배전용 CN/CV 케이블의 절연재료 및 가교방식별 열화특성연구

* 김 화 종, 최 영 훈, 안 용 규, 김 관 성, ** 구 자 윤
* 대 한 전 선 (주) ** 한양대학교

An Experimental investigation on the dependation characteristics of CN/CV cables : dependence on the materials and curing process

* H.J.Kim, Y.H.Choi, Y.K.Ahn, K.S.Kim, ** J.Y.Koo
* Taihan Electric Wire Co., Ltd ** HanYang Univ.

ABSTRACT

It is shown that the ac breakdown strength, treeing phenomena, oxidation level, and crystallinity of unaged and aged distribution CV cables vary with XLPE insulations (characterizing anti-oxidation) and curing process. The maximum size of bow-tie tree in insulation influenced on the decrease of ac breakdown strength and the increase of oxidation level and crystallinity of XLPE according to aging time lead to increase the size and density of bow-tie trees.

1. 서 론

배전용 CV 케이블의 경우 구조상 또는 사용환경상 케이블내로 수분이 침입할 가능성이 있으며, 침수하의 CV 케이블은 수트리 형성에 의한 가속 열화 특성을 보인다. 수트리 열화는 케이블 수명에 있어서 제특성 악화의 원인이 되므로 케이블의 안전과 신뢰성에 가장 큰 영향을 미친다. CV 케이블의 전기적 특성은 종래부터 과전 열화후의 잔류 AC 파괴 전압 특성에 의해 조사되어 왔으나 이들 대부분은 수증기가교에 의해 제조된 케이블에서의 결과이고, 건식가교 방식으로 제조한 케이블에서의 보고는 적은 편이다[1]. 또한 이들 결과의 대부분은 Miniature 케이블을 대상으로 한 것으로써, 실용 케이블에서의 결과는 상당히 미흡한 실정이다. 한편, 침수과전하에서의 CV 케이블의 열화 특성 분석은 대부분 트리를 중심으로한 Phenomenology 측면에서 이루워져 왔으나 근래 들어서 Morphology 및 Oxidation 평가에 분석 기술을 이용하는 추세에 있다.

본 연구는 22.9 kV 급 CN/CV 케이블을 대상으로 하였다. 절연재료는 산화방지제가 다른 XLPE 로 사용하였으며, 수증기 가교와 건식 가교 방식으로 제작하였다. 이들 케이블의 도체 및 외부 반도전층을 침수하에서 3, 6, 12 개월 동안 과전 열화 시켜 비과전 및 각 과전 열화 단계에서의 잔류 AC 파괴 전압 특성, 트리 분포 특성, 결정화도 특성, 산화도 특성등을 조사, 검토하였으며 이들 상호 관계를 고찰 하였다.

2. 시험 방법

2.1 케이블 시료

시료는 22.9 kV급 CN/CV 케이블 (1C x 325 mm²) 을 표1 과 같이 준비하였다. 각 시료의 길이는 15m 로 하였으며, 시료별 수량은 초기 교류파괴시험 및 분석용 3개, 침수과전후 파괴시험용 9개, 침수과전후 트리조사 및 분석용 3개를 준비하였다.

표 1. 시험 케이블 개요

시 료	가교 방식	절연재료	산화방지제	비 고
A	Steam cured	INS- 1	Irganox	-
B	Dry cured #1	INS- 1	Irganox	-
C	〃	INS- 2	Santonox R	-
D	Dry cured #2	INS- 1	Irganox	-
E	〃	INS- 2	Santonox R	-
F	〃	INS- 3	Santonox R	EVA 함유

2.2 시험 조건 및 방법

비과전 시료 및 표2 의 조건으로 열화된 시료에 대한 AC 파괴 시험은 교류 50kV 를 30분 인가후 매번 25kV/30분 의 상승속도로 단계 승압하여 파괴시켰다.

트리는 광학현미경을 이용하여 각 절연체와 내·외부 반도전층 계면에서 발생한 Vented 트리, 그리고 그림1 과 같이 내부 반도전층으로 부터 외부반도전층사이의 절연체를 Radial 방향으로 0.5mm x 0.5mm 씩 분할하여 Bow-tie 트리의 크기와 갯수를 조사하였다. 이때의 관찰 시편의 두께는 약 180㎛이었다.

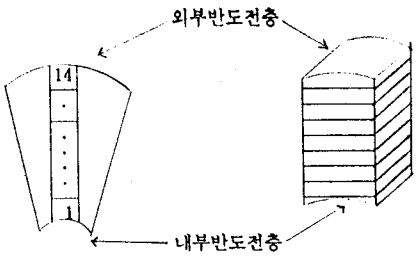

그림 1. 트리관찰시편 절단방법

그림 2. 결정화도분석시편 절단방법

결정화도 측정을 위한 시료 준비는 Microtome 을 사용하여 그림2 와 같이 절연체의 Radial 방향으로 약 100㎛ 두께로

찰하였다. 이들 여러 시편중 내부반도전층으로 부터 약 1mm 간격으로 9개의 시편을 얻었으며 시험은 DSC (Differential Scanning Calorimeter : Dupont Model 910) 로 측정하였다. 각 시료의 결정화도는 이들 9 개 지점에 대한 평균 값을 취하였다.

케이블 절연체의 산화평가에는 FT-IR (DIGILAB FTS-40)을 이용하였다. 시료 준비 및 채택은 결정화도와 동일한 방법으로 하였다. 산화 수준의 평가는 산화열화에 의해 생성되는 carbonyl 기를 기준으로 하였고 base line 법[2]으로 측정하였다. 또한, 흡광도를 정량화하기 위하여 적산횟수를 16회로 하였다.

표 2. 가속 열화 시험 조건

전압/주파수	침수조건, 온도	수 질	시험 기간
41KV (3Uo), 60Hz	도체 및 외도 침수, 70℃	지하수 pH 6.95	2,160hrs (3개월) 4,320hrs (6개월) 8,760hrs(12개월)

* U_o : 대지전압 (상간전압/√3)

3. 시험 결과

3.1 잔류 AC 파괴 전압 특성

그림3 은 Virgin 시료와 가속 열화후의 시료에 대한 AC 파괴 전압 Data 중 최저치를 나타낸 것이다. 건식 가교한 Virgin 시료의 AC 파괴 전압 값은 시료C 를 제외하고는 수중기 가교한 시료A 보다 높았다. 가속열화 3 개월 후에는 전반적으로 급격히 저하하나 6개월 가속열화 후에는 비교적 완만하게 저하하였다. 이가운데 시료 C, D, E 는 과전 열화 기간이 12개월에 도달하기 전에 가속 시험 전압에서 파괴되었다. 나머지 시료 A,B,F 의 AC 파괴전압 추이는 비교적 완만하게 저하하여 12개월간의 가속 열화 시험후 잔류 AC 파괴 전압은 50 kV~75 kV 수준을 나타내고 있다.

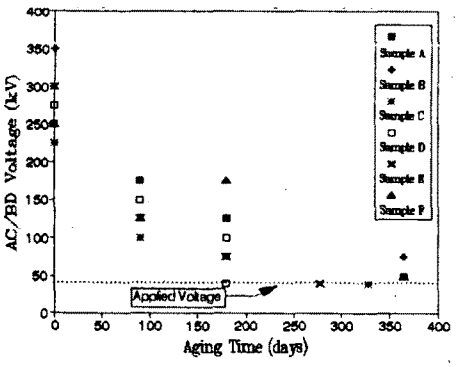

그림3. 침수과전하의 잔류 AC 파괴전압특성

3.2 트리 분포 특성

Vented 트리는 시료F 를 제외한 나머지 시료의 내부반도전층 계면에서만 발생하였고, 모든 시료의 외부반도전층 계면에서는 관찰되지 않았다.

내부반도전층 계면에서의 Vented 트리길이 및 발생밀도 특성은 그림4 와 같다. 시료의 종류에 따라 트리의 최대길이 및 발생밀도는 정도의 차이를 보이나 평균길이는 20㎛ 정도이다. 시간 경과에 따른 최대길이 및 평균길이의 변화는 그다지 없으나 12개월 열화시킨 시료D 의 경우는 트리 크기가 타 종류보다 크다. 트리형태[3]를 살펴보면 시료 D 에서는 주로 절연 파괴부위 주변에 나타나는 Dendrite Type 이며, 다른 시료에서는 Delta Type 만 발견되어 서로 다른 양상을 띄고 있다.

발생밀도는 시간 경과에 따라 증가하고 있으며 시료별 발생밀도는 A > B > C > D > E 시료 순으로 나타나고 있다. 이러한 Vented 트리의 발생은 반도전층의 돌기에서 나타났으며, 계면이 평활한 곳에선 트리 발생이 전혀 없거나 소수만이 발생하고 있다.

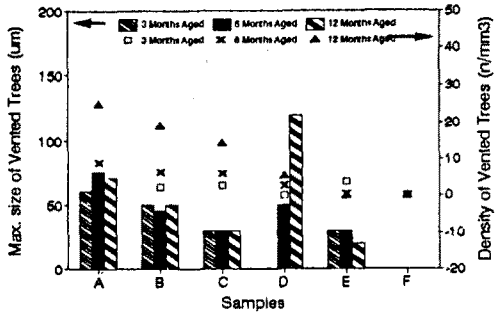

그림4. 내부반도전층 계면에서의 Vented 트리 특성

Bow-tie 트리는 모든 시료에서 관찰되었으며, 시료별 Bow-tie 트리의 발생밀도와 최대크기는 그림 5 에 나타내었다. 이 그림에서 Bow-tie 트리의 발생밀도는 B > D > F > C > E > A 시료의 순이며 3개월 침수과전후 포화되는 것으로 나타났다. 그 이후 수량적으로 감소하는 추세를 보이는 것도 있다. 이러한 양상은 다음과 같은 관점에서 해석될 수 있다. 감소의 추세는 실질적인 숫적 감소가 아니라 작은 트리가 서로 연결되어 성장한 트리의 형태로 나타나거나 관찰 대상 시료가 동일하지 않은 것도 하나의 이유라 생각된다.

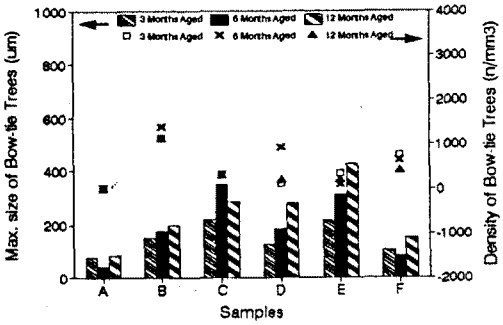

그림5. 침수과전하의 Bow-tie 트리 발생밀도와 최대크기

최대 크기는 그림 5 에서 나타낸 바와 같이 E > C > D > B > F > A 시료의 순이다. 이들의 발생원은 3 개월 과전 열화시까지는 5㎛ 이하의 보이드가 많았으며 6 개월, 12 개월 과전열화시에는 5~25㎛ 크기의 모진 형상의 이물이 많았다.

3.3 결정화도의 변화

그림6 은 과전열화 시간의 경과에 따른 결정화도변화 추이를 나타낸 것이다. 결정화도는 비과전시에 비해 열화후에는 상승하는 것으로 나타났다. 모든 Virgin 시료의 결정화도는 13%~16.2% 로써, 이중에서 INS- 2 (시료 C, E)와 INS- 3 (시료 F) 로

제조된 Virgin 시료의 결정화도는 INS- 1 (시료 A, B, D)으로 제조된 시료에 비해 높게 나타나고 있다. 3개월 열화후에는 시료 E, C, F 가 8~11% 의 폭으로 크게 상승하여 6개월 시점이후부터는 거의 포화 상태를 보이는 반면에 시료 A, B, D 는 지속적으로 완만한 상승을 보이고 있다. 결정화도의 증가 원인은 케이블 과전열화중에 가해지는 온도에 의한 thermal annealing [4] 때문인 것으로 해석될 수 있다.

가교방식에 따른 결정화도는 수증기 가교 (시료 A) 한 Virgin 시료가 건식 가교한 Virgin 시료 B 와 D (Curing Process 가 다름) 에 비해 약간 높게 나타났으나 열화가 진행됨에 따라 대등한 수준을 보였다.

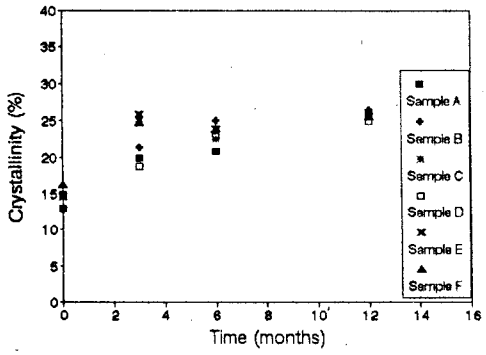

그림6. 침수과전열화에 따른 결정화도의 변화

3.4 산화도의 변화

열화시킨 시료 및 Virgin 시료의 절연체에 대해 산화를 분석한 결과 1742Cm^{-1}부근에서 Carbonyl Group의 흡수대가 관찰되었다. 이흡수는 산화 열화에 의해 생성되는 알데히드와 케톤이 존재하는 Carbonyl 기(>C=O) 에 귀속하는 것으로 잘 알려져 있으며[5] FT-IR에 의해 검출된다. 그러나 시료 A, B, D F 의 경우 Virgin 시편에서도 흡수가 관찰되었다. 이는 산화에 기인한 것이 아니라 재료 자체가 가지는 고유의 흡수때문인 것으로 보인다. 즉, Irganox 계 산화방지제는 1735Cm^{-1} 에서, 그리고 EVA 는 1742Cm^{-1} 대에서 고유의 Carbonyl 기의 흡수대가 생성된다고 알려져 있다[6]. 따라서 본 고찰에서의 산화도 평가는 산화 흡수대와 재료 고유의 흡수대가 같은 영역에서 일어나기 때문에 열화 시료의 흡수대에서 재료 고유의 흡수대를 빼는 방법으로 하였다.

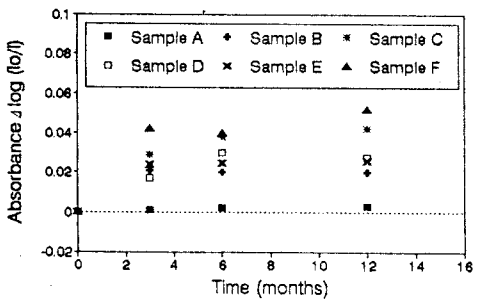

그림7. 침수과전하의 Absorbance 특성

이러한 방법으로 얻은 각 열화시료의 산화도는 그림 7 와 같다. 여기서 산화도는 열화 시간의 경과에 따라 증가하고 있다. 증가량은 3개월 시점이 가장 현저하며, 그 후 포화되는 경향을 보인다. 3개월 열화시점에서의 각 시료의 산화도는 시료 F > C > E > B > D > A 이며 6개월 이후에는 F > C > D > E > B > A 시료의 순을 보인다. 여기에서 수증기 가교한 시료 A 가 타 건식가교한 시료들에 비해 산화도가 적은 것으로 나타났다.

4. 고 찰

1) 열화시킨 시료에서 발생한 Vented 트리는 평균크기가 20μm 정도로 작기 때문에 AC 파괴전압의 저하에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 보인다. 50μm 이하의 Bow-tie 트리는 발생수량에 관계없이 AC 파괴전압 저하에는 영향을 미치지 못하는 것으로 생각된다.

그림8 은 AC 파괴전압과 Bow-tie 트리의 최대크기와의 관계를 나타낸 것이며 발생된 Bow-tie 트리의 크기가 큰 것일수록 AC 파괴전압의 저하에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, Bow-tie 트리의 크기가 크거나 큰 트리의 수가 많으면 많을수록 AC 파괴전압은 낮아지므로 케이블 수명저하의 요인이 될 수 있다.

2) 그림9 에서 나타난 바와 같이 산화도가 높을수록 AC 파괴전압은 낮아진다. 따라서 케이블 산화는 AC 파괴전압 저하의 한가지 요인이 될 수 있다. 그림 10과 11에서 산화도는 Bow-tie 트리의 발생밀도 및 최대크기와 관계가 있음을 알 수 있다.

3) Irganox 계의 산화방지제를 사용한 시료는 Santonox R 계의 시료에 비해 전반적으로 산화도가 작게 나타남으로써 산화도는 산화방지제와도 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 Irganox 계의 시료가 Santonox R 계의 시료에 비해 Bow-tie 트리의 발생밀도는 크며, 최대크기는 작은 것으로 나타났다. Santonox R 계와 EVA 를 함유한 시료의 경우, 산화도는 높음에도 불구하고 Bow-tie 수트리의 크기가 작은 것은 트리 성장을 억제시킬수 있는 EVA 가 함유되어 있기 때문인 것으로 해석할 수 있다[7].

4) 비정질부의 AC 파괴강도는 결정부에 비해 낮다는 것은 잘 알려져 있다[8]. 하지만 침수 과전 열화시킨 시료의 결정화도가 증가함에도 불구하고 AC 파괴전압이 낮은 것은 절연재료의 비정질부가 결정화되어가는 과정에서 열화기간중 케이블의 주변온도로 인한 Thermal Anealing 으로 인해 보이드의 부분적 Filling 이 일어나 Sharp crack 과 같은 구조가 형성되므로[9][10], 이들이 트리잉에 크게 기여하였다고 생각된다. 그림12 는 3개월 열화기간에 대한 결정화도 변화량과 B/T 트리의 최대크기와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 B/T 트리의 최대크기와 결정화도 증가량과는 비례 관계에 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

잔류 AC 파괴전압은 Bow-tie 트리의 최대크기와 밀접한 관계에 있고, 열화의 진행은 산화도와 결정화도의 증가를 수반한다. 산화도의 증가는 Bow-tie 트리의 발생밀도와 최대크기의 증가와 관계가 있고, 결정화도의 증가는 3 개월 열화 시점에서의 Bow-tie 트리의 최대크기와 밀접한 관계를 보였다. Irganox 계의 산화방지제를 함유한 절연재료는 Santonox R 을 함유한 절연재료에 비해 Bow-tie 트리의 발생수는 많으나

Bow-tie 트리의 최대크기는 상대적으로 작다. 가교방식에 있어서 결정화도는 서로 대등하며 산화도는 상이함을 보이고 있다.

6. 참 고 문 헌

1) 橋詰,條田,谷, "浸水過電에 있어서 乾式 가교 폴리에칠렌 케이블의 殘存 破壞 電壓 特性에 관한 考察",電氣學會論文誌A, 111권 7호(平3.7)

2) J. C. Henniker, " Infrared Spectroscopy of Industrial Polymer", p85 (1967) Academic Press

3) G.Bahder, C.Katz, J.Lawson, "Electrical and Electro-Chemical Treeing Effect in Polyethylene and Crosslinked Polyethylene Cables", IEEE PES Summer Meeting & EHV/UHV Conference, 1973

4) Jean-Pierre Crine, Serge Pelissou and Jean-Luc Parpel, "Influence of Insulation Morphology Impurities and Oxidation on Some Electric Properties of Cables", IEEE Trans. EI-26,No.1,Feb,1991

5)渡邊英紀, 栗國安一, " 低密度 PE의 劣化 過程과 熱刺戟 電流 ", 電氣學會論文誌A, 108권, 4호, 1988

6) Yvon McNicoll & Hugues St-onge, "A critical evaluation of Analytical techniques for the characterization of extruded dielectric cables", IEEE TRANS. EI-26, No. 1, 1991

7)福田暉夫, "CV 케이블 접연체의 수트리 방지재료", 電氣學會論文誌A, 108권, 5호, 1988

8) S.N.Kolesov, " The Influence of Morphology on the Electrical Strength of Polymer Insulation", IEEE Trans. EI, pp 382-388, 1980

9) Y.Namiki, H.Shimanuki, F.Aida and M.Morita, "A Study on Microvoids and Their Filling in XLPE Insulated Cables", IEEE Trans. EI, Vol.15, pp 473-480, 1980

10) C.Katz, A.Dima, A.Zidon, M.Ezrin, W.Zaengel and B.S. Bernstein, "Emergency Overload Characteristics of Extruded Dielectric Cables Operating at 130℃ and Above", Proc. of 1984 Trans. and Distrib.Conf. Paper 332_2,1984

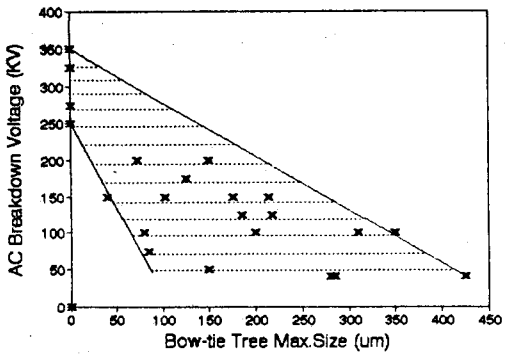

그림 8. AC 파괴전압과 Bow-tie 수트리 최대크기와의 관계

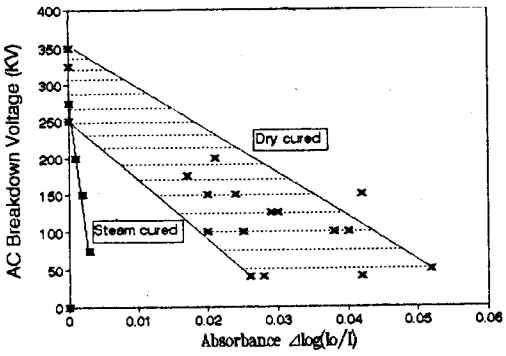

그림 9. AC 파괴전압과 산화도와의 관계

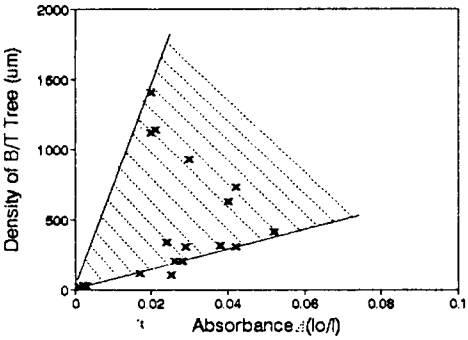

그림 10. 산화도와 Bow-tie 수트리 발생밀도와의 관계

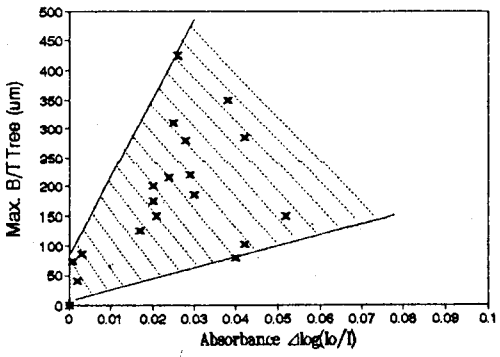

그림 11. 산화도와 Bow-tie 수트리 최대 Size와의 관계

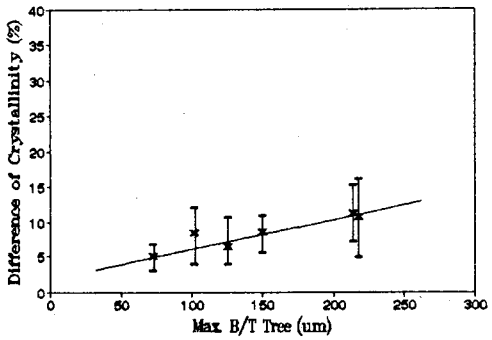

그림 12. 3개월 열화후의 결정화도 변화량과 Bow-tie 수트리 최대크기와의 관계