

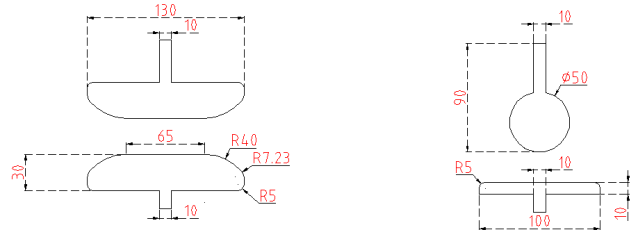
친환경 송전급 변압기 개발을 위한 식물성절연유 절연성능 분석 연구

김용한\*, 석복렬\*, 이찬주\*, 강형구\*, 김준연\*, 오훈\*, 김동해\*  
현대중공업(주) 기계전기연구소\*

Study of Analysis on Dielectric Strength of Vegetable Oil for Development of Eco-friendly Transmission Transformer

Yong-Han Kim\*, Bok-Yeol Seok\*, Chanjoo Lee\*, Hyoungku Kang\*, Joon-Yeon Kim\*, Hoon Oh\*, Dong-Hae Kim\*  
Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd.\*

**Abstract** - 최근, 친환경 물질이면서 광유에 비하여 발화점이 높은 식물성절연유에 대한 관심이 고조되고 있으며 식물성절연유변압기의 사용이 미주 등 해외시장에서 급격하게 증가되고 있다. 본 연구에서는 송전급 식물성절연유변압기 개발을 위하여 액체절연 매질의 고전압 시험법을 검토하고 전극 간 이격 거리에 따른 절연과피 시험을 통하여 식물성절연유의 절연성능을 평가하였다. Weibull 분포와 전개해석을 이용하여 2% 절연과피전압을 산출하고 전개분포를 계산하여 기존의 변압기 절연매질인 광유와 비교하였다. 본 연구 결과는 향후 식물성절연유변압기 제작에 필요한 설계 자료로 활용될 것이다.



(a) Rogowski electrodes (b) Sphere-plane electrodes  
〈그림 1〉 식물성절연유 절연과피 시험을 위한 전극 형상

1. 서 론

최근, 친환경 전력기기에 대한 요구 증대로 식물성절연유변압기 개발 관련 연구가 전세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 식물성절연유는 기존의 광유에 비하여 생분해성이 뛰어나 환경오염을 방지할 수 있고 발화점 및 연소점이 광유 대비 약 2배 정도로 높아 난연성절연유에 해당하는 것으로 알려져 있다. 또한, 변압기 내부에 설치된 고체 절연물에 함유된 수분을 흡수하여 고체절연물의 열화를 감소시키고 궁극적으로는 변압기의 열화수명을 증가시키는 것으로 보고된 바 있다 [1].

상기와 같이 식물성절연유가 갖고 있는 우수한 친환경 및 절연적 특성으로 인하여, 1998년 배전급변압기에 retro-fill 형태로 처음 적용되었으며, 매년 식물성절연유의 적용 실적이 증가되어 30,000대 이상의 배전급 식물성절연유변압기가 미주지역에서 현재 상용 운전 중이다[2]. 특히, 2000년 이후에는 고전압, 대용량변압기에도 적용되는 사례가 점차 증가하여 국내에서도 이에 대한 연구개발의 활성화가 절실히 요구되고 있다.

국내에서는 한전 전력연구원을 중심으로 배전급 변압기를 대상으로 한 식물성절연유 적용 관련 연구가 활발하게 진행된 바 있으며, 배전급 식물성절연유변압기의 시험 적용 및 송전급 식물성절연유변압기 개발을 위한 기초연구 계획이 수립된 바 있다.

본 연구에서는 상기와 같이 개발 필요성이 증대되고 있는 송전급 식물성절연유변압기 개발을 위한 사전연구로 식물성절연유의 절연성능을 분석하고 광유와 비교하였으며, 식물성절연유 적용에 따른 송전급 변압기의 절연내력 변화를 개념 설계를 통하여 확인하였다.

2. 본 론

2.1 식물성절연유의 절연성능 분석 시험 개요

본 연구에서 사용된 식물성절연유는 미국의 Cooper power system(이하 Cooper)사에서 제조한 식물성절연유인 FR3™(Fire Resistant 3)이며, 절연성능 분석을 위하여 다양한 조건 하에서의 식물성절연유 절연특성 실험 및 결과 분석을 수행하였다.

전극 간의 간격 변화에 따른 식물성절연유의 절연과피전압값을 획득하였으며, 전개해석을 통하여 각 실험에서의 최대 및 평균 전계를 계산하였다. 전개해석에는 유한요소법에 의한 전개계산 프로그램인 Maxwell을 사용하였다. 전극의 재질은 스테인레스스틸이며, 정밀 가공된 구 대 평판 전극과 로고스키 전극을 사용하였다.

본 시험에서 사용된 전극의 형상을 그림 1에 제시하였다. 또한 식물성절연유 FR3™의 물질특성은 표 1과 같다.

본 연구에서 절연과피 시험은 ASTM D1816에서 명시한 규칙에 의거하여 수행되었다. 전극 간 거리 변경에 따른 절연성능의 변화를 확인하기 위하여 그림 1의 구 대 평판 및 로고스키 전극 상단에 마이크로미터를 부착하여 전극 간 거리를 조정 가능하도록 하였다.

〈표 1〉 식물성절연유 FR3™의 주요 물질 특성

Property	Value	Test method
Dielectric strength	56kV at 25°C (2mm gap)	ASTM D1816
Relative permittivity	3.2 at 25°C	ASTM D924
Dissipation factor	0.08 at 25°C, 3.0 at 100°C	ASTM D924
Volume resistance	20×10 <sup>12</sup> Ω · cm at 25°C	ASTM D1169
Impulse strength	226kV at 25°C (3.81mm gap)	ASTM D3300
Relative density	0.92 at 2 °C	ASTM D1298
Flash point	316°C	ASTM D93
Fire point	360°C	ASTM D92
Pour point	-21°C	ASTM D97
Thermal conductivity	4×10 <sup>-4</sup> cal/(cm · s · °C)	CPS method
Heat capacity	2.1J/g/°C at 50°C	ASTM E1269
Aquatic biodegradation	100%	EPA OPPTS
Ready biodegradation	100%	835.3110

식물성절연유 내부에 용존되어 있거나 절연유를 시험용 챔버에 주유하는 과정에서 유입되는 기포 제거를 위하여 10<sup>-2</sup>torr의 진공에서 1 시간 이상 탈포공정을 수행하였다.

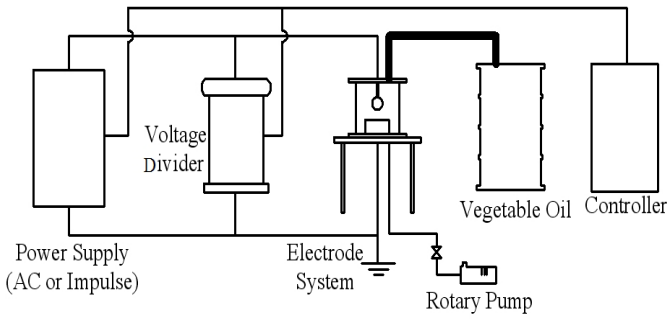
각 조건별 시험은 각 10회가 수행되었으며, 상용 확률통계 계산 프로그램인 Minitab을 사용하여 측정된 절연과피전압 데이터의 정규성 검사를 수행하고 신뢰수준 이하의 경우에는 재시험을 실시하였다. 또한 각 조건에서의 절연과피전압 데이터와 Weibull분포를 활용하여 2% 절연과피전압 및 전개분포를 계산하였다.

다음의 그림 2는 본 연구의 절연과피 시험을 위한 장치들의 개략도이다.

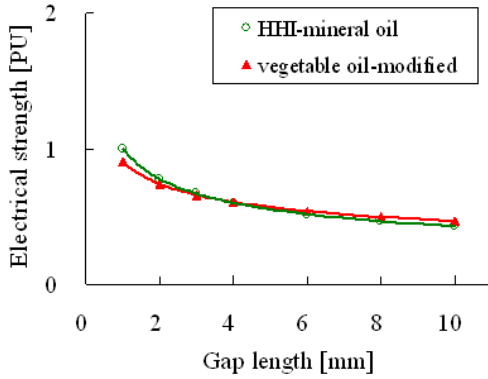
2.2 식물성절연유의 절연과피 시험 결과

구 대 평판 전극 조건에서 2% 절연과피전압을 전계로 환산한 결과와 당사 절연설계기준을 비교하여 그림 3에 제시하였다. 식물성절연유 절연과피전계 곡선은 계산된 2% 절연과피전압값에 실제 시험에서 발생한 분산값을 고려한 결과이다. 이는 송전급 식물성절연유변압기 개발 초기 제품의 신뢰성을 확보하기 위함이다. 해당 시험결과는 교류 동일전압을 1분 간 인가를 하고 절연과피가 없을 경우에 2kV씩 상승시켜 1분 간을 인가하는 방식으로 수행되었으며 이는 전력용 변압기의 내전압 시험방식과 유사하다.

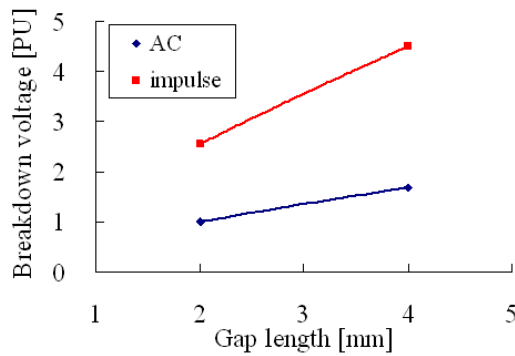
그림 4는 교류 1분 내전압 시험과 임펄스 시험 조건의 결과를 비교한 결과이며, 해당 비율은 2.64배 정도로 당사 기준에 비하여 약간 낮다.



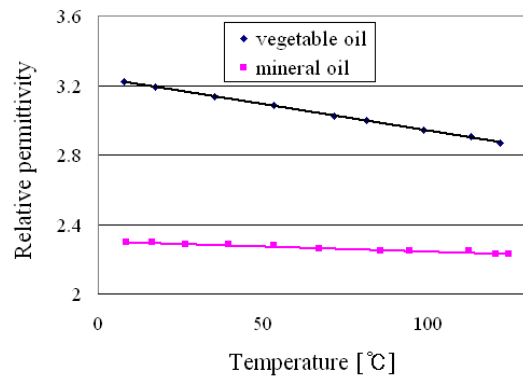
〈그림 2〉 절연파괴 시험 장치 개략도



〈그림 3〉 2% 확률의 절연파괴전계 비교



〈그림 4〉 교류 1분 시험과 임펄스 시험 결과 비교



〈그림 5〉 온도변화에 따른 식물성절연유 및 광유의 비유전율을 변화  
(Cooper社 제공 자료)

### 2.3 식물성절연유의 송전급 변압기 적용 검토

유입변압기의 절연구조는 액체절연물과 고체절연의 복합절연에 해당하므로 각 절연매질의 비유전율의 차는 매우 중요한 절연설계 요인이 된다. 즉, 유입변압기에서 사용되는 고체절연물과 액체절연 매질의 비유전율이 비슷할수록 전체 구조의 절연내력은 증가한다고 할 수 있다.

그림 5는 Cooper社 FR3™의 온도변화에 따른 비유전율을 변화 곡선이다. 식물성절연유의 비유전율은 광유와는 달리 온도가 상승함에 따라 비유전율이 급격하게 강해진다. 이에 통상적으로 사용되는 25℃에서의 비유전율값을 활용하여 전계를 계산하고 이를 근거로 절연 설계를 수행했을 경우와 과부하운전 등으로 인하여 절연유 온도가 상승한 상태를 조건으로 전계해석 및 절연설계를 수행했을 경우에는 온도 변화에 따른 유전율을 변화가 변압기 전체 절연내력의 변화를 발생시키기 때문에 제품의 절연 안전성에도 변화가 발생한다.

본 연구에서는 주위온도 30℃의 경우, 허용 권선온도에 해당하는 95℃에서의 식물성절연유 비유전율 2.95를 사용하여 154kV급 변압기 주절연부의 절연설계에 대하여 전계해석을 수행하였다. 또한 획득한 절연파괴 시험 및 분석 데이터를 토대로 154kV급 유입변압기를 식물성 절연유로 대체할 경우를 가정하여 절연설계를 수행하였다.

고체절연물의 배치를 기존 방식과 동일하게 적용한 구조에서 식물성 절연유를 적용한 경우의 설계안은 광유 적용 대비 절연내력이 8% 정도 상승하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 동일 절연내력 조건에서 해당 변압기의 주절연부 절연설계를 수행할 경우에는 주절연부의 절연 거리를 감소시킬 수 있음을 의미한다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 미국 Cooper社의 식물성절연유인 FR3™의 절연성능을 시험을 통하여 분석하고 광유와 비교하였다. 또한, 비교분석 결과를 토대로 식물성절연유를 154kV급 유입변압기 절연구조에 적용할 경우 얻을 수 있는 장점을 설계를 통하여 분석하였다.

시험결과 식물성절연유는 광유에 비하여 높은 절연내력을 갖고 있는 것으로 평가되었으며, 시험데이터의 분산 정도는 광유에 비하여 매우 큰 것으로 분석되었다. 이에 154kV급 식물성절연유변압기 개발을 위한 설계기준은 해당 분산의 정도를 감안하여 보정하였으며 이 값은 당사의 광유 절연설계 기준과 거의 동일하였다.

획득한 절연파괴 시험 및 분석 데이터를 토대로 154kV급 유입 변압기의 주절연부에 대한 절연설계를 수행한 결과, 동일 절연 거리에서는 식물성절연유변압기의 절연내력이 8% 정도 상승하는 것으로 분석되었다.

송전급 식물성절연유변압기 개발 및 실 계통 적용을 위해서는 해당 식물성절연유에서의 권선 간 절연내력의 분석, 고체 절연물 설치에 따른 절연내력 변화 분석, 연면방전에 대한 분석 및 부분방전 특성 등에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 아울러 절연적 측면과 더불어 열 및 구조적 측면에 대해서도 체계적인 연구가 공동으로 진행되어야 한다.

당사에서는 154kV급 식물성절연유 변압기 개발을 위하여 절연설계 기술 및 냉각설계기술 확보를 위한 연구를 지속적으로 수행하고 있으며, 해당 기술의 확보를 통하여 국내외 송전급 식물성절연유변압기를 개발함과 더불어 풍력발전기용 및 고속전철용 등 고온 절연 시스템이 요구되는 변압기에도 식물성절연유 적용을 긍정적으로 고려 중이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] C. Clair Claiborne, and Donald B. Cherry, "A Status Update on the Use of Natural ester(Vegetable Oil) Dielectric Fluids in transformers," 73rd Annual International Doble Client Conference, 2006.
- [2] C. Patrick McShane, and Peter G. Stenborg, "Review of In-Service Transformer Using Natural (Vegetable Oil) Ester Dielectric Fluid," 73rd Annual International Doble Client Conference, 2006.