

저밀도폴리에틸렌에서 트리 형상의 전기장의존성에 관한 연구 A Study on Electric Field Dependence of Tree Shape in Low Density Polyethylene

김재환* · 박창옥** · 윤현주****

Jae-Hwan Kim · Chang-Ok Park · Hun-Ju Yoon

*광운대학교 전기공학과 교수
**안동상지전문대학 전기과 교수
***광운대학교 전기공학과 박사과정수료

요 약

절연재료의 내부에서 부분방전이 발생하면 국부파괴와 완전절연파괴의 원인이 된다. 부분방전으로 생기는 트리잉은 절연재료를 열화시키고 절연 수명을 단축시키는 중요한 원인이 된다. 따라서 절연파괴의 예측과 절연재료의 수명을 진단할 수 있는 방법에 대한 연구는 매우 중요하다. 고전압 하에서 일어나는 트리잉 현상에 대해서 저밀도폴리에틸렌의 트리잉 개시 전압과 그 진전 과정을 진성파괴의 견해에서 고찰하였다. 이러한 관점에서 본 연구는 고전압하에서 일어나는 트리잉현상에 대해서 저밀도폴리에틸렌에서 트리형상의 전기장의존성에 관하여 고찰하였다. 결과로서 트리의 성장을 그 내부가 각각 유전체 혹은 도체라고 가정했을 때의 중간적인 특성을 갖는다는 추리하에 이론적으로 검토한 결과, 실험결과와도 잘 일치됨을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Internal insulators give rise to partial discharge(PD), which cause local breakdown and even entire insulation breakdown. Treeing due to PD is one of the main causes of breakdown of the insulating materials and reduction of the insulation life. Therefore the necessity for establishing a method to diagnose the aging of insulation materials and to predict the breakdown of insulation has become important. From this viewpoint, we have studied on Electric Field dependence of tree shape in Low Density Polyethylene about treeing phenomena occurring on the high electrical field. As the result, under the reasoning that the growing of tree supposing when the inner part of tree is either dielectric or conductor has the intermediate characteristics between dielectric and conductor, theoretically investigated results well according with the experimental results.

Keywords : partial discharge, Low Density Polyethylene, Electric Field

1. 서 론

전력 및 통신케이블의 지하공동구에서 화재로 인한 전선의 소실피해 및 사회전반에 미치는 간접적인 피해를 줄이고자 전력용 케이블의 일부분을 이용하여 전력용케이블의 절연열화에 의한 과열로 케이블 피복부에 착화 및 전기합선으로 인한 화재사고를 방지하기 위하여 전기재료의 원료로 사용되는 저밀도 폴리에틸렌의 전기적특성의 연구를 통하여 절연열화로 인한 전력계

통사고에 의한 화재를 방지하기 위하여 다음과 같이 실험을 하였으며 그의 주된 사고는 그의 표면 또는 내부에 국부고전계가 존재하여 거기에서 절연파괴가 일어나 부분방전이 개시되어 진전되어 감에 따라 수지상으로 절연파괴(트리잉현상)가 진전되다가 최후에는 전로파괴에 이르러 계통 및 화재사고로 발전한다.^{1,3)} Fig. 1은 케이블에 의한 초기 화재가 진행되는 사진이다. 이러한 트리잉 파괴현상의 발생기구에 관한 정설은 아직도 확립되지 않고 있으나 (1) 국부적인 결함에 집중된 고전계가 재료자체의 진성파괴치를 초월함으로써 트리가 발생한다는 설과 (2) 국부방전에 의한 이온충격으

† E-mail : jangmag@orgio.net



Fig. 1. Initiation cable fire.

로 트리가 발생한다는 설과 (3) 방전열화에 의해서 핏트상의 공공이 전계방향으로 신장하여 핏트 선단에서 진성파괴가 생긴다는 설과 (4) 재료가 전계로 열화하여 진성파괴치 그 자체가 저하하여 트리가 발생하기 쉽게된다는 설등의 여러 가지 설⁴⁾이 있는바 기초적인 발생기구에 관한 세밀한 연구는 그의 중요성이 크다고 하겠다. 이상의 파괴기구는 재료의 조성, 구조 및 온도 등에 밀접한 관계가 있다⁵⁾고 사료되는데 본 연구에서는 트리잉파괴 양상에 의한 트리 모양의 전계의존성을 연구하기 위하여 저밀도 폴리에틸렌 시편(침단간격 2mm)에 교류 상용 주파수 전압(7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20 kV AC)을 상온에서 각각 계속 인가한 후 발생하는 트리의 길이를 현미경 사진으로 측정하여 인가 전압의 변화에 따른 트리의 길이의 변화와 상기전압들에 대한 절연파괴시간(수명)을 측정하였다.

이상의 실제적인 실험 결과를, 트리내부의 유전성 및 도전성에 관한 모델을 기초로 트리 진전 길이를 검토한 결과와 작성된 전기력선 및 등전위선을 기초로 계산한 이론적인 절연파괴(최대전계강도 kV/mm) 계산치와 비교 연구하기 위하여, 침대 평판간의 전기력선과 등전위선(구대 평판간 전기력선과 등전위선으로 보완)을 등각사상법에 의하여 완성하고, 실측 촬영한 현미경 사진과 비교 검토하여 이로부터 저밀도폴리에틸렌의 트리 모양을 전계의존성에 관하여 연구하여 전력계통 및 화재사고를 발생할 수 있는 원인으로 모의실험을 통해 연구하였다.⁶⁾

2. 시편제작 및 실험장치

본 실험에 사용된 시편은 저밀도 폴리에틸렌(이하 LDPE)으로서 밀도 0.92 g/cm^3 인 LDPE의 펠릿(Pellet)을 시료제작기의 주형 위에 올려 놓고 130°C 에서 10분간 예열한 후 시료중앙에 바늘을 꽂고 압력이 100

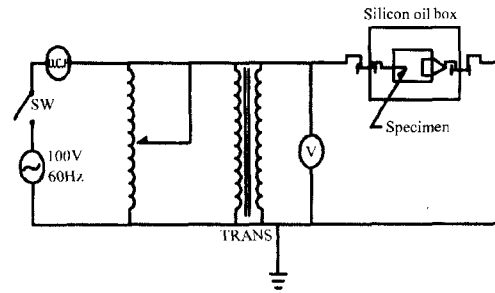


Fig. 2. A experiment device block diagram of composite system.

$\text{kg}\cdot\text{f/cm}^2$ 이 될 때까지 5분 동안 단계적으로 가압하고 다시 5분동안 주형위에 가열한 후 시료의 투명도를 위해 15°C 의 물에 급냉시켜 제조하였다. 시편은 블록 형태로 만들었다. 시편의 규격은 $30\times 40\times 3 \text{ mm}^3$ 로 제조하였으며 침전극은 $0.56 \text{ mm}\phi$ 인 바늘(스테인레스 스틸재질)을 에칭법에 의해 침선단 곡률반경을 $3 \mu\text{m}$ 로 조정하여, 침전극의 삽입 상태에서 블록형태로 몰딩하여 사용하였다. 시료표면과 침전극 사이를 에폭시 수지계의 접착제로 밀봉하였으며 전극의 형태는 침대 평판전극이고 극간거리 2mm이고 집적층 전극은 실버페이스트(silver paste)로 도포하였다.

실험장치에 대한 블록선도는 Fig. 2에 표시하였으며 전원으로는 KYONAN ELEC제 고압발생 장치를 사용하였으며, 내장된 시험용 변압기는 정격 60 Hz, 2차전압은 0~50 kV, 1.5 KVA용량이다. 전극부분은 표면에서의 연면방전을 방지하기 위하여 시료를 실리콘 유(Silicon oil)에 함침하였으며 실험은 상온에서 실시하였다. 전압 인가방식은 승압속도 1 kV/s 로 7.5 kV와 10 kV를 각각 인가한 후 광학현미경(Olympus)으로 35배에서 파괴시까지 관측하였으며, 트리의 길이가 0.1 mm이상인 것 만을 발생으로 간주하였다. 둘째로 트리의 길이와 모양에 관한 실험을 위하여 일단 초기 트리가 발생한 시료를 트리의 진전상황을 관측하기 위하여 교류 상용 주파수 전압(7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20 kV AC)을 각각 4분간씩 인가한 후, 35배의 배율에서 현미경 관찰을 실시하여 동일 시간에서 파괴되는 트리잉현상에 의한 절연파괴를 알아보고자 트리의 길이를 측정하였으며, 또한 각각의 동일 전압에서 계속 전압을 인가하였을 때의 파괴시간을 측정하여 절연파괴에 의한 케이블 외복부에 착화 및 전기합선으로 인한 화재사고의 원인이 될 수 있음을 알아보고자 하였다.

셋째로 인가전압 대 수명에 관한 실험을 위해서 같은 실험장치를 가지고 교류 상용 주파수 전압(7.5, 10,

12.5, 15, 17.5, 20 kV AC)을 계속 인가하였을 때 절연파괴로 인한 전력계통 및 화재사고를 미연에 방지하고자 실험을 통하여 파괴시간을 측정하였다. 이때 수명시간을 측정하기 위하여 시료가 파괴되는 순간에 고전압 차단기에 의해서 자동으로 차단되며, 전압인가 직후에서 파괴시간까지의 시간을 스톱워치(Stop watch)로 측정하여 그 값을 수명치로 취하였다.

3. 실험 결과 및 검토 고찰

3.1 초기 트리의 발생

2의 요령에 의하여 만든 20여개의 시편에 대하여 초기트리 발생 실험을 실시하여 초기트리의 갯수-시간 곡선을 그려본 결과 Fig. 3, Fig. 4와 같다.

초기 트리가 맨 처음에 발생한 본 실험에 사용한 저

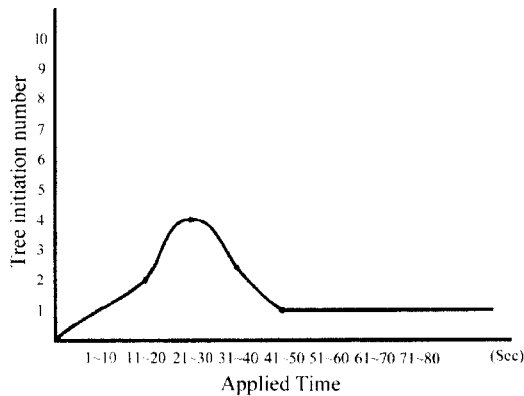


Fig. 3. Initiation treeing breakdown(7.5 kV).

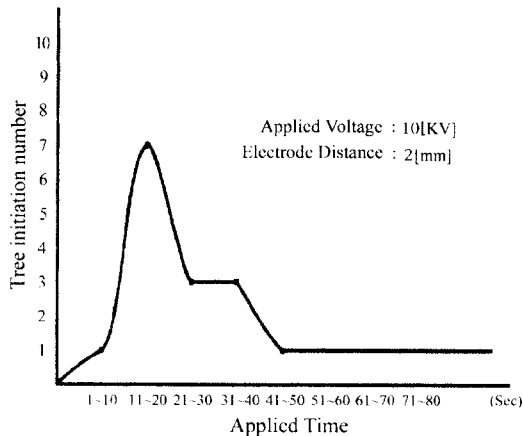


Fig. 4. Initiation treeing breakdown(10 kV).

밀도폴리에틸렌에서 전극 침단 부분의 고전계 집중에 의한 진성 파괴 강도가 7 MV/cm에 도달할 때이므로 그의발생 조건은 최대전계강도의 식(1)에서

$$E_{\max} = \frac{2V}{R \ln(1 + 4x/R)} \geq 7[\text{MV/cm}] \quad (1)$$

여기서, V는 인가전압으로 10 kV, R은 침단 부분의 곡률 반경으로서 3×10^{-4} cm, x는 전극의 갭으로서 2 mm이라면 $E_{\max} = 8.45$ MV/cm가 되어 20°C에서의 LDPE의 진성파괴강도인 7 MV/cm보다 크고 전압 인가후 트리 발생시까지 10 sec 전후인 것이 많고, 맥스웰 응력을 계산해 보면

$$f = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon \gamma E_{\max}^2 = 73.3[\text{kg/cm}^2] \quad (2)$$

가 되어 LDPE의 기계적 인장강도 20°C때는 90 kg/cm²가 되므로 맥스웰 응력에 의한 절연 파괴보다는 진성 파괴로 보는 것이 타당하다고 생각된다.

3.2 트리의 모양

Fig. 6, Fig. 7은 전압을 인가했을 때 시간에 대한 트리 모양을 현미경에 부착된 사진기로 찍은 사진이다. Fig. 6, Fig. 7에서 트리의 모양을 전계 모양의 관점에서 검토하면, 바늘 끝을 전계 내의 각 점의 전계 방향을 접선방향으로 하는 곡선인데 트리가 진전하는 방향은 전계의 방향에 영향을 받는다고 생각되므로, 전계의 방향을 나타내는 전기력선에 의하여 트리의 진전 방향이 영향을 받는다고 생각된다. 이상과 같은 견지에서 쌍곡선 모양의 침 대 평판의 전기력선 및 등전위선을 등각사상법을 써서 구하면

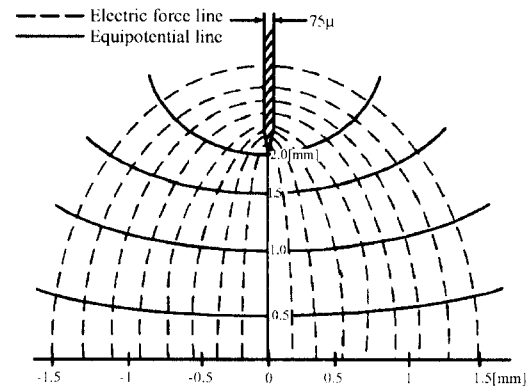


Fig. 5. Electric force lines and equipotential lines by mapping method(needle-plate).

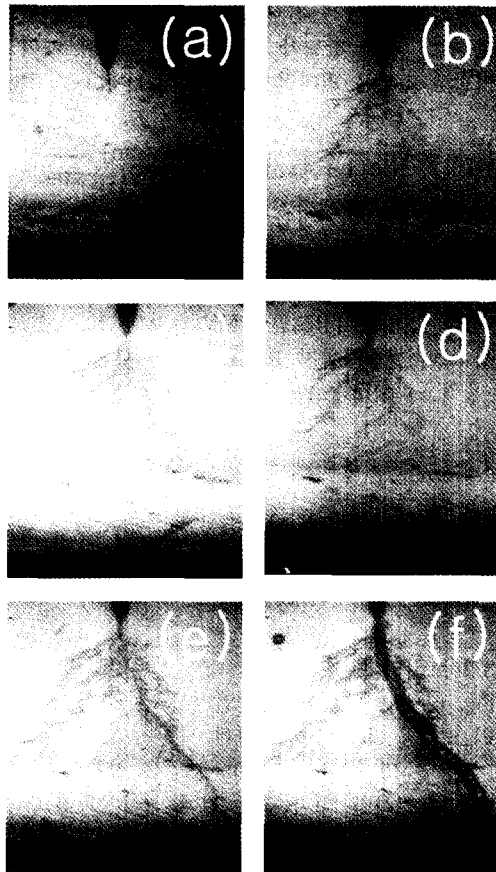


Fig. 6. The growth of tree photography with applied time (7.5 kV) (a) 5 min, (b) 15 min, (c) 25 min, (d) 40 min, (e) 42 min, (f) 45 min.

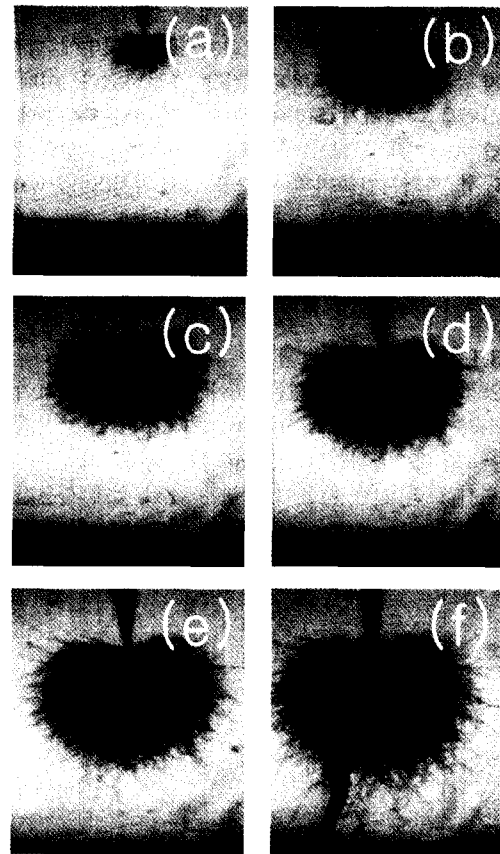


Fig. 7. The growth of tree photography with applied time (10 kV) (a) 5 min, (b) 10 min, (c) 65 min, (d) 80 min, (e) 95 min, (f) 115 min.

$$\left. \begin{aligned} z &= x + jy \\ w &= u + jv \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

에 있어서 $z = asinw$ 변환을 실시함으로써 w 평면(평행평판)을 z 평면(침 대 평판)으로 변환하고, 침(쌍곡선형) 대 평판의 전기력선과 등전위선을 구할 수 있다.

$$z = asinw \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= asinu \cdot coshv \\ y &= acosu \cdot sinh v \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(3)식을 (4)식에 대입하면

$$\frac{x^2}{cosh^2v} + \frac{y^2}{sinh^2v} = a^2 \quad (6)$$

(5)식을 양변에 제곱하고, u 를 소거하면 (6)식은 a 를 초점거리의 1/2, $acoshv$ 를 장경의 1/2로 하는 공초점인 원군의 식으로 전기력선을 표시한다.

$$\frac{x^2}{sin^2u} - \frac{y^2}{cos^2u} = a^2 \quad (7)$$

(6)식에 직교하는 계는 v 를 소거하면 구해진다.

(7)식은 a 를 초점 거리의 1/2, $asinu$ 를 정점간 거리의 1/2로 하는 공초점 쌍곡선 군의 식으로서 등전위선을 표시한다. Fig. 5는 (6), (7)식을 $0 \leq u \leq \pi/2$, $0 \leq v \leq 1$ 의 범위에서 적당한 u, v 값을 대입하여 그린 것이다. 점선은 전기력선을 표시하며 실선은 등전위선을 표시한다. 전극의 침 끝은 $u=8/20\pi$ 를 (7)식에 대입하여 그린 것이다. 트리 길이의 방향을 전기력선에 착안하여 보면 전적으로 대향 전극으로 향하여 침과 전기력선 상

의 임의의 점에 있어서의 접선과 이루는 각도가 예각이 되고 있다. 그러나 실제로 트리 길이가 늘어남을 관측해 보면 Fig. 6과 같이 예각을 이루며 시간이 경과하여 45분이 될 때 파괴에 도달함을 보여주고 있는 것과 Fig. 7에서와 같이 트리의 진전하는 방향과 접이 둔각을 이루며 115분에 도달할 때 절연파괴로 인한 전력계통 및 화재사고를 발생할 수 있는 사진을 (f)에서 보여주고 있다.

따라서 원전극 대 대향전극으로 바꿈으로서 트리의 진전하는 방향이 둔각인 조건을 만족할 수 있도록 좌표변환으로 유도된 점을 착안하여 원전극 대 평판전극 간의 좌표 변환을 생각해 보았다. 이때에는 등각사상법을 써서 전기력선과 등전위선을 구할 수 있다. 이것을 w평면에서 z평면으로 $z = \tan w$ 에 의하여 변환하면 다음과 같다.

$$(x + \cot 2u)^2 + y^2 = \left(\frac{1}{\sin 2u}\right)^2 \quad (8)$$

(8)식은 u의 값에 따라서 변화하는 원군의 식으로서 전기력선을 표시한다. 같은 형태로서 이것에 직교하는 계는

$$(y - \coth 2v)^2 + x^2 = \left(\frac{1}{\sin 2v}\right)^2 \quad (9)$$

(9)식은 v의 값에 따라 변화하는 원군의 식으로써 등전위선을 표시한다. Fig. 7은 (8), (9)식에서 $-\pi/2 \leq u \leq \pi/2$, $0 \leq v$ 의 범위에서 적당한 u, v값을 대입해서 그린 Fig. 8이다. 접선은 전기력선을 표시하고, 실선은 등전위선을 표시한다. 전기력선에 착안하여 보면 쌍곡선형 침일 때와는 달리 그의 방향이 대향전극과 역방향인 것도 있어 실험 결과에서 얻은 트리 모양과 대응한다.

다음으로 트리의 외형에 대해서는 등전계선에 착안하여 보면 u, v에 의해서 결정되는 z평면에 있어서의 전계를 구하면 된다. v를 등전위면 u를 전기력선으로 하는 v/u계에 있어서는 표준변환을 써서 전계 중의 임의의 점의 전계의 세기를 (10)식, (11)식, (12)식으로 할 수 있다.

$$E_z = E_x - jE_y = j \frac{dw}{dz} \quad (10)$$

평면에 있어서의 복소 전계 세기의 공액 복소수가 구해져서 그의 절대값은

$$|E_z| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (11)$$

이 된다. $E_z^* = E_x + jE_y = -\text{grad}v$ 에서 z평면에 있어서의 복소 전계강도를 구할 수 있다. (11)식을 쓸 때에는 정규형으로부터 함수를 구해야 한다.

$$|E_z| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial v}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial v}\right)^2}} \quad (12)$$

또한, (12)식에 의해서 z평면 있어서의 전계 세기의 절대치가 구해진다. 이를 위해서는 정규형으로부터 $x=f_x(u, v)$ 와 $y=f_y(u, v)$ 의 두개의 함수를 만들어야 한다. 수치적인 검토를 하기 위해서는 u와 v는 디멘존(dimension)이 없는 양이므로 3개식의 어느 것에 대해서도 보충적인 처리를 해야 하는데 그를 위해서는 다음의 식(13)식이 성립된다.

$$|E_z| = |E_{(z)}| \cdot |E_w| \text{ kV/mm} \quad (13)$$

$$|E_w| = \frac{V}{VI - VII} \text{ kV/mm}$$

여기서 V는 전극간에 주어지는 전압을 kV로 나타낸 것이고 VI와 VII는 전극면을 mm단위로 표시한 것이다. 원대 평판에 있어서의 전계를 계산하는 경우 (12)식을 쓴다. (8), (9)식을 (12)식에 대입하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$|E_z| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial v}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial v}\right)^2}} = \frac{1}{2}(\cos 2u + \cosh 2v) \quad (14)$$

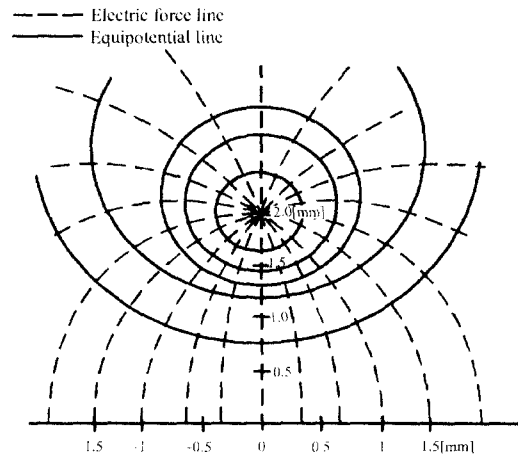


Fig. 8. Electric force lines and equipotential lines of point to plate electrode according to conformal representation.

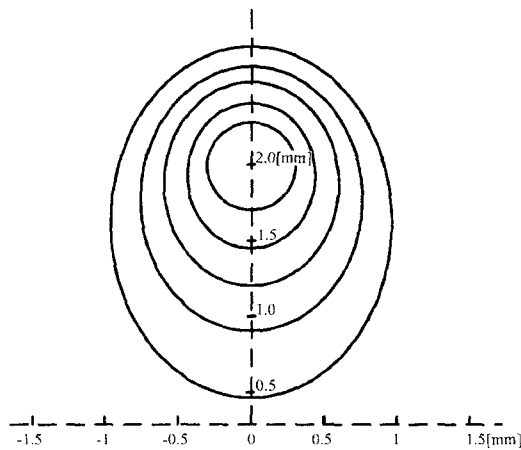


Fig. 9. Equi-Electric field lines of point to plate electrode according to conformal representation.

Fig. 9은 u , v 에 의해 결정된 z 평면에 있어서의 등전계선을 표시한 것이다. 이때의 실제의 전계는 $|E_z|$ [kV/mm]로 표시할 수 있는데 $|E_w|$ 는 전극의 구조에 따라서 결정되는 정수이다. 따라서 그림을 그리는데 있어 등전계선의 모양에는 $|E_w|$ 가 무관계하므로 $|E_w|=1$ 로 하여 그렸다.

본 실험 결과에서 트리가 최고로 늘어난 길이는 1.2 mm 정도로서 그 이상은 파괴된다는 것을 Fig. 5, Fig. 6에서와 같이 알 수 있었다. 그러므로 침극에서 1.2 mm 정도까지의 등전계선의 모양과 실제의 트리와 비교하면 거의 유사하다고 생각된다.

3.3 트리의 길이

Fig. 10의 A곡선은 전압 인가 후 4분이 되었을 때의 트리의 진전 상황을 현미경에 부착된 사진기로 촬영하여 인가전압(7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20 kVAC)에 대한 길이를 실측한 후 도시한 결과이며 인가전압에 대한 절연열화를 알아보려고 하였다. 인가전압에 따라 1.2 mm까지는 같은 시간의 경과에 따른 트리의 길이는 거의 비례하는 경향을 보이고 있다.

이 측정 결과는 트리 내부를 유전체로 가정했을 때의 계산 결과 곡선 B와 트리 내부를 도체라고 가정하여 계산했을 때의 결과 곡선 C의 거의 중간치를 갖는 곡선임을 Fig. 10에서 알 수 있다.

4. 결 론

지하공동구에서 수용된 시설물중에서도 전력 및 통

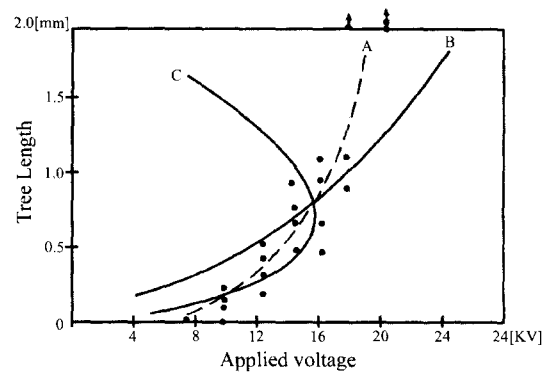


Fig. 10. Comparison of theoretical value to experimental value of tree length with each voltage.

신케이블에서 화재로 인한 전선의 소실 피해 및 사회 전반에 미치는 간접적인 피해로 인한 사회기간산업 및 국가보안 유지상에도 큰 문제가 될 수 있다는 사실에 착안하여 실험을 하였다. 따라서 본 논문에서는 절연 열화에 미치는 트리잉현상에 따른 절연파괴 실험을 제한된 범위에서 실험하고 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다

1. 트리의 진전하는 방향이 전계의 방향에 영향을 받는다는 점에 착안하여 트리의 모양을 등각사상법을 이용함으로써 1차 보정을 거쳐 수식화할 수 있었으며 절연열화의 원인으로 인하여 절연파괴에 의한 전력계통 및 화재사고를 발생할 수 있음을 알았다.

2. 초기 트리의 발생에 관해서는 시편의 조직 양상이나 이물의 혼입, 결합 및 보이드등은 시편 자체의 요인과 침 전극의 곡률반경의 영향등 복합 요인으로 시간 분포가 상당히 임의성을 지녀 설명이 난해하나 최대 절연파괴강도의 계산치가 8.45 MV/cm로서 진성과 파괴강도 7 MV/cm를 넘고 10초 내외에서 트리가 발생하는 점으로 보아 트리의 발생원인이 진성과파괴 임을 확인하였고 전압을 인가하였을 때 케이블의 손상됨을 알 수 있었다.

3. 같은 경과 시간에 있어 각 인가전압에 대한 트리 길이의 측정 결과는 대체로 트리 내부를 유전체로 가정했을 때의 계산결과와 도체로 가정했을 때의 계산결과와의 중간치 임을 확인하였다.

4. 절연파괴의 수명을 여러 인가전압에 대해서 구한 결과 인가전압의 증가에 따라 급히 수명이 감소함을 알 수 있었으며 이에 따른 케이블 원료의 전기적특성에 대한 연구가 진행되어 전력계통 및 화재사고를 미연에 방지되어야 한다.

후 기

본 연구는 광운대학교 교내 연구비 지원에 의하여 수행되었음

참고문헌

1. T. Yamakita, T. Ariyasu "Relation between the superstructure and Initial Tree Polyethylene", JIEE, Vol. 112, No. 2(1992)
2. F. Komori, N. Nishiguchi, M. Hikita and T. Mizutani "Construction of Expert System Prototype for Degradation Diagnosis and Measurement System Using Personal Computer", T. IEE Japan, Vol. 113a, No. 5(1993)
3. Tairo *et. al.*, "Phase Angle Analysis of Discharge Magnitude Distribution in a Fine Void", JIEE Vol. 109, No. 12(1989)
4. E. Gulski, F. Morshius and F.H. Kreiger, "Automized Recognition of Partial Discharge in Cavities" J. Appl. Phys., pp. 1329-1335(1990)
5. L.A Dissade, J.C Fothergill, "Electrical Degradation and Breakdown in Polymers" Peter Peregrinus, pp. 69-154(1992)
6. Suwarno, H. Ichikawa, Y. Suzuo ki, T. Mizuani, K.Uchida, "Partial Discharge Pattern of Electrical Treeing in Polyethylene", Proc. 4th Int. Conf. Prop. Appl. Diel. Mats., Brisbane, pp. 379-382 (1994)