

도체와 절연체 계면에서의 전기트링 현상

조영신, 심미자*, 김상욱

서울시립대학교 화학공학과, *서울시립대학교 생명과학과

Electrical Treeing Phenomena at the Interface of Conductor and Insulator

Y. S. Cho, M. J. Shim*, and S. W. Kim

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Seoul City Univ., Seoul 130-743, Korea

*Dept. of Life Sci., College of Liberal Arts and Natural Sci., Seoul City Univ., Seoul 130-743, Korea

Abstract

This paper describes a study of electrical tree growth in DGEBA/MDA/SN system subjected to ac high electric field. The dielectric breakdown process, which consists of tree initiation, tree propagation and the complete puncture of the system was investigated. Dielectric breakdown always initiated from the needle tip where the electric field reinforcement is the highest. Higher temperature and voltage accelerated the tree growth and reduced the time to breakdown.

1. 서 론

절연 재료에서는 열, 광, 습기, 화학물질 및 전기적 또는 기계적 스트레스의 복합적인 작용에 의하여 장시간에 걸쳐 절연특성이 저하되고 결국 절연 파괴에 이르는 열화 현상이 발생한다¹⁾. 절연체 중의 보이드, 균열, 혹은 수지와 재료의 이물질 간의 박리 외에도 표면처리가 불안정한 매립금구와 도체 표면에서의 침상 돌기에 고전계가 인가되었을 때 불평등 전계가 형성되어 전계가 집중된다. 이러한 응력집중현상이 재료파괴의 주요한 원인중 하나이며 특히 전기적 응력이 집중되었을 때 부분 방전 현상이 발생하여 재료가 침식되고 저 분자량의 기체생성물이 생긴다. 이 때 고분자 사슬이 축차적으로 절단되어 생성된 도관(channel)의 선단은 계속

불평등 전계 하에 놓이게 되고 연속적인 트리 개시 프로세스에 의해 대향전극을 향해서 전계 진행방향으로 전기트리(electrical tree)라고 하는 절연파괴 형상이 진전되게 된다^{1, 2)}. 장시간 동안 고전계 하에 놓여있는 전기 절연체에서는 이와 같은 트링에 의한 열화가 절연 파괴의 주 요인으로 주목되고 있으며, 이러한 트링 열화의 현상을 고찰하는 것은 기기의 수명 진단과 안정성 보장에 있어서 매우 중요하다.

이러한 전기트리의 발생과 진전 메커니즘에 대한 연구는 학문적인 관심에서 뿐만 아니라, 트리를 억제시키기 위한 근본적인 대책 마련을 위하여 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 트링 현상에 대한 연구는 그 형상이 복잡하고 다양하여 아직도 미흡하다. 본 연구에서는 내 충격성을 보완하

기 위해 사슬 연장제로 작용하는 나이트릴계 반응성 첨가제 SN을 도입한 DGEBA(diglycidyl ether of bisphenol A)-MDA(4,4'-methylenedianiline)-SN(succinonitrile)계^{3, 4)}의 절연파괴 특성을 인가 전압과 분위기 온도를 달리하여 조사하고 제반 성질과 비교 고찰하여 절연 열화 메카니즘을 추적하여 절연 특성이 우수한 에폭시 수지계 전기 절연재료를 설계하고자 한다.

2. 실험 방법

2. 1. 실험재료

실험에 사용한 에폭시 수지는 비스페놀 A계 에폭시 수지로 점도가 11,000~14,000cps(25°C)이고, 당량(EW)과 분자량이 각각 188, 385인 Shell사의 Epon 828(DGEBA)이다. 경화제는 아민계 경화제로서 Fluka Chemie AG사의 MDA(4,4'-methylenedianiline)를 사용하였으며 DGEBA와의 양론비는 26phr(additive parts per one hundred resins)이다. 반응성 첨가제는 mp가 46~48°C인 Fluka Chemie AG사의 SN(succinonitrile)을 사용하였으며, 이들의 화학 구조식을 Fig. 1에 나타내었다.

트링시험용 칩 전극은 직경 1mmφ, 선단 각도 30°, 선단 곡률반경 3μm, 길이 90mm인 강철재의 장침(성광산업 제작)을 사용하였다.

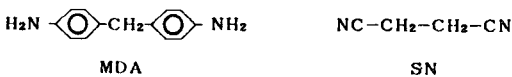
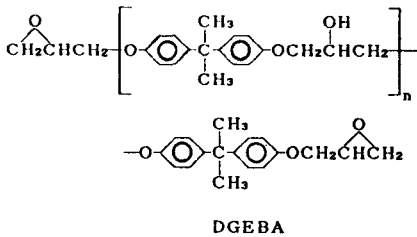


Fig. 1. Chemical structures of DGEBA, MDA and SN.

2. 2. 실험 기구

본 실험에 사용된 절연 파괴 시험장비는 input 220V, output 0~60kV, 500VA, 60Hz의 고전압 시험기(high voltage testing equipment)로 그 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

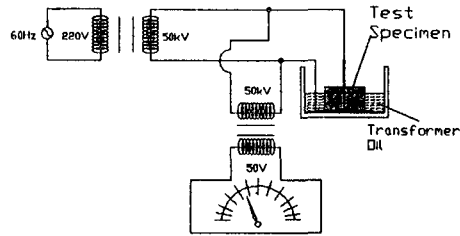


Fig. 2. Schematic diagram of AC dielectric breakdown test set.

2. 3. 시편제작 및 시험

전극간 간격을 달리하여 이형제로 피막된 몰드에 칩전극을 삽입시켜 고정시킨 뒤 반응물들을 전처리 과정을 거쳐 혼합하여 주입하였다. 너무 급격히 겔화 반응이 진행되면 분자들의 회전 및 전이의 자유도가 작아져 주변 분자와 결합하는 기회가 줄어들게 되고, 또한 가교되는 분자들도 적어지므로 분자간의 branch network가 고차 구조화 되지 않아 불안정한 화합물이 되기 쉽다⁵⁾.

따라서 80°C에서 1.5시간 동안 1차 경화(30분간 진공 탈포시간 포함)시킨 뒤 확산 제한된 반응을 더 진행시키기 위하여 유리 전이온도 이상의 온도인 150°C에서 1시간 동안 2차 경화시켰다. 고온에서 경화된 시편의 냉각시 열팽창계수 차이에 의해 발생하는 보이드와 기계적 응력을 최소화 하기 위하여 오븐 내에서 실온까지 -3°C/min의 냉각속도로 서냉하였다.

그리고 시편 바닥에 평판 접지전극용 알루미늄 박막을 부착하고 리드선을 연결하였다. 칩전극과 함께 주형된 블럭상 시편의 형상을 Fig. 3에 나타내었다.

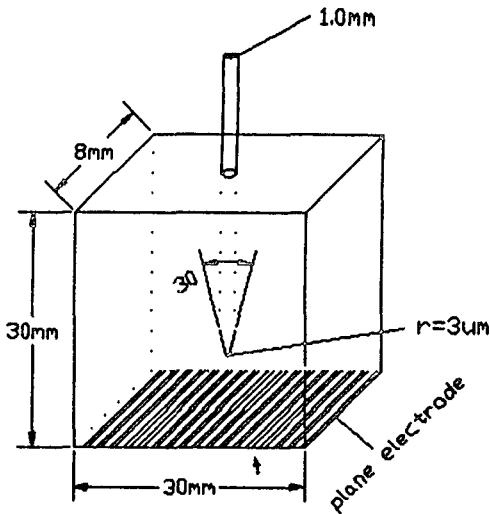


Fig. 3. AC dielectric breakdown test specimen.

절연 파괴시험을 할 때에는 연면 방전을 방지하고 시편의 균일한 온도를 유지하기 위하여 특정한 온도(25°C, 100°C)로 유지되는 절연유(silicon oil)에 20분간 침적시킨 뒤 전로파괴에 이르기까지 전압을 인가하고, 일정한 시간 간격으로 트리의 길이를 현미경(100×)으로 측정하여 그 형상을 관찰하였다. 그리고 제반성질과 비교·고찰하여 열과 전기적 응력에 의한 복합 절연파괴 메카니즘을 추적하였다.

3. 결과 및 고찰

절연체에 국부적으로 전계가 강하게 인가되면 수지상의 절연 파괴로가 형성되고 그것이 성장하여 결국 전로 파괴에 이르는 현상이 나타나며 이것을 전기트링에 의한 절연파괴라고 한다. 이와 같은 프로세스로 절연체의 성능이 저하되는 것을 트링 열화라고 하며 절연 파괴의 주 요인으로 보고되어지고 있다^{1, 2)}.

트링 현상에는 유도 기간인 트리 발생과정과 트리 전진과정이 있다. 트리가 발생할 때 까지의 시간을 트리 개시시간이라고 하며 피트가 형성되기 전까지는 거시적으로 아무런 변화도 관찰되지 않는

다⁶⁾. 그러나 일단 재료가 침식되어 사슬이 절단되면 기체상의 탄화생성물이 사슬절단으로 생성된 통로를 가득 채우게 되며 새까맣게 탄화 흔적을 남기게 된다. 그런데 고체 절연체에서는 열화원이 제거되어도 이러한 절연열화 현상은 없어지지 않으며 파괴된 절연체는 다시 회복되지 않는 단점을 가지고 있다. 따라서 계속되는 전압 인가로 발생하는 트리는 절연체의 수명과 직접 관련되는 절연 파괴의 선 단계 현상 중 하나로 여러가지 조건 변화에 따른 형상 변화와 진전 특성을 관찰하는 것은 내트링성이 우수한 전기절연체를 설계하는 데 있어서 매우 중요하다.

먼저 25°C에서 10kV의 전압을 인가하였을 때 발생하는 트리의 형상을 현미경을 통하여 관찰하였다. 반응성 첨가제 SN이 첨가되어 사슬길이가 연장됨에⁷⁾ 따라 침 전극과 고온에서 경화된 DGEBA-MDA-SN계 사이의 열적 팽창계수의 차이가 작아져 냉각시 부피축소에 의한 기계적 응력으로 발생하는 크랙과 보이드는 훨씬 적게 나타났다. 이러한 열팽창 계수의 차이에 의한 보이드의 생성과 계면 박리 현상을 억제하기 위해 산화 알루미늄 등을 충전제로 첨가하기도 하지만⁸⁾ 본 연구에서는 순수 에폭시 수지계 그 자체에 대해서만 고찰하였다. 그런데 침전극 선단에서는 열팽창 계수 차이에 의해 발생하는 보이드와 접촉되어 있던 계면이 성형 수축으로 분리되면서 생기는 크랙 현상은 피할 수 없는 현상이다. 따라서 침전극 선단에 크랙과 보이드를 형성하게 되고 이 크랙이나 보이드가 기체 방전이 일어날 정도로 충분히 공간적인 넓이를 가졌을 때 보이드 방전 현상이 발생된다. 부분적인 코로나(corona) 방전이 일어나면 오존이나 산화질소가 생겨 금속을 부식시키게 되며 그 곳에 고 전계가 집중되어 수지계의 내 표면이 침식되어 Fig. 4와 같이 침전극 선단에서 무수한 피트가 형성되고 성장하여 가장 큰 피트 선단으로부터 트리가 발생된다. 그리고 대향전극을 향해서 트리가 성장하게 된다¹⁾. 이러한 현상을 본질적으로 억제하기 위하여

도전체의 표면처리시 침상의 돌기부분이 생기지 않도록 주의를 하여야 하며 절연체 제작시 불순물이나 첨예한 도전성 분말이 혼입되지 않도록 공정을 설계하여야 한다. 그리고 보이드가 생성되거나 기포가 발생되지 않도록 최적의 경화조건에 따라 제작을 해야 하며 휘발성 생성물에 의한 기포가 생성되지 않는 절연재료를 설계 개발하여야 한다.

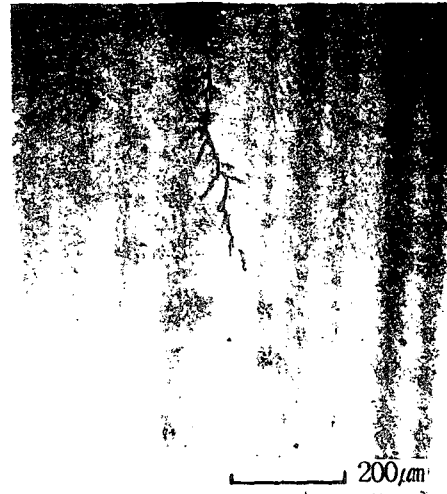


Fig. 4. Tree initiation from the tip of needle electrode.

일반적으로 트리 개시는 성장된 피트의 길이가 100 μm 가 되었을 때로 정의하며 이때까지 걸린 시간을 트리 개시시간, 유도기간 또는 잠복기간이라고 한다. 그리고 그 때의 전압을 트리 개시전압이라고 한다. 전기 화학적 열화를 잘 묘사해 주는 전하 주입 추출 모델⁹⁾에 따르면 기체 방전이 일어날 정도로 충분한 공간이 형성되면 전계가 강화된 침전극 선단으로부터 추출된 전자가 가속되어 재료를 열화시키고 또한 추출된 전하가 재료 깊숙히 포획되어 형성된 새로운 공간전하로 인해 침전극 선단의 전계가 더욱 강화되어 최고 전계강도가 기계적 탄성과파 한계치인 트리 개시 전계를 넘어서게 되어 전자사태에 의한 트리가 개시된다. 이렇게 형성된 트리의 내벽은 탄화에 의해 생성된 전도성 물질로 가득 채워지게 되며 트리 선단은 침전극과 마

찬가지로 전계가 항상 집중되어 불평등 전계를 형성하게 된다. 따라서 트리 선단에서 전계가 완화되고 완화된 공간전하 주위로 Fig. 5와 같이 트리가 분기되어 성장하게 된다.

이렇게 성장된 트리는 분위기 온도와 인가된 전압에 따라서 그 형상이 달라지는데 경화된 분자상의 segment가 마이크로 브라운 운동을 개시하는



(a)



(b)

Fig. 5. Tree propagation in DGEBA/MDA/SN system under 10kV at 25°C (a) and 100°C (b).

유리 전이온도를 기점으로 해서 트리의 형상이 크게 변화된다. Fig. 5(b)에서 알 수 있듯이 100°C에서 발생하여 성장한 트리는 가지 밀도가 높고 대향 전극과의 수직인 종축방향 뿐만 아니라 전계 진행방향을 따라서 횡축으로도 넓게 트리의 가지가 성장하고 있다. 이러한 형상의 변화는 예폭시 수지의 분자 운동과 밀접하게 관련되어 있다. 완고한 예폭시 수지가 온도가 높아짐에 따라 분자쇄의 운동이 용이해져 전계가 집중되는 침전극 선단에서 넓게 전계 완화 영역이 확대되어 트리의 가지가 쉽게 발생되고 성장한다¹⁰⁾. 그리고 그 진전 속도도 더욱 빨라진다. 따라서 저온에서 발생한 트리의 복잡함의 정도는 더 크고 이때 재료가 받게 되는 총 열화의 정도도 계속 증가한다.

이렇게 대향 전극을 향하여 전계 진행방향으로 성장하는 트리가 대향전극 가까이에 이르렀을 때 트리의 성장속도가 급격히 증가하고 관통되는 순간 다량의 전하가 순간적으로 방출되며 동시에 부채상의 크랙이 발생한다¹¹⁾. 이것은 예폭시 수지가 완고하게 취성을 나타내기 때문에 전로 파괴시의 방전 에너지에 의해 생기는 충격파로 인해 크랙이 발생한 것으로 생각된다. 그리고 파괴로는 발생한 열에 의하여 새까맣게 탄화되었으며 인가 시간에 따라 전로 파괴로의 직경은 Fig. 6과 같이 급격히 증가하였다.



Fig. 6. Dielectric breakdown phenomena in DGEBA/MDA/SN system under 10kV at 25°C.

위와 같은 일련의 절연파괴 경로는 전기장 진행 방향으로 침 선단에서부터 모두 시작하였다. 그리고 고온 영역에서의 초기의 트리 형상은 저온에서의 그것 보다 가지밀도가 높은 수지상의 트리형상을 나타내었다. 그러나 일반적으로 폴리 에틸렌계에서 주로 나타나는 부시상이나 해초상의 트리는 고온 영역에서도 관찰되지 않았다.

다음은 인가된 전압과 분위기 온도가 트리의 발생과 진전속도 그리고 절연 파괴시 까지 걸리는 시간에 대하여 측정하였다. 25°C와 100°C에서 인가 전압을 달리하여 축차적으로 트리를 관찰하고 시간에 따라 그 길이를 Fig. 7(a, b)과 Fig. 8(a, b)에 나타내었다.

절연 재료에 전압을 인가하면 어느 전계강도 이상에서는 특정한 시간이 경과된 후 절연 파괴를 일으키고, 전압을 상승시키면 절연 파괴에 이르는 시간이 짧아지는 게 일반적이다.

먼저 25°C에서 5kV의 전압을 인가하였을 경우 (Fig. 7(a))를 살펴보면 유도기간 동안 트리 개시선 단계인 100 μ m 이내의 피트가 형성되고 성장하여 트리가 개시되었으며 초기에는 트리가 급격히 성장하였다. 그러나 250 μ m 정도 성장한 후에는 인가 시간을 증가시켜도 더 이상 트리의 길이가 증가되지 않고 250 μ m 정도의 길이로 포화되었다. 이것은 발생한 트리 선단의 불평등 전계가 트리개시 전계에 이르지 못하여 기계적인 탄성파괴 한계치에 이르지 못한 것으로 생각되며 또한, 트리 내벽이 완전히 전도성 물질로 채워져 있지 않음을 시사하고 있다. 따라서 특정 전압 이하에서는 트리가 발생되어도 절연 파괴에 이르지 않는 임계 전계가 존재하며 이것은 전압-수명 특성 곡선에서 하한으로 나타나게 된다¹¹⁾. 그리고 계속해서 전압을 인가하게 되면 트리 내부의 기체에서 기중 방전 현상이 계속되어 트리의 내벽이 계속 침식되고 트리의 직경은 증가한다. 따라서 재료가 받게되는 총 열화 정도는 트리의 성장과는 관계 없이 인가 시간에 따라 계속해서 증가한다.

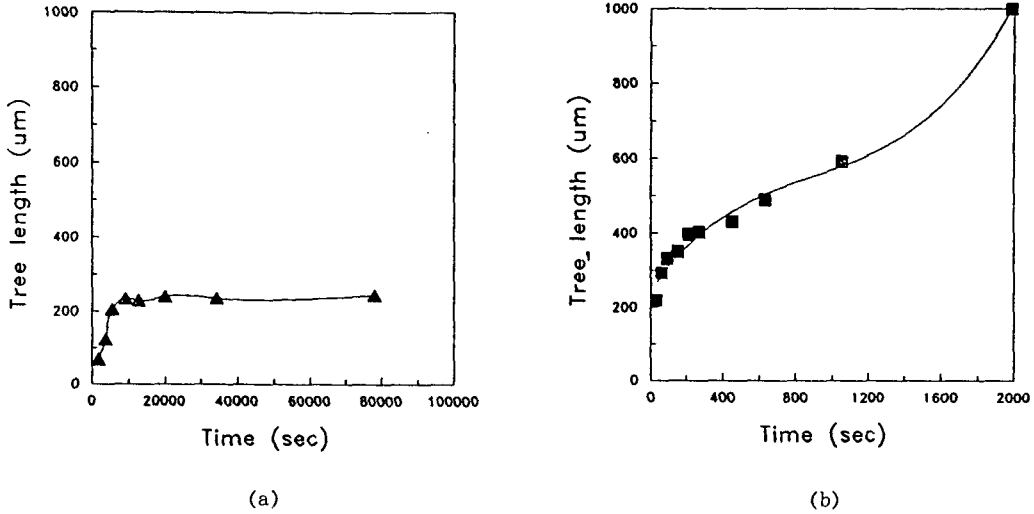


Fig. 7. Tree length vs. applied voltage at 25°C.
(a) 5kV, (b) 10kV

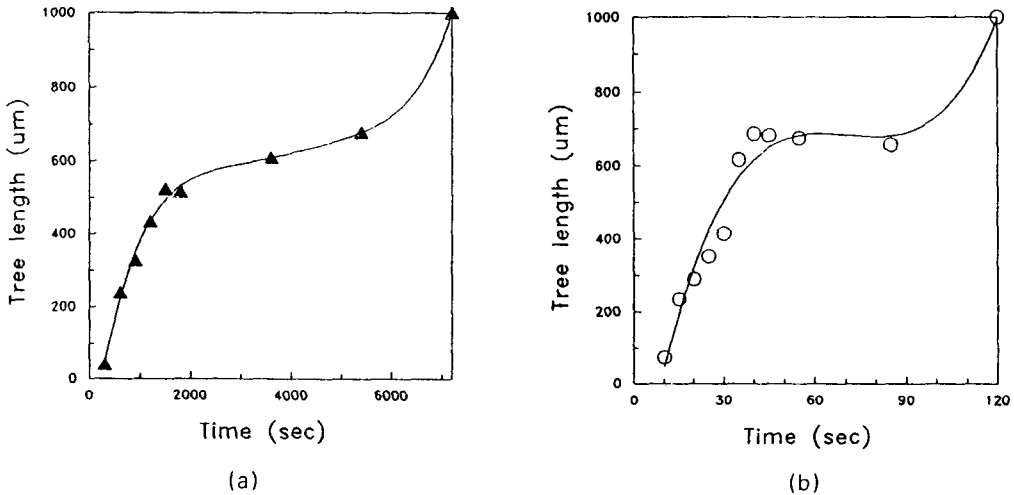


Fig. 8. Tree length vs. applied voltage at 100°C.
(a) 5kV, (b) 10kV

그러나 5kV의 전압을 인가하였을 경우와는 달리 10kV의 전압을 인가하였을 경우(Fig. 7(b))에는 잠복기간을 거치지 않고 트리가 발생되었다. 그리고 약 400 μm 정도의 길이까지 급성장한 후 600 μm 정도가 될 때까지는 그 성장 속도가 감소하였다. 그리고 대향전극에 가까워지면서 트리 성장속도가 급격히 증가하여 2000초가 경과된 후에

전로 파괴되었다. 다음은 유리 전이온도 이상의 온도인 100°C에서 5kV와 10kV의 전압을 인가한 경우이다.

먼저 5kV(Fig. 8(a))의 전압을 인가한 경우를 살펴보면 25°C에서와는 달리 300초 정도 잠복기간 동안 피트가 형성된 후 트리가 개시되고 침전극 선단의 전계가 트리개시 전계를 넘어서게 되므

로 트리가 급속히 성장하고 있다. 그리고 25°C 에서 성장한 트리와 마찬가지로 550 μ m까지 트리가 급속히 성장된 후 성장 속도가 둔화되어 700 μ m 정도 까지 서서히 진전되고 다시 대향전극에 이르러 트리 성장속도가 급격히 증가하였다. 또한 10kV의 전압을 인가하였을 경우(Fig. 8(b))에도 마찬가지로 초기에 트리가 생성된후 성장이 둔화되었다가 대향전극에 이르러 급속히 성장하는 전형적인 성장곡선을 나타내고 있으며, 인가 전압이 높아짐에 따라 절연이 파괴되는 즉 트리가 전극간의 거리인 1000 μ m까지 성장하는 데 걸리는 시간은 짧아졌다.

$$E_{\max} = \frac{2V}{\gamma \ln(1+4d/\gamma)} \quad \text{----- (1)}$$

이것은 침전극 선단의 전계 강도를 개략적으로 구할 수 있는 Mason식(1)으로 부터도 알 수 있듯이 인가전압이 2배가 되었을 경우 회전 포물 곡면으로 가정한 침전극 선단에서의 최대 전계도 역시 2배로 강화되어 트리의 발생이 용이해지고 트리의 성장속도가 빨라져서 전로 파괴시 까지 걸리는 시간 즉 수명이 짧아진 것으로 생각된다.

4. 결 론

침-평판 전극구성에 의한 DGEBA-MDA-SN 계에 교류 고전계를 인가하였을 때 나타나는 트링 열화 현상에 대하여 인가 전압과 분위기 온도를 달리하여 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 트링 열화 현상은 전계가 집중되어 강화된 침전극 선단으로 부터 개시되었다.

2) 분위기 온도와 인가된 전압이 높을 수록 트리의 성장 속도는 증가하였으며 전로 파괴시 까지 걸리는 시간은 감소하였다.

3) 특정 전압 이하에서는 트리가 발생되어도 성장되지 않고 절연이 파괴되지 않아 전압-수명 특성에서 하한으로 나타나는 파괴 임계전압이 관찰되

었다.

4) 분위기 온도가 높을 수록 트리의 가지밀도가 높고 인가된 시간이 길 수록 트리가 진전 되지 않더라도 재료가 받는 총 열화의 정도는 계속 증가하였다.

감 사

본 연구는 선경그룹의 연구비 지원에 의하여 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 家田正之: 電氣 電子材料ハンドブック, 朝倉書店, Tokyo (1987) 42
2. T. Mizutani : T. IEE Japan, 112-A (1992) 166
3. S. W. Cho, M. J. Shim, and S. W. Kim : J. Korean Mater. Res., 2 (1992) 191
4. M. J. Shim and S. W. Kim : J. Korean Ind. and Eng. Chem., 5 (1992) 517
5. H. Lee and K. Neville : Handbook of Epoxy Resins, McGraw-Hill Book Co., New York (1967) 5-1
6. R. J. Densley : IEEE Trans. Electr. Insul, EI-14 (1979) 148
7. S. W. Cho, M. J. Shim, and S. W. Kim J. Korean Mater. Res., 2 (1992) 257
8. S. Rasikawan, H. Ishihara, and N. Shimizu : T. IEE Japan, 112-A (1992) 224
9. M. Fukuma, M. Nagao, and M. Kosaki : ibid., 114-A (1994) 230
10. H. Fujii and E. Hirasawa : ibid., 107-A (1987) 532
11. K. Nakanishi and S. Hirabayashi : IEEE Trans. on Electr. Insul., EI-14 (1979) 306
12. J. H. Mason : Proc. IEE, 102C (1955) 254