

Statistical Life Expectancy Calculation of MV Cables and Application Methods

중전압 전선의 통계적 수명예측 계산과 응용 방법

Chong-Eun Cho, On-You Lee, Sang-Bong Kim, Kang-Sik Kim
 조종은, 이온유, 김상봉, 김강식

Abstract

In this paper, the change history of various types of MV (Medium Voltage) cables was investigated. In addition, the statistical life expectancy of each type was calculated by using the operation data and the failure data. For cut-off year, 10 years was applied, and realistically applicable statistical life expectancy was calculated by correcting the cause of failure entered by mistake. The life expectancy of FR-CNCO-W was calculated as 51.2 years, CNCV-W 38.1 years, and CNCV 31.4 years and the overall average is 33.8 years. Currently, the life expectancy of TR CNCV-W is 29.4 years, but it is estimated that the lifespan will be extended if failure data is accumulated. As a result, it is expected that life expectancy results can be applied to Asset Management System (AMS) in the future.

Keywords: Asset Management System, MV Cable, Failure rate, Hazard rate, Life expectancy, Lifespan, Weibull, CNCV, CNCV-W, FR-CNCO-W, Diagnosis

I. INTRODUCTION

우리나라를 포함한 세계 주요 선진국의 전력 설비는 대부분 포화상태에 이르러 앞으로 양적인성장은 한계에 이른 것으로 예상된다. 향후 전력설비 운영 정책의 중심은 이미 구축된 전력설비의 효율을 극대화하기 위한 유지보수 기법, 즉 수명의 종점까지 운영하여 설비투자 가치를 최대화할 수 있는 경제성 기반의 운영정책에 초점이 맞추어 질 것으로 예상된다[1]. 이에 KEPCO는 2019년에 자산관리(Asset Management) 기본계획을 수립하고 핵심기술을 확보하기 위해 세계적 수준의 자산관리 기술을 도입하여 송배전 전력설비 10종에 대하여 우리회사의 실정에 맞게 최적화할 예정이다. 이 논문은 10종의 전력설비 중에서 배전용 케이블에 대한 선종별 통계적 기대수명을 산출하고, 초기고장 제거년수(Cut-off year)의 적정성을 검토하여 이를 자산관리시스템에 적용하는 방안을 제시하였다.

II. History of Type Change in MV Cables

A. 지중 배전용 케이블 일반현황

우리나라 전국에 전력을 공급하기 위하여 KEPCO에서 관리하는 22.9kV-y급 배전용 케이블은 2021년 12월말을 기준으로 약 49,850 C-km에 이른다. 전국의 지중화율은 2005년에는 11.7%였으나, 2021년 연말 기준으로 20.1%로 도시화와 지방자치단체의 요청에 의해서 매년 약 0.5% 정도 늘어나는 추세이다[2].

B. 지중 배전용 케이블 선종 변천사

우리회사에서 사용하는 배전용 케이블의 선종 변천사를 살펴보면 Table 1과 같다. 1970년 7월 국내에서 처음으로 개발된 CV 케이블은 22kV급 비접지 방식으로 중성선은 구리(Cu) 테이프 방식으로

TABLE 1
배전용 케이블 선종의 변천사

케이블 선종	도체	절연체	외 피	현장 적용기간	주요 특성
CV	Cu	XLPE	PVC	'70.7 국내 최초개발	22kV 동테이프 중성선
CNCV		XLPE		'83.9~'99.12	22.9kV-y 동심 중성선
CNCV-W			PVC	'95.6~'08.07	도체 수밀강화
TR CNCV-W	Cu	TR-XLPE		'01.11~'11.3	절연체 트리역제 강화
FR CNCO-W		XLPE		'98.4~'22년 현재	외피 난연성 강화
FR CNCO-W/AL	AL		할로젠프리 폴리올레핀	'13.4~'22년 현재	
TR CNCE-W	Cu	TR-XLPE		'09.10~'22년 현재	외피 난연 및 수밀강화
TR CNCE-W/AL	AL		난연성 PE	'11.2~'22년 현재	

Article Information

Manuscript Received August 12, 2022, Accepted September 16, 2022, Published online December 30, 2022

The authors are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: Jintae Cho (jintae.cho@kepc.co.kr)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>
 This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepc.co.kr>.

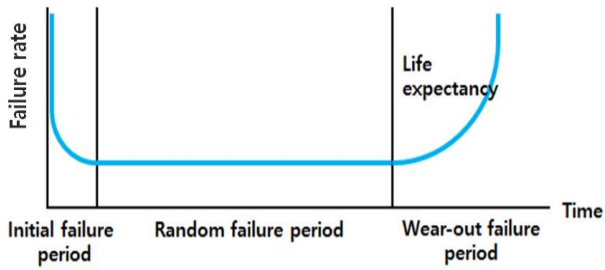


Fig. 1 OMRON이 정의한 욕조곡선(Bathtub Curve)의 기대수명

제작하였으며, 1973년 이후 CV 케이블을 본격적으로 사용하여, 1983년 9월에 22.9kV-y CNCV(Concentric Neutral Cross linked Polyethylene Insulated Vinyl Sheathed Cable, 동심중성선 가교폴리에틸렌 절연 비닐 시스 케이블) 케이블 표준규격을 제정하였다[3]. 최근에는 도체의 재질이 구리에서 알루미늄으로 변화는 추세이며, “트리아크제형 외피충실형 알루미늄 케이블(TR CNCE-W/AL)”을 주로 사용하고 있다.

III. Hazard Rate and Failure Pattern Analysis of MV Cables

A. 시간에 따른 고장의 특성을 나타내는 욕조 곡선(Bathtub Curve)

OMRON은 일반적으로 Solid-state Relay의 기대수명에 관하여 Fig. 1과 같이 ‘순간고장률[=위험률(Hazard rate, $h(t)$)]이 상승하기 시작하고 마모 고장기간으로 들어가는 욕조곡선의 지점(Point)’으로 정의하였다. 배전용 케이블의 경우 기대수명은 정상운전 조건에서 정상적으로 작동할 것으로 예상하는 시간이다. 기대수명은 운전환경, 재료의 순도, 가교도 등 여러가지 요인에 따라 달라지며, 욕조곡선에서 순간고장률이 상승하기 시작하고 마모고장으로 들어가는 시점이다[7].

B. 배전용 케이블의 설계수명과 기대수명

CNCV 케이블의 설계수명은 30년을 기준으로 절연설계를 하고 있다[3]. 케이블의 기대수명을 평가하기 위해서 가속열화, 전압상승 등의 시험으로 예측은 하지만 정확하게 검증하기는 어렵다. 최근에는 선진국의 자산관리 기술이 도입되면서, 통계적 기대수명 산출의 중요성이 부각되고 있다. 케이블의 수명은 크게 3가지로 고장 및 운영데이터 Weibull 분석을 통한 “통계적 기대수명”, VLF 등 진단데이터를 활용하여 잔여수명을 예측하는 “상태수명”, 부하전류에 의한 절연체의 열화정도를 판단하는 “운전수명”이 있다.

C. 배전용 케이블 운영데이터 추출 과정

통계적 기대수명 산출과정은 Table 3과 같다. 먼저 배전용 케이블 운영데이터(2022년 5월)에서 선종별, 나이별로 공장(C-m)을 추출한다. 배전용 케이블의 주요 선종(Table 1. CV제외한 7종)의 운영데이터 나이별 공장의 합계는 47,971,693(C-m)이며, 이를 구간의 평균 공장(76m)으로 나누면 평균 운영공장 수량은 631,206개가 산출된다. 구간의 평균 공장은 지중맨홀~지중맨홀, 지중맨홀~지상기기, 지상기기~지상기기, 지상기기~입상주 등 전산화번호로 구분이 가능한 설비에서 설비까지의 길이(m) 더한 후에 평균한 값이다. 운영데이터의 나이 산출은 기준 2021년에서 제작년도를 빼고 1년을 더하는데, 이는 나이를 0으로 만들지 않기 위함이다, 예를 들어

TABLE 2
배전용 케이블 통계적 기대수명 산출 과정

1. 운영데이터 수집	● 공장 : 47,971,693C-m (운영구간 수량 : 631,206개, 평균 공장 : 76m) - 나이 산출 = 2021년 - 제작년도 + 1년(NDIS 제작년도 추출) - 선종 : CNCV 등 7종(CV, 해저케이블, 광섬유케이블 등 제외)
2. 고장데이터 수집	● 전체 고장 : 1,603건 (고압 고장 발생기간 : 2008년~2021년)
3. 중복 고장 삭제	● 중복고장 제거 후 : 1,603건 → 1,585건 - 중복 조건 : 아래 5가지 사항 일치 시 중복으로 판단함 (사업소, 정전년월일, 변전소명, 회선면, 선종)
4. 나이, 열화고장 추출	● 나이 있는 고장 : 1,585 → 936건 - 나이 산출 = 정전년도 - 제작년도 + 1년 열화고장 추출 : 936건 → 483건(오류 제거) - 열화고장 3종 : 자연열화, 보수불량, 제조결함
5. 기대수명 1 단계	● Weibull++ 프로그램 활용 수명 산출(고장/운영데이터 활용) - Cut-off year 미적용 : 0년 적용(형상모수 β 분석)
6. 기대수명 2 단계	● Weibull++ 프로그램 활용 수명 산출(고장/운영데이터 활용) - Cut-off year 적용 : 10년 적용(형상모수 β 분석)

제작년도가 2021년인 경우에 ‘2021-2021+1’와 같이 산출하고 나이는 1년 미만으로 해석한다.

D. 배전용 케이블 고장데이터 추출 과정

고장데이터는 최근 14년(2008~2021년)간 고압 정전통계에서 추출하였다.[8] 정제과정은 고장데이터에서 중복고장을 삭제하고, 나이별 고장건수를 추출하고 다시 열화고장만 추출한다. 중복고장은 설비는 1개이나 반복된 순간고장 또는 인적 실수로 2번 이상 입력한 경우이다. 사업소, 정전년월일, 변전소명, 회선면, 선종 5가지가 모두 일치할 경우에 중복고장으로 판단하고, 고장데이터 중에서 첫번째 1건만 고장데이터에 반영하고 나머지 중복되는 고장은 삭제한다. 고장데이터의 나이 산출은 운영데이터와 유사하게 정전년도에서 제작년도를 빼고 1년을 더해서 산출한다.

E. 배전용 케이블 전체고장 원인별 점유율

고장데이터에서 중복고장을 삭제한 나이별 고장건수는 936건이며 Table 3과 같다. 고장의 종류는 자연열화(44%), 일반인 과실(36%), 작업자 과실(5%), 제작불량(4%) 등의 순으로 Fig. 2와 같다.

F. 배전용 케이블 전체고장 순간고장률

평균 운영공장 수량 631,206개 대비 전체고장 936건을 나이별 순간고장률로 표현하면 Fig. 3과 같다. 순간고장률은 초기 고장기간(3년 이내)에는 높고, 우발 고장기간(4~16년)에는 다소 지그재그로 변동하지만 일정수준을 유지하고, 마모 고장기간(16~22년)에 다시 증가하는 형상은 욕조곡선(나이 2~22년)과 유사하다. 다만, 나이 1~3년의 평균 운영공장이 적고 나이 1년의 순간고장률 $h(t)$ 이 낮은 것은 케이블을 현장에 설치하고 NDIS에서 준공처리하는 과정이

TABLE 3
전체고장 원인별 점유율

고장원인	건수	점유율
자연열화	412	44%
일반인과실	339	36%
작업자와과실	43	5%
제작불량	39	4%
보수불량	36	4%
시공불량	24	3%
과부하	16	2%
이물접촉	8	1%
기타	19	2%
합계	936	100%

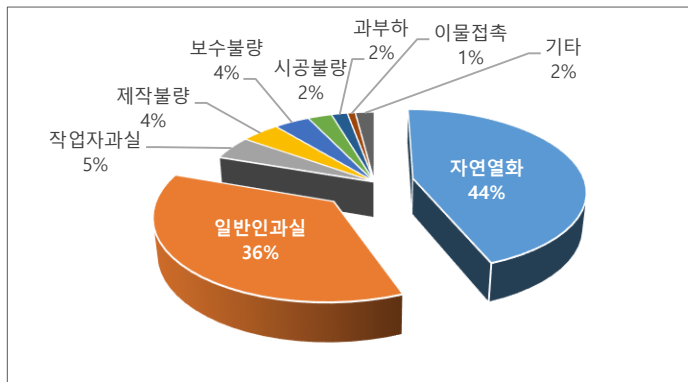


Fig. 2. 전체고장 원인별 점유율

수개월~수년 정도 소요되기 때문에 추정된다.

G. 배전용 케이블 열화고장 순간고장률

나이별 평균 운영공장 수량(개) 대비 열화고장 483건의 순간고장률은 Fig. 4와 같다. 곡선의 모양은 뾰족한 산 모양의 정규곡선과 유사하며, 나이 16년~22년까지 순간고장률이 급격히 상승하는 이유는 수트리 열화고장의 증가로 추정된다. 나이 22년 이후에 평균 운영공장 수량과 순간고장률이 동시에 감소하는 이유는 KDA-1(비파괴 열화진단기) 및 VLF(0.1Hz, Very Low Frequency) 진단으로 제작 20년이 경과된 케이블과 고장 이력이 많은 케이블(1988년 제작)을 사전에 교체된 결과로 추정된다[9],[10].

VI. Life Expectancy Calculation of MV Cables and Correction

A. 통계적 기대수명 산출을 위한 누적 고장확률 Bx(%) 선정

배전용 케이블에서 나이가 확인된 전체고장은 936건이며, 전체 고장 순간고장률은 Table 4와 같다. 선종별 기대수명 산출을 위한 누적 고장확률 Bx(%)는 Weibull++ 프로그램을 사용하여 산출하였다. 여기서 누적 고장확률 Bx(%)는 운전중인 전체 공장 수량이 100개라고 가정하면 그 중 X개가 고장나는데 소요되는 시간(년)이다. 케이블은 선(Line) 설비로 변압기와 유사하게 1개 단위로 구분하기 위하여 평균 공장(76m)으로 나누어 개수를 산출하였다. 케이블 고장은 복구 시간이 길고 또한 자재를 확보하기 힘들기 때문에 본사 활용부서와 협의하여 보수적인 관점에서 누적 고장확률 B1(%)를 통계적 기대수명으로 선정했다.

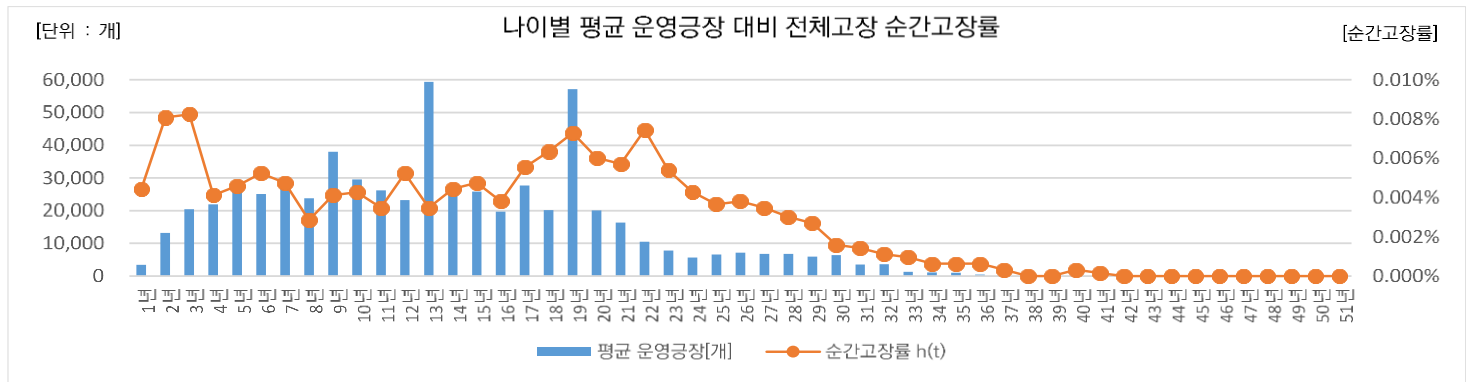


Fig. 3. 나이별 평균 운영공장 대비 전체고장 순간고장률

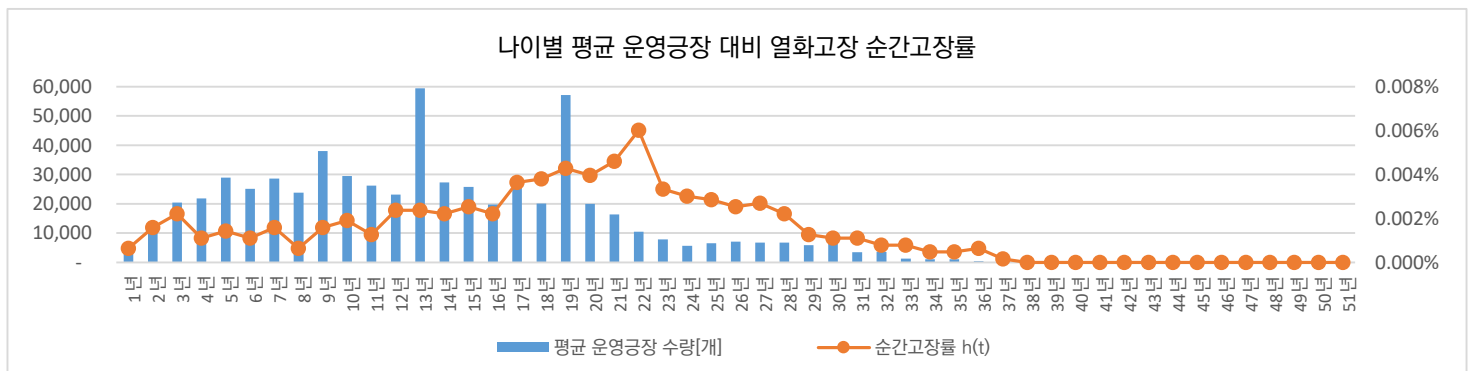


Fig. 4. 나이별 평균 운영공장 대비 열화고장 순간고장률

TABLE 4
배전용 케이블 나이 있는 전체고장(건) 및 순간고장률 $h(t)$

나이	전체고장[건]	열화고장[건]	고장(C-m)	고장수량[개]	확률밀도 $f(t)$	누적확률 $F(t)$	신뢰도 $R(t)$	순간고장률 $h(t)$
1 년	28	4	262,067	3,448	0.004%	0.004%	100.0%	0.004%
2 년	51	10	1,003,507	13,204	0.008%	0.013%	100.0%	0.008%
3 년	52	14	1,555,044	20,461	0.008%	0.021%	100.0%	0.008%
4 년	26	7	1,663,670	21,890	0.004%	0.025%	100.0%	0.004%
5 년	29	9	2,202,339	28,978	0.005%	0.029%	100.0%	0.005%
6 년	33	7	1,907,380	25,097	0.005%	0.035%	100.0%	0.005%
7 년	30	10	2,172,215	28,582	0.005%	0.039%	100.0%	0.005%
8 년	18	4	1,810,304	23,820	0.003%	0.042%	100.0%	0.003%
9 년	26	10	2,885,895	37,972	0.004%	0.046%	100.0%	0.004%
10 년	27	12	2,243,436	29,519	0.004%	0.051%	99.9%	0.004%
11 년	22	8	1,991,468	26,204	0.003%	0.054%	99.9%	0.003%
12 년	33	15	1,762,314	23,188	0.005%	0.059%	99.9%	0.005%
13 년	22	15	4,514,062	59,396	0.003%	0.063%	99.9%	0.003%
14 년	28	14	2,073,626	27,285	0.004%	0.067%	99.9%	0.004%
15 년	30	16	1,961,813	25,813	0.005%	0.072%	99.9%	0.005%
16 년	24	14	1,498,737	19,720	0.004%	0.076%	99.9%	0.004%
17 년	35	23	2,103,239	27,674	0.006%	0.081%	99.9%	0.006%
18 년	40	24	1,528,727	20,115	0.006%	0.088%	99.9%	0.006%
19 년	46	27	4,345,913	57,183	0.007%	0.095%	99.9%	0.007%
20 년	38	25	1,522,099	20,028	0.006%	0.101%	99.9%	0.006%
21 년	36	29	1,244,631	16,377	0.006%	0.107%	99.9%	0.006%
22 년	47	38	796,965	10,486	0.007%	0.114%	99.9%	0.007%
23 년	34	21	594,367	7,821	0.005%	0.120%	99.9%	0.005%
24 년	27	19	431,653	5,680	0.004%	0.124%	99.9%	0.004%
25 년	23	18	500,099	6,580	0.004%	0.128%	99.9%	0.004%
26 년	24	16	540,669	7,114	0.004%	0.131%	99.9%	0.004%
27 년	22	17	514,880	6,775	0.003%	0.135%	99.9%	0.003%
28 년	19	14	516,584	6,797	0.003%	0.138%	99.9%	0.003%
29 년	17	8	448,230	5,898	0.003%	0.141%	99.9%	0.003%
30 년	10	7	485,428	6,387	0.002%	0.142%	99.9%	0.002%
31 년	9	7	268,546	3,533	0.001%	0.144%	99.9%	0.001%
32 년	7	5	271,580	3,573	0.001%	0.145%	99.9%	0.001%
33 년	6	5	97,069	1,277	0.001%	0.146%	99.9%	0.001%
34 년	4	3	83,598	1,100	0.001%	0.146%	99.9%	0.001%
35 년	4	3	79,448	1,045	0.001%	0.147%	99.9%	0.001%
36 년	4	4	30,229	398	0.001%	0.147%	99.9%	0.001%
37 년	2	1	28,073	369	0.000%	0.148%	99.9%	0.000%
38 년			18,144	239	0.000%	0.148%	99.9%	0.000%
39 년			3,208	42	0.000%	0.148%	99.9%	0.000%
40 년	2		7,625	100	0.000%	0.148%	99.9%	0.000%
41 년	1		1,469	19	0.000%	0.148%	99.9%	0.000%
42 년			812	11	0.000%	0.148%	99.9%	0.000%
43 년			63	1	0.000%	0.148%	99.9%	0.000%
44 년			201	3	0.000%	0.148%	99.9%	0.000%
45 년			99	1	0.000%	0.148%	99.9%	0.000%
46 년			121	2	0.000%	0.148%	99.9%	0.000%
47 년			0	0	0.000%	0.148%	99.9%	0.000%
48 년			19	0	0.000%	0.148%	99.9%	0.000%
49 년			0	0	0.000%	0.148%	99.9%	0.000%
50 년			0	0	0.000%	0.148%	99.9%	0.000%
51 년			29	0	0.000%	0.148%	99.9%	0.000%
소계	936	483	47,971,693	631,206				

TABLE 5
고장원인 정정 전 선종별 B1% 통계적 기대수명

선종	B1%	기대수명(년) (초기 10년 제거)	기대수명(년) (초기 15년 제거)	전체 고장 (건수)	검토의견
CNCV		31.4년(298건)	32.1년(286건)	11~37년(298건)	
CNCV-W		38.1년(72건)	34.8년(33건)	5~26년(99건)	
TRCNCV-W		29.4년(17건)	28.2년(8건)	2~19년(41건)	기대수명 불신뢰
FRCNCO-W		24.9년(9건)	×	3~17년(16건)	제작결함 4건포함
FRCNCO-W/AL		×	×	×	고장미발생
TRCNCE-W		×	×	1~7년(27건)	
TRCNCE-W/AL		×	×	5년(2건)	
전체 선종 평균		33.9년(396건)	33.6년(328건)	1~37년(483건)	

TABLE 6
배전용 케이블 고장분석결과 원인별 소요기간

고장원인	건수 (점유율)	평균소요 (년)	전체소요 (년)	세부원인
외상	69(43.4%)	8.4	0.3~29	외상(칼날, 못), 굴착 등
수트리 열화	44(27.7%)	20.6	10~29	수트리 열화→전기트리
제조결함	27(17.0%)	4.9	0.4~17	보이드, 돌기, 이물질 등
원인불명	12(7.5%)	8.3	0.8~23	국부순상 의심
자연열화	5(3.1%)	23.8	19~27	수트리 의심되나 미발견
절연 불균일	1(0.6%)	28.0	28.0	절연체 두께 불균일
내도 굴곡	1(0.6%)	28.0	28.0	스트레스 집중 (돌기 유사)
총 합계	159(100%)	11.9	0.3~29	

B. 고장원인 정정 전 선종별 B1% 통계적 기대수명

배전용 케이블 선종별 B1% 기대수명은 Table 5와 같다. 수십 년간의 운전 경험이 있는 2개 선종(CNCV, CNCV-W)의 고장점유율은 약 82%(397건/483건)이다. 초기고장 제거년수(Cut-off year)를 10년으로 적용하면 CNCV는 31.4년, CNCV-W는 38.1년, 전체 선종(7종) 평균은 33.9년이 산출된다. 초기고장 제거년수를 15년으로 적용하면 CNCV는 32.1년, CNCV-W는 34.8년, 전체 선종(7종) 평균은 33.6년이 산출된다. 난연 케이블(FR-)은 전력구 또는 공동구에 설치되기 때문에 침수 운전의 가능성이 적기 때문에 수트리 열화의 가능성이 희박하여 CNCV, CNCV-W 2개의 선종보다는 기대수명이 크다. 그러나 난연 케이블 FR-CNCV-W의 통계적 기대수명은 24.9년으로 CNCV 31.4년 보다 더 짧게 산출되어서 고장데이터의 정확성이 의심된다.

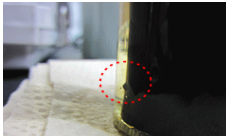
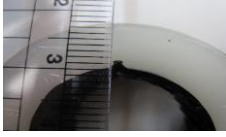
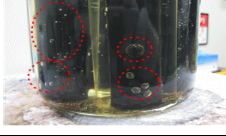
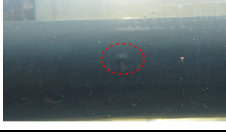
C. 최근 18년간 배전케이블 고장원인별 소요기간 분석

지난 18년간(2003년~2020년) 배전용 케이블에서 발생한 고장 중에서 전력연구원 및 설비진단처에서 고장원인을 분석(159건)한 결과는 Table 6과 같다. 고장 소요기간을 살펴보면 제작결함 4.9년, 수트리 열화 20.6년으로 Fig. 5와 같다[11]. 제작결함 27건 중에서 6건이 10년을 경과하여 고장으로 진전되었고 22.2%를 점유하고 있다. 따라서 고장 소요기간이 제작 10~20년 사이인 경우는 열화 고장이 아닐 가능성이 크므로 원인분석이 필요하다.

TABLE 7
고장원인 정정 전/후

기술지원 번호	고장번호	건수	제작년월	고장년월일	고장원인 정정 전/후
2012-K-000024-1	5445-20120117-0001	1	2002-02	2012-01-17	자연열화→제작결함
2012-K-000082-1	3922-20120625-0006	1	2001-01	2012-06-25	자연열화→제작결함
2013-K-000178-1	3930-20130410-0001	1	2001-01	2013-04-10	자연열화→제작결함
2014-K-000289-1	3922-20140203-0001	1	2001-01	2014-02-03	자연열화→제작결함

TABLE 8
기술지원 고장분석결과 제작결함 원인

기술지원 번호	제작결함 원인	고장분석 시 발견된 제작결함 원인
2012-K-000024-1	돌기결함	
2012-K-000082-1	보이드, 돌기	
2013-K-000178-1	보이드	
2014-K-000289-1	돌기	

D. 배전용 케이블 고장원인 착오입력분 정정처리

사업소의 요청으로 설비진단처에서 기술지원으로 작성한 FR-CNCV-W 고장분석보고서와 정전통계의 고장을 호 비교한 결과 고장원인을 착오로 입력한 사례가 4건 확인되었으며 Table 7, 8과 같다. 그리하여 착오입력 4건에 대해서는 고장원인을 자연열화에서 제작결함으로 정정하였다.

배전용 케이블에서 고장이 발생하면 하자기간(제작년월로부터 5년 이내)에 해당하는 경우에는 전문기관에 고장원인 분석을 의뢰하지만, 하자기간이 경과하면 업무담당자의 경험에 의해서 고장원인을 자연열화 또는 보수불량으로 처리하는 경우가 많다. 최근에 개발된 트리억제형 케이블(TR CNCV-W, TR CNCE-W, TR CNCE-W/AL) 또는 난연 케이블(FR CNCV-W, FR CNCV-W/AL) 선종은 운전경험이 짧고, 고장데이터 건수가 적기 때문에 고장분석 과정을 거치지 않고 임의로 자연열화 또는 보수불량으로 입력할 경우 Weibull 통계수명의 신뢰도를 저하시키므로, 향후에는 고장원인을 분석하여 정확한 데이터를 축적할 필요성이 있다.

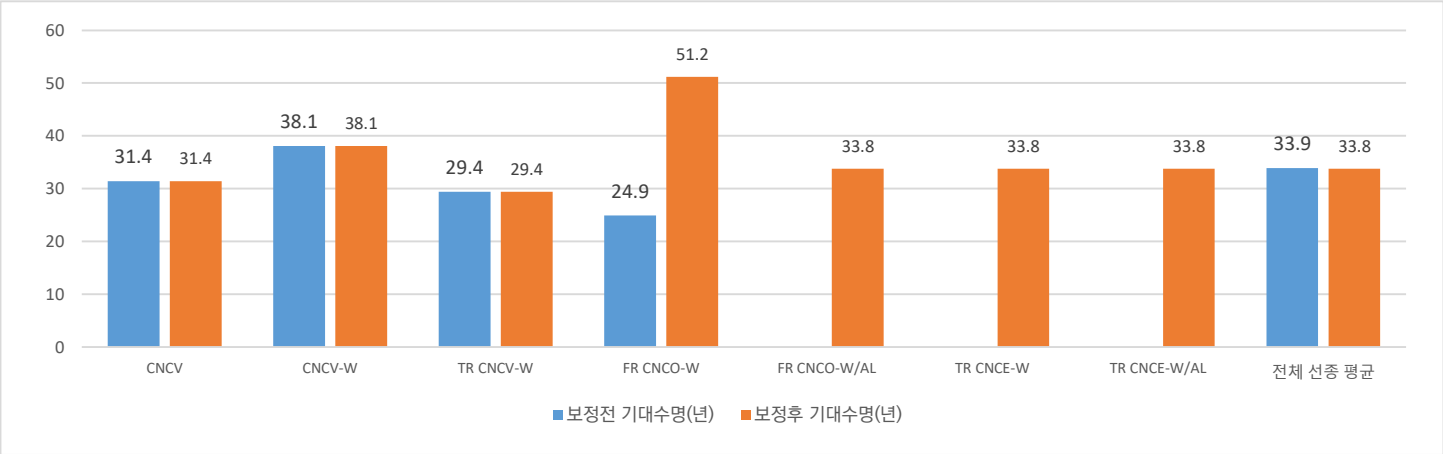


Fig. 6. 고장원인 정정 전/후 선종별 통계적 기대수명(년) 그래프

TABLE 9
고장원인 정정 후 선종별 B1% 통계적 기대수명

선종	B1% 기대수명(년) (초기 10년 제거)	기대수명(년) (초기 15년 제거)	고장 나이 (건수)	검토의견
CNCV	31.4년(298건)	32.1년(286건)	11~37년(298건)	
CNCV-W	38.1년(72건)	34.8년(33건)	5~26년(99건)	
TR CNCV-W	29.4년(17건)	28.2년(8건)	2~19년(41건)	전체 선종 평균
FR CNCO-W	51.2년(5건)	×(1건)	3~17년(16건)	제작결함 4건 제외
FR CNCO-W/AL	33.8년(0건)	33.6년(0건)	×(0건)	전체 선종 평균
TR CNCE-W	33.8년(0건)	33.6년(0건)	1~7년(27건)	전체 선종 평균
TR CNCE-W/AL	33.8년(0건)	33.6년(0건)	5년(2건)	전체 선종 평균
전체 선종 평균	33.8년(392건)	33.6년(328건)	1~37년(483건)	

E. 고장원인 정정 후 선종별 B1% 통계적 기대수명

4건의 고장원인을 자연열화에서 제조결함으로 정정한 후 초기 고장 제거년수를 10년으로 적용하면 B1% 기대수명은 Fig. 6과 Table 9와 같다. 정정 후 기대수명은 FR-CNCO-W는 51.2년으로 CNCV의 31.4년, CNCV-W의 38.1년 보다 훨씬 더 길게 산출된다. 1996년 연구개발 당시 TR CNCV-W 수명의 목표는 약 45년(XLPE의 1.5배 이상)이었다[5]. Table 9의 TR CNCV-W의 기대수명은 29.4년으로 CNCV 및 CNCV-W보다 더 짧지만, 고장데이터가 축적된 다면 수명이 연장될 것으로 추정된다. TR CNCV-W의 특성은 수트리의 성장을 억제하는 친수성(Hydrophilic)의 첨가제가 들어가서 수트리의 성장을 방해하므로[12], 적어도 기존의 CNCV 및 CNCV-W보다 수명이 길 것으로 예측된다.

만약 초기고장 제거년수를 15년으로 적용하면 FR-CNCO-W의 경우 고장이 1건으로 데이터 부족으로 기대수명 산출이 불가능하며, 전체 선종의 평균이 32~34년으로 평균화되어 선종별 계층화가 어려워지는 단점이 발생한다. 따라서 고장원인을 착오로 입력한 경우가 확인될 경우에만 고장원인을 정정한 후 초기고장 제거년수를

10년[13]으로 적용하는 것이 바람직해 보인다.

운전경험이 짧은 난연 케이블(FR-) 또는 트리억제형 케이블(TR-)의 경우 고장데이터 건수가 10건 이하로 적은 경우 고장원인을 착오로 분류하면 기대수명 평가에 많은 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 따라서 운전경험이 짧은 선종의 경우 고장 소요기간이 제작 10년 이내에는 열화고장으로 입력이 안되도록 NDIS에서 체크 기능을 신설하고, 제작 10~20년 사이인 경우에는 고장원인을 분석하여 정확한 데이터를 축적할 필요성이 있다.

F. 주요 선종별 순간고장률 h(t) 그래프와 형상모수(β)

Weibull++ 프로그램 활용하여 주요 선종별 순간고장률 h(t) 그래프와 B1% 기대수명을 산출한 결과는 Table 10과 같다. 4개의 선종 모두 초기고장 10년을 제거하면, 형상모수(β)는 2이상으로 전형적인 열화고장의 패턴을 보이고 있다.

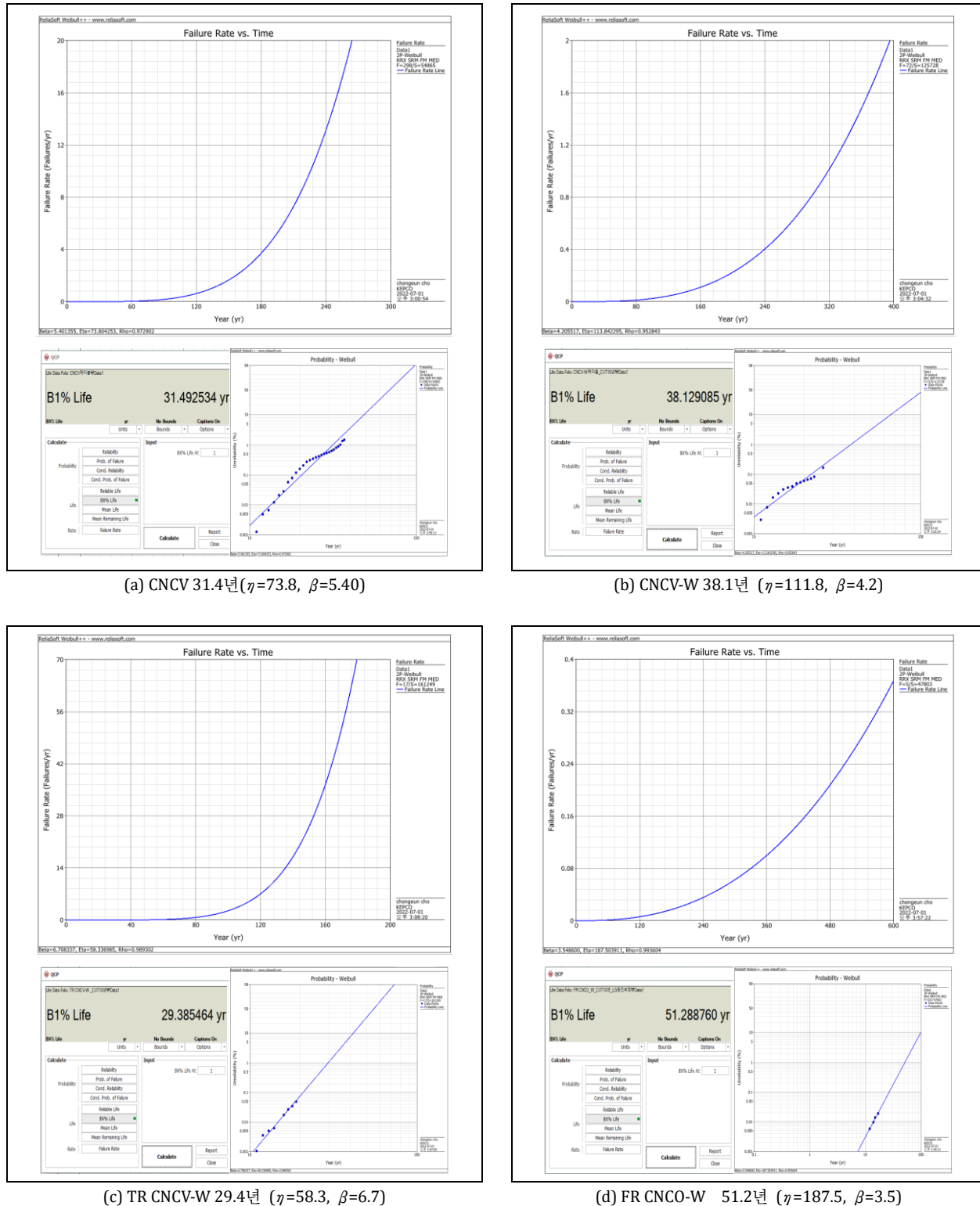
V. Conclusion

지금까지 배전용 케이블 고장데이터(2008년~2021년)와 운영 데이터(2022년 5월)를 활용하여 선종별 통계적 기대수명을 산출하였다. 고장데이터 정제과정은 1,603건의 고장중에서 중복고장을 삭제하면 1585건, 그 중에서 제작년도가 입력되어 나이 산출이 가능한 데이터는 936건, 그 중에서 열화고장만 추출하면 483건이 추출된다. 483건에 대해서 초기고장 10년을 제거하고, 고장원인이 착오로 입력된 4건에 대하여 원인을 정정하면 392건의 고장이 남는다. 운영데이터는 47,971,693C-m에 이르며 평균 공장(76m)로 나누면 평균 운영 공장 수량은 631,206개가 산출된다. 위의 392건의 고장데이터와 631,206개의 운영데이터를 활용하여 선종별로 통계적 기대수명을 산출하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 열화고장의 순간고장률 곡선의 모양은 뾰족한 산 모양의 정규곡선과 유사하며 나이 16년~22년까지 순간고장률이 급격하게 상승하는 이유는 수트리 열화고장의 증가로 추정되며, 나이 22년 이후에 급격하게 감소하는 이유는 진단으로 제작 20년 경과된 케이블 중에서 불량으로 판정된 케이블을 교체한 결과로 보여진다.

둘째, 운전경험이 짧은 난연 케이블 또는 트리억제형 케이블의 경우 고장 소요기간이 제작 10~20년 사이인 경우는 열화고장이 아닐 가능성이 크므로, 고장원인을 분석하여 정확한 데이터를 축적

TABLE 10
주요 선종별 순간고장률 $h(t)$ 및 누적고장확률 B1% 기대수명(년)



할 필요성이 있다.

셋째, 고장분석보고서 159건에 대한 고장원인별 평균 소요기간은 제조결함은 4.9년, 외상은 8.4년으로 마모기 열화고장 선정을 위한 초기고장 제거년수(Cut-off year)는 10년으로 정하는 것이 적절하다고 판단된다.

넷째, 초기고장 제거년수를 10년으로 적용하면 FR-CNCV-W의

기대수명은 51.2년, CNCV-W는 38.1년, CNCV는 31.4년이며, 고장데이터가 없는 선종은 전체 선종의 평균 33.4년을 적용한다. 다만, TR CNCV-W의 기대수명은 29.4년으로 CNCV 보다 더 짧지만 향후 고장데이터가 축적이 된다면 40년 이상으로 수명이 연장될 것으로 추정된다.

References

- [1] 홍성규, “배전설비 진단기술 적용현황 및 고도화 방향, 전기의 세계”, PP. 42, 2014
- [2] 한전 e-배전정보 > 설비통계 > 지중설비통계(2005, 2021)
- [3] 배전운영처 지중배전팀, “지중케이블 열화 진단개론”, PP14~96, 2010
- [4] 황원서, “배전산업의 22.9kV-y 다중접지 배전방식의 도입”, 전기학회지 제 46권7호, PP25~27, 1997
- [5] 한민국 외, “수트리 억제형 22.9kV CV/CN 케이블 개발(1차년도 중간보고서)”, PP2~197, 1996
- [6] 한전 NDIS GIS 배전용케이블 선종별 데이터 추출(2022.5)
- [7] OMRON, “Technical Explanation for Solid-state Relays” report PP26.
- [8] 한전 정전통계 종합관리시스템 > 정전세부내역조회(2008~2021)
- [9] 배전운영처, “지중배전공사 시공절차서”, PP136, 2008
- [10] 김일권, “전력케이블 열화진단 신기술”, PP57~58, 전력기술인, 1998
- [11] 조종은, “지중 배전용케이블 고장통계분석 및 고장률 활용 진단대상 우선순위 선정방법”, PP263~268, Volume 7, KEPCO Journal, 2021
- [12] Steven Boggs and James Xu, “Water Treeing-Filled Versus Unfilled Cable Insulation”, Volume 17, No.1, IEEE, PP23~29, 2001
- [13] B.Desai, “Industry-wide Transformer Database”, EPRI, PP410, 2015