

흐름작업장 형태를 따르는 유연 생산시스템에서의 일정계획 —Scheduling in Flexible Manufacturing System with Flow Type—

장석화*

Abstract

This paper deals with a scheduling problem with the objective of maximizing the throughput rate in flexible manufacturing system with flow shop type. Manufacturing system is consisted of multi-stage in series. All kinds of parts are processed in same order, but are not same in processing time. No buffer space is allowed between stages, and no part waiting is allowed in each stage.

Parts flow control method for determining the optimal production sequence of all parts and the production starting time of each part is proposed.

1. 서언

일련의 여러 단계의 작업장이 직렬로 이루어져 가상된 생산시스템에 여러 제품종류가 생산되는 것으로, Flow Shop 형태를 따르는 유연 생산시스템에서의 생산문제를 생각하자. 생산되는 제품종류에 관계없이, 모든 제품은 직렬로 배일되어 있는 작업장을 차례로 모두 거치며 가공 혹은 조립되어 하나의 완제품이 만들어진다. 즉 여러 제품종류가 동일한 생산라인에서 동일한 순서의 가공과정을 거친다. 그러나 각 작업장에서의 가공시간은 제품종류에 따라 각각 다르다.

이와같이 일련의 여러 작업장이 직렬로 배일되어 있는 생산라인에서 공정순서는 같으나 공정시간이 다른 여러 종류의 제품들을 생산하는 문제는 기업의 생산문제에서 흔히 발생하게 된다. 이러한 경우에 연구대상은 많이 존재하고 있다. 그중 하나의 문제로서 여러 종류의 제품을 생산시 발생하는 것으로 제품종류 사이에 가공하는 순서(release sequence) 및 각 제품의 생산작수시점에 따라서 생산률(throughput rate)이 달라진다.

제작의 생산 방법에서는 제품종류별로 생산 봇크기(lot size)를 고려하는 배치(batch) 생산방법으로, 여러 제품을 주기적으로 교대로 생산하는 형태를 취하였다[4, 5]. 이는 새로운 제품의 생산시 생산작수비용이 발생하는 것으로 사정하였기 때문에 이러한 생산방법을 많이 취하였다. 이 경우에는 한번에 생산되는 양이 크기 때문에 제품의 재고량을 증가시키는 경향이 있다.

반면, 유연 생산시스템처럼 생산작수비용이 존재하지 않은 상황에서는 제품의 봇크기를 아주 적정하는 생산방법을택한다. 이러한 경우에 여러 종류의 제품을 수시로 바꾸어 생산하게 된다. 따라서 각 제품의 재고량은 거의 적게 발생할 수 있으나, 생산시 제품의 번번한 교체로 인하여 기계적인 면과 생산 일정계획면 등 여러 가지 문제가 발생할 수 있다. 그중 생산율에 영향을 주는 생산 일정계획이 중요한 문제중의 하나이다. 동일한 생산라인에 다른 종류를 생산하는 데 있어서 제품혼합(product mix), 제품사이의 생산순서 및 간격이 생산율에 큰 영향을 준다.

Flow shop에서의 일정계획 문제는 오래전부터 연구되어 왔다[1, 2, 3, 9]. 여기서의 연구는 여러 작업이 하나씩 주어진 경우에 모두 생산하기 까지의 생산시간, 평균 효율시간, 기계의 평균이용 등과 같은 수행척도(performance measures)을 이용하여 최적의 생산순서를 결정하는 문제에 중점을 두고 있다.

반면 다른 분야로서 작업종류가 여러개이고, 각 작업의 생산하려는 양이 주어질 경우의 연구는 Hitz[8]가 주어진 작업집합으로부터 kit라 불리는 부품형태의 부품집합을 실장에서 작업장으로 보내는 방법으로 생산률을 최대화하였다. Graves[6]는 주어진 작업을 고정비율로 하여 일정계획을 구하기 위하여 순환적 접근법을 제안하였다. Han와 McGinnis[7]는 다단계 직렬 제조시스템에서 각 단계의 기계가 여러대이고 고장날 수 있으며, 각 단계 사이에 buffer 공간이 있는 경우에 각 단계가 산에 차이 생산율을 최대화하는 문제를 다루었다.

*인천대학교 산업공학과 조교수

접수: 1991. 10. 25.

본 논문에서는 앞에서 설명한 바와 같이 하나의 생산라인에 여러 종류의 제품을 생산할 때 생산율을 최대화하는 제품 사이에 생산순서 및 각 제품의 생산차수시점을 결정하는 문제이다. 각 작업장과 작업장 사이의 가공물을 운송하는데 있어서 운송시간은 발생하지 않는다고 가정한다. 주어진 수요량을 여러번의 생산회수로 나누어 각 제품의 생산 몽크기를 적게하여 모든 제품의 필요생산량 대비 실제생산량의 비율을 일정하게 유지하면서 생산시간을 최소로하는 제품 사이의 생산순서를 결정하는 방법을 연구하려고 한다.

2. 모형 기술

본 논문은 그림 1과 같은 생산시스템으로 이루어진 것으로 부품저장소에서 각 종류의 제품이 생산되기 위하여 생산라인에 보내져 일련의 연속된 작업장에서의 가공을 통하여 제품이 완성된다. 각 작업장에는 기계(machine)가 한대씩 있는 것으로 가정한다.

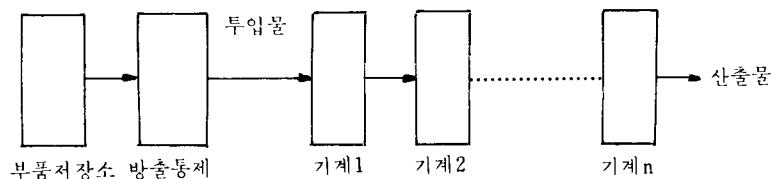


그림 1. 생산시스템의 흐름 예

각 종류의 제품을 생산하기 위하여 필요한 부품이 부품저장소(part pool)에 있다. 이러한 부품들은 적절한 방출통제(releasing control) 기준에 의해 생산라인의 기계1(작업장)에서 투입물이 되어 연속적으로 배열되어 있는 모든 기계에서의 가공과정을 통하여 산출물인 제품이 만들어진다.

본 문제를 설명하기 위하여, 다음의 가정과 부호를 정의한다.

2.1 가정

- (1) 생산시스템은 n 대의 기계(machine)가 직렬로 구성되어 있다.
 - (2) 기계(작업장) 사이의 buffer 공간과 이동시간은 무시한다.
 - (3) 제품종류는 m 개이며, 모두 동일한 생산라인에서 생산된다.
 - (4) 각 기계에서의 가공시간은 제품종류에 따라 각각 다르고, 가공시간은 확정적이다.

2.2 부호

i, j : 제품종류 첨자, i, j=1, 2, ……, m
 k : 기계(작업장) 순서 첨자, k=1, 2, ……, m
 t : 생산구간 순서 첨자, t=1, 2, ……, T
 P_{ik} : 제품종류 i의 기계 k에서의 가공시간
 d_{it} : 제품종류 i의 t번째 생산구간에서 생산되어야 할 필요량
 D_i : 제품종류 i의 생산되어야 할 총 필요량

$$D_i = \sum_{t=1}^T d_{it}$$

동일한 생산라인에 여러 종류의 제품을 혼합하여 생산하는 본 문제에서 매 시기마다 방출통제에서 어떤 한 순서로 제품을 생산할 것인가를 결정하는 것은 목적 함수에 따라 달라질 수 있다.

연속적인 시간개념으로 각 제품의 생산비율을 균일하게 유지하는 문제일 경우에는 각 제품에 대하여 생산하려고 하는 총필요량에 대한 아직 생산되지 않은 양의 비율이 높게 유지되고 있는 제품을 생산순서로 결정할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 각 제품의 생산해야 할 필요량 D_i 를 T번의 생산회수로 나누어 하는 것이다. 이 경우에는 각 제품의 생산비율을 연속적인 시간개념에서 같도록 유지하는 것이 아니고, 연속에 가까운 이산적인 시간개념에서 각 생산구간에서는 생산비율이 같도록 유지한다.

T번의 생산구간 중 $t(t=1, 2, \dots, T)$ 번째 생산구간에서 각 제품의 생산해야 할 필요량은 $d_t = (d_{1t}, d_{2t}, \dots, d_{mt})$ 이다. 여기서 T는 시간으로 나타내진 것이 아니고, 생산회수로 나타낸 것이다. 그리고 d_{it} 는 D_i 를 T로 나누어 균등하게 성하여질 수도 있고, 균등하게 하지 않을 수도 있다. T를 크게하면 각 생산구간에서의 각 제품의 필요 생산량은 적어져 연속적인 생산형태에 가깝고, 반대로 T를 적게하면 배치(batch) 생산형태가 될 수 있을 것이다.

3. 최적 생산율을 위한 생산순서 및 생산 착수시점 결정

3.1 최적 변환회수 결정

각 제품은 T번의 생산구간으로 나누어 생산할 때, 임의의 생산구간 t에서 $(d_{1t}, d_{2t}, \dots, d_{mt})$ 를 생산시 생산율을 최대화하는 제품 사이의 생산순서와 제품들의 생산착수시점을 구하려고 한다.

생산구간 $t(t=1, 2, \dots, T-1)$ 에서의 생산시간을 생산구간 $t-1$ 에서의 마지막 제품이 생산이 시작된 시점 직후부터 생산구간 t에서의 마지막 제품의 생산이 시작된 시점까지로 정의한다. 따라서 이 생산시간을 최소로 함으로서 생산율을 최대화할 수 있을 것이다. 그리고 마지막 생산구간 T에서는 생산시간에 마지막 생산제품의 가공시간을 합친 총 생산시간을 최소화함으로써 생산율을 최대화 할 수 있다.

이를 위하여 우선 제품사이의 변환회수를 구하는 모형을 개발한다. 여기서 변환이란 제품종류 $i(i=1, 2, \dots, m)$ 이 생산된 후 제품종류 $j(j=1, 2, \dots, m)$ 이 생산되는 경우를 말하는 것으로, 변환회수는 이의 바뀐 회수를 말한다.

먼저 제품종류 i 가 생산라인의 기계1에서 생산시작(release)된 직후 제품종류 j 가 기계1에서 생산시작(release)되기까지의 시간간격을 구한다. 이 시간간격을 제품 사이의 지연시간(waiting time)이라 하자. 이 지연시간은 모든 제품들이 각 기계에서 기다림(waiting)이 없이 가공될 수 있는 것을 가정하고 구하여진 것으로 각 제품들의 생산 시작 가능한 시점중 가장 빠른 시점사이의 시간간격을 말한다.

다음의 부호를 성의한다.

w_{ij} : 모든 제품종류가 생산라인의 각 기계에서 기다림없이 가공이 이루어지는 경우에 제품종류 i 가 기계1에서 가공이 시작된 직후 제품종류 j 가 기계1에서 가공이 시작되기까지의 시간간격.

x_{ij}^1 : 생산구간 t에서의 제품종류 i 의 생산이 시작된 직후 제품종류 j 가 바로 이어서 생산되는 회수.

i_t : 생산구간 t에서의 마지막으로 생산되는 제품종류.

그러면 w_{ij} 는 다음과 같이 구하여진다.

$$w_{ij} = \max \left\{ \sum_{s=1}^{i-1} p_{is} - \sum_{s=1}^{j-1} p_{js} \right\}, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, m \quad (1)$$

생산구간 t에서 m개의 제품종류의 생산량 $(d_{1t}, d_{2t}, \dots, d_{mt})$ 의 생산시 생산시간을 최소로 할 수 있는 제품사이의 변환회수를 구하기 위하여 선형계획모형을 개발한다.

1) 목적함수

제품종류 i 의 생산 시작직후에 제품종류 j 의 생산 시작시까지의 지연시간(w_{ij})에 변환된 횟수(x_{ij}^1)를 곱하면 총 지연시간이 구해지며, 생산시간을 최소화하기 위하여는 이 지연시간을 최소화하여 달성될 수 있으므로 다음과 같이 나타내진다.

$$\text{Minimize } Z_t = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} x_{ij}^1$$

2) 제약조건

제품사이의 변환과 관련된 제약조건식을 구한다.

(1) 제품사이의 총 변환회수는 다음과 같다.

$t=1$ 일 경우,
 $d_{11} + d_{21} + \dots + d_{m1} = 1$

$t > 1$ 일 경우,
 $d_{1t} + d_{2t} + \dots + d_{mt}$

그러므로,

$t=1$ 일 경우,
 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} = d_{1t} - 1$

$t > 1$ 일 경우,
 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} = \sum_{i=1}^m d_{it}$

(2) 제품종류 i 의 생산식후 이어서 어떠한 제품으로 변환된 회수는 $t=1$ 일 경우 최대한 d_{it} 이고, $t > 1$ 일 경우 $i=i_{t-1}$ 이면 최대한 $d_{it}+1$ 이고, $i \neq i_{t-1}$ 이면 최대한 d_{it} 이다.

그러므로, $t=1$ 일 경우,

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq d_{it}, \quad i=1, 2, \dots, m,$$

$t > 1$ 일 경우,

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n x_{ij} &\leq d_{it}, \quad i \neq i_{t-1}, \quad i=1, 2, \dots, m, \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} &\leq d_{it} + 1 \quad i = i_{t-1}, \end{aligned}$$

(3) 어떠한 제품의 생산식후 이어서 제품종류 j 로 변환된 회수는 $t=1$ 일 경우 최대한 d_{jt} 이고, $t > 1$ 일 경우는 d_j 이다.

그러므로, $t=1$ 일 경우,

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq d_{jt}, \quad j=1, 2, \dots, m,$$

$t > 1$ 일 경우,

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = d_{jt}, \quad j=1, 2, \dots, m,$$

(4) 제품종류 i 의 생산식후 이어서 제품종류 i 가 생산된 회수는 $t=1$ 일 경우 최대한 $d_{ii} - 1$ 이고, $t > 1$ 일 경우 $i=i_{t-1}$ 이면 최대한 d_{ii} 이고, $i \neq i_{t-1}$ 이면 최대한 $d_{ii} - 1$ 이다.

그러므로, $t=1$ 일 경우,

$$x_{ii} \leq d_{ii}, \quad i=1, 2, \dots, m,$$

$t > 1$ 일 경우,

$$\begin{aligned} x_{ii} &\leq d_{ii} - 1, \quad i \neq i_{t-1}, \quad i=1, 2, \dots, m, \\ x_{ii} &\leq d_{ii}, \quad i = i_{t-1}. \end{aligned}$$

(5) 제품사이의 연속적인 순서를 이루기 위하여 제품종류 i 에서 제품종류 $j \neq i$ 로의 변환이 적어도 한개이상 존재한다.

그러므로, $t \geq 1$ 일 경우,

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \geq 1, \quad i=1, 2, \dots, m$$

(6) 제품사이의 변환회수는 음수가 될 수 없다.

그러므로, $t \geq 1$ 일 경우,

$$x_{ij} \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, m, \quad j=1, 2, \dots, m,$$

이상의 목적함수와 제약조건에서 설명된 것을 이용하여 다음과 같이 선형계획모형을 나타낼 수 있다.

$t=1$ 일 경우,

$$\begin{aligned} \text{Minimize } Z_1 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} x_{ij} \\ \text{subject to } & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m x_{ij} = \sum_{i=1}^m d_{ii} - 1, \\ & \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq d_{ii}, \quad i=1, 2, \dots, m \\ & \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq d_{jj}, \quad j=1, 2, \dots, m \\ & x_{ij} \leq d_{ii} - 1, \quad i=1, 2, \dots, m \\ & \sum_{i=1}^m x_{ij} \geq 1, \quad i=1, 2, \dots, m \\ & x_{ij} \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, m, \quad j=1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

$t=2, 3, \dots, T-1$ 일 경우,

$$\begin{aligned} \text{Minimize } Z_t &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} x_{ij} \\ \text{subject to } & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m x_{ij} = \sum_{i=1}^m d_{ii} \\ & \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq d_{ii}, \quad i=1, 2, \dots, m, \quad i \neq i_{t-1} \\ & \sum_{i=1}^m x_{ij} \geq d_{ii} + 1, \quad i=i_{t-1} \\ & \sum_{i=1}^m x_{ij} = d_{ii}, \quad j=1, 2, \dots, m \\ & x_{ii} \leq d_{ii} - 1, \quad i=1, 2, \dots, m, \quad i \neq i_{t-1} \\ & x_{ii} \leq d_{ii}, \quad i=i_{t-1} \\ & \sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, \quad i=1, 2, \dots, m \\ & x_{ij} \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, m, \quad j=1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

$t=T$ 일 경우,

$i=i_T$ 인 경우 목적함수

$$Z_T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} x_{ij} + \sum_{k=1}^n p_{ik} \cdot k$$

$i_{T-1} = i_T, \quad t>1$ 의 선형계획모형 중

3번 째 제약식이

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = d_{iT}$$

로 바뀐다.

그리고 나머지 제약식은 둘 다 $i_t = 1, 2, \dots, m$ 에 대하여 각각 풀어. 이 중 가장 적은 값을 갖는 해

가 $t=T$ 에서의 해가 된다.

여기서 $t=1$ 경우의 선형계획모형을 풀어 해인 제품사이의 번화횟수를 이용하여 생산순서(sequence)를 결정한 후, $t=2, 3, \dots, T$ 의 순서로 생산구간 t 일 경우에 생산구간 $t-1$ 의 마지막 생산제품을 이용하여 선형계

획모형을 풀후 제품 사이의 변환회수를 이용하여 생산순서를 결정한다. 다음 부분에서 생산순서를 구하는 방법을 설명한다.

3.2 생산순서 결정

선형계획모형을 풀어서 각 생산구간에서 모든 제품의 생산시간을 최소로 하기 위한 제품사이의 변환회수를 구하는 방법을 앞부분에서 설명하였다. 여기서는 구하여진 제품종류사이의 변환회수를 이용하여 실제의 제품사이의 생산순서를 구하고자 한다.

생산구간 1에서의 제품사이의 생산순서를 결정한다.

$x_{ij} > 0$, $i=1, 2, \dots, m$, $j=1, 2, \dots, m$ 인 해에서 제품종류 i 의 생산후에 제품종류 j 가 생산되는 순서($i-j$)가 포함되는 것을 의미하므로 또한 제품종류 j 이후에 제품종류 j' 가 생산되는 순서($j-j'$)가 존재하는 것이 해에 포함되어 있어야 일련의 순서가 형성된다. 본 문제의 해에서는 어느 생산구간에서든 일련의 연속적인 순서는 존재한다. 생산구간 1에서 마지막으로 생산할 제품종류는 $\sum_{j=1}^m x_{ij} < d_{i1}$, $i=1, 2, \dots, m$ 인 조건을 만족하는 한개의 제품종류가 존재하며, 이것이 마지막 생산할 제품종류가 된다. 그리고 첫번째 생산할 제품종류는 해에서 일련의 순서를 구성할 수 있는 어떠한 제품종류도 생산가능하고, 첫번째 이후의 생산은 첫번째 생산할 제품종류가 정하여진 후에 생산순서를 형성할 수 있는 것이 계속하여 생산할 제품으로 결정된다.

이어서 생산구간 t ($t=2, 3, \dots, T$)에서의 제품 사이의 생산순서를 결정한다. 생산구간 t 에서의 첫번째 생산제품은 생산구간 $t-1$ 에서의 마지막 생산제품과 연결될 수 있는 제품의 순서를 $x_{ij} > 0$ 인 해에서 찾으며, 마지막으로 생산될 제품 종류는 첫번째 생산할 제품을 제외한 나머지 생산할 제품들중에서 $\sum_{j=1}^m x_{ij} < d_{it}$, $i=1, 2, \dots, m$ 인 제품종류가 한개 존재하므로 이러한 조건을 만족시키는 것이 마지막 생산제품이 된다. 그리고 첫번째 이후의 중간의 생산제품은 해에서 첫번째의 제품종류와 생산순서가 연결될 수 있는 제품을 찾아 생산순서를 정한다.

예를 들어, $d_{11}=3$, $d_{21}=2$, $d_{31}=1$ 이고, 생산구간 $t-1$ 에서의 마지막 생산제품 종류가 2일 때 선형계획을 풀 결과가 $x_{12}=1$, $x_{21}=2$, $x_{31}=0$ 면 $i=3$ 에서 $\sum_{j=1}^m x_{3j} < d_{31}$ 이므로 제품종류 3이 마지막으로 생산되어야 한다. 그리고 $t-1$ 에서 마지막 생산제품이 제품종류 2이므로 연결될 수 있는 순서를 정한다. 그러므로 생산순서는 제품종류 1-1-2-1-2-3과 1-2-1-1-2-3으로 된 2개의 배열이 구하여진다. 그리고 이의 최소 지체시간은 $w_{11}+2w_{12}+2w_{21}+w_{23}$ 이고, 이것이 생산시간을 최소로 하는 제품사이의 배열순서이다.

3.3 생산 차수시점 결정

앞부분의 생산순서 결정 방법을 이용하여 생산기간 t 에서의 제품 사이의 생산순서를 결정할 수 있다. 이어 제품사이의 생산차수 시점을 식 (1)을 이용하여 쉽게 결정할 수 있다. 제품종류 i 의 생산시작 후 w_{ij} 시간후에 제품종류 j 가 생산이 시작된다.

4. 수치적 예제

3-제품 종류, 5-기계로 이루어진 예제를 생각하자.

$i \backslash k$	1	2	3	4	5
1	3	4	3	6	5
2	4	2	5	3	3
3	4	5	2	2	3

생산하여야 할 필요량은 $D_1=20$, $D_2=15$, $D_3=10$ 이다. 우리는 $T=5$ 로 하여 $t=1, 2, 3, 4, 5$ 에 대하여 생산하고자 하는 필요량은 다음과 같다고 하자.

$i \backslash t$	1	2	3	4	5	D_i
1	4	3	5	3	5	20
2	3	3	2	4	3	15
3	2	1	1	3	3	10

먼저 w_{ij} 를 구한다.

	1	2	3
1	6	6	8
2	4	5	4
3	6	4	5

각 생산구간에서의 최적 변화회수, 생산순서 및 생산 차수시점을 구하면 다음의 표 1에 나타낸 것 같다.

표 1. 생산순서와 생산차수시점

t	변화횟수	생산순서	생산 차수시점
1	$x_{11}=2, x_{12}=1, x_{21}=2, x_{22}=1, x_{32}=2$	3-2-1-1-1-2-3-2-1-	0-4-8-14-20-26-30-34-38-
2	$x_{11}=1, x_{12}=2, x_{21}=2, x_{22}=1, x_{32}=1$	2-1-1-2-3-2-1-	44-48-54-60-64-68-72-
3	$x_{11}=4, x_{12}=1, x_{21}=1, x_{22}=1, x_{32}=1$	1-1-1-1-2-3-2-1-	78-84-90-96-102-106-110-114-
4	$x_{11}=2, x_{12}=1, x_{21}=1, x_{22}=3, x_{32}=3$	1-1-2-3-2-3-2-3-2-1-	120-126-132-136-140-144-148-152-156-160
5	$x_{11}=5, x_{12}=1, x_{21}=3, x_{22}=2$	1-1-1-1-1-2-3-2-3-2-3	166-172-178-184-190-196-200-202-208-212-216

그러므로 총 생산시간은 $216 + 16 = 232$ 이다.

5. 결 론

본 논문에서는 단계별로 구성된 생산시스템에서 공정순서는 같으나 공정시간이 다른 여러종류의 제품을 생산하는 문제를 다루었다. 각 제품의 주어진 양을 생산할 때 생산물을 최대화 할 수 있는 제품들의 생산순서와 생산 차수시점을 구하는 방법을 나타내었다.

생산회수는 임의적으로 결정하는 것으로 가정하였으나, 각 제품에 대한 수요률을 이용하여 결정될 수 있음을 것이다. 그러나 이에 대한 연구가 필요할 것이다. 그리고 각 작업장사이에 적절한 buffer 공간을 허용할 경우도 여기서의 방법이 쉽게 적용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Baker, K. R., *Introduction to Sequencing and Scheduling*, Wiley, New York, 1974.
- [2] Conway, R., W. Maxwell and L. Miller, *Theory of Scheduling*, Addison-Wesley, reading, MA, 1967.
- [3] Dannenbring, D. G., "An evaluation of flow-shop sequencing heuristics," *Management Science*, 23, 1174-1182(1977).
- [4] Elmaghraby, S. E., "The economic lot scheduling problem : review and extensions," *Management Science*, 24, 587-598(1978).
- [5] Goyal, S. K., "Economic batch quantity in a multi-stage production system," *Int. J. Prod. Res.*, 16, 267-273(1978).
- [6] Graves, S. C., H. C. Meal, D. Stefk and A. D. Zeghmi, "Scheduling in reentrant flow shop," *J. of Operations Management*, 14, 197-207(1983).
- [7] Han, M. H. and L. F. McGinnis, "Throughput rate maximization in flexible manufacturing cells", *IE Transactions*, 20, 409-417(1988).
- [8] Hitz, K., "Scheduling flexible flow shop-II," *Report LIDS-R-1049*, Laboratory for Information and Decision Systems, MIT(1988).
- [9] Ignall, E. and L. E. Schrage, "Operations Research", 13, 400-412(1965).