

## 친환경 변압기 절연유의 특성

한동희, 조한구, 한세원, 안명상

한국전기연구원 재료응용연구단

### Performance of environment friendly insulating dielectric oil for power transformer

Dong-Hee Han, Han-Goo Cho, and Se-Won Han, Myung-Sang Ahn

KERI

#### Abstract

This paper surveys the latest findings on vegetable-oil-based dielectric coolants in power systems. In recent years, environmental concerns have been increased on the use of poorly biodegradable mineral oils in distribution and power transformers in regions where spills from leaks and equipment failure could contaminate the surroundings. In addition, there are demands to improve equipment efficiencies in power systems. In this reason, researches were started in the mid 1990s to develop a fully biodegradable dielectric coolants. Vegetable oil was considered the most likely candidate for a fully biodegradable dielectric coolants. Vegetable-oil-based dielectric coolants provide the advantages of high level of biodegradability, renewable natural resource, non-toxic properties, enhanced fire safety, more effective cooling and good dielectric strength for many electrical equipment.

**Key Words** : transformer, vegetable oil, biodegradability, dielectric coolant, renewable resource

#### 1. 서론

1885년 미국에서 처음으로 배전급 건식변압기가 제작된 이래 1892년 광유를 적용한 변압기가 GE 사에 의해 처음으로 개발되었다. 당시 유입변압기의 냉각매체로서 광유의 성능을 향상시키려는 연구와 더불어 식물유를 이용하려는 여러 가지 실험이 이루어졌으나 식물유는 산화안정성의 부족과 높은 점도로 인한 흐름성의 부족으로 상용화되지는 못하였다.

유입변압기 냉각매체의 경우 화재에 대한 안정성을 높이기 위하여 1930년대에 할로겐화탄화수소로 이루어진 불연성 화학물질을 사용하여 상품화

를 시작하였다. 이러한 불연성 화학물질은 askarel 이란 물질로서 polychlorinated biphenyls(PCB)과 트리클로로벤젠의 혼합물이다.

1976년 PCB의 인체위험성 및 심각한 환경오염 등을 문제로 독극물질 규제법안에 따라 강도 높은 비난이 시작되었고 EPA의 규제가 가해짐에 따라 마침내 PCB의 추가적인 생산과 상업화에 대한 금지조치가 단행되었다. 이러한 계기를 바탕으로 화재에 대한 안정성을 확보할 수 있는 다른 변압기의 연구 개발이 시작되었고 대체방안으로서 PCB가 포함되지 않은 불연성 냉각매체가 개발되었다. 이러한 용도로 현재 약 10종의 냉각매체가 개발되었으나 HMWH와 실리콘 오일이 최적의 현장성능

을 나타내는 것으로 확인되고 있다.

그러나 일반적인 변압기 오일처럼 HMWH도 광유를 기초로 한 물질로서 환경규제가 심각해 질 것으로 예측되며, 실리콘 오일의 경우 비식용으로 자연적인 분해가 거의 되지 않는 단점을 가지고 있다. 이러한 먹을 수 없는 오일을 포함하는 책임위험과 환경적인 규제에 따라 결과적으로 확대된 연구개발의 노력으로 1990년대 초에 식물유에 대한 연구가 다시 시작되었다.

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

그러나 국내의 경우 아직 환경친화형 식물성 오일에 대한 연구를 수행한 실적이 없으며 이를 적용한 변압기에 대한 기술 개발 실적도 없다. 현재는 석유를 기본으로 한 합성 절연유가 개발되어 광유와 함께 사용되고 있는 상황이다.

국내 식물성 오일에 있어서 가장 많이 소비되는 대표적인 것으로는 대두유, 미강유, 유채유 및 옥수수유 등이 있다. 식물성 오일의 90% 이상이 수입에 의존하고 있는 현실을 감안할 때 고부가가치를 도모할 수 있으며 선진국의 환경규제정책과 관련되어 국내에서도 환경친화적인 전력기기에 응용 가능한 식물성 절연유의 개발이 절실한 시점이라고 판단된다.

## 2. 식물성 절연유의 기본적 특성

식물유는 지방산의 트리글리세라이드 에스테르로서 일부 식물유의 지방산 조성을 표 1에 나타내었다. 이러한 지방산의 구성성분에 따라 화학적 물리적 성질이 다르게 된다. 식물성 에스테르유는 기존의 광유가 아주 복잡한 다성분계로 이루어진데 반하여 그 구성성분이 단순명료하여 화학적 및 물리적 특성을 제어하기가 용이하다. 불포화도의 정도는 식물유의 내열성에 대한 척도이다. 산화안정도는 불포화 결합의 수가 증가할수록 엄청나게 증가한다. 이러한 불안정한 불포화 결합의 수를 줄이기 위하여 수소화반응(hydrogenation)을 이용하기

도 한다. 식물유의 산화안정도 측면에서 장기적인 사용과 성능을 발현하기 위해서는 monounsaturate의 함량이 약 80% 이상으로서 diunsaturate 또는 triunsaturate의 함량이 적어야 한다. 변압기에 있어서 도체로서 구리의 존재는 절연유의 산화를 촉진한다. 따라서 변압기에 식물성 에스테르유가 적용되기 위해서는 강력한 산화안정제의 사용이 불가피하다.

표 1. 식물유의 지방산 조성.

식물유	포화지방산 [%]	불포화지방산 [%]		
		mono	di	tri
유채유	7.9	55.9	22.1	11.1
올리브유	13.2	73.3	7.9	0.6
면실유	25.8	17.8	51.8	0.2
옥수수유	12.7	24.2	58.0	0.7
콩기름	14.2	22.5	51.0	6.8
해바라기유	10.5	19.6	65.7	-

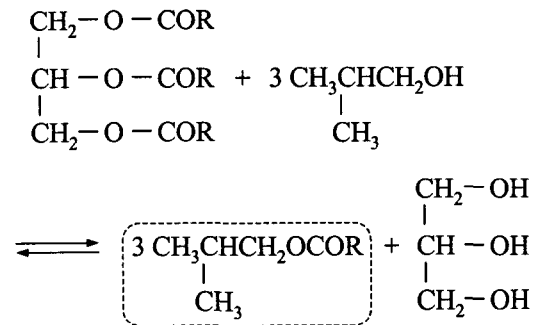


그림 1. 식물유의 에스테르교환반응.

식물성 에스테르유는 식물유와 알코올의 에스테르교환반응에 의해 얻어진다. 식물유 자체로는 점도가 높아 변압기의 냉각매체로서 효율이 떨어져 사용이 곤란하므로 위와 같은 화학반응을 이용하면 점도를 낮출 수 있다. 그 화학반응을 그림 1에 나타내었다. 그림 1과 같은 화학반응을 통하여 제조된 식물성 에스테르유는 점도가 광유의 70% 수준으로서 유동성이 좋아 냉각성능의 향상을 도모할 수 있으므로 기기의 수명을 증가시키는 효과를

기대할 수 있다.

변압기에 사용되는 식물성 절연유는 내부에서는 온도특성과 절연성능이 좋고 화학적으로 안정되어야 하며 외부적으로는 독성이 없고 생분해성이 좋아야 한다. 이러한 환경친화적인 생분해 특성을 기존의 광유 및 실리콘유와 비교하여 그림 2에 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 실리콘유는 거의 생분해가 되지 않고 광유는 약 30%정도 분해가 되는 것을 알 수 있다. 이에 비하여 식물유는 생분해도가 90% 이상으로서 환경에 덜 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

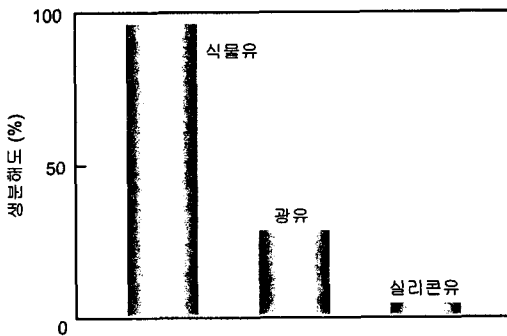


그림 2. 각종 절연유의 생분해도.

### 3. 식물성 절연유 가속열화시험

앞에서 언급한 특성 이외에도 식물성 절연유를 적용한 변압기는 절연내력의 향상으로 콤팩트한 설계가 가능하고 내열 및 난연특성이 우수하므로 화재에 대한 안정성의 확보 등 많은 장점이 있다. 이러한 식물성 절연유의 우수한 특성들이 실제로 유입변압기에 적용이 되어 장기간 사용되었을 때의 신뢰성을 확보할 필요가 있다.

표 2. 150℃ 변압기 테스트 셀에서의 가속시험결과

열화 시간 (hrs)	절연내력 (kV)		연소점 (℃)		절연지강도 유지율(%)	
	광유	식물유	광유	식물유	광유	식물유
1000	59	67	174	354	87	93
2000	62	63	168	351	70	83
4000	62	64	169	352	59	77

표 2는 작은 규모의 변압기 테스트 챔버에서 가속열화시험을 한 결과를 나타낸 것이다. 시험조건은 기존의 변압기에 사용되는 재료를 동일한 비율로 첨가한 후 150℃의 온도에서 4000시간동안 가속열화 하였다. 절연내력의 경우 기본적으로 광유보다 특성이 우수하며 열화시간에 따른 성능의 저하는 뚜렷하게 나타나지 않은 것을 알 수 있다. 연소점 또한 광유에 비하여 월등히 높으며 열화시간에 따른 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 절연지의 경우 광유보다 인장강도 유지율이 높게 나타나며 열화시간에 따라 조금씩 감소하는 경향을 볼 수 있다.

### 4. 식물유/광유 혼합계의 특성

기존에 사용 중인 변압기에 있어서 절연유를 교체할 경우 환경적인 대책으로서 식물성 절연유의 대체 가능성을 조사할 필요가 있다. 상용성의 척도가 되는 용해도 파라미터를 계산해보면 광유와 식물유의 값이 유사한 것을 알 수 있고 따라서 혼합계를 일정부분 그대로 사용할 수 있다는 것을 예측할 수 있다.

그림 3은 식물유와 광유의 혼합계에 있어서 유전특성 및 절연파괴전압의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것처럼 기존 변압기에 잔류된 광유의 함량이 20%이내에서는 순수한 식물성 절연유와 유사한 특성을 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 혼합계의 연소점에 대한 특성을 그림 4에 나타내었으며 광유의 함량이 약 10%이내에서는 양호한 특성을 나타냄을 알 수 있다.

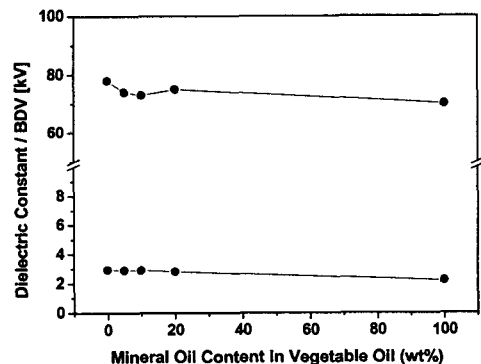


그림 3. 식물유/광유 혼합계의 전기적 특성.

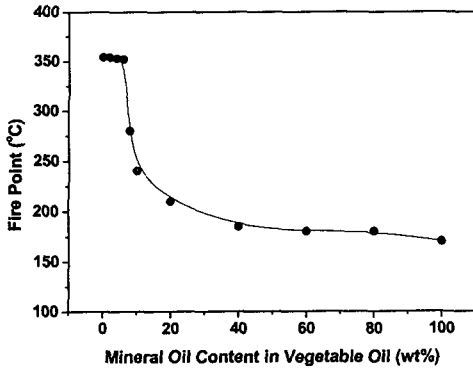


그림 4. 식물유/광유 혼합계의 연소점.

#### 4. 결 론

식물성 절연유를 적용한 변압기에 대하여 조사한 결과 성능이 우수하고 환경친화적인 제품임을 알 수 있었다. 그러나 국내의 경우 아직 환경친화형 식물성 절연유에 대한 연구를 수행한 실적이 없으며 이를 적용한 변압기에 대한 기술 개발 실적도 없다. 식물성 오일의 90% 이상이 수입에 의존하고 있는 현실을 감안할 때 고부가가치를 도모할 수 있으며 선진국의 환경규제정책과 관련되어 국내에서도 환경친화적인 전력기기에 응용 가능할 것으로 판단된다.

#### 참고 문헌

- [1] T. V. Oommen, "Vegetable Oils for Liquid Filled Transformer", IEEE Electrical Insulation Magazine. Vol. 18, No. 1, 2002.
- [2] PCB Regulations, EPA, Part 761, 40 CFR, 1979
- [3] C. P. McShane, G. A. Gauger and J. Lukich, "Fire Resistant Natural Ester Dielectric Fluid and Novel Insulation System for Its Use" Proc. IEEE/IAS Transmission and Distribution Conf., Vol. 2, pp. 890-894, 1999
- [4] K. M. Kamath, et al., "Variation of Dielectric Properties of Some Vegetable Oils in the Liquid Solid Transition Phase", Indian J. of Technology, pp. 312-313, 1971.
- [5] T. V. Oommen, "A New Vegetable Oil Based