

병목공정 자원할당 방식에 따른 강교 제작공장 생산성 차이 분석

이재일¹ · 정은지² · 정근채^{3*}

¹충북대학교 토목공학과 석사과정 · ²한미글로벌 글로벌사업부 사원 · ³충북대학교 토목공학부 교수

Analysis of Productivity Differences in Steel Bridge Manufacturing Plants According to Resource Allocation Methods for the Bottleneck

Lee, Jaeil¹, Jeong, Eunji², Jeong, Keunchae^{3*}

¹Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

²Staff, Department of Global Business, Hanmiglobal

³Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

Abstract : In this study, we proposed resource allocation methodologies to improve the productivity of steel bridge manufacturing plants based on the constraint theory which is very popular in the area of manufacturing industries. To this end, after defining the painting process as a bottleneck, three resource allocation methodologies were developed: Operation Specific Resource Allocation (OSRA), Product Specific Resource Allocation (PSRA), and General Resource Allocation (GRA). As a result of experiments for performance evaluation using a simulation model of the steel bridge supply chain, GRA showed the best performance in terms of the Number of Work-In-Process (NWIP) and Waiting Time (WT), in particular, as workload itself and its variability were increased, the performance gap with the specific resource allocation became further deepened. On average, GRA reduced NWIP by 36.2% and WT by 34.6% compared to OSRA, and reduced NWIP by 71.0% and WT by 70.4% compared to PSRA. The reduction of NWIP and WT means alleviating the bottleneck of the painting process, which eventually means that the productivity of the steel bridge manufacturing plant has improved.

Keywords : Modular, Steel Bridge, Productivity, Bottleneck, Resource Allocation, Simulation

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

21세기 건설산업은 기존 노동 인력의 고령화와 신규 진입 인력의 감소로 인해 제한된 인원으로 높은 생산성을 달성해야 하는 시대적 과제에 직면해 있다. 지난 20년간, 전체 산업 생산성은 연평균 2.8% 향상되었으나, 건설산업은 현장 중심의 생산방식이 오랜 기간 유지된 탓에 연평균 1%대의 향상률을 기록하며 상대적으로 더딘 향상세를 보이고 있다(Jung, 2018). 이에 건설산업에서는 뒤쳐진 생산성 수준을 향상시키고자 현장 중심의 건설체계를 생산성 저하의 핵심 원인으로 지목하고 이에 대한 대안으로서 고품질 대량생

산이 가능한 공장 제작 기반의 건설체계, 즉, 모듈러 공법에 주목하였다(Lee et al., 2019a). 모듈러 공법은 공장에서 제작한 모듈러 유닛(Modular Unit)을 현장으로 공급하여 조립함으로써 단기간에 저렴한 비용으로 안전하게 고품질의 구조물을 설치하는 것을 가능하게 하였으며, 이는 결국 품질 보장, 공사비 절감, 공기 단축 등 생산성 측면에서의 혁신을 가져왔다(Kim et al., 2014). 다른 한편으로, 모듈러 공법은 부분적으로 자재 재활용을 가능하게 함으로써 건설 폐기물을 감소시키는 친환경 기술로 평가받고 있다. 이와 같이 모듈러 공법은 생산성 및 환경성 측면에서 가치를 인정받아 건설시장에서의 입지를 넓혀가고 있다.

교량 건설 분야에서 강교는 모듈러 공법을 적용한 대표적인 사례로서, 현장에서의 시공 기간이 짧으며, 콘크리트교 대비 미관이 우수하며, 생애주기비용 측면에서 사용수명이 길고 재활용이 가능하다는 점은 강교만이 가질 수 있는 장점이다(Lee, 2013). 강교는 이와 같은 다양한 장점을 바탕으로 국내 교량 건설시장에서 1980년대 이후부터 주목받기 시

* **Corresponding author:** Jeong, Keun Chae, School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

E-mail: kcjeong@cbnu.ac.kr

Received October 21, 2022; **revised** February 6, 2023

accepted February 20, 2023

작하여 장경간 교량 건설 분야에 주로 적용되어왔다. 그러나 이러한 강교의 다양한 장점에도 불구하고 비용 측면에서의 경쟁력 저하로 인해 2011년 이후 수주물량이 지속적으로 감소하고 있다(Lee, 2013). 강교의 가격 경쟁력이 떨어진 이유는 근본적으로 철강 소재 가격의 상승에 있지만 다른 한편으로는 강교 제작공장의 낮은 생산성에서 그 원인을 찾아볼 수 있다. 따라서, 강교 경쟁력 향상을 위해서는 모듈러 공법을 통해 얻을 수 있는 생산성 측면의 장점을 실현하기 위한 보다 향상된 생산관리 방법을 적용할 필요가 있다.

강교 건설 과정은 제작공장에서의 모듈 생산을 중심으로 이루어지며, 이는 공장에서 제품을 생산하여 유통하는 제조업과 매우 유사한 특성을 갖는다. 제조업 분야에서 생산성 향상을 위해 적용되는 가장 보편적 방법론 중 하나가 바로 제약이론(Theory of Constraints; TOC)이다. 이는 전체 시스템 중 제약이 되는 부분, 즉, 병목공정이 전체 시스템의 생산성을 결정하는 핵심 공정이기 때문에 이를 효과적으로 통제해야만 생산성 향상이 가능하다는 이론이다(Lee et al., 2006). 강교 제작공장 역시 생산성 향상의 핵심은 병목공정의 효과적 관리에 있음에도 불구하고, 체계화된 관리방식이 적용되지 못한 채 현장관리자의 경험과 직관에 의존하여 운영되고 있는 형편이며(Kim et al., 2015), 이는 결국 생산성 저하와 가격 경쟁력 하락으로 이어지고 있다.

제조업 분야에서 병목공정을 개선하여 공장의 생산성을 향상시키고자 한 연구는 다음과 같다. Chae and Park (2008)은 반도체 생산공장의 병목공정인 패키지 공정에 대해 장비의 추가투입 및 일정 조정으로 병목공정을 통제하여 생산성을 향상시키는 연구를 수행하였다. Park and Jeong (2016)은 소품종 대량 생산 체제를 갖는 제조공장의 병목공정 통제를 위해 자원 변경 시점 결정, 자재 가공순서 결정, 배치 크기 결정 등 세 가지 관점에서 접근한 휴리스틱 방법을 제안하여 생산을 향상할 수 있게 하였다. Mun et al. (2016)은 다이싱 블레이드 제조공장의 병목공정을 분석한 후, 이를 통제하기 위한 다섯 가지 대안을 제안하고 각각의 생산성을 비교하여 가장 우수한 대안을 탐색하였다. Lee et al. (2019b)는 자동차 조립 라인의 차량 투입 순서를 조정하여 병목공정의 발생을 최소화하는 알고리즘을 개발 및 적용하여 생산성을 향상시키는 연구를 수행하였다.

이들 선행연구에 대한 고찰을 통해, 비록 서로 다른 제조 환경일지라도 적절한 과학적 관리기법을 적용하여 병목공정을 효과적으로 통제한다면 생산성을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 따라서, 강교 제작공장 역시 제조업에서의 생산성 향상 사례들과 유사하게 병목공정을 효과적으로 관리한다면 생산성과 가격 경쟁력을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 이에 본 연구에서는 제약이론을 적용하여

강교 제작공장의 병목공정을 효과적으로 통제하여 생산성을 향상시킬 수 있는 방법을 모색한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

대부분의 병목공정은 자원의 한계로 인해 발생하는데, 이때, 자원의 한계란, 자원의 절대적인 용량 부족 및 긴 작업시간 등으로 인해 자원이 작업물을 모두 처리할 능력이 부족하다는 것을 의미한다. 이에 본 연구에서는 강교 제작공장의 병목공정으로 위의 특성을 갖는 도장 공정을 선정하였다. 병목공정은 자원의 추가투입을 통해 쉽게 해소시킬 수 있으나, 이는 강교 제작공장의 공간적, 비용적 제약으로 인해 실행이 어려운 비현실적 대안이라는 한계점을 갖는다. 이에 본 연구에서는 기존의 자원 제약은 그대로 유지한 상태로, 즉, 자원의 추가투입이 없는 조건하에, 자원의 할당 방식만을 변경함으로써 병목공정을 해소하는 대안들을 분석한다.

〈Fig. 1〉은 본 연구의 과정을 3단계로 구분하여 보여주고 있다. 첫째, 강교 제작공장의 생산과정을 분석한 후, 생산성에 대한 개선 가능성이 가장 높은 공정을 선정하여 병목공정으로 정의한다. 둘째, 병목공정의 자원을 효율적으로 배치하기 위한 세 가지 방법론, 즉, 공정전용, 제품전용, 범용 자원할당 방식을 제안한다. 셋째, 제안된 방법론 간 생산성 차이 분석을 위해, 실험 대상 강교 제작공장 시스템을 정의한 후 성능평가를 위한 시뮬레이션 모형을 구축한다. 시뮬레이션 모형을 바탕으로 실험을 수행하여 성능평가척도를 도출하고 통계적 분석을 통해 생산성 차이의 원인을 밝힌다.

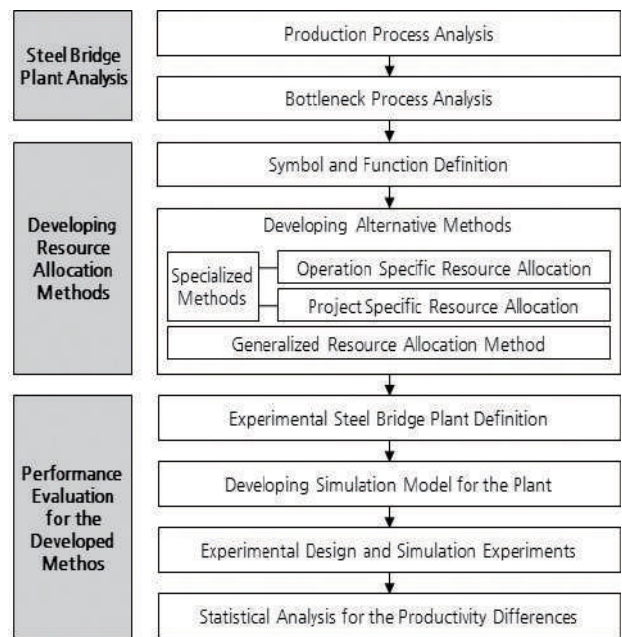


Fig. 1. Research procedure

2. 강교 제작공장 분석

2.1 생산공정 분석

강교 제작공장의 생산공정 분석을 위해 문헌조사, 현장조사, 작업자 및 관리자 인터뷰를 진행하였다. 분석 결과, 일반적인 강교 제작공장에서는 강박스를 생산하기 위해 <Table 1>에 나열되어 있는 바와 같이 '(1) 원자재 공급', '(2) 전처리', '(3) 패널 제작', '(4) 패널 조립', '(5) 강박스 용접', '(6) 강교 가조립', '(7) 강박스 도장', '(8) 강박스 야적' 등 총 8개의 공정을 순차적으로 진행하고 있었다. 또한, 이들 공정의 수행을 위해서는 <Table 1>의 세 번째 열에 정리되어 있는 바와 같이 다양한 종류의 인력과 수송 및 가공 장비가 요구된다. 각 공정은 작업환경, 작업일정 및 자재특성에 따라 강박스마다 차이는 있지만, 평균적으로 <Table 1>의 네 번째 열에 나열된 작업시간 만큼 소요되었다.

Table 1. Production processes in a steel bridge plant

Sequence	Process	Resources	Average Processing Time
(1)	Supplying Materials	• Office Worker	7 Days/Order
(2)	Preparation	• Preparation Machine • Gantry Crane	0.167 Days/Box
(3)	Making Panels	• Cutting Machine • Drilling Machine • Welding Machine • Overhead Crane	1.5 Days/Box
(4)	Assembling Panels	• Manufacturing Worker • Gantry Crane	4 Days/Box
(5)	Welding Steel Boxes	• Welding Machine • Gantry Crane	2 Days/Box
(6)	Assembling Steel Bridge	• Manufacturing Worker • Mobile Crane • Forklift	0.625 Days/Box
(7)	Painting Steel Boxes	• Blasting Machine • Space for Blasting • Painting Spray • Space for Painting	7.75 Days/Box
(8)	Storing Steel Boxes	Forklift	0.014 Days/Box

(1) 원자재 공급은 설계도면을 바탕으로 강교 모듈러 유닛(이하, 강박스) 제작을 위해 필요한 원자재인 강판의 수량을 산출하는 공정이다. 공정에서 산출된 강판의 수량은 이후 원자재 공급업체에 전달되며, 이는 강교 제작공장 내의 사무원이 공정을 진행한다.

(2) 전처리는 본격적인 가공에 앞서 후속 공정의 원활한 진행을 위해 공급된 강판의 표면을 깔끔하게 정리하는 공정이다. 이 공정은 크레인을 이용하여 강판을 컨베이어 벨트로 옮긴 후 전처리 기계를 통과시키는 방식으로 진행된다.

(3) 패널 제작은 전처리된 강판을 강박스의 구성요소인 상판, 하판, 측판, 내부재 등 패널로 가공하는 공정이다. 이 공

정에서는 절단기, 천공기, 용접기 등의 장비를 이용하여 강판을 가공하며, 장비 간 이동을 위해 천정크레인을 이용한다. 한편, 강박스를 연결하는 가로보와 세로보 또한 이 공정에서 제작되는데, 일반적으로 절단과 천공 작업만을 진행한다.

(4) 패널 조립은 패널을 강박스 형태로 조립하는 공정이다. 이 공정은 작업자와 크레인에 의해 수행되며, 하판 위에 내부재와 측판을 조립한 후 상판을 덮는 형태로 진행된다.

(5) 강박스 용접은 조립이 끝나 강박스의 형태를 갖춘 작업물을 용접을 통해 단단히 고정하는 공정이다. 이때, 강박스를 손쉽게 이동 및 회전시키기 위해 특화된 크레인을 이용하며, 작업자가 용접기를 이용하여 직접 강박스를 용접한다.

(6) 강교 가조립은 용접이 끝난 강박스를 제작공장 내에서 현장 가설과 동일한 형태로 사전에 조립해 보는 공정이다. 이는 강박스 제작 상에 존재할 수 있는 오류를 사전에 발견하여 수정하기 위함이다. 강박스 운송 및 이동을 위해 크레인과 지게차를 이용하며, 강박스 간의 체결 및 오류 점검 작업은 작업자가 직접 수행한다.

(7) 강박스 도장은 선형 공정을 진행하는 동안 발생한 녹을 제거한 후 표면을 깨끗이 정리하는 블라스팅 작업을 진행한 후, 강교의 부식을 방지하기 위해 강박스 표면에 페인트를 칠한 후 건조하는 공정이다. 이 공정에서는 작업자가 블라스팅 기계를 통해 강박스의 표면을 처리한 후, 이동대차를 이용하여 도장공간으로 옮기고, 도장 스프레이로 페인팅 작업을 실시한 후, 일정시간 도장공간에 거치하여 페인트를 건조시킨다.

(8) 강박스 야적은 도장 작업을 마친 강박스를 제작공장 내의 야적장에 보관하는 공정이다. 이는 제작이 완료된 강박스를 현장에서 필요로 할 때까지 보관하는 과정으로, 도장 공정을 마친 강박스는 지게차를 통해 야적장으로 옮겨진다.

<Table 1>에 나타나 있는 바와 같이, 8개의 공정 중 가장 긴 작업시간을 필요로 하는 것은 (7) 강박스 도장이다. 이는 도장 공정이 강박스를 전처리하고 페인팅 작업을 마침과 동시에 종료되는 것이 아니라, 페인팅 이후 장시간의 건조 작업을 완료한 후에 종료되기 때문이다. 또한, 이러한 페인팅과 건조 작업은 1회만 수행되는 것이 아니라, 하도, 중도, 상도 등 세 차례에 걸쳐 반복적으로 수행되기 때문에 작업시간이 몇 배로 길어질 수 있다. 따라서, 강교 제작공장의 생산성을 높이기 위해서는 가장 긴 작업시간을 필요로 하는 도장 공정의 생산능력을 높이는 것이 필요하다. 도장 공정의 생산능력을 높이기 위해서는 기본적으로 더 많은 자원을 확보해야 하지만, 이는 원가절감 차원의 비용적 문제와 제작공장 내의 공간적 한계로 인해 쉽지 않은 상황이다. 이에 본

연구에서는 도장 공정을 병목공정으로 지정하고 최적의 자원할당 방식을 적용함으로써 새로운 자원 확보 없이 자원의 가동률을 높이는 방식으로 생산능력을 향상시키고자 한다.

2.2 병목공정 분석

병목공정으로 지목된 강박스 도장 공정에 대한 효율적이고 효과적인 자원할당 방식을 개발하기 위해서는 이 공정에 대한 보다 상세한 분석이 선행되어야 한다. 도장 공정은 크게 전처리, 도장, 건조 등 세 가지 세부 공정으로 구성된다. <Fig. 2>에 나타나 있는 도장공장 배치도와 같이, 전처리 작업은 블라스팅 작업장에서 진행되며 도장과 건조 작업은 별도의 페인팅 작업장에서 진행된다. 작업과 이송 단위는 모두 조립이 완료된 강박스이며, 작업을 위해 필요한 자원은 블라스팅 작업공간, 블라스팅 장비, 도장 및 건조 작업공간, 그리고 도장 스프레이 등이다.

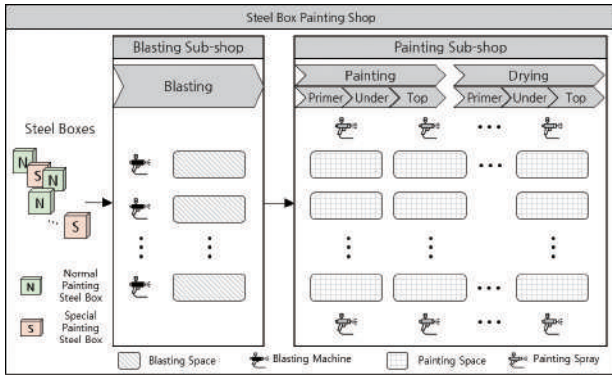


Fig. 2. Layout for the steel box painting shop

블라스팅 작업장에는 강박스 제작과정에서 발생한 녹을 제거하고 페인트가 표면에 잘 부착될 수 있도록 처리하는 작업(전처리 작업)을 진행한다. 전처리 작업은 강박스를 블라스팅 작업공간에 이송하여 배치한 후 블라스팅 장비를 이용하여 수행한다. 이때, 블라스팅 장비는 한 번에 한 개의 강박스만을 처리할 수 있으며, 각각의 블라스팅 장비는 별도의 블라스팅 작업공간을 필요로 하기 때문에, 블라스팅 작업장은 블라스팅 장비 수만큼의 블라스팅 작업공간으로 구분되어 있다.

페인팅 작업장에서는 페인트를 칠하는 작업(도장 작업)과 칠한 페인트를 말리는 작업(건조 작업)을 진행한다. 도장 작업은 페인팅 효과를 극대화하기 위해 하도, 중도, 상도로 구성된 3단계의 세부 도장 공정으로 구분하여 진행되며, 각각의 세부 도장 공정이 끝난 후에는 바로 이어서 건조 작업이 진행된다. 이때, 각각의 세부 도장 공정 작업내용이 서로 다르기 때문에 도장 및 건조 작업은 2단계의 단순 공정이 아닌 6단계의 복수 공정(하도 도장, 하도 건조, 중도 도장, 중

도 건조, 상도 도장, 상도 건조)으로 이해되어야 한다. 도장 작업은 강박스를 도장 및 건조 작업공간에 이송하여 배치한 후 도장 스프레이를 이용하여 수행한다. 반면, 건조 작업 중에는 도장 스프레이가 필요하지 않기 때문에 블라스팅 장과 달리 도장 및 건조 작업공간 수보다 적은 수의 도장 스프레이가 배치된다.

각 세부 도장 공정에서 사용하는 페인트는 강교가 가설되는 주변의 환경(가설 환경)에 따라 일반 도료와 특수 도료로 구분된다. 내륙지역에 가설되어 부식으로 인한 성능저하의 위험성이 비교적 적은 환경에서는 보편적인 일반 도료를 이용하며, 해안지역에 가설되어 해수로 인한 부식의 위험성이 큰 환경에서는 특수 도료를 이용한다. 이제 수주된 강교의 가설 환경에 따라, 두 종류의 도료가 구분되어 사용되기 때문에, 앞서 언급한 6단계의 공정은 일반과 특수 도료를 구분한 12개의 복수 공정(일반 하도 도장, 일반 하도 건조, 일반 중도 도장, 일반 중도 건조, 일반 상도 도장, 일반 상도 건조, 특수 하도 도장, 특수 하도 건조, 특수 중도 도장, 특수 중도 건조, 특수 상도 도장, 특수 상도 건조)으로 정의되어 관리되어야 한다.

앞서 분석한 블라스팅 작업장의 전처리 작업은 단일공정으로 진행되며, 작업 중에 사용하는 자원(블라스팅 작업공간, 블라스팅 장비)의 변화가 없어 운영관리가 단순하며, 작업시간(평균 1.5시간/박스)은 전체 강박스 도장 작업시간 중 0.8% 정도에 지나지 않을 정도로 짧다. 따라서 전처리 작업이 강박스 도장 공정의 병목현상에 미치는 영향은 도장 및 건조 작업에 비해 매우 작을 것으로 판단된다. 반면, 도장 및 건조작업은 다수의 세부 공정으로 구분되며, 각각의 세부 공정에 투입되는 자원(도장 및 건조 작업공간, 도장 스프레이)에 변화가 있으며, 작업시간(평균 184.5시간/박스)도 강박스 도장 작업시간 중 약 99.2%를 차지하고 있어 자원할당 방식의 차이에 따라 생산성의 변화가 크게 나타날 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 강교 제작공장 중 강박스 도장 공정, 그중에서도 도장과 건조 작업이 진행되는 페인팅 작업장을 대상으로 도장 및 건조 작업공간과 도장 스프레이의 할당 방식을 개선함으로써 강교 제작공장의 생산성을 향상시킬 수 있는 방안을 연구한다.

3. 도장 공정 자원할당 방법론 개발

3.1 TOC 기반 자원할당 방법론

TOC는 시스템의 효율성을 저해하는 제약조건을 탐색하여 이를 지속적으로 개선해야만 시스템의 효율 향상이 가능하다는 이론이다. 이는 Goldratt가 개발한 생산일정계획 소프트웨어인 OPT (Optimized Production Technology)에서

출발한 경영과학 이론으로 이후 생산관리 분야 외에도 물류 관리, 재고관리, 그리고 일반적 문제해결 방법론으로 널리 활용되어 왔다(Goldratt, 1984). 제약이론에서 언급한 시스템의 효율성을 저해하는 제약조건은 앞서 언급한 병목공정과 대응하는 개념으로 이는 병목공정을 지속적으로 개선해야만 시스템의 효율 향상이 가능하다는 것을 의미한다.

병목공정의 개선은 추가 자원의 투입이나 기존 자원의 효율적인 운용을 통해 실현할 수 있는데, 일반적으로 이미 운영 중인 대부분의 강고 제작공장은 공간적 제약으로 인해 추가 자원의 투입은 사실상 어려운 형편이다. 이에 본 연구에서는 추가 자원 투입 없이, 기존 자원의 효율적인 운용을 통해 병목공정을 개선하기 위한 방법론을 개발한다. 첫 번째, 공정 전용 자원할당은 동일한 공정을 전용으로 처리할 수 있도록 자원을 할당함으로써 병목공정의 생산 흐름을 개선하기 위한 방법론이다. 두 번째, 제품 전용 자원할당은 동일한 제품을 전용으로 처리할 수 있도록 자원을 할당함으로써 병목공정의 생산 흐름 개선을 도모한다. 세 번째, 범용 자원할당은 앞서 공정이나 제품에 따라 전용으로 처리하는 방식이 아닌 모든 공정과 제품을 구분하지 않고 범용으로 처리할 수 있도록 자원을 할당한다.

3.2 기호 및 함수 정의

페인팅 작업장에 대해, 본 연구에서 개발한 세 가지 자원 할당 방식은 서로 다른 절차로 도장 및 건조 작업공간과 도장 스프레이를 12개의 세부 공정에 할당한다. 이를 명확하게 서술하기 위해 다음과 같은 첨자, 기호와 함수를 정의한다.

<첨자 정의>

- i : 사용 도료, $i = 1, 2$ (1: 일반 도료, 2: 특수 도료)
- j : 도장 단계, $j = 1, 2, 3$ (1: 하도, 2: 중도, 3: 상도)
- k : 수행 공정, $k = 1, 2$ (1: 도장, 2: 건조)

<기호 정의>

- t_{ijk} : 사용 도료 i , 도장 단계 j , 수행 공정 k 의 작업시간
- α_i : 사용 도료 i 제품의 비중, $\sum_{i=1}^2 \alpha_i = 1$
- M : 배치 가능한 총 도장 및 건조 작업공간의 수
- N : 배치 가능한 총 도장 스프레이의 수

<함수 정의>

- $r(x)$: x 에 가장 가까운 정수, 반내림 및 반올림 함수
- $|x|$: x 의 절댓값
- $IndexMax_l(x_i)$: x_i 이 최댓값을 갖는 첨자 l

3.3 공정 전용 자원할당

공정 전용 자원할당(Operation Specific Resource Allocation; OSRA) 방식은 도장 단계별 세부 공정을 전용으로 처리할 수 있도록 자원을 할당한다. OSRA 방식에서는 (Fig.

3)에 나타나 있는 바와 같이, 페인팅 작업장을 하도, 중도, 상도의 세 구역으로 구분한다. 각 구역에서는 각각 하도, 중도, 상도 단계의 도장과 건조 작업을 전담하여 진행한다. 이 방식에서는 하도 단계를 마치면 중도 단계 작업을 위한 구역으로, 중도 단계를 마치면 상도 단계 작업을 위한 구역으로 이동하여 작업을 수행한다. 이때, 각 구역에 배치된 도장 스프레이는 각각 하도 단계의 일반 및 특수 도료(하도 구역), 중도 단계의 일반 및 특수 도료(중도 구역), 상도 단계의 일반 및 특수 도료(상도구역)가 장착되어 해당 도장 작업을 수행한다. 즉, 각 구역의 도장 스프레이들은 각각 일반과 특수 도료를 사용하는 2가지 공정을 분담하여 처리한다.

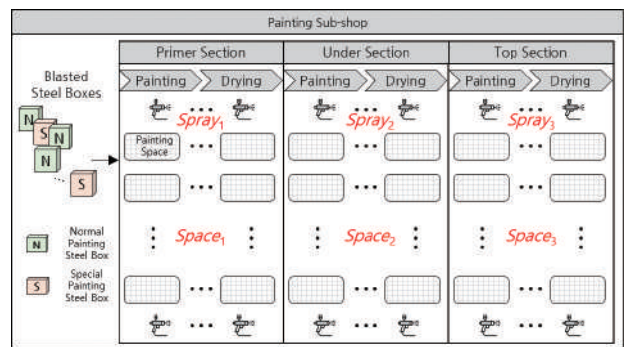


Fig. 3. Resource layout in the OSRA method

OSRA 방식에서 도장 및 건조 작업공간과 도장 스프레이 자원은 작업 부하에 비례하여 각 구역에 할당된다. 즉, 작업 부하가 큰 공정을 위해서는 더 많은 자원이 할당되며, 작업 부하가 작은 공정에 대해서는 더 작은 자원이 할당된다. 이때, 작업 부하는 해당 세부 공정을 수행하는데 소요되는 작업시간에 의해 결정된다. 작업 부하를 바탕으로 작업공간과 도장 스프레이 자원을 할당하는 방법은 다음과 같다.

<도장 및 건조 작업공간 할당>

Step 1. 도장 단계별 도장 및 건조 작업의 부하 비중 s_j 를 계산

$$s_j = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 t_{ijk}}{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^2 t_{ijk}} \rightarrow \sum_{j=1}^3 s_j = 1$$

Step 2. 부하 비중에 비례하여 구역별 작업공간의 초기 개수 $Space_j$ 를 결정

$$Space_j = r(M \times s_j) \rightarrow \sum_{j=1}^3 Space_j = M \text{ or } M \pm 1$$

Step 3. 초기 개수(정수)와 실제 필요 공간(실수)의 차이가 가장 큰 도장 단계 j^* 를 검색

$$j^* = IndexMax_j[|Space_j - M \times s_j|]$$

Step 4. 작업공간의 초기 개수를 조정하여 최종 할당 개수를 결정

Case 1: $\sum_{j=1}^3 Space_j = M \rightarrow$ 조정 없음

Case 2: $\sum_{j=1}^3 Space_j = M + 1 \rightarrow Space_{j^*} = Space_{j^*} - 1$

Case 3: $\sum_{j=1}^3 Space_j = M - 1 \rightarrow Space_{j^*} = Space_{j^*} + 1$

〈도장 스프레이 할당〉

Step 1. 도장 단계별 도장 작업의 부하 비중 s_j 를 계산

$$s_j = \sum_{i=1}^2 t_{ijl} / \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 t_{ijl} \rightarrow \sum_{j=1}^3 s_j = 1$$

Step 2. 부하 비중에 비례하여 구역별 스프레이의 초기 개수 $Spray_j$ 를 결정

$$Spray_j = r(N \times s_j) \rightarrow \sum_{j=1}^3 Spray_j = N \text{ or } N \pm 1$$

Step 3. 초기 개수(정수)와 실제 필요 공간(실수)의 차이가 가장 큰 도장 단계 j^* 를 검색

$$j^* = \text{IndexMax}_j [|Spray_j - N \times s_j|]$$

Step 4. 작업공간의 초기 개수를 조정하여 최종 할당 개수를 결정

Case 1: $\sum_{j=1}^3 Spray_j = N \rightarrow$ 조정 없음

Case 2: $\sum_{j=1}^3 Spray_j = N + 1 \rightarrow Spray_{j^*} = Spray_{j^*} - 1$

Case 3: $\sum_{j=1}^3 Spray_j = N - 1 \rightarrow Spray_{j^*} = Spray_{j^*} + 1$

OSRA 방식에서는 블라스팅 작업장에서 강박스에 대한 전처리 작업을 마치면, 하도 구역에 가용한 작업공간이 있는 경우, 해당 작업공간으로 이동하여 도장 및 건조 작업을 진행한다. 만약, 가용한 작업공간이 없는 경우, 페인팅 작업장 앞의 대기공간에서 가용한 작업공간이 생길 때까지 기다린다. 하도 단계의 도장 및 건조 작업을 마치면, 중도 구역에 가용한 공간이 있는 경우 중도 구역으로 이동하여 작업을 진행하고, 중도 구역에 가용한 공간이 없는 경우 하도 구역 작업공간을 점유한 채 그대로 머무르면서 중도 구역에 가용한 공간이 생기기를 기다린다. 중도 단계의 운영방식은 하도 단계의 운영방식과 동일하며, 상도 단계의 작업이 종료되면 도장 공정이 끝나게 되어 강박스 야적장으로 이동한다.

이와 같이, 작업공간과 도장 스프레이가 도장 단계별로 세분화되기 때문에, 작업자는 도료 종류만을 구분하여 작업하면 된다. 따라서, 공정의 관리가 비교적 수월하다는 장점이 있다. 반면, 페인팅 작업장을 도장 단계에 따라 세 구역으로 구분하기 때문에, 도장 및 건조 작업을 완료하기 위해서는 하도, 중도, 상도 구역의 서로 다른 세 작업공간과 스프레이 자원의 점유가 필요하다. 이 과정에서 각 단계별 도장 및 건조 작업시간의 변동성으로 인해, 세 구역으로 나누어 할당된 작업공간과 스프레이에 대한 작업 부하에 불균형이 발생한다면 공정의 진행이 원활하지 않을 수 있다는 단점을 갖는다.

3.4 제품 전용 자원할당

제품 전용 자원할당(Product Specific Resource Allocation; PSRA) 방식은 가설 환경의 차이에 따른 페인트 종류별 세부 공정을 전용으로 처리할 수 있도록 자원을 할당한다. PSRA 방식에서는 (Fig. 4)에 나타나 있는 바와 같이, 페인팅 작업장을 일반 및 특수 구역으로 양분하여 운영한다.

두 구역에서는 각각 일반 및 특수 도료를 이용하여 하도, 중도, 상도 단계의 도장과 건조 작업을 모두 진행한다. 이는 하나의 동일한 작업공간에서 하도, 중도, 상도 단계의 도장과 건조 작업을 수행하기 때문에 작업공간 간의 이동은 필요 없다. 이때, 각 구역의 도장 스프레이는 각각 하도, 중도, 상도 단계의 일반 도료(일반 도장 구역), 하도, 중도, 상도 단계의 특수 도료(특수 도장 구역)가 장착되어 해당 도장 작업을 수행한다. 즉, 두 구역에 할당된 도장 스프레이들은 각각 하도, 중도, 상도의 3가지 도장 공정을 분담하여 처리한다.

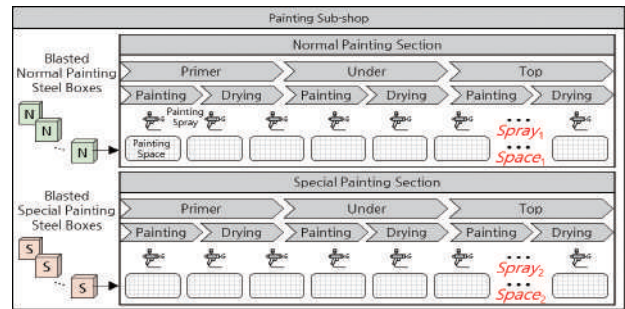


Fig. 4. Resource layout in the PSRA method

PSRA 방식에서도 OSRA 방식과 마찬가지로 도장 및 건조 작업공간과 도장 스프레이 자원은 작업시간을 바탕으로 한 작업 부하에 비례하여 양 구역에 할당된다. 두 구역의 자원의 수는 다음과 같은 단계를 거쳐 결정된다.

〈도장 및 건조 작업공간 할당〉

Step 1. 도장 단계별 도장 및 건조 작업의 부하 비중 s_i 를 계산

$$s_i = \alpha_i \sum_{j=1k=1}^3 \sum_{l=1}^2 t_{ijk} / \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1k=1}^3 \sum_{l=1}^2 t_{ijk} \rightarrow \sum_{i=1}^2 s_i \neq 1$$

Step 2. 부하 비중에 비례하여 구역별 작업공간의 개수 $Space_i$ 를 결정

$$Space_i = r(M \times \frac{s_i}{\sum_{i=1}^2 s_i}) \rightarrow \sum_{i=1}^2 Space_i = M$$

〈도장 스프레이 할당〉

Step 1. 도장 단계별 도장 작업의 부하 비중 s_i 를 계산

$$s_i = \alpha_i \sum_{j=1}^3 t_{ijl} / \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 t_{ijl} \rightarrow \sum_{i=1}^2 s_i \neq 1$$

Step 2. 부하 비중에 비례하여 구역별 스프레이의 개수 $Spray_i$ 를 결정

$$Spray_i = r(N \times \frac{s_i}{\sum_{i=1}^2 s_i}) \rightarrow \sum_{i=1}^2 Spray_i = N$$

PSRA 방식에서는 블라스팅 작업장에서 강박스에 대한 전처리 작업을 마치면, 가설 환경에 따른 페인트 종류에 따라 일반 도장 구역과 특수 도장 구역으로 분기된다. 즉, 각 구역에 가용한 작업공간이 있는 경우 해당 작업공간으로 이동하여 도장 및 건조 작업을 진행하며, 가용한 작업공간이 없는

경우 각 구역 앞에 별도로 설치된 대기공간으로 이동하여 각 구역의 작업공간이 가용해질 때까지 대기한다. 일단 페인팅 작업장의 일반 및 특수 도장 구역으로 이동하면, 이후에는 이동 없이 하나의 동일 작업공간에서 하도, 중도, 상도 단계의 모든 도장 및 건조 작업을 진행한다. 모든 작업을 마치면 강박스 야적장으로 이동한다.

이 방식에서는 도장 및 건조 작업공간과 도장 스프레이가 페인트 종류별로 세분화되어 운영된다. 따라서, 작업자는 오로지 하도, 중도, 상도 공정만을 구분하여 작업하면 되기 때문에, OSRA와 마찬가지로 공정의 관리가 비교적 수월하다는 장점이 있다. 반면, PSRA는 페인팅 작업장을 페인트 종류에 따라 두 구역으로 양분하여 운영하기 때문에, 가설 환경별 프로젝트 수주량의 변동성으로 인해 할당된 작업공간과 스프레이에 대한 작업 부하에 불균형이 발생하는 경우 공정의 진행이 원활하지 않을 수 있다는 단점을 갖는다.

3.5 범용 자원할당

범용 자원할당(Generalized Resource Allocation; GRA) 방식은 <Fig. 5>와 같이 도장 단계별 또는 페인트 종류별 구분 없이 모든 세부 공정들을 임의의 작업공간과 도장 스프레이를 이용하여 범용으로 처리할 수 있도록 페인팅 작업장을 단일 구역으로 정의한다. 이 경우, 하나의 도장 스프레이에 하도, 중도, 상도 단계의 일반 및 특수 도료 6가지가 모두 장착된다. 즉, 범용 자원할당 방식에서는 하나의 도장 스프레이가 2가지 또는 3가지 전담 공정을 처리하는 전용 자원할당 방식과 달리 하나의 도장 스프레이가 6가지 모든 세부 도장 공정을 처리할 수 있어야 한다. GRA 방식에서 작업공간과 도장 스프레이 자원은 모두 하나의 단일 구역에 할당된다. 따라서, 도장 및 건조 작업공간의 수 $Space$ 는 M 이 되며, 도장 스프레이의 수 $Spray$ 는 N 이 된다.

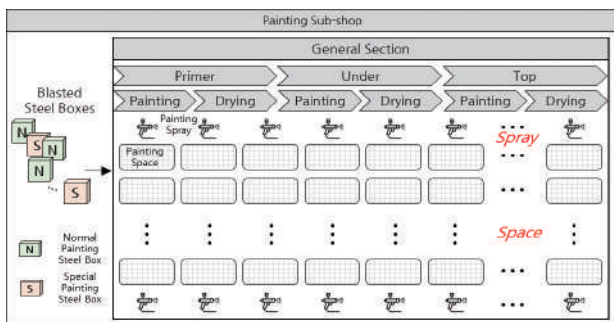


Fig. 5. Resource layout in the GRA method

GRA 방식에서는 블라스팅 작업장에서 강박스에 대한 전처리 작업을 마치면, 페인팅 작업장에 가용한 작업공간이 있는 경우, 해당 작업공간으로 이동하여 도장 및 건조 작업을 진행한다. 만약, 가용한 작업공간이 없는 경우, 페인팅 작업

장 앞의 대기공간에서 가용한 도장 및 건조 작업공간이 생길 때까지 기다린다. 일단 페인팅 작업장으로 이동하면, 이후에는 하나의 동일한 작업공간에서 하도, 중도, 상도 단계의 모든 도장 및 건조 작업을 진행한다. 모든 작업을 마치면 전용 자원할당 방식과 마찬가지로 강박스 야적장으로 이동한다.

GRA 방식에서는 모든 도장 및 건조 작업공간과 도장 스프레이가 하나의 단일 구역에서 운영되기 때문에, 작업자는 작업해야 할 도장 작업이 6가지 공정(일반 하도 도장, 일반 중도 도장, 일반 상도 도장, 특수 하도 도장, 특수 중도 도장, 특수 상도 도장) 중 어떤 것인지 명확하게 인식하고 있어야 한다. 따라서, OSRA와 PSRA 방식과 같은 전용 자원할당 방식과 달리 공정의 관리가 복잡하다는 단점이 있다. 반면, GRA는 페인팅 작업장을 하나의 단일 구역으로 통합하여 운영하기 때문에, 가설 환경 별 프로젝트 수주량의 변동성과 도장 단계별 도장 및 건조 작업시간의 변동성에 효과적으로 대응할 수 있다는 장점을 갖는다. 즉, 수주량과 작업시간의 변동성으로 인해 작업 부하에 불균형이 발생하더라도, 모든 자원이 6가지 공정을 모두 처리할 수 있는 범용성을 가지고 있으므로 이러한 변동성에 쉽게 대응할 수 있는 것이다.

4. 자원할당 방법론 성능평가

4.1 실험 대상 및 방법

본 연구에서는 충북 진천군에 위치한 강교 제작공장을 대상으로 앞서 제안한 세 가지 자원할당 방식의 성능평가 실험을 진행한다. 이 공장에서 운영 중인 도장 및 건조 작업공간의 수는 20개이며 도장 스프레이의 수는 6개이다. 공정의 평균 작업시간은 <Table 2>와 같이 도료 종류와는 관계가 없으며, 도장보다는 건조 공정의 작업시간이 길고, 하도보다는 중도가, 중도보다는 상도 도장 단계에서 길게 나타난다.

Table 2. Average processing times for painting processes

Process		Processing Time			
		Unit	Normal Paint	Special Paint	
Painting	Blasting	Hour	1.5	1.5	
	Spraying	Primer	Hour	1.5	1.5
		Under	Hour	1.5	1.5
		Top	Hour	1.5	1.5
	Drying	Primer	Day	1	1
		Under	Day	2.5	2.5
		Top	Day	4	4

본 연구에서는 다양한 환경에서의 성능평가를 위해 다음과 같은 네 가지 영향요인들의 수준을 <Table 3>과 같이 설정한 후, 총 144(=3×3×4×4)개의 서로 다른 상황을 가정하여 실험하였다. 새로운 프로젝트가 수주되는 평균 시간 간

격을 의미하는 평균주문주기(Average Order Interval; AOI)와 주문주기의 불규칙성을 나타내기 위해 주문주기의 변화폭으로 정의되는 주문주기변동(Variance of Order Interval; VOI) 요인들은 각각 세 가지 수준을 갖는다. 작업시간의 불규칙성을 나타내는 것으로 작업시간의 변화폭으로 정의되는 작업시간변동(Variance of Processing Time; VPT)과 일반 도장을 필요로 하는 프로젝트의 비중을 의미하는 일반도장비중(Normal Paint Rate; NPR) 요인들은 각각 네 가지 수준을 갖는다. <Table 4>는 앞선 세 가지 병목공정 자원할당 방식인 OSRA, PSRA, GRA를 총 작업공간의 수 20개와 총 스프레이의 수 6개에 적용하여 얻은 도장 및 건조 작업공간 및 도장 스프레이의 자원할당 결과를 보여주고 있다.

강교 제작공장의 생산성을 향상시키기 위해서는 병목공정인 도장 공정에서의 생산 흐름을 원활하게 관리할 필요가 있다. 따라서 병목공정 자원할당 방법론의 성능을 평가하기 위해서는 해당 방법론의 적용 시 생산 흐름이 얼마나 원활해지는가를 분석해야 한다. 일반적으로 일정한 생산율 하에서 병목공정의 생산 흐름이 좋아지면 병목공정 앞에서 대기하는 물량이 감소하고 대기하는 시간이 짧아지는 경향을 보인다(Little, 1961). 이에 본 실험에서는 병목공정의 생산 흐름 원활성에 대한 대체 지표(Surrogate Measure)인 도장 공정 앞에서 대기 중인 강박스의 재공재고수(Number of Work in Process; NWIP)와 대기시간(Waiting Time; WT)을 성능평가척도로 이용한다. PSRA는 OSRA와 GRA와 달리 사용 도료에 따라 두 개의 대기열이 존재하기 때문에, NWIP은 두 대기열의 합계를 취하고 WT는 도장을 완료한 강박스 수를 가중치로 이용하여 가중평균을 구해 사용한다.

Table 3. Experimental factors and levels

Factor (Unit)	Level			
	1	2	3	4
AOI (Day)	40	50	60	-
VOI (±Day)	10	20	30	-
VPT (±%)	20	30	40	50
NPR (%)	50	60	70	80

Table 4. Resource allocation results

Operation Method	Resource	Number of Resources			
		Index	1	2	3
OSRA	Space _i	3	7	10	
	Spray _i	2	2	2	
PSRA	α ₁ = 0.5	Space _i	10	10	-
	α ₁ = 0.5	Spray _i	3	3	-
	α ₁ = 0.6	Space _i	12	8	-
	α ₁ = 0.6	Spray _i	4	2	-
	α ₁ = 0.7	Space _i	14	6	-
	α ₁ = 0.7	Spray _i	4	2	-
	α ₁ = 0.8	Space _i	16	4	-
	α ₁ = 0.8	Spray _i	5	1	-
GRA	Space	20			
	Spray	6			

4.2 시뮬레이션 모델

본 연구에서는 성능평가척도 도출을 위해 기존에 개발된 강교 공급사슬 시뮬레이션 모형(Lee et al., 2022)에 <Fig. 6>과 같은 자원할당 논리를 추가한 시뮬레이션 모형을 사용하였다. <Fig. 6>의 서브 모델은 모두 운송 모듈(Transfer Module)과 프로세스 모듈(Process Module)의 조합으로 구성된다. 각 서브 모델은 운송 모듈을 통해 개체를 서브 모델 내로 옮기는 논리로부터 시작하여, 프로세스 모듈들을 거쳐, 다시 운송 모듈을 통해 작업이 끝난 개체를 서브 모델 밖으로 내보내는 논리로 끝이 난다. 프로세스 모듈들은 운송 모듈 사이에 배치되어 개체에 대해 자원의 가용성 확인, 자원의 점유, 자원을 이용한 작업 수행, 작업이 끝난 자원의 점유 해제에 대한 논리 수행을 담당한다. 또한, 시뮬레이션 모형에서 변동성을 반영하기 위한 모든 확률변수는 최소값, 최빈값, 최대값의 세 모수로 정의되는 좌우대칭형 삼각분포로 이루어져 있는데, 이는 삼각분포가 데이터가 부족한 상황에서 경험에 의존하여 모수를 추정할 때 용이하게 활용될 수 있는 확률분포이기 때문이다(Kwon et al. 2021).

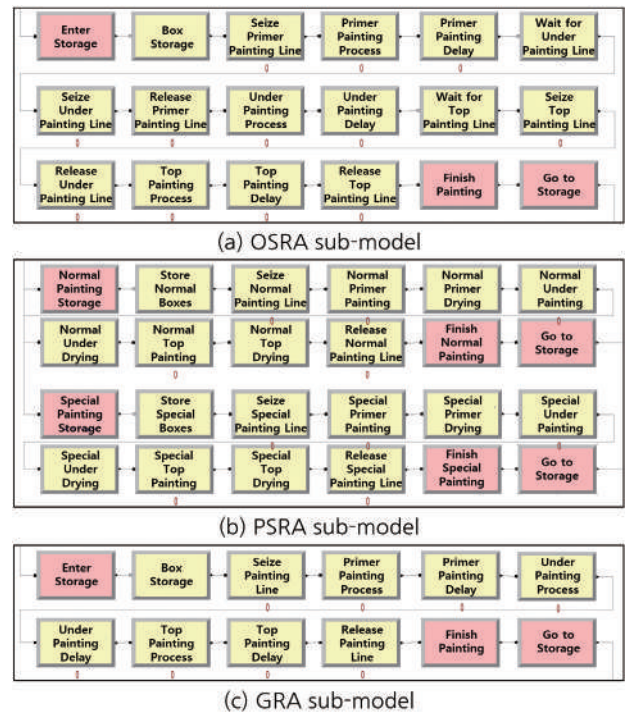


Fig. 6. Sub-models for describing three operational method

<Fig. 6(a)>의 OSRA에서는 하도, 중도, 상도 단계의 도장과 건조 작업이 각각의 전용 작업 구역에서 순차적으로 진행된다. 첫 번째 하도 도장 단계의 수행을 위해, 가용한 하도 도장공간을 탐색하여 점유하며, 만약 가용한 공간이 없다면 하도 대기공간에서 가용한 공간이 발생할 때까지 대기한다. 하도 도장공간을 점유하게 되면, 프로세스 모듈을 통해 가용

한 도장 스프레이를 탐색하여 점유하며, 만약 가용한 스프레이가 없다면 하도 도장공간에서 가용한 스프레이가 발생할 때까지 대기한다. 하도 도장공간과 도장 스프레이가 모두 확보되어 도장작업이 수행된 후 마무리되면 도장 스프레이의 점유를 해제한 후 동일 공간에서 건조작업을 진행한다. 이후 건조작업까지 마무리되면 하도 도장공간의 점유를 해제한 후 중도 단계의 도장을 위해 이동한다. 두 번째와 세 번째로 진행되는 중도, 상도 단계의 도장과 건조 작업은 하도 단계와 동일한 논리로 진행한다.

(Fig. 6(b))의 PSRA에서는 일반과 특수 제품으로 구분하여 각각의 전용 작업 구역에서 도장과 건조 작업을 수행한다. 각 제품은 각각의 전용 작업 구역에서 첫 번째 하도 도장 단계의 수행을 위해 OSRA와 동일한 방식으로 가용한 도장공간과 도장 스프레이를 탐색하여 점유한 후 도장 작업을 진행하고 이후 도장 스프레이의 점유를 해제한 후 건조작업을 진행한다. 하도 단계가 마무리되면 OSRA와 달리 작업공간의 이동없이 하도 단계가 진행된 동일한 작업공간에서 반복적인 도장 스프레이의 점유를 통해 두 번째와 세 번째 중도, 상도 단계의 도장과 건조 작업을 진행한다.

(Fig. 6(c))의 GRA에서는 OSRA와 달리 하도, 중도, 상도 단계 공정의 작업 구역을 구분하지 않고, PSRA와 달리 일반과 특수 제품의 작업 구역을 구분하지 않은 채, 모든 작업공간과 도장 스프레이를 모든 개체가 공유하는 방식으로 페인팅 작업장을 운영한다. 즉, 페인팅 작업장을 하나의 작업 구역으로 통합하여 운영하는 것이다. GRA에서 모든 제품은 첫 번째 하도 도장 단계의 수행을 위해 가용한 도장공간과 도장 스프레이를 탐색하여 점유한 후 도장 작업을 진행하고 이후 도장 스프레이의 점유를 해제한 후 건조작업을 진행한다. 중도와 상도 단계의 도장과 건조 작업 역시 하도 단계를 수행한 동일 작업공간에서 중도와 상도 단계를 위한 별도의 두 차레 도장 스프레이 점유를 통해 도장 작업을 진행하고 도장 스프레이의 점유 해제 후 건조 작업을 진행한다.

4.3 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 총 144개의 실험 상황 각각에 대해, 앞서 제안한 세 가지 자원할당 방식을 적용하여 제작공장을 10,000일 동안 가상으로 운영하는 실험을 100회씩 반복 수행하였다. 실험 결과의 분산을 줄이기 위해, 불안정한 초기 1,000일 동안의 자료는 제외하고 나머지 9,000일에 대해서만 통계량을 수집하였고, 확률분포 사용을 위한 난수 발생 시드를 개별 블록별로 분리하여 적용하였다.

시뮬레이션을 통해 성능평가척도를 도출한 후, 실험 상황을 정의하기 위한 네 가지 요인 AOI, VOI, VPT, NPR에 자원할당 방법론(Resource Allocation Method; RAM)을 하나

의 요인으로 추가하여 총 5개 요인이 성능평가척도 NWIP과 WT에 미치는 영향을 알아보기 위한 분산분석을 수행하였다(IBM Corp., 2019). 분석 결과, <Table 5>에 나타나 있는 바와 같이, 자원할당 방법론을 포함한 다섯 가지 요인 모두가 성능평가척도에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

Table 5. Analysis of Valance (ANOVA) on NWIP and WT

Performance Measure	Factor	Degree of Freedom	Mean Square Error	F	p-Value
NWIP	RAM	2	51,572,385	20,795.94	0.000*
	AOI	2	50,785,162	20,478.50	0.000*
	VOI	2	64,465	26.00	0.000*
	VPT	3	21,709	8.75	0.000*
	NPR	3	49,163	19.82	0.000*
	Error	43,187	2,480		
	Total	43,200			
WT	RAM	2	14,534,007	31,364.18	0.000*
	AOI	2	6,754,435	14,575.98	0.000*
	VOI	2	15,634	33.74	0.000*
	VPT	3	5,032	10.86	0.000*
	NPR	3	12,940	27.92	0.000*
	Error	43,187	463		
	Total	43,200			

* This factor affects the performance measure under significant level of 0.01

세 가지 자원할당 방법론별 성능평가척도의 평균값은 (Fig. 7)과 같다. 성능평가척도 NWIP과 WT 모두에 대해 GRA가 가장 좋은 성능을 보였고, 다음으로 OSRA와 PSRA 순이었다. GRA는 성능평가척도 NWIP과 WT를 OSRA에 비해서는 약 65%, PSRA에 비해서는 약 30% 수준으로 크게 감소시켰다. OSRA와 PSRA는 각각 공정(하도, 중도, 상도)과 제품(일반, 특수)이라는 기준에 따라 자원을 확정적으로 할당하므로, 만약 공정과 제품 측면에서 수요 또는 생산 측면의 변동이 발생하면 그에 따라 확정적으로 할당된 자원을 100% 활용하지 못하는 상황이 발생할 수 있다. 이에 반해 GRA는 특정 기준에 따라 자원을 구분하여 미리 확정적으로 할당하지 않고 일감의 크기에 따라 유연하게 처리할 수 있도록 범용적으로 자원을 할당하기 때문에 상대적으로 자원의 활용도가 높아진다. 결과적으로 GRA 방법론은 작업공간과 스프레이 등 자원을 범용화함으로써 가설 환경별 프로젝트 수주량의 변동성과 도장 단계별 도장 및 건조 작업시간의 변동성에 대한 대응력을 향상시켰기 때문에 생산성을 높일 수 있었던 것이다. 리드타임은 대기시간과 작업시간의 합계로 정의되므로, 대기시간의 감소는 궁극적으로 리드타임의 단축을 의미한다. 실험 결과, GRA는 PSRA와 OSRA보다 평균적으로 리드타임을 각각 60.5일과 13.5일 감소시켰으며, 이는 주문의 투입부터 산출까지의 소요기간을 단축시킴으로써 시장의 수요 변화에 보다 신속히 대응할 수 있음을 나

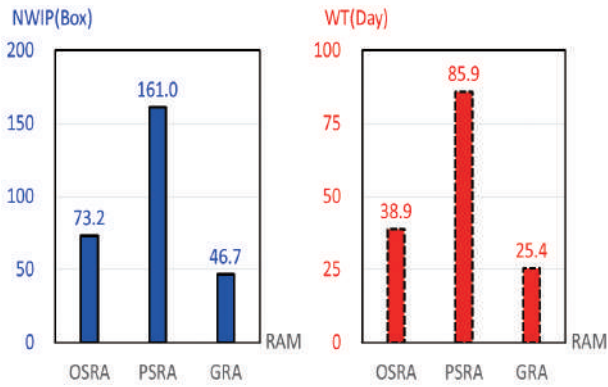


Fig. 7. Average performance measures for three RAMs

타낸다.

〈Fig. 8〉은 실험 상황을 규정하는 네 가지 요인 AOI, VOI, VPT, NPR의 변화에 따른 세 방법론의 성능평가적도 평균값을 보여주고 있다. 분석 결과, 다음과 같은 경향이 나타났다. 첫째, 평균주문주기 AOI가 짧아져 주문량이 늘어나면 제작 공장에 걸리는 작업 부하가 높아져 NWIP과 WT가 증가한다. 둘째, 주문주기변동 VOI나 작업시간변동 VPT가 커져 시점별 주문량과 생산량의 변화가 심해지면 개별 장비에 걸리는 작업 부하의 변동성이 커져 NWIP과 WT가 증가한다. 셋째, 일반도장비중 NPR이 커져 작업장별 작업 부하의 불균형이 커지면, 특정 도장 구역에 설치된 장비들의 가동률이 떨어져

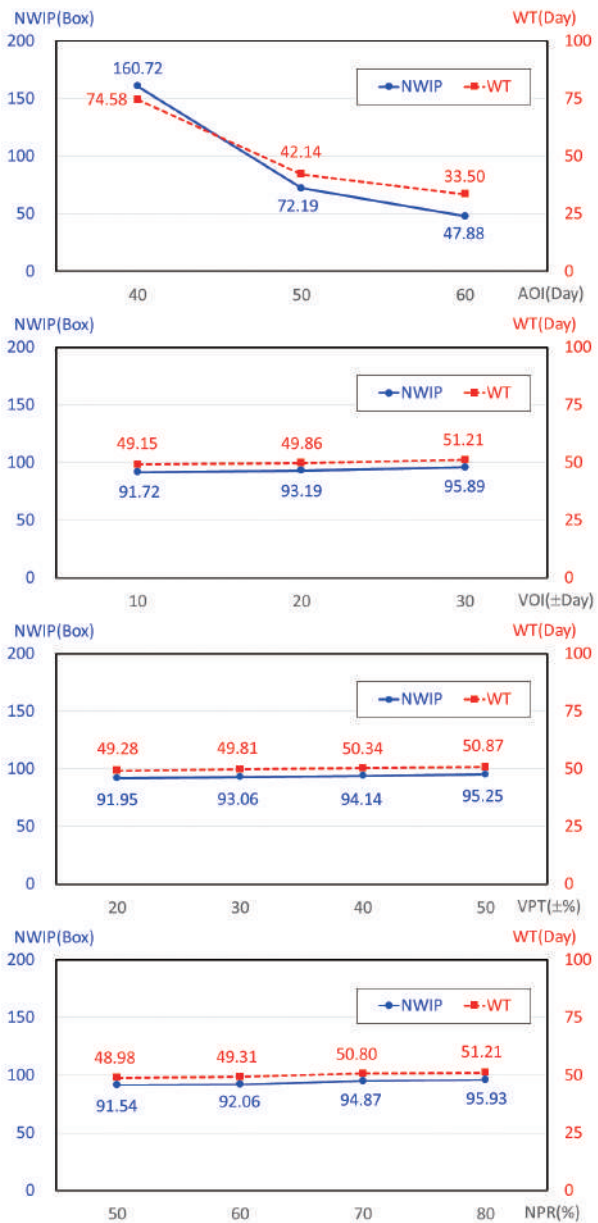


Fig. 8. Average performance measures for experimental factors

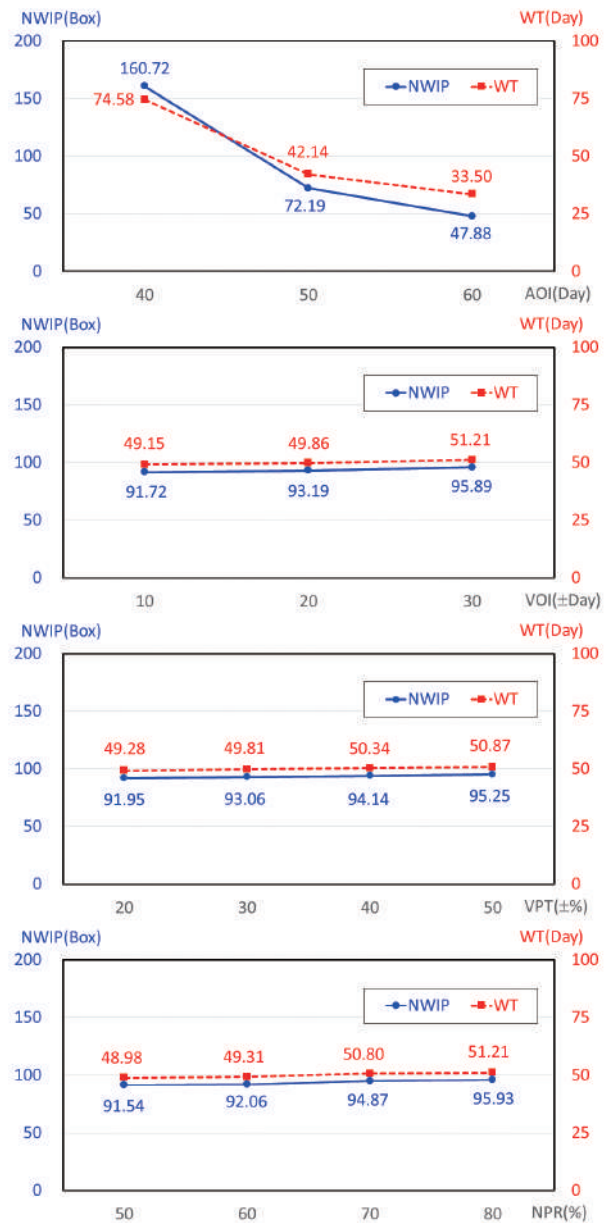


Fig. 9. Performance of RAMs for experimental factors

NWIP과 WT가 증가한다. 이와 같은 성능평가척도 NWIP과 WT의 증가는 결국 생산성의 악화를 초래하게 된다.

다음으로는 네 가지 요인 AOI, VOI, VPT, NPR의 수준 변화에 따른 세 가지 자원할당 방법론 GRA, OSRA, PSRA 각각의 성능 변화를 분석하였다. 분석 결과는 <Fig. 9>에 요인 별로 정리되어 있으며, 분석을 통해 나타난 경향은 다음과 같다. 첫째, AOI에 대한 분석 결과, 전술한 세 방법론의 평균에 대한 분석 결과와 마찬가지로 모든 자원할당 방식이 AOI가 짧아질수록 NWIP과 WT가 증가하는 경향을 보였다. 모든 AOI 수준에서 GRA가 가장 우수한 성능을 보였으며, OSRA와 PSRA가 뒤를 이었다. 둘째, VOI에 대한 분석 결과, VOI가 커질수록 모든 자원할당 방식의 NWIP과 WT가 증가하는 경향을 보였다. 모든 VOI 수준에서 자원할당 방식의 성능은 GRA, OSRA, PSRA 순으로 나타났다. 셋째, VPT에 대한 분석 결과, OSRA는 VPT가 커질수록 NWIP과 WT가 증가하는 경향을 보였으나, GRA와 PSRA에서는 일정한 수준을 유지하였다. 이러한 결과는 OSRA에서는 다른 두 방식과 달리 페인팅 작업장이 하도, 중도, 상도의 세 작업 구역으로 분리되어 운영됨으로써, 작업시간의 변동성이 커질수록 구역 간 작업거부(Blocking)와 일감부족(Starving) 현상이 더 자주 발생하기 때문이다. 작업거부는 하도 혹은 중도 작업 구역에서의 공정을 마친 강박스가 후공정인 중도 혹은 상도 작업 구역에 가용한 공간이 없어 전공정에 그대로 머물러 있는 비효율적 현상을 말한다. 반면, 일감부족은 중도 혹은 상도 작업을 마친 후 가용한 작업공간이 생겼으나 전공정에서 작업을 마친 강박스가 없어 후공정 작업공간이 일감부족으로 인한 유휴상태로 대기하는 비효율적 현상을 의미한다. 모든 VPT 수준에서 자원할당 방식의 성능은 GRA, OSRA, PSRA 순으로 나타났다. 넷째, NPR에 대한 분석 결과, PSRA는 NPR이 커질수록 NWIP과 WT가 증가하는 경향을 보였으나, GRA와 OSRA에서는 일정한 수준을 유지하였다. 이러한 결과는 PSRA에서는 다른 두 방식과 달리 페인팅 작업장이 일반과 특수 두 작업 구역으로 분리되어 있어, 일반도장의 비중이 커질수록 상대적으로 특수도장을 위한 자원들이 적게 할당됨에 따라, 특수도장 프로젝트들이 연속적으로 수주된 경우 병목현상의 심화로 인해 특수도장 강박스의 NWIP이 급격히 증가하고 이에 따라 WT도 함께 증가하는 현상이 더 자주 발생하기 때문이다. NPR 요인에 대한 모든 수준에서도 역시 앞의 세 경우와 마찬가지로 자원할당 방식의 성능은 GRA, OSRA, PSRA 순으로 동일하게 나타났다.

앞선 분석 결과, 모든 실험환경에서 자원할당 방법론 GRA가 가장 우수한 성능을 보였다. 이는 GRA가 공정과 제품 측면에서 수요 또는 생산 측면의 변동성에 보다 잘 대응할 수 있도록 설계된 방법론이므로 변동성의 크기에 따라 차이가

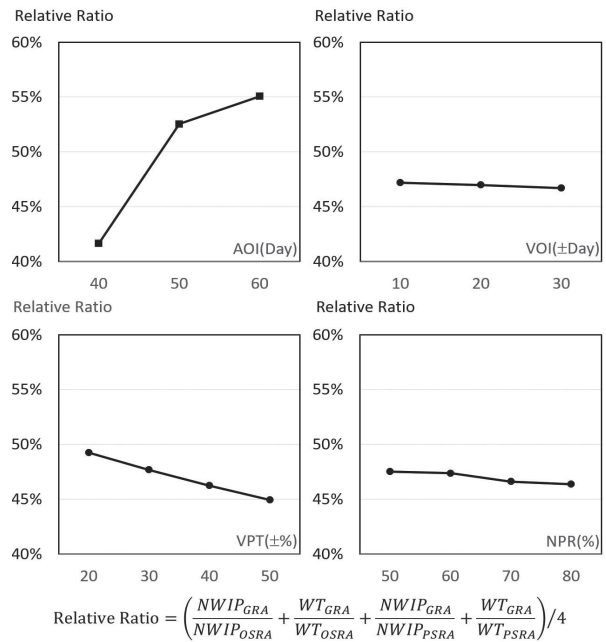


Fig. 10. Relative ratio of GRA to OSRA and PSRA

있을 수는 있지만 항상 OSRA와 PSRA에 비해 우수한 성능을 보이게 된 것이다. 여기서 어떤 환경에서 GRA가 OSRA와 PSRA에 비해 더 큰 성능 개선을 나타내는가를 분석하였다. <Fig. 10>은 네 가지 요인 AOI, VOI, VPT, NPR의 수준별로, OSRA와 PSRA의 NWIP과 WT 대비 GRA의 NWIP과 WT 값의 상대적 크기 비율을 구한 후 평균을 취한 값 (Relative Ratio)을 보여주고 있다. 분석 결과를 살펴보면, AOI가 짧아져 제작공장의 작업 부하가 증가함에 따라 GRA는 OSRA와 PSRA에 비해 더 좋은 성능을 보였다. 또한, VOI, VPT, NPR이 증가하여 제작공장 작업 부하의 변동성이 커짐에 따라, GRA는 OSRA와 PSRA에 비해 더 좋은 성능을 보였다. 종합해보면, GRA는 작업 부하가 크고 작업 부하의 변동성이 큰 제작공장 환경에서 유용하게 활용될 수 있는 것이다. 이는 GRA가 도장 단계 또는 페인트 종류에 따라 전용 자원을 할당하지 않고 모든 자원을 범용으로 사용함으로써 외적인 측면에서의 제품주문 변동성과 내적인 측면에서의 작업시간 변동성에 대한 대응력을 높였기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 제조업의 생산성 향상 방법론 중 하나인 제약이론을 강교 제작공장에 적용하기 위해, 병목공정으로 도장 공정을 선정한 후 작업공간과 도장 스프레이 자원을 할당하기 위한 세 가지 방법론, 공정 전용 자원할당 OSRA, 제품 전용 자원할당 PSRA, 범용 자원할당 GRA를 제안하였다. 시뮬레이션 모형을 이용하여 제안된 방법론의 성능을 평

가한 결과, 범용 자원할당 방법론이 재공재고수 NWIP과 대기시간 WT 측면에서 가장 우수한 성능을 보였으며, 특히, 작업 부하의 크기와 변동성이 증가할수록 전용 자원할당 방법론과의 성능 차이는 더욱 심화되었다. 평균적으로 GRA는 OSRA 대비 NWIP을 36.2%, WT를 34.6% 감소시켰으며, PSRA 대비 NWIP을 71.0%, WT를 70.4% 감소시켰다. NWIP과 WT의 감소는 도장 공정의 병목현상 완화를 의미하며, 이는 결과적으로 강교 제작공장의 생산성이 향상되었음을 의미한다.

본 연구는 모듈러 유닛 제작공장 중 하나인 강교 제작공장에서 추가적인 자원의 투입 없이 동일한 자원 조건하에서 단지 자원할당 방식의 개선만으로도 생산성을 크게 향상시킬 수 있음을 보여줬다는 점에서 의의가 있다고 할 것이다. 그러나 본 연구에서는 자원할당의 범위가 병목공정인 도장 공정에 한정되어 있어 공정들 상호 간의 간섭효과를 종합적으로 반영할 수는 없었다. 향후에는 도장 공정뿐만이 아닌 제작공장을 구성하는 전체 공정과 제작공장에서 제작한 강박스를 조립하는 현장시공 단계의 공정까지로 범위를 확장하여 자원을 할당하는 문제를 연구할 예정이다. 또한, 단순히 자원의 초기 할당뿐만이 아닌 자원의 실시간 운영, 즉, 일감이 자원을 점유하는 우선순위 방식을 개선함으로써 전체적인 생산성을 향상시키기 위한 연구도 진행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1F1A1048256).

References

Chae, J.I., and Park, Y.B. (2008). "A Case Study on the Throughput Improvement in the Semiconductor Package Process." *KIIE Conference 2008*, KIIE, pp. 1333-1337.

Goldratt, E.M. (1984). *The Goal*, North River Press.

IBM Corp. (2019). *IBM SPSS Statistics for Windows (26.0)*. <http://www.ibm.com>

Jung, I.S. (2018). "A Preliminary Study for Productivity Improvement of Construction Industry based on Big Data Analysis." *Proceedings of the KCC 2018 Conference*, KIISE, pp. 19-20.

Kim H.C., Hwang, Y.K., and Kim, K.R. (2014). "Study on the Application of Multi-skilled labors to Factory Production Process for Securing Economic Feasibility of Modular Unit." *Korean Journal of Construction*

Engineering and Management, KICEM, 15(1), pp. 11-19.

Kim, M.J., Park, M.S., Lee, H.S., Lee, J.H., and Lee, K.P. (2015). "Development of Manufacturing Planning for Multi Modular Construction Project based on Genetic-Algorithm." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 16(5), pp. 54-64.

Kwon, H.J., Jeon, S.W., Lee, J.I., and Jeong, K.C. (2021). "Development of a Simulation Model for Supply Chain Management of Precast Concrete." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 22(5), pp. 86-98.

Lee, D.Y., Nam, S.H., Lee, J.S., Jung, D.I., Kim, K.R., and Cho, B.H. (2019a). "Factory Production Management of Modular Units Using MFD 2019." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, AIK, 35(6), pp. 139-146.

Lee, H.K., Jung, W.M., and Kim, H.S. (2006). "TOC Theory Applications for Construction Management." *AIK Conference 2006*, AIK, 26(1), pp. 649-652.

Lee, H.S., Yang, J.H., Noh, S.D., and Park, Y.J. (2019b). "A Study on the Determination of Real Time Proper Vehicle Input Order Considering the Bottleneck Process of Automobile Assembly Line." *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, CDE, 24(1), pp. 30-38.

Lee, J.I., Jeong, E.J., Kim, S.N., and Jeong, K.C. (2022). "Development of a Simulation Model for Supply Chain Management of Modular Construction based Steel Bridge." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 23(2), pp. 3-15

Lee, S.Y. (2013). "Eco-friendly Construction and Activation of Steel Structure." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, KSCE, 61(2), pp. 19-21.

Little, J.D.C. (1961). "A Proof for the Queuing Formula: $L=\lambda W$." *Operations Research*, 9(3), pp. 383-387.

Mun, J.S., Park, S.Y., and Lee, D.H. (2016). "A Study on the Productivity Improvement of the Dicing Blade Production Process." *Journal of Korean Society of Industrial and Systems Engineering*, 39(3), KSIE, pp. 147-155.

Park, K.M., and Jeong, S.J. (2016). "A Study on the Improvement of Work Flow and Productivity in Complex Manufacturing Line by Employing the Effective Process Control Methods." *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, KAIS, 17(5), pp. 305-315.

Rockwell Automation (2020). *Arena Simulation Software (16.00.00)*. <http://www.rockwellautomation.com>

요약 : 본 연구에서는 제조업 분야에서 보편적으로 활용되어 온 제약이론을 바탕으로 강교 제작공장의 생산성을 향상시키기 위한 자원할당 방법론을 제안한다. 이를 위해 도장 공정을 병목공정으로 정의한 후, 공정 전용 자원할당(OSRA), 제품 전용 자원할당(PSRA), 범용 자원할당(GRA) 등 3가지의 자원할당 방법론을 개발하였다. 강교 공급사슬 시뮬레이션 모델을 활용한 성능평가 실험 결과, GRA 방법론이 재공재고수(NWIP)와 대기시간(WT) 측면에서 가장 우수한 성능을 보였다. 특히, 강교 제작공장의 부하와 부하 변동성이 증가할수록 다른 두 전용 자원할당 방식과의 성능 격차는 더욱 커졌다. 평균적으로 GRA는 NWIP과 WT를 OSRA 대비 36.2%, 34.6%, PSRA 대비 71.0%, 70.4% 감소시켰다. 재공재고수와 대기시간의 감소는 병목현상의 완화를 의미하며, 이는 결국 강교 제작공장의 생산성이 향상되었음을 의미한다.

키워드 : 모듈러, 강교, 생산성, 병목공정, 자원할당, 시뮬레이션
