

품질검사의 불완전성과 회수물류를 고려한 시스템 다이내믹스 재고 모형 System Dynamics Inventory Model with Imperfect Inspection and Reverse Logistics

유승호, 박명섭

서울시 성북구 안암동5가 고려대학교 경영학과

(shy1228@korea.ac.kr, mspark@korea.ac.kr)

Abstract

Most previous studies considering inventory models for imperfect quality assumed that defective items could be completely detected by inspection and fixed before delivery to customers. This makes it difficult to adopt their research results to practice. This study reduces the assumption of perfect inspection, and presents an inventory model considering reverse logistics caused by imperfect inspection. System dynamics model is used to describe complex and dynamic problem and to show the effect of imperfect inspection on profit by simulation. Then, this article provides a guideline for the inspection policy which provides the maximum profit.

Keyword: inspection; system dynamics; inventory model; reverse logistics; production control

1. 서론

과거 수십 년 동안 다양한 재고 모형에 대한 연구가 학계 및 기업에서 이루어져 왔으나, 대부분의 재고모형들은 생산된 모든 제품의 품질이 완전하다는 가정 하에 연구가 이루어져 왔다. [22] 하지만 많은 기업들의 다양한 품질관리 노력에도 불구하고 실제의 생산 과정에 있어 일정 비율의 불량품이 생산되고 또한 조달되는 현실을 고려할 때, 재고 관리 정책에 중요한 영향을 미칠 수 있는 불량품의 존재와 품질 관리의 효과가 이들 연구들에서는 간과되어 왔다고 할 수 있다.

이를 보완하기 위한 연구들은 Rosenblatt과 Lee[22], Porteus[17]에 의해 시작되었으며, 그 후 다수의 연구들이 다양한 시나리오 하에서 불량 제품이 생산되는 상황에서의 품질관련 비용을 고려한 최적 생산량(EPQ) 결정 모형을 제시하였고, 이들 연구들은 총 비용의 최소화를 위한 품질 활동 수준과 생산 로트(lot) 크기의 결정을 주로 다루고 있다. 하지만 일련의 이러한 연구들은 불량으로 인해 야기되는 회수물류(reverse logistics) 및 고객의 품질에의 불만이 재고 및 생산 관리 정책 결정에 미치는 영향을 고려하지 않고 있는데, 이는 대부분의 연구들

이 품질검사(inspection)의 완벽성을 가정하는데에 기인한다. 즉, 생산 과정 상에 불량품이 발생할 수 있으나 품질검사를 통해 모든 불량품을 완벽하게 분리할 수 있다고 가정하고 있는 것이다. 하지만 실제에 있어 식스 시그마(6σ)를 포함한 많은 기업의 끊임 없는 품질 개선 활동에도 불구하고, 업종, 기업, 제품 별로 그 정도의 차이는 존재하겠으나, 고객으로의 불량 제품 유통과 이의 반품을 포함한 회수물류의 발생은 흔히 발생하고 있는 현실이다.

본 연구는 기존의 연구들에서 전제해 놓은 불완전 품질 제품에 대한 완벽한 품질검사의 가정을 완화하여 불완전한 품질검사로 인한 고객으로의 불량품 전달, 고객으로부터의 회수물류의 발생, 고객의 품질 불만으로 인한 판매 기회의 상실 등을 고려한 보다 현실에 가까운 모형을 제시하고, 이의 기업 수익에의 영향을 분석하고자 한다. 정태적 재고 모형으로는 품질검사의 불확실성으로 인해 발생하는 교환 주문의 발생 등 복잡한 동태적 피드백(feedback) 관계를 반영하기에는 무리가 있어, 시간의 흐름에 따른 시스템의 동적 특성을 밝혀내는 데에 적합한 시스템 다이내믹스(system dynamics)를 이용하여 재고 모형을 구축하도록 한다.

본 연구의 목적은 제품의 품질검사의 영향을 구조적으로 분석하고, 이를 바탕으로 시스템 다이내믹스 모형(system dynamics model)을 구축, 이의 시뮬레이션(simulation)을 통해 아래 효과를 거두는 데에 있다.

■ 일반적으로 적용 가능한 시뮬레이션 재고 모형의 제시

품질검사 작업과 불량품 유통으로 인한 판매 기회 상실, 반품 및 폐기를 포함한 회수물류의 발생 등을 고려한 현실적인 시뮬레이션 재고 모형을 제시한다.

■ 적정 품질검사 신뢰도 산정 방법 제시

품질검사 신뢰도와 품질검사 투입 비용의 변화에 따른 매출 및 비용, 수익 구조와의 민감도 분석(sensitivity analysis)을 통해 적정 품질검사

신뢰도 수준을 산출하기 위한 가이드라인(guideline)을 제시한다.

■ 품질검사 비용 투입의 기업 수익 영향 분석
많은 기업들이 품질검사의 중요성에 대해 인지하고 있으나, 진행되고 있는 품질검사 작업과 이의 기업 수익에 대한 영향에 대한 연구는 미진한 상황이므로, 본 연구를 통해 제시하는 시스템 상의 재고의 흐름과 수익 요소들의 상관관계에 대한 분석을 통해 이의 기업 수익에의 영향을 분석하고 이해할 수 있는 틀을 제시한다.

2. 기존 연구의 고찰 및 본 연구의 의의

불완전 품질 제품의 재고 모형에 대한 연구는 불량 원인의 정의에 따라 크게 두 가지의 흐름으로 나누어 볼 수 있는데, 하나는 생산 시스템 또는 프로세스의 시간의 흐름에 따른 기하급수적인(geometric) 품질 능력 저하(deterioration)를 불량 제품 발생의 원인으로 지목한 연구들이며, 그와 다른 흐름은 시간의 흐름과는 무관한 생산 프로세스 자체의 불완전성을 그 원인으로 고려한 연구들이다.

첫 번째 연구들은 초기 완전한 제품만 생산하는 생산 시스템이 품질 능력 저하로 시간 흐름에 따라 기하급수적으로 불량 제품의 생산이 증가함을 가정하고 있기 때문에 대부분이 규칙적인 간격의 품질검사를 품질 관리 방법의 기본으로 하고 있으며, 생산 로트 크기의 결정 외에 최소 총 비용을 달성케 하는 품질검사 시기의 결정을 그 연구의 주요 목적으로 하고 있다. 이에 해당하는 연구들에는 Rosenblatt과 Lee[22], Porteus[17], Lee와 Rosenblatt[11,12], Lee와 Park[13], Liou 외[16], Rahim[18], Vickson[28], Kim 외[9], Rahim과 Ben-Daya[19], Guu와 Zhang[7], Yeh와 Chen[29]의 연구 등이 있다. 두 번째, 생산 프로세스 자체의 불완전으로 일정 비율의 불량 제품이 생산됨을 가정한 연구들에는 Schwaller[24], Cheng[2,3,4], Zhang과 Gerchak[30], Anily[1], Lee 외[14], Salameh와 Jaber[23], Tripathy 외[27], Leung[15]의 연구 등이 있으며, 대부분이 생산 로트 전체에 대한 전수검사를 품질검사의 기본으로 하고 있다. 이들 중 Cheng[2,3,4], Lee 외[14], Tripathy 외[27], Leung[15]은 프로세스의 신뢰성(process reliability), 즉, 불량 제품을 생산하지 않는 생산 시스템의 능력이 프로세스에의 투입 비용과 관계가 있음을 보이며, 생산 로트 크기의 결정 외에 최소 총 비용을 달성케 하는 프로세스 신뢰성의 수준의 결정이 이들 연구의 주요 목적

이라 할 수 있다.

제시한 두 가지 흐름의 연구들은 모두 불량률이 생산에서 발생할 경우의 품질 활동 수준의 결정을 주요 연구 목적으로 다루며, 과거 품질의 완전성을 가정한 연구들을 많은 부분 보완하고 있다. 하지만 대부분이 품질검사의 완벽성을 가정하며 고객으로의 불량 제품 전달, 이로 인한 회수물류 및 고객의 품질 불만을 재고 및 생산 관리 정책 결정에 고려하지 않고 있는 점은 현실 적용에 또 다른 한계점을 시사하고 있다. 이들 연구들을 Juran과 Gryna[8]가 제시한 품질비용의 개념에서 고려해 본다면 예방, 평가, 내적 실패에 관련된 비용은 고려하고 있으나, 제품이 유통된 후에 발생하는 외적 실패 비용은 간과하고 있다고도 할 수 있다. 불량 제품의 소비자에의 전달은 관련 처리 비용을 급격하게 증가시키며, 영향 평가가 어렵기는 하나 고객 불만으로 인해 시장점유율과 이익에도 악영향을 미칠 것이라는 점은 명확하며 [10], 품질 문제로 인한 손실의 대부분은 고객에의 전달 이후에 발생한다는 점을 고려할 때 [26] 이들 연구에서 제시하고 있는 품질 활동 수준의 결정 방법에 일부 보완의 필요성이 제기되는 것이다. 또한 대부분의 연구들이 수익 극대화(profit maximization) 보다는 비용 최소화(cost minimization)를 그 목적으로 하여 진행된 바, 불량품의 존재 및 품질 활동이 비용 만이 아니라 매출, 그리고 결과적으로 기업 수익에 영향을 미칠 것임을 고려할 때 수익 극대화를 목적으로 문제에 접근하는 것이 더 타당할 것이다.

불량 제품의 생산에 관련된 기존 연구들은 주로 불량률의 발생과 품질 활동 등 생산 과정 내부에서의 불량 발생과 이의 처리가 주된 관심사항이었다고 할 수 있다. 반면에 비교적 최근인 1990년대부터 본격적으로 이루어진 회수물류에 대한 기존 연구들은 불량 제품의 발생 등 회수물류를 일으키는 근본적인 원인과 이의 회수물류에의 영향에 대한 고찰보다는 재활용을 중심으로 한 최적 네트워크 구축 또는 회수 비용 최소화를 위한 최적 재고 모형 등 이미 발생한 회수물류 자체의 효율성을 높이기 위한 연구가 주를 이루고 있다.

본 연구에서는 일정 비율의 불량품이 생산되는 환경에서 품질검사의 불완전성으로 인해 불량 제품이 유통되는 상황을 고려하여 이로 인한 매출에의 영향과 회수물류의 발생에 의한 추가적 비용 요소의 발생 등 기업 수익에의 영향에 대한 분석을 시도한다.

3. 시스템 다이내믹스 재고 모형의 구축

(1) 모형 환경의 설정

본 연구의 모형 수립에 적용될 기본적인 환경을 설정하도록 한다. 우선, 분석의 단순화를 위해 단일 제품의 생산과 판매를 함께 수행하는 일반적인 제조 기업을 가정하여 시스템 다이내믹스 기반 재고 모형을 제시하도록 한다.

고객의 수요는 정규분포를 따름을 가정하며, 수요는 모두 주문으로 축적(backlog)된 후 생산에 의해 충족된다. 생산 주기가 일정하고, 로트 크기가 가변적인 정기 검토(periodic review) 생산 모형을 따르며, 생산 능력에 한계를 두지 않아 요구되는 로트 크기 만큼의 즉각적인 생산이 가능하다고 가정한다. 생산된 로트 내에는 불량 제품이 '생산불량 비율'만큼 존재하고, 이는 품질검사로 검출된다. 품질검사는 전수 검사를 기본으로 하며, 품질검사 속도에는 제한을 두지 않아 품질검사는 즉각적으로 수행됨을 가정한다. 또한 품질검사 작업은 완전하지 않아 존재하는 불량품 중 '품질검사 신뢰도'의 비율에 해당하는 불량품만이 품질검사로 발견된다. 즉, 품질검사를 거친 제품만이 '가용재고' (serviceable stock)로 분류되어 고객의 주문 충족에 사용되는데, '가용재고'에는 품질검사의 불완전성으로 인해 품질에 문제가 없는 양품과 검출되지 않은 불량품이 혼재되어 있는 것이다. 제조 공정에서의 불량품의 발생 확률 및 품질검사의 신뢰도 모두 고객에 전달되는 불량품의 양에 함께 영향을 미치는 요소이나, 본 연구는 제조 공정에서의 불량품의 발생 확률은 고정된 상황을 가정하고, 불완전한 품질검사로 발생하는 기업 수익에의 영향 분석에 그 초점을 둔다. '품질검사 신뢰도'와 '품질검사 비용' 간의 관계는 Juran과 Gryna[8]가 제시한 품질과 제품 단위당 예방 및 평가 비용의 지수 함수적인 관계를 따르도록 하며, 품질의 수준과 품질 관리에의 투입 비용 간의 관계에 대한 연구에서 흔히 채택된 바 있는 $a(1-x)^b$ 형태의 지수 함수를 채택한다. [2,3,4,14,15,27] 여기서 x 은 프로세스의 신뢰성(reliability), $a(1-x)^b$ 는 x 를 달성하기 위해 투입되어야 하는 품질 비용을 의미하며, 상수 a 와 b 는 산업, 기업 및 제품의 특징에 맞게 선정되어야 한다. 따라서 이러한 지수 함수 형태의 설정에서는 어떠한 비용으로도 품질의 수준은 완벽한 수준에 도달할 수가 없다. 현재 무결점(zero defect) 및 식스 시그마 품질 활동의 근간 개념이 되고 있는 Crosby[6]의 경우 이와는 반대로 일정 수준의 비용 지출로 완벽한 품질 수준에의 도달이 가능하다고 보고 있으나, 현실에서의 불량품의 빈번한 발

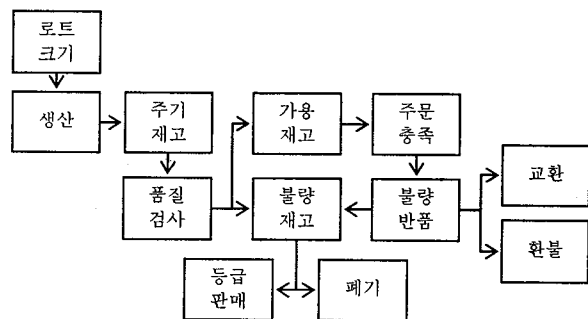
생을 고려할 때 Juran과 Gryna[8]의 전통적인 개념도 아직 충분한 설득력을 가진다고 할 수 있을 것이다.

고객에게 전달되는 '가용재고'에는 불량품이 존재하므로 불량 제품을 구입한 고객의 불만은 해당 제품의 반품으로 연결된다. 반품에 관련된 제반 비용은 기업에서 부담하고, 반품의 발생은 고객의 교환(exchange) 또는 환불(refund) 선택에 따라 이 후의 기업의 회계 처리 및 생산 계획에 영향을 미친다. 교환과 환불의 선택은 '환불 비율'에 의해 결정된다. 고객의 교환 요청은 매출의 증가 없이 생산 로트 크기를 늘려 관련 비용만 증가시킨다. 환불 결정은 당장의 매출 손실을 의미하며, 또한 미래 고객의 자사 제품 선택에도 악영향을 미쳐 미래의 판매 기회를 일정 부분 감소시킬 수 있다. 현재와 미래의 손실에 대한 부분은 포함하여 판매손실 비용(lost sales cost)으로 일반적으로 정의된다. [5]

품질검사로부터 발견되었거나, 반품된 불량 제품은 판정을 거쳐 일부는 폐기되며, 불량이 미미한 제품은 주기가 정해진 등급 제품(salvage item) 처리 시점까지 보관 후 양품 판매 가격보다 낮은 가격으로 판매된다. 불량 제품의 처리 방법은 크게 재작업을 통한 양품으로의 재전환, 등급 판매, 폐기, 서비스 부품으로의 활용 등으로 나누어 볼 수 있겠으나, 재작업 및 서비스 부품으로의 활용 등은 가전 산업 등 일부 산업 환경에서만 가능한 사안이므로 본 연구에서는 모형의 일반화를 위해 폐기 및 등급 판매만 고려하도록 한다.

본 연구에서 사용되는 비율들인 '생산불량 비율', '품질검사 신뢰도', '환불 비율', '폐기 비율'은 연구의 단순화를 위해 정규분포를 가정하기로 한다.

설명한 모형 환경을 종합해보면 [그림 1]과 같이 전반적인 재고 흐름을 나타낼 수 있다.

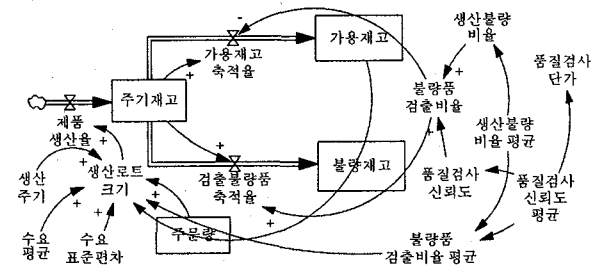


[그림 1] 모형의 재고 흐름

(2) 기본 모형의 구축

기술한 모형의 환경을 기초로 하여 재고

모형을 수립하도록 하며, 본 연구에서는 시스템 다이내믹스를 다루는 툴(tool)로 잘 알려진 Vensim(<http://www.vensim.com/>)을 이용하여 모형화(modeling)를 진행한다. 본 연구의 재고 모형은 네 개의 모듈로 구성된다. - 모듈 1: 제품의 생산과 품질검사; 모듈 2: 주문의 충족(order fulfillment); 모듈 3: 불량품의 반품과 교환 및 환불 처리, 모듈 4: 폐기 및 등급제품 판매 처리를 포함한 불량재고의 처리.



[그림 2] 제품의 생산과 품질검사

[그림 2]는 모듈 1의 전개 과정을 보여준다. 정기 발주 상황을 가정하므로 생산로트 크기의 산정은 매 생산주기마다 1회 수행된다. 일반적인 정기 발주 상황에서 생산로트 크기의 산정은 아래와 같이 결정된다. [5]

$$Q = D_{L+T} + SS - OH$$

- Q 생산로트 크기
- D_{L+T} 생산주기와 리드타임 중의 수요
- SS 안전재고(= $z\sigma_D$)
- OH 현재고(inventory on-hand)

본 연구에서는 생산은 즉각적임을 가정하므로 생산 리드타임 동안의 수요는 고려하지 않는다. 대신 추가적으로 현 시점의 '주문량'(order backlog)을 고려하고, 품질검사로 생산된 로트 중 검출된 불량품을 제외한 '가용재고'만이 고객의 주문을 충족시킬 수 있으므로 생산로트의 크기는 수식 (1)과 같이 결정된다.

$$Q = (B + D_L + SS - OH) / S \quad (1)$$

- B 현 시점의 주문량(order backlog)
- D_L 생산주기 중의 수요
- OH 현 시점의 가용재고량
- S 품질검사로 검출되는 가용재고 평균 비율

S 는 수식 (2)와 같이 표현된다.

$$S = (1 - pq) \quad (2)$$

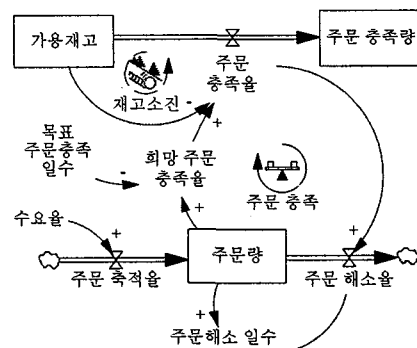
- pq 불량품 검출비율 평균
- p 생산불량 비율 평균
- q 품질검사 신뢰도 평균

현 시점의 '주문량'(B)는 고객의 수요와 교환 주문에 의해 결정되고, '주문량'의 증가는 생산로트 크기의 선형적 증가를 의미한다. 검출되는 가용재고 비율(S)은 '생산불량 비율' 또는 '품질검사 신뢰도'가 증가할수록 줄어들어 생산로트 크기를 지속적으로 증가시킨다. 단, 본 연구에서는 생산주기 동안 발생할 교환의 양은 기업이 미리 인지할 수 없어 생산로트 크기의 결정에 고려되지 않는 상황을 가정한다.

결정된 로트 크기만큼 생산은 이루어져 '주기재고'를 이루며, '주기재고'는 '생산불량 비율'의 불량품을 포함한다. '주기재고'는 품질검사를 거쳐 '가용재고'와 '불량재고'로 나뉘어지게 되는데, 품질검사는 완전하지 않아 불량품 중 '품질검사 신뢰도' 비율의 불량품만을 검출 가능하다. 즉, '주기재고' 중 '생산불량 비율'과 '품질검사 신뢰도'의 곱인 '불량품 검출비율'의 재고는 불량으로 검출되고, 생산된 '주기재고' 중 검출되지 않은 불량품은 양품과 더불어 '가용재고'로 분류된다. '품질검사 신뢰도 평균'의 수준에 따라 '품질검사 단가'는 결정되고, 이들의 관계는 앞 절에서 언급한 지수함수를 가정하여 아래 수식 (3)과 같이 표현된다.

$$i = a(1 - q)^b \quad (3)$$

- i 품질검사 단가
- q 품질검사 신뢰도 평균
- a, b 상수, 지수



[그림 3] 주문의 충족

[그림 3]은 모듈 2를 보여주는데, 이는 Sterman[25]이 제시한 주문 축적을 포함한 주문의 충족 모형(order fulfillment model with order backlog)을 따라 모형화하였다. 주문은 주어진 '수요율'에 의해 축적되고, '주문 충족율'에 의

해 해소되어 나간다. '주문 충족율'은 아래 수식과 같이 표현된다.

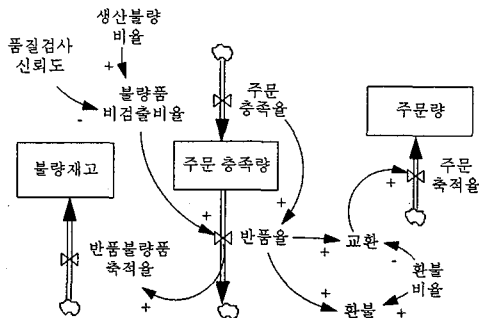
$$O = \min(OH, DO)$$

O 주문 충족율
DO 희망 주문 충족율
(desired order fulfillment rate)

$$DO = B/TD$$

TD 목표 주문충족 일수(target delay)

주문이 해소되면서 충족되는 주문의 양은 늘게 되고, '가용재고'는 점차 소진되게 된다. 여기서 한가지 고려해야 할 부분은 주문의 충족을 위해 사용된 '가용재고'에는 불완전한 품질검사로 인하여 불량품이 일부 섞여 있을 수 있어 충족된 주문이 다시 반품될 수 있다는 것이다. [그림 4]는 고객의 반품으로 일어나는 세번째 모듈인 '불량품의 반품과 교환 및 환불 처리'를 보여주고 있다.

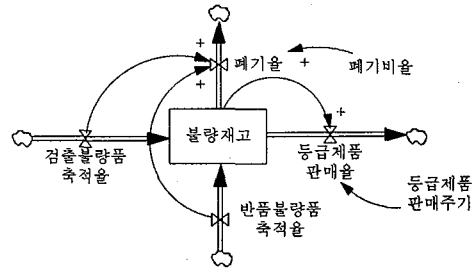


[그림 4] 불량품의 반품과 교환 및 환불 처리

충족된 주문 중에서 '불량품 비검출비율' (= 생산불량 비율 · (1-품질검사 신뢰도))에 해당하는 주문은 불량품에 의해 충족된 주문으로 이는 고객의 반품을 유발한다. 반품된 불량품들은 [그림 2]에서 설명한 검출된 불량품들과 함께 '불량재고'로 축적되게 된다. 불량품을 반품한 고객은 '교환' 또는 '환불'을 선택하게 되는데, '환불'을 선택하는 고객의 비율을 '환불 비율'로 표현하였다. '환불'은 일정 부분의 미래 판매 기회의 상실을 유발하므로 '판매상실 비용'을 추가적으로 발생시킨다. 고객이 '교환'을 선택할 경우, 이는 [그림 3]에서 설명한 고객의 수요와 함께 '주문량'을 증가시킨다.

[그림 2]과 [그림 4]에서 설명한 바와 같이 '불량재고'는 품질검사 또는 반품으로 인해 증가하게 되는데, 축적된 불량재고는 [그림 5]의 모듈 4 '불량재고의 처리'에서 보여지듯이 폐기 또는 등급제품 판매로 소진된다. 폐기는 '폐기

비율'의 양만큼 즉각적으로 일어나며, 등급제품의 판매는 불량재고 잔량을 대상으로 정해진 '등급제품 판매주기'마다 발생한다.



[그림 5] 불량재고의 처리

모듈 1에서 4까지를 결합하면, 부록 B와 같이 전체를 모형화할 수 있다.

[표 1]은 기업의 수익 계산에 고려되어야 하는 매출 및 비용 관련 요소들을 나타낸다.

매출 요소	비용 요소
판매 매출	셋업(setup) 비용
등급제품 판매 매출	생산 비용
환불 매출적자	품질검사 비용
	재고유지 비용
	주문축적 비용
	반품 비용
	폐기 비용
	판매손실 비용

[표 1] 매출 및 비용 관련 요소

매출 및 비용 관련 요소들까지를 포함하여 본 연구의 기본 모형은 완성되며, 완성된 모형을 통해 4장, 5장의 시뮬레이션을 실시한다. 모델에 사용되는 각 변수들의 자세한 수식은 부록 A에 수록되었다.

4. 완전한 품질검사와 불완전한 품질검사에 따른 차이 비교

본 장에서는 품질검사가 완전할 경우와 불완전할 경우의 로트 크기, 주문의 충족 및 수익 차이에 대한 분석을 실시한다. 불량품 존재시의 재고모형에 관한 과거의 많은 연구들이 완전한 품질검사를 가정하고 있으나, 품질검사의 불완전성으로 인하여 빈번하게 불량품이 유통되고 외적 실패 비용이 발생하는 현실을 고려할 때, 완전한 품질검사에 대한 가정의 완화가 기업에 어떠한 영향을 주는지 분석해보는 것은 의미가 있다.

시뮬레이션 실행을 위해 외생변수(exogenous variable)들의 값은 아래와 같이 설정한다. 정규분포를 가정한 외생변수들은 주어

진 평균과 분산을 따르는 난수가 생성되어 적용되도록 하였다.

수요율	$N(50,000, 5,000^2)$ unit/year
생산주기	7 day
목표 주문충족 일수	1 day
등급제품 판매주기	15 day
생산불량 비율	$N(0.1, 0.02^2)$
환불 비율	$N(0.5, 0.02^2)$
폐기비율	$N(0.6, 0.02^2)$
셋업 단가	\$100
생산 단가	\$25/unit
재고유지 비용 분율	0.2/year
주문축적 비용 분율	0.3/year
판매 단가	\$60/unit
반품 단가	\$5/unit
등급제품 판매 단가	\$30/unit
판매손실 단가	\$10/unit
폐기 단가	\$3/unit

미국 RLEC (Reverse Logistics Executive Council)의 65개 소비자 가전 업체와 45 의류 제조 업체를 대상으로 한 반품에 대한 조사[20,21]에 의하면, 평균 반품 비율은 각각 8.46%와 19.44%로 조사되었고, 반품 원인으로는 고객 변심 및 제품 불량, 오제품 배달, 배송 중 불량 등이 있었으나, 제품 자체의 불량으로 인한 반품 비율이 각각 35.71%와 49.45%로 가장 높은 비율을 차지했다. 품질 검사에 의해 일정량의 불량품이 유통 전에 검출되었을 것임을 고려할 때, 생산불량 비율 0.1(10%)의 설정은 오히려 보수적일 수도 있는 수치일 것이다. 품질검사 신뢰도와 품질검사 단가의 설정에 있어 완전한 품질검사의 경우 품질검사 단가는 \$1, 품질검사 신뢰도는 완벽함을 가정하므로 1.0(100%)으로 분산 없이 고정되도록 설정하고, 불완전한 품질검사에 대해서는 품질검사 비용은 동일하되, 품질검사 신뢰도는 평균(q) 0.8(80%), 분산 0.02^2 를 갖는 정규분포로 설정한다. 앞 장에서 완성한 모형과 주어진 변수들의 설정을 통해 1년(365일)의 기간에 대한 시뮬레이션을 일 단위로 실시하였다.

먼저 평균 생산로트 크기를 살펴보면, 주기(7일) 당 완전 품질검사는 평균 1,072개, 불완전 품질검사는 평균 1,060개의 결과를 보이고 있다. 생산로트의 크기는 수식 (1)과 같이 표현되며, 주문량(B)을 늘리는 교환과 품질검사로 분류되는 가용재고의 비율(S)에 영향을 받게 된다. 충족되는 주문 중의 교환의 양은 아래 수식 (4)와 같이 여러 비율들의 곱에 비례하며 생산로트 크기의 결정에 선형적으로 작용하므로

현 시뮬레이션 설정에서 불완전 품질검사에서만 발생하는 교환은 생산로트 크기의 결정에 미미한 효과를 가진다.

$$E \propto p(1 - q)(1 - r) \quad (4)$$

E 교환
 r 환불 비율

반면 가용재고 비율(S)은 수식(2)와 같이 표현되며, 생산로트 크기와 지수적인 관계가 있으므로 모든 불량품을 검출 가능한 완전 품질검사에서도 가용재고의 확보를 위해 더 큰 생산로트 크기가 필요하게 된다.

모형에 사용된 주요 비율들의 생산로트 크기에의 영향을 고려할 때 완전 품질검사의 경우는 불량품의 외부 유통이 발생하지 않으므로, 생산불량 비율의 증가가 생산로트 크기를 증가시키는 유일한 요인이다. 반면, 불완전 품질검사의 경우는 여러 요인의 복합적인 영향을 받게 된다.

p, q, r 변동값	완전	불완전 품질검사		
	$q=1.0$	$q<1.0$		
	p 변동 $q=1.0$ $r=0.5$	p 변동 $q=0.8$ $r=0.5$	q 변동 $p=0.1$ $r=0.5$	r 변동 $p=0.1$ $q=0.8$
0	968	968	1,018	1,071
0.1	1,072	1,060	1,022	1,069
0.2	1,206	1,173	1,027	1,067
0.3	1,378	1,310	1,032	1,065
0.4	1,607	1,479	1,038	1,062
0.5	1,926	1,693	1,043	1,060
0.6	2,405	1,975	1,049	1,058
0.7	3,200	2,359	1,054	1,056
0.8	4,778	2,916	1,060	1,054
0.9	9,416	3,792	1,066	1,052

[표 2] 주요 비율 평균들의 단일 변동에 따른 평균 생산로트 크기의 변화 [단위: 개] (생산불량 비율: p , 품질검사 신뢰도: q , 환불 비율: r)

[표 2]는 다른 비율 및 외생변수가 고정된 상태에서 본 모형의 주요 비율들인 생산불량 비율(p), 품질검사 신뢰도(q), 및 환불 비율(r) 각각의 평균 증가에 대한 생산로트 크기의 민감도 분석 결과이다. 각 비율들의 평균값이 0일 경우에는 분산을 0으로 설정하였다. q 의 증가에 따라 생산로트 크기는 증가하고, r 의 증가에서는 그 크기가 감소하나 p 의 변동에 따른 변화에 비해 상대적으로 그 증감이 크지 않음을 알 수 있다. 이는 앞서 수식 (1)과 (2)에서 설명한 바와 같이 완전 및 불완전 품질검사 모두에서 p 의 증가에 대해 생산로트 크기의 지수적인 증

가가 있기 때문이다. q 의 증가 역시 생산로트 크기에 지수적으로 영향을 미치나 p 가 상대적으로 낮은 비율(0.1)로 설정되어 있는 상태이기 때문에 생산로트 크기에 미미한 영향만을 미친다. p 가 극도로 높은 상황에서는 q 의 영향이 클 수 있겠으나, 이러한 상황 설정은 현실과의 괴리가 있으므로 q 의 큰 영향은 현실에서 예상하기 힘들 것이다. r 의 변동은 교환의 양을 변동시켜 주문량에 영향을 미치나 교환은 수식(4)에서 알 수 있듯이 영향의 크기 자체가 미미하며, 수식(1)에서 보듯이 생산로트 크기의 결정에 선형적으로 영향을 미쳐 p 의 변동에 비해 상대적으로 그 영향이 크지 않다.

	완전 $q=1.0$	불완전 $q=0.8$
년간 수요	50,596	50,596
년간 교환요청	0	503
전체 주문(=수요+교환)	50,596	51,099
주문 충족(교환 제외)	50,447	49,944
주문 충족률(=수요/충족)	99.71%	98.71%

[표 3] 1년간 주문 및 충족 정보
(품질검사 신뢰도: q)

[표 3]은 1년간의 고객의 주문과 이의 충족에 관련된 시뮬레이션 결과를 보여준다. 시뮬레이션 실행 결과, 1년간 총수요는 두 상황 모두 50,596개로 동일하였으나, 불완전 품질검사에서는 총 503개의 교환 요청이 발생하여 기업이 처리해야 할 전체 주문은 높게 나타난다. 교환을 제외한 고객 수요 50,596개에 대한 주문 충족률은 완전한 품질검사와 불완전한 품질검사에서도 각각 99.71%와 98.71%로 나타나 불완전 품질검사 상황에서 주문 충족률이 약 1% 가량 낮은 결과를 보였다. 이는 불완전 품질검사에서는 환불로 인한 판매 상실로 충족되지 못한 주문이 존재하기 때문이다. 완전한 품질검사에서도 주문 충족이 100%가 되지 못한 이유는 주문적체를 허용하는 모형의 특성 상 일부 주문이 적체된 채로 남아 있기 때문이다.

[표 4]는 판매 및 비용을 포함한 수익 요소들의 1년간 시뮬레이션 결과를 보여준다. 두 상황이 동일한 수요량을 가지나 판매 매출에서 차이가 나타나는 것은 시뮬레이션 말일의 적체되어 있는 주문의 양이 다르게 남아있기 때문이다. 불완전 품질검사에서만 발생하는 매출 및 비용 요소로는 환불 매출적자, 반품 비용, 판매손실 비용이 있으며, 이 중 환불로 인한 매출 적자는 모든 매출 및 비용 요소 중 수익 차이의 가장 큰 요인이 되고 있다.

	완전 $q=1.0$	불완전 $q=0.8$
총수익	1,598,573	1,575,501
총매출	3,091,641	3,059,808
판매 매출	3,026,833	3,026,765
등급제품 판매 매출	64,808	63,327
환불 매출적자	0	30,284
총비용	1,493,068	1,484,306
셋업 비용	5,300	5,300
생산 비용	1,421,021	1,404,966
품질검사 비용	55,762	55,134
재고유지 비용	3,248	3,213
주문적체 비용	1,175	1,201
반품 비용	0	3,023
폐기 비용	6,562	6,421
판매손실 비용	0	5,047

[표 4] 1년간의 매출, 비용 및 수익 [단위: \$]
(품질검사 신뢰도: q)

앞서 수식(1)과 (2)에서 설명한 바와 같이 완전한 품질검사에서도 더 많은 생산이 이루어지므로 생산, 품질검사, 재고유지 비용은 완전한 품질검사에서도 더 높은 결과를 보이고, 생산량의 증가는 수적으로 더 많은 불량품의 생산을 의미하므로 등급제품 판매 매출과 폐기 비용 역시 완전한 품질검사에서도 더 높은 결과를 보인다. 그 외 주문적체 비용은 교환 요청 피드백으로 인한 추가적 주문 축적으로 불완전 품질검사에서도 더 높게 나타나게 되고, 두 상황에서 같은 셋업 회수를 가지므로 셋업 비용도 같게 나타난다. 전체적으로 수익 차이에 큰 영향을 미치는 요소들은 판매 매출, 환불 매출적자, 생산 비용이며, 불완전 품질검사에서는 생산 비용 차이로 인해 더 적은 총비용을 보이나, 환불 매출적자로 인한 총매출 저하로 완전 품질검사에 비해 더 낮은 총수익을 얻게 된다.

기업의 수익 요소들은 주요 비율들의 변화에 따라 달라질 수 있다. [표 5]는 다른 비율들이 고정된 상태에서 생산불량 비율(p), 품질검사 신뢰도(q), 환불 비율(r)의 각각의 평균 변동에 대한 수익 요소들의 변화를 나타내고 있다. p 의 증가에 따른 불량품 생산 증가로 반품이 증가해 반품 비용과 환불 매출적자, 판매손실 비용은 증가한다. 수식(1), (2)에서 보인 바와 같이 p 의 증가에 따라 생산로트 크기가 기하급수적으로 증가하므로 생산 비용, 품질검사 비용, 재고유지 비용은 증가하고, 불량품의 생산 증가로 등급제품 판매 매출과 폐기 비용은 증가하게 된다. q 가 증가하면 고객에의 불량품의 유통 및 반품, 교환, 환불 요청이 감소하여 환불 매출적자와 반품, 주문적체, 판매손실 비용은

감소하게 된다. 생산로트 크기가 증가하므로 생산 비용, 재고유지 비용은 증가하고, q 의 증가에 따라 생산로트 크기 뿐 아니라 품질검사 비용($=a(1-q)^b$) 또한 기하급수적으로 증가하므로 전반적으로 품질검사 비용은 증가하게 된다. 생산로트 크기 증가에 따른 불량품 생산 증가로 폐기 비용과 등급제품 판매 매출은 증가한다.

	$p \uparrow$	$q \uparrow$	$r \uparrow$
판매 매출	일정	일정	일정
등급제품 판매 매출	↑	↑	↓
환불 매출적자	↑	↓	↑
셋업 비용	일정	일정	일정
생산 비용	↑	↑	↓
품질검사 비용	↑	↑	↓
재고유지 비용	↑	↑	↓
주문적체 비용	↑	↓	↓
반품 비용	↑	↓	↓
폐기 비용	↑	↑	↓
판매손실 비용	↑	↓	↑

[표 5] 주요 비율 평균들의 단일 변동에 따른 수익 요소들의 변화 (생산불량 비율: p , 품질검사 신뢰도: q , 환불 비율: r)

r 의 증가는 환불의 증가를 의미하므로 환불 매출적자와 판매손실 비용을 증가시킨다. 교환의 감소로 주문적체 비용은 감소하고, 생산로트 크기를 감소시켜 생산, 품질검사, 재고유지 비용은 감소한다. 생산로트 크기의 감소로 불량품 생산이 감소하므로 반품, 폐기 비용 및 등급제품 판매 매출 또한 감소한다.

p, q, r 변동 값	완전 $q=1.0$	불완전 품질검사 $q<1.0$		
	p 변동 $q=1.0$ $r=0.5$	p 변동 $q=0.8$ $r=0.5$	q 변동 $p=0.1$ $r=0.5$	r 변동 $p=0.1$ $q=0.8$
0	1,684,827	1,684,827	1,509,950	1,596,323
0.1	1,598,574	1,575,505	1,523,769	1,592,127
0.2	1,488,305	1,448,443	1,536,775	1,587,974
0.3	1,346,643	1,300,777	1,549,022	1,583,840
0.4	1,157,948	1,125,606	1,560,288	1,579,721
0.5	894,151	912,125	1,570,171	1,575,505
0.6	499,284	642,987	1,577,881	1,571,306
0.7	-156,564	288,106	1,581,556	1,567,123
0.8	-1,459,349	-209,368	1,575,505	1,562,954
0.9	-5,287,818	-971,382	1,531,789	1,558,801

[표 6] 주요 비율 평균들의 단일 변동에 따른 1년간 수익의 변화 [단위: \$] (생산불량 비율: p , 품질검사 신뢰도: q , 환불 비율: r)

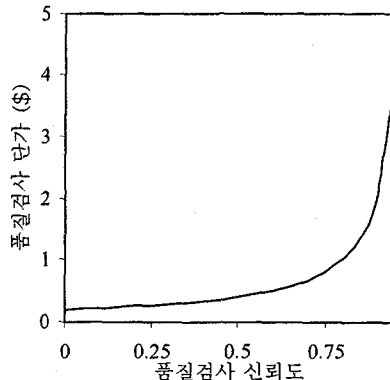
[표 6]은 다른 비율들이 고정된 상태에서

생산불량 비율(p), 품질검사 신뢰도(q), 환불 비율(r)의 각각의 평균 변동에 따른 1년간의 총수익의 변화를 보여주고 있다. 각 비율들의 평균 값이 0일 경우에는 분산을 0으로 설정하였다. q 의 변동에 따른 수익 변화는 품질검사 단가 함수로 $(0.2 \cdot (1-q)^{-1})$ 가 적용된 것이다. p 와 r 은 증가할수록 1년간의 총수익을 감소시킨다. 높은 p 에서 완전한 품질검사의 경우가 더 낮은 수익을 보이는 이유는 p 가 커질수록 생산로트 크기가 불완전 품질검사에서도 더 크게 증가하여 관련 비용이 더 크게 증가하기 때문이다. q 의 증가에 따라 총수익은 낮은 범위에서는 증가하다가 일정 비율을 지나면 다시 감소한다. 품질검사 신뢰도(q)와 수익 간의 관계 분석은 5장에서 자세히 분석해보도록 한다.

5. 품질검사 신뢰도 수준의 결정

본 장에서는 기업이 최대 수익을 올릴 수 있는 적정 품질검사 신뢰도 수준을 구하는 가이드라인을 제시하고자 한다. 과거의 많은 연구들은 내부 비용 최소화를 가능케 하는 품질활동 수준의 결정을 그 주요 목표로 하였으나, 불량품의 유통과 이의 회수물류와 매출에의 영향 등을 고려할 때, 수익 극대화를 고려하는 것이 더 합리적일 것이다.

품질검사 신뢰도는 0에서 1 사이의 값으로 제한되어 있기 때문에 민감도 분석을 통해 큰 수고를 들이지 않고도 적정 품질활동의 수준의 근사해를 구하는 것이 가능하다. 시뮬레이션 모형의 특성상 산업, 기업 또는 제품의 특성에 맞는 다양한 형태의 함수를 설정하는 것이 가능하나, 본 연구에서는 품질검사 신뢰도에 대한 품질검사 비용의 함수로 II장에서 설명한 바와 같이 많은 연구들에서 채택된 바 있는 $(a(1-x)^b)$ 형태의 지수 함수를 적용한다. [2,3,4,14,15,27]



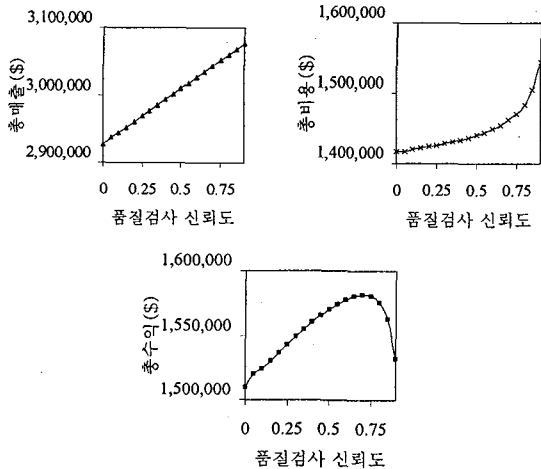
[그림 6] 품질검사 신뢰도에 따른 품질검사 단가의 변화

품질검사 신뢰도 범위 내에서 제품의 생산 비용에 비해 지나치게 큰 값을 갖지 않도록 상수 a 는 0.2, 지수 b 는 1로 설정하여 품질검사 신뢰도 평균(q)에 대해 품질검사 단가는 $(0.2 \cdot (1-q)^b)$ 이 되도록 한다. 품질검사 단가는 [그림 6]과 같이 낮은 품질검사 신뢰도 범위에서는 완만한 증가 추세를 보이거나, 높은 범위에서는 급격하게 증가하게 되고, 품질검사 신뢰도 (0, 0.95) 범위에서 품질검사 단가는 \$0.2에서 \$4의 값을 갖는다.

4장에서 설정한 외생 변수들과 동일한 설정 하에 품질검사 신뢰도 0에서 0.95 범위에 대해 1년(365일)간의 총수익, 총매출, 총비용의 민감도 분석을 수행하였고, 그 결과는 [표 7], [그림 7]과 같다.

품질검사 신뢰도	품질검사 단가	총매출	총비용	총수익
0.0	0.20	2,927,285	1,417,334	1,509,950
0.1	0.22	2,944,367	1,420,598	1,523,769
0.2	0.25	2,961,008	1,424,233	1,536,775
0.3	0.29	2,977,599	1,428,577	1,549,022
0.4	0.33	2,994,141	1,433,854	1,560,288
0.5	0.40	3,010,638	1,440,466	1,570,171
0.6	0.50	3,027,097	1,449,216	1,577,881
0.7	0.67	3,043,525	1,461,969	1,581,556
0.8	1.00	3,059,811	1,484,306	1,575,505
0.9	2.00	3,075,909	1,544,120	1,531,789

[표 7] 총매출, 총비용 및 총수익의 민감도 분석 결과 [단위: \$]

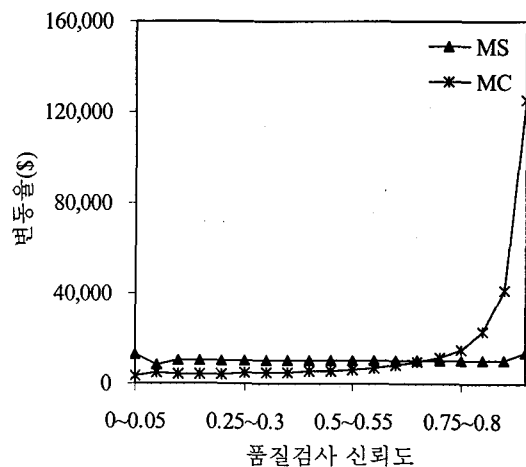


[그림 7] 품질검사 신뢰도에 따른 총매출, 총비용 및 총수익의 변화

[표 7]과 [그림 7]에서 볼 수 있듯이 품질검사

신뢰도의 증가에 따라 총매출은 선형에 가까운 형태로 일정하게 증가하고, 총비용은 초기 완만하게 증가하다가 높은 품질검사 신뢰도에 도달하면서 지수적으로 증가하게 된다. 총매출과 총비용의 이러한 변동은 품질검사 신뢰도에 따른 총수익 곡선을 볼록하게 만들어 일정 품질검사 신뢰도에서 최대 총수익을 갖게 한다. 좀 더 자세한 민감도 분석을 수행해보면, 제품 단위당 \$0.68의 품질검사 단가 투자, 약 0.705(70.5%)의 품질검사 신뢰도에서 \$1,581,566의 최대 수익을 올릴 수 있다.

[표 5]에서 보인 것과 같이 품질검사 신뢰도의 변동은 수익 요소들 전반을 변동시킨다. 품질검사 신뢰도의 증가에 따라 수익을 증가시키는 요소들(MS, marginal saving)과 감소시키는 요소들(MC, marginal cost)을 분리해볼 수 있는데, 품질검사 신뢰도의 증가에 따른 MS에는 등급 제품 판매 매출, 환불 매출적자, 주문적체 비용, 반품 비용, 판매손실 비용이 있고, MC는 생산 비용, 품질검사 비용, 재고유지 비용, 폐기 비용이 있다. 판매 매출과 셋업 비용은 품질검사 신뢰도의 변동에 무관한 수익 요소들이다. 품질검사 신뢰도의 변동은 MS와 MC 간의 교환(trade-off) 관계를 발생시키고, 둘의 변동률이 같아지는 곳에서 최적 품질검사 신뢰도를 찾을 수 있다. [그림 8]은 품질검사 신뢰도 0.05 증가시의 MS와 MC 요소들의 변동을 변화 추이를 보이고 있다. 품질검사 신뢰도 0.7~0.75 범위에서 변동률은 같아지고, 이는 최대 수익을 얻을 수 있는 품질검사 신뢰도가 이 범위 내에서 결정됨을 의미한다.



[그림 8] 품질검사 신뢰도에 따른 MS, MC 요소들의 변동을 추이

본 장에서 결정된 품질검사 신뢰도 수준의 결과는 외생 변수들의 설정과 품질검사 단가 함

수의 설정 등에 따라 달라질 수도 있을 것이다. 하지만 [표 5]와 [그림 7,8]에서 보인 것과 같이 품질활동 수준의 변동은 총비용 만이 아니라 수익 관련 대부분의 매출 및 비용 요소에 영향을 미치므로 품질활동 수준의 결정에 있어 비용 측면 만이 아닌 기업 수익 요소들에의 영향을 전체적으로 고려하여야 함은 분명할 것이다.

6. 연구의 종합 및 결론

본 연구에서는 품질검사의 불완전성으로 인한 불량품 유통과 이로 인한 회수물류 피드백을 포함한 재고모형을 제시하고, 그 영향을 분석하였다. 4장에서는 품질검사가 완전할 경우와 불완전할 경우의 생산로트 크기의 결정, 주문과 이의 충족, 수익의 차이를 1년간의 시뮬레이션 결과를 통해 분석하였으며, 주요 비율들의 변화에 따른 생산로트 크기와 수익 요소들의 변화를 분석하였다. 또한 5장에서는 올바른 적정 품질검사 수준의 결정에 대한 가이드라인을 제시하였다. 본 연구를 통해 불량품 유통으로 인한 회수물류의 발생이 제품의 품질에 직접적으로 관련된 일부 요소들만이 아니라 수익 관련 대부분의 매출 및 비용 요소에 영향을 미침을 확인할 수 있었는데, 정적 재고모형이나 단순한 품질 비용 곡선으로는 이의 복잡한 관계를 설명하기에는 무리가 있을 것이다.

불량품의 외부 유통으로 발생하는 회수물류를 고려하지 않는 완전한 품질검사의 가정으로는 품질 문제로 인한 손실 중 대부분을 차지하는 외적 실패 비용을 고려하지 않아 의사 결정에 혼란을 줄 수도 있다. 불량품이 빈번히 유통되고, 이의 반품으로 인한 회수 물류의 발생이 일반적으로 일어나고 있는 현실을 고려할 때 품질검사의 불완전성을 고려하는 것이 실상에 더욱 맞을 것이다. 또한 구조적인 영향을 파악하지 못한 상태에서의 무조건적인 불량 최소화나 기업 내부 비용 최소화를 위해 노력하기보다는 품질 활동이 이에 직접적으로 관련된 비용 요소들만이 아니라 생산 계획과 수익 요소 전반에 걸쳐 영향을 주는 것임을 고려하여 수익 극대화 측면에서 접근하는 것이 품질 활동 수준의 결정에 보다 합리적일 것이다.

기업 활동의 구조적 접근을 통해 수익에의 전반적인 영향을 분석하여 품질검사를 포함한 품질 관련 비용의 지출과 품질 활동 수준을 결정한다면 기업 경쟁력 향상 및 수익 향상에 도움이 될 것이다.

참고 문헌

[1] Anily, S., "Single-machine Lot-sizing with

Uniform Yields and Rigid Demands: Robustness of the Optimal Solution", *IIE Transactions*, Vol.27, No.5(1995), pp.625-633.

- [2] Cheng, C.E., "An Economic Production Quantity Model with Flexibility and Reliability Considerations", *European Journal of Operational Research*, Vol.39(1989), pp.174-179.
- [3] Cheng, T.C.E., "An Economic Order Quantity Model with Demand-dependent Unit Production Cost and Imperfect Production Process", *IIE Transactions*, Vol.23, No.1(1991), pp.23-28.
- [4] Cheng, T.C.E., "EPQ with Process Capability and Quality Assurance Considerations", *Journal of the Operational Research Society*, Vol.42, No.8(1991), pp.713-720.
- [5] Chopra, S. and Meindl, P., *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*, 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey, 2004.
- [6] Crosby, P.B., *Quality Is Free*, McGraw-Hill, New York, 1979.
- [7] Guu, S. and Zhang, A.X., "The Finite Multiple Lot Sizing Problem with Interrupted Geometric Yield and Holding Costs", *European Journal of Operational Research*, Vol.145(2003), pp.635-644.
- [8] Juran, J.M. and Gryna, Jr., F.M., *Quality Planning and Analysis*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1980.
- [9] Kim, C.H., Hong, Y. and Chang, S.Y., "Optimal Production Run Length and Inspection Schedules in a Deteriorating Production Process", *IIE Transactions*, Vol.33, No.5(2001), pp.421-426.
- [10] Krajewski, L.J. and Ritzman, L.P., *Operations Management: Strategy and Analysis*, 6th ed., Prentice Hall, New Jersey, 2002.
- [11] Lee, H.L. and Rosenblatt, M.J., "Simultaneous Determination of Production Cycle and Inspection Schedules in a Production System", *Management Science*, Vol.33, No.9(1987), pp.1125-1136.
- [12] Lee, H.L. and Rosenblatt, M.J., "A Production and Maintenance Planning Model with Restoration Cost Dependent on Detection Delay", *IIE Transactions*, Vol.21, No.4(1989), pp.368-375.
- [13] Lee, J.S. and Park, K.S., "Joint Determination of Production Cycle and Inspection Intervals in a Deteriorating Production", *Journal of the Operational Research Society*, Vol.42, No.9(1991), pp.775-783.
- [14] Lee, W.J., Kim, D. and Cabot, A.V., "Optimal Demand Rate, Lot Sizing and Process Reliability Improvement Decisions", *IIE Transactions*, Vol.28, No.11(1996), pp.941-952.
- [15] Leung, K.F., "A Generalized Geometric-programming Solution to 'An Economic Quantity Model with Flexibility and Reliability

Considerations", European Journal of Operational Research, Available online 11 October 2005.

[16] Liou, M., Tseng, S. and Lin, T., "The Effects of Inspection Errors to the Imperfect EMQ Model", IIE Transactions, Vol.26, No.2(1994), pp.42-51.

[17] Porteus, E.L., "Optimal Lot Sizing, Process Quality Improvement and Setup Cost Reduction", Operations Research, Vol.34, No.1(1986), pp.137-144.

[18] Rahim, M.A., "Joint Determination of Production Quantity, Inspection Schedule and Control Chart Design", IIE Transactions, Vol.26, No.6(1994), pp.2-11.

[19] Rahim, M.A. and Ben-Daya, M., "Joint Determination of Production Quantity, Inspection Schedule, and Quality Control for an Imperfect Process with Deteriorating Products", Journal of the Operational Research Society, Vol.52, No.12(2001), pp.1370-1378.

[20] RLEC (Reverse Logistics Executive Council), *Apparel Manufacturers Survey*, <http://www.rlec.org/> (2006.07.13).

[21] RLEC (Reverse Logistics Executive Council), *Consumer Electronics Manufacturers Survey*, <http://www.rlec.org/> (2006.07.13).

[22] Rosenblatt, M.J. and Lee, H.L., "Economic Production Cycles with Imperfect Production Processes", IIE Transactions, Vol.18, No.1(1986), pp.48-55.

[23] Salameh, M.K. and Jaber, M.Y., "Economic Production Quantity Model for Items with Imperfect Quality", International Journal of Production Economics, Vol.64(2000), pp.59-64.

[24] Schwaller, R.L., "EOQ under Inspection Costs", Production and Inventory Management, Vol.29, No.3(1988), pp.22-24.

[25] Serman, J.D., *Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw-Hill, New York, 2004.

[26] Taguchi, G. and Clausing, D., "Robust Quality", Harvard Business Review, Jan.-Feb. (1990), pp.66-75.

[27] Tripathy, P.K., Wee, W. and Majhi, P.R., "An EOQ Model with Process Reliability Considerations", Journal of the Operational Research Society, Vol.54, No.5(2003), pp.549-554.

[28] Vickson, R.G., "Optimal Inspection Sublots for Deteriorating Batch Production", IIE Transactions, Vol.30, No.11(1998), pp.1019-1024.

[29] Yeh, R.H. and Chen, T., "Optimal Lot Size and Inspection Policy for Products Sold with Warranty", European Journal of Operational Research, Vol.174, No.2(2005), pp.766-776.

[30] Zhang, X. and Gerchak, Y., "Joint Lot Sizing and Inspection Policy in an EOQ Model with

Random Yield", IIE Transactions, Vol.22, No.1(1990), pp.41-47.

부록 A. 모형 변수들의 수식 (외생변수 제외)

가용재고(unit) = INTEG(가용재고 축적율-주문 충족율, 수요 평균)

가용재고 축적율(unit/day) = 주기재고*(1-불량품 검출비율)

검출불량품 축적율(unit/day) = 주기재고*불량품 검출비율

교환(unit/day) = (1-환불 비율)*반품율

등급제품 판매 매출(\$/day) = 등급제품 판매 단가*등급제품 판매율

등급제품 판매율(unit/day) = IF THEN ELSE(MODULO(Time, 등급제품 판매주기)=1, 불량재고, 0)

반품 매출적자(\$/day) = 환불*판매 단가

반품 비용(\$/day) = 반품 단가*반품율

반품불량품 축적율(unit/day) = 반품율

반품율(unit/day) = DELAY FIXED(주문 충족율* 불량품 비검출비율, 1, 0)

불량재고(unit) = INTEG(검출불량품 축적율+반품불량품 축적율-등급제품 판매율-폐기율, 0)

불량품 검출비율(Dmnl) = 생산불량 비율*품질 검사 신뢰도

불량품 검출비율 평균(Dmnl) = 생산불량 비율 평균*품질검사 신뢰도 평균

불량품 비검출비율(Dmnl) = DELAY FIXED(생산 불량 비율*(1-품질검사 신뢰도), 1, 0)

생산 비용(\$/day) = 생산 단가*생산로트 크기

생산로트 크기(unit) = MAX(IF THEN ELSE(MODULO(Time , 생산주기)=1, (주문량+수요 평균*생산주기+1.64*수요 표준편차-가용재고)/(1-불량품 검출비율 평균), 0), 0)

생산불량 비율(Dmnl) = RANDOM NORMAL(0, 0.99, 생산불량 비율 평균, 0.02, 0.05)

셋업 비용(\$/day) = IF THEN ELSE(생산로트 크기>0, 셋업 단가, 0)

수요율(unit/day) = RANDOM NORMAL(0, 100000/365, 수요 평균, 수요 표준편차, 수요 평균)

제품 생산율(unit/day) = 생산로트 크기

재고유지 비용(\$/day) = 재고유지 비용 분율*생산 단가*(주기재고+가용재고+불량재고)

판매 매출(\$/day) = 판매 단가*(주문 충족율-교환)

판매손실 비용(\$/day) = 환불*판매손실 단가

폐기 비용(\$/day) = 폐기 단가*폐기율

폐기비율(Dmnl) = RANDOM NORMAL(0, 1, 0.6,

0.02, 0.6)
 폐기율(unit/day) = 폐기비율*(반품불량품 축적율 + 검출불량품 축적율)
 주기재고(unit) = INTEG(제품 생산율-가용재고 축적율-검출불량품 축적율,0)
 주문 충족량(unit) = INTEG(주문 충족율-반품율,0)
 주문 충족율(unit/day) = min(IF THEN ELSE(가용재고>=1, 가용재고, 0), 희망 주문충족율)
 주문 축적율(unit/day) = 수요율+교환
 주문 해소율(unit/day) = 주문 충족율
 주문량(unit) = INTEG(주문 축적율-주문 해소율,0)
 주문충족 일수(day) = IF THEN ELSE(주문 해소

율=0, 0, 주문량/주문 해소율)
 주문적체 비용(\$/day) = 주문적체 비용 분율*생산 단가*주문량
 품질검사 단가(\$/unit) = 0.2*power((1-품질검사 신뢰도 평균),-1)
 품질검사 비용(\$/day) = (가용재고 축적율+검출 불량품 축적율)*품질검사 단가
 품질검사 신뢰도(Dmnl) = RANDOM NORMAL(0, 1, 품질검사 신뢰도 평균, 0.02, 0.05)
 환불(unit/day) = 환불 비율*반품율
 환불 비율(Dmnl) = RANDOM NORMAL(0, 1, 0.9, 0.02, 0.5)
 희망 주문충족율(unit/day) = 주문량/목표 주문충족 일수

부록 B. 품질검사의 불안전성과 회수물류를 고려한 시스템 다이내믹스 재고 모형 (회계 변수 제외)

