

다수의 고장모드를 가지는 기계부품의 신뢰성 분석[§]

장무성^{*†} · 최병오^{*} · 강보식^{*} · 박종원^{*} · 이충성^{*}

* 한국기계연구원 신뢰성평가센터

Reliability Analysis of Mechanical Component with Multiple Failure Modes

Mu Seong Chang^{*†}, Byung Oh Choi^{*}, Bo Sik Kang^{*}, Jong Won Park^{*} and Choong Sung Lee^{*}

* Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received March 8, 2013 ; Revised June 14, 2013 ; Accepted June 14, 2013)

Key Words: Multiple Failure Mode(다중 고장모드), Reliability Analysis(신뢰성 분석), Pneumatic Cylinder(공기압 실린더), Competing Failure Modes(경쟁 고장모드), Mixed Weibull(혼합 와이블), Shape Parameter(형상 모수)

초록: 대부분의 제품은 다수의 고장모드를 가지지만, 일반적으로 신뢰성 분석에서 고장모드 별로 분석하는 경우는 많지 않다. 또는 신뢰성 분석 시 고장모드에 대한 정보를 제공하지 않거나 대표적인 고장모드로 분석하기도 한다. 특히 신뢰성 인증시험에서 가정하고 있는 형상모수는 제품의 형상모수보다는 고장모드에 대한 형상모수 값이 더 중요하다. 본 연구에서는 다수의 고장모드를 가지는 기계부품에 대한 신뢰성 분석방법으로 경쟁 고장모드 분석방법과 혼합 와이블 분석방법을 소개한다. 그리고 3 가지 고장모드를 가지는 공기압 실린더의 사례에 대해 각 고장모드 별로 형상모수를 구하였으며, 3 가지 고장모드를 고려했을 때와 하나의 고장모드로 가정했을 때의 신뢰성 척도(B_{10} 수명, 특성 수명)을 비교하였다.

Abstract: Most products are indeed governed by multiple failure modes. However, there are few cases in which reliability analysis applies to only one failure mode at a time. Furthermore, reliability data do not include information about failure modes, or the reliability analysis is performed using a representative failure mode. The Weibull shape parameter for failure modes is more important than one for products in the reliability qualification test. This paper presents reliability analysis methods for a mechanical component with multiple failure modes. These methods include the competing failure modes (CFM) method and the mixed Weibull method. Pneumatic cylinder test data with three failure modes are presented to estimate the shape parameter for each separate failure mode. In addition, reliability measures (B_{10} life, characteristic life) of the pneumatic cylinder considering three failure modes were compared with those assuming a single failure mode.

- 기호설명 -

T, t : 수명 (시간 또는 사이클)
 M : 고장모드의 개수
 t_p : 100p% 백분위수
 p : 불신뢰도
 R(t) : 신뢰도 함수
 F(t) : (누적)분포 함수
 β : 와이블 분포의 형상모수

η : 와이블 분포의 척도모수 및 특성수명
 B_{10} : 전체 모집단의 10%가 고장 나는 시점
 N : 전체 데이터 수
 N_i : i 번째 고장모드의 데이터 수

1. 서론

많은 제품들은 하나 이상의 고장 원인을 가진다. 그러한 원인은 고장모드 또는 고장 메커니즘으로 불린다.⁽¹⁾ 고장모드와 고장 메커니즘을 구분하면 고장 메커니즘은 고장을 발생시키는 물리적 혹은 화학적 프로세스를 말하며, 고장모드는 고장 메커니즘의 징후로 볼 수 있다.⁽²⁾ 따라서 고장 부품에

§ 이 논문은 대한기계학회 신뢰성부문 2013년도 춘계학술대회 (2013. 3. 27-29., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, mirucms@kimm.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

서 바로 확인할 수 있는 것은 고장모드이며, 이후 고장분석을 통해 근본적인 고장 메커니즘을 확인할 수 있다.

기계공학 분야에서 가장 널리 사용되는 분포는 와이블 분포이며,⁽³⁾ 와이블 분포의 형상모수는 고장물리에 의해 설명되며, 척도모수는 재질에 따라 변할 수 있는 내구성의 척도로 볼 수 있다.^(4,5)

일반적으로 고장 데이터에 대한 신뢰성 분석에서 고장모드 별로 구분하여 분석하는 경우는 많지 않다. 신뢰성 분석 시 고장모드에 대한 정보가 포함되어 있지 않거나 대표적인 고장모드로 분석하기도 한다.⁽⁶⁻⁹⁾ 또한 필드 고장 데이터의 경우 고장모드 정보에 대한 비용과 획득의 어려움으로 보고 되지 않는 경우도 있다.⁽¹⁰⁾ 하지만 기계류 부품에 대한 무고장 시험과 같은 신뢰성 인증시험에서는 부품보다는 부품의 고장모드에 대한 형상모수 값이 필요하다. 또한, 고장모드들이 각각 다양한 고장률 패턴(초기 고장, 우발 고장, 마모 고장)을 가질 때 개별 고장모드에 대한 개선으로 제품에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 다수의 고장모드를 가지는 기계 부품에 대한 신뢰성 분석방법으로 경쟁고장모드(CFM; Competing Failure Modes) 분석방법과 혼합와이블(Mixed Weibull) 분석방법을 소개한다. 그리고 3 가지 고장모드를 가지는 공기압 실린더의 사례에 대해 각 고장모드 별로 형상모수를 구하고, 3 가지 고장모드를 고려했을 때와 하나의 고장모드로 가정했을 때의 신뢰성 척도(B₁₀ 수명, 특성 수명)을 비교한다.

2. 다중 고장모드의 신뢰성 분석

2.1 경쟁고장모드 분석

경쟁고장모드 분석은 다수의 고장모드를 가지는 제품 또는 부품의 신뢰성 분석에 적용할 수 있으며, 2 가지 가정이 필요하다. 대상 부품은 수리가 불가능하며, 각각의 고장모드는 서로 독립이다. 각 고장 데이터에 대한 고장모드 정보가 존재하는 경우에 여러 고장모드들은 통계적으로 독립이라고 가정할 수 있다.⁽¹¹⁾

경쟁고장모드는 다수의 고장모드들이 부품 내에서 고장을 유발하기 위해 경쟁한다는 의미이다.⁽¹²⁾ 즉, 여러 고장모드 중에서 가장 먼저 발생한 하나의 고장모드로 인해 부품은 고장이 된다. 이는 직렬 시스템의 신뢰도 계산방식과 동일하다.

경쟁고장모드 분석 방법은 고장모드 별로 분석

을 실시한 후 결과를 조합한다. 각 고장모드에 대한 분석 시 다른 고장모드들의 고장 데이터는 관측중단 데이터로 간주하여 분석한다. M 개의 고장모드를 고려한 부품의 신뢰도 함수 R(t)는 식 (1) 과 같이 계산할 수 있다.

$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdots R_M(t) \tag{1}$$

확률변수 T 의 100p% 백분위수 t_p 는 식 (2)와 같다. B₁₀ 수명은 p=0.1, t_{0.1} 이 된다.

$$1 - R(t_p) = F(t_p) = P[T \leq t_p] = p \tag{2}$$

와이블 분포의 신뢰도 함수 R(t)는 식 (3)과 같으며, β 는 형상모수, η 는 척도모수이자 B_{63.2} 수명인 특성수명이다.

$$R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right\} \tag{3}$$

경쟁고장모드 분석을 설명하기 위해 Meeker & Escobar⁽¹³⁾에 제시된 전기부품의 예제를 사용한다. 30 개의 샘플이 전형적인 사용환경에서 설치된 후, 고장이 발생한 후 고장모드에 대한 정보가 기록되었다. 고장모드에는 제품 초기에 주로 발생하는 우발적인 과전압에 의한 서지(surge) 고장모드와 10 만 사이클 이후 정상적인 사용에 의해 발생하는 마모 고장모드가 있다.

분석결과는 Table 1 과 같으며, 2 가지 고장모드를 고려한 와이블 플롯은 Fig. 1 과 같다. 고장데이터 중 관측중단 데이터를 포함하기 때문에 최우추정법을 적용하여 추정하였다. Table 1 에서 2 가지 고장모드를 모두 고려한 경우의 특성수명과 B₁₀ 수명은 식 (1)과 (3)을 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다. 아래 식을 만족하는 t 가 B₁₀ 수명이 된다. 특성수명의 경우 0.9 대신에 0.368 을 대입하여 구할 수 있다.

Table 1 Estimated reliability measures of CFM example

신뢰성 척도	2 가지 고장모드를 고려한 경우			단일 고장모드
	서지	마모	전체	
β	0.67	4.49	-	0.93
η	449,430	340,380	259,450	242,590
B ₁₀	15,630	206,204	15,714	21,400

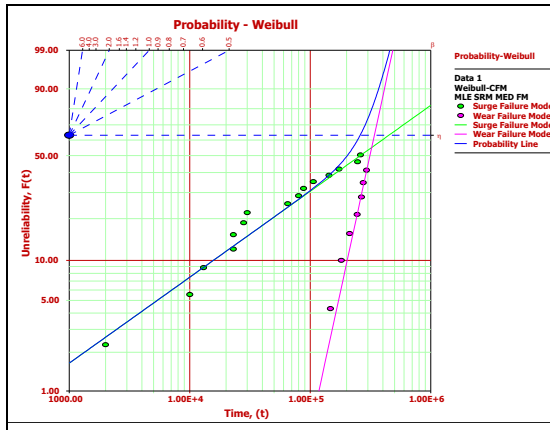


Fig. 1 Weibull plot of CFM example

$$R(t) = R_{\text{서지}}(t) \cdot R_{\text{마모}}(t) = 0.9$$

$$= \exp\left\{-\left(\frac{t}{449430}\right)^{0.67}\right\} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{t}{340380}\right)^{4.49}\right\} = 0.9$$

Fig. 1 에서 실선은 각 고장모드에 대한 적합선 (fitted line)이며, 곡선은 2 가지 고장모드를 고려한 적합선을 나타낸다.

분석결과로부터 서지 고장모드의 경우 감소형 고장률을 가지며, 마모 고장모드는 증가형 고장률을 나타낸다. 그리고 고장모드를 구분하지 않고 단일 고장모드로 분석할 경우, B_{10} 수명의 추정 값은 크게 추정하며, 특성수명의 추정 값은 작게 추정하게 된다. 만약 서지 고장모드를 개선(제거)할 수 있다면 제품의 B_{10} 수명을 증가시킬 수 있다.

2.2 혼합 와이블 분석

다수의 고장모드를 가지며, 와이블 분포를 따르는 부품에 대한 또 다른 분석방법은 혼합 와이블 분석으로 여러 개의 와이블 분포가 혼합된 분포 형태를 가지게 된다. 이러한 분석방법은 고장모드에 대한 정보가 없거나 각 모드들이 통계적으로 독립이라는 가정이 적합하지 않을 때 유용하게 사용할 수 있다. 특히 부품의 초기 고장, 우발 고장, 마모 고장의 데이터가 혼합되어 있을 때 적용될 수 있다.⁽¹¹⁾ 고장모드의 개수 M 에 따라 혼합 와이블 분포의 신뢰도 함수는 식 (4)와 같다.⁽¹⁴⁾

$$R_{1,\dots,M}(T) = \sum_{i=1}^M \frac{N_i}{N} e^{-\left(\frac{T}{\eta_i}\right)^{\beta_i}} \quad (4)$$

여기서, N 은 총 데이터 수, N_i 는 i 번째 고장모드에 대한 데이터 수, β_i, η_i 는 i 번째 고장모드에

Table 2 Estimated reliability measures of Mixed Weibull example

신뢰성 척도	2 가지 고장모드를 고려한 경우			단일 고장모드
	1	2	전체	
β	0.95	7.87	-	1.1
η	92,241	195,420	171,060	139,070
B_{10}	11,925	25,264	14,646	17,979
P(비율)	62.45%	37.55%	-	-

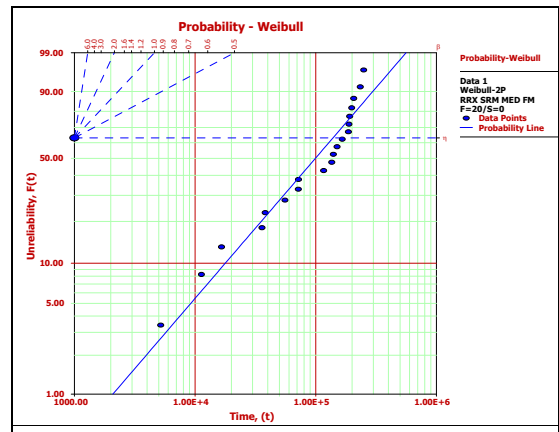


Fig. 2 Weibull plot of Mixed Weibull example (assuming a single failure mode)

대한 형상모수와 척도모수이다. 고장모드의 개수를 2 개로 했을 때 최소 5 개의 데이터가 필요하다.

혼합 와이블 분석을 설명하기 위해 가상 데이터를 활용한다⁽¹²⁾. 이 경우 개별 고장 데이터에 대한 고장모드 정보가 없기 때문에 경쟁고장모드 분석을 하기는 어렵다. 혼합 와이블 분석에서는 고장모드의 수를 임의로 정할 수 있다. 단일 고장모드로 가정한 경우, 고장 데이터에 대한 확률 플롯 결과는 Fig. 2 와 같으며, 결과로부터 100,000 사이클 이후부터 기울기가 급해짐을 알 수 있으므로 고장모드의 수는 2 개로 결정하였다.

고장모드 수를 2 개로 하여 혼합 와이블 분석을 실시한 결과는 Table 2 와 같다. 고장데이터가 완전 데이터이므로 최소제곱법을 적용하여 추정하였다. Table 2 에서 2 가지 고장모드를 모두 고려한 경우의 특성수명과 B_{10} 수명은 식 (4)를 이용하여 구할 수 있으며, 식 (4)의 N_i/N 는 Table 2 의 P 가 된다.

2 가지 고장모드를 고려한 확률 플롯은 Fig. 3 과 같으며, Fig. 4 는 시간에 따른 고장률을 나타낸다. Table 2 와 Fig. 4 로부터 0 사이클에서 10 만 사이클

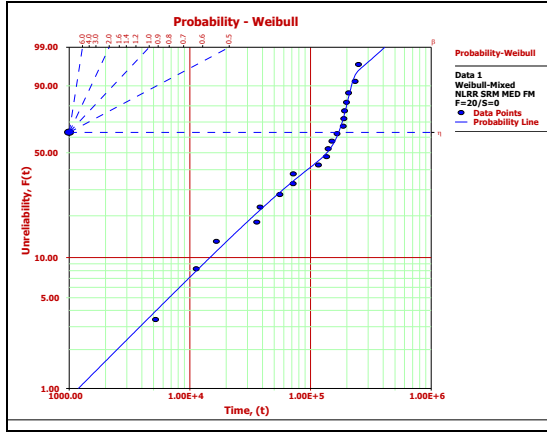


Fig. 3 Weibull plot of Mixed Weibull example (considering two failure modes)

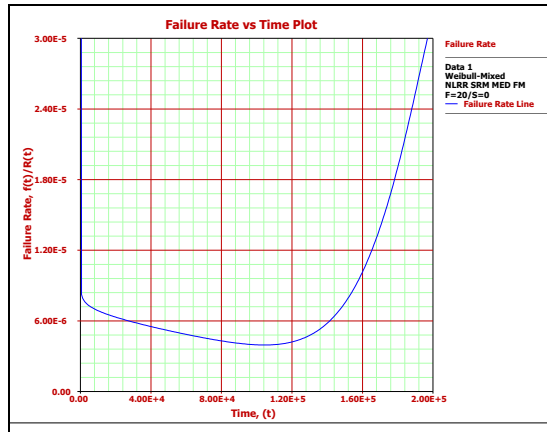


Fig. 4 Failure rate plot of Mixed Weibull example (considering two failure modes)

까지는 우발 고장기간으로 볼 수 있으며, 10 만 사이클부터는 마모 고장기간임을 알 수 있다. 그리고 경쟁고장모드 분석과 같이, 고장모드를 구분하지 않고 단일 고장모드로 분석할 경우, B₁₀ 수명의 추정 값은 크게 추정하며, 특성수명의 추정 값은 작게 추정하게 된다.

3. 공기압 실린더 사례

3.1 공기압 실린더의 시험결과

본 연구에서 고려되는 공기압 실린더의 사용환경 및 시험조건은 630kPa, 23℃이며, 내경은 32mm, 행정길이는 160mm 이다. 시험은 8 개의 샘플을 사용환경과 유사한 조건에서 실시하였으며, 고장 확인을 위해 주기적으로 측정하여 고장유무를 판단하였으며, 해당 고장모드에 대한 고장기준은 Table 3 과 같다.⁽¹⁵⁾ Table 4 는 공기압 실린더 시험으로부터 얻은 고장시간(사이클)과 고장모드를 나타낸다.

Table 3 Failure criteria of three failure modes

고장모드	고장 기준
누설	> 1 sec
최저작동압력	> 12 dm ³ /h
행정속도	≥ 120 kPa

Table 4 Test results of pneumatic cylinders

샘플 No	시작	종료	고장모드
1	9,000,000	11,000,000	최저작동압력
2	17,000,000	20,000,000	누설
3	25,000,000	30,000,000	최저작동압력
4	20,000,000	21,000,000	최저작동압력
5	21,000,000	25,000,000	행정속도
6	6,000,000	7,000,000	누설
7	25,000,000	30,000,000	최저작동압력
8	17,000,000	20,000,000	행정속도

Table 5 Shape and scale parameters for each failure mode

고장모드	형상모수	척도모수(특성수명)
누설	1.35	58,065,000 사이클
최저작동압력	4.25	26,608,000 사이클
행정속도	3.97	33,166,000 사이클

샘플 고장은 실제로 시작 사이클과 종료 사이클 사이에서 발생한다.

3.2 경쟁고장모드 분석 결과

Table 4 와 같이 고장시간과 고장모드에 대한 정보가 존재하는 경우에는 앞에서 언급한 분석 방법 중 혼합 와이블 분석은 고려할 필요가 없으며, 대신 경쟁고장모드 분석 방법을 적용할 수 있다.

만약 Table 4 의 고장데이터에 대해서 단일 고장모드로 판단하여 분석할 경우에는 구간데이터이므로 최우추정법을 적용하여 모수를 추정할 수 있다. 단일 고장모드로 가정하여 분석한 결과는 형상모수 3.12, 척도모수 21,285,000 사이클과 같다.

반면 경쟁고장모드 분석방법을 적용하여 공기압 실린더의 3 가지 고장모드 별로 분석한 결과는 Table 5 와 같다. 각 고장모드에 대한 형상모수 값 으로부터 모든 고장모드는 증가형 고장률이며, 고

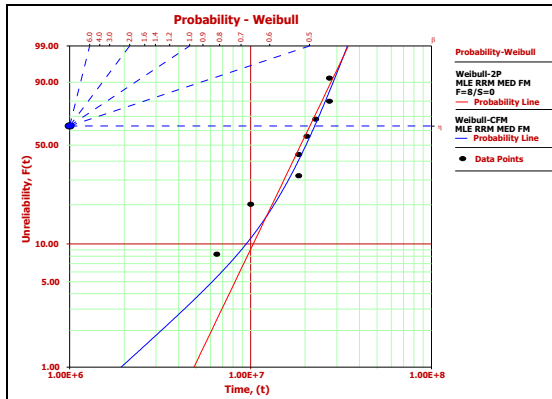


Fig. 5 Two Weibull plots for pneumatic cylinders

장모드에 따라 형상모수 값에 차이가 있음을 알 수 있다.

3 가지 고장모드 별로 고려한 경우의 B_{10} 수명과 특성수명은 식 (1)과 (3)을 이용하여 구할 수 있다. B_{10} 수명과 특성수명($B_{63.2}$ 수명)은 아래 식을 만족하는 t 값이 된다.

- B_{10} 수명의 경우

$$R(t) = R_{\text{누설}}(t) \cdot R_{\text{최저작동압력}}(t) \cdot R_{\text{행정속도}}(t) = 0.9$$

$$B_{10} = t = 9,458,900 \text{ 사이클}$$

- 특성수명($B_{63.2}$ 수명)의 경우

$$R(t) = R_{\text{누설}}(t) \cdot R_{\text{최저작동압력}}(t) \cdot R_{\text{행정속도}}(t) = 0.368$$

$$B_{63.2} = t = 22,617,000 \text{ 사이클}$$

일반적으로 다수의 고장모드가 존재하는 경우, 개별 고장모드를 모두 고려하여 분석하는 것이 바람직하다. 공기압 실린더의 3 가지 고장모드를 모두 고려한 경우와 고려하지 않는 경우(단일 고장모드로 가정한 경우)에 대해서 통계적인 수치로 비교하였다. 비교 기준은 우도 값(likelihood value)을 사용하였다. 우도 값은 최우추정법에서 계산되는 값으로 이 값이 클수록 적합한 방법이라고 볼 수 있다. 3 가지 고장모드를 고려한 경우의 우도 값은 -9.5944 로 단일 고장모드로 가정한 경우의 우도 값 -19.4314 보다 크므로, 고장모드를 고려하여 분석하는 것이 통계적으로 적합하다는 것을 알 수 있다.

공기압 실린더의 3 가지 고장모드를 모두 고려한 경우와 고려하지 않는 경우에 대해 확률 플롯을 비교한 결과는 Fig. 5 와 같다. 그래프에서 직선은 단일 고장모드로 분석한 결과이며, 곡선은 경쟁고장모드로 분석한 결과이다. 결과로부터 단일 고장모드로 분석할 경우 B_1 , B_5 , B_{10} 수명 추정 값은 경쟁고장모드로 추정한 값보다 크게 추정하였으며, 특성수명의 추정 값은 작게 추정함을 알 수 있다.

Table 6 Comparison results of B life for two cases

B 수명	단일 고장모드로 고려한 경우(사이클)	경쟁고장모드 분석 결과(사이클)
1	4,865,300	1,923,800
5	8,207,700	6,142,000
10	10,340,000	9,458,900
20	13,155,000	13,493,000
30	15,291,000	16,183,000
40	17,159,000	18,332,000
50	18,924,000	20,231,000
60	20,697,000	22,038,000
63.2	21,283,000	22,617,000
70	22,592,000	23,881,000
80	24,797,000	25,932,000
90	27,816,000	28,612,000
99	34,744,000	34,353,000

경쟁고장모드 분석 결과의 곡선은 개별 고장모드들의 직선을 고려하여 작성하였기에 단일 고장모드를 가정한 직선보다 고장 데이터를 더 잘 반영하는 것을 알 수 있다. 공기압 실린더의 경우 특히 초기 고장데이터를 잘 반영하였다.

Table 6 은 Fig. 5 에 대한 수치적인 결과를 나타낸다. 고장모드가 다수인 부품에 대해 고장모드를 고려하지 않고 분석할 경우, 신뢰성이 우수한 제품의 신뢰성 측도로 많이 사용되는 B_1 , B_5 , B_{10} 수명 추정 값은 경쟁고장모드 분석의 추정 값보다 크게 추정하는 오류를 범할 수 있게 된다.

따라서, 공기압 실린더의 경우 다수의 고장모드를 가지므로 단일 고장모드로 분석하는 것보다 경쟁고장모드 분석 방법을 적용하는 것이 고장모드에 대한 의미 있는 형상모수를 얻을 수 있고, 수명 추정 시 오류를 줄일 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 다수의 고장모드를 가지는 기계부품에 대한 신뢰성 분석방법인 경쟁고장모드 분석과 혼합 와이블 분석방법에 대한 개념과 문헌에 포함된 예제를 소개하였다. 또한 공기압 실린더의 사용조건 시험 데이터에 대해 경쟁고장모드 분석을 실시하여, 고장모드를 고려하지 않은 분석 결과와 비교하였다.

(1) 공기압 실린더의 경우, 고장데이터에 대한 고장모드 정보가 포함되어 있으므로 경쟁고장모드 분석 방법을 적용하였다.

(2) 경쟁고장모드 분석결과에서 각 고장모드의

형상모수는 다음과 같다. 누설은 1.35, 최저작동압력은 4.25, 행정속도는 3.97 이었다. 이러한 형상모수 값들은 향후 신뢰성 인증시험에 유용한 정보로 활용될 수 있다.

(3) 단일 고장모드로 분석할 경우 경쟁고장모드 분석 결과에 비해 B_{10} 수명의 추정 값은 크게 추정하였으며, 특성수명은 작게 추정하였다.

참고문헌

- (1) Nelson, W., 2004, *Accelerated Testing, Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*, John Wiley & Sons, Inc.
- (2) Edson, L., 2009, *Demonstrating Reliability with Accelerated Testing*, Hobbs Engineering.
- (3) Bertsche, B., 2008, *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*, Springer.
- (4) Barringer & Associates, 2010, Weibull Database, <http://www.barringer1.com>.
- (5) Abernethy, R.B., 2004, *The New Weibull Handbook* (5th edition), Abernethy, Robert B.
- (6) Kim, H.M., Wei, S.H., Park, D.K. and Shin, H.D., 2011, "Lifetime Prediction of Fuel Level Sender by Accelerated Life Test," *Proceedings of Conference on the Korean Society of Automotive Engineers*, pp. 1590~1595.
- (7) Kang, B.S. and Song, C.S., 2006, "The Estimation of Shape Parameter of Pneumatic Cylinders," *Journal of the Korea Society for Power System Engineering*, pp. 127~132.
- (8) Lee, S.C. and Choi, D.S., 2003, "Reliability Analysis for Power Plants Based on Insufficient Failure Data," *the Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 401~406.
- (9) Shin, W.G, Lee, S.H. and Song Y.S., 2006, "The Reliability Life Test Design and Analysis of Wiper Motor for Automobiles," *Proceedings of Conference on the Korean Society of Automotive Engineers*, pp. 1968~1973.
- (10) Seo, S.K., 2006, *Minitab Reliability Analysis*, ERETEC.
- (11) Nikulin, M.S., Limnios, N., Balakrishnan, N., Kahle, W. and Huber-Carol, C., 2010, *Advances in Degradation Modeling: Applications to Reliability, Survival Analysis, and Finance*, Birkhauser, pp. 6~7.
- (12) KORTS, 2009, Data Analysis for Several Failure Modes, KORTS Technical Report.
- (13) Meeker W.Q. and Escobar L.A., 1998, *Statistical Methods for Reliability Data*, John Wiley & Sons, Inc.
- (14) ReliaSoft, 2005, *Life Data Analysis Reference*, ReliaSoft Publishing.
- (15) ISO, 2007, *Pneumatic Fluid Power-Assessment of Component Reliability by Testing-Part 3: Cylinders with piston rod*, ISO 19973-3.