

IV와 HIV 절연 전선용 PVC 절연재료의 수명 예측

박형주*†

Lifetime Prediction on PVC Insulation Material for IV and HIV Insulated Wire

Hyung-Ju Park*†

†Corresponding Author

Hyung-Ju Park
Tel : +82-63-450-7282
E-mail : sandelf@howon.ac.kr

Received : December 14, 2018

Revised : January 2, 2019

Accepted : January 3, 2019

Copyright©2019 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : Weight and elongation changes of IV and HIV insulations were measured simultaneously at several given temperature of 80°C, 90°C and 100°C. And the lifetime was predicted using the Arrhenius model. Based on the initial weight values, a 50% elongation reduction was seen at 6.96% for the IV insulation and 10.29% for the HIV insulation. The activation energy from the slope of the lifetime regression equation was calculated as 92.895 kJ/mol(0.9632 eV) for the IV insulation and 95.213 kJ/mol(0.9873 eV) for the HIV insulation. Also, the expected lifetime at the operating temperature of 30°C to 90°C is 2.02 to 94.32 years, and longer lifetime was predicted on HIV insulated wires than on IV insulated wires. As a result, it was found that the thermal characteristics of the HIV insulated wires were about 12.44% better than those of IV insulated wires under the same conditions of use.

Key Words : PVC insulation material, accelerated degradation, lifetime prediction, activation energy, arrhenius model

1. 서론

2018년 소방청 통계연보에 따른 2017년 화재 원인별 화재발생 현황을 살펴보면, 총 화재발생 건수는 44,178건으로 이중 23,425건의 부주의에 의한 화재에 이어 전기적 원인은 20.95%인 9,256건으로 두 번째로 높게 나타났다¹⁾. 2008년부터 2017년까지 10년의 통계에 있어서도 전기적 원인에 의한 화재는 매년 약 10,000건을 상회하고 있는 주요 화재원인을 차지하고 있다¹⁾.

2017년 전기적 원인에 의한 발화요인의 소분류에 따른 화재발생 현황을 살펴보면, 미확인 단락 2,455건(26.50%), 절연 열화에 의한 단락 2,362건(25.50%), 접촉불량에 의한 단락 994건(10.73%), 트래킹에 의한 단락 894건(9.65%), 과부하/과전류 870건(9.39%), 압착/손상에 의한 단락 582건(6.28%), 기타 514건(5.55%), 누전/지락 317건(3.42%), 반단선 184건(1.99%), 충전단락 92건(0.99%) 순으로 미확인을 제외한 절연 열화에 의한 단락이 가장 높게 나타났다. 또한 절연 열화에 의한 단

락에 의해 화재가 발생한 장소를 살펴보면, 주거 607건(25.70%), 산업시설 398건(16.85%), 생활서비스 376건(15.92%), 자동차/철도차량 360건(15.24%), 판매/업무시설 215건(9.10%) 순으로 주로 사람들이 많이 거주하거나 이용하는 소방대상물에서 발생하고 있음을 알 수 있다²⁾.

절연재료의 절연성능이 저하되어 절연파괴로 이어지는 현상을 절연 열화라고 말하며, 발생 요인으로는 전기적, 열적, 기계적, 환경적 요인 등으로 다양하며 단일 또는 복합적인 요인에 의해서 발생한다. 전기적 원인에 의한 발화요인의 소분류에서 발화의 원인 중 절연 열화에 의한 단락은 전선 또는 케이블의 피복 재료(절연 및 외부 자켓 등)로 사용되고 있는 절연재료의 경과 시간이 오래된 노후 건축물에서 많이 발생하고 있으나, 가혹 조건에서는 아주 짧은 시간에 절연 열화로 인한 단락으로 화재가 발생할 가능성 또한 높다³⁾.

절연 열화에 의한 단락에 의해 화재가 발생한 장소 중에서 가장 많은 비중을 차지하고 있는 주거 건축물

*호원대학교 소방안전학과 교수 (Department of Fire Safety Engineering, Howon University)

의 경우 전기 설비는 600 V 이하의 저압으로 일반 옥내 배선용 전선인 IV와 HIV 절연 전선이 많이 사용되고 있다. 이들 절연 전선의 절연재료로 주로 사용되는 PVC(Polyvinyl chloride)는 난연성, 내후성, 내습성, 유연성이 좋고 가벼우며 값이 저렴하여 다양한 제품을 만들 수 있다는 장점을 가지고 있으나 열에 의해 절연체로부터 염화수소(HCl)가 이탈하고, 공기 중 산소가 존재할 때는 유리염화수소가 자기 매체로 되어 심하게 열화를 촉진하게 된다⁴⁾.

전선 및 케이블의 피복 재료(절연 및 외부 자켓 등)의 열적 원인에 의한 절연 열화에 대한 국내 연구로는 PVC 절연재료의 가속열화에 따른 트레킹 특성에 관한 연구⁵⁾, 가속열화에 따른 IV절연전선 피복의 과전류 특성에 관한 연구⁶⁾, 열 열화된 PVC 케이블의 부분방전 진단⁷⁾, 열적 스트레스 변화에 따른 600 V 비닐절연전선의 특성 분석⁸⁾ 등이 있으며, 장기 수명예측의 기초 자료로 사용되는 활성화 에너지에 대한 연구로는 TGA와 가속열화를 이용한 전선 피복용 PVC의 열적 평가⁹⁾, 원전 케이블 방사선 조사취화 평가용역¹⁰⁾, 원전 케이블용 EPR 절연재료의 가속열화와 수명예측¹¹⁾ 등이 있다. 절연재료에 대한 활성화 에너지를 산출하는 방법으로는 사용환경 보다 가혹한 조건에서 시험을 진행하고 고장을 촉진시키고, 그 결과를 분석하여 수명-스트레스 관계를 추정하는 아레니우스(Arrhenius) 모델, 1937년 Waloddi Weibull에 의해 고안된 수명분포 모델, 비교적 단시간 안에 사용 환경 온도하에서 수명 예측이 가능한 장점이 있는 열분석에 의한 수명 예측 방법¹²⁾ 등이 있다. 이와 같이, 국내 전선 및 케이블의 피복 재료에 대한 절연 열화에 대한 연구는 사용 온도 조건에서의 장기 사용 수명을 예측하기 보다는 열화에 의한 전기화재의 원인 분석 및 활성화 에너지를 산출하는데 중심을 두고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 주거 건축물 내에서 저압용 일반 옥내 배선용 전선으로 사용되고 있는 IV와 HIV 절연 전선의 절연재료인 PVC 절연체에 대해 3개 구간의 온도 범위에서 가속 열화를 실시하고 무게변화, 연신율 변화를 측정 후 Arrhenius 모델을 적용하여 활성화 에너지를 산출하고 이를 통해 사용 온도 조건에서의 장기 수명을 예측하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험재료

국내에서 옥내 배선 재료로 많이 사용되고 있는 내경 2.0 mm, 외경 3.5 mm의 PVC 절연전선(IV; PVC insulated

wire)과 내열 PVC 절연전선(HIV; Heat-resistant PVC insulated wire)을 사용하였으며, 도체를 제외한 절연체(두께 0.75 mm)만을 ISO 527 part 2의 샘플 기준인 100 mm의 크기로 각 600개씩 준비하였다.⁹⁾

2.2 가속 열화

2.1의 실험재료에 대한 열적 열화에 의한 특성 변화를 측정하고 활성화 에너지를 산출하기 위해 IEEE 383-1974의 2.3.2항에 따라 온도가 적어도 10°C 이상 차이가 나는 최소한 3개의 데이터 점인 80°C, 90°C, 100°C의 온도를 장기간의 가속열화 조건으로 설정하고 가속 열화를 실시하였다¹³⁾.

가속 열화 전 기준 재료의 무게와 연신율을 측정한 후 80°C, 90°C, 100°C로 설정된 oven에 준비된 실험재료인 IV와 HIV의 절연체를 각각 200개씩 넣고 4일 간격으로 실험재료를 5개씩 채취한 후 식 (1)을 이용하여 무게 변화와 식 (2)를 이용하여 연신율 변화를 측정하였다.

$$\epsilon = \frac{M' - M}{M} \times 100(\%) \quad \text{식 (1)}$$

여기서, M' : 가속 열화 후 무게 [g], M : 초기 무게 [g]이다.

2.3 연신율 측정

인장강도, 연신율, 단면수축률, 항복점 등은 재료의 성질을 규명하는 중요한 자료이며, 응력과 연신율의 관계를 나타내는 선도는 재료의 변형 특성을 나타내는데 꼭 필요한 요소라 할 수 있다. 인장실험을 통해 시료의 신율을 측정하여 신율이 초기의 50% 수준으로 떨어지면 그 순간이 재료를 더 이상 사용할 수 없는 한계점으로 보고 그 동안의 시간을 이용하여 아레니우스 식으로부터 재료에 대한 수명을 예측할 수 있다.

80°C, 90°C, 100°C의 온도에서의 가속 열화 전 / 후 IV와 HIV의 절연체에 대한 연신율을 측정하기 위해 만능재료시험기(Tinius olsen, H5K-S)를 사용하였으며, ISO 527 part 2 규격에 따라 Test speed는 100.00 mm/

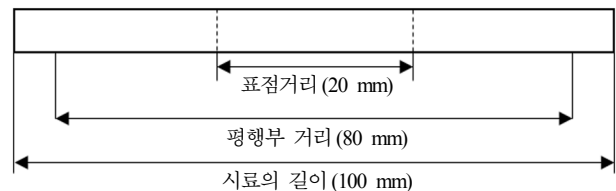


Fig. 1. Plastic test sample [ISO 527 part 2].

min.로 하여 재료가 끊어질 때 까지 자를 이용하여 Fig. 1의 표점거리(20 mm)가 늘어난 길이를 재고 식 (2)를 이용하여 각 가속 열화 조건에 따른 연신율을 측정하였다.

$$\epsilon = \frac{L' - L}{L} \times 100(\%) \quad \text{식 (2)}$$

여기서, L' : 늘어난 표점거리 [mm], L : 초기 표점 길이 [mm]이다.

2.4 수명 예측

유기물질의 열적 노화는 식 (3)의 아레니우스의 화학반응속도 식으로 잘 표현할 수 있으며, 이는 온도의 함수로서 반응속도를 예측하는데 널리 사용되고 가속 열화를 적용하는데 있어서의 그 중요성은 재료의 화학적인 관계의 퇴화를 특성으로 나타내는 것이다.

$$dR/dt = Ae^{-E/RT} \quad \text{식 (3)}$$

여기서, dR/dt : 시간(화학반응속도)에 대한 성질의 감소(반응률), A : 재료의 상수, E : 활성화 에너지(kJ/mol), R : 볼츠만 상수($8.617E-5$ eV/K), T : 절대온도(K)이다.

아레니우스 방정식에서 수명 방정식의 도출은 일정 온도에서 식 (3)은 시간에 대하여 적분하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(R)_L = (Ae^{-E/RT})L \quad \text{식 (4)}$$

$(R)_L$ 은 수명의 종료를 정의하는 반응수준으로 가정한다. 수명의 종료는 절연체의 연신율 %를 노화하지 않은 재료에 대한 연신율의 반으로(50%)로 감소하는 것으로 본다. 적분한 식 (4)의 양변에 자연 log를 취하면 식 (5)를 얻을 수 있으며, 이를 일반적인 형태로 나타내면 식 (6)과 같다.

$$\ln(L) = \ln(\Delta R)_L / A + E/RT \quad \text{식 (5)}$$

$$\ln(L) = (E/R)(1/T) + constant \quad \text{식 (6)}$$

여기서, $\ln(L)$ 대 $(1/T)$ 은 서로 직선임을 알 수 있다. 이 직선은 아레니우스 수명선도라고 할 수 있으며 기울기는 활성화 에너지에 비례한다.

식 (6)은 상용대수의 식 (7)과 같은 형태로 바꿀 수 있으며, 식 (7)의 대수형은 식 (8)과 같다.

$$\log_{10}(L) = (E/2.303R)(1/T \times 10^3) + constant \quad \text{식 (7)}$$

$$y = mx + b \quad \text{식 (8)}$$

여기서, y : $\log_{10}(L)$, x : $(1/T) \times 10^3$, m : $E/2.303R$, b : constant이다.

상수 m 과 b 는 $\log_{10}(L)$ 에 대한 $(1/T) \times 10^3$ 형에서의 실험 데이터를 상기의 단순 선형관계에 맞추므로서 산정 될 수 있다.

가속 열화에 의한 활성화 에너지의 산출은 2.1의 실험재료에 대한 2.3의 연신율 측정 방법에 따라 측정된 80°C, 90°C, 100°C의 온도에서의 가속 열화 전 연신율을 기준으로 가속 열화 후 측정된 연신율이 50%로 떨어지는 그 순간을 더 이상 사용되지 못하는 수명한계점으로 보고 그 동안의 시간을 측정하고 아레니우스 방정식으로부터 유도된 식 (7)의 기울기를 이용하여 계산하였다.

3. 실험결과

3.1 가속 열화에 의한 무게변화

IV와 HIV의 절연체에 대한 가속 열화 전 무게를 측정하고, 80°C, 90°C, 100°C의 온도에서 가속 열화하는 과정 중에 연신율이 50%까지 감소할 때까지의 무게를 측정하여 가속 열화 전 / 후의 무게 변화율을 식 (1)을 이용하여 계산하였으며, 결과 값은 Fig. 2와 3에 나타내었다. Fig. 2와 3에서와 같이 가속 열화 조건인 온도가 증가할수록 무게 변화율은 크게 나타남을 알 수 있으며, 각 그래프의 data로부터 추세선을 그리고 fit equation을 산출한 결과는 Table 1에 나타내었다.

가속 열화에 의한 연신율 변화 측정에 있어서 연신율이 초기 값의 50%에 도달 시간을 기준으로 무게 변화율을 계산한 결과, 초기 무게 값을 기준으로 3개 구간의 온도에서 IV 절연체의 경우 6.96%, HIV 절연체의 경우 10.29%가 감소하는 것으로 나타났다.

Table 1. Tendency equation and coefficient of determination (R^2) of change in mass by aging time

| Type | Tem. [°C] | Tendency Equation | [R^2] |
|------|-----------|--------------------------------------|-----------|
| IV | 80 | $y = 748.38e^{-8.0246E-07} - 648.48$ | 0.9653 |
| | 90 | $y = 10.63e^{-4.9610E-04} + 89.12$ | 0.9826 |
| | 100 | $y = 39.18e^{-4.8110E-04} + 60.70$ | 0.9842 |
| HIV | 80 | $y = 10.24e^{-2.5240E-04} + 89.78$ | 0.9974 |
| | 90 | $y = 62.47e^{-6.4802E-05} + 37.45$ | 0.9970 |
| | 100 | $y = 19.17e^{-2.8670E-03} + 80.89$ | 0.9995 |

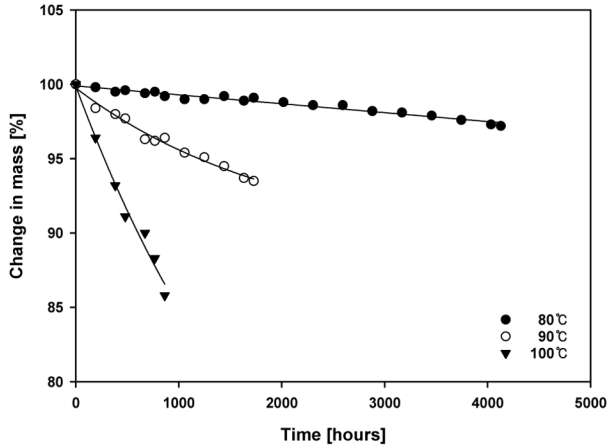


Fig. 2. Changing in mass of IV insulation by ageing time.

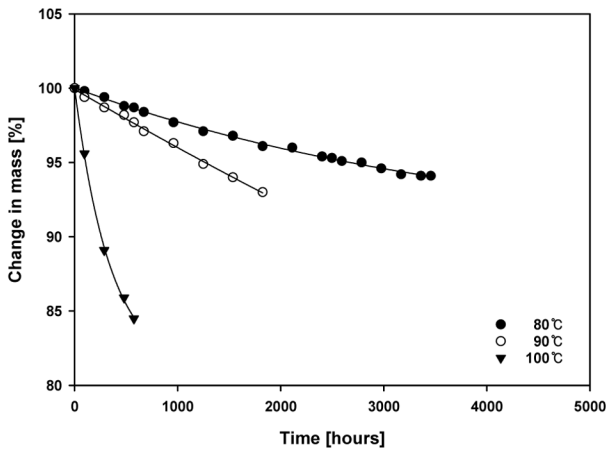


Fig. 3. Changing in mass of HIV insulation by ageing time.

3.2 가속 열화에 의한 연신율 변화

IV와 HIV의 절연체에 대한 가속 열화 전 연신율을 측정하고 이를 기준으로 하여 80°C, 90°C, 100°C의 온도에서 가속 열화하는 과정 중에 연신율이 50%까지 감소할 때까지의 연신율 변화를 식 (2)를 이용하여 계산하였으며, 결과 값은 Fig. 4와 5에 나타내었다. Fig. 4와 5에서와 같이 가속 열화 조건인 온도가 증가할수록 연신율이 50%로 감소하는 시간이 짧아지는 것을 알 수 있으며, 각 그래프의 data로부터 추세선을 그리고 fit equation을 산출한 결과는 Table 2에 나타내었다.

Table 2의 각 추세선에 대한 fit equation으로부터 IV 절연체의 경우 80°C 가속 열화 환경에서 4,141시간, 90°C 가속 열화 환경에서 1,645 시간, 100°C 가속 열화 환경에서 759시간, HIV 절연체의 경우 80°C 가속 열화 환경에서 3,459시간, 90°C 가속 열화 환경에서 2,444시간, 100°C 가속 열화 환경에서 601시간에서 50% 연신율 감소를 나타내었다.

Table 2. Tendency equation and coefficient of determination (R²) of change in elongation by ageing time

| Type | Tem. [°C] | Tendency Equation | [R ²] |
|------|-----------|---|-------------------|
| IV | 80 | $y = 23332.3e^{-5.8217E-07} - 23226.12$ | 0.9704 |
| | 90 | $y = 145.88e^{-2.6320E-04} - 44.61$ | 0.9893 |
| | 100 | $y = 3198.69e^{-2.1004E-05} - 3098.09$ | 0.9886 |
| HIV | 80 | $y = 9894.33e^{-1.4479E-06} - 9794.90$ | 0.9822 |
| | 90 | $y = 64.14e^{-5.9410E-04} + 34.98$ | 0.9945 |
| | 100 | $y = 55.40e^{-3.7040E-03} + 44.02$ | 0.9952 |

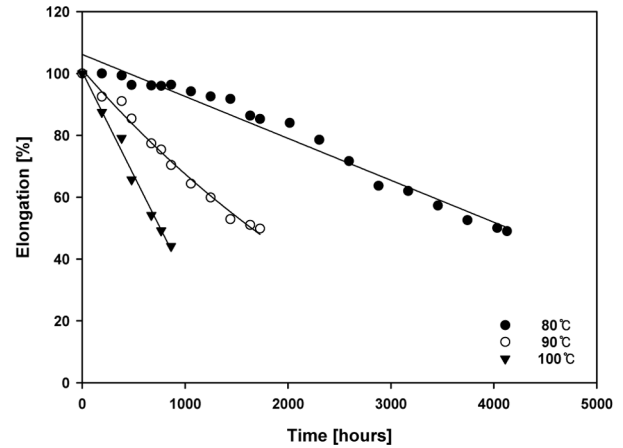


Fig. 4. Elongation at break of IV insulation by ageing time.

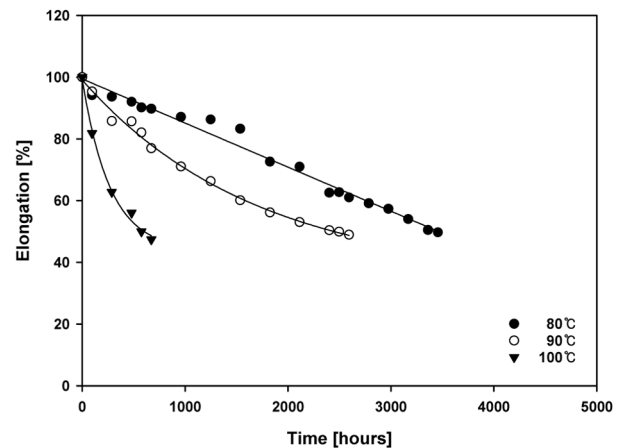


Fig. 5. Elongation at break of HIV insulation by ageing time.

3.3 가속 열화에 의한 수명 예측

80°C, 90°C, 100°C의 온도에서 가속 열화하는 과정 중에 연신율이 50%까지 감소할 때까지 각 시간을 Table 3과 같이 산출하고 이를 이용하여 활성화 에너지와 사용 온도에서의 수명을 예측하였다. Table 3의 $(1/T) \times 10^3$ 와 $\log(\text{hr})$ 를 이용하여 식 (8)의 형태로 나타낸 IV 절연체에 대한 수명 회귀 방정식은 식 (9), HIV

절연체에 대한 수명 회귀 방정식은 식 (10)과 같다. 이들 방정식의 기울기로부터 계산된 활성화 에너지는 IV 절연체 92.895 kJ/mol(0.9632 eV), HIV 절연체 95.213 kJ/mol(0.9873 eV)이다.

$$y = 4.8538x - 10.1403 [R^2 = 0.9988] \quad \text{식 (9)}$$

$$y = 4.9750x - 10.4767 [R^2 = 0.8818] \quad \text{식 (10)}$$

또한, 식 (9)와 (10)을 이용하여 전선의 사용 온도에서의 장기 수명을 예측한 식은 식 (11)과 식 (12)와 같다. 또한, 식 (11)과 식 (12)로부터 전선의 사용 온도를 30°C ~ 90°C까지로 설정하였을 때 예상되는 수명은 Table 4에 나타내었다. 두 전선의 수명 예측을 통해 IV 절연 전선보다 HIV 절연 전선에서 보다 긴 수명이 예측됨에 따라 동일한 사용 조건에서는 HIV 절연 전선의 열적 특성이 평균 약 12.44% 우수함을 알 수 있었다.

$$\text{Life(IV)} = 1631352.5915e^{-0.1342 \times X [^\circ\text{C}]} + 727.6188 \quad \text{식 (11)}$$

$$\text{Life(HIV)} = 2084526.3455e^{-0.1376 \times X [^\circ\text{C}]} + 832.7643 \quad \text{식 (12)}$$

Table 3. Experiment data of 50% Elongation time by aging temperature

| Type | Tem.[°C] | (1/T) × 10 ³ [K ⁻¹] | hours | log(hours) |
|------|----------|--|-------|-------------|
| IV | 80 | 2.680965 | 4,141 | 3.617105231 |
| | 90 | 2.754821 | 1,645 | 3.216165902 |
| | 100 | 2.832861 | 759 | 2.880241776 |
| HIV | 80 | 2.680965 | 3,459 | 3.538950562 |
| | 90 | 2.754821 | 2,444 | 3.388101202 |
| | 100 | 2.832861 | 601 | 2.778874472 |

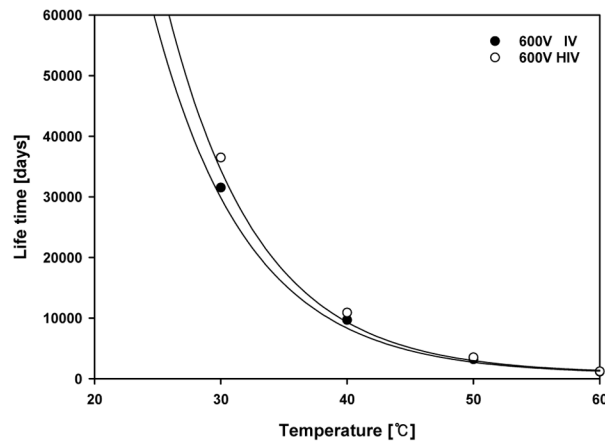


Fig. 6. Prediction of Lifetime at operating temperature of IV and HIV wire.

Table 4. Lifetime predicted by regression line

| Operating tem. [°C] | IV wire | | HIV wire | |
|---------------------|---------|---------|----------|---------|
| | [days] | [years] | [days] | [years] |
| 30 | 29,840 | 81.75 | 34,425 | 94.32 |
| 40 | 8,335 | 22.84 | 9,318 | 25.53 |
| 50 | 2,716 | 7.44 | 2,976 | 8.15 |
| 60 | 1,247 | 3.42 | 1,374 | 3.76 |
| 70 | 863 | 2.36 | 970 | 2.66 |
| 80 | 763 | 2.09 | 867 | 2.38 |
| 90 | 737 | 2.02 | 841 | 2.30 |

4. 결론

국내에서 옥내 배선 재료로 많이 사용되고 있는 IV와 HIV 절연체를 대상으로 80°C, 90°C, 100°C에서 가속 열화를 통해 무게 및 연신율 변화를 측정하고 아레니우스 모델을 이용하여 수명을 예측한 결과는 다음과 같다.

1) 무게 변화 데이터를 이용한 추세선 방정식을 통해 연신율이 초기 값의 50%에 도달 시간을 기준으로 무게 변화율을 계산한 결과, 초기 무게 값을 기준으로 IV 절연체의 경우 6.96%, HIV 절연체의 경우 10.29%가 감소하는 것으로 나타났다.

2) 가속 열화 조건인 온도가 증가할수록 연신율이 50%로 감소하는 시간이 짧아지는 것을 알 수 있으며, 각 그래프의 fit equation로부터 계산된 시간은 IV 절연체의 경우 80°C 4,141시간, 90°C 1,645시간, 100°C 759시간, HIV 절연체의 경우 80°C 3,459시간, 90°C 2,444시간, 100°C 601시간에서 50%의 연신율 감소를 나타내었다.

3) IV와 HIV 절연체에 대한 수명 회귀 방정식의 기울기로부터 계산된 활성화 에너지는 각각 92.895 kJ/mol (0.9632 eV)와 95.213 kJ/mol(0.9873 eV)로 계산되었다.

4) 장기 수명을 예측한 식으로부터 전선의 사용 온도를 30°C ~ 90°C까지로 설정하였을 때 예상되는 수명은 2.02 ~ 94.32년으로 IV 절연 전선보다 HIV 절연 전선에서 보다 긴 수명이 예측되었으며, 동일한 사용 조건에서 HIV 절연 전선의 열적 특성이 평균 약 12.44% 우수함을 알 수 있었다.

References

- 1) National Fire Agency, "Annual report on fire statistics 2018, p. 104, 2018.
- 2) National Fire Agency, "National Fire Information Center E-Fire Statistics", 2017.

- 3) K. T. Song and S. I. Lee, "Partial Discharge Diagnosis of Thermal Degradated PVC Cable", Journal of the Korea Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 24, No. 3, pp. 208-214, 2011.
- 4) C. S. Choi, D. G. Park and H. G. Kim, "A study on the fire hazard of wire for wiring and instrument", Korea Electrical Safety Corporation, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2001.
- 5) S. G. Choi and S. K. Kim, "Study on the Tracking Characteristics Depending on Accelerated Degradation of PVC Insulation Material", Fire Science and Engineering, Vol. 31, No. 6, pp. 91-98, 2017.
- 6) S. K. Kim and S. G. Choi, "A Study on the Over-current Characteristics of IV Insulated Wire Sheath According to Accelerated Degradation", Fire Science and Engineering, Vol. 32, No. 2, pp. 48-56, 2018.
- 7) K. T. Song and S. I. Lee, "Partial Discharge Diagnosis of Thermal Degradated PVC Cable", J. KIEEME, Vol. 24, No. 3, pp. 208-214, 2011.
- 8) C. S. Choi, "The Properties Analysis of 600V Grade Polyvinyl Chloride Insulated Wire with Variation of Thermal Stress", T. Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 108-115, 2001.
- 9) H. J. Park, K. H. Kim and H. Kim, "Evaluation of Thermal Aging on PVC Using Thermo Gravimetry Analysis and Accelerated Thermal Aging Test", T. of Korea Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 45-50, 2004.
- 10) Korea Electric Power Research Institute, "Evaluation of Radiation Degradation of Cable in Nuclear Power Plant", Korea Atomic Energy Research Institute, Service report, KAERI/CM-1026, 2007.
- 11) J. Y. Kim, "Lifetime Prediction and Accelerated Degradation of EPR Insulation Material for NPP Cables", Thesis for a Master, Wonkwang University, pp. 17-41, 2015.
- 12) W. Y. Jung and J. I. Weon, "Characterization of Thermal Degradation of Polyamide 66 Composite: Relationship between Lifetime Prediction and Activation Energy", Polymer(Korea), Vol. 36, No. 6, pp. 712-720, 2012.
- 13) An American National Standard, "IEEE Standard for Type Test of Class 1E Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generating Stations", IEEE Std 383, p. 10, 1974.