

정수 선형 최적화를 이용한 조선해양 의장품 제작 물량 할당에 관한 연구

박중구[†]·김민규
삼성중공업(주) 조선해양연구소

Optimization of Quantity Allocation using Integer Linear Programming in Shipbuilding Industry

JungGoo Park[†]·MinGyu Kim
Ship & Offshore Research Institute, Samsung Heavy Industries

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this study, we developed an allocation optimization system for supply chain management in the shipbuilding and offshore construction industry. Supply chain operation is a way of operating manufacturing company responsible for the procurement of outfitting parts. The method about how to allocate the manufacturing volume to each partner company includes important decisions. According to the allocation method, the stability of the material supplied to the final installation process is guaranteed. We improved the allocation method that was previously decided by the person in charge. Based on the optimization engine, a system is developed that can automatically allocate the production volume. For optimization model configuration, factors affecting the volume allocation were analyzed and modeled as constraint factors. A target function is defined to minimize the difference in the load variance of each partner company. In order to use the same type of volume allocation engine for various outfitting products, the amount of work done by the partner company was standardized. We developed an engine that can allocate the same production load of each production partner. Using this engine, the operating system was developed and applied to the actual offshore project. It has been confirmed that the work load variance of suppliers can be maintained uniformly using the optimization engine rather than manual method. By this system, we stabilize the manufacturing process of partner suppliers.

Keywords : allocation optimization engine(할당 최적화 엔진), integer linear programming(정수 선형 최적화), supply management of outfitting materials (의장품 공급 관리)

1. 서론

선형 계획법(linear programming)은 주어진 선형 조건들을 만족시키면서 선형 목적 함수를 최적화하는 문제이다. 선형 계획법은 운용과학, 미시경제학, 네트워크 경로 최적화 등 많은 분야에서 사용되고 있으며, 선형 계획법의 특수한 경우인 네트워크 흐름과 같은 문제들에 대해서는 여러 특화된 알고리즘들이 연구되어 왔다. (Park et al., 2016) 선형 계획법은 의사결정 변수와 목적함수, 제약조건으로 구성된다. 의사결정 변수는 최적화 문제에서 찾아야 할 대상으로 의사결정 변수의 선형 함수로 구성된 목적함수를 최소화 또는 최대화 시켜야 한다. 또한

의사결정 변수는 시스템의 제약이나 요구사항인 제약조건을 만족해야 한다. 제약조건 역시 의사결정 변수의 선형함수로 구성되어야 하며, 등호나 부등호 조건으로 표현되어야 한다. 일반적인 선형 계획법에서 의사결정 변수가 정수일 때를 정수 선형 계획법(integer linear programming)이라고 부르며, 의사결정 변수 일부가 정수일 때를 혼합 정수 선형 계획법(mixed integer linear programming)이라고 부른다. (Kim and Ryoo, 2006)

조선해양 산업에서 최적화 기법은 매우 다양하게 많이 활용되고 있다. 설계 단계에서의 선형최적화, 제작 단계에서의 일정 계획 수립 및 물류 최적화 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 특히 물류 최적화 분야에서는 물류 관제 시스템으로부터 수집된 데이터를 이용하여 조선소 물류 계획 최적화 및 부하 분석을

위한 시스템을 구축한 사례가 있다. (Cho et al., 2011) 특히 선형 계획법은 조선해양 산업에서 공간계획, 일정계획 수립에 많이 응용되었다. 생산 계획 시스템과 연동하여 조선소의 제작 공간 배치를 최적화 할 수 있는 알고리즘을 개발하거나, (Zhuo et al., 2012) 조선소 블록의 탑재 일정 최적화를 위하여 블록의 배치 계획을 최적화하는 기법 등에 대한 연구가 진행되었다. (Koh et al., 2011) 이번 연구에서도 이와 유사하게 실제 생산 계획 수립에 최적화를 응용하고자 한다. 다만 블록 단위의 중장기 생산 일정계획 수립이 아닌, 의장품의 실제 제작 공정 레벨로 의사결정 단계를 하향하여 적용 가능성을 확인하였다. 유사한 연구로, 생산 단계에서 블록간의 간섭을 고려하여 적치장 블록의 배치를 최적화 하는 연구를 진행한 사례가 있다. (Roh, 2012) 다만 이렇게 최적화 모델을 통한 의사결정의 단계가 일정 계획이라는 상위 단에서 실행 계획, 작업 계획이라는 하위 단계로 전개되면서 즉시 실행할 공정에 대한 의사 결정으로 인해 실패에 대한 리스크가 증가하게 되며, 따라서 신속한 의사 결정을 할 수 있는 시스템의 필요성이 대두되었다.

이번 연구에서는 정수 선형 최적화 기법을 이용하여 의장품의 제작 협력사에 제작 물량을 최적으로 할당하는 방법에 대해 기술하고자 한다. 조선해양 생산에서 중요한 비중을 차지하고 있는 의장품의 설치 공정은 설치할 대상품인 의장품의 적기 조달이 매우 중요한 시작점이 된다. 대부분의 조선해양 생산 공정에서 매우 주요한 병목 공정으로 분석되고 있으며, (Park and Woo, 2018) 의장품의 적기 입고율은 매우 중요한 경영지표로 사용되고 있다. 의장품의 적기 조달을 위한 의사 결정 중, 가장 중요한 부분은 협력사의 제작 물량 배분이라 할 수 있다. 조선해양 생산 경쟁력 확보를 위해 기존에 대부분 수작업 혹은 배정 담당자의 임의 판단에 의존하여 배분하던 방식에서 벗어나, 공정 데이터를 기반으로 하는 체계적인 제작량 할당에 대한 필요성이 대두되었다. 협력사에 제작 물량을 할당하는 배분에 관한 문제는 각각의 제작 협력사별로 가지고 있는 제약 조건에 맞추어 물량을 배분해야 하는 문제로 정의할 수 있다. 이를 위해 물량 배분의 시스템화에 관한 요구사항 분석을 통해 시스템 구성 방향을 결정하였다. 의장품의 물량 배분은 크게 배관재에 해당하는 스펴과 철의장품으로 구분할 수 있다. 스펴이나 철의장품의 경우, 제작하는 협력사가 모두 상이하고, 각 아이터별로 각각의 물성에 따라 전문적인 제작 협력사들이 존재하며, 물량 배분 방식에서도 차이가 있다.

스펴의 물량 배분에 고려하는 요인들을 살펴보면, 협력사별로 제작이 가능한 재질 및 크기로 1차 구분이 된다. 이는 제작사에서 보유하고 있는 용접사의 기량, 용접 장비의 유무에 영향을 받고 있다. 용접사의 기량으로는 특수 재질의 용접이 가능한지, 대형관의 용접이 가능한지, 다양한 용접 자세에서 작업이 가능한지 등의 여부들이 고려 대상이 된다. 또한 보유하고 있는 크레인의 용량이나 작업 보조 치구들의 여부들이 제작 가능 크기나 형상에 제한을 주고 있다. 또한 제작과 도장 작업이 동일한 협력사 내에서 가능한지의 여부도 많은 영향을 주고 있다. 대부분의 협력사는 제작 혹은 도장에 특화되어 있으나, 일부 대형 협력사의 경우 제작과 도장을 동시에 수행할 수 있다. 이러

한 협력사는 한번에 처리 가능한 물량이 많은 대형 협력사들이 많다.

또한 설계 공정의 지연, 자재 공급의 지연 등의 사유로 제작에 소요되는 시간을 충분히 확보하지 못한 상태에서 설치 공정에 착수해야하는 경우가 빈번히 발생하고 있다. 이러한 경우 각각의 제작품에 대해 긴급도를 부여하여 제작 공정을 관리한다. 제작 일정이 정상 제작 공정에 비해 매우 작게 확보된 경우는 긴급 제작 스펴으로 분류하고, 별도의 집중관리를 통해 제작 일정을 단축한다. 이렇게 제작에 확보된 일정에 따라 긴급, 준긴급 그리고 정상으로 분류한다. 긴급 혹은 준긴급 제작 물량의 경우 제작 협력사의 공정 흐름에 악영향을 주는 요인으로, 몇몇 협력사에 이러한 물량이 집중되어 배정되면, 긴급 제작 물량에 제작 리소스가 집중 투입되어 오히려 다른 정상 제작 물량의 일정이 지연되는 문제가 발생한다. 이에 따라 정상 제작 물량이 제작 공기 지연으로 인해 긴급 물량으로 변경되는 악순환이 발생한다. 또한 원청사 입장에서 긴급 물량으로 지정되면 정상 물량대비 높은 비용을 지불해야 한다. 따라서 각각의 제작 협력사별로 이러한 긴급도에 따른 물량 비율이 유사하게 배정되어야 한다.

철의장품 제작의 경우에도 스펴의 제작과 유사하게 각 철의장 아이터 별로 전문적인 제작 협력사가 존재하며, 각 전문 제작 협력사별로 해당 아이터에 대한 물량이 배분된다. 수천가지 이상이 되는 철의장 아이터들을 자재 그룹화하여 분류하고, 자재 그룹별로 제작이 가능한 협력사를 분류하여 배정한다. 철의장품의 경우는 스펴에 비해 매우 다양한 형상 및 제품 항목으로 인해 협력사별 취급이 가능한 재질 혹은 물성의 영향을 강하게 받는다.

앞서 언급한 물리적 조건 외에, 협력사의 실적 혹은 원청사에 대한 신뢰도도 물량 배분에 영향을 주고 있다. 적기 납입 실적이 높은 협력사나 실적 입력 정확도가 높은 협력사가 물량 배분에 긍정적인 영향을 주고 있고, 반대로 긴급 처리할 물량이 많거나 공정 지연이 많은 협력사는 부정적인 영향을 주고 있다.

그리고 물량 배분을 위해 제작 협력사의 제작 능력을 고려해야 한다. 대부분의 스펴 혹은 철의장품의 경우 주간단위 혹은 월간단위로 처리 가능한 물량, 무게로 제작 능력을 정의한다. 스펴의 경우는 배관의 직경과 두께, 용접부의 개수로 일의 양을 결정할 수 있어서 용접장을 기준으로 능력을 정의하는 경우가 많다. 철의장품의 경우는 용접부의 개수를 특정하기 어려운 점이 있어서 의장품의 무게로 제작 능력을 정의한다.

이렇게 도출된 다양한 요구사항을 분석하여, 단순한 분류에 의해 배분할 수 있는 부분과 최적화 기법을 사용해서 배분해야 하는 부분으로 구분하였다. 단순 분류의 경우 협력사별로 제작이 가능한 재질, 특정 협력사만 제작이 가능한 제품, 협력사별로 가능한 용접기법 및 보유하고 있는 장비의 제약에 따라 분류하였다. 최적화 기법은 각 협력사별로 긴급도의 배분을 균등하게 하는 목적과 각 협력사별로 공정 부하를 균등하게 하는 목적으로 선정하였다. 단순 분류는 최적화 작업 전에 전처리 과정에서 자동으로 처리되도록 시스템을 구성하였고, 전처리 과정을 통해 배정된 이외의 물량에 대해 최적화를 수행하여 배치하는

방식으로 전체 시스템을 구성하였다. 다만 최적화 모델이 앞서 언급된 모든 요구 사항들을 반영할 수 없기에, 실제 시스템의 운영에서는 최적 물량 배정 결과의 일부에 한해 관리 담당자의 직관에 의한 임의 물량 배정을 고려하였다. 이는 대부분 공사가 진행될 때 수행되는 물량 배분으로, 협력사와의 계약관계나 협력사 인력 이동에 대한 정보 입수, 회사 정책의 방향 변화 등 논리적으로 구현하기 어려운 요인에 대해서 담당자가 임의로 결정하는 부분도 포함되어 있다.

2. 의장품 제작 물량 할당 자동화 시스템의 개념 설계

2.1 전체 시스템의 개념 설계

물량을 배분하기 위해 우선 협력사 마다 고유의 제작 능력을 평가하였다. 제작 능력은 스포의 경우 일 단위 처리 가능한 개수로 결정하였고, 철의장품의 경우 처리 가능한 무게로 결정하였다. 결정된 단위에 따라 협력사별로 처리 가능한 제작 물량을 할당하기 위해 각 협력사별로 Fig. 1과 같은 슬롯의 개념을 도입하였다. 슬롯은 각 제작 협력사별 제작 능력을 의미하는 것으로, 평가된 일의 양을 슬롯에 채우는 개념이다. 각각의 슬롯은 일 단위로 점유된 현황을 평가할 수 있다. 예를 들면, 전체 작업 공기가 10일인 의장품의 경우, 제작 착수일부터 10일 이후까지 슬롯을 채워서 작업량이 유지되고 있는 모습을 가시화할 수 있다. 그리고 비어있는 슬롯을 쉽게 확인할 수 있어 작업량 배정에 쉽게 의사결정을 할 수 있다. 슬롯의 크기는 평가된 제작 실적을 기본으로 하며, 협력사의 제작 능력 평가 결과를 반영하여 추가 물량의 배분도 가능하도록 가상 슬롯의 개념을 추가하였다. 즉 생산 능력의 효율성이 높아지면서 배분이 가능한

빈 슬롯의 증가 속도가 높은 경우, 현재의 제작 능력이 낮게 평가되었다고 판단하여 추가의 물량을 배분할 수 있도록 슬롯 자체를 가상으로 늘려주는 개념이 된다. 현재 슬롯 상에 머물고 있는 물량은 제작 착수에서부터 최종 제작 반출까지 현재 제작 작업장에 걸려있는 전체 물량으로 평가하였다. 물량 배분은 일 단위로 진행되며, 설계 과정을 통해 새로운 물량이 산정되었을 때 수행된다. 전체 과정은 Fig. 2에 도식화한 것과 같은 순서로 진행된다. 우선 1차 물량 배분에 앞서 협력사의 제작 능력을 평가한다. 평가된 제작 능력에 현재의 제공 재고를 제외하여 배분 가능한 물량을 계산한다. 각 협력사별로 배분 가능한 물량에 대해 공정 부하를 균일하도록 1차 배분을 진행한다. 2차 배분부터는 각 협력사의 제작 능력을 고려하여 추가적인 물량을 배분하는 방식이 된다. 각 협력사별로 제작 능력을 평가하고, 평가된 제작 능력만큼 제작 능력을 조정한다. 이렇게 평가된 결과를 근거로 2차 이후의 물량 배분을 진행한다. 2차 물량 배분 후에 잔여 물량이 발생하는 경우에는 제작 능력 평가에 따라 잔여 물량을 추가로 배분한다. 추가 물량의 경우 제작 능력이 우수한 협력사 입장에서 공정 개선 및 공정 관리에 대한 보상의 개념이 된다. 이러한 배분 방식을 일 단위로 수행한다. 이를 위해서는 앞서 제작 공정 관리 시스템에서 기술한 바와 같이, 제작 공정 상황을 매일 단위로 체크를 하며 이 데이터를 참고하여 배분을 진행한다. 또한 협력사에서 납품하는 제품에 대한 품질 관리 실적도 물량 산출의 지표로 활용하여 공정 및 품질이 동시에 관리되도록 유도하였다. Fig. 3에 협력사의 물량 배분에 대한 전체적인 프로세스를 도식화 하였다. 설계로부터 물량이 산출된 후부터 협력사에서 제작 가능한 물량별로 물량을 구분하고, 구분된 물량에 대해 제작 가능한 협력사에 대해 순차적으로 배정하는 방식이다. 물량 배정은 협력사마다 보유한 빈 슬롯의 개수를 평가하고, 빈 슬롯에 순차적으로 물량을 하나씩 넣어가면서 협력사의 부하율을 체크하는 방식으로 배정을 한다. 협력사의

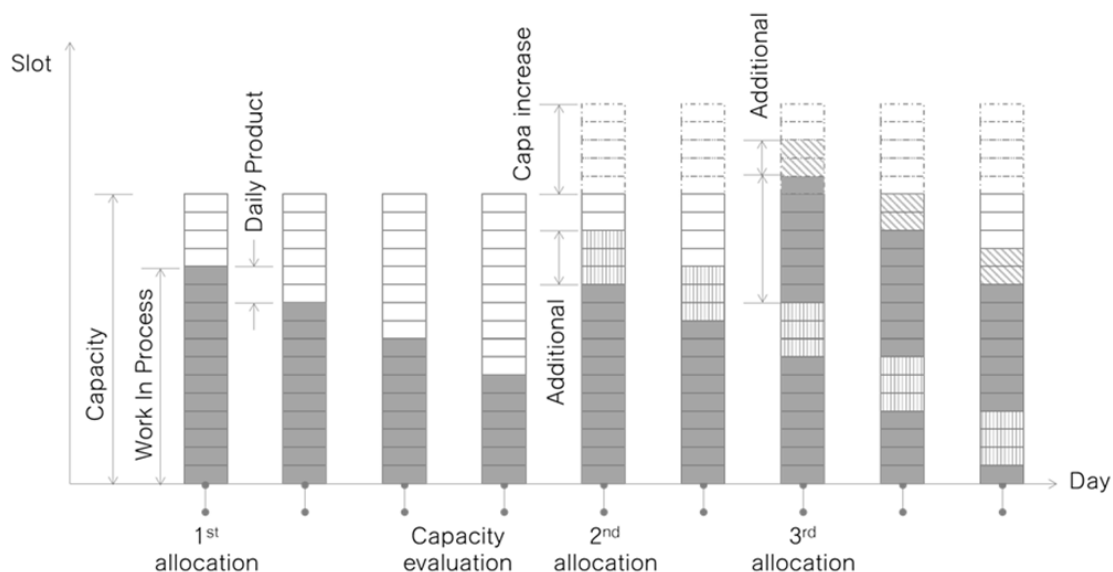


Fig. 1 Composition of the total system algorithm for installation readiness rate management

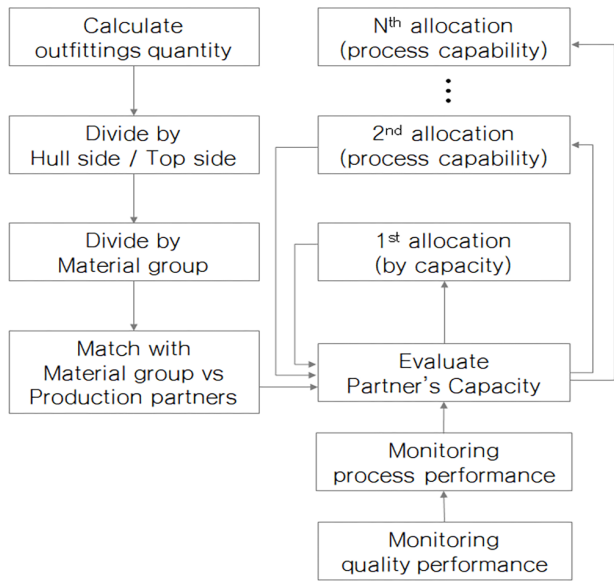


Fig. 2 Quantity allocation and management process

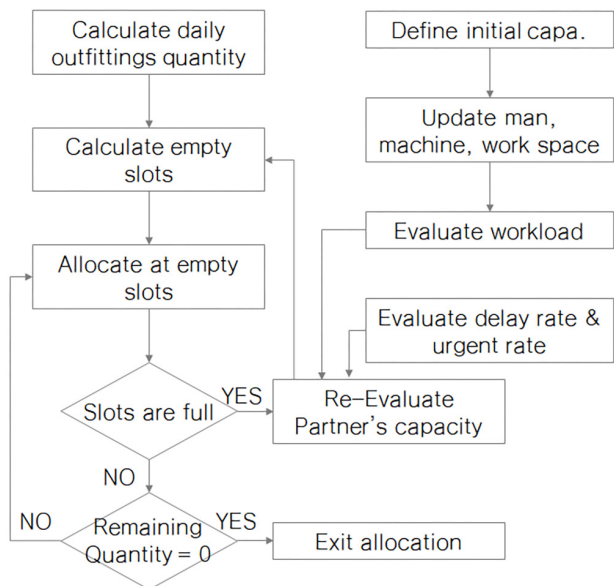


Fig. 3 Function diagram of optimal quantity allocation system

부하율이 일정 값에 이르면 배분을 중단하며, 나머지 잔여 물량은 빈 슬롯이 있는 곳에 배정을 진행한다. 다만, 물량 배정을 일 단위로 수행하기 때문에 배정될 슬롯이 없는 경우는 거의 발생하지 않는다. 배정될 슬롯이 없어지는 협력사가 발생하는 경우에는 협력사 제작 능력 평가를 재 실시하며, 이 평가 결과를 통해 가상의 슬롯을 추가 생성하여 물량을 배정받을 수 있도록 구성하였다. 이러한 방식은 단순한 배분 루프의 반복을 통해서 아래 Fig. 3과 같이 간단히 구현할 수 있다.

2.2 제작 물량 및 일단위의 표준화

다양한 종류의 제품에 대해 물량 배정을 진행하기 위해 제작 물량의 단위, 협력사에서 공정을 진행하는 일의 단위(work

rate)를 표준화하였다.

제작 물량의 단위는 다음과 같이 정의하였다. 배관재의 경우는 용접장의 길이로 정의하였다. 배관재는 원형의 용접장을 가지게되므로 직경 정보와 두께 정보를 통해 총 용접장을 평가할 수 있다. 제작 작업 지시가 될 스펴 각각에 대해 스펴 단위로 용접장을 평가하여 스펴당 일의 양을 정의하였다. 배관재 외의 일반 철의장품의 경우는 다양한 형상, 용접부위 등으로 인해 용접장을 산출하는 작업이 매우 어렵다. 또한 용접 작업 외에 형상에 따른 조립 난이도가 전체 제작 시간에 더 중요한 요인으로 작용하고 있어서 일의 양을 정량적으로 평가하기 어려운 점이 있다. 이로 인해 통상 철의장품의 경우 무게 단위로 일량을 정의하고 있다.

협력사에서 진행하는 공정의 일의 단위(work rate)는 앞서 정의한 일량을 바탕으로 전체 공기를 나누어 정의하였다. 이를 통해 각각의 의장품마다 하루 단위로 수행해야하는 일의 단위가 산출이 된다. 각각의 의장품들은 제작 착수일과 최종 납품일이 다르게 설정이 되어 있다. 따라서 착수일에서 최종 납품일까지 작업이 지속적으로 진행된다고 가정하고 일의 양을 전체 일정에 균등하게 배분하여 제작 능력을 평가하도록 하였다. 또한 각각의 협력사들의 전체 제작 능력도 이러한 일의 단위로 동일하게 평가하였다. 협력사에서 하루 단위로 총 수행 가능한 일의 양을 기본적인 제작 능력으로 산정하고, 작업자의 추가 투입 혹은 다양한 원인으로 발생한 생산성의 향상 등은 수행 가능한 일의 양을 재 평가하는 방식으로 반영하였다.

3. 물량 배정 최적화 시스템의 정식화

3.1 물량 배정 최적화의 개념 설계

표준화된 일 단위로 각각의 슬롯에 물량을 할당하기 위해 선형 최적화 문제를 정의하였다. 선형 최적화 문제는 다음과 같이 자재를 일정에 맞게 납품 받기 위해, 어떤 제작 협력사에 어떤 물량을 배정할 것인지로 정의하였다. 최적화의 목표는 각 협력사별로 제작 협력사의 제작 능력(capacity), 공정 상황, 납품 품질을 고려하여 공정하게 물량이 할당되는 것으로 하였다. 또한, 제작 업체에 적절한 물량을 할당하여 제작품의 납기일을 준수하는 것을 목표로 하였다. 이를 위한 세부 목표로는 첫째, 제작 협력사에 할당된 제작품의 물량이 적절한지 판단하기 위해 제작품들의 표준 일량을 정의하였다. 그리고 제작품의 재질과 제작에 필요한 세부 공정에 따라 각 협력사들에서 제작품의 제작 가능 여부를 정의하였다. 마지막으로 일의 량을 표준화하여 협력사별로 가지고 있는 시설, 인력, 현재의 납품 품질에 따라 제작 능력을 정의하였다. 이를 위한 수리 모델은 다음의 개념을 가지고 설계하였다. 첫째, 협력사들 간의 제작 제작 능력 대비 할당되는 물량의 비율의 차이를 최소화 하도록 하였다. 둘째, 협력사들 간의 긴급도별 물량에 대해 배정되는 물량의 비율의 차이가 최소가 되도록 하였다. 나머지 고려한 제약사항으로는

하나의 제작품은 반드시 한 곳의 협력사에만 배정을 한다는 것과, 배정하고자 하는 모든 제작품은 반드시 배정하여야 한다는 것이다.

특별히 각 협력사별로 제작 능력을 정의하기 위하여, 일(day)단위의 평균 소요 일량(work load)을 정의하였다. 이를 위해 각 제작품별로 소요되는 평균 사이클 타임을 계산하고, 각 제작품에 대해 일량을 사이클 타임으로 나누어 일(day)단위의 일량(work load)을 정의하였다.

3.2 정수 최적화 모델링

위에서 정의한 정수 최적화 문제를 모델링하기 위해 아래와 같이 결정 변수 및 매개 변수를 정의하였다.

1) 결정 변수

$x_{p,i} \in \{0,1\}$: 제작품에 대해 제작 협력사에 할당되었는지 여부를 나타내는 결정 변수. 하나의 스펙은 반드시 하나의 제작 협력사에 할당되어야함. p는 제작품을, i는 제작 협력사를 지칭

$LOD_{i,j,t} \geq 0$: 제작 협력사 i와 j의 시간 t에서의 할당된 소요 일량의 양의 차이

$LUD_{i,j,t} \geq 0$: 제작 협력사 i와 j의 시간 t에서의 할당된 소요 일량의 음의 차이

$ID_{i,t} = LUD_{i,j,t} - LOD_{i,j,t} \geq 0$: 제작 협력사 i와 j의 시간 t에서의 할당된 소요 일량의 비율 최대 차이를 계산

$EOA_i \geq 0, EOB_i \geq 0, EOC_i \geq 0$: 제작 협력사 i의 할당된 자재들의 전체 할당 공정 소요에 대한 정상, 준긴급, 긴급 자재들의 양의 비율의 차이

$EUA_i \geq 0, EUB_i \geq 0, EUC_i \geq 0$: 제작 협력사 i의 할당된 자재들의 전체 할당 공정 소요에 대한 정상, 준긴급, 긴급 자재들의 음의 비율의 차이

2) 매개변수

$poss_{p,i}$: 자재 p가 제작 협력사 i에서 제작이 가능한지 여부, 제작 물성에 따라 값이 0 또는 1로 값을 설정

a_p, b_p, c_p : 자재 p의 납품 요청의 긴급도가 정상, 준긴급, 긴급인지의 여부. a 정상, b 준긴급, c 긴급으로 정의

r_a, r_b, r_c : 전체 할당 공정의 소요 일량에서 긴급도가 정상, 준긴급, 긴급인 물량이 차지하는 비율

sd_p, ed_p : 자재 p의 제작 공정 시작 일자(sd)와 종료 일자(ed)

w_p : 자재 p의 공정 소요 일량 (work load)

$cum W_{i,t}$: 제작 협력사 i의 일자 t에서 이전의 배정 결과로 인해 이미 배정되어 있는 총 일량

w_1, w_2, w_3, w_4 : 목적 함수 상의 각 항의 중요도를 표현하기 위한 가중치

ODC_i : 제작 협력사 i에서의 협력사 별 제작 가능 능력

3) 최적화 모델의 목적 함수

앞서 정의한 결정 변수와 매개 변수를 활용하여 아래와 같이 목적 함수를 정의하였다. 목적함수는 각 협력사별 공정 부하의 차이를 나타내는 $ID_{i,t}$ 의 합을 최소화하고, 또한 각 긴급도별 물량 비율의 차이의 합을 최소화하도록 하였다.

$$\min \left\{ \begin{aligned} & w_1 \sum_i \sum_t ID_{i,t} + w_2 \sum_i \frac{EOA_i - EUA_i}{r_a \sum_p w_p} \\ & + w_3 \sum_i \frac{EOB_i - EUB_i}{r_b \sum_p w_p} + w_4 \sum_i \frac{EOC_i - EUC_i}{r_c \sum_p w_p} \end{aligned} \right\}$$

4) 최적화 모델의 제약 조건 함수

앞서 정의한 목적 함수의 제약 조건을 결정하기 위해 아래와 같은 제약 조건 함수를 정의하였다.

$x_{p,i} \leq poss_{p,i}$: 제작 가능한 협력사의 수는 1개 이상

$\sum_i x_{p,i} = 1$: 하나의 스펙은 하나의 제작 협력사에 할당

$$\begin{aligned} & \frac{(ODC_i - cum W_{i,t} - \sum_p \frac{1}{ed_p - sd_p} \times w_p \times x_{p,i})}{ODC_i} \\ & - \frac{(ODC_j - cum W_{j,t} - \sum_p \frac{1}{ed_p - sd_p} \times w_p \times x_{p,j})}{ODC_j} \\ & = LUD_{i,j,t} - LOD_{i,j,t} \leq ID_{k,t} \end{aligned}$$

: 제작 협력사에 할당된 소요 일량의 차이를 계산

$$r_a \sum_p (w_p \times x_{p,i}) - \sum_p (a_p \times w_p \times x_{p,i}) = EOA_i - EUA_i$$

$$r_b \sum_p (w_p \times x_{p,i}) - \sum_p (b_p \times w_p \times x_{p,i}) = EOB_i - EUB_i$$

$$r_c \sum_p (w_p \times x_{p,i}) - \sum_p (c_p \times w_p \times x_{p,i}) = EOC_i - EUC_i$$

: 제작 긴급도별로 할당된 비율의 차이를 계산

4. 물량 배정 최적화 적용 및 검증

4.1 검증을 위한 비교 대상 선정

정수 선형 최적화 모델을 활용한 물량배분 엔진의 검증을 위해 실제 해양플랜트 제작 물량의 배정에 적용하여 알고리즘을 검증하였다. 이를 위해 속련도가 높은 물량 배정 담당자가 수작업으로 배정을 한 결과와 최적화 엔진이 연산한 결과를 비교하였다. 11개의 협력사가 존재하는 의장품에 대해 특정 기간에 발행된 제작 작업 지시 물량을 배정하여 비교 하였으며, 서로의 배정 결과를 모르는 상태에서 블라인드 방식으로 진행하였다. 배정 후 협력사의 부하를 비교 평가할 수 있도록 물량 배정에 앞서 각 협력사의 제작 제작 능력 및 현재의 공정 부하 값은 동

일한 값으로 세팅하여 제시하였다. 그리고 각각의 제작사별로 제작 가능한 물성 정보는 사전에 공유하여 동일하게 적용하였다. 이러한 사전 정보 공유를 통해 배정 방식에 의한 차이만 비교될 수 있도록 다른 요인들은 모두 통제하였다. 배정 대상이 특정 협력사에만 배정될 수 있는 특수한 물성이면 배정 방식의 차이를 확인할 수 없으므로 배정할 각각의 제작품은 두 개 이상의 협력사에서 제작이 가능한 물성으로 선택하였다. 다만 모든 협력사가 모든 종류의 의장품을 제작할 수 없으며, 특정 그룹의 물성은 특정 몇몇 협력사에서만 특정 물성을 제작할 수 있다. 따라서 최종 배정된 후의 협력사별 공정 부하는 모두 균일할 수는 없다.

4.2 최적화 배정과 수작업 배정 결과의 비교

Table 1에 담당자의 직관에 의해 배분된 결과와 물량 배정 알고리즘을 통해 배분된 결과를 비교 하였다. 11개의 협력사를 A~K의 이름으로 정의하였고, 각 협력사별로 제작 능력을 동일한 단위로 평가하였다. 수작업 배분 시 판단의 어려움이 가중될 수 있어서 기존 협력사에서 작업 중인 재공재고는 없는 것으로 가정하였다. 협력사의 제작 능력을 기준으로 제작 능력 대비 공정 부하를 균등하게 하는 것을 이상적인 목표값으로 하여 알고리즘을 수행하였다. 숙련된 배정 작업자의 경우, 기존의 업무 프로세스 혹은 업무 감각에 따라 배정하였으며, 배정 작업에 엑셀 등의 기존 도구는 활용하도록 하였다. 제작 능력은 당일 평가 결과를 기준으로 사가 가장 능력이 우수한 것으로 사전 평가를 하였고, K사의 추가 물량 배정률을 20%로 가정하고 알고리즘 수행 및 수작업 배정을 진행하였다.

A, B, C, E 사의 경우 수작업 배분과 자동 배분이 매우 유사한 결과가 나타났다. 이는 대부분 제작해야 하는 물성이 두 개

인 협력사에만 해당하는 경우여서 물량 배정을 자동으로 하는 것과 수작업으로 배정하는 방식과의 큰 차이를 나타낼 수 없기 때문으로 해석된다. 전체적으로는 협력사의 평균 부하율이 수작업 배분에서의 0.66에 비해 0.72로 약 6% 상승하는 것을 확인할 수 있다. 공정 부하율의 표준편차 또한 수작업 배정의 경우 0.252에서 자동 배정의 경우 0.089로 매우 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 자동 물량 배정을 통해 각 제작 협력사는 매우 유사한 공정 부하를 유지할 수 있음을 확인할 수 있다.

그리고 Table 2에 긴급도가 긴급, 준긴급인 물량이 배정된 4개 협력사에 대해 긴급도별 배정 결과를 비교하였다. 긴급도별로 각 협력사마다 유사하게 배정되는 것이 목표이므로, 배정된 각 긴급도별로 표준편차를 비교하였다. Table 2에 표기한 바와 같이 자동배정의 경우, 수기배정에 비해 표준편차가 크게 감소함을 확인할 수 있다.

앞선 고찰을 통해 물량 배정 최적화 엔진의 타당성을 검증하였다. 다만, 최적화 엔진이 모든 것을 다 정확히 반영할 수 없으며 실제 업무 프로세스로 진행하기 위해서는 사용자가 인터페이스 할 수 있는 시스템이 반드시 필요하다. Table 1의 결과 중, D사의 수작업 배정 결과는 배정 작업에서 사람의 정책적인 판단이 들어간 경우로, 협력사의 물량을 전체적으로 감소시키고자 하는 담당자의 의도가 수작업 배정에 반영이 되었다. 이러한 경우 최적화 엔진에서는 아직 반영할 수 있는 알고리즘이 없어서 배정 결과에 차이가 많이 발생하였다. 이러한 경우는 사용자가 인터페이스 할 수 있는 시스템을 이용하여 사전에 예외적인 정책을 반영하는 프로세스가 필요하다. J사의 경우에도 수작업 배분율이 매우 높게 나타나는데, 이는 담당자의 임의 배정값이 높게 작용한 경우이고, 제작사의 제작 능력이나 잔여 부하와 관계없이 회사의 전략적인 물량 배분 정책에 의해 결정된 값이다. 앞서 언급한 D사와 J사와 같은 케이스가 실제 운영 과정에서 발생할 수

Fig. 4 User interface development example for using quantity allocation optimization engine

Table 1 Comparison of manual allocation and automatic allocation results

partner	capacity	manual alloc.	work load	optimize alloc.	work load
A	53,000	39,270	74%	38,176	72%
B	25,000	22,950	92%	20,643	83%
C	105,000	89,474	85%	79,569	76%
D	10,500	1,599	15%	7,131	68%
E	33,200	23,201	70%	21,325	64%
F	45,000	18,886	42%	31,921	71%
G	22,500	15,950	71%	12,755	57%
H	63,500	24,773	39%	48,317	76%
I	18,500	10,586	57%	16,312	88%
J	78,000	73,562	94%	49,484	63%
K	35,000	30,531	87%	25,149	72%
AVG	-	-	66%	-	72%
STDV	-	-	0.252	-	0.089

Table 2 Comparison of manual allocation and automatic allocation results with urgent rate

partner	manual			optimize		
	U	Q	N	U	Q	N
A	41%	12%	47%	10%	20%	70%
C	4%	13%	82%	4%	14%	82%
E	50%	-	50%	5%	13%	82%
F	-	-	100%	7%	8%	85%
STDV	0.25	0.07	0.26	0.03	0.05	0.07

U:Urgent 긴급, Q:Quasi-Urgent 준긴급, N:Normal 정상

있으며, 이는 시스템의 알고리즘에서 반영하기 보다는 운영 프로세스에서 고려할 수 있도록 해야 한다. 이를 위해 Fig. 4와 같이 최적화 엔진에서 배정한 결과를 현업 담당자가 회사의 정책에 맞추어 수정 배정할 수 있도록 사용자 환경을 구축하였다.

5. 결론

이번 연구를 통해 조선해양 의장품의 제작 협력사의 제작 물량을 최적으로 배정할 수 있는 엔진을 개발하였다. 최적화 엔진은 정수 최적화 모델을 기반으로 구성하였으며, 협력사별로 공정 부하를 균등하게 물량을 배정할 수 있도록 하였다. 이를 통해 특정 협력사에 물량이 편중되어 공정이 지연되거나, 반대로 특정 협력사에 물량이 부족하여 제작 능력을 상실하는 상황을 사전에 방지하고자 하였다. 최적화 엔진의 적용을 통해 각 협력사별로 적기에 제작을 완료하여 납품할 수 있는 가능성이 높아졌으며, 이를 통해 의장품 제작 이후의 생산 공정을 안정화 할 수 있었다. 또한 제작 협력사에는 긴급도별 물량이 골고루 배정되어 제작 공정의 안정화를 추구할 수 있었다. 이번 연구에서는 제작 공정에 대해 물량배정 자동화 엔진을 개발하였지만, 향후

연구를 통해 제작 이후의 공정, 즉 도장 및 후처리 공정의 현황 및 협력사별 제작 능력을 반영할 필요성이 있다. 이러한 물량 배정의 자동화로 기대되는 효과로는 조선소로 최종 공급되는 제작품의 물량이 안정적으로 수급되어 설치 공정의 생산성 향상, 선행 의장품의 실질적인 상생을 기대할 수 있다.

References

- Cho, D.Y., Song, H.C., & Cha, J.H., 2011. Simulation of block and logistics control. *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(4), 24-29.
- Kim, K.S., & Ryoo, H.S., 2006. An MILP approach to a nonlinear pattern classification of data. *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 32(2), pp.74-81.
- Koh, S., Logendran, R., Choi, D., & Woo, S., 2011. Spatial scheduling for shape-changing mega-blocks in a shipbuilding company. *International Journal of Production Research*, 49(23), pp.7135-7149.
- Park, J.G. & Woo, J.H., 2018. A study on process management method of offshore plant piping material. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(2), pp.124-135.
- Park, Y.K., Lee, M.G., Jung, K.K., & Won, Y.J., 2016. Design of mixed integer linear programming model for transportation planning. *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, 53(11), pp.1754-1759.
- Roh, M.I., 2012. Block layout method in the block stockyard based on the genetic algorithm. *Ocean Systems Engineering*, 2(4), pp.271-287.
- Zhuo, L., Chua, K. H. D., & Wee, K. H., 2012. Scheduling dynamic block assembly in shipbuilding through hybrid simulation and spatial optimization. *International Journal of Production Research*, 50(20), pp.5986-6004.

