

열적 열화 온도 변화에 따른 PAI 에나멜 각형코일의 절연 파괴 주파수 특성

박재준^a

중부대학교 전기전자공학과

Insulation Breakdown Frequency Properties of PAI Enamelled Rectangular Coils According to Thermal Deterioration Temperature Variation

Jae-Jun Park^a

Department of Electrical Electronic Engineering, Joongbu University, Goyang 10279, Korea

(Received October 12, 2016; Revised November 17, 2016; Accepted November 19, 2016)

Abstract: Coil specimens were prepared by continuous coating on a copper wire with flexible PAI (polyamideimide) and PAI/nanosilica (5 wt%) varnish and thermally aged at 150, 200 and 250°C for 5, 10 and 15 days, respectively. AC insulation breakdown voltage was investigated under inverter surge condition at 60 Hz and 1,000 Hz and insulation breakdown voltage decreased with increasing aging temperature and aging time at each 60 and 1,000 Hz.

Keywords: Thermal deterioration, PAI enamelled rectangular coils, AC insulation breakdown, Frequency variation

1. 서 론

에나멜 와이어는 도전성 구리 또는 알루미늄코어(aluminum core)에 폴리에스터(polyester), 폴리에스테리미드(polyesterimide) 그리고 폴리아미드이미드(polyamideimide) 그리고 폴리이미드(polyimide)와 같은 얇은 절연층에 의해 둘러 싸여진다. 그것은 전기 모터와 같은 코일에 응용되고 있다. 전기 모터의 수명은 절연층의 전기적 그리고 열적특성에 의존하고 있다. 특히, 고속 스위칭 인버터 되먹임이 전기자동차 또는 고압전기 모터와 같은 환경에서 설치되어 사용함으로써, 절연층이 구동중인 전기기내의 상시온도가 70°C 온도에 노출되거나 인버터 서지 전압원으로 부터 부분방전

결과로 손상되게 된다 [1]. 또한 모터로 인버터 공급전압이 모터로부터 반사전압과 매우 짧은 시간동안에 중첩된다. 서지전압이라 불리는 이런 동시적인 중첩전압이 부분방전 개시전압보다 더욱 크고 코로나가 매우 가까운 근처 에나멜 와이어에서 발생하여, 그 결과 절연층이 열화하기 시작하게 된다 [2]. 이런 이유로, 서지에 강한 에나멜와이어는 여러 종류 인버터 되먹임 모터가 전기자동차와 같은 곳에 설치되어 수명이 연장되기를 원하는 것이다. 부분방전으로부터 에나멜와이어의 열화를 줄이기 위하여, 무기물 필러-고분자 콤포지트를 형성하여 절연층 안으로 끼어들게 된다. 여러 가지 무기물 필러 즉, 실리카(SiO₂), 알루미늄(Al₂O₃), 티탄에이트(TiO₂), 지르코니아(ZrO₂) 등이 테스트되어졌다 [3-4]. 콤포지트의 서지저항 특성은 충전된 무기물 입자 크기가 감소되고, 충전함량이 증가할수록 향상된다. 이유는 부분방전에 의해 유기된 코로나가 무기필러의 표면에 반사되거나 또는 트랩 될 수 있다 [5,6]. 예로서, 실리카 나노필러 1 wt%을 폴리에스테리미드에

a. Corresponding author; jjpark@joongbu.ac.kr

첨가함으로 에나멜와이어의 수명은 인버터서지 하에서 순수한 수지에 비하여 수십 배 향상된다. 또한 인버터서지와 열적환경을 복합적으로 가속열화가 진행된 경우, 그보다 더욱더 수명이 짧아지고 그 중에서도 열적인 열화가 절연수명과 절연 파괴 전압의 감소에 크게 기여하고 있음을 보고하고 있다 [5,7].

본 연구에서는 개발된 PAI 에나멜 각형코일이 고전압모터 및 자동차의 구동에 필요한 모터가 인버터서지 등에 영향을 받게 되며, 사용 환경이 열적환경에 노출되어있다 그런 이유로 열적 열화가 절연수명에 매우 큰 인자로서 작용하고 있음을 더욱더 상세히 알기 위하여 열적 열화 환경온도 150, 200, 250°C 조건과 적용시간 5일, 10일, 15일 각각 건조오븐에서 열적으로 가속열화를 실시하였으며, 열적 열화된 코일의 절연 파괴 전압을 측정하기 위하여 전원주파수 60 Hz와 1 kHz 변화를 주어 주파수 변화에 따른 절연 파괴 전압 특성을 연구하였다.

2. 실험 방법

PAI (polyamideimide) 코일의 에나멜 절연층 두께가 30~50 μm 이고, 각형구리코일의 두께와 폭은 각각 0.77~0.83 mm 그리고 1.17~1.23 mm를 Sam Dong Co. Ltd.에서 제조하였다. 첫 번째 층은 고유연성 PAI 원형 바니시를 코팅 하였고 그리고 두 번째 층의 바니시는 코로나 방지용, 나노실리카 충전함량 15 wt%를 완전 분산시킨 바니시로 코팅하여 온도 조건 220°C의 경화조건으로 새로운 코일을 개발하였다.

본 연구에서는 개발된 코일의 열적 열화에 의한 전원주파수 가변에 따른 절연 파괴 전압을 측정하였다. 교류 전압 상승속도는 0.5 kV/s로서 상온상태의 절연유에서 구대구 전극 하에서 측정하였다. 피 측정 샘플은 5회 솔레노이드 형으로 감은 코일로서, 감긴 코일의 곡률은 5 mm ϕ 의 형상을 갖는 샘플로서, 한쪽 단자의 코일 끝부분은 절연층을 제거하였고 그 단자는 (+) 전원부에 연결되었다 그리고 다른 한쪽 단자는 접지로 연결된 상태이다.

고전압 발생장치는 교류 1~50 kV/50~1 kHz까지 가변할 수 있으며, 전류는 20 mA를 갖는 변압기로서, Sky Innotek Co. Ltd.에서 제조한 제품을 이용하였다. 코일의 열적 열화 조건은 3단계 온도 조건으로 150, 200, 250°C에서 5일, 10일, 15일 3단계 열화기간을 정하여 코일의 열적 열화를 실시한 샘플을 사용하였다. 열적 열화가 코일의 절연 파괴전압에 미치는 영

Table 1. Thermal deterioration and AC insulation breakdown condition.

Thermal deterioration condition	Measuring condition
150°C × 5 day	60 Hz, 1 kHz high voltage source
150°C × 10 day	
150°C × 15 day	
200°C × 5 day	
200°C × 10 day	
200°C × 15 day	
250°C × 5 day	
250°C × 10 day	
250°C × 15 day	

Table 2. Coil properties.

Coil properties	The terms desired	Properties
Breakdown voltage	1,000 V or more	6,300 V
Elongation ratio	30% or more	36.6
Adhesion test	1.2 mm less than	Good
Heat shock sensitivity	240°C/0.5 HR/6 FD	Good
Flexibility	5° less than	3.5
Conductor resistance	20.93 k Ω /km less than	17.97
PDIV	35°C	505
Tangent delta	-	214.1

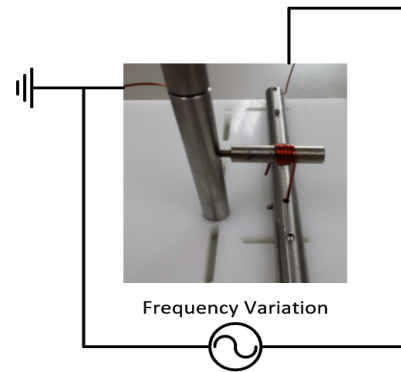


Fig. 1. Measuring electrodes.

향을 연구하기 위하여 일반적으로 모터가 구동중일 때 환경온도 70°C를 기준으로 했을 때, 150°C(5일, 10일, 15일), 200°C(5일, 10일, 15일) 그리고 250°C(5일, 10일, 15일)에 PAI코일을 가속화된 열적 열화를 실시하였다. 측정결과에 대한 해석을 위하여 Weibull plot을 이용하여 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

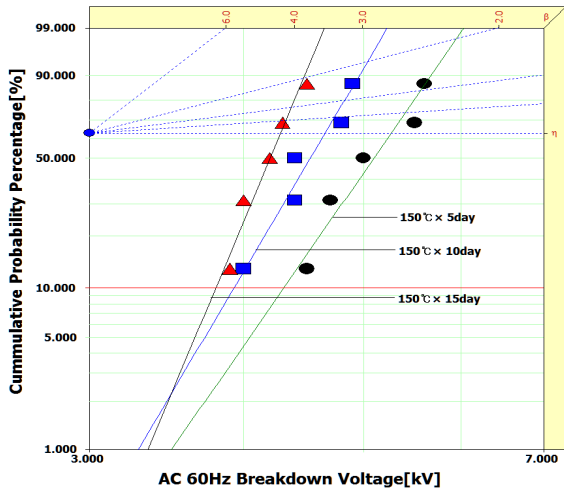


Fig. 2. AC (60 Hz) insulation breakdown voltage of thermal deterioration : 150°C (5, 10, 15 day) coils.

Table 3. Weibull plot parameter for Fig. 2.

60 Hz	Shape parameter	Scale parameter (kV)	B10 (kV)
150°C × 5 day	11.24	5.26	4.18
150°C × 10 day	13.21	4.65	3.93
150°C × 15 day	18.61	4.28	3.80

그림 2와 표 3에서 첫 번째 층은 고유연성 PAI 원형 바니시를 코팅하였고 그리고 두 번째 층의 바니시는 코로나 방지용, 나노실리카 충전함량 15 wt%를 완전 분산시킨 바니시로 코팅된 각형코일 온도 조건 220°C의 경화조건으로 새로운 코일을 개발하였다. 코일의 열적 열화 조건으로 150, 200, 250°C 온도 조건에서 5, 10, 15일의 열화시간 동안 열적 열화된 9종류의 샘플에 대한, 전원주파수 변화 60 Hz, 1 kHz 교류절연 파괴 결과를 Weibull Plot으로 나타내었다.

열화 온도 조건하에서 열화시간의 변화에 따른 파괴전압의 Weibull plot의 두 가지 특성파라미터가 결정된다. Weibull plot의 누적확률은 식 (1)에서 주어진다 [8].

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

t: 시간, α 는 63.2 파괴전압으로 스케일 파라미터로

표현한다. 그리고 β 는 형상파라미터 또는 분산 파라미터로서 기울기를 의미한 것으로 기울기가 크면 절연 파괴전압 결과의 균질성이 매우 높고, 기울기가 낮으면 균질성이 적은 것으로 표현한다. B10 수명의 경우, 누적확률분포에서 10%가 주어진 측정조건하에서 Fail이 일어날 수 있는 전기적 failure을 언급하는 것이다 [9].

3.1 전원 주파수 60 Hz 하에서 절연 파괴 전압

그림 2에서는 150°C 온도 조건하에서 열화시간이 5, 10, 15일로 열화시간에 따라 절연 파괴전압의 결과는 감소하였다. 또한 B10 값의 변화도 역시 열화시간에 따라 감소하는 결과이다. 표 3에서는 교류 절연 파괴에서 150°C × 5일의 경우 62.3%의 결과 5.26 kV를 얻었으며, 10일 지난 결과 6.1 kV 감소된 4.65 kV를 그리고 15일이 지난 결과 5일에 비하여 0.98 kV가 감소된 결과를 얻었다. 열적 열화에 의하여 절연 성능 약화된 상태로서, 고분자가 갖는 열적 팽창계수와 구리가 갖는 열적팽창계수가 서로 다르기 때문에, 급격한 온도 차에 의하여 금속과 고분자간의 계면이 매우 취약하게 되어 절연 파괴에 영향을 주는 것으로 사료되며, 실질적으로 150°C 온도는 PAI수지와 PAI-나노실리카 콤포지트의 유리전이 온도가 그 이하의 온도로서, 표 2에서 나타난 바처럼 상온상태에서 교류 60 Hz 절연 파괴 전압은 6.3 kV로서 150°C × 5 day의 열화동안 1.04 kV 절연 파괴 전압이 열적 열화로 인하여 감소하는 결과이다.

그림 3, 표 4에서는 그림 2의 경우처럼 열적열화 온도조건이 더욱더 가혹한 온도 200°C에서의 결과를 나타낸 것이다. 50°C 상승된 온도조건의 절연 파괴 결과는 5일의 경우 150°C에 비하여 0.38 kV 낮은 결과를 나타내었고 그리고 10일의 경우 오히려 0.08 kV가 높은 결과이며, 15일의 경우 역시 0.6 kV 높은 절연 파괴의 결과를 얻게 되었다. 오히려 약간의 향상을 나타낸 이유는 코일의 절연코팅과정에서 절연층 두께의 오차는 존재하게 된다. 그런 이유로 약간의 향상된 의미는 전체 연구결과에서 큰 의미를 부여하기 힘들다.

그림 4와 표 5에서는 250°C 온도 조건에서 5일, 10일, 15일 동안의 열적 열화된 코일의 절연 파괴 전압의 Weibull plot 결과로서, 상온상태의 비교결과 5일의 경우, 1.6 kV 감소되었고, 10일의 경우 2.52 kV 그리고 15일의 경우 4.22 kV 감소한 결과로서, 감소 이유는 3.02배로 매우 크게 절연내력이 약화된 결과를 얻게 되었다.

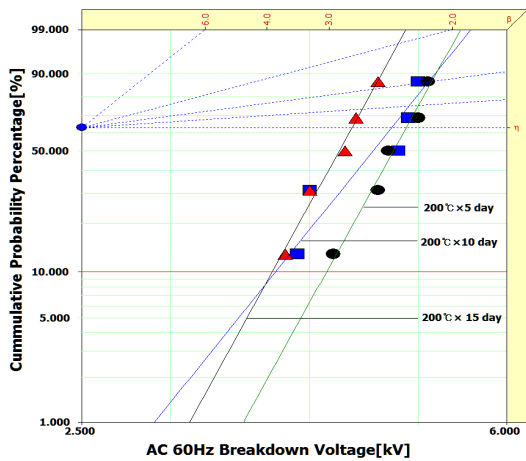


Fig. 3. AC (60 Hz) insulation breakdown voltage of thermal deterioration : 200°C (5, 10, 15 day) coils.

Table 4. Weibull plot parameter for Fig. 3.

60 Hz	Shape parameter	Scale parameter (kV)	B10 (kV)
200°C × 5 day	13.68	4.88	4.13
200°C × 10 day	9.40	4.73	3.72
200°C × 15 day	13.72	4.88	3.70

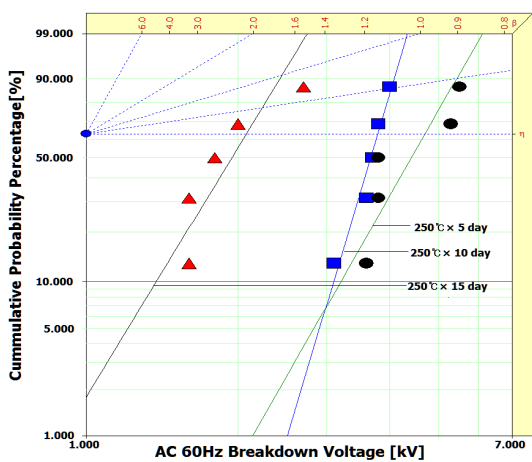


Fig. 4. AC (60 Hz) insulation breakdown voltage of thermal deterioration : 250°C (5, 10, 15 day) coils.

Table 5. Weibull plot parameter for Fig. 4.

60 Hz	Shape parameter	Scale parameter (kV)	B10 (kV)
250°C × 5 day	5.84	4.70	3.20
250°C × 10 day	11.15	3.79	3.10
250°C × 15 day	5.47	2.08	1.37

이는 앞서 상온에서 인버터서지만을 인가하여 절연 파괴수명을 측정한 결과와 20, 70, 100, 150, 200 그리고 250°C 온도 하에서 연구한 결과 순수한 인버터서지의 경우 미약한 절연 파괴 감소의 결과를 얻었지만, 가속 열화된 온도스트레스 하에서 인버터서지가 인가된 복합열화된 상태에서 절연수명이 상대적으로 짧은 결과를 나타낸 것에 근거하여 볼 때, 인버터서지만의 영향보다 오히려 열적 열화 인자가 절연의 신뢰성 및 절연특성 저하의 원인으로 작성되어 절연 파괴 전압을 크게 헤치고 있음을 알 수 있었다 [5].

3.2 전원 주파수 1 kHz 하에서 절연 파괴 전압

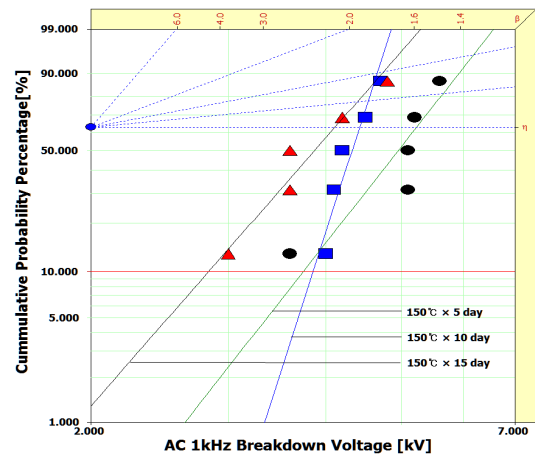


Fig. 5. AC (1 kHz) insulation breakdown voltage of thermal deterioration : 150°C (5, 10, 15 day) coils.

Table 6. Weibull plot parameter for Fig. 5.

1 kHz	Shape parameter	Scale parameter (kV)	B10 (kV)
150°C × 5 day	6.72	5.23	3.75
150°C × 10 day	16.36	4.42	3.85
150°C × 15 day	6.03	4.11	2.83

그림 5, 표 6에서는 150°C 온도 조건하에서 5일, 10일, 15일의 기간 동안 열적 열화된 코일의 1 kHz 전원주파수를 인가한 절연 파괴 전압의 Weibull plot을 나타내고 있다. 전원주파수 60 Hz에서 절연 파괴 실험 결과와 유사하게 열화시간이 길어질수록 파괴전압이 감소한 결과를 나타내고 있다. 60 Hz의 경우, 5일 동안 열적 열화된 코일의 절연 파괴 전압과 비교하여볼 때, 0.03 kV 파괴전압이 감소하였고 그리고 10일의 경우

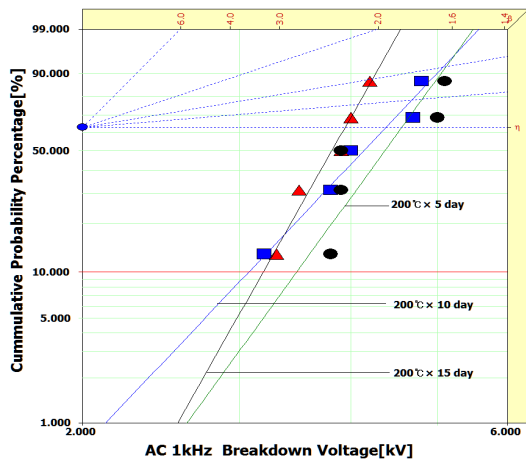


Fig. 6. AC (1 kHz) insulation breakdown voltage of thermal deterioration : 200°C (5, 10, 15 day) coils.

Table 7. Weibull plot parameter for Fig. 6.

1 kHz	Shape parameter	Scale parameter (kV)	B10 (kV)
200°C × 5 day	8.29	4.56	3.47
200°C × 10 day	6.35	4.38	3.07
200°C × 15 day	10.63	3.94	3.19

0.23 kV 그리고 15일의 경우 0.17 kV 감소하는 결과를 얻었다. 미약한 파괴전압이지만 고주파 전원이 인가될 때 주파수 가속에 의한 열화로 절연 파괴 전압이 감소하고 있음을 알 수 있었다.

그림 6, 표 7에서는 200°C 온도 조건에서 5일, 10일, 15일 열적 열화된 코일을 1 kHz 전원주파수를 인가한 절연 파괴 실험결과를 나타내고 있다. 60 Hz의 경우와 비교하여 볼 때, 5일 열화된 코일의 경우 0.32 kV 감소되었고 그리고 10일의 경우 0.35 kV 그리고 15일의 경우 0.94 kV 감소한 결과를 얻었다. 열화 온도가 높아질수록 (150°C → 200°C 경우) 5일 열화시 0.03 kV → 0.32 kV, 10일 열화시 0.23 kV → 0.35 kV 그리고 15일 열화시 0.17 kV → 0.94 kV 감소하는 정도가 점차로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 열적 열화도 절연 파괴감소를 나타내지만 전원주파수의 증가도 절연 파괴를 가속하는 인자로서 작용하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 주파수 가속보다는 열적 열화가 절연의 열화를 더욱더 가속시키는 더 큰 인자로서 작용하고 있음을 알 수 있었다.

그림 7, 표 8에서는 250°C 온도 조건에서 5일, 10

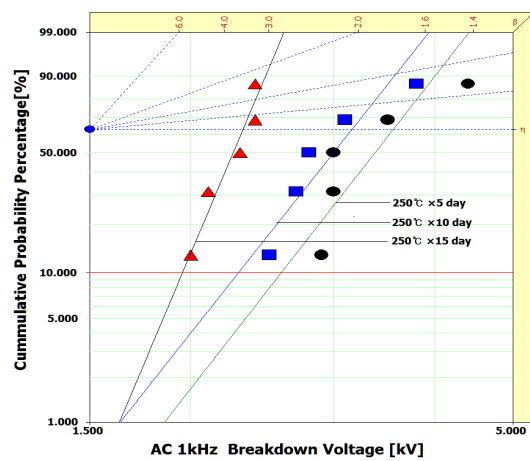


Fig. 7. AC (1 kHz) insulation breakdown voltage of thermal deterioration : 250°C (5, 10, 15 day) coils.

Table 8. Weibull plot parameter for Fig. 7.

1 kHz	Shape parameter	Scale parameter (kV)	B10 (kV)
250°C × 5 day	7.07	3.55	2.58
250°C × 10 day	6.97	3.16	2.29
250°C × 15 day	13.08	1.71	0.95

일, 15일 열적 열화된 코일을 1 kHz 전원주파수를 인가한 절연 파괴 실험결과를 나타내고 있다. 60 Hz의 경우와 비교하여 볼 때, 5일 열화된 코일의 경우 1.15 kV 감소되었고 그리고 10일의 경우 0.63 kV 그리고 15일의 경우 0.37 kV 감소한 결과를 얻었다.

이로써, 본 연구에서는 온도가 150°C, 200°C, 250°C 순서로 그리고 5일, 10일, 15일 가열시간에 따라 절연 파괴 전압이 감소하는 결과를 나타내었고 또한 주파수 60 Hz에 비하여 1 kHz에서 절연 파괴 전압이 더욱 낮아지는 결과는 열화환경 온도가 가혹한 상태에 가열 시간이 오래될수록 열적 열화가 가속됨을 의미한 것이다. 이는 열적 열화가 가혹한 조건에 이룰수록 도전성 금속도체인 구리와 PAI 원형수지 그리고 PAI에 나노입자 15 wt%를 충전시킨 나노바니시를 이중으로 코팅한 코일의 경우 이중층의 박막이 구리금속과 열적팽창계수의 큰 차이와 지나친 열적 열화로 접착력이 크게 감소되어 계면 결함의 결과로 파괴전압이 낮아지게 된다. 저자의 이전 연구결과에서 확인할 수 있었다 [1]. Yongbeom Kim [10] 연구에서 나노컴포지트 에나멜 와이어의 제조가 3 wt% AN_S (3-Anilinopropyl

trimethoxysilane)을 갖는 폴리에스터 바니시가 구리선에 코팅하여 제조된 코일의 절연 파괴 전압을 측정하였다. 콤포지트 와이어 절연층이 상업적 코일의 절연층보다 더욱더 두께가 얇았다. 이유는 점도와 바니시의 고체 함량 때문에 줄어들기 때문이라 보고하고 있다. Su. Haq [11] 등 연구자들의 연구결과에서도 실리카 충전함량이 증가할수록 절연 파괴강도가 증가함을 보고하고 있다. 나노콤포지트 와이어의 표면이 더욱더 평평하다. 이유는 나노입자 주위 고분자체인의 운동이 제한을 받기 때문으로 생각한다. 코팅 층의 열적저항으로 150°C에서 가열 후 상온상태에서 서냉한 결과 변화는 없었지만, 상업용 에나멜코일의 경우 160°C에서 가열 후 서냉한 코일의 코팅층이 벗겨지는 경우가 발생하였지만, 그러나 나노콤포지트 와이어는 여전히 정상상태로 존재하고 있음을 보고하고 있다. 원인은 구리표면의 코팅 층의 접착력이 약해지고 그리고 코팅층의 열적저항이 충분히 강하지 못하기 때문에 벗겨지는 원인으로 사료된다. 나노콤포지트 에나멜 와이어는 상업용 폴리에스터보다 열적 저항이 크지만 170°C에서 열적에서 가열 후 서냉한 경우는 두 가지 모두 코팅층이 벗겨지는 결과를 가져 왔지만, DSC 측정결과와 상호 일치된 결과로 보고하고 있다 [11].

4. 결론

본 연구에서는 유연성 있는 PAI 수지로 구리도체에 코팅한 후 PAI 15 wt% 나노실리카를 분산시킨 바니시를 이중 코팅한 코일의 열적 열화의 절연 파괴 신뢰성 특성을 연구하기 위하여 열화 온도 150, 200, 250°C 열화 시간 5일, 10일, 15일 동안 지속적으로 인가하여 열적 열화된 코일의 절연 파괴특성을 위하여 60 Hz, 1 kHz의 전원주파수를 가변하여 연구를 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 열적 열화 온도 조건 150, 200, 250°C에 적용시간 5일, 10일, 15일 온도 증가와 가열 시간의 증가에 따라 60 Hz, 1 kHz 주파

수에서 절연 파괴 전압은 모두 감소한 결과를 얻었다. 더욱이 주파수 증가에 따라 절연 파괴 감소 폭보다 열화 온도 증가에 따른 절연 파괴 감소폭이 상대적으로 큰 결과를 얻었다.

그 결과로 인하여 열적 열화가 가혹할수록 구리와 나노콤포지트의 열팽창계수의 차이가 크고 구리와 고분자간 접착력이 매우 약하여 계면에 큰 결함의 원인이 되어 절연 파괴 전압이 낮아지는 결론에 이르렀다.

REFERENCES

- [1] J. J. Park, *Trans. KIEE.*, **65**, 1840 (2016).
- [2] H. Kikuchi and H. Hanawa, *IEEE Trns. Dielectr. Electr. Insul.*, **19**, 99 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6148507>]
- [3] C. Fothergill, J. K. Nelson, and M. Fu, *Proc. 2004 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (Boulder, USA, 2004) p. 406.
- [4] T. Tanaka, G. C. Montanari, and R. Mülhaupt, *IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, **11**, 763 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2004.1349782>]
- [5] J. J. Park, *Trans. KIEE.*, **65**, 1840 (2016).
- [6] M. Kozako, R. I. Kido, N. Fuse, Y. Ohki, T. Okamoto, and T. Tanaka, *Proc. 2004 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (Boulder, USA, 2004) p. 398. [DOI: <https://doi.org/10.1109/ceidp.2004.1364271>]
- [7] B. Gornicka and E. Prociow, *Acta Phys. Pol., A*, **115**, 842 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.115.842>]
- [8] E. Ildstad and S. R. Chalise, *Proc. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (Virginia Beach, USA, 2009) p. 85.
- [9] J. Park, Y. B. Park, and J. Y. Lee, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **12**, 93 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2011.12.3.93>]
- [10] Y. Kim, S. Y. Park, S. Y. Kwon, S. J. Kim, J. Kim, and Y. S. Seo, *Thermochimica Acta*, **542**, 62 (2012).
- [11] S. U. Haq, S. H. Jayaram, and E. A. Cherney, *IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, **14**, 417 (2007).