

22.9(kV) 지중배전용 전력케이블의 전기적 특성과 파괴수명 고찰

김충배*, 이정빈*, 임장섭**, 한재홍***, 김철운*, 김태성*
 *전남대학교 전기공학과, **목포해양대, ***KEPRI 배전자동화 그룹, *전남과학기술대학

Consideration on Electrical Characteristics and Breakdown Lifetimes in 22.9(kV) Underground Distribution Power Cables

Choong-Bae Kim*, Jung-Bin Lee*, Jang-Seob Lim**, Jae-Hong Han***, Chul-Woon Kim*, Tae-Sung Kim*
 *Chonnam National Univ., **Mokpo National Maritime Univ., ***KEPRI., *Chonnam Techno College

Abstract - Degradation diagnosis of XLPE insulated URD cables was accomplished through out new method, which was to be analyzed by non-electrical experiments and synthesized by degradation points.

To supplement this method, It was also carried out using several electrical analyses.

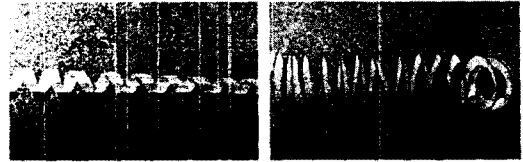
PD-q increased generally in proportion to the applied voltage and showed no uniform patterns in relation to the thickness of insulator.

Leakage current was unequal according to the thickness of insulator and its range was from 20(nA) to 50(nA).

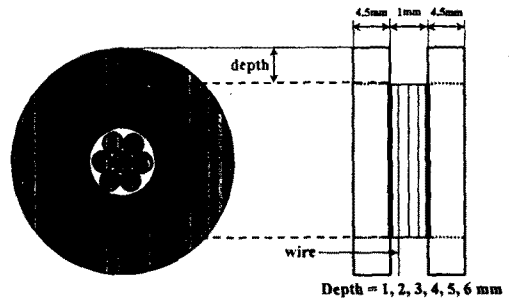
Tanδ had commonly a different tendency by means of temperature and frequency and also appeared higher at the outer part rather than inner part of insulator.

Breakdown voltages were measured and breakdown lifetimes were predicted applying for Weibull distribution function. As a result, breakdown lifetime in failure cables was longer up to three times as much as general cables.

다. 비전기적 특성분석 실험을 위해서 그림 1의 (a), (b)와 같이 시료를 가공하였으며, 절연층 두께에 따른 전기적 특성분석 실험을 위해서 (c)와 같은 시료를 제작하였다.



(a) 리본 형태 (b) 코일 형태



(c) 전기적 특성 실험을 위한 시료
 그림 1. 시료의 형태

1. 서 론

1973년 이후 XLPE 절연 배전케이블의 지중화는 산업화, 도시화 등의 이유로 급속히 증가하는 추세이다. 그러나, XLPE 절연 케이블이 주류를 이루는 배전케이블은 설계수명이 30년 정도임에도 불구하고 실제로는 이에 훨씬 못미친다는 연구결과가 있었다¹⁾. 현재까지 배전케이블의 교체는 일괄적으로 이루어져 왔다. 하지만, 경제성 등의 이유로 좀 더 효율적인 교체를 위해서는 비교적 정확한 열화진단이 요구되고 있으나, 아직까지 이에 대한 연구는 미진한 상태이다. 외국의 경우에는 비전기적 분석 결과에 의한 열화가중치를 이용하여 케이블의 성능을 종합적으로 판단하는 방법이 개발되어 활용 중이다²⁾. 국내에서도 이를 응용하려는 연구가 최근에 이루어지고 있지만, 이러한 방법이 국내 배전케이블에 효율적으로 적용될 수 있는지에 대해서는 아직 미지수이다. 본 연구에서는 국내에서 제작된 케이블을 이용하여 열화가중치에 의한 절연성능을 평가해보고, 이러한 열화진단방법의 효율성을 확인하기 위하여 몇 가지 전기적 특성을 분석하였다. 분석 결과, 열화가중치에 의한 케이블의 진단은 매우 유용한 방법이지만, 신뢰성을 높이기 위해서는 전기적 특성을 함께 분석하는 것이 현명할 것으로 생각된다.

2. 실험 방법

실험에 사용한 케이블은 비교를 위해서 사고경력이 없는 XLPE 절연 지중케이블(S1~S5)과 사고경력이 있는 XLPE 절연 지중케이블(F1~F7) 12종을 선택하였

표 1은 각각의 실험 항목을 정리하였다. 표에서 빗금으로 표시된 부분은 본 연구에서 새로이 시도된 항목으로서, *는 제조시에 생성될 수 있는 결함을 찾기 위해 시도된 방법이고, **는 전기적 특성실험 항목들을 나열한 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열화가중치에 의한 케이블의 열화진단

각 항목에 대한 실험결과에 의한 열화가중치를 종합한 결과가 나타나 있다. 건전케이블보다는 사고케이블의 가중치가 월등히 높았으며, 특히 F1, F4, F6의 경우는 절연층에 수트리가 넓게 분포하는 등 실제로 열화가 상당히 진행되어 있는 것을 확인하였다. S4의 경우는 사고 이력은 없으나, 오랜 사용기간 동안 경년열화되었을 가능성이 높았다.

3.2 부분방전량 측정

100(V/sec)의 인가속도로 전압을 서서히 상승시키면서 절연파괴까지의 부분방전량을 측정하였다. XLPE는 가교반응을 위하여 첨가된 DCP의 분해에 의하여 미세 기공이 발생하는 것으로 알려져 있는데, 그 밀도는 약

30,000[개/cm²] 정도에 이른다. 이는 LDPE의 경우 (3,000[개/cm²])에 비교하면 무척 많은 수로서 기공의 크기가 작을수록 부분방전량도 작아지므로, 일반적으로 LDPE의 방전펄스가 단일펄스인데 비하여 XLPE의 경우는 방전량과 방전펄스가 크다²⁾.

표 2. Experimental Categories

Categories	Targets	Test parts	References
Optical observation	Observing interface	Interface	Carefully stripping insulation shield
X-ray	Convolution, interface defects	Cable	-
Hot oil test	Water tree, impurities	Cable	Silicon oil
Water tree	Water tree	Insulator	Methylene blue
Degree of Crosslinking	Crosslinking percent	Insulator	Xylene
Shrinkage	Shrinkage	Insulator	Precisely measurement
Volume resistivity	Volume resistivity	Semi-conductive layer	Precisely measurement
μ -FTIR	chemical structural defects	Insulator	Base-line method
ICP-AES	impurity contents	Insulator, semi-conductive layer	Dry ashing method
DSC	Thermal analysis	Insulator	RT~200(°C), air
Tan δ	Measuring tan δ	Insulator	LCR meter
Leakage current	Measuring leakage current	Cable	DC, high voltage
Partial discharge	Measuring PD-q	Cable	0 ~ 23(kV)
Breakdown test	Breakdown lifetime.	Cable	Weibull function

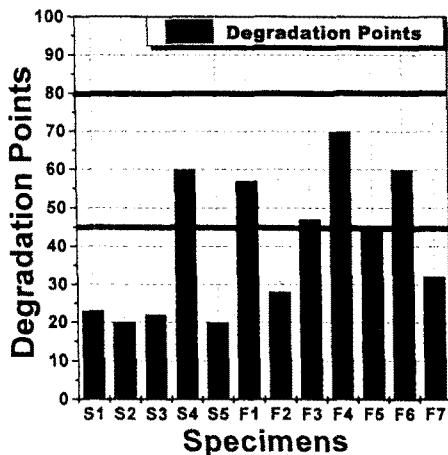


그림 2. 열화가중치 그래프

그림 3의 (a)는 전형적인 방전형태를 나타내고 있다. 방전패턴은 저전압에서는 방전의 형태가 나타나지 않다가, 5[kV] 이상에서 수십[pC] 정도의 방전량을 나타내고, 15[kV] 이상에서는 방전량이 300[pC] 정도를 계속 유지하다가 절연파괴에 이른다³⁾.

절연층이 얇아질수록 이러한 형태는 저전압에서도 방전량이 급격히 증가하여 낮은 전압에서 절연파괴가 일어나는 현상을 보이는데, 특이한 것은 그림 3의 (b)~(f)에서처럼 비전기적 분석과는 달리 S2와 S5가 S4보

다 더 나쁜 특성을 보이고 있다.

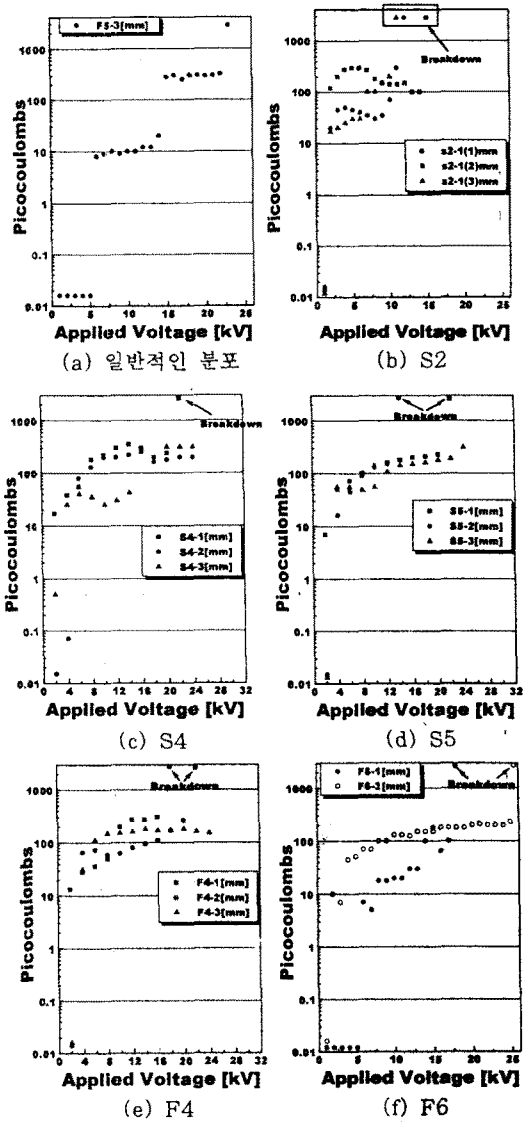
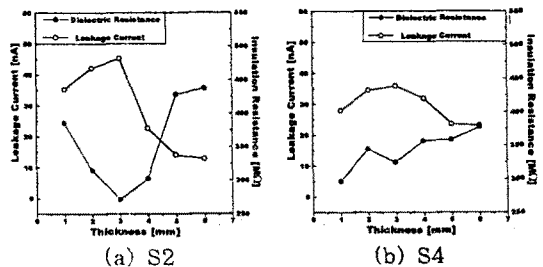
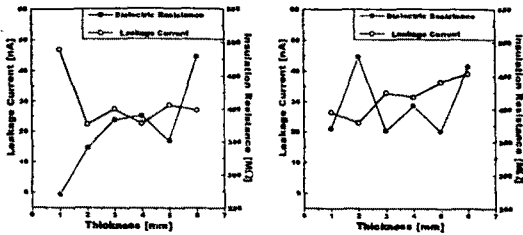


그림 3. 절연파괴시의 부분방전량 분포

3.3 누설전류와 절연저항

직류전압 23[kV]를 인가하고, 7분치의 누설전류와 절연저항을 측정하였다. 일반적으로 누설전류는 온도와 습도의 영향을 많이 받으므로, 이를 고려하여 실험을 실시하였다⁴⁾.





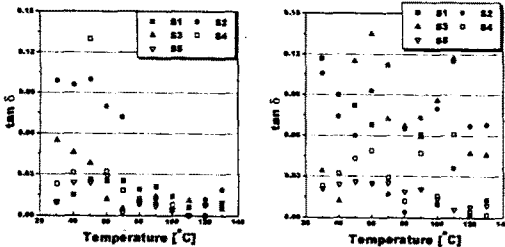
(c) S5 (d) F7
 그림 4. 누설전류와 절연저항 (RT, Humidity : 30%)

실험 결과, 절연층의 두께가 얇아질수록 누설전류량은 커졌으며, 절연저항값은 낮아졌다. 그림 4에서 S2, S4, S5의 경우는 절연저항값이 낮은 경우가 발견되었고, F4의 경우는 두께에 상관없이 일정한 값을 보이고 있으며, F7은 절연층의 두께가 증가할수록 오히려 누설전류가 약간씩 증가하는 경향을 보였다.

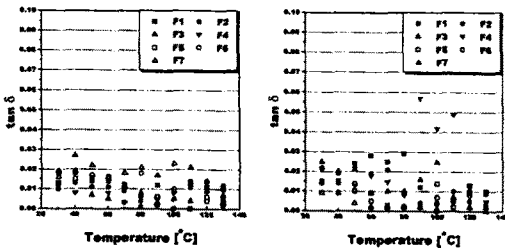
3.4 tan δ

케이블의 절연층으로 사용되는 XLPE는 유전율과 유전손실이 작다. 유전손실의 척도가 되는 유전정점 (tan δ)은 주파수가 증가할수록 커지고 온도가 높을수록 작아지는 경향을 보인다. tan δ 값은 주로 고분자 구조의 열화로 인한 주쇄 일부의 불포화의 증가나 계면분극의 증가 때문에 변화하나, 전계 및 열 스트레스로 인해 XLPE의 Carbonyl기와 같은 극성기가 고분자쇄 내에 작지만 상당한 양이 발생하여 쌍극자분극이 증가했기 때문일 가능성도 배제할 수는 없다.

그림 5에서 보는 바와 같이 F4를 제외한 사고케이블의 경우와 비교했을 때, 건전케이블에서 오히려 tan δ의 값이 불균일하게 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 본 실험에 사용된 미사고케이블의 사용기간이 10년 이상으로, 경년열화에 의해 전기적 성능이 저하되었기 때문으로 생각된다.



(a) 내도 (b) 외도



(c) 내도 (d) 외도

그림 5. 온도에 따른 tan δ (1kHz, Humidity : 30%)

3.5 파괴확률에 의한 파괴수명

XLPE의 절연파괴강도는 1[mm] 정도의 두께에서 약 40[kV] 정도이고, 1[mm] 이상이 되면 절연파괴강도는

감소한다⁵⁾. 그러나, 경년열화에 의해 장시간 사용된 케이블의 경우는 이보다 훨씬 낮으며, 본 실험에 사용된 케이블의 절연내력은 약 20[kV/mm] 정도였다. 1[mm]의 두께로 가공한 시료에 20[kV]의 전압을 인가한 후, 파괴시간을 측정하고, 이를 와이בל 분포함수에 적용하여 파괴수명을 측정하였다. 일반적으로 본 실험에 사용된 케이블의 절연파괴전압은 19~22[kV] 정도로 측정되었다. 그림 6은 이러한 과정을 거쳐 얻은 수명예측값이다. 예상했던 것처럼 사고케이블의 파괴수명은 건전케이블보다 훨씬 낮았다. 그러나, 열화가중치에 의한 분석 결과와는 달리 S4의 파괴수명은 양호하나 S2의 파괴수명은 낮게 나타났다. 이는 방전량이나 누설전류, 유전정점 등 다른 전기 특성시험에서 얻은 결과와 일치한다.

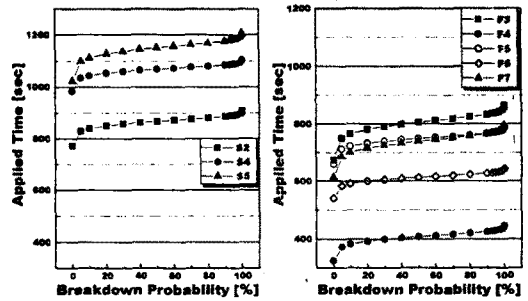


그림 6. 파괴확률에 따른 수명에측값

4. 결 론

본 연구에서는 열화가중치를 이용한 배전케이블의 열화진단의 유용성을 확인하기 위해 국내 케이블을 대상으로 비전기적 특성 및 전기적 특성을 분석하였다. 실험 결과, 열화가중치를 이용한 절연진단은 매우 효율적인 방법임이 확인되었다. 그러나, 전기적인 특성을 분석한 결과, 열화가중치에 의한 열화진단에서는 나타나지 않았던 다른 결과를 얻을 수 있었으며 이는 비전기적분석만으로는 국내 케이블의 전반적인 진단을 결정하는 것보다는 전기적인 특성이 상호 보완되었을 때 더욱 열화진단의 신뢰성을 높일 수 있다는 것을 확인하였다.

본 연구에 많은 도움을 주신 KEPRI의 한재홍 과장님 및 배전자동화 그룹 임원 여러분께 깊은 감사사를 드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] "배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축", 전력연구원, TR.95YJ16.L.199787, 1997. 10.
- [2] G. Gulski, F.H. Kreuger, "Computer-aided analysis of discharge patterns.", J. phys.D: Appl. phys. 23, pp1569-1575, 1990.
- [3] Lim Jang-seob, "Aging Recognition of Partial Discharge Patterns Using Neural Network and Semi-Fractal Dimension", ICPADM, Vol.1., pp.290-293, 1997. 5.
- [4] Richard L. Nailen et al "Online Monitoring of Insulation Resistance", Electrical Apparatus, 1991. 5.
- [5] S. K. Aggarwal, "Literature Review of Environmental Qualification of Safety Related Electric Cables", Division of Engineering Technology Office of Nuclear Regulatory Research, NUREG/CR-6384 BNL-NUREG-52480, Vol.1.