

고전압 중전기용 에폭시 수지 3종에 대한 교류트리잉 파괴특성

Characteristics of AC Treeing for Three Epoxy Resins for High Voltage Heavy Electric Machine Appliances

박재준*
(Jae-Jun Park)

Abstract - In this paper, the reliability test of three kinds of epoxy resin for GIS Spacer, which is a high voltage based heavy electric machine, AC electrical treeing experiments were performed. Three types of epoxy resins, Araldite B41, CT 5531 CI and B46, have slight viscosity differences. An non-uniform electric field, $E = 1149.4$ kV/mm, as the needle to plate electrode, a power source with a frequency of 1 kHz was applied to the tree electrode for accelerated deterioration. The treeing phenomena of the three kinds of epoxy resin all initiated, propagated, and destroyed by the branch tree. Epoxy Resin B46 was 145 times longer than B41 and 53 times longer than CT 5531CI. I think that the choice of epoxy resin is very important in choosing high voltage heavy electric machine insulation materials.

Key Words : GIS Spacer, AC treeing, Reliability evaluation, Epoxy resin, Evaluation of insulation life

1. 서 론

고체상태의 에폭시수지의 전기 트리 성장은 장기간에 걸친 비가역 경로의 증거이다[1]. 따라서 고전압 시스템을 위한 고분자 절연재료에서의 전기적 트리에 대한 저항성의 연구가 폭 넓게 연구되고 있다[2]. 최근 트리관련 연구에 따르면, 직류와 교류 전계를 비교하면, 직류가 교류에 비하여 상대적으로 전기트리 개시전압이 높다[3]. 그러나 직류전계에서, 극성 반전 및 충격을 사용할 때 일부 물질은 공간 전하 주입/축적 및 후속 전기 트리에 취약한 것으로 드러났다[4-5]. 향후 전기적 트리 연구에서, 교류에 국한되지 않고 직류 또는 직류+교류가 중점된 연구가 최근에 진행되고 있다.

본 연구에서는 중전기 분야(GIS spacer, mold-type transformer, current transformer (CT), potential transformer (PT), gas switching gears 등)에서 필요한 절연재료로서 잘 알려진 에폭시 수지는 전기적, 기계적 특성이 매우 우수하다[6~7]. 지난 수 십년에 걸쳐 많은 연구자들이 전기적 응용에 있어서 경제적이며, 성능면에서 우수한 새로운 에폭시 기반 콤포지트를 개발하여 왔다. 특히 나노입자 (나노실리카, 나노충상실리카이트, 나노알루미나 등)를 잘 분산시켜 최소의 양으로 최대의 절연성능을 향상시키는 연구개발이 진행되어져왔다[8] [9] [10] [11].

또한 에폭시수지에 나노입자자체의 분산만으로 중전기에 적용하는 것은 어려움이 있어, 기계적, 열적, 전기적 특성향상과 고전압기반 중전기 적용에 어려움을 극복하기 위하여, 나노와 마이크로입자를 충전 혼합된 형태인 멀티-콤포지트의 개발이 다방

면에서 진행되어 지고 있다[11][12].

이러한 중전기에 적용하는 에폭시수지의 종류도 다양하고, 적용범위에 따라 서로 다른 에폭시수지를 사용하고 있다. 또한 에폭시 수지가 상온에서 경우 액체, 고체상태 등 매우 다양하다. 그러나 신뢰성에 기반한 에폭시수지의 연구는 많지 않다. 전기적 트리는 수많은 연구자들이 오랫동안 다양한 연구를 진행하여 왔고 그리고 고분자절연의 열화과정을 이해하는 메커니즘에 중요한 참고자료로 이용하여 왔다.

본 연구에서는 3종류의 고체상태 에폭시 수지 즉, 특히 GIS용 에폭시수지가 유럽형, 아시아형, 특히 중국산 에폭시 등 국내에서는 수지의 면밀한 신뢰성 검증도 되지 않고 사용하기 때문에, 향후 이와 같은 산업에 도움을 주기 위하여 에폭시수지 종류에 따른 전기트리 신뢰성 연구를 하게 되었다.

연구의 주안점은 고전압 기반 중전기(AC, DC 전력케이블, 몰드타입 전력기기)[13] [14], 트리열화 메커니즘은 트리잠복기, 트리개시, 트리진전으로 3과정으로 나뉘어 질수가 있다. 트리의 개시가 이루어지지 않으면 그 절연체는 대단히 양질의 절연체로서 산업에 크게 기여할 수가 있다.

그런 이유로 GIS Spacer등에 사용하는, 범세계적으로 많이 사용하는 수지를 선정하여 신뢰성 역점 두어, 트리잠복기, 트리개시, 진전 그리고 파괴에 이르는 전 과정의 트리형상, 축방향 트리진전길이, 진전속도 그리고 트리절연수명 등에 관한 연구를 실시하였다.

2. 실 험

2.1 에폭시 수지의 특성

3 종류의 에폭시 수지는 양호한 전기적 그리고 기계적 특성을 갖는 주물생산(producing casting)용 고체상태의 열 경화수지로

* Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Joongbu University, Korea.

E-mail:jjpark@joongbu.ac.kr

Received : July 1, 2018; Accepted : September 18, 2018

서, 중,고전압 응용을 위한 옥내용 전기절연물로서 CT, PT, 스위치기어(switchgear), GIS Spacer요소와 높은 기계적, 열적 그리고 화학적 스트레스를 받은 설비용의 구조적 부분으로 사용하고 있다. 수지와 경화제의 선택은 설비용 과정과 응용계획에 따라 결정되어진다. 성형물의 수명과 발열온도(exothermic temperature) 상승은 적절한 수지, 경화제 그리고 사용된 필러조합의 선택에 의하여 제어될 수가 있다. 3 종류 에폭시에 관한 기본적인 물성은 표 1에서 제시하였다. 그리고 경화를 위한 조성비는 표 2에서 나타내었다.

표 1 3 종류 에폭시 수지의 물성

Table 1 Physical Properties of 3 Types of Epoxy Resins

Types of epoxy resin	B41	CT5531CI	B46
Properties			
Viscosity[m Pa s]	390-520	430	650-850
Epoxy Contents[equiv./kg]	2.55-2.70	2.6	2.30-2.45
Density[g/cm ³]	1.15-1.25	1.2	1.15-1.25
Aspect	Solid	Solid	Solid
Tensile Strength[MPa]	70-90	85-95	70-90
Flexural Strength[MPa]	120-140		120-140
Electric Strength[kV/mm]	21-23	22-24	23-25
DSC[°C]	105-120	105-115	105-120

표 2 에폭시 수지 시스템

Table 2 Araldite Casting Resin System

	Araldite B41	Araldite CT 5531 CI	Araldite B46
Resin	100g	100g	100g
Hardener	HT 903-1/40g	Aradur _HY5532CI/38g	HT 903-1/40g
Fillers	200-250g	330g	200-250g

현재 중전기용 절연물에 사용하고 있는 필러의 충전함량을 나타낸 것이다.

2.2 트리시스템 및 측정

사용된 트리 전극은 침대 평판 전극으로 오구라 쥬얼리(Ogura Jewelry Co., Japan)로부터 구입하였다. 그것의 직경과 길이는 각각 1 mm와 60 mm였고, 팁 각도는 30°이고 곡률 반경은 5 μm이었다. 샘플의 전극은 음극부분에 도전성 페이스트를 시험편의 바닥면에 코팅하여 판상 전극을 형성하였고, 시험편크기는 45×45×6 mm이며, 침과 대향전극면과의 절연거리는 3.8mm로서 구리판이 접지된 전극으로 구성하였다.

그림 1에서는 에폭시수지 시스템의 전기적 트리 구조를 측정하기 위하여 실험장치를 설치하였다. 전기적 트리구조는 Stereo Microscope (S645T, EZscope), Digital Camera (TOUPCAM, LCMOS05100KPA) 그리고 LCD Personal Computer로 구성된,

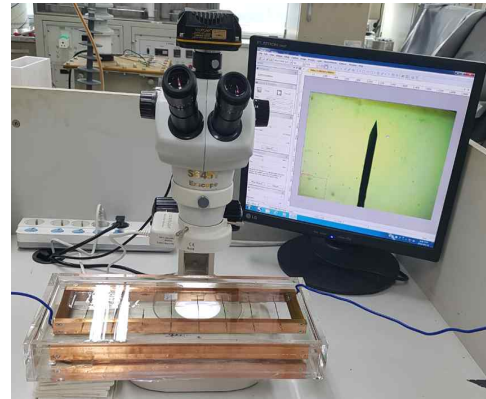


그림 1 트리 시스템

Fig. 1 Treeing System

On line monitoring system을 이용하여 조사되었다. 60배의 확대능력을 갖는 전기적 트리구조를 관찰하기 위하여 on line monitoring system으로부터 관찰하였다. 블록화된 측정시편이 실험과정에 손상을 예방하기 위하여 광유에 잠겨진 상태로 실험을 실시하였다. 측정시편은 디지털카메라의 렌즈아래에 직접적으로 위치되어졌고 그리고 고전압 인가전원은 5kVA(220/50kV, 50~1000Hz) 고전압 발생장치로서, 전기트리계시로부터 파괴에 이르기까지 일정하게 10kV/1000Hz를 인가하였다. 측정시간은 2분마다 1회의 화면을 카메라로부터 모니터링 후 기록하여 개인용 컴퓨터에 자동 저장하게 된다.

2.3 AC 트리 측정을 위한 샘플

B41, CT 5531 CI 그리고 B46 각각의 원형수지에 경화제 조성비에 따라 혼합한 후 10분 동안 완전한 혼합을 위하여 120°C온도상태에서 300rpm으로 교반하였다. 사전에 고체상태인 에폭시 수지를 오븐에서 140°C로 10시간 용융상태가 되도록 하였고, 주어진 트리금형에 혼합된 수지를 주형하여 5분 정도 진공탈포 후 경화하였다. 경화조건은 140°C×16hr으로 하였으며, 경화완료 후 오븐에서 금형이 완전히 식을 수 있도록 서냉하여 샘플을 꺼내어 데시케이터에 보관 후 사용하였다. 샘플 하단면에 실버페이스트를 바르고 80°C×10hr 건조하였다. 샘플 구성은 그림 2에서 나타내었다.

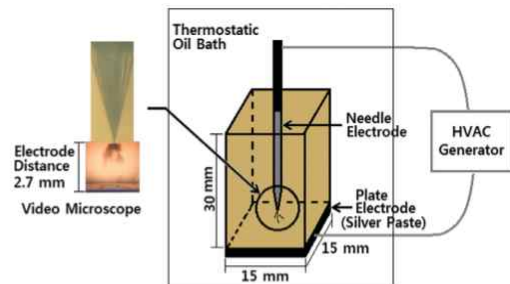


그림 2 트리 샘플 구성

Fig. 2 Tree sample configuration

3. 결과 및 검토고찰

3.1 에폭시 수지 B41의 전기적 트리

그림 3에서는 중전기기인 GIS Spacer에 주로 사용되는 원형에폭시수지로서 고체 상태인 수지와 경화제로 구성되어 있다.

본 에폭시 수지 특징은 저점도형 에폭시 수지로서 현재 국내에 주로 사용되는 수지이다. 표 1에서 나타낸 바처럼 점도(Viscosity), 국제규격 DIN 53019에 근거하여 제공된 B41의 값은 390~520[mPa s] (120°C 측정)이다. 그리고 전계강도 평가자료에서 측정결과 2mm 두께의 샘플을 이용하여 측정한 가이드 값은 21~23kV/mm이었다. 또한 B41 수지의 밀도(Density)는 국제규격 ISO 1675에 근거하여 측정한 가이드 값은 1.15~1.25(g/cm³)의 원형 수지를 이용하였다. 이와같은 수지에 대한 신뢰성의 입장에서 볼 때, 전기적 트리에 대해 연구된 결과는 전무하였고, 향후 산업에서 참고 되어지길 바라는 바이다. 본 연구에서는 인가전압

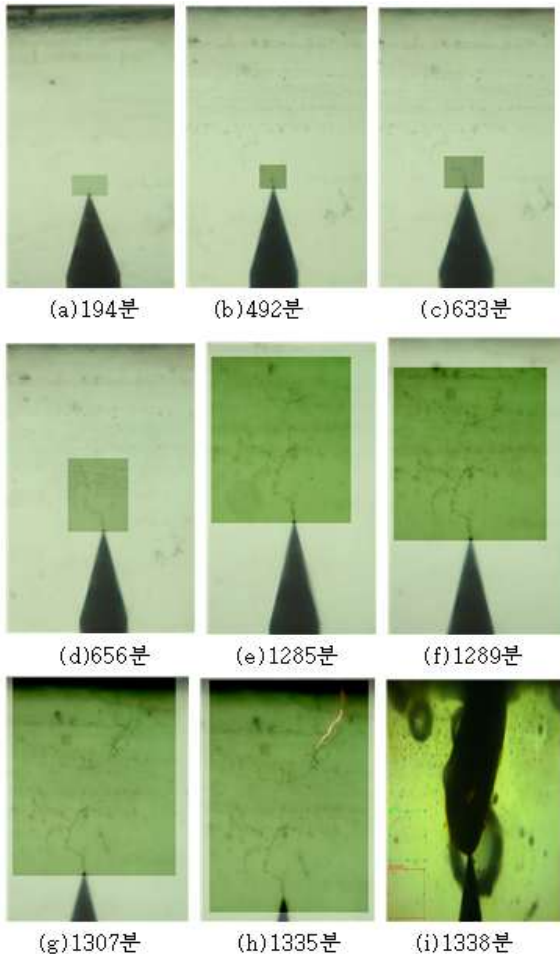


그림 3 에폭시 B41 절연시스템의 트리개시 및 트리진전 그리고 파괴과정 트리형상

Fig. 3 Tree initiation, tree propagation and tree breakdown process shape of the epoxy B41 insulation system

을 상용주파 60Hz에서 실험하지 않고 전원 전압의 크기는 10kV 이면서, 주파수를 1000Hz을 증가하는 조건의 주파수 가속열화를 실시하였다.

전기적 트리 침은 침선단의 내각이 30°로서 5μm 곡률반경을 갖는 오구라 침을 사용하였고, 전압인가 후 파괴에 이를 때까지 일정하게 인가하였다. 그 결과 다음과 같은 결과를 얻었다. B41 에폭시수지의 초기트리는 194분 후에 발생하였고, 초기트리길이는 0.12mm이다. 즉, 고주파고전압을 인가 후 194분까지의 잠복기를 가졌고, 이후 트리침 선단으로부터 초기트리가 발생하였다. 656분 후까지 0.25mm의 트리진전길이를 나타내었고, 이후 1289분 까지 트리진전길이는 1.19mm로서, 640분 동안 0.94mm의 트리가 진전하였다. 파괴까지의 시간은 매우 짧은 59분이 소요되었다. 트리 절연거리는 3.8mm로서 트리 침 주위의 불평등 전계강도는 Mason식[15][16]

$$E = \frac{2V}{r \ln(1 + \frac{4d}{r})} [kV/mm]. \quad (1)$$

r는 침선단 곡률반경 5μm, d는 침대 평판 간 절연거리 3.8mm 그리고 인가전압 10kV일 때, 추정되는 전계강도 E=1149.4 kV/mm(측정온도 상온 25°C) 고전계를 적용하였다. 주파수 가속열화에 따른 트리진전속도는 다음과 같다.

$$\text{평균트리진전속도} = \frac{\text{갭길이}}{\text{파괴시간} - \text{트리개시시간}} \quad (2)$$

B41에폭시수지의 교류트리 진전속도는 식 (2)에 근거하여 3.2 μm/min의 트리 진전율을 나타내었다.

그림 4에서는 그림 3에서 나타낸 것과 같이, E=1149.4 kV/mm, 1000Hz의 주파수 가속된 전원전압을 인가하여 축방향

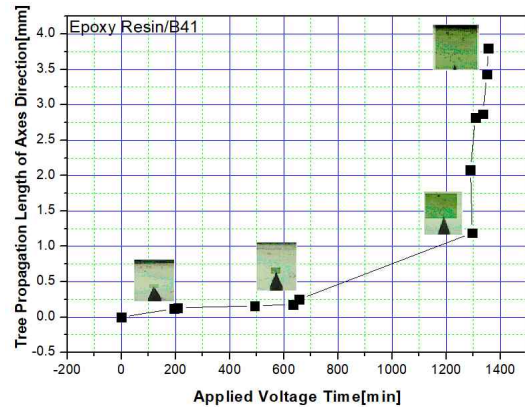


그림 4 에폭시 B41 절연시스템의 10kV/1000Hz전압 인가 후 트리개시 및 트리진전 그리고 파괴과정의 축방향 트리진전 길이

Fig. 4 Axial tree propagation length of tree initiation and tree propagation and breakdown process after 10kV/1000Hz voltage application of epoxy B41 insulation system.

트리진전길이를 나타내었다. 60Hz에 비하여 1000Hz의 경우 16.6배의 주파수가 가속됨을 의미한 것이다. 즉, 트리 침선단으로부터 주입된 전자의 주입과 추출과정이 60Hz에 비하여 초당 16.6배의 반복된 경우이다. 잠복기를 걸쳐 초기트리의 개시는 지속적으로 고전계에서 주어진 전자의 운동에너지가 초기트리의 전로를 통하여 트리 선단에 충돌을 하게 된다. 충돌된 에너지가 에폭시의 망상구조로 된 네트워크를 절단할 수도 있고 그로인한 분해가스의 발생을 가져올 수도 있다. 특히, 초기트리의 발생이 늦어지면, 즉, 잠복기가 길면 길수록 절연재료 가치는 우수하다 할 것이다. 잠복기는 불평등 전계 하에서 인가전계에서 주어진 에너지보다 텅스텐 전극과 수지의 계면결합력의 정도, 수지와 경화제간 가교밀도, 무결점의 제조 그리고 에폭시수지 함량 등에 영향을 주게 된다. 이와 같은 요소를 고려한 원형수지의 선택은 중전기기의 신뢰도를 높이는 역할을 하게 된다.

그 결과 트리의 선단가지는 축방향으로 진전할 수도 있고 또

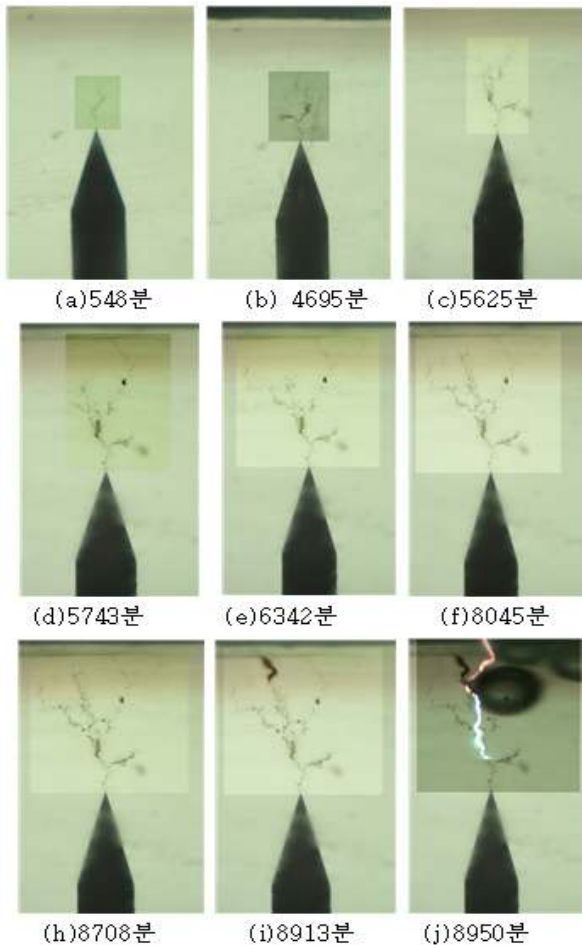


그림 5 에폭시 CT 5531 CI 절연시스템의 트리개시 및 트리진전 그리고 파괴과정 트리형상

Fig. 5 Tree initiation, tree propagation and tree breakdown process shape of the epoxy CT 5531 CI insulation system

는 축방향(옆방향)으로 진전할 수도 있다. 가지의 축방향은 트리 가지가 뻗어가는데 가교밀도가 약한 부분 또는 미경화된 부분 등 약점으로 뻗어가게 된다. 트리진전이 어느 정도 진행되면, 트리선단 가지와 대향전극간 거리가 점차로 작아지게 된다. 그 결과 전계의 세기는 극간 거리가 좁아짐으로 인하여 점차로 전계세기가 세어지게 된다. 이와 같은 망상구조된 트리가지가 쉽게 절단되고 그리고 분해되어 급속도로 트리선단까지의 진전이 빠르게 진행되어 대향전극에 도달하게 된다. 트리 침선단 선단으로부터, 대향전극에 이르는 전자가 이동할 수 있는 길로서, 미세한 채널 즉, 수 μm 의 직경을 갖는 탄화된 채널이 형성되어 지속적으로 트리가지 선단을 공격하게 된다. 최후로 채널이 대향전극에 이를 때 절연이 파괴되는 결과를 가져온 것이다[17].

3.2 에폭시 수지 CT 5531 CI의 전기적 트리

그림 5에서는 CT 5531 CI 에폭시수지 시스템의 교류전기 트리의 개시, 진전 그리고 파괴에 이르는 과정을 자동 트리 계속시스템을 이용하여 2분마다 진전상태를 디지털카메라의 촬영결과 컴퓨터에 저장하여 분석한 결과이다. 초기트리는 사진에서는 나타나지 못했지만 320분 즈음에 발생하였다. 그림 5(a)의 경우는 가지적으로 트리가지가 진전된 경우를 나타내었다. 전반적인 영상을 살펴볼 때, 초기에는 트리가지가 뻗어가는 면적이 작고 시간이 갈수록 트리진전이 가속화되어 축방향으로 다수의 가지가 뻗어가는 경향을 나타내었다. 그러나 축방향으로 가지가 뻗어갈 때면 축방향으로 트리 진전은 둔화되는 상태이다. 즉, 그림 6에서 볼 수 있듯이 1670분의 트리길이는 1.38mm이지만 4818분까지 1.44mm의 진전을 가져온 것이다. 즉, $1.905 \times 10^{-5} \text{mm/min}$ 의 진전율을 나타내었다. 또한 5580분에서 2.64mm의 트리가 진전하였다. 8717분에서 3.504mm의 트리진전결과를 나타내었다. 트리 진

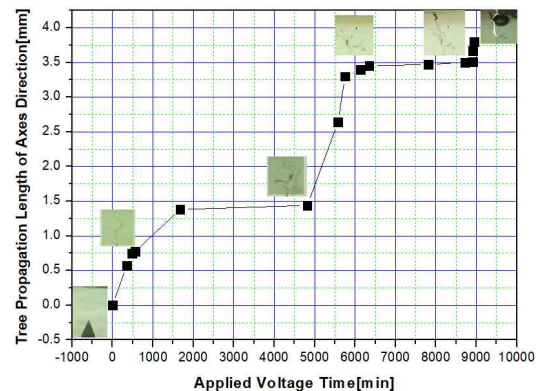


그림 6 에폭시 B46 절연시스템의 10kV/1000Hz전압 인가 후 트리개시 및 트리진전 그리고 파괴과정의 축방향 트리진전 길이

Fig. 6 Axial tree propagation length of tree initiation and tree propagation and breakdown process after 10kV / 1000Hz voltage application of epoxy B46 insulation system.

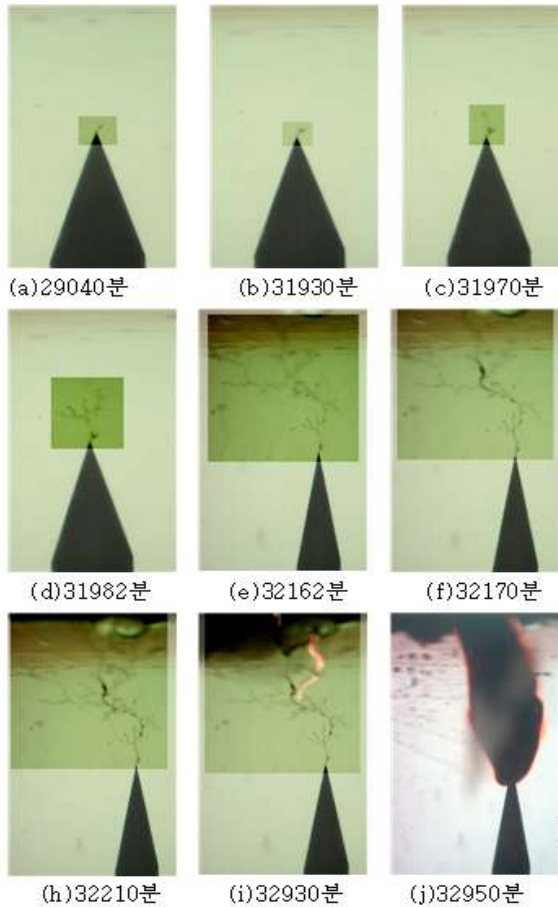


그림 7 에폭시 B46 절연시스템의 트리개시 및 트리진전 그리고 파괴과정 트리형상

Fig. 7 Tree initiation, tree propagation and tree breakdown process shape of the epoxy B46 insulation system

전율은 $2\mu\text{m}/\text{min}$ 이었다. 이처럼 축방향으로 트리가 진전할 때, 축방향으로 트리의 전전은 매우 둔화된 결과이다.

그림 6에서는 에폭시 CT 5531 CI 시스템에서 교류 전압 10kV/1000Hz를 인가한 경우 트리개시 및 진전 그리고 파괴에 이르는 트리진전길이를 나타내었다. 두 단계의 축방향 트리의 가지가 진행된 결과로 축방향의 트리진전은 거의 진행되지 못하였고, 초기, 중기, 말기 모두 트리가 축방향으로 진전됨을 볼 수 있었다.

전체적인 트리진전율을 살펴볼 때, 초기트리는 320분에서 발생되었고 그리고 8942분에서 절연이 파괴 되었다. 실제로 트리가 진전하는데 걸린 시간은 8622분 동안 진전하였고, 그때 트리 침선단에서 대향전극까지 3.8mm를 진전하게 된 것이다. 이로서 식 (2)에 근거하여 볼 때, $4\mu\text{m}/\text{min}$ 의 트리가 진전하게된 것이다.

3.3 에폭시 수지 B46의 전기적 트리

그림 7에서는 에폭시 B46 절연시스템의 교류 전기적 트리 개

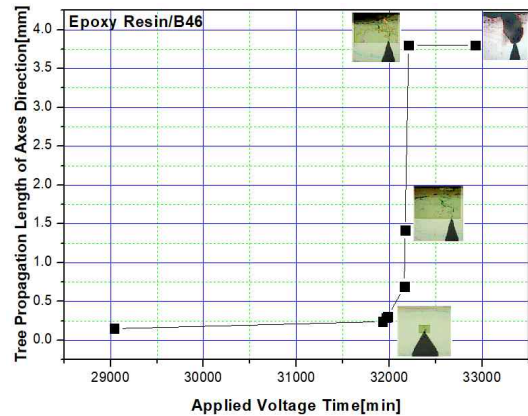


그림 8 에폭시 B46 절연시스템의 10kV/1000Hz전압 인가 후 트리개시 및 트리진전 그리고 파괴과정의 축방향 트리진전 길이

Fig. 8 Axial tree propagation length of tree initiation and tree propagation and breakdown process after 10kV/1000Hz voltage application of epoxy B46 insulation system

시, 진전 그리고 파괴에 관한 영상을 나타내었다. $E=1149.4\text{ kV}/\text{mm}$, 1000Hz의 주파수 가속에 따른 고전압이 트리개시로부터 파괴에 이르는 동안 계속하여 인가되었다. 가속한 조건의 전원전압 및 주파수 가속된 상황의 트리현상을 나타내었다. 그림 8의 경우는 에폭시 B46 에폭시 시스템의 트리개시, 진전 그리고 파괴의 전 과정을 축방향 트리진전 길이에 관한 결과이다. 특히 한 것은, 트리개시가 29,040분 후에 개시되었고, 파괴에 이르는 시간은 32,930분이었다. 초기트리의 경우 0.15mm 길이를 나타내었고, 트리개시로부터 파괴에 이르는 시간은 3,890분 동안 진전되어 파괴에 이르게 되었다.

평균 트리 진전율은 $9.76 \times 10^{-4}\text{ mm}/\text{min}$ 으로서 트리잠복기의 시간이 매우 긴 결과를 나타내었다(29,040분). 이후 파괴에 걸리는 시간이 상대적으로 짧은 시간 동안 빠르게 진행된 결과이다. 또한 괄목할 것은 트리개시 후 급속한 트리진전이 발생한 시간은 32162 분으로 트리개시로부터 31222분으로, 초기트리로부터 진전된 길이의 변화는 0.54mm에 불과하였다. 그리고 급속한 진전시작으로부터 파괴에 이르는 시간은 32170분으로부터 32930분에 파괴되는 시간인 760분 동안 1.42 mm(32170분)에서 3.8 mm(32930분)의 트리진전과 파괴를 나타낸 것이다. 즉, 760분 동안 2.38mm의 트리 진전율을 나타내었다. 이상의 결과로부터,

3.3.1 3종류 에폭시수지의 트리형상에 관한 것

세 종류 에폭시 원형수지의 전기적 트리 실험결과에서 볼 수 있듯이, Araldite B41, Araldite CT 5531 CI 그리고 Araldite B46 절연시스템에 교류 불평등 고전압전계 $E=1149.4\text{ kV}/\text{mm}$ 와 주파수 1000Hz를 갖는 고전압 발생장치를 이용하여 침 선단과 평판전극(대향전극)간 거리 3.8mm의 트리샘플을 제조하여 절연 파괴 시까지 걸리는 시간을 측정하였고 그리고 초기트리의 개시,

진전 그리고 파괴되는 트리형상을 관찰하였다. 그 결과 3종류의 에폭시수지의 트리형상은 가지형 트리의 개시와 진전 그리고 파괴에 이르게 되었다. 가지형 트리는 일반적으로 원형에폭시수지 등 재료에서 트리의 개시 및 진전을 나타내며, 트리는 트리개시로부터 트리형상이 일반적으로 결정되곤 한다. 가지형 트리가 개시되면 가지의 진전이 축방향으로 진전되어 파괴되는 시간이 오래 걸리지 않고 진전되는 속도도 매우 빠르게 진행된다. 그러나 수초형 트리의 경우는 축방향으로 진전하는 경우보다 축방향(옆)으로 진전하는 율이 매우 크고 오래 걸리어 오히려 파괴에 이르는 시간이 매우 길다. 더불어 구상트리(밤송이)트리는 수초형 트리보다 더욱더 트리의 절연파괴 수명이 더욱더 긴 것이 특징이다. 전기적 트리에서는 인가전압과 트리진전과는 비례하지 않은 것이 특징이며, 트리형상에 매우 의존적이다 [18][19][20].

그러나 본 연구에서 트리형상은 가지형 트리이지만 축 방향으로 가지가 많은 트리로서 초기에는 진전율이 크지만 진전도중 트리 진전율은 매우 낮고, 축방향으로 트리가 진전 후 다시 축방향으로 진전하게 된다. 반복적으로 축방향으로 트리가 진행된 후 트리의 파괴 말기에서 급속한 진전으로 파괴에 이르고 있다. 이는 대향전극에 가까이 갈수록 트리침으로 부터 도전로를 타고 전자가 이동하는 길(탄화된 도전로)는 전자의 원활한 통로가 되어 실제적으로 트리가지의 선단 전계강도가 점차로 커지기 때문에 말기에는 파괴되는 시간이 짧아지는 원인이 된다[17].

그리고 나노입자가 에폭시 매트릭스 내에서 잘 분산되면, 트리형상이 가지형 트리이지만 잔가지가 매우 많은 즉, 축 방향으로 트리의 진전이 주로 이루어져서, 상대적으로 축방향의 진전이 둔화되는 경향을 나타내곤 한다. 이유는 나노입자들이 트리진행을 가로막은 역할로서 계면이 부실한 약점부위로 트리가 진행하게 되어 상대적으로 작은 가지들이 많은 형상의트리로 진행하곤 한다.

3.3.2 3종류 트리 진전길이에 관한 것

트리진전길이는 축방향으로 진전하는 길이를 나타낸 경우이다. 그림 4, 6, 8의 경우는 B41, CT 5531 CI 그리고 B46 에폭시 수지의 인가전압 시간에 따른 트리진전길이의 측정결과이다. B41에폭시 수지는 트리개시로부터 파괴말기에 이르기까지 꾸준히 축방향의 트리의 진전이 진행되었다. 트리개시는 인가전압 불평등 전계, $E=1149.4$ kV/mm, 1000Hz 후 194분 즈음에 개시되었다. 개시된 초기트리는 0.12mm이었고 656분에서는 0.25mm의 트리가 진전하였다. 트리 진전율은 2.81×10^{-4} mm/min이었고 그 후, 1296분까지 트리길이는 1.19mm로서 640분 동안 0.94mm진행하여, 14.68×10^{-4} mm/min 트리 진전율을 나타내었다. 트리파괴 말기에서는 2.61mm 트리길이가 진전될 때 걸리는 시간은 59분 동안 진전된 경우이다. 트리 진전율은 4.4×10^{-2} mm/min으로 매우 빠른 진전율을 내었다.

CT 5531 CI 에폭시수지는 두 단계의 축방향 트리진전을 나타내었다. 첫 번째 단계, 축방향 트리진전은 1,670분경 트리길이는 1.38 mm이었고, 4,818분경 트리길이는 1.44 mm이었다. 트리 진전율은 1.90×10^{-5} mm/min이었다. 트리진전 후반 5,750분경, 트리길이는 3.3 mm이었고 8,920분경 트리길이는 3.51mm이었다.

트리 진전율은 6.62×10^{-5} mm/min을 나타내었다. 파괴말기에서는 1.3×10^{-2} mm/min로서 역시 매우 빠른 파괴 결과를 가져왔다.

B46에폭시 수지의 트리 진전길이에 대해서 그림 7~그림 8에서는 앞서 서술한 바처럼 트리의 진전형상을 시간별로 나타내었고 그리고 축방향 트리진전 길이에 대해서도 나타내었다. 트리침의 불평등 전계강도 $E=1149.4$ kV/mm 하에서 주파수 1000Hz의 가속을 실시하였다. 초기트리 개시는 29040분에서 0.15mm의 가지형 트리로 개시하였고, 개시하기까지의 잠복기는 29,040분의 시간동안이었다. 트리의 잠복기, 개시, 진전 그리고 파괴과정으로 4단계로 표현할 수가 있다.

트리 침선단으로 부터 전하주입과 추출이 에폭시 절연체 내에서 이루어지며, 주파수 가속으로 인하여 60Hz에 비하여 이와 같은 과정이 16.6배가 가속되는 환경 하에서 실험이 이루어졌다. 그리고 그 때, 조그마한 가지형 트리의 개시가 트리 침선단으로부터 그림에서 보여준 그림 7(a)처럼, 분명하게 개시된 것이다. 다음은 트리진전단계로 탄화된 도전성 트리 팀(끝단)으로부터 에폭시 절연체로 전하의 주입과 추출이 지속적으로 발생하게 되고 그리고 그때 에폭시 절연체의 약한 부분 또는 에폭시 분자의 절단으로 수많은 가지를 갖는 트리가 새롭게 탄생하게 된다. 그들이 더욱더 빠르게 성장할 수도 있고 그리고 점차로 두툼하게, 더욱더 검게 생긴 새로운 가지와 함께 진전하게 된다. 여기서 트리가지의 미세 체널의 두께는 수 μ m~수십 μ m에 이르게 된다. 결국 트리가 개시되면 결국은 파괴에 이르는 결과를 초래하게 된다.

여기서 잠복기 과정은, 트리 침선단 반경 r 은 상대적으로 크고 그리고 침대평판간 거리는 탄화 된 도전성 팀보다 훨씬 멀어서, 그리하여 트리침 선단 전계강도가 상대적으로 약하게 된다. 그러므로 어떤 가지의 트리도 생성하지 못하고 오랜시간 동안 지속되게 된다. 그렇지만, 트리가 초기과정에 트리침선단으로부터 개시되면 트리 팀에서 트리침 곡률반경 r 은 작게 되어 그리하여 트리 팀에서의 전계강도가 트리침의 선단 보다 더 강하게 된다. 그런 이유로, 트리 진전율은 더욱더 빨라지고 새로운 트리 팀과 대향전극간거리가 훨씬 더 좁혀져서 새로운 트리 팀 전계강도가 더욱더 강하게 된다. 그런 이유로 트리성장률이 가속되어진다[17][21]. 결과적으로, 잠복기의 시간은 가능한 길어지게 되고 그리고 우수한 절연체로 이용하는 트리 진전율이 지연되게 된다.

3.4 에폭시 수지 B41과 CT 5531 CI의 절연수명평가

그림 9와 표 3에서는 에폭시 B41과 CT 5531 CI 에폭시 시스템의 전기적 교류 트리 절연파괴 수명을 평가하였다. 와이블 플롯은 3가지 파라미터로서 형상파라미터, 스케일파라미터 그리고 B10수명의 파라미터로서 측정된 결과의 수명을 평가할 수가 있다. 형상파라미터는 측정된 자료의 회귀분석을 통한 기울기를 의미하는 것으로, 기울기가 낮으면 측정자료의 분포가 넓고 반대로 높으면 측정결과의 신뢰도가 높은 결과를 의미하는 것이다. 중요한 점은 고전압을 수반한 중전기기에서는 대부분 약점으로 파괴되는 경향을 갖게 된다. 중전기기의 경우 평등전계부분에서는 강한 절연내력을 갖고 있다 하더라도 가장자리 및 불평등전계에 취약한 부분으로 절연파괴가 발생하게 되면 중전기기는 불능의 상

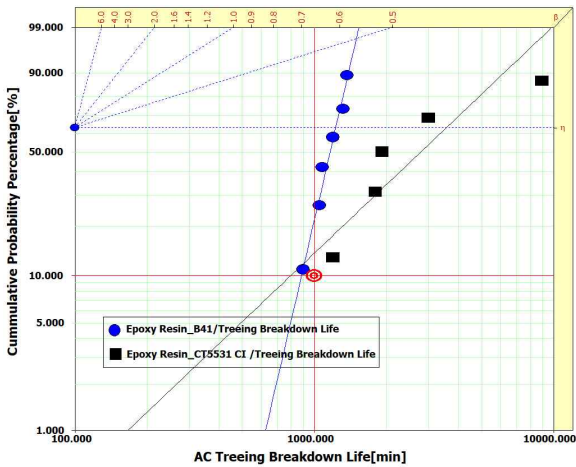


그림 9 에폭시 B41과 CT 5531 CI 수지의 전기적 교류 트리 절연수명 평가

Fig. 9 Evaluation of electrical AC treeing insulation life of epoxy B41 and CT 5531 CI resin.

표 3 그림 9 와이불 플롯의 특성값

Table 3 Properties values of the weibull plot

Types	Shape Parameter	Scale Parameter (min)	B10 Life (min)
Epoxy B41	6.83	1228.73	882
Epoxy CT 5531 CI	1.50	3557	794

태로 되어지기 때문에 형상파라미터의 경우는 매우 중요한 파라미터이다. 10개 중 9개가 우수하다라도 그 중 한 개의 결함으로 전력기기는 치명적인 상태에 이르기 때문에 중요한 것이다. 또한 스케일파라미터는 63.2% 지점의 교점에서의 절연내력을 의미하는 것으로 실제적인 절연내력을 나타내는 파라미터이다, 그리고 B10수명의 파라미터는 하위 10% 지점에서의 확률분포를 나타낸 경우로, 형상파라미터가 낮으면 B10수명은 매우 낮게 평가된다. 반대로 형상파라미터가 높으면 B10 수명은 높게 평가되게 된다.

이와같은 파라미터를 기초하여 볼 때 B41의 에폭시수지의 형상파라미터는 6.83을 나타내었고 반면, CT 5531 CI의 경우 1.5를 기록하였다. CT 5531 CI 수지의 불평등 전계인 장시간 트리실험에서 파괴되는 시간분포의 폭이 매우 넓어 신뢰성에 크게 문제가 될 수 있음을 의미하는 것이다. 그러나 B 41 수지의 경우 절연 파괴 수명의 경우 상대적으로 짧지만 신뢰성에는 그보다 우위에 있음을 알 수 있었다. 절연파괴 수명을 바탕으로 산업체에서는 절연 설계 시 그 점을 감안하여 적용하면 향상된 전력기기의 제품을 생산할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 중전기 GIS Spacer 용 에폭시수지 3 종류

(Araldite B41, Araldite CT 5531 CI 그리고 Araldite B46)에 대한 신뢰성평가를 위해, 교류 트리 실험을 실시하였다. 인가전계는 E=1149.4 kV/mm, 주파수 1000Hz를 인가하여 주파수 가속을 실시하였다. 측정시스템은 자동화된 트리전용 측정시스템으로 트리 잠복기, 트리개시, 진전 그리고 파괴의 전 과정을 디지털 카메라를 이용하여 2분 동안마다 컴퓨터에 영상자료가 저장되는 시스템을 구성하여 측정하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. GIS 중전기 용 비스페놀 A형 에폭시수지로서 3종류 수지의 교류 전기적 트리실험의 결과 트리절연과 시간의 결과 B 46>CT 5531>B 41의 순으로 절연파괴에 이르는 시간의 결과를 얻었다. 에폭시수지의 차이점은 점도의 차이로서 B 46>CT 5531 CI>B 41의 순으로 점도가 높은 상태이다.
2. 3 종류의 트리개시 및 진전 그리고 파괴의 경우 B 41, CT 5531 CI 그리고 B46의 에폭시수지 트리개시 이전의 트리 잠복기가 200분, 542분 그리고 29,040분으로 잠복기의 큰 차이를 얻게 되었다. B41에 비하여 B46는 145배 그리고 CT 5531CI의 경우보다 53배가 긴 잠복기를 갖는 특성을 얻게 되었다. 이는 중전기기용 에폭시수지의 선택에 중요한 자료가 될 것으로 사료되며, 트리개시는 결국 최종적으로 파괴를 가져오는 특성을 갖고 있다.
3. 3 종류의 에폭시수지의 경우 트리개시와 진전에서 트리형상은 모두가 가지형 트리로 개시하였고 그리고 진전하였다. 특징적인 것은 CT 5531 CI의 경우 측면으로 트리진전이 크게 진행하였고 B41의 경우 점진적인 트리진전이 이루어졌으며, B46의 경우 초기트리 개시로부터 파괴직전까지 트리 진전이 매우 지연되었고, 극적으로 파괴에 이르는 과정을 관찰할 수가 있었다.
4. 본 연구는 GIS용으로 범세계적 주로 사용되는 에폭시수지로서, 전기적 트리의 개시는 언젠가는 파괴가 예견된 수명을 평가할 수 있지만 그러나 잠복기가 긴 수지 일수록 절연수지로서 우수하다 평가를 할 수 있다. 이는 고점도 이지만 B46의 경우 B41에 비하여 145.2배, CT 5531 CI에 비하여 53.57배 긴 잠복기를 갖는 에폭시수지로서 수지와 텅스텐과 강한 계면결합, 가교밀도 등이 높은 유럽형 중전기기용 수지로 주목받을 수지로 사료된다.

감사의 글

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

References

[1] R. M. Eichhorn, "Treeing in Solid Extruded Electrical Insulation", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-12, no. 1, 1977.

[2] J. H. Mason, "Assessing the resistance of polymers to electrical treeing", *IEE Proc.*, vol. 128, no. No. 3, pp.

- 193-201, 1981.
- [3] S. Bamji, "Electrical Trees, Physical Mechanisms and Experimental Techniques", in *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics*, J. Webster, Ed. John Wiley & Sons, 1999, pp. 264-275.
- [4] I. Ieda and N. Nawata, "DC Treeing Breakdown Associated with Space Charge Formation in Polyethylene", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI12, no. 1, 1977.
- [5] I. Idrissu, S. M. Rowland, and A. Tzimas, "The Impact of Interfaces and Space Charge Formation on Breakdown Strength of Epoxy Resin", 2014, pp. 90-93.
- [6] Y. S. Cho, M. J. Shim, and S. W. Kim, *Mater. Chem. Phys.* 66, 70 (2000).
- [7] R. Sarathi, R. K. Sahu, and P. Rajeshkumar, *Mater. Sci. Eng.: A* 445, 567 (2007).
- [8] T. Imai, F. Sawa, T. Yoshimitsu, T. Ozaki, and T. Shimizu, *IEEE Annual Report Conference on CEIDP, Colorado, USA* (2004), p. 402.
- [9] T. Imai, F. Sawa, T. Ozaki, T. Shimizu, R. Kido, M. Kozako, and T. Tanaka, "Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials", *Kitakyushu, Japan* (2005), p. 5.
- [10] Jae Jun Park, Chang Hoon Lee, Jae Young Lee and Hee Dong Kim, "Preparation of Epoxy/Micro-and-Nano-Composites by Electric Field Dispersion Process and Its Mechanical and Electrical Properties", *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 18, No. 3, pp. 667-674, 2011. 06.
- [11] Jae Jun Park, Jae Young Lee, "A New Dispersion Method for the Preparation of Polymer/Organoclay Nanocomposite in the Electric Fields", *IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRICS and Electrical Insulation*, Vol. 17, No. 5 pp. 1516-1522, 2010. 10.
- [12] Jae-Jun Park, "Effect of Epoxy-modified Silicone-treated Micro-/NanoSilicas on the Electrical Breakdown Strength of Epoxy/Silica Composites", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 24, No. 6, pp. 3794-3800, 2017-12-01.
- [13] Ibrahim Idrissu, Hualong Zheng, Simon M Rowland, "Electrical tree growth in epoxy resin under DC voltages," *2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*, Volume: 2, Pages: 820-823, 2016.
- [14] Bojie Sheng, Victoria M. Catterson, Simon M. Rowland, Ibrahim Idrissu, "Investigation into pulse sequence analysis of PD features due to electrical tree growth in epoxy resin", *2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*, Volume: 2, Pages: 744-747, 2016.
- [15] J. H. Mason, *Proc. IEE C* 102, 254 (1955).
- [16] K. Theodosiou and I. Gialas, *J. Electr. Eng.* 59, 248 (2008).
- [17] Jae-Jun Park and Jae-Young Lee, "AC Electrical Breakdown Phenomena of Epoxy/Layered Silicate Nanocomposites in Needle-Plate Electrodes," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 13, 3377-3382, 2013.
- [18] R. Sarathi, P. Gani Raju, "Diagnostic study of electrical treeing in underground XLPE cable using acoustic emission technique", *Polymer Testing* 23(2004), pp. 863-869.
- [19] Yuanxiang Zhou, Rui Liu, Fei Hou, Xu, Wenbin Xue, "Morphology of Electrical Trees in Silicon Rubber", *Journal of Electrostatics*, pp. 1-9, 2013.
- [20] Minghui Bao, Xiaogen Yin, Junjia He, "Structure Characteristics of Electrical Treeing in XLPE insulation under High frequency", *Physica B* 406(2011), pp. 2885-2890.
- [21] R. Vogelsang, T. Farr and K. Fröhlich, "The Effect of Barriers on Electrical Tree Propagation in Composite Insulation Materials", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 13, No. 1, pp. 373-382, February 2006.
- [22] Toshikatsu Tanaka, Akira matsunawa, Yoshimichi Ohki, Masahiro Kozako, Masanori Kohtoh, Shigemitsu Okabe, "Treeing Phenomena in Epoxy/Alumina Nanocomposite and Interpretation by a Multi-core Model", *IEEJ Trans. FM*, Vol. 26, No. 11, pp. 1128-1135, 2006.

저 자 소 개



박재준 (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