

품질을 고려한 3-stage flow line의 수율 근사계산

이 종 성* · 지 용 훈**

An approximate procedure for throughput of 3-stage flow line considering quality inspection

Jong-Seung Lee* · Yong-Hoon Ji**

ABSTRACT

This paper develops an algorithm for throughput of a 3-stage flow line with job inspection stations, limited buffer capacity, and exponential processing times. Each stage consists of a single workstation, and an infinite number of jobs always waits in front of the first workstation. Blocking may occur when a processed job is waiting at one workstation for another workstation to become available. Numerical example results provide insights into the problems related to quality inspection and measure of performance of flow lines.

1. 서 론

1913년 Henry Ford가 자동차 생산공정에 moving belt assembly line을 도입하여 획기적인 생산성 향상을 이룩한 이래로, flow line은 작업자(human operator)가 개재되는 일련의 조립작업을 수행하는 공장의 대표적인 생산방식으로 인식 되어왔다 [7]. 일반적으로 flow line은 각기 다른 작업기능을 갖는 여러 개의 작업장(work station)이 직렬로 연결되어 있고 각 작업(j

ob)은 같은 순서로 모든 작업장을 거치게 되어 있으므로, 이 같은 종류의 생산라인은 tandem queueing system으로 모델링될 수 있다. Flow line의 성능분석에서는 생산라인이 단위시간 당 처리 할 수 있는 평균작업갯수, 즉, 수율(throughput)이 가장 보편적인 성능측도(performance measure)로 사용되고 있다. Flow line의 수율의 계산방법에 대한 연구는 생산공정의 가장 중요한 과제인 생산성 향상을 위한 연구의 기본과제로서 많은 연구자들의 중요 관심사가 되어왔다. 이제까지의 연구는 기본적으로 tandem queue의 capacity 계산방법을 이용하여 각 작업장의 버퍼의 유·무 및 크기, 작업장에서의 작업시간의 확률분포, 서비스

* 강원대학교 산업공학과 교수

** 강원대학교 산업공학과 석사과정

를 요구하는 작업의 발생패턴(job arrival process), 혹은 작업장의 서비스 프로토콜 등의 여러 가지 변동상황에서의 수율의 계산방법을 개발하는 것으로서, 직렬로 연결되어 있는 작업장의 갯수가 증가함에 따라서 시스템의 정상 상태 확률(steady-state probability)의 계산이 용이치 않으므로 대부분의 경우 근사적 계산방법을 제시하고 있다.^[1, 4, 5, 6, 7, 9]

실제의 flow line에서는 생산제품의 품질이 중요 문제이므로, 수율의 계산에 있어서 flow line에 작업의 불량률 검사하는 절차, 즉 품질관리를 고려함으로써 수율 계산방법의 실질적인 유효성을 높일 수 있을 것이다. 그러나 이제까지의 연구에서는 flow line의 수율계산에 작업의 품질을 고려한 경우는 매우 드물어서 Tapiero and Hsu[2]와 Posner and Tapiero[8] 등에서만 볼 수 있을 뿐이다. Tapiero 와 Hsu의 연구는 버퍼가 없는 2개의 작업장이 직렬로 연결되어 있는 생산라인에서 작업의 품질검사를 실시하는 경우 생산라인의 총비용을 최소화 할 수 있는 검사비용을 구하는 것으로서, 시스템을 Markov process로 모델링하여 라인의 수율과 불량률을 구할 수 있었다. Posner 와 Tapiero의 연구는 flow line의 수율을 분석함에 있어서 작업의 품질과 함께 라인 설비의 관리문제 까지 동시에 고려하는 경우에 확률과정에 의한 모델링 기법 및 운영상의 제반문제를 다룬 것으로서 flow line의 품질관리의 일반적 접근방법을 제시하고 있다.

본 연구의 목적은 작업의 품질을 고려하는 경우 flow line의 수율 계산방법을 개발하는 것이다. 일반적으로 flow line의 수율을 정확히 계산하는 방법은 너무나 복잡하고 실제적인 효용성이 떨어지므로, 본 연구에서는 Buzacott[7]의 수율의 근사적 계산방법과 Tapiero 와 Hsu의 품질관리 방법을 기본으로 하여 각 stage 마다 한 개의 작업

장과 유한한 크기의 버퍼를 갖는 3-stage flow line에서 작업의 품질을 고려한 수율의 계산 알고리즘을 개발하고, 실제의 수치 적용 예를 통해서 품질검사를 실시하는 경우와 실시하지 않는 경우의 수율을 비교, 분석하여 품질검사가 flow line의 수행도에 미치는 영향을 알아 보았다.

2. 품질을 고려한 3-stage flow-line의 수율 계산

2.1 품질을 고려하지 않는 3-stage flow line 수율의 근사계산

각 작업장에서 서비스 시간은 각각 rate μ_1, μ_2, μ_3 인 지수 분포에 따르며, buffer의 크기 b_1, b_2, b_3 는 유한하다고 가정한다. 단, 작업장1의 buffer의 크기 b_1 은 무한히 크며, 이곳에는 서비스 받을 작업이 항상 존재하는 것으로 가정한다. 각각의 작업장을 M/M/1/K의 queueing 시스템으로 볼 수 있으므로 각 작업장의 capacity 즉, 수율을 $TH(\mu_1, \mu_2, \mu_3, b_2, b_3)$ 으로 표현할 수 있다. flow line의 수율은 버퍼가 크면 클수록 블록킹될 확률이 작아지므로 식(1)과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} & TH(\mu_1, \mu_2, \mu_3, b_2, b_3) \\ & \leq TH(\mu_1, \mu_2, \mu_3, b_2, +\infty) \\ & = \min(\mu_1(1-B(\mu_1, \mu_2, b_2+1)), \mu_3) \quad (1) \end{aligned}$$

where,

$$\begin{aligned} B(\mu_1, \mu_2, b_2+1) &= \frac{\rho^{b_2+1}(1-\rho)}{(1-\rho^{b_2+2})} \\ \rho &= \frac{\mu_1}{\mu_2} \end{aligned}$$

또한, flow line의 reversibility에 의해 식 (2)가 성립된다.

$$\begin{aligned}
& TH(\mu_1, \mu_2, \mu_3, b_2, b_3) \\
& = TH(\mu_3, \mu_2, \mu_1, b_3, b_2) \\
& \leq TH(\mu_3, \mu_2, \mu_1, b_3, +\infty) \\
& = \min(\mu_3(1 - B(\mu_3, \mu_2, b_3 + 1)), \mu_1) \quad (2)
\end{aligned}$$

식(1)과 식(2)로부터 수율에 대한 upperbound가 다음의 식(3)과 같이 도출될 수 있다.

$$\therefore TH \leq \min(\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_3) \quad (3)$$

where

$$\begin{aligned}
\hat{\mu}_1 &= \mu_1(1 - B(\mu_1, \mu_2, b_2 + 1)) \\
\hat{\mu}_3 &= \mu_3(1 - B(\mu_3, \mu_2, b_3 + 1))
\end{aligned}$$

식(3)의 결과는 3-stage flow line 수율의 upperbound 값이다.

작업장1에서 나오는 서비스 비율 μ_1 은 작업장2의 유한한 버퍼로 인하여 블로킹(blocking)이 발생할 확률에 의해 작업장1의 실제 서비스비율($\hat{\mu}_1$)이 결정되고 이것은 작업장2로 들어가는 입력(arrival)이 되며 작업장2의 실제 서비스 비율은 작업장3의 유한한 버퍼에 의해 $\hat{\mu}_1$ 보다 더 작아질 것이다. 따라서 이 flow line 수율의 근사공식은 식(4)와 같이 된다.

$$TH = \hat{\mu}_1(1 - B(\hat{\mu}_1, \mu_3, b_3 + 1)) \quad (4)$$

2.2 3-stage flow line의 품질관리 절차

품질을 검사하는 3-stage flow line은 Figure 1의 구성과 같다. 각 작업장에서 작업을 마친후 다음 작업장으로 이동하기 전

에 반드시 검사소를 통과한다. 이 검사소에 서는 작업을 임의 확률로 랜덤하게 검사한다. 작업이 불량일 경우 처음으로 불량 발생된 작업장으로 재작업(rework)을 위해 이동(feedback)하게 된다. 검사를 하는데 걸리는 시간은 무시하고 검사는 완벽하다고 가정한다. 검사를 마친 작업은 다음 작업장으로 이동하게 된다.

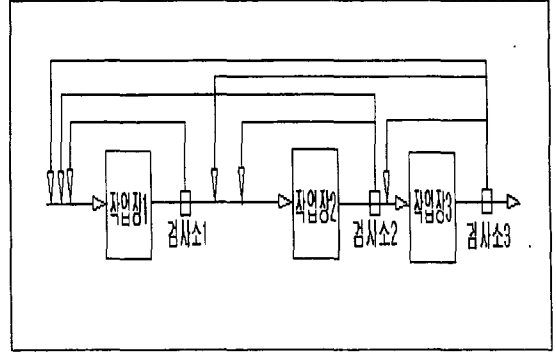


Figure 1.샘플링 검사를 고려하는 3-stage flow line 모형

2.3 품질을 고려하는 3-stage flow line의 수율계산 알고리즘

본 알고리즘을 개발하는데 사용되는 기호는 다음과 같다.

q_{ij} : 하나의 작업이 작업장 i에서 작업장 j으로 갈 확률(routing probability).

q_{30} : 작업장3에서 작업을 마친 작업이 창고(storage)로 나갈 확률.

a_i : 작업장 i에서 작업을 마친 작업이 검사소에서 검사를 받을 확률.

p_i : 작업장 i에서 작업을 할때 발생하는 불량율.

A : 최종적으로 창고에 쌓이는 작업의 불량율.

R : 창고에 쌓이는 작업의 신뢰도.

즉, $1 - A$.

"-" : 특정 변수의 여사상

이상의 기호로 3-stage flow line에서의 이 동확률을 다음과 같이 표현한다.

$$q_{11} = \alpha_1 p_1$$

$$q_{12} = 1 - q_{11} = 1 - \alpha_1 p_1$$

$$q_{21} = \overline{\alpha_2} \overline{\alpha_1} p_1$$

$$q_{22} = \alpha_2 p_2 (1 - \overline{\alpha_1} p_1)$$

$$q_{23} = 1 - q_{21} - q_{22} \\ = 1 - \overline{\alpha_2} \overline{\alpha_1} p_1 - \alpha_2 p_2 (1 - \overline{\alpha_1} p_1)$$

$$q_{31} = \alpha_3 (\overline{\alpha_1} \overline{\alpha_2} p_1)$$

$$q_{32} = \alpha_3 \overline{\alpha_2} p_2 (1 - \overline{\alpha_1} p_1)$$

$$q_{33} = \alpha_3 p_3 (1 - \overline{\alpha_1} p_1) (1 - \overline{\alpha_2} p_2)$$

$$q_{30} = 1 - q_{31} - q_{32} - q_{33}$$

$$A = \frac{\overline{\alpha_3} (\overline{\alpha_1} \overline{\alpha_2} p_1 + \overline{\alpha_2} p_2 + p_3)}{\overline{\alpha_1} \overline{\alpha_2} p_1 p_2 + \overline{\alpha_2} p_2 p_3 + \overline{\alpha_1} \overline{\alpha_2} p_1 p_2 p_3}$$

$$R = 1 - A.$$

불량작업이 발생하는 3-stage flow line의 수율을 구하고자 할때 품질을 고려하지 않은 모델과 가장 큰 차이점은 reversibility가 성립되지 않고 작업장2, 3에서 블록킹을 일으키는 경우가 늘어나며 각 작업장에는 재작업 비율이 있다는 것이 큰 차이점이다. 작업장2의 블록킹 확률을 구하면 M/M/1/ b_2+3 대기행렬 시스템에서 state가 b_2+1 부터 b_2+3 까지의 확률이다. 또한 작업장3의 블록킹될 확률을 구한다면 M/M/1/ b_3+3 대기행렬 시스템에서 state가 b_3+1 부터 b_3+2 까지의 확률이다.

재작업 비율과 앞의 작업장에서 작업을 마치고 블록킹되지 않고 들어오는 부품의 비율을 합한 것이 그 작업장의 입력이 된다. 불량률이 발생하는 3-stage flow line의 수율을 계산하기 위한 알고리즘은 초기값으로 불량률이 없을 때의 수율을 사용한다.

수율계산 알고리즘을 Figure 2와 같이 나타낼 수 있다.

r_i : 작업장 i로 재작업 하기위해 돌아오는 비율.

$s_i th$: 작업장 i에서 작업을 완료했지만 검사소를 아직 거치지 않은 서비스 비율.

th_i : 작업장 i에서 작업을 완료하고 검사소를 지나 다음 작업장으로 진행하는 수율 (rate).

$\hat{\lambda}_i$: 작업장 i-1에서 들어오는 수율과 작업장 i로 이동하는 재작업의 비율을 합한 입력비율. ($i=2,3$)

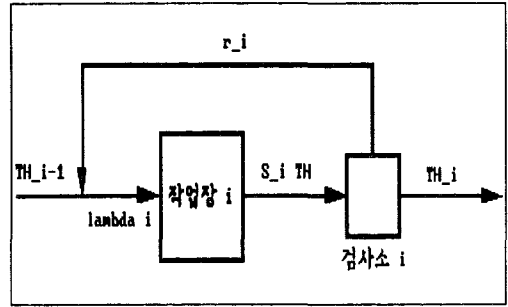


Figure 2. 샘플링검사를 하는 3-stage flow line 출력근사 방법

Figure 2로 부터 품질을 고려한 3-stage flow line의 알고리즘은 다음과 같은 단계로 설명된다.

단계1.

작업장 $s_1 th$ 의 초기값 수율을 upperbound의 결과를 $\hat{\mu}_1$ 로 설정한다.

$$(i) r_1 = \hat{\mu}_1 q_{11} + \hat{\mu}_1 q_{12} q_{21} + \hat{\mu}_1 q_{12} q_{23} q_{31}$$

$$s_1 th = \mu_1 (1 - \sum_{i=1}^3 B(\mu_1, \mu_2, b_2 + i))$$

$$th_1 = s_1 th * q_{12}$$

$$(ii) r_2 = th_1 * q_{22} + th_1 * q_{23} * q_{32}$$

$$\hat{\lambda}_2 = th_1 + r_2$$

$$s_2 th = \hat{\lambda}_2 (1 - \sum_{i=1}^2 B(\hat{\lambda}_2, \mu_3, b_3 + i))$$

$$th_2 = s_2 th * q_{23}$$

$$(iii) r_3 = th_2 * q_{33}$$

$$\hat{\lambda}_3 = th_2 + r_3$$

$$s_3 th = \hat{\lambda}_3$$

$$th_3 = \hat{\lambda}_3 * q_{30}$$

단계2

$$(i) r_1 = s_1 th * q_{11} + s_2 th * q_{21} + s_3 th * q_{31}$$

$$s_1 th = \mu_1 (1 - \sum_{i=1}^3 B(\mu_1, \mu_2, b_2 + i))$$

$$th_1 = s_1 th * q_{12}$$

$$(ii) r_2 = s_2 th * q_{22} + s_3 th * q_{32}$$

$$\hat{\lambda}_2 = r_2 + th_1$$

$$s_2 th = \hat{\lambda}_2 (1 - \sum_{i=1}^2 B(\hat{\lambda}_2, \mu_3, b_3 + i))$$

$$th_2 = s_2 th * q_{23}$$

$$(iii) r_3 = s_3 th * q_{33}, \quad \hat{\lambda}_3 = th_2 + \hat{\lambda}_2$$

$$s_3 th = \hat{\lambda}_3, \quad th_3 = \hat{\lambda}_3 * q_{30}$$

단계3 단계2를 1회 더 반복한다.

위의 알고리즘은 다음과 같은 내용을 포함한다.

(1) 알고리즘 단계1에서 초기값으로 품질 검사를 하지 않는 근사방법을 이용하여 각 작업장 서비스 비율에 경로 확률을 곱한 값으로 재작업 비율과 다른 작업장으로의 이동비율을 구하여 각 작업장의 수율을 계산하려고 하는 것이다.

(2) 단계1에서 각 작업장의 재작업 비율의 초기값(r_1, r_2, r_3)은 근사 접근 방법에서 사용된 각 작업장의 서비스 비율에 불합격 판정 확률을 곱해준 값이다. 그리고

M/M/1/ $b_2 + 3$ 대기행렬 시스템에서 state가 $b_2 + 1$ 에서 $b_2 + 3$ 이 될 확률이 작업장2에서 블록킹될 확률로 되는 이유는 $b_2 + 1$ 의 확률은 작업장1에서 블록킹될 때, 또는 작업장2에서 불합격 판정을 받은 작업이 재작업을 하기 위해 작업장2에 들어와 있을 때 또는, 작업장3에서 재작업을 위해 작업장2에 들어와 있을 때 중의 한가지 경우이며, $b_2 + 2$ 일 확률은 이중 두가지가 작업장2에 있을 때이며, $b_2 + 3$ 일 확률은 세가지가 들어와 있을 경우이다. 또한 작업장3에서 블록킹될 확률이 M/M/1/ $b_3 + 2$ 에서 state가 $b_3 + 1$ 부터 $b_3 + 2$ 까지의 합한 확률이 되는 것은 같은 이유이다.

(3) 모든단계에서 작업장2의 입력($\hat{\lambda}_2$)은 항상 작업장2의 서비스 비율(μ_2)보다 작거나 같다. 서비스 프로토콜인 production 블록킹은 항상 작업장2의 steady-state 조건을 충족 시키기 때문이다. 또한 작업장3의 입력도 작업장2의 steady-state 조건과 같이 적용된다.

(4) 모든 단계에서 작업장3의 가능한 실제 서비스의 최대 비율($s_3 th$)은 작업장3의 서비스 비율(μ_3)을 넘지 못한다. 서비스 프로토콜인 production 블록킹은 항상 작업장2의 steady-state 조건을 충족 시키기 때문이다. 또한 작업장3의 입력도 작업장2의 steady-state 조건과 같이 적용된다.

2.4 알고리즘의 수치 적용 예

각 작업장의 steady-state 조건을 만족하는 서비스 비율이 주어지고 각 작업장에서 불량율이 주어졌을때, 각 검사장의 작업 검사비율을 변화시키면서 각 작업장의 수율과 최종적인 작업의 신뢰비율(reliable rate)

을 분석하였다.

Table 1, 2, 3은 각 작업장의 불량율이 $p_1=0.1$, $p_2=0.02$, $p_3=0.3$ 에서 검사비율을 변화시킬 때의 수율과 재작업 비율이다.

Table 1-6에서 사용한 기호는 다음과 같다.

upper th : 품질을 고려 하지 않는 upperbound 수율이다.

appro th : 품질을 고려 하지 않는 근사 수율이다.

upper Q.C th : 품질을 고려한 upperbound 수율이다.

appro Q.C th : 샘플링검사를 고려한 근사 수율이다.

α_i : 각 작업장에서 작업을 검사하는 비율이다. 단, $\alpha_i=1$ 은 전수 검사를 의미한다.

$i=1,2,3$.

r_i : 각 작업장의 재작업 비율(rate)이다.

Table 4, 5, 6은 각 작업장의 불량율이 $p_1=0.3$, $p_2=0.02$, $p_3=0.1$ 에서 검사비율을 변화시킬 때의 수율과 재작업 비율이다.

위의 수치 적용예로 부터 다음과 같은 내용을 알수 있다.

(i) 버퍼의 크기가 커짐에 따라 각 작업장에서 다음 작업장으로 들어가는 입력이 다음 작업장에서 블록킹될 확률이 작아지므로 최종적으로 작업장3의 수율은 증가한다.

(ii) 품질을 고려하는 3-stage flow line의 수율은 품질을 고려하지 않을 때의 수율보다 상당히 감소한다.

(iii) 각 작업장의 재작업 비율은 그 작업장의 검사소에서 검사비율을 높일때 증가한다. 또한 검사소1에서 검사비율을 높이는 것보다 검사소3에서 검사비율을 높이는 것이 재작업 비율을 증가 시킨다. 즉, 최종 작업장의 작업의 검사비율을 높이는 방법이 각 작업장의 재작업 비율을 증가 시킨다.

(iv) 일반적으로 최종작업장의 검사비율

을 높일수록 최종작업장의 수율은 감소한다. 그러나 모든 작업장에서 전수 검사를 실시할 경우 검사비율이 작을 때보다 수율은 더 증가할 수도 있으며 수율의 신뢰비율은 가장 높은 것으로 나타났다.

(v) 후속 작업장의 불량율이 선행 작업장의 불량율이 더 클 경우 수율과 신뢰비율이 더 크다. 그러나 작업장2의 서비스 비율이 작업장1과 3보다 월등히 클 경우 그 반대로 나타났다.

3. 결론

기존의 flow line에 대한 연구는 불량품이 발생하지 않는다는 가정하에 수율을 구하는 노력을 해왔다. 그러나 일반적으로 flow line에서 작업을 할 때, 각 작업장에서 불량품이 발생하여 실제의 성능측도가 떨어지는 것을 고려해야한다. 그래서 본 연구는 flow line의 각 작업장에서 일정확률로 불량품이 발생하고 각 작업장에서 작업을 끝낸 작업은 검사소에서 일정확률로 랜덤하게 검사를 받고 불량품으로 판명된 작업은 불량이 처음 발생한곳으로 이동하여 재작업을 하는 flow line을 모형화 하였다. 이 모형에서 하나의 작업이 각 작업장에서 각 검사소로 이동, 다른 작업장으로 진행할 확률을 이동 확률(routing probability)로 표현하여 각 작업장에서 검사를 받기전의 수율이 다음 작업장으로 가는 서비스 비율과 불량률이 처음 발생한 작업장으로 가는 재작업 비율을 구하고 최종적으로 작업을 마친 부품이 창고에 쌓일 때의 신뢰 비율을 구하는 근사 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘은 각 작업장을 M/M/1/K대기행렬 시스템으로 가정하여 수행측도를 직렬로 연결된 대기행렬 시스템으로 근사시켜 최종적인 수율을 구하였다.

알고리즘을 이용하여 각 작업장의 서비스 비율이 주어지고 각 작업장의 불량율이

Table 1. $\mu_1 = 0.833$, $\mu_2 = 1.667$, $\mu_3 = 0.833$

α_1	α_2	α_3	b_2	b_3	upper th	appro th	appro q.c th				reliable rate
							r_1	r_2	r_3	th	
0.2	0.2	0.2	1	1	0.714	0.512	0.0234	0.0025	0.0027	0.3630	0.3295
0.2	0.02	0.1	1	1			0.0162	0.0008	0.0014	0.3419	0.3275
0.1	0.02	0.04	1	1			0.0083	0.0004	0.0005	0.3740	0.3231
1	1	1	1	1			0.0632	0.0075	0.0152	0.3655	0.3655
0.2	0.15	0.3	1	1			0.0248	0.0028	0.0041	0.3614	0.3309
0.2	0.2	0.2	2	2	0.778	0.603	0.0283	0.0031	0.0034	0.4552	0.4131
0.2	0.02	0.1	2	2			0.0192	0.001	0.0017	0.4664	0.4107
0.1	0.02	0.04	2	2			0.0099	0.0005	0.0007	0.4687	0.4049
1	1	1	2	2			0.0738	0.0094	0.0192	0.4608	0.4608
0.2	0.15	0.3	2	2			0.0300	0.0035	0.0051	0.4531	0.4149
0.2	0.2	0.2	3	3	0.806	0.655	0.0310	0.0035	0.0038	0.5157	0.4680
0.2	0.02	0.1	3	3			0.0208	0.0012	0.0019	0.5284	0.4654
0.1	0.02	0.04	3	3			0.0107	0.0006	0.0008	0.5308	0.4586
1	1	1	3	3			0.0786	0.0107	0.0218	0.5230	0.5230
0.2	0.15	0.3	3	3			0.0330	0.004	0.0058	0.5133	0.4700

Table 2. $\mu_1 = 0.714$, $\mu_2 = 5$, $\mu_3 = 0.714$

α_1	α_2	α_3	b_2	b_3	upper th	appro th	appro q.c th				reliable rate
							r_1	r_2	r_3	th	
0.2	0.2	0.2	1	1	0.701	0.472	0.0227	0.002	0.0022	0.2940	0.2668
0.2	0.02	0.1	1	1			0.0169	0.0007	0.0011	0.3015	0.2655
0.1	0.02	0.04	1	1			0.0086	0.0003	0.0004	0.3014	0.2604
1	1	1	1	1			0.0699	0.0063	0.0129	0.3092	0.3092
0.2	0.15	0.3	1	1			0.0238	0.0023	0.0033	0.2925	0.2679
0.2	0.2	0.2	2	2	0.712	0.535	0.0256	0.0026	0.0028	0.3817	0.3464
0.2	0.02	0.1	2	2			0.018	0.0009	0.0014	0.3913	0.3446
0.1	0.02	0.04	2	2			0.0092	0.0004	0.0006	0.3921	0.3387
1	1	1	2	2			0.0712	0.0081	0.0165	0.3949	0.3949
0.2	0.15	0.3	2	2			0.027	0.0029	0.0043	0.3798	0.3478
0.2	0.2	0.2	3	3	0.714	0.571	0.0273	0.003	0.0032	0.4382	0.3976
0.2	0.02	0.1	3	3			0.0186	0.001	0.0016	0.4492	0.3956
0.1	0.02	0.04	3	3			0.0096	0.0005	0.0006	0.4505	0.3892
1	1	1	3	3			0.0714	0.0092	0.0187	0.4494	0.4494
0.2	0.15	0.3	3	3			0.029	0.0034	0.0049	0.436	0.3993

Table 3. $\mu_1 = 1.25$, $\mu_2 = 1.5$, $\mu_3 = 1.25$

α_1	α_2	α_3	b_2	b_3	upper th	appro th	appro q.c th				reliable rate
							r_1	r_2	r_3	th	
0.2	0.2	0.2	1	1	0.907	0.695	0.0224	0.0028	0.0031	0.4130	0.3748
0.2	0.02	0.1	1	1			0.0142	0.0009	0.0015	0.4220	0.3716
0.1	0.02	0.04	1	1			0.0073	0.0005	0.0006	0.4270	0.3688
1	1	1	1	1			0.0506	0.0081	0.0166	0.3978	0.3978
0.2	0.15	0.3	1	1			0.024	0.0032	0.0046	0.4113	0.3766
0.2	0.2	0.2	2	2	1.017	0.835	0.0321	0.0041	0.0044	0.5932	0.5383
0.2	0.02	0.1	2	2			0.0203	0.0013	0.0022	0.6063	0.5339
0.1	0.02	0.04	2	2			0.0105	0.0007	0.0009	0.6129	0.5295
1	1	1	2	2			0.0723	0.0117	0.0240	0.5749	0.5749
0.2	0.15	0.3	2	2			0.0343	0.0046	0.0066	0.5907	0.5409
0.2	0.2	0.2	3	3	1.082	0.923	0.0383	0.0049	0.0053	0.7107	0.6450
0.2	0.02	0.1	3	3			0.0241	0.0016	0.0027	0.7266	0.6399
0.1	0.02	0.04	3	3			0.0125	0.0008	0.0011	0.7341	0.6341
1	1	1	3	3			0.0859	0.0141	0.0288	0.6916	0.6916
0.2	0.15	0.3	3	3			0.041	0.0055	0.0080	0.7077	0.6481

Table 4. $\mu_1 = 0.833$, $\mu_2 = 1.667$, $\mu_3 = 0.833$

α_1	α_2	α_3	b_2	b_3	upper th	appro th	appro q.c th				reliable rate
							r_1	r_2	r_3	th	
0.2	0.2	0.2	1	1	0.714	0.512	0.0094	0.0026	0.0072	0.3695	0.3290
0.2	0.02	0.1	1	1			0.0065	0.0009	0.0036	0.3742	0.3252
0.1	0.02	0.04	1	1			0.0033	0.0004	0.0014	0.3753	0.3217
1	1	1	1	1			0.0253	0.0075	0.0409	0.3684	0.3684
0.2	0.15	0.3	1	1			0.01	0.003	0.011	0.3686	0.3326
0.2	0.2	0.2	2	2	0.778	0.603	0.0114	0.0033	0.0091	0.4628	0.4120
0.2	0.02	0.1	2	2			0.0077	0.0011	0.0045	0.4687	0.4074
0.1	0.02	0.04	2	2			0.004	0.0005	0.0018	0.4700	0.4028
1	1	1	2	2			0.0295	0.0094	0.0512	0.4624	0.4624
0.2	0.15	0.3	2	2			0.0121	0.0037	0.0137	0.4616	0.4165
0.2	0.2	0.2	3	3	0.806	0.655	0.0125	0.0037	0.0103	0.5240	0.4666
0.2	0.02	0.1	3	3			0.0083	0.0012	0.0051	0.5308	0.4614
0.1	0.02	0.04	3	3			0.0043	0.0006	0.0020	0.5322	0.4562
1	1	1	3	3			0.0315	0.0107	0.0508	0.5240	0.5240
0.2	0.15	0.3	3	3			0.0133	0.0042	0.0156	0.5226	0.4717

Table 5. $\mu_1 = 0.714$, $\mu_2 = 5$, $\mu_3 = 0.714$

α_1	α_2	α_3	b_2	b_3	upper th	appro th	appro q.c th				reliable rate
							r_1	r_2	r_3	th	
0.2	0.2	0.2	1	1	0.701	0.472	0.0091	0.0021	0.0058	0.2969	0.2644
0.2	0.02	0.1	1	1			0.0067	0.0007	0.0029	0.3010	0.2617
0.1	0.02	0.04	1	1			0.0034	0.0003	0.0011	0.3013	0.2582
1	1	1	1	1			0.028	0.0061	0.0335	0.3010	0.3010
0.2	0.15	0.3	1	1			0.0096	0.0024	0.0088	0.2961	0.2672
0.2	0.2	0.2	2	2	0.712	0.535	0.0103	0.0028	0.0076	0.3865	0.3441
0.2	0.02	0.1	2	2			0.0072	0.0009	0.0038	0.3918	0.3406
0.1	0.02	0.04	2	2			0.0037	0.0005	0.0015	0.3924	0.3364
1	1	1	2	2			0.0285	0.0079	0.0432	0.3892	0.3892
0.2	0.15	0.3	2	2			0.0109	0.0031	0.0115	0.3854	0.3478
0.2	0.2	0.2	3	3	0.714	0.571	0.0109	0.0032	0.0087	0.4443	0.3956
0.2	0.02	0.1	3	3			0.0074	0.001	0.0043	0.4503	0.3914
0.1	0.02	0.04	3	3			0.0038	0.0005	0.0017	0.4512	0.3868
1	1	1	3	3			0.0285	0.0091	0.0494	0.4461	0.4461
0.2	0.15	0.3	3	3			0.0117	0.0036	0.0132	0.4431	0.3999

Table 6. $\mu_1 = 1.25$, $\mu_2 = 1.5$, $\mu_3 = 1.25$

α_1	α_2	α_3	b_2	b_3	upper th	appro th	appro q.c th				reliable rate
							r_1	r_2	r_3	th	
0.2	0.2	0.2	1	1	0.907	0.695	0.009	0.003	0.0083	0.4238	0.3774
0.2	0.02	0.1	1	1			0.0057	0.001	0.0041	0.4280	0.3720
0.1	0.02	0.04	1	1			0.0029	0.0005	0.0016	0.4301	0.3687
1	1	1	1	1			0.0202	0.0085	0.0463	0.4168	0.4168
0.2	0.15	0.3	1	1			0.0097	0.0034	0.0126	0.423	0.3818
0.2	0.2	0.2	2	2	1.017	0.835	0.013	0.0043	0.0119	0.6080	0.5414
0.2	0.02	0.1	2	2			0.0081	0.0014	0.0059	0.6142	0.5339
0.1	0.02	0.04	2	2			0.0042	0.0007	0.0023	0.6171	0.529
1	1	1	2	2			0.0289	0.0122	0.0655	0.5992	0.5992
0.2	0.15	0.3	2	1			0.0139	0.0049	0.0181	0.6067	0.5476
0.2	0.2	0.2	3	3	1.082	0.923	0.0155	0.0052	0.0143	0.7278	0.6481
0.2	0.02	0.1	3	3			0.0097	0.0017	0.0071	0.7355	0.6393
40.1	0.02	0.04	3	3			0.005	0.0008	0.0028	0.7388	0.6333
1	1	1	3	3			0.0344	0.0347	0.0796	0.7183	0.7183
0.2	0.15	0.3	3	3			0.0166	0.0059	0.0216	0.7263	0.6555

주어졌을 때 각 검사소에서 검사할 확률을 변화시켜 각 작업장의 재작업 비율과 최종수율을 분석 하였다. 일반적인 분석결과는 다음과 같다.

(1) 불량품을 고려한 결과와 불량품을 고려하지 않았을 때 수율은 블록킹될 확률과 불량품(재작업)으로 인해 상당히 감소하였다.

(2) 각 작업장의 버퍼가 증가함에 따라 수율도 동시에 증가하였다.

(3) 마지막 검사소에서 검사비용을 높이면 모든 작업장에서 재작업 비율은 증가한다.

(4) 일반적으로 검사비용을 높임에 따라 수율은 감소하였으나 모든 검사소에서 전수검사를 실시할 경우 검사비용이 작을 때보다 더 수율이 증가할 때도 있었다.

(5) 최종 수율의 신뢰비용은 전수 검사할 경우가 가장 높았다.

본 연구에서는 수율 계산 알고리즘을 구하는데 그쳤지만, 실제적으로 적용되기 위해서는 각 작업장의 재작업 비용과 검사비용, 최종 불량품의 단위 생산 비용을 고려하여 생산 비용을 최소화하는 연구가 요구되며 수율을 최대화 하는 최적 검사확률을 찾는 연구가 필요하다. 만약 작업장의 배치를 바꾸는 것이 가능하다면 수율을 최대화시키는 작업장 배치 방법에 대한 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

[1] Bhaba R. Sarker. "The Comparative and Design Aspects of Series Production System". *IIE TRANSACTION*. page 229-239, 1984

[2] Charles S. Tapiero and Lie-Fern Hsu, "Randomized Quality Control of a 2- station Machining Process With Blocking", *IEEE TRANSACTION, VOLR-35, NO.4* 1986

[3] D. Gross and C. M. Harris, *The Fundamentals of Queueing Theory*, John Wiley and Sons. page 226-228. 1974.

[4] Dennis E. Blumenfeld. "A simple formula for estimating throughput of serial production lines with variable processing times and limited buffer capacity". *INT. J. PROD. RES*, vol 28, NO 6, page 1163-1182. 1990.

[5] Eginhard J. Muth and Abdullah Alakaff. "The throughput rate of three-station production line". *Int. J. Prod. Res.* vol. 25, no.10, 1405-1413. 1987.

[6] G. Yamazaki, T. Kawashima. and H. Sakasegawa. "Reversibility of tandem blocking queueing system". *Management Science.* page78-83,1985.

[7] John. A. Buzacott and J. George Shanthikumar. *Stochastic Models of Manufacturing sysems*. Prentice-Hall page177-194.1993.

[8] Morton J. M Posner and Charles S. Tapiero. "Manufacturing quality density, control and maintenace". *INT. J. PROD. RES* vol 25, NO,151. page 1511-1521. 1987.

[9] Tayfur Altioek and Shaler Stidham, Jr. "The Allocation of Interstage Buffer Capacities in Production Lines". *IIE TRANSCATION* vol 15. page 292-299. 1983.