

점화코일 절연체의 열화에 따른 부분방전 해석

김탁용 · 안병철 · 신종렬* · 이충호** · 홍진웅

광운대학교 전기공학과 · *삼육의명대학 자동차과 · **충주대학교 전기공학과

1. 서 론

자동차는 일상생활과 산업 활동에 필수품이 된 지 이미 오래되었으며, 운전자의 편의성 및 안전성을 위해 전기 및 전자장치의 활용이 매우 급증하고 있다. 또한 자동차의 상태점검의 신뢰성을 확보를 위해 자동차의 과학적 점검장치인 스캐너의 사용이 증가하고 있으며, 이를 위한 내부장치의 상태를 검출할 수 있는 기술 및 장치의 개발이 연구·실용화시키고 있다. 그러나 가솔린 엔진이 탑재된 자동차의 점화장치에 고압을 공급하는 점화코일은 낮은 DC전압을 고압으로 변성하여 점화플러그에 보내는 매우 중요한 장치 중에 하나이다. 현재 점화코일은 소형화 및 친환경성을 위해 절연층에 혼합오일에서 에폭시 몰딩으로 변환됨에 따라 점화코일 절연층에 대한 절연진단 및 노화에 대한 정확한 진단의 어려움으로 적절한 교체시기를 예측하기 더욱 어려워졌다. 그로 인해 점화장치부분에 대한 예기치 못한 사고는 대형사고 유발을 초래할 수 있다.

이에 본 논문에서는 비파괴검사의 일종인 부분방전^[1]을 이용한 열화검출을 연구하기 위해 열화에 따른 위상각-방전전하량-방전빈도수의 분포 특성을 조사하였다^{[2][5]}. 또한 방전 발생의 분포가 동일 조건에서도 매우 불규칙성을 가지고 있으므로 데이터의 정량화를 위해 불규칙적인 통계처리를 위한 와이블 분포를 사용하여 기기의 고장시간예측을 조사하였다^[3].

2. 시료 및 실험 방법

국내 A사에서 제작되고 있는 에폭시 몰딩 점화코일을 사용하였으며, 주행거리는 0, 10만, 15만[km] 주행한 점화코일을 사용하였다. 몰딩용 에폭시의 물성은 표 1에서 나타내었다.

본 실험은 AVO. co.에서 제작된 부분방전 측정 장치를 사용하였고, 전압은 상용주파수를 step 범으로 인가하고, 방전량의 Calibration은 50[pC] (slope=8.696)으로 셋팅하였다. 또한, 데이터는 전압인가 후 10 [sec](600 [cycle])동안 발생하는 전하량과 빈도수를 검출하였다. 또한 인가전압에 따른 시료의 연면방전을 억제하기 위하여 전극 및 시료를 실리콘유(1000[cSt]) 속에서 실험하였다.

같은 조건에서 실험을 10회 이상 하고 그 중 최대 및 최소값을 제외한 나머지 데이터를 사용하여, 와이블 분포함수로 형상파라미터를 구하였다.

표 1. 에폭시 물성

| Test item | Test Temperature [°C] | Value | |
|---|-----------------------|--------------------------|----------------|
| Component | | Epoxy | Acid anhydride |
| Viscosity [Pa.s] | 25 | >500 | 0.05 |
| | 70 | 90 | - |
| Mixing ratio [phr] | - | 100 | 28 |
| Test specimen hardness condition [°C/h] | - | 1차 : 90/2.5 2차 : 140/2.5 | |
| Volume resistivity [Ω·m] | 25 | 1.8×10^{14} | |
| | 100 | 2.9×10^{13} | |

3. 결과 및 고찰

3.1 $\phi-q-n$ 분포

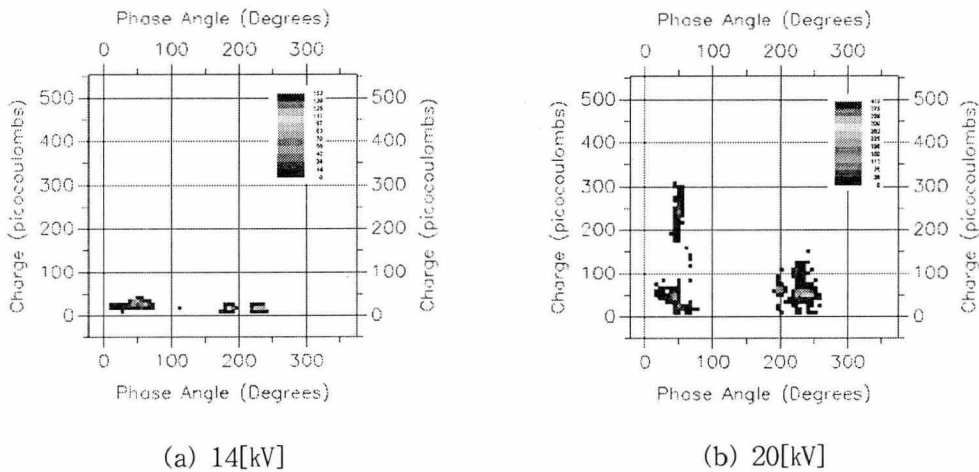


그림 3.1 주행거리 0[km] 점화코일의 $\phi-q-n$ 분포

그림 3.1은 주행거리 0[km] 점화코일의 전압변화에 따른 $\phi-q-n$ 분포를 나타낸 것이다. 그림 (a)는 초기 방전이 발생되는 전압으로 14[kV]일 때의 방전발생분포를 나타낸 것이다. 초기 방전은 정극성에서 위상영역이 8~75도에서 방전이 주로 발생하였으며, 최대전하량 50[pC], 최대방전발생빈도수 70이 발생하였다. 부극성에서는 180~250도에서 방전이 발생하였으며, 최대방전전하량 25[pC], 최대방전전하량 152 발생하였다. 그림 (b) 인가전압을 20[kV]로 승압했을 때로 방전이 정극성에서는 20~75도 영역에서 발생하였으며, 50도 부근에서 최대방전전하량 283.320[pC]이 발생하였다. 또한 최대방전빈도수도 50도에서 432 발생하였다. 부극성에서는 195~260도에서 방전이 주로 발생하였으며, 최대 방전전하량은 245도에서 149.994[pC], 최대

방전빈도수는 240도에서 336발생함을 볼 수 있었다. 전체적으로 초기방전개시전압이나 승압시 방전분포는 정극성에서는 방전발생위상이 좁은 반면, 부극성에서는 넓은 영역에서 방전이 발생하였다. 또한 정극성에서 방전전하량이 높고, 부극성에서 방전빈도수가 많이 나타났다.

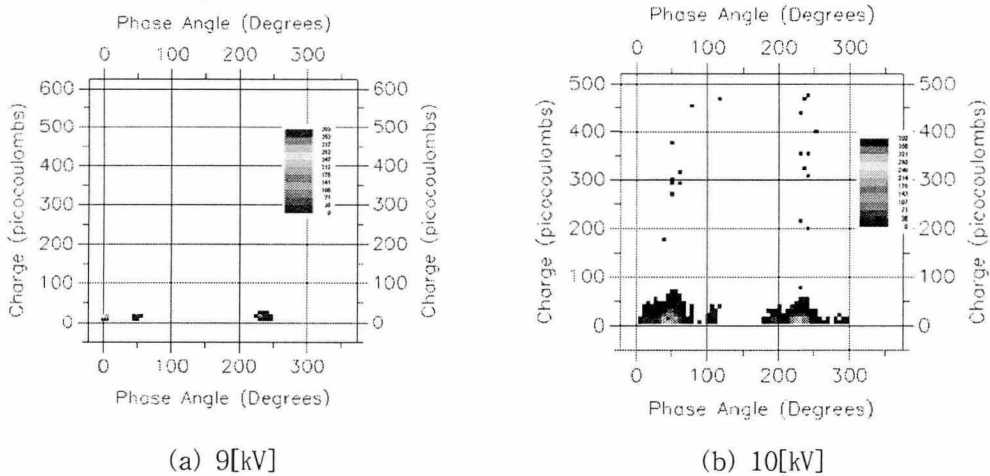


그림 3.2 주행거리 10만[km] 점화코일의 $\phi-q-n$ 분포

그림 3.2는 10만[km]를 주행한 점화코일에서 전압변화에 따른 $\phi-q-n$ 분포를 나타낸 것이다. 초기 방전개시전압인 9[kV]에서는 정극성에서 0도부근과 50도부근에서 30[pC]이하의 작은 방전이 발생하였으며, 방전은 601회 발생하였다. 부극성에서는 220~250도 부근에서 방전이 집중되었으며, 방전전하량은 모두 30[pC]이하의 낮은 방전만이 발생하였다. 방전발생빈도는 596으로 정극성보다 적은 방전이 발생함을 확인할 수 있었다. 그러나, 최대방전빈도수는 정극성에서 250, 부극성에서 368로 부극성에서 일정한 방전이 계속 발생함을 볼 수 있었다. 그림 (b)는 트립전압 바로 전의 전압으로 10[kV]일 때의 $\phi-q-n$ 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 정극성은 방전이 0~120도 영역에서 방전이 발생하였으며, 50도 부근을 제외하고 대부분 영역에서 고르게 방전이 발생하였음을 확인할 수 있었다. 50도 영역에서는 약20[pC]의 전하량을 가지는 방전이 592회로 전체 위상영역에서 가장 많이 발생하였다. 부극성에서는 180~300도 영역에서 방전이 발생하였으며, 230도 부근에서 정극성과 동일한 약 20[pC]의 방전이 249회로 가장 많이 발생하였으며, 동일 위상에서 최대 방전전하량이 460[pC]이 발생하였다. 그러나 모든 영역에서 100[pC]이하 방전이 주 방전이였으며, 큰 전하량을 가진 방전은 10이하로 발생빈도가 매우 낮음을 확인할 수 있었다.

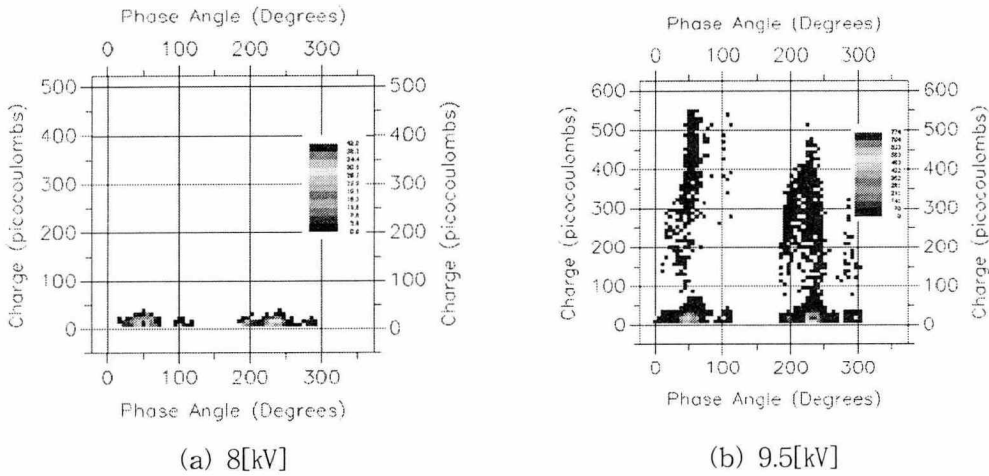


그림 3.3 주행거리 15만[km] 점화코일의 $\phi-q-n$ 분포

그림 3.3은 15만[km]를 주행한 점화코일의 $\phi-q-n$ 분포를 나타낸 그래프이다. 그림 (a)는 8[kV]일 때의 $\phi-q-n$ 분포로 정극성에서 5~120도 영역에서 방전이 발생하였으며, 모두 50[pC]이하의 방전이였다. 최대방전발생빈도는 50도에서 약 20[pC]의 전하량을 가지는 방전이 42회로 가장 많이 발생하였다. 부극성에서는 180~300도에서 방전이 발생하였으며, 정극성과 동일하게 모든 방전이 50[pC]이하로 낮은 방전만이 발생하였다. 방전빈도수는 230도에서 10[pC]의 낮은 방전이 40회로 가장 많이 발생하였다. 전압을 9.8[kV]로 승압하면 방전전하량이 매우 높아 검출한도를 초과하기 때문에 인가전압 9.5[kV]일 때(그림 b)의 $\phi-q-n$ 분포를 보면, 정극성에서 0~120도 영역에서 방전이 발생하였으며, 방전전하량도 500[pC]이상의 매우 큰 방전이 발생하였다. 특히 50도에서는 20[pC]의 전하량을 가지는 방전이 503회로 가장 많이 발생하였으며, 발생전하량도 552[pC]으로 최대전하량을 가지는 방전이 나타났다. 부극성에서는 180~305도 영역에서 방전이 발생하였으며, 225~245도 영역에서 방전발생빈도수가 최대인 774회의 방전이 발생함을 볼 수 있었으며, 225도에서 최대방전전하량인 520[pC]의 방전이 발생하였다. 또한 10만[km] 주행한 시편과는 달리 전하량이 큰 방전도 다수 존재함을 확인할 수 있었다.

주행거리에 따른 $\phi-q-n$ 분포는 초기방전발생전압에서 방전은 낮은 방전만이 나타났으며, 대부분 정극성은 50도, 부극성에서는 225도를 중심으로 주변에 방전이 분포되어 있는 형태를 나타내었다. 또한 전압상승으로 인하여 방전전하량이 증가하여도 주 방전은 50[pC]이하의 낮은 방전이 주를 이루고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나, 주행거리의 증가로 점화코일에 열화현상이 존재하면, 전압 상승에 따라 높은 방전의 분포가 증가하며, 점차적으로 토끼의 귀모양으로 방전분포가 형성됨을 확인할 수 있었다.

3.2 주행거리에 따른 와이블 해석

검출된 10개의 데이터를 검토하기 위하여 2-parameter 와이블 함수를 이용하여, 전압 변화에 따른 누적과피확률($F(n)$), 척도파라미터 (n_s), 형상파라미터(m)의 값을 구했다.

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

단, n_s : 척도 파라미터, m : 형상 파라미터

척도파라미터 n_s 를 구하기 위해 x축은 방전빈도 및 방전전하량, y축은 누적확률분포로 설정한 후, 각각에 대한 변화량을 계산하였다. 척도 파라미터는 누적확률이 63.2[%] 일때를 나타낸다.

또한 식 (1)을 변형하여 간단히 표현하면

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

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

로 1차방정식을 나타내고 있다. 식(3)에서 직선의 기울기가 형상파라미터를 나타내고 있다.

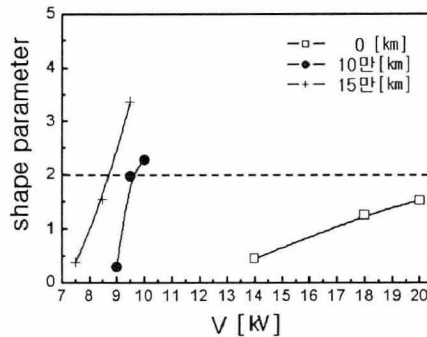


그림 3.4 주행거리에 따른 와이블 해석

그림 3.4는 식(3)에 의해서 구해진 기울기(형상파라미터)값을 전압변화에 따라 도시화 한 것이다. 그림에서 보게 되면 주행거리 0[km]인 점화코일은 20[kV]로 전압이 증가하여도 2이하의 값을 나타냈으며, 10만[km] 주행한 점화코일은 낮은 전압에서는 1이하의 값을 나타내다가 전압의 증가에 따라 2이상의 값으로 증가함을 볼 수 있다. 또한 15만[km] 주행한 점화코일도 동일하게 초기 7.5[kV]에서는 매우 낮은 값을 나타내다가 전압의 증가에 따라 급속하게 증가하여 9.5[kV]에서는 3이상의 값을 나타내고 있다. 와이블 분포에서 형상파라미터 값에 따라 X의 확률밀도함수(probability density function)의 모양이 변하기 때문에 매우 중요한 파라미터이다. 일반적으로 $m=2$ 인 경우를 란리분포(Ralyleigh distribution)라고 하는데, 이를 기준으로 m 이 작아지면 지수분

포함수를, m 이 커지면 정규분포함수를 나타낸다. 특히 $m=1$ 인 경우가 완전한 지수분포의 확률밀도함수를 나타내므로, 사용되지 않는 점화코일의 경우 전압증가에 따라 지수분포형상을 유지하고 있음에 반해 사용된 점화코일의 경우 전압증가에 따라 불규칙적인 함수에서 점차 정규분포형태를 형성해 가는 것을 확인할 수 있었다.

$$\lambda(t) = \frac{dF(t)/dt}{1-F(t)} = \frac{m}{n_s} \left(\frac{n-\gamma}{n_s} \right)^{m-1} \quad (3)$$

단, $F(t)$: 와이블 함수 γ : 위치파라미터

끝으로 고장율에 대한 시간함수는 식(3)로 구할 수 있는데, 형상파라미터의 증가는 기기수명저하율이 지수함수적으로 증가함을 볼 수 있다.

4. 결론

점화코일 열화에 따른 부분방전특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 초기방전은 주행거리와 관계없이 50[pC]이하의 낮은 전하량을 가진 방전이 나타났으나, 방전발생 개시전압의 낮아짐을 확인할 수 있었다.
- (2) 주행거리의 증가에 따라 방전형태가 토끼 귀의 형태를 형성하였으며, 정극성은 50도, 부극성은 225도를 중심으로 주변위상으로 퍼져나가는 형상을 나타내었다.
- (3) 방전발생빈도의 와이블 해석결과 주행거리의 증가에 따라 형상파라미터의 급격하게 증가하여 방전발생빈도의 분포가 정규분포에 가까워짐을 알 수 있었다.
- (4) 주행열화가 커질수록 고장율에 대한 시간감소율이 지수함수적으로 증가함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] L.A. Dissado, J.C. Fothergill ; Electrical Degradation and breakdown in polymers; Peter Peregrinus Ltd. pp.117-198, 1997
- [2] 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
- [3] Kuniharu IMAI, "Relationship between Diameter of Simulated Tree Channel and Tree Propagation from Its Tip", J. Inst. Electrostate. Japan, Vol. 26, No. 2, pp.84-90, 2002
- [4] T.J. Gallaghe, A.J. Pearmain, "HIGH VOLTAGE Measurement, Testing and Design", JOHN WILEY&SONS Ltd., pp.66-72, 1983
- [5] Imai. K, Ito.K, Shimizu.N, Nawata.M, "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