

부품의 수명 데이터를 이용한 승강기의 신뢰성 평가 Reliability Assessment of Elevators Using Life Data of the Components

손상훈 · 손혜정 · 김선진 · 양보석 · 윤문철

S. H. Sohn, H. J. Sohn, S. J. Kim, B. S. Yang and M. C. Yoon

(접수일 : 2010년 7월 29일, 수정일 : 2010년 11월 2일, 채택확정 : 2010년 11월 10일)

Key Words : Elevators(승강기), Life Cycle(수명), Stochastic Nature(확률론적 본성), Reliability Assessment (신뢰성 평가), Weibull Distribution(와이블 분포)

Abstract : Engineering asset management (EAM) requires the accurate assessment of current and the prediction of future asset health condition. Suitable mathematical models that are capable of predicting time-to-failure and the probability of failure in future time are essential. In general reliability models, lifetime of component and system is estimated using failure time data. This paper deals with the reliability assessment of elevators using life of main components. Especially this work is concerned with the stochastic nature of life of elevator components. First, we investigate the Weibull statistical analysis of lifetime data for the components. The final goal is to establish the mathematical model for reliability assessment. This work provides more perspectives to future research in the fields of reliability and maintainability.

1. 서 론

승강기란 일반적으로 건축물, 기타 공작물에 부착되어 일정한 승강로를 통하여 사람이나 화물을 운반하는데 사용되는 다중 이용 시설로서 엘리베이터, 에스컬레이터 등 산업자원부령으로 정하는 것을 말한다. 우리나라의 승강기는 1970년대부터 본격적으로 보급되기 시작하여 신도시 개발과 국가산업의 발전과 더불어 급속히 보급되어 승강기 보유대수는 세계 8위 수준에 이르고 있다¹⁾.

승강기는 현대사회에서 자동차 이상으로 중요한 필수 교통수단으로 인식되고 있으며 한국승강기안전관리원의 통계자료²⁾에 의하면 우리나라는 2009년 말 기준으로 404,000여대가 설치되어 운영되고 있으며, 매년 26,000여대씩 증가되고 있다.

이러한 승강기는 이용자의 편익을 증진시켜 주는 반면, 고장 발생 시에는 인명사고와 같은 중차대한 문제를 야기할 수 있으므로 무엇보다도 높은 안전

성 및 신뢰성이 요구된다고 할 수 있다³⁾.

따라서 안전과 직결된 부품의 수명인자와 요인을 파악하고 예상 수명을 평가하는 방법의 개발이 요구된다. 일반적으로 승강기 및 부품의 수명은 설계 단계, 품질 및 제조방법 등에 따라 많은 차이가 날 수 있으며, 또한 사용 환경 조건의 변화에 의하여 그 수명에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이러한 관점에서 시스템 전체의 안전성을 확보하기 위한 신뢰성 평가를 위해서는 시스템을 구성하고 있는 주요 부품의 수명 평가와 더불어 신뢰성의 배분 문제 등 여러 가지 인자를 고려한 평가가 필요하다.

국내에서도 최근 승강기 시스템의 안전성(safety)이나 신뢰성 확보에 관한 요구가 일층 증가하고 있으며, 그 사용 환경이나 사용빈도도 가혹하게 되고 있다^{3)~7)}. 시스템에 작용하는 외력이나 사용되는 부재의 강도도 결정론적으로 주어지는 경우는 적고 일반적으로 고유의 변동을 가지고 있다. 따라서 시스템의 안전성이나 신뢰성 해석에 있어서 외력이나 부재의 강도에 대한 분포 특성을 정량적으로 파악하는 것이 기본적으로 중요하다.

이와 같이 기계적 부품의 수명은 확률적 본성을 나타내는 것으로써 안전성이나 공업자산관리 측면

김선진(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과
E-mail : sjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6163
손상훈, 손혜정 : 부경대학교 대학원
양보석, 윤문철 : 부경대학교 기계자동차공학과

에서도 정확한 수명의 신뢰성 평가를 하기 위해서는 무엇보다도 확률론적 수학적 모델링의 정립이 중요한 과제 중의 하나이다⁸⁾.

이상과 같은 관점에서, 본 연구에서는 승강기 부품의 제조회사의 수명 데이터를 이용하여⁹⁾ 시스템(승강기)의 신뢰성 평가 방법론을 개발하는 것이 목적이다. 부품의 수명 데이터의 확률적 본성에 초점을 두어 먼저 주요 부품에 대한 와이블 통계 해석(Weibull statistical analysis)을 행하여 수명을 결정하였으며, 시스템(승강기) 수명에 대한 주요 부품의 기능적 수명과의 관계를 모델링하여 시스템의 안전성 및 신뢰성 향상을 위한 예방정비, 부품교체 및 수리 등의 유지관리에 기여하고자 한다.

2. 수명 데이터 및 와이블 통계 해석

2.1 수명 데이터

본 연구에서 이용한 승강기 부품의 수명 데이터는 한국승강기안전기술원⁹⁾이 공표한 제조회사의 설문조사에 기초한 부품 중 Table 1에 나타난 10개의 부품에 대하여 수명 데이터의 와이블 통계해석을 수행하여 시스템(승강기)의 신뢰성 평가 방법론을 개발하고자 하였다.

Table 1 Components of elevators used in this study

Component	Number of data	Identification
Hoisting (Main) Rope	5	C1
Motor	5	C2
Sheave	5	C3
Brake	5	C4
Vibration-proof rubber	5	C5
Guide Shoe	5	C6
Traction Machine Bearing	5	C7
Door Safety Shoe	5	C8
Door Spring Closer	5	C9
Limit switch	5	C10

2.2 와이블 통계 해석

와이블 분포는 다음과 같은 확률분포함수를 가지는 분포이다¹⁰⁾.

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^\alpha\right] \quad (1)$$

여기서, α 는 분포의 형상을 나타내는 형상계수

(shape parameter)이며, β 는 특수한 수명을 나타내는 척도계수(scale parameter)이며 그리고 γ 는 최소 수명을 의미하는 위치계수(location parameter)이다.

본 연구에서는 데이터의 수 등을 고려하여 $\gamma=0$ 인 2-파라미터 와이블 분포에 대하여 고려하기로 한다. 이 때 그 확률밀도함수는 아래와 같이 주어진다.

$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left\{ \left(\frac{t}{\beta} \right)^{\alpha-1} \right\} \exp\left\{ -\left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right\} \quad (2)$$

또한 이 분포의 신뢰도 함수 $R(t)$ 와 고장을 함수 $\lambda(t)$ 는 각각 아래 식으로 표현된다.

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (3)$$

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta} \right)^{\alpha-1} \quad (4)$$

Weibull 함수의 평균수명(MT)은 다음과 같이 주어진다.

$$MT = \beta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right) \quad (5)$$

여기서, $\Gamma(-)$ 는 감마함수(gamma function)이다. 그리고, 특정 신뢰도에서 부품이 성공적으로 기능을 유지할 와이블 신뢰 수명 (Weibull Reliable Life, WRL) T_R 은 다음과 같이 주어진다.

$$T_R = \beta \cdot \{-\ln[R(T_R)]\}^{\frac{1}{\alpha}} \quad (6)$$

이상과 같은 Weibull 분포의 통계적 특성을 이용하여 승강기 부품의 수명을 평가하였다.

3. 수명 평가 결과 및 고찰

일례로 Fig. 1은 C1(주로프)에 대한 수명 데이터를 2-파라미터 와이블 확률지에 플롯트한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 승강기 부품의 수명 데이터는 비교적 2-파라미터 와이블 분포에 잘 따름을 알 수 있었다. 2-파라미터 와이블 분포 함수의 통계적 특성을 이용하여 승강기의 수명평가를 행한 결과를 Table 2에 나타내었다. 이후부터는 편의상 각 부품의 인식번호(identification)를 이용하여 C1에서 C10까지 넘버링 하여 표기하도록 한다.

형상계수 값을 보면 C1, C3, C9은 그 외의 부품들에 비해 산포가 적다고 볼 수 있다. α 의 영향을 명확히 고찰하기 위하여, 최소치 1.50과 최대치 3.92를 고려하여 α 를 다음의 3그룹으로 나누어 해석하

였다.

- (a) $\alpha \in [1.01 \sim 1.99]$
- (b) $\alpha \in [2.01 \sim 2.99]$
- (c) $\alpha \in [3.01 \sim 3.99]$

(a) 그룹의 부품에는 C2(전동기), C5(방진고무), C6(가이드 슈), C7(권상기 베어링), C8(도어 세이프티 슈) 그리고 C10(리미트 스위치)가 해당되었고, 조사된 부품 중 상대적으로 비교적 수명의 변동이 큰 부품으로 판단된다. (b) 그룹의 부품에는 C4(브레이크)와 C9(도어 스프링 클로저)가 해당되었고, (c) 그룹의 영역에는 C1(주로프) 및 C3(도르래)가 해당되었다. (b) 그룹의 부품에는 브레이크와 도어 스프링 클로저가 해당되었고, (c) 그룹의 영역에는 주로프가 해당되었다.

본 연구에서 조사된 승강기 부품의 수명에 대한 변동성의 영향을 좀 더 고찰하기 위하여 분포의 형상 파라미터 값의 평균치 정도를 보이는 C4(브레이크) 부품을 기준으로 평균화한 결과를 Fig. 2에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 C1(주로프), C3(도르래) 그리고 C9(도어 스프링 클로저)순으로 높게 나타났으며, 나머지 부품은 모두 브레이크 부품보다 낮게 나타났다. 즉 주로프의 수명의 변동이 가장 적게 나타났으며, 도어 세이프티 슈의 수명의 변동이 가장 크게 나타났다. 이상과 같은 분포의 형상 파라미터의 고찰로부터 부품의 수명에 대한 변동성의 고찰이 가능하다.

한편 분포의 척도 파라미터 β 값을 통해서도 확률이 63.2%일 때의 특성수명 값을 알 수 있다. 그러나 특성수명 β 값은 절대적이지 않다. Table 2에 식(5)에 의해 구한 평균수명 MT도 함께 나타내었다. 총 5개의 승강기 부품 제조회사로부터의 평균값에 대한 수명 평가의 결과이므로 타 회사와 비교했을 때 부품의 설계, 제작, 그리고 동일 부품이라 할지라도 사용 환경 등에 따라 평균 수명이 달라질 수 있기 때문이다. 따라서 평균과 분산뿐만 아니라 분포의 특성을 고려할 필요가 있다고 판단된다.

승강기 부품의 특성 수명을 기준으로 살펴보면 전동기, 브레이크, 방진고무, 권상기 베어링, 도어 세이프티 슈, 그리고 리미트 스위치 등이 10년 이상의 수명을 보였으며, 주로프, 도르래, 가이드 슈 등은 약 5년 정도의 수명을 보였다. 이는 타의 조사 결과와도 유사하다⁶⁾.

한편, Fig. 3은 산술평균(AM)과 와이블 분포 합

Table 2 The estimated Weibull parameters

Identification (Component)	shape parameter α	scale parameter β [year]	MT [year]
C1	3.9182	4.7878	4.33
C2	1.7698	18.3901	16.37
C3	3.1196	4.8805	4.37
C4	2.3982	18.5091	16.41
C5	1.8452	11.7355	10.42
C6	1.6411	5.9576	5.33
C7	1.5379	10.0005	9.00
C8	1.4974	15.2892	13.8
C9	2.4623	9.4163	8.35
C10	1.6583	11.0527	9.88

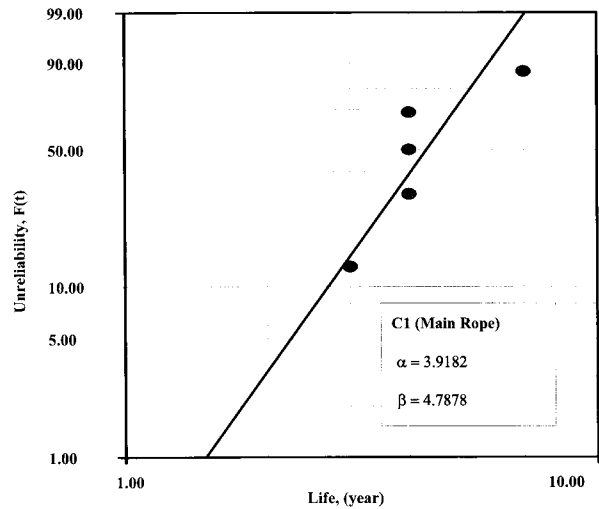


Fig. 1 2-parameter Weibull plot of life for C1

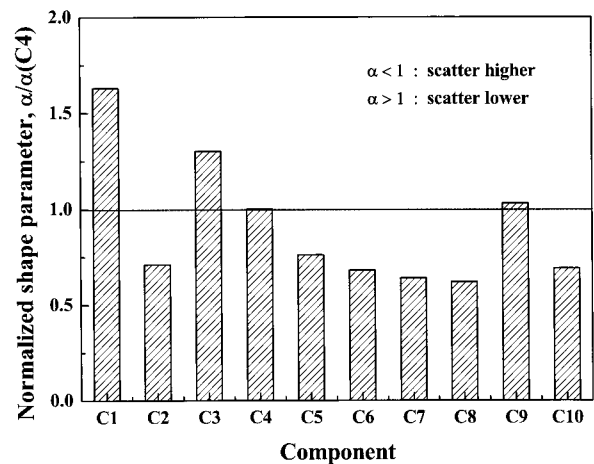


Fig. 2 Comparison of normalized shape parameter on the components

수에 의한 평균(MT)의 값을 비교한 결과를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 산술평균(AM)과 와이블 밀도 함수에 의한 평균(MT)의 값이 거의 동일하므로 수명 데이터가 2-파라미터 와이블 분포에 적합하여 평가하여도 본 조사에 의한 결과치에는 무리가 없을 것으로 판단된다. 그러나 방진고무(C5)와 리미트 스위치(C10)에서는 비교적 큰 차이를 보였다. 이는 제조회사별 평균 수명이 많은 차이가 난 것에 기인한 결과라 사료된다. 이것은 표준편차를 나타낸 Fig. 4에서 확인할 수 있다. 부품 중 표준편차가 첫 번째로 큰 C10과 두 번째로 큰 C5가 Fig. 3의 AM과 MT를 비교했을 때 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 신뢰도(R)가 0.90 및 0.95일 때의 각 부품에 대한 식(6)의 와이블 신뢰 수명(WRL) T_R 을 구하여 정리한 것이다. 각각의 부품에 대한 특정 신뢰도를 고려한 신뢰 수명을 예측하는 것이 가능하

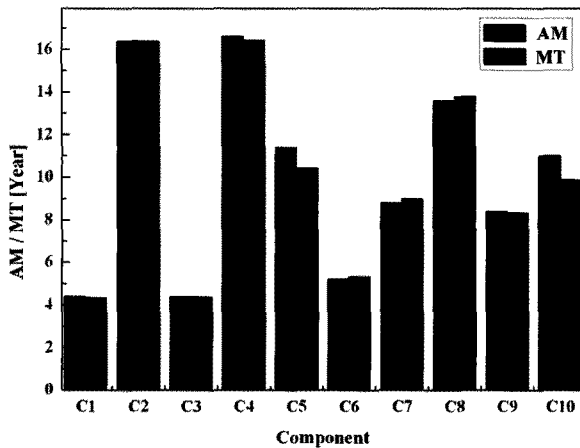


Fig. 3 Arithmetic mean (AM) vs. mean lifetime (MT)

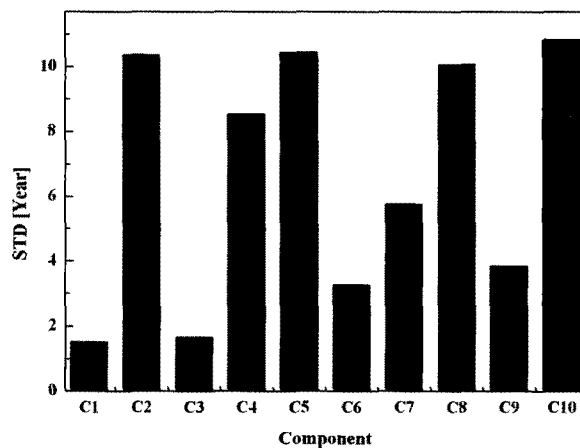


Fig. 4 Standard deviation of the component

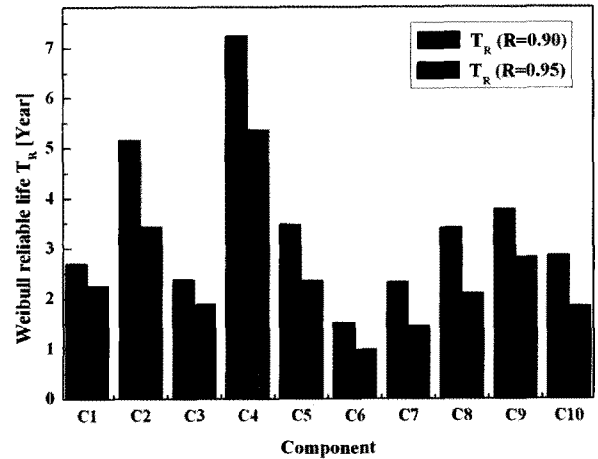


Fig. 4 Comparison of Weibull reliable life, TR for component

다. 신뢰도를 고려한 신뢰수명의 평가 결과는 브레이크, 전동기 그리고 도어 스프링 클로저의 순으로 나타났다. Table 3에 상기의 와이블 신뢰수명 값을 나타내었다.

이상과 같은 부품의 수명 평가법은 승강기 사고 예방을 위한 안전성 및 신뢰성 향상을 위한 주요 부품의 신뢰수명 평가, 교체주기나 유지보수 등의 보전 활동에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3 Weibull reliability life (T_R) at R=0.90 and R=0.95

Component	T_R (R=0.90)	T_R (R=0.95)
C1	2.6959	2.2435
C2	5.1566	3.4334
C3	2.3724	1.8835
C4	7.2421	5.3642
C5	3.4661	2.3465
C6	1.5120	0.9751
C7	2.3149	1.4496
C8	3.4018	2.1034
C9	3.7754	2.8184
C10	2.8452	1.8433

4. 신뢰성 평가 모델링 및 적용

4.1 시스템(승강기)의 수명

승강기의 설계수명은 국내에서 평균적으로 약 18년으로 설계 제작되고 있으며, 실제 수명은 설치 이

후 사용 환경, 보수 유지 관리의 질 등에 따라 그보다 연장되거나 혹은 단축 될 수도 있다. 그러나 본 연구에서는 하나의 방법론적 평가 모델을 제안하고자 하는 것으로서 이러한 환경적인 변동은 배제하고, 평균적인 설계 수명인 18년으로 고려한다.

4.2 부품의 수명 사이클 예측

시스템(승강기)의 수명을 사용 부품에 대한 과거의 수명 데이터의 신뢰성 해석으로부터 구한 어떤 특정의 수명으로 나누어주면 간단한 수명 사이클의 수가 나오고, 여기에 사용 부품에 대한 사용조건, 즉 동작 스트레스에 대한 수정계수(correlation factor) κ 를 정의한다. 이를 통해 시스템과 부품과의 관계에 대한 부품의 수명 사이클에 관한 신뢰성 평가 모델링을 아래와 같이 정의하였다.

$$N_{LC} = \kappa \frac{L_P}{L_C} \tag{7}$$

N_{LC} = 부품의 총 수명 사이클(life cycle) 수

L_P = 시스템 혹은 제품의 수명

L_C = 부품의 수명

κ = 수정계수 ($0 < \kappa \leq 1$)

단, 본보에서는 κ 를 1로 가정한다. 이것의 정의에는 향후 더 많은 고찰이 요구된다.

시스템(제품)의 수명 사이클의 각 구간에 부품의 수명 사이클을 대입하여 부품에 따른 제품의 총 수명 사이클을 평가하는 것이 가능하다. 이때, 부품의 수명은 앞장의 신뢰성 평가에서 구한 와이블 평균 수명, MT나 특정의 신뢰도에 의한 T_R 를 가지고 수명 사이클의 신뢰성 평가를 행한다.

4.3 적용 예

Table 4는 제품에 대한 부품의 수명 사이클 수를 나타낸다. 일례로 Fig. 4에 C1의 경우에 대한 총 수명 사이클 수의 개념도를 $N_{LC}(MT)$ 의 기준으로 나타내었다. 평균수명(MT)를 기준으로 총 사이클 수는 4.16으로 시스템의 수명 18년에 대하여 약 4번의 수명 사이클을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 신뢰도 90%와 95%를 기준으로 할 때 총 수명 사이클 수는 각각 1.6배, 1.9배로 증가함을 알 수 있다.

이상과 같이 승강기 부품에 대한 정확한 수명 데이터의 획득이 가능하다면 확률론적 본성에 기초한 와이블 통계 해석을 통하여 승강기(혹은 시스템이나 장치)안전성 및 신뢰성 향상을 위한 부품의 교체

Table 4 The estimated total number of life cycle for component

Component	N_{LC} (MT)	N_{LC} ($T_{R=0.90}$)	N_{LC} ($T_{R=0.95}$)
C1	4.16	6.68	8.02
C2	1.10	3.49	5.24
C3	4.12	7.59	9.56
C4	1.10	2.49	3.36
C5	1.73	5.19	7.67
C6	3.38	11.90	18.46
C7	2.00	7.78	12.42
C8	1.30	5.29	8.56
C9	2.16	4.77	6.39
C10	1.82	6.33	9.77

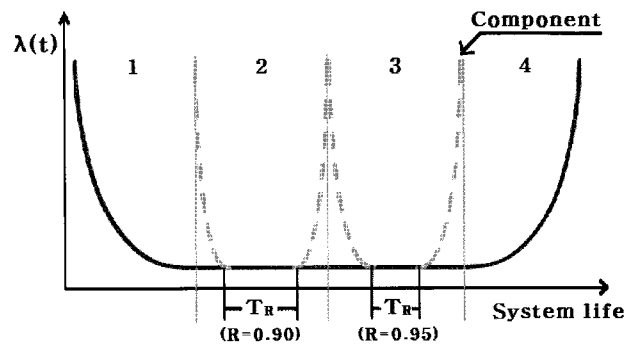


Fig. 5 Schematic diagram of total number of life time cycle for the components

주기나 유지 보수, 점검 등에 활용 가능하리라 판단된다. 그러나 본 연구에서 해석한 결과는 제조회사의 설문조사에 의한 것으로써 실제 승강기(시스템)의 사용환경이나 사용빈도 등과 같은 상황을 고려할 때는 다른 결과가 나타날 가능성이 충분히 존재할 것이므로 해석 결과의 활용에 주의를 요한다고 할 수 있다.

5. 결론

시스템(승강기)의 신뢰성 평가 방법론을 개발하기 위한 기초적 연구로, 부품의 수명 데이터의 확률론적 본성에 초점을 두어 먼저 주요 부품에 대한 수명의 와이블 통계 해석을 수행하고, 시스템(승강기) 수명에 대한 주요 부품의 기능적 수명과의 관계를 모델링하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 승강기 부품의 수명 데이터는 비교적 2-파라미터 와이블 분포에 잘 따름을 알 수 있었다.

(2) 파라미터 α 및 β 값을 이용하여 부품의 통계 해석이 가능하며, 특정한 신뢰도에서 부품이 성공적으로 기능을 유지 할 수 있는 와이블 신뢰수명을 평가할 수 있었다.

(3) 시스템과 부품과의 관계에 대한 부품의 수명 사이클에 관한 신뢰성 평가 모델링을 제안 하였다.

이상의 결론을 종합하면, 승강기 부품에 대한 정확한 수명 데이터의 획득이 가능하다면 확실적인 본성에 기초한 와이블 통계 해석을 통하여 본 연구에서 제안한 신뢰성 평가 모델을 이용하여 승강기의 안전성 및 신뢰성 향상을 위한 부품의 신뢰수명 평가, 교체주기 및 유지보수 등에 활용가능하리라 사료된다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과의 일부로 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 김봉찬, 최경현, 2010, “승강기 부품의 내구연한에 관한 연구”, 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 259~260.
2. 한국승강기안전관리원 홈페이지, “http://kesi.or.kr/”
3. 이수종의 5명, 2007, “승강기용 웹기어의 결합에 따른 진동 특성”, 한국동력기계공학회지, 제11권, 제4호, pp. 65~71.
4. 한국기계연구소, 1991, “승강기 안전성 평가기술 개발, 과학기술처
5. 우창수, 박현성, 2007, “승강기용 방진고무부품 특성 및 사용수명 평가”, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 576~580.
6. 산업기술시험원, 2004, “승강기 주요부품 내구연한 조사연구 보고서”, 대한주택공사
7. 기술표준원, 2002, “승강기 안전부품 수명평가 방법에 관한 연구”, 기술표준원
8. Mazhar, M. I., Salman, M. and Howard I., 2009, “Assessing the reliability of system Modules used in Multiple Life Cycles”, Proc.

of 4th WCEAM, pp. 251~258

9. 한국승강기안전기술원 홈페이지, “http://kest.or.kr”
10. Weibull, W., 1951, “A Statistical Distribution Function of Wide Applicability”, Journal of Applied Mechanics, Vol. 18, pp. 293~297.