

두 가지 고장형태를 고려한 생산 및 예방보전 정책*

김호균*, 조형수**

*동의대학교 산업공학과, **부산대학교 BK21 로지스틱스 사업팀

A Production and Preventive Maintenance Policy with Two Types of Failures

Ho Gyun Kim*, Hyung Soo Cho**

*Dept. of Industrial Engineering, Donggeui University

**Logistics team of BK21, Pusan National University

Key Words: EMQ Model, Preventive Maintenance, Major(minor) Failure, Minimal Repair

Abstract

This paper studies an economic manufacturing quantity (EMQ) model with two types of failures and planned preventive maintenance of the production facility. One is a type I (major) failure which should be corrected by a failure maintenance and the other is a type II (minor) failure which can be minimally repaired without interrupting the production run. The objective is to determine the lot size and preventive replacement policy minimizing the long-run expected cost per unit time. We consider a control policy with a constant production lot size and preventive maintenance after completing n production runs. It is assumed that both preventive and failure maintenance times are random and the demand arriving during a stock-out period is lost. An expression for the expected cost per unit time is obtained in the general case. A special case is discussed and numerical results are provided.

1. 서론

고전적인 EMQ(Economic Manufacturing Quantity) 모형은 비현실적인 가정사항을 가지고 있음에도 불구하고 산업분야에서 생산/재고 관리를 위해 광범위하게 사용되고 있다. 최근에는 불완전한 생산설비를 갖는

EMQ 모형과 랜덤 퇴화(deteriorating) 생산 과정을 갖는 EMQ 모형에 많은 연구가 수행되어져 왔다. 생산 활동 중에 고장이 발생할 수 있는 불완전한 생산설비의 보전활동을 생산/재고 정책과 연계시킨 대표적인 연구로는 Groenevelt et al. (1992a, b), Makis & Fung (1998), Makis et al. (2000) 및 Lee &

* 본 연구는 2001년도 동의대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음

Srinivasan (2001)이 있다.

Groenevelt et al. (1992a)은 경제적 생산량의 결정에 생산설비의 고장과 사후보전(failure maintenance)의 효과를 처음으로 고려하였다. 생산설비는 고장이 발생하거나 1회의 생산 런을 끝마친 후에 보전되고, 보전활동은 생산설비를 AGAN(as good as new) 상태로 회복시킨다고 가정한 후, 최적 로트크기는 고전적인 EMQ 모형에서의 최적 로트크기보다 항상 크다는 것을 보였다. Groenevelt et al. (1992b)은 일반적인 수리 시간 및 안전재고를 통합한 EMQ 모형으로 확장시켰으며, Makis & Fung (1998)은 생산설비의 고장과 예방보전(preventive maintenance)이 최적 로트크기 및 검사스케줄에 미치는 영향을 조사하였다. Makis et al. (2000)은 예방보전과 두 가지 형태의 생산설비 고장(미세고장, 치명적 고장)을 갖는 EMQ 모형에 대한 연구에서, 보전활동에 소요되는 시간이 무시될 때 최적 생산 및 보전정책을 준-마코프 의사결정과정(semi-Markov decision process)으로 수식화하여, 최적 예방보전정책은 관리한계형태(control limit type)를 취하고 최적 로트크기는 생산설비의 수명에 대한 함수임을 밝혔다. 실제적으로 구현이 쉽지 않아 일정한 로트크기를 갖는 비교적 간단한 정책을 고려하여, 단위시간당 기대비용을 최소로 하는 최적 생산량과 예방보전이 수행되기 전까지 최적 생산 런의 수를 구하였다. 그러나 분석할 때 보전활동에 소요되는 시간을 무시하고 지수고장분포를 사용하였으며 미세고장만을 고려하여 수치예제를 제시하였다. Lee & Srinivasan (2001)은 일정한 수의 로트생산주기 후 예방보전을 시행하고 증가고장률을 갖는 생산설비의 생산 및 예방보전정책을 고려하였다. 이 정책 하에서

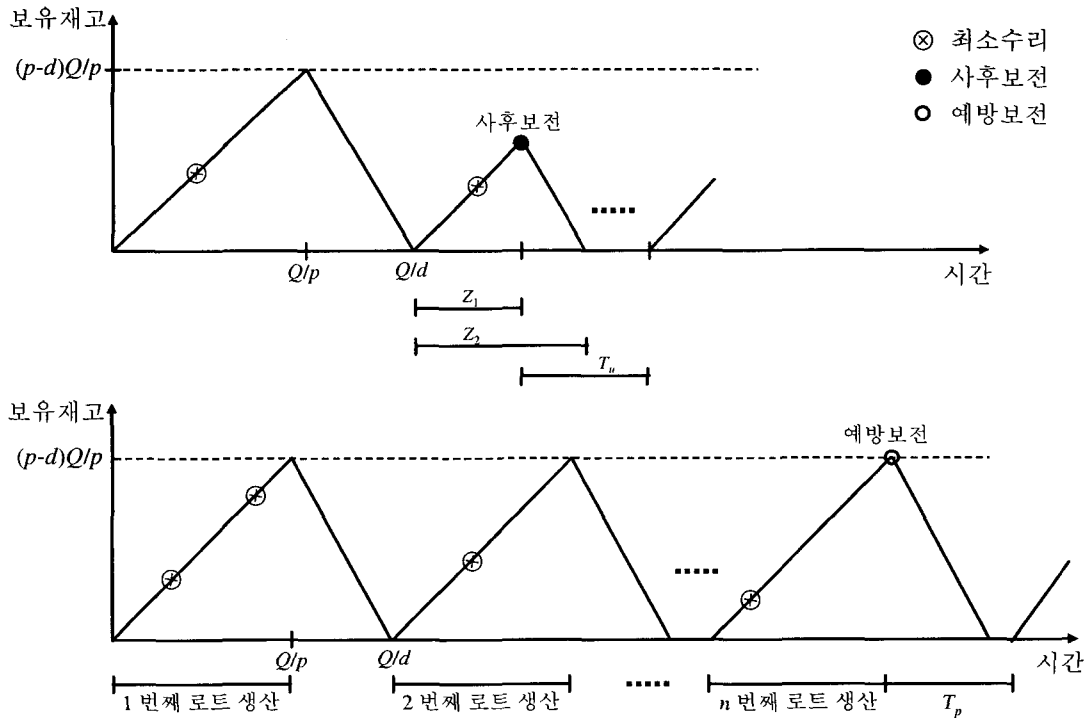
단위시간당 기대 비용식을 표현하고, 비용함수의 성질을 특성화하여 최대 재고수준과 예방보전주기를 찾을 수 있는 효율적인 알고리즘을 제시하였다.

관리상태(in control)에서 확률적으로 비관리상태(out of control)로 전환하여 불량품을 생산할 수 있는 생산과정에 대한 EMQ 모형에 관한 관심도 많았다. 생산과정의 퇴화가 최적 생산시간에 미치는 영향이 Rosenblatt & Lee (1986)와 Porteus (1986)에 의해 처음으로 조사되었다. 그들은 최적 로트크기가 고전적인 EMQ 모형에서의 최적 로트크기보다 작다는 사실을 발견하였다. Lee & Rosenblatt (1987)는 생산과정이 검사로써 모니터링되는 상황을 생각하였고, 보다 큰 로트를 생산하는 것이 비용 면에서 보다 효과적임을 보였다.

본 연구에서는 두 가지 형태의 생산설비고장과 예방보전 및 유실(lost sales)을 갖는 일반적인 EMQ 모형을 고려한다. 즉 사후보전 및 예방보전 활동에 소요되는 시간은 확률변수이고 미세고장 및 치명적 고장은 증가고장률 함수를 가진다. 모형설명과 사용되는 기호가 2절에 주어진다. 3절에서는 모형에 대한 단위시간당 기대비용이 도출되고, 매 생산시간 후 예방보전을 실시하는 것으로 가정한 Groenevelt et al. (1992a)이 본 모형의 특수한 경우임을 언급한다. 수치예제와 결과에 대한 토의가 4절에서 실시되고 5절에서 결론과 추후 연구방향이 제시된다.

2. 모형설명

두 가지 형태의 고장 및 예방보전을 갖는 생산설비의 생산/재고 모형을 고려한다. 가동



<그림 1> 미세고장과 치명적 고장이 발생하는 생산/보전 시스템

중인 생산설비에는 미세고장(minor failure)과 치명적 고장(major failure)이 발생할 수 있다. 미세고장의 발생빈도는 고장률 함수 $h(t)$ 에 의해 결정되고 치명적 고장이 발생할 때까지 소요되는 시간 T_d 의 분포함수, 고장밀도함수 및 고장률함수는 각각 $F_d(t)$, $f_d(t)$, $\lambda_d(t)$ 이며 $h(t)$ 와 $\lambda_d(t)$ 는 증가고장률(IFR)함수라고 가정한다. 여기서 t 는 직전 재생으로부터 경과한 생산설비의 운용시간이다. 생산설비에 치명적 고장이 발생하면, 즉시 사후보전활동이 수행되어 설비의 상태를 초기상태로 완전히 회복시킨다. 사후보전활동에 소요되는 시간 T_u 는 분포함수 $F_u(x)$ 를 갖는 확률변수이다. 가용한 재고가 고갈될

(depleted) 때 생산은 재개된다. 사후보전 혹은 완전하게 한 생산 런(run)을 마친 후 새로운 생산로트를 시작할 때마다 생산준비비용 K 를 부담한다. 미세고장이 발생할 때는 최소수리(minimal repair)가 수행되며 최소수리에 소요되는 시간은 무시할 수 있고 최소수리비용 C_m 이 부담된다고 가정한다. 예방보전활동은 n 번째 로트 생산이 끝난 직후에 대대적으로 실시되며, 예방보전활동에 소요되는 시간 T_p 는 분포함수 $F_p(x)$ 를 갖는 확률변수이다. 예방보전활동에 소요되는 비용 C_p 는 사후보전활동에 소요되는 비용 C_u 보다는 작고 ($C_p \leq C_u$), 기대시간도 $E(T_p) \leq E(T_u)$ 이다. 사후보전 또는 예방보

전이 실시되어 완료되는 시점에서 생산이 새롭게 시작되므로 이 시점이 재생성(regeneration)점이 된다.

예방보전활동 혹은 사후보전활동 기간 중 만족되지 않는 수요는 유실(lost sales)되고 단위 유실수요 당 품질비용 C_l 을 부담한다. 재고수준에 비례하여 발생하는 재고유지비용은 단위제품 당 단위시간당 h 이다. 생산설비는 운용기간 중에만 고장날 수 있다고 가정한다. 생산율, p 및 수요율, d ($p > d$)는 일정하다고 가정한다.

<그림 1>은 미세고장과 치명적 고장이 발생할 수 있는 생산/보전시스템의 보유재고(on-hand inventory) 경로를 보여준다.

3. 모형의 수학적 분석

본 절에서는 단위시간당 기대비용 $TC(Q, n)$ 을 수식화하고, 이를 최소화하는 최적생산량 Q^* 와 예방보전이 수행되기 전까지 최적 생산 런의 수 n^* 를 구한다. 단위시간당 기대비용은 재생보상정리(renewal reward theorem)에 의해 재생성주기 동안 발생하는 기대비용과 재생성주기의 기대길이의 비로 나타낼 수 있다.

한 재생성주기(regenerative cycle)의 기대 길이와 재생성주기 동안 발생하는 기대비용은 치명적 고장이 발생하는 기간 T_d 의 조건부로 도출될 수 있다. 생산과정이 T_d 시간 동안 운용되고 난 뒤 치명적 고장이 발생하면, 완전한 생산 런의 수는 $\lfloor (p/Q)T_d \rfloor$ 가 될 것이다. 여기서 $\lfloor x \rfloor$ 는 x 를 넘지 않는 최대정수, $\lfloor x \rfloor \leq x < \lfloor x \rfloor + 1$ 이다. 마지막

불완전한 생산 런에서 실제 생산기간을 Z_1 으로, 마지막 생산 런의 시작지점에서 재고수준이 0이 되는 시점까지의 시간을 Z_2 라 표시한다[참조: <그림 1>]. $T_d = t$ 로 가정하면, Z_1 과 Z_2 는 다음 관계식을 갖는다.

$$Z_1 = t - \lfloor \frac{p}{Q}t \rfloor \frac{Q}{p},$$

$$Z_2 = \frac{p}{d}Z_1 = \frac{p}{d}t - \lfloor \frac{p}{Q}t \rfloor \frac{Q}{d}.$$

재생성주기의 기대길이, $L(Q, n)$ 은 치명적 고장의 발생기간의 조건부로서 다음과 같이 도출된다.

$$L(Q, n) = \int_0^{nQ/p} L(Q, n | T_d = t) dF_d(t) + \int_{nQ/p}^{\infty} L(Q, n | T_d = t) dF_d(t).$$

$t > nQ/p$ 인 경우 즉 예방보전이 실시될 경우,

$$L(Q, n | T_d = t) = n \frac{Q}{d} + \int_{Q/d - Q/p}^{\infty} \left(x - \frac{Q}{d} + \frac{Q}{p} \right) dF_p(x)$$

이다. 여기서 $x - Q/d + Q/p$ 는 예방보전활동에 소요되는 시간 T_p 가 $Q/d - Q/p$ 를 초과하여 재고고갈(shortage)이 발생하는 기간이다.

$t < nQ/p$ 인 경우 즉 사후보전이 실시될 경우,

$$L(Q, n | T_d = t) = \lfloor \frac{p}{Q}t \rfloor \frac{Q}{d} + Z_2$$

$$+ \int_{Z_2-Z_1}^{\infty} (x - Z_2 + Z_1) dF_u(x)$$

이다. 여기서 $x - Z_2 + Z_1$ 은 사후보전활동에 소요되는 시간 T_u 가 $Z_2 - Z_1$ 을 초과하여 재고고갈이 발생하는 기간이다.

따라서, 재생성주기의 기대길이는 다음 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} L(Q, n) &= \overline{F}_d(n \frac{Q}{p}) \\ &= \overline{F}_d(n \frac{Q}{p}) \left[n \frac{Q}{d} + \int_{Q/d-Q/p}^{\infty} (x - \frac{Q}{d} + \frac{Q}{p}) dF_b(x) \right] \\ &\quad + \int_0^{nQ/p} \left[\lfloor \frac{p}{Q} t \rfloor \frac{Q}{d} + Z_2 \right. \\ &\quad \left. + \int_{Z_2-Z_1}^{\infty} (x - Z_2 + Z_1) dF_u(x) \right] dF_d(t) \\ &= \overline{F}_d(n \frac{Q}{p}) \left[n \frac{Q}{d} + \int_{Q/d-Q/p}^{\infty} \overline{F}_b(x) dx \right] \\ &\quad + \sum_{i=0}^{n-1} \int_{iQ/p}^{(i+1)Q/p} \left[\frac{p}{d} t \right. \\ &\quad \left. + \int_{(t-iQ/p)(p-d)/d}^{\infty} \overline{F}_u(x) dx \right] dF_d(t) \\ &= \overline{F}_d(n \frac{Q}{p}) \int_{Q/d-Q/p}^{\infty} \overline{F}_b(x) dx \\ &\quad + \frac{p}{d} \int_0^{nQ/p} \overline{F}_d(t) dt \\ &\quad + \sum_{i=0}^{n-1} \int_{iQ/p}^{(i+1)Q/p} \\ &\quad \left[\int_{(t-iQ/p)(p-d)/d}^{\infty} \overline{F}_u(x) dx \right] dF_d(t). \quad (1) \end{aligned}$$

재생성주기 동안에 발생하는 비용은 생산 준비비용, 재고유지비용, 품질(lost sales)비

용, 최소수리비용 및 보전(예방 혹은 사후)비용의 합으로 표시된다. $T_d = t$ 로 가정하면, 한 주기동안 발생하는 기대비용 $C(Q, n)$ 은 다음과 같이 구해질 수 있다. 먼저, 기대 생산준비비용을 치명적 고장 발생기간 T_d 의 조건부로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E[\text{생산준비비용}] &= \int_0^{nQ/p} E[\text{생산준비비용} | T_d = t] dF_d(t) \\ &\quad + \int_{nQ/p}^{\infty} E[\text{생산준비비용} | T_d = t] dF_d(t). \end{aligned}$$

$t < nQ/p$ 일 경우에는

$$\begin{aligned} E[\text{생산준비비용} | T_d = t] &= K \left(\lfloor \frac{p}{Q} t \rfloor + 1 \right) \text{이고,} \end{aligned}$$

$t > nQ/p$ 일 경우에는

$$E[\text{생산준비비용} | T_d = t] = nK \text{ 이다.}$$

따라서 기대 생산준비비용은 다음과 같게 된다.

$$\begin{aligned} E[\text{생산준비비용}] &= nK \overline{F}_d(n \frac{Q}{p}) \\ &\quad + \int_0^{nQ/p} K \left(\lfloor \frac{p}{Q} t \rfloor + 1 \right) dF_d(t) \\ &= nK \overline{F}_d(n \frac{Q}{p}) \\ &\quad + K \sum_{i=0}^{n-1} (i+1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\overline{F}_d(i\frac{Q}{p}) - \overline{F}_d((i+1)\frac{Q}{p})) \\ &= K \sum_{i=0}^{n-1} \overline{F}_d(i\frac{Q}{p}). \end{aligned}$$

동일한 방법으로, 한 재생주기 동안의 기대 재고유지비용을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E[\text{재고유지비용}] &= \int_0^{nQ/p} \left[\frac{p}{Q} t \right] \frac{h(p-d)}{2pd} Q^2 \\ &+ \frac{hp(p-d)}{2d} Z_1^2 dF_d(t) \\ &+ \frac{hn(p-d)}{2pd} Q^2 \overline{F}_d(n\frac{Q}{p}) \\ &= \frac{h(p-d)p}{d} \\ &\sum_{i=0}^{n-1} \int_{iQ/p}^{(i+1)Q/p} (t - i\frac{Q}{p}) \overline{F}_d(t) dt. \end{aligned}$$

한 재생주기 동안 수행되는 최소수리의 회수는 평균이 $H(t)$ 인 비정상 포아송 분포 (NHPP: non-homogeneous Poisson process)를 따른다. 여기서 $H(u) = \int_0^u h(y) dy$ 이다. 따라서 기대 최소수리비용, 사후보전비용 및 예방보전비용에 대한 다음 식이 구해진다.

$$\begin{aligned} E[\text{최소수리비용} + \text{사후보전} + \text{예방보전}] &= \int_0^{nQ/p} [C_m H(t) + C_u] dF_d(t) \\ &+ \overline{F}_d(n\frac{Q}{p}) [C_m H(n\frac{Q}{p}) + C_p] \\ &= C_m \int_0^{nQ/p} h(t) \overline{F}_d(t) dt \end{aligned}$$

$$+ C_u F_d(n\frac{Q}{p}) + C_p \overline{F}_d(n\frac{Q}{p}).$$

보전활동이 실시되는 동안 재고가 고갈되어 품질이 발생할 수 있으며, 이 때 발생하는 주기 당 기대 품질비용은 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} E[\text{품질비용}] &= \int_0^{nQ/p} E[\text{품질비용} | T_d = t] dF_d(t) \\ &+ \overline{F}_d(n\frac{Q}{p}) E[\text{품질비용} | T_d \geq n\frac{Q}{p}] \\ &= C_1 d \\ &\int_0^{nQ/p} \int_{Z_2 - Z_1}^{\infty} (x - Z_2 + Z_1) dF_u(x) dF_d(t) \\ &+ C_1 d \overline{F}_d(n\frac{Q}{p}) \\ &\int_{Q/d - Q/p}^{\infty} (x - \frac{Q}{d} + \frac{Q}{p}) dF_p(x) \\ &= C_1 d \\ &\sum_{i=0}^{n-1} \int_{iQ/p}^{(i+1)Q/p} \left(\int_{(t-iQ/p)(p-d)/d}^{\infty} \overline{F}_u(x) dx \right) dF_d(t) \\ &+ C_1 d \overline{F}_d(n\frac{Q}{p}) \int_{Q/d - Q/p}^{\infty} \overline{F}_p(x) dx. \end{aligned}$$

윗 식들을 정리하면, 재생성주기 동안에 발생하는 비용 $C(Q, n)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C(Q, n) &= K \sum_{i=0}^{n-1} \overline{F}_d(i\frac{Q}{p}) \\ &+ C_p \overline{F}_d(n\frac{Q}{p}) + C_u F_d(n\frac{Q}{p}) \\ &+ C_m \int_0^{nQ/p} h(t) \overline{F}_d(t) dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{h(p-d)p}{d} \sum_{i=0}^{n-1} \int_{iQ/p}^{(i+1)Q/p} (t - i\frac{Q}{p}) \overline{F}_d(t) dt \\
 & + C_d \overline{F}_d(n\frac{Q}{p}) \int_{Q/d-Q/p}^{\infty} \overline{F}_p(x) dx \\
 & + C_d \sum_{i=0}^{n-1} \int_{iQ/p}^{(i+1)Q/p} \left[\int_{(t-iQ/p)(p-d)/d}^{\infty} \overline{F}_u(x) dx \right] dF_d(t). \quad (2)
 \end{aligned}$$

단위시간당 기대비용은 다음 식으로 주어진다.

$$TC(Q, n) = \frac{C(Q, n)}{L(Q, n)}. \quad (3)$$

$TC(Q, n)$ 을 최소로 하는 최적 생산량, Q^* 와 예방보전이 수행되기 전까지 최적 생산 런의 수, n^* 를 구하여야 한다. 그러나 최적해의 존재와 유일성을 해석적으로 증명하는 것은 매우 어려우므로, 일반적인 경우 최적화는 수치적인 방법으로 $TC(Q, n)$ 의 표면을 탐색하여 전체(global) 최소 $TC^*(Q^*, n^*)$ 를 갖는 Q^* 와 n^* 를 찾는다.

Groenevelt et al.(1992a)이 고려한 첫 번째 정책인 NR(no resumption) 하에서는 고장이 발생했을 때 생산이 중단되고 가용한 재고가 고갈될 때 생산은 재개된다. 생산설비의 보전은 고장이 발생할 때 또는 한 로트의 생산이 끝날 때 이루어지며 보전은 시스템을 초기 운용상태로 회복시켜준다. 결정변수는 최적 로트크기 Q^* 이다. 제시한 본 모형에서 $h(t)=0$, $T_u=0$, $T_p=0$, $n=1$,

$C_l=0$, $C_p=0$, $C_m=0$ 일 경우이다. 즉 $\overline{F}_u(x)=0$, $\overline{F}_p(x)=0$ 이다. 식 (1)~(3)으로부터 재생주기 동안 발생하는 비용 $\overline{C}(Q)$ 는 다음과 같게 된다.

$$\begin{aligned}
 \overline{C}(Q) & = TC(Q, n=1) \\
 & = \left(K + C_u F_d\left(\frac{Q}{p}\right) \right. \\
 & \quad \left. + \frac{h(p-d)p}{d} \int_0^{Q/p} t \overline{F}_d(t) dt \right) \\
 & \quad / \left(\frac{p}{d} \int_0^{Q/p} \overline{F}_d(t) dt \right). \quad (4)
 \end{aligned}$$

식 (4)는 Groenevelt et al.(1992a)이 도출한 다음 식과 동일하게 된다. 즉 NR 정책은 본 모형의 특수한 경우이다.

$$\begin{aligned}
 \overline{C}(Q) & = \left(K + C_u F_d\left(\frac{Q}{p}\right) \right. \\
 & \quad \left. + \frac{1}{2} h(p-d) \left(\frac{p}{d}\right) \left(\frac{Q}{p}\right)^2 (1 - F_d\left(\frac{Q}{p}\right)) \right. \\
 & \quad \left. + \int_0^{Q/p} t^2 f_d(t) dt \right) / \\
 & \quad \left(\left(\frac{p}{d}\right) \int_0^{Q/p} t f_d(t) dt + \left(\frac{Q}{d}\right) (1 - F_d\left(\frac{Q}{p}\right)) \right)
 \end{aligned}$$

4. 수치예제

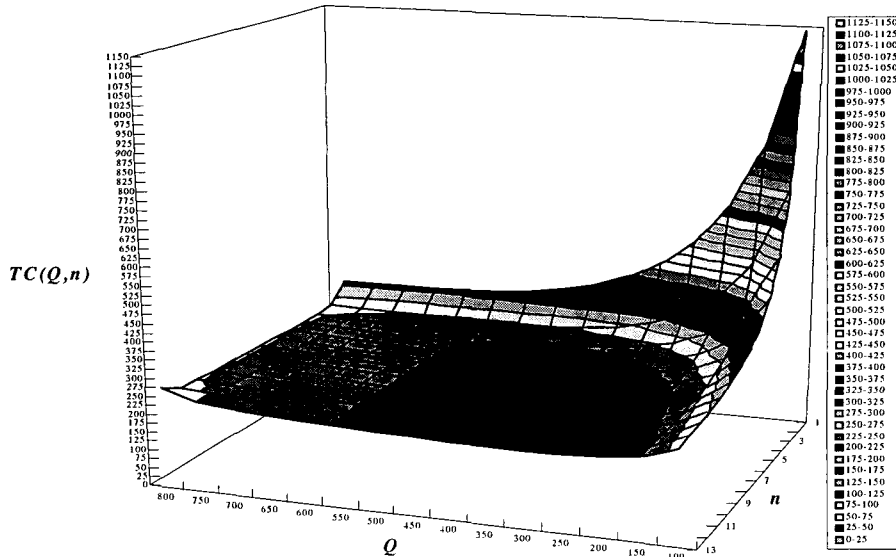
두 가지 고장형태를 갖는 본 모형을 예시하기 위하여 증가 고장률 함수를 가정한다. 미세 고장률은 $h(t)=0.5t$ 이고 치명적 고장이 발생할 때까지의 시간은 파라미터 값이

$\alpha=0.0005$, $\beta=2$ 인 Weibull 분포로서 고장률은 $\lambda_d(t) = \alpha\beta t^{\beta-1} = 0.001t$ 로 가정한다. 사후보전활동 및 예방보전활동에 소요되는 시간은 파라미터 $\lambda_u=0.1$ 및 $\lambda_p=0.2$ 를 갖는 지수분포를 선택한다. 그 외의 파라미터 값들은 <표 1>에 주어져 있다.

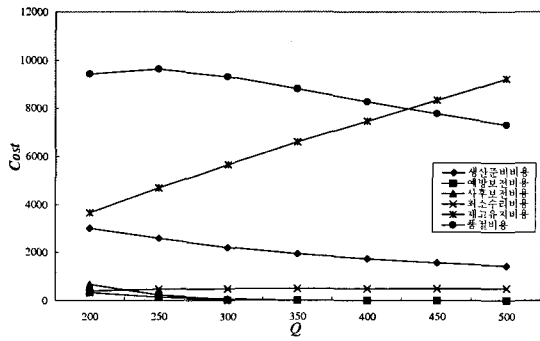
<표 1> 수치예제를 위한 파라미터 값

파라미터	값
d	15 (units/time)
p	30 (units/time)
K	500 (\$)
h	1 (\$/units/time)
C_p	2,000 (\$)
C_u	4,000 (\$)
C_m	1 (\$)
C_i	100 (\$/units)

<그림 2>는 Q 와 n 의 함수로써 단위 시간당 기대비용 $TC(Q, n)$ 의 2차원 표면을 나타낸다. 볼록함수의 형태를 취하며 $Q^*=300$ 및 $n^*=9$ 일 때 전체 최소값, $TC^*(Q^*, n^*)$ 가 \$209.18 임을 알 수 있다. 비용 파라미터 값의 민감도 분석을 위하여 한 주기동안 발생하는 기대비용 $C(Q, n)$ 을 구성하는 생산 준비비용, 재고유지비용, 품질비용, 최소수리비용, 예방보전비용 및 사후보전비용을 각각 Q 의 변화에 따라 <그림 3>에 표시하였다. 품질비용과 재고유지비용이 높은 비율을 차지하였다.

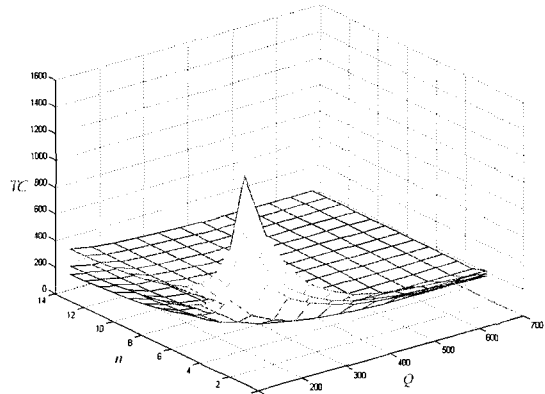


<그림 2> 단위 시간당 기대비용의 2차원 표면

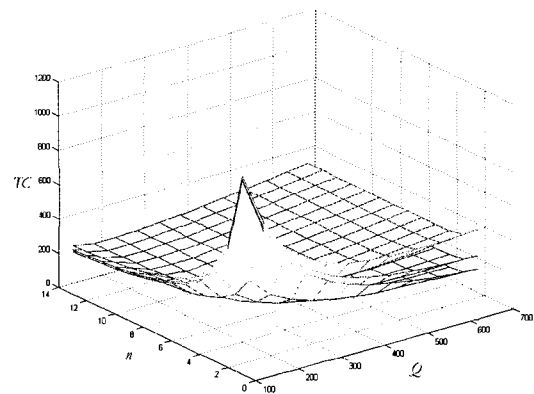


<그림 3> 한 주기동안 발생하는 기대비용의 구성 ($n^* = 9$ 일 때)

단위품질비용, $C_f = 50, 100, 200$ 에 대하여 n 과 Q 의 변화에 따른 $TC(Q, n)$ 값을 <그림 4>에 도시하고, 결과는 부록 A에 나타내었다. C_f 값이 증가하면 예측되는 대로 n^* 값은 $13 \rightarrow 9 \rightarrow 3$ 으로 감소하고 Q^* 값은 $250 \rightarrow 300 \rightarrow 450$ 으로 증가된다. 유사하게 단위재고유지비용, $h = 0.5, 1, 2$ 에 대하여 n 과 Q 의 변화에 따른 $TC(Q, n)$ 값을 <그림 5>에 도시하고, 결과는 부록 B에 나타내었다. h 가 증가하면 n^* 값은 $4 \rightarrow 9 \rightarrow 13$ 으로 증가되고 Q^* 값은 $600 \rightarrow 300 \rightarrow 150$ 으로 감소됨을 알 수 있다. 이는 단위품질비용이 증가하면 품질을 막기 위해 생산량을 늘리고 예방보전활동까지의 생산 런을 줄이며, 반대로 재고유지비용이 증가하면 적은 재고량 유지를 위해 생산량을 줄이고 생산 런을 늘리게 됨을 반증하는 결과이다.

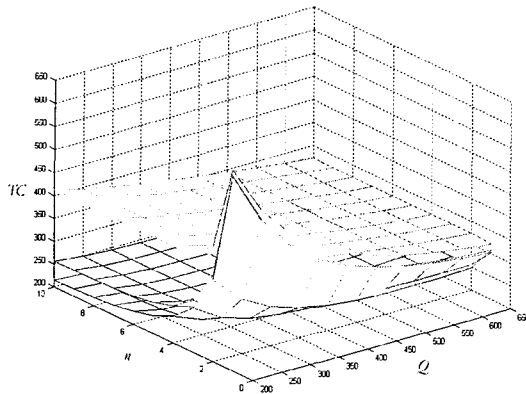


<그림 4> C_f 에 따른 $TC(Q, n)$ 의 변화



<그림 5> h 에 따른 $TC(Q, n)$ 의 변화

<그림 6>은 치명적 고장을 표현하는 Weibull분포의 크기 파라미터인 $\alpha = 0.0005, 0.001, 0.005$ 에 따른 $TC(Q, n)$ 값을 도시하였다(부록 C 참조). α 값이 증가하면 n^* 값은 $9 \rightarrow 5 \rightarrow 1$ 으로 감소되고 Q^* 값은 $300 \rightarrow 400 \rightarrow 650$ 으로 증가됨을 알 수 있다.



<그림 6> α 에 따른 $TC(Q, n)$ 의 변화

5. 결론

본 연구에서는 두 가지 형태의 생산설비 고장과 예방보전 및 유실을 갖는 일반적인 EMQ 모형을 고려하였다. 생산설비에 발생하는 고장을 대대적 보전활동에 의해서만 회복 가능한 치명적 고장과 최소수리에 의해 조치 가능한 미세고장의 두 가지 형태로 분류하였고 생산설비의 예방보전활동은 n 번째 로트 생산이 끝난 직후에 실시된다고 가정하였다. 생산율과 수요율은 일정하고, 사후보전 및 예방보전활동에 소요되는 시간을 확률변수로 가정하여 단위 시간당 기대비용식을 표시하였다. 치명적 고장과 미세고장에 대하여 증가 고장률 함수를 가정하여 수치방법으로 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적 생산량과 예방보전활동을 탐색하였고, 비용 파라미터 값의 변화에 따른 민감도 분석을 하였다.

비용식에 대한 구조 분석과 불량품 발생률을 반영한 다수의 상태를 갖는 생산설비에

대한 보다 일반적인 EMQ 모형의 연구가 필요하리라 판단된다.

참고문헌

- [1] Groenevelt, H., L. Pintelon and A. Seidmann, "Production Lot Sizing with Machine Breakdowns", *Management Science*, Vol. 38, pp. 104-123, 1992a.
- [2] Groenevelt, H., L. Pintelon and A. Seidmann, "Production Batching with Machine Breakdowns and Safety Stocks", *Operations Research*, Vol. 40, pp. 959-971, 1992b.
- [3] Lee, H.L. and M.J. Rosenblatt, "Simultaneous Determination of Production Cycle and Inspection Schedules in a Production System", *Management Science*, Vol. 33, pp. 1125-1136, 1987.
- [4] Lee, H.S. and M.M. Srinivasan, "A Production/Inventory Policy for an Unreliable Machine", *Integrated Models in Production Planning, Inventory, Quality, and Maintenance* In: Rahim M. A. and M. Ben-Daya (ed.), pp. 79-94, 2001.
- [5] Makis, V. and I. Fung, "An EMQ Model with Inspections and Random Machine Failures", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 49, pp. 66-76, 1998.
- [6] Makis, V., X. Jiang and E. Tse, "A General EMQ Model with Machine Breakdowns and Two Types of

- Failure", *Maintenance, Modeling and Optimization* In: Ben-Daya, M., S.O. Duffuaa and A. Raouf (ed.), pp. 377-396, KAP, Boston, 2000.
- [7] Porteus, E.L., "Optimal Lot Sizing, Process Quality Improvement and Setup Cost Reduction", *Operation Research*, Vol. 34, pp. 137-144, 1986.
- [8] Rosenblatt, M.J. and H.L. Lee, "Economic Production Cycles with Imperfect Production Processes", *IIE Transactions*, Vol. 18, pp. 48-55, 1986.

부 록

A. C_i 값의 증가에 따른 $TC(Q, n)$ 의 계산결과

C_i	n	Q											
		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
50	1	927.8025	693.9917	553.0983	464.5378	406.9041	368.4206	342.3071	324.4873	312.4115	304.4267	299.4258	296.6443
	2	579.2410	415.2741	330.5035	282.7596	254.6074	237.7466	227.8248	222.3913	219.9877	219.7059	220.9586	223.3527
	3	437.1656	312.5823	252.7887	221.3091	204.2220	195.2298	191.1549	190.2646	191.5543	194.4078	198.4247	203.3287
	4	360.3626	259.7775	214.0715	191.5019	180.4687	175.8808	175.2252	177.1425	180.8309	185.7743	191.6131	198.0821
	5	312.4969	228.0548	191.5436	174.8016	167.8198	166.2750	168.0302	171.8984	177.1496	183.3029	190.0332	197.1226
	6	279.9958	207.2456	177.3498	164.8639	160.8901	161.5842	165.0105	170.0768	176.1294	182.7750	189.7812	197.0116
	7	256.6398	192.8427	168.0401	158.8627	157.1826	159.4566	163.9008	169.5574	175.9125	182.6942	189.7544	197.0036
	8	239.1773	182.5372	161.8372	155.2908	155.3081	158.5899	163.5545	169.4388	175.8777	182.6855	189.7525	197.0033
	9	225.7428	175.0178	157.7095	153.2369	154.4312	158.2787	163.4640	169.4173	175.8735	182.6848	189.7524	197.0034
	10	215.1892	169.4780	155.0004	152.1119	154.0563	158.1811	163.4442	169.4141	175.8731	182.6848	189.7518	197.0032
	11	206.7715	165.3878	153.2631	151.5304	153.9110	158.1544	163.4406	169.4138	175.8730	182.6858	189.7452	197.0039
	12	199.9838	162.3793	152.1823	151.2486	153.8600	158.1481	163.4401	169.4137	175.8730	182.6758	189.7811	196.8031
	13	194.4694	160.1856	151.5333	151.1209	153.8439	158.1468	163.4400	169.4140	175.8721	182.6996	189.7244	197.4050
100	1	1138.361	814.4894	626.3171	511.9690	439.7967	392.8811	361.7503	340.8684	326.8707	317.6383	311.7928	308.4102
	2	706.0221	488.1734	379.0882	319.5927	285.5700	265.7427	254.3232	248.1336	245.3357	244.8207	245.8953	248.1115
	3	532.0498	371.3724	297.1741	259.6904	240.1588	230.2400	225.8273	224.752	225.8084	228.2961	231.7902	236.0195
	4	439.6742	313.7302	259.3039	233.8473	222.0061	217.1923	216.2769	217.6713	220.5247	224.3560	228.8748	233.8929
	5	383.3983	280.8732	239.2799	221.3869	214.1845	212.2748	213.1977	215.7631	219.3638	223.6689	228.4827	233.6787
	6	346.2174	260.6411	228.0424	215.2164	210.8974	210.5967	212.3848	215.3935	219.2083	223.6097	228.4630	233.6734
	7	320.3317	247.6286	221.6072	212.2321	209.6464	210.1404	212.2487	215.3658	219.2087	223.6136	228.4654	233.6745
	8	301.6577	239.0604	217.9427	210.8800	209.2542	210.0698	212.2537	215.3764	219.2140	223.6154	228.4659	233.6746
	9	287.8491	233.3615	215.9094	210.3335	209.1758	210.0834	212.2669	215.3813	219.2152	223.6156	228.4660	233.6745
	10	277.4603	229.5706	214.8310	210.1532	209.1844	210.0992	212.2723	215.3825	219.2153	223.6158	228.4668	233.6778
	11	269.5512	227.0686	214.2960	210.1180	209.2032	210.1066	212.2737	215.3825	219.2157	223.6163	228.4706	233.6750
	12	263.4831	225.4414	214.0558	210.1274	209.2149	210.1090	212.2739	215.3823	219.2135	223.6080	228.4606	233.6679
	13	258.8069	224.4053	213.9642	210.1431	209.2202	210.1096	212.2737	215.3816	219.2203	223.8294	229.4277	233.4814
200	1	1559.478	1055.485	772.7548	606.8313	505.5820	441.8019	400.6366	373.6306	355.7891	344.0614	336.5268	331.9418
	2	959.5843	633.9722	476.2577	393.2590	347.4953	321.7349	307.3201	299.6182	296.0318	295.0504	295.7687	297.6292
	3	721.8183	488.9525	385.9449	336.4532	312.0322	300.2605	295.1721	293.7267	294.3165	296.0729	298.5212	301.4011
	4	598.2974	421.6356	349.7689	318.5381	305.0809	299.8152	298.3803	298.7289	299.9123	301.5194	303.3983	305.5144
	5	525.2012	386.5101	334.7525	314.5575	306.9141	304.2743	303.5326	303.4927	303.7923	304.4008	305.3815	306.7908
	6	478.6607	367.4322	329.4275	315.9213	310.9121	308.6217	307.1333	306.0267	305.3661	305.2791	305.8267	306.9972
	7	447.7155	357.2006	328.7413	318.9708	314.5741	311.5080	308.9443	306.9825	305.8010	305.4523	305.8876	307.0162
	8	426.6187	352.1070	330.1537	322.0585	317.1464	313.0296	309.6521	307.2516	305.8864	305.4752	305.8929	307.0173
	9	412.0618	350.0490	332.3092	324.5268	318.6649	313.6926	309.8727	307.3095	305.8987	305.4771	305.8934	307.0173
	10	402.0025	349.7558	334.4921	326.2360	319.4404	313.9354	309.9283	307.3191	305.9000	305.4777	305.8922	307.0186
	11	395.1104	350.4301	336.3619	327.2931	319.7875	314.0109	309.9398	307.3202	305.9006	305.4812	305.8719	306.9475
	12	390.4818	351.5655	337.8028	327.8850	319.9248	314.0309	309.9417	307.3205	305.9031	305.4635	306.0939	305.9682
	13	387.4818	352.8448	338.8259	328.1873	319.9730	314.0355	309.9418	307.3246	305.8965	305.4844	304.5973	304.0734

B. h 값의 증가에 따른 $TC(Q, n)$ 의 계산결과

h	n	Q											
		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
0.5	1	1129.379	798.7846	603.8412	482.8643	404.2391	351.0358	313.7637	286.8707	266.9810	251.9691	240.4540	231.5120
	2	695.6543	471.3159	355.8787	290.2146	250.2004	224.5445	207.4472	195.7222	187.5258	181.7456	177.6852	174.894
	3	521.1613	354.1982	273.9069	230.5298	205.287	189.8205	180.0059	173.6593	169.5607	166.9964	165.5288	164.8758
	4	428.5369	296.4694	236.1403	204.9855	187.6200	177.4243	171.2402	167.4538	165.1936	163.9643	163.4679	163.5151
	5	372.1312	263.6162	216.2668	192.8135	180.1980	172.9771	168.6544	166.0161	164.4444	163.6096	163.3245	163.4741
	6	334.8824	243.4282	205.1861	186.8888	177.2054	171.5957	168.1012	165.8468	164.4263	163.6348	163.3516	163.4922
	7	308.9641	230.4773	198.8956	184.0971	176.1501	171.3017	168.0778	165.8856	164.4604	163.6535	163.3596	163.4951
	8	290.2791	221.9765	195.3554	182.8848	175.8746	171.3075	168.1230	165.9134	164.4717	163.6571	163.3605	163.4953
	9	276.4729	216.3442	193.4229	182.4322	175.8585	171.3519	168.1478	165.9218	164.4738	163.6574	163.3606	163.4952
	10	266.0949	212.6151	192.4219	182.3103	175.8968	171.3785	168.1560	165.9234	164.4740	163.6576	163.3620	163.5000
	11	258.2018	210.1681	191.9437	182.3086	175.9283	171.3890	168.1580	165.9237	164.4747	163.6572	163.3655	163.4773
	12	252.1527	208.5881	191.7428	182.3358	175.9448	171.3923	168.1583	165.9236	164.4757	163.6634	163.4311	163.6409
	13	247.4968	207.5911	191.6771	182.3602	175.9518	171.3931	168.1581	165.9263	164.4762	163.6556	163.4148	163.9766
1	1	1138.361	814.4894	626.3171	511.9690	439.7967	392.8811	361.7503	340.8684	326.8707	317.6383	311.7928	308.4102
	2	706.0221	488.1734	379.0882	319.5927	285.5700	265.7427	254.3232	248.1336	245.3357	244.8207	245.8953	248.1115
	3	532.0498	371.3724	297.1741	259.6904	240.1588	230.2400	225.8273	224.7520	225.8084	228.2961	231.7902	236.0195
	4	439.6742	313.7302	259.3039	233.8473	222.0061	217.1923	216.2769	217.6713	220.5247	224.3560	228.8748	233.8929
	5	383.3983	280.8732	239.2799	221.3869	214.1845	212.2748	213.1977	215.7631	219.3638	223.6689	228.4827	233.6787
	6	346.2174	260.6411	228.0424	215.2164	210.8974	210.5967	212.3848	215.3935	219.2083	223.6097	228.4630	233.6734
	7	320.3317	247.6286	221.6072	212.2321	209.6464	210.1404	212.2487	215.3658	219.2087	223.6136	228.4654	233.6745
	8	301.6577	239.0604	217.9427	210.8800	209.2542	210.0698	212.2537	215.3764	219.2140	223.6154	228.4659	233.6746
	9	287.8491	233.3615	215.9094	210.3335	209.1758	210.0834	212.2669	215.3813	219.2152	223.6156	228.4660	233.6745
	10	277.4603	229.5706	214.8310	210.1532	209.1844	210.0992	212.2723	215.3825	219.2153	223.6158	228.4668	233.6778
	11	269.5512	227.0686	214.2960	210.1180	209.2032	210.1066	212.2737	215.3825	219.2157	223.6163	228.4706	233.6750
	12	263.4831	225.4414	214.0558	210.1274	209.2149	210.1090	212.2739	215.3823	219.2135	223.6080	228.4606	233.6679
	13	258.8069	224.4053	213.9642	210.1431	209.2202	210.1096	212.2737	215.3816	219.2203	223.8294	229.4277	233.4814

B. h 값의 증가에 따른 $TC(Q, n)$ 의 계산결과(계속)

h	n	Q											
		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
2	1	1156.326	845.8990	671.2690	570.1784	510.9119	476.5716	457.7235	448.8638	446.6502	448.9767	454.4702	462.2064
	2	726.7577	521.8884	425.5072	378.3490	356.3093	348.1391	348.0752	352.9563	360.9555	370.9711	382.3155	394.5466
	3	553.8269	405.7206	343.7085	318.0118	309.9022	311.0791	317.4701	326.9374	338.3038	350.8957	364.3130	378.3069
	4	461.9489	348.2517	305.6313	291.5711	290.7784	296.7283	306.3502	318.1064	331.1870	345.1395	359.6887	374.6483
	5	405.9325	315.3873	285.3060	278.5338	282.1576	290.8701	302.2841	315.2572	329.2027	343.7875	358.7989	374.0879
	6	368.8875	295.0671	273.7550	271.8714	278.2815	288.5987	300.9520	314.4869	328.7723	343.5594	358.6859	374.0359
	7	343.0669	281.9313	267.0304	268.5020	276.6391	287.8178	300.5903	314.3262	328.7053	343.5338	358.6770	374.0331
	8	324.4150	273.2282	263.1173	266.8705	276.0134	287.5944	300.5152	314.3025	328.6984	343.5320	358.6766	374.0332
	9	310.6016	267.3961	260.8826	266.1362	275.8102	287.5462	300.5050	314.3005	328.6981	343.5319	358.6767	374.0334
	10	300.1911	263.4815	259.6490	265.8391	275.7594	287.5407	300.5047	314.3005	328.6981	343.5321	358.6755	374.0338
	11	292.2499	260.8695	259.0007	265.7367	275.7529	287.5417	300.5051	314.3005	328.6979	343.5341	358.6624	374.0347
	12	286.1440	259.1481	258.6818	265.7105	275.7551	287.5425	300.5051	314.3004	328.6999	343.5383	358.7527	374.3689
	13	281.4270	258.0338	258.5383	265.7087	275.7571	287.5428	300.5049	314.3032	328.6995	343.5203	358.8128	376.0359

C. α 값의 증가에 따른 $TC(Q, n)$ 의 계산결과

α	n	Q									
		200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
0.0005	1	626.3171	511.9690	439.7967	392.8811	361.7503	340.8684	326.8707	317.6383	311.7928	308.4102
	2	379.0882	319.5927	285.5700	265.7427	254.3232	248.1336	245.3357	244.8207	245.8953	248.1115
	3	297.1741	259.6904	240.1588	230.2400	225.8273	224.7520	225.8084	228.2961	231.7902	236.0195
	4	259.3039	233.8473	222.0061	217.1923	216.2769	217.6713	220.5247	224.3560	228.8748	233.8929
	5	239.2799	221.3869	214.1845	212.2748	213.1977	215.7631	219.3638	223.6689	228.4827	233.6787
	6	228.0424	215.2164	210.8974	210.5967	212.3848	215.3935	219.2083	223.6097	228.4630	233.6734
	7	221.6072	212.2321	209.6464	210.1404	212.2487	215.3658	219.2087	223.6136	228.4654	233.6745
	8	217.9427	210.8800	209.2542	210.0698	212.2537	215.3764	219.2140	223.6154	228.4659	233.6745
	9	215.9094	210.3335	209.1758	210.0834	212.2669	215.3813	219.2152	223.6156	228.4661	233.6742
	10	214.8310	210.1532	209.1844	210.0992	212.2723	215.3825	219.2154	223.6160	228.4664	233.6672
0.001	1	627.8070	514.3158	442.4809	395.3933	363.6398	341.7533	326.4337	315.6177	307.9733	302.6138
	2	387.9548	330.6162	297.8114	278.4266	266.8583	260.0971	256.4430	254.8919	254.8215	255.8253
	3	313.3225	278.8607	261.0528	251.8613	247.4544	245.8753	246.0611	247.3971	249.5048	252.1386
	4	282.0391	259.9328	249.7176	245.2402	243.7408	243.9117	245.1049	246.9833	249.3569	252.1049
	5	267.6668	252.8386	246.5214	243.9894	243.3548	243.8471	245.1269	247.0113	249.3738	252.1126
	6	261.0196	250.4147	245.8541	243.8991	243.3861	243.8760	245.1397	247.0154	249.3748	252.1128
	7	258.0838	249.7391	245.8012	243.9324	243.4041	243.8812	245.1407	247.0155	249.3748	252.1128
	8	256.8994	249.6177	245.8279	243.9463	243.4071	243.8816	245.1407	247.0155	249.3749	252.1128
	9	256.4850	249.6235	245.8423	243.9491	243.4074	243.8816	245.1407	247.0155	249.3749	252.1129
	10	256.3707	249.6391	245.8464	243.9495	243.4074	243.8816	245.1407	247.0155	249.3747	252.1130
0.005	1	640.1813	534.1324	466.7371	421.5655	389.9204	367.0120	350.0854	337.4701	328.0835	321.1684
	2	452.2139	410.0058	386.6342	372.0193	361.3612	352.3711	344.1294	336.4617	329.5188	323.5067
	3	417.9880	396.6616	382.9216	371.7898	361.8874	352.7953	344.3451	336.5476	329.5473	323.5148
	4	412.3487	396.0160	383.0555	371.8705	361.9071	352.7984	344.3454	336.5476	329.5473	323.5148
	5	411.7874	396.0544	383.0683	371.8717	361.9071	352.7984	344.3454	336.5476	329.5473	323.5148
	6	411.7747	396.0592	383.0685	371.8717	361.9071	352.7984	344.3454	336.5476	329.5473	323.5148
	7	411.7781	396.0594	383.0685	371.8717	361.9071	352.7984	344.3454	336.5476	329.5473	323.5148
	8	411.7785	396.0594	383.0685	371.8717	361.9071	352.7984	344.3454	336.5476	329.5473	323.5148
	9	411.7786	396.0594	383.0685	371.8717	361.9071	352.7984	344.3454	336.5476	329.5473	323.5148
	10	411.7786	396.0594	383.0685	371.8717	361.9071	352.7984	344.3454	336.5476	329.5473	323.5148