

## 정시중단 고장자료를 이용한 신뢰성예측 연구

백 재 진<sup>\*1)</sup> · 이 광 원<sup>2)</sup> · A. Meyna<sup>1)</sup>

부퍼탈대학교 안전공학과<sup>1)</sup> · 호서대학교 안전보건공학과<sup>2)</sup>

### A Study on a Reliability Prognosis based on Censored Failure Data

Jaejin Baek<sup>\*1)</sup> · Kwangwon Rhie<sup>2)</sup> · Arno Meyna<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Safety Engineering, University of Wuppertal, Gausstrasse 20, 42119 Wuppertal, Germany

<sup>2)</sup>Department of Safety and Health Engineering, University of Hoseo, Chungnam 336-795, Korea

(Received 30 January 2009 / Accepted 29 July 2009)

**Abstract** : Collecting all failures during life cycle of vehicle is not easy way because its life cycle is normally over 10 years. Warranty period can help gathering failures data because most customers try to repair its failures during warranty period even though small failures. This warranty data, which means failures during warranty period, can be a good resource to predict initial reliability and permanence reliability. However uncertainty regarding reliability prediction remains because this data is censored. University of Wuppertal and major auto supplier developed the reliability prognosis model considering censored data and this model introduce to predict reliability estimate further “failure candidate”. This paper predicts reliability of telecommunications system in vehicle using the model and describes data structure for reliability prediction.

**Key words** : Reliability(신뢰성), Failure data(고장자료), Reliability prognosis(신뢰성예측), Weibull distribution (와이블분포), Parameter estimate(모수추정), Reliability theory(신뢰성이론), Warranty data(보증자료)

### 1. 서 론

자동차 생산에 기여하고 있는 많은 기업의 투자와 노력으로 국내에서 생산되는 자동차의 품질, 편의성, 안전성이 크게 향상되고 있다. 근래에 들어서 국내외 많은 자동차 전문잡지들은 국내에서 생산된 자동차와 자동차부품의 초기 품질 향상에 대한 내용과 충돌테스트를 통한 좋은 결과는 매우 고무적이라 할 수 있다. 초기 품질 향상에 대한 결과와는 달리 TÜV-Report 2007<sup>2)</sup>에 의하면 2년에서 5년 된 차량 중 국내차량의 품질문제를 지적하고 있다. 신뢰성예측은 품질문제에 대응하기 위한 하나의 방법으로 차량의 경우 수명이 보통 10년 이상이 되기 때문

에 초기품질 향상 뿐 아니라 내구신뢰성 향상을 위해 객관적이고 정량화된 수치를 제공할 수 있는 장점이 있다. 개발단계에서 신뢰성설계가 이루어지나 수명이 긴 차량의 경우 모든 사항을 고려한 설계가 이루어지기 현실적으로 어려운 점이 있으며 다양한 운전자 습관, 실제 환경 하에서 발생한 고장을 대상으로 신뢰성을 분석하는 것이 더 많은 고장원인을 분석할 수 있기에 본 논문에서는 실제 운전 중 발생한 고장자료를 이용한 신뢰성예측을 하며 이러한 신뢰성예측에 필요한 고장자료가 가지고 있어야 할 항목에 대해서 기술한다.

### 2. 보증 신뢰도 데이터

보증자료는 흔히 필드자료, 고장자료 라고도 하

\*Corresponding author, E-mail: baek@uni-wuppertal.de

는데 차량의 고장발생 시 수집되는 자료로 보통 보증기한 동안에 수집되는 신뢰성 자료를 말한다. 보증기한 동안 무상수리와 저렴한 수리비로 인하여 이 기간 동안 발생하는 고장은 수집되기 쉬우나 차량의 전 수명동안 발생하는 고장을 수집하고 분석하기에는 현실적인 어려움이 있기에 본 논문에서는 보증기한 동안 발생한 보증자료에 의한 신뢰성예측 방법에 대해서 기술한다.

차량이나 차량부품의 경우 항상 작동되는 것이 아니고 주행거리에 따른 노후화가 발생되기 때문에 시간에 따른 고장이 아닌 주행거리에 따른 신뢰성 평가가 이루어져야 한다. 보통 보증자료는 다음과 같은 과정을 통해서 수집이 된다. 부품생산업체에서 완성차업체에 부품을 판매한 후 완성차업체는 부품을 조립하여 완성차를 판매하게 된다. 완성차업체는 이렇게 발생한 고장 중 일부를 부품생산업체에 보내게 되는데 부품업체는 이 고장을 분석하여 데이터베이스에 저장을 한다.

Table 1은 신뢰성관련 내용을 기술 할 수 있는 최소의 테이블 칼럼을 보여주고 있다. 이 이외의 필요한 정보를 분석하기 위해 필요한 칼럼 예컨대, 고장 모드, 판매지역, 부품버전 등이 추가 될 수 있다. “manu\_date” 부품이 생산된 날짜, “reg\_date” 생산 후 부품이 실제 차량에 조립된 날짜, “failure\_date” 차량이 일반상태에서 고장이 발생한 날짜, “Tkm” 고장이 발생할 때 차량의 주행거리로 1000km 기준으로 작성을 한다. 하지만 보통 보증 신뢰도 데이터에는 고장 시간만 기술 되어있고, 그 당시까지의 주행거리는 없는 것이 보통이다. 이에 본 논문에서는 Fig. 1와 같은 과정을 통해서 신뢰성예측을 하게 되는데 가장 먼저 주행거리 분포를 기술하게 되고 이 주행거리 분포를 이용하여 주행거리와 시간에 따른 고장함수, 고장밀도함수, 고장률에 대해서 기술하며 논문에서 관찰된 보증자료에는 관찰된 대상이 고장이 발생하면 새로운 부품으로 교체되며 보통 2

년이라는 보증기한 동안에 동일한 차량에 똑같은 부품의 고장이 다수 발생할 수 없다고 가정하였다.

### 3. 신뢰성 이론

본 장에서는 신뢰성예측에 필요로 하는 기본적인 신뢰성이론, 매개변수추정 방법, 주행거리 분포에 대해서 다루고 저 한다.

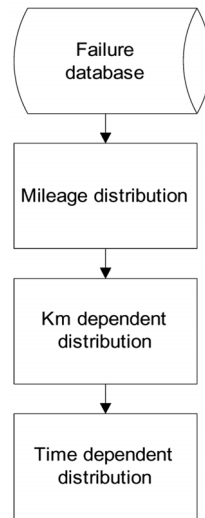


Fig. 1 Process of reliability prognosis

#### 3.1 신뢰성이론

신뢰성공학에서 T는 부품이나 시스템의 작동시작과 고장 사이의 시간구간을 나타내는 연속 확률변수 이고 t는 특정시간을 의미한다. 이 T는 관찰하는 목적에 따라서는 시간 뿐 아니라 부품, 시스템의 주행거리, 사용시간이 될 수 있다. T의 수명분포함수는 식 (1)과 같으며 이를 누적분포함수, 고장함수라고도 한다.

$$F(t) = P(T \leq t) \tag{1}$$

여기에서 고장밀도함수는  $F(t)$ 를 미분하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \tag{2}$$

신뢰도 함수  $R(t)$ 는 시점 t에 있어서 생존확률이 되고 다음과 같이  $F(t)$ 와 같이 나타낼 수 있다.

Table 1 Warranty database

manu_date	reg_date	failure_date	Tkm
20010101	20010125	20011225	40
20010101	20010102	20010110	0.2
...	...	...	...

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t) \quad (3)$$

어떤 부품이나 시스템이 시점 t에서 생존한다고 가정하고 그 시점으로부터 짧은 시간(Δt)안에 고장이 발생할 확률을 고장률이라고 하고 식 (4)와 같다.

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4)$$

고장률 h(t)로 관찰대상의 고장형태 즉, 초기고장, 우연한 고장, 마모고장 등의 형상을 기술할 수 있다. 평균고장시간, 평균고장간격으로 불리는 평균수명은 기대 값이기 때문에 확률의 기댓값으로 표현이 가능하며 식 (5)와 같다.

$$E(T) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (5)$$

본 논문의 신뢰성예측은 보증자료를 기반으로 하며 다음과 같이 고장함수를 계산한다.

$$\tilde{F}(t) = \frac{n_{tot}(t)}{n_0} \quad (6)$$

where

$n_{tot}(t)$  : total number of failures until time t,

$n_0$ : basic population.

2개의 모수  $\alpha, \beta$  를 갖는 와이블분포를 사용하여 고장의 특성을 기술할 경우 와이블분포  $W(\alpha, \beta)$  의 고장함수, 고장밀도함수 및 고장률은 식 (7), 식 (8), 식 (9)와 같다.

$$F(t) = 1 - e^{-\alpha t^\beta} \quad (7)$$

$$f(t) = \alpha \cdot \beta \cdot t^{\beta-1} \cdot e^{-\alpha t^\beta} \quad (8)$$

$$h(t) = \alpha \cdot \beta \cdot t^{\beta-1} \quad (9)$$

$\alpha$ 는 형상모수로 고장률의 증감형태를 결정지어 주고,  $\beta$ 는 척도모수로  $0 < \beta < 1$  인 경우 초기고장 형태를 나타내고,  $1 < \beta < 2$  인 경우 고장률은 처음에는 빠르게 증가하다가 나중에는 천천히 증가하는 형태를 나타내고  $\beta > 2$  경우는 고장속도곡선 중 마모고장에 따른 고장형태를 나타낸다.<sup>3)</sup>

### 3.2 모수추정

본 장에서는 와이블분포를 이용하여 모수추정 방법에 대해서 기술한다.

와이블분포  $W(\alpha, \beta)$  의 고장함수는 식 (7)과 같으며 모수추정을 위한 최소 제곱법(least square technique)을 사용한다.<sup>3)</sup> 먼저 고장함수 양변에 이중 ln 함수를 취하고 직선함수로 변환하면 다음과 같다.

$$\ln[-\ln(1 - F(t))] = \ln\alpha + \ln\beta \cdot \ln t \quad (10)$$

모수  $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$  는 최소 제곱법을 이용하여 다음과 같이 추정된다.

$$\hat{\alpha} = e^{-\bar{y} - \hat{\beta}\bar{x}}, \hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (11)$$

where

$x = \ln t,$

$y = \ln(-\ln(1 - F(t))).$

### 3.3 주행거리 분포

보증기한 동안 운행된 개개의 차량 운행거리를 알기란 쉽지 않기에 식 (12)는 보증기한동안 운행된 거리(Tkm)를 추정하기 위한 식이며 이를 위하여 실제 운영 중 발생한 고장자료를 이용하였으며 고장자료 중 2년 이내에 발생하지 않거나 년 당 주행거리가 140,000km를 넘는 자료를 제외시켰다. 이러한 이유와 함께 보통의 차량들은 연간 주행거리가 비슷하기 때문에, 년당 주행거리를 상수(constant)로 가정하였으며 이때, 차량의 보증기한동안 주행거리  $S_w$ 는 다음과 같이 계산된다.<sup>1)</sup> Fig. 2는 상수 가정하의 이론값과 실제 실측값이 잘 맞는 것을 보여주고 있습니다.

$$S_w = \frac{w}{T_t} S_t \quad (12)$$

where

$S_w$  : random variable of the driven distance for the warranty period [Tkm],

$S_t$  : random variable of the driven distance for the lifetime [Tkm],

$w$  : warranty period (year),

$T_t$  : Life time (year).

본 논문에서 관찰된 자료는 운전자의 편의를 위

해 MOST(Media Oriented System Transport)기반에서 작동되는 개인용 전화 시스템으로 차량에 내장되어 있으며 보증기한이 2년인 고장자료이며 Fig. 2는 보증기한동안 관찰된 고장정보를 이용하여 차량들의 주행거리  $S_w$ 의 누적분포함수  $L_w(s) = P(S_w \leq s)$ 를 나타내었으며 점들은 실제데이터를 보여주고 있으며 실선은 최소 제곱법을 통해 추정된 모수를 이용하여 이론적인 값이다. 아래 그림에 따르면 와이블분포를 잘 따라 주고 있음을 확인 할 수 있다. Fig. 2에 의하면 2년 동안 50 Tkm에서 100 Tkm 사이를 주행하는 차량은 식 (13)과 같이 계산되며 그 결과 25%이다.

$$L_w(100) - L_w(50) = 0.8 - 0.55 = 0.25 \quad (13)$$

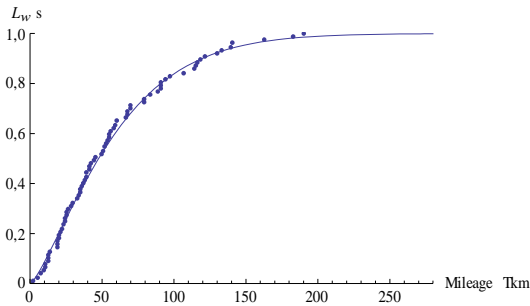


Fig. 2 Empirical failure data in Tkm and fitted theoretical function

#### 4. 신뢰성예측 모델

본 장에서 소개되는 신뢰성예측 모델은 보증기한 동안 발생한 고장정보를 기본으로 이용하여 신뢰성예측을 한다. 보증기한 이후 발생한 고장의 수집과 분석은 힘들고 차량의 주행거리가 많은 경우 고장 발생빈도가 높다. 이에 보증기한 이후의 신뢰도 예측이 필요한 경우에 이 자료를 이용할 경우 신뢰성예측이 왜곡될 수 있다. 이러한 점을 보완하기 위해서 관찰되는 시점이후에 발생하는 고장을 고려하고 이러한 고장을 고장 후보(failure-candidature)라고 한다.

##### 4.1 failure-candidature

보증기한 이후 발생하는 고장에 대해서 고려하여 보자. 현실적으로 보증기한 이후 발생한 고장이 수집되기 힘들다. 보통 미신고 고장들이 많으며, 이를

을 고려하기 위해서는 다음과 같은 절차를 통하여 고장 개수를 보정해줘야 한다. 즉 보증기한동안에 수집된 자료로 신뢰성평가를 하는 경우에는 왜곡의 우려가 있기 때문에 주행거리분포함수  $L_w(s) = P(S_w \leq s)$ 를 이용하여 주행거리  $s$ 에서의 수정된 고장갯수  $n_c(s)$ 를 다음과 같이 수정할 수 있다.<sup>4)</sup> 예컨대,  $s=50(\text{Tkm})$ 인 경우에 Fig. 2에 의하여 보증기한(2년)동안 50Tkm 이하를 주행할 확률은 0.55이다. 만약에 보증기한동안에 50Tkm를 주행하면서 수집된 고장갯수가 10개라면, 식 (14)에 의거 50Tkm에서 고장 난 전체 고장갯수는  $10 / (1-0.55) = 22.2$ 개로 예측이 가능하다.

$$n_c(s) = \frac{n_w(s)}{1 - L_w(s)} \quad (14)$$

where

$s$  : distance [Tkm],

$n_c(s)$  : corrected number of failure at driven distance  $s$ ,

$n_w(s)$  : number of failures during warranty time period at driven distance  $s$ ,

$L_w(s)$  : mileage distribution for warranty period.

##### 4.2 주행거리에 따른 고장확률

주행 중 발생한 고장에 대한 고장함수는  $\tilde{F}_c(s)$ 는 관찰대상의 총 수량  $n_t$ 와  $n_c(s)$ 를 이용하여 다음과 같이 표현 할 수 있으며 Fig. 3은 관찰된 고장자료를 식 (15)를 이용하여 나타내었다.<sup>1)</sup>

$$\begin{aligned} \tilde{F}_c(s) &= \frac{n_c(s)}{n_t} \\ &= \frac{1}{n_t} \sum_{\zeta \leq s} n_c(\zeta) \\ &= \frac{1}{n_t} \sum_{\zeta \leq s} \frac{n_w(\zeta)}{1 - L_w(\zeta)} \end{aligned} \quad (15)$$

##### 4.3 시간에 따른 고장함수

차량의 경우 시간의 경과에 따른 신뢰성예측보다는 주행거리에 따른 신뢰성예측이 차량의 특성을 더 잘 표현할 수 있기에 지금까지는 차량의 신뢰성 특성을 주행거리를 기반으로 하여 신뢰성예측을 하였다. 하지만 품질, 생산기술 분야에서는 신뢰성을

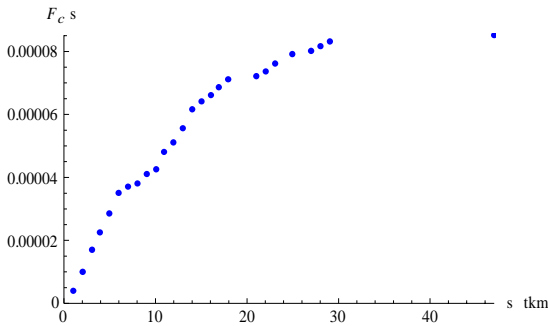


Fig. 3 Cumulative failure frequencies  $\tilde{F}(s)$  (모양:\*) and corrected empirical distribution function  $\tilde{F}_c(s)$  (모양: point) of the km-dependent failures

표현하는데 고장함수  $F(t)$ , 고장률  $h(t)$  등과 같이 시간을 고려해야 하기에 본 장에서는 주행거리에 따른 고장기반으로 시간에 따른 신뢰성예측에 대한 방법을 기술하고 실제 자료를 이용한 신뢰성예측을 한다.

시간에 따른 고장함수를 얻기 위해서는 가장먼저 주행거리 분포함수를 다음과 같이 변화해야 한다.<sup>1)</sup>  $A_s(t)$ 는 누적분포함수로, 몇 %의 차량이  $t$ 시간 동안 주행거리  $s$ 까지 주행하였나를 기술할 수 있으며 이는 다시 주행거리  $s$ 까지 주행하기 위해서 몇 %의 차량이  $t$  시간 보다 빠르게 주행거리  $s$ 를 주행하였는가에 대한 내용이며 다음과 같이 계산된다.<sup>1)</sup>

$$\begin{aligned} A_s(t) &= P(T_s \leq t) \\ &= P(S_t > s) \\ &= 1 - L_w\left(\frac{w}{T_t} s\right) \end{aligned} \tag{16}$$

where

$T_s$ : random variable of the time needed for distance  $s$ ,

$S_t$ : random variable of distance  $s$  for time  $t$ ,

$A_s(t)$ : probability, in time  $t$  at least the distance  $s$  to drive.

결국 시간에 따른 고장 누적분포함수  $F(t)$ 는 식 (17)과 같이 계산된다.<sup>1)</sup> 여기에서  $f_c(s)$ 의 함수는 식 (15)를 이용하여 주행거리에 따른 실제 고장자료를 Fig. 3처럼 도시한 이후 후 매개변수 추정을 통해 추정된  $\alpha, \beta$ 를 이용하여 이론적인 함수의 확률밀도함수를 의미한다.

$$\begin{aligned} F(t) &= P(T \leq t) \\ &= \int_0^\infty f_c(s) \left(1 - L_w\left(\frac{s \cdot t_w}{T_t}\right)\right) ds \end{aligned} \tag{17}$$

where

$t_w$ : warranty period,

$f_c(s)$ : Probability density function of corrected distribution function at driven distance  $s$ .

관찰된 자료가 보증기한 동안에만 발생한 고장정보를 포함하고 있기에 이를 이용하여 그 이후의 신뢰성예측을 식 (17)을 이용하였으며 이는 Fig. 4와 같은 그래프로 나타낼 수 있다. 관찰대상의 신뢰성을 기술하기에 중요한 특성은 고장률이고 와이블분포를 이용하여 다음과 같이 고장률을 계산한다. 여기서 와이블분포를 이용하는 이유는 초기고장, 우연고장, 마모고장 등의 고장특성을 기술할 수 있기 때문이며<sup>1)</sup> 지금까지 신뢰성예측에 필요한 고장밀도함수, 고장함수를 이용하여 식 (17)로부터 고장률 식 (18)을 다음과 같이 계산할 수 있다.<sup>1)</sup>

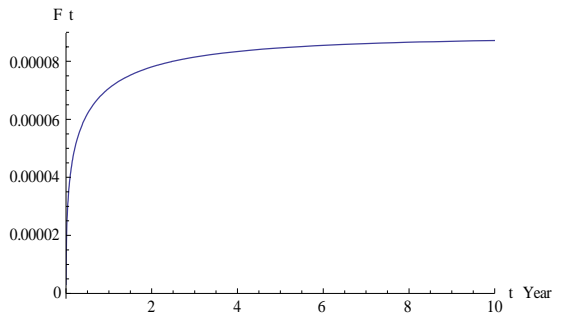


Fig. 4 Time-dependent failure probability

$$\begin{aligned} h(t) &= \frac{f(t)}{R(t)} \\ &= \frac{\int_0^\infty f_c(s) \left(\frac{s \cdot t_w}{T_t^2}\right) L_w\left(\frac{s \cdot t_w}{T_t}\right) ds}{1 - \int_0^\infty f_c(s) \left(1 - L_w\left(\frac{s \cdot t_w}{T_t}\right)\right) ds} \end{aligned} \tag{18}$$

where

$L_w(s)$ : Probability density function of mileage distribution at driven distance  $s$ .

고장률  $h(t)$ 의 단위는 1/year이고 예컨대, 10년에

서의 고장률  $h(10)$ 은 10년을 생존한 무고장 차량들이 10년째(10년된 시점에서 1년 동안)에 고장 나는 비율을 의미한다.

식 (18)에 의하여 관찰된 대상의 고장률은 Fig. 5에 나타내었으며 관찰된 대상은 시간이 경과함에 따라 고장률이 감소하는 형태이다. 이는 초기고장의 형태로 충분한 디버깅과 Burn-in 기간을 갖는다면 고장률을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

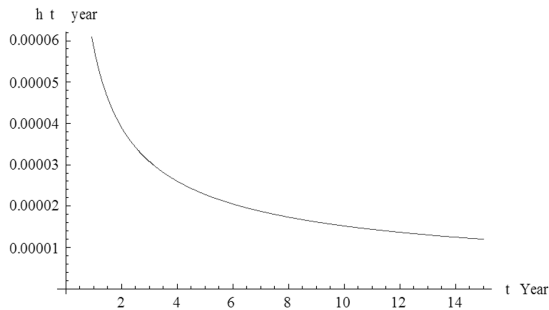


Fig. 5 Hazard rate of a Telecommunication system

### 5. 결론

신뢰도 함수는 관찰 대상에 따라서 시간이나 주행거리 또는 (사용)횟수 등의 함수로 표현되기도 하나 본 논문에서는 차량의 부품인 경우에 시간보다는 주행거리로 고찰 하는 것이 훨씬 더 타당하다는 현실적 사실에 근거를 둔 신뢰성예측모델을 소개하였다. 이 신뢰성예측모델은 보증자료를 기본으로 하는데 현실적으로 보증기한내의 고장은 대부분 무

상 또는 실비로 수리가 가능하며 이때는 모든 기록이 존재하는 것이 보통이나, 보증기한을 넘어서게 되면 개인적으로 수리를 하여 고장횟수를 찾아내기가 현실적으로 불가능 하여 이에 “Failure-candidate”라는 개념을 사용하여 신뢰성예측을 하였다. 이는 보증기한 이후의 발생한 고장이 왜곡되어 신뢰성예측이 되기 때문에 이러한 문제를 해결할 수 있는 방법으로 사료되며 또한 많은 고장자료의 품질관리 측면에서 확실하게 수집된 자료를 이용한 신뢰성예측방법은 차량의 모든 수명동안 발생하는 고장자료의 보관에 따른 비용을 절감시킬 수 있을 것으로 사료된다. 본 논문에서 소개된 신뢰성예측 방법은 완성업체 뿐 아니라 부품업체 또는 통신, 방산분야 등 보증자료가 존재하는 다양한 분야에서도 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

### References

- 1) B. Pauli, Zuverlässigkeitsprognose Für Elektronische Steuergeräte im Kraftfahrzeug, Shaker Verlag, 1998.
- 2) Verband der TÜV e.V., TÜV-Report 2007, Verband der TÜV e.V., 2007.
- 3) A. Meyna and B. Pauli, Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik, Carl Hanser Verlag, München, 2003.
- 4) Reliability Prognoses for Vehicle Components with Incomplete Data. ATZ Worldwide, Vol.12, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2000.