

보증분석을 위한 품질보증 기간 중 제품 교체율 추정 사례 연구

안 해 일[†]

서경대학교 산업공학과

Estimation of a Product Replacement Ratio During the Warranty Period for a Warranty Analysis

Haeil Ahn[†]

Seokyeong University

In this paper, an evaluation of a product replacement ratio of irreparable items to the normally working ones is performed with a view to a warranty analysis. It is demonstrated that the replacement ratio during the warranty period can be estimated from the field data collected during the period of operation, and one can provide the management with a useful information regarding the appropriateness for the warranty period, which is vital to the product marketing strategy. Although warranty data usually take the form of multiply right censored interval data, the conventional reliability analysis method seems to be good enough as in this case. More sophisticated method such as warranty cost analysis and 2-dimensional warranty analysis is yet desired.

Keywords : Reliability, Failure Rate, Weibull Distribution, Warranty Analysis, Warranty Period

1. 서 론

품질보증(quality assurance)과 관련된 분야에서 품질하자보증(warranty)이란 약정된 기간이 완료될 때까지 판매된 제품이 완벽하게 기능을 발휘할 수 있다는 것을 보증함과 동시에 만일 보증기간이 만료되기 전에 품질에 하자 또는 고장이 발생될 경우 제품의 수리 또는 교체를 무상으로 제공하겠다고 하는 고객에 대한 일종의 약속이다. 품질하자보증기간(warranty period)의 결정은 회사의 이미지 제고, 마케팅 전략과도 밀접하게 연관되어 있어 중요한 경영 의사결정 사안 이라고 할 수 있다[1, 4].

품질하자보증은 제품의 제조자 또는 공급자가 구매자에게 구매제품의 고장 시 이의 수리나 교체 또는 가격의 환불을 제공하겠다는 약속을 이행하려면 비용이 발생되며

제품의 가격을 상승시키기도 하는데 이를 품질하자보증비용(warranty cost)이라 한다. 제품의 고장률이 높고 품질하자 무상수리 보증기간이 길면 길수록 제품의 수리나 교체수량이 증가하게 되고 따라서 제조회사가 부담하는 품질하자 보증비는 증가하며 이로 인해 제품의 제조원가가 높아지게 되어 결국은 제품의 경쟁력 저하와 함께 매출의 감소로 이어진다.

한편 제품의 고장률이 낮고 품질하자보증 기간이 길면 제품에 대한 구매자의 신망은 높아지고 매출은 증가하게 된다. 구매자는 일반적으로 판매단가는 저렴하면서도 고장률이 낮고 품질하자보증기간이 길 것을 요구하므로 국내시장이나 수출시장에서 경쟁적으로 보증기간을 확장하려는 경향이 나타나고 있다. 품질하자보증 정책(quality warranty policy)은 제품의 가격결정, 판매량, 시

장점유율, 판매이익 등에 매우 중요한 영향을 미치게 되므로 합리적으로 결정되어야 하며 그러기 위해서는 과학적인 분석이 선행되어야 한다.

품질하자보증비용은 제품의 신뢰성과 보증정책에 따라 다양하게 나타날 수 있기 때문에 품질하자보증비용 모델 수립 시에는 (1) 고장확률밀도함수, (2) 품질하자보증정책, (3) 수리 불가능 고장 시의 제품 교체 시기 등을 반드시 고려하여야 한다[1].

품질하자보증 정책(warranty policy)은 1차원적 보증정책[6]과 2차원적 보증정책[3]이 있을 수 있다. 일차원적 보증정책은 사용시간(t)만을 주변수로 한 보증정책이고 2차원적 보증정책은 사용시간과 사용량의 두 가지를 변수로 한 보증정책이다. 자동차를 예로 든다면 일본의 T사의 하이브리드 자동차부품 무상 수리 보증한도가 사용기간 8년 또는 주행거리 10만km에 대응해 국내 H사의 하이브리드 자동차부품의 무상 수리 보증한도를 사용기간 10년 또는 주행거리 20만km로 하고 있는데 이는 2차원적인 보증정책으로서 제조자의 부담으로 무상 수리 또는 교체가 이루어지는 한도를 시간과 운행거리 두 가지로 설정한다는 의미가 된다[3].

무상 수리 보증한도가 경쟁업체에 비해 상대적으로 크다면 이는 자사제품에 대한 일종의 자신감의 표현으로 받아들여질 수 있고 구매자로부터 환영받을 만한 일이다. 하지만 제조업체의 입장에서는 비용을 고려할 때 이러한 하자보증한도를 무턱대고 늘릴 수도 없는 것이 현실이다. 이러한 제조업체의 딜레마에서 벗어나기 위해서는 제품에 대한 자료를 수집하고 분석한 후 보증기간을 합리적으로 결정하여야 한다. 또한 과연 이러한 보증기간이 합리적으로 결정된 것인지 정기적으로 재검토해 보아야 할 것이다[1, 6, 7].

본 연구에서는 실내 온도 조절기능을 담당하는 일종의 공기 제어기기에 대한 교체자료를 대상으로 하여 현재 3년(36개월)으로 되어 있는 품질하자보증기간에 기기의 무상 교체율을 추정하고 제조업체에서 감내할 수 있는 적절한 수준인가를 검토하는 분석과정에서 신뢰성 분석이 어떻게 사용될 수 있는가를 연구한 일차원적인 품질하자보증정책 분석 사례이다. 여기서는 고장밀도함수의 추정, 신뢰도의 추정, 백분위수명의 추정 등의 분석과정이 포함되어 있으며 하자보증 기간의 합리성을 검토하는 것이 본 연구의 목적이라 할 수 있다.

2. 신뢰성 척도

고장자료의 분석 시에는 모수적인 방법과 비모수적인 방법이 있을 수 있는데 특정한 분포함수를 따르는 것으

로 생각되는 경우에는 모수적방법이라 할 수 있다. 특정한 분포함수를 가정할 수 없을 때는 비모수적 방법을 선택할 수밖에 없다. 본 연구에서는 상대적으로 분석이 용이한 모수적인 방법을 택하고자 한다[2]. 신뢰성의 척도는 일반적으로 (1) 신뢰도(reliability), (2) 고장률(failure rate), (3) 평균수명(mean time), (4) 백분위 수명(percentile), (5) 평균잔여수명(mean residual life) 등 5가지를 들 수 있다 [1, 2, 4, 9].

2.1 신뢰도(Reliability)

한 기능을 담당하는 시스템 또는 부품이 t 시점까지 고장이 나지 않고 정상적으로 작동될 확률이라 정의되며 신뢰도 함수 $R(t)$ 또는 생존함수 $S(t)$ 로 표기한다. 한편 고장밀도함수의 누적포함수에 해당하는 $F(t)$ 는 누적고장확률 또는 불신뢰도(unreliability)라고 불리며

$$R(t) = \Pr[T > t] = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(x) dx \quad (1)$$

와 같은 관계가 성립된다. 신뢰도를 계산하기 위해서는 고장분포 밀도함수 $f(t)$ 의 추정이 선행되어야 한다.

2.2 고장률(Failure Rate)

고장률(failure rate)은 위험률(hazard rate)이라고도 하는데 어느 한 시점에서 아직 고장이 나지 않은 기기들 중 순간적으로 고장 날 기기들의 비율을 순간고장률(instantaneous failure rate)이라고 하며 $\lambda(t)$ 로 나타내고 단위시간 동안에 고장이 발생하는 비율로 생각할 수 있다. 신뢰도와는 다음과 같은 관계에 있다.

$$\lambda(t) = f(t)/R(t) \quad (2)$$

신뢰도($R(t)$)와 고장률($\lambda(t)$) 사이에는 다음과 같은 관계가 성립함을 보일 수 있다.

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x) dx} \quad (3)$$

이 고장률 함수는 (1) 감소형(decreasing failure rate; DFR) (2) 일정형(constant failure rate; CFR) (3) 증가형(increasing failure rate; IFR) 등으로 나타날 수 있다.

고장률이 일정한 경우는 밀도함수가 지수분포를 따르는 경우이고 정규분포를 따르는 경우는 증가형에 해당한다. 와이블 분포 밀도함수는 감소, 일정, 증가의 3가지를 모두

나타낼 수 있는 경우이다. 그 외에도 대수정규(lognormal) 분포, 감마(gamma)분포, 로지스틱(logistic)분포, 극단치 분포(extreme value)등 여러 가지의 밀도함수들이 고장밀도를 표현하는 데 사용될 수 있다.

고장률이 일정하지 않은 경우에는 두 시점 t_1 과 t_2 사이에 발생된 고장수를 시간 간격 ($t_2 - t_1$)로 나누어 평균고장률(mean failure rate)이라는 측도를 사용하기도 한다.

2.3 평균수명(Mean Time)

평균수명의 경우 수리불가능 고장의 경우에는 MTTF (mean time to failure)라 하는데 첫번째 고장 시각까지의 기대시간이라고 할 수 있다. 수리가 가능한 고장의 경우에는 MTBF(mean time between failure)라고 하고 수리완료 시점부터 다음 고장 시까지의 평균 시간 간격을 의미한다고 할 수 있다. 시간을 나타내는 확률변수를 T 라 하면

$$MTTF = E(T) = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (4)$$

와 같은 방식으로 계산할 수 있음을 증명할 수 있다.

2.4 백분위수명(Percentile)

백분위수명은 수명을 나타내는 확률변수를 T 로 쓸 때 $100p\%$ 백분위수는 t_p 로 표시하기도 하며 흔히 B_{100p} (또는 L_{100p})로 쓰기도 한다. 여기서 B 라고 하는 기호는 백분위 수명에 대한 ISO 표준 표기방식으로 독일어의 고장 발생시간(brucheinleinzeit)을 의미하며 L 은 단순히 생존(life)을 의미한다. 예를 들어 B_1 수명이라고 하면 정상사용되고 있는 기기들 중 1%가 고장이 나는 시간이라는 의미가 되고 B_{10} 수명이라 하면 10%가 고장이 나는 시간이라고 생각할 수 있다.

2.5 평균잔여수명(Mean Residual Life)

평균 잔여수명은 주어진 나이(t)의 시스템이 고장날 때까지의 기간에 대한 조건부 기대치이다. 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$m(t) = E(T-t|T>t) = \int_0^{\infty} x dF(x|t) \quad (5)$$

$$= \int_0^{\infty} R(x|t)dx = \frac{\int_0^{\infty} R(x+t)dx}{R(t)}$$

3. 보증분석 자료의 최우추정

일반적으로 신뢰성 자료는 우측 중단자료인 경우가 흔하다고 할 수 있다. 신뢰성시험을 무한정 실시할 수 없기 때문에 미리 시간(t_0)을 정해놓고 한정된 시간 내에서 시험을 하는 경우 제1종의 중단시험(type I censored test)이라고 하고 사전에 관측할 고장수(r)를 정해놓고 r 번째 고장 시점에서 더 이상의 관측을 중단한다면 제2종의 중단시험(type II censored test)이라 한다. 관측중단 시점이 모두 동일하게 적용된다면 단일 중단(singly censored test)시험이라고 할 수 있고 관측중단이 이루어지더라도 중단시점이 두 가지 이상으로 다양하다면 다중 중단 시험(multiply censored test)이라고 한다. 또한 수집된 자료의 형태로 볼 때 개개의 시료의 고장 시점을 기록한 자료라면 고장시점 자료이지만 일주일 또는 한 개월 등 일정기간 수집한 형태로 기록되어 있다면 이는 집단화된 구간자료라고 할 수 있다.

보증분석 자료의 경우에는 우측 중도 중단이면서 관측중단시기가 현재 시점으로 일정하지만 제품의 출하시기가 모두 다르므로 출하된 시점을 중심으로 볼 때 관측중도 중단시기가 모두 다르다고 할 수 있으므로 다중 중도 중단 자료에 해당한다고 할 수 있다. 또한 대체로 제조업체에서 이러한 자료를 월별로 수집하여 보관하고 있기 때문에 교체시기 자료가 고장시점 자료라기보다는 집단화된 구간자료로 간주되어야 한다. 이점이 보증분석 자료를 이용하여 모수를 추정이 어렵다고 생각하게 하지만 이미 신뢰성 이론에는 다중 중단 구간자료의 모수적 분석도 가능하다.

3.1 다중 중단자료에서의 최우 추정

모수적 신뢰성 분포분석에서 가정된 고장밀도함수의 모수의 추정은 최소 제곱법(least square method; LSM)이나 최대 우도 추정법(maximum likelihood estimation; MLE)이 주로 사용되고 있으며 통계학적인 관점에서는 최우 추정법이 바람직한 경우가 많다.

일반적으로 다중 우측관측중단시험인 경우 고장시점 자료로 주어져 있다면 다음과 같이 우도함수를 정의 할 수 있다.

여기서 F 를 고장난 제품의 인덱스 집합이고 C 를 관측 중단된 제품의 인덱스 집합이라고 하고 가정된 고장 밀도함수가 $f(t_i)$, 신뢰도함수가 $R(t_i)$, 모수벡터를 θ 라 하면

$$L(\theta) = \prod_F f(t_i) \prod_C R(t_i) \quad (6)$$

와 같이 표현될 될 수 있다. 지수 분포를 가정하였을 때 다음과 같이 표현된다.

$$L(\theta) = \prod_F \left[\frac{1}{\theta} e^{-\frac{t_i}{\theta}} \right] \prod_C \left[e^{-\frac{t_i}{\theta}} \right] \quad (7)$$

로그우도를 취하고 최대 해를 구하면 최우추정치(MLE)를 구할 수 있다.

3.2 다중 중단 구간자료의 최우 추정

주어진 자료가 구간자료라고 하면 우도함수에 약간의 변형이 필요하다. 여기서 F 를 (t_{i-1}, t_i) 기간 동안 고장난 제품의 인덱스 집합이고 C 를 관측 중단된 제품의 인덱스 집합이라고 하고 가정된 고장 밀도함수가 $f(t_i)$, 신뢰도함수가 $R(t_i)$, 모수벡터를 θ 라 하면

$$L(\theta) = \prod_F [F(t_i) - F(t_{i-1})] \prod_C R(t_i) \quad (8)$$

와이블 분포를 가정하면

$$L(\eta, m) = \prod_F \left[e^{-(t_i/\eta)^m} - e^{-(t_{i-1}/\eta)^m} \right] \prod_C \left[e^{-(t_i/\eta)^m} \right] \quad (9)$$

와 같이 되며 로그우도 $\ln L(\eta, m)$ 의 값이 최대가 되도록 η 와 m 값을 구하면 최우추정치가 된다.

3.3 최우추정치의 구간 추정

최우추정치의 구간추정은 문헌에는 3가지 정보의 방법이 소개되고 있다. 첫째는 주축통계량(pivotal quantity)을 이용한 조건확률분포를 이용하면 정확한 구간추정결과를 얻을 수 있다. 둘째는 대표본일 경우를 전제로하고 정규근사를 가정하여 Fisher의 정보행렬(information matrix)[4, 9]을 구하여 구간을 추정하는 방법이 있으며 구간을 근사치로 추정할 수 있다. 셋째 우도비 검정 통계량을 사용하여 수치 해석적으로 구간을 추정하는 방법이 있는데 상대적으로 작은 표본크기인 경우에도 근사한 결과를 얻을 수 있다. 여기서는 직접적인 설명을 피하겠지만 Lawless[8]와 같은 문헌에 자세히 설명되어 있다. 어느 경우이건 수작업 계산은 사실상 어렵지만 상업적 통계 패키지를 이용하면 쉽게 얻을 수 있다[9, 10].

본 연구에서는 미니탭(minitab)이나 SAS와 같은 패키지를 사용하고 있다.

4. 교체율 분석 사례

한 공조 설비 제조업체에서는 여러 가지의 공조기기를 제조하고 있는데 비교적 최근에 출시한 한 가지 제어기(controller) 모델의 신뢰성에 관심을 가지고 있다. 이 신행 실내온도 제어기의 개발은 약 4~5년 전부터 시작되었으나 양산체제를 갖추고 본격적인 생산을 하여 출하하기 시작한 것은 약 28개월 전이었다. 과거의 개발단계에서의 분석결과와 그간의 사업경험에 따라 품질하자보증기간(warranty period)을 3년(36개월)으로 정하였으며 이 기간에 고장이 신고된 제품들 중 수리불가능으로 판명된 제품은 다시 신제품으로 교체, 설치하여 주고 고장난 제품은 회수하고 있다.

본 제조업체에서의 의문은 이 제품의 고유한 고장밀도함수가 있는지 있다면 어떠한 분포함수인지 또한 현재 36개월로 설정된 품질하자보증기간 동안 출하된 제품의 교체율을 합리적으로 추정할 수 있는 방법을 알고 싶어 한다.

<표 1> 고장 유형별 발생건수

고장유형	2008년	2009년	2010년	합계
D31, D33 쇼트	52	40	1	93
D30, D32 쇼트	27	43		70
D30~D33 쇼트	21	23	2	46
TRIAC1 특성 불량	37	3	3	43
R72 쇼트	12	12	4	28
MICOM 특성 불량	2	21	1	24
R18 쇼트		14		14
Q9 특성 불량	2	10		12
RL5 접점 불량	1	7	3	11
RL4 접점 불량	2	8	1	11
D30, D33 쇼트	4	6		10
C3 특성 불량	4	5		9
R73 쇼트	2	7		9
C18 특성 불량		8		8
D7, 30, 31, 32, 33 쇼트	4	2	2	8
U2 특성 불량		7		7
D30, 32 쇼트	2	4	1	7
D6, 7, 30, 31, 32, 33 쇼트	2	3		5
U7 특성 불량	4	1		5
D7, D30~D33 쇼트	4	1		5
D18 특성 불량		4	1	5
D31, 33 쇼트	1	4		5
RL3 접점 불량	1	2	1	4
U6 특성 불량	1	3		4
RL6 접점 불량	1	3		4
D6, D7, D30~D33 쇼트	1	2		3
R11 쇼트		2	1	3
기타	15	52	13	80
합계	202	297	33	532

수리불가능 고장유형(failure mode)에는 <표 1>과 같이 여러 가지가 있다. 고장 유형별 고장 건수에서는 PCB 기판의 다이오드의 쇼트 발생이 가장 큰 원인인 것으로 생각된다. 고장원인별 신뢰성분석도 필요하지만 현재의 자료로는 불충분하며 좀 더 자료수집이 이루어져야만 가능할 것으로 보인다. 앞으로 다이오드의 불량률 제거하는 것이 수리불가능 고장의 원인을 제거하는데 가장 큰 기여를 할 것으로 보인다. 본 연구에서는 고장유형별 고장률을 분석할 만큼 충분하지는 않다.

4.1 교체자료의 특성

사용개시 후 수리불가능 상태로 판명된 공기온도 제어기(controller)의 교체 건수를 월별로 집계한 자료가 <표 2>에 제시되어 있다. 우선 자료의 수집기간은 최초 출하된 이후 28개월 간이며 월별로 집계한 자료이다. 정상가동 상태로 볼 수 있는 설치 기기들 중 고장이 신고되는 경우가 발생되었을 때 이러한 기기들 중 사후 수리(A/S)가 가능하면 바로 수리(repair)가 이루어지지만 수리가 불가능하다고 판단되면 신 제품으로 교체 설치하여 다시 정상가동

상태로 복구하여 주고 고장 난 제품은 교체(replacement)한다. 이러한 경우에는 고장발생과 동시에 신제품으로의 교체가 발생하였다고 보아야 하며 교체하기 전의 제어기기의 고장 시기는 신제품의 정상가동 시작시기와 일치하는 것으로 보아야 한다.

<표 1>에서 최하단의 합계는 설치 후 사용 개월 수별 교체건수이다. 이 수치를 사선방향(↙)으로 집계하면 교체된 신제품의 사용기간 별 수량이 된다. 이 수량들은 설치수량에 더해져서 교체 후 정상가동 수량이 될 수 있다.

설치수량에서 누적 교체량을 제외하면 현재 시점에서의 정상가동 수량이며 앞서 계산한 교체정상가동 수량을 합하면 정상가동 수량이 된다고 할 수 있다. 이때 사용기간이 동일한 기기들 별로 집계하여야 한다.

신뢰성 분석을 위해서는 정상가동 기간과 수량, 관측 중단 시점과 수량 등의 정보가 중요하다고 할 수 있다. 교체 시기는 고장수명자료(life time data)에 해당하고 현재까지의 사용개월 수는 제품의 관측기간이며 현재 시점이 우측 중도 중단(right censored) 시점에 해당한다. 자료의 수집 정리방식을 감안할 때 월별자료로서 집단화 구간자료이다.

<표 2> 설치 후 사용기간 별 교체시기 및 수량

설치연월	교체 수량	설치 후 사용 개월 수																											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
08	09	0																											
	10	0		1	5	4	8	3		1	3	6	1	5	8	10	8	8	3										
	11	0	1		2	2	2	1		1	1	1	3	4	4	3	2	4	1	4	1						1	1	
	12	2	1	4	1	4	1	3		4	5	2	10	6	3	4	5	1		3	3	2				3	3		
09	01	6	4	1	2	1	2	3	4	2	2	2	3	1	7	3	3	3		1	1					1	3		
	02	14			1			2	1	5	4	7	3	2	4	1		1	1							2	1	1	
	03	12	1	3	1	3	1	1	3	4	3	2	4	3	3			1	1	1	1	1							
	04	13			1	1	2			1		1	1	1		1					1								
	05	7	1		1	3		4	2	2	3	2			2						3								
	06	8		1	1	1	3	3	3	2	4			1					1		1								
	07	11	1	1		2	1	3	4			2							1										
	08	22		2	1	3	2	2	1		2	2	1				1	3	2										
	09	18		1		2			1				1																
	10	23	6	7	7	8	4	1	1	1		1		1	4	1													
	11	49		1	5	2		1	2		1		1	4															
	12	50	3	6	2	2		2					2	1															
10	01	43	3	3	2									1															
	02	61	3			1	1																						
	03	44			2		1		2		1																		
	04	16					1	1	1	1																			
	05	13					1																						
	06	20				1	1	1																					
	07	10					2																						
	08	11																											
	09	3		1																									
	10	21	2																										
	11	34																											
	12	21																											
합계		532	26	32	34	40	33	31	26	24	29	30	29	29	35	24	23	22	9	10	7	6	3	5	7	9	8	1	0

<표 3> 월별 관측중단 및 정상가동 수량

설치 연월	설치 수량	누적 교체량	관측중단 수량	정상 가동수량	교체 수량	사용 기간	
			A	A+B	B		
08	9	56	1	55	55	0	28
	10	3,249	94	3,155	3,155	0	27
	11	9,551	39	9,512	9,512	0	26
	12	9,219	68	9,151	9,153	2	25
09	1	18,583	49	18,534	18,540	6	24
	2	12,608	36	12,572	12,586	14	23
	3	12,506	37	12,469	12,481	12	22
	4	7,158	10	7,148	7,161	13	21
	5	11,707	23	11,684	11,691	7	20
	6	10,634	21	10,613	10,621	8	19
	7	7,573	15	7,558	7,569	11	18
	8	5,646	22	5,624	5,646	22	17
	9	6,993	7	6,986	7,004	18	16
	10	12,554	42	12,512	12,535	23	15
	11	14,551	17	14,534	14,583	49	14
	12	17,248	18	17,230	17,280	50	13
10	1	11,122	9	11,113	11,156	43	12
	2	8,879	5	8,874	8,935	61	11
	3	15,137	6	15,131	15,175	44	10
	4	9,372	4	9,368	9,384	16	9
	5	6,685	1	6,684	6,697	13	8
	6	7,135	3	7,132	7,152	20	7
	7	7,764	2	7,762	7,772	10	6
	8	9,422	0	9,422	9,433	11	5
	9	11,271	1	11,270	11,273	3	4
	10	11,439	2	11,437	11,458	21	3
	11	13,534	0	13,534	13,568	34	2
	12	9,495	0	9,495	9,516	21	1
합계		281,091	532			532	

<표 4> 가동 기기의 사용기간 별 빈도

시작	종료	월별 고장 빈도	사용 기간별 빈도	시작	종료	월별 고장 빈도	사용 기간별 빈도
0	1	26	26	14	15	23	23
1	*	9454	9516	15	*	12512	12535
1	2	32	32	15	16	22	22
2	*	13534	13568	16	*	6986	7004
2	3	34	34	16	17	9	9
3	*	11437	11458	17	*	5624	5646
3	4	40	40	17	18	10	10
4	*	11270	11273	18	*	7558	7569
4	5	33	33	18	19	7	7
5	*	9422	9433	19	*	10613	10621
5	6	31	31	19	20	6	6
6	*	7762	7772	20	*	11684	11691
6	7	26	26	20	21	3	3
7	*	7132	7152	21	*	7148	7161
7	8	24	24	21	22	5	5
8	*	6684	6697	22	*	12469	12481
8	9	29	29	22	23	7	7
9	*	9368	9384	23	*	12572	12586
9	10	30	30	23	24	9	9
10	*	15131	15175	24	*	18534	18540
10	11	29	29	24	25	8	8
11	*	8874	8935	25	*	9151	9153
11	12	29	29	25	26	1	1
12	*	11113	11156	26	*	9512	9512
12	13	35	35	26	27	0	0
13	*	17230	17280	27	*	3155	3155
13	14	24	24	27	28	0	0
14	*	14534	14583	28	*	55	55

4.2 자료의 정리

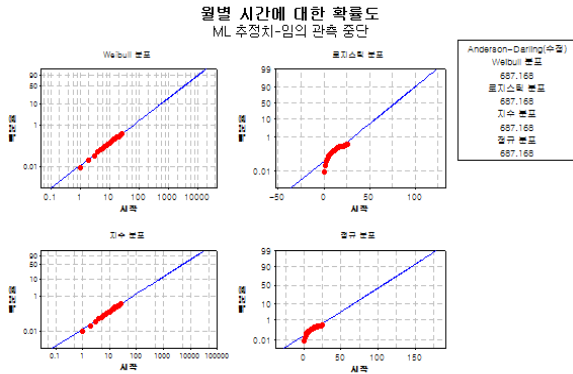
사용기간 별 수명 자료는 <표 3>에서와 같이 미니탭 (minitab)[10]에서 요구되는 입력자료 형식(worksheet)으로 정리하여 보았다. (*)가 있는 줄과 없는 줄이 교대로 나타나 있는데 없는 줄은 출하되기 시작한 시점부터 월 별 고장 빈도를 나타낸다고 할 수 있으며 다음 줄의 (*)의 의미는 아직 수리불능 고장이 관측되지 않은 상태로 정상가동 중이라는 의미로 해석될 수 있다. 현재 시점에서 관측이 중단되고 있으므로 우측 중도 중단(right censored) 자료로서 임의중단(구간)자료의 전형적인 입력 형식이다[10].

월별 고장빈도에는 교체 후 정상가동 중인 수량이 합산되어 있지 않지만 사용기간별 빈도에는 교체 후 새롭

게 사용 중인 기기의 수량이 사용기간 별로 합산되어 있다. 따라서 실제로 미니탭에 입력된 분포함수의 추정에 사용한 자료는 교체수량을 포함한 시작, 종료 시점, 사용기간별 빈도이다. 교체수량이 적은 관계로 결과에 크게 영향을 주지는 않고 있는 것으로 보인다.

4.3 고장밀도함수의 추정

고장밀도함수의 추정방식으로는 모수적 추정방식으로서 (1) 와이불 분포(weibull distribution) (2) 지수 분포(exponential distribution) (3) 정규 분포(normal distribution) (4) 로지스틱 분포(logistic distribution) 등 4가지를 고려하였다. 각 분포의 고장밀도함수를 적합시키기 전에 예비조사를 위하여 확률도(probability plot)를 작성하였으며 그 결과는 <그림 1>과 같다.



〈그림 1〉 가정된 분포함수에 대한 확률도

여기서 가장 적합한 것으로 보이는 확률밀도함수는 와이블(Weibull)로 보이며 지수분포 밀도함수도 상당히 근접한 것으로 보인다. 반면 정규분포와 로지스틱분포는 그다지 적합하지 않은 것으로 판단된다. 와이블 분포를 가정하고 최우추정법(maximum likelihood estimation)을 사용하여 추정한 모수의 추정치는 <표 5>와 같이 주어진다.

〈표 5〉 와이블 분포 모수의 추정

추정 방법 : 최대우도법				
분포 : Weibull 분포				
모수 추정치				
	추정치	표준 오차	99.0% 하한	정규 CI 상한
형상 모수	1.07303	0.0424013	0.969182	1.18800
척도 모수	4851.28	1103.61	2700.05	8716.46
로그 우도 = -5265.961				

〈표 6〉 분포의 특성치 점추정 및 구간추정

분포의 특성	추정치	표준 오차	99.0% 하한	CI 상한
평균(MTTF)	4720.83	1138.65	2536.29	8786.95
표준 편차	4402.57	1230.47	2143.15	9044.01
중위수	3447.58	738.537	1985.52	5986.25
제1사분위수(Q1)	1519.13	277.267	949.329	2430.92
제3사분위수(Q3)	6577.45	1574.22	3550.76	12184.1
사분위간 범위(IQR)	5058.33	1297.43	2612.61	9793.52

여기서 확률밀도함수의 형상모수(m)의 점 추정치는 $\hat{m} = 1.07303$, 척도모수(η)의 점 추정치는 $\hat{\eta} = 4851.28$ 로 계산되고 있다. 따라서 고장밀도함수와 신뢰도 함수 등의 신뢰성 척도는 각각 다음과 같이 추정된다.

$$f(t) = \frac{\hat{m}}{\hat{\eta}} \left(\frac{t}{\hat{\eta}}\right)^{\hat{m}-1} e^{-\left(\frac{t}{\hat{\eta}}\right)^{\hat{m}}} \quad (10)$$

$$= \frac{1.073}{4851} \left(\frac{t}{4851}\right)^{0.073} e^{-\left(\frac{t}{4851}\right)^{1.073}}$$

신뢰도(reliability function)함수는 다음과 같으며

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\hat{\eta}}\right)^{\hat{m}}} = e^{-\left(\frac{t}{4851}\right)^{1.073}} \quad (11)$$

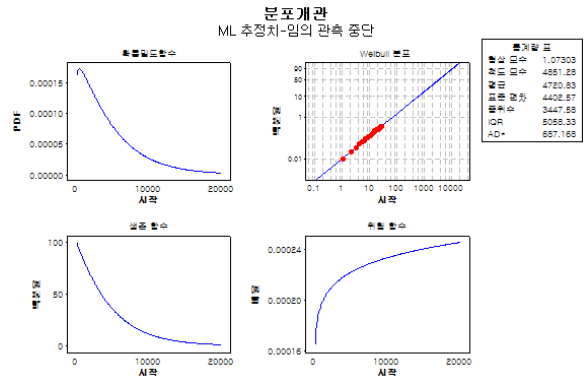
고장률(위험)함수(hazard function)는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\hat{m}}{\hat{\eta}} \left(\frac{t}{\hat{\eta}}\right)^{\hat{m}-1} \quad (12)$$

$$= \frac{1.073}{4851} \left(\frac{t}{4851}\right)^{0.073}$$

이와 같은 함수들을 미니탭으로 플롯하면 <그림 2>와 같이 나타낼 수 있다.

분포개관을 살펴볼 때 와이블 밀도함수가 거의 지수분포와 유사한 형태로 나타나고 있다. 위험함수(고장률 함수)는 급격히 증가하는 듯 보이지만 세로축의 눈금을 보면 실제로는 고장률의 증가가 매우 완만하다는 사실을 알 수 있다. 이 사실 역시 지수분포에 매우 근접한 와이블 분포로 볼 수 있다는 근거가 될 수 있다.



〈그림 2〉 추정된 와이블 분포 개관

4.4 신뢰성 척도의 추정

4.4.1 신뢰도의 추정

신뢰도는 주어진 시점 t 까지 고장이 발생되지 않을 확률로 정의된다. 현재 하자보수보증기간 36개월까지 수리불능고장이 발생되지 않을 확률 $R(36)$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$R(36) = 1 - F(36) = e^{-\left(\frac{36}{\hat{\eta}}\right)^{\hat{m}}} \quad (13)$$

$$= e^{-\left(\frac{36}{4851}\right)^{1.073}} = 0.994825248$$

따라서 36개월 이내에 수리불능고장이 발생될 확률은 $F(36) = 0.005174751654$ 로 계산되며 이는 약 0.52% 정도

로 생각할 수 있다. 미니탭의 결과에서는 생존확률 $R(t) = R(36)$ 에 대한 점 추정과 99% 신뢰구간을 다음과 같이 추정되고 있음을 알 수 있다.

<표 7> 신뢰도/생존확률 추정결과

생존 확률 표		99.0%	정규 CI
시간	확률	하한	상한
36	0.994826	0.994055	0.995497

수리불능 제품의 교체율(replacement ratio)의 99% 신뢰 구간은 (0.4503%, 0.5945%)로 추정될 수 있다.

한편 백분위 수명의 추정도 가능한데 다음과 같은 방식으로 추정할 수 있다. 백분율이 p 이면

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\hat{\eta}}\right)^{\frac{1}{m}}} = p \quad (14)$$

$$\ln t = \hat{\eta} [-\ln(1-p)]^{\frac{1}{m}} \quad (15)$$

$$t = \exp\left[\hat{\eta} \left(\ln \frac{1}{1-p}\right)^{\frac{1}{m}}\right] \quad (16)$$

로 계산할 수 있다. $p = 0.01$ 인 경우에는 즉 B_1 수명인 경우에는 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$t = \hat{\eta} \left[\ln \frac{1}{1-p}\right]^{\frac{1}{m}} \quad (17)$$

$$= 4851 \left[\ln \frac{1}{1-0.01}\right]^{\frac{1}{1.073}} = 66.7$$

미니탭의 출력 결과로 미루어 볼 때 1% 고장이 발생할 때까지의 시간(B_1 수명)은 약 66.7개월로서 대략 6년 반이 걸린다는 계산이고 하한은 약 56개월 적어도 4년 8개월 정도 사용가능한 확률이 99% 이상이라고 해석할 수 있다. B_5 수명 즉 5% 고장이 발생 할 때까지의 시간은 약 305개월로서 약 25년의 세월이 걸린다는 해석이 가능하다. 평균수명과 같은 신뢰성 척도는 신뢰구간을 살펴볼 때 불확실성이 너무 크며 연구의 목적에도 그다지 부합되지 않는 것으로 보인다.

백분율의 수치가 커지면 커질수록 신뢰구간의 폭이 커지는 점으로 미루어 볼 때 백분율이 큰 수치에 대해서는 정밀한 예측이 곤란한 것으로 보인다. 그 이유로서는 현재와 같은 공기온도 조절기의 경우에는 수십 년 간 사용할 수 있는 기기로서 실제 수명이 매우 길 것으로 예상되는데 현재 수집된 수명자료는 28개월 미만에 해당하는 자료로서 전체 백분위수를 추정하기에는 턱없이 부족하기 때문인 것으로 생각된다.

<표 8> 생존확률 및 백분위 수명 추정치

백분위수 표		표준 오차	99.0% 하한	정규 CI 상한
백분율	백분위수			
0.001	0.106204	0.0216810	0.0627723	0.179685
0.01	0.908033	0.110947	0.662854	1.24390
0.1	7.76654	0.393163	6.81707	8.84825
1	66.6808	4.52200	55.9935	79.4080
2	127.818	11.4759	101.428	161.076
3	187.399	19.3974	143.541	244.658
4	246.200	27.9475	183.782	329.818
5	304.583	36.9795	222.786	416.412
6	362.760	46.4131	260.911	504.367
7	420.872	56.1984	298.384	593.641
8	479.021	66.3019	335.365	684.212
9	537.285	76.7005	371.971	776.070
10	595.727	87.3773	408.289	869.213
20	1198.87	207.893	766.988	1873.95
30	1856.09	353.114	1137.04	3029.85
40	2594.08	527.095	1537.02	4378.11
50	3447.58	738.537	1985.52	5986.25

좀 더 정밀한 신뢰성 척도의 추정을 위해서는 앞으로도 지속적인 자료의 수집이 요구된다. 많을수록 좋겠으나 평균 수명 이상의 기간에 수집된 자료가 필요할 것으로 예상된다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 제조업 산업현장에서 흔히 볼 수 있는 수리불능 제품의 교체율 산정을 위한 신뢰성분야의 보증분석 가능성을 생각하여 보았다. 수리가 불가능한 교체제품에 대한 월별 집계자료를 토대로 어느 정도의 신뢰성분석은 가능하다고 생각된다. 예를 들자면 품질하차보증기간 36개월 이내에 교체될 확률은 평균적으로 약 0.52%이며 일시적으로는 0.5945%까지 증가될 수도 있을 것이다. B_1 수명은 약 66.7개월로서 1% 고장이 발생할 때까지 약 5년 반 적어도 66개월 정도 걸릴 것으로 예측할 수 있다.

이와 같이 교체비율이나 백분위 수명 등의 기초적인 신뢰성 분석은 가능하다고 생각되지만 수집된 자료에는 여러 가지 아쉬움이 있다고 생각이 된다. 우선 수집된 수명자료가 초기 28개월 간의 교체 수량 자료로서 제품의 수명이 수십 년으로 예상되는 기기의 신뢰성분석에는 충분치 않은 것이다. 고장 밀도함수가 지수분포에 가까운 와이블 분포를 따르는 것으로 분석된 것도 자료의 불충분에 기인할 수가 있다고 생각된다. 좀 더 정밀한 밀도함수를 추정해 내려면 장기간 많은 자료가 필요한 것이 분명하다. 따라서 앞으로도 지속적인 자료의 수집이 요구된다.

고장유형(failure mode)이 다양하게 나타나고 있는데 고장유형별 분석을 할 수가 없었다. 빈도가 큰 고장 유형에 대한 집중적인 자료수집과 고장원인 분석, 고장 원인에

따른 후속조치, 개선효과 분석 등이 이루어져야만 본 제품에 대한 성능향상이 이루어 질 수 있다.

현재 보증비용에 대한 자료가 부족하여 보증기간을 확대 실시하는 것이 바람직한지 아닌지를 판단하기는 어렵다. 하지만 보증기간 중 교체율을 정밀도 높게 추정할 수 있다면 보증비용을 고려한 보증기간의 연장을 통한 매출의 증대와 절충하여 보증기간의 정책 수립이 가능할 수 있다.

제품의 사용시간과 사용량을 동시에 고려한 2차원적인 품질보증 방식도 가능할 수 있다. 제품의 사용기간은 길지만 가스나 전기등의 사용량은 그다지 많지 않을 수도 있고 기간은 짧더라도 사용량은 많을 수 있다. 따라서 2차원적인 자료의 수집이 이루어져야만 2차원적인 신뢰성분석이 가능하며 2차원적인 보증수립정책이 수립될 수 있을 것이다[2, 9, 10].

초가속수명시험(highly accelerated life test; HALT)과 같은 시험방식을 도입하여 제품의 설계상의 취약점을 발견해 내고 이를 개선한다면 제품의 고장률을 더 낮출 수 있으며 이는 품질하자보증기간을 확장할 수 있다는 것을 의미하는 것으로 구매자들로부터 좀 더 높은 신망을 얻을 수 있으며 경쟁우위를 확보할 수 있고 궁극적으로 매출의 증대로 이어질 수 있을 것이다.

앞으로 본 제품에 대한 자료수집이 지속적으로 이루어져야함은 물론 좀 더 체계적으로 이루어 질 필요가 있으며 신뢰성 연구는 지속되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 안해일; 신뢰성설계분석, 성신출판사, 2012.
- [2] 이상용; 신뢰성공학, 형설출판사, 1999.
- [3] Banerjee, R. and Bhattacharjee, M. C.; "Analysis of a Two-dimensional Warranty Servicing Strategy with an Imperfect Repair Option," *Quality Technology and Quantative Management*, 9(1) : 23-33, 2012.
- [4] Dobson, A. J.; *An Introduction to Generalized Linear Models*, Chapman and Hill, 2001.
- [5] Ebeling, C. E.; *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering, 2nd Edition*, Waveland Press Inc., 2010.
- [6] Jack, N. and Van der Duyn Schouten, F.; "Optimal repair-replace strategies for a warranted product," *Int. J. Production Economics*, 67 : 95-100, 2000.
- [7] Kececioglu, D. B.; *Reliability Engineering HandBook*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [8] Lawless, J. F.; *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*, Wiley, New York, 1984.
- [9] Leemis, L. M.; *Reliability: Statistical Models and Statistical Methods, 2nd Edition*, Library of Congress, USA, 2009.
- [10] Minitab, Minitab Manual, 2011.