

XLPE의 계면형태에 따른 트리성장에 관한 연구

A Study on the Tree Growth by Interface Type of XLPE

*김 철 운, *김 영 민, **김 태 성

*전남대학교 전자공학과

**전남대학교 전기공학과

Cheol-Woon Kim, *Young-Min Kim, **Tae-Sung Kim

*Dept. of Electronic Engineering, Chonnam National University

**Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University

Abstract

There exists a interface among the different kinds of materials in the solid insulating ones, which effects on the insulating capability heavily. The insulating construction has been developed for each usages and take themselves into several sorts. The conjunction between CV cables have the electrical weakness of solidity and solid interface, so they were focused at the long distance-line. To this background, it is very important to get the information on the interface influencing on the insulating capability of cable and to observe its procedure. In this paper, the interface was made artificially to research the effect owing to the toughness of interface, which results in the aging and treeing proceeding was observed. The polyethylen, as is generally using for the cable, was taken in this research.

1. 서론

고체 절연재료의 절연특성에 대해서는 여러 가지 연구가 행해지고 있지만 각각의 재료가 갖는 특성만으로는 이해할 수 없는 점이 많다. 절연구성에는 반듯이 다른 종류의 재료간의 계면과 전극과의 계면이 존재하고 이들이 전체 절연성능에 중요한 영향을 미치고 있기 때문이다. 그러나 각각의 절연재료의 전기절연 특성에 대해서는 연구되고 있지만 계면을 포함한 경우는 거의 보고되고 있지 않은 것이 현 상황이다. 이와같은 배경에서 고체 절연재료의 계면의 영향에 대해서 연구하는것은 의의가 있는 것이라고 생각된다. 이와같은 연구를 기초로 케이블의 고전압화에 따른 고신뢰

성이 있는 설계지침이 주어질것이 기대된다. 계면을 가지는 절연구성은 각각의 용도에 따라 개발되고 그 종류도 여러 가지로 본 연구에서는 CV케이블 (cross-linked polyethylene insulated and polyvinyl sheathed cables) 의 접속부에서 발생할 수 있는 문제를 다루었다. 이 접속부는 고체/고체 계면의 전기적 약점을 가지고 있고 그 때문에 현재 500KV CV케이블의 장거리 선로에 적용하기 위해서는 큰 문제가 되고 있다. 이것에서 케이블 전체의 절연성능에 미치는 계면의 접촉상황과 가공처리 등의 영향에 대해서 연구하는 것은 실용상 중요한 문제라고 생각된다. 그래서 본 연구에서는 전체의 절연성능에 미치는 계면조건의 영향에 대해서 검토하기 위해 계면을 인공적으로 제작하고 재료의 전기 트리 진전형태의 관측을 행했다. 시험재료는 케이블 재료로서 일반적으로 사용되어지고 있는 가교 폴리에틸렌

으로 하였으며 계면의 유무에 의한 트리 진전 형태의 차이와 계면의 형태가 미치는 영향에 대해서 검토했다.

2. CV케이블의 계면

일반적으로 CV케이블의 절연체에는 가교 폴리에틸렌 (crosslinked polyethylene: XLPE)이 사용되고 있다. XLPE의 화학조성은 저밀도 폴리에틸렌(low density polyethylene: LDPE)에 가교제와 산화방지제를 함유한 것이다. 가교폴리에틸렌의 가교방법은 다음과 같다. 일반적으로 폴리에틸렌의 가교방법에는 과산화물 가교, 실란 가교, 전자선 가교등이 있지만, 두꺼운 절연의 CV케이블에 대해서는 오로지 과산화물 가교 (DCP)가 사용되고 있다. 이는 LDPE에 DCP를 1~3%정도 혼합해 주면 된다. 따라서 가교후의 XLPE에는 메탄, 아세트페논등은 비등점(200~210℃)이 높기 때문에 XLPE안에 잔존한다. 이들의 불순물은 XLPE의 전기전도 뿐만 아니라 공간전하분포, 절연 파괴에 커다란 영향을 미치지만 아직 충분하게 해명되어 있지 않다. 용융상태에서 가교한 폴리에틸렌은 고체화할 때에 분자가 구속되어 있기 때문에 평면구조의 폴리에틸렌과는 다르고 고차원 구조가 된다. 또 가교에 의해서 분자가 자유롭게 움직이기 어렵게 되면 라메라 과정이 성장하기 어렵게되고 그 때문에 XLPE는 결정화도가 낮은 구조가 된다. CV케이블에 존재하는 계면으로는 다음과 같다. 1) 종단부, 접속부등의 다른 종류의 재료의 계면 2)절연체 내의 계면 3)반도전층과 절연체의 계면 4)반도전층내의 계면등이 있으나 본 연구에서는 1)의 계면구성중 CV케이블의 접속부에 관하여 서술했다. 가교폴리에틸렌 절연케이블의 성능향상에 수반하여 275KV CV케이블은 이미 장거리선로에 적용되고 더 500KV급의 장거리 선로는 개발이 진행되고 있다. 이것에는 도중에서 케이블을 접속하기 위해 중간 접속부가 필요 불가결하지만 송전압의 고압화가 진전함에 따라 이 중간 접속부의 문제가 대두되고 있다. 이 케이블의 중간 접속부는 케이블 절연체인 XLPE를 접속관에

의해 압축 접속하고 그 위에 내부 반도전층, 보강절연체, 외부 반도전층으로 구성되어 있다. 현재, 275KV급의 중간 접속부에는 몰드 방식 조인트 (extruded and molded Joint: EMJ)가 채용되는데 이것은 가교제 첨가 폴리에틸렌 수지를 밀어내고 가열 가교 일체화해서 형성하는 것이다. 이 조인트 방식에서는 재료가 케이블 절연체와 동일하고 전반적으로 용착하기 때문에 전기절연성능이 상당히 뛰어나다. 또 결함이 되는 이물질의 혼입도 배제되기 때문에 신뢰성도 높고 게다가 치수가 콤팩트화되고 있다. 그러나 고도의 시공기술 및 기자재가 요구되고 시공시간이 길다는 단점을 가지고 있다. 이에 대해 근래 도로사정과 환경문제 등에서 시공시간이 제약됨과 함께 사고시의 조기복구의 필요성 등에 의해 현장 시공시간의 단축화가 요구되고 있다. 그 때문에 EMJ로 대체하는 접속부로서 고도의 기술을 필요로 하지 않고 시공시간이 짧고 또한 신뢰성이 높은 조인트방식을 필요로 하고 신뢰성을 떨어뜨리지 않고 prefab화하는 접속부 (prefabrication type Joints)의 개발, 실용화가 진행되고 있으며 현재 6KV에서 154KV까지의 넓은 범위에서 실용화되고 있다. 그리고 275KV, 500KV CV케이블도 도입이 예정되고 있으며 많은 연구가 요망되고 있다. prefab joint (이하 PJ)는 미리 공장에서 제작한 재료를 현지에서 조립하기 때문에 EMJ와 비교해서 고도의 시공기술을 필요로 하지 않고 시간도 단축되는등의 이점이 있다. 주재료는 epoxy unit 와 고무성의 premold 절연체 (절연고무와 반도전고무를 전반적으로 주형한 것)인데 이 고무에 의해서 전계가 완화되며 절연이 확보된다. 이것을 케이블 외선을 제거한 곳에 epoxy unit 측으로 삽입하고 장신구를 밀어 케이블절연체 및 epoxy unit에 균일한 압력으로 밀착시킨다. XLPE의 표면은 케이블 외선을 제거한 후 평평하게 마무리하고 고무 및 epoxy의 표면은 금형주형한 것을 평평하게 그대로 사용하고 있다. 또 고무/XLPE, 고무/epoxy 계면에는 미세한 간격을 없애기 위해 실리콘오일을 도포하고 통상 5kg/cm² 정도의 압력을 주고 있다.

3. Treeing 현상

방전 흔적인 트리가 형성되고 차례로 진전하는 현상을 트리잉이라고 한다. 일반적으로 트리는 절연재료의 절연파괴 과정의 시작이다. 트리는 방전시 생긴 채널로 직경 수 마이크로미터 공간의 관이다. 방전에 의해서 내부의 도전성이 유지되며 트리의 발생은 절연체 표면과 내부의 결합 즉 전극표면의 돌기와 미세한 공간 이물질등으로 발생되며 결합부 주변에 생기는 고전계등 부분방전이 트리발생의 원인이라고 생각되고 있다. 트리발생에 대한 설명으로서 Whitehead 는 국부적인 고전계가 재료의 진성 파괴치를 넘을때 트리가 발생 진전한다고 설명하고 있다.¹⁾ 또 McMahon은 국부방전에 의한 이온충격이 트리발생의 주된 원인이라고 하고 있다. 또한 절연 물체에 보이드가 발생하고 있는 경우는 방전면이 전반적으로 침식될뿐만 아니라 특정 부분에 방전이 집중하고 피트 (pct) 방전공을 형성한다.²⁾ 이 피트위의 구멍이 방전에 의해 전계방향으로 진전하고 피트 선단의 전계가 진성파괴치를 넘는 것에 따라 트리가 발생한다고 Mason은 지적하고 있다.³⁾ 그 외 전하의 주입 또는 추출에 기초한 파괴와 전기기계적 응력의 반복에 의한 고분자의 국부적인 비뚤어짐등도 있다. 트리발생에 의한 방전광이 다음 방전의 선단이 되고 차례 차례로 방전이 진전해 가는 현상을 트리의 진전이라고 한다. 교류 트리의 진전은 다음과 같이 설명된다. a) 트리선단의 고전계부에서 가속된 전자에 의해 분자쇄가 절단되고 트리가 진전된다. b) 트리선단이 트리관내의 방전을 시작하고 침전극과 등전위가 되고 진성파괴에 의해 트리가 진전한다. c) 산소에 의한 침식을 수반하는 고전계에 의해 절연파괴와 부분방전 열화가 반복되고 이것에 의해 진전한다. 즉, 방전에 의해 트리 선단부에 국소 고전계가 형성되고 이것이 새로운 절연파괴를 일으키고 이와 같은 과정의 반복에 의해서 트리진전이 초래하고 있는 것이라고 생각되고 있다.⁴⁾ 트리의 형상은 전계강도가 높아짐에 따라 그림 1에 나타나듯이 branch형 트리, bush형 트리, chestnut형 트리로 변화한다. branch형 트리가 가장 성장하기 쉽고 bush형, chestnut형 트리는 비교적 성장하기 어렵다.⁵⁾

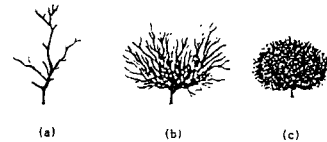


Fig. 1 Shapes of Tree

트리잉은 절연파괴에 밀접한 관련이 있으며 기기와 케이블의 절연성능을 결정하기 때문에 절연성의 평가법으로 이용되어 왔다. 트리잉 현상을 재현하기에는 그림 2와 같이 곡률반경이 작은 도체를 절연 재료안에 매입해서 국부 고전계를 형성하면 좋다. 단침법이 가장 대표적이고 침과 평판 전극과의 사이에 고전압을 인가하고 침선단에서 발생하는 트리를 관측하고 있다. 침전극 선단부분의 최대 전계강도는 Mason의 공식으로 나타냈다.³⁾

$$E_{\max} = \frac{2V}{2.3r \log(1+4d/r)}$$

(V:인가전압 r:침선단 곡률반경 d:침-평판전극 간 거리)

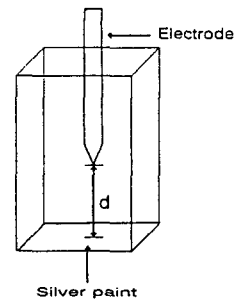


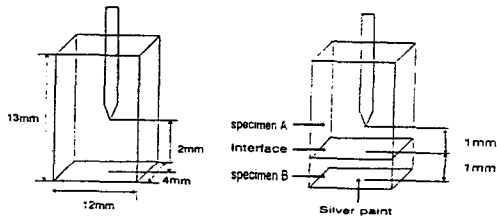
Fig. 2 Method of Single needle electrode

4. 시험방법

4-1 시료의 제작

시료는 트리진전의 관측을 위해 일반적으로 사용되고 있는 XLPE로 했다. 그림 3에 시료와 전극배치를 나타냈다. 계면은 그림에 나타냈듯이 2개의 XLPE를 겹쳐 인공적으로 제작했다. 침전극(오쿠라 보석회사 제품)은 선단곡

를 반경 5 마이크로미터 선단각도 30°의 것을 사용 이것을 고압측으로 하고 아래의 평판전극을 접지측으로 했다. 또한 하부 평판전극에 접하는 시료의 면에는 접촉저항을 감소하기 위해 실버페인트를 도포했다. 시료는 4mm 두께의 XLPE판을 12×13mm로 절단하고 침삽입기에 장착한 후 온도 140℃의 항온조 내에서 15분간 가열했다. 그후 부드럽게 침을 삽입하고 실온까지 서냉했다. 계면 없는 시료 A는 50배율의 투영기에 의해 침전극선단에서 평판전극까지의거리가 2mm 되도록 지정번호 샌드 페이퍼에서 시료의 면을 연마하여 조성했으며 시료 B의 두께는 계면을 기준으로 1mm의 간격이 되도록 가공한후 시험했다.



a) Without Interface b) With Interface
Fig. 3 Specimen Interface

4-2 실험

계면의 가공처리의 영향에 대해서 검토하기 위해 본시험에서는 계면의 상태를 변화시켜 실시했다. 이 계면 조건으로서 표면거침은 번호가 다른 3종류의 샌드 페이퍼(#80 #600 #1200)에 의해 처리하였으며 시험재료 표면을 연마하고 가루를 완전히 제거한후 시험하였다. 트리진전 관측도는 그림 4와 같이 광원→시험재료→현미경→CCD 카메라→비디오 테이프 레코드→모니터의 관측계통에서 실시하고 전압을 인가한 상태로 트리발생 진전의 상황을 연속적으로 관찰했다. 본 시험에서는 인가전압을 9, 10, 11, 12kv로 하고 전압 인가시간과 트리성장 및 절연파괴 시간의 측정을 실시했다. 또 트리잉에 의한 파괴의 판정에는 과전류 계전기에서 하도록하고 전압 인가시간은 최장시간 120분으로 했다.

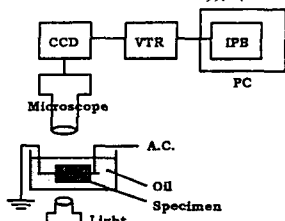


Fig. 4 Schematic diagram of image measurement system for treeing

4-3 계면의 표면거침의 영향

트리의 성장은 네가지 형태로 진행된다 (a)의 형태는 트리가 시료 B에 진입하지 않는 경우이고 (b)의 형태는 트리가 시료 B에 진입은 하나 절연파괴에는 이르지 않는 경우이다. (c)의 형태는 트리가 시료 B에 진입후 절연파괴에 까지 이르는 경우이고 (d)의 형태는 계면을 타고 절연파괴가 일어나는 경우이다. 계면에서의 절연 파괴된 형상은 그림 5와 같다.



Fig. 5 Breakdown in Interface

표면거침에 대한 절연파괴시간을 표 1에서 표 2까지에 나타냈다. 그림에서 각 트리 패턴을 다른 기호로 나타내고 있다. 9kv를 인가한 경우에는 계면의 표면 거침에 의한 트리진전 형태 및 절연파괴 시간으로의 영향은 거의 볼 수 없다. 10kv를 인가한 경우에는 트리의 진전은 일부 보여지며 #80처리 및 #600 #1200 처리로 갈수록 절연파괴가 계면을 관통하는 것으로 나타났다. 11kv와 12kv에서는 절연파괴시간이 10분 내외에서 발생되었다. 이와 같이 계면의 표면 거침이 매끈하면 할수록 트리진전 형태 및 절연파괴시간은 계면이 없는 경우와 거의 유사함을 알았다. 그러나 시료의 면이 거친 경우는 트리의 진전이 계면을 따라 진전하는 모습을 관찰할 수 있었다.

Table. 1 [min] of breakdown in Interface(9kv, 10kv)

type	9kv			10kv		
	#80	#600	#1200	#80	#600	#1200
(a)	120-130	120-130	110-130	110-130	130	120
(b)	-	110-120	-	-	110-120	-
(c)	-	-	-	40-50	110	30-40
(d)	-	-	-	60-70	-	-

Table. 2 [min] of Breakdown in Interface(11kv, 12kv)

type	11kv			12kv		
	#80	#600	#1200	#80	#600	#1200
(a)	-	-	-	-	-	-
(b)	-	-	-	-	-	-
(c)	10	15	5-15	-	10	3-10
(d)	5-10	5-25	-	5-15	5-10	-

5. 결론

계면의 거칠기를 조건으로하여 9에서 12kV까지의 전압을 인가하여 트리진전 형태를 관찰하고 이들의 영향에 대해서 검토한 결과 다음과 같다.

1) 트리가 시험 재료 B로 진입하고 절연과피에 이르는 (c)의 형태와 계면을 통하여 절연과피에 이르는 (d)의 형태를 확인 하였다.

2) 계면에서의 절연과피는 계면의 표면거침이 트리 진전에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알았다.

3) 접촉부에서 형성되는 계면의 상태가 절연에 미치는 영향이 크므로 이를 분석하므로써 재료의 표면개선에 의한 시공이 현장에서 요구되며 표면거침이 미세할수록 계면이 없는 경우에 근사한 결과가 나타났다.

참고문헌

- (1)Whitehead,S.:"Dielectric Breakdown of Solid", Clarendon Press, Oxford(1953)
- (2)McMchon E.J.:IEEE Trans. Power APP. Syst., Vol. pas-69, p.1128(1963-12)
- (3)J.H.Mason:Proc. Instn Elect. Engrs, Vol.98, Pt.I, p.44(1951)
- (4)T.Tanaka:"Charge Ttransfer and Tree Initiation in Polyethylene Subjected to ac Voltage Stress", IEEE Trans. EI, Vol.27 No.3, p.424(1992-6)
- (5)R.Patsh:"Breakdown of Polymer Tree Initiation and Growth",CEI에 323(1975)