

A Case Study of Reliability Assessment of CMC in Hydraulic Clutch System with Field Warranty Data

Sang Cheon Lee* · Jong Hun Park**†

*Division of Industrial Systems Engineering, ERI, Gyeongsang National University

**Department of Business Administration, Catholic University of Daegu

보증수리자료를 활용한 유압클러치시스템의 클러치마스터실린더 신뢰성 분석 사례연구

이상천* · 박종훈**†

*경상대학교 산업시스템공학부, 공학연구원

**대구가톨릭대학교 경영학과

This paper is a case study of reliability assessment with field warranty data of Clutch Master Cylinder (CMC) in hydraulic clutch system. We estimate lifetime distribution using field warranty data which contain much useful information for understanding reliability of the system in the real-world environments. However, the estimated parameters are far from existing reference values, which seems to be caused right censored field warranty data. To modify the parameters, we use the information of the durability test which is performed to verify that the lifetime of the item meets the required level. After that, we can observe that the modified parameters are closer to the existing reference values. This case study shows a possible idea to supplement lack of right censored field warranty data and its applicability.

Keywords : Field Warranty Data, Reliability Assessment, Right Censored Data, Parameter Estimation

1. 서 론

자동차는 양산하여 판매하는 보편화된 제품이기 는 하지만, 다른 양산 제품들과 달리 도로를 고속으로 운행하는 것을 목적으로 하기 때문에 안전의 문제가 항상 최우선으로 고려되어 왔다. 따라서 자동차산업은 내구성을 매우 중요시 여기는 문화를 가지고 있으며, 이러한 내구성에 대한 관심은 자동차를 구성하는 부품들의 신뢰성(reliability)에 대한 관심으로 이어져왔다. 따라서 자동차 부품업체들에게 자사 제품(자동차부품)의 신뢰성을 확인 및

평가하는 것은 매우 중요한 업무가 되었다.

자동차 부품업체들은 신뢰성 평가를 위하여 자사제품의 수명자료(life data)를 수집한다. 이러한 수명자료는 판매 이전에 실험실에서 수행되는 수명시험(life testing)에 의해서 얻어지거나, 판매 후 실제 사용되는 과정에서 수집되는 것이 일반적이다.

자동차 부품의 경우 자체적으로 신뢰성 수명시험을 수행하여 일정수준의 내구성을 보장하는 기준을 통과하고 있음을 확인하고 그 결과를 제시해야만 자동차 회사에 납품을 할 수 있기 때문에 수명시험에 의한 수명시험자료(life testing data)를 확보하는 것이 그리 어렵지 않으며, 현장자료(field data)역시 자동차 판매 후 보증수리를 통하여 보증수리 내역자료(warranty claim data)를 확보할 수 있는

상황이다.

그러나 납품을 위한 수명시험은 시험시간을 단축하기 위하여 가속수명시험(accelerated life testing)을 수행하는 것이 일반적이며, 제시된 내구성기준을 통과함을 확인하는 것이 목적이기 때문에 수명의 하한(lower bound)만을 확인할 수 있는 수준 만큼만 실행되는 경우가 일반적이다. 또한 수명시험이 충분히 수행되었다 하더라도 실험실에서 수행된 실험이 실제의 환경적 요인을 모두 반영하여 수행되는 어렵다. 따라서 해당 자료를 사용현장에 그대로 적용하기에는 정보왜곡의 위험이 존재한다[4, 8].

이에 반하여, 현장자료인 보증수리 내역자료는 부품의 실제 사용특성과 환경이 반영되었으며 충분한 수의 자료를 확보할 수 있어 제품수명에 대한 합리적인 정보를 얻을 수 있기는 하지만[3], 품질보증기간이 만료된 이후의 자료에 대해서는 수집을 보장하지 못하기 때문에 모든 부품의 고장이 완벽하게 추적되어 기록되지 못 할 수 있다. 즉, 보증만료 시점까지 고장이 발생하지 않은 부품이라 하더라도 그 이후에도 고장이 발생할 경우 이를 확인할 수 없기 때문에 일종의 우측관측중단이 발생하고 이는 상대적으로 추정의 정확성을 저하시킨다[1, 9, 11].

그러나 자동차산업은 비교적 일찍부터 보증수리 정책을 시행한 관계로 보증수리 내역자료를 사용하여 제품의 신뢰성 분석을 수행한 연구를 꾸준히 진행하고 있으며, 특히 우측절단자료에 의한 모수추정의 정확성 저하를 보완하기 위한 연구들이 많이 수행되었다. Oh and Bai[10]는 추정의 정확성을 향상시키기 위해 보증기간 후에 추가적으로 수집된 자료를 사용하는 방안을 연구하였고, Rai and Singh[12]는 누적마일리지율(mileage accumulation rate)의 개념을 적용하여 사용량과 사용시간의 이차원 품질보증자료에 대하여 추정의 정확성을 높이려는 시도를 하였다[11].

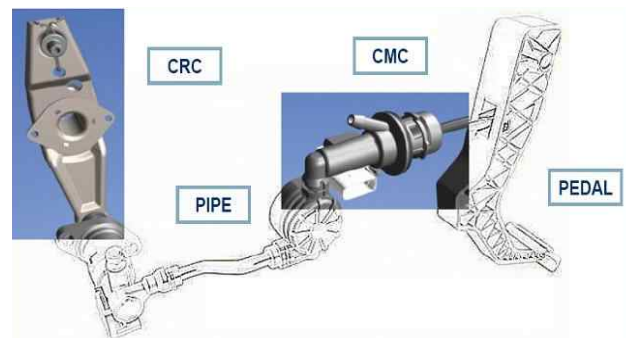
본 논문에서는 유압클러치시스템(hydraulic clutch system)의 주요부품인 클러치마스터실린더(Clutch Master Cylinder, CMC)의 보증수리 자료를 사용하여 신뢰성 분석을 수행한 사례연구를 소개한다. 본 사례연구에서는 우측관측중단의 특징을 가진 보증수리 내역자료로 신뢰성 척도를 분석하는 과정에서 내구성기준을 통과하기 위해 수행된 수명시험의 결과를 반영함으로써 모수추정의 정확성을 보완하려는 시도를 소개한다. 자동차 부품업체가 자동차회사로 자사의 부품을 납품하기 위해서는 자동차회사가 제시하는 일정수준의 내구성 시험을 통과해야 하는데, 이때 자동차회사가 요구하는 내구성 시험기준은 해당부품의 수명에 대하여 일정수준 이상을 요구하는 것을 목적으로 설계되어 있다. 따라서 부품업체가 내구성 시험을 통과했다면 그것은 해당부품이 자동차업체가 요구하는 최소수준의 수명을 확보하고 있음을 의미한다. 따라서 이러한 정보를 추가적으로 반영함으로써 우측절단자료로 인하여 저하되는 모수

추정의 정확성 저하를 보완하고자 하였다. 이는 차량부품인 Damper Strut Assy를 대상으로 신뢰성분석을 실시한 Kang et al.[2]의 사례연구에서 현장자료와 수명시험자료 사이에 상관관계가 있음을 실증적으로 증명한 결과와도 맥을 같이 한다. 추가적으로, 자동차 부품회사에게 내구성 시험의 통과는 자동차회사에 납품을 위한 필수적인 사항이므로, 자동차 부품산업의 경우에 한해서는 본 연구의 결과를 적용하는 것이 용이하리라 판단된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 분석대상인 hydraulic clutch system과 CMC에 대하여 소개하고, 제 3장에서는 신뢰성 분석절차를 소개하고 절차에 따른 분석내용 및 결과를 제시하였다. 마지막으로 사례연구로부터 얻은 결론과 추후연구를 제 4장에서 언급하였다.

2. 유압클러치시스템 (Hydraulic Clutch System)

<Figure 1>은 본 연구의 평가대상물인 자동차 변속 장치인 Hydraulic clutch system의 구성을 나타내고 있다. Hydraulic clutch system은 페달로부터 발생한 하중에 의해 CMC에서 발생한 액압을 파이프를 통해 Clutch Release Cylinder(CSC)에 전달하고, CSC는 액압을 다시 하중으로 변환하여 클러칭(Clutching) 기능을 수행하도록 구성되어 있으며, 실린더 바디, 피스톤, 컵 이라는 세 가지 부품으로 이루어진 CMC, CRC들을 연결하는 배관으로 구성되어 부품수가 적고, 구조가 간단하다. 이에 따라 취급, 보수가 편리하고, 유지비도 적으며, 브레이크 오일이 비압축식이기 때문에 클러칭 시 압력의 전달 효과가 좋은 특징을 가지고 있다.



<Figure 1> Structure of Hydraulic Clutch System

2.1 클러치마스터실린더(Clutch Master Cylinder)

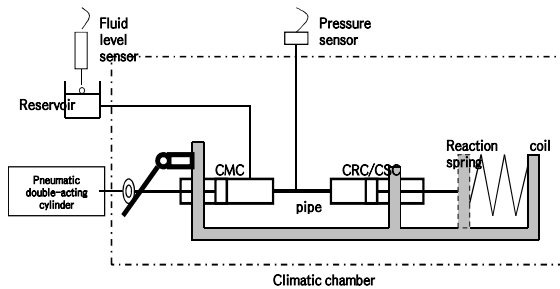
본 연구의 분석대상인 CMC는 Hydraulic clutch system의 주요부품 중 하나로 브레이크 페달에서 발생한 하중을

유압으로 변환하여 유액을 CSC에 전달하는 기능을 수행한다. 본 연구에서의 분석대상인 CMC의 내구성 시험은 <Figure 2>와 같은 rig 내구 시험 장치를 사용한 C10 시험 규격을 사용하고 있으며, 시험내역(Test Profile)은 가속 부하시험으로 설계되어 있으며 정시 중단 시험 방식을 채택하고 있다.

CMC의 내구성 시험은 아래에서 제시된 조건에 대하여 각각의 조건을 1주기로 10주기 반복 시험(작동횟수 : n = 6, T = 120만 Cycle)을 실시하고 아래에 제시된 실험결과 판정 조건에 따라 결과를 판정한다.

1. 파손이 없을 것
2. 오일(Oil) 누유가 없을 것.
3. CMC PISTON RETURN이 될 것.
4. 오일(Oil) 소모량은 60ml 이하 일 것.
5. 초기 효율 측정치 대비 시험 후 10%이내 일 것.

이상의 CMC의 내구성 시험규격을 신뢰도 척도로 변환하면 $B_{10}(10\% \text{ 고장 수명}) = 10^5 \text{ km}$ 수준으로 제시되어 있다.



<Figure 2> The Overview of C10 Rig Test

<Table 1> The Specification for CMC Durability Test

Temperature	Cycle	cycle/Hr
-30℃	5,000	600
20℃	30,000	2,000
100℃	75,000	2,000
120℃	10,000	2,000

3. 신뢰성 척도분석 및 해석

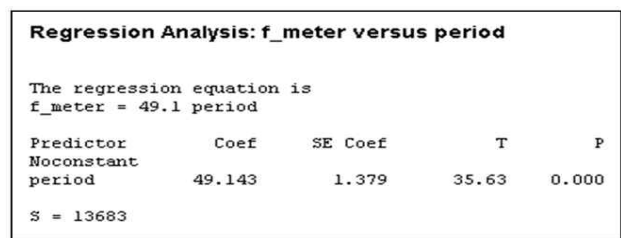
보증수리 내역자료는 전체 출고차량에 대하여 보증기간 만료 이전에 고장이 발생한 경우와 보증기간 만료 시점까지 고장이 발생하지 않은 경우의 우측관측 중단에 대한 정보를 제공하고 있으며, 이것은 신뢰성 수명시험의 정시관측 중단 (Type I Censoring) 자료로 간주되어 분석이 가능하다[9, 12].

따라서 본 사례연구는 2003년과 2004년 사이에 출고된 A, B, C 세 개 차종의 CMC에 대하여 보증기간이 만료되는 2006년까지의 보증수리 내역자료를 대상으로 분석을 수행되었다.

3.1 주행거리추정

자동차 산업에서 신뢰성 측정항목은 주로 주행거리(mileage)로 평가되며 신뢰성 척도들은 주행거리의 관점에서 정의되는 것이 일반적이다[7]. Hydraulic clutch system에 대한 신뢰성 분석 역시 수명변수를 주행거리로 하여 분석하는 것이 합리적이지만, 보증수리 내역자료로는 고장이 발생하지 않아 수리를 받지 않은 경우에 대해서는 주행거리를 알 수가 없어 우측관측 중단(Type I Censoring) 자료를 완성할 수 없게 된다. 그러나 자동차의 주행기간과 주행거리 사이에 선형의 관계가 존재한다고 주장하는 Lawless et al.[5, 6]의 연구를 적용하면, 보증수리 내역자료의 수리 입고시기와 출고시기 그리고 주행거리 정보를 사용하여 주행기간과 주행거리간의 선형관계를 규명함으로써 보증기간 만료에 대한 주행거리의 추정이 가능하다.

차량에는 생산시점에 서로를 식별할 수 있는 차대번호(VIN; Vehicle Identification Number)가 부여되며, 이 차대번호는 차량출고 및 보증수리 시에 기록한다. 따라서 차대번호를 사용하여 차량의 보증수리입고시기와 해당차량의 출고시기를 알 수 있으며, 이 두 시기의 차이를 계산함으로써 주행기간을 도출할 수 있다. 이렇게 도출된 주행기간을 독립변수로, 해당차량의 당시 주행거리를 종속변수로 하는 선형회귀분석을 실시하였으며, <Figure 3>은 A차종에 대한 회귀분석의 결과이다.



<Figure 3> Regression Analysis for Vehicle Type A

회귀분석은 절편을 0으로 고정하는 옵션을 선택하여 수행하였으며, <Figure 3>에서 볼 수 있듯이 주행기간은 주행 거리에 유의한 영향을 주는 것으로 나타났고 회귀계수는 49.1, 즉 주행기간과 주행거리간의 선형관계식은

$$\text{주행거리} = 49.1 \times \text{주행기간} \quad (1)$$

과 같이 도출되었다. 차량 B와 C에 대해서도 같은 방법으로

회귀분석을 실시하였으며 B와 C차종의 회귀계수는 각각 48.1과 51.3으로 추정되었다.

3.2 수명분포의 모수추정 및 해석

출고되었지만 보증수리를 받지 않은 차량, 즉 차량출고 자료에는 기록되어 있지만 보증수리 내역자료에는 기록되어 있지 않은 차량에 대해서는 보증기간 만료일까지 고장이 발생하지 않은 것으로 판단하고, 제 3.1절에서 각 차종별로 도출된 선형회귀계수를 사용하여 보증기간만료 시점까지의 주행거리를 추정함으로써 주행거리를 기준으로 하는 우측관측중단 자료를 완성하였다. 이를 제1종정시관측 중단 (Type I censoring)자료로 간주하고 신뢰성 척도분석, 즉 모수추정을 실시하였다.

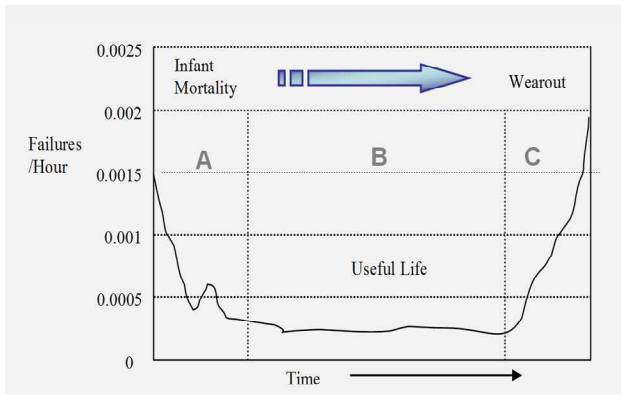
모수추정 시 수명분포는 형상모수(shape parameter)가 β , 척도모수(scale parameter)가 η 인 Weibull 분포를 가정하였다. 즉, 고장률함수는 다음과 같이 정의하였다.

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (2)$$

모수추정은 Minitab Release 14를 사용하여, 변수를 주행거리로 추정방법은 그래프를 사용한 최소제곱법(Least squa-

Variable: f_meter				
Censoring Information		Count		
Uncensored value		510		
Estimation Method: Least Squares (failure time(X) on rank(Y))				
Distribution: Weibull				
Parameter Estimates				
	Parameter	Estimate	Standard Error	95.0% Normal CI
				Lower Upper
	Shape	0.91717	0.03087	0.85862 0.97971
	Scale	16079.7	818.9	14552.2 17767.6
Log-Likelihood = -5478.328				

<Figure 4> Parameter Estimation for Vehicle Type A



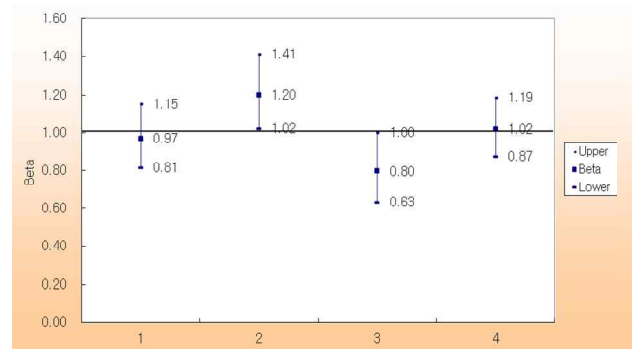
<Figure 5> Bathtub

res estimation)을 선택하였다. <Figure 4>는 A차종에 대하여 모수를 추정한 결과이다.

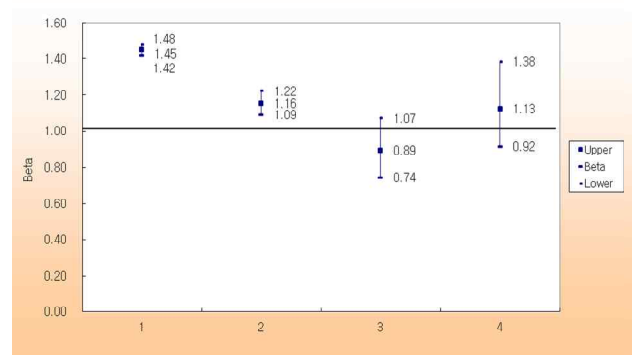
<Figure 4>에서 볼 수 있듯이 A차종의 수명은 형상모수가 0.917, 척도모수가 16079.7인 Weibull 분포를 따른다고 추정되었다. 추정결과에서 특이점은 형상모수가 1보다 작은 0.917이라는 것이다. 이것은 <Figure 5>와 같은 고장률 욱조곡선(bathtub)의 입장에서 보자면, A차종의 보증수리 기간은 hydraulic clutch system의 초기고장기간(<Figure 5>에서 A구간)과 우발고장기간(<Figure 5>에서 B구간)에 걸쳐있을 가능성을 시사한다.

추가적 확인을 위해, 세 개 차종을 출고시를 기준으로 2003년 상반기, 2003년 하반기, 2004년 상반기, 2004년 하반기로 구분하여 모수추정을 수행하였으며 그 결과는 다음의 <Figure 6>~<Figure 8>과 같다.

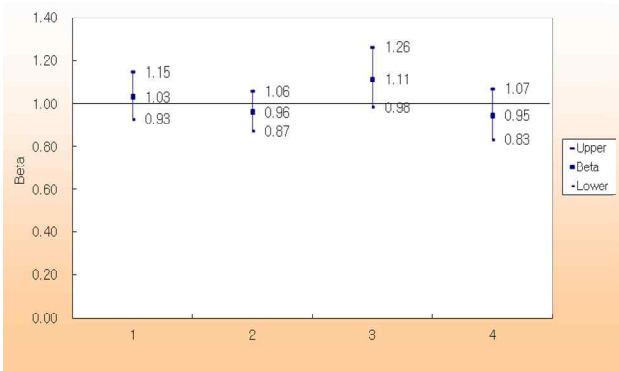
A, B, C 세 차종 모두의 경우에서 형상모수가 1 근처임을 알 수 있으며, 이는 차량의 보증수리기간이 CMC의 초기고장기간과 우발고장기간에 걸쳐있을 가능성을 더욱 높이고 있다. 특히 이 값은 해당 부품에 대해 기술표준원이 제시하는 참고값(reference value)인 2.0~3.8의 범위에 포함되지 않고 있으며, 해당회사가 제시하는 참고값 4.0에는 크게 못 미치는 값을 고려할 때 보증수리 내역자료에 의해 추정된 값이 과소추정 되었을 가능성을 살필 필요가 있다.



<Figure 6> Estimates of Shape Parameter for Vehicle Type A



<Figure 7> Estimates of Shape Parameter for Vehicle Type B



<Figure 8> Estimates of Shape Parameter for Vehicle Type C

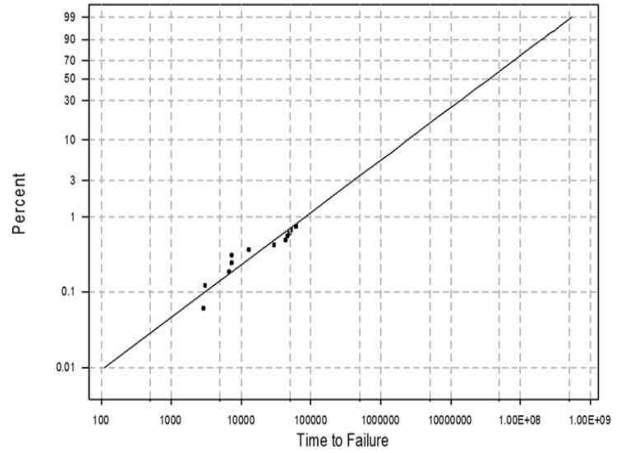
3.3 형상모수 보정 및 해석

현실적으로 자동차 부품회사에서 신뢰성에 관심을 가지는 자동차의 수명기간은 초기 고장기간이나 우발고장기간이기 보다는 마모고장기간(<Figure 5>에서 C구간)이며, 신뢰성 척도 역시 제품의 수명 일부 구간에 제한된 척도가 아닌 제품수명 전체에 대한 신뢰성 척도에 관심을 가진다. 그러나 현실적으로 보증기간 내에 발생하는 고장에 대해서만 현장자료를 수집할 수 있는 상황이기 때문에 보증기간 이후에 존재하는 마모고장기간의 자료를 확보하는 것은 거의 불가능하다.

그러나 서론에서 기술한 바와 같이, 자동차 부품회사는 자동차 회사에 납품을 위해 일정 수준의 내구성을 보장하는 기준을 통과함을 증명하기 위한 신뢰성 시험을 수행해야 하며, 이 수명시험의 결과를 통하여 보증수리 내역 자료에서 수집할 수 없는 마모기간에 대한 정보를 간접적으로 얻을 수 있다. 물론 내구성시험은 제한된 환경인 실험실에서 가속조건으로 수행되며 그나마도 수명의 하한만을 확인 할 수 있는 최소한의 수준 만큼만 실행되는 경우가 일반적이기 때문에, 이를 보증수리 내역자료에 그대로 활용할 수는 없다. 그러나 자동차회사가 제시하는 내구성 시험의 기준이 해당부품의 수명에 대하여 일정수준 이상을 만족하도록 사전에 계산되어 요구되었다는 사실을 활용하면 보증수리 내역자료가 가지고 있는 한계점을 조금이나마 개선할 수 있다.

최소제곱법을 사용한 Weibull 분포의 형상모수 추정용 고장자료를 <Figure 9>와 같은 Weibull 확률지에 타점한 후, 해당 자료에 대하여 편차제곱합이 최소인 직선, 즉 선형회귀직선의 기울기를 구함으로써 추정하는 방법이다[8]. 이는 수학적으로 식 (3)을 만족하는 β 를 결정하는 것을 의미한다.

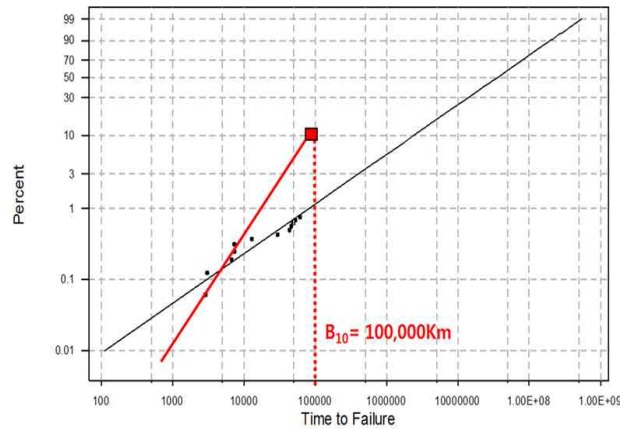
$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) = \beta \ln t - \beta \ln \eta \quad (3)$$



<Figure 9> Weibull Probability Plot

품질보증기간 만료에 의해 관측중단 된 보증수리 내역 자료의 경우, <Figure 9>에 초기고장기간과 우발고장기간에 발생한 고장자료만을 타점하기 때문에 실제로는 다수가 발생할 마모고장기간의 자료가 빠져있어 형상모수(선형회귀식의 기울기)를 과소 추정할 여지가 존재한다. 그러나 해당 부품이 자동차회사가 제시한 내구성시험 기준을 통과하였다는 사실과, 제 2장에서 소개하였듯이, CMC의 내구시험 규격으로 사용하고 있는 C10 시험규격이 신뢰도 척도로 변환할 경우 $B_{10}(10\% \text{ 고장 수명}) = 10^5 \text{ km}$ 수준으로 제시되어 있는 점을 추정과정에 고려하면 과소추정을 어느 정도 보정할 수 있다.

즉, 해당 제품이 C10 시험규격의 내구성 시험을 통과하였다는 사실은 제품의 B_{10} 이 10^5 km 임을 가정할 수 있는 근거가 될 수 있으며, 와이블확률지를 사용해 구해지는 선형회귀식이 <Figure 10>에서와 같이 붉은 점으로 표시된 B_{10} 기준점 부근을 통과할 가능성이 크다고 가정하고 회귀식이 B_{10} 기준점을 통과하도록 선형회귀에 제약조건

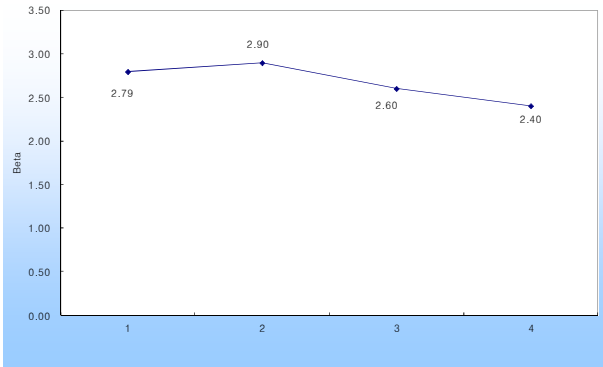


<Figure 10> The Concept of Parameter Estimation Considering B_{10}

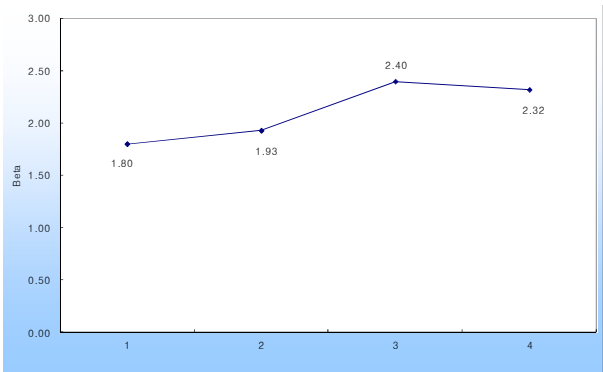
을 추가함으로써 과소추정을 보정 하려 하였다. 다시 말해, $B_{10} = 10^5\text{km}$ 라는 사실은

$$\eta = \frac{B_{10}}{(-\ln 0.9)^{1/\beta}} \quad (4)$$

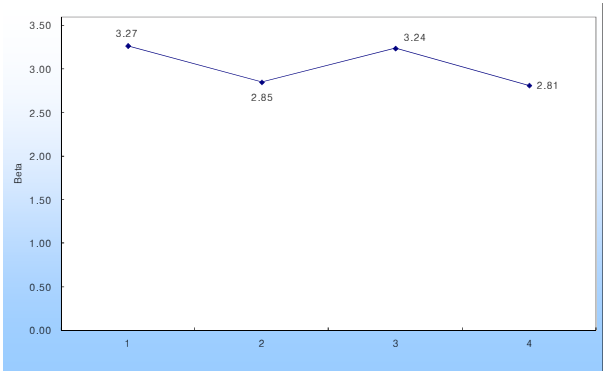
를 만족함을 의미하고, 따라서 식 (4)를 식 (3)에 대입함으로써 다음과 같은 제약식을 얻게 된다.



<Figure 11> Modified Estimates of Shape Parameter for Vehicle Type A



<Figure 12> Modified estimates of shape parameter for vehicle type B



<Figure 13> Modified Estimates of Shape Parameter for Vehicle Type C

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1-F(t)}{\ln 0.9} \right) \right] = \beta \left(\ln(t - B_{10}) \right) \quad (5)$$

<Figure 11>~<Figure 13>은 식 (5)를 제약식으로 추가하여 제 3.2절에서 수행한 모수추정을 다시 수행한 결과이다. 세 차종 모두 형상모수가 증가하였음을 확인할 수 있으며, 차종에 따라 1.8~3.2사이의 값으로 추정이 되었다. 이 값은 해당 부품에 대해 기술표준원이 제시하는 참고값 2.0~3.8의 범위와 비슷하며, 해당회사가 제시하는 참고값 4.0에 많이 근접함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 자동차의 보증수리 내역자료로부터 얻어낸 hydraulic clutch system의 CMC 보증수리자료를 사용하여 신뢰성분석을 하는 과정에서 내구성시험 기준을 통과하기 위해 수행된 수명시험의 결과를 반영함으로써 모수추정의 정확성을 보완하려는 시도를 하였다.

현장자료라 할 수 있는 보증수리 내역자료는 품질보증 기간 만료에 의해 관찰이 중지되는 상황에서, 차량의 보증 수리기간이 CMC의 초기 고장기간과 우발고장기간까지만 머물러 다수의 고장이 발생할 마모고장기간의 현장자료를 확보하기 어렵고, 그로 인해 신뢰성척도의 추정 정확성이 저하 될 여지가 존재하였다. 이에 해당 부품을 자동차회사가 납품하기 위해 실시한 내구성시험 기준이 $B_{10} = 10^5\text{km}$ 을 보장하기 위한 수준이며, 해당 부품이 내구성시험을 통과하였다는 점을 추정과정에 제약식으로 추가함으로써 과소 추정이 의심되는 신뢰성 척도를 어느 정도 보정하려 하였다. 그 결과, 과소추정이 의심되는 형상모수가 해당 부품에 대해 기술표준원이 제시하는 참고값과 비슷한 범위로 보정되었고, 이는 본 연구에서 시도한 보정과정이 합리적이라는 간접적인 증거라 할 수 있다.

그러나 $B_{10} = 10^5\text{km}$ 를 보장하기 위한 내구성 시험을 통과하였다는 사실로 와이블확률지를 사용해 구해지는 선형회귀 직선이 B_{10} 기준점을 통과한다는 가정이 무리한 가정으로 판단 될 수 있다는 점도 부인할 수 없다. 하지만, 자동차 부품회사에게 내구성 시험의 통과는 자동차회사에 납품을 위한 필수적인 사항이고 따라서 내구성 시험자료를 확보하고 있는 상황에서, 현장자료를 활용한 신뢰성 척도분석에 내구성 시험결과를 추가적으로 반영함으로써 모수추정의 정확성 저하를 개선하려는 시도라는 점에서 본 사례연구는 가치가 있다고 판단된다.

마지막으로 본 연구에서 소개한 과정을 좀 더 체계화함으로써 현장자료를 활용하는 과정에서 내구성시험결과를 반영하는 합리적인 모형 및 방법론 개발을 위한 추후 연구가 필요하다는 점을 밝힌다.

References

- [1] Ahn, H., Estimation of a Product Replacement Ratio During the Warranty Period for a Warranty Analysis. *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2012, Vol. 35, No. 2, p 71-79.
- [2] Kang, C., You, J., Lee, C., and Kim J., Research of reliability assement through the analysis of filed data and Taguchi method about vehicle component problem. *Journal of the Korean society of industrial application*, 2010, Vol. 13, No. 4, p 211-217.
- [3] Kim, J. and Park C.A., note on theoretical development and applications in reliability analysis using field data. *Journal of the Korea Safety Management and Science*, 2001, Vol. 3, No. 4, p 65-76.
- [4] Kim, Y.B. and Lie C.H., Estimating parameters of field lifetime data distribution using the failure reporting probability. *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 2007, Vol. 33, No. 1, p 52-60.
- [5] Lawless, J., Hu J., and Cao J., Methods for estimation of failure distributions and rates from automobile warranty data. *Lifetime Data Analysis*, 1995, Vol. 1, No. 3, p 227-240.
- [6] Lawless, J.F., Crowder, M.J., and Lee, K-A., Analysis of Reliability and Warranty Claims in Products With Age and Usage Scales. *Technometrics*, 2009, Vol. 51, No. 1, p 14-24.
- [7] Lee, S., Hur M., Lee, C., Kim, J., Kang, J., Lee, H., So, H., Lee, J., and Min, B., A study on mission profile and determination of durability test parameter in the hydraulic clutch system. *Transactions of the KSME A*, 2009, Vol. 5, No. 284, p 521-528.
- [8] Lim, T., Estimation of production reliability with incomplete field warranty data. *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 2002, Vol. 28, No. 4, p 368-378.
- [9] Nelson, W. Hazard plotting of left truncated life data. *Journal of Quality Technology*, 1990, Vol. 22, No. 3, p 230-232.
- [10] Oh, Y.S. and Bai, D.S., Field data analyses with additional after warranty failure data. *Reliability Engineering and System Safety*, 2001, Vol. 72, No. 1, p 1-8.
- [11] Park, J.H., Kim. Y.H., Baek, J.H., and Lie, C.H., Estimating Failure Rate Using Warranty Claim Data with Delayed Report of Customers. *IE Interface*, 2010, Vol. 23, No. 2, p 176-181.
- [12] Rai, B. and Singh, N., Hazard rate estimation from incomplete and unclean warranty data. *Reliability Engineering and System Safety*, 2003, Vol. 81, No. 1, p 79-92.