

이원배치법을 이용한 공기압 실린더의 가속수명시험에 관한 연구

강보식[†] · 김형의* · 유영철**

Research on accelerated life test of pneumatic cylinder using two-way factorial design

Bo-Sik KANG, Hyoung-Eui KIM, Yung-Chul YOO

Key Words: Reliability(신뢰성), Pneumatic Cylinder(공기압 실린더), Two-way factorial design (이원배치법), Accelerated life test(가속수명시험), Acceleration Factor(가속계수)

Abstract

In this study, we researched how to estimate life-stress relationship and acceleration factor through performing accelerated life test and analyzing it. The purpose of this study is to predict life of pneumatic cylinder within short time which is widely used in automation manufacturing line. In design of accelerated life test, we selected operating pressure and load that have the most influence on main failure mode of pneumatic cylinder as accelerated factor. We used two-way factorial design for arranging of test condition to accelerated factor and accelerated level.

기호설명

- β : 와이블 분포의 형상모수
 θ : 와이블 분포의 척도모수
 t : 고장 사이클
 p : 불신뢰도 값(B_{10} 이면 $p=0.1$)
 $\Gamma(\alpha)$: 감마 함수
 $L(X)$: 수명
 P : 압축공기 작동압력(bar)
 W : 사용부하(kg)
 K : 압력-부하 복합가속 모형의 모수(상수)
 m : 사용부하에 대한 가속모형 모수
 l : 작동압력에 대한 가속모형 모수
 AF : 가속계수

1. 서 론

공기압 실린더는 자동화 생산라인 등의 다양한 산업분야에서 폭넓게 사용되고 있는 부품으로, 고장이 발생하면 전체 시스템에 막대한 손실을 야기시킬 수 있어 신뢰성에 대한 중요성 및 소비자의 요구수준이 날로 증대되고 있는 추세이다. 그러므로 빠른 시간 안에 수명을 예측하여 제품의 신뢰성을 확보하기 위한 신뢰성시험 및 분석 방법에 대한 연구가 절실히 필요하다.

따라서 본 논문에서는 수명시험 시간을 단축할 수 있는 가속수명시험을 설계하는 방법과 시험을 수행하고 분석하여 수명-스트레스 관계 및 가속계수를 찾는 방법에 대해 소개하고자 한다. 또한 가속수명시험 설계는 공기압 실린더의 주 고장모드에 가장 큰 영향을 주는 작동압력과 사용부하를 가속인자(Accelerated factor)로 선정하고 이원배치법을 이용하여 2개의 가속인자와 각각의 인자별 3개 가속수준(Accelerated level)에 대해 시험조건을 배치하였다.

[†] 강보식, 회원, 한국기계연구원 신뢰성평가센터
 E-mail : kbs660@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7156 FAX : (02)868-7082

* 한국기계연구원 신뢰성평가센터

** 한국기계연구원 신뢰성평가센터

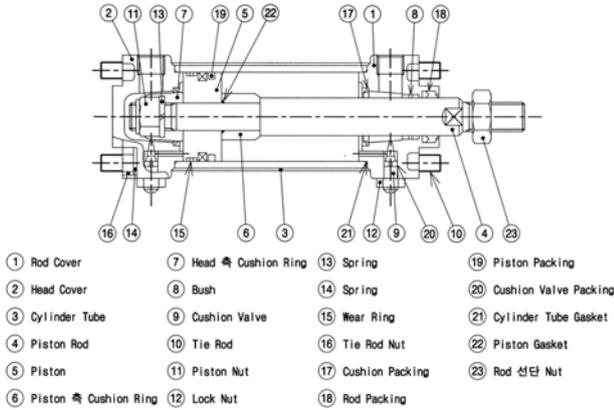


Fig. 1 Structure of Pneumatic Cylinder

2. 공기압 실린더의 고장분석

2.1 공기압 실린더의 구조

공기압 실린더는 압축공기의 흐름을 이용하여 왕복운동을 하는 공기압 시스템의 핵심 구동 장치로 주요 구성품은 구동부인 피스톤과 피스톤 로드, 실린더 튜브, 기밀을 위한 각종 패킹(씰) 등으로 구성되며, 세부 구조는 Fig. 1과 같다.

2.2 고장모드 및 영향 분석(FMEA)

공기압 실린더의 고장모드 및 고장 메커니즘은 FMEA를 통하여 분석하며, Table 1과 같이 주요 고장모드는 패킹(씰)의 마모 및 파손에 의한 누설이 대부분을 차지한다.

따라서 주 고장모드에 가장 큰 영향을 주는 압축공기의 작동압력과 실린더 로드 부하에 작용하는 사용부하를 가속 인자로 결정한다.

Table 1 Failure Mode & Effect Analysis(FMEA)

주요 구성품	기능	고장모드	고장 메커니즘	고장영향
피스톤 씰	내부 누설 방지	누설	마찰마모	최저작동 압력저하
		파손	윤활저하	효율저하
로드 씰	외부 누설 방지	누설	마찰마모	최저작동 압력저하
		파손	윤활저하	효율저하
실린더 튜브	압력 유지	파괴	피로	누설발생
		변형	외부충격	효율저하
헤드 및 로드 커버	기밀성 유지	조립볼트 파손	초과압력	누설발생

Table 2 Accelerated life test plan

Factor	Pressure(bar)			
	Level	6.3	8	12
Load (kg)	1.9	1 st step	1 st step	1 st step
	5	1 st step	2 nd step	2 nd step
	10	1 st step	2 nd step	2 nd step

3. 가속수명시험 조건 설계

가속수명시험 조건의 설계는 사용부하와 압축공기의 작동압력을 가속인자로 결정하여, 사용부하 1.9kg, 5kg, 10kg의 3개 가속수준과 작동압력 6.3bar, 8bar, 12bar의 3개 가속수준에 대하여 Table 2와 같이 이원배치법을 이용하여 배치한다.

또한 모든 9개의 시험조건을 한 번에 수행하는 것은 장비 및 시험시간 등의 현실적 제약이 따르므로, 시험의 효율성을 높이기 위해 수명분포 예측 및 복합 가속모형 모수 도출을 위한 최소 시험조건에 해당하는 1단계 5개 조건과 1단계의 분석 결과에 대한 검증 단계인 2단계 4개 조건으로 나누어 Table 3과 같이 수행한다.

본 논문은 현재 1단계의 시험 데이터만을 확보한 상태로 수명분포 모수 및 가속 모형 모수 도출과정 및 분석방법에 대하여만 소개하고, 추후 시험을 진행하여 검증 과정을 수행할 예정이다.

Table 3 Conditions of accelerated life test

Case	Test condition		Sample size	Test Procedure
	Load(W) (kg)	Pressure(P) (bar)		
1	1.9	6.3	8	1 st step
2	1.9	8	8	
3	1.9	12	8	
4	5	6.3	8	
5	10	6.3	8	
6	10	12	8	2 nd step
7	10	8	8	
8	5	12	8	
9	5	8	8	

4. 공기압 실린더의 수명분석 이론

4.1 수명분포

와이블 분포는 형상 모수(shape parameter), 척도 모수(scale parameter) 값에 따라 다양한 분포로 표현이 가능하므로 지수분포와 함께 신뢰성 데이터 분석에 가장 널리 사용되는 수명분포이다.

와이블 분포의 확률 밀도 함수, 분포함수, 신뢰도 함수, 고장률 함수, 평균수명, B_{100p} 수명은 각각 다음과 같은 식으로 표현한다.

(1) 확률 밀도 함수

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad \beta > 0, \theta > 0 \quad (1)$$

(2) 분포함수 및 신뢰도 함수

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad (2)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad (3)$$

(3) 고장률 함수

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

(4) 평균수명

$$E(T) = \theta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (5)$$

(5) B_{100p} 수명

$$B_{100p} = \theta \cdot [\ln(1-p)]^{\frac{1}{\beta}} \quad (6)$$

4.2 수명-스트레스 관계 모형

수명-스트레스 관계 모형은 여러 개의 스트레스를 인가하는 복합 가속수명시험 분석에 폭넓게 응용이 가능하도록 일반화시킨 GLL(General Log-Linear) 모형을 사용한다. GLL 모형은 스트레스의 종류에 따라 Arrhenius 모형, Inverse Power Law(IPL) 모형 등이 결합된 복합모형으로 변환이 가능하다.

4.2.1 GLL 모형

GLL 모형에서 수명은 n 개의 스트레스 $X=\{X_1,$

$X_2, \dots, X_n\}$ 에 대한 지수함수 형태로 다음과 같이 표현 된다.⁽³⁾

$$L(X) = e^{\left(\alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i\right)} \quad (7)$$

여기에서 α_0, α_i 는 상수로 모형 파라메타이다.

4.2.2 압력-부하 복합가속 모형

본 논문에서는 사용부하(W)와 작동압력(P) 2개의 스트레스(가속인자)에 대한 복합 가속수명시험을 수행한다.

압력과 부하에 대한 수명-스트레스 관계는 각각 역누승(Inverse power law) 관계를 따른다고 가정하고 부하를 $X_1 = \ln(W)$ 로 압력을 $X_2 = \ln(P)$ 로 대수 변환하여 수식 (7)에 대입하면, 다음과 같이 GLL 모형을 압력-부하 복합가속 모형 식으로 변환이 가능하다.⁽³⁾

$$L(W, P) = e^{[\alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln(W) + \alpha_2 \cdot \ln(P)]} \\ = e^{\alpha_0} \cdot W^{\alpha_1} \cdot P^{\alpha_2} \quad (8)$$

여기서 $L(W, P)$ 는 와이블 분포의 특성수명(θ)이다.

수식 (8)에서 $e^{\alpha_0} = K$, $\alpha_1 = -m$, $\alpha_2 = -l$ 을 대입하면 압력과 부하에 대한 IPL 모형이 2개 결합된 형태의 복합가속 모형으로 변환이 된다.

$$L(W, P) = K \cdot \frac{1}{W^m} \cdot \frac{1}{P^l} \quad (9)$$

따라서 가속수명시험의 최종목표는 가속모형을 이용하여 수명분포를 찾고, 수식 (9) 가속모형의 모수인 m 과 l 을 추정하여 가속계수를 산출하는 것이다.

4.2.3 가속계수

수식 (9)를 이용하여 압력-부하 복합가속 모형의 가속계수(AF) 식을 산출한다.

$$AF = \frac{L_{field}}{L_{test}} = \frac{L(W_{field}, P_{field})}{L(W_{test}, P_{test})} \\ = \left(\frac{W_{test}}{W_{field}}\right)^m \cdot \left(\frac{P_{test}}{P_{field}}\right)^l \quad (10)$$

Table 4 Accelerated life test data

시료	가속수명시험 조건($\times 10^5$ 사이클)					
	1.9	1.9	1.9	5	10	
	kg	1.9	1.9	5	10	
	bar	6.3	8	12	6.3	
1		223.1	185.3	116.5	48.1	8.2
2		245.0	224.2	120.9	59.5	9.4
3		255.1	234.3	162.3	61.8	10.4
4		290.4	237.8	187.6	64.8	13.9
5		314.9	276.3	190.3	70.6	16.6
6		318.6	280.5	204.2	81.5	17.1
7		373.9	297.5	212.3	117.4	18.4
8		398.1	308.8	225.6	120.8	19.1

5. 가속수명시험 결과분석

5.1 가속수명시험 데이터

앞장에서 2원배치법으로 설계한 시험조건과 시험순서를 바탕으로 Table 4와 같은 수명 데이터를 얻었다.

가속수명시험은 Fig. 2와 같은 장비를 구축하여, 공기압 실린더의 헤드 측과 로드 측에 시험압력(6.3bar, 8bar, 12bar)을 교대로 인가하고, 로드 측에 중량물(1.9kg, 5kg, 10 kg)을 부착하여 최대 스트로크(Stroke) 까지 왕복하는 것을 1사이클로 시험을 수행하였다.



Fig. 2 Test equipment for pneumatic cylinder

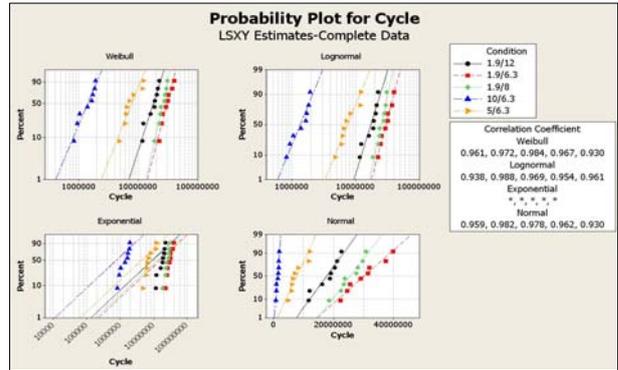


Fig. 3 Goodness-of-fit test of life distribution

5.2 가속수명시험 데이터 분석 결과

5.2.1 수명분포의 적합성 검증

수명 데이터의 수명분포를 추정하기 위하여 와이블분포(Weibull distribution), 대수정규분포(Lognormal distribution), 지수분포(Exponential distribution), 정규분포(Normal distribution) 4개의 대표적인 수명분포에 대하여 MINITAB 통계분석 소프트웨어를 이용하여 Fig. 3과 같이 적합도 검정을 수행하였다. 분석 결과 분포의 적합성을 나타내는 상관계수(Correlation coefficient) 값이 1(직선)에 가까울수록 수명분포로 적합함을 나타내므로, 본 논문의 수명 데이터의 수명분포는 와이블 분포로 결정하였다.

5.2.2 시험조건 가속성 성립 확인

가속수명시험 조건 설계 및 시험의 타당성을 확인하기 위해서는 시험 데이터의 가속관계 성립 여부 확인이 매우 중요하다. 따라서 Fig. 4와 같이 시험 조건별 수명데이터를 와이블 확률지에 타점하여 적합한 직선들의 기울기가 유사한지 확인하는 도시적 방법과 직선의 기울기를 의미하는 형상모수의 동일성을 검증하는 가설검정 방법을 사용하였다. 분석결과 Fig. 4에 나타나는 것과 같이 그래프의 기울기가 유사하고, 동일성 검증도 신뢰수준 95%에서 P-Value 값이 유의수준 0.05 보다도 큰 값을 가지므로, 각각의 시험조건에서 형상모수가 동일하다고 볼 수 있고 가속성이 성립된다고 할 수 있다.

Table 5 Test for equality of shape parameters

Chi-Square	Degree of freedom	P-Value
2.85219	4	0.583

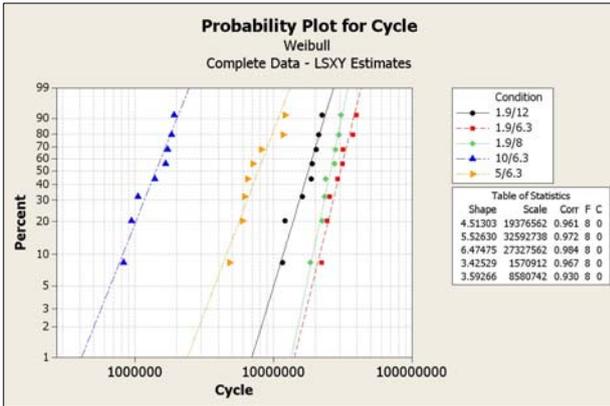


Fig. 4 Accelerated relation analysis

5.2.3 가속모형 모수 분석

위의 분석 결과를 통하여 가속성이 성립함으로 ALTA 신뢰성 소프트웨어를 이용하여 동일한 형상모수 $\beta=3.3654$ 를 추정하고, 각각의 시험조건에 대해 Fig. 5와 같이 와이블 확률지에 도시하였다.

또한 GLL 모형을 이용하여 수명-스트레스 관계를 분석하고, 사용수준에서의 수명 및 가속모형을 추정하였다. Fig. 6은 사용부하(W)에 대한 수명-스트레스 관계 분석결과로 기울기가 가속모형의 모수를 나타내고 있으며 모수 추정값은 $m=1.6986$ 이다. Fig. 7은 작동압력(P)으로 $l=1.0559$ 이다. 따라서 수명분포 및 GLL 모형의 모수는 Table 6과 같이 추정된다.

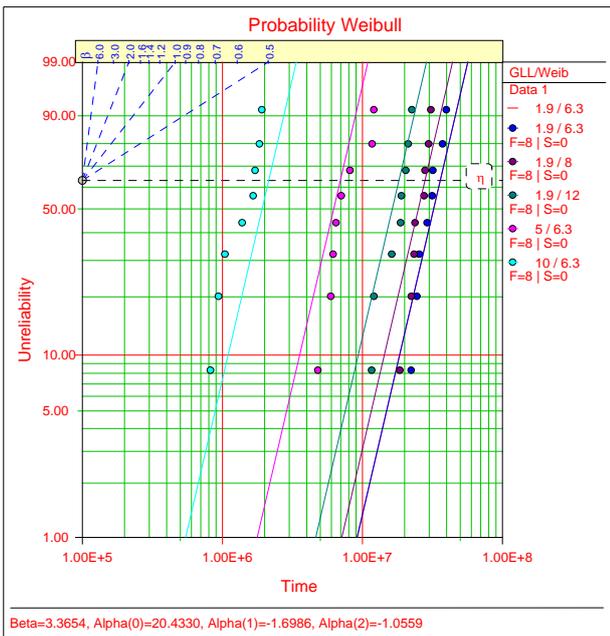


Fig. 5 Typical probability plot for five different test conditions

Table 6 Parameter estimation

구분	추정치	95% Normal CL	
		하한	상한
형상모수(β)	3.3654	2.6878	4.2138
$m = -\alpha_1$	1.6986	1.4773	1.92
$l = -\alpha_2$	1.0559	0.589	1.5227

$$AF = \left(\frac{W_{test}}{W_{field}} \right)^m \cdot \left(\frac{P_{test}}{P_{field}} \right)^l$$

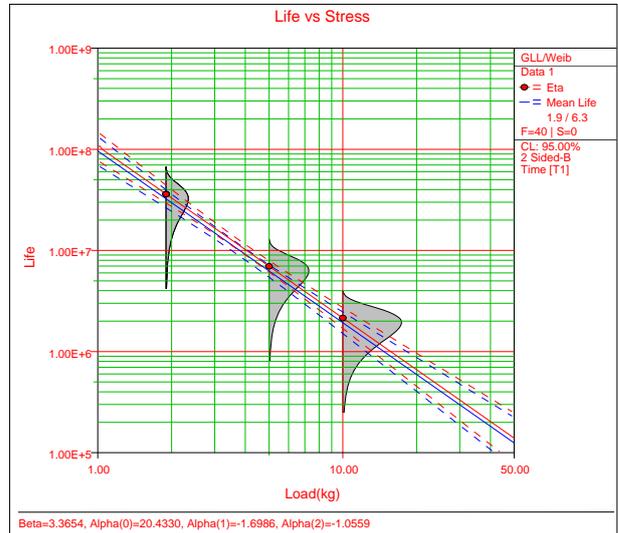


Fig. 6 Life-load relationship plot at fixed pressure

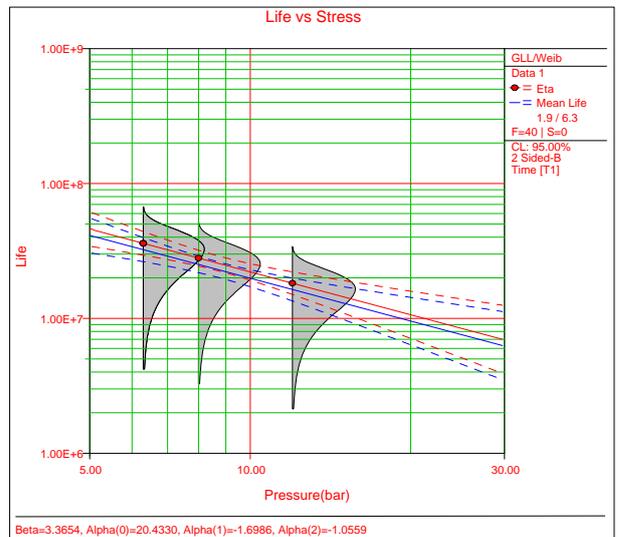


Fig. 7 Life-pressure relationship plot at fixed load

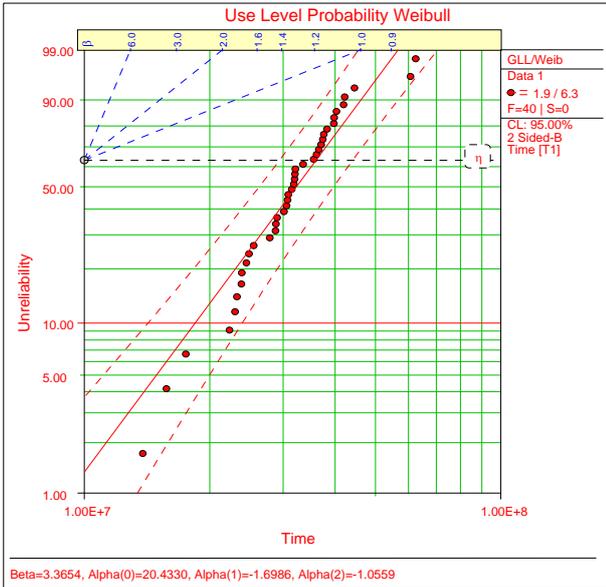


Fig. 8 Weibull probability plot at the use conditions

5.2.4 사용수준의 수명 및 가속계수 도출

수명-스트레스 모델을 통하여 각각의 시험조건에서의 시험 데이터를 Fig. 8과 같이 사용조건 (1.9kg, 6.3bar)으로 변환하고, 사용조건에서의 수명 예측 및 가속 계수를 도출하였다.

사용조건에서 공기압 실린더의 수명 형상모수가 3.3654인 와이بل분포를 따르고, 척도모수(θ)가 3.6×10^7 사이클, 평균수명이 3.23×10^7 사이클, B₁₀ 수명이 1.85×10^7 사이클이다. 또한 시험조건별 가속 계수는 $1.9\text{kg}/8\text{bar} = 1.29$, $1.9\text{kg}/12\text{bar} = 1.97$, $5\text{kg}/6.3\text{bar} = 5.17$, $10\text{kg}/6.3\text{bar} = 16.79$ 로, 작동압력보다는 사용부하가 가속이 더 크다.

6. 결론

본 논문은 이원배치법을 이용하여 시험 조건을 설계하고, GLL 모델을 이용하여 복합 가속수명 데이터를 분석하는 방법에 대하여 제안하였다.

공기압 실린더의 주고장 모드인 누설에 가장 영향을 많이 주는 사용부하와 작동압력을 가속인자로 선정하고, 각각의 인자별 3수준에 대해 이원배치법을 이용하여 복합 가속수명시험 조건을 설계하였다. 또한 시험의 효율을 높이기 위해 신뢰성 척도를 추정하기 위한 최소한의 시험 조건인 1단계(5개 시험조건)와 이의 검증을 위한 2단계(4개 시험조건)로 나누워 시험을 진행하였다.

Table 7 Reliability measure of pneumatic cylinder

구분	신뢰성 척도	추정치	95% Normal CL	
			하한	상한
사용수준수명분포	형상모수(β)	3.3654	2.6878	4.2138
	평균수명	3.23×10^7	2.63×10^7	3.97×10^7
	B ₁₀ 수명	1.85×10^7	1.42×10^7	2.39×10^7
가속모형모수	$m = -\alpha_1$	1.6986	1.4773	1.92
	$l = -\alpha_2$	1.0559	0.589	1.5227

시험 데이터에 대한 분석은 수명분포로 와이블 분포를 채택하고, 가속 모형은 GLL 모형을 이용하였다. 그 결과 Table 7과 같이 와이블분포 형상모수는 3.3654, 가속모형에서 사용부하에 대한 모수는 1.6986, 사용압력에 대한 모수는 1.0559 등의 신뢰성 척도를 얻었다.

이 분석결과를 사업계에서 응용하면, 공기압 실린더의 수명시험 시간 및 시험평가 비용이 많이 감소될 것으로 기대된다.

추후 2단계의 시험이 완료되면, 본 논문을 통하여 도출된 신뢰성 척도의 검증 방법 및 과정을 소개할 계획이다.

참고문헌

- (1) Gary S. Wasserman, 2003, "Reliability Verification, Testing, and Analysis in Engineering Design", Marcel Dekker, Inc.
- (2) Wayne Nelson, 1990, "Accelerated Testing; Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses", John Wiley&Sons, LTD.
- (3) ReliaSoft Corporation, 2007, Accelerated Life Testing Reference", ReliaSoft Publishing, pp 163~195, 269~277
- (4) Patrick D. T. O'connor, 2003, "Practical Reliability Engineering", John Wiley&Sons, LTD.
- (5) 서순근, 2002, "MINITAB 신뢰성 분석", 이레테크, pp 219~255
- (6) 김윤광 외 13인, 2005, "신뢰성 용어 해설서", 산업자원부 기술표준원