신뢰성응용연구 신뢰성기술
제14권, 제2호. pp.122-128, 2014

교체-수리보증 하에서 연장된 보증이 종료된 이후의 예방보전정책*

정 기 문†

경성대학교 정보통계학과

Preventive Maintenance Policy Following the Expiration of Extended Warranty Under Replacement-Repair Warranty

Ki Mun Jung

Department of Informational Statistics, Kyungsung University

In this paper, we consider the periodic preventive maintenance model for a repairable system following the expiration of extended warranty under replacement-repair warranty. Under the replacement-repair warranty, the failed system is replaced or minimally repaired by the manufacturer at no cost to the user. Also, under extended warranty, the failed system is minimally repaired by the manufacturer at no cost to the user during the original extended warranty period. As a criterion of the optimality, we utilize the expected cost rate per unit time during the life cycle from the user's perspective. And then 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, Extended Warranty, Preventive Maintenance Policy, Replacement-Repair Warranty

1. 서 론

일반적으로 시스템의 판매자는 사용자에게 일정 기간 동안 발생되는 시스템의 고장에 대하여 책임을 지겠다는 보증기간을 제공하고 있는데, 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 교체정책(replacement policy)과 예방보전정책(preventive maintenance policy)이 연구되었는데, 교체보증이 주어진 경우에 대한 교체 및 예방보전정책으로는 Sahin and Polatoglu(1996), Jung and Park(2003), Chien (2008a) 그리고 Chien(2008b) 등이 있다. 그리고 수리보증이 주어진 시스템에 관한 교체 및 예방보전정책과 관련된 연구로는 Yeh *et al.*(2007)과 Jung(2009)의 연구가 있다. 이 중에서 Sahin and Polatoglu(1996)는 재생교체보증(renewing replacement warranty)과 비재생교체보증(non-renewing replacement warranty)이 제공되는 시스템에 대하여 사용자 측면의 교체정책(replacement policy)을 제안하였으며, Yeh *et al.*(2007)은 보증기간 중 시스템에 고장이 발생되면 무료로 최소수리가 수행되고, 보증기간은 재생되지 않는 비재생 무료 최소 수리보증(non-renewing free minimal repair warranty; NFMW)이 주어진 수리가 가능한 시스템에 대한 교체정책을 제안하였다.

한편, 최근에 Jung *et al.*(2012)은 기존의 교체보증과 수리보증을 포함하는 일반적인 형태의 교체-수리보증(replacement-repair warranty)을 제안하고, 이러한 보증정책이 주어진 시스템에 대한 교체모형을 제안하였다.

그러나 위에서 언급한 연구들은 시스템을 구입할 때 처음에 기본적으로 제공되는 보증기간만을 고려하였는데, 최근

* 이 논문은 2014학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.
† 교신저자 kmjung@ks.ac.kr
2014년 3월 10일 접수; 2014년 4월 21일 수정본 접수; 2014년 5월 12일 게재 확정.

에는 기본적으로 제공되는 보증기간과 더불어 일정한 비용을 지불하고 추가적으로 보증기간을 선택할 수 있는 연장된 보증(extended warranty)에 대한 관심이 증가되고 있다. 이러한 연장된 보증과 관련된 연구로는 Wu and Longhurst(2011), Bouguerra *et al*.(2012) 그리고 Jung *et al*.(2013) 등이 있다. Wu and Longhurst(2011)는 두 종류의 고장을 갖는 연장된 보증 하에서의 최적의 보증 및 교체정책을 제안하였으며, Bouguerra *et al*.(2012)은 다양한 형태의 교체 및 예방보전정책 하에서 연장된 보증을 구입하기 위한 기준을 제시하였다. 그리고 Jung *et al*.(2013)은 교체-수리보증을 갖는 시스템에 대하여 연장된 보증 이후의 교체모형을 제안하였다.

일반적으로 시스템의 사용자는 시스템의 고장률을 일정수준으로 감소시키기 위하여 보증기간이 종료된 이후에 일반적으로 예방보전활동을 수행하게 되므로 연장된 보증을 고려한 예방보전모형에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 교체-수리보증을 갖는 시스템에 대하여 연장된 보증 이후의 예방보전모형을 제안하고자 한다. 즉, 수리가 가능한 시스템에는 기본적으로 교체-수리보증이 주어지며, 이 기본 보증기간 이후에는 사용자에 의해서 추가적으로 연장된 보증을 선택할 수 있다. 그리고 연장된 보증기간이 종료된 이후에는 τ, 2τ, $\cdots$, $N\tau$에서 사용자에 의해서 예방보전활동이 주기적으로 이루어지고 예방보전 사이에서 고장이 발생되면 최소수리를 수행한다. 그리고 N번째 예방보전주기에서는 사용자에 의해서 새로운 시스템으로 교체된다. 이러한 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. 제 2장에서는 본 논문에서 제안되는 교체-수리보증을 갖는 시스템에 대하여 연장된 보증 이후의 예방보전모형을 제안하고자 한다. 그리고 제 3장에서는 제 2장에서 제안된 연장된 보증이 있는 예방보전모형에 대하여 단위시간당 기대비용을 유도하고, 이를 최소화하는 최적의 예방보전정책을 결정하고자 한다. 마지막으로 유도된 단위시간당 기대비용과 최적의 예방보전정책을 설명하기 위해서 시스템의 고장시간이 와이블 분포를 따를 때 수치적 예를 제 4장에서 다루었다.

2. 교체-수리보증 하에서 연장된 보증 이후의 예방보전모형

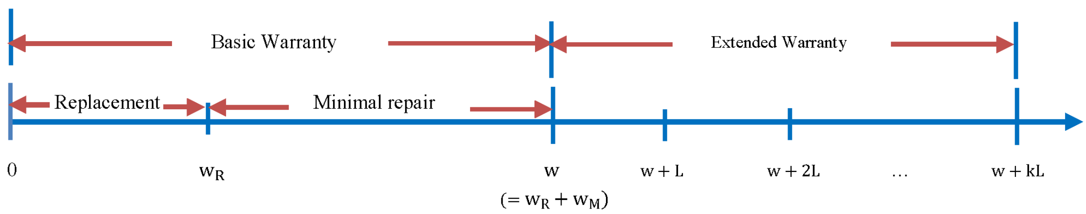
연장된 보증이란 시스템을 구입할 때 처음에 기본적으로 제공되는 보증기간이 아니고, 일정한 비용을 지불하고 추가적으로 보증기간을 선택할 수 있는 보증을 의미하며, 최근에 이러한 연장된 보증에 대한 관심이 증가되고 있는 실정이다. 이러한 연장된 보증기간과 관련된 주된 관심사항은 연장된 보증기간의 길이와 구입비용 그리고 연장된 보증기간이 제공되는 경우에 대한 사용자 측면의 최적의 보전정책 등이다. 그런데, 이러한 문제는 제공되는 보증정책의 종류와 시스템의 고장분포 그리고 수반되는 비용과 밀접한 관련이 있다고 할 수 있다. 본 논문에서 고려하고자 하는 보증은 Jung *et al*.(2013)이 제안한 교체-수리보증이 있는 연장된 보증이다 (<Figure 1> 참조). 즉, 처음에는 기본적으로 시스템에 교체-수리보증이 제공되고, 그 이후에는 일정비용을 지불하고 추가적으로 연장된 보증기간을 선택할 수 있는 보증이다. 교체-수리보증 기간인 $(0,\ w)$에서는 시스템에 고장이 발생되면 고장이 발생된 시점에 따라서 교체 또는 최소수리가 무료로 이루어진다. 즉, 교체보증기간$(0,\ w_R)$에서는 시스템에 고장이 발생되면 새것으로 교체되고 보증기간도 새롭게 다시 주어지게 되며, 수리보증기간$(w_R,\ w)$에서는 최소수리가 이루어지고 보증기간은 재생되지 않는다. 그리고 연장된 보증에서는 시스템에 고장이 발생되면 최소수리가 이루어지고 보증기간은 재생되지 않고 잔여 보증기간만이 유효하게 된다. 한편, 추가적으로 제공되는 연장된 보증기간$(w,\ w+kL)$에서는 시스템에 고장이 발생되면 무료로 최소수리가 진행된다. 여기서 L은 연장되는 보증의 기본단위이고, k는 연장되는 단위보증의 횟수이다. 따라서 추가적으로 연장되는 보증기간은 kL이 된다. <그림 1>은 이러한 교체-수리보증이 있는 연장된 보증의 전형적인 형태를 보여주고 있다.

이제, 앞에서 설명한 교체-수리보증을 갖는 연장된 보증에 기초한 사용자 측면의 예방보전모형을 제시하고자 한다. 시스템에는 기본적으로 교체보증 기간 $(0,\ w_R)$과 최소수리 보증기간 $(w_R,\ w)$가 제공되고, 사용자는 일정한 비용을 지불하고 추가적으로 보증기간을 연장할 수 있다. 여기서 w_R은 교체보증 기간이고 w_M은 최소수리보증 기간이며 $w_R+w_M=w$이다. 또한 시스템의 고장률을 감소시키기 위해서 연장된 보증이 종료된 이후에는 사용자에 의해서 예방보전(preventive maintenance; PM) 활동이 $j\tau$, $j=1,\ 2,\ \cdots,\ N$에서 주기적으로 이루어지고, N번째 PM 주기에서는 시스템이 새것으로 교체된다. 이때, j번째 PM이 이루어진 이후의 시스템의 고장률함수는 Canfield(1986)가 제안한 것처럼 다음과 같은 고장률함수를 갖는다고 가정한다.

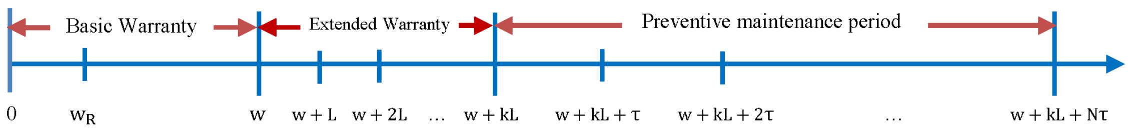
$$h_j(t)=\begin{cases} h(t), & \text{for} \quad 0\le t\le\tau \\ \sum_{i=1}^{j}\{h(i\tau-(i-1)\eta)-h(i(\tau-\eta))\}+h(t-j\eta), & \\ \qquad \text{for} \quad j\tau\le t\le(j+1)\tau. & \end{cases}$$

위의 고장률함수에서 $h(t)$는 PM이 이루어지지 않을 때의 고장률함수이고 η는 예방보전의 수준을 표현하는 인자로써 $0<\eta\le\tau$이다. <그림 2>는 이러한 교체-수리보증이 있는 연장된 보증 하에서의 예방보전모형의 전형적인 형태를 보여주고 있다.

이러한 연장된 보증 하에서의 예방보전모형에 대하여 최



〈그림 1〉 교체-수리보증이 있는 연장된 보증



〈그림 2〉 교체-수리보증이 있는 연장된 보증 하에서의 예방보전모형

적의 예방보전 횟수 및 예방보전 주기를 결정하기 위해서는 최적화의 기준이 필요한데, 본 논문에서는 최적화의 기준으로 단위시간당 기대비용을 사용하고자 하며, 이러한 단위시간당 기대비용에 대해서는 다음 절에서 자세히 설명하고자 한다.

한편, 본 논문에서 제안되는 예방보전모형은 다음과 같은 특별한 경우의 연장된 보증 이후의 교체모형과 예방보전모형으로 축소되는 모형이다.

i) 수리보증을 갖는 시스템에 대한 연장된 보증 이후의 예방보전모형 : $w_R = 0$

ii) 교체-수리보증을 갖는 시스템에 대한 연장된 보증 이후의 교체모형 : $N = 1$

iii) 수리보증을 갖는 시스템에 대한 연장된 보증 이후의 교체모형 : $N = 1$이고 $w_R = 0$

3. 최적의 예방보전정책

본 논문에서는 최적의 예방보전정책을 결정하기 위한 기준으로 단위시간당 기대비용을 사용하기 때문에 제2장에서 설명한 교체-수리보증을 갖는 연장된 보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 단위시간당 기대비용을 구하여야 한다. 먼저, T를 시스템의 고장시간이라고 하고 $F(t)$와 $f(t)$를 각각 T의 수명분포함수(life distribution function)와 확률밀도함수(probability density function)이라고 하자. 이때, 단위시간당 기대비용은 총기대비용과 기대순환길이로부터 구해질 수 있는데, 기대순환길이 $ECL(\tau,\ N)_k$는 Jung *et al.*(2012)과 Jung *et al.*(2013)의 결과를 이용하면 다음과 같이 구해진다.

$$ECL(\tau,\ N)_k = \frac{I(w_R)}{\bar{F}(w_R)} + w + kL + N\tau. \tag{1}$$

위 식에서 $I(s) = \int_0^s t f(t)dt$이다.

한편, 교체-수리보증을 갖는 연장된 보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대하여 사용자 측면의 총기대비용 $ETC(\tau,\ N)_k$은 연장된 보증의 구입비용 $E(C_E)$, 보증기간 동안에 발생하는 기대비용 $E(C_W)$, 보증기간이 종료된 이후의 보전기간 동안에 발생하는 기대비용 $E(C_M)$ 그리고 보전기간이 종료되는 시점에서 시스템을 교체하기 위한 기대비용 $E(C_R)$의 합으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$ETC(\tau,\ N)_k = E(C_E) + E(C_W) + E(C_M) + E(C_R). \tag{2}$$

이때 위의 식 (2)에 주어진 각 기대비용은 다음과 같이 구해진다.

$$E(C_E) = kc_e,$$

$$E(C_W) = c_{fw}\left(\frac{F(w_R)}{\bar{F}(w_R)} + \int_{w_R}^{w+kL} h(t)dt\right),$$

$$\begin{aligned} E(C_M) = (c_{fm} + c_m)\Bigg(&\sum_{j=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{j}\{h((i-1)(\tau-\eta) \\ &+ (\tau + w + kL)) - h(i(\tau-\eta) + w + kL)\}\tau\} \\ &+ \sum_{j=0}^{N-1}\int_{j\tau+w+kL}^{(j+1)\tau+w} h(t-j\eta)dt\Bigg) + (N-1)c_p, \end{aligned}$$

$$E(C_R) = c_r.$$

위의 식에서 L은 연장되는 보증의 기본단위이고, k는 연장되는 단위보증의 횟수이다. 그리고 c_r은 시스템의 교체비용, c_{fw}는 보증기간에서 발생되는 고장으로 유발되는 비용, c_{fm}은 보전기간에서 발생되는 고장으로 유발되는 비용, c_m은 보전기간에서 발생되는 고장에 대한 수리비용, c_p는 보전기간에서 수행되는 예방보전비용, c_e는 연장되는 보증기간을 구입하기 위한 기본 단위비용이다.

따라서 식 (2)에 주어진 사용자 측면의 총기대비용 $ETC(\tau,\ N)_k$는 다음과 같이 구해진다.

$$ETC(\tau,\ N)_k = kc_e + c_{fw}\left(\frac{F(w_R)}{\overline{F}(w_R)} + \int_{w_R}^{w+kL} h(t)dt\right) + (c_{fm}+c_m)\left(\sum_{j=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{j}\{h((i-1)(\tau-\eta) + (\tau+w+kL)) - h(i(\tau-\eta)+w+kL))\}\right. \tau + \sum_{j=0}^{N-1}\int_{j\tau+w+kL}^{(j+1)\tau+w+kL} h(t-j\eta)dt\Bigg) + (N-1)c_p + c_r\} \tag{3}$$

이제, 식 (1)의 기대순환길이와 식 (3)의 총기대비용으로부터 연장된 보증 하에서의 예방보전정책에 대한 단위시간당 기대비용은 다음과 같이 구해짐을 알 수 있다.

$$C(\tau,\ N)_k = \frac{\overline{F}(w_R)}{I(w_R)+\overline{F}(w_R)(w+kL+N\tau)}\left[kc_e + c_{fw}\left(\frac{F(w_R)}{\overline{F}(w_R)} + \int_{w_R}^{w+kL} h(t)dt\right) + (c_{fm}+c_m)\left(\sum_{j=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{j}\{h((i-1)(\tau-\eta) + (\tau+w+kL)) - h(i(\tau-\eta)+w+kL)\tau\} + \sum_{j=0}^{N-1}\int_{j\tau+w+kL}^{(j+1)\tau+w+kL} h(t-j\eta)dt\right) + (N-1)c_p + c_r\right]. \tag{4}$$

한편, 식 (4)에 유도된 단위시간당 기대비용으로 부터 다음과 같은 특별한 경우의 연장된 보증 이후의 교체모형과 예방보전모형에 대한 단위시간당 기대비용이 유도될 수 있다.

i) 수리보증을 갖는 시스템에 대한 연장된 보증 이후의 예방보전모형 : $w_R = 0$

$$C(\tau,\ N)_k = \frac{1}{I(w_R)+(w+kL+\tau)}\left[kc_e + c_{fw}\int_0^{w+kL} h(t)dt + (c_{fm}+c_m)\left(\sum_{j=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{j}\{h((i-1)(\tau-\eta) + (\tau+w+kL)) - h(i(\tau-\eta)+w+kL)\tau\} + \sum_{j=0}^{N-1}\int_{j\tau+w+kL}^{(j+1)\tau+w+kL} h(t-j\eta)dt\right) + (N-1)c_p + c_r\right].$$

ii) 교체-수리보증을 갖는 시스템에 대한 연장된 보증 이후의 교체모형 : $N=1$

$$C(\tau)_k = \frac{\overline{F}(w_R)}{I(w_R)+\overline{F}(w_R)(w+kL+\tau)}\left[kc_e + c_{fw}\left(\frac{F(w_R)}{\overline{F}(w_R)} + \int_{w_R}^{w+kL} h(t)dt\right) + (c_{fm}+c_m)\int_{w+kL}^{w+kL+\tau} h(t)dt + c_r\right].$$

iii) 수리보증을 갖는 시스템에 대한 연장된 보증 이후의 교체모형 : $N=1$이고 $w_R=0$

$$C(\tau)_k = \frac{1}{I(w_R)+(w+kL+\tau)}\left[kc_e + c_{fw}\int_0^{w+kL} h(t)dt + (c_{fm}+c_m)\int_{w+kL}^{w+kL+\tau} h(t)dt + c_r\right].$$

이제, 수리보증을 갖는 연장된 보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 사용자 측면의 단위시간당 기대비용인 식 (4)를 최소화하는 최적의 예방보전정책을 결정하는 문제를 다루고자 한다. 우선, 주어진 k의 값에 대해서 최적의 예방보전 주기 τ^*를 찾기 위해서 식 (4)를 τ에 관해서 1차 미분한 다음 0으로 놓고 풀면 다음을 얻을 수 있다.

$$(I(w_R)+\overline{F}(w_R)(w+kL))(a_1+\tau a_2+a_3) + N\overline{F}(w_R)(\tau^2 a_2+\tau a_3-a_4) = Nc_1/(c_m+c_{fm}). \tag{5}$$

식 (5)에서 c_1, a_1, a_2, a_3, a_4는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$c_1 = \overline{F}(w_R)\left(kc_e + c_{fw}\left(\frac{F(w_R)}{\overline{F}(w_R)} + \int_{w_R}^{w+kL} h(t)dt\right) + (N-1)c_p + c_r\right),$$

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

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

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

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

Jung and Park(2003)의 결과로부터 시스템의 고장률함수 $h(t)$가 볼록인 순증가 함수이고 N의 값이 주어지면, 식 (5)를 만족하는 최적의 주기 τ^*의 값이 항상 유일하게 존재한다는 사실을 알 수 있다. 그러나 이렇게 구해지는 τ^*는 N의 값에 의존하게 되므로 식 (4)를 만족하는 최적의 주기 τ^*와 최적의 예방보전 횟수 N을 동시에 찾아야 한다. 이를 위해서 식 (5)을 만족하는 τ가 N의 함수가 되기 때문에 이를 τ_N이라고 하고, 이 값을 식 (4)의 τ대신에 대입하면, $C(\tau_N,\ N)_k$은 N만의 함수가 되므로 최적의 횟수 N^*는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N^* = \min_N C(\tau_N,\ N)_k,\quad N=1,\ 2,\ 3,\ \cdots. \tag{6}$$

따라서 주어진 k의 값에 대해서 식 (4)의 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 예방보전 횟수는 식 (6)에서 구해진 N^*이고, 이 때 최적의 주기 τ^*는 τ_{N^*}가 된다. 결국, 연장된 보증이 종료된 이후에 τ^*시점마다 주기적으로 예방보전 활동을 수행하고, N^*번째 예방보전 주기에서는 사용자에 의해서 새로운 시스템으로 교체하는 것이 사용자 측면에서 최적의 예방보전정책이 되고, 그 때의 단위시간당 기대비용은 $C(\tau^*,\ N^*)_k$가 된다.

4. 수치적 예

본 논문에서 고려된 연장된 보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 최적의 예방보전정책을 설명하기 위해서 시스템의 고장시간 T가 척도모수(scale parameter)가 1이고 형태모수(shape parameter)가 β인 와이블분포를 따른다고 가정하자. 즉, 가정된 시스템의 고장시간 T의 확률밀도함수는 $f(t)=\beta t^{\beta-1}\exp(-t^{\beta})$이고, 고장률함수는 $h(t)=\beta t^{\beta-1}$이 된다. <표 1>에 나타나 있는 시스템의 고장률함수의 모수, 시스템에 주어지는 기본보증 기간 그리고 다양한 비용 등과 관련된 정보를 사용하여 식 (4)에 주어져 있는 단위시간당 기대비용을 유도할 수 있고, 식 (5)와 식 (6)으로 부터 최적의 예방보전정책과 그 때의 단위시간당 기대비용을 결정할 수 있다.

<표 2>부터 <표 6>에는 최적의 예방보전 주기와 횟수 그리고 그 때의 단위시간당 기대비용이 나타나 있다. 예를 들어 <표 2>에서 $k=4$인 경우에 식 (4)를 최소화하는 최적의 예방보전 주기는 0.49373이고 예방보전 횟수는 3이 됨을 알 수 있는데, 이는 연장된 보증이 종료된 이후에 0.49373시점에서 첫 번째 예방보전을 수행하고, $0.98746(=0.49373\times 2)$시점에서 두 번째 예방보전을 수행하며, 세 번째 예방보전주기인 $1.48119(=0.49373\times 3)$에서는 새로운 시스템으로 교체하면 단위시간당 기대비용이 83.29035가 되고, 이것이 기대비용 측면에서 최적의 예방보전정책이 된다는 것을 의미한다.

<표 2>에는 교체보증 기간의 변화에 따른 최적의 예방보전정책 및 단위시간당 기대비용이 나타나 있는데, 이로부터 최소수리 비용이 증가함에 따라 연장된 보증이 종료된 이후의 시스템의 운용기간($=\tau^{*}\times N^{*}$)은 짧아지고 단위시간당 기대비용은 감소한다는 사실을 알 수 있다. 이는 무료로 새로운 시스템으로 교체를 해주는 무료 교체보증 기간이 늘어나기 때문이라고 할 수 있다. <표 3>에는 최소수리 비용의 변화에 따른 최적의 예방보전정책 및 단위시간당 기대비용이 나타나 있는데, 이로부터 최소수리 비용이 증가함에 따라 연장된 보증이 종료된 이후의 시스템의 운용기간($=\tau^{*}\times N^{*}$)은 짧아지고 단위시간당 기대비용은 증가한다는 사실을 알 수 있다. 이는 보전기간에서 이루어지는 시스템의 최소수리 비용이 커지기 때문이라고 할 수 있다. <표 4>에는 교체 비용의 변화에 따른 최적의 예방보전정책 및 단위시간당 기대비용이 나타나 있는데, 이로부터 시스템의 교체비용이 증가함에 따라 최적의 예방보전 횟수와 단위시간당 기대비용이 증가한다는 사실을 알 수 있다. <표 5>에는 연장되는 보증의 구입비용에 따른 최적의 예방보전정책 및 단위시간당 기대비용이 나타나 있는데, 이로부터 연장된 보증의 구입비용이 증가함에 따라 연장된 보증이 종료된 이후의 시스템의 운용기간은 길어지고, 단위시간당 기대비용은 증가한다는 사실을 알 수 있다. 끝으로 <표 6>에는 와이블분포의 형태모수의 변화에 따른 최적의 예방보전정책 및 단위시간당 기대비용이 나타나 있는데, 형태모수의 값이 증가함에 따라 최적의 예방보전 횟수와 단위시간당 기대비용이 증가한다는 사실을 알 수 있다. 이는 형태모수의 값이 커지면 고장률이 증가하기 때문이라고 할 수 있다.

〈표 1〉 최적의 예방보전정책 결정을 위한 기본 정보

w	w_R	L	β	c_e	c_{fw}	c_{fm}	c_m	c_p	c_r
0.5	0.10	0.05	3	3	1.5	3	5	3	100
	0.15		4	5			25		150
	0.20		5	7			50		200

〈표 2〉 다양한 w_R에 대한 최적의 예방보전정책

k	w_R								
	0.10			0.15			0.20		
	τ^*	N^*	$C(\tau^*,\ N^*)_k$	τ^*	N^*	$C(\tau^*,\ N^*)_k$	τ^*	N^*	$C(\tau^*,\ N^*)_k$
1	0.43689	4	78.59000	0.43681	4	78.57512	0.43665	4	78.53749
2	0.42217	4	80.80380	0.42213	4	80.78853	0.42193	4	80.74986
3	0.40761	4	82.93801	0.40753	4	82.92236	0.40737	4	82.88268
4	0.49373	3	84.93031	0.49365	3	84.91363	0.49345	3	84.87131
5	0.47657	3	86.77297	0.47649	3	86.75599	0.47625	3	86.71286
6	0.45941	3	88.54603	0.45933	3	88.52876	0.45913	3	88.48485
7	0.44225	3	90.24931	0.44217	3	90.23175	0.44197	3	90.18709
8	0.59273	2	91.73302	0.59261	2	91.71445	0.59233	2	91.66717
9	0.57009	2	93.15390	0.56997	2	93.13514	0.56969	2	93.08735
10	0.54733	2	94.51536	0.54721	2	94.49641	0.54689	2	94.44812

〈표 3〉 다양한 c_m에 대한 최적의 예방보전정책

k	c_m								
	5			25			50		
	τ^*	N^*	$C(\tau^*,\ N^*)_k$	τ^*	N^*	$C(\tau^*,\ N^*)_k$	τ^*	N^*	$C(\tau^*,\ N^*)_k$
1	0.43689	4	78.59000	0.37001	2	122.54194	0.41437	1	147.86795
2	0.42217	4	80.80380	0.61717	1	124.44984	0.36609	1	148.40534
3	0.40761	4	82.93801	0.57333	1	125.70718	0.31633	1	148.47649
4	0.49373	3	84.93031	0.52845	1	126.75992	0.26493	1	148.04287
5	0.47657	3	86.77297	0.48249	1	127.59543	0.21173	1	147.06329
6	0.45941	3	88.54603	0.43541	1	128.20066	0.15657	1	145.49304
7	0.44225	3	90.24931	0.38713	1	128.56211	0.09929	1	143.28297
8	0.59273	2	91.73302	0.33765	1	128.66565	0.03961	1	140.37814
9	0.57009	2	93.15390	0.28681	1	128.49643	0.00001	1	136.79686
10	0.54733	2	94.51536	0.23461	1	128.03873	0.00001	1	133.38537

〈표 4〉 다양한 c_r에 대한 최적의 예방보전정책

k	c_r								
	100			150			200		
	τ^*	N^*	$C(\tau^*,\ N^*)_k$	τ^*	N^*	$C(\tau^*,\ N^*)_k$	τ^*	N^*	$C(\tau^*,\ N^*)_k$
1	0.43689	4	78.59000	0.33929	7	97.59242	0.31573	9	113.38665
2	0.42217	4	80.80380	0.36937	6	100.30203	0.30461	9	116.53577
3	0.40761	4	82.93801	0.35653	6	102.81889	0.32281	8	119.47306
4	0.49373	3	84.93031	0.39789	5	105.20488	0.34693	7	122.24310
5	0.47657	3	86.77297	0.38405	5	107.40922	0.33493	7	124.82870
6	0.45941	3	88.54603	0.37037	5	109.52221	0.36661	6	127.25151
7	0.44225	3	90.24931	0.42825	4	111.43854	0.35389	6	129.51906
8	0.59273	2	91.73302	0.41277	4	113.25848	0.39693	5	131.64275
9	0.57009	2	93.15390	0.50401	3	114.99720	0.38293	5	133.60551
10	0.54733	2	94.51536	0.48545	3	116.52430	0.36913	5	135.47616

〈표 5〉 다양한 c_e에 대한 최적의 예방보전정책

k	c_e								
	3			5			7		
	τ^*	N^*	$C(\tau^*,\ N^*)_k$	τ^*	N^*	$C(\tau^*,\ N^*)_k$	τ^*	N^*	$C(\tau^*,\ N^*)_k$
1	0.43689	4	78.59000	0.37137	5	79.44936	0.37457	5	80.27753
2	0.42217	4	80.80380	0.42981	4	82.53983	0.43729	4	84.25342
3	0.40761	4	82.93801	0.41873	4	85.54353	0.42953	4	88.10034
4	0.49373	3	84.93031	0.40757	4	88.46876	0.42149	4	91.86099
5	0.47657	3	86.77297	0.49897	3	91.29066	0.41321	4	95.53627
6	0.45941	3	88.54603	0.48569	3	93.95657	0.40465	4	99.12700
7	0.44225	3	90.24931	0.47225	3	96.54986	0.50033	3	102.61280
8	0.59273	2	91.73302	0.45861	3	99.07057	0.48985	3	105.95822
9	0.57009	2	93.15390	0.44489	3	101.51877	0.47905	3	109.22355
10	0.54733	2	94.51536	0.60365	2	103.81155	0.46797	3	112.40948

<표 6> 다양한 β에 대한 최적의 예방보전정책

k	β								
	3			4			5		
	τ^*	N^*	$C(\tau^*, N^*)_k$	τ^*	N^*	$C(\tau^*, N^*)_k$	τ^*	N^*	$C(\tau^*, N^*)_k$
1	0.43689	4	78.59000	0.25641	6	85.44025	0.19349	8	86.73010
2	0.42217	4	80.80380	0.27193	5	89.50828	0.19117	7	92.58141
3	0.40761	4	82.93801	0.25409	5	93.24296	0.21577	5	97.95151
4	0.49373	3	84.93031	0.27797	4	96.64856	0.22693	4	102.78379
5	0.47657	3	86.77297	0.31933	3	99.81285	0.20493	4	106.99981
6	0.45941	3	88.54603	0.29729	3	102.53635	0.22485	3	110.58402
7	0.44225	3	90.24931	0.37397	2	105.07847	0.26861	2	113.58260
8	0.59273	2	91.73302	0.34649	2	107.14470	0.40505	1	116.03204
9	0.57009	2	93.15390	0.31913	2	109.07073	0.35953	1	117.62583
10	0.54733	2	94.51536	0.51125	1	110.45226	0.31345	1	119.05085

5. 결 론

본 논문에서는 수리가 가능한 시스템에 대하여 교체-수리보증이 기본보증으로 주어진 경우에 연장된 보증이 종료된 이후의 예방보전정책을 제안함으로써 기존의 연구를 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 기본보증으로 시스템에 주어진다. 또한 추가적으로 연장된 보증기간에서는 최소수리가 진행되며 보증기간이 재생되지 않는다. 이러한 특성을 갖는 보증이 주어진 시스템에 대하여 사용자 측면의 최적의 예방보전정책을 제안하였는데, 이를 위해서 본 논문에서 제안된 교체-수리보증이 주어진 시스템에 대한 연장된 보증이 있는 예방보전모형에 대하여 단위시간당 기대비용을 이론적으로 유도하였다. 또한 이 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 예방보전 주기와 횟수를 결정하는 방법에 대하여 살펴보았다. 끝으로 수치적 예를 통하여 본 논문에서 제안된 예방보전모형에 대하여 최적의 예방보전 주기와 그 때의 단위시간당 기대비용을 결정할 수 있음을 보였으며, 교체보증의 길이, 시스템의 최소수리 비용, 교체 비용 그리고 연장되는 보증의 구입비용의 변화에 따른 최적의 예방보전정책 및 단위시간당 기대비용의 변화를 자세히 살펴보았다.

참고문헌

[1] Bouguerra, S., Chelbi, A. and Rezg, N. (2012), A decision model for adopting an extended warranty under different maintenance policies, *International Journal of Production Economics*, Vol. 135, pp. 840-849.

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

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

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

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

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

[7] Jung, K. M., Park, M. and Park, D. H. (2012), Optimal maintenance strategy for non-renewing replacement-repair warranty, *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, Vol. 28, pp. 607-614.

[8] Jung, K. M., Park, M. and Park, D. H. (2013), Cost optimization model following the extended renewing two-phase warranty, *Computer and Industrial Engineering*, submitted.

[9] Sahin, I. and Polatoglu, H. (1996), Maintenance strategies following the expiration of warranty, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 45, pp. 220-228.

[10] Wu, S. and Longhurst, P. (2011), Optimising age-replacement and extended non-renewing warranty policies in lifecycle costing, *International Journal of Production Economics*, Vol. 130, pp. 262-267.

[11] Yeh, R. H., Chen, M. Y. and Lin, C. Y. (2007), Optimal periodic replacement policy for repairable products under free-repair warranty, *European Journal of Operational Research*, Vol. 176, pp. 1678-1686.