'96 대한전기학회 하계학술대회 논문집 (1996. 7. 22~24)

DGEBA/MDA/SN/HQ 계에서 발생하는 교류 트리의 프랙탈성

조영신° · 심미자* · 김상욱
서울시립대학교 화학공학과, *생명과학과

Fractal Characteristics of AC Tree Grown in DGEBA/MDA/SN/HQ System

Young-Shin Cho · Mi-Ja Shim* · Sang-Wook Kim
Dept. of Chem. Eng · *Dept. of Life Sci., Seoul City Univ.

Abstract: The fractal characteristics of AC electrical tree grown in DGEBA/MDA/ SN/HQ system was investigated. As the applied voltage decreased, tree initiated after retardation. All the trees were fractals in spite of the applied voltage. Fractal dimension increased with tree length. When the tree grew slowly, the fractal dimension or the degree of treeing deterioration increased.

1. 서 론

성형 중에 발생하는 보이드와 크랙, 미처리된 복합재료 말단, 거친 도전체 표면 등에 집중된 불평등 고전계 영역으로부터 발생하는 나뭇가지 모양의 전기트리는 절연파괴의 주 요인으로 알려져 있으며, 이러한 현상을 억제하기 위하여 전기트리의 발생메카니즘 및 진전특성에 대한 연구가 널리 진행되어 왔다[1,2]. 그러나 그 형상에 대한 연구는 복잡하고 다양하여 덴드라이트, 부시, 해초상 등으로만 분류되어 왔으며, 열화진단 및 절연수명특성 평가에 있어서 전혀 고려되지 못하고 있다. 최근 들어 프랙탈개념과 화상처리장치를 이용하여 전기 트리 형상을 수학적으로 정량화 하는 연구가 시도되고 있으며, 프랙탈 차원은 자기유사성을 갖는 도형의 소수 차원으로서, 전기 트리에 의한 열화의 정도를 간접적으로 나타낼 수 있는 것으로 알려지면서, 프랙탈차원과 수명특성과의 상관관계에 대한 연구가 진행되고 있다[3-5].

본 연구에서는 사슬연장제 SN(succinonitrile)을 도입하여 기계적 특성이 크게 개선된 DGEBA/MDA/SN 계에 경화촉진제로서 HQ(hydroquinone)을 도입한 새로운 에폭시 수지 계의 프랙탈특성에 대하여 연구하였다[6]. 가속열화촉진시험을 위해 트링시험용 침전극을 삽입하고 교류고전계를 인가하여 발생하는 전기 트리를 scale covering 방법을 이용하여 프랙탈 차원을 측정하였다.

2. 실 험

2-1. 실험재료

본 연구에 사용하는 고분자 재료는 비스페놀 A계 에폭시 수지로 점도가 11,000~14,000 cps(25 ℃)이고, 당량과 분자량이 각각 188, 385인 Shell사의 Epon 828(DGEBA)이다. 경화제는 아민계로서 Fluka Chemie AG사의 MDA(4,4'-methylendianilin)를 사용하였으며, DGEBA와의 양론 비는 26 phr이다. 반응성 첨가제는 Fluka Chemie AG사의 SN (succinonitrile)을 사용하였으며, 반응촉진제는 일본 이화학공업(주)의 HQ(hydroquinone)을 사용하였다. 트링 시험용 침전극은 직경 1 ㎜ϕ, 선단각도 30°, 선단곡률반경 3 ㎛인 강철재 장침을 제작하여 사용하였다.

2-2. 시편제작

이형제로 피막된 몰드에 트링시험용 침전극을 고정시키고 80 ℃로 예열시킨 뒤 반응물들을 혼합하여 주입하고, 80 ℃에서 1.5시간 동안 경화시킨 후, 150℃에서 1시간 동안 2차 경화시켰다. 고온에서 경화된 시편이 냉각될 때 열적 수축응력에 의해 생성되는 크랙과 보이드를 최소화하기 위하여 오븐 내에서 서서히 냉각시켜 30×30×8[㎜]의 전극구성을 갖는 시편을 제작하였다. 그리고 침-평판 전극구성에 의한 불럭상 시편들을 광학현미경(100×)으로 관찰하여 보이드가 없는 시료만을 선별하여 시험하였다.

2-3. 트링열화 시험

연면방전을 방지하기 위하여 시편을 실리콘 오일에 침적하고 교류 고전압을 절연파괴시까지 인가하면서 일정한 시간간격으로 침전극 선단으로부터 상대전극 방향의 수직최단거리에서 가장 긴 트리의 길이를 측정하였다. 그리고 격자로 트리를 피복하고, 트리를 피복하는 격자들의 개수를 세어 양대수 그래프에 도시하여 직선관계인지 확인하

고, 그 기울기의 절대 값으로부터 전기 트리 형상의 복잡함의 정도 즉 열화의 정도를 나타내는 프랙탈 차원을 측정하였다[7,8].

3. 결과 및 고찰

트리의 진전특성에 대하여 살펴보기 위해 특정 전계를 인가하고 전계 인가시간에 따른 트리의 길이를 측정하여 Fig. 1에 나타내었다. 일반적으로 트리의 길이는 전극간 횡단 최단거리로 정의하는데, 인가시간에 따라 초기에는 트리가 발생되지 않고 특정시간이 경과되면 트리가 개시되고 급속히 성장하는 지연시간이 존재한다. 이 그림은 23 ℃에서 15.0, 17.5, 20.0 kV의 전압을 인가하였을 때 인가시간에 따른 트리의 길이를 나타낸 것이다. 20 kV(●)의 전압을 인가하였을 때에는 트리발생 초기에 지연시간 없이 바로 트리가 발생하여 급격히 성장하였으며, 12초 경과 후에 절연파괴 되었다. 그러나 17.5 kV(▲)의 전압을 인가한 경우에는 초기에 트리가 발생되었다가 5초 후에는 성장속도가 감소하였다. 그러나 20 초 이상 인가하였을 때, 트리의 성장속도가 급격히 증가하여 32초 후에 절연파괴되었다. 그리고 15 kV(■)의 전압을 인가한 경우에는 초기에 트리가 발생하여 성장하다가 성장속도가 둔화된 것을 알 수 있으며 시간 경과와 함께 서서히 트리의 길이가 증가하였으며, 상대전극 근처에서 급속히 성장하고 절연 파괴되었다. 그러나 너무 낮은 전계하에서는 트리가 발생되지 않는 트리발생 한계전계가 존재하며, 계속 전계를 인가하더라도 트리가 더 이상 성장하지 않는다.

Fig. 2는 15 kV의 전계를 인가하였을 때 발생된 전기 트리이다. 트리는 모두 전계의 강화정도가 가장 높은 침전극 선단에서 발생하였으며, 대향전극을 향하여 전계 진행방향으로 성장하였다. 그리고 main channel 주위에 가지가 성장하고 있으며, 이 가지는 모두main channel보다 짧다. 이처럼 단계적으로 성장하는 트리의 속성을 이용하여 통계적으로 화상처리하여, 자기유사성을 갖는 트리의 프랙탈 차원해석에 대한 연구가 널리 진행되고 있다[1-3]. 그리고 이렇게 발생된 트리형상을 크기가 다른 격자로 피복하고 트리를 포함하고 있는 격자들의 개수를 세어 Fig. 3에 도시하였다.

Fig. 2 Treeing pattern grown under 15.0 kV

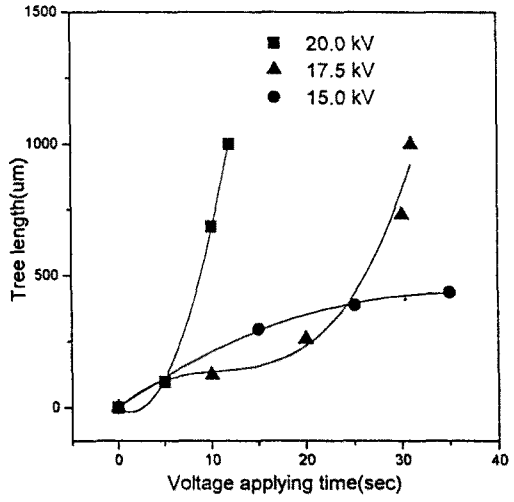

Fig. 1 Effects of the applied voltage on treeing propagation

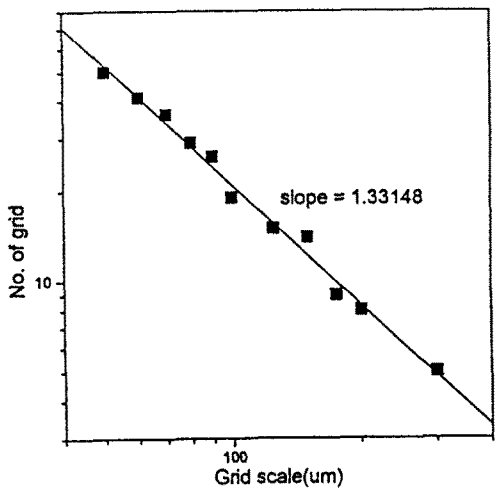

Fig. 3 Plot of grid scale(1/s) and no. of grids covering the tree on double logarithmic paper

Fig. 3에서도 알 수 있듯이 양대수 그래프상에서 양호한 직선관계를 나타내었다. 본 계에서 교류고전계하에 발생하는 전기트리는 자기유사성을 갖는 도형 즉 프랙탈임을 확인할 수 있고, 그 형상의 복잡함의 정도인 프랙탈 차원은 직선의 기울기의 절대 값으로부터 1.33148임을 알 수 있다. 이 값은 유클리드 기하에서 직선을 나타내는 1 차원보다 크고 면을 나타내는 2차원 보다 작은 소수차원을 나타내었다.

다음은 트리의 진전에 따른 프랙탈 차원을 측정한 결과이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 트리 진전 초기에는 트리길이가 증가함에 따라 프랙탈 차원은 약 1.2 정도의 낮은 값을 나타내었다. 그러나 트리의 길이가 500-600 ㎛에서는 트리가 완만하게 성장한 영역이며, 이 영역에서도 프랙탈 차원은 계속해서 증가하였다. 이것은 트리가 발생

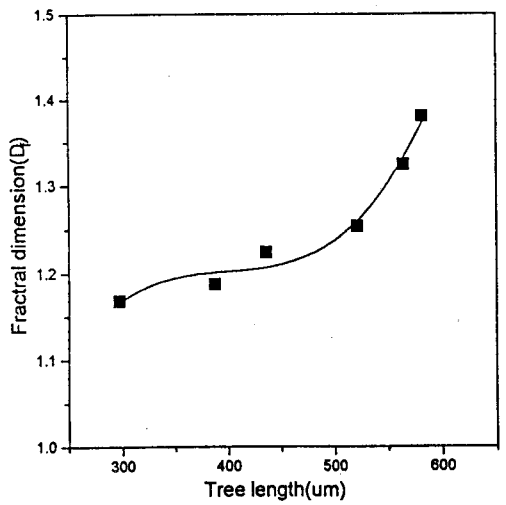

Fig. 4. Fractal dimension with tree length

된 후 트리 길이가 증가함에 따라 트리관벽이 완전히 전도성인 물질로 채워져있지 않기 때문에 트리 선단에서의 전계는 낮아지게 되므로 트리의 진전속도가 감소하게 된다. 그러나 침전극 근처에 있는 트리가지에서는 부가지가 계속해서 발생하고 성장하므로 트리의 복잡함의 정도 즉 프랙탈 차원은 계속해서 증가하였다[9,10]. 이것은 트리의 길이나 트리의 폭 등 1차원적인 정보만으로는 고분자 절연재료의 열화의 정도를 평가할 수 없음을 의미한다. 트리형상이 고려된 프랙탈 차원을 이용하여 트링열화의 정도를 평가할 수 있으므로, 수명특성이나 절연특성에서도 반드시 형상에 대한 인자 즉 복잡함의 정도를 수학적으로 나타낼 수 있는 프랙탈 차원이 반드시 고려되어져야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

DGEBA/MDA/SN/HQ 계에서 발생하는 교류트리의 프랙탈성에 대해 연구한 결론은 다음과 같다.

1. 인가전압이 낮아짐에 따라 트리개시에 시간지연이 있고 트리의 성장 속도가 저하되는 영역이 관찰되었다.
2. 15 kV를 인가하였을 때 DGEBA/MDA/SN/HQ 계에서 발생한 트리는 길이에 관계없이 모두 프랙탈이었다.
3. 프랙탈 차원은 트리의 성장과 함께 증가하였으며, 트리의 성장속도가 둔화되는 영역에서도 프랙탈 차원은 계속 증가하여 열화가 진행되는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. S. Maruyama, S. Kobayashi, and K. Kudo, *T. IEE Japan*, 114-A, 47(1994)
2. J.C. Fothergill, L.A. Dissado, and P.J.J. Sweeney, *IEEE Trans. on DEI*, 1, 474(1994)
3. J.W. Liu, *Pol. Sci. & Tech.*, 5, 479(1994)
4. M. Fujii, M. Watanabe, I. Kitani, K. Arii, and K. Yoshino, *IEEE Trans. on EI*, 26, 1159(1991)
5. S. Maruyama, S. Kobayashi, K. Kudo, *T. IEE Japan*, 113-A, 480(1993)
6. Y.S. Cho, M.J. Shim, and S.W Kim, *IUMRS-ICA-95 Seoul*, 453(1995)
7. Y.S. Cho, M.J. Shim, and S.W Kim, *ibid.*, 539(1995)
8. S.W. Cho, M.J. Shim, and S.W Kim, *Kor. J. Mater. Resear.*, 2, 191(1992)
9. A.L. Barclay, P.J. Sweeney, L.A. Dissado, G.C. Stevens, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 23, 1536(1990)
10. R. Sarathi and T.S. Ramu, *Solid State Communication*, 87, 401(1993)