주기적인 검사 정책하에서 최적예방 교체시기 결정에 관한 연구
- A Study of Optimal Maintenance Schedules of a System under the Periodic Inspection Policy-

정 현태*
Chung, Hyun-Tae
김 제 숭**
Kim, Che-Soong

Abstract

This paper presents a *preventive maintenance model* for determining the preventive replacement period of a system in which a failure rate is affected by the *cumulative damage* of *fault* and *inspection*. Especially, the failure rate function is considered to be a function of the cumulative damage of the fault and inspection time. Types of replacement considered are preventive replacement and failure replacement.

Failure rate and expected cost function between replacement are derived. An *optimal policy* is obtained that minimizes the *average cost per unit time* for *preventive replacement*, *failure replacement*, *inspection* and *repair*.

1. 서론

현대에 이르러 산업이 발달하고 시스템이 다양해짐에 따라 시스템의 신뢰성 향상에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구중의 한 분야가 보수(*maintenance*)정책에 관한 문제인데, 그 종류로서 시스템의 고장이 발생한 후에 보수를 수행하는 사후보수(*corrective maintenance*)와 고장이 발생하기 전에 보수를 수행하는 예방보수(*preventive maintenance*)등이 있다. 그러나 고장의 발생은 시스템을 정지시키므로, 이에 의한 비용은 실로 크다고 할 수 있다. 또한 비용을 고려하지 않더라도 시스템의 효율적인 운영 면에서 볼 때 고장의 발생을 미연에 방지하는 것이 보다 더 효율적이다. 그래서 사후보수 보다는 예방보수에 대한 분석이 더 활발히 진행되고 있다. 그런데 이전의 예방보수 정책 문제에 대한 분석에서는 거의 모두 시스템의 고장을 하나의 형태로 가정하거나, 여러 가지 고장이 존재하더라도 고장이 서로 독립적으로 발생한다고 가정하였다. 그러나 현실적으로 현재의 시스템은 많은 부품들이 복잡하게 구성되어 있어 시스템에 부하를 주지만 쉽게 발견되지 않는 결함(*fault*)들이 존재한다. 즉 시스템은 작동하지만 결함이 발생하면 부하를 주어 시스템의 고장 발생을 더욱 가속시키게 된다. 시스템의 고장은 언젠가 발생하는 것이지만 이러한 결함이 고장 발생 시간을 단축시킨다면 그 시스템을 효율적으로 사용하지 못하게 되는 상황에 도달하게 된다. 그래서 이러한 결함에 대한 또다른 관찰이 필요한 것이다. 즉 시스템이 작동되는 기간 정기적인 검사로써 이러한 결함을 적절히 수리하여 시스템이 받는 부하를 경감시키는 것이 보다 효율적인 시스템의 운영이라 할 수 있다.

* 경일대학교 산업공학과
**상지대학교 산업공학과

*Endreni*는 부품의 고장을 퇴화고장(*deterioration failure*)과 포아송 고장(Poisson *failure*)으로 분류하여 수리가 이루어지는 모형에 대해 마코프 과정을 통하여 적정 예방보수 정책에 대해 연구하였다. *Wells*는 부품 고장시에 수리, 교체 또는 방관(*ignored*) 중의 한 행동을 취하는 모형에 대해서 시스템으로부터 얻을 수 있는 수익을 평가 척도로 삼아 최적 예방보수 정책을 결정하는 연구를 하였다. 그는 또한 평균 수리 횟수에 따른 예방보수 시기의 변화에 대해서도 연구하였다. *Karpinski*는 수리 형태를 완전고장(*complete failure*)시의 수리와 성능이 저하된(*degraded*) 상태를 감지한 후의 수리로 분류하여 수리 정책과 검사 시기를 시스템으로부터 얻을 수 있는 이득에 대한 함수로 유도하여 결정하는 연구를 하였다. *Boland*는 최소 수리 비용이 시간에 따라 변하는 상황의 주기적 교체 모형에 대해 적정 교체 주기를 결정하는 문제를 연구하였다. *Zuckerman*은 비용 분석을 통해 검사와 교체 시기를 결정하는 문제를 다루었다. 그는 이 연구에서 시스템 고장은 단지 검사에 의해서 발견되고 이 고장에 대해서 즉시 교체된다고 가정하였다. 즉 검사 시점에서 고장이 발견되면 교체를 하고(고장교체), 고장 없이 일정 수명까지 작동되었을 때 교체를 하는(예방교체) 모형에 대해 연구하였다. 그는 이 연구에서 예방교체시의 비용이 고장 교체시의 비용보다 적다고 가정하여 매 검사시의 비용이 검사 횟수의 증가에 따라 증가하는 검사 비용의 비율이 총 비용에 대해 점점 증가하는 모형에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 결함이 시스템의 고장에 부하를 주는 시스템에 대해 적정 예방교체 시기와 이 기간 동안의 적정 검사시기에 대한 분석을 하고자 한다. 검사 시점에서 결함들이 발견되면 이 결함에 대해 적절한 수리를 해주고, 결함이 발견되지 않으면 아무런 조치를 취해주지 않는다. 그리고 시스템의 수명이 적정 시기에 도달되었을 때 예방교체를 취하여 시스템의 신뢰성을 높임으로써 효율적인 시스템 운영이 될 수 있도록 한다. 그리고 교체가 발생하기 전의 시스템에 대해 고장의 원인이 될 수 있는 결함에 대해서는 수리를 하기 위한 검사를 수행한다. 검사 시에 결함이 발견되면 그 결함들을 수리해주고, 발견되지 않으면 수리하지 않는 것으로 한다. 이러한 시스템 하에서 최적 예방교체 시기를 결정하는 것이 본 연구의 주된 목적이다.

본 연구에서 다루는 모형은 다음과 같은 가정 하에서 유도되었다.

(1) 고장의 발생은 시스템의 작동 중지로 즉시 알 수 있으나, 결함의 발생은 시스템의 작동 중지에 영향을 주지 못하므로 즉시 알 수 없다.

(2) 시스템의 고장률 함수는 지수함수를 따른다.

(3) 결함은 시간에 따라 증가하는 비제차 포아송 과정(*nonhomogeneous poisson process*)을 따른다.

(4) 검사 구간 내에서 발생하는 결함의 수는 여러개 일 수 있고, 검사 시점에서 모두 발견되어 수리된다.

(5) 고장이 발생하면 즉시 고장교체되며, 고장의 발생 없이 일정 수명까지 작동하면 예방교체를 실시한다.

(6) 교체 후의 시스템의 고장률은 동일한 신품의 시스템과 같다. 그러나, 수리 후 시스템의 고장률은 결함만 없어진 상태이므로 결함에 의해 증가한다.

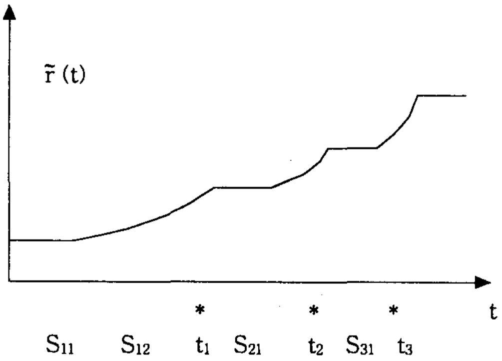
본 연구에서 사용된 기호들은 다음과 같다.

C_R, C_{PR}	: 고장교체, 예방교체 비용
C_I, Cr	: 검사, 수리 비용
T	: 예방교체 주기
t_i	: 검사 시기 i=1,2,3 ⋯
S_{ij}	: 구간 (t_{i-1}, t_i) 에서 j번째 결함이 발생한 시간(검사가 있을 시)
S_j	: j번째 결함이 발생한 시간(검사가 없을 시)
$N(t)$	: 시간 t까지 발생한 결함의 수
$n(t_{i-1}, t_i)$	: 구간 (t_{i-1}, t_i) 에서 발생한 결함의 수

$M(t)$	: $E[N(t)] = \int_0^t \lambda(u)du$
$M(t_{i-1}, t_i)$	: $E[N(t)] = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \lambda(u)du$
I, R	: 주기내의 평균 검사, 수리 회수
$\tilde{r}(t)$	: 시간 t 에서 누적된 결합으로 인한 고장률
$r(t)$	: $E[\tilde{r}(t)]$
$\overline{G}(t)$	: 시간 t 에서의 신뢰도 함수
$\alpha(i, j)$	: 구간 (t_{i-1}, t_i)에서 j번째 결합이 시스템 고장률에 준 부하
$\alpha(i)$	: 구간 (t_{i-1}, t_i)에서 발생한 결합으로 인한 누적 부하
$\alpha(t)$	: 시간 t까지 발생한 결합으로 인한 누적 부하
Z	: 고장교체 혹은 예방교체가 발생할 때까지의 기간

2. 고장률 함수 유도

본 연구에서 고려되는 시스템의 고장률 함수는 결합이 시스템에 주는 부하로 인하여 증가하며 다음 <그림1>로 표현될 수 있다.



<그림 1> 고장률의 변화

즉 <그림1>에서 $(0, t_1)$ 구간내의 시스템이 받는 부하는 2개의 결합에 의해 $a(t_1 - S_{11})$과 $a(t_1 - S_{12})$ 크기로 누적되어 받게 된다. 그래서 t_3 시점에서의 고장률은 4개의 결합에 의하여 증가되는데 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\tilde{r}(t_3) &= r + \alpha(t) \\ &= r + a(t_1 - S_{11}) + a(t_1 - S_{12}) + a(t_2 - S_{21}) + a(t_3 - S_{31})\end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)을 k번째 검사 시점에서의 고장률 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\tilde{r}(t_k) = r + \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{n(t_{i-1}, t_i)} \alpha(i, j) \quad (2)$$

식 (2)에서는 결합의 발생 시간 S_{ij}와 발생 수 $n(t_{i-1}, t_i)$ 등의 확률 변수들의 함수로 이루어졌다. 그래서 이 확률 변수들을 소거시키기 위해 식 (2)의 기대값을 구하면 다음과 같다.

$$r(t_k) = E[\tilde{r}(t_k)] \quad (3)$$

식 (3)이 구하고자 하는 고장률 함수인데, 풀어쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r(t_k) &= E\left[\tilde{r}(t_k)\right] \\ &= E\{E\left[\tilde{r}(t_k) \mid N(t)\right]\} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} E\left[\tilde{r}(t_k) \mid N(t)=n\right] Pr\{N(t)=n\} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} E\left[\tilde{r}(t_k) \mid N(t)=n\right] exp(-M(t)) \frac{\{M(t)^n\}}{n!} \\ &\quad [\{N(t),\ t\geq 0\} \sim Poisson\{\lambda(t)\}] \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{n=0}^{\infty} E[\tilde{r}(t_k) \mid N(t)=n] exp(-M(t)) \frac{\{M(t)\}^n}{n!} \\ &= \sum_{n_i=0}^{\infty} E\left[r + \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{n(t_{i-1},t_i)} \alpha(i,j) \mid n(t_{i-1},t_i)=n_i\right] \frac{\{M(t_{i-1},t_i)\}^{n_i}}{n_i!} exp\{-M(t_{i-1},t_i)\} \\ &= r + \sum_{n_i=0}^{\infty} E\left[\sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{n(t_{i-1},t_i)} \alpha(i,j) \mid n(t_{i-1},t_i)=n_i\right] \frac{\{M(t_{i-1},t_i)\}^{n_i}}{n_i!} exp\{-M(t_{i-1},t_i)\} \\ &= r + \sum_{i=1}^{k} \sum_{n_i=0}^{\infty} E\left[\sum_{j=1}^{n(t_{i-1},t_i)} \alpha(i,j) \mid n(t_{i-1},t_i)=n_i\right] \frac{\{M(t_{i-1},t_i)\}^{n_i}}{n_i!} exp\{-M(t_{i-1},t_i)\} \end{aligned} \tag{5}$$

위의 식은 결함 발생이 비제차 포아송 과정을 따라 발생하기 때문에 성립하게 된다. 그러므로 식 (5)의 일부를 다음 (6)식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E\left[\sum_{j=1}^{n(t_{i-1},t_i)} \alpha(i,j) \mid n(t_{i-1},t_i)=n_i\right] &= E\left[\sum_{j=1}^{n_i} \alpha(i,j)\right] = \sum_{j=1}^{n_i} E[\alpha(i,j)] \\ &= \sum_{j=1}^{n_i} E\left[a(t_i - S_{ij})\right] \\ &= n_i E\left[a(t_i - S_{i.})\right] \ (S_{ij}\text{가 서로 독립이므로}) \\ &= n_i\ a\left[t_i - E(S_{i.})\right] \\ &= n_i a\left[t_i - \int_{t_{i-1}}^{t_i} S_{i.} dF(S_{i.})\right] \\ &= n_i a \frac{1}{M(t_{i-1},t_i)} \int_{t_{i-1}}^{t_i} M(t_{i-1},S_{i.}) dS_{i.} \end{aligned} \tag{6}$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하면 검사가 k번 이루어졌을 때의 고장률 함수가 유도된다.

$$\begin{aligned} &\sum_{n=0}^{\infty} E\left[\tilde{r}(t) \mid N(t)=n\right] \exp\{-M(t)\} \frac{\{M(t)\}^n}{n!} \\ &= r + \sum_{i=0}^{k} \sum_{n_i=0}^{\infty} E\left[\sum_{j=1}^{n(t_{i-1},t_i)} \alpha(i,j) \mid n(t_{i-1},t_i)=n_i\right] Pr\{n(t_{i-1},t_i)=n_i\} \\ &= r + \sum_{i=1}^{k} E(n_i) \frac{a}{M(t_{i-1},t_i)} \int_{t_{i-1}}^{t_i} M(t_{i-1},S_{i.}) dS_{i.} \\ &= r + a \sum_{i=1}^{k} \int_{t_{i-1}}^{t_i} M(t_{i-1},t_i) dS_{i.} \end{aligned} \tag{7}$$

그리고, 시간 t까지 검사가 없는 경우의 고장률 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\tilde{r}(t) &= r + a(t) \\ &= r + \sum_{i=1}^{N(t)} a(i) \\ &= r + \sum_{i=1}^{N(t)} a(t - S_i)\end{aligned} \tag{8}$$

이제, 식 (8)의 기대값을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}r(t) &= E[\tilde{r}(t)] \\ &= E[E\{\tilde{r}(t) \mid N(t)\}] \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} E[\tilde{r}(t) \mid N(t) = n] \, Pr\{N(t) = n\} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} E[\tilde{r}(t) \mid N(t) = n] \, exp(-M(t)) \frac{\{M(t)\}^n}{n!}\end{aligned} \tag{9}$$

그래서, 위 식은 앞의 식(6)과 식(7)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}E[\tilde{r}(t) \mid N(t) = n] &= E\left[r + \sum_{i=0}^{N(t)} a(t - S_i) \mid N(t) = n\right] \\ &= r + nE[a(t - S)] \quad (\ S_i \text{ 가 서로 독립이므로 }) \\ &= r + na \int_0^t F(S)dS\end{aligned} \tag{10}$$

그리고 식 (10)을 식 (9)에 대입하면

$$\begin{aligned}r(t) &= r + \sum_{n=0}^{\infty} na \int_0^t F(S)dS \, exp(-M(t)) \frac{\{M(t)\}^n}{n!} \\ &= r + a \int_0^t M(S)dS\end{aligned} \tag{11}$$

그래서, 식 (7)과 (11)를 종합하면 고장률은 다음과 같이 표현되고, 고장률의 증가는 결함의 발생 빈도에 따라서 증가됨을 알 수 있다. 또한 고장률의 크기를 검사로써 줄일 수 있음을 알 수 있다.

$$r(t) = \begin{cases} r + a \sum_{i=1}^{k} \int_{t_{i-1}}^{t_i} M(t_{i-1}, x)dx, & \text{검사가 있을때(} \ t_{i-1} < x < t_i \text{)} \\ r + a \int_o^t M(x)dx, & \text{검사가 없을때(} \ 0 < x < t \text{)} \end{cases} \tag{12}$$

3. 적정 예방교체 시기와 검사시기 결정

검사가 없을 경우는 I는 0이다. 그러나, 검사가 있을 때는 시스템의 고장이 j번째 검사 시점과 $(j+1)$번째 검사 시점 사이에서 발생하였다면 검사는 j번의 검사를 수행하게 된다. 그리고 고장의 발생 없이 예방교체 시기까지 작동되었을 때 수행된 검사의 횟수는 예방교체 시기 바로 직전까지의 횟수가 검사가 이루어진 횟수가 된다. 그러므로 평균검사 횟수를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}I &= \sum_{i=0}^{k} i\{\overline{G}(t_i) - \overline{G}(t_{i+1})\} + k\overline{G}(T) \\ &= \sum_{i=1}^{k} \overline{G}(t_i)\end{aligned} \tag{13}$$

검사가 없을 때는 수리를 하지 않으므로 R은 당연히 0이다. 그러나, 평균 수리 횟수는 검사가 이루어졌을 때 바로 직전 검사시기 이후에 발생한 결함만을 수리하므로 다음과 같은 상황을 유추할 수 있다. 즉 j번째 검사 시기와 $(j+1)$번째 검사 시기 사이에서 고장이 발생하였다면 t_{j+1} 시점까지 발생한 결함만을 수리하게 된다. 그리고 예방교체 시기까지 고장이 발생하지 않았다면 수리는 바로 직전 검사 시기까지 발생한 결함을 수리하게 된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$R=\sum_{i=1}^{k}\{\overline{G}(t_{i-1})-\overline{G}(t_i)\}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\lambda(t)dt+\int_0^{t_k}\lambda(t)dt\ \overline{G}(T)$$
$$=\sum_{i=1}^{k}\overline{G}(t_i)\ \int_{t_{i-1}}^{t_i}\lambda(t)dt \qquad (14)$$

시스템이 새롭게 되는 상태는 교체시점이 된다. 그래서, 시스템의 평균 수명은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[Z]=\int_0^T\overline{G}(t)dt \qquad (15)$$

그리고, 시스템의 평균 수명 기간 사용되는 비용 요소들은 고장교체 비용($C_R\cdot G(T)$),예방교체 비용($C_{PR}\cdot G(T)$), 검사 비용($C_I I$), 수리 비용($C_r R$)들로 나누어 볼 수 있다. 이제 이런 비용들로 평균비용(*average cost*) 함수를 유도할 수 있다.

* 검사가 없을 때

이 경우는 검사와 수리가 발생하지 않으므로 비용 함수와 T까지 시스템이 작동 할 확률은 각각 다음과 같다.

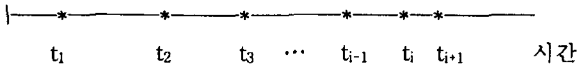
$$AC=\{C_R\ G(T)+C_{PR}\ \overline{G}(T)\}/E(Z) \qquad (16)$$
$$\overline{G}(T)=exp\left\{-\int_0^T\left[r+a\int_0^t M(x)dx\right]dt\right\} \qquad (17)$$

* 검사가 있을 때

이 경우는 검사가 k번 그리고 수리는 k번의 검사 시기까지 이루어지므로 비용 함수와 G(t)는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$AC=\{C_R\ G(T)+C_{PR}\ \overline{G}(T)+C_I\ I+C_r\ R\}/E(Z) \qquad (18)$$
$$\overline{G}(T)=exp\left\{-\int_0^T\left[r+a\sum_{i=1}^{k}\int_{t_{i-1}}^{t_i}M(t_{i-1},x)dx\right]dt\right\} \qquad (19)$$

이제 검사 시기 결정에 대해서 알아보자. 결함의 발생이 비율 $\lambda(t)$가 증가하는 비제차 포아송 과정을 따르므로 검사를 일정한 시간 간격으로 수행한다면 증가하는 결함 발생에 의한 부하의 증가를 효과적으로 줄일 수가 없다. 그러므로 일정한 간격의 검사보다는 검사 간격이 시간에 따라 변화하는 검사 정책을 수행하는 것이 효과적인 검사 정책일 것이다. 즉 다음 그림과 같다.



<그림2> 검사 시기

위의 그림에서 알 수 있듯이 시간에 따라 검사 간격의 크기가 줄어들어야 증가하는 결함의 발생을 빨리 찾아낼 수 있다. 이에 따라 검사 시기를 구해보면 다음과 같다.

$$t_{i+1}-t_i=\beta(t_i-t_{i-1}) \quad (0<\beta<1,\ t_0=0,\ t_{k+1}=T) \tag{20}$$

위의 식은 2차 차분 방정식(*difference equation*)으로 이를 풀어보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$t_i=\frac{1-\beta^i}{1-\beta^{k+1}}\,T \tag{21}$$

앞의 고장률과 평균 검사 및 수리 횟수 그리고 검사 시기의 결과를 이용하여 평균 비용 함수를 나타내면 다음과 같다.

$$AC=A(T)/B(T) \tag{22}$$

여기서,

$$A(T)=C_R\,G(T)+C_{PR}\,\overline{G}(T)+C_I\sum_{i=1}^{k}\overline{G}(t_i)+C_r\sum_{i=0}^{k}\overline{G}(t_i)\int_0^{t_i}\lambda(t)dt$$

$$B(T)=\int_0^{T}\overline{G}(t)dt$$

위 식에서 k=0일 때 검사가 없을 경우의 평균 비용 함수가 된다. 그리고, 위 식을 T에 대한 미분을 이용하면 평균 비용을 최소화시키는 T를 구할 수 있다.

$$dAC/dT=\left\{\frac{\partial A(T)}{\partial T}B(T)-A(T)\frac{\partial B(T)}{\partial T}\right\}/\{B(T)\}^2=0 \tag{23}$$

여기서,

$$\frac{\partial A(T)}{\partial T}=(C_{R-}C_{PR})\ r(T)\ \overline{G}(T)-C_i\sum_{i=1}^{k}r(t_i)\frac{1-\beta^i}{1-\beta^{k+1}}\overline{G}(t_i)$$
$$+C_r\sum_{i=1}^{k}\left\{\lambda(t_i)-r(t_i)\int_0^{t_i}\lambda(t)dt\right\}G(t_i)\frac{1-\beta^i}{1-\beta^{k+1}}$$
$$-C_r\sum_{i=1}^{k}\lambda(t_{i-1})\frac{1-\beta^{i-1}}{1-\beta^{k+1}}\overline{G}(t_i)$$

$$\frac{\partial B(T)}{\partial T}=\overline{G}(T)$$

$$C_R=(C_{R-}C_{PR})\frac{r(T)}{r}-\sum_{i=1}^{k}\{C_I+C_r\cdot M(t_{i-1,}t_i)\}G(t_i)$$
$$-\sum_{i=1}^{k}\{C_I+C_rM(t_{i-1,}t_i)\}r(t_i)G(t_i)\frac{1-\beta^i}{1-\beta^{k+1}}\frac{\int_0^{T}\overline{G}(t)dt}{\overline{G}(T)}$$
$$+\sum_{i=1}^{k}C_r\{(1-\beta_i)\lambda(t_i)-(1-\beta_{i-1})\lambda(t_{i-1})\}\frac{\overline{G}(t_i)}{1-\beta^{k+1}}\frac{\int_0^{T}\overline{G}(t)dt}{\overline{G}(T)} \tag{24}$$

식 (23)으로부터 다음과 같은 식 (24)을 얻을 수 있다. 즉 식 (24)을 만족시키는 T가 평균 비용을 최소화시키는 최적 예방교체 시기이다. 그리고, 위 식에서 k=0 즉, $T=t_l$ 일 때가 검사가 없을 경우의 최적 예방교체 시기가 된다. 위 식에서 알수 있듯이 예방교체 시기 결정에 가장 큰 영향을 주는 요소는 바로 고장교체와 예방교체에 드는 비용이다. 즉 고장교체 비용이 예방교체 비용보다 매우 크다면 예방교체 시기는 짧아질 것이고, 반대의 경우에는 길어질 것이다. 그러나 위 식은 수학적으로 풀기가 매우 어렵다. 그러므로 수치 해석적 방법으로 최적 예방교체 시기를 구할 수밖에 없다.

5. 결 론

기존의 신뢰도 모형에서는 부품들간의 고장이 독립적으로 발생한다고 가정하고 있으나, 현실적으로는 부품들간의 고장이 서로 영향을 주는 경우가 많다. 특히 부품들이 복잡하게 구성되어 있는 시스템에서는 구성 요소들간의 고장이 서로 독립이라고 보기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 부품들간의 고장이 서로 독립이라는 가정을 완화하여 사소한 고장(즉, 결함)이 시스템의 성능을 저하시키는(즉, 고장률의 증가) 모형에 대해 분석하였다. 본 논문에서의 주된 관심사는 시스템이 결함에 의해 받은 부하를 검사에 의해 어느 정도 줄일 수 있는 가이다. 시스템의 고장률은 결함의 발생 빈도와 검사 시기의 함수로 표현되었는데, 이 발생 빈도에 의해 증가되는 부하를 적절한 검사 정책의 수행으로서 줄일 수 있음을 알 수 있다. 즉 검사에 의한 결함의 처리는 시스템의 고장 확률을 낮추어 시스템 고장으로 인한 손실을 줄여줌을 알 수 있다. 검사 정책은 시스템의 사용 수명을 길게 하여 주지만 늘어나는 사용 수명이 시스템의 효율적인 운영이 되지 않음을 알 수 있다. 즉 사소한 고장(결함)의 신속한 처리는 시스템 전체로 볼 때 고장률의 증가를 감소시켜 예방교체 시기를 늘려주지만 비용 요소를 고려하면 검사에 따른 비용의 증가가 이 효과를 상쇄시켜 시스템의 사용 기간 평균 비용을 증가시키게 된다. 또한 비용을 고려하지 않더라도 단지 결함에 의한 부하를 줄여 고장률의 증가를 감소시키기 위한 검사 정책의 수행이라면 시스템 운영 면에서 볼 때 비효율적인 운영이 될 수도 있다.

참 고 문 헌

1. Barlow, R. E., and Proschan, F. (1975), *Statistical Theory of Reliability and Life Testing Probability Models,* Holts, Rinehart and Winston, Inc.

2. Boland, P. J.(1982), "Periodic Replacement When Minimal Repair Costs Vary with Time," *Naval Research Logistics,* Vol.29, No.4, pp.541-546.

3. Endreni, J.(1988), "Optimal Preventive Maintenance with Repair," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol.37, No.1, pp.92-96.

4. Jaunts, K.(1986), "A Multistate System Under an Inspection and Repair Policy," *IEEE Transaction on Reliability,* Vol.35, No.1, pp.76-77.

5. Fung, J. and Makis, V. (1997), "An Inspection Model with Generally Distributed Restoration and Repair Times," *Microelectronics and Reliability*, Vol.37, pp.381-389.

6. Kong, M.B. and Park, K.S.(1997), "Optimal Replacement of an Item subject to Cumulative Damage under Periodic Inspections," *Microelectronics and Reliability*, Vol.37, pp.467-472.

7. Milioni, A.Z., Pliska, S.R.(1988), "Optimal Inspection Under Semi-Markovian Deterioration Basic Results," *Naval Research Logistics*, Vol.35, pp.373-392.

8. Min-Tsai, L. and Bor-Yuh, L.(1996), "An Economic Discrete Replacement Policy for a Shock Damage Model with Minimal Repairs," *Microelectronics and Reliability*, Vol.36, pp.1347-1355.

9. Nakagawa, T.(1980), "Replacement Models with Inspection and Preventive Maintenance," *Microelectronics and Reliability*, Vol.20, pp.427-433.

10. Nakagawa, T.(1981), "Modified Periodic Replacement with Minimal Repair at Failure," *IEEE Transaction on Reliability,* Vol.30, No.2, pp.165-168.

11. Schabe, H.(1996), "Optimum Stochastic Inspection Policies for a System with Safety Device," *Microelectronics and Reliability*, Vol.36, pp.1395-1405.

12. Wells, C. E.(1988), "Replacement vs Repair of Failed Components for a System with a Random Lifetime," *IEEE Transaction on Reliability,* Vol.37, pp.280-286.

13. Wood, A. P.(1988), "Optimal Maintenance Policies for Constantly Monitored Systems," *Naval Research Logistics*, Vol.35, pp.461-471.

14. Yamada, S., Osaki, S.(1981), " Optimum Replacement Policies for a System Composed of Components," *IEEE Transaction on Reliability,* Vol.30, No.3, pp.278-283.

15. Zuckerman, D.(1980), "Inspection and Replacement Policies," *J. Appl. Prob.,* Vol.17, pp.168-177.