

보증데이터분석방법에 대한 조사연구 Research Trends on the Analysis Method of Warranty Data

김 종 곁* · 김 혜 미**

Abstract

최근 들어 시스템이나 부품에 대한 고객의 요구조건이 다양해지고 제품책임과 품질 보증 등의 사회적 요구가 점차 엄격해지고 있다. 이에 기업에서는 위험을 줄이고 제품의 합리적인 정보를 얻기 위해 제품 관련 보증데이터 수집 시스템을 구축하고 분석과 예측을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 그러나 데이터 수집체계 구축에 많은 시간이 소요되고 데이터 유형에 따른 분석 방법에 익숙하지 못하여 데이터를 수집하고 분석하는 데에 어려움이 되고 있다.

본 연구에서는 보증데이터의 분석방법에 대한 연구 동향과 적용 현황을 조사하고, 보증데이터를 통한 효과적 분석방법과 활용방안을 모색 하고자 한다.

Keywords : Warranty Data, Field Data, Reliability Analysis

1. 서 론

최근 들어 경제의 급속한 발전과 많은 경쟁기업들의 출현 속에서 고객들은 더욱 신뢰성 있는 제품을 요구하게 되었다. 기업의 제품이 충분한 신뢰성을 가지고 있지 못할 경우, 고객 불만족, 고객 이탈, 기업경쟁력상실 등의 장기적 손실로 큰 피해를 받을 수 있다. 이에 따라 각 기업에서는 고객 만족을 달성하기 위하여 제품의 신뢰성을 높여 제품의 보증기간을 경쟁적으로 연장하는 것이 기업의 생존과 발전을 위한 필수적 항목이 되었다. 이를 위하여 각 개발 단계에서 뿐 아니라 시장에서 출하한 후 사용단계에서 얻어지는 신뢰성을 수집·분석하여 체계화된 정량적 신뢰성 분석을 필요로 한다.

* 성균관대학교 시스템경영공학과 교수

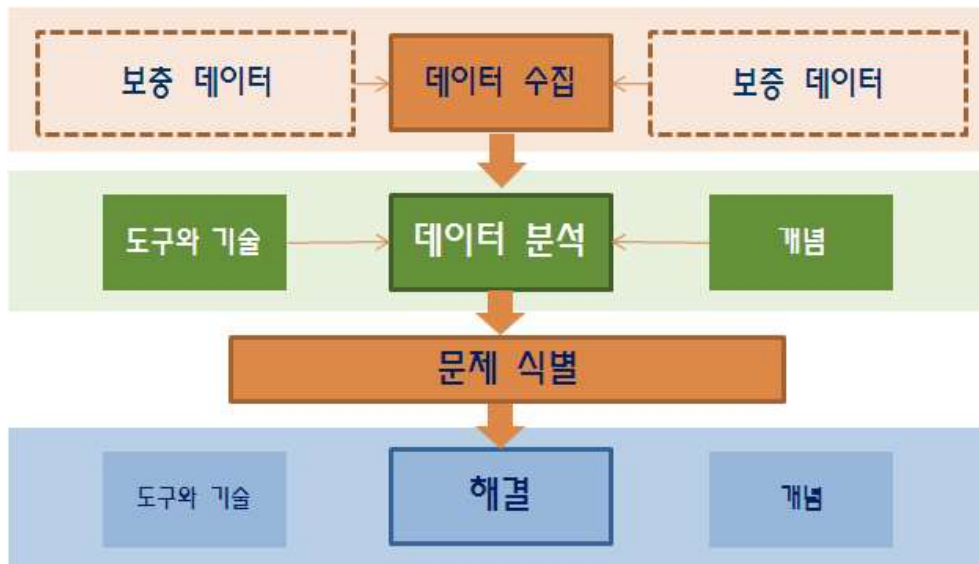
** 성균관대학교 산업공학과

통제된 환경인 실험실에서 짧은 시험 시간으로 신속하게 파악할 수 있는 수명시험, 환경시험 데이터는 정밀한 결과를 제공하지만, 실제 사용 환경을 잘 반영하지 못한다는 결점이 있다. 이에 반하여 보증데이터는 보증 기간 동안 서비스 센터에 접수된 클레임으로부터 얻어진 데이터로 실제 사용 환경에서의 제품의 신뢰도를 파악하는 데에 매우 중요한 역할을 한다는 장점이 있다. 보증 데이터로부터 제품 신뢰도에 관한 유용한 정보를 추출해내기 위해서는 다양한 통계 기법을 적절히 활용할 필요가 있다. 제품 사용현장에서의 합리적인 정보를 얻기 위하여 제품의 고장 및 수리에 관한 보증데이터의 연구는 중요한 일이다.

본 연구에서는 먼저 보증데이터에 대한 개념을 설명하고, 보증기간이 달력상의 시간으로 주어지는 일차원 보증데이터 분석과 보증기간이 달력시간과 운영시간 즉, 고장난 제품의 실 가동시간을 알 수 있는 이차원 보증 데이터 분석의 유형으로 나누어 보증데이터 분석방법에 대한 동향을 조사하고자 한다.

2. 보증데이터

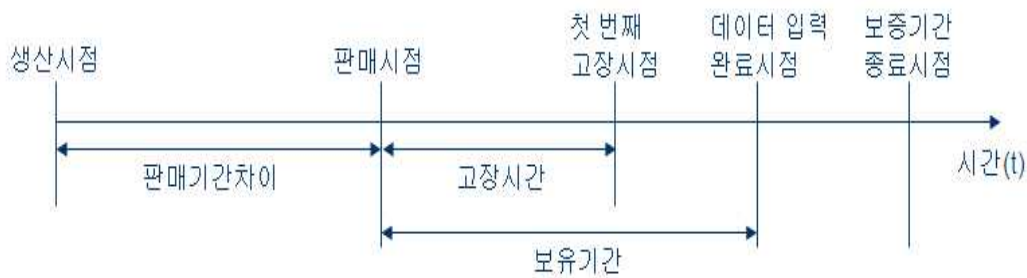
보증데이터란 제품의 수리·보증비용이나 현장에서의 신뢰도를 산출하기 위한 목적의 ‘필드서비스 데이터’로서 제품 판매 후 보증기간 내에 결함이 발생하면 해당 부품을 무상으로 수리 또는 교환을 하고, 이 결함이 발견된 제품으로부터 얻어진 고장관련 데이터를 말한다. 사용현장에서 수집된 보증데이터는 현장고장자료로 실제 사용량과 환경스트레스를 설명하기 때문에 신뢰도를 추정하기 위한 자료로서 매우 바람직하다. 보증데이터의 활용은 [그림 1]로 나타내었다.



[그림 1] 데이터 수집과 분석의 사용 [26]

보증데이터의 구성은 동일 부품, 고장 모드에 대한 클레임의 판매 시점과 고장시점을 구분할 필요가 있다. 제조 품질만을 판단하기 위해서는 제품의 첫 번째 클레임을 대상으로 하여야 한다. 보증 데이터 분석은 양산 제품의 수명을 판단하는 것이 목적이므로 보증 기간 내에 발생한 각 제품의 첫 번째 클레임만을 대상으로 한다.

보증데이터는 생산 시점 이후 그림과 같은 시간 구성을 가진다. 같은 판매시점에 출하된 차량들은 고장시점에 따라 다양한 고장시간을 가질 수 있으나, 고장 나지 않은 차량들은 일괄적인 데이터 입력 완료시점에 의해 보유기간을 가진다. 이러한 고장시간, 보유기간을 가리키는 용어로 MIS(Month in Service)와 MTF(Month to Failure)를 정의 할 수 있다.



[그림 2] 생산 시점 이후의 시간 구성

MIS는 판매 차량의 보유기간으로, 판매일 부터 데이터 입력 완료 시점까지의 시간을 의미한다. MTF는 고장 날 때까지의 기간으로, 판매일 부터 수리 일까지의 시간(단위: 개월)을 의미한다.

본 연구에서는 고장 시간을 보다 정확히 정의하기 위해 판매 후 15일 즉, 0.5개월 이내에 클레임이 발생하면 MTF를 0과 0.5개월의 평균인 0.25개월로 본다. 마찬가지로 판매 후 15일 후부터 45일 내에 발생한 클레임은 MTF를 15일과 45일의 평균인 1개월로 본다. 판매 후 0.5개월 내에 들어온 클레임의 MTF를 0으로 간주한다면 고장 시간 분포의 모수추정에 반영이 되지 않으므로 정확한 모수 추정을 위해 MTF의 범위를 0.25개월~보증 기간의 개월“로 설정하였다[7].

3. 일차원 보증데이터

일차원 분석은 변수 하나를 사용하는 분석으로 종류에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다. 판매후의 경과시간(calendar time)인 MIS를 변수로 사용하는 “보유기간에 근거한 분석”, 그리고 고장 날 때까지의 기간인 MTF를 사용하여 고장시간 분포를 추정하는 “고장 시간에 근거한 분석으로 나눌 수 있다[14].

3.1 일차원 보증데이터 분석

일차원 분석을 수행하기 위해서는 먼저 보증 데이터를 이용하여 고장 시간 분포를 추정해야 한다. 제품 수명 T는 지수분포, 와이블 분포, 대수정규 분포, 최소극치분포, 정규 분포, 감마분포 등과 같은 여러 분포를 따를 수 있으나, 주로 지수분포, 와이블 분포, 대수정규 분포 등이 사용된다. 아래 식은 와이블 분포의 확률 밀도 함수를 나타낸다.

$$f_T(t_i; \beta, \eta) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^{\beta-1} \left[-\left(\frac{t_i}{\eta} \right)^\beta \right]$$

여기서,

β : 형상 모수
 η : 척도 모수

이다.

첫 차량의 판매 시점부터 데이터 입력시점까지 총 N대의 차량이 판매되었을 때, 그 중 고장이 발생하여 클레임이 제기된 차량 수 n대의 MTF를 t_1, t_2, \dots, t_n 이라 하고, 클레임이 발생하지 않고 데이터 입력 시점의 한계 또는 보증기간의 한계에 의해 중도 절단된 차량의 MIS를 $\tau_{n+1}, \dots, \tau_N$ 은 중도 절단 시간(censoring time)으로 볼 수 있다.

와이블 분포의 모수를 추정하기 위한 대표적인 방법으로 최우추정법이 있다. 최우추정의 원리는 표본결과가 모집단을 대표한다는 가정 하에 모수가 어떤 값일 때 관찰된 표본결과가 나타날 가능성이 제일 큰 값을 찾는 것이다. 즉, 나타난 표본결과로부터 우도 함수를 최대로 하는 모수 값을 추정치로 한다. 수명 T의 고장 시간 분포에 대한 우도 함수식은 다음과 같다.

$$L(\beta, \eta) = \prod_{i=1}^n f_T(t_i; \beta, \eta) \prod_{i=n+1}^N \overline{F}_T(\tau_i; \beta, \eta)$$

여기서,

$$\overline{F}_T(\tau_i; \beta, \eta) = \exp\left(-\left(\frac{\tau_i}{\eta}\right)^\beta\right) : \text{와이블 분포의 생존함수}$$

위의 식과 같은 우도 함수를 최대화 하는 모수 값을 찾기 위해, 일반적으로 대수 우도 함수 $\ln L(\beta, \eta)$ 을 최대화하는 것이 편리하다. 따라서, 다음을 만족하는 β 와 η 를 구하게 된다.

$$\frac{\partial \ln L(\beta, \eta)}{\partial \beta} = 0, \quad \frac{\partial \ln L(\beta, \eta)}{\partial \eta} = 0$$

위에서 같이 시간 분포가 추정되면, 첫 차량의 판매시점부터 데이터 입력 시점까지 N 대의 차량이 판매되었을 때 보증 기간 τ_0 까지 발생한 클레임 수는 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{\tau_0} n_i \cdot 0.25 + \sum_{i=1}^{\tau_0} \sum_{j=1}^{\tau_0} n_{ij} = N \cdot F_T(\tau_0)$$

이와 같이 일차원 분석 방법을 이용하면 현재 보증 정책 하에서 첫 차량이 판매된 시점부터 데이터 입력 시점까지 발생한 클레임 수를 추정할 수 있다[7].

3.2 일차원 보증데이터 분석 연구

보증 데이터의 수집과 분석을 위한 절차 개발의 중요성을 Lawless(1983)가 지적한 이래로 여러 가지 연구가 진행되었다[12]. 하나의 변수에 근거한 일차원 보증데이터에 대한 기존 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Suzuki(1985)는 제품의 보증기간은 달력시간이고 고장은 운영시간을 따를 때, 추적조사 예정제품을 미리 정하여 판매한 후 서비스센터로부터 얻은 고장데이터와 추적 조사 예정제품 중 보증기간에 고장이 접수되지 않은 제품들을 추적 조사하여 얻어진 데이터를 이용하여 제품의 신뢰도를 추정하는 문제를 다루었다[23][24]. Kalbfleisch(1991)은 고장 난 제품이 서비스센터에 들어오기 까지 시간지연(time-lag)이 있는 경우에 보증 데이터를 이용하여 보증 클레임 횟수의 기댓값을 수하였다. 그들은 대수-선형 포아송(log-linear Poisson) 모형을 제안하여 문제를 간단히 표현하였으며, 고장 제품의 사용기간을 알고 동일 제품의 반복(recurrent) 고장을 허용하는 경우를 고려하였다[9]. Lawless(1994)는 이들의 연구를 시간지연이 제품의 고장시간에 따라 변화하는 변량모형(random effect model)인 경우로 확장하였다[11]. Baxter(1994)는 고장 난 제품의 사용 개시 점을 모르는 경우의 수명표(life table)로부터 비모수적 방법으로 이산형 수명분포를 추정하였는데, 이 방법은 매 시점마다 추가되는 제품수가 동일한 경우에만 적용가능하다[3]. Tortorella(1996)는 추가되는 제품수가 변하는 보다 일반적인 경우를 고려하였지만, 명확한 해를 제시하지 못하였다[25]. Lawless(1998)는 자동차와 냉장고의 보증 데이터를 사례로 들어, 보유 기간에 근거한 일차원 분석의 전반에 대해 정리하였다. 데이터가 일정한 시간 간격으로 그룹화되어 있거나 보고지연 시간(reporting delay)이 있는 경우, 또는 공변량(covariate)을 다루어야 할 경우 등, 실제 상황에서 발생할 수 있는 다양한 변수를 고려한 일차원 분석에 대해서도 정리하였다[14]. Majeske 와 Herrin(1998)은 차량의 오디오 시스템에 대한 보증 데이터를 사례로 들어, 제품 및 공정 설계 조건에 변동이 있을 때 변동 전후의 시스템을 실증적으로 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 보유기간에 따른 생명표 (life table)와 위험률 플롯(hazard rate plot) 을 사용하는 비모수적 방법을 개발하였다[18][19]. Lu(1998)는 초기 고장 주행거리 데이터를 활용하여 장기 또는 단기 신뢰도를 추정하고, 신뢰도에 문제가 있는 제품에 대한 조기의사결정(예, 리콜)을 지원하는 방법을 제안하였다. 추적조사를 통해 월간 평균 주행거리와 월간 주행거리의 표준편차를 구했고, 주행거리는 대수 정규분포를 따른다고 가정하였다[17]. Oh와 Bai(2001)은 보증기간 후의 사용현장데이터를 추가하여 신뢰성을 분석하는 절차를 제안하였다[21].

Lim(2002)은 수리 불가능한 제품의 경우, 특히 관측중단이 있는 경우에 있어서 불완전한 보증 데이터를 활용한 비모수적 신뢰도 추정 방법을 제안하였고, 이후에 사용개시 시점이 불확실한 경우의 추정 방법을 제시하였다[15][16]. Rai와 Singh(2003)은 보증 데이터로부터 파악할 수 있는 고장 주행거리에 로그를 취한 양이 절단정규분포(truncated normal distribution)를 따른다고 가정하고, 모집단의 모수를 추정하는 방법을 제안하였다. 또한 보증 데이터의 깨끗하지 못한 성질을 완화하기 위해 고장 주행거리의 각 백분위수에 대한 99% 신뢰 구간을 벗어나는 일종의 특이점을 제외할 것을 제안했다[22]. Attardi(2005)은 3-모수 와이블 분포를 이용하여 사용개시 시점이 지연된 보증 데이터의 분석방법을 제안하였다[2]. Mohan(2008)은 불완전한 보증자료를 이용한 실용적 신뢰도 추정 방법을 제시하였다[20].

위에서 나열한 일차원 보증데이터 분석에 관한 연구들을 정리하면 <표 1>과 같다.

<표 1> 일차원 보증 데이터 분석에 관한 연구

기존연구	수명분포	내 용
Suzuki(1985)	지수, 와이블	시험 제품 일부를 조적조사하고 보증기간은 달력인 경우
Kalbfleisch(1991)	지수, 와이블	시간지연 정보를 추정 후 기대고장 횟수와 기대 보증비용 추정
Lawless(1994)	지수	Kalbfleisch(1991) 연구를 제품 고장 시간에 따라 변하는 변량 모형으로 확장
Baxter(1994)	와이블	제품 사용 개시점을 모르는 경우 비모수적 방법으로 이산형 수명분포 추정
Majeske (1998)	와이블	제품과 공정 설계 조건에 변동이 있을 때 변동 전후의 시스템을 평가할 수 있는 방법 제안
Lu(1998)	대수정규	초기 고장 주행거리 데이터를 활용해 장단기 신뢰도를 추정
Oh와 Bai(2001)	와이블	보증기간과 보증기간 후의 정보를 이용한 신뢰성 분석
Lim(2002)	와이블	수리불가능한제품의 비모수적 신뢰도 추정방법 제안
Rai(2003)	정규	보증데이터의 단점을 완화 하기위한 특이점 제외를 제안
Attardi(2005)	와이블	사용개시 시점이 지연된 보증데이터 분석방법 제안
Mohan(2008)	지수, 와이블	불완전한 보증자료를 이용한 실용적 신뢰도 추정 방법제시

4. 이차원 보증데이터

이차원 보증데이터는 이차원 보증영역 내에서 고장이 발생하였을 경우 서비스센터를 통해 얻어지는 데이터이다. 보증영역 내에서 고장이 발생하여 서비스센터에 들어온 제품들에 대해서는 고장 발생시점에서의 운영시간과 달력시간을 모두 얻을 수 있다.

달력 시간의 보증이 완료되는 달력한계까지 서비스센터에 들어오지 않은 제품들은 달력 한계 이전에 고장이 발생하였으나 운영시간이 운영한계 보다 크게 되어 서비스센터에 들어오지 않았거나 달력한계까지 고장이 발생하지 않은 제품들로 이루어진다.

이 제품들에 대해서는 운영한계를 넘었을 때의 달력시간이 언제인지 혹은 달력한계까지 사용된 운영시간이 얼마인지 알 수 없기 때문에 제품 수명에 대해서는 운영시간이 운영한계보다 크거나 달력시간이 달력한계보다 크다는 정보만을 얻을 수 있다[10].

4.1 이차원 보증데이터 분석의 고찰

자동차 보증 정책은 자동차의 보유기간과 주행거리 두 변수에 의해 결정된다. 이와 같은 보증 정책 하에서는 보유기간은 초과하지 않았지만 주행거리 한계 때문에 고장이 발생해도 무상 수리를 받지 못하는 경우가 발생한다. 이러한 차량은 클레임 데이터에 포함되지 않고 분석 대상에서 제외된다. 따라서 보증 보유기간 내에 발생한 클레임 수는 실제 고장보다 적을 수 있다.

본 연구에서는 별도의 추적 조사 없이 보증 데이터만을 이용하는 Yang과 Zaghati의 방법을 설명한다. 이 방법은 축차회귀(Sequential Regression)분석을 통해 신뢰도의 과대평가를 보정한다.

이차원 분석에서 제시되는 기호는 다음과 같다.

M : 고장 주행거리

T : 고장 시간

u_0 : 보증 주행거리

τ_0 : 보증 기간

$f_{M,T}(m,t)$: 고장 주행거리와 고장 시간의 결합 밀도 함수

$f_{MT}(m)$: 고장 시간을 조건부로 하는 고장 주행거리 밀도 함수

$f_T(t)$: 고장 시간 밀도 함수

주행거리와 시간의 보증 기간 (u_0, τ_0) 까지 2차원 신뢰도 분석은 아래의 순서와 같이 추정하게 된다.

$$\bar{F}_{M,T}(u_0, \tau_0) = P(M > u_0, T > \tau_0) = \int_{u_0}^{\infty} \int_{\tau_0}^{\infty} f_{M,T}(m, t) dt dm$$

$$f_{M,T}(m, t) = f_{MT}(m) \cdot f_T(t)$$

축차 회귀를 이용하여 $f_{MT}(m)$ 추정하게 된다. 축차 회귀를 통해 신뢰도 과대평가를 보정하고 고장 시간과 고장 주행거리의 결합 분포를 추정한다. 이후 고장 시간과 고장 주행거리의 결합 분포에 근거한 이차원보증 데이터 분석을 제안하였다[27].

4.2 이차원 보증데이터 분석 연구

주행거리와 보유기간을 동시에 고려한 이차원 보증데이터에 대한 기존의 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Lawless 등(1995)은 보증기간이 달력시간과 운영시간을 갖는 이차원 영역이고 제품의 고장은 운영시간을 따를 때 달력시간과 운영시간 사이에 선형관계가 존재한다고 가정한 후 운영시간의 사용현장데이터를 달력시간의 데이터로 변환하여 수명 분포의 모수를 추정하는 문제를 다루었다[13]. Hu와 Lawless(1996)는 이들의 연구를 수리 가능한 제품에 대한 경우로 확장하였다[5]. Hu(1998)는 관측 중단 시간을 모를 경우에 대해서 비모수적 추정 방법을 제안하였다[6]. Eliashberg(1998)은 고장 주행거리 분포를 로지스틱 함수 (logistic function)의 형태로 제안하고, 비례위험 모형을 이용하여 고장 주행거리를 조건부로 하는 고장 시간 분포를 추정하여, 고장 시간과 고장 주행거리의 결합 분포를 추정하였다[4]. Ahn(1998)은 주행거리와 보유기간을 합성한 지표를 제시하였는데, 이는 시스템별 고장의 형태가 주로 주행거리에 의존하는지, 보유기간에 의존하는지, 아니면 두 측도에 의존하는지를 판정하는데 활용될 수 있다[1]. Yang 과 Zaghati(2002)는 별도의 추적조사 없이 보증 데이터만을 이용하여 고장 시간과 고장 주행거리의 결합분포를 추정하였는데, 주행거리의 보증 한계에 의해 중도 절단된 고장 수에 대한 정보를 얻기 위해 축차 회귀(Sequential Regression)분석을 제시하였다. 축차 회귀 분석단계에서 고장 시간과 평균 고장 주행거리 간의 회귀식과, 고장시간과 변동계수 역수 간의 회귀 식을 각각 산정하였다[27].

Jung(2007)는 제품의 고장시간이 정확히 기록된 경우 이중 보증데이터를 활용한 분석 방법을 제시하였다[8].

위에서 나열한 이차원 보증데이터 분석에 관한 연구들을 정리하면 <표 2>과 같다.

<표 2> 일차원 보증 데이터 분석에 관한 연구

기존연구	수명분포	내 용
Lawless(1995)	지수	달력시간 사용현장데이터를 운영시간으로 변환하여 수명모수 추정
Hu(1996)	지수	수리 가능한 제품에 대해 비모수적 추정 방법 제안
Eliashberg(1998)	지수	비레위험모형을 이용하여 고장 주행거리를 조건부로 하는 고장 시간 분포 추정
Yang(2002)	와이블	별도 추적조사 없이 보증 데이터만을 이용하여 고장시간과 고장 주행거리의 결합분포를 추정
Jung(2007)	지수	수리 가능한 제품에 대해 수명분포의 운영시간과 과거의 고장횟수와 선형적인 관계적용

5. 결론 및 추후 연구과제

보증 데이터로부터 제품 신뢰도에 관한 유용한 정보를 추출해내기 위해 다양한 통계 기법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 먼저 보증데이터에 대한 개념을 설명하고, 보증기간이 달력상의 시간으로 주어지는 일차원 보증데이터 분석과 보증기간이 달력시간과 운영시간을 알 수 있는 이차원 보증 데이터 분석으로 나누어 보증데이터 분석 방법에 대한 연구를 조사하였다. 일차원 보증데이터에 관한 연구는 많이 이루어지고 있으나 일차원적 접근 방법으로 보증데이터를 분석하게 되면 제품의 고장이 하나의 척도에 의해서만 발생한다고 가정해야하고 고장 데이터로부터 두 척도간의 선형관계 정도를 나타내는 모수들을 추정하기 어렵다는 문제점이 발생한다. 또한 보증 데이터에 포함되지 못하고 중도 절단된 데이터를 분석에 반영할 수 없으므로 신뢰도를 실제보다 과대평가할 위험이 있다는 문제점이 제시되고 있다. 이를 보완하기 위해 이차원 보증데이터 분석의 필요성이 증대되고 있으며 현재 운행 중인 제품에 대해 추적조사를 실시하고 중도 절단된 클레임을 추정하여 일차원 분석의 신뢰도 과대 추정을 완화하고 있다. 그러나 추적 조사는 높은 비용을 수반하고, 추적이 어렵다는 문제점이 있다.

추후 연구과제로 경제적인 측면을 고려하여 별도의 추적 조사 없이 보증데이터만을 활용한 이차원 분석방법의 연구가 필요하며, 불완전한 보증데이터를 보완하기 위한 다양한 신뢰도 예측 절차의 개발연구가 진행되어야 할 것이다. 또한 단일 고장 원인이 아닌 하나 이상의 원인들의 결합에 의한 고장모드 모형을 고려한 이차원 보증데이터 분석 방법에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

6. 참 고 문 헌

- [1] Ahn, C. W., Chae, K. C. and Dlark, G. M., "Estimating Parameters of the Power Law Process with Two Measures of Failure Time", *Journal of Quality Technology*, 30(2), pp.127-132, 1998.
- [2] Attardi, L., Guida, M., and Pulcini, G., "A Mixed-Weibull Regression Model for the Analysis of Automotive Warranty Data," *Rel. Eng & sys. Safety*, 87, pp.265-273, 2005.
- [3] Baxter, L.A., "Estimation from Quasi Life Tables", *Biometrika*, 81(3), pp.567-577, 1994.
- [4] Eliashberg, J., Singpurwalla, N. D. and Wilson, S. P., "Calculating the Reserve for a Time and Usage Indexed Warranty", *Management Science*, 43(7), pp.966-975, 1998.
- [5] Hu, X. J. and Lawless, J. F., "Estimation of Rate and Mean Functions from Truncated Recurrent Event Data", *Journal of American Statistical Association*, 91, pp.300-310, 1996.
- [6] Hu, X. J., Lawless, J. F. and Suzuki, K., " Nonparametric Estimation of a Lifetime Distribution When Censoring Times Are Missing", *Technometrics*, 40, pp.3-13, 1998.
- [7] Jin-Seon Kim, "Development of a Method for Analyzing Two-Dimensional Warranty Data", *Korea Advanced Institute of Science and Technology*, pp.51, 2004.
- [8] Jung, M. and Bai, D. S., "Analysis of Field Data under Two-Dimensional Warranty", *Rel. Eng & Sys. Safety*, 92, pp.135-143, 2007.
- [9] Kalbfleisch, J. D., Lawless, J. F. and Robinson, J. A., *Methods for the Analysis and Prediction of Warranty Claims*, *Technometrics*, 33(3), pp.273-285, 1991.
- [10] Kwang Ick Jang, "Field Data Analyses of Products under Two-Dimensional Warranty", *Korea Advanced Institute of Science and Technology*, pp.60, 2002.
- [11] Lawless, J. F., "Adjustments for Reporting Delays and the Prediction of Occurred but not Reported Events", *The Canadian Journal of Statistics*, 22, pp.15-31, 1994
- [12] Lawless, J. F., "Statistical Method in Reliability", *Technometrics*, 25, pp.305-335, 1983.
- [13] Lawless, J. F., Hu, J. and Cao, J., "Methods for the Estimation of Failure Distributions and Rates from Automobile Warranty Data", *Lifetime Data Analysis*, 1, pp.227-240, 1995.
- [14] Lawless, J. F., "Statistical Analysis of Product Warranty Data", *International Statistical Review*, 66(1), pp.41-60, 1998.
- [15] Lim, T., "Estimation of Product Reliability with Incomplete Field Warranty Data", *Jour. Korean Ins. Ind. Eng.*, 28(4), pp.368-378, 2002.
- [16] Lim, T., "Nonparametric Estimation of the Product Reliability from Grouped Warranty

- Data with Unknown Start-up Time", *Int. Jour. Ind. Eng.*, 10(4), pp.474-481, 2003.
- [17] Lu, M., "Automotive Reliability Predictions Based on Early Field Failure Warranty Data", *Quality and Reliability Engineering International*, 14, pp.103-108, 1998.
- [18] Majeske, K. D. and Herrin, G. D., "Assessing Mixture-model Goodness-of-fit with an Application to Automobile Warranty Data", *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp.378-383, 1995.
- [19] Majeske, K. D. and Herrin, G. D., "Determining Warranty Benefits for Automobile Design Changes", *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp.94-99, 1998.
- [20] Mohan, K., Cline, B., and Akers, J., "A Practical Method for Failure Analysis Using Incomplete Warranty Data," *RAMS*, 2008.
- [21] Oh, Y. S. and Bai, D. S., "Field Data Analyses with Additional After-Warranty Failure Data", *Reliability Engineering and System Safety*, 72, pp.1-8, 2001.
- [22] Rai, B. and Singh, N., "Hazard Rate Estimation from Incomplete and Unclean Warranty Data", *Reliability Engineering & System Safety*, 81(1), pp.79-92, 2003.
- [23] Suzuki, K., "Estimation of Lifetime Parameters From Incomplete Field Data", *Technometrics*, 27, pp.263-272, 1985.
- [24] Suzuki, K., "Nonparametric Estimation of Lifetime Distributions From a Record of Failures and Follow-Ups", *Journal of the American Statistical Association*, 80, pp.68-72, 1985.
- [25] Tortorella, M., "Life Estimation from Pooled Discrete Renewal Counts", in N. P. Jewell et al.(eds.) *Lifetime Data: Models in Reliability and Survival Analysis*, pp.331-338, 1996.
- [26] Wallace R. Blischke., M. Rezaul Karim, D. N. Prabhakar Murthy, *Warranty Data Collection and Analysis*, Springer, 2011.
- [27] Yang, G. B. and Zaghati, Z., "Two-Dimensional Reliability Modeling from Warranty Data", *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp.272-278, 2002.