

이진우 울산과학기술원 제어설계공학과 연구원 | e-mail : jlee93@unist.ac.kr  
 전희수 울산과학기술원 제어설계공학과 연구원 | e-mail : jhs8891@unist.ac.kr  
 권대일 울산과학기술원 제어설계공학과 교수 | e-mail : dkwon@unist.ac.kr

제품 및 시스템의 안정적인 운용과 높은 신뢰성 확보를 위해 건전성 관리가 요구된다. 최근 기술의 발전과 함께 실용적인 고장 진단기술이 주목을 받으며, 고장 진단을 통한 건전성 관리 연구가 다양한 분야에서 활발히 진행되고 있다. 이 글에서는 고장 진단 관련 연구 동향 분석 및 고장 진단 기술 적용 사례들을 소개하고자 한다.

부품, 모듈, 제품, 시스템을 막론하고 이들이 일반적인 운용조건에서 주어진 기능을 수행하지 못할 때 우리는 고장(failure)이 발생하였다고 표현을 한다. 고장의 원인은 다양하지만 크게 과응력(overstress) 고장과 마모(wear-out) 고장으로 분류하는 것이 일반적이다. 과응력 고장은 대상이 가진 강도(strength)대비 큰 응력(stress)의 발생으로 생기는 우발적 고장인 반면, 마모 고장은 시간에 따른 열화, 마모 등으로 사용기간에 따라 서서히 발생하는 고장이다. 고장 발생은 대상 본래의 기능저하를 유발하여 사용자의 물질적, 시간적 손해 및 불편을 야기하며, 특히 의료기기와 같은 사람의 생명과 직결된 시스템의 고장은 사용자의 안전을 위협할 수 있는 심각한 영향을 미칠 수 있다.

마모고장 발생이 일어나기 전에 열화와 마모 같은 현상이 진행 중인지, 이로 인해 고장이 발생할 가능성이 있는지를 판단하는 고장진단 연구가 국내외로 활발하다. 이는 마치 사람이 아플 때 스스로 아픈 것을 인지하고 병원을 가는 판단을 내리 것처럼, 시스템의 건강상태(건전성)를 감지하고 정상 혹은 아픈 상태인지를 판단하는 연구이다. 최근 센싱 기술의 발달, IoT기술의 발전, 그리고 이들 센서로부터 나오는 빅데이터들을 빠르

게 처리할 수 있는 컴퓨팅 파워의 향상으로 시스템의 실시간 진단이 가능하게 되었으며, 관련 연구개발이 빠르게, 그리고 다양한 분야에서 이루어지고 있다.

고장진단 연구는 대상의 남은 수명을 예측하는 고장예측 연구와 많은 부분을 공유한다. 학계와 산업계에서는 PHM(Prognostics and Health Management)이라는 이름으로 널리 알려져 있다. 이 분야의 연구자들이 모여 2000년도 중반에 학회를 결성하였고 2009년부터 매년 북미에서 학술대회를 개최하고 있다. 이 글에서는 2013년도에서 2015년도까지 3년간 PHM 학술대회에서 발표된 연구 논문들 중 진단 관련 연구 논문들을 대상으로 고장진단분야의 연구동향 파악 및 분석을 실시하고 진단 기술의 적용 사례를 소개하려 한다.

PHM 연구는 크게 센싱, 진단, 예측, 관리의 총 4단계로 나뉜다. 연구를 나누는 기준을 명확하게 정의하는 것은 어렵지만 앞서 정의한 시스템 건전성에 대한 판단을 포함하는 연구를 고장진단 연구로 정의하였다. 2013년도에서 2015년도까지 PHM학술대회에는 총 201개의 연구논문이 발표되었으며, 고장진단 관련 연구는 2013년도 17편, 2014년도 28편, 2015년도 26

편으로 총 71편의 연구가 발표되었다. 이는 전체 논문 중, 약 35%에 해당하는 수치로 PHM 연구분야 중 가장 많은 부분을 차지하며 실제로 가장 활발한 연구가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

그림 1은 1저자 기준으로 판단한 국가(대륙)별 고장진단 논문 출판 현황이다. 학술대회가 열리고 실제 많은 고

장진단 관련 연구가 수행되고 있는 미국을 포함한 북미 지역에서 과반수가 넘는 논문이 발표되었다. PHM학술대회의 자매 학술대회(PHM-Europe)가 열리는 유럽에서도 독일과 프랑스를 중심으로 많은 고장진단 연구가 이루어지고 있다. 우리나라, 중국, 호주를 포함한 아시아에도 적지 않은 연구논문이 발표되고 있으며 PHM Society에서는 2017년에 또다른 자매 학술대회인 PHM-Asia Pacific을 한국에서 개최할 예정이기도 하다.

그림 2는 발표 논문의 연구 성격별 분류를 보여준다. 연구 성격을 분류할 때는 크게 방법론과 응용 논문으로 분류하였다. 방법론 논문은 새로운 진단 방법 및 기술을 개발하고 이를 사례 연구 등을 통한 특정 대상에 적용 및 검증하는 연구로 정의하였다. 이러한 연구는 주로 개발한 진단 기술의 검증을 위해 테스트베드를 구축하고 실험을 진행한 경우, 시뮬레이션을 이용한 경우, 그리고 기존 수집한 데이터를 활용하여 검증한 경우가 많았다. 응용 논문은 실제 현장에서 발생한 문제를 진단 기술을 이용하여 해결하는 연구로 정의하였다. 이러한 연구는 실제 제품 및 시스템으로부터 데이터를 취득하고 진단 기술을 적용하여 건전성을 판단하는 경우가 대부분이었다. 총 71개의 연구 중에서 방법론 논문은 44편, 응용 논문은 27편으로 방법론 논문이 전체 연구의 약 62% 정도로 집중되어 있었다.

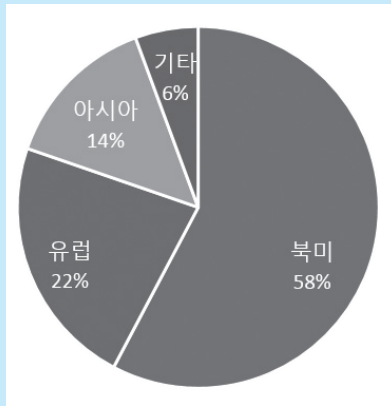


그림 1 1저자 기준 대륙별 분류

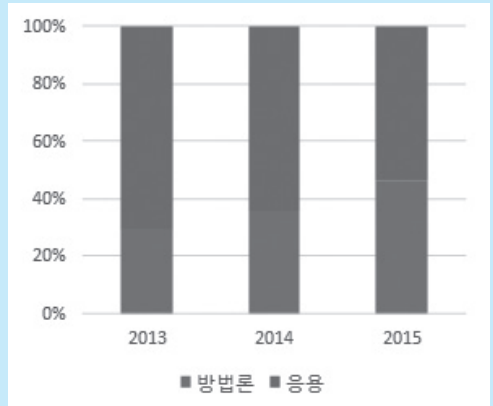


그림 2 연구성격별 분류

그러나 연도별 동향을 살펴보면 전체 대비 응용 논문의 비율이 꾸준히 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 다양한 진단 기술이 개발되고 기술 성숙도가 높아짐에 따라 현장에 진단 기술을 적용하는 연구가 계속 활성화 되고 있기 때문으로 판단된다.

그림 3은 발표 논문에서 다른 적용 대상의 학문별 분류를 나타낸다. 진단 기술의 연구 적용 분야로는 크게 기계공학, 산업공학, 재료공학, 전기전자공학으로 구분하였다. 기계공학 분야는 기계 부품, 모듈 등의 기계 요소가 적용 대상인 경우로 정의하였다. 산업공학 분야는 각 요소 부품으로 이루어진 전체 시스템 내부의 상호 관계를 진단 대상으로 정의한 경우를 가리킨다. 전기전자공학 분야는 전자 제품 및 시스템에 고장진단기술을 적용한 연구, 그리고 재료공학 분야는 재료 자체의 부식과 같은 손상을 진단한 연구로 정의하였다. 많은 연구가 기계 및 산업공학 분야에서 활발히 진행되고 있으며, 기계공학 내에 베어링, 기어박스, 발전기 등의 항공, 에너지 산업의 요소부품 및 설비의 진단 연구들이 다수 발표되었음을 확인할 수 있었다. 다른 분야에 비해 상대적으로 규모가 큰 기계 및 산업공학 분야 대상들은 고장으로 인한 피해 또한 일반적으로 크기 때문에 더 큰 피해가 생기기 이전에 고장을 진단하고자 하는 노력이 활발하기 때문이라 판단된다.

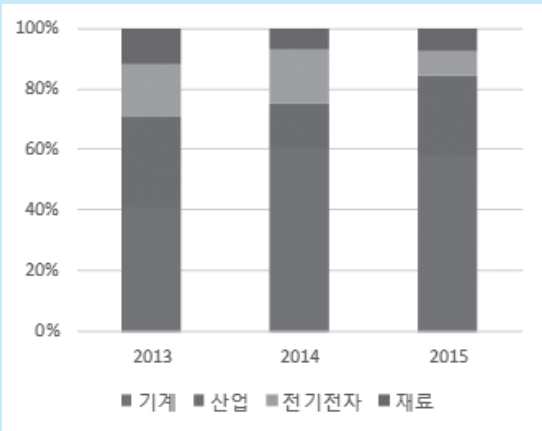


그림 3 학문별 분류

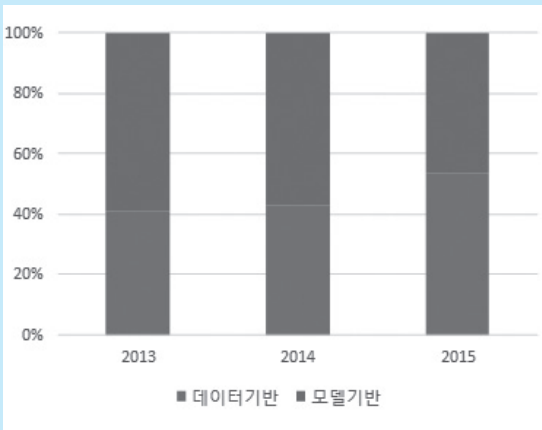


그림 4 진단 기술별 분류

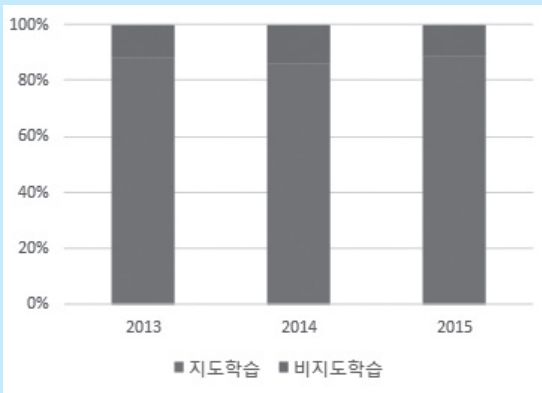


그림 5 진단 방법별 분류

그림 4는 진단 기술별 분류를 나타낸다. 고장 진단 기술은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 고장 메커니즘을

파악한 후 관련된 고장물리 모델을 이용하여 정상 혹은 이상상태를 파악하는 모델기반 진단기술과 주기적인 모니터링을 통해 건전성 인자들을 수집한 후, 패턴 인식, 머신러닝 등의 데이터 처리 기법을 활용하여 정상 혹은 이상상태를 파악하는 데이터 기반 진단기술이 두 가지 분류이다. 지난 3년간 PHM학술대회에 발표된 논문들을 분석한 결과 데이터 기반 진단기술의 비율이 상대적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 대상 시스템의 복잡도가 증가하여 고장물리 모델을 찾기가 어려운 상황과 센싱 및 IoT기술의 발전으로 다양한 그리고 다수의 데이터 확보가 가능하며 향상된 컴퓨팅 파워를 통해 이들 데이터를 빠른 시간 안에 분석할 수 있는 상황에 기반한 결과로 보인다.

그림 5는 고장진단을 위한 방법별 분류를 보여준다. 대상의 건전성을 나타내는 데이터를 수집할 때 대상의 상태정보를 아는 경우와 모르는 경우 다른 고장 진단방법을 이용하게 된다. 대상이 정상상태인지 이상상태인지에 대한 상태정보를 모르는 경우 일반적으로 비지도학습기반 데이터의 군집화를 통한 고장진단을 시행하게 된다. 반면, 상태정보를 아는 경우 지도학습기반 데이터의 분류를 통한 고장진단을 시행하게 된다. 지난 3년간 PHM학술대회에서 발표된 논문들을 분석해본 결과 주로 지도학습에 기반한 고장진단 연구가 많이 발표 되었음을 알 수 있다. 이는 많은 경우 고장을 인지한 이후 후속 조치로 고장진단 연구를 수행한다는 것을 보여준다.

일반적으로 고장 정보가 없는 비지도학습을 활용한 고장진단은 먼저 건전성 인자의 특성을 이용하여 대상 시스템의 상태를 구분하기 위해 취득한 데이터들을 군집화 하는 클러스터링 방법이 주로 활용된다. 군집화 된 상태 데이터들은 추후에 대상 시스템의 고장 분석 등을 통해 정상 혹은 이상 상태를 정의할 수 있다. 비지도학습 진단 방법 중 대표적인 것은 데이터 간의 유클리디안 거리를 기반으로 k개의 군집으로 나누는 k-means clustering 등이 있다.

고장 정보가 있는 지도학습의 방법으로는 대표적으로 SVM(Support Vector Machine)이 있다. SVM은 취득한 데이터들을 정상 혹은 이상상태로 먼저 분류 및 학습을 하고, 이를 기반으로 정상상태와 이상상태 사이의 역치 값과 같은 초평면(hyperplane)을 정의한다. 초평면을 기준으로 이후 취득한 데이터가 어느 상태에 속하는지를 바탕으로 고장진단이 가능하다.

최근 딥러닝(Deep Learning)을 이용한 인공신경망(Neural Network)이 활발히 연구되면서 진단 기술에서도 인공신경망을 활용한 사례가 보고되고 있다. 영국의 Strathclyde 대학에서 발표한 연구는 조력 터빈 발전기의 고장을 딥러닝을 활용하여 진단하였다. 조력 터빈 발전기는 고장 진행에 따라 발전기의 진동이 비정상적으로 증가하는 특성을 갖는다. 정상상태에서 조력 터빈 발전기의 진동을 모니터링한 결과를 단시간 푸리에 변환(Short Time Fourier Transform) 후 스펙트로그램(spectrogram)을 이용하여 표현하고 정상과 이상상태를 학습하였으며, 이후 모니터링에서 얻는 진동 데이터를 인공신경망 알고리즘을 적용하여 이상상태를 진단하였다. 전체 샘플 수 대비 빠르게 진단한 샘플의 수를 정확도라고 정의하였을 때 특성 기반 분류 알고리즘들은 SVM이 최고 96.86%의 정확도를 보여준 반면, 5개의 히든 레이어를 가진 딥러닝 기반 인공신경망은 100%의 정확성을 보여주었다. 이 연구는 물리 모델의 도움 없이 오직 진동 데이터와 딥러닝을 활용하여 진단한 결과로 더 복잡한 시스템에도 딥러닝을 활용한 고장 진단이 가능할 것으로 기대된다.

모델기반 진단 기술 역시 꾸준히 연구 되고 있다. 고장 메커니즘과 연관된 고장물리 모델을 정의하고 관련된 건전성 인자의 실시간 모니터링을 통해 모델 인자들을 업데이트 하며 대상의 정상 혹은 이상상태를 파악하는 기술이다. 미국 MIT에서 발표한 연구는 조종 가능한 자동 낙하산인 패러포일의 고장을 동적 모델과 건전성 인자의 모니터링을 통해 진단하였다. 실시간으로 전달되는 GPS 데이터와 확장 칼만필터(Extended Kalman Filter)를 이용하여 패러포일 시

스템의 동적 모델을 보정한 후, 모델에서 얻은 건전성 인자와 실제 관측된 건전성 인자의 차이를 통계적으로 정의된 역치값과 비교하여 고장을 진단하였다. 모델 보정에 사용된 확장 칼만필터는 물리 모델을 통한 산출 값과 실제 측정된 데이터 간의 차이에 따라 칼만 이득이라 불리는 가중치 값을 모델에 추가하게 되는 필터이다. 계산 시간도 비교적 짧은 편이기에 복합 진단 방법에 널리 쓰이고 있다.

이 글에서는 PHM학술대회에서 발표된 연구 논문들 중 진단 관련 연구 논문들을 기반으로 고장 진단분야의 연구동향 파악하고 진단기술의 적용 사례를 소개하였다. 고장 진단기술은 단품뿐만 아니라 장비, 설비와 같이 고장으로 인한 손해 및 과급효과가 큰 복잡한 시스템을 대상으로 전세계에서 활발히 연구되고 있다. 해마다 진단 기술 및 방법 또한 다양화 되어가며 최근 인공지능에 기반한 진단 방법도 활발히 연구되고 있음을 확인하였다.

우리나라에서도 고장진단을 비롯한 데이터 처리, 특징신호 추출, 고장예측 등의 PHM 관련 연구가 국내 대학들뿐만 아니라 연구소 및 산업체에서 활발하게 이루어지고 있다. 정부차원의 관심과 지원 또한 시작되어 최근 각처에 흩어져 있는 고장 진단기술과 방법을 정리하고 통합하는 고장진단 데이터베이스 구축 연구가 진행되고 있다. 또한, 2017년에 제주도에서 열리는 PHM-Asia Pacific을 통해 우리나라를 비롯한 중국, 일본, 싱가포르, 호주의 PHM 연구자들과 교류를 가질 예정이기도 하다.

IoT기술의 발전과 더불어 PHM기술 간의 융합은 제조업, 중공업, 에너지 등 여러 산업분야에 걸쳐 시스템의 효율성, 지속가능성, 생산성 향상을 이루는 사회 경제적 가치창출에 기여한다. 이는 비단 우리나라뿐만이 아닌 전세계적인 관심임을 생각해 볼 때 고장 진단 기술은 기존 산업의 고도화, 고부가가치화를 이루는 방향으로 더욱 활발한 연구가 진행되고 그 방법 또한 지속적으로 발전할 것이라 예상된다.