

송전용 OF 케이블의 절연특성 분석방법에 대한 고찰

김종은*, 서광석*, 김정태**, 이진선***, 구자운***
고려대학교 재료공학과*, 대전대학교 전기공학과**, 한양대학교 전기공학과***

The Investigation of Analytical Techniques for Insulation Characteristics of Oil-Filled Transmission Cables

Jong Eun Kim, Kwang S.Suh, Jung Tae Kim, Jun Sun Lee, Ja Yoon Koo
Dept. of Materials Science, Korea Univ., Dept. of Electrical Engineering, Dae Jin Univ.,
Dept. of Electrical Engineering, Han Yang Univ.

Abstract - To find effective diagnostic method for Transmission OF cables, various characterizations were carried such as DGA (dissolved gas analysis), water contents, total acidity and AC breakdown voltage. It was found that the result was varied by sampling and container. The results from those characterization method showed the present condition and history very well and could be used to estimate the degree of degradation of cables.

화칼륨 표준 수용액으로 적정한 후 절연유 1g 속에 함유되는 전체 산성성분을 중화시키는데 필요한 수산화 칼륨의 mg수인 전체 산값을 구하였다 [2-4].

절연유의 교류 절연파괴시험은 전극의 연단효과(edge effect)를 배제해야 하기 때문에 기존의 구-구 전극 구조보다 평등전계에 가까운 포물구-포물구 전극을 이용하였으며 전극간격은 2mm로 하였고 전압인가 속도는 1kv/sec로 하여 최고 60kv까지 인가하였다 [5].

3. 실험결과 및 고찰

1. 서 론

송전급에 사용되는 OF 케이블은 절연지와 절연유에 의한 절연이 이루어지며 이들은 각각 전기적, 열적, 환경적, 기계적 스트레스에 의하여 열화가 일어나며 이 경우 각종 부산물들이 발생하여 절연성능을 저하시키고 과다한 열화가 일어났을 경우 중극에는 절연파괴에 이르게 된다. 이러한 열화에 의한 절연파괴에 이르러 사고가 발생하기전 케이블의 상태를 진단하여 열화정도를 예측하는 일은 매우 중요한데 상시 진단시스템을 설치하여 감시하는 방법과 정기적으로 시료를 수거하여 상태를 판단하는 방법이 적용될 수 있다 [1].

본 연구에서는 정기적으로 시료를 수거하여 케이블 상태를 진단하는 방법으로, OF 케이블의 절연유를 채취하여 기 알려진 실험방법 또는 새로운 방법을 적용할 수 있는지에 대한 가능성을 검토하였으며 이 방법들이 효과적으로 케이블의 열화정도를 판단할 수 있는지에 대한 검토를 실시하였다.

2. 실험

2.1 절연유 시료 채취

실험을 실시한 시료는 포설되어 20여년 사용된 것으로 진공상태를 유지하면서 채취하였으며 현장에서 채취 즉시 실험을 수행하는 것이 아니므로 시료를 담은 용기에 따라 실험값의 차이가 있을것으로 예상되어 유리병, 캔, 주사기에 각각 시료를 채취하여 채취용기에 따른 특성분석 값을 비교하였다.

2.2 절연유 특성 분석

절연유를 진공상태에서 분산시켜 용존 가스를 추출한 후 Gas Chromatography를 이용하여 DGA (dissolved gas analysis)를 실시하였고, ASTM D 1533-88에 따라 Karl Fisher 지시약을 사용하여 iodine과 sulfur dioxide가 수분과 반응하는 양을 측정하여 ppm단위의 수분함량을 측정하였으며 절연유를 혼합 유기용매에 녹여 알칼리6B를 지시약으로 하여 수산

3.1 채취방법

오일탱크에서 진공상태를 유지하여 절연유를 채취하여도 현장에서 바로 실험을 하는 것이 아니기 때문에 어떤 용기를 사용하였는가에 따라 운반, 보관 상태가 다르기 때문에 실험결과의 차이가 생길 수 있으며 실제 실험자가 실험하기에 가장 편리한 방법을 사용하여야 한다. 이를 비교 분석하기 위하여 입구가 작으며 속뚜껑이 있는 캔, 내부가 보이는 유리병, 주사기를 선택하여 시료를 채취한 후 일정기간이 지난 뒤 실험을 실시하였다. 실험 결과에 가장 영향을 많이 받는 결과는 용해가스 분석인데 외부와 접촉 또는 노출되었을 경우 용해가스가 유출되기 때문이고 수분함량 또한 외부 습도에 영향을 받아 증가할 수 있다. 문헌상으로 보면 주사기가 가장 효과적이라고 알려져 있으나 실제 시료 채취 시 주사기 입구에 진공 장비를 연결하는 것이 매우 힘들며 보관을 위하여 sealing을 하는 작업은 주사기의 구조상 매우 어렵다. Gas tighted 주사기를 사용하면 이러한 문제점을 해결할 수 있으나 매우 비싸고 조작이 어렵기 때문에 현장에 적용하는 데는 문제가 있다. 보관과 운반이 쉬운 캔을 사용하는 것이 좋으나 이 또한 내부가 보이지 않고 입구가 작기 때문에 세척에 어려움이 있으며 유리병의 경우는 깨지기 쉽다는 단점을 가지고 있다.

채취 후 120 시간, 1,200시간 경과 후 분석을 실시하였는데 용해 가스분석, 수분함량 모두 캔의 경우 가장 정밀한 결과를 얻을 수 있었으며 유리병의 경우는 속뚜껑을 사용하지 않았기 때문에 시간이 경과할 수록 처음 채취시 보이지 않았던 기포가 내부에 존재하는 것으로 미루어 외부 공기와 접촉이 된 것으로 보이며 주사기의 경우는 내부의 기포존재는 물론 실제 실험시 sealing하였던 부분을 제거하기 위하여 장시간 대기에 노출되어야 하기 때문에 실험결과의 정확성이 떨어진다.

3.2 용해가스 분석

케이블 절연유는 평유와 알킬벤젠 혼합유를 사용하며 셀룰로오즈 절연지를 사용하는데 각종 스트레스에 의하여 여러 가지 종류와 함량의 가스가 생성된다. 이렇게 생성된 가스를 분석하면 케이블내에서 어떤 스트레스가 있었는지 확인할 수 있기 때문에 절연유에 용해되어 있

는 가스를 분석하는 방법은 상태진단방법으로 널리 사용되고 있다.

표 1에 스트레스에 따른 가스의 종류와 함량이 나와있다. 보통 보통 절연유가 과열되면 H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄등이 발생하고 방전이 일어나면 H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₂등이 발생하며 절연지가 과열되면 CO₂, CO, H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄등이 발생하고 방전이 일어나면 CO₂, CO, H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₂등이 발생한다.

표 2에는 채취용기에 따른 용해가스분석결과가 나와 있다. 채취후 120시간과 1,200시간이 경과한 후 실험을 실시하였는데 보통 현장에서 시료를 채취한 후 분석까지는 240이 소요되며 1,200시간까지 방치한 후 실험을 실시한 이유는 채취용기의 적합성을 판단하기 위해서였다.

표 1. 발생 가스와 열화기구

	다 량	소 량	미 량	미발생
열적파괴	H ₂ , CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
부분방전	H ₂ , CH ₄	-	C ₂ H ₂	-
저에너지			C ₂ H ₆	-
전기 방전	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	-
아크 방전	C ₂ H ₂ , H ₂	CH ₄ , C ₂ H ₄	-	-

절연지의 부분방전: CO, CO₂

표 2. 채취용기에 따른 용해가스 함량

용기	캔		유리병		주사기	
	120	1,200	120	1,200	120	1,200
H ₂	3	5	-	4	-	-
O ₂	6,194	1,455	6,262	1,594	11,894	19,282
N ₂	16,133	9,635	20,606	8,162	41,491	86,567
C ₂ H ₂	-	-	-	-	-	-
C ₂ H ₄	1	1	1	1	1	-
C ₂ H ₆	1	1	1	1	1	-
CH ₄	3	2	3	2	4	4
CO ₂	110	58	107	37	157	257
CO	10	11	7	7	29	53
TCG	18	20	12	15	35	57
Total	22,452	11,168	26,982	9,774	53,577	106,163

실험을 실시할 시료가 20년 사용하였으나 TCG (total combustible gas: H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂, CO)의 양은 매우 작았으며 큰 열화의 흔적은 보이지 않았다. 그러나 미량이나마 H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄ 등이 검출된 것으로 미루어 약간의 스트레스는 가해졌었다고 볼 수 있다. 또한 채취용기에 따라 가장 차이가 나는 값은 H₂인데 H₂가스는 다른 가스에 비해 절연유에 대한 용해도가 작아 쉽게 손실이 가능하다. 따라서 수소가스가 검출되는 용기가 보관이 잘된 것으로 판단할 수 있는 것인데 캔의 경우가 가장 좋은 것으로 나타났다. 또한 O₂와 N₂는 보통 대기의 성분으로 그 양이 절연유의 상태를 판단하는 기준은 될 수 없으나 같은 시료를 분석한 경우 O₂와 N₂의 함량이 다른 시료보다 많다면 채취방법과 운반, 보관등에 문제가 있었던 것이므로 실험결과와 신뢰도가 떨어진다고 할 수 있다.

3.3 수분함량 측정

절연유가 수분에 오염되면 절연유의 유전손, DC 비저항은 물론 절연유의 절연파괴강도도 크게 저하된다. 수분이 케이블의 절연유 내로 유입될 가능성은 크게 세 가

지로서 포설작업시, 유지보수 작업시, 그리고 셀룰로스의 열화에 의한 유입 등이 있을 수 있다. 여기에 또한 가지 중요한 것은 채취시 주변의 습도와 보관중 수분의 유입이다. 수분이 유입되어 전기적 성질을 저하시켜 운전에 영향을 미치는 것도 매우 중요하나 정기적 실험을 통하여 상태를 판단하고자 할 때 가능한 한 오차를 줄여 줘야 하는 의미에서 채취와 보관이 수분의 유입도 가능한 한 최대 배제하여야 한다.

표 3. 채취시료의 수분함량 측정결과

(ppm)	시간	1회	2회	3회	4회	5회	평균
캔	120	9	10	9	7	9	9
	1,200	19	21	18	19	18	19
유리병	120	12	9	9	9	13	10
	1,200	19	18	18	16	13	17
주사기	120	21	21	20	21	17	21
	1,200	38	39	43	40	39	39

표 3에 채취시료의 수분함량을 측정한 결과가 나와있다. 보통 수분함량은 채취시기에 따라 차이가 나는데 하절기에 측정한 값은 동절기에 비하여 매우 높은 값을 나타낸다. 본 실험에서는 채취는 한번에 한 것이나 측정된 시기는 1,000시간 이상 차이가 있으며 채취시 습도는 18%였으며 120시간 경과후 실험 시 습도는 20%였고 1,200시간 경과후 2차 실험시 습도는 67%였다. 결과를 보면 1차, 2차 실험시 수분함량이 차이가 나는데 2차 측정시의 값이 1차 측정값의 2배 정도이다. 이는 크게 두가지로 예상할 수 있는데 첫째로 주변 습도가 결과에 그대로 반영된 것과 둘째는 채취시 수분이 유입되어 초기 120시간에는 나타나지 않으나 장시간이 경과한 후 서서히 절연유에 용해되어 2차 측정시 2배이상의 수분이 검출된 것으로 예상할 수 있다. 이런 의미에서 수분함량의 실험은 채취후 짧은 시간안에 이루어지는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

3.4 전산가 측정

절연유의 중화도는 절연유 내에 들어 있는 산성 성분 및 산성오염물질의 척도로 사용되며 절연유 내에 산성 성분이 있으면 절연유의 전기전도도가 감소하고 유전손을 증가시킨다. 절연유의 중화도 측정은 케이블이 운전되고 있는 동안에는 일상시험으로서 시행되지 않는 것이 일반적이거나 유전손이 너무 높거나 절연저항이 너무 높을 때 오염물질의 근원을 밝히기 위한 검사항목으로 사용될 수 있다.

실험을 실시한 시료는 약 20여년 사용된 것이므로 산가는 어느정도 높은 수치라고 할 수 있는 0.017 KOH mg/g 이었다. 신유의 산가가 보통 0.002 KOH mg/g 인 것으로 비하여 보면 상당히 높은 값이기는 하나 단산가가 높다고 하여 케이블의 이상 유무를 판단할 수는 없고 이에 따라 영향을 받는 유전손이나 전기전도도를 측정해 보아야 한다. 또한 전산가의 측정은 용해가스 함량을 측정하거나 수분함량을 측정하는 것처럼 어렵고 복잡한 장비를 요구하는 것이 아니기 때문에 현장적용이 매우 쉬운 장점을 가지고 있다.

3.5 교류절연파괴 시험

AC 파괴강도는 절연유가 수분, 종이 분진 또는 도전성 이물질 등에 의해 오염되었는가를 판단할 수 있는 근거로 사용될 수 있으며 이물질이 전기장 내에서 전기장의 영향으로 두 전극을 연결짓는 형태로 사슬을 형성하면 도전로 역할을 하므로 절연파괴강도가 저하된다. 절연유 시료는 시료 채취 후 보관시간이 길수록 오염물

질들이 침전되는 등 시료상태가 변화할 가능성이 높으며

표 4. 교류절연파괴 결과

전압 (kV)	50	52.4	51	49	52	51	50.9
------------	----	------	----	----	----	----	------

로 채취 후 가능한 한 빠른 시간내에 시험해야 한다. 만일 보관시간이 수 일 정도로 길어질 경우 절연유 시료를 균질화 (homogenization)하는 작업을 거쳐 오염물질이 균일한 분포를 갖도록 한 뒤 절연파괴시험을 수행해야 한다.

보통 구-구 전극을 사용하면 전극을 사용하면 전극의 연단효과 (edge effect)를 배제할 수 없기 때문에 평등 전계에 가까운 포물구-포물구 전극을 이용하여 실험을 수행하였다. 표 4에 결과가 나와 있는데 평균 50.9kV로 신유의 규격이 40kV이상인 것으로 보아 크게 열화되었다고 볼 수 없는 값이다.

4. 결 론

본 연구의 목적은 OF 케이블의 이상유무를 판단하기 위한 방법으로 기존의 실험들이 OF 케이블에 적용될 수 있는지를 판단하고자 함이었다.

먼저 OF 케이블의 절연유를 채취하는 용기는 입구가 작고 속뚜껑이 있는 캔 또는 유리병이 적합하고 채취시 가능한 한 대기에 접촉되지 않게 하여야 하며 채취후 가능한 한 빠른 시간내에 실험을 수행하는 것이 외부로부터의 오차 유입을 최대한 줄일수 있는 방법임을 알게 되었고, 여러 가지 실험을 실시한 결과 용해가스 분석, 수분 및 전산가 측정, 교류절연파괴 강도 실험등은 OF 케이블의 절연유의 특성을 파악하는데 아주 적합한 분석방법이며 정기적으로 이와 같은 시험을 수행한다면 케이블의 상태를 파악 할 수 있고 그에 따른 적절한 조치를 취할 수 있는 예지방법으로 쓰일 수 있을 것으로 사료된다.

감사의글: 본연구는 전력연구위 연구비 지원으로 이루어졌으며 실험을 도와주신 최경화님, 이흥기님께 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] CIGRE Working group 21.05, Electra No. 176, 1998
- [2] ASTM D3612-90, IEC Pulb. No. 567
- [3] ASTM D1533-88, IEC Pulb. No. 814
- [4] ASTM D974-92, D664-89
- [5] KEPRI Report, 97EJ03.M1999.67,1999