

## 에폭시 몰드형 BCT의 절연열화 특성

### Characteristics of Insulation Degradation in Epoxy Mold Type BCT

송재주<sup>1</sup>, 이정철<sup>1</sup>, 임성훈<sup>2,a</sup>, 고석철<sup>3</sup>, 한병성<sup>4</sup>

(Jae-Joo Song<sup>1</sup>, Jung-Chol Lee<sup>1</sup>, Sung-Hun Lim<sup>2,a</sup>, Seok-Cheol Ko<sup>3</sup>, and Byung-Sung Han<sup>4</sup>)

#### Abstract

Various stresses (such as electrical stress, mechanical stress, environmental and electrochemical stress, and defects of structure) result in insulation degradation of epoxy mold type insulators. Since the insulation degradation of BCT(Bushing Current Transformer) and bushing proceeds during fabrication process or operation time due to these causes, various methods to reduce the degradation in their insulation ability have been suggested. In this paper, we investigated surface temperature increment of these insulators due to PD(partial discharge). After the voltage applied into the insulator to generate the artificial PD, the surface temperature of the insulator was measured with non-contact thermometer using infrared rays. It was confirmed through the analysis based on PD experiments that the procession in the insulation degradation of the insulator could be estimated through the measurement of the surface temperature in the insulator.

**Key Words** : Epoxy mold type insulator, BCT(bushing current transformer), PD(partial discharge), Insulation degradation

#### 1. 서 론

에폭시 몰드형 BCT(Bushing Current Transformer)는 배전시스템 MMSG(Metal Closed Switch Gear)에서 전기적으로 Bus bar-BCT-차단기-BCT-Feeder를 연결하며 절연체로 이용되고 있다. 이들 BCT는 대전류(2000 A, 600 A)용으로 전류 측정용과 과전류로부터 시스템을 보호하기 위한 릴레이용 BCT가 있다.

MMSG 내부에 있는 BCT를 포함한 에폭시 몰드형 절연체들은 상과 대지, 2차 단자, 금속간에 발생하는 섬락이나 절연체 표면에 발생하는 PD

(Partial Discharge)에 항상 유의해야 한다. 이는 표면에 부착된 유극성 먼지나 습기 등 주변 환경에 많은 영향을 받으며, 제작과정이나 사용 중에 일어나는 multi-stress에 의해 급격히 절연열화가 될 수 있기 때문이다[1].

기존의 연구들 중에는 적외선 측정 시스템을 이용하여 유전체의 PD에 기인한 표면온도상승에 대한 연구와 고체 유전체들의 주파수 의존특성과 온도에 따른 절연파괴에 대한 연구가 진행된 바 있다[2,3]. 또한, 에폭시 부상의 부분방전 패턴을 분석한 연구 사례도 있다[4]. 그러나 이러한 연구들은 절연열화를 사전에 인지할 수 있는 시스템에 적용하기에는 더 많은 연구가 필요하다.

본 논문에서는 절연능력을 강화시킨 에폭시 몰드형 시료(22.9~36 kV, 600~2000 A용 BCT, CT, Bushing)를 만들어 Heat cycle 시험, PD 시험, 단시간 과전류 시험을 행하였다. 또, 전압을 단계적으로 최고 70 kV까지 인가하여 인위적으로 PD를 발생시켜 실험함으로써 상용전압, 상용주파수에서 경년 변화에 의한 절연열화 가능성과 유사하도록

1. 순천청암대학 IT교육과  
(전남 순천시 덕월동 224-9)  
2. 전북대학교 공업기술연구소  
3. (재)전남테크노파크 전남전력산업기획단  
4. 전북대학교 전자정보공학부  
a. Corresponding Author : superlsh73@hanmail.net  
접수일자 : 2005. 8. 10  
1차 심사 : 2005. 9. 2  
심사완료 : 2005. 9. 13

하였다. 이때, 부분방전에 기인한 BCT 표면의 온도변화를 Infrared 측정시스템을 이용한 비접촉식 온도계로 원거리에서 절연체의 온도를 측정하여 부분방전에 의해서 일어나는 표면온도상승과 PD 특성을 고찰하였다. 비슷하게 반복되는 표면온도상승값과 PD의 특성을 이용하여 평균온도 변화특성과 인가전압이 높아지면 부분방전이 증가되고 표면온도 변화도 더욱 심해지는 특성을 절연체의 절연열화 예측에 적용하기 위해 가시, 가청 코로나 발생 및 부분방전과 온도변화의 값을 도시하고 측정온도와 PD와의 관계를 분석하였다.

## 2. 실험

절연능력 강화를 위해 절연체 제작과정 중에 행하는 시험과 이렇게 제작된 양호한 시료를 가지고 사용 중에 나타날 수 있는 부분방전과 온도변화 관계를 측정하는 두 가지로 분류하여 실험하였다.

### 2.1 실험준비

그림 1(a)는 시료제작에 사용된 동봉으로 반도 진층 형성을 위해 카본블랙(Carbon Black)을 도포한 것을 보여준다[5]. 동봉에는 2000 A와 600 A 용으로 구분하고, 전압에 따라 36 kV, 22.9 kV로 분류하여 BCT 및 부싱에 사용하였다. 그림 1(b)는 BCT 시료이며 600 A와 2000 A 2종류가 사용되었고, CT 내장형으로 절연능력 강화를 위해서 제작과정상 많은 주의가 필요했다. 그림 1(c)는 36 kV 용 2000 A용 부싱으로 너무 무겁고(40 Kg) 길어서(1 m) 절연과피의 위험이 많은 시료이다. 그리고, 그림 1(d)는 600 A와 2000 A용 부싱이며 PD와 표면온도상승 측정에 사용되었다. 실험에 사용된 시료들은 동일한 롯트(Lot)에서 생산 되었지만 특성의 변화가 다양하였다. 그림 1(e)와 (f)는 각각 22.9 kV, 36 kV용 관통형 CT를 보여준다.

한편, 에폭시 수지의 배합은 완전경화가 이루어져 에폭시의 물리적 특성을 잘 나타내고 제작과정에서 보이어나 크랙이 발생되지 않도록 적당한 배합비를 선택하였다. 이렇게 잘 배합된 에폭시 수지는 진공 챔버속에서 탈포하여 압력 0.5 kg/cm<sup>2</sup>로 APG (Automatic Pressure Gelation) 급형속으로 주입하여 1차로 성형하고 다시 후경화 공정을 거쳐 BCT, CT, Bushing과 같은 절연체를 제작하였다.

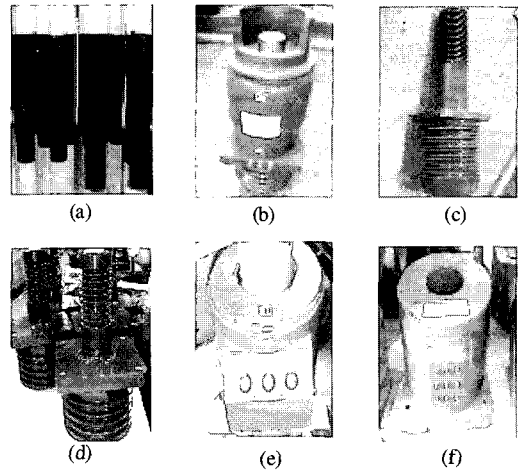


그림 1. BCT, CT와 부싱의 시료형태.

(a) 카본이 도포된 동봉, (b) 22.9 kV용 BCT, (c) 36 kV, 2000 A용 부싱, (d) 22.9 kV, 600~2000 A용 부싱, (e) 22.9 kV용 CT, (f) 36 kV용 CT.

Fig. 1. The shapes of BCT, bushing and Current Transformer specimens.

(a) Cu bar of painted carbon, (b) BCT for 22.9 kV, (c) Bushing for 36 kV, (d) Bushing for 22.9 kV, (e) CT for 22.9 kV, (f) CT for 36 kV.

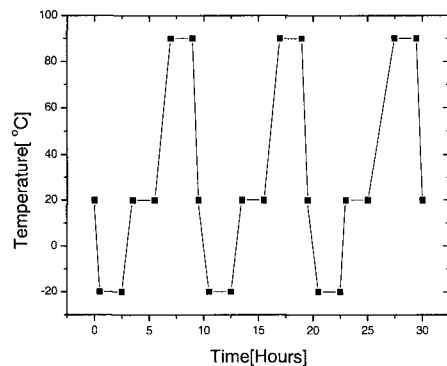


그림 2. 냉열반복 시험.

Fig. 2. Heat Cycle test.

### 2.2 Heat cycle 시험

그림 2는 절연능력 강화를 위하여 Heat cycle

테스트를 수행하는 시험이다. 항온조속에 BCT 시료를 넣고 냉온(-20 ℃)에서 2시간, 상온(+20 ℃)과 고온(+90 ℃)에서 각 2시간씩 유지하여 3Cycle 동안 실시하였다. 시험 적용규격은 KSC- 3835, JEC- 190의 저온(-20 ℃) 및 고온(+90 ℃)시험기준을 따랐으며, 온도의 변화에 따른 절연체 내, 외부의 크랙발생과 절연과피 여부를 확인하였다.

**2.3 과전류 강도 실험**

그림 3은 단시간 과전류 강도를 실험하기 위한 회로도이다. 2차 도체는 접지와 함께 연결하고, 1차 도체는 온도상승 한도가 최대 55 ℃이며, 도전율은 97 %이상이며, IEC 185-5에 따라 189 A/mm<sup>2</sup> 이상을 사용하였다. 한편, 시험회로는 그림 3과 같이 Gen(Generator), PT(potential transformer), BB(back up breaker), MS(making switch), CLR(current limiting reactor), Tr(transformer bank), CT(current transformer), TO(apparatus under test)로 구성된다.

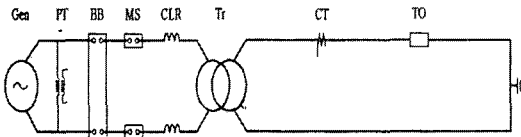


그림 3. 단시간 과전류 강도실험 회로도.  
Fig. 3. Test Circuit of short time over-current strength.

**2.4 부분방전에 따른 온도상승 측정실험**

그림 4는 BCT에 전압을 인가시켜 인위적으로 PD를 발생시켰을 때 절연체 표면에서 일어나는 온도의 상승값을 측정하기 위한 부분방전 실험 회로이다. 측정 포인트(Point)는 소호통 내부 1차 도체인 동봉주변의 1 cm되는 일정한 지점에 비접촉식 적외선 온도계를 이용하여 변화되는 온도를 측정하였다. 온도측정 장비는 Raytek의 Ranger PM Series로 비접촉식 적외선 온도계를 사용하였다. PD 측정은 전원이나 접지를 통한 외부 노이즈를 차단한 차폐된 Shield Room에서 부분방전 및 온도를 측정하였다. 부분방전 시험장비는 Tetex 9120 Series를 사용하였으며, 회로도에서 Z<sub>d</sub>는 감지임피던스(detection impedance), C<sub>k</sub>는 커플링 커패시터(Coupling capacitor), dd는 방전감지기(discharge detector)를 나타낸다.

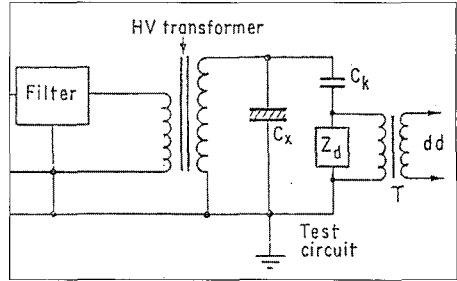


그림 4. 부분방전 실험회로도.  
Fig. 4. Test circuit of partial discharge.

**3. 실험 결과 및 고찰**

**3.1 절연능력강화 실험결과 분석**

에폭시 수지의 배합비는 여러 배합 조건에 따른 실험 결과 100 : 20 비율로 주재(LCT1160A)와 경화제(LCT1160B)를 선택하였다. 실험은 에폭시 수지 제조회사에서 온도분석 시스템을 이용하여 10 ℃/min으로 온도를 상승하여 40 ℃에서 200 ℃까지 실험한 값이다. 그림 5에서 보는바와 같이 이 배합 조건에서 액상이 유리상태로 변화하는 불연속 점(Shoulder Peak)이 나타나지 않고, 유리전이 온도[6] T<sub>g</sub>도 90.4 ℃로 높아 완전경화가 이루어져 에폭시 절연특성이 좋게 나타났다.

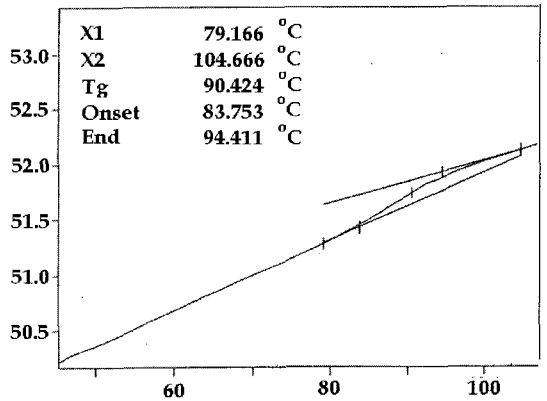


그림 5. 에폭시 배합비(100:20)에 따른 유리전이 온도(T<sub>g</sub>) 특성(LCT1160A: LCT1160B).  
Fig. 5. Characteristic of glass transition temperature(T<sub>g</sub>) dependent on epoxy mixing ratio(LCT1160A: LCT1160B).

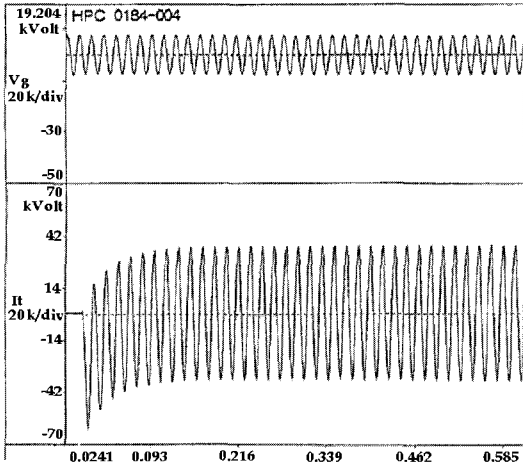


그림 6. 단시간과전류 강도실험결과(20 kA/ 1 sec).  
 Fig. 6. Test results of short time over-current strength(20 kA/ 1 sec).

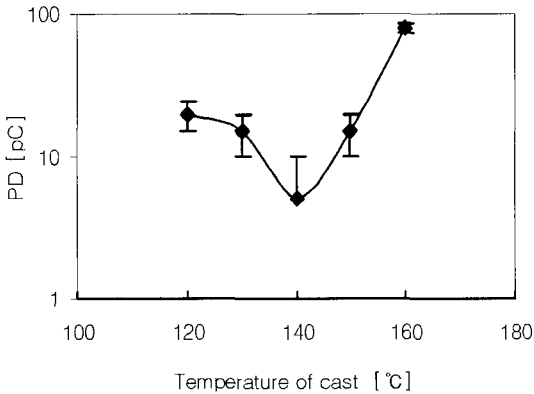


그림 7. 부분방전과 금형온도 특성.  
 Fig. 7. Property of PD and temperature of cast.

한편, 그림 6은 기계적 내구성과 열적인 과전류에도 견딜 수 있는 시험인 상용전압 19.2 kV와 단시간 과전류 20 kA를 1 sec동안 BCT의 1차 도체에 인가하여 실험한 결과로써 0.5 sec동안만 표시하였다. 기계적으로는 전자력에 의한 BCT의 파손이 없으면서 전기적으로는 계통과 절연협조가 이루어질 수 있도록 제조공정 상에서 절연능력을 배가시킨 결과, 열적 단시간 과전류강도에도 충분히 견딜 수 있었다.

그림 7은 PD와 금형온도와의 관계를 보여준다. 그림에서 성형온도에 따른 부분방전 변화를 분석

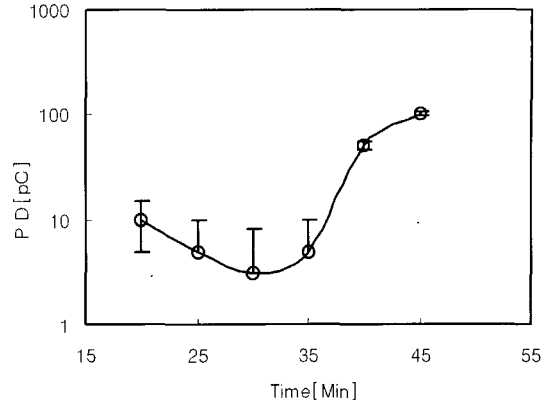


그림 8. 부분방전과 성형시간 특성.  
 Fig. 8. Property of PD and gelation time.

해 보면 금형의 예열온도는 110 °C ~ 120 °C, 성형온도는 140 °C에서 최적의 성형조건을 나타냄을 알 수 있다. 36 kV용 붓싱 시료의 경우 외견상이상이 없어 보이지만 부분방전이 많이 발생하였다. 절단하여 분석한 결과 절연체 내부에 미세한 크랙 발생과 보이드(void)가 다수 형성되어 있고, 말단에는 약 2~3 mm 정도로 길이방향의 수축이 있었다. 이는 성형시 동봉과 예폭시의 접촉부위가 너무 길어서 성형중에 예폭시의 부피가 많은 쪽으로 이끌리는 수축력이 작용하면서 굳어져 동봉 주위에 미세한 크랙이 발생된 것으로 여겨진다. 도체인 동봉과 예폭시 계면(Interface)에 작용하는 수축력과 성형시 가열조건에 따라 존재하는 여러 단계의 기계적인 다중응력의 변화 패턴에 기인한다[7-9].

따라서, 이러한 문제점을 줄이고 절연능력을 향상시키기 위해 동봉에 카본블랙을 도포하여 반도체층을 형성하고 자연스런 sliding 효과를 유도하여 성형시 수축으로 인한 크랙이 발생되지 않도록 하였다. 그림 8은 부분 방전량의 변화와 시료제작 시간과의 관계를 나타낸 것으로써, 성형하는데 소요되는 시간은 30 min이 최적이었다. 고온에서는 시료 제작시간이 짧아지는데 내부크랙이나 Cavity의 발생이 많고 PD특성이 좋지 않았다. 성형시 금형과 동봉의 온도가 높기 때문에 접촉 부분에서부터 굳어지게 된다. 즉, 높은 온도와 직접 닿는 표면은 먼저 굳고 중간층은 굳지 않는 젤(Gel)상태에서 밀려가면서 경화되어 공동이나 크랙이 발생된 것으로 여겨진다.

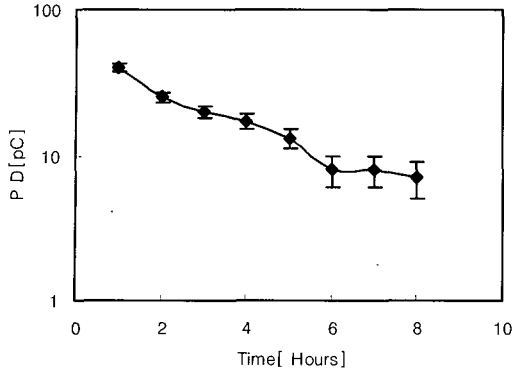


그림 9. 부분방전과 후경화시간 특성.  
Fig. 9. Property of PD and curing time.

그림 9는 APG에서 시료를 탈형하여 후경화를 오븐(Oven)에서 온도 80 °C~100 °C로 8 hours 이상하고 서서히 자연냉각을 시켰을 때 에폭시의 PD 특성을 측정 한 것으로, 냉각시간이 증가함에 따라 에폭시 고유의 물리적 특성을 회복하여 PD가 감소함을 볼 수 있다.

3.2 부분방전과 온도변화 실험 결과분석

그림 10에서 BCT 2000 A, BCT 600 A, Bushing 2000 A 그리고 Bushing 600 A인 시료를 사용하여 적용전압 22.9 kV를 인가하여 인위적으로 발생하는 부분방전 결과를 비교한 것이다. 일정 전압까지는 부분방전현상이 나타나지 않는다. 그러나 인가전압이 증가하여 부분방전 값이 500~1000 pC 이상이 되면 지수 함수적으로 갑자기 커지는 특징을 보였다.

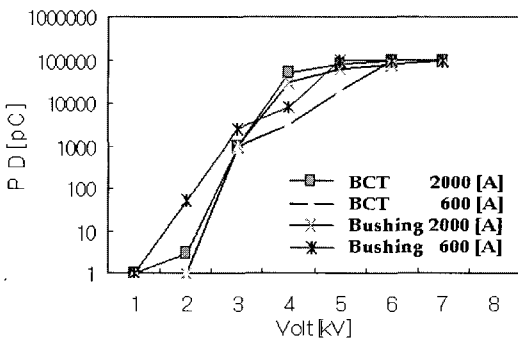


그림 10. 인가전압에 따른 부분방전 특성.  
Fig. 10. Property of partial discharge dependent on applying voltage.

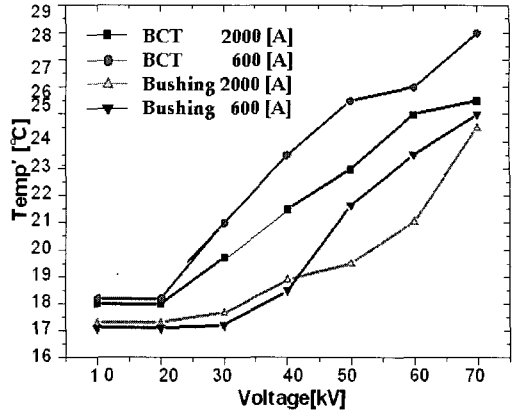


그림 11. 전압인가에 따른 표면온도 상승 특성.  
Fig. 11. Property of surface temperature increment dependent on applying voltage.

표 1. 부분방전 및 가시, 가청코로나 발생전압.  
Table 1. Voltage generated PD and Corona at epoxy mold type Insulators.

시료	PD발생 전압 [kV]	PD소멸 전압 [kV]	가청코로나 나전압/PD [kV/pC]	가시코로나 전압/PD [kV/pC]
BCT 2000[A]	20	17.5	23 / 300	30 / 800
BCT 600[A]	21	18.2	25 / 400	35 / 1000
Bushing 2000[A]	23	21	28 / 300	37 / 1000
Bushing 600[A]	24	22.5	30 / 500	40 / 1500

또한, 절연체 표면온도 변화는 그림 11과 같이 부분방전이 발생하기 전에는 거의 변화가 없었다. 그러나, 인가전압이 높아짐에 따라 거의 일정한 비율로 증가됨을 보였다. PD발생이 많아짐에 따라 표면온도가 상승하게 되며 변화의 폭이 커지는 특징을 나타내었다. PD측정시 인가전압 70 kV 이상은 인가하지 못하였으며, 절연체의 섬락발생에 따른 절연파괴 위험이 있었기 때문에 100,000 pC 이상에서는 실시하지 않았다[10].

표 1은 시료에 따른 부분방전 및 가청, 가시 코로나가 발생하는 전압을 나타내었는데 자체의 절연특성 때문에 약간씩 다르다. 부분방전이 시작되는 개시전압은 20~24 kV이며 소멸전압은 17.5~22.5

표 2. BCT 2000 A 시료에서 부분방전에 따른 표면온도상승.

Table 2. Surface temperature increment according to PD of BCT 2000 A.

PD [pC]	T[°C] -min	T[°C] -max	T[°C] -Ave
1	18	18	18
300	18	18.5	18.3
500	18.4	19.6	18.8
2500	18.8	21	19.9
8000	19	24	22
10000	21	27	24

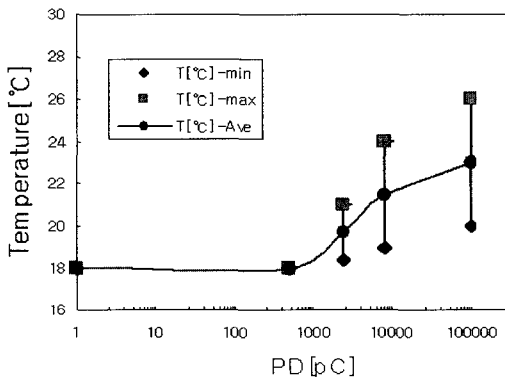


그림 12. BCT에서 PD 와 표면온도 상승특성.  
Fig. 12. Property of PD and surface temperature increment of BCT.

kV로 잔류전하 때문에 약간 낮게 나타난다. 가청 코로나(audible corona)발생은 300-500 pC 정도가 되었을때 나타났다[11]. 800 pC 이상에서는 가시코로나(visual corona)와 함께 오존(ozone)이 발생하였는데 오존은 절연체의 전극주변에서 화학적으로 부식을 일으키는 원인이 된다.

표 2는 BCT 2000 A 시료에 전압을 인가하여 PD값을 변화할 때 온도변화의 최대 상승값과 최소 상승값, 평균 상승값, 그리고 근사화시킨 그래프에서 얻은 근사값을 나타낸 것이다.

그림 12는 BCT 2000 A 시료로 가장 대표적인 온도-PD특성을 보였으며, 표 2에서 보는 바와 같이 온도측정 데이터값을 평균값으로 나타낸 곡선이다.

그림 13은 절연열화 기준 특성 곡선을 보여주고 있다. I 영역에서는 온도의 변화가 거의 없으며 부

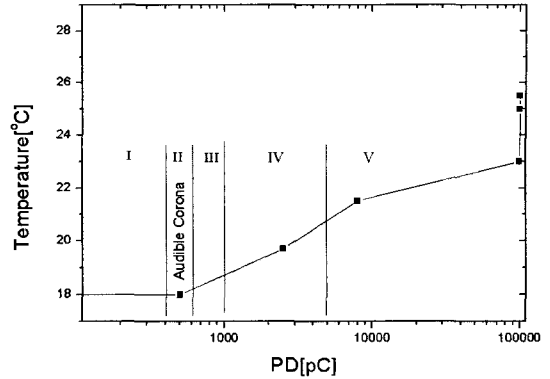


그림 13. 절연열화 기준 특성 곡선.  
Fig. 13. Example characteristics curve of insulation degradation.

분방전 값이 300 pC 이상인 II영역에서는 온도변화가 나타나기 시작하며, 가청 코로나가 발생하는 영역이다.

PD가 800 pC가 되는 III영역에서는 최소 온도는 거의 처음과 변화가 없었으나, 가시코로나 발생과 함께 표면온도의 변화가 아주 심해짐을 알 수 있었다. IV영역에서는 오존이 심하게 발생하고 온도변화가 심하며 전압은 40-50 kV를 넘었다. V영역은 60 kV 이상에서 나타나며, 섬락발생과 함께, 절연파괴의 위험이 있었다.

따라서, 그림 13곡선은 적외선 온도계를 이용하여 절연체의 표면온도를 측정함으로써 부분방전으로 인한 절연체의 절연열화를 PD 발생값과 비교하여 어느 정도 진행되었는지 사전에 예측할 수 있음을 보여준다.

#### 4. 결 론

절연체를 제작하는 공정에서부터 절연특성을 강화시키기 위한 다양한 실험을 하였다. 또한 부분방전과 온도특성을 이용하여 절연열화를 예측하여 볼 수 있도록 인위적으로 PD를 발생시켜 표면온도 상승과 부분방전 특성에 대하여 고찰하였다. 그 결과 우리는 다음과 같이 BCT나 붓싱과 같은 에폭시 절연체의 절연열화를 예측할 수 있음을 확인하였다.

1. 절연체에서 부분방전이 발생하면 절연열화는 운전 중에 받는 multi stress와 주변여건에 따라서는 급격히 진행될 수 있다.

2. 시스템을 유지보수하는데 있어서 부분방전량이 300 pC이하에서는 온도변화가 거의 없으며, 가청코로나는 300 pC이상에서 나타나고, 온도변화는 1 ℃이하였다. 가시코로나는 800 pC이상에서 나타나고 온도변화는 최대 3 ℃이하였다. 한편, 오존발생은 1000 pC 이상인 IV영역에서 발생하였고, V 영역은 섬락과 절연파괴의 위험이 있었다

3. 비접촉식 원거리 적외선 온도계를 이용하여 절연체 표면의 온도의 변화를 측정하면 부분방전과 표면온도 상승을 나타낸 특성곡선으로부터 절연열화 진행상태 여부를 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구를 바탕으로 더욱 연구 개발할 경우, 절연체 표면온도 상승변화를 측정할 근사화된 특성곡선을 이용하여 시스템 운전 중 유지보수를 위해 절연체들의 절연열화를 사전에 인지하는 예측시스템의 안정적 운용 방안에 활용할 수 있으리라 사료된다.

### 참고 문헌

- [1] M. Di Lorenzo del Casale, "On multistress aging of epoxy resins PD and temperature", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No. 2, p. 299, 2001.
- [2] Tadeusz. Las, "Measurement of solid dielectric surface temperature increment arising from partial discharge activity", IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Anaheim, USA, p. 324, 2000.
- [3] M. Di Lorenzo del Casale, "Investigation of temperature effect on epoxy resin; aging due to partial discharge", IEE Dielectrics Materials Measurements and Applications Conference Publication, No. 473, p. 509, 2001.
- [4] S. -H. Ahn, et al, "A study of partial discharge pattern analysis with artificially defected epoxy resin busing inhering voltage detecting sensor", IEEE Proceedings of 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Xian, China, p. 1069, 2000.
- [5] J.-J. Song, S.-H. Kim, J.-S. Hwang, J.-K. Park, and B.-S Han, "A study on the prevention of creak generated in interface cu and epoxy with painting of carbon", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 14, No. 7, p. 578, 2001.
- [6] M. Di Lorenzo del Casale, et al, "A life model for epoxy resins subjected to PD activity at different temperatures", IEEE Conference on International Symposium Electrical Insulation Dielectric Phenomena, Sicillia, Monreale(PA), Italy, p. 564, 2000.
- [7] Y. Suzoki, et al, "High temperature PD degradation characteristics at eoxy resin-EPR interface", IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Eindhoven, Netherands, p. 264, 2001.
- [8] B.-C. Song, et al, "The creak resistance and the dilectric breakdown properties of epoxy composites due to the multi stresses variation", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 1, No. 1, p. 136, 2000.
- [9] M. Di Lorenzo del Casale, "On multistress aging of epoxy resins PD and temperature", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No. 2, p. 299, 2001.
- [10] M. Di Lorenzo del Casale, "On investigation of aging of epoxy resin under distorted voltage", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectrics Phenomena, Italy, p. 573, 2000.
- [11] A. Skopec, et al, "Time-domain temperature variations of a composite insulator surface exposed to arc discharges", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No. 2, p. 369, 2004.