Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering
Vol. 33, No. 2, pp.170－175, June 2010.

최소수리가 가능한 시스템의 주문 및 교체정책 통합 최적화

인재순* · 김준홍**† · 전호기*

*영진전문대학 디지털경영계열
**수원대학교 산업정보공학과

A Joint Optimization of Ordering and Replacement Policy Under Minimal Repair

Jae Soon Ihn* · Jun Hong Kim**† · Ho-Ki Chon*

*YeungJin College School of Business
**Suwon Univ. Dept. of industrial information Engineering

Maintaining a complex repairable system can be achieved by repairing, replacing, or any other activities. This paper proposes a joint optimization policy that is composed with ordering and replacing under minimal repair for the complex system. For this purpose, we derive the expected cost due to the minimal repair, ordering, downtime, inventory costs, and salvage value of units that follow generally distribution.

Some properties about the optimum ordering policy that are suggested for our purpose shows that the optimum ordering policy minimizing the expected cost is either one of the two typical policies : (1) the original unit is replaced as soon as the ordered spare is delivered, or (2) the delivered spare is used as inventory part until the original unit fails.

Keywords : Minimal Repair, Spare Ordering, Inventory Cost, Salvage Value

1. 서론 및 선행 연구 고찰

최소수리(minimal repair)는 고장(failure)의 개념을 예비품이 도착하여 교체할 수 있을 때까지 기존 부품을 최소한의 수리를 통해 시스템을 일시적으로 운영할 수 있는 경미한 고장(minor failure)유형과 수리를 할 수 없어 예비품으로 교체해야만 시스템의 운영이 가능한 중대한 고장(major failure)유형으로 나누는 개념이다. 따라서 중대한 고장은 고장에 따른 기회비용손실이 상당히 크고, 경미한 고장은 기회손실비용은 작으나 발생빈도가 중대한 고장에 비해 크기 때문에 시스템 가용성의 관점에서 두 가지 유형의 고장종류를 모두 감안할 필요가 있다. 최소수리의 경우 경미한 고장이 발생할 확률을 p라 하면, 수리가 불가능한 중대한 고장일 확률은 $(1-p)$가 되고, 최소수리가 가능하지 않아 교체만 가능 한 부품의 경우는 $p=0$이 된다.

주문 및 교체정책 연구에 있어 선행된 연구결과를 살펴보면, Allen and D'Esopo[3]는 예비 시스템의 긴급주문이 가능한 상황에서 긴급주문 조달기간 L_1이 보통주문 조달기간 L보다 짧다고 가정하고, 긴급주문 정책에 따른 전체 비용 최소화에 대한 연구를 하였다. 구체적으로, 모델의 최적화 방법으로는 긴급주문을 발주할 부품의 재고수준 E와 긴급발주량 Q를 이용하여 긴급주문이 없을 경우에 예비 시스템 부족이 발생할 확률과 긴급주문

논문접수일 : 2010년 04월 26일　논문수정일 : 2010년 05월 19일　게재확정일 : 2010년 05월 27일
† 교신저자 yu141@suwon.ac.kr

이 있을 경우에 예비부품 부족이 발생할 확률을 계산하여 총비용을 최소화하는 방안을 연구하였다.

Kaio and Osaki[6]는 예비 시스템 재고가 없다는 가정 하에서, 예비 시스템 부족에 따른 가동정지 손실비용과 보통주문으로 도착한 예비 시스템으로 정상 시스템을 미리 교체하여 생기는 시스템 잔존가치의 균형을 통해 최적의 예비 시스템 주문정책을 연구하였다.

Park and Park[7]은 고정된 예비 시스템 조달기간 L이 랜덤하게 변하는 경우에 있어서 단위 시간당 비용을 최소화시키는 예비 시스템 주문정책을 연구하였다.

Sridharan[10]는 1-unit 시스템의 고장난 시스템이 일시적 수리를 통해 한시적으로 운영이 가능한 상황에서 예비 시스템의 긴급주문과 보통주문을 통해 시스템을 교체하는 최적의 주문정책을 연구하였다.

Sheu and Griffith[8]는 운영 중인 시스템이 경미한 고장의 형태를 보이다 치명적인 고장의 형태로 진화한다는 가정아래, 경미한 고장에 대해서는 즉각적인 조치를 통해 시스템의 가동중지 손실비용을 최소화하고, 예비 시스템 주문정책을 통해 치명적인 고장이 발생하거나 정기교체시점에서 시스템을 교체하는 정책에 대한 연구를 하였다.

본 연구에서는 최소수리가 가능한 시스템에 대해 두 가지 형태의 주문형태, 즉 긴급주문과 보통주문이 있는 예비 시스템 주문정책과 예방교체 정책의 통합최적화 모형을 제시한다. 비용을 최소화 하는 통합 정책은 주문된 예비 시스템이 도착하면 바로 교체해 주거나, 아니면 사용 중인 시스템이 수리가 불가능한 중대한 고장이 날 때까지 기다렸다가 교체해주는 것 중 하나임을 밝히고, 최적 주문시점에 대한 몇 가지 특성들을 유도하였다. 제 2장에서는 주문 정책에 따른 주기당 기대비용을 살펴보고, 제 3장은 제안된 최적 예비 시스템 주문 및 교체정책의 타당성을 제시하였다. 제 4장은 제안된 최적 예비 시스템 주문 및 교체정책의 그 수치 예를 제시하였고, 제 5장은 수치 예의 결과와 향후 논문의 연구의 방향을 제시하였다.

2. 주문 정책의 비용 모형

만약 시스템이 특정 시점 t_0전에 고장이 나면, 예비 시스템을 긴급주문하고 주문한 예비품이 도착 즉시 고장 난 시스템을 예비 시스템으로 교체한다. 시스템이 t_0 시점까지 고장이 나지 않은 경우에는 t_0시점에서 예비 시스템에 대한 보통주문을 내고 다음과 같은 기준으로 부품을 교체한다.

(i) 시스템이 주문시점 t_0와 계획된 예방교체 시점 t_1 $(\geq t_0+L)$사이에서 고장이 발생하게 되면, 예비 시스템이 도착하는 즉시 예비 시스템으로 교체한다.

(ii) 시스템이 t_1까지 고장이 나지 않는 경우에는 t_1시점에서 예방교체를 실시한다.

본 연구에서 사용되는 용어를 정리하면 다음과 같다.

t_0 : 계획 주문시점
t_1 : 계획 예방교체 시점($t_1 \geq t_0+L$)
L : 보통주문의 리드타임
L_e : 긴급주문의 리드타임
c_e, c_r : 긴급주문과 보통주문의 비용
c_d : 시스템 가동정지(downtime) 손실비용
c_h : 예비 시스템 재고유지비용
ν_s : 고장이 나지 않은 시스템의 잔존가치
p : 최소수리가 가능한 고장이 발생할 확률
c_f : 평균 최소수리 비용
$M(t)$: 시간[0, t] 사이의 평균 수리 횟수
$g(t)$: 중대한 고장의 고장밀도함수
$G(t)$: 중대한 고장의 누적 고장밀도함수
$r(t)$: 중대한 고장의 순간고장률
$T(t_0,\ t_1)$: 기대 주기길이
$K(t_0,\ t_1)$: 주기 당 기대비용
$C(t_0,\ t_1)$: 단위 시간당 기대비용
m : 시스템의 평균 수명

재생보상정리(renewal reward theorem)[6]에 따르면, 단위시간당 비용은 주기 당 기대비용을 기대 주기길이로 나눈 값이다.

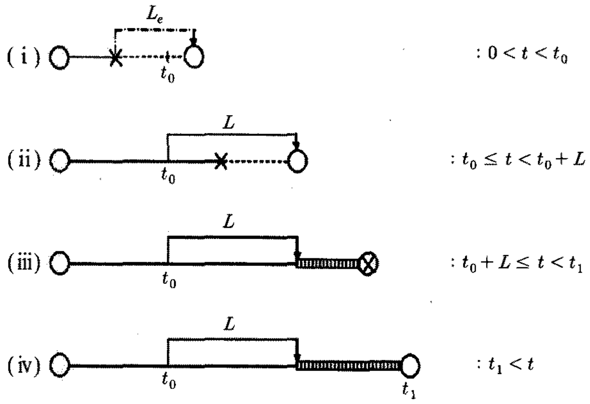
$$C(t_0,\ t_1)=\frac{K(t_0,\ t_1)}{T(t_0,\ t_1)}=\frac{\text{주기당 기대비용}}{\text{기대 주기길이}} \tag{1}$$

시스템 교체와 다음 번 교체 사이의 기간을 한 주기로 보면, 한 주기는 다음과 같은 네 가지 형태 중 하나로 구성된다(<그림 1> 참조).

(i) 주문시점 t_0전에 고장이 나는 경우
(ii) 주문시점 t_0와 주문 도착시점 t_0+L사이에 고장이 나는 경우
(iii) 주문 도착시점 t_0+L과 예방교체 시점 t_1사이에 고장이 나는 경우
(iv) t_1까지 고장이 나지 않는 경우

한 주기의 기대비용, $K(t_0,\ t_1)$,은 예비 시스템의 주문비용과 유지비용, 가동정지 손실비용, 교체된 시스템의 잔존가치, 최소수리 비용의 합으로 구성된다. 즉,

$K(t_0, t_1)$ = 주문비용 + 가동정지 손실비용+ 예비 시스템 유지비용 + 시스템 잔존가치 + 최소수리 비용



<그림 1> 주기 구성의 가능한 형태

Cleroux, Dubuc, and Tilquin[5]과 Savits[8]의 연구에 따라,

$g(t) = (1-p)f(t)\overline{F}(t)^{-p}$

$\overline{G}(t) = \overline{F}(t)^{1-p}$

$M(t) = \frac{p}{1-p}G(t)$이 된다.

그러므로 주기 당 최소수리 비용은

$c_f \cdot M(t) = c_f \cdot \frac{p}{1-p}G(t)$가 된다.

따라서, 주기 당 총 기대비용은

$$\begin{aligned} K(t_0, t_1) = {} & c_r + (c_e - c_r)G(t_0) \\ & + c_d\left[\int_{t_0}^{t_0+L} G(t)dt - (L-L_e)G(t_0)\right] \\ & + c_h\int_{t_0+L}^{t_1} \overline{G}(t)dt - \nu_s\int_{t_1}^{\infty}\overline{G}(t)dt \\ & + c_f \cdot \frac{p}{1-p}G(t_1) \end{aligned} \tag{2}$$

이 되고, 이를 $G(t_0)$로 정리하면,

$$\begin{aligned} K(t_0, t_1) = {} & c_r + \{(c_e - c_r) - c_d(L-L_e)\}G(t_0) \\ & + c_d\int_{t_0}^{t_0+L} G(t)dt + c_h\int_{t_0+L}^{t_1}\overline{G}(t)dt \\ & - \nu_s\int_{t_1}^{\infty}\overline{G}(t)dt + c_f \cdot \frac{p}{1-p}G(t_1) \end{aligned} \tag{3}$$

이 된다.

<그림 1>에서 제시한 4가지 형태의 교체시간에 대해 기대주기를 계산하면,

$$\begin{aligned} T(t_0, t_1) = {} & (t_0 + L_e)G(t_0) - \int_0^{t_0} G(t)\, dt \\ & + (t_0+L) \cdot G(t_0+L) - (t_0+L) \cdot G(t_0) \\ & - (t_1 - t_0 - L) + t_1G(t_1) - (t_0+L) \cdot G(t_0+L) \\ & + \int_{t_0+L}^{t_1} \overline{G}(t)\, dt + t_1 - t_1G(t_1) \end{aligned} \tag{4}$$

이 되고, 이를 정리하면,

$$\begin{aligned} T(t_0, t_1) = {} & (t_0 + L_e)G(t_0) + \int_0^{t_0}(\overline{G}(t) - 1)\, dt \\ & - (t_0+L)G(t_0) - (t_1 - t_0 - L) + \int_{t_0+L}^{t_1}\overline{G}(t)\, dt + t_1 \\ = {} & L - (L-L_e)G(t_0) + \int_0^{t_0}\overline{G}(t)\, dt \\ & + \int_{t_0+L}^{t_1}\overline{G}(t)\, dt \end{aligned} \tag{5}$$

가 된다.

식 (1)에서 제시한 단위시간당 기대비용 $C(t_0, t_1)$은 상기 식 (3)과 식 (5)에서 얻은 $K(t_0, t_1)$와 $T(t_0, t_1)$의 결과를 이용하여 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$C(t_0, t_1) = \frac{K(t_0, t_1)(=(3)\text{식의 결과})}{T(t_0, t_1)(=(5)\text{식의 결과})} \tag{6}$$

3. 최적 예비 시스템 주문 및 교체 정책

단위시간당 기대비용 $C(t_0, t_1)$을 최소화하는 최적 주문시점 t_0*와 최적 교체시점 t_1*에 대해 정리하면 다음과 같다.

[정리 1]

주문시점 t_0를 고정했을 때, $C(t_0, t_1)$을 최소화하는 최적 예방교체 시점은 $t_1 = t_0 + L$ 또는 $t_1 = \infty$가 된다.

[증명]

이 정리를 확인하기 위해 $C(t_0, t_1)$를 t_1에 대해 미분하여 정리하면,

$$\begin{aligned} \frac{\partial C(t_0, t_1)}{\partial t_1} & = \frac{K'(t_0, t_1) \cdot T(t_0, t_1) - K(t_0, t_1) \cdot T'(t_0, t_1)}{T(t_0, t_1)^2} \\ & = \frac{\overline{G}(t_1) \cdot A(t_0)}{T(t_0, t_1)^2} \end{aligned}$$

이 된다.

여기서, $\overline{G}(t) > 0$이고, $T(t_0, t_1)^2$는 항상 양수이므로, $\frac{\partial C(t_0, t_1)}{\partial t_1}$의 부호는 다음 $A(t_0)$에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} A(t_0) \ :&= (c_h+\nu_s)\left[L-(L-L_e)G(t_0)+\int_0^{t_0}\overline{G}(t)\ dt\right] \\ &-\left[\begin{aligned}&c_r+\left[(c_e-c_r)-c_d(L-L_e)\right]G(t_0) \\ &+c_d\int_{t_0}^{t_0+L}G(t)\ dt\end{aligned}\right] \\ &+\nu_s\int_{t_0+L}^{\infty}\overline{G}(t)\ dt \end{aligned}$$

지금 $t_1 \in (t_0, \infty)$에 대해,

(i) $A(t_0) > 0$인 경우, $\partial C(t_0, t_1)/\partial t_1 > 0$가 되어 증가하는 함수이므로, $C(t_0, t_1)$은 t_1이 가장 작은 시점인 $t_1 = t_0 + L$에서 최소화된다.

(ii) $A(t_0) < 0$인 경우, $\partial C(t_0, t_1)/\partial t_1 < 0$이 되어 감소하는 함수이므로, $C(t_0, t_1)$은 t_1이 가장 큰 시점인 $t_1 = \infty$에서 최소화된다.

(iii) $A(t_0) = 0$인 경우, $\partial C(t_0, t_1)/\partial t_1 = 0$이 되어 상수이므로 t_1값은 $t_1 = t_0 + L$인 경우와 $t_1 = \infty$인 경우 모두 동일한 $C(t_0, t_1)$을 갖게 된다.

따라서, t_0를 고정한다면, $C(t_0,t_1)$에서 t_1의 최적값은 t_0+L 또는 ∞이 되므로, 단위시간당 기대비용을 최소화하는 최적의 예비 시스템 주문정책을 얻기 위해서는 두 가지 경우($t_1 = t_0 + L$와 $t_1 = \infty$)만 고려하면 된다.

[정리 2]

$(c_e - c_r) \geq c_d(L - L_e)$이면, 예비 시스템이 도착하자마자 교체해주는 예비 시스템의 최적 주문시점 t_{01}*는 다음과 같다.

$C(t_0, t_1)$이 최적일 때를 알기 위해 t_0에 대해 미분하면,

$$\frac{dC_1(t_0)}{dt_0} = \frac{K'_1(t_0) \cdot T_1(t_0) - K_1(t_0) \cdot T'_1(t_0)}{T_1(t_0)^2} = \frac{\overline{G_1}(t_0)}{T_1(t_0)^2} \cdot p_1(t_0) \text{이다.}$$

(i) 만약, $p_1(0) \geq 0$이면, 최적의 주문시점 $t_{01}^* = 0$으로 시스템 교체 후 바로 예비 시스템에 대한 보통주문을 하며, 긴급주문은 필요 없다.

(ii) 만약, $p_1(0) \leq 0$이고 $p_1(\infty) \geq 0$이면, $p_1(t_{01}^*) = 0$ 을 만족하는 유일한 t_{01}*이 존재한다.

(iii) 만약, $p_1(\infty) \leq 0$이면, $t_{01}^* = \infty$으로 보통 주문이 필요하지 않고 시스템이 고장날 때 긴급주문을 하면 된다.

[정리 3]

$(c_e - c_r) \geq c_d(L - L_e)$이면 시스템이 고장날 때까지 예방교체를 하지 않는 예비 시스템의 최적 주문시점 t_{02}*는 다음과 같다.

$C(t_0, t_1)$이 최적일 때를 알기 위해 t_0에 대해 미분하면,

$$\frac{dC_2(t_0)}{dt_0} = \frac{K'_2(t_0)\,T_2(t_0) - K_2(t_0)\,T'_2(t_0)}{T_2(t_0)^2} = \frac{\overline{G}(t_0)}{T_2(t_0)^2} \cdot p_2(t_0) \text{이다.}$$

(i) 만약, $p_2(0) \geq 0$이면, 최적의 주문시점 $t_{02}^* = 0$이 된다.

(ii) 만약, $p_2(0) \leq 0$이고 $p_2(\infty) \geq 0$이면, $p_2(t_{02}^*) = 0$을 만족하는 유일한 t_{02}*이 존재한다.

(iii) 만약, $p_2(\infty) \leq 0$이면, $t_{02}^* = \infty$이다.

[정리 4]

예비 시스템 주문시점 t_0를 고정하면, 다음 중 단 하나만 참(true)이 된다.

① $C_1(t_0) < C_2(t_0) < c_h + \nu_s$
② $C_1(t_0) = C_2(t_0) = c_h + \nu_s$
③ $C_1(t_0) > C_2(t_0) > c_h + \nu_s$

[증명]

이를 증명하기 위해, $C_2(t_0) < c_h + \nu_s$이라 가정하면, [정리 2]와 [정리 3]으로부터 단위시간당 기대비용,

$C(t_0, t_1)$은 증가는 함수이므로, $C(t_0, t_1)$는 $t_1 = t_0$인 경우에 최소화되고, $C_1(t_0) < C_2(t_0)$가 성립한다. 따라서

$C_2(t_0) < c_h + \nu_s$이면,
① $C_1(t_0) < C_2(t_0) < c_h + \nu_s$가 성립하고,
$C_2(t_0) = c_h + \nu_s$이면,
② $C_1(t_0) = C_2(t_0) = c_h + \nu_s$가 성립되며,
$C_2(t_0) > c_h + \nu_s$이면,
③ $C_1(t_0) > C_2(t_0) > c_h + \nu_s$가 성립한다.

[정리 5]

최적주문시간 t_{01}*와 t_{02}*는 다음 중 단 하나의 조건만 참(true)이 된다.

① $C_1(t_{01}*) < C_2(t_{02}*) < c_h + \nu_s$
② $C_1(t_{01}*) = C_2(t_{02}*) = c_h + \nu_s$
③ $C_1(t_{01}*) > C_2(t_{02}*) > c_h + \nu_s$

[증명]

이를 각각 증명하면,

(i) $C_2(t_{02}*) < c_h + \nu_s$이라 가정하면,

[정리 4]에 의해 $C_1(t_{02}*) < C_2(t_{02}*) < c_h + \nu_s$가 성립한다. 또한, 모든 $C_1(\bullet)$에 있어 $C_1(t_{01}*) < C_1(t_{02}*)$이므로, 이 두 식으로부터

관계 ① $C_1(t_{01}*) < C_2(t_{02}*) < c_h + \nu_s$가 성립한다.

(ii) $C_2(t_{02}*) = c_h + \nu_s$이라 가정하면,

[정리 4]에 의해 $C_1(t_{02}*) = C_2(t_{02}*) = c_h + \nu_s$가 성립한다. 또한, 모든 $C_2(\bullet)$에 있어 $C_2(t_0) \geq C_2(t_{02}*) = c_h + \nu_s$이고, [정리 4]로 부터 $C_1(t_0) \geq C_2(t_0) \geq c_h + \nu_s$가 성립하므로, 위 식들로 부터 $C_1(t_{02}*) \leq C_1(t_0)$가 성립한다. 즉, $C_2(t_0)$의 최적해 $t_{02}*$이 $C_1(t_0)$도 최소화시키므로 $C_1(t_{02}*) = C_1(t_{01}*)$가 성립한다. 이 식을 $C_1(t_{02}*) = C_2(t_{02}*) = c_h + \nu_s$에 대입하면

관계 ② $C_1(t_{01}*) = C_2(t_{02}*) = c_h + \nu_s$가 성립한다.

(iii) $C_2(t_{02}*) > c_h + \nu_s$이라 가정하면,

모든 t_0에 대해 $C_2(t_0) > c_h + \nu_s$가 성립한다. 또한, [정리 4]에 의해 $C_1(t_0) > C_2(t_0) > c_h + \nu_s$이므로,

관계 ③ $C_1(t_{01}*) > C_2(t_{02}*) > c_h + \nu_s$가 성립하게 된다.

4. 수치 예

수명분포가 n(형상모수) = 3, λ(위치모수) = 0.003인 감마분포를 따르는 1-unit 시스템에 대해 상기 모델을 적용한다. 이 시스템에 대한 $g(t)$, $\overline{G}(t)$, 및 $r(t)$는 다음과 같다.

$$g(t) = \frac{\lambda^n}{\Gamma(n)} t^{n-1} \bullet e^{-\lambda t}$$
$$= \lambda^3 t^2 \bullet e^{-\lambda t} = \lambda(\lambda t)^2 \bullet e^{-\lambda t}$$
$$\overline{G} = [1 + \lambda t + (\lambda t)^2/2] \bullet e^{-\lambda t}$$
$$r(t) = \frac{g(t)}{\overline{G}(t)} = \frac{\lambda(\lambda t)^2 \bullet e^{-\lambda t}}{[1 + \lambda t + (\lambda t)^2/2] \bullet e^{-\lambda t}}$$
$$r_L(t) = 1 - \frac{[\{1 + \lambda(t+L) + \lambda^2(t+L)^2/2\}] \bullet e^{-\lambda L}}{[1 + \lambda t + (\lambda t)^2/2]}$$

그리고 수치 예를 위한 시스템의 파라미터들은 다음과 같다.

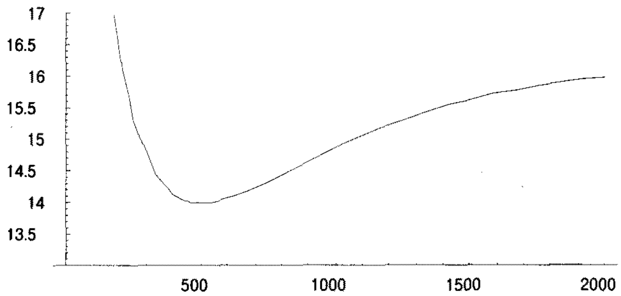
$m = 3/\lambda = 1{,}000$시간

$L_e = 50$시간, $L = 100$시간, $c_e = \$12{,}000$, $c_r = \$8{,}000$,

$c_d = \$100$, $c_h = \$20$, $\nu_s = \$5$, $p = 0.05$

$$C_1(t_0) \equiv C(t_0, t_0 + L) = K_1(t_0) / T_1(t_0)$$
$$= \frac{c_r + \{(c_e - c_r) - c_d(L - L_e)\} G(t_0) - \nu_s \int_{t_0+L}^{\infty} \overline{G}(t)dt + c_d \int_{t_0}^{t_0+L} G(t)dt}{L - (L - L_e) G(t_0) + \int_0^{t_0} \overline{G}(t)\, dt}$$
$$= \frac{8000 + \{(12000 - 8000) - 100(100 - 50)\} G(t_0) - 5 \int_{t_0+100}^{\infty} \overline{G}(t)dt + 100 \int_{t_0}^{t_0+100} G(t)dt}{100 - (100 - 50) G(t_0) + \int_0^{t_0} \overline{G}(t)\, dt}$$
$$= \frac{8000 - 1000 G(t_0) - 5 \int_{t_0+100}^{\infty} \overline{G}(t)dt + 100 \int_{t_0}^{t_0+100} G(t)dt}{100 - 50 G(t_0) + \int_0^{t_0} \overline{G}(t)\, dt}$$

<그림 2>는 예비 시스템 주문시점 t_0에 따른 기대비용 $C_1(t_0)$에 대한 곡선을 플로트한 곡선이다. 이 수치예에서 최적 주문시점 t_0*은 507시간에서 단위시간당 최소 기대비용 $C_1*(t_0) = \$14.0$을 제시하고 있다. 즉, 예비 시스템이 도착하는 즉시 시스템을 교체하게 되면 단위시간 당 최소 기대비용을 제시하는 최적 교체정책을 제시하는 결과를 얻는다.



〈그림 2〉 t_0의 변화에 따른 비용 변화

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 최소수리가 가능한 1-unit 시스템의 예비 시스템 주문, 교체, 유지비용, 잔존가치를 고려하여 최적 주문시점과 교체시점에 대한 최적교체정책을 연구하였다.

제 3장의 [정리 1], [정리 2], 그리고 [정리 3]은 단위시간당 기대비용, $C(t_0, t_1)$을 최소화하는 최적의 예비 시스템 주문정책은 예비 시스템이 도착하자마자 교체하거나, 운영 중인 시스템이 고장이 날 때까지 예비 시스템으로 교체하지 않는 것이 최적의 교체정책임이 제시되었고, 또한 [정리 4]와 [정리 5]는 최소수리 가능한 시스템에 대해 예비 시스템의 보유비용과 시스템의 잔존가치를 고려한 경우, 예비 시스템의 주문시점, 교체시점에 따른 최적해를 보여주고 있다.

본 연구는 1-unit 시스템에 대한 연구에 국한하였으나, 일반적인 시스템의 적용 방안으로 고려하여 일회 최적 주문량, 확률적 주문기간, 또는 2-unit 이상의 시스템에 대한 경우를 고려한 주문-저장-교체를 통합한 정책들에 대한 연구과제로 더욱 확장할 수 있을 것으로 본다.

참고문헌

[1] 인재순; "주문 및 교체정책의 통합 최적화", 박사학위논문, 성균관대학교, 2009.

[2] 김준홍, 정원; "신뢰성공학", 청문각, 2007.

[3] Allen, S. G. and D. A. D'Esopo; "An ordering policy for stock items when delivery be expedited," Operation Research, 16(4) : 880-883, 1968.

[4] Barlow, R. E. and L. Hunter; "Optimum preventive maintenance policies," *Operations Research*, 8 : 90-100, 1960.

[5] Cleroux, R., S. Dubuc and Tilquin; "The age replacement problem with minimal repair and random repair cost," *Operations Research*, 27 : 1158-1167, 1979.

[6] Kaio, N. and S. Osaki; "Optimum planned maintenance with salvage cost," *International Journal of Production Research*, 16 : 249-257, 1978.

[7] Park, Y. T. and K. S. Park; "Generalized spare ordering policies with random lead time," *European Journal of Operational Research*, 23 : 320-330, 1986.

[8] Savits, T. H.; "Some multivariate distributions derived from a nonfatal shock model," *Journal of Applied Probability*, 25 : 383-390, 1986.

[9] Sheu, S. H. and W. S. Griffith; "Optimal age-replacement policy with age-dependent minimal-repair and random-leadtime," *IEEE Transactions on reliability*, 50(3) : 302-309, 2001.

[10] Sridharan, V., "Optimum planned policies with minimal repair and random lead times," *Microelectronics and Reliability*, 32 : 905-909, 1992.