

문 병 민 한양대학교 산업공학과 박사과정

| e-mail : stat@psm.hanyang.ac.kr

이 진 욱 한양대학교 산업공학과 박사과정

| e-mail : culee@psm.hanyang.ac.kr

배 석 주 한양대학교 산업공학과 부교수

| e-mail : sjbae@hanyang.ac.kr

이 글에서는 대규모 시스템의 상태기반보전(CBM: condition-based maintenance)에 대한 최근 기술 동향을 소개하고자 한다.

항공기, 우주탐사선 및 발전소와 같은 복합 시스템은 수 천 혹은 수 만개 이상의 부품으로 구성되어 있으며, 다양한 고장을 야기하는 고장모드로 인해 시스템 장애가 발생한다. 이러한 시스템의 성능은 사용 시간이 경과함에 따라 열화하며, 성능 저하가 특정 임계값을 초과할 경우 고장이 발생하는 것으로 알려져 있다. 특히, 항공기나 원자력 발전소와 같은 시스템이 가동 중 시스템의 고장이 발생할 경우 큰 인명피해 및

국가적인 재앙으로 발전할 수 있다. 대표적인 사례로 2011년 후쿠시마 원전사고는 제1원자력 발전소의 냉각 시스템 고장으로 야기되어, 국제 원자력 사고 등급의 최고 단계인 7등급으로 체르노빌 원자력 발전소 사고와 비교되고 있다. 자연재해로 인한 사고라고는 하지만, 극단적 사건을 고려한 위험관리 및 보전성 설계의 필요성을 방증하는 사례라고 볼 수 있다. 또한 2011년 230명이 넘는 사상자를 초래한 중국 고속열



그림 1 상태기반보전에 대한 프로세스 및 내용

차의 추돌사고는 당초 ‘벼락’이라는 자연재해 탓으로 중국정부에서 해명하였으나, 선행열차와의 간격을 유지하는 자동제어 시스템 고장 및 관제시스템의 부실에 기인한 참사라는 것이 일반적인 견해이다.

이러한 사고사례에서 방증하듯 최근 이런 대규모 시스템의 고장을 사전에 방지하거나 고장 발생 시 빠른 시간 내에 고장을 정비할 수 있는 상태기반보전에 대한 기술이 널리 연구되고 있다. 상태기반보전은 시스템의 운용 및 열화 상태에 따라 고장발생 시점을 사전에 예측하고 선행보전활동을 수행함으로써 사후보전비용을 최소화할 수 있다.

상태기반보전에 대한 프로세스는 그림 1과 같으며, 크게 신호추출 및 신호 전처리, 특징추출, 진단 및 예측 단계로 구분된다. 이 글에서는 그림 1과 같은 프로세스에 따라 상태기반보전에 대한 최근 기술동향을 소개하고자 한다.

신호 전처리(Signal Preprocessing)

일반적인 데이터 전처리 과정은 결측값을 채우거나 잡음값 완화, 이상점을 발견하여 제거하여 불일치를 해결하는 등의 데이터 정제작업을 포함하며, 이외에도, 데이터를 합쳐서 표현하는 데이터 통합, 분석 결과를 동일하게 유지하면서 데이터 사이즈를 줄이는 데이터 정리 및 데이터 마이닝 알고리즘 효율성 극대화를 위한 데이터 변환이 이에 해당된다. 일반적인 데이터 전처리와는 달리, 시스템에서 추출되는 신호 데이터는 잡음을 포함하는 경우가 대부분이며, 원 신

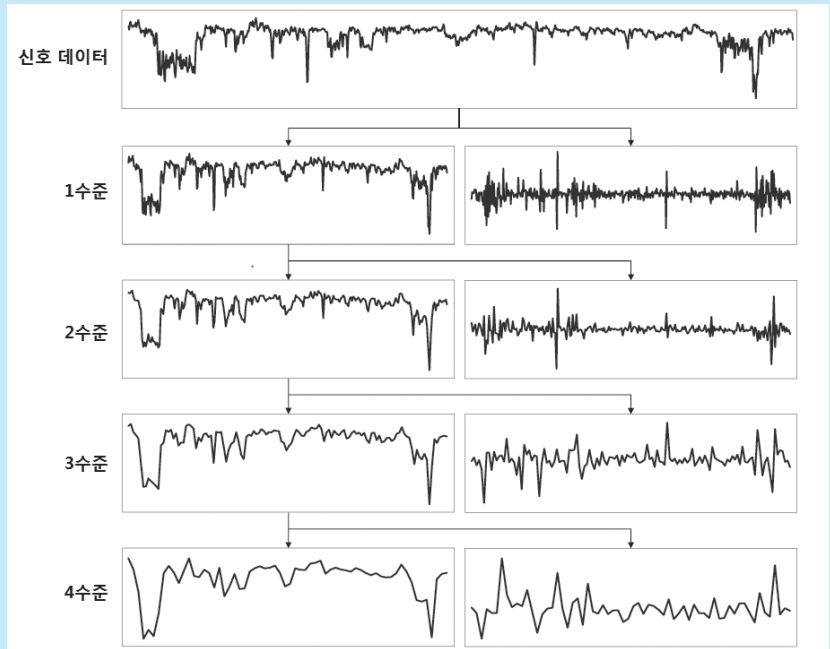


그림 2 신호 데이터에 웨이블릿 변환 실시 예(4수준)

호만으로 시스템의 이상여부를 판단할 수 없다. 신호 데이터로부터 잡음을 제거하고 유의미한 특성을 추출하기 위하여 사용되는 방법으로 대표적인 것이 푸리에 변환(Fourier transform) 및 웨이블릿 변환(wavelet transform) 등이 있다. 푸리에 변환에 대하여 독자들은 많은 지식을 보유하고 있다고 판단되어 본 원고에서는 웨이블릿 변환의 특성에 대하여 설명하고자 한다. 웨이블릿 변환은 몇 개의 유의한 웨이블릿 계수로서 전체 신호를 나타낼 수 있는 sparseness 특성을 가지고 있기 때문에 데이터 축소 및 잡음제거 기법으로 최근 각광을 받고 있다. 웨이블릿 변환은 사인 및 코사인 함수를 기본함수로 하는 푸리에 변환과 유사하지만 신호 데이터를 다른 주파수 성분들로 분해하고, 각 스케일에 해당하는 해상도 성분들을 파악할 수 있도록 하는 비선형 변환으로써 선형 변환인 푸리에 변환과는 차이가 있다.

웨이블릿 변환은 유한한 길이의 기저함수를 사용하여 원래 신호를 표현하는 방법으로, 웨이블릿의 기

저함수는 스케일 변수로 대변되는 father 웨이블릿과 디테일 변수로 대변되는 mother 웨이블릿으로 구분되며, 변환수준 별 스케일 계수와 디테일 계수를 통해 신호 데이터를 분석할 수 있기 때문에 다중 해상도 분석이 가능하다. 그림 2는 신호 데이터에 4수준까지 웨이블릿 변환을 실시한 결과이다. 좌측의 스케일 계수는 신호 데이터의 전반적인 변화를 표현하며, 우측의 디테일 계수는 신호 데이터의 세부 변화를 자세하게 표현한다.

특징추출(Feature Extraction)

한편으로 시스템의 이상여부를 감지하기 위해서는 다수의 주요 구성요소에 센서를 장착하여 다양한 특성치(온도, 가속도, 진동 등)를 측정한다. 이에 따라 측정된 신호 데이터는 다차원 신호 데이터이며, 차원이 커짐에 따라 복잡한 상관관계를 가지게 되어 시스템의 상태를 대변하는 특징추출이 어려워진다.

이러한 다차원 데이터로부터 차원을 축소하고 특성을 추출하기 위한 대표적인 방법으로는 주성분분석(PCA: Principal Component Analysis)이 있으며, 주성분분석은 변수의 공분산행렬을 직교분해함으로써 주성분이라 불리는 새로운 변수로 변환한다. p 차원의 신호 데이터에서 공분산행렬의 고유치(eigen value)를 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \lambda_p \geq 0$ 이라 한다면 주성분은 선형조합으로 표현할 수 있다. 주성분분석은 잡음 데이터에 강건하며, 변수 간에 상관관계를 가지는 문제를 해결할 수 있다. 또한 데이터의 차원을 축소하고, 상위 몇 개의 주성분만으로 원 변수의 변동을 80~90% 이상 설명할 수 있는 장점이 있어 특징추출 방법으로 널리 사용되고 있다.

또한 유의한 변수를 선택하기 위해 다양한 변수선택 방법을 사용할 수 있다. 변수선택방법이란 다수의 독립변수 중에서 통계적으로 의미있는 변수를 찾는 기법으로 변수선택 방법에는 후진제거법, 전진선택

법 및 단계별방법 등이 있다. 후진제거법은 모든 예측변수를 포함한 완전모형으로부터 시작해서 매번 하나씩 예측변수를 제거시켜 나가는 형식을 취한다. 이 경우 어느 한 예측변수는 그의 제거로 인한 오차제거함의 감소에 대한 공헌도를 기준으로 그의 제거여부가 결정된다. 전진선택법은 예측변수 없이 상수항만을 가진 회귀방정식으로부터 시작하여, 제1단계에 회귀방정식에 포함되는 첫 예측변수는 반응변수와 가장 큰 상관계수를 가지는 것이 선택되고, 2단계에서는 방정식에 도입되는 예측변수는, 일단 첫 예측변수가 반응변수에 대해 가지는 선형효과를 조정한 후, 이 조정된 반응변수와 최대상관을 가지는 것이 고려대상이 되는 방식으로 변수를 선택하여 공헌도를 평가하게 된다. 단계별방법은 기본적으로 전진적선택 절차라고 할 수 있으나, 추가적인 조건으로서 매 단계에서 후진적 제거 절차에서와 같이 이미 모형에 선택되어 있는 한 예측변수의 제거 가능성을 배제하지 않는다는 점이 다르다고 할 수 있다.

진단 및 예지(Diagnostics and Prognostics)

시스템의 고장을 사전에 방지하거나 고장 발생 시 빠른 시간 내에 고장을 정비하기 위해서는 사전에 고장 진단 및 예지를 실시하여야 한다. 신호 데이터로부터 웨이블릿 변환 후 주성분 분석 및 변수선택 방법을 통하여 유의미한 특징을 추출하고, 추출된 특징에 대하여 다양한 통계적 방법을 사용하여 고장 진단 및 예지를 실시할 수 있다. 대표적인 고장 진단 및 예지 방법으로는 다변량 관리도(multivariate control chart), 인공신경망(artificial neural network, ANN) 및 서포트벡터머신(support vector machine, SVM) 등이 있다.

다변량 관리도는 제조공정에서 이상을 사전에 감지하기 위해 많이 사용되는 모니터링 기법이며, 제조공정에서 이상원인이 발생할 경우 원인 추적 및 조치

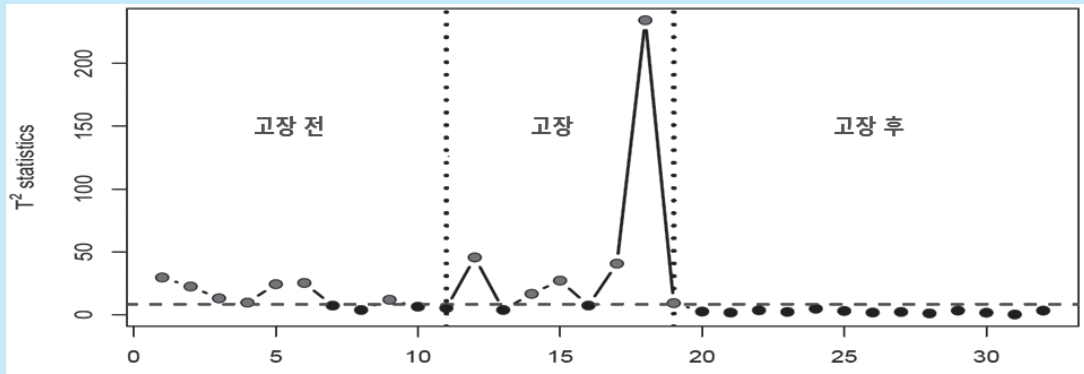


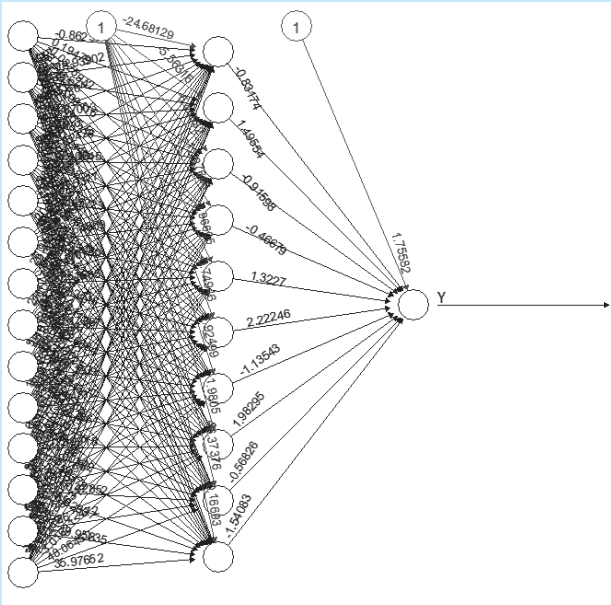
그림 4 '고장 전', '고장' 및 '고장 후' 신호 데이터에 대하여 다변량 관리도 적용 예

를 통하여 제품의 불량률 사전에 억제할 수 있다. 다변량 관리도는 변수 간의 상관관계를 고려할 수 있고, 다수의 변수의 변화를 동시에 탐지할 수 있기 때문에 많이 사용된다. 다변량 관리도 중 가장 많이 사용되는 관리도로서 hotelling's T^2 관리도가 있으며, 신호 데이터로부터 추정된 T^2 통계량이 관리상한선(upper control limit, UCL)을 초과할 경우 이상이 발생하였다고 판단할 수 있다. 그림 4는 특정 시스템에 센서를 장착하여 신호 데이터를 추출하고, 신호 데이터에 대하여 웨이블릿 변환을 실시 후 유의미한 특징을 추출, 이를 기반으로 hotelling's T^2 관리도를 적용한 예이다. 정상 상태의 신호 데이터에 대하여 관리상한선을 설정하고, '고장 전', '고장' 및 '고장 후'에 대하여 T^2 통계량을 추정하였다. '고장 전' 및 '고장' 시점에서는 T^2 통계량이 관리상한선을 초과하였으며, 반면에 '고장 후' 시점에서는 T^2 통계량이 관리상한선을 초과하지 않았다. 특히 고장 전의 T^2 통계량이 관리상한선을 초과하였기 때문에 고장이 발생하기 전 시스템에 이상이 발생하였다고 판단하여 고장을 사전에 방지할 수 있을 것이다.

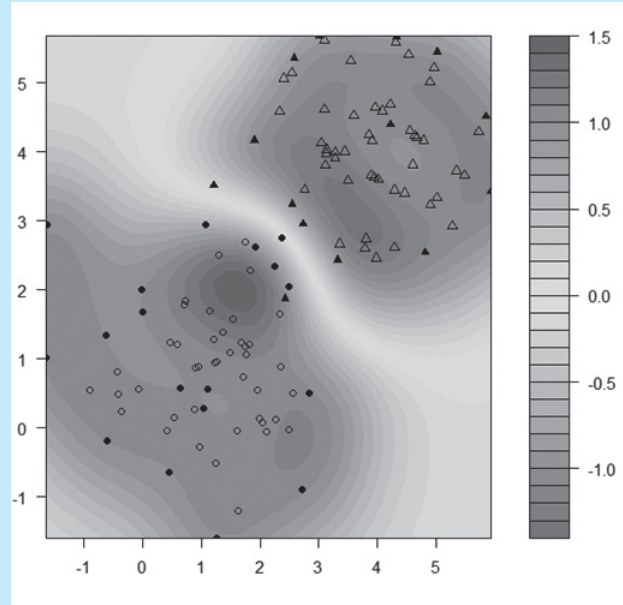
최근에 시스템의 고장 감지 및 진단 방법으로 이상 신호의 분류 및 예측을 하기 위하여 인공지능 및 서포트벡터머신과 같은 데이터마이닝 기법이 많이 사용되고 있다. 인공지능은 뇌의 정보 처리방법을 모

방한 방법으로 뛰어난 일반화 능력 및 병렬 처리 등으로 현실적인 문제에서 우수한 성능을 보이기 때문에 널리 사용되고 있다. 인공지능의 기본단위인 퍼셉트론(perceptron)은 데이터를 입력하는 입력층(input layer), 가중치 $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_d$, 속성집합 x_0, x_1, \dots, x_d 및 출력층(output layer)을 포함한다. 퍼셉트론은 분류를 하기 위하여 예측오차가 최소가 되는 가중치 $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_d$ 를 산출하고, 의사결정 경계를 설정한다. 다계층 퍼셉트론은 입력층과 출력층 사이에 은닉층(hidden layer)을 포함하며, 사인함수 대신 다른 유형의 다양한 활성화함수를 사용하여 이상 신호의 분류 및 예측 문제에 널리 사용되고 있다. 그림 5는 신호 데이터에 대하여 은닉층을 10개로 구성하여 다계층 퍼셉트론을 구축한 예이다.

서포트벡터머신은 훈련오류를 최소화한다는 점에서 인공지능과 동일하지만 일반화 오류를 최소화한다는 점에서 차이가 있다. 서포트벡터머신은 일반화 오류를 최소화하기 위하여 두 초평면의 마진을 최대화하는 의사결정 경계를 산출한다. 여기서 지지도 벡터는 초평면과 가장 가까이 있는 벡터를 의미하며, 마진은 두 초평면 사이의 거리를 의미한다. 서포트벡터머신은 다음과 같은 최적화 문제로 정의할 수 있으며, 라그랑주승수(Lagrange multiplier)를 통하여 효율적으로 최적해를 산출할 수 있다.



〈다계층 퍼셉트론〉



〈서포트벡터머신〉

그림 4 신호 데이터에 인공신경망 및 서포트벡터머신 적용 예

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \frac{\|w\|^2}{2} \\ & \text{subject to } y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 \end{aligned}$$

비선형 서포트벡터머신일 경우 벡터 내적의 곱 $x_i x_j$ 대신 RBF 커널(radial basis function kernel), 다항식 커널(polynomial kernel) 및 하이퍼볼릭 탄젠트 커널(hyperbolic tangent kernel) 등을 사용하여 최적해를 산출할 수 있다. 그림 5는 신호 데이터에 대하여 비선형 서포트벡터머신을 적용한 예이다.

이 글에서는 상태기반보전에 대하여 통계적 방법론에 대한 최근 기술 동향을 소개하였다. 시스템으로

부터 추출되는 신호 데이터를 전처리하기 위한 방법으로 웨이블릿 변환을 소개하였으며, 특징 추출 방법으로 히스트 지수 및 주성분분석을 소개하였다. 마지막으로 고장 진단 및 예지 방법으로 다변량 관리도를 소개하였으며, 인공신경망 및 서포트벡터머신과 같은 데이터마이닝 기법을 소개하였다. 이 글은 시스템의 고장을 사전에 방지하거나 고장 발생 시 빠른 시간 내에 고장을 정비하기 위한 상태기반보전의 발전 방향을 모색할 수 있는 좋은 기회를 제공할 것으로 기대한다.