*Journal of Korean
Data & Information Science Society
2003, Vol. 14, No.4 pp. 889～901*

Replacement Model Based on Cost and Downtime

Ki Mun Jung[1] · Sung Sil Han[2] · Jae-Hak Lim[3]

Abstract

In this paper, we consider the optimal replacement policies following the expiration of the combination warranty. The combination warranty can be divided into the renewing combination warranty and the non-renewing combination warranty. The criterion used to determine the optimal replacement period is the overall value function based on the expected cost and the expected downtime. Thus, we obtain the expected cost rate per unit time and the expected downtime per unit time for our model. And then the overall value function suggested by Jiagn and Ji(2002) is applied to obtain the optimal replacement period. The numerical examples are presented for illustrative purpose.

Keywords : combination warranty, expected cost rate per unit time, expected downtime per unit time, minimal repair, overall value function

1. 서론

수리가 가능한 시스템(repairable system)에 대한 최적의 교체정책(optimal replacement policy)과 관련된 연구들이 고전적인 접근방법과 베이즈 접근방법으로 활발히 진행되고 있다. 이러한 수리가 가능한 시스템에 대한 최적의 교체정책에서의 관심은 언제까지 최소수리(minimal repair)와 예방보전(preventive maintenance; PM)을 수행하고 시스템을 새 것으로 교체(replacement)하는가 하는 문제이다. 즉, 주어진 기준 하에서 최적의 예방보전 주기(optimal PM period)와 최적의 교체 주기(optimal replacement period)를 결정하는 것이다.

Boland(1982)는 최소수리를 갖는 수리가 가능한 시스템에 대한 교체모형(replacement model)을 고려하였다. 특히, 그는 최소수리의 비용을 고장시간의 증가함수로 고려하여 최적의 교체정책을 설정하였다. Mazzuchi와 Soyer(1996) 그리고 Sheu,

1) 교신저자. 부산광역시 남구 대연동 110-1 경성대학교 통계정보학과 전임강사
E-mail : kmjung@ks.ac.kr

2) 부산광역시 남구 용호동

3) 대전광역시 유성구 덕명동 산16-1 한밭대학교 회계학과 부교수

Yeh, Lin과 Juang(1999)은 Boland(1982)가 고려한 교체모형에 대하여 베이즈 관점에서의 최적의 교체정책을 고려하였다. Park, Jung과 Yum(2000)은 수리가 가능한 시스템에 대한 예방보전모형을 고려하였고, Sheu, Yeh, Lin과 Juang(2001)은 베이즈 관점에서의 최적의 예방보전정책을 설정하였다. 이러한 연구들은 보증기간이 없는 시스템에 대한 교체정책들이며, 보증기간이 있는 시스템에 대한 교체정책 또한 많은 학자들에 의해서 연구가 진행되고 있다. Chun(1992), Jack과 Dagpunar(1994), Yeh와 Lo(2001) 등은 보증기간 동안에 발생하는 보증비용을 최소화하기 위한 예방보전정책을 제안하였고, Sahin과 Polatoglu(1996)는 비례보증과 무료보증이 있는 수리가 가능한 시스템에 대한 최적의 교체정책을 고려하였다. 그리고, Jung(2002)은 혼합보증이 있는 시스템에 대한 최적의 교체정책을 설정하였다.

이러한 기존의 수리가 가능한 시스템에 대한 교체모형에 있어서 최적의 교체정책을 결정하기 위해서 사용한 기준은 단위시간당 기대비용(expected cost rate per unit time)이다. 그러나, 시스템을 운용하는데 있어서 시스템의 비가동시간(downtime)은 필연적으로 발생하게 될 뿐만이 아니라 사용자에 의해서 중요하게 고려되어야 할 요인이기 때문에 본 연구에서는 단위시간당 기대비용과 단위시간당 비가동시간(expected downtime per unit time)을 함께 고려하고자 한다. 본 논문에서 고려하게 될 교체모형은 다음과 같다. 시스템은 무료보증기간(w_f)과 비례보증기간(w_p)을 갖는 혼합보증기간($w=w_f+w_p$)이 있으며, 보증기간이 종료된 이후의 보전기간(x) 동안에 시스템에 고장이 발생하면 최소수리를 수행한다. 그리고, 시스템은 $w+x$에서 사용자에 의해서 새 시스템으로 교체된다.

본 연구에서는 이러한 교체모형에 대하여 Jung(2002)이 제시한 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 교체정책을 시스템의 단위시간당 기대비가동시간을 함께 고려하는 최적의 교체정책으로 확장하고자 한다. 특히, 측정단위가 서로 틀린 단위시간당 기대비용과 기대비가동시간이라는 두 기준을 고려한 최적의 교체정책을 설정하기 위해서 Jiang과 Ji(2002)가 제안한 총밸류함수(overall value function)를 이용한다.

본 논문은 다음과 같은 내용으로 구성된다. 제 2절에서는 본 논문에서 고려되는 혼합보증(combination warranty)을 포함한 일반적인 형태의 보증정책(warranty policy)을 소개한다. 3절에서는 재생혼합보증(renewing combination warranty; RCW)이 있는 교체모형에 대하여 최적의 교체정책을 결정하기 위해서 사용할 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간을 구하고, 이 두 기준을 이용한 총밸류함수를 정의하며, 이에 근거한 최적의 교체정책을 설정한다. 제 4절에서는 비재생혼합보증(non-renewing combination warranty; NCW)이 있는 교체모형에 대하여 3절에서 고려되었던 총밸류함수에 의한 최적의 교체정책을 고려한다. 제 5절에서는 시스템의 고장시간이 와이블분포(Weibull distribution)를 할 때 수치적 예를 통해서 3절과 4절에서 제안된 최적의 교체정책을 설명한다.

2. 보증정책

보증정책은 일정기간 동안에 시스템에 발생하는 고장에 대하여 생산자 또는 판매자가 수리 또는 교체 등의 조처를 해준다는 소비자와의 약속이다. 보증정책은 보증기간

의 재생여부와 소비자의 비용 부담 여부에 따라서 다양한 형태의 보증정책으로 구분된다.

보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생하였을 경우에 보증기간이 처음부터 다시 시작되는 재생보증(renewing warranty)과 보증기간이 재생되지 않고 처음에 주어진 보증기간이 유지되는 비재생보증(non-renewing warranty)이 있다. 그리고, 보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생하였을 경우에 사용자에게 무료로 새 시스템으로 교체해주는 무료보증(free replacement warranty)과 고장이 발생할 때까지의 사용기간에 비례한 교체비용의 일부를 부담하게 하는 비례보증(pro-rata warranty)이 있다. 이를 근거로 하여 재생무료보증(renewing free replacement warranty; RFRW), 재생비례보증(renewing pro-rata warranty; RPRW), 비재생무료보증(non-renewing free replacement warranty; NFRW), 비재생비례보증(non-renewing pro-rata warranty; RPRW)이라는 기본적인 형태의 보증정책이 구성된다. 즉, 재생무료보증에서는 보증기간동안에 시스템에 고장이 발생하면 시스템을 무료로 교체하고 보증기간도 처음부터 다시 시작되고, 재생비례보증에서는 고장이 발생할 때까지의 사용기간에 비례한 교체비용의 일부를 부담하고 보증기간 또한 처음부터 다시 시작된다. 비재생무료보증에서는 보증기간동안에 시스템에 고장이 발생하면 무료로 교체해 주지만 보증기간은 재생되지 않고 처음에 주어진 보증기간이 유지된다. 그리고, 비재생비례보증에서는 사용기간에 비례한 교체비용의 일부를 부담하고 새 시스템으로 교체하고 보증기간 또한 처음에 주어진 기간이 유지되고 재생되지 않는다.

또한, 위에서 설명한 무료보증과 비례보증이 혼합된 혼합보증이 있는데 가장 전형적인 형태는 보증기간 내의 일정기간 동안에 발생한 시스템의 고장에 대해서는 무료로 교체를 해주고, 이 시점 이후에 발생하는 시스템의 고장에 대해서는 비례보증을 실시하는 것이다. 이러한 혼합보증도 보증기간의 재생여부에 따라 재생혼합보증(RCW)과 비재생혼합보증(NCW)으로 구분된다. 그림 1은 이러한 일반적인 형태의 보증정책을 정리한 것이다.

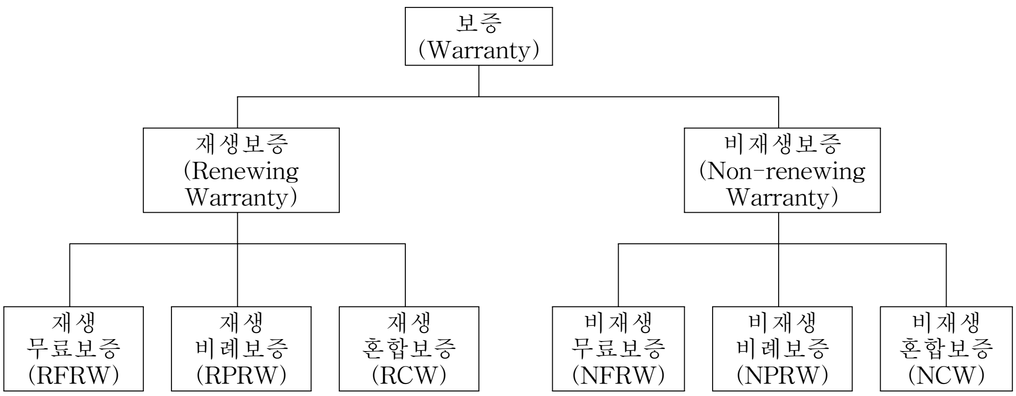

그림 1. 일반적인 형태의 보증정책

3. 재생혼합보증에서의 교체모형

본 절에서는 재생혼합보증기간이 있는 수리 가능한 시스템에 대한 최적의 교체정책을 고려한다. 즉, 시스템은 2절에서 설명한 재생무료보증기간이 있으며, 보증기간이 종료된 이후의 보전기간 (maintenance period) x 동안에는 시스템에 고장이 발생하면 최소수리를 하고, $w+x$에서 새 시스템으로 교체한다. 이러한 교체모형에 대하여 재생보증기간이 종료된 이후의 최적의 보전기간을 결정하기 위해서 단위시간당 기대비용과 단위시간당 비가동시간을 각각 구하고 이를 동시에 고려한 최적의 교체정책을 결정한다.

3.1 단위시간당 기대비용

재생혼합보증기간이 있는 수리 가능한 시스템에 대한 단위시간당 기대비용을 구하기 위해서는 시스템의 기대순환길이(expected cycle length)와 총기대비용(total expected cost)을 구하여야 한다. 먼저, 시스템의 기대순환길이를 고려하자. 시스템의 고장시간을 T라고 하고, 보증기간이 종료된 이후의 보전기간을 x라 하자. 그리고, $F(t)$를 고장시간 T의 수명분포함수(life distribution function), $f(t)$를 고장시간 T의 밀도함수(density function)라고 하면, 고장률함수(hazard rate function)는 $\overline{F}(t)>0$를 만족하는 t에 대하여 $h(t)=f(t)\,/\,\overline{F}(t)$와 같이 정의된다. 여기서, $\overline{F}(t)=1-F(t)$이다.

재생보증에서는 시스템이 보증기간 동안에 고장나면 새 시스템으로 교체하고 보증기간도 처음부터 다시 시작되며, 시스템의 순환길이(cycle length) 또한 다시 시작된다. 그리고, 시스템이 보증기간 동안에 고장나지 않으면 즉, $T>w$이면 $w+x$에서 시스템을 새 것으로 교체하게 되므로 기대순환길이는 다음과 같다.

$$ECL_R(x)=I(w)+(w+x)\overline{F}(w)\,. \tag{1}$$

여기서, $I(s)=\int_0^s tf(t)\,dt$이다.

재생혼합보증(RCW)이 있는 시스템을 운용하기 위한 총기대비용 TEC는 보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생하여 교체할 경우 보증정책에 의해서 소비자가 부담하게 되는 기대비용 $E(C_W)$, 보증기간이 종료된 이후의 보전기간 동안 발생하는 고장에 대하여 최소수리를 하는데 발생하는 기대비용 $E(C_M)$, $w+x$에서 시스템을 새 것으로 교체하기 위한 기대비용 $E(C_R)$, 보증기간과 보전기간 동안에 발생하는 시스템의 고장으로 야기되는 기대비용 $E(C_F)$들의 합으로 구할 수 있다. 즉, 총기대비용 TEC는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}TEC_R(x) &= E(C_W)+E(C_M)+E(C_R)+E(C_F \\ &= \frac{c_r}{w}\left(I(w)-I(w_f)\right)+c_r\overline{F}(w)+c_{fw}F(w)+(c_m+c_{fm})\overline{F}(w)\int_w^{w+x} h(t)\,dt.\end{aligned} \tag{2}$$

여기서, c_r은 시스템의 교체비용, c_m은 시스템의 최소수리비용, c_{fw}는 보증기간 동안에 발생하는 시스템의 고장으로 부담하게 되는 비용, c_{fm}는 보전기간 동안에 발생하는 시스템의 고장으로 부담하게 되는 비용이다.

그러므로, 시스템의 기대순환길이와 총기대비용을 이용하여 단위시간당 기대비용을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$EC_R(x) = \frac{\frac{c_r}{w}(I(w) - I(w_f)) + c_r\overline{F}(w) + c_{fw}F(w) + (c_m + c_{fm})\overline{F}(w)\int_w^{w+x} h(t)\,dt}{I(w) + (w+x)\overline{F}(w)}. \tag{3}$$

위의 식 (3)에서 $v=0$이거나 $v=w$이면 Sahin과 Polatoglu(1996)이 제시한 단위시간당 기대비용과 같게된다. 식 (3)의 단위시간당 기대비용을 구하기 위한 자세한 방법은 Jung(2002)이 제시하였으므로 이를 참조하면 된다.

3.2 단위시간당 기대비가동시간

재생보증기간이 있는 수리 가능한 시스템에 대한 단위시간당 기대비가동시간은 3.1절에서 단위시간당 기대비용을 구한 것과 유사하게 구할 수 있다. 시스템의 기대순환길이는 식 (1)에 있는 것과 동일하기 때문에 총기대비가동시간만 구하면 된다. $E(D_W)$를 보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생하여 새 시스템으로 교체하는데 기인하는 기대비가동시간이라고 하고, $E(D_R)$을 $w+x$에서 시스템을 새 것으로 교체하는데 발생하는 기대비가동시간이라고 하자. 그리고, $E(D_M)$은 보증기간이 종료된 이후의 보전기간 동안에 시스템에 고장이 발생하여 최소수리를 함으로써 발생하는 기대비가동시간이라고 하면, 총기대비가동시간 TED는 Boland(1982)의 결과를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} TED_R(x) &= E(D_W) + E(D_R) + E(D_M) \\ &= d_r\overline{F}(w) + d_wF(w) + \overline{F}(w)\int_w^{w+x} D_m(t)\,h(t)\,dt. \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, d_w는 보증기간에서 시스템의 고장에 의한 비가동시간, d_r은 $w+x$에서 시스템 교체에 의한 비가동시간, 그리고 $D_m(t)$는 최소수리에 의한 비가동시간으로서 수명시간 t의 비감소함수(non-decreasing function)라고 가정한다.

그러므로, 식 (1)의 시스템의 기대순환길이와 식 (4)의 총기대비가동시간을 이용하면 고려되는 교체모형에 대한 단위시간당 기대비가동시간은 다음과 같다.

$$ED_R(x) = \frac{d_r\overline{F}(w) + d_wF(w) + \overline{F}(w)\int_w^{w+x} D_m(t)\,h(t)\,dt}{I(w) + (w+x)\overline{F}(w)}. \tag{5}$$

3.3 최적의 교체정책

이 절에서는 식 (3)의 단위시간당 기대비용 뿐만이 아니라 식 (5)에 주어진 단위시간당 기대비가동시간을 함께 고려한 최적의 교체정책을 고려하고자 한다. 이러한 두

기준에 근거한 최적의 교체정책을 설정하기 위해서 단일 기준에 의한 최적의 교체정책을 살펴보자. 식 (3)에 있는 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 보전기간 x_c^*는 Jung(2002)의 결과로부터 다음을 만족하는 x값이 됨을 알 수 있다.

$$\frac{dEC_R(x)}{dx}=0.$$

또한, 식 (5)에 있는 단위시간당 비가동시간을 최소화하는 최적의 보전기간 x_d^*는 Boland(1982)의 결과로부터 다음을 만족하는 x값이 됨을 알 수 있다.

$$\frac{dED_R(x)}{dx}=0.$$

이제, 두 기준에 근거한 최적의 교체정책을 살펴보자. 단위시간당 기대비용과 단위시간당 비가동시간은 서로 다른 측정 단위를 사용하고 있기 때문에 이러한 문제를 해결하기 위한 방법이 필요하다. 이를 위해서 Jiang과 Ji(2002)에 의해서 제안된 총밸류함수를 이용한다. $v_{R1}(x)$ 을 단위시간당 기대비용에 대한 밸류함수라고 하자. 이때, 식 (3)에 있는 단위시간당 기대비용은 유일한 최소값 $C_{\min}$ 을 갖기 때문에 $v_{R1}(x)$ 을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v_{R1}(x)=\frac{C_{\min}}{EC_R(x)}.$$

그리고, $v_{R2}(x)$ 를 단위시간당 비가동시간에 대한 밸류함수라고 하면, 식 (5)에 있는 단위시간당 비가동시간은 유일한 최소값 $D_{\min}$ 을 갖기 때문에 $v_{R2}(x)$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v_{R2}(x)=\frac{D_{\min}}{ED_R(x)}.$$

그러므로, 밸류함수 $v_{R1}(x)$ 와 $v_{R2}(x)$ 를 이용하여 다음과 같은 총밸류함수를 정의할 수 있다.

$$V_R(x)=w_1v_{R1}(x)+w_2v_{R2}(x). \tag{6}$$

여기서, w_1은 단위시간당 기대비용에 대한 가중치이고 w_2는 단위시간당 비가동시간에 대한 가중치로써 $w_1+w_2=1$ 을 만족한다. 따라서, 식 (6)에 있는 총밸류함수를 최대화하는 값을 두 기준을 함께 고려한 최적의 보전기간 x_R^*로 설정하고자 한다.

4. 비재생혼합보증에서의 교체모형

본 절에서는 비재생혼합보증기간이 있는 수리가 가능한 시스템에 대한 최적의 교체정책을 고려한다. 즉, 시스템은 2절에서 설명한 비재생무료보증기간이 있으며, 보증기간이 종료된 이후의 보전기간 동안에는 시스템에 고장이 발생하면 최소수리를 하고, $w+x$에서 새 시스템으로 교체한다. 이러한 교체모형에 대하여 비재생보증기간이 종료된 이후의 최적의 보전기간을 결정하기 위해서 3절에서 고려했던 것처럼 단위시간당 기대비용과 단위시간당 비가동시간을 각각 구하고 이를 함께 고려한 최적의 교체

정책을 결정한다.

재생혼합보증(RCW)에서는 보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생하면 보증기간이 처음부터 다시 시작되기 때문에 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명(age)은 항상 w이지만, 비재생혼합보증(NCW)에서는 보증기간이 재생되지 않기 때문에 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명은 0과 w사이에 존재하게 된다.

4.1 단위시간당 기대비용

본 절에서 고려되는 교체모형에 대한 단위시간당 기대비용을 구하기 위해서는 3장에서처럼 시스템의 기대순환길이와 총기대비용을 구하여야 한다. 먼저, 시스템의 기대순환길이는 보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생하더라도 보증기간이 처음부터 다시 시작되지 않으므로 다음과 같이 구해진다.

$$ECL_N(x) = w + x\,. \tag{7}$$

그리고, 총기대비용은 식 (2)에 있는 기대비용들의 합으로 구할 수 있으므로 다음과 같다.

$$TEC_N(x) = C_0 + c_r + kc_{fw} + (c_m + c_{fm})\int_y^{y+x} h(t)\,dt. \tag{8}$$

여기서,

$$C_0 = \begin{cases} c_r \dfrac{(w-w_f)-y}{(w-w_f)}, & 0 \le y < w - w_f \\ 0, & y \ge w - w_f. \end{cases}$$

이고, k는 보증기간 동안에 발생한 교체 횟수이고, y는 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명이 된다. 이때, $y=w$이면 $k=0$이 되고, $k=0$이면 $y=w$가 됨을 알 수 있다.

그러므로, 시스템의 기대순환길이와 총기대비용을 이용하여 단위시간당 기대비용을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$EC_N(x) = \frac{1}{w+x}\left[C_0 + c_r + kc_{fw} + (c_m + c_{fm})\int_y^{y+x} h(t)\,dt\right]. \tag{9}$$

4.2 단위시간당 기대비가동시간

재생보증기간이 있는 수리가 가능한 시스템에 대한 단위시간당 기대비가동시간은 4.1절에서와 유사하게 구할 수 있다. 시스템의 순환길이는 식 (7)에 있는 것과 동일하기 때문에 총기대비가동시간을 구하면 된다. 3.2절에서 정의된 d_w, d_r, $D_m(t)$와 보증기간 동안에 발생한 교체 횟수 k와 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명 y에 관한 정보를 이용하면, 총기대비가동시간은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$TED_N(x) = d_r + kd_w + \int_y^{y+x} D_m(t)\,h(t)\,dt. \tag{10}$$

그러므로, 식 (7)에 있는 시스템의 기대순환길이와 식 (10)의 총 기대비가동시간을 이용하면 단위시간당 기대비가동시간을 다음과 같다.

$$ED_N(x) = \frac{1}{w+x}\left[d_r + kd_w + \int_y^{y+x} D_m(t)\,h(t)\,dt\right]. \tag{11}$$

4.3 최적의 교체정책

이 절에서는 식 (9)의 단위시간당 기대비용과 식 (11)의 단위시간당 비가동시간을 고려하여 비재생혼합보증이 종료된 이후의 시스템의 최적의 교체정책을 고려하고자 한다. 이러한 두 기준에 근거한 비재생혼합보증이 종료된 이후의 최적의 교체정책은 3절에서와 같은 방법으로 설정될 수 있다. $v_{N1}(x)$, $v_{N2}(x)$를 각각 단위시간당 기대비용과 단위시간당 비가동시간에 대한 밸류함수라고 하자. 이때, 식 (9)에 있는 단위시간당 기대비용은 Jung(2002)의 결과로부터 유일한 최소값 $C_{\min}$을 갖고, 식 (11)의 단위시간당 비가동시간은 Boland(1982)의 결과로부터 유일한 최소값 $D_{\min}$을 갖기 때문에 이를 이용하여 총밸류함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V_N(x) = w_1 v_{N1}(x) + w_2 v_{N2}(x)\,. \tag{12}$$

여기서, $v_{N1}(x) = \dfrac{C_{\min}}{EC_N(x)}$ 이고 $v_{N2}(x) = \dfrac{D_{\min}}{ED_N(x)}$ 이다. 그리고, w_1은 단위시간당 기대비용의 가중치이고 w_2는 단위시간당 비가동시간의 가중치로써 $w_1 + w_2 = 1$를 만족한다. 따라서, 식 (12)에 있는 총밸류함수를 최대화하는 값이 두 기준을 함께 고려한 최적의 보전기간 x_N^*가 된다.

5. 수치적 예

본 논문에서 고려된 교체모형에 대한 최적의 교체정책을 설명하기 위해서 시스템의 고장시간 T가 와이블분포를 한다고 가정하자. 즉, 가정된 시스템의 고장률함수는 $h(t) = \beta\lambda^{\beta}t^{\beta-1}$이 된다. 그리고, $D_m(t) = a\,t^b$이라고 가정하자. 단, $a > 0$이고 $b \geq 0$이다. 이때, 혼합보증이 종료된 이후의 최적의 교체정책을 결정하고 β와 보증기간의 변화에 따른 최적의 교체정책의 변화를 살펴보고자 한다.

표 1. 재생혼합보증에서의 최적의 보전정책
($\lambda=1$, $w=0.5$, $c_r=3$, $c_m=0.1$, $c_{fm}=c_{fw}=0.2$, $d_w=5$, $d_r=4$, $a=0.1$, $b=2$)

β	w_f		w_1 = 0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1
2	0.1	$EC_R(x_R^*)$	2.3745	2.3634	2.3368	2.3023	2.2563	2.2009	2.1893
		$ED_R(x_R^*)$	2.6354	2.6360	2.6434	2.6695	2.7556	3.1107	3.4143
		x_R^*	1.8620	1.8935	1.9748	2.0965	2.3049	2.7495	2.9999
	0.2	$EC_R(x_R^*)$	2.2893	2.2796	2.2566	2.2270	2.1879	2.1412	2.1297
		$ED_R(x_R^*)$	2.6354	2.6360	2.6426	2.6659	2.7413	3.0421	3.4143
		x_R^*	1.8620	1.8920	1.9691	2.0837	2.2774	2.6823	2.9999
	0.3	$EC_R(x_R^*)$	2.1529	2.1455	2.1279	2.1055	2.0765	2.0423	2.0333
		$ED_R(x_R^*)$	2.6354	2.6359	2.6413	2.6601	2.7189	2.9417	3.2704
		x_R^*	1.8620	1.8893	1.9590	2.0613	2.2305	2.5728	2.8889
	0.4	$EC_R(x_R^*)$	1.9730	1.9683	1.9572	1.9433	1.9256	1.9052	1.8997
		$ED_R(x_R^*)$	2.6354	2.6357	2.6395	2.6523	2.6908	2.8269	3.0263
		x_R^*	1.8620	1.8849	1.9429	2.0267	2.1615	2.4226	2.6661
3	0.1	$EC_R(x_R^*)$	2.8608	2.8608	2.8608	2.8608	2.8608	2.8608	2.8608
		$ED_R(x_R^*)$	2.9982	2.9982	2.9982	2.9982	2.9982	2.9982	2.9982
		x_R^*	1.2780	1.2783	1.2789	1.2796	1.2806	1.2820	1.2829
	0.2	$EC_R(x_R^*)$	2.8360	2.8360	2.8360	2.8360	2.8360	2.8360	2.8360
		$ED_R(x_R^*)$	2.9982	2.9982	2.9982	2.9982	2.9982	2.9982	2.9982
		x_R^*	1.2780	1.2779	1.2775	1.2771	1.2765	1.2757	1.2751
	0.3	$EC_R(x_R^*)$	2.7696	2.7696	2.7695	2.7693	2.7692	2.7691	2.7691
		$ED_R(x_R^*)$	2.9982	2.9982	2.9982	2.9983	2.9985	2.9989	2.9992
		x_R^*	1.2780	1.2767	1.2737	1.2699	1.2650	1.2583	1.2541
	0.4	$EC_R(x_R^*)$	2.6438	2.6435	2.6427	2.6419	2.6411	2.6405	2.6404
		$ED_R(x_R^*)$	2.9982	2.9982	2.9984	2.9991	3.0005	3.0033	3.0057
		x_R^*	1.2780	1.2745	1.2661	1.2555	1.2419	1.2240	1.2128
4	0.1	$EC_R(x_R^*)$	3.1442	3.1372	3.1234	3.1105	3.1001	3.0941	3.0933
		$ED_R(x_R^*)$	3.2462	3.2466	3.2502	3.2593	3.2760	3.3020	3.3187
		x_R^*	1.0201	1.0094	0.9854	0.9572	0.9250	0.8896	0.8711
	0.2	$EC_R(x_R^*)$	3.1382	3.1311	3.1171	3.1040	3.0935	3.0874	3.0866
		$ED_R(x_R^*)$	3.2462	3.2466	3.2503	3.2595	3.2764	3.3028	3.3197
		x_R^*	1.0201	1.0094	0.9851	0.9568	0.9244	0.8887	0.8701
	0.3	$EC_R(x_R^*)$	3.1121	3.1046	3.0898	3.0760	3.0649	3.0586	3.0578
		$ED_R(x_R^*)$	3.2462	3.2466	3.2506	3.2604	3.2783	3.3061	3.3238
		x_R^*	1.0201	1.0090	0.9840	0.9547	0.9214	0.8848	0.8659
	0.4	$EC_R(x_R^*)$	3.0427	3.0342	3.0171	3.0012	2.9886	2.9815	2.9806
		$ED_R(x_R^*)$	3.2462	3.2467	3.2513	3.2629	3.2838	3.3158	3.3358
		x_R^*	1.0201	1.0081	0.9809	0.9492	0.9132	0.8742	0.8543

표 2. 비재생혼합보증에서의 최적의 보전정책($\lambda=1$, $w=0.5$, $w_f=0.2$, $c_r=3$, $c_m=0.1$, $c_{fm}=c_{fw}=0.2$, $d_w=5$, $d_r=4$, $a=0.1$, $b=2$, $k=1$)

β	y		w_1: 0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1
2	0.10	$EC_N(x_N^*)$	2.3924	2.3847	2.3666	2.3435	2.3136	2.2782	2.2688
		$ED_N(x_N^*)$	3.7592	3.7598	3.7671	3.7920	3.8695	4.1614	4.5971
		x_N^*	2.5588	2.5889	2.6656	2.7778	2.9625	3.3345	3.6813
	0.15	$EC_N(x_N^*)$	2.2615	2.2558	2.2424	2.2256	2.2041	2.1792	2.1724
		$ED_N(x_N^*)$	3.8215	3.8220	3.8278	3.8474	3.9067	4.1186	4.4307
		x_N^*	2.5234	2.5502	2.6178	2.7158	2.8740	3.1825	3.4707
	0.20	$EC_N(x_N^*)$	2.1270	2.1232	2.1143	2.1032	2.0892	2.0734	2.0690
		$ED_N(x_N^*)$	3.8856	3.8860	3.8902	3.9042	3.9454	4.0855	4.2871
		x_N^*	2.4883	2.5109	2.5678	2.6493	2.7784	3.0222	3.2483
	0.25	$EC_N(x_N^*)$	1.9888	1.9867	1.9817	1.9756	1.9679	1.9595	1.9571
		$ED_N(x_N^*)$	3.9515	3.9517	3.9543	3.9628	3.9870	4.0654	4.1745
		x_N^*	2.4534	2.4709	2.5149	2.5771	2.6740	2.8509	3.0119
3	0.10	$EC_N(x_N^*)$	3.1622	3.1614	3.1597	3.1580	3.1563	3.1550	3.1548
		$ED_N(x_N^*)$	4.5486	4.5487	4.5493	4.5510	4.5548	4.5623	4.5683
		x_N^*	1.8733	1.8677	1.8545	1.8379	1.8167	1.7891	1.7723
	0.15	$EC_N(x_N^*)$	3.0170	3.0151	3.0108	3.0064	3.0022	2.9993	2.9989
		$ED_N(x_N^*)$	4.6463	4.6464	4.6481	4.6528	4.6627	4.6817	4.6962
		x_N^*	1.8338	1.8248	1.8035	1.7768	1.7430	1.7004	1.6754
	0.20	$EC_N(x_N^*)$	2.8668	2.8629	2.8545	2.8458	2.8377	2.8323	2.8315
		$ED_N(x_N^*)$	4.7478	4.7481	4.7517	4.7616	4.7824	4.8206	4.8480
		x_N^*	1.7945	1.7816	1.7510	1.7127	1.6648	1.6064	1.5737
	0.25	$EC_N(x_N^*)$	2.7112	2.7044	2.6897	2.6745	2.6606	2.6519	2.6507
		$ED_N(x_N^*)$	4.8532	4.8539	4.8606	4.8794	4.9184	4.9860	5.0316
		x_N^*	1.7555	1.7381	1.6968	1.6448	1.5807	1.5059	1.4662
4	0.10	$EC_N(x_N^*)$	3.6304	3.6153	3.5856	3.5588	3.5387	3.5283	3.5270
		$ED_N(x_N^*)$	5.0461	5.0472	5.0576	5.0831	5.1269	5.1891	5.2258
		x_N^*	1.5603	1.5430	1.5038	1.4586	1.4089	1.3576	1.3324
	0.15	$EC_N(x_N^*)$	3.4801	3.4600	3.4200	3.3844	3.3584	3.3456	3.3441
		$ED_N(x_N^*)$	5.1713	5.1729	5.1879	5.2243	5.2857	5.3691	5.4164
		x_N^*	1.5184	1.4982	1.4521	1.3990	1.3416	1.2844	1.2572
	0.20	$EC_N(x_N^*)$	3.3241	3.2975	3.2444	3.1975	3.1645	3.1490	3.1473
		$ED_N(x_N^*)$	5.3024	5.3046	5.3259	5.3777	5.4631	5.5734	5.6332
		x_N^*	1.4768	1.4533	1.3993	1.3370	1.2711	1.2080	1.1791
	0.25	$EC_N(x_N^*)$	3.1619	3.1271	3.0573	2.9957	2.9544	2.9364	2.9345
		$ED_N(x_N^*)$	5.4397	5.4427	5.4729	5.5469	5.6652	5.8093	5.8841
		x_N^*	1.4354	1.4083	1.3451	1.2718	1.1964	1.1277	1.0973

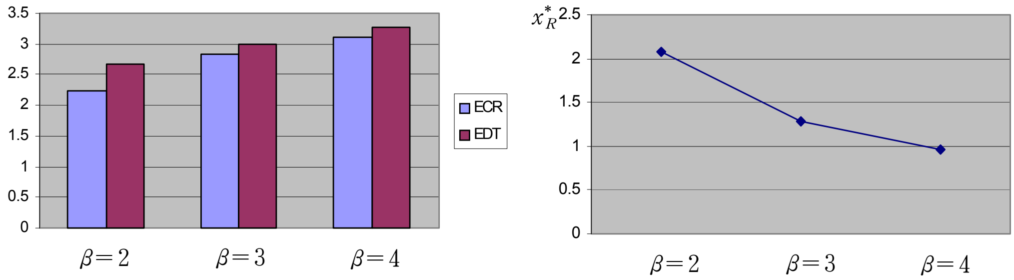

그림 2. β의 변화에 따른 최적의 교체정책 : 재생혼합보증
($w_f=0.2$, $w_1=w_2=0.5$)

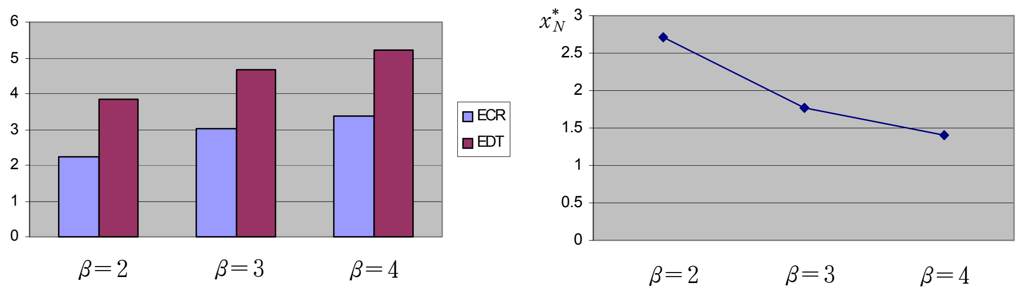

그림 3. β의 변화에 따른 최적의 교체정책 : 비재생혼합보증
($y=0.15$, $w_1=w_2=0.5$)

표 1에는 식 (6)을 최대화하는 최적의 보전기간 x_R^*와 이 때의 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간이 나타나 있다. 예를 들어, $\beta=3$, $w_f=0.2$, $w_1=0.5$ 일 때, 식 (6)을 최대화하는 x의 값이 1.2771이므로 1.7771($=w+x_R^*$)단위시간에서 시스템을 새 것으로 교체하는 것이 비용과 비가동시간을 함께 고려한 최적의 교체정책이 되며, 이 때의 단위시간당 기대비용은 2.8360단위비용이고 단위시간당 기대비가동시간은 2.9982단위시간이 된다는 것이다. 표 1과 그림 2로부터 β의 값이 증가하면 단위시간당 기대비용과 기대비가동시간은 증가하고 최적의 보전시간 x_R^*는 감소함을 알 수 있는데, 이는 β의 값이 커지면 시스템의 고장률이 증가하기 때문이다. 표 2에는 식 (12)를 이용하여 구한 비재생혼합보증에서의 최적의 보전기간 x_N^*와 이 때의 단위시간당 기대비용과 기대비가동시간이 나타나 있다. 표 2와 그림 3으로부터 비재생보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명 y가 고정되어 있으면, 재생혼합보증에서와 유사한 경향이 나타남을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 혼합보증기간이 있는 수리가 가능한 시스템에 대하여 보증기간이 종료된 이후의 소비자 관점에서의 최적의 교체정책을 설정하였다. 특히, 시스템을 운용하는데 필연적으로 발생하는 비용과 비가동시간을 함께 고려함으로써 Jung(2002)의 연구를 확장하였다. 비용과 비가동시간이라는 서로 다른 측정단위를 함께 고려한 최적의 교체정책을 결정하기 위해서 Jiagn과 Ji(2002)가 제안한 총밸류함수를 이용하였다. 이를 위해서, 본 논문에서 고려된 모형 하에서 발생하는 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간을 구하였으며, 이를 근거로 하여 총밸류함수를 정의하고 최적의 교체정책을 결정하였다. 시스템의 고장시간이 와이블분포를 할 때 형태모수 β의 변화에 따른 최적의 교체주기와 그때의 단위시간당 기대비용과 단위시간당 비가동시간을 구하고, 이들의 변화를 살펴보았다.

참고문헌

1. Boland, P. J.(1982). Periodic replacement when minimal repair costs vary with time, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 29, 541-546.
2. Chun, Y. H.(1992). Optimal number of periodic maintenance operations under warranty, *Reliability Engineering and System Safety,* Vol. 37, 223-225.
3. Jack, N. and Dagpunar, J. S.(1994). An optimal imperfect maintenance policy over a warranty period, *Microelectronics and Reliability,* Vol. 34, 529-534.
4. Jiang, R. and Ji, P.(2002). Age Replacement policy: a multi-attribute value model, *Reliability Engineering and System Safety,* Vol. 76, 311-318.
5. Jung, G. M.(2002). Optimal replacement policy for a repairable system with combination warranty, *The Korean Journal of Applied Statistics*, Vol. 15, 107-117.
6. Mazzuchi, T. A. and Soyer, R.(1996). A Bayesian perspective on some replacement strategies, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 51, 295-303.
7. Park, D. H., Jung, G. M. and Yum, J. K. (2000). Cost minimization for periodic maintenance policy of a system subject to slow degradation, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 68, 105-112.
8. Sahin, I. and Polatoglu, H.(1996). Maintenance strategies following the expiration of warranty, *IEEE Transactions on Reliability,* Vol. 45,

220-228.

9. Sheu, S. H., Yeh, R. H., Lin, Y. B. and Juang, M. G.(1999). A Bayesian perspective on age replacement with minimal repair, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 65, 55-64.
10. Sheu, S. H., Yeh, R. H., Lin, Y. B. and Juang, M. G.(2001). A Bayesian approach to an adaptive preventive preventive maintenance model, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 71, 33-44.
11. Yeh, R. H. and Lo, H. C.(2001). Optimal preventive-maintenance warranty policy for repairable products, *European Journal of Operational Research,* Vol. 134, 59-69.

[2003년 10월 접수, 2003년 11월 채택]