



Industry 4.0과 고장예지 및 건전성 관리 기술(PHM)의 방향

이수학, 윤병동*

(서울대학교 기계항공공학부)

1. 머리말

이 글에서는 독일의 Industry 4.0의 개념과 사례를 소개하고, 이러한 Industry 4.0을 활용하는 기술로서 고장예지 및 건전성관리 기술(PHM: prognostics and health management)의 제조산업 혁신에의 기여와 향후 연구방향에 대하여 논의하고자 한다.

최근 제조업은 정보통신기술(ICT: information communication technology)의 비약적인 발전에 힘입어 일대 전환기를 맞이하고 있다. 그 중심에는 제 4차 산업혁명으로 불리우는 Industry 4.0 개념이 자리하고 있다. Industry 4.0 이란, 사이버 물리 시스템¹(CPS: cyber-physical system)과 사물인터넷²(IoT: internet of things) 기술을 통해 생산기기와 생산품 간의 정보교환이 가능한 자동화 생산체계로서 기존의 중앙집중 제어방식의 대량생산(mass production) 체제에서 보다 능동적이고 유연한 다품종 고객맞춤형 생산(mass customization) 체제로의 변화를 의미한다. 여기서 사이버 물리 시스템이라 함은 획득한 데이터를 처리하고 최적의 결정을 돕는 가상 시스템과 공장 내 생산기기를 제어하는 물리 시스템을 통합한 개념으로서 기존 임베디드 시스템³의 발전된 형태이다. 근

래에는 사물인터넷과 빅데이터 처리기술의 발전에 힘입어 기계와 인터넷서비스, 그리고 사람이 상호 연결되는 지능형 생산체제로의 패러다임 변화가 가능하게 되었고 제조업의 발전 방향 또한 스마트 공장(smart factory) 구현의 형태로 구체화되고 있다. 다시 말해, 이전까지의 공장자동화 방식은 미리 프로그램화된 알고리즘에 따라 생산설비가 수동적으로 움직이는 방식이었으나 Industry 4.0 시대에서의 제조업 공장은 임베디드 시스템을 통해 네트워크에 연결되고 개별 장비가 제품 및 공정에 따라 능동적으로 최적화된 작업 방식을 결정하는 완전한 자동화가 이루어질 것으로 기대된다.

2. 독일의 Industry 4.0

2012년, 독일 정부는 첨단기술전략 실행계획(high-tech strategy 2020 action plan)을 발표함과 동시에 Industry 4.0 프로젝트를 통해 이미 세계적인 수준의 경쟁력을 갖춘 독일 제조업의 새로운 발전 방향을 제시한다. 이러한 배경에는 전세계 제조업에서 독일이 차지하는 비중이 점차 감소하고 있는 변화뿐만 아니라 고임금 사회를 유지하기 위해 노동 생산성의 제고와 높은 에너지 사용

¹ 로봇 등 물리적인 실체의 시스템과 사이버 공간의 소프트웨어를 통합한 시스템을 의미함

² 인터넷을 기반으로 모든 사물을 연결하여 사람과 사물, 사물과 사물 간의 정보를 상호소통하는 지능형 기술 및 서비스

³ 임베디드 시스템(embedded system)은 특정한 제품이나 기계, 전자 장치에 두뇌역할을 하는 마이크로 프로세서를 장착하여 주어진 작업을 수행하거나 장치를 제어할 수 있도록 한 시스템을 의미함

* E-mail : bdyoun@snu.ac.kr

기술의 복잡성 정도
(Degree of Complexity)

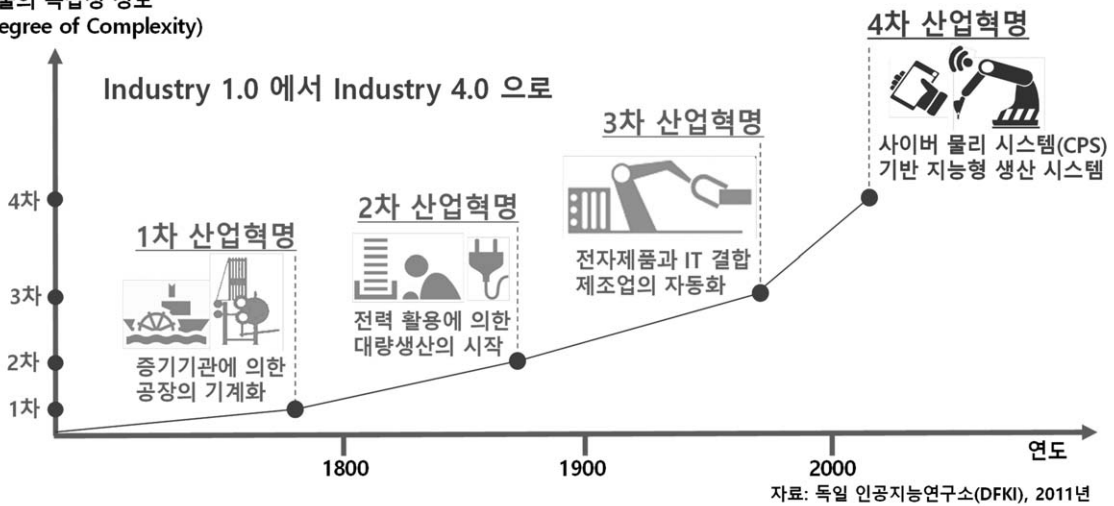


그림 1 제조업의 혁신 단계

량에 따른 자원의 효율성 측면 등을 고려해야만 하는 시대적 당위성 또한 존재하고 있었다. Industry 4.0이 비록 독일 정부의 전략적 기술정책을 일컫는 용어에서 출발하였지만 이제는 스마트 공장의 개념을 포괄하는 전세계 제조업의 한 흐름이라고 보는 것이 타당하다. 특히 제조업 경쟁국이라 할 수 있는 미국의 재 산업화 전략⁴과 일본의 산업재흥플랜 6대 전략⁵ 등을 통해 이러한 변화의 흐름을 함께 이해 할 수 있다. 먼저 Industry 4.0의 개념은 제조업의 혁신 단계를 그림 1의 4단계로 구분하면서 조금 더 명확해 진다. 수력 및 증기기관으로 비롯된 1차 산업혁명 이후 제조업은 노동 분업과 기계화를 통해 대량생산, 생산 자동화 등의 방향으로 발전해 왔으며 Industry 4.0, 즉 4차 산업혁명에서는 사물인터넷 기술로 제품과 개별 생산 장비, 그리고 사람이 모두 양방향으로 소통할 수 있는 체계를 구축하고 이를 통해 수집된 정보와 사이버 물리 시스템 기반으로 가장 최적화된 생산 체계로의 진화를 목표로 정의하고 있다.

Industry 4.0이 스마트 공장의 형태로 구체화되기 위해서는 최적의 상품이 제조될 수 있도록 통제하는 상품 제조 플랫폼, 사이버 물리 시스템의

구축이 가장 중요하다. 이와 관련하여 독일 정부는 사이버 물리 시스템 구축을 위해 3년간 5억 유로의 연구개발비를 지원하기로 계획하였는데, 독일의 Industry 4.0이 가지는 중요성은 바로 이곳에 있다. 미국, 일본 등에서도 관련 기술의 연구개발의 중요성을 인식하고 주요 연구분야로 지정하는 등의 노력을 하고 있지만 정부 차원에서 체계적으로 도입한 나라는 독일이 유일하기 때문이다.

3. Industry 4.0 사례 연구 (연구개발에서 적용까지)

3.1 Industry 4.0과 사이버 물리 시스템의 역할

그림 2는 자동차 생산 과정에서 사이버 물리 시스템의 역할에 따른 Industry 3.0과 Industry 4.0을 비교하는 사례로 Industry 4.0 시대에서는 사물인터넷 기술을 바탕으로 양방향 정보교환을 통해 얻은 데이터를 생산 시뮬레이션 자료로 활용하여 공정을 최적화 하게 된다. 각 생산 공정별 최적화가 목표인 Industry 3.0에서 Industry 4.0으로의 가장 중요한 변화는 개별 제품의 전체 공정이 최적화된다는 점이다. 이를 통해 더욱

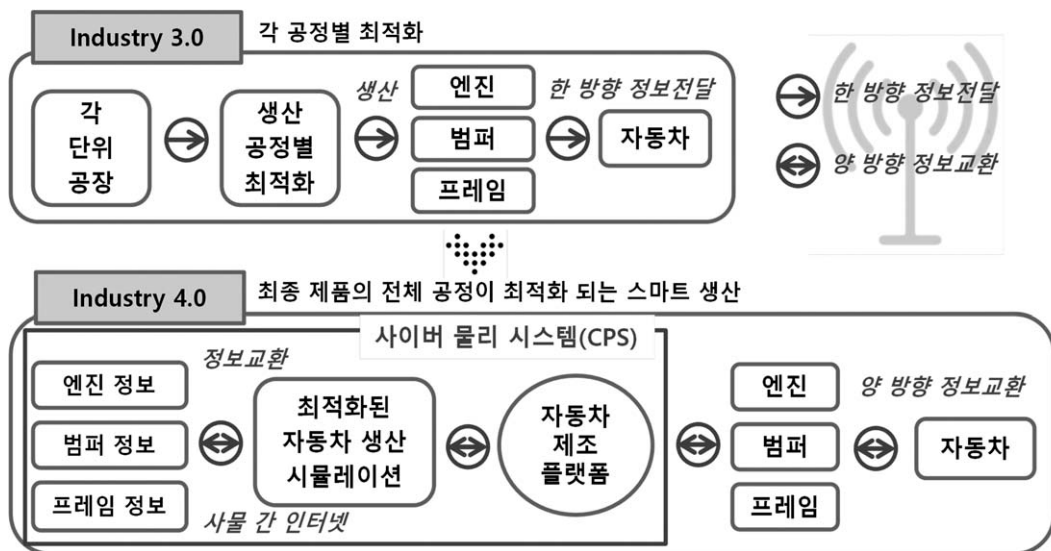
⁴ 자료: 현대경제연구원, '독일의 창조경제: 인터스트리 4.0의 내용과 시사점', 2014

신뢰도가 향상된 고객 맞춤형 제품을 생산할 수 있게 된다.

3.2 지능형 메모리를 활용한 분산·자율제어 생산체계 구현

기계설비뿐만 아니라 소재와 반제품에 센서, 메모리를 부착하여 소비자 주문에 알맞은 소재 및 반제품을 생산장비 스스로 취사 선택하여 가공,

조립하는 자율제어 생산체계도 구현이 가능하다. 또한 전체 생산공정의 흐름을 자가 진단하여 병목 현상을 피하도록 유연하게 최적 생산 경로를 결정할 수 있다. 대표적인 예로 독일 인공지능연구소(DFKI)의 경우 시맨틱 메모리를 개발하여 생산라인에 시범 적용하고 있으며 주로 생산라인 이동 팔레트나 생산 로봇의 관절 등에 부착하여 전 공장의 네트워크 연결을 구현하고 있다(그림 3).



자료: 독일의 창조경제: Industry 4.0의 내용과 시사점, 현대경제연구원 13-36 [통권546호], 2013

그림 2 사이버 물리 시스템의 역할 예시 - 자동차 생산

지능형 시맨틱 메모리를 장착한 이동 팔레트



지능형 시맨틱 메모리를 장착한 로봇



자료: 독일 인공지능연구소(DFKI) 홈페이지

그림 3 지능형 시맨틱 메모리 SemProM 적용 사례

3.3 사이버 물리 시스템을 활용한 사전 시뮬레이션

고객 주문이 접수되는 시점의 생산 물량(load) 및 장비 생산능력(capacity) 등을 고려하여 미리 생산 공정을 시뮬레이션 해 비용을 절감하는 방안도 개발되고 있다. 지멘스(SIEMENS) 사의 경우 TIA(totally integrated automation) 소프트웨어를 개발하여 공장의 레이아웃부터 제어설계, 생산 시뮬레이션, 가동 모니터링을 하나의 패키지에서 구현할 수 있도록 하고 있다. 특히 가상 생산 시뮬레이션의 경우 생산라인을 3차원으로 살펴 보며 마치 실제 생산을 수행하는 것과 같은 효과를 낼 수 있어 시행착오 과정에 따른 손실 비용을 절감하는 효과를 얻을 수 있으며 가동 모니터링을 통해 운용 효율성 또한 사전에 고려할 수 있게 해주는 장점이 있다(그림 4).

3.4 사이버 물리 시스템을 활용한 증강현실 (augmented reality) 기술 적용

작업자 혹은 검사원 등과 같이 사람의 업무 영역에서 사이버 물리 시스템이 실시간으로 적용되는 예로는 그림 5와 같이 증강현실 기술을 이용한 생산설비의 상태 진단이나 작업자 조립교육 및 원격 정비 지원 등이 있다. Festo사와 SAP사는 각각 그림 5의 구체적인 방안들을 소개하고 있어 또 다른 측면에서의 미래형 공장의 모습을 볼 수 있다.

4. Industry 4.0과 고장예지 및 건전성관리 기술(PHM)의 접목

Industry 4.0의 시대가 도래할 것으로 예상되는

지멘스(SIEMENS) 사의 TIA(Totally Integrated Automation) 소프트웨어 사례



자료: 지멘스(SIEMENS) 홈페이지

그림 4 지멘스(SIEMENS) 사의 TIA SW 개발 사례

실시간 시스템 건전성 모니터링



자료: Festo

작업자 조립교육 및 원격 정비



자료: SAP

그림 5 사이버 물리 시스템(CPS)을 이용한 증강현실 적용 예시

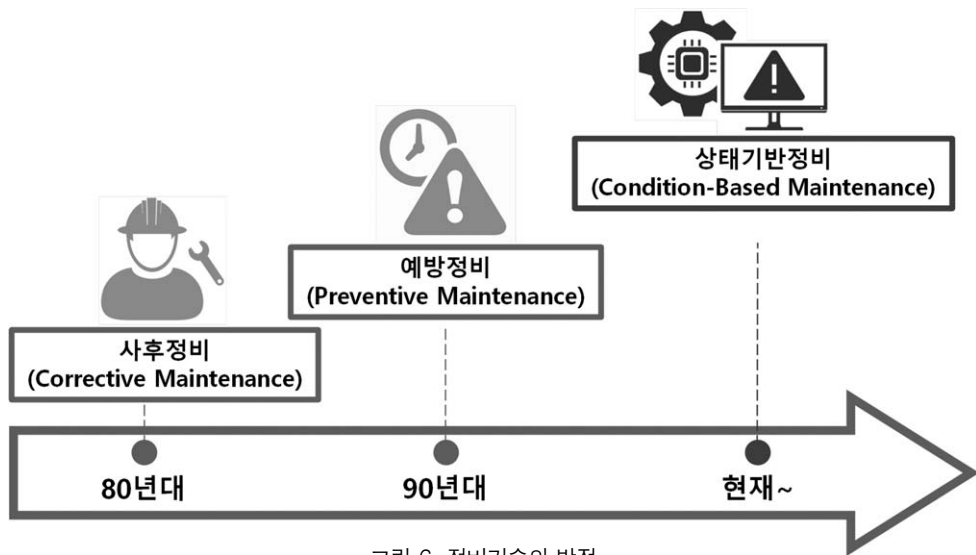


그림 6 정비기술의 발전

2020년에는 전반적인 기계시스템의 큰 변화가 예상된다. 새로운 기술이 개발되고 더욱 지능화된 시스템이 등장하겠지만 분명 그에 따른 불확실성(uncertainty)과 복잡도(complexity)는 증가하게 될 것이다. 이러한 상황에서 제조업 생산설비의 경우 불확실성을 통제할 수 있는 신뢰성 높은 장비와 시스템에 대한 수요가 증가될 것이며 적절한 유지보수 전략을 활용한 장비 수명의 연장 또한 반드시 필요하게 될 것이다. 특히 갑작스러운 중단으로 인한 경제적 손실이 매우 큰 자동화된 제조업 공장의 경우 스마트 공장을 구현함에 있어 적절한 유지보수 전략의 확보가 성공의 열쇠라고 할 수 있다. 스마트 공장의 유지보수 전략으로는 고장예지 및 건전성관리 기술(PHM: prognostics and health management)을 접목한 상태기반 정비(CBM: condition-based maintenance)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(그림 6).

4.1 고장예지 및 건전성관리 기술(PHM: prognostics and health management)

고장예지 및 건전성관리 기술이란, 센서를 이용하여 장비나 기계시스템의 상태를 모니터링하

고 고장의 징후를 포착하는 진단기술(diagnostics)과 잔여유효수명(RUL: remaining useful life)의 예측(prognostics) 및 효과적인 건전성관리 기술(health management)을 일컫는다. 고장진단의 경우 센서기술의 발전에 따라 산업현장에서도 적용되고 있으나 성능저하가 이미 어느 정도 진행이 되어 충분한 상태변화가 발생하였을 경우에 감지되는 것이 일반적이므로 효용성의 한계가 있다. 이를 보완하고자 현재 상태를 통해 기계장비나 시스템의 잔여유효수명을 예측하는 예지기술(prognostics)에 대한 연구가 이루어지고 있으며 수명을 추정하는 방법에 따라 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 데이터기반방법(data-driven approach)은 기계학습⁵ 기법을 이용하여 하중(input) 대비 손상(damage)의 관계를 훈련시킨 뒤 미래 고장을 예측한다. 물리모델기반방법의 경우 적용대상에 따라 물리적 모델이 달라지지만 보다 장기적인 손상의 거동에 대하여 비교적 정확한 예측이 가능하다. 이 때 물리적 모델은 반드시 검증이 필요하며 그 방법에는 통계적 가설검정(hypothesis test)이나 베이지안 기법(bayesian method) 등의 통계적 방법을 이용한다.

⁵ 기계학습(machine learning)은 인공지능의 한 분야로 컴퓨터가 학습할 수 있도록 하는 알고리즘과 기술을 개발하는 분야로 훈련데이터를 통해 이미 알려진 과거의 추이를 기반으로 미래의 상태를 예측하는데 사용됨

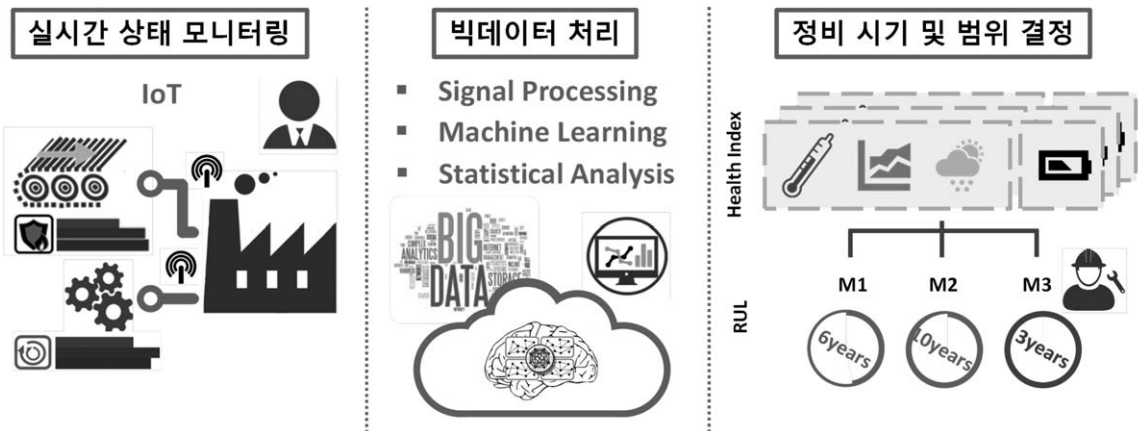


그림 7 Industry 4.0 시대의 상태기반 정비(CBM) 단계 개념도

표 1 상태기반정비의 단계

단계 1	데이터 취득 (Data Acquisition)	<ul style="list-style-type: none"> 이상 징후 감지(Detection) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 진동/초음파 소음 ✓ 적외선 온도 ✓ 트라이볼로지(Tribology) ✓ 모터 전류
단계 2	진단 (Diagnostics)	<ul style="list-style-type: none"> 결함과 결함의 원인을 진단 심각도 분류 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 데이터 상태(정상/비정상) ✓ 기준 데이터와 비교 ✓ 결함/증상 진단기법 ✓ 원인 진단 기법
단계 3	예지 (Prognostics)	<ul style="list-style-type: none"> 향후 결함 진행 예지 잔존유효수명 예측 (RUL: Remaining Useful Life) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 확률 평가 및 신뢰도 해석 ✓ 파손모드와 영향성 평가(FMEA) ✓ 위험도, 유해성 평가 ✓ 손상시작점/진전도 분석 ✓ 단기경향 외삽법 ✓ 단계별 변화분석
단계 4	제시, 조치 (Presentation, Actions)	<ul style="list-style-type: none"> 문제 해결 방안 제시 및 조치 수정조치를 위한 핵심정보 제공 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 해당 장비/부품 ✓ 고장/결함 유형 ✓ 심각도 추정 ✓ 권장 조치 ✓ 비용
단계 5	사후분석 (Postmortems)	<ul style="list-style-type: none"> 문제 해결 확인 및 사후 상태 진단 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 상태 진단

자료: ISO 13374 Condition Monitoring and Diagnostics of Machines 내용 발췌

4.2 상태기반 정비(CBM: condition-based maintenance)

Industry 4.0 시대의 미래형 제조 시스템은 생산 설비의 운용과 유지보수의 측면에서도 한 단계 진보될 것으로 예상된다. 바로 고장예지 및 건전성관리 기술(PHM)을 활용하여 기계 장비 및 시스템의 잔여유효수명 예측이 가능해지면 이를 통해 작업자의 접근이 어려운 영역에서의 사고

나 고장 등을 미리 예방하고 보다 신속한 대응이 가능하다는 점이 바로 그것이다. 특히 완전 자동화 추세에 있는 제조업 공장의 스마트 생산시스템의 경우, 고장으로 인한 작동 중단(downtime) 시에는 단순히 부품 교체로 인한 유지보수 비용뿐만 아니라 수리 기간 동안 제품 생산을 하지 못해 발생하는 손실기회비용이 상당히 치명적일 수 있다.

Industry 4.0 시대의 유지보수 전략은 상태기반 정비기술을 적용함으로써 그림 7과 같이 구체화되고 있다. 크게 실시간 상태 모니터링, 빅데이터 처리 그리고 정비 시기 및 범위 결정의 세 단계로 나눌 수 있다. 사물인터넷을 통해 모든 생산설비와 제품의 상태를 실시간으로 모니터링 하고 신호 처리, 기계학습, 통계분석 등의 빅데이터 처리 기법을 통해 적절한 건전성 지표(health index)를 추출(extraction)한 뒤 고장예지(prognostics) 기법을 활용해 잔여유효수명(RUL)을 예측하고 최적의 정비 주기와 범위를 결정할 수 있다. 이를 통해 사용자로 하여금 전반적인 건전성 관리(health management)를 할 수 있도록 해준다.

ISO 규격에는 표 1에서와 같이 상태기반 정비의 단계를 보다 구체적으로 명시하고 있으며 상태기반 정비를 수행하고자 하는 시스템에 따라 측정 변수나 적용 진단 기술 등이 달라질 수 있다.

고장 진단 및 예지기술의 방법으로는 실시간 모니터링이 되지 않는 경험기반방법을 제외하고 나면 데이터기반방법과 모델기반방법의 두 가지 방향이 존재한다. 데이터기반방법의 경우에는 물리적 모델을 만들기 어려운 대상에 대한 고장 진단 및 예지를 하고자 할 때 사용될 수 있으며 이 경우 신뢰할 수 있는 훈련 데이터(training data)를 얻는 것이 중요하므로 유지보수 전략을 계획함에 있어 장비 초기 설치 후 최대한 많은 데이터를 취득하는 과정이 고려되어야 한다. 반면, 모델기반방법을 적용할 때에는 복합적

인 전체 시스템으로 접근하기 보다 단일 기계 장비 단위로 접근하여 물리적 모델의 매개변수 추정 및 매개변수 간 관계 확인(parameter estimation & correlation between parameters) 단계에서의 불확실성과 복잡도를 낮추는 것이 좋다.

5. 맺음말

제조산업뿐만 아니라 산업 전반에 걸쳐 장비나 시스템의 고장을 조기에 진단하려는 시도는 지속적으로 있어왔다. 그러나 현재 상태를 통해 앞으로의 건전성을 평가하는 고장예지 기술(prognostics)의 경우에는 아직 초기 연구단계로서 적용 범위를 더욱 넓히고 보다 높은 정확도의 수명 예측 등의 해결 과제가 앞으로 남아 있는 만큼 기술성장 가능성 또한 매우 높다고 생각된다. Industry 4.0 시대를 준비하는 과정에서 결과적으로 고장예지 및 건전성관리 기술을 통한 상태기반정비를 가능하게 하기 위해서는 개발 기술에 대한 현장 적용성을 높이는 과정이 수반되어야 한다. 이러한 노력의 일환으로 향후에는 제조업 분야 내에서도 세부 적용 대상을 구분하여 나누어진 개별 그룹의 특성에 따라 적절한 예지기술 방법을 선택하고 그에 따라 필요한 건전성 데이터(health index data)를 취득하여 신뢰성 있는 잔여유효수명의 예측과 최적의 정비 주기 및 범위를 알려주는 연구가 수행되어야 할 것이다. [KSNVE](#)