

무료보증정책하에서 이봉-혼합 와이블 분포를 고려한
Burn-in 모형의 민감도 분석

송서일 · 조영찬 · 박현규
동아대학교 산업공학과

손한덕
부산정보대학 공업경영과

Sensitivity Analysis of Burn-in Model considering
Bimodal-Mixed Weibull Distribution under Free Warranty Policy

Suh-Il Song · Young-Chan Jo · Hyun-Kyu Park
Dept. of Industrial Engineering, Dong A University

Han-Deak Shon
Dept. of Industrial Engineering, Pusan Information Technology College

Abstract

Although the bimodal mixed weibull distribution is used to developing burn-in model widely, the failure times for a component or a system is often truncated at some time, T , due to the obsolescence in the electronics industry.

In this paper, we will determine minimum total cost and burn-in time by using the bimodal mixed weibull distribution and the truncated bimodal mixed weibull distribution under the free warranty policy.

The results of this study are summarized as follows.

First, when products or system is not repairable, the width of the change of burn-in time can be larger by β_1, β_2

Second, if burn-in time become longer, it will be impossible to consider the burn-in in a long time, and in this case, the burn-in time should be shorten by the acceleration burn-in.

Third, in case that opportunity loss cost or repair cost is exceed the warranty cost, or the total cost of considering burn-in is larger than that of not considering burn-in, it is not existed burn-in time which makes total cost to minimize.

Forth, the shorter life-cycle of product, the more burn-in times will be decreased and the cost in considering burn-in will be increased

1. 서론

Burn-in이란 제품이 소비자에게 인계되기 전에 불량을 발견하기 위해 제조공정에서 운영하는 시스템으로, Burn-in 공정을 통해 효과적으로 초기고장발생을 줄이고 그 결과 운영비용을 줄이고자 하는 것이 그 목적이다. 이러한 목적에 의해 Burn-in은 가능한 오랜 기간동안 실시하는 것이 바람직하나, 장기간의 Burn-in 실시에 따른 비용과 납기지연으로 인한 손실이 발생하게 되는 반면에 Burn-in을 전혀 실시하지 않거나 너무 짧게 실시할 경우에는 보증기간동안의 비용이 증가하게 된다.

또한 제품의 초기고장률이 작거나 출하 후 보증기간동안의 교체 또는 수리 비용이 출하전 Burn-in시간의 교체 또는 수리비용보다 그다지 크지 않은 경우에는 Burn-in을 실시하지 않는 경우가 유리할 때도 있다.

이러한 Burn-in기간에 관한 연구로는 Nguyen과 Murthy(1982)가 사후보증이 제공되는 판매제품의 최적 Burn-in 시간을 결정하기 위한 모형을 제안한 후, Burn-in 비용과 보증비용의 합으로서 총비용을 고려하였지만 모형에 있어서 고장률 함수의 형태를 명시하지 않았으며, Chou와 Tang(1992)은 수리가능, 불가능한 두 가지 경우에 대한 무료정책의 최적비용모형을 구하였다. 여기서 고장률이 초기에는 와이블분포, 나중은 지수분포를 따른다고 가정을 하였으며, 제품수명분포의 변곡점을 알 수 없을 때, 최대우도추정방법을 사용하여 추정을 하였다.

또한, Mi(1997)는 정규수명시간을 가정하여 Nguyen과 Murthy의 모형을 사용하여 비용함수를 제시하고, 최적의 Burn-in 시간이 고장비율함수의 첫 변곡점을 벗어나지 않는다는 것을 보여주었으며, Kim과 Thoma(1997)는 어떤 부품들은 정상부품보다 더 빨리 고장이나 마모가 발생하는 취약부품을 포함하고 있다는 가정하에 Burn-in 오류에 대한 총비용을 최소화하는 최적 Burn-in 절차에 대해 논의하였다.

그리고 Jensen과 Peterson(1982)의 많은 학자들이 고려하고 있는 이봉-혼합 와이블분포는 고장시간 t 가 무한하다는 것을 가정하고 있지만, 제품의 시장성과 노화를 고려해 볼 때, 제품의 수명은 일정한 시점 T 에서 종결되는 수명분포로 모형화하는 것이 필요로 하다.

그러므로, 본 연구에서는 무료보증정책하에서 수명분포가 이봉-혼합 와이블 분포를 따르는 경우와 노화시간 T 에서 종결되는 이봉-혼합 와이블 분포를 따르는 경우에 있어서, 부품 또는 시스템이 수리불가능한 경우의 각 모수 변화에 따른 민감도 분석과 비용이 최소가 되는 최적의 Burn-in 기간을 제시하고자 한다.

2. 이봉-혼합 와이블 분포

2.1 제품의 수명이 무한한 이봉-혼합 와이블 분포

이봉 고장유형을 나타내는 시스템의 예들을 많은 문헌에서 찾을 수 있는데 이봉 고장 유형에 대한 일반적인 설명으로 시스템들이 단지 시간의 흐름에 의해 고장나는 것과는 달리 제조상의 결점들을 가지고 있는 시스템들은 초기에 고장이 발생한다는 것이다. 또한 Jensen과 Peterson(1982)을 포함한 많은 학자들은 이봉 고장유형이 예외라기보다는 오히려 규칙이라고 주장하고 있다. 따라서 본 연구에서도 이봉-혼합 와이블 분포를 사용하여 고장률함수를 나타내기로 한다.

이봉-혼합 와이블 분포는 두 개의 누적분포함수로 구성된다. $F_1(t)$ 를 취약집단의 누적분포

포함수, $F_2(t)$ 를 정상집단의 누적분포함수라고 하며, $F(t)$ 를 전체모집단의 총 누적분포함수라고 가정하면 $F(t)$ 는 취약, 정상 하위모집단에 대한 누적분포함수의 가중평균을 가진다고 할 수 있다. 가중치는 각 하위모집단의 비율이다. 따라서 만약 취약집단이 p 의 비율을 가지고 정상집단이 $(1-p)$ 의 비율이라면 $F(t)$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(t) = pF_1(t) + (1-p)F_2(t) \quad (1)$$

일반적으로, $F_2(t)$ 가 식 (1)의 수명에서 일정하거나 매우 천천히 증가하는 낮은 고장률을 가지는 반면 $F_1(t)$ 는 높은 고장률을 가진다.

$i=1,2$ 에서 $F_i(t)$ 의 확률분포함수가 $f_i(t)$ 라고 가정하면, 이봉-혼합 와이블 분포의 고장률함수는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h(t) = \frac{pf_1(t) + (1-p)f_2(t)}{1 - \{pF_1(t) + (1-p)F_2(t)\}} \quad (2)$$

또한 각 모집단에 대해 두 개의 모수를 가지는 이봉-혼합 와이블 분포를 고려 할 경우, 식 (1)에서 이봉-혼합 와이블 분포의 누적분포함수는 식 (3)과 같다.

$$F(t) = 1 - pe^{-(t/\eta_1)^{\beta_1}} - (1-p)e^{-(t/\eta_2)^{\beta_2}} \quad (3)$$

- 단, β_1 = 취약모집단의 형상모수
- β_2 = 정상모집단의 형상모수
- η_1 = 취약모집단의 척도모수
- η_2 = 정상모집단의 척도모수
- p = 취약모집단의 비율

형상모수가 1보다 작으면 감소고장률함수이고, 형상모수가 1이면 일정한 고장률을 관찰할 수 있고, 형상모수가 1보다 크면 증가고장률을 가진다. 따라서 형상모수는 어느 고장영역에 제품이 속해 있는지를 결정한다. 또한 Kim과 Thoma(1997)는 척도모수를 특성수명이라고도 하며 63.2%에서 고장나는 점을 가르킨다.

식 (2)와 식 (3)으로부터, 고장분포함수인 식 (4)와 신뢰도 함수인 식(5)을 구할 수 있다.

$$f(t) = p\left(\frac{\beta_1}{\eta_1}\right)\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{\beta_1-1} e^{-(t/\eta_1)^{\beta_1}} + (1-p)\left(\frac{\beta_2}{\eta_2}\right)\left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{\beta_2-1} e^{-(t/\eta_2)^{\beta_2}} \quad (4)$$

$$R(t) = pe^{-(t/\eta_1)^{\beta_1}} + (1-p)e^{-(t/\eta_2)^{\beta_2}} \quad (5)$$

2.2 제품의 수명이 노화시간 T 에서 종결되는 이봉-혼합 와이블 분포

제품의 수명이 노화시간 T 에서 종결되는 이봉-혼합 와이블 분포의 누적분포함수는 식 (6)이 된다.

$$F(t) = 1 - pe^{-\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{\beta_1}} - (1-p) \frac{1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{\beta_2}}}{1 - e^{-\left(\frac{T}{\eta_2}\right)^{\beta_2}}} \quad (6)$$

그리고 고장분포함수, 고장률함수와 신뢰도 함수는 식 (7) ~ (9)와 같다.

$$f(t) = p \left(\frac{\beta_1}{\eta_1} \right) \left(\frac{t}{\eta_1} \right)^{\beta_1-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{\beta_1}} + (1-p) \left(\frac{\beta_2}{\eta_2} \right) \left(\frac{t}{\eta_2} \right)^{\beta_2-1} \frac{e^{-\left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{\beta_2}}}{1 - e^{-\left(\frac{T}{\eta_2}\right)^{\beta_2}}} \quad (7)$$

$$h(t) = p \left(\frac{\beta_1}{\eta_1} \right) \left(\frac{t}{\eta_1} \right)^{\beta_1-1} + (1-p) \left(\frac{\beta_2}{\eta_2} \right) \left(\frac{t}{\eta_2} \right)^{\beta_2-1} \frac{e^{-\left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{\beta_2}}}{e^{-\left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{\beta_2}} - e^{-\left(\frac{T}{\eta_2}\right)^{\beta_2}}} \quad (8)$$

$$R(t) = pe^{-\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{\beta_1}} + (1-p) \frac{e^{-\left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{\beta_2}} - e^{-\left(\frac{T}{\eta_2}\right)^{\beta_2}}}{1 - e^{-\left(\frac{T}{\eta_2}\right)^{\beta_2}}} \quad (9)$$

3. 보증비용모형의 수립

3.1 비용모형의 기호정의 및 가정

본 연구는 무료보증정책하에서 부품 또는 시스템 수준에서 수리불가능한 경우를 고려하고자 하며, 기호의 정의는 다음과 같다.

- p : 부품 또는 제품이 초기에 취약할 확률(취약부품의 비율)
- $p_m(q_m)$: 정상부품 또는 시스템이 Burn-in 기간중에 고장이 발생할(발생하지 않을) 확률
- $p_w(q_w)$: 취약부품 또는 시스템이 Burn-in 기간중에 고장이 발생할(발생하지 않을) 확률
- p_{pfm} : 정상부품 또는 시스템이 Burn-in 기간중에 고장이 발생하지 않으며 보증기간중에도 고장이 발생하지 않을 확률
- p_{pfw} : 정상부품 또는 시스템이 Burn-in 기간중에 고장이 발생하지 않으며, 보증기간중에 고장이 발생할 확률
- p_{pw} : 취약부품 또는 시스템이 Burn-in 기간중에 고장이 발생하지 않으며, 보증기간중에도 고장이 발생하지 않을 확률
- p_{pfw} : 취약부품 또는 시스템이 Burn-in 기간중에 고장이 발생하지 않으며, 보증기간중에 고장이 발생할 확률
- C_0 : 부품 또는 시스템의 단위 Burn-in비용(고정비)
- C_1 : 부품 또는 시스템의 단위 시간당 Burn-in 비용(변동비)
- C_2 : Burn-in 중 발생하는 고장으로 인한 손실비용
- C_3 : 보증기간중에 발생하는 고장에 대한 비용
- C_B : Burn-in을 실시하는 경우의 총비용
- C_W : Burn-in을 실시하지 않는 경우의 총비용
- W : 보증기간

또한, 본 연구에서는 Burn-in 기간을 거친 후에도 보증기간중에 고장이 발생할 수 있다는 가정하에 고장발생확률을 이용하여 모형화하고자 하며 다음과 같은 가정을 두고자 한다.

- ① 교체 또는 수리시간은 무시한다.
- ② 취약부품 또는 시스템이 초기고장의 주원인이며, Burn-in기간과 보증기간안에 모두 고장이 발생한다.
- ③ 제품의 수명분포는 이봉-혼합 와이블 분포이다.
- ④ Burn-in이 끝난 시점에 대상부품의 합격여부를 조사한다.

3.2 수리불가능한 경우의 총비용 결정

Burn-in에서 정상부품 또는 시스템이 고장이 발생하지 않을 확률은 $(1-p)q_m$ 이지만 보증기간중에 고장이 발생하지 않을 확률까지 포함하면 $(1-p)p_{ppm}$ 가 되며, 보증기간 중에 고장이 발생한다면 $(1-p)p_{pfm}$ 의 확률이 발생한다. 취약부품 또는 시스템이 Burn-in에서 고장이 발생하지 않고 보증기간중에 고장이 발생하거나 발생하지 않는 경우에는 Burn-in을 통과한 pq_w 의 확률 모두가 고장이 발생하는 것으로 보고 보증기간중에 고장이 발생할 확률은 존재하지 않는 것으로 간주한다. 즉, 취약부품이 고장나는 기간은 보증기간보다 매우 짧다. 또한, Burn-in중 정상부품 또는 시스템에서 고장이 발생한 경우는 보증기간을 고려할 필요가 없으므로 $(1-p)p_m$ 이 되며, 취약부품 또는 시스템은 $p p_w$ 가 된다. 따라서 <Table 1>와 같이 나타낼 수 있다.

<Table 1> Probability model for burn-in and warranty of replacement components

burn-in	warranty	main	weak
pass	pass	$(1-p)p_{ppm}$	0
	fail	$(1-p)p_{pfm}$	$p(p_{ppw} + p_{pfw})$
fail		$(1-p)p_m$	$p p_w$

<Table 1>의 확률에 대한 비용함수를 구해보면 먼저, 정상부품이 Burn-in에서 고장이 발생하지 않고 보증기간에서도 고장이 발생하지 않을 확률에 대한 단위당 부품 또는 시스템의 Burn-in 비용은 고정비와 Burn-in이 끝나는 t 지점까지 발생하는 변동비를 더한 $C_0 + C_1 \cdot t$ 의 비용이 발생한다. 따라서, 보증기간중에도 고장이 발생하지 않는다면 비용의 합은 $C_0 + C_1 \cdot t$ 이 되며, 보증기간 중에 고장이 발생한다면 $C_0 + C_1 \cdot t + C_3$ 의 비용이 발생할 것이다.

동일한 방법으로, 정상부품이 Burn-in에서 고장이 발생하면 부품 또는 시스템의 판매기회 손실비용이 발생하므로, 비용의 합은 Burn-in 비용과 손실비용의 더한 $C_0 + C_1 \cdot t + C_2$ 가 된다. 취약부품이 Burn-in에서 고장이 발생하지 않을 경우는 보증기간에서 모두 고장이 발생하므로 $C_0 + C_1 \cdot t + C_3$ 의 비용이 발생한다. 또한 취약부품이 Burn-in에서 고장이 발생하는 경우도 정상부품 또는 시스템의 경우와 동일하게 $C_0 + C_1 \cdot t + C_2$ 의 비용이 발생하므로 <Table 2>과 같은 비용요소로 나타낼 수 있다.

<Table 2> Cost function per item for burn-in and warranty

burn-in	warranty	main Cost	weak cost
pass	pass	$C_0 + C_1 \cdot t$	0
	fail	$C_0 + C_1 \cdot t + C_3$	$C_0 + C_1 \cdot t + C_3$
fail		$C_0 + C_1 \cdot t + C_2$	$C_0 + C_1 \cdot t + C_2$

따라서, <Table 1>와 <Table 2>으로 부터 Burn-in 비용과 보증비용을 고려한 총비용은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 C_B = & (1-p) p_{ppm} (C_0 + C_1 \cdot t) + (1-p) p_{pfm} (C_0 + C_1 \cdot t + C_3) \\
 & + (p p_{ppw} + p p_{pfw}) (C_0 + C_1 \cdot t + C_3) + (1-p) p_m (C_0 + C_1 \cdot t + C_2) \\
 & + p p_w (C_0 + C_1 \cdot t + C_2)
 \end{aligned} \quad (10)$$

그리고 Burn-in을 고려하지 않는 경우의 총비용은 식 (10)에서 비용 C_0, C_1, C_2 와 Burn-in 시간 t 가 0인 경우이므로 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$C_W = C_3 - (1-p) e^{-(W/\eta_2)^{\beta_2}} C_3 \quad (11)$$

한편 Burn-in은 Burn-in을 실시하는 경우의 총비용이 Burn-in을 실시하지 않는 경우의 총비용보다 적은 경우에 경제적 효과가 있다. 즉, Burn-in을 실시하지 않는 경우의 총비용과 Burn-in을 실시하는 경우의 총비용이 0이 되는 Burn-in 시간에서의 총비용차가 0보다 클 때 총비용을 최소화하는 Burn-in시간이 된다.

따라서, 수리불가능한 경우에 최적의 Burn-in 시간 t 를 결정하기 위해서 매우 복잡한 수식을 계산해야 하기 때문에 본 연구에서는 FORTRAN WIN 95용 프로그램을 사용하여 최적 Burn-in 시간을 결정하였다.

3.2.1 제품의 수명이 무한한 경우

이봉-혼합 와이블분포에서 $p_m, p_w, p_{ppm}, p_{ppw}, p_{pfm}, p_{pfw}$ 가 발생할 확률은 식 (12)부터 식 (17)까지 나타낼 수 있다.

$$p_m = 1 - e^{-(t/\eta_2)^{\beta_2}} \quad (12)$$

$$p_w = 1 - e^{-(t/\eta_1)^{\beta_1}} \quad (13)$$

$$p_{ppm} = e^{-((t+W)/\eta_2)^{\beta_2}} \quad (14)$$

$$p_{ppw} = e^{-((t+W)/\eta_1)^{\beta_1}} \quad (15)$$

$$p_{pfm} = 1 - p_m - p_{ppm} \quad (16)$$

$$p_{pfw} = 1 - p_w - p_{ppw} \quad (17)$$

3.2.2 제품의 수명이 노화시간 T 에서 종결되는 경우

이봉-혼합 와이블분포에서 제품의 수명이 노화시간 T 에서 종결되는 경우의 d_m , d_w , d_{pbm} , d_{pbw} 가 발생할 확률은 식 (18)부터 식 (21)까지 나타낼 수 있으며, d_{pfm} , d_{pfbw} 가 발생할 확률은 식 (16)~(17)과 동일하다.

$$d_m = \frac{1 - e^{-(t/\eta_2)^{\beta_2}}}{1 - e^{-(T/\eta_2)^{\beta_2}}} \quad (18)$$

$$d_w = 1 - e^{-(t/\eta_1)^{\beta_1}} \quad (19)$$

$$d_{pbm} = \frac{e^{-((t+W)/\eta_2)^{\beta_2}} - e^{-(T/\eta_2)^{\beta_2}}}{e^{-(t/\eta_2)^{\beta_2}} - e^{-(T/\eta_2)^{\beta_2}}} \quad (20)$$

$$d_{pbw} = e^{-[((t+W)/\eta_1)^{\beta_1} - (t/\eta_1)^{\beta_1}]} \quad (21)$$

4. 민감도 분석

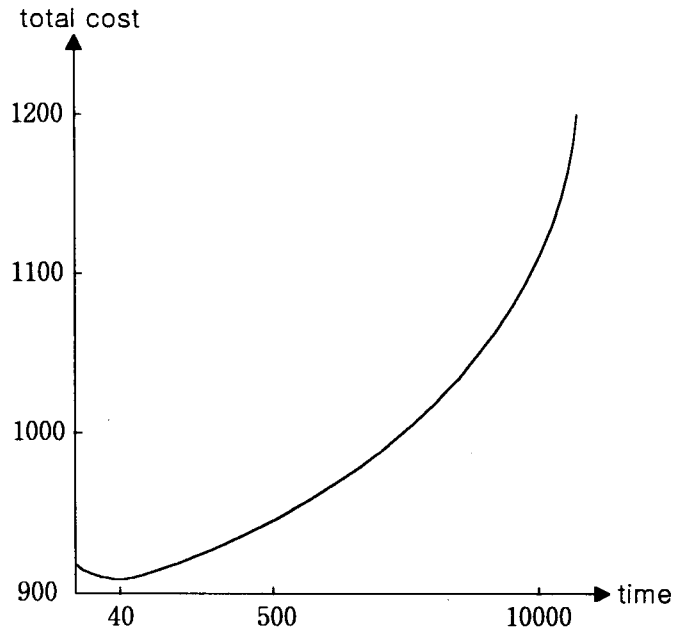
4.1 수치예제

본 연구에서 이봉-혼합 와이블 분포의 모수들과 비용들은 Jensen과 Petersen(1982)에 의한 것으로서 <Table 3>과 같고, 이때 비용들은 고정비 $C_0=1$ 원, 유동비 $C_1=0.1$ 원, Burn-in 중에 발견된 고장제품의 기회손실비용 $C_2=1000$ 원, 보증기간 동안 고장난 제품의 단위부품의 교체비용 $C_3=3000$ 원, 보증기간은 12개월이다.

<Table 3> Parameter estimate used of Jensen's method

parameter	\hat{p}	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\eta}_1$	$\hat{\eta}_2$
Jensen's estimates	6.7%	0.83	2.5	550hr	1,4000hr

<Figure 1>은 Jensen과 Petersen의 모수추정치를 식 (10)에 대입하여 총비용과 Burn-in 시간을 계산한 결과로 총비용을 최소로 하는 Burn-in이 존재한다는 것을 알 수 있다.



<Figure 1> Total cost and time

따라서, 식 (10)을 통해 $C_B = 922.6$ 원의 총비용과 $t=41$ 인 Burn-in 시간을 구할 수 있으며, Burn-in을 실시하지 않는 경우의 총비용이 924.8원이므로 Burn-in을 실시하는 것이 적절하다.

4.2 민감도 분석

제품의 수명시간이 무한한 경우와 제품의 수명시간이 노화시간 T 에서 종결되는 경우에서 수치예제의 각 모수변화에 대한 Burn-in 시간, Burn-in을 실시하는 경우와 실시하지 않는 경우의 총비용에 관해 FORTRAN WIN 95용 프로그램을 사용하여 정리하면 <Table 4> 부터 <Table 13>까지의 결과표를 얻을 수 있다.

<Table 4> Burn-in time and total cost for p

p	burn-in time	cost(burn-in+warranty) C_B	cost(warranty) C_W
0.1	142	983	998
0.2	470	1108	1221
0.3	741	1187	1443
0.4	974	1240	1665
0.5	1186	1275	1888
0.6	1386	1299	2110
0.7	1582	1313	2333

<Table 5> Burn-in time and total cost for p(truncated at T)

p	20000			30000			50000		
	burn-in	C_B	C_W	burn-in	C_B	C_W	burn-in	C_B	C_W
0.1	124.0	1051.54	1065.91	142.0	983.49	1000.04	142.0	982.62	999.19
0.2	444.0	1174.17	1280.92	473.0	1108.88	1222.36	473.0	1108.04	1221.62
0.3	715.0	1247.31	1495.93	748.0	1186.62	1444.69	748.0	1185.84	1444.04
0.4	952.0	1293.31	1710.94	985.0	1238.65	1667.02	985.0	1237.95	1666.46
0.5	1167.0	1321.49	1925.95	1199.0	1273.94	1889.35	1200.0	1273.33	1888.89
0.6	1372.0	1336.55	2140.96	1402.0	1297.00	2111.68	1402.0	1296.50	2111.31
0.7	1573.0	1341.17	2355.97	1599.0	1310.40	2334.01	1599.0	1310.01	2333.73

<Table 4>와 <Table 5>의 결과를 통해 p 가 증가함에 따라 Burn-in을 실시하지 않는 경우의 총비용과 Burn-in을 실시하는 경우의 비용은 모두 증가하며, 제품의 수명이 노화시간 T 가 50000시간에서 제품의 수명이 무한한 경우에 근접하게 나타나고 있다. 따라서 취약 부품의 비가 적을수록 Burn-in 시간이 감소하게 되고 총비용이 감소하며, 취약한 부품의 비가 클수록 Burn-in을 고려한 비용과 고려하지 않는 비용간에는 큰 차이가 나기 때문에 Burn-in을 하는 것이 좋겠다.

<Table 6> Burn-in time and total cost for warranty period

W	burn-in time	cost(burn-in+warranty) C_B	cost(warranty) C_W
3	259	207	218
6	141	335	344
9	72	576	581
12	41	923	925
15	31	1339	1340
18	34	1771	1773
21	50	2164	2167
24	86	2479	2485
27	147	2701	2711
30	226	2838	2854

<Table 7> Burn-in time and total cost for warranty period(truncated at T)

W	20000			30000			50000		
	burn-in	C_B	C_W	burn-in	C_B	C_W	burn-in	C_B	C_W
3	253.0	209.94	230.54	262.0	206.71	228.08	263.0	206.66	228.05
6	129.0	349.81	359.98	142.0	335.15	346.37	142.0	334.97	346.20
9	61.0	613.19	617.90	72.0	576.52	582.08	72.0	576.05	581.63
12	32.0	992.40	994.96	41.0	923.49	926.67	41.0	922.61	925.79
15	24.0	1448.36	1450.28	31.0	1340.34	1342.77	31.0	1338.96	1341.40
18	26.0	1921.90	1923.97	34.0	1773.05	1775.67	34.0	1771.14	1773.77
21	40.0	2352.95	2356.04	49.0	2166.73	2170.52	49.0	2164.35	2168.15
24	73.0	2698.55	2704.09	85.0	2482.12	2488.59	85.0	2479.35	2485.84
27	133.0	2942.22	2952.33	147.0	2704.25	2715.45	147.0	2701.21	2712.43
30	213.0	3092.60	3109.06	225.0	2841.23	2858.69	225.0	2838.02	2855.49

<Table 6>과 <Table 7>에서 보증기간이 증가함에 따라 Burn-in을 실시하는 경우의 총비용과 실시하지 않는 경우의 총비용은 모두 증가함을 알 수 있다. 그러나, Burn-in 시간은 보증기간이 너무 짧으면 Burn-in시간이 길어지므로 Burn-in을 실시할 필요가 없다는 것을 알 수 있다.

<Table 8> Burn-in time and total cost for η_2

η_2	burn-in time	cost(burn-in+warranty) C_B	cost(warranty) C_W
3000	4951	1553	2999
6000	8836	2019	2768
9000	9	1865	1865
12000	21	1196	1097
15000	55	820	824
18000	101	607	614

<Table 9> Burn-in time and total cost for η_2 (truncated at T)

η_2	20000			30000			50000		
	burn-in	C_B	C_W	burn-in	C_B	C_W	burn-in	C_B	C_W
3000	4951.0	1552.78	3001.00	4951.0	1552.78	3001.00	4951.0	1552.78	3001.00
6000	8835.0	2018.84	2768.54	8834.0	2018.84	2768.54	8834.0	2018.84	2768.54
9000	9.0	1866.68	1867.46	9.0	1865.62	1866.40	9.0	1865.62	1866.40
12000	19.0	1224.93	1226.51	21.0	1196.47	1198.17	21.0	1196.42	1198.12
15000	40.0	913.73	916.82	54.0	823.09	827.24	54.0	820.87	825.06
18000	59.0	764.80	769.38	97.0	619.22	626.72	101.0	607.14	614.96

<Table 8>과 <Table 9>에서 Burn-in을 실시하는 경우의 총비용과 Burn-in 시간은 보증기간까지는 증가를 하며, 그 이후에 총비용은 감소하며 Burn-in 시간은 증가한다. η_2 가 보증기간보다 적을 때는 Burn-in이 유효하지만 보증기간보다 길어지면 Burn-in 시간이 더 적어짐을 알 수 있다.

<Table 10> Burn-in time and total cost for β_1, β_2

β_1	β_2	burn-in time	cost(burn-in+warranty) C_B	cost(warranty) C_W
0.20	0.75	5695.0	1035.65	1605.89
0.20	1.25	61.0	1327.63	1381.25
0.60	0.75	5653.0	1010.78	1605.89
0.60	1.25	221.0	1353.31	1381.25
1.00	0.75	5562.0	1008.40	1605.89
1.00	2.75	—	—	—
1.10	0.75	5562.0	1008.39	1605.89
1.10	2.75	—	—	—
1.50	0.75	5562.0	1008.39	1605.89
1.50	2.75	—	—	—
1.90	0.75	5562.0	1008.39	1605.89
1.90	2.75	—	—	—

<Table 11> Burn-in time and total cost for β_1, β_2 (truncated at T)

β_1	β_2	20000			30000			50000		
		burn-in	C_B	C_W	burn-in	C_B	C_W	burn-in	C_B	C_W
0.20	0.75	3535.0	1601.48	2127.01	4744.0	1315.56	1893.73	5489.0	1133.21	1718.78
0.20	1.25	51.0	1642.02	1694.27	58.0	1423.43	1476.63	61.0	1336.43	1390.02
0.60	0.75	3553.0	1576.39	2127.01	4735.0	1290.30	1893.73	5451.0	1108.23	1718.78
0.60	1.25	168.0	1670.41	1694.27	204.0	1449.94	1476.63	219.0	1362.19	1390.02
1.00	0.75	3473.0	1570.22	2127.01	4651.0	1286.74	1893.73	5366.0	1105.64	1718.78
1.00	2.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.10	0.75	3465.0	1570.04	2127.01	4649.0	1286.71	1893.73	5365.0	1105.63	1718.78
1.10	2.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.50	0.75	3459.0	1569.97	2127.01	4649.0	1286.71	1893.73	5368.0	1105.63	1718.78
1.50	2.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.90	6.75	3459.0	1569.97	2127.01	4649.0	1286.71	1893.73	5368.0	1105.63	1718.78
1.90	2.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—

<Table 10>과 <Table 11>은 형상모수 β_1, β_2 의 관계에 대한 Burn-in을 실시하는 경우의 총비용과 실시하지 않는 경우의 총비용의 관계를 나타낸 표로서, 부품 또는 시스템이 수리불가능한 경우에 다른 모수들보다 Burn-in 시간에 크게 영향을 미친다. 즉, $\beta_1 < 1, \beta_2 < 1$ 와 $\beta_1 > 1, \beta_2 < 1$ 와 $\beta_1 < 1, \beta_2 > 1$ 및 $\beta_1 > 1, \beta_2 > 1$ 의 관계에 따라서 Burn-in 시간의 길이에 크게 영향을 미친다.

특히, $\beta_1 > 1, \beta_2 > 1$ 일 때, 총비용을 최소화하는 Burn-in 시간은 존재할수도 존재하지 않을 수도 있으며, 존재할 경우에도 Burn-in 시간이 매우 크기 때문에 납기를 고려할 경우에 부적절하다.

<Table 12> Burn-in time and total cost for C_3

C_3	burn-in time	cost(burn-in+warranty) C_B	cost(warranty) C_W
2000	5.0	617.29	617.53
4000	82.0	1224.53	1234.06
6000	140.0	1823.07	1850.59
8000	176.0	2418.51	2467.12
10000	198.0	3012.59	3083.65

<Table 13> Burn-in time and total cost for C_3 (truncated at T)

C_3	20000			30000			50000		
	burn-in	C_B	C_W	burn-in	C_B	C_W	burn-in	C_B	C_W
2000	4.0	663.45	663.64	5.0	617.87	618.11	5.0	617.29	617.53
4000	67.0	1318.47	1326.28	82.0	1225.72	1235.22	82.0	1224.53	1234.06
6000	118.0	1965.86	1988.92	140.0	1824.88	1852.33	140.0	1823.07	1850.59
8000	150.0	2610.42	2651.56	175.0	2420.94	2469.45	176.0	2418.51	2467.12
10000	170.0	3253.74	3314.21	198.0	3015.65	3086.56	198.0	3012.59	3083.65

<Table 12>와 <Table 13>의 비용요소인 경우에서 Burn-in 비용이 보증비용보다 크면 Burn-in을 실시할 필요가 없으며, 기회손실비용 C_2 가 보증비용 C_3 를 초과하면 총비용을 최소화하는 Burn-in 시간은 존재하지 않는다. 또한 C_3 가 증가하면 Burn-in 시간과 총비용도 증가를 하며, Burn-in을 실시하지 않는 경우의 총비용도 증가하게 된다.

4. 결 론

본 연구는 Burn-in 문제에 있어서 수명분포가 이봉-혼합 와이블 분포를 따를 때에 무료 보증정책하에서 최소비용을 가지는 최적 Burn-in 기간을 제시하고 있다. 이 경우에 있어서 Jesen과 Petersen에 의한 결과를 이용하여 이봉-혼합 와이블분포의 각 모수를 적용하고, 이를 이용하여 제품의 수명이 무한한 경우와 노화시간 T 에서 종결될 경우에서 최적의 Burn-in기간을 결정한다.

그 결과 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

첫째, 부품 또는 시스템이 수리불가능한 경우에 β_1 , β_2 에 의해 Burn-in 시간의 변화의 폭이 크다.

둘째, Burn-in 시간이 길어지면 납기 등의 이유로 인해 Burn-in을 오랫동안 실시할 수 없으며, 이러한 경우에는 가속 Burn-in을 통하여 Burn-in 시간을 단축시켜야 한다.

셋째, 기회손실비용이나 수리비용이 보증비용을 초과하거나, Burn-in을 실시하는 경우의 총비용이 실시하지 않는 경우의 총비용보다 크면 총비용을 최소화하는 Burn-in 시간은 존재하지 않는다.

넷째, 제품의 수명주기가 짧을수록 Burn-in기간이 감소하고 Burn-in을 고려한 비용은 증가하고 있다. 따라서 수명주기에 따른 Burn-in기간과 비용을 고려해 주어야겠다.

앞으로의 추후연구 및 과제로서는, 취약부품이 2가지 이상의 형태로 존재하는 경우, 수리 가능한 시스템의 경우에 수리 후 다시 Burn-in을 실시하는 경우, 와이블 분포가 아닌 다른 혼합분포의 적용 등에 관해서 많은 연구가 이루어져야 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] Chou, K., and Tang, K.(1992), "Burn-in Time and Estimation of Change-Point with Weibull-Exponential Mixture Distrubution", *Decision Sciences*, Vol. 23, pp. 973-990.
- [2] Jensen, F., and Petersen, N. E.(1982), *Burn-in: An Engineering Approach to The Design and Analysis of Burn-in Procedures*, John Wiley & Sons, New York, NY.
- [3] Kim, J., and Thoma, J.(1997), "Optimal Burn-in for a Process with Weak Components", *KSQC*, Vol 24, No. 4, pp. 70-89.
- [4] Kuo, W.(1984), "Reliability Enhancement through Optimal Burn-in", *IEEE Transaction on Reliability*, Vol. R-33, No. 2, pp.145-156.
- [5] Mi, J.(1997), "Warranty Policies and Burn-in", *Naval Research Logistics*, Vol. 44, pp. 199-209, 1997.
- [6] Nguyen, D. G., and Murthy, D. N. P.(1982), "Optimal Burn-in Time to Minimize Cost for Products Sold under Warranty", *IIE Transactions*, 14, pp. 167-174.