응용통계연구 제 **15**권 *1*호, *2002*년, *pp. 107–117*

혼합보증이 있는 수리 가능한 시스템에 대한 최적의 교체정책

정기문[1)]

요 약

본 논문에서는 혼합보증기간이 있는 수리 가능한 시스템에 대하여 보증기간이 종료된 이후의 교체정책을 고려한다. 이러한 교체정책은 보증기간이 재생되는 재생혼합보증과 재생되지 않는 비재생혼합보증에 대하여 고려되며, 최적의 교체정책을 설정하기 위해서 단위시간당 기대비용을 사용한다. 재생혼합보증과 비재생혼합보증이 있는 시스템에 대하여 소비자 관점에서의 단위시간당 기대비용을 구하고, 이를 최소화하는 최적의 보전기간을 결정한다. 그리고, 시스템의 고장시간이 와이블분포일 때 수치적 예를 통해서 제안된 최적의 교체정책을 설명한다.

주요용어: 교체정책, 보전기간, 재생혼합보증, 비재생혼합보증, 최소수리, 고장률함수.

1. 서론

보증정책(warranty policy)은 시스템을 판매한 후 일정기간 동안 발생하는 결함이나 고장에 대하여 생산자 또는 판매자가 수리(repair) 또는 교체(replacement) 등의 조처를 해준다는 소비자와의 약속이다. 이러한 보증정책은 보증기간(warranty period)의 재생 여부와 소비자의 비용 부담 여부에 따라 다양한 형태의 보증정책으로 구분할 수 있는데 먼저 보증기간의 재생 여부에 따라서 보증정책을 분류하면, 재생보증(renewing warranty)과 비재생보증(non-renewing warranty)으로 구분할 수 있다. 재생보증에서는 보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생하면 새 것으로 교체해 주고 보증기간도 처음부터 다시 시작되는 반면, 비재생보증에서는 시스템에 고장이 발생하면 새 것으로 교체해 주지만 보증기간은 재생되지 않고 처음에 주어진 보증기간이 유지된다. 또한, 소비자의 비용 부담 여부에 따라서 보증정책을 분류하면, 무료보증(free-replacement warranty), 비례보증(pro-rata warranty) 그리고 혼합보증(combination warranty)으로 구분할 수 있다. 무료보증에서는 보증기간 동안에 발생하는 시스템의 고장에 대해서는 생산자가 무료로 교체를 해주고, 비례보증에서는 보증기간 동안에 발생하는 고장에 대하여 시스템의 사용기간에 비례하여 교체비용의 일부를 소비자가 부담하게 된다. 그리고, 혼합보증은 무료보증과 비례보증을 혼합한 것으로 보증기간 내의 일정기간 동안에 발생한 시스템의 고장에 대해서는 무료로 교체를 해주고, 이 시점 이후에 발생되는 시스템의 고장에 대해서는 비례보증을 실시한다.

보증기간이 있는 시스템의 보전정책(maintenance policy)에 관한 연구는 크게 생산자 측면과 소비자 측면의 두 분야에서 진행되고 있다. Chun(1992), Jack과 Dagpunar(1994),

1) (501-759) 광주광역시 동구 서석동 375, 조선대학교 BK21 지역대학 육성사업단, 계약교수
E-mail: jgm@mail.chosun.ac.kr

Yeh와 Lo(2001) 등은 생산자 측면에서의 최적의 보전정책, 즉 보증기간 동안에 생산자가 부담하게 되는 보증비용을 최소화하기 위한 여러 가지 예방보전정책(preventive maintenance policy)을 제안하였다. Chun(1992)은 보증기간 동안에 발생하는 생산자의 보증비용을 최소화하는 최적의 예방보전횟수를 결정함으로써 최적의 주기적인 예방보전정책을 제안하였다. Jack과 Dagpunar(1994)는 예방보전주기가 서로 다른 경우를 고려하여 Chun(1992)의 예방보전정책을 일반화하였으며, Yeh와 Lo(2001)는 보증기간 내에서 이루어지는 예방보전의 효과를 변수로 고려한 최적의 예방보전정책을 제안하였다. 소비자 측면에서의 최적의 보전정책은 보증거간 동안에 소비자가 부담해야 하는 비용과 보증기간이 종료된 이후에 발생하는 유지비용을 모두 고려해야 한다. 이에 관한 연구로 Sahin과 Polatoglu(1996)은 무료보증기간과 비례보증기간이 종료된 이후의 최적의 교체정책(replacement policy)을 제안하였으며, Jung, Lee와 Park(2000)은 재생보증에서의 최적의 예방보전정책을 제안하였다.

본 논문에서는 혼합보증을 갖는 수리 가능한 시스템에 대하여 소비자 측면에서의 최적의 교체정책을 제안하고자 한다. 시스템은 무료보증과 비례보증이 혼합된 혼합보증을 가지며, 보증기간 w가 종료된 이후에 보전기간(maintenance period) x 동안에는 시스템이 고장나면 최소수리(minimal repair)를 한다. 보증기간이 종료된 이후에 $w+x$에서 새로운 시스템으로 교체하고, 최소수리시간 및 교체시간은 고려하지 않는다. 이러한 혼합보증이 있는 시스템의 교체모형에 대하여 재생보증과 비재생보증으로 나누어 각각 단위시간당 기대비용(expected cost rate per unit time)을 구하고, 이를 최소화하는 최적의 보전기간 x^*를 결정하고자 한다. 본 논문에서 고려하는 최적의 교체정책에서 무료보증기간이 없으면 즉, $v=0$이면 Sahin과 Polatoglu(1996)가 제시한 비례보증에서의 최적의 교체정책이 된다. 또한, 비례보증기간이 없으면 즉, $v=w$이면 Sahin과 Polatoglu(1996)가 제시한 무료보증에서의 최적의 교체정책이 된다.

본 논문의 2장에서는 재생혼합보증(renewing combination warranty)을 갖는 수리 가능한 시스템에 대하여 소비자가 부담하게 되는 단위시간당 기대비용을 구하고, 이를 최소화하는 최적의 보전기간을 결정한다. 3장에서는 비재생혼합보증(non-renewing combination warranty)이 있는 수리 가능한 시스템의 최적의 교체정책을 제안한다. 4장에서는 본 논문에서 고려된 혼합보증에서의 단위시간당 기대비용과 이를 최소화하는 최적의 보전기간을 설명하기 위해서 시스템의 고장시간(failure time)이 와이블분포(Weibull distribution)일 때 다양한 형태의 수치적인 예를 보인다.

2. 재생혼합보증에서의 최적의 교체정책

본 논문에서 고려되는 무료보증과 비례보증이 혼합된 혼합보증이 있는 수리 가능한 시스템에 대한 교체모형의 형태는 그림 1과 같다.

재생혼합보증에서는 무료보증기간 $v(0 \le v \le w)$동안에 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.

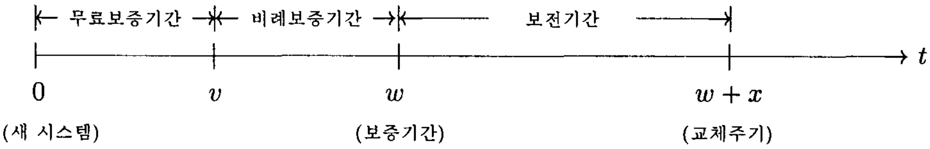

그림 1. 혼합보증이 있는 교체모형

2.1. 단위시간당 기대비용

T를 시스템의 고장시간이라 하고, x를 보증기간이 종료된 이후의 보전기간이라고 하자. 그리고, $F(t)$와 $f(t)$를 각각 T의 수명분포함수(life distribution function)와 밀도함수(density function)라고 하자. 이 때, 고장률함수(hazard rate function)는 $\bar{F}(t) > 0$를 만족하는 t에 대하여 다음과 같이 정의된다.

$$h(t) = f(t)/\bar{F}(t).$$

여기서, $\bar{F}(t) = 1 - F(t)$이다.

재생혼합보증에서 시스템을 운용하는데 발생하는 기대비용 $E\{C(x)\}$은 다음과 같이 네 가지 기대비용의 합으로 구할 수 있다.

$$E\{C(x)\} = E(C_{V,W}) + E(C_M) + E(C_R) + E(C_F). \tag{2.1}$$

여기서, $E(C_{V,W})$는 혼합보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생하여 교체할 경우 보증정책에 의해서 소비자가 부담하게 되는 기대비용이고, $E(C_M)$은 보증기간이 종료된 이후에 보전기간 동안 발생하는 고장에 대하여 최소수리를 하는데 발생하는 기대비용이다. 그리고, $E(C_R)$은 $w + x$에서 시스템을 새 것으로 교체하기 위한 기대비용이며, $E(C_F)$는 시스템의 고장으로 야기되는 기대비용이다.

시스템이 무료보증기간 동안에 고장나면 생산자가 이를 무료로 교체해 주고 비례보증기간인 v와 w사이에서 고장나면 사용기간에 비례한 교체비용을 소비자가 부담하게 되므로 $E(C_{V,W})$는

$$E(C_{V,W}) = \frac{c_r}{w}(I(w) - I(v)) \tag{2.2}$$

이 된다. 여기서, $I(s) = \int_0^s tf(t)dt$이고 c_r은 시스템의 교체비용이다. 시스템이 보증기간 동안에 고장나지 않으면 즉, $T > w$이면 보전기간 동안 발생되는 고장에 대한 최소수리비용과 $w + x$에서의 교체비용을 소비자가 부담하여야 하므로 $E(C_M)$과 $E(C_R)$은 각각 다음과 같다.

$$E(C_M) = c_m\bar{F}(w)\int_w^{w+x} h(t)dt. \tag{2.3}$$

$$E(C_R) = c_r\bar{F}(w). \tag{2.4}$$

여기서, $\int_w^{w+x} h(t)dt$는 $(w, w + x)$동안에 시스템에 이루어지는 최소수리의 평균횟수로써 Boland(1982)의 결과를 이용하여 구할 수 있으며, c_m은 시스템의 최소수리 비용이고, c_r은

시스템의 교체비용이다. 그리고, 보증기간 동안에 발생하는 시스템의 고장과 보증기간이 종료된 이후에 발생하는 시스템의 고장으로 야기되는 기대비용 $E(C_F)$는 $(w, w+x)$동안에 시스템에 이루어지는 최소수리의 평균횟수를 이용하면 다음과 같이 구해진다.

$$E(C_F) = c_{f,w}F(w) + c_{f,m}\bar{F}(w)\int_w^{w+x} h(t)dt. \tag{2.5}$$

여기서, $c_{f,w}$는 보증기간 동안에 발생하는 시스템의 고장으로 소비자가 부담하게 되는 비용이고, $c_{f,m}$은 보전기간 동안에 발생하는 시스템의 고장으로 소비자가 부담하게 되는 비용이다. 식 (2.2)부터 식 (2.5)를 이용하면 식 (2.1)의 기대비용은 다음과 같이 구해진다.

$$E\{C(x)\} = c_1 + (c_m + c_{f,m})\bar{F}(w)\int_w^{w+x} h(t)dt. \tag{2.6}$$

여기서, $c_1 = \frac{c_r}{w}(I(w) - I(v)) + c_r\bar{F}(w) + c_{f,w}F(w)$이다.

재생혼합보증에서는 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 기대순환길이(expected cycle length)는 다음과 같다.

$$E\{T(x)\} = I(w) + (w + x)\bar{F}(w). \tag{2.7}$$

식 (2.6)과 식 (2.7)로부터 구하고자 하는 단위시간당 기대비용은 다음과 같다.

$$C_{RW}(x) = \frac{c_1 + (c_m + c_{f,m})\bar{F}(w)\int_w^{w+x} h(t)dt}{I(w) + (w + x)\bar{F}(w)}. \tag{2.8}$$

식 (2.8)에서 $v = 0$ 또는 $v = w$이면 Sahin과 Polatoglu(1996)이 제시한 재생비례보증과 재생무료보증에서의 단위시간당 기대비용과 동일하게 된다.

2.2. 최적의 교체정책

이 절에서는 식 (2.8)에 주어진 단위시간당 기대비용을 최소화하는 시스템의 최적의 보전기간 x^*를 찾고자 한다. 최적의 보전기간 x^*를 찾기 위해서 식 (2.8)을 x에 관해서 1차 미분하여 0으로 놓고 풀면 다음을 얻을 수 있다.

$$c_2 h(w + x) + \bar{F}(w)\left\{xh(w + x) - \int_w^{w+x} h(t)dt\right\} = \frac{c_1}{(c_m + c_{f,m})}. \tag{2.9}$$

여기서, $c_1 = \frac{c_r}{w}(I(w) - I(v)) + c_r\bar{F}(w) + c_{f,w}F(w)$이고, $c_2 = I(w) + w\bar{F}(w)$이다.

정리 2.1 시스템의 고장률함수 $h(t)$가 순증가함수(strictly increasing function)라고 하자. 이때, $c_2 h(w) \geq c_1/(c_m + c_{f,m})$이면 최적의 보전기간은 $x^* = 0$이고, $c_2 h(w) < c_1/(c_m + c_{f,m})$이면 최적의 보전기간은 식 (2.9)를 만족하는 x^*이다.

정리 2.1은 Jung, Lee와 Park(2000)의 논문을 참조하면 쉽게 증명할 수 있으며, 이 정리로부터 식 (2.9)를 만족하는 x의 값이 식 (2.8)의 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 보전기간 x^*가 되므로 시스템을 $w + x^*$에서 교체하는 것이 최적의 교체정책이 됨을 알 수 있다.

3. 비재생혼합보증에서의 최적의 교체정책

비재생혼합보증에서도 재생혼합보증에서와 동일하게 무료보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생하면 시스템을 무료로 교체해 주고, 비례보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생하면 시스템의 사용기간에 비례한 교체비용의 일부를 소비자가 부담하도록 하고 시스템을 교체한다. 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 y라 하고, 이 값은 주어진다고 하자. 그리고, 보증기간 동안에 발생한 교체 횟수를 l이라고 하자. 만약 $y = w$이면 $l = 0$이 되고, $l = 0$이면 $y = w$가 된다.

3.1. 단위시간당 기대비용

비재생혼합보증에서는 보증기간 동안에 시스템이 고장나더라도 보증기간이 처음부터 다시 시작되지 않으므로 기대순환길이는 $E\{T(x)\} = w+x$가 된다. 비재생혼합보증에서 시스템을 운용하는데 발생하는 기대비용 $E\{C(x)\}$도 식 (2.1)과 같이 네 가지 기대비용의 합으로 구할 수 있다. 혼합보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생하여 교체할 경우 소비자가 부담하게 되는 기대비용 $E(C_{V,W})$는 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명인 y를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E(C_{V,W}|y) = \begin{cases} c_r \frac{(w-v)-y}{(w-v)}, & 0 \le y < w - v \\ 0, & y \ge w - v. \end{cases} \tag{3.1}$$

보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명이 y이기 때문에 보증기간이 종료된 이후에 발생하는 고장에 대하여 최소수리를 하는데 발생하는 기대비용은 $(y, y + x)$동안 시스템에 이루어지는 최소수리의 평균횟수를 이용하면

$$E(C_M|y) = c_m \int_y^{y+x} h(t)dt \tag{3.2}$$

이 되고, $y + x$에서의 교체비용은 소비자가 부담하여야 하므로 $E(C_R)$은 다음과 같다.

$$E(C_R) = c_r. \tag{3.3}$$

그리고, 보증기간 동안에 발생하는 시스템의 고장과 보전기간 동안에 발생하는 시스템의 고장으로 야기되는 기대비용은 l과 y 그리고 $(y, y + x)$동안 시스템에 이루어지는 최소수리

의 평균횟수를 이용하면

$$E(C_F|y,l) = c_{f,w}l + c_{f,m}\int_y^{y+x} h(t)dt \tag{3.4}$$

이 된다. 여기서, c_r은 시스템의 교체비용이고, c_m은 시스템의 최소수리비용이며, $c_{f,w}$는 보증기간 동안에 발생하는 시스템의 고장으로 소비자가 부담하게 되는 비용이다. 그리고, $c_{f,m}$은 보증기간이 종료된 이후에 보전기간 동안 발생하는 시스템의 고장으로 소비자가 부담하게 되는 비용이다.

식 (3.1)부터 식 (3.4)를 이용하면 비재생혼합보증에서 시스템을 운용하기 위한 단위시간당 기대비용은 다음과 같이 구해진다.

$$C_{NW}(x|y,l) = \frac{1}{w+x}\left[c_3 + (c_m + c_{f,m})\int_y^{y+x} h(t)dt\right]. \tag{3.5}$$

여기서, $0 \le y < w - v$인 경우 $c_3 = c_r\frac{(w-v)-y}{(w-v)} + c_r + c_{f,w}l$이고, $y \ge w - v$인 경우 $c_3 = c_r + c_{f,w}l$이다.

3.2. 최적의 교체정책

식 (3.5)에 주어진 단위시간당 기대비용을 최소화하는 시스템의 최적의 보전기간 x^*를 찾기 위해서 이 식을 x에 관해서 1차 미분하여 0으로 놓고 풀면 다음을 얻을 수 있다.

$$(w+x)h(y+x) - \int_y^{y+x} h(t)dt = \frac{c_3}{(c_m + c_{f,m})}. \tag{3.6}$$

다음 정리 3.1은 식 (3.6)을 만족하는 x값을 찾으면, 이는 식 (3.5)의 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 보전기간이 된다는 것이다.

정리 3.1 시스템의 고장률함수 $h(t)$가 순증가함수라고 하자. 이 때, $wh(y) \ge c_3/(c_m + c_{f,m})$이면 최적의 보전기간은 $x^* = 0$이고 $wh(y) < c_3/(c_m + c_{f,m})$이면 최적의 보전기간은 식 (3.6)을 만족하는 x^*이다.

4. 수치적 예

본 논문에서 고려된 교체모형에 대한 단위시간당 기대비용 및 최적의 보전기간을 설명하기 위해서 시스템의 고장시간 T가 와이블분포를 한다고 가정하면 시스템의 고장률함수는 다음과 같다.

$$h(t) = \beta\lambda^\beta t^{\beta-1}, \ \ \beta > 1, \ \ \alpha > 0, \ \ t \ge 0.$$

이 때, 형태모수(shape parameter) β와 무료보증기간 v, 그리고 교체비용 c_r의 변화에 따른 최적의 보전기간 x^*와 이 때의 단위시간당 기대비용을 구하고 이들의 변화를 살펴보고자

한다. 먼저, $\lambda = 1$인 경우에 재생혼합보증에서의 단위시간당 기대비용을 최소화하는 시스템의 최적의 보전기간 x^*는 식 (2.9)로부터

$$c_2\beta(w+x)^{\beta-1} + e^{-w^\beta}\{x\beta(w+x)^{\beta-1} - ((w+x)^\beta - w^\beta)\} = \frac{c_1}{(c_m + c_{f,m})} \tag{4.1}$$

를 만족하는 x값이 되며, 이 때의 단위시간당 기대비용은 식 (2.8)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$C_{RW}(x^*) = \frac{c_1 + (c_m + c_{f,m})e^{-w^\beta}((w+x^*)^\beta - w^\beta)}{I(w) + (w+x^*)e^{-w^\beta}}. \tag{4.2}$$

여기서, $c_1 = \frac{c_r}{w}(I(w) - I(v)) + c_r e^{-w^\beta} + c_{f,w}(1 - e^{-w^\beta})$이고, $c_2 = I(w) + we^{-w^\beta}$이다. 또한, $\lambda = 1$인 경우에 비재생혼합보증에서의 단위시간당 기대비용을 최소화하는 시스템의 최적의 보전기간 x^*는 식 (3.6)으로부터

$$(w+x)\beta(y+x)^{\beta-1} - ((y+x)^\beta - y^\beta) = \frac{c_3}{(c_m + c_{f,m})} \tag{4.3}$$

를 만족하는 x값이 되며, 이 때의 단위시간당 기대비용은 식 (3.5)로부터

$$C_{NW}(x^*|y,l) = \frac{1}{w+x^*}\left[c_3 + (c_m + c_{f,m})((y+x^*)^\beta - y^\beta)\right] \tag{4.4}$$

이 된다. 여기서, $0 \le y < w - v$인 경우 $c_3 = c_r\frac{(w-v)-y}{(w-v)} + c_r + c_{f,w}l$이고, $y \ge w - v$인 경우 $c_3 = c_r + c_{f,w}l$이다.

표 1에는 식 (4.1)과 식 (4.2)로부터 구한 재생혼합보증에서의 최적의 보전기간 x^*와 이 때의 단위시간당 기대비용이 나타나 있다. 예를 들어, $\beta = 2$, $v = 0.1$, $c_r = 3$일 때, 재생혼합보증기간이 종료된 이후에 3.60558($= w + x^*$)에서 시스템을 새 것으로 교체하는 것이 단위시간당 기대비용을 최소화하게 되며, 이 때의 단위시간당 기대비용은 2.16335가 된다는 것이다.

표 1로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 먼저, v와 c_r이 고정되어 있을 때, β가 증가하면 시스템의 최적의 보전기간 x^*는 감소하고 단위시간당 기대비용 $C_{RW}(x^*)$은 증가함을 알 수 있다. 이는 β가 증가하면 시스템의 고장률이 커지기 때문이다. 또한, β와 c_r이 주어져 있을 때, 무료보증기간 v가 증가함에 따라 x^*와 $C_{RW}(x^*)$가 감소함을 알 수 있으며, β와 v가 고정되어 있을 때 교체비용 c_r이 증가하면 x^*와 $C_{RW}(x^*)$가 증가함을 알 수 있다.

표 2에는 식 (4.3)과 식 (4.4)로부터 구한 비재생혼합보증에서의 최적의 보전기간 x^*와 이 때의 단위시간당 기대비용이 나타나 있다. β와 c_r의 변화에 따른 최적의 보전기간 x^*와 단위시간당 기대비용 $C_{NW}(x^*|y,l)$가 변화하는 형태는 재생혼합보증에서와 동일하며, β와 c_r이 고정되어 있을 때, y가 증가하면 x^*와 $C_{NW}(x^*|y,l)$가 감소함을 알 수 있다.

표 1. 재생혼합보증에서의 최적의 보전기간 및 단위시간당 기대비용
($w = 1$, $\lambda = 1$, $c_m = 0.1$, $c_{f,w} = 0.2$, $c_{f,m} = 0.2$)

β	v		c_r 3	5	10	15	20
2	0.1	x^*	2.60558	3.88695	6.26545	8.10010	9.65004
		$C_{RW}(x^*)$	2.16335	2.93217	4.35927	5.46006	6.39002
	0.3	x^*	2.55726	3.82384	6.17542	7.98950	9.52214
		$C_{RW}(x^*)$	2.13436	2.89431	4.30525	5.39370	6.31329
	0.5	x^*	2.39185	3.60771	5.86693	7.61051	9.08383
		$C_{RW}(x^*)$	2.03511	2.76463	4.12016	5.16631	6.05030
	0.7	x^*	2.07310	3.19062	5.27094	6.87801	8.23653
		$C_{RW}(x^*)$	1.84386	2.51437	3.76257	4.72681	5.54192
	0.9	x^*	1.60214	2.57252	4.38562	5.78904	6.97636
		$C_{RW}(x^*)$	1.56128	2.14351	3.23137	4.07342	4.78581
3	0.1	x^*	0.76272	1.15641	1.81919	2.28841	2.66363
		$C_{RW}(x^*)$	2.79647	4.18508	7.15304	9.73226	12.0800
	0.3	x^*	0.75758	1.15022	1.81129	2.27931	2.65358
		$C_{RW}(x^*)$	2.78017	4.16111	7.11300	9.67849	12.0138
	0.5	x^*	0.72417	1.11005	1.75996	2.22021	2.58831
		$C_{RW}(x^*)$	2.67549	4.00707	6.85566	9.33278	11.5884
	0.7	x^*	0.62521	0.99093	1.60767	2.04479	2.39453
		$C_{RW}(x^*)$	2.37717	3.56743	6.11996	8.34365	10.3705
	0.9	x^*	0.42651	0.75129	1.30065	1.69081	2.00330
		$C_{RW}(x^*)$	1.83142	2.76031	4.76369	6.51641	8.11785
4	0.1	x^*	0.35663	0.57146	0.91450	1.14647	1.32672
		$C_{RW}(x^*)$	2.99618	4.65682	8.42068	11.8674	15.1151
	0.3	x^*	0.35574	0.57043	0.91326	1.14509	1.32523
		$C_{RW}(x^*)$	2.99026	4.64768	8.40436	11.8446	15.0862
	0.5	x^*	0.34532	0.55845	0.89885	1.12905	1.30793
		$C_{RW}(x^*)$	2.92182	4.54214	8.21580	11.5808	14.7519
	0.7	x^*	0.29892	0.50511	0.83462	1.05756	1.23084
		$C_{RW}(x^*)$	2.62982	4.09156	7.41006	10.4529	13.3224
	0.9	x^*	0.17286	0.36002	0.65970	0.86273	1.02065
		$C_{RW}(x^*)$	1.93604	3.01865	5.48616	7.75591	9.90047

표 2. 비재생혼합보증에서의 최적의 보전기간 및 단위시간당 기대비용
($w = 1$, $v = 0.3$, $\lambda = 1$, $l = 1$, $c_m = 0.1$, $c_{f,w} = 0.2$, $c_{f,m} = 0.2$)

β	y		c_r 3	5	10	15	20
2	0.1	x^*	3.47639	4.69377	6.96026	8.71204	10.1927
		$C_{NW}(x^*\|y,l)$	2.14584	2.87626	4.23637	5.28723	6.17561
	0.3	x^*	3.09646	4.22084	6.31079	7.92402	9.28730
		$C_{NW}(x^*\|y,l)$	2.03787	2.71250	3.96647	4.93441	5.75238
	0.5	x^*	2.67747	3.70056	5.59726	7.05930	8.29414
		$C_{NW}(x^*\|y,l)$	1.90648	2.52033	3.65835	4.53558	5.27648
3	0.1	x^*	1.65893	2.03106	2.65924	3.10430	3.46021
		$C_{NW}(x^*\|y,l)$	2.78446	4.08729	6.85205	9.24078	11.4076
	0.3	x^*	1.41857	1.77268	2.36966	2.79217	3.12986
		$C_{NW}(x^*\|y,l)$	2.65815	3.86641	6.41437	8.60538	10.5875
	0.5	x^*	1.16541	1.49901	2.06030	2.45701	2.77385
		$C_{NW}(x^*\|y,l)$	2.49624	3.59643	5.89961	7.86951	9.64628
4	0.1	x^*	1.25839	1.46256	1.78989	2.01150	2.18371
		$C_{NW}(x^*\|y,l)$	3.00783	4.57820	8.10013	11.2968	14.2924
	0.3	x^*	1.03916	1.23605	1.55163	1.76517	1.93103
		$C_{NW}(x^*\|y,l)$	2.88192	4.34910	7.61800	10.5693	13.3260
	0.5	x^*	0.81348	1.00176	1.30340	1.50738	1.66575
		$C_{NW}(x^*\|y,l)$	2.71926	4.06428	7.03809	9.70663	12.1901

5. 결론

보증기간을 갖는 시스템에 대한 최적의 보전정책은 생산자와 소비자 측면의 정책으로 구분할 수 있으며 본 논문에서는 소비자 측면에서의 보전정책인 최적의 교체정책을 고려하였다. 즉, 혼합보증기간이 있는 수리 가능한 시스템에 대하여 보증기간이 종료된 이후의 최적의 교체정책을 설정하기 위한 방법으로 재생혼합보증과 비재생혼합보증을 갖는 경우에 대하여 각각 단위시간당 기대비용을 구했으며, 이를 최소화하는 최적의 보전기간을 결정하였다. 그리고, 시스템의 고장시간이 와이블분포일 때 무료보증기간과 형태모수 β, 그리고 교체비용 c_r 등의 변화에 따른 최적의 보전기간과 단위시간당 기대비용을 구하여 이들의 변화를 살펴보았다.

참고문헌

[1] Boland, P. J. (1982). Periodic replacement when minimal repair cost 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] Jung, G. M., Lee, J. H. and Park, D. H. (2000). Periodic preventive maintenance policies following the expiration of warranty, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, Vol. **17**, 17-26.

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

[6] 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.

[2001년 10월 접수, 2002년 1월 채택]

Optimal Replacement Policy for a Repairable System with Combination Warranty

Gi Mun Jung [1)]

ABSTRACT

In this paper we present the optimal replacement policies following the expiration of combination warranty. We consider two types of combination warranty policies: renewing warranty and non-renewing warranty. The criterion used to determine the optimal replacement period is the expected cost rate per unit time from the user's perspective. The optimal maintenance period following the expiration of combination warranty is obtained. Some numerical examples are presented for illustrative purpose.

Keywords: Replacement Policy, Maintenance Period, Renewing Combination Warranty, Non-renewing Combination Warranty, Minimal Repair, Hazard Rate Function.

1) Research Professor, BK21 Education Center for Transports in Systems, Chosun University.
E-mail: jgm@mail.chosun.ac.kr