Journal of the Korean
Data & Information Science Society
2006, Vol. 17, No. 2, pp. 367 ~ 377

Optimal Preventive Maintenance Policy for a Repairable System[1)]

Ki Mun Jung[2)]

Abstract

This paper develops a periodic preventive maintenance(PM) policy following the expiration of warranty. Two types of warranty are considered: renewing warranty and non-renewing warranty. Also, we consider the situation where each PM cost is an increasing function of the PM effect. We determine the optimal number of PM's before replacing the system by a new one and the optimal length of period for the periodic PM following the expiration of warranty. Explicit solutions to determine the optimal periodic PM are presented for the Weibull distribution case.

Keywords : Expected cost, PM effect, Preventive maintenance, Warranty policy

1. 서론

수리가 가능한 시스템(repairable system)에 대한 예방보전(PM)이란 사용자가 시스템을 원하는 수준으로 유지 또는 향상시키기 위하여 시스템에 고장이 발생하기 전에 취하는 일련의 활동으로써 수리(repair), 점검(inspection), 교체(replacement) 등의 활동이 포함된다. 그리고 보증정책(warranty policy)은 일정기간 동안에 시스템에 발생하는 고장에 대해서 생산자 또는 판매자가 수리 또는 교체 등의 조처를 해준다는 소비자와의 약속이다. 이러한 보증정책은 보증기간의 재생여부와 소비자의 비용 부담여부에 따라서 재생비례보증(renewing pro-rata warranty: RPRW), 재생무료보증(renewing free-replacement warranty: RFRW), 비재생비례보증(non-renewing pro-rata warranty: NPRW), 비재생무료보증(non-renewing free-replacement warranty: NFRW) 등 다양한 형태의 보증정책으로 구분된다.

---

1) This research was supported by Kyungsung University Research Grants in 2005.
2) Assistant Professor, Department of Informational Statistics, Kyungsung University, Busan 608-736, Korea.
E-mail : kmjung@ks.ac.kr

최근에 이러한 보증정책이 제공되는 수리가 가능한 시스템에 대한 보전정책과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있는데, 대표적으로 Sahin과 Polatoglu(1996)는 보증기간이 종료된 이후의 최적의 교체정책에 대하여 연구하였고 Jung과 Park(2003)은 다양한 형태의 비용함수를 고려하여 보증기간이 종료된 이후의 최적의 예방보전정책을 제안하였다. 그러나 Jung과 Park(2003)의 연구에서는 예방보전의 비용을 고정된 상수로 가정하여 예방보전의 효과와는 상관없는 예방보전비용을 가정하였다.

본 논문에서는 Jung과 Park(2003)의 연구에서 예방보전의 비용을 고정된 상수로 가정한 것을 예방보전의 효과에 의존하는 비용으로 가정하여 좀 더 일반적인 형태를 갖는 보증기간이 종료된 이후의 예방보전정책을 제안하고자 한다. 즉, 본 연구에서 고려하는 예방보전모형은 다음과 같다. 시스템에는 보증기간이 주어지며, 보증기간이 종료된 이후에는 일정한 주기 x마다 예방보전활동이 이루어지며 그 비용은 예방보전효과에 의존한다고 가정한다. 또한, N번째 예방보전주기에서는 시스템이 새것으로 교체되며 예방보전주기 동안에 시스템에 고장이 발생하면 최소수리(minimal repair)가 이루어진다. 본 논문에서는 이러한 예방보전모형에 대하여 단위시간당 기대비용을 구하고 이를 최소화하는 최적의 예방보전주기와 예방보전횟수를 결정하고자 한다.

본 논문은 다음과 같은 내용으로 구성된다. 제 2장에서는 재생비례보증(RPRW)과 재생무료보증(RFRW)이 주어진 경우에 예방보전비용이 예방보전의 효과에 의존하는 함수일 때 최적의 예방보전정책에 대해서 살펴본다. 즉, 단위시간당 기대비용을 구하고 이를 최소화하는 최적의 예방보전 횟수와 주기를 결정하는 문제를 다룬다. 제 3장에서는 2장에서 다룬 최적의 예방보전정책을 비재생비례보증(NPRW)과 비재생무료보증(NFRW)인 경우에 대해서 살펴본다. 그리고 제 4장에서는 다양한 수치적 예를 통해서 본 논문에서 살펴본 최적의 예방보전정책을 설명한다.

2. 재생보증 이후의 예방보전정책

2.1 단위시간당 기대비용

보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생하면, 재생보증인 경우에는 보증기간이 처음부터 다시 시작된다. 이러한 재생보증은 보증기간이 종료되기 전에 시스템에 고장이 발생하는 경우 생산자가 시스템을 무료로 교체해주는 재생무료보증(RFRW)과 시스템의 사용기간에 비례하여 교체비용의 일부를 소비자가 부담하도록 하는 재생비례보증(RPRW)으로 구분된다.

이 장에서는 이러한 재생비례보증이나 재생무료보증이 주어진 수리가 가능한 시스템에 대하여 보증기간이 종료된 이후의 최적의 예방보전정책을 고려한다. 이를 위해서, 재생보증기간을 w, 시스템의 고장시간을 T라 하고, 보증기간이 종료된 이후의 예방보전주기와 예방보전횟수를 각각 x와 N이라고 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. 또한, 예방보전비용 $C_{pm}(x, \tau)$을 예방보전의 효과를 나타내는 τ에 의존하는 함수라고 가정하자. 이

때, 예방보전의 주기 x가 주어져 있을 경우에 예방보전의 효과를 나타내는 τ가 증가하면 예방보전비용도 증가하게 된다.

이러한 예방보전모형에 대하여 단위시간당 기대비용을 구하기 위해서는 전체기대비용(total expected cost)과 기대순환길이(expected cycle length)를 결정하여야 한다. 우선, 재생보증 하에서 시스템을 운용하는데 발생하는 전체기대비용을 구하기 위해서 Jung과 Park(2003)의 연구에서와 동일하게 다음과 같은 Canfield(1986)의 예방보전모형을 가정한다.

$$h_{pm}(t)=\begin{cases} h(t),\ w\le t\le w+x \\ \sum_{i=1}^{k}\{h((i-1)(x-\tau)+(x+w))-h(i(x-\tau)+w)\}+h(t-k\tau), \\ w+kx< t\le w+(k+1)x, k=1,2,\cdots. \end{cases}$$

여기서, $h(t)$는 예방보전 활동이 없을 경우의 시스템의 고장율함수이며, τ는 예방보전의 효과를 나타내는 요인으로써 $0\le\tau\le x$이다. 만약, $\tau=0$이면 예방보전의 효과가 하나도 없음을 의미하는 것이다. 따라서, 본 논문에서 고려하는 예방보전모형에 대하여 전체기대비용을 $TC_R(x,N)$라 하면, 이는 Park과 Jung(2002) 그리고 Jung과 Park(2003)의 결과를 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$TC_R(x,N)=c_1+\overline{F}(w)(N-1)C_{pm}(x,\tau)+(c_m+c_{fm})\overline{F}(w)c_2, \tag{1}$$

여기서, c_m은 최소수리비용, c_r은 교체비용, $C_{pm}(x,\tau)$은 예방보전비용, c_{fm}은 예방보전주기 동안에 발생하는 고장으로 야기되는 비용이고 c_{fw}는 보증기간 동안에 발생하는 고장으로 야기되는 비용이다. 그리고 c_1과 c_2는 각각 다음과 같다.

$$c_1=\begin{cases} \frac{c_r}{w}I(w)+c_r\overline{F}(w)+c_{fw}F(w), & \text{under } RPRW \\ c_r\overline{F}(w)+c_{fw}F(w), & \text{under } RFRW \end{cases}$$

$$c_2=\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{k}\{h((i-1)(x-\tau)+(x+w))-h(i(x-\tau)+w)\}x+\sum_{k=1}^{N-1}\int_{kx+w}^{(k+1)x+w}h(t-k\tau)dt\ .$$

본 논문에서 고려하는 예방보전모형은 Jung과 Park(2003)의 예방보전모형에서 예방보전비용을 일반적인 형태로 확장한 것이기 때문에 기대순환길이는 Jung과 Park(2003)에서와 동일하게 구해진다. 즉, 기대순환길이 $CL_R(x,N)$은 다음과 같다.

$$CL_R(x,N)=I(w)+(w+Nx)\overline{F}(w). \tag{2}$$

여기서 $I(w)=\int_0^w tf(t)dt$이다.

그러므로 이 장에서 고려하는 예방보전비용이 예방보전효과에 의존하는 경우에 재생보증기간이 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 단위시간당 기대비용은 식 (1)과 식 (2)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$C_R(x,N)=\frac{c_1+\overline{F}(w)(N-1)C_{pm}(x,\tau)+(c_m+c_{fm})\overline{F}(w)c_2}{I(w)+(w+Nx)\overline{F}(w)}. \tag{3}$$

만약, 예방보전비용이 예방보전의 효과와는 상관없는 상수라고 가정하면 식 (3)의 단위시간당 기대비용은 다음과 같이 되며, 이는 Jung과 Park(2003)에서 구해진 결과와 동일하게 됨을 알 수 있다.

$$C_R(x,N)=\frac{c_1+\overline{F}(w)(N-1)c_{pm}+(c_m+c_{fm})\overline{F}(w)c_2}{I(w)+(w+Nx)\overline{F}(w)}.$$

2.2 최적의 예방보전정책

이 절에서는 2.1절에서 구한 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 예방보전 주기와 횟수를 결정하는 문제를 다루고자 한다. 최적의 예방보전 주기 x^*를 찾기 위해서 식 (3)을 x에 관해서 1차 미분한 다음 0으로 놓고 풀면 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}&(I(w)+w\overline{F}(w))((N-1)C'_{pm}(x,\tau)+(c_m+c_{fm})(a_1+xa_2+a_3)\\&\quad+N\overline{F}(w)((N-1)(xC'_{pm}(x,\tau)-C_{pm}(x,a))+(c_m+c_{fm})(x^2a_2+xa_3-a_4)=Nc_1\end{aligned} \tag{4}$$

여기서 a_1, a_2, a_3, a_4는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}a_1&=\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{k}\{h((i-1)(x-\tau)+(x+w))-h(i(x-\tau)+w)\},\\a_2&=\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{k}\{h'((i-1)(x-\tau)+(x+w))i-h'(i(x-\tau)+w)i\},\\a_3&=\sum_{k=0}^{N-1}\{(k+1)h((k+1)x+w-k\tau)-kh(kx+w-k\tau))\},\\a_4&=\sum_{k=0}^{N-1}\int_{kx+w}^{(k+1)x+w}h(t-k\tau)\ dt.\end{aligned}$$

만약, 시스템의 고장률함수 $h(t)$가 볼록(convex)인 순증가(strictly increasing) 함수이고 $C_{pm}(x,\tau)$이 $x\geq\tau$에 대해서 볼록인 감소함수이면, 주어진 N의 값에 대해서 식 (4)를 만족하는 최적의 주기 x^*의 값이 항상 유일하게 존재한다. 그러나 이와 같이 구해지는 x^*는 N의 값에 의존하게 되므로 식 (4)를 만족하는 최적의 주기 x^*와 최적의 예방보전 횟수 N^*를 동시에 찾아야만 한다. 이를 위해서 식 (4)를 만족하는 x가 N의 함수가 되기 때문에 이를 x_N이라고 하고, 이 값을 식 (3)의 x대신에 대입하면, $C_R(x_N,N)$은 N만의 함수가 되므로 최적의 횟수 N^*는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N^*=\min_N C_R(x_N,N),\quad N=1,2,3,\cdots. \tag{5}$$

따라서 식 (3)의 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 횟수는 식 (5)에서 구해진 N^*이고, 이 때 최적의 주기 x^*는 x_{N^*}가 된다.

3. 비재생보증 이후의 예방보전정책

3.1 단위시간당 기대비용

2장에서 고려한 재생보증에서는 보증기간 동안에 시스템에 고장이 발생하면 보증기간이 처음부터 다시 시작되지만 비재생보증인 경우에는 처음에 주어진 보증기간이 유지된다. 따라서 비재생무료보증(NFRW)에서는 보증기간동안에 시스템에 고장이 발생하면 무료로 교체해 주지만 보증기간은 재생되지 않고 처음에 주어진 보증기간이 유지된다. 그리고, 비재생비례보증(NPRW)에서는 사용기간에 비례한 교체비용의 일부를 사용자가 부담하고 새 시스템으로 교체되고 보증기간 또한 처음에 주어진 기간이 유지되고 재생되지 않는다. 이 때, 보증기간이 종료될 때의 시스템의 수명을 y라고 하고, 보증기간 동안에 발생한 시스템의 교체횟수를 l이라고 하면, y는 항상 0과 w사이에 존재하게 된다. 그리고 보증기간 동안에 고장이 전혀 발생하지 않아 시스템이 한 번도 교체되지 않으면, 즉 $l=0$이면 y는 보증기간 w와 같아지며, 반대로 $y=w$이면 $l=0$이 된다.

이 장에서는 이러한 비재생비례보증이 주어진 수리가 가능한 시스템에 대하여 예방보전비용이 예방보전의 효과에 의존하는 경우의 최적의 예방보전정책을 고려하고자 한다. 먼저, 비재생보증 하에서의 시스템의 기대순환길이 $CL_N(x,N)$는 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$CL_N(x,N)=w+Nx. \tag{6}$$

또한, 2장에서와 마찬가지로 Canfield(1986)의 예방보전모형을 가정하고 Jung과 Park(2003)의 결과를 이용하면 전체기대비용을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$TC_N(x,N)=c_3+(N-1)C_{pm}(x,\tau)+(c_m+c_{fm})c_4, \tag{7}$$

여기서 c_3와 c_4는 각각 다음과 같다.

$$c_3=\begin{cases} c_r\dfrac{(w-y)}{w}+c_r+lc_{fw}, & \text{under } NPRW \\ c_r+lc_{fw}, & \text{under } NFRW \end{cases}$$

$$c_4=\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{k}\{h((i-1)(x-\tau)+(x+y))-h(i(x-\tau)+y)\}x+\sum_{k=1}^{N-1}\int_{kx+y}^{(k+1)x+y}h(t-k\tau)dt\ .$$

따라서 예방보전비용이 예방보전효과에 의존하는 경우에 비재생보증기간이 종료된 이후의 예방보전모형에 대한 단위시간당 기대비용은 식 (6)과 식 (7)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$C_N(x,N)=\frac{c_3+(N-1)C_{pm}(x,\tau)+(c_m+c_{fm})c_4}{w+Nx}. \tag{8}$$

만약, 예방보전비용이 예방보전의 효과와는 전혀 상관없는 상수라고 가정하면 식 (8)

의 단위시간당 기대비용은 Jung과 Park(2003)에서 구해진 결과와 동일하게 된다.

3.2 최적의 예방보전정책

이 절에서는 3.1절에서 구한 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 예방보전 주기와 횟수를 결정하는 문제를 다루고자 한다. 최적의 예방보전 주기 x^*를 찾기 위해서 식 (8)을 x에 관해서 1차 미분한 다음 0으로 놓고 풀면 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & w\{(N-1)C_{pm}{}'(x,\tau)+(c_m+c_{fm})(b_1+b_2x+b_3)\} \\ & \quad +N\{x(N-1)C_{pm}{}'(x,\tau)-(N-1)C_{pm}(x,\tau)+(c_m+c_{fm})(b_2x^2+b_3x-b_4)\}=Nc_3 \end{aligned} \tag{9}$$

여기서 b_1, b_2, b_3, b_4는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} b_1 &= \sum_{k=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{k}\{h((i-1)(x-\tau)+(x+y))-h(i(x-\tau)+y)\}, \\ b_2 &= \sum_{k=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{k}\{h'((i-1)(x-\tau)+(x+y))i-h'(i(x-\tau)+y)i\}, \\ b_3 &= \sum_{k=0}^{N-1}\{(k+1)h((k+1)x+y-k\tau)-kh(kx+y-k\tau))\}, \\ b_4 &= \sum_{k=0}^{N-1}\int_{kx+y}^{(k+1)x+y}h(t-k\tau)\ dt. \end{aligned}$$

만약, 시스템의 고장률함수 $h(t)$가 볼록인 순증가 함수이고 $C_{pm}(x,\tau)$이 $x\geq\tau$에 대해서 볼록인 감소함수이면, 주어진 N의 값에 대해서 식 (9)를 만족하는 최적의 주기 x^*의 값이 항상 유일하게 존재한다. 그러나 이와 같이 구해지는 x^*는 N의 값에 의존하게 되므로 식 (9)를 만족하는 최적의 주기 x^*와 최적의 예방보전 횟수 N^*를 동시에 찾아야만 한다. 이를 위해서 식 (9)를 만족하는 x가 N의 함수가 되기 때문에 이를 x_N이라고 하고, 이 값을 식 (8)의 x대신에 대입하면, $C_N(x_N,N)$도 N만의 함수가 되므로 최적의 횟수 N^*는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N^*=\min_N\ C_N(x_N,N),\quad N=1,2,3,\cdots. \tag{10}$$

따라서 식 (10)의 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 횟수는 식 (10)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 와이블분포를 한다고 가정하자. 즉, 가정된 시스템의 고장률함수는 $h(t)=\beta\lambda^\beta t^{\beta-1}$이 된다. 그리고 예방보전 효과에 의존하는 예방보전비용을 고려하

기 위해서 $\tau=\alpha x$, $0<\alpha<1$, 라고 하자. 즉 α가 예방보전의 효과를 나타내기 때문에 예방보전비용을 α의 함수로 표현할 수 있을 것이다. α가 1의 값에 가까워질수록 예방보전이 더욱 더 효과적이고 따라서 예방보전의 비용도 증가하게 될 것이다. 본 예제에서는 이러한 것을 반영하는 다음과 같은 두 형태의 예방보전비용을 고려해 보고자 한다.

i) $C_{pm}(x,\tau)=c_0+c_1(x-\tau)^{-1}$ ii) $C_{pm}(x,\tau)=c_0+c_1\exp\{-(x-\tau)\}$

표 4.1에는 네 가지 보증정책에 대하여 첫 번째 예방보전비용의 가정 하에서 결정된 최적의 예방보전정책이 나타나 있다. 예를 들어, 재생비례보증(RPRW)인 경우 $c_1=0.2$이고 $\alpha=0.5$일 때, 최적의 예방보전 주기는 0.9814147734이고 횟수는 2라는 것이다. 이것은 재생비례보증기간이 종료된 이후에 첫 번째 예방보전 주기(=0.9814147734)에서 예방보전을 수행하고 두 번째 예방보전 주기(=2 ×0.9814147734)에서는 시스템을 새것으로 교체하는 것이 최적의 예방보전정책이 된다는 의미이다. 표 4.1에 있는 다른 경우도 마찬가지의 의미를 갖는 결과들이다. 표 4.1에서 $c_1=0$인 경우는 예방보전의 비용이 상수라는 의미를 갖는다. 이렇게 예방보전비용이 상수인 경우에는 예방보전의 효과를 나타내는 α가 증가할수록 최적의 예방보전 주기는 짧아지고 예방보전 횟수는 증가하며 단위시간당 기대비용은 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 예방보전 비용이 예방보전의 효과와는 상관없는 상수이기 때문이다. $c_1=0.2$인 경우는 예방보전의 비용이 예방보전의 효과에 의존하는 것이다. 이때는 $c_1=0$인 경우에서와 같은 현상이 나타나지 않는 것을 알 수 있는데, 이는 α가 1에 가까워질수록 예방보전의 비용이 급격하게 증가하기 때문일 것이다. 그리고 α가 고정되어 있을 때, 최적의 예방보전회수와 단위시간당 기대비용이 $c_1=0$인 경우가 $c_1=0.2$인 경우보다 더 작은 것을 알 수 있는데 이는 예방보전의 효과가 동일함에도 불구하고 $c_1=0$인 경우가 적은 비용을 지불하기 때문이다. 이러한 경향은 그림 4.1에서도 볼 수 있다. 표 4.1과 표 4.2 그리고 그림 4.2에서 볼 수 있듯이 무료보증인 경우보다 비례보증인 경우가 항상 단위시간당 기대비용이 큰 것을 알 수 있다. 표 4.2에는 두 번째 예방보전비용의 가정 하에서 결정된 최적의 예방보전정책이 나타나 있는데, 표 4.1의 경우와 비슷하게 의미를 부여할 수 있으며, 위에서와 유사한 경향이 나타남을 알 수 있다.

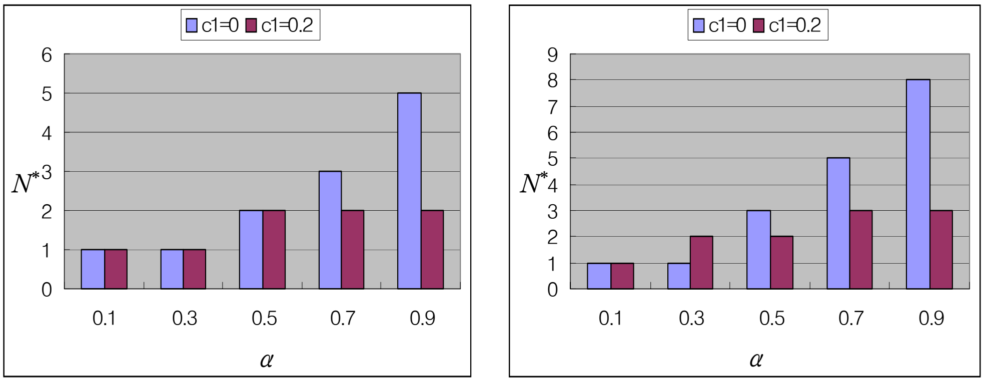
<표 4.1> 최적의 예방보전정책: $C_{pm}(x,\tau)=c_0+c_1(x-\tau)^{-1}=c_0+c_1(x-\alpha x)^{-1}$

($\beta=3$, $\lambda=1$, $c_0=1$, $C_{mr}=1$, $C_{re}=30$, $w=0.5$, $y=0.3$, $l=1$)

Warranty Type	c_1	α	x^*	N^*	$C(x^*, N^*)$
재생비례보증 (RPRW)	0	0.1	1.8045308160	1	20.71236288
		0.3	1.8045308160	1	20.71236288
		0.5	0.9699940159	2	20.46671367
		0.7	0.7079218257	3	20.00742389
		0.9	0.4994735261	5	19.27667469
	0.2	0.1	1.8045308160	1	20.71236288
		0.3	1.8045308160	1	20.71236288
		0.5	0.9814147734	2	20.63063121
		0.7	1.0153048120	2	20.43087647
		0.9	1.0792839850	2	20.57370360
재생무료보증 (RFRW)	0	0.1	1.7321387270	1	19.43152886
		0.3	1.7321387270	1	19.43152886
		0.5	0.9320419488	2	19.25572750
		0.7	0.6807384641	3	18.87967420
		0.9	0.5724068304	4	18.27435506
	0.2	0.1	1.7321387270	1	19.43152886
		0.3	1.7321387270	1	19.43152886
		0.5	0.9446982377	2	19.43140935
		0.7	0.9781337259	2	19.26339771
		0.9	1.7321387270	1	19.43152886
비재생비례보증 (NPRW)	0	0.1	2.1370400750	1	23.16274087
		0.3	2.1370400750	1	23.16274087
		0.5	0.8036595870	3	22.36546264
		0.7	0.5496431418	5	21.39174749
		0.9	0.4214412258	8	19.84292981
	0.2	0.1	2.1370400750	1	23.16274087
		0.3	1.1258884520	2	23.05772670
		0.5	1.1596878970	2	22.67593030
		0.7	0.8706459155	3	22.13623628
		0.9	0.9665035065	3	22.10246449
비재생무료보증 (NFRW)	0	0.1	1.8706067040	1	18.37498050
		0.3	0.9839965492	2	18.36151415
		0.5	0.7081280049	3	18.03369622
		0.7	0.5864222829	4	17.44107862
		0.9	0.4670092284	6	16.47684262
	0.2	0.1	1.8706067040	1	18.37498050
		0.3	1.8706067040	1	18.37498050
		0.5	1.0228096920	2	18.20639057
		0.7	1.0607486600	2	17.96434157
		0.9	1.1294370780	2	18.03645453

<표 4.2> 최적의 예방보전정책: $C_{pm}(x, \tau) = c_0 + c_1\exp\{-(x-\tau)\} = c_0 + c_1\exp\{-(x-\alpha x)\}$
($\beta=3$, $\lambda=1$, $c_0=1$, $C_{mr}=1$, $C_{re}=30$, $w=0.5$, $y=0.3$, $l=1$)

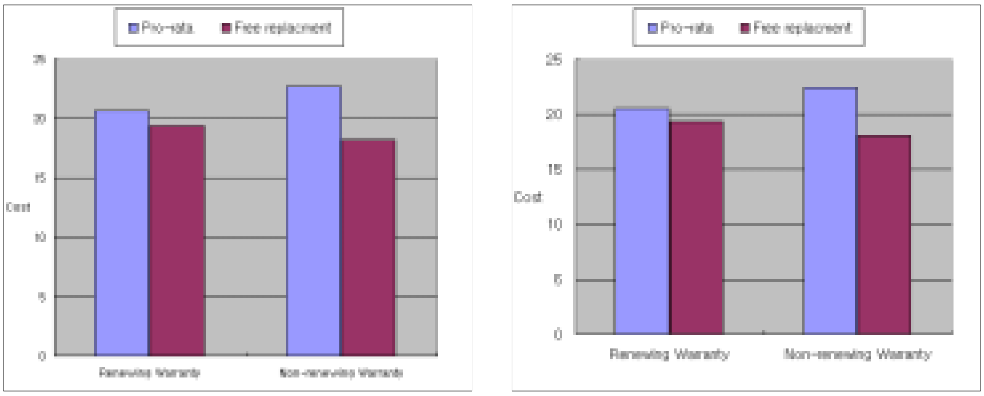
Warranty Type	c_1	α	x^*	N^*	$C(x^*, N^*)$
재생비례보증 (RPRW)	0	0.1	1.8045308160	1	20.71236288
		0.3	1.8045308160	1	20.71236288
		0.5	0.9699940159	2	20.46671367
		0.7	0.7079218257	3	20.00742389
		0.9	0.4994735261	5	19.27667469
	0.2	0.1	1.8045308160	1	20.71236288
		0.3	1.8045308160	1	20.71236288
		0.5	0.9724656347	2	20.51609831
		0.7	0.7115519079	3	20.12811236
		0.9	0.5995428855	4	19.49593485
재생무료보증 (RFRW)	0	0.1	1.7321387270	1	19.43152886
		0.3	1.7321387270	1	19.43152886
		0.5	0.9320419488	2	19.25572750
		0.7	0.6807384641	3	18.87967420
		0.9	0.5724068304	4	18.27435506
	0.2	0.1	1.7321387270	1	19.43152886
		0.3	1.7321387270	1	19.43152886
		0.5	0.9346877539	2	19.30763342
		0.7	0.6845946272	3	19.00515086
		0.9	0.5771443479	4	18.47322010
비재생비례보증 (NPRW)	0	0.1	2.1370400750	1	23.16274087
		0.3	1.1201487910	2	22.96507907
		0.5	0.8036595870	3	22.36546264
		0.7	0.5496431418	5	21.39174749
		0.9	0.4214412258	8	19.84292981
	0.2	0.1	2.1370400750	1	23.16274087
		0.3	1.1219737740	2	22.99835524
		0.5	0.8065084537	3	22.45720325
		0.7	0.6674846348	4	21.59197045
		0.9	0.4722064106	7	20.15707469
비재생무료보증 (NFRW)	0	0.1	1.8706067040	1	18.37498050
		0.3	0.9839965492	2	18.36151415
		0.5	0.7081280049	3	18.03369622
		0.7	0.5864222829	4	17.44107862
		0.9	0.4670092284	6	16.47684262
	0.2	0.1	1.8706067040	1	18.37498050
		0.3	1.8706067040	1	18.37498050
		0.5	1.0140051740	2	18.09894661
		0.7	0.7485588304	3	17.59322844
		0.9	0.5414381934	5	16.73176062



(a) RPRW (b) NPRW

<그림 4.1> 예방보전 비용에 따른 최적의 예방보전 횟수의 비교

($C_{pm}(x, \tau) = c_0 + c_1(x - \alpha x)^{-1}$)



(a) $C_{pm}(x, \tau) = c_0 + c_1(x - \alpha x)^{-1}$ (b) $C_{pm}(x, \tau) = c_0 + c_1 \exp\{-(x - \alpha x)\}$

<그림 4.2> 보증정책별 단위시간당 기대비용의 비교($c_1 = 0.2$, $\alpha = 0.5$)

5. 결론

본 논문에서는 수리가 가능한 시스템에 대하여 보증기간이 종료된 이후의 최적의 예방보전정책을 제시하였다. 재생비례보증(RPRW), 재생무료보증(RFRW), 비재생비례보증(NPRW), 비재생무료보증(NFRW)이 주어진 수리가 가능한 시스템을 고려하였으며, 특히 예방보전비용이 예방보전의 효과에 의존하는 함수라고 가정함으로써 예방보전비용이 고정된 값이라고 가정한 Jung과 Park(2003)의 연구를 확장하였다. 본 논문에서는 최적화의 기준으로 단위시간당 기대비용을 이용하였으며, 이를 위해서 주어진 다양한 비용함수 하에서 단위시간당 기대비용을 결정하였다. 그리고 시스템의 고장시간이 와이블분포를 할 때 예방보전 효과에 의존하는 예방보전비용을 고려하여 최적의 예방보전정책을 결정할 수 있음을 보였다.

참고문헌

1. Canfield, R. V. (1986). Cost optimization of periodic preventive maintenance, *IEEE Transactions on Reliability*, 35, 78-81.
2. Jung, G. M. and Park, D. H. (2003). Optimal maintenance policies during the post-warranty period, *Reliability Engineering and System Safety*, 82, 173-185.
3. Park, D. H. and Jung, G. M. (2002). Preventive maintenance policy with effect dependent cost, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 19, 223-232.
4. Sahin, I. and Polatoglu, H. (1996). Maintenance strategies following the expiration of warranty, *IEEE Transactions on Reliability*, 45, 220-228.

[2006년 2월 접수, 2006년 4월 채택]