

플랜트 이상감시 및 원인진단 시스템

고 홍 철 (kohc@techdas.co.kr) / (주)테크다스

1. 개요

AI 및 디지털 기술의 발전과 함께 전통적으로 전문가의 영역이었던 사고 감시 및 예방 업무가 FDD(Fault Detection & Diagnosis) 또는 FDI(Fault Detection & Identification)의 상업적 제품을 통해 비전문가 영역으로 확대되고 있다. FDD는 대상의 동향을 지속적으로 감시하다가 이상 징후가 포착되면 바로 경보를 발행하고, 운전자가 조치할 수 있도록 이상의 원인을 식별하여 가이드를 제공한다.

한 통계에 의하면 사고의 90%는 단순한 기계적 손상이나 사람의 실수에 의해 발생한다. 사소한 결함이 공정이상 을 야기하고 비정상적인 상태가 계속되다 보면 설비 고장이나 사고로 발전한다. 대부분이 발생 초기에 발견하여 조치하면 고장이나 사고로 확대되는 것을 방지할 수 있으며, FDD는 이 개념에 기반한다.

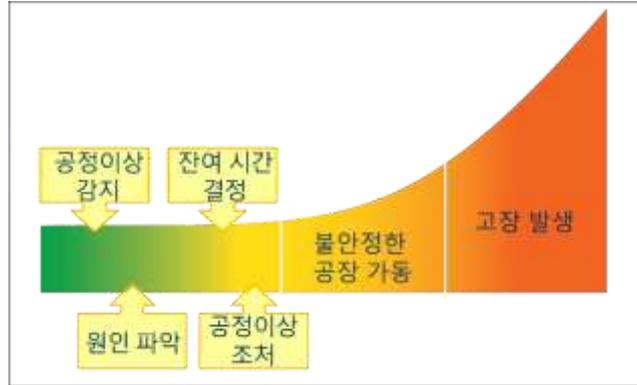


그림 1. FDD 시스템 기능[1]; FDD 시스템을 통해 고장이나 사고로 확대되는 것을 방지할 수 있음.

플랜트에서 고장이란 공정, 설비, 부품, 제품, 제어 시스템을 막론하고 이들이 일반적인 조건에서 주어진 기능을 수행하지 못하는 상태를 말한다. 고장의 원인은 크게 과응력(over-stress)과 마모로 분류된다. 과응력은 대상이 가진 강도에 비해 큰 응력이 작용하여 생기는 우발적인 변화인 반면, 마모는 시간에 따른 열화나 경화, 부식 등으로 사용기간에 따라 서서히 발생하는 변화이다.[2] 순간적인 과응력에 의한 사고는 FDD의 대상이 될 수 없으며, 서서히 발생하는 변화가 FDD의 대상이다.

2. 기대 효과

FDD 시스템은 공정이상 감시 및 진단 업무를 자동화하여 고장 없이 최고의 성능을 발휘하도록 지원하며, 설비의 수명을 정확하게 예측하여 최적의 정비 계획 수립을 가능하게 한다.[1]

설비 관리	성능 관리
<ul style="list-style-type: none"> · 사고 예방 · 비계획 가동 정지 감소 · 정비 비용 절감 	<ul style="list-style-type: none"> · 에너지 절감 · 품질 개선 · 처리량 유지

3. 실행 절차

FDD 시스템은 일반적인 온라인 모니터링 시스템의 실행 절차를 따른다.[2] 실시간 데이터 저장 장치(Data Historian)로부터 운전 데이터를 수집하여, 전처리 후에 FDD 알고리즘을 실행하고, 대처에 필요한 정보와 가이드를 출력한다. FDD 알고리즘은 이상감지(Fault Detection), 원인진단(Fault Diagnosis), 잔여수명 예측(Prognostics)으로 구성된다.

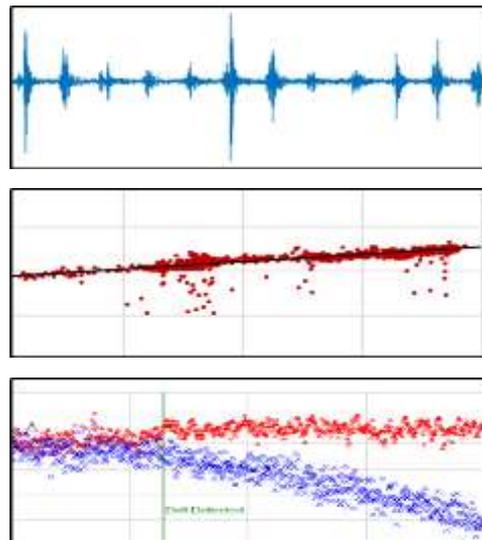


그림 2. FDD 시스템 실행 절차

(1) 이상감지

FDD 시스템은 공정이상 징후를 직접 감지하는 센서가 없을 때 사용한다. FDD 시스템은 패턴 인식 기법과 잔차 분석 기법으로 구분된다.

- 고도화된 센서 적용(Advanced Sensor Application)**
 고도화된 센서를 설치하고, 측정 값이 경계치보다 크면 공정이상으로 판단 (진동 센서, 음향 센서, 이미지 센서 등)
- 패턴 인식 기법(Pattern Recognition Technique)**
 공정의 상태를 나타내는 패턴을 학습하고, 학습한 패턴과의 다른 공정이상으로 판단 (증류탑 트레이 온도 분포, 반응기 유량 및 온도 분포 등)
- 잔차 분석(Residual Analysis)**
 변수 간의 관계식을 이용한 예측값과 측정값의 잔차가 크면 공정이상으로 판단 (반응기 출구 온도, 제품 품질, 배기가스 농도 등)



플랜트 운전 컴퓨터인 DCS(Distributed Control System)는 운전 변수가 High/Low 경계를 벗어날 때 경보를 발행한다. 일반적으로 정상을 비정상으로 판단하는 오류를 줄이기 위하여 경보 경계 범위를 넓게 설정한다. FDD 시스템의 이상감지 기법은 경보 경계 범위를 좁게 설정하여 준다. 그림 3과 같이 DCS 방법에 비해 Δt 만큼 조기에 공정 이상을 감지할 수 있다.

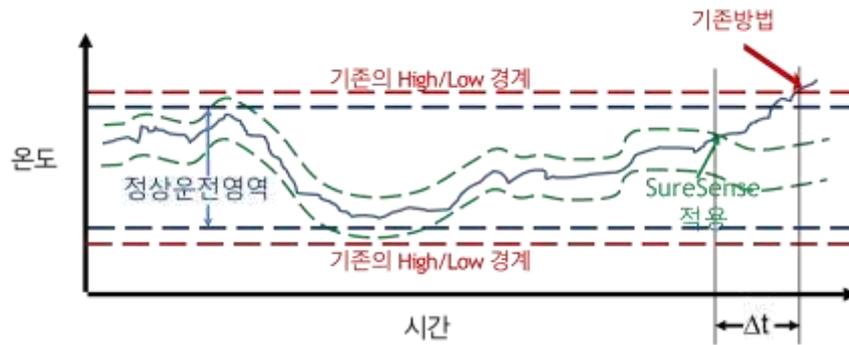


그림 3. High/Low 방식의 DCS 경보 체계 공정이상 조기감지를 위한 대비 SureSense FDD 알고리즘[3]

(2) 이상진단

공정 이상이 감지되면 다음은 공정 이상의 원인을 찾는 단계이다. 본 논문에서는 미국 Expert Microsystems 사의 SureSense[®][3]와 (주)테크다스의 PTOp-Valert[™]을 이용하여 사례 연구를 실시하는데, SureSense[®]는 전문가 시스템과 베이시안 네트워크를 적용하며, PTOp-Valert[™]는 공헌도 조사(Contribution Study)를 적용한다.

전문가 시스템은 운전 변수 패턴과 공정 이상 패턴을 1:1 매치하여 원인을 제시하며, 베이시안 네트워크는 변수 간의 인과관계를 확률적으로 분석하여 다수의 가능한 원인들을 찾는다.

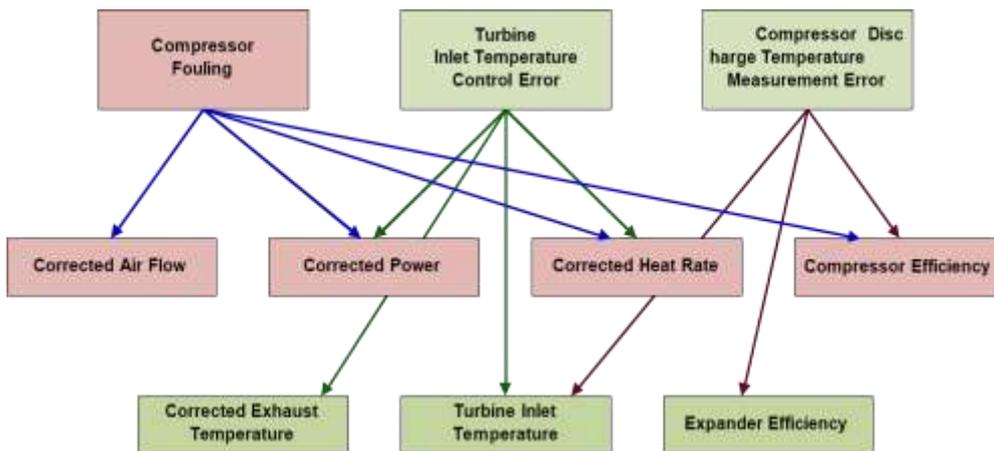


그림 4. 고장의 원인들을 확률과 함께 제시하는 베이시안 네트워크 사례[3]

공헌도 조사는 공정 이상 상태에서의 측정값과 정상 상태에서의 측정값의 차이를 비교하여, 차이가 큰 변수를 원인으로 제시한다. 막대 그래프의 길이로 영향의 크기를 판단하고, 방향으로 비례 또는 반비례 관계를 판단한다.

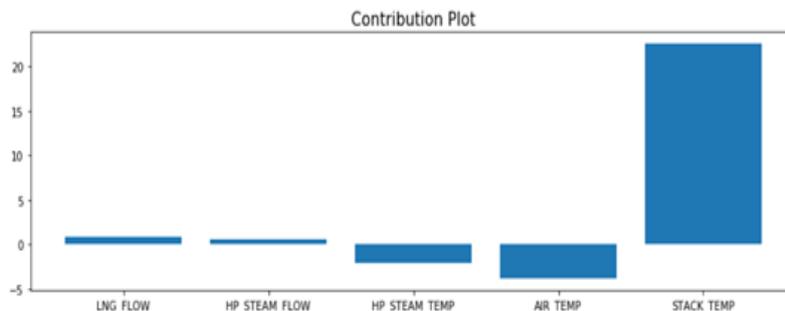


그림 5. 공헌도 조사 결과 예시

(3) 수명 예측

마모, 부식, 경화 등이 점점 진행되어 플랜트를 정상적으로 운전하기 어려운 한계에 이르기까지 잔여 시간을 예측한다. 운전 가능한 설비를 최대한 활용하기 위하여 보수 시점을 가능한 늦춰야 하므로, 실시간적으로 공정의 상태를 분석하여 잔여수명을 예측하는 상태 기반 보수(Condition Based Maintenance) 프로그램이 사용된다.

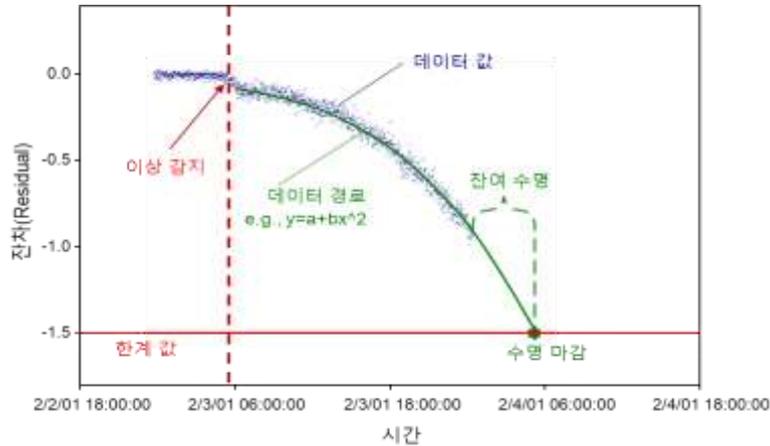


그림 6. 설비 열화의 경향성 모델을 이용한 잔여 수명 예측[3]

2. 플랜트 적용 사례

(1) 가스 압축기

3 단으로 구성된 압축기 사례이다. 본 압축기는 베어링 진동, 토출 압력, 토출 유량, 오일 온도, 전기 사용량을 측정하며, 이를 이용하여 측정 센서 고장, 베어링 손상, 임펠러 손상을 진단한다. 설비의 성능을 감시하기 위하여 별도로 이론식을 이용하여 압축 효율을 함께 모니터링한다. SureSense®를 이용하여 FDD 기능을 구성하면 그림 7과 같다. 그림에서 붉은 색은 이상 발생을 의미하는데, 현재 압축기 2단에서 베어링 진동과 효율 이상 경보가 떴었다.

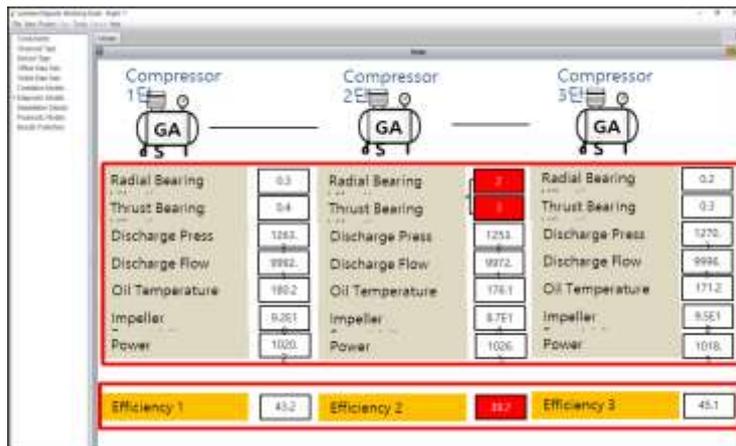


그림 7. SureSense®를 이용한 3 단 압축기 FDD 시스템 화면

압축기 운전에서 가장 중요한 서지(Surge)를 모니터링할 수 있다. 서지는 가스 공급이 원활하지 않거나 가스 밀도가 낮아 임펠러가 헛도는 상태를 말하는데, 서지가 발생하면 설비가 손상되기 때문에 자동으로 정지된다. 압축기 제작사에서 제공한 성능지도(Map)를 이용하여 서지선을 설정하지만, 운전 데이터를 통해서도 가능하다. 정상 운전에서의 토출 유량 대비 압축비의 산포도를 작성하고, 좌상의 경계선을 서지선으로 설정한다. 실시간 감시를 통

해 운전 상태가 서지선에 근접하면 트립을 방지하도록 경보를 발행한다.

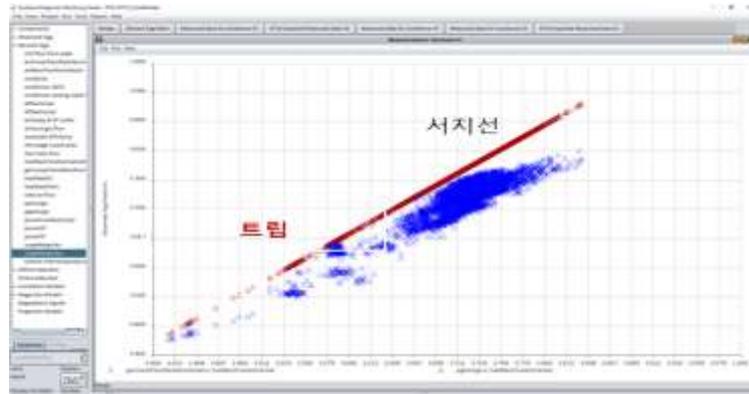


그림 8. 운전 데이터를 이용한 서지선 설정

(2) 보일러 스팀 유량 오차 및 효율 이상

센서 고장으로 오지시가 발생하면 센서 신호를 받아 작동하는 응용 시스템은 왜곡된 결과를 제시한다. 아래 그림은 보일러에 대한 고장예지 시스템의 화면으로 붉은색의 경보 두 개가 발생하였다. 하나는 스팀 유량계이며, 다른 하나는 보일러의 효율이다.

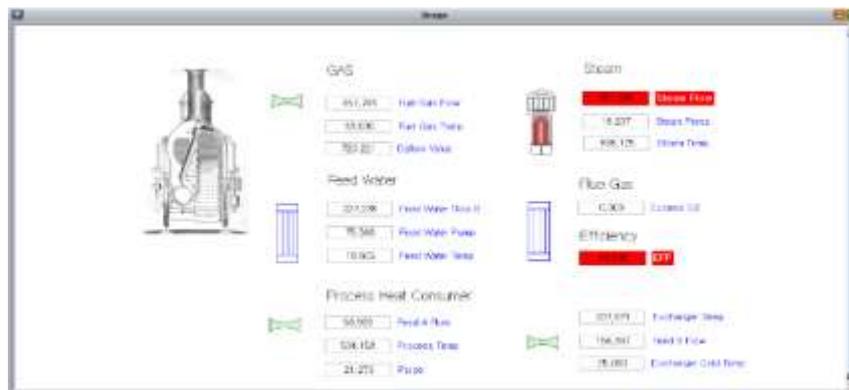


그림 9. 보일러 SureSense 화면 및 센서 고장 사례

보일러의 효율 이상 모니터링 화면은 아래 그림과 같다. 효율 예측값(붉은색 실선)은 큰 변화가 없는데, 측정값, 즉 효율 계산 값(파란색 실선)이 급격하게 하락하였다. 잔차 분석법에 의해 두 값의 차이가 크면 효율 이상 경보를 발행한다.

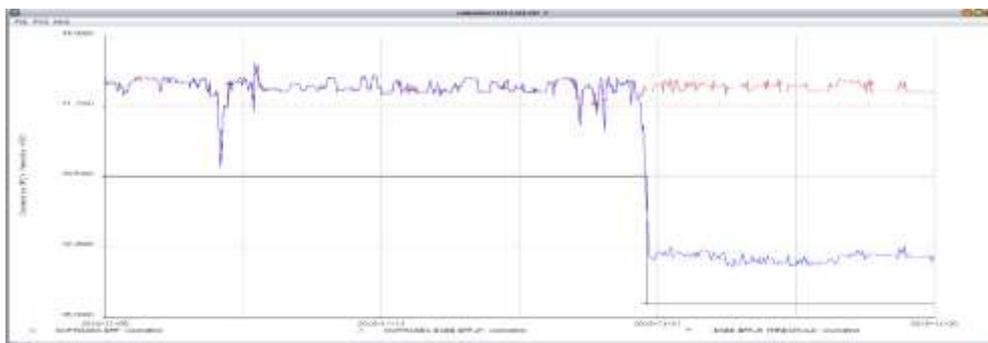


그림 10. 보일러 효율 트렌드 및 경보 발생 (때론 인식 모델 예측값 vs. 측정값)

그림 11 에 의하면 스팀 유량 측정값(파란색 실선)이 모델 예측값(붉은색 실선)보다 더 컸다. 잔차 분석법으로 스팀 유량계에 편향 오차가 존재함을 발견하였고, 이것이 바로 보일러 효율이 낮게 계산되는 원인이었다.



그림 11. 보일러 스팀 유량 트렌드 (예측값 vs 측정값)

(3) 증류탑 온도 프로파일

증류탑의 단 별 온도 프로파일(분포)은 제품의 순도와 관련되므로 운전자가 주의 깊게 모니터링하는 포인트이다. 온도 프로파일이 깨어지면 곧바로 분리 효율이 나빠지게 되며, 이로 인해 제품의 순도가 떨어진다. 아래 그림은 증류탑의 탑저, 탑상, 내부 단에 설치된 온도 센서 9 개의 프로파일로 좌측은 정상적인 온도 프로파일이고, 우측은 비정상적인 온도 프로파일이다. 비정상적인 프로파일을 육안으로는 구분하기는 쉽지 않다.

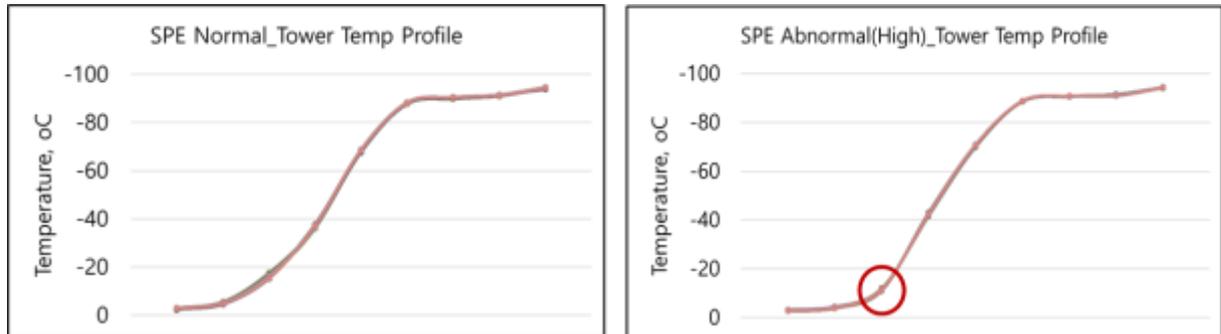


그림 12. 증류탑 온도 프로파일; (좌) 정상적인 온도 프로파일, (우) 비정상적인 온도 프로파일

약간의 패턴 변화도 인식할 수 있는 PTO-Valert™을 적용하여 온도 프로파일의 이상을 감지하였다. PTO-Valert™은 주성분 좌표에서 Hotelling의 T2 를 통해 온도 프로파일의 이상을 감지한다.

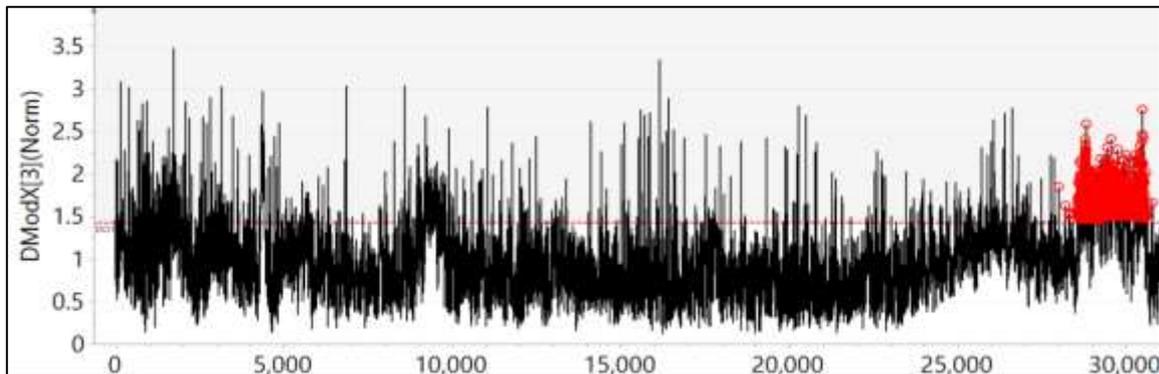


그림 13. Hotelling의 T2 경계 초과로 인한 온도 프로파일 이상 감지

그림 13에서 붉은색 점이 온도 프로파일의 이상 기간으로 이에 대해 공헌도 조사를 실시하여 이상의 원인을 조사하였다. 그림 14에서 증류탑 10 단 온도가 낮은 것이 그 원인이었다.

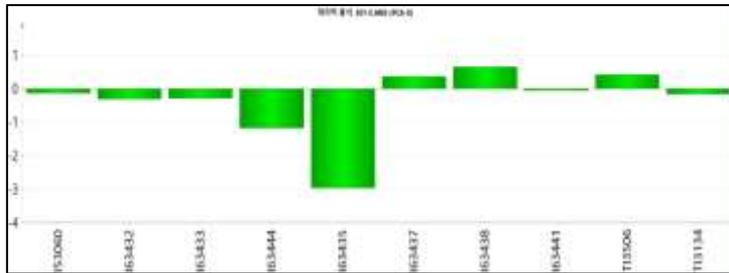


그림 14. 온도 프로파일에 대한 공헌도 조사

두 온도 프로파일 곡선을 겹쳐서 비교하였으며, 공헌도 조사 결과와 같이 증류탑 10 단 온도에 변화가 있었다.

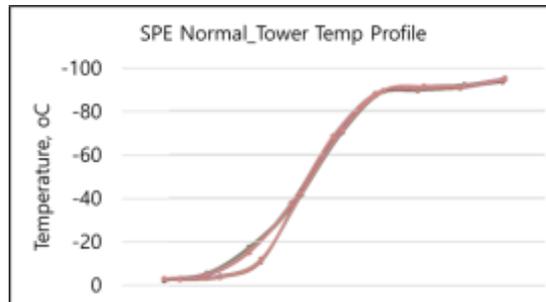


그림 15. 정상과 비정상 온도 프로파일의 겹친 그림

이와 같은 정보에 기초하여 운전자는 10 단 온도를 올려서 온도 프로파일을 정상으로 복귀시켜, 증류탑의 분리효율을 유지할 수 있었다.

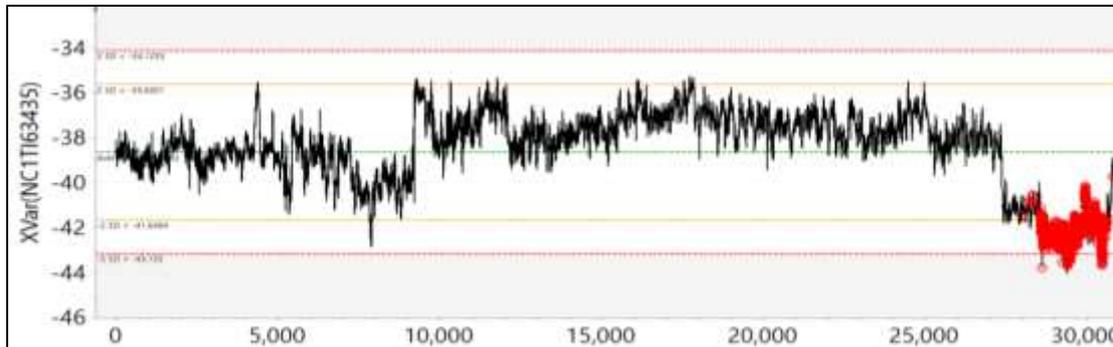


그림 16. 증류탑 10 단 온도 시계열 추이도

(4) 탈황공정

정유공장에서 생산하는 모든 유류 제품은 환경 오염물질인 황을 제거하는 탈황공정을 거친다. 유류 원료에 수 %로 포함된 황은 촉매 반응기에서 수소와 반응하여 황화수소로 전환되어 10ppm 미만으로 제거된다. 탈황공정은 고압·고온 상태에서 인화성이 높은 수소를 다루고, 극소량만 흡입해도 인체에 치명적인 손상을 미치는 황화수소가 존재하므로 사소한 고장도 허용되지 않는다.

탈황공정은 가동시간이 증가하면서 원료에 포함된 오염물질에 의해 촉매의 활성도가 낮아진다. 촉매 활성도가 낮아지면 생산량을 줄일 수밖에 없어 수급에 차질을 빚는다. 정기적으로 촉매의 잔여 수명을 관리하여 만일의 상황

을 대비하여야 한다. 경유 탈황공정의 고장 및 공정이상 항목을 표시하면 그림12와 같다. 여기에는 센서 고장, 촉매 활동도 저하, 설비 고장, 운전 이상 등 다양한 항목을 포함되어 있다.

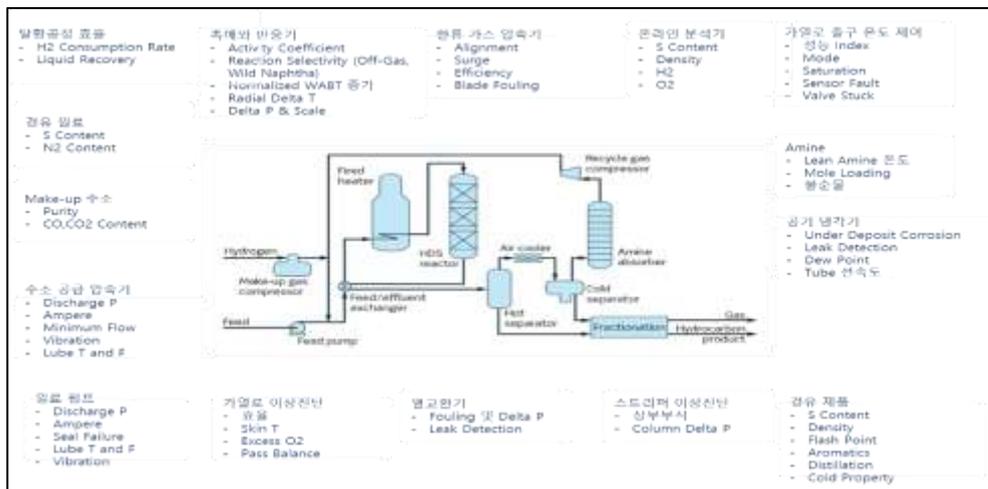


그림 17. 탈황공정 고장 항목 예시

2) 맺음 말

플랜트 현장은 에너지 절감을 위해 공정 간 복잡하게 통합되어 있으나, 숙련된 운전자의 퇴직으로 경험적인 지식의 공백이 우려되고 있다. 또한 IoT의 발전과 함께 가용하게 된 수많은 데이터는 플랜트 제어실 운전자의 감시 부하를 가중하고 있다. 이러한 환경에서 공정 데이터 속에 포함된 패턴을 찾고 숙련된 운전자의 경험적 지식을 디지털 전환 기술로 재구성하여 고장감시와 원인진단 업무를 지능화함으로써 운전자와 기술 및 정비 엔지니어를 지원하는 FDD 시스템이 필요하다.

FDD 시스템을 구축하는데 가장 핵심 포인트는 데이터 분석가가 현장의 운전 지식을 수집하는 것이다. 실제 프로젝트에서 기법이나 솔루션 개발에 소요되는 시간 비중은 30% 미만이다. 현장 지식을 수집하고, 지식을 기반으로 모니터링할 파생 Tag를 구성하는데 훨씬 많은 시간이 소요된다는 사실을 강조하고자 한다.

참고 자료

- [1] 이진우, 전취수, 권대일, 국내외 고장진단분야 연구 동향 및 분석, Vol. 56, No. 11, 기계저널, 2016
- [2] Technical Review of On-Line Monitoring Techniques for Performance Assessment, Volume 1: State-of-the-Art, University of Tennessee, 2006
- [3] SureSense Virtual SME, Premier Advanced Pattern Recognition System, Expert MicroSystems.

고홍철 kohc@techdas.co.kr

(주)테크다스 www.techdas.co.kr

서울특별시 금천구 디지털 1로 204, 510 호 (가산동, 가산반도아이비밸리) (우편번호: 08502)

Tel. 82 (0)2 865 1313 Fax. 82 (0)2 865 1311