

가속된 열적 스트레스에 의한 PAI / Nano Silica 하이브리드 코일의 절연수명 추정

Estimation of Insulation Life of PAI/Nano Silica Hybrid Coil by Accelerated Thermal Stress

박 재 준*
(Jae-Jun Park)

Abstract - In this paper, four types of insulation coils were fabricated by adding various kinds of glycols to improve the flexibility and adhesion of insulating coils in varnish dispersed with PAI / Nano Silica_{15wt%}. The applied voltage and frequency were 1.5 kV / 20 kHz for accelerated life evaluation. Through the 6th temperature stress level, the cause of the insulation breakdown of the coil was ignored and only the breakdown time was measured. The Arrhenius model was chosen based on the theoretical relationship between chemical reaction rate and temperature for estimating the insulation life of the coil due to accelerated thermal stress. Three types of distributions (Weibull, Lognormal, Exponential) were selected as the relationship between thermal stress model and distribution. The average insulation lifetime was estimated under the temperature stress of four types of insulation coils through the relationship between one kind of model and three kinds of distributions.

Key Words : Evaluation of insulation life, PAI/Nano silica hybrid coil, Accelerated thermal stress, Arrhenius model-weibull distribution

1. 서 론

Arrhenius 법칙은 원칙적으로 전기 절연의 열적 스트레스로 인한 열화 모델로서 독보적이라고 알려져 있다. Montsinger, Dakin, Nelson, Simoni, Montanari와 같은 많은 연구자들이 모델링하는 것을 참조해왔다[1~7]. 그렇지만, 열적스트레스에 기인한 열적열화에 대한 확률 분포 모델을 설명하는 참고문헌은 빈약한 상태이다. 최근 Hideo Hirose씨 등 연구자들은 열적 스트레스에 의한 수학적 열화 모델을 제안하였고 그리고 수명모델 하에서, 효율성 관점에서 최적의 측정설계에 관한 연구를 진행하였다[8~9]. 수학적 모델에서, 우리는 Arrhenius 법칙이 열적스트레스와 수명 사이에 관계하고 있음을 알고 있는바, 가속수명 시험으로 얻은 데이터는 실패까지의 시간데이터이며, 원인은 고려하지 않았다.

본 연구에서는 3종류의 분포(Exponential, Weibull, Lognormal)와 관계한 Arrhenius-Exponential, Arrhenius-Weibull, Arrhenius-Lognormal을 이용한, 온도스트레스 가속방법으로 상온에서 가혹한 온도까지, 일정한 온도환경조건과 지속적인 인버터서지를 인가하는 방법을 적용하였다.

최적의 가속 수명 테스트 설계를 통해 짧은 테스트 시간과 적

은 비용, 즉 효율적인 테스트 계획을 사용할 수 있다[9]. 열적 스트레스에 의한 최적의 시험 계획은 Nelson, Meeker 등 [3~4], [10~11]에 의해 연구되어졌다.

본 논문에서는 Arrhenius 모델과 확률 분포를 적절히 구성할 때, 가속온도 스트레스와 인버터서지 환경이 복합화된 가속열화된 절연재료 및 나노 하이브리드 표면 코팅된 코일의 평균수명을 측정할 수 있을 것으로 생각합니다.

그런 이유로, 본 연구에서는 PAI는 극성 용매에 녹으며 자석 배선 절연체(magnet wire insulation) 및 회로 기판 용 고분자를 동반하여 박막코팅 절연재로 널리 사용됩니다. 또한, PAI는 성형 가능한 내열성 수지로서, 엔지니어링 플라스틱으로 뛰어난 전기적 특성 및 기계적 특성이 우수하며, 가공성 및 내열성을 모두 가지는 고분자 수지이다. 더욱이 PAI는 내열성과 내습성이 우수하기 때문에 에나멜 전선 절연체로 사용된다[12]. 위와 같은 고분자수지를 이용하여, 4종류의 PAI/나노실리카 하이브리드 각형 코일을 제조하였고 그리고 제조된 코일을 산업용 모터 및 전기자동차의 모터와 같은 전기기에 적용할 목적으로, 상온에서 정상적인 동작조건보다 더욱더 가혹한 높은 전압 및 인버터서지 그리고 고온의 열적스트레스의 열화모델로 단일전기보다 복합화된 가속수명 테스트를 통하여 나노하이브리드 코일절연체의 열화모델을 Arrhenius모델로 결정하였다. 절연과 관련된 통계적 결과자료를 이용하여 상온보다 50 °C(80 °C) 높은 온도 스트레스 하에서 Arrhenius 모델-3 종류 수명분포가 결합된 고장데이터에 MLE(Maximum Likelihood Estimation) 적용하였고, ReliaSoft ALTA

* Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kiee University, Korea
E-mail:jjpark@joongbu.ac.kr

Received : November 11, 2018; Accepted : December 25, 2018

7 Accelerated Life Test를 이용하여 평균절연수명을 추정하였다 [13~15].

2. Experiment

2.1 재료

Polyamideimide(PAI)수지는 MDI (methylene diphenyl diisocyanate)와 TMA로부터 NMP에 용해된 상태에서 축합반응을 통해서 80~120°C에서 합성되었으며, 중합반응이 일어나는 동안의 점도변화의 관찰 및 점도제어를 통해 분자량조절을 하였다. 이와 같은 PAI는 우수한 절연성, 기계적 강도, 내열성 등을 가지고 있지만 열전도성과 방전내구성 등의 물성보완이 필요하여, 나노급 실리카 졸을 용해/분산시킨 하이브리드 절연바니쉬 소재를 제조하였다. 그러나 이와 같은 실리카의 첨가는 절연피막의 유연성 및 구리표면과의 밀착력의 저하를 가져오기 때문에 PAI의 화학적 구조 변성이 필요하게 된 것이다.

본 연구에서는 PAI수지의 유연성과 접착력 향상을 위해 4,4-MDI와 TMA 이외에 글리콜을 사용하여 유연한 우레탄구조를 도입하여, 변성 PAI를 합성하였으며 변성된 PAI의 분자구조를 변화시켰다. PAI 고분자에 도입한 글리콜들은 표면장력, 유연성, 절연성 등을 고려하여 실리콘글리콜(1000g/ml)과 BPA글리콜(660g/ml)을 사용하였다.

2.2 나노 바니시 제조

Tetraethyl orthosilicate (TEOS, Sigma-Aldrich chemical company) 40 g을 에탄올 220 ml에 넣고 교반하면서 녹인 후 증류수 20 ml와 25% 순도의 암모니아수 4 ml를 혼합한 용액을 교반하면서 투입하여 혼합한다. 그리고 반응기 온도를 50°C로 유지한 후 교반하면서 15 시간 동안 반응시킨다. 반응 완료 후 냉각시킨 후 질산 2 ml를 투입하여서 생성된 나노 실리카를 침강시킨 후 원심분리 공정을 사용하여 나노 실리카를 분리한다. 그리

고 에탄올 세척 및 원심분리 공정을 통해서 미반응 TEOS 및 유기물 불순물을 제거한다. 세척된 나노 실리카는 50°C 진공 오븐에서 24시간 건조한 후 데시케이터에 보관하여 사용한다. 나노 실리카의 표면을 친유성으로 개질하기 위하여 건조된 나노 실리카 20 g을 에탄올 100 ml와 증류수 30 ml 혼합액에 분산시킨 후 질산 0.35 ml를 투입한다. 그리고 p-aminophenyl trimethoxysilane (APhTMS, Gelest Inc.) 2 g을 투입하고 50°C로 유지한 후 교반하면서 10시간 동안 반응시킨다. 생성된 나노 실리카를 원심분리 공정을 사용하여 분리한 후 에탄올 세척 및 원심분리 공정을 2회 실시한다. 세척된 표면처리 나노 실리카는 50°C 진공 오븐에서 24시간 건조한 후 데시케이터에 보관하여 사용한다.

Polyamideimide (PAI)/나노 실리카(15 wt%) 바니시를 제조하기 위해서 15wt%의 PAI가 N-methyl-2-pyrrolidone (NMP) 용매 중에 용해된 PAI 용액(CTI Co.) 100 g 중에 표면처리 나노 실리카 4.5 g을 분산시켜서 제조하였다. 제조된 바니시를 사용하여 (썬삼동에서 구리 와이어에 코팅하여 코일을 제조하였다.

2.3 Sample Preparation

본 연구에서 개발된 4종류 코일의 즉, Number_1는 PAI 원형 수지로 코팅한 코일, Number_2는 TMA 1M/MDI 1M(4,4-MDI) 처리된 경우이며, Flexible Glycol이 포함되지 않았으며, 나노실리카 15wt%만 충전 분산된 코일이다. 여기서 처리된 MDI의 약칭은 메틸렌 디 페닐 디 이소시아네이트, 방향족 디 이소시아네이트 (Methylene diphenyl diisocyanate, 4,4'-diphenylmethane diisocyanate) 이다. 고리 주위의 이소시아네이트 기의 위치에 따라 다양한 이성질체가 있다. 즉, 4,4'-MDI는 4,4' 이성질체는 범용적으로 가장 널리 사용하고 있다. Number_3는 TMA 1M/MDI 1.01M(4,4-MDI)을 처리하였고, Flexible glycols인 BPA glycol 0.005M의 한 종류가 포함된, 나노실리카 15wt% 충전 분산된 바니시를 다층 코팅한 코일의 샘플이다. Number_4는 TMA 1M/MDI 1.02M(4,4-MDI 100%)을 처리하였고, Flexible glycols인 BPA glycol 0.01M + PDMS glycol 0.005M이 포함된 나노실리카 15wt% 충전 분산된 바니시를 다층 코팅한 코일의 샘플이다. 4종

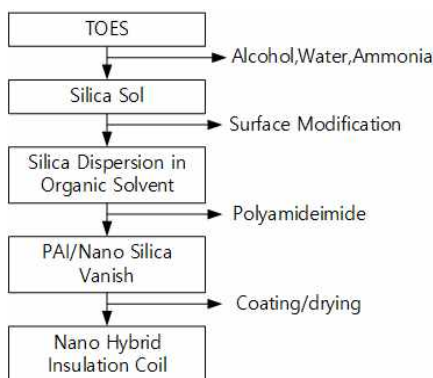


그림 1 PAI/Nano Silica Vanish 제조 및 코일 제작

Fig. 1 PAI/Nano silica vanish manufacture and coil production

표 1 제조된 코일의 종류 및 내용

Table 1 Types and contents of manufactured coil

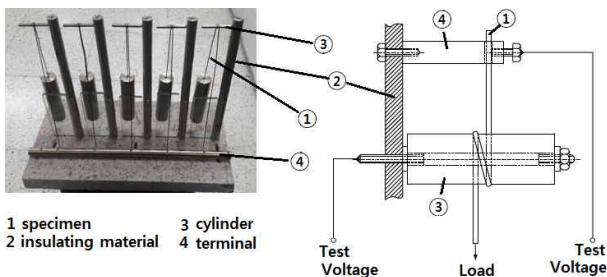
Type of Sample	Contents of Vanish
Number_1	PAI (Polyamideimide) Original 코일
Number_2	PAI 바니시에 TMA 1M/MDI 1M (4,4-MDI) 를 처리한 바니시를 이용하여 절연층을 형성시킨 각형코일
Number_3	TMA 1M/MDI 1.01M (4,4-MDI)와 유연화제 BPA Glycol 0.005M을 첨가한 바니시를 제조하여 절연층을 형성시킨 각형코일
Number_4	TMA 1M/MDI 1.02M (4,4-MDI 100%)와 유연화제 2종류인 BPA Glycol 0.01M + PDMS Glycol 0.005M를 첨가하여 제조된 바니시를 이용하여 절연층을 형성시킨 각형코일

류의 코일에 대한 인버터서지 조건하에서 절연과괴수명을 연구하였다.

2.4 각형 코일의 절연과괴 수명평가

2.4.1 환경온도 변화에 따른 인버터서지 절연과괴 수명

그림 2에서는 PAI (Polyamideimide) 원형 및 나노실리카 하이브리드 코일의 가속열화를 측정하기 위한 전극, 온도챔버 그리고 고주파 고전압 펄스발생기의 측정 시스템을 나타내었다. 출력전압의 파형은 그림 3에 나타내었고, 진폭의 크기는 0~1.5kV (peak to peak) 출력전압과 주파수 20 kHz의 인버터서지가 인가되었다. 에나멜 절연층 두께는 30~50 μm 이고, 각형 구리코일의 두께와 폭은 각각 0.77~0.83 mm 그리고 1.17~1.23 mm을 Sam Dong Co. Ltd에서 제조된 코일을 사용하였다.



(a) 절연과괴 수명평가를 위한 전극시스템



(b) 환경온도 & 인버터서지 적용의 절연과괴 수명 시스템

그림 2 환경온도 & 절연과괴 수명 측정시스템

Fig. 2 Environmental temperature & insulation breakdown life measurement system

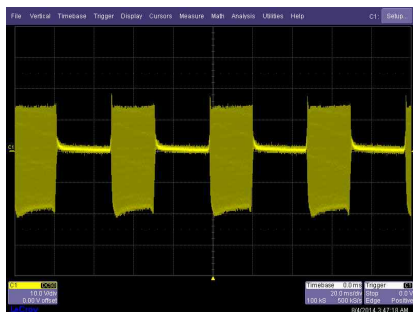


그림 3 인가된 인버터서지 출력파형

Fig. 3 Applied inverter surge output waveform

실험평가 전극은 IS 13778(part 5): 2012, IEC 60851-5 : 2008 코일의 절연수명 평가를 위한 시편과 실린더형 전극배열로, 측정시 감기어진 실린더형 전극에 밀착하여 접촉된 상태의 샘플에 인버터 서지 전원이 인가되어졌다. 감기어진 코일의 실린더형 전극의 지름은 5mm ϕ 로서(가변이 가능함), 2회 감기어진 상태로 한쪽 단자의 코일 끝부분 절연 층을 제거하였고, 그 단자는 (+) 전원부에 연결하였다. 그리고 다른 한쪽 단자는 380g의 하중을 갖는 추를 매달아 지지 하도록 하였다 [16~17].

그림 2(b)에서 나타낸 인버터서지의 파형 발생장치 Model: APCP-12kV-100, Sky Innotek Co. Ltd. 로부터 제조하였으며, 인가전압은 0~2kV까지 가변할 수 있고, 주파수는 0~20kHz까지 가변할 수 있는 시스템을 사용하였다. 일정한 온도를 유지할 수 있는 항온조 내에서 실험이 실시되었고, 코일의 절연수명이 끝날 때까지 모든 조건을 일정하게 유지하면서 실험을 수행하였고 그리고 실험 시작에서부터 종료시까지 인가전압과 누설전류 그리고 현재상태의 환경온도자료가 컴퓨터에 기록되어졌다.

본 연구에 사용된 측정 코일은 4종류가 사용되었다. 첫 번째 코일, Coil_1은 고유연성 PAI 원형 바니시로 코팅하였고, 두 번째 코일, Coil_2은 PAI 바니시에 코로나 억제용으로 나노실리카 충전함량 15wt%를 완전 분산시킨 바니시를 이용하여 코팅한 코일을 사용하였다. 그리고 세 번째 코일, Coil_3은 PAI수지에 한 종류 유연화제 (BPA Gylcol 0.005M)를 나노실리카 15wt%에 충전 분산된 바니시에 첨가하여 제조된 코일을 사용하였다. 마지막으로 네 번째 코일, Coil_4은 PAI수지에 나노실리카 15wt%를 충전 분산시킨 바니시에 두종류 유연화제(BPA Gylcol 0.01M + PDMS Gylcol 0.005M)를 첨가한 코일을 사용하였다.

온도조건은 6종류 온도레벨 303K (30 $^{\circ}\text{C}$), 343K (70 $^{\circ}\text{C}$), 373K (100 $^{\circ}\text{C}$), 403K (130 $^{\circ}\text{C}$), 423K (150 $^{\circ}\text{C}$), 473K (200 $^{\circ}\text{C}$)에서 절연과괴 가속수명을 평가하였다.

3. 결과 및 검토고찰

3.1 가속 온도스트레스 하에서 코일의 절연수명평가 방법

신뢰성의 중요한 목표는 연구대상의 제품이나 소재 등이 갖추어야 할 조건이 있다. 즉, 개발소재가 어떤 환경에서도 이상이 없어야 하고, 계획된 기간 동안 문제가없이 사용 가능해야하는 조건이 선행되어야 한다. 신뢰성평가의 주요관점은 소재가 사용될 인공 및 자연적인 환경온도, 습도, 전압, 진동 그리고 소음과 같은 조건에 견디는 실험을 말한다. 그리하여 개발한 소재의 우수성을 나타낸 경우이다.

신뢰성 평가측면에서 Arrhenius, Eyring, Inverse Power Law (IPL)모델 등이 있다. 그러나 본 연구에서는 환경 온도의 가속과 관계된 Arrhenius Model를 사용하였고, 수명분포는 Exponential, Weibull 그리고 Lognormal 등이 있다.

본 연구에서는 3종류의 분포(Exponential, Weibull, Lognormal)와 관계한 Arrhenius-Exponential, Arrhenius - Weibull, Arrhenius-Lognormal을 이용한, 가속수명 시험으로 온도스트레스 가속방법으로 일정한 온도환경조건과 지속적인 인버터서지를

인가하는 방법을 적용하였다. 정상적인 조건보다 가혹한 온도 및 인버터서지 환경조건하에서 짧은 시간동안 고장데이터를 얻은 후, 수명과 온도스트레스와의 관계를 이용하여, PAI/나노실리카 하이브리드 코일의 정상사용조건에서의 절연수명을 추정하는 방법을 선택한 것이다.

PAI/나노실리카 하이브리드 절연코일의 절연과괴 가속 수명 시험은 정상적인 사용 환경 조건보다 시간을 단축시킬 목적으로 사용조건보다 가혹한 환경 하에서 수행하는 시험을 의미하는 것이다. 본 연구의 가속수명시험은 같은 조건의 인버터서지 및 온도스트레스 하에서 10개 측정샘플이 절연과괴에 이를 때까지 실험을 실시한 결과를 이용하여 ReliaSoft ALTA-7를 이용하여 절연수명을 추정하였다[14].

3.1.1 Arrhenius-Distribution

① Arrhenius-Weibull

2-parameter 와이불 분포에 대한 pdf(probability density function)는

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

여기서 η 는 스케일파라미터(scale parameter)이다.

Arrhenius-weibull 모델 pdf에서 $\eta = L(V) = C.e^{\frac{B}{V}}$ 이다. 그리고 (1)식에 η 를 대입하면

$$f(t, V) = \frac{\beta}{C.e^{\frac{B}{V}}} \left(\frac{t}{C.e^{\frac{B}{V}}}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{C.e^{\frac{B}{V}}}\right)^\beta} \quad (2)$$

더 낮은 온도스트레스 레벨에서의 pdf는 더 높은 scale parameter와 함께 오른쪽으로 더 늘어나고, 그 동안의 형상은 동일하게 유지 됩니다. 이 상태는 Arrhenius 모델의 B 파라미터가 양수 일 때 관찰됩니다.

② Arrhenius-Lognormal

lognormal 분포의 pdf는

$$f(T) = \frac{1}{T\sigma T' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T'-\bar{T}}{\sigma T'}\right)^2} \quad (3)$$

여기서 $T' = \ln(T)$ 이다.

T : time to-failure

T' : time-to-failure의 자연대수의 평균

$\sigma T'$: time to-failure의 자연대수의 표준편차이다.

Lognormal 분포의 중앙값 $\check{T} = e^{\bar{T}}$ 이다. Arrhenius-Lognormal 모델 pdf는 다음과 같다.

$$f(T, V) = \frac{1}{T\sigma T' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T'-\ln(C)-\frac{B}{V}}{\sigma T'}\right)^2} \quad (4)$$

time-to-failure의 자연대수의 표준편차 $\sigma T'$ 는 온도스트레스와 독립적이다. 이런 가정은 분포의 형상이 온도스트레스와 함께 변화하지 않음을 의미한 것이다.

③ Arrhenius-Exponential

1-parameter 지수분포의 pdf는 $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ 로 주어진다.

1-parameter 지수 분포에 대한 평균수명은 $\lambda = \frac{1}{m}$ 으로 주어진다. 즉,

$$f(t) = \frac{1}{m} e^{-\frac{t}{m}} \quad (5)$$

이다. Arrhenius-Exponential 모델-분포의 pdf에서 $m = L(V)$, $L(V) = C.e^{\frac{B}{V}}$ 에 대입하면 $m = L(V) = C.e^{\frac{B}{V}}$ 가 된다. 방정식 (5)에 m을 대입하면 시간과 스트레스 함수 두 가지 모두에 대한 pdf는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$f(t, V) = \frac{1}{C.e^{\frac{B}{V}}} \cdot e^{-\frac{1}{C.e^{\frac{B}{V}}}t} \quad (6)$$

3.1.2 Arrhenius Relationship

실험은 인가전원인 인버터서지를 일정하게하고, 가속 온도스트레스에 대한 영향을 평가하기 위하여, 환경 온도스트레스는 30, 70, 100, 130, 150 그리고 200℃이다. Arrhenius Model은 온도 가속 모델 중 하나로서, 반응속도 R와 온도(절대온도) T와의 관계식

$$R(T) = C \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (7)$$

여기서

R : 반응속도 또는 반응율,

C : 미지의 비 열적 상수

E_a : 활성화 에너지 (eV)

k : 볼츠만 상수($8.617385 \times 10^{-5} eV/K$)

T : 절대온도이다

즉, 온도모델에 적용하면, 열화량 = 반응속도 × 시간(수명) 와의 관계식에서, 열화량 X_0 에 도달하면 고장이 발생 한다고 가정할 때, 활성화 에너지는 분자가 반응에 참여해야만 하는 에너지이다. 즉, 활성화 에너지는 온도가 반응에 영향을 미치는 결과의 측정값이다. Arrhenius Life-Temperature Stress 함수는 수명이 프로세스의 역 반응 속도에 비례한다고 가정함으로써 공식화된다. ALTA 7 소프트웨어에서 Arrhenius Life-Temperature Stress 반응은 다음과 같이 주어진다.

$$L(T) = C.e^{\frac{B}{T}} \quad (8)$$

- L : 평균 수명으로, 정량 가능한 수명 측정
- T : 온도 스트레스 레벨.
- C : 결정될 모델 매개 변수 중 하나 (C>0).
- B : 결정될 다른 모델 매개 변수.

Arrhenius는 온도의존성으로부터 파생된 물리기반모델이기 때문에, 온도가속 측정을 위해 사용된 모델이다. 온도 값은 절대값이어야 하고 식 (8)에서는 단위가 없다.

Arrhenius 온도관계는 선형화 될 수 있으며, Arrhenius 플롯을 Life-Stress plot으로 나타낼 수 있습니다. (8)식의 양측을 자연 대수로 식 (9)으로 선형화 될 수 있다.

$$\ln(L(T)) = \ln(C) + \frac{B}{T} \quad (9)$$

식 (9)에서, $\ln(C)$ 는 1차 함수 라인의 y 절편을 나타내고 있으며, B는 1차 함수 라인의 기울기입니다. 단, 온도스트레스의 역(inverse= $\frac{1}{T}$)은 스트레스가 아닌 변수(variable)이다.

수명은 온도스트레스(T)에 대한 것이고, $\frac{1}{T}$ 의 스트레스에 대한 것이 아닙니다.

식 (9)에서는 온도의 역수 스케일로 나타낼 수 있다. 기울기 B는 비록 B의 값이 양의 값일지라도 음의 값으로 나타난다. B가 온도스트레스 역수의 기울기이므로, 온도스트레스의 기울기는 아니다. 온도스트레스 역수($\frac{1}{T}$)는 온도스트레스가 증가함에 따라 감소되어진다.

Arrhenius 관계는 실제적인 이유로 역수스케일로 나타내어진다. 온도스트레스가 순전히 열적인 것일 경우, 파라미터 B는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$B = \frac{E_a}{k} = \frac{\text{activation energy}}{\text{Boltzman's constant}} = \frac{\text{activation energy}}{8.623 \times 10^{-5} eV/K} \quad (10)$$

여기서 E_a 는 활성화 에너지로서 선험적(a priori)인 값이며, B는 활성화 에너지와 동일한 성질을 갖는다. 즉, B는 온도스트레스가 수명에 영향을 주어 측정된 값이다. B의 값이 클수록 특정 온도스트레스에 대한 수명의 의존성이 높아진다. 파라미터 B는 음의 값을 가질 수 있다. 그 경우 수명은 온도스트레스가 증가함에 따라 증가하고 있습니다. 이러한 예는 저온이 고온보다 전구에 더 높은 스트레스인 플라즈마로 채워진 전구의 한 예입니다.

표 2에서는 4종류 코일에 대한, Arrhenius 수명-온도 스트레

표 2 Arrhenius-Weibull 분포의 수명-온도스트레스 계수
Table 2 Life-Temperature stress coefficient of Arrhenius-Weibull distribution

Arrhenius-Weibull			
Types of Coil	β	B	C
Coil_1	3.93	679.20	1.419
Coil_2	2.04	2823.47	0.034
Coil_3	2.52	1953.51	0.420
Coil_4	2.58	2629.98	0.052

스 가속열화의 사용 레벨에 따른 확률 와이블 분포의 특성결과와 계수를 나타낸 것이다. 여기서 사용레벨은 313K (30°C)에서 적용한 경우이다.

표 3에서는 Arrhenius-lognormal 분포의 수명-온도스트레스에 따른 가속열화의 사용레벨에 따른 확률 로그정규분포의 특성결과와 계수를 나타낸 것이다. 여기서 사용레벨은 313K(30°C)에서 적용한 결과이다.

Arrhenius-lognormal 분포에 대해 반환된 parameter는 항상 STD, B, C입니다. 반환 된 STD는 항상 실패할 자연 대수의 분산의 제곱근입니다. 또한 " Scale parameter "음선이 체크되면 반환된 평균값은 $\bar{T} = \ln(C) + \frac{B}{V}$ 에 의해 주어진 시간 대 실패의 자연 대수의 평균이 됩니다. 응용 프로그램이 평균 및 표준 편차로 이러한 값을 나타내지만 사용자는 이러한 값이 분포의 파라미터로 제공된다는 것을 생각해야 하며, 따라서 평균 및 표준 편차 데이터의 자연대수의 고장 시간의 평균 수명값과 고장시간의 표준편차는 ALTA 7에 의해 얻어진 결과이다.

표 3 Arrhenius-lognormal분포의 수명-온도스트레스 계수
Table 3 Life-Temperature stress coefficient of Arrhenius-lognormal distribution

Arrhenius-lognormal			
Types of coil	Standard deviation (STD)	B	C
Coil_1	0.3438	858.6755	0.7616
Coil_2	0.4481	2473.3116	0.0692
Coil_3	0.4853	2072.1790	0.2457
Coil_4	0.4673	2629.3679	0.0420

표 4에서는 Arrhenius-Exponential 분포의 수명-온도스트레스에 따른 가속열화의 사용레벨에 따른 확률 지수분포의 특성 결과의 계수를 나타낸 것이다. 여기서 사용레벨은 313K(30°C)에서 적용한 결과이다.

표 4 Arrhenius-Exponential분포의 수명-온도스트레스 계수
Table 4 Life-Temperature stress coefficient of Arrhenius-Exponential distribution

Arrhenius-Exponential		
Types of coil	B	C
Coil_1	774.9636	0.9993
Coil_2	2631.5650	0.0507
Coil_3	1998.0650	0.3312
Coil_4	2641.5068	0.0450

표 2에서, Coil_1의 경우는 679로서 다른 코일에 비하여 상대적으로 낮은 수치의 결과이다. 이는 원형 PAI수치를 도체에 절연 코팅한 코일로서 온도스트레스에 큰 영향을 받지 않았다. 즉, 저온에서나 고온에서 파괴되는 절연수명의 차이가 크게 나지 않음

을 의미한 것이다. 그러나 Coil_2의 경우는 PAI수지에 나노실리카를 충전 분산시킨 바니시를 절연 코팅한 경우로서, 이에 대한 평균절연수명 변수 B의 결과 2823으로서, 원형코일 Coil_1에 비하여 상대적으로 높은 4.15배를 기록하였다. 이는 나노 입자가 충전 분산된 코일의 경우 활성화 에너지가 매우 높아지는 결과이며, 이 결과 절연수명에도 큰 영향을 주어진 것이다.

Coil_3의 경우, B 파라미터의 경우 1953.5의 결과를 얻게 되었다. 나노실리카 입자를 충전 분산시킨 바니시에 유연화제 1종류를 첨가한 경우의 바니시를 도체에 절연 코팅한 경우로서, PAI 원형 코일(Coil_1)과 비교하여 볼 때 2.87배 높은 파라미터의 결과를 얻게 되었다. 그리고 Coil_4 코일의 경우, B 파라미터 결과는 2629로서 Coil_1에 비하여 3.87배 높은 결과이다. Coil_4의 경우 나노실리카 충전분산된 바니시에 유연화제 2종류를 첨가한 경우로서, 유연성과 절연성을 갖는 코일이기 때문에 나노실리카만 충전 분산된 Coil_2에 비하여 고온부에서 상대적으로 긴 절연수명을 나타낸 이유라 사료된다. 이처럼 B의 값이 클수록 특정 온도스트레스에 대한 절연수명의 의존성이 높아진 결과를 알 수 있었다.

더불어 표 3에서는 Arrhenius-lognormal 분포의 가속온도에 대한 수명에 대한 파라미터로서 Coil_1의 경우 858, Coil_2의 경

우 2473, Coil_3의 경우 2072 그리고 Coil_4의 경우 2629를 나타내었다.

또한, 표 4에서는 Arrhenius-Exponential 분포의 가속온도에 대한 수명에 대한 파라미터로서 Coil_1의 경우 774, Coil_2의 경우 2631, Coil_3의 경우 1998 그리고 Coil_4의 경우 2641를 나타내었다.

3.1.3 Mean Life as Reliable Life

① Arrhenius-Weibull

Arrhenius-Weibull 관계에서, 신뢰할 수 있는 수명, t_R 는 식 (11)에서 주어졌다. 이것은 유닛(unit)이 $R(t_R)$ 의 신뢰도로 성공적인 함수에 대한 평균수명이다.

$$t_R = C \cdot e^{\frac{B}{T}} [-\ln [R(t_R, T)]]^{\frac{1}{\beta}} \quad (11)$$

② Arrhenius-lognormal

Arrhenius-lognormal 모델에 대해서, 신뢰할만한 수명, 또는 바라는 신뢰목표에 대한 미션기간(mission duration), t_R 는 시간에 관계되는 신뢰방정식을 푸는 것으로 다음과 같이 추정할 수

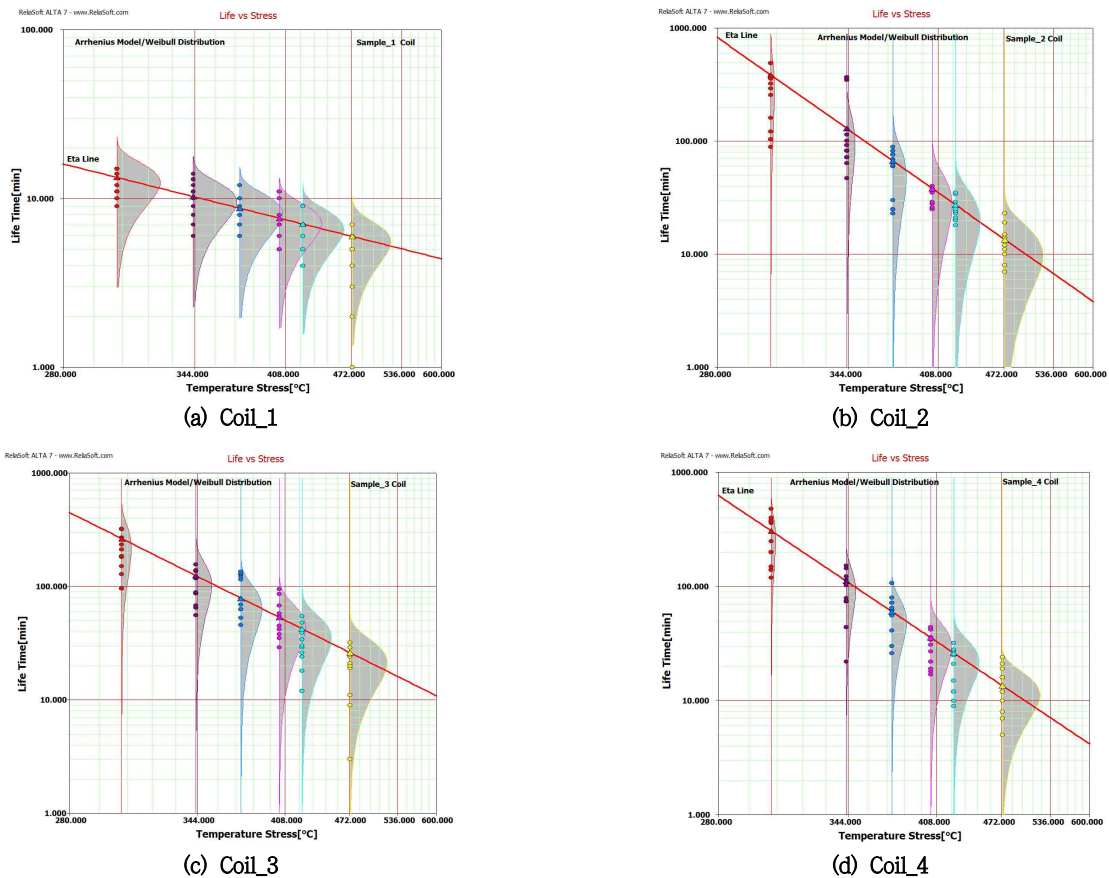


그림 4 4종류 코일의 온도 스트레스 가속열화에 의한 Arrhenius-Weibull 분포의 평균 절연수명

Fig. 4 Average Insulation life for Arrhenius-Weibull distribution induced to temperature stress of four types coils

있다.

$$T'R = \ln(C) + \frac{B}{V} + z \cdot \sigma T'$$

여기서, $z = \phi^{-1}[F(T'R, V)]$ 그리고

$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z(T', V)} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$, 이유는 $T' = \ln(T)$, 신뢰할만한 수명 t_R 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_R = e^{T'_R} \tag{12}$$

③ Arrhenius-Exponential

Arrhenius-exponential 모델에 대해, 신뢰할만한 수명 또는 요구된 신뢰도 목표를 위한 미션기간 t_R 은 다음과 같이 주어진다.

$$R(t_R, V) = e^{-\frac{t_R}{C \cdot e^{\frac{B}{V}}}}$$

$$\ln[R(t_R, V)] = -\frac{t_R}{C \cdot e^{\frac{B}{V}}} \text{ 또는}$$

$$t_R = -C \cdot e^{\frac{B}{V}} \ln(R(t_R, V)) \tag{13}$$

그림 4에서는 4종류 코일에 대한 신뢰할만한 평균수명으로서, 사용한 온도스트레스 레벨은 313K(30°C)와 353K(70°C)의 온도환

Table 5 Average lifetime of four types coils for three Arrhenius models - distribution

표 5 3종류 Arrhenius 모델-분포에 대한 4가지 코일의 평균수명

(a)	Arrhenius - Weibull	Arrhenius-Lognormal	Arrhenius-Exponential	Confidence
313K	11.26min	12.55min	11.88min	90%
353K	8.80min	9.20min	8.97min	
(b)	Arrhenius - Weibull	Arrhenius-Lognormal	Arrhenius-Exponential	Confidence
313K	253.5min	206.6min	226.9min	90%
353K	91.2min	84.4min	87.5min	
(c)	Arrhenius - Weibull	Arrhenius-Lognormal	Arrhenius-Exponential	Confidence
313K	191.4min	207.3min	196.0min	90%
353K	94.3min	97.9min	95.1min	
(d)	Arrhenius - Weibull	Arrhenius-Lognormal	Arrhenius-Exponential	Confidence
313K	207.08	208.53	207.91	90%
353K	79.91	80.49	79.90	

경에서 3가지 분포 (Arrhenius-Weibull, Arrhenius-Lognormal, Arrhenius-Exponential)중 Arrhenius-Weibull의 평균절연수명 평가결과를 나타내었다. 단 confidence는 90%의 신뢰도에서 실시하였다.

그러나 그림 4(a)에서 Coil_1의 가속온도스트레스에 대한 코일의 절연과괴 평균수명으로 313K에서 11.26분 그리고 353K에서는 8.8분의 평균수명을 나타내었다. 그림 4(b)에서는 Coil_2의 가속 온도스트레스에 대한 절연과괴 평균수명으로 313K에서는 253분 그리고 353K에서는 91.23분이었다. 그리고 그림 4(c)에서는 Coil_3의 가속온도스트레스에 대한 절연과괴 평균수명이 313K에서 191분 그리고 353K에서는 94.38분을 나타내었다. 더불어 그림 4(c)에서는 Coil_4의 가속온도스트레스에 대한 절연과괴 평균수명이 313K에서 207.08분 그리고 353K에서는 79.91분을 나타내었다. 여기서 Eta line은 기울기를 나타낸 것이다. 흑색으로 된 부분은 각각의 온도환경에서 부과된 pdf(probability density function)의 결과를 나타낸 것이다.

3.1.4 Acceleration Factor

대부분 연구자들은 가속계수를 사용 레벨(use level)과 가속열화 스트레스 레벨사이 수명의 비율로 언급된다. Arrhenius 모델에서 이런 가속계수는

$$AF = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}} = \frac{Ae^{\frac{B}{T_U}}}{Ae^{\frac{B}{T_A}}} = e^{\left(\frac{B}{T_U} - \frac{B}{T_A}\right)} = e^{\left(\frac{E_a}{kT_U} - \frac{E_a}{kT_A}\right)} = \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A}\right)\right] \tag{14}$$

n승 법칙으로 표현하면 $AF = \frac{L_U}{L_A} = \left(\frac{S_U}{S_A}\right)^n$ 으로 n는 지수, S는 스트레스 변수이다. 만일 B값이 이전 경험적으로 알려진다면, 가정된 활성화 에너지만이 단지 가속 인자로 작용하게 될 것이다.

본 연구에서 가속계수(AF)는 기준이 되는 사용온도 스트레스는 313K(60°C)이며, 가속 온도스트레스 333K(60°C), 343K(70°C), 353K(80°C)로서 가속될 때 표 6에서 그 결과를 나타내었다. 또한 그 결과를 그림 5에서 도시하였다.

그림 5에서는 Coil_1~Coil_4 코일의 아레니우스 모델인 수명-온도스트레스 가속계수 특성을 나타내었다. Coil_2의 경우 온도스트레스 변화에 따라 가장 큰 AF의 결과를 나타내었고 그리고

표 6 Arrhenius-Weibull 관계에서 4종류 코일의 가속계수 **Table 6** Acceleration coefficients of four types of coils in the Arrhenius-Weibull relation

Acceleration Factor	333K	343K	353K
Coil_1	1.13	1.20	1.27
Coil_2	1.71	2.20	2.77
Coil_3	1.45	1.72	2.02
Coil_4	1.65	2.08	2.59

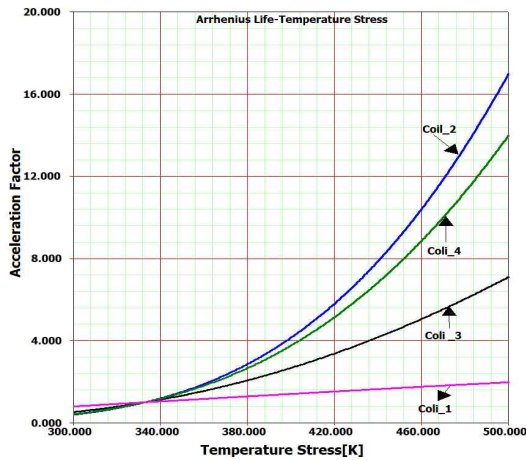


그림 5 Coil_1~Coil_4의 아레니우스 모델인 수명- 온도스트레스 가속계수 특성

Fig. 5 Life-temperature stress acceleration factor characteristic of arrhenius model of Coil_1~Coil_4

Coil_4, Coil_3 그리고 Coil_1순서로 AF 변화가 작게 나타내었다. 이는 가속된 온도스트레스의 증가에 따라 나노실리카의 충전 분산된 경우 열적인 가속이 크게 나타난 결과를 의미한 것이다. 1 종류의 유연화제를 첨가한 경우 수지와 결합력 그리고 입자와 수지와 결합력의 향상으로 열적스트레스에 강한 결과를 의미한 것이다.

그렇지만, Coil_1인 경우 PAI 원형수지의 경우 코일에서는 상온에서부터 고온스트레스에 절연수명이 대체로 매우 취약하기 때문에 수명이 상대적으로 짧은 결과이다. 그런 이유로 AF가 가장 낮은 가속계수의 결과를 얻게 된 것이다. AF는 온도스트레스 환경 하에서 가속열화와의 상관성에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.

4 결 론

PAI/Nano Silica_15wt%에 각기 다른 유연화제를 첨가하여바니시를 제조 후, 도체 4가지 종류의 절연 코팅된 코일이 제조되었다. 복합가속열화(인버터 서지조건 : 1.5kV/20kHz, 온도스트레스 조건인 303K(30℃), 343K(70℃), 373K(100℃), 403K(130℃), 423K(150℃), 473K(200℃))에서 복합적으로 열화를 가속하여 최종적으로 절연과괴 시간을 평가하였다. 그 결과 아레니우스 수명-온도조건으로 요구된 기준온도조건은 313K(30℃)이었고 가속 온도스트레스 조건을 353K(80℃)로 기준조건보다 50℃ 높은 온도스트레스 하에서 3가지 종류의 Arrhenius-Weibull, Lognormal, Exponential distribution를 이용한 평균절연수명을 평가하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, Arrhenius 온도모델과 3종류 분포관계를 이용한 가속복합열화에 의한 평균절연수명평가에서, Arrhenius-Weibull model과 Arrhenius-Exponential과의 평균수명의 차이는 0~4.05%의 차이를 나타내었다. 그러나 Lognormal의 분포는 상대적으로 평균수명의 오차가 더욱 크게 나타남을 알 수 있었다.

둘째, 실측된 측정데이터의 수가 많으면 추정된 목표에 더욱더 근접할 수 있음을 알 수 있었고, 향후 연구 시에 충분히 고려해야 할 문제로 생각되었다.

셋째, 원형 PAI수지에 비하여 유/무기하이브리드 코일의 평균 절연수명 평가 결과 유/무기하이브리드 코일이 17.29배 긴 절연수명을 갖고, 온도스트레스에 강한 유/무기 하이브리드 코일을 개발하였다. 이로서, 저압 및 고압 그리고 전기자동차에 적용할 수 있는 인버터 서지에 강한 전기기기의 신뢰성과 안정성을 갖는 코일로서 향후 활용이 기대됨.

감사의 글

본 연구는 2018도 중부대학교 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

Reference

- [1] V. M. Montsinger, "Loading transformers by temperature", *AIEE Trans.*, Vol. 67, pp. 113-122, 1944.
- [2] T. W. Dakin, "Electrical insulation deterioration treated 8s a chemical rate phenomenon", *AIEE Trans.*, Vol. 67, pp. 113-122, 1948.
- [3] W. Nelson, "Analysis of Accelerated Life Test Data - Part I/The Arrhenius Model and Graphical Methods", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 6, pp. 165-181, 1971.
- [4] W. Nelson, "Analysis of Accelerated Life Test Data Part II / Numerical Methods and Test Planning", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 7, pp. 3655, 1972.
- [5] L. Simoni, "A General Approach to the Endurance of Electrical Insulation under Temperature and Voltage", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 16, pp. 277-289, 1981.
- [6] G.C. Montanari and F.J. Lebok, "Thermal degradation of electrical insulating materials and the thermo kinetic background experimental data", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 25, pp. 1037-1045, 1990.
- [7] G.C. Montanari, G. Mazzanti and L. Simoni, "Progress in Electrothermal Life Modeling of Electrical Insulation during the Last Decades", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 9, pp. 730-745, 2002.
- [8] Hideo Hirose, Takenori Sakumura, "Foundation of Mathematical Deterioration Models for the Thermal Stress", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 22, No. 1, pp. 482-487, 2015.
- [9] Hideo Hirose, Takenori Sakumura and Naoki Tabuchi, "Optimum and Semi-optimum Life Test Plans of Electrical Insulation for Thermal Stress", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 22, No. 1;

page 488-494, 2015.

- [10] W.Q. Meeker, "A Comparison of Accelerated Life Test Plans for Weibull and Lognormal Distributions and Type I Censoring", *Technometrics*, Vol. 26, pp. 157-171, 1984.
- [11] C.A. Meeter and W.Q. Meeker, "Optimum Accelerated Life Tests With a Nonconstant Scale Parameter", *Technometrics*, Vol. 36, pp. 71-83, 1994.
- [12] Masakazu Mesaki, Yoshinori Tatematsu and Hideki Goda, "Hybrid Composites of Polyamidelmide and Silica Applied to Wire Insulation", *Furukawa Review*, No. 22, page 1-4, 2002.
- [13] J. C. Fothergill, "Estimating the Cumulative Probability of Failure Data Points to be plotted on Weibull and other Probability Paper", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. EI-25, No. 3, June.
- [14] Accelerated Life Testing Reference(ALTA 7), ReliaSoft Characteristics of Publishing, Tucson, Arizona, 2008.
- [15] Life Data Analysis Reference (Weibull ++7) ReliaSoft Characteristics of Publishing, Tucson, Arizona, 2008.
- [16] Calculation of breakdown voltage (Test acc. To IEC 60851.5.4.2, cylinder).
- [17] Indian Standard WINDING WIRES — TEST METHODS PART 5 ELECTRICAL PROPERTIES (First Revision) IS 13778 (Part 5) : 2012 IEC 60851-5 : 2008.

저 자 소 개



박 재 준 (Park Jae-Jun)

1985년 광운대학교 전기공학과 학사
1987년 광운대학교 전기공학과 석사
1993년 광운대학교 전기공학과 박사
1997년~현재 중부대학교 전기전자공학과
교수

E-mail: jjpark@joongbu.ac.kr