

PCB 생산에서 생산성 향상을 위한 최적화 문제들 -Optimization Problems for improving Productivity in Printed Circuit Board Manufacturing-

임 석 철*
김 내 현**
김 형 석***

ABSTRACT

Electrical or electronic products have been becoming smaller and high integrated recently, with printed circuit boards(PCB's) being the key components for these products. The introduction of new technology of surface mounted devices(SMD) opens new ways towards high integration on the PCB. Many plants in eletronical industry which produce high variety of PCB's to meet the demands of customer orders require flexibility in PCB's production lines.

This survey paper describes the related optimization problems and solution methods to the automated surface mount technology(SMT) assembly lines, and provides with the research direction for improving flexibility.

1. 서론

최근 전기, 전자 제품들은 소형화, 고집적화 되고 있는 추세에 있으며, 이러한 제품들을 구성하고 있는 주요 부품은 PCB(Printed Circuit Board)기판이다. 비디오, 컴퓨터, 캠코더, 카메라 등에 소요되는 PCB기판의 수요는 날로 증대되고 있으며 그 종류도 또한 다양화 되어가고 있다. PCB 기판 수요의 증대와 종류의 다양화에 대한 요구는 생산자로 하여금 유연 생산라인의 도입으로 제품의 납기를 단축하고 재고 수준을 낮추는 등 생산성 향상을 위한 노력을 강구 하도록 하였고, PCB 기판의 고집적화의 요구는 lead가 달린 부품을 미리 구멍을 뚫어는 위치에 장착하는 기존의 THT(Through Hole Technology)로 부터 PCB 기판의 표면에 각종 소형 전자 제품을 장착하여 soldering하는 일련의 SMT(Surface Mount Technology)로의 기술혁신을 가져왔다. SMT를 이용한 기판은, 기판의 양면을 사용 할 수 있는 등 THT를 이용한 기판보다 소형화, 경량화, 고집적화 시킬 수 있다. 따라서 많은 Through-Hole Type의 부품들이 SMD(Surface Mount Device)로 대체되고 있고 그 추세는 더욱 가속화 되고 있다.

이러한 기술의 전환은 PCB기판의 조립 자동화에 대한 개념의 변환을 가져오게 되었다. PCB 기판이 THT방식으로 조립되는 경우에는 장착되는 부품들이 lead의 길이 또는 모양에 따라 radial-type, axial-type, 이형부품등으로 분류되며 분류된 부품들은 종류별로 서로 다른 자삽기에 의해 장착되고 THT 생산라인 구성에 영향을 미치는 연관 기술이 불필요 하므로 장착되는 부품의 크기나 또는 PCB 기판의 크기가 표준화가 되면 유연 생산라인의 구성이 가능해 진다. 따라서, 지난 수년간 THT 방식을 이용한 기판 조립 자동화에 대한 많은 연구가 있었고 어느정도 소기의 목적도 달성하였다. 이 연구들은

*아주대학교 산업공학과
**아주대학교 산업공학과
***아주대학교 산업공학과
접수 : 1993년 6월 24일
확정 : 1993년 7월 5일

한 자습기에 할당된 부품들을 자습기의 어느 bin에 할당하고 어떠한 순서로 기판에 장착하여야 단위 기판 당의 생산시간을 최소로 할 수 있는가의 TSP 문제가 중심이 되어 왔으며, 여러개의 생산라인을 운영하는 경우는 라인의 부하의 균형을 이루도록 주문을 할당하는 문제도 검토 되었다. 그러나 SMT 방식을 위한 부품들은 일반적으로 비슷한 lead의 구조를 갖고 있으므로 어느 특정부품은 어느 자습기에 할당해야 하는 장착기술의 제약이 없어져 한 자습기에 의해 PCB 기판에 장착 될 수 있는 부품의 종류가 많아지게 되어 생산성 향상을 위하여는 어느 기판의 어떤 부품을 어느 자습기에 할당하여야 생산라인의 균형이 이루어 지며 단위 기판당의 생산시간을 최소로 할 수 있는가의 manufacturing cell의 최적화 문제로 화하게 된다. 뿐만 아니라, 표면실장을 위한 soldering, bonding, heating, cleaning 등의 연관 기술을 위한 장비들이 생산라인에 포함되게 되고, 기판의 양면 사용도 가능하며, THT부품과 SMT 부품의 혼합 사용 기판 등 기판의 종류도 더욱 다양하게 되어 THT방식을 위하여 개발된 유연 생산방식의 직접 적용이 불가능하게 된다.

우리나라의 전자업체 현실도 이미 SMT 방식을 도입하고 있으며, THT와 SMT 생산라인이 함께 운영되고 있고 또한 부품도 점차로 THT부품에서 SMT부품으로의 전환이 이루어 지고 있다. 그러나 이러한 생산라인의 도입에 따른 제반 생산성 향상 노력이 미흡하며 자체적인 관련 연구로 미비한 상황이다.

따라서 본 survey paper에서는 SMT 방식에 따른 자동 생산조립 라인의 그 동안의 연구결과를 살펴봄으로써 THT 방식과 SMT방식을 함께 가동하는 우리전자 업체가 생산성 향상을 위하여 노력하여야 할 방향을 제시하고자 한다.

2. SMT 조립생산 라인의 최적화 문제

일반적으로 PCB기판의 생산은 주문 생산방식에 따라 생산된다. 하나의 자습기 생산라인이 몇개의 자습기로 구성되느냐에 따라 그 라인에서 장착할 수 있는 부품의 숫자가 결정되며 장착 할 수 있는 부품의 수가 증가 하면 한 라인에서 생산 할 수 있는 기판의 종류도 증가하게 된다. 자습기 생산라인의 단거적인 효율적 운영과 관련하여 제기 될 수 있는 문제들을 대개 다음과 같다.

- 어느 주문을 어느 자습기 생산라인에 할당 할 것인가.
- 생산라인에 할당된 주문들을 어떤 순서로 생산 할 것인가.
- 언제 자습기의 부품을 교체하는 set-up을 시행할 것인가.
- 어느 부품을 어느 자습기에서 장착 시킬 것인가.
- 자습기에 할당된 부품을 그 자습기의 어느 bin에 할당할 것인가.
- 자습기의 bin에 할당된 부품들을 어떤 순서로 기판에 장착할 것인가.

일반적으로 위의 문제들은 생산라인을 구성하고 있는 자습기의 숫자와 그 생산라인에서 몇 종류의 기판을 생산하고자 하느냐에 따라 더욱 복잡해 질 수 있다. 뿐만 아니라 주문에 대한 정보, 기판에 대한 정보, 장착기술 및 제약, 자습기의 한계성 등에 대한 모든 정보가 종합적으로 검토되어야 생산조립라인을 통제하는 최적 전략을 도출 할 수 있다.

위의 최적화 문제들의 목적함수는 일반적으로 생산할 주문이 결정 되어있다는 가정하에 단위 시간당의 생산량을 최대화 하거나 또는 makespan을 최소화하는 것이다. 즉, 한 부품의 조립에 필요한 시간을 최소화 하여 기계의 총 가동시간을 줄이고, 이 기계 총 가동시간에 대한 기계의 총 정지시간의 비율을 최소화 하는 것이다. 정상적인 가동의 중단은 set-up으로 인하여 야기되며, 이러한 set-up은 자습기의 부품을 저장하는 bin의 수요가 한정되어 있어 bin의 부품의 교체시간과 자습기에 지시할 프로그램을 수정하는 시간으로 인한 것이다. 최적의 장착 sequence를 얻기 위하여는 많은 set-up 시간이 요구되므로, 가공시간과 set-up 시간은 목적 함수에 서로 상반되는 영향을 미치게 된다. 그러므로 set-up으로 인한 기계의 정지시간과 가동시간의 균형을 통한 기계가동의 효율을 높이는 최적화 문제로 귀결된다.

Feldmann과 Roth[1]는 위의 최적화 문제를 풀기 위하여 세 단계의 단계별 최적화 문제로 접근 하였다. 세 단계는 각각 manufacturing cell level, production line level과 machine level의 최적화 문제들인데, 이들 각 단계의 최적화 문제들은 서로 독립적으로 풀 수 있다고 가정한다.

여러개의 조립 생산라인으로 구성된 SMT manufacturing cell의 경우 생산해야 할 PCB의 총생산량, 라인별 생산성의 균형을 이루면서 set-up으로 인한 라인의 정지 시간을 최소화 하며, 각 라인에 배분하는 문제는 매우 중요하다.

이 문제의 경우 최적화의 목표는 주어진 시간 동안 SMT manufacturing cell의 총 생산량의 최대화에 있다. 물론 각 SMT 조립 생산라인은 기계적인 제약, 기술적인 제약 및 생산라인의 구성 전략등으로 인하여 완전히 동일하지는 않기 때문에 각 생산라인이 모든 종류의 PCB를 생산할 수는 없다. 그러나 특정한 기판이나 부품들을 서로 다른 라인에서 조립하거나 장착할 수 있도록 생산라인을 전략적으로 구성 하므로써 이 특정 기판의 경우 생산라인이 정지 되더라도 완전히 생산이 중단되는 것을 방지 할 수 있다. 위의 manufacturing cell level의 최적화 문제의 해를 구하는 확실한 방법은 주문을 생산라인에 배분하는 모든 경우의 수를 검토 하므로써 최적의 해를 구하는 것이다. 그러나 이러한 방법은 기판의 종류나 생산 라인의 수가 많은 경우 그 조합의 수가 급격히 증가하게 되어 모든 경우를 검토하는 것은 실제로 불가능해 진다. 따라서 제한된 수의 조합만을 검토 하므로써 최적해에 가까운 해를 구하는 경험적인 방법이 사용되며, 또한 각 생산라인에서 생산할 수 있는 기판의 종류를 공유 하도록 하여, 이렇게 생산라인에서 공유할 수 있는 종류의 기판 생산을 생산라인에 적절히 배분 하므로써 생산라인의 생산성의 균형을 유지하도록 하고 있다.

위의 방법에 따라 각 생산 라인에 할당된 주문들을 효율적으로 처리하기 위하여 production line level의 최적화 문제를 해결 한다. 이 문제의 수학적인 해결을 위하여 Feldmann등은 이를 다시 두개의 문제로 분리하였다. 첫번째 문제는 set-up 시간을 최소로 하는 주문의 생산라인 투입 sequence를 결정하는 것이고, 두번째 문제는 생산라인의 각 자삽기에 부여된 부하의 균형을 이루는 문제다.

Set-up 시간을 최소로 하는 주문의 생산라인 투입 sequence를 결정하는 문제는 특수한 형태의 TSP(Travelling Salesman Problem)문제를 푸는 경우로 귀착된다. 이 문제의 TSP문제와의 차이점은 출발점으로 다시 돌아 올 필요가 없다는 것이며 이러한 차이는 TSP해법으로 해결 가능한 것이어서 0-1 정수 계획법 문제 모형이 되며 branch and bound 알고리즘을 사용하여 풀 수 있다. 일단 생산라인에 투입되는 주문의 sequence가 결정되면, 이 sequence에 따라 생산이 이루어 질 때 모든 주문을 다 처리하기 위하여 실제로 얼마나 많은 set-up이 필요한 가를 계산한다. 이 계산은 sequence에 따라 set-up이 없이 처리할 수 있는 최대한의 주문을 투입한 후 더 이상의 주문을 첨가 할 수 없을 때 set-up이 이루어 지므로 필요한 set-up의 회수는 쉽게 계산할 수 있다. 주문 처리의 sequence와 필요한 set-up의 회수가 결정된 후에는 조립 생산라인의 모든 기계에 대한 부하의 균형을 이루는 것이 필요하다. 각 기계에 대한 부하의 균형이 이루어 지지 않으면 생산라인의 흐름에 문제를 야기하게 된다. 각 기계에 대한 부하의 균형을 위하여는 각 set-up에 의해 생산될 주문에 필요한 각 부품에 대해 기계에 다 배당하도록 한 후 각 기계에 배당된 부품을 장착하는데 필요한 실제시간을 계산하는 방법을 계속 적용하므로써 각 기계에 대한 부하의 균형을 이루어 나가게 된다.

각 생산라인의 set-up이 결정되고 각 set-up에 의해 생산될 주문에 필요한 부품들이 각 기계에 배당되면 machine level의 최적화 문제를 해결하는 단계에 이른다. machine level의 목적함수는 각 기계당 가공시간을 최소화하는 문제가 된다. 이 문제는 두개의 문제로 분리 되는데, 첫째는 각 기계에 배당된 부품의 기계에서의 위치를 결정하는 문제이며, 위치가 결정되면 각 부품이 기판에 장착되는 순서를 결정하는 것이다. 부품의 기계에서의 위치는 가공시간에 실제로 큰 영향을 주므로 매우 중요한 문제다. 이 문제는 각 set-up에서 필요한 각 부품에 대하여 기판에 장착되는 위치들에 대한 重點을 계산한 후 重點에 가장 가까운 위치에 부품을 배치하도록 하였다. 부품의 위치가 선정되면 각 부품이 기판에 장착되는 순서는 TSP문제를 풀므로써 결정할 수 있다. 그러나 이 TSP 문제는 production line level에서 주문의 생산라인 투입 sequence를 결정하는 TSP문제에 비하여 방문할 city의 수가 많을 뿐만 아니라, 이 문제를 푸는 회수도 많기 때문에 실제 계산시간이 매우 중요한 의미를 갖게되고 최적화 보다는 실제 기술적 제약등을 고려한 경험적 방법을 통하여 최적해에 가까운 해를 구하는 것이 보통이다. 일반적으로 자삽기의 부품 용기에서 부품을 집어 PCB 기판에 장착하는 TSP 문제는 그 동안 많은 연구가 있어 왔으며 대개 경험적인 방법을 이용한 branch and bound 기법에 의해 해결하는 것을 Andreou[2]등 에서 볼 수 있다.

Brandeau와 Billington[3]은 manufacturing cell level의 문제를 작업 할당 문제의 관점에서 혼합 정수 계획법 모형을 세운 후 이 모형에 대한 경험적인 해법을 제시하였다. 이들은 장기적인 계획을 수립하는 관점에서 문제에 접근하였으며, 미래의 수요예측이 주어져 있다는 가정하에 기대생산 비용을 최소화하는 목적함수를 사용하였다.

이들은 또한 기계에서 bin의 부품 교체는 부품의 교체시간과 프로그램 수정시간등 set-up 시간을 필요로 할 뿐만 아니라 만일 같은 종류의 PCB 기판을 서로 다른 기계에 의해 생산할 때 품질 저하등의 우려가 있으므로 같은 종류의 기판은 동일한 set-up하에서 생산한다고 가정하였다. 이러한 가정은 Hewlett-Packard의 실제사항을 고려한 것인데, 이 회사는 일년 또는 적어도 반년 동안의 모든 PCB기판에 대한 소요량을 예측하여 이 물량을 모두 처리 할 때 까지는 다시 set-up을 하지 않는다. 이 회사가 한번의 set-up을 통하여 생산하는 PCB기판의 종류는 500종 가까이 되며 이에 소요되는 서로 다른 부품의 종류는 무려 4000여종에 달한다. 따라서 이 모든 부품이 전부 자삽기에 의해 장착될 수 없으므로 자삽기에 의해 장착되지 못한 부품들은 수동 또는 반자동의 공정에 의해 장착되어진다. 위와 같은 가정 하에서 manufacturing cell level의 문제는 어느 부품을 어느 기계(수동 또는 반자동 공정 포함)에 할당하여야 총 set-up비용과 가동비용을 최소로 하며 모든 기판을 전부 생산할 수 있는가의 문제가 되며, 다음과 같은 0-1 혼합 정수 계획의 문제(BMP)로 표시할 수 있다.

$$\min \sum_i \sum_j \sum_k c_{ijk} x_{ijk} + \sum_i \sum_k s_i d_k y_k$$

$$\text{s. t. } \sum_j x_{jk} = r_k, \quad \forall j, k \quad (1)$$

$$y_k \geq x_{jk}, \quad \forall i, j, k \quad (2)$$

$$z_k \geq x_{jk}, \quad \forall i, j, k \quad (3)$$

$$\sum_j z_j \leq N_i, \quad i = 1, \dots, I-1 \quad (4)$$

$$y_k = 0 \text{ or } 1, \quad \forall j, k \quad (5)$$

$$x_{ijk} \geq 0, \quad \forall i, j, k \quad (6)$$

$$z_j \geq 0, \quad \forall j, k \quad (7)$$

i : 공정 ($1, 2, \dots, I-1$ = 기계, I = 수동 또는 반자동 공정).

j : 부품 ($j = 1, \dots, J$).

k : PCB 기판 ($k = 1, \dots, K$).

결정 변수는

x_{ijk} : 0-1 변수로 기판 k 의 부품 j 가 공정 i 에서 조립되면 1, 그렇지 않으면 0,

y_k : 0-1 변수로 기판 k 의 부품중 공정 i 에서 조립되는 부품이 있으면 1, 그렇지 않으면 0,

z_j : 0-1 변수이며 부품 j 가 공정 i 에서 조립되면 1, 그렇지 않으면 0 이다.

또한

d_k : 주어진 기간 동안 기판 k 의 총 소요량,

r_{jk} : 부품 j 가 기판 k 에 장착되면 1, 그렇지 않으면 0,

n_{jk} : 기판 k 에 장착되는 부품 j 의 갯수,

$v_{jk} = d_k r_{jk} n_{jk}$ = 주어진 기간 동안 기판 k 에 소요되는 부품 j 의 총 소요량,

이다.

한 기계에서 모든 기판의 set-up 비용은 동일하며 모든 부품의 가공 비용도 같다고 가정하여,

s_i : 기계 i 에서 기판 한개의 set-up 비용,

c_i : 기계 i 에서 부품 한개의 조립가공 비용,

N_i : 기계 i 에서 조립되는 부품의 종류의 수

를 표시한다.

위의 수학적 모형의 목적함수는 set-up비용과 가공비용의 총합을 최소화하고 있다. 변수 $x_{i,j,k}$ 와 $z_{i,j}$ 에 대한 정수제약이 없어도 위의 모형에서 0 또는 1의 값을 갖게 되어 혼합 정수 계획법 모형으로 표현하였다. 또한 위의 모형은 동일한 부품이 여러대의 기계에 할당될 수 있음을 보여주고 있다. 위의 문제의 한가지 해법으로 branch & bound법을 사용하여 푸는 것을 생각할 수 있다. 즉 부품 j의 기계 i에 대한 할당을 표시하는 변수 $z_{i,j}$ 로부터 branching하여 얻은 문제를 변수 $y_{i,k}$ 의 정수 제약을 잠정적으로 생략하고, 선형계획법 문제를 풀어 최적해를 구하고 이 최적해의 목적함수 값을 bound로 사용하여 해결하는 방법이다. 이때에 가장 많이 사용되는 부품이 총비용에 큰 영향을 주게 되므로 이와 관련된 변수를 먼저 branch하는 것이 효율적인 방법이 되겠다. 그러나 실제로 얻어지는 문제중 중간 크기에 해당된다고 볼수 있는 문제 즉, 기계하나와 반자동 공정등 2개의 공정으로 구성된 manufacturing cell에서 600여개의 부품을 이용하여 200종류의 기판을 생산하는 경우, 0-1 정수 변수는 무려 12000개, 선형 변수도 240만개나 되어 정수 제약이 없는 선형계획 문제라 하여도 현재의 LP 코드로는 풀기 어려운 문제다. 특히 하나의 기계와 하나의 반자동 공정으로 구성된 manufacturing cell의 문제는 어떤 부품을 기계에 할당할 것인가의 문제이며, 기계의 bin에 할당되지 못한 부품은 모두 반자동 공정에 의해 장착되며 기계에 의해 장착되는 부품도 또한 동시에 반자동 공정에 의해 장착되어질 수 있다. 위에서 언급한 바와 같이 최적해를 구하는 것이 불가능하므로 이들은 경험적인 두가지의 기법을 제시하고 있다. 경험적 기법의 근거는 일반적으로 기계에 의한 부품의 장착이 수동이나 반자동에 의한 부품의 장착보다 비용이 적게들므로 다른 부품에 비해 비교적 많이 사용되는 부품들을 우선적으로 기계에 할당하는 것이다. 동일한 이유로 인하여 다른 PCB기판 보다 더 많이 조립되는 PCB기판의 부품을 우선적으로 기계에 할당할 수도 있다. 또 다른 하나의 경험적 기법은 모든 PCB기판의 생산을 일단 수동 또는 반자동 공정에 할당한 후, 기계의 bin의 사용에 대한 PCB기판 생산의 증가가 큰 순서로 PCB기판을 하나씩 선정하여 이 기판의 모든 부품을 기계에 할당해 나가는 것이다. 이러한 경험적 기법에 의해서 desktop컴퓨터를 사용하여 최적해에 가까운 해를 얻었다. 동일한 여러개의 기계들로 구성된 manufacturing cell의 문제는 기계 하나씩 순서적으로 앞에서 얻은 경험적 해법을 적용하므로써 최적해에 가까운 해를 얻었다. 실제로 Hewlett-Packard의 manufacturing cell은 동일한 기계들로 구성되어 있다. Hillier와 Brandeau[4]는 위의 BMIP문제에서 등식의 제약식과 실제로 필요하지 않은 변수들을 제거함으로써, BMIP의 몇가지의 특수한 경우의 수학적 모형을 유도하였다. 이러한 변환으로 얻어진 문제는 크기가 대폭적으로 축소되며 계수 행렬도 totally unimodular가 되어 선형계획 문제를 풀어서 최적해를 구할 수 있게 된다. 그 변환된 문제를 소개하면 다음과 같다. BMIP의 제약식 (6)과 (7)을 0 또는 1의 정수 변수로 제약을 가한 문제를 BIP1이라 하자. BIP1에서 $r_{j,k} = 0$ 인 j와 k에 대하여 $x_{i,j,k} = 0$, ($i = 1, \dots, I$)이므로 이 변수들을 제거하고, $r_{j,k} = 1$ 인 j, k에 대하여는 등식 제약식 (1)로부터 $x_{i,j,k} = 1 - \sum_{i=1}^{i-1} x_{i,j,k}$ 이 되므로 이를 관련된 모든 식에 대입하면 다음의 BIP2를 얻게 된다.

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^{I-1} \sum_j \sum_k (c_i - c_I) v_{jk} x_{i,j,k} + \sum_i \sum_k s_i d_{i,k} y_{i,k} + \sum_j \sum_k c_I v_{j,k}$$

s. t.

$$y_{i,k} \geq x_{i,j} \quad i=1,2,\dots,I-1; \forall j,k \ni r_{j,k} = 1$$

$$y_{i,k} \geq 1 - \sum_{i=1}^{i-1} x_{i,j,k} \quad \forall j,k \ni r_{j,k} = 1$$

$$z_{i,j} \geq x_{i,j,k} \quad i=1,2,\dots,I-1; \forall j,k \ni r_{j,k} = 1$$

$$\sum_j z_{i,j} \leq N_i \quad i=1,2,\dots,I-1$$

$$x_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad i=1,2,\dots,I-1; \forall j,k \ni r_{j,k} = 1$$

$$y_{i,k} \in \{0,1\} \quad \forall i,k$$

$$z_{i,j} \in \{0,1\} \quad i=1,2,\dots,I-1; \forall j$$

(Then $x_{i,j,k} = 1 - \sum_{i=1}^{i-1} x_{i,j,k}$ and $z_{i,j} = 1$)

BIP2의 최적해를 구할 수 있는 효율적인 해법은 없다. 그러나, I=2인 BIP2의 특수한 경우를 생각하여 이를 BIP3라 할 때 변수 x_{ijk}, z_{ij} 와 N_i 의 첨자 i는 항상 1이므로 첨자 i를 제거할 수 있다. 이렇게 얻어진 모형을 BIP3라 한다.

이들은 또한 한 PCB기판은 반드시 하나의 기계에서만 조립되어야만 한다는 제약을 가함으로써 변수 x_{ijk} 를 제거할 수 있도록 하였다. 이렇게 하여 얻어진 문제는 기계가 여러개인 경우에도 구할 수 있는 알고리즘이 존재한다. 한 PCB기판을 한 기계에만 할당하는 단순 조립 정책은 최적화 문제의 해결을 쉽게 할 뿐만 아니라, 실수를 줄이고 품질을 향상시킬 수 있다는 실제적인 장점도 수반한다. 이 경우에서 I>2 인 경우의 모형을 BIP4, I=2인 경우의 모형을 BIP5라 하자. BIP3, BIP4와 BIP5의 최적해를 구하는 알고리즘은 이들 문제의 계수행렬의 특수한 구조로부터 얻어진다. 언급된 문제의 제약식에 여유변수와 잉여변수를 첨가하고, 결정변수를

$w = (x, y, z)$ 로 표시하고, 또한 목적함수의 계수, 제약식의 우변 및 계수 행렬을 각각 c, b 및 A 로 표시하면 모든 BIP들은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } cw \\ & \text{s. t.} \\ & Aw = b \qquad \qquad \qquad (P1) \\ & w \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

P1에서 기계 i에 대한 부품 할당 한계를 표시하는 제약식 $\sum_j z_j \leq N$ (BIP 3), $\sum_j z_{ij} \leq N_i$ (BIP4), $\sum_j z_j \leq N$ (BIP5)를 분리하여 다시 표현하면

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } cw \\ & \text{s. t.} \\ & Mw = b \qquad \qquad \qquad (P2) \\ & g(w) \leq N \\ & w \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

이 된다.

P2의 계수 행렬 M은 totally unimodular가 되어 한계 제약식이 없다면 BIP3, BIP4 및 BIP5는 LP코드로 풀 수 있다.

따라서, P2의 해결을 위하여 제약식 $g(w) \leq N$ 를 목적함수의 penalty 항으로 하는 Lagrangian relaxation문제를 구하면,

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } cw + \lambda (g(w) - N) \\ & \text{s. t.} \\ & Mw = b \qquad \qquad \qquad (P3) \\ & 0 \leq w \leq 1 \end{aligned}$$

의 선형계획문제가 되어 쉽게 해결할 수 있다. 다만 계수 $\lambda (\geq 0)$ 는 P3를 풀기전에 구하여야 하는데 BIP의 경우 λ 가 증가함에 따라 $g(w) - N$ 은 감소하는 계단함수가 되어 $g(w) - N = 0$ 인 λ 를 구하는 것이 이상적이다. 그러나, 이러한 λ 는 실제로 존재하지 않을 수도 있으며, 이상적인 값을 구할 필요는 없다.

λ 는

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } cw \\ & \text{s. t.} \\ & Mw = b \qquad \qquad \qquad (P4) \\ & g(w) \leq N \\ & 0 \leq w \leq 1 \end{aligned}$$

을 풀어 제약식 $g(w) \leq N$ 에 대응하는 shadow price를 사용하면 된다는 것이 알려져 있으므로, 먼저 선형계획 문제 P4를 풀어 λ 값을 구하고, 이 값을 이용하여 P3를 풀면 된다.

Crama et al.[5]은 manufacturing cell level의 문제를 부품들을 기계들에게 할당하는 문제로 생각하고, 각 기계의 최대 부하를 최소화하는 목적함수를 택했다. 이때에 기계의 부하는 부품 장착 시간과 set-up 시간의 합이다. 위에서 열거한 이와에도 machine level의 TSP문제를 풀기 위한 경험적 해법의 제기와 FMS로서의 manufacturing level의 연구를 찾아낼 수 있다.

3. 최적화 모형 개발의 필요성 및 방향

우리는 앞절에서 표면 실장 기술(SMT)을 이용한 PCB기판 조립 생산 시스템과 관련하여 생산성을 향상시키기 위한 제반 최적화 문제와 그들의 최적해법 또는 경험적 해법들을 살펴 보았다. 최적화 문제들은 대개 machine level, line level 및 cell level의 3단계로 분류할 수 있었다. 우리의 관심은 이러한 최적화 모형들을 국내 전자업체의 PCB기판 조립 생산 라인에 직접 적용할 수 있는가에 있다. 이를 위해 국내 전자업체에서 노트북 PC나 캠코더와 같은 SMT 부품이 장착된 소형 기판을 내장한 전자제품이 생산되기 시작한 것은 최근의 일이며 아직까지도 PC, 비디오등 많은 전자제품의 기판들이 THT부품이 장착된 PCB기판을 내장하고 있다. 이에따라, 국내 전자업체의 PCB기판 조립 생산라인의 대부분이 THT형의 자삽기로 구성되어 있다. 그러나, 캠코더와 같은 제품의 PCB기판 생산은 이미 SMT조립 생산라인에서 생산되고 있으며, THT부품을 SMT부품으로 전환하는 연구가 국내 선도 전자업체에 의해 적극적으로 진행되고 있다.

이와 같은 상황은, 국내 전자업체가 THT형의 자삽기로 구성된 생산라인, SMT형의 기계들로 구성된 생산라인 및 THT부품과 SMT부품을 함께 장착한 PCB기판 생산을 위한 두 종류의 자삽기로 형성된 생산라인의 운영이 불가피한 현실이다. 그러나, 세번째 경우는 THT부품과 SMT부품이 동일한 라인에서 조립되기 보다는 분리되어 조립되므로 분리된 각 부분만을 고려할 때 각각 THT형의 생산라인과 SMT형의 생산라인으로 간주할 수 있다. THT형의 자삽기로 구성된 생산라인은 대개 3종류의 자삽기로 구성된다. 첫째는 lead가 짧은 부품을 장착하는 radial-type 자삽기, 비교적 lead가 긴 부품을 장착하는 axial-type 자삽기, 위의 두 종류의 자삽기에 의해 장착될 수 없는 이형부품을 장착하는 자삽기의 3종류로 부품 장착 순서도 기판의 기계적인 특성상 radial-type, axial-type, 이형부품의 순으로 조립되고 있다. 따라서 생산할 PCB기판의 종류가 결정되면, 이 기판의 부품은 자동적으로 각 type의 기계에 할당되게 된다. 이로 인하여 line-level의 최적화 문제는 크게 부각되지 않으며, machine-level의 최적화 문제가 주요한 관심의 대상이 된다. 일반적으로 각 자삽기는 machine-level의 최적화 문제를 자체적으로 해결하는 프로그램을 내장하고 있는데, 국내 업체에서는 이를 사용하기 보다는 작업자의 경험에 의존하여 자삽기 헤드의 경로를 결정하고 있다. 뿐만아니라, 자삽기의 고장으로 인한 정지 시간이 크기 때문에 관리자는 최적 경로를 통한 PCB기판 생산시간 단축 보다는 철저한 설비관리를 통한 자삽기의 가동시간을 증가 시키는데 주안점을 두고 있다. 그러나, 최적 경로를 통한 생산성 향상이 팔목할 만 하기 때문에 관리자는 설비관리와 동시에 최적화도 함께 다뤄야 할 것이다. 그러나, 3가지 type으로 구성된 여러개 조립라인이 운영되는 경우, 각 생산라인의 생산성이 조화를 이루고, set-up으로 인한 라인의 정지 시간이 최소화 되도록 주문을 배분하는 최적화 문제를 해결하여야 하며, 또한 makespan을 최소화 하도록 라인에 배분된 주문을 sequencing하는 최적화 문제로 풀어야 한다. 그러나, THT형의 자삽기로 구성된 생산라인의 경우 기술적인 제약으로 인한 다른 공정의 라인내 삽입이나 장치의 설치가 없어 앞 절에서 언급한 모형을 단순화하여 적용할 수 있다. SMT형의 기계들로 구성된 생산라인의 경우 앞 절의 최적화 모형을 라인의 구성에 알맞게 변형하여 적용하여야 한다. 조립라인을 구성하고 있는 SMT형의 기계, solder screening machine, reflow oven등 그 구성을 매우 다양하게 만든다. 각 생산라인의 특성에 따라 최적화 모델을 세우고, 형성된 생산라인에 주어진 환경이나 제약을 이용한 경험적 방법을 통해 최적화 문제를 해결하게 된다.

따라서, 국내 생산라인의 특성에 맞도록 더 나아가서는 각 회사의 특성을 살릴 수 있는 자체 최적화 모델을 개발하여야 한다. 더우기 요구되는 PCB기판의 종류는 점점 증가하고 주문의 크기는 작아지는 추세에서 생산체제의 유연성을 높이기 위하여는 반드시 위와 같은 고려가 있어야 하며, 특히 기판의 설

계시 조립 가공시간을 단축할 수 있는 노력이 최적화 모형을 다루는 전문가, 작업자와 설계자 사이에 있어야 하겠다. 그러나, 국내 업체의 현실은 아직 이러한 문제에 관심이 적은 형편인데, 이에 관한 관심을 고조시키기 위하여는 이와 관련된 분야에 종사하는 모든 사람들의 많은 노력이 요구되고 있다.

4. 결론

최근 전자제품들은 소형화, 고직접화 추세에 있다. 따라서, 이들 제품에 내장되는 PCB기판도 소형화, 고직접화, 밀집화되고 있다. 이러한 필요는 표면 실장 기술(SMT)이라는 PCB기판 생산의 새로운 기술 출현을 가져왔다. 뿐만아니라, 요구되는 PCB기판의 종류는 다양해지고 한 종류 PCB기판의 주문량은 줄어들고 있다. 이러한 추세에 대체하기 위한 유연 생산 체제의 구성은 필수적이다. 그런데, SMT 조립라인의 유연생산성의 향상은 그 라인의 구성과 밀접한 관계가 있다. 그러므로, 모든 PCB기판 생산 업체들은 자신의 특성에 맞는 최적화 모형을 마련하고 자체의 제약이나 특성을 고려하여 해를 얻어야 한다.

따라서, 국내 전자 업체들은 이러한 부분에 많은 관심을 갖고 생산성 향상에 대한 노력을 해야 한다.

參 考 文 獻

1. K. Feldmann and N. Roth, "Optimization of Set-up Strategies for Operating Automated SMT Assembly Lines", *Annals of the CIRP*, vol.40.,433-436, 1991.
2. Andreou, A. D., "Optimization of the Traveling Sequence of the a "Pick and Place" Robot by Simulating its Operation as a Traveling Salesman Problem", *Annual Simulation Symposium*, 91-105, 1988.
3. M. L. Brandeau and C. A. Billington, "Design of Manufacturing cells : operation assignment in printed circuit board manufacturing", *Journal of Intelligent manufacturing*, 95-106, 1991.
4. M. S. Hillier and M. L. Brandeau, "Optimai Operation Assignment in Printed Circuit Board Manufacturing", *Stanford University, I.E.E.M. Department*, 1992.
5. Crama, Y., Kolen, A. W. J. and Oerlmans, A. G., "Throughput rate optimization in the automated assembly of printed circuit boards", *Annals of Opertions Research*, 1991.