건식 진공펌프의 상태진단 및 예지보수 기법

정완섭

Predictive Diagnosis and Preventive Maintenance Technologies for Dry Vacuum Pumps

Wan-Sup Cheung

This article introduces fundamentals of self-diagnosis and predictive (or preventive) maintenance technologies for dry vacuum pumps. The state variables of dry pumps are addressed, such as the pump and motor body temperatures, consumption currents of main and booster pumps, mechanical vibration, and exhaust pressure, etc. The adaptive parametric models of the state variables of the dry pump are exploited to provide dramatic reduction of data size and computation time for self-diagnosis. Two indicators, the Hotelling's T^2 and the sum of squares residuals (Q), are illustrated to be quite effective and successful in diagnosing dry pumps used in the semiconductor processes.

I. 서론

최근 10년 사이 건식 진공펌프 시장에서 가장 큰 기술적 과제는 저소비 전력의 신 모델 출시였다. 이들 저소비 전력의 펌프들이 실 공정에서 이전 모델보다 향상된 생산성과 내구성을 제공할 지는 아직 시간적 검증이 필요한 상태이다. 소비전력 저감과 더불어 진공펌프의 제작사들이 도전하고 있는 또 하나의 과제는 실 공정에 적용 가능한 개별 진공펌프의 상태진단 및 예지보수 기술 개발이다.

진공 펌프의 상태진단 및 예지보수 관련 국가지원의 과제는 "차세대 반도체용 진공공정의 실시간 측정, 진단, 제어 기술 개발" 중 "스마트형 진공 배기 진단 제어 시스템 개발"로 수행된 바 [1,2] 있으며, 본 과제의 주요 실적은 2 건의 PCT 특허 [3,4]로 국내외에 등록되어 있으며, 우리 진공학회 논문 [5]으로도 소개된 바 있다.

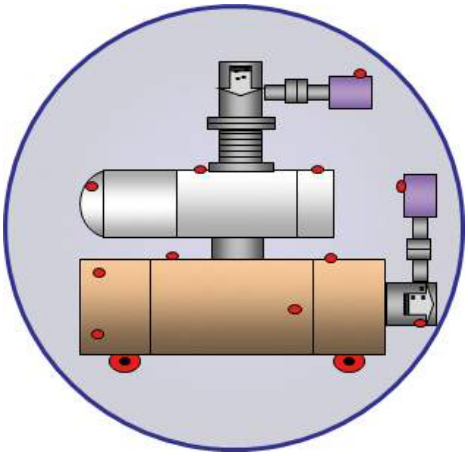
본 논문에서는 진공펌프의 상태진단의 기본개념과 상태변수들을 제 2절에서 소개한다. 그리고 시간 경과에 따른 상태변수들의 측정치의 변화 유무를 정량적으로 환산하여 진단을 수행하는 과정을 제 3절에서 소개하며, 제 4절에서는 상태진단 및 예지보수의 적용 사례를 소개한다. 마지막으로 현재 진행 중인 연구와 향후 추진 내용을 간략히 소개한다.

II. 진공펌프의 상태변수

진공펌프의 상태변화를 어떻게 평가할 것인가는 아직도 표준화된 방법이 완성되지 않은 실정이다. 그러나 본 연구팀의 경험에 의하면, 진공펌프 운전 시 최소한 측정 가능한 물리량, 즉 부위별 온도, 모터 소비전류, 배기부 압력, 모터 회전속도, N_2 가스 유량 등에 의존할 수 밖에 없다는 점이다. 그리고 이들 상태변수 측정치를 이용한 다변량 통계 분석 (multi-variable statistical analysis) [1,2,5] 기법을 이용하면 진공펌프의 상태진단 뿐만 아니라 예지보수 또한 부분적 성공을 경험할 수 있었다는 점이다. 즉, 다수의 상태변수 측정의 값을 하루의 시간 축에 따라 기록한 데이터는 한 장의 그림 즉, 오늘의 상태를 대표하는 그림이라는 점이다. 오늘의 그림과 이전의 그림들이 나타내는 차이를 정량적으로 평가하는 방법이 사실

〈저자 약력〉

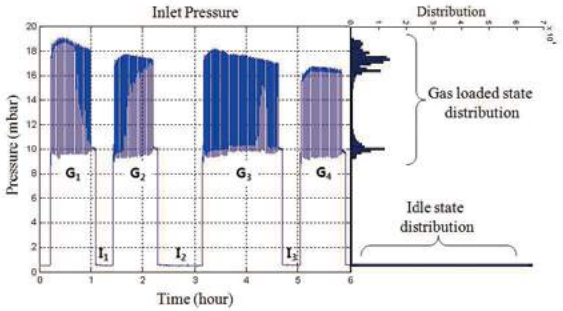
정완섭 박사는 1993년 영국 Southampton 대학에서 음향/진동학 박사학위를 받고, 현재까지 한국표준과학연구원 기반표준부 책임연구원으로 근무 중이며, 연합대학원 측정과학 교수로 겸임하고 있으며 한국음향학회 부회장을 역임하고 있다.
(wansup@kriss.re.kr)



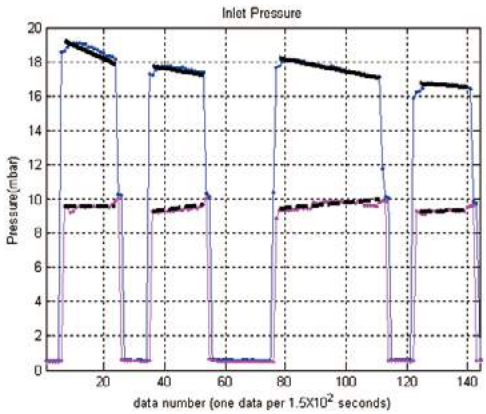
(a) Vacuum pump measurement points.

(b) State variables measured.

[Fig. 1] Measurement setup of the state variables of a dry vacuum pump.



(a) Recorded inlet pressure



(b) Reconstructed inlet signal using APM

[Fig. 2] Statistical features of measured state variable (inlet pressure).

상태진단의 기본 개념이라고 본 연구팀은 확신하고 있다.

위 그림 1은 진공펌프의 다중 상태변수의 측정 개념도를 보이고 있다. 본 연구팀은 동적 상태변수를 대표하는 진공펌프의 진동성분을 상태진단에 항상 포함하고 있다는 점이다. 사실 진공펌프는 모터에 의해 구동되는 회전기계라는 점과 그리고 회전 기계류의 상태진단에는 진동신호가 반드시 포함된다는 점이다. 본 연구팀은 진공펌프에 진동센서를 부착하여 회전 로터의 고주파 성분, 베어링 고주파 성분, 그리고 gear meshing 성분에 대응되는 진동을 측정하여 진공펌프의 요소 부품들의 운전 상태를 정량적으로 평가하는 방법을 이용해 오고 있다.

Ⅲ. 상태진단 기법

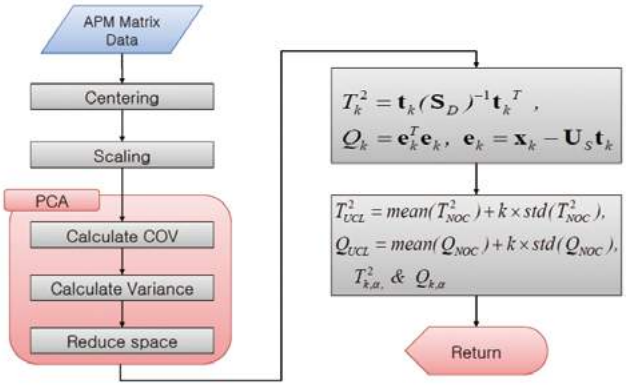
앞 소절에서 소개한 진공펌프의 운전 상태를 대표하는 상태변수를 이용하여 변화를 정량화하는 방법은 주로 2차 통계치 (second order statistics) 즉 평균값과 표준편차 기반을 두고 있다. 특히 2차 통계치 계산 이전에 우선적으로 수행해야할 분석이 개별 변수의 분포 특성 조사이다. 그림 2는 실 공정에서 측정한 흡입구 진공도를 보이고 있다. G는 가스부하 (gas loaded) 상태이며 I는 무부하 (idle)상태를 각각 나타낸다.

그림 2는 진공펌프의 가장 대표적인 신호의 특징을 나타내고 있으며, 대표적인 특성은 다음과 같이 요약된다.

–가스 부하 (G) 상태에서는 상한부와 하한부에 중심을 둔 2 개의 진폭 분포를 나타내며, 상하한 부의 평균값의 시간 변화량 고려가 필요.

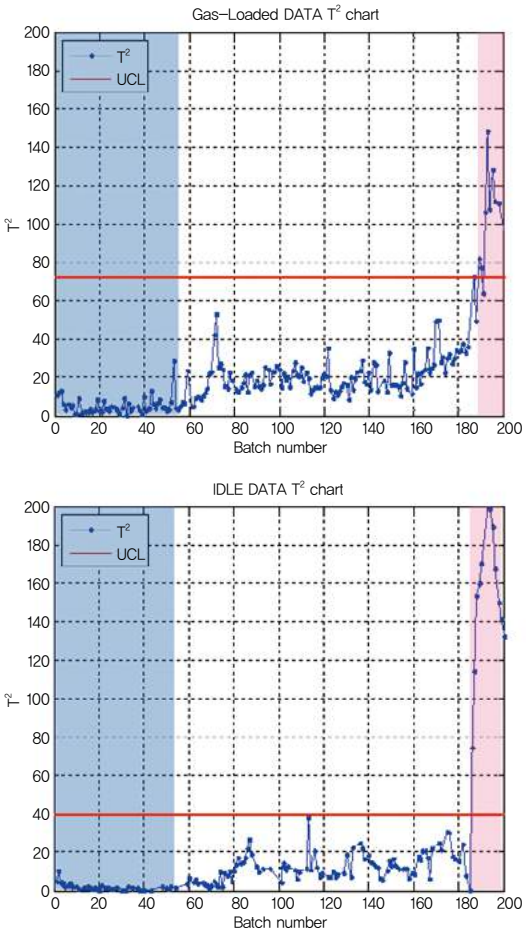
–무부하 (I) 상태에서는 하나의 단순 평균값만이 존재하며 이들의 시간변화 모델 필요.

위 두 특징을 고려한 각각의 평균값 시변 (time varying) 모델은 선형 회기 (linear regression) 모델을 이용하여 상태변수의 변화를 모델화하는 방법을 이전 연구[5]에서 소개하였다. 그림 2 (b)는 (a)에 주어진 시계열 측정 신호에 대한 선형 회기 모델을 적용하여 재구성

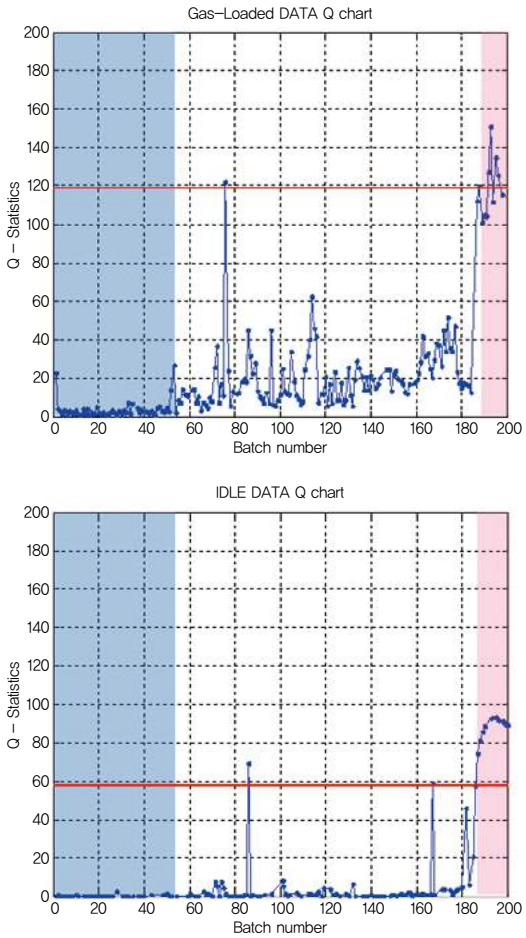


[Fig. 3] Evaluation model for self-diagnosis of dry vacuum pumps

된 변수의 평균값 시변 모델을 보이고 있다. 선형 시변 모델을 이용한 상태변수 표현은 약 100 배의 시간 측정치의 압축 효과 뿐 아니라 연산속도 또한 최소 10 배 이상을 향상할 수 있는 장점 [5]을 제공한다.



(a) Comparison of Hotelling's T^2 and UCL



(b) Comparison of Q (sum of squares residuals) and UCL.

[Fig. 4] Diagnosis results using the Hotelling's T2 and the sum of squares residuals (Q) for the gas-loaded and idle states.

그림 3은 2013년 본 연구팀이 완성한 진공펌프의 상태 진단을 위한 연산 모델을 보이고 있다. 앞서 소개한 선형 회기 모델 (APM, adaptive parameter modelling)에 의한 개별 상태변수들은 공정별 가스부하 (gas loaded) 세부 공정과 무부하 (idle) 세부공정으로 분리된 행렬 데이터 구조체로 변환 저장된다. 그리고 개별 인자들은 평균값 (centering) 과 표준편차 정규화 (scaling)을 통하여 통계 변수로 변환한다. 그리고 이들 통계치를 이용하여 주성분 분석 (principal component analysis) 기법을 이용하여 두 종의 scalar 값인 상태 진단 지시치 즉 Hotelling's T^2 와 잔차 제곱 합 (sum of squares residuals, Q)을 계산한다. 이들 두 Hotelling's T^2 와 잔차 제곱 합이 갖는 99 %의 신뢰구간 범위 안밖 여부를 판

단하여 상태진단을 수행하게 된다. 또한 경험에 기반을 둔 상한 제어 한계 (upper control limit, UCL) 범위를 초과 여부를 판단하여 상태진단을 수행하게 된다.

IV. 상태진단 사례

그림 4는 약 200회의 공정을 마치고 교체된 진공펌프의 상태진단 예를 보이고 있다. 그림 4 (a)는 가스부하 상태와 무부하 상태애서 환산된 Hotelling's T^2 차트와 UCL 값을 비교하고 하고 있으며, 그리고 그림 4 (b)는 잔차 제곱 합 Q 차트와 UCL 값을 각각 비교하고 있다. 흥미롭게도 가스 부하 상태애서 Hotelling T^2 차트와 잔차 제곱 합 Q 에 의한 진공펌프의 이상 진단은 187 번째 공정에서 확인된 반면에, 무부하 상태애서 Hotelling T^2 차트와 잔차 제곱 합 Q 에 의한 진공펌프의 이상 진단은 183 번째 공정에서 확인되었다. 즉 무부하 상태가 가스부하 상태보다 조기에 펌프의 이상을 탐지할 수 있었다. 특히 현장에서 펌프를 교체를 결정하기 최소 17 공정 전에 펌프의 이상을 확인할 수 있었다는 점은 매우 고무적인 결과라 판단된다. 펌프의 운전 조건 즉 무부하 및 가스부하 상태에서 제안된 Hotelling's T^2 차트와 UCL 값이 펌프의 이상 진단을 매우 성공적으로 예측함을 확인할 수 있었다.

V. 맺음말

지난 10여 년간의 연구에서 가장 값진 경험은 진공펌프의 상태진단 시 진동센서를 포함한 경우가 보다 높은 상태진단 신뢰도를 높일 수 있었다는 점이다. 물론 진동 센서의 추가 비용 단점이 수반된다.

본 연구에서는 2종의 상태진단 평가 지시치 즉, Hotelling T^2와 잔차 제곱 합 Q를 같이 이용하는 진단기법을 제안하고 있다. 특히 상태변수의 통계적 분포가 확연히 다른 가스부하 (gas loaded) 운전 상태와 무부하 (idle) 운전 상태를 반드시 분리하여 상태진단을 수행하는 효과적인 방법을 본 논문은 제안한다.

현재 진행 진행 중인 과제는 Hotelling T^2와 잔차 제곱 합 Q을 이용한 상태진단 기법에 수반되는 연산량을 획기적으로 줄이기 위한 연구를 진행하고 있다. 이는 개별 진공펌프 내에 장착된 저가형 32-bit DSP 로도 제안된 2종의 상태진단 평가치를 실시간으로 수행할 수 있는 상용제품화 모델 개발에 목표를 두고 있다.

Acknowledgement

상기 소개된 내용은 2008년부터 2013년 지식경제부 지원 사업 "스마트형 진공 배기 진단 제어 시스템 개발" 과제와 2015년 시작된 지식경제부 신규 사업 "3000m^3/h급 스마트형 대용량 진공펌프 개발" 과제 (과제번호: 10049118)의 지원에 의하여 수행된 결과의 일부임.

References

[1] 정완섭, "스마트형 진공 배기 진단 제어 시스템 개발," 1단계 최종보고서, 2011.
[2] 정완섭, "스마트형 진공 배기 진단 제어 시스템 개발," 2단계 최종보고서, 2013.
[3]정완섭, 임종연, 정광화, 이수갑, "진공펌프 트렌드 관측 및 진단 분석 기법", PCT Pub. No: WO2006/064990, 대한민국 특허 10-0882887 (2009), 미국특허 7,664618 (2010), 중국특허 ZL2004.8.0044627.1 (2007), 일본특허 2008-54492 (2008), EU 특허 (영국, 프랑스, 독일) **1**, 151 (2012).
[4]정완섭, 임종연, 정광화, 이수갑, "진공펌프 고장방지 및 에지보수를 위한 정밀진단 기술", PCT Pub. No: WO2006/064991, 대한민국 특허 10-0905235 (2009), 미국특허 7,653,512 (2010), 중국특허 ZL2004.8.0044628.6 (2007), 일본특허 2008-54493 (2008), EU 특허 (영국, 프랑스, 독일) **1**, 576 (2012).
[5]이규호 · 이수갑 · 임종연 · 정완섭, 한국진공학회지 **20**, 165 (2011).