신뢰성응용연구
제12권, 제2호. pp.57-66, 2012

교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전정책

정기문

경성대학교 정보통계학과

Preventive maintenance policy following the expiration of replacement-repair warranty

Ki Mun Jung

Department of Informational Statistics, Kyungsung University

Abstract

In this paper, we consider the periodic preventive maintenance model for a repairable system following the expiration of replacement-repair warranty. Under this preventive maintenance model, we derive the expressions for the expected cycle length, the expected total cost and the expected cost rate per unit time. Also, we determine the optimal preventive maintenance period and the optimal preventive maintenance number by minimizing the expected cost rate per unit time. Finally, the optimal periodic preventive maintenance policy is given for Weibull distribution case.

Keywords : Expected cost rate per unit time, preventive maintenance policy, replacement-repair warranty.

이 논문은 2012학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.
논문접수일 : 2012년 03월 08일 논문수정일 : 2012년 04월 22일 게재확정일 : 2012년 06월 01일

1. 서론

일반적으로 시스템의 생산자나 판매자는 시스템의 사용자나 소비자에게 일정 기간 동안 발생되는 시스템의 고장에 대하여 책임을 지겠다는 보증기간을 제공하기 때문에 보증기간이 주어지는 시스템에 대한 다양한 보전정책이 활발하게 연구되고 있다. 가장 일반적인 보증의 형태는 보증기간에서 시스템에 고장이 발생되었을 경우에 시스템을 새로운 것으로 교체를 해주는 교체보증(replacement warranty)과 최소수리(minimal repair)를 수행하여 주는 수리보증(repair warranty)이라고 할 수 있다. 이러한 전형적인 보증이 주어지는 경우에 대하여 다양한 형태의 보전정책(maintenance policy)이 연구되었는데, 먼저 교체보증이 주어진 경우에 대한 보전정책으로는 Sahin과 Polatoglu(1996), Jung과 Park(2003), Jung(2008), Chien(2008a) 그리고 Chien(2008b)등이 있다. 특히, Sahin과 Polatoglu(1996)는 재생교체보증(renewing replacement warranty)과 비재생교체보증(non-renewing replacement warranty)이 제공되는 시스템에 대하여 사용자 측면의 교체정책(replacement policy)을 제안하였다. 그리고 Chien(2008a)은 재생무료교체보증(renewing free replacement warranty)이 주어진 시스템에 대하여 일반적인 기령교체모형을 고려하였다. 그리고 수리보증이 주어진 시스템에 관한 보전정책과 관련된 연구로는 Yeh 등(2007)과 Jung(2009)의 연구가 있는데, Yeh 등(2007)은 보증기간 중 시스템에 고장이 발생되면 무료로 최소수리가 수행되고, 보증기간은 재생되지 않는 비재생무료최소수리보증(non-renewing free minimal repair warranty; NFMW)이 주어진 수리가 가능한 시스템에 대한 교체정책을 제안하였다.

한편, 최근에 Jung(2011)은 기존의 교체보증과 수리보증을 포함하는 일반적인 형태의 교체-수리보증(replacement-repair warranty)을 제안하고, 이러한 보증정책이 주어진 시스템에 대한 교체모형을 제안하였다. 그러나 시스템의 사용자는 시스템의 고장률을 일정수준으로 감소시키기 위하여 보증기간이 종료된 이후에 일반적으로 예방보전활동을 수행하게 되므로 Jung(2011)의 교체모형을 일반적인 보전모형인 예방보전모형(preventive maintenance model)으로 확장할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전모형을 제안하고자 한다. 즉, 수리가 가능한 시스템에는 교체-수리보증이 주어지며, 보증기간이 종료된 이후에는 $\tau, 2\tau, \cdots, N\tau$에서 사용자에 의해서 예방보전활동이 주기적으로 이루어지고 예방보전 사이에서 고장이 발생되면 최소수리를 수행한다. 그리고 N번째 예방보전주기에서는 사용자에 의해서 새로운 시스템으로 교체된다. 이렇게 제안된 예방보전모형에 대하여 총기대비용(expected total cost), 기대순환길이(expected cycle length) 그리고 단위시간당 기대비용(expected cost rate per unit time)을 유도하고, 최적의 예방보전정책을 제안하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 Jung(2011)에 의해서 제안된 교체-수리보증이 종료된 이후의 교체모형을 예방보전모형으로 확장하고자 한다. 이때, 제안된 예방보전모형에 대한 단위시간당 기대비용을 구하고, 구해진 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 예방보전정책을 제안하고자 한다. 그리고 3절에서는 본 논문에서 고려된 예방보전모형을 자세히 설명하기 위하여 수치적 예를 보이고자 한다.

2. 교체-수리보증 이후의 주기적인 예방보전정책

2.1 주기적인 예방보전모형

본 절에서는 Jung(2011)의 교체-수리보증이 종료된 이후의 사용자 측면의 교체모형을 예방보전모형으로 확장하고자 하는데, 이를 위해서 다음과 같은 사항들을 가정한다.

i) 시스템에는 교체-수리보증기간 w가 주어지고, 재생교체보증기간과 비재생수리보증기간을 나타내는 w_R과 w_M이 각각 주어진다. 단, $w = w_R + w_M$이 된다.

ii) 재생교체보증기간 w_R 중 시스템에 고장이 발생되면 시스템이 새것으로 교체되고, 보증기간도 재생된다.

iii) 비재생수리보증기간 w_M 중 시스템에 고장이 발생되면 시스템에 최소수리가 수행되며, 보증기간은 재생되지 않는다.

iv) 보증기간이 종료된 이후의 보전기간 동안 시스템에 고장이 발생되면 사용자에 의해서 최소수리가 수행된다.

v) 예방보전(preventive maintenance; PM)은 $k\tau$, $k = 1, 2, \cdots, N$에서 주기적으로 이루어지며, τ는 PM의 주기이고, N은 PM의 횟수이다. 그리고 N번째 PM주기에서는 시스템이 새것으로 교체된다.

vi) 연속되는 예방보전 주기 사이에서 고장이 발생되면 최소수리를 수행한다.

vii) $h(t)$는 PM이 이루어지지 않을 때의 강도함수(intensity function)로써 순증가함수이다.

viii) k번째 PM이 이루어진 이후의 시스템의 강도함수는 Canfield(1986)가 제안한 PM 하에서는 다음과 같이 표현된다.

$$h_k(t) = \begin{cases} h(t), & \text{for } 0 \le t \le \tau \\ \sum_{i=1}^{k} \{h(i\tau - (i-1)\eta) - h(i(\tau - \eta))\} + h(t - k\eta), & \text{for } k\tau \le t \le (k+1)\tau \end{cases}$$

여기서, η는 예방보전의 수준을 표현하는 인자로써 $0 < \eta \le \tau$이다.

ix) 최소수리, 예방보전 그리고 교체를 수행하기 위한 시간은 고려하지 않는다.

x) 보증기간에서의 고장에 따른 비용은 $c_{f,w}$, 보전기간에서 발생하는 고장에 따른 비용은 $c_{f,m}$, 예방보전기간에서 이루어지는 예방보전비용은 c_p, 보증기간에서의 최소수리비용은 $c_{m,w}$, 보전기간에서의 최소수리비용은 c_m이고 교체비용은 c_r이다.

위와 같은 가정을 통해서 교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전모형을 설정할 수 있으며, 이러한 예방보전모형에 대하여 최적의 예방보전 횟수 및 예방보전 주기를 결정하기 위한 기준으로 사용될 단위시간당 기대비용에 대해서는 다음 절에서 자세히 설명하고자 한다. 한편, 교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전모형에서 예방보전을 수행하지 않으면, 즉 $N = 1$이면 Jung(2011)의 교체모형과 동일하게 된다.

2.2 단위시간당 기대비용

본 논문에서는 최적의 예방보전정책을 결정하기 위한 기준으로 단위시간당 기대비용을 사용하기 때문에 3.1절에서 설명한 교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 단위시간당 기대비용을 구하여야 한다. 단위시간당 기대비용은 총기대비용과 기대순환길이로부터 구해질 수 있는데, 기대순환길이 $ECL(\tau,N)$는 Jung 등(2010)과 Jung(2011)의 결과를 이용하면 다음과 같이 구해진다.

$$ECL(\tau,N) = \frac{I(w_R)}{\overline{F}(w_R)} + w_M + N\tau. \tag{1}$$

한편, 교체-수리보증이 있는 시스템에 대한 예방보전정책에 대하여 사용자 측면의 총기대비용 $ETC(\tau,N)$은 보증기간 동안에 발생하는 기대비용, 보증기간이 종료된 이후의 보전기간 동안에 발생하는 기대비용 그리고 보전기간이 종료되는 시점에서의 시스템을 교체하기 위한 기대비용의 합으로 구할 수 있다. 그런데, 이러한 총기대비용 $ETC(\tau,N)$는 재생교체보증기간 동안에 발생하는 고장의 총 횟수를 고려하여야 한다. 따라서 K를 재생교체보증기간 동안에 고장이 발생하지 않을 때까지의 시스템의 교체횟수, X_j를 보증기간에서 m번의 고장이 발생했다고 가정했을 경우에 보증기간에서의 시스템의 고장시간이라고 가정하자. 여기서, $X_j < w_R$, $j=1,2,\cdots$, m이고 $X_{m+1} > w_R$이 된다.

먼저, 보증기간 동안에 시스템에 m번의 고장이 발생했다고 가정하면, 즉 $K=m$이 주어져 있다는 조건 하에서 기대비용 $ETC(\tau,N)$는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} ETC(\tau,N \mid K=m) &= m\frac{c_r}{w_R}\frac{I(w_R)}{F(w_R)} + mc_{f,w} + (c_{m,w}+c_{f,w})\int_{w_R}^{w} h(t)dt. \\ &\quad + (c_m + c_{f,m})\left(\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{k}\{h((i-1)(\tau-\eta)+(\tau+w)) - h(i(\tau-\eta)+w)\}\tau \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=0}^{N-1}\int_{k\tau+w}^{(k+1)\tau+w} h(t-k\eta)dt\right) + (N-1)c_p + c_r, \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 $c_{f,w}$는 보증기간에서의 고장에 따른 비용, $c_{f,m}$은 보전기간에서 발생하는 고장에 따른 비용, c_p는 예방보전기간에서 이루어지는 예방보전비용, $c_{m,w}$는 보증기간에서의 최소수리비용, c_m은 예방보전기간에서의 최소수리비용이고 c_r은 교체비용이다. 그리고 $I(s) = \int_0^s tf(t)dt$이다.

그런데, 식 (2)에 있는 기대비용은 $K=m$이 주어져 있다는 조건 하에서 구한 것이므로 일반적으로 조건이 없을 경우로 확장하기 위해서는 K의 분포를 고려하여야 한다. K는 재생교체보증기간 동안에 고장이 발생하지 않을 때까지의 시스템의 교체횟수이므로 다음과 같은 분포를 따른다.

$$P(K=m)=(1-F(w_R))F(w_R)^m,\ m=0,\ 1,\ 2,\ \cdots. \tag{3}$$

따라서 교체-수리보증이 있는 수리 가능한 시스템에 대한 예방보전정책에 대한 사용자 측면의 총기대비용 $ETC(\tau)$는 식 (2)와 식 (3)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} ETC(\tau,N) = & \frac{c_r}{w_R}\frac{I(w_R)}{\overline{F}(w_R)} + c_{f,w}\frac{F(w_R)}{\overline{F}(w_R)} + (c_{m,w}+c_{f,w})\int_{w_R}^{w} h(t)dt \\ & + (c_m + c_{f,m})\left(\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{k}\{h((i-1)(\tau-\eta)+(\tau+w)) - h(i(\tau-\eta)+w)\}\tau \right. \\ & \left. + \sum_{k=0}^{N-1}\int_{k\tau+w}^{(k+1)\tau+w} h(t-k\eta)dt\right) + (N-1)c_p + c_r. \end{aligned} \tag{4}$$

이제, 식 (1)의 기대순환길이와 식 (4)의 총기대비용으로부터 교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전정책에 대한 단위시간당 기대비용은 다음과 같이 구해짐을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} C(\tau,N) = & \frac{1}{I(w_R)+\overline{F}(w_R)(w_M+N\tau)}\left[\frac{c_r}{w_R}I(w_R) + c_{f,w}F(w_R) + \overline{F}(w_R)(c_{m,w}+c_{f,w})\int_{w_R}^{w} h(t)dt \right. \\ & + \overline{F}(w_R)(c_m + c_{f,m})\left(\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{k}\{h((i-1)(\tau-\eta)+(\tau+w)) - h(i(\tau-\eta)+w)\}\tau \right. \\ & \left.\left. + \sum_{k=0}^{N-1}\int_{k\tau+w}^{(k+1)\tau+w} h(t-k\eta)dt\right) + \overline{F}(w_R)(N-1)c_p + \overline{F}(w_R)c_r\right]. \end{aligned} \tag{5}$$

위의 식 (5)에 구해진 단위시간당 기대비용은 보증기간에서 시스템에 고장이 발생되면 사용자가 일정 비용을 지불하고 교체 및 최소수리가 이루어지는 유료 교체-수리보증인 경우에 해당된다. 만약, 보증기간에서 발생되는 시스템의 고장에 대하여 교체 및 수리가 무료로 이루어지는 무료 교체-수리보증이 제공된다면 식 (5)로부터 단위시간당 기대비용이 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} C(\tau,N) = & \frac{1}{I(w_R)+\overline{F}(w_R)(w_M+N\tau)}\left[c_{f,w}F(w_R) + \overline{F}(w_R)c_{f,w}\int_{w_R}^{w} h(t)dt + \overline{F}(w_R)(c_m + c_{f,m}) \cdot \right. \\ & \left(\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{k}\{h((i-1)(\tau-\eta)+(\tau+w)) - h(i(\tau-\eta)+w)\}\tau \right. \\ & \left.\left. + \sum_{k=0}^{N-1}\int_{k\tau+w}^{(k+1)\tau+w} h(t-k\eta)\ dt\right) + \overline{F}(w_R)(N-1)c_p + \overline{F}(w_R)c_r\right]. \end{aligned}$$

한편, 보증기간이 종료된 이후에 예방보전활동이 이루어지지 않는다면 식 (5)의 단위시간당 기대비용은 다음과 같이 되는데, 이는 Jung(2001)의 경우와 동일하게 됨을 알 수 있다.

$$C(\tau)=\frac{\frac{c_r}{w_R}I(w_R)+c_{f,w}F(w_R)+\overline{F}(w_R)(c_{m,w}+c_{f,w})\int_{w_R}^{w}h(t)dt+\overline{F}(w_R)(c_m+c_{f,m})\int_{w}^{w+\tau}h(t)dt+\overline{F}(w_R)c_r}{I(w_R)+\overline{F}(w_R)(w_M+\tau)}.$$

2.3 최적의 예방보전정책

이제, 교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 사용자 측면의 단위시간당 기대비용인 식 (5)를 최소화하는 최적의 예방보전정책을 결정하는 문제를 다루고자 한다. 우선, 최적의 예방보전 주기 τ^*를 찾기 위해서 식 (5)를 τ에 관해서 1차 미분한 다음 0으로 놓고 풀면 다음을 얻을 수 있다.

$$c_1(a_1+\tau a_2+a_3)+N\overline{F}(w)(\tau^2 a_2+\tau a_3-a_4)=Nc_2/(c_m+c_{f,m}). \tag{6}$$

식 (6)에서 c_1, c_2, a_1, a_2, a_3, a_4는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$c_1=I(w)+w\overline{F}(w_R),$$

$$c_2=\frac{c_r}{w_R}I(w_R)+c_{f,w}F(w_R)+\overline{F}(w_R)(c_{m,w}+c_{f,w})\int_{w_R}^{w}h(t)dt+\overline{F}(w_R)(N-1)c_p+\overline{F}(w_R)c_r$$

$$a_1=\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{k}\{h((i-1)(\tau-\eta)+(\tau+w))-h(i(\tau-\eta)+w)\},$$

$$a_2=\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{k}\{h'((i-1)(\tau-\eta)+(\tau+w))-h'(i(\tau-\eta)+w)i\},$$

$$a_3=\sum_{k=0}^{N-1}\{(k+1)h((k+1)\tau+w-k\eta)-kh(k\tau+w-k\eta))\},$$

$$a_4=\sum_{k=0}^{N-1}\int_{k\tau+w}^{(k+1)\tau+w}h(t-k\eta)\ dt.$$

Jung과 Park(2003)의 결과로부터 시스템의 강도함수 $h(t)$가 볼록인 순증가 함수이고 N의 값이 주어지면, 식 (6)을 만족하는 최적의 주기 τ^*의 값이 항상 유일하게 존재한다는 사실을 알 수 있다. 그러나 이렇게 구해지는 τ^*는 N의 값에 의존하게 되므로 식 (5)를 만족하는 최적의 주기 τ^*와 최적의 예방보전 횟수 N를 동시에 찾아야만 한다. 이를 위해서 식 (6)을 만족하는 τ가 N의 함수가 되기 때문에 이를 τ_N이라고 하고, 이 값을 식 (5)의 τ대신에 대입하면, $C(\tau_N,N)$은 N만의 함수가 되므로 최적의 횟수 N^*는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N^* = \min_{N} C(\tau_N, N), \quad N = 1, 2, 3, \cdots . \tag{7}$$

따라서 식 (5)의 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 횟수는 식 (7)에서 구해진 N^*이고, 이 때 최적의 주기 τ^*는 τ_{N^*}가 된다. 결국, 교체-수리보증이 종료된 이후에 τ^*시점마다 주기적으로 예방보전 활동을 수행하고, N^*번째 예방보전주기에서는 사용자에 의해서 새로운 시스템으로 교체하는 것이 사용자측면에서 최적의 예방보전정책이 되고, 그 때의 단위시간당 기대비용은 $C(\tau^*, N^*)$가 된다.

3. 수치적 예

본 논문에서 고려된 예방보전모형에 대한 최적의 예방보전정책을 설명하기 위해서 시스템의 고장시간 T가 척도모수(scale parameter)가 1인 와이블분포(Weibull distribution)를 따른다고 가정하자. 즉, 가정된 시스템의 고장시간 T의 확률밀도함수는 $f(t) = \beta t^{\beta-1} \exp(-t^{\beta})$이고, 강도함수는 $h(t) = \beta t^{\beta-1}$이 된다. 그리고 보증기간은 $w = 0.5$, 보증기간에서 발생하는 고장에 따른 비용은 $c_{f,w} = 1.5$, 보전기간에서 발생하는 고장에 따른 비용은 $c_{f,m} = 1.5$, 보전기간 동안에 수행되는 예방보전비용은 $c_p = 2$, 보증기간에서의 최소수리비용은 $c_{m,w} = 2$, 보전기간에서의 최소수리비용은 $c_m = 3$ 그리고 예방보전의 수준은 $\eta = \tau$라고 가정하자. 이때, 식 (5)에 주어져 있는 교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 단위시간당 기대비용을 구할 수 있으며, 이를 최소화하는 최적의 예방보전 주기와 횟수는 <그림 1>과 같은 과정을 통해서 결정할 수 있다.

시스템의 수명분포 정보 입력
↓
보증기간 정보 입력
↓
비용 정보 입력
↓
식 (6)을 사용하여 τ_N 계산
↓
식 (7)을 사용하여 최적의 예방보전횟수 N^* 결정
↓
식 (6)을 사용하여 최적의 예방보전주기 τ^* 결정

<그림 1> 최적의 예방보전정책을 결정하는 과정

<표 1>에는 $\beta=3$, $\beta=4$ 그리고 $\beta=5$인 경우에 대하여 각각 교체-수리보증이 종료된 이후의 최적의 예방보전정책과 그 때의 단위시간당 기대비용이 나타나 있다. <표 1>에서 $\beta=4$, $w_r=0.15$, $c_r=30$일 때, 식 (5)를 최소화하는 최적의 예방보전 주기는 0.36349이고 예방보전 횟수는 3이 됨을 알 수 있는데, 이는 교체-수리보증이 종료된 이후에 0.36349시점에서 첫 번째 예방보전을 수행하고, 0.72698($=0.36349\times2$)시점에서 두 번째 예방보전을 수행하며, 세 번째 예방보전 주기인 1.09047($=0.36349\times3$)에서는 새로운 시스템으로 교체하면 단위시간당 기대비용이 35.56157이 되고, 이것이 기대비용 측면에서 최적의 예방보전정책이 된다는 것을 의미한다. <표 1>에 주어져 있는 다른 최적의 예방보전주기와 횟수 그리고 이에 대응하는 단위시간당 기대비용도 동일한 의미를 갖는다. 한편, <표 1>로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 1) β의 값이 고정되어 있을 때, c_r값이 증가하면 단위시간당 기대비용과 예방보전 횟수가 증가한다. 2) c_r의 값이 고정되어 있을 때, β값이 증가하면 단위시간당 기대비용은 증가하고 예방보전 횟수는 많아짐을 알 수 있다.

<표 1> 교체-수리보증 이후의 최적의 예방보전정책

β	w_r	최적 정책	c_r		
			10	20	30
3	0.1	τ^*	0.59092	0.85879	0.60484
		N^*	1	1	2
		$C(\tau^*,N^*)$	16.06664	24.92509	32.05306
	0.15	τ^*	0.61933	0.88678	0.62011
		N^*	1	1	2
		$C(\tau^*,N^*)$	16.91386	25.96299	33.09639
	0.2	τ^*	0.64909	0.91615	0.63607
		N^*	1	1	2
		$C(\tau^*,N^*)$	17.82547	27.07373	34.20400
4	0.1	τ^*	0.46387	0.63880	0.35542
		N^*	1	1	3
		$C(\tau^*,N^*)$	16.11892	26.58462	34.32930
	0.15	τ^*	0.48328	0.40519	0.36349
		N^*	1	2	3
		$C(\tau^*,N^*)$	17.11185	27.86483	35.56157
	0.2	τ^*	0.50389	0.41686	0.30886
		N^*	1	2	4
		$C(\tau^*,N^*)$	18.21082	29.14544	36.80806
5	0.1	τ^*	0.41599	0.35161	0.27073
		N^*	1	2	4
		$C(\tau^*,N^*)$	15.83920	26.81881	34.47440
	0.15	τ^*	0.43066	0.36031	0.24298
		N^*	1	2	5
		$C(\tau^*,N^*)$	16.87968	28.10744	35.69207
	0.2	τ^*	0.44638	0.29215	0.24766
		N^*	1	3	5
		$C(\tau^*,N^*)$	18.04818	29.38021	36.90973

4. 결론

본 논문에서는 수리가 가능한 시스템에 대하여 교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전정책을 제안함으로써 기존 연구인 Jung(2011)의 교체정책을 일반적인 형태의 보전정책으로 확장하였다. 즉, 교체보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생되면 시스템을 교체해 주고 보증기간도 재생되며, 수리보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생되면 최소수리를 수행하여 주며 보증기간은 재생되지 않는 교체-수리보증이 종료된 이후의 사용자 측면의 예방보전모형을 제시하고, 이러한 모형이 기존의 교체모형을 포함하는 보전정책이 됨을 보였다. 그리고 제안된 예방보전모형에 대하여 사용자 측면의 단위시간당 기대비용을 이론적으로 구하였으며, 구해진 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 예방보전정책을 결정하는 방법과 그 의미에 대하여 설명하였다. 끝으로 수치적 예를 통하여 본 논문에서 고려된 예방보전모형에 대한 최적의 예방보전 주기와 예방보전 횟수 및 그 때의 단위시간당 기대비용을 결정할 수 있음을 보였고, 그 의미를 설명하였다. 더불어 교체비용과 교체보증기간 등이 다양한 값으로 변화할 때 최적의 예방보전정책 및 단위시간당 기대비용이 어떠한 변화를 보이는지에 대해서도 살펴보았다.

참고문헌

[1] Canfield, R. V.(1986). Cost optimization of periodic preventive maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*, 35, 78-81.

[2] Chien, Y. H.(2008a). A general age replacement model with minimal repair under renewing free-replacement warranty, *European Journal of Operational Research*, 186, 1046-1058.

[3] Chien, Y. H.(2008b). Optimal age-replacement policy under an imperfect renewing free-replacement warranty, *IEEE Transactions on Reliability*, 57, 125-133.

[4] Jung, K. M.(2008). PM policy with random maintenance quality following the expiration of non-renewing warranty, *The Korean Communications in Statistics*, 15, 77-86.

[5] Jung, K. M.(2009). Two PM policies following the expiration of free-repair warranty, *Journal of Korean Data & Information Science Society*, 20, 999-1007.

[6] Jung, K. M.(2011). Replacement model following the expiration of free RRNMW, *The Korean Communications in Statistics*, 18, 697-705.

[7] Jung, G. M. & Park, D. H.(2003). Optimal maintenance policies during the post-warranty period, *Reliability Engineering and System Safety*, 82, 173-185.

[8] Jung, K. M., Park, M. & Park, D. H.(2010). System maintenance cost dependent on life cycle under renewing warranty policy, *Reliability Engineering and System Safety*,

95, 816-821.
[9] Sahin, I. & Polatoglu, H.(1996). Maintenance strategies following the expiration of warranty, *IEEE Transactions on Reliability,* **45**, 220-228.
[10] Yeh, R. H., Chen, M. Y. & Lin, C. Y.(2007). Optimal periodic replacement policy for repairable products under free-repair warranty, *European Journal of Operational Research*, **176**, 1678-1686.