동적계획모형을 이용한 근무형태 결정

김중순* · 안봉근** · 손달호***

Determination of Work Schedule Type by Dynamic Programming

Joong-soon Kim* · Bong-geun An** · Dal-ho Shon***

■ Abstract ■

In this paper, we applied dynamic programming to determining work schedule type. In dynamic programming formulation, each day during a planning horizon represents a stage for which a decision is made. The alternatives are given by work schedule types that combine regular time, overtime, additional shift, and so on. In this case, their associated return function is labor cost. The state is defined as the amount of work time allocated to stage 1, stage 2, ···, and current stage. A case study for a real manufacturing company was performed to apply dynamic programming to scheduling daily work hours during a week. The case study showed that total cost of our solution derived from dynamic programming decreased by about 6% as compared with the solution obtained from the previous method.

Keyword : Dynamic Programming Application, Scheduling, Work Schedule Type

1. 서 론

근무형태 결정은 예측수요와 등록된 수주를 근거로 작업부하량을 계산한 후 이를 기초로 잔업과 야근 작업의 실시 유무를 결정하는 것이다. 근무형태는 평일, 토요일, 그리고 일요일/공휴일에 따라

논문접수일 : 2003년 5월 6일 논문게재확정일 : 2003년 8월 20일
* 계명대학교 산업시스템공학과
** 계명대학교 경영학과
*** 계명대학교 경영정보학과

달라진다. 근무형태가 달라지면 1일 작업가능시간과 시간당 임금이 달라진다.

지금까지의 근무형태결정은 적절한 평가기준 없이 많은 대안 들 중의 하나인 가능해(feasible solution)를 선택하였다. 그래서 선택된 근무형태가 과연 좋은 방법인지 아니면 나쁜 방법인지를 평가할 수가 없었다. 근무형태 결정의 평가기준은 근무형태에 따라 달라지는 것이 무엇인가를 살펴보면 되리라고 본다. 근무형태에 따라 달라지는 것은 1일 작업가능시간과 시간당 임금이므로, 결국 시간제 생산직 근무자의 정규시간외 근무수당이 근무형태에 따라 달라지게 된다. 이에 본 연구에서는 근무형태 결정 문제의 평가기준으로 시간제 생산직 근무자의 임금을 사용할 수 있다는 것을 보여 주었다. 본 연구에서는 이러한 임금을 최소화하는 근무형태를 결정하고자 한다.

근무형태결정 문제를 수학적으로 표현하면 정수계획모형으로 모형화할 수 있다. 하지만 정수계획모형 자체가 쉽게 풀리는 문제가 아니므로 동적계획모형을 적용하여 보았다. 근무형태 결정문제는 동적계획법이 적용되고 있는 자본투자문제(Capital Investment Problem)와 비슷하며 일반적으로 계획기간(Planning Horizon)이 그리 길지 않아 계산상의 어려움이 별로 없다.

근무형태 결정은 실행되는 시점보다 적어도 한 달전에는 이루어져야 한다. 왜냐하면 야근에 소요되는 인력을 확보/충원하고 또한 이들을 교육시키는데 어느 정도의 시간을 필요로 하기 때문이다.

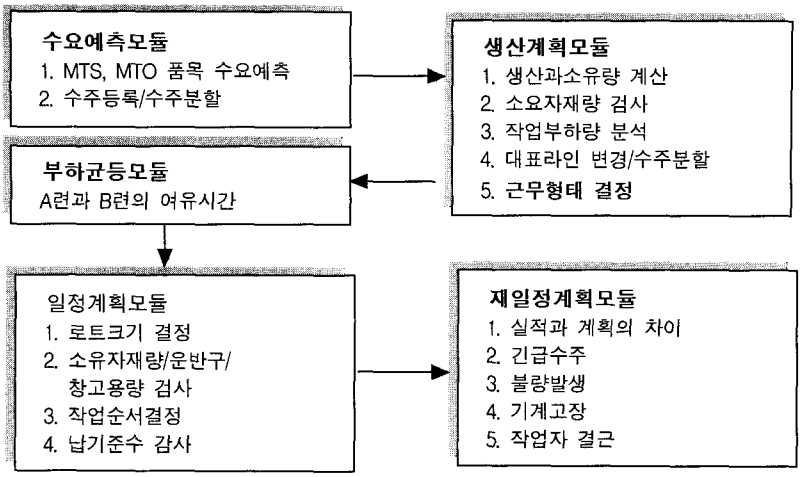
2. 근무형태 결정 문제의 발생

근무형태 결정 문제는 대구광역시에 소재하고 있는 P사의 OFP(Order Fulfillment Process)를 설계하면서 발생된 문제이다[2]. P사는 자동차 부품인 호스류, 방진/방유, 기타 특수고무제품에 사용되는 배합고무를 생산하고 있다. 생산시스템은 X, Y, Z의 3개 라인이 병렬로 구성되어 있으며, 각 라인은 A련과 B련이 직렬로 구성된 흐름생산시스템(Flow shop)이다. <표 1>에 3개 라인과 각 공정에 설치된 기계가 나타나 있다. 모든 라인은 똑같이 A련과 B련 공정으로 구성된다. A련의 공정은 혼합, 성형, 냉각, 자르기 공정으로 구성되어 있는데 이 중에서 자르기 공정은 A련이 마지막 공정인 경우에만 발생한다. 자르기 공정은 고객이 요구하는 대로 배합고무를 잘라 주는 공정이다. 이러한 이유 때문에 자르기 공정은 이탤릭체로 표시되어 있다. B련 공정은 A련 공정과 비슷하게 Kneader, Blending, Strip, 냉각, 자르기 공정으로 구성되어 있다. Kneader 공정은 반죽공정, Blending은 1차 성형공정, Strip 공정은 배합고무를 넓은 판으로 만드는 2

〈표 1〉 P사의 생산라인과 공정

공 정		라인 X	라인 Y	라인 Z
A 련	혼 합	Banbury 9호	Banbury 3호	Inter 7호
	성 형	TSR-280	TSR-240	24/16" Open Roller
	냉 각	BOM*	BOM	BOM
	자르기	*Sheet cutter*	*Sheet cutter*	*Sheet cutter*
B 련	Kneader	200*l*	75*l*	150*l*
	Blending	24"	22"	22"
	Strip	22"	22"	22"
	냉 각	BOM	BOM	BOM
	자르기	*Sheet cutter*	*Sheet cutter*	*Sheet cutter*
Batch당 무게		140Kg	67Kg	117Kg

주) * Batch off machine.



〈그림 1〉 OFP 모듈

차 성형공정이다. 여기서도 자르기 공정은 A련과 마찬가지로 마지막 공정인지 아닌지에 따라 발생하기도 하고 발생하지 않기도 한다. 제품의 특성 및 종류에 따라 배합종별이 다르다. 배합종별이란 A련, 숙성, B련을 거치는 공정순서를 말하며 총 10가지의 배합종별이 있다. <표 2>에 10가지의 배합종별이 나타나 있다. 그리고 제품의 종류와 그 거래처에 따라 X, Y, Z의 라인이 대표라인으로 결정되어 있다[2]. 고품질의 제품은 주로 Z라인에서 생산된다.

〈표 2〉 배합종별 공정

배합종별 번호	배합종별 설명
1	A
2	A1 → A2
3	A → B
4, 7	전A → M → 후A
5, 8	전A → M → 후B
6, 9	전A → 전B → M → 후B

OFP는 고객으로부터 주문을 받아 공장내에서 생산한 후 이를 고객에게 전달할때 까지의 전과정을 말한다. 이 과정은 크게 5개의 모듈로 구성되어 있다. <그림 1>에 OFP 모듈들이 나타나 있다.

수요예측모듈에서는 고객사의 생산계획과 과거 자료를 이용하여 각 제품별 수요를 예측한다. 고객사의 생산계획과 실제 주문 사이에는 차이가 많고 또한 납기까지의 시간이 제조인도기간(Manufacturing lead time)과 비교하여 짧기 때문에 제품별 수요를 예측하지 않을 수 없다. 이 점이 P사의 고민거리이다. **생산계획모듈**에서는 예측수요/수주를 근거로 배합종별과 충진율을 사용하여 라인별/련별 생산소요량을 계산하고, 또한 이에 필요한 자재소요량의 유무를 검토한 후 작업부하량을 분석한다. 여기서 부하량의 불균등이 발생하면 대표라인의 변경이나 수주분할을 한다. 이렇게 얻어진 작업부하량 자료를 근거로 하여 근무형태를 결정한다.

P사의 작업부하량을 계산하는 방법은 상당히 복잡하다. 예측수요/수주가 주어지면 제품의 사양 및 거래처에 따라 생산라인이 결정된다. 일반적으로 대표라인이 결정되어 있다. 대표라인이란 제품의 종류와 거래처가 명시되면 특별한 사정이 없는 한, 제품이 생산되는 라인이 X, Y, Z 라인 중의 하나로 결정되어 있는 라인을 말한다. 배합종별은 제품의 사양, 재질군, 원재료군에 의해 결정된다. 배합종별은 총 10개의 종류가 있는데 <표 2>에서 M(Maturation)은 숙성을 나타낸다. 숙성이란 고객이 요구하는 경도와 탄성을 고무제품이 유지하도록 A 또는 B 공정이 끝난 후 일정기간 동안 놓아 두는

〈표 3〉 생산소요량을 계산하는데 필요한 기호

SS_I(i, t)	제품 i의 t일 말의 적정재고수준((t + 1)일을 대비한, 생산소요량을 초과한 재고수준)
I(i, t)	제품 i의 t일 말의 재고수준(t = D이면 실제 재고수준, t > D이면 = SS_I(i, t))
d(i, t)	납기가 t일인 제품 i의 수주량
SS_WIP(i, t)	제품 i의 t일 말의 숙성품 적정재고수준((t + 1)일을 대비한, 소요량을 초과한 숙성 재고수준)
WIP(i, t)	제품 i의 t일 말의 실제 숙성 재고수준(t = D이면 실제 숙성재고수준, t > D이면 = SS_WIP(i, t))
CR1(i, k)	제품 i의 k라인에서의 1차 충진율
CR2(i, k)	제품 i의 k라인에서의 2차 충진율
BT	Batch
BTS1_B(i, k)	제품 i의 라인 k의 전B련 배치크기(kg/BT)
BTS2_B(i, k)	제품 i의 라인 k의 후B련 배치크기(kg/BT)
전A_PR(i, t)	제품 i의 t일의 숙성 전 A련 생산소요량 (kg단위)
전A_BT(i, k, t)	제품 i를 k라인에서 생산할 때 t일의 숙성 전 A련 생산소요량을 BT단위로 표시한 양
전B_PR(i, t)	제품 i의 t일의 숙성 전 B련 생산소요량 (kg단위)
전B_BT(i, k, t)	제품 i를 k라인에서 생산할 때 t일의 숙성 전 B련 생산소요량을 BT단위로 표시한 양
후B_PR(i, t)	제품 i의 t일의 숙성 후 B련 생산소요량 (kg단위)
후B_BT(i, k, t)	제품 i를 k라인에서 생산할 때 t일의 숙성 후 B련 생산소요량을 BT단위로 표시한 양
g(i)	제품 i에 따라 달라지는 파라메터, 계산된 BT수가 소수일 때 BT수를 결정하는 parameter
int(r, g(i))	실수 r의 소수점 이하가 g(i)이상이면 (r의 정수부분 + 1), g(i) 미만이면 r의 정수부분

것을 말한다. 숙성기간은 제품에 따라 다르지만 24시간 이내의 것과 24시간 이상의 것으로 분류하여 생산소요량을 결정하였다. <표 2>의 배합종별에서 4, 5, 6은 숙성기간이 24시간 이내의 것을 말하며, 배합종별 7, 8, 9는 숙성기간이 24시간 이상의 것을 말한다. <표 3>에는 생산소요량을 계산하기 위한 식에 사용되는 기호들이 정의되어 있다.

배합종별 9는 <전A → 전B → 숙성 → 후B>의 공정을 따른다. 전A/전B는 숙성전의 공정 A/B라는 뜻이고, 후B는 숙성 이후의 공정 B라는 뜻이다. 배합종별 9 제품의 생산소요량을 계산하는 공식이 다음 <표 4>에 주어져 있다. 배합종별에 따라 계산공식은 아주 다르다. 이렇게 공식이 복잡하여 지는 것은 1) 고객이 요구하는 양은 Kg 단위인데 회사의 생산계획은 Batch 단위로 수립되기 때문이며, 2) 라인별 련별 Batch 당 무게가 다르고, 3) 충진율 때문이다. 충진율이란 라인의 공정에 투입되는 양과 산출되는 양이 다르기 때문에 사용되는 용어이다. 충진율은 산출량(Kg)을 투입량(kg)으로 나눈 값이다. 이 값은 라인, 공정, 그리고 제품에 따라 달라진다. 이렇게 생산소요량이 Batch 단위로 계산되면 여기에다 Batch 당 주기시간을 곱하여 작업부하량을 구하고, 이를 일별 라인별 공정별로 할당하게 된다. 모든 예측수요/수주에 대해 동일한 방법으로 계산하여 일별 라인별 공정별로 누적시키면 된다.

〈표 4〉 배합종별 9 제품의 생산소요량 계산 공식

```
후B_PR(I, t) = SS_I(i, t) + d(i, t) - I(i, t-1)
후B_BT(i ,k, t) = int(후B_PR(i, t)/BTS2_B(i, k), g(i))
B_PR = 후B_BT(i, k, t) * BTS2_B(i, k)
전B_PR(i, t) = SS_WIP(i, t) - WIP(i, t-1)
             + B_PR/CR2(i, k)
전B_BT(i, k, t) = int(전B_PR(i, t)/BTS1_B(i, k), g(i))
A_PR = 전B_BT(i, k, t) * BTS1_B(i, k)
전A_PR(i, t) = A_PR / CR1(i, k)
전A_BT(i, k, t) = int(전A_PR(i, t)/BTS_A(i, k), g(i))
```

부하균등모듈에서는 배합종별 자료와 A련과 B련의 여유시간을 참작하여 수주들을 납기보다 먼저 생산하게 함으로써 라인 또는 공정간의 작업부하량이 균등하게 되도록 조정한다. **일정계획모듈**에서는 로트크기 결정, 운반구/원자재/창고용량 조건 검사, 상극성/폴리머이동공정최소화/웨이브 조건들을 고려한 로트투입순서 결정, 납기내 생산가능성 등을 검사한다. 마지막으로 **재일정계획모듈**

에서는 실적과 계획의 차이, 긴급수주. 불량발생, 기계고장, 작업자 결근 등에 의한 일정계획의 수정을 할 수 있게 한다.

근무형태 결정은 생산계획모듈의 가장 마지막 소모듈이다. 근무형태는 평일, 근무토요일, 일요일/공휴일/휴무토요일에 따라 달라진다. 평일에는 정상근무, 정상근무+야간근무, 정상근무+잔업+야간근무, 정상근무+잔업 등의 근무형태가 있다. 근무토요일은 정상, 정상+야간근무, 정상근무+잔업+야간근무, 정상근무+ 잔업+야간근무+특 등의 근무형태가 있다. 그리고 일요일/공휴일/휴무토요일에는 특정상, 특정상+특잔업, 특정상+특잔업+특야간근무 등의 근무형태가 있다. 정상근무, 잔업, 야간근무 등을 본 연구에서는 근무종류로 사용한다. 즉 근무형태와 달리 사용된다. P사에서는 근무종류의 일부분만을 사용할 수는 없다. 즉 잔업가능시간이 3시간이면 더 필요한 시간이 1시간이더라도 잔업을 하게 되면 3시간의 잔업계획을 세워야 한다는 것이다. 이러한 이유 때문에 부하균등모듈이 필요하게 된다. 근무형태 결정 문제는 납기를 준수하면서(납기보다 먼저 생산하는 것은 가능하지만 납기보다 늦게 생산하는 것은 불가능하고 납기보다 먼저 생산함으로써 발생하는 재고유지비용은 무시함) 계획기간 동안의 작업부하량을 최소의 비용으로 소화할 수 있는 근무형태를 결정하는 것이다.

3. 근무형태 결정 문제의 수학적 모형

3.1 기호의 정의

근무형태 결정 문제를 수학적으로 표현하는 데 필요한 기호를 정의하면 다음과 같다.

t 계획기간을 나타내는 첨자, t = 1, 2, …, n (일, 월, …, 토)

j 근무의 종류를 나타내는 첨자, j = A, B, C, 특A, 특B, 특C. A는 정상근무, B는 잔업, C는 야간근무를 의미하며, 공휴일/휴무토요일/일요일에는 특을 붙여 사용함.

i 근무형태를 나타내는 첨자, i = 1, 2, …, l. 근무형태는 근무종류의 조합임.
i = 1 : A
i = 2 : A + C
i = 3 : A + B + C
i = 4 : A + B

C_{jt} 계획기간 t, 근무종류 j의 분당 임금(원/분)

W_t 납기가 t인 작업부하량(분), 일요일이 납기인 작업은 없음

h_{jt} 계획기간 t의 근무종류 j의 작업가능시간(분)

H_{it} 계획기간 t의 근무형태 i의 작업가능시간(분)

$$H_{it} = \sum_{all\ j \in i} h_{jt}$$

TC_{it} 계획기간 t, 근무형태 i에 대한 임금(원)

$$TC_{it} = \sum_{all\ j \in i} h_{jt} C_{jt}$$

3.2 수학적 모형

의사결정변수(Decision variable)를 X_{it}라고 하면 다음과 같이 정의된다.

X_{it} 계획기간 t에 근무형태 i를 택하였을 때는 1, 그렇지 않으면 0을 취하는 0, 1 변수

본 연구의 근무형태 결정문제를 수학적으로 표현하면 다음과 같은 0-1 정수선형계획문제가 된다.

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^{n} \sum_{all\ i} TC_{it} \times X_{it} \quad (1)$$

$$\text{st } \sum_{t=1}^{k} W_t \le \sum_{t=1}^{k} \sum_{all\ i} X_{it} H_{it},\ k = 1, 2, \cdots, n. \quad (2)$$

$$\sum_{all\ i} X_{it} = 1,\ t = 1, 2, \cdots, n. \quad (3)$$

$$X_{i,t} = 0 \text{ 또는 } 1,\ i = 1, 2, \cdots, I,\ t = 1, 2, \cdots, n. \quad (4)$$

식 (1)에 주어진 목적함수 Z는 모든 계획기간 동안의 근무형태에 따른 임금을 최소화 하는 것이 목

적임을 나타내고 있다. 제약조건식 (2)는 납기보다 먼저 생산할 수는 있어도 납기보다 늦게 생산할 수는 없다는 것을 표현하고 있다. 제약조건식 (3)은 하나의 계획기간 중에 선택할 수 있는 근무형태는 오직 한 가지뿐이라는 것을 나타내고 있다. (4)식은 의사결정변수 $X_{i,t}$는 0과 1만을 취할 수 있는 0-1 변수라는 것을 나타내고 있다.

위의 0-1 정수선형계획문제는 일반적으로 NP-Hard 문제로 알려져 있으므로 변수의 수가 많지 않더라도 쉽게 풀 수 있는 문제는 아닌 것으로 보인다. 이 문제를 어느 정도 쉽게 해결할 수 있는 동적계획모형(Dynamic Programming)을 다음 장에서 제시하고자 한다.

4. 동적계획모형

동적계획모형은 최적성의 원리(The Principle of Optimality)에 기초를 두고, 완전 열거법(Full Enumeration)으로 인한 계산의 양을 줄이고자 사용된다. 동적계획모형은 1차원상태(One-dimensional State)문제와 다차원상태(Multidimensional State)문제로 분류될 수 있다. 또한 이산형 대안(Discrete Alternatives)문제와 연속형 의사결정변수(Continuous Decision Variable)문제로 분류될 수 있다[5]. 본 연구의 근무형태 결정문제는 1차원상태문제인 동시에 이산형대안문제에 속한다.

동적계획모형은 생산계획문제(Production Planning)[6], 로트크기 결정문제(Lot Sizing)[9], 작업순서결정문제(Sequencing)[3], 자본투자문제[1], 선적문제(Shipping Problem)[1], 조달문제(Procurement Problem)[4], 설비교체문제(Replacement Problem)[7], 신뢰성문제(Reliability Problem)[1] 등의 최적화 문제에 대한 최적해를 제공해 주는 기법 중의 하나이다. 목적함수가 각 단계의 손익함수 들의 합으로 표현이 가능하거나 목적함수에 상용로그를 취하였을 때 각 단계의 손익함수의 상용로그의 합으로 표현 가능하면 동적계획모형을 적용할 수 있다[3]. 이것을 목적함수의 가법성(additive form)이라고 한다. 근무형태 결정문제의 목적함수 Z는 $(\sum_{all\ i} TC_{it} \times X_{it})$의 합으로 표현되어 있으므로 동적계획모형의 적용이 가능함을 알 수 있다.

동적계획모형을 수립하기 위해서는 단계(stage), 대안(alternatives) 또는 의사결정변수(decision variables)와 그 손익함수(return function), 상태(states)들을 정의하여야 한다[5]. 본 문제에서 단계는 계획기간이 된다. 계획기간은 대안 또는 의사결정변수가 선택되는 부분이다. 여기서는 계획기간마다 근무형태를 결정하여야 하므로 계획기간 즉 요일이 단계가 된다. 요일의 종류에 따라 선택할 수 있는 근무형태가 달라진다. 대안 또는 의사결정변수는 선택할 수 있는 근무형태가 된다. 즉 정상근무, 정상근무+야간근무 등이 대안이 된다. 손익함수는 목적함수에 주어진 근무형태에 따른 임금이다. 그리고 가장 중요한 부분이 상태변수를 정의하는 것이다. 그것은 상태변수가 각 단계들을 연결시키는 고리 역할을 하기 때문이다. 상태변수를 정의하는 것이 쉬운 일은 아니지만 다음의 2가지 질문을 생각해 보면 그 실마리를 찾을 수 있다.

(1) 각 단계들을 연결시키는 고리 역할을 하는 것은 무엇인가?
(2) 앞 단계에서 결정된 해의 실행가능성(feasibility)을 검토하지 않고 현 단계에서 실행가능한 해를 구하는데 필요한 정보는 무엇인가?

본 문제에서 상태변수는 근무형태에 따른 계획기간의 작업가능시간의 합이 된다. 본 연구에서는 전진(forward) 동적계획모형을 사용하게 되는데 각 단계에서의 상태변수는 계획기간 동안의 총작업부하량 보다 커야 한다.

A_t를 계획기간 t일의 근무형태에서 가능한 작업시간의 최대값(단위 분)이라고 하면, $A_t = \max_{all\ i} [H_{it}]$가 된다. 그리고 S_t를 계획기간 1에서 t일 까지 근무형태 결정에 의해 결정된 가능한 총작업시간을 나타내는 상태변수라 하자. 상태변수 S_t는 계획기간 1에서 계획기간 t까지의 총작업부하량 이상

이어야 한다. 왜냐하면 납기 이후의 제품생산은 허용되지 않기 때문이다. 또한 상태변수 S_t는 계획기간 1에서 계획기간 t까지의 가능한 작업시간의 최대값들의 합 이하 라야 한다. 왜냐하면 상태변수 S_t에 그 이상의 시간을 할당할 수 없기 때문이다. 즉 상태변수 S_t는 다음 식 (5)를 만족하여야 한다. S_n은 계획기간 동안의 작업부하량의 총합이거나 아니면 그 이상이 될 것이다. 왜냐하면 근무형태에서 근무종류의 일부분 만을 할당할 수는 없기 때문이다.

$$W_1 + W_2 + \cdots + W_t \le S_t \le A_1 + A_2 + \cdots + A_t \quad (5)$$

$f_t(S_t)$ 를 S_t 하에서 계획기간 1에서 t까지의 비용의 최소값이라고 하면 동적계획모형의 순환식(Recursive Equation)은 다음 식 (6)과 같이 표현된다.

$$f_t(S_t) = \min_i \{TC_{it} + f_{t-1}(S_t - H_{it})\} \quad (6)$$

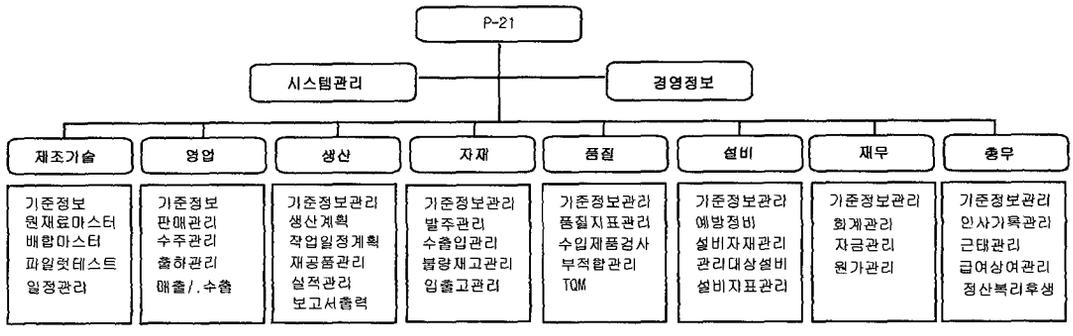
그리고 초기값인 $f_0(S_0)$는 0이다. 전진법으로 $f_1(S_1)$부터 시작하여 $f_n(S_n)$까지 차례대로 계산하면 된다. $f_n(S_n)$을 구한 후 거꾸로 H_{it}들을 구할 수 있으므로 각 단계의 근무형태는 결정된다.

5. 적용 사례

본 연구에서 연구대상으로 하고 있는 P사는 1993년에 설립되어 다양한 종류의 배합고무를 제조하여 판매하는 회사이다. 총자산 24,881(백만원), 자기자본 11,257(백만원), 자본금 9,700(백만원)으로 현대자동차 1차 공급자인 P산업에게 배합고무를 제조하여 판매하고 있다. 특히 이 회사에서 생산되는 배합고무는 자동차 부품과 산업용 고무제품의 원자재로 사용된다. 특히 P사는 라인 및 공정별로 Fool-Proof System을 구축하고 있으며 SQC 기반구축, 공정검사의 On-Line화, 라인 및 공정 별로 작업지시를 내리고 또한 실적 Data를 실시간(Real Time)으로 집계/관리하는 POP(Point Of Production)를 구축하고 있다.

P사는 1998년에 <그림 2>에 나타난 바와 같이 제조기술, 영업, 생산, 자재 및 총무 등 모든 분야를 포함하는 전사적 정보시스템인 P-21(가칭)을 구축하였다. 그러나 기존의 P-21 이 수요예측, 생산계획, 일정계획, 자재의 재고관리 부분을 지원하고 있지 못하고 있어, 저자들을 포함한 OFP TFT (Task Force Team)는 차제에 이러한 부분들이 모두 포함되고 또한 e-Business에 대응할 수 있는 Extended-ERP 시스템을 개발하였다. 저자들은 OFP의 전체로직 개발을 담당하였으며 그 과정 중에 근무형태 결정문제가 포함되어 있다.

P사의 근무형태 결정 문제를 정의하는데 필요한 자료는 <표 5>에서 <표 10>까지에 나타나 있다. 여기에 나타난 자료는 P사의 실제 값을 그대로 표현하고 있지는 않으며 약간 수정되어 있다. 왜냐하면 회사의 기밀사항이 될 수 있기 때문이다. 본 연구에서의 계획기간 단위는 1일이며, 매일 오전 8시부터 다음 날 오전 8시 까지가 1일이다. <표 5>에



〈그림 2〉 P-21 구조

는 요일별 근무종류에 따른 작업가능시간이 나타나 있다. <표 6>에는 요일별 근무종류에 따른 임금 C_{jt}의 상대적 비율이 나타나 있다. 즉 평일 정상근무의 분당 임금을 1로 두었을 때의 상대적 비율을 나타낸다. <표 7>에서 <표 9>까지에는 요일별 근무형태에 따른 최대작업가능시간과 상대적 임금이 나타나 있다. <표 7>에는 평일, <표 8>에는 근무토요일, <표 9>에는 휴무토요일/일요일/공휴일에 관한 자료가 각각 나타나 있다.

〈표 5〉 요일별 근무종류의 작업가능시간

(단위 : 분)

요 일	A	B	C
평 일	480	210	600
토요일	240	240	240
토요일연장	240	810	
특 근	480	210	600

〈표 6〉 요일별 근무종류에 따른 임금의 상대적 비율

요 일	A	B	C
평 일	1	2	1.5
토요일	1	1.5	1.5
토요일연장	1	2	
특 근	1.5	1.5	2

〈표 7〉 평일(월~금) 근무형태의 작업가능시간 및 그 비용

근무형태 i	설 명	H_{it}	TC_{it}
1	A	480	480
2	A + C	1080	1380
3	A + B + C	1290	1695
4	A + B	690	900

〈표 8〉 근무토요일 근무형태의 작업가능시간 및 그 비용

근무형태 i	설 명	H_{it}	TC_{it}
1	A	240	240
2	A + C	480	600
3	A + B + C	720	960
4	토요연장	1050	1860

〈표 9〉 휴무토요일/일요일/공휴일 근무형태의 작업가능시간 및 그 비용

근무형태 i	설 명	H_{it}	TC_{it}
1	특A	480	720
2	특A + 특B	690	1035
3	특A + 특B + 특C	1290	2235

<표 5>과 <표 6>의 자료를 이용하면 <표 7>, <표 8>, <표 9>의 자료를 구할 수 있다. 예를 들어 <표 7> 근무형태 2의 H_{it}는 <표 5>의 평일 A 값과 C값을 더하면 된다. 즉 480 + 600 = 1080이 된다. 그리고 TC_{it}는 4801 + 6001.5 = 1380이 된다. <표 10>에는 요일별 수주량에 대한 작업부하량이 나타나 있다. 이 작업부하량은 한 라인의 공정별 자료로 간주하면 된다. 즉 X 라인의 A련 자료로 보면 된다. P사의 생산라인은 자동화된 흐름생산라인이기 때문에 기계가 제약조건으로 작용하는(machine-limited) 생산시스템이라 인력을 충원시키더라도 생산량을 마음대로 증가시킬 수 있는 것은 아니다. <표 10>에 있는 자료는 상당한 가공과정을 거쳐 만들어진 자료이다. 배합종별에 따른 충진율을 고려하여 서론 부분에서 설명된 바와 같이 <표 4>에 나타나 있는 복잡한 식에 의해 양과 시점(작업부하량이 배정된 시점)이 계산되어 있다.

〈표 10〉 요일별 수주량에 대한 작업부하량 W_t

(단위 : 분)

요일	일	월	화	수	목	금	토	합계
W_t	0	700	1000	1200	800	800	900	5400

동적계획모형을 수립하는데 가장 어려운 점이 상태변수를 정의하는 것인데 여기서도 마찬가지로 상태변수를 정의하기가 쉽지 않았다. 정의를 하더라도 또한 계산상에서의 상태변수를 계산하는 것 또한 어렵다. 토요일의 상태변수가 <표 10>에서 보는 바와 같이 5400이 되면 좋은데 사실은 회사의 방침 때문에 5400분 이상이 될 수 있기 때문에 단계마다 주의를 기울여야 한다. 근무형태마다 이용가

능한 작업시간이 이미 결정되어 있으므로 각 단계에서의 취할 수 있는 상태변수의 값을 계산할 수가 있다. 다음 단계의 상태변수의 값을 계산하는 방법은 현 단계의 상태변수의 값에 다음 단계의 근무형태에 따른 작업가능시간 $H_{i,t}$를 더하여 취할 수 있는 상태변수의 값을 만들어 낼 수 있다.

P사 사례의 근무형태 결정 문제는 단계가 총 7단계이고, 근무형태는 요일에 따라 달라진다. <표 5>에서 <표 10>까지의 자료를 이용하여 동적계획모형으로 근무형태의 최적해를 구하는 과정의 일부분이 다음 <표 11>에서 <표 15>까지에 나타나 있다.

<표 11>의 단계 1은 일요일을 나타내며, 가능한 근무형태는 4가지가 있다. 일요일에는 근무를 하지 않는 대안이 있을 수 있으므로 총 4가지의 대안이 가능하다. <표 9>의 3가지 대안에 아무것도 하지 않는 대안을 고려하면 총 4가지 대안이 된다. 일요일/공휴일/휴무토요일이 아닌 경우에는 적어도 정상근무는 해야 하므로 아무 것도 하지 않는 대안은 있을 수가 없다. 단계 1에서의 상태변수 S_1은 0에서 A_1까지이고, 실제로는 0, 480, 690, 1290이다. 물론 여기서 $S_0 = 0$, $f_0(S_0) = 0$이다.

〈표 11〉 단계 1의 계산표

단계 1	일요일		
S_1	$H_{i,1}$	$TC_{i,1}$	$f_1(S_1)$
0	0	0	0
480	480	720	720
690	690	1035	1035
1290	1290	2235	2235

<표 12>에는 단계 2의 계산과정이 나타나 있다. 여기서 상태변수 S_2는, S_1이 4가지이고 근무형태가 4가지이므로 총 $4\times4 = 16$가지 경우가 나올 수 있다. 그 중에서 S_2가 700미만(480과 690) 되는 것은 이후의 계산에서 제외된다. 왜냐하면 월요일 까지의 누적부하량이 700이기 때문이다. 사용가능한 S_2는 앞의 두 경우를 제외하고 또한 중복되는 네 경우를 제외하면 총 10가지가 된다. $H_{i,2}$와 S_1을 합하면 S_2가 되며, $TC_{i,2}$와 $f_1(S_1)$을 합하면 $f_2(S_2)$가 된다. 동일한 S_2인 경우 가장 작은 값이 $f_2(S_2)$로 선택된다. 예를 들어 $S_2 = 1170$이 되는 경우가 두 가지인데 그 중 작은 값인 1515가 $f_2(S_2)$로 선택된다.

〈표 12〉 단계 2의 계산표

단계 2	월요일				
S_2	$H_{i,2}$	$TC_{i,2}$	S_1	$f_1(S_1)$	$f_2(S_2)$
480	480	480	0	0	480
690	690	900	0	0	900
960	480	480	480	720	1200
1080	1080	1380	0	0	1380
1170	690	900	480	720	1620
1170	480	480	690	1035	1515
1290	1290	1695	0	0	1695
1380	690	900	690	1035	1935
1560	1080	1380	480	720	2100
1770	1290	1695	480	720	2415
1770	1080	1380	690	1035	2415
1770	480	480	1290	2235	2715
1980	1290	1695	690	1035	2730
1980	690	900	1290	2235	3135
2370	1080	1380	1290	2235	3615
2580	1290	1695	1290	2235	3930

<표 13>에는 단계 3의 계산과정이 나타나 있다. 단계 3에서는 S_2가 10가지이고 $H_{i,3}$가 4가지 이므로 S_3는 총 40가지가 될 것이다. 단계 2에서 제외한 방법과 마찬가지로 제외하면, 40가지 중에서 가능한 경우는 총 16가지가 된다. 단계 2에서 제외하는 방법외에 단계 3에서 더 사용된 제외 방법이 있다. 그것은 상태변수가 작은데도 불구하고 $f_3(S_3)$가 더 큰 경우가 있으면 이것도 제외하는 것이다. 왜냐하면 더 작은 비용으로 더 많은 작업시간을 사용할 수 있기 때문이다. 예를 들어 $S_3 = 2070$, $f_3(S_3) = 2835$인 경우는 $S_3 = 2160$, $f_3(S_3) = 2760$가 있기 때문에 제외된다. 단계 4에서는 총 64 경우가 나열될 것이다.

〈표 13〉 단계 3의 계산표

단계3	화요일				
S_3	$H_{i,3}$	$TC_{i,3}$	S_2	$f_2(S_2)$	$f_3(S_3)$
1440	480	480	960	1200	1680
1560	480	480	1080	1380	1860
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1980	690	900	1290	1695	2595
2040	1080	1380	960	1200	2580
2040	480	480	1560	2100	2580
2070	690	900	1380	1935	2835
2160	1080	1380	1080	1380	2760
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3660	1080	1380	2580	3930	5310
3870	1290	1695	2580	3930	5625

〈표 14〉 단계 5의 계산표

단계 5	목요일				
S_5	$H_{i,5}$	$TC_{i,5}$	S_4	$f_5(S_4)$	$f_5(S_5)$
3420	480	480	2940	3690	4170
3540	480	480	3060	3870	4350
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
4140	480	480	3660	4770	5250
4200	1080	1380	3120	3960	5340
4200	480	480	3720	4860	5340
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
5250	1290	1695	3960	5325	7020
5250	690	900	4560	6120	7020
5430	1290	1695	4140	5490	7185
5430	1080	1380	4350	5805	7185
5430	690	900	4740	6690	7590
5430	480	480	4950	7005	7485
5640	1290	1695	4350	5805	7500
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
5850	690	900	5160	7320	8220
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

이와 같이 계산하여 보면 <표 14>에서 보는 바와 같이 단계 5에서 상태변수 S_5가 총작업부하량 5400을 초과하는 것이 나오는데, 실제로 5400을 초과하는 상태변수는 무의미하다. 왜냐하면 너무 많은 작업시간을 계획하기 때문이다. 그래서 약간의 버퍼를 두고(30 정도의 버퍼를 두었음) 5430 이상의 상태변수 값은 그 이후 단계에서 제외시켰다.

<표 15>에서 단계 7의 토요일은 휴무가 아니고 근무토요일이라 최소한 오전 근무는 하여야 하므로 가능한 근무형태는 4가지 이다. 휴무토요일인 경우에는 근무를 하지 않는 대안이 있으므로 가능한 근무형태는 총 5가지가 될 것이다.

〈표 15〉 단계 7의 계산표

단계 7	토요일				
S_7	$H_{i,7}$	$TC_{i,7}$	S_6	$f_6(S_6)$	$f_7(S_7)$
4740	240	240	4500	5550	5790
4860	240	240	4620	5730	5970
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
5370	480	600	4890	6135	6735
5400	720	960	4680	5820	6780
5400	480	600	4920	6285	6885
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
6540	1050	1860	5490	7035	8895

최적해는 총비용이 6780이 되는 대안이며, 일요일은 근무형태 1인 특A, 토요일은 근무형태 3인 A + B + C, 월/금요일은 근무형태 1인 A, 화/수/목요일은 근무형태 3인 A + C가 되는 안이 최적해이다. 최적해의 하나가 각 표의 행에 음영으로 표시되어 있다.

6. 토의 및 결론

회사에서 계획기간 동안의 근무형태 결정 문제에 대해 기준과 방법이 결정되어 있지 않아 어려움을 겪고 있었으나 이를 해결할 수 있었다. 과거에는 각 요일별로 누적작업부하량을 먼저 구한 후, 누적작업부하량보다 누적작업가능시간이 더 큰 근무형태 중에서 작업가능시간이 가장 작은 근무형태를 취하는 방법을 택하였다. 과거의 방법으로 적

용사례를 풀어 보면 월/금요일은 A+C, 화/목요일은 A+B, 수/토요일은 A+B+C의 근무형태를 취하고 총비용은 7215가 된다. 동적계획모형에 의한 최적해보다 약 6.42%가 많다. 직접노무비의 6.42%는 원가에 큰 영향을 미치리라고 본다. 본 문제를 푸는데는 많은 계산을 필요로 하나 계획기간의 수(많아야 14 기간 즉 2주)가 많지 않으므로 크게 걱정할 필요는 없다. 그러나 각 단계에서 대안들이 이산적(discrete)이라 일일이 대안들을 나열해야 하는 번거로움이 있다. 작성된 프로그램으로 실제 문제를 푸는데 현재의 Pentium 컴퓨터로는 거의 시간이 걸리지 않는다.

그리고 P사의 가장 중요한 평가기준이 납기준수이고 또한 재고유지비용이 크게 중요하지 않기 때문에 재고유지비용이 평가기준 즉 목적함수에 전혀 고려되지 않았다. 재고유지비용을 고려해야 한다면 큰 어려움 없이 목적함수에 그 비용을 포함시키면 되리라고 본다.

본 문제는 수송기법(Transportation Technique)으로 쉽게 해결될 수 있을 것 같으나 수송기법으로 풀기는 어렵다. 왜냐하면 근무형태가 이미 결정되어 있어 근무종류의 일부분을 사용할 수가 없고 또한 근무형태가 1, 2, 3, 4의 순서로 선택되어야 하기 때문이다.

본 연구의 기법인 동적계획모형은 목적함수의 가법성만 만족되면 어떠한 종류의 문제에도 적용할 수가 있다. 그러나 다차원 상태의 문제이거나 또는 1차원 상태의 문제이더라도 이산형 대안의 문제인 경우 계산의 양이 많아서 현실문제에 적용하기가 어렵다. 계산의 양이 많아지는 단점은 있으나, 프로그램으로 작성되어 있지 않더라도 EXCEL과 같은 Spread Sheet 프로그램을 사용하면 이러한 단점을 쉽게 해결 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] 강석호, 「Operations Research」, 7판, 영지문화사, 1985.

[2] 안봉근, 김중순, 손달호, 「OFP 프로젝트 최종보고서」, (주)평화 CMB, 2002.

[3] Baker, K.R., *Elements of Sequencing and Scheduling*, Paperback, 1995.

[4] Bellman, R.E., "On a dynamic programming approach to caterer problem I," *Management Science*, Vol.3(1957), pp.270-278.

[5] Bellman, R.E. and S.E. Dreyfus, *Applied Dynamic Programming*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1962.

[6] Bensoussan, A., M. Crouhy and J.-M. Proth, *Mathematical Theory of Production Planning*, Elsewier Science Publisher B.V., New York, 1983.

[7] Sinden, W., "The replacement and expansion of durable equipment," *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, Vol.8(1960), pp.466-480.

[8] Taha, H. A., *Operations Research : an introduction*, Macmillan, New York, 2nd Ed., 1976.

[9] Wagner, H. and T.M. Whitin, "Dynamic version of the economic lot size model," *Management Science*, Vol.5, No.1(1958), pp.89-96.