

진보하는 기술 환경에서의 장비 교체에 관한 연구 - A Study on Equipment Replacement under Technological development environment -

고 현 우*
황 의 철**

Abstract

This paper considers the problem of equipment replacement. A equipment replacement problem is treated in a thchnological development environment. Our model assumes that the costs associated with the presently available thchnology and future technology is known, but the appearance times of future technology is uncertain. A cost model is presented, and method is suggested for finding the optimal operating time for replacement. A numerical example is shown.

1. 서론

장비 교체 문제는 고전적인 문제로서 신뢰성, OR, 경제성 공학 분야에서 오랫동안 연구되어 왔다 [1,7,10]. 이런 모델의 대부분은 기술이 계속 발전하는 환경을 고려하지 않았으며 구장비를 동일한 신장비로 교체하는 문제를 다루어 왔다. 그러나 현대의 장비들은 교체에 대한 의사결정시에 장비의 고유수명 뿐만 아니라 진보하는 기술에 의해서도 의사결정에 영향을 미치고 있다. 이것은 증가하는 보전비용과, 일정한 교체비용을 고려해서 장비의 경제적 수명을 결정하는 것이 아니라 의사결정자가 현 시장에서 가장 바람직한 대안으로 현장비를 교체할 때의 이점과 곧 나타나게 될 신형장비를 기다릴 때의 이점을 비교한다는 것을 의미한다. 이와같이 기술의 발전을 고려한 장비교체에 대한 문제는 Sethi 와 Morton[9], Sethi 와 Chand[8], Chand 와 Sethi[5], Bean, Lohmann 그리고 Smith[2]에 의해 연구되어 왔다. 이들은 여러 기술들이 사용가능할 때의 첫번째 최적 교체에 대해 Lundil과 Morton[6], Bean과 Smith[3], Bes와 Sethi[4]에서 사용한 계획구간을 이용해서 여기서 선택된 교체안이 계획구간이후에도 계속 유효함을 보였다. 그러나 이들의 연구에서 신기술의 출현시기에 대한 고려가 미흡했다. 본 연구에서는 기술이 발전하는 가운데서 신장비의 출현이 미지일 때에 장비교체에 대한 문제를 다루었으며 비용적인 측면에서는 기술전환비용을 포함시켰다.

2장에서는 모형에 대한 설정, 용어설명, 여러가지 가정들 그리고 정형화 과정을 설명하며, 3장에서는 해법절차를, 4장에서는 수치예를 보이며 5장에서는 결론과 향후 연구과제를 언급한다.

2. 모형 설정 및 정형화

본 연구에서 사용되는 기본용어는 다음과 같다.

n : 의사 결정 기간 ($n= 0,1, \dots$)

E_k : 장비유형 ($k=1,2$)

* 한양대학교 대학원 산업공학과

** 한양대학교 공과대학 산업공학과

접수 : 1994년 4월 12일

확정 : 1994년 5월 4일

- i : 현 보유장비의 사용 년수 ($n \geq 1$ 에 대해)
- i_0 : $n=0$ 말기에 보유장비 E_1 의 사용년수
- α : 기간별 할인율
- B_k : 장비 E_k 의 구매비용 ($k=1,2$)
- $R_k(i)$: i 기간 사용한 장비 E_k 의 처분가격
- $M_k(i)$: i 번째 기간에서의 장비 E_k 의 보전비용
- $E(r_1, r_2)$: 기술전환비용 ($r_1=r_2$ 이면 $E(r_1, r_2)=0$)
- $W_k(i)$: i 번째 기간에서 장비 E_k 의 할인된 운용비용
- $C_p(d_i)$: 문제 P($=1,2$)에서 대안 I($=1,2,3$)에 따른 의사결정 비용요소

현재 사용하는 장비(E_1)는 생산되는 제품이 반드시 거쳐야 하는 핵심공정의 장비라고 가정하자. 그래서 현 장비는 계속 가동해야 하며 장비교체가 결정되더라도 공정의 중단없이 즉시 다른 장비로 교체되어야 한다. 장비교체에 대한 의사결정은 여러 비용 요소를 고려해서 매기말에 행해지고 교체는 매기초에 행해진다. 장비에 대한 기술개발이 계속 진행되는 환경에서 신기술이 적용된 장비(E_2)가 의사결정기간에 존재한다면 의사결정자가 원하는 즉시 구매가 가능하다고 하자. E_2 의 구매비용은 E_1 보다는 높을 것으로 기대되지만, 보전비용, 운용비용은 신기술이 적용되어 상대적으로 낮을 것이고, 처분가격은 동일한 사용년수의 E_1 보다는 높을 것이다. n 기초에 E_2 의 존재 유무에 따라 다음과 같은 두가지 장비 교체 문제가 생긴다. 즉,

- P1 : n 기초에 E_2 가 존재하는 경우 ($n > 1$)
 - 이 때의 의사결정은 세가지 대안중 하나일 것이다.
 - d_1 : 다음 의사결정시점까지 현장비(E_k $k=1,2$)
 - d_2 : 현장비(E_k)를 동종의 새장비(E_k)로 교체
 - d_3 : 현장비(E_k)를 새로운 E_2 로 교체
- P2 : n 기초에 E_2 가 존재하지 않을 경우 ($n \geq 1, n=1$ 은 현기간)
 - 이 때의 의사결정은 두가지 대안중 하나일 것이다.
 - d_1 : 다음 의사결정시점까지 현장비(E_1)을 계속 사용
 - d_2 : 현장비(E_1)를 동종의 새장비(E_1)로 교체

먼저 n 기초에 i 기간 사용중인 장비 E_k 를 보유한 P1문제를 고려하자. 세가지 대안에 따른 의사결정에서 발생하는 비용은 d_1 을 선택하면 다음 결정시점($i+1$)까지의 보전비용이 발생하게 되고, d_2 를 선택하게 되면 새장비(E_1)구매비용과 첫번째 사용기간동안의 E_1 보전비용, i 기간 사용후 처분되는 장비의 처분가격이 발생된다. d_3 을 선택할 경우는 새장비(E_2)구매비용과 첫번째 사용기간동안의 E_2 보전비용, i 기간 사용후 처분되는 장비처분가격이 발생된다. 그리고 d_2 와 d_3 이 경우에는 동종의 장비를 제외하고 교체시 기술전환비용이 발생하는데 이것은 기존기술과 다른 기술을 사용하기 위한 교육, 재훈련등의 비용을 말한다. 이들을 식으로 표시하면

$$\begin{aligned}
 C_1(d_1) &= M_k(i+1) \\
 C_2(d_2) &= B_1 + M_1(1) + E(r_1, r_2) - R_k(i)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$C_3(d_3) = B_2 + M_2(1) + E(r_1, r_2) - R_k(i)$$

이런 의사결정을 반복적으로 무한기간 계속될 것이다. 이런 과정은 D.P로서 설명될 수 있다. $A_k^*(i, n)$ 을 n 기초에 i 기간 사용한 장비 $E_k(k=1,2)$ 를 보유하고 있는 무한기간 P1문제의 최적교체비용이라 한다면 $A_k^*(i, n) = A_k^*(i, n+1) = A_k^*(i)$ 로 쓸수 있고 순환관계식은

$$A_k^*(i) = \min \begin{cases} \alpha\{M_k(i+1) + A_k^*(i+1)\} \\ -R_k(i) + \min_{r=1,2} [B_r + E(k, r) + \alpha\{M_r(1) + A_r^*(1)\}] \end{cases} \quad \text{for } i \geq 1, k=1,2 \quad (2)$$

P2문제에서 n 기초에는 d_1, d_2 의 대안이 고려되지만, $n+1$ 기초에는 P1 또는 P2문제로 바뀔수 있다. t 를 E_2 가 출현할 시간을 나타내는 확률변수라면 $n+1$ 기초에 P1문제로 바뀔 확률은 $P_{n+1} = \Pr(t=n+1 | t \geq n+1)$, P2문제로 바뀔 확률은 $Q_{n+1} = \Pr(t > n+1 | t \geq n+1)$ 로 표현할 수 있다. 신기술에 대한 연구개발이 계속 진행될 때 이 연구가 성공해서 E_2 가 시장에 출현하게되는 시기를 일정한 확률을 갖는 기하분포로서 가정한다면 $P_{n+1} = p$ 로 나타낼수 있다.

그러면 P2문제의 순환 관계식은 $H^*(i)$ 를 i 기간 사용한 장비 E_1 에 대한 무한기간 P2문제의 최적교체 기대비용이라 하면 다음과 같이 쓸수 있다.

$$H^*(i) = \min \begin{cases} \alpha\{M_1(i+1) + pA_1^*(i+1) + qH^*(i+1)\} \\ -R_1(i) + B_1 + \alpha\{M_1(1) + pA_1^*(1) + H^*(1)\} \end{cases} \quad \text{for } i \geq 1 \quad (3)$$

(2) 와 (3)은 다음과 같이 표현할수 있다.

$$\begin{aligned} A_k(i) &= A_k^*(i) + R_k(i) \\ H(i) &= H^*(i) + R_1(i) \end{aligned} \quad (4)$$

또 $W_k(i)$ 를 i 번째기간에서 장비 E_k 의 할인된 운용비용이라 하면

$$W_k(i) = \begin{cases} \alpha M_k(i) + R_k(i-1) - \alpha R_k(i) & , \text{for } i \geq 1 \\ \alpha M_k(1) + B_k + E(r, k) - \alpha R_k(1) & , \text{for } i=1 \end{cases} \quad (5)$$

$W_k(i)$ 는 순환 관계식에서 비용의 계산을 쉽게 할수 있게 한다.

$W_k(i)$ 의 몇가지 특성을 살펴보자. 장비를 오래 사용하다 보면 더 많은 보전을 필요로 하고 장비에 대한 처분가치도 떨어지므로 $W_k(i+1) \geq W_k(i)$ 관계가 성립한다. 그러나 첫번째 사용기간에 대해서만은 이 관계가 성립하지 않는데 왜냐하면 장비의 감가상각은 사용 1년차에서 상당히 크기 때문이다. 즉 $W_k(2) \geq W_k(1)$ 이다. 그리고 장비 E_2 가 E_1 보다 성능이 개선된다는 가정에서 $W_1(i) \geq W_2(i)$ 이다. 또한 최신장비가 구형장비보다는 첫번째 기간에서 감가상각이 크다는 점 때문에 $W_2(1) \geq W_1(1)$ 이다.

(4),(5)를 이용해서 $A_k(i)$ 와 $H(i)$ 를 표현하면

$$A_k(i) = \min \begin{cases} W_k(i+1) + \alpha A_k(i+1) \\ \min_{r=1,2} \{W_r(1) + \alpha A_r(1)\} \end{cases} \quad (6)$$

$$H(i) = \min \begin{cases} W_1(i+1) + \alpha \{pA_1(i+1) + qH(i+1)\} \\ W_1(i) + \alpha \{pA_1(1) + qH(i)\} \end{cases} \quad i \geq 1 \quad (7)$$

(7)식은 i^* 가 최적사용기간이라면

$$H(i) = \begin{cases} W_1(i+1) + \alpha \{pA_1(i+1) + qH(i+1)\} & i < i^* \\ W_1(i) + \alpha \{pA_1(1) + qH(i)\} & i \geq i^* \end{cases} \quad (8)$$

로 쓸수 있다.

이것은 P2문제의 무한기간에 대한 최적해는 고정된 주기를 갖는 정책으로서 $O_1(i)$ 가 $i > 1$ 에 대해 단조비감소라는 것을 나타낸다.

3. 최적 해법 개발

P2문제에서 장비교체를 위한 최적 사용기간 i^* 를 찾기 위해서는 가능한 모든 i 에 대해 $A_1(i)$ 를 계산해야 한다. 이것은 P1문제를 먼저 해결해야 한다는 것을 뜻한다. [5]에서 사용한 절차를 이용한다. P1문제에서 장비교체는 현장비를 E_1 이나 E_2 로 교체하는 것이다. 전자의 경우 구입한 E_1 은 일정기간 사용될 것이고 그 기간동안 대안의 하나였던 E_2 는 E_1 과 마찬가지로 열화하게 되므로 경합을 벌였던 E_2 는 선택된 E_1 의 교체시기 결정시 대안이 될수 없다. E_1 으로 교체했을 때의 j_1^* 가 최적사용기간이라면 다음의 관계식은 E_1 이 j_1^* 에 도달할 때마다 반복된다.

$$A_1(j_1^*) = W_1(1) + \alpha A_1(1) < W_2(1) + \alpha A_2(1) \quad (9)$$

따라서

$$A_1(i) = W_1(i+1) + \alpha A_1(i+1) \quad 1 \leq i \leq j_1^* - 1 \quad (10)$$

$$A_1(j_1^*) = W_1(1) + \alpha W_1(1)$$

이다.

후자의 경우 E_2 를 선택한 것은 보유기종과 같은 새장비를 구입하는 것 보다는 신기술의 장비를 구입하는 것이 바람직하다는 판단이므로 E_2 를 선택, 사용하게 되는 것이며 E_2 의 교체시기 결정단계에서 구식의 E_1 장비를 교체 대안으로 포함시킬 이유는 없다고 볼 수 있다.

만일 j_2^* 가 E_2 로 교체할 때의 최적사용기간이라면

$$A_2(j_2^*) = \min \{W_1(1) + \alpha A_1(1), W_2(1) + \alpha A_2(1)\} \quad (11)$$

그런데 E_1 이 j_1^* 에 도달할때

$$A_1(j_1^*) = W_2(1) + \alpha A_2(1) < W_1(1) + \alpha A_1(1) \quad (12)$$

따라서

$$A_1(i) = W_1(i+1) + \alpha A_1(i+1) \quad 1 \leq i \leq j_1^* - 1 \quad (13)$$

$$A_1(j_1^*) = W_2(1) + \alpha W_2(1)$$

이고

$$A_2(i) = W_2(i+1) + \alpha A_2(i+1) \quad 1 \leq i \leq j_2^* - 1 \quad (14)$$

$$A_2(j_2^*) = W_2(1) + \alpha A_2(1)$$

이다.

P2문제는 (8)로부터 얻을 수 있다. $i^* = j$ 라면

$$H(i | i^*) = \min H(i | I), \quad \text{for } I=1,2,\dots \quad (15)$$

i^* 를 탐색하기 위해서는 무한기간 모두를 대상으로 할 수 없으므로 탐색범위를 제한할 필요가 있다 [5.8]. 즉,

1) 최적 교체에 대한 결정은 현장비의 사용기간과는 무관하다.

즉 $H(i | I) < H(i | I+1), \quad i \geq 1$

2) 의사결정 $d(I)$ 가 $d(I+1)$ 보다 낮다면, $d(I+1)$ 은 $d(I+2)$ 보다 낮다. ($I \geq 1$)

3) E_2 가 존재할 때 E_1 에 대한 최적교체시기 (j_1^*)는 E_2 가 존재하지 않을 때의 최적교체시기 (i^*)보다 크지 않다. 즉, $i^* \geq j_1^*$

이런 제한을 이용해서 문제를 풀어나간다.

다음 장에서는 수치예를 보이겠다.

4. 수치예

현재 보유중인 장비가 두기간 동안 사용되어 왔고 ($i_0=2$), 신기술의 개발이 진행중이며 이것이 언제 출현할지도 모르지만 $p=0.6$ 의 기하분포를 한다고 가정하자. 이들의 운용비용은 Tab1 에 주어진다. α 는 0.95라 할 때 현장비를 교체하기 위한 최적시기를 구해보자.

Tab 1 장비 E_1, E_2 의 운용비용

장비 \ i	1	2	3	4	5	6
E_1	110	30	40	50	70	80
E_2	150	20	30	30	30	40

P1문제를 다룬다.

[5]의 절차를 이용해 P1문제를 풀어서 E_2 가 사용가능할 때의 최적교체시기가 $j_1^* = 3, j_2^* = 6$ 이 구해졌다고 하자.

순환식 $A_1(i)$ 와 $A_2(i)$ 의 계산

$$A_1(1) = W_1(2) + \alpha A_1(2)$$

$$A_1(2) = W_1(3) + \alpha A_1(3)$$

$$A_1(3) = W_2(1) + \alpha A_2(1)$$

$$A_2(1) = W_2(2) + \alpha A_2(2)$$

$$A_2(2) = W_2(3) + \alpha A_2(3)$$

$$A_2(3) = W_2(4) + \alpha A_2(4)$$

$$A_2(4) = W_2(5) + \alpha A_2(5)$$

$$A_2(5) = W_2(6) + \alpha A_2(6)$$

$$A_2(6) = W_2(1) + \alpha A_2(1)$$

$A_1(i)$ 를 구하려면, $A_2(i)$ 를 이용해야 한다.

$$A_2(6) = \frac{1}{1-\alpha^6} \sum_{r=1}^6 \alpha^{r-1} W_2(r) = 1056.33$$

이를 순환식에 대입하면, $A_1(i)$ 를 구할 수 있다(Table 2 참조).

Table 2 $1 \leq i \leq 6$ 에 대한 $A_1(i)$ 값

i	1	2	3	4	5	6
$A_1(i)$	1012.3	1034.0	1046.3	1046.3	1046.3	1046.3

$H(i | I)$ 계산, $I=3$ 에 대해

$$H(1 | I=3) = W_1(2) + \alpha [pA_1(2) + qH(2 | I=3)]$$

$$H(2 | I=3) = W_1(3) + \alpha [pA_1(4) + qH(4 | I=3)]$$

$$H(3 | I=3) = W_1(1) + \alpha [pA_1(1) + qH(1 | I=3)]$$

$$H(1 | I=3) = 907.7, \quad H(2 | I=3) = 1028.5,$$

$$H(3 | I=3) = 1031.9 = H(4 | I=3) = H(6 | I=3)$$

$I=4, 5, 6$ 에 대한 계산은 Table 3에 나타났다.

Table 3 $H(i | I=3)$ 의 값($I=3, 4, 5, 6$)

$i \backslash I$	3	4	5	6
1	907.7	907.5	907.2	907.3
2	1028.5	1026.2	1025.6	1026.3
3	1031.9	1028.7	1027.3	1027.9
4	1031.9	1030.1	1029.5	1029.7
5	1031.9	1030.1	1030.3	1030.8
6	1031.9	1030.1	1030.3	1031.4

결론적으로 E_2 가 존재할 때의 의사결정은 $i=3$ 일때 E_2 로 교체하고 E_2 가 존재하지 않을 때는 계속 기다리다가 E_1 으로 교체한다.

5. 결론

본 연구는 기술이 발전해가고 있는 상황에서의 장비교체에 대한 문제를 다루었다. 진보된 기술이 적용된 장비의 출현 가능성을 고려하였으며, 기존 연구에 전환비용을 비용요소에 고려해서 확장시켰다. 앞으로의 연구는 신기술의 출현이 확률적이며 이런 확률이 대상 기간마다 다를 수 있는 경우에 대한 연구가 필요하다고 하겠다. 또한 본 연구에서 가정된 신장비가 현장비보다 모든 면에서 바람직하다는 가정을 완화해서 정량적인 표현으로 모델링하는것이 향후 연구과제이다.

참 고 문 헌

- [1] Barlow, R., Proschan, F., and Hunter, L., *Mathematical Theory of Reliability*, Wiley, New Yo (1965).
- [2] Bean, J. C., Lohmann, J. R., and Smith, R. L., " Equipment Replacement under Technological Change," *Naval Research Logistics*, 41, pp. 117-128, (1994).
- [3] Bean, J., and Smith, R., "Conditions for the Existence of Planning Horizons," *Mathematics o Operations Research*, 9, 391-401, (1984).
- [4] Bes, C., and Sethi, S., "Concept of forecast and Decision Horizons: Applications to Dynamic Stochastic Optimization Problems," *Mathematics of Operations Research*, 13, (1988).
- [5] Chand, S., and Sethi, S., "Planning Horizon Procedures for Machine Replacement Models with Several Possible Replacement Alterantives," *Naval Research Logistics Quartely*, 29, 483-4 (1982).
- [6] Lundin, R. A., and Mortan, T. E., "Planning Horizon for the Dynamic Lot Size Model, Zabel vs. Protective Procedures and Computational Results," *Operations Research*, 23, 4, 711-734, (1975).
- [7] Pierskalla, W., and Voelker, J., "A Survey of Maintenance Models: The Control and Surveillance of Dteriorating Systems," *Naval Research Lohistics Quartely*, 23, 353-388, (1976).
- [8] Sethi, S., and Chand, S., "Planning Horizon Procedures for Machine Replacement Models," *Management Science*, 25, 140-151, (1979).
- [9] Sethi, S., and Morton, T., "A Mixed Optimization Technique for the Generanlized Machine Replacement Problem," *Naval Research Logistics Quarterly*, 19, 471-481, (1972).
- [10] Sherif, Y., and Smith, M., "Optimal Maintenance Models for Systems Subject to Failure-A Review," *Naval Research Logistics Quarerly*, 28, 47-74, (1981).