經營科學 第13卷 第3號
1996年 10月

생산속도 조절이 가능한 단일설비에서 금형비용을 고려한 경제적 생산계획

문덕희* · 조상종** · 김진욱*

An Economic Lot Scheduling Problem Considering Controllable Production Rate and Mold Cost

Dug Hee Moon* · Sang Jong Jo** · Jin Wook Kim*

ABSTRACT

This paper presents an Economic Lot Scheduling Problem in which controllable production rates are considered. We also take into account the controllable range of production rate (i. e., maximum and minimum production rate) of each product and the mold cost which varies to the production rate.

A mathematical model is developed and an iterative solution procedure is suggested. The objective of this problem is to minimize production related cost and the decision variables are common production cycle time and production rate of each product. As a case study, we adapted this model to the press machine of a company.

1. 서 론

현대의 생산체계는 과거의 소품종 다량생산체계에서 다품종 소량생산체계로 변환되었다. 따라서 하나의 설비를 이용하여 여러 종류의 제품을 경제적으로 생산해 내기 위한 방법에 대한 연구들이 지난 수십 년간 진행되어 왔으며, 이들 중 대표적인 것이 ELSP (Economic Lot Scheduling Problem) 문제이다. ELSP 문제를 해결하는 방법에 대해서는 많은 연구 결과가 발표되어 있지만 그 중에서 공동주기생산방식 (Common Cycle Approach)가 적용의 간편성 때문에 최근까지도 많이 응용이 되고 있다. 공동주기생산방식이란 일정한 생산주기내에 모든 제품들을 한번씩 교대로 생산하는 방식으로 일명 Rotation Cycle Approach 라고도 한다.

* 창원대학교 산업공학과
**(주)경남금속

이러한 ELSP 모형들은 설비의 각 제품별 생산속도가 일정하다는 상황하에서 생산준비비용과 재고유지비용의 합을 최소화 시키는 생산스케줄을 결정하는데 그 목적이 있다. 그러나 생산율을 일정하게 유지하며 생산계획을 결정하기 때문에 주기내의 필요한 수요량만큼 생산한 후에는 설비가 유휴 상태로 유지되는 경우가 발생하게 된다. 실제로 많은 경우에 있어서 생산속도를 최대로 하여 생산을 하려는 경향이 있다. 그러나 Just In Time 생산개념의 확산과 더불어 미리 만드는 낭비의 배제가 주요한 현안 중의 하나로 대두되면서 설비의 평균가동율이 높지 않은 경우에 있어서는 최대생산속도로 생산하는 것이 비경제적일 수도 있다는 인식을 하게 되었다. 즉 생산속도를 적절히 낮추어 줌으로써 재고유지비용의 감소를 유도할 수 있다는 것이다.

설비의 생산속도를 변동시킨다는 개념 (Controllable Production Rate)을 ELSP에 처음으로 접목시킨 연구는 Silver(1989)에 의해 수행되었는데 제품 1롯트가 생산되어 최종적으로 소비되기까지의 유효재고기간(Shelf-Life)에 대한 제약이 있는 경우를 다루었다. 그는 이 논문에서 기존의 ELSP로 해를 구한 것이 유효재고기간의 제약에 위배되는 경우가 발생한다면 이를 해결하는 방안으로 공동생산주기를 단축시키는 방법과 해당 제품의 생산속도를 감소시키는 두 가지 방법을 제시하였으며, 두 가지 방법 중에서 생산속도를 줄이는 방법이 보다 효율적임을 밝혔다. Silver(1990)는 후속 논문에서 유효재고기간이라는 개념을 떠나 비용을 최소화시키기 위하여 생산속도를 낮추는 방안에 대하여 연구하였다. 여기서 고려한 비용 요소는 생산준비비용, 재고유지비용 이외에 생산준비시간 및 실제생산시간의 합인 설비가동시간에 대한 설비가동비용이 추가되었다. 그 결과 설비의 가동율에 여력이 있으면 생산속도의 절감에 따른 비용의 감소효과가 가장 큰 한 제품을 선택하여 생산속도를 최소화 시키는 것이 가장 경제적이라는 주장을 하였으며, 그 한 제품을 선택하는 규칙을 제시하였다.

Sarker와 Babu(1993)는 위에서 언급한 Silver의 두 논문(1989, 1990)을 결합하여 비용함수에 설비가동비용이 포함되며, 유효재고기간이라는 제한이 있는 경우에 대한 논문을 발표하였는데, Silver(1989)가 유효재고기간의 대상이 되는 제품을 하나로 제한한데 반해 여러 제품에 대한 유효재고기간의 제약이 있는 경우를 다루었다. 그들은 이 논문에서 유효재고기간을 맞추기 위하여 공동생산주기를 감소시키는 방법과 생산속도를 감소시키는 방법을 각각 제시하였으며, 설비가동비용이 생산준비비용이나 재고유지비용에 대해 상대적으로 크다면 공동생산주기를 감소시키는 것이 경제적이라는 주장을 하였다. 이 이외에도 Goyal(1993), Sarker(1994)등이 이 문제에 대한 논의를 하였다.

위의 논문들이 생산속도를 낮추더라도 일단 생산이 시작되면 생산기간 동안에는 일정한 생산속도로 생산을 진행한다는 가정을 한 반면에 Moon, Gallego, Simch-Levi(1991)등은 생산기간 도중에 생산속도를 변경하는 방식을 제안하였다. 이 방법은 생산기간중 어느 정도는 수요율만큼의 생산속도로 생산하다가 그 이후에는 최대 속도로 생산을 하는 방법을 말하는 것으로 원료의 투입속도 등 관련 기능이 제품의 생산속도변화에 즉각적으로 따를 수 있는 경우에만 적용할 수가 있다. Gallego(1993)는 이 논문을 확장한 연구를 발표한 바 있다.

그러나 위에서 살펴본 모든 논문들은 설비의 최대생산속도만을 고려하였으며 최저생산속도는 고려하질 않았다. 예를 들어 단조작업의 경우 생산율을 너무 낮게 하면 생산중 소재온도의 저

하로 성형 또는 Crack 불량을 유발하게 되며, 적정 단조압보다 낮게 되어 금속조직이 치밀해 지지 않으므로 후속 공정에서 아무리 열처리를 잘 하여도 경도불량이 된다. 알루미늄 압출작업의 경우에도 소재온도, 컨테이너 온도, 금형온도의 조화가 필수적인데 생산율을 계속 감소시키게 되면 소재 및 마찰열의 감소로 온도균형을 맞출 수가 없게 되어 불량이 생기게 됨은 물론 소재가 컨테이너 내에서 굳어 버리게 되어 막대한 작업손실을 초래하게 된다. 즉 모든 생산설비는 생산속도의 적정범위 내에서 생산이 이루어 지도록 되어 있으며 결과적으로 최대생산속도와 최저생산속도를 동시에 고려하는 것이 타당하다고 하겠다.

이러한 상황은 종이를 생산하는 제지설비나 압출기계, 냉간단조기계등의 운영과정에서 쉽게 발견할 수 있다. 이러한 설비에서 생산속도에 관련된 또 다른 비용을 고려할 수가 있다. 예를 들어 냉간단조기계의 경우 생산속도는 타발속도로 정의할 수가 있는데, 타발속도를 증가시키면 금형의 피로를 가속화시키게 되므로 금형의 수명이 단축되어 금형비용이 증가되게 된다. 또한 속도가 증가할수록 불량이 증가하는 등 여러 가지 생산속도에 따르는 변동비용이 발생하게 된다.

따라서 본 논문에서는 Silver(1990)의 논문을 바탕으로 하여 설비의 최대, 최저생산속도에 대한 제한을 고려하며, 비용함수에 생산속도 변화에 따르는 변동비용이 추가된 새로운 모형을 제시하도록 하겠다.

2. 모형

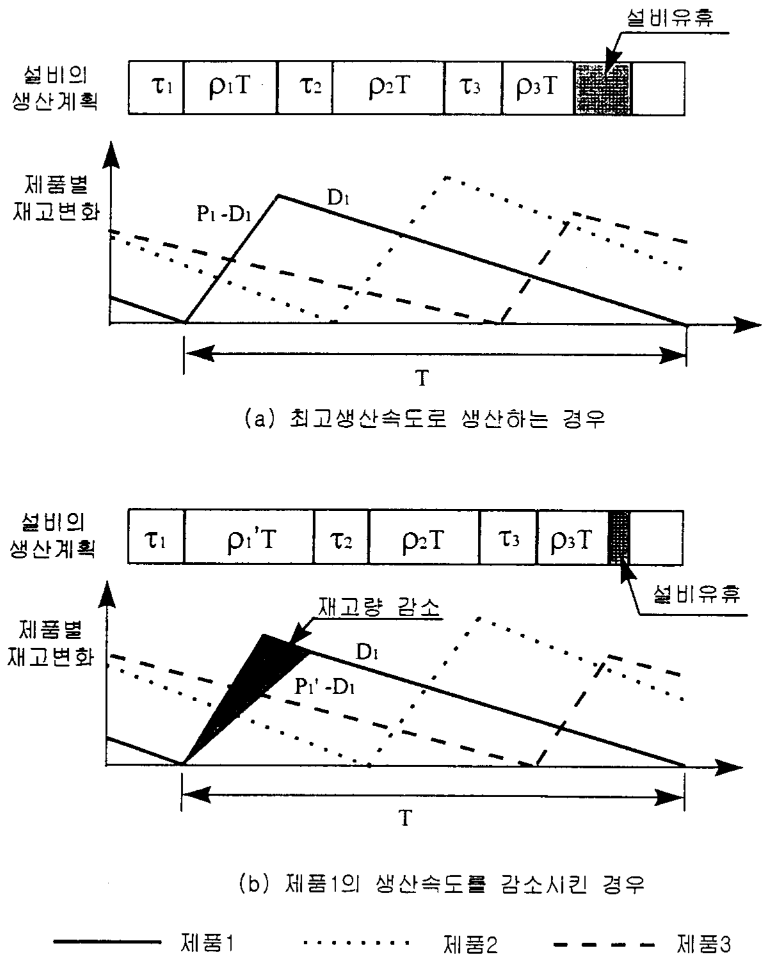
본 모형은 다음과 같은 가정을 토대로 하여 정립되었다.

1) 여러 종류의 제품이 한대의 설비를 공동으로 이용하여 생산된다.
2) 각 제품의 연간수요량은 알려져 있으며 상수이다.
3) 각 제품 생산에 소요되는 생산준비시간은 생산순서에 관계없이 일정하다.
4) 생산방식은 ELSP의 Common Cycle Approach 를 적용한다.
5) 설비의 생산속도는 최대생산속도와 최저생산속도 사이에서 조절이 가능하다.
6) 일단 제품의 생산이 시작되면 생산속도를 변경하지 못한다.
7) 설비가 유휴상태가 되더라도 고려대상제품 이외의 목적에는 사용할 수 없다.

모형의 정립을 위해 사용되는 기호는 다음과 같다.

n : 생산제품의 수
A_i : 제품 i의 생산준비비용
H_i : 제품 i의 단위당 연간 재고유지비용
D_i : 제품 i의 연간 수요량
P_i : 제품 i의 연간 생산속도 (의사결정변수)
P_i^U : 제품 i의 연간 최고생산속도
P_i^L : 제품 i의 연간 최저생산속도
τ_i : 제품 i의 생산을 위한 생산준비시간
C : 설비가동시간에 따라 변하는 연간 설비가동비용
$g_i(P_i)$: 제품 i의 생산속도를 P_i로 했을 때 연간 금형유지비용
T : 공동생산주기(의사결정변수)

〈그림 1〉은 위에서 고려한 전제조건을 바탕으로 시스템을 표현한 것인데 세가지 제품을 교대로 생산하는 경우에 제품1의 생산속도를 감소시켰을 때 전체 시스템의 변화하는 형태를 보여주고 있다. 이 그림에서 $\rho_i = D_i/P_i$를 의미한다.



〈그림 1〉 생산속도와 재고시스템의 관계

위에서 정의한 가정을 바탕으로 하여 연간 총비용함수를 도출하면 다음과 같다. 연간 총비용함수는 연간 생산준비비용, 연간 재고유지비용, 연간 설비가동비용, 연간 금형비용의 4가지 요소로 구성이 된다.

$$\text{연간 생산준비비용} = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n} A_i \qquad (1)$$

$$\text{연간 재고유지비용} = \frac{T}{2}\sum_{i=1}^{n} D_i H_i\left(1-\frac{D_i}{P_i}\right) \qquad (2)$$

$$\text{연간 설비가동비용} = \frac{C}{T}\sum_{i=1}^{n}\left(\tau_i + \frac{D_i}{P_i}T\right) \qquad (3)$$

$$\text{연간 금형유지비용} = \sum_{i=1}^{n} g_i(P_i) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i e^{\beta_i P_i} + \gamma_i$$

(지수함수를 가정한 경우) (4)

이제 각 비용의 합을 연간 총비용, $TC(T, P_1, \ldots, P_n)$라고 정의하면 식(5)가 된다.

$$TC(T, P_1, \ldots, P_n) = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n} A_i + \frac{T}{2}\sum_{i=1}^{n} D_i H_i\left(1-\frac{D_i}{P_i}\right)$$

$$+\frac{C}{T}\sum_{i=1}^{n}\left(\tau_i + \frac{D_i}{P_i}T\right) + \sum_{i=1}^{n} g_i(P_i)$$

$$= \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n}(A_i + C\tau_i)$$

$$+\frac{T}{2}\sum_{i=1}^{n} \mathrm{D_iH_i}\left(1-\frac{D_i}{P_i}\right)+\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{CD_i}{P_i}+\mathrm{g_i(P_i)}\right) \quad (5)$$

ELSP에서는 중요한 제한식이 두 종류 이상의 제품이 동시에 생산이 될 수 없다는 것으로 이러한 상황을 설비간섭(Facility Interference)이라 부른다. 따라서 설비간섭이 발생하지 않도록 하기 위한 조건을 〈그림 1〉로부터 구하면 식(6)과 같아진다. 이때 식(6)의 우변은 공동생산주기 T의 하한값이므로 T_B로 표시하겠으며, T_B는 생산속도 P_i의 함수가 된다.

$$T \geq \sum_{i=1}^{n}\tau_i \Big/ \left(1-\sum_{i=1}^{n}\frac{D_i}{P_i}\right)=T_B \quad (6)$$

따라서 위에서 유도한 목적식과 가정으로부터 도출한 제한식을 이용하여 다음과 같은 문제를 정의할 수 있다. 여기서 목적식은 모든 제한식을 만족하면서 연간 총비용을 최소화시키는 것이며, 의사결정변수는 공동생산주기와 각 제품의 생산속도이다.

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & TC(T, P_1,\dots, P_n) \\ \text{s.t.} \quad & T \geq \sum_{i=1}^{n}\tau_i \Big/ \left(1-\sum_{i=1}^{n}\frac{D_i}{P_i}\right) \\ & D_i \leq P_i^L \leq P_i \leq P_i^U,\ \mathrm{i=1,\dots,\ n} \\ & T \geq 0 \\ & \sum_{i=1}^{n}\frac{D_i}{P_i} \leq 1 \end{aligned}$$

3. 모형의 분석

목적함수와 각 의사결정변수들 사이의 관계를 규명하기 위하여 우선 목적함수$TC(T, P_1,\dots, P_n)$를 공동생산주기 T에 대하여 1차 편미분을 하자.

$$\frac{\partial TC(T, P_1,\dots, P_n)}{\partial T}=-\frac{1}{T^2}\left\{\sum_{i=1}^{n}(A_i+C\tau_i)\right\}+\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}D_iH_i\left(1-\frac{D_i}{P_i}\right) \quad (7)$$

또한 함수형태 파악을 위해 $TC(T, P_1,\dots, P_n)$를 공동생산주기 T에 대하여 2차 편미분을 한 결과는 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 TC(T, P_1,\dots, P_n)}{\partial T^2}=\frac{2}{T^3}\left\{\sum_{i=1}^{n}(A_i+C\tau_i)\right\}>0 \quad (8)$$

그 결과 우리는 목적함수가 변수 T에 대하여 오목함수임을 알 수 있으며, 모든 제품의 생산속도가 고정된다면 목적함수를 최소화 시키는 최적공동생산주기 T_o를 식(7)로부터 얻을 수 있다.

$$T_o=T_o(P_1,\dots, P_n)=\sqrt{\frac{2\sum_{i=1}^{n}(A_i+C\tau_i)}{\sum_{i=1}^{n}D_iH_i(1-\frac{D_i}{P_i})}} \quad (9)$$

식(9)에서 얻은 T_o를 원래의 목적함수 $TC(T, P_1,\dots, P_n)$에 대입하면 각 제품의 생산속도만으로 구성된 새로운 목적함수 $TC(T_o, P_1,\dots, P_n)$를 얻게 된다.

$$TC(T_o, P_1,\dots, P_n)=\sqrt{2\{\sum_{i=1}^{n}(A_i+C\tau_i)\}\{\sum_{i=1}^{n}D_iH_i(1-\frac{D_i}{P_i})\}}+\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{CD_i}{P_i}+g_i(P_i)\right) \quad (10)$$

이제 새로이 얻은 목적함수 $TC(T_o, P_1,\ldots, P_n)$를 P_j에 대해 1차편미분을 하면

$$\frac{\partial TC(T_o, P_1,\ldots, P_n)}{\partial P_j}$$

$$=\frac{D^2_j H_j}{2P^2_j}\sqrt{\frac{2\sum_{i=1}^{n}(A_i+C\tau_i)}{\sum_{i=1}^{n}D_iH_i(1-\frac{D_i}{P_i})}}$$

$$+(-\frac{CD_j}{P_j^2}+g'_j(P_j)) \qquad (11)$$

가 되며, P_j에 대해 2차편미분을 하면 식(12)의 결과를 얻게 된다.

$$\frac{\partial^2 TC(T_0, P_1,\ldots, P_n)}{\partial P_j^2}=$$

$$-\frac{D_j^2H_j}{P_j^3}\sqrt{\frac{2\sum_{i=1}^{n}(A_i+C\tau_i)}{\sum_{i=1}^{n}D_iH_i(1-\frac{D_i}{P_i})}}\,[1+\frac{D_j^2H_j}{4P_j}$$

$$(\sum_{i=1}^{n}D_iH_i(1-\frac{D_i}{P_i}))^{-1}]+(\frac{2CD_j}{P_j^3}+g_j''(P_j)) \qquad (12)$$

이제 제품 j에 대한 연간 금형비용이 생산속도에 대해 지수함수로 증가한다고 가정하고, $\alpha_i>0$, $\beta_j>0$, γ_j를 지수함수의 형태를 결정하는 모수라고 할 때, $g_j(P_j)=\alpha_j e^{\beta_j P_j}+\gamma_i$로 볼 수 있으며, 이 경우에 $g_j'(P_j)=\alpha_j\beta_j e^{\beta_j P_j}\geq 0$, $g_j''(P_j)=\alpha_j\beta_j^2 e^{\beta_j P_j}\geq 0$가 되어 식(11), 식(12)에 각각 대입하면 완전한 수식을 얻을 수 있다.

〈특성1〉

$\frac{\partial^2 TC(T_0, P_1,\ldots, P_n)}{\partial P_j^2}=0$이 되는 P_j는 최대 하나이다.

〈특성1〉로부터 우리는 총비용함수의 변곡점이 최대 하나임을 알 수 있다.

〈특성 2〉

$\frac{\partial TC(T_0, P_1,\ldots, P_n)}{\partial P_j}=0$이 되는 P_j는 최대 두개이다.

(증명)

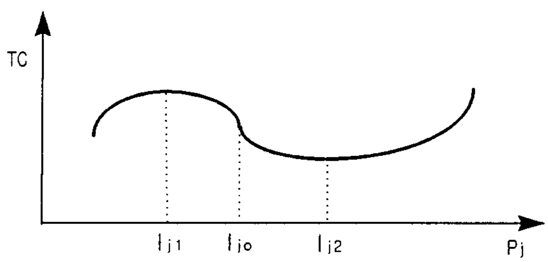
식 (11)을 0으로 만드는 P_j를 구하는 것은 아래이 좌변과 우변의 값이 같아지는 P_j를 구하는 것이다.

$$\frac{D_j^2H_j\sqrt{2\sum_{i=1}^{n}(A_i+C\tau_i)}}{(CD_j-P_j^2\alpha_j\beta_j e^{\beta_j P_j})}$$

$$=2\sqrt{\sum_{i=1}^{n}D_iH_i(1-\frac{D_i}{P_i})}$$

그런데 위 식에서 좌변항은 P_j에 대해 오목증가함수이며, 우변항은 P_j에 대해 볼록증가함수이므로 두 함수가 만나는 점은 최대 두개이다.

위의 두가지 성질을 이용하여 제품 j의 생산속도 P_j와 총비용 $TC(T_0, P_1,\ldots, P_n)$와의 관계를 그려보면 〈그림 2〉와 같은 볼록-오목함수임을 알 수 있다. 여기에서 I_{j1}, I_{j2}는 1차미분값을 0으로 만드는 P_j값이며, I_{jo}는 2차미분값을 0으로 만드는 P_j값이다.



〈그림 2〉 한 제품의 생산속도와 비용함수의 형태

위에서 우리는 각 제품의 생산속도에 대한 총 비용함수의 형태에 대하여 살펴보았다. 이론적으로는 비용함수가 볼록-오목함수의 형태를 가지지만 일반적으로 생각할 수 있는 대부분의 경우에 있어서는 오목함수 부분만이 대상 구간에 포함된다. 각 모수의 값을 변화시키면서 비용함수 형태의 변화를 관찰한 결과 변곡점이 있는 비용함수가 되려면 재고유지비용이 설비가동비용에 비해 상대적으로 매우 커지는 경우에는 가능하다 ($D_jH_j \gg C/T$). 그러나 본 논문에서 다루고자 하는 사례의 경우나 모수들의 값이 일반적으로 납득할 수 있는 관계를 가지는 상황하에서는 식(12)의 값이 양수가 되어 단순한 오목함수의 형태를 가진다. 따라서 최저생산속도가 $P_i^L \geq I_{i1}$의 조건을 만족한다는 가정하에서 해법절차를 찾도록 한다. 이러한 가정하에서도 함수의 특성상 폐쇄형(Closed form)의 해를 구하는 것은 곤란하다. 따라서 여기에서는 비용함수의 형태와 제한식을 고려하여 해를 구하는 탐색적 해법절차를 제시하도록 하겠다.

탐색절차를 위하여 다른 제품의 생산속도를 P_i로 고정시킨 상태에서 제품 j의 생산속도를 P_j에서 $P_j-\Delta$로 Δ만큼 감소시켰을 때 비용함수에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다.

$$\Delta TC_j = TC(T_0, P_1, \ldots, P_j, \ldots, P_n) - TC(T_0, P_1, \ldots, P_j-\Delta, \ldots, P_n)$$

$$= \sqrt{2\{\sum_{i=1}^{n}(A_i + C\tau_i)\}}\Big[\sqrt{\sum_{i=1}^{n} D_iH_i(1-\frac{D_i}{P_i})\}} - \sqrt{\{\sum_{i=1, i\neq j}^{n} D_iH_i(1-\frac{D_i}{P_i})\} + D_jH_j(1-\frac{D_j}{P_j-\Delta})}\Big] + \frac{CD_j}{P_j} - \frac{CD_j}{P_j-\Delta} + \alpha_j e^{\beta_j P_j} - \alpha_j e^{\beta_j(P_j-\Delta)} \tag{13}$$

탐색을 해 나가는 과정에서 식(13)의 결과를 탐색방향을 결정하는 데 이용하도록 하겠다. 이 ΔTC_j값이 양의 값을 가지면 제품 j의 생산속도를 감소시키는 것이 이점이 있다는 것을 의미한다. 탐색과정에서 고려하여야 할 추가적인 함수의 특성은 다음과 같다.

〈특성 3〉 일단 ΔTC_j값이 음수가 되더라도 다른 제품의 생산속도를 감소시키면 양수로 바뀔 수가 있기 때문에 끝까지 탐색고려대상에서 배제해서는 안된다.

4. 해법절차

단계1. k=0으로 하고 모든 제품의 $P_i(K)=P_i^U$로 한다. 이때 k는 반복 횟수를 의미한다.

단계2. 식(9)에 의해 T_o를 구한다. 이때 T_o가 식(6)을 만족하면 단계 3으로 가고, 아니면

$$T_o^* = \frac{\sum_{i=1}^{n}\tau_i}{1-\sum_{i=1}^{n}\frac{D_i}{P_i^U}}$$ 로 하고 중단한다.

단계3. 제품 i에 대해 각각 $P_i=P_i(k)-\Delta$로 하여 식(6)의 제한식과 $P_i>P_i^L$의 제한식을 만족하는지 검토한다. 하나라도 만족하지 않는 i 에 대하여는 고려대상에서 제외한다.

단계4. 제한식을 만족하는 i 에 대하여는 식(14)에 의해서 ΔTC_i를 구하고 가장 큰 양의 값을 갖는 제품을 선택한다. 이때 제품 j가 선택되었다고 하자.

단계5. k=k+1 로 하고 $P_j(k)=P_j(k-1)-\Delta$로, 나머지 $P_i(k)=P_i(k-1)$로 한다.

단계6. 새로운 $P_i(k)$를 이용하여 공동생산주기 T_o와 연간 총비용 TC를 구한 뒤 단계 3으로 돌아가 탐색과정을 반복한다. 고려대상이 되는 모든 제품의 ΔTC_i값이 음수가 되면 중단한다.

5. 적용사례

창원공단의 ㄱ금속의 냉간단조공정을 대상으로 본 모형을 적용하여 보기로 하겠다. 이 공장에서는 알루미늄 소재를 원료로 하여 전자부품 및 자동차부품을 생산하고 있다. 주요 생산설비중의 하나인 630톤 프레스를 분석대상으로 결정하여 조사한 바, 현재 분석대상기계에서 생산하고 있는 제품은 4가지이이며, 각 제품별 수요는 연중 거의 일정하게 안정적으로 발생하고 있다. 또한 이 공장의 관리자는 설비의 순수한 가동율이 높지 않은 상태이므로 생산속도를 최대로 할 필요가 없다는 인식을 하고 있었다. 아울러 금형의 주요 파손부위는 펀치(Punch)부위로서, 생산속도에 영향을 받아 생산속도가 증가하면 수명이 단축되어 금형 1조로 생산할 수 있는 수량이 줄어든다는 사실을 경험적으로 알고 있었다. 따라서 과거에는 최대속도로 생산을 하던 것을 정상속도로 변환하려는 준비를 하고 있었으며, 이 과정에서 조사결과 생산속도의 상한과 하한 사이에서는 생산속도를 변화시키더라도 제품의 품질에는 거의 영향이 없는 것으로 판명되었다. 이러한 상황에서 생산속도를 줄이는 것이 경제적인가에 대한 검토를 위하여 본 모형을 개발하였으며, 다음과 같은 과정에 의해 해를 도출하였다. 이 사례에 사용된 자료는 〈표 1〉과 같다.

〈표 1〉 생산관련자료

품명	연간 수요량	생산속도 (개/분)			금형수명 (만타/조)			생산준비시간	생산준비비용	제조원가	금형가격
		최저	정상	최대	최저	정상	최대				
제품1	121만개	25	35	40	5.5	5.0	4.6	40분	8천원	365원	20만원
제품2	115만개	25	35	40	8.0	7.2	6.4	40분	8천원	390원	25만원
제품3	18.5만개	15	22	25	2.2	2.0	1.7	50분	1만원	1800원	62만원
제품4	18.2만개	15	22	25	3.5	3.2	2.8	50분	1만원	1250원	75만원

〈표1〉에서 제품1의 경우를 보면 생산속도(타발속도)를 분당 25개로 하면 금형수명이 55000번이며, 분당 속도를 40으로 하면 금형수명이 46000으로 줄어든다는 말이다. 따라서 연간수요량 121만개의 제품을 생산하기 위해서는 최저생산속도를 채택하였을 경우에 연간 22대의 금형이 필요하며, 최대속도로 생산하는 경우에는 연간 26.3대의 금형이 필요하게 된다. 따라서 생산속도에 따른 금형비용의 차이는 860,000원이 된다.

본 모형에 위의 자료를 적용하기 위하여 자료들을 다음과 같이 변환하였다. 먼저 하루의 작업시간을 8시간으로 하여 1년간 250일 작업을 하는 것으로 간주하였고, 재고유지비용은 제조원가의 20%로 산정하였으며 그 결과는 〈표2〉와 같다. 또한 설비의 가동시간에 따라 변하는 연간유지비용에는 직접인건비, 전기요금, 기타 유지비 등이 포함되는데 C=21000천원/년 이다.

〈표 2〉 변환된 자료

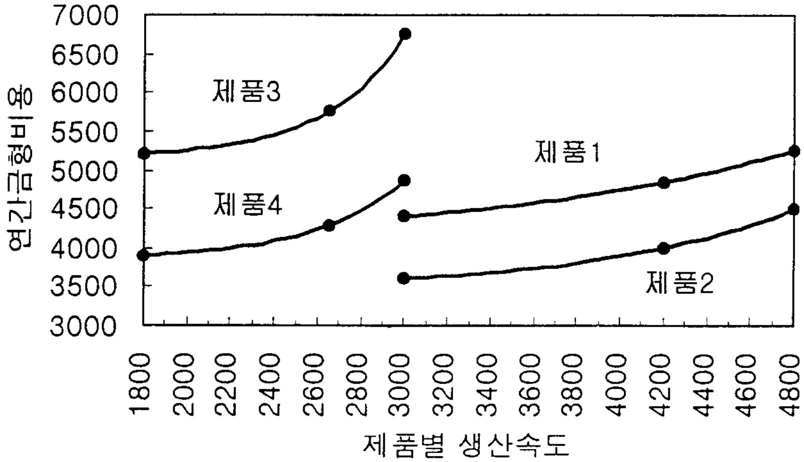
(수량단위 : 천개, 금액단위 : 천원)

제품 i	D_i	P_i			τ_i	S_i	H_i
		최저	정상	최고			
1	1,210	3,000	4,200	4,800	0.00033	8	73
2	1,150	3,000	4,200	4,800	0.00033	8	78
3	185	1,800	2,640	3,000	0.00042	10	360
4	182	1,800	2,640	3,000	0.00042	10	250

이제 생산속도와 연간금형비용과의 관계를 나타내는 함수를 결정해야 한다. 예를 들어 선반이나 밀링머신의 경우에는 절삭속도와 공구수명간의 관계에 대한 함수가 정립이 되어 있어 이를 고려한 경제적 생산방식에 대한 연구들이 발표되었다. 일반적으로 금형의 수명에 영향을 주는 요소들은 금형의 재질, 대상물의 물성, 타발시 발생하는 압력, 금형의 피로회복에 필요한 시간 등의 요인들이 복합적으로 작용하고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구의 대상이 되었던 타발속도와 금형수명 간의 관계를 직접적으로 규명해주는 연구결과를 찾을 수 없었다. 따라서 부득이 타발속도가 증가하면 금형의 피로회복에 필요한 시간이 확보되지 못하기 때문에 금형의 파손속도도 오목증가 함수가 된다는 경험적 사실과, 생산속도가 일정수준 이하로 떨어지면 금형의 피로가 충분히 회복되어 생산속도의 변화에 따른 더 이상의 금형수명의 변화는 발생하지 않는다는 사실을 바탕으로 α_i, β_i, γ_i의 세 가지 모수로 구성되는 지수함수 $g(P_i)=\alpha_i e^{\beta_i P_i}+\gamma_i$를 금형비용함수로 정의하였다. 이 함수의 모수값들을 추정하기 위해서는 최소한 3가지 이상의 다른 속도에 대한 금형수명의 자료가 필요하다. 그러나 생산현장에서 여러가지 속도에서 실험해야 하는 현실적인 어려움때문에 최저, 정상, 최고의 3가지에 대하여만 금형수명을 조사하였다. 자세한 결과는 〈표 3〉에 있으며 〈그림 3〉은 각 제품별 실험값과 금형비용함수의 관계를 보여주고 있다.

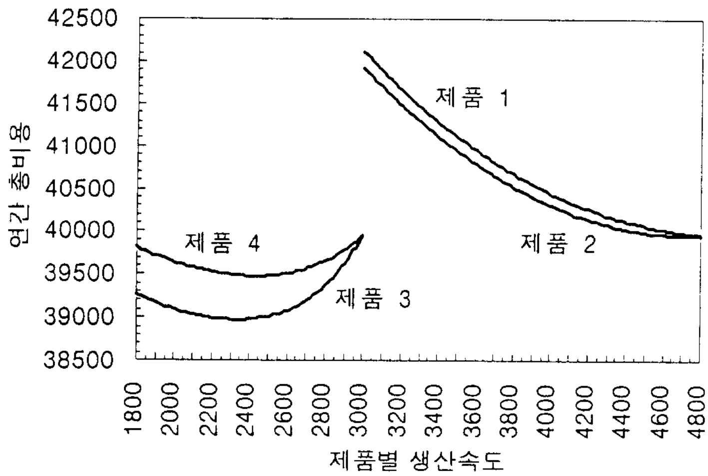
〈표 3〉 생산속도와 금형비용 간의 함수관계

제품	생산속도별 연간금형소요			생산속도별 연간금형비용			지수함수의 모수		
	최저	정상	최고	최저	정상	최고	α_i	β_i	γ_i
1	22.00	24.20	26.30	4,400	4,840	5,260	32.406210	0.000746	4096.14
2	14.38	15.97	18.00	3,595	3,993	4,500	5.391178	0.001098	3449.54
3	8.41	9.25	10.88	5,214	5,735	6,746	0.337108	0.002819	5160.14
4	5.2	5.69	6.50	3,900	4,268	4,875	0.597991	0.002483	3847.80



〈그림 3〉 제품별 생산속도에 따른 연간 금형비용함수의 추정

〈그림 4〉는 다른제품의 생산속도를 최대로 고정시켜 놓고 한제품의 생산속도를 상한과 하한 사이에서 변화시킬 때 총비용함수의 형태를 보여주고 있다.



〈그림 4〉 제품별 생산속도와 총비용함수와의 관계

이제 위에서 정리한 생산관련자료를 이용하여 본 논문에서 제시한 해법절차에 따라 해를 구해 보도록 하겠다.

단계 1. k=0, $P_1(0)=4800$, $P_2(0)=4800$, $P_3(0)=3000$, $P_4(0)=3000$.

단계 2. $T_o=0.02374155>T_B=0.00388601$.

단계 3. $\Delta=10$으로 하여 제한식의 위배여부를 검토한 결과 해당되는 것이 없다.

단계 4. $\Delta TC_1=-1.8528$, $\Delta TC_2=1.4790$, $\Delta TC_3=39.9469$, $\Delta TC_4=21.0458$ 이 되어 제품 3이 선택된다.

단계 5. k=1로 하고 $P_1(1)=4800$, $P_2(1)=4800$, $P_3(1)=2990$, $P_4(1)=3000$으로 하여 단계 3으로 돌아간다.

위와 같은 과정을 반복하여 얻은 최종 해는 P_1=4800, P_2=4700, P_3=2330, P_4=2440이며, 공동생산주기 T_o=0.02385, 연간총비용 TC=38477.47(천원)이 된다. 이 사례에서는 생산속도의 하한이나 공동생산주기의 하한조건에 위배되어서 생산속도를 더 이상 감소시키지 못하는 경우는 발생하질 않았다. 비용감소효과는 모든 제품을 최대생산속도로 생산할 때의 총비용 39960.37(천원)에 비해서 3.71% 였으며, 정상속도로 생산하는 경우에 비해서는 1.73% 였다. 이 때의 총비용은 39154.97(천원)으로 계산되었다. 이는 〈그림 3〉에서 보는 바와 같이 제품 1, 2의 경우에서 최대속도와 정상속도에 대한 비용함수의 차이가 미미한 반면에, 제품 3과 4의 경우에서는 그 차이가 크기 때문으로 분석할 수 있다. 따라서 정상속도로 생산하는 것도 이 사례에서는 비용효과면에서도 어느 정도 경제적이었음을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 생산속도조절이 가능한 단일설비에서 재고유지비용, 생산준비비용, 생산변동비용, 금형비용 등으로 구성되는 총비용을 최소화시키는 경제적 생산계획에 관하여 모형을 정립하고 해법절차를 제시하였다. 기존의 연구와 다른 점은 생산속도의 상한과 하한을 동시에 적용하였고, 금형비용이라는 요인을 비용함수에 추가하였다는 점이다.

향후 연구방향으로는 다음과 같은 것들을 고려할 수 있다.

첫째, 이 논문에서는 생산속도와 금형비용의 관계를 경험적 사실에 의하여 지수형 증가함수로 가정하였으나 이에 대한 정확한 함수형태의 도출이 필요하다.

둘째, 함수의 특성상 매우 효율적인 해법절차를 제시하지는 못하였다. 이에 관한 추가적인 연구도 가능할 것이다.

세째, 이 논문에서는 하나의 설비만을 대상으로 분석하였는데, 실제 이 회사에는 비슷한 종류의 여러대의 설비가 있어서 제품의 할당문제도 해결해야 할 문제였다. 따라서 이 두 문제를 통합화 하는 것도 해결해야 할 과제이다.

참 고 문 헌

[1] Silver, E.A., "Shelf Life Considerations in a Family Production Context," *International Journal of Production Research*, Vol. 27, No. 12(1989), pp. 2021-2026.

[2] Silver, E.A., "Deliverately Slowing down Output in a Family Production Context," *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 1(1990), pp. 17-27.

[3] Moon,I.K., G. Gallego and D. Simchi-Levi, "Controllable Production Rates in a Family Production Context," *International Journal of Production Research*, Vol. 29, No. 12(1991), pp. 2459-2470.

[4] Gallego, G., "Reduced Production Rates in the Economic Lot Scheduling Problem," *International Journal of Production Research*, Vol. 31, No. 5(1993), pp. 1035-1046.

[5] Goyal, S.K., "A Note on 'Effect of Production Cost on Shelf Life'," *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 9(1994), pp. 2243-2245.

[6] Sarker, B.R. and P.S. Babu, "Effect of Production Cost on Shelf Life," *International Journal of Production Research*,

Vol. 31, No. 8(1993), pp. 1865-1872.

[7] Sarker, B.R., "A Reply to 'A Note on "Effect of Production Cost on Shelf Life"'," *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 9(1994), p. 2247.