



# 유지보수를 더 스마트하게 만들기

예측적 유지보수와 디지털 공급망

딜로이트 디지털 제조 기업 시리즈

딜로이트 센터 포 인티그레이티드 리서치(Center for Integrated Research)는 신흥 기술의 빠른 변화부터 인간 행동의 지속적 요인까지, 산업 및 기능 전반에 걸친 비즈니스 쟁점에 대한 신선한 관점의 도출에 초점을 맞춘다. 우리는 엄밀하게 증명된, 깊은 인사이트를 발견하고 새로운 방식으로 격변적 주제들을 살펴보아, 연구 논문, 단편 동영상, 대면 워크숍과 같은 다양한 형식으로 새로운 사고를 전달한다.

---

# 목차

**서론 | 2**

**상충관계를 관리하기 | 5**

현재의 자산관리 전략

**상충관계를 무너뜨리기 | 7**

PdM 시대의 시작

**스마트 팩토리에 대한 PdM의 영향 | 10**

**PdM을 가능케 하는 기술들을 살펴보기 | 12**

**기반 쌓기 | 15**

PdM을 위한 역량 구축

**PdM을 향한 다음 단계 밟기 | 17**

**Endnotes | 18**

# 서론

**전** 통적으로, 대부분의 유지보수 전문가들은 제조 설비의 고장 상태를 파악하고 가동 중단시간을 축소하기 위한 노력에서 많은 기법들, 양적 및 질적 기법 둘 다를, 결합해 사용해왔다. 그러나 새롭게 부상한 연결 기술은 기계들이 이런 과업을 전문가들 대신 수행 가능하도록 해줬고, 기계 고장을 회피하는 동시에 기계 부품의 가용연수를 최대화한다.

오늘날, 형편없는 유지보수 전략 때문에 공장의 전반적인 생산 역량이 5~20% 가량 떨어질 수 있다.<sup>1</sup> 또한 최근의 연구 결과는 계획되지 않은 가동 중단으로 인해 산업의 제조업체들이 매년 500억 달러 가량으로 추정되는 비용을 부담함을 보여준다.<sup>2</sup> 잠재적인 고장으로 인한 생산시간의 손실 위험을 저울질하기뿐만 아니라 유지보수를 위해 얼마나 자주 기계를 정지시켜야 할지 결정하기는 어려울 수 있다.

PdM은 가용한 가장 효율적인 유지보수 전략으로 **—**목표로 해야 할 최적의 표준이다.

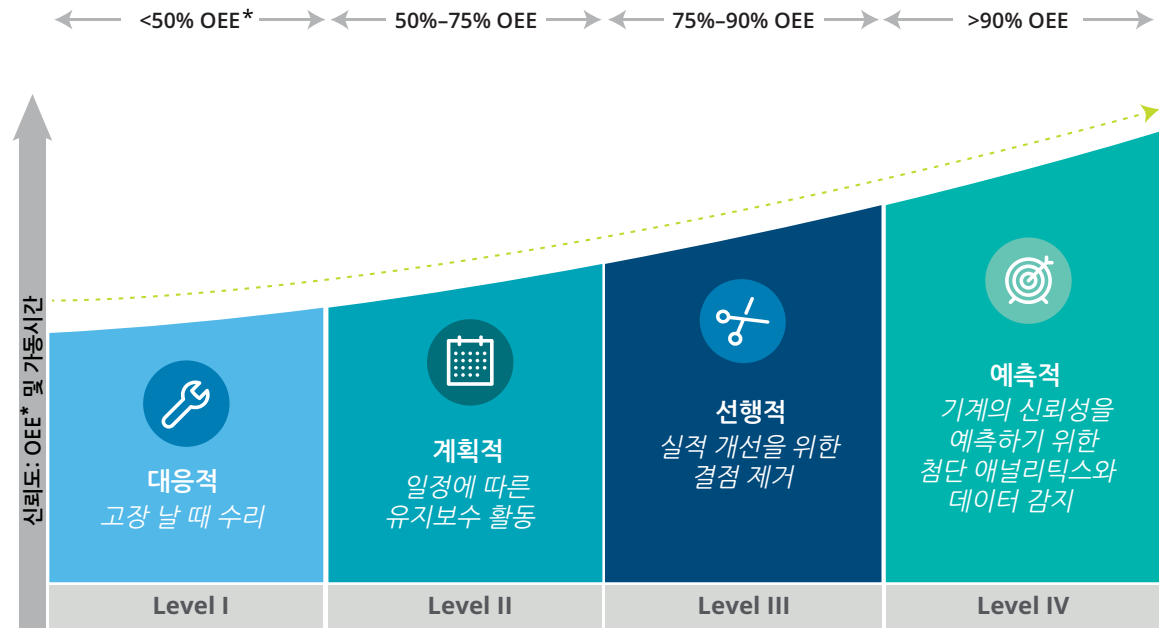
전통적으로, 이러한 딜레마는 대부분의 유지보수 조직들에게 상충적 상황을 강요했는데 기계의 가동 중단 위험을 대가로 부품의 가용연수를 최대화할지, 아니면 관촬을 가능성이 있는 부품을 조기 교체해서 가동시간을 최대화할지를 선택해야만 했고, 혹은, 일부 경우에는, 과거의 경험을 이용해 언제 고장이 일어날지를 예측해 미리 다루려 시도했다.

유지보수 프로그램의 전통적인 구성요소들은 보통 네 가지 범주로 나뉘지는데, 각각은 자기만의 일련의 도전과제와 장점을 가지고 있다(그림 1):

- 대응적 유지보수
- 계획적 유지보수
- 선행적 유지보수
- 예측적 유지보수

네 번째 구성요소인, **예측적 유지보수(Predictive Maintenance, PdM)**는, 디지털과 물리적 자산을 결합하는 스마트한 연결 기술을 통해 가능해진다. PdM이 새로운 개념은 아니지만, 요구되는 방대한 규모의 데이터 처리에 일반적으로 요구되는 기술에 대한 막대한 투자가 이의 구현을 오직 대규모 조직에게만 국한시키는 경우가 많았다. 오늘날 디지털 기술의 높은 가용성과 낮은 비용은,

그림 1. 유지보수 전략 연속체



\* OEE(Original equipment effectiveness): 원래 장비의 효과성

출처: 딜로이트 애널리틱스

Deloitte University Press | [dupress.deloitte.com](http://dupress.deloitte.com)

디지털 공급망(Digital Supply Network, DSN)의 부상과 결합해, PdM이 모든 규모의 설비 및 조직들에 걸쳐 광범위한 수준으로 확장되도록 만들어왔다.<sup>3</sup> 운영과 정보기술의 조합은 물리적 세계의 데이터에 관한 더 깊은 분석과 더 지능적인 행동의 추진을 가능케 한다(심화학습을 위해 삽입글 “예측적 유지보수와 물리-디지털-물리 고리”을 참조). PdM에서는, 연결된, 스마트 머신 및 장비에서 수집된 데이터가 언제 그리고 어디서 고장이 일어날 수 있는지, 부품의 효율성 최대화와 불필요한 가동 중단시간의 최소화가 가능한지를 예측할 수 있다. 대부분의 경우, 이것이 의미하는 바는 PdM이 가용한 최고로 효율적인 전략—목표해야 할 최적의 표준이라는 점이다.<sup>4</sup> 이 방식에서, PdM은 DSN의 시대의 중요한 역량으로서 간주되는 경우가 많다.

DSN—정적의 선형적인 공급 변화를 대체하는 적응성 높은 네트워크—과 연결된 민첩 생산의 추진 과정에서 연결 기술의 역할을 자세히 살펴 보려면, 『디지털 공급망의 부상: 인더스트리 4.0이 공급사슬의 디지털 변환을 가능케 한다(The rise of the digital supply network: Industry 4.0 enables the digital transformation of supply chains)』를 살펴보라.

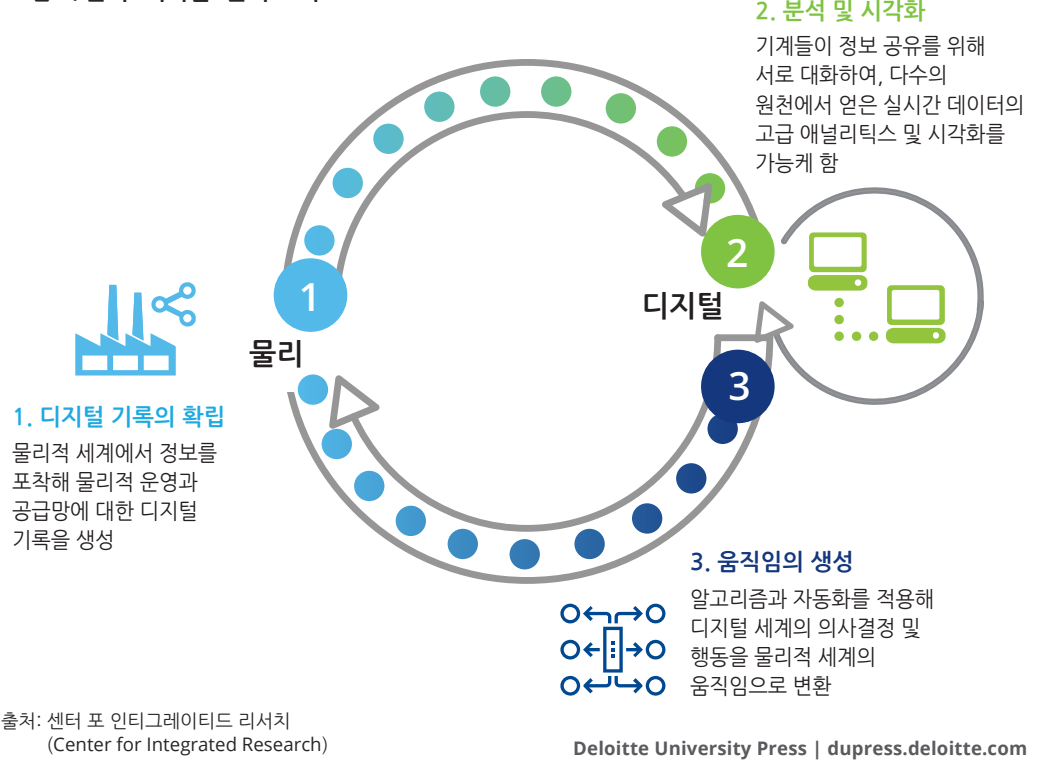
본고에서, 우리는 PdM을 살펴본다: 이의 DSN에서의 역할, 영향과 잠재적인 혜택, 이를 뒷받침하는 기술, 그리고 스마트 팩토리에서의 전형적인 역할을 살펴본다. 더 넓은 자산관리 전략에 어떻게 PdM을 통합할지에 대한 전략을 정의하고, PdM 구현 도전과제 중 일부를 탐색하며, PdM으로의 전환을 성공적으로 만드는 조직적 변화를 검토한다. 마지막으로, 스마트 팩토리를 위한 자산 관리 전략의 일부로서 PdM의 구현을 시작하기 위한 몇 가지 방법을 설명한다.

### 예측적 유지보수와 물리-디지털-물리 고리

전통적인 선형적 데이터와 의사소통에 익숙한 조직에 있어, 데이터 및 정보에의 실시간 접근은 자산을 관리하고 목표를 달성하는 방식을 근본적으로 변환시킬 수 있다. 일단 조직이 PdM 도입을 결정하면, 어떻게 개발하고, 구현하며, 그리고 의사결정을 추진하기 위해 PdM에 동력을 공급하는 다양한 연결 기술들을 어떻게 사용할지를 고려해야 한다. 하지만, 그렇게 하기 전에, 정보 생성, 분석, 그리고 행동 프로세스를 어떻게 이들 기술이 가치를 창출하는가에 대한 정수를 구성하는 고리로서 간주하는 것이 유용할 수 있다. 서로 다른 많은 출처와 장소들에서 나온 디지털 정보의 통합은 지속적인 순환 과정에서의 유지보수, 제조, 유통의 물리적 활동을 추진한다.

데이터와 정보에 대한 실시간 접근은 물리적 세계와 디지털 세계 간의 정보 및 행동의 지속적이고 순환적인 흐름에 의해 추진된다. 이 흐름은 총체적으로 물리-디지털-물리 고리로 알려진, 세 단계의 연속적인 반복을 통해 일어난다. 첫째, 정보가 물리적 세계에서 포착되고 디지털화 된다(물리에서 디지털로). 둘째, 고리의 디지털-디지털에 해당하는 부분은 의미 있는 인사이트를 생성하기 위한 데이터의 공유와 분석에 초점을 맞춘다. 마지막으로, 이들 인사이트를 실제 세계의 행동으로 변환하는 디지털에서 물리로의 단계와 함께 고리가 닫힌다. 이 과정은 그림 2에서 시각적으로 기술되었다.

그림 2. 물리-디지털-물리 고리



이의 전체에서, 이 과정은 조직이 단순히 데이터에 의해 정보를 제공받기 보다, 더 효율적인 운영 혹은 DSN과 같은 완전히 새로운 비즈니스 모델의 창조를 가능하게 해준다.

이 모델이 PdM에 적용될 때, 기업은 자산 및 기계장치로부터 수집된 데이터를 이용해 이상적으로 기능을 이해하고 언제 고장이 발생할지 혹은 유지보수 필요가 발생할지를 예측할 수 있다. 이는 조직을 보다 민첩하게 만들어, 자산 현황에 대한 총체적인 관점의 채택과, 니즈의 예상을 가능하게 해준다.



# 상충관계를 관리하기

## 현재의 자산관리 전략



**P**dM이 빠르게 유지보수 전략의 최적 표준으로 간주되고 있지만, 이것이 반드시 모든 종류의 유지보수 혹은 수리 필요성에 대한 최고의 접근법은 아닐 수 있다. 일부 경우, 다른 접근법이 스마트 팩토리 내에서 보다 효과적인 방안일 수도 있다. 이러한 이유 때문에, 아래서 각각을 간단히 살펴보고 어떻게 이들이 PdM을 향한 성숙도 곡선으로 이어지는지를 파악해본다.

### 대응적 유지보수: 부품이 고장 나도록 허용

자산 유지보수에서 기술적으로 가장 떨어지고 가장 평범한 수준인<sup>5</sup> 대응적 유지보수는 오로지 부품 혹은 장비가 고장 나거나 고장 시점에 가까워진 후에야 이에 대한 수리 혹은 교정이 수반된다. 대응적 유지보수 전략은 툴링(Tooling) 또는 기계 부품을 극한까지 사용함으로써 이들의 활용을 극대화한다. 하지만, 이로 인해 부품이 진동하고, 과열되며, 망가지기 시작함에 따라 재난에 가까운 기계 고장으로 이어질 수 있고, 추가적인 손상을 일으킬 가능성도 있다. 유사하게, 대응적 유지보수는 조직으로 하여금 문제 그 자체보다는 증상만을 다루도록 유도할 수 있는데, 열 팽창과 같은 문제의 근원보다 베어링의 진동 문제만을 반복적으로 처리하는 것처럼 말이다.<sup>6</sup> 이 접근법은 매우 저렴하고, 안정적이거나 혹은 여분의 부품을 특징으로 하는 기계장비의 경우 받아들여질 수도 있지만,<sup>7</sup> 대부분의 활용에 있어, 보다 빈번한 부품 교체와 장비의 유지보수가 더 비용 효과적인 전략일 수 있다.

### 계획적 유지보수: 문제 발생 전에 방지

부품이 고장 나기 전에 교체하는, 계획된 시점 기반의 방지적 유지보수 접근법은 정기적, 사전 계획된 간격으로 부품을 교체함으로써 기계의 고장을 방지하고 가동 중단 시간을 줄이는데 도움을 줄 수 있다. 계획적 유지보수가 대응적 전략보다 더 비용 효과적일 수 있지만, 이는 또한 정당화하기가 더 어려울 수 있다. 왜냐하면 사용연한이 아직 남은 상태에서도 부품이 교체되고, 일반적으로 추가적인 여분의 부품이 가까운 곳에 보관되며, 이미 복잡한 과업인 재고 관리에 여분의 부품이 추가되기 때문이다. 또한, 계획적 유지보수는 훨씬 긴 계획된 가동 중단 시간을 필요로 하는 경우가 많은데, 겉보기에 완벽해 보이는 기계들을 정지시키고 운영에 교란을 일으키는 작업을 정당화하는 일은 어려울 수 있다.<sup>8</sup>

### 선행적 유지보수: 증상이 아닌 근원을 치유

계획적 유지보수가 부품 교체와 수리를 위한 정기적으로 일정이 수립된 시간을 제공하는 반면, 선행적 유지보수는 보다 데이터에 기반한, 분석적인 접근법을 제시한다. 선행적 유지보수는 고장으로 이어질 수 있는 문제의 파악과 해결을 우선 노력하는데, 그러한 문제에는 기계류의 적절하지 않은 윤활 관리, 오염, 정렬 오류, 최적에 이르지 못한 습도 및 온도 환경이 있다.<sup>9</sup> 많은 부품 고장의

이러한 근본 원인을 식별하고 해결함으로써, 선행적 유지보수는 장비의 고장으로 이어지는 마모 및 파손을 방지하는데 일반적으로 도움이 되고, 궁극적으로 고장 및 가동 시간을 감소시킨다. 다른 혜택으로는 불필요한 수리의 감소, 여분의 부품 재고 필요성 축소, 장비와 부품의 수명 증가—궁극적으로 비용 절감이 있다. 또 다른 장점으로 는 선행적 유지보수가 다른 유지보수 전략과 결합될 수도 있다. 이는 도전적인 환경에 위치한 값비싼, 대형 장비에 최적일 가능성이 크다.

표 1은 이들 세 가지 유지보수 전략의 장점 및 도전과제를 나열한다.

각각의 유지보수 전략이 시간과 훈련 측면에서 상대적으로 높은 수준의 투자를 일반적으로 필요로 하지만, 그에 비례해서 보통 장점이 늘어나고, 도전과제 또한 어느 정도 수준까지 줄어들 수 있다.

표 1. 서로 다른 유형의 유지보수 전략들의 상충점

	장점	도전과제
대응적	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 톨링 혹은 기계 구성요소의 활용 극대화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 부품의 고장을 넘어 기계장비에 더 큰 손상을 입힐 가능성</li> <li>• 계획되지 않은 가동 중단시간</li> <li>• 높은 유지보수 비용</li> </ul>
계획적	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 더 낮은 기계 고장 가능성</li> <li>• 더 줄어든 계획되지 않은 가동 중단시간</li> <li>• 대응적 전략보다 더 비용 효과적</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시간이 지남에 따라 교체 비용 증가</li> <li>• 추가적인 여분의 부품 재고 필요</li> <li>• 계획된 가동 중단시간 증가</li> </ul>
선행적	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 장비의 수명 증가</li> <li>• 계획된 그리고 계획되지 않은 가동 중단시간 감소</li> <li>• 고장 날 때까지 가동 혹은 계획된 가동 중단보다 더 비용 효과적</li> <li>• 여분의 부품 재고 감소</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지속적인 유지보수 및 모니터링</li> <li>• 조직적인 변화 필요성</li> <li>• 훈련의 증가</li> </ul>

출처: 딜로이트 애널리시스

Deloitte University Press | [dupress.deloitte.com](http://dupress.deloitte.com)



# 상충관계를 무너뜨리기

## PdM 시대의 시작

**P**dM은 기업들이 부품의 사용연수를 최대화하면서 동시에 계획되지 않은 가동 중단을 회피하고, 계획된 가동 중단을 최소화하며, 비용을 절감할 수 있게 해줌으로써 오래된 전략들의 상충관계를 무너뜨릴 수 있다. 본질적으로, PdM은 연결된 장비에서 수집된 데이터를 분석해 언제 부품이 고장 날지, 그리하여 언제 유지보수가 이뤄져야 할지를 희망하건대 예측하려 한다. 부품이 고장 날때까지 사용하거나 많은 사용주기가 남은 완전히 멀쩡한 부품을 교체하기 보다, PdM은 조식이 오로지 필요할 때만—보다 정확히 하자면 *그전에*—수리를 하도록 도와준다.

### 왜 지금인가? PdM의 부상과 이의 DSN에서의 위치

PdM의 개념은 오랜 기간 동안 존재해 왔었지만, 단지 최근에 와서야 PdM이 널리 접근 가능해지도록 기술 역량이 충분히 갖춰지고 비용도 저렴해진 듯하다.<sup>10</sup> 과거에는, 수집된 데이터로부터 어떤 실제적 인사이트를 얻기 위해 PdM 프로그램이 시간 소모적인 수작업 데이터 작업과 분석을 필요로 하는 경우가 많았다.<sup>11</sup> 이들 전략은 일반적으로 “문서화되지 않은 내부적 절차나 정보에 관한 지식”에 크게 의존하거나 혹은 정확성을 유지하기 위해 각각의 개별 장비에 대한 깊은 지식과 분석을 지속적으로 필요로 했다.

하지만, 센서, 연산 능력, 통신 대역폭 비용의 하락이<sup>12</sup> 지속적인 기술 발전과 결합되어, PdM을 보다 부담 가능하고, 전사적 수준으로 확대 가능한 대안으로 만들어왔다. 이는 결국, PdM의 도입을 가능하게 만드는 경우가 많다. 유지보수 책임을 진 이들은 중요 장비의 센서, 산업용

통제 시스템, ERP 시스템, 전산화된 유지보수 관리 시스템(CMMS, Computerized Maintenance System), 생산 시스템과 같은 다양한 출처를 통해 연결된 기계 장비들로부터 빠르게 데이터를 수집할 수 있는데, 이는 그들이 전에는 보지 못하고 넘어갔던 문제의 근원을 파악 가능하게 해준다. 예를 들어, 한 소비자용 포장제품 제조기업은 센서 데이터와 고속 카메라의 데이터를 결합해 예상치 못한 압력의 축적과 생산라인의 가동 중단을 일으키는 걸보기에 관계없어 보이는 두 사건들 간의 상관관계를 파악했다. 이러한 인사이트는 연간 유지보수 비용 500만 달러를 절감하고 모든 공장에 걸쳐 효율성을 높이는데 도움을 주었다.<sup>13</sup>

그러나 단순히 센서와 시스템들로부터의 정보 수집만으로는 PdM의 혜택을 창출하는데 충분하지 않다. 데이터를 종합하고 분석하는 능력이 고장의 예측에 필수적이다. 이는 종종 데이터의 생성, 처리, 사용을 위한 새로운 역량을 필요로 하는 경우가 많다. 실제로, 애널리틱스 역량은 연결성 및 데이터의 성장과 함께 점점 더 정교해져서, 조식이 수집한 데이터로부터 의미를 파악하도록 해준다. 이들 역량이 DSN 및 연결된 스마트 팩토리의 중요 요소를 구성하는 경우가 많다. PdM은 데이터를 이용해 유지보수 의사결정에 더 나은 정보를 제공하고, 자산의 건강상태에 대한 더 큰 투명성을 전달하며, 네트워크 전반에 걸쳐 향상된 협업을 가능케 한다—여기서는, 자산을 보다 효율적인 방식으로 관리하기 위해 다수의 출처로부터의 데이터를 종합하는 형식으로 그렇게 한다. 정보의 이러한 실시간 흐름과, 이를 분석하는 능력은, 디지털 데이터를 이용한 유지보수 및 관리의 형태로서 물리적 행동을 추진해 더 큰 운영 효율성과 보다 민활한 성능을 달성한다. 이러한 흐름과 분석은 DSN의 특성을 구체화한다(그림 3).

그림 3. 디지털 공급망의 특성



출처: 딜로이트 애널리시스

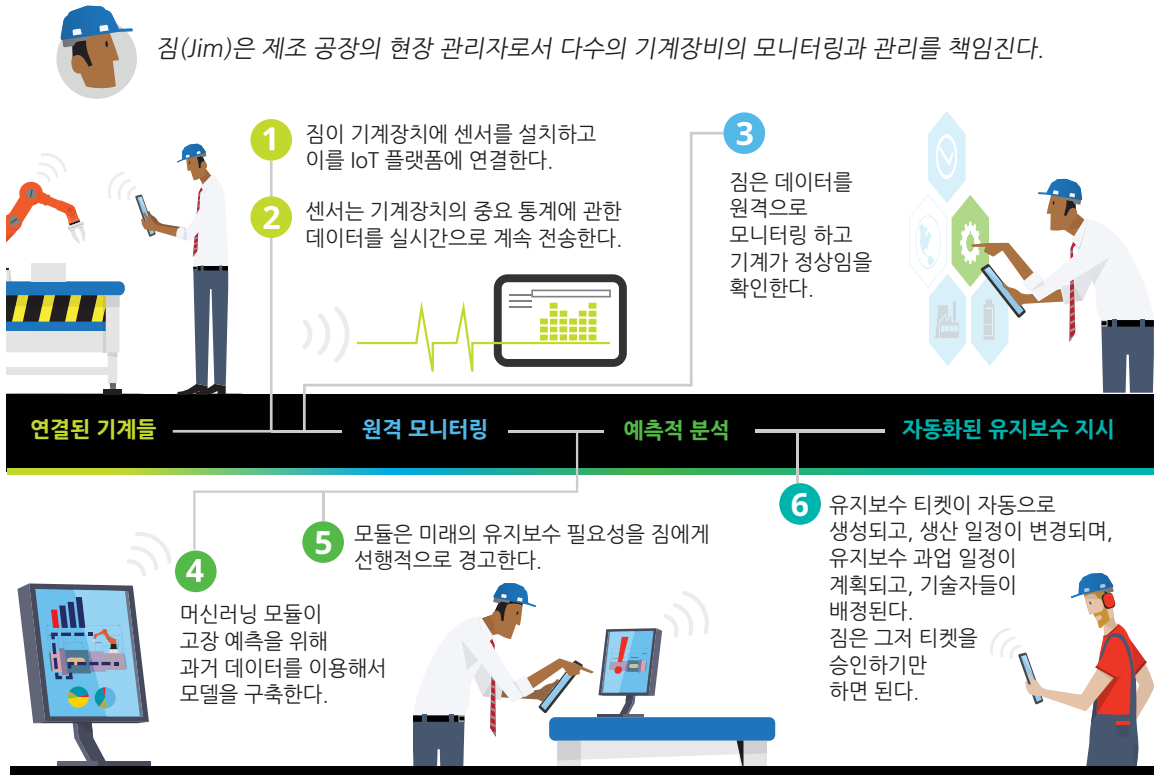
Deloitte University Press | [dupress.deloitte.com](http://dupress.deloitte.com)

연결된 물리적 자산과 관련 시스템으로부터의 지속적인 데이터 흐름이 “항상 깨어있는” 민첩성을 가능케 하는데, 이는 기계장치에 예기치 못한 상황과 변화하는 환경을 실시간으로 조명하며, 잠재적인 피해를 완화한다. 자산과 시스템의 **연결된 공동체**는 더 큰 범위와 규모로 데이터를 제공해 더 정확한 예측적 분석을 가능케 해, 조직이 의사결정과 기계장비의 사용을 **지능적으로 최적화**하게 해준다. 추가로, 연결된 기계장치의 센서 데이터를 생산공정 전반에 걸쳐 종합해 **중단 간 투명성**을 가능케 하고, 한편으로 데이터의 의미를 파악하기 위한 적절한 애널리틱스 및 알고리즘의 선택이 자산의 유지관리 접근법에 대한 **총체적 의사결정**을 가능케 해, 네트워크 전체 내에서의 자산의 역할에 기반한 성능 최적화를 이룬다. 다 함께, 이들 역량은 보다 정보에 기반한, 전략적 의사결정을 가능케 하는데— 이는 PdM의 주요 이점 중 하나다.

## 어떻게 연결성이 PdM 프로세스를 추진하는지 이해하기

일단 데이터 출처가 파악되면, 네트워크는 이들 데이터를 맞춤 혹은 표준적 데이터 네트워크를 통해 현장 혹은 클라우드 저장소로 전달할 수 있다. 거기서, 예측적 알고리즘을 갖춘 애널리틱스 도구가 수집된 데이터를 분석해 언제 각 개별 부품이 고장 날 가능성이 있는지 판단한다. 이 정보는 이후 자동적으로 데이터 시각화와 협업 도구를 통해 직원들에게 전달되는데, 이들 도구는 직원들로 하여금 유지보수가 필요한 부품만을, 필요로 할 때 정비하도록 해준다. 그림 4는 PdM 프로세스를 조명해 보여준다.

그림 4. 예측적 유지보수 프로세스



출처: 딜로이트 애널리시스

Deloitte University Press | [dupress.deloitte.com](http://dupress.deloitte.com)

# 스마트 팩토리에 대한 PdM의 영향

**연** 결된 디지털 및 물리적 기술은 일반적으로 제조 기업에 대한 두 가지 주요 사업목표에 영향을 미친다: 사업 운영과 사업 성장이 그것이다.<sup>14</sup>

PdM은 이 두 영역 모두에서 가치를 증명할 수 있다. 사업 성장에서 디지털 기술의 사용 목표가 매출 성장에 초점을 맞추는 반면, 운영에서는 생산성 향상 혹은 리스크 축소를 통해 비용 절감을 추구하는데 이는 대부분의 유지보수 전문가들이 일반적으로 집중하는 영역이다. 작업 지시로 이어지지 않는 일상적인 기계장비 검사 수행, 혹은 계획되지 않은 가동중단의 해결에 쓰이는 인시(Man-hour)의 규모를 고려할 때, 운영 효율성을 위한 도구로서 PdM의 사례는 명확해진다. 연결 기술은 여러 출처 및 과거 시스템들로부터 데이터를 끌어와 실시간 고급 인사이트를 제공해, 컴퓨터 시스템이 품이 많이 들지만 가치가 낮은 일을 수행하도록 만들어 유지보수 관리자들이 보유한 자원을 보다 효과적으로 배치 가능하게 해준다.

## 사업 운영에서의 효율성 개선

연결 기술(다음 장에서 더욱 상세히 살펴볼)은 PdM이 적절한 시점, 적절한 장소에서 적절한 부품의 관리라는 유지보수의 핵심 도전과제를 다루는데 도움을 준다. 개별 부품에 대한 추측이 아닌, 실 세계의 데이터로 이들 프로세스를 추진함으로써, PdM은 대부분의 유지보수 사용 사례에 대한 최적의 효율성을 결정하는데 도움이 된다.<sup>15</sup> PdM은 유지보수를 계획하는데 필요한 시간을 20-50%까지 줄일 수 있고, 장비 가동시간과 가용성을 10-20% 가량 높이며, 전반적인 유지보수 비용을 5-10% 절감할 수 있다.<sup>16</sup>

예를 들어, 한 대형 화학기업은 예측적 자산 애널리틱스에 대한 지대한 관심을 가지고 적극적으로 연결 기술을 배치 중이다.<sup>17</sup> 그 기업은 “자동화의 미래” 프로그램에

PdM은 유지보수를 계획하는데 필요한 시간을 20-50%까지 줄일 수 있고, 장비 가동시간과 가용성을 10-20% 가량 증가시키며, 전반적인 유지보수 비용을 5-10% 절감할 수 있다.

디지털 기술을 도입해 자산 및 프로세스 관리 분야에 대한 자사의 선도적 지위를 강화하기 위해 선행적으로 탐색하고 있다. 자산의 한 종류인, 압출기에 관한 예측 역량을 시험한 사업은 계획되지 않은 가동 중단시간의 80% 축소와 자산 당 30만 달러의 비용 절감이라는 결과로 이어졌다.<sup>18</sup> 이제 그 기업은 다수의 시설에 걸쳐 이 역량을 다른 중요 장비들로 확대하고 있다.

반응적, 계획적, 혹은 선행적 유지관리 전략에서, 갑작스러운 고장에 대비하기 위해 광범위하고 다양한 많은 예비 부품들이 보통 재고로 비축되지만, 일반적으로 PdM은 팀들이 유지보수 프로세스를 보다 효율적으로 관리하도록 해준다. 이탈리아 철도회사, 트레니탈리아(Trenitalia)의 예를 살펴보면, 이 회사는 정기적으로 계획된 유지보수를 위해서뿐만 아니라 예상치 않게 기차가 고장 난 경우에도 보유한 1,600대 이상의 기차 각각을 운영에서 제외시켜야만 했다.<sup>19</sup> 이는 많은 지연을 일으키고, 계약에 대한 실적 위약금을 발생시켰으며, 승객들을 짜증나게 만들었다. 문제의 처리를 위해, 트레니탈리아는 유지보수

개선 3년 추진계획의 일환으로서 1,500대의 기관차마다 수백여 개의 센서를 설치했다. 데이터가 거의 실시간으로 사설 클라우드 저장소로 전송되었고, 거기서 진단 애널리틱스는 브레이크 패드와 같은 부품의 고장에 대한 사전 경보를 제공했다. 그러한 데이터를 가지고, 트레니탈리아는 브레이크 패드의 가용 연수를 최대화하면서 동시에 필요한 예비 부품의 규모를 줄일 수 있었다. 전반적으로, 트레니탈리아는 가동 중단시간을 5-8%까지 줄이고 연간 유지보수 비용 13억 달러 중 추정컨대 8-10%를 절감해, 매년 약 1억 달러를 절약할 수 있었다.<sup>20</sup> 아마도 다른 모든 혜택을 넘어서, 더 많은 기차가 정시에 운영된 덕분에, 더 많은 승객이 행복해 진 듯하다.

보다 정확한 고장 예측과, 따라서 어떤 교체 부품이 가장 필요하게 될지를 알려줘, PdM은 리스크를 늘리지 않으면서도 더 줄어든 예비 부품만을 손에 닿는 곳에 보관하도록 해준다. PdM 시스템을 물류 혹은 부품 주문시스템과 연동하면, 프로세스가 더 매끄러워지고, 부품의 자동 주문이 가능해져, 적절한 부품을 적절한 장소와 적절한 시점에 제공한다는 전반적인 유지보수의 목표의 달성이 더욱 가능해진다.<sup>21</sup> 항공 업계는 이미 PdM을 사용해 다음 24시간 동안 고장이 발생할지 여부와 무슨 부품이 필요할지를 파악한다. 이는 항공기와 비행을 연결하는 복잡한 일상적 도전과제의 혼란을 최소화하는데 도움을 줄 뿐만 아니라, 유지보수 담당자들이 정비가 필요할 때 적절한 부품의 확보를 준비하는데도 도움이 된다.<sup>22</sup>

## 사업을 성장시키기

이러한 통계를 살펴보면, 오직 사업 전략이 비용 절감이나 더 높은 효율성을 추구할 때만 PdM이 유용해 보일 수 있다. 하지만 PdM은 운영을 넘어, 사업 성장에도 추가적인 혜택을 제공할 수 있다. PdM은 비용 통제에 도움을 줄 뿐 아니라, 차별화도 지원할 수 있다. 유지보수 실패는 단순히 기계 그 자체보다 더 큰 영향을 미칠 수 있다. 이는 또한 불량 혹은 낮은 품질의 제품이라는 결과를 낳게 된다.<sup>23</sup> 게다가, 툴링 및 기계장치가 허용 오차에서 벗어남에 따라 제품 품질의 하락이 시작될 수 있다. 그러한 허용 오차를 더욱 크게 인식하고 통제 가능케 함으로써, PdM은 더 나은 제품 품질을 보장하는데 도움을 준다. 덧붙여, 가동 중단시간을 단축함으로써, 제조업체는 기존



기계장비에서 추가적인 생산역량을 확보하여 사업의 성장과 더 큰 반응성을 지원한다. 이런 방식으로, PdM은 그 어느 때보다 빠르게 더 나은 품질의 제품을 출하하도록 지원해, 제조업체가 경쟁에서 차별화되도록 돕는다.<sup>24</sup>

예를 들어, 한 전자부품 제조업체는 제조 실행 시스템(MES, Manufacturing Execution System)과 소재 가공 시스템으로부터의 데이터를 결합해 일련의 분산화된 데이터베이스를 만들었다. 데이터를 구조화된 데이터 피드로 종합하여, 회사는 전반적인 산출을 늘리고 품질 불량을 33%까지 줄이는 예측적 알고리즘을 개발할 수 있었다. 가장 중요하게는, 이러한 품질 향상을 고객이 마주하면, 그 혜택은 단지 비용 절감에서 끝나지 않고—고객 만족과 브랜드 차별화에 강한 영향을 미치게 된다. 앞서 트레니탈리아의 사례를 생각해 보라. 프로젝트는 기관차의 유지보수와 안정성 개선을 목표로 했지만, 기업의 궁극적인 목표에는 유지보수의 운영 효율성 개선뿐만 아니라, 계획에 없던 고장이 줄어든 결과로 기차가 정시 운영됨에 인한 고객 만족도의 개선 또한 포함된다.<sup>25</sup>

# PdM을 가능케 하는 기술들을 살펴보기

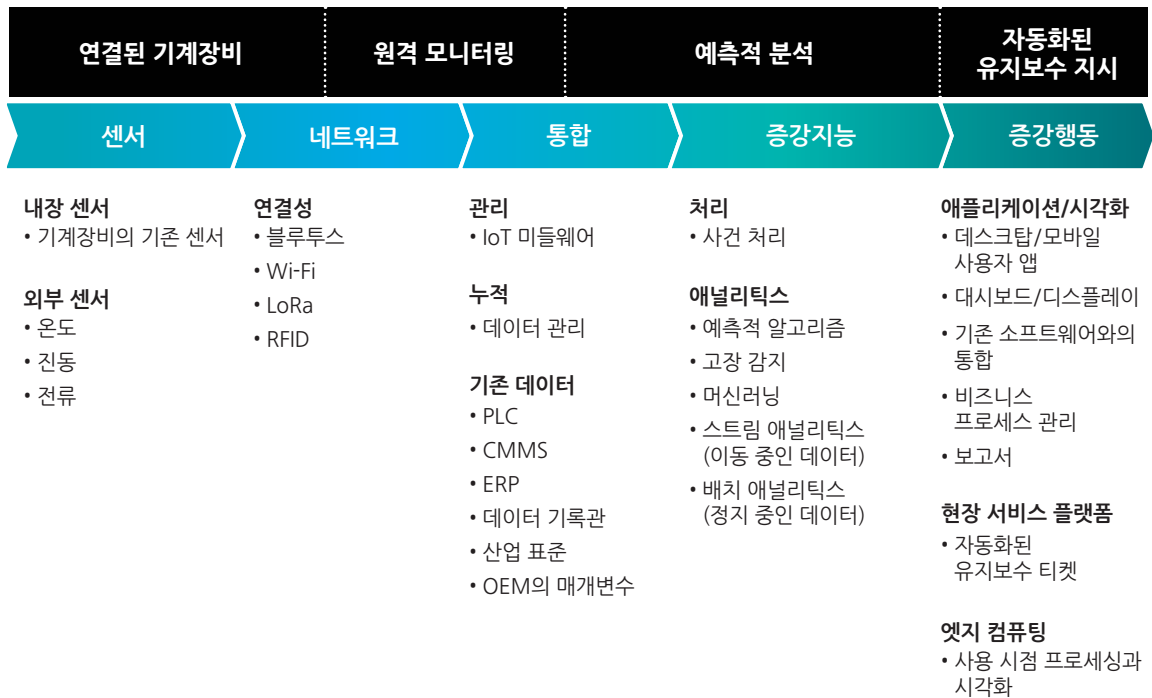
PdM이 어떻게 작동하는가에 대한 이해는 이를 가능케 하는 특정한 연결 기술들에 대한 검토를 필요로 한다. 센서와 통신 프로토콜, 애널리틱스와 데이터 처리 도구, 데이터 시각화와 협업 도구 등(그림 5).

## 센서와 네트워크

아마도 PDM 퍼즐에서 가장 중요한 조각들은 데이터를 생성하는 센서 그리고 데이터를 저장과 분석이 가능한 곳으로 이동시키는데 필요한 통신일 것이다. 이들 센서는

기계의 물리적 행동을 온도, 진동, 전도성과 같은 변수들을 전달하는 디지털 신호로 변환한다. 데이터는 또한 다른 출처로부터 흐름이 생성될 수 있는데, 기계의 프로그램 가능한 로직 컨트롤러(PLC, Programmable Logic Controller), MES, CMMS, 그리고 심지어 ERP 시스템에서도 가능하다. 예를 들어, GE의 환경 예측(Condition Forecaster) 시스템은 이 종합 접근법을 이용해 모터 당 250개 이상의 센서에서 나온 데이터와 40,000건 이상의 과거 유지보수 기록을 결합해 공장의 모터 성능과 안정성을 최대화한다.

그림 5. PdM을 추진하는 기술



표준, 보안, 그리고 서비스

출처: 딜로이트 애널리시스

Deloitte University Press | [dupress.deloitte.com](http://dupress.deloitte.com)

이들 도구가 보다 더 주류로 진입함에 따라, 활용을 위해 통계학 혹은 컴퓨터과학 학위가 더 이상 필요하지 않게 될 수도 있고, 과거 이를 활용하는데 필요한 전문 지식이나 자원을 보유하지 못했던 많은 조직들에게 접근 가능해질 수도 있다.

이러한 종류의 투명성을 가능케 하는 프로토콜의 유형이 특정한 활용을 위해 맞춤 설계되거나 혹은 Wi-Fi나 블루투스나 같이 일반적인 사용을 목적으로 하느냐에 관계없이, 오늘날의 통신 대역폭 및 저장공간의 낮은 비용과 부담 가능성은 막대한 규모의 데이터 전송이 가능해졌음을 시사한다. 이는 제조업체로 하여금 단일 공장의 자산들 뿐만 아니라 전체 생산 네트워크에 대한 전체 그림을 확보하게 해—DSN의 종단 간 투명성을 활용하게 해준다.

## 데이터 통합과 증강지능

일단 디지털 정보가 중앙 집중화되면, 일반적으로 이는 반드시 분해되고, 저장되며, 첨단 애널리틱스와 예측적 알고리즘을 이용해 분석되어야만 한다. 센서로부터 기계 장비의 데이터를 단순히 수집하는 것만으로는 충분하지 않다. 개별 부품의 고장을 예측하려면 비구조적 데이터를 위한 고차원의 솔루션, 증강지능, 혹은 머신러닝이 필요할 수 있다. 이러한 기술은 산더미 같은 데이터를 걸러내 일상적 운영의 “소음”으로부터 고장 나기 직전인 부품의 “신호”를 찾아내는데 필요하다. 간단히 말해, PdM이 시험 프로그램 혹은 검토 단계에서 결정된 고장 임계값의 정확성에 의존하긴 하지만, 머신러닝 기술은 각각의 예측 결과를 분석하고 그에 맞춰 임계값을 조정하여 장기적으로 이들 임계값을 반복 개선한다. 결과적으로, 적절한 애널리틱스 혹은 알고리즘의 선택은 PdM 역량의 창조에서 중요한 단계다. 그리고 그 결과는 심대할 수 있다. 최근 한 제조업체는 머신러닝 플랫폼이 제공하는 예측적 알고리즘을 활용함으로써 로봇화된 제조 라인의 가동 중단시간을 50% 줄이고 실적을 25% 증가시켰다.<sup>26</sup>

이들 도구가 보다 더 주류로 진입함에 따라, 사용을 위해 통계학 혹은 컴퓨터과학 학위가 더 이상 필요하지 않게 될 수도 있고, 과거 이를 활용하는데 필요한 전문 지식이나 자원을 보유하지 못했던 많은 조직들에게 접근 가능해질 수도 있다. 제조 공정과 보다 접점이 많은, 운영 분석가들은 특히 일상적인 사용자들을 위해 개발된 현대적인 API(Application Program Interface)를 이용해 손쉽게 대시보드를 만들 수 있다.<sup>27</sup>

또 다른 트렌드는 데이터의 가장자리(Edge)로의 이동이다. 사용시점에 톨링을 공급하는 린(Lean) 기법과 유사하게, 데이터 연산이 “가장자리”에서 이뤄지는데, 이는 데이터가 생성되는 기계에서 데이터 처리가 이뤄짐을 의미한다. 따라서 인사이트는 유지보수 기술자뿐 아니라 기계 조작자에게 곧바로 전달될 수 있다. 데이터가 계속해서 증가함에 따라, 엣지 컴퓨팅은 처리 작업의 일부를 네트워크의 외곽 교점에 분산시켜 컴퓨터 네트워크의 전반적 부하를 줄여서 중심 네트워크의 통신 부하를 완화하고 애플리케이션의 성능을 개선한다.<sup>28</sup>

## 증강행동

일단 데이터가 분석되면, 이를 인간과 기계에게, 그들이 수작업(인간의 경우) 혹은 자동(기계의 경우)으로 행동을 취할 수 있게 해주는 방식으로 제시하는 게 가능해진다. 이 단계에서, 증강행동이 의미를 가지게 된다. 웨어러블 및 증강현실과 같은 기술은 유지보수 담당자가 과업에 몰입한 도중에도, 유지보수 매뉴얼 혹은 전문가의 조언과 같은 대량의 데이터를 볼 수 있게 해준다. 이들 기술은 실제



세계의 영상에 덧입혀 보여지는 단계별 지시를 이용해, 작업자들이 문제가 발생하자마자 해결하도록 지원하고 (심지어 시끄러운 환경에서도), 몰입도 높은 주문형 훈련을 통한 지식의 전달을 돕는다.<sup>29</sup> 이들은 또한 다른 장소에 있는 팀들이 원격으로 작업을 모니터링하고 감독하게 해준다.

예를 들어, 한 선도적인 기술 제조업체는 문제의 원격 해결과 전문적인 지식의 실시간 전달을 위해 업계 선도적인 일련의 웨어러블 기술 도구를 배포했다. 그 솔루션은 중요 부품 조립과정 동안의 심각한 지연이 자주 목격된 제조사고 해결 프로세스를 지원한다. 이 회사는 줄어든 가동 중단시간을 통해 단 하나의 제품 라인에서 50만 달러로 추정되는 비용을 절감하고 결함의 수리를 위한 주기 시간의 50% 감소를 이뤘다.

최종적으로, 신호들이 처리, 분석, 시각화된 후에, 디지털 인사이트는 물리적 행동으로 변환된다. 일부 경우, 도출된 디지털 결론이 로봇 혹은 기계장비들로 하여금 그들의 기능을 변경하도록 지시할 수도 있다. 다른 경우에는, 유지보수 경보가 기술자들이 행동을 취하도록 박차를 가할 것이다. 다음과 같은 상황을 상상해 보라. 예측적 알고리즘이 회사의 CMMS 시스템에서 유지보수 작업 지시를 발생시키고, 예비 부품이 근처에 보관되어 있는지 ERP 시스템을 확인하며, 필요한 추가 부품에 대한 구매 요구서를 자동적으로 생성하는데, 이 모든 과정은 자동화되고 계획되지 않은 가동 중단 전에 이뤄진다. 그 후 유지보수 관리자는 워크플로에 있는 항목들을 승인하고 적절한 기술자를 파견하기만 하면 된다.

# 기반 쌓기

## PdM을 위한 역량 구축

어떤 업무 환경이든 간에 복잡한 신기술의 추가에는 상당한 영향이 따를 수 있다. 비용 및 기술 지원의 증가, 그리고 인재 요건의 변화가 PdM의 도입과 구현에 있어 가장 큰 도전과제로서 자주 인용된다.<sup>30</sup> 또한, 대개 기술 단독으로는 조직의 PdM 전환을 지원할 수 없다. 일반적으로 프로세스와 조직적 변화가 그만큼 중요하다. 조직이 PdM의 구현을 추구할 때, 다음을 고려해야 한다.

- **보안.** 보다 많은 자산들이 상호 연결되고, 사물 인터넷이 편재화됨에 따라, 기업은 중요 장비에 대한 접근을 보호하고 연결된 자산들을 방어하면서 사이버보안에 대한 선행적 태도를 취하는 방안을 고려해야 한다.<sup>31</sup>
- **새로운 기량과 조직적 접근법.** PdM에 대한 적응은 시스템의 관리를 위해 전통적인 유지보수 계획 및 실행 기량을 넘어서 완전히 새로운 일련의 기량을 필요로 할 수 있다. 알고리즘과 예측적 모델을 개발하기 위해 데이터 과학자가 안정성 엔지니어와 함께 협업해야만 할지도 모른다. 많은 조직들이 이들 기량을 찾기도 어렵고 채우기도 어려움을 깨닫고 있으며, 솔루션 구현에는 역량의 증강을 위해 여러 기술 공급사들과의 협력이 필요할지도 모른다.<sup>32</sup>
- **장비의 업그레이드.** 수십 년 된 장비가 여전히 사용 중임을 발견하는 건 드문 일이 아니며, 이는 예비 부품의 수배와 교체 부품의 재고관리를 어렵게 만드는 경우가 많다. 장비의 업그레이드나 스마트한 자산으로의 교체에 드는 비용은 상당한 투자를 필요로 할 수 있다. 반면에, 연결되지 않은 자산을 스마트 팩토리의 일부로 만들기 위한 개장은 사이버리스크의 증가로 이어질 수 있다.<sup>33</sup>

- **데이터 관리.** 적절한 데이터의 수집은, 조직이 유의미한 고장 패턴을 정확히 예측할 수 있게 해주며, PdM에 필수적이다. 따라서, 프로젝트의 유지보수 목표 달성을 위한 적절한 데이터 원천의 수집은 일반적으로 중요한 첫 번째 과업이다. 초기 단계에서, 효과적인 분석을 위한 데이터의 정제 및 사건과의 연결에 상당한 노력이 필요할 수 있다. 장기적으로, 이는 또한 직원들이 새로운 실무 관행을 채택하게끔 요구할 수도 있다. 하지만, 적절한 데이터의 보유는 프로세스의 일부에 불과하다. 일단 수집되면, 이들 데이터는 고장 및 결과를 예측하기 위해 여러 자산 및 위치에 걸쳐 종합되고, 저장되며, 알고리즘으로 분석될 수 있다. 따라서 예측적 결과의 산출을 위한 가장 적절한 알고리즘의 선택 및 머신러닝의 활용 또한 중요하다고 여겨진다. 이를 염두에 두고, 이러한 유형의 분석이 가능한 소프트웨어 도구의 선택 및 유지가 PdM의 성공에 필수적일 가능성이 크다.
- **기술.** PdM에 초점을 맞춘 소프트웨어, 하드웨어, 알고리즘은 다른 유지보수 접근법들과 비교할 때 여전히 초기 단계에 있다. 따라서 PdM에 대한 시험적 접근법의 채택, 확장 이전의 시험과 학습이 권고될 수 있다.

유지보수 전략과 프로세스는 일반적으로 모든 성공적인 유지보수 조직에 있어 핵심 요소다. 정착된 프로세스 및 인력의 기초적인 구성 요소가 없으면, 기술에 대한 투자는 원하는 결과를 산출할 가능성이 낮아진다. 세상의 모든 센서와 스마트 기기들은 그들이 보고하는 가치의 의미를 유지보수 담당자들이 이해하지 못하면 쓸모가 없다.

## 조직적 역량의 구축

PdM 프로세스의 도입은 획기적으로 프로세스를 단축시키고, 다수의 자원, 시스템, 장소로부터 데이터를 모아 결합한다. 예를 들어, 최근 한 항공사는 이 프로세스를 자동화하기 위해 문서 파일, 항공기 로그북, 유지보수 기록의 데이터를 결합해, 인사이트를 도출하는 시간을 어느 곳에서나 30에서 90일 사이에서 하루 미만으로 단축시켰다.<sup>34</sup> 하지만, 동시에, 그러한 데이터를 분석하고 그 결과에 기반해 행동하려면 역량을 갖춰야 한다. 따라서, 유지보수 변환의 필수적인 단계는 유지보수 담당자가 의사결정을 위해 직감과 경험에 의존하기보다, 데이터를 해석하고 가치를 뽑아낼 수 있게 해주는 의사결정 프레임워크의 개발일 수 있다. 이러한 의사결정 프레임워크를 개발하기 위한 조직적 역량은 단계별로 구축 가능하며, 프로세스를 보다 관리하기 쉽게 해준다.

**단계 1: 성능 관리 프레임워크의 설정.** 어떻게 “당신이 무엇을 하는가”가 “당신이 무엇을 달성하는가”와 연결되는지에 대한 이해는 지표가 적절한 영역을 측정하는지를 확실히 하는데 핵심일 수 있다. “당신이 무엇을 달성하는가”는 산출물이며 후행하는 지표에 맞춰 조정되어야 한다. “당신이 무엇을 하는가”는 일상에 기반하며 통제 가능한데 — 이는 선행적 기반으로 측정되고 적극적으로 관리되어야 한다.

**단계 2: 가치의 파악과 포착을 위한 프로세스의 설정.** 가치를 수량화하고 목표를 수립하라. 책임 소재를 수립하고 추진계획의 우선순위를 설정하라. 성과와 자원 할당을 모니터링하라.

**단계 3: 실시간 정보 애널리틱스에 기반하여 대응적 의사결정에서 선행적 의사결정으로 이동.** 보통, 이는 여러 출처로부터의 정보에 대한 단순화된 접근을 제공하는 자산 정보센터의 설립을 포함하게 될 것이다.



## 조직적 니즈의 평가

모든 기업들이 자산으로부터 같은 수준의 안정성을 요구하지는 않는다. 기업의 필요 조건과 유지보수 프로그램의 성숙도를 평가하기 위해, 조직은 다음 질문을 던져볼 수 있다.

### 사업 전략

- 전사적으로 PdM의 가치는 무엇이 될 수 있는가?
- 자산의 안정성은 어느 정도 수준이 될 필요가 있는가? 우리의 가용성 목표는 무엇인가?

### 유지보수 전략

- 어느 시점이 자산을 유지하기보다 교체할 때인지를 어떻게 결정할 수 있는가?
- 효과적으로 사용되지 않는 이미 보유중인 데이터는 무엇인가?
- 필요한 데이터 유형과 규모를 처리할 수 있는 애널리틱스 도구를 선택해 왔는가?
- PdM 시험사업으로부터 혜택을 보게 될 몇 가지 중요한 자산이 있는가?

### 유지보수 프로세스

- 적절한 여분의 부품을 적절한 시점에서 적절한 장소에 보유하고 있는가?
- 프로세스가 잘 문서화되고, 접근 가능하며, 유용한가?
- 작업을 위한 적절한 도구를 가지고 있는가?
- 필요한 일을 수행하기 위해 적절한 기량을 기술자들이 보유하고 있는가?

크고 작은 프로젝트에서, 일반적으로 어떤 유지보수 조직도 기반이 되는 유지보수 전략 및 프로세스와 이를 가능케 하는 기술을 동시에 고려하지 않으면 성공할 수 없다.

# PdM을 향한 다음 단계 밟기

**제** 초업에서 성공하기 위해서는 적절한 기술, 프로세스, 사람들 모두의 융합이 적절한 시점에서 보통 필요하고, 조직들이 DSN과 스마트 팩토리를 구현하는 방향으로 나아갈 때, 모든 이들이 PdM을 즉시 받아들일 준비를 갖추지는 못할 것이다. 기본적인 사안들 중 몇 가지—예방적 및 선행적 유지보수—부터 시작하는 방식이 PdM 역량을 구축하면서 대응적 유지보수를 넘어 앞으로 나아가는 방법이 될 수 있다. 조직이 유지보수 기반의 구축을 추구할 때, PdM을 향한 몇 가지 단계를 취할 수 있다:

**작게 시작하라.** 예방적 및 선행적 유지보수의 기본이 자리잡은 상황에서, 조직은 하나 혹은 두 가지의 적절한 자산을 가지고 PdM을 시험할 수 있다. 기준이 되는 예측적 알고리즘을 생성하려면 이들 시범사업 중 하나에 대한 주요 자산이 고도로 운영에 필요 불가결하고 어느 정도의 빈도로 고장을 일으켜야 한다. 추가로, 이들 시범사업이 정의된 성공 측정지표에서 얼마나 좋은 값을 기록하는가에 대한 검토는 조직이 제한된 위험만을 초래하면서 전략, 기술, 프로세스를 검증 가능하게 해준다.

**빠르게 확대하라.** 일단 시범사업의 구조가 자리잡고 초기 자산 집단에 대한 증거가 이뤄지면, PdM은 두세 대의 연결된 기계장비로부터 전체 스마트 팩토리로 보다 신속하고 용이하게 확대될 수 있고, 다음으로는 생태계 전반적인 혜택을 창출하는 더 넓은 DSN으로 연결될 수 있다.

이렇게 소규모로 시작해, 빠르게 확대하는 PdM 접근법은 또한 조직이 직면하는 고유한 도전과제를 해결하는데 도움을 줄 수 있다. 예를 들어, 일부 공장은 막대한 규모의 도구와 장비들을 보유하고 있지만, 정확한 문서화 또는 훈련 프로그램이 없거나, 혹은 보다 정교한 애널리틱스 역량에 대한 투자가 필요할 수 있다. 조직은 기반이 되는 유지보수의 성숙도가 그들 기업에서 PdM의 성장을 얼마나 잘 지원할지를 판단해야 한다. 스마트 팩토리 기술에 의해 기술자들의 작업이 향상될 것인가, 아니면 기술의 추가가 기본적인 유지보수 이해력의 약점을 드러낼 것인가? 작업 지시의 적시성 및 실행이 가동 중단에 회피에 있어 절대적으로 중요해졌을 때 말이다.

**시작하기 전에 계획을 수립하라.** 상세한 계획이 때로는 시간 낭비처럼 느껴질 수 있지만, 앞장에서 기술한 의사결정 프레임워크와 같은 기반의 창조는 결함을 파악하고 성공을 달성하는데 필수적이다. 구현 과정에서, 센서를 갖춘 첫 번째 기계장비 혹은 최초의 대시보드를 갖춘 건물의 구축과 같은 중요 단계에 도달할 때 이에 따라 진척도를 측정하는 방안을 고려하라. 즉각적인 반응이 뒤따르는 짧은 전력 질주 구간의 반복은 진행 과정을 따라 배워온 교훈의 통합을 이루는 훨씬 더 민첩하고 유연한 구현을 가능케한다.

이 접근법을 염두에 두면, 기업은 PdM이 제공하는 이전에 달성 불가능했던 효율성의 확대를 이룰 수 있다. 신기술이 PdM을 가능케 만들고, 조직적 변화가 이를 유지 가능케 한다—지금도 남은 모든 것들을 현실로 만들 시점이다.

---

## ENDNOTES

1. Gary Wollenhaupt, "IoT slashed downtime with predictive maintenance," PTC, <http://www.ptc.com/product-lifecycle-report/iot-slashes-downtime-with-predictive-maintenance>, accessed March 7, 2017.
2. IndustryWeek and Emerson, "How manufacturers achieve top quartile performance," WSJ Custom Studios, <http://partners.wsj.com/emerson/unlocking-performance/how-manufacturers-can-achieve-top-quartile-performance/>, accessed March 7, 2017.
3. Jonathan Holdowsky et al., *What is the Internet of Things? A primer on the technologies building the Internet of Things*, Deloitte University Press, August 21, 2015, <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/internet-of-things/iot-primer-iot-technologies-applications.html>.
4. A. Van Horenbee and Liliane Pintelon, "A dynamic perspective on maintenance policy for complex multi-component systems," *Reliability Engineering and Systems Safety* 120 (2013): pp. 39–50.
5. In a recent survey by Plant Engineering, 61 percent of maintenance professionals responded that they operate a run-to-failure method. Source: C.T. Lam and R.H. Yeh, "Optimal maintenance-policies for deteriorating systems under various maintenance strategies" *IEEE Transactions on Reliability* 43, no. 3 (1994): pp. 423–30.
6. Brenna Sniderman, Monika Mahto, and Mark Cotteleer, *Industry 4.0 and manufacturing ecosystems: Exploring the world of connected enterprises*, Deloitte University Press, February 22, 2016, <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/industry-4-0/manufacturing-ecosystems-exploring-world-connected-enterprises.html>.
7. Lam and Yeh, "Optimal maintenance-policies for deteriorating systems under various maintenance strategies."
8. Mike Gehloff, "Does moving from reactive to proactive maintenance require a change management process," Maintenance Phoenix, January 5, 2014, <http://maintenancephoenix.com/2014/01/05/does-moving-from-reactive-to-proactive-maintenance-require-a-change-management-process/>.
9. Brendan Casey, "Securing your future with proactive maintenance," *Machinery Lubrication*, February 2013, <http://www.machinerylubrication.com/Read/29283/proactive-maintenance-future>.
10. Sniderman, Mahto, and Cotteleer, *Industry 4.0 and manufacturing ecosystems*.
11. A. D. Telang and Amit Telang, *Comprehensive Maintenance Management: Policies, Strategies, and Options* (New Delhi: PHI Learning, 2010).
12. Adam Mussomeli, Doug Gish, and Stephen Laaper, *The rise of the digital supply network: Industry 4.0 enables the digital transformation of supply chains*, Deloitte University Press, December 1, 2016, <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/industry-4-0/digital-transformation-in-supply-chain.html>.
13. Deloitte client work.
14. Sniderman, Mahto, and Cotteleer, *Industry 4.0 and manufacturing ecosystems*.
15. Van Horenbee and Pintelon, "A dynamic perspective on maintenance policy for complex multi-component systems."
16. Internal Deloitte analysis derived from work with clients.
17. Stefan Van Thienen et al., *Industry 4.0 and the chemicals industry: Catalyzing transformation through operations improvement and business growth*, Deloitte University Press, June 7, 2016, <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/industry-4-0/chemicals-industry-value-chain.html>.

18. Ibid.
19. Matthew Finnegan, "Trenitalia to cut train maintenance costs with SAP IoT and big data project," *Computer World UK*, October 4, 2016.
20. Nathan Nuttall, "Trenitalia drives cost savings using IoT on train operations," *Gartner*, December 2016.
21. Mussomeli, Gish, and Laaper, *The rise of the digital supply network*.
22. Jacob LaRiviere et al., "Where predictive analytics is having the biggest impact," *Harvard Business Review*, May 25, 2016.
23. The American Society for Quality considers both repair costs and the costs of poor-quality or defective products (warranty claims, returns complaints, etc.) to be costs of external failure. For more information, see American Society for Quality, "Cost of quality (COQ)," <http://asq.org/learn-about-quality/cost-of-quality/overview/overview.html>, excerpted from Grace L. Duffy, *The ASQ Quality Improvement Pocket Guide: Basic History, Concepts, Tools, and Relationships* (ASQ Quality Press, 2013), pp. 62–65.
24. Xiaoning Jin et al., "The present status and future growth of maintenance in US manufacturing: Results from a pilot survey," *Manufacturing Review* 3 (2016): p. 10.
25. Tom Raftery, "Italy's train operator invests big in IoT," *Tom Raftery's Internet of Things*, October 11, 2016, <https://tomraftery.com/2016/10/11/italys-train-operator-invests-big-in-iot/>.
26. H. James Wilson, Sharad Sachdev, Allan Alter, "How companies are using machine learning to get faster and more efficient," *Harvard Business Review*, May 3, 2016, <https://hbr.org/2016/05/how-companies-are-using-machine-learning-to-get-faster-and-more-efficient>.
27. See this sample dashboard and solution stack from Microsoft as just one example of many available on the market today: Microsoft, "Predictive maintenance preconfigured solution overview," April 25, 2017, <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/iot-suite/iot-suite-predictive-overview>.
28. Dave LeClair, "The edge of computing: It's not all about the cloud," *Wired Innovation Insights*, July 22, 2014, <http://insights.wired.com/profiles/blogs/the-edge-of-computing-it-s-not-all-about-the-cloud#axzz4ZFqo7srQ>.
29. Nelson Kunkel et al., "Augmented and virtual reality go to work: Seeing business through a different lens," *Tech Trends 2016*, Deloitte University Press, February 24, 2016, <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/tech-trends/2016/augmented-and-virtual-reality.html>.
30. Jin et al., "The present status and future growth of maintenance in US manufacturing."
31. Irfan Saif, Sean Peasley, and Arun Perinkolam, "Safeguarding the Internet of Things: Begin secure, vigilant, and resilient in the connected age," *Deloitte Review* 17, Deloitte University Press, July 27, 2015, <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/deloitte-review/issue-17/internet-of-things-data-security-and-privacy.html>.
32. R. K. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, 2nd ed. (New York: Butterworth Heinemann, 2002).
33. Saif, Peasley, and Perinkolam, "Safeguarding the Internet of Things."
34. HCL, "Best-in-class service experience with predictive maintenance analytics," <https://www.hcltech.com/success-story/internet-things/best-class-service-experience-predictive-maintenance-analytics>, accessed April 26, 2017.

---

## 저자 소개

### 크리스 콜맨(CHRIS COLEMAN)

**크리스 콜맨**은 딜로이트 컨설팅 LLP의 공급사슬 및 제조업 운영 사업부의 전문가 리더다. 그는 운영 개선, 특히 유지보수 전략, 예비 부품 관리, 전술적 실행, 그리고 인더스트리 4.0, 사물인터넷, 고급 애널리틱스, 지원 기술과 같이 진화하는 기술들을 포함하는 유지보수 프로그램의 변환에 집중한다.

### 사티쉬 다모다란(SATISH DAMODARAN)

**사티쉬 다모다란**은 딜로이트 컨설팅 LLP의 공급사슬 및 제조업 운영 사업부의 시니어 매니저로 광범위한 산업에 대해 20년 이상의 컨설팅 및 업계 경험을 가지고 있으며, 글로벌한 종단 간 공급사슬 변환을 수행한다. 그의 전문 지식은 제조업 운영, 린 생산 시스템, 공급자 개발에 초점이 맞춰져 있다.

### 마헤쉬 찬드라모울리(MAHESH CHANDRAMOULI)

**마헤쉬 찬드라모울리**는 딜로이트 디지털 IoT 사업부의 시니어 매니저이며 유통업, 제조업, 생명과학, 헬스케어, 통신, 미디어, 기술 산업에서의 IoT 전략, 솔루션, 전달 업무에 있어 광범위한 경험을 가지고 있다. 찬드라모울리는 기업이 고객들을 위해 독특한 디지털 경험을 창조하도록 돕는데 15년 이상의 경력을 활용한다.

### 에드 듀엘(ED DEUEL)

**에드 듀엘**은 딜로이트 컨설팅 LLP의 공급사슬 및 제조업 운영 사업부의 전문가이다. 그는 항공우주 및 방위산업, 석유 및 가스, 제조업을 포함한 다수의 산업에 걸친 유지보수 및 안정성 프로그램 변환과 관리, 차세대 예측 기술과 첨단 애널리틱스, 공급사슬 계획 및 운영 탁월성에 관한 20년 이상의 경력을 가지고 있다.

---

## 감사의 글

본고에 대한 **수밋 카울(Sumeet Kaul)**, **라이언 매인스(Ryan Manes)**, **브렌나 스나이더만(Brenna Sniderman)**, **로라 맥고프(Laura McGoff)**, **조 마리아니(Joe Mariani)**의 공헌에 감사의 말을 전한다.



---

## CONTACTS

**Doug Gish**

Principal  
Supply Chain and Manufacturing Operations  
Deloitte Consulting LLP  
+1 816 802 7270  
dgish@deloitte.com

**Stephen Laaper**

Principal  
Supply Chain and Manufacturing Operations  
Deloitte Consulting LLP  
+1 617 437 2377  
slaaper@deloitte.com

# Deloitte. University Press



Follow @DU\_Press

Sign up for Deloitte University Press updates at [www.dupress.deloitte.com](http://www.dupress.deloitte.com).

## **About Deloitte University Press**

Deloitte University Press publishes original articles, reports and periodicals that provide insights for businesses, the public sector and NGOs. Our goal is to draw upon research and experience from throughout our professional services organization, and that of coauthors in academia and business, to advance the conversation on a broad spectrum of topics of interest to executives and government leaders.

Deloitte University Press is an imprint of Deloitte Development LLC.

## **About this publication**

This publication contains general information only, and none of Deloitte Touche Tohmatsu Limited, its member firms, or its and their affiliates are, by means of this publication, rendering accounting, business, financial, investment, legal, tax, or other professional advice or services. This publication is not a substitute for such professional advice or services, nor should it be used as a basis for any decision or action that may affect your finances or your business. Before making any decision or taking any action that may affect your finances or your business, you should consult a qualified professional adviser.

None of Deloitte Touche Tohmatsu Limited, its member firms, or its and their respective affiliates shall be responsible for any loss whatsoever sustained by any person who relies on this publication.

## **About Deloitte**

Deloitte refers to one or more of Deloitte Touche Tohmatsu Limited, a UK private company limited by guarantee (“DTTL”), its network of member firms, and their related entities. DTTL and each of its member firms are legally separate and independent entities. DTTL (also referred to as “Deloitte Global”) does not provide services to clients. In the United States, Deloitte refers to one or more of the US member firms of DTTL, their related entities that operate using the “Deloitte” name in the United States and their respective affiliates. Certain services may not be available to attest clients under the rules and regulations of public accounting. Please see [www.deloitte.com/about](http://www.deloitte.com/about) to learn more about our global network of member firms.

Copyright © 2017 Deloitte Development LLC. All rights reserved.  
Member of Deloitte Touche Tohmatsu Limited