ISSN 1229-1889(Print)
ISSN 2287-9005(Online)
J Korean Soc Qual Manag Vol. 47, No.1: 87-96, March 2019
https://doi.org/10.7469/JKSQM.2019.47.1.87

생산설비의 유지보수서비스와 제품의 불량률을 고려한 최적 생산주기 연구

김미경[*] · 박민재[**†]

[*]연세대학교 응용통계학과
[**]홍익대학교 경영학과

Determining an Optimal Production Time for EPQ Model with Preventive Maintenance and Defective Rate

Migyoung Kim[*] · Minjae Park[**†]

[*]Department of Applied Statistics, Yonsei University
[**]College of Business Administration, Hongik University

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this paper is to determine an optimal production time for economic production quantity model with preventive maintenance and random defective rate as the function of a machinery deteriorates.
Methods: If a machinery shifts from "in-control" state to "out-of-control" state, a proportion of defective items being produced increases. It is assumed that time to state shift is a random variable and follows an arbitrary distribution. The elapsed time until process shift decreases stochastically as a production cycle repeats and quasi-renewal process is used to implement for production facilities to deteriorate.
Results: When the exponential parameter for exponential distribution increases, the optimal production time increases. When Weibull distribution is considered, the optimal production time is closely affected by the shape parameter of Weibull distribution.
Conclusion: A mathematical model is suggested to find optimal production time and optimal number of production cycles and numerical examples are implemented to validate the patterns for changes of optimal times under different parameters assumptions. The real application is implemented using the proposed approach.

Key Words: Deterioration, Economic Production Quantity, Imperfect Production Process, Optimal Production Time, Preventive Maintenance, Quality Management

● Received 7 February 2019, 1st revised 19 February, accepted 20 February 2019
† Corresponding Author(mjpark@hongik.ac.kr)

※ This work was supported by the National research Foundation of Korea Grant funded by Korea Government (NRF-2014S1A5A8012594)

1. 서 론

오랫동안 연구자들은 다양한 요인과 조건을 고려하여 가정을 세우고 경제적 생산량 모형을 개발했다. 모형을 개발하고자 만든 가정 중에는 현실을 반영한 것도 있었고 모형을 단순화하기 위해 현실을 제대로 반영하지 못한 것도 있었다. Whitin(1957)는 최적 생산 주기와 경제적 생산량을 구하기 위해 수요량이 일정하고 재고비용이 고정되어 있으며 생산공정 중에 불량품은 생산되지 않는다고 가정했다. 그 후 Rosenblatt and Lee(1986)는 생산공정에서 불량품이 나올 수 있다는 가정을 세우고 최적 생산량 모형을 개발했다. 그들은 생산 설비가 불량품을 생산하는 경우 불량품 처리비용을 생산비용에 포함하고 이 비용이 생산주기에 영향을 끼친다고 생각했다. Rosenblatt and Lee(1986)외에도, Portues(1986)는 불량품으로 인한 생산비용을 고려하면서 최적 생산량모형을 개발하였다. Lin et. al.(1991)은 Rosenblatt and Lee(1986)의 연구를 응용하여 발전시켰다. Hariga and Ben-Daya(1998)와 Kim and Hong(1999)은 지수 분포를 이용하여 고장률 함수를 상수로 가정하고 연구를 행하였다. 그러나, 지수 분포는 고장률 함수가 상수이기 때문에 시간이 지나도 제품의 성능저하를 반영하지 못하는 한계가 있다.

생산설비의 품질 수준이 낮아지면 불량품을 생산하게 되기 때문에 생산설비의 품질 수준을 유지하기 위한 유지보수 서비스가 필요하다. 본 연구에서는 생산설비에 대한 유지보수서비스가 완전한 경우와 완전하지 못한 경우를 고려한다. 유지보수 서비스가 완전하지 못한 경우, 즉 유지보수 서비스를 받은 생산설비가 새것처럼 작동하지 않는다는 것은 최적 생산량 모형을 개발할 때 주로 고려되는 가정 중에 하나이다. Pham and Wang(1996)이 불완전한 유지보수서비스의 개념을 처음으로 고려한 이후 많은 연구자들이 불완전한 유지보수서비스를 이용한 연구를 행하였다. 완벽하지 않은 유지보수 서비스를 받은 생산설비가 '새것처럼 좋은 상태'와 '고장난 것처럼 나쁜 상태'의 중간에 있다고 가정하는 것이다. Ben-Daya(2002)는 유지보수 정도가 유지보수 비용에 의해 결정된다고 했다. 더 많은 유지보수비용을 지불하면 유지보수 서비스의 수준이 더 높아진다고 가정했다. Liao et al.(2009)은 불완전 유지보수서비스의 횟수가 많아질수록 생산설비가 완벽하게 작동하는 확률이 더 높아진다고 가정했다. 최근들어 생산설비를 위한 예방보전서비스에 대한 연구는 더욱 다양하게 이루어지고 있다 (Ha and Park(2017), Lim(2017), Lim et al. (2018) and Park and Park(2018)). Lin and Kroll(2006)은 생산설비의 고장율을 고려한 경제적 생산량 모형을 개발하였다. 그들은 사용시간이 지남에 따라 생산설비가 노후화되어 점점 더 불량품이 많이 생산된다고 가정하고 생산설비가 고장날 때는 수리보전서비스를 제공하는 모형을 개발했다. Sheu and Chen(2004)은 불완전한 생산설비를 위한 단계별 예방보전 서비스를 구상하여 예방보전 서비스를 받으면 생산설비의 수명이 늘어난다고 가정했다. Shah et al.(2018)은 어떠한 경우에도 불량품의 생산을 피할 수 없다고 생각하고 재작업하거나 폐기하거나 환불해 주는 세가지 대응방안을 고려하여 각각의 보전정책모형을 개발했다.

본 연구에서는 Rosenblatt and Lee(1986)의 불완전 생산공정 개념과 Pham and Wang(2001)의 완전하지 않은 유지보수서비스의 개념을 사용하여 최적 생산량 모형을 개발하고 최적 생산 시간을 결정한다. 생산설비가 일정 비율 이상으로 불량품을 생산하면 제어불능상태(Out-of-control condition)가 된다. 공정변동은 생산설비가 제어상태(In-control condition)에서 제어불능상태로 바뀌는 것을 말한다. 생산주기가 반복되면서 생산설비는 노후화되고 공정변동까지의 경과 시간은 확률적으로 감소한다. 각 생산주기마다 공정변동까지의 경과 시간 예상치는 다르고 이를 최적 생산 시간에 반영하기 위해 생산설비의 수명 동안 생산주기를 고려한다. 생산주기에서는 총비용을 최소로 하는 최적 생산시간을 찾는다. 확률적으로 감소하는 경과 시간을 나타내기 위해 Wang and Pham(1996)이 제안한 유사재생과정(Quasi-renewal process)을 사용한다. 재생과정(Renewal process)을 이용하여 분석하는 경우는 연속적인 사건들 사이의 시간들이 독립적이며 동일하게 분포되어 있다고 가정한다. 유사재생과정은 연속된 사건들 사이의 시

간들이 확률적으로 감소한다고 가정한다. Wang and Pham(1996)이 유사재생과정을 도입한 이후 이에 관한 많은 연구가 진행되었다. Pham and Wang(2001)은 소프트웨어의 신뢰성을 측정하기 위해 유사재생과정을 적용했고 Liu and Huang(2010)은 완전하지 않은 유지보수 서비스를 고려하여 보전정책모형을 만드는데 유사재생과정 개념을 적용했다. Bai and Pham(2005)은 유사재생과정을 이용하여 수리서비스를 무한대로 제공하지 않고 어느 시점이후에는 교체서비스를 제공한다는 모형을 연구했다. 고객입장에서는 고장난 제품을 계속 기다리지 않아도 되고 생산자입장에서도 고장난 제품으로 인한 더 큰 법적 책임을 회피할 수 있게 되어 서로에게 윈윈(Win-win)전략이라고 판단했다. Park and Pham(2008)은 유사재생과정을 이용하여 *k-out-of-n* 시스템을 대상으로 보증손익모형을 분석했다. Park and Pham(2010)은 유사재생과정을 응용하여 대체(Altered) 유사재생과정과 혼합(Mixed) 유사재생과정 등의 두 가지 유사재생과정을 개발했다. 그들은 고장이 난 제품을 수리한 후 다음 고장이 오는 시기가 짧아진다는 점에 착안하여 다양한 유사재생과정을 개발하고 보증수익분석을 실시했다. 본 연구에서는 유사재생과정을 이용하여 경제적 생산량 모형을 개발하고 비용을 최소화하는 최적 생산 시간을 찾는다.

앞으로 전개될 본문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 생산 설비의 예방보전 서비스와 생산설비에서 생산하는 제품의 불량률을 고려한 최적 생산 시간을 찾기 위한 경제적 생산량 모형을 개발한다. 일반적인 분포를 고려한 모형을 개발하고 특별한 형태로서 지수 분포를 이용하여 구체적인 모형을 얻는다. 3장에서 수치 예제를 통해 일부 변수의 변화에 따른 최적 생산 시간의 변화를 보여준다. 마지막으로 4장에서는 연구결과를 바탕으로 결론을 제시한다.

2. 예방보전서비스와 불량률을 고려한 최적 생산량 모형

본 장에서는 생산주기의 평균 비용을 최소화하는 최적 생산 시간을 연구한다. 생산주기는 제품을 생산하기 위해 생산설비를 운행하는 단위기간을 나타낸다. 생산설비의 성능이 저하되어 제어상태에서 제어불능상태로 변하는 공정변동이 일어날 때, 생산 설비의 성능이 기준에 미치지 못한다고 판단한다. 공정변동이 일어나면 생산설비는 불량품을 생산한다. 생산주기는 생산 설비의 성능이 기준에 미치지 못할 때 또는 목표로 한 생산량을 생산했을때 종료된다. 최적 생산 시간을 찾기 위해서는 먼저 생산주기에서 불량품 수를 추정해야 한다. 그 후 불량품으로 인한 비용을 반영해 생산주기의 비용을 계산하고 평균 비용을 최소화하는 최적 생산 시간을 결정한다.

N번째 생산주기에서 불량품 수를 확률변수 Y_n 으로 표시한다. x_n은 n번째 생산 주기에서 공정 변동이 일어나는 시간을 나타낸다. 공정변동이 발생하면 불량품이 생산된다. P는 생산율이고 $\alpha,(0 \le \alpha \le 1)$는 생산되는 제품 중 불량품의 비율이라고 가정하면 시점 t에서 불량품의 갯수 Y_n은 다음과 같다.

$$Y_n = \begin{cases} 0 & x_n \ge t \\ \alpha P(t - x_n) & x_n < t \end{cases} \tag{1}$$

n번째 생산주기에서 공정 변동까지 경과 시간은 확률밀도함수 $f_n(x)$를 갖는다.

Wang and Pham(1996)이 제안한 유사재생과정의 정의는 다음과 같다. 확률변수 $X_i, i = 1,2,\cdots,$가 확률밀도함수 $f_i(x)$, 누적분포함수 $F_i(x)$, 위험률함수 $h_i(x)$를 갖는다. X_n을 n번째 생산주기에서 공정변동이 일어나는 시간이라고 가정하고 $X_n = a^{n-1} \cdot Z_n, n = 1,2,\cdots$인 경우 Z_n이 iid이고 a는 $0 < a \le 1$인 상수일때 $\{N(t), t > 0\}$이 셈과정(counting process)이면 $\{N(t), t > 0\}$을 유사재생과정이라고 한다. 이때 확률변수 $X_n, n = 2,3,\cdots,$의 확률밀도함수

$f_n(x)$, 누적분포함수 $F_n(x)$, 위험률함수 $h_n(x)$는 각각 다음과 같다.

$$f_n(x)=\frac{1}{a^{n-1}}f_1\left(\frac{1}{a^{n-1}}x\right),F_n(x)=\frac{1}{a^{n-1}}F_1\left(\frac{1}{a^{n-1}}x\right),h_n(x)=\frac{1}{a^{n-1}}h_1\left(\frac{1}{a^{n-1}}x\right) \tag{2}$$

식(1)과 식(2)를 이용하여 n번째 생산주기에서 불량품의 예상 개수를 구하면 다음과 같다.

$$E[Y_n]=\int_0^t \alpha P(t-x)f_n(x)dx \tag{3}$$

총비용은 생산설비의 수명 동안 발생한 모든 비용을 의미하고 생산준비비, 재고유지비, 불량품처리비용으로 구성된다. 생산준비비(c_s), 재고유지비(c_h), 불량품처리비용(c_d), 생산율(P), 소비율(D)을 고려하면 r번의 생산주기동안 총비용 (Total cost: $TC(t)$)은 다음과 같다.

$$TC(t)=rc_s+rc_h\frac{(P-D)t}{2}+\sum_{n=1}^{r}c_dY_n \tag{4}$$

단순화를 위하여 생산주기가 한번이라고 가정하면 수식(4)은 수식(5)가 된다. 만약 시점 t대신 생산량 Q와 생산율 P를 이용하면 총비용은 다음과 같다.

$$TC\left(\frac{Q}{P}\right)=c_s+c_h\frac{(P-D)Q}{2P}+c_d\cdot Y_1 \tag{5}$$

현재시점 t에서 총기대비용 (Expected total cost: $ETC(\bullet)$)은 다음이다.

$$ETC\left(\frac{Q}{P}\right)=c_s+c_h\frac{(P-D)Q}{2P}+c_d\int_0^t \alpha P(t-x)f(x)dx \tag{6}$$

총기대비용을 시간 $T(=Q/P)$으로 나누면 총기대비율 (Expected total cost rate: $ETCR(\bullet)$)이 된다.

$$ETCR\left(\frac{Q}{P}\right)=c_s\frac{P}{Q}+c_h\frac{(P-D)}{2}+c_d\cdot\frac{P}{Q}\cdot\int_0^t \alpha P(t-x)f(x)dx \tag{7}$$

평균 비용은 총비용을 생산설비의 수명으로 나눈 값이다. 생산 주기의 시간 t를 고려하여 총 생산설비 작동시간이 rt라고 가정하면 총기대비율 $ETCR(t)$은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}ETCR(t)&=\frac{TC(t)}{rt}=\frac{c_s}{t}+c_h\frac{(P-D)}{2}+\frac{1}{rt}\sum_{n=1}^{r}c_dE[Y_n]\\&=\frac{c_s}{t}+c_h\frac{(P-D)}{2}+\frac{c_d}{rt}\sum_{n=1}^{r}\int_0^t \alpha P(t-x)f_n(x)dx\end{aligned} \tag{8}$$

최적 생산시간은 $ETCR(t)$를 최소화하는 시간 t^*가 된다. 먼저, 지수 분포를 이용하여 총기대비율을 구한다. 첫 번째 생산 주기에서 공정 변동까지 시간이 평균이 μ인 지수 분포를 따른다면 n번째 생산 주기에서 공정 변동은 다음의 확률 밀도 함수를 따른다.

$$f_n(x)=\frac{1}{a^{n-1}}f_1\left(\frac{1}{a^{n-1}}x\right)=\frac{1}{a^{n-1}\mu}e^{-x/(a^{n-1}\mu)} \tag{9}$$

본 연구에서 생산 주기가 반복됨에 따라 생산설비가 노후화되어 공정 변동까지 도달시간이 점점 줄어들기 때문에 $a<1$인 경우를 고려한다. 지수 분포를 이용하는 경우 n번째 생산주기에서 불량품의 예상 갯수 $E[Y_n]$는 아래와 같다.

$$E[Y_n]=\alpha P\left[t+a^{n-1}\mu e^{-t/a^{n-1}\mu}-a^{n-1}\mu\right] \tag{10}$$

지수 분포를 이용하여 생산주기의 총기대비용 $ETC(t)$을 구하면 다음과 같다.

$$ETC(t)=rc_s+rc_h\frac{(P-D)t}{2}+\sum_{n=1}^{r}c_d\alpha P\left[t+a^{n-1}\mu e^{-t/a^{n-1}\mu}-a^{n-1}\mu\right] \tag{11}$$

총기대비율 $ETCR(t)$은 다음과 같다.

$$ETCR(t)=\frac{c_s}{t}+c_h\frac{(P-D)}{2}+c_d\alpha P+\frac{c_d\mu\alpha P}{rt}\sum_{n=1}^{r}a^{n-1}\left(e^{-t/a^{n-1}\mu}-1\right) \tag{12}$$

총비용을 최소화하는 최적생산시간 t^*는 다음과 같이 주어진다.

$$\arg\min_t\left(\frac{c_s}{t}+\frac{c_d\mu\alpha P}{rt}\sum_{n=1}^{r}a^{n-1}\left(e^{-t/a^{n-1}\mu}-1\right)\right) \tag{13}$$

맥로린 시리즈(McClaurin Series)를 사용해 식(13)을 최소화하는 최적 생산시간 t^*를 결정한다. 맥로린 시리즈를 이용하여 3차항보다 높은 항은 작은 수이므로 무시한다고 가정하면 식(13)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\sum_{n=1}^{r}a^{n-1}+\sum_{n=1}^{r}\frac{1}{a^{n-1}\mu}\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{\mu}\right)t^2+\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{r}\frac{1}{a^{2n-2}\mu^3}t^3=-\frac{c_s r}{c_d\mu\alpha P} \tag{14}$$

식(14)를 풀면 생산설비의 수명동안 평균 비용을 최소화하는 최적 생산시간 t^*을 구할 수 있다. 3장에서는 수치예제를 이용하여 최적 생산시간을 구해본다.

3. 수치예제

수치예제를 위해서 Rosenblatt and Lee(1986)의 연구에서 사용한 3옴 저항기(3-ohm resistor)의 자료를 이용한다. Rosenblatt and Lee(1986)이 사용한 3옴 저항기 자료의 실제 수요율(D)은 월 단위(Monthly) 200개이고 생산율(P)은 월단위 400개이다. 생산준비비(Set-up cost)는 \$32이고 단위당 재고유지비(Inventory holding cost per unit)는 \$0.08이다. 생산설비가 제어불능상태가 된 경우의 불량률은 5%이고 단위당 불량품처리비용은 \$10이라고 가정한다. 생산주기에서 생산설비가 제어불능상태로 변환되는 시간을 와이블 분포를 이용하는 경우와 지수 분포를 이용하는 경우 등 두 가지 분포를 고려한다. 와이블 분포는 여러 가지 장점이 있어서 신뢰성 모형 등에 가장 많이 쓰이는 분포 중 하나이다. 와이블 분포는 생산설비의 사용시간이 오래되어 고장율이 증가하게 되는 경우 또는 작업자가 능숙하게 되어 오히려 고장율 또는 사고율이 감소하는 경우 등 다양한 경우를 모형화할 수 있다. 또한, 지수

분포는 신뢰성 척도 추정이 쉽고 수학적으로 다루기 편하여 널리 이용되는 확률분포이며 전자제품의 신뢰도 예측에 많이 사용된다. 시간이 지나도 고장률이 변하지 않는 제품이나 다수의 부품으로 구성된 제품 또는 일정기간의 번인 기간(Burn-in period)을 거쳐 초기고장이 제거된 제품 등의 신뢰도 예측에 주로 쓰인다. 본 장의 수치예제를 위해 R 소프트웨어를 사용한다.

형상모수(Shape parameter) κ와 척도모수(Scale parameter) λ를 가지는 와이블 분포의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(x;\lambda,\kappa)=\frac{\kappa}{\lambda}\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\kappa-1}e^{-(x/\lambda)^{\kappa}}p \tag{15}$$

생산설비의 제어불능상태까지의 시간을 유사재생과정을 이용한 와이블 분포라고 가정하고 최적 생산시간과 최적 생산주기의 횟수를 구하여 표1을 얻었다. 민감도 분석을 위해 형상모수 κ와 척도모수 λ, 그리고 유사재생과정의 변수 a의 다양한 값을 대입한다. 표 1에서 알 수 있듯이, 형상모수 κ와 척도모수 λ가 각각 1이고 10일 때 유사재생과정의 변수 a가 0.7인 경우는 최적 생산시간은 1.745개월이고 최적 생산주기의 횟수는 2번이다. 유사재생과정의 변수 a가 증가하면 한 생산설비에서 실행하는 최적 생산주기 횟수가 증가한다. 예를 들어, $\lambda=10$ and $\kappa=1$이고, a가 각각 0.7,0.9,0.95일 때 최적 생산주기의 횟수 r은 각각 2,7,14의 값을 갖는다. 이것은 유사재생과정의 변수 a가 높아질수록 생산설비의 내구성이 높아짐을 뜻하기 때문이다. 그러나 유사재생과정의 변수 a가 최적 생산 시간에 미치는 효과는 미미하다는 것을 알 수 있다. 이는 λ와 κ의 영향때문이다. 다른 변수들이 고정되어 있을때 κ,λ가 증가하면 최적 생산 시간은 증가한다. 예를 들어, $\lambda=10, a=0.7$일 때, κ가 1,2,3,4,5가 되면 최적생산시간은 1.745, 2.565, 3.270, 3.814, 4.232가 된다. 와이블 분포의 형상모수 κ와 척도모수 λ가 최적 생산 시간에 어떤 영향을 미치는지 알 수 있다.

Table 1. Optimal production time and optimal number of production cycle when a Weibull distribution is considered

λ	κ	$a=0.7$		$a=0.9$		$a=0.95$	
		r^*	$t*$	r^*	$t*$	r^*	$t*$
10	1	2	1.745	7	1.634	14	1.622
	2	2	2.565	6	2.426	12	2.398
	3	2	3.270	6	3.068	12	3.029
	4	2	3.814	6	3.560	12	3.512
	5	2	4.232	6	3.934	12	3.879
5	1	2	1.274	5	1.258	10	1.247
	2	2	1.638	4	1.675	8	1.652
	3	2	1.961	4	2.023	8	1.992
	4	2	2.205	4	2.293	9	2.198
	5	2	2.387	5	2.359	9	2.389
3	1	4	1.000	11	1.000	22	1.000
	2	3	1.037	10	1.000	20	1.000
	3	3	1.141	10	1.046	20	1.040
	4	3	1.214	10	1.105	20	1.098
	5	3	1.264	10	1.143	20	1.137

그림 1은 와이블 분포의 형상모수와 유사재생과정의 변수와 최적 생산시간과의 관계를 나타낸다. 그림 1에 따르면 형상모수 κ가 증가할수록 최적 생산 시간 t^*은 증가한다. 또한, 유사재생과정의 변수는 생산주기의 횟수에는 영향을 끼치지만 생산시간에는 미미한 영향을 끼친다고 생각할 수 있다. 그림 2은 와이블 분포의 척도모수와 유사재생과정의 변수와 최적 생산시간과의 관계를 나타낸다. 그림 2에 따르면 척도모수 λ가 증가할수록 최적 생산 시간 t^*은 증가한다.

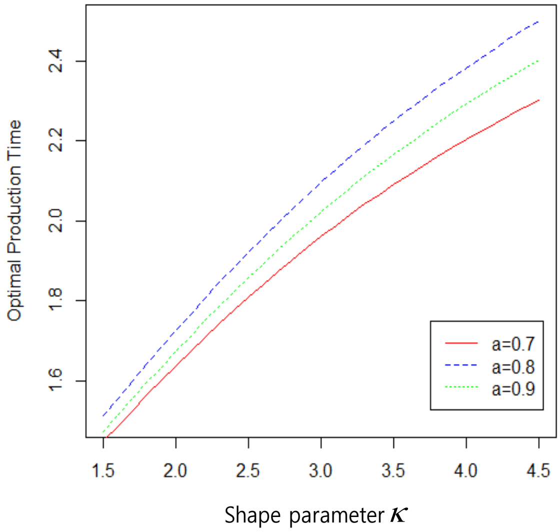

Figure 1. Relationship between optimal production time and shape parameter κ for Weibull distribution

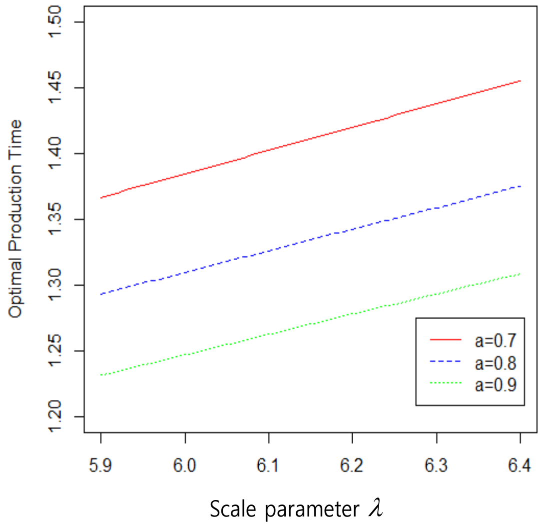

Figure 2. Relationship between optimal production time and scale parameter λ for Weibull distribution

이번에는 지수 분포를 이용한 식(13)을 이용하여 최적 생산시간과 최적 생산주기 횟수를 구한다. 와이블 분포의 특수한 경우가 지수 분포이기 때문에 와이블 분포를 이용한 경우와 크게 다르지 않다. 민감도 분석을 위해 유사재생과정의 변수 a와 지수 분포의 모수 μ를 이용하여 민감도 분석을 행한다. 민감도 분석의 결과는 표 2에서 확인할 수 있다. 유사재생과정의 변수 a가 증가할수록 생산주기의 횟수도 증가한다. 지수 분포의 모수 μ가 10이고 유사재생과정의 변수 a가 0.7인 경우는 와이블 분포를 이용한 경우와 같아진다. 지수 분포의 모수 μ가 20이고 유사재생과정의 변수 a가 0.7인 경우는 최적 생산시간은 λ1.996개월이고 최적생산주기의 횟수는 4번이다. 유사재생과정의 변수 a가 증가하면 한 생산설비에서 실행하는 최적 생산 주기 수가 증가한다. 예를 들어, $\mu=20$이고, a가 각각 0.7,0.9,0.95일 때 생산주기의 최적 횟수는 각각 4,14,28의 값을 갖는다. 이것은 와이블 분포의 경우와 마찬가지로 유사재생과정의 변수 a가 커질수록 생산설비의 내구성이 높아짐을 뜻하기 때문이다. 그러나 유사재생과정의 변수 a가 최적 생산 시간에 미치는 효과는 미미하다는 것을 알 수 있다. 다른 변수들이 고정되어 있을때 μ가 증가하면 최적 생산 시간은 증가한다. 예를 들어, $a=0.7$일 때, μ가 10,20,50,70,100이 되면 최적생산시간은 1.745, 1.996, 2.245, 2.352, 2.479가 된다.

Table 2. Optimal production time and optimal number of production cycle when an exponential distribution is considered

$1/\mu$	$a=0.7$		$a=0.9$		$a=0.95$	
	r	$t*$	r	$t*$	r	$t*$
1/10	2	1.745	7	1.634	14	1.622
1/20	4	1.996	14	1.856	28	1.852
1/50	7	2.245	22	2.231	45	2.209
1/70	8	2.352	26	2.296	52	2.317
1/100	9	2.479	29	2.453	59	2.444
1/10	4	1.456	12	1.432	24	1.427
1/20	6	1.642	19	1.610	37	1.636
1/50	8	2.020	27	1.912	55	1.902
1/70	9	2.111	30	2.023	62	1.987
1/100	10	2.219	34	2.087	69	2.089
1/10	7	1.119	22	1.108	45	1.099
1/20	9	1.245	29	1.229	59	1.224
1/50	11	1.495	38	1.395	77	1.399
1/70	12	1.555	41	1.467	83	1.475
1/100	13	1.627	44	1.551	90	1.543

그림 3은 지수 분포의 모수와 유사재생과정의 변수와 최적 생산시간과의 관계를 나타낸다. 그림 3에 따르면 모수 μ가 증가할수록 최적 생산시간 t^*은 증가한다. 유사재생과정의 변수는 생산주기의 횟수에는 영향을 끼치지만 생산시간에는 미미한 영향을 끼친다고 생각할 수 있다.

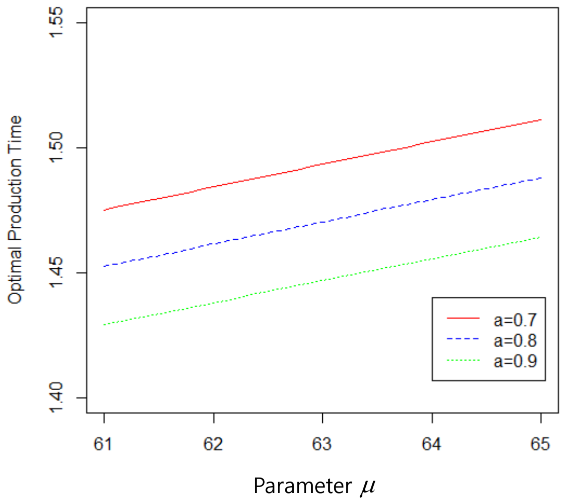

Figure 3. Relationship between optimal production time and parameter μ for exponential distribution

4. 결론

본 연구는 비용을 최소화하는 최적 생산시간과 생산주기의 최적 횟수를 분석하는 것이 목적이다. 생산설비가 제어불능 상태에 있으면 불규칙한 간격으로 불량품을 생산한다고 가정하고 이를 바탕으로 본 연구에서는 경제적 생산량 모형을 개발하고 보수유지서비스를 접목시켰다. 완벽하지 않은 보수유지서비스를 받은 생산설비는 고장 시간 간격이 점점 짧아지게 되므로 유사재생과정을 이용하여 모형화했다. 실제 데이터를 이용하여 개발한 모형을 분석하였으며 수익분석과 민감도분석을 시행했다. 생산준비비, 재고유지비, 불량품 처리비용 등을 고려하여 생산설비 성능 저하의 영향을 반영했고 수치 예제에서는 와이블 분포와 지수 분포를 이용했다.

앞으로의 연구주제로는 다양한 가정을 고려하여 좀 더 현실에 가까운 경제적 생산량 모형을 개발하는 것이다. 현재까지 경제적 생산량 모형 연구는 널리 행해진 연구분야이지만 보전/보증정책과 결합하여 함께 연구된 경우는 상대적으로 적다. 따라서 보전/보증 정책과 경제적 생산량 모형을 결합한다면 현실과 가까운 심화 연구가 가능할 것이라고 생각된다.

REFERENCES

Bai, Jun, and Hoang Pham. 2005. “Repair-limit risk-free warranty policies with imperfect repair.” IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans 35(6):765-772.

Ben-Daya, Mohamed. 2002. “The economic production lot-sizing problem with imperfect production processes and imperfect maintenance.” International Journal of Production Economics 76(3):257-264.

Groenevelt, Harry, Liliane Pintelon, and Abraham Seidmann. 1992. “Production lot sizing with machine breakdowns.” Management Science 38(1):104-123.

Ha, Jung Lang, and Minjae Park. 2017. “Optimal Maintenance Policy Using Non-Informative Prior Distribution and

Marcov Chain Monte Carlo Method.” Journal of the Applied Reliability 17(3):188-196.

Hariga, M, and M. Ben-Daya. 1998. “Note: the economic manufacturing lot-sizing problem with imperfect production processes: bounds and optimal solutions.” Naval Research Logistics 45(4):423-433.

Kim, Chang Hyun, and Yushin Hong. 1999. “An optimal production run length in deteriorating production processes.” International Journal of Production Economics 58(2):183-189.

Liao, Gwo-Liang, Yen Hung Chen, and Shey-Huei Sheu. 2009. “Optimal economic production quantity policy for imperfect process with imperfect repair and maintenance.” European Journal of Operational Research 195(2):348-357.

Lim, Jae Hak. 2017. “The Current Issues on Warranty & Maintenance Policy of the Second-Hand Products.” Journal of the Applied Reliability 17(2):159-167.

Lim, Jun Hyoung, Dong-Yeon Won, Hyun Su Sim, Cheol Hong Park, Kwan-Ju Koh, Jun-Gyu Kang, and Yong Soo Kim. 2018. “A Study on Condition-based Maintenance Policy using Minimum-Repair Block Replacement.” Journal of the Applied Reliability 18(2):114-121.

Lin, Gary C., and Dennis E Kroll. 2006. “Economic lot sizing for an imperfect production system subject to random breakdowns.” Engineering Optimization 38(1):73-92.

Lin, TM, ST Tseng, and MJ Liou. 1991. “Optimal inspection schedule in the imperfect production system under general shift distribution.” Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers 8(2):73-81.

Liu, Yu, and Hong-Zhong Huang. 2010. “Optimal replacement policy for multi-state system under imperfect maintenance.” Reliability, IEEE Transactions on 59(3):483-495.

Park, Minjae, and Dong Ho Park. 2018. “Two-dimensional Warranty Policy for Items with Refund Based on Korean Lemon Law.” Journal of the Applied Reliability 18(4):349-355.

Park, Minjae, and Hoang Pham. 2008. “Warranty system-cost analysis using quasi-renewal processes.” Opsearch 45(3):263-274.

Park, Minjae, and Hoang Pham. 2010. “Altered quasi-renewal concepts for modeling renewable warranty costs with imperfect repairs.” Mathematical and Computer Modelling 52(9-10):1435-1450.

Peterson, Rein, and Edward Allen Silver. 1979. Decision systems for inventory management and production planning: Wiley New York.

Pham, Hoang, and Hongzhou Wang. 1996. "Imperfect maintenance." European Journal of Operational Research 94(3):425-438.

Pham, Hoang, and Hongzhou Wang. 2001. “A quasi-renewal process for software reliability and testing costs.” Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on 31(6):623-631.

Porteus, Evan L. 1986. “Optimal lot sizing, process quality improvement and setup cost reduction.” Operations research 34(1):137-144.

Rosenblatt, Meir J., and Hau L. Lee. 1986. “Economic production cycles with imperfect production processes.” IIE transactions 18(1):48-55.

Shah, Nita H, Dushyantkumar G. Patel, and Digeshkumar B. Shah. 2018. “EPQ model for returned/reworked inventories during imperfect production process under price-sensitive stock-dependent demand.” Operational Research 18(2):343-359.

Sheu, Shey-Huei, and Jih-An Chen. 2004. “Optimal lot-sizing problem with imperfect maintenance and imperfect production.” International journal of systems science 35(1):69-77.

Wang, Hongzhou, and Hoang Pham. 1996. “A quasi renewal process and its applications in imperfect maintenance.” International journal of systems science 27(10):1055-1062.

Whitin, Thomson M. 1957. Theory of inventory management: Princeton University Press.