



Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2017.21.3.091>

산업용 가스터빈을 위한 정비지원 시스템 개발에 관한 연구

강명철^{a,*} · 기자영^a

A Development of EMAS (Easy Maintenance Assistance Solution) for Industrial Gas Turbine

Myoungcheol Kang^{a,*} · Jayoung Ki^a

^aStrategy Business Department/Technical Team, EGT Co., Ltd., Korea

*Corresponding author. E-mail: m.c.kang@ezgtc.com

ABSTRACT

The solution was developed for the maintenance decision support of combined cycle power plant gas turbine. The developed solution was applied to MHI501G gas turbine and is, in present, on the process of field test at GUNSAN combined cycle power plant, South Korea. The developed solution provides the calculated result of optimal overhaul maintenance period through following modules: Real Time Performance Monitoring, Model-Based Diagnostics, Performance Trend Analysis, Optimal Overhaul Maintenance Interval, Compressor Washing Period Management, and Blade Path Temperature Analysis. Model-Based Diagnostics module analyzed the differences between the data of gas turbine performance model and the online measurement. Compressor washing management module suggests the optimal point of balancing between the compressor performance and the maintenance cost.

초 록

복합화력 발전소의 가스터빈 정비 의사 결정을 지원하기 위한 솔루션을 개발하였다. 대상 엔진은 군산 복합화력 발전소에서 사용하고 있는 MHI 501G 가스터빈이다. 개발된 솔루션은 다음과 같은 모듈들을 통해 최적의 정비주기 계산 결과를 제공해주며, 각 모듈에는 실시간 성능 감시, 모델기반 성능진단, 성능 경향분석, 최적 오버홀 정비주기 예측, 압축기 최적 세정주기 관리, BPT (Blade Path Temperature) 분석 기능이 포함되어 있다. 모델 기반 성능진단은 실시간으로 계속되는 성능 파라미터 데이터와 가스터빈 시뮬레이션 결과를 비교하여 그 차이를 분석하여 진단을 수행한다. 압축기 세정주기 분석은 압축기 성능과 정비비용 사이의 최적 점을 제시한다.

Key Words: Gas Turbine(가스터빈), Engine Condition Monitoring(엔진 상태감시), Blade Path Temperature(블레이드 가스경로 온도), Compressor Wash Interval(압축기 세정주기), Maintenance Interval(정비주기)

Received 12 May 2016 / Revised 15 February 2017 / Accepted 19 February 2017
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Nomenclature

BPT : Blade Path Temperature
 EGT : Exhaust Gas Temperature
 EOH : Equivalent Operation Hour
 GT : Gas Turbine

1. 서 론

최근 기계 산업의 유지보수에 대한 관심이 높아지면서 제작사들은 유지보수 사업을 단순한 정비 및 부품지원에서 전체 수명 주기 동안의 운용관리 서비스까지 확장하고 있는 추세이다. 이러한 유지보수 산업의 영역 확장은 제품의 수명 증가, 신흥국의 원가 경쟁력 향상을 통해 신제품 수요가 감소하는 현상을 극복할 수 있는 수단으로 인식되고 있기 때문이다.

가스터빈 분야에서도 이러한 유지보수 시장이 커지고 있으며 엔진 제작사들의 경쟁도 치열해지고 있다. 항공용 가스터빈 제작업체인 롤스로이스(Rolls-Royce) 엔진의 경우 약 500개의 항공사에서 매일 4,000개가 가동되고 있고, 매일 6만 5,000시간 분량의 엔진 가동 데이터를 분석하여 엔진 수리 및 부품 교체 여부를 결정하는 유지보수 서비스를 제공하고 있다. GE의 경우 최근 10억 달러를 투자하여 데이터 분석 소프트웨어 센터를 개소하였고, 비행기 엔진, 발전 플랜트, 의료기기 등의 분야에 예방보수, 원격 모니터링 등의 서비스를 제공하고 있다[1].

현재 세계적으로 산업용 가스터빈 시장은 전체 가스터빈 시장의 약 40% 규모이며, 2018년까지 연 평균 3.8%의 성장이 기대된다. 현재 전체 가스터빈 유지보수 시장에서 발전용 가스터빈은 약 78%로 가장 크게 형성되고 있다[1]. 가스터빈의 유지보수 서비스 시장의 상당수는 제작사를 중심으로 형성되어 있다. 이로 인해 실제 운용사에서는 가스터빈 정비 및 운용에 관한 데이터 관리가 소홀해 왔으며, 체계적인 운용 관리 환경을 반영하지 못하고 있다. 최근 화석연료의 고갈로 전력 생산 단가가 증가됨에 따라 가스터빈을 운용하는 발전사는 운용비용의 절감과 효율적인 발전소 시스템 운용을 위해 많은 인력과 자원을

투자하고 있다.

EMAS (Easy Maintenance Assistant Solution)는 이러한 투자의 일환으로 개발되었으며, 가스터빈 엔진의 온라인 상태감시, 성능 저하율 분석 및 성능 경향 분석, 경제성을 고려한 최적의 압축기 세정주기 및 최적 오버홀 주기 예측 모듈을 포함하고 있으며, 현재 한국서부발전 산하 군산 복합발전소에서 시험운용 중에 있다. 이 논문은 EMAS의 개발과 적용사례에 대해 기술한다.

2. EMAS (EASY MAINTENANCE ASSISTANCE SOLUTION)

EMAS (Easy Maintenance Assistant Solution)는 Fig. 1과 같이 6개 모듈로 구성된다. 가스터빈으로부터 직접 측정되는 데이터는 데이터 서버를 통해 입력되고, 사용자가 직접 입력하는 데이터는 각 모듈에서 입력되도록 하였다. 데이터 서버는 대상 엔진과 EMAS 시스템이 설치되는 발전소에 따라 수정 및 재사용이 용이하도록 설계되었다.

시스템은 용도에 따라 6개의 모듈로 나뉘고, 필요에 따라 서브 모듈을 갖도록 설계하였다. 가스터빈에서 직접 측정되는 실시간 데이터는 데이터 서버에 데이터베이스 형태로 저장되며, 모든 모듈에서 접근이 가능하다. 각 모듈은 필요에 따라 독립적 또는 상호 보완적으로 기능을 수행하며, 모듈 간의 인터페이스는 프로그램의 계산 및 데이터 관리 부하를 고려하여 최적화 된 설계를 수행하였다. 모든 화면 구성은 현장 환경과 사용자의 의견을 수렴하여 설계하였으며, 가스터빈의 전반적인 상황을 보여줄 수 있도록 메인 화면을 구성하였다.

2.1 적용 대상 가스터빈

현재 개발되어 시험 운용 중인 EMAS의 대상 가스터빈은 Mitsubishi사(MHI)에서 개발한 MH501G 모델이다. 터빈 입구온도를 1500℃까지 높은 최신 기술의 엔진으로 한국에서는 군산 발전소에서 최초로 도입하여 운용 중에 있다.

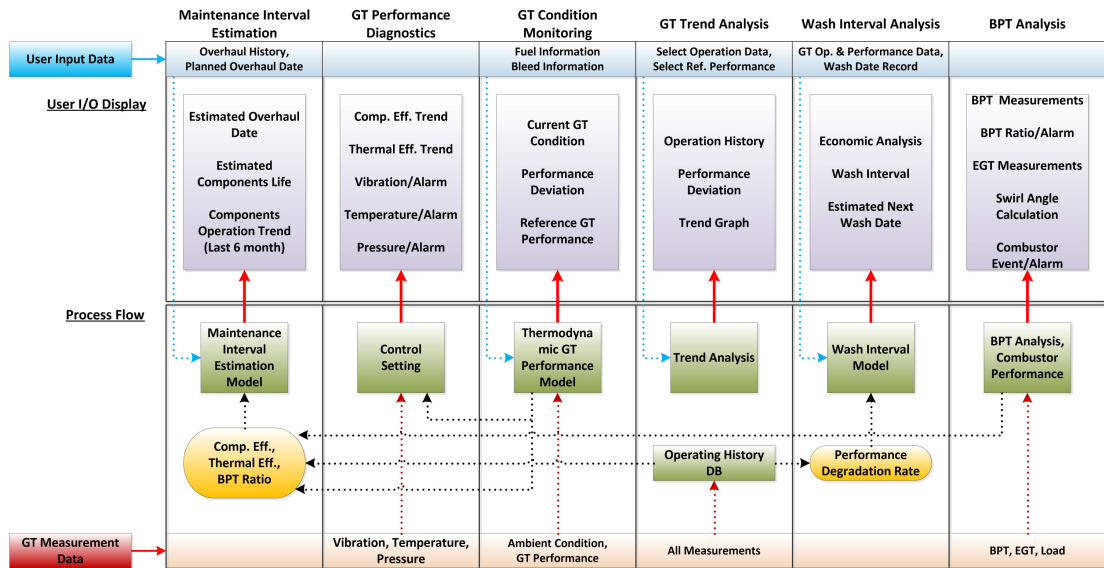


Fig. 1 Configuration of 6 modules and data flow.

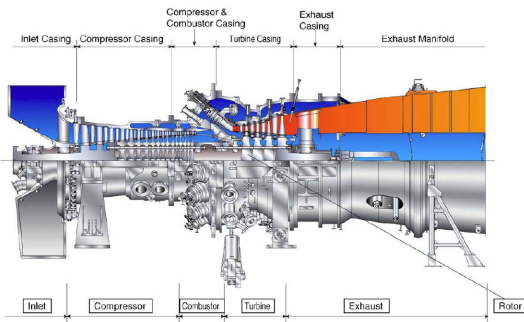


Fig. 2 MHI501G industrial gas turbine.

MHI501G는 17단 Axial Compressor와 16개의 연소실로 구성된 Cannular Combustor, 4단 Axial turbine으로 구성된 One-Spool Type으로 정격 출력은 258MW이다. MHI501G의 구성도는 Fig. 2와 같으며, 주기계약서 상의 주요 성능은 Table 1과 같다[2].

2.2 기준 성능 가스터빈 모델

EMAS는 Model-based 솔루션이다. 따라서 정확한 진단과 예측을 위해서는 대상 가스터빈의 정확한 성능 모델링이 중요하다[3]. 개발된 성능 모델의 적용 전에 신뢰성 검토를 위한 검증을 수행하였으며, 이를 위하여 개발된 기준성능 모

델의 입/출력 화면은 Fig. 3과 같다.

탈-설계점 성능 해석은 표준 대기조건과 대상 엔진이 설치된 군산의 1월과 8월의 평균 대기 조건에 대해 3가지 해석조건으로 수행하였으며, 제작사에서 제공한 주기계약서의 엔진 제작사 데이터 (출력 및 열 효율)와 비교하였다. 비교 결과는 Table 2, Fig. 4 및 5와 같다. 비교 결과, 최대 오차가 1.4%로서 모델링 오차가 비교적 적음을 알 수 있었으며, 이로 인해 상당히 정확한 열역학적 성능 모델이 개발되었음을 확인할 수 있었다.

3. 모듈 별 주요 기능

EMAS의 개발 목적은 사용자가 가스터빈의 성능을 직관적으로 판단할 수 있도록 하는데 있다. 이를 위해 Main Window에서는 각 모듈에서의 계산 결과를 요약하여 현재 대기상태, 기준 성능 대비 현재 성능 변화율 분석, 오버홀 계획 및 예측 일자, 주요 성능 감시 변수 알람, BPT (Blade Path Temperature) 분포도, 압축기 효율 경향 분석 및 예측 세정주기 일자를 출력한다. Fig. 6은 EMAS의 Main Window의 예이다.



Fig. 3 Input/output display for base-line performance calculation.

Table 1. Design point performance.

	Item	Unit	Value
Ambient	Temperature	℃	15
	Barometric Pressure	kPa	101.3
	Relative Humidity	%	60
Compressor	Inlet Air Flow Rate	kg/s	586.1
	Inlet Air Pressure Drop	kPa	1.226
	Inlet Air Pressure	kPa	100.1
	Outlet Temperature	℃	451
	Outlet Air Pressure	kPa	2,059.4
	Pressure Ratio	-	20.57
	Compressor Efficiency	%	0.831055
Combustor	Fuel Gas Flow	kg/s	13.456
	High Heat Value	kJ/kg	54,709
Turbine	Inlet Gas Temperature	℃	1,500
	Inlet Gas Pressure	kPa	1,961.3
	Exhaust Gas Temperature	℃	609.7
	Exhaust Gas Pressure	kPa	105.03
Gross Power Output		MW	258.1
Thermal Efficiency		%	35.06

Table 2. Off-design performance.

	Power (MW)		Error (%)	Thermal Efficiency (%)		Error (%)
STD Day (15℃)	257.5	258.1	0.2	35.1	35.1	-0.1
Cold Day (-0.4℃)	279.5	282.8	1.2	35.5	35.5	-0.2
Hot Day (26℃)	241.9	238.4	-1.4	34.6	34.4	-0.6

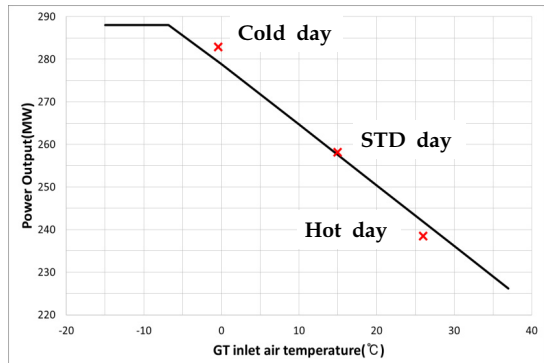


Fig. 4 Verification of base-line engine model(power).

이를 통해 운용자는 현재 가스터빈의 성능 상태와 정비 정보를 통합적으로 파악하여 정비에 대한 의사결정을 할 수 있다. 다음 각 절에서는 모듈별 목적과 기능, 활용방안에 대해 설명하였다.

3.1 실시간 성능감시 모듈

가스터빈 성능감시 모듈은 가스터빈의 열역학적 모델의 시뮬레이션 성능과, 실제 계측되는 성능을 비교하여 시스템의 성능 저하 및 손상 여부를 감시한다. 이는 제작사에서 제공한 설계 성

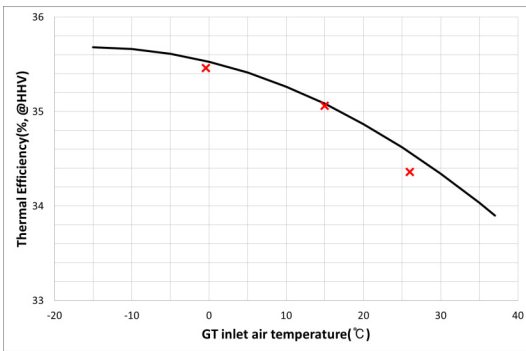


Fig. 5 Verification of base-line engine model(thermal efficiency).

능 또는 사용자가 지정한 성능 대비 실제 운용 데이터의 차이를 분석하는 것이다. 주요 기능은 다음과 같다.

- 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

이러한 기능들은 실시간 시스템 성능 모니터링, MHI501G 성능 모델을 이용한 다양한 운용 조건에서의 성능 시뮬레이션, Model-based 성능 진단을 위한 기준 성능 계산, 기준 성능 대비 실제 시스템 성능의 차이 분석 등에 활용될 수 있다.

3.2 가스터빈 성능진단 모듈

가스터빈 성능 진단은 실시간 운전 성능을 모니터링하고 정상범위를 벗어나게 되면 알람을 통해 시스템 운전 안정성을 감시한다(Fig. 7). 주요 기능은 다음과 같다.

- 압축기 효율 및 열효율의 추이 분석

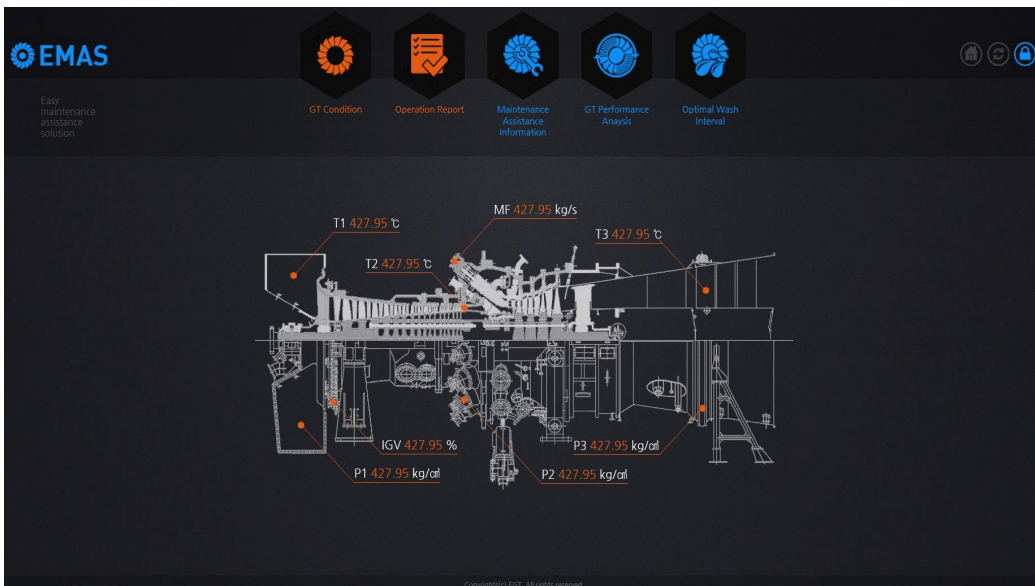


Fig. 6 EMAS main display.

- 주요 구성품 및 부품의 진동, 온도, 압력 계측값의 실시간 모니터링
- 정상 운용범위 이탈 알람

이러한 기능들은 압축기 효율 경향 분석을 통한 압축기 성능 저하율 감시, 열효율 경향 분석을 통한 가스터빈 시스템 성능 저하율 감시, 추진계통 주요 부위 진동 모니터링을 통한 기계적 결함 감시, 시스템 주요부위 온도 및 압력 모니

터링을 통한 과온/과부하, 압축기 서지 및 이상 유무 감시 등에 활용될 수 있다.

3.3 경향 분석 모듈

가스터빈 경향 분석의 개발 목적은 운전 이력 데이터 DB를 활용하여 시간에 따른 성능 변화 추이를 분석하고 계절별, 기간별, 정비 전/후 등 사용자가 원하는 조건에서의 가스터빈 성능 변화를 분석하는데 있다(Fig. 8). 주요 기능은 다음

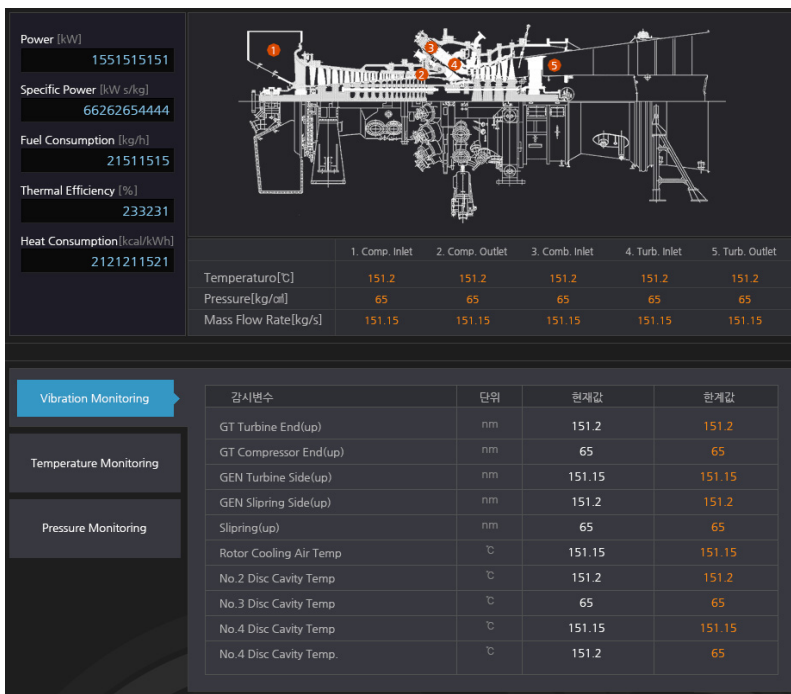


Fig. 7 GT condition monitoring display.

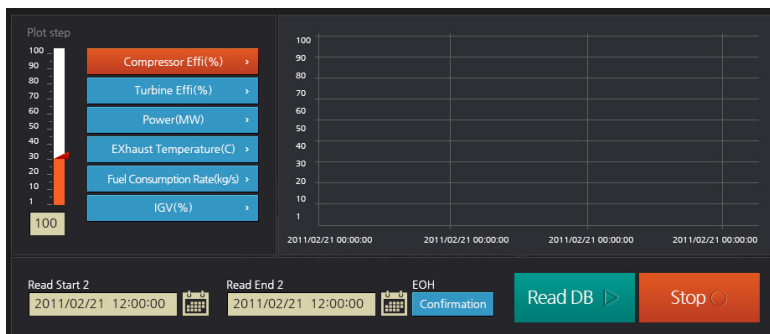


Fig. 8 Performance trend analysis display.

과 같다.

- 임의 운영 기간 동안의 주요 성능 변화 출력
- 특정 기간 사이의 성능 비교를 위한 데이터 저장
- 시간 대비 성능 변화 및 EOH 대비 성능 변화 비교

이러한 기능들을 통해 과거에서부터 현재까지의 가스터빈 성능 변화를 분석하여 향후 성능 예측에 활용할 수 있고, 기간별 성능 비교를 통해 시스템 성능 변화 추이를 분석할 수 있다.

3.4 BPT (Blade Path Temperature) 감시 모듈

BPT 분석 모듈은 연소기를 통과한 연소가스의 온도 분석을 통해 연소기 성능을 감시하고 정상 운용범위 이탈에 대한 알람을 제공한다(Fig. 9). 주요 기능은 다음과 같다.

- 실시간 BPT 분포도 출력
- 출력 대비 Swirl Angle 계산
- 블레이드 별 측정 온도 및 분포도 출력
- 실시간 배기가스 온도 감시
- 배기가스 (NOx) 분석

실시간 BPT 모니터링을 통해 연소기 성능 이상 유무 판단, 출력에 따른 Swirl Angle 계산을

통한 손상 연소기 위치 파악, 배기가스 온도 감시를 통한 과온, 과부하 운용 상태 감시 등에 활용될 수 있다.

3.5 압축기 세정주기 관리 모듈

압축기 세정주기 관리 모듈은 시스템 운용 비용, 압축기 세정 비용, 효율 저하에 따른 손실 비용, 세정 후 효율 상승에 따른 수익을 비교하여 가장 경제적인 세정주기를 계산한다(Fig. 10). 주요 기능은 다음과 같다.

- 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

현재 가스터빈 운용 비용(연료비, 정비비용, 손실비용 등) 및 판매 단가를 고려한 최적 세정주기를 계산하고, 제작사에서 제공한 세정주기 및 압축기 세정 비용의 경제적 타당성을 검토하는데 활용될 수 있다.

3.6 정비주기 관리 모듈

정비주기 예측 모듈은 A, B, C급 오버홀의 대상 정비 구성품의 성능 분석을 통해 최적의 오버홀 주기를 예측하기 위해 개발되었다(Fig. 11). 주요 기능은 다음과 같다.



Fig. 9 BPT monitoring display.

- 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

각 구성품의 수명저하 예측의 수학적 모델은 Eq. 1 ~ 3과 같다. 각 식은 GE 사의 수명저하 인자 및 저하계수 적용 방식[4]을 바탕으로 실제 성능 저하 경향 데이터를 적용한 경험식 형태로 개발되었다.

- 수명저하 인자의 저하 계수 계산
 - 압축기 : 압축기의 수명저하는 압축기의 성능, 압축기의 공기 유량으로 계산

$$Comp_{factor} = 0.5 \times e^{(0.02 \times Comp_{eff})} + 0.5 \times e^{(0.01 \times Comp_{NDMF})} \quad (1)$$

여기서, $Comp_{eff}$ = 압축기 효율, $Comp_{NDMF}$ = 압축기 유량함수

- 터빈 : 터빈의 수명저하는 터빈의 성능, 터빈의 공기 유량으로 계산

$$Turb_{factor} = 0.5 \times e^{(0.025 \times Turb_{eff})} + 0.5 \times e^{(0.01 \times Turb_{NDMF})} \quad (2)$$

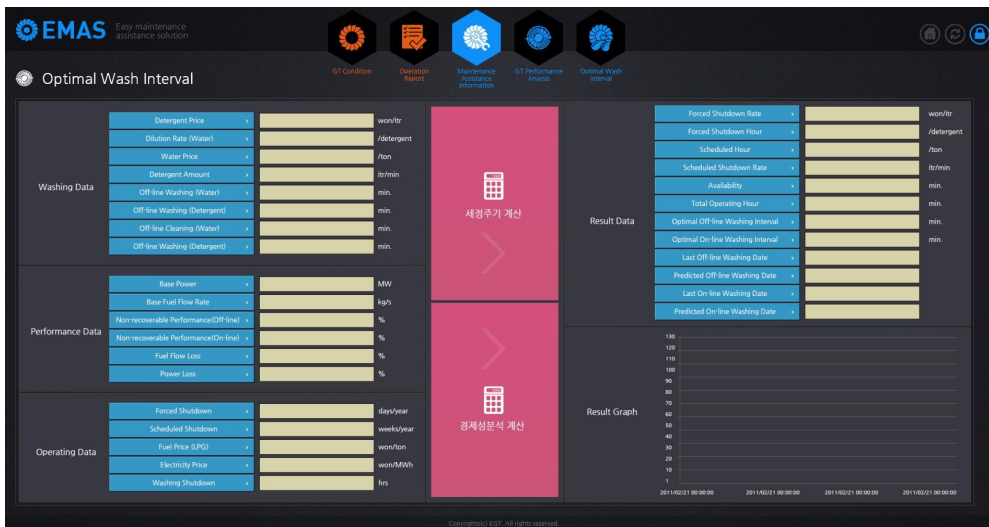


Fig. 10 Input/output display for compressor washing interval calculation.

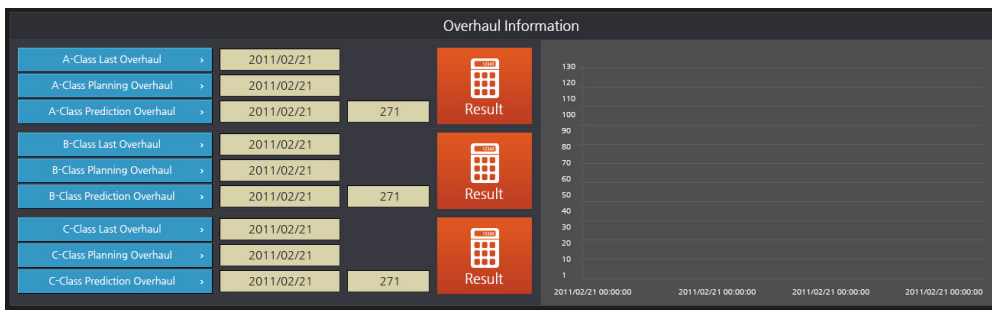


Fig. 11 Input/output display for calculation of each class overhaul.

여기서, $Turb\text{eff}$ = 터빈 효율, $TurbNDMF$ = 터빈 유량함수

- 연소기 : 연소기의 수명저하는 연소기에서 발생된 온도분포 불균형을 이용하여 계산

$$Comb_{factor} = e^{(0.2 \times -BPT\ Ratio)} \quad (3)$$

여기서, $BPTRatio$ = 터빈 출구 경로 온도 분포 비율, $factor$ 의 값이 1이상이면 제작사가 제공한 수명보다 짧은 OH일자 계산, $factor$ 의 값이 1이하이면 제작사가 제공한 수명보다 긴 OH일자 계산

- 저하 계수를 이용한 정비 일자 계산

- 연소부 예측수명 = $\frac{\text{연소부수명 } EOH}{\text{연소기수명 저하계수}}$
- 고온부 예측수명 = $\frac{\text{고온부수명 } EOH}{Select(\text{연소기, 터빈 수명저하계수})}$
- 엔진 예측수명 = $\frac{\text{엔진 수명 } EOH}{Select(\text{연소기, 터빈, 압축기 수명저하계수})}$

이러한 기능들은 통해 현재 시스템 상태를 반영한 예측 오버홀 주기와 비교, 분석을 통해 제작사에서 제공한 오버홀 주기의 타당성을 검증하고 최적 정비주기 모델을 수립한다. 또한 최적 시스템 정비 관리를 통해 발전 효율과 가동율을 최대화하는데 활용될 수 있다.

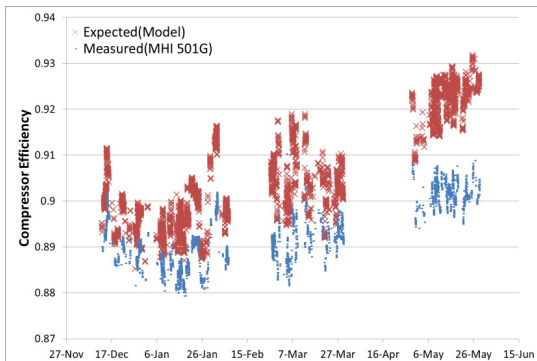


Fig. 12 Compressor efficiency.

4. 현장 적용 사례

EMAS는 2012년 7월부터 한국 군산 복합 발전소에서 테스트 운용 중에 있다. 주요 테스트 내용으로는 시스템 안정성 확인, 데이터베이스 생성 및 분석을 통한 시스템 신뢰성 확인, 제작사에서 제시한 각종 알람값과 운용자의 경험 및 환경에 의한 설정값 현실화 등이 있다. 현재 시스템 안정성은 발전소 서버와의 네트워크 인터페이스 수정을 통해 상당부분 안정화 단계에 이르렀다. 신뢰성 부분은 주기적인 데이터 분석 및 업데이트를 통해 향상되고 있다고 판단된다.

4.1 BPT 알람 기준 변경

현재 제작사에서는 BPT에 대한 정상 범위를 전체 평균의 -30~20℃로 제안하고 있다[5]. 하지만 운용사인 한국 서부발전 군산발전처는 오버홀 이후 수행하는 연소기 튜닝 결과를 통해 정상 운용 범위를 결정하여 사용하고 있다. 따라서 본 시스템에서 운용자의 의견을 반영하여 연소기 튜닝 후 일주일간의 데이터를 분석하여 얻은 결과를 정상 운용 범위로 설정하였다. 이를 바탕으로 향후 좀 더 빠른 점검을 할 수 있을 것으로 기대된다.

4.2 압축기 성능 저하에 따른 세정 주기 예측 기준 변경

2013년 5월말에 가스터빈에서 연료량 증가에 비해 출력이 증가되지 않은 현상이 발생되어 긴급점검을 수행하였다. 문제는 압축기 오염으로

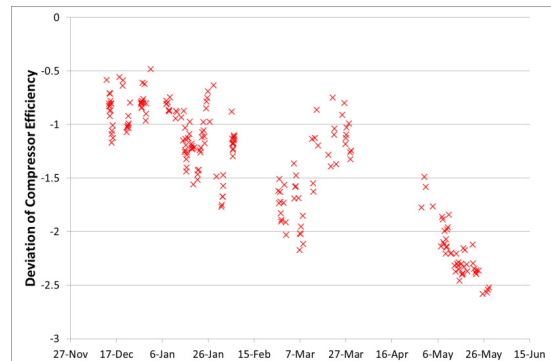


Fig. 13 Deviation of compressor efficiency.

인한 전체 출력이 저하되었고, 이에 따라 제작사의 제어기는 출력을 제한했던 것이다. 당시 본 시스템은 운용 중이었음에도 불구하고 감지되지 않았다. 데이터베이스 분석 결과 Fig. 12 및 13과 같이 기준성능 대비 성능저하가 뚜렷하게 나타났음에도 불구하고 느슨한 기준으로 인해 알람을 제공하지 않았던 것으로 나타났다[5]. 이후 알람 기준을 성능저하 3%에서 2.5%로 변경하였고, 2%에서 예비 알람을 추가하도록 하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 산업용 가스터빈의 정비 의사결정을 지원하기 위한 시스템을 개발하였다. 이를 위하여 대상 가스터빈의 기준 성능 모델을 개발하고, 정비 의사결정에 필요한 정보를 제공하기 위한 솔루션을 개발하였다.

프로그램은 기능의 확장성을 고려하여 각 기능별로 모듈화 하였으며 대상 가스터빈 변경 시 프로그램의 수정 및 재사용이 용이하도록 설계하였다. 현재 개발된 EMAS는 군산 복합 발전소에 설치되어 시험 운용 중이며, 추가적인 모듈에 대한 적합성 테스트를 수행 중이다. 또한, 상태 진단 및 예측을 위한 DB를 생성 중에 있어 구성품 수명 예측 모듈을 추가 개발할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원 지원 청정화력 핵심기술개발 사업(20151120200070, 산업용 가스터빈의 운영효율 향상을 위한 스마트 기기 연동 정비지원 시스템 개발)의 일환으로 수행되었음.

References

1. Korea Institute of Machinery & Materials Strategy Research, "Trends analysis and implications for machinery industry," *KIMM*, Issue No. 69, pp. 72-82, 2013.
2. Korea Western Power, "MHI501G Performance Contract," TR-M03-S2010-1566, 2010.
3. Walsh, P.P. and Fletcher, P., *Gas Turbine Performance*, 2nd ed., Blackwell Science, 2004.
4. David Balevic, Steven Hartman, Ross Youmans, "Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations," GER-3620L.1, GE Energy, 2010.
5. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., *MHI501G Operation Manual*, MHI, Ltd., Japan, 2010.