

SF6 가스 절연변압기의 절연특성과 부분방전

Insulation Characteristics and Partial Discharge for the SF6 Gas Insulated Transformer

선종호*, 김우성**, 김광화***, 오원근****, 하영식*****

Sun, Jong-Ho*, Kim, Woo-Sung**, Kim, Kwang-Hwa***, Oh, Won-Keun****,
Ha, Young-Sik*****

ABSTRACT

This paper describes insulation characteristics and partial discharge for the SF6 gas insulated transformer. The characteristics of gas insulated transformer and the degradation sequence of solid insulation under SF6 gas atmosphere were explained. The model electrode system of the types that the aramid papers were inserted between two sphere electrodes was prepared. The partial discharge tests were carried out to that system and the insulation characteristics were considered.

1. 서론

최근 대도시에서 전력수요의 증가 때문에 과밀화된 도심부의 지하에 대규모의 변전소가 설치되고 있으며, 지하변전소에 설치되는 변압기는 방재 대책면으로부터 난연성 변압기인 몰드변압기나 불연성 변압기인 가스절연변압기가 설치되고 있지만 몰드변압기는 용량이나 사용전압에 있어서 기술적으로 개발의 한계가 있기 때문에 큰 옥내변전소의 대용량 변압기로서 가스절연변압기가 주로 사용될 전망이다¹.

가스변압기에서는 피복권선이 인접하는 턴간이나 섹션간을 지지하고 있는 스페이스에서 가스절연체와 함께 소위 쇄기형태의 삼중점이 형성된다. 가스변압기는 삼중점에서 가장 취약한 절연특성을 보이게 되며 권선에 감겨질 고체절연필름이 장기적으로 부분방전에 노출되면 고체절연필름은 점차 침식되어 절연능력이 저하되므로써 턴간 절연파괴에 도달하게 된다. 이와 같은 특성 때문에 가스변압기의 절연특성중 쇄기형 갭에서의 부분방전에 관한 연구는 매우 중요하다².

본 연구에서는 이러한 점을 감안하여 부분방전에 의한 가스변압기 절연특성도출을 위한 연구를 수행하였다. 연구내용으로서는 가스절연변압기의 일반적인 특성과 부분방전에 의한 고체절연체의 열화과정을 검토하였고, 제작된 모델전극에 대하여 부분방전실험을 실시하여 SF6가스와 고체절연체로 구성된 절연시스템의 부분방전에 대한 절연특성을 고찰하였다.

* 한국전기연구소 선임연구원 정회원

** 한국전기연구소 연구원 비회원

*** 한국전기연구소 책임연구원 정회원

**** (주)효성중공업 직원 비회원

***** (주)효성중공업 부장 비회원

2. 가스절연변압기의 특성

2.1 일반적 특성¹

유입변압기는 내부사고 발생시 아크로 인해 화재로 파급되는 위험성이 있으므로 방재상의 관점에서 변압기의 불연화가 요구되고 있다. 불연변압기를 실현하는 방법으로서, SF₆ 가스를 이용한

가스절연변압기가 특성상 실용적으로 나타나고 있다. 가스절연변압기를 사용함으로써 나타나는 결과는 유입변압기에 비해 다음과 같은 특징이 있다.

① 콤팩트화

유입변압기의 탱크 상부에 취부되어 있는 콘서 베이타가 불필요해지며, 변압기의 높이가 낮아진다. 이 때문에 초고압급 지하변전소의 기기실의 높이는 2.5[m]정도 낮출 수 있다.

② 변전소 배열의 합리화

4[bar]의 SF₆를 봉입하고 있는 가스절연변압기와 가스절연개폐장치를 연결해 동일한 기기실에 배치할 수 있고 변전소 전체의 배열에 합리화가 가능하다.

③ 불연성-방재설비의 합리화

SF₆ 가스의 불연성은 소화설비 등의 방재설비가 종래에 비해 합리화 되었다.

④ 현지공사의 합리화

⑤ 보수점검의 간소화

가스절연변압기에 사용된 재료로 철심, 도체 및 탱크 등의 구조재료는 유입변압기와 같으며 SF₆ 가스의 절연, 냉각특성에 적합한 가스절연변압기 고유의 절연재료가 사용되어 있다. SF₆ 가스의 절연내력 및 냉각능력이 절연유에 비해 적으므로, 특히 코일 절연물에 도체 피복은 PET(Polyethylene Terephthalate), PPS(Polyphenylene Sulfide), PEN(Polyethylene Naphthalene) 필름 및 노맥스(Nomax)등의 고분자 절연재료가 사용되고 비교적 저온부에 절연성능이 요구되는 장소에서는 크래프트지가 사용된다.

2.2 가스절연변압기에서의 부분방전 발생 특성³

비교적 가스절연변압기에 대한 연구의 경험이 많음에도 불구하고 절연특성에 대한 대부분의 연구는 가스절연방식 고체절연권선에서 취약부분으로 알려져 있는 턴간 쇄기형구조에서 나타나는 방전이나, 섹션간 스페이스에서 나타나는 방전현상에 집중되어 있으며, 특히 턴간구조에서 나타나는 쇄기형부분의 절연특성연구가 많이 수행되고 있다. 이러한 연구경향은 가스절연변압기의 절연구조에서 쇄기형 부분이 가장 취약한 부분임을 뜻하는 것으로서 그림 1은 턴간에서 나타나는 쇄기형구조형태를 보여주고 있다. 그림 1에서 알 수 있듯이 쇄기형부분에서의 방전은 기중방전과 고체절연방전이 혼합된 방식이며 기중방전은 식(1)과 같이 가스압력이나 전극구조에 의해 결정되고, 고체절연체에서의 방전은 고체절연체의 절연특성에 의하여 결정된다. 식(1)에 의하면 부분방전개시전압은 가스압력에 영향을 받음을 알 수 있다.

$$V_{th} = 89 \cdot p \cdot d \cdot u \cdot \left(1 + \frac{0.175}{\sqrt{p \cdot R}}\right) \text{-----}(1)$$

V_{th} : 이론적 절연파괴전압(kVpeak),

P : SF₆가스압력(kgf/cm² · abs),

d : 갭길이(cm)

u : 전계이용률=평균전계/최대전계,

R : 최대전계측전극선단의 곡률반경(cm)

3. 부분방전과 고체절연재료의 열화⁴

부분방전에 의한 절연체의 열화과정은 그림2와 같이 나타낼 수 있다. 그림2의 열화과정에서 침식과 pit형성은 중요한 역할을 한다. 침식과 pit가 발생하면 뒤이어 트리가 발생하고 최종적으로 절연파괴에 도달하게 된다. 침식과정은 다음에 의해서 일어난다.

- (1) 방전과정에서 만들어진 이온에 의한 직접적인 충돌
- (2) 고온의 방전가스에 의한 국부적인 온도상승
- (3) 여기된 분자와 방전에서 발생된 화학성분을 기점으로한 화학반응

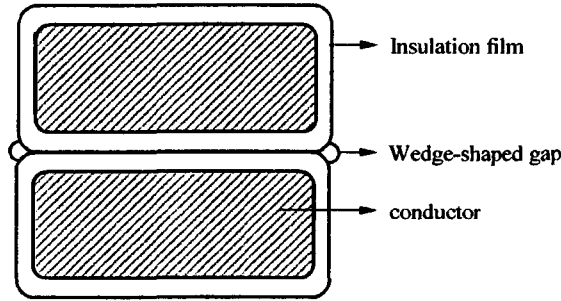
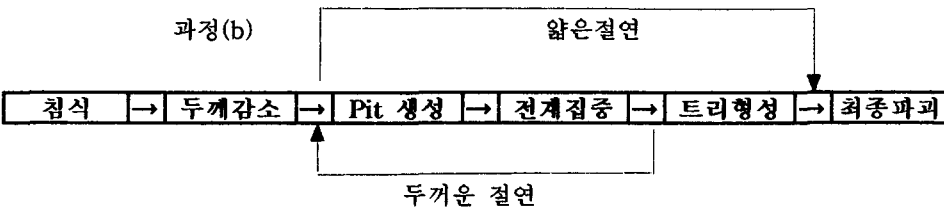


그림 1. 턴간 권선도체의 구조

부분 방전	→	이온생성	→	이온충격	→	원자 분자 해리	→	두께 감소
	→	고온가스생성	→	국부적온도상승	→	용융	→	
	→	여기분자생성	→	이차 생성물	→	산화	→	

(a)



(a) 부분방전에 의한 절연열화의 과정

(b) 부분방전에 의해서 절연체가 침식후 절연파괴되기 까지의 과정

그림2. 부분방전에 따른 침식에 의하여 절연체가 파괴되는 절연열화과정

4. 실험방법

4.1 시료제작

절연필름의 미소가스갭을 모의하기 위하여 제작된 전극시스템은 그림3과 같다. 그림3에서 챔버는 아크릴 튜브로 되어 있으며 챔버 내에는 고체절연물을 삽입하기 위한 전극시스템을 설치하였다. 전극시스템은 고전압전극과 접지전극 모두 직경 40mm의 구전극으로 하였으며, 고전압전극부

에 전극간 거리를 0에서 25mm까지 변화시킬 수 있는 최소 눈금단위가 1 μ m인 마이크로메타를 설치하였다.

고체절연필름으로서서는 두께 50 μ m의 NOMEX지를 사용하였다. 실제 가스절연변압기의 도체에는 얇은 절연필름이 여러 장 겹쳐져 있기 때문에 본 연구에서도 절연필름을 직경 100mm의 크기로 오려낸 후 절연필름을 4장 겹쳐 전체 두께 200 μ m의 시료를 하나의 시료로 사용하였다. 시료는 사용전 100 $^{\circ}$ C에서 약 24시간동안 건조를 실시하였으며, 시료삽입방법은 상하부 구전극이 접촉되었을 때 마이크로메타를 읽은 후 두께 200 μ m의 시료를 삽입하고 다시 마이크로메타로서 초기치에 180 μ m를 더한 값으로 조정하여 전극사이의 시료두께는 압력을 가하여 180 μ m로 하였으며 이는 전극과 시료가 접한 부분의 기중부를 없애기 위해서 이다. 이와 같이 시료가 삽입된 전극시스템은 아크릴로 제작된 가스챔버내부에 설치되고 충분히 진공 탈기한 후 가스내에는 규정압력의 SF₆가스가 채워진다.

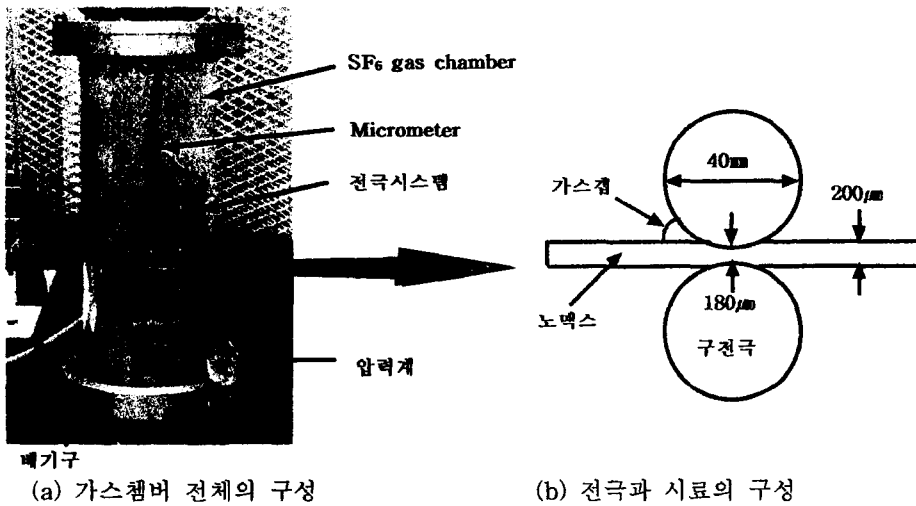


그림3. SF₆ 가스챔버와 전극시스템의 구조

4.2 실험회로

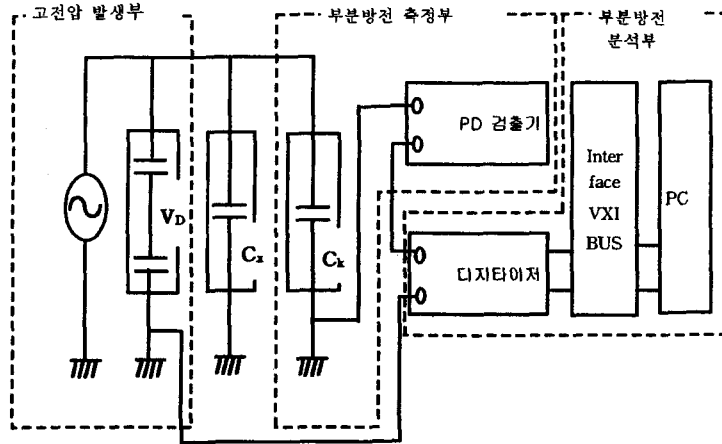
그림4는 본 연구에서 사용된 교류절연파괴 및 부분방전실험회로를 보여주고 있다. 시료를 제외한 시험용변압기, 커플링 커패시터, 고압 인가선 등은 50kV까지 부분방전이 발생하지 않으며, 잡은 레벨은 1pC이하이다. 전압은 정확도를 높이기 위하여 시험용 변압기의 제3권선에 연결된 Multimeter로 전압을 확인한 후 변압비를 적용하여 전압특성을 구하였으며, 부분방전측정기로서 부분방전크기 및 발생을 확인하였다. 장시간 부분방전열화실험에서는 그림4에서 디지털계측 및 컴퓨터를 사용하여 장시간 열화에 따른 부분방전분포특성을 고찰하였다.

4.3 실험방법

본 연구에서 사용된 SF₆가스 압력은 1.0, 1.5, 2.0kgf/cm²의 3종류이며, 각 가스압력에서 단시간 전압인가방식과 장시간 전압인가방식의 2가지 전압인가방식을 사용하여 부분방전실험을 실시하였다.

단시간 전압인가방식에서는 인가전압을 약 500V/s의 속도로 연속적으로 상승시키면서 각 가스압력에서 아라미드지를 삽입했을 때의 부분방전개시전압과 절연파괴전압 및 아라미드지 전체 두께와 같은 갭 간격 180 μ m에서의 SF₆가스 절연파괴전압을 구하였다. 이러한 실험은 동일 가스압력에서 3회 실시되었으며, 매 시험마다 노맥스지와 SF₆가스를 교체하여 사용하였다.

장시간 전압인가방식에서는 각 가스압력에서 교류 6kV의 일정전압을 시료가 부분방전열화에



V_D: 분압기, C_x: 결합콘덴서, C_x: 시료

그림4. 디지털 부분방전실험회로

의하여 절연파괴될 때까지 인가하였다. 1회의 부분방전 측정시간은 인가전압파형의 20주기로 하였으며, 각 가스압력에서 시료가 열화되어 절연파괴될 때까지의 부분방전분포 변화특성으로부터 부분방전량과 펄스수의 변화특성을 고찰하였고 고체절연체 표면의 전자현미경적관찰을 통하여 열화과정을 육안으로 관측 분석하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 단시간 전압인가 실험결과

그림 5는 SF₆가스 압력에 따른 절연파괴전압과 부분방전개시전압특성을 보여주고 있다. 그림 5의 결과로부터 동일 가스압력에서 절연저항을 삽입했을 때가 삽입하지 않았을 때보다 약 2-3배정도 절연파괴전압이 높게 나타나고 있어 일정 크기이상의 전압이 가스와 고체절연체로 구성된 절연시스템에 인가되면 가스부분에서 방전이 시작됨을 알 수 있다. 또한 가스압력의 증가에 따른 부분방전 개시전압과 절연파괴전압의 증가율이 유사하게 나타나고 있어 이들 결과 부분방전개시전압과 절연파괴특성은 직접적인 관계가 있는 것으로 생각할 수 있다.

5.2 장시간 전압인가 실험결과

그림 6은 인가전압 6kV에 대한 각 가스압력에서의 전압인가 초기와 절연파괴전의 부분방전분포 형태를 보여주고 있다. 이 분포 변화로부터 부분방전량의 경우 각 가스압력에서 전압인가초기에는 큰 부분방전량이 발생하고 있으며 시간이 경과하면 큰 부분방전은 점차 사라지고 또한 이러한 초기의 큰 부분방전량은 가스압력이 높을수록 크기가 작아서 300kPa에서는 초기치와 마지막 부분방전량이 거의 비슷한 값으로 분포하고 있음을 알 수 있다.

전압인가시간에 따른 부분방전량과 펄스수의 변화를 보다 상세히 조사하기 위하여 각 압력에서 일정간격으로 측정된 전체의 평균부분방전량과 펄스수의 분포 변화특성을 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 여기서 평균부분방전량은 한 측정시점에서 20주기동안 측정된 총부분방전량을 펄스수로 나눈 것이다. 이 그림들로부터 전압이 인가되는 동안 부분방전량과 펄스수는 가스압력이 높을수록 더 작은 량으로 분포하고 있으며, 절연파괴까지의 시간은 200kPa에서 5분, 250kPa에서 14분,

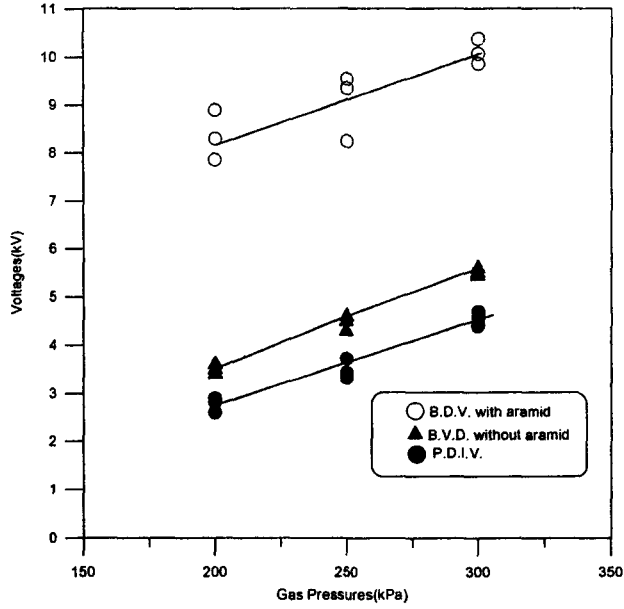


그림 5. 교류절연파괴 및 부분방전실험결과
전압인가직후 ← → 절연파괴전

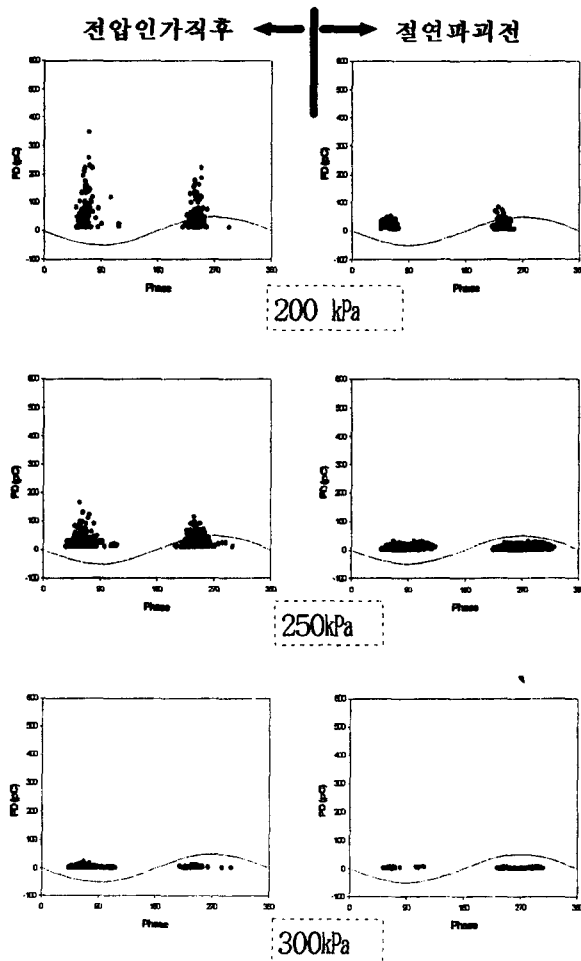


그림 6 q, n의 분포

300kPa에서는 94분으로 더 긴 것으로 나타나고 있다. 또한 각 가스압력에서 두 가지의 부분방전 특성치는 전압이 인가되고 나서 어느 정도시간까지 감소하는 경향을 보이지만 그 이후에 증가하면서 절연파괴에 이르는 특성을 보이고 있고 특히 펄스수는 처음 전압이 인가되었을 때의 펄스수보다 더 크게 증가한 후 절연파괴되는 것으로 나타나고 있다.

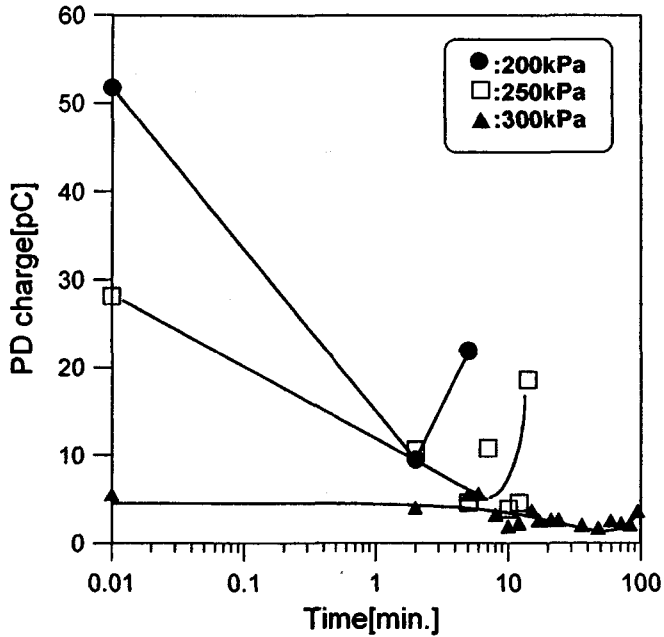


그림 8 전압인가시간에 따른 부분방전량 변화

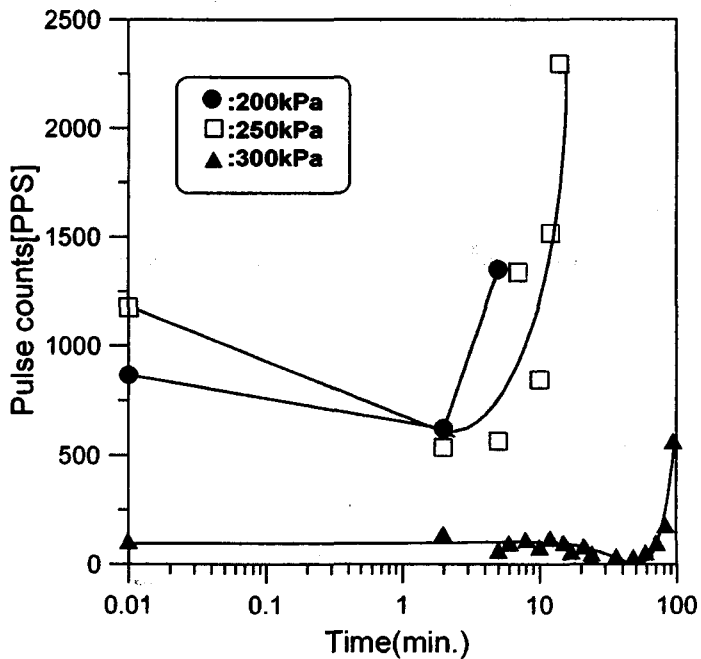


그림 9. 전압인가시간에 따른 부분방전 펄스수 변화

6. 결 론

- 1) SF6가스 압력에 따른 절연파괴전압과 부분방전 개시전압특성으로부터 가스와 고체절연체로 구성된 절연시스템은 가스부분에서 먼저 방전이 시작됨을 알 수 있었다.
- 2) 가스압력의 증가에 따른 부분방전 개시전압과 절연파괴전압의 증가는 유사한 경향을 보여 주었다.
- 3) 각 가스압력에서 전압인가초기에는 큰 부분방전량이 발생하고 있으며 시간이 경과하면 큰 부분방전은 점차 소멸하는 것으로 나타났다.
- 4) 부분방전량과 펄스수는 전압인가시간의 경과에 따라 감소하다가 증가한 후 절연파괴되는 결함을 보였으며, 특히 펄스수는 초기치보다 절연파괴전이 더 크게 증가하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. "不燃性難練性變壓器の現狀とその動向", 電氣學會技術報告 第459号, pp30-48, 1993. 4
2. Tamotsu Inoue et al., "Dielectric characteristics of turn to turn insulation Models of gas insulated transformer under very fast transient voltages", T.IEE Japan, Vol. 116-B, No. 10. 1996
3. A. Inui, "Characteristics of Partial Discharge in SF6 GAS Wedge Gap", T. IEE Japan, Vol. 110-A, No. 2, '1990
4. T. Tanaka, "Internal Partial Discharge and Material Degradation", IEEE Trans. on EI-21 No. 6, December 1986