

다단계 생산시스템에서 재작업 정책의 비교분석 Comparative Analysis of Rework Policies in Multistage Production System

신재선, 한주윤, 정봉주

연세대학교 정보산업공학과
서울특별시 서대문구 신촌동 134 연세대학교 공과대학 정보산업공학과
Fax : 02-364-7807, E-mail : jaesuny@yonsei.ac.kr

Abstract

최근 개별 제품의 가격이 상승하고 품질의 중요성이 강조됨에 따라, 생산현장에서 제품의 불량률 검사하고, 불량품을 즉시 재작업하는 공정이 많아지고 있다. 따라서 본 연구에서는 불량품의 재작업 과정을 고려하여 생산라인에서 비용을 최소화 하는 최적 배치사이즈와 재작업 정책을 결정하는 모델을 제안하였다.

제안된 모델은 다수의 기계가 연속적으로 연결된 다단계생산시스템을 가정하고 있으며, 검사 공정의 위치 변화에 따른 두 가지 재작업 정책과 두 정책으로부터 변형된 정책을 반영할 수 있다. 제안된 모델을 통해 생산 환경에 따라 비용을 최소화하는 재작업 정책과 최적의 생산 배치사이즈를 결정할 수 있으며, 생산 환경요인들의 변화에 따른 배치사이즈와 비용의 변화를 정책 별로 비교 분석할 수 있다.

1. 서론

기술수준이 날로 발전하면서 개별 제품의 가격이 상승하고, 경제주체의 중심이 기업에서 고객으로 넘어가면서 고객만족을 위한 품질의 중요성이 강조됨에 따라, 생산현장에서 제품의 불량률 검사하고, 불량품을 즉시 재작업하는 공정의 필요성이 증가하고 있다. 또한 제품의 공급과잉과 글로벌 경쟁의 심화 등으로 인한 제품가격의 하락으로 기업의 수익성이 악화되는 상황에서 재작업을 통해 폐기되는 불량품의 양을 감소시키는 것은 기업이 원가절감을 하는데 큰 역할을 할 수 있다.

이러한 재작업 공정은 날로 심각해지는 환경오염 측면에서도 폐기물로 인한 오염을 줄일 수 있어 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 생

산성을 높이는데 많은 기여를 할 수 있다.

이처럼 재작업의 중요성이 커지면서 생산시스템의 분석에 있어서도 재작업에 대한 고려가 필요하게 되었다. 불량품의 발생은 생산시스템의 생산량을 감소시키고, 불량품의 검사비용, 폐기비용과 재작업 비용을 발생시켜서 제품의 생산원가를 상승시킨다. 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 생산시스템 내에서 발생하는 불량품을 재작업을 고려한 생산비용을 최소화하는 재작업 정책과 배치단위생산 환경에서의 최적의 배치사이즈를 결정하고, 이에 따른 총생산비용의 변화를 정책별로 비교분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 불량품과 재작업 정책에 대한 기존의 연구에 대해 살펴보고, 3절에서는 다단계 생산시스템에 대한 정의와 가정에 대해 설명하고, 셋업, 생산, 검사, 재고비용을 최소화하는 생산 배치사이즈를 결정하는 모델을 정책별로 제시한다. 4절에서는 제안된 모델을 이용한 간단한 실험을 통해서 생산 환경요인들의 변화에 따른 배치사이즈와 최소생산비용의 변화를 재작업 정책 별로 비교분석을 하고, 마지막으로 5절에서는 본 연구의 결론을 제시한다.

2. 기존연구현황

불량품과 재작업에 관련된 연구는 크게 단일단계의 생산시스템에서의 연구와 다단계의 생산시스템에서의 연구로 분류할 수 있다.

단일단계의 생산시스템에서의 재작업에 관한 연구는 비용의 최소화를 고려한 생산배치사이즈 결정 문제를 해결하는 방향으로 많이 진행되어왔다. Porteus(2004)는 불량률과 셋업비용이 최적 생산 배

치사이에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Hayek and Salameh(2001)과 Chiu(2003)는 각각 단위시간당 비용을 최소화하는 상황과 백로그가 허용된 상황에서 최적 생산 배치사이즈를 구하는 모델을 제시하였다.

단일단계에서 재작업 시기를 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 재작업 정책을 구분하고, 정책에 따른 생산시스템에서의 성능과 비용을 분석한다.

다단계 생산시스템에서의 연구도 여러 방향으로 진행되어왔다. 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 배치사이즈에 대한 연구로는 Gupta and Chakraborty(1984), Lee et al(1997), Ben-daya and Rahim(2003) 등이 있는데, 이들은 단일형태의 정책에 대해서 분석을 하고 있으며, 재작업을 고려하지 않고 불량품의 발생에 대해서만 고려하고 있는 경우가 많다.

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

본 연구에서는 배치단위생산과 불량품의 재작업을 고려한 다단계 생산시스템 내에서 셋업, 생산, 검사, 재고 등의 모든 비용을 최소화하는 재작업 정책과 정책에 따른 최적의 배치사이즈를 결정하여, 정책별로 최소생산비용에 대한 비교분석이 가능한 모델을 제시하고자 한다.

3. 재작업정책에 따른 최적 배치사이즈 결정 모델

본 연구는 불량품과 재작업 정책을 고려한 배치단위생산을 하는 다단계 생산시스템을 대상으로 하고 있다. 다단계 생산시스템은 여러 개의 공정이 직렬로 배치되어 있는 시스템이다.

배치단위로 생산을 하는 생산시스템에서 생산비용을 최소화하기 위해서는 최적의 배치사이즈를 결

정해주어야 한다. 따라서 본 연구에서는 최소생산비용 산출을 위해서 재작업정책별로 최적 배치사이즈 결정 모델을 제안하였다.

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

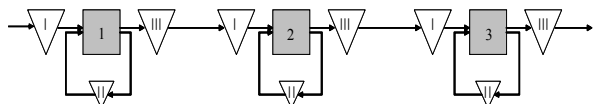
- 각 공정은 직렬로 연결되어 있다.
- 생산시스템 내에서 제품의 이동은 배치단위로 하고, 배치사이즈는 모든 공정에서 동일하다.
- 각 공정의 생산시간, 불량률, 검사시간은 고정적이다.
- 검사시간은 생산시간보다 항상 더 적다.
- 배치내의 모든 제품의 공정이 끝난 후 다음 공정으로 이동한다.
- 재작업의 경우에는 불량품이 발생하지 않는다.

모델을 위한 기호와 변수는 다음과 같다.

- Q : 배치사이즈
- SC_j : j 번째 공정의 셋업비용
- P_j : 단위시간당 생산량
- RP_j : 재작업의 단위시간당 생산량
- PC_j : j 번째 공정의 단위시간당 생산비용
- I_j : j 번째 공정의 단위시간당 검사량
- IC_j : j 번째 공정의 단위시간당 검사비용
- HCI_1 : j 번째 공정의 I부분의 단위재고비용
- $HC2_j$: j 번째 공정의 II부분의 단위재고비용
- $HC3_j$: j 번째 공정의 III부분의 단위재고비용
- β_j : j 번째 공정의 불량률

3.1 정책 1 (매 공정마다 검사 후 재작업)

첫 번째 재작업 정책은 개별공정마다 불량품을 검사하여 재작업을 하는 정책이다. 매 공정마다 배치에 대한 작업과 검사가 끝나면 불량품이 선별되고, 선별된 불량품은 바로 해당 공정에서 재작업을 거친 후 배치를 이루어 다음 공정으로 이동한다. 이 같은 제품의 흐름을 그림으로 표시하면 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 정책 1에서 제품의 흐름

3.1.1 셋업비용

셋업은 각 공정마다 배치를 생산할 때 1번 발생한다. 따라서 한 배치가 전체 공정을 거치면서 발생하는 셋업비용은 각 공정의 셋업비용의 합으로 구할 수 있다.

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

3.1.2 생산비용

생산비용은 배치를 생산하는데 소요된 작업 및 재작업시간과 단위시간당 생산비용의 곱으로 구할 수 있다. 작업시간은 배치사이즈를 단위시간당 생산량으로 나눈 Q/P 로 나타낼 수 있으며, 재작업시간은 작업 중 발생한 불량품의 개수를 단위시간당 재작업의 생산량으로 나눈 $\beta Q/RP$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 생산비용은 다음과 같다.

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

3.1.3 검사비용

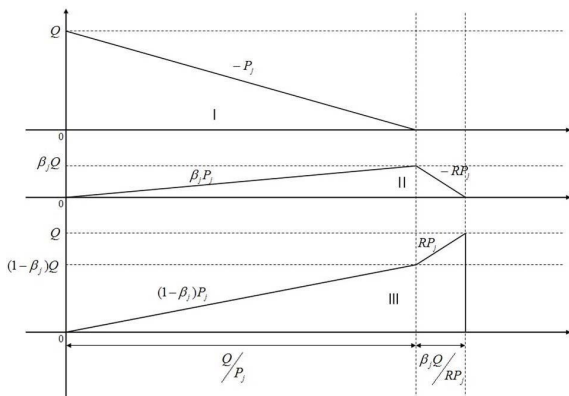
검사비용은 검사를 하는데 소요된 시간과 단위 시간당 검사비용의 곱으로 구할 수 있다.

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

3.1.4 재고비용

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

<그림 2>에서 I 부분은 공정 앞에서 제품이 작업을 기다릴 때 발생하는 재고를, II 부분은 재작업을 기다리는 불량품에 대한 재고를, III 부분은 공정 뒤에서 배치의 작업이 모두 마치고 다음공정으로 가기 위해 기다리는 재고를 나타내며 <그림 1>에서의 I, II, III부분에 해당한다.



<그림 2> 정책 1에서 각 공정의 재고

재고비용은 재고량에 단위재고비용을 곱한 값으로 나타낼 수 있다.

$$\text{재고비용} = \sum_{j=1}^N \left[\frac{Q^2}{2P_j} \times HC1_j + \frac{\beta_j Q}{2} \times \left(\frac{Q}{P_j} + \frac{\beta_j Q}{RP_j} \right) \times HC2_j + \left\{ \frac{(1-\beta_j)Q^2}{P_j} + \frac{\beta_j(2-\beta_j)Q^2}{2RP_j} \right\} \times HC3_j \right] \quad (4)$$

3.1.5 총비용

총비용은 셋업, 생산, 검사, 재고비용의 합으로

나타낸다. 총비용을 배치사이즈 Q 로 나누면 제품 1개당 총생산비용(TCP)이 산출된다.

정책 1의 제품 1개당 총생산비용 [$TCP(1)$]을 식으로 나타내면 다음과 같다.

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

3.1.6 최적 배치사이즈

제품 1개당 총생산비용 [$TCP(1)$]에 대한 식 (5)가 Q 에 대해 오목함수이므로 $dTCP(1)/dQ=0$ 을 통해서 비용을 최소화하는 최적 배치사이즈(Q^*)를 구할 수 있다.

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

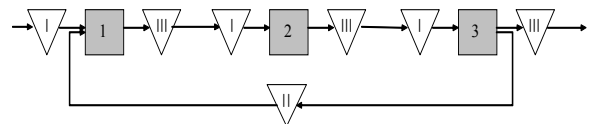
(6)번식을 Q 에 대해 정리하면, 최적 배치사이즈 (Q^*)를 구할 수 있다. $Q^*(2)$ 는 다음과 같다.

$$Q^*(1) = \quad (7)$$

$$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N SC_j}{\sum_{j=1}^N \left[\frac{HC1_j}{2P_j} + \frac{\beta_j}{2} \times \left(\frac{1}{P_j} + \frac{\beta_j}{RP_j} \right) \times HC2_j + \left\{ \frac{(1-\beta_j)}{P_j} + \frac{\beta_j(2-\beta_j)}{2RP_j} \right\} \times HC3_j \right]}}$$

3.2 정책 2 (마지막 공정에서만 검사)

두 번째 재작업 정책은 최종공정 후 불량품을 검사하여 재작업하는 정책이다. 매 공정마다 불량품을 검사하지 않고, 최종공정까지 작업을 마친 후 불량품을 선별하고 불량품에 대해서 처음공정부터 다시 재작업을 수행하는 방법이다. 이 같은 제품의 흐름을 그림으로 표시하면 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 정책 2에서 제품의 흐름

3.2.1 셋업비용

정책 2에서 셋업비용은 정책 1에서의 셋업비용과 같다.

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

3.2.2 생산비용

정책 2의 전체공정 내에서의 불량률은 $(1 - \prod_{j=1}^N (1-\beta_j))$ 이다. 따라서 정책 2에서의 생산비용은

다음과 같다.

생산비용 =

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

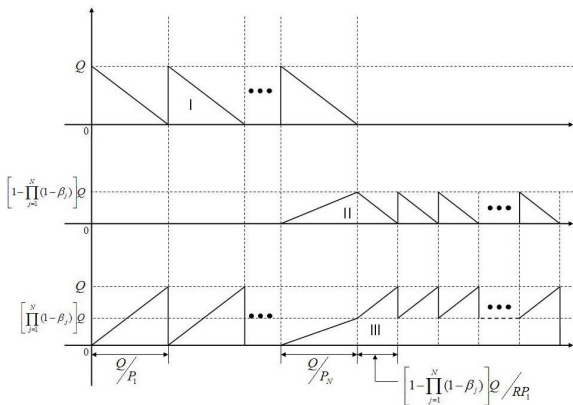
3.2.3 검사비용

정책 2에서 검사는 가장 나중의 공정에서만 이루어지므로 검사비용은 다음과 같다.

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

3.2.4 재고비용

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



<그림 4> 정책 2에서 전체공정의 재고

따라서 정책 2에서의 재고비용은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{재고비용} = INV[1, N] \times Q =$$

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

여기서 $INV[i, j] \times Q$ 는 정책 2의 시작공정인 i번째 공정에서부터 마지막 공정인 j번째 공정까지의 재고비용으로 정의한다.

3.2.5 총비용

정책 1과 같은 방법으로 정책 2의 제품 1개당

총생산비용 [$TCP(2)$]을 식으로 나타내면 다음과 같다.

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

3.2.6 최적 배치사이즈

제품 1개당 총생산비용 [$TCP(2)$]에 대한 식 (12)가 Q 에 대해 오목함수이므로 정책 2에서도 $dTCP(2)/dQ=0$ 을 통해서 비용을 최소화하는 최적 배치사이즈(Q^*)를 구할 수 있다.

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

(13)번식을 Q 에 대해 정리하면, 최적 배치사이즈(Q^*)를 구할 수 있다. $Q^*(2)$ 는 다음과 같다.

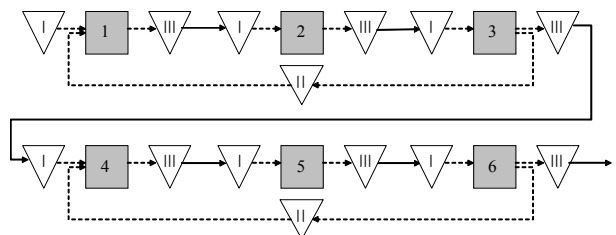
$$Q^*(2) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N SC_j}{\frac{dINV[1, N]}{dQ}}} \quad (14)$$

3.3 정책 3 (정책 2에 한 번의 검사 추가)

세 번째로 재작업 정책은 두 정책으로부터 변형된 것으로 최종공정에서 검사가 이루어지기 전 중간 공정 중 한곳에 검사공정이 추가되는 정책이다.

검사비용이 매우 비싸서 매 공정마다 검사공정을 추가하기 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 비용간의 문제가 재작업을 고려한 생산시스템에서 흔히 발생하기 때문에 세 번째 정책을 고려하였다.

정책 3에서 제품의 흐름을 그림으로 표시하면 <그림 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.



<그림 5> 정책 3에서 제품의 흐름

3.3.1 셋업비용

정책 3에서 셋업비용은 정책 1과 2에서의 셋업비용과 같다.

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

3.3.2 생산비용

정책 3의 공정 내에서의 불량률은 첫 번째 검사가 이루어지기전 공정까지는 $(1 - \prod_{j=1}^k (1 - \beta_j))$ 이고, 그 이후 공정에서는 $(1 - \prod_{j=k+1}^N (1 - \beta_j))$ 이다. 따라서 정책 3에서의 생산비용은 다음과 같다.

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

3.3.3 검사비용

정책 3에서 검사는 k 번째 공정과 가장 마지막 공정에서 이루어지므로 검사비용은 다음과 같다.

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

3.3.4 재고비용

정책 3에서 재고는 각각 k 개의 공정과 $N-k$ 개의 공정을 갖고 정책 2를 사용하는 2개의 생산시스템의 재고비용과 같다. 따라서 정책 3에서의 재고비용은 다음과 같다.

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

3.3.5 총비용

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

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

3.3.6 최적 배치사이즈

제품 1개당 총생산비용 [$TCP(3)$]에 대한 식 (19)가 Q 에 대해 오목함수이므로 정책 3에서도 $dTCP(3)/dQ=0$ 을 통해서 비용을 최소화하는 최적 배치사이즈(Q^*)를 구할 수 있다.

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

(20)번식을 Q 에 대해 정리하면, 최적 배치사이즈(Q^*)는 다음과 같다.

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

4. 실험결과 및 분석

10개의 공정을 가지고 있는 생산시스템에 대해서 모델을 적용하여 분석해 보았다. 각 공정의 특성은 동일하다고 가정하였다. $SC_j = 2$ (\$/배치), $P_j = 60$ (개/시간), $RP_j = 75$ (개/시간), $PC_j = 10$ (\$/시간), $I_j = 180$ (개/시간), $IC_j = 1$ (\$/시간), $HCI_j = 0.4$ (\$/시간), $HC2_j = 0.6$ (\$/시간), $HC3_j = 0.5$ (\$/시간), $\beta_j = 0.1$ (10% 불량률)로 하여, 이 수치들을 각 모델에 대입한 결과는 <표 1>과 같다.

<표 1> 수치예제 결과

정책 1*	$Q^*(1)$	13
	$TCP(1)$	4.9549
정책 2	$Q^*(2)$	16
	$TCP(2)$	6.2371
정책 3	최적 k	5
	$Q^*(3)$	13
	$TCP(3)$	5.2754

<표 1>에서 보는 바와 같이 정책 1, 2, 3에서의 최적 배치사이즈는 각각 13개, 16개, 13개 이다. 또한 정책 3의 경우에는 5번째 공정 이후에 검사과정이 추가될 때 최소비용으로 생산이 가능함을 알 수 있다. 정책별로 비교해 보았을 때 결과적으로 최적의 정책은 정책 1이고, 그때의 제품 1개당 총생산비용은 \$4.9549이다.

4.1 검사비용의 변화

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

<표 2>는 IC 값을 1~175까지 변화시키면서 각 정책의 최적 배치사이즈와 제품 1개당 총생산비용을 구한 결과들이다.

IC 의 변화는 최적 배치사이즈에는 영향을 미치지 못하고, TCP 에 영향을 미친다. 모든 공정의 특성이 동일하다고 가정하였으므로 각 정책별 제품 1개당 총생산비용 [TCP]을 IC 에 대한 식으로 표현이 가능하다.

<표 2> 검사비용 변화에 따른 결과

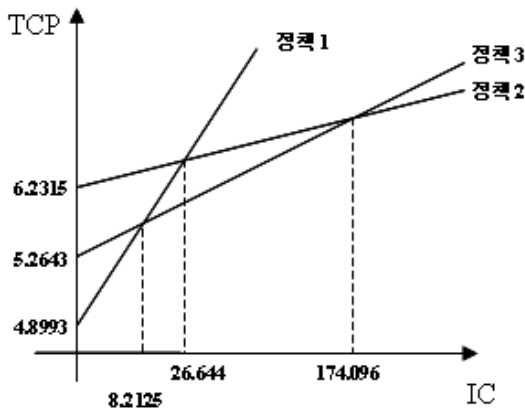
IC	정책 1		정책 2		정책 3		정책
	Q*	TCP	Q*	TCP	Q*	TCP	
1	13	4.9549	16	6.2371	13	5.2754	1-3-2
2	13	5.0104	16	6.2426	13	5.2866	1-3-2
...							
8	13	5.3438	16	6.2760	13	5.3532	1-3-2
9	13	5.3993	16	6.2815	13	5.3643	3-1-2
...							
26	13	6.3438	16	6.3760	13	5.5532	3-1-2
27	13	6.3993	16	6.3815	13	5.5643	3-2-1
...							
174	13	14.566	16	7.1982	13	7.1977	3-2-1
175	13	14.621	16	7.2037	13	7.2088	2-3-1

TCP를 IC에 대한 식으로 정리한 후 수치예제를 대입하면 다음과 같은 식이 도출되고, 이 식들에 대한 그래프는 <그림 6>과 같다.

$$TCP(1) = 0.0556 \times IC + 4.8993$$

$$TCP(2) = 0.0056 \times IC + 6.2315$$

$$TCP(3) = 0.0111 \times IC + 5.2643$$



<그림 6> IC변화에 따른 정책별 TCP

그래프에서 볼 수 있듯이 단위시간당 검사비용이 증가할 때, 정책 1, 정책 3, 정책 2 순으로 비용이 가파르게 증가한다. 따라서 검사비용이 높을수록 정책 2가, 낮을수록 정책 1이 더 적합함을 알 수 있다.

4.2 생산비용의 변화

같은 조건에서 생산비용에 변화를 주었을 때 각 정책에서의 최적배치사이즈와 비용의 변화를 분석해 보았다. 정책 사이의 차이를 보이기 위해서 IC = 20(\$/시간)으로 가정하였다.

<표 3>에서 볼 수 있듯이 PC의 변화는 최적 배치사이즈에는 영향을 미치지 못하고 TCP에만 영향을 미친다. 검사비용의 경우와 마찬가지로 각 정책별 제품 1개당 총생산비용[TCP]을 PC에 대한 식으로 표현이 가능하다.

<표 3> 생산비용 변화에 따른 결과

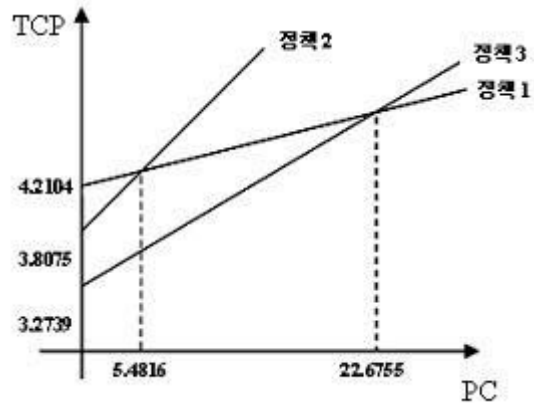
PC	정책 1		정책 2		정책 3		정책
	Q*	TCP	Q*	TCP	Q*	TCP	
24	13	8.5304	16	9.8918	13	8.5843	1-3-2
23	13	8.3504	16	9.6383	13	8.3630	1-3-2
22	13	8.1704	16	9.3847	13	8.1418	3-1-2
...							
6	13	5.2904	16	5.3286	13	4.6015	3-1-2
5	13	5.1104	16	5.0751	13	4.3802	3-2-1
4	13	4.9304	16	4.8216	13	4.1589	3-2-1

TCP를 PC에 대한 식으로 정리한 후 수치예제를 대입하면 다음과 같은 식이 도출되고, 이 식들에 대한 그래프는 <그림 7>과 같다.

$$TCP(1) = 0.18 \times PC + 4.2104$$

$$TCP(2) = 0.2535 \times PC + 3.8075$$

$$TCP(3) = 0.2213 \times PC + 3.2739$$



<그림 7> PC변화에 따른 정책별 TCP

그래프에서 보는 것처럼, 단위시간당 생산비용이 증가할 때, 정책 2, 정책 3, 정책 1 순으로 비용이 가파르게 증가한다. 따라서 생산비용이 높을수록 정책 1이, 낮을수록 정책 2가 적합함을 알 수 있다.

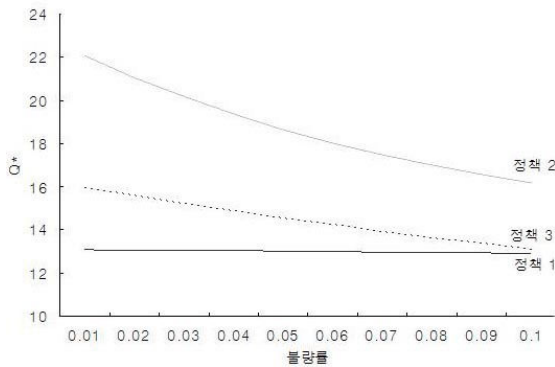
4.3 불량률의 변화

불량률의 변화에 따른 최적배치사이즈와 비용의 변화를 분석해 보았다.

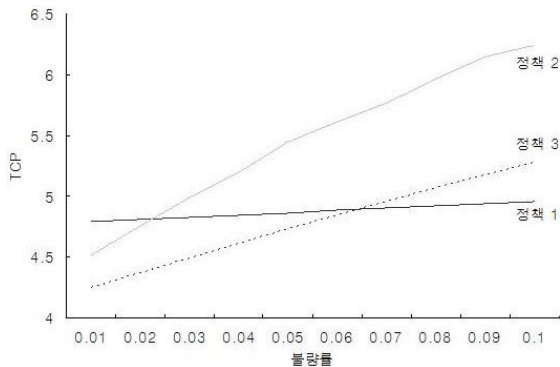
<표 4>에서 볼 수 있듯이 불량률의 변화는 배치사이즈와 TCP에 영향을 미친다. 이러한 불량률 변화에 따른 Q*와 TCP의 변화를 그래프로 나타내면 <그림 8>, <그림 9>와 같다. <그림 8>에서 보는 바와 같이 불량률이 증가할수록 최적의 배치사이즈는 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 <그림 9>를 통해서 불량률이 증가할수록 정책 1이 나머지 정책보다 적합하다는 사실을 알 수 있다.

<표 4> 불량률 변화에 따른 결과

β	정책 1		정책 2		정책 3		정책
	Q^*	TCP	Q^*	TCP	Q^*	TCP	
0.1	13	4.9549	16	6.2371	13	5.2754	1-3-2
0.09	13	4.9371	17	6.1455	13	5.1735	1-3-2
0.08	13	4.9192	17	5.9620	14	5.0672	1-3-2
0.07	13	4.9014	17	5.7660	14	4.9569	1-3-2
0.06	13	4.8837	18	5.6156	14	4.8450	3-1-2
0.05	13	4.8659	19	5.4442	15	4.7310	3-1-2
0.04	13	4.8482	19	5.1973	15	4.6124	3-2-1
0.03	13	4.8304	20	4.9871	15	4.4932	3-2-1
0.02	13	4.8127	21	4.7590	16	4.3727	3-2-1
0.01	13	4.7950	22	4.5169	16	4.2498	3-2-1



<그림 8> 불량률 변화에 따른 정책별 Q^*



<그림 9> 불량률 변화에 따른 정책별 TCP

5. 결론

본 연구에서는 불량품의 발생과 불량품에 대한 재작업 정책을 고려한 다단계 생산시스템 내에서 불량품의 검사방식에 따른 3가지 재작업 정책에 대하여 분석하였다. 이를 위해 셋업, 생산, 검사, 재고비용을 최소화하는 재작업 정책과 최적의 배치사이즈를 결정하는 수리적 모델을 제시하였고, 실험을 통해서 특정 상황에서의 최적 정책과 생산 환경요인들의 변화에 따른 배치사이즈와 최소생산비용의 변화를 재작업 정책별로 비교분석하였다.

제안된 모델은 재작업을 고려한 특정 다단계 생산시스템에서 최소의 비용으로 제품을 생산할 수 있는 재작업 정책과 배치사이즈를 결정해 줄 수 있다. 또한 이 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 3가지 방식의 재작업 정책에 대해서만 제시하였고, 생산시스템 내의 모든 변동성에 대한 고려는 하지 못했다. 따라서 다단계 생산시스템 내에서 제품의 생산비용을 최소화하기 위한 검사 공정 개수와 설치위치에 대한 연구와 생산시스템 내의 변동성을 고려한 연구가 추가된다면, 더욱 현실적인 생산시스템에 대한 분석이 가능할 것이다.

6. 참고문헌

- [1] Ben-daya M., Rahim A., "Optimal lot-sizing, quality improvement and inspection errors for multistage production systems" *Int. J. Prod. Res.*, Vol.41, No.1(2003), pp.65-79.
- [2] Chiu, Y.P. "Determining the optimal lot size for the finite production model with random defective rate, the rework process, and backlogging" *Engineering Optimization*, Vol.35, No.4(2003), pp.427-437.
- [3] Cho, B.R., Govindaluri, M.S., "Optimal screening limits in multi-stage assemblies", *Int. J. Prod. Res.*, Vol.40, No.9(2002), pp.1993-2009.
- [4] Flapper, S.D.P, Teunter, R.H., "Logistic planning of rework with deteriorating work-in-process", *Int. J. Prod. Economics*, Vol.88, No.1(2004), pp.51-59.
- [5] Gopalan, M.N., Kannan, S., "Probability of first passage analysis of a two-stage transfer-line production system with storage and rework" *Microelectron Reliab.*, Vol.36, No.3(1996), pp.403-407.
- [6] Gupta, T., Chakraborty, s., "Looping in a multistage production system" *Int. J. Prod. Res.*, Vol.22, No.2(1984), pp.299-311.
- [7] Hayek, P.A., Salameh, M.K., "Production lot sizing with the reworking of imperfect quality items produced" *Production Planning and Control*, Vol.12, No.6(2001), pp.584-590.
- [8] Inderfurth, K., Lindner, G., & Rachaniotis, N. P., "Lot sizing in a production system with rework and product deterioration" *Int. J. Prod. Res.*, Vol.43, No.7(2005), pp.1355-1374.
- [9] Jamal, A.M.M., Sarker, B.R., & Mondal, S., "Optimal manufacturing batch size with rework process at a single-stage production system.", *Computers & industrial Engineering*, Vol.47, No.1(2004), pp.77-89.
- [10] Lee, H.H., Chandra, M.J., & Deleveau, V.J., "Optimal batch size and investment and inspection errors for multistage production systems" *Int. J. Prod. Res.*, Vol.41, No.1(2003),

pp.65-79.

- [11] Lee, J., Unnikrishnan, S., "Planning quality inspection operations in multistage manufacturing systems with inspection error" *Int. J. Prod. Res.*, Vol.36, No.1(1998), pp.141-155.
- [12] Li, J., "Performance analysis of production systems with rework loops" *IIE Transactions*, Vol.36, No.8(2004), pp.755-765.
- [13] Porteus, E. L., "Optimal lot sizing, process quality improvement and setup cost reduction" *Operation Research*, Vol.34, No.1(1986), pp.137-144.
- [14] Raz, T., Kaspi, M. "Location and sequencing of imperfect inspection operations in serial multi-stage production systems" *Int. J. Prod. Res.*, Vol.29, No.8(1991), pp.1645-1659
- [15] Shiau Y.R., "Inspection resource assignment in a multistage manufacturing system with an inspection error model" *Int. J. Prod. Res.*, Vol.40, No.8(2002), pp.1787-1806.
- [16] Teunter, R., "Lot-sizing for inventory systems with product recovery", *Computers & industrial Engineering*, Vol.46, No.3(2004), pp.431-441.
- [17] Zargar, A.M., "Effect of Rework Strategies of Cycle Time", *Computers & industrial Engineering*, Vol.29, No.1-4(1995), pp.239-243.