

비재생무료교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전모형[†]

정기문¹

¹경성대학교 정보통계학과

접수 2011년 6월 18일, 수정 2011년 7월 13일, 게재확정 2011년 7월 22일

요약

본 논문에서는 비재생무료교체-수리보증이 종료된 이후의 수리가 가능한 시스템에 대한 주기적인 예방보전모형을 고려한다. 이러한 예방보전모형에 대하여 기대순환길이, 총기대비용 그리고 단위시간당 기대비용을 각각 유도하고자 한다. 또한 유도된 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 예방보전주기와 예방보전횟수를 결정하는 방법에 대하여 자세히 설명한다. 끝으로 고장시간이 와이블분포를 따르는 경우에 최적의 주기적 예방보전정책을 결정하여 본다.

주요용어: 단위시간당 기대비용, 비재생무료교체보증, 비재생무료교체-수리보증, 비재생무료수리보증, 예방보전정책.

1. 서론

일반적으로 수리가 가능한 시스템에는 다양한 형태의 보증정책 (warranty policy)이 주어지기 때문에, 보증기간이 제공되는 시스템에 대한 사용자 측면의 보전정책 (maintenance policy)과 관련된 연구가 최근까지 활발하게 진행되고 있다.

Blischke와 Murthy (1994, 1996)는 다양한 형태의 보증정책에 대하여 자세히 설명하였으며, Sahin과 Polatoglu (1996)는 보증기간에서 시스템에 고장이 발생되었을 경우에 시스템을 새 것으로 교체해 주고 보증기간이 재생되는 재생교체보증 (renewing replacement warranty)과 교체는 해 주지만 보증기간은 재생되지 않는 비재생교체보증 (non-renewing replacement warranty; NRW)이 각각 제공되는 수리가 가능한 시스템에 대하여 사용자 측면의 교체정책 (replacement policy)에 대하여 살펴보았다. 그리고 Jung과 Park (2003)은 Sahin과 Polatoglu (1996)가 제안한 보증기간이 종료된 이후의 교체정책을 예방보전정책으로 확장하였다. 또한, Jung (2006a)은 예방보전의 비용을 예방보전의 효과에 의존하는 비용으로 가정하여 Jung과 Park (2003)의 연구를 확장한 예방보전정책을 제안하였고, Chien (2008)은 재생무료교체보증 (renewing free replacement warranty; NFRW)이 주어진 시스템에 대하여 일반적인 기령교체모형 (age replacement model)을 고려하였다. 한편, 비용뿐만이 아니라 시스템의 비가동시간도 함께 고려하여 최적의 보전정책을 제안하는 연구도 진행되고 있다 (Jung 등, 2003; Jung 등, 2008; Jung, 2010a).

Yeh 등 (2007)은 가장 일반적인 보증정책 중의 하나인 비재생무료수리보증 (non-renewing free repair warranty; NFRW)이 주어진 수리가 가능한 시스템에 대한 교체정책에 대하여 살펴보았다. 즉, 보증기간에서 시스템에 고장이 발생하면 최소수리 (minimal repair)가 이루어지며, 보증기간은 재생되

[†] 이 논문은 2011학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

¹ (608-736) 부산광역시 남구 대연3동 314-79, 경성대학교 정보통계학과, 부교수. E-mail: kmjung@ks.ac.kr

지 않는 무료수리보증에 대하여 살펴보았으며, Jung (2009)은 비재생무료최소수리보증 (non-renewing free minimal repair warranty; NFMW)이 주어진 수리가 가능한 시스템에 대하여 Wu와 Clements-Croome (2005)과 Jung (2006b)의 보전모형을 이용한 사용자 측면에서의 예방보전모형을 고려했다.

한편, 위에서 언급된 선행연구들에서는 교체보증 (replacement warranty)과 최소수리보증 (minimal repair warranty)이 각각 독립적으로 가정되어 연구가 진행되었으나, Jung (2010b)은 교체보증과 수리보증을 모두 포함하는 일반적인 보증정책인 비재생무료교체-수리보증 (non-renewing free replacement-repair warranty; NFRRW)이 종료된 이후의 교체모형에 대하여 고려했다. 그러나 시스템의 사용자는 시스템의 고장률을 일정수준으로 감소시키기 위하여 일반적으로 예방보전활동을 수행하게 되므로 Jung (2010b)의 교체정책을 예방보전정책 (preventive maintenance policy)으로 확장할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 비재생무료교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대하여 살펴보고자 한다. 즉, 수리가 가능한 시스템에는 비재생무료교체-수리보증이 주어지며, 보증기간이 종료된 이후에는 시스템에 고장이 발생하면 최소수리가 이루어진다. 그리고 보전기간 동안에는 τ 시점마다 주기적으로 예방보전활동이 이루어지며, N 번째 예방보전주기에서는 사용자에게 의해서 새로운 시스템으로 교체된다. 이러한 예방보전모형에 대하여 총기대비용 (expected total cost), 기대순환길이 (expected cycle length) 그리고 단위시간당 기대비용 (expected cost rate per unit time)을 구하고, 최적의 예방보전정책에 대하여 설명하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 비재생무료교체보증과 비재생무료최소수리보증을 포함하는 비재생무료교체-수리보증에 대하여 살펴보고자 한다. 3절에서는 2절에서 설명한 비재생무료교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 단위시간당 기대비용을 구하고자 한다. 그리고 구해진 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 예방보전정책에 대하여 살펴보고자 한다. 끝으로 4절에서는 본 논문에서 고려된 예방보전모형을 자세히 설명하기 위하여 수치적 예를 보이고자 한다.

2. 비재생무료교체-수리보증

이 절에서는 Jung (2010b)에 의해서 설명된 비재생무료교체-수리보증에 대하여 살펴보고자 한다. 이를 위해서 비재생무료교체보증과 비재생무료최소수리보증에 대하여 먼저 소개하고, 이에 근거한 비재생무료교체-수리보증에 대하여 설명하고자 한다.

비재생무료교체보증은 시스템에 제공되는 가장 일반적인 보증정책 중의 하나로써 지금까지 많은 연구가들에 의해서 다양한 형태로 연구가 진행되고 있다. 특히, Sahin과 Polatoglu (1996)는 비재생무료교체보증이 종료된 이후의 교체정책에 대하여 고려했으며, Jung과 park (2003)은 비재생무료교체보증이 종료된 이후의 예방보전정책에 대하여 살펴보았다. 비재생무료교체보증에서는 보증기간 동안 시스템에 고장이 발생되면 시스템을 무료로 교체 해 주지만, 주어진 보증기간은 다시 재생되지 않고 잔여 보증기간만이 유효하게 된다.

이러한 비재생무료교체보증에서는 보증기간에서 시스템에 고장이 발생되면 새 것으로 교체를 해 주지만, 비재생무료최소수리보증에서는 보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생되면 새 것으로 교체하는 것이 아니라 최소수리를 무료로 수행하여 준다. 그리고 보증기간은 다시 재생되지 않고 잔여 보증기간만이 유효하게 된다. 최근에 Yeh 등 (2007)은 이러한 비재생무료최소수리보증이 주어진 시스템에 대하여 교체모형을 제안하였다. 또한 Jung (2009)은 사용자 측면에서 비재생무료최소수리보증이 종료된 이후의 예방보전모형을 고려했다.

그러나 생산자 측면에서 살펴보면 교체비용이 최소수리 비용에 비하여 매우 크기 때문에 보증기간의 초기 일정부분까지만 새 시스템으로 교체를 해 주고, 그 이후의 잔여보증기간 동안에는 최소수리

를 수행해 주는 보증정책을 고려할 수 있을 것이다. 따라서 비재생무료교체-수리보증에서는 교체보증기간 $(0, w_{FR})$ 과 최소수리보증기간 (w_{FR}, w) 이 주어지며, 교체보증기간 동안에는 무료로 시스템을 교체 해 주고, 최소수리보증기간 동안에는 최소수리를 수행하여 주게 된다 (Jung, 2010b). 여기서, $w = w_{FR} + w_{FM}$ 이다. 물론, 주어진 보증기간은 다시 재생되지 않고 잔여 보증기간만이 유효하게 된다. Jung (2010b)은 비재생무료교체-수리보증이 종료된 이후의 시스템에 대한 최적의 교체정책에 대하여 살펴보았다. 한편, 비재생무료교체-수리보증에서 교체보증기간이 없으면 즉, $w_{FR} = 0$ 이면 비재생무료최소수리보증이 되고, 수리보증기간이 없으면 즉, $w_{FM} = 0$ 이면 비재생무료교체보증이 됨을 알 수 있다. 따라서 비재생무료교체-수리보증은 비재생무료교체보증과 비재생무료최소수리보증을 포함하는 일반적인 형태의 비재생무료보증이 된다고 할 수 있다.

3. NFRRW 이후의 주기적 예방보전정책

3.1. 예방보전모형

본 절에서는 2절에서 소개한 비재생무료교체-수리보증이 종료된 이후의 사용자 측면의 예방보전정책에 대하여 살펴보려고 하는데, 이를 위해서 다음과 같은 사항들을 가정한다.

(가정)

- i. 시스템에는 비재생무료교체-수리보증 w 가 주어지고, 무료교체보증기간과 무료수리보증기간을 나타내는 w_{FR} 과 w_{FM} 이 각각 주어진다. 단, $w = w_{FR} + w_{FM}$ 이 된다.
- ii. 예방보전 (preventive maintenance; PM)은 $k\tau$, $k = 1, 2, \dots, N$,에서 주기적으로 이루어지며, x 는 PM의 주기이고, N 은 PM의 횟수이다. 그리고 N 번째 PM주기에서는 시스템이 새 것으로 교체된다.
- iii. $h(t)$ 는 PM이 이루어지지 않을 때의 고장률함수로서 순증가함수이다.
- iv. k 번째 PM이 이루어진 이후의 시스템의 고장률함수는 다음과 같이 Canfield (1986)가 제안한 PM 하에서의 고장률함수를 갖는다.

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

여기서, η 는 예방보전의 수준을 표현하는 인자로써 $0 < \eta \leq \tau$ 이다.

- v. 연속되는 예방보전 주기 사이에서 고장이 발생되면 최소수리를 수행한다.
- vi. 무료교체보증기간이 종료되는 시점에서의 시스템의 수명은 y 이다.
- vii. 무료교체보증기간 동안에 시스템에는 k 번의 고장이 발생한다.
- viii. 예방보전기간 동안에는 시스템에 주기적으로 예방보전 활동이 이루어진다.
- ix. 최소수리 및 교체를 수행하기 위한 시간은 고려하지 않는다.
- x. 보증기간 또는 보전기간에서 발생하는 고장에 따른 비용은 c_d , 예방보전기간에서 이루어지는 예방보전비용은 c_p , 예방보전기간에서의 최소수리비용은 c_m 이고 교체비용은 c_r 이다.

위와 같은 가정을 통해서 비재생무료교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전모형을 고려할 수 있다. 즉, 시스템에는 비재생무료교체-수리보증이 주어져서 무료교체보증기간 $(0, w_{FR})$ 에서는 시스템에 고장이 발생하면 무료로 시스템을 교체해 주고, 무료최소수리보증기간 (w_{FR}, w) 에서는 시스템에 고장이 발

생되면 무료로 최소수리를 수행하여 주게 된다. 물론, 주어진 보증기간은 다시 재생되지 않고 잔여 보증기간만이 유효하게 된다. 또한 보증기간이 종료된 이후에 시스템에는 주기적으로 예방보전활동이 이루어지며, 만약 시스템에 고장이 발생하면 사용자에게 의해서 최소수리가 수행된다. 그리고 N 번째 예방보전 주기에서는 새로운 시스템으로 교체된다.

3.2. 단위시간당 기대비용

3.1절에서 설명한 예방보전모형에 대한 최적의 보전정책을 설정하기 위해서는 단위시간당 기대비용을 결정하여야 한다. 그리고 단위시간당 기대비용을 구하기 위해서는 총기대비용과 기대순환길이를 구해야 한다. 우선, 비재생무료교체-수리보증에서는 주어진 보증기간에서 시스템에 고장이 발생하여도 보증기간은 재생되지 않고 교체 또는 최소수리가 수행되기 때문에, 시스템의 기대순환길이는 다음과 같다.

$$ECL(\tau, N) = w + N\tau. \quad (3.1)$$

한편, 총기대비용 $ETC(\tau, N)$ 은 비재생무료교체-수리보증 동안에 발생하는 기대비용 $E(W)$ 과 보전기간 동안에 발생하는 기대비용 $E(M)$ 으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} ETC(\tau, N) &= E(W) + E(M) \\ &= c_d \left(k + \int_y^{y+w_{FM}} h(t) dt \right) + (c_d + c_m) \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{i=1}^k \{h((i-1)(\tau-\eta) + (\tau+y)) \right. \\ &\quad \left. - h(i(\tau-\eta) + y)\} \tau + \sum_{k=0}^{N-1} \int_{k\tau+y}^{(k+1)\tau+y} h(t - k\eta) dt \right) + (N-1)c_p + c_r. \end{aligned} \quad (3.2)$$

여기서, c_d 는 보증기간 또는 보전기간에서 발생하는 고장에 따른 비용이고, c_m 은 보전기간에서의 최소수리비용, c_p 는 예방보전비용 그리고 c_r 은 보전기간이 종료되는 시점에서 새로운 시스템으로 교체하기 위한 교체비용이다. 따라서 식 (3.1)의 기대순환길이와 식 (3.2)의 총기대비용으로부터 비재생무료교체-수리보증 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 단위시간당 기대비용을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} C(\tau, N) &= \frac{1}{w + N\tau} \left\{ c_d \left(k + \int_y^{y+w_{FM}} h(t) dt \right) + (c_d + c_m) \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{i=1}^k \{h((i-1)(\tau-\eta) + (\tau+y+w_{FM})) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - h(i(\tau-\eta) + (y+w_{FM}))\} \tau + \sum_{k=0}^{N-1} \int_{k\tau+y+w_{FM}}^{(k+1)\tau+y+w_{FM}} h(t - k\eta) dt \right) + (N-1)c_p + c_r \right\}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

이제, 식 (3.3)에 주어져 있는 단위시간당 기대비용과 보증정책이 종료된 이후의 교체정책 및 예방보전정책과 관련된 기존의 연구결과와의 관계를 살펴보기 위해서 아래와 같은 몇 가지 특별한 경우를 고려해 보고자한다.

예제 3.1 ($w_{FM} = 0$ 인 경우)

본 논문에서 고려한 모형에서 $w_{FM} = 0$ 이면 무료수리보증기간이 없는 경우가 되므로 비재생무료교체 보증이 종료된 이후의 예방보전모형으로 축소되는데, 이는 Jung과 Park (2003)이 고려한 모형이 된다. 따라서 식 (3.3)의 단위시간당 기대비용은 다음과 같이 되며, 이는 Jung과 Park (2003)에서 구해진 단위시간당 기대비용과 동일하게 됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} C(\tau, N) &= \frac{1}{w + N\tau} \left\{ kc_d + (c_d + c_m) \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{i=1}^k \{h((i-1)(\tau-\eta) + (\tau+y)) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - h(i(\tau-\eta) + y)\} \tau + \sum_{k=0}^{N-1} \int_{k\tau+y}^{(k+1)\tau+y} h(t - k\eta) dt \right) + (N-1)c_p + c_r \right\}. \end{aligned}$$

예제 3.2 ($N = 1$ 인 경우)

본 논문에서 고려한 모형에서 $N = 1$ 이면 예방보전활동이 없는 경우가 되므로 비재생무료교체-수리보증이 종료된 이후의 교체모형으로 축소되는데, 이는 Jung (2010b)이 고려한 모형이 된다. 그리고 식 (3.3)의 단위시간당 기대비용은 다음과 같이 되며, Jung (2010b)의 연구에서 구해진 단위시간당 기대비용과 동일하게 된다.

$$C(\tau, N) = \frac{1}{w+x} \left\{ c_d \left(k + \int_y^{y+w_{FM}} h(t) dt \right) + (c_d + c_m) \int_{y+w_{FM}}^{y+w_{FM}+\tau} h(t) dt + c_r \right\}.$$

예제 3.3 ($w_{FM} = 0$ 이고 $N = 1$ 인 경우)

본 논문에서 고려한 모형에서 $w_{FM} = 0$ 이고 $N = 1$ 이면 무료수리보증기간이 없으면서 예방보전활동이 없는 경우가 되므로 비재생무료교체보증이 종료된 이후의 교체모형으로 축소되는데, 이는 Sahin과 Polatoglu (1996)가 고려한 교체모형이 된다. 따라서 식 (3.3)의 단위시간당 기대비용은 다음과 같이 되고, 이는 Sahin과 Polatoglu (1996)에서 구해진 단위시간당 기대비용과 동일하게 된다는 사실을 알 수 있다.

$$C(\tau, N) = \frac{1}{w+\tau} \left\{ kc_d + (c_d + c_m) \int_y^{y+\tau} h(t) dt + c_r \right\}.$$

예제 3.4 ($w_{FR} = 0$ 이고 $N = 1$ 인 경우)

본 논문에서 고려한 모형에서 $w_{FR} = 0$ 이고 $N = 1$ 이면 무료교체보증기간이 없으면서 예방보전활동이 없는 경우가 되므로 비재생무료수리보증이 종료된 이후의 교체모형으로 축소되는데, 이는 Yeh 등 (2007)이 고려한 모형이 된다. 그리고 식 (3.3)의 단위시간당 기대비용은 다음과 같이 되며, 이는 Yeh 등 (2007)에서 구해진 단위시간당 기대비용과 동일하게 된다.

$$C(\tau, N) = \frac{1}{w+\tau} \left\{ c_d \left(k + \int_0^w h(t) dt \right) + (c_d + c_m) \int_w^{w+\tau} h(t) dt + c_r \right\}.$$

3.3. 최적의 예방보전정책

이제, 비재생무료교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 사용자 측면의 단위시간당 기대비용인 식 (3.3)을 최소화하는 최적의 예방보전 주기와 횟수를 결정하는 문제를 다루고자 한다. 우선, 최적의 예방보전 주기 τ^* 를 찾기 위해서 식 (3.3)을 τ 에 관해서 1차 미분한 다음 0으로 놓고 풀면 다음을 얻을 수 있다.

$$w(a_1 + \tau a_2 + a_3) + N(\tau^2 a_2 + \tau a_3 - a_4) = Nc_0 / (c_d + c_m). \quad (3.4)$$

식 (3.4)에서 c_0, a_1, a_2, a_3, a_4 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} c_0 &= c_d \left(k + \int_y^{y+w_{FM}} h(t) dt \right) + (N-1)c_p + c_r, \\ a_1 &= \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{i=1}^k \{ h((i-1)(\tau-\eta) + (\tau+y+w_{FM})) - h(i(\tau-\eta) + (y+w_{FM})) \}, \\ a_2 &= \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{i=1}^k \{ h'((i-1)(\tau-\eta) + (\tau+y+w_{FM})) - h'(i(\tau-\eta) + (y+w_{FM})) \} i, \\ a_3 &= \sum_{k=0}^{N-1} \{ (k+1)h((k+1)\tau + y + w_{FM} - k\eta) - kh(k\tau + y + w_{FM} - k\eta) \}, \\ a_4 &= \sum_{k=0}^{N-1} \int_{k\tau+y+w_{FM}}^{(k+1)\tau+y+w_{FM}} h(t - k\eta) dt. \end{aligned}$$

만약, 시스템의 고장률함수 $h(t)$ 가 볼록인 순증가 함수이고 N 의 값이 주어지면, 식 (3.4)를 만족하는 최적의 주기 τ^* 의 값이 항상 유일하게 존재한다. 그러나 이와 같이 구해지는 τ^* 는 N 의 값에 의존하게

되므로 식 (3.3)을 만족하는 최적의 주기 τ^* 와 최적의 예방보전 횟수 N 를 동시에 찾아야만 한다. 이를 위해서 식 (3.4)를 만족하는 τ 가 N 의 함수가 되기 때문에 이를 τ_N 이라고 하고, 이 값을 식 (3.3)의 τ 대신에 대입하면, $C(\tau_N, N)$ 은 N 만의 함수가 되므로 최적의 횟수 N^* 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N^* = \min_N C(\tau_N, N), \quad N = 1, 2, 3, \dots \quad (3.5)$$

따라서 식 (3.3)의 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 횟수는 식 (3.5)에서 구해진 N^* 이고, 이 때 최적의 주기 τ^* 는 τ_{N^*} 가 된다. 결국, 비재생무료교체-수리보증이 종료된 이후에 τ^* 시점마다 주기적으로 예방보전 활동을 수행하고, N^* 번째 예방보전주기에서는 사용자에게 의해서 새로운 시스템으로 교체하는 것이 사용자측면에서 최적의 예방보전정책이 되고, 그 때의 단위시간당 기대비용은 $C(\tau^*, N^*)$ 가 된다.

4. 수치적 예

본 논문에서 고려된 예방보전모형에 대한 최적의 예방보전정책을 설명하기 위해서 시스템의 고장시간 T 가 척도모수 (scale parameter)가 1인 와이불분포 (Weibull distribution)를 따른다고 가정하자. 즉, 가정된 시스템의 고장시간 T 의 확률밀도함수는 $f(t) = \beta t^{\beta-1} \exp(-t^\beta)$ 이고, 고장률함수는 $h(t) = \beta t^{\beta-1}$ 이 된다. 그리고 보증기간은 $w = 0.5$, 보증기간 또는 보전기간에서 발생하는 고장에 따른 비용은 $c_d = 1$, 보전기간 동안에 수행되는 예방보전비용은 $c_p = 2$, 보전기간에서의 최소수리비용은 $c_m = 3$, $k = 1$ 그리고 예방보전의 수준은 $\eta = \tau$ 라고 가정하자. 이때, 식 (3.3)에 주어져 있는 비재생무료교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 단위시간당 기대비용을 구할 수 있으며, 이를 최소화하는 최적의 예방보전 주기와 횟수를 결정할 수 있다. 표 4.1, 표 4.2 그리고 표 4.3에는 $\beta = 3$, $\beta = 4$ 그리고 $\beta = 5$ 인 경우에 대하여 각각 비재생무료교체-수리보증이 종료된 이후의 최적의 예방보전정책과 그 때의 단위시간당 기대비용이 나타나 있다. 표 4.1에서 $\beta = 4$, $w_{FR} = 0.10$, $y = 2w_{FR}/4 = 0.05$, $c_r = 20$ 일 때, 식 (3.3)을 최소화하는 최적의 예방보전 주기는 0.42559이고 예방보전 횟수는 2가 됨을 알 수 있는데, 이는 비재생무료교체-수리보증이 종료된 이후에 0.42559시점에서 첫 번째 예방보전을 수행하고, 두 번째 예방보전 주기에서는 새로운 시스템으로 교체하면 단위시간당 기대비용이 23.21347이 되고, 이것이 기대비용 측면에서 최적의 예방보전정책이 된다는 것을 의미한다. 표 4.1에 주어져 있는 다른 최적의 예방보전주기와 횟수 그리고 이에 대응하는 단위시간당 기대비용도 동일한 의미를 갖는다. 그리고 표 4.2와 표 4.3에서는 무료보증교체기간을 나타내는 w_{FR} 의 값을 0.10에서 0.15와 0.20으로 각각 변화시키면서 최적의 예방보전정책과 그 때의 단위시간당 기대비용을 다시 구하였다. 물론, 표 4.2와 표 4.3에 주어져 있는 최적의 예방보전주기와 횟수 그리고 그 때의 단위시간당 기대비용에 대해서도 표 4.1에서와 동일하게 의미를 부여할 수 있다.

한편, 표 4.1, 표 4.2 그리고 표 4.3으로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 1) y 와 β 의 값이 고정되어 있을 때, c_r 값이 증가하면 단위시간당 기대비용과 예방보전 횟수가 증가한다. 2) c_r 과 β 의 값이 고정되어 있을 때, y 값이 증가하면 단위시간당 기대비용은 증가하고 예방보전 횟수는 작아짐을 알 수 있다. 3) y 와 c_r 의 값이 고정되어 있을 때, β 값이 증가하면 단위시간당 기대비용은 증가하고 예방보전 횟수는 많아짐을 알 수 있다.

본 수치적 예에서는 c_r , β 그리고 y 의 값만을 변화시키면서 최적의 보전정책을 살펴보았는데, c_m , c_p 그리고 k 등의 값이 변화는 경우에도 마찬가지로 최적의 예방보전정책을 결정할 수 있다. 만약, c_r 에 비하여 c_m 의 값이 상대적으로 커지게 된다면 최적의 예방보전 횟수는 증가할 것이다. 또한, c_r 에 비하여 c_p 의 값이 상대적으로 커진다면 최적의 예방보전 횟수는 감소할 것으로 예상된다.

표 4.1 수리보증이 종료된 이후의 최적의 예방보전정책 ($w_{FR} = 0.10$)

β	y	최적 정책	c_T		
			10	20	30
3	$\frac{1}{4}$ ${}^{-w}FR$	τ^*	0.64291	0.91291	0.64456
		N^*	1	1	2
	$\frac{2}{4}$ ${}^{-w}FR$	$C(\tau^*, N^*)$	13.68541	21.47988	27.78013
		τ^*	0.62824	0.89890	0.63517
	$\frac{3}{4}$ ${}^{-w}FR$	N^*	1	1	2
		$C(\tau^*, N^*)$	13.95160	21.83427	28.25294
4	$\frac{1}{4}$ ${}^{-w}FR$	τ^*	0.61369	0.88498	0.62593
		N^*	1	1	2
	$\frac{2}{4}$ ${}^{-w}FR$	$C(\tau^*, N^*)$	14.22256	22.19486	28.73150
		τ^*	0.52723	0.43819	0.33106
	$\frac{3}{4}$ ${}^{-w}FR$	N^*	1	2	4
		$C(\tau^*, N^*)$	13.81467	22.65652	29.07213
5	$\frac{1}{4}$ ${}^{-w}FR$	τ^*	0.50950	0.42559	0.38368
		N^*	1	2	3
	$\frac{2}{4}$ ${}^{-w}FR$	$C(\tau^*, N^*)$	14.13302	23.21347	29.88326
		τ^*	0.49183	0.66481	0.37291
	$\frac{3}{4}$ ${}^{-w}FR$	N^*	1	1	3
		$C(\tau^*, N^*)$	14.46049	23.69363	30.66360
3	$\frac{1}{4}$ ${}^{-w}FR$	τ^*	0.48409	0.32191	0.27670
		N^*	1	3	5
	$\frac{2}{4}$ ${}^{-w}FR$	$C(\tau^*, N^*)$	13.65939	22.52664	28.53738
		τ^*	0.46468	0.38599	0.26539
	$\frac{3}{4}$ ${}^{-w}FR$	N^*	1	2	5
		$C(\tau^*, N^*)$	14.00010	23.26409	29.62460
4	$\frac{1}{4}$ ${}^{-w}FR$	τ^*	0.44542	0.37168	0.28768
		N^*	1	2	4
	$\frac{2}{4}$ ${}^{-w}FR$	$C(\tau^*, N^*)$	14.35320	23.92974	30.70736

표 4.2 수리보증이 종료된 이후의 최적의 예방보전정책 ($w_{FR} = 0.15$)

β	y	최적 정책	c_T		
			10	20	30
3	$\frac{1}{4}$ ${}^{-w}FR$	τ^*	0.66508	0.93412	0.65890
		N^*	1	1	2
	$\frac{2}{4}$ ${}^{-w}FR$	$C(\tau^*, N^*)$	13.29531	20.96001	27.08165
		τ^*	0.64291	0.91291	0.64456
	$\frac{3}{4}$ ${}^{-w}FR$	N^*	1	1	2
		$C(\tau^*, N^*)$	13.68506	21.47959	27.77991
4	$\frac{1}{4}$ ${}^{-w}FR$	τ^*	0.62092	0.89191	0.63052
		N^*	1	1	2
	$\frac{2}{4}$ ${}^{-w}FR$	$C(\tau^*, N^*)$	14.08543	22.01294	28.49083
		τ^*	0.55402	0.45739	0.34642
	$\frac{3}{4}$ ${}^{-w}FR$	N^*	1	2	4
		$C(\tau^*, N^*)$	13.35420	21.84553	27.84972
5	$\frac{1}{4}$ ${}^{-w}FR$	τ^*	0.52723	0.43819	0.33106
		N^*	1	2	4
	$\frac{2}{4}$ ${}^{-w}FR$	$C(\tau^*, N^*)$	13.81464	22.65650	29.07212
		τ^*	0.50065	0.67348	0.37828
	$\frac{3}{4}$ ${}^{-w}FR$	N^*	1	1	3
		$C(\tau^*, N^*)$	14.29547	23.45470	30.27137
3	$\frac{1}{4}$ ${}^{-w}FR$	τ^*	0.51334	0.34165	0.26809
		N^*	1	3	6
	$\frac{2}{4}$ ${}^{-w}FR$	$C(\tau^*, N^*)$	13.17108	21.44937	26.91397
		τ^*	0.48409	0.32191	0.27670
	$\frac{3}{4}$ ${}^{-w}FR$	N^*	1	3	5
		$C(\tau^*, N^*)$	13.65939	22.52663	28.53737
4	$\frac{1}{4}$ ${}^{-w}FR$	τ^*	0.45505	0.37879	0.25987
		N^*	1	2	5
	$\frac{2}{4}$ ${}^{-w}FR$	$C(\tau^*, N^*)$	14.17507	23.59426	30.18087

5. 결론

본 논문에서는 수리가 가능한 시스템에 대하여 비재생무료교체-수리보증이 종료된 이후의 예방보전정책을 제안함으로써 기존 연구인 Jung (2010b)과 Yeh 등 (2007)의 보전정책을 일반적인 형태의 보전정책으로 확장하였다. 즉, 교체보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생되면 무료로 시스템을 교체 해 주고,

표 4.3 수리보증이 종료된 이후의 최적의 예방보전정책 ($w_{FR} = 0.20$)

β	y	최적 정책	C_T		
			10	20	30
3	$\frac{1}{4}^{-w_{FR}}$	τ^*	0.68749	0.95557	0.50380
		N^*	1	1	3
	$\frac{2}{4}^{-w_{FR}}$	$C(\tau^*, N^*)$	12.91649	20.45431	26.34808
		τ^*	0.65764	0.92701	0.65407
	$\frac{3}{4}^{-w_{FR}}$	N^*	1	1	2
		$C(\tau^*, N^*)$	13.42327	21.13105	27.31251
4	$\frac{1}{4}^{-w_{FR}}$	τ^*	0.62815	0.89884	0.63514
		N^*	1	1	2
	$\frac{2}{4}^{-w_{FR}}$	$C(\tau^*, N^*)$	13.94871	21.83194	28.25111
		τ^*	0.58108	0.47704	0.31858
	$\frac{3}{4}^{-w_{FR}}$	N^*	1	2	5
		$C(\tau^*, N^*)$	12.91403	21.06363	26.64200
5	$\frac{1}{4}^{-w_{FR}}$	τ^*	0.54508	0.45094	0.34123
		N^*	1	2	4
	$\frac{2}{4}^{-w_{FR}}$	$C(\tau^*, N^*)$	13.50533	22.11255	28.25315
		τ^*	0.50947	0.42559	0.38368
	$\frac{3}{4}^{-w_{FR}}$	N^*	1	2	3
		$C(\tau^*, N^*)$	14.13252	23.21310	29.88296
6	$\frac{1}{4}^{-w_{FR}}$	τ^*	0.54283	0.31438	0.26479
		N^*	1	4	7
	$\frac{2}{4}^{-w_{FR}}$	$C(\tau^*, N^*)$	12.70926	20.35621	25.29651
		τ^*	0.50356	0.33499	0.26245
	$\frac{3}{4}^{-w_{FR}}$	N^*	1	3	6
		$C(\tau^*, N^*)$	13.33085	21.80258	27.46107
7	$\frac{1}{4}^{-w_{FR}}$	τ^*	0.46468	0.38599	0.26539
		N^*	1	2	5
	$\frac{2}{4}^{-w_{FR}}$	$C(\tau^*, N^*)$	14.00002	23.26403	29.62456

수리보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생되면 최소수리를 수행하여 주며, 보증기간은 재생되지 않는 비재생무료교체-수리보증이 종료된 이후의 사용자 측면의 예방보전모형을 제시하고, 이 모형이 기존의 보전모형을 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

- Blischke, W. R. and Murthy, D. N. P. (1994). *Warranty cost analysis*, Marcel Dekker, New York.
- Blischke, W. R. and Murthy, D. N. P. (1996). *Product warranty handbook*, Marcel Dekker, New York.
- Canfield, R. V. (1986). Cost optimization of periodic preventive maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*, **35**, 78-81.
- Chien, Y. H. (2008). A general age replacement model with minimal repair under renewing free-replacement warranty. *European Journal of Operational Research*, **186**, 1046-1058.
- Jung, K. M. (2006a). Optimal preventive maintenance policy for a repairable system. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **17**, 367-377.
- Jung, K. M. (2006b). Extension of PM model with random maintenance quality. *The Korean Communications in Statistics*, **13**, 651-656.
- Jung, K. M. (2009). Two PM policies following the expiration of free-repair warranty. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **20**, 999-1007.
- Jung, K. M. (2010a). A Bayesian approach to replacement policy following the expiration of non-renewing combination warranty based on cost and downtime. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **21**, 873-882.

- Jung, K. M. (2010b). Replacement model following the expiration of NFRRW. *The Korean Journal of Applied Statistics*, **23**, 1147-1156.
- Jung, K. M, Han, S. S. and Lim J. H. (2003). Replacement model based on cost and downtime. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **14**, 889-901.
- Jung, K. M. and Han, S. S. and Park, D. H. (2008). Optimization of cost and downtime for replacement model following the expiration of warranty. *Reliability Engineering and System Safety*, **93**, 995-1003.
- Jung, G. M. and Park, D. H. (2003). Optimal maintenance policies during the post-warranty period. *Reliability Engineering and System Safety*, **82**, 173-185.
- 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 and System Safety*, **90**, 99-105.
- 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*, **176**, 1678-1686.

Preventive maintenance model following the expiration of NFRRW[†]

Ki Mun Jung¹

¹Department of Informational Statistics, Kyungshung University

Received 18 June 2011, revised 13 July 2011, accepted 22 July 2011

Abstract

In this paper, we consider the periodic preventive maintenance model for repairable system following the expiration of non-renewing free replacement-repair warranty (NFRRW). 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, non-renewing free replacement warranty, non-renewing free replacement-repair warranty, non-renewing free repair warranty, preventive maintenance policy.

[†] This research was supported by Kyungshung University Research Grants in 2011.

¹ Associate professor, Department of Informational Statistics, Kyungshung University, Busan 608-736, Korea. E-mail: kmjung@ks.ac.kr