

유한요소법을 이용한 PTFE 일렉트레트의 코로나 대전 과정 시뮬레이션

The Simulation of Corona Charging Process in Polytetrafluoroethylene Electret using Finite Element Method

이수길^{○*}, 유재웅[○], 박건호[○], 김충혁[○], 이준웅[○], 김용주^{○○}
○ 광운대학교 전기공학과
○○ 충주산업대학교

Su-Kil Lee^{○*}, Jai-Woong Yoo[○], Geon-Ho Park[○], Choong-Hyuk Kim[○],
Joon-Ung Lee[○], Yong-Ju Kim^{○○}
○ Dept. of Electrical Eng. Kwangwoon Univ.
○○ Chungju Industrial Univ.

ABSTRACT

In this study, the thermally stimulated current(TSC) of corona charged PTFE film was studied and the simulation of corona charging process was also calculated by finite element method. The electrets which were formed by applying high voltages(DC -5~-8 [kV]) to PTFE film, were experimented to measure TSC in the temperature range of -100~+200 [°C] and then the finite element method was accomplished to examine corona charging process using a obtained physical constants.

It is confirmed that the charging negative corona is profitable as the applications are manufactured, because the time constant of negative corona is much larger than it of positive corona. And it is attempted to estimate the corona charging process in space using simulation.

광범위하게 이용되어지고 있는데, 이들 고분자 물질은 매우 우수한 유전 특성을 가지고 있기 때문이다.

본 연구에서 연구한 고분자 재료는 학명 PTFE(Polytetrafluoroethylene)으로, 이 물질은 화학적, 전기적 및 기계적인 면에서 여타 고분자가 갖지 않는 우수한 성질을 가지고 있어서 첨단 산업 분야는 물론 일반 생활 용품에 까지 널리 이용되고 있다. 이 재료의 하전 입자를 규명하기 위하여 코로나 대전시킨 일렉트레트로부터 열자극 전류(Thermally Stimulated Current) 방법을 이용하였으며, 코로나로 일렉트레트를 형성할 때에 나타나는 전위 분포의 불균형이 전기적 특성을 일정치 않게 한다는 단점을 극복하기 위하여 코로나로 시료를 대전시키는 과정을 공간적으로 분석할 수 있는 기술로서, 여러 공학계의 연구 분야에서 사용되어지고 있는 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 그 대전 과정을 시뮬레이션(Simulation)하였다.

1. 서 론

오늘날 전기·전자 산업 분야에 있어서 각종 소자나 센서를 개발 위하여 고분자 물질이

2. 실험 방법

2-1. 사용 시료

본 연구에서 사용된 시료는 두께 100[μ m]의 PTFE(Polytetrafluoroethylene; 이하 PTFE) 필

를인데, 이 시료는 열가소성 수지로서 용점(Melting Point)은 327[°C]이며, 단량체는 $[-CF_2-CF_2-]_n$ 이다.

PTFE는 절연 내력이 좋고 내화학성 및 비접착성도 우수하고 비교적 기계적 가공성도 우수한 특성을 갖는 재료로서 C-F 결합력(114.76[kcal/mole])이 크고, F원자가 C-C 결합(69~79.8[kcal/mole]) 주위에서 공간을 회전하면서 조밀하게 충전되어 있기 때문에 내침투성도 매우 우수하다.

2-2. 실험 장치

코로나 대전 장치를 이용하여 일렉트레트를 형성한 후, TSC 측정 장치를 사용하여 제반 데이터를 얻었는데, TSC 측정장치의 구성은 온도 범위 -200[°C]~300[°C]를 제어할 수 있는 온도 조절 장치(Toyo Seiki社, UTP-137-340), 전위계(Keithley, 610C<U.S.A>)와 기록계(J.J.Lloyd Instrument Ltd.Recorder CR503<U.K>) 등으로 구성하였다.

2-3. 실험 방법

실험의 파라미터는 코로나 대전 전압 DC -5~-8 [kV]를 두께 100 [μm]인 PTFE 필름에 대전시켜 일렉트레트를 형성한 후, 온도 범위 -100~200 [°C]에서 TSC를 측정하였으며, 이를 통하여 구한 여러가지 물리 정수와 코로나 진전 경로의 순환 경계 조건의 재설정법을 사용하여 코로나가 진행하는 경로와 이로 인한 전위 분포의 변화를 예측하는 시뮬레이션을 시도하였다.

2-4. 코로나 대전 과정 시뮬레이션

단순 3절점 삼각 요소를 사용하여 해석 대상 영역이 수직면으로 대전된 점을 감안하여 전체 대상 영역의 반쪽면만을 해석 대상으로 삼았으며, 요소의 수는 컴퓨터의 메모리와 수렴 시간을 고려하여 설정하였다. 그림 3에 해석면의 요소 분할도를 나타내었다.

2-5. 경계치의 재설정

본 모의 실험에서는 369개의 노드(node)와 x개의 요소를 사용하였고, Dirich 경계 조건을 갖는 y개의 노드에 경계치를 설정하여 계산을 수행하였으나 코로나 진전 경로 예측을 위한 반복 계산시에는 직전의 전계 분포 중 최대치를 갖는 영역에서의 코로나 생성을 가정하여 그 영역에 해당하는 절점에 전극과 같은 크기의 포텐셜을 재설정하였다. 이상과 같은 실험 절차 및 알고리즘을 도시하면 각각 그림 1 및 그림 2와 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 대전 전압에 따른 TSC 스펙트럼

그림 4에 DC -8~-5[kV]의 코로나 전압으로 대전시켜 형성한 일렉트레트로 부터 관측한 TSC 스펙트럼을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 170, 90, 30 및 -40[°C]의 온도 부근에서 4개의 피크를 얻었으며, 이들을 각각 고온으로 부터 α , β_1 , β_2 및 γ 피크라 하고, 이들 피크들의 기원 및 재 현상에 대해서 알아 보기로 한다.

① γ 피크

코로나에 의해 음극으로 부터 튀어나온 전자는 공기 중에 존재하는 산소 분자(O₂)와 충돌하여 전리되어 2개의 산소 원자(O)로 되고 산화력이 강한 산소 원자는 시료 표면에 접촉하게 되는데, 이때 산소 원자는 전자보다 무거워서 시료 내에 침투하기 어렵다고 사료되며, 따라서 이 산소 원자는 PTFE의 말단기에 존재하는 이중 결합(C=C)과 반응하여 카르보닐기(C=O)가 생성될 수 있다고 생각된다. 이렇게 해서 생성된 카르보닐기가 -40[°C]의 온도 부근에서 탈분극되어 γ 피크가 나타나는 것으로 사료된다.

한편, -7[kV] 이하로 대전시켰을 때, γ 피크의 진폭이 나타나는 온도가 일정한 것은 단일 완화 피크임을 암시하며, -8[kV] 이상일 때 전류 값은 대단히 커지고 피크 온도도 보다 고온으로 이동하는데 이는 쇼트키 효과(Schottky's Effect)로 인해 전위 장벽의 높이가 낮아져서 전자의 주입이 용이해져서 비교적 낮은 깊이에 카르보닐기의 생성이 이루어지기 때문으로 생각된다.

② β 피크

두번째로 일어날 수 있는 화학 구조의 변화는 주쇄와 측쇄의 절단 가능성을 고려할 수 있다. 이는 전극으로 부터 시료 내로 주입되는 고에너지의 전자에 의해서인데, 이 전자가 고분자를 구성하고 있는 분자들과 충돌하여 주쇄나 측쇄를 끊어뜨리고 또, 충돌로 인해 속도가 줄어든 전자들은 절단된 주쇄나 측쇄와 반응해서 음이온(Stable Anion)과 중성기(Neutral Radical)를 유발시킬 수 있다. 이 경우는 전자가 주입되어 일어나는 반응이므로 카르보닐기의 생성 반응에서 보다 시료 내의 더 깊은 곳에서 일어날 것으로 사료된다. 이상의 검토로부터, β_2 피크의 기원은 코로나로 가속된 전자가 주쇄 및 측쇄와 충돌하여 절단된 위치에 트랩(Trap)된 전자가 30[°C] 부근에서 탈트랩(Detrap) 또는 탈분극(Depolarization)의 기여로 나타나는 것으로 고려되며, β_1 피크는 90[°C]의 결정 전이

온도 부근에서 트랩된 전자들의 탈트랩 및 탈분극 그리고 쌍극자들의 기여로 나타나는 것으로 사료된다.

③ α 피크

α 피크의 기원은 코로나 주입된 전자들이 준결정질 영역의 비교적 깊은 곳에 트랩되어 있다가 제2차 전이 온도인 127[$^{\circ}$ C] 이상의 고온에서 탈트랩되어 나타나는 것으로 여겨진다.

3-2. 코로나 진전 과정의 공간적 시뮬레이션

그림 2의 알고리즘에 의한 공간적 전위분포의 계산과 코로나 진전과정의 시뮬레이션을 수행하는데 있어서 Norton's Benchmark 108MHz 속도의 486DX2-50 Machine을 사용한 결과 계산시간이 23 [Hour/Frame] 정도 소요되었으며 전체적인 해석시 4 Frame의 분포도를 사용하였으므로 약 92 시간이 소요되었음을 알 수 있다. 그림 5, 그림 6, 그림 7, 그리고 그림 8에 -8kV의 정전압이 인가된 코로나 대전장치에서의 전위분포 변화와 코로나의 예상경로를 나타내었다.

그림 5에 나타난 전위 분포는 코로나가 발생하기 직전의 상태를 분석한 것인데, Dirich 경계 조건을 칼날 전극과 실린더 전극에만 주었고 공간 전하는 존재하지 않는다는 가정하에 시뮬레이션을 수행하였다. 이미 보고된 바와 같이, 칼날 전극의 모서리 부분에서 전위의 집중 현상이 심하게 나타났고 전계의 절대값 비교에서도 가장 큰 값이 얻어졌다.

그림 9에는 칼날 전극의 모서리에서 A 지점까지의 전위 변화가 가장 급격함을 보여주고 있다. 그림 6에 나타난 전위 분포는 그림 5에서 가장 큰 전계값을 가지는 경로에 Dirich 경계 조건을 재설정하여 전체 계산을 순환시킨 것이었으며, 전계에 의해서 공기 중의 절연 파괴가 일어나는 것으로 분석하였다.

그림 7에 나타난 전위 분포는 순서도에서 나타낸 바와 같이 Dirich 경계 조건의 재설정에 의한 전위 분포의 변동을 유도하여 과도 상태의 코로나 진전 상태를 나타낸 것이다. 코로나는 최단 경로와 더불어 칼날 전극의 윗 부분으로 부터의 영향에 의해 방향을 결정하는 것으로 사료된다.

그림 8에 나타난 전위 분포는 코로나가 시료에 도달하여 시료 내부의 전위 분포에도 상당한 영향을 주고 있음을 확인할 수 있고, 이로 인해서 절연 내력 이상의 전계가 유지되면 파괴에 도달할 것으로 사료된다.

4. 결 론

두께 100 [μ m]인 PTFE에 DC -5~-8 [kV]의 코로나 전압으로 대전시켜 형성한 일렉트레트로 부터 온도 범위 -100~+200 [$^{\circ}$ C]에서 TSC를 관측한 결과, -40, 30, 90 및 170 [$^{\circ}$ C]의 온도 부근에서 각각 γ , β_2 , β_1 , 및 α 인 4개의 피크를 관측하였는데,

첫째로, 이들 피크의 기원은 다음과 같다.

1) γ 피크는 시료 표면에 생성된 카르보닐기가 -40 [$^{\circ}$ C]의 온도 부근에서 탈분극되어 나타난다.

2) β_2 피크는 코로나로 가속된 전자가 주체 및 측체와 충돌하여 절단된 위치에 트랩(Trap)된 전자가 30[$^{\circ}$ C] 부근에서 탈트랩(Detrap) 또는 탈분극(Depolarization)의 기여로 나타난다.

3) β_1 피크는 90[$^{\circ}$ C]의 결정 전이 온도 부근에서 트랩된 전자들의 탈트랩 및 탈분극 그리고 쌍극자들의 기여로 나타난다.

4) α 피크의 기원은 코로나 주입된 전자들이 준결정질 영역의 비교적 깊은 곳에 트랩되어 있다가 제2차 전이 온도인 127[$^{\circ}$ C] 이상의 고온에서 탈트랩되어 나타난다.

둘째로, 기능성 소자를 제작할 때에는, 부코로나로 대전시켜 형성한 일렉트레트의 시정수가 정코로나로 대전시킨 것보다 상당히 크므로 부코로나로 대전해야 유리함을 확인할 수 있었다.

셋째로, FEM법을 이용하여 전위 분포를 시뮬레이션한 결과, 코로나의 공간적인 진전 과정을 예측하는 방법의 시도가 이루어졌고 동적 상태에서의 상태 해석을 위한 기초적인 방법을 제시하였다. 또한 시료의 코로나 진전 과정의 시뮬레이션과 이상적인 코로나 대전 장치의 설계를 통하여 시뮬레이션 결과의 효과적인 검증을 하기 위하여 순환계산형 전극 형상 설계 시뮬레이터와 실험 환경의 이상화가 이루어져야 하며, 전극의 Edge 현상으로 인한 전계 불균형을 억제하기 위하여 전극의 말단 부분을 최적 공률로 제작하는 것이 필요하다.

Reference

- 1] Heinz von Seggern : A New Model of Isothermal Charge Transport for Negatively Corona Charged Teflon., J.Appl.Phys. 50, 11, pp.7039-7043 (1979)
- 2] 里川, 米谷, 山田, 小泉 : ぶつ素樹脂, pp.1-46
- 3] G.M. Sessler : "Electrets", Springer-Verlog, Heidelberg (1980)
- 4] R.R. Haering et. E.N. Adams : Theory and

Application of Thermally Stimulated Current in Photoconductor., Phys.Rev., 117, p.451(1960)
 5) Heinz von Seggern : Identification of TSC Peaks and Surface Voltage Stability in Teflon FEP., J.Appl.Phys. 50, 4, pp.2817-2821 (1979)
 6) Gouri Dhatt and Gilbert Touzot : The Finite Element Method Displayed., pp.129-162 (1982)

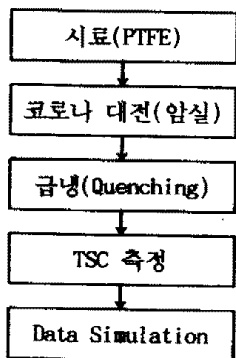


그림 1. 실험 절차
 Fig. 1. Experimental Procedure

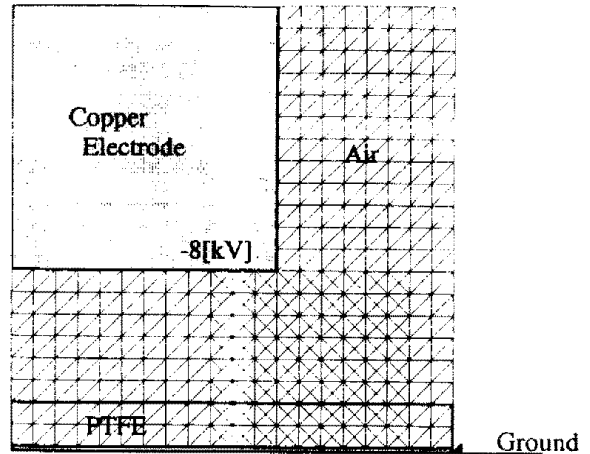


그림 3. 해석 영역의 요소 분할도
 Fig. 3. Diagram of Domain Area

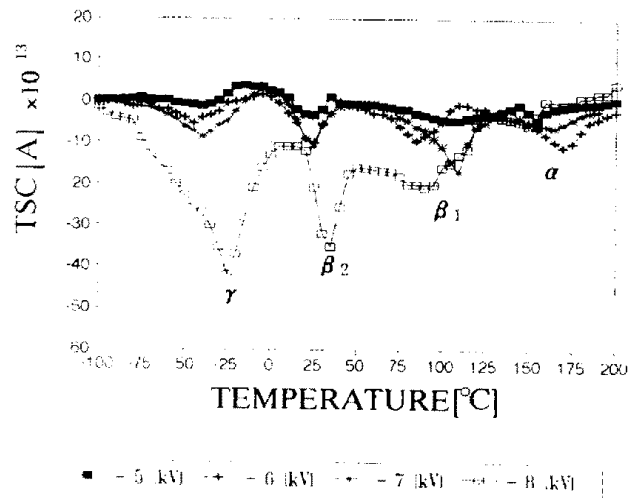


그림 4. 부(-) 코로나 일렉트레트의 대전 전압 의존성

Fig. 4. Dependence of Negative Corona Electret on Charged Voltage

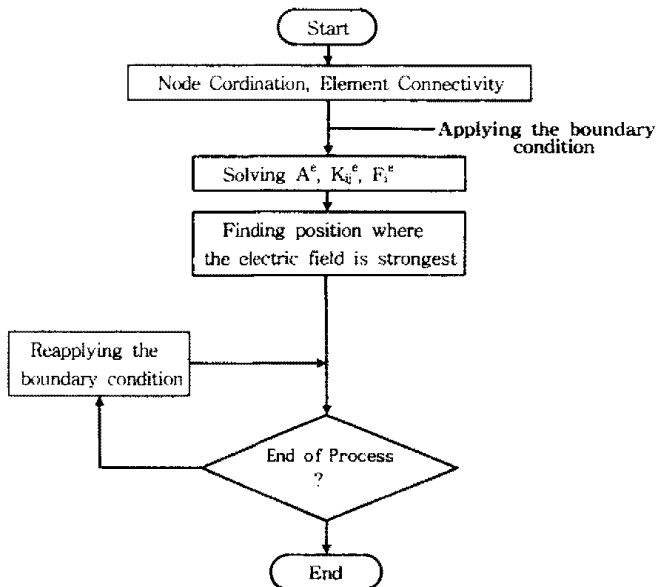


그림 2. 알고리즘
 Fig. 2. Algorithm

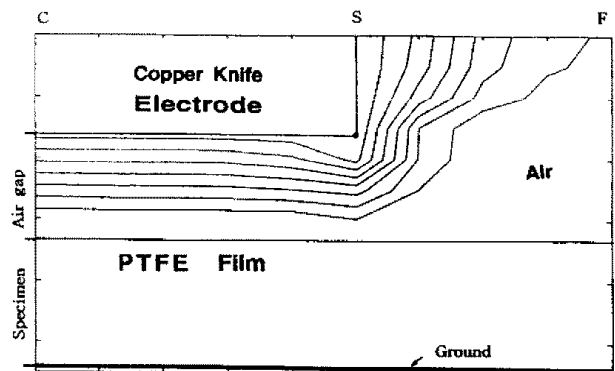


그림 5. 코로나 발생 전의 전위 분포
 Fig. 5. The electrostatic contour before the emergence of corona discharge

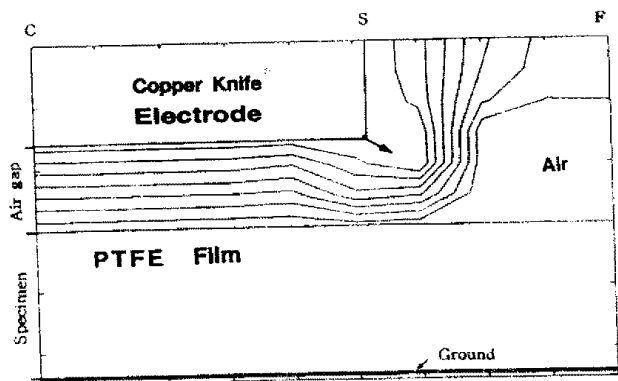


그림 6. 코로나 초기 발생 상태의 전위 분포
 Fig. 6. The electrostatic contour at the start of corona discharge

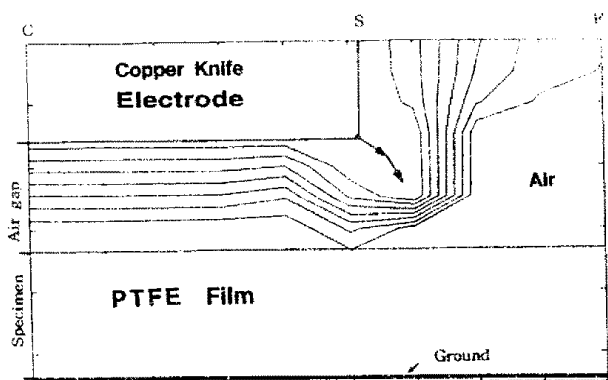


그림 7. 코로나 진행 상태의 전위 분포
 Fig. 7. The electrostatic contour at the process of corona discharge

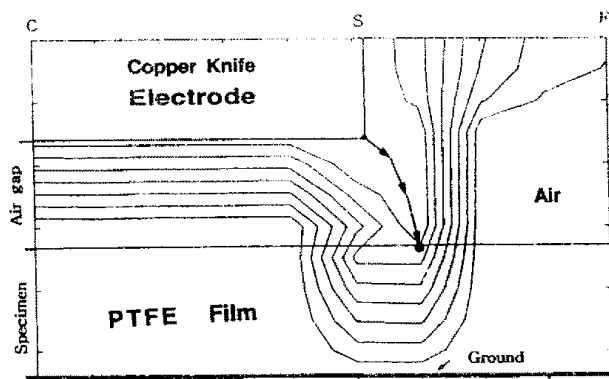


그림 8. 코로나가 시료에 도달 했을때의 전위 분포
 Fig. 8. The electrostatic contour at the time when the corona discharge reaches on the specimen

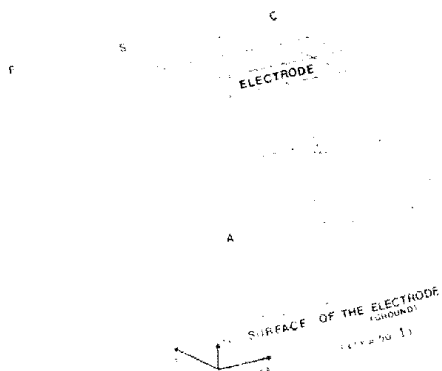


그림 9. 전위 변화
 Fig. 9. The variation of Potential