

에폭시수지의 고전압 전원주파수 변화에 따른 장시간 전기적 트리잉 열화 특성연구

A Study on Long-time Electrical Treeing Deterioration Properties According to High Frequency Voltage of Epoxy Resin

박 재 준*
(Park Jae-Jun)

Abstract - Electrical tree structure is one of the most important influencing factors for electrical treeing characteristics in polymers. In this paper, we focused on the structure characteristics of electrical treeing in epoxy resins (original) insulation under different high-frequency voltages (60, 500, 1000Hz). Effects of voltage frequency on the ac electrical treeing phenomena in an epoxy resins were carried out in needle-plate electrode arrangement. To measure the treeing initiation and propagation, and the breakdown rate, constant AC of 10 kV with three different voltage frequencies (60, 500 and 1,000 Hz) was applied to the specimen in needle-plate electrode specimen at 30 °C of insulating oil bath. At 60 Hz, the treeing initiation time was 360 min and the propagation rate was 6.85×10^{-4} mm/min, and the morphology was dense branch type. As the voltage frequency increased, the treeing initiation time decreased and the propagation rate increased. At 1,000 Hz, the treeing initiation time was 0 min and the propagation rate was 7.81×10^{-2} mm/min, and the morphology was dense bush type.

Key Words : AC treeing breakdown, Frequency dependence, Epoxy resin, Frequency acceleration deterioration, High voltage Heavy electric machine

1. 서 론

트리잉(treeing) 현상은 1936년[1]처음으로 서술한 고체유전체에서 전기적 파괴이전(pre-breakdown) 현상중 하나이다. 교류전기적 주파수를 절연물에 인가함으로써 트리개시되어 절연부분이 미세 침식된 도전로의 경로를 시각적 가지형상으로 나타낸 것이다. 트리가 발생하는 절연부분의 경우, 우리는 그 부분을 전기적으로 완전히 파괴되었다 또는 파괴된 것이 아니다 라고 이야기 하곤 한다. 그러나 고체유전체에서는 이를 대부분 전기적 고장(failure)의 메커니즘으로 인정되어 왔지만 오히려 누적 손상과정의 결과로 표현하였다. 수많은 연구자들은 교번전계 하에서 고분자절연 내에 전기적 트리 개시 및 진전과정을 이해하려고 그리고 실험적 관찰이 진행되어져 왔다. 전기적 트리는 고전적으로 극도의 불평등전계를 모의하기 위해 침대평판전극배열로 구성되었으며, 트리 개시 및 진전 등에 영향을 주어지는 침전단부분의 곡률반경, 인가전압 레벨, 인가전원의 주파수 크기, 절연재료의 종류, 트리환경온도 그리고 고분자수지에 나노입자를 함유한 또는 나노-마이크로 입자가 혼합된 콤포지트 등 여러가지 인자의 영향을 받게 된다. 전기적 트리 형상들로서

불 때, 작은 가지(twig)[2], 가지형(branch type) [3, 4], 소나무형상트리(pine-like tree) [2,5], 수초형(bush type)[4,6] 그리고 구상트리(sphere type)[3,4] 등이 있다. 이런 독특한 현상은 트리채널 내의 부분방전(partial discharge)에 크게 기여하여 왔다. 이와 같은 트리실험은 장기적 신뢰성 실험의 일환으로 연구가 진행 중이며, 트리의 진전을 억제하는 내부조직구조 즉, 나노콤포지트 그리고 마이크로-나노가 혼합된 콤포지트 [3,7,8,9]등의 다양한 트리 억제현상 등의 연구가 진행되어왔다.

본 연구에서는 SF₆ (Sulfur hexafluoride) 절연가스 중 고전압 중전기 장치의 절연성능 면에서 우수한 화학적 안정성을 갖는 설비들 가령, GIS(Gas Insulated Switchgear), 초고압 변압기의 절연매질로 사용하였지만, SF₆가스가 온실가스의 주범으로 지정된 이래 대체할 수 있는 고체 절연의 필요성이 크게 부각되어왔다. 고체절연재료의 평가방법 중 장기신뢰성 평가방법으로서 가능할지를 알기 위하여 인가전압 주파수를 상용주파수(60Hz)에서 더욱더 높은 주파수인 500Hz로서 상용주파수의 8.3배 그리고 1000Hz로서 16.6배의 주파수 가속과 트리잉 파괴와의 상관관계 그리고 트리개시, 진전 그리고 트리 진전형상과의 관계를 정립하고자 연구를 실시하였다. 그리고 인가전압 주파수의 변화에 따른 축방향 트리진전길이, 트리진전속도 그리고 파괴에 걸리는 시간(수명)등을 평가하였다. 이 결과는 극도의 불평등 전계 하에서 모의 실험한 경우로서, 향후 절연소재의 신뢰성평가에 주파수 가속열화의 특성평가 시 이용하게 될 것이다.

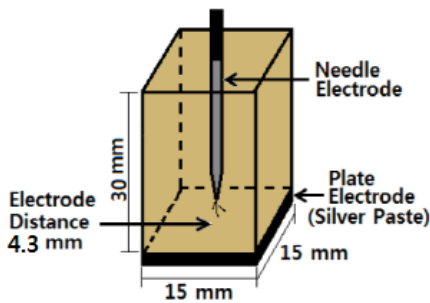
* Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Joongbu University, Korea
E-mail : jjpark@joongbu.ac.kr

Received : September 24, 2013; Accepted : October 28, 2013

2. 실험

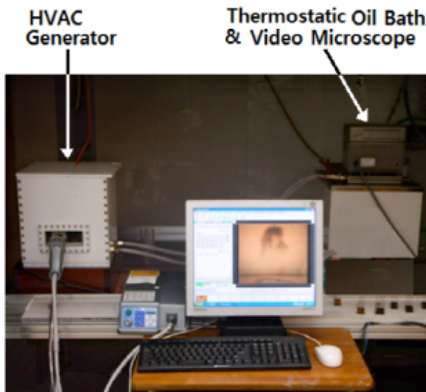
2.1 재료

비스페놀 A형 타입의 디그리시딜 에테르 에폭시수지, 상품명 YD-128(Kukdo Chem. Co. Korea)이 사용되어졌다. 에폭시 당량(EEW)는 184~190 g/eq.이었다. 그리고 경화제는 3-or-4-methyl-1,2,3,6-tetrahydrophthalic anhydride (Me-THPA)이었고 그리고 상품명은 HN-2200(Hitachi Chem. Co., Japan)이었다. tertiary amine 타입 경화촉진제는 benzyl-dimethyl amine (BDMA, Kukdo Chem. Co. Korea)을 사용하였다. 텅스텐 재질의 침 종류는 일본 오구라 보석상(Ogura Jewelry Co., Japan.)에서 구입하였으며, 지름과 길이는 1mm 그리고 60mm이었고 그리고 침의 선단 각은 30° 그리고 곡률반경이 5μm 이었다. 시편의 하부전극측은 평판형 전극으로 도전성 실버페이스트로 코팅하였다.



(Specimen in Thermostatic Oil Bath)

(a) Treeing Specimen



(b) Alternative Current Treeing System

그림 1 침대평판전극의 배열과 교류 트리시스템

Fig. 1 Arrangement of needle-plate electrode in a specimen and AC tree measurement system.

2.2 교류 트리링 측정을 위한 샘플제조

원형에폭시수지(100phr)와 경화제(80phr)를 혼합하여 경화촉진제(1phr)를 넣고 기계식교반기(500rpm×30min)를 이용하여 교반 후, 금형 몰드에 미리 침을 삽입 배치하였다. 금형을 예열시켜 최대한 기포발생을 억제하였고 그리고 주입된 에폭시수지에 기포를 제거하기 위하여 진공오븐에서 탈기포 처리하였다. 제조된 트리링 샘플의 치수는 15×15×30mm³이었다. 그리고 침전극 선단과 접지전극사이의 절연거리

4.3mm로 하였다. 경화조건은 120×2hr+150℃×24hr으로 경화를 구현하였다. 마지막 전극구성은 침전극에 대향전극인 접지의 경우 실버페이스트를 바르고 80℃×24hr 동안 오븐에서 건조하여 샘플로 사용하였다.

2.3 교류 트리링 측정

고전압 전원주파수 변화에 따른 트리개시 및 진전 그리고 파괴에 이르는 트리 진전에 관한 연구를 위하여 교류 고전압10kV (주파수 가변용: 60Hz, 500Hz 그리고 1000Hz)을 침대평판 전극에 인가하였다. 측정하는 절연유 온도는 30℃로 일정하게 온도조절장치를 이용하여 제어되었으며, 인가전압의 상승속도는 0.5kV/s로 일정하게 10kV까지 상승 후 파괴에 이를 때까지 지속적으로 인가하였다. 트리개시 및 진전 과정은 그림 1에서 나타낸 비디오현미경 시스템(ICS-305B, SOMETECH Inc.)으로 모니터링 하였다. 트리영상은 매 5분마다 자동으로 또는 간헐적으로 자료를 얻을 수 있도록 시스템을 구성 하였다.

3. 결과 및 검토 고찰

3.1 인가전압 주파수 가속과 트리링 파괴 수명특성

트리 침선단 주위 전계강도는 다음 Mason 식[28]

$$E = \frac{2V}{r \ln(1 + \frac{4d}{r})} \quad (1)$$

으로부터 r는 침선단 곡률반경 5μm, d는 침대평판 전극간거리 4.3mm 그리고 인가전압 10kV 일 때, 추정되는 전계강도 E=1163 kV/mm (측정온도 30℃) 고전계를 적용하였다.

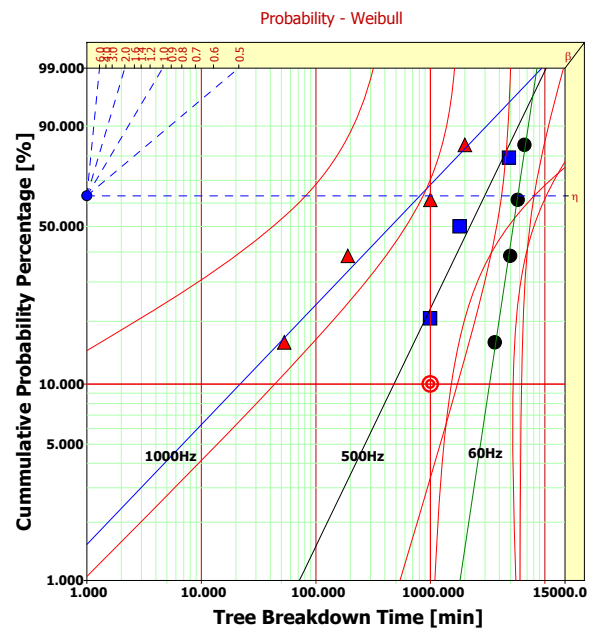


그림 2 주파수 가속열화에 따른 트리링 파괴 수명특성

Fig. 2 Life characteristics of treeing Breakdown according to frequency accelerated deterioration

표 1 주파수 가속열화에 따른 트리잉 파괴 특성의 와이블 분포 특성

Table 1 Weibull properties for treeing breakdown according to frequency accelerated deterioration

주파수 가속열화를 이용한 트리잉 파괴 수명 추정			
10kV에 대한 인가전원 주파수	형상 파라미터	스케일 파라미터 (min)	B ₁₀ 수명 (min)
60Hz	3.95	5805	3291
500Hz	1.23	2982	487
1000Hz	0.62	811	22

그림 2에서는 고전압 10kV(60Hz)를 기본 주파수로서 실제 중전기 전력설비에 사용되고 있지만, 고전압전원주파수 60Hz의 정수배로서 8.33배(500Hz) 그리고 16.6배(1000Hz)의 주파수를 각각 인가하였다. 열화인자로서 절연유 환경온도는 30℃로서 일정하게 제어하였다. 에폭시원형수지의 트리잉 파괴 수명을 평가하기 위하여 주파수당 4개씩의 트리샘플을 이용하여 실험을 실시한 결과 통계적 분석인 기법인 와이블플롯을 통하여 나타내었다. 와이블플롯의 특성 값은 표 1에서 나타낸 바처럼 60Hz, 500Hz, 1000Hz의 형상파라미터는 3.95, 1.23, 0.62의 값을 기록하였고, 여기서 형상파라미터의 의미는 와이블플롯의 기울기를 나타낸 경우이다. 즉, 주파수의 가속열화를 크게 하면 할수록 형상파라미터 즉, 기울기가 작아지는 결과를 가져왔다. 이는 1000Hz주파수를 가속시킨 경우, 트리파괴에 이르는 시간이 상대적으로 분포가 큰 경우를 의미한 것이다. 주파수가 낮을수록 오히려 기울기가 높은 결과를 나타낸 것이다. 트리파괴시간이 유사한 시간대에서 파괴됨을 의미한 것이다. 스케일파라미터는 60, 500, 1000Hz 경우 트리잉 파괴 수명은 5805분(96.7시간), 2982분(49.7시간), 811분(13.5시간)을 얻었다. 인가전압 전원주파수가 낮을수록 파괴에 걸리는 시간은 길고, 반면에 주파수의 가속열화가 크면 클수록(주파수가 클수록) 파괴에 이르는 시간이 상대적으로 짧았다. 60Hz 약 8.33배가량의 높은 주파수(500Hz)를 인가 할 때 파괴에 이르는 시간은 약 1/2배로 낮아지는 시간을 그리고 16.6배 가량 높은 주파수(1000Hz)를 인가할 때 1/7배만큼 짧은 시간 내에 파괴에 도달됨을 나타낸 것이다. 주파수가속과 트리파괴시간과의 비례성을 검토한 결과 500Hz이면 8.33배 그리고 1000Hz이면 16.6배와의 관계에서 파괴시간은 60Hz의 경우에 비하여 500Hz시간에서는 1/2 그리고 1000Hz에서는 1/7의 시간에 해당되어 비례성은 있지만, 정비례한다고 할 수는 없다. 결과적으로 인가전압 주파수가 증가할수록 절연파괴에 걸리는 시간이 짧았고 반대로 주파수가 낮으면 오히려 파괴시간이 긴 결과를 가져온 것이다. 이는 트리형상에 따라 서로다른 절연파괴시간에 도달되므로 이는 트리형상에 의존적이라 말할 수 있다[10][11]. 그러나 본 연구에서는 다양하고 많은 실험자료를 검토하기 위하여 향후 더욱더 많은 연구가 필요할 것이다. 그러나 부분방전 저항성의 실험에서 주파수 증가에 따라 열화가 가속되는지를 표면침식실험결과 큰 관계가 없음을 알았다[12].

3.2 인가전압 주파수 변화와 트리 파괴시간

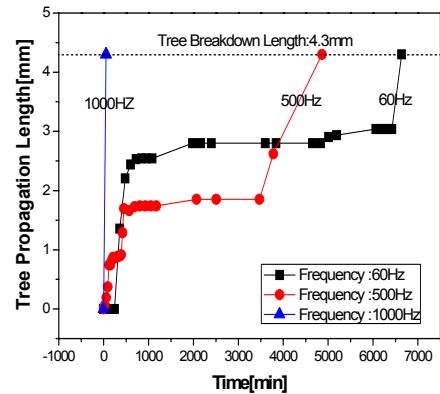


그림 3 주파수 가속열화에 따른 트리잉 파괴시간 의존성
Fig. 3 Treeing Breakdown Time dependence for frequency accelerated deterioration

그림 3에서는 트리 침선단으로 부터 대향전극까지 절연간격이 4.3mm로서 일정하였고, 절연유 온도는 30℃로 일정하게 유지하였다. 고전압 발생 전원주파수는 앞서 서술된 3종류의 주파수를 고전압 10kV 인가하였다. 그 결과 60Hz를 인가 후 파괴에 이르는 시간은 6634분 동안 진전 후 대향전극에 도달하여 파괴되었고, 500Hz를 인가 후 파괴에 이르는 시간은 4862분, 1000Hz를 인가 후 파괴에 이르는 시간은 55분으로 매우 빠르게 진전 후 파괴되었다. 일정한 전압 전하에서 가속주파수를 크게 하면 에폭시원형수지의 트리잉 파괴 시간이 짧아지는 결과를 가져왔으며, 트리잉 파괴 시간은 가속열화된 주파수에 비례성을 갖고 있음을 알 수 있었다.

그림 2의 주파수 가속열화에 따른 트리잉 파괴 수명과 관계에서 알 수 있듯이 일반적으로 트리잉 파괴는 트리개시 및 진전시 형상에 지배적이다[2],[5]. 즉, 트리형상이 가지형 (Twig-like, Branch-like), 소나무형(Pine-like) 부시형 (Bush-like), 구상형(Sphere-Like) 등 트리형상에 따라 축 방향으로 트리가 진전되는 속도가 다르기 때문에 파괴에 이르는 시간은 다르게 된다. 여기서 twig형 트리는 단일형 또는 가지수가 극히 적은 타입의 트리를 말하고, 가지형 트리는 매우 얇은 가지들을 갖는 트리형상, 소나무형상 트리는 하나 또는 여러 개의 주요한 가지 줄기를 갖는 형상의 트리, 부시형 트리는 트리침 선단 부근의 가지밀도가 높은 또는 수초형태처럼 이루어진 형상의 트리 그리고 구상 트리는 수초형 트리보다는 침선단 부근에 밀집한 가지들이 매우 치밀한 형태로 이루어 졌지만 거의 구의 형상을 갖는 즉, 밤송이 형태의 트리라 말할 수 있다.

그림 4에서는 트리개시, 진전 그리고 파괴에 이르는 모델을 3단계로 나누어 트리진전을 표현할 수 있다. 첫째로, 잠복기(incubation period)가 존재할 수 있다. 잠복기는 전기적 스트레스가 인가되었지만 그러나 가지적으로 전기적 트리가 발생되지 않은 경우를 말한다[2][3][4][5][10][11]. 잠복기는 일반적으로 나노입자를 에폭시에 충전한 경우 완전한 분산에 의하여 입자들이 트리침선단을 가로막아 스트레스를 주어진다 하더라도 트리개시를 일으킬 수 없는 경우를 말한다. 그리고 초기트리의 경우 한번에 불쑥 튀어나온 형태로

대체로 가지형, 수초형, 구상형 등의 트리는 초기트리로부터 트리형상이 구체화되어진다. 그러나 트리가 진전과정에 환경온도 등 외부적인 요인에 의하여 약간 변화되는 경우도 존재하게 된다. 그렇지만 대체로 트리는 트리개시로부터 진전에 이르기까지 변화되지 않은 경우가 오히려 많다.

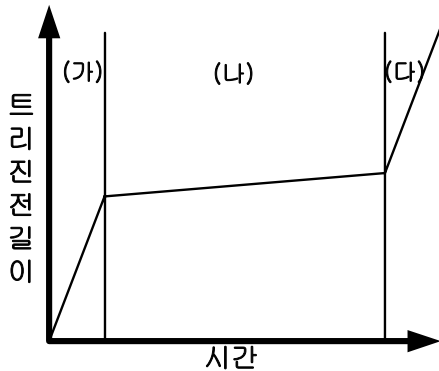


그림 4 축방향 트리개시, 진전 그리고 파괴에 대한 모델
 Fig. 4 Model for axes direction tree initiation, propagation and breakdown

두 번째, 트리성장(진전)기 및 트리정체기이다. 두 번째의 경우는 트리가 성장하는 단계로서 트리형상에 따라 시간에 따른 기울기는 다를 수 있다. 즉, 가지형 트리인 경우는 기울기가 크고 그리고 잔가지가 많은 경우는 다소 기울기가 낮게 되어 진다. 또한 소나무형과 같은 트리는 트리의 진전이 정체되는 시간이 길다. 왜냐하면 트리진전 시 트리채널이 처음에는 진하지 않은 즉 엷은 색을 지닌 채널이 가늘게 형성되지만 시간에 따라 트리채널이 굵어지고 그리고 탄화되는 흔적이 더욱 선명하여 검은 색깔을 갖는 형태의 소나무처럼 진전하게 되므로 트리의 진전이 거의 없는 경우가 된다. 또한 부시형태의 트리는 트리가 개시되는 형태가 대체로 부시형태로 발생되고 진전되어 축방향으로 트리가 진전하는 경우는 거의 없고 축방향(옆방향)으로 커지는 형상이 된다. 구상트리는 부시형 트리와 유사하게 생겼지만 더욱더 구의 형상이 완전한 밤송이 형상을 갖는 것이다. 마찬가지로 축방향 트리진전은 거의 없고 축방향으로 커지는 경우이므로 이처럼 축방향으로 진전이 이루어져야 만이 트리 파괴시간에 영향을 주게 된다. 그러나 반대로 축방향으로 커지게 되면 수명이 매우 길게 되는 형상을 가져온다.

세번째는 파괴 전단계 및 파괴단계이다. 트리는 앞서 서술된 것처럼 대향전극에 트리가 도달되면 파괴로 보아야 할지 파괴로 보지 않아도 될지 의견이 매우 분분하다. 반드시 대향전극에 트리가지가 도달하였다 하더라도 관통파괴에 이르는 시간이 매우 길게 된 경우가 종종 있게 된다. 대체로 가지형으로 진전된 경우, 부시형으로 진전된 경우, 구상형으로 역시 진전된 경우 어떤 경우라도 마지막 파괴에 이르러서는 가지형 트리로서 진전되어 파괴에 이르게 된다. XLPE 케이블의 상용 주파수(60Hz) 실험결과 저전압측으로 갈수록 트리양상이 가지형트리로 진전하고, 가지형트리에서 수초형트리로 변환하는 전압을 Ishida 씨[12]의 연구결과에서도 볼 수 있었으며, 고전압 측으로 갈수록 구형타입의 트리로서 진전

됨을 알 수 있었다 [4].

Yuanxiang Zhou[2]는 각기 다른 종류의 주파수 그리고 인가 전압레벨을 변화하여 실리콘 고무에 적용한 트리시험에서 여러 종류의 트리형상을 연구하였다. 주파수가 높아지면 가지밀도가 높은 형상의 트리가 개시되어진다. 분명한 차이는 이런 영향이 주파수 영역을 3부분으로 나누어 실험한 결과이다. 첫째 부분은 50~500Hz에서는 가지형 과 소나무형 트리가 개시되었고, 나중의 형태는 더욱더 큰 가지형 및 소나무형으로 되었다. 두 번째 부분은 1kHz~10kHz에서는 소나무형과 부시형트리가 개시되었고, 그 후 분명한 변화가 없었다. 세 번째 부분은 주파수가 10kHz 이상에서는 모든 트리가 부시형 트리개시 하였고 이후 변화 없이 파괴에 이르는 결과를 나타내었다.

결과적으로 가속주파수 열화에 따른 축방향 트리진전과의 관계에서 60Hz의 경우 짧은 시간동안 축방향으로 일정길이가 진전되고 나서 포화되는 시간이 매우 길고, 주파수 가속 열화가 커질수록 즉, 500Hz에서는 상대적으로 포화되는 시간이 짧았고 그리고 1000Hz에서는 거의 포화 상태없이 트리가 축방향으로 진전하여 파괴되는 결과를 가져온 것이다. 이는 주파수가 가속되면 트리 침전단으로부터 주입된 전자 에너지가 크기 때문에 축방향으로 트리진전 속도가 빨라져서 파괴에 이르는 시간이 짧아진 것이며, 오히려 60Hz의 경우처럼 트리채널이 굵어지고 그리고 채널이 검게 되는 현상이 상대적으로 미약함을 의미한 것이다.

3.3. 주파수 가속열화와 트리진전과의 관계

그림 5와 그림 9의 경우는 상용주파수 60Hz, 500Hz 그리고 1000Hz의 10kV 고전압을 상온상태(30°C)에서 전압을 인가하여 트리개시, 진전 그리고 파괴에 대한 트리형상, 축방향 트리진전속도 등의 특성을 나타내었다.

(1) 가속주파수: 60Hz

그림 5와 그림 6에서는 교류 10kV 고전압을 전원주파수 60Hz를 인가 후로부터 파괴에 이르는 시간까지 일정하게 전원을 인가하였으며, 일정시간동안의 간격을 가지고 트리

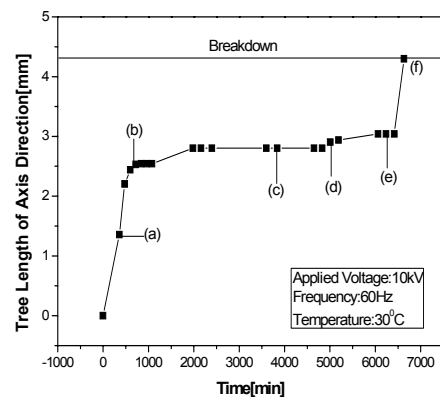


그림 5 트리진전 길이에 대한 시간의존성(30°C,60Hz)
 Fig. 5 Time dependence of tree propagation length(30°C, 60Hz)

가 진전되는 양상을 그림 6에서 촬영된 영상의 결과를 나타내었다. 초기트리개시가 360분 후에 가지형 트리개시로 개시하였으며, 개시된 초기트리개시 길이는 1.356mm로서 환순간 트리 침 단부분으로부터 개시가 이루어진 것이다. 그림 5(b)의 경우 720분에서 그림 5(e)까지 6420분까지 약 5700분 동안 축방향 트리의 진전(0.509mm)으로, 트리진전속도 8.9×10^{-5} mm/min가 극히 미소하게 진전하였다. 그러나 측면으로 미소한 가지형의 트리가 발생되었고 그리고 탄화된 도전로인 트리 채널이 시간에 따라 더욱더 검은색의 채널로 변화하여 진행하였다. 이는 트리진전은 거의 이루어지지 않으며 단지 측면으로 내지 미소한 가지의 발생을 가져온 것이다. 이후 약 200분 후에 관통되는 파괴로 진행하였다.

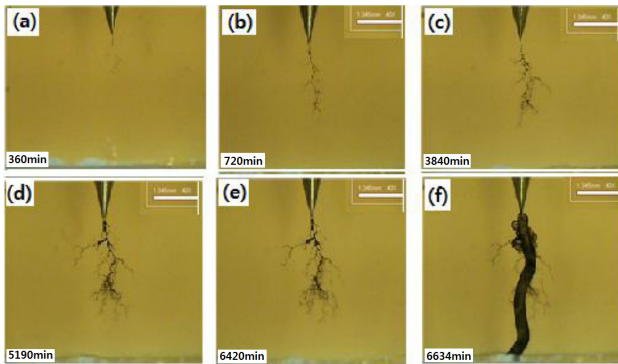


그림 6 일정전계 하(10kV/4.3mm)에서 측정된 에폭시 시스템의 트리잉 진전형상 (60Hz, 30°C)

Fig. 6 Treeing growth shape in epoxy system tested in the constant electric field of 10kV/4.3 mm (60 Hz) at 30oC.

(2) 가속 주파수 : 500Hz

그림 7과 그림 8에서는 교류 10kV 고전압을 전원주파수 500Hz를 인가 후로부터 파괴에 이르는 시간까지 일정하게 전원을 인가하였으며, 일정시간동안의 간격을 가지고 트리가 진전되는 양상을 그림 8에서 관찰하여 촬영된 영상의 결과를 나타내었다. 초기트리개시는 전압인가 후 30분에 이르

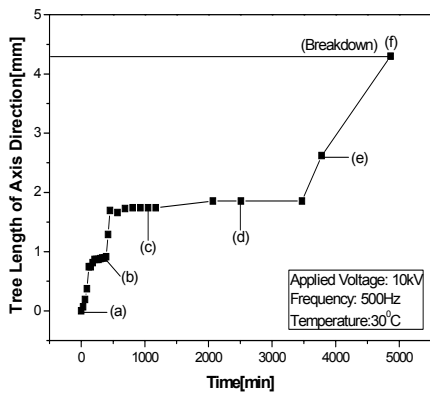


그림 7 트리진전 길이에 대한 시간의존성(30°C, 500Hz)
Fig. 7 Time dependence of tree propagation length(30°C, 500Hz)

러 소나무형 트리개시로 개시되었고 개시된 트리는 0.068mm로서 극히 미소한 초기트리개시였다. 그림 7의 그림에서 볼 수 있듯이 트리가 진전하여 약 450분에서 3470분까지는 축방향 트리진전이 매우 미약한 진전 즉, 3020 분 동안 축방향으로 트리가 0.158mm 진전하는 매우 미약한 트리진전속도 5.23×10^{-5} mm/min을 얻을 수 있었다. 그러나 60Hz에 비하여 소나무형 트리로서 진전하여 파괴에 이르렀다.

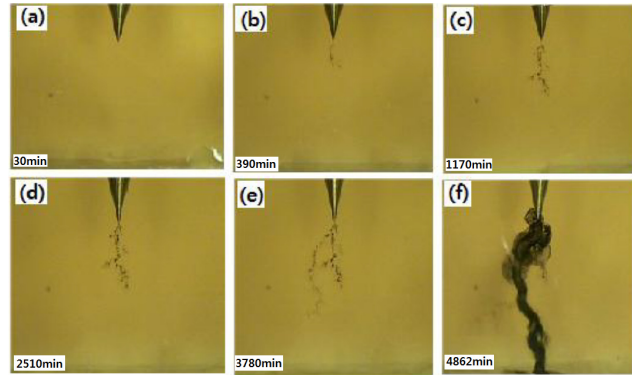


그림 8 일정전계 하(10kV/4.3mm)에서 측정된 에폭시 시스템의 트리잉 진전형상 (500Hz, 30°C)

Fig. 8 Treeing growth shape in epoxy system tested in the constant electric field of 10kV/4.3 mm (500Hz) at 30oC.

(3) 가속 주파수 : 1000Hz

그림 9에서는 교류 10kV 고전압을 전원주파수 1000Hz를 인가한 후로부터 파괴에 이르는 시간까지 일정하게 인가하였으며, 인가전압 직후로부터 급격하게 트리가 개시되었으며 축방향 트리진전속도 및 진전양상 역시 500Hz와 60Hz에 비하여 전혀 다른 양상을 나타내었다. 매우 잔가지가 많은 가지형트리에서 수초형(부시형) 트리로서 짧은 시간동안 급격하게 트리가 진행하여 55분에 파괴되는 트리형상, 그림 9에 나타내었다. 트리진전속도는 7.81×10^{-2} mm/min 로서 매우 빠른 진전속도를 나타내었다.

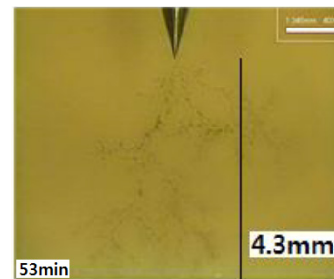


그림 9 일정전계 하(10kV/4.3mm)에서 측정된 에폭시 시스템의 파괴직전의 트리잉 진전형상 (1000Hz, 30°C)

Fig. 9 Treeing growth shape for before breakdown in epoxy system tested in the constant electric field of 10kV/4.3 mm (1000 Hz) at 30oC.

표 2 주파수 가속열화에 따른 트리진전속도

Table 2 Tree Propagation Velocity for Frequency Acceleration deterioration

샘플	60Hz	500Hz	1000Hz
트리갭 길이	4.3mm	4.3mm	4.3mm
트리개시 시간	360min	30min	0
트리파괴 시간	6634min	4862min	55min
트리진전 속도	6.85×10^{-4} mm/min	8.89×10^{-4} mm/min	7.81×10^{-2} mm/min

$$\text{평균진전속도} = \frac{\text{갭길이}}{\text{파괴시간} - \text{트리개시시간}}$$

이상의 결과로부터 교류 고전압 10kV 인가한 전원주파수를 60, 500, 1000Hz로 가속 열화를 실시한 결과 교류 고전압 인가 시, 가속열화를 위해 주파수를 증가시킬수록 트리개시 시간이 매우 짧아지는 현상을 나타내었다. 일정한 크기의 고전압 진폭을 갖는 주기적인 주파수가 고주파로 갈수록 트리개시는 더욱더 빨라져서 상용주파수에서는 360분정도에서 초기트리가 개시하였고, 500Hz에서는 30분 정도로 가속된 초기트리가 개시되었다. 그리고 더욱더 가속주파수가 높아짐에 따라 1000Hz에서는 전원 전압인가 시 초기트리가 개시되는 결과를 가져왔다. 트리진전속도는 60Hz를 기준으로 할 때 500Hz에서는 트리진전속도가 1.3배 빠르고 그리고 1000Hz에서는 114배 빠른 결과를 가져왔다.

실리콘고무에서 주파수와 인가전압 변화에 따른 트리개시 및 진전에 관한 연구에서처럼 인가전압 주파수가 저주파일수록 트리개시 및 진전형상이 가지형 트리로 진전되고 그리고 주파수가 높은 주파수로 갈수록 소나무형 트리로 그리고 더욱더 높은 주파수로 갈수록 부시타입의 트리로 개시하여 진전되었다. 본 연구와 유사하게 60Hz에서 가지형 트리, 500Hz에서는 소나무형 트리 그리고 1000Hz에서는 부시타입 트리로 진전됨과 유사함을 알 수 있었다[2]. 파괴되는 시간은 인가전압 주파수가 클수록 짧았으며 반대로 상용주파수에서는 매우 파괴시간이 긴 결과를 가져왔다. Minghui 등의 연구자들은[5] 고주파하에서 XLPE내 전압과 주파수에 대한 전기적 트리형상구조에 대한 연구로서 부시타입 트리는 더욱더 높은 전압에서 그리고 포도와 같은(Vine-like tree) 트리는 더욱더 높은 주파수에서 나타난다. 또한 가지형을 갖는 트리의 에너지 threshold은 전압을 증가시킴으로써 감소되어지고 반면에 부시타입 트리는 처음에는 약간 증가하였지만 가지형 트리와 함께 유사한 비율로 감소하게 된다. 에너지 threshold에 대한 주파수 영향은 분명하지 못하고 그리고 규칙적임을 설명하였다. 또한 Toshikatsu Tanaka는 주파수 가속을 통한 부분방전 저항성 실험에서 주파수 가속을 실시한 결과 표면 침식이 비례성을 갖지 못함을 보고하였고 그리고 주파수가 가속의 요소로서는 600Hz와 1200Hz의 경우는 2배의 가속요소로 작용하지만 그러나 60Hz와 600Hz는 사이는 10배 라는 것에는 미치지 못함을 알 수 있었다 [12].

4. 결 론

고전압 중전기기의 절연소재로 이용하고 있는 에폭시원형 수지를 이용하여 트리전극을 삽입한 에폭시 트리샘플을 제조하여 고전압 발생 주파수를 60Hz, 500Hz, 1000Hz으로 가변하여 트리가속열화 실험을 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 주파수 변화에 따른 트리수명 특성

온도 30℃, 인가전압 교류10kV, 주파수 60Hz, 500Hz, 1000Hz을 가변 할 때 트리수명평가는 인가전압 승압 후 트리개시로부터 트리파괴에 이르는 시간을 평가하였다. 통계 처리는 와이블플롯을 이용하여 평가한 결과 형상 파라미터의 경우 60Hz는 3.95, 500Hz에서는 1.23, 1000Hz에서는 0.62로 이는 기울기를 의미한 것이다. 가속열화주파수가 클수록 오차범위가 크고, 상대적으로 낮은 주파수인 상용주파수 실험결과 기울기가 큰 결과를 얻을 수 있었다. 또한 와이블플롯의 63.2%인 누적확률분포에서 60Hz의 경우 5805분, 500Hz의 경우 2982분 그리고 1000Hz의 경우 811분으로 인가전압 10kV 상용주파수(60Hz)를 기준으로 할 때, 500Hz는 51.3%의 수명을 그리고 1000Hz는 13.9%의 수명을 평가할 수 있었다. 이는 장시간 트리링 절연파괴에서 트리링 수명은 트리형상에 지배적임을 알 수 있었다.

2. 인가전압 주파수와 트리형상과의 관계

인가전압 주파수에 대한 트리형상과의 관계에서 60Hz의 경우는 미소한 가지가 많은 가지형 트리로서 절연파괴속도가 6.85×10^{-4} mm/min 상대적으로 느렸고 500Hz의 경우 소나무형상 트리로서 8.89×10^{-4} mm/min를 그리고 1000Hz의 경우 7.81×10^{-2} mm/min로 부시형 타입의 트리로 트리진전이 대단히 빠르게 진행하였다.

References

- [1] D. M. Robinson, Dielectric Phenomena in High Voltage Cables, London: Chapman and Hall, 1936.
- [2] Yuanxiang Zhou, Rui Liu, Fei Hou, Xu Zhang, Wenbin Xue, "Morphology of electrical trees in silicon rubber", Journal of Electrostatics, No.xxx, pp.1-9, 2013
- [3] Jae-Jun Park, "Long-term and Short-term AC Treeing Breakdown of Epoxy/Micro-Silica/Nano-Silicate Composite in Needle-Plate Electrodes", TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 13, No. 5, pp. 252-255, October 25, 2012
- [4] Jae-Jun Park, "A Study on the Diagnosis of Treeing Breakdown using the method of Acoustics Emission", A Doctoral Thesis, Kwangwoon University, 1992
- [5] Minghui Bao, Xiaogen Yin, Junjia He, "Structure characteristics of electrical treeing in XLPE insulation under high frequencies", Physica B, Vol.406, pp. 2885 - 2890, 2011
- [6] F. Guastavino and B. Cerutti, "Tree Growth Monitoring by Means of Digital Partial Discharge Measurements", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical

Insulation Vol. 10, No. 1 ; pp. 65~72 February 2003

- [7] Takahiro Imai, Fumio Sawa, Toshiyuki Nakano, Tamon Ozaki, Toshio Shimizu, Masahiro Kozako and Toshikatsu Tanaka, "Effects of Nano-and Micro-filler Mixture on Electrical Insulation Properties of Epoxy Based Composites", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 13, No. 1, pp. 319~326; February 2006
- [8] Takahiro Imai, Fumio Sawa, Tamon Ozaki, Toshio Shimizu, Ryouichi Kido, Masahiro Kozako and Toshikatsu Tanaka, "Influence of Temperature on Mechanical and Insulation Properties of Epoxy-Layered Silicate Nanocomposite", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 13, No. 1, pp. 445~452, February 2006
- [9] Takahiro Imai, Fumio Sawa, Tamon Ozaki, Toshio Shimizu, Shin-ichi Kuge, Masahiro Kozako and Toshikatsu Tanaka, "Approach by Nano-and Micro-filler Mixture toward Epoxy-based Nanocomposites as Industrial Insulating Materials", *IEEJ Trans. FM*, Vol.126, No.11, pp.1136~1143, 2006
- [10] Jae-Jun Park and Jae-Young Lee, "AC Electrical Breakdown Phenomena of Epoxy/Layered Silicate Nanocomposite in Needle-Plate Electrodes", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 13, 3377 - 3382, 2013
- [11] Jae-Jun Park, Jae-Young Lee, "Effect of nano-sized layered silicate on AC electrical treeing behavior of epoxy/layered silicate nanocomposite in needle-plate electrodes", *Materials Chemistry and Physics*, No.141, pp.776-780, 2013
- [12] Toshikatsu Tanaka, Yoshimichi Ohki, Mitsukazu Ochi, Miyuki Harada and Takahiro Imai, "Enhanced Partial Discharge Resistance of Epoxy/Clay Nanocomposite Prepared by Newly Developed Organic Modification and Solubilization Methods", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 15, No. 1; pp. 81-89, February 2008

저 자 소 개



박재준 (朴材俊)

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

E-mail : jjpark@joongbu.ac.kr