

개질된 에폭시 수지계에서 트리진전과 프랙탈 차원의 특성

Characteristics of Tree Propagation & Fractal Dimension in Modified Epoxy Resin System

| | |
|-----|---------------|
| 안현수 | 서울시립대학교 화학공학과 |
| 박수길 | 충북대학교 공업화학과 |
| 이흥기 | 우석대학교 화학공학과 |
| 심미자 | 서울시립대학교 생명과학과 |
| 김상욱 | 서울시립대학교 화학공학과 |

| | |
|---------------|------------------------------------------------|
| Hyun-Soo An | Dept. of Chem. Eng., Seoul City University |
| Soo-Gil Park | Dept. of Ind. Chem., Eng., Chungbuk University |
| Hong-Ki Lee | Dept. of Chem. Eng., Woo-Suk University |
| Mi-Ja Shim | Dept. of Life Sci., Seoul City University |
| Sang-Wook Kim | Dept. of Chem. Eng., Seoul City University |

Abstract

Characteristics of tree propagation and fractal dimension in DGEBA/MDA/GN system were investigated. In the GN contents of 0 and 5 phr, tree was not produced. In the GN content of 10 phr, a reversed sigmoidal behaviour was found but in those of 15 and 20 phr, linear behaviors were found. All electrical trees possessed fractal characteristics. Fractal dimensions of epoxy resin system were almost constant with the variation of observation angles. Since dielectric breakdown occurred earlier in the GN content of 20 phr, fractal characteristics of modified epoxy resin system in a particular term couldn't be investigated.

1. 서론

공유결합을 골격으로 하는 고분자 재료는 자유전자를 방출할 가능성이 희박하기 때문에 전도성이 매우 낮으므로 전기 절연성이 우수하다. 따라서 고분자재료는 전기 절연재료로서 널리

사용되어 습식 절연재료를 대체하여 사용되어왔다. 그러나 이러한 고분자 절연재료가 장시간 고전계하에서 사용되면 절연열화가 발생하여 결국 절연파괴 즉, 절연사고가 일어나 큰 재해를 발생시킨다. 따라서 절연특성이 우수한 절연재

료에 대한 요구가 급증함에 따라 그에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다.^{1~3)}

절연재료에 대한 연구 중 절연열화의 요인의 하나인 전기 트리의 발생 및 진전 메카니즘에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그리고 3차원 공간적으로 성장해가는 트리형상은 매우 복잡하고 내·외부 많은 요인들에 의해 영향을 받기 때문에 해석적으로 설명하기 어려우나 자기유사성을 지닌 도형으로 정의되는 프랙탈이라는 개념을 도입하여 정량적으로 트리형상에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁴⁾

본 연구에서는 접착성, 치수안정성, 내화학성 등이 우수하며 전기 절연성이 매우 뛰어난 에폭시 수지를 사용하였다. 에폭시 수지의 단점인 내충격성을 향상시키기 위하여 반응성 첨가제로서 nitrile계인 glutaronitrile(GN)을 사용하였다. 그리고 트렁열화 현상을 모의해석하기 위하여 침/평판 전극구조를 갖는 GN 함량에 따른 에폭시 수지계의 시편을 제작하고 전계를 인가하여 발생하는 트리진전 특성과 프랙탈차원의 특성을 연구하였다.^{4,5)}

2. 실험

2.1 실험 재료

본 연구에 사용된 에폭시 수지는 Shell 사의 Epon 828 grade로 당량(EEW)이 188이고 분자량이 385인 diglycidyl ether of bisphenol A(DGEBA)를 사용하였다. 경화제는 내열성이 우수한 aromatic amine 계로 4,4'-methylene dianiline(MDA)를 사용하였다. 반응성 첨가제로 사용된 GN이 첨가되어 주사슬이 확장됨으로써 내충격성이 크게 향상되었다. 침전극은 선단의 곡률반경이 5 μm 이고 각도가 30°이며 길이가 7 cm인 장침을 사용하였다.

2.2 실험 방법

침전극 선단과 평판 전극의 거리를 1 mm로 하

여 몰드에 고정시킨 후 반응혼합물로 주입하였다.⁴⁾ DGEBA, MDA(30 phr) 그리고 GN의 함량을 변화시킨 반응혼합물을 80°C에서 1.5시간 동안 1차 경화시켰다. 확산제한된 반응을 더 진행시키기 위하여 150°C에서 1시간 동안 2차 경화시켰다. 그리고 고온에서 경화된 시편이 냉각될 때 금속침전극과 에폭시 수지의 열팽창 계수 차이로 인해 발생하는 침전극 선단의 보이드를 막기 위하여 실온까지 -1 °C/min로 서냉하였다. 냉각된 시편을 30×30×1 mm의 크기로 규격화하였다. GN의 함량에 따른 각 시편에 주파수가 60 Hz인 교류 고전압 발생장치를 이용하여 일정 전압을 인가하고 발생된 트리는 화상처리장치를 이용하여 관찰하였다. Box counting법을 통해 트리의 프랙탈 차원을 구하였다.⁴⁾ 고전계 인가 시 연면방전을 방지하기 위하여 실리콘 오일을 이용한 유증과피 실험을 하였다.

3. 결과 및 고찰

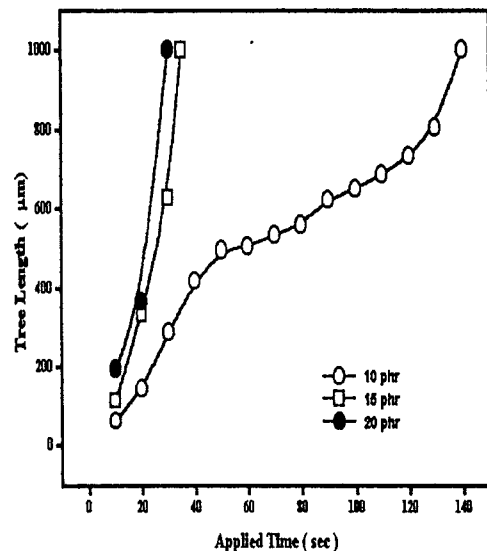


Fig. 1. Electrical tree propagation of DGEBA/MDA/GN system with different GN contents.

Fig. 1은 DGEBA/MDA/GN 계에서 GN 함량에 따라 10 kV의 전압을 인가하였을 때 인가 시간에 따른 전기트리의 진전특성을 나타내었다. GN의 함량이 0 phr 일때에는 장시간 동안 10 kV의 전압을 인가하였으나 트리가 생성되지 않았으며, 5 phr 일때에는 초기에 트리가 약간 성장하였으나 일정시간 후 트리성장이 중지되었다. GN의 함량이 20, 15 그리고 10 phr 일때에는 절연파괴에 이르는 시간이 각각 20초, 35초 그리고 143초로 GN의 함량이 증가함에 따라 감소하였다. 10 phr이 첨가된 계에서 발생한 트리는 시간이 흐름에 따라 역 S자 형태로 성장하였으며 15 phr과 20 phr에서는 트리가 거의 직선적으로 성장하였다. 이는 GN의 함량이 증가함에 따라 고분자 주사슬의 길이가 확장되어 침전극으로부터 주입된 전자가 시료내부에 쉽게 트랩될 수 있기 때문에 공간전하를 형성하기 용이해지므로 트리생성이 빨라지고 진전속도가 증가하여 절연파괴에 이르는 시간이 짧아진 것으로 사료된다.

Fig. 2는 DGEBA/MDA/GN(20 phr)에서 10 kV의 전압을 10 초와 20 초동안 인가하였을 때 성장된 트리를 화상처리장치로 관찰하고 box counting법을 이용하여 프랙탈성을 고찰한 것이다. 인가시간에 관계없이 양대수 좌표에서 피복체 크기(pixel)와 피복된 트리의 개수의 관계가 모두 직선을 나타내었다. 따라서 성장된 트리는 프랙탈성이 있음이 확인되었으며, 프랙탈 차원은 10초와 20초에서 각각 1.30과 1.35이다.⁴⁾

실제 트리는 3차원 형상을 지니고 있으나 화상처리장치를 통한 형상관찰은 2차원으로 투영된 형상에 대한 연구이다. 따라서 2차원 투영상으로부터 얻은 프랙탈 차원이 관찰각도에 의존성할 가능성이 있으므로 이에 대한 고찰이 필요하다. Fig. 3은 12.5 kV의 전압을 40초간 인가하였을 때 관찰각도에 따른 프랙탈 차원의 변화를 나타내었다. 프랙탈 차원은 관찰각도에 따라

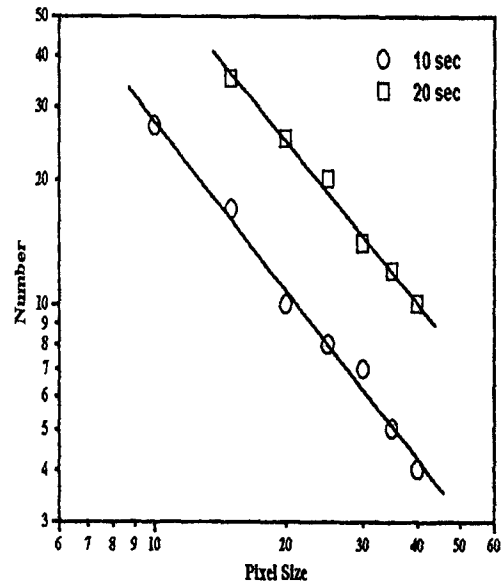


Fig. 2. Fractal dimension of DGEBA/MDA/GN (20 phr) with the different applied time by scale covering method.

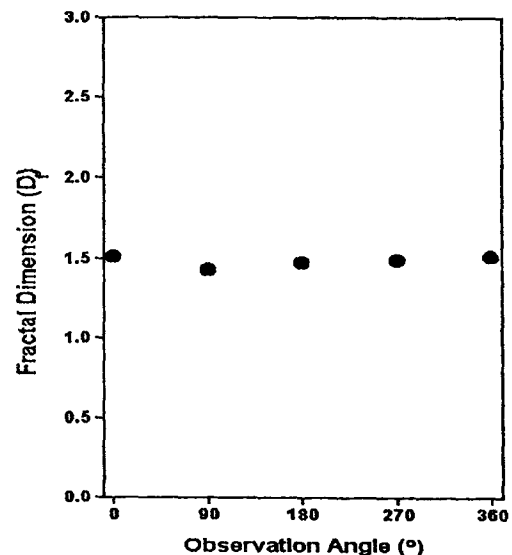


Fig. 3. Fractal dimension of DGEBA/MDA/GN system with the variation of observation angles.

1.5로 거의 일정한 값을 나타내었다. 따라서 트리형상 관찰에 있어서, 관찰각도에 관계없이 모두 프랙탈성을 갖고 있으며 그 값은 일정하므로 실험결과에 있어서 신뢰성이 있다고 할 수 있다.

10 kV의 전압을 20초간 인가하였을 때, GN 함량에 따른 프랙탈 차원은 10 phr과 15 phr에서는 거의 1.0 이었으나 20 phr에서는 1.35를 나타내었다. 그러나 시간이 경과함에 따라 10 phr과 15 phr에서는 모두 프랙탈 차원이 증가하여 각각 1.61과 1.37를 나타내었으며, 20 phr에서는 절연파괴가 빨리 발생하여 일정시간 구간에서는 비교할 수 없었다.

4. 결 론

Nitrile계 반응성 첨가제 GN으로 개질된 에폭시 수지계에서 트리 전진특성과 프랙탈 차원 특성에 대하여 연구하였다. GN의 함량이 0 phr과 5 phr에서는 트리가 거의 생성되지 않았으며, 10 phr 이후 GN 함량이 증가함에 따라 트리전진속도는 증가하였다. 모든 트리는 프랙탈성을 지녔으며 관찰각도에 의존하지 않고 거의 일정

한 값을 나타내었다. GN의 함량이 20 phr 일 때에는 절연파괴가 너무 빨리 발생하기 때문에 일정시간 구간 내에서 에폭시 수지계의 프랙탈 차원의 특성은 비교할 수가 없었다.

참고문헌

1. P. P. Budenstein, "On the Mechanism of Dielectric Breakdown of Solids". *IEEE Trans. on Electr. Insul.*, **EI-15**, 225(1980)
2. E. J. McMahon, "A Tutorial on Treeing", *ibid.*, **EI-13**, 277(1978)
3. H. J. Wiesmann and H. R. Zeller, "A fractal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics", *J. Appl. Phys.*, **60**, 1770(1986)
4. Y. S. Cho, M. J. Shim and S. W. Kim, "Fractal Characteristics of Treeing Deterioration Phenomena in DGEBA/MDA/SN System", *J. of Kor. Ind., & Eng. Chem.*, **6**, 1150(1995)
5. H. Lee, "Handbook of epoxy resins", McGraw-Hill, 1-5, New-York(1980)