

[Research Paper]

가속열화에 따른 페놀수지 절연재료의 트래킹 특성에 관한 연구

김시국 · 최수길 · 이춘하[†]

호서대학교 소방방재학과

A Study on the Tracking Characteristics of Phenolic Resin Insulation Material Due to Accelerated Degradation

Si-Kuk Kim · Su-Gil Choi · Chun-Ha Lee[†]

Dept. of Fire and Disaster Protection Engineering, Hoseo University

(Received January 20, 2017; Revised February 1, 2017; Accepted February 3, 2017)

요 약

본 논문은 가속열화에 따른 페놀수지 절연재료의 트래킹 특성에 관한 연구이다. 페놀수지 절연재료의 절연열화를 위해 가속수명 시험방법 중 아레니우스 방정식을 이용한 가속열화 실험을 진행하여 등가연수 0년, 10년, 20년, 30년, 40년 된 실험시료를 제작하였다. 그 후 가속열화된 실험시료를 대상으로 KS C IEC 60112 기준에 의한 트래킹 실험을 진행하였다. 가속열화에 따른 페놀수지의 트래킹 특성 측정결과 염화암모늄 0.1% 적하 시 등가수명 0년을 기준으로 위험성이 등가수명 10년 1.38배, 20년 1.45배, 30년 1.62배, 40년 1.94배 증가하는 것으로 나타났다. 염화암모늄 0.01% 적하 시 등가수명 0년을 기준으로 위험성이 등가수명 10년 1.39배, 20년 1.52배, 30년 1.99배, 40년 5.30배 증가하는 것으로 나타났다. 실험 결과 노후화에 따른 절연열화가 오래될수록 트래킹 위험성이 커지는 것으로 나타났으며, 특히 등가수명 40년의 경우 그 위험성이 크게 증가하는 것으로 관측되었다. 따라서 노후화에 따른 절연열화 등의 위험성을 고려하여 제도적으로 권장 교체주기를 마련해 주는 것이 전기화재 발생 가능성 및 위험성을 최소화할 수 있을 것으로 생각된다.

ABSTRACT

The present article reports the tracking characteristics of phenolic resin insulation material due to accelerated degradation. For assessing insulation degradation of the phenolic resin insulation material, experiment samples with equivalent years of 0, 10, 20, 30, and 40 years were produced by conducting accelerated degradation experiments using Arrhenius equation. Subsequently, tracking experiments according to KS C IEC 60112 standard were conducted for the experiment samples that were previously subjected to accelerated degradation. According to the measured results for tracking characteristics of phenolic resin subjected to accelerated degradation, upon dropping of 0.1% ammonium chloride, the risks were shown to increase by 1.38 times for the equivalent life of 10 years; 1.45 times for 20 years; 1.62 times for 30 years; and 1.94 times for 40 years based on the equivalent life of 0 year. Upon dropping of 0.01% ammonium chloride, the risks were shown to increase by 1.39 times for the equivalent life of 10 years; 1.52 times for 20 years; 1.99 times for 30 years; and 5.30 times for 40 years. According to the experimental results, the tracking risk was shown to be higher for longer-duration insulation degradation due to aging. In particular, the risk was observed to be greatly increased in the case of the equivalent life of 40 years. Therefore, it is proposed that the occurrence possibility and the risk of electric fires could be minimized through institutional preparation of recommended replacement period by considering risks such as insulation degradation, etc. due to aging.

Keywords : Accelerated degradation, Fire risks, Insulation degradation, Phenolic resin, Tracking

1. 서 론

전기설비는 생활의 윤택함과 편리성 등을 제공함으로써 그 수요가 급격히 증가되고 있는 추세이지만, 사용에

있어 각별한 주위 및 지속적인 유지관리가 되지 않을 경우 전기화재로 이어질 수 있는 위험성을 내포하고 있다. 국민 안전처 국가화재정보센터의 E-화재통계에 따르면 2016년도에 발생된 전체 화재건수는 43,410건으로 발화요인별 화

[†] Corresponding Author, E-Mail: leecha@hoseo.edu, TEL: +82-41-540-5732, FAX: +82-41-540-5738
Copyright © 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

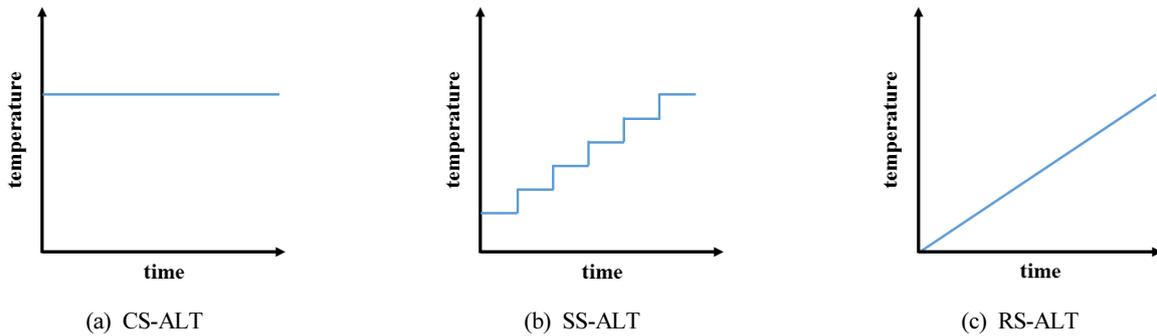


Figure 1. Stress application methods of ALT.

재원인 분석결과 전기적인 요인이 8,981건(20.7%)으로 부주의 다음으로 가장 높은 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 전기적인 요인을 세부적으로 분석해보면, 절연열화에 의한 단락(25.9%), 미확인단락(23.2%), 접촉불량에 의한 단락(10.8%), 과부하 및 과전류(10.5%), 트래킹에 의한 단락(10.2%), 압착손상에 의한 단락(6.4%), 기타요인(6.3%), 누전 및 지락(3.7%), 반단선(1.9%), 층간단락(1.1%) 순으로 발생하였다⁽¹⁾. 전기화재에서 가장 높은 비중을 차지하고 있는 절연열화의 경우 다양한 외적인 요인에 의해 발생될 수도 있지만, 일반적으로 전기설비의 장시간 사용에 의해 절연재료의 절연능력이 저하되고 절연파괴로 이어져 전기화재가 발생할 가능성이 높다. 국토교통부 2015년 건축통계집에 따르면 전국기준으로 30년 이상 건축물은 2,511,900동으로 가장 높은 비중을 차지하고 있으며, 20년 이상 30년 미만 건축물은 1,449,983동, 10년 이상 20년 미만 건축물은 1,296,800동, 10년 미만 건축물은 1,164,511동 순으로 나타났다⁽²⁾. 국내의 노후화된 건축물이 증가됨에 따라 기 설치된 전기설비의 사용기간이 경과됨에 따라 경년변화에 따른 절연재료의 절연열화로 이어져 전기화재 발생 가능성이 높게 나타날 수 있을 것으로 생각된다. 이로 인해 절연재료의 절연열화에 따른 전기화재의 위험성분석 연구가 지속적으로 이루어져야 하지만, 노후화된 절연재료 시료채취 등의 어려움이 있어 현재까지 연구가 미비하였다. 또한, 기존의 전기화재 논문들은 대부분 단일 전기적 원인을 대상으로 연구가 되었지만, 전기화재의 원인 중 미확인 단락 및 기타 요인에 의해 발생된 전기화재 비중이 29.5%를 차지하고 있는 것은 다양한 원인에 의해 발생될 수 있기 때문에 전기화재를 분석하기 위해서는 다각적인 연구가 필요⁽³⁾할 것으로 판단된다. 즉, 단일 원인만이 아닌 복합적인 원인에 의해 발생될 수 있는 전기화재에 대한 연구가 지속적으로 필요할 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 절연열화와 트래킹에 의한 복합적인 전기화재의 위험성을 분석하기 위해 폐놀수지 절연재료를 실험시료로 하여 가속수명시험(accelerated life test; ALT) 방법 중 아레니우스 방정식을 이용한 가속열화시험을 진행하여 등가수명(equivalent life; EL)이 0년, 10년, 20

년, 30년, 40년 된 피실험체를 제작하였다. 그 후 피실험체를 대상으로 KS C IEC 60112에 의거 트래킹 실험을 진행하여 가속열화에 따른 폐놀수지 절연재료의 트래킹 특성을 분석하였다.

2. 가속수명시험 이론적 고찰

최근 전기기기에 사용되는 절연재료의 수명평가 연구는 전기기기의 성능확보에 있어 직접적인 영향을 미치는 열화 메커니즘에 대한 특성연구로서 그 중요성이 매우 높아지고 있는 추세로, 절연재료의 이상상태(고장상태)가 발생할 수 있는 메커니즘 분석을 단축할 목적으로 가속수명시험(ALT)이 진행되고 있다⁽⁴⁾. 가속수명시험이란 전기절연재료의 수명에 큰 영향을 미치는 전압, 온도, 습도 등의 스트레스 수준을 실제 사용조건보다 열악한 수준으로 시험하여, 관측되는 데이터로부터 수명과 스트레스와의 관계를 예측하여 사용조건에서 수명을 빠르게 측정하기 위한 시험이다. Figure 1은 가속수명시험을 위한 스트레스의 인가방법을 나타낸 것이다. 스트레스는 인가방법에 따라 일정형스트레스(constant stress ALT; CS-ALT), 계단형스트레스(step stress ALT-SS-ALT), 점진적형스트레스(progressive stress ALT; PS-ALT)가 있다. 이중 일정형스트레스는 계단형 또는 점진적형 스트레스보다 데이터를 빨리 얻을 수 없는 단점이 있으나, 사용환경과 시험환경이 가장 유사하며, 시험수행의 편리성 및 스트레스 인가가 수월하여 많은 재료 및 부품에 대한 시험 및 개발 검증에 가장 많이 사용되고 있으며, 신뢰도가 높아 본 연구에서도 가속열화 인가시 일정형스트레스를 이용하였다⁽⁵⁾.

가속수명시험 모형 중 수명스트레스와 관련된 모형은 아레니우스(Arrhenius), 역거듭제곱(Inverse power), 아이링(Eyring) 있으며, 본 연구에서는 절연재료의 온도스트레스와 관련 있는 아레니우스 모형을 이용하였다.

2.1 아레니우스 방정식

열화메커니즘은 절연재료의 전기적·기계적 특성을 변화시키게 되며, 고온의 환경에서는 온도의 함수인 분자의

Table 1. Calculation of Accelerated Degradation Time ($T_1=130\text{ }^\circ\text{C}$)

EL	0 yr	10 yr	20 yr	30 yr	40 yr
Time	0 h	149 h	298 h	447 h	596 h



(a) Thermostat



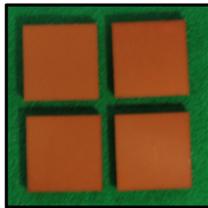
(b) Temperature controller



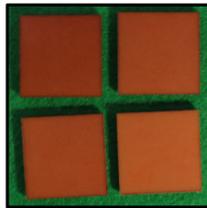
(c) Thyristor power regulator

Figure 2. Accelerated degradation experimental equipment.

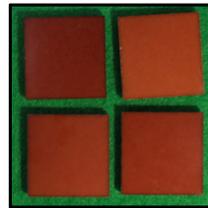
(a) EL-0 yr



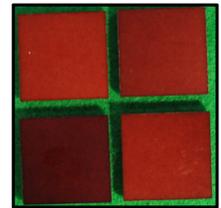
(b) EL-10 yr



(c) EL-20 yr



(d) EL-30 yr



(e) EL-40 yr

Figure 3. Phenolic resin samples with accelerated degradation.

운동에너지를 상승시키게 된다. 이로 인한 운동에너지는 분자 내의 화학반응을 일어나게 하고, 결국 절연재료의 분자구조를 분해시키고 노후화가 진행되게 된다. 아레니우스 방정식은 속도상수(K)와 절대온도(1/T)의 관계를 이용하여 시간 및 온도에 따라 노후를 가속시키는 기법으로 페놀수지 절연재료의 가속열화를 위해 식(1)의 아레니우스 식을 이용하였다⁽⁶⁾.

$$K_2 = K_1 \cdot \exp\left[\frac{E_a}{K_b} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (1)$$

여기서, K_1 은 가속열화시간[h], K_2 는 등가수명[yr], T_1 은 가속열화온도[K], T_2 는 사용온도[K], E_a 는 활성화에너지[eV], K_b 는 볼츠만상수[eV/K]를 의미한다.

식(1)을 이용하여 식(2)와 같이 변형시키면 등가수명에 따른 가속열화시간을 산출할 수 있다.

$$K_1 = \frac{K_2}{\exp\left[\frac{E_a}{K_b} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right]} \quad (2)$$

2.2 가속열화시간 산출

가속열화시간의 선정은 등가수명에 따라 0년, 10년, 20

년, 30년, 40년으로 설정하였으며, 실험시료인 페놀수지를 절연재료로 하는 단자대 및 차단기가 설치되는 저압용 배전반의 최고 안전온도인 $40\text{ }^\circ\text{C}$ (313 K)⁽⁷⁾를 사용온도로 설정하였고, 가속열화온도는 페놀수지의 재료특성과 시험기간 및 실험의 안전을 위해 $130\text{ }^\circ\text{C}$ (403 K)로 설정하였다. 페놀수지의 활성화에너지는 L. K. H. VAN BEEK의 논문⁽⁸⁾을 참조하여 0.77 eV 를 대입하였다. Table 1은 식(2)에 의해 산출된 등가수명에 따른 가속열화시간을 나타낸 것이다.

3. 실험

3.1 실험시료

본 연구에 사용된 실험시료는 페놀수지(phenolic resin)로써 일반적으로 기계적 강도 및 가공성, 치수 안정성 그리고 내열성 및 전기 절연성이 우수하여 단자대 및 차단기, PCB 판 등 저전압용 외함재료로 가장 널리 사용되고 있는 절연재료이다^(9,10).

실험시료인 페놀수지의 가속열화를 위해 Figure 2(a)의 항온기(MC-6, INTEC Co., Japan)를 이용하였고, 정밀한 온도제어를 위해 추가적으로 Figure 2(b)의 온도컨트롤러(TD 500, HANYOUNG NUX Co., Korea), Figure 2(c)의 전력조정기(TPR-2N 50A, HANYOUNG NUX Co., Korea)를 설치하여 $130\text{ }^\circ\text{C}$ 의 일정온도로 스트레스를 인가하였다. 이때, 가속

Table 2. Experiment Results Due to the Accelerated Degradation (NH₄Cl 0.1%)

EL	0 yr	10 yr	20 yr	30 yr	40 yr
Fist Discharge Time	65 s	35 s	20 s	15 s	13 s
Fist Carbonization Time	75 s	55 s	53 s	47 s	43 s
Tracking Time	138 s	100 s	95 s	85 s	71 s

Table 3. Experiment Results Due to the Accelerated Degradation (NH₄Cl 0.01%)

EL	0 yr	10 yr	20 yr	30 yr	40 yr
Fist Discharge Time	579 s	499 s	372 s	353 s	202 s
Fist Carbonization Time	621 s	515 s	441 s	432 s	236 s
Tracking Time	1410 s	1016 s	930 s	710 s	266 s

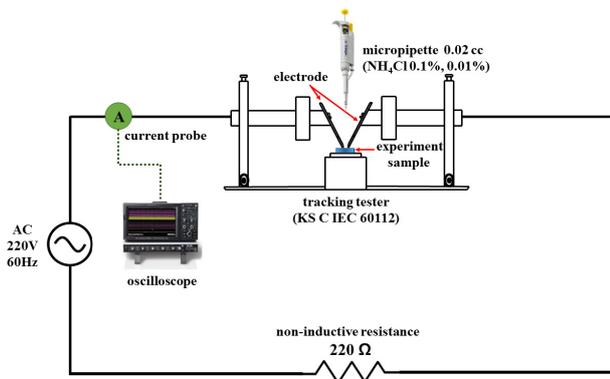


Figure 4. Schematic diagram of experimental set-up.

열화시간은 Table 1에서 산출된 등가수명을 바탕으로 0년을 제외하고, 10년의 경우 149시간, 20년의 경우 298시간, 30년의 경우 447시간, 40년의 경우 596시간 동안 항온기 내부에서 130 °C 온도로 일정스트레스(CS-ALT)에 노출시켰다. Figure 3은 등가수명(EL)에 따라 가속열화된 페놀수지(시료크기 30 mm×30 mm×3 T) 실험시료를 나타낸 것이다. 외형적으로 열화가 진행됨에 따라 변색정도가 짙어지는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 실험조건 및 방법

실험은 상온 23±5 °C, 습도 50±5%에서 진행하였고, 모든 실험은 5회 실시 후 평균값으로 나타내었다. 가속열화에 따른 페놀수지 절연재료의 트래킹 특성을 연구하기 위해 KS C IEC 60112(고체 절연 재료의 내트래킹 및 비교트래킹 지수 측정방법)의 실험장치 및 실험방법을 응용하여 진행하였다⁽¹¹⁾. Figure 4는 실험의 구성도를 나타낸 것으로 트래킹 전극사이의 간격은 4 mm로 하여 하단부에 실험시료인 페놀수지를 위치하고 트래킹시험 표준용액(이하; 시험용액)인 염화암모늄 수용액(이하; 염화암모늄) 농도를 0.1%로 하여 마이크로피펫(WitoPet, WITEG Co., Germany)을 이용하여 0.02 cc(20 mg)를 30 mm 상부에서 30초 간격으로 최대 50방울을 적하시켜 트래킹 특성을 관찰하였다. 또한,

회로의 단락전류는 KS C IEC 60112의 권고안에 의해 사고로 인한 단락전류가 1±0.1 A를 넘지 않기 위해 무유도저항 220 Ω을 직렬로 연결하였고⁽¹²⁾, 트래킹 판정은 2초 동안 최소 0.5 A의 단락전류가 전극사이의 페놀수지 표면으로 흐를 경우 트래킹으로 판정하였다. 트래킹 발생 시 전류파형은 오실로스코프(WaverRunner 610Zi, LeCroy Co., USA)와 전류프로브 2대(CP031 & CP150, LeCroy Co., USA)를 설치하여 세부적으로 측정하였다. 또한, 실험진행결과 시험용액인 염화암모늄 0.1%의 경우 트래킹 발생 시간이 등가수명 별로 차이가 발생하나, 시간적 간격이 다소 적게 나타나, 위험성을 좀 더 세밀하게 분석하기 위해 시험용액의 농도보다 1/10배 오손도가 낮은 염화암모늄 0.01%로 추가 실험을 진행하여 시험용액의 농도와 위험성과의 상관관계를 분석하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 가속열화에 따른 트래킹 특성 분석

Table 2는 염화암모늄 0.1% 적하 시 가속열화에 따른 등가수명별 페놀수지 절연재료의 최초방전시간 및 최초탄화개시시간 그리고 최종 트래킹 발생시간을 측정한 결과이다. 최초방전시간은 등가수명 0년의 경우 65 s, 10년의 경우 35 s, 20년의 경우 20 s, 30년의 경우 15 s, 40년의 경우 13 s로 나타났으며, 최초 카본이 증식된 탄화개시시간은 등가수명 0년의 경우 75 s, 10년의 경우 55 s, 20년의 경우 53 s, 30년의 경우 47 s, 40년의 경우 43 s로 등가수명이 오래될수록 최초방전시간 및 탄화개시시간이 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 그 후 방전과 탄화를 지속하다 결국에는 트래킹 발생과 함께 섬락이 나타나는데 그 시간을 분석해보면 등가수명 0년의 경우 138 s, 10년의 경우 100 s, 20년의 경우 95 s, 30년의 경우 85 s, 40년의 경우 71 s로 가속열화 시간이 지속될수록 트래킹 발생 시간이 상대적으로 빠르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3은 위험성을 좀 더 세부적으로 관찰하기 위해 추가로 진행한 염화암모늄 0.01% 적하 시 가속열화에 따른

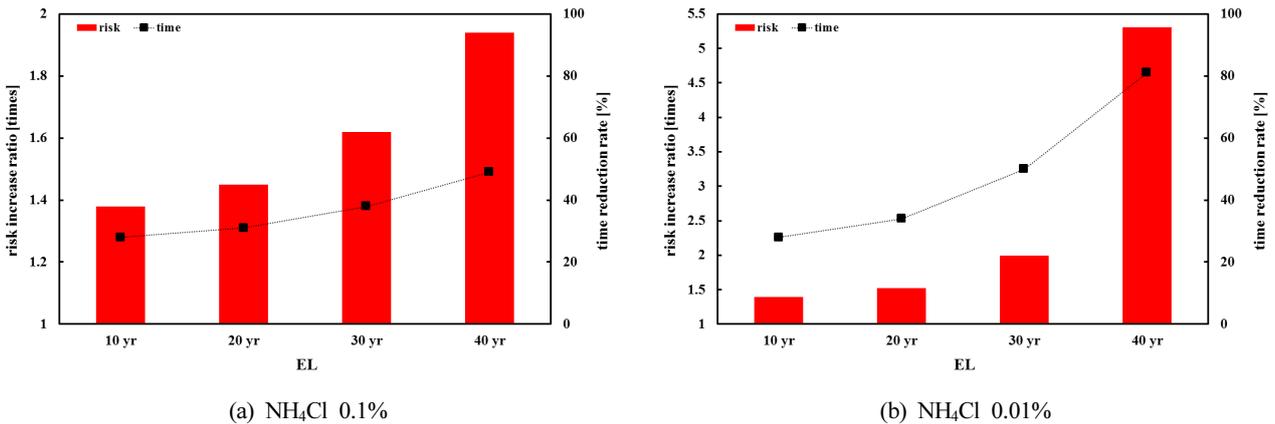


Figure 5. Tracking risk increase ratio and time reduction rate due to EL.

등가수명별 폐놀수지 절연재료의 최초방전시간 및 최초탄화개시시간 그리고 최종 트래킹 발생시간을 측정된 결과이다. 최초방전시간은 등가수명 0년의 경우 579 s, 10년의 경우 499 s, 20년의 경우 372 s, 30년의 경우 353 s, 40년의 경우 202 s로 나타났으며, 최초 카본이 증식된 탄화개시시간은 등가수명 0년의 경우 621 s, 10년의 경우 515 s, 20년의 경우 441 s, 30년의 경우 432 s, 40년의 경우 236 s로 시험용액의 농도가 감소함으로 인해 최초방전시간 및 탄화개시시간이 0.1% 농도 때 보다 상대적으로 증가되는 것으로 나타났다. 또한, 최종 트래킹 발생시간도 등가수명 0년의 경우 1,410 s, 10년의 경우 1,016 s, 20년의 경우 930 s, 30년의 경우 710 s, 40년의 경우 266 s로 시험용액의 농도가 감소됨에 따라 트래킹 발생 시간이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 염화암모늄 0.1% 농도에서 크게 관찰되지 않았던 트래킹 발생시간의 차이가 염화암모늄 0.01% 농도에서 등가수명 40년의 경우 다른 등가수명의 시료에 비해 그 위험성이 상대적으로 크게 증가되는 것으로 나타났다.

Figure 5는 정상시료인 등가수명 0년을 기준으로 등가수명에 따른 트래킹 발생 위험성증가비 및 시간단축률을 나타낸 것이다. Figure 5(a)는 염화암모늄 0.1% 적하시의 결과 데이터로써 트래킹 발생 위험성증가비 및 시간단축률은 등가수명 10년의 경우 위험성 1.38배 증가(시간 28% 단축), 20년의 경우 위험성 1.45배 증가(시간 31% 단축), 30년의 경우 위험성 1.62배 증가(시간 38% 단축), 40년의 경우 위험성 1.94배 증가(시간 49% 단축)하는 것으로 나타났다. Figure 5(b)는 염화암모늄 0.01% 적하시의 결과 데이터로써 트래킹 발생 위험성증가비 및 시간단축률은 등가수명 10년의 경우 위험성 1.39배 증가(시간 28% 단축), 20년의 경우 위험성 1.52배 증가(시간 34% 단축), 30년의 경우 위험성 1.99배 증가(시간 50% 단축), 40년의 경우 위험성 5.30배 증가(시간 81% 단축)하는 것으로 나타났다.

실험결과 KS C IEC 60112 시험용액 기준 농도인 염화암모늄 0.1%의 경우 가속열화시간이 증가될수록 트래킹 발생 위험성이 등가수명 0년의 시료에 비해 등가수명 40년의

경우 최대 1.94배 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한, 시험용액 기준 농도보다 낮은 염화암모늄 0.01%의 경우에서도 모든 실험시료에서 트래킹이 발생되었으며, 특히 트래킹 발생 위험성이 등가수명 0년의 시료에 비해 등가수명 40년의 경우 최대 5.30배 증가하는 것으로 나타났다. 이상과 같은 결과 절연재료의 사용기간이 오래될수록 절연열화로 인한 트래킹 위험성이 증가되기 때문에 폐놀수지 절연재료를 사용한 차단기 및 단자대 등의 경우 노후화에 따른 절연열화 등을 고려하여 교체주기를 마련해 주는 것이 전기화재 발생 가능성을 낮출 수 있을 것으로 생각된다.

Figure 6은 염화암모늄 농도에 따른 트래킹 진전과정의 전류파형을 나타낸 것으로 세부적이고 정확한 측정을 위해 2대의 전류프로브를 이용하였고, C1 프로브의 경우 50 mA/div, C2 프로브의 경우 500 mA/div 범위로 하여 동시에 전류파형을 측정된 결과이다. 또한, 등가수명에 따라서 트래킹 발생 시간에 차이만 있을 뿐 실험조건에 의해 트래킹 발생에너지는 동일하기 때문에 위험성이 가장 높게 나타난 등가수명 40년 시료로만 결과로 나타내었다. Figure 6(a)은 염화암모늄 최초 적하 시 적극 사이로 흐르는 누설전류를 측정된 것으로 시험용액인 염화암모늄의 농도가 짙을수록 전해질 양이 증가하기 때문에 0.1% 농도에서 실효값(rms)이 76 mA로 0.01% 농도에서 측정되는 실효값인 38 mA보다 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 순수한 물에 가까울수록 전기저항이 높기 때문에 시험용액의 농도가 짙을수록 상대적으로 전기저항이 낮아져 누설전류가 높게 측정되는 이유이다. Figure 6(b)는 트래킹 발생시 단락 전류파형으로 트래킹 발생 시간에 차이만 있을 뿐 KS C IEC 60112에 의해 실험조건상 단락전류를 1 ± 0.1 A로 제한하였기 때문에 0.1%와 0.01%의 실효값이 1 A로 동일하게 측정되었으며, 이로 인해 파형도 거의 유사하게 관측되었다. 즉, 0.1%보다 시험용액의 농도가 낮은 0.01%의 경우 최초 흐르는 누설전류의 양은 적지만, 시험용액의 적하 수가 증가됨에 따라 누설전류에 따른 방전에너지가 지속적으로 증가하게 되고, 이로 인해 탄화도전로의 점진적 증식으로 이어져 최

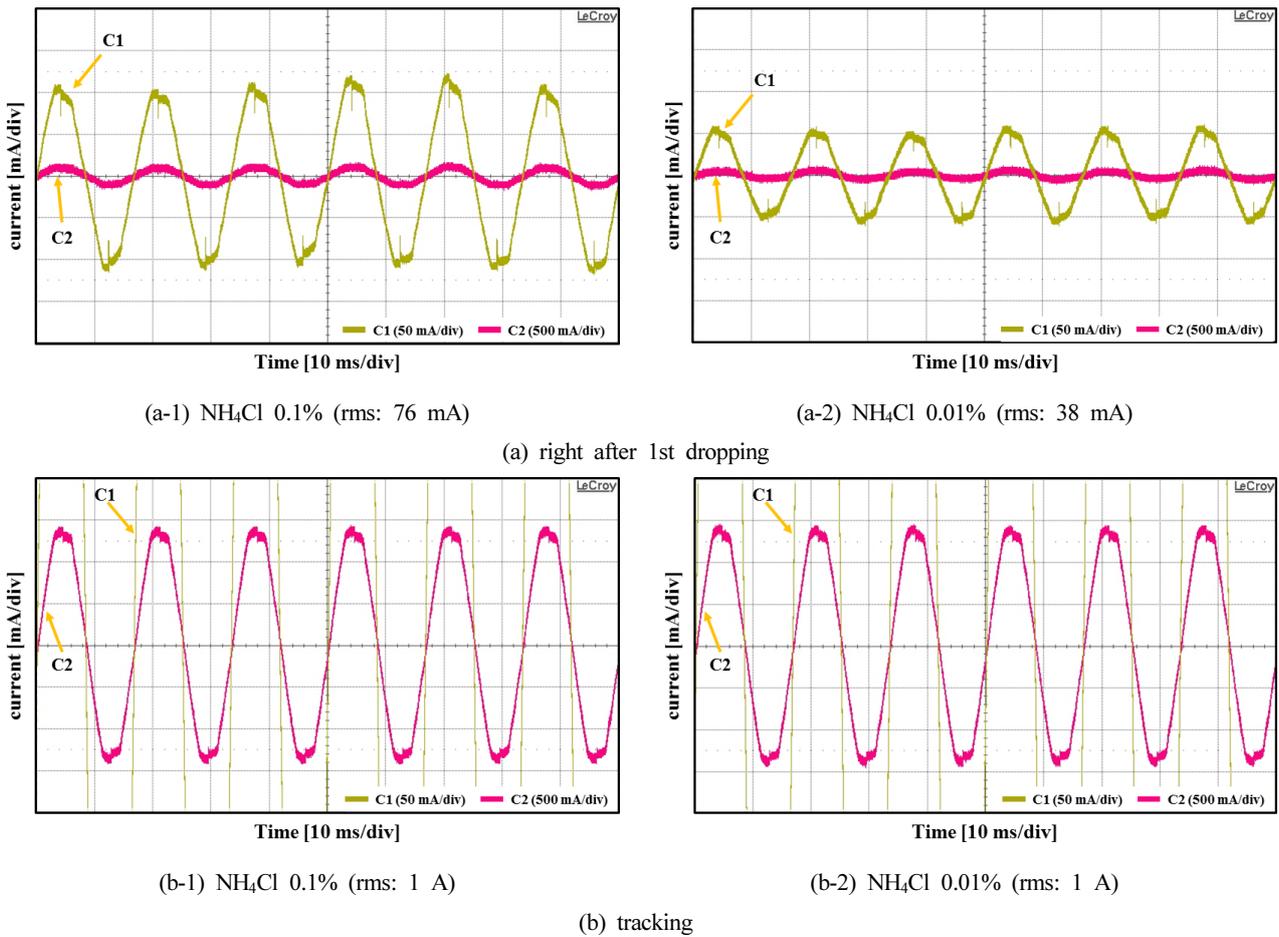


Figure 6. Current waveforms of tracking process.

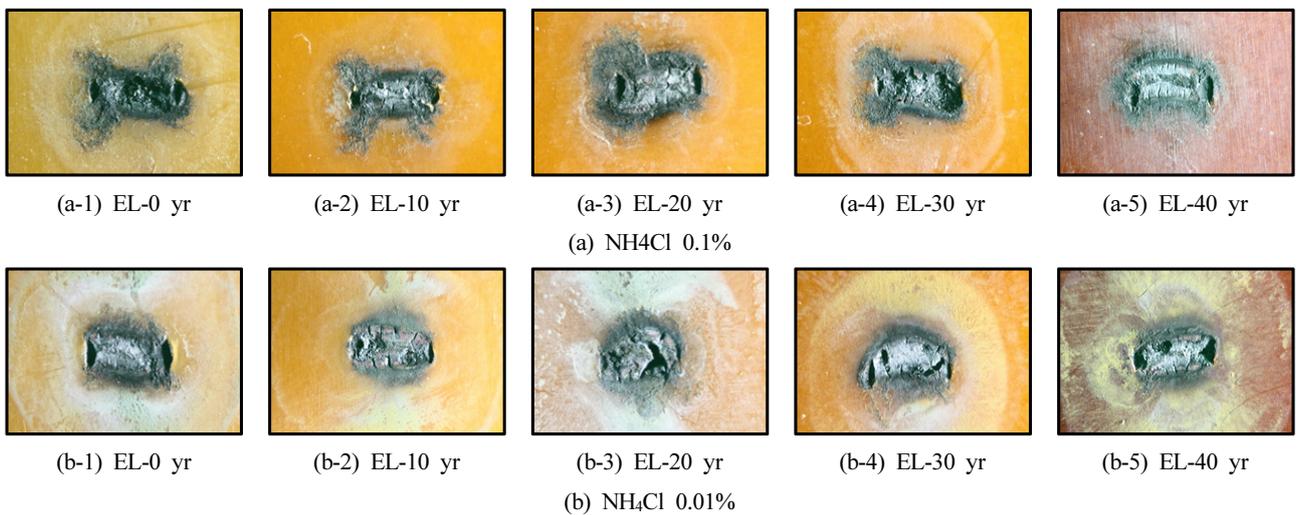


Figure 7. Photograph of tracking due to the accelerated degradation.

종적으로 트래킹이 발생하기 때문에 결과적으로 시간지연만 있을 뿐 트래킹 단락전류는 동일하게 나타난 것이다.

Figure 7은 가속열화에 따른 페놀수지 절연재료의 표면 트래킹 사진을 나타낸 것으로 트래킹에 의해 발생하는 단

락전류가 1 A로 모두 동일하기 때문에 시험용액의 농도 및 등가수명에 따라 트래킹 발생 시간에 차이가 나타날 뿐 트래킹의 외형상 차이는 뚜렷이 관찰되지 않았다. 열경화성 수지인 페놀수지의 경우 시험용액에 의해 전극사이로 누설

Table 4. Resistances of Before and After Tracking

EL		0 yr	10 yr	20 yr	30 yr	40 yr
Before tracking		OL	OL	OL	OL	OL
After tracking	NH ₄ Cl 0.1%	11.0 Ω	10.0 Ω	12.0 Ω	4.8 Ω	8.6 Ω
	NH ₄ Cl 0.01%	3.8 Ω	3.0 Ω	7.6 Ω	7.0 Ω	3.0 Ω

전류가 흐르고, 줄열(Joule's heat)에 의해 시험용액이 증발되면서 국부적인 건조대(dry band) 형성과 함께 공간상 전계부재로 인한 방전불꽃(scintillation)이 일어나게 된다. 이때, 발생하는 방전불꽃에 의해 폐놀수지 표면이 열분해되어 도전성 물질인 카본(carbon)이 생성되고, 이 과정이 반복되면서 점차적으로 도전성 트랙(track)으로 성장하여 최종적으로 표면 트래킹(tracking) 발생과 함께 섬락이 일어난다. 이와 같은 트래킹 진전과정에서 시험용액의 농도가 열을수록 초기에 발생하는 누설전류 및 방전에너지가 상대적으로 낮기 때문에 트래킹 발생에 필요한 시험용액의 적하수가 증가하게 된다. 이로 인해 염화암모늄 0.1% 보다 농도가 옅은 염화암모늄 0.01% 경우 트래킹이 발생된 주변에 시험용액의 잔상이 많이 나타나는 것을 관찰할 수 있었다.

Table 4는 추가적으로 멀티테스터기(Fluke 289, FLUKE Co., USA)를 이용하여 절연재료 표면의 트래킹 발생 전·후 저항을 측정된 결과로써 트래킹 발생 전에는 등가수명과 관계없이 Over Limit (OL)로 저항이 매우 높게 측정되었지만, 트래킹 발생 후 저항은 최소 3 Ω에서 최대 12.0 Ω으로 탄화도전로 형성으로 인해 일반적인 트래킹 판정 저항인 100 Ω 이하로 측정되는 것으로 나타났다⁽³⁾.

5. 결 론

본 논문은 가속열화에 따른 폐놀수지 절연재료의 트래킹 특성에 관한 연구로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 절연열화된 폐놀수지 시험시료를 얻기 위해 가속수명 시험방법 중 아레니우스 방정식을 이용하여 등가수명에 따른 가속열화시간을 역으로 산출한 후, 가속열화실험을 진행하여 산출된 가속열화 시간동안 130°C의 일정온도로 스트레스를 인가하여 등가수명이 0년, 10년, 20년, 30년, 40년 된 폐놀수지 절연재료를 제작하였다.

(2) KS C IEC 60112 기준을 응용하여 가속열화에 따른 폐놀수지의 트래킹 특성 측정결과 시험용액 기준 농도인 염화암모늄 0.1% 적하 시 등가수명 0년을 기준으로 트래킹 발생 위험성증가비 및 시간단축률은 등가수명 10년 위험성 1.38배 증가(시간 28% 단축), 20년 위험성 1.45배 증가(시간 31% 단축), 30년 위험성 1.62배 증가(시간 38% 단축), 40년 위험성 1.94배 증가(시간 49% 단축)하는 것으로 나타났다. 위험성을 좀 더 세부적으로 관찰하기 위해 시험용액 기준 농도보다 1/10 옅은 염화암모늄 0.01%로 진행해 본 결과 등가수명 0년을 기준으로 트래킹 발생 위험성증가비 및 시

간단축률은 등가수명 10년 위험성 1.39배 증가(시간 28% 단축), 20년 위험성 1.52배 증가(시간 34% 단축), 30년 위험성 1.99배 증가(시간 50% 단축), 40년 위험성 5.30배 증가(시간 81% 단축)하는 것으로 나타났다.

(3) 트래킹 진전과정의 전류파형을 관측해 본 결과 시험용액 최초 적하 시 누설전류는 염화암모늄 0.1% 실험값 76 mA, 염화암모늄 0.01% 실험값 38 mA 관측되었는데, 이는 시험용액 농도가 짙을수록 전류를 쉽게 통과할 수 있는 전해물질이 많기 때문에 누설전류가 높게 측정된 것이다. 이로 인해 염화암모늄 0.1%가 상대적으로 트래킹이 빠르게 발생하지만, 세부적인 위험성 관측에 있어서는 트래킹이 발생하기 더 어려운 조건인 염화암모늄 0.01%의 결과가 위험성을 분석하는데 있어서는 신뢰성이 더 높을 것으로 판단된다. 또한, 트래킹 발생 시 단락전류는 실험조건에 의해 1 A로 제한하였기 때문에 트래킹 파형 및 단락 전류는 유사하게 관측되었다. 이로 인해 최종 트래킹이 발생된 절연재료의 소손 특성에는 뚜렷한 차이가 관찰되지 않았다.

이상과 같은 결과 본 실험조건에서는 폐놀수지 절연재료의 사용기간이 오래될수록 절연열화로 인한 트래킹 위험성이 증가되는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 등가수명 40년의 경우 등가수명 0년보다 트래킹 발생 시간이 최대 81% 단축되면서, 위험성이 최대 5.3배 크게 증가하는 것으로 나타났다.

끝으로 현재까지 차단기 및 단자대 등 전기제품의 경우 권장 내용연수(service life) 없이 사용되고 있지만, 노후화에 따른 절연열화 등의 위험성을 고려하여 제도적으로 권장 교체주기를 마련해 주는 것이 전기화재 발생 가능성 및 위험성을 최대한 낮출 수 있을 것으로 생각된다. 향후 다양한 절연재료를 이용한 추가적인 연구를 진행하여 절연열화에 따른 전기적 화재위험성을 분석하고 전기화재 예방 및 최소화를 위한 기초자료를 마련하고자 한다.

후 기

이 논문은 2016년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임(2016-0059).

References

1. Ministry of Public Safety and Security, "National Fire

- Information Center E-Fire Statistics” (2016).
2. Ministry of Land Infrastructure and Transport, “2015 Building Statistics Yearbook”, pp. 139-140 (2016).
 3. S. K. Kim, D. S. Gum and C. H. Lee, “A Study on the Electrical Fire Risk of Terminal Block Due to Single and Composite Cause”, Fire Science and Engineering, Vol. 29, No. 5, pp. 57-66 (2015).
 4. J. H. Kim, S. O. Han and D. S. Kim, “A Study of Electrical and Mechanical Characteristics by Accelerated Life Test”, Proceedings of 2007 Spring Annual Conference, The Korean Institute of Electrical Engineering, pp. 28-30 (2007).
 5. FRONTIS Corporation, “Design and Case for Accelerated Test of Electronic Items for Vehicles” (2012).
 6. S. J. Kim, H. S. Kwon and D. S. Hong, “The Life Assessment Using Accelerated Thermal Degradation of 15 kV Cable”, Proceedings of 2013 Summer Annual Conference, The Korean Institute of Electrical Engineering, pp. 10-12 (2013).
 7. Korea Electrical Safety Corporation, “Checkup Guideline for Low-voltage Distribution Panel” (2012).
 8. L. K. H. VAN BEEK, “Dielectric Behavior of Curing Phenolic-Formal Resins”, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 8, Issue 6, pp. 2843-2851 (1964).
 9. Y. S. Roh, J. S. Park, S. T. Park and J. W. Kim, “An Analysis of Carbonization Patterns of Organic Insulating Materials”, R-2007-2-048, Ministry of Commerce Industry and Energy, pp. 10-11 (2008).
 10. K. M. Shong, Y. S. Roh and H. R. Kwak, “Surface Discharge Characteristics of Phenolic Resin Treated by Heat and Its Structure Analysis”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 20, No. 8, pp. 71-79 (2006).
 11. KS C IEC 60112, “Methods for Determining the Comparative and the Proof Tracking Indices of Solid Insulating Materials Under Moist Conditions” (2005).
 12. S. W. Jee, “Prediction for Possibility of the Electric Fire by Tracking Breakdown”, Fire Science and Engineering, Vol. 29, No. 2, pp. 1-7 (2015).