論 文
37~6~10

熱 硬化性 Epoxy 樹脂의 2次 硬化條件에 따른 Treeing現象에 관한 硏究

A Study on the Treeing Phenomenon due to the Post-Cure Conditions of the Thermo-Setting Epoxy Resin

曺 井 守*·金 鍾 經**·白 先 換§·李 鍾 浩§§
(Jung-Soo Cho · Jong-Kyung Kim · Sun-Whan Baek · Jong-Ho Lee)

요 약

본 논문에서는 열경화성 에폭시 수지의 2차 경화조건에 따른 에폭시 수지의 내부 물리적특성 변화와 초기 tree발생전압, tree의 진전 및 treeing 파괴전압 특성과의 상관관계를 규명하였다.

실험결과, 본 연구에 사용되어진 내열성 에폭시 수지의 50% tree 발생전압, tree 진전특성 및 treeing 절연파괴전압특성이 최적으로 나타나는 경화조건은 100℃에서 15시간이며, 이러한 결과는 에폭시 수지의 내부 분자결합상태 및 입체적 가교상태와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 또한, 2차 경화조건 및 2차 경화 후 냉각방법은 tree발생, tree진전 및 treeing 파괴전압특성에 현저히 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그리고 주위온도 변화에 따른 tree의 진전특성은 에폭시 수지의 연화점과 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

Abstract-This paper is to investigate relationships between tree inception voltage, tree extension or treeing breakdown voltage and physical characteristics changing as parameter of the post-cured conditions of thermo-setting epoxy resin. According to the results in this paper, the optimal tree inception voltage and treeing breakdown voltage of the samples are obtained for the sample post-cured for 15 hours at 100℃. It can be noticed that these results are closely related with the state of interior molecule coupling and three-dimen sional cross-linked of thermo-setting epoxy resin. And tree inception, tree extension and treeing breakdown of the samples are affected significantly on the post-cured conditions and the cooling method after post-cured of thermo-setting epoxy resin. Moreover, the tree extension by ambient temperature are closely related with softening temperature of thermo-setting epoxy resin.

1. 서 론

최근 고분자 절연물중 점도, 경화시의 수축, 경화의 용이성 및 경화후의 전기적, 열적, 화학적측면에서 우수한 성질을 가지고 있는 에폭시 수지가 각종 전기기기의 절연물, 즉 고전압기기에 있어 가스 절연변압기, 고체 절연 개폐장치, 회전기 권선의 절연 등에 널리 이용되고 있다. 한편, 전기기기의 고압화,

*正 會 員 : 釜山大 工大 電氣工學科 敎授 · 工博
**正 會 員 : 釜山工業大 電氣工學科 助敎授
§正 會 員 : 釜山大 大學院 電氣工學科 碩士課程
§§正 會 員 : 釜山大 工大 電氣工學科 講師 · 工博
接受日字 : 1988年 3月 16日
1次修正 : 1988年 5月 14日

소형화와 더불어 전기기기의 절연설계가 더욱 엄격해지고 있으므로 전기 절연물의 전기적 절연파괴 기구를 명확히 규명하는 것이 더욱 요구되고 있다.

유기 고분자 절연재료에 있어 tree 절연파괴현상은 D.W. Kitchin과 O.S. Pratt[1]가 폴리에틸렌 케이블의 실험중에 발견하여 발표한 후, 많은 연구가 진행되어 tree 발생기구에 관한 각종 기구가 제시되어 왔다.[2)~6)] 그러나 tree 발생기구에 있어서 주위의 작용인자가 많기 때문에 아직까지 세계의 각 산업체와 학계에서 많은 연구가 진행중에 있다.

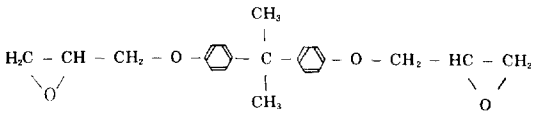
에폭시 수지의 tree 절연파괴현상에 관한 연구는 구-평판전극 및 평판-평판전극 구성으로 행한 실험이 많고,[7)~9)] 최근 침-평판전극 구성으로 인한 불평등전계하의 tree 발생기구 및 절연파괴현상을 연구한 결과가 많이 발표되고 있다.[3),10)~14)] 특히, 열경화성 수지인 에폭시 수지는 주제 및 경화제의 혼합비와 경화조건등이 전기적 절연강도 및 tree 발생등에 많은 영향을 미치고 있으므로 에폭시 수지의 주제 및 경화제의 혼합비 변화와 경화조건의 변화에 따른 tree 절연파괴현상에 관한 연구가 더욱 행해져야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 케이블의 헤드몰드, 대형 회전기 및 발전기 권선의 절연용으로 주로 사용되고 있는 열경화성 에폭시 수지의 경화조건에 따른 tree 절연파괴현상을 에폭시 수지의 경화시의 물리적특성 변화중심으로 규명하기 위하여 에폭시 수지의 후기 경화조건을 달리했을 때, 에폭시 수지의 물리적특성 -연화점(softening temp.), IR(infrafed spectrum), 밀도변화-을 측정하고, 나아가 침-평판전극 구성으로 후기 경화시간에 따른 50% 초기 tree 발생전압 단계승압법(3kV/sec)에 의한 순시 tree 진전특성을 측정하여 에폭시 수지의 물리적특성 변화와 비교 검토하여 에폭시 수지의 tree 절연파괴현상을 규명하였다.

한편, 열경화성 에폭시 수지는 후기 경화후의 냉각조건에 따라 물리적 성질이 변화되고, 따라서 전기적 및 기계적 특성이 달라지므로 본 연구에서는 후기 경화후의 냉각조건을 상온 서냉 및 오븐내의 서냉으로 한 시료에 대해서도 실험을 행하였다.

2. 에폭시 수지의 물리적특성

본 연구에 사용되어진 에폭시 수지는 비스페놀 A(bisphenol A) 1분자와 에피클로로히드린(epichlorohyrin) 2분자와의 축합반응으로 생성된 비스페놀 A의 디글리시딜 에테르(diglycidyle ether of bisphenol A)이며, 다음과 같은 분자식으로 나타내어진다.



An epoxy resin molecule

또한, 경화제로서는 산 무수물(acid anhydride; MNA) 계를 사용하였으며, 이러한 경화제는 에폭시 수지와 혼합후 80℃~100℃에서 경화가 시작되며 경화후의 에폭시 수지는 열 변형온도(heat deflection temperature; HDT)가 높아 내열성 에폭시 수지로 이용되고 있다. 그림1은 이러한 경화반응의 흐름도를 나타내고 있다. 일반적으로 에폭시 수지의 경화반응은 발열 반응이지만 가열을 행하면 온도에 비례하여 경화반응을 완결시키는데 필요한 시간을 단축시킬 수 있다.[15),16)] 그리고 경화후의 냉각과정(그림1에서 D-F과정)에서 냉각조건에 따라 에폭시 수지의 물리적성질 즉, 침전극과 에폭시 수지와의 계면상의 마이크로 크랙발생 및 망상구조의 결함등이 발생하여[11)] 전기적특성에 많은 영향을 미치게된다. 또한, 내열성 에폭시 수지를 상온 이상에

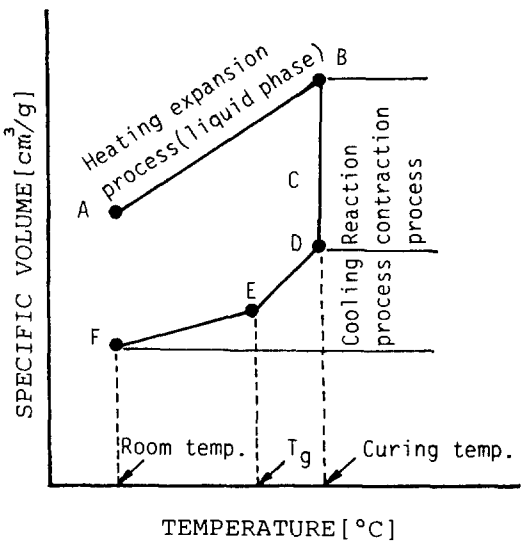


그림 1 에폭시 수지의 비체적과 경화온도와의 관계
Fig. 1 Relation between specific volume and temperature of the epoxy resin.

서 후기 경화(post-cure)를 행하면 더욱 가교도(degree of cross lincked)가 증가하고 미반응기가 감소하게 된다.[16]

그림2는 본 연구에 사용되어진 내열성 에폭시 수지의 후기 경화온도를 100℃로 하였을 때, 경화시간에 따른 연화온도의 변화특성 곡선을 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 후기 경화시간이 장시간 됨에 따라 연화온도가 점차적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향은 후기 경화를 장시간 행하므로서 에폭시 수지의 내부 미반응기가 점차적으로 감소하고, 3차원적 가교가 더욱 증가하여 에폭시 수지 내부의 분자 결합이 더욱 강해지기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 이러한 예로서 후기 경화온도를 변수로 하였을때, 후기 경화시간 변화에 대한 에

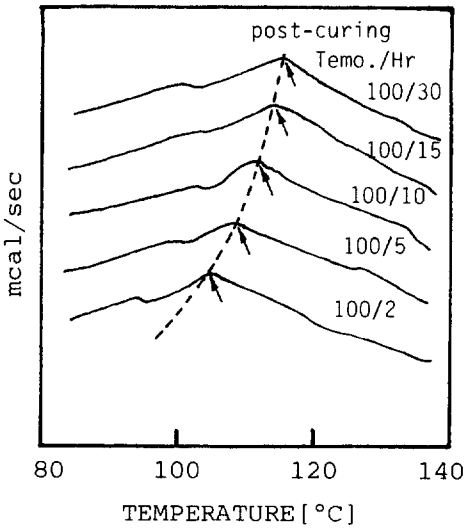


그림 2 에폭시 수지의 후기 경화조건에 따른 연화온도특성

Fig. 2 Softening temp. characteristics of the epoxy resin as parameter of post-curing conditions.

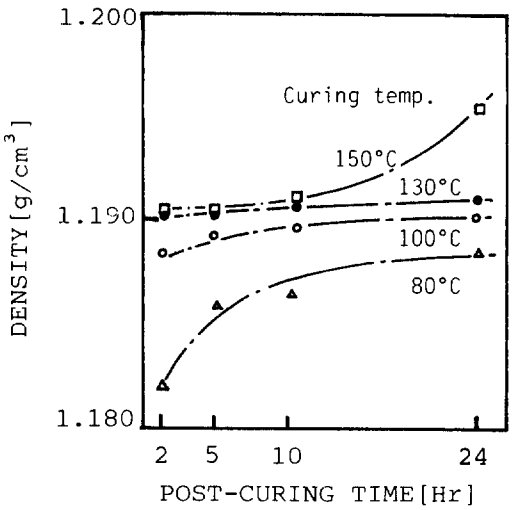


그림 3 에폭시 수지의 후기경화시간에 따른 밀도변화특성

Fig. 3 The relationships between density and postcuring time for the curing time for the epoxy resin.(at 25℃)

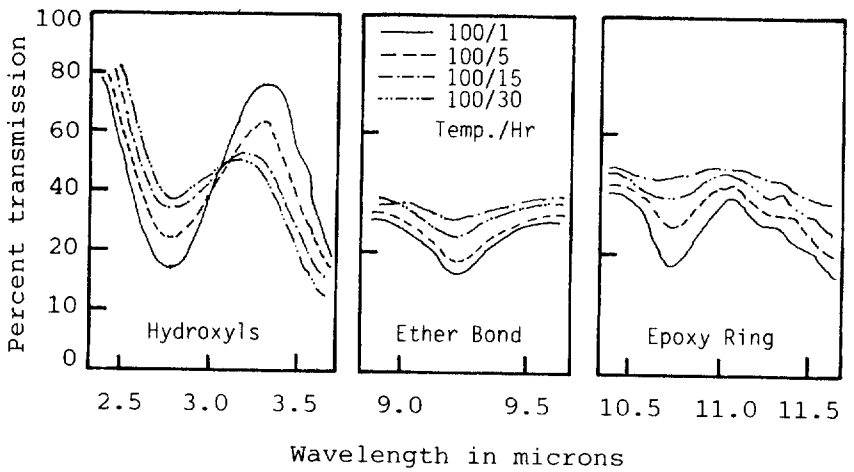


그림 4 에폭시 수지의 후기 경화조건에 따른 IR특성

Fig. 4 IR characteristics of the epoxy resin as parameter of post-curing conditions.

폭시 수지의 밀도 변화특성 곡선을 그림3에 나타내었다. 이 그림에서도 알 수 있듯이 후기 경화온도가 100℃에서 후기 경화시간이 약 15시간 이후 부터는 거의 포화상태에 도달함을 알 수 있다. 즉 이러한 현상도 에폭시 수지 내부의 미반응기가 점차적으로 감소하여 3차원적 망목상 가교가 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

그림4는 일정 온도하에서 후기 경화시간을 변화시켰을 때, 에폭시 수지내의 수산기, 에테르결합 및 에폭시 환의 진동상태를 알아보기 위하여 IR(infrared spectrum)로서 측정한 결과를 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 후기 경화시간이 길어질수록 에폭시 수지의 내부기의 진동이 점차 줄어들고, 후기 경화시간이 약 15시간 이후 부터는 거의 안정상태에 도달함을 알 수 있다. 이러한 이유는 후기 경화시간이 길어질 수록 에폭시 내부의 미반응기가 점차줄고, 망상구조의 형태가 증가하여 가교도가 높아지므로서 에폭시 수지 내부의 분자 결합이 더욱 강해지기 때문인 것으로 생각된다.

3. 시료제작 및 실험방법

3.1 시료제작 및 전극

본 연구에 사용되어진 에폭시 수지의 주제는 비스페놀 A계의 내열성 에폭시 수지(seoul epikote MF#1)를 사용하였으며, 경화제는 산 무수물(acide anhydride)계의 MNA(Methyl Nadie Anhydride)를 사용하였다. 본 실험에 사용되어진 시료의 제작과정은 다음과 같다.

먼저 유리판으로 크기가 100×100×30[㎜]인 유리상자를 제작한 후, 유리상자내에 직경이 5[㎜]이고, 표면에 온도금을 한 평판전극과 곡율반경이 30[㎛]인 침전극을 전극간 거리가 2[㎜]되게 설치한다. 다음 내열성 에폭시 수지의 주제와 경화제를 100 : 1로 혼합시킨 후, 주위온도가 60℃이고, 진공도가 10^{-3}[torr]인 진공장치내에서 1차적으로 에폭시 수지내의 기포를 30분간 완전히 제거한다. 그리고 유리상자내에 설치된 전극에 기포가 제거된 에폭시 수지로 함침시킨 다음, 2차적으로 에폭시 수지와 유리 상자내벽 및 전극과의 계면에 존재하는 보이드를 완전히 제거한 후, 주위 온도가 80℃인 오븐내에서 2시간동안 초기 경화를 행한다. 초기 경화가 끝난 시료를 주어진 온도 및 시간으로 후기 경화를 행한다. 그림5는 본 실험에 사용된 시료의 형태와 침전극의 형상을 보여주고 있다.

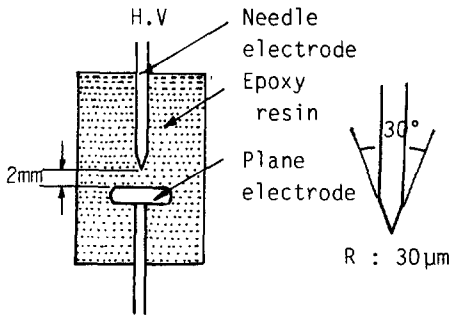


그림 5 시료형상과 침전극
Fig. 5 Specimen configuration and needle electrode.

일반적으로 내열성 에폭시 수지의 후기 경화후 냉각과정이 에폭시 수지의 내부구조 형성에 커다란 영향을 미치고,[11),15)] 이러한 영향은 에폭시 수지의 전기적 및 기계적특성에 중요한 인자로 나타나므로 본 연구에서는 에폭시 수지의 후기 경화후 냉각방법을 상온에서 서냉 및 오븐내에서 서냉하는 2가지 방법을 택하는 시료를 제작하였다.

한편, 내열성 에폭시 수지의 후기 경화후의 내부 분자 결합의 운동상태 및 열적 거동상태를 알아보기 위하여 크기가 100×100×0.2[㎜]인 에폭시 수지 필름을 제작하였다.

3.2 실험방법

주어진 온도와 시간으로 후기 경화가 끝난 시료로서 다음과 같은 측정을 하였다.

1) IR(infrared spectrum)의 측정
2) DSC(differential scanning colorimeter)의 측정
3) 후기 경화온도에 따른 tree 파괴전압의 측정
4) 후기 경화시간에 따른 tree 파괴전압의 측정
5) 후기 경화시간에 따른 50% tree 발생전압의 측정
6) 전압 인가시간에 따른 tree 진전특성
7) tree 진전의 인가전압의 의존성
8) tree 진전의 주위온도의 의존성

내열성 에폭시 수지의 후기 경화조건에 따른 내부 분자결합의 거동상태와 열적 거동상태를 측정하기 위하여 각각 infrared spectrophotometer(독일; PERKIN-ELMER 1330)와 differential sacanning calorimeter(일산; RIGAKU CN8089)를 이용하였다. 본 실험에 사용되어진 전원은 교류전압이며, 측정치의 값은 실효치로 나타내었으며, 모든 측정치의 값은 측정시료 10개의 평균값으로 나타내었다.

4. 실험결과 및 고찰

그림6은 내열성 에폭시 수지의 후기 경화온도(경화시간: 10시간) 및 후기 경화후의 냉각조건에 따른 단계승압법(3kV/sec)에 의한 순시 tree 절연파괴전압특성을 나타내고 있다. 이 그림에서 후기 경화온도에 따른 tree 파괴전압은 100℃에서 후기 경화한 시료에서 최대 tree 파괴전압을 나타내고, 오븐내에서 서냉한 시료가 tree 파괴전압이 높게 나타났다. 즉, 이러한 이유는 후기 경화온도가 100℃ 일때 에폭시 수지 분자들의 입체적 가교가 치밀하게 형성되기 때문인 것으로 생각되며, 100℃ 이상의 고온에서는 초기에 경화가 급격히 진행되어 치밀한 구조를 형성할 수 없을 뿐 아니라 고온에서 시료의 열 열화가 진행되기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 에폭시 수지의 후기경화 후 냉각조건에 따라 tree 파괴전압이 달라지는 이유는 내열성 에폭시 수지를 경화한 후 냉각조건을 상온에서 서냉하면 에폭시 수지의 빠른 냉각과 더불어 수축력이 커지므로 침전극과 에폭시 수지와의 계면에서 마이크로 보이드가 발생하고,[11),15)] 전계를 인가했을 경우 침전극 선단의 마이크로 보이드에 의한 부분방전이 선행되어 나타나므로 파괴전압이 낮게 나타나는 것으로 생각된다.

그림7은 후기 경화온도 100℃에서 경화시간에 따른 단계 승압법(3kV/see)에 의한 순시 tree 파괴전압특성을 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 경화시간이 15시간 까지는 tree 파괴전압이 증가한 후, 그 이상의 경화시간에 있어서는 tree 파괴전압은 점차적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 에폭시 수지의 내부 입체적 가교가 최적으로 형성되는 후기 경화시간이 15시간 임을 알 수 있다. 그러나 후기 경화시간이 15시간보다 길 때는 에폭시 수지 내부의 가교 부분에서의 열 열화현상 및 과잉 경화로 인한 침전극 주위에 마이크로 크랙등의 결함들이 나타나, 이들 결함들에 의하여 에폭시 수지 내부에서의 선행 부분방전이 일어남으로서 tree 파괴전압이 낮아지는 것으로 생각된다.

그림8은 후기 경화온도를 100℃로 고정시킨 후, 경화시간에 따른 50% 초기 tree 발생전압특성을 나타내고 있다. 이때 50% 초기 tree 발생전압의 정의는 단계 승압법(3kV/sec)에 의하여 전압을 시료 10개에 동시에 인가시켰을 때, 시료내에 침전극 선단에 20[μm]정도의 tree가 10개 시료중 5개가 나타났을 때의 전압이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 50%

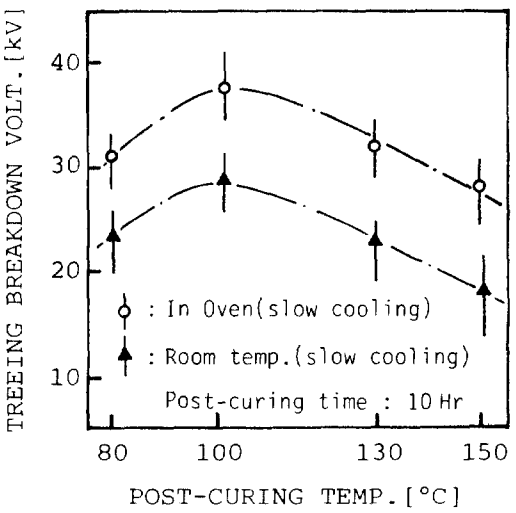


그림 6 에폭시 수지의 후기 경화온도에 따른 교류 tree 파괴전압특성

Fig. 6 ac treeing breakdown voltage-postcuring temp. characteristics of the epoxy resin. (post-curing time : 10[Hr])

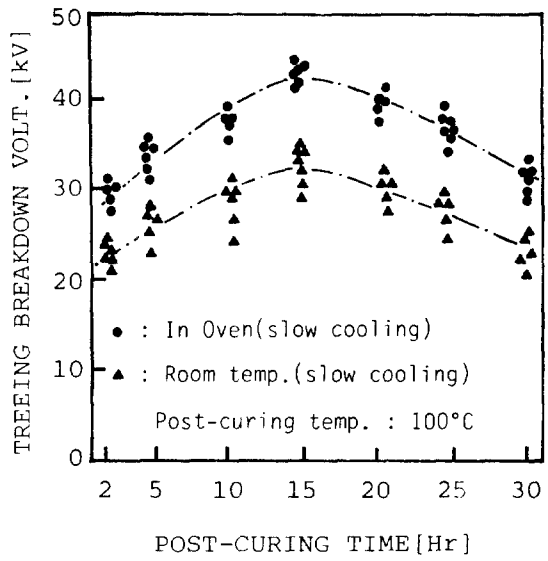


그림 7 에폭시 수지의 후기 경화시간에 따른 교류 tree 파괴전압특성

Fig. 7 ac treeing breakdown voltage-postcuring time characteristics of the epoxy resin. (post-curing temp. : 100℃)

초기 tree 발생전압은 오븐내에서 서냉시킨 시료는 대부분 20[kV] 이상에서 나타남을 알 수 있다. 그리고 후기경화시간이 15시간까지는 tree 파괴전압과 같은 특성을 보이고 있으나, 15시간 이후 부터는 급격하게 떨어짐을 알 수 있다. 이러한 이유는 후기경화가 장시간화될 수록 에폭시 수지의 수축력이 커지고, 에폭시 수지자체의 열 열화현상으로 인한 침전극 주위에 마이크로 크랙[11],[17] 등이 나타남으로 생겨나는 현상으로 생각된다.

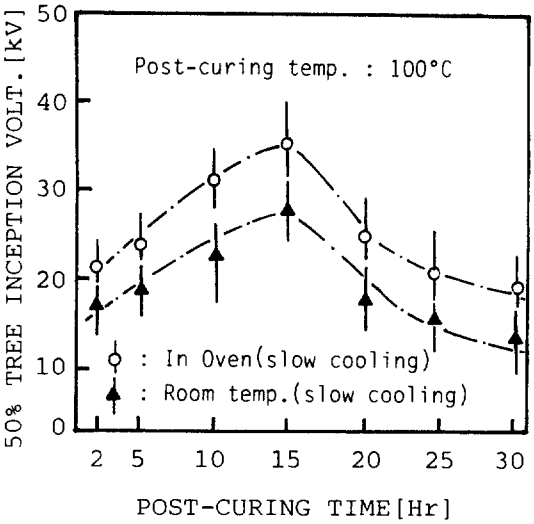


그림 8 에폭시 수지의 후기 경화시간에 따른 50% 초기 tree 발생전압 특성

Fig. 8 50% tree inception voltage-postcuring time characteristics of the epoxy resin. (post-curing temp. : 100℃)

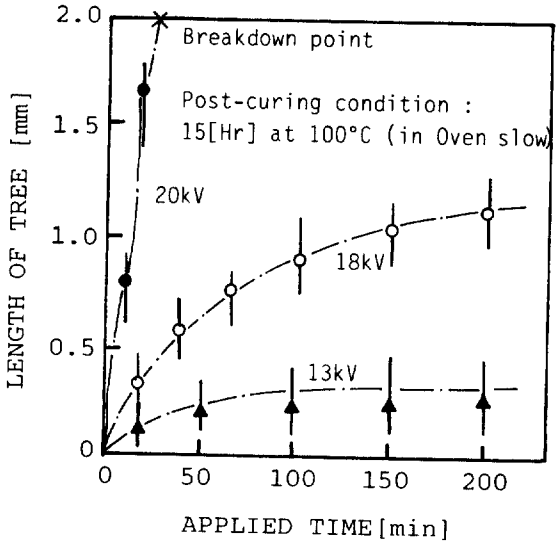


그림 9 tree 진전의 시험전압의 효과

Fig. 9 Effects of test voltage on treeing(post-curing condition : 15 [Hr] at 100℃ in oven, cooling slow)

그림9는 내열성 에폭시 수지의 tree 파괴전압특성과 초기 tree 발생전압이 최적으로 나타나는 경화조건으로 제작한 시료의 tree 진전에 있어 인가전압의 의존성을 나타내고 있다. 이 그림에서 인가전압이 13[kV]일 때는 tree의 진전길이가 짧으며, 인가시간이 장시간될 수록 포화상태로 되어 tree진전이 억제됨을 알 수 있다. 그리고 인가전압이 더욱 높아지면 tree의 진전은 빨라진다. 즉, 인가전압이 20[kV]인 경우는 급격히 진전을 하여 약 25분 정도에서 tree 파괴에 도달함을 알 수 있다.

그림10은 내열성 에폭시 수지의 후기 경화조건을 변화시켰을 때, 전압 인가시간에 따른 tree 진전특성을 나타내고 있다. 이때 인가전압은 20[kV]로 하였다. 이 그림에서 후기 경화시간이 길어질 수록 tree의 진전은 둔해지고 있으나, 후기경화시간이 30시간 이후 부터는 오히려 빨라짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 에폭시 수지 내부의 분자의 입체적 가교와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 에폭시 수지의 내부 분자의 입체적 가교도가 높아지고, 미반응기가 줄어들 수록 진전은 억제되어 나타나고, 이

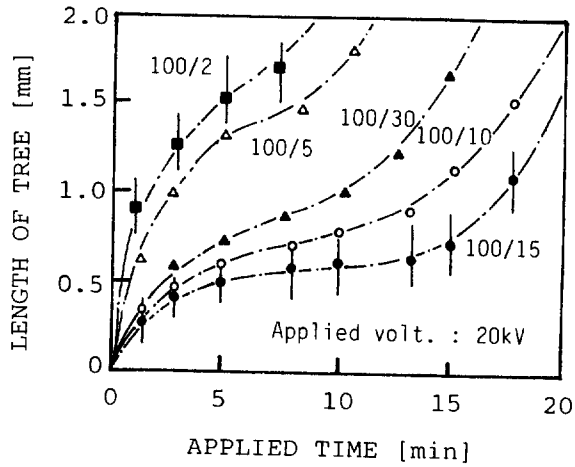


그림 10 에폭시 수지의 전압 인가시간에 따른 tree의 진전특성

Fig. 10 Length of tree-applied time of voltage characteristics of the epoxy resin as parameter of postcuring conditions. (applied voltage:20kV)

와 반면에 후기 경화가 30시간을 넘어서면 에폭시 수지 자체의 열 열화에 의한 에폭시 수지 내부의 입체적 가교부분 및 침전극과 에폭시 수지 사이의 계면상의 마이크로 크랙과 같은 결함들이 나타나므로 이들 결함들이 tree의 진전을 더욱 가속화 시키는 것으로 생각된다. 즉, 이러한 결과는 단시간 tree 파괴전압특성의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림11은 내열성 에폭시 수지의 후기 경화온도를 100℃ 로 일정하게 한후, 경화시간만을 변화하였을 때 tree 진전의 주위온도 의존성을 나타내고있다. 이때 인가 전압은 20(kV)이고, 각 온도에대한 전압 인가시간은 2분으로 하였다. 이 그림에서 주위온도에 따른 에폭시 수지의 tree 진전특성은 약 100℃까지는 tree진전이 적고, 이 시간 이후 부터는 tree의 진전이 급격하게 빨라지고 있음을 알 수 있다. 즉, 에폭시 수지의 후기 경화조건에 따른 tree 진전의 주위온도 특성은 에폭시 수지의 내부 구조형성과 긴밀한 관계를 가지고 있음을 알 수 있고, 또한 이러한 결과는 그림2에서 보여준 바와같이 에폭시 수지의 연화온도 특성과 거의 일치함을 알 수 있다.

그림12는 내열성 에폭시 수지의 후기 경화조건을 100℃에서 15시간으로 했을 경우, 주위온도를 변수로하여 전압 인가시간에 따른 tree의 진전특성을 나타내고 있다. 이 그림에서 주위온도가 증가할 수록 tree의 정체시간이 짧아지고, tree의 진전이 빨라지고 있음을 알 수 있다. 이러한 이유로 주위온도가 높아지면 에폭시 수지의 내부 분자결합의 세그멘트 운동[18]이 활발해지므로 전자의 이동도를 높여주고 또한 분자 결합상태가 열운동에 의하여 이완되어지므로서 tree의 진전을 촉진시켜주는 것으로 생각된다.

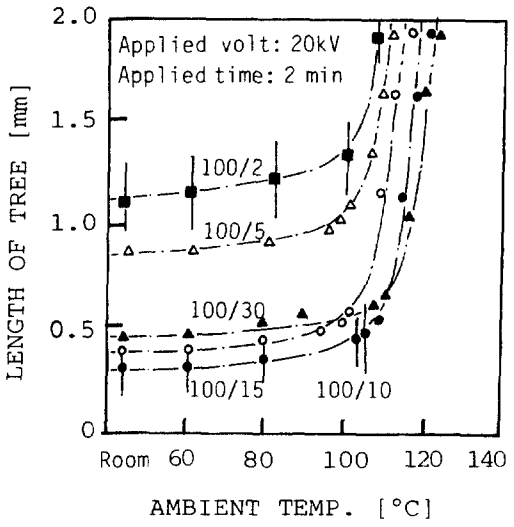


그림 11 에폭시 수지의 주위온도 변화에 따른 tree의 진전특성

Fig. 11 Length of tree-ambient temp. characteristics of the epoxy resin as parameter of postcuring conditions. (applied volt.: 20kV, applied time:2min)

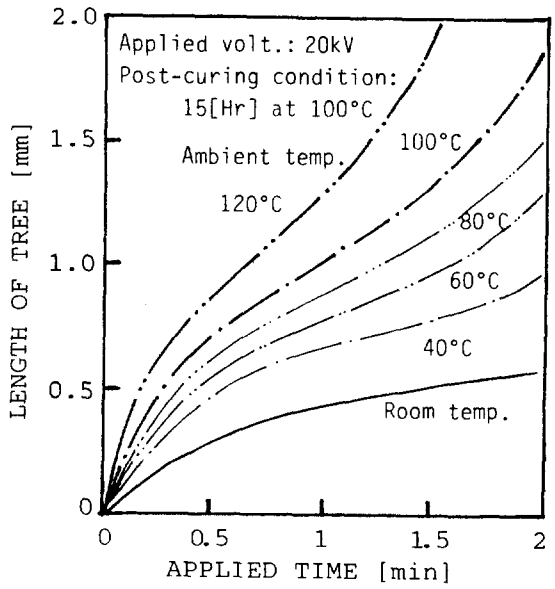


그림 12 에폭시 수지의 전압 인가시간에 따른 tree의 진전특성

Fig. 12 Length of tree-applied time of volt. characteristics as a parameter of ambient temp. of the epoxy resin. (post-curing condition:15〔Hr〕 at 100℃)

5. 결 론

내열성 에폭시 수지의 후기 경화조건에 따른 에폭시 수지의 내부 분자결합상태 및 열적 거동상태와 50% tree 발생전압특성, tree 진전의 주위온도 의존성 및 tree 파괴전압특성을 측정하여 분석 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 내열성 에폭시 수지의 후기 경화조건에 대한 tree 파괴전압특성과 50% tree 발생전압특성의 최적 경화조건은 100℃에서 15시간이며, 이는 에폭시 수지 내부의 입체적 가교상태와 긴밀한 관계가 있

음을 알 수 있다.

2) 내열성 에폭시 수지의 후기 경화후 냉각조건에 있어서 오븐내에서 서냉한 시료가 상온에서 서냉한 시료보다 양호한 특성을 나타내었다. 즉 경화후의 냉각조건이 tree 발생 및 파괴특성에 커다란 인자로 나타냄을 알 수 있다.

3) 내열성 에폭시 수지의 후기 경화조건에 따른 tree 진전특성도 에폭시 수지 내부의 입체적 가교도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 즉 에폭시 수지 내부의 입체적 가교가 증가하면 tree의 진전이 억제되어 나타나나, 경화온도가 130℃ 이상 또는 경화시간이 장시간화 되면 에폭시 수지 자체의 열 열화에 따른 에폭시 수지의 구조상의 결함 및 전극과의 계면상의 마이크로 크랙등에 의하여 오히려 tree의 진전이 가속화됨을 알 수 있다.

4) 내열성 에폭시 수지의 tree 진전의 주위온도 의존성은 주위온도가 약 100℃ 근방에서 급격한 진전을 나타내고 있다. 즉 이러한 결과는 본 연구에 사용되어진 에폭시 수지의 연화점특성과 잘 일치하고 있으며, 이는 에폭시 수지의 연화점이 에폭시 수지의 고온하에서의 tree 발생 및 진전에 커다란 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

본 논문은 1987년 문교부 학술 연구비의 보조로 이루어졌기에 이에 심심한 사의를 표하는 바이다.

참 고 문 헌

1) D.W. Kitchin, O.S. Pratt : *trans. Amer. Inst. Elect. Engrs.*, Vol.105, Pt.III, 180, 1958.

2) S. Whitehead, "*Dielectric Breakdown of Solids*", Carendon Press, 1951.

3) S. Zoledziowski, et all : *IEEE Trans. Elect. Insul.*, Vol, EI-17, 84, 1972.

4) E.J. McMahan : *IEEE Trans. Power A pparatus Syst.* PAS-69, 1128, 1963.

5) K. Nakanishi, et all : *JIEE trans. A*, Vol.96, No.3, 25, 1975.

6) F. Noto, et all : *JIEEJ* Vol.89-4, No.967, 142, 1968.

7) J.H. Beard & S. Orman : *Proc. Instn. Elect. Engrs.*, 114, 989, 1967.

8) O. Milton & J.L. Wentz : *Insulation*, 71, 1966.

9) R.E. Cuthrell : *J. Appl. Poym. Sci.*, 16, 1983, 1972.

10) M. Olyphant : *IEEE, Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-69, 1106, 1963.

11) K. Nakanishi, et all : *IEEE Trans. Elect. Insul.* Vol. EI-14, No.6, 306, 1979.

12) H. Nakayama, et all : *JIEE Trans. A*, Vol.100, No. 4, 241, 1980.

13) T. Hashizume, et all : *JIEE Trans. A*, Vol.102, No. 9, 507, 1982.

14) H. Kawamura, et all : *JIEE Trans. A*, Vol.104, No. 2, 81, 1984.

15) H. Lee, K. Neville, "*Epoxy Resin*", McGraw-Hill Co., 1957.

16) 김박윤, "*Epoxy Resin*" 대광서림, 1979.

17) W. Schnable, "*Polymer Degradation*," Macmillan Publ. Co., Chapt.2, 1981.

18) P. Peyer : *Polym. Plast. Tchnol. Engrs.*, 10(2), 117, 1978.