

전동차 인버터 구동용 전해콘덴서의 신뢰도예측과 수명 연구

한재현 · 배창한* · 구정서†

서울과학기술대학교 철도전문대학원 · *한국철도기술연구원
(2013. 10. 23. 접수 / 2014. 2. 3. 채택)

A Study on the Reliability Prediction and Lifetime of the Electrolytic Condenser for EMU Inverter

Jae-hyun Han · Chang-Han Bae* · Jeong-Seo Koo†

Seoul National University of Science and Technology Gradnate School of Railroad
· *Korea Railroad Research Institute

(Received October 23, 2013 / Accepted February 3, 2014)

Abstract : Inverter module, which feeds the converted power to the traction motor for EMU. Consists of the power semiconductors with their gate drive unit(GDU)s and the control computer for driving, voltage, current and speed controls. Electrolytic condenser, connected to the gate drive unit and a core component to drive the power semiconductor, has problems such as reduction in lifetime and malfunction caused by electrical and mechanical characteristic changes from heat generation during high speed switching for generation of stable power.

In this study, To check the service life of electrolytic condenser, the test was carried out in two ways. First, In the case of accelerated life testing of condenser, the Arrhenius model is a way of life testing. Another way is to analyze the reliability of the failure data by the method of parametric data analysis. Eventually, life time by accelerated life test than a method of failure data analysis(Weibull distribution) was found to be slightly larger output.

Key Words : electrolytic condenser, field data analysis, parametric method, MTTF, arrhenius equation, law of 10 2times

1. 서론

신뢰성 개념이 적용되기 이전에 도입된 전동차의 부품은 대부분 긴 수명을 갖고는 있지만, 부품의 고장분포나 수명 특성 자료는 부족한 것이 현실이다. 이러한 신뢰성 자료의 부족은 고장예측과 정비계획 설정 시 적정 기준을 제시하지 못한다. 그 결과 현재까지도 제작사에서 제시한 정비주기를 대부분 고수하고 있다. 신뢰도에 의한 수명평가 방법을 보면, 제조사는 설계·제작 시 고장데이터 취득의 어려움과 품질보증 행위를 위한 가속수명시험을 주로 시행하고, 운영기관에서는 오랜 시간 동안 모은 필드 데이터를 분석하고 경험적인 적정수명을 판단하여, 그것을 정비기준(사용수명)으로 삼았는데 이는 통계적인 기법 이라기보다는 운영적 측면에서의 대처라고 할 수 있다.

본 연구에서는 서울도시철도공사 5호선 전동차의 인버터 구동(Gate drive unit, GDU)용 전해콘덴서의 적정수명(Lifetime)을 도출하고자, 고장데이터(Field data)를 이용한 모수적 방법(Parametric method)으로 신뢰도 수명 분석과 가속수명시험을 통하여, Arrhenius equation¹⁾과 제작사에서 많이 사용하고 있는 Arrhenius 근사식(Law of 10 2times)²⁾으로 기대수명을 도출하여 콘덴서의 적정수명 범

위를 평가하는데 기여하고자 하였다. 이는 전해콘덴서의 경우 대부분의 전동차 운영기관에서 고장정비를 시행하고 있으나, 노화부품의 적정 수명을 제시할 수 있는 정량적인 기준이 도출된다면, 고장정비 대신 예방정비를 시행하여 고장으로 인한 비용(사회적 비용 포함)을 크게 감소시킬 것으로 판단되기 때문이다.

2. 전동차의 모델링

2.1 전동차 시스템의 구성

일반적으로 도시철도 차량의 주행시스템 구성은 운행·제어감시용 컴퓨터종합제어장치, 전력변환용 인버터 장치와 견인 전동기 등의 구동장치로 나누어지는데 전류 제어 특성의 GTO 인버터를 사용하는 전동차의 경우 제어 시스템은 동일하거나 유사하다. Fig. 1은 지하철 5호선 전동차의 인버터 제어시스템으로 본 연구의 대상이 되는 전해콘덴서는 전력변환 소자의 GTO 게이트 전단인 구동 컴퓨터장치에 장착되어 매우 짧은 시간동안 일정 전류의 크기를 만들어 GTO를 반복적으로 On-off 작동시켜 직류전압을 교류전압으로 변환시키는 작용을 하며 전압의 크기는 AC 0~1,150V로 가변한다.

* Corresponding Author : Jeong-Seo Koo, Tel : +82-2-970-6878, E-mail : koojs@seoultech.ac.kr

Department of Rolling Stock System Engineering, Seoul National University of Science & Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

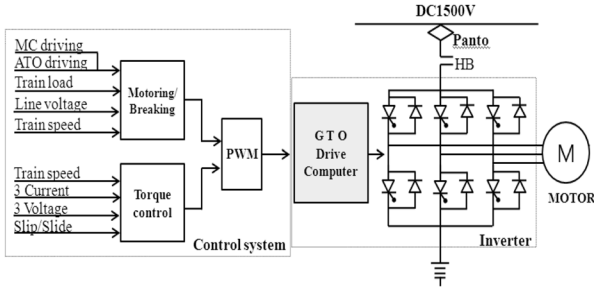


Fig. 1. Functional block diagram of VVVF inverter

2.2 전해콘덴서의 동작특성

전해콘덴서의 동작주기는 차량속도, 가선전압, 구동전류 등의 변수값 크기에 따라 동작 주기가 정해진다. 열차속도가 0~35Km/h사이의 저속에서는 210~496Hz이고 35Km/h이상의 고속에서는 71Hz로 제한되어 동작한다.

GTO 구동을 위해서는 GTO 동작 특성에 맞게 Fig. 2와 같이 콘덴서의 용량을 설계하여 장착하는데 역전류를 인가하여 GTO를 off시킬 경우 콘덴서의 용량은 커야하고 반면에 On시키는 콘덴서의 용량은 작아도 된다. 이처럼 콘덴서에서 만들어지는 전류의 적정 크기는 Fig. 3에서와 같이 Turn-on시에는 35~45A(IGM)이고 Turn-off시에는 -700A(IGQ)로서 GTO 게이트에 인가시켜 동작시킨다.

2.3 GDU 콘덴서의 고장특성

전해콘덴서는 P사에서 제조된 것으로, 고장은 주로 정전용량 허용범위 초과, 외관팽창, 단선, 전해액 액출 등의 전기적, 기계적 특성변화로 이어져 인버터 전력변환 기능에 치명적인 중고장(Fatal trouble)을 발생시키고 더

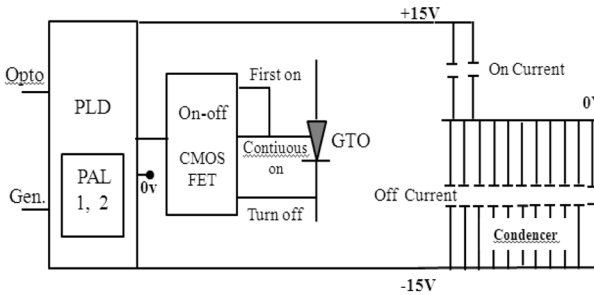


Fig. 2. Block diagram of GTO drive computer

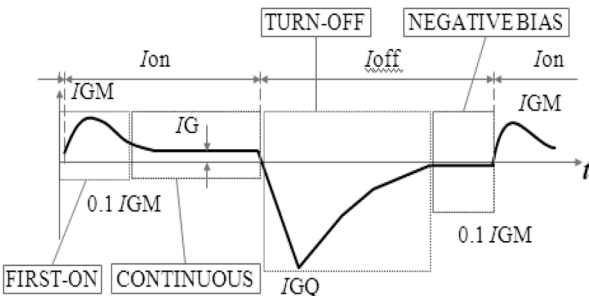


Fig. 3. On - off pulse and cycle of GTO

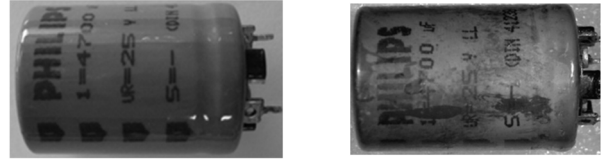


Fig. 4. Target of condenser

이상의 운전이 불가능해지면서 운행지연 등의 장애가 일어난다.

Fig. 4는 연구 대상인 신품과 파국고장이 발생한 P사의 콘덴서이다.

3. 고장데이터를 활용한 콘덴서 수명평가

3.1 고장데이터의 수집

본 연구에 사용된 고장데이터(Field-failure data)는 Table 1과 같이 지하철 5호선 76개 편성(Fleet) 1,824 수량의 모 집단이 된다. 이중 콘덴서 고장 발생 수량은 538건으로 약 70.5%가 관측 중단 비율이다. 데이터의 모집 기간은 '99. 1. 1 ~ '11. 12. 27(약 155month) 까지 이다.

Table 1. Number of equipped quantity

Fleet	Equipped quantity	Sum
76	24	76×24=1,824

여기서 초기고장 분포 특성을 갖는 3건(100시간 이하)의 고장은 신뢰성이나 내구성과 관련되지 않으므로 제외시킨다.³⁾

Fig. 5는 고장난 콘덴서만을 데이터의 고장 시간대비 발생 건으로 나타낸 그래프 이다.

3.2 고장데이터의 신뢰도 분석 절차

콘덴서 신뢰도 평가를 위한 모수의 추정 방법에 있어서 최소제곱법(Least square estimator: LSE)을 주로 사용하고, 최대우도법(Maximum likelihood estimator)은 참고 자

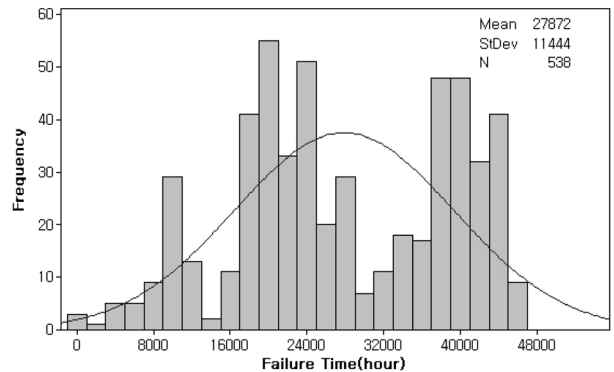


Fig. 5. Histogram of the number of failure

료로 사용하였다. 이는 최대우도법이 일반적으로 최소제곱법보다 정확한 모수 추정치를 제공할 가능성이 크지만, 소표본 또는 본 연구의 대상처럼 관측중단 비율이 높은 경우에는 최소제곱법이 보다 정확할 수 있으며,⁴⁾ 특히 신뢰성 분석에서 많이 이용되는 Weibull 분포의 경우에는 최대우도법이 형상모수를 과대 추정하는 경향이 있기 때문이다. 이런 이유로 앤더슨달링계수(Anderson-darling)는 Table 2와 같이 참고용으로만 사용한다.⁵⁾ 본 연구에서는 minitab을 사용하여 신뢰도 모수를 도출하였다.

Table 2와 Fig. 6에서 고장분포를 추정한 결과로 Weibull

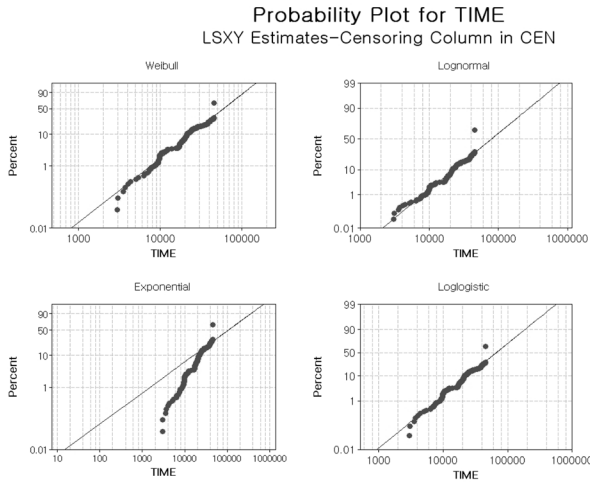


Fig. 6. Probability plot of distribution

Table 2. Result of goodness of fit

Distribution model	Anderson-darling coefficient	Coefficient of correlation
Weibull	1710.377	0.984
Lognormal	1722.482	0.988
Exponential	1732.94	*
Logistic	1697.56	0.914

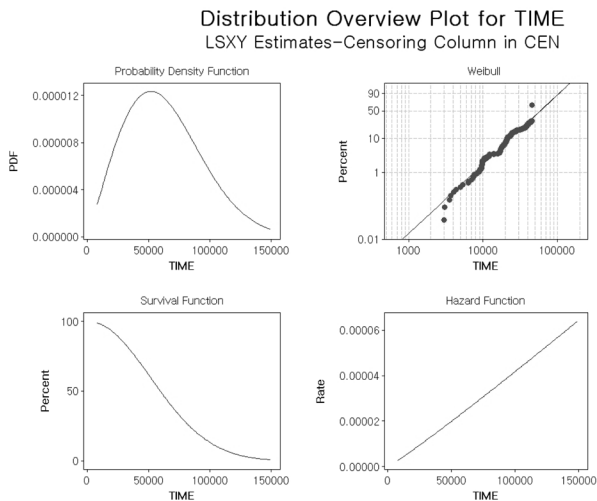


Fig. 7. Distribution overview for weibull

(Fig. 7)과 Lognormal(Fig. 8) 분포가 가장 강한 적합성을 나타내므로 두 가지 분포를 모두 분석하여 신뢰도를 추정하기로 한다. 또한 콘덴서의 고장은 Fig. 7과 Table 3의 Weibull 분포의 형상모수(Shape factor)가 관측기간 동안 마모고장(노후고장)의 형태를 나타내고 있다.

3.3 고장 데이터의 신뢰도 수명평가 결과

GTO 구동용 전해콘덴서의 고장을 대표할 수 있는 두 가지 분포에 대한 수명특성 중 MTTF(Table 4)의 경우 대수정규 분포(Lognormal distribution)가 127,952시간(hrs),

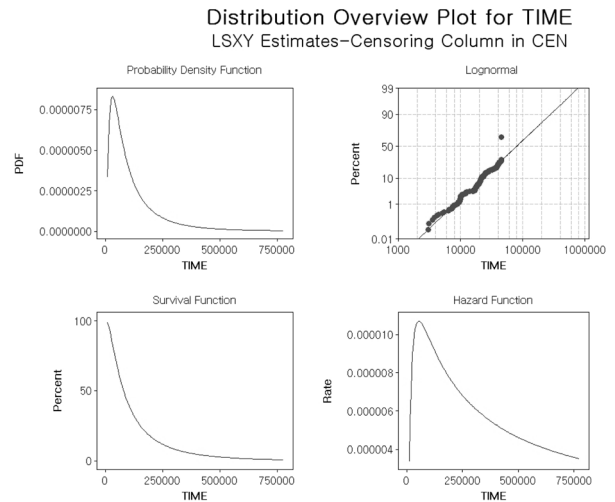


Fig. 8. Distribution overview for lognormal

Table 3. Reliability parameters

Distribution	Parameter	Estimate	Error
Weibull	Shape	2.06	0.077
	Scale	70,988.1	1813.71
	Cumulative distribution function	$F(t, \alpha, \beta) = 1 - \exp - \left(\frac{t}{70,988} \right)^{2.06}, t > 0$	
Lognormal	Location	11.28	0.042
	Scale	0.979	0.036
	Cumulative distribution function	$F(t, \mu, \sigma) = \Phi \left(\frac{\ln(t) - 11.28}{0.979} \right), t > 0$	

Table 4. Characteristics of distribution

Distribution	Weibull		Lognormal	
	Estimate	Error	Estimate	Error
MTTF	62,883	1,622	127,952	9,204
Median	59,442	1,305	79,194	3,329
First Quartile	38,827	804	40,903	1,201
Third Quartile	83,155	2,465	153,331	9,511

Weibull 분포가 62,883시간(hrs)을 나타내 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 7~8과 Lognormal 분포가 처음 일정기간 증가하다 나중에 감소하는 UBR(Upside down bathtub failure rate) 특성을 나타내기 때문이다.⁶⁾ 5호선 전동차의 일일운행 시간이 평균 9.4시간을 감안하여 환산한 결과, 고장데이터에 의한 MTTF 수명은 대수로그 분포가 13,612day(37.3year)로 환산되며, 와이블 분포로 평가한 MTTF는 6689.7day(18.3year)로 계산되었다.

4. 가속수명 시험에 의한 기대 수명

알루미늄 전해 콘덴서의 고장은 파국고장(Catastrophic failure)과 마모고장(Wear-out failure)의 두 가지 고장모드를 가지고 있다. 파국고장의 경우 단락, 단선, 외형변형과 같이 콘덴서의 기능이 완전히 상실된 경우를 말한다. 이에 반해 마모고장의 경우 콘덴서의 전기적 특성(Parameters)이 점점 열화(Degradation)되어 결국에 가서는 콘덴서의 기능이 상실되는 경우를 말한다. 이러한 기능 열화의 임계값 등은 대부분의 경우 제조사의 생산기술자료(Data sheet, Catalog)에 명시되게 된다. 콘덴서의 열화를 평가하는 파라미터 값들은 다음과 같다.

- 캐패시턴스(Change in capacitance)의 변화
- 정전용량의 손실비(Loss factor, Dielectric loss tangent, $\tan \delta$)
- 누설전류(Leakage current)

4.1 콘덴서 가속시험 스트레스의 선정

전자 부품의 대부분, 특히 콘덴서의 경우는 온도에 가장 민감하게 수명이 좌우된다는 것이 관련 논문 및 문헌을 통해 정설로 통용되고 있다. 따라서 온도 스트레스를 콘덴서의 신뢰성 시험의 스트레스 요인으로 선정하였다.⁷⁾

4.2 콘덴서 온도 열화 특성

콘덴서의 수명은 리플전류에 의한 자기발열 온도에 크게 영향을 받으며, 이는 콘덴서 전해액과 온도와의 반응 관계에 따른 것으로 용량감소(Change in capacitance), 정전용량의 손실증가(Dielectric loss tangent, $\tan \delta$)를 초래하여 수명을 저하시키는 주요 요인이 된다.⁸⁾

따라서 사용 온도를 낮게 설정하거나 허용 리플전류(Ripple current) 이내의 스트레스가 인가 될 경우, 보다 오랜 수명을 기대할 수 있다. 주위 온도와 콘덴서의 수명 사이에는 Arrhenius(Arrhenius' law of chemical activity) 화학반응 법칙이라는 관계를 따른다고 알려져 있다.⁹⁾ 이식을 콘덴서의 사용 허용온도 범위 내에서 변형할 경우 제조 현장에서 많이 사용하는 Arrhenius 경험식을 유도할 수 있는데, 이는 콘덴서의 사용 온도가 10°C 감소되면, 사용수명은 두 배로 증가된다는 이론(Law of 10 2times)이다.

4.3 Arrhenius 이론에 의한 가속 수명평가 방법

Arrhenius는 자당의 전도를 기술하기 위해 1889년에 그

의 모델을 개발하였다. 모델은 공정 속도의 온도 의존성을 주는 속도 공식이다.

$$AF = \frac{t_u}{t_t} = \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t} \right) \right] \quad (1)$$

여기서 AF 는 가속계수, 첨자 u 와 t 는 각각 사용 환경 온도와 시험온도로 온도(대문자는 절대온도)를 나타낸다. 또한 E_a 는 활성화 에너지(activation energy), k 는 볼츠만 상수(8.617×10^{-5} eV/K)를 의미한다. 본 연구에서는 E_a 값을 0.7로 한다.¹⁰⁻¹¹⁾

사용 환경에 대한 콘덴서의 수명은 식1에서 얻어진 가속계수와 콘덴서의 사용 환경(온도)로 평가되어 진다.

$$L_n = AF \times \exp \left[\frac{E_a}{8.617 \times 10^{-5} \times T_n} \right] \quad (2)$$

식 2에서 L_n 는 온도 환경에 대한 사용수명, T_n 는 사용 환경의 온도이다.

현장 사용온도에 의한 가속법은 일반적으로 Arrhenius의 경험식(Arrhenius model)에 따른다. Arrhenius 모델에 의한 수명 L_n 과 온도 T_n 와의 관계는 식 1과 같이 표현되고, 인접한 온도범위 즉 콘덴서가 안전하게 동작할 수 있는 온도(T_a , T_n) 즉, 허용범위에서는 식(3)은 다음과 같이 표현할 수가 있다.

$$AF = 2^{\frac{T_a - T_n}{\theta}} \quad (3)$$

θ 값은 유전체 재료에 의해 약간의 차이가 있지만, 일반적으로 콘덴서는 7 ~ 8°C를 사용한다. 이 수명과 온도의 관계를 보다 쉽게 하기 위해서 온도가 어느 정도 상승(대략 10°C 증가하면)한다고 하면, 대상 콘덴서의 수명은 반으로 감소된다. 가속수명시험에서 사용되는 온도와 현장수명에 영향을 주는 온도차로 콘덴서의 수명을 평가할 수 있게 된다.

위의 내용을 다시 식으로 재정리 하면, 기존의 온도 T_n 에 대하여 θ 의 온도가 올라가면 수명이 반으로 줄어들게 되어, 식 4와 같이 10°C 법칙(Law of 10 2times)이 된다.¹²⁾

$$L_x = L_0 \times AF^{(T_n - T_x)/10} \quad (4)$$

본 연구에서는 식 1과 식 4를 비교하여 평가하기로 한다.

4.4 콘덴서의 사용 환경

4.4.1 실제 사용 환경(온도) 측정

전동차가 운행할 때 인버터장치의 부품 등에서 발생하는 온도와 콘덴서 작동 과정에서 발생하는 발열온도에 의한 스트레스와 같이 콘덴서 수명에 직접적인 영향을 미치는 온도 요인을 조사하기 위하여, Table 5와 Fig.9과 같이 영업용 전동차를 선정하여 콘덴서 주변 온도를 실측하였다.

Table 5. Temperature measurement method at train

Measurement method	Description
Measurement period	10 hours(530feet, '12.10.25)
Measurement location	Inverter 1,2(GDU surface), Passage of cooling air(Inside), Outside air(Outside)
Data Acquisition	Temperature sensor and the notebooks

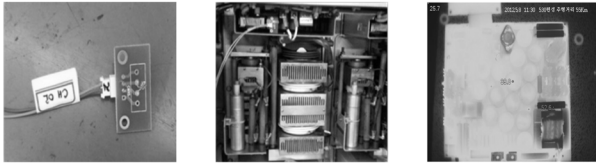


Fig. 9. A position measuring temperature

4.4.2 온도 측정결과

영업용 전동차의 측정(10시간 연속 측정)결과 Fig. 10~11과 같이 전력소자(GTO)1, 2 주변의 평균 온도는 50.5℃, 50.4℃과 표준편차는 0.7℃로 유사한 50℃ (최대온도는 약 52℃)정도로 측정되었다. 인버터 내부 온도의 경우는 48.6℃(표준편차 0.7℃), 외부 온도(터널온도)는 약 28℃(표준편차 0.8℃)로 측정되었다.

4.5 콘덴서의 가속시험

4.5.1 시험 방법

본 연구에 사용된 시험방법은 Table 7, Fig. 12와 같이 고온부하시험(Load life test)과 리플 전류시험(Ripple load

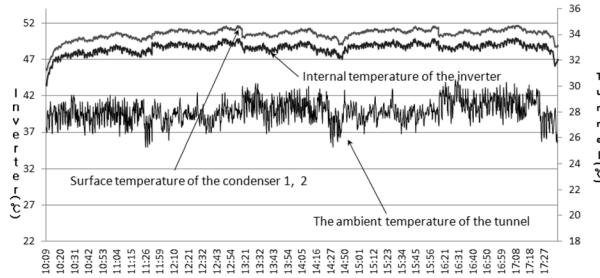


Fig. 10. Temperature measurement results

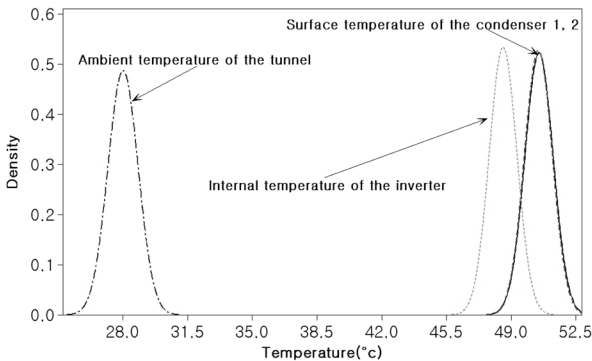


Fig. 11. Histogram of temperature

Table 6. The characteristics of the target condenser

Warranty properties	Value
Capacitance(μF)	4,700 \pm 20%
Rated voltage(V)	25
Ambient Temp($^{\circ}\text{C}$)	-40 ~ +85
ESR(Equivalent series resistance)	60m Ω (100Hz, 20 $^{\circ}\text{C}$)
Ripple Current	2.9A(20 $^{\circ}\text{C}$ 100Hz)
Warranty Lifetime(hours)	12,000(85 $^{\circ}\text{C}$)

Table 7. Conditions and duration of acceleration

Load life test(Temp.)		Ripple load life test		Period
Quantity	Method	Quantity	Method	
14	25Vdc/105 $^{\circ}\text{C}$ (No current)	10	25Vdc/2.9A (100Hz 105 $^{\circ}\text{C}$)	'11.8.25 - '12.1.19

life test)이 병행되었다. 이는 온도와 리플전류가 알루미늄 전해콘덴서의 수명에 가장 큰 영향을 미치는 스트레스라는 것이 연구 문헌의 정설이기 때문이다. Table 6은 대상 GTO 구동용 전해콘덴서의 사양이고, Table 7은 가속수명 시험의 종류, Table 8은 가속시험 중 측정 시간대별 특성 값의 양부 판정 기준(Applicable standard, JIS C-5141)을 나타낸다.

4.5.2 고장 판정 방법

콘덴서 고장의 판정은 JIS C-5141의 규격을 적용하여 판단하였다.

4.5.3 고온부하 시험 결과(Table 9~12)

각 각의 시료에서 전해콘덴서 외부튜브가 변색이 발생되면서, 가속시험 3,000시간 중에 3번, 4번, 6번, 8번 시료



Fig. 12. Test methods and scenery of testing

Table 8. Condenser failure criteria(JIS C-5141)

Criteria of Measurement	Range
Capacitance change(μF)	Within \pm 20% of initial measured value
tan δ (Tangent of loss angle)	\leq 200% of initial specified value
Leakage current(μA)	\leq Initial specified value
Appearance characteristics	Good

는 부플림(Vent)의 외형변형과 10번 시료는 튜브가 갈라지는 현상이 발생하였다.

Table 9. Cap(μF) change due to time change

Spec	INIT.	240hrs	1000hrs	2000hrs	3000hrs
1	4,468	4,508	4,502	4,464	4,401
2	4,283	4,340	4,339	4,292	4,239
3	4,283	4,346	4,344	4,285	-
4	4,267	4,334	4,331	4,279	-
5	4,308	4,321	4,319	4,294	4,254
6	4,398	4,456	4,459	4,412	-
7	4,272	4,333	4,328	4,292	4,262
8	4,239	4,218	4,244	4,202	-
9	4,613	4,592	4,601	4,590	4,599
10	4,669	4,732	4,759	4,747	-
11	4,339	4,398	4,398	4,363	4,316
12	4,230	4,206	4,232	4,204	4,151
13	4,199	4,215	4,222	4,197	4,169
14	4,282	4,250	4,261	4,229	4,189

Table 10. $\Delta C/C(\%)$ change due to time change

Spec	240hrs	1000hrs	2000hrs	3000hrs
1	0.9	0.76	-0.09	-1.5
2	1.33	1.31	0.21	-1.03
3	1.47	1.42	0.05	-
4	1.57	1.5	0.28	-
5	0.3	0.26	-0.32	-1.25
6	1.32	1.39	0.32	-
7	1.43	1.31	0.47	-0.23
8	-0.5	0.12	-0.87	-
9	-0.46	-0.26	-0.5	-0.33
10	1.35	1.93	1.67	-
11	1.13	1.01	0.32	-0.76
12	-0.57	0.05	-0.61	-1.87
13	0.38	0.55	-0.05	-0.71
14	-0.75	-0.49	-1.24	-2.17

Table 11. Tan δ change due to time change

Spec	INIT.	240hrs	1000hrs	2000hrs
1	0.116	0.124	0.125	0.126
2	0.136	0.133	0.131	0.132
3	0.136	0.131	0.129	0.124
4	0.126	0.133	0.131	0.125
5	0.126	0.139	0.137	0.132
6	0.127	0.115	0.114	0.111
7	0.137	0.137	0.134	0.129
8	0.114	0.152	0.154	0.156
9	0.137	0.154	0.15	0.16
10	0.139	0.154	0.155	0.171
11	0.143	0.146	0.142	0.143
12	0.135	0.16	0.163	0.164
13	0.113	0.114	0.111	0.108
14	0.118	0.131	0.128	0.123

Table 12. L/C(μA) change due to time change

Spec	INIT.	240hrs	1000hrs	2000hrs
1	14.4	13.2	8.45	3.56
2	14.9	11.7	8.41	3.79
3	15.8	13.2	8.55	3.88
4	15.7	12.9	8.31	4.01
5	13.2	12.8	9.62	3.72
6	13.9	12.1	8.79	3.92
7	14.3	12.2	8.42	3.78
8	14.1	10.7	7.59	4.21
9	16.9	17.5	8.31	4.31
10	17.7	12.8	8.92	5.62
11	14.4	11.9	7.15	3.22
12	13.1	11	7.09	3.21
13	14.4	12.5	7.51	3.12
14	18.1	10.8	7.52	3.24

4.5.4 리플전류 시험 결과(Table 13~16)

시료에서 전해콘덴서의 외부튜브 변색이 발생되면서 가속시험 3,000시간에서 전체 시료 중 5, 6 시료에서 부플림(Vent)의 변형과 전해액이 액출(Oil leakage)되는 고장이 발생하였다.

4.6 시험 결과 분석

고온 부하시험과 리플전류 시험의 경우 전기적 특성값의 변화가 양부판정에 미치는 영향은 없었으나, 외형 변화로 인한 관측 중단을 발생되었다. 두 가지 가속시험 결

Table 13. Cap(μF) change due to time change

Spec	INIT.	240hrs	1000hrs	2000hrs	3000hrs
1	3976	3973	3957	3929	3894
2	4287	4268	4256	4202	4170
3	4410	4412	4397	4372	4323
4	4286	4297	4298	4259	4181
5	4095	4047	4053	4050	-
6	4651	4594	4355	4352	-
7	4374	4366	4376	4318	4251
8	4162	4230	4211	4283	4074
9	4260	4226	4253	4214	4176
10	4161	4154	4162	4137	4083

Table 14. $\Delta C/C(\%)$ change due to time change

Spec	240hrs	1000hrs	2000hrs	3000hrs
1	-0.08	-0.48	-1.18	-2.06
2	-0.44	-0.72	-1.98	-2.73
3	0.05	-0.29	-0.86	-1.97
4	0.26	0.28	-0.63	-2.45
5	-1.17	-1.03	-0.80	-
6	-1.23	-1.08	-6.36	-
7	-0.18	0.05	-1.28	-2.81
8	1.68	1.18	2.91	-2.11
9	-0.8	-0.16	-1.08	-1.97
10	-0.17	0.02	-0.58	-1.87

Table 15. Tan δ change due to time change

Spec	INIT.	240hrs	1000hrs	2000hrs	3000hrs
1	0.114	0.114	0.16	0.187	0.205
2	0.123	0.123	0.158	0.2	0.218
3	0.111	0.111	0.143	0.169	0.198
4	0.113	0.113	0.133	0.174	0.224
5	0.136	0.136	0.207	0.134	-
6	0.144	0.144	0.378	0.17	-
7	0.13	0.13	0.16	0.21	0.25
8	0.136	0.136	0.182	0.231	0.289
9	0.131	0.131	0.186	0.205	0.246
10	0.106	0.106	0.135	0.178	0.214

Table 16. L/C(μA) change due to time change

Spec	INIT.	240hrs	1000hrs	2000hrs	3000hrs
1	13.9	11.5	3.85	3.42	4.6
2	12.9	11	3.57	3.52	4.3
3	14.2	11.7	3.66	3.89	4.25
4	15.5	11.1	3.42	3.72	4.42
5	13.2	12.1	2.59	2.56	-
6	14.7	12.7	3.52	3.32	-
7	17.7	9.55	2.89	3.45	4.24
8	13.2	12.4	6.91	3.33	4.32
9	13.4	11.8	5.69	3.62	3.15
10	13.8	9.4	2.72	3.18	3.15

과와 Table 8에 의하여, 가속수명 시험에 의한 콘덴서 생존 수명을 본 연구에서는 2,000hrs로 판단하기로 한다.

4.7 가속시험에 의한 기대수명 평가

가속 시험온도와 제조사에서 제시한 최대 사용온도(85°C)를 비교하면, 10°C법칙(Law of 10 2times), 식 4에 의한 가속계수는 약 4이고, 식 1에 의한 가속계수는 Fig. 13과 같이 약 3.3 정도가 되는 것을 Matlab code 결과 확인할 수가 있다.

또한 전동차의 사용 환경 온도가 Fig. 11과 같이 약 50°C

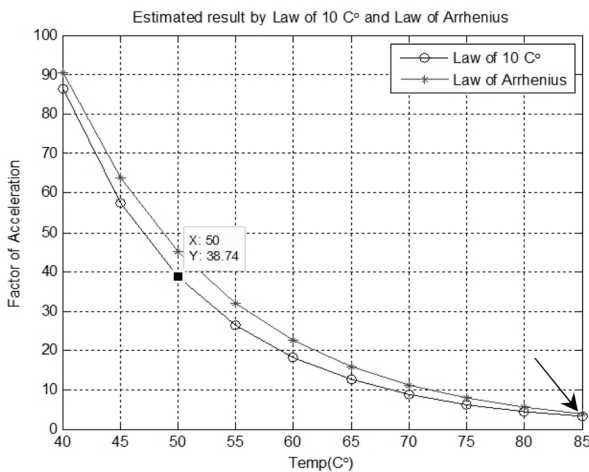


Fig. 13. Estimated acceleration factor

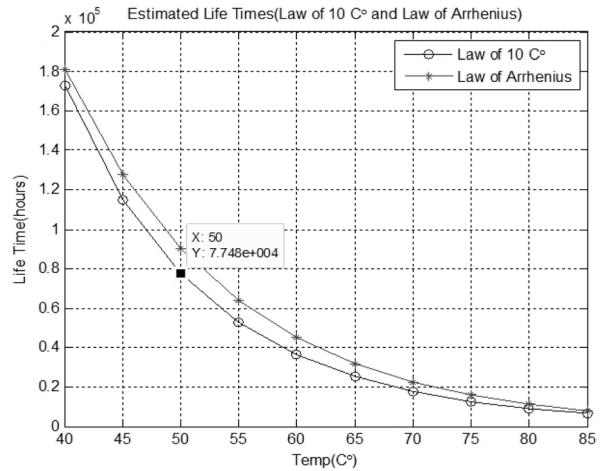


Fig. 14. Expected life time for condenser

정도임을 감안할 때, Fig. 14에서와 같이 10°C법칙에 의한 수명 77,480시간(hrs) 이고, Arrhenius식에 의한 90,510시간(hrs)으로 관측된다.

Table 6과 같이 제조사가 보증하는 콘덴서의 수명 시간은 12,000시간(85°C) 이었으나, 본 연구에서 수행된 온도 스트레스에 의한 가속수명으로 평가(식 1, 식 4)한 경우, 일부시료의 외형손상(파국고장)으로 85°C(105°C에서 2,000hrs)에서는 8,000시간(hrs) 정도만 수명을 기대할 수 있을 것으로 판단하였다.

또한 전동차의 일일 평균 주행 시간(9.4시간)을 고려하여 환산 할 경우, 10°C법칙에 의한 기대수명은 8,277day(22.7year), Arrhenius식에 의한 기대수명은 9,668day(26.5year)로 평가되었다.

5. 결론

본 연구에서는 전동차의 인버터 구동(GDU)용 전해콘덴서, 약 13년간의 고장데이터를 활용한 통계적 방법의 신뢰도 수명, 가속수명시험을 통한 기대수명을 산출하여, 콘덴서의 적정수명 범위를 제시하고자 하였다.

고장데이터의 수명을 평가한 결과, Table 2와 같은 고장의 분포는 Lognormal 분포와 Weibull 분포가 콘덴서의 신뢰도를 잘 표현하는 것으로 나타났으며, Table 4의 결과를 일일 운영시간을 고려할 경우 Lognormal 분포인 경우 MTTF는 37.3year, Weibull 분포로 판단할 경우 18.3year으로 3.3장의 분석과 같이 다소 차이가 나고, Weibull 분포의 형상모수(Shape factor)가 2.06으로 관측 기간 동안 콘덴서는 열화 특성을 나타내는 것으로 판단할 수가 있다.

또한 온도의 영향만을 고려한, 가속수명 시험의 경우 콘덴서의 기대수명은 약22.7year(Law of 10 2times), 26.5year (Arrhenius equation)으로 평가되었다.

고장데이터의 신뢰도 분석 수명과 가속수명시험에 의한 기대수명을 비교하면, Weibull 분포의 신뢰도 수명<가속수명 시험의 기대수명<Lognormal 분포의 신뢰도 수명

순으로 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

본 연구에서 시행한 수명평가와 제조사에서 보증한 수명이 다소 차이가 발생하였다. 고장데이터에 의한 신뢰도 수명의 경우, 전동차 운행시 발생하는 진동 등의 환경 영향으로 예측 수 있고, 가속수명시험에서는 Table 9~16의 결과와 같이 시험 중 콘덴서의 파국고장이 수명평가에 영향을 미치는 것으로 예측 된다.

전해콘덴서와 같은 부품들은 장시간 사용시 열화 특성을 갖고 있지만, 대부분의 전동차 운영기관에서는 고장정비(CM, Corrective maintenance)를 시행하고 있다. 적정 수명을 제시할 수 있는 정량적인 기준이 도출된다면, 고장정비 대신 예방정비(PM, Preventive maintenance)를 시행하여 고장으로 인한 비용(사회적 비용 포함)을 크게 감소시킬 수 있으므로, 본 연구는 전동차 정비수명 평가에 기여할 수 있을 것으로 판단한다.

References

- 1) IEC 62308, "Equipment Reliability - Reliability Assessment Methods", pp. 42-43, 2008.
- 2) NIPPON CHEMI-CO, "CAT. NO. E1001L, Judicious use of Aluminum Electrolytic Capacitors Technical Note", pp. 7
- 3) W. Jung, "Reliability Estimation of Agricultural Machinery Components Based on QFD and Failure Mechanism Analysis", Journal of Society of Korea Industrial and System Engineering, Vol. 33, No. 4, pp. 209-217, 2010.
- 4) J. H. Kim, "Field Data Collection and Failure Analysis for Durability Improvement", Journal of the Korea Industrial Society, Vol. 16, Issue 5 Information System, pp. 107-114 2011.
- 5) J. W. Baek and J. n. Jo, "Predicting the Future Number of Failures Based on the Field Failure Summary Data", Journal of the Korean Data Information Science Society, Vol. 22 Issue4, pp. 755 - 764, 2011.
- 6) H. S. Jung, D. H. Park and J. J. Kim, "Reliability Analysis and Applications", Young-ji Publishers, pp. 78-80, 1999.
- 7) IEC 62308, "Equipment Reliability - Reliability Assessment Methods", pp. 42-43, 2008.
- 8) J. W. Park and J. H. Lee, "Development of Accelerated Life Tests for Solid Aluminum Electrolyte Capacitor Made by Domestic Manufacturing Company and Comparison of Characteristics between Domestic Products and Foreign Advanced Products", Journal of the Applied Reliability, Vol. 2, Issue 1, pp. 1-14, 2002.
- 9) David J. Smith, "Reliability Maintainability and Risk-Practical Methods for Engineers", Elsevier, pp. 181-184, 2011.
- 10) T. -b. Jun, "Electrical/Electronic System Reliability Prediction", Gyowoosa, pp.182, 2010.
- 11) Korea coil Engineering Co., "Reliability and Accelerated Test Methods for Magnetic Components", pp.14
- 12) J. G. Kim and Y. J. Park, "Analysis of hrs Thermal Distribution by the Variance of Voltage & Frequency", Proceedings of KIIEE Annual Conference, pp. 465, 2009.