

공장 자동화를 위한 다열 배치에서의 작업자 할당*

김 채 복

경북대학교 경영학부

Workforce Assignment in Multiple Rows for Factory Automation

Chae-Bogk Kim

School of Business Administration, Kyungpook National University

This paper considers the workforce assignment problem to minimize both the deviations of workloads assigned to workers and to maximize the total preference between each worker and each machine. Because of the high expense of technology education and the difficulties of firing employees, there is no part time workers in semiconductor industry. Therefore, multi-skilled workers are trained for performing various operations in several machines. The bicriteria workforce assignment problem in this paper is not easy to obtain the optimal solution considering the aisle structure and it is belong to NP-class. The proposed heuristic algorithms are developed based on the combination of spacefilling curve technique, simulated annealing technique and graph theory focusing on the multiple-row machine layout. Examples are presented for the proposed algorithms how to find a good solution.

Keywords : workforce assignment, bicriteria optimization, spacefilling curve, graph theory

1. 서 론

현재 우리 나라의 반도체 산업에서는 최적의 작업자 수를 결정하는 것보다는 불량률을 줄이고 작업자들에게 가능한 균등하게 작업 부하를 배정하기 위한 연구가 필요하다. 특히, 공장 자동화가 진행되고 있는 우리 나라 반도체 공장의 trimming, forming 작업장에서는 자동화 기계와 반자동 기계가 함께 있으며, 작업자가 다기능공 일(multi-skilled worker) 경우에 작업자는 기계에 따른 작업 선호도가 있고 작업 선호도가 낮은 기계에 배치될 경우에는 불량품을 생산할 확률이 높다. 그런데, 우리나라의 반도체 공장 현장에서는 작업자 배치를 leader girl이라 불리는 사람이 자신의 경험과 직관에 의해 아침마다 작업자를 배치하고 있다. 이에 보다 합리적으로 작업자를 기계에 배치함으로써 작업자 사이의 작업 부하 편차를 줄임과 동시에 작업 선호도가 높은 기계에

작업자를 배치하여 불량률을 줄일 필요가 있다.

작업자 배치문제는 생산관리 분야에서 지난 30년 동안 꾸준히 연구되어져 왔으나 대부분의 연구들이 실제 현장에서 사용되기에는 너무나 이론적이다. 또한 공장의 기계 배치를 고려하여 작업자를 기계에 배당하는 연구가 미비하며 공장에서 흔히 중요하게 생각하는 작업자에 대한 작업 부하의 평준화와 각 기계에 대한 작업자의 작업 선호도를 함께 고려하는 두 목적(bicriteria)의 연구도 부족하다. 문헌에 나타난 순수한 작업자 배치에 대한 연구는 크게 세 가지로 분류될 수 있다. 첫째는, 기계의 수와 능력(capacity)이 주어진 상황에서 작업 부하를 남기내에 마치기 위하여 작업자를 할당하는 연구이며[1, 5, 11, 33, 34, 35, 36] 둘째는, 수행하여야 할 업무와 작업자를 연결하는 작업 배정에 관한 연구이고[8, 14, 15, 18, 23, 27, 30, 31] 셋째는, 작업자의 작업 부하를 가

* 이 논문은 2003년도 경북대학교의 연구비에 의하여 연구되었음

능한 균등하게 하기 위하여 shift scheduling, cyclic scheduling 등과 같이 작업자에게 작업일과 비작업일을 제시하는 연구이다[2, 9, 26, 39]. 그러나, 우리나라의 반도체 산업의 실정은 보다 많은 우량의 제품을 생산하는데 주력하고 있다. 공장의 상황이 peak time일 때도 공장을 운영할 수 있도록 충분한 작업자를 확보하고 있으므로 최적의 작업자 수를 결정하는 것은 중요하지 않다. 또한, 파트타임의 작업자를 고용하는 것은 기술 교육의 문제점 때문에 힘들며, 매일 매일 작업자에게 기계를 할당하는 것은 작업 일수를 결정하는 연구와 구별되며, JIT 환경에서 다기능공을 주어진 작업에 할당하거나 교육하는 연구와도 다르다.

본 연구의 목적은 공장의 기계 배치, 작업 부하의 평준화, 작업 선호도를 고려하여 빠른 시간에 좋은(good) 작업자 배치를 얻을 수 있는 자기 발견적(heuristic) 알고리즘을 개발하여 공장에서도 쉽게 사용할 수 있도록 하는 것이다. 보다 생산 현장의 상황에 적합하도록 작업자 배치 문제를 설정하기 위하여 공장이 바쁜 시기(peak period)에 있을 때와 바쁘지 않은 시기(slow period)일 때를 나누어서 문제들을 설정하고, 주어진 기계배치에서 작업자가 다룰 수 있는 기계 수에 대한 제약, 한 작업자에게 할당된 기계들의 배치에 대한 제약을 고려하였다. 공장의 상황이 바쁘지 않은 시기일 때는 작업자 수가 바쁜 시기에 맞추어 결정되어져 있으므로 작업자 사이의 작업 부하의 편차를 최소화하여야 한다. 작업 부하뿐 아니라 여러 가지 척도(measure)들의 편차를 줄이는 연구는 많이 수행되어져 있으며 [10, 22, 23, 34] 개발된 알고리즘의 기본 개념을 본 연구의 작업자 배치 문제에 이용할 수 있다. 특히 최근에 많이 연구되어지고 있는 space-filling curve 기법과 [3, 4, 6, 23] 그래프를 이용한 기법을 [16, 17, 20, 23] 함께 사용하여 실현 가능한 작업자 배치를 구하고, 이 해를 simulated annealing 기법을 [12, 23, 25, 32, 40] 이용하여 작업자의 작업 선호도를 증가시킬 수 있는 해를 찾는다. 공장에서의 설비 배치는 여러 가지 형태로 연구되어져 있는데 본 논문에서는 그 중 일반적으로 쉽게 생산 현장에서 접할 수 있는 다열(multiple row) 배치에 초점을 맞춘다. 그러나, 중요한 것은 불량을 줄이기 위하여 작업자의 기계에 대한 작업 선호도를 작업 부하와 함께 고려해야 한다. 작업자 할당 문제에 대한 두 목적 최적화에 대한 연구는 문헌에 많이 발표되어져 있지 않으나, 실제로 반도체 산업뿐만 아니라 다른 산업에 있어서도 매우 필요하다. 본 연구의 필요성은 다음과 같다.

- (1) 설비 배치(facility layout)는 공장 자동화의 개념이 도입된 1980년대부터 공장내에서의 설비들을 자동

화의 개념에 따라 재배치할 필요성이 생김에 따라 더욱 활발히 연구되고 있다. 특히, 다열 배치의 특수 경우인 일열 배치와 이열 배치에서 물류 비용을 최소화하는 문제는 [21, 24, 35] 최근에 연구되는 주제이다. 본 연구에 제안되는 해법 절차는 작업자 배치 문제를 공장의 설비 배치와 함께 고려하기 때문에 생산 현장에서 작업자를 기계에 배치하는데 도움을 줄 수 있다.

- (2) 과거 대량 생산 형태에서는 제품의 질(quality)보다는 양(quantity)에 중점을 두어 생산 관리를 했으나, 현재의 다양한 소비자의 욕구를 만족시키기 위해서는 생산의 형태는 다품종 소량의 형태가 되었고 제품의 품질이 제품 판매의 중요한 척도가 되었다. 일본의 자동차가 품질로 미국의 Big 3를 물리치고 미국 자동차 시장을 점령한 것을 생각하면 품질의 중요성을 알 수 있다[7]. 본 연구에서 제안되는 해법 절차는 각 기계에 대한 작업자의 작업 선호도에 따라 작업자를 할당하기 때문에 제품의 불량률을 줄일 수 있다.
- (3) 생산 현장의 작업자들은 노조를 결성하고 해마다 임금 투쟁을 하고 있으며 자신들의 작업량(작업시간)에 대하여 매우 민감하다. 따라서, 회사의 입장에서는 가능한 작업자들의 작업 부하를 균등하게 할당하여 작업자들이 불만을 가지지 않도록 할 필요가 있다. 본 연구에서 제안되는 해법 절차는 각 작업자에게 할당되는 작업량에 대한 편차를 최소화하기 때문에 작업자들이 가능한 균등한 작업 부하를 가질 수 있다.

2. 작업자 배치

작업 현장에서 작업자가 아침에 출근하면 곧바로 기계에 할당하여야 하므로 최적의(optimal) 해를 구하는 것은 시간적인 제약때문에 바람직하지 않으므로, 빠른 시간에 좋은 해를 구하는데 연구의 초점을 맞추고자 한다. 본 연구를 다른 산업에도 쉽게 확장할 수 있도록 작업자 한 명이 m 대의 기계까지 동시에 작업할 수 있다고 가정하였다. 또한, 바쁘지 않은 시기에는 K 대의 기계가 작업량이 있으며, 바쁜 시기에는 M 대의 기계에서 작업을 수행한다고 가정하였다 ($K < M$). 기계 배치는 연구결과와 일반화를 위하여 모든 공장에서도 흔히 볼 수 있는 다열 배치에 대하여 고려하였다.

2.1 작업자 할당 문제의 정형화

작업자 할당 문제는 작업자를 기계에 배치하는 것으로 정의될 수 있다. 작업자 i 가 기계 j 에 할당되었을 때, 작업 선호도(비용)은 $U_{ij}(C_{ij})$ 로 정의될 수 있으며 이 때 $i=1, 2, \dots, N$ 이며 $j=1, 2, \dots, M$ 이다. 일반적으로 작업자 할당문제는 수학적으로 다음과 같이 수식화된다.

$$\begin{aligned}
 \text{(P1) Maximize} \quad & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M U_{ij} X_{ij} \\
 \text{Subject To} \quad & \sum_{j=1}^M X_{ij} = 1 \text{ for } i = 1, 2, \dots, N. \\
 & \sum_{i=1}^N X_{ij} = 1 \text{ for } j = 1, 2, \dots, M. \\
 & X_{ij} \text{ are binary}
 \end{aligned}$$

본 논문에서는 작업자 할당문제를 공장이 바쁜 시기와 바쁘지 않은 시기로 나누어 접근한다. 특히, 반도체 공장의 trimming, forming 작업장에 대하여 연구의 초점을 맞추고자 한다. 매일마다 아침에 작업관리자는 그날에 작업이 필요한 기계들에 출근한 작업자를 배치하여야 한다. 월말과 같이 공장이 바쁜 시기에는 대부분의 기계가 거의 쉬지 않고 작업을 해야하므로 작업자의 작업 선호도를 최대화하는 것이 바람직하다. 그러나, 바쁘지 않은 시기에는 기계들의 작업량이 다르므로 각 작업자에게 할당된 작업 부하(workload)를 가능한 균등하게 하는 것이 중요한 문제이다. 실제로 노조가 결성되고 모든 작업자가 작업량을 가능한 균등하게 하려고 하는 지금의 공장 상황에서는 작업 선호도와 작업 부하가 매우 중요한 척도이다. 일반적으로, 반도체 공장에서는 기술 교육의 비용이 매우 높기 때문에 파트타임 작업자를 고용하기는 어렵다. 그러나, 반도체가 고부가 가치의 수익성이 높은 품목이므로 관리자는 공장이 바쁜 시기에도 각 작업장을 운용할 수 있도록 충분한 작업자를 고용하고 있다.

기술적인 제약 조건은 다음과 같다. 기계들의 배치와 크기 때문에 각 작업자는 복도 구조를 고려하여 서로 이웃하는(adjacently located considering aisle structure) m 개의 기계를 최대로 다룰 수 있다. 각 작업자가 m 개의 기계를 할당받을 수 있으므로 관리자는 작업자를 M/m 만큼 유지하고 있다. 그러므로, 최적의 작업자 수를 정하는 것은 중요한 문제가 되지 못한다. 반면에, 바쁜 시기를 대비하여 충분한 작업자가 있으므로 각 작업자에게 할당된 작업 부하의 편차를 최소화하는 것이 바람직하다. 공장이 바쁘지 않는 시기에는 작업 순서, 각 기계에 장착된 금형의 형태에 따라 각 기계에서 수행되어야 할

작업 부하가 다르다. 문제 (P1)에서 첫번째 제약식은 각 작업자가 반드시 한대의 기계에 할당되어야 함을 의미한다. 그러므로, 각 작업자가 최대 m 개의 기계들을 다룰 수 있도록 수정하여야 한다. 바쁘지 않은 시기의 할당 문제는 순차적 목표 계획법(preemptive goal programming)으로 수식화 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{(P2) [Goal 1] Minimize} \quad & \sum_{i=1}^N |w_i - W/n| \\
 \text{[Goal 2] Maximize} \quad & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K U_{ij} X_{ij} \\
 \text{Subject To} \quad & 1 \leq \sum_{j=1}^K X_{ij} \leq m \text{ for } i = 1, 2, \dots, N. \\
 & \sum_{i=1}^N X_{ij} = 1 \text{ for } j = 1, 2, \dots, K. \\
 & \sum_{j=1}^K v_j X_{ij} = w_i \text{ for } i = 1, 2, \dots, N.
 \end{aligned}$$

한 작업자에게 할당된 기계는 복도 구조를 고려하여 서로 이웃에 위치하여야 한다.

$$X_{ij} \text{ are binary.}$$

$$\text{where, } W \equiv \sum_{i=1}^N w_i = \sum_{j=1}^K v_j, \text{ 총부하량}$$

$$w_i \equiv \text{작업자 } i \text{에 할당된 부하량}$$

$$v_j \equiv \text{기계 } j \text{가 작업하여야 하는 작업량}$$

문제 (P2)는 공장이 바쁜 시기에는 다음과 같이 수정하여야 한다. 각 작업자는 바쁜 공장의 생산 일정을 맞추기 위하여 반드시 m 대의 기계를 할당받아야 한다. 각 기계가 거의 대부분 쉬지 않고 일을 해야할 정도의 작업 부하를 가지고 있으므로 작업 부하를 평준화하는 것은 의미가 없다. 그러나, 작업자마다 기계에 대한 작업 선호도가 서로 다르므로 공장이 바쁜 시기의 작업자 할당 문제는 다음과 같이 수식화 되어진다.

$$\begin{aligned}
 \text{(P3) Maximize} \quad & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M U_{ij} X_{ij} \\
 \text{Subject To} \quad & \sum_{j=1}^M X_{ij} = m \text{ for } i = 1, 2, \dots, N. \\
 & \sum_{i=1}^N X_{ij} = 1 \text{ for } j = 1, 2, \dots, M. \\
 & \sum_{j=1}^M v_j X_{ij} = w_i \text{ for } i = 1, 2, \dots, N.
 \end{aligned}$$

한 작업자에게 할당된 기계는 복도 구조를 고려하여 서로 이웃에 위치하여야 한다.

X_{ij} are binary.

where, $W \equiv \sum_{i=1}^N w_i = \sum_{j=1}^M v_j$, 총부하량

$w_i \equiv$ 작업자 i 에 할당된 부하량

$v_j \equiv$ 기계 j 가 작업하여야 하는 작업량

문제 (P2)는 두개의 목적 함수를 갖는 최적화 문제이다. 또한, 한 작업자에게 할당된 기계들은 서로 이웃하여야 하는 지역적인 제한 때문에 정확히 수식적으로 표현하기가 힘들다. 복도 형태를 고려한 지역적인 제한이 없다고 하더라도 이 문제는 NP-class에 속하는 0-1 정수 목표 계획법 문제이다. (P3) 또한 지역적인 제한이 없다고 하더라도 0-1 정수 계획법 문제이다. 그러므로, (P2)와 (P3)의 최적 작업자 배치안을 구하는 것보다는 자기 발견적 기법을 개발하여 좋은 배치안을 찾는 것이 바람직하다.

2.2 작업자 배치 해법

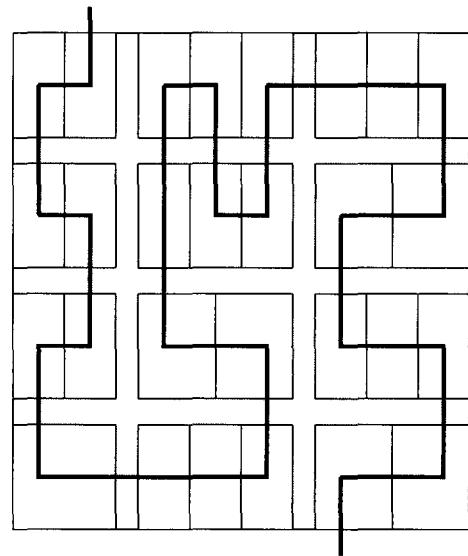
본 연구의 bicriteria 작업자 할당 문제에 대하여 최적해를 구하는 접근 방법을 고려하지 않고 heuristic 알고리즘의 개발에 논문의 초점을 맞춘 이유는 이 문제의 복잡성(complexity) 때문이다. 공장이 바쁜 시기와 바쁘지 않은 시기로 나눈 이유는 대부분의 생산 현장이 월말과 같이 바쁜 시기와 그렇지 않을 경우가 매우 많이 발생한다는 현실을 고려하기 위함이다(생산 계획에 따라 꾸준히 작업을 하지 못하고 있으며 계획의 변경이 매우 빈번하다). 다열의 설비 배치를 주제로 한 연구는 일반적인 생산 현장에서 빈번하게 볼 수 있기 현실 때문이며, 또한 다열 배치의(multiple rows) 경우를 해결하면 이를 일열 배치나 이열 배치에 바로 적용할 수 있다. 본 연구에서 사용되어진 spacefilling curve기법, simulated annealing기법, 그래프 이론을 통한 접근 방법 등이 다열 배치인 경우의 작업자 할당에 사용될 수 있다. 본 연구에서는 문제를 2가지로 나누었다. 첫 번째는 문제 (P2)에 대하여 다열 설비 배치에 대해 연구해 보며 두 번째는 문제 (P3)에 대해 다열 설비 배치에 관하여 생각해 보고자 한다.

2.2.1. 바쁘지 않은 시기의 다열 배치

문제 (P2)의 복잡성(complexity) 때문에 간단히 좋은 해를 얻는 절차를 개발하는 것은 쉽지 않다. 그러므로, 본 연구에서는 해를 얻기 위하여 순차적인 단계들로(sequential steps) 구성되어진 알고리즘을 개발하고자 한다. 먼저 작업 부하가 있는 기계가 K 대, 작업자가 N 명 있으므로, 실현 가능한 해를 찾기 위하여 각 기계가 반

드시 한 명의 작업자에게 할당될 수 있도록 K 대의 기계들을 N 개의 집합들로 구성한다. 이 때 한 작업자가 최대 m 개의 기계를 다룰 수 있으므로(복도의 형태로 인하여 다룰 수 있는 최대 기계 수가 m 보다 작은 경우도 있다.) 한 개의 기계 집합에는 기계 수가 m 개 보다 같거나 작아야 한다. 지역적인 제한을 만족시키기 위하여 각 집합에 속해 있는 기계들은 위치적으로 서로 이웃하여야 한다.

본 연구에서는 다열 배치에서 해를 얻기 위하여 spacefilling curve 기법을 이용한다. 최근에 spacefilling curve 기법은 traveling salesman 문제[3], 자동 창고 문제[4], 설비 배치 문제[6] 등에서 사용되었다. 설비 배치 문제처럼 각 기계는 미리 정의된 사각형과 대응이 되고 spacefilling curve가 모든 사각형을 지날 수 있도록 만들어야 한다. 문제 (P2)와 (P3)는 지역적 제한때문에 한 작업자에게 할당된 기계들은 복도를 고려하여 서로 이웃해 있어야 한다. 그러므로, 한 작업자에게 할당된 모든 사각형은 서로 이웃해 있어야 한다. Spacefilling curve는 하나의 사각형(기계를 나타냄)에서 다른 사각형으로 가기 전에 반드시 이웃한 사각형을 지나야 한다. 다열 배치에 대한 spacefilling curve기법의 예가 <그림 1>에 나타나 있다.



<그림 1> Spacefilling curve기법의 예

본 연구의 문제 (P2)의 제약 조건을 만족하는 해는 많이 있으므로, [목표 1]을 먼저 고려하면 각 작업자에게 할당된 작업 부하의 절대치 편차(absolute deviation)를 최소화하여야 한다. 다시 말하면, 이 때 사용할 알고리즘 1은, 편차의 합을 최소화하는, 각 집합이 공집합이 아니며 각 집합의 원소들이 m 개가 넘지 않도록 K 개의 기계

들을 N 개의 집합으로 구성하는 것이다. 문제를 해결하기 위해 알고리즘 1에서 필요한 정보는 기계의 대수, 작업자의 수, 각 기계에 할당된 작업 부하이다.

알고리즘 1의 기본 개념은 이상적인 작업 부하로부터 절대치 편차를 최소화할 수 있도록 기계들을 그룹화 하는 것이다. 만약 각 단계에서의 작업 부하가 이상적으로 누적되면 누적작업량은 직선의 모양을 나타내게 되며, 이 때의 절대치 편차의 총합은 0이다. 이상적인 작업 부하와 실제로 할당된 작업 부하 사이에 편차가 있을 때에는 이상적인 작업 부하보다 많을 때와 적을 때를 함께 계산한 후 이상적인 작업 부하와 편차가 적은 쪽을 선택한다. 알고리즘 1이 어떻게 적용되는지를 간략하게 설명하면 다음과 같다. 먼저, 기계 1부터 K 의 작업 부하를 순서대로 나열한다. 다음에 작업 부하를 이상적인 작업량이 초과될 때까지 계속 누적시킨다. 첫 번째 기계 집합을 구하기 위하여 제일 마지막에 할당된 작업 부하를 포함했을 때와 하지 않았을 때의 편차를 계산한 후 편차가 적은 쪽으로 기계 집합을 정한다.

Algorithm 1

Step 1. 각 작업자의 작업량을 초기화 한다. 각 작업자의 이상적인 작업량을 구한 후, 누적작업량을 초기화 한다.

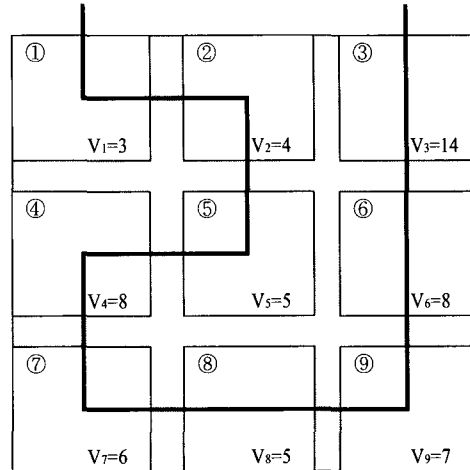
Step 2. 각 작업자에게 할당된 누적작업량이 이상적인 작업량을 초과하지 않을 때까지 각 기계의 작업량을 더한다. 누적 할당된 작업량이 이상적인 누적 작업량을 초과하는 경우와 초과되지 않는 두 경우의 편차를 구한 후, 작은 편차를 가지는 작업자 할당을 선택한다.

Step 3. 작업량에 대한 할당이 끝난 작업자를 작업량과 함께 저장한다. 만약 최종 작업자 1명이 남으면, 남은 작업량을 할당한 후 마친다. 그렇지 않으면, Step 2로 가서 작업자별 작업량을 계속 할당하는 절차를 수행한다.

실제로 알고리즘 1은 just-in-time 생산 방식에서 순서 결정을 할 때 사용되는 mixed model sequencing method 와[13, 28, 29] 유사하다. Mixed model sequencing method 에서는 이상적인 부품 소요치로부터 가장 작은 편차를 가지는 제품을 찾기 위하여 모든 종류의 제품들을 대안으로 생각하고 계산을 한다. 그러나, 알고리즘 1에서는 하나의 집합 속에 있는 기계들은 서로 이웃하게 배치되어야 한다는 조건을 만족하는 기계들 중에서 이상적인 작업 부하와 가장 작은 편차를 가지는 기계 집합을 찾으려 한다.

[예제 1] 한 작업장에 9대의 기계와($K=9$) 4명의 작업

자가($N=4$) 있다. 기계 배치, 복도 구조, 각 기계의 작업량, spacefilling curve가 그림 2과 같이 주어지고, 한 작업자가 최대 4대의($m=4$) 기계까지를 다룰 수 있다고 하자. 알고리즘 1을 적용하여 작업자를 기계에 할당하면 다음과 같이 해를 구할 수 있다.



<그림 2> 기계 배치와 각 기계의 작업량

Step 1. 총 작업량 = 60. 각 작업자별 이상적인 작업량 = $60/4 = 15$. Spacefilling curve에 따른 기계 순서는 (1, 2, 5, 4, 7, 8, 9, 6, 3)이다.

Step 2. 첫 번째 작업자의 누적 작업량이 이상적인 누적작업량을 넘는 경우: $(3+4+5) < 15 < (3+4+5+8)$

기계 (1, 2, 5) 할당시 편차는 $15 - 12 = 3$.

기계 (1, 2, 5, 4) 할당시 편차는 $20 - 15 = 5$.

그러므로, 첫 번째 작업자에게 기계 (1, 2, 5)를 할당한다.

Step 3. 첫 번째 작업자의 작업량(12)과 할당된 기계집합을 저장한다. 할당할 작업자가 3명이 남았으므로, Step 2로 간다.

Step 2. 두 번째 작업자의 누적 작업량이 이상적인 작업량을 넘는 경우: $(12+8+6) < 30 < (12+8+6+5)$

기계 (4, 7) 할당시 편차는 $30 - 26 = 4$.

기계 (4, 7, 8) 할당시 편차는 $31 - 30 = 1$.

그러므로, 두 번째 작업자에게 기계 (4, 7, 8)을 할당한다.

Step 3. 두 번째 작업자의 작업량(19)과 할당된 기계집합을 저장한다. 할당할 작업자가 2명이 남았으므로, Step 2로 간다.

Step 2. 세 번째 작업자의 누적 작업량이 이상적인 작업량을 넘는 경우: $(12+19+7) < 45 < (12+19+7+8)$

기계 (9) 할당시 편차는 $45 - 38 = 7$.

기계 (9, 6) 할당시 편차는 $46 - 45 = 1$.

그러므로, 세 번째 작업자에 기계 (9, 6)을 할당한다.

Step 3. 세 번째 작업자의 작업량(15)과 할당된 기계집합을 저장한다. 할당할 작업자가 1명이 남았으므로, 남은 작업량인 기계 3의 14를 네 번째 작업자에게 할당한 후 마친다.

따라서, 최종 결과는 첫 번째 작업자에 기계 (1, 2, 5)를 배정하며 작업량은 12, 두 번째 작업자에 기계 (4, 7, 8)을 배정하며 작업량은 19, 세 번째 작업자에 기계 (9, 6)을 배정하며 작업량은 15, 네 번째 작업자에 기계 (3)을 배정하며 작업량은 14가 된다. 이 경우, 편차의 총합은 $(3 + 4 + 0 + 1) = 8$ 이 된다.

기계의 배치가 일열일 때는 spacefilling curve를 생성하는 방법이 한가지이나 이열일 경우에는 spacefilling curve를 생성하는 방법이 여러 가지이며, 다열일 경우에는 더욱 다양한 종류의 방법이 있다. 그러므로, spacefilling curve에 기초로 다열 배치를 일열 배치로 전환하여 작업자를 할당하면 알고리즘 1을 이용하여 N개의 기계 집합으로 만들 수 있다. 이는 spacefilling curve를 1개 생성할 때마다, 알고리즘 1을 적용하여 작업자 N명에게 할당할 N개의 기계집합을 구할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서, 알고리즘 1을 수행하여 N개의 기계 집합들이 얻어지면 이는 문제 (P2)의 [목표 1]을 만족하는 좋은 (good) 실현 가능 해이다. N명의 작업자와 N개의 기계 집합, 그리고 각 작업자와 기계사이의 작업 선호도가 주어지면 일반적인 작업자 할당 문제를 풀 수 있는 Hungarian Method를 이용할 수 있다. 문제 (P2)의 [목표 1]은 기계 집합 속의 기계들이 바뀌지 않으므로 목적함수의 값이 변하지 않는다. 따라서, 어느 작업자를 어떤 기계 집합에 할당하여야 하는 것을 결정할 수 있다.

구해진 해의 목적함수 값을 더 최소화하기 위해서 simulated annealing 기법을 사용할 수 있다. 해가 주어지면 (N개의 집합과 그 원소들) 하나의 기계 집합에 속하지 않는 두 기계를 임의로 선택한 후 이 두 기계를 바꾸는 것이 지역적인 제한을 위배하는지 아닌지를 확인한다. 만약 이와 같은 작업이 지역적인 조건을 만족하면 목적함수 값을 계산한다. 이 때, 목적 함수의 값이 좋아지면 두 기계를 교환한 후 해를 기록하며 그렇지 않을 경우에는 목적 함수 값의 차이를 계산한 후 이를 D로 둔다. 다음에 균등 분포(uniform distribution)의 $[0, 1]$ 범위에서 임의로 하나의 숫자 X (random number)를 추출한다. 만약 $X < e^{-DT}$ 이면 이 해는 받아들여지고 또 다른 교환 작업을 행한다. 그렇지 않으면 지금까지 기록된 가장 좋은 해에서 두개의 기계를 선택한 후 다시 교환 작업을 시

도한다. T(temperature)값을 얻기 위하여 지역적인 제한을 만족하는 해 100개를 구하여 제일 좋은 값과 제일 나쁜 값을 얻는다. 그 때 시작 온도와 마지막 온도는 다음과 같이 정해진다.

$$T_0 = Z^{\min} + (Z^{\max} - Z^{\min})/10 \quad (\text{시작 온도})$$

$$T_f = Z^{\min} \quad (\text{마지막 온도})$$

또한 작업이 진행됨에 따라 온도를 낮추는 절차와 알고리즘을 멈추는 기준은 다음의 수식에 의해 정해진다.

$$T_{k+1} = \frac{T_k}{(1 + \beta T_k)}, \quad \text{단 } \beta = \frac{(T_0 - T_f)}{p T_0 T_f},$$

$$p = \frac{50\delta N(N-1)}{2} \quad (\text{cooling strategy})$$

$$\frac{(Z_{best} - Z)}{Z} \leq \epsilon \quad (\text{stopping criterion})$$

다열 배치에서 spacefilling curve 기법은 모든 경우를 고려하여 생성하기가 대단히 어려우므로, simulated annealing 기법을 이용하여 더 좋은 해를 구할 수 있다. 즉, 두 개의 기계 집합에 있는 두 기계를 교환하였을 때 문제 (P2)의 [목표 1]의 목적 함수 값을 감소시킬 수 있다.

[예제 2] 앞에서 알고리즘 1을 이용하여 해를 구한 [예제 1]을 생각해 보자. [예제 1]에서의 해는 첫 번째 작업자에 기계 (1, 2, 5)를 배정하며 작업량은 12, 두 번째 작업자에 기계 (4, 7, 8)을 배정하며 작업량은 19, 세 번째 작업자에 기계 (9, 6)을 배정하며 작업량은 15, 네 번째 작업자에 기계 (3)을 배정하며 작업량은 14이다. 이 경우, 편차의 총합은 8이었다. 그런데, 첫 번째 작업자에 할당된 기계 5를 두 번째 작업자에게 배정하고 두 번째 작업자에게 할당된 기계 4를 첫 번째 작업자에게 배정해 보자. 그림 1에서 보는 바와 같이 이 경우의 해는 복도 구조를 고려해 볼 때, 한 작업자에게 할당된 기계가 이웃하여 있으므로 실현 가능한 해이다. 또한 이 경우에 각 작업자에게 할당된 작업량은 각각 15, 16, 15, 14가 되며, 총 편차는 2이다(최적해임). Simulated annealing 방법은 이와 같이 각 작업자에 할당된 기계를 복도구조를 고려하여 실현가능한 해를 제공하는 경우에 서로 바뀌어 보면서 더 좋은 해를 얻고자 하는 기법이다.

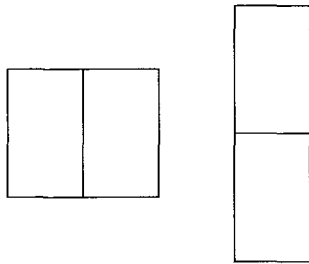
2.2.2. 바쁜 시기의 다열 배치

기계의 배치가 일열일 때는 문제 (P3)의 제약 조건을

만족하는 실현 가능한 해는 단 하나이다. 그러므로, 이 경우에는 Hungarian method를 사용하면 쉽게 최적해를 구할 수 있다. M개의 기계들을 지역적인 제약 조건을 만족하면서 N개의 집합으로 나눌 때 실현 가능한 배치는 쉽게 구할 수 있다. 단, 이 경우에는 $M=mN$ 이 된다.

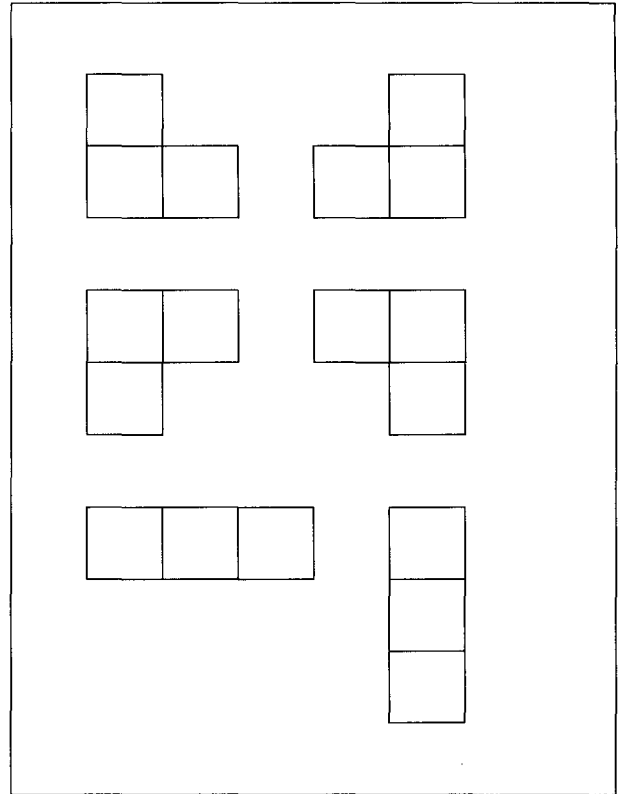
공장이 바쁜 시기에 다열 배치에서 문제 (P3)의 실현 가능한 해를 찾는 절차는 공장이 바쁘지 않는 시기에 실현 가능한 해를 찾는 절차를 이용할 수 있다. 알고리즘 1과 spacefilling curve기법을 사용할 수 있고, simulated annealing기법을 이용할 수도 있다. 그러나, 이 경우에 작업자는 정확히 m대의 기계를 할당 받아야 하므로 그래프 이론 (graph theory)을 이용하여 보다 다양한 실현 가능한 해들을 쉽게 찾을 수 있다. 이 문제는 pallet loading문제에서[16, 17] 그래프 이론을 이용하여 해를 찾는 것과 매우 유사하다.

만약 m이 2라고 생각하면 한 작업자에게 할당된 기계 배치는 1x2이거나 2x1이다(그림 3 참조). 따라서, 공장의 기계 배치가 그림 4과 같이 2x3이면 한 작업자가 1x2형태의 기계배치에 배정될 수 있는 경우는 4가지가 가능하고, 2x1형태의 기계배치에는 3가지의 경우가 가능하다. 만약 m이 3이라면 6개의 기계 배치가 가능하다 (그림 4 참조).



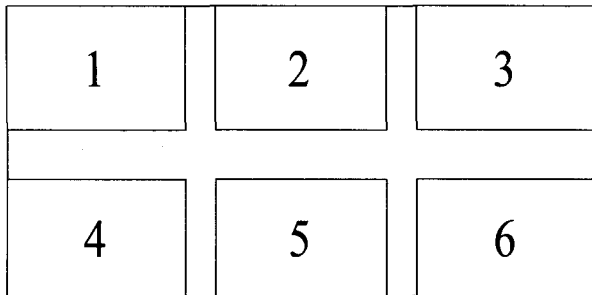
<그림 3> 한 작업자에 기계 2대가 할당될 경우의 기계 배치

그러므로 m이 결정되어지면 (일반적으로 m은 5이하이다) 한 작업자에게 할당된 기계 배치의 모든 가능한 경우를 알 수 있다. 이 각각의 기계 배치를 구축할 network에서 node라고 생각하고 이들 기계 배치를 구성하는 기계들이 다른 기계 배치에도 속할 경우에는 두 node 사이에 arc를 그린다. 이렇게 구축된 network에서 maximal stable set을[20] 찾으면 이는 우리가 원하는 문제 (P3)의 실현 가능한 해가 된다. 이 절차는 network을 구축할 때 시간이 많이 소요될 수 있으나 모든 maximal stable set을 찾으면 문제 (P3)의 모든 실현 가능 해들을 찾는다는 장점이 있다.

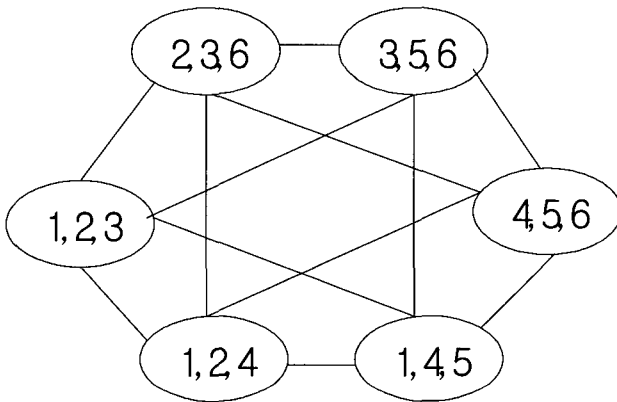


<그림 4> 한 작업자에 기계 3대가 할당될 경우의 기계 배치

[예제 3] 그림 5에 나타나 있는 공장의 기계 배치에 대하여 생각해 보자. 만약 한명이 최대 3대의 기계까지 다룰 수 있다면, 공장이 바쁜 시기에는 최대한 작업을 수행하여야 하므로 한 작업자가 할당 받을 수 있는 기계 집합은 (1, 2, 3), (1, 2, 4), (1, 4, 5), (2, 3, 6), (3, 5, 6), (4, 5, 6)의 6가지이다. 다른 기계 집합은 복도구조와 한 작업자에게 할당된 기계가 서로 이웃하여야 한다는 제약을 위반하는 경우이다. 이 6가지의(node가 6개) 기계 집합으로 네트워크를 구성하여 나타낸 것이 그림 6이다. 한 기계 집합을 구성하는 기계가 다른 기계 집합에도 속해 있으면 이 두 개의 기계 집합 사이에는 선(arc) 연결되어져 있다. 이 그래프의 maximal stable set을 구하면, 이 답이 각 작업자에게 할당된 기계 집합을 나타낸다. 예를 들면, 이 네트워크의 maximal stable set의 하나는 (1, 4, 5)와 (2, 3, 6)이다. 이 두 가지의 기계 집합을 Hungarian Method를 사용하여 작업자에 할당하면 문제 (P3)의 하나의 답이 된다. 이론적으로 모든 maximal stable set을 찾아 Hungarian Method를 적용하여 해를 구하면 최적해를 찾을 수 있으나, 작업자의 수와 할당할 기계 수가 많아지면 실현 가능한 해가 기하급수적으로 증가하게 된다.



<그림 5> 2x3형태의 기계 배치



<그림 6> 한 작업자에 기계 3대가 할당될 경우의 네트워크

2.3 제안된 알고리즘의 계산량

실제 생산 현장에서는 어느 작업자가 어떤 기계에 할당되어야 하는지가 중요한 관심이다. Just In Time시스템의 구현을 위해 다기능공화 되어가고 있는 지금의 현실에서 한 작업자가 어떤 특정 기계에서만 작업하지 않는다. 그러므로, 불량률 저하를 통하여 관리자에게 도움을 줄 수 있고, 작업 부하에 대한 편차의 최소화를 통하여 작업자에게도 거부감이 없으며, 실제로 생산 현장에서 사용할 수 있도록 공장의 기계 배치, 작업자의 기계 관리 능력을 고려하여 작업자 할당 문제를 해결할 수 있는 해법 절차를 본 연구에서 개발하였다. 또한 개발된 방법을 통해 해를 찾는 절차를 예제를 이용하여 예시하였다.

본 연구에서 개발된 알고리즘은 문제의 복잡성으로 인하여 현실적으로 최적의 해를 찾는 것이 불가능하기 때문에 자기발전적 알고리즘이다. 제안된 알고리즘 1, Hungarian Method와 simulated annealing기법은 P-class에

속해 있다. 그러나, spacefilling curve를 생성하는 절차와 문제 (P3)를 위하여 네트워크를 구축하고 maximal stable set을 구하는 방법은 문제의 크기가 증가함에 따라 계산량을 기하급수적으로 증가한다. 그러므로 이 두 절차에 대하여 효과적으로 계산량을 줄이는 연구가 향후 필요할 것으로 사료된다.

3. 결론 및 연구 방향

지난 30년간 작업자 할당에 관한 연구는 순수한 작업자 배치 문제 (assignment problem)나 staff scheduling, cyclic scheduling 등과 같은 작업일, 비작업일에 대한 명시를 하는 것에 연구의 초점이 맞추어져 있었다. 본 연구의 작업자 배치 문제는 기계의 배치와 함께 고려하며, 작업 부하의 편차를 최소화함과 동시에 작업자의 기계에 대한 작업 선호도를 최대화하는 bicriteria decision making문제이다.

본 연구 결과는 사람의 경험이나 직관에 의해서 작업자를 배치하는 것을 배제하고, 보다 합리적으로 생산 현장의 상황에 적합한 작업자 배치를 빠른 시간에 수행하는데 사용할 수 있다. 공장 관리자에게는 품질을, 작업자에게는 부하 평균화를 제공할 수 있으며, 공장 자동화를 위하여 기계들을 자동화 기계로 교환하고 있는 곳에서 유용하게 사용될 수 있다.

그러나, 효과적으로 spacefilling curve를 생성하는 방법, 순차적이 방법이 아닌 동시에 두 가지의 목적을(작업자에게 할당된 작업량의 편차와 기계에 대한 작업선호도) 최적화하는 방법, 본 연구에서 고려한 두 가지 목적 외에 생산현장에서 필요한 목표를 추가하여 최적화하는 방법 등은 본 연구에서 개발된 문제해결 절차를 보다 현실적으로 적용하기 위한 향후 연구 문제가 될 것이다.

참고문헌

[1] Askin, R. G and Huang, R. Y., 2001, Forming effective work teams for cellular manufacturing. International Journal of Production Research, 39(11), 2431-2451.
 [2] Baker, K. R., "Workforce allocation in cyclical scheduling problems: A survey", Operational Research Quarterly, Vol. 27, No. 1, 1976, pp.155-167.
 [3] Bartholdi, J. J. and Platzman, L. K., "An O(n logn) planar traveling salesman heuristic based on spacefilling curves", Operations Research Letters, Vol.1, No. 4,

- 1982, pp.121-125.
- [4] Bartholdi, J. J. and Platzman, L. K., "Design of efficient bin-numbering schemes for warehouses", *Material Flow*, Vol. 4, 1988, pp.247-254.
- [5] Billionnet, A., 1999, "Integer programming to schedule a hierarchical workforce with variable demands". *European Journal of Operations Research*, 114, 105-114.
- [6] Bozer, Yavuz A., Meller, Russell D. and Erlebacher, Steven J., "An improvement type layout algorithm for single and multiple-floor facilities", *Management Science*, Vol. 40, No. 7, 1994, pp.918-932.
- [7] Browne, Jimmie, Harhen, John and Shivnan, James, "Production Management Systems", Addison-Wesley Publishing Company, 1988.
- [8] Brusco, M. J., John, T. R. and Reed, J. H. (1998), "Cross utilization of a two skilled workforce", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 18 No.6, pp.555-64
- [9] Burns, R. N. and Koop, G. J., "A modular approach to optimal multiple-shift manpower scheduling", *Operations Research*, Vol. 35, No. 1, 1987, pp.100-110.
- [10] Cho, S. A., Kim, Chae-Bogk and Lee, D. H., "Single machine MAD/Tmax problem with a common due date", *Computers & Operations Research*, Vol. 18, No. 3, 1991, pp.255-262.
- [11] Cochran, J. K. and Horng, H. -C. (1999), "Dynamic dispatching rule-pairs for multitasking workers in JIT production systems", *International Journal of Production Research*. Vol. 37 NO. 10, 2175-2190.
- [12] Connolly, D. T., "An improved annealing scheme for the QAP", *European Journal of Operational Research*, Vol. 46, 1990, pp.93-100.
- [13] Dal-El, E. M. and Cother, R. F., "Assembly line sequencing for model mixing", *International Journal of Production Research*, Vol. 13, 1975, pp.463.
- [14] Dahlen, P., Ericsson, J. and Fujji, H. (1995), "Labour stability and flexibility-conditions to reach just in time", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 15 No.9, pp.26-43
- [15] Downey, B. S. and Leonard, M. S. (1992), "Assembly line with flexible work force", *International Journal of Production Research*, Vol. 30 No. 3, pp.469-83.
- [16] Dowsland, Kathryn N., "An exact algorithm for the pallet loading problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 31, 1987, pp.78-84.
- [17] Dowsland, Kathryn N., "Efficient automated pallet loading", *European Journal of Operational Research*, Vol. 44, 1990, pp.232-238.
- [18] Ebeling, A. C. and Lee, C. Y. (1994), "Cross training effectiveness and profitability", *International Journal of Production Research*, Vol. 32 No. 12, pp.2843-59.
- [19] Grag, S., Vart, P. and Kanda, A. (2002), "Trade-offs between multiskilling and inventory in assembly line operations under demand variability", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 22 No.5, pp.565-83.
- [20] Harary, Frank, "Graph Theory", Addison-Wesley Publishing Company, 1972.
- [21] Heragu, S. S. and Kusiak, Andrew, "Efficient models for the facility layout problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 53, 1991, pp.1-13.
- [22] Kim, C. and Foote, B. L., "Minimizing the mean squared deviation from a common due date: Unconstrained and constrained cases", *Production Planning & Control*, Vol. 7, 1996, pp.492-502.
- [23] Kim, C., Kim, S., and Foote, B. L., "Assignment problems in single-row and double-row machine layouts during slow and peak periods", *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 30, No. 3, 1996, pp.411-422.
- [24] Kouvelis, Panagiotis and Chiang, Wen-Chyuan, "A simulated annealing procedure for single row layout problems in flexible manufacturing systems", *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 4, 1992, pp.717-732.
- [25] Laarhoven, P. J. M., Aarts, E. H. L. and Lenstra, J. K., "Job shop scheduling by simulated annealing", *Operations Research*, Vol. 40, No. 1, 1992, pp.113-125.
- [26] Levitin, G. and Rubincvitz, J., "Genetic algorithm for linear and cyclic assignment problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 20, No. 6, 1993, pp.575-586.
- [27] Liang, T. T. and Buclatin, B. B., "Improving the utilization of training resources through optimal personnel assignment in the U.S. navy", *European Journal of Operational Research*, Vol. 33, 1988, pp.183-190.
- [28] Miltenburg, John, "Level schedules for mixed-model assembly lines in just in time production systems", *Management Science*, Vol. 35, No. 2, 1989,

- pp.192-207.
- [29] Miltenburg, John and Goldstein, T., "Developing production schedules which balance part usage and smooth production loads for just-in-time production systems", *Naval Research Logistics*, Vol. 38, 1991, pp.893-910.
- [30] Norman, B. A., Tharmmaphornphilas, W., Needy, K. L., Bidanda, B. and Warner, R. C. (2002), "Worker assignment in cellular manufacturing considering technical and human skills", *International Journal of Production Research*. Vol. 40 NO. 6, 1479-1492.
- [31] Plenert, G. (1997), "Line balancing techniques as used for just-in-time (JIT) product line optimization", *Production Planning and Control*, Vol. 8 NO. 7, pp.686-93.
- [32] Radhakrishnan, Sanjay and Ventura, J. A., "Simulated annealing for parallel machine scheduling with earliness-tardiness penalties and sequence-dependent set-up times, *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 10, 2000, pp.2233-2252.
- [33] Sarker, Bhaba R., "Optimum manpower models for a production system with varying production rates", *European Journal of Operational Research*, Vol. 24, 1986, pp.447-454.
- [34] Seo, J. H., Kim, Chae-Bogk and Lee, D. H., "Minimizing mean squared deviation of completion times with maximum tardiness constraint", *European Journal of Operational Research*, Vol. 33, 1988, pp.183-190.
- [35] Suryanarayanan, J. K., Golden, B. L. and Wang, Q., "A new heuristic for the linear placement problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 18, No. 3, 1991, pp.255-262.
- [36] Shin, D. and Min, H., 1991, Uniform assembly line balancing with stochastic task times in just-in-time manufacturing. *International Journal of Operations and Production Management*, 11, 23-34.
- [37] Sule, D. R. and Norris, W. J., 1992, Manpower assignment strategies in serial production lines with limited personnel: evaluation of pull-push rules. *Computer and Industrial Engineering*, 22, 231-243.
- [38] Van Oyen, M. P., Gel, E. S. and Hopp. W. J., 2001, Performance opportunity for workforce agility in collaborative and non-collaborative work system. *IIE Transactions*, 33, 807-818.
- [39] Vohra, R. V., "The cost of Consecutivity in the (5,7) cyclic staffing problem", *IIE Transactions*, Vol. 19, No. 3, 1987, pp.296-299.
- [40] Wilhelm, M. R. and Ward, T. L. "Solving quadratic assignment problems by simulated annealing problem", *IIE Transactions*, March, 1987, pp.107-119.