

몰드변압기 침수조건에 따른 절연재의 연면방전 특성

정진수, 정종욱, 임용배, 한운기
한국전기안전공사 전기안전연구원

Surface Discharge Behavior of Insulation with Submerged Conditions of Mold Transformers

Jin-Soo Jung, Jong-Wook Jung, Young-Bae Lim, Woon-Gi Han
Electrical Safety Research Institute, KESCO

Abstract - 본 논문에서는 전기적인 도전율이 다른 도전성수용액에 침적된 고분자 표면의 연면방전 현상에 대해 연구하였다.

실험용 고분자로는 몰드변압기의 주재료로 사용되는 필라충진 에폭시 수지를 사용하였으며, 서로 다른 도전성수용액을 분사한 후 전압을 인가하여 접지선전류, 방전개시전압 및 연면방전전압 등을 측정하였다.

실험결과, 두 전극간의 거리가 멀어질수록 방전개시전압이 상승하였으며, 도전성수용액의 도전율이 높을수록 방전개시전압이 낮아지는 것을 확인하였다. 또한, 파형분석결과 극간거리와 도전성수용액의 도전율에 상관없이 특정 주파수영역에서 고주파가 발생하는 것을 확인하였다. 이는 연면방전이 발생하였을 때 특정주파수에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

1. 서 론

최근의 급속한 경제성장과 함께 인구가 도시로 집중되면서, 인간의 생활공간은 지하로 확대되어 왔다. 이와 함께 지상의 각종 전기공학물들에 대한 일반인들의 혐오감으로 인해 지상의 전기설비는 점점 지하에 설치되는 경향을 나타내었으나, 이에 대한 안전대책은 미흡한 실정이다. 지하에 설치된 전기설비는 침수와 같은 비상시에는 오히려 재해복구에 투입된 인간의 안전을 위협하는 요소로 작용하고 있다. 인간의 안전에 위협을 가하는 전기적 원인으로는 침수된 전기설비 주위로 유출되는 누설전류 및 접촉전압을 들 수 있으며, 특히 누설전류가 인체의 심실세동전류를 초과하게 되면 치명적인 인명사고를 유발하기도 한다. 이를 예방하기 위해 인체의 감전전류에 관한 연구는 여러 문헌을 통해 이미 보고된 바 있으며[2-4], 특히, 침수된 콘센트 주위의 전위분포를 해석한 연구도 진행된 바 있으나[5], 전기설비가 침수되어 있는 수용액의 도전율에 따른 연구는 아직 미흡하다.

본 연구에서는 지하에 설치가 의무화되어 있는 건식변압기 중, 몰드변압기가 침수되었을 때 도전성수용액의 도전율 및 인가전압에 따른 접지선 전류, 방전개시전압 및 연면방전전압 등을 측정·분석함으로써 침수 복구 시 수중에서 활동하는 인력의 안전과 관련된 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1 장치구성

본 실험은 침수된 몰드변압기의 인체에 대한 안전성을 검토하기 위해, 몰드변압기절연재표면에 수분이 부착되었을시 연면방전에 의해 접지선을 통해 지중으로 유출되는 누설전류, 방전개시전압 및 연면방전전압을 측정하기 위한 장치를 그림 1과 같이 구성하였다.

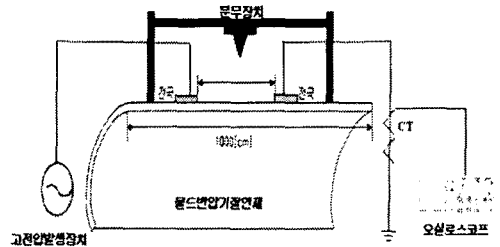


그림 1 실험장치 구성

그림 1에 보인 바와 같이, 몰드변압기절연재표면에 2개의 전극을 설치하였으며, 고전압발생장치는 110[kV]까지 인가할 수 있는 장비를 사용하였다. CT는 1:1000의 센서를 사용하였으며, 오실로스코프는 연면방전이 발생하였을 때 파형을 분석하기 위한 장치이다.

분무장치는 45°로 분사가 가능하도록 설계를 하였으며, 두전극간의 거리가 최대 10[cm]인 점을 감안하여 몰드변압기 절연재와 분무장치와의 높이는 7.2[cm]로 하였다. 분무장치 내부의 도전성수용액은 표 1과 같이, IEC 60587에서 지정한 방법으로 NH₄Cl을 용해시킨 도전성수용액을 시료에 분사를 하였다. 이때 사용된 순수는 2[μS]이하의 것을 사용하였다.

실험에 사용된 시료는 몰드변압기의 주재료로 사용되는 필라충진 에폭시 수지를 사용하였으며, 시료의 조성비는 표 2에 나타내었다.

표 1 도전성수용액의 조성비

조성비[%w]	순수(H ₂ O)	NH ₄ Cl
우 수 102[μS]	99.974	0.026
수돗물(지하수) 400[μS]	99.9	0.1
시험용도전성수용액 1[mS]	99.75	0.25

표 2 시료의 조성 성분

조성	Resin	Hardener	Flexibilizer	Aclerator	Color paste
재료	CY205 (Araldite F)	HY905	DY040	DY062	DW0133 (red)

2.2 실험방법

실험방법은 몰드변압기절연재표면 양단에 4*10[m]간격으로 거리를 조정하였으며 직경 10[m]의 SUS제 평판전극을 설치한 후, 한 전극은 110[V_{ac}]까지 인가할 수 있는 고전압발생장치에 한쪽의 전극을 연결하고 나머지 전극

은 접지에 연결하였으며, 고전압발생장치에 표시되는 인가전압을 통하여 연면방전개시전압을 확인하였다.

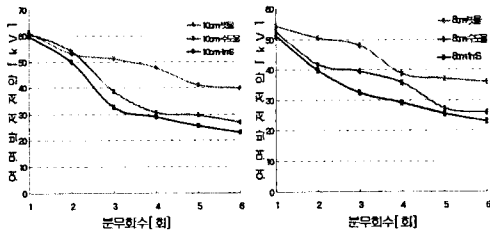
전극은 몰드변압기절연재표면에 고정하기 위해서 절연 테이프를 이용하여 부착시켰다.

두 전극간거리에 따른 연면방전전압을 측정하기 위해 전극간의 거리를 4, 6, 8, 10[cm]에서 분무장치를 이용하여 단위표면당 수적밀도를 변경하며 실험을 하였으며, 총 10회에 걸쳐 데이터를 수집하였다. 수집한 데이터는 최대값과 최소값을 제외한 나머지 8개의 평균값을 이용하였다. 또한, 접지선에 CT를 연결한 후 오실로스코프를 이용하여 접지선에 흐르는 접지선전류를 측정하였으며, 주파수파형을 분석하였다.

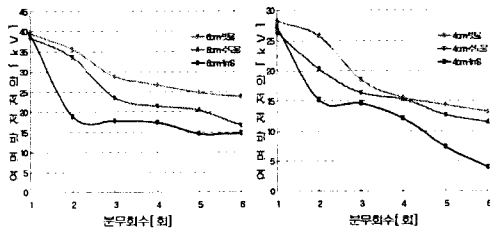
3. 결과 및 고찰

3.1 수적밀도에 따른 연면방전전압

수적밀도에 따른 연면방전전압의 특성을 살펴보기 위하여 0-5회에 걸쳐 수용액을 전극사이에 분사하였다. 그림 2는 단위표면상의 수적밀도에 따른 연면방전전압을 나타낸 것이다. 실험결과 수적밀도가 증가할수록 연면방전전압이 떨어지는 것을 알 수 있었으나 수분이 일정량 이상 증가하면 연면방전전압이 상승한다는 타운셴트이론에 위배된다는 사실을 알 수 있다. 이와 같은 차이점을 가져온 원인은 분사장치에 의해 분사된 수용액이 몰드변압기절연재표면에 수적상태로 분포되는 과정에서 수용액 서로간의 응력에 의해 수적이 응집하여 수분의 성질이 아닌 도전성수용액의 성질을 나타내며, 몰드변압기절연재표면에 통전이 쉬운 전로를 형성하였기 때문이다. 또한 수용액의 도전율에 따라 연면방전전압의 변화를 알아 보기 위해 빗물, 지하수, 실험용수용액을 분사하였다. 그 결과, 전도율이 높은 수용액의 연면방전전압이 전도율이 낮은 수용액에 비해 방전개시전압이 낮은 것을 알 수 있다.



(a) 극간거리 10[cm] (b) 극간거리 8[cm]

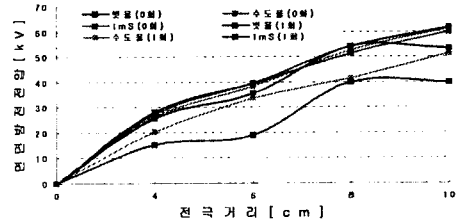


(c) 극간거리 6[cm] (d) 극간거리 4[cm]
그림 2 단위표면상 수적밀도에 따른 연면방전전압

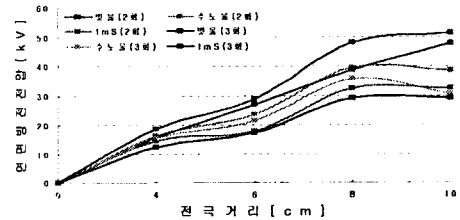
3.2 극간거리에 따른 연면방전전압

극간거리에 따른 연면방전전압의 특성을 살펴보기 위하여 전극간 거리를 4, 6, 8, 10[cm]로 설치하였다. 그림 3은 극간거리에 따른 연면방전전압을 나타낸 것이다. 실험결과 극간거리가 멀어질수록 연면방전전압이 상승하는 것을 알 수 있었으나 그림 3(c)에서와 같이 수도물을 4

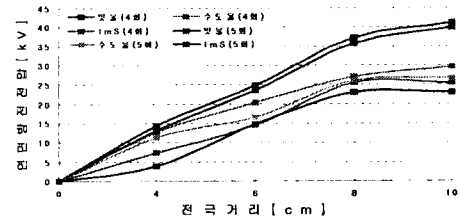
회분사한 도전성수용액보다 우수를 5회 분사한 도전성수용액의 연면방전전압이 전체적으로 보다 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 극간거리와 도전율에 따른 연면방전특성 실험결과평균 연면방전전압은 표 3과 같이 나타났다. 극간거리가 가까울수록 연면방전전압이 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 도전율이 낮을수록 연면방전전압이 높아지는 것을 확인하였다. 또한, 두 결과는 서로 상호관계에 의해 연면방전전압이 결정된다.



(a) 도전성수용액을 0.1회 분사했을 경우



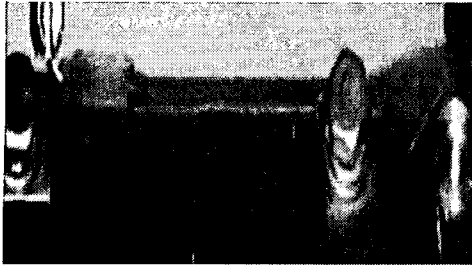
(b) 도전성수용액을 2.3회 분사했을 경우



(c) 도전성수용액을 4.5회 분사했을 경우
그림 3 극간거리에 따른 연면방전전압

표 3 거리와 도전율별 연면방전전압 (단위:[kV])

도전율[μ S]		극간거리[cm]			
		4	6	8	10
우수 102[μ S]	0 회	28.2	39.5	54.2	61.3
	1 회	25.8	35.5	50.4	53.2
	2 회	18.6	28.8	47.9	51.2
	3 회	15.5	26.8	38.7	47.7
	4 회	14.3	24.8	37.1	41.1
수돗물 (지하수) 400[μ S]	0 회	26.3	38.4	52.6	61.1
	1 회	20.3	33.6	41.6	54.1
	2 회	16.3	23.5	39.5	38.4
	3 회	15.3	21.4	35.6	30.4
	4 회	12.7	20.4	27.2	29.5
시험용 도전성수용 액 1000[μ S]	0 회	27.3	39.2	51.2	59.9
	1 회	15.2	18.9	39.8	49.8
	2 회	14.6	17.7	32.3	32.3
	3 회	12.2	17.3	29	29
	4 회	7.4	14.6	25.5	25.5
5 회	4	14.8	23	23	



(a) 연면방전 이전



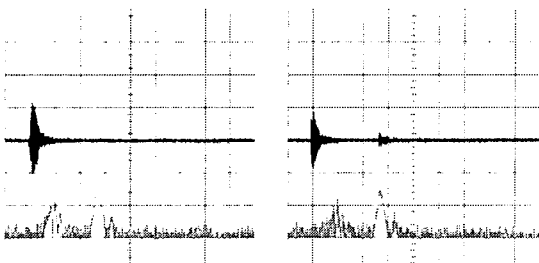
(b) 연면방전 상태

사진 1 몰드변압기 표면에서 발생한 연면방전 사진

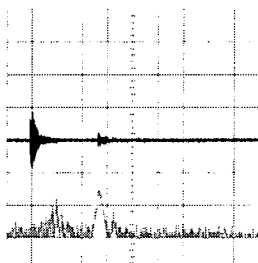
사진 1은 몰드변압기절연재표면상 양단에 전극을 고정하여 두 전극간의 연면방전을 실험한 사진을 연면방전이 발생하기 전과 후의 장면을 보여주고 있다. 본 실험의 결과는 표 3에 나타내었다. 사진 1(b)에서와 같이 두 전극사이에 발생한 방전전압이 몰드변압기절연재연면을 따라 흐르는 것을 확인할 수 있다.

3.3 집지선전류 파형분석

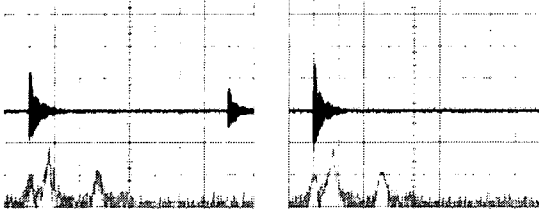
그림 5는 몰드변압기 침수조건에 따른 절연체의 연면방전 특성에 관한 실험에서 두 전극간거리를 4, 6, 8, 10[cm]로 이동하며, 도전성수용액의 도전율을 1[mS], 400[μ S], 102[μ S]로 setting한 후, 연면방전전압이 발생하였을 때의 출력파형을 오실로스코프를 통하여 관측한 결과이며, 상단의 파형은 집지선전류를 나타낸 것이며, 하단의 파형은 FFT(Fast Fourier Transform)를 분석한 결과파형이다.



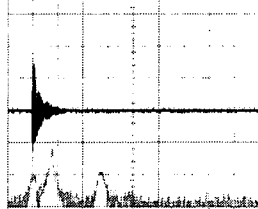
(a) 4[cm], 0회, 1[mS]



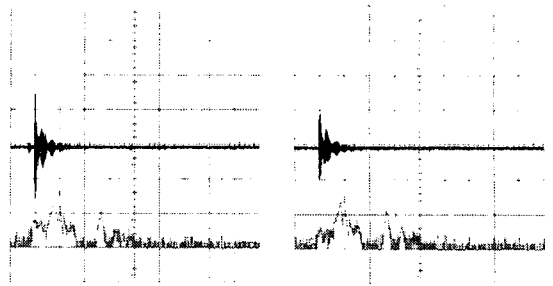
(b) 4[cm], 1회, 1[mS]



(c) 8[cm], 0회, 102[μ S]



(d) 8[cm], 1회, 102[μ S]



(e) 10[cm], 3회, 400[μ S] (f) 10[cm], 4회, 400[μ S]

그림 5 집지선전류 & FFT 파형
(1[μ s], 200[mV], 20[MHz])

파형분석결과 집지선전류의 파형은 크기만이 변화할 뿐 파형의 형태에는 별다른 변화가 없는 것을 확인하였으며, 주파수파형분석 결과 극간거리와 도전성수용액의 도전율에 상관없이 380[MHz]와 760[MHz]부근에서 고주파가 발생하는 것을 확인하였다. 이는 연면방전이 발생하였을 때 특정주파수에 영향을 받는다는 것을 확인하였다.

4. 결 론

몰드변압기 침수조건에 따른 절연체의 연면방전의 특성을 알아보기 위해 3가지 종류의 도전성수용액을 분사하여 집지선전류, 방전개시전압 및 연면방전전압 측정과 분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

수적밀도에 따른 연면방전전압은 전도율이 높은 도전성수용액의 연면방전전압이 전도율이 낮은 도전성수용액에 비해 방전개시전압이 낮은 것을 알 수 있었으며, 극간거리에 따라서는 극간거리가 가까울수록 연면방전전압이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 파형분석결과 극간거리와 도전성수용액의 도전율에 상관없이 380[MHz]와 760[MHz]부근에서 고주파가 발생하는 것을 확인하였다. 이는 연면방전이 발생하였을 때 특정주파수에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

본 연구는 산업자원부(MOCIE) 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Y.Kamata, A.Miki and S.Furukawa, "A Singular Flashover Path Observed on the Surface of Synthetic-resin-bonded Paper Cylinders Immersed in Transformer Oil under Switching Impulse Voltage Conditions", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 20 No.2, 1991. 4
- [2] 김두현, 김상철, 고은영, "대전인체의 방전위험성 평가를 위한 모델 및 예방진단", 한국산업안전학회지, Vol.13, No.3, pp.80-87, 1998. 9
- [3] 김두현, 강동규, 김상철, "저전압에서의 통전류를 이용한 인체의 동저항 측정 및 예측", 한국산업안전학회지, Vol.16, No.1, pp.37-42, 2003. 3
- [4] 김두현, 강동규, "침수된 전기설비의 누전으로 인한 수중에서의 감전특성에 관한 연구", 한국산업안전학회지, Vol.17, No.3, pp.61-65, 2002. 7
- [5] "배선기구류의 감전위험성 연구", 한국전기안전공사, 1999