

## 열 열화에 의한 주상변압기의 수명 손실

(Life Loss of Pole Mounted Transformers by Thermal Aging)

정종만\*, 이병성, 송일근

(Jong-Man Joung, Byeong-Seong Lee, Il-kweon Song)

### Abstract

To enhance the reliability of distribution transformers in service and to reduce the cost of maintaining and replacing these, the condition and life of those insulating system should be evaluated accurately and the time to replace should be determined economically. Since the transformer failures related to insulation failure indicates that the primary cause is normally mechanical failure of integrity due to loss of mechanical strength as a result of degradation, the tensile strength characteristics of paper during ageing under accelerated conditions in insulating oil and research trends for assessing the life of insulating paper were investigated.

### 1. 서 론

현재 국내 배전계통에서 운영되고 있는 배전용 변압기는 160만대 이상으로 주상변압기는 약 95% 정도를 차지하고 있다. 그리고 경제성장에 따른 소비전력의 증가와 더불어 매년 7% 정도의 증가 추세를 보이고 있다. 이러한 배전용 변압기는 소비자에 직접 전압을 공급하기 위해 인구밀집 지역에서 사용되고 있다. 따라서 변압기의 사고는 소비자에게 직접 영향을 주게되어 높은 신뢰성이 요구된다. 이러한 변압기를 적정시기에 유지·보수하는 것은 계통의 안정성, 안전성뿐만 아니라 경제성을 위해 매우 중요한 기술과제이다[1]~[5].

지금까지 국내 배전급 변압기는 관행적인 육안 점검 및 간단하고 주기적인 시험을 통해 운영하고 있으며, 13년을 주기로 신규교체하고 있다. 따라서 경제적이고 효율적인 운영과 유지·보수에 관한 연구가 필요하다. 또한 산업 전반에서도 주기적인 관리에서 상태기반 관리 그리고 예시적 관리로 변화하고 있는 추세이다[6][7].

경제적이고 효율적인 변압기의 운영을 위해서는 운영 중인 변압기의 수명을 정확히 평가하여 사고 위험을 배제하고 최대한 오랫동안 운영하는 것이 요구된다.

주상변압기 수량은 매년 약 7% 정도로 증가하는 추세를 보이고 있어, 전력공급의 신뢰도 향상 및 경제적인 배전설비의 운용 측면에서 배전용 변압기의 품질이나 수명주기가 중요하다. 변압기 운

용자나 설계자는 변압기가 설계되어 정상적으로 운전된다고 가정하면 수명은 약 30년 이상은 될 것이라는 것이 일반적인 견해이다. 일부 설계자에 따라서는 수명이 40년 이상은 될 것으로 주장하기도 하고, 국외 전력회사의 현장 운용 분석을 살펴보면 변압기의 고장율이 50%가 되는 시점을 수명의 종기로 판단할 때 대략 50년이 된다는 의견도 있다.

변압기의 운용상 수명은 단순히 기계적인 수명만으로 결정되는 것이 아니라 운용 중 고장이 발생하였을 때 예상되는 피해에 대해서도 함께 검토되어야 한다. 경제적이고 효율적인 운영을 위해 운전 중인 변압기 수명을 정확히 평가할 필요가 한다[8]~[10].

배전용 변압기의 수명을 정확히 평가하는 것은 쉬운 일이 아니다. 전력회사에서 변압기의 열화유형 및 고장요인에 대한 본질적인 분석, 검토가 이루어져야 하고, 고장시 발생하는 비용까지 고려되어야 한다. 따라서 변압기 수명은 변압기를 운용하는 전력회사별로 상이한 결과가 나올 수 있다는 것이다.

변압기 수명에 영향을 주는 인자는 변압기 구성 재료, 주위 온도, 부하의 크기와 시간, 수분 등과 같은 것들이 있으나, 본 연구에서는 변압기 수명에 가장 큰 영향을 미치는 운전 중 발생하는 열에 의한 절연물의 수명저하에 대해 분석하였다. 열 열화에 의한 절연지 기계적 강도 변화 측정, 절연지 또는 절연유의 열화 생성물 분석을 통해 변압기 수

명손실을 평가하는 방법들에 대한 연구동향과 기초 실험결과를 나타내었다[11]~[14].

## 2. 본 론

### 2.1. 변압기 수명평가 방법

변압기 수명추정을 위해 주로 사용하는 방법은 사용된 절연지의 인장강도를 측정하는 것이다. IEEE Std C57.91에서 제시한 수명곡선의 경우 수명기준은 절연지 초기인장강도의 50%로 하고 있다. 수명곡선에서 변압기의 선계 권선온도 상승이 65℃의 경우 100% 부하로 지속적인 운전을 하고 주위온도가 30℃일 경우 수명곡선에서 계산한 변압기 기대수명은 20년 정도 된다. 하지만 연구자들은 다양한 수명기준을 제시하고 있으며, 인장강도 외에도 가스성장속도, 중합도(DP) 등을 통해 수명곡선을 구하기도 한다. 또한, 최근에는 절연유내의 퓨란(Furan)계 생성물을 측정하거나 회복전압, 유전손실 변화 등을 측정해서 수명을 평가하는 시도도 이루어지고 있다.

하지만 제조업체별로 약간씩 다른 설계로 변압기를 생산하고 있기 때문에 열화패턴이 다르게 나타날 수 있다. 즉, 변압기 제작에 소요되는 절연물의 량과 권선의 핫스팟(hottest-spot) 온도가 상이하기 때문에 특정변압기에 대해 산정한 수명곡선이 다른 변압기에서 차이를 보일 수 있다.

### 2.2. 인장강도 측정에 따른 수명추정

변압기의 수명은 절연지의 절연내력으로 결정되는데, 열화에 따라 절연내력의 변화는 아주 느리게 진행된다. 하지만 열화와 동시에 절연지에 기계적 진동 및 단락기계력 등이 작용할 경우 절연내력은 급격히 감소하는 것으로 알려져 있다. 따라서 변압기 수명을 기계적 강도로 평가하는 것이 일반적인 연구자들의 결론이다. 변압기 수명평가를 위해 현장에서 운용중인 배전용 변압기에서 절연지를 샘플링하는 것은 사실상 불가능하므로 실험실에서 절연물에 열적인 스트레스를 가하여 열화특성을 평가하였다. 본 연구에서는 실 변압기의 열화 상태를 가장 잘 모의할 수 있는 방법으로 고안된 가속 열화 시험 장치를 활용하였다.

#### 2.2.1 시험장치

그림 1은 가속열화 시험 장치 사진이다. 변압기 권선의 과열점에서의 절연지 열화가 변압기 수명에 가장 큰 영향을 주기 때문에 그림 2와 같이 표면 온도가 균일한 히터 표면에 에너멜 권선과 절연지를 감아 열화셀을 제작하여 시험장치에 설치

하였다. 각 열화 셀은 4층(T1~T4), 4열(U1~U4)로 절연지가 설치된 4개의 셀(N1~N4)로 구성되었다.

일정 시간마다 절연지의 일부를 발취하여 기계적인 특성변화를 측정하여 수명곡선을 산출하고자 하였다.

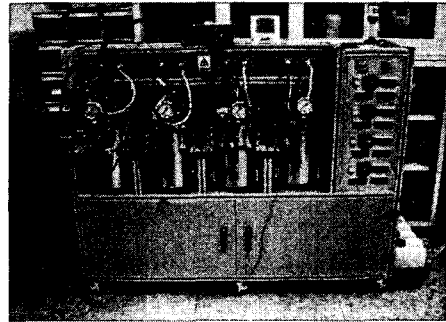


그림 1. 변압기 절연물 가속열화 시험장치  
Fig. 1. Test equipment for accelerated aging of transformer insulating materials

#### 2.2.2 시험시료 구성

사용된 절연지는 두께 0.17 mm, 폭 20 mm, 길이 250 mm의 셀룰로오스 절연지를 MD(Machine direction)방향과 XD(Cross Direction)방향으로 각 4매씩 구분하여 히터에 감았다.

절연지가 함유하고 있는 수분을 완전히 제거하기 위해 105도에서 18시간동안 건조하였으며, 절연지가 받게되는 열적스트레스 온도는 145℃로 하였다. 시험시간은 IEEE C57.91의 수명곡선을 기준으로 하여 결정하였다. 과열점 온도를 145℃로 약 62일간 운전하게 되면 55℃ 변압기의 기대수명이 다하는 것으로 계산되었다. 여기서 수명의 종기는 초기 인장강도의 50% 기준으로 하였다.

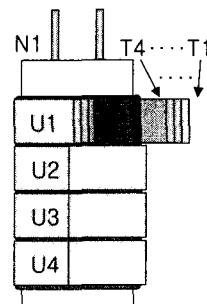


그림 2. 열화 셀 개념도  
Fig. 2. Schematic of aging test cell

#### 2.2.3 측정결과

절연지의 인장강도는 KS C 2313에 의해 측정하

였다. 그림 3은 절연지의 열화 시간에 따른 인장강도를 측정된 결과이다.

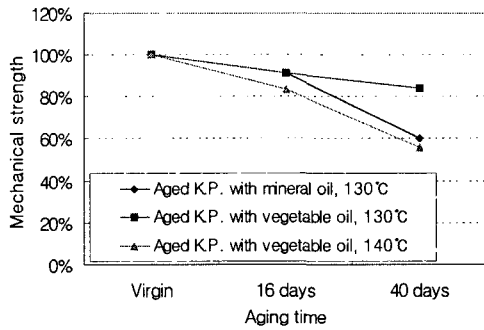


그림 3. 열화 시간에 따른 인장강도 변화와 식물유와 광유의 비교

Fig. 3. Changes in tensile strength of insulating paper with aging time and its comparison between mineral and vegetable oil

환경성이 좋은 식물유와 광유에 대한 절연지의 열화 특성을 비교하였다. 130°C에서 40일간 열화시킨 결과 광유의 경우는 절연지 인장강도가 초기의 60%까지 저하된 반면 식물유의 경우는 약 85%를 유지하였다. 식물유의 경우 점도가 커 변압기 절연유로 사용할 경우 권선의 온도상승을 초래할 수 있지만 광유에 비해 절연지의 열화특성에 있어 좋을 것이다.

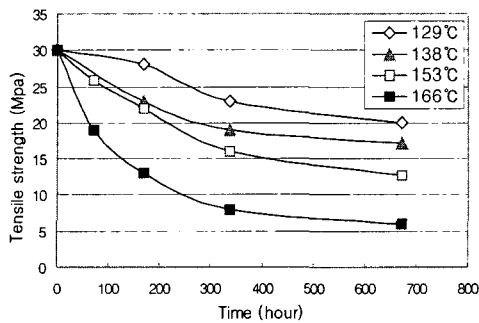


그림 4. 가속열화에 의한 절연지의 인장강도 변화

Fig. 4. Changes in tensile strength of insulating paper with accelerated aging temperature

#### 2.2.4 인장강도와 수명관계

절연지의 인장강도는 다른 특성과 같이 수분에 영향을 받는다. 따라서 ASTM에서는 25°C, 상대습도 50%의 실험환경에서 시료를 취급하도록 한다. 그리고 MD 방향에서 두드러지게 나타나는 섬유질

방향의 주름에 의한 인장강도 영향을 최소화하기 위해 XD 방향에 대하여 시험하도록 하고 있다.

그림 4는 광유에서 열화온도에 따른 절연지의 열화 특성을 나타내었다. 절연지의 인장강도는 열화 시간에 따라 대수적인 감소 경향을 나타내고 있으며 이러한 열화 특성을 기반으로 절연지의 수명을 정의 하고 있다.

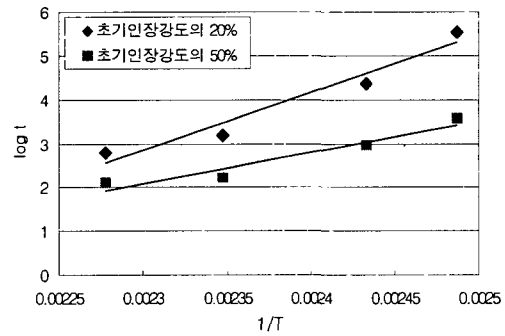


그림 5. 초기인장강도의 20%와 50%를 수명기준으로 하는 수명곡선

Fig. 5. Life curves of insulating paper when the 20% and 50% of initial tensile strength taken as criterions

그림 4와 같은 각 온도에 대한 인장강도 변화 특성으로 부터 임의의 인장강도에 대한 열화시간을 추정해 낼 수가 있다. 각 시험온도에 대한 인장강도가 초기인장강도의 20% 그리고 50%가 되는 열화시간을 구하여 x축을 온도의 역수(1/T)로 나타내고, y축을 열화시간에 상용로그(log10(t))를 취해 그림 5에 나타내었다. 각 경향선을 실선으로 나타내었을 때 선형적인 특성을 보이고 있으며, 아레니우스(Arrhenius) 반응을 이론을 따르고 있음을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 방법은 변압기 절연지의 열화 정도를 판단하는데 중요한 데이터로 활용되고 있다. 이와 같이 열에 의한 물질의 반응은 아레니우스의 반응을 이론을 따른다고 가정하고 있어 수명곡선은 다음과 같이 식 (1)과 (2)로 표현 된다.

$$\log_{10}(L) = A + B/T \quad (1)$$

$$L = A' \cdot \exp(B'/T) \quad (2)$$

L : 수명 시간, A, B : 절연지 실험 정수  
T : 권선의 과열점(Hottest-spot) 온도(K)

표 1. 수명기준에 따른 아레니우스 정수 A, B  
Table 1. Arrhenius constants A and B depending on the life criterions

	초기인장강도의 20%	초기인장강도의 50%
A	-27,411	-14,337
B	13,149	7,140
B'	30,277	16,442

### 2.3. 중합도에 의한 수명 추정

셀룰로오스 절연지는 고분자 물질로 기계적인 특성을 고분자 내에 포함된 단위체의 수인 중합도(DP, Degree of Polymerization)로 나타낼 수 있다. 따라서 중합도는 수명과 직접적인 관계가 있다. 일반적으로 신품의 중합도가 약 1000 ~ 1500을 나타내는데 절연지가 외적인 요인에 의해 경화되고 흑갈색으로 변색되면 중합도가 감소하게 된다. 초기 절연지 인장강도의 20% 정도에 해당하는 값이 약 150 ~ 200 정도의 중합도로 일반적으로 절연지 수명의 기준값으로 정하고 있다. 그림 6은 열화시간에 따른 평균중합도 변화를 측정된 결과이다. 열화 시간에 따라 절연지의 열화 특성을 잘 반영하고 있어 수명 평가를 위해 유용하게 이용될 수 있다. 하지만 절연지 샘플링을 위해 변압기 운전을 정지시켜야 하는 단점이 있으며 특히 국내 변압기의 경우 바니시 처리로 인해 샘플링 어려운 실정이다.

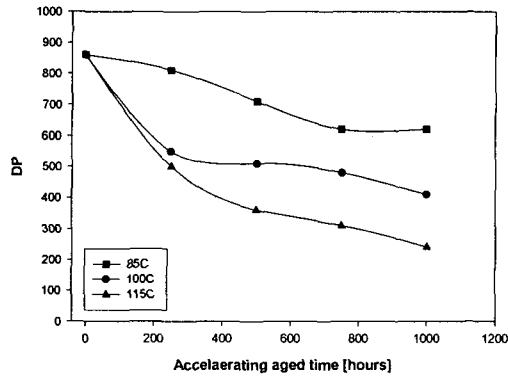


그림 6. 평균중합도와 열화시간 및 열화온도 관계  
Fig. 6. Variation of DP with aging time and temperature

### 2.4. 용존가스 분석에 의한 수명평가

변압기는 열적, 전기적 스트레스에 의해 절연유 및 절연지는 소량의 가스를 생성하게 된다. 이때

발생되는 가스는 온도에 따라 상이한 가스가 발생되게 되는데 유증가스의 구성에 따른 결합진단을 위한 방법으로 IEEE C57.104가 적용되고 있다.

결합원인에 대한 발생 가스 중에서 이산화탄소는 변압기의 정상적인 운전상태에 의한 열화를 대표할 수 있다. 그림 7은 Queensland Electricity Commission에서 1987년 이후부터 CO<sub>2</sub>화학적 분석결과를 나타낸 데이터베이스를 나타낸 것이다.

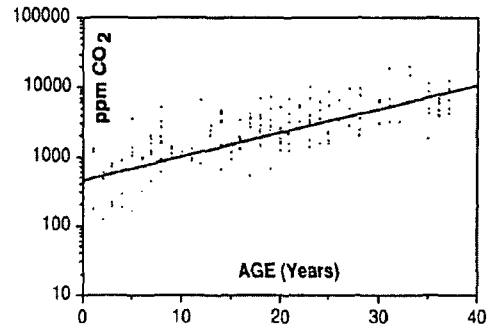


그림 7. CO<sub>2</sub>농도와 수명과의 관계  
Fig. 7. Relationships between concentration of CO<sub>2</sub> and insulating life

그림에서와 같이 이산화탄소의 농도와 수명이 상관관계를 가진다는 것을 알 수 있다. 하지만 측정값에 대한 편차가 커서 정확한 수명을 평가하기 위해서는 DP, 퓨란화합물 등의 방법을 병행하는 것이 좋을 것이다. 특히, 열화에 따른 퓨란화합물 분석[15]은 현재 연구중에 있으며 무정전 분석이 가능하고 열화시간에 따른 열화 특성을 잘 반영하는 것으로 조사되고 있다.

## 3. 결론

주상변압기의 효율적이고 경제적인 운영을 위해 변압기 절연시스템의 진단과 더불어 수명평가의 중요성이 더해가고 있다. 따라서 수명평가를 위한 절연지의 기계적 특성을 평가 하였으며, 보다 정확하고 효율적인 수명평가를 위한 국제적인 동향을 살펴보았다. 그리고 국내 주상변압기의 실정에 맞는 수명곡선을 구하기 위한 기초실험 결과를 소개하였다.

변압기 수명평가를 위해서 절연지의 인장강도 변화에 의한 추정법이 가장 간편하고 신뢰성이 있는 것으로 여겨지고 있으며 이를 변압기 수명의 기준으로 적용하고 있다. 따라서 절연지 기계적 특성을 대변할 수 있으며 분석이 용이한 방법이 개

발 되어야 할 것으로 판단된다. 현재 DP가 절연지의 기계적 강도를 가장 밀접하게 나타내고 있지만 샘플링을 위해 정전을 해야 하고 국내 변압기의 절연지 샘플링이 어려운 실정이다. 따라서 류란 생성물 분석이 용이할 것으로 판단된다.

변압기 수명은 변압기 자체 설계수명 뿐만 아니라 사용환경, 부하조건에 영향을 많이 받으므로 정확한 산출은 사실상 어렵다고 할 수 있다. 국외의 변압기 기술자들이 추정하고 있는 다양한 통계에 의하면 현재 배전용변압기의 수명을 30년 이상으로 추정하고 있다. 하지만 일부 국외 보험회사에서는 변압기 수명을 15~20년 정도로 운용하는 것이 타당하다고 주장하는 실정이다.

국내에서도 국내변압기에 대한 다양한 분석을 통해 국내 변압기 품질 및 운용 실정에 맞는 수명 평가방법과 기준을 정하는 것이 타당할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업의 일환으로 이루어 졌습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] A.J.Kachler, "On-Site Diagnosis of Power and Special Transformers", Conference Record of the 2000 IEEE Inter. Symp. on Elect. Insul., Anaheim, CA USA, pp.362-367, April 2-5 2000
- [2] M.Ali, C.Eley, A.M.Emsley, R.Heywood, and X.Xiao, "Measuring and Understanding the Ageing of Kraft Insulating Paper in Power Transformers", IEEE Elect. Insul. Magazine, pp. 28-34, 1996
- [3] Jin Zhijian, Zhu Minglin, Zhu Zishu, "Fault Location of Transformer Winding Deformation Using Frequency Response Analysis",
- [4] IEEE std C57.91-1995, "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers"
- [5] IEEE std C57.91-1981, "Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Overhead and Ppad-Mounted Distribution Transformers Rated 500kVA and Less with 6 5°C or 55°C Average Winding Rise"
- [6] A.M.Emsley and G.C.Stevens, "Review of Chemical Indications of Degradation of Cellulosic Electrical Paper Insulation in Oil-filled Transformers", IEE Proc. Sci. Measur. Techn., Vol. 141, pp.324-334, 1994.
- [7] P.J.Burton, M.Carballeira, M.Duval, C.W.Fuller, J.Graham, A.DePablo, J.Samat, and E.Spicar, "Application of Liquid Chromatography to the Analysis of Electrical Insulating Materials", CIGRE, Inten. Conf. Large High Voltage Electric Systems, Paris, France, Paper No. 12-12, 1988.
- [8] J.Unworth and F.Mitchell, "Degradation of Electrical Insulating Paper Monitered with High Performance Liquid Chromatography", IEEE Trans, Electr. Insul., Vol. 25, pp. 737-746, 1990.
- [9] R.Batruni, R.C.Degeneff, M.A.Lebow, "Determining the Effect of Thermal on the Remaining Useful Life of A Power Transformer from Its Impedance Versus Frequency Characteristic", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1385-1390, July 1996
- [10] Tapan Kumar Saha, "Review of Time-Domain Polarization Measurements for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 18, No. 4, pp. 1293-1301, October 2003
- [11] Tapan K.Saha, "Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers", IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul., Vol. 10, No. 5, pp. 903-917, October 2003
- [12] Tapan K.Saha, "Investigation of an Expert System for the Condition Assessment of Transformer Insulation Based on Dielectric Response Measurements", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 19, No. 3, pp. 1127-1134, July 2004
- [13] Walter S.Zaengl, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part 1: Theoretical Considerations", IEEE Elec. Insul. Magazine, Vol. 19, No. 5, pp. 5-19, Sept/Oct 2003
- [14] V.Ascherbrenner and T.Ucik, "Using of Parameters of RVM Measurement for Qualitive Appreciation of Power Transformers Insulation State", pp. 1829-1833
- [15] R.M.Morais, W.A.Mannheimer, M.Carballeira, J.C.Noualhaguet, "Furfural Analysis for Assessing Degradation of Thermally Upgraded Papers in Transformer Insulation", IEEE Trans. Dielec. and Elect. Insul., Vol. 6, No. 2, pp. 159-163, April 1999