

시물레이션을 이용한 다층 P.C.B. 생산공정의 운영분석

Analysis of Multi-Layer P.C.B. Manufacturing Process by Simulation

김만식*, 이영해**

Man-Sik Kim*, Young-Hae Lee**

Abstract

The capacity of the drilling process in Multi-Layer PCB fabrication can be affected by various process parameters determining material flows in the unit operations. The ratio of mass-lamination to pin lamination and the number of stacks as the most critical parameters, among them, were chosen on the basis of exhaustive field evaluation to study their effects on the capacity of the process. The best alternative condition for maximum capacity of the process was selected by simulation of process.

1. 서 론

다층 PCB 산업은 그 특성상 사용자 주문에 신속히 대응을 해야 하는 다품종 소량생산형태의 생산방식을 취하고 있고, 다양한 기종의 변화와 긴급납기 요구로 인하여 잦은 생산계획의 변경이 불가피하다. 모든 제조공정이 설비에 주로 의존하는 장치산업의 성격을 띠고 있고, 설비 자체도 고가(高價)이므로 설비가동률이 기업에 있어서는 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 즉, 이러한 여러가지 상황을 고려한 적절한 생산방법의 선택이 기업의 성패를 좌우한다.

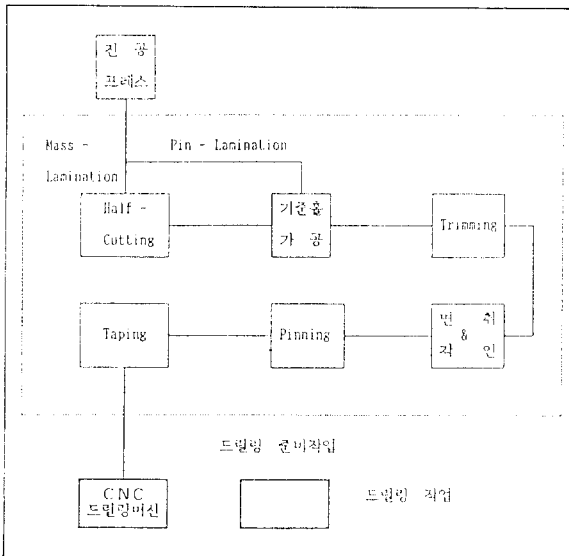
불확정 수요와 납기에 대한 해석방법으로는 적절한 수학적 모델을 작성하여 근사적해를 구하는 방법과, 유사한 모형을 작성하여 시물레이션에 의한 근사적인 해를 구하는 두가지 방법이 있다. 현실문제의 시스템은 매우 유동적이어서 전자의 방법으로는 여러가지 상황을 기지(Known)로 가정된 상태에서 만이 가능하며, 최적해를 구하는데 매우 복잡한 과정과 계산방법이 동원되어야 하므로, 기간도 많이 걸릴 뿐만 아니라 해자체도 최적해라는 보장도 없다. 반면에 유사한 모형을 작성하여 시물레이션을 이용하여 반복적 실험에 의한 최적해를 구해 나가는 것이 현실적이며, 더 정확한 최적해를 구할 수 있다고 하겠다.[1]

* 삼성전기 ** 한양대학교 산업공학과

본 연구의 대상인 다층 PCB공정은 배치(batch)에 의한 생산형태를 취하고 있고 공정의 특성에 따라서 배치형태 또는, 날개로 작업이 진행되는 등 물류의 흐름이 매우 가변적이다. 이러한 공정중 특히 구멍을 가공하여 내층과 외층을 전기적으로 연결하는 드릴링 공정을 중심으로 운영 형태를 분석하여, 다층 PCB 제조공정에 맞는 적절한 생산방법의 대안제시에 그 목적이 있다. 분석대상 시스템은 S사의 사례를 중심으로 한다.

2. 시스템 개요

주 분석대상인 CNC 드릴링머신은 설비가 고가인 관계로 다층 PCB 전체 공정중에서 차지하는 원가의 비율도 높은 편이다. 이에 대한 공간적 표현은 <그림 1>로 나타낸다.



<그림 1> 시스템 개요도

진공프레스 공정에서는 로트단위로 분석대상인 드릴링 공정으로 보내진다. 프레스 방법으로는 매스 라미네이션(Mass Lamination)과 핀 라미네이션(Pin Lamination) 방식이 있는데, 매스 라미네이션 방식은 동일 진공프레스 설비에 2개의 로트를 동시에 작업하는 것을 말하고, 핀 라

미네이션 방식은 1개의 로트를 작업하게 된다. 프레스시 내층과 외층의 유동을 방지하고자 핀을 사용하게 되는데, 이 핀의 사용 유무에 따라 핀 또는 매스방식으로 분류한다. 매스 라미네이션으로 작업된 로트는 로트의 분할을 위하여 절단기(Half-Cutter)를 이용한 절단작업을 실시하여, 2개의 로트로 분할이 된다.

기준홀 가공은 드릴링 작업시 기준이 되는 구멍을 내층재 작업시 기준이 되었던 위치에 X-ray를 이용 투시하여, 동일한 위치에 기준구멍을 가공하게 된다.

트리밍(Trimming) 공정은 프레스시 내층재보다 조금 크게 외층을 라미네이션하게 되는데, 이 불필요한 부분을 드릴비트(BIT)를 이용하여 외형을 잘라내는 공정으로, 한 설비에 4개의 드릴축이 있고, 한 비트당 3장의 제품을 동시에 가공할 수 있다.

면취 및 각인 공정은, 트리밍면을 부드럽게 라운딩(Rounding)하고, 표면에 로트번호를 각인하는 공정으로, 날개의 연속된 작업을 실시한다.

핀삽입(Pinning) 작업은 판넬(Pannel)에 드릴링 작업을 위하여 지지판(Back Board)과 알루미늄 박판을 양면에 부착후, 핀을 박아 고정시킨다. 이때 제품의 특성에 따라서 한번에 판넬을 3장, 2장 또는 1장씩 적층을 하게 된다. 이것을 3중칩(Stack), 2중칩, 1중칩이라고 부른다.

테이프 부착(Taping) 작업은 드릴링 작업시 판넬을 보호하는 알루미늄판을 고정시키기 위하여, 사각형 모서리 부분을 테이프로 고정을 한다.

드릴링 작업은 내층과 외층을 전기적으로 연결을 시키기 위하여 구멍을 가공하는 작업을 실시한다. 이 CNC 드릴링머신은 한 설비에 4개의 드릴축이 있어서, 위에서 준비된 배치를 동시에 4개까지 작업이 가능하며, 사전에 입력된 드릴링 데이터에 따라서 구멍을 가공하는 작업이다.

시물레이션 수행을 위한 전제사항은 다음과 같다.

- 1) 작업시간은 평일(24HR)을 기준으로 하고, 설비의 고장은 고려하지 않는다.
- 2) 설비별 작업시간은 Time Study한 실적을 적용한다.
- 3) 제품의 도착 패턴은 일정한 분포를 이룬다.
- 4) 드릴링머신은 모두 동일 규격의 설비이다.

3. 입력자료

본 연구에서 사용되는 입력 Data는 S사의 사례를 기준

으로 수집하였다. 각 공정별 작업시간은 스톱워치법에 의하여 직접 산출하였다. 작업시간은 워크사이즈(Work Size)에 따라서 다르게 되는데 데이터는 <표 1>과 같다.

<표 1> 워크사이즈별 작업시간

워크사이즈	기준출가공	라우팅	트리밍	핀삽입	테이프부착
340×510	37sec/매	25sec/매	24sec/매	30sec/매	30sec/매
405×510	38sec/매				
510×510	39sec/매	40sec/매			
510×610	40sec/매				

진공프레스에서 분석대상 공정으로 제품 도착시간 간격의 분포를 결정하기 위하여 181개의 도착시간 데이터를 수집하였다. 데이터를 이용하여 분산계수(Coefficient of Variation)을 구하면[2],

$$\hat{\sigma}(n) = S(n) / \bar{X}(n)$$

$$\hat{\sigma}(181) = 61.4/68.2$$

$$= 0.90$$

분산계수의 추정치 $\hat{\sigma}(n)$ 이 1에 근사하므로 도착간격 시간들에 대하여 지수분포를 가정하였다. 주어진 분포에 대하여 χ^2 검정(5)을 실시한다. 먼저, χ^2 의 검정 통계량을 계산하기 위해서 가정된 분포의 범위를 20개의 구간으로 나눈다. 즉, $(a_0, a_1), (a_1, a_2) \dots (a_{19}, a_{20})$ 이고, 여기에서 $a_0 = -\infty, a_{20} = \infty$ 이다. 그리고 $j=1, 2 \dots$ 에서,

$N_j = j$ 번째의 구간 (a_{j-1}, a_j) 에 있는 X_j 의 갯수를 구한다. 다음에는 도착시간 데이터가 가정된 분포에서 나왔다는 가설하에 j 번째의 구간에 속하는 X_i 의 기대비율 P_j 를 계산한다. 마지막으로 다음의 검정 통계량을 구한다.

$$\chi^2_0 = \sum (N_j - np_j)^2 / np_j$$

구해진 χ^2_0 값을 유의수준 α 에 대해서 구한 χ^2 값과 비교를 하여 이 값보다 작으면 가정된 분포가 지수분포라고 가정할 수 있다.

$$\text{구간수}(n) = 20$$

$$\text{기대비율}(P_j) = 1/20 = 0.05$$

$$\text{기대갯수}(np_j) = 181 \times 0.05$$

$$= 9.05$$

이상의 결과로 검정통계량을 구하면,

$$\chi^2_{19, 0.05} = 30.144 > \chi^2_0 = 29.43$$

이 된다. 검정통계량이 χ^2 보다 작으므로, 유의수준 $\alpha = 0.05$ 로 평균치가 68.2인 지수분포가 주어진 데이터에 적합하지 않다는 결론을 내릴 수 없다.

같은 방법으로 워크사이즈별 드릴링 작업시간을 분석한 결과 작업시간은 정규분포를 하였다. 드릴링 작업시간은 기종에 따라 다르나, 유의차 검정을 실시한 결과 유의하지 않고 다발, 워크사이즈에 따라서 유의한 차이를 보였다. 워크사이즈별 드릴링 작업시간은 <표 3>과 같다.

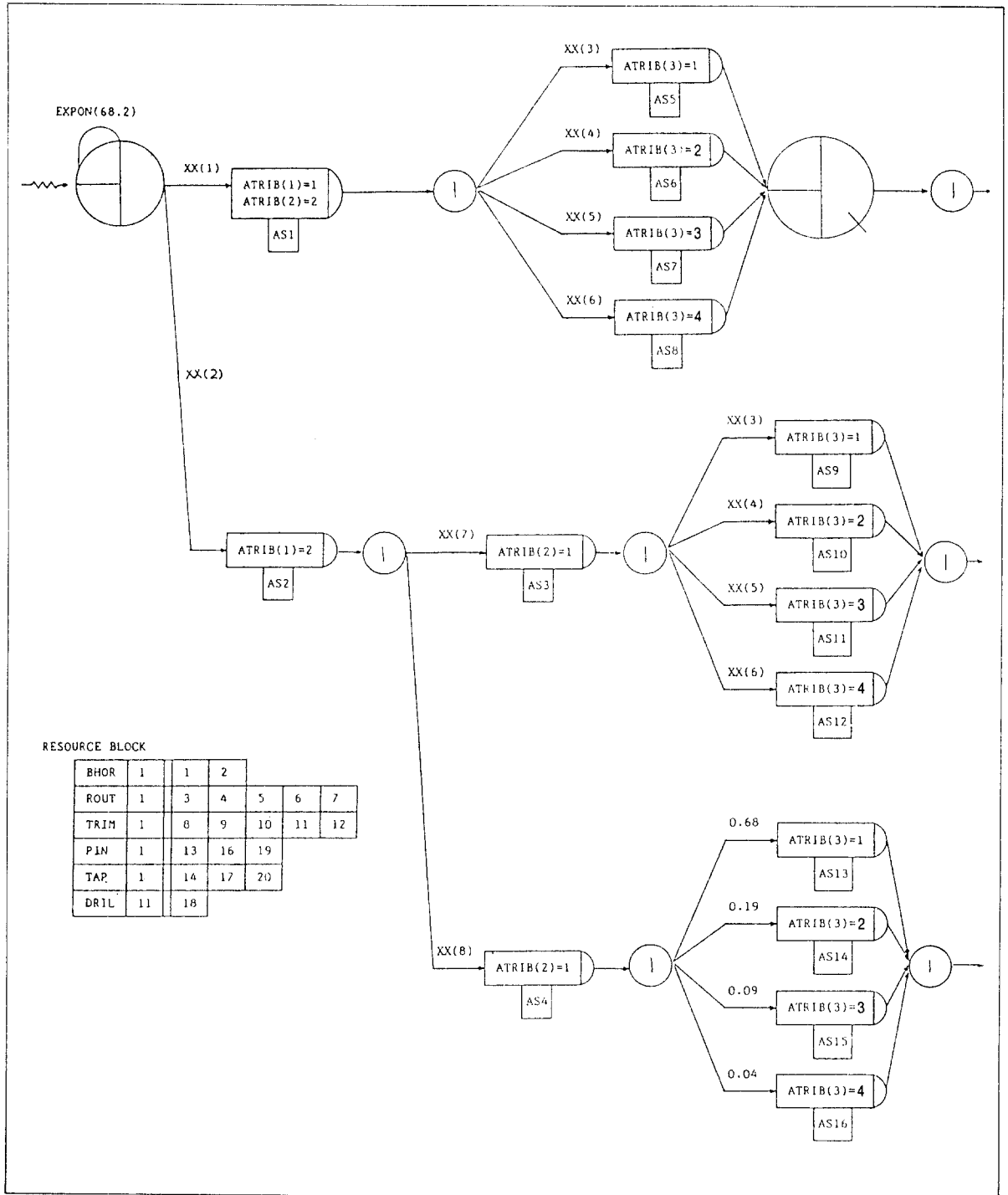
<표 3> 워크사이즈별 드릴링 작업시간

워크사이즈	평균값	표준편차
340×510	47.83	15.17
405×510	62.48	26.6
510×510	95.3	7.07
510×610	160.6	30.2

4. SLAM 네트워크 모델링

네트워크 모델링시 각 설비들은 Resource로 처리를 하였고, 매스 라미네이션, 핀 라미네이션, 샘플의 구분, 워크사이즈, 3중첩의 배치수, 2중첩의 배치수, 드릴작업방법(1중첩, 2중첩, 3중첩) 등은 Attribute로 처리하였다. 또한, 매스 라미네이션 점유율, 핀 라미네이션 점유율, 워크사이즈 구분, 2중첩, 3중첩 점유율 등은 $XX(i)$ 의 변수로 처리하여 쉬게 모델을 변형 가능하도록 하였다. 모델의 일부분이 <그림 2>에 나타나 있다.[2]

최초에 진공프레스 공정에서 드릴링 공정으로 평균이 68.2인 지수분포로 제품이 투입된다. 한 로트당 판넬수는 60장으로 구성된다. 드릴링 공정에서는 제품을 매스 라미네이션 및 핀 라미네이션으로 구분하며, 전자의 제품을 Half-Cutting하여 2개의 로트로 구분되고, 후자는 바로 기준출가공 공정으로 보내어진다. 핀 라미네이션 제품은 다시 양산품과 샘플로 구분되는데, 샘플은 한 로트당 판넬수가 60장이 못되고 판넬수가 가변적이다. 이와 관련된 확률이 부여되어 있다.



(그림 2) SLAM 네트워크 모델

기준홀가공, 트리밍, 면취 및 각인, 판삽입, 테이프부착 공정 등을 거치게 되는데, 각 설비들은 Resource로 처리를 하였고, 설비가 가동중일 경우 Awaiting 노드에서 대기하였다가, 설비가 선행작업을 끝냈을 경우에 작업이 진행된다. 드릴링공정에서는 각 중첩별 방법에 따라서 3중첩, 2중첩, 1중첩으로 배치를 이루고 있고, 이 배치를 드릴링 공정에서 구멍을 가공하며 가공완료된 배치는 각 배치의 Attribute별로 작업량을 계산하고 모든 시뮬레이션 과정은 종료된다.

5. 대안설정

본 연구에서는 단위 시간당 생산량의 증대를 그 목적으로 하므로, 다음과 같은 대안을 설정하여 비교를 한다. 매스 라미네이션 비율의 증가에 따라서 앞 공정한 진공 프레스에서 드릴링공정으로 단위 시간당 투입되는 로트수가 많아지게 된다. 그러므로, 매스 라미네이션 비율의 증가에 따른 시스템의 변화를 분석한다. 대안 설정시 매스 비율이 0.2 이하 그리고 0.8 이상은 현실적이지 못한 비율이므로 대안에서 제외를 한다. 이에 대한 설정이 <표 4>에 나타나 있다.

<표 4> 매스 대 핀 라미네이션 점유율별 대안

생산방식	대안				
	1	2	3	4	5
매스 라미네이션	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
핀 라미네이션	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3

3중첩 비율의 증가에 따라서 단위 시간당 드릴링머신의 생산성은 향상되게 된다. 이에 따른 생산량의 변화 및 드릴링머신의 효율을 분석한다. 마찬가지로 3중첩 점유율이 0.2 이하, 0.8 이상은 현실적이지 못한 비율이므로 대안에서 제외를 하였다. <표 5>에 설정된 대안들이 나타나 있다.

<표 5> 3중첩 대 2중첩 점유율별 대안

생산방식	대안				
	1	2	3	4	5
3중첩 점유율	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
2중첩 점유율	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3

6. 결과분석

각 대안별 20회 실험을 하고 시뮬레이션은 10000 분을 기준으로 하였다. 초기 런(run)을 실시한 결과 약 4000분에서 안정상태(Steady State)를 이루었다[4]. 그러므로 초기 4000분의 데이터를 삭제하고 나머지 6000 분의 데이터를 기준으로 분석을 실시했다.

6.1 매스 대 핀 라미네이션 점유율별 대안분석

각 대안별로 실험을 실시하여 <표 6>과 같은 결과를 얻었다.

<표 6> 매스 대 핀 라미네이션 점유율별 실험결과

통계량	대안					
	1	2	3	4	5	
생산량	평균	5131.05	5189.30	5231.70	5524.20	4566.75
	표준편차	362.47	443.12	236.59	721.0	1122.29
평균이용율	6.67	6.91	7.02	7.71	7.11	

시뮬레이션이 각각의 대안에서 독립적으로 수행이 되었으므로 반복이 있는 일원배치법에 의한 ANOVA 분석[3]을 실시하여, Mass Lamination이 생산능력에 영향을 미치는지를 분석한다. 각각의 대안을 수준 A₁, A₂, A₃, A₄, A₅로 놓고 <표 7>과 같은 ANOVA 분석을 실시하였다. 여기서 A는 각 수준간의 효과차이로 인한 변동, E는 오차 변동, T는 총변동을 의미한다.

분산분석 결과 생산량의 변화에 매스 대 핀라미네이션의 점유율이 유의수준 0.01로 영향을 미치고 있음을 알 수

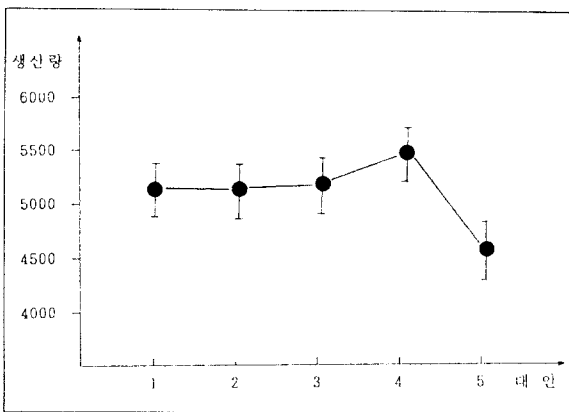
〈표 7〉 매스 대 핀 라미네이션 실험결과와 분산분석표

요 인	제곱합	자유도	제곱평균	F ₀	F(0.01)
A	9477497.7	4	2369374.43	5.52	4.13
E	40743106.3	95	42887480		
T	50220604	99			

있다. 각 대안에서 생산량 점 추정치의 신뢰구간을 유의 수준 0.05로 구하면,

$$\begin{aligned} \mu(1) &= X \pm t(\Phi_e; \alpha/2) \sqrt{Ve/m} \\ &= 5131.05 \pm 2.0 \sqrt{428874.80 / 20} \\ &= 5131.05 \pm 292.87 = (4838.28, 5423.92) \end{aligned}$$

이 된다. 여기서 m은 각 수준에서의 실험수, Ve는 오차항의 분산을 의미한다. 같은 방법으로 각각의 대안에서 신뢰구간을 구하여 도시하면 〈그림 3〉과 같다.



〈그림 3〉 생산량 점 추정치의 신뢰구간

각 대안에서 모평균차에 대한 검정을 실시한다. 검정을 쉽게 하기 위하여 두 모평균차의 신뢰구간을 구한후, 이 신뢰구간이 0을 포함하고 있으면 두 모평균 간에 차이가 있다고 볼 수 없다. 두 모평균 μ_1 와 μ_1' 의 $100(1 - \alpha)\%$ 신뢰구간은,

$$(\bar{X}_1 - \bar{X}_1') \pm t(\Phi_e; \alpha/2) \times \sqrt{2Ve / m}$$

이 된다. 따라서 $|\bar{X}_1 - \bar{X}_1'| > t(\Phi_e; \alpha/2) \times \sqrt{2Ve / m}$

의 크기를 비교하여 $(\bar{X}_1 - \bar{X}_1') > t(\Phi_e; \alpha/2) \times \sqrt{2Ve / m}$ 이면, 유의수준을 α 에서 유의한 차이가 있다고 결론을 내릴 수 있다. 이 값을 최소 유의차(Least Significant Difference ; LSD)라고 부른다.[3]

유의수준 $\alpha = 0.05$ 로 유의차 검정을 실시하기 위해 LSD를 계산하면,

$$\begin{aligned} LSD &= t(\Phi_e; \alpha/2) \times \sqrt{2Ve / m} \\ &= t(95; 0.05) \times \sqrt{(2 \times 428874.8) / 20} \\ &= 343.8 \end{aligned}$$

이 된다. 데이터로 보아 대안 4가 최적으로 보이므로 대안 4를 중심으로 유의차 검정을 실시한 결과, 대안 2,3,4에서는 유의한 차이가 없으나 대안 4와 대안 1, 대안 4와 대안 5에서는 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다.

매스 라미네이션 점유율이 증가함에 따라서 단위 시간당 진공프레스 공정에서 투입되는 양이 증가하므로, 전체적인 생산량은 증가하게 된다. 대안 4에서 생산량은 최대가 되며, 대안 5에서는 감소하게 된다. 이것은 매스 라미네이션 점유율이 일정비율 이상이 되면, Half-Cutting 작업시간의 추가와 드릴링 준비작업 등에 부하가 증가되기 때문이다. 그러므로 현시스템 상황하에서는 대안 4가 최적의 조건이라고 할 수 있다.

6.2 3중첩 대 2중첩 점유율별 대안분석

대안별로 실험을 실시하여 〈표 6〉과 같은 결과를 얻었다. 핀 및 매스 라미네이션의 비율은 앞에서 최적으로 선택이 되었던 대안 4로 설정을 하고 실험을 실시하였다. 같은 방법으로 3중첩 점유율의 변화가 생산능력의 변화에 영향이 있는지를 분석하기 위하여, 각각의 대안에 대해서 ANOVA 분석을 실시한 후 〈표 9〉와 같은 결과를 얻었다. 분산분석 결과 3중첩 대 2중첩 점유율의 변화가 유의수

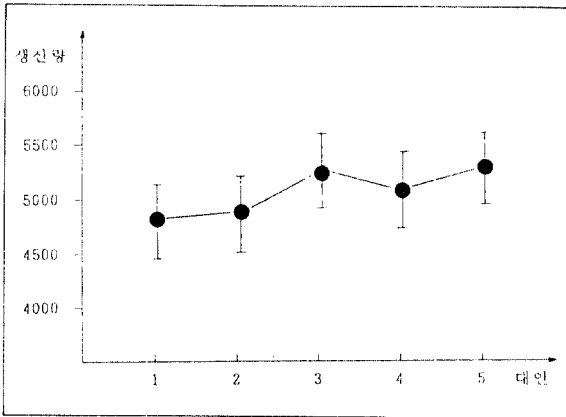
〈표 8〉 3 Stack 대 2 Stack 점유율별 실험결과

통계량		대안				
		1	2	3	4	5
생산량	평균	4926.30	4763.90	5168.10	4993.60	5164.60
	표준편차	660.05	844.46	799.40	571.35	480.18
평균이용율		8.22	6.98	6.95	6.83	6.95

(표 9) 3 중첩 대 2중첩 점유율별 실험결과와 분산분석

요 인	제곱합	자유도	제곱평균	F ₀	F(0.01)
A	2330398.05	4	582599.51	1.017	2.18
E	54378519.0	95	572405.46		
T	54378519.0	99			

준 0.1로 유의한 차이가 없음을 나타내었다. 앞과 동일한 방법으로 각 대안에서 생산량 점 추정치의 신뢰구간을 구하여 도시하면 (그림 4)와 같다.



(그림 4) 생산량 점 추정치의 신뢰구간

대안 3에서 생산량이 최대가 되므로 대안 3이 최적으로 보이나 현재로서는 알 수가 없다. 그러므로 모평균차에 대한 유의차 검정을 실시한다. 먼저 대안 2와 대안 3을 비교하기 위해서 모분산에 차이가 있는지 F검정을 실시한다. 여기서 V₁은 대안 2의 생산량의 분산, V₂는 대안 3 생산량의 분산을 의미한다.

$$F_0 = V_1 / V_2 = 1.06$$

$$F(n_1 - 1, n_2 - 1 ; \alpha / 2) = F(19, 19 ; 0.05) = 2.51$$

$$F_0 < F(19, 19 ; 0.05) = 2.51$$

이다. 그러므로, 대안 2와 대안 3의 분산에 유의수준 0.05로

유의한 차이가 있다고 말할 수 없다. 두 대안의 모분산이 같다는 가정하에 모평균차의 검정을 실시한다. 대안 3의 평균을 \bar{X} , 대안 2의 평균을 \bar{Y} 로 놓고 공분산 Sp를 구한 후 유의수준 0.05로 검정을 실시하면,

$$t_0 = (\bar{X} - \bar{Y}) / Sp \sqrt{1/n_2 + 1/n_3}$$

$$t_0 = (5168.1 - 4763.90) / [843.6 \times \sqrt{(1/20+1/20)}]$$

$$= 1.515$$

$$t_0 < t(n_2 + n_3 - 2 ; \alpha / 2) = t(38, 0.05) = 2.021$$

이 된다. 즉, 대안 2와 대안 3에서는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 같은 방법으로 유의차 검정을 실시한 결과, 대안 2와 4에서는 유의한 차이가 없으나, 대안 2와 5에서는 유의한 차이가 있었고, 대안 3, 4 및 대안 4, 5에서는 유의한 차이가 없었다. 그러므로, 현 시스템 상황하에서는 대안 5에서 실질적인 생산능력의 증가가 있었다.

3중첩 점유율이 70% 이상이 되어야 현 시스템에서는 실질적인 생산량의 증대를 가져올 수 있었다. 즉, 이론적으로는 3중첩 점유율이 높을수록 드릴링머신의 생산성이 증가하므로 생산량은 많이 나오겠지만, 앞 공정에서 투입되는 양이 일정한 분포를 이루고 있고, 드릴링 준비작업의 생산능력도 일정하다. 그러므로, 드릴링공정의 생산능력 증가가 전체적인 생산능력의 증가를 가져오는 것은 아니다. 현 시스템 상황하에서는 생산량으로 보아 5안이 최적의 대안이라 할 수 있다.

7. 결 론

패스 라미네이션 대 핀 라미네이션 점유율별 대안을 검토한 결과 대안 4에서 일정 시간에서의 생산량이 가장 많았고, 이때 평균 드릴링 머신의 이용율은 7.71대였고, 3중첩 점유율별 대안에서는 대안 5에서 생산량이 최대가 되며, 이때 평균 드릴링머신의 이용율은 6.95대인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 생산방식의 변화에 대해서 생산량 및 고가 설비인 드릴링머신의 이용율을 중심으로 적절한 대안 선정에 대해서 분석을 하였다. 대상으로 한 시스템은 진공프레스 공정의 생산능력에 대해서 드릴링머신의 생산능력이 큰 시스템에 대해서 분석을 실시하였다.

본 연구에서 실시한 여러 통계자료는 진공프레스의 생

산능력 증가에 따라 적절하게 입력 데이터를 변화시켜 가면서, 시스템 상황에 맞는 최적의 생산방식의 설계 등으로 시스템의 개선방향을 넓혀 나갈 수 있다.

참고문헌

[1] 김재련, 1987, 컴퓨터 시뮬레이션, 박영사.

[2] 이영해, 백두권, 1991, 시스템 시뮬레이션, 경문사

[3] 박성현, 1987, 현대실험계획법, 대영사.

[4] Pritsker, A. A. B, 1986, Introduction to Simulation and SLAM II, John Wiley & Sons, System Publishing Co., N.Y., U.S.A..

[5] Law, A. M., and W. D. Kelton, 1991, Simulation Modclng and Analysis, McGraw-Hill, N.Y..

● 저자소개 ●



이영해(李永海)

1977년 고려대학교 산업공학 학사
 1983년 미국 Univ. of Illinois, 산업공학 석사
 1986년 미국 Univ. of Illinois, 산업공학 박사
 일본 오사카대학 전자제어기계공학과 객원교수(1990년)
 대우중공업(주) (1977년 - 1981년)
 현재 한국시뮬레이션학회 이사
 현재 대한산업공학회 이사
 현재 한양대학교 산업공학과 부교수
 관심 분야: Simulation in Manufacturing, Simulation Output Analysis, Simulation-Optimization