

에폭시 복합재료의 내트래킹성에 미치는  
상호침입망목의 효과

The Effect of Interpenetrating Polymer Network upon  
Tracking Resistance of Epoxy Composite Materials

\*김탁용, \*이덕진, \*손인환, \*\*김명호, \*\*\*김경환, \*김재환

\*광운대학교 전기공학과, \*\*경원전문대학 건축설비과,  
\*\*\*경원대학교 전기공학과

\*T. Y. Kim, \*D. J. Lee, \*I. H. Son, \*\*M. H. Kim, \*\*K. H. Kim, \*J. H. Kim

\*Kwangwoon Univ. \*\*Kyungwon College, \*\*\*Kyoungwon Univ.

**Abstract**

In this study, in order to develop outdoor insulating materials, SIN(simultaneous interpenetrating polymer network) was introduced to Epoxy resin and the environment resistance was investigated. The single network structure specimen(E series) formed of Epoxy resin alone and simultaneous interpenetrating polymer network specimen (EM series) in which epoxy resin was taken as the first network and methyl methacrylate resin as the second network were manufactured.

Ten kinds of specimens were manufacture by filler ( $\text{SiO}_2$ ) content. SEM were utilized in order to confirm their network structure changes, and AC voltage dielectric strength was measured. Also, UV-test and tracking test were carried out investigate the environment resistance characteristic.

Therefore the variations of network structure were happened as a result of SEM test, and it was confirmed that simultaneous interpenetrating polymer network specimens were more excellent than single network structure specimens.

**1. 서 론**

최근 급속히 증가하는 전력수요로 전력계

통의 초고압화가 진행되고 있으며, 이로 인해 복잡한 배전작업의 증가와 송전전압의 고압화에 따른 설비 시설량의 증가가 초래되고 있다. 기존의 초고압 유타입 절연재료는 세라믹을 소재로 이루어져 왔으나, 최근 신소재 기술의 발달에 따라 생산공정이 복잡한 세라믹 절연재료의 대체 절연재료로서 고분자 복합재료의 사용이 증가하고 있다.<sup>1)</sup> 또한, 배전기기재의 경량화 및 소형화에 기여하는 새로운 절연재료의 개발과 성능 개선이 요구된다.

이와 같은 신소재 중에서 절연파괴 특성 및 기계적 특성이 우수하고, 다른 물질과의 상용성 및 조화성이 우수하여 단독으로는 얻을 수 없는 다양한 제반 특성을 용이하게 얻을 수 있는 에폭시 수지를 현재, 송배전용 기기 및 절연지지물 제품 등에 이용되고 있다.<sup>2)</sup>

따라서, 본 논문에서는 에폭시 수지에 상호침입망목 수법을 도입하여, 고분자 복합재료의 망목구조 변경에 따른 표면절연파괴 현상인 트래킹파괴 특성과 광열화에 의한 내자외선성의 변화를 파악하였다.

충전제 함량에 따라 제작된 10 종류의 시편을 각각 트래킹 파괴 시험, 자외선 촉진 열화 시험 및 시편 자체의 절연파괴 시험을 통하여 애포시 복합재료의 망목구조 변화에 의한 트래킹 파괴 시간과 자외선 열화 정도의 변화를 파악하여, 상호침입망목 구조가 각각의 열화에 미치는 효과에 대하여 고찰하였다.

## 2. 시료 및 실험방법

### 2-1. 시료 제작

본 논문에서는 단일망목구조 시편과 상호침입망목구조 시편을 제작하였다. 측정시편의 형상에 따라 제작한 금형에 각각 주입하여, 표 1과 같은 경화조건으로 경화시켰다.<sup>3)</sup>

표 1에 시편의 구성 배합비 및 경화 조건을 나타내었다.

충전제 함량비에 따라 0, 25, 50, 75, 100[phr]의 E 계열 시편과 EM 계열 시편을 제작하였다.

표 1. 시편의 구성 배합비 및 경화조건  
Table 1. Composite ratio and curing condition of specimens

단위:[phr]

시 편		E	EM
배 합 비 수 지	YD-128	100	
	YD-128 + MA		100
경화제	PA	12.3	8
	SiO <sub>2</sub>	0.25, 50, 75, 100	0.25, 50, 75, 100
중 합 개 시 제	DICUP	-	0.86
	BDMA	0.2	0.11
경 화 시 간	130[°C]/ 4[hr] + 150[°C]/ 4[hr]	130[°C]/ 3[hr] + 150[°C]/ 4[hr]	

### 2-2. 실험 방법

#### 2-2-1 망목변화에 따른 내부구조 관찰

제작된 시편의 망목 구조 형태를 관측하기 위하여 시편의 파단면을 전자 주사 현미경(Scanning Electron Microscope : SEM, Philips Co.Ltd)을 이용하여 촬영하였다.

#### 2-2-2 절연파괴강도 실험

교류절연파괴강도는 고전압 발생기(Pulse Enginnering co.Ltd)를 사용하여 측정하였다. 그림 1은 절연파괴강도 측정에 사용된 시편과 전극의 형상을 나타내었다. 주위 매질로 실리콘 오일을 사용하여 절연파괴강도를 측정하였다.<sup>4)</sup>

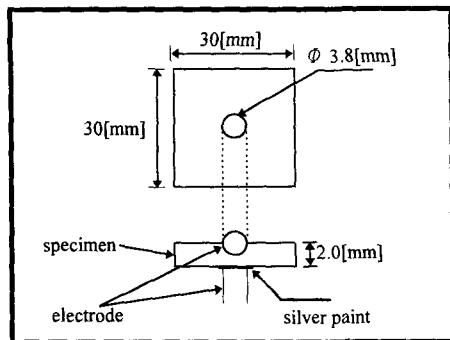


그림 1. 절연파괴 측정용 시편의 형상

Fig. 1. Geometry of dielectric strength specimen

#### 2-2-3 내트래킹성 실험

내트래킹성 실험은, ASTM2303에서 규정한 시험법 및 시험 조건에 의하여 제작된 LG 전선 전력연구실의 트래킹 시험장비를 사용하여 실시하였다.

인가전압은 주파수 60[Hz]인 교류전압 3.5[kV]로 일정하게 하여, 트래킹 파괴에 이르는 시간을 측정하였다.

#### 2-2-4 자외선 조사 실험

내자외선성을 측정하기 위하여 ASTM G-53 시험법에서 규정한 시험조건으로 내자외선 실험을 하였다. 2년에 상응하는 자외선 조사 시험을 하기 위하여 촉진내후시험기(SUV-V13)(IWASAKI)를 사용하여 13시간 Xe-Lamp로 연속 조사하였으며, 시험기 내부 온도는 60 °C, 자외선 강도는 100[mW/cm<sup>2</sup>], 조사거리는 240[mm]로 하였다. 시편은 10 × 10 [cm] 정사각형으로 제작하였다.

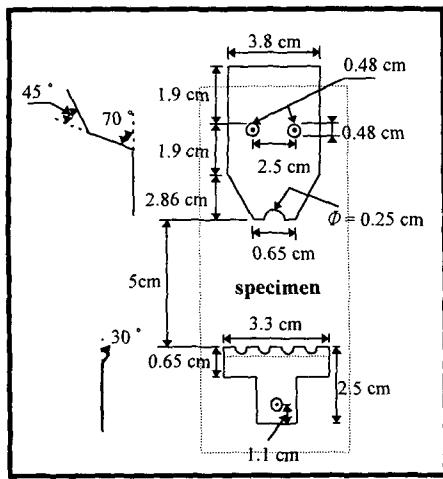


그림 2. 트래킹 측정용 시편의 형상과 전극  
Fig. 2. Geometry of Tracking Specimen and electrodes

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3-1. 시편의 내부 구조 관찰

사진 1은 E-0 시편의 파단면을, 사진 2는 EM-0 시편의 파단면을 전자주사현미경으로 관측한 결과이다.

사진 1의 경우 파단되는 방향이 불규칙하게 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 사사진 2의 경우는 round 모양을 형성하고 있는 것으로 관찰된다.

따라서, 단일망목 시편과 이중망목 시편의 망목구조가 상이함을 확인 가능하다고 사료된다.

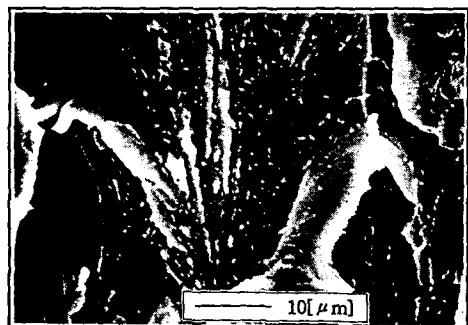


사진 1. E-0 시편의 전자 현미경 사진  
Photo 1. SEM of E-0 specimen

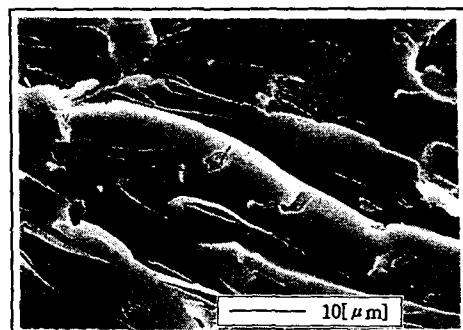


사진 2. EM-0 시편의 전자 현미경 사진  
Photo 2. SEM of EM-0 specimen

#### 3-2. 교류 절연파괴강도 특성

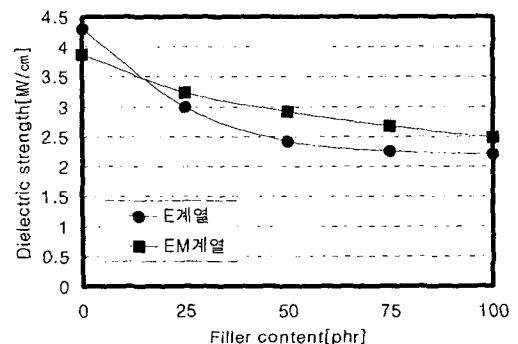


그림 3. 충진제 함량 변화에 따른 교류 절연파괴 강도( $20[^\circ\text{C}]$ )  
Fig.3. AC Dielectric strength due to variation of filler content( $20[^\circ\text{C}]$ )

상온의 충진제 함량 변화에 따른 절연파괴 강도를 그림 3에 나타내었다.

충진제 첨가시 모체수지와 충진제 사이의 계면의 증가와 기층의 형성 및 접착불량의 문제점이 발생하여, 전계의 집중을 유발하게 된다. 그 결과  $E_{BD}$ 의 감소를 볼 수 있는데 상호침입망목구조의 경우는 격자구조에 분자쇄의 뒤얽힘이 존재하여, 충진제 첨가로 인한 계면발생을 단일망목보다 감소시키므로, 충진제 첨가로 인한  $E_{BD}$ 가 단일망목에 비해 증가함을 확인할 수 있었다.

고온의 충진제 함량 변화에 따른 절연파괴 강도를 그림 4에 나타내었다.

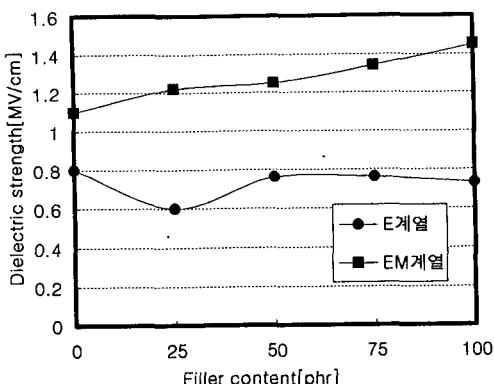


그림 4. 충진제 함량 변화에 따른 교류 절연파괴 강도(200[°C])

Fig. 4. AC Dielectric strength due to variation of filler content(200[°C])

열전도가 우수한  $\text{SiO}_2$  충진제가 열방산을 도와서 충진제가 첨가된 시편의  $E_{BD}$ 가 높아지게 된다. 그런데 단일망목시편의 경우 충진제 함량의 증가로 열방산율은 증가하지만, 계면의 발생이 증가되고, 따라서 전계집중이 유도되기 때문에  $E_{BD}$ 가 감소하게 된다.<sup>4)</sup>

복합재료계에서, 충진제 첨가 효과를 얻기 위해서는 가능한 상호침입망목구조가 도입되어야 한다고 생각된다.

### 3-3 내자외성 시험

에폭시 복합재료를 자외선 조사시킨 시편의 표면색 변화를 표 3에서 나타내었다.

열화기구중 광열화기구로서의 자외선은 옥외용 절연재료 개발에 있어서 중요한 요구 조건으로 제안되어 왔다. 자외선 조사에 의한 열화시험결과를 색차로 나타내면<sup>5)</sup>, 망목별로 E 계열시편 > EM 계열시편으로 나타났고, 충진제의 첨가시 색차가 감소함을 확인할 수 있었고, 전체적으로 색차를 비교하면  $E-0 > E-50, EM-0 > EM-50$  과 같은 결과를 확인할 수 있었다.

색의 변화는 자외선 조사에 의해 고분자재료의 내부에서 물리·화학적 변화가 생겼음을 의미하므로, 색차의 정도로 열화의 정도를 확인할 수 있다. 즉, 상호침입망목구조 시편

의 경우 단일 망목에 비하여 자외선에 안정하며, 충진제의 첨가는 자외선 조사에 안정한 성질을 가짐을 알 수 있었다.

시편종류	변색도	색차( $\Delta E$ )
E 계열	E-0	확인가능
	E-50	확인가능
EM 계열	EM-0	미소변화
	EM-50	미소변화

표 3. UV 조사에 의한 색의 변화  
Table 3. Variation of color due to UV radiation

### 3-4. 내트래킹성 시험

#### 3-4-1. 망목구조 변화에 따른 내트래킹성

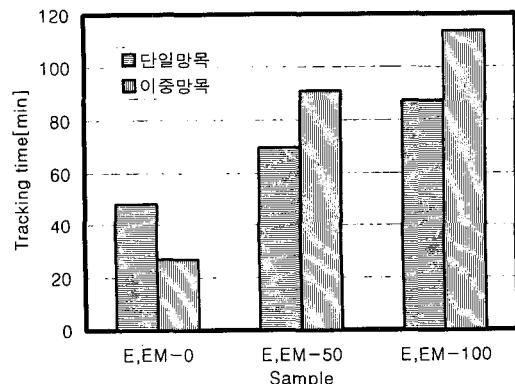


그림 5. 망목구조 변화에 따른 시편의 내트래킹성

Fig. 5. Tracking resistance due to variation of Network structure

망목구조 변화에 따른 트래킹실험 결과를 그림 5에서 나타내었다.

트래킹 파괴란 절연물 표면에 오손액의 누수로 생긴 이물질이 전계인가시 전계 집중을 유도하여, 주울열을 발생시킨다. 따라서 절연재료 표면의 탄화가 일어나고, 탄화의 증가로 표면파괴가 일어나는 현상을 트래킹 파괴라 한다.<sup>5)</sup>

그림 5의 경우 충진제의 함량의 증가에 따라 단일망목구조시편과 상호침입망목구조 시편의 트래킹 파괴시간이 차이됨을 볼 수 있다. 결국, 상호침입망목구조의 도입은 모체수

지와 계면사이의 접착력을 강화시켜주므로 트래킹 파괴시간이 단일망목에 비하여 길어짐을 확인할 수 있었다.

따라서, 충진제 첨가가 필수적인 예폭시 복합재료의 경우 상호침입망목구조의 도입이 필수적이라고 사료된다.

#### 3-4-2 충진제 함량의 변화에 따른 내트래킹 성

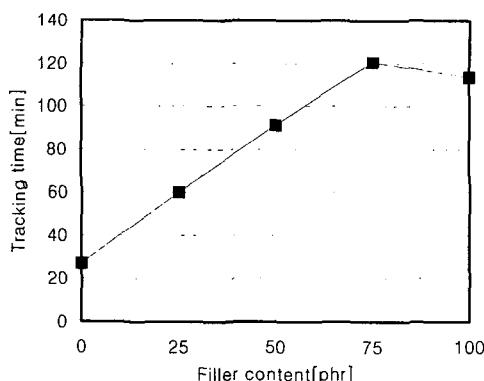


그림 6. EM 계열 시편의 충진제 함량 변화에 따른 트래킹 파괴시간  
Fig. 6. Tracking time of EM series specimens due to variation of filler content

EM 계열 시편의 경우에 충진제 함량의 변화에 따른 트래킹 실험을 그림 6에 나타내었다.

그림 6의 경우 충진제 함량이 증가함에 따라 시편의 파괴가 지연되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 충진제의 첨가로 시편의 표면 열방산율을 높여주기 때문에 표면에서 발생하는 주울열에 의한 표면 탄화를 억제시키므로<sup>6)</sup>, 트래킹 파괴시간의 지연됨을 확인할 수 있으나, 75[phr] 이상의 충진제가 첨가됨에 따라, 내트래킹성이 저하함을 확인할 수 있다.

결과적으로 복합재료의 기계적 강도의 증가와 열적특성 보완의 목적으로 첨가되는 충진제가 트래킹 파괴시간을 지연시켜주지만, 과도한 충진제 첨가는 역전현상을 나타남을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

예폭시 복합재료에 동시상호침입망목 구조를 도입하여, 옥외 사용 평가 특성 실험에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 망목구조변화에 따라 상온 및 고온절연파괴강도가 개선되었다..
2. 상호침입망목구조의 도입으로 충진제첨가 효과를 개선시킬 수 있다고 사료된다.
3. 자외선 조사에 의한 열화에 영향을 미치는 요소로서 망목구조 변화 및 충진제가 작용된다고 사료된다..
4. 단일망목구조 시편 보다 상호침입망목 시편의 내트래킹성이 우수한다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Sri Sundar. et.al., "Polymer Insulating Materials and Insulators for High voltage Outdoor Applications", Proc. of Conf. on Electrical Insulation of IEEE, pp.222-228, 1992.
- (2) J. M. Braun et.al., " Reliability of GIS EHV Epoxy Insulators", IEEE PES T&D conference, pp. 2149-2152, 1991.
- (3) 김재환 외 4인, "상호침입망목 예폭시 복합재료의 교류절연파괴 특성 및 기계적 특성에 관한 연구", 한국전기전자재료학회지, Vol.9, No.7, pp.702-707, 1996.
- (4) 吉村 昇 外 2名 "エポキシ樹脂の 直流 破壊 電圧に 及ぼす 充てん 剤の 效果", 日本 電氣 學會誌 A, 102 卷, pp.30-50, 1987
- (5) 大澤善次郎 著, "高分子の 劣化と 安定化", 武藏野クリエイト
- (6) 電氣 學會 技術 報告(II部), "固體 絶縁 材料の 添加劑, 充てん剤 效果", 日本 電氣 學會, 第 342 號