

FOM 데이터 파일 세트의 공정별 단가 데이터와 장비 절삭 공구 수명 간의
상관관계 분석을 통한 제조원가 절감 알고리즘에 대한 연구김용홍^a, 양해성^a, 김성수^b, 배병성^a, 김수영^{a*}**Manufacturing Cost-reduction Algorithm Through Correlation analysis
Between Process-specific Unit Cost Data of FOM Data
File Set and Machine-cutting Tool Life**Yong-hong Kim^a, Hae-sung Yang^a, Seong-soo Kim^b, Byung Seong Bae^a, Su Young Kim^{a*}^a Department of AI Smart Factory Convergence Engineering, Hoseo University^b Department of Mechanical Convergence Engineering, Silla University**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	17	May	2022
Revised	1	August	2022
Accepted	2	August	2022

*Keywords:*FOM(smart-factory operation management)
Analysis
Milling cutting
Tool life
Cost optimization**ABSTRACT**

It have been composed only introducing automatic equipment without analyzing manufacturing process in many smart factories; hence, productivity does not improve significantly. In this study, production data obtained from a computerized NC machining center were analyzed based on the operation and tool costs for each process to reduce the tool management cost of the cutting process for the die manufacturing, which is weak in cost analysis. Tool cost of the minimum cost required for each process was then modeled using linear programming. We derived a modeling logic that could manage the life of the medium cutting process using the programming method and achieved a cost reduction of up to 12% compared to the operation cost by linking tool cost to the manufacturing per process cost. The proposed algorithm can be applied to field equipment as a manual cost item one of the items of the FOM which manufacturing optimization system.

1. 서론

2014년부터 진행되어온 스마트 팩토리 전환은 제조기업의 생산성 30%, 품질 43.5% 향상에 원가는 15.9% 줄었으며, 납기 준수율도 25.5% 향상되는 성과를 달성했다^[1,19]. 이후 IT자원 구축에 대한 비용과 기술적 측면의 운용관리에 효과적인 IaaS(infrastructure as a service), Paas(platform as a service), IDC(internet data center) 등의 클라우드 컴퓨팅 환경을 구축하고, 데이터를 수집 저장하여 분석하는 인공지능 솔루션을 도입을 추진하며, 특히 자동화 설비로부터 측정되는 제조 raw data를 수집 저장하는 디지털화

사업이 중점적으로 추진되고 있지만 실제 제조 현장은 디지털 데이터의 활용이 턱없이 부족한 실정이다^[11,19]. 데이터 수집에 앞서 반드시 선행되어야 할 제조공정의 프로세스 정립이 필요하나, 제조 업종별 맞춤형 설비, 작업자의 콜라보가 되는 프로세스 구축 단계를 무시하고 이루어진 H/W, S/W 도입은 결과적으로 여러 산업현장의 제조 현장의 실정에 맞지 않아 제조 공정의 지능화와 시스템적인 연결화는 요원한 실정이다^[12].

본 연구에서는 제조산업 4M(man, machine, material, method)^[6]의 핵심인 현장작업자와 생산설비에서 수집된 제조 데이터의 효과적으로 활용할 수 있는 관리 프로세스 모델을 정립하고,

* Corresponding author. Tel.: +82-41-540-5114

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

현장의 실증적 데이터를 분석한 유의미한 결과를 디지털 제조에 적용 하도록 제시하고자 한다. 이와 함께 본 연구에서 제시하는 설비 절삭공구의 공정계획 알고리즘을 확장하여 생산공정 뿐만 아니라 빅데이터, 머신러닝을 통한 AI 등 고도화 구축을 계획하는 공정에도 적용 할 수 있다.

본 연구 대상으로 선정한 제조 리드타임이 긴 주문형 제품인 금형을 제작하는 절삭가공 공정은 제품을 대량 생산하는 제조공정과 달리 각 공정간 싸이클 타임이 길고 공수의 표준화가 어려워 양산 공정에 비해 연구, 개발이 상대적으로 뒤쳐져있어 효율적인 제조 프로세스의 확립이 시급한 실정이다. 또한 절삭공구 바이트에 의한 가공을 하는 선삭 절삭가공의 수명에 대한 연구는 많이 되어 있으나 금형제품을 가공하는 주요 공정인 CNC_머시닝센터 밀링 가공의 절삭공구인 엔드밀에 대한 수명 관리 프로세스 및 알고리즘을 제시하는 연구는 제대로 이루어지지 않고 있다.

이에 본 연구는 절삭공구를 사용하는 설비의 공구수명과의 알고리즘 및 상관 관계를 분석한 후, 제조원가를 구성하는 주요 소모품 비용 중의 하나인 절삭 공구 소모 비용이 최적이 되는 공구수명 관리 방법을 제시하여 이를 공정별 소요되는 설비,작업자,기타 유틸리티 비용을 합한 총임월에 반영한 후, 도출된 최적의 제조임월을 FOM(smart-factory operation management)^[6,14] file set manual cost^[17]의 제조단가에 적용하여 제조효율 최적화를 구현하도록 한다.

2. 본 론

2.1 연구의 구성

첫째로는 본 연구의 핵심 축인 제조비용에 해당하는 제조원가의 최적화를 위해 전체제조원가, 공정별 제조원가, 연구주제인 절삭공정의 작업자, 기계(절삭공구 포함), 유틸리티 제조원가에 대한 조사를 위한 관련 공정별 원가 check sheet에 의한 원가를 분석하였다.

두 번째로 실험을 통한 실증적 데이터를 얻기 위하여 국내 우수 금형제조 기업인 N사의 가동중인 NC가공 공정의 CNC_머시닝센터 설비 중 제조 데이터의 일관성이 높은 cooling fan 금형 절삭가공기를 선정하여 실적 data를 얻도록 하였고, 설비는 CNC(컴퓨터수치제어)가 되는 밀링 머시닝센터(3축, 다 절삭공구 사용)로 구성되어 CNC_머시닝센터의 공구 변경에 따라 다음 공정으로 넘어가게 되어져 적용 공구별 분석이 가능하게 구성 하였다.

세 번째로 해당 공정별 원가 최적화 모델링 구성 알고리즘 구축을 위한 제조 data에 대한 제조실적, 제조조건, 목적함수등을 구성하여 이를 선형계획법을 통하여 최적의 해를 구할 수 있도록 하였고, 구성한 알고리즘에 실험 데이터를 넣어 시뮬레이션 진행 후 검증하고 특성을 도출하였다.

마지막으로 도출한 최적의 제조 임월 알고리즘을 FOM file set manual cost의 제조단가에 적용하여 공정별 제조비용 신뢰성이 향상된 제조단가 데이터를 제공하여 FOM system의 제조 효율 최적화를 구현하도록 구성하였다.

2.2 선행 연구

제조원가의 최적화를 위해 필요한 원가 구성 포맷, 구성방법, 내용 등의 숙지를 위해 완성차 자동차 회사에서 사용하는 공정별 제조원가 Sheet(Table 1)를 참조하여 본 연구에 필요한 설비관련 제

Table 1 Description of the manufacturing process

DESCRIPTION OF THE MANUFACTURING PROCESS	Operation 1	Operation 2	Operation N
Item description			
Manufacturing step coefficient			
Designation of the operation			
Designation of the machine			
Commercial name of the machine			
The Machine maker's name			
Type of machine : C = Standard capacity; D = dedicated capacity; PS = product-specific capacity			
Number of machine used			
Amount of capital investment for one machine:			
acquisition cost in quotation currency			
acquisition currency			
acquisition / quotation currencies rates at the acquisition date			
acquisition date			
oldness at the acquisition date			
replacement value			
Technical depreciation period (years)			
Number of operators at workstation			
Supplementary personnel time (SP T) (%)			
Workstation performances			
Number of parts per cycle			
Gross cycle time (min)			
Regular support time (min)			
Number of parts produced between 2 regular support times (parts)			
Production capacity per hour (parts/h.)			
Unplanned down time (%)			
Changeover time (min)			
Number of parts per sequence (product run) (parts)			
Actual production rate per hour (parts/h.)			
Manufacturing scrap (%)			
Reworking parts (%)			
Manufacturing costs (in currency of quote)			
Cost of direct labour (per part)			
Depreciation of Plant capacity means (per part)			
Cost of supplies (per part)			
Energy and fluids consumption (per part)			
Machine maintenance cost (per part)			
Tool maintenance cost (per part)			
Scrap cost (per part)			
Reworking cost (per part)			
Selling price for the operation			
Workshop description			
Workshop availability for production:			
number of hours/day			
number of days/year			
Rate of workstation utilization in production for all customers (%)			
Number of production shifts per week			
Number of hours' direct labour presence:			
number of presence hours			
number of days worked per year			
Number of hours' actual work per year by direct labour			
Annual Direct Labour payroll expenses			

All rights reserved ©Renault s.a.s. 2008

조 공정 원가 구성을 파악 하였다. 구성 항목은 주요 네 부분으로 구성되어 있으며, 첫째, item description(제품명)으로 주요 항목은 manufacturing step coefficient(제조 비율), designation of the operation(공정의 설비), designation of the machine(설비의 용량, 크기, 규격), commercial name of the machine(설비구매처), amount of capital investment for one machine(설비당 구입 가격), acquisition currency(취득 통화), acquisition date(취득 일), oldness at the acquisition date replacement value(감가 잔존액), technical depreciation period (years) (설비 감가상각 기간, 년), number of operators at workstation(해당 공정 작업자 수), energy and fluids consumption (per part) (부품당 에너지, 기름 소비량)으로 구성되어 있다.

둘째, workstation performances(공정 지표)가 있으며 셋째, manufacturing costs(제조 원가)로 주요 항목 중에 cross cycle time(총 소요공수) 항목을 본 연구 주문형 제품 절삭 가공에 필요한 각 공정별 소요공수로 사용했다.

또한 세부항목 구성에 본 연구 주문형 제품 절삭 가공에 필요한 data는 cost of direct labour(작업자 인건비)가 필요했다.

넷째, workshop description(현장 내용)으로 주요항목으로 본 연구 주문형 제품 절삭 가공에 필요한 data는 lifetime of specific tools(공구수명)의 data를 채택하였다.

CNC 머시닝센터 밀링 가공기의 공작물 절삭에 적용되는 공구와 공정구성에서 우선 적용되는 공구는 엔드밀(endmill)이 쓰이며 엔드밀은 표면 생김에 따라 둥근형을 볼엔드밀(ball endmill), 표면이 직각이면 플랫엔드밀(flat endmill)이 주로 사용된다. 금형의 기계가공에 필요한 절삭가공은 크게 3단계 정밀도인 황삭, 중삭, 정삭으로 공정이 분류하여 가공되며 여기서 기계 가공이란 기계적, 전기적, 열적인 에너지를 이용해 소재로부터 불필요한 부분을 제거하여 원하는 형상, 치수 및 거칠기의 부품 또는 제품을 만드는 가공 방법으로 단계별로 구분되는 절삭가공에서 황삭은 거친 절삭(쇠붙이를 자르거나 깎는 것)이라고도 하며 정삭 가공에서 흑피를 제거할 때, 또는 가공 여유가 클 때 행해지는 절삭 하는 공정으로 공작물의 가공 여유를 남기고 절삭하는 것이다. 가공량이 많은 경우 절삭력을 크게 하여 공구 이동 속도를 높여 빠르게 가공하는 방법으로 황삭의 작업공수는 중삭, 정삭의 작업공수에 비해 짧은 편이다^[20].

중삭은 황삭 가공 후 가공 변형, 열처리 변형 등이 다듬질의 정도에 영향을 주지 않도록 다듬질 여유를 남기고 절삭하는 방법이며^[20] 정삭은 정확한 치수로 가공하기 위해 정밀하게 가공하는 절삭 방법으로 공작물의 다듬질 여유 부분을 소정의 치수, 형상 및 표면 거칠기로 최종 절삭하는 것을 말하며 황삭에 비해 절삭량이 적고 공구 이동 속도를 낮춰 정밀하게 가공하는 방법이다^[20].

절삭가공의 요령으로 공작물을 가공할 경우, 정밀한 가공을 위해서는 절삭량을 적게하고 공구 이동 속도를 낮추어 작업을 진행하는데, 가공 첫 단계부터 이렇게 가공을 할 경우 공작물 가공 속도가 매우 느리며 공구 마모가 많이 발생하여 오차가 발생할 가능성이 높다.

반대로 절삭량을 크게하고 공구 이동 속도를 높여 가공할 경우 절삭시 열과 진동이 많이 발생하여 가공 오차가 발생하게 되어 현장의 적절한 노하우가 반영된 가공이 이루어지고 있으므로 본 연구의 실험에서는 가공의 방법은 바꾸지 않고 기존의 가공 패턴에 맞추어 가공실적 data 수집을 하였다^[20].

고속가공은 일반 기계가공에 비하여 높은 절삭속도와 이송속도로 생산비용 절감, 높은 재료 제거율, 가공시간의 단축 등으로 생산효율을 증가 시켰다. 생산효율의 증가로 머시닝센터를 주로 사용하는 금형 가공에서 각광 받고 있으나, 높은 이송과 절삭속도로 고가의 공구를 급격히 마모시켜 가공업체의 생산이윤을 저하 시킨다. 현재 금형업체의 한 달 동안의 공구 사용비용은 업체에 따라 다소 차이가 있으나 작업자의 한달 임금과 상응하는 금액을 공구비용으로 지출하고 있으며, 공구의 지출비용을 줄이기위해서 금형 가공 업체에서는 가공 재료, 제품의 형상, 크기, 정밀도, 절삭공구에 따라 절삭 환경의 최적화를 하려하고 있다. 그리하여 생산자는 가공 상황에 따른 적절한 절삭 환경에 대한 데이터를 얻기 위해 생산자마다 공구수명, 절삭력, 표면 거칠기와 같은 자료가 실린 데이터를 얻고자 다양한 실험을 하고 있다. 이렇게 얻어진 절삭조건들은 통계적인 방법을 사용하여 가공환경에 따라서 최적의 가공 경제문제를 형성하게 된다.

고속절삭가공(high speed machining)에서는 주축회전속도 20,000 rpm, 테이블이송속도 10 m/min 이상인 공작기계에서 이루어질 수 있는 절삭가공이 되며 절삭속도(밀링커터 또는 선삭봉재의 원주 속도로 측정) 아래와 같이 표현 된다.

$$V = \pi D N \quad (m/min)$$

절삭속도 V는 원운동을 하는 반면에 이송속도(f)는 절삭공구가 공작물의 표면을 따라서 혹은 내측으로 진행하는 속도로 나타내며 밀링에서 이송속도 s(mm/tooth), 회전속도 N(rpm)이면 이송속도 f는 다음 식과 같다.

$$f = sN \quad (mm/min)$$

본 연구에서는 가공조건 변경은 필요없는 공정 프로세스 모델링 필요하므로 절삭속도와 이송속도 변경없이 기존 제조 실적 Data 그대로 적용한다.

공구의 수명은 Taylor 공구수명방정식인 $VT^n = C$ 을 적용한다 (Fig. 1참조) (n : 공구수명 지수, C:공구수명 1분일 때 의 절삭속도).^[2]

본 연구에 적용한 공구의 재질은 초경합금(cemented carbide)으로 이 재질의 수명 판정기준으로 3가지 정도 보면 공구의 갑작스

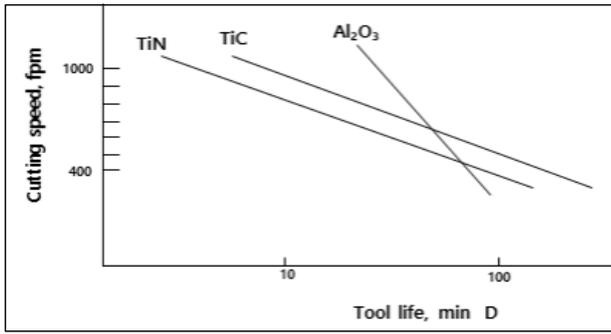


Fig. 1 Example of tool-life^[2]

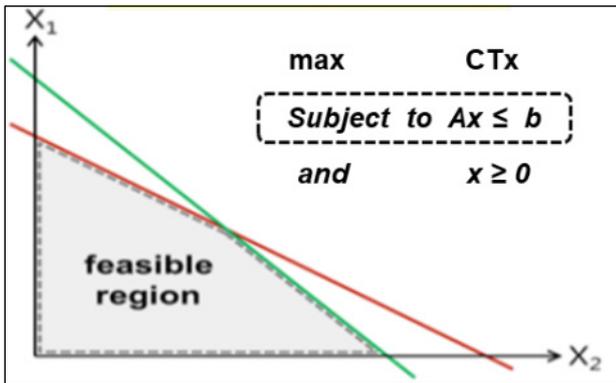


Fig. 2 Formula of linear programming^[18]

러운 파손이 생기거나 공구 바닥면 마모가 균일하게 나면 0.6 mm 정도, 바닥면이 불균일하면 0.3 mm 정도가 수명이 완료되어 교체하여야 한다.

초경합금의 구성 재질을 세 가지로 나누어 보면 첫 번째는 WC 계열 초경합금으로 WC + Co + (소량의 TiC + TaC) 등으로 되어 있으며, 두 번째로 Ti계열 초경합금은 TiC를 주성분으로 하고, Ni, Mo 등 기타 소량의 탄화물, 붕화물과 함께 소결로 구성되어지며 세 번째는 피복공구인데 초경의 우 피복을 하여 많이 사용하는데 TiN, TiAlN 등으로 구성되어 있다.

해당 공정별 원가 최적화를 위한 모델링 구성 알고리즘 구축을 위한 제조 data에 대한 제조실적, 제조조건, 목적함수등을 구성하여 이를 선형계획법을 통하여 최적의 해를 구할 수 있다(Fig. 2 참조)^[18].

FOM data-file^[19]은 총 6개의 data set으로 구성되어 있으며, 제조기업의 MES/POP/ERP/Excel 등 raw data를 기반으로 FOM data-file set을 구성되어 있는데, ① Manual qpr_yyyy, ② Manual downtime:비가동요인 데이터, ③ Manual abnormal: 부적합요인 데이터, ④ Manual reject: 불량요인 데이터, ⑤ Manual cost:제품별 단가 데이터, ⑥ Manual limit:알림하면 제어데이터를 분석한다.

FOM data-file set^[7]은 제조현장 프로세스 최적화를 구현하는

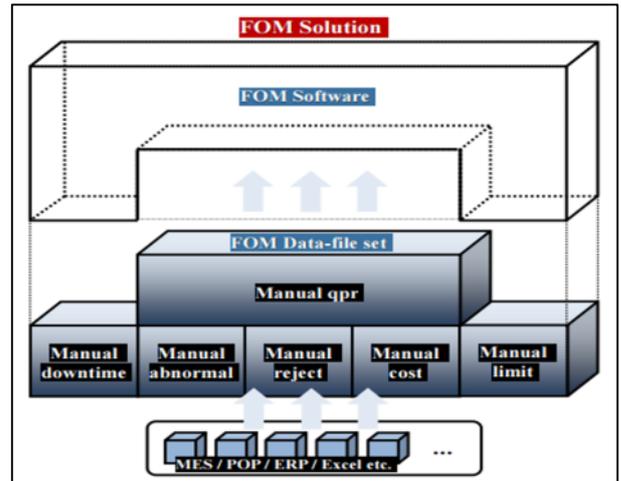


Fig. 3 FOM Solution^[19]

How to input for raw data of MES/ERP							
Manual cost : Transfer excel data to Manual cost							
No.	Shift	Main	Sub-1	Sub-2	Machine	Product	Cost
1	day	MCT #1	Cutting	Rough-cutting	CNC-MCT	Pulsator	200,000
2	night	MCT #1	Cutting	Mid-cutting	CNC-MCT	Pulsator	250,000
3	day	MCT #1	Cutting	Fine-cutting	CNC-MCT	Pulsator	300,000
4	night	MCT #1	Cutting	Rough-cutting	CNC-MCT	Pulsator	200,000
5	day	MCT #1	Cutting	Mid-cutting	CNC-MCT	Pulsator	250,000
6	night	MCT #1	Cutting	Fine-cutting	CNC-MCT	Pulsator	300,000
7	day	MCT #1	Cutting	Rough-cutting	CNC-MCT	Pulsator	200,000
8	night	MCT #1	Cutting	Mid-cutting	CNC-MCT	Pulsator	250,000
9	day	MCT #1	Cutting	Fine-cutting	CNC-MCT	Pulsator	300,000
10	night	MCT #1	Cutting	Rough-cutting	CNC-MCT	Pulsator	200,000
11	day	MCT #1	Cutting	Mid-cutting	CNC-MCT	Pulsator	250,000
12	night	MCT #1	Cutting	Fine-cutting	CNC-MCT	Pulsator	300,000

Fig. 4 Manual cost

FOM solution (Fig. 3)에 속해진 부분으로 이 중 manual cost 부분은 Fig. 4와 같이 원가 최적화 모델링 구성하는데 필요한 기본 포맷이다. 본 연구에서는 이 포맷을 사용하여 수집된 data의 분석 및 효과금액을 산출하였다.

Manual-cost^[7]의 입력부분 중 단가는 공정별 소요비용을 임을 입력하며 임율은 설비임율, 작업자 임율, 유틸리티 소요비용으로 구성되어진다(Table 2).

2.3 연구 실험 장비 및 공정

본 연구를 위한 실험 공정은 코스닥기업인 창원 나라엔디사의 금형절삭 가공 공정을 활용하였고 장비 사양은 RODERS_3축 CNC_밀링 머시닝이며 Fig. 5와 같이 구성되어 있다.

적용공구는 ball end-mill (Fig. 6의 ㉠)과 RADI(flat) end-mill

Table 2 Example of manual cost

Main category (Factory name)	Mid category (Line of factory)	Sub category Factory process	Product name	Cost per process
T-3	As-is #1	Set up	Product A_Set up	5000
T-3	As-is #1	Cutting	Product A_Cutting	15000
T-3	As-is #1	Pressing	Product A_Pressing	10000
T-3	As-is #1	Assembly	Product A_Assembly	7000
T-3	As-is #1	Inspection	Product A_Inspection	5000
T-3	As-is #1	Package	Product A_Package	3000
T-3	To-be #1	Set up	Product A_Set up	5000
T-3	To-be #1	Cutting	Product A_Cutting	15000
T-3	To-be #1	Pressing	Product A_Pressing	10000
T-3	To-be #1	Assembly	Product A_Assembly	7000
T-3	To-be #1	Inspection	Product A_Inspection	5000
T-3	To-be #1	Package	Product A_Package	3000



Fig. 5 RODERS_3axis CNC_milling machining center

(Fig. 6의 ㉑)으로 구성되어 있다.

2.4 연구 대상 절삭 가공 공정의 실적 data

FOM data-file set와 가공공정 원가 테이블을 활용한 공정별 가공 단가 도출은 다음과 같다.

먼저 제품별 단가 데이터를 excel양식의 manual set에 적용하였는데, 기존의 manual set는 대량생산을 하는 부품 위주로 되어 있으므로 주문형 제품의 가공공정 맞춤식으로 양식의 항목을 변경하여 공구의 절삭가공 시간을 구성하고 관련 data 측정을 하였다 (Table 3). Table 3의 구성 내용을 살펴보면 No.는 절삭공정 순서를 나타내며 이송속도,가공거리에 대한 소요시간을 측정된 것이다.

도출된 생산 실적데이터를 FOM에서 적용되는 제품별 단가 데이터 excel양식의 manual set적용하기 위하여 기존의 manual set



㉑ ball end-mill



㉒ flat end-mill(RADI)

Fig. 6 Type of tool used in this study

Table 3 Cutting performance data of tools

No.	D : Diameter R : Round		Length		Z-min	rpm	Feed	Pitch		Stock	Time
	D	R	cut	long				xy	z		
1	12	0.5	15	45	-10.64	7200	4200	5	0.2	0.2	357.55
2	6	0.5	15	20	-10.70	11000	4400	2	0.2	0.2	0.48.19
3	10	5	15	50	-3.30	8000	3200	0.4	0	0.1	0.42.18
4	10	5	15	50	-3.41	9600	3900	0.3	0	0	0.45.51
5	11.98	0.5	15	50	-0.57	6000	2800	0	0.1	0	1.28.45
6	11.98	0.5	15	50	-10.75	6000	2800	0	0.2	0.1	0.25.35
7	11.98	0.5	15	50	-10.85	6000	2800	0	0.1	0	0.51.17
8	10	5	15	50	-1.68	8000	3200	0	0	0.1	1.29.37
9	9.98	4.99	15	50	-1.81	9600	3900	0	0	0	2.26.25
10	10	5	15	50	-10.99	8000	3000	0.2	0.2	0	0.30.03
11	9.98	0.5	15	45	-24.44	8000	4800	0	0.1	0.2	0.06.05
12	10	0.5	20	25	-24.64	10000	4000	4	0.5	0	0.00.11
13	9.98	0.5	15	45	-24.64	8000	4800	0	0.1	0	0.05.25
14	6	3	15	25	-3.15	15000	2600	0.12	0.24	0	0.50.46
15	4	2	8	25	-3.16	15000	2600	0.12	0.24	0	0.20.45
16	2	1	5	15	-3.18	18000	2600	0.06	0.12	0	0.20.29
17	1	0.5	5	25	-3.19	20000	2200	0.02	0.04	0	0.51.56

는 대량생산을 하는 부품 위주로 되어 있으므로 주문형 제품의 가공공정 맞춤식으로 Table 4와 같이 항목을 변경하여 같이 구성하고 data 수집을 하였다. 본 연구에서 공정의 임율 의미는 작업자,설비,유틸리티 소비비가 모두 포함된 의미로 정하였고 Table 4의 operation cost는 이 임율의 해당하는 것으로 산출하였다.

동일 공구 합산 절삭가공 시간에 따른 공구 수명과 가격을 분석하였다(Table 5).

현장에서는 황삭,중삭 공정의 공구 수명의 파악 없이 육안으로 확인 후 시간에 대한 잔여 수명시간 파악이 불가하여 작업자 숙련도에 의존하여 관리하고 있으며 As-is의 현황 파악을 위하여 현장 산출기준에 의한 공정별 임율(operation cost)을 정리하였다. 참고로,설비 NC머시닝 센터의 10년 감가기간에 대한 감가액(비용)은 임율 대비 50% 정도를 차지하고 있으나 실제 현장과 본 실험 데이터를 도출한 현장에서는 세부항목에 대한 분류없이 경험적인 회사 기준에 따라 제조공정의 작업자, NC머시닝센터, 유틸리티 비용 등

Table 4 Cutting man-hours and labour cost rate by cutting process

No.	Cutting process	Tool order	Tool No.	Tool	Tool cutting time		Operation cost
					hh:mm:ss	Sec	
1	Rough	A1	1	RADI	3:57:55	14,275	210,160
2	Mid	A2	5	RADI	0:48:19	2,899	42,680
3	Mid	A3	6	BALL	0:42:18	2,538	37,365
4	Finish	A4	6	BALL	0:45:51	2,751	40,501
5	Finish	A5	2	RADI	1:28:45	5,325	78,396
6	Mid	A6	2	RADI	0:25:35	1,535	22,599
7	Finish	A7	2	RADI	0:51:17	3,077	45,300
8	Mid	A8	6	BALL	1:29:37	5,377	79,161
9	Finish	A9	7	BALL	2:26:25	8,785	129,335
10	Finish	A10	6	BALL	0:30:03	1,803	26,544
11	Mid	A11	4	RADI	0:06:05	365	5,374
12	Finish	A12	3	RADI	0:00:11	11	162
13	Finish	A13	4	RADI	0:05:25	325	4,785
14	Finish	A14	8	BALL	0:50:46	3,046	44,844
15	Finish	A15	9	BALL	0:20:45	1,245	18,329
16	Finish	A16	10	BALL	0:20:29	1,229	18,094
17	Finish	A17	11	BALL	0:51:56	3,116	45,874
Total cutting time					16:01:42	57,702	849,502

Table 5 Remaining tool life time per cutting process

No.	Process Mode	Cutting process	Tool No.	Tool Diameter	Tool	Remaining tool life time (Hr)	Tool price
1	Z-level Rough Cutting	Rough	1	12	RADI	None	42,410
2	Z-level Re-machining	Mid	4	10	RADI	None	29,390
3	Low Lying Processing	Mid	5	6	RADI	None	16,370
4	Z-level Finishing	Mid	6	10	BALL	None	27,780
5	Horizontal Area Cutting	Finish	2	12	RADI	10	42,410
6	Z-level Finishing	Finish	3	10	RADI	10	29,390
7	CL+Check	Finish	7	10	BALL	10	27,780
8	Pe-machining	Finish	8	6	BALL	10	14,880
9	Pe-machining	Finish	9	4	BALL	10	14,450
10	Pe-machining	Finish	10	2	BALL	10	13,500
11	Pe-machining	Finish	11	1	BALL	10	12,380

모든 비용을 합산하여 시간당 임율(operation cost per hour)을 53,000원으로 잡는다(Table 6).

공정의 1시간에 대한 임율이 53,000원으로 구성되는 한편, 가공 설비 설비 NC머시닝 센터의 절삭가공작업에 쓰이는 공구인 엔드 밀의 황삭, 중삭, 정삭가공 공정에 소모 비용을 조사하였는데, 황삭(rough), 중삭(mid-*) 가공시의 공구 수명관리는 이루어지지 않아 잔여수명에 따른 공구 투입이 불투명하게 가능하게 된 상태이다. 즉, 정삭(finish)가공의 절삭가공 前 잔여수명 시간(remaining tool life time (Hr) before process)과 절삭가공 後 잔여수명 시간(remaining tool life time (Hr) after process)이 관리 측정되어져 됨으로서 절삭가공 後 잔여수명 시간에 해당공구의 가격을 곱하면 절감 할 수 있는 비용(saving effect)이 도출되는데, 황삭이나 중삭의 잔여수명시간은 측정되지 않아 절감 할 수 있는 비용(saving effect)은 도출 할 수 없게 된다. 따라서 절감 가능 비용은 정삭공정의 비용을 합하여 111,219원이 된다. 상세 사항은 Table 7에 표기하였다.

Table 6 Depreciation cost and operating cost per processing

Tool No.	Cutting process	CNC P/G C/T(Sec)	Real C/T (P/G*2, sec)	CNC MCT Depreciation KRW	Operation cost (53,000 KRW/hour)
1	Rough	14,275	28,550	211,270	420,319
4	Mid-1	690	1,380	10,212	20,317
5	Mid-2	2,899	5,798	42,905	85,359
6	Mid-3	12,469	24,938	184,541	367,143
2	Finish-1	9,937	19,874	147,068	292,589
3	Finish-2	11	22	163	324
7	Finish-3	8,785	17,570	130,018	268,669
8	Finish-4	3,046	6,092	45,081	89,688
9	Finish-5	1,245	2,490	18,426	36,656
10	Finish-6	1,229	2,458	18,189	36,187
11	Finish-7	3,116	6,232	46,117	91,749
Total	-	57,702	115,404	863,990	1,699,003

Table 7 Cost savings for tool life management

Tool No.	Cutting process	Tool life (H)	Remaining tool life time (H) before process	C/T (H)	Remaining tool life time (H) after process	Saving effect (KRW)	Tool used cost	Ratio of tool used cost to operation cost(%)
1	Rough	10	None	7.93	None	None	33,633	8%
4	Mid-1	10	None	0.38	None	None	1,127	6%
5	Mid-2	10	None	1.61	None	None	2,636	3%
6	Mid-3	10	None	6.93	None	None	19,244	5%
2	Finish-1	10	10	5.52	4.48	18,997	23,413	8%
3	Finish-2	10	10	0.01	9.99	29,372	18	6%
7	Finish-3	10	10	4.88	5.12	14,222	13,568	5%
8	Finish-4	10	10	1.69	8.31	12,382	2,518	3%
9	Finish-5	10	10	0.69	9.31	13,451	999	3%
10	Finish-6	10	10	0.68	9.32	12,578	922	3%
11	Finish-7	10	10	1.73	8.27	10,237	2,143	2%
Total	-	-	-	32.06	54.80	111,219	100,212	6%

2.5 공구의 절삭시간과 수명에 따른 최적의 원가 구성 알고리즘

작업 후의 공구수명이 최소로 되는 알고리즘을 선형계획법 모델링에 적용하면 관리 이전과 이후의 목적함수의 최소값을 나타내어진다.

이를 식으로 표현하면 $TL-Xi-1 - Yi < \text{최소}$ 를 도출 할 수 있으며, 최소값이 0이 되면 최대 관리 효과를 볼 수 있으므로 원가절감 최대치를 구할 수 있다. 여기서

$$Yi = TL-Xi-1-Zi$$

TL : 공구수명

$Xi-1$: 작업 전의 수명 잔여량

Yi : 작업 후의 수명 잔여량

Zi : 해당 공정(i) 작업 공수

이다.

중삭인 경우 잔여수명이 최소로 되어야 애매하게 폐기되는 공구비용의 손실이 적어진다.

모델링을 하여 절삭가공 전/후의 잔여수명 및 수명관리 후 얻을

Table 8 Optimization modeling formula for tool life management

Tool No.	Tool price	Cutting process	Tool life (H)	Remaining tool life time (H) before process	C/T (H)	Remaining tool life time (H) after process	Saving effect (KRW)	Tool used cost
A100	ⓐ	Rough	TL=10	TL-E-1	Ai	TL-E-1-Ai	ⓐ/TL x TL-E-1	ⓐ/TL x Ai
A200	ⓑ	Mid-1	TL=10	TL-F-1	Bi	TL-F-1-Bi	ⓑ/TL x TL-F-1	ⓑ/TL x Bi
A300	ⓒ	Mid-2	TL=10	TL-G-1	Ci	TL-G-1-Ci	ⓒ/TL x TL-G-1	ⓒ/TL x Ci
A400	ⓓ	Mid-3	TL=10	TL-H-1	Di	TL-H-1-Di	ⓓ/TL x TL-H-1	ⓓ/TL x Di
A100	ⓐ	Finish-1	TL=10	TL	Ei	TL-Ei	ⓐ/TL x (TL-Ei)	ⓐ/TL x Ei
A200	ⓑ	Finish-2	TL=10	TL	Fi	TL-Fi	ⓑ/TL x (TL-Fi)	ⓑ/TL x Fi
A300	ⓒ	Finish-3	TL=10	TL	Gi	TL-Gi	ⓒ/TL x (TL-Gi)	ⓒ/TL x Gi
A400	ⓓ	Finish-4	TL=10	TL	Hi	TL-Hi	ⓓ/TL x (TL-Hi)	ⓓ/TL x Hi

수 있는 절감효과금액 공식을 도출하였다(Table 8).

3. 결론

3.1 공구의 수명 관리를 통한 원가 절감 효과

본 연구에서 유도한 최적원가 구성 알고리즘을 파악된 기존 제조원가에 대해서 FOM에 적용하여 공정 제조원가 최적해를 Table 9과 같이 구하였다.

여기서 임율은 작업자, 기계(공구 포함), 유틸리티 가동시간을 합하여 시간당 40,000원으로 정하여 계산하였다.

절삭공구의 수명은 일반적인 기준인 10시간(Hr)으로 정하였다.

공정은 황삭(rough) 1개, 중삭(mid) 3개, 정삭(finish) 4공정으로 정리하였고 절삭공구 정삭(신공구) A100, A200, A300, A400이며 황삭, 중삭은 A100-1, A200-1, A300-1, A400-1으로 구분하였다.

상기 기준 조건을 유도된 알고리즘 Table 8에 대입하면 기존에 도출하지 못한 황삭,중삭을 포함한 모든 절삭공정의 절감 할 수 있는 비용(saving effect)을 도출하였다.

현장 실험 데이터로 분석한 결과 본 연구에서 제시된 최적의 원가 분석 데이터로 공구 수명관리를 하게 된다면 136,479원의 비용 절감을 얻게되어 임율(opration cost)인 1,158,044원의 12% 해당하는 비용을 절감하는 결론을 얻었다.

산업현장에서 공구수명은 가공작업 후에 공구 수명 잔여량 측정하여 조치 되지 않을 경우 기업 마다 경험적인 관리 기준으로 적용되고 있다.

3.2 FOM을 통한 현장 적용 방안

본 연구의 결과로 도출된 임율 부문 원가 절감 프로세스는 관련 기업 현장의 수준에 따라 2가지 경우로 전개할 수 있다.

첫 번째로 현장의 생산실적 데이터를 수작업에 의존하거나 PLC

Table 9 Cost savings when applying optimization to tool life management for modeling based on FOM format

Tool No.	Cutting process	Tool life (H)	Remaining tool life time (H) before process	C/T (H)	Remaining tool life time (H) after process	Saving effect (KRW)	Operation cost
A100-1	Rough	10	7.93	7.93	0	33,633	317,222
A200-1	Mid-1	10	0.38	0.38	0	1,127	15,333
A300-1	Mid-2	10	1.61	1.61	0	2,636	64,422
A400-1	Mid-3	10	6.93	6.92	0	19,244	277,089
A100	Finish-1	10	10	5.52	4.48	19,000	220,822
A200	Finish-2	10	10	0.01	9.99	29,372	244
A300	Finish-3	10	10	4.88	5.12	8,381	195,222
A400	Finish-4	10	10	1.69	8.31	23,085	67,689
				28.94	27.90	136,479	1,158,044
						12%	100%

등 자동수집 장치가 있더라도 사용하지 않는 수준의 기업 인 경우에는 본 연구에서 도출한 알고리즘 공식을 엑셀로 정리하여 기계 가동 임율, 작업자 임율, 유틸리티 비용을 더한 후 FOM data set^[12]의 manual cost^[14]에 입력하면 최적의 제조효율을 산출할 수 있게 된다.

두 번째로 현장의 데이터 수집이 자동으로 이루어지는 공정의 경우에는 실제 데이터를 구축된 자체서버컴퓨터나 클라우드 서버에서 자동수집하고 본 연구에서 도출한 알고리즘 공식에서 도출한 데이터와 기계가동임율, 작업자 임율, 유틸리티 비용을 더한 것을 FOM data set의 manual cost에 입력하면 FOM이 연동된 경우 서버에서 최적화 된 결과를 분석하여 실시간 현장으로 피드백 할 수 있다. 향후 수집되는 데이터 양이 방대해질수록 머신러닝을 통한 인공지능(AI) 연계도 가능해지게 된다.

3.3 향후 연구 계획

본 연구에서는 현장 데이터 수집 실태에 따라 산업공학적인 측면으로 최적의 모델링 도출에 접근하였는데, 절삭 공학적 공구수명의 관리에 대한 접근이 이루어지지 않아 고도화 된 수명관리 연구를 위하여 절삭공정에 투입된 공구의 마모 상태 측정 등의 데이터를 기반으로 공구수명 예지관리에 대한 연구가 필요하며 추가 연구를 진행 할 계획이다.

후 기

이 연구는 중소벤처기업부 ‘중소기업연구인력지원사업’의 재원으로 한국산학연합회(AURI)의 지원을 받아 수행된 연구임(2022년 기업연계형연구개발인력양성사업, 과제번호: S3282285).

References

- [1] Park, J. K., Chang, T. W., 2018, Review of Domestic Research on Smart Manufacturing Technologies, *J. Soc. e-Bus. Stu.*, 23:2 123-133, <https://doi.org/10.7838/jsebs.2018.23.2.123>.
- [2] Lee, J. C., Kang, S. S., Kang, C. G., Go, T. J., Kim, J. D., Kim, H. S., Lee, Y. M., Lee, J. H., Jeong, S. J., Jeong, H. D., Cho, M. U., 2008, Chapter 8 Cutting Processing in Practical-oriented Machine-manufacturing Method, Munundang, Republic of Korea, <https://doi.org/10.978.897393/4539>.
- [3] Kim, J. S., Cho, W. S., 2015, Data Analysis of 4M Data in Small and Medium Enterprises, *Journal of the Korean Data and Information Science Society*, 26:5 1117-1128, <https://doi.org/10.7465/jkdi.2015.26.5.1117>.
- [4] Maeng, H. Y., 1985, Chapter 5. Machining Center Programming and NC Device Operation, *NC Mechanical Cutting*, DaeWoong, Republic of Korea, ISBN 200136000042.
- [5] Liang, S., Rajora, M., Liu, X., Yue, C., Zou, P., Wang, L., 2018, Intelligent Manufacturing System: A Review, *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, 7:3 324-330, <https://doi.org/10.18178/ijmerr.7.3.324-330>.
- [6] Kim, S. Y., 2018, A Case Study of the Introduction of Smart Factory Operation Management(FOM) in the fourth Industrial Revolution Era, *Korean Computers and Accounting Review*, 16:1 43-62, <http://doi.org/10.32956/kaoca.2018.16.1.43>.
- [7] Lee, J. C., Kang, S. S., Kang, C. G., Go, T. J., Kim, J. D., Kim, H. S., Lee, Y. M., Lee, J. H., Jeong, S. J., Jeong, H. D., Cho, M. U., 2008, Chapter 2. Design of Production System in Practical-oriented Machine-manufacturing Method, Munundang, Republic of Korea, <https://doi.org/10.978.897393/4539>.
- [8] Noh, K. S., Park, S., 2014, Application of MI-NPS Digital Factory Methodology for Production Ability Improvement and Optimal Layout Design : Applied Case to Vehicle Shaft Manufacturing Line, *Productivity Review*, 28:1 47-73, <http://doi.org/10.15843/kpapr.28.1.201403.47>.
- [9] Hong, Y. H., Kim, C. R., 2014, Recent Developments of Constructing Adjacency Matrix in Network Analysis, *Journal of the Korean Data and Information Science Society*, 25:5 1107-1116, <http://doi.org/10.7465/jkdi.2014.25.5.1107>.
- [10] Noh, K. S., Park, S. H., 2014, An Exploratory Study on Application Plan of Big Data to Manufacturing Execution System, *Journal of Digital Convergence*, 12:1 305-311, <https://doi.org/10.14400/JDPM.2014.12.1.305>.
- [11] Kim, J. M., Yoo, Y. H., 2021, Design of Data-collection & Analysis System for Smart Factory-based on UV Lamp Manufacturing Facility, *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 46:2 352-360, <http://doi.org/10.7840/kics.2021.46.2.352>.
- [12] Kim, S. Y., Kim, W. H., Jung, I. H., 2014, A Case Study on the Automobile Company's Productivity Improvements by Applying Digital Factory Technology, *Productivity Review*, 28:3 35-52, <https://doi.org/10.15843/kpapr.28.3.201409.35>.
- [13] Kim, S. Y., 2015, Study of Digital Factory FOM Solution on Software-based : Applied Case to Heat-Treatment Company, *Korean Institute of Industrial Engineers Spring Joint Conf.*, 2855-2863.
- [14] Ji, S. Y., 2017, viewed 29 July 2022, 4M (Man. Machine, Material, Method) Predictive using Data Integration Analysis Manufacturing System Technology Development, Research Project Report, <<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201800040350>>.
- [15] Oh, S. S., Yang, H. S., Bae, B. S., Kim, S. Y., 2021, Application of FOM Methodology for 4M Optimization Based on the Data of Manufacturing Process of Mechanical Parts, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 30:6 456-464, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.6.456>.
- [16] Park, H. G., 2021, viewed 20 Jan. 2022, Announces 2021/2022 Smart Factory Construction Project Results and Prospects, <<https://www.youtube.com/watch?v=wtJOvkXnUSc>>.
- [17] EM DATA administrator, 2020, viewed 12 Feb. 2021, How to set CAM parameters - Machining (roughing, semi-finishing, finishing), <<https://zwcad.co.kr:48193/SupportBoard3/25109>>.
- [18] Kim, J. S., 2021, viewed 24 Mar 2022, Using Linear and Integer Programming and Excel, <https://gaussian37.github.io/etc-or-linear_programming/>.
- [19] Kim, S. Y., 2022, viewed 2 May, FOM system, Hoseo University Digital Factory Lab, <http://www.df.re.kr/gnuboard4/bbs/board.php?bo_table=pds&wr_id=355>.
- [20] Kim, Y. H., Yang, H. S., Kim, S. S., Bae, B. S., Kim, S. Y., 2022, A Study on Optimizing Cutting Tool Management Cost using FOM of Cost Data for Each Process, *Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Spring Conf. 2022*, 88.

	<p>Yong-hong Kim Ph.D. candidate in Department of AI Smart Factory Convergence Engineering,, Hoseo University. His research interest is FOM (smart-Factory Operation Management) with AI. E-mail: kyonghong777@daum.net</p>
	<p>Hae-sung Yang Graduate student in Department of AI Smart Factory Convergence Engineering,, Hoseo University. His research interest is FOM (smart-Factory Operation Management) with AI. E-mail: hsyang@silla.ac.kr</p>
	<p>Seong-soo Kim Professor in Department of Mechanical Convergence Engineering, Silla University. His research interest is FOM with AI. E-mail: sskim@silla.ac.kr</p>
	<p>Byung Seong Bae Professor in Department of Smart Factory for Materials-Parts-Equipment, Hoseo University. His research interest is FOM (smart-Factory Operation Management) in Display and Semiconductor Field. E-mail: bsbae3@hoseo.edu</p>
	<p>Su Young Kim Professor in Department of Smart Factory for Materials-Parts-Equipment, Hoseo University. His research interest is applications of FOMs (smart-Factory Operation Managements). E-mail: df2030@hoseo.edu</p>