

## 복수 제품의 병렬 생산 설비별 생산량 할당 방법에 관한 연구\*

김 태 복\*\*

### Apportioning the Production Quantities into Parallel Production Facilities for Multiple Products\*

Taebok Kim\*\*

#### ■ Abstract ■

To realize the mass customization entails the optimized supply chain design for efficiently producing and delivering the various products. In this study, we considered the problem obtaining the optimized production policy under the situation wherein the multiple products are apportioned into multiple parallel production facilities. More specifically, the production set-up costs incurs according to whether the production facilities are utilized or not. The facility-dependent set-up costs increase the problem complexity in solving the production apportioning problem for multiple products. This problem can be formulated as concave minimization problem, which is known as NP-hard problem. In this paper, a heuristic algorithm is proposed to solve two conjoint problems : one is to select the cost-effective facilities from alternative multiple production facilities and the other is to apportion the production lot to those selected facilities.

Keywords : Mass Customization, Multiple Production Facilities, NP-hard

논문접수일 : 2007년 01월 05일 논문게재확정일 : 2007년 05월 09일

\* 이 논문은 인천대학교 2006년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

\*\* 인천대학교 동북아물류대학원

## 1. 서 론

다양한 고객 수요에 대응하기 위한 대량 고객화(mass customization) 전략의 실현은 제조업체의 공급망 운영에 있어서 중요한 이슈로 대두되고 있다[11]. 이를 위해 제조라인 운영의 유연성, 제조 인력의 다기능화 등의 개선이 지속적으로 진행되어 왔다. 다품종 소량 생산을 위한 제조 라인의 특성은 기존의 대량 생산을 위한 단일 공장의 형태에서 병렬 라인, 셀 라인 등과 같은 병렬화된 생산 설비 형태를 구성하는 추세이다 [2, 7, 8]. 공급망 운영의 상위 단계에서는 기업이 운영하는 글로벌 생산기지의 효율적인 운영을 위한 복수 공장 조정(multiple plant coordination) 이슈 또한 이러한 복수 생산 설비의 하나의 예가 될 것이다. 또한, 고객의 수요에 효율적인 대응을 위한 고객 대응 자원의 효과적인 활용방안으로 재고 통합(inventory pooling)과 생산능력통합(capacity pooling)등의 대안이 큰 관심사가 되고 있는 현실이다. 따라서, 복수 생산기지(multiple production sites) 환경하에서의 대량 고객화 운영 이슈가 해결해 나가야 할 중요한 과제로 부각되고 있다. 다양한 제품을 주어진 복수개의 글로벌 생산 기지를 가동하여 효율적으로 생산하기 위해서는 제품별 생산기지의 선정 및 해당하는 생산 기지별 생산량을 결정이 체계적인 구도하에서 수행될 필요가 있다. 따라서, 복수개의 제품을 다루는 공급망 체계하에서의 단위 설비, 생산라인, 공장, 생산 기지 등 복수개의 생산 활동 단위를 대상으로 하는 생산량 할당비를 결정에 대한 문제를 생각해 볼 수 있다. Ghodsypour and O'Brien[3]은 제품가격(net price), 저장 및 운송, 그리고 주문 비용 등을 고려한 복수 소싱(multiple sourcing) 문제 해결을 위해 혼합 정수 비선형 계획 모델(mixed integer non-linear programming model)을 제안하였다. Herer, Rosenblatt, and Hefter[4]는 단일 소스 고정비용 운송 모델(single-sink fixed-charge transportation problem)의 구조를 소개하고 열거(enumeration)

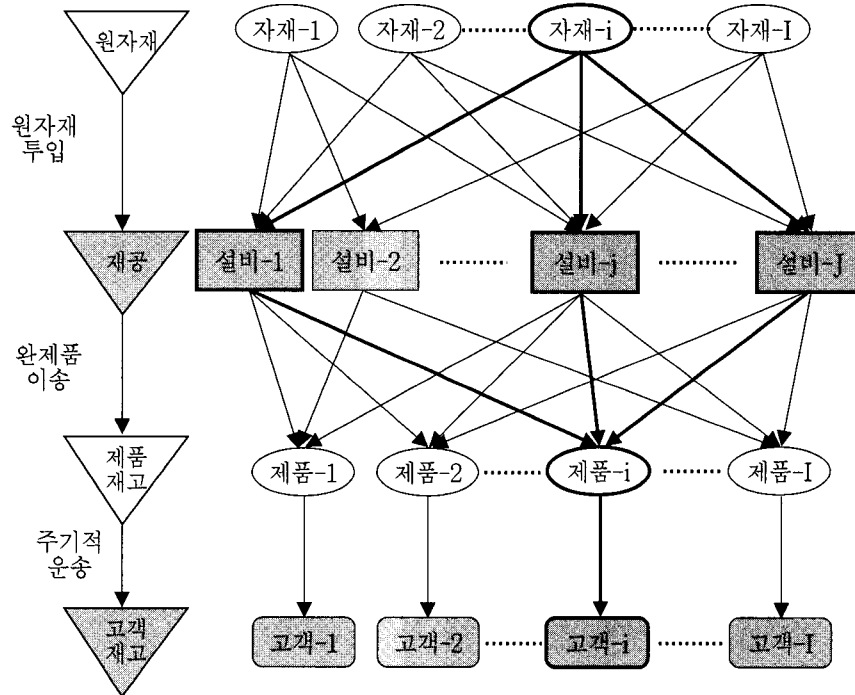
기법에 방법을 둔 알고리즘을 제안하였다. 이 문제 구조가 적용될 수 있는 영역으로는 공급자 선정(supplier selection), 공정 설계(process selection), 제품분배(product distribution) 등을 꼽을 수 있다. Park, Kim and Hong[9]은 단일 제품에 대해 복수의 공급자가 가용한 경우, 주어진 수요에 대해 각 공급자별 물량 할당비를 결정하는 문제를 구성하고 이를 해결하기 위한 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. Kim and Hong[5]은 복수개의 제품을 병렬 생산설비에 할당하는 방법에 대한 연구를 하였다. 이 연구에서는 생산설비(또는 공장)의 생산 셋업비용은 제품 단위별로 발생하는 것으로 가정하였다. 즉, 생산에 이용되는 설비의 수에 상관없이 항상 일정한 셋업비용이 발생하는 형태를 취하고 있다. 이러한 셋업형태는 철강공정과 같이 설비중심의 제조 특성을 지닌 경우, 생산이 없는 휴지(idle) 상태에도 기본적인 설비운영을 위한 인력, 에너지 등 각종 유틸리티가 소비되는 경우에 나타날 수 있다. 즉, 직접적인 생산에 투입되지 않는 경우에도 설비운영을 위한 유지비용이 발생하게 된다. 본 연구에서는 이러한 셋업비용에 대한 가정을 완화하여 각 제품별 설비별로 발생하는 셋업비용이 다르고, 생산에 투입되는 설비에 한해서만 셋업비용이 발생하는 경우로 확장한 모델을 고려하였다. 이를 위하여 제 2장에서는 본 연구의 대상이 되는 문제에 대한 정의를 하였고, 제 3장에서는 문제 해결을 위해 제안된 해법을 제시하였다. 제 4장에서는 제안된 알고리즘을 적용한 수치 예제를 정리하였다. 마지막으로, 제 5장에서는 연구의 주요결과와 한계점을 제시하였다.

## 2. 문제 정의

본 연구에서는  $I$ 개의 제품을  $J$ 개의 설비를 이용하여 분산 생산하는 제조 시스템을 고려하였다. 아래의 <그림 1>에서와 같이, 임의의 제품  $i$ 는 여

러 설비에 분산되어 동시에 생산된다. 각 설비에서 생산된 제품  $i$ 는 하나의 중앙 창고에 저장된다. 중앙 창고에서는 각 제품의 고객에게 일정한 주기로 일정한 양을 운송한다. 완제품 생산에 필요한 자재는 해당하는 각 제품의 생산 시점에 납품되어 설비별로 공급이 이루어진다. 임의의 설비  $j$ 에서

는 복수개의 제품을 일정한 순서에 따라 반복적으로 생산한다. 각 설비는 제품생산에 앞서 셋업과정을 필요로 하고, 생산 셋업은 모든 설비에서 동일 시점에 이루어진다. 따라서, 생산설비에서 작업이 이루어지는 모든 제품은 동일한 공통의 생산 사이클에 의해 운영되는 것으로 가정하였다.



〈그림 1〉 병렬 설비를 이용한 복수 제품의 생산 형태

본 연구에서 사용하는 기호는 다음과 같다[5].

- $i$  : 생산 제품을 나타내는 인덱스( $i=1, \dots, I$ )
- $j$  : 병렬 설비를 나타내는 인덱스( $j=1, \dots, J$ )
- $D_i$  : (연간) 제품  $i$ 의 수요량
- $d_{i,j}$  : (연간) 제품  $i$ 를 설비  $j$ 에서 제품창고로의 이송능력
- $p_{i,j}$  : (연간) 설비  $j$ 에서 생산되는 제품  $i$ 의 생산량
- $A_i^R$  : 제품  $i$ 를 생산하기 위해 필요한 원자재의 주문비용
- $H_i^R$  : 제품  $i$ 를 생산하기 위해 필요한 원자재의

재고유지비용(/년간)

- $S_{i,j}$  : 제품  $i$ 를 설비  $j$ 에서 생산하기 위한 셋업 비용
- $h_{i,j}$  : 설비  $j$ 에서 제품  $i$ 의 재공에 대한 재고유지비용(/년간)
- $A_i^W$  : 제품  $i$ 를 창고에서 고객에게 운송하기 위한 운송비용
- $H_i^W$  : 창고에서 제품  $i$ 에 대한 재고유지비용
- $A_i^C$  : 제품  $i$ 에 대한 고객의 주문비용
- $H_i^C$  : 제품  $i$ 에 대한 고객의 재고유지비용

본 연구에서 도출되는 의사결정변수(decision variables)는 다음과 같다.

$T$  : 모든 제품의 공동 생산주기(Common Cycle Time)(단위 : years)

$Q_i$  : 단일 생산주기에서 제품  $i$ 의 생산량,  
where  $T=Q_i/D_i, \forall i$

$m_i$  : 제품  $i$ 에 대해 단일 생산주기 동안 창고에서 고객  $i$ 로의 운송 횟수

$q_i$  : 매 운송시점마다 중앙창고에서 고객  $i$ 로 운송되는 제품  $i$ 의 물량, where

$$Q_i = m_i q_i, \forall i$$

$\lambda_{i,j}$  : 설비  $j$ 에 할당된 제품  $i$ 의 생산량 할당비율,  $\forall i, j$

$\lambda_i$  : 제품  $i$ 의 설비별 생산량 할당비율을 나타내는 벡터, where  $\lambda_i = (\lambda_{i,1}, \dots, \lambda_{i,J})$

$$\text{and } \sum_{j=1}^J \lambda_{i,j} = 1, \forall i$$

$\wedge$  : 설비별 물량 할당비율을 나타내는 벡터, where  $\wedge = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_I)$

$\delta_{i,j}$  : 제품  $i$ 생산을 위해 설비  $j$ 의 가동 여부를 나타내는 이진 변수, where  $\delta_{i,j} = 1$  if  $\lambda_{i,j} > 0$ ,  
 $\delta_{i,j} = 0$  if  $\lambda_{i,j} = 0$ .

$\delta_i$  : 제품  $i$ 의 생산을 위해 설비별로 가동 여부를 나타내는 벡터, where  $\delta_i = (\delta_{i,1}, \dots, \delta_{i,J})$

본 논문에서 다루고 있는 문제의 성립을 위해서는 다음의 기본 조건들이 만족되어야 한다.

- 절품(shortage)이 발생하지 않도록 제품창고로의 입고물량은 수요를 만족시킬 수 있어야 한다(즉,  $\sum_{j=1}^J d_{i,j} \geq D_i, i=1, 2, \dots, I$ ).

- 제품  $i$ 를 생산하는 설비  $j$ 에서의 생산능력이 창고로의 이송능력 이상이어야 한다(즉,  $p_{i,j} \geq d_{i,j}, \forall i, j$ ).

- 하나의 설비에서 복수개의 제품이 반복 생산되므로 각 설비의 최소 생산 시간의 합( $\sum_{i=1}^I (Q_i / \sum_{j=1}^J p_{i,j})$ , where  $Q_i = D_i T$ )이 사이클 타임( $T$ )보다 작아

야 한다(즉,  $\sum_{i=1}^I (D_i / \sum_{j=1}^J p_{i,j}) \leq 1$ ).

또한, 각 제품별 설비별 생산할당량 결정을 위해서는 다음의 추가 조건이 만족되어야 한다. 본 연구에서 제안하는 모델에서는 임의의 제품  $i$ 의 생산에 이용되는 모든 설비가 동시에 셋업이 이루어진다는 전제하에 모든 제품이 동일한 생산주기를 갖는 것으로 가정하였다. 즉, 생산 셋업을 위해서는 임의의 제품에 대한 생산이 모든 설비에서 종료된 후에 다른 제품을 생산하는 형태를 취한다. 따라서, 각 제품의 생산 완료 시간의 합이 생산 사이클타임보다 작아야 한다. 제품  $i$ 의 생산완료 시간은 해당 제품을 생산하는 설비 중에서 가장 늦게 생산이 완료되는 설비를 기준으로  $L_i(\lambda_i) = \max_{1 \leq j \leq J} \{\lambda_{i,j} Q_i / p_{i,j}\}$ 로 정의되고, 이에 대한 제약은  $\sum_{i=1}^I L_i(\lambda_i) \leq T$ 의 형태로 표현된다. 이러한 운영 제약을 반영한 공급망 단계별 재고 운영 형태는 다음의 <그림 2>와 같다.

<그림 2>에 나타난 운영형태에 따른 각 공급망 단계별 평균재고는 아래와 같이 계산할 수 있다[6].

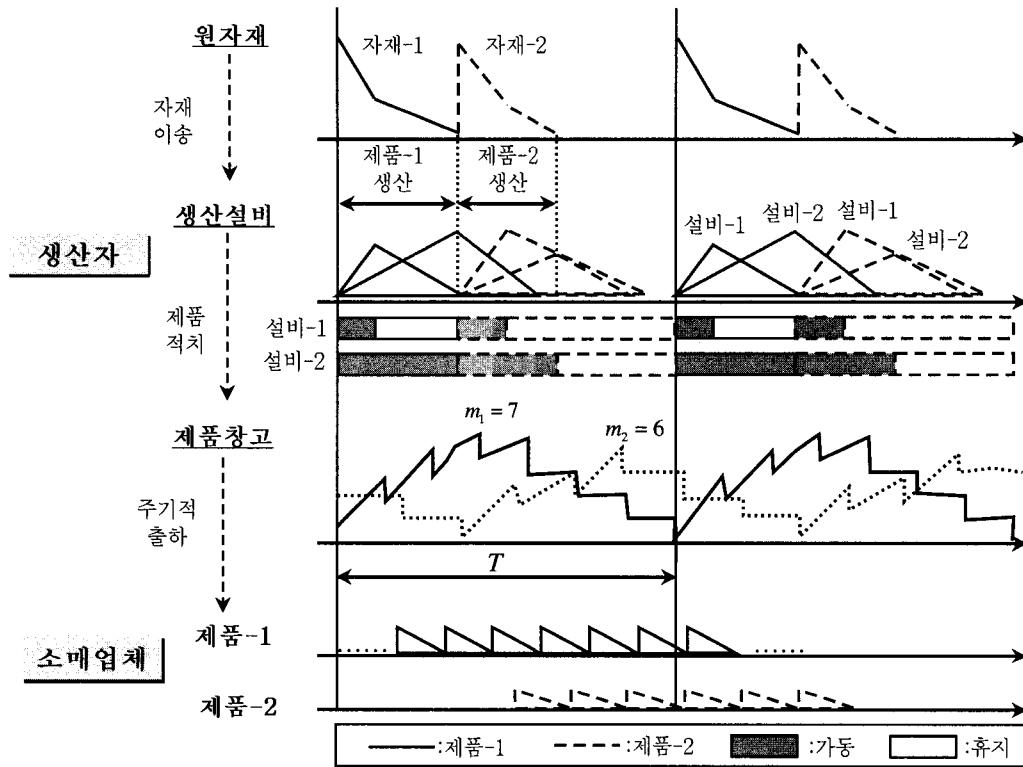
$$I_i^R = (D_i^2 T/2) \sum_{j=1}^J \lambda_{i,j}^2 / p_{i,j}, i=1, \dots, I \quad (1a)$$

$$I_{i,j}^M = (D_i T/2) [(\lambda_{i,j}^2 / d_{i,j}) (1 - d_{i,j}) (1 - d_{i,j} / p_{i,j})], \\ i=1, \dots, I; j=1, \dots, J \quad (1b)$$

$$I_i^W = (D_i T/2) (1 + 1/m_i) - (D_i^2 T/2) \sum_{j=1}^J \lambda_{i,j}^2 / d_{i,j}, i=1, \dots, I \quad (1c)$$

$$I_i^R = D_i T/2m_i, i=1, \dots, I \quad (1d)$$

앞서 언급된 바와 같이, Kim and Hong[5]의 연구에서는 제품  $i$ 의 생산에 가동되는 설비에 관계없이 제품별로 일정한 셋업비용을 적용하였다. 본 연구에서는 이러한 가정을 완화하여 제품생산에 이용되는 설비에 한해서 차등적으로 발생하는 셋업비용형태( $\sum_{j=1}^J S_{i,j} \delta_{i,j}$ )를 감안하였다. 이러한 셋



〈그림 2〉 공급망 단계별 재고 운영 형태(Kim and Hong[5])

업비용의 형태를 고려한 시스템 비용(Total Relevant Cost)은 다음과 같이 정의된다.

$$TRC(T, \mathbf{m}, \lambda) = \frac{\sum_{i=1}^I \left[ (A_i^R + \sum_{j=1}^J S_{i,j} \delta_{i,j}) + (A_i^W + A_i^C) m_i \right]}{T} + \sum_{i=1}^I \left( H_i^C I_i^R + \sum_{j=1}^J h_{i,j} I_{i,j}^M + H_i^W I_i^W + H_i^C I_i^C \right) \quad (2)$$

따라서, 본 연구의 분석대상이 되는 문제는 아래와 같이 정의되어진다.

$$\text{Minimize } TRC(T, \mathbf{m}, \lambda) \quad (3a)$$

$$\text{subject to } \sum_j \lambda_{i,j} = 1, \quad \forall i \quad (3b)$$

$$\sum_{i=1}^I \max_{1 \leq j \leq J} \{ \lambda_{i,j} Q_i / p_{i,j} \} \leq T \quad (3c)$$

$$0 \leq \lambda_{i,j} \leq d_{i,j} / D_i, \quad \forall i, j \quad (3d)$$

### 3. 해법

식 (2)에 정의된 공급망 비용은 아래와 같이 의사결정변수에 의해 정리되어진다.

$$TRC(T, \mathbf{m}, \lambda) = \frac{\sum_{i=1}^I \left[ (A_i^R + \sum_{j=1}^J S_{i,j} \delta_{i,j}) + (A_i^W + A_i^C) m_i \right]}{T} + \frac{T \sum_{i=1}^I D_i \left[ H_i^W + (H_i^W + H_i^C) / m_i - D_i \sum_{j=1}^J \eta_{i,j} \lambda_{i,j}^2 \right]}{2},$$

$$\text{where } \eta_{i,j} = (h_{i,j} - H_i^R) / p_{i,j} + (H_i^W - h_{i,j}) / d_{i,j} \quad (4)$$

먼저, 위의 식 (4)에서 제품운송횟수( $\mathbf{m}$ )과 설비별 생산량 할당( $\lambda$ ) 방안이 이미 정해져 있는 경우를 가정하면,  $TRC(T|\mathbf{m}, \lambda)$ 는 생산주기( $T$ )에 대

해 볼록 함수(convex function)의 형태를 취하므로  $dTRC[T(\mathbf{m}, \lambda)]/d\mathbf{m}=0$ 을 이용하여 최적 생산 주기( $T^*(\mathbf{m}, \lambda)$ )를 도출할 수 있다.

$$T^*(\mathbf{m}, \lambda) = \left\{ \frac{2 \sum_i \left[ (A_i^R + \sum_{j=1}^J S_{i,j} \delta_{i,j}) + (A_i^W + A_i^C) m_i \right]}{\sum_i D_i \left[ H_i^W + (H_i^W + H_i^C)/m_i - D_i \sum_j \eta_{i,j} \lambda_{i,j}^2 \right]} \right\}^{1/2} \quad (5)$$

식 (5)의  $T^*(\mathbf{m}, \lambda)$ 을 식 (4)의  $TRC[T(\mathbf{m}, \lambda)]$ 에 입력하여 정리하면 다음과 같은 식을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} TRC[T^*(\mathbf{m}, \lambda), \mathbf{m}, \lambda] \\ = & \left\{ 2 \left[ \sum_i \left( (A_i^R + \sum_{j=1}^J S_{i,j} \delta_{i,j}) + m_i (A_i^W + A_i^C) \right) \right] \right. \\ & \left. \left[ \sum_i D_i \left( H_i^W + (H_i^W + H_i^C)/m_i - D_i \sum_j \eta_{i,j} \lambda_{i,j}^2 \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (6) \end{aligned}$$

식 (6)을 이용하여  $TRC[T^*(\mathbf{m}, \lambda), \mathbf{m}, \lambda]$ 을 최소화하는 창고에서 수요가로 단위 사이클 타임( $T$ )동안 이루어지는 제품  $i$ 의 최적 운송회수( $m_i^0(\lambda)$ )는 아래의 식 (7)의 형태로 정의된다.

$$m_i^0(\lambda) = \left[ \frac{(H_i^W + H_i^C) D_i \sum_i (A_i^R + \sum_{j=1}^J S_{i,j} \delta_{i,j})}{(A_i^W + A_i^C) \sum_i D_i (H_i^W - D_i \sum_j \eta_{i,j} \lambda_{i,j}^2)} \right]^{1/2}, \quad \forall i \quad (7)$$

$T^*(M^0(\lambda), \lambda)$ 와  $m^0(\lambda)$ 를 이용하여 설비별 물량할당 방안( $\lambda$ )을 결정하는 문제의 형태로 표현된 비용함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} TRC[T^*(M^0(\lambda), \lambda), m^0(\lambda), \lambda] = \\ \sqrt{2 \sum_{i=1}^I f_i(\delta_i) \sum_{i=1}^I g_i(\lambda_i)} + \\ \sum_{i=1}^I \sqrt{2(A_i^W + A_i^C)(H_i^W + H_i^C) D_i} \end{aligned}$$

$$\text{where, } f_i(\delta_i) = (A_i^R + \sum_{j=1}^J S_{i,j} \delta_{i,j}),$$

$$g_i(\lambda_i) = (H_i^W D_i - D_i^2 \sum_{j=1}^J \eta_{i,j} \lambda_{i,j}^2) \quad (8)$$

식 (4)에서 식 (8)까지의 전개과정은 Kim and Hong[5]의 논문에서 적용한 절차를 동일하게 이용하였다.

식 (2)에 정의된  $TRC[T^*(M^0(\lambda), \lambda), m^0(\lambda), \lambda]$ 의 구조로부터 전체 비용을 최소화하기 위해서는 2개의 혼합된 문제를 동시에 해결해야 함을 알 수 있다. 먼저,  $f_i(\delta_i) = (A_i^R + \sum_{j=1}^J S_{i,j} \delta_{i,j})$ 는 생산에 투입되는 설비 선정여부에 따른 셋업비용을 최소화하는 문제이고,  $g_i(\lambda_i | \delta_i) = (H_i^W D_i - D_i^2 \sum_{j=1}^J \eta_{i,j} \lambda_{i,j}^2)$ 는 선정된 설비들을 대상으로 재고유지비용을 최소화할 수 있는 설비별 생산할당비용을 결정하는 문제이다.  $g_i(\lambda_i | \delta_i)$ 는 NP-hard 특성을 갖는 오목함수 최소화(concave minimization) 문제이다[10]. 이러한 문제의 최적해는 제약조건으로 구성된 극값(extreme points)중의 존재하는 것으로 알려져 있다[1]. 따라서,  $g_i(\lambda_i | \delta_i)$ 의 최적해는  $G_i^1 = \{j | \lambda_{i,j}^* = \overline{\lambda_{i,j}}\}$ ,  $G_i^2 = \{j | 0 < \lambda_{i,j}^* < \overline{\lambda_{i,j}}\}$ , 그리고  $G_i^3 = \{j | \lambda_{i,j}^* = 0\}$ 으로 3개 속성으로 구분된다. 즉, 임의의 제품  $i$ 에 대해  $J$ 개의 설비를 이용하여 주어진 수요( $D_i$ )를 소화할 수 있는 설비를 선정하는 것은  $J$ 개의 설비 중에서 제품생산에 가동되는 설비들(즉,  $\lambda_{i,j}^* > 0$ )과 생산에 투입되지 않은 설비(즉,  $\lambda_{i,j}^* = 0$ )로 구분하는 것이다. 따라서, 제품  $i$ 의 수요를 만족시키기 위해서는 해당하는 수요를 소화할 수 있는 가용한 설비의 조합으로  $k$ -out-of- $J$ 의 경로집합들(path sets)로 구성할 수 있다. 즉, 셋업비용을 최소화하기 위해서는 수요를 소화할 수 있는 최소의 경로집합을 운영하고, 이에 포함되지 않은 설비를 가동할 필요는 없다. 따라서, 대안이 되는 모든 설비의 조합(combination)을 평가하는 것이 아니라, 이러한 해의 특성을 이용하여 부분적인 열거(partial enu-

meration)를 통하여 최적 경로집합을 설정하는 방법을 취하였다. 본 연구에서 제안하는 알고리즘은 크게 2단계로 구분된다. 단계 1에서는 각 제품별로 주어진 수요량, 설비별 생산능력 및 이송능력을 이용하여  $k$ -out-of- $J$  형태의 경로집합들을 설정한다. 단계 2에서는 각 제품별로 설정된 경로집합을 이용하여 해당하는 경로집합에 포함된 설비에 대한 생산량 할당비율을 결정하는 것이다.

### 3.1 대안 경로집합 설정

임의의 제품  $i$ 가 갖는 수요를 소화할 수 있는 가능 경로집합(feasible path set) 구성을 위해 아래의 식 (9a)과 식 (9b)의 조건을 만족하는 설비의 집합을 구성한다.

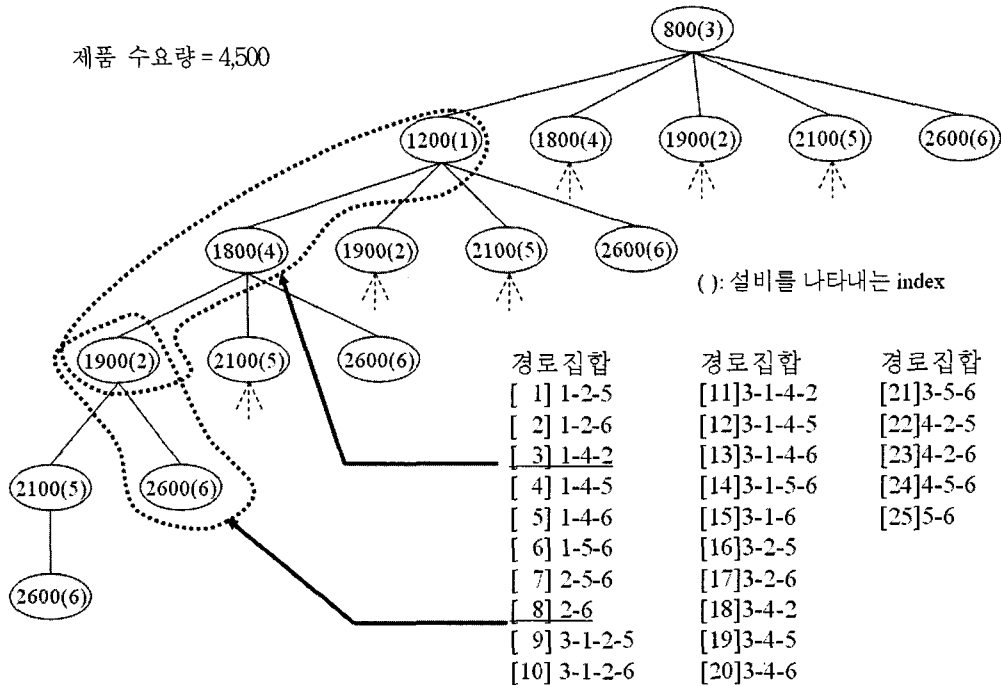
$$\sum_{j \in \varphi_i} d_{i,j} \geq D_i, \text{ for } \exists i \quad (9a)$$

$$\sum_{j \in \varphi_i} d_{i,j} - d_{i,x} < D_i,$$

$$\text{for some work-center } x \in \varphi_i, \exists i \quad (9b)$$

식 (9a)에서는 경로집합에 포함된 설비에서 창고로의 이송 능력의 합이 수요보다 커야 한다. 제품의 수요를 소화할 수 있는 범위내에서 셋업비용 최소화를 위해 최소개수의 설비만이 필요하므로, 식 (9b)은 해당하는 경로집합에 포함된 설비 중에서 특정 설비 하나를 제거하였을 경우에 불가능(infeasible)해지는 경우가 발생하는 집합이다.

각 제품별 수요를 만족시키는 경로집합은 다음과 같은 방법으로 설정할 수 있다. 아래의 <그림 3>에서는 해당 제품의 수요가 4,500이고 이 제품의 생산을 위해 가용한 설비가 6개가 있는 경우이다. 6개의 병렬 설비에서 중앙창고로의 이송능력은 각각 1200, 1900, 800, 1800, 2100, 2600으로 설정되



<그림 3> 깊이우선 탐색(Depth-first search)을 이용한 경로집합 설정

었다. 이러한 각 설비의 이송능력을 증가순서(ascending order)로 정렬한 후 아래의 <그림 3>와 같은 형태를 구성하여, 깊이 우선탐색(depth-first search) 방식으로 총 25개의 대안 경로집합을 생성하였다.

예를 들면, 위의 <그림 3>에서 대안 경로집합 중 3번 경로(path)는 {1, 4, 2}로 구성된다. 이 집합에 포함되는 3개 설비의 이송능력의 합은 4,900 이고, 3개 설비 중 임의의 하나가 집합에서 제외된 경우에는 불가능한 경로집합이 된다.  $\varphi_i$ 는 제품  $i$ 에 해당하는 경로의 벡터를 의미한다. 즉,  $\varphi_i = \{\varphi_i^1, \varphi_i^2, \dots, \varphi_i^{|\varphi_i|}\}$ 로 정의된다. <그림 3>의 예에서는  $\varphi = \{\{1, 2, 5\}, \{1, 2, 6\}, \dots, \{5, 6\}\}$ 이고,  $|\varphi_i|$ 는 25이다.

### 3.2 최적 경로집합 및 생산량 할당비율 결정

본 연구에서 제안하는 알고리즘은 앞서 설명된 대안 경로집합 중에서  $TRC[T^*(\lambda), \lambda, m^0(\lambda), \lambda]$ 을 최소화할 수 있는 각 제품별 경로집합을 선정하고, 해당하는 설비별 생산량 할당비율을 결정하는 것이다. 이러한 조건을 만족하는 경로집합을 선정하는 과정에서 다음과 같은 추가 조건을 감안하여야 한다.

#### 3.2.1 최적 경로집합 설정

앞서 정의된 가능해 조건인  $\sum_{i=1}^I (D_i / \sum_{j=1}^J p_{i,j}) \leq 1$ 는 이미 만족되었다고 가정한다.  $\varphi_i^{min}$ 는 제품  $i$ 에 해당하는 복수 경로집합(multiple path sets) 중에서 집합에 포함된 설비들의 생산능력 합이 가장 큰 경로를 의미한다. 즉, 해당 제품의 생산완료 시간이 가장 짧은 경로를 나타낸다. 따라서, 최악의 경우에 각 제품별로 생성된 경로집합이 가능해를 유지하기 위해서는 각 제품별 최단 생산완료 시간을 갖는 집합들은 아래의 조건을 만족하여야 한다.

$$\sum_{i=1}^I (D_i / \sum_{j \in \varphi_i^{min}} p_{i,j}) \leq 1 \quad (10)$$

$$\text{where } \varphi_i^{min} = \arg_{j \in \varphi_i^k} \max \left\{ \sum_{j \in \varphi_i^k} p_{i,j} \mid k = 1, 2, \dots, |\varphi_i| \right\}$$

각 제품별로 구성된 경로집합에 대해서 식 (10)의 조건이 만족되지 않은 경우는 각 제품별 수요를 소화할 수 있는 여유치를 포함한 경로집합을 편성한다. 이 방법은 아래의 식 (11a)와 식 (11b)의 형태로 표현된다.

$$\sum_{j \in \varphi_i} d_{i,j} \geq D_i \times \varepsilon, \text{ for } \exists i \quad (11a)$$

$$\sum_{j \in \varphi_i} d_{i,j} - d_{i,x} < D_i \times \varepsilon, \text{ for some } x \in \varphi_i, \exists i \quad (11b)$$

따라서, 초기에는  $\varepsilon = 1.0$ 으로 설정하고 식 (10)을 만족할 때까지 반복적으로 수행하면서 각 단계마다  $\varepsilon$ 는 일정량만큼 증가시키면서(예,  $\varepsilon = \varepsilon + 1.0$ ) ( $D_i \times \varepsilon$ )를 만족하는 대안 경로집합을 생성시킨다. 이 방법은 각 제품의 생산에 모든 설비가 가동되는 경우를 가정한  $\sum_{i=1}^I (D_i / \sum_{j=1}^J p_{i,j}) \leq 1$ 가 이미 만족되었으므로 유한 반복 후에 종료될 수 있다.

각 제품별 최적 생산경로집합은 다음의 과정을 통하여 도출된다. 먼저, 각 제품에 대해서 독립적으로 생산량 할당비율을 결정하는 경우를 고려해보자. 임의의 제품  $i$ 만을 생산하는 경우를 가정하여, 제품  $i$ 에 해당하는 각 경로집합에 해당하는 비용은 아래의 식 (12)을 이용하여 산정한다.

$$\begin{aligned} & TRC_i^* [T_i^*(m_i^0(\lambda_i), \lambda_i), m_i^0(\lambda_i), \lambda_i] \\ &= \sqrt{2f_i(\delta_i)g_i(\lambda_i)} + \sqrt{2(A_i^W + A_i^C)(H_i^W + H_i^C)D_i} \quad (12) \end{aligned}$$

이러한 비용 평가 과정을 통하여 제품  $i$ 에 해당하는 경로집합들 중에서 최소비용을 갖는 경로집합( $\varphi_i^*$ )을 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi_i^* = \arg_{\varphi_i^k} \min \{ & TRC_i^* [T_i^*(m_i^0(\lambda_i^k), \lambda_i^k), m_i^0(\lambda_i^k), \lambda_i^k | \varphi_i^k] \\ & k = 1, 2, \dots, |\varphi_i| \} \quad (13) \end{aligned}$$

where  $\lambda_i^k$ 는  $\varphi_i^k$  기준으로 알고리즘에 의해 설정된



설비별 생산량 할당비율

제품  $i$ 의 임의의 경로집합( $\varphi_i^k$ )에 대해 제품 생산에 이용되는 설비의 집합이 주어진 경우에 각 설비에 생산량 할당비율( $\lambda_i^k, k=1, 2, \dots, |\phi_i|$ )에 대해 Kim et al.[6]이 제안한 휴리스틱 알고리즘을 적용하였다. 이 알고리즘에서는 각 설비별 생산 및 이송능력, 재고비용 등을 감안하여 선호하는 설비를 순차적으로 선택하는 과정을 반복하는 형태를 취하고 있다. 각 제품별로 도출한 최적 경로집합( $\{\varphi_i^k, i=1, 2, \dots, I\}$ )은 생산완료시간에 대한  $\sum_{i=1}^I L_i(\lambda_i^k | \varphi_i^k) \leq T$ 의 가능해 조건을 만족해야 한다. 각 제품별 최소 생산완료 시간  $L_i(\lambda_i^{min} | \varphi_i^k)$ 은 각 설비별 생산능력의 비율을 기준으로 생산량을 할당하는 경우이다(즉,  $\lambda_{i,j}^{min} = p_{i,j} / \sum_{j \in \varphi_i^k} p_{i,j}, \forall i, j$ ). 따라서,  $L_i(\lambda_i^{min} | \varphi_i^k) = Q_i / \sum_{j \in \varphi_i^k} p_{i,j}$ 가 되고, 가능해 조건은  $\sum_{i=1}^I (D_i / \sum_{j \in \varphi_i^k} p_{i,j}) \leq 1$ 로 표현된다. 각 제품별 최소 비용에 해당하는 최적 경로집합( $\varphi_i^*, \dots, i=1, 2, \dots, I$ )들이 이 조건을 만족하면, 현재의 최적 경로집합은 그대로 유지된다. 그러나, 이 가능해 조건이 성립되지 않은 경우에는 모든 제품별 모든 대안 경로집합에 대해서 최소의 비용 증가가 발생하면서 생산완료 시간이  $\sum_{i=1}^I (D_i / \sum_{j \in \varphi_i^k} p_{i,j}) \leq 1$ 의 조건을 만족될 때까지 반복적으로 경로집합을 설정한다.

$$(i, k) = \arg_{(i,k)} \min \{TRC_i^*(m_i^0(\lambda_i^k), \lambda_i^k, m_i^0(\lambda_i^k), \lambda_i^k) \mid i=1, 2, \dots, I; k=1, 2, \dots, |\phi_i|\} \quad (14)$$

3.2.2 최적 생산 비율 결정

3.2.1절을 통해 가능해를 포함하는 각 제품별 경로집합( $\varphi_i^*, i=1, 2, \dots, I$ )을 설정하였다. 즉,  $\sum_{i=1}^I L_i(\lambda_i^{min} | \varphi_i^*) \leq T$ 의 가능해 조건은 만족된 단계이다. 추가적으로, 최적 생산량 할당비율( $\lambda_i^*, i=1, 2, \dots, I$ )

이  $\sum_{i=1}^I L_i(\lambda_i^* | \varphi_i^*) \leq T$ 의 조건을 만족한다면 이 문제의 해결단계는 종료된다. 이 조건이 만족되지 않은 경우에는 각 제품별 생산량 할당 비율을 조정하여야 한다. 현재의 생산량 할당비율( $\lambda_i^*, i=1, 2, \dots, I$ )이 갖는 정상생산시간(normal production time)과 이에 해당하는 정상생산비용(normal production cost), 그리고 속성생산시간(crash production time)과 속성생산비용(crash production cost)을 도출하여 시간-비용 조정(time-cost trade-off)를 통해 비용증가가 가장 작은 제품의 생산량 할당비율을 우선 조정하는 형태의 아래와 같은 선형계획 모델을 적용하였다[5].  $\Delta G_i$ 는 제품  $i$ 의 생산완료 시간 기준의 비용증가 정도를 의미한다. 따라서, 비용증가가 큰 제품은 가능한 현재의 생산할당 정책( $\lambda_i^*$ )을 유지하고, 비용증가가 작은 제품의 경우는 최소 생산완료시간을 갖는 할당정책( $\lambda_i^L$ )으로 조정된다.

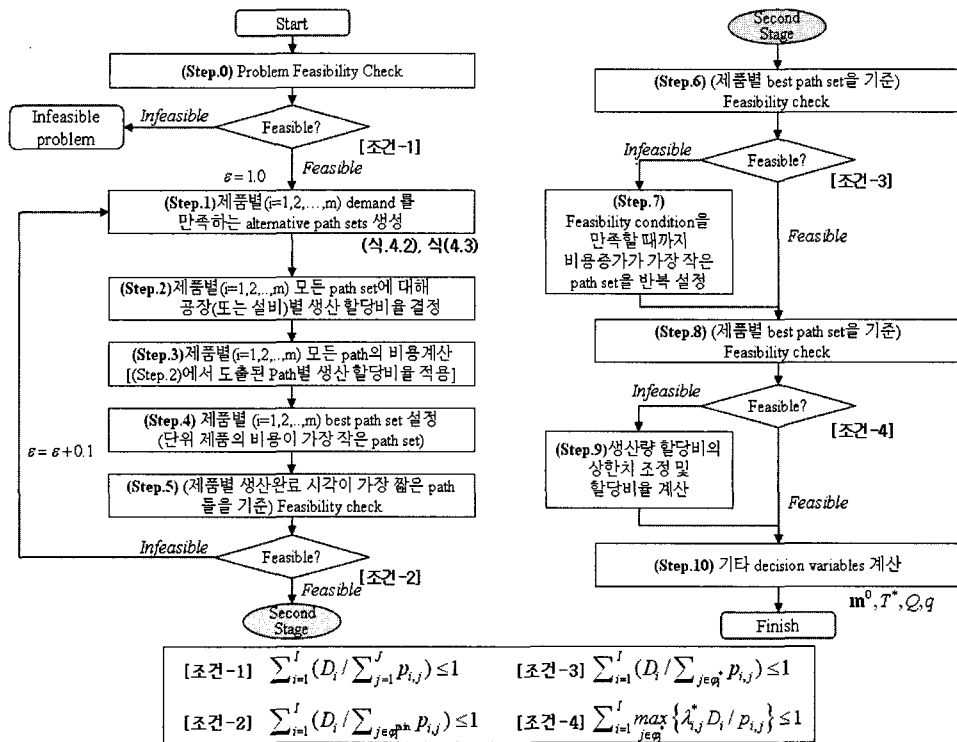
$$\text{Maximize } \sum_i \Delta G_i \delta_i \quad (15a)$$

$$\text{subject to } \sum_i \delta_i \leq 1 \quad (15b)$$

$$L_i(\lambda_i^L) \leq \delta_i \leq L_i(\lambda_i^*), \forall i \quad (15c)$$

$$\text{where } \Delta G_i = \frac{G_i(\lambda_i^*) - G_i(\lambda_i^L)}{\rho_i(\lambda_i^*) - \rho_i(\lambda_i^L)}, G_i(\lambda_i) = \sum_j \eta_{i,j} \lambda_{i,j}^2$$

위의 식 (15c)에서  $\lambda_i^L = (\lambda_{i,1}^L, \dots, \lambda_{i,j}^L)$ 은 제품  $i$ 를 생산할 수 있는 모든 설비에 대해 각 설비의 생산능력의 비율로 생산할당 비율을 설정한 경우이다. 즉, 각 설비별 생산물량을  $\lambda_{i,j}^L = p_{i,j} / \sum_j p_{i,j}, \forall i, j$ 의 값으로 결정된 경우이다. 이때, 모든 설비의 생산이 동일 시점에 끝나는 형태로 제품  $i$ 의 생산완료 시간  $L_i(\lambda_i^L)$ 는 최소값인  $Q_i / \sum_j p_{i,j}$ 을 갖게 된다. 전체적인 해법의 단계별 내용은 <그림 4>에 나타내었다.



<그림 4> 제안된 알고리즘 형태

### 4. 수치 예제

본 절에서는 제안된 알고리즘의 수행 예제를 알아보고자 한다. 본 수치예제에서는 7개의 제품을 6개의 병렬 설비에 분산 생산하는 경우를 고려하였다. 아래의 <표 1>은 예제 문제 구성을 위해 임의로 설정된 수치이다. 제안된 알고리즘은 MATLAB을 이용하여 구현하였으며, 최종해를 도출하는 과정에 소요된 시간은 1초 미만으로 알고리즘 수행 시간은 부담을 주지 않았다.

7개의 제품에 대한 수요를 6개의 설비에서 수용 가능 여부 확인을 위한 가능해 여부 확인 결과,  $\sum_{i=1}^7 (D_i / \sum_{j=1}^6 p_{i,j}) = 0.785$ 로 이 문제의 가능해는 존재함을 알 수 있다. 7개 제품의 수요를 수용할 수 있는 경로집합들은 각각 25개, 25개, 23개, 24개, 21개, 25개, 그리고 24개로 도출되었다. 그러나, 각

제품별 경로 집합들 중에서 가장 작은 생산완료 시간을 갖는 경로집합들이 갖는  $\sum_{i=1}^7 (D_i / \sum_{j \in \varphi_i^{min}} p_{i,j}) = 1.1959$ 로 나타났다. 즉, 현재 각 제품별로 정해진 경로집합( $\{\varphi_i^{min} | i=1, \dots, I\}$ )으로는 반복적 형태로 복수개의 제품을 생산할 수 없다. 이 문제를 해결하기 위해서는 가동 설비 추가로 생산능력을 확보해야 복수개 제품의 생산에 지장이 발생하지 않는다. 이러한 과정을 통해서 조정된 최적 경로집합이 갖는 최소 생산 완료시간의 비율은  $\sum_{i=1}^7 (D_i / \sum_{j \in \varphi_i^{min}} p_{i,j}) = 0.9255$ 로 나타났다. 따라서, 최악의 경우(worst case)라도 가능한 경로집합이 존재함을 확인할 수 있다.

즉, 하나의 설비에 대해서 복수개의 제품이 순차적으로 생산되는 과정이 반복적으로 진행되기 위해서는 생산완료 시간의 합이 사이클 길이보다

〈표 1〉 예제 적용을 위한 공급망 운영 파라미터 설정치

구분		제품-1	제품-2	제품-3	제품-4	제품-5	제품-6	제품-7
수요량		4,500	4,200	4,200	3,000	5,000	3,500	3,000
설비-제품별 생산능력	1	5,200	5,700	8,400	2,800	6,500	5,700	6,800
	2	5,300	4,100	5,400	5,100	6,400	7,300	3,000
	3	3,800	5,700	5,800	3,500	8,200	6,400	3,300
	4	8,400	7,000	5,700	6,200	8,100	5,500	4,300
	5	10,000	1,800	8,400	4,100	10,000	3,100	6,500
	6	6,800	11,100	4,000	5,600	3,100	4,000	5,100
설비-제품별 이송능력	1	1,200	1,900	1,800	600	1,500	1,700	1,600
	2	1,900	1,400	1,100	1,400	1,800	1,800	700
	3	800	1,700	2,300	1,000	1,700	1,800	800
	4	1,800	2,000	1,600	1,900	2,000	1,600	1,100
	5	2,100	700	2,000	1,000	2,100	800	1,300
	6	2,600	2,300	1,400	1,600	1,000	900	1,500
설비-제품별 셋업비용	1	380	360	160	270	350	470	170
	2	320	170	360	430	100	260	420
	3	390	280	450	280	420	260	150
	4	200	250	430	100	250	440	160
	5	420	150	390	380	180	340	370
	6	200	450	170	320	350	300	120
설비-제품별 재고 유지 비용	1	5	3	4	4	4	6	5
	2	4	7	3	6	5	6	6
	3	4	8	6	6	7	6	5
	4	3	5	3	8	7	6	5
	5	3	6	7	3	7	5	6
	6	3	5	4	9	6	6	6

〈표 2〉 제품별 최소비용 경로집합( $\varphi_i^{min}$ ) 구성 형태

제품	설비	초기에 선정된 최소비용 경로집합 (경로집합에 포함된 설비)						조정후의 최소비용 경로집합 (경로집합에 포함된 설비)					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1		○	○				○	○				●	○
2			○		○			○	○	●	○		○
3		○	○				○	○	○	●			○
4					○				●		○		○
5			○		○	○		●	○		○	○	
6			○	○				●	○	○			
7		○				○	○	○	●			○	○

주) ● : 경로집합 조정과정에서 새롭게 경로집합에 포함된 설비

작게 운영되어야 한다. 앞서,  $\sum_{i=1}^7 (D_i / \sum_{j \in \varphi_i^{\text{sub}}} p_{i,j}) = 0.9255$

의 조건은 이미 만족된 상태이므로 비용을 최소화하는 가능 경로집합을 구하는 것이다. 각 제품별로 구해진 최상의 경로집합에 대해 평가가 이루어지는 추가적인 조건은  $\sum_{i=1}^7 (D_i / \sum_{j \in \varphi_i^{\text{sub}}} p_{i,j}) \leq 1$ 이다.

이 예제에서는 아래의 <표 3>에서와 같이  $\sum_{i=1}^7$

$(D_i / \sum_{j \in \varphi_i^{\text{sub}}} p_{i,j})$ 의 초기값이 1.153로 나타났다.

따라서,  $\sum_{i=1}^7 (D_i / \sum_{j \in \varphi_i^{\text{sub}}} p_{i,j}) \leq 1.0$ 을 만족할 때까지 반복적으로 경로집합을 조정하는 과정을 반복하고, 대안 경로집합 중에서 비용증가가 가장 작은 경로를 우선적으로 선택한다. <표 3>에 나타난 결과를 이용하여 비용 증가를 최소화하는 범위 내에서 아래의 <그림 5>에서와 같은 순서로 설정된 경로집합을 조정하는 과정을 거친다.

<표 3> 제품별 경로집합별 비용 및 생산완료 시간

번호	제품-1		제품-2		제품-3		제품-4		제품-5		제품-6		제품-7	
	비용	완료 시간 ( $\times T$ )	비용	완료 시간 ( $\times T$ )	비용	완료 시간 ( $\times T$ )	비용	완료 시간 ( $\times T$ )	비용	완료 시간 ( $\times T$ )	비용	완료 시간 ( $\times T$ )	비용	완료 시간 ( $\times T$ )
1	1,440	0.165	2,432	0.176	2,101	0.186	1,928	0.152	2,073	0.161	1,846	0.180	1,392	0.126
2	2,200	0.156	1,991	0.151	2,057	0.150	2,037	0.170	2,280	0.128	2,373	0.189	1,367	0.135
3	1,760	0.175	1,991	0.187	1,895	0.166	2,037	0.176	2,594	0.152	2,373	0.199	1,392	0.133
4	1,760	0.148	2,023	0.158	1,895	0.151	2,049	0.138	2,298	0.153	2,123	0.182	1,698	0.153
5	1,440	0.204	1,924	0.151	2,365	0.166	2,049	0.142	2,495	0.147	2,251	0.156	1,698	0.121
6	1,440	0.145	2,023	0.142	1,567	0.178	2,055	0.181	2,709	0.155	2,456	0.162	1,698	0.165
7	2,140	0.213	1,953	0.164	1,567	0.160	2,055	0.135	2,709	0.146	2,456	0.169	1,699	0.146
8	2,220	0.138	2,023	0.141	2,067	0.143	1,748	0.166	3,015	0.139	2,216	0.157	1,697	0.159
9	1,780	0.153	2,023	0.185	1,906	0.132	2,049	0.165	2,698	0.140	2,581	0.174	1,699	0.156
10	1,780	0.132	1,953	0.173	2,441	0.201	2,049	0.170			2,581	0.182	1,217	0.140
11	2,140	0.174	2,023	0.148	2,364	0.179	1,780	0.160			2,027	0.168	1,392	0.144
12	2,220	0.174	1,924	0.141	2,052	0.178	1,629	0.178			2,792	0.137	1,367	0.156
13	2,220	0.164	2,075	0.185	2,109	0.148	1,946	0.147			2,792	0.142	1,392	0.154
14	2,020	0.185	2,478	0.175	1,807	0.158	2,152	0.159			2,554	0.176	1,363	0.138
15	2,220	0.155	1,953	0.208	1,691	0.176	2,152	0.164			2,554	0.184	1,363	0.132
16	1,840	0.148	2,023	0.173	1,691	0.158	1,818	0.155			1,846	0.150	1,217	0.163
17	1,840	0.179	1,924	0.164	2,128	0.176	1,849	0.196			2,442	0.156		
18							1,975	0.143			2,442	0.162		
19							1,884	0.189			2,200	0.151		

[Step.7 실행전] → [Step.7 실행과정] → [Step.7 실행후]

제품별 최적 경로집합구성			반복 횟수	제품 번호	경로집합 번호	생산완료시간(T)	제품별 최적 경로집합구성		
제품	경로집합 번호	경로집합 형태					제품	경로집합 번호	경로집합 형태
1	1	(1,2,5,6)	1	6	16	1.1219	1	6	(1,2,3,5,6)
2	5	(2,3,4,6)	2	3	7	1.1042	2	12	(2,3,4,5,6)
3	6	(1,2,3,6)	3	2	12	1.0951	3	9	(1,2,4,5,6)
4	12	(2,4,6)	4	1	6	1.0750	4	7	(1,3,4,5,6)
5	1	(1,2,4,5)	5	4	8	1.0632	5	1	(1,2,4,5)
6	1	(1,2,3)	6	4	11	1.0579	6	16	(1,2,3,6)
7	10	(1,2,5,6)	7	4	16	1.0521	7	15	(1,4,5,6)
			8	4	1	1.0497			
			9	4	13	1.0445			
			10	4	18	1.0403			
			11	4	5	1.0396			
			12	4	4	1.0357			
			13	4	7	1.0326			
			14	3	16	1.0308			
			15	3	14	1.0302			
			16	3	4	1.0228			
			17	3	9	1.0040			
			18	7	15	0.9959			

〈그림 5〉 제품별로 선정된 경로집합별 비용 및 생산완료 시간

추가적으로, 하나의 설비에서 복수개의 제품을 반복형태로 생산하는 형태를 취하므로 제품의 생산완료 시간의 합은 자체보다도 작게 나와야 한다. 즉,  $\sum_{i=1}^7 L_i(\lambda_i^*|\varphi_i^*) \leq T$ 의 가능해 조건을 만족해야 한다. 현재의 경로집합들의 조합은  $\sum_{i=1}^7 L_i(\lambda_i^*|\varphi_i^*) = 2.1466 \times T$ 을 나타내고 있다. 이 문제는 앞서 설명된 시간-비용간 조정(time-cost trade-off)을 위한 선형계획모델을 통해 조정하였다[5]. 선형계획 모델을 통해 도출된  $\lambda_{i,j}$ 의 상한치(upper bound)를 이용하여 조정된 생산량 할당비율을 결정한다[6]. 아래의 <표 4>는 선형계획 모델 적용 전에 도출된 설비별 생산량 할당비율과 적용 후 조정된 상한치를 이용하여 도출한 생산량 할당비율을 나타낸 것이다.

본 연구에서 다루고 있는 문제의 특성은 제품별 셋업비용을 감안한 위한 설비 선정 문제와 선정된 설비내에서의 생산물량 할당 문제가 조합된 구조를 지니고 있다. 따라서, 제안된 알고리즘을 통해 도출된 해의 품질에 대한 평가를 위한 기준치(Benchmarking value)를 설정하는 것이 어려운 구조를 지니고 있다. 단, 알고리즘 내에서 셋업비용의

〈표 4〉 각 제품별 설비별 생산량 할당비율 설정 결과

(a) 각 제품별로 독립적으로 설정된 생산량 할당비율 (Step. 7 실행전)

조정前	제품별 생산량 할당비율					
	설비-1	설비-2	설비-3	설비-4	설비-5	설비-6
제품-1	-	-	-	-	0.4222	0.5778
제품-2	-	-	-	0.4762	-	0.5238
제품-3	0.4048	0.2619	-	-	-	0.3333
제품-4	-	0.4667	-	0.5333	-	-
제품-5	0.3000	0.3600	-	0.3400	-	-
제품-6	0.4857	-	0.5143	-	-	-
제품-7	0.5333	-	-	-	-	0.4667

(b) Feasibility 조건을 감안한 생산량 할당비율(Step. 9 실행후)

조정後	제품별 생산량 할당비율					
	설비-1	설비-2	설비-3	설비-4	설비-5	설비-6
제품-1	0.1672	0.1704	0.1222	-	0.3215	0.2186
제품-2	-	0.1380	0.1919	0.2357	0.0606	0.3737
제품-3	0.2633	0.1693	-	0.1787	0.2633	0.1254
제품-4	0.1299	-	0.1624	0.2877	0.1903	0.2297
제품-5	0.2097	0.2065	-	0.2613	0.3226	-
제품-6	0.2436	0.3120	0.2735	-	-	0.1709
제품-7	0.2996	-	-	0.1894	0.2863	0.2247

최소화는 제품의 수요를 소화할 수 있는 경로선정 과정에서 모든 대안에 대한 비교평가가 되었고, 설비별 재고비용을 최소화할 위한 생산량 할당 알고리즘은 Kim et al.[6]의 논문에서 효용성이 검증된 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 복수개의 제품을 복수개의 병렬 생산 설비에 분산 생산하는 제조 특성을 갖는 경우에 대한 문제를 다루었다. 설비별로 생산하는 제품에 따라서 제조 특성, 원가 특성이 상이한 경우에 이를 전체적으로 조율하는 기능이 최적화는 필수적인 요소이다. 본 연구에서는 정형화된 문제가 NP-hard 형태의 속성을 지님에 따라 이를 해결하기 위해 휴리스틱 알고리즘을 개발하였다. 그러나, 최적해에 근접하는 평가 기준치(benchmarking value)를 설정할 수 없음에 따라, 알고리즘의 성능평가에 대한 부분은 좀 더 면밀한 검토가 진행되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 제품별 셋업비용의 특성이 제품의 생산순서에 따른 셋업(sequence-dependent set-up) 등 좀 더 현실적인 제조환경을 고려한 병렬 생산 설비의 효과적인 생산 운영 정책에 대한 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

- [1] Benson, H.P., "Deterministic algorithms for constrained concave minimization: a unified critical survey," *Naval Research Logistics*, Vol.43(1996), pp.765-795.
- [2] Fulkerson, B., "A response to dynamic change in the market place," *Decision Support Systems*, Vol.21(1997), pp.199-214.
- [3] Ghodsypour, S.H., O'Brien, C., "The total cost of logistics in supplier selection, under conditions of multiple sourcing, multiple criteria and capacity constraints," *International Journal of Production Economics*, Vol.73(2001), pp.15-27.
- [4] Herer, Y.T., M.J. Rosenblatt, and I. Hefter, "Fast algorithms for single-sink fixed charge transportation problems with applications to manufacturing and transportation," *Transportation Science*, Vol.30(1996), pp.376-390.
- [5] Kim, T., Hong, Y., "Technical Note: Production Allocation, Lot-Sizing, and Shipment Policies for Multiple Items in Multiple Production Lines," *International Journal of Production Research*, Article In Press.
- [6] Kim, T., Y. Hong, and J. Lee, "Joint economic production allocation and ordering policies in a supply chain consisting of multiple plants and a single retailer," *International Journal of Production Research*, Vol.43(2005), pp.3619-3632.
- [7] Kotha, S., "From mass production to mass customization: The case of the national Industrial bicycle," *European Management Journal*, Vol.14, No.5(1996), pp.442-450.
- [8] MacCarthy, B., Brabazon, and P.G., J. Bramham, "Fundamental modes of operation for mass customization," *International Journal of Production Economics*, Vol.85(2003), pp.289-304.
- [9] Park, S.S., T. Kim, and Y. Hong, "Production allocation and shipment policies in a multiple-manufacturer-single-retailer supply chain," *International Journal of Systems Science*, Vol.37, No.3(2006), pp.163-171.
- [10] Sahni, S., "Computationally related problems," *SIAM Journal of Computing*, Vol.3, No.4(1974), pp.262-279.
- [11] Selladurai, R.S., "Mass customization in operations management: oxymoron or reality?," *International Journal of Management Science-Omega* Vol.32(2004), pp.295-300.