

Makespan 최소화를 위한 공정계획/일정계획 통합 시스템

An Integrated System of Process Planning/Scheduling for Minimizing Makespan

김기동*

Kim, Ki-Dong

ABSTRACT

Traditionally, the problems of manufacturing technology and manufacturing management have been treated independently. In this research, we endeavor to integrate the process planning and scheduling activities as an attempt to integrate the two realms. To draw up a plan of process planning and scheduling in real manufacturing environment is not an easy task because available time to plan could be limited and the shop status could change frequently. So we propose an architecture of integrated process planning and scheduling problem within the allowed time even if shop situations change rather frequently. We argue that we can obtain a better and practical scheduling solution by dynamically changing the processing machines and operations as the shop condition changes. The proposed system takes the initial information for alternative machines and operations represented by an AND/OR graph as its input. Other informational inputs to the system are part order and shop status. The system then generates new process plans and schedules during permitted time. Experimental results show that the proposed scheme provides a viable solution for real world scheduling problems.

키워드 : 통합생산시스템, 공정계획, 일정계획, AND/OR 그래프

keywords : *integrated manufacturing system, process planning, scheduling, AND/OR graph*

1. 서론

세계화가 구호가 아니라 현실이 되어가는 지금, 전 세계는 단일 시장이 되어 가고 있으며, 소비자의 요구는 나날이 다양해지고, 제품의 수명주기는 짧아지고 있다. 따라서 기업은 상대적인 경쟁력 확보를 위해 낮은 가격으로 소비자가 원하는 품질 수준의 제품을 빠른 납기일 안에 생산할 수 있는 효율적인 생산 시스템을 갖추어야 하며, 한편으로는 신제품의 빠른 생산과 다양한 제품을 생산할 수 있도록 하기 위해 유연한 생산 시스템을 갖추어야 한다. 고품질, 납기일 준수, 상품의 다양화 및 제품 수명 주기의 단축을 요하는 이러한 시장 변화에 대응하기 위해 기업은 여러 가지 공학적 접근법을 시도하고 있다. 이러한 노력들은 크게 두 가지 방향으로 나타나고 있다. 그 중 하나

는 시스템의 통합을 통한 생산 시스템의 성능 향상이고, 다른 하나는 표준화를 통한 생산 시스템의 성능 향상이다. 물론 이 둘 두 가지 방법론들은 상호 보완적으로 이루어져야 한다.

1.1 생산 시스템의 통합화

시장 환경의 변화에 대응하기 위한 기업의 노력 중 하나는 생산 시스템을 구성하는 단위 기능 시스템의 통합에 대한 노력이라 할 수 있다. CIM(Computer Integrated Manufacturing : 컴퓨터 통합 생산)이나 CE(Concurrent Engineering : 동시공학)와 같은 철학들이 이들 노력의 대표적인 경우라 할 수 있다.

일반적인 제조기업의 경우 제품의 제조 과정을 살펴보면, 설계 부서에서는 소비자가 요구하는 품질과 성능을 지닌 제품을 설계하여 설계 도면을 작성하고, 공정계획을 담당하는 부서에서는 이러한 설계 자료와 공장의 상황을 고려하여 작업 지시서를 작성하고, 생

* 강원대학교 산업공학과 전임강사, 공학박사

산관리 부서에서는 시간적인 측면과 보유 자원을 고려하여 경제적인 생산을 할 수 있도록 생산계획을 수립하고, 이에 의해 생산 지시를 내리며 작업장을 통제한다. 이러한 일련의 과정은 크게 두 개의 영역으로 구분될 수 있다. 그 중 하나는 생산에 관련된 기술적인 측면에 해당하는 설계, 공정계획, 가공 등이 속하는 생산기술 영역이고, 다른 하나는 경제적인 생산 활동을 수행할 수 있도록 통제하는 생산관리의 영역이다. 상기의 두 영역은 전통적으로 분리되어 수행되어져 왔으며, 효율적인 생산 시스템을 이루기 위해서는 이들 영역에의 통합이 필요하다. 생산기술 영역과 생산관리 영역의 통합을 위해서 다양한 방법들을 생각해 볼 수 있겠지만, 한정된 생산 설비의 효율적인 운용을 위해서는, 부품별 공정의 선택과 가공 기계를 결정하는 공정계획 문제와 각 기계에서의 가공 순서를 결정하는 일정계획 문제를 함께 고려하는 것이 가장 효율적이라고 볼 수 있다. 이 두 기능은 모두, 자원의 할당에 관련된 문제를 다루고 있으므로 어느 한 모듈에서의 결과가 다른 모듈의 결과에 결정적인 영향을 미치고 있다.

공정계획은 설계 도면과 제품의 사양서(specification)를 입력받아 가공 지시서를 출력으로 산출하는, 설계와 가공간의 중요한 연결 고리이다. SME에서는 공정계획을 '경제적이고 경쟁력 있게 제품을 생산할 수 있는 체계적인 가공 방법의 결정'이라고 정의하고 있고, Chen[1]은 '공정계획은 각 특정 형상(feature)을 가공할 최적의 가공 순서와 그 가공을 수행할 최적의 기계를 찾아줌으로써 가공에 대한 최적의 방법을 찾아내는 것'이라고 정의하고 있다. 이러한 정의에서 알 수 있듯이 공정계획에서는 제품 생산을 완료하기 위한 단순한 계획이 아니라 경제적으로 생산할 수 있는 방법을 제시해야 한다[2].

일정계획은 공정계획 결과물, 공장 상황에 대한 동적인 정보, 상위 생산관리 부서에서 계획한 부품별 생산량을 입력으로 받아, 시간에 따른 각 자원의 할당에 대한 계획안을 출력하는 시스템이다[3]. 생산관리 부서에서 계획한 각 부품별 생산량을 공정계획에서 결정한 가공 방법으로 기계에서 가공할 때, 기업에서 요구하는 목표에 맞추어서 각 기계에서의 부품 가공순서를 결정하는 것이 일정계획 문제이다.

1.2 표준화

급속한 컴퓨터 기술의 발달은 제조업자들에게 필요한 공작기계, 컴퓨터, CAD/CAM 및 다양한 소프

트웨어들에 대한 선택의 폭을 넓혀 주었다. 따라서 기업 내에 다른 종류의 컴퓨터나 소프트웨어가 존재하는 현상은 일반화되어 있고, 이들간의 상호 호환성에 대한 요구가 자연히 뒤따르게 되었다. 이러한 호환성은 기업 내에서뿐만 아니라 정부나 여타 다른 기업간의 자료 호환 시에도 문제가 되어왔다. 자연스럽게 기업은 각종 표준화에 대해 깊은 관심을 가지게 되었고 이러한 요구에 부응하여 여러 가지 국제 표준을 제정하려는 노력들이 시도되고 있다. 대표적인 기구로 ISO(International Standard Organization)를 들 수 있다. 특히 STEP(STandard for Exchange of Product Data)으로 알려진 ISO 10303에서는 설계 및 공정계획 단계에서 필연적으로 참조하게 될 제품 관련 자료의 표현에 대한 국제 표준을 제정하고 있는 중이다. STEP은 컴퓨터가 인식 가능한 표현(Computer interpretable representation)과 제품 데이터의 교환에 관한 국제 표준 중의 하나이다. 그 목적은, 제품의 전 수명주기를 통해서 특별한 시스템과는 독립적으로, 제품 데이터를 설명할 수 있는 중립적인 메카니즘을 제공하는 것이다. STEP의 각 파트에서 정의되는 정보의 표현은 EXPRESS라는 공식적인 정보 정의 언어를 이용해서 記述된다. EXPRESS는 관심의 대상이 되는 객체의 정의에 중점을 두고 있다. STEP 표준을 따른다는 것은 이러한 EXPRESS언어의 형태로 정보를 표현할 수 있다는 의미이다[4]. 이 STEP에서 다루고 있는 여러 종류의 자료들 중 특히 많이 언급되고 있는 부분은 제품 도면의 표현과 공정계획의 표현에 관한 부분이다. STEP의 파트 49에는 공정계획 표현안에 관한 내용이 정의되어 있다[5].

본 논문은 5개의 장으로 구성되어 있다. 1장 서론에서는 공정계획/일정계획의 통합 및 자료의 표준화에 대한 필요성을 설명하고, 2장 관련 연구현황에서는 기존의 공정계획/일정계획의 통합에 관해 다루었던 연구들에 대한 현황 분석 및 문제점, 그리고 현재 논의되고 있는 공정계획의 표현 방안에 대해서 다룬다.

3장 공정계획/일정계획 통합 시스템에서는 본 논문에서 제안한 통합 시스템의 세부 사항에 대해 논의하고, 4장에서는 실험 결과를, 5장에서는 결론 및 추후 연구과제를 다룬다.

2. 관련 연구 현황

2.1 공정계획 표현법에 관한 연구

공정계획/일정계획의 연계에 대한 연구는 주로 유

업을 중심으로 수행되고 있으며, 이 연계에서 중요한 역할을 하는 자료는 공정계획의 표현 방법이다. 공정계획의 표현 안에서는 가공을 위한 자료이외에 공정계획과 일정계획의 연계를 위해 필요한 대체 공정, 대체 기계, 가공 시간 등에 관한 정보를 효과적으로 표현할 수 있어야 한다.

공정계획의 표현 방안에 대한 내용은 구축된 공정계획 시스템의 전체 통제 구조나 사용된 언어에 따라 차이가 있다. 예를 들어 공정계획에서 기계 선택과 공정 선택이 끝난 후 이를 바탕으로 일정계획을 수립하는 일방적인 시스템의 경우에는 공정계획 결과를 표현하는 양식에는 대체 공정과 대체 기계들의 내용이 들어갈 필요가 없지만, 기계 선택과 공정 선택 일정계획을 동시에 해결하는 시스템에서는 이들 대체 공정과 대체 기계들에 대한 정보를 유지할 필요가 있다. 한편, 산업의 종류나 구현된 공정계획 시스템에 무관하게 사용될 수 있는 공정계획 표현에 대한 국제 표준의 제정에 대해서도 활발한 토의가 진행되고 있다. 본 절에서는 공정계획 시스템에서 사용하고 있는 공정계획과 관련된 국제 표준과 대표적인 공정계획의 표현에 대해 살펴본다.

STEP 파트 49의 아이디어는 공정의 분할에 의거한 것이다. 여기서 제시한 표현법은 개념적인 모델이라 할 수 있으며, 이러한 공정계획의 표현법을 이용하여 직접적인 가공 명령이 이루어지지 않는다는.

한편 STEP에서 공정계획의 표현 모델에 대한 논의가 이루어질 때와 거의 비슷한 시기에 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서는 국제 표준과는 별도로 ALPS(A Language for Process Specification)이라는 실험적인 공정계획 언어를 만들었다. STEP과는 달리 이 언어는 실행을 염두에 두고 만들었으며, 그래프 구조를 이용하여 공정계획을 작성하게 되어있다[6].

대표적인 공정계획 표현법중 나머지 하나는 Mettala가 제시한 AND/OR 그래프이다. 이 방법은 DeMello와 Sanderson이 조립 계획에 대해 사용했던 AND/OR 그래프에서 아이디어를 얻어서 제시한 방법으로 노드는 가공해야 할 공정을 의미하고, 아크는 선행관계를 의미한다[7].

STEP에서 제정한 공정계획 표현안은 일반적인 표현을 위한 것이지만, 계층 구조 자체가 가지는 한계로 인해 표현할 수 없는 관계가 존재할 수 있으며, ALPS에서도 엄밀히 정의된 통제 논리에 의해 표현할 수 없는 관계가 존재한다. 한편 AND/OR 그래프에서는 분명한 선후행 관계를 표현할 수는 있지만,

동시가공과 같은 특정한 관계가 있는 경우에는 표현할 수 없는 한계가 있다.

2.2 공정계획/일정계획 통합에 관한 연구

공정계획과 일정계획의 통합에 대한 연구는 공정선택에 대한 기능과 일정계획에 대한 기능의 연계 방식에 따라 크게, 선형적이고 일방적인 구조, 순환 반복 구조, 통합 구조의 3개로 나누어 볼 수 있다.

선형적이고 일방적인 구조에서는 공정계획 단계에서 각 부품에 대한 공정계획을 유일하게 결정하여 주고, 일정계획 단계에서는 이를 바탕으로 각 기계에서의 공정 순서를 결정하는 방식이다. 네덜란드 Twente 대학의 Production Engineering Lab.에서 개발한[8] PART(Planning of Activities, Resources and Technology)와 Zhang[9]이 발표한 DTTP(Distributed Process Planning)는 이와 같은 구조로 이루어져 있다. DTTP에서는 다수의 작업들이 동시에 가공될 때의 일정계획 수행도는 고려하지 않고 한 부품만을 가공한다고 가정했을 때 최소한의 시간으로 끝낼 수 있는 공정 하나를 선택한다. 이러한 방법에서는 일정계획 수립시 대체 공정을 활용할 수 없고, 공정 설계시 최선의 공정계획이라고 결정되었던 계획이 일정계획에 미치는 영향에 대해서는 알 수 없다는 한계가 있다.

순환반복 구조에서는 공정계획 단계에서 최선의 공정계획을 결정하여 일정계획 단계에 넘겨주고, 일정계획 단계에서는 이를 바탕으로 일정계획을 수립하여 운영한다. 기계 고장이나 예상되는 일정에 문제점이 발생하면 대체 공정을 공정계획에 요구하고 공정계획에서 대체 공정계획을 수립하여 주는 방식이다. 일본 Osaka 대학에서 개발한 DPP(Dynamic Process Planning) 같은 시스템이 이러한 방식을 따르고 있다[9]. 이 시스템에서는 일정계획을 수립하는 단계에서 대체 공정에 대한 정보를 이용할 수 없다는 점에서 선형적이고 일방적인 방식과 마찬가지로의 한계가 있으나, 현장에서 발생할 수 있는 이상 상황에 대한 대처 방안이 존재한다는 점이 다르다. 그러나 이러한 경우 공정계획 모듈은 실시간에 대체 공정을 수립할 수 있는 능력을 갖추고 있어야 한다. 즉 현장의 실시간 정보를 이용하여 실시간에 공정계획을 수립할 수 있는 뛰어난 공정계획 모듈이 있어야 가능한 구조이다. 기본적인 문제의 수리 모형은 선형 구조와 다를 바가 없지만 필요한 경우 실시간에 대체 공정이 생성될 수 있다는 점에서 운영에 유연성이 있다.

통합 구조는 가공 가능한 대체 공정을 모두 만든 후, 이를 바탕으로 공정계획과 일정계획을 동시에 수립하는 방법으로 가장 이상적인 시스템이라 할 수 있다. 이러한 구조를 가진 시스템에 대해서는 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. 이러한 방식에서는 공정의 선택과 일정계획의 수립 문제를 동시에 풀어야 하므로 문제의 크기가 커진다. 따라서 대개는 우선 순위를 할당해 주거나 또는 문제를 분할한 후 발전적 해법에 의해 해를 찾는 쪽의 연구가 대부분이다.

문제를 분할해서 해를 구한 연구로는 부품을 하나씩 고려한 네덜란드 Twente 대학의 Mechanical Engineering 학과에서 개발한 시스템[10], 계획 기간대를 분할한 미국의 Southern California 대학에서 개발한 시스템[1]을 예로 들 수 있다. 또한 우선 순위 할당에 대한 연구로는 독일의 Hannover 대학과 Leuven 대학에서 공동으로 수행한 ESPRIT 프로젝트 2457인 FLEXPLAN[11]과 Louisiana State Univ. 의 Liao의 시스템[12]을 예로 들 수 있다.

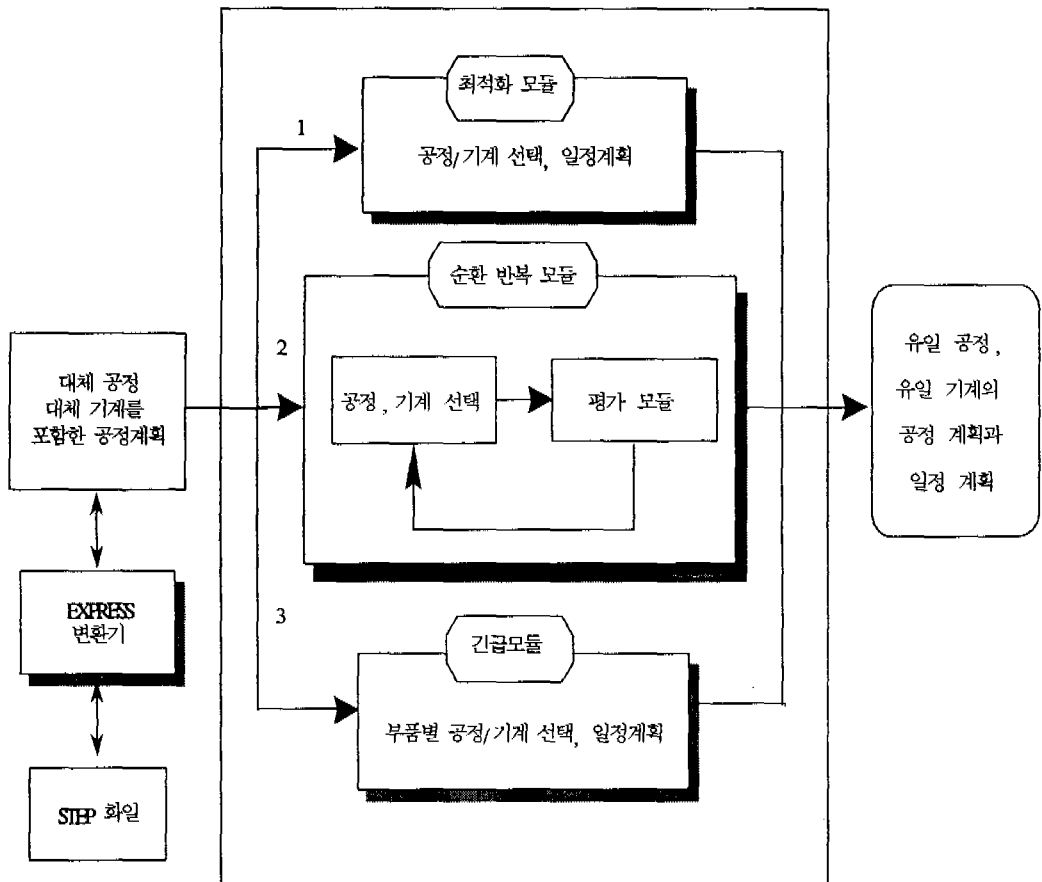
3. 공정계획/일정계획 통합 시스템

3.1 전체 시스템 구성

본 논문에서 제안하는 시스템은 공정계획/일정계획의 수립에 허용된 시간, 주문의 긴급한 정도에 따라 공정계획/일정계획의 수행도(performance) 수준이 달라질 수 있는 구조로 이루어져 있다. 시스템의 전체 구조를 [그림 1]에 도시했다.

통합 시스템의 전체 구조는 크게 네 개의 모듈로 구성되어 있다. 그 중 공정계획과 일정계획의 수립에 직접 관련된 세 개의 모듈은 각각 최적화 모듈, 순환 반복 모듈, 긴급 모듈이다. 다른 하나의 모듈은, 본 논문에서 정의해서 사용하고 있는 공정계획 표현 자료를 EXPRESS 언어로 상호 변환할 수 있는 변환기 모듈이다.

공정계획/일정계획의 수립에 허용된 시간에 따라 입력된 자료는 각기 3개의 경로를 따라 갈 수 있다



[그림 1] 공정계획/일정계획 통합 시스템의 전체 구조

장기 계획이 가능한 경우, 1의 경로를 따라 최적화 모듈에서 계획이 수립된다. 장기 계획이 불가능한 경우, 2의 경로를 따라 순환 반복 모듈에서 허용된 시간만큼의 시간을 소요하며 계획이 수립된다. 납기가 촉박한 긴급 주문이 들어왔을 경우에는 경로 3을 따라 긴급 모듈이 선택된다.

3.2 자료 구조와 Express 변환기

통합 시스템에서 이용하는 기본적인 자료는 공정 계획과 일정계획 수립 문제에서 다루게 될 자료들이다. 공정계획/일정계획의 통합 시스템에 이용되는 중요한 자료로는 기계, 주문, 부품 관련 자료가 있다.

현장 내의 자료의 실시간 취합이 가능하다고 할 때, 현장의 원활한 통제를 위해서는 기계와 관련된 최소한의 데이터가 갖추어져야 한다. 여기에는 예약된 부하를 표현하기 위해 {machine id, order#, part#, operation#, start time, standard operation time}의 내용이 포함되며, 기계의 작동 상태를 파악하기 위해 {machine id, machine condition, 고장발생 시각, 예상수선시간}의 내용이 포함된다. 고객 주문에 관해서는 {order #, priority, part #, due date, quantity}의 내용이 최소한 포함된다. 부품에 관련된 자료는 {job #, AND/OR 그래프}로 이루어진다.

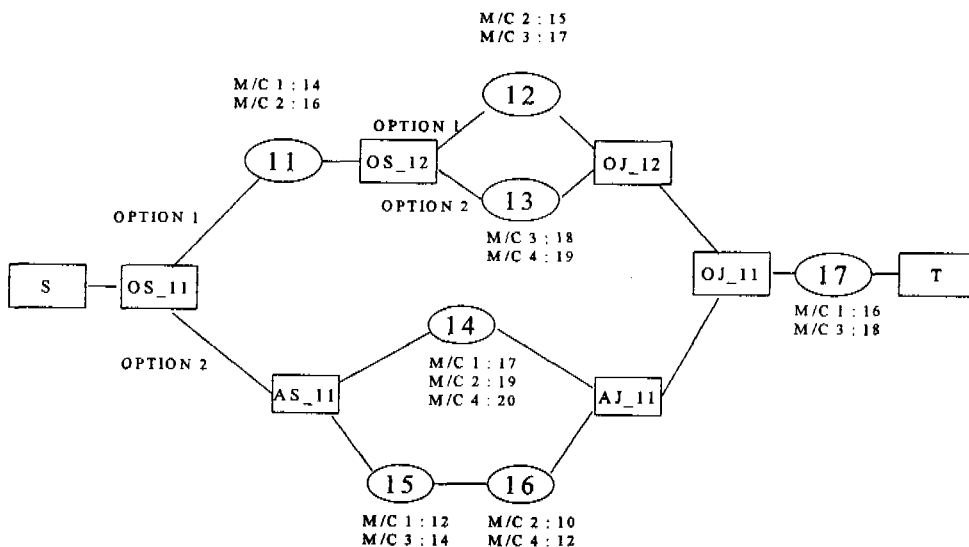
본 논문에서는 부품별 공정계획의 표현을 위해 AND/OR 그래프를 이용한다. 본 논문에서 사용되는 AND/OR 그래프내의 노드 종류는 7 가지가 있다. AS_j는 AND SPLIT를 의미하며, AJ_j는 AND JOIN을 의미한다. OS_j는 OR SPLIT를 의미하며, OJ_j는 OR JOIN을 의미한다. S, T는 dummy노드로

그래프의 시작과 끝을 각각 의미한다. 그 외의 노드는 모두 1회 셋업으로 가공 가능한 공정을 의미하며, 각 노드에는 해당 공정을 수행할 수 있는 기계와 표준 가공 시간이 명시되어 있다.

다음 [그림 2]에 예제 부품1의 AND/OR 그래프를 도시했다. 이 그래프에 의하면 예제 부품 1은 OS₁₁에서는 두 개의 아크 중 하나를 따라서 갈 수 있고 (즉, 두 가지 옵션 중 하나를 선택), AS₁₁에서는 두 가지 아크에 있는 모든 공정(14, 15, 16)을 수행해야 한다. 단 15 공정과 16 공정은 선행 제약이 있지만 14 공정과는 아무런 선행 제약이 없다. 따라서 [그림 2]에 표현된 예제 부품 1은 (11, 12, 17), (14, 15, 16, 17), (15, 14, 16, 17), (15, 16, 14, 17)의 대체 공정을 나타내고 있으며, 각 공정은 공정 노드에 표현된 대체 기계에서 가공이 수행될 수 있다.

위의 AND/OR 그래프의 구조와 각 노드에 포함된 정보를 효과적으로 표현하기 위해서, 상위 클래스로 노드를 정의하고 노드의 멤버 변수(member variable)로 노드 ID, Parent Node, Child Node를 가지게 한다. 그래프에 표현된 여러 노드는 노드 클래스로부터 기본적인 변수를 상속받고, 추가로 노드의 종류에 알맞게 정의된 멤버 변수를 갖게된다. C++ 클래스 정의를 이용해서 AND/OR 그래프를 표현하면 다음 [표 1]과 같이 요약될 수 있다.

STEP 표준안을 따른다는 것은 STEP에서 정의한 각종 자원(resource)을 이용하여 자료를 정의한다는 의미이다. 이들 각종 자원은 기본적으로 STEP 파트 11에서 정의한 EXPRESS 언어를 기반으로 작성된다. 따라서 STEP 표준안을 따르는 것은 원칙적으로,



[그림 2] 예제 부품 1의 AND/OR 그래프(입력)

[표 1] AND/OR 그래프를 표현하기 위한 C++의 클래스 정의

클래스	클래스 특성	멤버 변수	멤버 변수 의미
CNode	최상위 노드	int m_ID	노드의 identifier
		CList m_Parent	parent node list
		CList m_Child	child node list
CSplit	child node가 다수인 노드	Type m_AndOr	AND split과 OR split을 구분
CJoin	parent node가 다수인 노드	Type m_AndOr	AND join과 OR join을 구분
COperation	child와 parent가 하나씩인 노드	CMachineList m_MachineID	노드에 해당하는 공정용 가공하는 기계 list
		CTimeList m_ProcTime	기계 list에 대응하는 가공 시간 list
CDum	child나 parent 노드 중 하나가 null인 노드	Type m_SinkorTerminal	Sink 노드와 Terminal 노드를 구분

사용하는 자료를 EXPRESS 언어로 변환할 수 있다는 의미이다.

위에서 정의한 자료들을 STEP 파트 11에서 정의한 EXPRESS 언어로 변환하기 위한 방법에 대해서 살펴본다. STEP 파트 11에는 EXPRESS에서 허용하는 자료들의 형태에 대해 설명되어 있다. 여기에서 정의하고 있는 데이터 타입은, 기본 데이터 타입, 집합체 데이터 타입, 사용자 정의 데이터 타입으로 구분된다. 기본 데이터 타입에는 가장 기본적인 수준의 데이터 타입을 정의한다. 기본 데이터 타입은 NUMBER, REAL, INTEGER, STRING, BOOLEAN, LOGICAL 그리고 BINARY이다. 집합체 타입으로 정의된 것은 ARRAY, LIST, BAG 과 SET이다. 사용자가 지정해서 사용하는 데이터 타입으로 두 가지가 있는데 하나는 ENTITY이고 다른 하나는 TYPE이다. 또한 타입을 정의하는 방식에 따라 열거형(ENUMERATION)과 선택형(SELECT)으로 나눈다 [13].

본 논문에서 이용하는 자료들에 대한 EXPRESS 정의를 살펴본다. 기본적으로 C++에서의 클래스에 해당하는 데이터 타입으로는 EXPRESS에서는 집합체 데이터 타입으로 볼 수 있다. 이 중 ENTITY 데이터 타입에서는 사용자가 다양한 자료들에 대한 구

조를 정의할 수 있다. 따라서 위에서 정의한 C++ 클래스는 ENTITY 데이터 타입으로 변환할 수 있다. 한편 C++의 LIST에 해당하는 EXPRESS의 데이터 타입에는 집합체 데이터 타입에 속한 LIST로 변환할 수 있다[5, 13].

AND/OR 그래프의 표현을 위한 EXPRESS 스키마(scheme) 정의를 설명한다.

노드 리스트와 기계 리스트의 정의를 위해 다음을 정의한다.

```
TYPE Nid = INTEGER;
```

```
END_TYPE;
```

```
TYPE Mid = INTEGER;
```

```
END_TYPE;
```

이를 이용하여 상위 클래스인 CNode는 다음과 같은 ENTITY를 이용하여 정의한다.

```
ENTITY CNode
```

```
  ABSTRACT SUPERTYPE OF { CSplit, CJoin, CDummy, COperation }
```

```
  name : Nid;
```

```
  parent : LIST OF CNode;
```

```
  child : LIST OF CNode;
```

```
END_ENTITY;
```

CNode의 속성을 상속받는 하위 클래스인 CSplit, CJoin, CDummy, COperation 중 COperation과 CSplit의 정의는 다음과 같다.

```
ENTITY COperation
```

```
  SUBTYPE OF CNode;
```

```
  machine : LIST [1:?] OF UNIQUE Mid;
```

```
  proc_time : LIST [1:?] OF REAL;
```

```
END_ENTITY;
```

```
ENTITY CSplit
```

```
  SUBTYPE OF CNode;
```

```
  node_type : BOOLEAN;
```

```
WHERE
```

```
  wr1 : SIZEOF(parent) = 1;
```

```
  wr2 : SIZEOF(child) > 1;
```

```
END_ENTITY;
```

위에서 WHERE 다음에 있는 wr1, wr2는 SPLIT의 경우에는 parent는 하나이고, child는 둘 이상임을 나타내는 규칙(RULE)이다.

3.3 최적화 모듈

최적화 모듈에서는 makespan을 최소화 할 수 있는 최적 공정계획과 일정계획을 수립한다. 공정계획/일정계획의 통합 수립을 가능케하는 수리 모형을 다음에 제시했다. AND/OR 그래프로 표현된 공정계획, 주문에 따른 생산 계획, 그리고 공장 내 기계들에 예

약된 부하가 주어졌을 때 최종 가공 완료 시각(makespan)을 최소화 할 수 있는 혼합 정수 계획법이다. 다음에 모형에서 이용될 인덱스, 상수와 모형을 통해 결정할 결정 변수에 대해 설명했다.

인덱스

- i, l : 부품(job) 인덱스
- j, m : 공정(operation, setup) 노드, OR SPLIT 노드, AND SPLIT노드 인덱스
- p, q : OR SPLIT 노드에서의 옵션 인덱스
- k : 기계 인덱스

상수

- M : 큰 정수 M
- P_{ijk} : 부품 i 의 j 공정을 k 기계에서 가공할 때의 가공 시간
- OR_i : 부품 i 의 OR 노드 인덱스 집합
- OP_i : 부품 i 의 공정 노드 인덱스 집합
- SN_{ijm} : 부품 i 의 j OR 노드 m 번째 옵션에 속한 OR 노드 인덱스 집합, m 번 옵션에 내포된 OR 노드에 다시 내포된 OR 노드 인덱스는 제외
- SO_{ijm} : 부품 i 의 j OR 노드 m 번째 옵션에 속한 공정 노드 인덱스 집합, m 번 옵션에 내포된 OR 노드에 다시 내포된 공정 노드 인덱스는 제외
- PR_{ij} : 부품 i 의 노드 중 j 노드 이후에 수행되어야 하는 공정 노드 인덱스 집합
- MJ_k : k 기계를 사용 가능한 모든 공정 노드 인덱스 집합
- LS_{km} : k 기계에서 기존에 할당된 m 번째 공정의 시작 시각
- LP_{km} : k 기계에서 기존에 할당된 m 번째 공정의 가공 시간

결정변수

- Z_{ijm} : 부품 i 의 AND/OR 그래프에서 j 번 OR SPLIT 노드의 m 번 option이 선택되면 1 아니면 0
- Y_{ijk} : 부품 i 의 j 공정을 k 기계에서 수행하면 1 아니면 0
- X_{ij} : 부품 i 의 j 공정의 가공 시작 시각
- W_{ijm} : 부품 i 의 j 공정이 부품 i 의 m 공정을

선행하면 1 아니면 0

V_{ijlmk} : 부품 i 의 j 공정이 부품 l 의 m 공정을 선행하면 1 아니면 0

L_{ijmk} : 기계 k 에서 부품 i 의 j 공정이 기존에 할당된 m 공정을 선행하면 1 아니면 0

MS : 최종 가공 완료 시각(makespan)

[문제 1] 최적화 모듈의 0-1 혼합 정수 계획법

Min MS (1)

subject to

$$\sum_p Z_{ijp} = 1 \quad \text{모든 } i, j \in OR_i, \text{ 단 } j \notin \bigcup_{m,q} SN_{imq} \quad (2)$$

$$\sum_p Z_{ijp} = Z_{imq} \quad \text{모든 } i, j \in OR_i, \text{ 단 } j \in SN_{imq} \quad (3)$$

$$\sum_k Y_{ijk} = 1 \quad \text{모든 } i, j \in OP_i, \text{ 단 } j \notin \bigcup_{m,p} SO_{imp} \quad (4)$$

$$\sum_k Y_{ijk} = Z_{imp} \quad \text{모든 } i, j \in OP_i, \text{ 단 } j \in SO_{imp} \quad (5)$$

$$X_{ij} + \sum_k P_{ijk} Y_{ijk} \leq X_{im} \quad \text{모든 } i, j, m, \text{ 단 } m \in PR_{ij} \quad (6)$$

$$X_{ij} + \sum_k P_{ijk} Y_{ijk} \leq X_{im} + M(1 - W_{ijm}) \quad \text{모든 } i, j, m, \text{ 단 } m \notin PR_{ij} \quad (7)$$

$$X_{im} + \sum_k P_{imk} Y_{imk} \leq X_{ij} + MW_{ijm} \quad \text{모든 } i, j, m, \text{ 단 } m \in PR_{ij} \quad (8)$$

$$X_{ij} + P_{ijk} \leq X_{im} + M(3 - Y_{ijk} - Y_{lmk} - V_{ijlmk}) \quad \text{모든 } i, k, j, m, \text{ 단 } j \in MJ_k \quad (9)$$

$$X_{lm} + P_{lmk} \leq X_{ij} + M(2 - Y_{ijk} - Y_{lmk} + V_{ijlmk}) \quad \text{모든 } i, k, j, m, \text{ 단 } j \in MJ_k \quad (10)$$

$$X_{ij} + P_{ijk} \leq LS_{km} + M(2 - Y_{ijk} - L_{ijmk}) \quad \text{모든 } i, j, k, m \quad (11)$$

$$LS_{km} + LP_{km} \leq X_{ij} + M(1 - Y_{ijk} + L_{ijmk}) \quad \text{모든 } i, j, k, m \quad (12)$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad \text{모든 } i, j \text{는 START 노드 인덱스} \quad (13)$$

$$X_{ij} + \sum_k P_{ijk} Y_{ijk} \leq MS \quad \text{모든 } i, j \text{는 END 노드 인덱스} \quad (14)$$

$$L_{ijmk}, V_{ijlmk}, W_{ijm}, Y_{ijk}, Z_{ijm} \in \{0, 1\} \quad (15)$$

식 (2)와 (3)은 OR 노드에서의 공정 선택에 관한 제약이고, 식 (4)와 (5)는 선택된 옵션에 속한 공정을 수행할 기계 선택에 관한 제약이다. 식 (6)은 그래프 상에서 선행 관계가 있는 작업들 간의 수행 순서에 관한 제약이며, 식 (7), (8)은 선행관계가 없는 공정들이 동시에 가공되는 것을 방지하는 제약이다. 식 (9)와 (10)은 한 기계에서 서로 다른 작업이 동시에

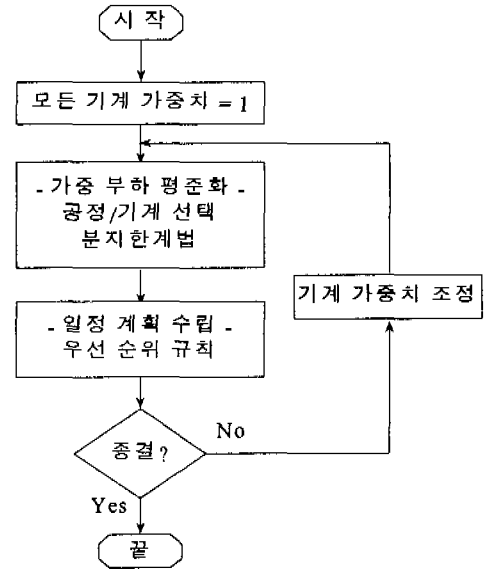
수행되는 것을 방지하고, 식 (11)과 (12)는 기계에 미리 할당이 예약된 공정과 동시에 가공되는 것을 제약하며, 이 식에서 현재의 공장 상황이 반영된다. 식 (13)은 변수에 대한 초기조건을, 식 (14)는 목적함수의 식 (1)과 함께 최종 가공 완료 시간(makespan)의 최소화에 관한 식이다.

최적화 모듈에서는 0-1 변수들에 대해 분지한계를 통해 [문제 1]에 대한 해를 찾는다. 탐색 공간의 각 노드에서는 LP 완화식을 이용해서 하한값을 구한다. 0-1 변수들의 종류는 Z, Y, W, L, V 이다. Z는 OR SPLIT에서의 공정 선택에 관련된 변수, Y는 선택된 공정에서의 가공기계 선정에 관한 변수, W는 동일 부품에서 그래프 상 선행관계가 없는 공정들 간의 동시 가공 방지에 관한 변수, V는 다른 부품들 간의 동시 가공 방지에 관한 변수, L은 미리 할당된 부하와의 동시 가공 방지를 위한 변수이다. 0-1 변수들의 분지 순서는 Z, Y, W, L, V의 순서이다. 그 이유는 변수 Z가 결정될 경우 해당되는 Z에 내포되는 노드에 해당하는 변수 Y가 쉽게 결정될 수 있다. 또한 동일 부품에서의 동시 가공 방지에 대한 변수인 W는 변수 Z이 결정될 경우 보다 쉽게 결정될 수 있는 변수이다. 이렇게 개별 부품에 대한 결정이 끝난 후 부품끼리의 동시 가공을 방지하기 위한 변수인 L, V와 같은 변수들을 고려한다. 변수 Z, Y의 결정에 관한 문제는 공정과 기계의 선택 문제이고 변수 W, L, V는 일정계획에 관한 문제이다. 이와 같은 구조로 분지한계를 수행해 나가는 것은 주어진 수리 모형 뿐 아니라 원 문제의 구조상 특징을 반영한 것이다.

3.4 순환반복 모듈

순환반복 모듈에서는, 계층적이고 반복적인 방법을 이용해서 공정계획과 일정계획을 수립한다. 공정계획 단계에서 결정되어야 할 두 가지 의사결정 문제 즉, 공정 선택과 기계 선택 문제를 가중 부하 평준화(weighted load balancing)를 목적으로 풀이한다. 이 결과 생성된 라우팅을 바탕으로 간단한 우선 순위 규칙(dispatching rule)을 적용하여 시물레이션을 시행한다. 시물레이션의 결과인 최종 가공 완료 시간을 보고 종결 조건을 만족하는지를 검사한 후, 만족하지 못할 경우 기계에 대한 가중치를 조정하여 공정 선택과 기계 선택을 시행하는 과정을 다시 반복한다. 시물레이션의 수행 후 기계의 가중치를 조정한다. 기계의 가중치는 기계 중에서 가공 완료 시간이 가장 긴 기계를 병목기계로 정의하고, 이 병목기계의 가공 완료 시각으로 각 기계의 가공 완료 시각을 나눈 값

으로 결정한다. 따라서 다음 번 반복되는 가중 부하 평준화 모듈에서는 가중치가 큰 기계, 즉 병목기계 가공 완료시간과 근사한 값을 갖는 기계는 선택 회가 줄어든다. 다음 [그림 3]에 순환반복 모듈의 체 구조를 나타내었다.



[그림 118] 순환반복 모듈의 전체 구조

1) 일정계획의 수립

시물레이션 모듈에서는 미리 정의한 우선 순위 정 규칙(dispatching rule)에 따라 각 기계에 할당 공정들의 가공 순서를 결정한다. 시물레이션 수행과, 각 기계에서의 모든 작업의 최종 완료 시간과 작업의 최종 완료 시간을 기록한다.

2) 가중치의 결정

최종 가공 완료 시각이 가장 큰 기계를 병목 기계로 정의한다. 가중치는 병목 기계에 할당된 부하 비교적 부하가 적은 곳으로 할당해 주는 역할을 수 있도록 정해진다. 이미 할당된 부하를 고려하여 각 기계의 가중치를 계산한다. t번째 반복에서 시물레이션을 수행한 결과, 기계 k의 최종 작업 완료 시각이 $MS_{t,k}$ 일 때, t+1번째 반복에서 기계 k에 대한 가중치 $W_{t+1,k}$ 는 다음의 식 (16)에 의해 결정된다

$$W_{t+1,k} = \max \left(\frac{MS_{t,k}}{\max_k \{MS_{t,k}, \epsilon\}} \right) \quad (16)$$

위의 식 (16)은 우선 순위 규칙에 의한 일정 계획의 결과, 최종 작업 완료 시각이 큰 기계일수록 높은 가중치를 가지게 되고, 최종 작업 완료 시각이 작을수록 낮은 가중치를 갖게 되며, 가중치의 최대값은

이 되며, 최소값은 epsilon으로 주어진다.

3) 종결 조건

순환반복 모듈의 종결 조건은 모두 세 가지이다. 각 작업의 최종 완료 시간이 주어진 납기일을 모두 만족하던가, 기계의 가중치를 조정 한 후 나아지는 해의 폭이 정해진 기준치 보다 작을 때, 공정계획과 일정계획에 주어진 시간이 지났을 때 순환반복 모듈을 중지한다.

4) 가중 부하 평준화

가중 부하 평준화 모듈에서는 가공해야 할 각 부품의 공정을 결정하고, 각 공정을 수행할 기계를 결정한다. 각 기계에는 기존에 할당된 부하가 존재하고 있으며, 기계 고장과 같은 이상 상황의 발생으로 인해 작업이 불가능한 경우가 존재한다. 이러한 경우, 본 모듈에서는 이상 상황으로 인한 작업 불가능의 경우도 모두 기존에 할당된 기존 부하가 있는 것으로 간주한다. 이러한 상황에서 가중 부하 평준화 모듈에서는 각 기계에 새로이 할당될 공정들의 가중 부하와 기존 부하의 합이 평준화를 이룰 수 있도록 각 부품의 공정과 공정을 가공할 기계를 선택한다. 즉, 각 부품의 공정계획을 표현한 AND/OR 그래프의 OR SPLIT 노드에서의 옵션 결정, 각 공정 노드에서의 가공 기계 선정의 기능을 수행한다. 가중 부하란 병목으로 파악된 기계의 사용을 제한하기 위해 결정된 각 기계의 가중치를 고려한 부하이다.

가중 부하 평준화를 위한 공정, 기계를 선택하는 수리 모형을 다음 [문제 2]에 제시하였다. 이 문제는 0-1 정수 계획법 문제로 모델링된다. 모형에 이용된 인덱스, 상수, [문제 1]과 동일하며, 결정변수는 Z과 Y이다.

[문제 2] 순환반복 모듈의 t 번째 반복에서 공정, 기계 선택을 위한 0-1 정수 계획법

$$\text{Min } L_t \quad (17)$$

subject to

식 (2), 식 (3), 식 (4), 식 (5)

$$\sum_m LP_{km} + LW_{tk} \sum_i \sum_j P_{ijk} Y_{ijk} \leq L_t \quad \text{모든 } k \quad (18)$$

$$Z_{ijm}, Y_{ijk} \in \{0, 1\} \quad (19)$$

식 (2), (3), (4), (5)의 의미는 [문제 1]에서와 같다. 식 (17)과 (18)이 가중 부하 평준화(weighted load balancing)에 대한 식이다. 식 (18)의 LW_{tk} 는 t 번째 반복시 기계 k에 부여되는 가중치이다. t 번째 반복에서 가중 부하의 최대치인 L_t 는, 기계 k에 할당된

작업들의 가중 부하를 표현하는 식 (18)과 식 (17)의 목적함수에 의해 최소화가 된다. 식 (19)는 변수의 무결성을 위한 제약식이다.

[문제 2]는 분지한계법을 이용해서 풀이한다. 하한값은 주어진 문제의 제약식 (18)을 완화시킨 라그랑지안 완화식을 풀이하여 결정한다. 탐색 전략은 깊이 우선이며, OR SPLIT 노드에서의 옵션 결정과 관련된 변수부터 분지한다.

3.5 긴급 모듈

긴급 모듈에서는 계획의 빠른 수립을 위해 가공할 부품을 하나씩 고려하여 공정계획/일정계획을 수립해나간다. 현재 공장에는 기존에 수립된 계획에 의해 작업이 진행되고 있는 상황이다. 긴급 모듈을 통해 일정을 수립해야할 부품은, 이 부품보다 낮은 우선순위를 가진 작업들에 대해서는 선점(preemption)이 가능하며, 이 부품보다 높은 우선순위를 가진 작업들에 대해서는 선점이 불가능하다. 이들 작업들의 일정에 따라 공장에는 예약된 부하가 존재한다. 이 상황에서 해당 부품을 가장 빨리 가공할 수 있는 공정계획과 일정계획을 김기동[14]이 제안한 '시간 창을 이용한 부품별 공정계획/일정계획' 방법에 의해 수립한다.

4. 실험 결과

최적화 모듈, 순환반복 모듈, 최적화 모듈의 수행도를 비교하기 위한 실험을 수행했다.

예제 부품 타입의 AND/OR 그래프의 구조를 4가지 종류로 미리 정하고, 각 부품 타입에 대해 각 공정을 가공할 수 있는 기계와 가공 시간을 무작위로 선택한 자료를 이용한 실험을 수행했다. 공장의 기계는 모두 다섯 대라고 가정했다. 각 공정을 가공할 수 있는 대체 기계의 수는 1에서 5까지의 난수를 발생해서 결정했고, 결정된 대체 기계 수만큼의 기계 번호를 중복을 방지하면서 난수를 이용해서 결정했다. 각 기계에서의 가공 시간은 10에서 20까지의 난수를 발생시켜 결정했다. [실험 1], [실험 2], [실험 3], [실험 4]은 각각 상이한 구조의 예제 부품을 이용한 실험이다.

예비 실험을 실시한 결과, 실험 회수는 긴급 모듈의 경우 50회, 최적해의 실험은 20회로 결정된다.

실험 결과를 다음 [표 2]에 정리했다. [표 2]의 MS는 Makespan을 의미하고, RT는 수행 시간을 의미한다. 긴급 모듈과 순환반복 모듈 열의 값은 50개의 예

제에 대한 실험 결과의 평균값이며, 최적화 모듈 열의 값은 20개의 예제에 대한 최적해 실험 결과의 평균값이다. 순환반복 모듈에서 RT가 빠진 이유는 반복 회수 결정에 user의 개입이 있었기 때문이며, 평균 3회 반복에 1회 당 평균 180초이다.

참고문헌

[표 25] 긴급, 순환반복, 최적화 모듈의 비교 실험 결과

실험	모듈	긴급(1)	순환반복(2)	최적화(3)	비교	
					(1)/(3)	(2)/(3)
실험1	MS(분)	52.14	48.9	45.35	1.15	1.08
	RT(초)	0.19	-	493.39	0.0004	-
실험2	MS	54.48	48.5	45.10	1.21	1.08
	RT	0.07	-	70.03	0.001	-
실험3	MS	73.08	65.1	58.35	1.25	1.12
	RT	0.25	-	784.40	0.0003	-
실험4	MS	68.22	56.6	51.15	1.33	1.11
	RT	0.17	-	200.31	0.0008	-
평균	MS				1.235	1.10
	RT				0.0006	0.45

[1] Chen, Q. and B. Khoshnevis, "Scheduling with flexible process plan", *Production Planning & Control*, Vol. 4, No. 4, pp. 333-343, 1993.

[2] Kamrani, A. K., P. Sferro and J. Handelman, "Critical issues in design and evaluation of computer aided process planing systems", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 29, No. 1-4, pp. 619-623, 1995.

[3] Kuhnle, H., H.-J. Braun and J. Buhning, "Integration of CAPP and PPC - Interfusion Manufacturing Management", *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 5, No. 2, pp. 21-27, 1994.

[4] 생산기술연구원, "STEP 규격 (1차년도 번역사업 : 번역초안)", 1994.

[5] Owen, J., *STEP An Introduction*, INFORMATION GEOMETERS, 1993.

[6] Ray, S. R. and A. B. Feeney, "A national testbed for process planning research", From <http://elib.cme.nist.gov/fasd/pubs/ray93.html>, 1993.

[7] Lee, S., R. A. Wysk and J. S. Smith, "Process planning interface for a shop floor control architecture for computer-integrated manufacturing", *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 33, No. 9, pp. 2415-2435, 1995.

[8] Lenderink, A. and H. J. J. Kals, "The integration of process planning and machine loading in small batch part manufacturing", *Robotics & Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 10, No. 1, pp. 89-98, 1993.

[9] Zhang, H.-C., "IPPM - A prototype to integrate process planning and job shop scheduling functions", *Annals of CIRP*, Vol. 42, No. 1, pp. 513-518, 1993.

[10] Zijm, W. H. M., "The integration of process planning and shop floor scheduling in small batch part manufacturing", *Annals of CIRP*, Vol. 44, No. 1, pp. 429-432, 1995.

[11] Kruth, J. P. and J. Detand, "A CAPP system for nonlinear process plans", *Annals of CIRP*, Vol. 41, No. 1, 1992.

[12] Liao, T. W., E. R. Coates, R. Aghazadeh, L. Mann and N. Guha, "Modification of CAPP systems for CAPP/scheduling integration", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 25, Nos 1-4, pp. 203-206, 1993.

[13] Metzger, F. J., I.-E. Zurich, "EXPRESS implementation theory", *5th Annual EXPRESS User Group International Conference*, Oct. 21-22, 1995.

[14] 김기동, 정한일, 정대영, 박진우, "AND/OR 그래프를 이용한 공정계획과 일정 계획의 통합에 관한 연구", *대한산업공학회지*, 제23권, 제2호, pp323-341. 1997.

5. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 생산기술 영역과 생산관리 영역의 통합을 위해 가장 중요한 부분 중 하나인 공정계획에서의 공정 선택과 기계 선택과 일정계획의 통합을 위한 통합 시스템의 복합 구조를 제시했다. 본 논문에서 제안된 시스템은 공정 계획을 표현한 AND/OR 그래프, 공장의 현 상황, 주문에 대한 납기일, 해를 얻기까지 허용된 시간을 입력받아 주어진 상황에서 최선의 해를 얻을 수 있는 구조이다. 또한 본 논문에서 설정한 공정계획 표현안에 대한 EXPRESS 언어로의 변환 과정을 규정함으로써, 국제 표준의 사양을 수용할 수 있도록하였다.

제안된 해법의 구조에 의하면 문제의 풀이에 허용된 시간에 따라 각기 다른 모듈을 통과할 수 있도록 허용함으로써 언제나 각 상황에서 최선의 해를 찾을 수 있도록 하였다.

추후 긴급 모듈과 관련해서는 분해된 부분 문제를 풀이하는 순서가 수행도에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험을 수행하고, 순환반복 모듈과 관련해서는 가중치에 대한 보정 작업에 대해 연구를 수행한다.