

# 불완전한 생산 시스템에서의 경제적인 생산량 결정

An EMQ Model in An Unreliable Machine

김창현\*, 홍유신\*\*, 김수영\*\*

Chang Hyun Kim\*, Yushin Hong\*\*, Soo-Young Kim\*\*

## Abstract

This paper presents an EMQ model which determines an optimal manufacturing lot size in an unreliable machine. The machine has an exponentially distributed life time, and requires a constant time to repair when it fails. We 1) derive an average cost function, 2) obtain an optimal lot size and show that it is unique, 3) carry out sensitivity analysis to examine the effect of machine parameters (life time, time to repair) to optimal lot size.

## 1. 서론

고전적인 EMQ(Economic Manufacturing Quantity) 모형에 관한한 그 간 수 많은 저자들에 의해서 여러가지 상황의 가정 아래 많은 논문들이 발표되었다[3]. 이 가운데 불완전한 생산 시스템에서의 EMQ 모형에 관한 연구로서 Rosenblatt and Lee[6]는 생산 진행 과정에서 시스템이 퇴화하여 비 정상적인 작동상태일 때, 일정비용 만큼 불량품을 생

산한다고 가정할 때의 EMQ 모형을 발표하였다. 그 후 이들은[4] 최적 생산량과 검사계획을 동시에 고려하는 모형을 발표하였는데, 시스템이 지수분포의 비 정상적인 작동상태의 간격을 가질 때 이러한 상태를 검출하고자하는 검사계획은 등 간격(equally spaced period)을 가짐을 보여 주었다. 나아가 이들은[5] 비 정상적으로 작동중인 생산시스템의 복구비용이 비 정상적인 작동 상태로 부터 검사 후 수리하기 까지의 지연시간에 비례한

\* POSCO 경영연구소 컨설팅 2부

\*\* 포항공과대학교 산업공학과

다고 가정했을 때, 최적 생산계획 및 검사계획을 동시에 결정해 주는 모형을 발표하였다.

최근에는 H.Groenevelt et al. [1]이 기계가 불완전하여 고장이 일어날 수 있으며 지수 분포의 수명을 가질 때, 수리시간을 필요로 하지 않는 경우에서의 EMQ 모형을 발표하여 고전적인 EMQ 모형과는 다른 여러 특성들을 보여 주었다. 그들의 또 다른 논문[2]에서는 보유 재고를 운영 재고(running stock)와 안전 재고로 구분한 후 생산되는 제품의 일정 비율 만큼씩 각각의 재고로 나누어 생산하고, 기계의 수명이 지수 분포를 가지며, 수리 시간이 임의의 분포를 가질 때 일정한 Service level을 만족시켜 주는 EMQ 모형을 대기이론을 적용하여 제시하였다.

이상에서 생산 시스템이 불완전할 때의 EMQ 모형에 대해 간략히 살펴 보았다. 본 연구는 위 논문들 가운데 H.Groenevelt et al. [1]의 모형을 확장한 것으로서 생산 시스템이 불완전하여 고장이 일어날 수 있으며, 고장 발생시 이를 수리하는데 일정한 수리시간을 필요로 하는 경우에서의 단위 시간당 비용을 최소화하는 최적 생산량 결정에 관한 문제를 제시하였다. 모형의 수식화는 생산시스템의 수명이 일반분포를 따를 때의 모형에 대해서 수식화하였고, 이 후 모형에 대한 분석은 생산시스템의 수명이 지수분포를 따를 때의 모형에 대해서 분석하였다. 주요 가정으로는 생산 시스템이 생산 과정 도중에 고장이 발생하면 즉시 수리를 시작하며, 수리 시간 동안의 수요량은 생산과정 동안 생산된 보유 재고량으로 충족시킨다. 그리고, 수리 완료 후 여전히 보유재고가 있으면 이들을 모두 소진한 다음에 다시 생산과정에 들어가

며, 수리시간 동안의 수요량이 보유 재고량보다 클 경우에는 재고고갈이 발생한 부분에 대해서 Lost Sales가 발생하는 것으로 하였다.

본 연구에서의 주요 결과로는 첫째, 생산량에 대한 비용함수를 도출하였고, 둘째, 비용함수를 최소화하는 최적 생산량에 대한 결정과 이것이 Unique 하게 존재함을 보였으며, 셋째, 수리시간을 허용할 때와 허용하지 않았을 때의 최적 생산량과 그 때의 비용 함수간의 관계를 주어진 관련 비용 모수와의 관계식으로 나타내었으며, 넷째, 모형에 대한 수치실험을 통해 생산시스템의 특성치 및 비용요소의 변화에 따른 감도분석을 실시하였다.

## 2. 모형에 대한 전제 조건 및 기호 설명

### 2.1 전제 조건

- 본 모형은 고전적인 EMQ 모형의 기본 가정을 따른다.
- 기계는 고장날 수가 있으며 기계 수명의 평균과 분산은 유한한 값을 갖는다.
- 기계가 고장나면 이미 편성된 Lot는 취소하고 그 동안 생산된 보유 재고로 수요를 충족시키며 이들이 모두 소진되면 다시 새로운 생산작업을 시작한다.
- 생산과정 도중 기계가 고장이 나면 이를 수리하는 데 일정한 수리시간 및 비용이 소요된다.
- 생산 과정 도중에 고장이 발생하여 수리 시간 동안의 수요량이 고장 발생전까지 생산된 공급 가능한 재고량보다 클 경우에는 재고고갈이 발생하는 데 이 경우 재고고갈이 발생한 부분에 대해서는 Lost Sales로 처리한다.

- 기계가 고장난 후 수리를 거쳐 새로이 생산에 투입되거나, 기계 고장이 없이 해당 Lot만큼 생산한 후 새로운 Cycle로 들어가게 되면 기계의 상태는 항상 초기 작동 상태로 돌아간다.
- 제품 한 단위당 생산비용은 Lot 크기와는 무관하다.

2.2 기호 설명

- d : 수요율(개/시간)
- p : 생산율 (개/시간)
- h : 재고 보유 비용 (₩/시간/개)
- $\pi$  : Lost sales 비용 (₩/개)
- S : 생산준비 비용 (₩)
- M : 고장수리 비용 (₩)
- Q : Lot 크기 (개)
- T : 기계의 수명 (시간),  $T \sim f(t)$
- f(t) : 기계 수명의 확률 밀도 함수
- F(t) : 기계 수명의 누적 밀도 함수,  
 $\bar{F}(t) = 1 - F(t)$
- r(t) : 기계 수명의 고장율 함수
- L : 고장 수리시간

3. 모형에 대한 분석

3.1 모형 설명

고전적인 EMQ모형에서는 모든 Cycle은 같다. 그러나, 본 모형에서는 그림 1에서와 같이 크게 세 가지 Cycle이 발생된다.

그림 1에서의 첫번째 재고 수준의 궤적은 생산시간 동안 기계의 고장없이 정상적으로 생산했을 때의 재고 수준 궤적이며, 두번째, 세번째 궤적은 기계 고장이 발생했을 때의 재고 수준의 궤적이다. 그런데, 시간 t에서 기

계 고장이 발생하여 수리시간 L이 소요되었다면 생산 시간 동안 쌓아둔 보유 재고로 수리시간 동안의 수요를 충족시키게 된다. 이때, 재고 소진 기간의 크기에 따라 재고고갈이 발생되거나 발생되지 않을 수가 있다. 그림 1에서 두번째 궤적은 수리시간 L동안의 수요를 충족시키지 못하여 재고고갈이 발생하여 Lost sales로 처리한 경우이고, 세번째 궤적은 기계 고장이 발생했지만 그 동안 생산하여 둔 보유 재고로 수리시간 동안의 수요를 충족시킨 경우이다.

따라서, 매 Cycle당 발생 비용은 다음과 같이 나누어 생각할 수 있다.

- 정상조업의 경우 : 생산준비 비용 + 재고 보유 비용
- 기계 고장이 발생한 경우
- 수리시간이 재고 소진 기간보다 클 때 : 생산준비 비용 + 재고 보유 비용 + 고장 수리 비용 + Lost sales 비용
- 수리시간이 재고 소진 기간보다 작을 때 : 생산준비 비용 + 재고 보유 비용 + 고장 수리 비용

3.2 모형의 수식화

우리의 목적은 단위 시간당 평균비용을 최소화하는 최적 Lot크기  $Q^*$ 를 구하는 것이다. 위에서 살펴본 바와 같이 재고 과정이 매 Cycle의 생산 초기에 계속 반복되므로 Renewal Reward Theorem[7]에 의해 단위 시간당 평균비용은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C(Q) = \frac{\text{한 Cycle내에서 발생하는 비용}}{E[\text{한 Cycle의 길이}]}$$

단위 시간당 평균비용을 구하기 위해 매

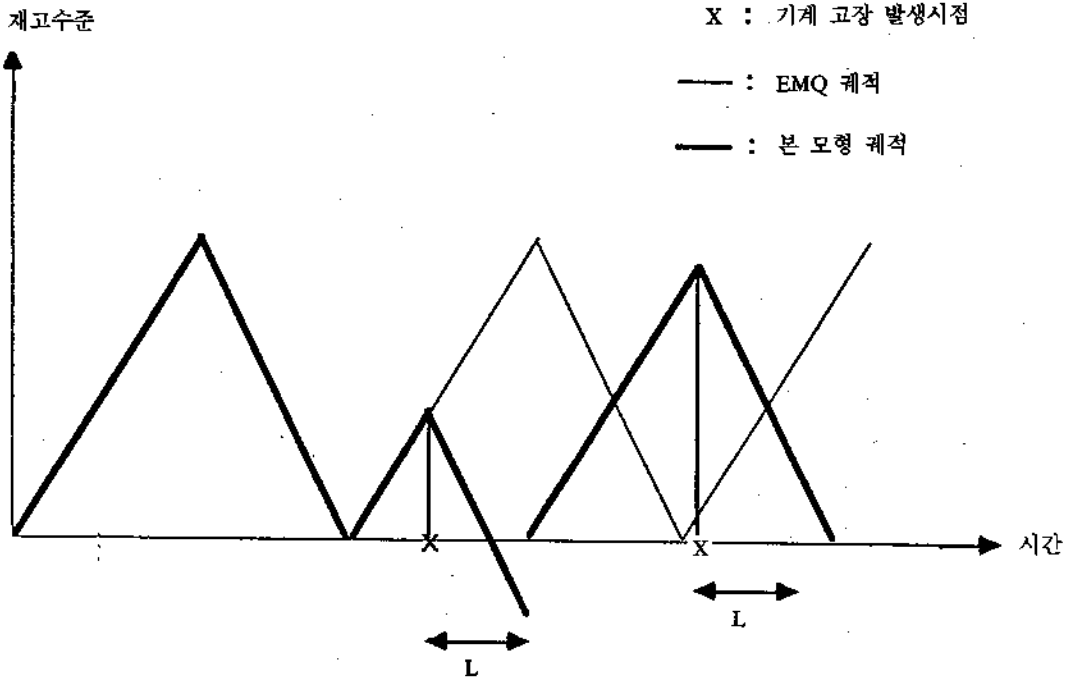


그림 1. 재고 수준 궤적

Cycle 당 평균비용과 한 Cycle의 평균 길이를 구해보자. 앞서 살펴본 바와 같이 수리시간이 재고 소진 기간보다 크면 재고고갈이 발생한다.  $\alpha = dL/(p-d)$ 라 두면 이는 생산잉여량  $(p-d)$ 의 총 누계량이 수리시간 동안의 수요량과 같아지는 시점으로 다시 말해, 수리시간  $L$ 과 재고 소진 기간과 같아지는 시점이다. 이  $\alpha$ 와 기계의 고장 발생시점  $t$ 와의 관계에 따라 그림 2와 그림 3에서와 같이 두 가지의 재고 궤적을 생각할 수 있다.

이에 따라 비용함수  $C(Q)$ 는  $\alpha$ 와 생산량  $Q$ 를 생산하는데 소요되는 생산시간  $Q/p$ 에 따라 비용함수의 정의가 달라진다.

1)  $Q \geq p\alpha$  일때

이 경우는 생산과정 도중에 기계가 고장나면 기계가 어느 시점에서 고장이 났느냐에

따라 그림 2와 그림 3에서 보는 바와 같이 재고고갈이 발생할 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다.  $U_1(Q)$ 를 한 Cycle내에서 발생하는 평균비용,  $W_1(Q)$ 를 한 Cycle의 평균 길이,  $C_1(Q)$ 를 비용함수라고 두면

$$\begin{aligned}
 W_1(Q) &\equiv E[\text{한 Cycle의 길이}] \\
 &= \int_0^{\alpha} (t+L)f(t)dt + \int_{\alpha}^{Q/p} \frac{p}{d}f(t)dt + \int_{Q/p}^{\infty} \frac{Q}{Q/p \cdot d}f(t)dt \\
 &= LF(\alpha) + \int_0^{\alpha} tf(t)dt + \frac{p}{d} \int_{\alpha}^{Q/p} f(t)dt + \frac{Q}{d} F(Q/p) \quad (1)
 \end{aligned}$$

$U_1(Q) \equiv E[\text{한 Cycle내에서 발생하는 비용}]$

$$\begin{aligned}
 &= \int_0^{\infty} E[\text{비용} | T=t]f(t)dt \\
 &= \int_0^{\alpha} E[\text{비용} | T=t]f(t)dt + \int_{\alpha}^{Q/p} E[\text{비용} | T=t]f(t)dt
 \end{aligned}$$

· 기계의 고장이  $\alpha$  이전에 발생될 때

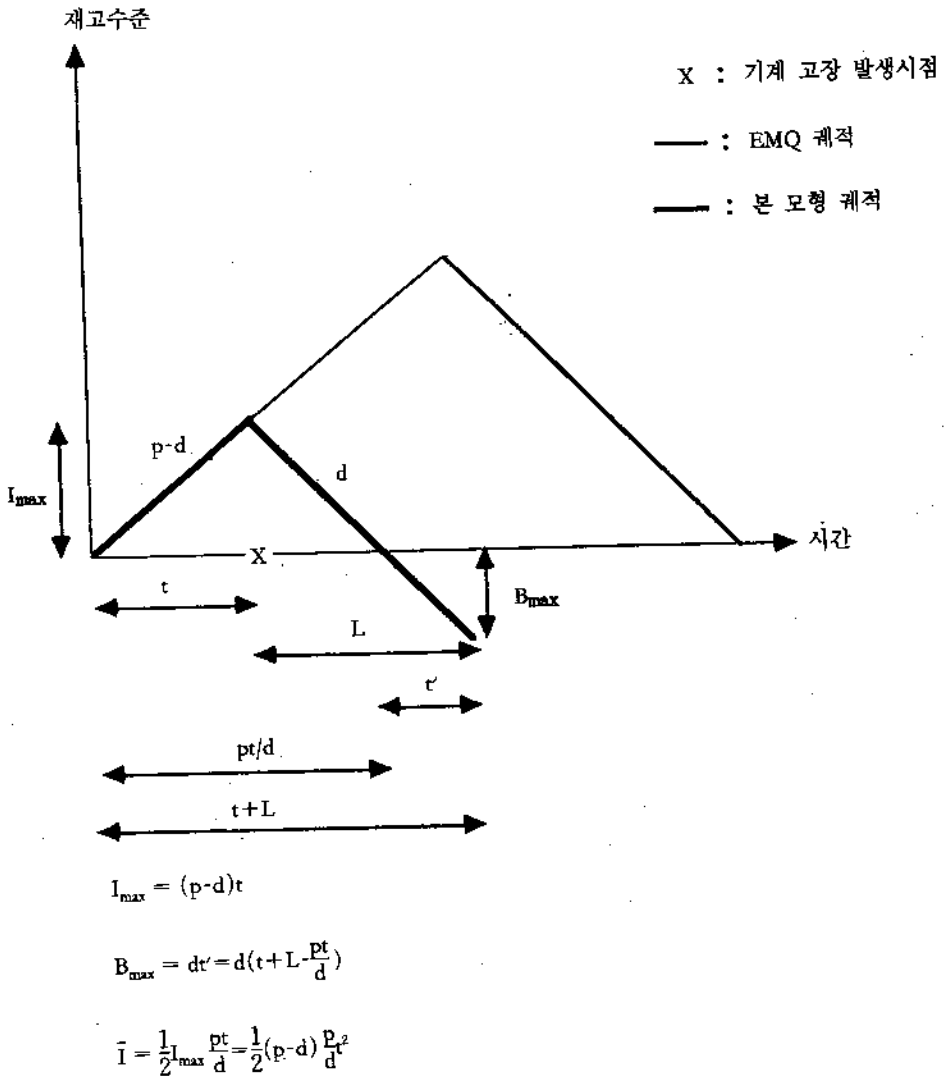
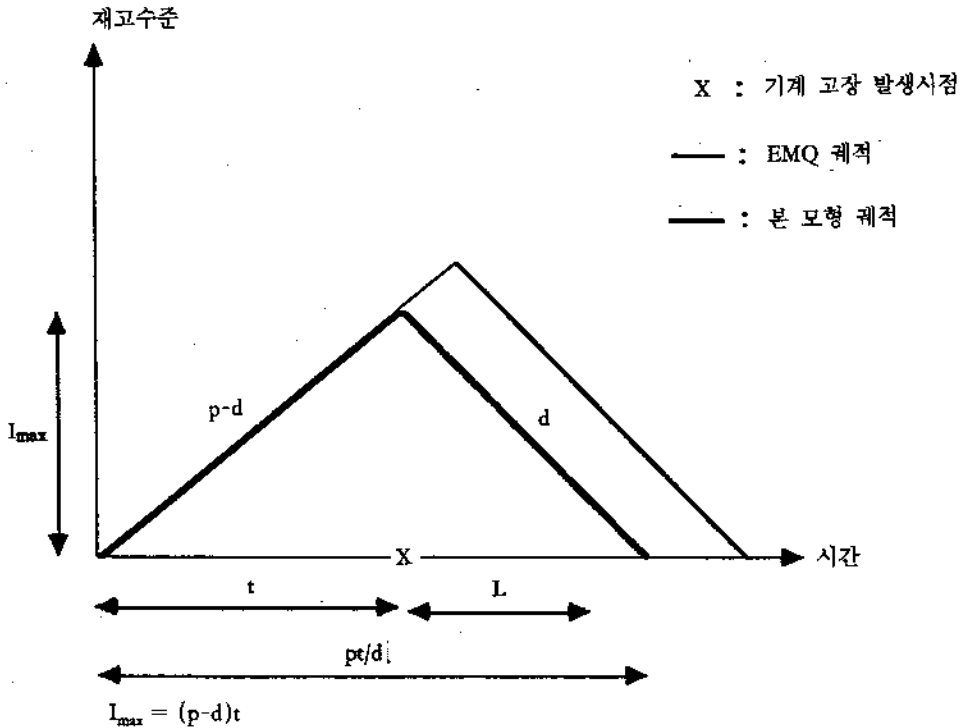


그림 2.  $t \leq \alpha$  일 때의 재고수준 궤적

$$\begin{aligned}
 & + \int_{Q/p}^{\infty} E[\text{비용} | T=t] f(t) dt & = \pi(p-d) \int_0^{\alpha} (\alpha-t) f(t) dt + S + MF(Q/p) \\
 & = \int_0^{\alpha} \left\{ S + M + \frac{1}{2} h(p-d) \frac{p^2}{d^2} t^2 + \pi(dL - (p-d)t) \right\} f(t) dt & + \frac{1}{2} h(p-d) \frac{p}{d} \left\{ (Q/p) \bar{F}(Q/p) + \int_0^{Q/p} t^2 f(t) dt \right\} \quad (2) \\
 & + \int_{\alpha}^{Q/p} \left\{ S + M + \frac{1}{2} h(p-d) \frac{p^2}{d^2} \right\} f(t) dt & \\
 & + \int_{Q/p}^{\infty} \left\{ S + \frac{1}{2} h \frac{p-d}{pd} Q^2 \right\} f(t) dt &
 \end{aligned}$$

로 나타낼 수 있으므로 비용함수  $C_1(Q)$  는 다음과 같이 주어진다.

· 기계의 고장이  $\alpha$  이후에 발생될 때



$$\hat{i} = \frac{1}{2} I_{max} \frac{pt}{d} = \frac{1}{2} (p-d) \frac{p^2}{d^2}$$

그림 3.  $\alpha \leq t \leq Q/p$  일 때의 재고수준 계획

$$C_1(Q) = \frac{\pi(p-d) \int_0^\alpha (\alpha-t)f(t)dt + S + MF(Q/p) + \frac{1}{2}h(p-d)\frac{p}{d} \left\{ (Q/p)^2 \bar{F}(Q/p) + \int_0^{Q/p} t f(t) dt \right\}}{LF(\alpha) + \int_0^\alpha t f(t) dt + \frac{p}{d} \int_\alpha^{Q/p} t f(t) dt + \frac{Q}{d} \bar{F}(Q/p)} \quad (3)$$

2)  $Q < p\alpha$  일때

이 경우는 생산과정 도중에 기계가 고장나면 생산과정 동안 축적된 보유 재고량만으로는 고장수리 시간동안의 수요량을 충족시키지 못하므로 그림 2에서와 같이 항상 재고고갈이 발생하게 된다.  $U_2(Q)$ 를 한 Cycle내에

서 발생하는 평균비용,  $W_2(Q)$ 를 한 Cycle의 평균 길이,  $C_2(Q)$ 를 비용함수라고 두면

$$W_2(Q) = \int_0^{Q/p} (t+L)f(t)dt + \int_{Q/p}^\infty Q f(t)dt = LF(Q/p) + \int_0^{Q/p} t f(t)dt + \frac{Q}{d} \bar{F}(Q/p) \quad (4)$$

$$U_2(Q) = \int_0^{Q/p} \left\{ S + M + \frac{1}{2}h(p-d)\frac{p^2}{d^2} + \pi(dL - (p-d)t) \right\} f(t)dt + \int_{Q/p}^\infty \left\{ S + \frac{1}{2}h\frac{p-d}{pd}Q^2 \right\} f(t)dt = \pi(p-d) \int_0^{Q/p} (\alpha-t)f(t)dt + S + MF(Q/p)$$

$$+\frac{1}{2}h(p-d)\frac{p}{d}\left\{(Q/p)^2\bar{F}(Q/p)+\int_0^{Q/p}t^2f(t)dt\right\} \quad (5)$$

$$\lim_{Q \rightarrow \infty} W_1(Q) = \int_0^{\alpha} tf(t)dt + LF(\alpha) + \frac{p}{d} \int_{\alpha}^{\infty} tf(t)dt \quad (7)$$

로 나타낼 수 있으므로 비용함수  $C_2(Q)$  는 다음과 같이 주어진다.

$$C_2(Q) = \frac{\pi(p-d) \int_0^{Q/p} (\alpha-t)f(t)dt + S + MF(Q/p) + \frac{1}{2}h(p-d)\frac{p}{d}\left\{(Q/p)^2\bar{F}(Q/p) + \int_0^{Q/p}t^2f(t)dt\right\}}{LF(Q/p) + \int_0^{Q/p}tf(t)dt + \frac{Q}{d}\bar{F}(Q/p)} \quad (6)$$

(3), (6)을 종합하면 비용함수  $C(Q)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C(Q) = \begin{cases} C_1(Q) = \frac{U_1(Q)}{W_1(Q)}, & Q \geq p\alpha \\ C_2(Q) = \frac{U_2(Q)}{W_2(Q)}, & Q < p\alpha \end{cases}$$

비용함수  $C(Q)$ 의 실행가능한 영역에서의 극한치를 구해보자.  $Q$ 가 0에 접근할 때의 극한치는  $\lim_{Q \rightarrow 0^+} U_2(Q) = S$ ,  $\lim_{Q \rightarrow 0^+} W_2(Q) = 0$ 가 되어  $Q$ 가 0으로 접근함에 따라 비용함수  $C_2(Q)$ 는 무한대로 접근한다. 그리고,  $Q = p\alpha$ 에서는  $U_1(p\alpha) = U_2(p\alpha)$ ,  $W_1(p\alpha) = W_2(p\alpha)$ 이며 이들은 유한한 값을 갖는다. 따라서, 각 비용함수는  $C_1(p\alpha) = C_2(p\alpha)$ 이며 이 역시 유한하다.  $Q$ 가 무한대로 접근하면

$$\lim_{Q \rightarrow \infty} U_1(Q) = \pi(p-d) \int_0^{\alpha} (\alpha-t)f(t)dt + S + M + \frac{1}{2}h(p-d)\frac{p}{d}\{\text{Var}[T] + E[T]^2\},$$

가 되어  $Q$ 가 무한대로 접근함에 따라 비용함수  $C_1(Q)$ 는 유한한 값으로 존재한다. 최적 생산량  $Q^*$ 가 무한대라는 의미는 생산 작업을 고장이 날 때 까지 하는 정책으로 볼 수 있다.

앞서 전개한 모형의 수식화는 기계의 수명이 일반분포를 따를 때의 내용이므로 지금부터는 특정분포를 따를 때의 모형을 전개하고자 한다. 본 연구에서는 기계의 수명분포가 고장을  $\lambda$ 를 갖는 지수분포를 따른다고 가정하였다. 이는 지수분포가 신뢰도 분야에서 설비나 부품의 수명을 추정하는 데 널리 이용되고 있을 뿐만 아니라 기계의 수명이 일반분포를 따를 때의 모형분석시 모형에 대한 행태를 살펴볼 수 있기 때문이다. 이러한 가정하에 식 (1), (2), (4), (5)을 정리하면 다음과 같다.

$$W_1(Q) = K_{11} + K_{12}e^{-\lambda Q/p} \\ K_{11} = \frac{1}{\lambda} + \frac{p-d}{d} \left( \alpha + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda\alpha} \right), \quad K_{12} = -\frac{p}{\lambda d} \quad (8)$$

$$U_1(Q) = K_{13} + K_{14}e^{-\lambda Q/p} + K_{15}Qe^{-\lambda Q/p} \\ K_{13} = \pi(p-d) \left( \alpha + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda\alpha} \frac{1}{\lambda} \right) + S + M + \frac{hp(p-d)}{\lambda^2 d} \\ K_{14} = - \left( M + \frac{hp(p-d)}{\lambda^2 d} \right), \quad K_{15} = \frac{h(p-d)}{\lambda d} \quad (9)$$

$$W_2(Q) = K_{21} + K_{22}e^{-\lambda Q/p} + K_{23}Qe^{-\lambda Q/p} \\ K_{21} = \frac{1}{\lambda} + \frac{\alpha(p-d)}{d}, \quad K_{22} = -K_{21}, \quad K_{23} = \frac{p-d}{pd} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 U_2(Q) &= K_{21} + K_{22} e^{-\lambda Q/p} + K_{23} Q e^{-\lambda Q/p} \\
 &= \frac{\lambda \alpha (p-d) + p S}{pd} + \frac{\lambda (p-d) S}{p^2 d} Q + \frac{p-d}{d} \left( \pi \frac{\lambda M}{p} \right. \\
 K_{21} &= (p-d) \left( \pi \alpha \frac{\pi}{\lambda} + \frac{hp}{\lambda^2 d} \right) + M + S \\
 &\quad \left. \frac{hp}{\lambda d} \frac{\alpha h (p-d)}{d} \right) \left( \frac{1}{\lambda} \frac{Q}{p} \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda Q/p} \right) \quad (13) \\
 K_{22} &= -(p-d) \left( \pi \alpha \frac{\pi}{\lambda} + \frac{hp}{\lambda^2 d} \right) - M \\
 K_{23} &= (p-d) \left( \frac{\pi}{p} \frac{h}{\lambda d} \right) \quad (11)
 \end{aligned}$$

3.3 최적해의 결정

비용함수 C(Q)를 최소화하는 최적 생산량 Q\*를 구하기 위해서는 먼저, Q\*가 pα보다 큰지 작은지를 살펴봐야 한다. 다시 말해서, Q\*를 비용함수 C<sub>1</sub>(Q)에서 찾아야 할 것인지 C<sub>2</sub>(Q)에서 찾아야 할 것인지를 결정해야 한다. 이를 위해 C<sub>1</sub>(Q), C<sub>2</sub>(Q)의 일차 도함수를 구해보자.

함수 q<sub>1</sub>(Q), q<sub>2</sub>(Q)의 극한값은

$$\begin{aligned}
 \lim_{Q \rightarrow 0^+} q_2(Q) &= -\frac{\lambda \alpha (p-d) + p S}{pd} < 0, \quad \lim_{Q \rightarrow \infty} \\
 q_1(Q) &= \infty > 0 \quad \text{이므로}
 \end{aligned}$$

$\lim_{Q \rightarrow 0^+} C_1(Q) = -\infty < 0, \quad \lim_{Q \rightarrow \infty} C_1(Q) = 0^+ > 0$  이며 Q=pα에서는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 q_1(p\alpha) &= q_2(p\alpha) \\
 &= -\frac{S}{d} \frac{p-d}{d} \left( \pi \frac{\lambda M}{p} \frac{hp}{\lambda d} \frac{\alpha h (p-d)}{d} \right) \times \\
 &\quad \left( \alpha + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda \alpha} \frac{1}{\lambda} \right) \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$C_i(Q) = \frac{[(U_i(Q)/e^{-\lambda Q/p}) W_i(Q) - (W_i'(Q)/e^{-\lambda Q/p}) U_i(Q)] e^{-\lambda Q/p}}{[W_i(Q)]^2}, \quad i=1, 2$$

이들 결과와 관계식 C<sub>1</sub>(pα)=C<sub>2</sub>(pα)로부터 비용함수 C(Q)는 실행가능영역에 따라 C<sub>1</sub>(Q), C<sub>2</sub>(Q)로 나뉘어지지만 Q가 0<sup>+</sup>에서 시작하여 점점 커짐에 따라 C(Q)의 값은 감소하다가 어느 시점에서 다시 증가하여 일정한 극한값에 수렴함을 알 수 있다. 그리고, Q=pα에서는 같은 값의 기울기를 갖는 연속함수라는 것을 알 수 있다. 위 결과로부터 다음과 같은 정리를 도출할 수 있다.

$$q_i(Q) = (U_i(Q)/e^{-\lambda Q/p}) W_i(Q) - (W_i'(Q)/e^{-\lambda Q/p}) U_i(Q), \quad i=1, 2 \text{ 라 두면}$$

[정리 1] (Q\*의 존재 영역 결정 조건)

① S=0 일 때

- i)  $\left( \pi \frac{\lambda M}{p} \frac{hp}{\lambda d} \frac{\alpha h (p-d)}{d} \right) \geq 0$  이면  $Q^* \geq p\alpha$
- ii)  $\left( \pi \frac{\lambda M}{p} \frac{hp}{\lambda d} \frac{\alpha h (p-d)}{d} \right) < 0$  이면  $Q^* < p\alpha$

$$\begin{aligned}
 q_1(Q) &= \left[ \frac{\lambda M}{p} + \frac{h(p-d)}{pd} Q \right] W_1(Q) - \frac{1}{d} U_1(Q) \\
 &= -\frac{(p-d)}{d} \left( \pi \frac{\lambda M}{p} \right) \left( \alpha + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda \alpha} \frac{1}{\lambda} \right) \frac{S}{d} \frac{hp(p-d)}{\lambda^2 d^2} \\
 &\quad + \frac{h(p-d)}{pd} \left( \frac{1}{\lambda} + \frac{p-d}{d} \left( \alpha + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda \alpha} \right) \right) Q + \frac{hp(p-d)}{\lambda^2 d^2} e^{-\lambda Q/p} \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_2(Q) &= \left[ \frac{\lambda \alpha (p-d)}{p} + \frac{\lambda M}{p} \frac{\lambda}{p} (p-d) \left( \frac{\pi}{p} \frac{h}{\lambda d} \right) Q \right] W_2(Q) \\
 &\quad - \left[ \frac{1}{d} + \frac{\lambda \alpha (p-d)}{pd} \frac{\lambda (p-d)}{p^2 d} Q \right] U_2(Q)
 \end{aligned}$$



②  $S \neq 0$  일 때

i)  $\left(\pi \frac{\lambda M}{p} \frac{hp}{\lambda d} \frac{\alpha h(p-d)}{d}\right) \geq 0$  이면

$Q^*$ 는  $S$ 값에 관계없이  $Q^* > p\alpha$

ii)  $\left(\pi \frac{\lambda M}{p} \frac{hp}{\lambda d} \frac{\alpha h(p-d)}{d}\right) < 0$  이고

$$S \geq -(p-d) \left(\pi \frac{\lambda M}{p} \frac{hp}{\lambda d} \frac{\alpha h(p-d)}{d}\right) \left(\alpha + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda \alpha} \frac{1}{\lambda}\right)$$

이면  $Q^* \geq p\alpha$

iii)  $\left(\pi \frac{\lambda M}{p} \frac{hp}{\lambda d} \frac{\alpha h(p-d)}{d}\right) < 0$  이고

$$S < -(p-d) \left(\pi \frac{\lambda M}{p} \frac{hp}{\lambda d} \frac{\alpha h(p-d)}{d}\right) \left(\alpha + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda \alpha} \frac{1}{\lambda}\right)$$

이면  $Q^* < p\alpha$

<증명>

식 (14)에서  $C(Q)$ 는  $Q=p\alpha$ 에서 같은 값의 기울기를 갖는 연속함수이므로  $q_1(p\alpha) = q_2(p\alpha) \leq 0$ 이면  $Q^* \geq p\alpha$ ,  $q_1(p\alpha) = q_2(p\alpha) > 0$  이면  $Q^* < p\alpha$  이다. 이에 따라 위의 정리가 쉽게 도출되므로 이하 생략 ■

[정리 1]은 생산시스템의 특성에 대한 요소인  $\lambda, p, d, L$ 과 비용요소인  $\pi, h, M, S$ 와 의 관계식이 어떠한 형태로 나타나느냐에 따라  $Q^*$ 의 존재 영역을 결정해준다. 최적 생산량  $Q^*$ 는  $C(Q^*)=0$ 를 만족하는  $Q^*$ 로서 주어 지는 데 [정리 1]의 관계식에 의해서  $Q^* \geq p\alpha$ 이면  $C_1(Q^*)=0$ ,  $Q^* < p\alpha$ 이면  $C_2(Q^*)=0$ 을 만족하는  $Q^*$ 가 비용함수  $C(Q)$ 를 최소화하는 최적 생산량이다. 예를 들어, 재고고갈 비용

에 대해서 재고고갈 비용이 충분히 크면  $Q^* \geq p\alpha$ 이고, 재고고갈 비용이 상대적으로 작더라도 생산준비 비용의 크기에 따라  $Q^* \geq p\alpha$ 이거나  $Q^* < p\alpha$  이다.

[정리 2] ( $Q^*$ 의 Uniqueness)

$Q^*$ 가 [정리 1]에서의 조건에 따라 해당 영역에 존재한다면  $C'(Q^*)=0$ 를 만족하는  $Q^*$ 는 각 해당 영역에서 Unique 하며, 그때의 비용함수는 다음과 같다.

$$C_1(Q^*) = \frac{U_1(Q^*)}{W_1(Q^*)} = \frac{\lambda d M}{p} + \frac{h(p-d)}{p} Q^*, \quad Q^* \geq p\alpha$$

$$C_2(Q^*) = \frac{U_2(Q^*)}{W_2(Q^*)} = \frac{\frac{\lambda \alpha (p-d)}{p} + \frac{\lambda M \lambda}{p} (p-d) \left(\frac{\pi h}{p \lambda d}\right) Q^*}{\frac{1}{d} + \frac{\lambda \alpha (p-d)}{pd} + \frac{\lambda (p-d)}{p^2 d}} Q^*$$

,  $Q^* < p\alpha$

<증명>

각 영역에서  $C'(Q^*)=0$ 를 만족하는 해 즉,  $q_1(Q^*)=0$  또는  $q_2(Q^*)=0$ 을 만족하는 해  $Q^*$ 가 유일함을 보이기 위해  $q_1(Q), q_2(Q)$ 가 각 영역의 모든  $Q$ 에 대해 단조 증가함수임을 보이자.

$$q_1(Q) = \frac{h(p-d)}{\lambda d p} (1 - e^{-\lambda \alpha}) + \frac{h(p-d)}{\lambda d^2} (e^{-\lambda \alpha} - e^{-\lambda Q/p}) + \frac{\alpha h(p-d)^2}{d^2 p}$$

그런데, 영역  $Q \geq p\alpha$ 에서는  $q_1'(Q) > 0$ .

$\therefore q_1(Q)$ 는 단조 증가함수이다.

$$q_2'(Q) = \frac{\lambda(p-d)S}{p^2 d} \frac{(p-d)}{dp} \left(\pi \frac{\lambda M}{p} \frac{hp}{\lambda d} \frac{\alpha h(p-d)}{d}\right) \times (1 - e^{-\lambda Q/p})$$

그런데,  $Q^* < p\alpha$  위한 조건이 [정리 1]에서

$$\left(\pi \frac{\lambda M}{p} \frac{hp}{\lambda d} \frac{\alpha h(p-d)}{d}\right) < 0 \text{ 이므로 } q_2'(Q) > 0.$$

$\therefore q_2(Q)$  역시 단조 증가함수이다.

또한,  $Q^*$ 에서의 각 비용함수 값은 식 (12), 식 (13)의 관계식  $q_1(Q^*)=0, q_2(Q^*)=0$ 으로 부터 위와 같이 주어진다. ■

### 3.4 수리시간이 있을 때와 없을 때의 $Q^*$ 및 비용함수의 비교

수리시간을 필요로 하지 않을 때의 모형은  $\alpha=0$ 가 되어  $Q^* \geq 0$ 를 만족하는 비용함수 식 (3)에서  $L=0$ 일 때의 비용함수로 주어지며 H.Groenevelt et al. [1]의 모형과 일치하게 된다.  $W_0(Q), U_0(Q), Q_0^*, C_0(Q)$ 를 기계의 수명이 지수분포를 따르고 수리시간을 필요로 하지 않을 때의 모형의 평균 한 Cycle의 길이, 한 Cycle당 평균 비용, 최적 생산량 및 비용함수라 하고,  $q_0(Q) = (U_0'(Q)/e^{-\lambda Q/p}) \times W_0(Q) - (W_0'(Q)/e^{-\lambda Q/p}) U_0(Q)$ 라 하자. 편의상 기계 수명의 확률 밀도 함수를 그대로 두고 전개하면,

$$\begin{aligned} W_0(Q) &= \frac{p}{d} \int_0^{Q/p} f(t) dt + \frac{Q}{d} F(Q/p) \\ U_0(Q) &= S + MF(Q/p) + \frac{1}{2} h(p-d) \frac{p}{d} \left\{ (Q/p) F(Q/p) + \int_0^{Q/p} f(t) dt \right\} \\ q_0(Q) &= \left[ \frac{\lambda M}{p} + \frac{h(p-d)}{pd} Q \right] W_0(Q) - \frac{1}{d} U_0(Q) \end{aligned} \quad (15)$$

로 주어진다. 그러면, 비용함수  $C(Q)$ 에서의  $Q^*$ 와  $Q_0^*$ 의 대소 관계를  $C_0(Q_0^*)$ 와 관련 비용과의 관계식을 통해 유도해 보자.  $Q_0^*$ 에서

의 식(12), 식(13)은  $Q_0^*$ 의 존재 영역에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} q_1(Q_0^*) &= \left( \frac{\lambda M}{p} + \frac{h(p-d)}{pd} Q_0^* \right) \times \\ & \quad [LF(\alpha) + \int_0^{\alpha} f(t) dt - \frac{p}{d} \int_0^{\alpha} f(t) dt + W_0(Q_0^*)] \\ & \quad - \frac{1}{d} \left[ \pi(p-d) \int_0^{\alpha} (\alpha-t)f(t) dt + U_0(Q_0^*) \right], \quad Q_0^* \geq p\alpha \\ q_2(Q_0^*) &= \left[ \frac{\lambda \alpha \alpha (p-d)}{p} + \frac{\lambda M}{p} \frac{\lambda}{p} (p-d) \left( \frac{\pi}{p} \frac{h}{\lambda d} \right) Q_0^* \right] \times \\ & \quad \left[ \frac{p-d}{d} \int_0^{Q_0^*/p} (\alpha-t)f(t) dt + W_0(Q_0^*) \right] \\ & \quad - \left[ \frac{1}{d} + \frac{\lambda \alpha (p-d)}{pd} \frac{\lambda (p-d)}{p^2 d} Q_0^* \right] \times \\ & \quad \left[ \pi(p-d) \int_0^{Q_0^*/p} (\alpha-t)f(t) dt + U_0(Q_0^*) \right], \quad Q_0^* < p\alpha \end{aligned}$$

수리시간을 필요로 하지 않을 때의 모형에서는 관계식

$$\frac{\lambda M}{p} + \frac{h(p-d)}{pd} Q_0^* = \frac{1}{d} C_0(Q_0^*), \quad U_0(Q_0^*) = C_0(Q_0^*) W_0(Q_0^*)$$

이 성립하므로  $q_1(Q_0^*), q_2(Q_0^*)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} q_1(Q_0^*) &= \left( \frac{\lambda M}{p} + \frac{h(p-d)}{pd} Q_0^* \right) [LF(\alpha) + \int_0^{\alpha} f(t) dt - \frac{p}{d} \int_0^{\alpha} f(t) dt] \\ & \quad - \frac{1}{d} \left[ \pi(p-d) \int_0^{\alpha} (\alpha-t)f(t) dt \right], \quad Q_0^* \geq p\alpha \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} q_2(Q_0^*) &= \frac{\lambda(p-d)}{p} \left( \alpha - \frac{Q_0^*}{p} \right) \left( \pi \frac{1}{d} C_0(Q_0^*) \right) W_0(Q_0^*) \\ & \quad - \frac{p-d}{d} \left( \pi \frac{1}{d} C_0(Q_0^*) \right) \int_0^{Q_0^*/p} (\alpha-t)f(t) dt, \quad Q_0^* < p\alpha \end{aligned} \quad (17)$$

따라서,  $q_1(Q_0^*), q_2(Q_0^*)$ 는  $Q_0^*$ 가 주어졌을

때 함수  $q_1(Q)$ ,  $q_2(Q)$ 의 Q축으로 부터의 편차로 해석할 수 있으며  $q_i(Q_0^*) > (=, <) 0, i = 1, 2$  일 때  $Q^* < (=, >) Q_0^*$ 가 성립함을 알 수 있다.

[정리 3]

기계의 수명이 지수분포를 따를 때 비용함수  $C(Q)$ 의 해  $Q^*$ 는 어느 영역에 존재하든지 상관없이 다음과 같은 관계가 성립한다.

- i)  $C_0(Q_0^*) - \pi d > 0$  이면,  $Q^* < Q_0^*$
- ii)  $C_0(Q_0^*) - \pi d = 0$  이면,  $Q^* = Q_0^*$
- iii)  $C_0(Q_0^*) - \pi d < 0$  이면,  $Q^* > Q_0^*$

<증명>

식 (16), (17)을 전개하여 정리하면

$$q_1(Q_0^*) = \frac{p-d}{d^2} (C_0(Q_0^*) - \pi d) \left( \alpha + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda \alpha} - \frac{1}{\lambda} \right)$$

$$q_2(Q_0^*) = \frac{p-d}{d^2} (C_0(Q_0^*) - \pi d) \left( \frac{Q_0^*}{p} + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda Q_0^*/p} - \frac{1}{\lambda} \right)$$

따라서,  $q_1(Q_0^*)$ ,  $q_2(Q_0^*)$ 의 부호는  $C_0(Q_0^*)$ 와  $\pi d$ 의 차에 의해 결정되므로 위 정리가 성립한다. ■

덧붙여,  $Q_0^* \leq p\alpha$ ,  $Q_0^* \geq p\alpha$  일 조건은 각각  $q_0(p\alpha) \geq 0$ ,  $q_0(p\alpha) \leq 0$  일 때이며 식 (15)에 대입하여 전개해 보면 다음의 관계식이 도출된다.

$$S < \frac{hp(p-d)}{\lambda d} \left( \alpha + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda \alpha} - \frac{1}{\lambda} \right) \text{ 이면, } Q_0^* < p\alpha$$

$$S = \frac{hp(p-d)}{\lambda d} \left( \alpha + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda \alpha} - \frac{1}{\lambda} \right) \text{ 이면, } Q_0^* = p\alpha$$

$$S > \frac{hp(p-d)}{\lambda d} \left( \alpha + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda \alpha} - \frac{1}{\lambda} \right) \text{ 이면, } Q_0^* > p\alpha$$

[정리 3]의 결과로 부터 재고고갈 비용  $\pi$

에 따른  $q_2(Q_0^*)$ 값의 변화를 살펴보자. 재고고갈 비용이 무한히 커질 때, 즉, Lost sales를 허용하지 않을 때는  $q_2(Q_0^*) < 0$ 이므로  $Q^* < Q_0^*$ 이다. 이는 Lot의 크기  $Q^*$ 는 생산시간에 비례하기 때문에 재고고갈이 발생되면 안 되므로 최대한 생산량을 크게 하여 수리시간 동안의 재고고갈을 방지하자는 것이며 생산시간은 최소한  $\alpha$ 보다 커야 한다. 재고고갈이 발생되어도 비용함수에는 하등의 영향을 미치지 못할 때, 즉, 비용이 0으로 갈 때는  $q_2(Q_0^*) > 0$ 이므로  $Q^* < Q_0^*$ 이다. 이 경우  $Q^*$ 는 재고고갈 비용과 무관하므로 정비비용과 재고 보유비용을 생산 준비비용과 비교했을 때 이들 비용이 너무 크지 않도록 하는 Lot 크기  $Q^*$ 를 구한다.

[정리 4]

$Q^* \geq p\alpha$  일 때

- i)  $Q^* < Q_0^*$  이면,  $C_1(Q^*) < C_0(Q_0^*)$
- ii)  $Q^* = Q_0^*$  이면,  $C_1(Q^*) = C_0(Q_0^*)$
- iii)  $Q^* > Q_0^*$  이면,  $C_1(Q^*) > C_0(Q_0^*)$

<증명>

수리시간을 필요로 할 때와 필요로 하지 않을 때의 최적 생산량  $Q^*$ 와  $Q_0^*$ 에서의 비용은 각각  $C_1(Q^*) = \frac{\lambda d M}{p} + \frac{h(p-d)}{p} Q^*$ ,  $C_0(Q_0^*) = \frac{\lambda d M}{p} + \frac{h(p-d)}{p} Q_0^*$ 로 그 비용함수 형태가 동일하므로  $Q^*$ 와  $Q_0^*$ 의 크기에 따라  $C_1(Q^*)$ 와  $C_0(Q_0^*)$ 의 크기가 달라진다. ■

4. 수치실험

H.Groenevelt et al. [1]의 예제에서 사용한

입력자료를 바탕으로 기계의 수명이 모수  $\lambda$  인 지수분포를 따를 때 본 연구의 결과를 예시하고자 한다. 수리시간이 있을 때와 없을 때의 최적 생산량  $Q^*$ ,  $Q_0^*$ 와  $Q^*$ ,  $Q_0^*$ 에서의 평균 비용은 생산시스템의 특성치와 비용요소에 따라 표 1에서 표 4에 나타난 바와 같다. 그리고, 이들 표의 내용을 그림 4, 그림 5에 나타내었다.

1) 생산시스템의 고장을 변화에 따른  $Q_0^*$ ,  $C_0(Q_0^*)$ ,  $Q^*$  및  $C(Q^*)$

표 1. Case 1 :  $h=10, p=35, d=30, \pi=50, L=0.5, S=450, M=1000$  일 때

$\lambda$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$Q_0^*$	147.10	158.09	170.64	184.93	201.04
$C_0(Q_0^*)$	295.85	397.27	500.92	607.04	715.77
$Q^*$	160.69	183.56	206.90	230.71	254.35
$C(Q^*)$	315.27	433.66	552.72	672.45	791.93

$\lambda$	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$Q_0^*$	218.97	238.58	259.63	281.86	304.99
$C_0(Q_0^*)$	827.10	940.82	1056.62	1174.09	1292.85
$Q^*$	276.81	297.02	314.19	327.86	337.84
$C(Q^*)$	909.72	1024.31	1134.56	1239.80	1339.77

주 : 1.  $p\alpha=105$

2) 수리시간의 변화에 따른  $Q^*$  및  $C(Q^*)$   
 수리시간을 고려하지 않았을 때의 모형에 대해서 분석한 H.Groenevelt et al. [1]는 고장을  $\lambda$ 와 고장 수리비용  $M$ 의  $Q_0^*$ 와의 관계에 대해서 표 1과 표 2에 나타난 바와 같이 고장을  $\lambda$ 가 증가하면  $Q_0^*$  역시 증가하지만, 고장 수리비용  $M$ 은  $Q_0^*$ 의 결정에 무관하다는

표 2. Case 2 :  $h=10, p=35, d=30, \pi=50, L=0.5, S=450, M=3000$  일 때

$\lambda$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$Q_0^*$	147.10	158.09	170.64	184.93	201.04
$C_0(Q_0^*)$	467.28	740.13	1015.21	1292.75	1572.91
$Q^*$	158.81	175.87	188.57	195.77	195.99
$C(Q^*)$	484.02	765.53	1040.82	1308.24	1565.70

$\lambda$	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$Q_0^*$	218.97	238.58	259.63	281.86	304.99
$C_0(Q_0^*)$	1855.67	2140.82	2428.05	2716.94	3007.13
$Q^*$	187.95	170.85	144.34	108.25	95.23
$C(Q^*)$	1811.36	2044.07	2263.35	2468.93	2661.17

주 : 1.  $p\alpha=105$

표 3. Case 1 :  $\lambda=0.2, h=75, p=35, d=30, \pi=750, S=450, M=1000$  일 때

L	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
$Q^*$	99.37	173.79	250.24	324.98	396.74
$C(Q^*)$	1236.11	2033.54	2852.55	3653.36	4422.22
$p\alpha$	63	126	189	252	315

L	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0
$Q^*$	464.90	529.18	589.53	646.03	698.86
$C(Q^*)$	5152.50	5841.24	6487.83	7093.20	7659.22
$p\alpha$	378	441	504	567	630

주 : 1.  $L=0$ 일 때  $Q_0^*=52.72, C_0(Q_0^*)=736.27$  임.

것을 증명하였다. 이에 반해, 수리시간을 고려할 경우에는 식 (12), (13)에서 보는 바와 같이  $Q^*$ 는 고장을  $\lambda$  뿐만이 아니라 고장 수리비용  $M$ 에 의해서도 영향을 받는다. 그 결과 표 1에서와 같이  $\lambda$ 가 증가함에 따라 일건

표 4. Case 2 :  $\lambda=0.2, h=75, p=35, d=30,$   
 $\pi=525, S=450, M=1000$  일 때

L	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
Q*	87.04	144.06	202.10	257.76	239.32
C(Q*)	1104.02	1714.95	2336.77	2933.16	3492.81
$p\alpha$	63	126	189	252	315

L	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0
Q*	181.73	153.62	136.45	124.70	116.07
C(Q*)	4000.97	4464.81	4891.42	5285.74	5651.64
$p\alpha$	378	441	504	567	630

주: 1. L=0일 때  $Q_0^*=52.72, C_0(Q_0^*)=736.27$  일.

$Q^*$  역시 증가하는 것 처럼 보일 수 있으나, 표 2에서와 같이 고장 수리비용  $M$ 이 클 때는  $\lambda$ 가 증가한다고 해서  $Q^*$  역시 항상 증가하는 것은 아니고, 어느 정점을 고비로 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 특히, 표 2에서  $\lambda$ 가 0.9까지 커짐에 따라  $Q^*$ 는  $Q^* \geq p\alpha$ 에서 결정되었으나,  $\lambda=1.0$ 일 때는  $Q^* < p\alpha$ 에서 결정되어 생산시스템이 고장날 때 마다 항상 재고고갈이 발생하게 되는 경우도 있다. 이는  $\lambda$ 가 커짐에 따라 재고고갈 비용  $\pi$ 와 고장 수리비용  $M$ 과의 상대적인 차이에 의해 [정리 1]의  $Q^*$ 의 존재영역 결정조건이 바뀌기 때문이다. 표 2에서와 같이  $\lambda$ 가 증가함에 따라  $Q^*$ 가 증가하다가 다시 감소하는 현상은 수리시간을 반영함에 따라 나타나는 흥미로운 현상으로서 이는 다음과 같이 설명할 수 있다.  $\lambda$ 가 증가하면 기계의 평균 수명 (MTTF : Mean Time To Failure)은 짧아진다. 이에 따라, 생산시간이 길어지게 되면 즉, 생산량  $Q^*$ 가 커지면 그 만큼 기계가 고장날 가능성은 높아지게 되며 수리비용의 부담이 커지게

된다. 따라서,  $\lambda$ 가 어느 정도까지는 증가하더라도 가능한 한 생산목표량을 크게하여 생산시간을 늘림으로써 재고보유 비용을 부담해서라도 수리비용의 부담을 줄이도록 노력하지만,  $\lambda$ 가 어느 한도 이상 커지게 되면 수리비용의 부담이 커지게 되므로 이때는 생산목표량을 적게하여 생산시간을 줄임으로써 더 이상의 수리비용의 부담을 줄이려 하기 때문이다.

또한, 수리시간이 증가함에 따라  $Q^*$ 의 존재영역이 표 4에서 보는 바와 같이  $Q^* \geq p\alpha$ 에서  $Q^* < p\alpha$ 로 바뀌면서  $Q^*$ 의 값이 증가하다가 감소하기도 하는 데 이는 [정리 1]의  $Q^*$ 의 존재영역 결정조건이 수리시간이 바뀌에 따라 이 역시 바뀌기 때문이다. 이에 대한 설명을 부가하면 다음과 같다. 생산과정 도중에 고장이 발생하면 경우에 따라 재고고갈이 발생한다. 그런데, 수리시간이 커지게 되면 재고고갈이 발생했을 경우 그 만큼 재고고갈 비용의 부담이 커지게 된다. 따라서, 수리시간이 증가하면 수리시간이 어느 정도까지는 증가하더라도 생산목표량을 크게 하여 보유 재고량을 늘림으로써 재고보유 비용을 부담해서라도 재고고갈 비용의 부담을 줄이도록 노력하지만, 수리시간이 어느 한도 이상 커지게 되면 재고고갈 비용의 부담이 더욱 커지게 되므로 이때는 생산목표량을 적게하여 생산시간을 줄임으로써 기계가 고장나더라도 재고고갈 비용의 부담을 줄이려 하기 때문이다.

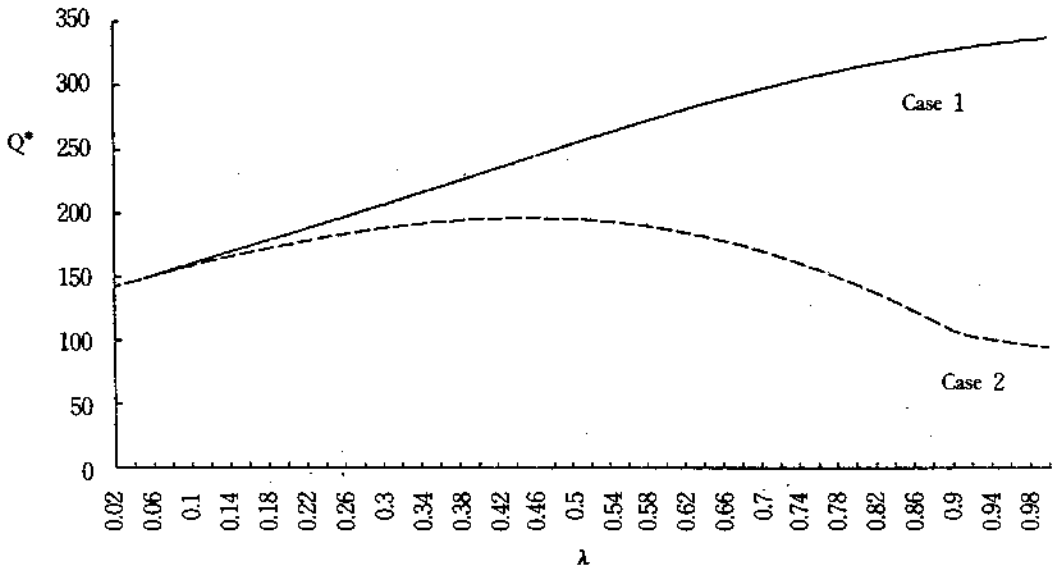


그림 4. 생산시스템의 고장율 변화에 따른  $Q^*$

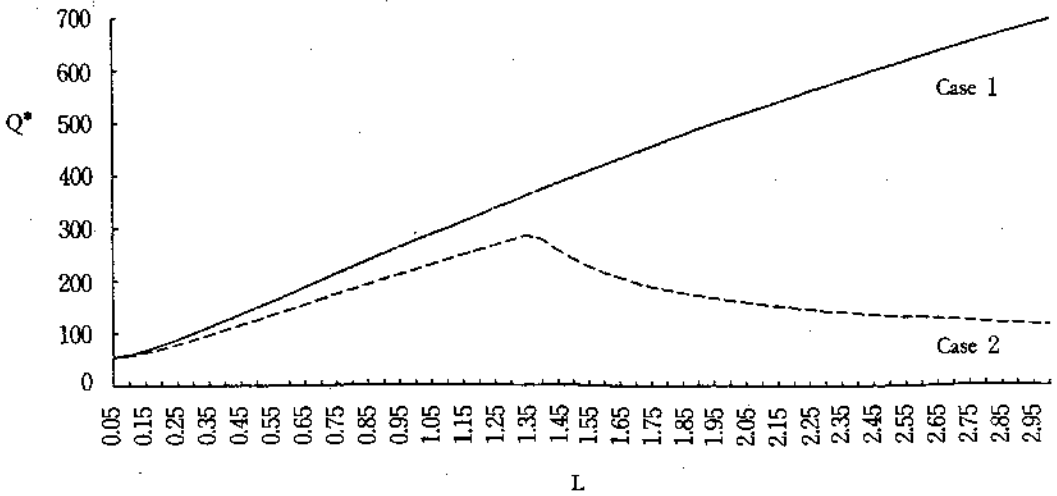


그림 5. 수리시간의 변화에 따른  $Q^*$

## 5. 끝맺음 말

이상에서 생산 시스템이 불완전하여 고장이 날 수 있으며 지수 분포의 수명을 가질 때, 수리시간을 필요로 하는 경우에서의 경제적인 생산량 결정에 관한 문제를 분석하였다. 비용함수는 실행가능 영역에 따라 두 가지의 비용함수를 도출할 수 있었고, 이들 비용함수에 대한 최적 생산량의 결정 및 해가 유일하게 존재함을 보일 수 있었으며, 수리시간을 허용할 때와 허용하지 않았을 때의 최적 생산량과 그 때의 비용 함수간의 관계를 주어진 관련 비용 모수와의 관계식으로 나타내었다. 그리고, 수치실험을 통해 생산시스템의 특성과 비용요소의 변화에 따른 감도 분석을 실시하였다.

본 모형에 대한 확장으로는 먼저, 수리시간이 확률적일 때를 고려할 수 있다. 이 경우는 수리시간에 대한 확률분포를 가정하여 본 모형에서 전개한 방법과 유사하게 전개하면 큰 어려움은 없을 것으로 사료되며, 다음은 지금 현재 저자들에 의해 연구 중이지만 기계의 수명이 일반분포를 따를 때의 경우를 들 수 있다. 그리고, 다 품종 제품을 생산할 때의 모형도 고려해 볼 수 있는데, 이 경우 생산과정 도중 기계가 고장나면 수리 후 생산하던 품목을 계속 생산할 것인지, 다른 품목으로 바꾸어 생산할 것인지에 대한 결정도 포함되어야 할 것으로 보인다.

## 참 고 문 헌

- [1] H.Groenevelt, L.Pintelon and A.Seidmann, "Production Lot Sizing with Machine Breakdowns", Management Science, Vol. 38, No.1, pp. 104-123, Jan. 1992
- [2] ———, "Production Batching with Machine Breakdowns and Safety Stocks", Operations Research, Vol.40, No.5, pp. 959-971, 1992
- [3] A.C.Hax and D.Candea, "Production and Inventory management", Prentice-Hall, Inc., 1984, New Jersey
- [4] H.Lee and M.Rosenblatt, "Simultaneous Determination of Production Cycle and Inspection Schedules In a Production System", Management Science, Vol.33, No.9, pp.1125-1136, Sep. 1987
- [5] H.Lee and M.Rosenblatt, "A Production and Maintenance Planning Model with Restoration Cost Dependent on Detection Delay", IIE Transactions, 21(4), pp. 368-375, 1989
- [6] M.Rosenblatt and H.Lee, "Economic Production Cycles with Imperfect Production Processes", IIE Transactions, 18(1), pp. 48-55, 1986
- [7] S.Ross, "Stochastic Processes", John Wiley, New York, 1983