Journal of the Korean Data & Information Science Society
2009, **20**(6), 999–1007

한국데이터정보과학회지

무료수리보증이 종료된 이후의 두 예방보전정책†

정기문[1]

경성대학교 정보통계학과

접수 2009년 8월 1일, 수정 2009년 11월 11일, 게재확정 2009년 11월 17일

요 약

본 논문에서는 무료수리보증이 종료된 이후의 최적의 주기적 예방보전정책을 고려한다. 이를 위해서 Wu와 Clements-Croome (2005) 그리고 Jung (2006b)이 제안한 확률적 보전효과를 갖는 두 종류의 예방보전모형을 가정하고자 한다. 이 때, 시스템이 가동되는 동안에 사용자가 지불해야 할 비용이 주어져 있을 때, 단위시간당 기대비용을 유도한다. 그리고 이렇게 구해진 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 예방보전 횟수와 예방보전 주기를 결정한다. 끝으로 수치적 예를 통해서 제안된 예방보전정책을 자세히 설명한다.

주요용어: 단위시간당 기대비용, 무료수리보증, 예방보전, 예방보전효과.

1. 서론

보증기간이 제공되는 수리가 가능한 시스템 (repairable system)에 대한 사용자 측면의 최적의 보전정책 (optimal maintenance policy)과 관련된 연구는 신뢰성 응용분야에서 많은 연구가들이 관심을 갖는 분야 중의 하나이다. Sahin과 Polatoglu (1996)는 재생보증 (renewing warranty) 또는 비재생보증 (non-renewing warranty)이 제공되는 시스템에 대하여 사용자 측면의 교체정책 (replacement policy)에 대하여 고려하였다. 그리고 Jung과 Park (2003)은 Sahin과 Polatoglu (1996)의 교체정책을 예방보전 (Preventive Maintenance; PM)정책으로 확장하였는데, 이를 위해서 Canfield (1986)의 예방보전모형을 이용하였다. 그런데, 최근에 Canfiled (1986)의 모형에서 사용된 예방보전 활동에 대한 효과 또는 수준이 항상 고정된 상수로 표현된 것을 어떤 임의의 확률분포를 갖는 확률변수라고 가정한 일반적인 형태의 예방보전모형이 Wu와 Clements-Croome (2005)에 의해서 제안되었다. 그리고 Jung (2006b)은 이러한 Wu와 Clements-Croome (2005)의 예방보전 모형을 예방보전의 비용도 예방보전의 효과에 의존한다는 예방보전 모형으로 확장하였다.

따라서 이러한 일반적인 형태의 예방보전모형, 즉 Wu와 Clements-Croome (2005)의 모형과 Jung (2006b)의 모형을 사용하여 보증기간이 고려된 예방보전모형을 살펴 볼 필요가 있다. 한편, Jung (2006a)은 Canfiled (1986)의 예방보전 모형을 가정하여 재생보증과 비재생보증이 종료된 이후의 예방보전정책을 설명하였으며, Han과 Jung (2002)은 비재생보증이 종료된 이후의 교체모형을 베이즈 관점에서 다루었다. 또한, Yeh 등 (2007)은 가장 흔히 사용되는 보증정책인 무료수리보증 (free-repair warranty)을 고려한 교체정책을 제안하였다.

---

† 이 논문은 2009학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.
[1] (608-736) 부산광역시 남구 대연3동 314-79, 경성대학교 정보통계학과, 부교수. E-mail: kmjung@ks.ac.kr

본 연구에서는 무료수리보증이 주어진 수리가 가능한 시스템에 대하여 확률적 예방보전효과를 갖는 두 종류의 예방보전모형을 고려한 새로운 예방보전모형을 고려하고자 한다. 즉, 시스템에는 무료수리보증이 주어지고, 보증기간이 종료된 이후에는 주기 x마다 예방보전 활동이 이루어지며, 예방보전 활동이 이루어진 이후에는 Wu와 Clements-Croome (2005) 또는 Jung (2006b)의 확률적 예방보전효과를 갖는 예방보전모형을 따른다고 가정한다. 그리고 보증기간이 종료된 이후에 시스템에 고장이 발생하면 최소수리 (minimal repair)가 수행되며, N번째 예방보전주기에서는 사용자에 의해서 새로운 시스템으로 교체된다. 이러한 두 종류의 예방보전모형에 대하여 단위시간당 기대비용 (expected cost rate per unit time)을 구하고 이를 최소화하는 최적의 예방보전 주기와 횟수를 결정하는 최적의 예방보전정책 (optimal PM policy)을 설정하는 방법을 소개하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 두 종류의 확률적 예방보전효과를 갖는 예방보전모형인 Wu와 Clements-Croome (2005)의 모형과 Jung (2006b)의 모형에 대하여 살펴본다. 그리고 3절에서는 2절에서 설명한 두 종류의 예방보전모형을 이용한 무료수리보증기간이 종료된 이후의 예방보전정책에 대하여 설명하고, 이러한 두 모형에 대한 단위시간당 기대비용을 구하고자 한다. 또한, 이를 최소화하는 최적의 예방보전정책을 결정하는 방법에 대하여 설명하고자 한다. 4절에서는 3절에서 고려된 최적의 예방보전정책을 설명하기 위하여 수치적 예를 보이고자 한다.

2. 확률적 예방보전효과를 갖는 예방보전모형

본 논문에서는 두 종류의 확률적 예방보전효과를 갖는 예방보전모형을 이용하여 무료수리보증이 종료된 이후의 예방보전정책에 대하여 살펴보고자 한다. 따라서 이러한 모형에 대하여 살펴 볼 필요가 있는데, 이 절에서는 본 논문에서 이용할 두 종류의 확률적 예방보전효과를 갖는 예방보전모형인 Wu와 Clements-Croome (2005)의 모형과 Jung (2006b)의 모형에 대하여 간단히 설명하고자 한다.

2.1. 모형 A

모형 A를 Wu와 Clements-Croome (2005)이 제안한 확률적 예방보전효과를 갖는 예방보전모형이라고 하자. 모형 A는 다음과 같은 6개의 기본가정이 모형에 포함되도록 하여 기존의 연구를 좀 더 일반적인 형태로 확장하였다. 특히, 세 번째 가정을 통해서 예방보전 활동에 대한 효과를 고정된 상수로 가정한 기존의 예방보전모형을 예방보전의 효과를 표현하는 인자가 어떤 임의의 확률분포를 갖는 확률변수라고 가정한 예방보전모형을 제안한 것이다.

가정 (A)

1. PM은 kx, $k = 1, 2, \cdots, N$에서 주기적으로 이루어지며, x는 PM의 주기이고, N은 PM의 횟수이다. 그리고 N번째 PM주기에서는 시스템이 새 것으로 교체된다.
2. $h(t)$는 PM이 이루어지지 않을 때의 고장률함수로써 순증가함수이다.
3. k번째 PM이 이루어진 이후의 시스템의 고장률함수는 $h_k(t) = \theta^{k-1}h(t)$, $t \in (0, x)$이 되고 θ는 예방보전의 수준을 표현하는 인자로써 누적분포함수 $F(\theta)$를 갖는 확률변수이다. 단, $\theta \geq 1$이다.
4. 연속되는 예방보전 주기 사이에서 고장이 발생되면 최소수리를 수행한다.
5. PM과 최소수리, 그리고 교체를 위한 시간은 고려하지 않는다.
6. 최소수리비용은 c_m, 예방보전비용은 c_p 그리고 교체비용은 c_r이다.

위와 같은 모형에 대해서 Wu와 Clements-Croome (2005)은 단위시간당 기대비용이 다음과 같이 구해짐을 보였으며, 이러한 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 N^*와 x^*을 찾는 알고리즘에 대해서 설명하였다.

$$C_A(x,N) = \frac{1}{Nx}\left\{c_m \sum_{k=1}^{N} \int_0^x \left(\int_1^\infty \theta dF(\theta)\right)^{k-1} h(t)dt + (N-1)c_p + c_r\right\}. \tag{2.1}$$

여기서, c_r은 시스템의 교체비용이고, c_p는 예방보전비용 그리고 c_m은 시스템의 최소수리비용이다.

2.2. 모형 B

모형 B를 Jung (2006b)이 제안한 확률적 예방보전효과를 갖는 예방보전모형이라고 하자. 모형 B는 예방보전의 수준뿐만이 아니라 예방보전의 비용 또한 예방보전의 효과에 의존한다고 가정하여 모형 A를 확장한 모형이다. 모형 B에는 다음과 같은 가정들이 포함된다.

가정 (B)

1. 가정 (A)의 1, 2, 3, 4, 5와 동일하게 가정한다.
2. 최소수리비용은 c_m이고 교체비용은 c_r이다. 그리고 예방보전비용은 예방보전의 수준을 나타내는 확률변수 θ에 의존한다. 단, θ의 누적분포함수는 $F(\theta)$이고, $\theta \geq 1$이다.

위와 같은 모형에 대해서 Jung (2006b)은 단위시간당 기대비용이 다음과 같이 구해짐을 보였으며, 이러한 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 N^*와 x^*을 찾는 방법에 대해서 설명하였다.

$$C_B(x,N) = \frac{1}{Nx}\left\{c_m \sum_{k=1}^{N} \int_0^x \left(\int_1^\infty \theta dF(\theta)\right)^{k-1} h(t)dt + (N-1)c_p(\mu_\theta) + c_r\right\}, \tag{2.2}$$

여기서, c_r은 시스템의 교체비용이고, c_p는 예방보전비용 그리고 c_m은 시스템의 최소수리비용이며, $c_p(\mu_\theta)$는 예방보전비용으로써 예방보전의 수준을 비용에 반영하기 위해서 μ_θ의 감소함수라고 가정한다. 단, $\mu_\theta = \int_1^\infty \theta dF(\theta)$이다.

3. 무료수리보증 이후의 예방보전정책

본 논문에서는 무료수리보증이 종료된 이후의 예방보전정책을 고려하고자 한다. 따라서 시스템에는 보증기간이 주어지며, 보증기간 동안 시스템에 고장이 발생하면 시스템에는 무료로 최소수리가 수행된다. 그러나 보증기간에 있어서는 보증기간이 재생되지 않고 처음에 주어진 보증기간이 유지된다. 그러므로 무료수리보증에서는 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명 (age)은 항상 w가 된다. 이제 이러한 무료수리보증이 주어진 경우에 2절에서 설명한 모형 A와 모형 B를 가정한 예방보전모형에 대하여 사용자 측면의 최적의 예방보전정책을 고려하고자 한다.

3.1. 무료수리보증 이후의 예방보전정책: 모형 C

이 절에서 고려하는 예방보전모형은 다음과 같다. 먼저, 시스템에는 무료수리보증기간 w가 주어지고, 보증기간이 종료된 이후에 주기 x마다 예방보전활동이 이루어지며, 예방보전활동이 이루어진 이후에는 2.1절에서 설명한 모형 A를 따른다고 가정한다. 그리고 보증기간이 종료된 이후에 시스템에 고장이 발생하면 최소수리가 수행되며, N번째 예방보전주기에서는 사용자에 의해서 새로운 시스템으로 교

체된다. 이러한 예방보전모형을 모형 C라고 하고, 모형 C에 대한 단위시간당 기대비용을 구하고 이를 최소화하는 최적의 예방보전정책에 대하여 고려하고자 한다.

먼저, 단위시간당 기대비용을 구하기 위해서는 시스템의 기대순환길이 (expected cycle length)을 구하여야 하는데, 무료수리보증에서는 보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생하여도 보증기간이 새로 시작되지 않고 잔여 보증기간만이 유지되기 때문에 시스템의 기대순환길이 L이 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$L = w + Nx. \tag{3.1}$$

그리고 총기대비용 (total expected cost)은 Jung과 Park (2003) 그리고 Wu와 Clements-Croome (2005)의 결과를 이용하면 다음과 같이 구해진다.

$$T_C(x,N) = c_m \left\{ \int_w^{w+x} h(t)dt + \sum_{k=2}^{N} \int_0^x \left(\int_1^\infty \theta dF(\theta) \right)^{k-1} h(t)dt \right\} + (N-1)c_p + c_r. \tag{3.2}$$

위의 식 (3.2)에서 w는 보증기간, c_m은 최소수리비용, c_p은 예방보전비용, 그리고 c_r은 교체비용이다. 그러므로 식 (3.1)의 기대순환길이와 식 (3.2)의 총기대비용으로부터 단위시간당 기대비용은 다음과 같이 된다.

$$C_C(x,N) = \frac{1}{w+Nx} \left[c_m \left\{ \int_w^{w+x} h(t)dt + \sum_{k=2}^{N} \int_0^x \left(\int_1^\infty \theta dF(\theta) \right)^{k-1} h(t)dt \right\} + (N-1)c_p + c_r \right]. \tag{3.3}$$

식 (3.3)에서 보증기간이 없으면 즉, $w = 0$이면 식 (2.1)에 있는 모형 A의 단위시간당 기대비용과 동일해 짐을 알 수 있다.

이제, 식 (3.3)의 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 예방보전 주기와 횟수를 결정하는 문제를 다루고자 한다. 최적의 예방보전 주기 x^*를 찾기 위해서 식 (3.3)을 x에 관해서 1차 미분한 다음 0으로 놓고 풀면 다음을 얻을 수 있다.

$$\left(h(w+x) + \sum_{k=2}^{N} h_k(x) \right) \left(\frac{w}{N} + x \right) - \left(\int_w^{w+x} h(t)dt + \sum_{k=2}^{N} \int_0^x h_k(t)dt \right) = \frac{(N-1)c_p + c_r}{c_m}. \tag{3.4}$$

위의 식 (3.4)에서 $h_k(t)$는 다음과 같다.

$$h_k(t) = \left(\int_1^\infty \theta dF(\theta) \right)^{k-1} h(t).$$

여기서 시스템의 고장률함수 $h(t)$가 증가함수이면, 주어진 N의 값에 대해서 식 (3.4)를 만족하는 최적의 주기 x^*의 값이 항상 유일하게 존재한다. 그러나 이와 같이 구해지는 x^*는 N의 값에 의존하게 되므로 식 (3.4)을 만족하는 최적의 주기 x^*와 최적의 예방보전 횟수 N^*를 동시에 찾아야만 한다. 이를 위해서 식 (3.4)를 만족하는 x가 N의 함수가 되기 때문에 이를 x_N이라고 하고, 이 값을 식 (3.3)의 x대신에 대입하면, $C_C(x_N, N)$은 N만의 함수가 되므로 최적의 횟수 N^*는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N^* = \min_N C_C(x_N, N), \quad N = 1, 2, 3, \cdots. \tag{3.5}$$

따라서 식 (3.3)의 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 횟수는 식 (3.5)에서 구해진 N^*이고, 이 때 최적의 주기 x^*는 x_{N^*}가 된다.

3.2. 무료수리보증 이후의 예방보전정책: 모형 D

이 절에서 고려하는 예방보전모형은 다음과 같다. 먼저, 시스템에는 무료수리보증기간 w가 주어지고, 보증기간이 종료된 이후에 주기 x마다 예방보전활동이 이루어지며, 예방보전활동이 이루어진 이후에는 모형 B를 따른다고 가정한다. 그리고 보증기간이 종료된 이후에 시스템에 고장이 발생하면 최소수리가 수행되며, N번째 예방보전주기에서는 사용자에 의해서 새로운 시스템으로 교체된다. 이러한 예방보전모형을 모형 D라고 하고, 모형 D에 대한 예방보전모형에 대하여 단위시간당 기대비용을 구하고 이를 최소화하는 최적의 예방보전정책을 설정하고자 한다. 먼저, 단위시간당 기대비용을 구하기 위해서는 시스템의 기대순환길이를 구하여야 하는데, 이는 식 (3.1)과 동일하게 된다. 그리고 총기대비용은 Jung과 Park (2003) 그리고 Jung (2006b)의 결과를 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_D(x,N) = c_m \left\{ \int_w^{w+x} h(t)dt + \sum_{k=2}^{N} \int_0^x \left(\int_1^\infty \theta dF(\theta) \right)^{k-1} h(t)dt \right\} + (N-1)c_p(\mu_\theta) + c_r. \quad (3.6)$$

여기서, w는 보증기간, c_m은 최소수리비용, c_p은 예방보전비용, 그리고 c_r은 교체비용이다. 그리고 $c_p(\mu_\theta)$는 예방보전비용으로써 예방보전의 수준을 비용에 반영하기 위해서 μ_θ의 감소함수라고 가정한다. 단, $\mu_\theta = \int_1^\infty \theta dF(\theta)$이다. 예를 들어 Park과 Jung (2002)의 연구에서 고려했던 것처럼 임의의 $q_0 > 0$와 $q_1 \geq 0$에 대하여 다음과 같은 형태의 예방보전비용을 고려할 수 있을 것이다.

$$c_p(\mu_\theta) = q_0 + q_1 (\mu_\theta)^{-1} \quad (3.7)$$

또는

$$c_p(\mu_\theta) = q_0 + q_1 \exp\{-\mu_\theta\}. \quad (3.8)$$

이제, 식 (3.1)의 기대순환길이와 식 (3.6)의 총기대비용으로부터 단위시간당 기대비용은 다음과 같이 된다.

$$C_D(x,N) = \frac{1}{w+Nx} \left[c_m \left\{ \int_w^{w+x} h(t)dt + \sum_{k=2}^{N} \int_0^x \left(\int_1^\infty \theta dF(\theta) \right)^{k-1} h(t)dt \right\} + (N-1)c_p(\mu_\theta) + c_r \right]. \quad (3.9)$$

만약, 식 (3.7) 또는 식 (3.8)과 같은 형태의 예방보전비용을 고려하고, $q_0 = c_p$이고 $q_1 = 0$이면 식 (3.9)의 단위시간당 기대비용은 식 (3.3)에 있는 모형 C에 대한 단위시간당 기대비용과 동일해 짐을 알 수 있다.

이제, 식 (3.9)의 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 예방보전 주기와 횟수를 결정하는 문제를 다루고자 한다. 최적의 예방보전 주기 x^*를 찾기 위해서 식 (3.9)를 x에 관해서 1차 미분한 다음 0으로 놓고 풀면 다음을 얻을 수 있다.

$$\left(h(w+x) + \sum_{k=2}^{N} h_k(x) \right) \left(\frac{w}{N} + x \right) - \left(\int_w^{w+x} h(t)dt + \sum_{k=2}^{N} \int_0^x h_k(t)dt \right) = \frac{(N-1)c_p(\mu_\theta) + c_r}{c_m}. \quad (3.10)$$

여기서 고장률함수 $h(t)$가 증가함수이면, 주어진 N의 값에 대해서 식 (3.10)을 만족하는 최적의 주기 x^*의 값이 항상 유일하게 존재한다. 그러나 이와 같이 구해지는 x^*는 N의 값에 의존하게 되므로 식

(3.10)을 만족하는 최적의 주기 x^*와 최적의 예방보전 횟수 N^*를 동시에 찾아야만 한다. 이를 위해서 식 (3.10)을 만족하는 x가 N의 함수가 되기 때문에 이를 x_N이라고 하고, 이 값을 식 (3.9)의 x대신에 대입하면, $C_D(x_N, N)$은 N만의 함수가 되므로 최적의 횟수 N^*는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N^* = \min_N C_D(x_N, N), \quad N = 1, 2, 3, \cdots . \tag{3.11}$$

따라서 식 (3.9)의 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 횟수는 식 (3.11)에서 구해진 N^*이고, 이 때 최적의 주기 x^*는 x_{N^*}가 된다.

4. 수치적 예

본 논문에서 고려된 예방보전모형에 대한 최적의 보전정책을 설명하기 위해서 시스템의 고장시간 T가 척도모수 (scale parameter)가 1인 와이블분포 (Weibull distribution)를 한다고 가정하자. 즉, 가정된 시스템의 고장률함수는 $h(t) = \beta t^{\beta-1}$이 된다. 그리고 식 (3.5)의 예방보전비용을 가정하고, 예방보전의 수준인 θ는 Wu와 Clements-Croome (2005)의 논문에서와 동일하게 다음과 같은 분포함수를 갖는 균등분포 (uniform distribution)를 한다고 가정하자.

$$F(\theta) = \begin{cases} \dfrac{\theta}{u-1}, & 1 \le \theta \le u \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

표 4.1은 u와 q_1의 변화에 따라 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 예방보전 주기와 횟수 그리고 그때의 단위시간당 기대비용을 보여주고 있다. 즉, 본 논문에서 고려한 네 종류의 모형 (모형 A, B, C, D)에 대한 최적의 예방보전정책을 보여주고 있다. 예를 들어, 표에서 $w = 0.5$, $q_1 = 3$이고 $u = 1.3$일 때, 식 (3.11)을 최소화하는 최적의 예방보전 주기는 0.730이고 횟수는 6이 됨을 알 수 있는데, 이는 모형 D에 대한 최적의 예방보전정책이다. 이것은 보증기간이 종료된 이후에 0.730시점마다 예방보전을 수행하고 6번째 예방보전 주기에서는 시스템을 새것으로 교체하는 것이 기대비용 측면에서 최적의 예방보전정책이 된다는 것을 의미한다. 다른 u와 q_1의 값에 대해서도 동일하게 의미를 부여할 수 있다. 그리고 표 4.1로부터 w와 u값이 고정되어 있을 때 q_1이 증가하면, N^*는 감소하고, $C(x^*, N^*)$는 증가함을 알 수 있다. 이는 동일한 예방보전의 효과에 대한 비용이 증가했기 때문이라고 할 수 있다. 표 4.2에는 β의 변화에 따른 최적의 예방보전정책이 나타나 있는데, 이로부터 β의 값이 증가할수록 최적의 예방보전 주기는 짧아지고, 최적의 예방보전 횟수는 증가하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 무료수리보증이 주어진 수리가 가능한 시스템에 대하여 사용자 측면에서의 예방보전모형을 고려하였다. 특히, 예방보전의 수준을 고정된 상수가 아닌 어떤 임의의 확률분포를 갖는 확률변수라고 가정한 일반적인 형태의 예방보전모형인 Wu와 Clements-Croome (2005)의 모형과 Jung (2006b)의 모형을 이용하여 사용자 측면에서의 주기적인 예방보전모형을 고려하였다. 이러한 무료수리보증이 종료된 이후의 두 종류의 주기적인 예방보전모형인 모형 C와 모형 D에 대하여 각각 단위시간당 기대비용을 이론적으로 구하였고, 최적의 예방보전정책에 대하여 살펴보았다. 그리고 수치적 예를 통하여 제안된 모형에 대한 최적의 예방보전 주기와 예방보전 횟수 그리고 그 때의 단위시간당 기대비용에 대하여 자세히 설명하였다.

표 4.1 모형 A, B, C, D에 대한 최적의 예방보전정책과 단위시간당 기대비용 ($q_0 = 1$, $c_r = 9$, $c_m = 3$, $\beta = 3$)

w	q_1	Optimal policy	u				
			1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
0	0	x^*	0.521	0.523	0.529	0.515	0.549
		N^*	20	13	10	9	7
		$C_A(x^*, N^*)$	4.0334	4.6366	5.1071	5.5065	5.8502
	1	x^*	0.655	0.649	0.645	0.637	0.643
		N^*	15	10	8	7	6
		$C_B(x^*, N^*)$	5.5495	6.0480	6.4219	6.7313	6.9930
	3	x^*	0.845	0.820	0.834	0.802	0.822
		N^*	9	7	5	5	4
		$C_B(x^*, N^*)$	7.8653	8.1979	8.4336	8.6075	8.7612
	5	x^*	0.975	0.948	0.942	0.913	0.940
		N^*	6	5	4	4	3
		$C_B(x^*, N^*)$	9.6962	9.8704	9.9695	10.0646	10.1063
0.5	0	x^*	0.488	0.481	0.473	0.474	0.468
		N^*	22	14	11	9	8
		$C_C(x^*, N^*)$	4.0578	4.6257	5.0501	5.3970	5.6880
	1	x^*	0.620	0.595	0.576	0.580	0.549
		N^*	16	11	9	7	7
		$C_D(x^*, N^*)$	5.5974	6.0657	6.3984	6.6620	6.8786
	3	x^*	0.782	0.746	0.730	0.716	0.689
		N^*	11	8	6	5	5
		$C_D(x^*, N^*)$	7.9613	8.2741	8.4631	8.6060	8.7045
	5	x^*	0.893	0.850	0.820	0.801	0.777
		N^*	8	6	5	4	4
		$C_D(x^*, N^*)$	9.8549	10.0189	10.0901	10.1149	10.1382

표 4.2 β의 변화에 따른 최적의 예방보전정책과 단위시간당 기대비용 (모형 D) ($q_0 = 1$, $q_1 = 3$, $c_r = 9$, $c_m = 3$, $w = 0.5$)

β	Optimal policy	u				
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
3	x^*	0.782	0.746	0.730	0.716	0.689
	N^*	11	8	6	5	5
	$C_D(x^*, N^*)$	7.9613	8.2741	8.4631	8.6060	8.7045
4	x^*	0.721	0.690	0.668	0.650	0.624
	N^*	15	10	8	7	7
	$C_D(x^*, N^*)$	7.6149	7.9096	8.0867	8.2060	8.2995
5	x^*	0.702	0.669	0.642	0.628	0.614
	N^*	19	13	11	9	8
	$C_D(x^*, N^*)$	7.2965	7.5719	7.7307	7.8326	7.9057

참고문헌

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

Han, S. S. and Jung, G. M. (2002). Bayesian maintenance policy for a repairable system with non-renewing warranty. *Journal of Korean Data & Information Science Society*, **13**, 55-65.

Jung, G. M. (2006a). Optimal preventive maintenance policy for a repairable system. *Journal of Korean Data & Information Science Society*, **17**, 367-377.

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

Jung, K. M. (2006b). Extension of PM model with random maintenance quality. *The Korean Communications in Statistics*, **13**, 651-656.

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

Park, D. H. and Jung, G. M. (2002). Preventive maintenance policy with effect dependent cost. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, **19**, 223-232.

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.

Journal of the Korean Data & Information Science Society
2009, **20**(6), 999–1007

한국데이터정보과학회지

Two PM policies following the expiration of free-repair warranty†

Ki Mun Jung[1]

Department of Informational Statistics, Kyungsung University

Received 1 August 2009, revised 11 November 2009, accepted 17 November 2009

Abstract

This paper considers the optimal periodic preventive maintenance (PM) policy following the expiration of free-repair warranty. We assume that two periodic PM models with random maintenance quality which were proposed by Wu and Clements-Croome (2005) and Jung (2006b), respectively. Given the cost structure to the user during the cycle of the product, we derive the expressions for the expected cost rate per unit time. Also, we obtain the optimal PM number and the optimal PM period by minimizing the expected cost rate per unit time. The numerical examples are presented for illustrative purpose.

Keywords: Expected cost rate per unit time, free-repair warranty, preventive maintenance, PM quality.

† This research was supported by Kyungsung University Research Grants in 2009.

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