

다단계 생산시스템에서 재작업정책의 비교분석

신재선[†] · 한주윤 · 정봉주

연세대학교 정보산업공학과

Comparative Analysis of Rework Policies in Multistage Production System

Jaeseon Shin · Jooyun Han · Bongju Jeong

Department of Industrial & Information Engineering, Yonsei University, Seoul, 120-749

As the quality and environmental problems become one of the most concerned issues of company, the rework policy needs to be efficiently designed and implemented to sustain the company's competitiveness. This paper examines three basic rework policies in multi-stage production systems and analyzes them in terms of costs of setup, production, inspection, and inventory. For analyzing the performance of the rework policies, we propose mathematical models which can compute total production cost and determine the optimal production batch size to minimize the total production cost. The rework policies are classified by the number and location of inspection stages. Using the mathematical models, we could analyze the performances of rework policies and suggest the optimal rework policy according to each manufacturing environment. The analyses show that the proposed model can be used to analytically evaluate and choose the rework policies.

Keywords: rework policy, multi-stage production system, production batch size

1. 서론

기술수준이 날로 발전하면서 개별 제품의 가격이 상승하고 경제 주체의 중심이 기업에서 고객으로 이동하게 되면서 고객 만족을 위한 품질의 중요성이 강조되고 있다. 때문에 생산현장에서 제품의 불량을 검사하고, 불량품을 즉시 재작업하는 공정의 필요성이 증가하고 있다. 또한 제품의 공급과잉, 글로벌 경쟁의 심화 등으로 인한 제품가격의 하락으로 기업의 수익성이 악화되는 상황에서 재작업을 통해 폐기되는 불량품의 양을 감소시키는 것은 제품원가를 절감하여 기업의 수익성을 향상시키는 데 큰 역할을 할 수 있다. 재작업 공정을 통해서 폐기물로 인한 오염을 줄일 수 있어 날로 심각해지는 환경오염을 예방하는 측면에서도 긍정적인 효과를 기대할 수 있고 정부에서 환경적인 문제로 폐기량을 제한한다거나, 폐기비용이 매우 비쌀 경우, 또는 원자재의 공급량이 한정되어 있거나 그 비용이 비싼 경우에도 불량품의 재작업은 생산성을 높이는 데

많은 기여를 할 수 있다.

이처럼 재작업의 중요성이 커지면서 생산시스템을 분석하는 데 있어서도 재작업에 대한 고려가 필요하게 되었다. 불량품이 발생하면 생산시스템의 생산량이 감소하고, 불량품의 검사비용, 폐기비용과 재작업비용이 발생하여 제품의 생산원가가 상승하게 된다. 따라서 생산시스템에서 발생하는 불량품과 이를 수정하기 위한 재작업은 생산시스템의 성능과 비용에 복합적인 영향을 미치게 된다. 그러므로 생산시스템의 성능과 비용의 최적화를 위해서는 불량품과 재작업에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 배치단위생산과 불량품의 재작업을 고려한 다단계 생산시스템 내에서 생산비용을 최소화하는 재작업정책과 최적 배치크기를 결정하는 모델을 제시하였다. 또한 이 모델을 이용하여 생산시스템 특성변화에 따른 총 생산비용과 최적 배치크기의 변화를 정책별로 비교분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 불량품과 재작업

[†] 연락저자 : 신재선 석사과정, 120-749 서울 서대문구 신촌동 134 연세대학교 정보산업공학과, Fax : 02-364-7807,

E-mail : jaesuny@yonsei.ac.kr

2005년 7월 접수; 2005년 12월 수정본 접수; 2006년 1월 게재 확정.

정책에 대한 기존의 연구에 대해 살펴보고, 3장에서는 다단계 생산시스템에 대한 정의와 가정에 대해 설명하고, 준비, 생산, 검사, 재고비용을 최소화하는 생산 배치크기를 결정하는 모델을 정책별로 제시한다. 4장에서는 제안된 모델을 이용한 간단한 실험을 통해서 생산환경요인들의 변화에 따른 배치크기와 최소 생산비용의 변화를 재작업정책별로 비교분석을 하고, 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론을 제시한다.

2. 기존 연구현황

본 연구와 관련된 기존 연구들은 크게 단일단계의 생산시스템에서의 연구와 다단계의 생산시스템에서의 연구로 분류할 수 있다.

단일단계의 생산시스템에서의 재작업에 관한 연구는 비용의 최소화를 고려한 생산 배치크기 결정문제를 해결하는 방향으로 많이 진행되어 왔다. Porteus(1986)는 불량률과 준비비용이 최적 생산 배치크기에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Hayek and Salameh(2001)과 Chiu(2003)는 각각 단위시간당 비용을 최소화하는 상황과 추후 재고가 허용된 상황에서 최적 생산 배치크기를 구하는 모델을 제시하였다. Kim *et al.*(1994)은 불완전한 생산시스템 내에서 시스템에 고장이 발생했을 경우의 손실을 최소화하는 경제적 생산량 결정에 대해 연구하였다. 이후 Kim and Hong(1997)의 연구에서는 생산 배치크기 대신에 생산주기를 사용하여, 기계의 고장으로 인해 불량이 발생한다고 보고, 최소의 비용으로 제품을 생산할 수 있는 생산주기와 그 생산주기 내에서 기계의 고장을 검사하는 횟수를 산출하는 모델을 제시하였다. Kim(2005)의 연구에서는 제품에 불량이 확률적으로 발생할 때 생산비용을 최소로 하는 생산 배치크기 결정 모델을 제시하였다.

단일단계에서 재작업시기를 결정하는 모델을 제시한 연구들로는 Jamal *et al.*(2004), Teunter(2004), Flapper and Teunter(2004), Inderfurth *et al.*(2005) 등이 있다. 이들 연구는 불량품의 재작업시기에 따라 재작업정책을 구분하고, 정책에 따른 생산시스템에서의 성능과 비용을 분석한다.

다단계 생산시스템에서의 연구도 여러 방향으로 진행되어 왔다. Gopalan and Kannan(1996)과 Li(2004)에서는 재작업을 고려한 생산시스템을 마코브체인을 사용하여 분석하였고, Zargar(1995)의 연구에서는 재작업하는 동안 정상제품의 움직임의 유형을 대기행렬 모델을 사용하여 분석하였다. Cho and Govindaluri(2002)에서는 품질에 따른 손실을 고려한 분석을 하였다.

다단계 생산시스템에서 생산 배치크기에 대한 연구도 진행되어 왔다. Kang and Kang(1990)의 연구에서는 Kanban 시스템에서 준비, 주문, 재고 비용 등을 최소화하는 배치크기 산출문제를 다루었다. Gupta and Chakraborty(1984), Lee *et al.*(1997), Ben-daya and Rahim(2003) 등의 연구들은 단일형태의 정책에

대해서 분석을 하고 있으며, 재작업을 고려하지 않고 불량품의 발생에 대해서만 고려하고 있는 경우가 많다

다단계 생산시스템에서 불량품 검사공정의 할당과 관련하여서도 여러 연구가 있었다. Lee and Unnikrshnan(1998)의 연구와 Shiau(2002)의 연구에서는 검사오류가 있는 상황에서 생산 검사, 오류비용 등을 고려한 검사공정 할당에 대하여 연구하였다. Raz and Kaspi(1991)의 연구에서는 비선형 정수계획법을 통해서 할당문제를 분석하였다. 위 연구들은 공정 내에서의 재고비용을 고려하지 않았고, 재작업을 고려하지 않은 경우도 있다.

본 연구에서는 배치단위 생산과 불량품의 재작업을 고려한 다단계 생산시스템 내에서 준비, 생산, 검사, 재고 등의 모든 비용을 고려한 제품 1개당 총 생산비용을 최소화하는 재작업정책과 정책에 따른 최적 배치크기를 결정하여, 최소 생산비용에 대해 정책별로 비교분석이 가능한 모델을 제시하고자 한다.

Table 1. Related work on the single-stage production system

Single-stage production system	
Opt. prod. batch size decision model	Porteus (1986) Hayek and Salameh (2001) Chiu (2003)
Consider machine failure	Kim <i>et al.</i> (1994) Kim and Hong (1997)
Rework period decision model	Jamal <i>et al.</i> (2004) Teunter (2004) Flapper and Teunter (2004) Inderfurth <i>et al.</i> (2005)

Table 2. Related work on the multistage production system

Multistage production system	
Opt. prod. batch size decision model	Kang and Kang (1990) Gupta and Chakraborty (1984) Lee <i>et al.</i> (1997) Ben-daya and Rahim (2003)
Markov Chain, queueing theory	Gopalan and Kannan (1996) Li (2004) Zargar (1995)
Quality cost	Cho and Govindaluri (2002)
Inspection process allocation	Lee and Unnikrshnan (1998) Shiau (2002) Raz and Kaspi (1991)

3. 재작업정책에 따른 최적 배치크기 결정 모델

본 연구는 불량품과 재작업정책을 고려한 배치단위 생산을 하

는 다단계 생산시스템을 대상으로 하고 있다. 다단계 생산시스템은 여러 개의 공정이 직렬로 배치되어 있는 시스템이다.

배치단위로 생산을 하는 생산시스템에서 생산비용을 최소화하기 위해서는 최적 배치크기를 결정해 주어야 한다. 따라서 본 연구에서는 최소 생산비용 산출을 위해서 재작업정책별로 최적 배치크기 결정 모델을 제안하였다.

제안된 최적 배치크기 결정 모델이 적용되는 생산시스템에 대한 가정은 다음과 같다.

- 각 공정은 직렬로 연결되어 있다.
- 생산시스템 내에서 제품의 이동은 배치단위로 하고, 배치 크기는 모든 공정에서 동일하다.
- 각 공정에서의 생산시간, 불량률, 검사시간은 고정적이다.
- 검사시간은 생산시간보다 항상 더 적다.
- 배치 내의 모든 제품의 공정이 끝난 후, 다음 공정으로 이동한다.
- 재작업의 경우에는 불량품이 발생하지 않는다.

모델을 위한 기호와 변수는 다음과 같다.

- Q : 배치크기
- SC_j : j 번째 공정의 준비비용
- P_j : 단위시간당 생산량
- RP_j : 재작업의 단위시간당 생산량
- PC_j : j 번째 공정의 단위시간당 공정비용
- I_j : j 번째 공정의 단위시간당 검사량
- IC_j : j 번째 공정의 단위시간당 검사비용
- HCI_j : j 번째 공정의 I부분의 단위재고비용
- $HC2_j$: j 번째 공정의 II부분의 단위재고비용
- $HC3_j$: j 번째 공정의 III부분의 단위재고비용
- β : j 번째 공정의 불량률

3.1 정책 1 (매 공정마다 검사 후 재작업)

첫 번째 재작업정책은 개별공정마다 불량품을 검사하여 재작업을 하는 정책이다. 매 공정마다 배치에 대한 작업과 검사가 끝나면 불량품이 선별되고, 선별된 불량품은 바로 해당 공정에서 재작업을 거친 후 정상제품과 함께 배치를 이루어 다음 공정으로 이동한다. 이전 공정으로부터 제품이 도착하면 재고 I에서 작업을 하기 위해 대기한다. 작업을 마친 후 검사공정

을 통해서 정상품은 재고III으로 이동하여 배치가 모두 작업을 마칠 때까지 대기하고, 불량품은 재고II에서 대기하고 있다. 배치에 대한 작업이 끝난 후 바로 재작업을 수행하게 된다. 불량품에 대한 재작업이 모두 끝나면 배치단위로 모여 다음 공정으로 이동하게 되고, 다음 공정에서도 같은 방식으로 작업이 이루어진다. 이 같은 제품의 흐름을 그림으로 표현하면 <Figure 1>과 같다.

생산시스템에서 제품을 생산하는 데 발생하는 비용으로 배치별로 공정을 준비하기 위한 준비비용, 공정에서 작업을 하기위한 공정비용, 불량품을 검사하는 데 발생하는 검사비용, 공정중에 발생하는 재고에 따른 재고비용이 있다. 이 모든 비용을 고려하여 모델을 제안하였다.

3.1.1 준비비용

준비는 각 공정마다 배치를 생산할 때 1번 발생한다. 따라서 한 개의 배치가 전체 공정을 거치면서 발생하는 준비비용은 각 공정의 준비비용의 합으로 구할 수 있다. 다음 식 (1)은 정책 1에서의 준비비용을 나타낸다.

$$\text{준비비용} = \sum_{j=1}^N SC_j \quad (1)$$

3.1.2 공정비용

공정비용은 배치를 생산하는 데 소요된 작업 및 재작업시간과 단위시간당 공정비용의 곱으로 구할 수 있다. 작업시간은 배치크기를 단위시간당 생산량으로 나눈 Q/P 로 나타낼 수 있으며, 재작업시간은 작업중 발생한 불량품의 개수를 단위시간당 재작업의 생산량으로 나눈 $\beta Q/RP$ 로 나타낼 수 있다. 다음 식 (2)는 정책 1에서의 공정비용을 나타낸다.

$$\text{공정비용} = \sum_{j=1}^N \left[PC_j \times \left(\frac{Q}{P_j} + \frac{\beta_j Q}{RP_j} \right) \right] \quad (2)$$

3.1.3 검사비용

검사비용은 검사를 하는 데 소요된 시간과 단위시간당 검사비용의 곱으로 구할 수 있다. 검사를 하는 데 소요된 시간은 배치크기를 단위시간당 검사량으로 나눈 Q/I 로 나타낼 수 있다. 다음 식 (3)은 정책 1에서의 검사비용을 나타낸다.

$$\text{검사비용} = \sum_{j=1}^N \left(\frac{Q}{I_j} \times IC_j \right) \quad (3)$$

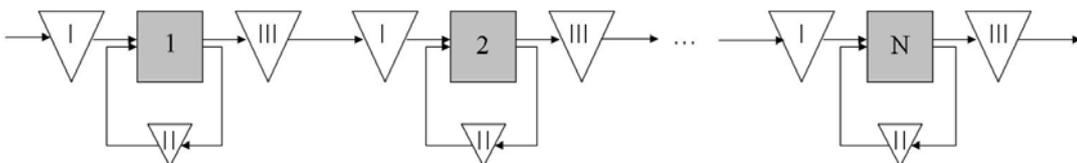


Figure 1. Sequence of processes in policy 1.

3.1.4 재고비용

각 공정에서 발생하는 재고의 양을 시간에 따른 그래프로 표현하면 <Figure 2>와 같다.

<Figure 2>에서 각각의 I, II, III부분은 <Figure 1>에서 1개의 공정에 대한 I, II, III부분의 재고량을 나타낸다.

I 부분은 공정 앞에서 제품이 작업을 기다릴 때 발생하는 재고량을 나타낸다. 배치크기가 Q인 배치가 재고 I에 도착한 후 P_j의 비율로 작업이 이루어지는 동안 재고 I의 변화를 나타낸 것이다. II부분은 재작업을 기다리는 불량품에 대한 재고량으로서 배치단위로 도착한 제품에 대한 작업이 이루어지는 동안 불량품이 βP_j의 비율로 발생하게 되고 작업이 끝난 후 RP_j의 비율로 불량품에 대한 재작업이 이루어지게 되는데 이때 재고II의 변화를 나타낸 것이다. III부분은 공정 뒤에서 배치의 작업을 모두 마치고 다음 공정으로 가기 위해 기다리는 재고량을 나타내는데, 제품에 대한 작업과 재작업이 이루어지는 동안 생산되는 정상품의 양을 나타낸다.

재고비용은 재고량에 단위재고비용을 곱한 값으로 나타낼 수 있다. 각 재고에서의 재고량은 <Figure 2>에서 각 재고부분의 넓이를 통해서 산출할 수 있다 다음 식 (4)는 각각 정책 1에서 I, II, III부분에 해당하는 재고비용을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 \text{I 부분의 재고비용} &= \sum_{j=1}^N \left[\frac{Q^2}{2P_j} \times HC1_j \right] \\
 \text{II 부분의 재고비용} &= \sum_{j=1}^N \left[\frac{\beta_j Q}{2} \times \left(\frac{Q}{P_j} + \frac{\beta_j Q}{RP_j} \right) \times HC2_j \right] \\
 \text{III 부분의 재고비용} &= \sum_{j=1}^N \left[\left\{ \frac{(1-\beta_j)Q^2}{2P_j} + \frac{\beta_j(2-\beta_j)Q^2}{2RP_j} \right\} \times HC3_j \right]
 \end{aligned} \tag{4}$$

3.1.5 제품 1개당 총 생산비용

총 비용은 준비, 공정, 검사, 재고비용의 합으로 나타낸다. 총

비용을 배치크기 Q로 나누면 제품 1개당 총 생산비용(TCP)이 산출된다.

다음 식 (5)는 제품 1개당 총 생산비용[TCP(1)]을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 TCP(1) &= \sum_{j=1}^N \left[\frac{SC_j}{Q} + PC_j \times \left(\frac{1}{P_j} + \frac{\beta_j}{RP_j} \right) + \frac{IC_j}{I_j} \right. \\
 &\quad \left. \frac{Q}{2P_j} \times HC1_j + \frac{\beta_j Q}{2} \times \left(\frac{1}{P_j} + \frac{\beta_j}{RP_j} \right) \times HC2_j \right. \\
 &\quad \left. + \left\{ \frac{(1-\beta_j)}{2P_j} + \frac{\beta_j(2-\beta_j)}{2RP_j} \right\} Q \times HC3_j \right] \tag{5}
 \end{aligned}$$

3.1.6 최적 배치크기

제품 1개당 총 생산비용[TCP(1)]에 대한 식 (5)가 Q에 대해 아래로 볼록한 함수이므로 dTCP(1)/dQ=0을 통해 비용을 최소화하는 최적 배치크기(Q*)를 구할 수 있다. (5)번 식의 양변을 Q에 대해서 미분하면 다음 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \frac{dTCP(1)}{dQ} &= \sum_{j=1}^N \left[-\frac{SC_j}{Q^2} + \frac{HC1_j}{2P_j} + \left(\frac{\beta_j}{2P_j} + \frac{\beta_j^2}{2RP_j} \right) \right. \\
 &\quad \left. \times HC2_j + \left\{ \frac{(1-\beta_j)}{2P_j} + \frac{\beta_j(2-\beta_j)}{2RP_j} \right\} \times HC3_j \right] = 0 \tag{6}
 \end{aligned}$$

식 (6)을 Q에 대해 정리하면, 최적 배치크기(Q*)를 구할 수 있다. 다음 식 (7)은 정책1에서의 최적 배치크기 Q*(1)를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 Q^*(1) &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N SC_j}{\sum_{j=1}^N \left[\frac{HC1_j}{2P_j} + \left(\frac{\beta_j}{2P_j} + \frac{\beta_j^2}{2RP_j} \right) \times HC2_j + \left\{ \frac{(1-\beta_j)}{2P_j} + \frac{\beta_j(2-\beta_j)}{2RP_j} \right\} \times HC3_j \right]}} \tag{7}
 \end{aligned}$$

3.2 정책 2 (마지막 공정에서만 검사)

두 번째 재작업정책은 최종공정 후 불량품을 검사하여 재작

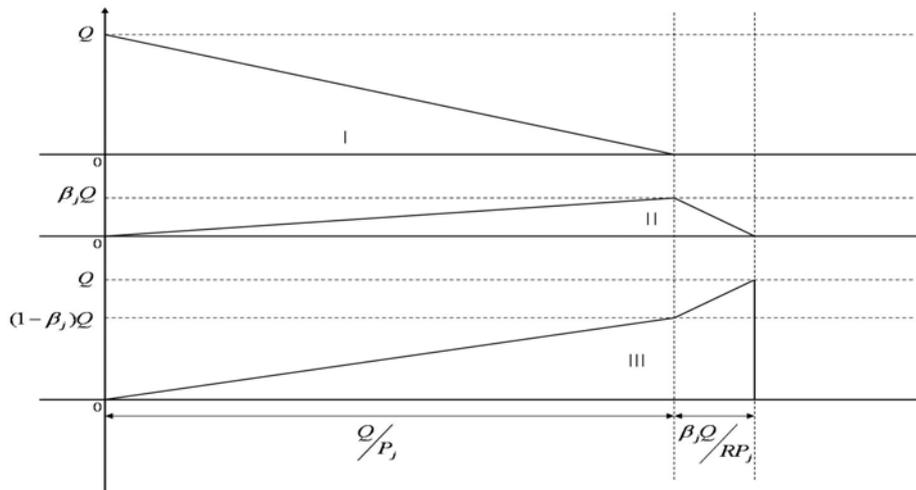


Figure 2. Inventory of each process in policy 1.

업하는 정책이다. 매 공정마다 불량품을 검사하지 않고, 최종 공정까지 작업을 마친 후 불량품을 선별하고 불량품에 대해서 처음 공정부터 다시 재작업을 수행하는 방법이다. 이 같은 제품의 흐름을 그림으로 표시하면 <Figure 3>과 같다.

3.2.1 준비비용

정책 2에서 준비비용은 정책 1에서의 준비비용과 같다. 다음 식 (8)은 정책 2에서의 준비비용을 나타낸다.

$$\text{준비비용} = \sum_{j=1}^N SC_j \quad (8)$$

3.2.2 공정비용

정책 2에서는 불량률이 공정들을 거치면서 누적되기 때문에 불량률이 정책 1과 다르게 적용된다. 정책 2의 전체 공정 내에서의 불량률은 1에서 공정 전체를 거친 후 생산되는 정상품의 비율을 뺀 $(1 - \prod_{j=1}^N (1 - \beta_j))$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 정책 2에서의 작업시간은 정책 1과 같고, 재작업시간은 $(1 - \prod_{j=1}^N (1 - \beta_j)) QLSLANTRP$ 로 나타낼 수 있다. 다음 식 (9)는 정책 2에서의 공정비용을 나타낸다.

$$\text{공정비용} = \sum_{j=1}^N \left[PC_j \times \left\{ \frac{Q}{P_j} + \frac{(1 - \prod_{j=1}^N (1 - \beta_j)) Q}{RP_j} \right\} \right] \quad (9)$$

3.2.3 검사비용

정책 2에서 검사는 가장 나중의 공정에서만 이루어지므로 검사비용은 마지막 공정에서의 검사비용만 적용한다. 다음 식 (10)은 정책 2에서의 검사비용을 나타낸다.

$$\text{검사비용} = \frac{IC_N}{I_N} \times Q \quad (10)$$

3.2.4 재고비용

정책 2의 공정들에서 발생하는 재고의 양을 시간에 따른 그래프로 표현하면 <Figure 4>와 같다. 각 I, II, III부분이 나타내는 재고는 정책 1에서와 같다.

<Figure 4>의 전반부는 배치크기가 Q인 배치가 P_j의 비율로 작업이 이루어지는 과정이 N번의 공정을 통해 이루어지는 과정에서 발생하는 재고의 양을 나타낸다. 이와 같은 처음 작업을 통해서 $(1 - \prod_{j=1}^N (1 - \beta_j)) Q$ 의 불량품이 발생하는데 이에 대한 재작업이 N번의 공정을 통해 이루어지는 동안 발생하

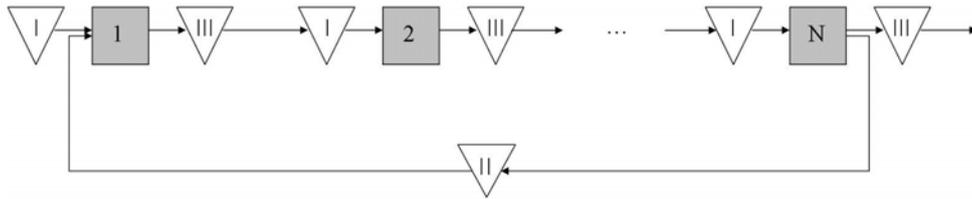


Figure 3. Sequence of processes in policy 2.

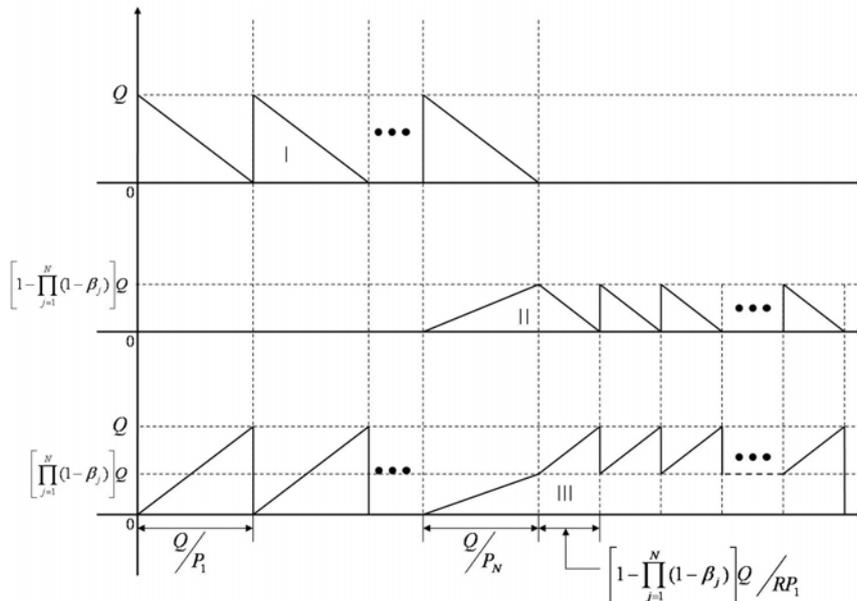


Figure 4. Inventory of process in policy 1.

는 재고량은 <Figure 4>의 후반부와 같다.

재고비용은 정책 1에서와 마찬가지로 재고량에 단위재고비용을 곱한 값으로 나타낼 수 있다. 각 재고에서의 재고량은 <Figure 4>에서 각 재고부분의 넓이를 통해서 산출할 수 있다. 다음 식 (11)은 각각 정책 1에서 I, II, III부분에 해당하는 재고비용을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 \text{I 부분의 재고비용} &= \sum_{j=1}^N \left[\frac{Q^2}{2P_j} \times HC1_j \right] \\
 \text{II 부분의 재고비용} &= \frac{\left[1 - \prod_{j=1}^N (1 - \beta_j) \right] Q^2}{2P_N} \times HC2_N \\
 &\quad + \sum_{j=1}^N \left[\frac{\left[\left\{ 1 - \prod_{i=1}^N (1 - \beta_i) \right\} Q \right]^2}{2RP_j} \times HC2_j \right] \\
 \text{III 부분의 재고비용} &= \\
 &\quad \sum_{j=1}^{N-1} \left[\frac{Q^2}{2P_j} \times HC3_j \right] + \sum_{j=1}^N \left[\frac{\left[\left\{ 1 - \prod_{i=1}^N (1 - \beta_i) \right\} Q \right]^2}{2RP_j} \times HC3_j \right] \\
 &\quad + \left[\frac{\left\{ \prod_{i=1}^N (1 - \beta_i) \right\} Q^2}{2P_N} + \sum_{j=1}^N \frac{\left[\prod_{i=1}^N (1 - \beta_i) \right] \left[1 - \prod_{i=1}^N (1 - \beta_i) \right] Q^2}{RP_j} \right] \\
 &\quad \times HC3_N \tag{11}
 \end{aligned}$$

따라서 전체 재고비용은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{전체 재고비용} &= INV[I, N] \times Q \\
 &= \text{I 부분의 재고비용} + \text{II 부분의 재고비용} \\
 &\quad + \text{III 부분의 재고비용} = \\
 &\quad \sum_{j=1}^N \left[\frac{Q^2}{2P_j} \times HC1_j \right] \\
 &\quad + \frac{\left[1 - \prod_{j=1}^N (1 - \beta_j) \right] Q^2}{2P_N} \times HC2_N + \sum_{j=1}^N \left[\frac{\left[\left\{ 1 - \prod_{i=1}^N (1 - \beta_i) \right\} Q \right]^2}{2RP_j} \times HC2_j \right] \\
 &\quad + \sum_{j=1}^{N-1} \left[\frac{Q^2}{2P_j} \times HC3_j \right] + \sum_{j=1}^N \left[\frac{\left[\left\{ 1 - \prod_{i=1}^N (1 - \beta_i) \right\} Q \right]^2}{2RP_j} \times HC3_j \right] \\
 &\quad + \left[\frac{\left\{ \prod_{i=1}^N (1 - \beta_i) \right\} Q^2}{2P_N} + \sum_{j=1}^N \frac{\left[\prod_{i=1}^N (1 - \beta_i) \right] \left[1 - \prod_{i=1}^N (1 - \beta_i) \right] Q^2}{RP_j} \right] \times HC3_N
 \end{aligned}$$

여기서 $INV[i, j] \times Q$ 는 정책 2의 시작공정인 i 번째 공정에서

서부터 마지막 공정인 j 번째 공정까지의 재고비용으로 정의한다.

3.2.5 제품 1개당 총 생산비용

준비, 공정, 검사, 재고비용의 합으로 총 비용을 산출하고 이를 배치크기 Q 로 나누어 정책 2의 제품 1개당 총 생산비용 $[TCP(2)]$ 을 구할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 다음 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned}
 TCP(2) &= \sum_{j=1}^N \left[\frac{SC_j}{Q} + \left\{ \frac{1}{P_j} + \frac{\left(1 - \prod_{i=1}^N (1 - \beta_i) \right)}{RP_j} \right\} \right] \\
 &\quad \times PC_j + \frac{IC_N}{I_N} + INV[1, N] \tag{12}
 \end{aligned}$$

3.2.6 최적 배치크기

제품 1개당 총 생산비용 $[TCP(2)]$ 에 대한 식 (12)가 Q 에 대해 아래로 볼록한 함수이므로 정책 2에서도 $dTCP(2)/dQ=0$ 을 통해서 비용을 최소화하는 최적 배치크기 (Q^*) 를 구할 수 있다. (12)번 식의 양변을 Q 에 대해서 미분하면 다음 식 (13)과 같다.

$$\frac{dTCP(2)}{dQ} = \sum_{j=1}^N \left[-\frac{SC_j}{Q^2} \right] + \frac{dINV[1, N]}{dQ} = 0 \tag{13}$$

식 (13)을 Q 에 대해 정리하면, 최적 배치크기 (Q^*) 를 구할 수 있다. 다음 식 (14)는 정책1에서의 최적 배치크기 $Q^*(2)$ 를 나타낸다.

$$Q^*(2) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N SC_j}{dINV[1, n] LSLANTdQ}} \tag{14}$$

3.3 정책 3 (정책 2에 한 번의 검사추가)

세 번째 재작업정책은 정책 2로부터 변형된 정책으로 최종 공정에서 검사가 이루어지기 전 중간공정 중 한 곳에 검사공정이 추가되는 정책이다.

검사비용이 매우 비싸서 매 공정마다 검사공정을 추가하기

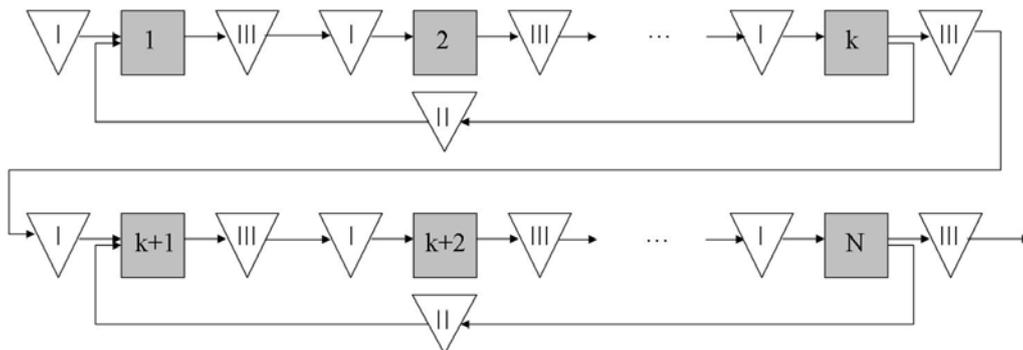


Figure 5. Sequence of processes in policy 3.

어렵거나 마지막에만 검사하면 축적된 불량률이 너무 높아져서 불량품이 대량으로 발생하게 될 경우, 시스템 중간부분에 한 번의 검사만 추가하여도 큰 효과를 얻을 수 있다. 이러한 품질과 비용 간의 문제는 재작업을 고려한 생산시스템에서 흔히 발생하기 때문에 세 번째 정책을 고려하였다.

정책 3에서 제품의 흐름을 그림으로 표시하면 <Figure 5>와 같다. 중간에 검사가 이루어지는 공정을 k번째 공정이라고 가정할 때, 정책 3은 각각 k개의 공정과 N-k개의 공정을 갖고 정책 2를 사용하는 2개의 시스템이 직렬로 연결되어 있는 것과 동일하다.

3.3.1 준비비용

정책 3에서 준비비용은 정책 1과 2에서의 준비비용과 같다. 다음 식 (15)는 정책 3에서의 준비비용을 나타낸다.

$$\text{준비비용} = \sum_{j=1}^N SC_j \quad (15)$$

3.3.2 공정비용

정책 3의 공정 내에서의 불량률은 첫 번째 검사가 이루어지는 k번째 공정을 기준으로 이전과 이후 공정에서 다르게 나타난다. k번째 공정까지 누적된 불량률은 $\left\{1 - \prod_{j=1}^k (1 - \beta_j)\right\}$ 이고, 그 이후 공정에서 누적된 불량률은 $\left\{1 - \prod_{j=k+1}^N (1 - \beta_j)\right\}$ 와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 정책 3에서의 공정비용은 다음 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{공정비용} &= \sum_{j=1}^N \left[\frac{Q}{P_j} \times PC_j \right] \\ &+ \sum_{j=1}^k \left[\frac{\left(1 - \prod_{j=1}^k (1 - \beta_j)\right) Q}{RP_j} \times PC_j \right] \\ &+ \sum_{j=k+1}^N \left[\frac{\left(1 - \prod_{j=k+1}^N (1 - \beta_j)\right) Q}{RP_j} \times PC_j \right] \quad (16) \end{aligned}$$

3.3.3 검사비용

정책 3에서 검사는 k번째 공정과 가장 마지막 공정에서 이루어지므로 검사비용은 k번째 공정과 마지막 공정에서의 검사비용을 적용한다. 다음 식 (17)은 정책 3에서의 검사비용을 나타낸다.

$$\text{검사비용} = \frac{IC_k}{I_k} \times Q + \frac{IC_N}{I_N} \times Q \quad (17)$$

3.3.4 재고비용

정책 3에서 재고는 각각 k개의 공정과 N-k개의 공정을 갖고 정책 2를 사용하는 2개의 생산시스템의 재고비용과 같다. 따라서 정책 3에서의 재고비용은 첫 번째 공정부터 k번째 공정까지의 재고비용인 $INV[I, k] \times Q$ 와 k+1번째 공정부터 마지막 공정인 N번째 공정까지의 재고비용인 $INV[k+1, N] \times Q$ 의 합으로 나타

낼 수 있다. 다음 식 (18)은 정책 3에서의 재고비용을 나타낸다.

$$\text{재고비용} = (INV[1, k] + INV[k+1, N]) \times Q \quad (18)$$

3.3.5 제품 1개당 총 생산비용

정책 3의 제품 1개당 총 생산비용[TCP(3)]을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} TCP(3) &= \sum_{j=1}^N \left[\frac{SC_j}{Q} \right] + \frac{IC_k}{I_k} + \frac{IC_N}{I_N} \\ &+ INV[1, k] + INV[k+1, N] \\ &+ \sum_{j=1}^k \left[\frac{Q}{P_j} \times PC_j \right] + \sum_{j=1}^k \left[\frac{\left(1 - \prod_{j=1}^k (1 - \beta_j)\right) Q}{RP_j} \times PC_j \right] \\ &+ \sum_{j=k+1}^N \left[\frac{\left(1 - \prod_{j=k+1}^N (1 - \beta_j)\right) Q}{RP_j} \times PC_j \right] \quad (19) \end{aligned}$$

3.3.6 최적 배치크기

제품 1개당 총 생산비용[TCP(3)]에 대한 식 (19)가 Q에 대해 아래로 볼록한 함수이므로 정책 3에서도 $dTCP(3)/dQ=0$ 을 통해 비용을 최소화하는 최적 배치크기(Q*)를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dTCP(3)}{dQ} &= \sum_{j=1}^N \left[-\frac{SC_j}{Q^2} \right] + \frac{dINV[1, k]}{dQ} \\ &+ \frac{dINV[k+1, N]}{dQ} = 0 \quad (20) \end{aligned}$$

식 (20)을 Q에 대해 정리하면, 최적 배치크기(Q*)는 다음과 같다.

$$Q^*(3) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N SC_j}{\left(\frac{dINV[1, k]}{dQ} + \frac{dINV[k+1, N]}{dQ} \right)}} \quad (21)$$

4. 실험결과 및 분석

10개의 공정을 가지고 있는 생산시스템에 대해 앞 장에서 제안된 모델을 적용하여 분석해 보았다. 특정한 생산시스템에 제안된 모델을 적용하여 앞 장에서 제시한 3가지 정책 중에서 어떠한 정책을 사용할 때 최소비용으로 생산이 가능한지 스프레드시트를 사용하여 실험해 보았다. 또한 단위검사비용, 단위공정비용, 불량률, 준비비용, 단위재고비용 등을 변화시켜가면서 그에 따른 각 정책의 최적 배치크기와 최소 생산비용의 변화를 살펴봄으로써 각 정책이 어떠한 특성에서 유리하게 작용하는지에 대해서도 알아보았다.

4.1 수치예제

수치예제에서 각 공정의 특성은 특정한 범위를 갖는 임의의

Table 3. Parameters of each process that used in numerical example

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SC _j	4	1	3	1	3	2	2	3	3	2
P _j	56	56	57	58	59	60	60	61	64	64
PC _j	10	13	9	18	8	14	19	10	4	20
RP _j	70	70	71.25	72.5	73.75	75	75	76.25	80	80
IC _j	10	8	11	9	8	9	8	8	9	8
I _j	45	331	226	104	280	186	349	177	109	63
HC1 _j	0.0589	0.1711	0.1868	0.2733	0.6951	0.9829	1.1594	1.4347	1.5465	1.5529
HC2 _j	0.2256	0.2348	0.2796	0.3724	0.5695	0.6337	0.8934	0.9583	1.0656	1.1642
HC3 _j	0.0110	0.1018	0.1367	0.1706	0.1750	0.3529	0.3903	0.4030	0.9127	0.9773
β _j	0.0679	0.0429	0.0846	0.0322	0.0942	0.0877	0.0095	0.0913	0.0824	0.0652

수를 사용하였다. 각 특성 값의 범위를 다음과 같이 $SC_j = [1, 5] (\$/배치)$, $P_j = [55, 65] (\text{개}/\text{시간})$, $RP_j = P_j/0.8 (\text{개}/\text{시간})$, $PC_j = [5, 15] (\$/\text{시간})$, $I_j = [90, 110] (\text{개}/\text{시간})$, $IC_j = [8, 12] (\$/\text{시간})$, $HCI_j = [0, 3.2] (\$/\text{시간})$, $HC2_j = [0, 2.4] (\$/\text{시간})$, $HC3_j = [0, 2] (\$/\text{시간})$, $\beta_j = [0, 0.1]$, $GP = 10 (\$)$ 로 하여 각 공정의 특성값을 정하였다. 각 특성값은 다음 <Table 3>과 같다. 단위시간당 생산량(P_j)의 경우에는 후반으로 갈수록 생산능력이 커지도록 하였고, 후반으로 갈수록 재공품의 부가가치가 커지므로 단위시간당 재고비용(HC_j)이 증가하도록 설정하였다.

이 수치들을 각 모델에 대입한 결과는 <Table 4>와 같다.

<Table 4>에서 보는 바와 같이 정책 1, 2, 3에서의 최적 배치 크기는 각각 15개, 19개, 14개 이다. 정책 3의 경우에는 검사공정이 추가되는 위치(k)를 1에서 9까지 바꾸어 가며 일일이 비교하여 최소 생산비용 및 단위시간당 최대이익을 나타내는 위치를 구하였다. 이 경우에는 5번째 공정 이후에 검사공정이 추가될 때 최소 비용으로 생산이 가능함을 알 수 있었다. 정책들을 비교해 보았을 때 결과적으로 최적의 정책은 정책 3이고, 최적의 배치크기는 14개이며, 그때의 제품 1개당 총 생산비용 [TCP]은 \$5.5848이다.

Table 4. Result of numerical example

정책 1	Q*(1)	15
	TCP(1)	5.9125
정책 2	Q*(2)	19
	TCP(2)	6.5372
정책 3	Q*(3)	14
	TCP(3)	5.5848

이러한 결과를 가지고 생산시스템 내에서 공정특성이 개선될 경우 효과에 대한 예측이 가능하기 때문에 개선을 위해 투자되는 비용과 그 결과로 얻을 수 있는 이익을 고려하여 개선 여부를 결정하는데 도움을 줄 수 있다.

4.2 공정특성 변화에 따른 결과

분석의 용이성을 위해서 각 공정의 특성은 동일하다고 가정하였다. $SC_j = 2 (\$/배치)$, $P_j = 60 (\text{개}/\text{시간})$, $RP_j = 75 (\text{개}/\text{시간})$, $PC_j = 10 (\$/\text{시간})$, $I_j = 180 (\text{개}/\text{시간})$, $IC_j = 50 (\$/\text{시간})$, $HCI_j = 1 (\$/\text{시간})$

Table 5. The result as the change of inspection cost

inspection cost	policy 1		policy 2		policy 3		policy
	Q*	TCP	Q*	TCP	Q*	TCP	
1	11	5.6537	11	7.7696	9	6.6387	1-3-2
2	11	5.7093	11	7.7752	9	6.6498	1-3-2
...							
23	11	6.8760	11	7.8918	9	6.8831	1-3-2
24	11	6.9315	11	7.8974	9	6.8942	3-1-2
...							
43	11	7.9871	11	8.0030	9	7.1053	3-1-2
44	11	8.0426	11	8.0085	9	7.1164	3-2-1
...							
204	11	16.9315	11	8.8974	9	8.8942	3-2-1
205	11	16.9871	11	8.9030	9	8.9053	2-3-1

간) $HC2_j = 1(\$/시간)$, $HC3_j = 1(\$/시간)$, $\beta = 0.1$ (10% 불량률)로 하여 실험을 진행하였다.

4.2.1 검사비용의 변화

위와 같은 조건에서 검사비용에 변화를 주었을 때, 각 정책에서의 최적 배치크기와 비용의 변화를 분석해 보았다

<Table 5>는 IC 값을 1~205까지 변화시키면서 각 정책의 최적 배치크기(Q^*)와 제품 1개당 총 생산비용(TCP)을 구한 결과들이다.

IC의 변화는 최적 배치크기에는 영향을 미치지 못하고 TCP에 영향을 미친다. 모든 공정의 특성이 동일하다고 가정하였으므로 각 정책별 제품 1개당 총 생산비용(TCP)을 IC에 대한 식으로 표현이 가능하다.

TCP를 IC에 대한 식으로 정리한 후 예제수치를 대입하면 다음 식 (22)와 같은 식이 도출되고, 이 식들에 대한 그래프는 <Figure 6>과 같다.

<Figure 6>의 그래프에서 볼 수 있듯이 단위시간당 검사비용이 증가할 때, 정책 1, 정책 3, 정책 2 순으로 비용이 가파르게 증가한다. 검사비용을 제외한 나머지 비용은 정책 2, 정책 3, 정책 1 순으로 높음을 알 수 있다. 이는 정책에 따라 전체 공정에서 이루어지는 검사횟수가 다르기 때문이다. 검사횟수가 많아

지면 검사비용에 대한 계수는 증가하는 반면, 누적되는 불량률이 적기 때문에 공정비용과 재고비용이 감소하게 된다 따라서 검사비용이 높을수록 정책 2가, 낮을수록 정책 1이 더 적합함을 알 수 있다. 또한 정책 1과 정책 2의 최적 구간 사이에 정책 3의 최적 구간이 존재하게 되어 정책 3이 정책 1과 정책 2 사이에서 보완적인 정책으로 사용 가능함을 알 수 있다

$$\begin{aligned} TCP(1) &= 0.0556 \times IC + 5.5982 \\ TCP(2) &= 0.0056 \times IC + 7.7641 \\ TCP(3) &= 0.0111 \times IC + 6.6276 \end{aligned} \tag{22}$$

4.2.2 공정비용의 변화

같은 조건에서 공정비용에 변화를 주었을 때 각 정책에서의 최적 배치크기와 비용의 변화를 분석해 보았다

<Table 6>에서 볼 수 있듯이 PC의 변화는 최적 배치크기(Q^*)에는 영향을 미치지 못하고 제품 1개당 총 생산비용(TCP)에만 영향을 미친다. 검사비용의 경우와 마찬가지로 각 정책별 제품 1개당 총 생산비용(TCP)을 PC에 대한 식으로 표현이 가능하다.

TCP를 PC에 대한 식으로 정리한 후 예제수치를 대입하면 다음 식 (23)와 같은 식이 도출되고, 이 식들에 대한 그래프는

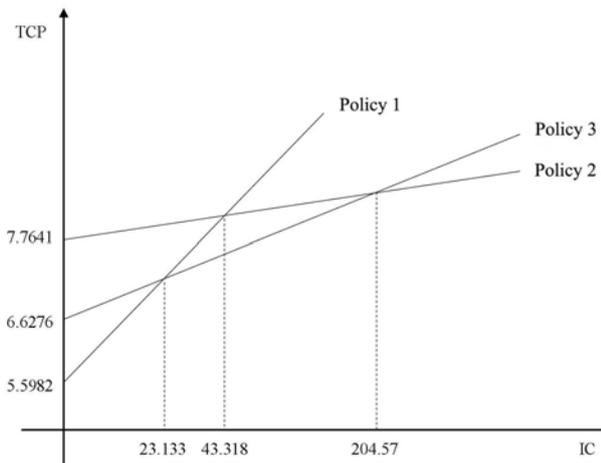


Figure 6. TCP for each policy according to inspection cost.

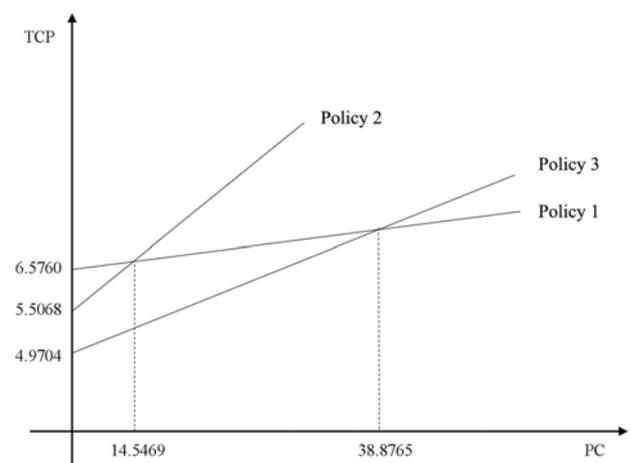


Figure 7. TCP for each policy according to production cost.

Table 6. The result as the change of production cost

production cost	policy 1		policy 2		policy 3		policy
	Q*	TCP	Q*	TCP	Q*	TCP	
1	11	6.7560	11	5.7603	9	5.1917	3-2-1
...							
14	11	9.0960	11	9.0559	9	8.0682	3-2-1
15	11	9.2760	11	9.3094	9	8.2894	3-1-2
...							
38	11	13.4160	11	15.1401	9	13.3786	3-1-2
39	11	13.5960	11	15.3936	9	13.5999	1-3-2

<Figure 7>과 같다.

$$\begin{aligned}
 TCP(1) &= 0.18 \times PC + 6.5760 \\
 TCP(2) &= 0.2535 \times PC + 5.5068 \\
 TCP(3) &= 0.2213 \times PC + 4.9704
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

<Figure 7>의 그래프에서 보는 것처럼, 단위시간당 공정비용이 증가할 때, 정책 2, 정책 3, 정책 1 순으로 비용이 가파르게 증가한다. 이는 정책에 따라 전체 공정에서 이루어지는 검사횟수가 다르기 때문이다. 검사횟수가 많아지면 누적되는 불량률이 감소하여 공정비용에서 재작업에 대한 비용부분이 감소하여 공정비용에 대한 계수가 감소하게 된다. 따라서 공정비용이 높을수록 정책 1이, 낮을수록 정책 2가 적합함을 알 수 있다. 또한 검사비용의 변화에 따른 실험에서와 마찬가지로 정책 1과 정책 2의 최적 구간 사이에 정책 3의 최적 구간이 존재하게 되어 정책 3이 정책 1과 정책 2 사이에서 보완적인 정책으로 사용 가능함을 알 수 있다.

4.2.3 불량률의 변화

불량률의 변화에 따른 최적 배치크기와 비용의 변화를 분석해 보았다. 정책 사이의 차이를 보이기 위해서 $IC_j = 20(\$/시간)$ 으로 가정하였다.

<Table 7>에서 볼 수 있듯이 불량률의 변화는 최적 배치크기(Q^*)와 제품 1개당 총 생산비용(TCP)에 영향을 미친다. 이러한 불량률 변화에 따른 Q^* 와 TCP의 변화를 그래프로 나타내면 <Figure 8>, <Figure 9>와 같다. <Figure 8>에서 보는 바와 같이 불량률이 증가할수록 최적의 배치크기는 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 <Figure 9>를 통해서 불량률이 증가할수록 정책 1이 나머지 정책보다 적합하다는 사실을 알 수 있다.

4.2.4 준비비용의 변화

준비비용의 변화에 따른 최적 배치크기와 비용의 변화를 분석해 보았다. <Table 8>에서 볼 수 있듯이 준비비용의 변화는

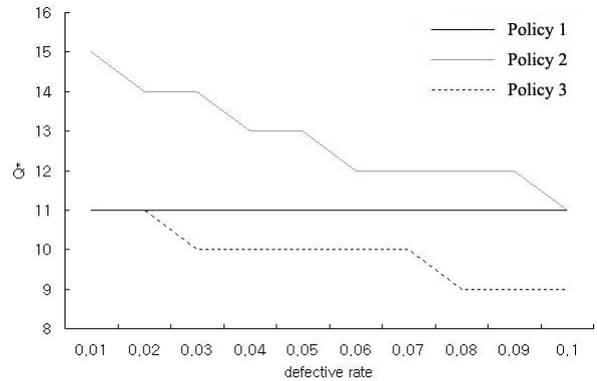


Figure 8. Q^* for each policy according to defective rate.

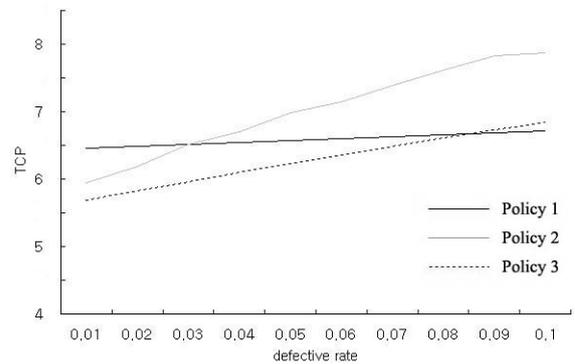


Figure 9. TCP for each policy according to defective rate.

최적 배치크기(Q^*)와 제품 1개당 총 생산비용(TCP)에 영향을 미친다. 이러한 준비비용의 변화에 따른 Q^* 와 TCP의 변화를 그래프로 나타내면 <Figure 10>, <Figure 11>과 같다. <Figure 10>에서 보는 바와 같이 준비비용이 증가하면 최적의 배치크기도 같이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 <Figure 11>을 통해서 준비비용이 증가할수록 정책 1과 정책 3이 정책 2보다 적합하다는 사실을 알 수 있다.

Table 7. The result as the change of defect rate

defective rate	policy 1		policy 2		policy 3		policy
	Q^*	TCP	Q^*	TCP	Q^*	TCP	
0.01	11	6.4573	15	5.9481	11	5.6812	3-2-1
0.02	11	6.4853	14	6.1875	11	5.8230	3-2-1
0.03	11	6.5133	14	6.5086	10	5.9589	3-2-1
0.04	11	6.5413	13	6.7055	10	6.0933	3-1-2
0.05	11	6.5693	13	6.9925	10	6.2270	3-1-2
0.06	11	6.5973	12	7.1384	10	6.3596	3-1-2
0.07	11	6.6253	12	7.3841	10	6.4905	3-1-2
0.08	11	6.6533	12	7.6154	9	6.6142	3-1-2
0.09	11	6.6813	12	7.8320	9	6.7332	1-3-2
0.1	11	6.7093	11	7.8752	9	6.8498	1-3-2

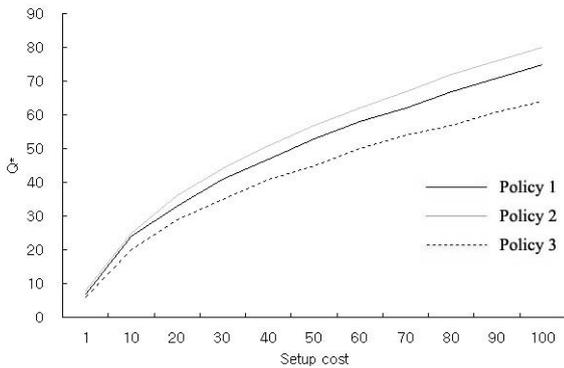


Figure 10. Q^* for each policy according to setup cost.

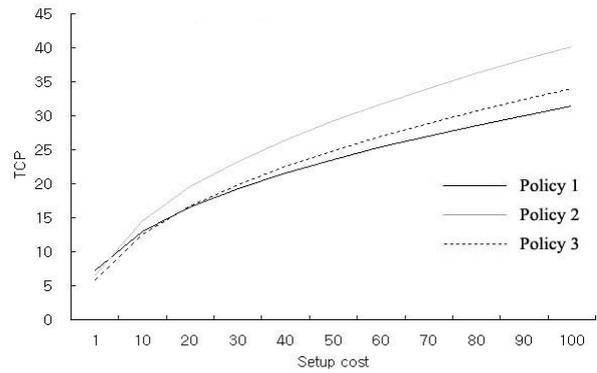


Figure 11. TCP for each policy according to setup cost.

4.2.5 재고비용의 변화

재고비용의 변화에 따른 최적 배치크기와 비용의 변화를 분석해 보았다.

<Table 9>에서 볼 수 있듯이 재고비용의 변화는 최적 배치크기(Q^*)와 제품 1개당 총 생산비용(TCP)에 영향을 미친다. 이러한 재고비용 변화에 따른 Q^* 와 TCP의 변화를 그래프로 나타내

Table 8. The result as the change of setup cost

setup cost	policy 1		policy 2		policy 3		policy
	Q^*	TCP	Q^*	TCP	Q^*	TCP	
1	11	6.3951	11	5.4039	9	4.9269	3-2-1
20	49	12.7052	51	14.5324	41	12.4186	3-1-2
40	70	16.0717	72	19.3774	59	16.4154	1-3-2
60	85	18.6548	89	23.1627	72	19.4823	1-3-2
80	98	20.8326	102	26.2520	83	22.0679	1-3-2
100	110	22.7510	114	29.0156	93	24.3460	1-3-2
120	121	24.4857	125	31.5256	102	26.4056	1-3-2
140	130	26.0807	135	33.8250	110	28.2994	1-3-2
160	139	27.5653	145	36.0181	117	30.0621	1-3-2
180	148	28.9598	153	37.9716	124	31.7178	1-3-2
200	156	30.2787	162	39.9286	131	33.2837	1-3-2

Table 9. The result as the change of inventory holding cost

inventory holding cost	policy 1		policy 2		policy 3		policy
	Q^*	TCP	Q^*	TCP	Q^*	TCP	
0.1	33	5.7778	36	4.4847	29	4.1644	3-2-1
0.5	15	7.2611	16	6.5435	13	5.8903	3-2-1
1	11	8.3760	11	8.0418	9	7.1831	3-2-1
2	7	9.9549	8	10.2740	6	9.0251	3-1-2
3	6	11.1511	7	12.1815	5	10.4227	3-1-2
4	5	12.1778	6	13.5879	5	11.6408	3-1-2
5	5	13.0778	5	14.5647	4	12.6408	3-1-2
10	3	16.6444	4	20.2158	3	16.7437	1-3-2
15	3	19.3444	3	23.4328	2	20.0771	1-3-2
20	2	21.7778	3	28.0839	2	22.5133	1-3-2

면 <Figure 12>, <Figure 13>과 같다. <Figure 12>에서 보는 바와 같이 재고비용이 증가할수록 최적의 배치크기는 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 <Figure 13>를 통해서 재고비용이 증가할수록 정책 1과 정책 3이 정책 2보다 적합하다는 사실을 알 수 있다.

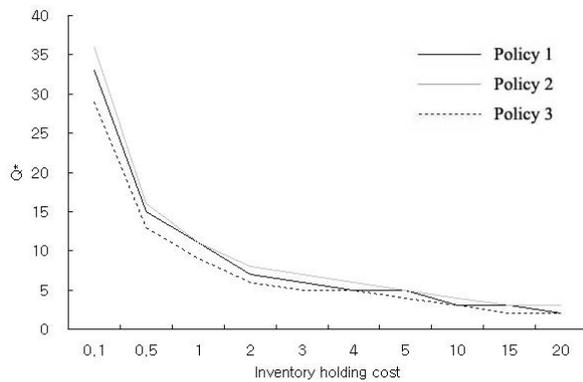


Figure 12. Q^* for each policy according to inventory holding cost.

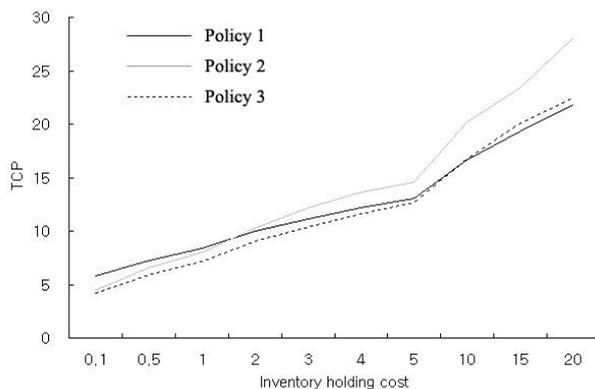


Figure 13. TCP for each policy according to inventory holding cost.

5. 결론

본 연구에서는 배치단위 생산과 불량품에 대한 재작업을 고려한 다단계 생산시스템 내에서 불량품의 검사방식에 따른 3가지 재작업정책에 대하여 분석하였다. 이를 위해 준비, 생산, 검사, 재고비용을 최소화하는 재작업정책과 정책별로 최적 배치크기를 결정하는 수리적 모델을 제시하였고, 실험을 통해서 특정 상황에서의 최적 정책과 생산환경요인들의 변화에 따른 최적 배치크기와 최소 생산비용의 변화를 재작업정책별로 비교분석하였다.

제안된 모델은 재작업을 고려한 특정 다단계 생산시스템에서 최소의 비용으로 제품을 생산할 수 있는 재작업정책과 최적

배치크기를 결정해 줄 수 있다. 이를 통해서 정책3이 정책1과 정책2의 보완적인 모델로서 최적의 성능을 보이는 정확한 범위와 그때의 절감비용을 산출할 수 있다. 이처럼 제안된 모델을 통해서 생산시스템을 개선할 경우 제품의 생산비용이 어느 정도 절감될 수 있는지 알 수 있기 때문에, 개선을 위한 타당한 투자금액을 산정할 수도 있다.

본 연구에서는 세 가지 방식의 재작업정책에 대해서만 제시하였고, 생산시스템 내의 모든 변동성에 대한 고려를 하지 못했다. 또한 정책2와3에서는 불량이 발생한 위치에 상관없이 모든 공정에 대해서 재작업이 이루어지는 것으로 가정하였다 따라서 다단계 생산시스템 내에서 제품의 생산비용을 최소화하기 위한 검사공정 개수와 설치위치에 대한 연구와 생산시스템 내의 변동성을 고려한 연구, 또한 불량이 발생한 공정에서만 재작업이 이루어지는 가정에 대한 연구가 추가된다면, 더욱 현실적인 생산시스템에 대한 분석이 가능할 것이다.

참고문헌

- Ben-daya M., Rahim A. (2003), Optimal lot-sizing, quality improvement and inspection errors for multistage production systems *Int. J. Prod. Res.*, **41**(1), 65-79.
- Chiu, Y. P. (2003), Determining the optimal lot size for the finite production model with random defective rate, the rework process, and backlogging *Engineering Optimization*, **35**(4), 427-437.
- Cho, B. R., Govindaluri, M. S. (2002), Optimal screening limits in multi-stage assemblies, *Int. J. Prod. Res.*, **40**(9), 1993-2009.
- Flapper, S. D. P., Teunter, R. H. (2004), Logistic planning of rework with deteriorating work-in-process, *Int. J. Prod. Economics*, **88**(1), 51-59.
- Gopalan, M. N., Kannan, S. (1996), Probability of first passage analysis of a two-stage transfer-line production system with storage and rework *Microelectron Reliab.*, **36**(3), 403-407.
- Gupta, T., Chakraborty, s. (1984), Looping in a multistage production system *Int. J. Prod. Res.*, **22**(2), 299-311.
- Hayek, P. A., Salameh, M. K. (2001), Production lot sizing with the reworking of imperfect quality items produced *Production Planning and Control*, **12**(6), 584-590.
- Inderfurth, K., Lindner, G., & Rachaniotis, N. P. (2005), Lot sizing in a production system with rework and product deterioration *Int. J. Prod. Res.*, **43**(7), 1355-1374.
- Jamal, A. M. M., Sarker, B. R., & Mondal, S. (2004), Optimal manufacturing batch size with rework process at a single-stage production system., *Computers & industrial Engineering*, **47**(1), 77-89.
- Kang, S. H., Kang, J. Y. (1990), Lot Size Determination in the Kanban System *Journal of the Korean Institution of Industrial Engineers*, **16**(1), 115-122.
- Kim, C. H., Hong, Y. S., & Kim, S. Y. (1994), An EMQ Model in An Unreliable Machine *Journal of the Korean Institution of Industrial Engineers*, **20**(2), 3-17.
- Kim, C. H., Hong, Y. S. (1997), An Optimal Production Cycle and Inspection Schedules in A Deteriorating Machine *Journal*

- of the Korean Institution of Industrial Engineers, **23**(2), 261-273.
- Kim, C. H. (2005), An EMQ Model with Rework Journal of the Korean Institution of Industrial Engineers, **31**(2), 173-179.
- Lee, H. H., Chandra, M. J., & Deleveaux, V.J. (2003), Optimal batch size and investment and inspection errors for multistage production systems *Int. J. Prod. Res.*, **41**(1), 65-79.
- Lee, J., Unnikrishnan, S. (1998), Planning quality inspection operations in multistage manufacturing systems with inspection error *Int. J. Prod. Res.*, **36**(1), 141-155.
- Li, J. (2004), Performance analysis of production systems with rework loops *IIE Transactions*, **36**(8), 755-765.
- Porteus, E. L. (1986), Optimal lot sizing, process quality improvement and setup cost reduction *Operation Research*, **34**(1), 137-144.
- Raz, T., Kaspi, M. (1991), Location and sequencing of imperfect inspection operations in serial multi-stage production systems *Int. J. Prod. Res.*, **29**(8), 1645-1659.
- Shiau Y. R. (2002), Inspection resource assignment in a multistage manufacturing system with an inspection error model *Int. J. Prod. Res.*, **40**(8), 1787-1806.
- Teunter, R. (2004), Lot-sizing for inventory systems with product recovery, *Computers & industrial Engineering*, **46**(3), 431-441.
- Zargar, A. M. (1995), Effect of Rework Strategies of Cycle Time, *Computers & industrial Engineering*, **29**(1-4), 239-243.