

변압기 절연유의 유동대전현상에 미치는 불순물의 영향

조문호* 권동진*곽희로*김두석**

* 숭실대학교 ** 전북산업대학교

Effect of Impurities on Streaming Electrification in Transformer Oil

Moon-Ho Cho* Dong-Jin Kweon* Hee-Ro Kwak* Du-Suck Kim**

* SOONG SIL UNIVERSITY ** CHUN BOOK UNIVERSITY OF INDUSTRY

ABSTRACT

The static charges generated at the interface between the insulating oil and the solid materials, can be affected by impurities such as moisture.

This paper investigated the charging tendency of clean oil and the oil with moisture in stainless steel pipe. The experimental results show that static electrification of the oil with moisture is smaller than that of the clean oil, and the oil is positively charged.

1. 서 론

유동대전현상은 과거 석유공업에 있어서 제품의 수송이나, 항공기 기체 내의 연료보급 등과 같이 석유성의 액체가 파이프를 통하여 탱크에 저장될 때, 폭발, 화재 등의 재해가 발생되어 문제점으로 대두되기 시작하였다.[1]

유동대전현상은 고체와 액체의 계면에서 유종 이온의 선택흡착 현상에 의한 것으로 대전의 강도에 영향을 미칠 수 있는 요소는 액체 및 고체의 종류, 온도, 유동속도, 유동량, 유로의 형상, 불순물, 고체의 표면상태, 인가전압 등이 있으며, 이러한 요소들이 복합적으로 얽혀 있다.

최근, 전력 수요의 급격한 증가로 인하여 계통전압이 초고압화되고, 변압기의 용량은 증가하고 있다. 이에 따라 냉각 효과를 높이기 위하여 절연유의 유동속도를 증가시키게 되고, 절연물질의 절연성을 향상시키게 되었다. 대전현상은 대전체의 전기절연성이 우수할수록 현저하게 나타나고 절연유의 유동량, 유동속도의 증가에 따라 함께 증가하므로, 이러한 변화들은 절연유의 유동에 의해 발생하는 정전전하의 양을 증가시키게 될 것이다.[2]

유동대전에 의해 발생하는 전하의 양이 누설 또는 완화되는 전하의 양보다 많을 때 공간전하를 형성하게 된다. 이러한 전하의 축적은 강한 전계를 야기하고, 유종 정전방전이나 연면방전을 일으킬 수 있다.[3]

본 논문에서는 유동대전현상을 분리, 해석하기에 용이한 직렬식 대전장치를 채택하여, 외부의 영향과 불순물의 영향,

유체역학적인 절연유의 흐름 등을 감안하여 장치를 개선하였다. 대용량 변압기의 절연유는 경년열화를 일으키며, 이에 따라 절연유의 역률과 $\tan\delta$ 가 증가하게 되고, 또한 수분의 양도 증가하게 된다.[4][5] 절연유의 유동대전에는 여러 요소들이 복합적으로 영향을 미치므로 유동대전기구를 규명하는데 어려움이 있다. 그러므로 각 요소들의 영향을 각각 검토하여 종합판단함으로써 유동대전기구의 규명이 가능할 것으로 사료된다. 따라서, 본 실험에서는 다른 불순물의 영향을 제거하기 위하여 절연유를 정화시키고, 진공상태에서 탈기를 한 후, 수분을 첨가하여 수분이 유동대전에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 유속의 변화에 따른 대전량의 변화 및 절연유의 온도에 따른 대전량의 변화도 함께 연구하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

가. 실험장치

액체가 유동될 때 고체와의 마찰에 의하여 발생하는 전하를 평가할만한 표준 측정 절차가 없기 때문에 각 실험자들은 그들 나름대로의 접근 방법을 개발하여 왔다.

지금까지 개발된 대표적인 측정방법으로는 소정전 시험기, 도전 탐침법, 분리 측정관법, 고체 회전 방식, 직렬식 대전장치 등이 있다. 그러나, 유동대전을 측정하는 측정장치 자체가 측정에 영향을 주는 경우가 많이 있었다.[6] 이 중에서 직렬식 대전장치는 두 개의 절연 탱크를 이용하여 상부탱크에서 하부탱크(Faraday cage)로, 대전 파이프를 통하여 액체를 유동시키는 방법이다. 이 방법은 유동부분이 대전 발생부분에만 국한되어 있기 때문에 실험장치 자체의 오차가 거의 없고 해석이 비교적 용이하다. 또한, 대전 발생부와 측정 부위가 전기적으로 분리되어 있으므로, 대전전하의 측정은 대전 파이프와 하부탱크 두 곳에서 가능하며, 두 가지의 측정값을 비교하여 전하의 발생, 운송, 측정, 누설 등을 단계적으로 분리하여 해석하기에 용이하다.

그림 1은 본 연구에 사용한 실험장치의 구성도이다. 실험장치는 27[1]의 용량을 가지는 상,하부 탱크로 구성되어 있다. 탱크는 스테인레스 스틸을 사용하여 진공이 가능하도록 제작하였고, 탱크의 상부에는 다른 장치들과 연결할 수 있도록 파이프를 도출시켜 놓았으며 진공 그리스와 에폭시를 사

용하여 진공이 가능하도록 하였다. 하부탱크는 페러데이 상자로 작용할 수 있도록 외란 방지용 실드 챔버를 스테인레스 스틸로 제작하여 외부에 설치하였다. 하부탱크와 실드 챔버는 테프론을 사용하여 전기적으로 분리하였고, 탱크의 외부에는 가스 출구를 도출시켜 놓았는데 가스 출구에는 체크 밸브를 연결하여 내부의 가스가 밖으로 방출 수는 있으나, 외부의 공기가 페러데이 상자 내부로 들어올 수 없도록 하였다. 대전 파이프는 내경 3mm, 외경 4mm의 스테인레스 스틸 ($t=500\text{mm}$)을 사용하였다. 상부 탱크의 절연유 유출구에 진공 밸브를 연결하고, 밸브의 끝단에 테프론을 사용하여 대전 파이프와 연결하였다. 진공 밸브와 테프론의 연결 부분은 절연유의 흐름을 원활히 하기 위하여 주입각을 60° 로 하여 제작하였다.

절연유의 온도를 조절하기 위하여 판형 히터(1500W)를 제작하여 상부탱크의 측면에 부착하였다. 탱크의 측면에는 탱크내의 절연유의 양을 측정할 수 있도록 유면계를 설치하였으며, 탱크의 밑 바닥은 테프론을 사용하여 전기적으로 절연을 하였다.

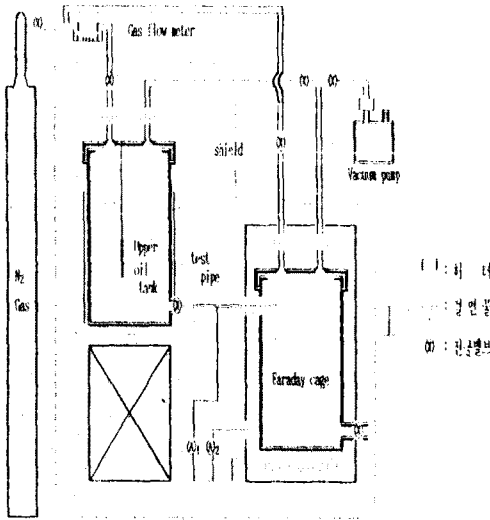


그림 1. 실험 장치

절연유는 상부탱크에 질소 가스로 압력을 가하여 하부탱크로 흐르게 하였으며, 유속은 유속계(미국 Dwyer 社: 유속 범위 0~1000(cc/min))의 제어밸브를 이용하여 조절하였다.

온도에 따른 영향을 측정하기 위하여 히터를 온도제어장치로 조절하여 20~70 [°C]의 범위로 온도를 변화시켰다. 온도가 상승하는데 걸리는 시간은, 1단계(10°C) 상승하는데 평균 15분이 소요되었으나, 장치의 평형유 위하여 약 30분 동안 설정 온도도 유지한 이후에 다음 과정을 진행하였다.

절연유의 유동에 의해 대전 파이프의 표면과 절연유와의 계면에서 정전전하가 분리되는데, 대전 파이프에서 발생한 전하는 미소전류계 ① (Takeda : TR 8651)을 통하여, 절연유속의 전하는 페러데이 상자의 외벽을 거쳐 ② (Keithley : 601C)를 통하여 각각 대지로 누설되며, 그 값은 미소전류계에 연결된 기록계(日本 Graphtec 社 : SR6211)를 통하여 기록되도록 하였다. 측정 신호의 전달은 이중차폐케이블을 사용하여 외란을 방지하였으며, 실험장치는 동방사로 차폐하여 외란 및 정전유도를 방지하였다.

나. 실험방법

본 실험에서 사용한 시료유는 일반 전력용 변압기에 사용하는 광유계 절연유(KSC 2301, 1종 2호)를 사용하였다. 시판되고 있는 절연유는 제품의 제조, 운송, 보관 등의 과정에서 불순물을 함유하게 되고, 이러한 불순물들은 유동대전 현상에 영향을 미치게 될 것이다. 따라서, 본 실험에서는 불순물의 영향을 최소화하여 측정값의 오차를 없애고, 수분 첨가시의 실험결과와 비교하기 위하여, 각 단계의 실험을 시작 할 때마다 절연유를 보집임자경이 20[μm]인 여과지를 사용하여 정화하였으며, 불순물을 제거한 후에는 10^{-3} [torr]로 진공을 하여 약 1시간 동안 탈기를 하였다. 한편, 실험장치는 제작과정에서 불순물이 장치의 표면에 상당히 부착하였을 것이므로, 이를 제거하기 위하여 공업용 휘발유로 장치를 세척하였고, 다시 벤젠을 사용하여 실험장치 속의 불순물을 최대한 제거하였다. 특히, 대전 파이프는 벤젠 속에 넣어서 불순물의 부착이 없도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 유속을 0.5~2[m/s]로 변화시키면서 대전 파이프와 절연유중의 유동대전을 측정하여 나타낸 것으로, 온도는 실온(21°C)에서 행하였으며, 대전 파이프의 재질은 스테인레스 스틸이다. 이때의 대전극성은 스테인레스 스틸은 음으로 절연유는 양으로 대전되었다. 유동전류는 관벽과 액체의 계면에서 양, 음이온중의 어느 한이온이 관벽에 선택적으로 흡착되는 선택흡착계수에 의한 것으로, 본 실험의 경우에는 스테인레스 스틸 파이프의 관벽에 음이온이 선택흡착되고, 절연유중의 확산층에 양이온이 분포되어 유동한 것으로 해석할 수 있다. 그러나, 유동전류는 고체의 재질과 액체의 종류 및 불순물의 종류에 따라 계면에서의 선택흡착계수가 다름으로 인하여 대전량이나, 대전극성의 차이가 발생하므로 급우 더 연구할 필요가 있다.

대전 파이프에서의 누설전류와 페러데이 상자에서의 완화전류는 거의 같은 값을 나타내었고, 대전 전류는 유속의 증가에 따라 증가되는 것을 나타내고 있다. 본 실험에서의 유속은 0.5~2.0 [m/s]이다. 이때의 레이놀즈 수는 약 83~333이므로 층류의 범위가 된다. 층류에서는 유속에 비례하여 대전전하량이 변화하므로 이론과 실험이 일치함을 알 수 있다.

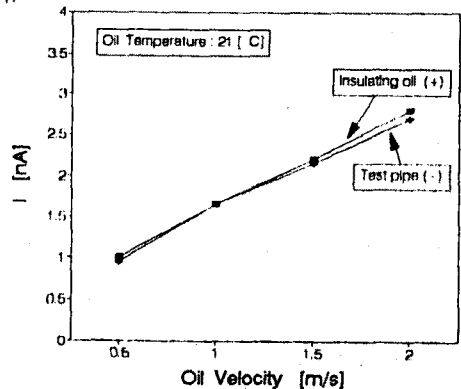


그림 2. 유속에 따른 대전전류

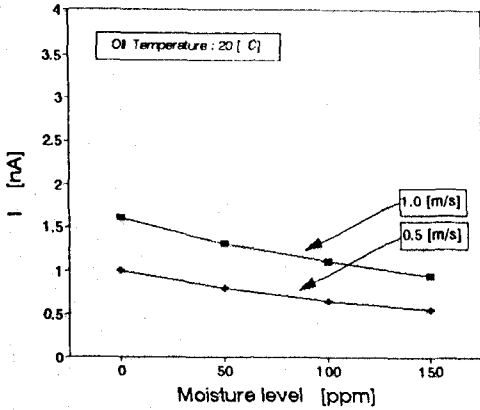


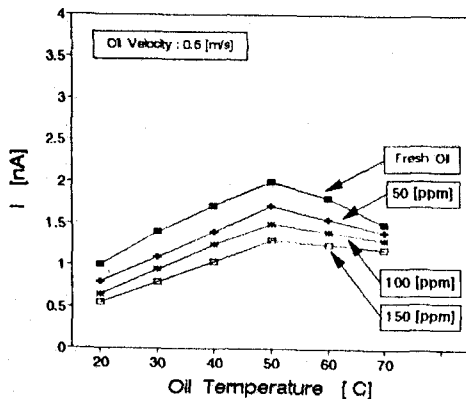
그림 3. 유동전류의 수분 농도 의존성

그림 3은 수분의 양에 따른 대전특성을 나타낸 것이다. 그림 2에서 대전전류는 유속의 증가에 비례하여 증가하므로 유속은 0.5와 1.0 [m/s]의 두 경우만을 선택하였으며, 수분의 양이 적을 때는 대전량의 변화가 거의 없었으므로 수분의 함량은 50 [ppm] 단위로 선택하였다. 한편, 대전 파이프에서 측정된 누설전류와 페러데이 상자에서 측정된 완화전류는 근본적으로 차이가 없으므로, 측정 데이터는 페러데이 상자에서 측정된 값을 나타내었으며, 온도는 상온 20[°C]이다.

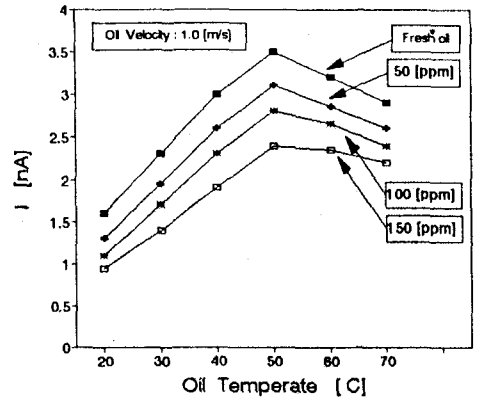
완화전류의 값은 수분의 양이 증가함에 따라 감소하였고, 유속이 1.0 [m/s]인 경우와 0.5 [m/s]일 경우의 수분량 증가에 따른 대전량의 감소비는 비슷하게 나타났다.

이와같이 수분의 첨가량이 증가함에 따라 대전량이 감소하는 이유는 절연유중에 용해된 수분이 고체와 액체의 계면에 흡착하여 대전발생을 억제한 것으로 해석할 수 있다.

그림 4는 절연유의 온도 변화에 따른 대전특성을 나타낸 것이다. 절연유의 온도를 20~70 [°C]까지 변화시키면서 각 10 [°C]마다 유속을 변화시켜 측정한 것이다. 그림 4-(a)는 유속이 0.5 [m/s]일 경우이고, 4-(b)는 1.0 [m/s]일 경우이다. 파라데이 케이지에서의 완화전류는 저온 영역에서 온도의 증가에 따라 증가하다가 50 [°C] 부근에서 최대치를 나타내었으며, 수분의 함량이 증가함에 따라 대전량은 감소되었다. 이와 같이 절연유의 온도에 따라 대전전류가 최대치를 나타내는 원인을 고찰해보면 다음과 같다. ① 유속이 일정할 경우 온도가 증가함에 따라 유종의 해리전류밀도도 함께



(a) 유 속 0.5 [m/s]



(b) 유 속 1.0 [m/s]

그림 4. 유동전류의 유온 의존성

증가되어 발생전하량이 증가하게 되고, ② 고온영역에서는, 액체의 도전율이 급격히 증가하여 전하의 완화시간이 감소하기 때문에 검출되는 전하량이 감소하게 된다.

4. 결 론

변압기 절연유와 변압기의 고체 구성물질과의 계면에서 발생하는 유동대전현상에 대하여 직렬식 대전장치를 개선하여 연구한 결과, 금속물질과 절연유의 계면에서 금속은 음으로 대전되었고, 절연유는 양으로 대전되었다. 대전 파이프에서의 누설전류와 페러데이 상자에서의 완화전류는 반대극성의 같은 크기의 값을 나타내었으며, 절연유의 유속과 대전강도와의 관계에서 중류일때 대전량은 유속에 비례하여 증가하였다. 절연유의 온도와 대전전류와의 관계에서 온도가 50 [°C]부근에서 대전전하량이 최대치가 나타났으며, 절연유 속의 수분의 양이 증가함에 따라 발생 대전량은 감소하였다.

참 고 문 헌

- [1] B. Abedian, "Electrostatic Charge Relaxation in Tank Filling Operations", J. Electrostatics, Vol.14, pp.35-57, 1983.
- [2] I. Cinsburgh, "The Static Charge Reducer", Journal of Colloid and Interface Science, Vol.32, No.3, pp.424-432, March 1970.
- [3] 大久仁, "流動帶電と絶縁破壊", 静電気學會誌, Vol.14, No.1, pp.16-24, 1990.
- [4] Edward Brzostek, "Exmination of the static electrification of transformer oil", Journal of Electrostatics, Vol.14, No.3, pp.309-318, 1983.
- [5] 石岡康昭 外, "油浸絶縁の劣化現象", IEEJ Trans., pp.5-13, 1984.
- [6] A. J. Morin, M. Zahn, and J. R. Melcher "Fluid Electrification Measurements of Transformer Pressboard / Oil Insulation in a Couette Charger", IEEE Trans. on electrical Ins., Vol.26, NO.5, pp.870-901, October 1991.