

## 변압기 절연유의 열화에 따른 대전특성

권동진<sup>①</sup> · 김한상<sup>\*</sup> · 정용기<sup>\*</sup> · 김경화<sup>\*\*</sup> · 김두석<sup>\*\*\*</sup> ·곽희로<sup>\*</sup> · 박동화<sup>\*\*\*\*</sup>

\* 숭실대학교, \*\* 한전기술연구원, \*\*\* 전북산업대학교, \*\*\*\* 인천대학교

### Characteristics of Static Electrification on Insulation Oil Aging

Dong-Jin Kweon<sup>①</sup> · Han-Sang Kim<sup>\*</sup> · Yong-Ki Chong<sup>\*</sup> · Kyoung-Wha Kim<sup>\*\*</sup> ·

Du-Seok Kim<sup>\*\*</sup> · Hee-Ro Kwak<sup>\*</sup> · Tong-Wha Park<sup>\*\*\*</sup>

\* Soong Sil Univ., \*\* KEPCO, \*\*\* Cheon Buk Industrial Univ., \*\*\*\* In Cheon Univ.

#### Abstract

This paper studied the streaming electrification of the U.H.V. transformer with the spinning cylinder system, and compared and analyzed it with the conventional forced flowing system which uses a pump or gas for oil flowing. Also, accumulated surface voltage in its electrified material was measured with the electrostatic voltmeter, and the effect of insulation oil aging was measured.

As results, in spinning cylinder system, characteristics of the streaming electrification to its rotational speed and oil temperature are same tendency as those of the forced flowing system and it showed the spinning cylinder system is useful to study the streaming electrification. And, aging of insulation oil increases the electricity of streaming electrification at initial stage of aging.

#### 1. 서론

전력용 변압기의 용량이 증가하고 전력 시스템의 전압이 초초고압화됨에 따라 절연유의 순환으로 인하여 발생하는 유동대전현상을 억제하기 위한 많은 연구가 행해지고 있다.<sup>1,2)</sup> 가연성 액체에 비하여 변압기에서의 유동대전현상은 액체, 고체의 양 계면이 절연을 목적으로 하고 있으며, 밀폐된 순환계내의 현상이며, 온도의 변화범위가 넓고, 복잡한 냉각구조와 과전상태 등 변압기 고유의 조건을 많이 함유하고 있는 특징을 갖고 있다.

유동대전현상은 2개의 물질이 접촉반응을 통하여 전하이동, 전하분리, 대전의 과정으로 발생하며, 일반적으로, 이렇게 발생한 전하는 공간전하, 표면전하로서는 아주 미량이지만, 그것의 이동, 축적에 의해서 높은 전위를 발생하여 전계의 집중을 일으키게 된다.<sup>3)</sup> 지금까지의 유동대전에 관한 실험들은 일반적으로 유체의 운송속도, 파이프의 길이, 구경 등과 같은 요소를 변화하므로써 대전량의 대소를 구하는 방법과 액체의 도전율, 점도, 비유전율 등의 물성을 변화시킬 때의 대전량을 조사하여, 대전기구를 알고자 하는 방법을 사용하여 왔다.<sup>4,5)</sup> 그러나, 유동대전현상을 해석

하기 위한 표준 측정절차가 없기 때문에 각 실험자들은 나름대로의 유동대전현상 모델링을 개발하여 왔으며, 측정장치 자체가 측정에 영향을 주는 경우가 있다.

본 논문에서는 절연유의 유동대전현상을 해석하고 이를 억제할 수 있는 방안을 도출하기 위하여, 유동대전현상의 모델링에 대하여 연구, 검토하고, 기존의 펌프나 가스를 이용한 강제유동식과는 달리 회전원통을 이용한 측정법에 대하여 회전원통의 회전속도, 온도, 직경 등을 변화시켜, 기존의 강제유동식에서의 대전전류와 비교, 검토하였다. 또한, 변압기내의 유체 흐름속에 물체가 놓일 경우에 유동대전에 미치는 영향을 검토하기 위하여 점지선을 유중에 침입시켜 표면전위의 변화를 측정하였다. 또한, 절연유의 열화에 따른 유동대전의 대전도를 측정하기 위하여 절연유를 가속열화시켜 열화시간에 따른 대전강도의 변화를 측정하였다.

#### 2. 실험장치 및 실험방법

절연유의 순환으로 발생하는 유동대전현상의 대전강도를 측정하기 위하여 대부분의 실험에서는 절연유에서의 정전하나 완화전류를 측정하거나, 고체로부터의 누설전류를 측정하는 방법을 흔히 사용하고 있으며, 각 실험장치는 나름대로의 장단점을 갖고 있다. 본 연구자가 채용했던 강제유동식 대전장치는<sup>6)</sup> 초고압 대용량 변압기에서의 절연유 순환계통을 가장 잘 모의한 모델이지만, 전압 인가상태의 운전조건이나 온도의 변화, 수분, 불순물의 영향 등을 고려한 실험에는 적합하지 않은 것으로 생각된다. 또한, 대전전하를 절연유에서 직접 측정할 수 없고, 대전용 파이프에서 누설되는 전류만을 측정하게 되므로 오차가 발생하기 쉽고, 전하의 발생과정과 누설과정이 중복되어 있으므로 대전현상에 대한 규명이 충분하지 못하다는 단점을 갖고 있다. 또한, 직렬식 대전장치는<sup>7)</sup> 대전전하의 측정이 테스트 파이프와 하위탱크 두 곳에서 가능하기 때문에 두 값을 비교하여 해석하기에는 용이하나, 일정 정도의 자료를 얻기 위하여 상당히 많은 양의 시료가 필요하고, 절연유의 열화에 따른 대전특성이나 대전방지제의 첨가와 같은 연구에서 장시간의 연속측정이 불가능하다는 단점을

갖고 있다.

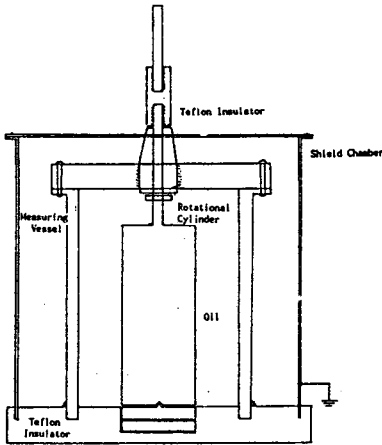


그림 1. 回轉圓筒 시스템의 概略圖

Fig. 1. Schematic diagram of the spinning cylinder system

그림 1은 변압기에서의 절연유 유동과 유사하게 금속원통 및 변압기용 프레스보드를 부착한 동축 원통 사이에 변압기 절연유를 채울 수 있도록 제작한 회전원통 시스템으로서, 두 개의 원통은 변압기 권선 및 철심사이의 냉각덕트나 라디에이터를 모의한 것이다. 본 연구에서 채택한 회전원통 시스템은 기존의 실험들이 고체를 고정하고 액체를 유동시키는데 비하여 고체를 회전시키는 방법이다. 회전원통 시스템에서도 고체가 정지하고 있을 경우에는 강제유동식 시스템과 같이 고체와 절연유의 계면에는 전기이중층이 형성된다. 이때, 고체가 회전하면 고체표면에 부착한 고착층은 유체역학 법칙에 따라 회전원통과 같은 속도로 회전하고, 확산층은 점성에 따라 천천히 운동할 것이다. 따라서, 회전원통 시스템은 강제유동식 시스템에서와 같이 전기이중층의 파괴가 일어나고, 이로 인하여 정전하가 발생한다.

회전원통은 직경에 따른 대전경향을 측정하기 위하여 길이 150 [mm], 직경 35 [mm], 32 [mm], 25 [mm]의 스테인레스 봉을 사용하였다. 고체와 액체사이의 전기이중층으로부터 전하가 발생할 수 있도록 층류에서부터 완전 난류까지 유동시키기 위하여 0~500[rpm]까지 회전속도를 조절할 수 있도록 하였으며, 회전원통과 모터와의 접촉은 전기적으로 분리하기 위하여 테프론봉(teflon pipe)으로 절연하였다. 내부원통은 직경 130[mm], 높이 180[mm]의 스테인레스를 사용하였다. 회전원통 시스템은 외부잡음의 차폐를 위하여 직경 230 [mm], 높이 220 [mm]의 스테인레스를 사용하여 차폐하였으며, 내부원통과는 테프론으로 절연하였다. 온도에 따른 유동대전의 특성과 절연유의 열화에 따른 영향을 측정하고, 외부영향을 최소화하기 위하여 실험장치는 온도챔버(temperature chamber)에 설치하였으며, 측정신호는 이중차폐 케이블을 사용하여 외란을 방지하였다.

고체와 절연유 계면에서의 전하발생은 회전원통의 회전속도로 조절되며, 회전원통과 절연유 계면의 전하가 회전원통의 회전

으로 인하여 분리되어 절연유 속으로 확산되고, 이 전하는 내부원통에 연결된 미소전류계를 거쳐 대지로 누설되어 측정되도록 구성하였다. 내부원통에 축적되는 전하의 크기를 측정하기 위하여 TREK, 모델 344의 정전전압계(electrostatic voltmeter, 측정 범위:  $\pm 2,000[V]$ )를 사용하여 표면전위를 측정하였다. 실험에 사용한 시료유는 일반 전력용 변압기에서 사용하는 광유계 절연유를 사용으며, 열화에 따른 대전특성을 연구하기 위하여 절연유를 95 [°C]로 가속열화시켜 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

액체를 강제 유동시키는 기존의 실험장치에서는 액체를 유동시키기 위하여 펌프나 가스를 필요로 하는 반면, 회전원통 시스템에서는 액체 대신 고체를 회전시키기 위하여 전동기가 필요하다. 본 연구에서는 전압 조절기로 회전속도를 제어할 수 있는 직류 전동기를 사용하였는데, 이때 회전자와 브러시와의 마찰로 인하여 발생하는 전하가 유동대전의 측정에 영향을 미치지 않도록 주의하였다.

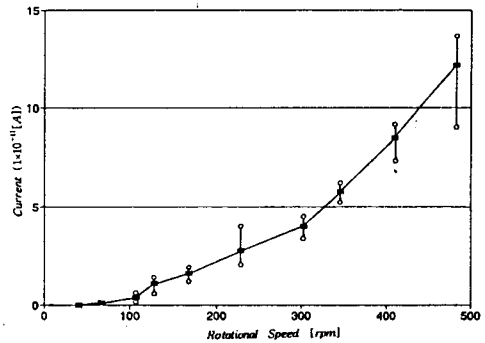


그림 2. 回轉速度 依存性

Fig. 2. Dependence on rotational speed

그림 2는 회전원통의 회전속도를 0~500[rpm]까지 변화시키면서 측정한 누설전류이다. 이때의 내부원통과 회전원통의 재질은 모두 스테인레스이며, 회전원통의 직경은 35[mm]이다. 측정시의 주위온도는 23~25[°C] 범위였다. 일정속도에서 누설전류는 수초이내에 안정이 되었으며, 이 값은 3시간 이상 계속 측정하여도 안정적인 값을 유지하였다. 회전속도가 증가할수록 누설전류는 크게 증가하여 강제유동식에서의 유동속도의 증가시 누설전류의 증가와 같은 경향을 나타내었다.

그림 3은 회전원통 시스템을 항온조에 설치하고 회전원통의 회전속도를 286 [rpm]으로 일정하게 유지하면서 온도를 20 [°C]에서 부터 95 [°C]까지 변화시킬 때의 온도의존성을 측정한 것이다. 온도의 증가에 따라 강제유동식 시스템에서와 같이 40~50 [°C] 부근에서 최대치를 나타내는 경향을 보였으며, 특히, 고온 범위에서는 대전량이 상당히 감소함을 보여, 회전원통 시스템이 유동대전을 연구하는데 적합함을 알 수 있었다.

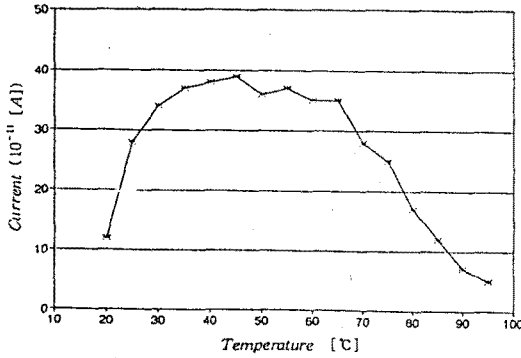


그림 3. 油溫 依存性  
Fig. 3. Dependence on temperature

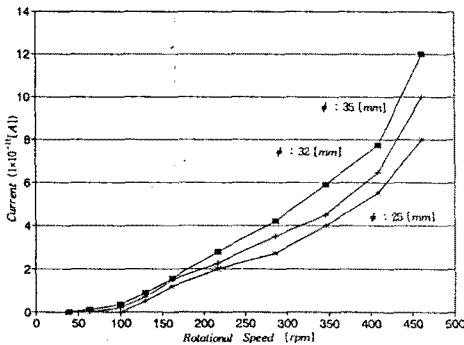


그림 4. 직경에 따른 帶電傾向  
Fig. 4. Charging tendency on the radius

그림 4는 회전원통의 직경을 35 [mm], 32 [mm], 25 [mm]로 변화시킬 경우에 회전속도에 따른 대전경향을 측정한 것으로, 회전원통의 직경이 감소됨에 따라 대전량이 감소되는 경향을 보였다. 이는 회전원통의 계면에 형성되는 전기이중층이 표면적에 비해함을 나타내는 것으로서, 실 변압기에서 유로의 접촉면적이 많을수록 발생 대전전하의 발생량이 증가할 것임을 보여주는 것이다.

일반적으로, 자유공간중에 축적된 전하는 시간의 경과에 따라 완화된다. 절연유의 순환으로 발생한 대전전하는 절연유와 고체물질에 축적됨으로써 높은 전계를 야기하여 변압기 사고의 원인이 되므로 축적 전하의 감쇄상황을 파악하는 것은 아주 중요하다. 일반적으로, 대전전하의 측정에는 대전된 시료에 프로브(probe)를 사용하여 표면전위를 측정할 수 있으며, 이 방식은 주로 고체 시료에 적용되지만, 액체시료에 대해서는 액체내에 프로브를 삽입하는 경우도 있다. 그러나 미소전류계에 의한 측정법은 발생된 전하가 미소전류계를 통하여 누설되는 전류를 측정하는 것이기 때문에 고체나 절연유에 축적되는 전하를 측정할 수 없는 단점을 갖고 있다.

그림 5는 미소전류계에 의한 측정법을 검증하고, 내부원통에 축적되는 전하의 양을 측정하기 위하여 미소전류계를 제거한 후 정전전압계로 내부원통에 축적되는 표면전위를 측정하는 것이다.

정전전압계의 프로브는 내부원통과의 간격이 멀어지면 측정되는 표면전위의 크기가 급격히 줄어들고, 노이즈의 영향을 받을 수 있으므로 내부원통에 3[mm]의 간격을 두고 설치하였다. 내부원통에 이미 전하의 축적이 있을 수 있으므로 접지상태에서 영점 조정을 하고 접지선을 제거하였는데, 이때 접지선 제거시의 접촉으로 인하여 대전이 되지 않도록 주의하였다.

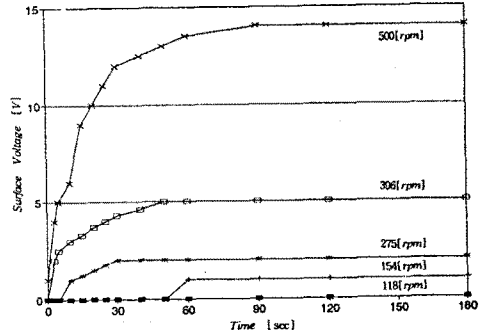


그림 5. 靜電 電位  
Fig. 5. Electrostatic potential

전동기를 회전시키면 회전원통에서 발생된 음전하는 회전원통을 접지한 접지선을 통하여 누설되고, 절연유에 발생된 양전하는 내부원통에 축적되어 표면전위로 나타난다. 이때, 회전원통의 접지선을 제거하면 회전원통에 발생된 음전하가 누설되지 못하여 축적되고, 절연유 속에 발생된 양전하량과 같으므로 정전전압계에는 표면전위가 측정되지 않았다. 이러한 현상은 미소전류계에 의한 누설전류에서도 같은 경향을 보였으며, 테프론으로 제작한 회전원통을 이용한 경우에도 대전전하가 측정되지 않았다.

회전원통의 회전속도에 따라 표면전위는 118[rpm]까지는 특별히 대전치가 측정되지 않았고, 154[rpm]부터 표면전위가 측정되기 시작하여 회전속도의 증가에 따라 표면전위도 증가하는 경향을 보였다. 일정한 회전속도에서 표면전위는 거의 1분 이내에 안정이 되었다. 회전속도에 따른 표면전위의 측정은 반복 측정시 측정치가 거의 일정하여 재현성이 아주 높았으며, 표면전위의 시간특성도 미소전류계에 의한 시간특성과 같이 표면전위가 일단 안정이 되면 측정시간의 경과에 따라 축적전하의 변화는 나타나지 않았다.

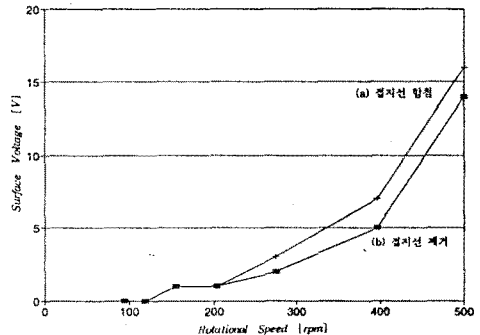


그림 6. 探針의 影響  
Fig. 6. Effects of the grounding wire

유동대전되어 있는 액체중의 전위분포는 축경이 크게 곤란하고, 축경방법도 확립되어 있지 않다. 액체중의 전위분포를 측정하기 위한 도전 탐침법은 유체속에 놓인 탐침자를 통하여, 대전된 액체중의 전하가 대지로 누설될 때의 전류를 측정하는 방법이다. 그림 6은 변압기내의 유체의 흐름속에 물체가 놓일 경우에 유동대전에 미치는 영향을 측정하고, 기존의 축경방법중 대전과이프에 도전탐침자를 설치하여 유체의 전하를 측정하는 방법을 검토하기 위하여 접지선을 유체에 함침시켜 표면전위의 변화를 측정한 것이다. 그림 6-(a)는 접지선을 함침시켰을 경우에 측정된 표면전위이고, 그림 6-(b)는 접지선을 제거하였을 경우에 표면전위를 측정한 것이다. 회전원통을 회전시켜 일정전압에 안정된 후 접지선을 함침시키면 표면전위가 2[V]정도 상승하여 포화되었고, 접지선을 제거하면 이전의 표면전위값으로 돌아가 포화되었다. 또한, 접지선을 처음부터 유체에 함침시키고 회전원통을 일정한 속도로 회전시켜도 같은 표면전위값을 나타내었다. 따라서, 유체의 흐름속에 물체가 놓이게 되면 유체의 흐름에 후류(wake)가 발생되어 유체 흐름이 매우 복잡하게 되고, 유체의 흐름속에 놓인 물체에 의하여 전하가 발생하여 표면전위가 상승된 것으로 생각한다. 따라서, 도전탐침법에 의한 절연유중의 전하 측정방법은 대전된 유체의 흐름으로부터 탐침자가 추출해 내는 전하의 양이 어느 정도인지 명확히 알 수 없으며, 액체가 유동할 때 대전되지 않았더라도 그림 6과 같이 탐침자 자체로부터 발생하는 전하의 영향을 제거할 수 없다는 것을 알 수 있다.

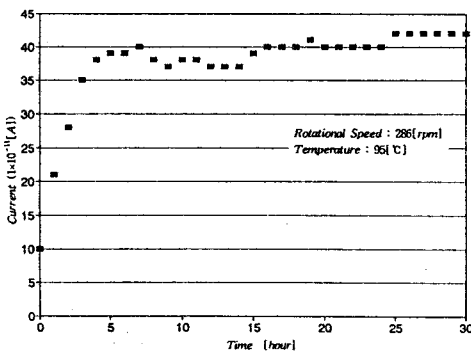


그림 7. 절연유의 열화에 따른 대전경향

Fig. 7. Charging tendency to the insulation oil aging

절연유는 변압기의 사용시간이 길어질 수록 열화되며, 절연유의 열화에 따라 유동대전 특성도 변화될 것이다. 그림 7은 절연유의 열화에 따른 유동대전의 대전도를 측정하기 위하여 절연유를 95 [°C]로 가열하여 열화 시간에 따른 대전강도의 변화를 측정한 것이다. 이때의 회전속도는 286 [rpm]이다. 절연유를 95 [°C]로 가열하였을 때, 열화에 따른 대전강도는 열화의 초기단계에서 급격히 증가되었으며, 어느정도의 시간이 지남에 따라 포화하는 경향을 나타내었다. 따라서, 변압기를 오랜기간 운전함으로써 발생하는 절연유 열화를 완화시킴으로써 대전강도의 증가를 최소화시킬 수 있으며 변압기내의 유동대전을 완화시킬 수 있을 것으로 사료된다.

회전원통 시스템은 절연유의 대전현상을 연구하는데 있어서 간단한 기계적 구조와 적은 양의 절연유만이 필요하며, 여러가지 다른 물질로 실험하기가 비교적 편리함을 알 수 있었다. 또한, 전하발생을 최소화하고, 발생전하를 가능한 빨리 완화시켜 전하 축적에 의한 정전기 방전해해를 방지하기 위한 대전 방지제의 첨가나, 변압기의 장시간 운전으로 인한 절연유의 열화에 따른 대전전하의 특성을 연속적으로 수행할 수 있는 특징이 있음을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 유동대전현상의 연구에 있어서 기존의 펌프나 가스를 이용한 강제유동식 시스템과는 달리 고체를 회전시키는 회전원통 시스템을 사용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 원통의 회전속도, 온도 등을 변화시키면서 측정된 결과, 각 요소의 변화에 따른 대전특성은 강제유동식과 같은 경향을 보여 회전원통 시스템이 유동대전을 연구하는데 적합함을 보였으며, 강제유동식에 비하여 실험장치의 기계적 구조가 간단하고, 적은 양의 절연유만이 필요하며, 여러가지 물질이 유동대전에 미치는 영향을 비교적 용이하게 검토할 수 있었다. 또한, 변압기의 장시간 운전으로 인한 절연유의 열화에 따른 대전전하의 특성을 연속적으로 수행할 수 있는 특징이 있음을 알 수 있었다. 절연유의 열화에 따른 대전강도는 열화의 초기단계에서 급격히 증가하여 포화되는 경향을 나타내었다.

#### 참고 문헌

- 1) J. L. Lauer and P. G. Antal, "Electrostatic Charge Generation during Nonuniform Flow of Hydrocarbons through Porous Insulators," Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 32, No. 3, pp.407~423, 1970.
- 2) S. Shimizu, H. Murata, and M. Honda, "Electrostatics in Power Transformers," IEEE Trans. PAS, Vol. 98, No. 4, pp.1244~1250, 1979.
- 3) M. J. Lee and J. K. Nelson, "Flow-induced Electrification and Partial Discharge Measurements in Transformer Duct Structures," IEEE Trans. EI, Vol. 26, No. 4, pp.739~748, 1991.
- 4) T. Tanaka et al., "Model Approach to the Static Electrification Phenomena Induced by the Flow of Oil in Large power Transformers," IEEE Trans. PAS, Vol. 99, No. 3, pp.1097~1106, 1980.
- 5) J. D. Cross, "Breakdown Across a Dielectric Spacer in Insulating Oil and the Role of Electrohydrodynamics in Liquid Breakdown," IEEE Trans. EI, Vol. 17, No. 6, pp.493~498, 1982.
- 6) 각 희로·권 동진·김 두석·김 재철, "제질이 변압기 절연유의 유동대전에 미치는 영향," 한국조명·전기설비학회지, Vol. 5, No. 3, pp.72~77, 1991.
- 7) 권 동진·김 두석, "수분 및 먼지의 첨가에 따른 절연유의 대전경향," 한국조명·전기설비학회지, Vol. 6, No. 5, pp.50~56, 1992.