

해양플랜트 예지 시스템 개발 개요

[글] 전홍배*
홍익대학교

*hongbae.jun@hongik.ac.kr

1. 서 론

오래전부터 주요 플랜트 설비 및 장치들을 대상으로 상태 및 운용환경을 모니터링을 해왔으나, 최근 들어 다양한 센서들의 개발, SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition)/DCS(Distributed Control System) 시스템등의 기술발전으로 인해 장비 및 프로세스들의 상태 및 운용 데이터를 실시간으로 수집하는 것이 플랜트 전반으로 확대 적용되어지고 있으며, 이에 따라 수집되는 데이터의 양이 폭발적으로 증가하게 되었다. 플랜트 운영시 한순간이라도 시스템이 정지하게 되면 제조물의 품질에 막대한 피해를 입을 수 있고 원상태로 재복구되어지기까지 많은 손해를 끼칠 수 있기 때문에 주요 장비에 대해 고신뢰성을 요구하는 경우가 대부분이다. 따라서, 실시간으로 수집되는 방대한 상태 데이터를 활용하여 플랜트 주요 설비 및 장치의 신뢰성 및 안정성을 확보하는 능력을 갖추는 것이 플랜트 업계의 주요 현안 및 경쟁력으로 급부상하고 있다. 특히, 육상 및 해상 플랜트와 같은 큰 규모의 시스템에 있어서는 시스템 운용의 신뢰성 및 안전성을 확보를 위해 실시간으로 수집되는 데이터들에 대한 분석을 바탕으로 보다 빠른 상황인식을 하고 대처하기 위한 요소기술들의 개발이 무엇보다도 중요하다.

해양플랜트(offshore plant)는 바다에 매장되어 있는 석유, 가스 등 같은 해양 자원들을 발굴, 시추, 생

산해내는 활동을 위한 장비와 설비를 포함한 제반 산업이다. 더글라스-웨스트우드(Douglas-Westwood)사의 스티브 로버트슨(Steve Robertson)에 따르면, 부유식 생산설비(floating production units, FPU)는 2014년에서 2025년까지 연평균 성장률이 3.3%로 전망되는데, 이중 FPSO는 현재보다 60% 증가한 262기가 될 전망이다.

해양플랜트는 20~30년의 긴 수명주기로 인해 운영 단계 및 유지보수단계에서 건조단계보다 더 많은 비용과 노력을 필요로 하고, 사고 발생시 피해의 정도가 매우 크다. 이로 인해 해양 플랜트는 설계 단계에서는 필요 이상의 강건 설계(robust design)를 하고, 운영에 있어서는 과잉 보전 문제에 직면해 있어서, 장비의 생애주기 기간동안 효율적인 유지보수를 수행하는 것이 중요한 문제로 대두되어졌다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 최첨단 정보통신기술을 활용한 상태 기반 보전(condition based maintenance, CBM) 방식의 해양 플랜트 적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

플랜트 운용시 수집되어지는 수많은 상태 데이터를 기반으로 주요 설비의 비정상 상황에 대해 이를 진단하고 분석하는 방안이 필요하다. 또한 플랜트 운용상황 초기부터 특정 시스템에 딱 들어맞는 예측 모형을 만드는 것은 상당히 힘든 일이므로, 학습에 기반하여 축적된 데이터를 바탕으로 주요 설비의 이상시점에 대한 예측을 수행하고 이를 지속적으로 보정해가는 모형을 만들 필요가 있다.

본 기고문에서는 2013년부터 진행해 오고 있는 해양플랜트 통합 운영 및 유지보수를 위한 예지보전 시스템 개발 프로젝트의 중간 결과물인 예지시스템 개발에 관한 개요를 소개하고자 한다.

2. 기존 연구

2.1 CBM 연구

시간기준 예방 보전활동에 대한 연구들은 그동안 많이 제시되었지만 CBM과 관련해서는 그 중요성에도 불구하고, 산업용 자산의 사용기간 동안 자산의 상태정보를 파악할 환경이 갖추어져 있지 않았던 이

유로 그동안 연구가 많이 진행되지 못했었다. 하지만 최근 들어 이를 극복할 수 있는 센서 및 무선통신기술과 같은 정보통신기술들의 발달로 인해, 상태 정보에 관한 가시성을 확보할 수 있었고, 이를 바탕으로 CBM에 관한 연구가 새로이 조명을 받고 있는 실정이다. CBM 연구는 다양한 센서 데이터의 가공, 처리, 대상 시스템의 상태 데이터에 대한 분석, 진단 및 확률 예측, 보전 비용 모델 수립, 보전 의사 결정 최적화, 의사결정시스템 구축기술등 폭넓은 다학제 간 지식을 요구하고 있다.

그 동안 CBM의 전체적인 개념 및 틀에 대한 리뷰에 대해서는 아래와 같은 몇몇 연구들이 진행되어져 왔다. 예를 들어, Thurston(2001)는 상태기반 보전을 위한 개방형 시스템 구조(Open System Architecture for Condition Based Maintenance, OSA-CBM)을 제시하였는데, 총 7가지 층으로 구성되어 있다: 센서 모듈(Sensor Module), 신호처리(Signal Processing), 상태감시(Condition Monitoring), 진단(Diagnosis), 예지진단(Prognostics), 의사결정(Decision Support) 및 구현(Presentation). Bengtsson(2004)은 CBM과 관련한 국제 표준 및 표준에 준하는 문서들에 대해 조사하고, CBM을 실제 적용할시에 고려해야 하는 유지보수 조직의 여러 이슈들에 대해 언급하였다. Kothamasu와 2인(2006)은 CBM의 철학 및 기술들에 대해 리뷰를 하고, 연관된 사례연구들을 소개하였다. 또한 Jardine와 2인(2006)은 기계장비의 CBM 구현과 관련한 구체적인 진단 및 예지 기법들에 대해 데이터 처리 및 유지보수 의사결정들의 모델들, 알고리즘 및 기술들을 중심으로 정리하였다. 그리고 Dragomir와 4인(2009)은 CBM의 단계중 하나인 예지(prognostics) 시스템을 구현하기 위한 프레임에 대한 정의와 함께, 예측에 대한 개념, 척도 및 기법들을 자세히 리뷰하였다. 보다 자세한 CBM의 구체적인 기술 및 적용사례와 관련해서는 신중호의 2인(2014)의 논문을 참조하기 바란다.

2.2 예지 시스템

예지(prognostics): 진단과 예지의 가장 큰 차이점은 진단에서는 과거의 데이터들을 바탕으로 현재시

점의 시스템 상태를 분석하지만, 예지에서는 지금까지의 상태데이터들을 바탕으로 경향을 파악하여 앞으로 대상 시스템의 고장이 언제쯤 발생할지, 잔여 수명(Remaining Useful Life, RUL)을 추정하거나, 남은 성능을 추정한다.

일반적으로 신호처리 및 데이터 처리를 위해서 wavelet 및 Fourier 분석과 우주항공 분야에서 동적인 특성을 예측할 때 쓰이는 Kalman filtering 기법 등이 신호데이터의 변환 및 결측치의 보정을 위해서 자주 쓰인다. 진단단계에서는 수집되어지는 데이터들을 기반으로 통계적 패턴 인식 기법(Statistical pattern recognition, Support vector machine), 메타휴리스틱(Genetic algorithms), 데이터 마이닝(Decision tree induction), 인공지능 기법(Fuzzy logic, artificial neural network)등이 고장을 진단하는데 많이 사용되어진다. 예측단계에서는 시계열 분석(Time series data analysis), 회귀분석(Regression), 신뢰성 이론(Reliability theory), Case based reasoning 기법등을 이용하여 잔여 수명 및 미래의 성능치를 예측한다. 진단 및 예측을 위해서 쓰이는 기법들의 대부분은 데이터들이 충분히 확보가 되어야지만 좋은 결과를 줄 수 있는 기법들이라고 할 수 있다. 특히, 인공지능 기법의 하나인 neural network 기법은 초기 CBM 운영시 다소 부정확하고 불완전한 데이터들이 수집되어진다고 해도 적용할 수 있으며, 데이터의 학습을 통해 더 정확한 진단 및 예측치를 알 수 있다. 예측기법으로 쓰여지는 case based reasoning 기법 역시 꾸준한 학습을 통해 진화되어질 수 있는 장점을 가지고 있으나 적절한 case base가 만들어져야지만 그 결과값들이 의미를 가질 수 있다.

유지보수 의사결정을 위해서는 주로 경영과학 기법들중 통계적 확률과정 이론(Renewal theory), 최적화 기법(Math programming), 시물레이션, 다기준 의사결정기법(MCDM)등을 이용하여 유지보수 의사결정을 위한 모델을 수립하고 최적해를 구한다. 시물레이션 기법은 시물레이션을 하는데 들어가는 시간과 노력이 다소 부담이 될 수 있는 반면에 통계적으로 의미있는 결과값을 얻을 수 있는 반면, 확률과정 이론, 최적화기법, 다기준 의사결정 기법들은 수립되

어진 모델의 정확성 정도에 따라 해의 유용성이 달라지게 된다.

일반적으로 CBM의 단계중 예지에서 쓰여지는 관련 기술들은 크게 model driven approach와 data driven approach로 구분할 수 있다. Model driven approach는 비교적 단순하고 직관적이며 많이 적용되어지고 있는 방법중에 하나로서 특정 대상 시스템의 고장매커니즘에 대한 물리적인 해석 및 분석을 바탕으로 모델을 만들어 진단 및 예측을 수행함으로써 다른 방법들보다 분석의 정밀도가 높다고 할 수 있다. 또한 이론적으로 많은 결함들의 진단이 가능하다. CAD 모델로부터 생성할 수도 있으며, 제품설계 개선에도 힌트를 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만 모델의 유연성 및 범용성 측면에서는 한계가 있다는 단점이 있다. 즉, 개발 및 유지보수에 많은 시간과 노력이 들어가며, 구체적인 고장모드 및 현상을 자세히 이해하여 수확모델로 정립하는데 애로점이 있다. 그리고, 많은 수의 components를 가지고 있는 시스템의 경우 적용하기가 힘들며, 완전하고 일관된 모델을 개발하는 것이 상대적으로 많이 어렵다. Data driven approach의 경우 model driven approach에 비해 적용의 유연성 및 범용성은 높다. 즉, 불완전하고 다소 부정확한 데이터에도 적용해 볼 수 있다. 많은 CBM 응용사례에서 적용되고 입증되어졌으며, 데이터가 충분히 많이 확보될 경우 좋은 결과를 줄 수 있는 장점이 있으나, 관련 데이터의 확보 및 확보된 데이터의 품질에 많은 영향을 받는 단점이 있다.

3. 해양플랜트 예지시스템 개발 현황

3.1 LNG FPSO

상태기반 보전 방식을 적용함에 있어서 가장 중요한 것 중에 하나가, 현재까지 수집된 정보를 바탕으로 미래의 상태, 즉 고장시점을 예측하는 방안을 개발하는 일이다.

LNG는 천연가스를 가스전에서부터 사용자에게 액화하여 전달하는 방식을 말한다. 가스전에서 채취된 천연가스는 산성가스 및 수분, 그리고 수운을 제거

하는 전처리공정을 통과한 후에 중질분을 분리하고, 액화공정에서 LNG로 액화하여 수송선을 이용하여 수요처로 이동된다. 이러한 가스전처리 공정과 액화 및 저장 공정을 육상이 아닌 부유식 해상플랜트에서 하는 방법이 LNG FPSO이다.

3.2 원심식 압축기 예지 알고리즘 개요

1차년도 연구개발에서는 LNG FPSO의 주요장비 중의 하나인 원심식 가스 압축기(Compressor)에 대해 다루었다. 원심식 가스 압축기는 가스를 압축하여 유정의 가스압력유지를 위해 재투입되거나 FPSO의 연료로 사용되어지기 위해 가스를 내보내는데 핵심 역할을 한다.

LNG FPSO에 사용되는 압축기는 전체 플랜트 내에서 에너지 소비가 가장 큰 부분이다. 전체 플랜트의 열효율을 높이기 위해서는 압축기 동력의 감축, 압축기 구동기의 효율 향상이 필요하다. 플랜트 가동률 면에서도 압축기의 비중 또한 매우 크다. 이러한 이유로 LNG FPSO의 예지 보전을 달성하기 위해서는 압축기의 예지 보전은 선결되어야 하는 과제이다.

대상 장비인 원심식 압축기의 검사는 대부분 육안으로 이루어진다. 하지만 압력, 온도, 진동 등의 센서의 시계열 데이터를 바탕으로 부품의 상태를 예측하는 것이 가능하다. 이러한 시계열 데이터는 진단 및 예지 시스템의 주요 입력 데이터로 활용되어질 수 있다. Lee(1999)의 연구에 따르면 원심식 압축기 장비의 주요 고장의 원인들중 회전체/축에 대한 고장원인이 제일 많은 비율을 차지함을 알 수 있다.

원심식 압축기의 경우 회전축에서 발생하는 진동은 종종 변동하는 힘을 일으켜 원하지 않는 소음과 불편한 운동, 또는 구조물의 파괴등으로 이어질 수 있는 기계진동을 일으킨다. 이 사례 연구에서는 여러 성능 특성중 원심식 압축기의 고속 회전 운전 때 따른 진동에 초점을 맞추어, 축진동의 이상징후(고장) 시점 정보 및 축진동의 신호를 바탕으로 고장을 예지하는 알고리즘을 개발하였다.

장비 상태 데이터를 모니터링해서 이를 기반으로 장비의 이상 시점을 예측하는 방안(Condition-Based

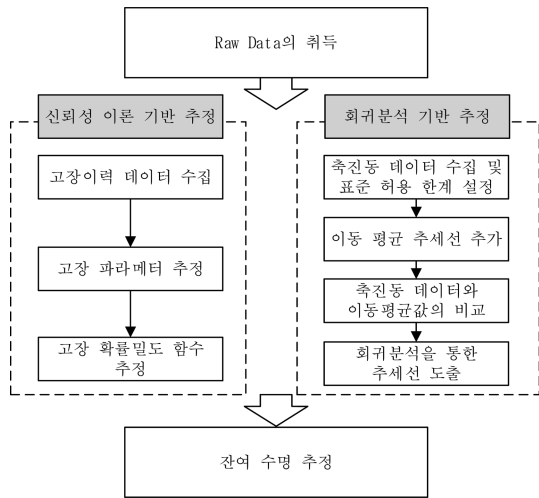


그림 1. 압축기 예지알고리즘 프로세스 (조상제외 3인 2014)

Predictive Maintenance)과 고장 통계 및 신뢰성 데이터를 기반으로 고장시점을 예측하는 방안(Statistical-Based Predictive Maintenance), 이렇게 두가지 방안들을 제시하였다(조상제외 2인 2014).

그림 1은 원심식 압축기 예지알고리즘 프로세스를 보여주고 있다.

3.3 펌프타워 예지 알고리즘 개요

2차년도 연구개발에서 다루었던 예지시스템 대상은 천연가스를 가스전에서부터 사용자에게 액화하여 제공하는 LNG-FPSO의 주요장비 중의 하나인 펌프타워이다. LNG는 일반적으로 가스전에서 채취된 천연가스에 전처리 공정을 거친 후 중질분을 분리하고, 액화공정을 통하여 얻어지게 된다. 이러한 가스전처리 공정과 액화 및 저장 공정을 기존에는 육상에서 실시하였지만, 육상이 아닌 부유식 해상플랜트에서 하는 방법이 LNG-FPSO이다.

LNG-FPSO에서 사용되는 펌프타워에 손상 또는 파괴를 일어나게 하는 여러 하중들 중 사례 연구에서는 슬로싱 하중에 많은 영향을 미칠 것이라고 예상되는 해양환경 변수들을 활용하여 펌프타워의 잔여 수명을 예측하였다.

기존의 예지 알고리즘들과는 차별화되게 수집된 해양환경데이터들에 대한 군집 분석을 수행하였다. 환경데이터들에 대한 미션프로파일을 구축한 후 미래시점의 해양환경데이터에 대해 예측한 데이터를 바탕으로 미션 프로파일을 판별하고 미션프로파일과 균열 피로 속도와의 관계성을 활용하여 잔여수명을 추정하였다.

고장을 일으키는 여러 특성 중에서 슬로싱 하중에 초점을 맞추어 고장을 예지하는 알고리즘을 개발하였으며 펌프타워가 받는 스트레스를 실험을 통하여 알아낼 수 있도록 균열센서(crack sensor)를 균열이 발생하는 주관(main pipe)과 지지대(brace member)의 연결부위에 부착한다는 가정을 하였다. 또한, 응력 확대 계수와 균열 성장률의 관계를 설명하는 패리스-에르도간(Paris-Erdogan)모델을 통하여 균열의 성장을 설명하고 이를 통하여 펌프타워의 구조물에 대한 잔여수명을 추정하였다(김용재외 4인, 2016).

4. 맺음말

해양플랜트의 주요 장비에 대한 고장 유지보수 관리의 현재 대부분 예방보전의 방법을 취하고 있으며, 최근들어, 첨단 ICT 기반 기술을 바탕으로 상태기반 유지보수 방식으로 진화하려고 하고 있다. 상태기반 유지보수 방식의 시스템을 도입 운영하기 위해서는 많은 요소기술들의 개발 및 통합이 필요하다. 본 프로젝트에서 초점을 맞추고 있는 예지 시스템의 개발은 이러한 요소기술들중에 하나로, 이외에 관련 데이터의 수집, 저장 및 관리를 위한 체계, 진단, 보전 기술과 같은 요소기술들과 유기적으로 통합되어질때에 비로소 큰 효과를 볼 수 있을것으로 판단된다.

참고문헌

1. Jardine AKS, Lin D, Banjevic D., "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance". *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20, pp. 1483-1510, 2006.

2. Kothamasu R, Huang SH, Verduin WH., "System health monitoring and prognostics-a review of current paradigms and practices". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 28, pp. 1012-1024, 2006.
3. Thurston, M.G., "An Open Standard for Web-Based Condition-Based Maintenance Systems", Proceedings from the IEEE System Readiness Technology Conference, Autotestcon Proceedings 2001 USA, Val-ley Forge, PA, 2001.
4. Dragomir, E., Gouriveau, R., Dragomir, F., Minca, E. and Zerhouni, N., "Review of prognostic problem in condition-based maintenance", Proceedings of European Control Conference, 2009.
5. Bengtsson M. *Condition Based Maintenance Systems an Investigation of Technical Constituents and Organizational Aspects*. Mlardalen University Licentiate Thesis; 2004.
6. Lee, B.J, Vibration and maintenance handbook for field engineers, Technical report, pp. 18-94, 1999.
7. 조상제, 전홍배, 신중호, 최상덕, 해양플랜트 LNG FPSO 압축기의 신뢰성 및 회귀분석 기반 고장시점 추정 방법, 한국 CAD/CAM 학회 논문집, Vol. 19, No. 3, pp. 203-213, 2014.
8. 김용재, 조상제, 전홍배, 하정훈 신중호, LNG FPSO 펌프타워 고장 예지 방안에 관한 연구, working paper, 2016.
9. 신중호, 전홍배, 김동근, 상태기반 보전 방법에 대한 고찰 및 사례 소개, EJIT, 13(3), pp. 123-138, 2014.