

# 장비능력에 의존적인 처리시간을 가진 애로공정의 일정계획 수립 (몰드변압기 공장을 중심으로)†

서준용 · 고재문

울산대학교 산업정보경영공학부

## Scheduling of the Bottleneck Operation with Capacity-Dependent Processing Time

Jun-yong Seo · Jae-moon Koh

In this paper, a scheme of scheduling a bottleneck operation is presented for production planning of make-to-order. We focus on the problem of capacity-dependent processing time in which processing time of the bottleneck operation is not fixed, but varies with job sequence or equipment capacity. For this, a genetic algorithm is applied for job sequencing with an objective function of mean square of weighted deviation. An experimental study is implemented in power transformer plant and results are compared with those of the EDD rule. It shows that the genetic algorithm is relatively good for most cases.

### 1. 서론

수주 생산방식에서 고객의 납기를 준수하기 위한 생산계획 (production scheduling) 수립 방안으로는 납기를 기준으로 하는 후진적 기법(backward approach)과 전진적 기법(forward approach)을 많이 이용한다. 그러나 후진적 기법은 재고유지비용의 감소효과를 가져다 줄 수는 있지만, 각 생산 공정의 부하에 불균형을 초래할 수 있으며, 전진적 기법은 재고유지 비용이 크게 발생한다. 또한 계획수립을 위한 정보가 개략적인 납기뿐이기 때문에 현실성이 부족한 계획이 수립될 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 장비나 인원 등의 공정정보가 반영된 생산계획이 수립되어야 한다. 그러나 모든 공정의 정보를 반영하게 되면, 제품이 많거나 공정의 수가 많을 경우 현실적으로 해결하기 어려운 문제가 된다. 따라서 생산공정 중에서 병목현상이 가장 크게 발생하는 애로공정의 공정정보를 반영한 생산계획을 수립하는 것이 현실적이다.

본 연구에서는 변압기 공장(transformer plant)에 대한 애로공정의 일정계획을 수립한다. 변압기 공장은 job shop 생산방식을 가지고 있는데, 애로공정의 능력에 따라 변압기 공장의 연간

제품 생산능력이 결정된다. 이 공장에서는 변압기의 생산계획 수립을 위해 우선 애로공정의 일정계획을 수립하고, 나머지 선후 공정에 대해서는 이 애로공정을 기준으로 후진적 기법과 전진적 기법을 적용하는 방식을 택하고 있다. 애로공정의 일정계획은 장비 제약조건과 제품별 납기 및 사양에 따른 제품 할당순위에 의한다.

지금까지 일정계획문제에 대한 연구에서 단순한 문제의 최적해를 구하는 해법은 많이 다루어졌지만, 실제로 산업현장에서 발생하는 복잡한 문제에 대한 최적화 방법은 찾아보기 힘들다. 또한 일정계획의 평가기준도 총 처리시간(makespan time) 또는 흐름시간(flow time)의 최소화보다는 조기생산 및 지연생산 비용의 최소화, 지연생산되는 작업수의 최소화, 또는 납기 지연 비율의 최소화 등으로 그 기준이 변하고 있다(이동현, 2000).

본 연구에서 애로공정의 일정계획은 단일기계에 대해 납기가 상이한 경우를 대상으로 한다. 이러한 일정계획문제에 대해 기존의 연구추세를 간략히 살펴보면 다음과 같다. Abdul-Razaq와 Potts(1988), Garey *et al.*(1998) 및 Morton(1989) 등은 도착 시간이 동일한 경우에 대하여 조기생산과 지연생산에 대한 비용을 최소화하는 발견적 기법을 제시하였으며, Kim과 Yano (1994)는 도착시간이 동일한 경우에 대한 최적해의 특성

† 이 논문은 2000년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었음.

을 논의하면서 이를 해결하기 위한 발전적 기법을 제시하였다. 그런데 이러한 연구에서는 각 제품별 작업처리시간이 고정되어 주어진 경우를 고려하고 있지만 본 연구에서는 제품별 작업처리시간이 달라지는 문제를 다룬다. Gupta *et al.*(1993)은 작업의 도착시간이 동일하고 완료시점에 따라 가중치가 변화하는 문제에서 평균 완료시간으로부터의 편차제곱을 최소화하는 경우에 대하여 유전 알고리즘을 적용하였다. 그러나 본 연구에서는 조기생산과 지연생산으로 발생하는 비용을 다루며, 각 제품의 완료시점에는 동일한 가중치를 부여한다. Yang and Dea (1993)는 job shop 생산에서 지연작업의 수와 지연시간의 합을 줄이는 해법을 제시하였다.

기존의 연구에서는 각 제품의 처리시간이 고정적인 경우를 고려하였다. 즉 생산시점이나 생산순위가 바뀌더라도 처리시간은 그대로 유지되는 경우만 다루었다. 그러나 본 연구에서의 대상공정은 일정계획 수립을 위한 할당순위와 작업가능 시점에 따라 동일한 제품이라도 공정처리시간이 달라질 수 있다는 특성이 있다. 예를 들어 어떤 제품을 이 공정에 할당할 때, 장비의 잔여 용량이 충분하면 이 제품은 2일만에 처리되지만, 잔여 용량이 충분치 않으면 그 처리시간이 4일 또는 6일로 될 수도 있다는 것이다. 이러한 특성은 일반적인 일정계획문제에서는 찾아보기 힘들며 따라서 통상적인 일정계획 기법으로는 해결하기 어렵다. 본 연구에서는 이러한 특성을 무리없이 반영할 수 있는 유전알고리즘을 적용한다.

본 연구에서는 일정계획의 평가기준으로 지연생산과 조기생산 비용을 고려한다. 이것은 납기준수를 최우선적으로 고려해야 하는 수주생산의 특성과 본 연구의 대상공장의 작업환경에서 적재공간의 적정성 및 재고유지비용을 동시에 감안한 것이다. 이러한 평가기준을 고려한 생산계획에 관한 연구결과는 많이 제시되어 있다(Baker and Scudder, 1990; Hall and Posner, 1991; Hall *et al.*, 1991). 이들 연구에서는 지연생산과 조기생산의 가중치를 고려한 계획수립에 중점을 두고 있는데 본 연구에서도 이 방법을 원용한다. 다만 기존의 연구에서는 전체 공정에 대한 일정을 감안한 것에 반해 본 연구에서는 애로공정의 공정능력을 우선 고려한다는 점에서 차이가 있다.

## 2. 문제정의 및 일정계획 수립방안

### 2.1 대상제품

본 연구에서 적용하는 변압기공장의 생산제품은 소형변압기 중에서 몰드변압기를 대상으로 한다. 몰드변압기는 진공주형 몰딩방식으로 생산되는데, 고객주문에 따라 제품사양이 변하는 수주생산방식의 제조환경을 가진다.

몰드변압기는 제품의 전압에 따라 일반형, 고압형, 저압형의 3가지 종류로 구분된다. 변압기의 전압은 1차 전압과 2차 전압으로 구분되며, 1.1kV 이상은 고압이고, 1.1kV 미만은 저압이

다. 제품구분에 따른 전압을 보면, 일반형은 1차 전압이 고압이고 2차 전압이 저압인 제품이고, 고압형은 1, 2차 전압이 모두 고압인 제품이며, 저압형은 1, 2차 전압이 모두 저압인 제품이다. 제품용량은 변압기의 중요한 특성 중의 하나이며 생산공정에도 큰 영향을 준다. 용량은 변압기의 온도 상승한도 내에서 수용할 수 있는 전기의 양을 말하며, 전압×전류로 나타낸다. 단위는 킬로볼트암페어(kVA)나 메가볼트암페어(MVA)로 표시한다. 일반적으로 몰드변압기에서 생산되는 제품용량은 10 ~ 5,000kVA이다. 제품의 용량과 전압에 따라 몰드변압기는 2, 3, 6개의 권선을 필요로 한다. 권선은 변압기의 핵심 부품으로 전압을 변화시키는 역할을 하는데, 이와 관련된 공정들은 몰드변압기의 생산과정 중에서 중요한 부분을 차지한다. 특히 권선몰딩공정은 몰드변압기의 애로공정으로 본 연구의 주된 대상공정이다.

몰드변압기는 난연성, 저소음, 소형 및 경량, 보수 및 점검의 용이성 등의 특징을 가지고 있다. 따라서 고층빌딩, 지하철 및 광산, 수처리 설비, 부하변동이 심한 기기(기중기, 압연기 등), 학교, 공항 등에 널리 사용되는 변압기이다.

### 2.2 애로공정

<그림 1>은 몰드변압기의 제조공정도를 나타낸다. <그림 1>에서 HM 경로에 있는 G020 공정이 본 연구의 대상이 되는 애로공정으로 몰딩작업이 이루어지는 공정이다. 이 공정은 장비제약을 가진 공정으로 일반형과 고압형의 제품은 반드시 거쳐야 하며, 몰드변압기의 연간 생산능력을 결정한다. 주문이 증가할 경우, 이 공정의 선후 공정은 작업인원을 많이 투입하거나 잔업 등으로 부하를 해소할 수 있지만, 이 공정은 가동시간의 증가 또는 신규 장비의 도입과 같은 제한된 부하 해소방법만을 가지기 때문에 전체 작업 공정에서 병목현상이 발생하는 공정이다. 또한 주문이 많아 이 공정의 가동 시간을 증가시킬 경우, 선후 공정에 미치는 작업부하는 상당히 크게 발생한다.

이 공정은 진공주형 몰딩 생산방식으로서 선 공정에서 작업된 권선을 적절한 주형에 넣어 주형기 안에서 몰딩작업을 수

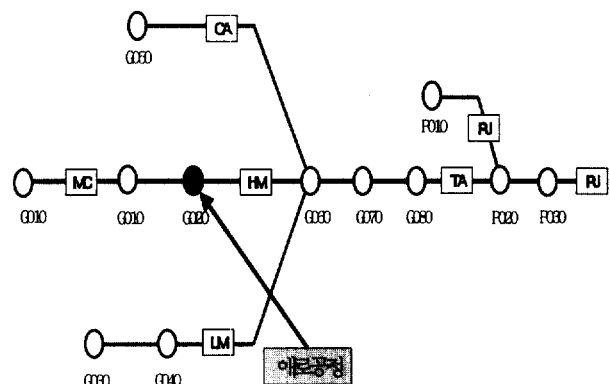


그림 1. 몰드변압기의 제조공정도.

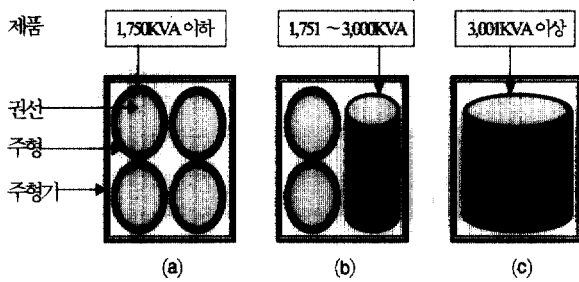


그림 2. 제품별 주형기 권선할당 방안.

행한다. 주형기 가동은 작업자의 작업시간에 따라 결정되는데, 준비작업과 몰딩작업이 끝난 권선을 주형기에서 밖으로 꺼내는 작업을 포함해서 1회 가동에 4시간이 소요된다. 주형기에 대한 작업을 살펴보면, 작업자가 출근 직후 전날 퇴근 전 가동한 권선을 빼내고 새로운 권선을 주형기에 넣어 오전 1회 가동한다. 오후에도 같은 방법으로 1회 가동이 되며, 퇴근 전 주형기를 가동시켜 놓고 퇴근을 한다. 따라서 1일 8시간 작업을 고려할 때 주형기 가동횟수는 1일 3회가 된다.

<그림 2>는 주형기에 제품별 권선을 할당하는 방안을 보여준다. 여기에서 (a)는 용량이 1,750kVA 이하의 제품에 대해서 주형기 1회 가동으로 4개의 권선이 몰딩되는 경우이다. (b)는 1,750kVA 이하 제품 2개 권선과 1,751~3,000kVA 제품의 권선 1개가 몰딩되는 경우를 나타내고 있다. 제품의 용량이 3,000kVA를 넘어 선다면 (c)와 같이 1개의 권선만이 몰딩된다.

따라서 한 대의 주형기로 용량이 1,750kVA 이하인 제품만 생산할 경우, 1일 몰딩되는 권선수는 12개이다. 용량이 1,751~3,000kVA 제품만 생산하면, 6개의 권선이 몰딩되며, 용량이 3,000kVA를 초과하는 제품에 대해서는 3개가 몰딩된다.

2.3 일정계획을 위한 고려사항

몰드변압기 공장의 생산계획은 애로공정에 대한 일정계획을 수립한 다음, 애로공정의 일정계획을 기준으로 나머지 선 후 공정들의 일정계획을 전진적 기법과 후진적 기법으로 수립한다. 또 애로공정의 일정계획은 생산계획을 수립하기 위한 평준화(balancing) 역할을 한다. 이것은 현재 몰드변압기 공장의 생산조건에서, 장비제약을 가진 애로공정의 생산능력에 의해 다른 나머지 공정의 생산능력이 결정되기 때문이다.

이 공정의 일정계획은 주어진 제품의 계획순위에 따라 제품별 권선의 주형을 주형기에 할당하여 수립한다. 권선의 주형이 주형기에 들어간 후 몰딩작업이 끝났을 때, 주형기에서 몰딩된 주형을 꺼낸 다음 이 주형으로부터 내부의 권선을 분리하고, 이 주형의 다음 제품에 대한 몰딩작업이 가능하도록 정리를 하게 된다. 이 때 권선의 주형이 주형기에 들어갈 때부터 정리작업이 완료되기까지 2일이 소요된다. 물론 이 주형을 사용하는 다음 순위의 권선은 이 정리작업이 완료된 후 투입된다.

본 공정의 일정계획 수립을 위한 고려사항은 다음과 같다.

- ① 제품용량이 1,750kVA 이하의 제품을 기준으로 1일 12개의 권선을 할당해야 한다.
- ② 제품에 따라 필요한 권선수는 2개 또는 3개 또는 6개이다.
- ③ 제품에 따라 사용되는 주형은 서로 다르다.
- ④ 이 공장에서 보유하고 있는 주형의 수량은 각 주형번호별로 1, 2, 3개로 제한된다. 따라서 동일한 주형번호를 사용해야 하는 제품은 이전 제품의 완료시점 이후에 할당된다. 여기서 이전 제품의 완료시점이라 함은 이전 제품의 몰딩작업 후 정리작업이 끝나는 시점을 말한다.
- ⑤ 제품의 용량과 전압에 따라, 1개의 권선이 주형기를 점유하는 면적은 1/4, 1/2, 1로 서로 상이하다.
- ⑥ 각 제품마다 필요한 권선이 본 공정에서 모두 생산되어야 후속 공정으로 이동이 가능하다. 따라서 각 제품의 본 공정 생산일정은 본 공정에 처음 할당된 권선의 착수일자과 마지막에 할당된 권선의 완료일자가 된다.

<그림 3>과 <그림 4>는 <표 1>의 제품들을 대상으로 주문순위와 납기순위에 따라 각각 일정계획을 수립한 예를 보여준다. <표 1>의 제품번호는 제품 주문순위를 나타내며, 납기는 각 제품의 고객 요구일자에서 제품별 생산 주공정(critical path)의 애로공정 이후 생산일정을 감안한 애로공정의 납기이다. 이 공장은 애로공정을 제외한 나머지 공정에 대해서 생산계획 수립을 위한 표준 공정처리시간을 가진다. 따라서 <표

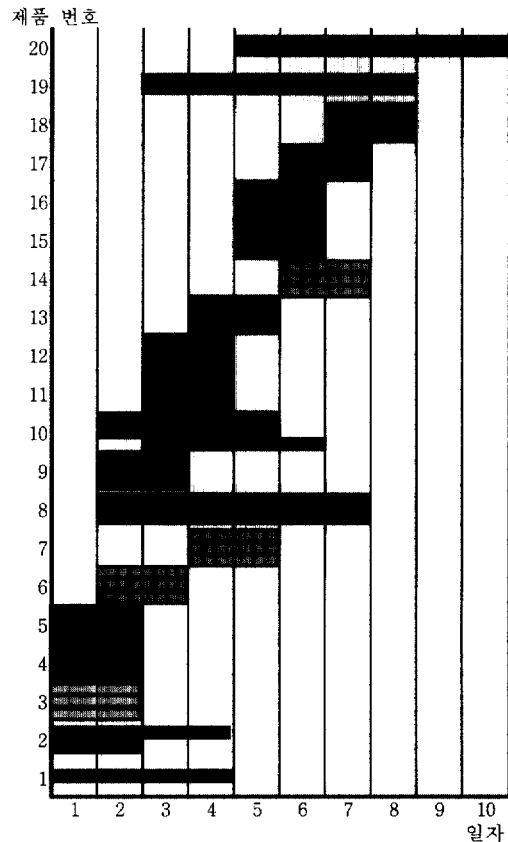


그림 3. 주문순위에 의한 일정계획.

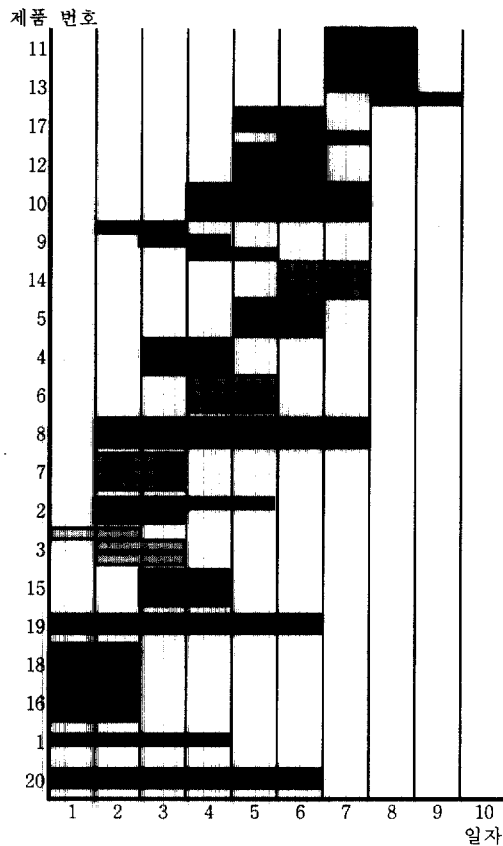


그림 4. 납기순위에 의한 일정계획.

표 1. 일정계획 수립을 위한 입력정보

제품번호	납기	용량(kVA)	권선수	점유크기	주형번호
1	17	200	2	1/4	1
2	48	1,000	3	1/4	2
3	45	1,500	3	1/4	3
4	70	250	3	1/4	4
5	70	100	3	1/4	5
6	61	400	3	1/4	6
7	59	400	3	1/4	6
8	59	3,700	3	1	7
9	80	500	3	1/4	8
10	80	1,200	6	1/4	9
11	195	100	3	1/4	5
12	90	250	3	1/4	4
13	92	500	3	1/4	8
14	70	400	3	1/4	6
15	39	100	3	1/4	5
16	23	250	3	1/4	4
17	90	500	3	1/4	8
18	28	100	3	1/4	5
19	35	2,500	3	1/2	10
20	8	2,000	3	1/2	11

표 2. 주형번호별 보유수량

주형번호	보유수량
1	1
2	2
3	3
4	3
5	3
6	3
7	1
8	3
9	3
10	1
11	1

1>의 납기는 후 공정의 일정계획을 고려한 애로공정의 일정 계획 기준납기가 된다. 세 번째 열은 제품의 용량을 나타내는데 8번과 19, 20번을 제외한 나머지 제품은 용량이 1,750kVA 이하인 제품이다. 네 번째 열은 각 제품에 소요되는 권선의 수를 나타내는데 1번과 10번을 제외한 나머지 제품은 3개의 권선으로 이루어진 제품이다. 점유크기는 각 제품의 권선 1개가 주형기를 차지하는 상대적인 크기이다. 즉, 8번 제품의 권선 1개는 주형기 1대를 다 차지하고, 19, 20번 제품은 권선 1개가 주형기의 반을 차지한다. 나머지 제품은 권선 하나가 주형기의 1/4을 차지한다. 주형번호는 각 제품의 권선을 처리하는 주형의 고유번호이다. <표 2>는 각 주형번호에 대해서 공장이 보유하고 있는 수량을 나타낸다. 즉, 주형번호 1, 10, 11번은 1개의 주형을, 주형번호 2는 2개의 주형을 나머지 주형번호는 3개의 주형을 보유하고 있다.

<그림 3>은 <표 1>의 데이터를 주문순위에 따라 일정계획을 수립한 예이다. 먼저 1번 제품은 생산해야 할 권선이 2개이고, 사용 가능한 주형이 1개이다. 따라서 일정계획은 제1일과 제3일에 1개씩의 권선이 주형기에 할당되어, 제1일에 착수하여 제4일에 완료되는 일정이 된다. 그리고 2번 제품은 2개의 주형이 존재하기 때문에, 제1일에 2개의 권선이, 제3일에 1개의 권선이 할당된다. 3, 4, 5번 제품은 3개의 주형이 존재하기 때문에 제1일에 3개의 권선 모두가 주형기에 할당이 된다. 지금까지 제1일에 할당된 권선수는 12개이다. 따라서 6번 제품은 제2일에 할당이 되며, 3개의 주형이 있기 때문에 제2일에 권선 3개가 모두 할당된다. 7번 제품의 경우 6번 제품과 동일한 주형번호의 주형을 사용해야 하기 때문에, 6번 제품이 완료되는 제4일에 3개의 권선이 할당된다. 제2일에 할당된 권선수는 6번 제품의 3개 밖에 없다. 따라서 8번 제품의 권선은 1개의 주형으로 제2일, 제4일, 제6일에 각각 1개씩 할당되며, 용량이 3,000kVA를 초과하기 때문에 주형기는 1개의 권선으로 1회가 동된다. 제2일의 권선 할당수는 1,750kVA 이하인 제품의 권선을 기준으로 할 때 7개가 할당되었다. 따라서 9번 제품의 권선

은 3개의 주형으로 제2일에 3개가 할당된다. 10번 제품은 3개의 주형으로 6개의 권선을 할당해야 한다. 제2일에 10개의 권선이 이미 할당되었기 때문에 제2일에 할당 가능한 2개를 먼저 할당하고, 남은 주형 1개로 제3일에 1개의 권선을 할당한다. 그리고 제2일에 할당된 권선이 완료되는 제4일에 다시 2개를 할당하며, 제3일에 할당된 권선이 완료되는 제5일에 1개의 권선이 할당된다. 따라서 10번 제품의 계획일정은 5일이 된다. 11번에서 18번 제품은 이전에 할당된 제품과 동일한 주형을 사용하기 때문에, 각 제품의 권선 할당은 해당되는 주형의 사용 완료시점과 할당 가능수를 고려하여 할당된다. 그러나 지금까지 할당된 과정에서 제3일에 할당된 권선 수는 9개이기 때문에, 19번 제품은 1개의 주형으로 제3일, 제5일, 제7일에 각각 할당된다. 같은 방법으로 <표 1>의 제품들을 납기순위에 따라 할당을 하면, <그림 4>와 같은 계획이 수립된다.

<그림 3>과 <그림 4>에서 최종작업 완료시간은 주문순위에 의한 경우 제10일이 되며, 납기순위에 의한 경우 제9일이 된다. 또한 할당순위에 따라 제품별 처리시간이 제품번호 3, 9, 13, 17의 경우 2일에서 3일 또는 4일로 증가하고, 10번 제품은 5일에서 4일로 줄어들어, 같은 제품이라도 할당순위 또는 잔여 용량에 따라 그 처리시간이 달라짐을 알 수 있다.

2.4 일정계획 수립방안

일정계획의 대상이 되는 모든 제품에 대해 할당순위가 결정되었을 때 애로공정의 일정계획은 <그림 5>와 같은 구조로 이루어지며 다음과 같은 단계를 거친다.

- 단계 1. 할당차폐가 된 제품에 대해 주형기 할당가능일(y)을 선정한다. 할당가능일은 일자별로 주형기에 할당된 권선들의 총 점유크기가 3 미만인 날 가운데 가장 빠른 날이다.
- 단계 2. 할당가능일에 이미 할당된 권선들의 총 점유크기를 합산하여(할당점유크기), 추가 할당이 가능한 여유 점유크기( $a = 3 - \text{할당점유크기}$ )를 계산한다. 또 제품별로 사용될 주형가용수( $b = \text{보유수} - \text{사용수}$ )를 계산한다. 만약, 주형가용수가 0이면, 할당가능일을 하루 증가시켜( $y = y + 1$ ), 단계 2를 다시 수행한다.
- 단계 3. 제품의 권선의 주형기 점유크기( $W_i$ )와 여유 점유크기( $a$ )를 비교한다. 만약, 여유 점유크기가 제품별 점유크기보다 작다면, 할당가능일을 하루 증가시켜( $y = y + 1$ ) 단계 2로 간다.
- 단계 4. 할당가능일에 할당할 수 있는 권선의 최대 수를 계산한다. 우선 여유 점유크기( $a$ )에 들어갈 수 있는 권선의 수를 계산한다. ( $c = a \div W_i$ ) 이 값을 주형가용수( $b$ )와 비교하여 작은 값을 택한다. ( $c$ )
- 단계 5. 할당가능일(y)에 이 제품의 권선을 가능한 만큼 할당한다. 이에 따라 각 권선별 일정계획을 수립한다.

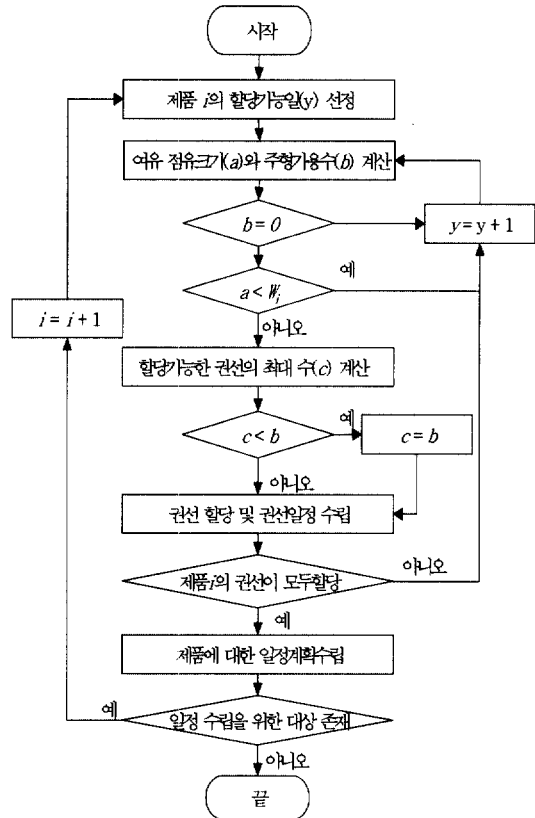


그림 5. 일정계획 수립방안의 흐름도.

- 여기에는 할당된 주형의 일정, 주형기의 여유 점유크기 등에 대한 조정도 포함된다. 만일 제품에 대한 권선이 모두 할당되지 않았으면, 할당가능일을 하루 증가시켜( $y = y + 1$ ) 단계 2로 간다.
- 단계 6. 제품에 대한 일정계획을 수립한다. 제품의 착수일자는 제품별 권선할당일이 가장 빠른 날이며, 완료일자는 마지막에 할당된 권선의 완료일자이다.
- 단계 7. 일정계획 수립을 위한 대상제품이 존재하면 단계 1로 간다.

이 방안은 장비의존에 따라 제품처리시간이 달라지는 공정에서 제한된 장비능력을 고려한 것이다. 일자별 장비가동은 단계 1에서 제시된 점유크기(3) 미만으로 계획이 특정한 날에 집중되지 않고 분산시키는 역할을 한다. 단계 2, 3, 4는 이전에 할당된 권선수와 사용할 주형번호를 고려하여 제품별 계획수립이 가능한 권선수를 결정한다. 제품할당순위에 따라 이들 단계를 거치는 동안 각 제품별 특정일에 할당되는 권선수가 달라진다. 따라서 이들 단계는 본 연구에서 고려한 제품별 처리시간이 달라지는 공정에서 일정계획을 수립하는 역할을 한다.

2.5 일정계획 평가기준

본 연구대상 공장은 수주생산방식의 제조환경을 가진다. 이

러한 제조환경에서 고객주문에 대한 납기준수는 기업경쟁력 강화에 절대적인 영향을 미친다. 이것은 납기를 얼마나 정확히 맞출 수 있는가에 따라 지연생산 비용 및 고객신뢰도에도 영향을 주기 때문이다.

따라서 생산일정을 정확하게 예측하고 반영하여야 한다.

일반적으로 가장 이상적인 생산일정계획은 생산계획에서 수립된 각 공정의 모든 작업들을 정확하게 그들의 납기에 맞추는 것이다. 그러나 현실적으로 여러 가지 제약조건들 때문에 모든 작업들에 대하여 그들의 납기를 만족시켜주는 것은 어려운 문제이다. 따라서 조기생산과 지연생산에 대한 손실비용을 동시에 고려하여 그 비용을 최소로 하는 것이 현실적이다. 본 연구에서는 조기생산과 지연생산에 대한 손실비용을 최소화하기 위해 애로공정에 대한 일정계획에서 아래와 같은 평가기준을 사용한다.

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\alpha \{(d_i - T_i)^+\}^2 + \beta \{(T_i - d_i)^+\}^2] \quad (1)$$

- $P$  :가중 편차 제곱평균값
- $I$  :제품(1, ...,  $n$ )
- $d_i$  : $i$ 번째 제품의 납기
- $T_i$  : $i$ 번째 제품의 완료일자
- $\alpha$  :조기생산 시간에 대한 가중치
- $\beta$  :지연생산 시간에 대한 가중치

### 3. 유전알고리즘의 적용

몰드변압기의 애로공정은 일정계획을 수립하는 할당순위에 따라 제품 처리시간이 달라지기 때문에, 각 제품의 할당순위를 결정하는 것이 매우 중요하다. 앞에서 살펴 본 바와 같이 몰드공정은 같은 제품이라도 할당순위나 장비의 잔여 용량에 따라 처리시간이 2일 또는 4일 또는 6일 등이 될 수 있다는 특성이 있다. 이러한 특성 때문에 통상적인 일정계획 기법으로는 해결하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 각 제품의 최적 할당순위를 결정하기 위해 이러한 특성을 무리없이 반영할 수 있는 유전알고리즘을 적용한다.

일반적으로 유전알고리즘은 다수 탐색점을 사용하여, 적절한 다양성(diversity)을 유지하면서 우수한 후보해들 사이에 정보를 교환하기 때문에 최적해에 도달할 확률이 높다. 또한 최적해를 발견하지 못하는 경우에도 이 알고리즘은 좋은 해를 제공할 수 있는 견실성(robustness)도 가지고 있다. 이러한 장점들 때문에 유전알고리즘은 NP-hard 문제에 대한 효율적인 탐색 방법으로 알려져 있다. 지금까지 유전알고리즘에 대한 연구는 많은 분야에서 이루어지고 있으며, 특히 생산공정의 부하 평준화를 위한 문제(김여근 등, 1997; 박지형 등, 1998)와 일정계획의 수립을 위한 문제(Jawahar, 1998; Lee and Dagli, 1998; Y. Li et al., 1998)에 많이 적용되고 있다.

유전알고리즘을 적용하기 위해서는, 일정계획 문제를 부호

화하는 방법, 연산자에 대한 설명 및 파라미터 값에 대한 정의가 선행되어야 한다. 유전알고리즘의 절차에 따른 각 단계별 적용방안은 다음과 같다.

#### 3.1 유전자 구조

본 연구에서는 몰드변압기의 생산계획 수립을 위한 기준으로 계획대상 제품의 애로공정 일정계획 순위를 결정한다. 따라서 유전자 구조는 <그림 6>과 같이, 일정계획 수립을 위한 각 제품의 계획 우선순위를 나타낸다. <그림 6>은 10개의 제품에 대해 각 제품별 우선순위 유전자의 예를 보여준다. 유전자가 생성되면, 유전자 우선순위에 의한 일정계획은 <그림 5>에서 제시된 수립방안을 적용한다.

제품번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
우선순위 유전자	9	2	8	10	1	7	3	4	6	5

그림 6. 유전자 구조.

#### 3.2 입력(input) 모듈

입력 모듈에서는 계획수립을 위한 제품정보와 유전알고리즘에 대한 정보를 입력받는다. 제품정보는 <표 1>과 같은 정보이다. 또한 유전알고리즘에 정보는 반복횟수와 돌연변이율(mutation ratio)을 입력받으며, 모집단 크기와 선택(selection)을 위한 적합도율(fitness ratio)은 입력된 제품수량으로 결정한다. 본 연구에서는 모집단의 크기는 제품수( $n$ )와 같으며, 적합도율은  $1/n$ 로 정한다.

#### 3.3 초기화(initialization) 모듈

초기화 모듈에서는 모집단 크기만큼 유전자(chromosome)를 생성하여 초기 모집단을 구성한다. 유전자는 1에서  $n$ 까지 무작위수로 발생시키며, 우선순위를 위해 같은 수가 중복되지 않도록 한다.

#### 3.4 평가(evaluation) 모듈

평가 모듈에서는 각 유전자에 대한 일정계획을 수립하여 적합도 평가와 유전자의 선택확률을 구한다. 먼저 우선순위에 변동이 발생한 유전자에 대해, 앞에서 제시한 수립방안으로 일정계획을 수립한다. 수립된 결과에 따라 각 유전자의 제품별 조기생산과 지연생산 일수를 구한다. 그리고 식 (1)의  $P$ 를 이용하여 각 유전자에 대한 가중편차 제곱평균값( $P_i$ )을 구한다.

#### 3.5 선택(selection) 모듈

선택 모듈에서는 다음 세대의 모집단을 위해 부모세대의 모

집단에서 우성 유전자를 선정한다. 우성 유전자의 선택은 각 유전자의 적합도율(fitness ratio,  $F_i$ ) 값이 주어진 적합도율( $1/n$ ) 보다 작은 유전자를 다음 세대의 유전자로 선택한다. 각 유전자의 적합도율은 평가 모듈에서 계산된 각 유전자별  $P_i$  값을 다음의 (2)에 적용하여 모집단 전체의 값( $P_{tot}$ )을 계산한다. 계산된  $P_{tot}$ 과  $P_i$ 를 (3)에 적용하여 각 유전자의 적합도율을 구한다.

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

$$F_i = \frac{P_i}{P_{tot}} \quad (3)$$

### 3.6 교차변이(crossover) 모듈

교차변이는 부모세대에서 선택된 자식세대의 모집단 크기가 주어진 모집단 크기보다 작을 경우 나머지 유전자를 생성하기 위해 적용한다. 본 연구에서는 PMX(partial-mapped crossover) 연산자를 이용한다. 먼저 자식세대로 선택된 유전자에서 교차변이를 위한 두개의 부모 유전자를 무작위 방법으로 선택한다. 선택된 유전자에서 교차를 위한 두 개의 위치를 무작위로 선정한다. 아래 예는 부모 유전자 P1과 P2에서 3번째와 6번째 위치를 무작위로 선택한 결과이다.

P1 : 163428579

P2 : 724139856

자식 유전자는 선택된 위치 사이의 유전인자를 교차하여 생성한다. 아래의 예는 교차에 의한 자식 유전자 Q1과 Q2를 나타낸다.

Q1 : 164139579

Q2 : 723428856

생성된 자식 유전자에서 교차된 유전인자와 기존의 유전인자가 중복될 경우, 기존의 유전인자는 교차된 범위 안에서 대응되는 중복 유전인자를 찾아 변경한다. 예에서 Q1 유전자에서 1번 유전인자는 교차된 유전인자에 존재한다. 따라서 1번 유전인자는 대응되는 중복 유전인자 2번으로 변경한다. 자식 유전자에서 유전인자의 중복을 모두 변경시키면, 아래와 같은 자식 유전자가 생성된다.

Q1 : 264139578

Q2 : 713428956

### 3.7 돌연변이(mutation) 모듈

돌연변이는 해 공간의 다양성을 유지하고 부분 최적해에 조기 수렴하는 것을 방지하는 역할을 한다. 본 연구에서는 우선순위 유전인자의 중복을 방지하기 위해 박지형, 최희련, 김영휘(1998)가 제시한 우선순위 유전자에 대한 돌연변이 연산자를 적용한다. 유전인자의 선택은 자연생산일수가 가장 큰 유

전인자를 선택하며, 변경위치는 각 유전자에 0 ~ 1 사이의 값을 무작위로 할당하여 돌연변이율보다 작은 유전자 가운데 자연생산일수가 0 이하가 되는 위치를 선택한다.

아래 예는 자연생산일수가 가장 큰 인자는 7이고, 자연생산일수가 0 이하가 되는 위치에서 변경 위치로 선택된 위치가 3 일 경우이다.

P: 631825749

⇒ 671825749

⇒ 571824639

## 4. 실험 및 결과분석

앞에서 제시한 일정계획 수립방안의 성능을 평가하기 위해 실험을 수행하였다. 실험에는 몰드변압기 공장에서 실제로 수주된 제품정보를 사용하였다. 제품수를 40, 60, 80, 100, 120, 150으로 변화시키면서 실험을 하였다. 이것은 몰드변압기 공장에서 일정계획을 수립하는 기간이 주간 또는 월간으로 구분되는데, 여기에 따라 계획되는 제품수가 달라지기 때문이다. 그런데 보통 주간 생산량은 20대 미만이며, 월간 생산량은 100대 미만인데 통상적으로 150대 정도까지 일정계획을 수립한다.

실험은 펜티엄 586에서 수행하였으며, 알고리즘은 C 언어로 구현하였다. 목적함수는 자연생산과 조기생산에 의해 발생하는 비용을 최소화하기 위해 두 가지 비용의 가중합으로 하였다. 가중치는 자연 및 조기생산 발생에 대한 벌점으로 두 가중치의 합은 1이다. 실험에서 자연생산에 가중치를 크게 줄수록 납기준수는 좋아지지만 조기생산으로 인한 재고유지비용은 증가할 것이다. 또한 조기생산에 가중치를 크게 주면 납기 지연이 발생할 확률이 높다. 따라서 실험은 두 가중치를 0.1에서 0.9로 변화시켜 다양하게 하였으며, 유전알고리즘에서 돌연변이율은 0.1, 0.2, 0.3으로 변화시켜 사용하였다.

본 연구에서는 유전알고리즘에 의한 결과와 기존의 할당규칙인 납기순위(EDD) 규칙에 의한 결과를 비교하였다. 이것은 현재 몰드변압기 공장의 애로공정에 대한 일정계획수립이 EDD 규칙에 따라 먼저 이루어진 후, 그 결과를 담당자가 검토하여 납기지연이 최소로 될 수 있는 제품 순위로 변경하여 계획을 수립하기 때문이다.

<표 3>은 돌연변이율 0.1을 사용하여 가중치에 변화를 주어 실험한 결과이다. 유전알고리즘을 적용한 값은 동일한 환경에서 50회 실험한 결과의 평균값이다. <표 3>은 평균적으로 유전알고리즘에 의한 일정계획이 EDD에 의한 것보다 더 좋은 결과를 보여준다. 또한 동일한 가중치에서 제품수의 증가에 따라 개선률도 함께 증가하는 것으로 나타난다. 가중치의 변화에 따른 개선률은 제품수 80개까지는 거의 동일하지만, 100개 이상의 경우 조기생산의 가중치가 클수록 개선률도 증가한다. 그리고 유전알고리즘에 사용된 돌연변이율을 0.2, 0.3으로 변경해도 EDD 규칙보다 더 좋은 결과를 보여주었다.

표 3. 가중편차 제곱평균값에 대한 실험결과

가중치	제품수	GA에 의한 평균값	EDD에 의한 평균값	개선률(%)
$\alpha = 0.1$ $\beta = 0.9$	40	5766.189375	5908.609766	2.4
	60	4862.666875	5065.186979	4.0
	80	4656.658438	4926.040234	5.5
	100	4160.363125	4459.783750	6.7
	120	3454.224062	3681.573438	6.2
	150	2802.005054	2903.447083	3.5
$\alpha = 0.3$ $\beta = 0.7$	40	17297.987500	17725.831250	2.4
	60	14593.506250	15195.560417	4.0
	80	13967.847500	14778.120312	5.5
	100	12399.556250	13379.351250	7.3
	120	10174.280000	11043.518750	7.9
$\alpha = 0.7$ $\beta = 0.3$	40	40102.402344	41360.268750	3.1
	60	34042.300000	35456.304167	4.0
	80	32534.265000	34482.278125	5.6
	100	28891.187500	31218.492500	7.5
	120	23598.090000	25767.412500	8.4
	150	18412.741250	20315.771667	9.4
$\alpha = 0.9$ $\beta = 0.1$	40	51870.275000	53177.487500	2.5
	60	43745.005000	45586.679167	4.1
	80	41850.772500	44334.356250	5.4
	100	37077.230000	40138.060000	7.7
	120	30315.665000	33129.364583	8.5
	150	23529.195000	26119.878333	10.0

## 5. 결론

본 연구에서는 몰드변압기 공장의 생산계획을 위해 애로공정의 일정계획을 수립한 후 이를 기준으로 나머지 선후 공정들의 일정계획을 전진적 기법과 후진적 기법으로 수립하는 방안을 채택하였다. 애로공정의 일정계획은 제품할당순위에 따라 공정처리시간이 달라지기 때문에 각 제품의 할당순위를 결정하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 유전알고리즘을 적용하였다.

우선 임의의 할당순위에 대해 애로공정의 일정계획 수립방안을 제시하고, 유전알고리즘의 틀을 이용하여 할당순위를 변경, 평가를 함으로써 최적 순위를 찾아 나가는 기법을 제시하였다. 평가기준으로 조기생산과 지연생산에 대한 손실비용을 사용하였다.

실험에는 몰드변압기 공장에 수주된 실제 데이터를 사용하고 그 결과를 EDD 규칙과 비교하였다. 제품수를 40에서 150으로 변화시켜 적용한 결과, 본 연구에서 제시한 방법이 대체적으로 좋은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 상황에 따라 공정처리시간이 달라지는 환경에서 일정계획 수립방안을 제시하였다. 이러한 환경에서 향후 연구과제를 몇 가지 생각해 볼 수 있다. 우선 유전알고리즘의 적용과정에서 목적함수를 효과적으로 개선할 수 있는 새로운 발전적 연산자의 발견이다. 이는 공정처리시간이 달라지는 상황을 면밀히 검토함으로써 이루어질 수 있다. 또한 해의 개선 속도에 대한 수행시간을 평가하기 위해 다른 탐색적 기법과의 비교가 있어야 할 것이고, 다른 평가기준에 대해서도 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 참고문헌

- 김여근, 이수연, 김용주 (1997), 혼합모델 조립라인에서 작업부하의 평활화를 위한 유전알고리즘, *대한산업공학회지*, 23(3), 515~532.  
 박지형, 최희련, 김영휘 (1998), "대체 공정을 도입한 유전알고리즘 응용의 작업일정계획", *대한산업공학회지*, 24(4), 551~558.  
 이동현 (2000), *주문생산방식의 조립시스템을 위한 생산일정계획*, 부산대학교.



Abdul-razaq, T. S. and Poots, C. N. (1988), Dynamic Programming State-Space Relaxation for Single Machine Scheduling, *Journal of the Operation Research Society*, 39(2), 141~152.

Baker, K. R. and Scudder, G. D. (1990), Sequencing with earliness and tardiness penalties: a review, *Operation Research*, 38, 22~36.

Gen, M. and Cheng, R. (1998), Genetic Algorithm and Engineering Design, *Ashikaga Institute of Technology*, Ashikaga, Japan.

Gupta, Y. P., Gupta, M. C. and Kumar, A. (1993), Minimizing Flow Time Variance in a Single Machine System Using Genetic Algorithms, *European Journal of Operational research*, 70, 289-303.

Hall, N. G., Kubiak, W., Sethi, S. P. (1991), Earliness-tardiness scheduling problem II: deviation of completion times about a restrictive common due date, *Operation Research*, 39, 847~856

Hall, N. G., Posner, M. E. (1991), Earliness-tardiness scheduling problem I: weighted deviation of completion times about a common due date, *Operation Research*, 39, 836~846.

HE, Z., Yang, T. and Deal, D.E. (1993), A Multiple-pass heuristic Rule for JobShop Scheduling with Due Dates, *International Journal of Production Research*, 31(11), 2677~2692.

Jawahar, N., Aravindan, P., Ponnambalam, S. G. and Karthikeyan, A. A. (1998), A genetic algorithm-based scheduler for setup-constrained FMC, *Computers in Industry*, 35, 291~310.

Kim, Y. D. and Yano, C. A. (1994), Minimizing Mean Tardiness and Earliness in Single-machine Scheduling Problem with Unequal Due Dates, *Naval Research Logistics*, 41, 913~933.

Lee, H. C. and Dagli, C. H. (1997), A parallel genetic-neuro scheduler for job-shop scheduling problems, *International Journal of Production Economics*, 51, 115~122.

Li, Y., Ip, W. H. and Wang, D. W. (1998), Genetic Algorithm approach to earliness and tardiness production scheduling and planning problem, *International Journal of Production Economics*, 54, 65~76.

Ow, P. S. and Morton, T. E. (1989), The Single Machine Early-Tardy Problem, *Management Science*, 35, 177~191.



**서준용**

울산대학교 산업공학과 학사  
 울산대학교 산업공학과 석사  
 울산대학교 산업공학과 박사수료  
 현재: 울산대학교 산업정보경영공학부 외래강사  
 관심분야: 전자상거래, 데이터베이스 응용,  
 B2B 마켓플레이스, e-비즈니스



**고재문**

서울대학교 산업공학과 학사  
 한국과학기술원 산업공학과 석사  
 한국과학기술원 경영과학과 박사  
 현재: 울산대학교 산업정보경영공학부 교수  
 관심분야: 데이터베이스 응용, 전자상거래, 통  
 신망 관리, e-비즈니스