

홍 주 표 한국기술교육대학교 디자인공학과 교수

| e-mail : joopyo@koreatech.ac.kr

전자산업 중에 첨단 현장인 반도체칩 제조공장을 예전 기억으로부터 소환하여 ‘스마트 팩토리’에 대해 한 번 생각해보았다.

여러 나라에서 수많은 사람들이 ‘제4차 산업혁명’과 그 중에 ‘스마트 팩토리’에 대한 이야기를 하고 관련된 일들을 진행하고 있다. 이상적인 스마트 팩토리를 고려하더라도, 효율적인 운영환경으로 전환시키기 위해서 현실적으로는 생산하고자 하는 제품과 공장의 성격에 따라 고민해야 할 부분이 달라질 것이다. 현재 좁게는 생산현장에서 각종 센서와 IoT 기반 공정장비의 자동화 및 실시간 제어 등을 통한 생산성 및 품질 향상, 넓게는 고객맞춤형 제품 생산을 위한 유연한 공정대응 능력향상이나 유기적이며 효율적인 전후방 공급망 관리구축 등의 특징이 보인다.

유수의 기업 사례를 통해 각각이 처한 상황에서 어떻게 대응하는지 알려지고 있는데 한편으로는, 전자산업 중 기존의 첨단 반도체 소자 제조공장이 IT시스템, 자동화, 운영기술 등에 있어 기계를 포함한 다른 분야에의 실제 적용에 참고할 수 있겠다는 생각에서 이 글을 작성한다. 스마트 팩토리는 궁극적으로 개인 맞춤형 제품을 효율적으로 제조할 수 있도록 지원하는 내용이겠지만, 여기서는 기존의 다품종소량생산 혹은 대량생산체제에 대응할 수 있도록 하였다. 사이버 물리시스템(CPS: Cyber Physical System) 개념은 여기서는 포함하지 않고, 오히려 전통적 제조시스템 운영모델 측면에서 살펴보았다. 공장의 기본인 생

산 측면에서, 반도체 제조공정 특징의 간단한 이해와 EDA(Equipment Data Acquisition) 기반 APC/AEC(Advanced Process Control/Advanced Equipment Control)의 적용을 소개하고자 하였다. 일련의 흐름이 기계분야에 어떻게 참고가 될 수 있는지 고민해보았다.

전형적인 반도체공정은, MOS(Metal-Oxide-Semiconductor) 트랜지스터를 예로 간략히 표시한 그림을 보면, 실리콘 웨이퍼 위에 박막(thin film)을 덮고(deposition), 그 위에 포토공정(photo-lithography)으로 패터닝(masking & patterning)하고, 에칭 공정으로 파내는(etching) 일련의 연이은 공정의 반복이라 할 수 있다. 그림은 후반부에 감광제 도포(photoresist coating)와 노광(exposure) 및 현상(develop)하는 포토공정의 반복 표현과 배선 형성 과정은 생략되어 있다. 이렇게 웨이퍼가 팹(fab)에 들어가서 수백 번의 단위 공정을 진행하는, 조립 및 검사 이전 단계에 대해 물류와 공정장비 및 운영관리 등을 알아보자.

팹에서는, 특성에 따라 주요 공정군이 구분되어 운용되며, 웨이퍼는 25매 단위로 매 공정 및 측정 단계로 이송된다. AMHS(Automated Material Handling System) 측면에서, 300mm 웨이퍼는 FOUP(Front

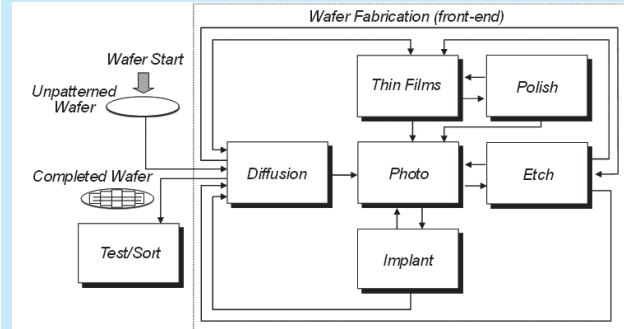
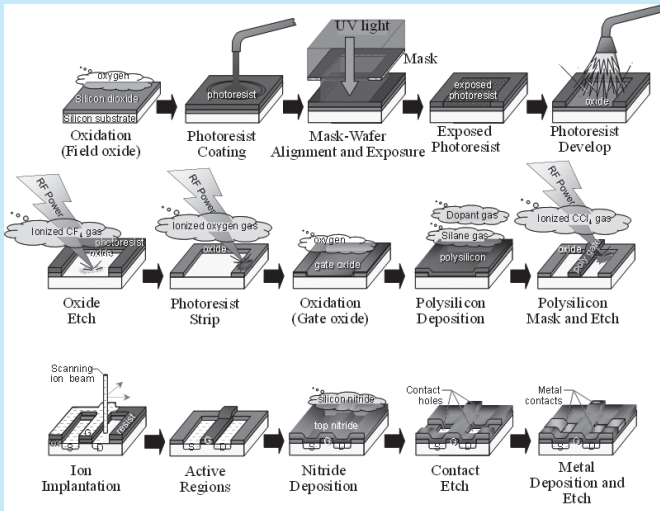


그림 1 반도체소자의 주요 공정흐름(AMD)

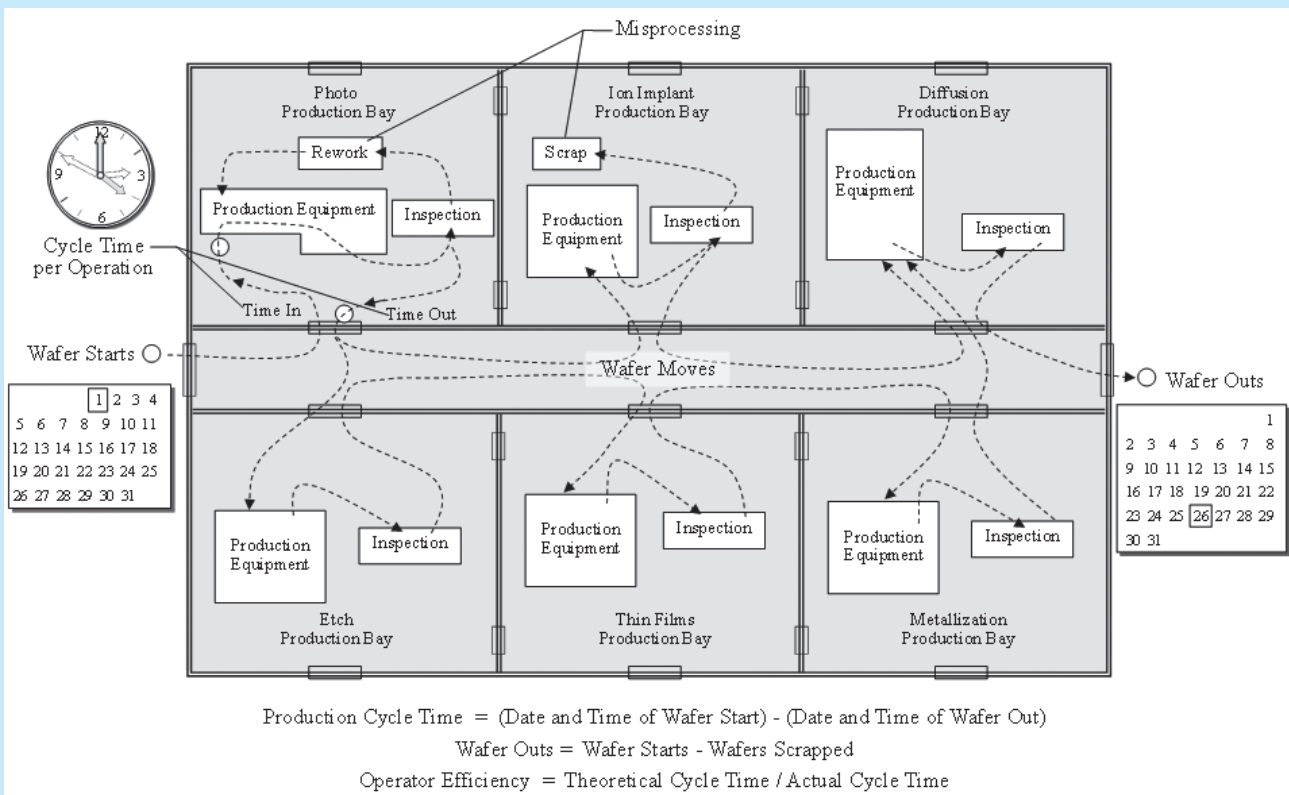


그림 2 웨이퍼 팹에서의 생산성 측정(Michael Quirk & Julian Serda)

Opening Unified Pod)에 담겨 OHT(Over Head Transport)를 이용하여 이송되며 공정장비 EFEM

(Equipment Front End Module)의 로드포트(loadport)에 안착된다. 이는 300mm 웨이퍼 공정이

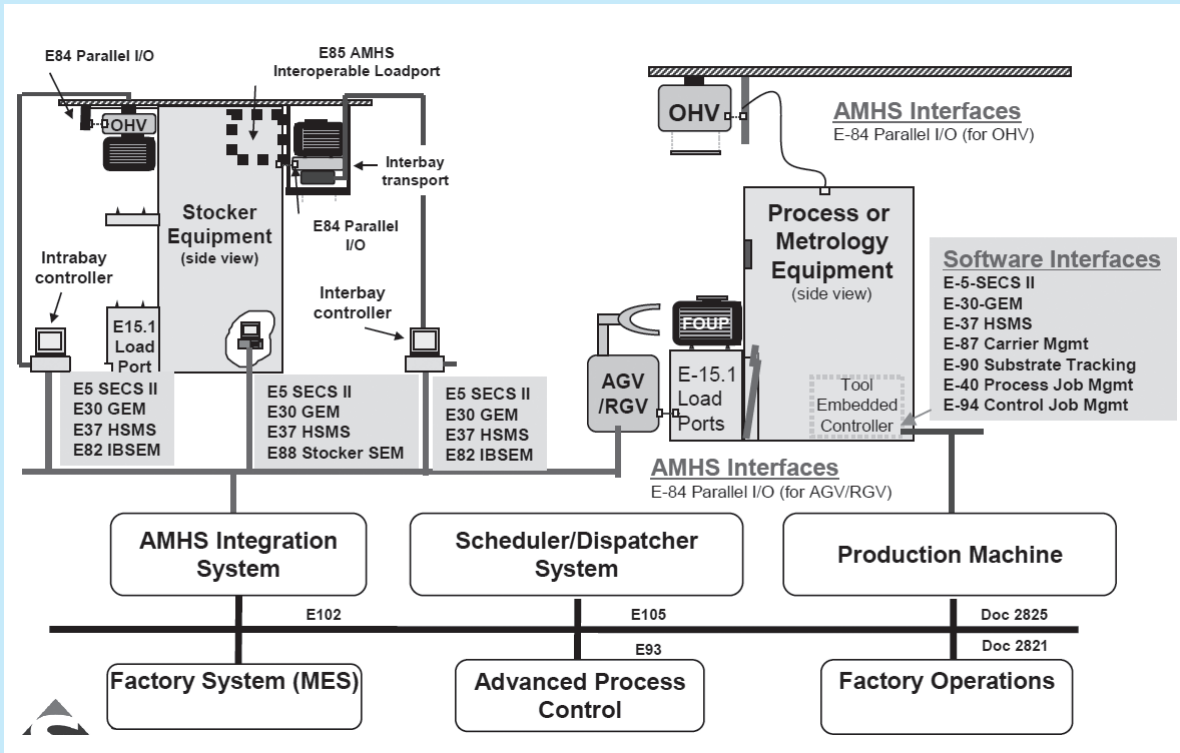


그림 3 300mm 웨이퍼 공정 펌 자동화 개략도(SEMI e-Manufacturing Workshop)

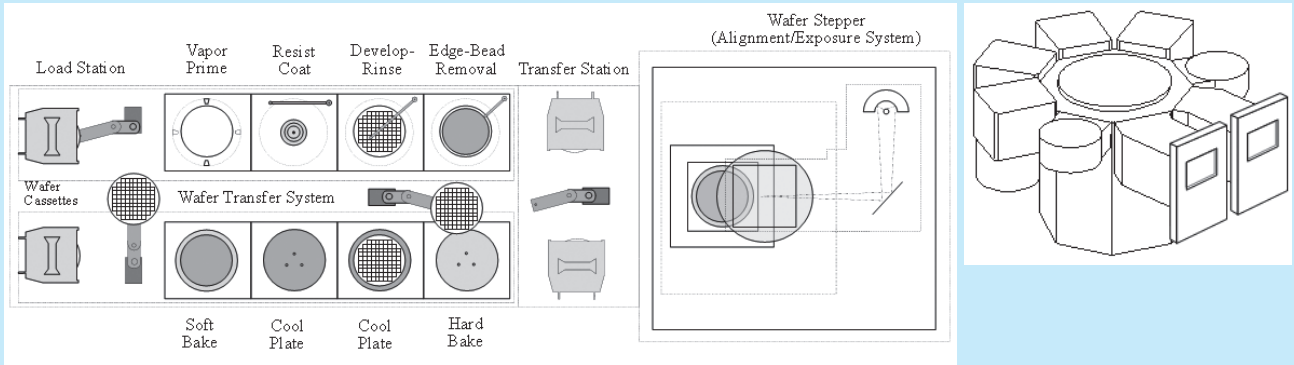


그림 4 200mm 웨이퍼용 트랙 형식 포토공정장비와 클러스터 형식 플라즈마공정장비 개략도(Michael Quirk & Julian Serda)

도입될 때 SEMI(Semiconductor Equipment and Materials International) 표준으로 제정하여 각기 다른 형태의 공정장비라도 물리적으로 입출력 부의 통일성을 기한 것이다. FOUP에 장착된 RFID태그에 로트(lot) 정보가 있으며, 각각 공정장비에서의 이벤트 정보는 해당 장비와 공장 전체의 호스트 컴퓨터를 통해 실시간으로 공유된다.

각 공정장비는 요구 품질과 속도에 따라 웨이퍼 한 장씩 가공하기도 하고, 배치(batch)로 공정을 진행하기도 한다. 트랙(track) 형식 장비에서 여러 모듈을 거치며 연속된 공정을 진행하거나, 클러스터(cluster) 형식 장비를 통해 여러 모듈에서 동일 공정을 진행할 수도 있으며, 다양한 형태로 진화하고 있다. 장비는 EFEM, 이송모듈(TM: Transfer Module)과 공정모

들(PM: Process Module)의 조합으로 구성되어 있으며, 각 모듈별 제어기와 통합 제어기가 있으며, 다양한 데이터를 팍 내 여러 곳에서 공유한다. 예를 들어, 모듈 간 게이트 밸브 상태, 로드락(load-lock)의 압

력변화, 플라즈마 공정모듈의 온도, 압력, 가스유량, RF 파워 등 주요 공정인자에 대한 실시간 데이터를 해당 장비와 클린룸 내외의 사무실에서 모니터링할 수 있으며 자동 원격제어가 가능하다. 장비나 공정

이상 발생 시 바로 장비가 멈추며(interlock), 라인 내외의 작업자 및 관리자의 휴대폰으로 즉시 상황 전파가 된다.

이러한 것들은 2000년대 초반 본격화되었는데, 웨이퍼의 대구경화에 대응하는 신규 개발 장비의 공정품질이 요구수준에 부응하기 위해서도 필수적이었다. 시장 및 경쟁 상황에서 매년 거의 두 배의 성능 개선을 요구하던 반도체산업의 특성에도 기인하는데, 동일한 면적에 소자를 배치하다 보면 매년 선폭(line and space)이 크게 감소하여, 공정여유가 급격히 부족해지는 것이다. 한편, 수백 개의 단위공정을 거치는 중에 특정 스텝에서 치명적인 결함이 발생하거나 누적되어 발생하는 경우 이를 조기에 발견하여야 품질관리가 가능하다.

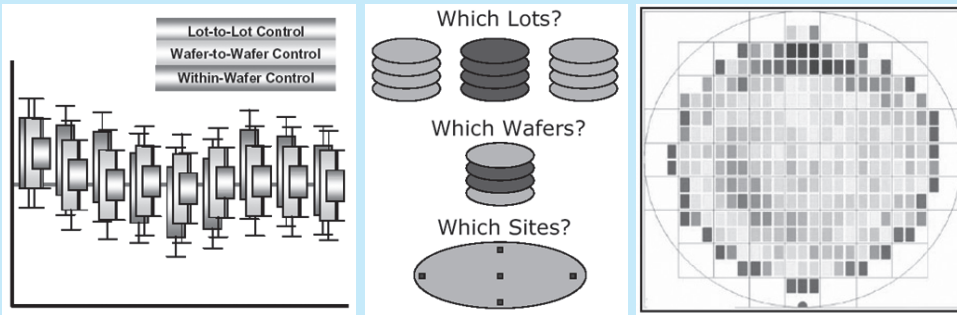
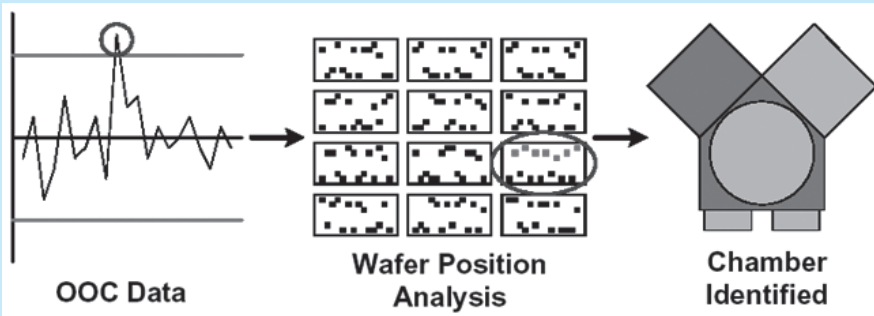


그림 5 SPC 및 R2R 기반 APC, IPS(integrated production scheduling), YMS(yield management system) 운영(IEEE/SEMI ASMC)

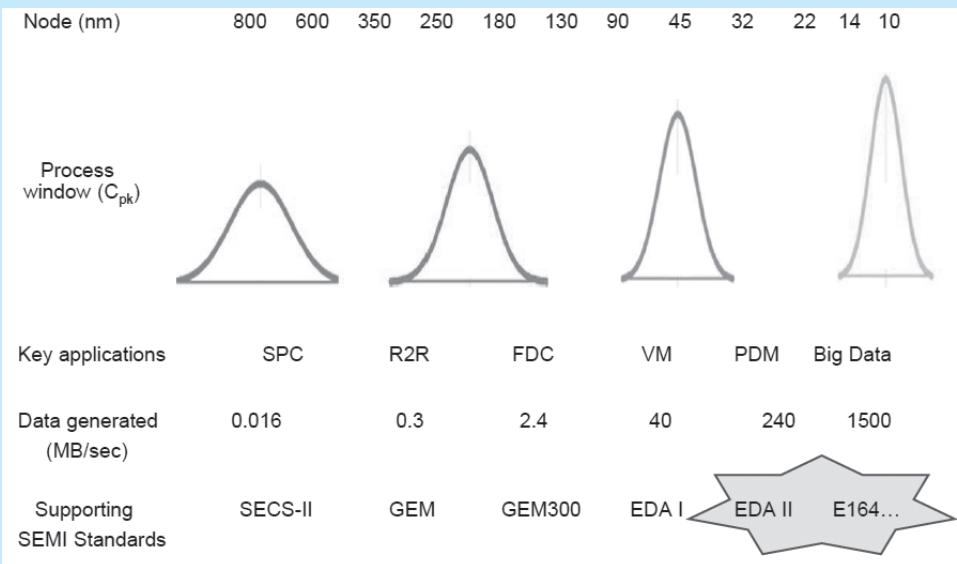


그림 6 선폭에 따른 공정여유 감소와 센서 데이터를 활용한 공정장비관리 경향(semicon taiwan)

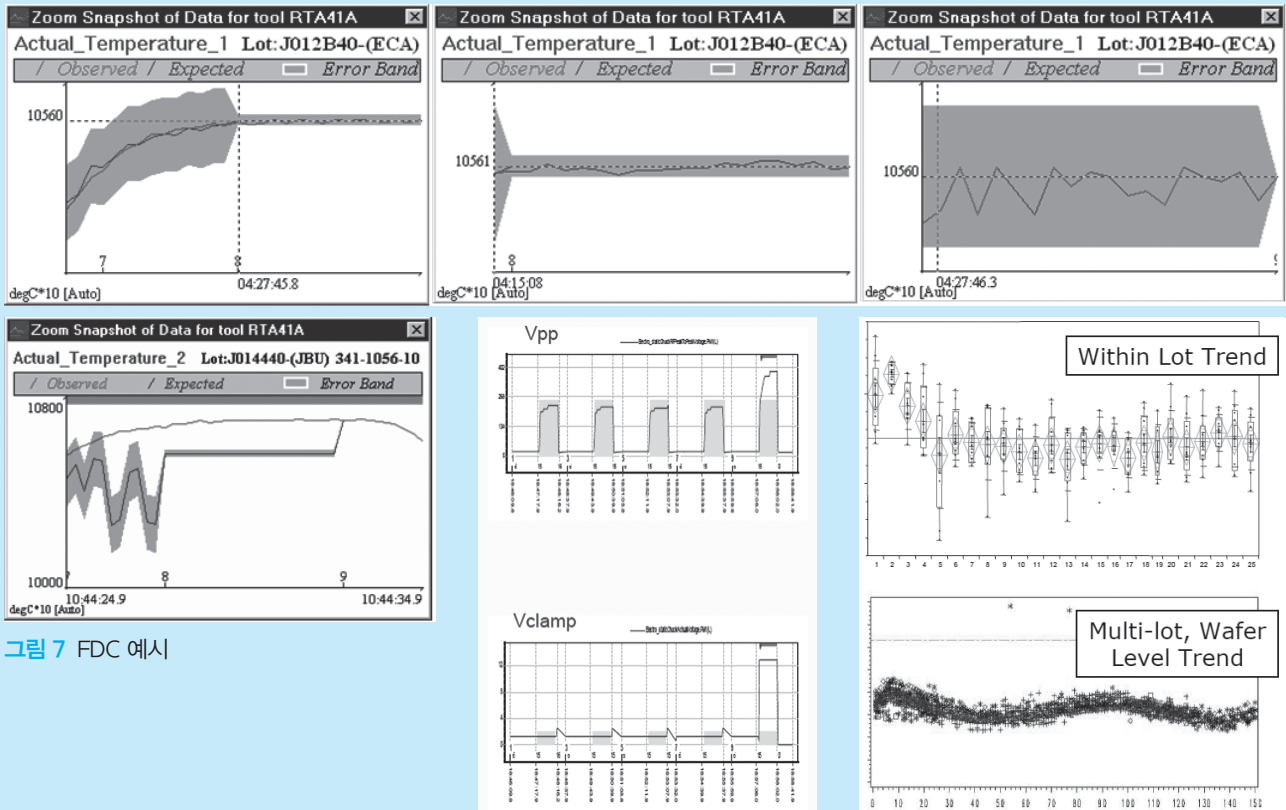


그림 7 FDC 예시

초기에는 각 공정 단계에서 증착 두께, CD(Critical Dimension), 오염입자(particle) 개수 측정 등을 통해 통계적 공정관리(SPC: Statistical Process Control)를 진행하였으며, R2R(Run-to-Run) 관점에서 웨이퍼 이력과 장비 관리 상태를 대응시킬 수도 있었다. 그러나 어떤 경우, 간헐적인 기존의 측정만으로는 공정장비의 이상 상태를 확인하기에 한계가 있었으며, 수율이 영향 받은 상태에서 알아채는 것은 해당 단계 이후의 웨이퍼는 모두 스크랩(scrap) 처리해야 하는 큰 손해를 의미하였다.

APC 측면에서, 각 공정모듈에서의 여러 가지 센서 데이터의 실시간 모니터링 및 인터락 설정은 FDC(Fault Detection and Classification)를 통해 가능했다. 한 대의 장비에서 수십 가지 이상의 데이터를 받을 수 있는데, 그 중 주요 공정인자에 대응하는

센서 값에 대해 알람 설정을 하고, 특이 상태를 확인할 수 있다. 확실한 이상상태를 확인하는 데는 문제가 없지만, 측정이 어려워 진성(true) 알람과 가성(false) 알람의 경계가 애매한 경우 어떻게 하느냐 하는 문제가 발생하기도 하는데, 장비를 멈추고 공정결과를 확인하며 특이사항을 종합하지만 명확한 결론을 내리기 쉽지 않은 부분이 종종 있다.

2010년대 들어서는, 각 공정과 측정 스텝을 연계한 VM(Virtual Metrology)과 공정진행에 따른 모듈 및 부품의 열화까지 예측하려는 PdM(Predictive Maintenance) 개념으로 경고의 오류를 최소화하고 있다. FDC를 통해 획득한 장비 및 공정 데이터, 공정 단계 사이의 계측장비를 통해 획득한 측정 데이터, MES(Manufacturing Execution System and equipment integration)를 통해 획득한 물류 데이



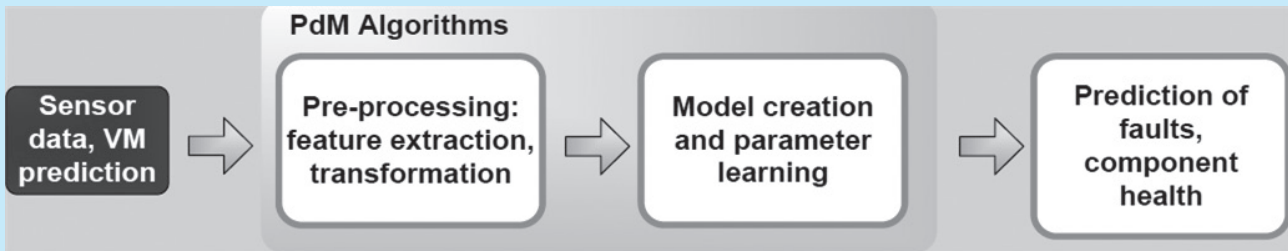


그림 8 PdM의 통계 모델링 작업순서(semicon europa)

터, 현장에서의 장비 및 부품 관리 데이터를 연계하여, 여러 가지 방법으로 모델링하고 기계학습을 시켜 경고의 신뢰도를 향상시킨 것이다.

최근 이슈가 되고 있는 인공지능(AI, artificial intelligence) 기술의 응용 측면에서는, FDC 인터락의 알람을 사람이 하나하나 확인하지 않아도 될 수 있게 하는 것이나, 하루에 수천 내지 수만 장의 사진을 봐야 해서 작업자에게 너무 가혹하고 정확도가 떨어지는 육안검사를 보완 혹은 대체하거나, 물류 반송장비의 운영을 효과적이고 효율적으로 하게 하는 것 등을 고려할 수 있다.

기존의 반도체칩 제조공장에서 효율적인 공장운동을 위해 도입한 일련의 자동화 및 표준화, 수율 향상을 위한 장비 내 각종 계측 센서 데이터 및 IT시스템을 활용한 경고와 즉각적인 대응 등에 대해 간략히 설명하였다. 웨이퍼라는 통일된 재료의 가공을 전제하나, 대규모 투자에 따른 위험 부담을 덜기 위해 민간 컨소시엄을 형성해 표준화를 선행하고, 극단적인 공정으로 오차를 식별하기 어려운 상황에서 유의미한 데이터를 확보하기 위해 무수히 많은 시도를 해왔다.

공정부산물(byproduct)을 장비 하단에서 인라인으로 실시간 분석하여 공정 상태를 파악하기도 하고, 각 공정장비에 연결되어 있는 펌프나 칠러(chiller), 스크리버(scrubber) 같은 부대설비의 온도와 압력 등의 인자도 모니터링하며, 공급되는 원료유체(gas/chemical)의 상태나, 펌 외부의 온습도 및 황사 상태

도 모니터한다. 펌 공정의 전후 단계에 해당하는 웨이퍼 가공, 마스크 가공, 조립 및 검사 공장 등 다른 기업이나 다른 공정체계와의 관계나, 소재 및 부품 공급망 관리, 수요 변화에 따른 레이아웃이나 생산 대응 등 넓은 의미에서의 스마트 팩토리 요소는 이 글에서는 생략하였으나, 공정 이슈를 해결하기 위해 소자기업과 장비기업, 소재부품기업이 공동 작업을 하는 것은 일상이 되어 있다. 반도체 펌은 신뢰성, 능동성, 지능성, 민첩성, 연계성 등 스마트 팩토리의 특징을 잘 보여주는데, 이는 작업을 수행하는 데 있어 기본이면서, 문화로서 자리매김하고 있다.

다른 특징의 공장에 적용할 때 참고할 수 있는 부분은, 먼저 사업계획에 대응하기 위해 품질이나 생산성 측면에서 필요한 부분을 확인 또는 예측하고 투자비용을 산출하는 것이다. 투자 대비 성과에 대한 전환효율로서 기준을 정할 수도 있다. 필요한 부분은 자동화나 표준화, 혹은 전산화 등이 될 수 있을 것이다. 신기술공정장비나 기존장비 보완의 경우에는 공정조건을 계측할 수 있는 센서의 적절한 위치에서의 설치와 데이터의 실시간 모니터링, 저장, 인터락이 가능하도록 한다. 특정 IT시스템을 구축했다고 그냥 효과가 나타나지 않으므로, 작업자들에 대한 지속적인 교육과 관리가 필요하다. 한편, 기업 문화 측면에서는 성과를 제때 2차 투자로 연계하여 다시 성과로 나타나는 선순환 효과를 느껴보는 것이 시장 환경이나 공정 한계에 걸릴 수 있는 중요한 요소가 된다.