

다수 표면실장기계를 포함하는 PCB조립라인의 작업분배 알고리즘 설계(Part II)

Design of a Line Balancing Algorithm of the PCB Assembly Line Including Multiple Surface Mounters(Part II)

◦김진철*, 이성환*, 김대원**, 이범희*

*서울대학교 전기공학부(Tel : 02-880-7316, Fax : 02-885-6620)

**명지대학교 제어계측공학과(Tel : 0335-30-6472, Fax : 0335-35-9998)

Abstracts This paper proposes a heuristic algorithm for performing the line balancing of PCB assembly line including multiple surface mounters efficiently. We consider a PCB assembly line including the multiple surface mounters arranged serially as a target system. We assume that the number of heads of surface mounters can be changed. Also, the conveyor is assumed to move at a constant speed and have no buffer. Considering the minimum number of machines required for the desired production rate is a discrete nonincreasing function which is inversely proportional to the cycle time, we propose an optimization algorithm for line balancing by using the binary search method. Also we propose an head_changing algorithm. The algorithms are validated through the computer simulation.

Keywords line balancing, cycle time, PCB assembly, surface mounter, binary search

1. 서론

인쇄회로기판 조립라인의 생산률을 높이기 위해서는 각 표면실장기계(SM:surface mounter)의 작업 최적화와 조립라인상의 다수의 표면실장기계에 대한 작업분배(line balancing)의 최적화가 동시에 수행되어야 한다.

작업분배에 관한 연구는 크게 두 가지로 나눌 수 있다 [1][2][3]. 첫째, 생산률(production rate)이 주어졌을 때 그것을 달성하기 위해 필요한 최소의 기계수를 구하는 문제가 있다. 둘째, 기계수가 주어졌을 때 각 기계에 분배된 작업시간의 합 중 최대시간 - 주기시간(cycle time) - 이 최소가 되도록 각 작업을 분배하는 문제가 있다. 일반적으로 전자를 Type I 문제, 후자를 Type II 문제라고 한다. Type II 문제는 대부분 Type I 문제에 대한 알고리즘을 반복적으로(iteratively) 적용함으로써 해결할 수 있다[1][2][3][4][5]. 본 논문에서는 후자를 다룬다. 작업분배 문제는 NP-hard문제이므로 발견법적인 알고리즘을 찾는 연구가 많이 수행되었다[6].

본 논문은 [2]의 논문에서 밝혀진 주기시간과 필요한 기계수가 반비례한다는 사실을 근거로 하여, 인쇄회로기판 조립라인이 주어졌을 때 모든 작업을 마치기 위해 필요한 주기시간이 최소가 되도록 하는 이분탐색법을 이용한 발견법적 작업분배 알고리즘을 제시한다. 또한 작업대상 PCB와 작업라인의 근본적인 불일치로 인한 작업분배 효율의 감소를 막기 위한 헤드교환 알고리즘을 제시한다.

2. 문제의 설정

2.1 문제의 설정

본 논문이 대상으로 하는 조립라인은 여러 종류의 표면실장기계가 직렬로 배치되어 있는 인쇄회로기판(PCB : Printed

Circuit Board) 조립라인으로 표면실장기계의 수는 일정하고 각 표면실장기계의 헤드는 교환가능하다고 가정한다. 또한, 조립라인을 연결하는 컨베이어벨트는 일시저장 기능이 없으며 일정한 주기로 움직인다고 가정한다.

본 논문에서는 칩(chuck)을 사용하여 흡착한 부품의 위치 및 방향을 기구적 방법으로 보정시키는 헤드를 일반용 헤드, 카메라를 사용하여 흡착한 부품을 보정시키는 헤드를 정밀용 헤드라 정의한다. 그리고 일반용 헤드를 사용하는 부품을 일반용 부품, 정밀용 헤드를 사용하는 부품을 정밀용 부품이라 정의한다.

2.2 목적함수

본 논문이 대상으로 하는 조립라인은 컨베이어 벨트의 주기가 일정하고 일시저장 기능이 없으므로 생산률은 컨베이어 벨트의 주기와 반비례 관계에 있다. 그런데 컨베이어 벨트의 주기는 각 표면실장기계에 분배된 작업시간의 합 중 최대시간, 즉 주

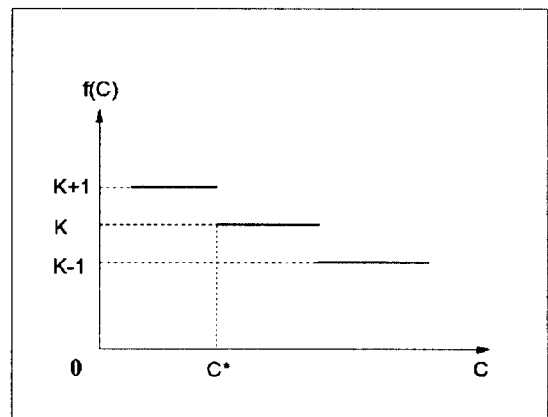


그림 2.1 함수 f(C)의 형상
Fig. 2.1 Shape of function f(C)

기시간에 의해 결정되므로 목적함수는 주기시간(cycle time)이다 [8].

$$\begin{aligned} & \text{minimize } C \\ & \text{subject to } f(C) \leq K \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, C는 주기시간, K는 조립라인상의 표면실장기계의 수, f(C)는 주기시간이 주어졌을 때 그 시간안에 모든 표면실장부품을 인쇄회로기판상에 실장하는데 필요한 최소의 표면실장기계의 수이다. 정의로부터 f(C)는 이산단조 감소함수이며 그래프의 형상은 그림 2.1과 같다. 그림 2.1에서 C*은 최적 주기시간이다.

3. 작업분배 알고리즘

먼저 작업분배 알고리즘에서 사용되는 기호를 정의하면 다음과 같다.

- C : 주기시간(cycle time)
- C_L : 주기시간의 하한(lower bound)
- C_H : 주기시간의 상한(upper bound)
- T : 총 작업시간
- T_P : 정밀용 부품의 총 작업시간
- T_G : 일반용 부품의 총 작업시간
- K : 조립라인의 표면실장기계수
- K_P : 조립라인의 정밀용 헤드를 가진 표면실장기계수
- K_G : 조립라인의 일반용 헤드를 가진 표면실장기계수
- K_{OP} : 조립라인의 정밀용 헤드만 가진 표면실장기계수
- K_{OG} : 조립라인의 일반용 헤드만 가진 표면실장기계수
- BE : 작업분배 효율(line balancing efficiency)

작업분배 알고리즘은 다음과 같이 5단계로 설명된다.

Step 1. 조립라인에 대한 정보와 조립할 인쇄회로기판에 대한 정보가 주어지면 [7],[8]에서의 같이 입력정보처리를 통해 표면실장부품을 정밀용 부품과 일반용 부품으로 분류하고 각 부품에 사용할 노즐을 선택한다. 또한 각 부품의 작업시간과 자동노즐교환시간을 계산한다.

Step 2. (2)를 이용하여 주기시간의 상한과 하한을 구한다. 조립라인상의 각 표면실장기계에 분배된 작업시간이 균등할 경우를 하한으로 정한다. K=1일 경우 상한과 하한은 같다.

$$\begin{aligned} C_L &= \left[\frac{T}{K} \right]^+ \\ C_H &= \begin{cases} \left[\frac{2T}{K+1} \right]^+ & \text{if } K \text{ is odd} \\ \left[\frac{2T}{K} \right]^+ & \text{if } K \text{ is even} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, []⁺는 실링(ceiling) 함수를 의미한다.

Step 3. f(C)는 이산단조감소하는 특성을 가지므로 상한과 하한 사이에서 이분탐색법을 적용한다. f(C)를 구하는 알고리즘에서

부품의 분배는 각 표면실장기계의 최대 피더수와 주기시간 제한 내에서 이루어진다. 주어진 주기시간내에 분배가 가능할 경우 K이하의 값을, 불가능할 경우 K+1을 f(C)의 출력값으로 가진다. Step 4. f(C) ≤ K라는 조건을 만족하며 C - C_L < Min일때 탐색을 종료한다. 여기서, Min은 최소의 작업시간을 가지는 부품의 작업시간을 의미한다.

Step 5. 각 표면실장기계의 피더배치 및 작업경로 최적화 알고리즘의 입력정보로 사용되는 파일을 각 표면실장기계별로 만든다.

본 논문에서는 효율적인 분배가 이루어졌는 지의 여부를 판단하기 위한 성능지표로 주기시간과 함께 (3)과 같이 정의되는 작업분배 효율을 사용한다. (3)은 각 기계에 분배된 작업시간들의 평균값을 주기시간으로 나눈 값이다. 따라서 작업분배 효율은 (4)와 같은 범위내에 존재한다. 만일 총 작업시간이 고정되어 있을 경우 주기시간과 작업분배 효율은 반비례 관계이다.

$$BE = \frac{T}{C \times K} \quad (3)$$

$$\frac{1}{K} \leq BE \leq 1 \quad (4)$$

4. 헤드교환 알고리즘

3장에서 제시된 방식으로 작업분배를 하면 조립라인 표 4.1에 대해 표 4.2-4와 같은 방식으로 작업분배가 이루어진다[7]. 표 4.2-4에 대한 최적 작업분배 효율의 그래프는 그림 4.1과 같다. 이때 K_P > K_G라고 가정한다[7].

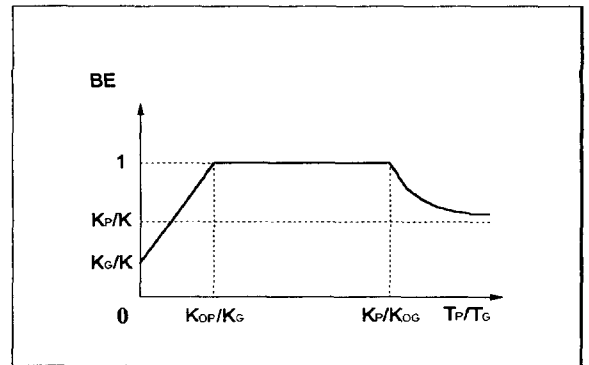


그림 4.1 최적 작업분배 효율

Fig. 4.1 Optimal line balancing efficiency

표 4.2와 4.4의 경우는 작업대상 PCB와 조립라인의 근본적인 불일치로 작업분배 효율이 감소된 경우이다. 표 4.2의 경우는 일반용 헤드를 가진 기계수에 비해 일반용 부품의 수가 많기 때문에 1에서 K_{OP}사이의 정밀용 헤드중 하나를 일반용 헤드로 교환해 주어야 한다. 헤드의 교환은 1에서 K_G까지의 정밀용 헤드에 작업이 분배되지 않고 이때의 작업분배 효율이 0.97보다 작

표 4.1 조립라인의 구성

Table 4.1 Structure of assembly line

(유 : ●)

기계번호	정방향	1	...	K _{OG}	K _{OG} +1	...	K _G	K _G +1	...	K
	역방향	K	...	K _P +1	K _P	...	K _{OP} +1	K _{OP}	...	1
정밀용 헤드의 유무					●	●	●	●	●	●
일반용 헤드의 유무		●	●	●	●	●	●			

표 4.2 'T_P/T_G<K_{OP}/K_G'인 경우의 최적 작업분배
Table 4.2 Optimal line balancing in case of 'T_P/T_G<K_{OP}/K_G'

기계번호	정방향	1	...	K _{OG}	K _{OG} +1	...	K _G	K _G +1	...	K
	역방향	K	...	K _P +1	K _P	...	K _{OP} +1	K _{OP}	...	1
정밀용 헤드의 작업시간					0	0	0	$\frac{T_P}{K_{OP}}$	$\frac{T_P}{K_{OP}}$	$\frac{T_P}{K_{OP}}$
일반용 헤드의 작업시간		$\frac{T_G}{K_G}$	$\frac{T_G}{K_G}$	$\frac{T_G}{K_G}$	$\frac{T_G}{K_G}$	$\frac{T_G}{K_G}$	$\frac{T_G}{K_G}$			

표 4.3 'K_{OP}/K_G≤T_P/T_G≤K_P/K_{OG}'인 경우의 최적 작업분배
Table 4.3 Optimal line balancing in case of 'K_{OP}/K_G≤T_P/T_G≤K_P/K_{OG}'

기계번호	정방향	1	...	K _{OG}	K _{OG} +1	...	K _G	K _G +1	...	K
	역방향	K	...	K _P +1	K _P	...	K _{OP} +1	K _{OP}	...	1
정밀용 헤드의 작업시간					$\frac{B}{K_G - K_{OG}}$	$\frac{B}{K_G - K_{OG}}$	$\frac{B}{K_G - K_{OG}}$	$\frac{T_P - B}{K_{OP}}$	$\frac{T_P - B}{K_{OP}}$	$\frac{T_P - B}{K_{OP}}$
일반용 헤드의 작업시간		$\frac{T_G - A}{K_{OG}}$	$\frac{T_G - A}{K_{OG}}$	$\frac{T_G - A}{K_{OG}}$	$\frac{A}{K_G - K_{OG}}$	$\frac{A}{K_G - K_{OG}}$	$\frac{A}{K_G - K_{OG}}$			

표 4.4 'T_P/T_G>K_P/K_{OG}'인 경우의 최적 작업분배
Table 4.4 Optimal line balancing in case of 'T_P/T_G>K_P/K_{OG}'

기계번호	정방향	1	...	K _{OG}	K _{OG} +1	...	K _G	K _G +1	...	K
	역방향	K	...	K _P +1	K _P	...	K _{OP} +1	K _{OP}	...	1
정밀용 헤드의 작업시간					$\frac{T_P}{K_P}$	$\frac{T_P}{K_P}$	$\frac{T_P}{K_P}$	$\frac{T_P}{K_P}$	$\frac{T_P}{K_P}$	$\frac{T_P}{K_P}$
일반용 헤드의 작업시간		$\frac{T_G}{K_{OG}}$	$\frac{T_G}{K_{OG}}$	$\frac{T_G}{K_{OG}}$	0	0	0			

올때 시행한다. 표 4.4의 경우는 정밀용 헤드를 가진 기계수에 비해 정밀용 부품의 수가 많기 때문에 1에서 K_{OG}사이의 일반용 헤드중 하나를 정밀용 헤드로 교환해 주어야 한다. 헤드의 교환은 1에서 K_P까지의 일반용 헤드에 작업이 분배되지 않고 이때의 작업분배 효율이 0.97보다 작을때 시행한다. 0.97은 모의실험 결과에 기초한 경험치이다. 헤드교환이 일어난 후에도 똑같은 조건이 존재하면 순환적으로 계속 시행한다.

5. 모의실험

기계수 및 기계당 헤드수는 각 모의실험에 따라 표 5.1-3과 같이 변화시키면서 사용하였다. 부품수는 400개로 고정하였고 헤드의 최고속도비는 표 5.1-2의 경우 1:1:2:2, 표 5.3의 경우 1:1:2로 가정하였다. 정밀용 부품과 일반용 부품의 총 작업시간의 비의 변화에 따른 작업분배 효율의 변화를 확인하기 위해 정밀용 부품대 일반용 부품의 개수의 비를 1:0.5, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4,

표 5.3 조립라인의 헤드 구성(K=K_P인 경우)

Table 5.3 Structure of assembly line in case of K=K_P

기계번호	SM1	SM2	SM3
정밀용 헤드수	1	2	2
일반용 헤드수	2	1	0

1:5, 1:6, 1:7, 1:8로 변화시키면서 모의실험을 수행하였다. 모의 실험에 따라 경계점에서의 변화를 살펴보기 위해 부품비 1:0.7, 1:1.5, 1:9, 1:10인 경우를 추가하였다. 표 5.1-3의 경우 헤드교환 알고리즘을 적용하기 전과 후의 작업분배 효율의 변화는 그림 5.1-3과 같다.

그림 5.1-3에서 'K_{OP}/K_G≤T_P/T_G≤K_P/K_{OG}'인 경우는 작업분배 효율이 0.97이상이므로 헤드교환이 없으나 그외의 경우는 헤드교환이 이루어짐을 볼 수 있다. 헤드교환후는 모든 경우에서

표 5.1 조립라인의 구성(일반적인 경우)
Table 5.1 Structure of assembly line in general case

기계 번호	SM1	SM2	SM3	SM4
정밀용 헤드수	0	1	2	2
일반용 헤드수	2	2	1	0

표 5.2 조립라인의 구성(K=K_G인 경우)

Table 5.2 Structure of assembly line in case of K=K_G

기계 번호	SM1	SM2	SM3	SM4
정밀용 헤드수	0	0	1	2
일반용 헤드수	2	2	2	1

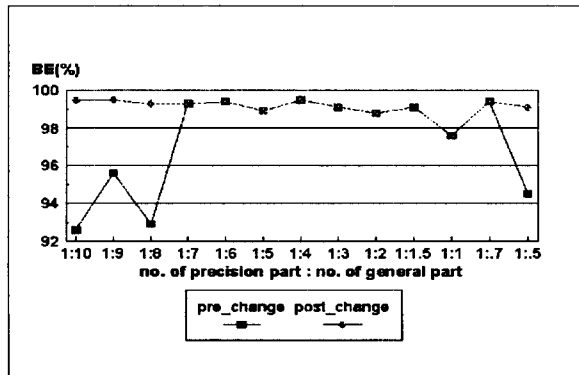


그림 5.1 표 5.1의 경우에 대한 작업분배 효율
Fig. 5.1 Line balancing efficiency in case of Table 5.1

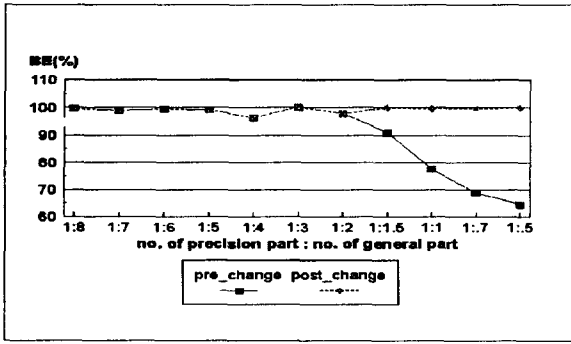


그림 5.2 표 5.2의 경우에 대한 작업분배 효율
Fig. 5.2 Line balancing efficiency in case of Table 5.2

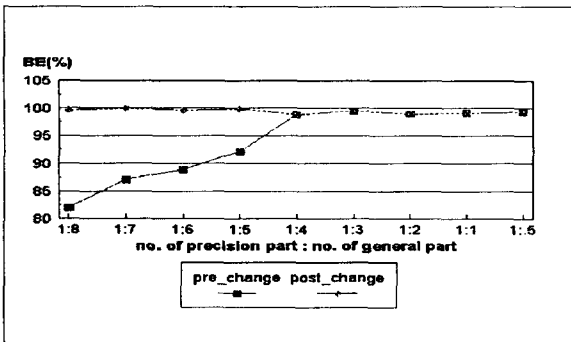


그림 5.3 표 5.3의 경우에 대한 작업분배 효율
Fig. 5.3 Line balancing efficiency in case of Table 5.3

높은 작업분배효율을 보인다. 그림 5.2는 $K=K_G$ (즉, $K_{OP}=0$)인 경우, 그림 5.3은 $K=K_P$ (즉, $K_{OC}=0$)인 경우의 작업분배 효율이다. 모의실험 결과 제시된 최적 작업분배 효율의 그래프와 유사한 형태를 보임을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 조립라인상의 각 표면실장기체들이 직렬로 연결되고, 각 표면실장기체를 연결하는 컨베이어벨트는 일시저장 기능이 없으며, 주기가 일정하다는 가정하에 조립라인에 대한 정보와 조립대상 인쇄회로기판에 대한 정보가 주어졌을 때 각 표면실장기체에 분배된 작업시간의 합 중 최대시간 - 주기시간 - 이 최소가 되도록 각 표면실장기체에 작업을 분배하는 문제를 다루었다.

본 논문은 주기가 주어졌을 때 그 시간안에 모든 표면실장부품을 인쇄회로기판상에 실장하는데 필요한 최소의 표면실장기체수를 찾는 함수가 주기시간에 대한 이산단조 감소함수라는 점을 이용하여 주기시간의 상한과 하한을 구하고 하한과 상한사이에서 이분탐색법을 적용하는 발견법적 작업분배 알고리즘을 제시하였다. 그리고 각 표면실장기체의 헤드교환이 가능하다는 가정하에 헤드교환 알고리즘을 제시하였다. 또한 정밀용 부품 및 일반용 부품의 총 작업시간의 비의 변화에 따른 이론적 최적 작업분배 효율의 그래프를 제시하였다.

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능은 컴퓨터 모의실험을 통해 입증하였다. 모의실험의 결과를 통해 본 논문에서 제시한 작업분배 알고리즘이 제시된 최적 작업분배 효율의 그래프와 유사한 개형을 나타냄을 볼 수 있었다. 또한 헤드교환 알고리즘의 적용을 통해 모든 경우에 0.97이상의 높은 작업분배 효율을 가질

을 볼 수 있었다.

앞으로 전문가에 의한 작업분배와 본 논문에서 제안한 알고리즘에 의한 작업분배의 결과를 직접 생산현장에서 비교함으로써 실제적인 알고리즘의 성능평가 작업도 필요하리라 생각된다.

참고문헌

- [1] I. Baybars, "A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problems", *Mgmt. Sci.* vol.32, no.8, pp909-932, 1986
- [2] S. T. Hackman, M. J. Magazine and T. S. Lee, "Fast, Effective Algorithms for Simple Assembly Line Balancing Problem", *Oper. Res.* vol.37, no.6, pp916-924, 1989.
- [3] F. B. Talbot and J. H. Patterson, "A Comparative Evaluation of Heuristic Line Balancing Techniques", *Mgmt. Sci.* vol.32, no.4, pp430-454, 1986.
- [4] E. M. Dar-El, "MALB - A Heuristic Technique for Balancing Large Single-Model Assembly Lines", *AIEE Trans.* vol.5, no.4, pp343-356, 1973.
- [5] M. S. Magazine and T. S. Wee, "An Efficient Branch and Bound Algorithm for an Assembly Line Balancing Problem - Part II. Maximize the Production Rate", WorkingPaper 150, University of Waterloo, Department of Management Science. 1981c.
- [6] M. S. Magazine and T. S. Wee, "An Efficient Branch and Bound Algorithm for an Assembly Line Balancing Problem - Part I. Minimize the Number of Work Stations", Working Paper 150, University of Waterloo, Department of Management Science. 1981b.
- [7] 김진철, "표면실장기용 인-라인 시스템의 최적화에 관한 연구", 서울대학교 공학석사 학위논문, 1996
- [8] 김진철, 이성환, 홍지민, 김대원, 이범희, "표면실장기용 인-라인 시스템의 최적화에 관한 연구", *한국 자동제어 학술회의 논문집 국내학술편*, pp719-722, 1995