

A Comparison Study on Mechanical Properties of XLPE Insulation Thermally Degraded at Equivalent and Variable Temperature Conditions

XLPE 절연체의 등가 및 가변온도 가속열화실험을 통한 기계적 특성 비교 분석

Taejoon Kim, Jae-Sang Hwang, Sung Hoon Jung, Tae Young Kim
김태준, 황재상, 정성훈, 김태영

Abstract

Recently, as the number of years of operation has increased for more than 30 years, interest in evaluating the remaining life of major power facilities such as transformers and ultra-high voltage cables is increasing. In particular, the risk of failure is increasing because the underground transmission XLPE cable has been built since 1980 and has been operating in excess of 30 years of design life or close proximity. Therefore, it is necessary to develop an algorithm to evaluate the residual life of the XLPE cable considering the load to determine the risk of failure. Since load data is large amount of data, it is necessary to make the variable load information equivalent to the time unit first in order to calculate the remaining life of the system quickly. In overseas literature, transformers are reported to be standardized for variable load equivalent conversion formulas, but they have not been reported for ultra-high voltage cables. Therefore, in this paper, whether the equivalent conversion formula of a transformer can be applied to XLPE cables was reviewed through accelerated degradation tests under equivalent and variable temperature conditions, and considerations were studied when evaluating the remaining operating life of XLPE cables based on the experimental results.

Keywords: XLPE Cable, Mechanical property, Accelerated degradation experiment, equivalent conversion formula

I. 서론

지중송전 케이블 중 154kV 가교 폴리에틸렌(XLPE) 케이블의 10% 정도가 20년 이상 운영 중이며, 30년 이상 운영중인 케이블이 약 3%정도 차지한다. 이와 같이 설계수명 이상으로 운영되는 케이블이 존재하지만 케이블에 대한 교체기준은 따로 마련되어 있지 않아 고장의 위험에 노출되어 있는 상황이다. 이러한 고장 위험을 줄이기 위해서는 케이블의 상태평가를 통해 현재 상태를 점검하고, 지금까지의 운전 이력을 통해 케이블의 잔여수명을 예측하여 고장이 발생하기 전에 교체 해야한다. 이를 위해서는 케이블의 정기적인 진단 및 점검을 통해 정확한 상태를 확인하여야 하며, 이상이 있을 시 조치 및 교체가 이루어 질 수 있도록 해야한다. 이와 더불어 케이블의 운전 이력을 확인하여 부하에 의한 케이블의 수명 감소를 예측하는 것이 매우 중요하다. 케이블 열적 열화에 따른 수명 감소는 케이블 절연체의 구조적 및 화학적 특성 변화에 의해 나타나는데, 케이블 운전 부하에 수반하여 발생하는 열 에너지에 의해 고분자 절연재료의 산화(oxidation), 분해(decomposition), 미세공극(void)의 팽창, 및 고분자 조망 사슬(entanglement)이 끊어지는 등의 현상이 나타나고 이로 인해 절연체의 미시 구조 및 화학적 상태가 변화하고 이로 인해 최종적으로 기계적 물성이 저하된다. 이는 변압기의 절연재료인 절연지와 같은 다른 절연재료와는 열적 열

화 특성이 다르기 때문에 XLPE 절연체만의 열적 열화 특성을 분석하는 것은 매우 중요하다. 따라서 XLPE 절연체를 위한 전기적 부하 정보를 열적 스트레스로 변환하는 방법과 열적 스트레스로 인한 열화 특성을 분석 하는 것이 무엇보다 중요하다[1].

현재 KEPCO에서 운영중인 변전소운전실적관리시스템(SOMAS)을 통해 얻을 수 있는 케이블의 부하데이터는 1시간 단위로 측정되어 기록되고 있으며, 케이블 열화에 직접적인 영향을 주는 열적 인자로 변환하기 위해서는 시간-부하 정보가 시간-온도 정보로 변환되어야 한다. 케이블 운영 중 시간에 따른 부하가 일정하다면 케이블의 온도는 일정하게 나타나겠지만, 실제 케이블 운영 시에는 시간에 따라 부하가 변하며 이에 따른 케이블의 온도도 변하게 된다. 따라서 가변 부하를 정확히 등가온도로 변환할 수 있는 방안은 대용량 데이터이기 때문에 시스템에서 운전잔여수명을 빠르게 계산하기 위해 필수적이지만 아직까지 XLPE 절연체에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다. 그렇다고 1시간 단위의 부하데이터를 모두 사용하게 되면 XLPE 케이블의 부하 운전수명을 계산하는데 시스템에서 많은 시간이 소요되는 문제점이 있다. 또한, 일반적으로 케이블 운영은 정격 부하에 비해 낮은 범위에서 운영되므로 모든 부하를 적용하여 계산하는 것은 좋은 방법이 아니다. 따라서 가변 부하의 일정 구간을 등가화 하는 방법을 적용하는 것이 효율적인 방법이다.

이를 위해 많은 연구를 통해 알려진 변압기 가변 부하의 등가

Article Information

Manuscript Received July 19, 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@kepcoco.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.kepcoco.kr>.

화 방법에 대해 알아보고 XLPE 케이블에 적용 가능한지 확인할 필요가 있다. 일반적으로 절연체를 절연체로 하는 변압기의 경우 1일 24시간을 기준으로 동일한 부하 패턴이 반복되는 경우가 많기 때문에 1일 24시간을 부하 주기로 설정한다. 1일 부하주기에서 부하는 시간에 따라 변동되어 나타나기 때문에 등가 부하로 변환시켜 주기 위해서는 우선 일정시간에 따라 몇 개의 구간으로 나눈다. 각각의 구간에서 일정한 값을 가지는 등가 부하로 변환하기 위해서는 아래 식 (1)의 등가 부하 변환 수식을 이용하여 산출할 수 있다.

$$Equivalent\ load = \left[\frac{L_1^2 t_1 + L_2^2 t_2 + L_3^2 t_3 + \dots + L_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n} \right]^{0.5} \quad (1)$$

L_1, L_2, \dots : 각 시구간에서의 부하를 나타내며 백분율(%), 또는 전압, 전류 등으로 나타낼 수 있음.

N : 주기내 각 구간에서의 부하의 전체 수

t_1, t_2, \dots : 각 구간에서의 시간

위의 등가 부하 산출식은 시간단위 구간에서 변동되는 부하를 제곱평균제곱근(RMS) 값으로 나타낸 것이기 때문에 시간단위 구간 설정이 매우 중요하다. 아래 Fig. 1의 이상운전 조건과 같이 짧은 구간에서 순간적으로 높은 부하가 발생한 경우를 등가피크부하(equivalent peak load)라 하며 등가피크부하가 있는 부하 주기에서는 모든 시간에 대한 등가변환수식을 적용하여 계산하기 보다는 등가피크부하가 있는 구간에 해당하는 시간단위 구간을 따로 선택하여 계산하는 것이 적합하다[2-3].

XLPE를 절연체로 하는 케이블에서 변압기의 등가변환수식을 사용하기 위해서는 실험적 검증이 필요하다. 가변 부하를 사용하여 직접 케이블 열화를 확인하는 것보다 가변 온도를 사용하여 실험을 진행하는 것이 효율적이므로 가변 온도 인가 방식을 선택하였다. 가변 온도로 열적 열화를 주었을 때의 열적 열화와 가변 온도의 평균 온도의 열적 열화가 동일하게 받는지 확인이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 XLPE 케이블 절연체 샘플을 제작하여 1차적으로 등가 온도에서 가속 열화를 시켜준 후 기계적 특성 변화를 관찰하였다. 다음으로는 가변 온도로 가속 열화를 시켜준 후 기계적 특성을 분석하여 등가 온도 가속 열화 결과와 비교하는 실험을 진행하였다. 이를 통해 변압기의 등가부하변환 수식을 XLPE 절연체에 적용가능한지 검토하였다. 논문의 구성은 2장에서 XLPE 절연체의 가속열화실험 방법을 소개 하였으며, 3장에서는 등가 온도 가속열화실험 방법과 결과를 기술하였다. 4장에서는 가변 온도 가속열화실험 방법과 결과를 기술하였으며, 5장에서 등가 및 가변 온도 가속열화실험 결과를 비교 분석하여 그 결론을 기술하였다.

II. XLPE 절연체의 가속열화실험 절차 및 방법

등가부하 변환수식의 검증 실험을 위해서는 XLPE 절연체 시료를 가속 열화 시켜준 후 기계적 강도를 측정하여 확인할 수 있다. 여기서 가속 열화는 열적, 전기적, 화학적, 기계적 등이 열화요인으로 작용하는 인자를 분석하여 운영 환경보다 가혹한 조건에서 스트레스를 인가하여 기대수명을 유추할 수 있는 정량적 실험방법이다. 본 실험에서는 케이블에 등가/가변 온도와 같은 열적 열화로 대체하여 비교하는 실험을 진행하였다. 아래 Fig. 2와 같이 XLPE 시편을 가혹 온도조건에서 등가 및 가변 온도로 가속 열화를 시켜준 후 만능재료시험기(UTM)를 이용하여 신율과 인장강도와 같은 기계적 물성 측정하고 이를 비교 검증하였다[4-6].

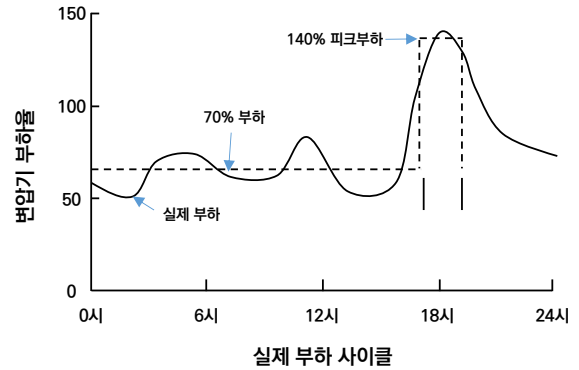


Fig 1. 변압기 가변부하의 등가부하 변환의 예(IEEE std C59.91)



Fig 2. XLPE 케이블 가속열화실험 평가 방법

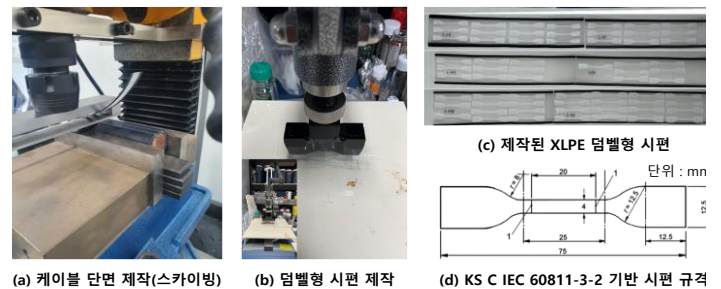


Fig. 3. XLPE 절연체 시편 제조 과정

A. XLPE 절연체의 시편 제작 방법

케이블의 특성은 절연체의 두께 방향으로 일정한 값을 갖지 않고 분포도를 갖는다. 따라서 케이블 한 부분이 전체를 대변할 수 없기 때문에 여러 지점의 시편을 얻고 이에 대한 분석을 진행하여야 한다. XLPE 절연체 시편의 기계적 물성 측정을 위해 먼저 Fig. 3 (a)와 같이 스카이빙 장비를 이용하여 XLPE 케이블의 단면을 제작하여야 한다. 제작된 XLPE 케이블은 Fig. 3(b)의 덤벨형 시편 제작기를 이용하여 XLPE 단면을 잘라 Fig. 3(c)와 같이 시편을 제작하였다. 여기서 덤벨형 시편의 규격은 Fig. 3(d)와 같은 KS C IEC 60811-501:2018의 시편 규격에 맞게 제작하였다. 시편의 물림부는 12.5mm이며 양쪽으로 물리기 때문에 전체 75mm중 25mm가 이에 해당된다. 즉 물림부 사이의 거리가 약 50mm가 되어야 정확한 실험이 진행될 수 있다. XLPE 시편 준비 후 각 단면의 두께를 측정한 결과 평균 2.081~2.113mm로 확인되었다 [7].

B. XLPE 절연체의 가속 열화 및 인장강도 실험 방법

제작된 XLPE 시편은 계획된 등가/가변 온도에 해당하는 강제순환오븐에서 가속 열화를 진행하였다. 가속 열화된 시편은 UTM를 통해 신율을 측정하는 실험을 진행하였다. 인장강도 실험 시 주의

할 사항은 실험 시편을 인장강도 시험기 그림에 고정할 때에 고정 위치에 따라 인장 시험의 결과 값이 달라지기 때문에 인장강도 시편은 다음과 같은 기준으로 인장강도 시험기에 고정하여 각 열화 조건에 따른 절연체 시편의 신율을 확인하여야 한다. 1) 시편은 인장강도 시험기 그림 중앙에 고정하여 지면과 수직을 이루도록 한다. 2) 시편의 모서리가 육안으로 보일 수 있는 그림의 높이로 고정함으로써 양쪽 그림에 고정하는 시편의 지점 및 넓이가 같게 한다. Fig. 2의 (C)와 같이 UTM을 이용하여 기계적 특성을 확인하였으며 5개의 절연체 시편의 파단 시 신율을 확인하여 평균값 및 표준오차를 구하였다. 열화가 진행됨에 따라 신율이 초기치 보다 감소하는 것을 확인하였다.

III. 등가 온도 가속열화실험 방법 및 결과

A. 등가 온도 가속열화실험 조건

등가 온도 가속열화실험은 가변 온도 가속열화실험 결과를 비교할 수 있는 하나의 기준이 되기 때문에 먼저 수행되었다. 등가 온도 가속열화실험은 IEC 60126-1에서 제시한 규격에 따른 노출 온도와 시간을 참조하여 온도 조건 및 노출 시간을 결정 하였다. XLPE의 온도지수(Thermal Index)를 반영한 조건을 선택하였으며 추가로 보다 정확한 XLPE 절연체의 기계적 특성 분석을 위해 허용 온도 90°C와 규격 최저온도 120°C 사이 온도인 100°C 조건을 하나 추가하여 총 100, 120, 140, 160°C의 4가지 온도 조건에서 가속 열화를 한 후 기계적 특성을 분석하였다. 등가 온도 가속열화에서 중요한 요소는 온도 별 정확한 열화 노출 시간을 결정하는 것이다. IEC 60126-1에서 노출 시간을 제시하고는 있지만 본 실험에서는 초기 100% 신율 대비 50%로 감소하는 열화 기간을 완전 열화 시점으로 정하였기 때문에 온도 별 열화 회수 시기를 따로 정하여 실험을 진행하였다. 여기서 중요한 점은 설정한 열화 회수 시기를 놓쳐 완전 열화가 일어난 경우 열화 시편은 손으로 잡아당겨도 파손될 정도로 기계적 물성이 낮아지기 때문에 이를 유의하여 실험을 진행하여야 한다[8].

B. 등가 온도 가속열화실험 결과

가속열화실험 진행 시 XLPE 시편의 열화 양상을 시편의 색깔을 통해 먼저 확인할 수 있었다. XLPE 절연체 시편의 색깔은 최초 투명한 흰색에서 열화가 진행됨에 따라 점차 불투명의 노란색으로 변화하는 것을 확인할 수 있었으며 Fig. 4와 같이 녹는점(T_m) 이하에서는 200일에 걸쳐 천천히 색깔 변화가 나타나지만 녹는점 이상에서는 14일 만에 급격히 색깔 변화가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 녹는점 이상에서 열화가 월등히 빨리 일어나는 것을 알 수 있었다.

다음으로 등가 온도 가속열화실험에서의 기계적 특성을 확인하기 위해 만능재료시험기(UTM)을 이용하여 XLPE 절연체 시편의 신율 결과를 확인하였다. 절연체 색깔 변화의 양상과 동일하게 가속 열화 온도가 높을수록 초기 신율 대비 50% 감소되는 열화 완료 시점이 매우 짧아지는 것을 Fig. 5와 같이 확인할 수 있었다.

VI. 가변 온도 가속열화실험 방법 및 결과

A. 가변 온도 가속열화실험 조건

가변 온도 가속열화실험은 Fig. 6과 같이 12시간씩 온도를 가변

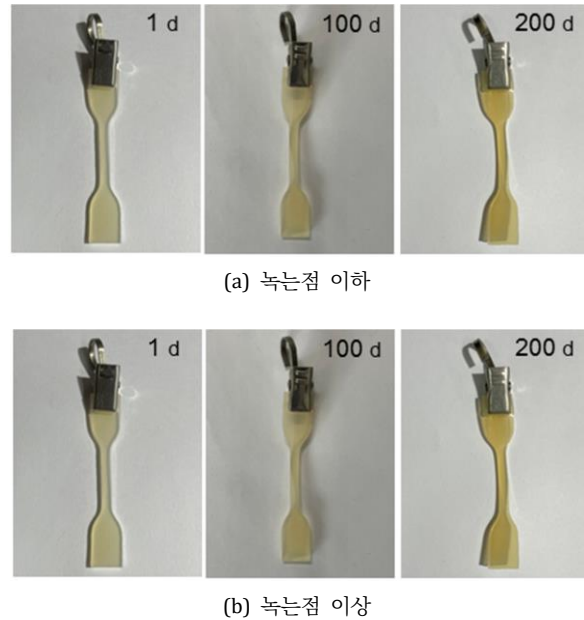


Fig. 4. 가속열화실험에 따른 시편 색깔 변화

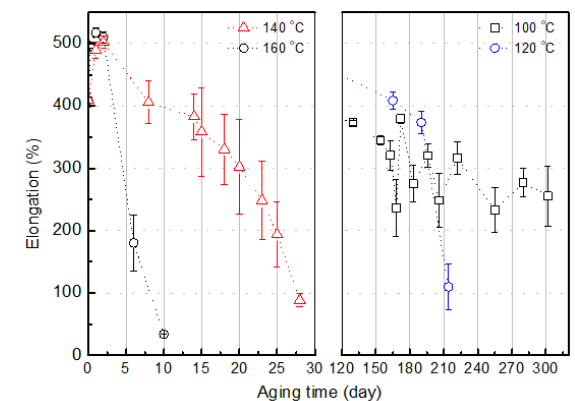
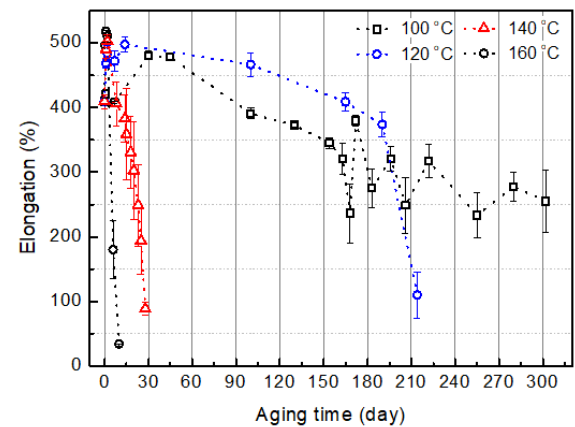
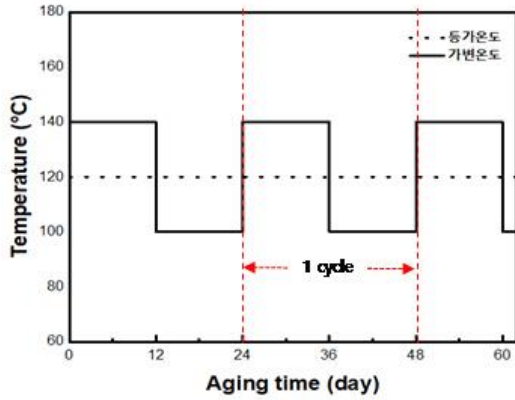
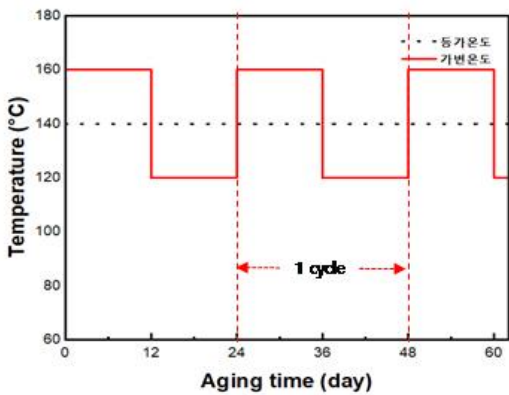


Fig. 5. 등가 온도 조건에서의 신율 변화

하면서 가속 열화를 시켜주며 진행하였다. 기본적으로 가변 온도로 열적 열화를 주었을 때의 열적 열화와 가변 온도의 평균 온도의 열적 열화가 동일하게 받는지 확인하는 실험을 일차적으로 진행하였으며, 다음으로는 가속열화에 영향을 주는 요소가 무엇인지 확인하는 실험을 진행하였다.



(a) 100~140°C 가변온도 조건



(b) 120~160°C 가변온도 조건

Fig. 6. 가변 온도 가속열화실험 조건

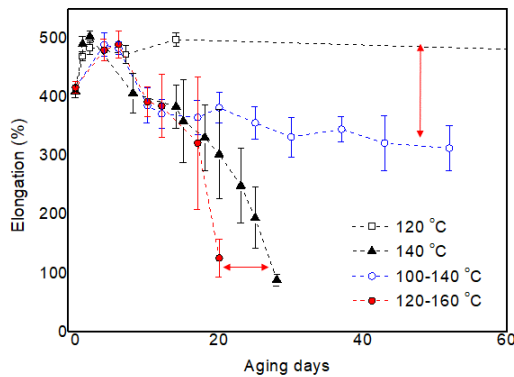


Fig. 7. 등가 온도와 가변 온도의 신율 변화 비교

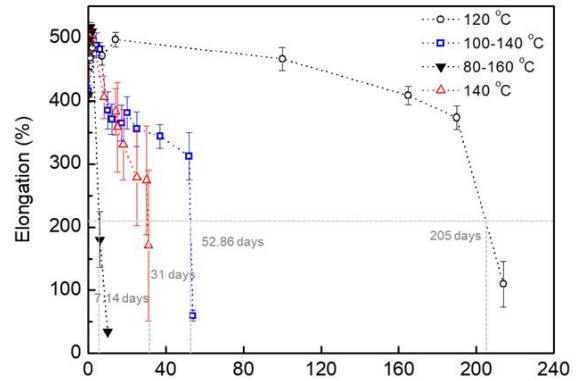
B. 가변 온도 가속열화실험 결과

먼저 변압기의 가변부하의 등가변환수식 사용 가능성을 확인하기 위하여 가변 온도로 열적 열화를 주었을 때의 열적 열화와 가변 온도의 평균 온도의 열적 열화의 실험결과를 비교 분석하였다. Fig. 7과 같이 가변온도 조건에서 열화가 평균 온도의 열적 열화 대비 빠르게 진행되는 것을 확인할 수 있었으며 이를 통해 가변 부하의 평균 등가화는 적절하지 않음을 확인할 수 있다. 하지만 실험결과는 가속열화를 위해 정상운전 온도 이상에서 진행되었기 때문에 저

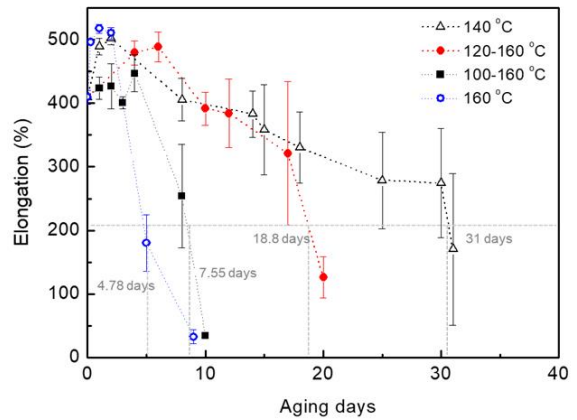
TABLE 1

피크온도 영향 확인을 위한 실험조건

온도(°C)	평균온도(°C)	열화기간(일)
120]		250
100~140	120	52.8
80~160		7.1



(a) 피크온도 영향 확인



(b) 연화점 영향 확인

Fig. 8. 피크 온도 및 연화점에 따른 신율 비교

온을 포함한 모든 온도영역에서 등가화가 적절하지 않다고 단정지을 수는 없다.

추가적으로 가변 온도조건에서 열화에 직접적으로 영향을 미치는 요소를 확인하기 위하여 2가지 실험을 추가로 수행하였다. 먼저 피크온도의 영향을 확인하기 위하여 Table 1과 같이 가변 온도의 평균이 120°C인 조건에서 열화 양상을 확인하였다. 피크온도가 120°C에서 160°C로 증가함에 따라 열화기간이 205일에서 7.1일로 감소하는 것을 확인하였다. 이를 통해 동일한 열적 에너지를 받았더라도 피크온도가 클수록 열화가 더욱 빠르게 진행되는 것을 확인할 수 있었다.

다음으로 XLPE 재료특성에 따른 영향을 확인하기 위하여 XLPE의 연화점(약110°C)을 포함한 가변온도와 포함하지 않은 가변온도의 실험결과를 Fig. 8과 같이 비교하였다. 여기서 연화점이란 물질이 열에 의하여 변형되어 연화를 일으키기 시작하는 온도로 고분자 재료는 연화점 이상의 온도가 되면 재료의 물리적 특성이 저하되는 현상이 나타나게 된다. 연화상태에서는 형태가 변화할 정도로 사슬이

운동에너지를 가진 상태이기 때문에 연화점을 기준으로 온도를 가변하게 되면 절연체가 구조적인 변화를 갖게 되면서 물성 저하가 발생할 수 있다. 일반적으로 120-160°C 가변 조건이 100-160°C 가변 조건보다 열적 에너지가 크기 때문에 열화가 더욱 빠르게 진행될 것으로 예상되지만, 본 실험결과에서는 연화점을 포함하는 가변 조건인 100-160°C에서 열화가 7.5일로써 120-160°C 가변조건의 18.8일보다 열화가 빠르게 진행되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 온도 가변 시 연화점 포함 여부는 가속열화의 영향을 주는 하나의 요소로 볼 수 있다고 사료된다.

V. CONCLUSION

본 논문에서는 변압기에 활용되고 있는 가변 부하의 등가변환수식을 케이블 절연체에 활용 가능한지 검토하기 위해 XLPE 케이블의 가속열화실험을 수행하였다. 등가 온도 가속열화실험과 가변 온도 가속열화실험의 열화 양상을 비교하였으며 그 결과 변압기의 등가변환수식이 케이블에는 적합하지 않음을 확인하였다. XLPE 케이블에 적합한 등가변환수식은 현재 개발되어 있지 않으며 부하에 따른 운전잔여수명 산출을 위해서는 등가변환수식 개발이 필요한 사항이다. 실험 결과를 통해 XLPE 케이블의 등가변환수식 개발 시 중요한 요소 2가지 임을 알 수 있었다. 첫번째 요소는 피크 온도에 따른 열적 열화를 고려해야 한다는 것이다. 피크 온도에 따라 열화가 지수적으로 증가하기 때문에 피크 온도를 반영한 등가변환수식의 개발이 이루어져야 한다. 두번째 요소는 XLPE 재료 특성인 연화

연화점을 반영한 열화를 고려하여 한다. 절연체 온도 가변 시 연화점 포함 여부가 열화에 영향을 미치기 때문에 이를 반영한 등가변환수식 개발이 이루어져야 한다.

References

- [1] Abdulsalam S. "A study of expected lifetime of XLPE insulation cables working at elevated temperatures by applying accelerated thermal ageing", *Heliyon*, Vol. 6, e03120, pp1-11, 2020
- [2] IEEE C57.91-2011, IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators
- [3] IEC 62506:2013, Methods for product accelerated testing
- [4] Su-Gil Choi, Si-Kuk Kim, "A Study on the Traking Characteris Depending on Accelerated Degradation of PVC Insulation Material", Vol. 31 No. 6 pp. 91-98, 2017
- [5] Kee-Hong Um, Kwan-Woo Lee, "A Study on Cable Lifetime Evaluation based on Characteristic Analysis of Insulation Resistance by Acceleration Factor of the Arrhenius Equation", Vol. 14. No 5, pp. 231-236, Oct. 31. 2014.
- [6] IEC Standard 60853-2, "Calculation of the Cyclic and Emergency Current Ratings of Cables. Part 2: Cyclic Rating Factor of Cables Greater than 18/30 (36) kV and Emergency Ratings for Cables of All Voltages", Publication 853-2, 1989.
- [7] KS C IEC 60811-501:2018, "전기 및 광섬유 케이블-비금속 재료에 대한 시험방법"
- [8] KS C IEC60216-1, "전기 절연 재료-열 내구성-제 1부: 노화절차 및 시험결과 평가"