

무상수리 정책에서 응급수리 적용의 비용분석 모델

- Cost Analysis Model for Minimal Repair in Free-Replacement Policy -

김 재 중 *
Kim, Jae Joong
김 원 중 **
Kim, Won Joong

Abstract

This paper is concerned with cost analysis model in free-replacement policy. The free-replacement policy with minimal repair is considered as follows; in a manufacturer's view point operating unit is periodically replaced, if a failure occurs between minimal repair and periodic maintenance time, unit is remained in a failure condition. Also unit undergoes minimal repair at failures in minimal-repair interval. Then total expected cost is calculated according to the parameter of failure distribution in a view of consumer's. The expected costs are included repair cost and usage cost: operating, fixed, minimal repair and loss cost. Numerical example is shown in which failure time of item has weibull distribution.

1. 서론

제품에 대한 적극적인 품질 보증활동을 위하여 제조, 생산자측은 고장발생시 애프터 서비스, 수리, 정비정책이 마련되고 있다. 일반적으로 제품의 고장 감소와 수리, 정비를 위한 중요 정비정책으로 제조업자들은 정기보전제도를 보편적인 수리방식으로 실행하고 있으며 이 정기보전 제도는 일정한 시간간격을 정하여 두고 제품을 구성하고 있는 부품전체를 정기적으로 수리, 정비, 검사를 수행하는 활동으로, 점차적으로 제품의 구성이 정밀하게 되어 모든 부품의 고장 발생시 일정한 시점에서의 수명보전방식을 선정하여 적용하기에는 수리비용 측면의 비 경제적인 면을 내포하고 있으며 정기적으로 일정 시점마다 제품을 구성하고 있는 부품 전체를 수리하고 일정 정기보전 시점 이내에 부품 고장이 발생시 고장 직전의 동일한 고장으로 복원되는 응급수리를 적용하여 유지하는 정책이 수리비용의 관점에서 경제적이라 할 수 있다. 일정 시점에서 제품의 정기적인 수리가 적용되어 수리 복원되고 정기보전 시점 이전에 고장 발생시 수리후 고장 발생 직전에 동일한 고장률로 복원되는 응급수리를 고려한 정기보전제도의 적용과 유지가 현실적이라 할 수 있다. 일반적으로 수리정책은 제품의 사용시간

* 여주전문대학 공업경영과

** 아주대학교 기계산업공학부

장으로 복원되는 응급수리를 적용하여 유지하는 정책이 수리비용의 관점에서 경제적이라 할 수 있다. 일정 시점에서 제품의 정기적인 수리가 적용되어 수리 복원되고 정기보전 시점 이전에 고장 발생시 수리후 고장 발생 직전에 동일한 고장률로 복원되는 응급수리를 고려한 정기보전제도의 적용과 유지가 현실적이라 할 수 있다. 일반적으로 수리정책은 제품의 사용시간이 경과함에 따라 정비정책을 수립하여 적용하는 바 기존 연구의 고찰을 살펴보면 Barlow와 Proschan[4]은 시스템의 사용시간에 따라 일정기간이 지난후에 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 사용중 고장이 발생하였을 때 수리후 고장 직전의 동일한 고장률로 복원되는 응급수리 모형을 제시하였으며 Tilquin과 Cleroux[15]는 시스템의 고장 발생시 응급수리를 적용하고 일정시점에서 정기적으로 수리 적용시 조정비용, 감가비용, 이자율을 고려하여 단위시간당 평균기대비용을 최소화하는 비용 분석을 하였다. Cleroux, Dubuc와 Tilquin[9]은 시스템의 고장 발생시 일정시점에서 수명보전 정책을 시행하고 일정시점을 경과 하기전에 고장발생의 경우, 수리비용이 확률적으로 산출될때 일정수준 이하이면 응급수리를 적용하고 이외에는 수명보전정책을 적용하여 분석하였다. Borland[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 발생시 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 포아송 과정에서 고장분포 함수가 와이블분포 일 때에 응급수리비용, 운영비용을 고려하여 기대비용을 계산하였고 최적 수리시점을 산출하였다.

본 연구에서는 Nakagawa[12]가 제시한 정기보전 정책의 수리모형에서 제품을 구입한 소비자 측면에서의 기대비용을 고정비용, 운영비용, 응급수리비용과 손실비용을 설정하여 일정기간 동안 발생하는 제품의 총 수리비용 분석을 위한 모델을 제시하고 정기보전 기간동안의 총 기대비용을 고장분포 함수의 모수변화에 대한 비용분석을 하고자 한다.

2. 수리정책의 설명

제품을 구입한 소비자는 제품의 전반적인 사용과 운영 측면에서 수리 및 교환에 소요되는 비용 분석의 필요성이 대두되며 제품의 고장발생시 동일한 기능과 성능의 제품이라면 수리와 정비에 필요한 비용의 소요와 책정이 특정한 제품을 선호하게 하는 주요한 척도가 되고 있다. 아울러 수리, 정비 계획은 제조업자 측면에서 경영정책의 주요한 관심사 일뿐 아니라 소비자측면

에서 제품의 선택에 관건이 되고 있다.

본 절에서는 제조업자의 제품 판매 후 수리정책의 적용에 대한 측면으로 무상수리적용 정책에 서의 수리정책 모형[12]은 제품의 사용되고 있는 부품은 정기보전 시점 T 에서 정기적으로 수리하며 응급수리 시점 T_0 와 정기보전 기간 T 사이에서 고장 발생시 시간간격 $[T_0, T]$ 에서는 수리가 적용되지 않으며 부품은 고장상태로 방치되어 정기보전시점 T 에서 소비자에게 무상수리의 정기보전수리를 적용한다. 이때 제조업자가 제품을 판매한 후 제품을 구입한 소비자 입장에서 정기보전 기간동안 발생하는 기대비용을 산출하기 위하여 아래와 같은 수리정책을 적용한다.

수리 정책

제품 한개가 판매된 후 사용되고 있는 부품은 시점 T_0 까지는 응급수리를 적용하며 응급수리시점 T_0 와 정기보전 기간 T 사이에서 고장 발생시 시간간격 $[T_0, T]$ 에서는 수리를 적용하지 않으며 부품은 고장상태로 방치되어 정기보전시점 T 에서 정기보전수리를 한다. 이때 정기보전 비용은 제조업자측에서 부담하는 무상수리를 적용한다.

2.1 가정 및 기호

본 연구에서 설정한 가정과 사용기호는 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) 손실비용은 고장시점에서 정기보전 시간까지의 제품을 사용하지 못하여 발생하는 기회비용이다.
- (5) 수리에 소요되는 시간은 무시할 만큼 작아 고려하지 않는다.
- (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
- $CRF(T; T_0)$: 무상수리정책의 총기대비용
- $RL(T_0, T)$: 시간간격 $[T_0, T]$ 에서 시점 T_0 의 평균잔여수명
- C_m : 응급수리 비용
- $C_m(t)$: 응급수리 비용함수
- $C_M(T_0)$: 응급수리 기대비용
- C_i : 손실 비용
- C_f : 고정 비용
- C_o : 운영 비용
- $C_L(T_0, T)$: 손실 기대비용

$C_F(T)$: 고정 기대비용
 $C_O(T)$: 운영 기대비용
 T_0 : 응급수리 적용시점
 T : 정기보전 시점

3. 무상 수리 적용의 비용분석

3.1 수리 비용 요소

본 절에서는 제품의 고장발생시 고장 부품이 전체 제품의 사용과 운용에 주요한 영향을 미치는 고장으로서 무상으로 부품의 수리가 적용될 때의 정책이다. 무상수리적용 정책에서 정기보전기간 동안 비용항목을 고려하여 정기보전 기간의 총 기대비용을 분석하기 위하여 고장분포함수의 모수변화에 대한 비용분석을 다룬다.

이때 고장분포함수가 와이블(Weibull)분포함수 일때 제품의 사용시간인 확률변수 에 대하여 총 기대 비용함수의 각 비용요소의 기대비용을 산출해 보면 다음과 같다. 시간 간격[0, T_0]에서 응급수리에 대한 기대비용은 고장률함수와 신뢰도함수로 산정하며 다음과 같이 산출한다.[12]

$$\begin{aligned}
 C_M(T_0) &= \int_0^{T_0} C_m(t)h(t)dt \\
 &= C_m \int_0^{T_0} \frac{e^{-H(t)}}{F(t)} dF(t) \\
 &= C_m(1 - e^{-\lambda T_0^{\beta}}) \quad t \geq 0 \tag{3.1}
 \end{aligned}$$

응급수리적용 후 시간간격 [T_0, T]에서 발생하는 고장에 대한 무수리적용으로 정기보전 기간까지의 손실 기대비용은 고장발생 시점으로 부터 고장탐지의 정기보전기간까지의 제품을 사용하지 못하여 발생하는 기회손실비용으로 응급수리시점에서 정기보전 시점까지의 시간간격 [T_0, T]에서 응급수리시점 T_0 의 평균잔여 수명 차이를 비율로서 손실비용을 산출할수 있다.[12]

$$\begin{aligned}
 C_L(T_0, T) &= C_L[(T - T_0) - RL(T_0, T)] \\
 &= C_L[(T - T_0) - \int_{T_0}^T \frac{F(t)}{F(T_0)} dt] \\
 &= C_L[(T - T_0) - \frac{1}{e^{-\lambda T_0^{\beta}}} \int_{T_0}^T e^{-\lambda t^{\beta}} dt] \tag{3.2}
 \end{aligned}$$

정기보전 기간T 동안의 운영비용이 시간에 선형적으로 비례할 때의 기대 운영비용과 정기보전 기간동안 고정 기대비용은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 C_O(T) + C_F(T) &= C_o E[a + bt] + C_f \\
 &= C_o [a + b \int_0^T \lambda \beta t^{\beta} e^{-\lambda t^{\beta}} dt] + C_f \\
 &= C_o [a + b (\lambda^{-\frac{1}{\beta}} \Gamma(1 + \beta^{-1}))] + C_f \tag{3.3}
 \end{aligned}$$

여기서 $\Gamma(n)$ 은 감마함수(Gamma Function)으로 $\Gamma(1 + \beta^{-1}) = \int_0^{\infty} x^{\beta-1} e^{-x} dx$ 이다.

3.2 수리 비용분석 모델

제품을 구입한 소비자 입장에서의 운용 및 고장 발생으로 인한 정기보전기 간 동안 소요되는 총 수리비용의 비용요소를 응급수리 기대비용, 손실 기대비용, 고정기대비용, 운영기대비용으로 구성할 때 다음식으로 비용분석 모델을 제시한다.

$$C_{RF}(T; T_0) = C_M(T_0) + C_L(T_0, T) + C_O(T) + C_F(T) \quad (3.4)$$

정기 보전기 간 시간 T 동안 발생하는 총기대비용을 산출하기 위한 각 비용요소를 고려하면 응급수리비용, 무상수리적용 시 손실 비용, 운영비용 및 고정비용으로 기대비용을 설정한 총 기대비용 함수식은 고장분포 함수가 와이블 분포 일때 다음과 같다.

$$C_{RF}(T; T_0) = C_m(1 - e^{-\lambda T_0^\beta}) + C_L[(T - T_0) - \frac{1}{e^{-\lambda T_0^\beta}} \int_{T_0}^T e^{-\lambda t^\beta} dt] + C_o[a + b(\lambda^{-\frac{1}{\beta}} \Gamma(1 + \beta^{-1}))] + C_f \quad (3.5)$$

3.3 적용사례 및 분석

단위 시간당 기대비용을 산출하기 위하여 다음 예제를 통하여 분석한다.

적 용 사 례

정기보전시점 T기간 동안 응급수리 비용 350, 응급수리시점 T₀에서 정기보전기 간 까지의 기간 이 0.3년, 시간간격 [T₀, T]에서의 제품의 비사용으로 인한 손실비용 480, 정기보전기 간 동안의 고정비용이 150, 운영비용 280이며 a=1, b=0이며 고장분포 함수가 와이블분포일 때 모수 β=1 로 고정시 이때 총 기대비용을 산출한다.

표 <3.1>에 척도모수 변화에 대하여 응급수리 시점 T₀, 정기보전 기간 T에서의 기대비용요소를 고려한 총 기대비용이 나타나는 바 고장분포 함수의 척도 모수 λ 변화에 대하여 정기보전 기간이 증가될 때 기대비용요소의 계산과 각 비용요소의 기대비용을 산출하여 총 기대비용함수 C_{RF}(T; T₀)와 정기보전기 간 T에 대한 산출의 시뮬레이션을 통한 결과가 표 <3.1>에 정기보전 기간의 증가에 따른 총 기대비용을 분석한다. 표 <3.1>의 결과는 응급수리 시점 1.0 < T₀ < 3.0에서 변화 시 정기보전 시점 까지 시간간격이 0.3의 기간이 주어질 때 총 기대비용을 산출한다. 일정 고장 분포함수의 모수 λ에서 정기보전 기간이 증가할 때 총 기대비용은 증가의 형태로 나타난다. 또한 고장분포 함수의 척도 모수가 증가할 때 동일 정기보전 기간의 총 기대비용은 증가의 형태로 산출되었다. 이때 동일 척도모수에서 정기보전 기간 1.3 < T < 3.3 으로 증가시 보전기 간이 증대함에 따라 총 기대비용의 증가 폭은 점차 감소의 상태를 나타내며 척도모수 1 < λ < 5 로의 증가시 총기대비용은 거의 일정한 상태로 나타남을 알수 있다.

<Table 3.1> Total Expected Repair Cost

Lambda	To	T	C _{RF} (T;To)
1	1.0	1.3	670.829
1	2.0	2.3	721.491
1	3.0	3.3	752.219
1	4.0	4.3	770.857
1	5.0	5.3	782.161
2	1.0	1.3	768.337
2	2.0	2.3	798.278
2	3.0	3.3	809.293
2	4.0	4.3	813.346
2	5.0	5.3	814.836
3	1.0	1.3	811.611
3	2.0	2.3	825.149
3	3.0	3.3	828.169
3	4.0	4.3	828.843
3	5.0	5.3	828.994
4	1.0	1.3	833.716
4	2.0	2.3	839.259
4	3.0	3.3	840.009
4	4.0	4.3	840.111
4	5.0	5.3	840.124
5	1.0	1.3	847.044
5	2.0	2.3	849.208
5	3.0	3.3	849.386
5	4.0	4.3	849.401
5	5.0	5.3	849.402

4. 결 론

본 연구에서는 정기보전제도에서 응급수리적용 제품의 수리정책하에서 비용분석모델을 제시하고 정기보전 기간동안 발생하는 기대비용을 산정하여 비용분석을 하였다. 정기보전 기간 동안의 기대비용은 제조업자의 제품에 관한 수리정책에 따라 달라지므로 본 연구에서는 무상수리 정책에서 제품을 구입한 소비자측면에서 기대비용을 산정하였다. 기대비용의 산정은 제품 고장으로 인한 수리, 정비비용과 일정 기간동안의 사용시 운영 비용으로 분류하여 비용분석 모델을 제시하였으며 총 기대비용을 산출 하였다. 무상수리 정책에서 비용분석 모델의 총 기대비용은 고장분포함수의 모수 λ 의 변화에 대한 비용분석을 하였으며 총 기대비용은 모수 λ 와 기간 T가 증가하면서 증가형태로 분석되었다.

본 연구와 관련된 추후 연구방향을 살펴보면 정기보전 기간동안의 발생하는 기대비용 요소를 추가하여 소비자 측면에서 총 기대비용을 산출할 수 있으며 일정 정기보전 시점에서 총 비용 함수를 최소화하는 최적 응급수리 시점의 설정과 분석이 이루어져야 된다고 사료된다.

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, pp1158-1167, 1979.
- [10] Cleroux, R., and M. Hanscom, "Age Replacement with Adjustment and Depreciation Costs and Interest Charges," *Technometrics*, Vol. 16, No. 2, pp235-239, 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, pp139-144. 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] Tilquin, C. and R. Cleroux, "Periodic Replacement with Minimal Repair at Failure and Adjustment Cost," *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 22, pp.243-254, 1975.
- [16] 신뢰도공학 및 정비이론, 박경수, 회중당, 1993.