

TOC-DBR 기반의 스마트공장 레이아웃 설계에 관한 연구

김병주¹ · 김덕현² · 이인수² · 전차수^{3*}

¹경상대학교 대학원 산업시스템공학과 한국항공우주산업 / ²한국항공우주산업 /

³경상대학교 산업시스템공학부 · 공학연구원

A Study on a Smart Factory Layout Design Based on TOC-DBR

Byung-Joo Kim¹ · Deok Hyun Kim² · In Su Lee² · Cha-Soo Jun³

¹Department of Industrial and Systems Engineering, Gyeongsang National University and Korea Aerospace Industry

²Korea Aerospace Industry

³Department of Industrial and Systems Engineering & Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

This study presents a plant concept design for a smart factory which is mainly targeted to machine airplane parts. The plant layout is based on the TOC-DBR approach together with autonomous distributed factory control considered, while discrete event simulation is also performed in order to validate its layout. The resulting layout and its procedure turn out to be quite a useful guideline in realizing those smart factories especially for machining-oriented manufacturing industries.

Keywords: TOC(theory of constraints), DBR(drum buffer rope), Smart Factory, Plant Layout Design, Job Shop, Discrete Event Simulation

1. 서 론

항공기 부품은 전형적인 다품종 소량 생산품으로 주로 가공기술 기반의 잡샵(job shop)에서 생산된다. 잡샵은 품종과 생산량이 늘어날수록 공정간 밸런스가 맞지 않아 재공품 재고가 증가하고 리드타임이 길어지며, 인력 소요도 증가하는 어려움이 있다(Baker, 1974; Bae, 2006). 현재 한국을 비롯해 세계의 제조업은 새로운 생산 패러다임인 스마트공장(smart factory)을 주요 화두로 삼고 있다(KEPD, 2014). 부품 가공분야의 스마트공장은 가공기술, 장비기술, 소프트웨어기술, 운영기술 등 각 요소기술의 고도화와 요소기술 간의 통합이 이루어져야 하는데, 실제로 구현을 하는데 있어서는 관련 연구 및 적용사례의 부족과 전문 인력의 부족으로 많은 어려움이 있다. 본 논문에서는 항공기 부품 스마트공장 구축 사례를 소개함으로써 스마트공장의 확산과 관련 연구에 도움이 되었으면 한다.

스마트공장을 구축하기 위해서는 제품 생산에 필요한 장비를 선정·배치하고, 자동화된 장비에 센싱(sensing)과 운영규칙(operating rule)같은 판단기능을 부여하는 과정이 필요하다. 특히 스마트공장에서는 물류 장치의 분산·자율제어가 핵심이므로 이를 고려한 공장 레이아웃 설계가 요구된다.

스마트공장 관련 연구에 있어서 관리 소프트웨어에 관한 연구는 비교적 활발하나, 물리적인 레이아웃 및 운영개념에 대한 연구는 거의 찾지 못하였다(Nam *et al.*, 2014).

본 논문의 연구대상인 K사의 항공기 부품 생산은 잡샵 형태의 가공·검사장비로 이루어지므로 공정간 장비부하 밸런스가 맞지 않아 흐름라인을 만들기 어렵고 물류자동화가 용이하지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 아이디어가 간결하고, 운영에 대한 구체적인 방법론을 제시하는 TOC-DBR(theory of constraints-drum buffer rope) 기법을 공장 레이아웃 설계에 적용하였다.

* 연락처 : 전차수 교수, 52828 경상남도 진주시 진주대로 501, 경상대학교 산업시스템공학부, Tel : 055-772-1693, Fax : 055-772-1699, E-mail : csjun@gnu.ac.kr

2016년 6월 20일 접수; 2016년 8월 31일 1차 수정본 접수; 2017년 1월 5일 2차 수정본 접수; 2017년 1월 29일 게재 확정.

2. 이론적 고찰

2.1 스마트공장

스마트공장이란 사물인터넷(internet of things), 사이버물리 시스템(cyber physical systems)을 기반으로 제조의 모든 단계가 자동화 및 정보화되고, 가치사슬 전체가 하나의 공장처럼 실시간 연동되며, 과거의 경직된 중앙집중식 생산체계에서 소재, 제품, 기기의 스마트화를 통하여 모듈단위의 유연한 분산·자율제어 생산체계를 구현하는 것이다(Yim, 2015).

독일은 2011년부터 미래의 기술변화에 대응하여 제조업 경쟁력을 유지하는 것을 목표로 ‘인더스트리 4.0’ 프로그램을 추진해왔다. 현재 독일은 ‘인더스트리 4.0’의 추진성과를 분석하여, 기존의 이론위주의 연구에서 실용성과 실행력을 강화해 플랫폼 인더스트리 4.0을 재추진 선언하였다(NIA, 2014).

우리나라의 경우에도 ‘제조업 혁신 3.0’의 기치 하에 기존의 중소·중견기업 육성 프로그램에 ICT(information and communication technology)를 접목시켜 제조 기업의 경쟁력을 강화하는 ‘민관합동 스마트공장 추진단’을 운영하고 있다(Park, 2016).

스마트공장을 구축하기 위해서는 자동화에 기초한 스마트화 장비에 대한 이해가 선행되어야 하며, 스마트화된 장비를 운영하기 위해 스마트공장의 지향적인 모듈 단위의 유연한 분산·자율제어가 가능한 공장운영 개념이 레이아웃 설계 단계부터 고려되어야 한다.

2.2 TOC-DBR

제약이론(theory of constraints)은 시스템의 성과에 장애가 되거나 기업이 돈을 버는데 장애가 되는 요인을 찾아 집중적으로 개선함으로써 단기간에 가시적인 성과를 나타내고, 장기적으로 지속적인 경영개선을 통해 전체 시스템 최적화를 달성하는 프로세스 중심의 경영 혁신 기법이다(Koh, 2002; Choi, 2001). TOC의 DBR(drum buffer rope)은 생산 스케줄링과 운영 최적화를 위해 사용되는 방법론이다. ‘드럼(drum)’은 제약자원(constraint resource)의 생산스케줄을 말한다. 제약자원은 시스템의 병목자원으로서 고가의 장비나 핵심장비를 말하며, 제약자원에서 한 시간의 손실은 시스템 전체가 한 시간을 허비하는 것과 같기 때문에 제약자원의 능력을 최대한 활용하도록 드럼이 계획되어야 하고, 비제약자원(unconstraint resource)은 제약자원의 생산속도에 맞추어 운영되어야 한다. ‘버퍼(buffer)’는 설비고장, 공구 파손, 불량품 발생, 작업자 결근 등의 장애로부터 발생하는 변동(언제 일어날지는 모르나 반드시 발생하는 고장, 불량품, 자재 결품 등)에 대비하기 위해 제약자원 앞에 위치한다. ‘로프(rope)’는 첫 공정의 자재 투입 속도를 제약자원과 동기화하는 역할을 한다.

생산 자원의 능력을 처리능력(throughput capacity)과, 보호능력(protective capacity)으로 구분할 수 있다. 처리능력은 공장의 스루풋(throughput)을 직접 유지하기 위한 자원의 필요 능력이다. 보호능력은 병목자원의 공정처리능력에 예기치 않은 영향을 끼치지 않도록 비병목자원에 추가된 여분의 능력이다.

리소스 추가에는 비용이 따르기 때문에 보호능력의 수준을 무한정 늘릴 수는 없다(Lee, 2002). 보호능력의 확보는 장비 용량 증대 및 인력증가, 가동시간 연장 등을 통해서 이루어지는데 어떤 대안을 선택할지는 시뮬레이션 보다 경험과 직관에 의한 의사결정을 하는 경우가 많다.

TOC의 DBR은 보호능력과 버퍼로 시스템의 변동으로부터 제약자원을 보호하고, 로프로 시스템 내에 제품의 투입 시점을 결정하여 재공품 재고를 줄이고, 납기를 단축하는 관리방법을 제공한다. 특히 부하 평준화가 어려운 부품 가공라인에 버퍼 개념을 적용하는데 실용적인 아이디어를 제공한다. 일반적으로 TOC-DBR의 개념에 따르면 공정변동으로부터 시스템을 보호하기 위해 시간버퍼(time buffer)를 사용한다(Koh, 2001). 그러나 본 논문에서 다루는 버퍼는 공장 레이아웃 설계 관점에서 시간버퍼를 구현하기 위한 재고저장 공간크기 또는 부품의 수량을 뜻한다.

3. TOC-DBR 이론 기반의 항공기 부품 공장의 레이아웃 설계

3.1 연구대상 특성 분석

(1) 생산제품 특성 분석

본 논문의 연구 대상인 K사는 대형 항공기 날개 부품인 윙립(wing rib)을 수주하였으며 새로운 공장을 짓기로 하였다. 윙립은 항공기 주익의 하중을 지탱하는 구조물로서 크기가 크고 형상이 복잡하며 고난위도의 가공 및 품질관리 기술을 요구한다. 총 32종의 윙립을 생산하는데 최대 크기는 가로 5,600mm, 세로 1,600mm, 높이 170mm이며, 무게는 약 120kg이다. 특이한 점은 원 자재의 무게가 4.3ton으로 원자재의 97%가 절삭 칩으로 제거된다. <Figure 1>에서는 5축 가공라인에서 생산되는 윙립과 그 공정 순서를 나타내었다. 윙립은 판재(plate) 소재로부터 가공 및 검사공정을 통해 생산된다. 본 공장은 윙립 외에도 프레임(frame), 벌크헤드(bulkhead)와 같이 원자재가 판재인 기계가공 부품들을 혼류 생산할 수 있도록 공장의 유연성을 설계 단계에서 고려하였다. 그러나 윙립에 주력하고 여력이 있을 때만 다른 부품을 생산하게 되므로 본 논문에서는 윙립의 경우만을 다룬다.

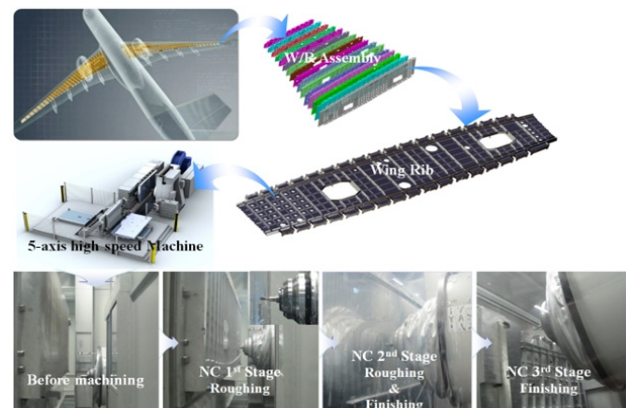


Figure 1. Wing-Ribs and Machining Processes

(2) 생산라인의 공정 분석을 통한 운영 개념 및 목표 설정
레이아웃 설계 사전 작업으로 모든 리소스에 대한 설정과 운영개념을 확정하여야한다. 신규 공장의 운영개념은 TOC-DBR을 적용하는 것이 적합한 것으로 판단하였고, 생산 규모에 따른 장비대수와 가동 형태를 운영목표로 설정하였다. 구체적 절차는 다음과 같다. 1단계 : 공정흐름을 정의하고, 2단계 : 제품가공 시간과 가동률을 고려하여 장비 소요 대수를 산출하고, 3단계 : 공정내 공정간 물류방안을 수립한다.

특히, 2단계 장비소요 대수는 (총 가공공수)/(목표가동률×가동시간×가동일수)에 의해 산출할 수 있는데 주요 요인인 가동시간은 장비별 투자비 규모에 따라 정책적으로 결정되며, 현실적인 인력 운영 상황을 고려하여 교대수(shift) 단위로 설정한다. TOC-DBR 관점에서 제약공정은 5축 가공라인인데, 이들은 최대한 활용 되도록 3교대 근무형태로 하였고, 비제약공정인 후공정 및 검사라인은 보호능력을 부여하기 위해 2교대로 운영되도록 하였다. 제품단위당 소요시간(tact time)은 고객의 주문에 대응하기 위한 생산 흐름을 의미하는 것으로(1일 가동시간)/(1일 목표생산량)이며, 제약공정은 90분, 비제약공정은 45분을 목표로 설정하였다. 비제약공정은 제약공정의 50% 수준으로 여기에 문제가 발생되면 50%의 여유분을 가동하여 그 문제가 제약공정으로 확산되지 않도록 할 수 있다. 장비별 가동률 목표치는 경험에 의하여 설정하였다.

3단계에서는 공정내·공정간 물류 방안을 수립하는 것으로 그 방안에 따라 배치 및 물류경로가 정해지므로 레이아웃 개념설계 전에 반드시 정의되어야한다. 무거운 물체를 아래위로 핸들링 하는 경우에는 크레인을 적용하였다. 5축 가공라인에서는 높은 위치정밀도를 요구하므로 RGV(rail guided vehicle)

를, 공정간 물류는 경로가 복잡하고 꺾여있어 LGV(laser guided vehicle)을 선택하였다. <Table 1>은 레이아웃 개념 설계에 필요한 공정분석 내용과 공정 목표를 보여주고 있다.

3.2 레이아웃 개념 설계

공장 구성은 물리적인 공정흐름인 레이아웃과 논리적인 운영방식으로 구분하여 설명할 수 있다. 레이아웃은 크게 가공라인과 후처리 및 검사라인으로 구분되는데 가공라인은 전체가 하나의 유연생산시스템(flexible manufacturing system)으로, 이는 원자재 자동창고와, 5축 고속가공기(machining center), 셋업스테이션, RGV, 팔레트 스토리지로 구성된다. 후처리 및 검사라인은 사상공정, 가공품의 표면 균열을 검사하는 형광침투검사라인, 3차원형상윤곽검사, 두께검사 공정으로 이루어졌다.

논리적인 운영방식은 TOC-DBR을 적용하여, 생산라인을 제약공정과 비제약공정, 버퍼로 구성된다. 제약공정은 단위시간당 투자비가 가장 큰 5축 가공라인으로 결정하였고, 비제약공정은 후처리 및 검사라인에 해당되는데 뒤 공정에 더 많은 보호능력을 할당하는 흐름계단형 분포 형태(Lee, 2002)를 갖는다.

일반적으로 생산라인의 종속성과 변동성을 완충하기 위한 buffer는 제약버퍼(constraint buffer)와 출하버퍼(shipping buffer)로 구분되어진다(<Figure 2(a)> 참조). 그러나 본 연구에서는 <Figure 2(b)>와 같이 제약공정과 비제약공정 사이에 보호버퍼(protective buffer)를 더 두었다. 이는 제약공정은 3교대 24시간 운영되지만, 비제약공정의 2교대 16시간 운영되기 때문에 완충 역할 외에 운영시간 차이에 의한 재공품재고 보관이 필요하기 때문이다.

Table 1. Process table of FAB

Process	Process Description	Target Utilization (%)	Shift	Machine Quantity	Target tact time (min)	Transportation
Automatic materials storage	Storing raw material		1	1	20	auto crane
5-axis FMS	Setup	loading & unloading of part		4	60	auto crane
	Machine	5-axis machining	90	3	9	RGV
Deburr	deburring	80	2	1	45	LGV/RGV
FPI	fluorescent penetrant inspection	80	2	1	45	auto crane
CMM	geometry measuring	80	2	2	45	LGV
TMM	thickness measuring	80	2	1	45	LGV
Outlet	part shipped out		1	1	20	LGV

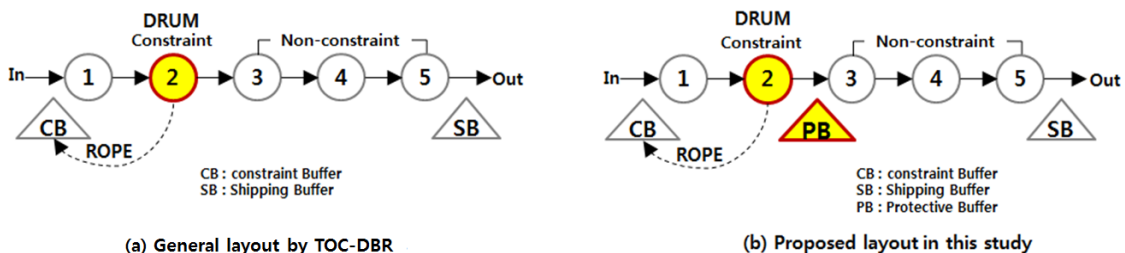


Figure 2. Buffers in DBR

5축 가공라인 앞의 원자재 자동 창고가 제약버퍼에 해당한다. 보호버퍼는 5축 가공라인과 후처리 및 검사라인 사이에 두며 이 또한 별도의 자동창고이고 가공품의 육안확인 및 물류의 접근성을 고려하여 공장 중앙에 배치하였다. 출하버퍼는 맨 마지막 공정에 컨베이어 형태로 구성하였는데 이는 외부의 “표면처리 공장”의 변동으로부터 본 공장의 생산라인을 보호한다. <Figure 3>에서는 본 공장의 설계 개념을 TOC-DBR의 관점에서 나타내고 있다.

<Figure 4>에서는 <Figure 3>의 개념을 실제로 구현한 레이아웃을 나타내고 있다. 원자재 입고와 완성품 출고를 같은 곳에 배치하여 외부 물류의 효율을 높였다. 내부 물류로 5축 가공라인에는 RGV, 후처리 및 검사라인에는 LGV를 각각 설치하였으며, 모듈단위의 유연한 분산·자율제어가 용이하도록 구성하였다. RGV와 LGV는 세 종류의 자동창고형 버퍼와 연결되어 스마트공장 구현의 중심 역할을 한다.

생산계획 시스템은 제품 생산 일정계획에 맞춰 TOC-DBR에 따라 드럼 공정인 5축 가공라인을 중심으로 후진스케줄링과 후처리 공정에 대한 전진스케줄링을 하고, 5축 가공라인에 로프를 걸어 가공이 완료된 만큼 자동창고에 투입되도록 APS(advanced planning system)를 개발하였다. 운영개념과 레이아웃이 통합되어 있으므로 5축 가공장비의 가동률과 3가지 버퍼의 재고수준을 모니터링하면 공장의 성능(performance)을 쉽게 관리할 수 있다.

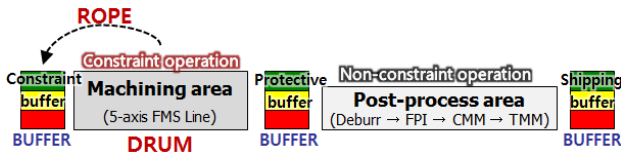


Figure 3. Design Concept of Study Model

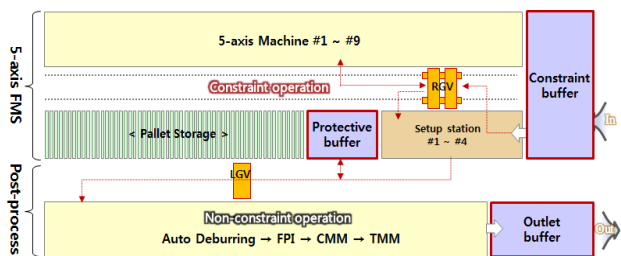


Figure 4. Plant Layout based on TOC-DBR

3.3 레이아웃 시뮬레이션

레이아웃 설계에 대한 검증을 위하여 이산이벤트 시뮬레이션 도구인 Quest를 사용하였다. 시뮬레이션 절차는 입력 데이터(input data) 분석, 라인 모델링, 시뮬레이션, 시뮬레이션 결과의 반영 등 4단계 과정으로 이루어졌다. 먼저, 1단계 입력 데이터 분석 과정에서는 생산 제품사양 분석, 프로세스 흐름 및 로직 분석, 시나리오별 공정 분석, 반송조건 분석, 시나리오별 투입 규칙에 대한 결정 등의 순서로 진행하였다. 2단계 라인

모델링 과정에서는 생산 장비 및 물류 장비의 배치와 모델링, 반송장치의 기구학적 운동정의, 라우팅 로직(routing logic) 프로그래밍, 라인설비의 3D CAD 변환 작업 등의 순서로 진행하였다. 3단계 시뮬레이션 검증과정에서는 실험 시나리오를 바탕으로 시뮬레이션을 진행하였다. 5축 가공라인의 가공장비의 대수와 가공 공수, 셋업 시간 등의 입력 값을 결정하기 위한 선행 시뮬레이션을 통해 공장 운영 기준 모델을 설정하였다. 이후 기준 모델에 대한 시뮬레이션을 통하여 보호버퍼의 적재 수량과 각 공정의 가동률의 변동을 검증하였다.

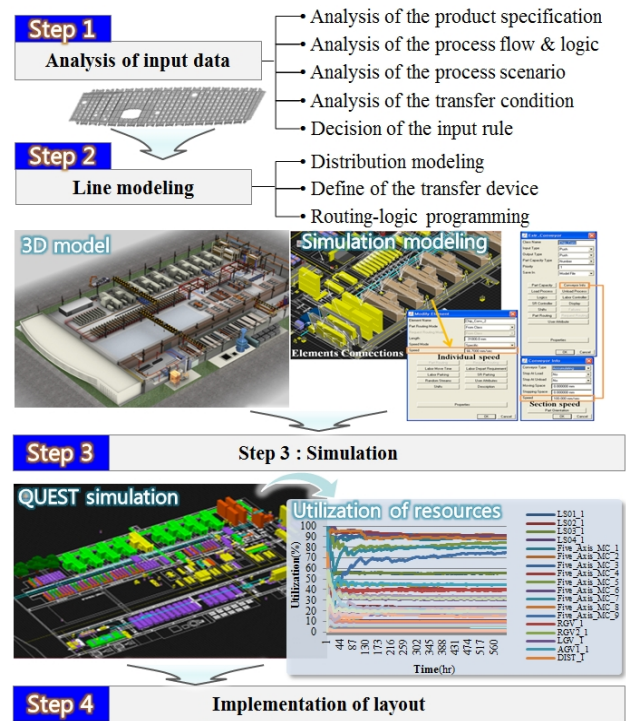


Figure 5. Simulation procedure

시뮬레이션의 의사결정 변수로 생산량, 리드타임, 장비 가동률의 3가지 평가척도를 선정하여 공장의 능력을 검증하였다(Altiok, 1983, Park, 2002). <Figure 5>에서는 공장 레이아웃에 대한 시뮬레이션 과정을 나타내고 있다. 시뮬레이션을 통하여 공정 및 물류에 있어서 몇 가지 문제점을 발견하였고, 개선사항의 영향성 검토와 변경조건에 대한 반복 실험과정을 통해서 레이아웃에 대한 조정이 이루어졌다.

본 논문에서는 생산성에 영향을 미치는 요소를 고려하여 장비 가동시간, 공정 순서, 작업자 근무시간, 제품 투입순서, 버퍼 크기를 입력요소로 갖는 시뮬레이션 실험환경 적용하였다. 시뮬레이션 모델은 항공기 호기별 납기가 있는 주문생산 방식의 특성을 반영하여 DBR 개념에 따라 가공라인의 장비별 공정별 일정을 작성하였다. 먼저 가공일정을 가공장비별로 작성하고, 가공장비 리소스(resource)가 비워지면(empty) 자동투입 되는 로프를 후진스케줄링(backward scheduling)으로 보호버퍼인 원자재창고에 도착시간을 작성하여 투입일정을 확정

하였다. 가공 공정 이후는 공정별 택타임(tact time)인 한 시간 간격으로 완료할 수 있도록 전진스케줄링(forward scheduling) 계획을 작성하였다.

시뮬레이션 진행과정은 환경변수 설정으로 생산품목, 공정, 투입 조건, 팔레트, 물류 흐름, 제품별 공정시간, 조업시간, 물류 시스템과 공정별 버퍼에 대해서 정의하였다. 시뮬레이션 time 분포를 정의하고 제약공정인 5축 기계가공은 3 shift(24시간), 비제약공정은 2 shift(16시간) 운영하도록 하였다. 시뮬레이션 실험은 3회 반복하였고, 시뮬레이션 기간은 총 40일로, warm-up 15일, 정상 가동 25일(1개월, 주 6일)이다. 시뮬레이션 시나리오 계획 및 실험조건(공정 운영)은 시나리오로 기준모델(기본)을 설정하고, 변형모델(환경 변수 조절)을 비교하도록 하여, 교대근무에 따른 버퍼의 크기결정, 각 공정별 부하율, 물류 장치의 작업할당 규칙, 돌발고장, 셋업 시간의 분포(정규분포 5~10분 변동 반영), 물류장치의 2대 운영 vs 1대 운영 시의 재공/재고 변화에 대해서 시뮬레이션을 각각 실시하였다.

시뮬레이션을 통하여 산출된 결과는 다음과 같다. 생산되는 제품의 호기별 평균 리드타임은 4.2일이 소요되었으며, 보호버퍼에 적재되는 가공품의 순간 최대 적재수량은 9개로 나타났다. 이는 하루 16시간 2교대 형태로 운영되는 비제약공정의 근무시간과 24시간 3교대 형태로 운영되는 제약공정의 근무시간과의 차이가 발생하는 구간인 새벽 근무 8시간 동안 제약공정에서 생산되는 가공품이 보호버퍼에 쌓이기 때문이다. 시뮬레이션 결과를 생산 공정 별로 구분하여 살펴보면, 제약공정인 5축가공라인의 경우 24시간 기준 가동률은 94.6%로 매우 바람직함을 확인할 수 있었다. 후처리 및 검사공정의 경우 16시간 기준 가동률은 50~66%로 목표 가동률 80%보다 낮아 제약공정을 보호하기 위한 여유능력이 확보되었음을 알 수 있었다. <Table 2>에서는 공정별 장비 가동률에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

Table 2. Results of Basic Model Simulation

Process	5-axis in FMS	Deburr	FPI	Inspection
Shift	3	2	2	2
Utilization(%)	94.6	66.6	50.1	58.8

<Table 3>에서는 시뮬레이션 결과인 공장 레이아웃 및 각 공정별 운영기준, 버퍼수량, 가동률, 리드타임 등을 나타내고 있다. 가공 및 검사장비의 수량과 근무형태는 공정분석 및 목표설정 단계에 정의한대로 운영이 가능함을 알 수 있다.

세 종류의 버퍼 중 제약버퍼와 출하버퍼는 정책적으로 결정할 문제로 판단되어 시뮬레이션에서 제외하였다. 제약버퍼인 원자재 보관 자동창고는 2일치의 생산량인 32개의 원자재 보관능력을 가지도록 하여 눈으로 보는 관리가 용이하게 구성하였고, 출하버퍼인 출하 컨베이어는 2시간 간격으로 운행되는 물류차량의 운행조건에 맞추어 최대 5개의 완성품을 보관할 수 있도록 결정하였다.

Table 3. Simulation Results for the Layout Design

Process	Shift	Result of evaluation
Automatic materials storage	-	<ul style="list-style-type: none"> Automatic materials storage (conveyor, auto stacker) Inventory operation : 1~2days in buffer
5-axis in FMS	3 Shift	<ul style="list-style-type: none"> 5-axis high speed machine : 9ea Setup 120 min./part
Inspection		<ul style="list-style-type: none"> CMM 2set, TMM 1set 45min./part
Deburr	2 Shift	<ul style="list-style-type: none"> Machine run 40min. Setup table 2place(reduction of setup time), Manual work 20min.
FPI		<ul style="list-style-type: none"> Auto crane 2set operations, buffer 8ea FPI dry tank 30min.
Result of Analysis		<ul style="list-style-type: none"> Lead time : Average 4days (Raw materials storage 1day+In process 3days) 5-axis utilization : 94.6%(1day = 24.0hr) Target : 90%

보호버퍼는 시뮬레이션 결과와 정책적 판단을 고려하여 제약공정인 5축 가공라인의 심야조업시간대에 생산되는 최대수량인 9개와 비제약공정의 문제 발생 시에 대응이 가능하도록 여유버퍼 5개를 포함하여 총 14개의 보관능력을 가지도록 결정하였다. 시뮬레이션 결과 보호버퍼 9개 이상이면 운영 성과에 영향이 없었다. 이는 운영 목표에서 주어진 대로 보호버퍼에 쌓이는 속도보다 후 공정의 처리속도가 빠르기 때문이다.

<Figure 6>에서는 시뮬레이션 결과를 반영하여 제작, 설치된 제약버퍼 및 보호버퍼, 출하버퍼를 나타낸 것이다.

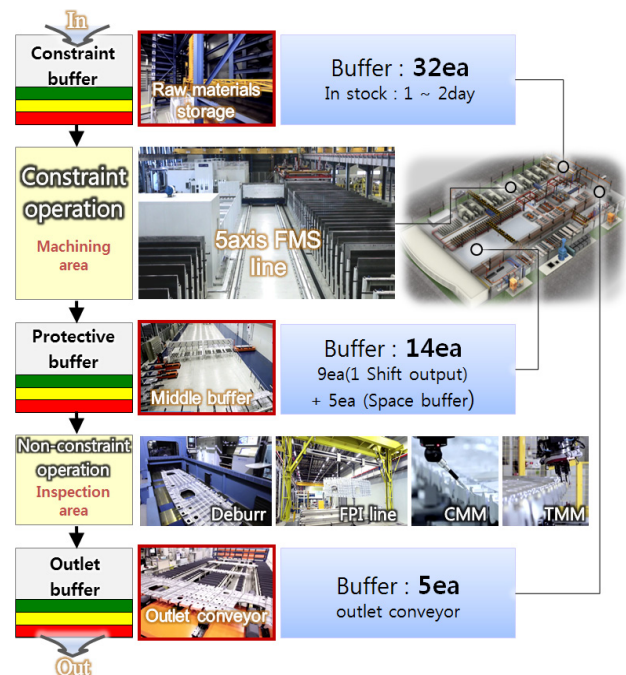


Figure 6. Buffers Resulted from the Simulation

4. 운영 실적 비교를 통한 설계 검증

<Figure 7>에서는 초기 1년간의 양산 운영 실적을 시뮬레이션 결과와 비교하여 나타내고 있다. 생산라인의 가동률은 공정에 따라 최대 8.8%의 차이를 보였다. 제약공정인 5축 유연생산시스템 라인에서 가동률과 생산실적이 가장 많은 차이가 나타났는데, 이는 5축 가공 장비의 고장과 물류장치 운영 로직의 변경 등에 기인한 것으로 판단된다. 앞서 <Table 1>에서 정의된 개념설계 단계의 공장 목표 가동률 90% 대비 양산 운영 실적 가동률은 85.8%로, 4.2%의 차이를 보였으며, 이는 운영 기간 첫째에 발생할 수 있는 생산 환경의 변동 및 개선을 고려할 때 아주 양호한 것으로 판단된다.

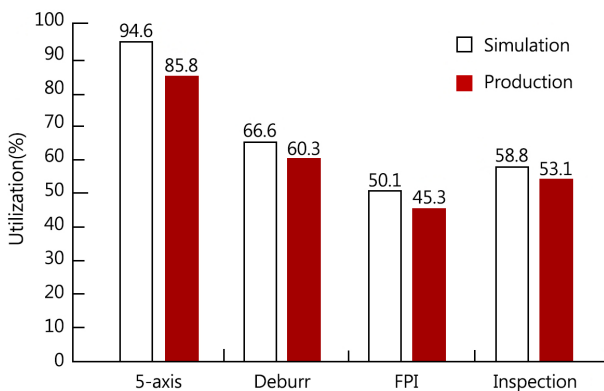


Figure 7. Comparison of the Actual Production and Simulation

5. 결론 및 토의

본 논문에서는 항공기 부품 기계가공을 위한 스마트공장의 구축에 대한 사례를 레이아웃 설계 중심으로 소개하였다.

1. TOC-DBR을 기반으로 공장운영 개념을 수립하고 레이아웃의 개념 설계를 하였는데 TOC-DBR은 아이디어가 간결하고, 구체적인 방법론을 제시하여 주므로 처음 만드는 새로운 형태의 공장의 개념 설계에 매우 효과적인 도구로 쓰였다. 레이아웃 설계에 대한 검증과 조정을 위해서는 이산이벤트 시뮬레이션 도구인 Quest를 사용하였다.
2. 스마트공장의 지향적인 모듈단위의 유연한 분산·자율제어가 용이하도록 레이아웃을 구성하였으며, 제약공정인 5축 가공장비의 가동률과 함께 세 가지 버퍼의 재고수준 모니터링으로 공장의 성능 관리가 가능하도록 되었다.
3. 물류시스템으로는 5축 유연생산시스템 라인에는 RGV, 후처리 및 검사라인에는 LGV 두 개로 구분하여 모듈 단위의 유연한 분산·자율제어가 가능하도록 하였다. RGV와 LGV는 세 종류의 자동창고형 버퍼와 연결되어 스마트공장의 핵심 역할을 한다.
4. 생산라인의 근무형태는 제약공정인 5축 유연생산시스템 라인인 3교대 근무(8시간×3교대)로 운영하고, 비제약공정은 2

교대 근무(8시간×2교대)로 운영함으로써 비제약공정은 문제가 발생하면 3교대로 전환시켜 그 여파가 제약공정으로 전이되지 않도록 운영의 안정성을 높였다.

5. 초기 1년간의 양산 운영 실적 가동률은 85.8%로 설계 단계의 목표 가동률 90% 대비 5% 이내의 차이를 보였으며, 이는 양산 첫째에 발생 가능한 초기 고장, 생산 환경의 변동 및 개선 등을 고려할 때 양호한 것으로 판단된다.

“제조업 혁신 실행대책 3.0”에 따르면 스마트공장을 구현하기 위한 기능모델을 디바이스/네트워크, 플랫폼, 애플리케이션 레이어로 나눌 수 있다(Yim, 2015). 본 연구에서 설계하고 구축한 공장은 디바이스 레이어에는 RFID/센서/머신비전, 플랫폼 레이어에는 분산제어시스템(distributed control system)/감시 제어 데이터 수집 시스템(supervisory control and data acquisition), 사이버물리시스템(FMC/PS/HMI), 애플리케이션 레이어에는 유통/조달(APS), 제조실행(MES), 설비보전(MMS), 품질분석(QCS), 공구관리(TDM) 등이 구축되어 적용하고 있다. 하였다. 일반적으로 스마트공장의 수준은 기초단계, 중간-1, 중간-2, 고도화로 구분할 수 있는데(KEPD, 2014), 본 공장은 현재로서는 최고 수준인 “스마트공장 중간-2 단계”로 평가된다.

부품 가공공장은 기본적으로 제품의 형상을 결정하고 확인하는 가공공정과 검사공정으로 이루어져 있으며, 본 논문에서 제시하는 생산라인은 매우 일반적인 형태라고 볼 수 있다. 그러므로 본 논문에서 제시된 레이아웃 개념과 절차는 잡샵형 공장을 부품 가공 스마트공장으로 구축하고자할 때 유용한 아이디어를 제공할 것으로 기대한다.

참고문헌

Altioik, T. (1983), The Allocation of Interstage Buffer Capacities in Production Lines, *IIE Transactions*, **15**(4), 292-299.

Bae, S. Y. (2006), The Information of Dispatching Rules for Improving Job Shop Performance, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, **29**(4), 107-112.

Baker, K. R. (1974), *Introduction to Sequencing and Scheduling*, John Wiley & Sons Inc., New York, 2-8.

Choi, K. S. (2001), Password TOC for Corporate, HanEon Community.

Chung, N. K. (2002), TOC Constraint management, HanEon Community.

KEPD (2014), KEIT PD The present condition and the outlook of Smart Factory, PD ISSUE REPORT OCTOBER 2014, **14**(10), 53-72.

Koh, H. G. (2001), On the Size of the Constraint Buffer in the TOC (Theory of Constraints).

Koh, H. G. and Yoon, H. Y. (2002), On the Size of the Constraint Buffer in The TOC(Theory of Constraints), *IE interfaces*, **14**(4), 248-265.

Lee, K. S. (2002), The Study for Protective Capacity and Time Buffer of DBR, 2002 Fall Conference Proceeding of the JKIIIE, 248-265.

Nam, S. H., Lee, J. Y., Yun, J. S., Kim, B. H., and Kim, C. H. (2014), Korea Evaluation Institute of Industrial Technology, *The domestic and overseas status and prospect of the smart factory*, **14**(10), 54-72.

NIA (2014), Industry 4.0 & Creative Economy Strategies of Manufacture

- Industry, IT & Future Strategy Report.
- Park, Y. H. (2002), Multi-Factor Analysis of Firm-Level Performance Through Feed-Forward, Feed-Back Relationships, *The Korea Society For Simulation*, **11**(1), 59-70.
- Park, J. W. (2016), Policy and business case of government about Smart factory, *Industrial Engineering Magazine*, **23**(1), 13-17.
- Yim, J. I. and Kim, Y. W. (2015), Functional Model for Smart Factory, 2015 Summer Conference Proceeding of the KICS, 208-209.