식물성절연유의 가속열화에 따른 장기적 안정성 분석

Research of Accelerated Aging According to Long-term Stability of Vegetable Oil

최 순 호[†] · 허 창 수^{*}
(Sun-Ho Choi · Chang-Su Huh)

Abstract - The vegetable-based insulating oils are substitutes for mineral oils in oil-filled transformer. The important properties of vegetable insulating oil is their higher flash/fire point and biodegradability than conventional mineral oils. The large oil-filled transformer eliminate the risk of explosion and fire should the transformer fail and oil ignite owing to high flash/fire point of vegetable insulating oil. In addition, higher biodegradability of vegetable insulating oils can let the oil spill damage reduced. In this experiment, the real oil-filled transformers using mineral oil and vegetable oil have accelerated aging. After working on the 100% accelerated aging experiment were conducted comparing the transformer. The hottest-spot temperature using thermal coefficients were calculated to determin the degree of accelerated aging. As a result, apply mineral oil transformer in accordance with the accelerated aging life come to an end. In contrast, vegetable insulating oils showed the opposite characteristics. Vegetable insulating oil compared to the mineral oil are found to be an long life. As a result, the vegetable oil has a long-term stability.

Key Words : Vegetable insulating oils, Long-term stability, Accelerated aging

1. 서 론

과거부터 유입식 중전기에 사용되어온 광유는 지난 100여년간 장기적인 사용과 개량을 통하여 안정적인 성능을 확보하였다. 하지만 원유에서 추출되는 특성상 발화점·인화점이 높아 폭발에 대한 문제가 항상 존재하고, 절연유의 수송 과정이나 처리과정 역시 위험하다. 또한 더 나아가서 폭발 시 유출되는 광유는 생분해성이 높지 않기 때문에 환경오염을 발생시킨다는 문제점이 지속적으로 제기되어왔다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 특성을 만족시키면서 환경에 영향을 미치지 않을 절연유 개발이 당연한 수순이었고 1990년대 초반에 미국 'C사'에서 식물성절연유가 개발되었다.[1,2] 전력공급에 있어 장기적 안정성이 무엇보다 최우선시 되어야 하는 시대에 광유는 지속적인 연구와 개량을 통해 안정성을 확보하였다고 평가받지만 식물성절연유는 개발과 적용기간이(약 20년) 광유에 비해 짧기 때문에 열화에 따른 절연유의 변화와 장기적 안정성을 실험하기 위해서는 식물성절연유에 가속열화실험을 진행하여 그 안정성을 검증해야 한다. 광유의 경우에는 연구기간이 길기 때문에 이러한 데이터를 토대로 IEEE Std C57.91 (IEEE Guide for Loading Mineral - Oil - Immersed Transformers)[3]의 기준을 만들 수 있었고 이 기준을 사용하여 열화정도를 판단, 평가할 수 있다.[4]

본 논문에서는 10kVA급 유입변압기를 사용하여 광유와 같은 열화기준을 식물성절연유에 적용함으로써 가속열화를

진행하였다. 또한 실험샘플의 가속열화 계수에 따른 100%가속열화 (변압기 수명인 약 20년)를 진행한 후 실험을 진행한 변압기의 절연유를 신유로 재생을 시킨 후 뇌 임펄스 실험을 진행함으로써 가속열화에 따른 중전기의 내부 절연체(절연지, 권선)의 수명변화정도를 분석하였다.

2. 실험 방법

광유와 식물성절연유는 국내 'D사'의 제품을 사용하여 실험을 실시하였다. 외국의 경우 'C사'와 'A사' 제품을 적용하여 실제적으로 많은 적용이 되고 있고 우리나라에서도 많은 기업과 연구기관이 식물성절연유를 사용한 중전기를 개발 중이거나 이미 완료하였다. 기본적으로 식물성절연유는 인화점·발화점이 높고 생분해성이 높은 특성을 가지고 있다. 환경적인 부분에서는 생분해성이 높은 점이 큰 장점인 한편, 대형 유입변압기에서는 화재안정성이 높다는 점이 더 큰 장점으로 부각된다. 대형 유입변압기는 가격적인 측면 때문에 가스절연 변압기보다 많이 사용 되지만 절연체로 사용되는 광유는 원유를 원료로 제조하는 특성상 항상 화재의 위험성이 존재하고 있다. 이와 같은 문제로 절연유를 항상 개량을 해야 했고, 원유를 원료로 사용하지 않은 식물성절연유는 중전기의 폭발위험성 문제를 해결할 수 있다. 표 1과 같이 식물성절연유의 전기적·화학적 특성은 광유에 비해 대등한 특성을 나타내거나 더 우수한 특성을 나타낸다. 하지만 식물성절연유는 제조 시 Pour Point 저하제를 첨가하지만 광유보다 높은 유동점 특성이 단점으로 부각되고 있다. 우리나라는 지역별·계절별 기온차이가 크고 겨울철 강원도 산간지역의 경우에는 식물성절연유의 유동점보다 낮은 온도로 떨어진다. 이런 상황에서 폭설, 지진과 같은 천재지변으로 전력공급이 중단된다면 변압기 자체에서 열이 발생

* 시니어회원 : 인하대학교 전기공학과 교수

† 교신저자, 정회원 : 인하대학교 전기공학과 박사과정

E-mail : whitelily37@hanmail.net

접수일자 : 2012년 4월 19일

최종완료 : 2012년 7월 23일

하지 않기 때문에 변압기의 절연유가 고체화 될 수 있다.[5] 식물성절연유가 고체화 되면 절연내력이 감소하고 재가동 시 절연물의 절연성능을 발휘하지 못할 수 있다. 'D사'의 광유와 식물유의 열전도율(열전달특성)은 표 2와 같다. 열전도율의 측정방법은 절연유와 센서의 접촉함에 따라 다양하게 분류하였고 절연유가 액체인 점을 감안하여 레이저펄스법을 사용하여 실험을 진행하였다. 열전도도 측정장치는 Laser Flash Apparatus : 모델명 LFA (제작사 : NETZCH)을 사용하고 열전도율을 계산할 때 필요한 열용량(비열)을 측정하기 위해서는 시차주사열량계 (DSC-Differential Scanning Calorimeter : 모델명 DSC 200 F3 (제작사: NETZCH))를 사용하였다. 유입변압기가 가동할 경우 내부에서 열이 발생하므로 변압기의 유온이 상승할 것을 감안하여 상온(25℃)과 70℃에서 열전도율을 측정하였다. 열전도율 측정 시 액체시료는 고체시료와 다르게 열을 가하는 도중에 기포의 발생이나 불순물 등이 측정에 방해를 주어 고체에 비해 정확도가 떨어진다는 것을 감안하고 데이터를 분석해야 한다.[6] 상온에서는 식물유가 광유에 비해 높은 열전도율을 가지고 있지만 70℃에 도달하게 되면 광유가 식물유에 비해 높은 열전도율을 가짐을 알 수 있다. 절연유의 열전도율 수치는 변압기 내부에 존재하는 철(45 W/mK), 구리(320 W/mK)에 비해 상당히 낮기 때문에 유입변압기의 자연, 강제순환에 의한 대류작용이 없다고 가정한다면 열전도율에 차이에 따른 냉각특성의 변화 정도는 미비할 것으로 예상된다. 유입변압기의 가열 후 냉각되는 문제에 대해서는 변압기와 사용된 절연체가 같은 조건 상태이면 이러한 상황에서 열전도율이 큰 차이를 보이지 않기 때문에 냉각되는 시간에 대해서는

크게 고려할 필요가 없다.

2.2 변압기의 가속열화

유입변압기를 가속열화를 통해 내부 절연물의 열화정도를 판단하고 장기적으로 변화되는 유입변압기의 절연특성을 알아보기 위해 같은 10kVA급 유입변압기에 광유와 식물성절연유를 채운 뒤 가속열화실험을 진행하였다. 유입변압기의 특성은 단상 13.2kV/230V, 주파수는 60Hz, 전압변동률은 1.83, 효율은 97.84%(역률=1.0)이다. 절연유는 국내 'D사'에서 제작된 '1중 2호' 광유와 'Biotran-35' 식물성절연유를 사용하였다. 실험에서 유입변압기 내부에 120[℃]의 온도상승을 유도하기 위해서 변압기의 특성 임피던스 전압(385/2.92(v/%))의 185% 부하인 712V를 내부에 인가하였다. 또한 유입변압기 유온이 120[℃]에 도달하였을 경우 실험 챔버 내의 냉방장치가 작동하게 하여 유입변압기 내부의 유온이 감소하도록 하였다. 그에 따른 1Cycle 당 16시간동안 가속열화가 진행되었고, 총 300 Cycle 동안 실험을 진행시킴으로써 가속열화정도를 분석하였다.

그림 1 실험 제어 장치

Fig. 1 The experimental control device

표 1 식물성절연유와 광유의 특성

Table 1 The Properties of Vegetable and mineral insulating oils

CHARACTERSTICS		Biotran-35	mineral oil
Viscosity [cSt]	40 ℃	35.12	7.800
	100 ℃	8.010	2.240
Total Acid Value [mg KOH/g]		0.08	0.01
Dielectric Strength [kV]		78.8	75.0
Specific Gravity [15/4 ℃]		0.924	0.855
Flash Point [℃]		312	140
Pour Point [℃]		-21	-50

표 2 절연유의 열 전도도

Table 2 The heat conductivity of insulating oils

Contents	Temperature	Heat Conductivity (W/mK)	Diffusivity (mm ² /s)	Heat capacity (J/(g*K))
Mineral oil	25℃	0.214	0.125	2.003
	70℃	0.262	0.140	2.187
Biotran-35	25℃	0.245	0.141	1.877
	70℃	0.256	0.139	1.997

유입변압기 내부에 높은 부하를 걸어줌으로써 변압기 내부에 열을 발생시켰고, 절연유의 온도변화에 의한 열화를 유도하였다. 변압기 내부의 온도변화는 변화기 상부에 온도센서를 배치하여 실시간으로 측정함으로써 변화되는 온도를 파악하였다. 많은 연구를 통하여 유입변압기의 열화온도는 핫스팟의 온도로 결정되는 것이 일반적이고 그 온도는 변압기 내부의 유온에서 20 ℃정도 차이가 난다는 것을 감안하여 실험용 유입변압기의 내부 핫스팟 온도를 예측하였다. 이에 따른 핫스팟의 온도변화는 그림 1과 같고 1Cycle (약 16시간)동안 핫스팟 온도가 44~138[℃]까지 분포하게 된다. 이런 핫스팟의 온도를 통해 IEEE Std C57.91-1995의 기준에 따라 총 등가 수명열화 가속계수를 구할 수 있고 열화에 따른 수명변화를 예측할 수 있다.

그림 2 실제 변압기의 가속열화에 따른 핫스팟 온도

Fig. 2 The hottest-temperature according to accelerated aging of real oil-filled transformer

가속열화계수 F_{AA} (aging acceleration factor)은 식 1과 같이 표현된다.

$$F_{AA} = \text{EXP} \left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273} \right) \quad (1)$$

핫스팟의 온도가 110°C 이상이 되면, 가속열화계수(F_{AA})의 값이 1 이상이 되고, 110°C 미만일 경우에는 가속열화계수가 1 미만이 된다. 하지만 우리가 진행하는 실험에서는 온도가 가변하는 조건으로 실험을 실시하였으므로 식 2와 같이 등가수명을 계산하는 식 2를 적용해야 한다.

$$F_{EQA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA,n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (2)$$

F_{EQA} : 전체시간 동안에 이에 상응하는 가속계수

n : 시간 간격 t의 지수

N : 시간 간격의 총 수

Δt_n : 시간간격

$F_{AA,n}$: 시간간격 Δt_n 에 존재하는 온도의 가속열화 계수

2.3 변압기 충격실험

유입변압기의 충격실험은 변압기나 송전선에 낙뢰가 떨어지는 경우에 뇌 임펄스가 중전기에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험이다. 일반적으로 권선내부에 상용주파수 범위에서 볼 수 없는 복잡한 원인에 의한 전기적 현상에 일반적으로 권선절연이 견디는지에 대해 확인하기 위해 실험을 실시했다. KS 기준인 KS C 0902[7](변압기 충격전압 시험방법)을 적용해보면, 변압기 충격실험은 이미 완료된 새로운 변압기에 대해서 제작 공장에서 실험함을 원칙으로 하기 때문에, 수리한 변압기에 대해서는 적용을 하지 않는다. 하지만 본 실험에서 내부의 절연지와 권선의 양호함을 판단할 방법이 없기 때문에 뇌 임펄스 실험을 진행함으로써 내부 절연물의 열화에 따른 수명상태를 판단하였다. 뇌임펄스 실험 진행 전 변압기의 저항 및 철손, 동손을 측정함으로써 내부 권선의 양호함의 판별 및 변압기의 특성을 계산하였다. 측정한 후에는 반파(50%), 재단파(50%), 재단파(75%), 재단파(100%) 순으로 실험을 진행하였다. 우리나라에서의 규정

에서는 뇌임펄스 전압을 모의하기 위해서 규약 파두, 파미장은 $1.2 \times 50 [\mu s]$ 을 적용하고, 파미를 파두의 최고상승전압의 50%까지 두지 않고 파미를 절단하는 파미 절단파는 $2 \sim 6 [\mu s][7]$ 을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

핫스팟의 온도를 식 1에 적용하여 계산하면 그 온도에 맞는 각각의 가속열화계수를 얻을 수 있다. 하지만 핫스팟의 온도가 가변하는 경우에는 식 2의 식을 적용해야 하고, 그에 따른 가속열화계수의 총 합은 표 3과 같다.

표 3 16시가 부하 사이클 열화 계산

Table 3 The 16 hours load cycle aging calculation

Time	Hot - spot temp. [°C]	$F_{AA,n}$	Aging hours	cumulative age hours
1:00	71	0.0118	0.0118	0.0118
2:00	93	0.1622	0.1622	0.174
3:00	109	0.9026	0.9026	1.0766
4:00	122	3.2865	3.2865	4.3631
5:00	132	8.3935	8.3935	12.7566
6:00	138	14.4131	14.4131	27.1697
7:00	135	11.0208	11.0208	38.1905
8:00	109	0.9026	0.9026	39.0931
9:00	90	0.1156	0.1156	39.2087
10:00	76	0.0220	0.0220	39.2307
11:00	66	0.0062	0.0062	39.2369
12:00	58	0.0021	0.0021	39.239
13:00	53	0.0011	0.0011	39.2401
14:00	49	0.0006	0.0006	39.2407
15:00	46	0.0004	0.0004	39.2411
16:00	44	0.0003	0.0003	39.2414

결과적으로 가변하는 핫스팟의 온도를 계산하여 보면 한 사이클 당 가속열화계수가 39.2414라는 것을 알 수 있다. 또한 구해진 가속열화계수를 열화정도를 산정하는 식을 이용하여 유입변압기의 열화정도를 예측할 수 있다. 유입변압기의 열화정도를 구할 때에는 가속열화계수와 열화시간을 조합하였고 또한 IEEE Std C 57.91 기준에서 제시한 유입변압기 수명인 180000[hours] (약 20.55 년)을 적용하여 계산을 한다면, 식 3과 같이 가속열화를 진행한 유입변압기는 300cycle을 진행하였을 때 104% 정도의 열화가 진행되었다는 것을 계산식으로 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} \% \text{ Loss of life} &= \frac{F_{EQA} \times t \times 100}{\text{Normal insulation life}} \quad (3) \\ &= \frac{39.2414 \times 300 \text{ cycle} \times 16 \text{ hours} \times 100}{180000 \text{ hours}} \\ &= 104.6437 \% \end{aligned}$$

유입변압기 가속열화 후 변압기의 절연유를 같은 종류의 신유로 교체하였다. 그 후 변압기의 저항 및 동손, 철손을 측정한 결과 광유를 사용한 유입변압기의 경우에는 측정이

되지 않았다. 이런 결과를 통해 광유를 사용한 유입변압기의 경우 내부 절연체에 문제가 생겨 측정이 안 된다는 것을 예상할 수 있다. 그렇기 때문에 식물성절연유를 사용한 유입변압기에 뇌 임펄스 실험을 진행하였고 인가한 펄스는 반파 진행 후 재단과 50%, 75%, 100% 순으로 진행하였으며 그 결과는 그림 3~6와 같다. 충격시험을 진행함으로써 그림 6와 같이 재단과 100%에서 유입변압기 내부에 이상 현상이 발생했다는 점을 과형을 통해 알 수 있었다.

그림 3 식물성절연유를 사용한 재생변압기의 임펄스 실험(반파)
Fig. 3 The half-wave of impulse test in the vegetable oil-filled recycled transformer

그림 4 식물성절연유를 사용한 재생변압기의 임펄스 실험(재단 50%)
Fig. 4 The chopped-wave at 50% of impulse test in the vegetable oil-filled recycled transformer

그림 5 식물성절연유를 사용한 재생변압기의 임펄스 실험(재단 75%)
Fig. 5 The chopped-wave at 75% of impulse test in the vegetable oil-filled recycled transformer

그림 6 식물성절연유를 사용한 재생변압기의 임펄스 실험(재단 100%)
Fig. 6 The chopped-wave at 100% of impulse test in the vegetable oil-filled recycled transformer

4. 결 론

유입변압기에 광유, 식물성절연유를 사용하여 실험 샘플을 제작한 후 일정한 온도변화를 주기적으로 주어 가속열화를 진행하였고 그 결과를 분석하였다. 식물성절연유를 광유와 같은 기준으로 실험을 진행하여 가속열화에 따른 장기적 안정성을 확인하였다. 광유를 사용한 유입변압기의 수명은 180,000시간(약 20년)으로 알려져 있고, 가속열화가 100%이상 증가하였을 때 광유를 적용한 유입변압기는 수치상으로는 수명을 다한다는 것을 알 수 있다. 이러한 유입변압기를 내부의 절연유를 신유로 교체 후 유입변압기의 저항 및 철손, 동손을 측정하였을 때 측정이 불가능한 것으로 보아 유입변압기의 기능을 상실했음을 예상할 수 있다. 그와 반대로 식물성절연유를 적용한 유입변압기는 전기적 특성을 측정할 수 있었으며 절연유 교체 후 실험과 같은 과형 특성을 보이는 것으로 보아 재생 후에도 변압기 사용이 가능하다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 식물성절연유는 환경오염이라는 문제를 해결할 수 있는 광유의 대안책 뿐만 아니라 열화에 따른 절연특성, 장기적 수명 또한 광유보다 우수하다는 것을 실험을 통해 확인할 수 있다.

감사의 글

“본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원 대학 IT연구센터 육성지원 사업의 연구결과로 수행되었음” (NIPA-2012-H0301-12-1010)

참 고 문 헌

- [1] C. P. Mcshane, J. Corkran, K. Rapp, J. Luksich, “Natural ester dielectric fluid development update” IEEE Power & Energy society General Meeting, 1, pp. 1-6, 2009.
- [2] C. P. Mcshane, “Vegetable-oil-based dielectric coolants”, IEEE Industry Applications Magazine,

- Vol.8, No.3, pp.34-41, 2002.
- [3] IEEE Std C57.91, "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformer", 1995.
- [4] Y. I. Kim, "A Study on the Safety Diagnosis and Evaluation of Oil-immersed Transformer using Fuzzy Algorithm", The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.55, No.4, pp.190-195, 2006.
- [5] M. S. Shim, J. S. An, S. H. Choi, J. I. Jeong, T. H. Lee, C. S. Huh, "Analysis on Electrical-Mechanical Characteristics of Environment-friendly Transformer Insulation Material Accelerated Thermal Aging", The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.59, No.10, pp.1832-1837, 2010.
- [6] P. Boss, T. V. Oommen, "New insulating fluids for transformers based on biodegradable high oleic vegetable oil and ester fluid", IEE Colloquium on Insulation Liquids, pp. 7/1~7/10, 1999.
- [7] KS C 0902, "Impulse voltage testing for transformers", 2011.

저 자 소 개

최 순 호 (崔 淳 豪)

1984년 10월 12일 생. 2010년 2월 인하대학교 전기공학과 학사 졸업. 2010 ~ 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2012년 현재 동 대학교 전기공학과 박사과정

Tel : 032-860-7408

E-mail : whitelily37@hanmail.net

허 창 수 (許 昌 洙)

1955년 1월 27일 생. 1981년 인하대학교 전기공학과 학사졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983 ~ 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사) 1983년~1993년 한국전기연구원 기능재료 연구실장. 현 인하대학교 전기공학과 교수