

다중 플랜트 체인 구조에서 공정계획과 일정계획의 통합†

문치웅 · 김규웅 · 김종수 · 허 선

한양대학교 산업공학과

Integrated Process Planning and Scheduling in Multiple Plants Chain

Chiung Moon · Kyu-Woong Kim · Jong-Soo Kim · Sun Hur

In this paper, we propose an approach for integrated process planning and scheduling through analysis of the alternative operations sequences and machine selection in supply chain with multiple plants. It takes into account such factors alternative machine, alternative operations sequences, setup time, transportation time between plants, along with other manufacturing factors. The objective of the model is to minimize makespan of machine schedules for all parts, determines operations sequence for each part, and selects a machine for each operation simultaneously. Examples are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

1. 서론

최근 기업들은 인수합병과 적극적인 아웃소싱(outsourcing) 전략으로 운영과 관련한 의사결정의 대부분은 한 사업부 또는 공장 단위의 범위를 넘어 공급사슬(supply chain) 차원에서 효율적인 계획수립에 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 변화는 시장에서의 고객요구의 다양화에 대한 적시대응, 낮은 재고유지, 경쟁력 유지, 시장 점유율의 극대화 및 밀접한 관련이 있다. 그러므로 더 이상 단일 사업장 또는 한 공장 내에서의 독립적인 문제해결 방법으로는 전체적인 최적화(global optimization)에 한계가 있다(Beamon, 1998; Douglas & Paul, 1996; Moon *et al.*, 2000).

비슷한 부품 또는 제품을 생산할 수 있는 다수의 플랜트들이 생산 공급사슬로 구성되고, 그 공급사슬 안에서 여러 플랜트의 작업상황을 고려하여 공정계획, 생산계획, 일정계획문제를 통합적으로 해결할 수 있다면 현장에서 빈번하게 발생하는 상황에 대한 대처능력을 향상시키고 생산 효율성 증대와 함께 고객의 요구납기 충족 측면에서 효과를 얻을 수 있다. 그런데 다중 플랜트를 갖는 생산 공급사슬에 대한 계획문제는 복잡한 제약과 정보공유의 문제 등으로 인하여 모델화에 많은 어려움이 있다.

생산 일정계획은 자재 입고일, 현장의 가공상태, 기계의 부하상태 등의 변경사항에 대하여 유연하게 대응할 수 있어야

하며, 공정순서나 각 공정의 작업을 위한 장비의 변경, 작업장의 부하와 대상 장비의 사용가능 여부를 고려하여 계획이 수립되어야 한다.

이를 통해 납기 지연과 빈번하게 발생될 수 있는 일정조정(rescheduling)을 최소화할 수 있다. 그러나 통합적인 접근방법은 많은 제약과 계산의 복잡성으로 인해 기존의 최적화 해법으로는 쉽게 해를 구할 수 없으며, 문제의 규모가 커질 경우 원하는 시간 안에 해를 구하기가 쉽지 않다. 더욱이 다중 플랜트의 경우 단일 플랜트 문제에 비해 부품의 운송시간 등과 같은 추가적인 제약이 고려되어야 하므로 문제의 복잡성은 기하급수적으로 증가할 수 밖에 없다. 또한 기존의 MRP II와 같은 Closed Loop 방식에 의한 일정계획의 경우 고정된 공정계획에 따른 예로 공정을 제거하기 위한 반복 일정계획 방식으로 많은 시간이 필요하므로 현장에서 빈번히 발생하는 예측치 못한 상황에 효율적으로 대응하기가 어렵다.

다중 플랜트로 구성된 공급사슬에서의 공정과 일정의 통합 계획은 전체 시스템에 대한 유연성 확보와 최적화를 위한 것이다. Iwata *et al.*(1978)은 분지한계법을 이용한 대체 장비를 고려한 job shop 환경에서의 최적 makespan을 구하였다. Halevi와 Weil(1980)은 기계 부하와 관련한 공정계획과 스케줄의 관계를 보여주었다. Chrystolouris과 Chan(1984)은 공정계획과 스케줄 통합에 관한 문제와 함께 공정계획 및 대체 장비 할당을 위한 모델을 제시하였다. 또한 관련 연구로 공급사슬 환경에서 생산과 물류의 통합에 관한 문제, 물류 거점의 위치 선정문제,

† 이 논문은 BK21 핵심연구사업에 의하여 지원되었음.

공급망에서의 재고 관리문제 등 물류 시스템과 생산시스템의 통합에 대한 연구가 이루어지고 있으며(Carlo, 1999; Chrystolouris & Chan, 1984; Douglas & Paul, 1996; Moon *et al.*, 2000), Carlo(1999)는 용량 제약이 있는 2단계 생산 시스템의 다중 플랜트에서의 주일정계획(MPS) 문제를 LP 해법을 기초로 한 휴리스틱 기법을 이용한 방법을 제시하였다. Moon *et al.*(2000)은 주문생산 환경에서 공정과 일정계획의 통합적인 해결을 위한 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 제품에 대하여 소규모의 생산량을 가지는 고도로 고객 지향적인 제품을 생산하는 대형 가공물 가공 산업의 다중 플랜트로 구성된 공급사슬에서 전체 부품의 공정작업 시간의 최소화를 위하여 각 공정을 위한 장비 선정과 동시에 공정과 공정간의 선후행 관계(precedence constraints)를 만족하는 공정순서계획 그리고 플랜트와 플랜트간의 이동관계를 고려하여 모든 공정의 작업수행을 위한 생산 일정계획 수립 방법을 제시하고자 한다.

2. 문제 정의

다품종 소량의 주문생산(make-to-order) 방식에서 대부분의 제품은 고객의 요구에 의하여 생산된다. 이때 각 주문에 대하여 생산계획에서는 제품의 납기 및 각 작업장별 공정 작업시간이 정해진다. 그리고 공정계획에서는 설계실에서 만들어진 제품 정보를 바탕으로 공정 결정, 공정의 작업을 위한 기계선정, 공정순서 결정, 공정 작업시간 등의 공정계획이 수립된다. 일반적으로 이러한 정보들은 통합 데이터베이스에서 관리되며, 이 안에서 원자재의 구매, 부분 작업 수행을 위한 공급자 그룹, 주 생산업체, 조립, 고객간의 정보와 자재의 흐름의 공급사슬 관계가 이루어진다. <그림 1>은 이러한 주문생산에서의 공급사슬 구조의 한 예이다.

이 구조에서 하나의 제품은 조립에서 완성된다. 그런데 전 공정과정에서 가장 주요하며 비용구조에서 가장 많은 부분을 차지하는 부분이 생산부분(manufacturer)이다. 이 부분에서의 작업은 거의 기계작업으로 이루어지기 때문에 납기가 촉박하더라도 기계의 능력은 한계가 있으므로 추가적인 대체 장비가 없다면 납기의 지연은 불가피하다. 그러므로 효율적인 계획수립과 전체 가공시간의 최소화를 위해서는 부품의 가공을 위한

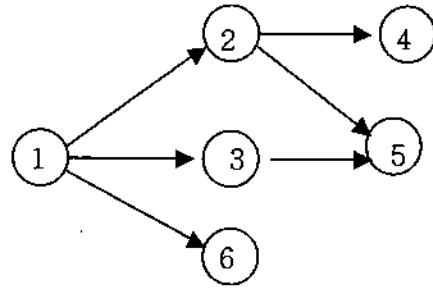


그림 2. 부품의 가공제약.

대안적인 공정계획(process plans)을 이용하여 계획대로 작업을 수행한다. 이때 임의의 장비에 대한 대체 장비는 지역적으로 떨어진 위치에 있을 수 있다. 이런 경우 추가적인 이동시간이 고려된다.

이를 통해 과도한 부하가 걸리는 장비에 대한 부하를 대체 장비로 분산시킬 수 있으며, 전체 가공시간의 합을 최소화할 수 있다. 이 경우 반드시 고려되어야 할 부분 중의 하나가 공정간의 선후행 조건(precedence constraints)이다. <그림 2>는 이러한 선후행 조건을 가지는 부품의 예를 나타낸 것이다.

<그림 2>에서 노드는 그 부품의 공정(operation)을 나타내고 아크는 선후행 제약을 나타낸다. 이때 각 공정의 가공을 위해 여러 대안적인 장비 중에서 임의의 한 장비가 선택되며, 모든 공정 작업을 위하여 공정 작업순서가 결정되어야 한다. 이때 작업순서는 공정간의 선후행 조건을 만족하면서 가공시간과 이동시간, 준비시간의 합이 최소화하도록 하여야 하며, 여러 개의 부품이 있을 경우 전체 부품의 가공시간을 최소화할 수 있도록 한다. 그러므로 작업장의 상황과 기계의 상태, 부품 특성 등을 고려하여 유연하게 공정계획이 수립되어야 하겠다.

이러한 부품특성을 고려한 공정계획 수립은 전체 부품의 가공시간을 최소화하기 위한 일정계획과 밀접한 연관을 갖는다. 일정계획은 공정의 선행관계에 맞는 공정계획과 함께 각 공정을 수행할 수 있는 다중 플랜트 내의 장비들의 가용여부, 부하 등의 정보 검색을 통해 전체 최적을 위한 일정을 수립하게 된다. 이를 통해 현장에서의 문제점을 즉각적으로 공정과 일정계획에 반영시켜 줌으로써 좀더 현실적이고 효율적인 일정계획을 수립할 수 있다. <그림 3>은 다중 플랜트를 가지는 공급사슬에서의 통합적인 계획모형을 나타낸 것이다.

이러한 통합적인 접근을 위해 해결해야 하는 주요한 문제로는 첫째, 대부분의 부품들이 갖는 생산 공정상의 선후행 관계에 관한 문제이다. 공정의 선후행 관계 문제는 선행 관계 제약이 있는 외판원 문제(traveling salesman problem with precedent relations: TSPPR)로 정식화가 가능하다. 그리고 각 공정의 가공을 위하여 대안적인 기계 집합을 가질 수 있는데, 그 대안적인 기계 집합 중에서 전체 공정 작업시간의 최소화를 위한 임의의 한 기계가 선정되어야 한다. 이러한 공정계획은 전체 가공시간의 합을 최소화하기 위한 일정계획과 함께 모형화되며, 유연한 계획수립과 변경에 능동적으로 대처할 수 있도록 한다.

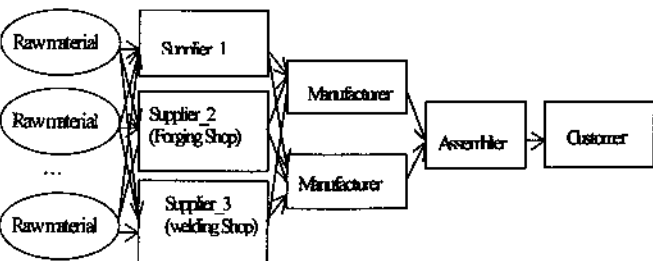


그림 1. 주문생산에서의 공급사슬 구조.

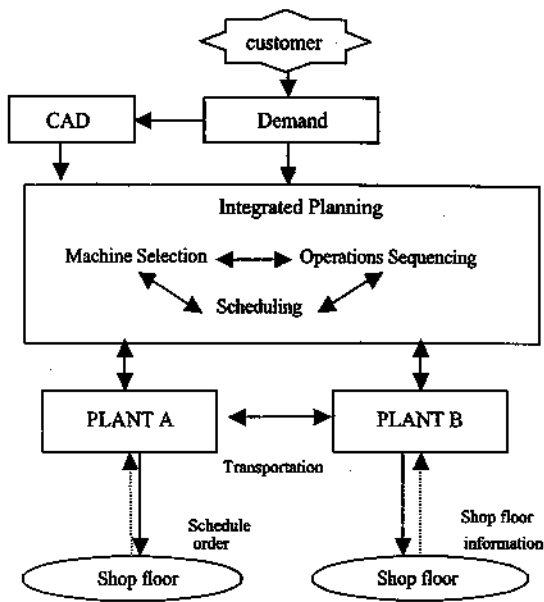


그림 3. 다중 플랜트를 갖는 공급사슬에서의 계획 구조 모형.

공정 작업을 위한 기계 결정은 전체 플랜트 내의 대체 장비들을 고려하여 전체 가공시간, 준비시간, 이동시간의 합을 최소화하도록 하여야 한다. 이동에 있어서, 동일 플랜트 내에서의 선행관계를 갖는 부품의 장비간 이동은 운송 장비의 적재 용량만큼씩 될 수 있으나, 플랜트 간 이동의 경우는 물류비용과 이동시간의 문제가 발생하므로 로트 크기 만큼 모두 생산된 후에서야 다른 플랜트로 이동되어야 한다. 각 공정의 수행을 위한 작업시간은 각기 다르며, 해당 작업을 수행할 수 있는 다중 플랜트내의 여러 장비들에 대해 장비들의 탐색을 통한 최적 장비 선정에 대한 방법이 필요하다. 이를 통해 시스템의 전체 최적화를 기대할 수 있다.

3. 공정작업순서 결정과 장비선정

공정의 선행관계가 있는 부품들의 공정 순서를 정하기 위해서 각 부품의 공정 관계를 TSPPR로 바꾸어 생각할 수 있다. TSPPR 문제는 모델 구성 및 해법 적용이 일반 TSP보다 매우 복잡하고 어려운 문제가 된다. 이러한 TSPPR을 보다 효율적으로 풀기 위한 방법으로 위상정렬(topological sort)을 이용하여 선후행 제약을 만족시키는 가능해를 발생시킬 수 있다. 예를 들어, 임의의 두 부품 A, B에 대한 가공순서 제약이 <그림 4>와 같이 부품 A에 대하여 $v_1 \sim v_6$ 과 부품 B에 대하여 $v_7 \sim v_{12}$ 로 표현되었다고 보자.

<그림 4>에서 부품들의 생산을 위한 공정작업순서는 TSPPR 문제로 표현되므로 각 부품에 대하여 한번의 TSPPR 문제를 풀어야 하므로, n 개 부품이 있다면 동시에 n 개의 TSPPR 문제를 풀어야 한다. 그러나 n 개 부품에 대한 순서제약 네트워크를 하나의 네트워크로 보고 위상정렬을 이용하여 전체 네트

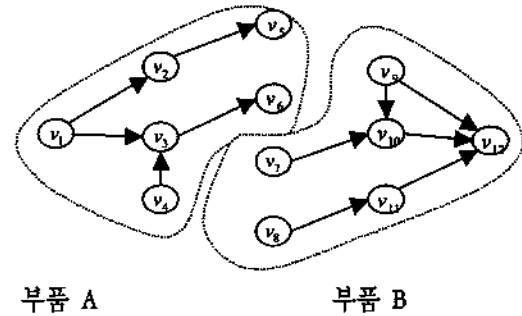


그림 4. 부품 A, B에 대한 선행 관계 네트워크.

워크에 대한 순서를 구한 다음 이 결과를 각각의 부품에 대한 순서로 변환한다면 많은 부품에 대해서도 어렵지 않게 전체적인 최적해 또는 근사 최적해를 구할 수 있다.

위상정렬은 방향성을 가지는 네트워크에서 모든 노드를 방문하는 순서를 결정하는 정렬방법이다. <그림 3>의 두 부품에 대한 2개의 네트워크는 v_1 에서 v_{12} 까지 12개의 노드로 이루어진 하나의 네트워크로 볼 수 있다. 이 네트워크에 대하여 공정간의 선후행 제약을 만족하면서 가능해 집합을 구하려면 임의의 노드 다음에 이어지는 공정이 여러 개 있을 경우 한 노드를 선택하기 위한 기준이 필요하다. 이를 위해 각 노드에 대하여 우선 순위값을 랜덤하게 부여하면 선택적인 공정들에 대하여 우선 선택될 공정을 결정할 수 있다. 공정을 나타내는 각 노드에 대하여 대안적인 장비집합으로부터 하나의 기계가 선정되는 과정을 포함한 해의 발생을 위한 일련의 과정을 순서적으로 표현하면 다음과 같다.

■ 공정작업순서 결정과 장비선정을 위한 해의 표현 절차:

단계 1. 해의 표현 구조

주어진 TSPPR 문제에 대한 임의의 실현 가능해를 찾기 위한 가능해 구조가 <그림 5>와 같이 표현할 수 있다.

공정	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}	v_{12}
우선순위	7	5	8	6	9	1	2	12	11	3	10	14

그림 5. 공정의 우선순위를 나타내는 유전자.

여기서 첫번째 행(row)은 공정 집합을 나타내며, 두번째 행은 공정 순서결정에서 임의의 순서결정 위치에서 선택 가능한 대안적인 장비가 여럿 있을 경우 우선결정에 대한 순위를 랜덤하게 부여한 것이다.

단계 2. 최초 방문 가능한 노드 집합 S 구성

주어진 네트워크에서 최초 선정될 수 있는 경로들은 선행 경로가 없는 노드들의 집합으로 $S = \{1, 4, 7, 8, 9\}$ 와 같이 구성될 수 있다.

단계 3. 집합 S의 모든 원소에 대한 우선순위 비교

S 내의 모든 원소에 대하여 <그림 4>의 우선순위값을 대

응시키면, v_8 의 우선순위값이 12로 가장 큰 값을 가지므로 최초 방문 노드로 v_8 이 선정된다(Path= v_8).

단계 4. 네트워크의 재구성

선행 경로가 없는 노드들의 집합 S로부터 방문된 노드(v_8)와 이 노드에 연결되어 있는 모든 경로를 제거하고 새로운 네트워크를 구성한다.

단계 5. 새로 구성된 네트워크로부터 다음 방문 가능한 노드 집합을 다시 선택

선행 경로가 없는 노드집합 $S = \{1, 4, 7, 9, 11\}$

단계 6. 방문 가능한 노드집합 S내의 모든 원소가 제거될 때까지 단계 1부터 단계 4의 과정을 반복한다. 위의 과정을 거쳐 최종적으로 생성된 하나의 실현 가능해는 다음과 같다.

Path = $v_8 \rightarrow v_9 \rightarrow v_{11} \rightarrow v_1 \rightarrow v_4 \rightarrow v_3 \rightarrow v_2 \rightarrow v_5 \rightarrow v_7 \rightarrow v_{10}$
 $\rightarrow v_{12} \rightarrow v_6$

단계 7. 위의 순서에 대하여 각 공정을 작업할 수 있는 플랜트 내의 모든 대체 장비들에 대해서 가장 짧은 시간 안에 작업을 수행할 수 있는 장비를 각 공정의 가공장비로 선정한다. 장비의 선정에 위해서 고려해야 될 조건으로는 다음과 같은 것들이 있다.

- (1) 각 부품의 처음 공정에 대한 장비선정은 가장 빠른 시간 내에 작업이 이루어질 수 있는 장비를 선택한다
- (2) 임의의 부품에 대한 공정순서가 A → B일 때, A가 끝난 후 B의 작업을 위해 동일 플랜트내의 장비를 이용한다면, 이동은 이송장치의 적재단위만큼씩 운반한다.
- (3) 임의의 부품에 대한 공정순서가 A → B일 때, A가 끝난 후 B의 작업을 위해 플랜트간 이동이 발생시에는 부품의 전체 로트 크기 전부를 한번에 옮긴다.
- (4) 임의의 부품에 대한 공정순서가 A → B일 때, A가 끝난 후 B의 작업을 위해 동일 장비를 이용할 때는 이동시간은 없다고 본다.

단계 8. 부품별 공정순서 결정

단계 6의 결과를 부품별로 분류하면 각 부품에 대하여 <그림 4>의 선후행 제약을 만족하는 공정순서가 결정된다. 단계 6의 결과에 대하여 부품별 공정순서는 다음과 같다.

부품 B: $v_8 \rightarrow v_9 \rightarrow v_{11} \rightarrow v_7 \rightarrow v_{10} \rightarrow v_{12}$
 부품 A: $v_1 \rightarrow v_4 \rightarrow v_3 \rightarrow v_2 \rightarrow v_5 \rightarrow v_6$

4. 유전 알고리즘 접근

위상정렬에 의하여 각 부품의 생산 공정상의 선행 관계 제약

을 만족하는 공정순서를 찾을 수 있는데, 이때 각 공정의 작업 수행을 위한 기계가 동시에 결정된다. 이 장에서는 부품의 가공작업을 위한 공정에 장비선정과 이러한 장비선정을 통한 공정순서결정, 그리고 각 장비에서의 작업 일정계획 수립을 위한 위상정렬 개념에 기반한 유전 알고리즘을 제시하겠다.

유전 알고리즘을 이용한 해법 개발시에 고려해야 할 주요 연산자로는 교차변이(crossover), 돌연변이(mutation), 선택(selection) 등이 있으면 알고리즘의 실행에 앞서 모집단 크기, 교차변이율(crossover rate), 돌연변이율(mutation rate), 세대수(generation) 등과 같은 유전 파라미터 값의 결정이 우선되어야 한다.

4.1 해의 표현과 초기화

해의 표현 방법은 제3절에서 제시된 <그림 5>의 방법에 의하여 실행 가능한 해를 나타내며, 유전 알고리즘의 실행을 위한 모집단 구성은 이러한 가능해 집합을 랜덤하게 파라미터 값으로 부여된 모집단 크기만큼 발생시킨다. <그림 5>의 해의 표현에 대하여 전체 공정순서 Path = $v_8 \rightarrow v_9 \rightarrow v_{11} \rightarrow v_1 \rightarrow v_4 \rightarrow v_3 \rightarrow v_2 \rightarrow v_5 \rightarrow v_7 \rightarrow v_{10} \rightarrow v_{12} \rightarrow v_6$ 에 대하여 부여된 장비의 번호가 ($m_2, m_3, m_1, m_4, m_5, m_2, m_3, m_1, m_5, m_3, m_2, m_1$)과 같을 때, 이 해의 구조에 대한 공정 작업순서, 각 공정에 대한 장비선정 결과는 다음과 같다.

부품 B: $v_8 \rightarrow v_9 \rightarrow v_{11} \rightarrow v_7 \rightarrow v_{10} \rightarrow v_{12}$
 선정된 장비: $m_2 \rightarrow m_3 \rightarrow m_1 \rightarrow m_5 \rightarrow m_3 \rightarrow m_2$
 부품 A: $v_1 \rightarrow v_4 \rightarrow v_3 \rightarrow v_2 \rightarrow v_5 \rightarrow v_6$
 선정된 장비: $m_4 \rightarrow m_5 \rightarrow m_2 \rightarrow m_3 \rightarrow m_1 \rightarrow m_1$

그리고 이 결과에 대하여 각 장비에 위의 Path에 대한 순서에 의하여 공정을 할당하면 일정계획이 만들어진다.

4.2 해의 선택과정과 평가함수

선택과정이란 다음 세대의 유전자(Child)를 만들기 위해 현재 세대의 모집단 집합으로부터 두 개의 부모가 되는 유전자(Parent)를 선택하는 과정을 말한다. 일반적인 경우 임의선택법(Roulette wheel)과 우성유전자 선택법(Elitist Selection)이 주로 채택되며 본 연구의 경우 임의의 선택법이 채택되었다.

또한 해의 평가를 위해 전체 가공시간, 준비시간, 이동시간의 합으로 표현되는 makespan을 평가함수로 사용하였다.

4.3 교차변이 연산

다음 세대의 유전자를 구성하는 새로운 염색체 집합은 부모 세대의 유전자들의 선택, 교차변이, 돌연변이 등 유전자 변형 과정을 거쳐서 생성된다. 교차변이 과정은 사실상 유전 알고리즘의 수행도와 효율성을 결정짓는 가장 중요한 해의 변형과

정으로 본 연구에서는 TSPPR 문제를 풀기 위한 교배과정으로 Position Based Crossover 방법(Gen & Cheng, 1997)을 이용한다.

4.4 유전자의 돌연변이 과정

차세대 유전자 생성과정 중 교환에 의한 돌연변이 과정이 수행된다. 교환에 의한 유전자 돌연변이 과정이란 한 유전자로부터 임의로 두 개의 염색체를 선정하여 두 염색체가 같은 값을 상호 교환하는 방법을 일컫는다. 이 돌연변이 과정에 의해 알고리즘이 지역 해에서 벗어날 수 있게 하는 효과를 얻을 수 있으며 경우에 따라 극적인 해의 개선 효과를 얻을 수 있는 장점이 있다. <그림 6>은 상호 교환에 의한 돌연변이 과정을 설명한다.

Parent	5	1	7	2	4	6	3
off-spring	5	1	6	2	4	7	3

그림 6. 상호 교환에 의한 유전자의 돌연변이 과정.

4.5 전체적인 알고리즘의 절차

알고리즘의 전체적인 수행과정은 <그림 7>과 같이 나타낼 수 있다.

```

Begin
  t ← 0;
  initialize P(t);
  evaluate P(t);
  While (not termination criteria) Do
    apply the genetic operation into the P(t) to
    yield O(t);
    evaluate O(t);
    select P(t+1) from P(t) and O(t);
    t ← t + 1;
  End;
End;
    
```

그림 7. 전체 유전 알고리즘 흐름도.

5. 수치 실험

다중 플랜트 구조에서 모든 장비들에 대한 공정과 일정계획에는 많은 장비가 고려되고 생산하고자 하는 부품에 대한 수요와 부품의 종류 또한 다양하다. 본 절에서는 부품 생산 공정상의 선행 조건이 있는 5개의 부품을 생산하기 위하여 2개의 플랜트를 가지는 구조에서 각 공정의 작업을 위한 기계선정, 공정간의 순서결정과 일정계획의 통합적인 해결 과정을 예를 들어 보이도록 하겠다.

부품은 <그림 8>과 같이 선우행 제약을 가지며, 각각에 대한 공정 수는 4, 3, 5, 5, 4개이다. 또한 각 부품의 로트크기는 각각 40, 70, 60, 30, 60개이고 각 플랜트 내에는 3대씩 장비들이 있다. 장비간 부품 운송을 위한 운송장비의 단위 이송당 부품 적체용량은 10개의 부품으로 일정하다고 두겠다. <표 1>에는 각 부품에 대한 공정을 수행할 수 있는 수행 가능 장비들의 단위 가공시간이며, <표 2>는 부품의 각 공정간 장비의 Setup 시간을 나타낸다. 공정간 장비의 Setup 시간은 장비마다 다소 차이가 있지만 문제의 편의상 장비의 Setup은 공정에 따라 모든 장비들에 대해서 일정하게 설정하겠다.

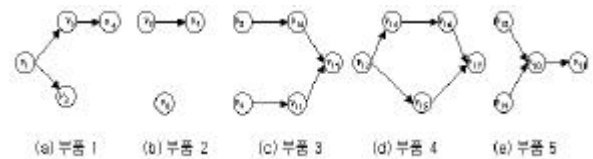


그림 8. 각 부품의 선행 관계 제약을 갖는 네트워크.

<표 3>은 각각 플랜트 내에서의 운송장비에 대한 장비간 1회 운송시간을 나타낸다. 플랜트간 운송비용은 각각 50시간이 소요된다고 가정한다.

유전 알고리즘의 실행을 위해 사용된 유전 알고리즘의 모수를 다음과 같이 정의 한다. 최대 세대수(Max_gen=200), 세대 당 유전자수(Pop_Size=100), 교배율(C_rate=0.8), 돌연변이율(M_rate=0.2). 이 모수값들은 동일 문제에 대한 반복 실험을 통해서 결정된 문제 해결을 위한 가장 적절한 모수로 선택된 수치이다.

표 1. 공정별 장비가공 시간(시간/부품 1단위)

		부품 1			부품 2			부품 3				부품 4				부품 5						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	M1	7	7	-	6	-	3	8	-	10	6	15	-	-	-	-	-	5	-	-	13	-
	M2	-	-	6	-	9	5	-	-	5	-	6	-	5	-	5	-	8	7	-	-	-
	M3	-	-	5	-	-	-	12	5	-	-	-	-	6	-	6	-	-	-	10	-	7
2	M4	5	6	-	-	8	-	9	-	10	-	6	-	6	-	4	3	-	6	-	-	6
	M5	-	-	8	-	-	6	-	8	-	6	-	5	-	9	-	-	4	-	8	8	-
	M6	-	-	-	5	-	-	8	-	7	-	5	-	8	-	-	5	-	8	-	9	-

표 2. 공정간 Setup 시간

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0	17	36	6	37	20	11	30	5	32	30	36	23	21	1	28	20	32	8	0	28
2	42	0	32	3	2	15	15	22	44	39	30	37	47	12	5	38	31	6	46	25	14
3	6	6	0	37	26	0	23	29	12	5	13	3	13	24	29	26	8	27	17	0	39
4	12	3	40	0	19	46	31	30	31	49	49	27	39	45	9	0	3	7	39	26	21
5	2	48	43	25	0	49	10	11	4	8	17	39	34	31	11	0	24	20	33	46	43
6	24	26	43	31	49	0	22	31	21	43	31	10	30	23	2	34	38	6	10	41	13
7	20	45	28	43	22	16	0	39	46	25	43	34	9	22	38	12	7	27	39	16	32
8	15	41	44	35	14	10	30	0	2	14	7	8	22	3	18	45	18	35	1	0	28
9	25	47	22	21	47	39	26	0	0	22	33	7	37	20	25	20	7	29	12	28	7
10	3	46	9	10	35	18	5	21	24	0	33	40	22	23	41	37	31	3	42	2	19
11	1	17	31	3	30	15	23	21	37	3	0	15	23	32	3	46	6	3	15	37	47
12	4	18	41	37	26	39	43	46	44	28	13	0	46	47	7	32	2	24	48	7	35
13	18	45	24	27	47	21	8	21	35	38	26	39	0	21	2	12	33	35	39	3	6
14	48	37	46	44	25	24	1	8	38	46	48	37	6	0	6	41	10	4	24	6	44
15	43	3	39	3	44	17	46	24	46	33	9	16	15	4	0	4	12	25	49	4	7
16	9	44	40	21	16	12	36	37	44	16	41	31	7	3	8	0	44	2	2	6	13
17	14	21	5	29	44	48	8	31	10	44	1	7	18	2	11	22	0	37	41	13	6
18	15	32	26	33	0	15	15	44	40	18	44	28	43	24	41	11	10	0	38	8	43
19	14	48	30	9	12	18	28	41	20	16	40	46	6	7	24	15	14	39	0	33	41
20	46	38	32	38	12	14	17	12	48	9	25	30	43	1	4	45	1	30	21	0	0
21	40	35	34	21	17	41	44	43	36	39	32	32	39	46	29	37	46	35	1	9	0

표 3. 장비간 운송 시간

		플랜트 1			플랜트 2		
		M1	M2	M5	M3	M4	M6
1	M1	0	5	6	-	-	-
	M2	5	0	7	-	-	-
	M3	6	7	0	-	-	-
	M4	-	-	-	0	5	6
	M5	-	-	-	5	0	7
2	M6	-	-	-	6	7	0

<표 4>는 위의 실험에서 가장 최적의 Make Span을 만드는 유전자를 나타낸 것이다. 여기서 첫번째 행은 네트워크에 속한 각 노드의 번호를 나타내고, 두 번째 행은 최적해를 도출해 줄 수 있는 유전자로서 각 노드의 우선순위를 나타낸다. 세 번째 행은 두 번째 행에 나타난 유전자에 의해 생성된 우선순위에 의한 각 부품의 공정순서를 나타낸다. 세 번째 행에서 제품의 우선순위는 4, 5, 1, 2, 3의 순서를 갖는다.

<표 5>는 최적의 유전자를 통해 생성된 각 부품에 대한 공

표 4. 최적 유전자와 제품 공정순서

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
15	6	2	13	7	12	3	1	4	16	18	8	21	5	14	11	9	20	17	10	19
13	18	19	1	15	6	20	21	5	3	4	14	16	17	9	11	7	3	8	10	12

표 5. 각 부품에 대한 생산 공정 계획

	공정-(수행 장비)				
부품 4	13-(M3)	15-(M3)	14-(M2)	16-(M2)	17-(M5)
부품 5	18-(M4)	19-(M5)	20-(M5)	21-(M4)	
부품 1	1-(M1)	2-(M1)	4-(M1)	3-(M2)	
부품 2	6-(M2)	5-(M4)	7-(M6)		
부품 3	9-(M6)	11-(M6)	8-(M3)	10-(M1)	12-(M2)

정 순서와 각 공정에 대한 장비번호가 나타나 있다. 그리고 이때의 각 플랜트의 장비들에 대한 일정 계획은 <표 6>과 같이 시작 시점과 끝나는 시점이 계산되며, 이를 간트차트로 나타내면 <그림 9>와 같다.

반복적인 실험에서 유전 알고리즘의 해의 진화 과정을 그림으로 나타내면 <그림 10>과 같다. 제안된 알고리즘의 경우 대부분 100회 이내의 Generation에서 주어진 문제에 대한 해를 찾아낼 수 있었으며 모든 실험에서 목적식 값은 1363으로 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다. 결과에서 부품 생산은 최초 공정에 선택된 장비가 있는 플랜트 내에서 이루어지는 경우가 대부분이며 부품 3의 8번째 공정의 경우와 같이 현재 플랜트 2에서 해당 작업을 수행할 수 있는 유일한 장비(M5)가 다른 작업에 의해 부하가 많이 가중된 경우 다른 플랜트의 대체 장비(M3)와 비교하여 상대적으로 작업량이 적은 다른 플랜트 1로의 이동이 발행한다.

표 6. 플랜트에서의 장비별 일정정보

		공점 1		공점 2		공점 3		공점 4		공점 5	
		시작	종료	시작	종료	시작	종료	시작	종료	시작	종료
		M1		M2		M3		M4		M5	
1	M1	1		2		4		10			
		0	280	297	577	580	820	932	1292		
	M2	6		14		16		3		12	
		0	350	373	523	564	714	754	994	1000	1360
	M3	13		15		8					
		0	180	182	362	827	1127				
2	M4	18		5		21					
		0	360	400	960	1003	1363				
	M5	19		20		17					
		65	545	578	1058	1059	1179				
	M6	9		11		7					
		0	420	453	753	776	1336				

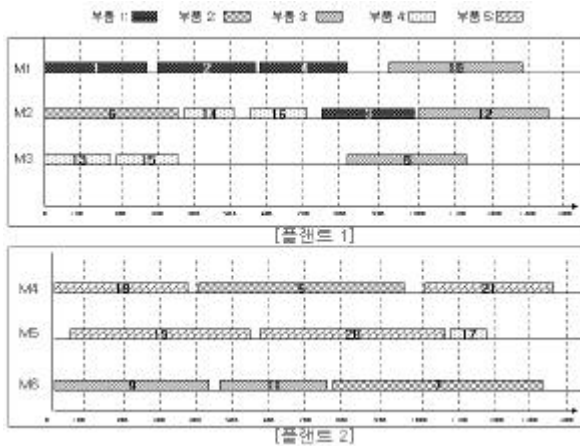


그림 9. 각 플랜트의 장비 스케줄.

Evolution Progress

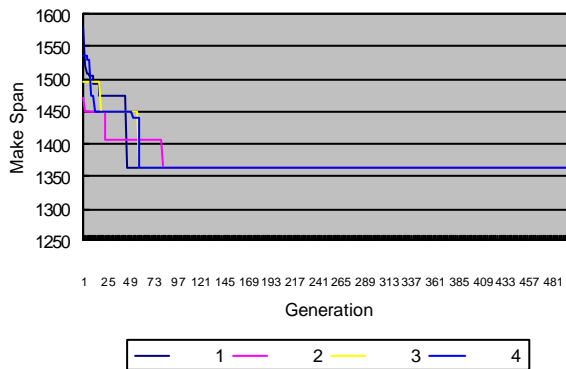


그림 10. 해의 진화 과정.

다음 <표 7>은 같은 환경에서 문제의 크기를 달리하여 유전 파라미터 값을 변화시켜 가면서 실험한 결과를 나타낸 것이다.

표 7. 다양한 크기의 문제에 대한 실험 결과

Parts	Oper	Plants	Mach	Test	Gen	Pop	C_rate	M_rate	Value
5	21	2	6	1	50	50	0.8	0.2	1465
				2	100	50	0.8	0.2	1465
				3	150	100	0.8	0.2	1465
				4	150	100	0.5	0.5	1465
				5	200	150	0.8	0.2	1465
10	43	2	6	1	100	50	0.8	0.2	1850
				2	100	50	0.5	0.5	1858
				3	150	100	0.8	0.2	1839
				4	150	100	0.5	0.5	1839
				5	200	150	0.8	0.2	1839
15	64	3	9	1	100	150	0.8	0.2	1757
				2	200	100	0.8	0.2	1786
				3	250	100	0.8	0.2	1757
				4	250	150	0.8	0.2	1768
				5	300	150	0.8	0.2	1757
				1	200	50	0.8	0.2	2297
				2	250	100	0.8	0.2	2293
				3	300	100	0.8	0.2	2285
				4	350	100	0.8	0.2	2285
				5	400	100	0.8	0.2	2285
20	86	3	9	1	100	150	0.8	0.2	1757
				2	200	100	0.8	0.2	1786
				3	250	100	0.8	0.2	1757
				4	250	150	0.8	0.2	1768
				5	300	150	0.8	0.2	1757

위의 실험 결과에서 문제의 크기에 따라 변동이 있기는 하지만 거의 일관된 해를 발생함을 알 수 있으며, 파라미터 값이 변경에 의하여 일관된 해를 구할 수 있음을 보여주고 있다.

6. 결론

본 논문에서는 다중 플랜트로 구성된 공급사슬 구조에서 공정 간의 선후행 관계가 있는 제품 생산을 위해 각 공정에 대한 장비선정과 동시에 공정순서결정과 일정계획을 통합적으로 해결하기 위한 방법이 제시되었다. 제시된 방법은 위상정렬 개념과 유전 알고리즘을 이용하여 개발되었으며, 최소의 makespan을 가지는 생산 일정의 발생과 더불어 각 부품에 대하여 선후행 순서 제약을 만족시키는 공정순서와 장비선정 결과가 동시에 제공되었다.

예제 적용을 통하여 제시된 방법이 통합적인 공정계획과 일정계획문제의 해결에 적합함을 보였으며, 중소형의 로트 생산 방식에 대하여 효율적으로 적용 가능하리라 사료된다.

참고문헌

Beamon, B. M. (1996), Supply chain design and analysis: Models and Methods, *International Journal of Production Economics*, 55(3), 281-294.
 Carlo, V. (1999), Multi-plant production planning in capacitated self-configuring two stage serial systems, *European Journal of Operational Research*, 119, 415-460.
 Chryssolouris, G. and Chan, S.(1984), An integrated approach to process

planning and scheduling, *Annals of the CIRP*, 34, 413-417.
 Douglas J. T. and Paul M. (1996), Coordinated supply chain management, *European Journal of Operational Research*, 94, 1-15.
 Gen, M. and Cheng, R. (1997), *Genetic algorithms and Engineering design*, John Wiley & Sons.
 Halevi, G. and Weil, R. (1980), Development of flexible optimum process planning procedures, *Annals of the CIRP*, 29, 313-317.
 Iwata, K. and Morutsu, Y. (1978), Optimization of the selection of machine-tools,

loading sequence of parts and machining systems, *Annals of the CIRP*, 29, 335-338.
 Marmalis, A. G., Malagardis, I. and Kambouris, K.(1996), On-line Integration of a Process Planning Module with Production Scheduling, *International Journal of Adv Manuf Technol.*, 12, 330-338.
 Moon, C., Jeong, C., Lee, Y. and Kim, J. (2000), GA based Heuristic for Integrated Process Planning and Scheduling in Supply Chain, *Proceedings of International Conference on Production Research*, Bangkok.



문치웅

울산대학교 산업공학과 학사
 건국대학교 산업공학과 석사
 건국대학교 산업공학과 박사
 일본 Ashikaga 공대 경영정보공학과 Post Doc
 현재: 한양대학교 산업공학과 연구교수
 관심분야: SCM, 통합시스템 모델링,
 정보시스템, 지능탐색알고리즘 응용



김종수

한양대학교 산업공학과 학사
 University of California, Berkeley 석사
 University of California, Berkeley 박사
 현재: 한양대학교 산업공학과 부교수
 관심분야: OR, 시스템 최적화, SCM



김규웅

한양대학교 산업공학과 학사
 현재: 한양대학교 산업공학과 석사과정
 관심분야: SCM, 지능탐색 알고리즘 응용



허선

서울대학교 산업공학과 학사
 서울대학교 산업공학과 석사
 Texas A&M University 산업공학과 박사
 현재: 한양대학교 산업공학과 조교수
 관심분야: 대기이론, 정보통신시스템, SCM