한국정밀공학회지 제 16 권 제 11 호 (1999 년 11 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 11, November 1999.

조선에서의 조립공정계획과 일정계획의 지능형 통합시스템 개발

조규갑*, 류광렬**, 최형림***, 오정수****

Development of Integrated Assembly Process Planning and Scheduling System in Shipbuilding

Kyu Kab Cho*, Kwang Ryel Ryu**, Hyung Rim Choi***, and Jung Soo Oh****

ABSTRACT

The block assembly process takes more than half of the total shipbuilding processes. Therefore, it is very important to have a practically useful block assembly process planning system which can build plans of maximum efficiency with minimum man-hours required. However, the process plans are often not readily executable in the assembly shops due to severe imbalance of workloads. This problem arises because the process planning is done on block by block basis in current practice without paying any attention to the load distribution among the assembly shops. This paper presents the development of an automated hull block assembly process planning system which results in the most effective use of production resources and also produces plans that enable efficient time management. If the load balance of assembly shops is to be considered at the time of process planning, the task becomes complicated because of the increased computational complexity. To solve this problem, a new approach is adopted in this research in which the load balancing function and process planning function are iterated alternately providing to each other contexts for subsequent improvement. The result of case study with the data supplied from the shipyard shows that the system developed in this research is very effective and useful.

Key Words : Assembly process planning(조립 공정계획), Load balancing(부하 평준화), Integration of process planning and scheduling(공정계획과 일정계획의 통합)

1. 서론

현재 대부분의 선박 건조는 블럭분할 공법에 따라 이루어지며, 대형 선박의 경우에 일반적으로 200 여 개의 블럭으로 분할되어 건조된다. 분할된 블럭은 개별적으로 선각 조립 공장에서 조립하며, 도크(dock)에서 대형 크레인을 사용하여 완성된 각 블럭을 탑재하여 선박으로 만들고 있다. 블럭 조립 공정은 전체 선박 건조 공정의 절반 이상을 차지하고 있다. 따라서 최소 공수의 효율적인 계획을 생성할 수 있는 블럭 조립 공정계획 시스템이 실제 현장에 아주 필요하다.

* 부산대학교 산업공학과, 부산대학교 기계기술연구소
** 부산대학교 컴퓨터공학과, 부산대학교 기계기술연구소
*** 동아대학교 경영정보학과
**** (주)현대중공업

한편, 조선에서의 선박건조를 위한 일정계획은 선박 주문으로부터 실제 조립 작업이 이루어지기까지 계획 시점과 계획 기간의 범위에 따라 선표계획 및 종합일정계획(master scheduling) 등을 포함하는 장기계획, 중일정계획, 작업일정계획 순으로 진행된다. 장기계획과 중일정계획은 과거에 생산 경험이 있는 유사 선종의 정보에 근거한 추정치들을 바탕으로 설비와 자재 관리, 인력수급, 강재 발주 및 작업장간 월별 부하평준화를 도모하는데 사용된다. 조선 생산의 특성상 공정계획은 중일정계획 수립 시점 이후에 완료되며, 작업일정계획은 확정된 블럭별 공정계획 정보 중 실제 공수를 바탕으로 작업장간, 작업반별, 일자별 부하를 다시 평준화 시킴으로써 현장에서 실제로 실행 가능한 계획을 수립한다. 각 단계의 일정계획 수립 시 하위의 일정계획은 현재의 현장 상황을 최대한 반영함과 동시에 상위의 일정계획에서 결정된 사항들을 최대한 지키는 방향으로 수립된다.

그러나, 개개 블럭별로 최소의 공수를 가지도록 수립된 기존의 공정계획은 공장 내 전체 작업장의 부하상태를 고려한 것이 아니기 때문에, 각 블럭을 이 계획에서 지정된 작업장에서 그대로 조립할 경우 특정 일자에 특정 작업장의 부하가 처리 능력을 초과함으로써 조립 작업의 수행이 실제로 불가능하게 되는 수도 있다. 현재의 선각 블럭 조립 공정계획은 수백 개의 블럭이 각각 독립적으로 개별적인 차원에서 수작업으로 수립되고 있으며, 작업장의 부하 상태를 전혀 고려하지 못하고 있다[1].

공정계획과 일정계획의 통합에 관련된 연구는 [illegible] 분야를 대상으로 일부 수행되어 왔으며, 특히 선박건조에서 블럭 조립에 관련된 공정계획과 일정계획의 통합에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 논문에서 제시하는 조립공정계획과 일정계획의 지능형 통합 시스템에는 Fig. 1 과 같이 기존의 조립공정계획과 일정계획 수립절차와는 다르게 2 단계로 구성된 새로운 개념의 접근방법을 사용하고 있다. 단계 1 (Phase 1)에서는 개개 선각 블럭을 최소공수로 조립할 수 있도록 조립 공정계획을 자동으로 수립한다. 이 단계에서 생성된 계획정보에는 각 블럭을 최소 공수로 조립하기 위한 최적 작업장 뿐만 아니라 공수가 다소 증가하더라도 조립은 가능한 대안 작업장들 까지 포함하게 되어 있다. 단계 2(Phase 2)에서는 이미 수립되어 있는 중일정계획의 블럭별 조립 착수 완료일에 따라 단계 1 에서 결정된 최적 작업장으로 블럭들을 배정한 후 전체 작업장의 부하와 각 작업장마다의 일자별 부하를 계산한다. 이 때 평준화의 정도가 만족스럽지 못하면 일부 블럭들을 최적 작업장으로부터 대안 작업장으로 옮김으로써 부하를 평준화할 수 있도록 최적화 탐색을 수행한다. 이러한 과정을 거친 후에도 평준화 정도가 만족스럽지 못할 경우에는 일부 블럭의 조립 방법 자체를 변경함으로써 문제 작업장의 부하를 경감하고 상대적으로 여유가 있는 작업장에서 더 많은 조립작업이 이루어 지게 하는 방안을 강구해야 한다. 이를 위해서 본 시스템에서는 부하평준화 후 과부하 작업장의 블럭들 중 조립방법의 변경을 통

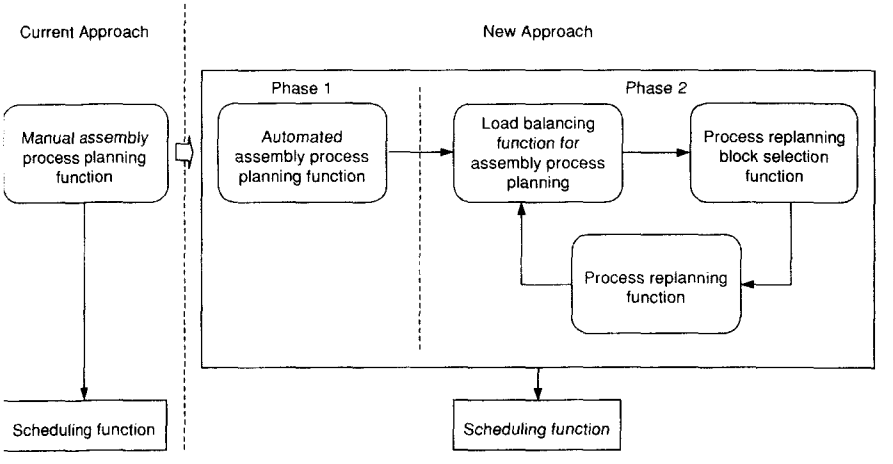

Fig. 1 Concept of a new approach adopted in this paper

해 작업장간 공수 배분을 유리한 방향으로 재조정하는데 적합한 재공정계획 대상 블럭들을 선정하는 작업을 수행한다. 이 선정 작업은 작업장 간 공수 재분배의 예상 누적효과가 부하평준화를 만족스러운 수준까지 개선시키는 것으로 판단될 때까지만 계속된다. 그 다음에는 이들 선정 블럭들에 대한 실제 재공정계획이 수행된다. 재공정계획의 결과 실제로 얻게 되는 작업장 간 공수 재분배의 효과는 예상과 다를 수 있다. 따라서, 공장 전체의 부하를 계산하고 다시 "조립 작업장의 부하평준화 → 재공정계획 대상블럭 선정 → 재공정계획"의 순환 구조를 반복함으로써 작업장의 부하평준화까지 고려하는 조립 공정계획을 생성할 수 있다. 이렇게 부하를 고려한 최적 공정계획을 생성함으로써 이 후 작업일정계획 단계에서는 실행가능한 일정계획의 수립이 보다 용이해 진다. 참고문헌 [1]은 이러한 시스템의 개발을 위한 방향을 개념적인 수준에서 소개하고 있는데 반해, 본 논문에서는 그 후속 연구에 따른 구체적 방법론과 시스템 개발 결과를 제시하고 있다.

시스템은 PC 환경에서 운용되도록 개발되었으며, 전문가시스템 개발용 도구로 CLIPS(Version 6.03), 휴리스틱 등의 알고리즘 구현에는 Visual C++, GUI(Graphic User Interface) 환경의 구현에는 Visual Basic, 그리고 선각 블럭의 입체 형상을 출력하기 위해서는 AutoCAD R14를 각각 사용하였다. 본 논문에서 개발된 시스템은 실제 사례연구를 통하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 조립공정계획의 자동화

2.1 선각 블럭의 표현

블럭 조립품(block assembly)을 A라고 하면, A는 부품들 사이의 기하학적 관계를 유지하면서 조립순서, 조립방법 등에 의해 하나의 조립 단위로 결합되어 있는 부품들의 그룹이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 블럭 조립품 A를 표현하기 위해 최종블럭 A를 구성하고 있는 모든 부품의 리스트를 나타내는 집합인 $P(A)$, 최종블럭 A의 attributed connection graph를 나타내는 집합인 $G(A)$, 그리고 조립베이스 정보를 중심으로 최종블럭 A의 조립단위 구조, 조립방법 등을 포함한 최종블럭 A의 계층적 구조를 나타내는 조립트리(Assembly Tree; AT)를 개발하여 사용하였다.

접속관계 그래프는 마디(node)의 집합 N과 모서리(edge)의 집합 E로 구성된 $G = (N, E)$ 형태로 표현할 수 있는 그래프 G로 표현할 수 있다. 마디는 블럭의 각 부품에 대응되며, 모서리는 두 부품 사이의 접속관계에 대응된다. 본 논문에서 사용하는 부품 접속관계 그래프(Attributed Connection Graph; ACG)는 각 마디와 모서리에 프레임(frame) 형태의 정보가 부가된 형태의 그래프이다. ACG의 각 마디와 모서리에 포함되는 프레임 정보는 부품 정보와 부품접속관계 정보이다[1, 2, 3]. 마디에 표현되는 부품 관련 정보는 부품의 번호, 종류, 크기, 무게 등이 있으며, 모서리에 표현되는 접속관계 관련 정보는 접속번호, 접속방향, 접속형태, 접속길이 등이 있다[1, 4].

블럭의 계층적인 구조를 표현할 수 있는 조립트리는 조립단위, 조립공정 등을 표현하는데 사용된다. 조립트리는 조립단위의 구성요소 정보와 조립단위 사이의 관계 정보를 포함하고 있다. Fig. 2는 초기 조립트리 및 최종 조립트리 구조의 한 예를 들어 나타낸 것이다[1, 2].

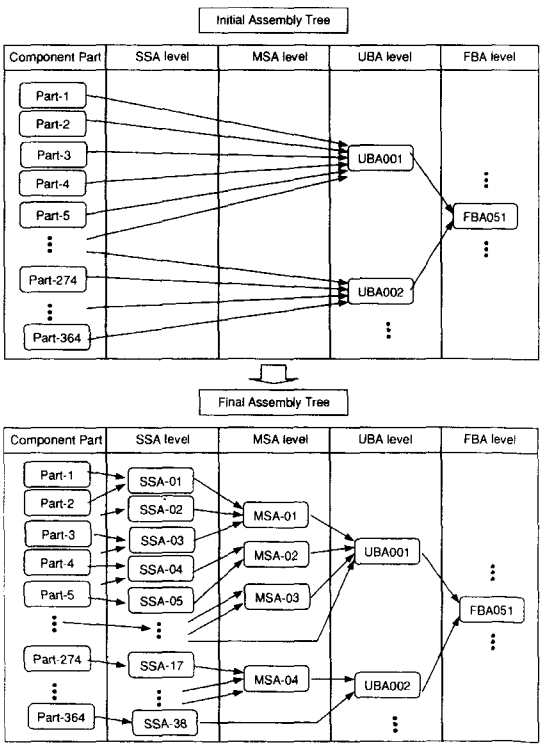

Fig. 2 Example of an initial assembly tree and a final assembly tree

선각블럭의 조립단위에는 소조립(Small SubAssembly; SSA) 단위, 중조립(Mid SubAssembly, MSA)단위, 단위블럭(Unit Block Assembly; UBA)단위 및 최종블럭(Final Block Assembly; FBA)단위가 있다[4]. 초기 조립트리는 CAD 시스템으로부터 제공되는 블럭의 구조 정보와 블럭 분할 정보를 기반으로 블럭의 기본적인 구성 정보를 나타낸다. 기본적인 구성 정보는 최종 블럭을 구성하고 있는 단위블럭 리스트와 단위블럭을 구성하고 있는 부품 리스트 정보로부터 Fig. 2 의 초기 조립트리와 같이 최종블럭과 단위블럭 사이의 구조와 단위블럭과 단위블럭을 구성하고 있는 부품들 사이의 구조를 계층적 구조로 표현한 것이다. 최종 조립트리는 초기 조립트리의 구조 정보, 부품 정보 및 부품 사이의 접속관계 정보를 사용하여 Fig. 2 의 최종 조립트리와 같이 모든 조립단계에서의 최종 블럭의 계층적 구조를 나타내며, 자동화된 조립 공정계획의 결과로 생성된다. 최종 조립트리의 마디에는 조립단위에 관련된 정보가 저장되며, 모서리에는 조립단위를 구성하고 있는 부품 정보 및 조립 정보를 포함하고 있다.

2.2 선각 블럭 조립 공정계획 자동화

선각 블럭 조립 공정계획 모듈은 조립단위를 자동으로 결정하는 기능과 결정된 각 조립단위에 대해 조립방법, 조립작업장 등의 조립정보를 자동으로 생성하는 기능으로 이루어져 있다.

2.2.1 조립단위의 결정

조립단위 결정 과정은 단위블럭의 조립베이스 단위 결정, 소조품 단위 결정, 중조품 단위 결정, 단위블럭 조립정보 생성 및 최종블럭 조립정보 생성의 5 단계로 이루어져 있다.

[단계 1] 단위블럭의 조립베이스 결정 및 조립 정보 생성 : 단위블럭을 구성하고 있는 부품들 중에서 단위블럭의 조립베이스가 되는 부품들을 선정하여 하나의 조립단위로 구성하고, 관련 조립 정보를 생성한다.

[단계 2] 소조립품 단위 결정 및 조립 정보 생성 : 단위블럭의 구성품 중에서 단위블럭의 조립베이스를 제외한 나머지 부품들 중에서 소조립품 단위를 결정한다. 소조립품 단위 결정은 소조립품의 조립베이스부터 결정한다. 소조립품의 조립베이스가 결정되고 나면 조립베이스를 기준으로 조립 결정 기준에 따라 최하위 단위의 부품끼리만 조립되는 소조립품 단위들을 선정한다.

[단계 3] 중조립품 단위 결정 및 조립 정보 생성 : 중조립품 단위를 구성하고 있는 부품은 소조립품 단위이며, 중조립품 단위의 결정은 구성 부품인 소조립품 단위 중에서 조립베이스가 되는 소조립품을 먼저 선정하여야 한다. 조립베이스로 선정된 소조립품을 기준으로 중조립품을 구성할 수 있는 소조립품을 선정하여 중조립품 단위를 결정한다.

[단계 4] 단위블럭의 조립 정보 생성 : 단위블럭은 소조립품과 중조립품으로 구성되어 있으며, 단계 1 에서 결정한 단위블럭의 조립베이스와 이 단위블럭에 소속되어 있는 소조립품과 중조립품을 조립할 때 필요한 조립 정보를 생성한다.

[단계 5] 최종블럭의 조립 정보 생성 : 최종블럭은 단위블럭으로 구성되어 있다. 블럭 분할 정보로부터 제공되는 최종블럭의 구성과 최종블럭의 조립베이스 정보를 이용하여 최종블럭의 조립베이스가 되는 단위블럭을 기준으로 최종블럭을 조립하는데 필요한 정보를 생성한다.

각 단계에서 사용되는 조립베이스 결정, 부품 검색 및 선정 방법은 다음과 같으며, 소조립 단위, 중조립 단위, 단위블럭 단위, 최종블럭 단위의 결정에 동일하게 적용할 수 있다.

● 조립단위의 조립베이스 결정

조립베이스(assembly base)는 조립 과정에서 조립단위를 형성하기 위해 구성 부품들을 붙여 나가는데 베이스(base)가 되는 부품으로[5], 선각 블럭의 조립단위, 조립방법, 조립순서 등의 조립관련 정보 생성시 중요한 기준으로 작용한다. 조립베이스의 결정에서는 부품 형태가 강판인 경우에 대해서 면적이 가장 넓은 부품을 조립베이스로 결정하게 되며, 조립단위는 선정된 조립베이스를 기준으로 접속되어 있는 부품을 검색하여 결정한다.

Fig. 3 은 블럭 조립시 기준이 되는 조립베이스의 예를 나타낸다. Fig. 3 에서 부품 ①과 부품 ②로 구성된 조립품에서는 부품 ②가 단일 부품의 조립베이스, 부품 ③과 부품 ④로 구성된 조립품에서는 부품 ④가 단일 부품의 조립베이스, 그리고 부품 ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥으로 구성된 조립품에서는 부품 ⑤와 ⑥이 결합되어 하나의 조립베이스로 사용된다.

조립베이스를 결정하고 나면 1 차 접속 관계로만 조립베이스에 접속되어 있는 부품을 선정하여

조립단위에 포함시킨다. 조립베이스에 1 차로 접속된 부품에 다시 2 차 접속 부품이 있는 경우에는 1 차로 접속된 부품이라도 조립단위에서 제외한다.

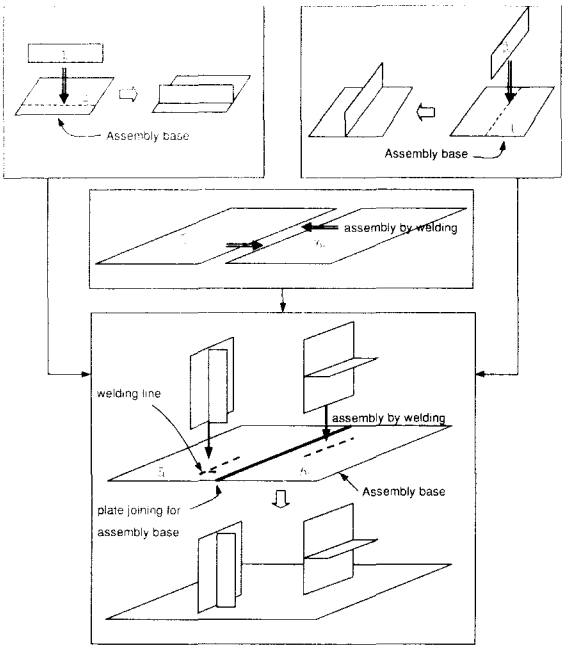

Fig. 3 Example of an assembly base for block assembly

● 1 차 접속 관계 부품 검색 및 선정

1 차 접속 관계 부품이란 선정된 조립베이스에 직접 접속되어 있는 부품을 의미한다. 조립베이스의 모서리와 접속되는 부품의 면이 접속되는 경우는 제외하고 조립베이스에 직접 접속되어 있는 부품을 먼저 검색하여 현재 작업 중인 조립단위의 구성부품으로 선정한다. 예를 들면 Fig. 4 와 같이 조립베이스의 모서리와 접속되는 부품의 면이 접속되는 경우에는 위 보기 용접자세 또는 Turnover 작업이 발생하므로 현재의 조립단위 결정 시에는 포함시키지 않도록 해야 한다.

● 2 차 접속 관계 부품 검색 및 선정

2 차 접속 관계란 조립베이스에는 접속되어 있지 않고 조립베이스에 직접 접속되어 있는 1 차 접속 관계에 있는 부품에만 직접 접속되어 있는 부품을 의미한다. 조립베이스를 기준으로 조립베이스에 접속되어 있는 1 차 접속 관계의 부품을 조립하고 나서 1 차 접속 관계에 있는 부품에만 접속된 2 차 접속 관계 부품을 조립할 때의 용접자세가 수직 용접이나 위 보기 용접이 될 경우에는 1 차 접속 관계의 부품을 현재 결정하려고 하는 소조립품 단위에서 제외시킨다.

Fig. 5 에서와 같이 1 차 접속 관계에 있는 부품 ①, ②, ③, ④ 및 ⑤는 2 차 접속 관계로 조립되는 부품이 2 개씩 있으며 위보기 용접자세가 발생하므로 현재의 소조립품을 구성하는 부품에서 제외한다.

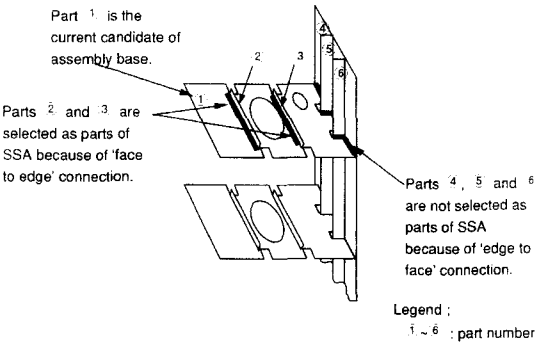

Fig. 4 Checking the primary connection for small subassembly

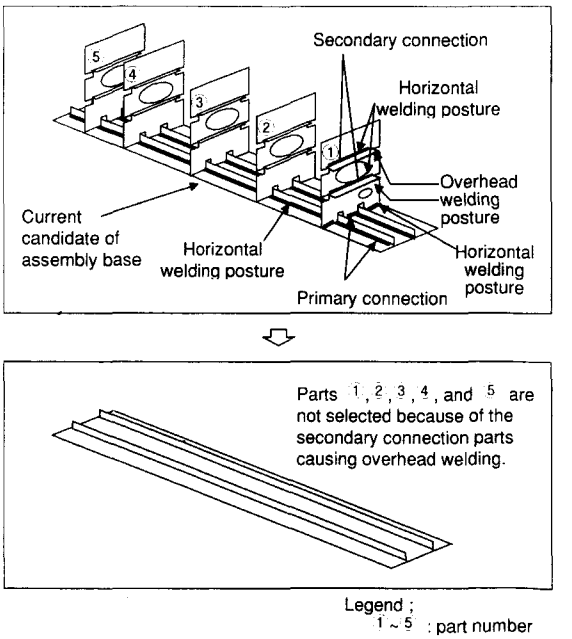

Fig. 5 Checking the secondary connection for small subassembly

2.2.2 조립 관련 정보 생성

조립 단위가 결정되고 나면, 조립작업에 필요한 조립방법, 조립작업장, 조립순서, 조립공수 등에 대한 정보를 생성한다.

선각 블럭 조립 작업은 대부분 용접작업에 의해 조립되고 있으며, 조립방법 결정에서는 용접작업을 수행하기 위해 필요한 용접 자세, 용접 기법, 용접 장비, 용접 재료에 대한 정보를 생성한다[6, 7]. 조립방법을 결정하는데 필요한 정보는 부품정보에 있는 재질, 크기, 곡률반경 등의 정보, 부품접속관계 정보에 있는 접속형태, 접속방향, 접속각 등의 정보, 그리고 조립베이스 정보 등이 있다. 용접 자세 정보는 조립단위 내에서 조립베이스 부품과 접속 부재의 방향 정보를 이용하여 두 부재의 접속 형태를 파악한 다음, 용접 자세를 아래보기 용접, 수평 용접, 수직 용접, 위 보기 용접의 네 가지 자세 중에서 하나를 결정하게 된다. 이 중 아래보기 용접자세가 가장 안정된 자세이고, 위 보기 용접자세가 가장 어려운 작업이다[6, 8].

조립단위 및 조립순서가 결정되고 난 후에 각 조립단위가 가지는 정보에 따라 조립작업이 수행될 작업장을 지정하게 된다. 조립단위의 정보를 활용하여 각 작업장의 제약조건 등을 만족하도록 최적작업장 및 대안작업장을 결정하게 된다.

선각 블럭을 조립할 수 있는 최적작업장은 최단 시간 내에 최소의 비용으로 블럭을 조립할 수 있는 작업장을 의미한다. 작업장을 결정할 때 입력 받아야 되는 정보로는 조립단위에 관한 정보가 필요하고, 조립단위가 가지는 정보에는 앞서 살펴보았듯이 조립베이스, 조립단위의 크기, 무게 및 조립방법 등이 있다. 작업장의 제약조건은 정반 종류, 크레인의 작업 능력, 정반 규격, 작업 대상물의 크기, Turnover 장비, 반출 무게, 종통재 높이, 반출구의 크기 등이 있다. 결정된 조립단계별 작업장 범위 내에서 조립단위의 정보와 비교 시 작업장의 제약조건을 만족하는 작업장을 최적작업장으로 결정한다. 대안작업장은 부하를 고려한 조립 공정계획을 수립할 경우에 부하평준화 정도를 향상시키기 위하여 작업장간의 이동이 필요할 경우와 예상치 못했던 사고의 발생으로 인해 최적작업장에서 대상 조립단위가 작업될 수 없을 경우에 조립 작업을 할 수 있는 작업장을 의미한다.

본 논문에서는 선각 블럭 조립단위 결정의 최종 결과를 Fig. 2 와 같은 조립트리 구조를 이용하여 표현하였다. 조립순서에는 조립단위 사이의 조립순서와 각 조립단위 내의 조립순서가 있다. 조립순서 결정은 조립단위 내의 조립순서를 생성하고 난 다음에 조립단위 사이의 조립순서를 생성한다. 조립단위 사이의 조립순서는 조립트리 구조 정보의 상위 조립단위와 하위 조립단위의 선후행 관계를 이용하여 조립단위 사이의 상대적인 조립순서를 표현하며, 하위 조립단위는 상위 조립단위의 구성부품으로 사용된다. 조립단위 내의 조립순서는 결정된 조립베이스를 기준으로 구성부품을 용접하는 순서를 의미한다.

선각 블럭 조립 공수는 일정계획 수립을 위한 중요한 요소이므로 정확한 공수산정을 위해 선종, 구조, 접속형태, 용접자세, 작업장, 두께, 각장 등 공수산정에 영향을 미치는 요소들이 일반적으로 반영되어야 한다. 그러나 대부분의 조선소에서는 경험적인 값을 계수로 사용한 산식을 사용하여 공수를 산정하고 있으며, 일반적으로 공수 산정 산식에 사용하고 있는 계수들로는 표준율, 조립단계 계수, 구조계수, 용접 자세계수, 두께/각장 계수, 선종계수 등이 있다. 선각 블럭의 조립 공수는 조립시 발생하는 용접길이와 각종 계수들의 곱에 따라 산출할 수 있다.

3. 부하를 고려한 조립 공정계획의 수립

3.1 조립 작업장의 부하평준화

조립 작업장의 부하평준화는 자동 조립 공정계획의 결과 중 대안작업장 정보를 이용하여 부하가 높은 조립 작업장 또는 일자에 있는 조립단위를 최적작업장에서 대안작업장으로 이동함으로써 이루어진다. 자동 조립 공정계획 시스템으로부터 받는 입력정보로는 조립단위, 조립작업장 정보 및 조립공수 정보 등이 있다. 단계 1(Phase 1)에서 결정된 조립 작업장으로는 최적작업장과 대안작업장이 있다. 최적작업장이란 해당 블럭의 조립작업이 가능한 작업장 중에서 최소 공수로 작업이 가능한 작업장을 의미하며, 대안작업장은 최적작업장보다는 많은 공수가 투입되지만 조립작업이 가능한 작업장을 의미한다. 중일정 계획 시스템으로부터는 각 블럭의 착수일자 및 완료 일자에 대한 정보를 입력 받아 블럭 공기를 계산하는데 사용한다.

부하를 고려한 조립 공정계획에서는 조립작업장의 부하평준화를 위하여 조립단위의 조립을 최적작업장에서 대안작업장으로 이동할 수 있도록 부하 불균형 정보를 공정계획에 반영하는 것이다. 그리고, 계획 기간에 고려해야 할 조립단위는 최종블럭만 해도 700~800개 정도로서 부하를 고려한 최적 공정계획을 얻는 데는 상당한 계산 시간이 소요된다. 따라서, 부하평준화를 위해서는 빠른 시간 내에 좋은 결과를 얻을 수 있는 휴리스틱 기법을 개발하여 사용하였다.

3.1.1 부하 상태의 평가 기준

본 논문에서는 부하평준화의 정도를 평가하기 위하여 세가지 항목 즉, 각 작업장의 부하의 분산(variance)을 사용한 부하평준화 정도, 작업장 변경에 따른 총 투입공수의 증가치, 그리고 잔업비용의 최소화를 고려하였다. 이 세가지 항목의 값이 낮을수록 부하평준화가 잘 이루어 지고, 총 투입공수가 최소화되며, 생산 비용이 최소화되었다고 할 수 있다.

3.1.2 부하평준화 휴리스틱

본 논문에서는 조립 작업장의 부하를 평준화하기 위해서 국지적 탐색 기반의 휴리스틱 방법을 적용하였으며, Hill-Climbing 탐색방법과 유사하다.

국지적 탐색 기반의 휴리스틱 알고리즘은 계획 기간 내에 있는 대상 블럭의 모든 조립단위에 대하여 초기 작업장으로 최적작업장을 사용한다. 각 조립단위의 공수를 공기로 나누면 일일 작업공수가 되고, 각 작업장별로 특정 일자에 해당 되는 조립단위의 일일 공수를 합하면 각 작업장의 초기 부하 상태가 된다.

대안작업장으로 이동할 조립단위를 선택하기 위하여 먼저 Fig. 6과 같이 부하 상태가 가장 높은 일자를 선택한다. 본 논문에서는 대안작업장으로 이동할 조립단위를 선정하는 방법으로 선택된 일자에 놓인 조립단위 중에서 각 조립단위를 가능한 대안작업장으로 이동하였을 때 목적함수를 계산하여 보고 부하 평준화의 개선정도가 가장 큰 조립단위를 선정하여 이동하는 방법을 사용하였다.

예를 들어 평블럭 작업장 #2의 작업장 부하 그래프가 Fig. 6과 같다고 하면 이중 부하가 가장 높은 세번째 일자를 선정한다. 선정된 일자에 4개의 블럭이 놓여 있다면 4개의 블럭 각각에 대해 가능한 대안작업장으로 이동하였을 때의 목적함수를 계산하고 부하평준화 정도를 평가한다. 그 결과 부하 개선이 가장 좋은 블럭을 선택하여 대안작업장으로 이동한다. 현재 계산과정 중에서 가장 부하가 높은 일자에서 더 이상의 개선이 없으면 다음으로 부하가 높은 일자를 선택하며 이러한 과정을 계속하여 반복한다. 이러한 과정은 모든 조립 작업장의 모든 일자에 대하여 수행된다.

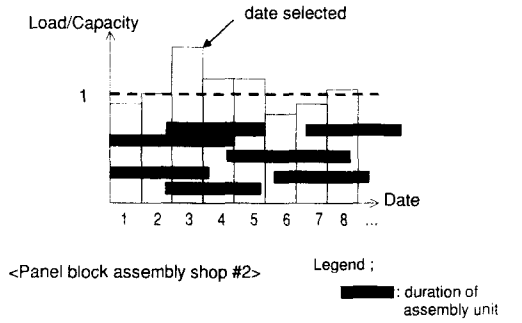

Fig. 6 Example of date selected with maximum load

3.2 재공정계획 대상 블럭 선정

부하 평준화 모듈에서는 대안작업장으로의 이동만을 고려하여 조립 작업장의 부하를 평준화하였지만, 공정계획의 변경 등을 통해 부하 평준화의 정도를 더욱 개선할 수 있다. 공정계획 시점에서 조립 작업장의 부하를 고려한 조립 공정계획을 수립하는데 있어서 핵심적인 기능을 담당하는 재공정계획 대상 블럭 선정 모듈은 부하평준화 이후에도 여전히 부하가 높은 특정 기간이나 일자에 해당되는 작업장에 속해 있는 블럭들 중에서 공정계획을 수정하였을 때 부하평준화가 개선될 수 있는 블럭을 선정하여 준다. 공정계획을 수정하는 재공정계획을 통한 부하 평준화는 대상 블럭의 조립단위를 변경하여 소조립 작업장과 블럭 조립장에서의 조립 작업량을 조정하고, 조정된 조립 작업량에 따라 조립 작업장의 부하평준화를 개선하는 것을 의미한다.

재공정계획 대상 블럭의 수는 재공정계획을 수립하는데 소요되는 시간과 직결된다. 본 논문에서 제안하는 방법은 재공정계획 대상 블럭 선정 모듈을 매개로 하여 부하평준화 모듈과 재공정계획 모듈의 반복적인 수행을 통하여 공정계획을 조정하므로, 재공정계획 시간을 단축하면서 부하가

평준화되는 공정계획을 생성하기 위해서는 재공정계획 대상으로 선정되는 블럭의 수를 최소화 하면서, 작업장의 부하평준화를 개선시킬 수 있어야 한다.

따라서 부하가 높은 일자에 속해 있는 모든 블럭을 대상으로 재공정계획을 수립하는 것이 아니라 부하가 높은 일자가 연속적으로 나타나는 과부하 기간을 선정하고, 과부하 기간에 속해 있는 블럭들 중에서 재공정계획이 이루어 질 경우에 부하를 가장 많이 개선할 수 있는 블럭을 선정하는 방법을 개발하였다.

3.2.1 과부하 기간 선정 알고리즘

재 공정 계획 대상 블럭 선정의 첫번째 단계는 엔트로피 기반 이진 분할(Entropy based binary partitioning) 방법을 사용한 조정 기간 선정이다. 우선 각각의 조립 작업장에 대해 일자별 부하정보를 참조하여 조립 작업장의 작업능력 보다 부하가 많은 날과 적은 날로 구분한다. 일자별로 부하를 보고 재공정계획 대상 블럭을 선정할 수 있는 과부하 기간을 찾게 되며, 과부하 기간을 찾아 내는 알고리즘은 인공지능의 기계학습 분야에서 연속된 값(continuous value)을 이산화(discretization) 시키는 방법인 엔트로피 기반 이진 분할 방법을 응용하였다[9].

재공정계획 대상 블럭 선정 기간을 선택하는 알고리즘은 전체 구간에 대하여 엔트로피가 감소하는 방향으로 기간을 이등분하고, 다시 나누어진 두 구간에 대하여 엔트로피가 감소하는 방향으로 이등분하는 과정을 엔트로피가 감소하지 않을 때까지 혹은 추가 종료조건이 만족될 때 까지 반복한다. 추가 종료 조건은 나누어진 기간이 너무 짧아지는 것을 방지하기 위하여 6 일 이하가 되면 더 이상 구간을 나누지 않는 것이다.

작업장의 일자별 작업 부하가 작업 능력을 초과하는지 않는지에 따라 '+' 또는 '-'로 단순히 표시한 부하 그래프를 개념적으로 그리면 Fig. 7 과 같다. 전체 구간의 엔트로피는 다음의 식 (1)에 따라 계산할 수 있으며, 보다 균등한 두 부분으로 나누어질 때 나누어진 두 부분의 가중 평균 엔트로피는 원래의 엔트로피보다 적은 값을 가진다. 엔트로피 기반 이진 분할 방법은 구간을 두 부분으로 나누고 난 후에, 각 부분의 엔트로피를 유사한 방법으로 계산한다. 식 (1)에서 p 는 + 개수를 n 은 - 개수를 나타낸다.

$$-(p/p+n)\log_2(p/p+n)-(n/p+n)\log_2(n/p+n) \quad (1)$$

Fig. 7 에서 나타낸 바와 같이 화살표는 비교적 균질의 두 구간으로 나눌 수 있는 분할 위치를 나타낸다. 분할된 구간은 구간 내에 '-'의 수보다 '+' 수가 더 많을 경우에 과부하 상태 기간이고, 반대의 경우는 부하에 여유가 있는 구간이다. 이러한 방법은 각 조립 작업장의 과부하 기간 선정에 적용된다.

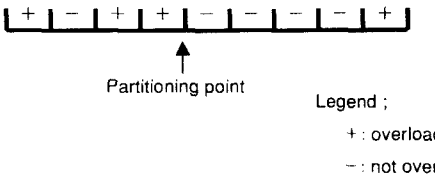

Fig. 7 Example of an entropy-based binary partitioning method

3.2.2 재공정계획의 요청

과부하 기간이 선정되고 나면 공정계획을 수정하여 조립 작업장의 부하를 가장 많이 낮출 수 있는 조립 단위를 선정하게 된다. 한 개의 최종 블럭은 여러 개의 중조립품과 단위블럭으로 구성되어 있으므로 중조립품 단위와 단위블럭 단위에 대한 조립방법을 변경함으로써 소조립 작업장과 블럭 조립장 사이의 부하를 조절할 수 있다.

부하를 낮출 수 있는 블럭을 선정하는 방법은 우선 자동 조립 공정계획의 결과인 조립트리 정보에 있는 최종블럭을 구성하고 있는 조립단위 정보를 확인하고, 현재 과부하 기간에 속해 있는 최종블럭의 공정계획을 수정할 경우의 부하를 계산하여 보고 부하평준화 정도가 개선이 되면 선정하는 것이다. 이때 과부하 기간에 속해 있는 조립단위 중에서 우선적으로 선정되는 조립단위는 과부하 기간에 속해 있는 조립단위의 공기가 가장 길고 이동하려고 하는 조립 작업장의 대응 조립공기가 과부하 기간에 속해 있지 않는 조립단위를 우선적으로 선정한다. 만일 이동시키려고 하는 조립 작업량이 대응 조립 작업장의 과부하 기간에 속해 있으면 선정하지 않는다. 이 과정을 모든 작업장의 과부하 기간에 속해 있는 조립단위에 대해 수

해한다.

재공정계획 모듈로 선택되는 재공정계획 요청 정보는 부하평준화 정도를 개선시킬 수 있는 조립단위를 포함하고 있는 재공정계획 대상 블럭 리스트이다. 재공정계획 대상 블럭별로는 부하평준화를 개선시킬 수 있는 조립단위의 현재 작업장과 변경된 작업장, 기존의 조립 공수, 변경요청 조립 공수, 기존의 부하 평준화 평가값 및 변경된 부하 평준화 평가값 등의 정보를 포함한다.

3.2.3 휴리스틱을 이용한 재공정계획 대상 블럭 선정

특별히 과부하 기간이 존재하지 않는 경우에는 일자별로 보아 특정 일자에 부하가 가장 높은 작업장에 속해 있는 조립단위를 재공정계획 대상 조립단위 후보군으로 선정한다. 선정된 모든 후보 조립단위들의 일부 조립작업량을 이동 하였을 경우, 현재 조립 작업장에 대해 부하 개선정도가 가장 좋은 조립단위를 찾아 재공정계획 대상 조립단위로 선정한다. 이러한 방법을 모든 작업장에 대하여 더 이상 개선이 나타나지 않을 때 까지 반복 수행한다.

이상에서 살펴본 재공정계획 대상 블럭 선정 모듈은 과부하 기간을 구분하여 수행하는 방법과 국지적 탐색을 통한 방법으로 구분할 수 있다. 그리고, 이러한 방법을 통하여 재공정계획이 요청된 블럭들의 정보를 참조하여 재공정계획이 수행된다. 재공정계획 시에는 선정된 블럭들에 대하여 재공정계획 블럭 선정 모듈에서 조립 작업장의 부하를 고려하여 제안한 조정 요청치와 유사하도록 공정계획을 조정한다. 그러나, 반드시 재공정계획 대상 블럭 선정 시스템에서 요청한 값과 일치하도록 조정하는 것이 가능하지 않을 경우가 많기 때문에 본 논문에서 제안한 반복적인 수정을 통하여 부하평준화가 고려된 조립 공정계획을 생성하는 구조가 필요하게 된다.

3.3 재공정계획

재공정계획 모듈은 재공정계획 대상 블럭 선정 모듈에서 선정된 블럭의 재공정계획 요청 정보를 바탕으로 공정계획을 수정하는 역할을 담당한다. 재공정계획 모듈에 필요한 정보는 자동 조립 공정계획에서 생성한 조립단위, 조립방법, 조립작업장 및 조립공수와 재공정계획 대상 블럭 선정 모듈에서 선정된 블럭 리스트와 이들 블럭에 대한 재공정계획 요청 정보가 있다. 재공정계획 요청 정보는 선정된 블럭을 구성하고 있는 중조립품과 단위블럭의 변경 요청 공정계획 정보로, 기술적인 검토는 없이 단지 부하의 개선 관점에서 중조립품과 단위블럭의 조립 작업장 이동을 통해서 부하가 개선될 수 있을 것으로 예상하는 추정 정보이다.

재공정계획은 재공정계획 가능성 검토, 조립단위 재생성, 조립방법 재생성, 조립순서 재생성 및 조립공수 재추정 등의 과정을 거친다.

재공정계획 모듈에 사용되는 각 단계의 알고리즘은 자동 조립 공정계획에서 사용한 방법과 유사하다.

3.3.1 단위블럭의 조립단위 변경

단위블럭의 조립단위 변경에는 단위블럭을 중조립품화 하는 경우와 단위블럭의 구성품 일부를 다른 단위블럭으로 이동하는 경우가 있으며, 변경된 조립단위에 대해 조립방법, 조립순서 및 조립공수를 다시 생성하게 된다.

단위블럭을 중조립품화 하는 경우는 단위블럭 자체를 중조립품화 하는 개념으로, 단위블럭의 조립을 블럭조립장에서 소조립 작업장으로 이동하게 되어 블럭 조립장의 조립작업 부하가 감소하게 된다. 단위블럭의 구성품 일부를 다른 단위블럭으로 이동할 경우에는 소조립 작업장의 부하에는 영향을 미치지 않고 부하가 높은 조립장의 조립 공수를 주변의 조립장으로 분산시키는 효과가 있다.

3.3.2 중조립품의 조립단위 변경

중조립품의 조립단위 변경에는 중조립품을 단위블럭화 하는 경우와 중조립품의 조립을 블럭 조립장에서 수행하는 경우가 있다. 중조립품의 조립단위를 변경하게 되면 중조립품을 구성하고 있는 조립단위의 구성을 변경하고, 변경된 조립단위의 조립방법 및 조립공수를 다시 산정하여야 한다.

중조립품을 단위블럭화 하는 경우에는 조립이 소조립 작업장에서 블럭 조립장으로 이동하게 되고, 소조립 작업장의 작업 부하는 감소하게 되고 블럭 조립장의 부하는 증가하게 된다. 중조립품의 구성품 일부를 독립시키는 경우에는 소조립품 단위를 블럭 조립장에 바로 전달하여 중조립 단계의 개념 없이 조립하는 개념으로 소조립 작업장의 작업 부하는 감소시키고 일부 조립장의 부하가 증

가하게 된다.

4. 사례연구

본 논문에서 개발한 시스템은 자동 조립 공정계획 단계와 부하를 고려한 조립 공정계획 단계로 구성되어 있으며, 전체 구성은 Fig. 8 과 같다.

본 논문에서 개발한 시스템 중에서 조립 공정계획 자동화 단계를 평가하기 위해서 이중 선체 구조의 컨테이너선의 중앙부의 바닥 쪽에 있는 블럭(double bottom block)을 대상으로 시스템을 분석하였다. 조립 공정계획 자동화 단계의 결과로 생

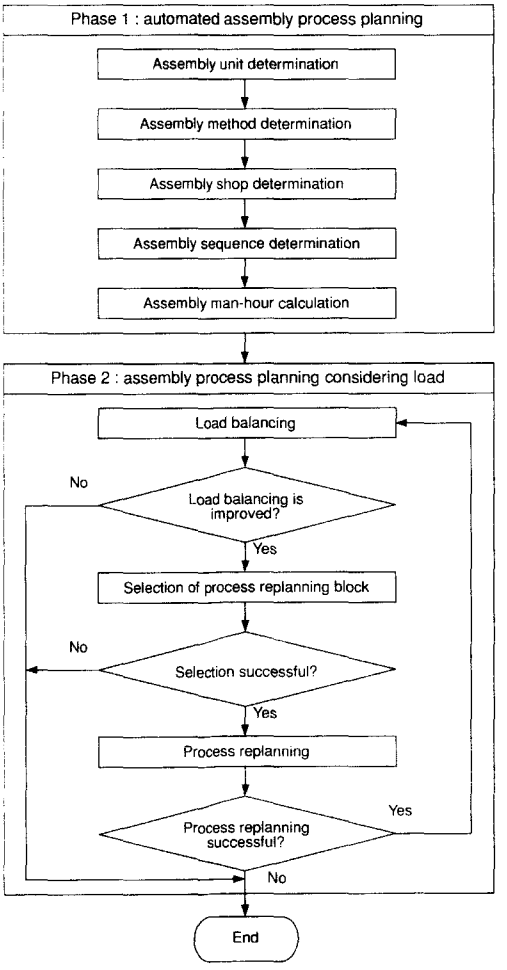

Fig. 8 Total procedures of the developed system

성된 중조립품의 한 예를 Fig. 9 에 나타내었다.

공정계획 결과화면은 Fig. 9 에서와 같이 최종 블럭 선정, 선정된 최종블럭의 조립트리의 출력, 선정된 조립단위의 입체형상 출력, 조립단위 출력 및 부품접속 정보 출력의 5 개 화면 영역으로 구성되어 있다.

본 논문에서 개발한 조립 작업장의 부하평준화 모듈은 작업장 이동을 통한 부하평준화 휴리스틱 알고리즘을 사용하고 있다. 재공정계획 대상 블럭 선정 모듈의 성능평가를 위해서는 재공정계획 대상 기간을 선정하여 재공정계획 대상 블럭을 선정하는 방법과 국지적 탐색 방법을 적용한 휴리스틱 방법을 개발하여 두 가지 결과를 비교하였다. 재공정 계획 모듈은 재공정계획 대상 블럭 선정 모듈의 재공정계획 요청에 따라 재공정 계획을 수행한다. 사례 연구용 데이터는 A 조선에서 2 개월간 생산한 882 개의 블럭의 착수/완료일자 및 공수정보이다.

국지적 탐색 휴리스틱을 사용한 부하평준화 모듈은 계획기간 내의 모든 블럭을 처리하는데 수행 시간이 10 분 정도가 소요되었고, 수행시간과 성능면에서 효과적임을 알 수 있었다. 부하평준화 모듈을 수행하여 본 결과, 초기 부하평준화의 결과 보다 대안작업장 이동을 통한 휴리스틱을 적용한 부하평준화 결과가 개선이 되었으며, 휴리스틱만을 적용한 결과 보다는 재공정계획을 통한 부하평준화 결과가 더 개선이 되었음을 알 수 있었다.

재공정계획 대상 블럭 선정 시스템은 대상 블럭 선정기간을 이용한 구간 탐색 방법과 국지적 탐색을 이용한 휴리스틱 방법에 대하여 수행하였다. 대상 블럭 선정 기간을 이용한 구간 탐색 방법을 이용하였을 때 한 번 수행시간은 평균 7 분 정도이며 국지적 탐색을 이용한 휴리스틱 방법은 평균 13 분 정도가 소요되었다. 과부하 기간을 이용한 구간 탐색방법이 훨씬 수행 시간면에 있어서는 짧았다. 국지적 탐색을 이용한 휴리스틱 방법은 가능한 모든 일자와 작업장에 대하여 적절한 재공정계획이 가능한 조립작업량을 가지는 블럭을 찾기 때문에 수행시간 면에서 많은 시간이 소요된다. 두 가지 방법을 이용한 실험결과는 Fig. 10 에 나타내었다. Fig. 10 은 각 방법의 수행에 따른 성능 평가치를 나타낸다. 국지적 탐색 방법의 경우에는 첫번째 수행 시에 많은 블럭을 재공정계획 대상 블럭으로 선정하므로 두 번째 수행이후에는

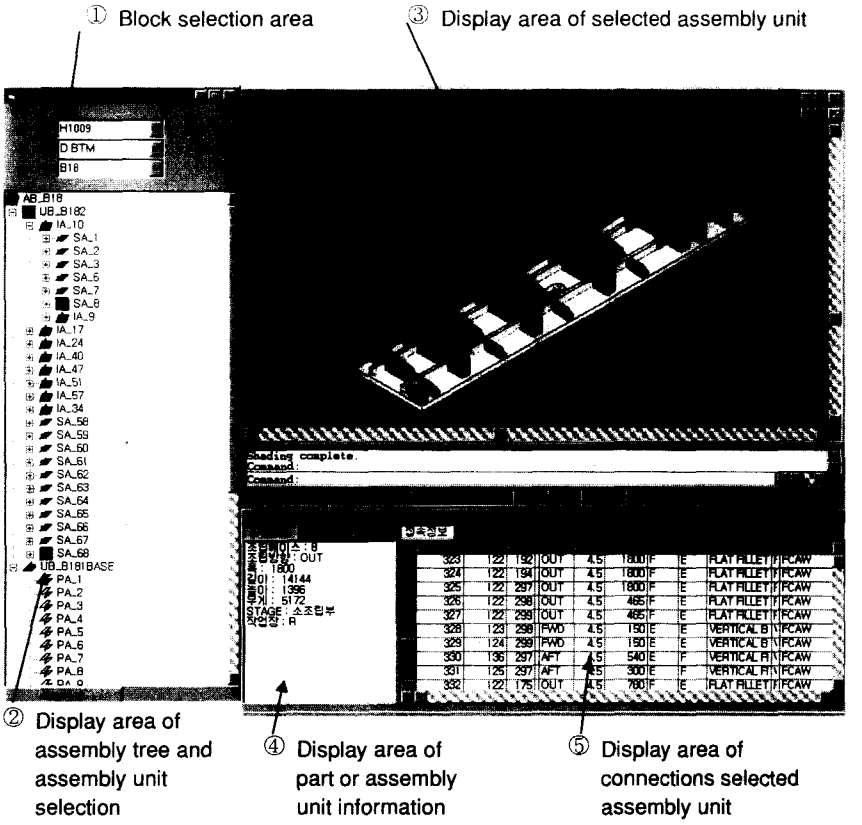

Fig. 9 Output screen of implemented system for assembly process planning

개선의 정도가 둔화되어 개선이 거의 없는 것처럼 보인다. 구간 선정 탐색 방법은 블럭의 조립기간이 부하가 높은 구간에 많이 놓여 있는 것들을 재공정계획 대상 블럭으로 선정하는 방법이며 다섯 번의 수행동안 조금씩 개선되어 가는 것을 볼 수 있다. 세 번째 방법은 구간 선정-국지적 탐색 (첫 번째 수행은 구간 선택 탐색 방법을 이용하며 두 번째 이후에는 국지적 탐색 방법을 이용)을 이용한 방법으로 세가지 방법 중에서 가장 개선된 평가치를 보여준다.

재공정 계획 시스템은 설계 정보가 제공되는 블럭에 대해서만 수행할 수 있기 때문에, 설계정보가 제공되지 않는 블럭에 대해서는 실적 데이터로부터 추출한 블럭별 구성 조립단위의 평균 조립량을 사용하여 평균 조립량 내에서 재공정계획이 가능하다고 가정하였다. 실적 데이터로부터 추출한 평균 조립량은 재공정계획 대상 블럭 선정 모듈에서도 사용되며, 평균 조립량을 사용하여 재공정계획 대상 블럭을 선정하게 된다. 즉, '부하평준화 → 재공정계획 대상 블럭 선정 → 재공정 계획'의 순환구조를 반복적으로 수행하기 위해서 가상적인 재공정 계획 모듈을 설정하였다. 재공정 계획 대상 블럭 선정 모듈의 평균 조립량을 사용한 재공정계획 요청에 대해 재공정 요청량의 일부

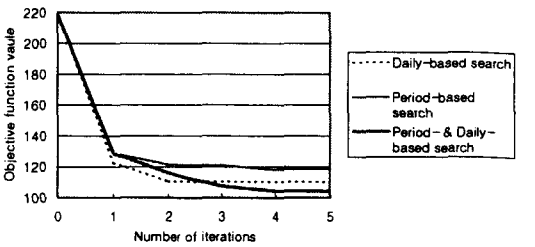

Fig. 10 Evaluation of a process replanning block selection module

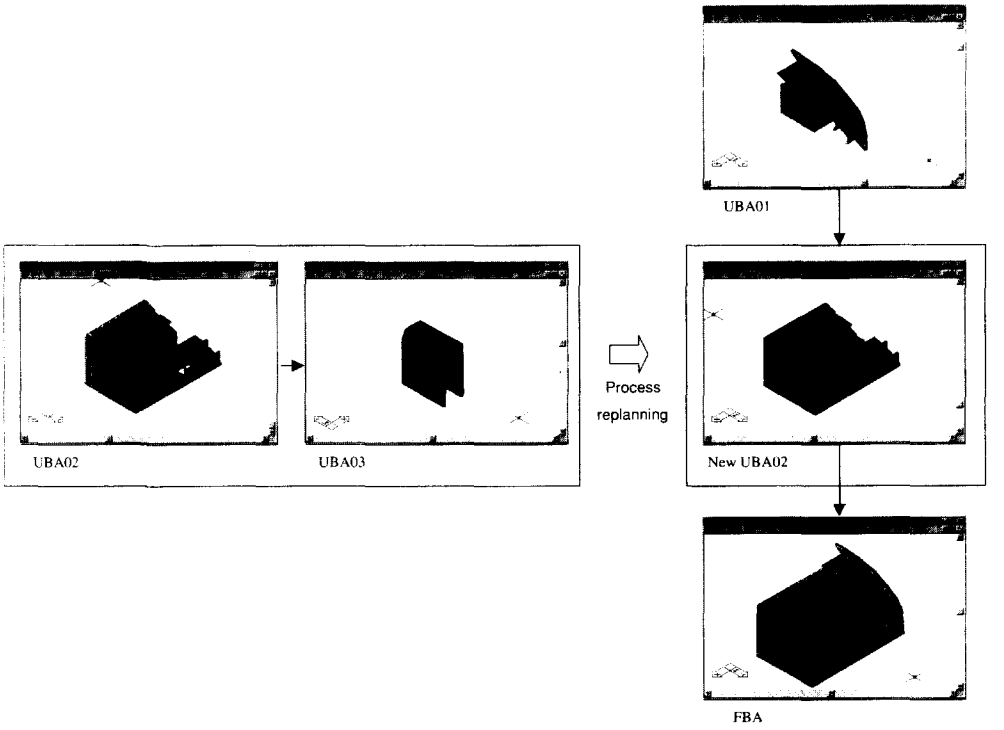

Fig. 11 Example of changing UBA into MSA

만 재공정계획이 가능하다고 가정한 것이다.

재공정계획 대상 블럭의 수가 많을 경우에는 실제 재공정계획 시간이 많이 소요되므로, 재공정계획 대상 블럭의 수는 작을수록 유리하다. 국지적 탐색 방법의 경우 평균 530 여 개의 재공정계획 대상 블럭을 선정하였으며, 구간 선정 탐색방법의 경우에는 평균 450 여 개의 재공정계획 대상 블럭을 선정하였다. 구간 선정 탐색방법과 국지적 탐색 방법을 섞어 사용한 방법의 경우에는 평균 487 개의 블럭 선정을 하였다.

재공정 계획은 단위블럭의 조립단위 변경과 중조립품 단위의 변경으로 나누어서 수행되며, 그 실제 예는 Fig. 11 과 같다. Fig. 11 의 예는 선박의 엔진룸 구역의 블럭을 대상으로 단위블럭을 중조립품화 하는 경우의 예이다. 단계 1 의 조립 공정계획 결과는 UBA02 를 조립베이스로 하여 UBA01 과 UBA03 을 조립하여 FBA 로 완성하는 것이다. 단계 2 의 재공정계획 블럭 선정 모듈에서 블럭 조립장의 부하를 줄이기 위해 단위블럭을 중조립품화하는 경우가 선정이 되었다면 UBA03 을 중조립품화하여 UBA02 에 속해 있는 중조립품으로 변경하여 UBA02 를 조립베이스로 하여 UBA01 을 조립하여 FBA 를 완성하는 조립 공정계획을 재수립하게 된다.

부하를 고려한 공정계획 단계의 결과는 Fig. 12 에서와 같이 작업장 선정, 선정된 작업장의 기간별 최종블럭의 간트 차트 출력, 선정된 최종블럭에 관련된 작업장의 조립 단위 정보의 표시, 지정된 최종블럭의 호선, 블럭명, 작업장, 일자, 공수에 대한 정보 출력 및 선정된 작업장의 기간별 부하 출력의 5 개 창으로 나누어져 있다.

5. 결론

본 논문에서는 선각 블럭 조립 공정을 대상으로 조립 공정계획의 자동화 및 공정계획과 일정계

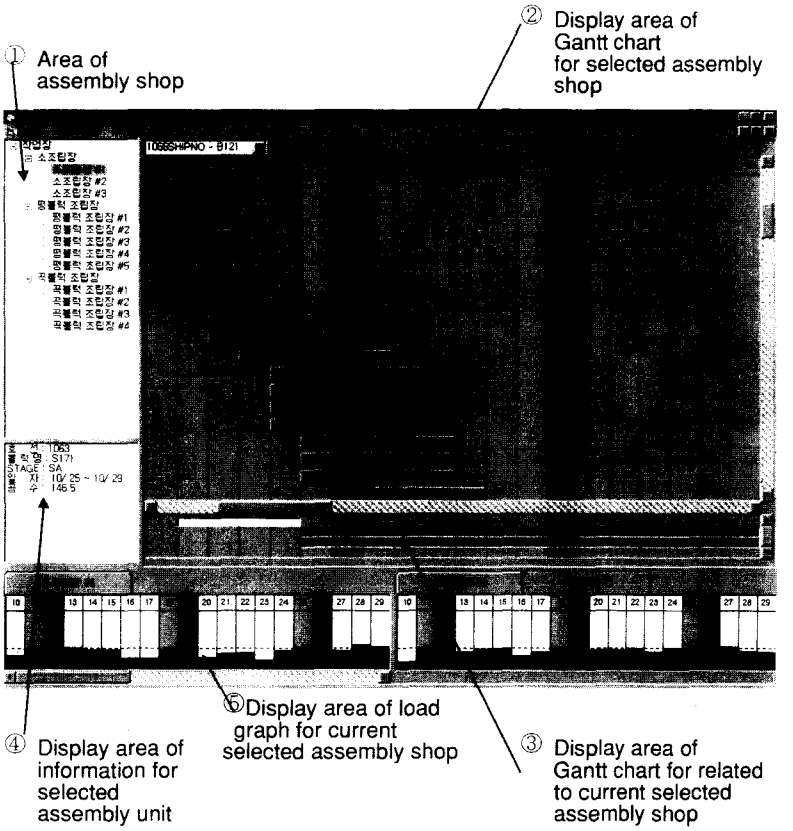

Fig. 12 Output screen of implemented system for load balancing data

획을 통합화 할 수 있는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 기존의 조립 공정계획은 수작업으로 수립되고 있으며, 조립작업장의 부하를 고려하지 않고 있다. 따라서 본 논문에서는 선각 블럭 조립 공정계획의 자동화 방법의 개발과 동시에 부하 평준화를 고려한 조립 공정계획 시스템을 개발하였다.

개발된 시스템을 실제 선각 블럭의 조립 공정계획에 적용하여 본 결과가 공정계획 전문가에 의해 수행된 결과와 잘 일치되므로 그 실용 가능성이 입증되었으며, 부하를 고려한 조립 공정계획 수립에서는 '부하평준화 → 재공정계획 대상 블럭 선정 → 재공정계획 모듈'의 전체 순환 구조를 시뮬레이션한 결과는 실제 중일정계획의 부하평준화 상태보다 많이 개선되어 그 효용 가능성을 확인하였다.

본 논문의 결과를 기초로 하여 조립 시 발생할 수 있는 충돌을 사전에 예방할 수 있는 방법에 관한 연구 및 작업자가 한 번의 준비 작업으로 조립작업을 수행할 수 있는 작업 구역/작업량을 선정하는 방법 등에 관한 연구가 계속 진행될 것이다.

후기

본 연구는 1996 년도 한국학술진흥재단의 학제간연구비에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. K. K. Cho, J. S. Oh, K. R. Ryu and H. R. Choi, "An Integrated Process Planning and Scheduling System for Block Assembly in Shipbuilding," Annals of CIRP, Vol. 47. No. 1, pp. 419-422, 1998.

2. K. K. Cho, J. S. Oh and S. J. Kim, "Determination of Assembly Units and Assembly Sequences for Block Assembly in Shipbuilding," Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Industrial Engineering Application and Practice, pp. 1229-1234, 1997.
3. J. D. Wolter, "Representing Subassembly Trees by Deepest Common Ancestor Relations," Technical Report 90-009, Department of Computer Science, Texas A&M University, 1990.
4. K. K. Cho, K. R. Ryu, H. R. Choi, J. S. Oh and S. T. Yun, "Computer aided process planning system for block assembly shop using CBR," Technical papers of the North American Manufacturing Research Institution of SME 1996, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, pp.157-162, 1996.
5. B. Lotter, Manufacturing Assembly Handbook, Butterworths, 1989.
6. American Welding Society, Structural Welding Code - Steel, ANSI/AWS D1.1-85, American Welding Society, Inc. 1985.
7. K. K. Cho, J. G. Sun and J. S. Oh, "An Automated Welding Operation Planning System for Block Assembly in Shipbuilding," International Journal of Production Economics, Vol.60-61, pp.203-209, 1999.
8. S. Kalpakjian, Manufacturing Engineering and Technology, Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
9. U. M. Fayyad and K. B. Irani, "Multi-interval discretization of continuous-valued attributes for classification learning," Proceedings of the 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Morgan Kaufmann, pp.1022-1027, 1993.