

## SF6 EHV VT권선 절연지의 절연특성

### Insulation Characteristics of PET Films for SF6 EHV VT Winding

김정달\*, 박재윤\*, 정장근\*, 김종석\*, 하현진\*, 이용길\*\*

(Jung-Dal Kim\*, Jae-Yoon Park\*, Jang-Gun Jung\*, Jong-Seok Kim\*, Hyun-Jin Ha\*, Yong-Gil Lee\*\*)

#### Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of hole or crack on the Insulation characteristics of a PET films for EHV(Extra High Voltage) VT winding. The hole or the crack in the PET films was made and the insulation characteristics of them were measured. As an experimental result, it was shown that the PDIV(Partial Discharge Inception Voltage) and the BDV(Breakdown Voltage) of the PET films with hole or crack were lower than those without them, and were markedly dependent on their position and temperature. Therefore, the hole and the crack affected to insulation characteristics of PET films for SF<sub>6</sub> EHV(Extra High Voltage) VT Winding.

**Key Words** : PDIV(Partial Discharge Inception Voltage), BDV(Breakdown Voltage)

PET Film(Polyethylene terphthalate Flim), VT(Voltage Transformer)

#### 1. 서론

전력계통의 부하가 증가되어 감에 따라 전력기기도 역시 소형화, 대용량화, 고성능화, 고신뢰성화가 되어가고 있다. 대용량 기기는 크기와 무게 뿐 아니라 설치에 필요한 장소확보와 이동의 불편함을 필연적으로 동반하므로 콤팩트하면서도 높은 신뢰도를 갖는 기기가 요구되고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 현재 국내에서 추진중인 765[kV]송압에 사용되는 초고압급VT의 절연은 가스(SF<sub>6</sub>)를 이용하고

있다[1].

절연가스로 절연을 했을 경우 기기의 경량화 및 온도상승에 의한 폭발의 위험 등 많은 문제점을 해소할 수 있지만 기기의 구조적 특징으로 가스만으로는 완벽한 절연을 구현할 수가 없다. 특히, 권선의 경우 그 구조적 특성상 기계적 강도를 필요로 할 뿐 아니라 도체간의 간격이 매우 밀집되어 있기 때문에 가스절연방식 만으로는 절연을 완벽히 하기 어렵다. 그러므로, 권선간 절연에는 고체절연물을 사용하게 된다[2,3]. 그러나, 고체절연물의 경우 유전율, 불순물, 보이드 및 표면상태 등이 절연특성에 많은 영향을 주기 때문에 설계시 이러한 여러 가지 사항에 유의하지 않으면 안 된다[4-8].

본 논문은 현재 개발중인 초고압VT의 권선간 절연에 쓰이고 있는 고체절연물(PET Film)의 절연특성과 PET 필름에 존재하는 보이드와 크랙이 절연특성에 미치는 영향을 측정하고 분석하여 설계에 필요한 자료를 마련하는데 그 목적을 두었다.

\* : 경남대학교 전기공학과  
(경남 마산시 월영동 449번지  
Fax: 055-249-2839

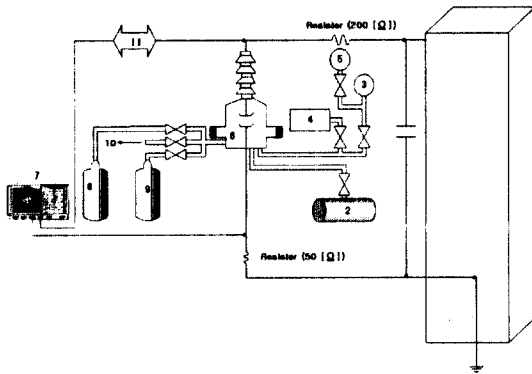
E-mail : jypark@kyungnam.ac.kr)

\*\* : 부산동의공업대 전기과  
2000년 12월 4일 접수, 2000년 12월 29일 1차심사완료  
2001년 2월 12일 2차심사완료, 2001년 3월 19일 3차심사  
완료, 2001년 4월 3일 4차심사완료

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

그림 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도이다. 인가 전압은 AC 상용전압을 사용하며 시편에 흐르는 전류 파형은 시편 부하에 50[Ω] 무유도 저항을 연결하여 양단의 전압을 오실로스코프(Lecroy LC334 500[MHz])로 측정하였다. 실험 챔버(Chamber)는  $2 \times 10^3$ [Torr]~ $10^{-7}$ [Torr]까지 압축과 배기가 가능하며 진공도 측정은 Pirani gauge와 Ionization



- |                   |                        |
|-------------------|------------------------|
| 1. H.V Generator  | 7. LeCroy 334A         |
| 2. Vacuum pump    | 8. The other Gas       |
| 3. Pressure gauge | 9. SF <sub>6</sub> Gas |
| 4. Pirani gauge   | 10. Outlet             |
| 5. Vacuum gauge   | 11. H.V prove(2000:1)  |
| 6. Chamber        |                        |

그림 1. 실험장치도.

Fig. 1. Experimental setup.

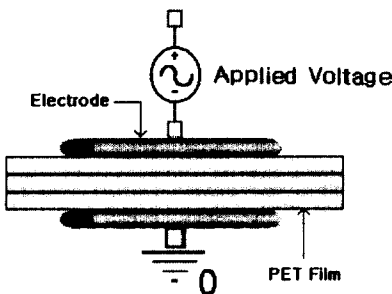


그림 2. 전극구성.

Fig. 2. Electrode configuration.

gauge를 사용하였으며, 가스압력의 측정은 Bourdon형 압력계를 사용하였다.

그림 2의 전극구성은 단부효과에 의한 전계 집중을 최소화하기 위해 Bruce 형으로 설계하였으며, 연면 방전을 막기 위해 전극에서 PET 필름 가장자리까지의 거리(5~6[cm])를 충분히 두었다. 그림 4의 전극구성은 필름에 발생 할 수 있는 보이드가 BDV와 PDIV에 미치는 영향을 측정하기 위하여 인공적으로 보이드를 만들었다. 그림 7의 크랙은 필름표면에 5[mm]길이의 홈집을 내어 실험하였다. 실험에 사용한 평판 전극은 구리 전극을 사용하였으며 전극표면은 파티클에 의한 오차를 줄이기 위하여 선반 가공 후 전극 표면을 사포(CW 1000)로 연마하고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[1μm]분말로 최종 경면처리를 하였다. PET 필름의 두께는 초고압 VT에서 실제 사용하고 있는 에폭시가 코팅된 50[μm]두께의 PET 필름(실험에 사용된 필름 크기:15cm×13cm)을 사용하였다. 전극과 PET 필름간의 불순물에 의한 영향을 최소화하기 위해 밀착접촉을 이용하여 실험을 하였다.

### 2.2 실험방법

실험챔버는 주위 오염을 막고 순도를 높이기 위해 먼저 진공 배기 장치로  $10^{-3}$ [Torr]까지 배기 시키고 시험의 목적에 따라 여러 가지 압력의 SF<sub>6</sub>가스를 주입시켰다. 실제 제품과 같은 환경을 만들어 주기 위해 시편을 직접 전기 오븐에 넣어 시험 온도 별로 숙성시켜 사용하였다. 파괴 후 시편 손상에 의한 오차를 줄이기 위해 매회 전극 표면을 세척 후 재실험을 하였다. 획득한 데이터는 실험의 정확성을 기하기 위해 5회 이상 반복하여 그 평균값을 도출하였으며, 실험도중 방전에 의한 가스 손상에 의한 영향을 최대한 배제하기 위해 매회 고진공 장치로 시험 챔버내를  $10^{-3}$  [Torr]까지 진공 배기 시킨 후 새 가스를 주입하여 실험하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 온도의 영향

필름 위에 코팅된 에폭시가 PET 필름의 절연특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 에폭시가 코팅되어 있지 않은 순수 PET 필름과 에폭시가 코팅된 PET 필름의 온도에 따른 절연특성 변화를 측정하였다. 온도를 30[℃]에서 200[℃]까지 10[℃]씩 상승시키면서 FT-IR, DSC, TGA분석한 결과 필름자체의 열화는 나타나지 않았다. SF<sub>6</sub> EHV VT 권선용으로

사용되는 필름은 제조공정을 간소화하기 위해 권선 접착을 위한 접착용 에폭시가 필름 위에 코팅되어 있다. 에폭시는 필름표면에 바둑판 모형으로 증착되어 있으며, 이러한 구조는 온도변화시 에폭시가 열화되어 절연내력을 저하시키는 요인으로 작용할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 3은 실제 권선절연에 사용되는 필름과 같은 매수(3매)에 대한 온도변화에 따른 BDV, PDIV를 나타낸 것이다.

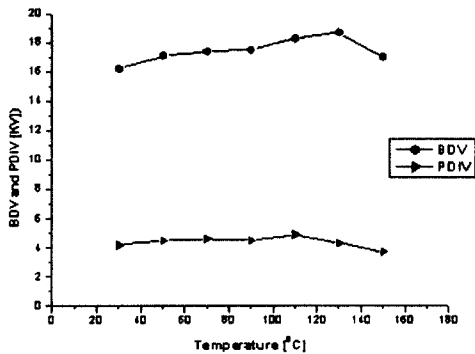


그림 3. 온도변화에 따른 PDIV, BDV 특성.  
Fig. 3. PDIV, BDV as function of temperature.

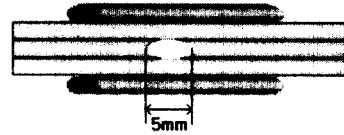
BDV가 130[°C]까지 증가함을 볼 수 있다. 이는 필름 위에 코팅된 에폭시가 약 50[°C]부터 녹기 시작하여 필름과 전극간에 존재하는 미세공극을 채워주기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 130[°C] 이상부터 BDV가 감소하는 것은 130[°C]이상에서 필름에 증착되어있는 에폭시가 증발하는 속도와 양이 급격히 증가하여 필름사이에서 국부적으로 미세파티클과 미세 보이드를 생성시켜 이 부분의 전계를 집중시키기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.2 보이드의 영향

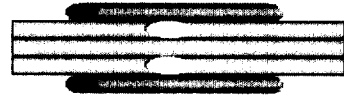
필름에 발생 할 수 있는 보이드가 BDV와 PDIV에 미치는 영향을 측정하기 위하여 그림 4와 같이 시편에 보이드를 내어 앞결과 같은 실험을 하였다. 필름 위에 코팅된 에폭시가 보이드 안에 포함된 위치와 정도에 따른 영향을 알아보기 위해 보이드의 직경을 5mm로 하였다.



(a) PET film without void(Type A)



(b) The void existed between PET film (Type B)



(c) The void existed both sides(Type C)

그림 4. 전극구성.

Fig. 4. Electrode configuration for the effect of void.

그림5와 그림6은 온도의 변화에 따른 부분방전개시전압(PDIV)과 절연파괴전압(BDV)을 나타낸 것이다. 온도의 상승에 따른 변화율보다 형상별 변화가 더 큰 것을 볼 수 있다.

PDIV는 타입A의 경우가 타입B와 타입C에 비해서 전체적으로 크지만 온도가 150[°C]부근에서 감소하고 오히려 타입B와 C가 약간 증가한다. 이는 보이드가 PDIV 특성에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있는 것

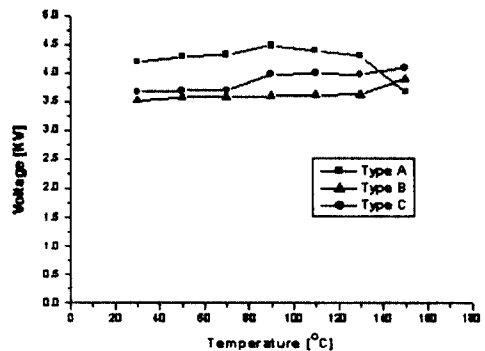


그림 5. 온도변화에 따른 PDIV 특성.  
Fig. 5. PDIV as function of temperature.

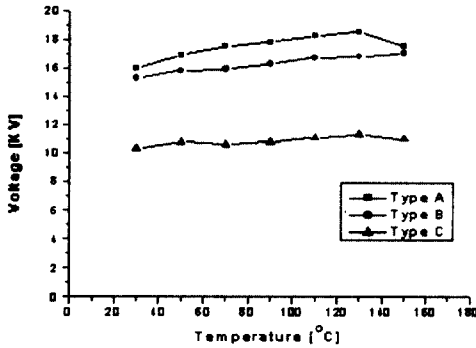


그림 6. 온도변화에 따른 BDV 특성.

Fig. 6. BDV as function of temperature.

으로서 B와 C형태는 보이드에 전계가 집중되어 PDIV가 A형구조보다 낮은 것으로 사료된다. 그러나 온도가 130[°C] 이상에서는 필름에 증착 되어있는 에폭시가 증발하는 속도와 양이 증가하게 된다.

보이드가 있을 경우에는 에폭시가 열을 받아 녹거나 증발될 때 발생하는 상대적으로 높은 압력에 의해 그 주위에 비어있는 공간인 보이드 쪽으로 이동한다. 타입A는 높은 온도에 의해 활동성을 가지게된 에폭시가 이동할 수 있는 보이드와 같은 공간이 없기 때문에 필름과 필름사이에서 에폭시가 국부적으로 미세파티클과 미세보이드를 만든다. 이러한 미세파티클과 미세보이드 부분에서 전계가 집중되어 부분방전개시전압이 낮아지는 것으로 사료된다.

그림 6에서 나타난 것과 같이 부분방전개시전압이 먼저 발생한다고 해서 파괴가 먼저 일어나는 것이 아니며, 결국 파괴의 주 메커니즘은 필름을 관통하여 발생하기 때문에 필름의 두께가 중요한 요인이 될 것이다. 그림 5에서 타입B는 타입C에 비해 낮은 전압에서 부분방전이 개시되었다. 이는 타입B처럼 전극이 필름을 전극의 양쪽에서 압착하고 있기 때문에 가스를 가압하여도 시편주위에 있는 절연가스의 밀도만큼 보이드에 가스가 침투하지 못하여 보이드의 절연내력이 시편주위보다 떨어지기 때문인 것으로 사료된다. 타입C는 필름양면 즉 전극과 접촉하는 두면에 보이드가 있지만 부분방전개시전압이 높은 것은 가압된 SF<sub>6</sub>가스가 전극을 따라 보이드로 유입되어 보이드내의 절연내력을 증가시키기 때문이다. 그러나 절연파괴는 필름을 관통하여 발생하기 때문에 타입B가 두장이 완전한 필름이지만 타입C는 한장만이 완전한 상태이므로 타입C의 파괴가 먼저 발

생하는 것으로 사료된다. 사진1에 시편 유형별 절연 파괴상을 사진으로 나타내었다. 타입A 와 타입C는 절연파괴상이 매우 집중되어 있지만, 타입B는 타입A 와 타입 C에 비해 매우 광범위하게 되어 있을 뿐 아니라, 그 형상도 불규칙적이라는 것을 알 수 있다.

사진 1. 시편유형별 파괴형상.

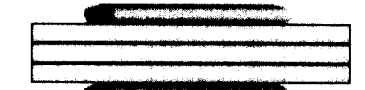
Photo. 1. Failure spot of PET film.

이러한 파괴형상의 가장 직접적인 요인은 절연가스(SF<sub>6</sub>가스)의 영향에 의한 것으로 사료된다. 타입A는 보이드가 없는 필름이 그대로 겹쳐져 있기 때문에 전극과 필름주위가 3[kgf/cm<sup>2</sup>]의 SF<sub>6</sub>가스압의 환경내에 있는 경우이며 또한 타입C는 보이드가 양옆의 필름에 있기 때문에 역시 전극과 필름간의 틈사이로 3[kgf/cm<sup>2</sup>]의 SF<sub>6</sub>가스압이 침투하여 전계집중부분에서의 코로나방전의 영역을 억제하고 있다. 그러나 타입B는 가운데 필름에 보이드가 있기 때문에 프레스 콘택(Press Contact)으로 압축되어있는 전극의 힘과 그 힘으로 접촉되어있는 필름간의 틈새로 3[kgf/cm<sup>2</sup>]의 SF<sub>6</sub>가스가 침투하기가 어렵기 때문에 코로나 발생시 코로나 발생영역의 확대를 저지하는 능력이 타입A 와 C 보다 작기 때문인 것으로 사료된다.

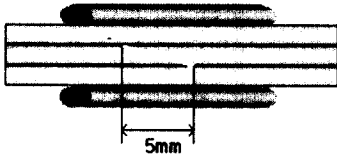
### 3.3 크랙의 영향

크랙이 BDV와 PDIV의 특성에 미치는 영향을 측정하기 위해 그림7에서와 같이 크랙이 없을 때(타입

A), 필름과 필름간에 존재하는 필름에 크랙이 있는 경우(타입B), 바깥쪽에 있는 두필름에 크랙이 있는 경우(타입C)로 시편을 구분하고, 에폭시의 유무에 따른 절연특성을 측정하기 위해 상온에서 같은 필름 내에 크랙 위치를 에폭시 코팅된 부분과 그렇지 않은 부분으로 구분하여 실험을 하였다.



(a) PET film without crack(Type A)



(b) The crack existed between PET film (Type B)



(c) The crack existed both sides PET film (Type C)

그림 7. 전극 구성.

Fig. 7. Electrode configuration for the effect of crack.

그 결과 에폭시 쪽에서 먼저 파괴가 일어났으며, 에폭시의 영향으로 절연내력이 저감한다는 것을 알 수 있다. 이는 필름에 코팅된 에폭시 표면이 사진1과 같이 엠보싱타입으로 있기 때문에 울퉁불퉁한 표

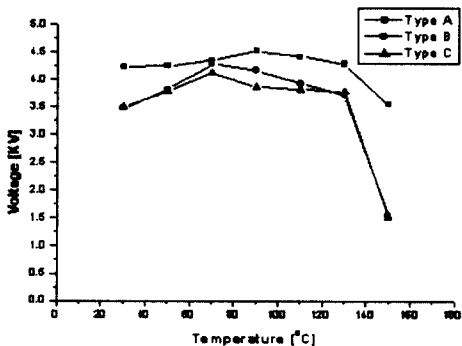


그림 8. 에폭시 없는 부분에서의 PDIV.

Fig. 8. The PDIV of place without epoxy.

면에 존재하는 미세보이드와 크랙간에 전계가 집중하여 파괴값을 저감시키는 것으로 사료된다.

그림 8은 에폭시가 없는 부분에 크랙이 존재할때 온도 변화에 따른 부분방전개시전압을 나타낸 것이다. 타입 A가 타입 B나 타입 C 경우보다 부분방전개시 전압이 전체적으로 높은 것을 알 수 있으나 130[°C] 이상에서는 세 타입 모두 부분 방전 개시 전압이 급격히 감소됨을 알 수 있다. 이 현상은 130 [°C]이상에서 온도에 의해 활동성이 왕성해진 에폭시가 미세파티클과 미세보이드를 형성하기 때문인 것으로 사료된다.

그림 9는 에폭시가 존재하는 부분에 크랙이 있을 경우의 부분방전 개시전압 변화를 나타낸 것이다. 여기서 부분방전 개시전압은 타입 A, 타입 B, 타입 C의 순으로 나타내어지고 있지만 130[°C] 이상에서

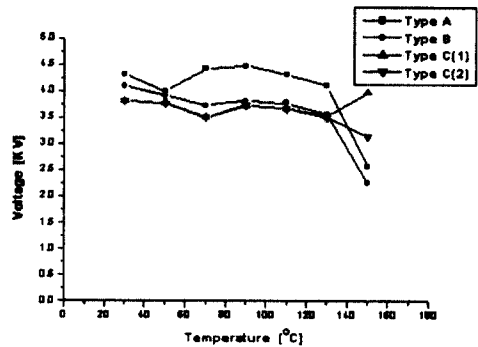


그림 9. 에폭시 부분에서의 PDIV.

Fig. 9. The PDIV of place with epoxy.

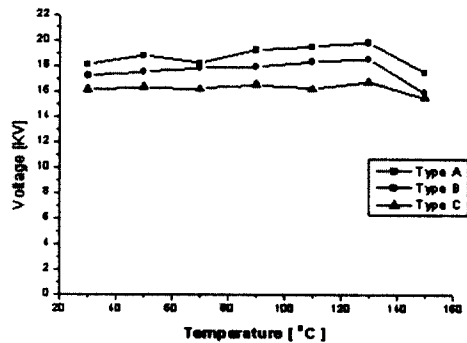


그림 10. 에폭시 없는 부분에서의 BDV.

Fig. 10. The BDV of place without epoxy.

타입 A와 B가 급격히 낮아지는 반면 타입 C의 경우 상승과 감소를 불규칙적으로 반복하였다. 이는 온도가 130[°C] 부근에서 왕성한 활동성을 가진 에폭시가 크랙에 미치는 영향으로 전극과 필름 계면에서 에폭시의 접착밀도는 예측할 수 없는 상황이 되어 일관성 있는 값을 얻는 것이 매우 어렵다는 것을 알 수 있다.

그림 10은 에폭시가 없는 부분에 크랙이 있을 경우 크랙의 온도 변화에 따른 절연파괴전압을 나타낸 것이다. 타입 A, B, C순으로 파괴값이 낮아짐을 볼 수 있다. 결국 크랙이 존재하는 위치에 따라 절연파괴값이 달라질 수 있다는 점을 알 수 있다.

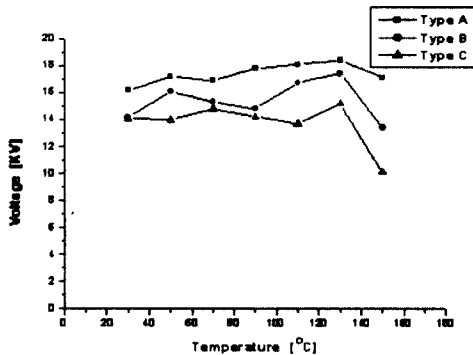


그림 11. 에폭시 부분에서의 BDV.  
Fig. 11. The BDV of place with epoxy.

그림 11은 에폭시 내에 크랙이 존재 할 때 온도 변화에 따른 부분 방전 개시 전압을 나타낸 것이다. 이는 앞에서 설명한 부분 방전 개시 전압 특성과 절연파괴 전압 특성이 같은 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

초고압 가스 VT 권선 절연용 PET Film내에 보이드와 크랙이 있는 경우 보이드와 크랙의 위치, 온도 변화에 따른 BDV, PDIV 변화 특성을 측정 한 결과는 다음과 같다.

PET Film에 온도를 상승시켰을 경우에 절연내력의 변화는 필름에 의한 것보다 필름에 코팅된 에폭시의 영향이 큰 것으로 나타났으며, 필름이 보이드를 가질 경우 보이드 내면이 에폭시를 어떻게 포함하느냐에 따라 절연특성이 변화되었다. PET Film표면의 에폭시가 없는 부분에 크랙이 존재할 경우 BDV는

크랙의 영향을 받으나, PDIV는 크랙자체의 영향보다 온도상승에 의해 활동성을 가지게된 에폭시의 영향을 더 많이 받는 것으로 사료된다. 또한 상온에서 코팅된 에폭시는 전계강도를 저해하는 요인으로 작용되지만 온도상승에 의해 용융된 에폭시는 오히려 절연파괴를 막아주는 박막역할을 하는 것으로 나타났다. PET Film을 접착하기 위해 온도를 130[°C]이상으로 증가시키면 필름에 증착 되어있는 에폭시가 증발하는 속도와 양이 급격히 증가하여 필름사이에서 국부적으로 미세파티클과 미세보이드를 생성시켜 이 부분의 전계를 집중시켜 절연파괴값이 떨어진다 는 것을 알 수 있었다.

#### 참고 문헌

- [1] J.M. Meek, J.D. Craggs, "Electrical Breakdown of Gases", JOHN WILEY & SONS, 1978.
- [2] Brian Chapman, "Glow Discharge Process", JOHN WILEY & SONS, 1983.
- [3] 中村信幸 御所康七 遠藤正雄, "誘電體表面に現れるコロナ放電", ED-95-18
- [4] L.Niemer, L.Ullrich, N. Wiegart, "The Mechanism of Leader Break-down in Electronegative Gases", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.24 No.2, April 1989.
- [5] 田春生, "放電・高電壓 工學", 東明社, 1988.
- [6] 유영식, 김희곤, 송우창, 이재형, 박용관, "마이카-에폭시 절연재료의 열화특성분석", 전기전자재료학회논문지, Vol. 11, pp. 82-89, 1998.
- [7] 이창중, 김진수, 박강식, 한상욱, "전력케이블 절연접속계면의 절연파괴 특성에 미치는 열처리 효과", 전기전자재료학회논문지, Vol. 11, pp. 502-507, 1998.
- [8] 조한구, 박용관, "고분자 절연재료의 트래킹 열화에 미치는 오손액의 영향", 전기전자재료학회논문지, Vol. 10, pp. 770-777, 1997.