IE Interfaces
Vol. 13, No. 4, pp. 564-571, December 2000.

ILOG를 활용한 금형 생산시스템의 일정계획 시스템 개발에 관한 연구

정한일[1] · 정대영[2] · 김기동[3] · 박찬권[4] · 박진우[5]

[1]대전대학교 정보시스템공학과 / [2]LG-EDS Systems / [3]강원대학교 산업공학과 /
[4]영산대학교 정보경영학부 / [5]서울대학교 산업공학과

A Study on Developing a Scheduling System for a Die Manufacturing System Using ILOG

Han-Il Jeong[1] · Dae-Young Chung[2] · Ki-Dong Kim[3] · Chan-Kwon Park[4] · Jin-Woo Park[5]

Manufacturing companies are implementing a so-called customer-centered supply chain management to have a competitive advantage. In these efforts, collaboration not only within a company but also with suppliers, partners and customers is emphasized. The fast delivery, reducing the total lead-time from development to delivery, is pursued more than ever, though the quality and cost are still importantly regarded. Die manufacturing companies are not exception from these trends, because a die is a necessary tool for almost manufacturing industries. The planning and scheduling system plays an important role in supply chain management. In this study, we address a scheduling problem of a die manufacturing company. The problem is very complex due to many reasons including the uncertainty in environment and the complexity of constraints. Considering the importance of due-date satisfaction and human planners' roles, we designed the solution algorithm and the user interface respectively. In the implementation phase, modeling constructs and basic solution algorithms of ILOG solver and ILOG scheduler are used. In the paper, the problem and the algorithm are described with ILOG constructs, and the experience of use is also addressed.

1. 서 론

고객지향적 공급사슬관리(Customer Centered Supply Chain Management)는 제조업체가 당면한 중요한 과제이다. 정보통신기술의 발전에 따른 정보의 신속한 확산, 시장 규제의 완화 등으로 인하여 제조업체는 경쟁우위를 바탕으로 시장을 넓힐 수 있는 기회와 함께 적절하고 신속한 대응의 미비로 인한 도태의 위협을 안고 있다. 전통적으로 품질과 원가는 제조업체의 경쟁력을 좌우하는 중요한 요소로 여겨져 왔으나, 근래에는 제품 수명의 단축과 함께 개발로부터 시장 출하에 이르는 시간(Time-to-Market)의 단축, 맞춤형 생산(Build-to-Order, Configure-to-Order) 등을 통하여 고객이 원하는 제품을 신속히 제공할 수 있는 능력이 경쟁 우위를 좌우하는 핵심 요소로 여겨지고 있다(Daeyoung *et al.*, 2000).

금형은 전기전자 제품, 기계제품, 성형가공제품, 생활용품, 건축자재, 광학정밀제품 등의 생산에 반드시 필요한 생산 도구로서, 최종 제품의 품질 및 원가에 지대한 영향을 미친다. 일반적으로 설계를 포함한 금형 개발에는 수개월 이상이 소요되기 때문에 금형 개발 기간은 제품 개발로부터 시장 출하까지의 기간에 대한 비중도 크다. 뿐만 아니라, 우리나라의 금형산업은 생산액 기준으로 세계 4위, 수출액 기준으로 세계 5위에 이르는 등 세계적으로도 경쟁우위를 지니고 있는 중요한 산업이다. 금형 제조업체의 공급사슬관리는 내부적으로는 설계 및 생산관리 강화, 외부적으로는 고객 및 협력 업체와의 정보 공유 및 협력을 통하여 리드타임 단축, 납기 준수, 원가 절감, 품질 향상을 목적으로 하고 있다. 본 논문은 공급사슬관리의 핵심 요소의 하나인 일정계획 시스템의 개발에 관한 것이다.

금형 제조업체의 일정계획 문제는 학계에서 주로 연구가 이루어지고 있는 순수 잡샵 일정계획 문제와는 다른 특성을 가

지고 있다.

- 금형 설계뿐만 아니라 생산에 소요되는 리드타임이 길다.
- 전체 개발 기간 중 설계 기간과 생산 기간이 중첩되어 있다.
- 금형의 제작에 소요되는 부품의 수가 많다.
- 최종 금형은 부품의 조립으로 이루어지며, 부품의 생산 공정은 가공 공정뿐만 아니라 조립 및 분해 과정을 포함한다.
- 자동화된 공정과 수작업으로 처리되는 공정이 혼재한다.
- 금형의 개발 및 가공 소요시간을 예측하기 힘들다.
- 신규 금형의 경우 설계상의 오류 등으로 인한 재작업(수리, 수정 등)이 많다.
- 협력 업체를 통한 개발 또는 생산 공정의 외주가 보편화되어 있다.

위와 같은 특성으로 인하여, 일반적으로 금형 생산을 위한 일정계획은 규모가 크고, 예측 곤란한 사건의 발생으로 인한 재일정계획의 수립이 빈번히 요구되며, 중요한 의사결정이 계획 담당자에 의해 이루어지기 때문에 의사결정지원 기능이 매우 중요하다.

본 논문에서는 국내의 대형 금형 제조업체를 대상으로 개발된 일정계획 시스템의 사례를 중심으로 알고리듬과 의사결정 지원을 위한 사용자 인터페이스(GUI: Graphical User Interface)에 관하여 설명하고자 한다. 2절에서는 금형 생산시스템의 특징과 일정계획 시스템의 역할을 소개하고, 3절에서는 제안된 일정계획 알고리듬과 시스템 개발에 사용된 최적화 도구인 ILOG를 이용한 구현 사례를 설명한다. 4절에서는 일정계획 시스템의 GUI(Graphical User Interface)를 중심으로 의사결정지원 기능을 소개하였으며, 마지막으로 5절에서는 결론 및 추후 연구 과제에 관하여 설명하였다.

2. 금형 생산 시스템과 일정계획

본 장에서는 금형 생산 시스템의 특성 및 일정계획의 역할을 설명한 후, 연구의 결과로 구현된 일정계획 시스템의 개발 방향에 관하여 소개하고자 한다.

2.1 금형 생산 시스템의 특성

금형은 동일 규격의 공산품을 대량으로 생산할 목적으로 재료의 소성과 유동성 등의 성질을 이용하여 재료를 성형 가공함으로써 제품을 얻기 위해 주로 금속소재로 만든 틀이다(금형의 개요, 1994). 금형은 일반적으로 주문설계(Engineer-to-Order) 방법으로 단품 또는 소량이 제작되며, 금형의 납품에 이르기까지 중요한 프로세스로는 수주, 금형설계, 공정설계, 구매, 가공, 조립, 시험 등이 있다. 수주 단계에서는 (1) 납품 가능일 예측 또는 고객이 지정한 시점까지의 납품 가능 여부의 파악, (2) 원가 예측을 통한 견적가격 산출이 중요한 의사결정 활동이다. 신규 제품의 경우에는 과거 생산 경험을 갖고 있는 금형 중 유사 금형을 찾아 리드타임을 추정하고, 제조원가를 예측하는 활동이 이루어진다. 수주가 확정되면, 유사 금형의 BOM 및 라우팅(Routing)을 기준으로 가일정(tentative schedule)을 수립하고, 납기를 기준으로 설계, 가공, 조립, 시험 단계의 기준시점(milestone)을 설정한다. 금형설계 단계에서는 조립도를 작성하고, 개별 부품별로 설계와 함께 구매 또는 제작 여부의 결정이 이루어진다. 근래에는 설계로부터 납품에 이르는 리드타임 단축을 위해서 부품설계, 공정설계, 생산 활동이 중첩되어 이루어지는 동시공학적 접근방법이 많이 적용되고 있으며, 부품 설계와 공정 설계가 진행됨에 따라 BOM 및 Routing의 수정과 재일정계획을 통한 가일정의 수정이 이루어진다. 확정된 일정을 기준으로 가공이 이루어지며, 부품의 가공이 종료됨에 따라 조립이 이루어진다. 부품 가공은 자동화된 기계 또는 수동 기계를 이용하여 이루어지며, 때로는 정밀도의 확보 또는 생산성 향상을 위하여 복수의 부품을 동시에 가공하기도 한다. 가공 단계에서는 공정단위 또는 부품단위의 외주가 행해지고 있으며, 외주는 원가절감을 위한 목적으로 설계단계에서 결정되기도 하고, 납기준수를 위한 목적으로 초과부하(over-load)를 해소하기 위한 목적으로 행해지기도 한다 (Holloway and Nelson, 1973; Vollmann *et al.*, 1997). 조립이 완료되면 금형을 이용하여 시제품을 생산하는 시험 단계에 들어간다. 불량품이 생산되면 설계 오류, 가공 오류 등의 원인을 파악하고 금형 해체와 부품의 재설계, 가공 등의 과정이 반복된다.

2.2 일정계획의 역할

금형 생산 시스템에서 일정계획은 전사적 자원관리(Enterprise Resource Management)를 위한 핵심 부분이다. 일정계획을 중심으로 영업부서에서는 수주단계에서 의사결정(납품일, 납품가 등)을 수행하며, 설계/개발부서에서는 금형 및 부품의 설계, NC 프로그래밍 등을 수행한다. 구매/자재부서에서는 일정계획을 기반으로 필요한 부품 및 금형 재료의 구입을 추진하며, 외주관리를 수행한다. 생산/조립 부서에서는 매일의 작업 내역을 확인하고, 필요에 따라 잔업, 특근 등 작업능력 조정을 수행하는 활동을 수행한다. 금형을 발주한 고객에게는 금형 제작 상황을 공유하는 수단으로 활용된다. 특정 부서에서 예기치 못한 사건이 발생하는 경우, 관련 부서와의 공동의사결정을 통하여 일정계획을 변경하게 된다. 즉, 금형 생산 시스템에서 일정계획은 해당 기업 내의 모든 부서, 하위 공급업체 또는 협력업체 및 상위 고객업체 간의 협력을 위한 공통 의사교환 수단이라고 할 수 있다.

2.3 일정계획 시스템의 개발 방향

현장에서 사용되는 일정계획 시스템의 개발에서는 (1) 현장

에서 중요하게 여겨지는 제약조건의 반영, (2) 요구되는 수준의 해를 주어진 시간 내에 구할 수 있는 해법의 개발, 그리고 (3) 사용자가 원하는 정보를 적합한 형태로 제공하고 정보를 입력받을 수 있는 사용자 인터페이스의 개발이 중요하다(Vicent and Tjer, 1997). 특히, 금형 공장은 제조 시스템의 유형 중, 생산현장에 불확실성이 많고, 부분적으로 작업자에 의한 일정의 복구가 가능한 환경에 속한다(Vicent and Tjer, 1997). 이와 같은 환경에서는 작업장에 많은 권한을 부여할 수 있어야 하며, 신속한 재일정계획 수립이 가능해야 하기 때문에, 많은 노력이 요구되는 최적화보다는 발견적 기법을 이용한 일정계획이 적합하다고 할 수 있다. 금형 제조에는 수개월의 시간이 소요되고, 최종 금형의 생산에는 많은 부품의 가공 및 조립이 요구되기 때문에, 납기를 준수하기 위해서는 임계 경로(critical path)와 병목 공정을 파악하여 지속적으로 관리하는 방법이 요구된다. 특히, 여러 종류의 금형이 자원을 공유하면서 동시에 설계, 가공, 조립되는 것이 일반적이기 때문에 주요 부품 또는 공정에 기준시점(milestone)을 부여하는 프로젝트 관리 방법이 생산관리에 적합하다고 할 수 있다.

생산현장의 일정계획 시스템이 적용 과정에서 실패한 사례를 살펴본다면, 제조 시스템 특성의 충분한 반영 부족, 사용자 인터페이스를 비롯한 사용의 편의성 부족, 시스템의 성능 부족(예; 해의 품질이 낮거나 해를 구하는 데 많은 시간이 소요됨) 등을 들 수 있다. 이 외에도 시스템의 개발에 중점을 둔 채, 최종 사용자인 각 부서의 상충된 이해 관계의 조정을 위한 체계 수립에 대한 노력 부족, 시스템 사용의 친숙화를 위한 지속적 지원 부족 등을 들 수 있다. 아울러, 제조환경이 변함에 따라 일정계획 시스템의 가능도 조정이 가능하도록 유연성과 확장성을 갖추어야 하나, 이와 같이 미래를 대비한 설계의 부족이 실패 원인이었다.

표 1. 금형 생산 일정계획 문제의 주요 특징

번호	주요 특징	일정계획 시스템 개발 방향
1	자동화 수준의 혼재	생산 자원별로 월력 유지 및 반영
2	공정간의 선후행 관계 존재	그래픽을 이용한 모델링
3	생산능력이 상이한 대체 자원의 존재	대체 공정/기계 고려 필요
4	납기 준수가 매우 중요한 요건임	생산능력 조정(예; 초과근무, 외주) 기법의 반영
5	사람에 의한 의사결정 비중이 큼	What-If 시뮬레이션 기능 GUI(Graphical User Interface)
6	생산현장의 불확실성이 큼 (가공시간의 지연/단축, 고장, 불량 등)	신속한 재일정계획 기능
7	일정에 영향을 주거나, 일정에 의해 영향을 받는 부서가 많음	부서간 협력을 위한 일정의 공유 및 변경 조정 기능 개발

본 연구에서는 사용자 부서 담당자의 인터뷰를 거쳐, 일정계획 시스템의 핵심 성공 요소가 (1) 생산현장에 존재하는 제약의 충분한 반영, (2) 사용자 편의성에 기반한 의사 결정 지원이라고 판단하게 되었다. 학계에서 연구되고 있는 순수 잡샵 일정계획 문제에서는 다루어지지 않는 생산현장의 제약을 정리하면 다음의 <표 1>과 같다.

일정계획 시스템의 개발 도구를 선정하는 과정에서는 다양한 제약조건의 효과적 반영, 사용자 인터페이스의 개발, 부서간 협업을 위한 정보의 공유, 발견적 기법의 적용 및 구현, 향후 시스템의 수정 또는 이식을 위한 유연성 및 확장성 등을 고려하였다. 본 작업에서는 제약만족문제의 효과적 모델링, 제약전파 등의 효과적 해법 지원, 객체지향 언어로 구현되어 유연성 및 이식성 등이 우수한 ILOG를 개발 도구로 선정하게 되었다.

3. 일정계획 문제의 모델링 및 해법

본 장에서는 ILOG를 활용한 금형 생산 시스템의 제약조건 모델링에 관하여 설명한 후에, 사용자의 의사결정지원을 위해 개발된 알고리듬을 설명한다.

3.1 금형 생산 일정계획 문제의 모델링 및 제약전파

일정계획 문제의 해법은 문제의 표현방법과 밀접한 관련을 가지고 있으며, 문제의 표현은 목적함수와 제약조건에 관련된 부분으로 나누어질 수 있다. 본 연구에서 다루었던 문제는 크게 2가지로 나누어 볼 수 있다.

- 유형 1: 납기지연의 최소화
- 유형 2: 생산능력 조정의 최소화

유형 1은 일반적인 일정계획 문제로서 생산능력이 고정된 상태에서 납기지연을 최소화할 수 있는 일정의 수립을 목적으로 하며(Baker, 1974), 본 연구의 대상이 된 금형 생산 시스템에서는 신규 금형의 수주시 납품 가능일을 예측하는 목적으로 주로 사용되었다. 유형 2는 납기를 반드시 준수한다는 가정하에 일정계획을 수립하는 것으로 생산능력을 초과하는 부하에 대해서는 사용자가 초과근무 또는 외주를 활용하거나, 주문고객과의 협의를 통해 납기일을 조정하는 목적으로 사용된다. 유형 1은 유형 2에 비하여 학계에서 많은 연구가 이루어진 부분이나, 유형 2는 학계에서 많이 다루어지지 않았으며, 최적화를 통한 기여도 중요하나 사용자 편의성 및 의사결정 지원이 중요한 비중을 차지한다. 본 장에서는 유형 2의 문제를 중심으로 일정계획 문제의 모델링과 해법을 설명하고자 한다.

일정계획 문제의 모델링에 반영되어야 하는 제약으로는 (1) 공정간의 선후행 관계, (2) 공정과 생산자원의 관계가 있다. 이 외에도 현실적으로는 시간별로 자원의 생산능력에 차이가 있

그림 1. 기계 자원의 시간 가용성.

는, 즉 생산자원의 시간 가용성에 따른 제약이 있다. 일정계획 문제의 모델링 방법으로 많이 사용되는 Disjunctive 그래프나 혼합정수계획법은 자원의 시간 가용성 제약을 표현하기에 곤란하며, 모델링이 가능하다 하더라도 해법을 개발하기에 곤란한 단점이 있다. 본 연구에서는 제약만족문제(Constraint Satisfaction Problem)의 모델링에 적합하다고 알려진 ILOG Solver와 ILOG Scheduler를 이용하여 모델링을 수행하였다.

3.1.1 기계 자원의 모델링

객체지향 모델링 라이브러리인 ILOG Solver, ILOG Scheduler에서 기계 자원의 표현을 위한 클래스로는 IlcUnaryResource와 IlcDiscreteResource가 제공된다. 다음의 <그림 1>은 연구 대상이 된 제조시스템의 기계자원의 시간 가용성을 보여주고 있다.

<그림 1>에서 휴지시간은 식사시간, 휴식시간, 휴일, 퇴근 후 시간 등 일반적으로 작업이 이루어지지 않는 시간을 나타낸다. 기계 A는 수동 기계를 나타낸 것으로 작업자의 근무시간에 의해 기계의 시간 가용성이 결정된다. 기계 B는 자동 기계를 나타낸 것으로 24시간 작업을 가정으로 하나, 셋업/셋다운 작업은 작업자를 필요로 하기 때문에 작업자의 휴식시간 또는 식사시간에는 작업이 이루어지지 못한다. 단, 작업자의 휴지시간 중에도 작업은 계속 진행될 수 있는 특징을 갖는다. IlcDiscreteResource는 동일한 능력을 갖는 여러 대의 기계를 모델링하거나, 동일한 시점에 투입되는 자원 용량에 따라 공정 수행시간이 비례하여 단축될 수 있는 상황의 표현에 적합하다. 단, 휴지시간을 표현하기에 곤란하며, Disjunctive Constraints에 대한 제약전파가 이루어지지 못하고, 할당된 공정의 추적에 기술적으로 어려운 단점이 있다. 본 연구에서는 IlcUnary Resource를 활용하여 생산 자원을 모델링하였다. 다음의 표현은 기계 자원 A의 생성을 의미한다. 단, schedule은 일정계획을 의미하는 인스턴스(instance)이며, 자원 A가 schedule에 연계되어 있음을 표현하는 것이다. 그리고 IlcRequiredResource는 특정 공정이 기계에서 작업되는 동안 다른 공정이 동일 기계에서 가공되지 못하는 성질을 의미한다.

```
IlcUnaryResource A ( schedule, IlcRequiredResource );
```

앞서 설명한 휴지시간은 IlcBreak 또는 IlcBreakList를 이용하여 반영할 수 있다.

3.1.2 공정 및 선후행 관계 제약의 표현

ILOG에서 공정을 표현하는 클래스로는 IlcActivity 클래스의 파생클래스인 IlcIntervalActivity와 IlcBreakableActivity가 제공된다. 앞서 기계자원의 모델링에서 설명한 바와 같이 자동기계의 경우 휴지시간 중에 작업이 시작될 수는 없으나, 휴지시간 중에도 작업은 진행될 수 있는 특징이 있으며, 수동기계의 경우에는 휴지시간 중 작업이 시작될 수도 없으며, 작업이 진행될 수도 없다. 이와 같은 특성은 IlcIntervalActivity로는 반영될 수 없기 때문에, IlcBreakableActivity를 사용하여 기계자원의 자동화 특성에 따른 휴지시간 제약을 반영하였다. 다음의 표현은 수동기계에서 10단위시간 동안 작업되는 공정 A와 자동 기계에서 5단위시간 동안 작업되는 공정 B를 표현한 것이다.

```
IlcBreakableActivity A( schedule, 10, IlcFalse, IlcFalse );
IlcBreakableActivity B( schedule, 5, IlcFalse, IlcTrue);
```

제약만족문제의 표현에는 다양한 변수가 사용될 수 있으나, 일정계획 문제에서는 주로 Point 변수와 Interval 변수가 많이 활용된다. Point 변수는 시점 표현에 적합하며, 시작시각 및 종료시각을 나타내는 변수로 구성된 Interval 변수는 공정의 표현에 적합하다. 이론적으로 공정과 시점, 공정과 공정간의 관계는 Point-to-Interval Algebra, Interval-to-Point Algebra 및 Interval-to-Interval Algebra로 표현된다. ILOG는 이와 같은 Algebra를 표현하고 계산할 수 있도록 설계된 라이브러리이다. 대상 시스템에서 공정과 시점간의 관계에는 (1) 구매 재료의 입고 시점 후에 첫번째 가공 공정의 시작이 가능함, (2) NC 프로그램의 준비 시점이 지난 후에 해당 가공 공정이 시작될 수 있음, (3) 주어진 시간까지 작업이 완료되어야 함 등이 있다. 그리고 공정과 공정간의 관계로는 (1) 공정 A가 종료된 후에 공정 B가 시작될 수 있음, (2) 공정 A의 종료시점과 공정 B의 시작시점 사이에는 적어도 일정 시간이 요구됨, (3) 공정 A와 공정 B가 종료된 후에 공정 C가 시작될 수 있음, (4) 공정 C가 종료되면, 공정 D와 공정 E가 시작될 수 있음 등이 있다. 다음의 <그림 2>는 이와 같은 상황을 묘사하는 작은 예를 나타낸다.

<그림 2>에 묘사된 제약 상황을 ILOG를 이용하여 표현하면 다음과 같다. 공정의 표현은 생략하기로 한다.

```
IlcPost( B.startsAfter( 15 ) );
IlcPost ( C.startsAfterEnd( A ) );
IlcPost ( C.startsAfterEnd( B ) );
IlcPost ( D.startsAfterEnd( C ) );
IlcPost ( E.startsAfterEnd( C ) );
IlcPost ( E.endsBefore( 40 ) );
```

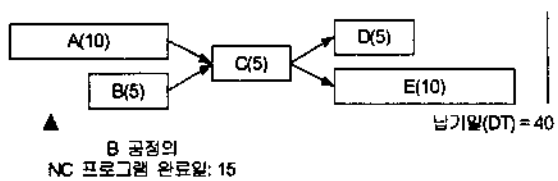

그림 2. 선후행 관계에 따른 제약의 예.

3.1.3 공정과 생산 자원간의 관계

자원제약이 있는 일정계획 문제에서 공정은 필요로 하는 자원이 가용한 경우에 시작될 수 있으며, 공정이 자원을 사용하고 있는 기간 중에는 타 공정이 해당 자원을 사용할 수 없다. ILOG에서는 공정을 표현하는 클래스의 member 함수를 이용하여, 공정과 생산 자원간의 관계를 표현할 수 있다. 다음의 표현은 공정 A의 작업을 위해서는 1 단위의 기계 M을 필요로 함을 나타낸다.

```
IlcPost ( A.requires( M, 1 ) );
```

만일 공정 A가 기계 M1에서도 가공 가능하며, 기계 M2에서도 가공 가능하다고 하면 boolean 표현을 이용하여 모델링하는 것이 가능하다.

3.1.4 제약 전파(Constraint Propagation)

ILOG는 제약이 추가됨에 따라 가능 해의 영역을 자동적으로 줄여주는 제약전파라는 기능을 제공하고 있다. 일정계획에서 유용하게 활용할 수 있는 제약전파 방법으로는 Arc Consistency 방법과 Immediate Selection 방법이 있으며, 두 가지 방법 모두가 ILOG에서 제공되고 있다. 공정간의 선후행관계를 표현해 줌으로써 해당 공정이 수행될 수 있는 가능 시간대를 자동으로 계산해 주는 방법은 Arc Consistency에 해당되며, 동일한 자원을 이용하는 공정들의 최조시작시간(Earliest Start Time), 최지종료시간(Latest Finish Time), 공정시간(Operation Time)을 이용하여 공정들의 작업 순서를 자동으로 결정해 주는 방법은 Immediate Selection에 해당된다. Arc Consistency 방법은 알고리듬의 복잡도가 낮기 때문에 제약전파에 많은 시간이 소요되지 않으나, Immediate Selection의 경우에는 계산량이 많은 단점이 있다. 본 연구의 대상이 된 금형 공장에서는 1회 일정계획의 대상이 되는 공정의 수가 수만 개에서 수십만 개에 이르기 때문에 Immediate Selection과 간단한 Variable Ordering 또는 Value Ordering 기법을 이용하여 일정계획을 수립하는 것은 현실적으로 불가능하였다. 또한, 납기일이 제약조건으로 작용하는 상황에서는 Immediate Selection의 사용이 무의미하기 때문에 본 시스템의 구현과정에서는 Arc Consistency만을 사용하였다.

3.2 공정간의 선후행관계 설정 및 변경

2장에서 설명한 바와 같이, 신규 금형을 수주한 경우 유사금형을 기준으로 일정계획을 수립하고, 납품일 및 견적가격 산정의 기준으로 사용하고 있다. 수주 후 설계가 진행됨에 따라 유사금형의 라우팅 및 BOM 정보는 신규 금형에 맞추어 점차적으로 수정된다. 금형 생산 시스템의 라우팅 및 BOM 데이터에는 공정(노드)과 공정(노드)간의 조립/해체 관계를 표현하는 선후행관계와 기술적 제약에 따른 선후행관계가 포함된다. 본 일정계획 시스템이 개발되기 전, 대상 금형 생산 공장에서는 담당자가 SQL을 이용하여 선후행 관계를 변경(설정, 삭제 포함)하고 있었으나, 선후행 관계를 잘못 설정하거나 종종 실수로 유방향 환(Directed Cycle) 관계가 설정되기도 하였다. 결과적으로 이러한 실수는 일정계획 시스템의 운영 정지로 이어졌으며, 원인 파악에 많은 노력이 필요하였다.

본 연구에서는 선후행 관계의 정확한 설정을 위하여 그래픽 사용자 인터페이스를 개발하였으며, 유방향 환의 발생으로 인한 피해를 없애기 위하여 유방향 환이 존재하는 경우 해당 금형과 관련 공정을 사용자에게 알림으로써 유방향 환으로 인한 피해를 없앨 수 있었다. 유방향 환을 쉽게 판별하는 방법으로는 Topological Ordering과 Transitive Closure를 이용하는 방법이 있다(Ahuja *et al.*, 1993). Topological Ordering을 사용하는 방법은 시작 노드(공정)로부터 종료 노드까지의 최장거리를 구하는 방법을 응용한 것으로서 계산 복잡도는 낮으나, 유방향 환의 구성 노드를 밝힐 수 없는 단점이 있다. 본 연구에서는 Transitive Closure를 계산하여, 유방향 환을 구성하는 노드를 밝힐 수 있도록 하였다. 본 알고리듬의 계산 복잡도는 공정의 수를 N이라 할 때에 $O(N^3)$이며, 임의의 공정을 i, j, k라 하면 알고리듬은 다음과 같다. 단 $R(i,j)$는 공정 i가 공정 j를 선행하면 1을 나타내는 변수이다.

```
for(i = 0; i < n; i++)
  for(j = 0; j < n; j++)
    if(R(j, I) == 1)
      for(k = 0; k < n; k++)
        if(R(j, k) == 0)
          R(j, k) = R(i, k);
```

그림 3. Transitive Closure를 이용한 유방향 환 발견 알고리듬.

3.3 일정계획 및 On-Line 시뮬레이션 알고리듬

앞서 설명한 바와 같이, 본 연구에서는 납기를 만족시키기 위하여 초과근무 또는 외주를 통하여 자원능력 제약의 완화를 고려할 수 있는 일정계획 문제를 대상으로 한다. 금형의 개발로부터 납품에 이르는 생산시간은 길기 때문에 임계경로를 중심으로 한 프로젝트 관리기법이 유용하며, 생산현장의 불확실성과 사용자 의사결정의 비중과 중요도를 감안하면 일정계획 또는 시뮬레이션의 결과가 의사결정지원 용도로 사용되어야 한다. 본 절에서는 프로젝트 관리 기법의 기준이 되는 임계경로의 결정, 공정 또는 부품별 기준시점의 결정, 그리고 생산능력 제약을 완화한 일정계획 방법에 대하여 설명한다.

3.3.1 임계경로의 결정

본 연구의 대상이 된 금형 생산 시스템에서 설계 과정은 금형 가공 및 조립 과정에 비하여 자원능력의 조정에 여유를 가지고 있기 때문에, 자원능력 부족으로 인한 납기지연은 금형 가공 및 조립 과정에서 주로 발생하였다. 금형 가공 및 조립 과

정을 대상으로 임계경로를 발견하면 중점 관리가 필요한 공정 및 자원을 파악할 수 있다. 그러나 생산자원의 시간 가용성 제약으로 인하여 임계 경로를 구하는 작업도 간단한 작업은 아니다. ILOG에서 기본적으로 제공하는 Arc Consistency를 활용함으로써 임계경로를 간단히 구할 수 있다. 기본 절차는 다음과 같다.

Step 1. 일정계획 문제를 표현한다. 즉, 공정, 자원, 자원의 휴지기간, 공정간의 선후행관계 등 앞서 설명한 제약 조건의 표현을 완료한다. 단, 공정의 자원 소요량을 0으로 한다. 제약전파의 결과로 모든 공정에 대하여 수행 가능한 시간대를 자동으로 얻을 수 있다.

Step 2. 마지막 공정들의 종료시간을 (납기일 − 여유시간)으로 설정한다. 제약전파의 결과로 모든 공정의 수행 가능 시간대를 자동으로 얻을 수 있다.

Step 3. 공정의 여유시간이 0인 공정을 후방 탐색(Backward Search)한다.

Step 4. 시작 공정까지 파악되면 종료한다. 단, 시작 공정이 아닌 공정에서 종료되면, Step 2로 돌아가 반복한다.

3.3.2 공정 또는 부품별 기준시점(milestone)의 결정

임계경로 상의 부품 및 각 부품의 공정은 납기를 준수하기 위하여 철저히 관리되어야 한다. 연구 대상이 된 금형공장에서는 각 공정별로 가상의 납기, 즉 기준시점을 관리함으로써 납기지연을 원천적으로 예방하고자 노력하고 있었다. 불확실성이 적은 제조 환경이라면 JIT 생산 방식을 따름으로써 공정 중 재고 및 원자재 재고를 줄이는 것이 바람직하나, 생산현장의 불확실성이 크기 때문에 공정 단위의 기준시점을 이용하여, 납기에 영향을 미칠 사항을 미리 파악하고자 하는 조기경보(early-warning)의 개념을 활용한 생산관리 방법이라고 할 수 있다. 공정별 기준시점의 계산 알고리듬의 소개에 앞서 몇 가지 용어를 간략히 정의하도록 한다. 최조시작시간(EST; Earliest Start Time)은 선행 공정이 완료되고, 공정을 수행할 수 있는 조건이 충족되어 공정이 시작될 수 있는 가장 빠른 시각을 나타낸다. 상대되는 개념으로 최지완료시간(LFT; Latest Finish Time)은 금형의 납기를 충족시킬 수 있는 한도 내에서 가장 늦게 종료될 수 있는 시각을 나타낸다.

공정별 기준시점을 합리적으로 결정하는 기준은 부하의 균등화이다. 최종 공정이 갖고 있는 여유시간(납기일 − 최종 공정의 최초시작시간 − 최종 공정의 소요시간)을 i) 각 공정별로 균일하게, 즉 topological order에 비례하여 분배하거나, ii) 각 공정시간의 크기를 기준으로 분배하거나, iii) 미래의 불확실성을 고려하여 topological order에 반비례하여 분배하는 방법으로 milestone을 구할 수 있다. 공정별 소요시간(processing time)의 분산이 크고, 상대적으로 여유시간이 크지 않은 환경임을 고려하여 i)을 기준으로 기준시점을 계산하였다. 이 기준의 선

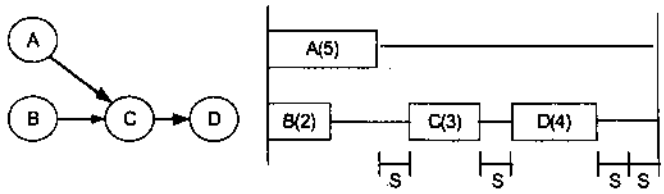

그림 4. 공정별 기준시점 계산.

정에는 현업의 요구가 가장 중요하게 작용하였다. 다음의 <그림 4>는 공정별 기준시점을 계산하는 예를 나타낸 것이다.

그림에서 임계경로는 A-C-D로 구성되며, 납기일까지의 여유시간은 4S이다. 여유시간을 임계경로를 구성하는 공정의 수에 1을 더하여 나누어 각 공정별로 여유시간을 주면, 해당 공정의 기준시점이 계산된다. 즉, 공정 A의 기준시점은 5+S, 공정 C의 기준시점은 8+2S, 공정 D의 기준시점은 12+3S이다. 납기준수의 중요도를 강조하기 위하여 최종공정에는 S만큼의 여유시간을 추가로 분배하기로 하였다. 공정별 기준시점을 부여하는 계산도 자원의 시간가용성 제약으로 인하여 계산이 복잡할 수 있으나, Arc Consistency를 이용하여 쉽게 계산할 수 있었다. 공정별 기준시점은 1일 1회 수행되는 일정계획 과정에서 해당일까지의 작업진척현황에 따라 새롭게 계산된다. 공정별, 단 NC 프로그램, 원자재의 입고, 외주공정 또는 외주품목의 입고 등이 종료되어야 끝나는 공정에 대해서는 일정시간의 여유시간을 추가로 부여할 수 있도록 고려하였다.

3.3.3 생산능력 제약을 완화한 일정계획 방법

앞서 설명한 알고리듬을 이용하면 생산능력을 고려하지 않은 상황에서 납기를 충족시킬 수 있는 공정별 작업시간대를 구할 수 있다. 그러나 현장으로 작업지시를 내려보내기 위해서는 생산자원별로 작업순서를 결정하여야 하며, 작업량이 생산능력을 초과하는 경우에는 외주 또는 초과근무를 이용하여 초과부하(overload)를 감소시켜야 한다. 본 연구에서는 작업자로 하여금 경험 및 선호도에 따라 외주 공정을 선택하는 접근방법을 선택하였기 때문에 외주공정을 선정하는 과정에서 최적화 기법을 활용하지 않았다.

잘 알려진 우선순위 규칙을 이용하여 일정계획을 수립하는 방법을 사용하되, 스케줄된 공정의 완료시간이 공정의 기준시점보다 큰 경우에 해당공정을 잠정적 외주공정처리하고, 외주의 결정여부는 사용자에게 일임하는 방법을 선택하였다. 단, 여러 가지 우선순위 규칙을 제공하고, 경험에 의하여 사용자가 원하는 우선순위 규칙을 선택할 수 있도록 하였다. 금형의 설계, 가공, 조립 리드타임이 길기 때문에 계획 담당자는 현재일로부터 최소 3일 후의 부하도표(load profile)를 보고 외주여부를 결정하도록 하였으며, 현재일로부터 3일까지의 일정계획을 고정시킴으로써 외부에서 발생한 사건이 생산현장의 일정계획에 미치는 영향을 최소화하고, 작업자로 하여금 자율권을 가지고 의사결정을 할 수 있도록 지원하였다.

4. 개발된 일정계획 시스템

본 장에서는 사용자 인터페이스를 중심으로 개발된 일정계획 시스템을 설명하고자 한다. <그림 5, 6, 7>은 개발된 사용자 인터페이스 중에서 현장 용어로 대일정, 중일정, 소일정 화면의 예이다. <그림 6>의 대일정은 금형 제작의 주요 단계, 즉 설계, 가공, 조립, 시험의 기준시점과 현재까지의 제작이 어떤 단계에 있으며, 남은 시간은 얼마인지를 한눈에 알아볼 수 있도록 하였다. 본 정보는 영업부서에서 금형을 주문한 고객에게 현황정보를 제공할 때에 사용가능하며, 실무자를 비롯한 관리자가 전체현황을 신속히 알아보기에 적합하다. 해당 금형에 대하여 보다 자세한 정보를 확인하고 싶을 때에는 해당 금형이 표시되어 있는 부분을 마우스로 누르면, <그림 6>의 중일정계획을 확인할 수 있다.

<그림 6>은 중일정계획을 나타낸다. 설계, 구매, NC프로그램 등의 준비여부, 외주여부, 완료여부, 납기지연 여부 등에 따라 막대로 나타낸 공정의 색상을 다르게 하였으며, 임계공정만을 색상을 달리하여 확인할 수 있다. 그리고 공정간의 선후행 관계 설정을 해당 화면에서 직접 수행할 수 있으며, 마우스의 포인터가 위치한 공정에 대한 상세 정보는 화면 하단에서 얻을 수 있다. 별도의 화면을 통한 설명은 생략하였으나, 공정

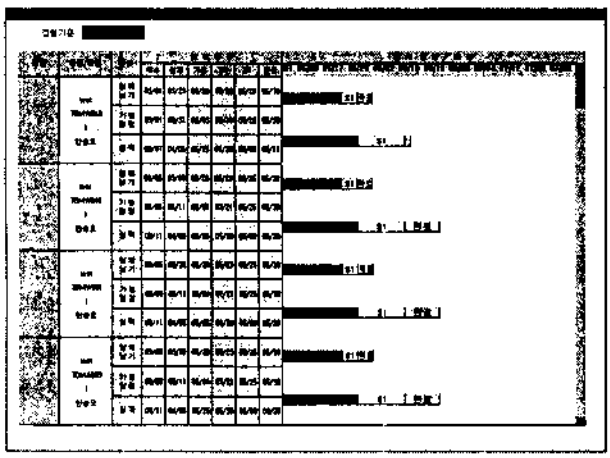

그림 5. 대일정계획의 그래픽 사용자 인터페이스.

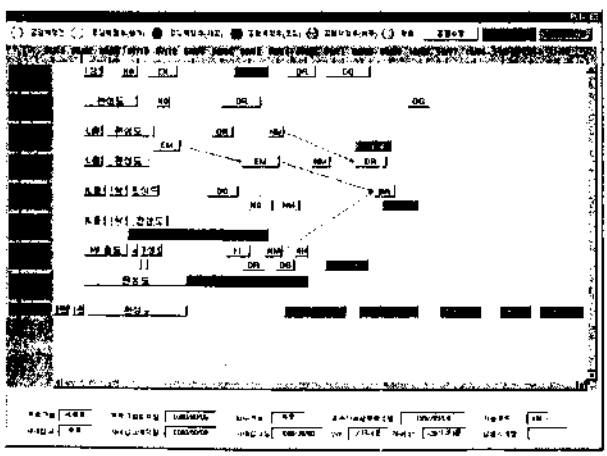

그림 6. 중일정계획의 그래픽 사용자 인터페이스.

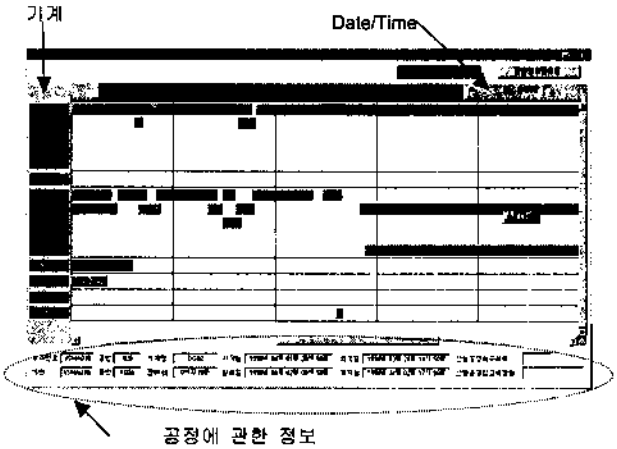

그림 7. 소일정계획의 그래픽 사용자 인터페이스.

정보(할당된 기계, 소요시간, 셋업시간, 외주여부 등)를 수정할 수 있는 인터페이스를 pop-up할 수 있도록 구성하였다.

<그림 7>은 자원기준의 간트차트로 생산자원별로 할당된 공정과 작업순서를 확인하고 수정할 수 있다. 본 인터페이스에서는 스케줄 조정이 필요한 공정을 마우스로 잡고 이동시킬 수 있으며, 일정 변경을 막을 수 있도록 고정시키는 기능을 제공한다. 미세한 스케줄 조정을 위하여 별도의 사용자 정보 입력화면을 pop-up 기능으로 제공하며, zoom-in, zoom-out 기능을 제공한다. <그림 7>에서 단일 기계의 특정 시점에 여러 개의 작업이 몰려 있는 것을 확인할 수 있으며, 이들 공정 중 일부는 사용자에 의하여 외주공정으로 처리되거나, 초과근무 등을 통하여 작업시간을 늘리게 된다.

개발된 시스템에서는 설명한 기능 외에도 의사결정에 따른 효과를 확인할 수 있는 시뮬레이션 기능이 제공되며, 시뮬레이션 시나리오와 결과는 스택(stack)으로 축적하여 합리적인 대안을 찾을 수 있도록 기능을 제공하였다.

5. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구는 생산현장의 특성에 부합하는 일정계획 시스템의 개발에 목적을 두고 있다. 최적화 알고리듬을 이용하여 생산성을 올리기보다는, 생산현장에서 중요하게 여겨지는 각종 제약조건을 충실히 반영하고, 사용자의 의사결정을 지원할 수 있도록 기능과 사용자 인터페이스를 설계함으로써 개발 이후 5년이 넘도록 애착을 가지고 계속적으로 개량/발전될 수 있는 시스템을 개발하였다는 데 의의가 있다. 아울러, 약 7만여 개의 공정을 대상으로 일정계획을 수립하는 데 15~20분 정도가 소요되었기 때문에 사용자 만족도는 크게 증가하였다. 이와 같은 성과는 일정계획 시스템의 합리적인 개발방향과 시스템 개발에 사용한 ILOG의 훌륭한 모델링 능력과 제약전파 능력에 기인한 것이라 판단된다. 기존 시스템과 비교할 때, 본 연구에서 개발된 시스템의 성능은 획기적인 것으로 평가되었다. 기존 시스템의 경우 같은 크기의 문제를 푸는 데 1시간 이상이 소요되었으며, 데이터베이스와의 입출력을 포함하면 3시간 이상 소모되어 일정계획

을 수립하는 작업은 야간에 배치로 처리되었다. 본 연구에서 개발된 시스템이 실시간에 일정계획 결과를 제시함으로써, 빈번한 재일정계획의 요구에 대처할 수 있으며, 다양한 시나리오에 대한 What-if 시뮬레이션을 통한 합리적인 의사결정을 가능하게 하였다.

향후 시스템 개선과제로는 (1) Web 기반으로 구성함으로써 사용자 편의성과 접근성을 확보하는 것이 필요하고, (2) 외주를 담당하는 협력업체와의 정보공유를 통하여 예기치 못한 사건에 대하여 신속한 조기경보 체계를 구성하는 것, (3) 신규금형의 납기예측과 납품가격 예측을 위하여 유사금형을 찾는 방법을 CBR(Case-Based Reasoning) 등을 이용하여 자동화하는 것 등을 들 수 있다. 아울러 (4) 납기지연과 생산능력을 초과하는 부하의 조정(예; 초과근무, 외주)에 소요되는 비용을 함께 고려하여 최소 비용의 생산능력 조정 대안을 생성하는 알고리듬 등을 현장에서 사용할 수 있는 시스템으로 개발하는 것이 필요하다고 본다. 아울러, 유럽의 일부 제조업체에서 확인할 수 있었던 수요예측, 판매계획, 생산계획, 구매계획, 설계계획 등을 중앙의 한 부서에서 집중적으로 계획하고, 관리하는 것과 같이 공급사슬관리를 위한 조직과 프로세스의 변혁을 국내에 적용하는 문제도 깊이 고려되어야 할 것이라고 판단된다(Wassermann, 1999).

참고문헌

강석호 (1986), *현대생산관리론*, 경세원.

금형의 개요 (1994), 금성사.

Ahuja, R. K., Mahnanti, T. L., and Orlin, J.B. (1993), *Network Flows*, Prentice-Hall.

Baker, K. R.(1974), *Introduction to Sequencing and Scheduling*, John Wiley & Sons.

Blazewicz, J., Lenstra, J. K., and Rinnooy Kan, A. H. G. (1983), Scheduling subject to resource constraints : classification and complexity, *Discrete Applied Mathematics*, 5, 11-24.

Chung, D. Y., Lee, K. C., Shin, K. T., and Park, J. W . (2000), An Approach to Job Shop Scheduling Problems with Due Date Constraints Considering Operation Subcontract, *International Conference on Production Research 2000*, Bangkok, Thailand.

Conway, R. W., Maxwell, W. L., and Miller, L. W. (1967), *Theory of Scheduling*, Addison-Wesley.

Holloway, C. A., and Nelson, R. T. (1973), Alternative formulation of the job shop problem with due dates. *Management Science*, 20(1), 65-75.

ILOG Scheduler 2.2 User Manual, ILOG.

ILOG Solver 3.2 User Manual, ILOG.

Lee, C. Y. (1997), Machine scheduling with availability constraint, *Journal of Global Optimization*, 9, 395-416.

Rainer, K. (1995), *Project Scheduling under Resource Constraints*, Physica-Verlag.

Talbot, B. (1982), Resource-constrained Project Scheduling with Time-resource Trade-offs : The Nonpreemptive Case, *Management Science*, 28, 1197-1210.

Vicent, C. S. W., and Tjer, W. V. D. S. (1997), A Framework for Decision Support in Production Scheduling Tasks, *Production Planning & Control*, 7(6).

Vollmann, T. E., Berry, W. L., and Whybark, D. C. (1997), *Manufacturing Planning and Control Systems*, McGraw-Hill.

Wassermann, O. (1999), *Intelligent Organization*, Springer-Verlag.

정 한 일
서울대학교 산업공학과 학사
서울대학교 산업공학과 석사
서울대학교 산업공학과 박사
서울대학교 자동화시스템공동연구소
현재: 대전대학교 정보시스템공학과 조교수
관심분야: ERP/SCM, 비즈니스 프로세스 모델링, 생산정보시스템

정 대 영
서울대학교 산업공학과 학사
서울대학교 산업공학과 석사
서울대학교 산업공학과 박사
현재: LG-EDS시스템 제조 엔지니어링사업부
관심분야: e-business 전략, ERP/SCM

김 기 동
서울대학교 산업공학과 학사
서울대학교 산업공학과 석사
서울대학교 산업공학과 박사
현재: 강원대학교 산업공학과 조교수
관심분야: ERP, 생산정보시스템, 스케줄링

박 찬 권
서울대학교 산업공학과 학사
서울대학교 산업공학과 석사
서울대학교 산업공학과 박사
서울대학교 자동화시스템공동연구소
현재: 영산대학교 정보경영학부 조교수
관심분야: ERP/EC, 생산정보시스템

박 진 우
서울대학교 공과대학 산업공학과 학사
한국과학원 산업공학과 석사
한국중공업 생산관리부
Univ. of Calif., Berkeley 산업공학과 박사
현재: 서울대학교 산업공학과 교수