

부분방전법을 이용한 점화코일의 안정도 해석

박희두[†] · 김탁용* · 신현택* · 김원종* · 신종열** · 홍진웅*

삼척대학교 방재기술전문대학원 · *광운대학교 전기공학과 · **삼육의명대학 자동차과
(2005. 8. 22. 접수 / 2006. 1. 11. 채택)

Stability Analysis of the Ignition Coil using Partial Discharge

Hee-Doo Park[†] · Tag-Yong Kim* · Weon-Jong Kim*

Hyun-Taek Shin* · Jong-Yeol Shin** · Jin-Woong Hong*

The Professional Graduate School of Disasters Prevention Technology Samcheok University

^{*}Department of Electric Engineering, Kwangwoon University

^{**}Department of Automobile, Sahmyook College

(Received August 22, 2005 / Accepted January 11, 2006)

Abstract : This paper has been addressed on the discharge characteristics of the ignition coil by Weibull function. It analyzed discharge number and amount of discharge using Weibull distribution to know the inter-relationship between partial discharge and mileage. We detected the discharge which happens for 10 seconds. The applied voltage increased by 0.5[kV] at discharge inception voltage. We diagnosed failure rate using the shape parameters.

As a result, we confirmed that the failure rate was increased, because the shape parameter showed the value of 5 according to increasing mileage degradation. Also, it is considered to increase the degradation of inner insulator of ignition coil. Because failure rate of virgin was increased from 0[%] to 25[%] after degradation, stability analysis of the ignition coil using Weibull analysis is possible.

Key Words : partial discharge, ignition coil, weibull function, weibull distribution, shape parameter, mileage degradation

1. 서 론

자동차는 일상생활과 산업 활동에 필수품으로 점점 증가하고 있으며, 최근 전기전자부품산업의 발달로 신뢰성과 안정성이 우수한 전기장치의 개발로 비중이 증가되고 있다. 그리고 자동차 점검의 편리성과 신뢰성을 위한 Electronic Control Unit(ECU) 장치의 도입은 자동차 내부 장치의 특성 및 고장부분을 검출할 수 있는 기술개발과 부품개발의 연구 및 실용화를 가속화 시켰고, ECU와 같은 장치는 자동차의 전기장치 사용을 증가시켰다¹⁾. 또 가솔린 엔진이 탑재된 자동차의 점화장치는 낮은 DC전압을 고압으로 변성하여 점화플러그에 보내는 매우 중요한 장치로 안정된 전원공급은 절연분야가 매우 중요한 과제 중의 하나이다. 현재 점화코일의 절연재료는

소형화와 친환경성이 우수한 에폭시물딩으로 반영구적인 수명을 가질 수 있게 되었으나, 점화코일 절연층에 대한 절연진단 및 열화에 대한 정확한 진단이 어려워 적절한 교체시기를 예측할 수 없다.

따라서 본 논문에서는 비파괴검사의 일종인 부분방전²⁾을 이용한 열화검출을 연구하기 위해 열화에 따른 위상각-방전전하량-방전빈도수의 분포 특성을 조사하였다³⁻⁵⁾. 또한 고분자에서 부분방전발생은 동일조건에서도 매우 불규칙한 분포를 나타내는 단점이 있으므로, 불규칙한 방전패턴을 정량적 패턴으로 정립하기 위해 와이를 함수를 사용하여 방전패턴의 변화를 확인하였으며, 이를 통한 점화코일의 열화 및 고장에 대하여 검토한 결과를 보고한다^{3,6,7)}.

2. 시료 및 실험

2.1. 시료

[†] To whom correspondence should be addressed.
pr@samcheok.ac.kr

Table 1. Kind of the specimens

| specimen | mileage × 10 ⁴ [km] |
|----------|--------------------------------|
| virgin | 0 |
| S - I | >10 |
| S - II | >15 |

일반적으로 점화코일 장치의 수명은 반영구적이므로 차량의 수명과 거의 같다고 할 수 있다. 그러므로 점화코일의 주행거리는 50만[km] 이상에서도 사용가능하지만, 고장직전의 시료를 구하기 어렵고 주행거리가 5만[km] 이하에서는 원시료와 거의 차이가 나타나지 않으므로 10만[km] 이상 주행한 점화코일을 주행거리별로 2종류 선택하였다. 또한 원시료와의 차이를 측정하기 위해 원시료에서의 방전전하량을 측정하였고, Table 1은 시료의 주행거리를 나타내고 있다. 에폭시 경화조건은 90[°C]에서 2.5시간에 걸쳐 1차 경화시켰으며, 2차 경화는 140[°C]에서 2.5시간 경화시켰다.

2.2. 실험

본 실험은 AVO.사에서 제작한 부분방전 측정 장치를 이용했고, 전압은 교류 3[kV]부터 0.5[kV]씩 step 법으로 최대 20[kV]까지 승압시키면서 측정하였다. 부분방전 전하량이 검출감도를 초과하면 전압을 더 이상 승압시키지 않고 자동으로 실험을 종료하였다. 초기에 발생하는 부분방전을 검출하기 위해 부분방전 검출기기의 Calibration은 50[pC]으로 하였으며, 1회 발생하는 최대 방전전하량이 약 600[pC]을 초과하면(이하 trip 전하량이라고 명명함), 방전전하량을 측정할 수 없으므로 실험을 중지하였다. 또한, 데이터는 전압인가 후 10[s] (600[cycle])동안 발생하는 방전을 검출하였다.

연면방전을 억제하기 위하여 전극 및 시료를 실리콘유(1000[cSt]) 속에 침적시킨 후, 방전데이터는 DAQ보드를 이용하여 64×64 행렬형태로 저장한 후 MATLAB을 이용하여 10초 동안 발생한 부분방전을 위상에 따라 방전전하량 및 방전 빈도수로 누적하여 나타내었다.

그리고 와이블 분포함수에 의한 패턴 및 방전분포특성을 조사하기 위하여 동일 조건에서 10회 이상 실험하였으며, 그 중에서 최대값 및 최소값을 제외한 후 와이블 함수를 이용하여 척도파라미터 및 형태파라미터를 구했다. 마지막으로 형상파라미터 및 척도파라미터를 이용하여 점화코일의 수명을 약 50만[km]일 때 고장률 100[%]로 설정하여 주행열화에

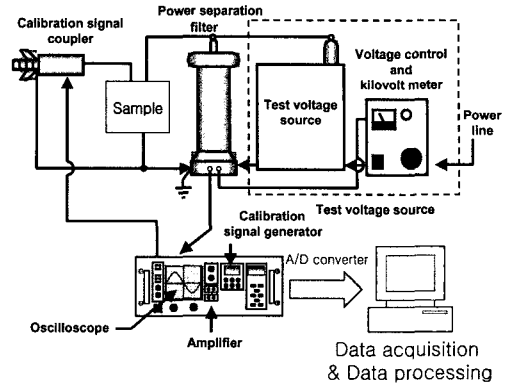


Fig. 1. Block diagram of experiment.

따른 안정도를 조사하였다. Fig. 1은 측정시스템의 개략도를 나타내고 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 주행열화에 따른 $\phi-q-n$ 분포

Fig. 2는 원시료에 AC 10[kV]을 인가했을 때의 위상-방전전하량-방전빈도수($\phi-q-n$)분포를 나타낸 것으로 Range I은 교류신호 한 주기에서 전압이 증가되는 영역을 나타내고, Range II는 전압이 감소하는 영역을 의미하고 있다. 또한 점선은 한주기 정현파(sine wave)를 표시한 것이다. 정현파의 전압이 증가되는 -90°~+90° 위상영역을 Range I로 나타내었고, 전압이 감소되는 90°~270°(-90°) 위상영역을 Range II로 정의하였다. Range I에서는 5.625~73.125° 위상에서 주로 방전이 나타났다. 이 영역에서 10초 동안 최대 누적방전전하량은 50.625°에서 13,833[pC]의 방전을 나타냈고, 방전발생빈도수는 244회 발생함을 확인할 수 있었다. Range II에서는 174.375~247.5°에서 주로 방전이 발생하였다, Range I과는 다르게 183.625°와 225°의 위상에서 높은 방전이 발생함을 볼 수 있었으며, 누적전하량은 183.625°에서 6,583.1[pC], 225°에서 7,491.1[pC]의 방전이 나타났고, 방전발생빈도수도 282회 및 330회 발생함을 볼 수 있었다. 그러나 Range I의 방전분포는 한 위상에서 집중되는 것과는 다르게 Range II에서는 두 영역으로 나누어짐을 확인할 수 있었다. 방전발생빈도 및 방전 전하량의 크기는 전체적으로 비슷하였다. 일반적으로 부분방전은 연면방전, 코로나 방전 및 내부방전에 의해 나타나므로, 초기 점화코일은 코일의 모서리 부분에서 전계의 집중에 의한 코로나 방전이 주로 기여한 것으로 사료된다.

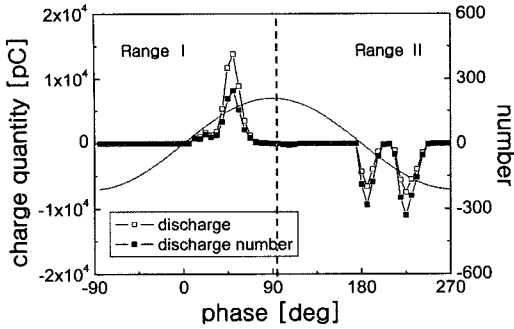


Fig. 2. $\phi-q-n$ distribution of ignition coil at virgin.

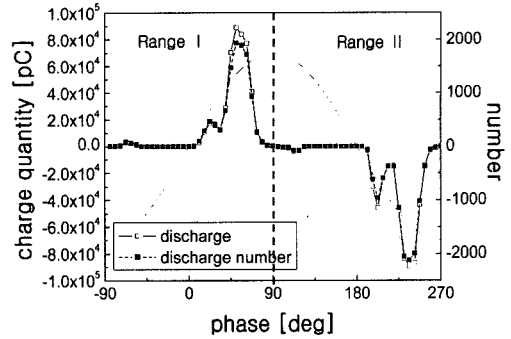


Fig. 4. $\phi-q-n$ distribution of S-II.

Fig. 3은 열화-I시료에 교류전압 10[kV]을 인가했을 때 $\phi-q-n$ 분포를 나타낸 것으로 Range I에서 방전은 $-90^{\circ}\sim-61.875^{\circ}$ 와 $16.875^{\circ}\sim95.625^{\circ}$ 에서 발생하였으며, 주 방전은 $56.25^{\circ}\sim95.625^{\circ}$ 에서 발생함을 확인할 수 있었다. 최대 누적방전전하량은 73.125° 에서 $76,032[\text{pC}]$ 이 발생하였으며, 방전빈도수도 동일 위상에서 1,424회 발생하였다. Range II의 $208.125\sim270^{\circ}$ 위상에서 방전이 발생하였으며, 최대누적방전전하량은 253.125° 에서 $78,448[\text{pC}]$ 을 나타냈으며, 방전빈도는 258.75° 에서 2,235회가 발생하였다.

Fig. 4는 열화-II시료에 10[kV] 교류전압을 인가했을 때 $\phi-q-n$ 분포를 나타낸 것이다. Range I에서 주된 방전은 $5.625^{\circ}\sim90^{\circ}$ 영역에서 발생하였으며, 그 외 부분에서는 $100[\text{pC}]$ 이하의 낮은 방전이 발생하였다. 또한 최대 방전은 50.625° 에서 $88,984[\text{pC}]$ 의 방전이 발생하였으며, 동일 위상에서 방전빈도수도 1,934회 발생함을 확인할 수 있었다. Range II에서는 주 방전이 $191.25^{\circ}\sim258.75^{\circ}$ 에서 발생하였으며, 최대 방전은 236.25° 에서 $89,208[\text{pC}]$ 의 방전이 발생하였다. 또한 동일 위상에서 2,120회의 방전발생빈도수를 나타내고 있다.

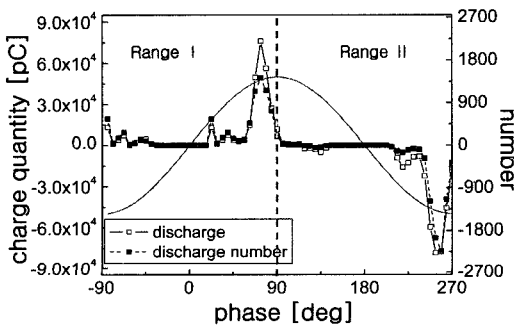


Fig. 3. $\phi-q-n$ distribution of S-I.

열화 최대 방전전하량 두 영역에서 모두 약 $0.6[\text{pC}]$ 의 변화량을 나타냈으며, 방전발생빈도수는 약 0.01 정도 증가하였으며, 또한 주행열화 증가에 따라 Range I보다 Range II에서 방전이 더 커짐을 확인할 수 있었다. 그러나 전체적인 변화량은 거의 나타나지 않았으며, 단지 원시료에 비해서는 전하량 및 방전빈도수는 거의 12배정도 증가함을 볼 수 있다.

일반적으로 원시료의 경우 불평등전극에 의한 전극의 전계집중에 의한 방전이 주로 발생하며, 절연층에서의 열화는 거의 존재하지 않으므로 낮은 방전전하량과 적은 방전빈도수를 가지지만, 주행열화 시료의 경우 엔진 주변의 열열화, 흡습열화 및 전기적 열화 등에 의해 에폭시의 열화가 진행된 상태이므로 불평등 전계에 의한 전계집중 뿐만 아니라 내부열화에 의한 전계집중도 존재하기 때문에 더 큰 부분방전이 발생한다고 생각된다.

3.2. 확률분포를 이용한 안정도 판정

부분방전은 동일 조건에서 측정하여도 그 수치가 불규칙하기 때문에 방전전하량 및 방전빈도수에 대한 정량화 값을 도출하기 위해 2-parameter 와 이블 함수를 이용하였다. 측정된 데이터 중 최대값과 최소값을 제외한 데이터를 이용하여 주행열화에 따른 누적과파확률($F(n)$)을 식 (1)을 이용하여 구했다.

$$F(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n}{n_s}\right)^m\right] \quad (1)$$

단, n_s : 척도파라미터, m : 형상파라미터

척도파라미터 n_s 를 구하기 위해 x 축은 방전빈도 및 방전전하량, y 축은 누적확률분포로 설정한 후, 각각에 대한 변화량을 계산하였다. 척도 파라미터는 누

Table 2. Scale parameter of specimens

| specimen | discharge [pC] | number |
|----------|----------------|-----------|
| virgin | 94,605 | 2,672.1 |
| S - I | 234,475 | 4,646.649 |
| S - II | 1,197,790 | 25,238.72 |

적확률이 63.2[%]일 때를 나타내므로, 계산하면 Table 2와 같이 나타낼 수 있다.

또한 식 (1)을 변형하면

$$\ln \ln \left[\frac{1}{1-F(n)} \right] = m \ln \left[\frac{n}{n_s} \right] \quad (2)$$

을 얻을 수 있으며, 이를 간단히 표현하면

$$y = mx \quad (3)$$

단, $x = \ln \left[\frac{n}{n_s} \right]$, $y = \ln \ln \left[\frac{1}{1-F(n)} \right]$ 인 1차방정식을 나타내고 있다.

식 (3)에서 직선의 기울기가 형상파라미터를 의미하므로, 형상파라미터를 구하기 위해 식 (3)의 x 와 y 좌표를 이용하여 그래프를 그리면 Fig. 5와 Fig. 6을 구할 수 있다.

Fig. 5는 방전발생빈도수에 대한 와이블 해석결과로서 원시료는 1.1245의 형상파라미터를 가지고, 주행열화가 증가함에 따라 각각 2.5118 및 4.4149로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

와이블 분포에서 형상파라미터 값은 X의 확률밀도함수(probability density function)의 모양을 결정하는 매우 중요한 파라미터이다. 일반적으로 $m=2$ 인 경우를 랠리분포(Rayleigh distribution)라고 하는

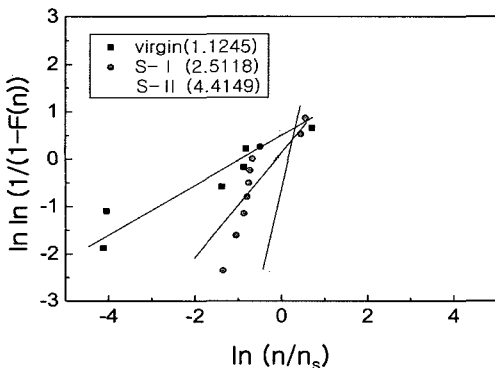


Fig. 5. Weibull plot of the x versus y of discharge number.

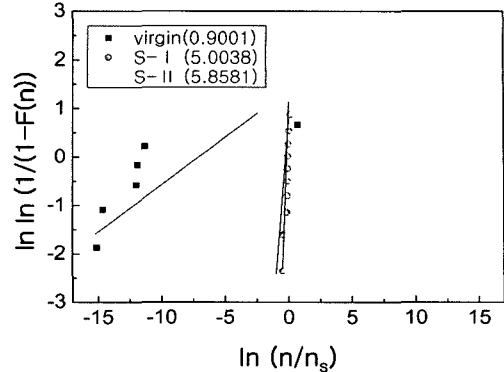


Fig. 6. Weibull plot of the x versus y of discharge quantity.

데, 이를 기준으로 m 이 작아지면 지수분포함수를, m 이 커지면 정규분포함수를 나타낸다. 특히 $m=1$ 인 경우가 완전한 지수분포의 확률밀도함수를 나타내고, $m>2$ 로 가면 점차적으로 정규분포형상을 나타냄을 의미하므로, 원 시료는 거의 1의 값을 유지하므로 방전분포가 지수분포함수를 나타내고, 주행열화의 증가에 따라 방전발생빈도는 점차적으로 정규분포형상을 나타냄을 확인할 수 있었다⁸⁾. 이것은 장시간 이용한 점화코일은 내부 절연물질이 엔진 열에 의한 열열화, 공기중 수분에 의한 흡습열화 및 전기적 열화 등에 의해 내부 절연재료의 열화가 진행되었기 때문에 방전이 집중되는 형태를 나타낸다고 생각된다.

Fig. 6은 주행열화에 따른 방전전하량의 와이블 해석 결과로서 주행열화시료는 모두 5이상의 값으로 정규분포를 형성하였으며, 주행열화의 증가는 방전분포를 정규분포형태로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 방전빈도수에 비해 방전전하량에 대한 와이블 분포는 비슷한 값을 나타냄을 확인하였다. 또한 고장밀도함수 $f(t)$ 는

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4)$$

로 된다. 이 때 식 (4)의 $F(t)$ 가 와이블 함수라면 식 (4)는

$$f(t) = m \frac{t^{m-1}}{t_s^m} \exp \left[- \left(\frac{t-t_l}{t_s} \right)^m \right] \quad (5)$$

으로 된다. 여기서 고장률 $\lambda(t)$ 는

$$\lambda(t) = \frac{dF(t)/dt}{1-F(t)} = \alpha\beta^{m-1} \quad \text{단, } \beta = \left(\frac{t-\gamma}{t_s} \right) \quad (6)$$

단, $F(t)$: 와이블 함수, α : 상수, γ : 위치파라미터

으로 구할 수 있다^{8,10,11}). 이로부터 일정시간이 경과하면 절연체는 수명한계를 가지게 되는데, 이때의 $\lambda(t)$ 를 한계치(수명: λ_L)로서 정의하며, 형상파라미터(m) 1을 기준으로 $m < 1$ 일 때 $\lambda(t)$ 는 시간경과에 따라 감소하며, $m = 1$ 일 때 $\lambda(t)$ 는 일정한 값을 유지한다. 또한 $m > 1$ 일 때 $\lambda(t)$ 는 시간경과에 따라 증가하며, m 의 값이 증가하면 선형적 증가에서 지수적 증가로 변화하게 된다^{8,11,12}). 이 식은 시간에 대한 함수이지만 우리는 방전전하량을 적용해 보았을 때, 점화코일의 고장률은 초기에는 선형적으로 증가하다가 주행열화가 증가함에 따라 지수적으로 증가함을 확인하였다. 이러한 현상은 초기에는 제품의 결함은 전혀 없으므로 방전은 코일의 모서리 부분에서 전계집중현상을 통한 코로나 방전이 주로 발생하지만, 주행열화의 증가로 점화코일 모서리 부분의 전계집중현상뿐만 아니라 엔진주변의 열에 의해 열열화, 장시간 노출에 의한 흡습열화 등과 같은 복합 열화에 의해 내부 절연층의 열화에 의한 결함이 증가되고, 이로 인한 고장률이 가중되어지기 때문이라고 사료된다^{13,14}).

또한 Fig. 7에서 보는 바와 같이 주행열화시료의 경우 모두 고장확률이 약 25[%]에서부터 시작되며, 그때의 형상파라미터 값은 5 이상의 값을 나타내고 있다. 또한 원시료는 형상파라미터가 1의 값을 나타내며 초기 고장률은 0[%]의 값을 나타냄을 확인되므로, 와이블 함수를 이용한 방전빈도수의 형상파라미터 값은 점화코일 수명예측 시스템개발을 위한 파라미터 적용 가능할 것이다.

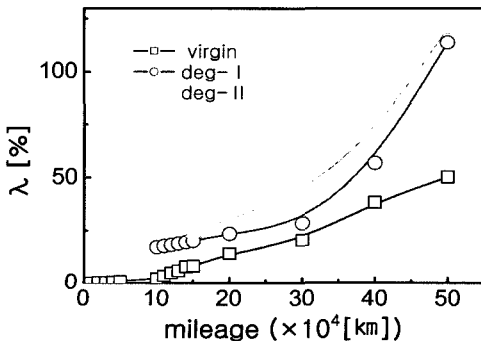


Fig. 7. Failure rate of Ignition coil.

고장률 증가로 문턱값 λ 를 초과한 거리를 수명예측 값으로 하는 것도 있으며, 고신뢰도의 요구에 대하여 수명판단을 엄격하게 하는 경우 등에 이용되고 있다^{11,12}). 이와 같은 결과를 통해 부분방전전하량에 대한 형상파라미터가 5이상의 값이 되면 점화코일의 고장확률이 25[%]로 증가하였음을 확인할 수 있으므로, 점화코일 진단시스템 설계시 부분방전전하량의 와이블 분포를 통한 내부절연층의 열화 판단여부 및 수명예측이 가능할 것으로 생각되어진다. 또한 추후 형상파라미터를 뉴우렐 및 퍼지시스템¹³)을 통한 처리로 보다 정확한 진단시스템 개발이 가능할 것으로 생각된다. 그러나, 주행거리에 따른 고장률 그래프에서 원시료의 변화폭과 주행열화시료의 변화폭이 점차적으로 차이가 발생하므로 이를 위한 보정계수가 필요할 것으로 생각되어지면, 추후 이 부분에 대한 연구조사가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

부분방전법을 이용한 점화코일의 안정성을 연구한 결과 다음과 같다.

- 1) 전압증가영역에서는 방전이 50°~90°에서 집중되었으며, 전압감소영역에서는 200°~240°에서 방전이 집중됨을 확인하였다.
- 2) 주행열화 증가로 방전발생빈도에 대한 형상파라미터는 1.1245, 2.5119 및 4.4199로 증가하였으며, 방전전하량은 0.9112, 5.0039 및 5.8581로 증가함으로 방전발생빈도 보다는 방전전하량에 대한 형상파라미터가 더욱 신뢰성을 가질 것으로 사료된다.
- 3) 방전분포는 주행열화시료에서 정규분포형태를 나타내며, 원시료에서는 지수분포형태를 확인하였다.
- 4) 원시료의 고장률은 선형적으로 증가하지만 주행열화시료의 고장률은 지수적으로 증가함을 확인하였다.
- 5) 고장률 해석시 주행거리의 증가에 따라 절연층의 열화증가로 고장률이 증가하므로, 이에 따른 보정계수의 확립이 필요하였다.

참고문헌

- 1) Barry Hollembeak, "Automotive Electricity, Electronics & Computer Controls", Delmar publishers, pp. 331~434, 1999.
- 2) L.A. Dissado, J.C. Fothergill, "Electrical Degradation"

- tion and breakdown in polymers”, Peter Peregrinus Ltd. pp. 117~198, 1988.
- 3) Kuniharu IMAI, “Statistical Analysis of Tree Propagation from a Simulated Tree Channel with Weibull Distribution and Influence of Temperature on it”, T. IEE Japan, Vol. 120-A, No. 5, pp. 645~650, 2000.
 - 4) Kuniharu IMAI, “Relationship between Diameter of Simulated Tree Channel and Tree Propagation from Its Tip”, J. Inst. Electrostat. Japan, Vol. 26, No. 2, pp. 84~90, 2002.
 - 5) T.J. Gallaghe, A.J. Pearmain, “HIGH VOLTAGE Measurement, Testing and Design”, JOHN WILEY & SONS Ltd., pp. 66~72, 1983.
 - 6) K. Imai, K. Ito, N. Shimizu, M. Nawata, “Influence of Polymer Structure on Tree Growth from a Simulated Tree Channel”, 2000 Conference on Electrical Insulation and Dielectric, Vol. 1, pp. 337~340, 2000.
 - 7) J.S. Barrett, M. A. Green, “A Statistical Method for Evaluating Electrical Failures”, IEEE Tran. Power Delivery, Vol. 9, No. 3, pp. 1524~1530, 1994.
 - 8) 河村 達雄, 田中 祀捷, “電氣設備の診断技術”, 日本電氣學會, pp. 38~55, 2003.
 - 9) Wu E.Y, Sune. J, Lai W, “On the Weibull shape factor of intrinsic breakdown of dielectric films and its accurate experimental determination”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 49, No. 12, pp. 2141~2150, 2002.
 - 10) Wenyuan Li, “Evaluation Mean Life of Power System Equipment with Limited End-of-Life Failure Data”, IEEE Tran. Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 236~242, 2004.
 - 11) Wendai Wang and Dimitri B. Kececioglu, “Fitting the Weibull Log-Linear Model to Accelerated Life-Test Data”, IEEE Tran. Reliability, Vol. 49, No. 2, pp. 217~223, 2000.
 - 12) 山村 昌, “電氣・電子部品の壽命診断”, 日本電氣協會, pp. 45~48, 1999.
 - 13) F. Komori, M. Hikita, Y. Suzuoki, T. Mizutani, “Study of partial discharge occurrence patterns for construction of degradation diagnosis system”, Properties and Applications of Dielectric Materials, Proceedings of the 5th International Conference, pp. 224~227, 1997.
 - 14) Sagias, N.C., Karagiannidis, G.K, “Gaussian class multivariate Weibull distributions: theory and applications in fading channels”, Information Theory, IEEE Transactions on Vol. 51, Issue 10, pp. 3608~3619, 2005.