⊠연구논문

일반수리회수에 의한 장비 교환 정책

김용필 · 윤덕균
한양대학교 산업공학과

Preventive Replacement Policy with the Number of General Repairs

Yong-Pil Kim · Deok-Kyun Yoon
Dept. of Industrial Engineering, Hanyang University

Abstract

This paper presents a model for determining the optimal number of general repairs and supplementary input cost limit rate in addition to minimal repair cost rate to implement preventive maintenance. The basic concept parallels the periodic replacement model with minimal repair at failure introduced by Barlow and Hunter(1960) and Park(1979), only difference being the replacement signalled by the number of previous general repairs performed on the system. A general repair brings the state of the system to a certain better state than before repaired. Numerical examples are provided.

1. 서론

모든 설비들은 노후화 등 자연적인 원인 또는 사용효과 등으로 상태가 나빠지거나 고장을 일으키게 된다. 고장의 원인은 장비의 내부 결함 때문일 수도 있으며 외적 요소로부터 발생할 수도 있다. 고장이 일어나면 장비 그 자체를 교환하거나 수리하는 데 비용이 들뿐만 아니라 생산과 용역의 기회손실에서도 비용이 발생할 수 있다. 또한 관련 장비와 관련 인원의 유휴에 의해서도 추가적인 비용은 발생된다. 그래서 고장의 가능성을 최소로 감소시켜 장비를 일정 수준으로 보전하려는 조치를 취하게 된다. 그렇지만 고장을 미리 막기 위한 정비, 즉 예방 정비는 그 자체로도 많은 비용이 든다. 만일 고장을 막는다는 단 하나의 목적만으로 예방정비를 수행하다보면 너무 많은 돈을 쓰게 되어 예방정비를 안 할 경우 발생하는 고장으로부터 야기되는 비용을 초과할 수도 있다. 더욱 예방정비를 곤란하게 만드는 경우는 장비의 점검 및 수리를 외주에 전적으로 의존해야 할 때이다. 이러한 경우 수리를 해야 할 때 예방 보전을 병행한다면 비용면에서 매우 유리할 수 있다.

본 연구에서 제기하고자 하는 모델은 이렇게 수리 보전을 할 경우에 예방보전을 병행하는 일반 수리 모델이다. 일반수리(general repair) 모

델과 최소 수리(minimal repair) 모델의 가장 큰 차이는 최소 수리는 수리 전후의 장비의 상태는 변함이 없다는 것이지만, 일반수리는 추가적인 예방보전으로 장비의 상태가 향상된다는 것이다. 그러므로 예방보전으로 인해 1회 일반수리 비용은 최소수리에 비해 증가하지만 장비의 상태가 향상되어 장비 사용 기대주기가 늘어나기 때문에 단위 시간당 비용은 증가하지 않게 된다.

본 연구에서의 기본적인 가정은 아래와 같다.

(1) 고장난 부품에 대하여 수리는 완전하게 이루어진다.

(2) 고장 수리시 예방보전을 병행하며 수리 후 장비의 상태는 수리전보다 향상된다.

(3) 수리 후 향상되는 장비의 상태는 고장 발생 간격에 비례한다.

(4) 장비의 수명 분포는 와이블 분포를 따른다.

(5) 수리와 교환 시간은 무시한다.

여기에서 사용되는 기호 및 정의는 다음과 같다.

c_f : 1회 장비 수리 비용

c_r : 1회 장비 교환 비용

β : 와이블 분포의 형상모수

λ : 와이블 분포의 척도모수

$h(t)$: 시점 t에서의 장비 고장률

$H(t)=\int_o^{\infty} h(t)dt$ (와이블 분포일 경우 λt^{β})

$N_f(t)$: [0, t]에서의 장비 수리 회수

$N_r(t)$: [0, t]에서의 장비 교환 회수

$\overline{F}_i(t)$: $1 - F_i(t)$

C_n : n번째 고장 발생시의 단위 시간당 총 비용

t_n : n번째 고장이 발생한 시간

$f_n(t)$: 시점 t에서 n번의 고장 발생 확률밀도함수

$F_n(t)$: 시점 t에서 n번의 고장 발생 분포함수

$P_n(t)$: 시점 t에서 n번의 고장이 발생할 확률

$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} x^{n-1}e^{-x}dx$: 감마 함수

τ_n : (n-1)번째 고장과 n번째 기대 고장 간격

$$poim(i;x) = e^{-x}\frac{x^i}{i!}$$

γ : 향상계수(improvement factor), $0<\gamma<1$

수치 예제는 형상모수, 시스템 향상 계수, 그리고 교체비용 대비 수리비용의 변화에 대하여 최소 수리 회수에 의한 장비 교환 모델과 비교하여 단위 시간당 비용의 값을 산출하였다.

2. 기존 연구 고찰

2.1 수리 보전과 예방 보전에 대한 기존 연구

장비 관리에 있어서 효과적인 관리 방안은 많이 연구되어 왔다. 특히 비용 측면에서 예방 보전과 수리 보전의 대립된 개념의 접근이 현실적이고, 통합되는 과정으로 이루어져 왔다. 본격적인 장비 예방 교체 개념의 도입은 Barlow & Hunter(1960)가 수리 사용 후 정기 교환 정책을 제안하면서이다. 여기에서는 장비 사용 도중에 실시되는 고장 수리에 의해서는 장비의 고장률이 변하지 않는다는 최소 수리를 가정하였다. 이러한 최소 수리(minimal repair)는 특정한 부품이 고장났을 때, 고장부품은 장비와 같은 연령의 고장나지 않은 중고부품으로 교환해 주거나, 새 부품으로 교환해 주었을 때의 장비 고장률의 감소는 무시할 수 있다는 수리 개념이다. 이는 수리 전후 장비의 고장률은 동일하다. 그러나 이러한 정기 교환 정책은 결정변수로서 시간을 택함으로서 수학적으로 다루기 쉽게하였으나 실제 문제에 있어서 시간을 결정변수로 택하여 사용하기 곤란하기 때문에 Park(1979)은 고장회수에 근거한 장비 교환을 함으로서 장비가 고장난 경우에만 교환을 고려하는 모델을 제시하였다. 이는 Barlow & Hunter(1960)의 교환 시점까지 시간이 얼마 남지 않았는데도 수리를 강해할 필요성이 배제되므로 좀 더 효율적일 수가 있다. Park(1979)의 연구에 가용도를 고려하여 장비 교환 모델을 연구한 강호선외 2명(1998)은 장비의 고유 가용도를 최소한의 요구된 수준에 만족

되도록 하면서 단위 가동 시간당 평균정비비용을 최소화하는 최적 정비모형을 제시하였다. 여기에서 수리의 형태는 최소수리를 실시하며 최소 가용도를 만족하는 선형방정식을 이용한 최소수리 횟수를 찾는 모형이다. 또한 Barlow & Proschan(1965)은 장비는 시간이 지남에 따라 노후화 되기 때문에 노후화 되기 전에 교체하는 것이 유리하며, 이때 단위 시간당 정비 비용을 최소화하는 최적 수명 교체 및 정기 교체 주기를 제시하였다. 이와는 달리 Beichelt(1982)는 수리비용율(repair cost rate)이 고정된 수준(기준값)을 넘게되면 시스템을 교환하는 정책을 제시하면서 경제적 수명 정책(economic cost rate)과 비교하여 보다 효율적임을 제시하였다. 또한 Barlow & Proschan(1965)은 시스템 고장으로부터 이를 발견할 때까지 발생하는 고장정지비용과 고장을 발견하기 위한 검사비용의 합을 최소화하는 최적 검사일정을 구할 수 있는 반복계산절차를 제시하였다. Canfield(1986)는 정기적인 예방보전 간격을 시스템 운용의 평균비용율이 최소가 되도록 결정하였으며 마찬가지로 고장율은 예방보전 전후 동일하다(hazard function is monotone)고 가정하였고 단지 예방보전은 설비의 스트레스를 감소(설비의 마모진행을 감소)시키는 효과만이 있다고 가정하였다.

이와 같이 초기의 예방 보전은 예방 보전 전후의 시스템의 고장율은 변함이 없다고 생각하였으나 Jayabalan & Chaudhuri(1992)는 예방보전 후의 시스템의 고장율은 일정 비율로 향상되는 것을 가정하였는데 보전 회수가 증가함에 따라 향상되는 정도는 감소되므로 향상이 적을 때는 시스템 교환을 실시한다. 여기에서 보전회수가 증가함에 따라 보전 간격은 짧아지는 것을 가정하였으며, Chan & Shaw(1983)는 예방보전 사이 운용 기간의 특정 확률적 순환 가용도를 달성할 확률을 최대화하는 방법 제시하였는데 예방보전에 의한 고장율 향상이 일정한 수준과 비율적인 수준을 가정하였다.

이와 같이 최근의 연구는 보전 행위로 인하여 시스템은 일정 정도 향상되는 것으로 가정하고 있다. 이는 많은 부품으로 구성되어 있는 기계와 전자 장빙에 있어서 부품간의 상호 의존성(dependent)을 수학적으로 증명하지 못하는 것을 반영한 것이다. 본 연구는 고장 수리를 할 때 예방 보전을 병행함으로서 수리 후 장비의 상태가 일정 수준 향상되는 일반 수리 회수에 의한 장비 예방교환 모델을 제시한다.

다음 절에서는 본 연구의 기조가 되는 최소 수리 회수에 의한 방비 교환 모델을 소개한다.

2.2 최소 수리 회수에 의한 장비 교체 모델

최소 수리 회수에 의한 장비 교체 모델은 (n-1)번의 최소수리 후 n번째 고장이 발생했을 때 장비를 교체하는 것이다. 여기에서의 기본 가정은 다음과 같다.

1. 장비의 수명은 와이블 분포를 따른다.
2. 최소 수리를 하며 장비의 고장율은 수리전 · 후 동일하다.
3. 수리 및 교환 시간은 무시한다.

단위 시간당 비용은 사용에 따른 기대 주기 대비 기대비용이므로

$$C_n = [N_f(t)c_f + N_r(t)c_r]/E\{t_n\} \qquad (1)$$

이며 여기에서 $N_f(t) = (n-1)$, $N_r(t) = 1$이며 기대주기는

$$E\{t_n\} = \int_0^\infty t f_n(t)dt = \Gamma(n+\frac{1}{\beta})/[\sqrt[\beta]{\lambda}\,\Gamma(n)] \qquad (2)$$

이다. 식(2)를 식(1)에 대입하면

$$C_n = [(n-1)c_f + c_r]\frac{\sqrt[\beta]{\lambda}\,\Gamma(n)}{\Gamma(n+1/\beta)} \qquad (3)$$

이며 최적 교체 시점은 식(3)에서 C_n을 최소화하는

$$\frac{C_{n+1}}{C_n}=\frac{n(c_r+nc_f)}{(n+1/\beta)[c_r+(n-1)c_f]}>1 \tag{4}$$

조건을 만족하는 n^*번째 고장 발생 시점이 최적 예방 교환 시점이 된다.

3. 일반 수리 회수에 의한 장비 교체 모델

기본적으로 단위 시간당 비용 산출 개념과 교환 시점 결정은 최소 수리에 의한 장비 교체 모델과 동일하다. 그러나 여기에서는 최소 수리가 아닌 일반 수리를 함으로 인해 수리 후 시스템의 상태는 수리 전보다 향상됨으로 기대 주기는 변화하게 된다.

NHPP이론에 의하여 i번째 고장 발생까지의 기대 시간은 $E\{t_i\}=\int_0^\infty \overline{F}_i(t)dt$ 이고 (n-1)번째 고장과 n번째 기대 고장 간격을 τ_n이라고 하면 $\tau_1>\tau_2>\cdots>\tau_n$ 이므로 τ_n은 감소 형태를 가지게 된다[7]. 또한 i번째 고장 수리로 인해서 향상되는 시스템의 상태는 (i-1)번째 고장수리후 i번째 고장발생까지의 시스템 사용 기대 시간에 비례하여 향상된다. 즉,

$$\gamma\tau_i=\gamma\int_0^\infty[\overline{F_i}(t)-\overline{F_{i-1}}(t)]dt \tag{5}$$

이 되므로 수리 회수가 증가함에 따라 시스템의 향상 정도는 점점 감소하게 된다.

시점 t에 n번의 고장이 발생할 확률을 $P_n(t)$라 하면 이는 시간의 함수로 비제차 포아송 과정(NHPP)으로

$$P_n(t)\equiv \Pr\{N_f(t)=n\}=poim(n;H(t))$$
$$=\frac{\{H(t)\}^n\exp(-H(t))}{n!} \tag{6}$$

$$\overline{F_n}(t)=\sum_{i=0}^{n-1}\frac{[H(t)]^i e^{-H(t)}}{i!} \tag{7}$$

$$\overline{F_n}(t)-\overline{F}_{n-1}(t)=\frac{[H(t)]^{n-1}e^{-H(t)}}{(n-1)!}$$
$$=poim(n-1;H(t)) \tag{8}$$

이며[8], n번째 고장의 확률밀도함수 $f_n(t)$는

$$f_n(t)=-\frac{d}{dt}\sum_{k=0}^{n-1}\Pr\{N_f(t)=k\}$$
$$=h(t)H^{n-1}(t)\frac{e^{-H(t)}}{(n-1)!} \tag{9}$$

이다. 그러므로 n번째 고장이 발생할 때까지의 기대 주기는

$$E\{t_n\}=\int_0^\infty\overline{F_n}(t)dt$$
$$+\sum_{i=1}^{n-1}\gamma\int_0^\infty[\overline{F_i}(t)-\overline{F_{i-1}}(t)]dt \tag{10}$$

이며 여기에 식(6), (7), (8), (9)을 식(10)에 대입하면

$$\int_0^\infty tf_n(t)dt+\sum_{i=1}^{n-1}\gamma\int_0^\infty poim(i;H(t))dt$$
$$=\frac{\Gamma(n+\frac{1}{\beta})}{\sqrt[\beta]{\lambda}\Gamma(n)}+\gamma\sum_{i=1}^{n-1}\frac{1}{\beta}\frac{\Gamma(n+\frac{1}{\beta})}{\sqrt[\beta]{\lambda}\Gamma(n+1)} \tag{11}$$

된다. n번째 고장에서 교환을 할 때의 단위 시간당 비용은 식(11)을 식(1)에 대입하면

$$C_n=\frac{[(n-1)c_f+c_r]}{\frac{\Gamma(n+\frac{1}{\beta})}{\sqrt[\beta]{\lambda}\Gamma(n)}+\gamma\sum_{i=1}^{n-1}\frac{1}{\beta}\frac{\Gamma(n+\frac{1}{\beta})}{\sqrt[\beta]{\lambda}\Gamma(n+1)}} \tag{12}$$

이 된다. 식(2)와 식(11)을 비교해보면 최소수리를 할 경우보다 주기는

$$\gamma \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\beta} \frac{\Gamma(n+\frac{1}{\beta})}{\sqrt[\beta]{\lambda}\Gamma(n+1)} \tag{13}$$

만큼 길다. 그러므로 식(3)과 식(12)를 비교하면 예방보전을 위한 추가적인 투입 허용 비용 범위는

$$\frac{\gamma \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\beta} \frac{\Gamma(n+\frac{1}{\beta})}{\sqrt[\beta]{\lambda}\Gamma(n+1)}[(n-1)c_f + c_r]}{\gamma \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\beta} \frac{\Gamma(n+\frac{1}{\beta})}{\sqrt[\beta]{\lambda}\Gamma(n+1)} \cdot [\frac{\Gamma(n+\frac{1}{\beta})}{\sqrt[\beta]{\lambda}\Gamma(n)} + \gamma \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\beta} \frac{\Gamma(n+\frac{1}{\beta})}{\sqrt[\beta]{\lambda}\Gamma(n+1)}]} \tag{14}$$

이 된다. 여기에서도 최적 교환시점은 $C_{n+1}/C_n > 1$을 만족하는 n^*번째 고장발생 시점이 된다.

4. 수치 예제

장비의 고장률이 척도 모수 $\lambda=1$이고 형상모수 $\beta=2,\ 3,\ 4$인 와이블 분포인 장비를 고려해 보자. 여기에서 1회 교체 비용대 고장 비용의 비율 $c_r/c_f=2,\ 5,\ 10,\ 20,\ 50$이고, 향상 계수 $\gamma=0.1,\ 0.2,\ 0.3,\ 0.4,\ 0.5$일때의 최적 교환시점인 고장 회수 n^*과 그 때의 단위 시간당 비용 C_n^*을 최소수리의 모델과 비교하여 산출하였다. 그러나 수치 예제에서는 추가 투입 비용 범위를 산출하기 위해 수리 후 장비 향상 정도 만을 고려하였다. <표 1>은 최소 수리와 일반 수리를 할 경우 단위 시간당 비용과 최적 교환 시점을 산출하였는데, 일반 수리의 경우 추가적인 예방보전으로 인한 추가 비용 투입은 고려하지 않고 향상 정도만을 고려함으로서 비교를 간단히 하였다. 결과에 있어 최소 수리의 경우보다 일반수리가 항상 좋음을 나타낸다고 할 수는 없다. 적용되는 장비의 상태나 관리 형태에 있어 적용이 서로 상이할 수 있기 때문에 단순 비교의 형태이지 우수하다고 할 수 없다. 그렇지만 일반수리가 실제 적용에 있어 더욱 합리적이라고 할 수 있을 것이다.

왜냐하면 곧 고장이 날 부품을 수리를 하지 않고 고장이 발생했을 때 수리하는 경우는 찾아보기 힘들며 장비 수리시에 기타 부품에 대하여도 기름칠하고 기능 보완을 할 것이다. 특히 분해에 의한 수리 보전을 행할 때는 이러한 보전 행위는 일반화되어 있기 때문이다. <표 1>은 단위 시간당 평균 정비비용과 최적 교체 시점은 형상모수의 값이 작을수록, 교체비용대비 수리비용율이 클수록, 향상계수가 클수록 단위 시간당 비용은 줄고 최적 교체시점의 고장회수는 증가함을 보여주고 있다. 이렇게 향상되는 정도가 높을 경우에 일반수리를 이용한 장비 교환 시점을 찾는 것이 더욱 유리하다.

<표 2>는 식(14)에 의해 예방 보전을 위한 단위 시간당 추가 투입 비용 범위를 산출한 것인데 형상모수 β의 값이 작고 향상계수 γ의 값이 커질수록 예방 보전을 위한 추가적인 투입 비용범위는 커지므로 일반수리 모델을 적용하면 유리하게 됨을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 수리 사용 후 예방 교체 정책으로 고장 수리시 최소 수리가 아닌 예방보전을 병행하는 일반수리를 하는 모형을 제시하였다.

외주에 의존한 고장 수리시 예방보전 행위를 병행함으로서 운영자가 수리 및 예방보전 정책을 수행하기 곤란할 경우 최적 교체 시점을 수리회수로서 결정함과 동시에 예방보전을 위해 추가 투입할 수 있는 비용의 범위를 산출하였다. 이는 장비에 대하여 전문적인 지식이 없이 고장 수리 경력을 충분히 반영함으로서 장비의 최적 운영 시점을 결정할 수가 있다.

이 모델의 추가적인 이점은 고장정지비용과 수리로 인한 정지비용을 고려한다면 예방 보전을 위해 추가적으로 투입할 수 있는 비용은 더욱 증대된다는 것이다.

차후 연구과제로 운용 장비들에 대한 데이터를 수집하여 이러한 모델의 합리성과 정확한 모수 추정을 실증하려고 한다.

<표 1 > 최소 수리와 일반 수리의 단위 시간당 비용 비교

β	γ	$c_r/c_f = 2$				$c_r/c_f = 5$				$c_r/c_f = 10$				$c_r/c_f = 20$				$c_r/c_f = 50$			
		최소 수리		일반 수리		최소 수리		일반 수리		최소 수리		일반 수리		최소 수리		일반 수리		최소 수리		일반 수리	
		n^*	C_n^*	n^*	C_n^*	n^*	C_n^*	n^*	C_n^*	n^*	C_n^*	n^*	C_n^*	n^*	C_n^*	n^*	C_n^*	n^*	C_n^*	n^*	C_n^*
2	0.1	2	112.8379	2	106.6185	5	82.5328	5	77.1793	10	60.8387	10	56.5088	20	43.8767	20	40.5305	50	28.0715	50	25.7907
	0.2	2	112.8379	2	101.0488	5	82.5328	5	72.4779	10	60.8387	10	52.7543	20	43.8767	20	37.6585	50	28.0715	51	23.8508
	0.3	2	112.8379	2	96.0322	5	82.5328	5	68.3165	10	60.8387	10	49.4676	20	43.8767	21	35.1576	50	28.0715	52	22.1812
	0.4	2	112.8379	2	91.4902	5	82.5328	5	64.6069	10	60.8387	11	46.5553	20	43.8767	21	32.9683	50	28.0715	53	20.7294
	0.5	2	112.8379	2	87.3538	5	82.5328	5	61.2795	10	60.8387	11	43.9547	20	43.8767	22	31.0340	50	28.0715	53	19.4552
3	0.1	1	111.9347	1	108.3239	2	100.9937	3	96.6045	5	84.1714	5	79.9028	10	68.5795	10	64.5963	25	51.3885	26	47.9802
	0.2	1	111.9347	1	104.9387	2	100.9937	3	92.4598	5	84.1714	5	76.0462	10	68.5795	10	61.0226	25	51.3885	26	44.9837
	0.3	1	111.9347	1	101.7588	2	100.9937	3	88.6562	5	84.1714	6	72.4929	10	68.5795	11	57.8014	25	51.3885	27	42.3307
	0.4	1	111.9347	1	98.7659	2	100.9937	3	85.1531	5	84.1714	6	69.1922	10	68.5795	11	54.9030	25	51.3885	28	39.9684
	0.5	1	111.9347	1	95.9440	2	100.9937	3	81.9163	5	84.1714	6	66.1790	10	68.5795	12	52.2615	25	51.3885	28	37.8518
4	0.1	1	110.3263	1	107.6353	2	105.9132	2	102.5794	4	94.1450	4	90.4711	7	81.0122	7	77.3691	17	65.3684	17	61.8677
	0.2	1	110.3263	1	105.0726	2	105.9132	2	99.4490	4	94.1450	4	87.0731	7	81.0122	8	74.0328	17	65.3684	18	58.6886
	0.3	1	110.3263	1	102.6291	2	105.9132	2	96.5040	4	94.1450	4	83.9212	7	81.0122	8	70.8933	17	65.3684	19	55.8063
	0.4	1	110.3263	1	100.2966	2	105.9132	2	93.7285	4	94.1450	4	80.9894	7	81.0122	8	68.0092	17	65.3684	20	53.1853
	0.5	1	110.3263	1	98.0677	2	105.9132	2	91.1081	4	94.1450	4	78.2556	7	81.0122	8	65.3507	17	65.3684	20	50.7880

< 표 2 > 단위 시간당 예방 보전을 위한 추가적인 투입 비용 범위

β	γ	$c_r/c_f = 2$		$c_r/c_f = 5$		$c_r/c_f = 10$		$c_r/c_f = 20$		$c_r/c_f = 50$	
		n^*	예방 보전 비용	n^*	예방 보전 비용	n^*	예방 보전 비용	n^*	예방 보전 비용	n^*	예방 보전 비용
2	0.1	2	6.2194	5	5.3535	10	4.3299	20	3.3462	50	2.2808
	0.2	2	11.7891	5	10.0549	10	8.0847	20	6.2183	51	4.2207
	0.3	2	16.8057	5	14.2163	10	11.3711	21	8.7191	52	5.8903
	0.4	2	21.3477	5	17.9259	11	14.2834	21	10.9084	53	7.3421
	0.5	2	25.4841	5	21.2533	11	16.8840	22	12.8427	53	8.6163
3	0.1	1	3.6108	3	4.9937	5	4.2686	10	3.9832	26	3.4083
	0.2	1	6.9960	3	8.9937	5	8.1252	10	7.5569	26	6.4048
	0.3	1	10.1759	3	12.9937	6	11.6785	11	10.7781	27	9.0578
	0.4	1	13.1688	3	15.9937	6	14.9792	11	13.6765	28	11.4201
	0.5	1	15.9907	3	19.9937	6	17.9924	12	16.3135	28	13.5367
4	0.1	1	2.6910	2	3.3338	4	3.6739	7	3.6431	17	3.5007
	0.2	1	5.2537	2	6.9132	4	7.0719	8	6.9794	18	6.6798
	0.3	1	7.6972	2	9.9132	4	10.2238	8	10.1189	19	9.5621
	0.4	1	10.0297	2	12.9132	4	13.1556	8	13.0030	20	12.1831
	0.5	1	12.3263	2	14.9132	4	15.8894	8	15.6615	20	14.5804

참고문헌

[1] 강호선 · 조남호 · 유왕진(1998), 가용도를 고려한 교체전 최소수리회수 결정 모델에 관한 연구, 공업경영학회지 제 21호 47집 pp. 47-55.

[2] Barlow, R. E., Hunter, L. C.(1960), "Optimum Preventive Maintenance Policies," Operations Research, Vol. 8, No. 1, pp. 90-100.

[3] Barlow, R. E., Proschan, F.(1965), Mathematical Theory of Reliability, John Wiley and Sons, Inc.

[4] Beichelt, F.(October 1982), "AReplacement Policy Based on Limit for the Repair Cost Rate," IEEE Trans. Reliability, Vol. r-31, No. 4, pp. 401-403.

[5] Canfield, R. V.(April 1986), "Cost Optimization of Periodic Preventive Maintenance," IEEE Trans. Reliability, Vol. R-35, No. 1, pp. 78-81.

[6] Chan, J. K., Shaw, L.(December 1993), "Modeling Repairable Systems with Failure Rates that Depend on Age & Maintenance," IEEE Trans. Reliability, Vol. 42, No. 4, pp. 566-571.

[7] Jayabalan, V., Chaudhuri, D.(March 1992), "Cost Optimization of Maintenance Scheduling for a System with Assured Reliability," IEEE Trans. Reliability, Vol. 41, No. 1, pp. 21-25.

[8] Nakagawa, T., Kowada, M.(1983), "Analysis of a System with Minimal Repair and Its Application to Replacement Policy," European Journal of Operations Research, 12 pp. 176-182.

[9] Park, K. S.(June 1979), "Optimal Number of Minimal Repair before Replacement," IEEE Trans. Reliability, Vol. R-28, No. 2, pp. 137-140.