



주문생산 환경에서 smart-Factory Operation Managements(FOMs) 기반 원가 및 납기 최적화 연구 - D사 절삭공구 제조라인 적용 사례

유한솔^a, 손경섭^a, 장오성^a, 김수영^{a,*}

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

Han Sol Yoo^a, Kyung Sup Son^a, O Seong Jang^a, Su Young Kim^{a,*}

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received	30	March	2026
Revised	7	April	2026
Accepted	9	April	2026

Keywords:

smart-Factory Operation Managements (FOMs)
Make-to-Order (MTO)
Cost estimation
On-time delivery
4M analysis

ABSTRACT

In Make-to-Order (MTO) manufacturing environments, the high variability of product specifications and process routes poses significant challenges for systematic cost estimation and precise delivery prediction. This study proposes an integrated operation management framework based on smart-factory operation management (FOM) to simultaneously optimize cost-competitiveness and on-time delivery (OTD) performance. The proposed approach leverages a standardized FOM code system (spanning #1000 to #4500) specifically adapted for MTO environments, incorporating multi-dimensional 4M (Man, Machine, Material, Method) analysis. To validate the framework, a case study was conducted at a carbide cutting tool manufacturer that operates under high-mix low-volume conditions. A simulation-based comparative analysis using multiple dispatching rules demonstrated a 12.4% reduction in the average lead time and significant improvement in the OTD rate, from 73.2% to 91.8%. Furthermore, the framework notably enhanced order-level cost visibility. These results confirm the practical effectiveness of FOM in transforming complex MTO environments using data-driven operational intelligence.

1. 서론

제조 산업은 다품종·소량 생산과 고객 맞춤형 제품에 대한 수요 증가로 인해 주문생산(make-to-order, MTO) 방식이 점차 확대되고 있다. 주문생산 환경에서는 고객 주문 접수 이후에 생산이 이루어지기 때문에 주문별 제품 사양, 공정 경로, 자원 투입이 상이하며, 이로 인해 생산 운영의 복잡성이 크게 증가한다. 특히 병목 자원과

설비 가용성 제약으로 인해 납기 지연이 빈번하게 발생하고, 주문별 원가 또한 체계적으로 산정하기 어려운 문제가 존재한다.^[7-9]

기존의 주문생산 운영관리는 주로 정성적 경험이나 단순한 규칙에 의존해 왔으며, 이는 원가 상승과 납기 지연의 직접적인 원인이 된다. 특히, 현장의 4M 데이터가 실시간 원가 및 공정 관리 지표와 유기적으로 결합되지 못하는 ‘정보의 파편화’는 제조 경쟁력을 약화시키는 핵심 요인이다.^[12,13]

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

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

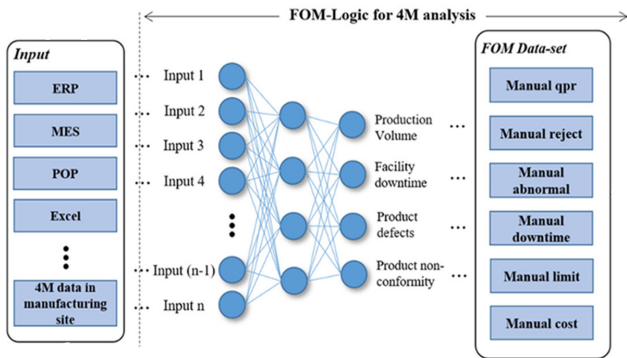


Fig. 1 FOMs package composition and mechanism

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, 현장의 4M 요소를 표준화된 관리 코드로 구조화하고 이를 기반으로 원가와 납기를 동시에 최적화하는 FOMs 기반 운영관리 체계를 제안한다. 이는 단순한 정보 시스템 구축을 넘어, 현장의 ‘물리적 현상’을 ‘데이터 기반의 의사결정 지표’로 연결하는 실질적인 방법론을 제시하는데 목적이 있다.

또한 본 연구의 목적은 FOMs 기반 운영관리 솔루션을 통해 주문별 원가와 납기 정보를 통합적으로 관리하고, 원가와 납기 간의 상충 관계를 고려한 의사결정 지원 프레임워크를 제시하는 것이다.

2. 이론적 배경 및 관련 연구

2.1 주문생산 환경의 운영관리 특성

주문생산 환경은 고객 요구에 따라 제품 사양이 상이하고 주문별 생산 경로가 다르게 구성되는 특성을 가진다. 이로 인해 표준화된 생산 계획 수립이 어렵고, 설비 가용성 및 병목 자원의 영향이 전체 리드타임에 크게 작용한다. 또한 주문 단위의 생산 특성으로 인해 재료비, 가공비, 외주비 및 간접비를 포함한 원가 구조가 복잡해지며, 주문별 원가 가시성 확보가 어려운 문제가 발생한다^[1,3,5].

2.2 공장운영관리 솔루션(FOMs)의 개념

FOMs는 주문, 공정, 자원, 원가, 납기 정보를 통합적으로 관리하고 공장 운영 전반의 의사결정을 지원하기 위한 운영관리 중심의 솔루션 체계이다. Fig.1은 FOMs 패키지의 구성 및 FOM-Logic for 4M analysis의 메커니즘을 나타낸다.

FOMs는 단순한 분석 모델이나 정보 시스템이 아니라, 공장 운영 문제를 정의·분석·개선하는 운영관리 방법론으로서의 성격을 가진다.^[2,4]

최근 연구에서는 FOM 솔루션을 활용하여 제조 현장의 4M(사람, 설비, 재료, 방법) 데이터를 체계적으로 관리함으로써 제조공정 데이터의 신뢰도를 향상시킨 사례가 보고되었다^[15]. 또한 다품종

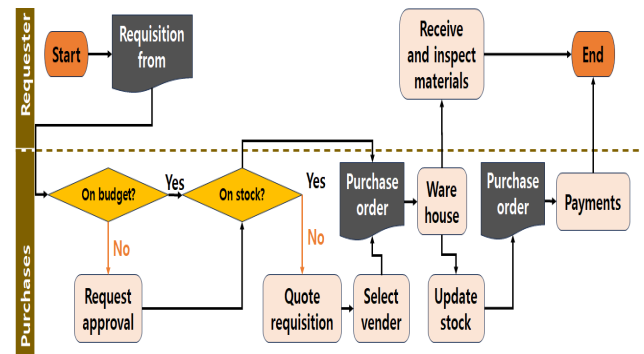


Fig. 2 Research overview and FOMs-based approach for cost and lead-time optimization

소량생산 환경에서 FOM 솔루션을 적용하여 설비 세팅 불량률 감소시키고 공정 안정성을 확보한 연구도 제시되었다. 이러한 연구들은 FOMs가 공장 운영관리 솔루션으로서 실질적인 효과를 가짐을 보여준다.^[6]

2.3 FOMs와 기존 연구와의 차별성

기존 생산관리 및 스마트팩토리 연구는 개별 공정 최적화나 자동화 기술에 초점을 맞추는 경향이 강하였다.^[10,11] 반면 FOMs는 공장 운영을 하나의 관리 대상 시스템으로 인식하고, 운영 전반을 통합적으로 관리하는 상위 개념의 운영관리 솔루션이라는 점에서 차별성을 가진다. 스마트팩토리 운영관리 관점에서 FOM 솔루션 도입 효과를 분석한 연구에서는 제조 현장의 낭비 요소 제거 및 생산성 향상 효과가 확인되었으며^[14], 이는 FOMs 기반 운영관리 접근의 타당성을 뒷받침한다.

3. 연구 방법론

3.1 연구 접근 개요

본 연구는 FOMs 관점에서 주문생산 환경의 운영 요소를 구조화하고, 원가 산정과 납기 예측을 통합한 운영관리 솔루션을 설계한다. Fig. 2는 본 연구의 전체 접근 개요 및 FOMs 기반 원가-납기 최적화 연구 흐름을 나타낸다. 이를 통해 원가 최소화와 납기 성과 개선이라는 상충 목표를 동시에 고려한 의사결정을 지원한다.

3.2 FOMs 기반 운영관리 구조화

본 연구에서는 FOMs 관점에 따라 주문, 공정, 자원, 원가, 납기 요소를 운영관리 차원에서 구조화하였다. 주문은 운영관리의 기준 단위로 정의되며, 각 주문은 작업지시와 공정 흐름을 통해 자원에 할당된다. 자원은 설비 가용성과 병목 제약을 포함하며, 원가는 주문 수행 과정에서 발생하는 비용 요소를 통합적으로 관리한다. 이

Table 1 Cost components for order-level cost estimation

Category	Sub-item	Description
Material cost	Raw material cost	Order-specific material input cost
Processing cost	Equipment processing cost	Standard time × Equipment rate per process
Outsource cost	Outsourced processing cost	External process cost
Overhead	Manufacturing overhead	Allocated based on processing time

를 통해 FOM 솔루션의 데이터 분석 체계와 연계하여 주문별 운영 정보의 가시성을 확보한다.

본 연구에서 FOMs는 분석 모델이 아니라, 공장 운영 문제를 구조적으로 정의하고 의사결정을 지원하는 운영관리 솔루션으로 해석된다.

본 연구에서 FOMs는 분석 모델이 아니라, 공장 운영 문제를 구조적으로 정의하고 의사결정을 지원하는 운영관리 솔루션으로 해석된다.

3.3 원가 산정 모듈

주문별 총원가는 재료비, 가공비, 외주비, 간접비의 합으로 정의되며, 원가 구성 요소의 세부 항목은 Table 1과 같다. 가공비는 공정별 표준 작업 시간과 설비 및 인력의 시간당 비용을 기반으로 산정되며, 간접비는 직접 작업 시간 기준으로 배부된다. 이를 통해 주문별 원가 가시성을 확보한다.

본 연구에서는 FOMs 관점에서 공장운영 전반의 원가 및 납기 요소를 관리코드 체계로 구조화하였다. 이때, FOM 솔루션의 기존 관리코드 체계는 생산량(#1000), 비가동(#2000), 불량(#3000), 부적합(#4000)으로 구성되어 생산성 및 품질 분석에 초점을 맞추고 있다^{15,16)}. 본 연구에서는 이러한 FOM의 코드 로직을 주문생산(MTO) 환경의 원가관리 목적에 맞게 응용 재구성하였다. 구체적으로, 기존 FOM 코드 체계의 구조적 프레임워크를 유지하면서, 각 코드의 분석 대상을 원가 항목으로 재정의하여 재료비, 가공비, 외주비, 간접비, 총원가의 5개 항목으로 매핑하였다. Table 2는 FOM 기존 코드 체계와 본 연구의 응용 코드 체계 간의 대응 관계를 나타낸다.

이러한 응용 재구성의 핵심은, FOM의 기존 코드별 데이터 수집·분석 로직을 그대로 활용하면서 분석 관점만 전환한 것에 있다.

구체적인 변환 산식은 다음과 같다. 재료비(#1000)는 BOM (Bill of Materials) 기반 투입량(qpr)에 단가(unit price)를 곱하여 $C_{prod} = \sum(qpr_i \times P_i)$ 로 산정한다.

가공비(#2000)는 공정별 표준 작업 시간(std_time)에 설비 시간당 비용(equipment rate)을 곱하여 $C_{proc} = \sum(std_time_j \times$

Table 2 Adaptation of FOM code logic for MTO cost management

FOM code	FOM original	MTO cost adapted	FOM data source
#1000	Production volume	Material cost	qpr (BOM qty) + cost (unit price)
#2000	Downtime	Processing cost	qpr (std time) + downtime
#3000	Reject	Outsource cost	cost (outsource) + reject (rework)
#4000	Abnormal	Overhead	downtime (time-based allocation)
	Total summary	Total cost	Aggregated from #1000~#4000



Fig. 3 FOM management code system and delivery change management process

R_j)로 산정하며, 비가동(downtime) 데이터를 반영하여 실제 가동률 기반으로 보정한다. 외주비(#3000)는 외주 가공 단가에 불량(reject)발생 시 재작업비를 가산하여 $C_{out} = cost_{outsource} + (reject_rate \times rework_cost)$ 로 산정한다.

간접비(#4000)는 앞서 설명한 직접 작업 시간 기준 배부율을 적용하여 $C_{ovh} = std_time_total \times overhead_rate$ 로 산정한다. 이러한 산식은 FOM 솔루션의 데이터 추출 체계(qpr, downtime, reject, cost 필드)와 직접 연동되어, 주문 단위의 원가를 자동으로 집계할 수 있도록 구현되었다.

예를 들어, 기존 FOM에서 비가동(#2000) 분석에 활용되던 downtime 데이터는 본 연구에서 설비 가동률 기반의 가공비 산정과 간접비 배부에 동시 활용된다. 마찬가지로, 불량(#3000) 분석에 활용되던 reject 데이터는 외주 재작업 비용 산정에 연계된다. 이를 통해 FOM 솔루션의 기존 데이터 인프라를 추가 투자 없이 원가관리에 확장 적용할 수 있으며, FOM 솔루션의 데이터 추출 체계가 이러한 코드 간 데이터 연계를 실무적으로 가능하게 한다.

Fig. 3은 이러한 응용 코드 체계와 납기관리 및 변화관리 프로세스의 통합 구조를 나타낸다.

주문별 총원가(TC)는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$TC(o) = C_{prod}(o) + C_{proc}(o) + C_{out}(o) + C_{ovh}(o) \quad (1)$$

여기서 o 는 주문을 나타내며, C_{prod} 는 생산량 기반 원가, C_{proc} 는 가공비, C_{out} 는 외주비, C_{ovh} 는 제조간접비를 의미한다. 특히 간접비(C_{ovh})는 D사의 실무 환경에서 직접 작업 시간(direct processing time) 기준의 배부 방식을 적용하였다.

구체적으로, 월간 총 제조간접비(감가상각비, 전력비, 관리인건비, 소모품비 등)를 해당 월의 총 직접 가공 시간으로 나누어 시간당 간접비 배부율(overhead rate, 원/시간)을 산정하고, 이를 각 주문의 공정별 직접 가공 시간에 곱하여 주문별 간접비를 배부하였다. D사의 경우 2024년 기준 시간당 간접비 배부율은 약 12,500 원/시간으로 산정되었으며, 이는 FOM 솔루션의 비가동(#2000) 코드 데이터와 연계하여 설비 가동 시간 대비 실제 가공 시간을 기준으로 보정함으로써 배부 정확도를 높였다.

관리코드 체계의 핵심 가치는 원가 산정 자체에 그치지 않고, 납기관리와의 연계에 있다. Fig. 4의 우측에 나타난 바와 같이, 코드별 원가 분석 결과는 납기 리드타임 분석과 연계되어 문제 요인(problem factor)을 4M 차원에서 식별하고, 개선 활동(improvement action)을 통해 변화관리(change management)로 이어지는 PDCA 순환 구조를 형성한다. 이를 통해 원가와 납기의 상충 관계를 구조적으로 관리할 수 있다.

3.4 시뮬레이션 모델

원가 산정 및 납기 예측 모듈의 실효성을 검증하기 위해, 본 연구에서는 시뮬레이션 모델을 설계하였다. 시뮬레이션은 Python 3.11 기반으로 SimPy 4.0 이산사건 시뮬레이션(discrete event

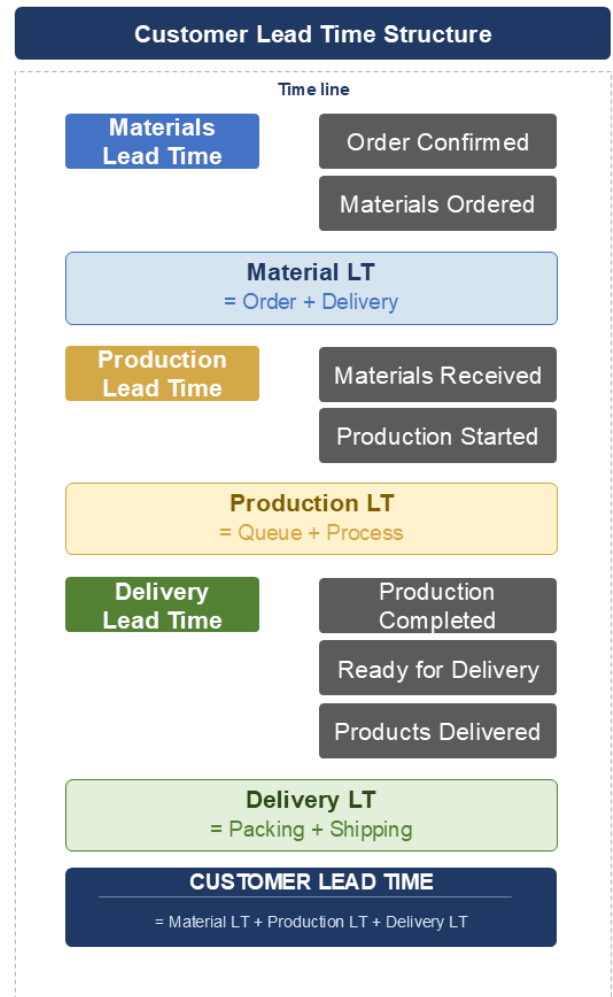


Fig. 4 FOM Management Code System and Delivery Change Management Process

simulation) 라이브러리를 활용하여 구현하였으며, D사의 실제 생산 환경을 반영한 모델을 구축하였다.

주요 입력 파라미터는 다음과 같다:

(1) 주문 풀(order pool): D사의 2024년 실제 수주 데이터 350 건/월 기준으로 제품 사양(초경합금 등급, 형상, 치수)과 공정 경로(평균 4.2공정/주문)를 반영하여 주문을 생성하였다.

(2) 설비 파라미터: CNC 연삭기 20대의 가용성(평균 가동률 78.5%), 공정별 표준 작업 시간(연삭 평균 2.8시간, 용접 평균 1.5시간, 검사 평균 0.8시간), 셋업 시간(평균 45분/건)을 설정하였다.

(3) 작업 우선순위 규칙: Shortest Processing Time (SPT), Earliest Due Date (EDD), First In First Out (FIFO) 3가지 디스패칭 규칙을 적용하여 비교하였다.

(4) 시뮬레이션 기간: 6개월(26주) 기간을 설정하고, 초기 2주를 워밍업(warm-up) 기간으로 제외하여 정상 상태(steady-state)의 결과를 분석하였다. 각 시나리오별 30회 반복 실험을 수행하여 통

계적 신뢰성을 확보하였다.

시뮬레이션 모델은 주문 투입부터 출원가 집계까지의 전 과정을 반복 실험함으로써, 운영 대안 간 원가·납기 트레이드오프를 정량적으로 분석할 수 있도록 설계되었다.

3.5 납기 예측 모듈

주문 리드타임은 공정 처리 시간과 대기 시간의 합으로 구성된다. 대기 시간은 설비 가용성과 병목 자원의 부하를 고려하여 추정되며, 이를 통해 납기 지연 가능성을 사전에 식별한다.

3.6 원가·납기 다목적 대안 평가

본 연구에서는 다양한 작업 우선순위 규칙을 적용하여 복수의 운영 대안을 생성하고, 각 대안에 대해 원가와 납기 성과를 평가한다. 이를 통해 원가와 납기 간의 트레이드오프를 고려한 의사결정이 가능하도록 한다.

4. 사례 연구 및 실증 분석

4.1 사례 개요

사례 연구는 초경합금 특수절삭공구를 주문생산 방식으로 제조하는 중소기업 D사를 대상으로 수행되었다. D사는 연간 약 2,400종 이상의 제품을 생산하는 다품종 소량생산 체제로 운영되며, CNC 연삭기 20대, 검사설비 등을 보유하고 있다. 월평균 수주 건수는 약 350건이며, 주문별 공정 경로가 상이하여 병목 설비(연삭기, 용접설비)에서의 납기 지연이 빈번히 발생하는 환경이다. 특히 2024년 이후 텅스텐 원재료 가격의 급등(전년 대비 약 35% 상승)으로 인해 주문별 원가 가시성 확보가 경영상 핵심 과제로 부각되었다. D사에는 기존 MES 시스템이 운영되고 있었으며, FOM 솔루션과 연동하여 생산실적(qpr), 비가동(downtime), 불량(reject), 원가(cost) 데이터를 체계적으로 추출·분석하는 체계를 구축하였다.

4.2 비교 시나리오: 원가·납기 통합 관점의 분석

기존 방식과 FOMs 기반 방식의 비교는 원가 산정과 납기관리 두 가지 측면에서 수행되었다. Table 3는 두 방식의 의사결정 기준, 원가 관리, 납기 관리, 문제 식별 및 변화관리 역량을 비교한 것이다.

FOMs 기반 방식의 핵심적 차별점은 납기관리에서 드러난다. 기존 방식에서는 납기 지연이 발생한 이후 경험적으로 원인을 추정하는 사후 대응에 머물렀다. 반면, FOMs 기반 방식에서는 관리코드 체계를 통해 납기 지연의 근본 원인을 사전에 식별할 수 있다. 예를 들어, D사의 경우 납기 지연의 주요 원인이 CNC 연삭 공정(가공비 코드)의 병목에 기인하는지, 외주 코팅 공정(외주비 코드)

Table 3 Comparison between conventional operation and FOMs-based approach

Category	Conventional method	FOMs-based method
Decision criteria	Experience-based	Data-based (management code system)
Cost estimation	Post-hoc monthly aggregation	Pre-estimation per order (Eq. (1))
Delivery prediction	Simple rule (FIFO)	Multi-rule comparison considering bottleneck/availability
Problem identification	Post-hoc cause estimation	Root cause analysis by 4M per management code
Change management	None (one-time response)	Continuous improvement based on PDCA cycle
Operation alternatives	Single (fixed rule)	Multi-alternative simulation comparison

의 리드타임 변동에 기인하는지를 코드 단위로 분리하여 분석할 수 있었다.

FOM 솔루션을 통해 추출된 D사의 생산실적(qpr) 및 비가동(downtime) 데이터를 분석한 결과, 납기 지연 건수의 약 62%가 가공비 코드에 해당하는 CNC 연삭 병목에서 발생하였으며, 약 24%가 외주비 코드에 해당하는 PVD 코팅 외주 리드타임 변동에서 발생한 것으로 나타났다. 병목 식별의 구체적 판단 기준은 다음과 같다. (1) Machine 차원에서는 설비별 대기시간이 평균 대기시간의 1.5배를 초과하는 경우(D사 기준: 5축 CNC 연삭기 평균 대기시간 4.1일 대비 기준치 6.15일)를 병목으로 판단하였고, (2) Method 차원에서는 외주 공정 리드타임이 기준 리드타임 대비 2일 이상 초과하는 경우를 이상으로 판단하였으며, (3) Material 차원에서는 원재료 단가 변동률이 전월 대비 10% 이상인 경우를 원가 이상 요인으로 식별하였다. (4) Man 차원에서는 작업자별 공정 소요시간이 표준시간의 1.3배를 초과하는 경우를 숙련도 문제로 분류하였다. 이러한 코드별 문제 요인 식별은 개선 활동의 우선순위를 객관적으로 결정하는 근거가 되었다. 구체적으로, 가공비 코드 영역에서는 SPT(Shortest Processing Time) 규칙 적용을 통해 연삭기 병목을 완화하였고, 외주비 코드 영역에서는 코팅 외주처 이중화를 통해 리드타임 변동성을 축소하였다.

이러한 개선 활동은 일회성에 그치지 않고, Fig. 4에 제시한 PDCA 순환 구조를 통해 변화관리로 정착되었다. 개선 결과를 KPI(납기 준수율, 평균 리드타임 등)로 모니터링하고, 이를 다시 관리코드별 분석에 피드백함으로써 지속적인 운영 개선이 가능한 체계를 구축하였다.

FOM 솔루션을 통해 추출된 D사의 실제 주문 데이터 중 대표적 5건에 대한 원가·납기·4M 문제요인 통합 분석 결과를 Table 4에

Table 4 FOMs-based empirical analysis: order-level cost, delivery, and 4M problem factor (unit: KRW 1,000 / days)

Order	WC-01	WC-02	WC-03	WC-04	WC-05
Mat.	248	524	186	198	387
Proc.	186	125	413	216	157
Outs.	45	39	67	52	90
Ovh.	68	52	125	72	79
TC	547	740	791	538	713
L/T	11.2	9.5	18.6	12.8	16.3
OTD	O	O	X	O	X

4M Problem Factor

WC-02 / Material : WC price surge

WC-03 / Machine : CNC grinding bottleneck
(5-axis queue 6.2d)

WC-05 / Method : PVD coating vendor L/T + 4.1d

* Mat.: Material cost, Proc.: Processing cost, Outs.: Outsource cost, Ovh.: Overhead, TC: Total Cost (KRW 1,000), L/T: Lead Time (days), OTD: On-Time Delivery (O: on-time, X: delayed), WC: Work Center (order identifier), 4M: Man, Machine, Material, Method

제시한다.

Table 4에서 납기 지연(OTD=X)이 발생한 WC-03과 WC-05의 4M 문제요인을 분석한 결과, WC-03(특수형상 절삭공구)은 가공비가 총원가의 52.2%를 차지하며 5축 CNC 연삭기의 대기시간이 6.2일에 달하는 Machine 차원의 병목이 납기 지연의 직접 원인으로 식별되었다. WC-05(CBN 인서트)는 재료비 비중이 54.3%로 높은 가운데, PVD 코팅 외주처의 리드타임이 기존 대비 4.1일 초과한 Method 차원의 변동이 납기 지연을 유발하였다. 반면, 납기를 준수한 WC-01, WC-02, WC-04는 특정 4M 차원에서의 이상 요인이 식별되지 않았다. 이러한 분석 결과는 FOM의 기존 코드 로직을 원가 관점으로 응용 재구성함으로써, 원가 구조와 납기 성과 간의 인과관계를 코드 단위로 추적할 수 있음을 실증적으로 보여준다.

4.3 실증 결과 및 논의

FOMs 기반 운영관리 솔루션을 D사에 적용한 결과, 평균 리드타임이 기존 14.2일에서 12.4일로 약 12.7% 감소하였으며, 납기 준수율은 73.2%에서 91.8%로 18.6%p 향상되었다. 주문별 원가 가시성 측면에서는, FOM 솔루션 기반의 데이터 분석 체계 구축으로, 기존 방식에서 월 단위로만 파악 가능했던 원가 정보가 #1000~#4500 코드 체계를 통해 주문 단위 실시간 추적이 가능해졌다. 특히 원재료비(#1000) 비중이 높은 주문군(WC-2402 유형)에서는 텅스텐 원재료 가격 변동을 사전에 반영한 견적 산출이 가능해져 수주 단계에서의 수익성 판단 정확도가 향상되었다. 이러한 결과는 기존 문헌에서 보고된 FOM 솔루션 적용 사례들과 일관된

경향을 보인다. 장재훈 등^[15]은 FOM Solution을 통해 제조공정 데이터의 신뢰도를 향상시켰으며, 이는 본 연구에서 FOM 솔루션을 활용하여 제조 데이터를 체계적으로 추출·분석하고, 주문·공정·자원 정보를 구조화하여 운영 의사결정의 정확성을 제고한 결과와 유사한 맥락을 가진다. 이는 손경섭 등^[16]이 제시한 4M 데이터 다차원 분석의 전제 조건인 데이터 신뢰성 확보와 일관된 맥락을 가진다. 또한 참고문헌^[16]에서 제시한 다품종 소량생산 환경에서의 품질 개선 결과는, 본 연구에서 병목 자원과 공정 경로 변동성을 고려하여 납기 성과를 개선한 결과와 개념적으로 일치한다.

5. 결론 및 시사점

본 연구는 공장운영관리 솔루션(FOMs)을 주문생산 환경에 실증적으로 적용하여 원가 및 납기 의사결정을 통합적으로 지원하는 운영관리 프레임워크를 제시하였다. 사례 연구 결과, 평균 리드타임이 14.2일에서 12.4일로 약 12.7% 감소하였으며, 납기 준수율은 73.2%에서 91.8%로 18.6%p 향상되어, 제안한 접근법이 기존 운영 방식 대비 실질적인 성과 개선 효과를 보였다. 또한 #1000~#4500 코드 체계 기반의 주문별 원가 추적 체계를 구축함으로써, 기존 월 단위 집계 방식에서 주문 단위 실시간 원가 가시성을 확보하였다.

이러한 결과는 기존의 FOM 솔루션 적용 연구들^[14-16]을 주문생산 환경으로 확장한 것으로, FOMs를 운영관리 솔루션 관점에서 실증적으로 확장하였다는 점에서 학문적 의의를 가진다. 실무적으로는 주문별 원가 및 납기 가시성을 확보함으로써 데이터 기반의 운영 의사결정을 가능하게 한다. 특히, 초경합금 절삭공구와 같이 원재료 가격 변동성이 큰 제품군에서는 원재료비(#1000) 비중이 높은 주문군(WC-2402 유형)에 대해 텅스텐 가격 변동을 사전 반영한 견적 산출이 가능해져, 수주 단계에서의 수익성 판단과 가격 정책 수립에 직접적으로 기여할 수 있음을 확인하였다.

본 연구의 한계로는 단일 기업 사례에 기반한 실증 분석으로 일반화에 제약이 있으며, 시뮬레이션 모델에서 설비 고장 및 긴급 주문 삽입 등의 확률적 변동 요인이 충분히 반영되지 못한 점이 있다. 실제 제조 현장에서는 설비의 돌발 고장(MTBF: Mean Time Between Failures 기반의 확률적 고장 발생), 긴급 주문의 비정기적 삽입(D사의 경우 월 평균 15~20건, 전체 주문의 약 5%), 원재료 입고 지연, 작업자 결근 등의 확률적 변동 요인이 납기와 원가에 유의한 영향을 미친다. 본 연구의 시뮬레이션에서는 설비 가동률을 고정값(78.5%)으로 설정하여 이러한 확률적 변동을 단순화하였으나, 향후 연구에서는 설비 고장률의 확률 분포(예: 지수분포 또는 와이블 분포)와 긴급 주문 삽입 빈도의 포아송 분포를 반영한 확률적 시뮬레이션(stochastic simulation) 모델로 확장

할 필요가 있다. 또한 FOMs 기반 KPI(핵심성과지표) 체계와의 연동을 통해 원가-납기-품질 성과를 통합적으로 관리하는 확장 프레임워크를 제시하고, 다수 기업에 대한 비교 사례 분석을 수행할 필요가 있다.

References

- [1] Kim, S. C., Kim, J. H., Nam, K. S., Kim, S. Y., 2024, A Case Study on Manufacturing Innovation Using the FOM System in the Continuous Process of Film Manufacturing, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.* 33:1 69-76, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2024.33.1.69>.
- [2] Kim, S. C., Jo, M. S., Lee, Y. C., Kim, S. Y., 2022, FOMs-Based Smart Manufacturing Innovation Methodology: Based on OKR Techniques, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.* 31:4 288-295, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.4.288>
- [3] 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>
- [4] 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>.
- [5] Kim, J. H., Son, K. S., Oh, S. S., Lim, H. J., Kim, S. Y., 2024, A Study on FOM Solution-based Production-Management Method Using Legacy Data from Rubber-Extrusion Manufacturing Company, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.* 33:3 155-163, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2024.33.3.155>.
- [6] 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>.
- [7] Stevenson, M., Hendry, L. C., Kingsman, B. G., 2005, A Review of Production Planning and Control: The Applicability of Key Concepts to the Make-to-Order Industry, *Int. J. Prod. Res.* 43:5 869-898, <https://doi.org/10.1080/0020754042000298520>.
- [8] Gunasekaran, A., Ngai, E. W. T., 2004, Information Systems in Supply Chain Integration and Management, *Eur. J. Oper. Res.* 159:2 269-295, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.08.016>.
- [9] Hopp, W. J., Spearman, M. L., 2011, *Factory Physics*, McGraw-Hill, New York.
- [10] Thurer, M., Stevenson, M., Silva, C., Qu, T., 2017, Drum-Buffer-Rope and Workload Control in High-Variety Flow and Job Shops with Bottlenecks: An Assessment by Simulation, *Int. J. Prod. Econ.* 188 116-127, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.025>.
- [11] Goldratt, E. M., 2004, *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*, North River Press, Great Barrington, MA.
- [12] Monostori, L., 2014, Cyber-physical Production Systems: Roots Expectations and R&D Challenges, *Procedia CIRP* 17 9-13, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115>.
- [13] Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J., 2013, *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*, German National Academy of Science and Engineering, Berlin.
- [14] Kim, S. Y., 2018, A Case Study of the Introduction of Smart Factory Operation Management(FOM) System in the Fourth Industrial Revolution Era, *Korean Comput. Account. Rev.* 16:1 43-62.
- [15] Jang, J. H., Kim, S. R., Kim, J. H., Bae, B. S., Kim, S. Y., 2022, Improving Reliability of Manufacturing Process Data Using FOM Solution, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.* 31:3 216-223, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.3.216>.
- [16] 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>.



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



Kyung Sup Son

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: ksson@net-plus.kr



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



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