 결 함관리를 통해 고장 발생시점을 예측하여 최적의 정비 시기와 정비방법을 결정하고자 하였다. ICAS를 운용하여 불특정 시간의 발생하는 치명적인 고장을 사전에 예측정비하여 가동율 향상, 정비비 절감, 함정 승조원의 업무부하 저감 효과를 달성하기 위해 적용되었다. 하지만 DDG ICAS는 한국해군이 상태기준정비개념이 정착되지 않은 상태에서 도입된 체계로서 사업관리 측면에서 반드시 필요한 파라미터별 기준값 데이터가 미 확보되어 총체적으로 성능발휘를 할 수 없는 상태이다. DDG에 적용된 LM-2500 가스터빈 제작업체 미국 GE社, 디젤엔진 제작사인 독일 MTU社, 롤스로이스社 등 엔진성능데이터를 기업의 비밀이라는 이유로 제공 하지 않고 있다. 또한 한국해군이 운용하는 엔진의 테

이터가 제작사로 넘어가 성능을 분석하고 결과를 받는 식으로 이뤄지게 되면 ICAS의 장점이라 할 수 있는 적기의 정비식별의 어려움이 있으며, 함정의 가동을 또한 고스란히 제3국으로 넘겨주게 되는 문제점도 발생하게 된다. 이러한 이유로 한국해군이 운용하는 엔진별로 성능맵을 확보 방안이 필요한 실정이다. 해군은 이러한 문제점을 극복하기 위하여 2011년 원격정비체계 구축사업을 통해 정비체계 구축을 위한 연구를 진행하였고, 정부는 국가적 차원에서 차세대 핵심사업으로 사물인터넷(IoT)에 대한 지원 계획을 발표('14.5월)하고 국방부는 미래창조과학부와 “첨단 정보통신기술(ICT)을 활용한 창조국방 업무협약”을 체결('15.5.19)을 통해 사물인터넷(IoT)을 활용한 다양한 사업을 추진하게 되었다. 이에 국방부는 선진국의 국방분야에 IoT/빅데이터 기술을 융합을 통한 장비고장 예측 시스템을 적극 도입/개발하게 되었다. Figure 6은 CBM의 발전방향으로 현재 기술상태는 감시 및 경고, 운용기록 저장까지 구현이 가능하고 송수신 체계 구축을 위한 연구가 진행되었고 고장 패턴 및 정비 권고 D/B 구축까지 목표로 개발이 진행되고 있다.

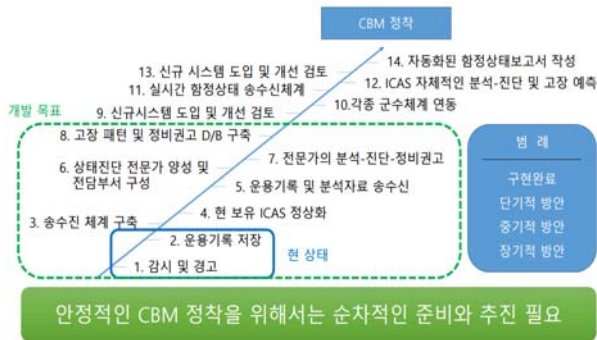


Fig. 6 Development Direction of Condition Based Maintenance(CBM)

3. 상태진단시스템 개발프로세스 적용

3.1 실험실 기반 엔진상태진단시스템 모니터링

한국형 상태진단시스템을 개발 프로세스 적용을 위해 실험실 기반으로 엔진상태를 모니터링하고 엔진 성능 맵 제작과 그를 통해 엔진상태를 분석하고 진단하는 프로그램을 개발하였다. 엔진상태모니터링 시스템

은 FSA (Frequency Spectrum Analysis), MCD (Magnetic Chip Detector), SOAP (Spectrum Oil Analyzer Program), etc. 와 GPAs, Observers, Parity Equations 모델 기반하는 기법, Neural Networks, Fuzzy Logic 매개변수 판단 및 Soft Computing 기법, 전통적인 기법인 전문가 시스템을 적용하여 엔진 상태 모니터링이 개발되어왔다 [4-6,9]. 본 연구에서는 소형 가스터빈 엔진 시험장치에 사용 중인 "I-jet 130" 터보제트 엔진의 실시간 정상상태 성능진단 및 상태감시시스템 프로그램을 이용하였고[8], 대상 엔진 구성품 성능 맵을 실험 데이터를 이용하여 역 생성하였다. 각 운용조건에서의 여러 성능

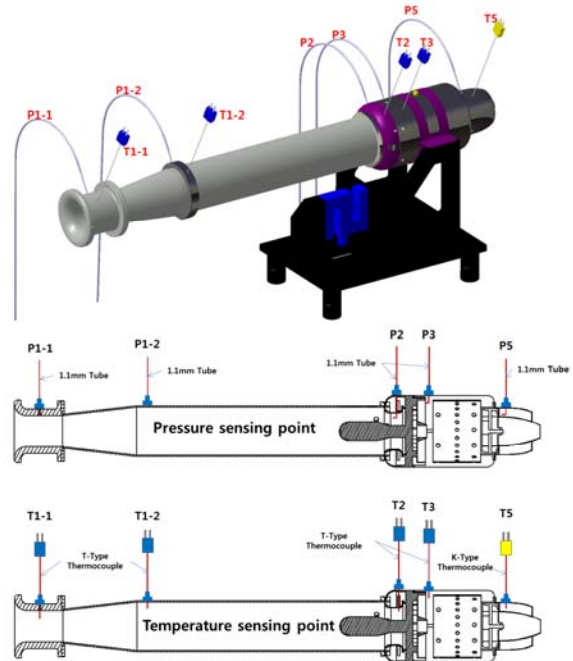


Fig. 7 Performance Data Measuring Points

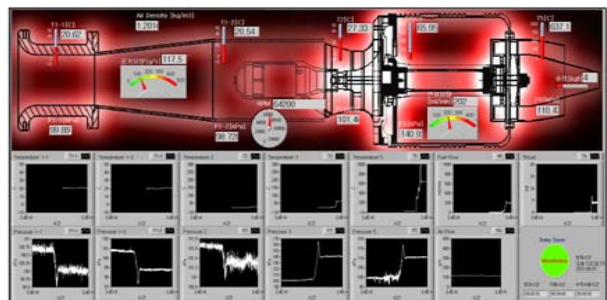


Fig. 8 Data Monitoring System.

데이터를 획득하였다. 개발한 정상상태 성능해석 및 상태 감시 프로그램의 검증을 위하여 지상 정지 조건에서 실제 측정된 실험 데이터와 성능해석 결과를 비교하여 개발한 모델을 검증 하였다. Figure 7는 소형 가스터빈 엔진에 공기유량, 압축기 입/출구와 터빈 출구의 온도 및 압력을 측정하기 위하여 센싱홀에 압력 측정용 튜브와 온도 센서를 장착하였다. 데이터는 Fig. 8과 같이 실시간 모니터링 화면(Real-time Monitoring System)으로 실시간으로 계측되는 데이터를 확인이 가능하도록 하였다. 압축기 입출구 온도, 압력, 터빈 출구 온도와 압력, 연료유량, 추력 값이 전시되어 있다.

3.2 가스터빈엔진 수명저하 파라미터 도출

가스터빈엔진 수명저하 계수를 도출을 위한 계산식은 다음과 같다. 수식 (1)은 압축기저하로 수명저하는 압축기의 성능, 압축기의 공기 유량으로 계산한다.

$$\circ \text{Comp}_{factor} = 0.5 \times e^{(0.02 \times \text{Comp}_{eff})} + 0.5 \times e^{(0.01 \times \text{Comp}_{NHP})} \quad (1)$$

수식(2)는 터빈에 대한 수명저하로 터빈의 성능, 터빈의 공기 유량으로 계산한다.

$$\circ \text{Turb}_{factor} = 0.5 \times e^{(0.025 \times \text{Turb}_{eff})} + 0.5 \times e^{(0.01 \times \text{Turb}_{NHP})} \quad (2)$$

수식(3)은 연소기에 대한 수명저하로 연소기에서 발생된 온도분포 불균형을 이용하여 계산한다.

$$\circ \text{Comb}_{factor} = e^{(0.2 \times -BPT \text{ Ratio})} \quad (3)$$

여기서, factor의 값이 1이상이면 제작사가 제공한 수명보다 짧은 총 분해 정비(O/H) 시간계산, factor의 값이 1이하이면 제작사가 제공한 수명보다 긴 총 분해 정비(O/H) 시간 계산을 적용한다. 성능 저하 계수를 이용한 정비 일자 계산은 다음과 같다.

$$\circ \text{연소부 예측수명} = \frac{\text{연소부 수명 } EOH}{\text{연소기 수명저하 계수}} \quad (4)$$

◦ 고온부 예측수명

$$= \frac{\text{고온부 수명 } EOH}{\text{Select(연소기, 터빈 수명저하 계수)}} \quad (5)$$

◦ 엔진 예측수명

$$= \frac{\text{엔진 수명 } EOH}{\text{Select(연소기, 터빈, 압축기 수명저하 계수)}} \quad (6)$$

이러한 시스템 상태를 반영하여 수명예측을 수행하고 총분해정비(O/H) 주기를 비교분석하여 최적의 장비 운용/정비 시스템을 도출하였다. 이를 통해 장비 가동율 증가에 적극 활용 할 수 있다.

3.3 한국형 상태기준정비 모델의 성능 및 정비예측

실험실기반으로 상태기준정비를 모델링을 수행하는 절차는 가스터빈 성능 맵이 제공되지 않는 엔진에 대해 가스터빈 성능 맵을 제작[8]하고 제작된 성능 맵을 이용하여 상태기준을 정립하고 정비방안을 구축하였다. 상태진단을 위해서는 획득된 센서데이터가 장비성능을 분석하고 상태를 진단하여 최적의 솔루션을 제공하고자 가스터빈을 이용하여 개발 가능성을 확인하였다. 획득한 데이터를 통해 전시되는 값은 3가지로 모사하였으며, 가스터빈엔진 상태, 상태분석, 정비이력 등이 나타날 수 있도록 하였다. Figure 9는 추력, 연료소모량, 엔진 출구 온도 및 압력 압축기 회전수를 가시화한 화면으로 엔진운용시 상태를 즉각적으로 확인하도록 하였다.

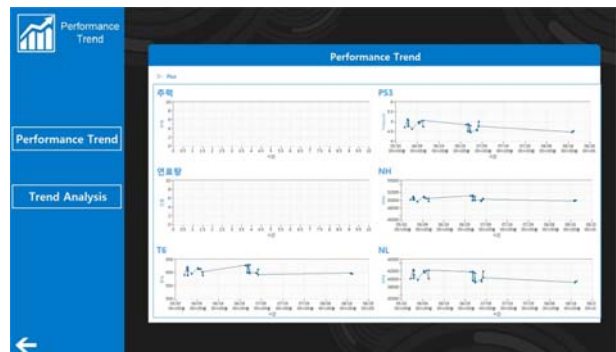


Fig. 9 Performance Trend

Figure 10은 상태모니터링으로 획득된 데이터를 분석하고 경향을 추적하여 성능 척도를 제시하고 있다. 고온부의 온도변화 경향이 상승하게 되면 알람을 통해 엔진 상태 진단 결과를 제시하고 이에 운용자의 행동

지침과 정비자의 검사 절차등이 명시하도록 하였다.



Fig. 10 Performance Trend Analysis

Figure 11은 장비운용시간과 장비상태에 따른 정비 흐름을 기록이다. 엔진의 시동횟수와 정상운용시간, 전체운용시간, 필터 및 오일 등 각종 소모품 교환주기 등을 기록하였고 창정비 도래주기를 명시하였다.



Fig. 11 Maintenance History

4. 결 과

한국형 상태기준정비는 현재 한국해군 함정에 설치된 ICAS(Integrated Condition Based Assessment System : 통합상태조진평가시스템)를 최대한 활용하여 전투준비태세를 완비하고, 선제적 정비/보급 지원과 군수자산의 경제적 운용, 데이터 기반 장비수명관리를 위한 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 장비상태의 기준을 설정해야 하는데 이는 제작사에서 원천적인 기술을 제공하고 있지 않아 각 장비별 성능 맵 확보가 필요하고 고장패턴 등의 자료 축적이 필요하다. 본 연구에서는 소형 가스터빈엔진을 활용하여 가스터빈 성능 맵을 확인하고 고장정보를 축적하여 실시

간으로 장비성능 확인과 성능 경향을 나타내게 하였고 이를 통해 운용자의 행동지침과 정비자의 검사 절차등을 명시하여 최적의 장비상태가 유지 될 수 있도록 솔루션을 개발하였다. 본 연구를 기반으로 실제 함정의 데이터를 이용한 상태진단기법 발전에 활용할 예정이다.

후 기

본 연구는 2016년 해군 해양연구소 국고과제지원(“가스터빈 추진시스템이 적용된 함정 정비지원시스템 플랫폼 개념연구”)으로 수행되었음.

References

- [1] Jim Davis, “Information Revolution: Using the Information Evolution Model to Grow Your Business” 2006.
- [2] Michael DiUlio, “ICAS and Remote Monitoring ; Informational Brief”, AMG2CC Workshop, 2015.
- [3] Y. G. Li, “GasTurbine Diagnostics”, Cranfield University LectureNote. 2004.
- [4] Ji. Jhou, “Intelligent Fault Diagnosis With Application to Gas Turbine Engines”, Ph. D thesis. The University of Sheffield, 1998.
- [5] L.A. Urban, “Gas Path Analysis Applied to Turbine Engine Condition Monitoring”, *J. of Aircraft*, Vol.10, No7, pp.400-406. 1972
- [6] L. H. Tsoukalas and R. E. Uhrig, “Fuzzy and Neural Approaches in Engineering”. John Wiley & Sons, Inc. 1997.
- [7] K. W. Oh, H. S. Choi, C. D Kong and H. B. Park, "Research on Naval Weapons Systems MRO by analyzing Aerospace MRO Industry", *SASE*, Vol.8, No.2, pp.13-20, June, 2014.
- [8] C. D. Kong, S. H. Kho, G. S. Park, G. L. Park, “Development of Practical Integral Condition Monitoring System for A Small Turbojet Engine Using SIMULINK and LabVIEW”, *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol.17 No.1, 80-88, 2013

- [9] C. D. Kong, M. C. Kang, G. L. Park “Study on Fault Diagnostics Considering Sensor Noise and Bias of Mixed Flow Type 2-Spool Turbofan Engine using Non-Linear Gas Path Analysis Method and Genetic Algorithms”, *SASE*, Vol.7, No.1, pp.8-18, March, 2013.