

## 정기보전 제도에서 응급수리를 고려한 신제품 수리정책에서의 비용분석 모델

김 재 중

시그마에코컨설팅

### - Cost Analysis Model with Minimal Repair of New Unit Repair Policy under Periodic Maintenance Policy -

Kim, Jae Joong

Sigmaeco Consulting

#### Abstract

This paper deals with cost analysis model in periodic maintenance policy. The repair policy with minimal repair is considered as follow : as the occurrence of failure between minimal repair and periodic interval time, unit is replaced by a new unit before the periodic maintenance time comes. Then total expected cost per unit time is calculated according to time delta  $t$  in a view of customer's. The total expected costs are included repair and usage cost : operating, fixed, minimal repair, periodic maintenance and new unit expected cost. Numerical example is shown in which failure time of item has Normal distribution.

Key word : minimal repair, new unit, periodic maintenance, expected cost

## 1. 서론

일반적으로 제품의 고장 감소와 수리, 정비를 위한 중요 정비정책으로 제조업자들은 정기보전제도를 보편적인 수리방식으로 실행하고 있으며 정기보전 제도(Periodic Maintenance Policy)는 일정한 시간간격을 정하여 두고 제품을 구성하고 있는 부품전체를 정기적으로 수리, 정비, 검사를 수행하는 활동으로 점차적으로 제품의 구성이 정밀하게 되어 모든 부품의 고장 발생 시 일정한 시점에서의 수명보전방식을 선정하여 적용하기에는 수리비용 측면의 비경제적인 면을 내포하고 있으며 정기적으로 일정 시점마다 제품을 구성하고 있는 부품 전체를 수리하고 일정 정기보전 시점 이내에 부품 고장이 발생 시 고장 직전의 동일한 고장율로 복원되는 응급수리를 적용하여 유지하는 정책이 수리비용의 관점에서 경제적이라 할 수 있다. 일정 시점에서 제품의 정기보전이 적용되어 수리 복원되고 정기보전 시점 이전에 고장 발생 시 수리 후 고장 발생 직전에 동일한 고장률로 복원되는 응급수리를 고려한 정기보전제도의 적용과 유지가 현실적이라 할 수 있다.

수리정비정책은 제품의 사용시간이 경과함에 따라 수리정책을 수립하여 적용하는 바 기존 연구의 고찰을 살펴보면 Barlow와 Proschan[4]은 시스템의 사용시간에 따라 일정기간이 지난 후에 수리하는 수명보전정책과 일정 시점에서 정기적으로 고장 부품의 수리정책을 다루는 정기보전제도를 제시하였다. Cleroux와 Hanscom[10]은 시스템의 사용시간에 따라 운용비용, 조정비용, 감가비용등을 고려하여 단위 시간당 평균 기대비용을 산출하여 기대비용을 분석하였으며 Scheaffer[13]는 시스템의 사용시간에 따라 비용함수의 형태가 증가하는 함수를 고려하여 수명보전정책을 분석하였으며 Subramanian과 Wolff[14]는 비용함수를 손실함수형태로 도입하고 단위시간당 평균기대비용을 최소화하는 비용분석을 하였다. Barlow와 Hunter[3]는 시스템의 사용 중 고장이 발생하였을 때 수리 후 고장 직전의 동일한 고장률로 복원되는 응급수리 모형을 제시하였으며 Tilquin과 Cleroux[15]는 시스템의 고장 발생 시 응급수리를 적용하고 일정시점에서 정기적으로 수리 적용 시 조정비용, 감가비용, 이자율을 고려하여 단위시간당 평균기대비용을 최소화하는 비용분석을 하였다. Cleroux, Dubuc와 Tilquin[9]은 시스템의 고장 발생 시 일정시점에서 수명보전정책을 시행하고 일정시점을 경과하기 전에 고장발생의 경우, 수리비용이 확률적으로 산출될 때 일정수준 이하이면 응급수리를 적용하고 이외에는 수명보전정책을 적용하여 분석하였다. Boland[7]는 시스템의 일정시점 수리를 실행하는 정기보전제도에서 응급수리를 도입하여 수리비용은 증가함수의 형태를 설정하여 기대비용을 분석 하였다. 또한 Block, Borges와 Savits[6]는 수명보전정책 적용시 응급수리의 개념을 도입하여 시스템의 시점을 유한 시점과 무한 시점에서 총 기대비용을 산출하였다. Boland와 Proschan[8]은 정기보전제도를 도입하여 응급수리 모형을 시스템의 고장 발생 시 지수분포와 와이블 분포를 고려하여 사용 시점이 유한과 무한 시점일 때 단위 시간당 총비용을 분석하였다. Berg와 Epstein[5]은 일제 교환정책에서 한계 사용비용이 증가형태일 때 단위시간당 기대비용을 분석 하였다. Nakagawa[11][12]은 시스템의 가동 후 일정시점 전에 고장이 발생하거나 교환시점에 도달하면 부품 교환을 실시하고 고장이 일정시점 이후에 발생하였을 경우에는 교체시점까지 상태를 유지하여 교환시점에서 수리하는 일제 교환정책에서 평균비용을 산출하였고 응급수리를 고려한 수정된 정기보전 정책에서 정기보전기간 시점 전에 고장발생시 수리정책별로 정기보전기간 동안의 기대비용을 산출하였다. Bagai와

Jain[2]은 수리가 가능한 제품의 경우 응급수리를 적용하여 포아손 과정에서 고장분포 함수가 와이블 분포 일 때에 응급수리비용, 운영비용을 고려하여 기대비용을 계산하였고 최적 수리시점을 산출하였다. 본 연구에서는 정기보전 시점전의 고장에 대하여 신제품의 수리정책에서 소비자측면의 수리, 운용비용을 분석한다. 정기보전 기간 동안 발생하는 응급수리비용, 정기보전비용, 신제품의 수리비용, 운영비용, 고정비용을 고려한 비용분석 모델에서 정기보전 기간 동안의 총 기대비용과 단위시간당 기대비용을 시간  $\Delta t$  변화에 대한 비용분석을 하고자 한다.

## 2. 수리정책

응급수리적용 후 정기보전 시점전이라도 고장발생 시 새로운 부품으로 수리를 적용하는 신제품 수리정책으로 제품의 고장발생시 전체 제품의 사용에 지장을 초래하거나 소비자의 치명적인 손실을 나타낼 때 적용하는 수리 정책이다.

응급수리적용 후 일정기간동안 신제품의 수리적용 정책에서 소비자측면에서 제품사용 시의 비용과 고장발생시의 수리비용을 기대비용요소로 고려하여 비용분석 모델에서 시간  $\Delta t$ 와 정기보전기간의 변화에 대한 단위시간당 기대비용을 분석한다. 정기보전 기간 동안의 비용항목은 응급수리비용, 정기보전비용, 신제품의 수리비용, 운영비용, 고정비용으로 구성한다. 결국 정기보전 기간 동안 소요되는 기대비용 항목을 제품의 수리비용과 운용비용의 총 기대비용과 단위 시간당 기대비용을 분석한다. 정기보전기간동안 신제품의 수리적용 정책에서 정기보전기간동안 발생하는 기대비용을 고려하여 총 기대비용을 분석하고 아울러 단위 시간당 기대비용을 산출하기 위하여 응급수리 시점을  $T_0$ 로 적용 시 신제품 수리정책에 대한 비용분석을 행한다.

### 2.1 T시점에서 정기보전 수리

정기보전기간 동안 신제품의 수리적용 정책에서 정기보전 기간 동안 발생하는 제품고장에 대한 기대비용과 제품 사용 시의 발생하는 운용비용을 고려하여 정기보전 기간당 총 기대비용을 모델화 하며 아울러 단위시간당 총 기대비용을 분석하기 위하여 응급수리시점을  $T_0$ 와 신제품 수리정책이 적용되는 시간간격  $[T_0, T]$ 로 나타나는  $\Delta t$ 와 응급수리시점  $T_0$ 에 대한 기대비용 결과를 분석한다, 제조업자가 제품을 판매한 후 다음과 같은 수리정책에서 제품을 구입한 소비자 입장에서 정기보전 기간 동안 발생하는 수리비용을 산출하기 위하여 다음과 같은 수리정책을 적용한다.

#### 수리정책

제품 한 개가 판매된 후 가동되고 있는 부품은 정기보전시점  $T$ 에서 정기적으로 수리정비하며 응급수리시점  $T_0$ 와 정기보전 시간  $T$ 사이에서 부품고장 발생 시 정기보전 시점  $T$ 이전이라도 신제품수리를 적용하며 아울러 정기보전시점  $T$ 에 도달하면 정기보전수리를 한다. 이때 정기보전 동안의 수리, 운용비용은 제품을 구입하는 소비자 측에서 부담한다,

## 2.2 가정 및 기호

본 연구에서 설정한 가정과 사용기호 다음과 같다.

### 가 정

- (1) 정기보전 시점  $T$ 는 유한하다.
- (2) 운영비용 함수는 시간에 선형비례( $a + bt$ )하며 고장분포함수의 기대값을 기대비용으로 한다.
- (3) 정기보전기간 동안의 고정비용은 일정한 상수이다.
- (4) 수리에 소요되는 시간은 무시할 만큼 작아 고려하지 않는다.
- (5) 고장 분포함수는 정규분포이다.
- (6) 제품의 고장률은 연속이며 단조 증가함수이다.

### 기 호

- $T_1, T_2, T_3, \dots$  : 제품의 고장시간 간격  
 $F(t)$  : 제품의 고장분포 함수  
 $h(t)$  : 고장률 함수  
 $H(t)$  : 누적 고장률 함수  
 $U(T)$  : 단위 시간당 총기대 비용  
 $C_{RN}(T; T_0)$  : 신제품수리정책의 총기대비용  
 $C_N(T_0; T)$  : 신제품수리 기대비용  
 $C_m$  : 응급수리 비용  
 $C_{mf}(t)$  : 응급수리 비용함수  
 $C_M(T_0)$  : 응급수리 기대비용  
 $C_f$  : 고정 비용  
 $C_o$  : 운영 비용  
 $C_r$  : 정기보전 비용  
 $C_n$  : 신제품 수리비용  
 $C_F(T)$  : 고정 기대비용  
 $C_O(T)$  : 운영 기대비용  
 $RL(T_0, T)$  : 시간 간격  $[T_0, T]$ 에서 시점  $T_0$ 의 평균잔여 수명  
 $ML(T_0, T)$  : 시간 간격  $[T_0, T]$ 의 평균수명  
 $T_0$  : 응급수리 적용시점  
 $T$  : 정기보전 시점

## 3. 신제품 수리정책의 비용분석

정기보전기간동안 소요되는 총 기대비용은 응급수리 기대비용, 정기보전 비용, 신제품수리 기대비용, 고정 기대비용, 운영 기대비용으로 구성할 때 다음 식으로 모델화한다.

$$C_{RN}(T; T_0) = C_M(T_0) + C_r + C_N(T_0, T) + C_o(T) + C_F(T) \tag{3.1}$$

이때 고장분포함수가 표준 정규 분포함수일 때, 총 기대비용함수의 수리, 운용비용의 기대비용을 산출 해 보면 다음과 같다. 시간간격  $[0, T_0]$ 에서 응급수리에 대한 기대비용은 비용함수가 신뢰도 함수 일 때 기대비용을 산출하며 응급 수리 기대비용은 고장률함수와 신뢰도 함수로 나타나며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_M(T_0) &= \int_0^{T_0} C_{mf}(t)h(t)dt = C_m \int_0^{T_0} e^{-H(T_0)} \frac{\phi(z)}{1-\Phi(z)} dt \\ &= C_m \int_0^{T_0} \phi(z)dt = C_m \Phi\left(\frac{T_0-u}{\sigma}\right) \end{aligned} \tag{3.2}$$

여기서  $\Phi\left(\frac{T_0-u}{\sigma}\right)$ 는 표준정규분포의 누적분포함수이며

$$\int_0^{\frac{T_0-u}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \text{이다.}$$

$$\begin{aligned} C_N(T_0, T) &= C_n \frac{F(T) - F(T_0)}{F(T_0)} = \frac{C_n \left( \int_0^T \phi(z)dt - \int_0^{T_0} \phi(z)dt \right)}{R(T_0)} \\ &= C_n \frac{\Phi\left(\frac{T-u}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T_0-u}{\sigma}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{T_0-u}{\sigma}\right)} \end{aligned} \tag{3.3}$$

응급수리적용 후 시간간격  $[T_0, T]$ 에서 발생하는 제품 고장발생에 대한 신제품의 수리기대비용은 고장 분포함수의 평균고장함수와 수리비용으로 위의 식 (3.3)이 산출된다.

응급수리 적용 시점  $T_0$ 에서 정기보전시점  $T$ 까지의 평균잔여 수명은 시간 간격  $[T_0, T]$ 에서의 평균수명에서 신뢰도함수의 비율로서 나타나며 아래와 같이 산출한다. 이때 단위시간당 기대비용은 각 비용요소의 총 기대비용에서 응급수리 시점에서 평균잔여 수명의 비율로 산출한다. 단위 시간당의 기대비용은 총 기대비용에 대한 응급수리시점에서 시간간격  $[T_0, T]$ 의 잔여 수명으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} U(T) &= \frac{C_{RN}(T; T_0)}{P(T; T_0)} \\ P(T; T_0) &= T_0 + RL(T_0, T) \end{aligned} \tag{3.4}$$

$$= T_0 + \frac{ML(T_0, T)}{F(T_0)} = T_0 + \frac{\int_{T_0}^T \overline{F(t)} dt}{1 - \Phi\left(T_0 - \frac{u}{\sigma}\right)} \tag{3.5}$$

정기보전기간  $T$ 동안의 제품 사용 시의 운영비용이 선형적으로 비례할 때 운영 기대비용과 고정 기대비용이 정기보전 기간 동안 일정하게 발생하면 다음과 같이 산출된다.

$$\begin{aligned} C_o(T) + C_F(T) &= C_o E[a+bt] + C_f \\ &= C_o[a+bt] + C_f = C_o a + C_f \end{aligned} \quad (3.6)$$

정기보전기간 시점 T동안 발생하는 단위 시간당 기대비용을 산출하기 위한 제품의 고장 발생 시의 기대비용과 제품 사용 시의 기대비용을 고려하면 응급수리비용, 정기보전비용, 신제품의 수리비용, 운영비용 및 고정비용을 비용항목으로 설정 시 총 기대 비용식은 다음과 같다.

$$C_{RN}(T, T_o) = C_m \Phi\left(\frac{T_o - u}{\sigma}\right) + C_n \frac{\Phi\left(\frac{T-u}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T_o - u}{\sigma}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{T_o - u}{\sigma}\right)} + C_o a + C_f + C_r \quad (3.7)$$

#### 4. 적용 사례 및 분석

단위 시간당 기대비용을 산출하기 위하여 다음 예제를 통해 분석한다.

##### 적용사례

응급수리 시점  $T_o$ 가 주어지고 응급수리 적용의 비용 250, 응급수리시점 T에서 정기보전 기간까지의 기간 Delta t에 대한 신제품에 대한 수리비용 550, 시간간격 T정기보전비용 600, 정기보전 기간 동안의 고정비용이 350, 운영비용 450이며  $a=1$ ,  $b=0$ 일 때의 고장분포함수는 고장률함수가 증가형 형태인 정규분포를 사용하여 총 기대비용과 단위 시간당 기대비용을 산출한다.

표 <4.1>에 응급수리 시점  $T_o$ 에서 정기보전 시간까지의 기간 Delta t 변화에 대하여 정기보전 기간이 증가될 때 기대비용 항목의 계산과 각 비용요소의 기대비용을 산출하여 총 기대비용함수  $CRS(T, T_o)$ 와 단위시간당 기대비용  $U(T)$  산출의 결과에 대하여 Delta t와 응급수리시점  $T_o$ 의 증가에 따른 총 기대비용과 단위 시간당 기대비용을 분석한다. 응급수리 시점에서 정기보전 시점까지의 기간 Delta t가  $0.01 < \Delta t < 0.05$ 에서 변화 시 응급수리시점과 정기보전 시점은  $1.0 < T_o < 2.2$ 에서 변화하고  $1.01 < T < 2.25$ 에서 변화 할 때 총 기대비용과 단위 시간당 기대비용을 산출하였다. 이 때 총 기대비용은 응급수리 시점에서 정기보전 시점까지의 기간 Delta t가 일정 할 때 정기보전 기간과 응급수리 시점이 증가함에 따라 증가하며 이때 단위시간당 비용은 감소한다. Delta t가 증가 변화함에 따라 일정 응급수리 시점에서의 총 기대비용은 증가형태로 나타나며 일정 응급수리시점에서 정기보전기간 T가 늘어남에 따라서 기대비용 요소의 총 기대 비용은 증가 형태로 산출되며 이때 단위 시간당 기대비용은 감소 형태로 나타남을 알 수 있다. 응급수리 시점  $T_o$ 가 증가하여 변화 시 일정 Delta t에서 총 기대비용은 증가하며 단위 시간당의 기대비용은 응급수리 시점이 증가 변화할수록 감소의 형태로 산출 되었다.

&lt;Table 4.1&gt; Total Expected Cost per Unit Time

Delta t	TO	T	CRS(T,TO)	U(T)
0.01	1.0	1.01	1487.35	1472.65
0.01	1.3	1.31	1502.37	1146.86
0.01	1.6	1.61	1512.39	939.37
0.01	1.9	1.91	1518.50	795.03
0.01	2.2	2.21	1521.90	688.64
0.01	1.0	1.01	1489.34	1460.24
0.01	1.3	1.31	1503.92	1139.38
0.01	1.6	1.61	1513.46	934.26
0.01	1.9	1.91	1519.16	791.24
0.01	2.2	2.21	1522.27	685.71
0.01	1.0	1.01	1491.31	1448.10
0.01	1.3	1.31	1505.45	1132.02
0.01	1.6	1.61	1514.52	929.20
0.01	1.9	1.91	1519.81	787.49
0.01	2.2	2.21	1522.63	682.80
0.01	1.0	1.01	1493.26	1436.22
0.01	1.3	1.31	1506.95	1124.78
0.01	1.6	1.61	1515.56	924.21
0.01	1.9	1.91	1520.45	783.78
0.01	2.2	2.21	1522.98	679.92
0.01	1.0	1.01	1495.19	1424.60
0.01	1.3	1.31	1508.44	1117.66
0.01	1.6	1.61	1516.58	919.28
0.01	1.9	1.91	1521.08	780.01
0.01	2.2	2.21	1523.32	677.06

#### 4. 결론

정기보전 기간 동안의 기대비용은 제조업자의 제품에 관한 수리정책에 따라 달라지므로 본 연구에서는 신제품수리 정책에서 제품을 구입한 소비자측면에서 기대비용을 산정하였다. 기대비용의 산정은 제품 고장으로 인한 수리, 정비비용과 일정 기간 동안의 사용 시 운영비용으로 분류하여 총 기대비용분석을 하였으며 총 기대비용과 단위 시간당 기대비용을 산출 하였다. 신제품수리 정책에서 비용분석 모델의 총 기대비용은 시간 Delta t 변화에 대한 비용분석을 하였으며 총 기대비용은 T가 증가하면서 증가하나 단위시간당의 기대비용은 기간T가 증가하면서 감소형태로 분석되었다.

## 참 고 문 헌

- [1] Abdel-Hameed, M.S., E. Cinlar and J. Quinn, Reliability Theory and Models, Academic Press, 1984.
- [2] Bagai, I. and K. Jain, "Improvement, Deterioration, and Optimal Replacement Under Age-Replacement With Minimal Repair," IEEE Transactions on Reliability, Vol. 43, No. 43, pp.156-162, 1994.
- [3] Barlow, R.E. and L.C. Hunter, "Optimum Preventive Maintenance Policies," Operations Research, Vol. 8, pp.90-100, 1960.
- [4] Barlow, R.E. and F. Proschan, Mathematical Theory of Reliability, John Wiley and Sons, New York, 1965.
- [5] Berg, M. and B. Epstein, "A Note on a Modified Block Replacement Policy for Unit with Increasing Marginal Running Costs," Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 26, pp.157-160, 1979.
- [6] Block, H.W., W.S. Borges and T.H. Savits, "A General Age Replacement Model with Minimal Repair," Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 35, pp.365-372, 1988.
- [7] Boland, P. J., "Periodic Replacement When Minimal Repair Costs Vary With Time," Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 29, No. 4, pp. 541- 546, 1982.
- [8] Boland, P.J. and F. Proschan, "Periodic Replacement with Increasing Minimal Repair Costs at Failure," Operations Research Vol. 30, No. 6, pp.1183-1190, 1982.
- [9] Cleroux, R., S. Dubuc and C. Tilquin, "The Age Replacement Problem with Minimal Repair and Random Repair Costs," Operations Research, Vol. 27, No. 6, pp.1158-1167, 1979.
- [10] Cleroux, R., and M. Hanscom, "Age Replacement with Adjustment and Depreciation Costs and Interest Charges," Technometrics, Vol. 16, No. 2, pp.235-239, 1974.
- [11] Nakagawa, T., "A Modified Block Replacement with Two Variables," IEEE Transaction on Reliability, Vol. R-31, No. 4, pp. 398-400, 1982.
- [12] Nakagawa, T., "Modified Periodic Replacement with Minimal Repair at Failure," IEEE Transaction on Reliability, Vol. R-30, No. 2, pp.165-168, 1981.
- [13] Scheaffer, R.L., "Optimum Age Replacement Policies with Increasing Cost Factor," Technometrics, Vol. 13, No. 1, pp.139-144. 1971.



- [14] Subramanian, R. and M.R. Wolffs, "Age Replacement In Simple Systems with Increasing Loss Functions," IEEE Transaction on Reliability, Vol. R-25, No. 1, pp32-34. 1976.
- [15] Tilguin, C. and R. Cleroux, "Periodic Replacement with Minimal Repair at Failure and Adjustment Cost," Naval Research Logistics Quaterly, Vol. 22, pp.243-254, 1975.