

자동차 필드데이터 수집 및 신뢰도 분석

권 영 일

청주대학교 산업공학과

Collection and Analysis of Automotive Field Reliability Data

Young Il Kwon

Dept. of I.E., Cheongju University

Abstract

A methodology for collection and analysis of automotive field reliability data is presented. Automotive warranty system usually covers a pre-determined period of time and/or mileage accumulation. Therefore mileage information for the vehicles that have not experienced any failure or problems during the warranty period is not available. In this paper, a reliability analysis method using the estimated mileage distribution from an additional survey for vehicles that have not any record during the warranty period is proposed. Methods of reliability analysis using the warranty information collected under the EU and US warranty policies are also provided.

Key words : automotive field reliability(자동차 필드 신뢰도), warranty data(보증 데이터), field data(필드 데이터), warranty policy(보증정책)

1. 서 론

사용현장에서의 제품성능 또는 신뢰도에 관한 데이터를 수집하고 분석하는 일은 생산자나 소비자 양측에 있어 모두 중요하다. 필드데이터(field data)란 제품의 수리/보증비용이나 현장에서의 신뢰도를 산출하기 위한 목적의 '필드서비스 데이터'로서 일반적으로 보증기간을 갖는 제품들에 대해 얻어지는 서비스 데이터를 의미한다. 사용현장에서 수집된 필드데이터는 (i) 사용현장에서의 신뢰도 평가 및 설계상의 예측치와 비교, (ii) 제품에 대한 변경 및 개선 정보 제공, (iii) 설계변경의 영향을 확인, (iv) 보증비용(warranty costs) 추정, 그리고 (v) 보증, 정비(maintenance) 및 부품교체 정책설계를 위한 중요한 정보를 제공한다.

필드데이터의 일반적 유형으로 다음과 같은 것들이 있다.

판매(sales) 데이터]

판매(sales) 또는 판매예측(forecasting) 데이터는 필드 데이터 분석을 위해 필요한 기본적인 데이터이다. 이 데이터로부터 현재 필드에서 사용되고 있는 제품 수를 산출할 수 있다. 주어진 일정기간동안 필드에 몇 개의 제품이 사용되고 있는지에 대한 정보는 신뢰도를 산출하는데 필수적으로 요구되는 정보이다. 필드에서 사용 중인 제품 수에 대한 정보가 없다면 그 기간 동안의 고장 수에 대해 아무리 정확한 정보가 있더라도 무용지물이 된다.

보증 데이터(warranty data)

대부분의 보증체계(warranty systems)는 신뢰도에 대한 정보를 얻기 위한 것보다 보증 비용을 추적, 조사할 목적으로 설계되어 있다. 따라서 보증 데이터 유형 중 일부는 신뢰도 산출에 아무 도움도 되지 않는 경우도 있다. 그러나 보증체계에 출하날짜(ship dates)와 서비스 요청날짜(service call dates)가 기록된다면, 실제 고장시간은 알 수 없더라도 고장시점이 서비스 요청 날짜와 비슷하다고 가정하여 대략적인 필드 신뢰도를 산출할 수 있다. 보증 체계가 정확한 고장날짜를 별도로 기록하도록 설계된 경우에는 출하날짜와 고장날짜로부터 실제 고장시간을 계산하여 정확한 필드 신뢰도를 산출할 수 있다.

필드 서비스 데이터(field service data)

필드 서비스 데이터는 정비 기술자가 현장에서 고장을 수리해주는 필드 서비스 요청과 관련된 데이터이다. 이러한 유형의 데이터가 필드 신뢰도를 산출하는데 가장 유용한 데이터라고 할 수 있다. 여기서 서비스 기술자의 역할은 고장에 대한 자세한 분석보다는 가능한 신속히 제품을 수리해 주는 것이다. 따라서 다음과 같은 문제가 발생할 수 있다.

- 정비 기술자가 고장 시까지 실제 사용시간과 같은 신뢰도 산출에 필요한 정보를 기록하지 않을 수도 있다.
- 고장 부품을 정확히 찾아 수리하기보다는 고장 가능성이 있는 것으로 보이는 모든 부품을 일괄적으로 교체한다. 이 경우 교체된 모든 부품들 중 어느 부품에 의해 고장이 유발되었는지 분석해야 한다. 그러나 현실은 교체된 부품 모두를 반품하여 실제 고장 나지 않은 부품도 고장으로 기록되는 경우가 대부분이다. 이는 필드 신뢰도가 실험실에서 평가된 신뢰도보다 낮게 나타나게 하는 요인 중 하나이다.
- 반품된 부품 중 고장 나지 않은 부품을 교체부품으로 재사용 하는 경우, 그 부품이 고장났을 때 실제 사용시간을 전혀 알 수 없게 된다.

위와 같은 문제들이 필드 신뢰도를 추적하고 산출하는데 가장 큰 어려움이 되고 있다. 필드 서비스 데이터로부터 신뢰도를 정확히 산출할 수 있기 위해서는 다음의 요건을 반드시 지켜야 한다.

- 수리 시 필요한 고장정보를 반드시 기록한다.
- 고장으로 의심되는 모든 부품을 일괄 교체하는 방식은 피해야 한다.
- 교체부품은 반드시 신품을 사용한다.

고객지원 데이터(customer support data)

고객지원 데이터란 고객이 전화로 서비스를 요청해오는 데이터를 말한다. 많은 경우 이를 필드서비스 데이터로 볼 수 있다. 어떤 경우는 현장을 방문하지 않고 전화상으로 고장현상에 대해 듣고 고장원인을 찾아 교체할 부품을 우송하기도 한다. 따라서 고객지원데이터와 필드서비스 데이터는 동일한 데이터베이스로 관리되어야 하나 현실은 그렇지 않은 경우가 많다. 고객지원 데이터의 많은 부분은 제품의 고장이나 신뢰성과는 무관한 사용상의 문제(사용 방법을 잘 알지 못함)로 인한 것들이다. 이 역시 실험실에서 평가된 신뢰도와 현장에서의 신뢰도가 차이가 나는 이유 중 하나이다. 사용자에 대한 자세한 안내서를 제공함으로써 이러한 문제를 줄일 수 있다.

반송부품/고장분석 데이터(returned parts/failure analysis data)

고장 부품이나 시스템이 자세한 고장분석을 위해 반송되는 경우가 있다. 이 데이터는 고장 원인에 대해 더 상세한 정보를 포함하며, 신뢰도 공학자보다 설계나 제조공정 엔지니어들에게 더욱 유용한 정보를 제공한다. 정비소에서 고장 수리 시, 의심이 가는 모든 부품을 일괄 교체하여 반환하는 부품들에 대해서 실제 고장요인이 어느 부품에 있는지 확인하기 위해 모든 부품을 분석하는 일은 신뢰도 측면에서도 중요하다. 고장의 특성을 충분히 이해하기 위해 고장분석 결과와 실제 필드서비스 기록과의 상관성을 확인해야 한다. 그러나 고장 분석을 제대로 시행하더라도, 반송된 부품에 아무 문제도 발견되지 않는 경우도 허다하다. 이 역시 실험실 신뢰도와 필드 신뢰도가 차이가 나는 이유 중 하나이다. 중요한 점은 현장에서 소비자가 경험하는 신뢰도가 그 제품의 최종 신뢰도라는 것이다.

본 연구에서는 자동차, 굴착기, 복사기 등과 같이 대량생산, 공급되는 제품에 대한 필드데이터 분석방법을 다룬다. 이러한 유형의 제품은 임의의 시점에서 제품의 실 가동시간(주행거리, 엔진가동시간, 복사매수)을 알 수 있는 경우이며, 제품에 대한 보증기간이 달력상의 시간으로만 주어지는 경우와, 달력상의 시간과 실 가동시간이 동시에 주어지는 경우가 있다. 예로서 자동차의 경우 EU에서는 달력상의 시간(1년 무제한 주행)으로만 보증기간이 주어지며, 우리나라나 북미지역에서는 보증기간을 달력상의 시간과 주행거리로 동시에 제한(3년 6만마일)하는 경우도 있다.

필드데이터 분석에 관해서는 Suzuki(1985), Kalbfleisch와 Lawless(1991, 1993), Meeker와 Escobar(1998), Kalbfleisch와 Prentice(2002), Majeske(2003), 그리고 Rai와 Singh(2003)을 비롯한 많은 연구가 진행되어 왔다. 본 연구에서 다루는 필드데이터의 유형에 속하는 자동차의 필드데이터 수집 및 분석시스템에 대한 연구가 James(2000)에 의해 이루어 졌고, Lu(1998)는 4~5개월 이내의 초기 필드고장데이터로부터 자동차의 신뢰도를 예측하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 보증기간이 달력상의 시간으로 주어지며, 보증기간동안 고장 난 제품의 실 가동시간을 알 수 있는 자동차와 같은 유형의 제품을 대상으로 필드데이터 분석방법을 제시하고 실제 데이터를 사용한 분석사례를 제공한다.

2. 자동차 필드데이터의 형식과 특징

자동차 부품에 대한 현장에서의 신뢰도 평가를 위해서는 필드데이터를 사용한다. 필드데이터는 주로 보증기간동안의 고장데이터로부터 얻어진다. 보증 서비스데이터에서의 고장 정보는 다음과 같은 요인들에 의해 훼손될 수 있다는 점에 유의해야 한다.

- 수리요청 날짜가 실제 고장날짜라고 간주한다(보고지연의 문제).
- 수리된 클레임은 실제고장으로 간주한다(허위 고장신고/일괄교체의 문제).
- 보증기간 이후의 고장, 특히 사용년수가 오래된, 높은 주행거리에서의 고장정보는 알 수 없다.

또한 대상 차량에 관한 정보도 다음과 같은 문제를 포함할 수 있다.

- 일부 차량은 교통사고에 의해 상실되거나 현재 운행중인차량 중에 이 비율을 알 수 없다.
- 보증수리를 요청하지 않은 차량의 주행거리는 알 수 없다.

자동차와 같은 유형의 제품에 대해서는 일반적으로 개별 제품에 대해 고장과 정비이력이 관리된다. 보증기간 내에 발생한 고장의 경우, 보증정책에 따른 무상 또는 매우 낮은 비용으로 서비스가 제공되므로 100% 보고되어 고장시간이 기록된다고 가정한다. 보증기간 내에 고장 나지 않은 제품의 경우는 고장시간을 알 수 없으며 달력상의 보증기간동안 고장 나지 않았다는 사실만을 알 수 있다. 그러나 보증기간동안 주행거리(실 가동시간)는 알 수 없으므로 신뢰도 분석을 위해서는 주행거리 정보를 구해야 할 필요가 있다. 따라서 자동차 필드데이터 분석을 위해서는 다음의 고장, 가동시간 자료가 필요하다.

- 신뢰도 분석 대상제품 전체 모집단에 대한 보증기간동안의 고장데이터: 모든 고장이 100% 보고된다고 가정한다.
- 보증기간 내 고장 나지 않은 제품에 대한 주행거리 데이터: 전체 제품 중 일부를 랜덤 추출하여 보증기간동안 주행거리를 추적 조사한다.

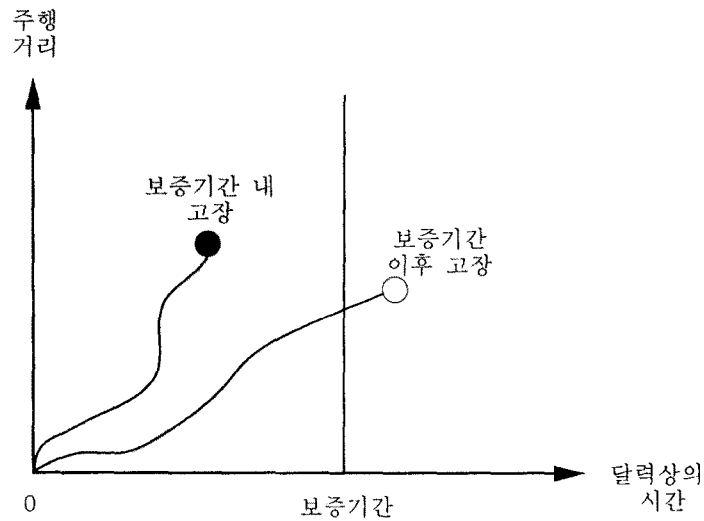
따라서 필드데이터로부터 부품 신뢰도 분석에 필요한 자료를 구하기 위해서는 고장 기록시 다음의 정보들이 포함되어야 한다.

<표 1> 고장데이터 기록양식

고객 번호	AS센터	모델 번호	제품 번호	생산 일자	출고 일자	고장 코드	실가동 시간	고장 접수일	수리 후 출고일	교체 부품	수량

자동차, 복사기 등과 같이 대량생산되는 제품들의 경우 신뢰도 분석 시, 개별 제품의 고장/가동시간을 사용하기 보다는 실 가동시간을 구간으로 나누어 각 구간별 고장 제품 수나 가동 중인 제품 수 데이터를 사용하여 신뢰도를 분석한다.

다음 표 2는 한 자동차 모델 (199X년형)의 엔진부품에 대한 고장자료를 정리한 것이다. 실 가동시간은 주행거리로 나타내며, 보증기간은 1년/무제한 주행거리(EU방식)이다. 참고로 EU 보증방식에서 얻어지는 고장정보는 그림 1과 같다. 총 22,384대가 생산, 출하되어 해당 엔진부품에 대해 1년간 116대의 고장이 접수되었다.



<그림 1> EU방식의 보증시스템에서의 고장정보

보증기간동안 고장이 접수되지 않은 차량에 대한 보증기간동안의 실 주행거리는 알 수가 없다. 전체 차량을 대상으로 무작위로 1,000대를 추적 조사하여 1년간의 주행거리를 파악한 결과가 표 3과 같다.

<표 2> 보증기간 내 주행거리 구간별 고장 수 (거리단위: 1,000 km)

주행거리 구간	고장수	주행거리 구간	고장수
0~5	21	25~30	3
5~10	25	30~40	6
10~15	28	40~50	1
15~20	22	50~60	1
20~25	9	>60	0

<표 3> 보증기간 동안의 주행거리 분포 (거리단위: 1,000 km)

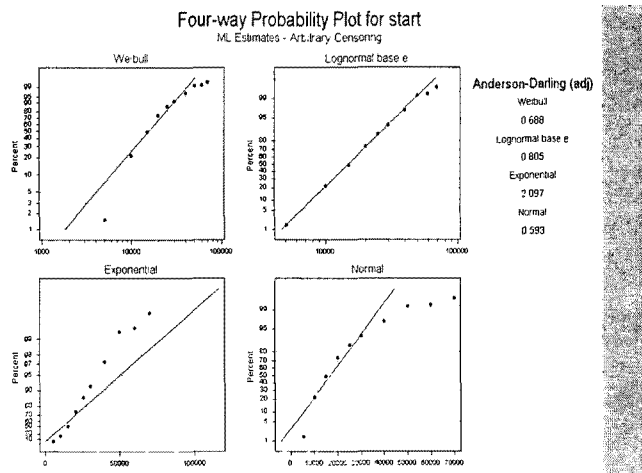
주행거리 구간	차량수	주행거리 구간	차량수
0 ~ 5	15	30 ~ 40	54
5 ~ 10	202	40 ~ 50	20
10 ~ 15	271	50 ~ 60	1
15 ~ 20	253	60 ~ 70	3
20 ~ 25	122	70 ~ 80	3
25 ~ 30	56	>80	0

위 자료를 사용하여 다음과 같은 방법으로 주행거리를 추정하고 신뢰도를 분석한다.

- 추적 조사한 자료로부터 실 가동시간 분포를 추정한다.
- 이 분포를 사용하여 전체 차량 중 각 주행거리 구간에 속하는 제품 수의 기대치를 산출한다.
- 이 기대치를 실제 각 구간에 속하는 차량 수로 간주하고 신뢰도 분석을 수행한다.

3. 주행거리분포 및 구간별 차량수 추정

먼저 표 3의 추적조사 자료를 사용하여 주행거리 분포를 분석한다. 다음 그림 2는 표 3의 자료에 대한 미니탭의 분포적합성 분석결과이다. 여기서 대수정규분포가 가장 적합한 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 알려진 자동차 주행거리 분포는 대수정규분포를 따른다는 사실과도 일치한다.

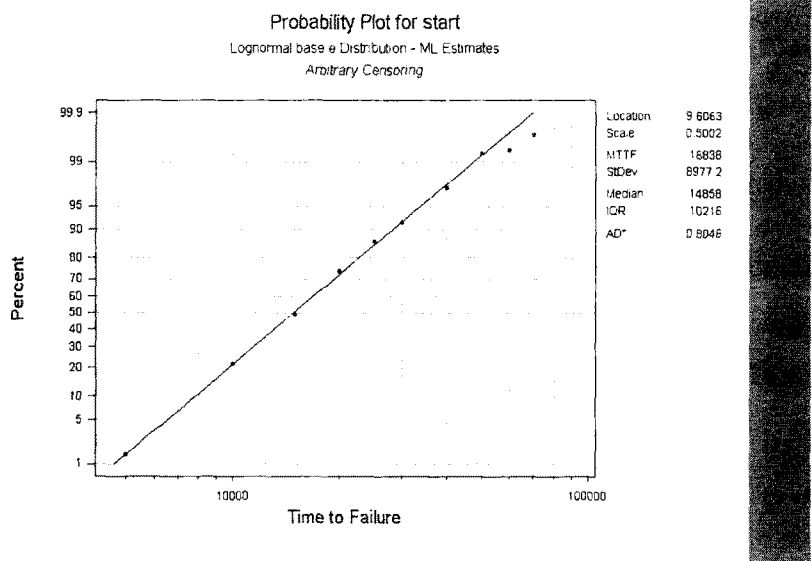


<그림 2> 분포적합성 검토, $\mu = 9.60$, $\sigma = 0.5002$

그림 3은 대수정규분포 확률지 그래프와 추정된 모수 값들을 나타내고 있다. 대수정규분포의 위치모수와 척도모수에 대한 최우추정값 (maximum likelihood estimation) 은 각각 다음과 같다.

$$\mu = 9.60, \quad \sigma = 0.5002$$

앞에서 추정된 대수정규분포로부터 총 22,384대를 대상으로 각 구간에 속하는 제품 수 (관측중단 제품 수)의 기대치를 구하면 다음 표 4와 같다. 여기서 유의할 점은 관측 중단 데이터가 구간의 처음이나 끝이 아니라 구간 전체에 걸쳐 있다는 점이다. 이러한 유형의 데이터는 생명표 방법 (actuarial method)을 사용하여 분석할 수 있다.



<그림 3> 대수정규 확률지 플롯결과

4. 부품 신뢰도 분석

먼저 생명표 방식을 사용하여 각 구간 끝에서의 신뢰도와 불신뢰도를 추정한다. 분석대상 데이터가 m 개의 구간으로 나뉘어져 있는 경우를 고려한다. 여기서 각 구간이 길이가 일정할 필요는 없다. 먼저 분석에 사용될 기호를 아래와 같이 정의한다.

<표 4> 주행거리 구간별 무고장 차량 수 추정값

구간 i	구간시작 (km)	구간끝 (km)	구간확률	차량수 기대값
1	0	5000	0.014698	329

2	5000	10000	0.199515	4,466
3	10000	15000	0.293371	6,567
4	15000	20000	0.216277	4,841
5	20000	25000	0.127113	2,845
6	25000	30000	0.069052	1,546
7	30000	40000	0.056155	1,257
8	40000	50000	0.016204	363
9	50000	60000	0.004992	112
10	60000	∞	0.002623	58
계			1.0	22,384

구간 i : $(t_{i-1}, t_i]$, $t_0 = 0$

n_i : 구간 i 의 초(t_{i-1})에서 가동 중인 제품 수(risk set)

c_i : 구간 i 에서 관측 중단된 제품 수

d_i : 구간 i 에서의 고장 제품 수

이들 간에는 다음의 관계가 성립한다.

$$n_i = n_{i-1} - d_{i-1} - c_{i-1}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \dots, m \quad (1)$$

$$\text{단 } n_0 = n_1, \quad d_0 = 0, \quad c_0 = 0$$

여기서 관측중단 시간은 대수정규분포를 따르는 확률변수로서 구간 전체에 걸쳐 분포한다. 따라서 구간 i 의 초에 가동 중인 제품 수는 n_i 개이나 구간 i 의 끝에 가동 중인 제품 수는 $n_i - c_i$ 개이다. 이러한 관측중단의 문제를 다음의 2가지 극단의 경우로 나누어 생각해 볼 수 있다.

- 모든 관측중단이 구간 i 의 초 t_{i-1} 에서 발생한다고 가정한다. 이때 구간 i 에서의 고장 비율은 $d_i/(n_i - c_i)$ 이다.
- 모든 관측중단이 구간 i 의 끝 t_i 에서 발생한다고 가정한다. 이때 구간 i 에서의 고장 비율은 d_i/n_i 이다.

이 같은 상황을 조정하기 위해 일반적으로 위 두 가지 극단적인 추정치의 조화평균을 구간 i 에서의 고장비율로 사용한다.

$$\text{구간 } i \text{에서의 조정된 고장비율} = \frac{d_i}{n_i - c_i/2} \quad (2)$$

생명표 방법에서는 이와 같이 조정된 고장비율을 사용하여 신뢰도 또는 불신도를 추정한다. $n_i' = n_i - c_i/2$ 라 두면, 구간 i 의 끝 t_i 에서의 신뢰도 $R(t_i)$ 와 불신도 $F(t_i)$ 의 최우추정량 (MLE)은 각각 다음과 같이 구해진다.

$$\widehat{R}(t_i) = \prod_{j=1}^i \left(1 - \frac{d_j}{n_j}\right), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$\widehat{F}(t_i) = 1 - \prod_{j=1}^i \left(1 - \frac{d_j}{n_j}\right), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

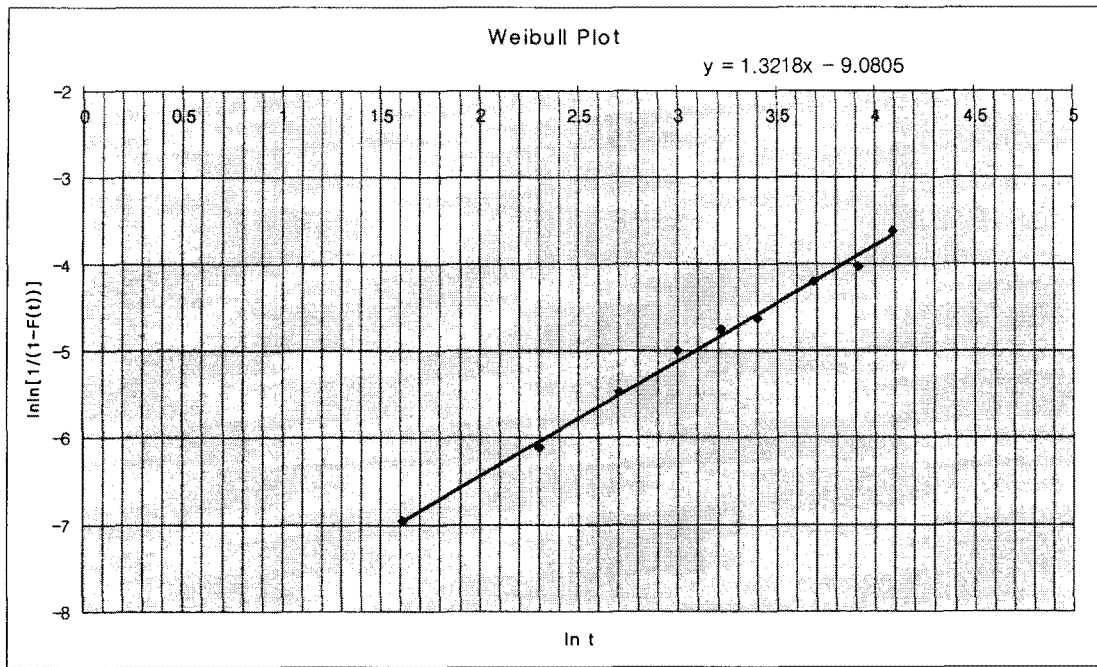
이 방법에 따라 앞의 필드데이터로부터 매 구간 끝에서의 불신도의 추정값은 표 5와 같이 구해진다.

<표 5> 주행거리 별 신뢰도와 불신도 추정치

주행거리 t	$\widehat{R}(t)$	$\widehat{F}(t)$
5	0.99906	0.00094
10	0.99780	0.00220
15	0.99585	0.00415
20	0.99330	0.00670
25	0.99142	0.00858
30	0.99026	0.00974
40	0.98516	0.01484
50	0.98236	0.01764
60	0.97378	0.02622

다음 그림 4는 표 5의 자료를 사용하여 와이블 확률지를 작성한 것이다. 그림에서 와이블 분포가 적합한 것으로 판단되며 최소제곱법에 의한 형상모수 β 및 척도모수 θ 의 추정값은 각각 다음과 같다.

$$\hat{\beta} = 1.3218, \quad \hat{\theta} = 962.7$$



<그림 4> 고장시간의 와이블 플롯

위 와이블 분포를 사용하여 대상 부품의 백분위수를 구하면 다음 표 6과 같다.

<표 6> 부품의 백분위 수명 t_p (단위: 1,000 km)

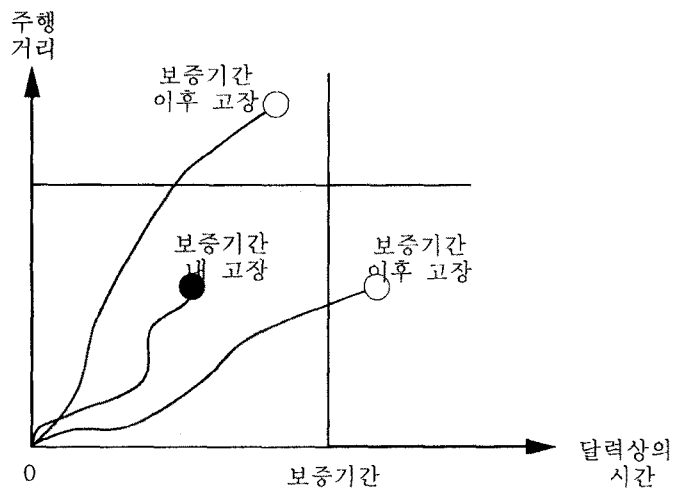
100p (%)	t_p	100p (%)	t_p
1	29.65	20	309.52
2	50.29	30	441.36
3	68.61	40	579.18
4	85.62	50	729.61
5	101.77	60	901.14
6	117.29	70	1107.91
7	132.32	80	1379.98
8	146.98	90	1809.46
9	161.33	95	2208.06
10	175.44	99	3056.96

표에서 이 부품의 신뢰도가 99 %, 95 %, 및 90 %에 해당하는 백분위 수명은 각각

$$t_{0.01} = 29,650 \text{ km}, \quad t_{0.05} = 101,770 \text{ km}, \quad t_{0.1} = 175,440 \text{ km}$$

임을 알 수 있다.

다음은 복미방식의 보증제도를 갖는 경우의 고장데이터 분석방법을 생각해 보자. 2절에서 보증기간이 1년 3만 km라고 가정한다. 즉 사용기간이 1년 이내이며 주행거리가 3만 km 이내인 고장에 대해서만 보증수리가 제공되는 경우이다. 이때의 고장정보는 그림 5와 같다.



<그림 5> 복미방식의 보증시스템에서의 고장정보

즉 1년 3만 km 이내의 고장만 기록되고 이후의 고장여부 및 주행거리는 알 수 없다. 3만 km 까지의 고장자료를 사용하여 EU방식에서와 같이 주행거리 별 신뢰도와 불신뢰도를 추정하면 표 7과 같다. 표 7의 자료로부터 고장시간 분포(와이블 분포)의 형상모수와 척도모수의 최소제곱 추정값은 각각

$$\hat{\beta} = 1.3608, \quad \hat{\theta} = 846.5$$

이 되고 부품 고장시간의 백분위수는 <표 8>과 같이 구해진다.

<표 7> 복미 보증방식에서의 주행거리 별 신뢰도와 불신뢰도 추정치

주행거리 t	$\hat{R}(t)$	$\hat{F}(t)$
5	0.99906	0.00094
10	0.99780	0.00220
15	0.99585	0.00415
20	0.99330	0.00670
25	0.99142	0.00858
30	0.99026	0.00974

표에서 이 부품의 신뢰도가 99 %, 95 %, 및 90 %에 해당하는 백분위 수명은 각각

$$t_{0.01} = 28,810 \text{ km}, \quad t_{0.05} = 95,430 \text{ km}, \quad t_{0.1} = 161,970 \text{ km}$$

가 되어 EU방식의 보증데이터의 경우와 거의 유사한 추정결과가 얻어진다.

<표 8> 부품의 백분위 수명 t_p (단위: 1,000 km)

100p (%)	t_p	100p (%)	t_p
1	28.81	20	281.14
2	48.12	30	396.83
3	65.07	40	516.71
4	80.69	50	646.63
5	95.43	60	793.83
6	109.54	70	970.22
7	123.15	80	1200.89
8	136.38	90	1562.44
9	149.30	95	1895.79
10	161.97	99	2600.28

5. 결 론

본 연구에서는 자동차와 같이 보증기간이 달력상의 시간으로 주어지며, 보증기간동안 고장 난 제품의 실 가동시간을 알 수 있는 제품의 필드데이터로부터 신뢰도를 분석하는 방법을 제안하였다. 부품의 신뢰도분석을 위해 필요한 정보와 데이터의 통계적 분석방법과 함께 EU 및 북미 방식의 자동차 보증제도하에서의 분석사례를 제공하였다. 최근 보증기간은 점차 강화되는 추세이므로 (예: 5년 6만 마일 bumper to bumper warranty, 10년 10만마일 powertrain warranty) 본 연구에서 제안한 방식과 같이 이들 자료를 기록하고 관리한다면 자동차 부품의 필드 신뢰도 평가에 충분한 정보가 축적되며 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 여기서 제시된 방법은 달력상의 보증기간이 제공되며 고장 발생 시 실 가동시간 (주행거리, 사용횟수, 엔진가동시간 등) 을 알 수 있는 자동차, 복사기, 건설 및 산업용 장비 등의 필드자료 분석에도 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] James, J. (2000), Field Data is Reliability Information: Implementing an Automated Data Acquisition and Analysis System, 2000 RM-089.
- [2] Kalbfleisch, J.D. and Lawless, J.F. (1991), Truncated Data Arrising in Warranty and Field Performance Studies, and Some Useful Statistical Methods, IIQP Research Report RR-91-02.
- [3] Kalbfleisch J.D. and Lawless J.F. (1993), Statistical Analysis of Warranty Claims Data, IIQP Research Report RR-93-03.
- [4] Kalbfleisch J.D. and Prentice, R.L. (2002), The Statistical Analysis of Failure Time Data, 2nd Edition, Wiley.
- [5] Lu M.W. (1998), Automotive Reliability Prediction Based on Early Field Failure Warranty Data, Quality and Reliability Engineering International, Vol.14 No.2, pp. 103-108.
- [6] Majeske, K.D. (2003), A Mixture Model for Automobile Warranty Data, Reliability engineering & system safety, Vol.81 No.1., pp 71-77.
- [7] Meeker W.Q. and Escobar, L.A. (1998), Statistical Method for Reliability Data, Wiley.
- [8] Rai, B. and Singh, N. (2003), Hazard Rate Estimation from Incomplete and Unclean Warranty Data, Reliability engineering & system safety, Vol.81 No.1, pp. 79-92.
- [9] Suzuki, K. (1985), Estimation of Lifetime Parameters From Incomplete Field Data, Technometrics, Vol. 27, No. 3, pp. 236-271.