

주상변압기 적용을 위한 친환경 식물성절연유의 절연특성 연구

곽 동 순

경일대학교 소방방재학부

(2010. 3. 20. 접수 / 2010. 11. 8. 채택)

Research on Dielectric Characteristics of Environmental-Friendly Vegetable Insulation Oil for the Pole Transformer

Dong-Soon Kwag

School of Fire and Disaster Prevention, Kyungil University

(Received March 20, 2010 / Accepted November 8, 2010)

Abstract : In recent years, environmental concerns have been raised on the use of poorly biodegradable fluids in electrical apparatus in regions where spills from leaks and equipment failure could contaminate the surroundings. The vegetable insulation oils are highly biodegradable, have negligible effect on the environment, human health and ecosystem. Therefore, to assure their safe use in electrical power systems, it may require some processing and modification to improve some of their physical, chemical, thermal and electrical properties. This paper provides a comparative results of the electrical breakdown properties of several vegetable insulation oils and mineral oil to use as dielectric fluid in environmental-friendly pole transformer. Also, the electrical breakdown property of the Nomex and kraft insulation papers in vegetable insulation oil is examined.

Key Words : vegetable insulation oil, electrical breakdown, pole transformer

1. 서 론

최근 들어 전기전력에 대한 경제성의 향상 및 기기의 소형 경량화에 대한 요구와 더불어 사회 환경을 고려해야 된다는 의식이 높아지고 있으며, 전 세계적으로 전력기기의 친환경 제품 개발이 의무화 되어가고 있다. 국내에서도 2005년 7월 ‘친환경 상품 구매촉진 법률’ 발표로 인해 친환경 변압기 개발이 확대되고 있는 추세이다. 따라서 향후에는 제품 단가뿐만 아니라 친환경적 요소도 제품 경쟁력에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

유입변압기는 본체 내부에 냉각 및 절연용도의 절연유가 주입되는 방식으로 종래에는 광유나 광유의 단점인 낮은 인화점을 개선한 실리콘유를 주로 사용하였으나, 이들 절연유는 공업유이기 때문에 본체의 결함이나 변압기의 폐기로 인하여 외부로 누출될 경우 심각한 환경오염을 야기한다는 문제점이 있었다. 따라서 유입변압기에서도 기존의 광유를 대체할 수 있는 새로운 식물성절연유에 대한

연구 개발이 활발히 진행되어 실제로 적용이 되고 있으며, 뛰어난 생분해성, 우수한 절연특성 및 고갈 걱정이 없고 안정적 공급 가능 등의 장점을 살려 그 우수성을 인정받고 있다.

미국의 경우 1990년대 말부터 Environmental Technology Verification(ETV) 프로그램으로 ABB, Cooper 등의 기관에서 전력기기용 친환경성 오일을 적극 개발하여 200 MVA급 변압기 등에 적용하였으며, 일본의 경우 관서전력에서 3R(Reduce, Reuse, Recycle) 프로젝트의 일환으로 2000년 이후 환경친화형 식물성 오일 변압기를 연구 개발하여 환경 적합성과 성능의 우수성을 검증하고 있다¹⁾.

국내에서도 한전전력연구원에서 배전용 변압기에 식물성절연유를 적용하기 위한 연구를 수행하여 기술적 타당성과 필요성, 경제성, 예상효과 등에 대한 우수성을 검증하였으며, 현재 국내 변압기 제조회사를 중심으로 친환경 식물성절연유 변압기 개발을 위한 연구가 활발히 진행 중에 있다^{2,3)}.

본 연구에서는 식물성절연유를 적용한 친환경 주상변압기 개발을 위한 기초 연구로서 식물성절연유

의 온도변화에 따른 절연파괴 특성을 조사하였으며, 이를 기존 변압기용 광유 및 기타 식용유들과 비교하였다. 또한 주상변압기의 권선 절연용으로 가장 많이 사용 중인 Kraft 및 Nomex 절연지의 식물성절연유에 대한 절연 안정성을 평가하기 위해 이들을 식물성절연유에 침적시킨 후 온도 상승에 따른 절연지의 절연파괴 특성 변화를 조사하였다.

2. 실험

2.1. 시료의 구성

본 실험에 사용된 식물성절연유는 식물의 씨앗에서 추출한 기름에 특성 향상을 위해 식용 첨가제를 혼합한 순수 식물성 기름이다. 변압기 및 커패시터용 절연유로 사용하기 위하여 개발되었으며, 발화점 및 인화점이 300℃ 이상으로 기존 광유에 비해 2배 이상 높아 과부하 운전으로 인한 변압기 화재의 위험을 최소화할 수 있다. 또한 순수 식물성이기 때문에 우수한 생분해성과 취급이 용이하다는 장점을 가지고 있다⁴⁾. 제조사에서 제공된 식물성절연유의 전기적 및 열적 특성을 Table 1에 나타내었다.

친환경 주상변압기 적용을 위해 대두된 식물성 절연유의 절연성능 비교를 위해 기존의 유입변압기 및 유입차단기 등에서 널리 사용되고 있는 제1종 2호의 천연광유를 사용하였으며, 카놀라유(canola oil), 포도씨유(grape seed oil), 대두유(bee oil), 옥수수유(corn oil), 현미유(unpolished rice oil) 등과 같은 식용유들은 국내에서 식용으로 시판중인 제품들을 사용하였다. 또한 식물성절연유에 침적된 변압기 권선 절연지의 안정성을 평가하기 위한 Kraft

(0.17mmt) 및 Nomex(0.14mmt) 절연지는 현재 광유를 사용하는 주상변압기에서 널리 적용되고 있는 상용 제품을 사용하였다.

실험에 사용된 절연유의 기포 제거를 위해 1×10³ Torr의 진공에서 1시간 이상 탈포 공정을 수행하였으며, 절연지의 수분 제거를 위해 105℃에서 4시간 동안 건조하였다.

2.2. 실험장치 및 방법

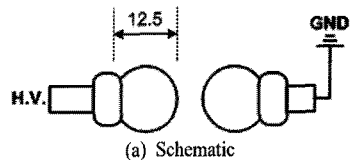
식물성절연유 및 절연지의 절연파괴 시험을 위하여 스테인리스스틸(SUS304)로 제작된 전극의 형상을 Fig. 1과 2에 나타내었다. 절연유의 절연내력 시험은 Fig. 1의 구대 구 전극을 사용하여 상용주파수에서 매초 3kV의 비율로 전압을 상승시켜 절연유의 절연파괴 전압을 측정하였다⁵⁾. 절연유의 온도 조절은 핫플레이트(hot plate)를 이용하여 상온에서부터 160℃까지 가변하였으며, 드라이아이스(dry ice)를 이용하여 0℃의 절연유를 만들어 주었다.

절연지의 절연내력 시험은 Fig. 2의 평판대 평판 전극을 사용하였으며, 절연지 1매를 평판 전극계 사이에 삽입하고 식물성절연유에 침적시킨 후 상용주파수에서 매초 1kV의 비율로 전압을 상승시켜 절연지의 절연파괴 전압을 측정하였다⁶⁾. 또한 전극 가장자리(edge)의 전계집중을 막기 위하여 로고스키(Rogowski) 전극을 사용하였다. 전극 홀더는 내구성 및 내열성이 뛰어난 fiberglass reinforced plastic (FRP)을 사용하였다.

고전압 인가를 위한 교류전원은 AC 60Hz, Max. 90kV/300VA 용량의 교류내전압시험기를 사용하여 시료의 절연파괴 전압을 측정하였으며, 결과에

Table 1. Dielectric and thermal properties of vegetable insulation oil

Properties	Values	Test method
Dielectric Strength	56 kV@25℃(2 mm gap)	ASTM D1816
Relative Permittivity	3.2@25℃	ASTM D924
Volume Resistivity	20×10 ¹² Ω·cm@25℃	ASTM D1169
Impulse Strength (sphere to sphere)	226 kV@25℃ (3.8mm gap)	ASTM D3300
Flash Point	330℃(open cup)	ASTM D92
Fire Point	360℃(open cup)	ASTM D92
Pour Point	-21℃	ASTM D97
Thermal Conductivity	4.0×10 ⁻⁴ cal/(cm.s.℃)@25℃	CPS method
Heat Capacity	2.10 J/g/℃@50℃ 2.39 J/g/℃@100℃	ASTM E1269

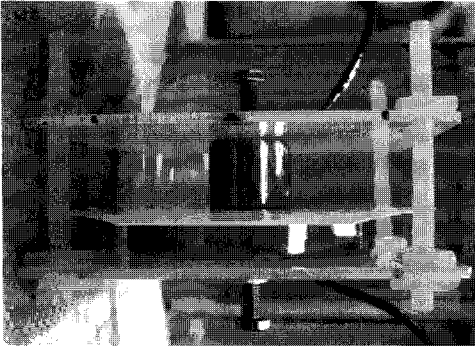
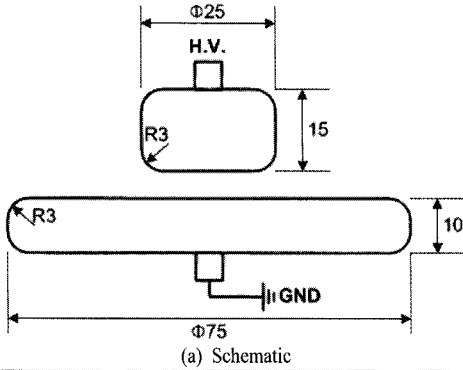


(a) Schematic



(b) Photograph

Fig. 1. Sphere to sphere electrode systems for dielectric breakdown test of insulation oil.



(b) Photograph

Fig. 2. Plane to plane electrode systems for dielectric breakdown test of insulation paper.

제시된 각 실험데이터는 10회 이상의 측정값을 최소자승법(method of least squares)으로 처리하여 오차막대(error bar) 및 추세선과 함께 그래프에 표시하여 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 상온에서 식물성절연유의 절연파괴 전압을 광유 및 5종의 식용유와 비교하여 나타내었다. 전극 간격 1mm에 대한 식물성절연유의 절연파괴 전압은 약 27.5kV로 조사되었으며, 기존 광유(≒26kV)와 비교하여 다소 높은 절연내력을 보여주었다. 한편 식용유 중에서도 카놀라유(≒32.5kV)와 포도씨유(≒27.5kV), 대두유(≒27.7kV) 등은 식물성절연유와 비교하여 유사하거나 또는 더 높은 절연파괴 전압을 보여주고 있다.

한편 변압기 내부 권선의 발열로 인해 일반적인 유입변압기의 운전온도는 상온보다 높은 약 50°C로 설계되어진다. 따라서 앞선 실험결과에서 식물성절연유 보다 높은 절연파괴 전압을 보여준 3종의 식용유에 대해서는 운전온도 범위에서의 절연성능 평가가 추가로 요구되어진다.

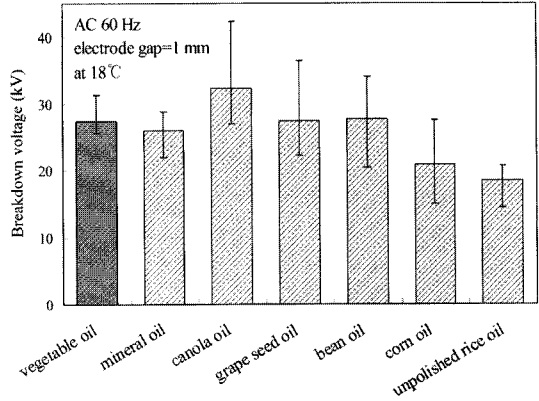


Fig. 3. Dielectric breakdown voltage of insulation oils at room temperature.

Fig. 4는 식물성절연유 및 앞서 제시된 식용유 3종에 대해 상온(18°C)과 변압기 운전온도(50°C)에서의 절연파괴 전압을 비교하여 나타내었다. 식물성절연유의 경우 온도가 상승하더라도 거의 일정한 절연성능을 보여주고 있는 반면, 식용유들의 경우에는 모두 50°C에서 절연성능이 저하되는 것으로 조사되었다. 특히 상온에서 가장 높은 값을 나타낸 카놀라유는 가장 현격한 절연성능 저하를 보여주었다. 따라서 일반적인 식용유를 유입변압기의 절연유로 사용하기에는 다소 무리가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5는 상온에서의 전극 간격에 따른 식물성절연유의 절연파괴 전압을 기존의 광유와 비교하여 나타내었다. 두 절연유 모두 전극 간격이 증가함에 따라 절연파괴 전압은 거의 선형적으로 증가하고 있으며, 식물성절연유가 광유에 비해 약 10% 정도 높은 절연파괴 전압을 보여줌으로서 상온에서의 식물성절연유의 절연성능은 광유에 비해 다소 우수한 것으로 판단된다.

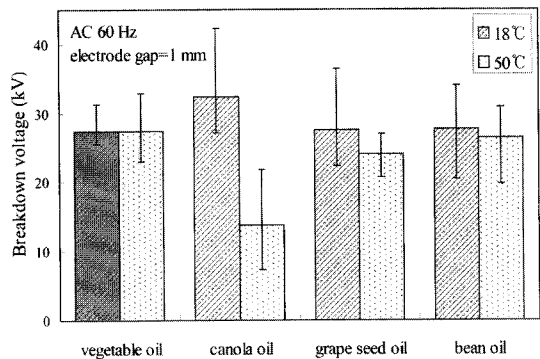


Fig. 4. Dielectric breakdown voltage change of vegetable insulation oils at room and driving temperature.

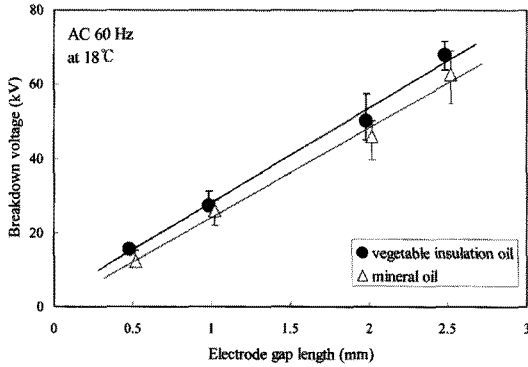


Fig. 5. Dielectric breakdown voltage of the vegetable insulation oil and mineral oil according to increase of electrode gap length.

식물성절연유는 기존 광유에 비해 점도⁴⁾가 높기 때문에 열대류에 의한 자연 냉각이 원활하지 않을 수 있다. 또한 변압기 내부 권선에서 국부적인 이상 고온이 발생할 경우 절연유의 급격한 온도상승으로 인한 절연성능의 저하를 가져올 수 있다. 따라서 식물성절연유를 변압기 절연유로 사용하기 위해서는 온도변화에 따른 열적 안정성 평가가 반드시 선행되어야 할 것이다. Fig. 6에 식물성절연유와 광유의 온도상승에 따른 절연파괴 전압의 변화를 비교하여 나타내었다. 본 실험은 전기절연유 시험방법⁵⁾에 따라 전극 간격 2.5mm의 구대 구 전극계에서 이루어졌다. 실험결과로써 두 절연유 모두 유입변압기의 운전온도 범위라고 할 수 있는 20~80°C까지는 안정된 절연내력을 보여주고 있으며, 0°C 및 120°C 이상에서는 급격한 절연성능 저하를 나타내고 있다. 또한 식물성절연유는 기존의 유입변압기에 장기간 적용되어 안정적인 사용이 입증된 광유와 비교하더라도 더 높은 값을 보여줌으로써 식물성절연유를 유입변압기에 적용함에 있어서 절연성능의 열적 안정성에 대한 문제점은 없을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 식물성절연유 속에 함침한 상용의 Kraft 및 Nomex 절연지의 절연유 온도변화에 따른 절연 파괴 전압을 나타내었다. 유입변압기의 내부구조는 철심 주위에 복수 층의 1차코일과 2차코일이 반경 방향으로 순차적으로 권선되어 있고, 2차코일의 권선부는 Kraft 또는 Nomex 절연지를 버트갭(butt-gap) 방식으로 복수 회 감아 절연하여 절연유에 함침되어 있는 구조이다. 이 외에도 각 코일 권선부의 층간 및 고·저압 권선간, 권선과 외함 사이의 대지간 절연을 위해서 제조 회사별 다양한 종류의 절

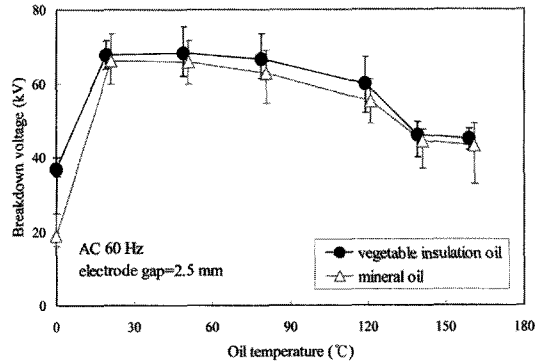


Fig. 6. Dielectric breakdown voltage of the vegetable insulation oil and mineral oil according to change of oil temperature.

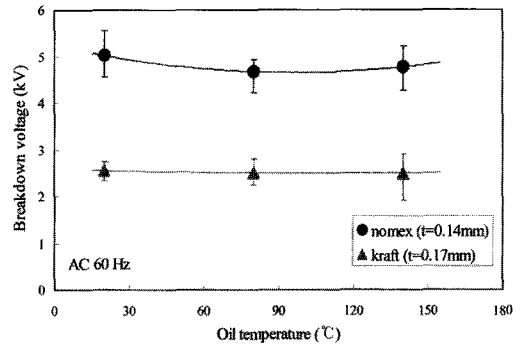


Fig. 7. Dielectric breakdown voltage of Kraft and Nomex insulation paper in vegetable insulation oil according to change of oil temperature.

연재료를 삽입한다. 따라서 유입변압기의 절연성능 확보를 위해서는 절연유 속에서 절연지의 절연 파괴 강도 또한 중요한 요소로 작용한다 할 수 있다. Fig. 7의 실험결과에서 Nomex가 Kraft에 비해 더 높은 절연파괴 전압을 보이고 있지만, 온도상승에 따른 열적 안정성에 대해서는 두 절연지 모두 일반적인 유입변압기 운전온도 범위 내에서뿐만 아니라 140°C까지 가열된 상태에서도 비교적 안정된 특성을 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구는 기존 유입변압기의 절연유로 사용되어 온 광유를 친환경 식물성절연유로 대체하기 위하여 전기적 및 열적 안정성을 검토하기 위한 연구로서, 기존 유입식 주상변압기의 구성 및 운전조건을 모의한 환경에서 온도변화에 따른 식물성절연유의 절연파괴 전압을 조사하고 광유 및 기타 식용유의 절연성능과 비교하였다.

식물성절연유는 상온에서뿐만 아니라 온도가 상승하더라도 기존의 광유보다 더 높은 절연파괴 전압을 보여줌으로서 더욱 우수한 절연성을 보여주었으며, 유입변압기 운전온도라 할 수 있는 상온에서부터 약 80℃ 부근까지는 매우 안정된 성능을 보여주고 있다. 한편, 시판중인 식용유들의 절연성을 비교한 결과 카놀라유, 포도씨유, 대두유 등은 기존 광유뿐만 아니라 식물성절연유보다 더 높은 절연성을 보여주고 있지만, 변압기 운전온도인 약 50℃에서는 급격한 성능저하를 보여 절연유로서의 사용은 불가능할 것으로 판단된다. 또한 식물성절연유에 침적된 Kraft 및 Nomex 절연지의 절연 성능 평가에서도 안정된 열적특성을 보여주었다.

감사의 글 : 이 논문은 2008년도 경일대학교 신임교원정착연구비 지원에 의하여 수행된 것임(This study was Supported by the Kyungil University Grant).

참고문헌

- 1) T. V. Oommen, "Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, No. 1, pp. 6~11, 2002.
- 2) 이병성, 박철배, 송일근, 한상옥, "식물성 절연유를 사용한 배전용 변압기의 온도변화 특성", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2060~2061, 2008.
- 3) 김용한, 석복렬, 이찬주, 강형구, 김준연, 오훈, 김동해, "친환경 송전급 변압기 개발을 위한 식물성 절연유 절연성능 분석 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1195~1196, 2008.
- 4) C. Patrick McShane, John Luksich, Kevin J. Rapp, "Retrofilling Aging Transformers with Natural Ester based Dielectric Coolant for Safety and Life Extension", IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference, pp. 1~8, 2003.
- 5) 한국산업표준(KS), "전기 절연유 시험 방법(Testing methods of electrical insulating oils)", KS C 2101, 2006.
- 6) 한국산업표준(KS), "전기 절연지 시험 방법(Testing methods of electrical insulating papers, pressboard and presspaper)", KS C 2313, 2008.