Communications of the Korean Statistical Society Vol. 15, No. 6, 2008, pp. 909–923

혼합보증이 종료된 이후의 비용과 비가동시간에 근거한 보전정책

정기문[1)]

요 약

본 논문에서는 수리가 가능한 시스템에 대하여 혼합보증이 종료된 이후의 교체모형과 예방보전모형을 고려하는데, 만약 보증기간이 종료된 이후에 시스템에 고장이 발생하면 최소수리를 수행한다. 최적의 교체정책과 최적의 예방보전정책을 결정하기 위한 기준으로는 기대비용과 기대비가동시간에 근거한 총밸류함수를 사용한다. 그리고 시스템의 고장시간이 와이블분포를 할 때 수치적 예를 통해서 제안된 최적의 교체정책 및 예방보전정책을 자세히 설명하고자 한다.

주요용어: 혼합보증; 교체모형; 예방보전모형; 비용; 비가동시간; 총밸류함수.

1. 서론

수리가 가능한 시스템에 대한 최적의 보전정책에서 관심은 어느 시점에서 예방보전(preventive maintenance: PM)을 수행하고, 언제 시스템을 새 것으로 교체(replacement)하는가 하는 문제이다. 즉, 주어진 기준 하에서 최적의 예방보전 주기(optimal PM period)와 최적의 예방보전 횟수(optimal PM number)를 결정하는 것이다. 최근까지 이러한 보전정책과 관련된 연구들이 활발히 진행되고 있는데, 대표적으로 Malik (1979), Canfield (1986), Nakagawa (1986, 1988), Lin 등 (2000), Jung과 Park (2003), Wu와 Clements-Croome (2005) 등이 있다. 한편, 보증정책(warranty policy)은 일정기간 동안 시스템에 발생하는 고장에 대해서 생산자 또는 판매자가 수리 또는 교체 등의 조처를 해준다는 소비자와의 약속이다. 이러한 보증정책이 제공되는 수리가 가능한 시스템에 대한 보전정책과 관련된 연구로는 Sahin과 Polatoglu (1996), Jung (2002), Jung과 Park (2003) 등이 있다.

이러한 연구들에 있어서 최적의 보전정책을 결정하는 기준으로 시스템을 운용하는데 필요한 기대비용(expected cost)을 주로 사용하였다. 그러나 시스템을 운용하는데 있어서 시스템의 비가동시간(downtime)은 필연적으로 발생하게 될 뿐만이 아니라 사용자에 의해서 중요하게 고려되어야 할 요인이라고 할 수 있다. 따라서 기대비용과 기대비가동시간(expected downtime)을 함께 고려한 최적의 보전정책과 관련된 연구를 진행할 필요가 있는데, 최근에 Jung 등 (2008)은 교체모형(replacement model)에 대하여 이러한 문제를 다루었다. 즉, 보증기간이 종료된 이후의 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비

1) (608-736) 부산광역시 남구 대연 3동 314-79 경성대학교 정보통계학과, 조교수.
E-mail: kmjung@ks.ac.k

가동시간에 근거한 최적의 교체정책에 대하여 살펴보았다. 그리고 Jung (2008)은 Jung 등 (2008)의 연구를 예방보전모형으로 확장하였다. 그러나 이들의 연구는 재생보증과 비재생보증이 주어진 경우만을 고려하였고, 재생보증과 비재생보증의 혼합형태인 혼합보증(combination warranty)에 대해서는 고려하지 않았기 때문에 이들의 연구를 혼합보증이 있는 보전모형에 대해서도 연구를 진행할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 혼합보증기간이 종료된 이후의 기대비용과 기대비가동시간을 함께 고려하는 보전모형, 즉 교체모형과 예방보전모형을 각각 고려하고자 한다.

본 논문은 다음과 같은 내용으로 구성된다. 2절에서는 본 논문에서 고려되는 혼합보증을 포함한 일반적인 형태의 보증정책(warranty policy)을 소개한다. 그리고 3절에서는 혼합보증이 종료된 이후의 교체모형에 대하여 기대비용과 기대비가동시간을 함께 고려한 최적의 교체정책에 대하여 살펴본다. 이를 위해서, 기대비용과 기대비가동시간에 근거한 총 밸류함수(overall value function)를 정의하고자 한다. 4절에서는 3절에서 고련된 교체모형을 예방보전모형으로 확장하고자 한다. 즉, 혼합보증이 종료된 이후의 기대비용과 기대비가동시간을 함께 고려한 예방보전모형에 대한 최적의 예방보전정책에 대하여 살펴본다. 끝으로 5절에서는 시스템의 고장시간이 와이블분포(Weibull distribution)를 할 때 수치적 예를 통해서 3절과 4절에서 살펴본 최적의 보전정책을 설명한다.

2. 보증정책

보증정책은 일정기간 동안 시스템에 발생하는 고장에 대하여 생산자 또는 판매자가 수리 또는 교체 등의 조처를 해준다는 소비자와의 약속이다. 보증정책은 보증기간의 재생여부와 소비자의 비용 부담 여부에 따라서 다양한 형태의 보증정책으로 구분된다. 보증기간 동안 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 동안 시스템에 고장이 발생하였을 경우에 사용자에게 무료로 새 시스템으로 교체해 주는 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: NPRW)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(renewing combination warranty: RCW)과 비재생혼합보증(non-renewing combination warranty: NCW)으로 구분된다.

3. 교체정책

3.1. 재생혼합보증이 종료된 이후의 교체정책

3.1.1. 기대비용 및 기대비가동시간

본 절에서는 2절에서 설명한 재생혼합보증이 종료된 이후의 기대비용과 기대비가동시간을 함께 고려하는 교체모형을 고려하고자 한다. 따라서 시스템에는 재생혼합보증 기간이 주어지기 때문에 무료보증기간 $v(0 \le v \le w)$동안 시스템에 고장이 발생하면 시스템을 무료로 교체하고 보증기간 w도 처음부터 다시 시작되며, 비례보증기간인 v와 w사이에서 고장이 발생하면 시스템의 사용기간에 비례한 교체비용의 일부를 소비자가 부담하고 보증기간 w가 처음부터 다시 시작된다. 이러한 재생혼합보증이 있는 시스템에 대하여 다음과 같은 교체모형을 고려하고자 한다. 우선, 시스템에는 무료보증기간 $v(0 \le v \le w)$와 비례보증기간이 있는 재생혼합보증기간 w가 주어지고, 시점 τ에서 시스템이 새 것으로 교체된다. 그리고 시스템에 고장이 발생하면 최소수리(minimal repair)를 수행한다고 가정한다. 위와 같은 교체모형에 대하여 최적화의 기준으로 사용할 총밸류함수를 정의하기 위해서는 기대비용과 기대비가동시간을 결정하여야 한다. 먼저, 단위시간당 기대비용은 Jung (2002)의 결과로부터 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$C_{RRC}(\tau) = \frac{c_1 + (c_m + c_{fm})\bar{F}(w)\displaystyle\int_w^{w+\tau} h(t)dt}{I(w) + (w+\tau)\bar{F}(w)}, \tag{3.1}$$

여기서,

$$c_1 = \frac{c_r}{w}\{I(w) - I(v)\} + c_r\bar{F}(w) + c_{fw}F(w)$$

이고, $I(s) = \int_0^s tf(t)dt$이며, c_m은 최소수리비용, c_{fm}은 보전기간 동안에 발생한 고장으로 인한 비용, c_{fw}은 보증기간 동안에 발생한 고장으로 인한 비용 그리고 c_r은 교체비용이다. 식 (3.1)에서 $v = 0$ 또는 $v = w$이면 Sahin과 Polatoglu (1996)이 제시한 재생비례보증과 재생무료보증에서의 단위시간당기대비용과 동일하게 된다.

또한, 이러한 재생혼합보증이 종료된 이후의 교체모형에 대하여 단위시간당 기대비가동시간은 Jung 등 (2008)의 결과를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_{RRC}(\tau) = \frac{d_wF(w) + \bar{F}(w)\left\{d_r + d_m\displaystyle\int_w^{w+\tau} h(t)dt\right\}}{I(w) + (w+\tau)\bar{F}(w)}, \tag{3.2}$$

여기서, d_w는 보증기간 동안에 교체를 위해 필요한 시간, d_m은 최소수리를 위해 필요한 시간 그리고 d_r은 시스템을 새 것으로 교체하기 위해서 필요한 시간이다.

3.1.2. 최적의 교체정책

이 절에서는 3.1.1절에서 설명한 재생혼합보증이 종료된 이후의 교체모형에 대한 최적의 교체정책에 대하여 설명하고자 한다. 시스템을 운용하는데 있어서 시스템의 비가동시간은 필연적으로 발생하게 될 뿐만이 아니라 사용자에 의해서 중요하게 고려되어야할 요인이라고 할 수 있기 때문에, 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간을 함께 고려한 최적의 교체정책을 고려할 필요가 있다.

그러나 식 (3.1)의 단위시간당 기대비용과 식 (3.2)에 주어져 있는 단위시간당 기대비가동시간을 함께 고려한 최적의 교체정책은 서로 다른 측정 단위를 사용하고 있기 때문에 이러한 문제를 해결해야 하는데, 이를 위해서 본 연구에서는 Jiang과 Ji (2002)에서 고려된 총밸류함수를 이용하고자 한다. 총밸류함수를 정의하기 위해서는 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간에 근거한 각각의 밸류함수(value function)를 정의하여야 한다. 먼저, 단위시간당 기대비용에 대한 밸류함수 $v_{RR1}(\tau)$을 정의하기 위해서, 식 (3.1)에 있는 단위시간당 기대비용의 최소값을 $C_{\min}$이라고 하면 $v_{RR1}(\tau)$을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v_{RR1}(\tau) = \frac{C_{\min}}{C_{RRC}(\tau)}, \tag{3.3}$$

여기서, $C_{RRC}(\tau)$는 식 (3.1)에서 정의된 단위시간당 기대비용이다.

또한, $v_{RR2}(\tau)$를 단위시간당 기대비가동시간에 대한 밸류함수라고 하자. 이 때, 식 (3.2)에 있는 단위시간당 기대비가동시간의 최소값을 $D_{\min}$이라고 하면, $v_{RR2}(\tau)$는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v_{RR2}(\tau) = \frac{D_{\min}}{D_{RRC}(\tau)}, \tag{3.4}$$

여기서, $D_{RRC}(\tau)$는 식 (3.2)에서 정의된 단위시간당 기대비가동시간이다.

이제, 식 (3.3)과 (3.4)의 단위시간당 기대비용과 기대비가동시간에 대한 각각의 밸류함수를 이용하여 비재생보증이 종료된 이후의 교체모형에 대하여 최적화의 기준으로 사용 할 총밸류함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V_{RRC}(\tau) = w_1 v_{RR1}(\tau) + w_2 v_{RR2}(\tau), \tag{3.5}$$

여기서, w_1은 단위시간당 기대비용에 대한 가중치이고, w_2는 단위시간당 기대비가동시간에 대한 가중치로써 $w_1 + w_2 = 1$을 만족한다. 따라서 식 (3.5)에 있는 총밸류함수를 최대화하는 τ값을 재생혼합보증이 종료된 이후의 기대비용과 기대비가동시간을 함께 고려한 최적의 예방보전정책으로 설정할 수 있다.

3.2. 비재생혼합보증이 종료된 이후의 교체정책

3.2.1. 기대비용 및 기대비가동시간

본 절에서는 비재생혼합보증이 종료된 이후의 기대비용과 기대비가동시간을 함께 고려

하는 교체모형을 고려하고자 한다. 따라서 시스템에는 비재생혼합보증이 제공된다. 비재생혼합보증에서도 재생혼합보증에서와 동일하게 무료보증기간 동안 시스템에 고장이 발생하면 시스템을 무료로 교체해 주고, 비례보증기간 동안 시스템에 고장이 발생하면 시스템의 사용기간에 비례한 교체비용의 일부를 소비자가 부담하도록 하고 시스템이 교체된다. 그러나 보증기간에 있어서는 재생혼합보증에서처럼 보증기간이 재생되지 않고 처음에 주어진 보증기간이 유지된다. 그러므로 재생혼합보증에서는 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명(age)은 항상 w이지만 비재생혼합보증에서는 시스템의 수명이 0과 w사이에 존재하게 된다. 비재생혼합보증에서 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명을 y라고 하자. 그리고 보증기간동안에 발생한 교체 횟수를 l이라고 하자. 만약 $y = w$이면 $l = 0$이 되고, $l = 0$이면 $y = w$가 된다.

이러한 비재생혼합보증이 있는 시스템에 대하여 3.1절에서 고려했던 교체모형을 가정하고, 최적의 교체정책을 결정하고자 한다. 따라서 3.1절에서와 비슷하게 최적화의 기준으로 사용할 총밸류함수를 정의하기 위해서는 기대비용과 기대비가동시간을 결정하여야 한다. 먼저, 단위시간당 기대비용은 Jung (2002)의 결과로부터 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$C_{RNC}(\tau \mid y, l) = \frac{1}{w+\tau}\left\{c_2 + (c_m + c_{fm})\int_y^{y+\tau} h(t)dt\right\}, \tag{3.6}$$

여기서,

$$c_2 = \begin{cases} c_r \dfrac{(w-v)-y}{(w-v)} + c_r + lc_{fw}, & 0 < y < w-v, \\ c_r + lc_{fw}, & y \geq w-v \end{cases}$$

이고, y는 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명, l은 보증기간 동안의 시스템의 고장횟수, c_m은 최소수리비용, c_{fm}은 보전기간 동안에 발생한 고장으로 인한 비용, c_{fw}은 보증기간 동안에 발생한 고장으로 인한 비용 그리고 c_r은 교체비용이다. 식 (3.6)에서 $v = 0$ 또는 $v = w$이면 보증기간이 종료된 이후의 교체모형이 되기 때문에 Sahin과 Polatoglu (1996)에서 구해진 비재생비례보증과 비재생무료보증에서의 단위시간당 기대비용과 동일하게 된다.

또한, 비재생혼합보증이 종료된 이후의 교체모형에 대하여 단위시간당 기대비가동시간은 Jung 등 (2008)의 결과를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_{RNC}(\tau \mid y, l) = \frac{1}{w+\tau}\left\{ld_w + d_m\int_y^{y+\tau} h(t)dt + d_r\right\}, \tag{3.7}$$

여기서, d_w는 보증기간 동안에 교체를 위해 필요한 시간, d_m은 최소수리를 위해 필요한 시간 그리고 d_r은 시스템을 새 것으로 교체하기 위해서 필요한 시간이다.

3.2.2. 최적의 교체정책

이 절에서는 3.2.1절에서 설명한 비재생혼합보증이 종료된 이후의 교체모형에 대한 최적의 교체정책에 대하여 설명하고자 한다.

3.1.2절에서 설명했던 것처럼 총밸류함수를 정의하기 위해서는 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간에 근거한 각각의 밸류함수를 정의하여야 한다. 먼저, 단위시간당 기대비용에 대한 밸류함수 $v_{RN1}(\tau\,|\,l,\,y)$는 식 (3.6)에 있는 단위시간당 기대비용의 최소값을 $C_{\min}$이라고 하면 $v_{RN1}(\tau\,|\,l,\,y)$을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v_{RN1}(\tau\,|\,l,\,y) = \frac{C_{\min}}{C_{RNC}(\tau\,|\,l,\,y)}, \tag{3.8}$$

여기서, $C_{RNC}(\tau\,|\,l,\,y)$은 식 (3.6)에서 정의된 단위시간당 기대비용이고, y는 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명이며, l은 보증기간 동안의 시스템의 고장횟수이다.

또한, $v_{RN2}(\tau\,|\,l,\,y)$을 단위시간당 기대비가동시간에 대한 밸류함수라고 하자. 이 때, 식 (3.7)에 있는 단위시간당 기대비가동시간의 최소값을 $D_{\min}$이라고 하면, $v_{RN2}(\tau\,|\,l,\,y)$은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v_{RN2}(\tau\,|\,l,\,y) = \frac{D_{\min}}{D_{RNC}(\tau\,|\,l,\,y)}, \tag{3.9}$$

여기서, $D_{RNC}(\tau\,|\,l,\,y)$은 식 (3.7)에서 정의된 단위시간당 기대비가동시간이고, y는 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명이며, l은 보증기간 동안의 시스템의 고장횟수이다.

이제, 식 (3.8)과 (3.9)의 단위시간당 기대비용과 기대비가동시간에 대한 각각의 밸류함수를 이용하여 비재생혼합보증이 종료된 이후의 교체모형에 대하여 최적화의 기준으로 사용할 총밸류함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V_{RNC}(\tau\,|\,l,\,y) = w_1 v_{RN1}(\tau\,|\,l,\,y) + w_2 v_{RN2}(\tau\,|\,l,\,y), \tag{3.10}$$

여기서, w_1은 단위시간당 기대비용에 대한 가중치이고, w_2는 단위시간당 기대비가동시간에 대한 가중치로써 $w_1 + w_2 = 1$을 만족한다. 따라서 식 (3.10)에 있는 총밸류함수를 최대화하는 τ값이 비재생혼합보증이 종료된 이후의 기대비용과 기대비가동시간을 함께 고려한 최적의 교체정책이 된다.

4. 예방보전정책

4.1. 재생혼합보증이 종료된 이후의 예방보전정책

4.1.1. 기대비용 및 기대비가동시간

본 절에서는 재생혼합보증이 종료된 이후의 기대비용과 기대비가동시간을 함께 고려하는 예방보전모형을 고려하고자 한다. 즉, 시스템에는 무료보증기간 $v(0 \le v \le w)$와 비례보증기간이 있는 재생혼합보증기간 w가 주어진다. 그리고 PM은 kx, $k = 1, 2, \ldots, N$에서 주기적으로 이루어지며, N번째 PM주기에서는 시스템이 새 것으로 교체된다. 또한, k번째 PM이 이루어진 이후의 시스템의 고장률함수는 Canfiled (1986)의 예방보전 하에서의 고장률함수를 갖으며, 연속되는 예방보전 주기 사이에서 고장이 발생하면 최소수리를 수행한다고 가정한다.

위와 같은 예방보전모형에 대하여 최적화의 기준으로 사용할 총밸류함수를 정의하기 위해서 3절에서와 마찬가지로 기대비용과 기대비가동시간을 결정하여야 한다. 먼저, 단위시간당 기대비용은 Jung (2002)와 Jung과 Park (2003)의 결과로부터 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$C_{PRC}(x,N) = \frac{c_3 + \bar{F}(w)(N-1)c_{pm} + (c_m + c_{fm})\bar{F}(w)c_4}{I(w) + (w+Nx)\bar{F}(w)}, \tag{4.1}$$

여기서,

$$\begin{aligned} c_3 &= \frac{c_r}{w}\{I(w) - I(v)\} + c_r\bar{F}(w) + c_{fw}F(w) \\ c_4 &= \sum_{k=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{k}\big[h\{(i-1)(x-\alpha) + (x+w)\} - h\{i(x-\alpha)+w\}\big]x \\ &\quad + \sum_{k=1}^{N-1}\int_{kx+w}^{(k+1)x+w} h(t-k\alpha)dt \end{aligned}$$

이고, c_m은 최소수리비용, c_{pm}은 예방보전비용, c_{fm}은 보전기간 동안에 발생한 고장으로 인한 비용, c_{fw}은 보증기간 동안에 발생한 고장으로 인한 비용 그리고 c_r은 교체비용이다. 식 (4.1)에서 $v=0$ 또는 $v=w$이면 Jung과 Park (2003)이 제시한 재생비례보증과 재생무료보증에서의 단위시간당기대비용과 동일하게 된다. 또한, 예방보전의 횟수가 $N=1$이면 재생혼합보증이 종료된 이후의 교체모형이 되기 때문에 식 (3.1)의 단위시간당 기대비용과 동일하게 된다.

또한, 이러한 재생혼합보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대하여 단위시간당 기대비가동시간은 Jung 등 (2008) 그리고 Jung과 Park (2003)의 결과를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_{PRC}(x,N) = \frac{d_wF(w) + \bar{F}(w)d_mc_4 + (N-1)d_{pm} + \bar{F}(w)d_r}{I(w) + (w+Nx)\bar{F}(w)}, \tag{4.2}$$

여기서, d_w는 보증기간 동안에 교체를 위해 필요한 시간, d_m은 최소수리를 위해 필요한 시간, d_{pm}은 예방보전 활동을 위해 필요한 시간 그리고 d_r은 시스템을 새 것으로 교체하기 위해서 필요한 시간이다.

4.1.2. 최적의 예방보전 정책

이 절에서는 4.1.1절에서 설명한 재생혼합보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 최적의 예방보전정책에 대하여 설명하고자 한다. 그런데 최적의 예방보전정책을 결정하기 위해서는 최적의 예방보전 주기와 횟수를 동시에 결정해야 하는 문제가 있다. 뿐만 아니라, 식 (4.1)의 단위시간당 기대비용과 식 (4.2)에 주어져 있는 단위시간당 기대비가동시간을 함께 고려한 최적의 예방보전정책은 서로 다른 측정 단위를 사용하고 있기 때문에 이러한 문제도 해결해야 한다. 이를 위해서, 3절과 유사하게 총밸류함수를 이용하고자 한다.

먼저, 단위시간당 기대비용에 대한 밸류함수 $v_{PR1}(x,N)$은 식 (4.1)에 있는 단위시간당 기대비용의 최소값을 $C_{\min}$이라고 하면 $v_{PR1}(x,N)$을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v_{PR1}(x,N) = \frac{C_{\min}}{C_{PRC}(x,N)}, \tag{4.3}$$

여기서, $C_{PRC}(x,N)$은 식 (4.1)에서 정의된 단위시간당 기대비용이다.

또한, $v_{PR2}(x,N)$을 단위시간당 기대비가동시간에 대한 밸류함수라고 하자. 이 때, 식 (4.2)에 있는 단위시간당 기대비가동시간의 최소값을 $D_{\min}$이라고 하면, $v_{PR2}(x,N)$은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v_{PR2}(x,N) = \frac{D_{\min}}{D_{PRC}(x,N)}, \tag{4.4}$$

여기서, $D_{PRC}(x,N)$은 식 (4.2)에서 정의된 단위시간당 기대비가동시간이다.

이제, 식 (4.3)과 (4.4)의 단위시간당 기대비용과 기대비가동시간에 대한 각각의 밸류함수를 이용하여 재생보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 최적화의 기준으로 사용 할 총밸류함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V_{PRC}(x,N) = w_1 v_{PR1}(x,N) + w_2 v_{PR2}(x,N), \tag{4.5}$$

여기서, w_1은 단위시간당 기대비용에 대한 가중치이고, w_2는 단위시간당 기대비가동시간에 대한 가중치로써 $w_1 + w_2 = 1$을 만족한다. 따라서 식 (4.5)에 있는 총밸류함수를 최대화하는 x값과 N값을 재생혼합보증이 종료된 이후의 기대비용과 기대비가동시간을 함께 고려한 최적의 예방보전정책으로 설정할 수 있다.

4.2. 비재생혼합보증이 종료된 이후의 예방보전정책

4.2.1. 기대비용 및 기대비가동시간

본 절에서는 비재생혼합보증이 종료된 이후의 기대비용과 기대비가동시간을 함께 고려하는 예방보전모형을 고려하고자 한다. 따라서 시스템에는 무료보증기간 $v(0 \le v \le w)$와 비례보증기간이 있는 비재생혼합보증기간 w가 주어진다. 따라서 보증기간이 재생되지 않고 처음에 주어진 보증기간이 유지된다. 그리고 PM은 kx, $k = 1,2,\ldots,N$에서 주기적으로 이루어지며, N번째 PM주기에서는 시스템이 새 것으로 교체된다. 또한, k번째 PM이 이루어진 이후의 시스템의 고장률함수는 Canfiled (1986)의 예방보전 하에서의 고장률함수를 갖으며, 연속되는 예방보전 주기 사이에서 고장이 발생하면 최소수리를 수행한다고 가정한다. 이러한 예방보전모형에 대하여 최적화의 기준으로 사용할 총밸류함수를 정의하기 위해서는 기대비용과 기대비가동시간을 결정하여야 하는데, 먼저 단위시간당 기대비용은 Jung (2002) 그리고 Jung과 Park (2003)의 결과로부터 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$C_{PNC}(x,N \mid y,l) = \frac{1}{w+Nx}\{c_5 + (c_m + c_{fm})c_6\}, \tag{4.6}$$

여기서,

$$c_5 = c_r \frac{(w-v)-y}{(w-v)} + (N-1)c_{pm} + c_r + lc_{fw},$$

$$c_6 = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{i=1}^{k} \big[h\{(i-1)(x-\alpha)+(x+y)\} - h\{i(x-\alpha+y\}\big]x + \sum_{k=0}^{N-1} \int_{kx+y}^{(k+1)x+y} h(t-k\alpha)dt,$$

이고, y는 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명, l은 보증기간 동안의 시스템의 고장횟수, c_m은 최소수리비용, c_{pm}은 예방보전비용, c_{fm}은 보전기간 동안에 발생한 고장으로 인한 비용, c_{fw}은 보증기간 동안에 발생한 고장으로 인한 비용 그리고 c_r은 교체비용이다. 식 (4.6)에서 $v = 0$ 또는 $v = w$이면 Jung과 Park (2003)이 제시한 비재생비례보증과 비재생무료보증에서의 단위시간당기대비용과 동일하게 된다. 또한, 예방보전의 횟수가 $N = 1$이면 비재생혼합보증이 종료된 이후의 교체모형이 되기 때문에 식 (3.6)의 단위시간당 기대비용과 동일하게 된다.

또한, 이러한 비재생혼합보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대하여 단위시간당 기대비가동시간은 Jung 등 (2008) 그리고 Jung과 Park (2003)의 결과를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_{PNC}(x, N \,|\, y, l) = \frac{1}{w+Nx}\{ld_w + (N-1)d_{pm} + d_m c_6 + d_r\}, \tag{4.7}$$

여기서, d_w는 보증기간 동안에 교체를 위해 필요한 시간, d_m은 최소수리를 위해 필요한 시간, d_{pm}은 예방보전 활동을 위해 필요한 시간 그리고 d_r은 시스템을 새 것으로 교체하기 위해서 필요한 시간이다. 식 (4.7)에서 예방보전의 횟수가 $N = 1$이면 보증기간이 종료된 이후의 교체모형이 되기 때문에 식 (3.7)의 단위시간당 기대비가동시간과 동일 해 짐을 알 수 있다.

4.2.2. 최적의 예방보전 정책

이 절에서는 4.2.1절에서 설명한 비재생혼합보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 최적의 예방보전정책에 대하여 설명하고자 한다. 4.1절에서 설명했던 것처럼 총밸류함수를 정의하기 위해서는 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간에 근거한 각각의 밸류함수를 정의하여야 한다. 먼저, 단위시간당 기대비용에 대한 밸류함수 $v_{PN1}(x, N \,|\, l, y)$은 식 (4.6)에 있는 단위시간당 기대비용의 최소값을 $C_{\min}$이라고 하면 $v_{PN1}(x, N \,|\, l, y)$을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v_{PN1}(x, N \,|\, l, y) = \frac{C_{\min}}{C_{PNC}(x, N \,|\, l, y)}, \tag{4.8}$$

여기서, $C_{PNC}(x, N \,|\, l, y)$은 식 (4.6)에서 정의된 단위시간당 기대비용이고, y는 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명이며, l은 보증기간 동안의 시스템의 고장횟수이다. 또

한, $v_{PN2}(x,\, N\,|\, l,\, y)$을 단위시간당 기대비가동시간에 대한 밸류함수라고 하자. 이 때, 식 (4.7)에 있는 단위시간당 기대비가동시간의 최소값을 $D_{\min}$이라고 하면, $v_{PN2}(x,\, N\,|\, l,\, y)$은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v_{PN2}(x,\, N\,|\, l,\, y) = \frac{D_{\min}}{D_{PNC}(x,\, N\,|\, l,\, y)}, \tag{4.9}$$

여기서, $D_{PNC}(x,\, N\,|\, l,\, y)$은 식 (4.7)에서 정의된 단위시간당 기대비가동시간이고, y는 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명이며, l은 보증기간 동안의 시스템의 고장횟수이다.

이제, 식 (4.8)과 (4.9)의 단위시간당 기대비용과 기대비가동시간에 대한 각각의 밸류함수를 이용하여 비재생보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 최적화의 기준으로 사용할 총밸류함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V_{PNC}(x,\, N\,|\, l,\, y) = w_1 v_{PN1}(x,\, N\,|\, l,\, y) + w_2 v_{PN2}(x,\, N\,|\, l,\, y), \tag{4.10}$$

여기서, w_1은 단위시간당 기대비용에 대한 가중치이고, w_2는 단위시간당 기대비가동시간에 대한 가중치로써 $w_1 + w_2 = 1$을 만족한다. 따라서 식 (4.10)에 있는 총밸류함수를 최대화하는 x값과 N값이 비재생혼합보증 기간이 종료된 이후의 기대비용과 기대비가동시간을 함께 고려한 최적의 예방보전정책이 된다.

5. 수치적 예

이 절에서는 본 논문에서 고려된 혼합보증기간이 종료된 이후의 교체모형과 예방보전모형에 대한 최적의 보전정책을 수치적 예를 통해서 설명하고자 한다. 이를 위해서 시스템의 고장시간 T가 와이블분포를 한다고 가정한다. 즉, 가정된 시스템의 고장률함수는 $h(t) = \beta\lambda^{\beta}t^{\beta-1}$이 된다. 이때, 혼합보증이 종료된 이후의 최적의 보전정책을 결정하고, β 또는 y의 변화에 따른 최적의 보전정책의 변화를 살펴보고자 한다.

5.1. 교체정책

5.1.1. 재생혼합보증이 종료된 이후의 최적의 교체정책

이 절에서는 3.1절에서 고려한 재생혼합보증이 종료된 이후의 최적의 교체정책에 대하여 살펴보고자 한다. 표 5.1에는 재생혼합보증에 대하여 식 (3.5)로부터 구해지는 최적의 교체주기 τ^*와 이때의 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간이 나타나 있다. 예를 들어, 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간에 대한 가중치인 w_1과 w_2가 각각 0.5이고, $\beta = 4$일 때, 식 (3.5)를 최대화하는 최적의 교체주기 τ^*의 값은 0.823이 됨을 알 수 있다. 즉 재생혼합보증기간이 종료된 이후에 0.823단위시간마다 시스템을 새 것으로 교체하는 것이 비용과 비가동시간을 함께 고려한 최적의 교체정책이 된다는 것이다. 그리고 이렇게 교체정책을 수행할 경우의 단위시간당 기대비용은 17.282단위비용이며, 단위시간당 기대비가동시간은 14.064단위시간이 된다는 것이다. 또한, 표 5.1로부터 β가 증가함에 따라 최적의 최적의 교체주기가 줄어드는 것을 알 수 있다.

표 5.1: 재생혼합보증에서의 최적의 교체정책($w = 0.5$, $v = 0.3$, $c_r = 15$, $c_m = 1$, $c_{fm} = c_{fw} = 1.5$, $d_w = 15$, $d_r = 15$, $d_m = 1$, $\lambda = 1$)

β		w_1						
		0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0
	τ^*	1.522	1.456	1.320	1.192	1.082	0.992	0.954
3	$C_{RRC}(\tau^*)$	17.782	17.390	16.710	16.238	15.977	15.875	15.865
	$D_{RRC}(\tau^*)$	12.266	12.280	12.396	12.630	12.943	13.290	13.464
	τ^*	1.009	0.970	0.893	0.823	0.763	0.714	0.693
4	$C_{RRC}(\tau^*)$	18.643	18.268	17.666	17.282	17.080	17.004	16.996
	$D_{RRC}(\tau^*)$	13.742	13.755	13.864	14.064	14.316	14.581	14.712
	τ^*	0.807	0.779	0.724	0.676	0.635	0.601	0.586
5	$C_{RRC}(\tau^*)$	18.846	18.498	17.955	17.633	17.467	17.403	17.397
	$D_{RRC}(\tau^*)$	14.587	14.600	14.704	14.878	15.091	15.313	15.425

표 5.2: 비재생혼합보증에서의 최적의 교체정책($w = 0.5$, $v = 0.3$, $c_r = 10$, $c_m = 1$, $c_{fm} = c_{fw} = 1.5$, $d_w = 5$, $d_r = 5$, $d_m = 1$, $\lambda = 1$, $\beta = 3$, $l = 1$)

y		w_1						
		0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0
	τ^*	1.432	1.407	1.359	1.313	1.271	1.232	1.213
0.10	$C_{RNC}(\tau^*\|l, y)$	13.191	13.137	13.051	12.989	12.953	12.936	12.934
	$D_{RNC}(\tau^*\|l, y)$	7.036	7.038	7.049	7.071	7.101	7.137	7.158
	τ^*	1.401	1.366	1.299	1.235	1.178	1.127	1.104
0.15	$C_{RNC}(\tau^*\|l, y)$	12.266	12.166	12.005	11.892	11.827	11.799	11.796
	$D_{RNC}(\tau^*\|l, y)$	7.221	7.224	7.247	7.293	7.353	7.424	7.461
	τ^*	1.372	1.325	1.233	1.148	1.074	1.012	0.985
0.20	$C_{RNC}(\tau^*\|l, y)$	11.320	11.148	10.869	10.681	10.577	10.536	10.531
	$D_{RNC}(\tau^*\|l, y)$	7.412	7.418	7.463	7.549	7.661	7.785	7.849
	τ^*	1.343	1.283	1.160	1.047	0.955	0.882	0.852
0.25	$C_{RNC}(\tau^*\|l, y)$	10.345	10.077	9.619	9.318	9.165	9.108	9.102
	$D_{RNC}(\tau^*\|l, y)$	7.610	7.620	7.703	7.864	8.064	8.274	8.374
	τ^*	1.314	1.240	1.076	0.923	0.808	0.727	0.696
0.30	$C_{RNC}(\tau^*\|l, y)$	9.340	8.944	8.214	7.734	7.517	7.449	7.443
	$D_{RNC}(\tau^*\|l, y)$	7.815	7.830	7.981	8.293	8.664	9.010	9.164

5.1.2. 비재생혼합보증이 종료된 이후의 최적의 교체정책

이 절에서는 3.2절에서 고려한 비재생혼합보증이 종료된 이후의 최적의 교체정책에 대하여 살펴보고자 한다. 표 5.2에는 비재생혼합보증에 대하여 식 (3.10)으로부터 구해지는 최적의 교체주기 τ^*와 이때의 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간이 나타나 있다. 예를 들어, 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간에 대한 가중치인 w_1과 w_2가 각각 0.5이고, 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명인 y가 0.15일 때, 식 (3.10)을 최대화하는 최적의 교체주기 τ^*의 값은 1.235가 됨을 알 수 있다. 즉 비재생혼합

표 5.3: 재생혼합보증에서의 최적의 예방보전정책($w = 0.5$, $v = 0.3$, $c_r = 15$, $c_{pm} = 1$, $c_m = 1$, $c_{fm} = c_{fw} = 1.5$, $d_w = 15$, $d_r = 15$, $d_{pm} = 1$, $d_m = 1$, $\lambda = 1$)

β		w_1						
		0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0
3	N^*	3	3	2	2	2	2	2
	x^*	0.659	0.631	0.767	0.691	0.626	0.574	0.552
	$C_{PRC}(x^*, N^*)$	17.981	17.607	16.713	16.235	15.971	15.870	15.859
	$D_{PRC}(x^*, N^*)$	11.891	11.903	12.031	12.260	12.571	12.909	13.080
4	N^*	4	4	3	3	3	3	3
	x^*	0.409	0.393	0.430	0.394	0.363	0.337	0.326
	$C_{PRC}(x^*, N^*)$	18.676	18.298	17.465	17.038	16.805	16.712	16.703
	$D_{PRC}(x^*, N^*)$	12.854	12.867	13.029	13.241	13.518	13.826	13.979
5	N^*	5	5	5	4	4	3	3
	x^*	0.318	0.306	0.283	0.296	0.275	0.304	0.295
	$C_{PRC}(x^*, N^*)$	18.507	18.127	17.528	16.988	16.773	16.672	16.664
	$D_{PRC}(x^*, N^*)$	13.029	13.042	13.148	13.395	13.653	14.085	14.225

보증 기간이 종료된 이후에 1.235단위시간마다 시스템을 새 것으로 교체하는 것이 비용과 비가동시간을 함께 고려한 최적의 교체정책이 된다는 것이다. 또한 표 5.2로부터 y가 증가함에 따라 최적의 교체주기는 줄어드는 것을 알 수 있다.

5.2. 예방보전정책

5.2.1. 재생혼합보증이 종료된 이후의 최적의 예방보전정책

이 절에서는 4.1절에서 고려한 재생혼합보증이 종료된 이후의 최적의 예방보전정책에 대하여 살펴보고자 한다. 표 5.3에는 재생혼합보증에 대하여 식 (4.5)로부터 구해지는 최적의 예방보전 주기 x^*와 횟수 N^* 그리고 이때의 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간이 나타나 있다. 예를 들어, 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간에 대한 가중치인 w_1과 w_2가 각각 0.5이고, $\beta = 4$일 때, 식 (4.5)를 최대화하는 최적의 예방보전 주기 x^*의 값은 0.394이고, 최적의 예방보전 횟수 N^*의 값은 3이 됨을 알 수 있다. 즉 재생혼합보증 기간이 종료된 이후에 0.394단위시간마다 시스템에 예방보전 활동을 수행하고, 3번째 예방보전 주기에서는 시스템을 새 것으로 교체하는 것이 비용과 비가동시간을 함께 고려한 최적의 예방보전정책이 된다는 것이다. 그리고 이렇게 예방보전정책을 수행할 경우의 단위시간당 기대비용은 17.038단위비용이며, 단위시간당 기대비가동시간은 13.241단위시간이 된다는 것이다. 또한, 표 5.3으로부터 β가 증가함에 따라 최적의 예방보전 횟수가 증가함을 알 수 있다.

5.2.2. 비재생혼합보증이 종료된 이후의 최적의 예방보전정책

이 절에서는 4.2절에서 고려한 비재생혼합보증이 종료된 이후의 최적의 예방보전정책에 대하여 살펴보고자 한다. 표 5.4에는 비재생혼합보증에 대하여 식 (4.10)으로부터 구해

표 5.4: 비재생혼합보증에서의 최적의 예방보전정책($w = 0.5$, $v = 0.3$, $c_r = 10$, $c_{pm} = 1$, $c_m = 1$, $c_{fm} = c_{fw} = 1.5$, $d_w = 5$, $d_r = 5$, $d_{pm} = 1$, $d_m = 1$, $\lambda = 1$, $\beta = 3$, $l = 1$)

y		w_1						
		0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0
0.10	N^*	3	4	4	4	5	5	6
	x^*	0.676	0.557	0.534	0.512	0.429	0.412	0.362
	$C_{PNC}(x^*, N^*\|l, y)$	12.264	12.058	11.933	11.845	11.727	11.701	11.695
	$D_{PNC}(x^*, N^*\|l, y)$	6.725	6.729	6.746	6.778	6.883	6.946	7.073
0.15	N^*	3	3	3	3	3	4	4
	x^*	0.656	0.638	0.604	0.572	0.543	0.431	0.421
	$C_{PNC}(x^*, N^*\|l, y)$	11.814	11.696	11.509	11.379	11.302	11.258	11.253
	$D_{PNC}(x^*, N^*\|l, y)$	6.994	6.998	7.025	7.078	7.151	7.291	7.340
0.20	N^*	3	3	2	2	2	2	2
	x^*	0.636	0.615	0.745	0.693	0.647	0.609	0.592
	$C_{PNC}(x^*, N^*\|l, y)$	11.316	11.146	10.776	10.581	10.471	10.427	10.422
	$D_{PNC}(x^*, N^*\|l, y)$	7.267	7.272	7.325	7.414	7.532	7.663	7.731
0.25	N^*	2	2	2	1	1	1	1
	x^*	0.808	0.774	0.702	1.046	0.953	0.881	0.852
	$C_{PNC}(x^*, N^*\|l, y)$	10.514	10.261	9.810	9.316	9.167	9.107	9.102
	$D_{PNC}(x^*, N^*\|l, y)$	7.513	7.522	7.600	7.866	8.069	8.277	8.374
0.30	N^*	2	2	1	1	1	1	1
	x^*	0.788	0.748	1.074	0.921	0.807	0.727	0.696
	$C_{PNC}(x^*, N^*\|l, y)$	9.763	9.407	8.206	7.729	7.516	7.449	7.443
	$D_{PNC}(x^*, N^*\|l, y)$	7.758	7.770	7.984	8.299	8.668	9.010	9.164

지는 최적의 예방보전 주기 x^*와 횟수 N^* 그리고 이때의 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간이 나타나 있다. 예를 들어, 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간에 대한 가중치인 w_1과 w_2가 각각 0.5이고, 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명인 y가 0.15일 때, 식 (4.10)을 최대화하는 최적의 예방보전 주기 x^*의 값은 0.572이고, 최적의 예방보전 횟수 N^*의 값은 3이 됨을 알 수 있다. 즉 비재생혼합보증 기간이 종료된 이후에 0.572단위시간마다 시스템에 예방보전 활동을 수행하고, 3번째 예방보전 주기에서는 시스템을 새 것으로 교체하는 것이 비용과 비가동시간을 함께 고려한 최적의 예방보전정책이 된다는 것이다. 또한 표 5.4로부터 y가 증가함에 따라 최적의 예방보전 횟수는 줄어드는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 혼합보증이 종료된 이후의 최적의 보전모형에 대하여 시스템을 운용하는데 필연적으로 발생하는 비용과 비가동시간을 함께 고려한 최적의 보전정책을 고려하였다. 즉, 재생혼합보증이 종료된 이후의 최적의 교체정책과 예방보전정책 그리고 비재생혼합보증이 종료된 이후의 최적의 교체정책과 예방보전정책을 각각 살펴보았다. 이러한 보

전모형들에 대하여 단위시간당 기대비용과 단위시간당 기대비가동시간을 구하였고, 이를 근거로 하여 총밸류함수를 정의하였다. 또한, 총밸류함수를 이용하여 최적의 교체주기 또는 예방보전의 주기 및 횟수를 결정하는 방법을 설명하였다. 끝으로 시스템의 고장시간이 와이블분포를 할 때 각각의 모형에 대한 최적의 보전정책과 그때의 단위시간당 기대비용과 단위시간당 비가동시간을 구하고 이를 자세히 설명하였다.

참고문헌

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

Jiang, R. and Ji, P. (2002). Age Replacement policy: A multi-attribute value model, *Reliability Engineering and System Safety,* **76**, 311–318.

Jung, G. M. (2002). Optimal replacement policy for a repairable system with combination warranty, *The Korean Journal of Applied Statistics,* **15**, 107–117.

Jung, K. M. (2008). Optimization of cost and downtime for periodic PM model following the expiration of warranty, *Journal of Korean Data & Information Science Society,* **19**, 587–596.

Jung, K. M., Han, S. S. and Park, D. H. (2008). Optimization of cost and downtime for replacement model following the expiration of warranty, *Reliability Engineering & System Safety,* **93**, 995–1003.

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

Lin, D., Zuo, M. J. and Yam, R. C. M. (2000). General sequential imperfect preventive maintenance models, *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering,* **7**, 253–266.

Malik, M. A. K. (1979). Reliable preventive maintenance scheduling, *IIE Transactions,* **11**, 221–228.

Nakagawa, T. (1986). Periodic and sequential preventive maintenance policies, *Journal of Applied Probability,* **23**, 536–542.

Nakagawa, T. (1988). Sequential imperfect preventive maintenance policies, *IEEE Transactions on Reliability,* **37**, 295–298.

Sahin, I. and Polatoglu, H. (1996). Maintenance strategies following the expiration of warranty, *IEEE Transactions on Reliability,* **45**, 220–228.

Wu, S. and Clements-Croome, D. (2005). Preventive maintenance models with random maintenance quality, *Reliability Engineering & System Safety,* **90**, 99–105.

[2008년 8월 접수, 2008년 9월 채택]

Maintenance Policy Based on Cost and Downtime Following the Expiration of Combination Warranty

Ki Mun Jung[1]

Abstract

This paper considers the replacement model and the preventive maintenance model following the expiration of combination warranty for a repairable system. If the system fails after the combination warranty is expired, then it is minimally repaired at each failure. The criterion used to determine the optimal replacement policy and the optimal preventive maintenance policy is the overall value function based on the expected cost rate per unit time and the expected downtime per unit time. The numerical examples are presented for illustrative purpose when the failure time follows a Weibull distribution.

Keywords: Combination warranty; replacement model; preventive maintenance model; cost; downtime; overall value function.

1) Assistant Professor, Department of Informational Statistics, Kyungsung University, Busan 608-736, Korea. E-mail: kmjung@ks.ac.kr