

고속철도차량용 견인 인버터 커패시터의 가속수명 예측

맹희영^{a*}, 정시교^b

Acceleration Life Prediction of the Capacitor on a Traction Inverter for a High-Speed Train

Heeyoung Maeng^{a*}, Si-Kyo Jung^b^a Department of Mechanical System Design Eng., Seoul National University of Science and Technology,
232, Gongreung-ro, Seoul 01811, Korea^b Department of Rolling Stock System Engineering, Graduate School of Railroad, Seoul National University of Science and Technology,
232, Gongreung-ro, Seoul 01811, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 November 2015
Revised 6 December 2015
Accepted 8 December 2015

Keywords:

High-speed train
Capacitor on a traction inverter
Acceleration life test
Life and exchange period prediction
Life-shortening acceleration effect
Efficiency of maintenance

ABSTRACT

The aim of this study is to develop a technique for the accelerated life test of the capacitor in a propulsion control device of a traction inverter used for a high-speed train. Using this technique, the accelerated life test can possibly estimate the life cycle of a capacitor under various temperature conditions and irregularly applied voltage. The accelerated life test is conducted for the capacitor of the traction inverter. The common proceedings of this test are selection of failure mechanism, determination of accelerated stress, range determination of the accelerated stress, determination of the test condition, and distribution and determination of the sample. From this result, the continuous applied voltage was not considered for the acceleration factors anymore. Therefore, the final result having an acceleration factor of 9.4 (= 13,626/1,445) was observed. Furthermore, the life-shortening acceleration effect for the irregular applied voltage condition can be applied to various situations.

1. 서론

고속철도차량은 전기-전자-기계가 복합적으로 결합된 시스템으로 기존 철도차량 시스템과는 달리 유지보수에 필요한 비용이 총 수명주기비용(LCC: life cycle cost)의 60% 정도로 높은 비중을 차지하며, 고속주행에 따른 안정성 확보 차원에서 효율적인 운영 체계와 유지보수 체계의 구축이 필요하다^[1,2].

견인 인버터는 KTX 추진제어장치의 중요한 부품으로 부품 당 단가가 높고 KTX 운행 이후 교체 횟수가 높아 추진제어장치 수명

주기비용의 상승을 초래한다. 그 때문에 견인 인버터 부품의 신뢰도를 높이는 것은 수명주기비용의 절감 효과를 가져 오는 데 큰 역할을 한다^[3]. 그리고 커패시터의 경우에는 전량 수입에 의존하고 있어 정확하게 수명을 예측하여 최적의 교체주기를 판단하는 것은 경제성 측면에서 매우 중요한 일이다.

일반적으로 철도 차량 부품의 가속수명시험에 대한 연구는 1962년에 Chernoff에 의해 시작된 이래 Singpurwalla^[4], Nelson^[5], Miller-Nelson^[6], Bai^[7] 등에 의해 단계적 스트레스의 축적에 따른 수명 예측 연구가 진행되었으며, Hobbs^[8] 등은 복합 가속시험을

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6363

Fax: +82-2-949-2407

E-mail address: maeng@seoultech.ac.kr (Heeyoung Maeng).

개발하여 시험한 것으로도 유명하다.

그러나 커패시터의 가속수명시험에 관한 연구는 아직 일반화되어 있지 못하다. 직류 링크 전해 커패시터의 수명 추정^[9]과 인버터용 전해 커패시터의 수명 추정, 고체 알루미늄 전해 커패시터의 가속수명시험^[9] 등이 있었으나, 고장 현황과 고장 원인과 연계되어 가속수명을 시험하고 예측한 경우는 아직 없는 실정이다.

따라서 본 연구는 커패시터의 경우 온도에 의한 고장이 주원인에 착안하여 가속 스트레스인 온도를 지배적인 고장 메커니즘으로 하는 가속수명시험 모델을 제안하였다. 그리고 수명-스트레스 관계에는 스트레스가 온도인 경우에 적합한 아레니우스 모형(arrhenius model)을 적용하고, 수명산정이론에는 와이블 분포를 적용하여 수명주기를 재산정하고 적정교체주기를 추정하는 새로운 방법론을 제시하였다. 또한 가속수명시험은 스트레스 조건으로 최고, 최저 사용 온도를 설정하면서 사용 전압을 지속적으로 인가하는 새로운 방법을 시도하였다.

그럼으로써 실제 고속철도차량에서 견인 인버터 커패시터가 사용 조건보다 가혹하게 되는 점을 충분히 반영한 수명 단축 가속효과 개념을 도출하였고, 이들 수명 단축 가속계수를 활용하여 보다 실질적이고 경제적인 수명을 추정하고자 하였다.

2. 견인 인버터 커패시터의 수명산정 이론

2.1 고속철도차량용 추진제어장치의 구성

고속철도차량용 추진제어장치는 모터의 회전수와 가/감속을 조절하여 열차가 알맞은 속도로 운행하도록 하는 핵심장치이다. 우리나라에서 운행되고 있는 고속철도차량에는 1편성에 전후부에 각각 동력차와 동력객차가 있으며, 고속철도차량 1편성(20량)에는 총 6 세트의 추진제어장치가 있다. 추진제어장치는 크게 컨버터(converter), 인버터(inverter), 초퍼(chopper), 제어기(controller), 송풍기(cooler), 본체(body)로 구성되어 있으며, Fig. 1의 추진제어 시스템 구성도와 같이 2대 견인 전동기의 주파수와 토크(torque)를 제어한다.

2.2 견인 인버터의 성능 및 기능

고속철도차량에 설치된 동기 전동기의 경우 컨버터 부에서 출력 전류를 제어하는데, 이때 전류형 인버터(IR-TT)는 출력전류를 일정하게 하는 역할을 하게 된다. 유로스타 또는 한국형 고속열차에는 전압형 인버터가 출력 전압을 일정하게 하는 역할을 갖기도 한다. Fig. 2는 견인 인버터의 개략도이다.

전압형 인버터는 전압원의 직류부에서 교류로 변환하는 것으로 제어성이 우수하며 동시에 전압원으로 직류 전원을 공동으로 사용

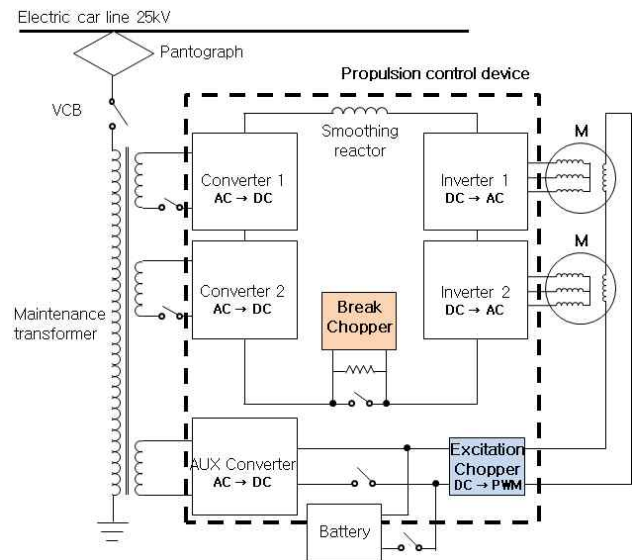


Fig. 1 System diagram of the traction inverter

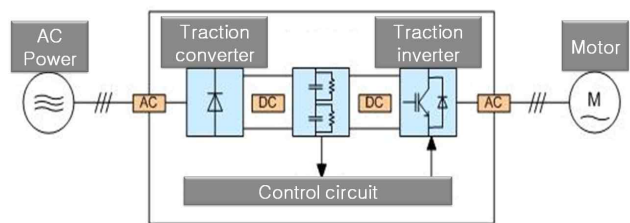


Fig. 2 Diagram of traction inverter

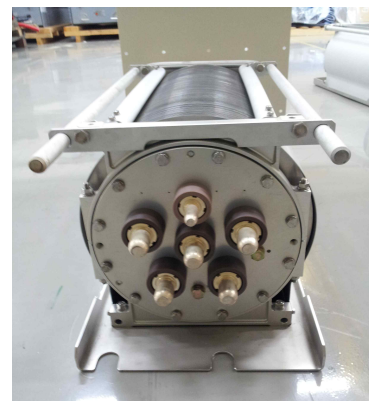


Fig. 3 The outside of traction inverter

할 수 있기 때문에 복수 인버터의 제어가 가능하여 현재 대부분 이 방식을 채용하고 있다. 한편 전류형 인버터(IR-TT)는 전류원인 직류부에서 교류로 변환하는 것으로 응답성이 우수하고 전원에 에너지를 회생할 수 있는 등 고성능 기종에 사용된다.

인버터는 추진제어장치 당 2개가 직렬로 연결되어 있으며, 각 인버터에는 견인전동기 1개가 연결되어 있다. 주행 시 역행모드에서는 직류를 교류로 변환해주는 역할을 하고, 회생 제동 모드에서는



Fig. 4 The Inside of traction inverter

Table 1 Specifications of capacitors for traction inverter

Item	Specification
Rated capacitance	0.25 μ F
Capacitance tolerance	± 10 %
Rated voltage Ura	2,100 Vca
Operating temperature	-20~+85°C
Maximum operating temperature on the case	-25~+105°C
Life time	85°C, 90,000 h
	105°C, 1,500 h

견인 전동기로부터 발생하는 교류를 직류로 변환해 주는 컨버터로서의 역할을 한다. 견인 인버터(IR-TT)의 외관은 Fig. 3과 같고 내부는 Fig. 4와 같다.

2.3 견인 인버터 커패시터

견인 인버터의 커패시터는 8개의 사이리스터에 각각 8개의 커패시터가 연결되어 있으며, 커패시터는 고속으로 스위칭 하는 소자의 온-오프(on/off) 시 발생하는 썬지 전압을 억제하기 위해 지속적으로 충-방전을 하며 직렬 회로로 구성되어 있다.

유지보수는 10년(90,000 h) 주기로 교체를 하고 있으며, 커패시터 제작 및 납품사에서 보증하는 커패시터의 수명 관련 자료에 의하면 사용온도 -20~+85°C에서 수명은 90,000 h, 최대사용온도 -25~+105°C에서 수명은 1,500 h이다. Table 1은 견인 인버터의 커패시터에 대한 사양을 나타내고 있다.

2.4 수명산정 이론의 적용

가속수명시험은 정상적인 사용조건보다 더 열악한 조건에서 시험하여 고장이 빨리 발생하도록 유도하고, 가속조건에서 얻어진 고장데이터를 이용하여 정상 사용조건에서의 신뢰성을 평가하는 방법이다. 수명산정을 위한 모형은 수명-스트레스 관계와 수명분포로 분류할 수 있다.

가속수명시험은 궁극적으로는 정상 사용조건에서의 신뢰성을 추정하고자 하는 것이며 가속조건과 정상 사용조건 사이의 가속효과를 나타내는 가속계수(AF: acceleration factor)를 구하는 것이다.

이때 가속계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{가속계수}(AF) = \frac{\text{정상사용조건에서의수명}}{\text{가속조건에서의수명}} \quad (1)$$

여기서 가속계수를 안다면 가속조건에서의 고장시간에 가속계수를 곱하여 정상 사용조건에서의 고장시간을 구할 수 있다. 가속수명시험에 사용되는 대표적인 모델들로는 아레니우스(arrhenius), 아이링(eyring), 역승(inverse power), 코핀 맨슨(coffin-manson)식 등이 있으나, 본 연구에서는 스트레스가 온도인 경우 널리 사용되는 아레니우스 모형을 적용하였다. 아레니우스 모형은 온도와 반응률의 관계식(활성화 에너지, 온도와 반응속도의 관계)에서 도출된 것과 같이 수명이 반응률의 역수에 비례한다는 내용이 골자이다. 스트레스에 의해 가속되는 수명분포의 모수를 $R(T)$ 라 할 때, 아레니우스 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$R(T) = A \exp^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (2)$$

여기서 R 은 반응속도, A 는 미지의 비열(specific heat)상수, E_a 는 활성화 에너지(activation energy)로써 단위는 eV이고, k 는 볼츠만 상수(8.671×10^{-5} eV/°C), T 는 절대온도(섭씨온도 +273.16), A 는 재료의 물성과 시험 조건에 따른 상수이다.

따라서 아레니우스 모형은 고장시간이 반응률에 반비례하는 형태로 표현되며, 아레니우스 모형을 로그 변환하면 다음과 같은 선형식으로 표현된다.

$$\ln[\tau(T)] = \ln(A) + \left(\frac{E_a}{k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T}\right) \quad (3)$$

즉, 아레니우스 모형은 $\ln[\tau(T)]$ 와 $(1/T)$ 이 선형으로 표현되는 대수선형(log-linear) 관계식으로 표현할 수 있으며, 이때 가속계수는 다음과 같다.

$$AF = \frac{\xi(T_d)}{\xi(T_a)} = \exp\left[\left(\frac{E_a}{k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_d} - \frac{1}{T_a}\right)\right] \quad (4)$$

따라서 가속계수(acceleration factor)는 다음 식과 같이 사용조건(use level)과 가속조건(accelerated level) 두 조건에서의 수명의 비율임을 알 수 있다.

$$A_F = \frac{L_{use}}{L_{accelerated}} = \exp\left[\frac{B}{V_u} - \frac{B}{V_a}\right] \quad (5)$$

한편 가속수명시험에서, 사용 조건에서의 수명(T_d)과 가속 조건에서의 수명(T_a)은 수명분포를 갖는 확률 변수이다. 본 연구에서는 수명 분포로 와이블 분포를 적용하였다. 와이블 분포는 기계 부품

의 수명을 나타내는 데 적합한 확률 분포로 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right)t^{\beta-1}\exp\left[1 - \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right], t > 0 \quad (6)$$

여기서 β 는 형상(shape) 모수, η 는 척도(scale) 모수이다. 형상 모수 β 는 분포의 모양을 결정하며, β 의 값에 따라 $\beta < 1$ 이면 감마 분포, $\beta = 1$ 이면 지수 분포, $\beta = 2$ 이면 레일리(Rayleigh) 분포, $\beta = 3.5$ 이면 정규 분포(근사적으로)가 된다. 또한 와이블 분포는 $\beta = 1$ 이면 지수 분포와 같아 $h(t)$ 가 일정하고, $\beta > 1$ 이면 $h(t)$ 가 단조 증가, $\beta < 1$ 이면 $h(t)$ 가 단조 감소한다. 즉, 와이블 분포는 고장률이 증가, 감소 또는 일정한 경우의 수명 분포로 사용될 수 있다.

3. 가속수명시험 조건 및 방법

3.1 가속수명시험 조건

가속수명시험에서 조건을 결정할 때 높은 스트레스(SH)는 고장 메커니즘이 변하지 않는 최대 스트레스 수준으로 설정하고, 낮은 스트레스(SL)는 사용 조건에서의 추정의 정확성을 높일 수 있도록 통계적으로 결정한다.

본 연구에서는 수명시험 조건을 결정할 때 다음과 같은 기본 가정을 설정하였다.

- ① 단일 스트레스의 2개 또는 3개 수준에서 일정 스트레스 가속 수명 시험을 실시하며, 시험은 τ 에서 종결된다.
- ② 수명 분포는 와이블 또는 대수 정규 분포를 따른다.
- ③ 수명-스트레스 관계는 역누승 또는 아레니우스 관계를 포함하는 대수 선형 관계를 갖고 관계식의 파라미터는 일반적으로 알려지지 않고 시험 데이터로부터 추정된다.
- ④ 사용 조건에서의 3번째 백분위수인 B3P수명을 추정한다.

2수준 최적 설계(optimum plan)는 2개의 스트레스 수준 SH와 SL을 사용하는 가속 수명 시험에서 높은 스트레스 수준(SH)이 주어지면 시험 조건은 Fig. 5와 같이 SL과 π_L 에 의하여 결정된다. 이때 사용 조건의 B100P 수명의 분산을 최소화하는 표준화된 스트레스 ξ_L (또는 SL)과 π_L 은 다음과 같이 찾을 수 있다.

우선 PD, PH에 대한 사전 추정 값을 준비하고, 수명 분포(와이블 또는 대수 정규 분포)를 선정한다. 와이블 분포와 대수 정규 분포의 최적 설계에서 해당 분포의 P, PD, PH에 대응하는 ξ_L 과 π_L 의 값을 읽는다. 표준화된 스트레스 ξ_L 를 원래 스트레스값 SL로 환산하여 낮은 스트레스 수준을 다음 식으로 결정한다(이때 전체 시료의 π_L 은 SL에, 나머지 $1 - \pi_L$ 의 비율은 SH에 배분한다).

$$\xi_L = (SL - SD)/(SH - SD) \quad (7)$$

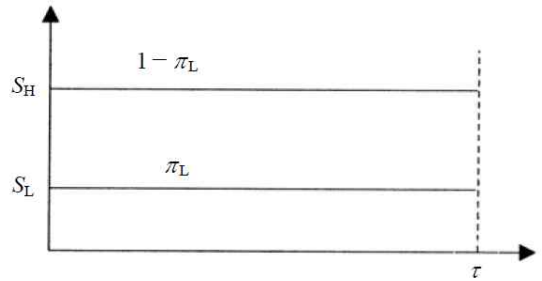


Fig. 5 Optimal distribution of the sample

Table 2 Allocation of the test samples

Items	1	2	3	4	5
Temperature (°C)	-20	+85	-25	+105	+105
Sample	-	5	5	5	5
Life time of the pecification	90,000 h	90,000 h	1,500 h	1,500 h	1,500 h
Applied voltage	2,100 V	2,100 V	2,100 V	2,100 V	2,100 V 5 sec on/off

여기서 τ 는 시험종료 시간, SD는 설계(design) 스트레스 수준, SL은 낮은(low) 스트레스 수준, SM는 중간(middle) 스트레스 수준, SH는 높은(high) 스트레스 수준이다. π_L 는 낮은 스트레스 ξ_L 에 할당된 시료의 비율, P는 사용 조건에서 추정하고자 하는 수명 분포의 누적 확률, 즉, $P=0.1$ 이면 B100P=B10 수명을 추정하는 것을 의미하고, PD는 사용 조건 SD에서 τ 이전에 고장날 확률, PH는 높은 스트레스 수준 SH에서 τ 이전에 고장날 확률을 뜻한다.

3.2 시료수의 결정 및 배분

가속 수명 시험에 필요한 총 시료 수를 결정하면, 각 시험 조건에 배분한다. 시료 수는 사용 조건에서의 평균 수명 또는 B10 수명 추정의 정확성(분산)을 기준으로 하여 결정할 수 있지만, 일반적으로 데이터 분석을 위하여 필요한 5개 이상의 시료를 Table 2와 같이 각 시험 조건에 배치하는 것으로 결정하였다.

인가 전압 조건에 따라 수명단축효과를 구하게 되면 실제 커패시터의 사용조건인 50°C에서 실험수명을 얻을 수 있고 이를 통해 실제 제품의 사용수명을 확인할 수 있다.

3.3 가속수명시험 방법

가속수명시험을 하기 위해서는 선정된 고장메커니즘 이외의 환경요인을 차단하는 것이 가장 중요하다. 본 연구에서는 항온항습기를 이용한 가속수명시험을 설계하였으며, 일정한 인가 전압을 위해서 별도의 power supply를 사용하였다.

가속수명시험을 수행하기 위해서는 ① 실험 온도를 만족하는

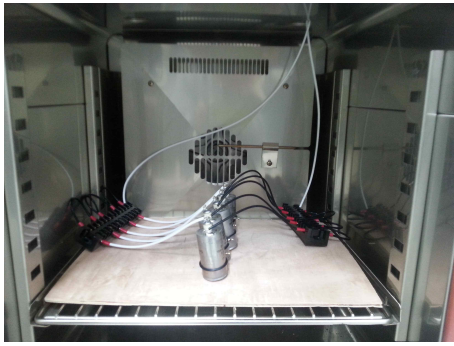


Fig. 6 Setting of the sample in chamber (at 85°C)



Fig. 7 Power supply and crossing gate

chamber, ② 2,100 V용 power supply, ③ 시험용 커패시터 시료를 Fig. 6~7과 같이 준비하였다.

그리고 가속수명시험의 순서는 ① 시료의 고정 및 결선, ② 시료 번호 marking, ③ 커패시터 초기 용량 측정, ④ 챔버 내 시료 부착, ⑤ 온도설정, ⑥ 전압인가, ⑦ 커패시터 용량변화 측정 등의 순으로 실시하였다.

4. 가속수명시험 결과 및 고찰

4.1 가속수명시험 결과 및 분석

가속수명시험은 커패시터의 용량변화 추이를 확인하기 위해서 85°C 및 -25°C에서 약 1000 시간 목표로 실시하였는 바, 시험 결과 -25°C에서 커패시터의 용량은 감소 추세이기는 하나 용량변화가 미비하여 실험을 중단하였고, 85°C에서 커패시터의 용량변화를 시뮬레이션하기 위하여 시료 11~15의 용량변화 추이를 Fig. 8과 같이 도출하였다.

시료별 용량변화 추이를 살펴보면 85°C에서 시료 11의 초기용량은 238 nF이었고 774시간 이후 236.7 nF으로 용량이 감소하였

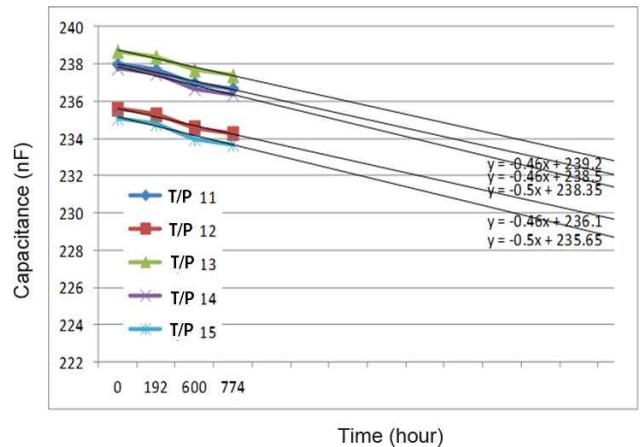


Fig. 8 Trends of change in capacitance of each sample at 85°C

고, 용량변화 추이를 분석한 결과 고장시점(초기용량의 $\pm 10\%$)인 214.2 nF이 되기까지 14,131 시간이 소요됨을 알 수 있었다. 마찬가지로 고장시점이 되기까지 소요되는 시간은 각각 시료 12의 경우 13,988 시간, 시료 13의 경우 14,172 시간, 시료 14의 경우 12,993 시간, 마지막으로 시료 15의 경우 12,846 시간이 소요되는 것으로 도출되었다. 그리고 1차 가속수명시험의 용량 변화를 통해서 85°C, 2,100 V 인가 조건에서의 수명 추정을 시뮬레이션한 결과는 기능의 문제가 발생하는 시점이 약 12,846 시간 이후에 발생하는 것으로 추정할 수 있었고, 평균수명시간은 13,626 시간으로 추정되며 이때 커패시터의 가속계수는 $6.6(=90,000 \text{ h}/13,626 \text{ h})$ 로 수명이 기존 90,000 h에서 13,626 h로 약 1/6.6로 단축됨을 알 수 있었다.

4.2 가속시험과 가속효과의 검증

가속시험의 검증을 위해서는 분포의 적합성 검증, 가속성 검증, 가속수명시험 모형 추정, 수명분포의 모수와 가속계수 추정 등이 필요하므로, 먼저 분포의 적합성을 검증하기 위하여 시험데이터를 지수분포(exponential), 와이불 분포(weibull) 등 어떤 분포에 적합한지를 비교하여 검증하였다. 그 결과 Fig. 9와 같이 와이불 분포(weibull)와의 적합성이 가장 두드러지는 것으로 판단되었다.

이때 Minitab™ 소프트웨어를 활용하여 검증한 가속수명시험 시뮬레이션 결과로는 인가 전압에 의한 가속효과와 시험 시간을 1/6.6로 줄일 수 있다는 가정 하에, 85°C에서 수명은 13,626 시간이고, 견인인버터의 사용온도인 50°C에서 커패시터의 수명은 전압 2,100 V(100% 인가) 했을 때 약 128,000 h로 예상되었으며, 이는 제품사양에 제시된 수명보다 42%나 긴 수명으로 14년 7개월에 해당하는 수명이 되었다.

한편 본 연구에서는 가속수명시험 검증을 위하여 Minitab™을 활용하여 워크시트에 시험온도, 고장시간 등 데이터를 입력하고

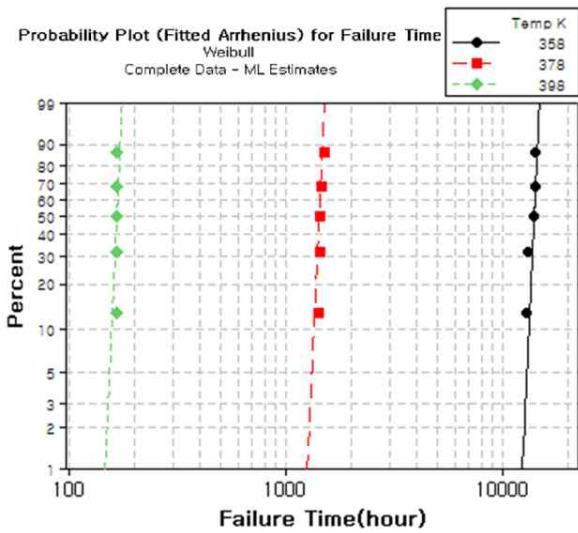


Fig. 9 Probability plot for weibull

아울러 수명-스트레스 관계식, 가속변수, 수명분포 등을 설정한 연후에 아레니우스식과 와이블 분포를 통하여 그 결과를 도출하였다. 그 결과 50°C(323 K) 사용조건에서 추정 수명분포를 확인할 수 있었다. 이때의 온도에 의한 가속조건의 모수 추정에 따른 형상모수는 34로 나왔으며, 본 사용 온도조건에서의 척도 모수는 1,119,817로 나왔다.

4.3 적정 교체주기 평가 및 검증

앞에서 수명 분포 모델로 와이블 분포가 적합하였기 때문에 이를 통해 적정 교체주기를 평가한 결과, 와이블 누적분포도는 형상모수 β는 34, 척도모수 η는 85°C일 때 14,128.4로 나타났고, 그 누적분포 그래프는 Fig. 10과 같이 얻을 수 있었다.

또한 부품의 최적교체주기를 산출하기 위해서 견인인버터용 커패시터의 부품 비용을 Table 3과 같이 설정(견인인버터의 30년간 총 생애주기비용(LCC)을 기준)하여 세부부품인 커패시터의 예방정비비와 고장정비비의 비율을 도출하였다. 그 결과 최적교체주기의 함수는 다음과 같이 제시할 수 있었다.

$$C(T_0) = \frac{1.75C_p \cdot (1 - e^{-\left(\frac{T_0}{1,119,871}\right)^{34}}) + C_p \cdot e^{-\left(\frac{T_0}{1,119,871}\right)^{34}}}{\int_0^{T_0} e^{-\left(\frac{t}{1,119,871}\right)^{35.7}} dt} \tag{8}$$

그리고 이들 계수를 Matlab m-file code에 적용하여, 비용(Y축)을 최소화하는 교체주기(X축) 즉, 견인인버터의 커패시터에 대한 최적교체주기(T₀)를 구한 결과는 101,960 h(=11.6년)으로 산출되었다.

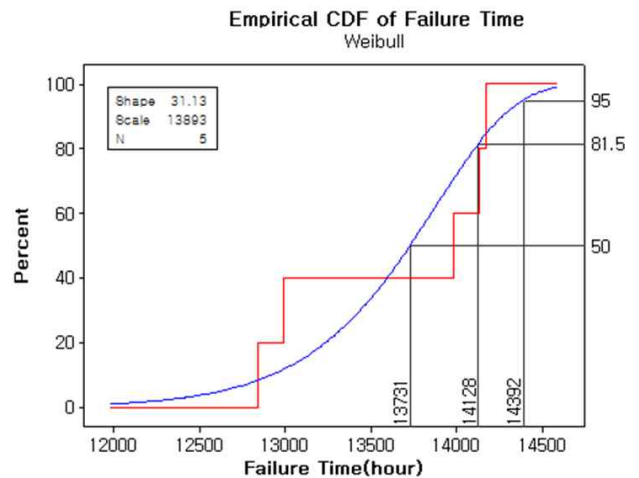


Fig. 10 Empirical cumulative distribution function of failure time at the case of 85°C

Table 3 Life cycle cost of traction inverter

(Unit: Thousand won)

Item	Material costs	Preventive maintenance cost	Operating cost	Breakdown maintenance cost
Life cycle cost	2,834,541	8,598	258	2,147,570

5. 결론

이상과 같이 본 연구는 고속철도차량용 추진제어장치의 견인 인버터에 사용되는 커패시터의 가속수명시험을 통해 수명을 추정하였고 적정교체주기를 제안하였다.

견인 인버터와 커패시터의 유지보수 데이터와 고장원인 분석을 통해 온도에 의한 고장이 주원인임을 확인하였고, 가속스트레스인 온도에 초점을 맞추어 가속수명시험을 진행하였다. 수명-스트레스 관계에 대해서는 스트레스가 온도인 경우에 널리 사용되는 아레니우스 모형이 적합함을 검토할 수 있었으며, 수명산정 이론에서는 와이블 분포가 가장 알맞게 적용될 수 있음을 확인하였다.

한편 신뢰성 예측 소프트웨어를 사용하여 가속수명시험의 타당성을 검증하였으며, 가속수명시험의 신뢰성 검증 결과로 추정된 고속철도차량용 견인인버터 커패시터의 적정 교체주기는 약 14년으로 추정되었고 이를 유지보수 주기에 적용하여도 안전운행에 큰 문제가 없음을 밝힐 수 있었다. 그러므로 현재 10년으로 규정되어 있는 기존 고속철도차량용 추진제어장치 견인 인버터의 적정교체주기는 14년 7개월까지 수명연장이 가능하며, 이벤트성 고장을 제외하고 고장 유무에 관계없이 10년마다 부품을 교체하고 있는 점을 감안한다면 이 교체주기에 있어서도 11.6년까지 연장하여 비용을 최소화할 수 있을 것으로 결론지을 수 있다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (일부)지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Venet, P., Perisse, F., El-Hussein, M. H., Rojat, G., 2002, Realization of a Smart Electrolytic Capacitor Circuit, IEEE Industry Applications Magazine, 51:1 16-20.
- [2] Shon, J., 2009, A Characteristic Analysis and Capacitance Estimation Algorithm of Electrolytic Capacitor for Non-linear Loads, The Journal of Korean Institute of Intelligent Transport Systems, 8:6 180-186.
- [3] Yum, B. J., Kim, S. H., 1990, Development of Life-Test Sampling Plans for Exponential Distribution Based on Accelerated Life Testing, Communications in Statistics-Theory and Methods, 17 2735-2743.
- [4] Tyoskin, O., Krivolapov, S., 1996, Non-parametric Model for Step-tress Accelerated Life Testing, IEEE Transactions on Reliability, 45:2 346-350.
- [5] Nelson, W., Meeker, W. Q., 1987, Theory for Optimum Accelerated Censored Life Tests for Weibull and Extreme Value Distributions, Technometrics, 20:2 171-177.
- [6] Nelson, W., 1990, Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses, New York, John Wiley.
- [7] Bai, D. S., Chung S. W., 1991, An Optimal Design of Accelerated Life Test for Exponential Distribution, Reliability Engineering & System Safety, 31:1 57-64.
- [8] Yu, H. F., Tseng, S. T., 2002, Designing a Screening Experiment for Highly Reliable Products, Naval Research Logistics, 49:5 514-526.
- [9] Yu, H. F., 2002, Optimal Selection of the Most Reliable Product with Degradation Data, Engineering Optimization, 34:6 579-590.