



FOMs 기반 중소제조기업 디지털전환(DX) 성숙도 진단 모델 - 절삭공구 제조 3사 실증 연구

유한솔^a, 김범태^a, 장오성^a, 김수영^{a,*}

A Smart-Factory Operation Management (FOM)-based Diagnostic Model for Assessing Digital Transformation Maturity in Small and Medium-sized Manufacturing Enterprises: An Empirical Study of Three Cutting-tool Manufactures

Han Sol Yoo^a, Beom Tae Kim^a, O Seong Jang^a, Su Young Kim^{a,*}

^a Department of AI Smart Factory Convergence Engineering, Hoseo University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	18	May	2026
Revised	10	June	2026
Accepted	10	June	2026

Keywords:

FOMs (smart-Factory Operation Managements)
Digital transformation maturity
Diagnostic model
Small and medium-sized manufacturing enterprises
Management code system
Cutting-tool manufacturing

ABSTRACT

This study proposes a FOM-based diagnostic model for assessing the Digital Transformation (DX) maturity of small and medium-sized manufacturing enterprises (SMEs). The proposed model makes three key contributions: (1) enabling self-diagnosis based on operational data without the need for external consulting; (2) assessing DX maturity using the FOM management code system rather than abstract constructs; and (3) providing an integrated diagnosis-to-prescription linkage. The model adopts a 3×3 matrix comprising three assessment dimensions (data acquisition, management code system, and utilization maturity) and three maturity levels (levels 1-3). A dual-condition rule combining the aggregate and minimum dimension scores prevents one dimension from compensating for another. As an exploratory empirical study of three SMEs in cutting-tool manufacturing, companies A, B, and C were diagnosed as levels 3, 2, and 1, respectively. Their operating margins (+6.6%, +4.7%, -9.1%) showed consistent monotonic correspondence with maturity, and the lowest-scoring dimension directly informed firm-specific improvement priorities.

1. 서론

제조 산업의 디지털전환(digital transformation, DX)은 한국 제조 경쟁력 회복의 핵심 의제로 부상하였다. 중소벤처기업부의 「2024년 스마트제조혁신 실태조사」에 따르면 공장 보유 중소·중견 제조기업 163,273개사 중 스마트공장 도입률은 19.5%이며, 도입 기업 중에서도 기초 수준에 머물러 있는 비중이 75.5%에 달한다^[1]. 즉, 정부의 보급·확산 정책이 양적 성과를 거두는 동안에도

도입 깊이와 운영 성과의 격차는 여전히 큰 과제로 남아 있다.

이러한 격차의 본질적 원인 중 하나는 도입 수준을 정량적으로 진단하고 단계적 개선 경로를 제시하는 평가 도구의 부재이다. Singapore EDB의 Smart Industry Readiness Index(SIRI)^[2], Acatech의 Industrie 4.0 Maturity Index^[3], Schumacher 외(2016)의 학술적 성숙도 모델^[4] 등 글로벌 평가 체계는 이미 제안되어 있으나, 평가 항목이 추상적 개념 수준(예: “데이터 활용 성숙도”, “조직 전략 정렬도”)에 머물러 SME가 일상적으로 작성하는

* Corresponding author. Tel.: +82-41-540-9930

E-mail address: df2030@hoseo.edu (Su Young Kim).

운영 데이터(제조원가명세서·공정실적·품질기록)와 직접 연계되지 않는 한계가 있다. 또한 이들 모델은 대기업의 조직 역량과 IT 인프라를 전제로 설계되어, 자가 진단을 위해서는 외부 컨설팅 의존이 불가피한 구조이다.

한편, 호서대학교를 중심으로 20여 년에 걸쳐 축적된 공장운영 관리 솔루션(smart-Factory Operation Managements, FOMs)은 #1000~#4000의 4개 상위 코드와 19개 하위 컴포넌트로 구성된 관리코드 체계를 통해 SME의 운영 데이터를 정량 관리하는 통합 방법론으로 발전해왔다^[5, 6, 7]. FOMs는 디지로그(Digi-log) 융합 사상과 4M(Man·Machine·Material·Method) 기반 분석 구조를 핵심 철학으로 삼으며, 자동차부품·식품·고무압출·필름 등 다양한 업종에서 적용 효과가 실증된 바 있다^[8, 9, 10]. 본 연구자의 선행 학술지 논문^[11]은 FOMs 관리코드 체계를 주문생산(make-to-order, MTO) 환경의 원가관리에 응용 적용하여 평균 리드타임 12.4% 단축과 납기 준수율 73.2%→91.8% 향상의 실증 결과를 보고하였다.

본 연구는 이러한 FOMs의 운영 친화성과 코드 기반 정량성에 착안하여, FOMs 관리코드 체계를 SME DX 성숙도 진단 모델의 골격으로 확장 활용하는 새로운 접근을 시도한다. 다만, FOMs는 단순한 제조실행시스템(manufacturing execution system, MES)이나 전사적 자원관리(enterprise resource planning, ERP)와 구별되는 운영 중심(operation-centric) 프레임워크이다. MES가 공정 실적의 수집·전달에, ERP가 자원 계획·재무 통합에 중점을 둔다면, FOMs는 생산·품질·원가·비가동·부적합 데이터를 동일한 관리코드 체계로 통합하여 의사결정 단위에서 운영하는 방법론으로, 데이터 수집이나 자동화 자체가 아닌 운영 의사결정과 지속적 개선(continuous improvement)을 목표로 한다.

본 연구는 호서대학교 디지털팩토리연구센터(Digital Factory Research Center) 및 AI DX FOMs 센터의 장기 연구 인프라를 기반으로 수행되었으며, 다음 세 가지 학술적 기여를 목적으로 한다. 첫째, SME가 외부 컨설팅 없이 자체 운영 데이터로 자가 진단 가능한 DX 성숙도 모델을 제안한다. 둘째, 추상적 평가 개념이 아닌 FOMs 관리코드 체계를 DX 평가의 측정 단위로 활용하는 코드 기반 평가 구조(code-based assessment structure)를 제시한다. 셋째, 단순 등급 진단을 넘어 진단 결과가 단계별 개선 우선순위로 직접 연결되는 진단-처방 일체형 모델(diagnosis-to-prescription model)을 설계·실증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 FOMs 관리코드 체계와 기존 DX 성숙도 모델을 검토하고 연구 Gap을 도출한다. 제3장에서는 본 연구가 제안하는 진단 모델을 설계하며, 제4장에서 적용 방법을 제시한다. 제5장에서는 절삭공구 제조 3사 실증 결과를 분석하고, 제6장에서 결론과 시사점을 제시한다.

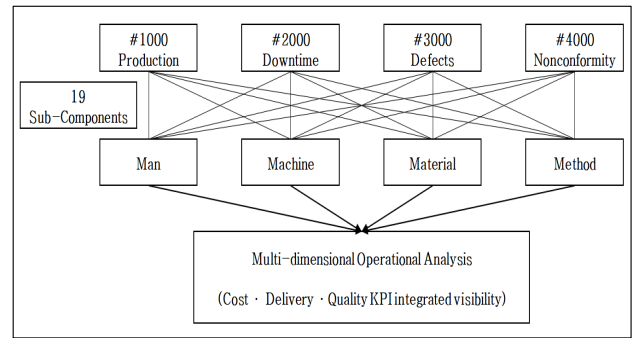


Fig. 1 FOMs management code system (#1000~#4000) and 4M cross-mapping

2. 이론적 배경 및 관련 연구

2.1 FOMs 관리코드 체계

FOMs(smart-Factory Operation Managements)는 한국 중소기업의 운영 현실을 전제로 설계된 통합 운영관리 방법론으로, 김수영(2021)^[5]의 기초논문에서 그 이론 체계가 정립되었다. FOMs의 근본 철학은 디지로그(Digi-log) 융합 사상에 있으며, 이는 디지털 기술의 정밀성·반복성과 아날로그적 현장 통찰력을 이분법적으로 대립시키지 않고 상호보완적으로 결합한다는 관점이다^[5, 7]. 우리나라 제조기업의 99% 이상을 차지하는 중소기업의 현실적 역량 — 엑셀 기반의 수기 관리, 제한된 IT 인력, 경영진 주도 의사결정 — 에 비추어볼 때, 대기업형 완전 자동화 모델은 적용 난도가 높다는 인식이 그 출발점이다.

FOMs의 핵심 인프라는 4개 상위 관리코드와 19개 하위 컴포넌트로 구성된 코드 체계이다^[5, 12]. 상위 관리코드의 정의는 다음과 같다. #1000(생산량, production)은 BOM 기반 원재료 투입과 주문별 생산실적을 포함한다. #2000(비가동, downtime)은 설비 다운타임과 공정별 직접 작업시간을 포괄한다. #3000(불량, defects)은 공정 내 발생한 결함과 외주 재작업 비용을 흡수한다. #4000(부적합, nonconformity)은 출하 후 클레임 및 보증 처리에 해당한다. 각 코드는 4M(Man·Machine·Material·Method) 분류와 교차 매핑되어 다차원 분석을 가능하게 하며, 그 전체 구조는 Fig. 1과 같다^[5, 8].

본 연구자의 선행 학술지 논문^[11]은 위 코드 체계를 MTO 환경의 원가관리 목적에 맞게 응용 재구성하여 #1000을 재료비, #2000을 가공비, #3000을 외주비, #4000을 간접비로 매핑하는 방법을 제시한 바 있다. 김용홍 외^[9]와 박용록 외^[10]의 선행 연구도 FOM 코드가 원가 지표와 밀접하게 연계 운영될 수 있음을 실증하였다. 이러한 연구들은 FOMs 코드 체계의 구조적 보편성과 확장성을 입증하며, 본 연구는 이러한 운영 친화성에 주목하여 FOMs 코드 체계를 SME DX 성숙도 진단의 측정 단위로 활용한다.

2.2 제조업 디지털전환 성숙도 모델 검토

제조업 DX 성숙도 평가 모델은 1990년대 Software Engineering Institute (SEI)의 Capability Maturity Model (CMM)을 시초로 발전해왔으며, 4차 산업혁명 도래 이후 다양한 변형 모델이 제안되었다. 본 절은 본 연구가 비교 준거로 삼는 4가지 대표 모델을 검토하고 SME 적용 관점의 한계를 분석한다.

(1) Smart Industry Readiness Index (SIRI)

Singapore Economic Development Board (EDB)가 제안한 SIRI^[2]는 글로벌 제조업의 표준 자가진단 도구로 자리매김한 평가 체계로, Process·Technology·Organization 3개 빌딩블록 하위에 8개 핵심 영역(Operations·Supply Chain·Product Lifecycle·Automation·Connectivity·Intelligence·Talent Readiness·Structure & Management)과 16개 평가 차원(assessment dimension)으로 구성된다. 각 차원은 0~5단계로 평가되며, 평가 결과는 동일 산업 내 벤치마크 비교가 가능하도록 익명화된 글로벌 데이터베이스에 축적된다. SIRI는 2017년 발표 이후 글로벌 제조기업에 광범위하게 적용되며 사실상의 글로벌 표준 위상을 확보하였다.

(2) Acatech Industry 4.0 Maturity Index

독일 공학한림원이 제안한 Acatech Industrie 4.0 Maturity Index^[3]는 단계 진화론적 관점에 기반한 모델로, Computerization → Connectivity → Visibility → Transparency → Predictive Capacity → Adaptability의 6단계 발전 경로를 제시한다. 이 모델의 핵심 기여는 단순한 정적 평가가 아닌 “성숙도 상승을 위한 단계별 능력 요건”을 명시했다는 점이며, Resources·Information Systems·Organizational Structure·Culture의 4개 영역에 걸쳐 각 단계의 충족 조건을 구체화하였다.

(3) Schumacher 외(2016) 학술 모델

Schumacher 외^[4]는 학술적 관점에서 9개 차원(Strategy·Leadership·Customers·Products·Operations·Culture·People·Governance·Technology)으로 구성된 성숙도 모델을 제안하였다. 이 모델은 평가 항목의 학술적 정당화에 강점을 가지며 후속 학술 연구의 표준 비교 준거로 활용된다.

(4) 국내 「스마트공장 수준확인제도」

국내에서는 정부 「스마트공장 수준확인제도」가 5단계(Level 1~5) 체계로 운영되며, ICT 미적용 → 식별 → 분석 → 통제 → 최적화의 단계별 발전을 정의한다^[1]. 이 제도는 한국 제조업 DX 추진의 핵심 정책 도구이나, 평가 결과가 정부 지원사업의 자격 기준 산정에 활용되는 비중이 커서 자가 진단 및 일상 운영 개선 도구로서의 활용은 제한적이다.

(5) 모델별 SME 적용성 비교 및 공통 한계

이상 4개 모델의 구성과 SME 적용 특성을 정리하면 Table 1과 같다.

이상의 모델들은 평가 차원의 다양성과 단계 정의의 정교함에서 학술적·실무적 가치를 인정받고 있다. 그러나 SME 적용 관점에서 다음 두 가지 한계가 공통적으로 지적된다.

첫째, 평가 항목의 추상성 문제이다. SIRI의 “Intelligence” 차원, Acatech의 “Predictive Capacity” 단계 등은 개념적 정의는 명확하나 SME가 일상적으로 생성·관리하는 운영 데이터(제조원 가명세서·공정실적·품질기록)와 직접 연계되지 않는다. 평가를 위해서는 별도의 측정 지표 변환이 필요하며, 이 과정에서 외부 컨설팅 의존이 발생한다.

둘째, 처방 기능의 한계이다. 평가 결과는 단순 등급 진단에 그쳐 단계 상승을 위한 구체적 운영 개선 활동을 처방하기 어렵다. Acatech 모델이 단계별 충족 조건을 제시하지만 이는 일반론 수준이며, 기업의 구체적 코드·지표 단위로 “무엇을 어떻게 개선해야 하는가”에 답하지 못한다.

따라서 SME가 자체 운영 데이터로 진단 가능하고 진단 결과가 즉시 개선 활동으로 연결되는 운영 친화형(operationally embedded) 진단 모델의 필요성이 제기된다.

2.3 연구 Gap

이상의 검토를 통해 본 연구가 다루는 연구 갭(research gap)을 다음 세 가지로 정리한다.

Gap 1 (운영코드 비연계): 기존 DX 성숙도 모델은 SME의 일상 운영 데이터와 연계되지 않은 추상적 평가 차원에 의존한다. SME가 매일 작성하는 제조원가명세서·공정실적·품질기록을 그대로 활용하는 진단 도구가 부재하다.

Gap 2 (SME 적용성): SIRI·Acatech 등 글로벌 모델은 대기업의 조직 역량과 IT 인프라를 전제로 설계되어 SME가 자가 진단하기 어렵다. 평가 응답에 외부 컨설팅이 필요한 구조이다.

Gap 3 (운영성과와의 단조관계 실증 부족): 기존 DX 성숙도 연구문헌은 평가 모델 개발 자체에 집중하여, 성숙도 단계와 운영 성과(영업이익률·납기준수율·품질지표) 간의 정량적 단조관계를 동일 업종 통제 조건에서 실증한 연구가 부족하다. 여기서 단조관계(monotonic relationship)란 성숙도 단계가 한 단계 상승할 때 운영성과 지표가 역전 없이 동일한 방향으로 일관되게 변화(증가 또는 감소)하는 순서적 대응 관계를 의미한다. 이는 두 변수 간의 선형성(linearity)이나 인과성(causality)을 전제하지 않고, 단계 순위와 성과 순위의 동일 방향 정합성만을 요구하는 순위 기반(rank-order) 개념이다. 따라서 본 연구의 검증 목표는 회귀계수의 추정이 아니라 ‘Level 3 ≥ Level 2 ≥ Level 1’의 순위 일관성 확인에 있다.

본 연구는 이 세 가지 Gap을 동시에 해소하기 위해, FOMs 관리 코드 체계를 진단 모델의 골격으로 채택하여 운영 데이터와의 직

Table 1 Comparison of Existing DX Maturity Models from an SME Adoption Perspective

Model	Dimensions	No. of Levels	Op. Data Link	Self-Diagnosis
SIRI [2]	16 dimensions	0~5 levels	Weak	Hard (ext. assessor)
Acatech [3]	4 domains	6 levels	Weak	Difficult (consulting dependency)
Schumacher [4]	9 dimensions	5 levels	Weak	Difficult (academic tool)
Korean govt. verification system	4 domains	5 levels	Partial	Feasible (policy instrument)

접 연계성을 확보하고(Gap 1 해소), SME 친화적 진단 절차를 설계하여 자가 진단 가능성을 확보하며(Gap 2 해소), 절삭공구 제조업 3사를 대상으로 동일 업종 통제 하의 대기업 실증을 수행하여 성숙도-운영성과 단조관계를 검증한다(Gap 3 해소).

3. FOMs 기반 DX 성숙도 진단 모델 설계

3.1 모델의 전체 개요

본 절에서 제안하는 FOMs 기반 DX 성숙도 진단 모델은 SME가 자체 운영 데이터를 그대로 활용하여 자가 진단이 가능하도록 설계되었으며, 진단 결과가 즉시 단계별 개선 활동으로 연결되는 처방 기능을 내장한 점을 핵심 차별성으로 한다. 모델의 전체 구조는 3개 평가 차원과 3개 성숙도 단계를 결합한 3 × 3 매트릭스이다.

3개 평가 차원은 FOMs Cycle^[5]의 “데이터 게더링 → 정보화 → 자동화 → 최적화 → 효율화 → 지능화” 6단계 순환 구조를 SME 실무 관점에서 재구성한 것으로, ① 데이터 수집(data acquisition), ② 코드 체계(management code system), ③ 활용 수준(utilization maturity)의 세 축으로 구성된다. 이 3차원 구조는 최근 호서대학교 AI DX FOMs 센터가 고도화하여 추진 중인 ‘AI DX FOMs Cycle’의 5대 필러-FOM-Assist(현장 보조), FOM-KPI(증진분석), FOM-AI(AI 분석), FOM-DX(디지털 트윈), FOM-PBL(현장-학습 연계)^[14, 16]와 정합한다. 각 차원은 SME가 일상적으로 다루는 실무 영역에 대응되며, 평가 기준은 운영 현장의 관찰 가능한 사실로 정의되어 외부 컨설팅 없이도 자가 평가가 가능하도록 하였다.

본 모델이 채택한 3개 평가 차원의 적절성은 선행 문헌으로 뒷받침된다. 첫째, 데이터 수집(D1) 차원은 데이터의 자동-실시간 수집과 무결성이 모든 상위 분석의 선결 조건임을 강조한 Acatech의 Computerization-Connectivity 단계^[3] 및 FOMs 데이터 신뢰성 확보 연구^[7]에 근거한다. 둘째, 코드 체계(D2) 차원은 추상적 개념

Table 2 FOMs-based SME DX maturity diagnostic matrix (3 dimensions × 3 levels)

Dimension	Level 1 (0~1 pts)	Level 2 (2 pts)	Level 3 (3 pts)
D1. Data acquisition	Partial manual/Excel records; retrospective entry; daily/weekly update cycle	Partial auto-collection of major 4M; hourly updates; data integrity around 90%	Real-time auto-collection via IoT/PLC across all processes; integrity ≥ 99%
D2. Code system	#1000~#4000 unestablished or simplified; accounting codes operated separately	#1000~#3000 established; #4000 unlinked; partial sub-component mapping	Full mapping of 19 sub-components; 100% code-accounting alignment
D3. Utilization	Retrospective reporting; quarterly decisions; manual KPI calculation	Monthly executive meeting materials; partial KPI automation; partial PDCA operation	Daily/weekly operational decisions; automated KPI dashboard; DT/simulation-based pre-validation

대신 명시적 측정 단위로 성숙도를 환원해야 한다는 Schumacher 외^[4]의 측정 가능성(measurability) 요구와 FOMs 관리코드 체계의 구조적 보편성^[5, 8, 12]에 근거한다. 셋째, 활용 수준(D3) 차원은 평가가 단순 진단을 넘어 의사결정·개선으로 이어져야 한다는 SIRI의 활용 영역(intelligence)^[2] 및 PDCA 변화관리^[13]. 디지털 트윈 활용^[14, 15] 문헌에 근거한다. 또한 각 항목을 0~3점으로 부여하는 평정 척도는 SIRI(0~5단계)·Acatech(6단계)의 단계형 루브릭(staged rubric)을 SME의 자가 관정 부담을 고려하여 축약한 것으로, 단계별 관찰 가능 기준을 Table 2에 명시함으로써 평정의 객관성과 재현성을 확보하였다.

3개 성숙도 단계는 Acatech 모델^[3]의 진화론적 관점을 SME 맥락에 맞게 압축한 것으로, Level 1(수기 관리 단계), Level 2(부분 전산 단계), Level 3(통합 전산 단계)의 세 단계로 구분한다. SIRI^[2]·Acatech^[3]·Schumacher^[4] 등 기존 모델이 5~6단계의 세분 구조를 채택한 것에 비해 본 모델은 의도적으로 단계 수를 축소하였다. 이 설계 선택은 “정밀성보다 실행 가능성”이라는 본 모델의 설계 원칙을 반영한 것으로, (i) SME 현장에서는 5단계 이상의 세분화가 자가 관정 부담을 가중시켜 적용성이 떨어지며, (ii) 자가 진단 도구의 본질적 가치는 단계 정밀도가 아닌 단계별 운영 개선과의 연계성에 있다는 판단에 근거한다. 본 모델의 전체 구조는 Fig. 2와 같다. Fig. 2의 진단 절차는 SME가 외부 컨설팅 없이 진단(평가)에서 처방(개선 활동 도출)까지 자체적으로 수행할 수 있도록 설계되었으며, 이는 본 모델이 일회성 평가 도구가 아닌

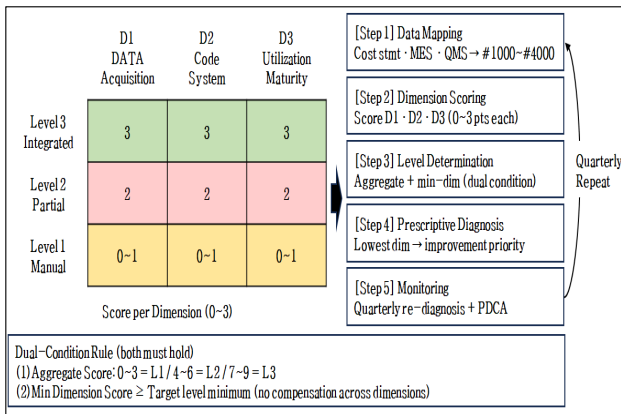


Fig. 2 Architecture and operational procedure of the FOMs-based DX maturity diagnostic model

단계적 DX 추진 로드맵 도구로 기능함을 보여준다.

3.2 평가 차원의 정의

(1) 데이터 수집 차원 (data acquisition dimension)

데이터 수집 차원은 SME가 4M(Man·Machine·Material·Method) 운영 데이터를 어느 수준으로 자동·실시간 수집하는지를 평가한다. FOMs 코드 체계가 의미 있는 분석 단위로 작동하기 위해서는 데이터 수집의 자동화·실시간성·무결성이 선결 조건이며^[7], 이는 대부분의 SME가 첫 번째로 직면하는 진입 장벽이다.

본 차원의 세부 평가 항목은 (i) 4M 데이터 수집 자동화율, (ii) 데이터 갱신 주기(실시간성), (iii) 데이터 무결성(누락·오류율)의 세 가지이다. 평가 점수는 0~3점으로 부여하며, 각 점수에 대응하는 운영 현장 관찰 기준은 Table 2에 정리하였다.

(2) 코드 체계 차원 (management code system dimension)

코드 체계 차원은 FOMs의 4개 상위 관리코드(#1000~#4000)와 19개 하위 컴포넌트가 기업 내에 어느 수준으로 정립·운영되는지를 평가한다^[5, 12]. 이 차원은 본 모델의 핵심 차별 요소로, 기존 글로벌 성숙도 모델들이 추상적 개념(예: “데이터 활용도”, “predictive capacity”)으로 평가하던 영역을 본 모델은 운영 코드의 명시적 매핑 수준으로 환원하여 평가의 객관성과 재현성을 확보한다. 즉, 본 차원은 단순한 “사후 실적 집계”가 아니라 생산성·원가의 “증진분석(improvement analytics)” 관점에서 코드 체계가 의사결정에 기여하는 정도를 측정한다.

본 차원의 세부 평가 항목은 (i) #1000~#4000 4개 상위 코드의 정립 여부, (ii) 19개 하위 컴포넌트의 매핑 완성도, (iii) 코드-회계 계정 간 정합성의 세 가지이다. 손경섭 외^[8]가 제시한 FOM-MES 연동 사례에서 강조된 바와 같이, 코드-회계 정합성은 코드 체계의 성숙도를 가장 직접적으로 확인할 수 있는 검증 지표이다. 본 연구자의 선행 학술지 논문^[11]은 이러한 코드 매핑이 MTO 환경의 원

가관리에 적용 가능함을 라인 단위에서 실증한 바 있다.

(3) 활용 수준 차원 (utilization maturity dimension)

활용 수준 차원은 진단 분석 결과가 의사결정과 개선 활동에 어느 수준으로 활용되는지를 평가한다. 본 차원은 단순 KPI 모니터링이나 사후 보고에 그치지 않고, 기업의 성과를 이끌어내는 생산성·원가의 “증진분석(improvement analytics)” 관점을 핵심으로 한다. 즉, KPI는 결과 지표가 아닌 개선 활동을 견인하는 의사결정 단위로 활용되어야 하며, 이는 FOM-KPI 모듈^[14]의 핵심 사상이기도 하다. 본 차원은 PDCA 변화관리^[13] 및 디지털 트윈 기반 사전 검증^[14, 15]의 활용 여부까지 포함한다.

본 차원의 세부 평가 항목은 (i) 의사결정 주기(분기/월/주/일), (ii) KPI 자동 산출 자동화율, (iii) 디지털 트윈·시뮬레이션 기반 사전 검증 활용 수준의 세 가지이다. 김범태 외^[14]가 제시한 FOM-DX(디지털 트윈) 기반 생산 효율성 최적화 연구는 본 차원 Level 3 단계에서 구현되는 활용 수준의 구체적 사례이며, 오경원 외^[15]의 FOMs 관점 Cyber-Physical System (CPS) 구축 방법론 연구와 정합한다. 즉, 활용 수준 차원은 단계가 상승할수록 “사후 보고 → 실시간 모니터링 → 사전 시뮬레이션 검증”의 시간적 진화 경로를 따른다.

3.3 성숙도 단계의 정의 및 진단 매트릭스

Level 1 (수기 관리 단계)은 데이터 수집이 수기·엑셀 기반으로 이루어지고, 코드 체계가 미정립 상태이며, 의사결정이 사후 보고서 중심으로 분기 단위 이상에서 이루어지는 단계이다. 한국 SME의 상당수가 이 단계에 위치하며, FOMs 진입 이전의 관리 공백 상태에 해당한다.

Level 2 (부분 전산 단계)는 일부 4M 데이터(주로 생산실적)가 MES/ERP에 자동 수집되고, #1000~#3000의 원가 관련 상위 코드가 정립되어 있으나 #4000(품질비용·부적합) 코드가 미연계된 단계이다. 의사결정은 월 단위 경영회의 자료에 기반하며, KPI 산출이 부분 자동화되어 있다. 김재혁·김수영^[12]이 제시한 FOMs 패키지 도입 초기 사례가 이 단계에 해당한다.

Level 3 (통합 전산 단계)는 4M 데이터가 IoT/PLC 연동을 통해 실시간 수집되고, FOMs의 19개 컴포넌트가 완전 매핑되며, 일·주 단위 운영 의사결정이 KPI 대시보드에 의해 지원되는 단계이다. 디지털 트윈 기반 사전 검증과 PDCA 변화관리가 정착된 상태이며, 본 연구자의 선행 학술지 논문^[11]에서 실증된 라인 단위 통합 운영관리가 기업 단위로 확장된 수준이다.

3개 차원과 3개 단계의 결합 매트릭스는 Table 2와 같다. 이 매트릭스는 단순한 등급 분류표가 아니라, SME가 각 차원의 현재 점수와 상위 단계의 도달 기준을 직접 대조하여 단계별 개선 활동을 스스로 도출할 수 있도록 설계되었다. 즉, 행(차원)과 열(단계)

의 교차 셀이 곧 ‘다음 단계 진입을 위해 무엇을 충족해야 하는가’에 대한 자가 점검 기준으로 기능한다.

종합 Level 판정 규칙은 다음 두 조건을 모두 만족해야 한다.

(조건 1) 차원별 점수 합산 — 0~3점은 Level 1, 4~6점은 Level 2, 7~9점은 Level 3.

(조건 2) 최저 차원 점수 — 상위 Level 판정에는 모든 차원이 해당 Level의 최소 점수 이상을 만족할 것 (예: Level 3 판정에는 모든 차원이 2점 이상).

(조건 2)의 의의는 “한 차원의 우수함이 다른 차원의 결손을 보상할 수 없다”는 본 모델의 통합 관점을 반영한 것이다. 예컨대 코드 체계는 완비되어 있으나 데이터 수집이 수기 단계에 머무르는 기업은 코드의 실시간 분석이 불가능하므로 Level 3로 분류되는 것이 부적절하다. 본 이중 조건은 기존 글로벌 모델들이 가중평균 방식의 단일 점수로 평가하여 발생하는 “평균의 함정”을 회피하는 본 모델의 설계 원칙이다.

3.4 진단 절차

본 모델의 진단 절차는 다음 5단계로 구성된다.

[1단계] 데이터 매핑(data mapping) — 진단 대상 기업의 제조원가명세서·ERP·MES·품질기록을 FOMs 4개 상위 코드(#1000~#4000)로 매핑한다. 매핑 규칙은 본 연구자의 선행 학술지 논문^[11]에서 검증된 변환 산식을 준용한다.

[2단계] 차원별 점수 산정(dimension scoring) — Table 2의 평가 매트릭스에 따라 D1·D2·D3 차원별로 0~3점을 부여한다. 평가는 운영 데이터의 직접 관찰과 담당자 면담의 삼각검증을 병행한다.

[3단계] Level 판정(level determination) — 차원별 점수 합산과 최저 차원 점수의 두 조건을 모두 만족하는 Level을 판정한다.

[4단계] 처방 도출(prescriptive diagnosis) — 차원별 점수 중 최저 점수 차원을 “가장 시급한 개선 영역”으로 식별하고, 해당 차원의 한 단계 상상을 위한 구체적 운영 개선 활동을 도출한다. 이 단계가 본 모델의 처방 기능을 구체화하는 부분이며, 단순 등급 진단에 그치는 기존 모델과의 핵심 차별점이다.

[5단계] 모니터링(monitring) — 진단 결과는 1회성 평가가 아닌 분기 단위 재진단을 통해 추적되며, PDCA 변화관리 사이클 [13]과 결합되어 지속적 성숙도 상승을 유도한다.

이상의 진단 절차를 절삭공구 제조업 3사에 실제 적용한 결과는 제5장에서 분석한다.

4. 적용 방법

4.1 적용 대상 3사 개요

본 연구는 동일 업종(절삭공구 제조업) 내 FOMs 도입 수준이

Table 3 Overview of the three SMEs applied in this study

Item	Company A	Company B	Company C
Primary products	WC/ PCD cutting tools	Diamond tools	Compatible tools
FY2025 revenue	Approx. KRW 10 billion	Approx. KRW 4.5 billion	Approx. KRW 2 billion
Employees	Approx. 50	Approx. 40	Approx. 15
Operating systems	Integrated ERP+ MES+ FOMs	Partially digitized	Per-customer Excel sheets
Annual shipments	Approx. 7,300	Approx. 7,900	Approx. 2,500

상이한 3개 중소기업을 진단 모델 적용 대상으로 선정하였다. 업종 변수를 통제함으로써 성숙도 차이의 순효과(net effect)를 식별하기 위함이다. 3사는 모두 한국표준산업분류 절삭공구 및 유사처리업에 속하며, 연 매출 20억~100억 원 규모의 중소기업이다. 익명 처리하여 A사·B사·C사로 표기한다.

A사는 초경합금·CBN·PCD 기반 정밀 절삭공구를 생산하는 기업으로 2025년 회계연도 매출 약 100억 원 규모이며, 자체 ERP·MES·FOMs 연계 시스템을 운영하고 주주·생산·출하·원가의 전 주기가 동일 코드 프레임에서 집계된다. 본 연구자의 선행 학술지 논문^[11]에서 실증 대상이 된 기업과 동일하다. B사는 다이아몬드 공구 전문 제조기업으로 매출 약 45억 원 규모이며, 생산입고·출하 데이터는 전산화되어 있으나 품질비용 집계는 부분적으로만 시스템화된 상태이다. C사는 호환성 공구(밀링 아바·드릴 홀더 등) 제조기업으로 매출 약 20억 원 규모이며, 주문·납품 관리가 업체별 엑셀 시트로 운영된다. 3사의 주요 운영 지표는 Table 3과 같다.

4.2 데이터 출처 및 처리

진단에 활용된 데이터는 (i) 3사의 표준재무제표증명원(2022~2025년), (ii) 출하품목현황(연간), (iii) 공정불량현황(2025년), (iv) 업체별 납품대장(C사 기준 1,038건)의 4종 1차 자료이다. 모든 자료는 외부 검증 가능한 공식 자료이며, FOMs 관리코드 체계로의 매핑 가능성이 사전 검증되었다. 자료 포집의 정합성은 회계감사 인증과 사내 ERP 데이터 일치성 점검을 통해 이중 확인되었다.

진단에 사용된 1차 자료의 구체적 구성은 다음과 같다. (i) 재무 자료로는 3사의 2022~2025년 4개 회계연도 표준재무제표(매출액·매출원가·매출총이익·판매관리비·영업이익)를 확보하여 영업이익률·매출총이익률을 산출하였다. (ii) 생산·출하 자료로는 A사 약 7,300건, B사 약 7,900건, C사 약 2,500건의 연간 출하품목현황을 #1000(생산량) 코드로 매핑하였다. (iii) 품질 자료로는 A사

14개 유형·2,444건, B사 1,044건, C사 4건의 공정불량 기록을 #3000(불량)·#4000(부적합) 코드로 매핑하였다. (iv) 납기 자료로는 C사의 업체별 납품대장 1,038건(수주일·희망납기·실납품일)을 분석하여 납기 준수율과 평균 지연일을 산출하였다. 이로써 D1(수집)·D2(코드)·D3(활용) 각 차원의 점수 산정에 필요한 4M·원가·품질·납기 데이터를 기업별로 확보하였다.

이러한 데이터가 절삭공구 제조업에서 특히 필요한 이유는 업종의 원가·품질 구조에 있다. 절삭공구 제조는 초경합금·다이아몬드·PCD 등 고가 소재를 사용하는 다품종 소량 주문생산(MTO) 방식으로, 재료비 비중이 높고 공구 형상 정밀도(치수공차·날끝 결합)가 곧 클레임·재작업 비용으로 직결된다. 따라서 #1000(생산·재료)·#3000(불량)·#4000(부적합) 데이터와 납기 데이터는 이 업종의 수익성을 좌우하는 핵심 운영 변수이며, 성숙도 차이가 운영 성과로 발현되는 경로를 관찰하기에 적합한 영역이다. 다만 본 연구가 활용한 4종 자료(재무제표·출하/생산실적·품질기록·납품/수주대장)는 절삭공구 산업에 특화된 자료가 아니라 대다수 중소제조기업이 일상적으로 생성·보관하는 보편적 운영 기록이다. 본 연구에서 절삭공구 업종을 선정한 것은 데이터 종류의 제약 때문이 아니라 업종 변수를 통제하기 위함이며, FOMs 관리코드 체계로의 매핑 구조 자체는 이산형·주문생산형 제조업 전반에 일반화 가능하다. 다만 Table 2의 단계별 정량 임계값(예: 데이터 무결성 99%, 의사결정 주기)은 업종별 공정 특성에 따라 재보정(recalibration)이 필요할 수 있다.

일부 항목(A사 희망납기 필드, B사 품질비용 화폐 환산 등)의 데이터 결측은 분석 결과 해석의 한계로 본문에 명시하였다. 다만 이러한 결측은 일부 필드에 국한되며 차원별 점수 산정의 주요 근거 데이터(원가명세서·공정실적·품질기록)는 모두 확보되었으므로, 점수 산정 자체의 왜곡 가능성은 제한적이다. 추가적인 안전장치로, 진단 모델의 차원별 점수 부여는 Table 2의 평가 기준에 따라 두 연구자가 독립 평가한 후 면담 결과와 운영 데이터 관찰을 결합한 “삼각검증(triangulation)”을 통해 합의 점수를 도출함으로써 판정 편향을 최소화하였다.

5. 실증 결과

5.1 3사 성숙도 진단 결과

본 절은 제3장에서 제시한 진단 모델의 5단계 절차를 3사에 적용하여 산출된 진단 결과를 분석한다.

[1단계 데이터 매핑]에서 A·B·C 3사의 제조원가 자료를 #1000~#4000 코드로 매핑한 결과, 3사 모두 매핑 가능성을 확인하였다. 다만 매핑의 완성도는 기업별로 큰 차이를 보였으며, 이는 D2 차원의 점수 산정에 그대로 반영되었다.

Table 4 FOMs-based DX maturity diagnostic results for three SMEs

Dimension	Company A	Company B	Company C
D1. Data acquisition	3 pts (real-time auto)	2 pts (partial auto, hourly)	1 pt (partial manual/Excel)
D2. Management code system	3 pts (full 19-component mapping)	2 pts (#1000~#3000 established)	0 pts (simplified, unestablished)
D3. Utilization maturity	2 pts (monthly/weekly + partial DT)	2 pts (monthly executive meeting)	1 pt (quarterly retrospective)
Aggregate score	8/9	6/9	2/9
Min. dimension score	2	2	0
Overall maturity level	Level 3	Level 2	Level 1

[2단계 차원별 점수 산정] 결과는 Table 4와 같다. 점수 부여의 근거는 4.2절에서 기술한 두 연구자 독립 평가의 평균값이다.

A사는 합산 8점·최저 2점으로 (조건 1)과 (조건 2)를 모두 만족하여 Level 3로 판정되었다. D3 활용 수준이 만점에 못 미친 것은 디지털 트윈 기반 사전 검증이 일부 라인에 한정 도입된 상태이기 때문이며, 이는 본 연구자의 선행 학술지 논문^[11]에서 실증한 라인 단위 통합 운영관리를 전사 단위로 확장해야 함을 시사한다.

B사는 합산 6점·최저 2점으로 Level 2로 판정되었다. D2 코드 체계에서 #1000~#3000은 정립되어 있으나 #4000(품질비용·부적합) 코드가 미연계되어 있어 점수 상승의 핵심 장애 요인으로 식별되었다.

C사는 합산 2점·최저 0점이며 (조건 2)에 따라 자동으로 Level 1으로 판정되었다. D2 차원이 0점인 것은 #1000~#4000 코드 체계가 정립되지 않고 제조원가명세서 항목 수준에서만 비용이 집계되기 때문이며, 이는 다른 두 차원의 점수 상승을 구조적으로 제약한다.

[3단계 Level 판정]은 위와 같이 종료되었고, [4단계 처방 도출]은 5.3절에서 분석한다.

5.2 성숙도와 운영성과의 단조관계 검증

본 절은 3사 진단 결과(Level 1~3)와 동일 시점의 운영성과 지표 간의 정량 관계를 분석하여 본 모델의 외적 타당성(external validity)을 탐색적으로 검증한다. 표본이 3개 기업으로 제한되어 통계적 일반화는 제약이 있으며, 본 검증은 통계적 추론이 아닌 “현장 적용 가능성 검증(applicability verification)”을 목적으로 한 탐색적 실증 연구(exploratory empirical study)임을 명확히 한다.

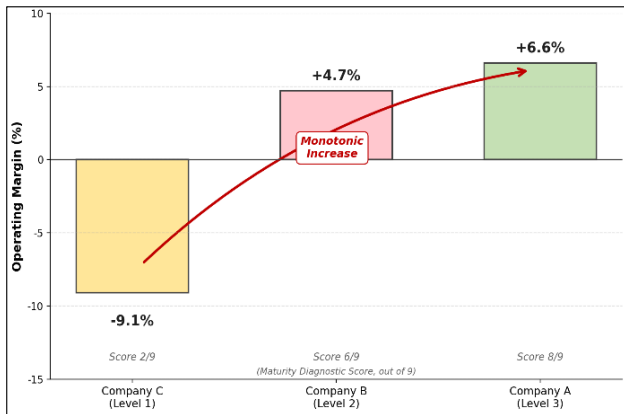


Fig. 3 Monotonic relationship between DX maturity levels and operating margins of the three SMEs

(1) 영업이익률

3사의 2025년 영업이익률은 A사 +6.6%, B사 +4.7%, C사 -9.1%로 나타나, Level 3 > Level 2 > Level 1의 정합적 단조 경향성(monotonic correspondence)이 관찰되었다(Fig. 3). 매출총이익률은 B사(35.0%)가 A사(31.5%)보다 다소 높은 양상을 보였으나, 판매관리비 효율과 운영 의사결정 속도의 차이로 영업 단계에서 순서가 역전된다. 이는 본 모델이 평가하는 “운영 의사결정 활용 수준(D3)”이 단순 원가 효율성을 넘어 종합 영업이익과 정합적으로 연결됨을 시사한다(인과관계가 아닌 정합성 관점에서 해석).

(2) 납기 준수율

납기 준수율은 데이터 완결성의 차이로 인해 3사 직접 비교에는 한계가 있다. C사(Level 1)의 1,038건 분석 결과 납기 준수율 30.3%·평균 지연 59.7일이 확인되었다. 반면 Level 3 기업인 A사는 본 연구자의 선행 학술지 논문^[11]에서 91.8%의 납기 준수율을 보고한 바 있다. 두 수치를 직접 동일 시점으로 비교할 수는 없으나, Level 1과 Level 3 간의 약 60%p 격차는 D1·D3 차원의 성숙도가 납기 관리 효과성에 결정적임을 강하게 시사한다.

(3) 품질 이벤트 기록 빈도

품질 측면에서는 기록 빈도 자체가 성숙도에 비례하는 양상이 관찰된다.

A사는 2025년 14개 유형 2,444건의 공정불량을 정량 집계하고 있으며, B사는 1,044건(생산입고 13.3%), C사는 단 4건(매출 대비 0.44%)만이 기록되어 있다. C사의 낮은 기록 빈도는 품질 우수성을 의미하는 것이 아니라 기록 인프라의 부재를 의미한다. 즉, D1·D2 차원의 성숙도가 품질 관리의 가시성과 직결됨이 확인된다. Table 5는 3사의 운영성과 종합 비교 결과이다.

본 결과는 본 연구의 Gap 3 (성숙도-운영성과 단조관계 실증 부족)을 동일 업종 통제 조건에서 정량 해소한 것으로, 진단 모델

Table 5 FOMs-based DX maturity diagnostic results for three SMEs

Operational performance indicator	Company C (L1)	Company B (L2)	Company A (L3)
Annual revenue	Approx. KRW 2 billion	Approx. KRW 4.5 billion	Approx. KRW 10 billion
Gross margin	25.4%	35.0%	31.5%
Operating margin	-9.1%	+4.7%	+6.6%
On-time delivery rate	30.3% (1,038 cases)	Data limitation	91.8% (cf. [11])
Quality records	4 per year	1,044 per year	2,444 per year
Quality recording ratio (vs. Revenue)	0.44%	13.3%	Auto-aggregated

의 외적 타당성을 확보한다.

5.3 진단 결과의 처방적 활용

본 모델의 핵심 차별점은 진단이 곧 처방으로 연결되는 구조이다. 본 절은 Table 4의 진단 결과에서 식별된 차원별 최저 점수를 기준으로 3사별 개선 우선순위를 도출한다.

A사 (Level 3, D3 = 2점) — 가장 시급한 개선 영역은 활용 수준 차원이다. 구체적으로 디지털 트윈 기반 사전 검증이 일부 라인에 한정 도입된 상태이므로, FOM-DX 모듈^[14]을 활용한 전사 단위 시뮬레이션 기반 의사결정 체계 확장이 D3를 3점으로 끌어 올리는 경로이다. 이는 동시에 본 연구자의 선행 학술지 논문^[11]에서 라인 단위로 실증된 통합 운영관리를 기업 단위로 확장하는 과제와 일치한다.

B사 (Level 2, D2 = 2점) — 가장 시급한 개선 영역은 코드 체계 차원으로, 특히 #4000 품질비용 코드의 연계 정립이 첫 과제이다. 이는 Prevention-Appraisal-Failure (PAF) 모형의 품질비용 항목을 FOMs 관리코드에 매핑하는 작업으로, 손경섭 외^[8]의 FOM-MES 연동 사례에서 제시된 절차를 준용할 수 있다.

C사 (Level 1, D2 = 0점) — 가장 시급한 개선 영역은 코드 체계 차원이다. 우선 #1000-#4000 4개 상위 코드를 제조원가명세서와 매핑하는 기초 작업부터 시작하여, 이후 데이터 수집 차원(D1)의 자동화 인프라 확보 단계로 진전해야 한다. 본 연구자의 선행 학술지 논문^[11]에서 검증된 코드 매핑 절차가 C사의 진입 도구로 직접 활용 가능하다.

이상의 처방 도출은 본 모델이 기존 글로벌 성숙도 모델^[2, 3, 4]이 제공하지 못한 운영 차원의 구체적 개선 활동 가이드를 제시함을 보여준다. 즉, 본 모델의 진단은 “무엇이 부족한가” 뿐

Table 6 Improvement priorities derived from the diagnostic results

Company	Current level	Lowest dimension	Priority improvement activity	Target level
Company A	L3 (8/9)	D3 (2 pts)	Enterprise-wide expansion of DT-based decision-making [14]	Full L3 (9/9)
Company B	L2 (6/9)	D2 (2 pts)	Establishment of #4000 quality-cost code linkage [8]	L3 entry
Company C	L1 (2/9)	D2 (0 pts)	Baseline mapping of four top-tier codes #1000~#4000 [11]	L2 entry

만 아니라 “무엇을 어떻게 개선해야 하는가”에 답하는 처방 도구로 기능한다.

이상 3사 별 개선 우선순위를 종합하면 Table 6과 같다.

6. 결론

본 연구는 중소기업(SME)의 디지털전환(DX) 성숙도를 자체 운영 데이터로 자가 진단하고 그 결과를 즉시 운영 개선 활동으로 연결할 수 있는 FOMs 기반 진단 모델을 제안하였다. 모델은 데이터 수집·코드 체계·활용 수준의 3개 평가 차원과 Level 1~3의 3단계 성숙도로 구성된 3×3 매트릭스 구조를 가지며, 평가 점수의 단순 합산이 아닌 합산 점수와 최저 차원 점수의 이중 조건 판정을 통해 차원 간 결손이 보상되지 않는 통합 관점을 구현하였다.

철삭공구 제조업 3사에 본 모델을 적용한 결과, A사는 Level 3(8/9점), B사는 Level 2(6/9점), C사는 Level 1(2/9점)으로 진단되었으며, 특히 2025년 영업이익률은 C사(Level 1) -9.1% < B사(Level 2) +4.7% < A사(Level 3) +6.6%로 나타나 성숙도 단계와 동일 방향의 단조 대응(monotonic correspondence)을 보였으며, 납기 준수율(C사 30.3% vs. A사 91.8%)과 품질 기록 빈도 등 다른 운영성과 지표에서도 동일한 순위 일관성이 관찰되었다. 또한 진단 결과에서 식별된 차원별 최저 점수가 기업별 개선 우선 순위 도출의 직접 근거로 작동함을 확인하여, 본 모델이 진단과 처방을 동시에 수행하는 도구임을 입증하였다.

본 연구의 학술적 기여는 (i) FOMs 관리코드 체계를 DX 성숙도 진단의 골격으로 확장한 점, (ii) 동일 업종 통제 조건에서 성숙도-운영성과 단조관계를 정량 실증한 점, (iii) 진단-처방 일체형




모델을 SME 친화형으로 설계한 점이다. 실무적으로는 외부 컨설팅 없이 자가 진단이 가능하며 진단 결과가 단계별 개선 활동으로 즉시 연결되는 DX 추진 로드맵 도구로 활용될 수 있다.

본 연구의 한계는 다음과 같다. 첫째, 실증이 철삭공구 제조업 3사에 한정되어 타 업종 일반화는 추가 검증이 필요하다. 둘째, 일부 운영 데이터(B사 납기, A사 희망납기)의 결측으로 단조관계 검증이 영업이익률 측에 강하게 의존한다. 셋째, 진단 모델의 5단계 절차 중 처방 도출 단계의 효과를 중단 추적으로 검증한 후속 연구가 필요하다. 향후 연구로는 FOM-AI 모듈^[6]과 디지털 트윈 시뮬레이션^[14]을 본 진단 모델에 결합하여 사전 예측 기반의 성숙도 상승 경로 시뮬레이션을 제시하는 방향을 제안한다.

References

- [1] Ministry of SMEs and Startups, 2024, viewed 25 May 2026, 2024 Smart Manufacturing Innovation Survey Report, <<https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156686561>>.
- [2] Singapore Economic Development Board, 2017, viewed 25 May 2026, The Smart Industry Readiness Index: Catalysing the Transformation of Manufacturing, <[https://www.edb.gov.sg/content/dam/edb-en/about-edb/media-releases/news/the-smart-industry-readiness-index/the-sg-smart-industry-readiness-index-whitepaper%20\(1\).pdf](https://www.edb.gov.sg/content/dam/edb-en/about-edb/media-releases/news/the-smart-industry-readiness-index/the-sg-smart-industry-readiness-index-whitepaper%20(1).pdf)>.
- [3] Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., ten Hompel, M., Wahlster, W. (Eds.), 2017, viewed 25 May 2026, Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies, <https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/acatech_STUDIE_Maturity_Index_eng_WEB.pdf>.
- [4] Schumacher, A., Erol, S., Sihm, W., 2016, A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises, *Procedia CIRP*, 52 161-166, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>.
- [5] Kim, S. Y., 2021, Smart manufacturing innovation based on FOMs(smart-Factory Operation Managements), *Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Spring Conf.*, 57.
- [6] Kim, S. Y., 2018, A Case Study of the Introduction of Smart Factory Operation Management(FOM) System in the Fourth Industrial Revolution Era, *Korean Computer Accounting Review*, 16:1 43-62.
- [7] Jeoung, Y. U., Jang, J. H., Bae, B. S., Kim, S. Y., 2021, Method for Acquiring Reliability of Manufacturing Data Using FOMs,

- Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Spring Conf., 58.
- [8] Son, K. S., Jang, J. H., Kim, J. H., Kim, S. Y., 2024, A Case Study on the Establishment of SMEs FOM-MES Interworking System for Multidimensional Analysis of 4M Data in Manufacturing Sites, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 33:1 58-68, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2024.33.1.58>.
- [9] Kim, Y. H., Yang, H. S., Kim, S. S., Bae, B. S., Kim, S. Y., 2022, Manufacturing Cost-reduction Algorithm Through Correlation Analysis Between Process-specific Unit Cost Data of FOM Data File Set and Machine-cutting Tool Life, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 31:4 279-287, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.4.279>.
- [10] Park, Y. R., Jang, O. S., Jang, J. H., Lim, H. J., Kim, S. Y., 2024, A Study on Productivity Improvement of Automobile Fan Manufacturing Process Using FOM, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 33:3 147-154, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2024.33.3.147>.
- [11] Yoo, H. S., Son, K. S., Jang, O. S., Kim, S. Y., 2026, Cost and Delivery Optimization Based on smart-Factory Operation Management in a Make-to-Order Environment: A Case Study of a Cutting Tool Manufacturing Line at Company D, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 35:2 151-158, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2026.35.2.151>.
- [12] Kim, J. H., Kim, S. Y., 2021, Productivity Analysis Method based on Manufacturing Big-data using the FOM System in the FOMs Package, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 30:4 259-268, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.4.259>.
- [13] Deming, W. E., 1986, *Out of the Crisis*, MIT Center for Advanced Engineering Study, Cambridge, MA.
- [14] Kim, B. T., Park, D. W., Cheon, S. H., Kim, J. H., Kim, S. Y., 2025, Research on Production Efficiency Optimization of N-Precision (Jeonju Industrial Complex 1&2) Based on FOM-DX (Digital Twin): Line Balancing and Bottleneck Process Analysis Using 3D Simulation, *Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Autumn Conf.*, 152.
- [15] Oh, K. W., Lee, S. H., Jang, J. H., Lim, H. J., Kim, S. Y., 2024, A Study on the Methodology of CPS Construction from the Perspective of FOMs, *Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Spring Conf.*, 141.
- [16] Son, K. S., Yoon, D. M., Kim, J. H., Kim, S. Y., 2025, A Study on Developing FOM-AI for Manufacturing Enterprises Based on the Five AI DX FOMs Modules, *Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Autumn Conf.*, 148.

	<p>Han Sol Yoo Graduate Student in Department of AI Smart Factory Convergence Engineering, Hoseo University. His research interests include FOM (smart-Factory Operation Management) with AI. E-mail: hsyoo@daehyuptool.co.kr</p>
	<p>Beom Tae Kim Graduate Student in Department of AI Smart Factory Convergence Engineering, Hoseo University. His research interests include FOM (smart-Factory Operation Management) with AI. E-mail: bigtiger8758@naver.com</p>
	<p>O Seong Jang Graduate Student in Department of AI Smart Factory Convergence Engineering, Hoseo University. His research interests include FOM (smart-Factory Operation Management) with AI. E-mail: osss2280@naver.com</p>
	<p>Su Young Kim Professor in Department of AI Smart Factory Convergence Engineering, Hoseo University. His research interests include Applications of FOMs (smart-Factory Operation Management) with AI. E-mail: df2030@hoseo.edu</p>