

화상계측에 의한 지중 전력케이블의 수트리 열화에 관한 연구

A Study on Water Tree Degradation Using Image Measurement in Underground Power Cables

김덕근*, 임장섭**, 이진***
(Duck-Keun Kim*, Jang-Seub Lim**, Jin Lee***)

Abstract

Water treeing in underground distribution power cable is not easy to observe by nondestructive method and it has very complex patterns.

This study describes the principles and practices of a continuous observation of initiation and growth of tree in polymeric insulation material using an image measurement technique. Using this technique we could observe water tree and the growing process of electrical tree due to the water tree. All of these growing process is analyzed quantitatively by image measurement program composed of borland c++.

We fabricated the thin film type specimen to observe water tree easier and also the needle electrode was prepared by etching method using electrolytes.

Initiation and the growth of tree was observed somewhat different depending on the applied voltage and the water electrode. AgNO₃ solution electrode accelerates the initiation and the growth of water tree, compared to those of distilled water electrode. The water tree and the electrical tree occurred by water tree has discontinuous growth characteristic.

Key Words : Water Tree, Etching Method, Needle Electrode

1. 서 론

전력 케이블의 절연체는 XLPE가 주로 사용되고 있으며[1], 운전중의 온도가 50~90℃로 되고, 물이 존재하는 환경에서 사용되는 경우, 이들 절연체는 수분과 열에 의한 열화가 발생하기 쉽다[2]. 1968년 지중 XLPE 케이블에서 처음 수트리가 발견된[3] 이

후 Miyashita[4], Vahlstrom[5] 등 많은 연구자들이 수트리 열화현상에 대하여 연구하였고, 1996년 Fan Zong-Hau[6]는 'Silver Tree'라는 새로운 용어를 사용하여 수트리를 설명하였다. 현재 수트리에 대한 연구는 수트리 특성을 전기적인 해석과 물성적인 측면을 접목해 해석하려 하고 있다[7, 8].

수트리는 절연과피까지의 시간이 길고, 수트리가 발생하여도 PD나 열화에 수반되는 다른 특성들의 관측이 어렵고, 특히, 케이블 내부에서 수트리가 발생한 후에는 열화의 중간단계를 관찰할 수 없다. 현재 케이블 내부에서 발생한 수트리에 대해서는 케이블을 절단한 후 메틸렌블루와 같은 착색제로 트리부분이 착색되도록 처리해 수트리의 관측을 용이하고

* : 전남대학교 전기공학과

** : 목포해양대학교 해양전자·통신공학부

*** : 목포대학교 전기·제어계측공학부

E-mail : mailcode@lycos.co.kr

2000년 1월 25일 접수, 2000년 11월 30일 심사완료

있다[7]. 그러나 이와 같은 방법들은 케이블 절단시 미소크랙들의 손상을 초래하며, 처리과정의 복잡성과 수트리 진전에 대한 연속적인 관측이 어렵다는 단점을 가지고 있으며, 활선상태에서 수트리의 진전에 의한 전기트리로의 전이 과정을 관측할 수 없다.

본 연구에서는 수트리 관측의 복잡성을 극복하고, 수트리 발생, 진전과정 및 수트리에 의한 전기트리 발생을 활선상태에서 연속적으로 관측하기 위한 방법을 강구하고자 얇은 필름 형태로 시료를 제작하고, 에칭(etching)법을 이용한 침전극 제작방법을 개발하였다.

중류수와 AgNO₃ 용액으로 수전극을 형성하여 XLPE 내부에서 발생하는 수트리 진전과정과, 수트리에 의해 발생하는 전기트리로 진전해 나가는 중간단계, 수트리에 의해 발생하는 전기트리를 연속적으로 관측하였고, 본 연구에서 개발한 화상계측 프로그램을 이용하여 그 진전과정을 정량적으로 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 시료제작

수트리를 착색하지 않고 시각적으로 관측하기 위해서는 시료를 얇은 필름형태로 제작하여야 하는데, 오크라 전극($\Phi : 1\text{mm}$)을 사용하게 되면 두께의 한계가 발생한다. 이런 문제점을 극복하기 위하여 H₃PO₄ 용액을 전해액으로 사용한 에칭법을 이용해 직경 170 μm 인 침전극(재질 : 연동)을 새롭게 제작하였다.

에칭법을 이용해 제작한 침전극을, 10 \times 10mm의 크기로 절단한 XLPE 필름(두께 150 μm , 일본 후지쿠라)을 4장 적층한 중간에 삽입한 후 시료의 표면을 균일하게 하고 형태를 유지하기 위해 커버글라스(두께 : 150 μm)를 상하에 씌우고, 온도조절을 할 수 있는 hot plate에서 압력을 가해 압착성형하고, XLPE를 가교시키기 위해 180 $^{\circ}\text{C}$ 에서 약 20분 동안 유지하였다. 이때 시료의 두께를 일정하게 유지하기 위해 spacer(두께 : 약 600 μm)를 제작하여 hot plate 사이에 설치한다. 이렇게 제작된 시료의 두께는 250~300 μm 이다.

제작된 시료에 수전극을 형성하기 위해 XLPE에 삽입되어 있는 침전극을 2mm정도 빼낸 후 침전극 형태의 보이드를 형성시켜 수전극용 수용액(중류수, AgNO₃ 수용액)에 시료를 넣고 진공상태에서 3시간 정도 유지한다. 침전극 형태의 보이드에 수전극용 수용액이 충만된 것을 현미경을 확인하고 수전극의 끝에서 1.5mm거리에 silver paste를 바른다. Fig. 1은

위와 같은 방법으로 제작한 시료의 형태이다.

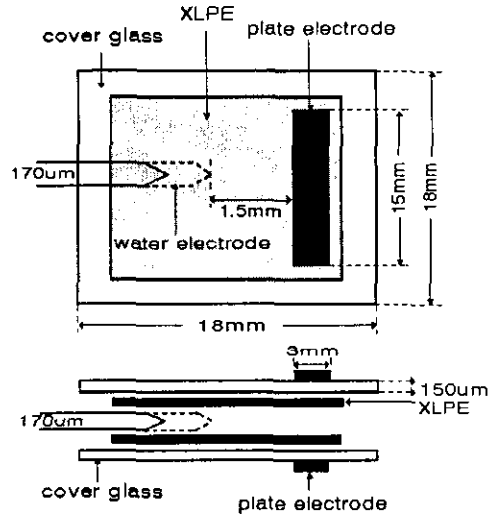


그림 1 시료의 형태

Fig. 1 The structure of specimen

2.2 화상계측 방법

Fig. 1과 같이 제작된 시료에 교류전압을 인가한 후 현미경을 통하여 트리를 관측하고 CCD카메라를 이용하여 VTR에 녹화하였다.

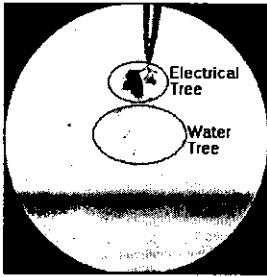
전극의 화상만을 입력 시키기 위해 최초 1분간은 전압을 인가하지 않았고, 그 후 수트리를 발생시키기 위해 승압속도 500V/sec로 5~7kV까지 인가하였다. 모든 실험은 실리콘 오일중에서 실시하였다.

녹화된 화상을 화상처리보드(canada, coreco BANDIT)를 통하여 컴퓨터로 입력시키고, 입력된 화상을 본 연구에서 개발한 화상계측 프로그램을 이용하여 노이즈와 전극(수전극, 평판전극) 부분을 제거하여 트리의 화상만을 추출하여 분석하였다. 트리를 관측할 때 현미경의 배율은 140배로 하였으며, CCD 카메라의 해상도는 512 \times 512이며 흑백출력이다. CCD 카메라의 출력을 VTR로 기록하고, 아날로그 출력을 VTR용 모니터에서 관측하였다. 녹화된 화상을 컴퓨터로 입력받아 화상처리를 할 때 입력화상의 크기는 256 \times 256크기로 고정하였다.

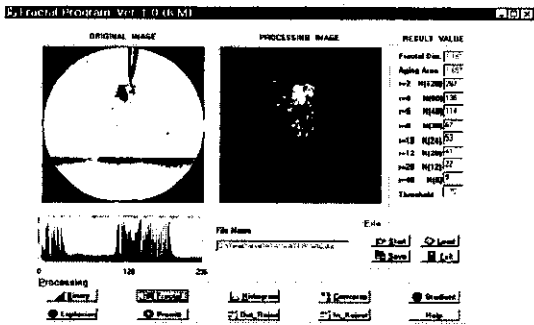
화상처리의 과정은 최초 전극만의 화상을 입력받아 저장하고, 전압이 인가되어 트리가 발생되면 트리가 생성되어 있는 화상에서 최초 전극만의 화상을 Exclusive-OR시켜 전극부분을 제거한다. 이런 트리만의 화상에 적절한 임계값을 부여해서 이진화 처리하고, 노이즈를 제거한 후, 트리의 정량적 분석을 실

시하였다[11, 12].

그림 2의 (a)는 위와 같은 화상계측 시스템을 이용해 획득한 256×256 크기의 화상이며, (b)는 (a)를 화상으로 입력받아 트리를 정량적으로 분석하기 위해 본 연구에서 개발한 프로그램을 화면 프린트한 것이다.



(a)



(b)

그림 2 입력 트리화상과 화상계측 프로그램의 예. (a) 수트리+전기트리, (b) 화상계측 시스템 표시화면

Fig. 2 Example of input tree image and image measurement program. (a) water tree + electrical tree, (b) display image of image measurement system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 증류수를 이용한 수트리 진전특성

수전극에 증류수를 사용한 경우 인가전압 5~7kV에서 수트리의 진전특성 및 열화정도를 Fig. 3에 나타냈다.

'X-Length', 'Y-Length'는 트리의 X, Y축 방향으

로 시간에 대한 최대 길이의 변화를 나타내며, 'Aging Area'는 식 1에 의해서 얻어진 결과를 나타낸다.

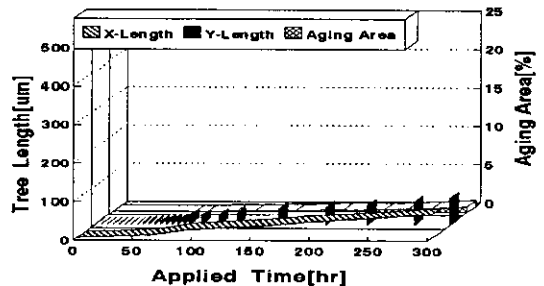
침전극 형태의 보이드에 증류수를 흡입시키고 수전극을 형성시켜 수트리의 발생 및 진전과정을 분석한 결과, 인가전압의 상승과 더불어 트리의 성장속도가 빨라지고, 열화면적도 급격히 증가하며, 수트리 개시시간이 짧아진다. 이것은 절연체에 가해지는 인가전압이 절연열화의 중요한 요소로 작용하고 있다는 것을 의미한다.

침전극에서 발생하는 전기트리는 인가전압에 따라 트리의 형태가 다르게 나타나지만, 수트리는 인가전압에 따라 수트리 발생시간의 차이는 있지만 전압에 관계없이 부시와 체스터너트형 트리의 중간형태의 트리 모양으로 진전을 계속한다.

Fig. 3에 나타낸 것과 같이 수트리는 X축방향에 비해 Y축방향으로 성장이 더 많은 것을 볼 수 있는데 이것은 전기트리의 체스터너트형 트리특성에 가깝다는 것을 의미한다. 또한 수트리는 인가전압에 비례해 일정한 크기까지는 연속적으로 진전 하지만, 일정시간 이후에는 수트리의 진전이 관측되지 않게 되는데 이때가 수트리에 의해 전기트리가 발생하는 단계이다. 그래프에 나타난 값들은 화상계측을 통해 얻어진 값들이며 수트리에 의해 절연체가 열화된 열화면적은 다음 식 1로 계산된다.

$$Aging Area(\%) = \frac{Treeing Area}{Frame Size} \times 100 \quad (식 1)$$

위 식에서, 'Treeing Area'는 트리부분이 "1"의 데이터 값을 갖도록 이진화 처리된 화상에서 "1"의 값을 갖는 pixel의 개수이며, 'Frame Size'는 화상계측 프로그램에 입력되는 화상에서 256×256 크기를 갖는다.



(a)

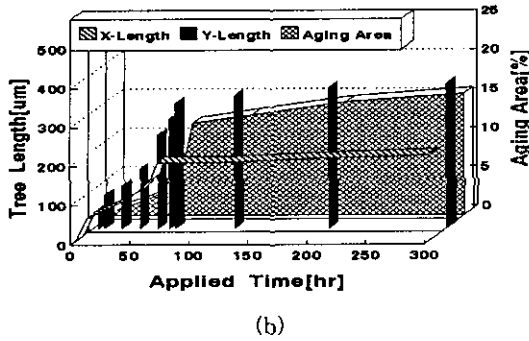


그림 3 증류수를 사용한 수트리 진전특성. (a) 5kV, (b) 7kV

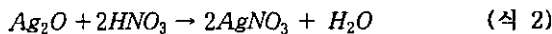
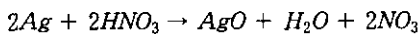
Fig. 3 The growth characteristics of water tree using distilled water electrode. (a) 5kV, (b) 7kV

3.2 AgNO₃ 수용액을 사용한 수트리 진전특성

지중 전력케이블 내부에 수분이 유입되면 금속성 이온도 함께 혼입된다. 이런 금속성 이온은 전기와의 상호작용에 의해 고분자의 사슬구조를 변형시켜 수분유입을 증가시키며, 또한 산화반응을 증가시키므로 수트리의 성장을 촉진시킨다.

금속성 이온들이 수트리 진전에 어떤 영향을 미치는가에 대해 연구하기 위하여 AgNO₃ 수용액을 수전극으로 사용하였고, AgNO₃ 수용액을 사용하면 Ag⁺ 이온의 착색으로 인해 수트리의 형태를 보다 쉽게 관측할 수 있다.

Fig. 4는 금속성 이온으로 Ag⁺가 들어있는 불순물을 첨가해 수트리 진전특성을 관측한 결과이다. AgNO₃ 0.1mol을 증류수와 혼합해 수전극을 형성시켜 전압을 인가하면, 인가전압이 5kV로 비교적 낮은 경우에는 수트리의 개시 및 진전속도가 느리지만 인가전압이 상승함에 따라 수트리의 개시시간이 짧아지며, 열화면적도 급격히 증가하게 된다. 이것은 증류수를 수전극으로 사용했을 때와 마찬가지로 인가스트레스가 열화에 중요한 요인이 되는 것을 나타낸다.



식 2의 반응식은 AgNO₃용액을 수전극으로 사용

했을 때 고분자와 Ag⁺ 이온의 착색과정을 표시한다. 이런 과정은 Fan Zong-Hau등에 의한 연구 “Silver Tree”에 잘 나타나 있다[6].

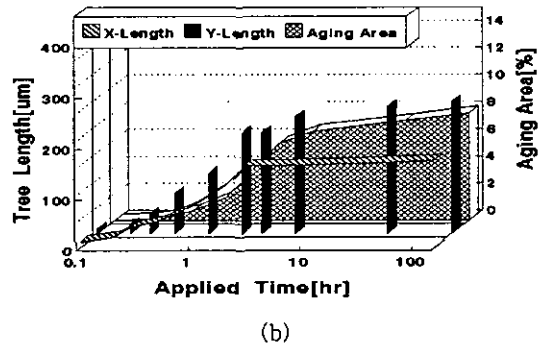
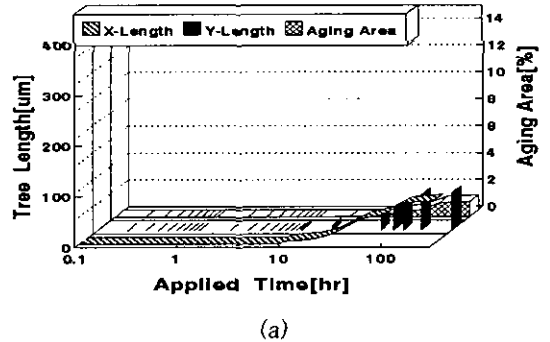


그림 4 AgNO₃ 수용액을 사용한 수트리 진전특성. (a) 5kV, (b) 7kV

Fig. 4 The growth characteristics of water tree using AgNO₃ solution electrode. (a) 5kV, (b) 7kV

이처럼 금속성 이온이 불순물로 첨가된 경우 수트리 진전속도가 빨라지는 것은 전압이 인가되면 첨가된 이온이 전기방향으로 작용이 활발해져 절연체의 트리 진전을 촉진시키는 매개체가 되어 열화를 가속시키기 때문으로 생각되고 있다. 그러므로 금속성 이온이 수분에 혼합되어 절연체 내부에 흡입되면 이온의 작용으로 인해 열화가 가속되고, 사고의 확률도 높아짐을 의미한다. 지중케이블이나 해저케이블의 경우 수분 이외에 다른 금속성 이온들이 혼입될 수 있는 환경에 노출되기 쉽기 때문에 케이블에서 이러한 금속성 이온에 의한 수트리 열화가 더욱 문제점이 될 수 있다[9]. Fig. 5는 증류수와 AgNO₃ 용액을 수전극으로 사용했을 때 발생한 수트리를 인가

전압에 대한 트리의 X, Y축 방향 진전특성을 나타낸 것이다. 증류수를 수전극으로 사용했을 때보다 금속성 이온이 있는 $AgNO_3$ 용액을 수전극으로 사용한 경우에 수트리의 진행이 빨라지는 것을 알 수 있다. 'AgNO₃-X', 'AgNO₃-Y'는 $AgNO_3$ 용액을 수전극으로 사용했을 때 X, Y축 방향으로 트리의 진전 길이이며, 'Water-X', 'Water-Y'는 증류수를 수전극으로 사용했을 때 X, Y축 방향으로 트리의 진전 길이 나타낸다.

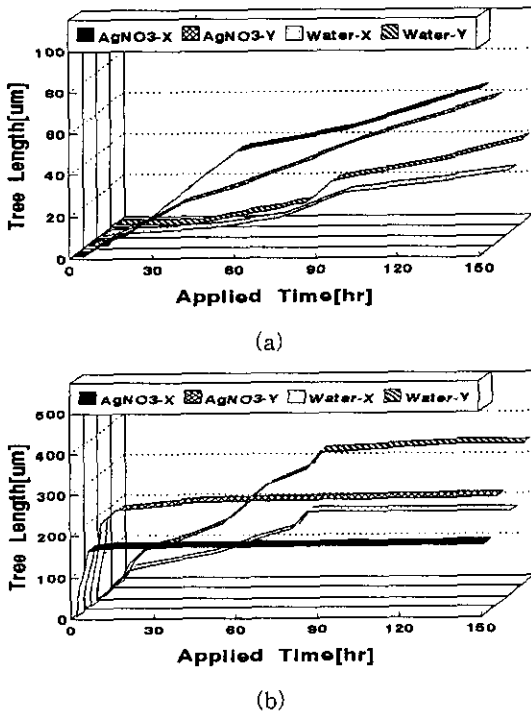


그림 5 증류수와 $AgNO_3$ 용액을 사용한 수트리의 X, Y축 방향 진전특성.

Fig. 5 The X and Y axis direction growth characteristics of water tree using distilled water and $AgNO_3$ solution electrode. (a) 5kV, (b) 7kV

3.3 수트리에서 발생하는 전기트리 진전특성

본 연구에서 사용한 XLPE 시료는 인가전압 10kV 이하에서는 전기트리가 발생하지 않았다. 그러나 수트리가 발생하면 10kV이하의 낮은 전압에서도 전기트리가 발생하는 것을 관측할 수 있었다. 본 실험에서는 인가전압 5~7kV로 하였는데 모두 수트리가 성

장한 후 전기트리가 성장하였다. 인가전압이 매우 높은 경우에는 바로 전기트리로 진전하게 된다.

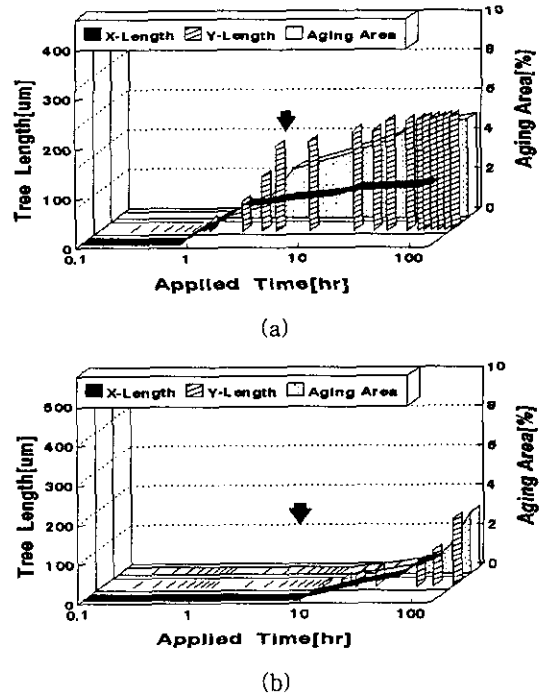


그림 6 수트리에 의해 발생한 전기트리의 진전특성 (6kV, $AgNO_3$ 용액) (a) 수트리 + 전기트리, (b) 전기트리

Fig. 6 The growth characteristics of electrical tree occurred by water tree(6kV, $AgNO_3$ solution) (a) water tree + electrical tree, (b) electrical tree

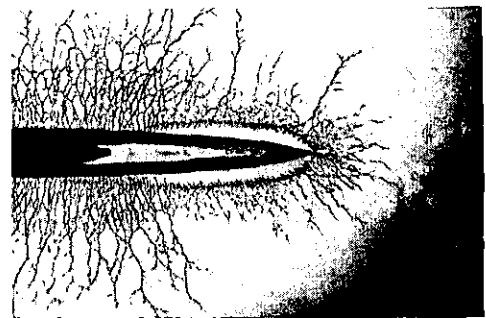


그림 7 수트리에 의해 진전한 전기트리
Fig. 7 The electrical tree occurred by water tree.

Fig. 6는 인가전압 6kV에서 수트리가 발생한 후 전기트리의 진전과정을 전압인가시간에 대해 나타낸 것이다. 전압을 인가한 후 수트리가 발생하여 계속 진전하지만 일정시간이 지난후에는 수트리의 크기가 거의 변화가 없게 되는데 이때부터 전기트리가 발생하게 된다. “↓”로 표시된 부분이 수트리에서 전기트리가 발생하는 시점이다. Fig. 7은 수트리에 의해 발생한 전기트리가 상당히 진전된 사진이다.

4. 결 론

본 연구에서는 비파괴적인 방법으로 수트리 열화 현상을 관측하기 위하여 얇은 필름형태의 시료를 제작하고 전기에칭법을 이용해 새롭게 전극을 제작하여 수트리의 발생 및 진전과정과 수트리에 의해 발생하는 전기트리를 화상계측을 통해 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수전극으로 증류수를 사용한 경우보다 AgNO₃ 용액을 사용했을 때 수트리 진전이 가속된다. 그러므로 케이블에 수분과 함께 금속 이온등의 다른 불순물이 혼입되면 케이블 열화는 가속되는 것으로 생각된다.
2. 수트리가 발생하면 보다 낮은 전압에서도 전기트리가 발생할 수 있는 가능성이 높다. 특히 케이블 설계 스트레스에서는 전기트리의 발생을 충분히 고려되어 수명을 추정하게 되지만, 수분이 유입되는 환경에서의 케이블은 수트리의 발생으로 인하여 낮은 스트레스에서도 전기트리가 발생하여 사고발생의 확률이 증대될 것으로 예상된다.
3. 수트리에서 발생하는 전기트리는 전기트리만의 진행 메카니즘보다는 수트리의 초기형성이 트리형상을 결정하는 중요한 인자로 작용하는 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] E. David, J. L. Parpal, J. P. Crine, "Influence of Internal Mechanical Stress and Strain on Electrical Performance of Polyethylene Electrical Treeing Resistance", *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 3, No. 2, pp. 248-257, April 1996.
- [2] A. Bulinski, S. Bamji, J. Densley, A. Gustafsson, U. W. Gedde, "Water Treeing in Binary Linear Polyethylene Blends - The Mechanical Aspect", *IEEE Trans. Dielectric and Electrical Insulation*, Vol. 1, No. 6, pp. 949-962, December 1994.
- [3] T. Tabata, T. Fukuda, Z. Iwata, "Investigation of Water Effects on Degradation of Crosslinked Polyethylene Insulated Conductors", *IEEE Trans. Power Apparatus and System*, Vol. 91, pp. 1361-1370, 1972,
- [4] T. Miyashita, "Deterioration of Water Immersed Polyethylene Coated Wire by Treeing", *IEEE Trans. Electrical Insulation*, Vol. 6, pp. 129-135, 1971.
- [5] W. Vahistrom, "Investigation of Insulation Deterioration in 15kV and 22kV Polyethylene Cables Removed from Service", *IEEE Trans. Power Apparatus and System-91*, pp.1023-1035, 1972.
- [6] Fan Zong-Huai and Noboru Yoshimura, "Silver Tree", *IEEE Trans. Dielectric and Electrical Insulation*, Vol. 1, pp. 131-135, February 1996.
- [7] 기초전력공학공동연구소, 제 2회 XLPE 전력케이블 분석강좌, 단행본, 1997.
- [8] 전력연구원, 배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축(2차년도 중간보고서), 단행본, 1997.
- [9] Rainer Patsch and Jochen Jung, "Water Trees in Cables Generation and Detection", 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials, D1-1, pp. 469-474, 1998
- [10] 길춘승, 김태성, "화상처리에 의한 유기절연재료의 트리열화 진단법", *전기전자재료학회지*, Vol. 4, No. 3, pp. 229-238, 1991.
- [11] 임장섭, 구할본, 길춘승, 김태성, "화상처리에 의한 XLPE의 트리열화관측", *전기전자재료학회지*, Vol. 8, No. 5, pp. 551-557, 1995.
- [12] 김덕근, 류경우, 임장섭, 김태성, "가교폴리에틸렌의 수트리 성장특성에 관한 연구", *전기전자재료학회 97' 춘계논문집*, 1997.