

필드고장을 이용한 신뢰성예측 프로그램 개발

백 재 진¹⁾ · 이 광 원^{*2)}

부퍼탈대학교 안전공학과¹⁾ · 호서대학교 안전보건공학과²⁾

A Development of a Reliability Prediction Program Using the Field Failure

Jaejin Baek¹⁾ · Kwangwon Rhie^{*2)}

¹⁾Department of Safety Engineering, University of Wuppertal, Gausstrasse 20, 42119 Wuppertal, Germany

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

(Received 5 October 2009 / Revised 1 April 2011 / Accepted 5 May 2011)

Abstract : A Failure data from operating condition includes various failures. Reliability evaluation by operating condition is more correct than test condition. Additional, the evaluation result by operating condition is widely used for quality assurance, forecasting amount of manufacturing at EOL. To discover valuable things from the failure data, arrangement of the failure data and information technique to handle data is needed among many failure data. This paper introduces a reliability prediction program to solve this problem based on the failure. And new technologies for parameters estimation with method of Graphic-Wizard-Parameters-Estimation and Genetic Algorithm are introduced.

Key words : Reliability prediction(신뢰성예측), Reliability theory(신뢰성이론), Warranty data(보증자료), GWPE(그래픽기반매개변수추정), Genetic algorithm(유전알고리즘)

Nomenclature

- MOST : media oriented systems transport
- MLE : maximum likelihood estimation
- SSE : sum of squares residual
- GWPE : graphic wizard parameters estimation
- GA : genetic algorithm
- Tkm : thousand kilometer

1. 서 론

차량의 개발이나 관련 부품 개발 시 신뢰성테스트는 개발될 제품의 품질향상을 위해 매우 중요한 부분이다. 이 신뢰성테스트는 차량이 생산되기 이전에 발생할 수 있는 고장을 미리 수정함으로써 양산 후 발생할 수 있는 고장을 예방할 수 있으며 테스트

시 수집되는 고장수명 자료는 신뢰성을 예측하는데 사용될 수 있다.

하지만 테스트는 실제 환경에서 발생할 수 있는 모든 사항을 고려 할 수 없으며 관찰대상이 한정되어 있다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 결국 실제 운영 하에 발생한 필드고장을 이용한 신뢰성평가, 예측이 필요하다. 이러한 신뢰성평가 및 예측은 필드고장 정보가 수집되어 있는 고장자료를 필요로 하며 이 자료는 다양한 경로를 통하여 수집이 가능하다. 예컨대, 보증기한 동안 발생한 고장정보가 수집되어 있는 보증자료, 승용차의 경우 2년 마다 받아야 하는 정기검사를 통해 수집된 정보, 자동차보험회사의 서비스 등을 가 보유하고 있는 자료가 있다.

이러한 자료 중 본 논문에서는 고장자료 정보 수집이 가장 용이하고 다른 자료보다 정확성을 신뢰

*Corresponding author, E-mail: kwrhie@hoseo.edu

할 수 있는 보증기한 동안 발생한 고장정보가 수집되어 있는 보증자료를 이용한다. 하지만 이 보증자료에도 보증기한 이후 발생할 수 있는 고장에 대한 정보가 없다는 단점이 있지만 참고문헌¹⁾에서는 “고장후보”라는 개념을 활용하여 이러한 문제를 해결할 수 있었다.

또한 방대한 보증자료를 기반으로 한 신뢰성평가 및 예측을 위해서는 자료를 정리해야 하는 어려움이 있으며 차량의 신뢰성특성을 잘 표현하기 위한 방법으로 참고문헌¹⁾에서 언급하는 주행거리기반 상대고장빈도는 일반 신뢰성분석을 위해 사용되는 프로그램으로는 불가능하다는 단점이 있다.

이에 본 논문에서는 참고문헌¹⁾의 신뢰성예측모델을 기반으로 하여 필드고장 자료를 이용한 프로그램을 개발하며 고장자료에 가장 적합한 이론적인 분포함수를 선택하는데 있어서 가장 중요한 모수추정을 위해 그래픽기반 모수추정(Graphic Wizard Parameters Estimation)방법을 새롭게 소개한다.

2. 프로그램 흐름도

개발된 프로그램은 PowerBuilder 11.0 Desktop⁹⁾ 버전을 사용하여 개발되었으며 계산의 정확성을 확인하기 위해서 Wolfram Research의 Mathematica 7.0¹⁰⁾을 통하여 그 결과 값을 비교하는 과정을 거쳐 개발되었다. 개발된 프로그램은 Fig. 1과 같은 과정을 통하여 신뢰성예측이 이루어지며¹⁾ 각 과정은 다음과 같이 기능을 수행한다.

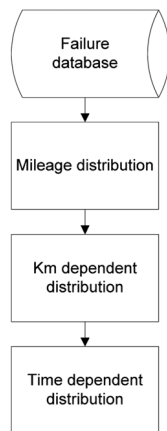


Fig. 1 Process of reliability prognosis

- (1) 필드고장이 수집되어 있는 파일을 고장자료로 읽어 들인다.
- (2) 각 고장마다 기록되어 있는 주행거리, 고장에 소비된 시간을 구하여 보증기한 동안 주행한 거리 S_w 를 다음과 같이 계산한다.¹⁾

$$S_w = \frac{w}{T_i} S_t \quad (1)$$

여기서 S_w 는 보증기한 동안 주행한 거리, S_t 는 고장이 발생하기 까지 주행한 거리, w 는 보증기한, T_i 는 고장이 발생하기 까지 소요된 시간을 의미한다. 이렇게 보증기한 동안 주행거리가 구해지면 S_w 의 누적분포함수 $L_w(s) = P(S_w \leq s)$ 를 구할 수 있으며 $L_w(s)$ 는 추후 주행거리기반 고장함수를 구하는데 사용된다.

- (3) $L_w(s)$ 는 관찰대상의 주행분포를 표현하는 함수이지 신뢰성특성을 기술하는 함수가 아니기에 주행거리에 따라 발생한 상대고장빈도를 구한다.
- (4) 주행거리기반 신뢰성특성 뿐 아니라 시간에 따른 신뢰성특성의 기술이 필요하기에 마지막 과정으로 시간에 따른 고장함수, 고장률을 구한다.

3. 모수추정

실제 관찰된 자료와 가장 적합한 분포가 선택이 되면 그 분포가 가지고 있는 고유한 모수가 추정된다. 예컨대, 대수정규분포는 평균, 편차라는 모수를 가지고 있으며 지수분포는 고장률이라는 모수를 가지고 있다. 모수추정 과정을 거쳐 Chi-square test (χ^2 test), Kolmogorov - Smirnov test 등을 통한 적합성을 검정을 하게 된다. 모수추정의 정확도에 의해 적합성 검정이 결정되기에 필드고장을 이용한 신뢰성예측에는 이 과정이 매우 중요하다. 개발된 프로그램의 모수추정은 일반적으로 많이 사용하는 MLE 뿐 아니라 GWPE라는 새로운 방법과 유전알고리즘 방법을 이용하였다.

3.1 Graphic wizard parameters estimation

GWPE는 개발된 프로그램에 모수추정을 위해 새롭게 개발된 방법이다. 비록 MLE의 경우 초기 값에 매우 큰 영향을 받아 잘 못된 모수를 추정할 수 있지

만 쉬운 알고리즘과 빠른 계산 때문에 GWPE의 경우 MLE를 통해 추정된 모수를 사용하며 다음과 같은 과정을 통하여 GWPE는 모수를 추정한다.

- (1) 선택된 분포함수에 맞는 모수를 MLE방법을 통하여 추정한다.
- (2) 실제 고장자료와 선택된 분포함수를 그래프로 표현하다.
- (3) 추정될 변수를 Power Builder의 Object중 “수평트랙바”개체를 이용하여 모수를 변경시키며 실제 고장자료의 그래프와 가장 유사한 그래프를 찾으며 SSE의 값을 비교하여 더 작은 SSE값을 가진 모수를 찾는다. 가장 작은 SSE의 값을 가진 모수가 추정될 최적의 모수가 된다.

Fig. 2의 빨간색은 실제 관측된 자료의 누적고장수이며 파란색은 관측된 고장자료가 대수정규분포(Log-Normal Distribution)를 따른다고 가정하고 MLE를 통해 추정된 모수를 이용한 값을 그래프로 표현하였다.

Fig. 2의 “수평트랙바”를 변경시키면 실시간으로 파란색 그래프와 “2nd. SSE”값이 변경되며 이 값이 가장 작을 경우 최적의 모수는 추정된다. GWPE방법은 MLE를 통한 모수추정보다 빠르며 정확한 모수를 추정할 수 있었으며 시각적으로 바로 확인할 수 있다는 장점이 있다.

식 (2)는 대수정규분포의 모수추정을 위한 MLE이며 SSE는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.²⁾

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i, \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln t_i - \hat{\mu})^2. \quad (2)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2. \quad (3)$$

여기서, y_i 는 실제 관측된 i 번째 고장의 고장확률 값이며 \bar{y}_i 는 분포함수의 i 번째 고장의 고장확률 값을 의미한다.

3.2 Genetic algorithm

유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)은 최적화 및 컴퓨터 과학 분야에서 최적화에 적합한 기술로 MLE, 최소 제곱법(Least square method) 방법의 경우 수집된 자료의 복잡성, 일관성의 문제로 항상 만족할 만한 결과를 내지 못한다는 단점이 있기⁶⁾ 개발된 프로그램의 또 하나의 모수추정 방법으로 GA방법이 사용되었다.

GA알고리즘을 사용하기 위해서는 신뢰계수가 고려된 신뢰구간을 구해야 하며 이 신뢰구간은 추정될 모수가 p_u (하위범의)보다는 크고 p_o (상위범의)보다는 작은 구간을 의미하고 신뢰계수는 추정 될 모수가 신뢰구간사이에 포함될 확률을 의미한다. 신뢰계수에 따른 분위수(Quantile) c 는 Table 1과 같으며 하위범위와 상의범위는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.⁵⁾

Table 1 Quantile of standard normal distribution

신뢰계수	0.9	0.95	0.975	0.99	0.995
c	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576

$$p_u = \frac{(i - 0.5 + 0.5c^2 - c\sqrt{i - 0.5 - n^{-1}(i - 0.5)^2 + 0.25c^2})}{(n + c^2)}, \quad (4)$$

$$p_o = \frac{(i + 0.5 + 0.5c^2 + c\sqrt{i + 0.5 - n^{-1}(i + 0.5)^2 + 0.25c^2})}{(n + c^2)}.$$

where

i : value of i th,

n : observed failure number,

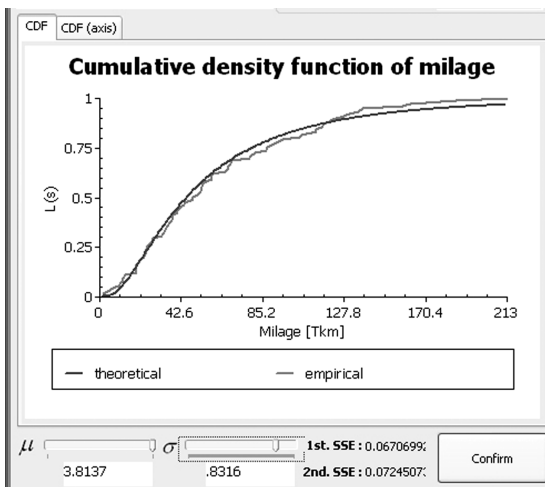


Fig. 2 GWPE window for log-normal distribution

$$c = \Phi^{-1} \times \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right),$$

α : confidence interval.

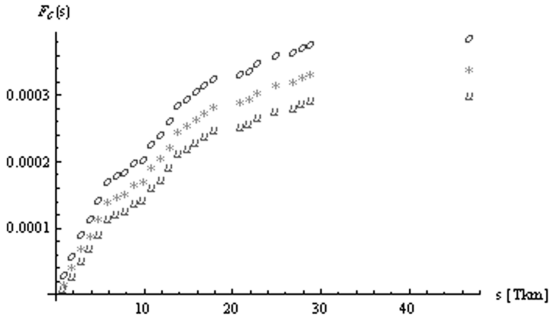


Fig. 3 Confidence interval, hazard rate 0.01

Fig. 3은 신뢰계수가 99%인 경우 실제(모양:*) 관찰된 자료와 추정된 구간 상(모양:o), 하(모양:u)를 나타낸다.

신뢰구간 중 상위범위(Fig. 3의 “o” 모양) 그래프와 하위범위(Fig. 3의 “u” 모양) 그래프를 MLE 방법으로 모수를 추정하며 추정된 모수의 상위범위, 하위범위의 값을 얻을 수 있다. 이렇게 구해진 최대, 최소값을 균일한 등분으로 나누고 이 변수들을 이용하여 GA를 수행하며 함수의 SSE값 중 최소값을 만족하는 모수가 GA를 통하여 추정된 모수이다.

Fig. 4에서는 추정된 모수들이 어떻게 사용되고

Table 2 SSE results

Least squares residuals	1.85604E-07
GA	1.15511E-09

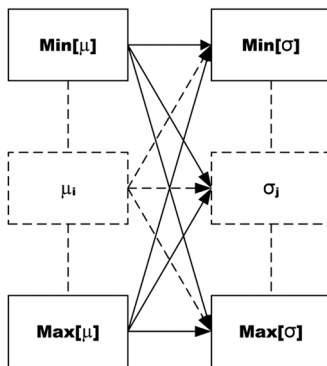


Fig. 4 Estimated parameters list

있는지 개략적인 표현으로 추정될 μ 의 경우 n개의 후보와 σ 의 경우 m개의 후보가 있을 경우 총 n^m 의 경우가 발생하고 이 중 SSE의 최소값일 경우 μ, σ 가 추정되며 실제 본 논문에서 사용된 GA를 통해 추정된 모수에 의한 SSE의 값이 Table 2처럼 최소 제곱법보다 더 작은 것을 확인할 수 있었다.

4. 프로그램

주행거리 기반 신뢰성예측 모델¹⁾의 경우 보증기간 동안 발생한 고장자료를 이용하여 신뢰성평가 및 예측하는 방법에 대해서 기술하였다.

하지만 모델을 이용한 신뢰성예측은 다수의 고장자료를 다루어야 하며 복잡한 계산과정을 통해 신뢰성예측이 이뤄진다는 단점이 있다.

본 장에서는 다수의 자료를 다룰 수 있으며 복잡한 계산이 가능한 Windows¹¹⁾기반에서 운영될 수 있는 개발된 프로그램에 대하여 기술하려고 한다.

4.1 고장자료입력

고장자료는 수집되어지는 환경에 따라 다양한 형태로 고장자료가 저장되지만 신뢰성예측을 위해서는 고장에 소요된 시간, 고장시점에서 주행거리를 필요로 한다. 개발된 프로그램의 고장자료 입력 창은 주행시작일, 고장일, 주행거리의 항목이 Tab으로 구분되어 있는 텍스트형식의 파일을 필요로 한다. Fig. 5에서는 텍스트 형식의 고장자료를 선택할 수 있는 창을 보여주고 있다.

고장자료가 선택이 Fig. 6처럼 신뢰성예측에 필요한 자료가 입력되게 된다. 고장자료의 보증기한

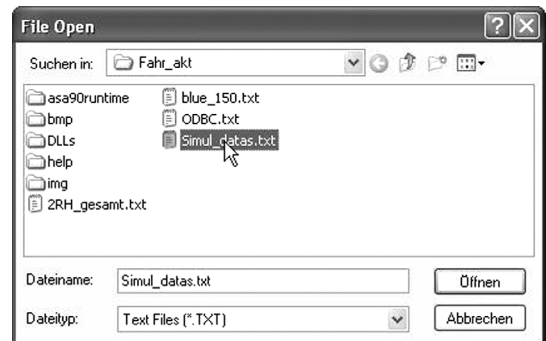


Fig. 5 File open window

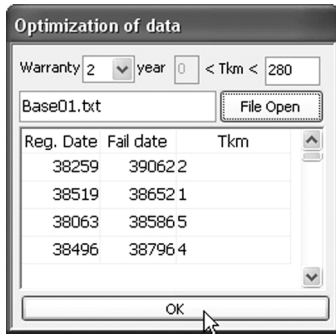


Fig. 6 Optimization window

을 선택하면 자동적으로 보증기한 1년 당 140Tkms로 입력되며 직접 입력 할 수도 있다. 이 과정을 통하여 신뢰성예측을 할 수 없는 자료는 고려되지 않는다.

4.2 주행거리분포 함수

본 프로그램에서는 가정할 수 있는 분포함수는 대수정규분포(Log-Normal distribution)와 와이블분포(Weibull distribution)로 제한되어 있다. 고장자료가 입력이 되면 원하는 분포함수를 선택하여 관찰대상과의 적합성을 SSE값을 비교하여 선택할 수 있다. 물론 대수정규분포와 와이블분포 모두 가정하여 더 정확한 분포함수를 찾아낼 수 있다.

또한 GWPE방법을 이용하여 더 정확한 모수를 추정할 수 있으며 시각적으로 그 정확성을 확인할 수 있다. 만약 2가지 분포함수로 가정하여 프로그램을 실행하였을 경우 프로그램은 SSE값이 작은 것이 관찰된 대상에 적합한 분포함수로 가정한다.

와이블분포로 가정되었을 경우 모수추정을 위

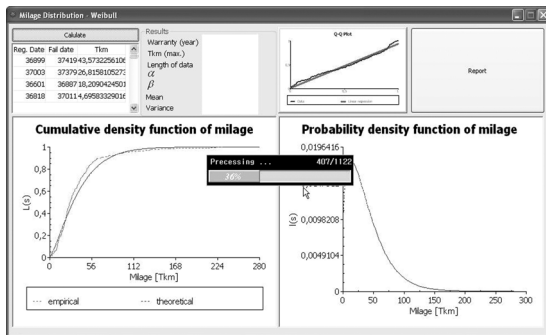


Fig. 7 Mileage distribution - Weibull distribution

해서는 3.2에서 기술한 내용처럼 GA방법이 사용되었다.

4.3 주행거리에 따른 상대고장빈도

주행거리에 따른 상대고장빈도 즉, 총 관찰대상 중 고장수를 계산을 위해서는 주행거리분포 함수를 이용하여 주행거리가 길어지면 고장개수가 증가하는 개념을 이용하여 고장개수를 보정해줘야 한다. 고장개수를 보정하기 위해서는 주행거리분포함수 $L_w(s) = P(S_w \leq s)$ 를 이용하여 주행거리 s 에서의 수정된 고장개수 $n_c(s)$ 를 식 (5)와 같이 구할 수 있다.¹⁾

$$n_c(s) = \frac{n_w(s)}{1 - L_w(s)} \quad (5)$$

where

s : distance[Tkms],

$n_c(s)$: 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.

관찰대상의 총 수량 n_t 중 주행거리에 따라 발생한 고장과 주행거리가 고려된 수정된 상대고장빈도 $\tilde{F}_c(s)$ 는 $n_c(s)$ 를 이용하여 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.¹⁾

$$\begin{aligned} \tilde{F}_c(s) &= \frac{n_c(s)}{n_t} \\ &= \frac{1}{n_t} \sum_{s \leq s} n_c(s) \\ &= \frac{1}{n_t} \sum_{s \leq s} \frac{n_w(s)}{1 - L_w(s)} \end{aligned} \quad (6)$$

Fig. 8에서 전체 관찰 수량 중 주행거리에 따라 발생한 상대고장빈도는 빨간색이며 초록색의 경우 고장후보 개념을 이용한 수정된 상대고장빈도이다. 초록색그래프의 값을 이용하여 모수추정을 거쳐 주행거리 기반 고장확률을 계산하게 된다.

4.4 시간에 따른 고장함수

지금까지는 차량의 신뢰성특성을 기술하기 위해서 주행거리를 기반으로 하여 신뢰성을 기술 하였

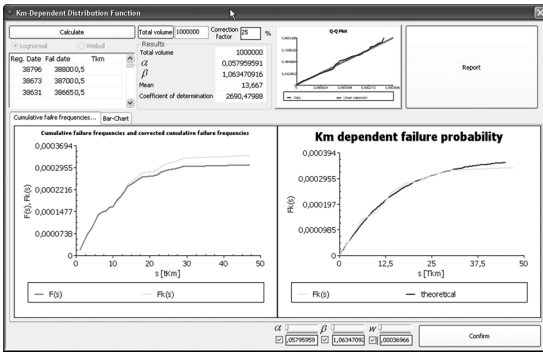


Fig. 8 Km dependent distribution function

으나 관찰대상의 수요예측에 따른 생산량 결정은 주행거리가 아닌 시간에 따라 이루어져야 하기에 시간에 따른 $F(t), h(t)$ 등을 이용하여 신뢰성분석 및 수요예측이 이루어져야 한다.

시간에 따른 고장 누적분포함수 $F(t)$ 는 식 (7)과 같이 계산되며 이 확률 값은 EOL시 수요예측을 위하여 사용되기도 한다.¹⁾

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^{\infty} f_c(s) \left(1 - L_w\left(\frac{s \cdot t_w}{T_t}\right)\right) ds \quad (7)$$

where

t_w : warranty period,

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

관찰대상이 시간에 따라 어떠한 고장형태 예컨대, 초기고장, 우연고장, 마모고장형태는 고장률 $h(t)$ 를 구하여 알 수 있으며¹⁾ 와이블분포로 가정하여 추정된 모수 중 척도모수에 의해서 고장형태가 결정이 된다. 척도모수 β 가 1보다 작은 경우 관찰된 대상은 초기고장형태를 띄며 1인 경우 고장률이 일정한 지수분포를 띄며 1보다 큰 경우 마모고장형태를 나타낸다.

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\int_0^{\infty} f_c(s) \left(\frac{s \cdot t_w}{T_t^2}\right) l_w\left(\frac{s \cdot t_w}{T_t}\right) ds}{1 - \int_0^{\infty} f_c(s) \left(1 - L_w\left(\frac{s \cdot t_w}{T_t}\right)\right) ds} \quad (8)$$

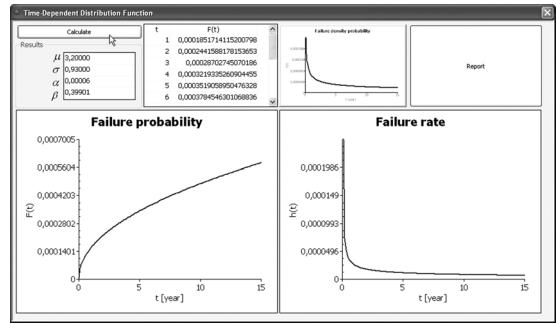


Fig. 9 Time dependent distribution function

where

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

Fig. 9처럼 주행거리가 아닌 시간에 따른 고장함수와 고장률이 계산된 것을 알 수 있다.

4.5 활용분야

필드고장자료를 이용한 연구는 그 동안 해외의 자동차관련분야에서 많은 연구가 이루어졌다.^{8,9)} 또한 그 결과는 단순한 평가 뿐 아니라 품질보증활동 분야로 확장이 되며 비용절감을 위한 분야로 확장되어 사용되고 있다.

그 중 EOL시 필요한 수량을 예측하는 분야에도 신뢰성예측 결과를 활용하고 있다. 이에 본 장에서는 EOL시 필요한 수량을 예측하기 위해 신뢰성예측 결과를 활용하는 방법을 기술한다.

신뢰성예측 과정을 통하여 얻어진 시간에 따른 고장함수와 판매수량의 정보를 이용한 EOL시 수요예측은 식 (9)와 같이 계산될 수 있다.¹⁰⁾

$$A_E = \sum_{i=1}^{t_E} n_0(i) \cdot [F(t_N - i + 1) - F(t_P - i + 1)] \quad (9)$$

where

$F(t)$: 시간 t 에서의 시간에 따른 고장확률,

t_E : 총 생산일자,

n_0 : 생산량,

t_N : 추가공급일자,

t_P : 생산 가능일자.

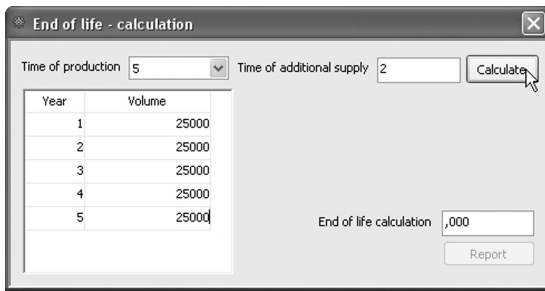


Fig. 10 EOL calculation window

Fig. 10은 EOL시 수량예측을 위한 창으로 식 (9)에서 필요로 하는 입력변수를 입력받아 최종 수량을 자동으로 계산한다.

5. 결론

다양한 차종에 걸쳐 수많은 차량이 판매되어 운영 중에 있으며 다양한 원인으로 발생하는 수많은 고장들이 여러 경로를 통하여 수집되고 있다. 이러한 정보는 개발과정에서 수행되는 신뢰성테스트 시 고려할 수 없는 다양한 운전자의 습관, 지리적인 특성 뿐 아니라 수많은 고장이 포함되어 있어 신뢰성평가 및 예측에 매우 좋은 자료로 활용되고 있다.

이에 본 논문에서는 이러한 자료를 이용하여 자동차산업에 적합한 주행거리 기반 신뢰성평가 및 예측을 할 수 있는 프로그램을 개발하였으며 개발된 프로그램은 EOL시 수요예측을 위해 사용되어 공학적인 측면 뿐 아니라 경제적인 측면까지 고려하여 다양한 분야에 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 고장자료에 적합한 수명분포 함수를 찾기 위한 모수추정으로 새로운 GWPE를 이용하여 시각적으로 그 정확성을 확인할 수 있어 편의성을 제공하였다.

또한 신뢰성예측의 결과는 정량적이기에 OEM (Original Equipment Manufacturer)은 동일한 차종에서 동일한 기능을 하는 부품의 경우 다양한 Supplier들을 통하여 받을 수 있기에 비교할 수 있는 자료로 확보하여 품질보증활동에 객관적인 자료로 활용할 수 있으며 Supplier 입장에서는 고객(OEM)과의 문제 대응에 객관적인 자료로 활용될 것으로 사료된다.

그 동안 고장자료를 기반으로 한 신뢰성평가 및 예측 프로그램의 경우 고가의 외국 프로그램을 많이 사용하였으나 개발된 프로그램을 기본으로 각 분야에 맞게 변경할 수 있어 그 활용범위는 더욱 다양할 것이며 국내 자동차산업에 활용되어 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- 1) J. Baek, K. Rhie and A. Meyna, "A Study on Reliability Prognosis Based on Censored Failure Data," Transactions of KSAE, Vol.18, No.1, pp.31-36, 2010.
- 2) A. Meyna and B. Pauli, Taschenbuch der Zuver-lässigkeit-und Sicherheitstechnik, Carl Hanser Verlag, München, 2003.
- 3) B. Pauli, Zuverlässigkeitsprognose für Elettronische Steuergeräte im Kraftfahrzeug, Shaker Verlag, Germany, 1998.
- 4) C. Hwang, K. Jun, J. Yoon, T. Park, S. Kim, and K. Yi, "Development of a Fatigue Life Prediction Program for the Hub Bearing Unit," Transactions of KSAE, Vol.13, No.5, pp.142-151, 2005.
- 5) N. Henze, Stochastik für Einsteiger, Vieweg, Germany, pp.211-232, 2008.
- 6) J. Hauschild, A. Braasch and A. Kazemina, Reliability Prediction for Automotive Components Using Real-parameter Genetic Algorithm, Taylor & Francis Group, New York, 2008.
- 7) A. Braasch, D. Althaus, J.-J. Baek and A. Meyna, "Importance of Regarding the Field Failure Behaviour of Automotive Components," Taylor & Francis Group, New York, pp.887-832, 2010.
- 8) D. Althaus, A. Braasch, M. Schlummer and A. Meyna, "Comparison of the Failure Behaviour of the Same Function in Different," Taylor & Francis Group, New York, pp.1549-1553, 2010.
- 9) Sybase Power Builder 11.0 Desktop Version.
- 10) Wolfram Research Mathematica 7.0.
- 11) Microsoft Windows.