

## 산화된 폴리에틸렌의 부분방전 특성

### The Partial Discharge Properties of Oxidized Polyethylene

李 賢 洙\* · 韓 相 玉\*\*  
(Hyun-Soo Lee · Sang-Ok Han)

**Abstract** - To investigate degradation procedure and life time of the oxidized PE and the unoxidized PE, alternative voltage is applied to the CIGRE Method-II (CM-II) electrode system, which is loaded artificial void, and measures the distribution of partial discharging generation. From the results, the samples etched by oxidation had wide degradation area of dielectric strength. Furthermore, discharge starting voltage was shifted to low voltage, the discharge generation frequency was high and consequently, the quantity of mean charge becomes small. Also, life time of the oxidized sample is shortened according as the oxidation time is longer.

**Key Words** : Artificial Void(인공보이드), Partial Discharge(부분방전), Dielectric Strength(절연내력), Oxidized Sample(산화시료), Discharge Starting Voltage(방전개시전압)

#### 1. 서 론

최근 전력설비에 사용되고 있는 전기절연재료로써 여러가지 유기고분자재료가 이용되어지고 있다. 그러나 전력기기가 대용량화, 초 고전압화,

소형화로 되기 때문에 절연재료로서는 절연성이 좋고, 가공성, 기계적강도, 고신뢰성 등이 우수한 것이 요구되고 있다.

그러나, 유기고분자 절연재료는 제조과정중에 보이드와 이물질 등이 절연재료 내부에 포함되어 부분방전이 발생하는 원인으로 되며, 부분방전이 발생하던 산화가 촉진된다. 이러한 이유로 전력기기의 초 고전압화와 소형화에 의한 전계강도 상승으로 절연재료는 절연성이 저하되어 절연파괴에

\*正 會 員 : 忠南大 大學院 電氣工學科 博士課程 修了

\*\*正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授·工博

接受日字 : 1991年 10月 11日

1次修正 : 1992年 4月 3日

2次修正 : 1992年 5月 23日

이르게 된다. [1]

이와 같이 부분방전에 의해 보이드내에서의 방전열화가 절연재료에 어떠한 영향을 주고 있는가에 대하여는 지금까지 많은 연구가 진행되고 있지만 아직 불명확한 점이 많다. 한편, 부분방전이 발생하여 절연파괴에 이르기까지의 과정을 계측하는 열화진단방법은 컴퓨터의 발달에 따른 컴퓨터 계측시스템의 도입으로 다량의 부분방전 데이터를 통계적으로 처리하는 것이 가능하게 되었고, 이 통계적 자료에 의한 절연열화해석이 많이 진행되어지고 있다. [2~5]

이들은 장래 계획되는 열화진단을 위한 전문가 시스템의 구축에 많은 도움이 될 것으로 생각된다.

본 연구는 내부부분방전발생에 필요한 교류전압을 인공보이드가 형성되어 있는 시험전극에 인가하고 시료인 절연재료가 절연파괴 되기까지의 부분방전발생분포를 측정하고 이 데이터를 바탕으로 열화진행과정의 규명을 목적으로 하고 있다.

따라서, 실험은 CM-Ⅱ 전극계를 시험전극계로 이용하였고 산화가 시료에 어떠한 영향을 미치는가 알아보기 위해 미산화 및 산화처리된 폴리에틸렌을 사용하여 열화과정 및 수명에 대한 비교·검토를 하고 컴퓨터 계측시스템을 이용하여 통계적 데이터인 방전위상각  $\theta_{mc}$ 와 평균방전하량  $|\bar{q}|$  등 각종 방전파라메타 및 광학현미경사진에 의해 열화기구에 대한 해석을 하였다.

## 2. 시료 및 전극계

### 2.1 시료와 산화장치

시료는 미쓰비시(주) 0.1[mm]의 저밀도폴리에틸렌(LK30 : 밀도 0.92[g/mm<sup>3</sup>])을 이용하였다.

시료산화는 본 실험을 위해 제작한 산화장치의 동판전극(가로 12[cm], 세로 25[cm])에 전압을 인가하였고 실온에서 전극판 사이에 습도 99[%]의 산소를 산소압 1[Kg w/cm<sup>2</sup>]로 주입시켰으며

표 1 각 시료의 흡수계수

Table 1 Absorption coefficient of samples

시료	흡수계수 [cm <sup>-1</sup> ]
미산화	0
산화 10h	19.4
산화 30h	137.4
산화 50h	142.3

시료는 오존이 모아져 있는 파이렉스 유리그릇에 설치하여 10, 30, 50시간 산화시켰다. 그리고, 각 시료의 산화정도를 알기 위해 FT-IR 그래프의 1720[cm<sup>-1</sup>]부근 C=O기 흡수계수 계산결과를 표 1에 나타내었다. 산화장치 전원으로는 네온변압기를 사용하였다.

### 2.2 전극계

본 연구에 이용한 실험전극계는 그림1과 같이 CIGRE위원회에서 절연재료의 내내부 부분방전 특성평가용의 실험전극계로써 사용되고 있는 CI-GREY Method-Ⅱ (이하, CM-Ⅱ)이다.

통상의 보이드에서는 보이드벽면이 내부부분방전에 커다란 영향을 주어 부분방전현상이 복잡하게 발생한다고 알려져 있다. [6] 그러나, 이 CM-Ⅱ 전극계는 보이드벽면이 부분방전에 영향을 주지 않는 구조로 설계되어 내부부분방전현상의 기초적 연구에 적합하다. [7] 또 CM-Ⅱ 전극계를 이용하여 부분방전현상을 조사하는 것은 재료의 내부분방전 열화특성의 비교를 위해서도 대단히 중요한 것이다.

이 전극계는 구 대 평판전극의 밀폐형 MGI (Metal-Gap-Insulator) 전극계이며 보이드 공간은 높이 0.125[mm]이고 직경 38[mm]의 원통형 (체적 141.7mm<sup>3</sup>)구조이다. 상부전극인 구전극이 설치되어있는 Guard Insulation의 재료는 에폭시이며 액체상태의 Resin에 경화제와 가소제를 섞어 60[°C] 진공상태에서 10분간 유지시킨 다음, 대기압 80[°C]로 16시간, 다시 125[°C]에서 5시간 유지시킨 후 실온까지 냉각하여 제작하였다.

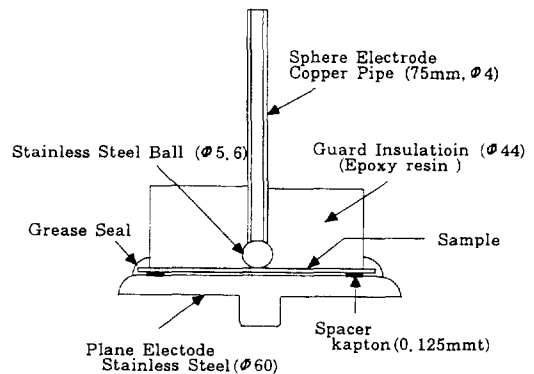


그림 1 CIGRE Method-Ⅱ (CM-Ⅱ) 전극계  
Fig. 1 Structure of CIGRE Method-Ⅱ (CM-Ⅱ) electrode system

2.3 실험조건

CM-II 전극계는 습도 30[%] 이하의 데시케터 속에서 조립하고, 보이드내로 외부공기의 유입을 차단하기 위해 실리콘구리스로 전극계를 밀폐시켰기 때문에 보이드 내부의 분위기는 건조공기이다.

CM-II 전극계를 대기중에 설치하여  $7kV_{rms} \cdot 60$  Hz 고전압을 전극계의 구전극측에 인가하고 평판 전극측은 검출임피던스를 거쳐 접지시켰다.

한편, 검출된 부분방전 전하량이 정인때는 구전극측의 극성이 +이고, 負인때는 구전극측의 극성이 -이다.

3. 실험방법

그림2에 본 연구에 사용된 부분방전 계측시스템의 회로도를 나타낸다.

부분방전 (Partial Discharge : PD) 펄스는 RC 검출임피던스를 거쳐 검출하였다. 고전압부로부터 나온 아날로그 데이터는 부분방전펄스신호(PD Pulse signal : PDP)와 제로크로스 검출용 신호(Zero Cross Detective signal : ZCD)의 2개이다.

PDP신호는 전극계의 보이드내에서 발생한 부분방전을 RC병렬회로로 검출한 펄스신호이고 ZCD 신호는 교류인가전압을 1000 : 1로 분압한 각 부분방전 전하펄스의 발생위상을 알기 위한 정현파 신호이다.

각각의 방전전하펄스인 PDP신호는 A/Dconverter에서 피크홀드 되어진 후 파고치  $+5[V] \sim -5[V]$  사이에서 8bit(256분할)신호로 양자화되어 부분방전의 크기를 나타내는 디지털신호(Amplitued signal of PD pulse : AMP)로 된다. 또, A/Dconverter내에서 ZCD신호가 1사이클마다 처리되어 정현파의  $0[deg]$ 에서  $1[\mu s]$ 폭 신호로 된다. 인터페이스부에서는 A/Dconverter에 의해 보내진  $1[\mu s]$ 신호를 기준으로 교류인가전압의 1사이클( $0[deg]$ )

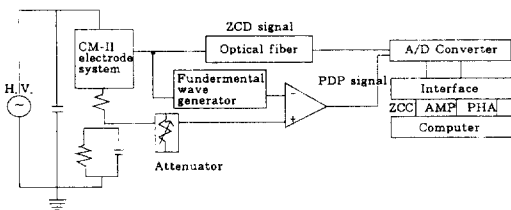


그림 2 부분방전계측시스템의 회로도  
Fig. 2 Circuit of partial discharge measurement system

$\sim 360[deg]$ 를 256( $=2^8$ )개의 위상영역  $\phi_0 \sim \phi_{255}$ 로 분할하고, 부분방전펄스가 발생한 위상은 부분방전의 발생위상 디지털신호(Phase signal PD of pulse : PHA)로써 컴퓨터에 전송된다. 그리고  $1[\mu s]$ 폭의 신호를 카운트하여 방전이 발생되고 몇번째 사이클인가를 나타내는 부분방전의 발생 사이클 디지털신호(Zero Cross Count signal : ZCC)로 된다.

디지털화된 3개의 AMP, PHA, ZCC는 인터페이스를 통하여 컴퓨터의 I/O포트에 보내진다.

한편, 이 계측시스템이 1회 취급할 수 있는 총 펄스수는 최대 98304개이며 최소취급전하량은  $12.5[pC]$ 이고 펄스와 펄스사이의 최소계측가능시간은 약  $15[\mu s]$ 이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 방전개시위상

방전개시위상  $\theta_{inc}(\theta$  Inception Phase)는 본 계측시스템의 특징인 시간적 변화에 대한 방전을 취급할 수 있는 통계량으로써 극성변화 후 최초로 방전펄스가 발생하는 위상으로 정의한다.

통상 부분방전(방전이 균소화되지 않은 방전)의 경우 gap전압  $V_g$ 변화에 의한 방전개시위상  $\theta_{inc}$ 변화를 그림3에 나타내었다.

일반적으로 부분방전은 방전장소 및 면적이 일정하다고 가정하면 불꽃전압  $V_0$ 와 잔류전압  $V_r$  모두 편차가 있기 때문에 gap전압  $V_g$ 는 그림 3과 같이 변화한다.

미산화시료와 산화시료에 대한 방전개시위상 평균치  $\overline{\theta_{inc}}$ 의 결과를 그림 4에 나타내었다. 두 종류

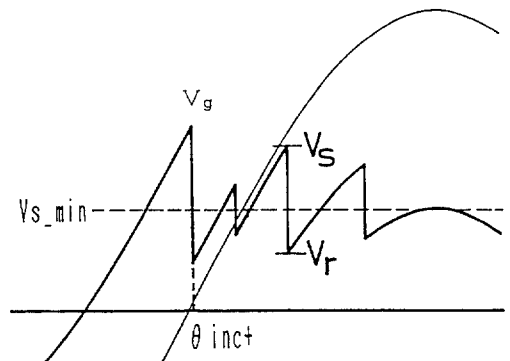
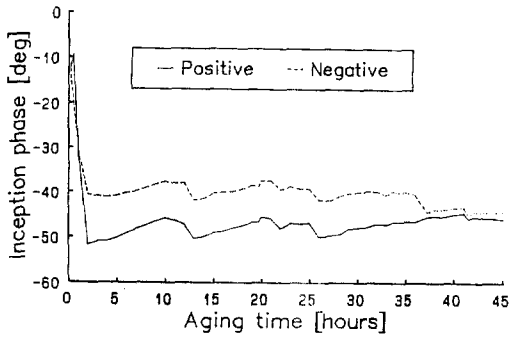


그림 3 방전개시위상  $\theta_{inc}$ 와 갭전압  $V_g$ 관계  
Fig. 3 Relation between the inception phase  $\theta_{inc}$  and a gap voltage  $V_g$

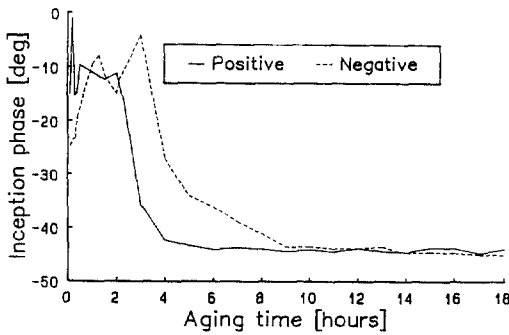
모두 정펄스의 방전개시위상  $\theta_{nc-}$ 의 평균치  $\overline{\theta_{nc+}}$ 가 부펄스의 방전개시위상  $\theta_{nc-}$ 의 평균치  $\overline{\theta_{nc-}}$ 보다 빠르다는 것을 알 수 있으며 부펄스의 위상은 실제보다 180[deg] 앞당겨 구성하였다.

방전개시위상차의 이유로써 구전극측이 정극성일때 평판전극은 부극성이 되므로 평판전극으로부터 초기 전자공급이 쉽게 되어 부분방전에 필요한 시료와 전극사이에 걸리는 전압  $V_g$ 가 작게 되고 그 결과 불꽃전압  $V_s$ 가 낮아져  $\theta_{nc+}$ 가  $\theta_{nc-}$ 보다 빠른 것으로 생각되어진다. [8]

한편, 산화처리된 시료에 있어서 방전열화 초기 상태인 Aging Time 5시간 까지의  $\theta_{nc}$ 를 보면 미산화시료보다 산화처리 시간이 긴 시료일수록  $\theta_{nc+}$ 가 -40[deg]에 도달하기까지의 시간이 늦어지는 경향이 있다.



(a)



(b)

그림 4 방전개시위상 평균치  $\overline{\theta_{nc}}$   
(a) 미산화시료  
(b) 산화 50시간 시료

Fig. 4 Average of partial discharge inception phase  $\overline{\theta_{nc}}$   
(a) Unoxidized sample  
(b) 50hr oxidized sample

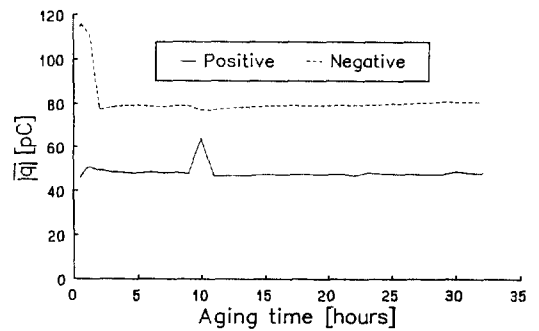
이 이유로써 미산화시료는 보이드 중의 산소소비가 방전열화 초기상태부터 진행되어 질소공부상태로 되기까지의 시간이 짧아 전리계수  $\alpha$ 가 낮은 산소의 체적비율이 적게 되었기 때문에  $V_s$ 가 낮아져 방전이 발생되기까지 걸리는 시간이 짧게되는 것으로 고려된다. [9, 10]

그러나 산화시료는 시료표면에 부착 또는 시료내부에 침투한 오존의 영향에 의해 보이드내로 산소공급이 쉽게 되는 것으로 사료된다. [11]

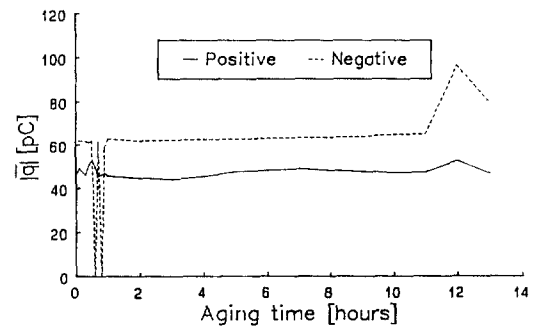
따라서 보이드내는 전리계수  $\alpha$ 가 낮은 산소가 증가하기 때문에 장시간 산화처리된 시료일수록  $\theta_{nc+}$ 가 늦어지는 것으로 고려된다.

#### 4.2 평균전하량

방전전하량의 총합을 방전펄스 발생횟수의 총합으로 나눈값인 평균전하량  $|\overline{q}|$ 를 그림 5에 나타내었다.



(a)



(b)

그림 5 평균전하량  
(a) 미산화시료  
(b) 산화 50시간 시료

Fig. 5 Quantity of mean charge  
(a) Unoxidized sample  
(b) 50hr oxidized samples

미산화시료와 산화시료의 평균전하량  $|\bar{q}|$ 는 정극성이 거의 모두 같은 값을 나타내고 있으나 부극성에서는 산화된 시료가 미산화시료에 비하여 평균전하량  $|\bar{q}|$ 가 작은 값을 나타내고 있다. 이것은 산화에 의해 시료표면에 부착 또는 시료내부에 침투한 오존이 보이드내로 공급될 수 있음에도 불구하고 산화과정중 산화에칭에 의해 시료는 절연내력에 약한 부분이 많이 형성되어 전압인가시간이 경과할수록 열화가 더욱 촉진되어 낮은 방전개시전압  $V_S$ 에서 방전이 발생할 가능성이 높아지므로 산화처리 시간이 긴 시료일수록 방전전하량  $q$ 는 작고 방전발생빈도  $n$ 가 높아 결과적으로  $|\bar{q}|$ 가 작게 되는 것으로 고려된다. [11]

4.3 광학현미경 사진의 관찰

광학현미경으로 미산화시료 및 산화시료의 표면 부위를 관찰한 그림6을 보면 산화시료의 표면은 미산화시료에 비하여凹凸가 현저하다. 이들은 산화에칭효과에 의해 저분자량 성분은 제거되었기 때문으로 생각된다.

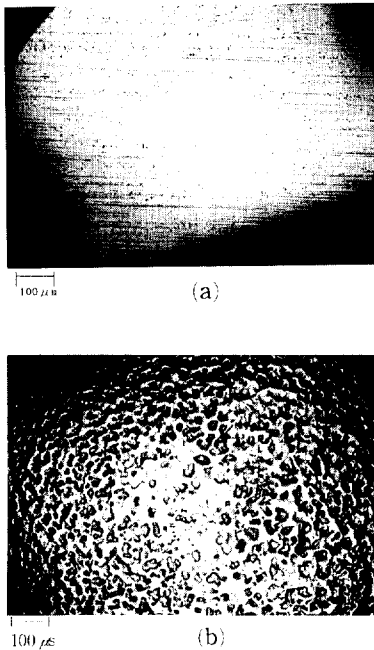


그림 6 시료의 광학현미경 사진  
(a) 미산화시료  
(b) 산화 50시간 시료

Fig. 6 Optical microscope photograph of sample  
(a) Unoxidized sample  
(b) 50hr oxidized sample

또한, 미산화시료와 산화시료의 부분방전에 의한 절연파괴부분을 비교한 그림7를 보면 미산화시료에서는 원형상의 반경이 큰 1개 孔만이 관찰된다. 그러나 산화시간이 긴 시료 (예: 50시간)에서는 절연파괴 장소가 1개소만이 아닌 다수의 반경이 작은 孔이 관찰되었다. 이들 파괴공의 형상차이는 미산화시료에서는 시료표면이 산화로 열화되지 않았기 때문에 구전극 부근의 전계가 집중한 1개소만이 방전열화되기 때문에 파괴부분의 직경이 큰 원형상으로 되지만, 산화시료에서는 초기상태부터 산화침식에 의해 시료표면이 절연파괴강도에 약한 부분이 많이 존재하고 있을 것으로 추정된다. 이 때문에, 부분방전에 의한 절연파괴공의 면적이 작고, 파괴공의 수가 많이 존재하는 것으로 고려된다.

4.4 수명특성

오존에 의한 시료의 산화는 최초 말단비닐기의 카보닐화가 지배적이고 어느정도 산화가 진행되면

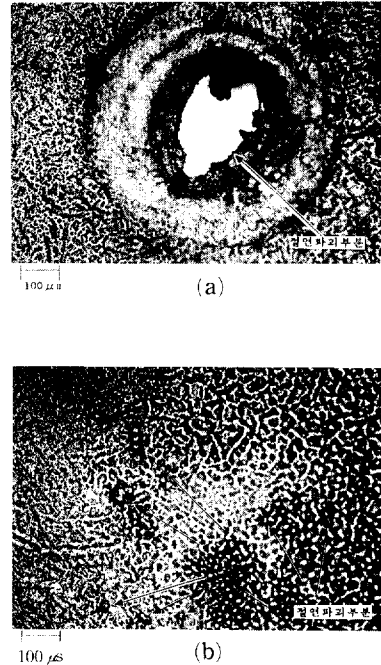


그림 7 절연파괴부분의 광학현미경 사진  
(a) 미산화시료  
(b) 산화 50시간 시료

Fig. 7 Optical microscope photograph of breakdown area  
(a) Unoxidized sample  
(b) 50hr oxidized sample

표 2 각 시료의 수명

Table 2 Life time of samples

시료	수명[hr]
미처리	46
10시간	44
30시간	35~36
50시간	19~26

주채의 절단 및 카보닐화가 일어난다. [9] 산화처리된 시료는 처음부터 열화침식의 상태이므로 절연과피강도가 약한 부분이 있으며 부분방전에 의해 더욱 침식이 촉진되어 절연과피에 이르기까지의 시간이 짧아지는 것으로 고려되어진다.

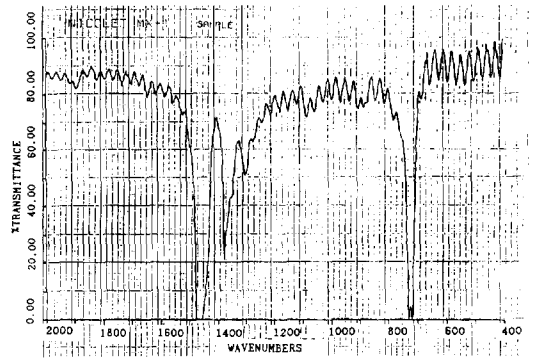
그러나 미산화와 단시간 산화된 시료(예: 10시간)는 산화열화 침식이 거의 없기 때문에 전압인가 초기부터 산소가 소비되어 보이드내는 질소 풍부상태로 되고 방전 1회당 전하량  $q$ 가 작고 방전 발생빈도  $n$ 가 높은 군소부분방전이 발생한다. [12] 이때 군소방전에서는 1회의 방전에너지가 작기 때문에, [13] 열화진행이 어려워 표2에서와 같이 미산화된 시료의 수명이 장시간 산화처리된 시료의 수명보다 길어지는 것으로 고려된다.

### 4.5 FT-IR의 검토

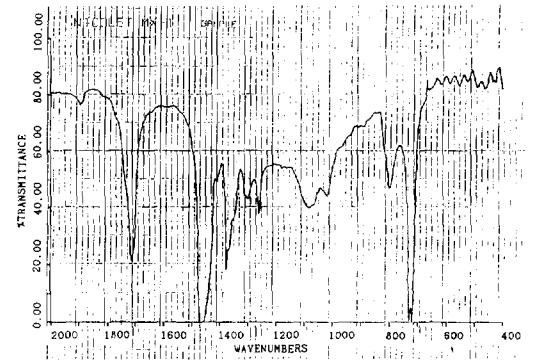
그림8의 FT-IR 그래프로부터  $1720[\text{cm}^{-1}]$ 부근의  $C=O$ 기 흡수계수를 베이스라인법에 의해 구해보면 표1에서와 같이 미산화시료는 거의 0이고, 산화처리 10시간 시료는 약 20 정도이지만 산화처리 30시간 시료는 약 137, 산화처리 50시간 시료는 약 142인 값이 얻어졌다.

표1에서 알 수 있는 바와 같이 시료를 산화시키면 오존은 폴리에틸렌중에 확산투과하고 2중결합과 반응하여 산화물을 만들며 또한 주채의 절단에 의하여 카보닐화합물을 생성한다. 이와 같이 산화반응이 생기면 폴리에틸렌자체는 말단비닐기가 감소하고 카보닐기가 증가한다. 그리고 보이드내에 산소가 존재하면 방전에 의해 원자 산소(O)와 오존(O<sub>3</sub>)이 발생하여 이 오존이 말단비닐기와 결합하고 그것이 산화물로 되어 최종적으로 카보닐기를 형성한다. [9, 13]

이와 같이 산화처리 시간이 길수록 흡수계수의 값이 커져 시료에  $C=O$ 기가 많이 생성되어 방전현상 및 수명에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 8 FT-IR그래프

- (a) 미산화시료
- (b) 산화 50시간 시료

Fig. 8 Graph of FT-IR

- (a) Unoxidized sample
- (b) 50hr oxidized sample

### 5. 결론

- 1) 미산화시료와 산화시료 모두 정펄스방전개시위상 평균치  $\theta_{nc+}$ 가 부펄스방전개시위상 평균치  $\theta_{nc}$ -보다 빠르다는 것을 알 수 있었다.
- 2) 산화처리시간이 긴 시료일수록 방전발생시간이 지 시간지연이 커져 평균방전발생위상  $\theta_{nc+}$ 가 늦어지는 것으로 생각된다.  $\theta_{nc}$ 가 늦어지는 것으로 생각된다.
- 3) 산화된 시료는 미산화시료보다 산화에칭에 의해 절연과피강도가 약한 부분이 많이 형성되어 낮은 방전개시전압  $V_s$ 에서 방전이 발생하므로 방전발생빈도  $n$ 가 높아 평균 전하량  $|q|$ 가 작게됨을 알았다.
- 4) 광학현미경으로 부분방전 발생부위를 관찰하

여 보면 탄화에 의해 검게 되어있으며, 미산화시료는 원형상의 큰 파괴공이 1개이지만 장시간(50시간) 산화된 시료는 다수의 작은 파괴공이 존재하고 있음을 알 수 있었다.

- 5) 오존에 의해 산화된 시료는 말단비닐기의 카보닐화와 주쇄절단등 산화에칭과 저분자량화에 의해 절연내력에 약한 부분이 많이 존재하여 부분방전시 장시간 산화된 시료일수록 수명이 짧아지는 것으로 생각된다.
- 6) FT-IR의 결과를 보면 산화처리시간이 긴 시료일수록 1720[cm<sup>-1</sup>]부근의 C=O기 흡수계수가 커져 방전현상과 수명에 영향을 주는 것으로 추정된다.

본 연구를 수행하는데 도움을 주신 일본 나고야 대학 일반전기연구실 여러분께 감사드립니다.

**참 고 문 헌**

- [1] J.H. Mason, "Discharge," IEEE Trans. Elect. Insulation, EI-13 No. 4, pp. 211~237, 1978.
- [2] 岡本達希, "コンピュータ計測による部分放電特性の解析とそのトリッキング劣化への應用," 電力中央研究所報告, 総合報告 118, 昭 59-10.
- [3] J.D. Grassaway et al, "Computer-aided Partial discharge measurement and recognition," 5th international Symp. on High Voltage Engineering. No. 41. 03, 1987.
- [4] M. Nagao, "Swarming pulsive microdischar-

- ge and internal partial discharge degradation in Epoxy Resin," 6Th International symposium on High Voltage Engineering, 22. 21, 1989.
- [5] T. Ito et al, "Statistical analysis of partial discharge aging of insulating materials," CEIDP. pp. 337~342, 1990.
- [6] 伊藤太郎 外, "ボイドの等價回路とボイド放電の經時變化との對應," 電氣學會論文誌, 95, pp. 25~30, 1975. 8.
- [7] 田中, "CIGRE 日本委員會 TG 15-06-01 活動報告(その 3) 電氣學會 絶緣材料研究學會 資料, EIM-86-4, 1986.
- [8] 堺孝夫, 放電現象演習, 朝倉書店, 1985, pp. 73~97.
- [9] T. Ito, O. Sato et al, "Analysis of Internal Discharge Degradation of Polyethylene by Simultaneous Chemical and Electrical Measurement," T. IEE Japan, Vol. 109-A, No. 10, pp. 457~463, 1989.
- [10] 井關 昇, "放電化學作用と 密閉 ボイドの部分放電劣化," 日本電氣學會全國大會, pp. 394~395, 1987.
- [11] K. Fukunaga, "Deterioration Process of Epoxy Resin by Internal partial Discharge Exposure," T. IEE Japan, Vol. 109-A, No. 12, pp. 523~529, 1989.
- [12] 松田 昭憲 外, "エポキシ樹脂中のボイド内ガスと部分放電," 第16回絶緣材料Symp. III-6. pp. 211~214, 1983.
- [13] 日本電力中央 研究所 報告 総合報告, 118, 1984. 10, pp. 178~183.

**저 자 소 개**



**이현수(李賢洙)**

1959년 12월 5일생. 1984년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 충남대 대학원 전기공학과 박사과정 수료.



**한상옥(韓相玉)**

1946년 5월 12일생. 1974년 충남대 공대 공업교육과(전기) 졸업. 1978년 단국대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1989년 12월~1990년 12월 일본 나고야대학 공학부 객원교수. 현재 충남대학교 공과대학 전기공학과 교수.