

최상부 유온 상승 특성을 이용한 100 kVA 이하 유입식 배전용 변압기의 과부하 판정 기준

論 文

51A-11-4

Overload Criterion of Mineral-Oil-Immersed Distribution Transformers Rated 100 kVA and Less Using the Characteristics of Top-Oil Temperature Rising

尹 尙 潤* · 金 載 哲** · 朴 昌 浩***

(Sang-Yun Yun · Jae-Chul Kim · Chang-Ho Park)

Abstract - This paper presents the general recommendations for the overload criterions of mineral-oil-immersed distribution transformers rated 100kVA and less. For this purpose, we analyze the characteristics of top-oil temperature rising for mineral-oil-immersed power distribution transformer rated 100kVA and less, manufactured in Korea. In order to analyze the characteristics of top-oil temperature rising due to the distribution transformer loading, we performed experiments at KERI (Korea Electrical Research Institute) from December 2000 to May 2001. The restraint of ambient temperatures for the experiment results is solved using the results of foreign standards. Finally, we present the overload criterions of distribution transformer for summer and winter season, respectively.

Key Words : Overload criterion, mineral-oil-immersed distribution transformer, top-oil temperature rising

1. 서 론

산업발달에 따른 전력수요의 증가, 대도시의 전력수요 집중현상 및 수용가 전력설비의 대용량화 추세는 전력공급의 여건을 한층 악화시키는 반면 국민 생활수준의 향상과 고도 정밀산업의 급격한 성장은 전력공급의 질적 향상에 대한 사회적 요구를 더욱 크게 하고 있다. 배전계통의 최말단 전력 설비인 배전용 변압기는 수용가에 직접 전력을 공급하는 매개체이며 배전용 변압기에 의한 전력공급의 중단은 수용가 및 전력회사의 신뢰도 및 전력품질의 심각한 저하를 초래한다.

배전용 변압기의 과부하 소손 사고는 유분출 및 폭발 등을 수반함으로써 수용가로 하여금 막대한 잠재적 전력 신뢰도 저하를 야기하며 그 복구 및 재공급에 많은 시간 및 비용을 소비하게 만든다. 이러한 이유 때문에 국내외 대부분의 전력회사들에서는 각기 해당 계통의 상황에 적합한 과부하 기준을 제정하여 운용하고 있다 [1,2]. 국내의 경우 약 20여년 전에 국외에서 제정된 규격에 근거한 과부하 기준을 사용하고 있으며 최근의 배전용 변압기의 특성 변화 및 수용가의 부하 소비 패턴과는 많은 차이점을 보이는 것이 사실이다 [3]. 따라서 국내 배전용 변압기의 사양에 부합하는 개선된 과부하 기준의 제정이 요구된다.

본 논문에서는 실험을 통해 최상부 유온 상승특성을 분석하여 국내 100kVA 이하급 유입식 배전용 변압기의 과부하

판정 기준을 제시하고자 한다. 본 논문에서 다루고 있는 100kVA 이하급 유입식 배전용 변압기는 국내 배전용 변압기중 주상 설치 변압기(pole type transformer) 전체가 이 규격에 해당되며 지상 설치 변압기(pad type transformer)의 일부도 해당된다. 본 논문은 크게 4장으로 구성되어 있다. 2장에서는 현행 배전용 변압기의 과부하 판정기준 및 이의 개선점을 모색하였으며, 3장에서는 국내 배전용 변압기의 과부하에 의한 최상부 유온의 상승 특성을 분석하기 위한 실증실험에 관해 언급하였다. 한국전력공사에서 사용 중인 배전용 변압기가 용량별, 제조업체별로 수집되어 실험되었으며 실험방법으로는 일반적인 변압기 온도상승 실험법인 단락부하법이 사용되었다. 4장에서는 배전용 변압기 유온 상승에 관련된 국외 규격을 이용하여 주변온도 변화에 따른 실증실험 결과를 보완하였으며, 5장에서는 실험결과와 4장에서 보완내용 및 누적된 주변온도 데이터를 종합하여 하계 및 동계 각각에 대한 국내 100kVA 이하급 유입식 배전용 변압기의 과부하 판정 기준을 제시하였다.

2. 국내 배전용 변압기 과부하 판정기준 및 문제점 고찰

2.1. 국내 배전용 변압기 과부하 판정기준의 현황

국내 배전용 변압기의 과부하 여부의 판정은 실제 과부하가 예상되는 시점인 하계(8월) 및 동계(1월)에 실시되는 것이 아니라 변압기의 교체 작업시점인 춘계 및 추계에 실시된다. 즉, 모든 변압기는 춘계 및 추계에 향후 하계 및 동계에 예상되는 변압기의 과부하율을 예측하고 이에 따라 과부하 여부를 판정하는 구조이다. 과부하 여부 판정을 위한 요소는 변압기의 과부하율이다. 그림 1에 개별 변압기의 과부하율 산정 개요를 나타내었다. 현재 국내의 모든 수용가들

* 正 會 員 : 韓 電 力 研 究 院 委 囑 研 究 員

** 正 會 員 : 崇 實 大 工 大 電 氣 工 學 科 教 授

*** 正 會 員 : 韓 電 力 研 究 院 責 任 研 究 員

接 受 日 字 : 2001 年 11 月 30 日

最 終 完 了 : 2002 年 10 月 2 日

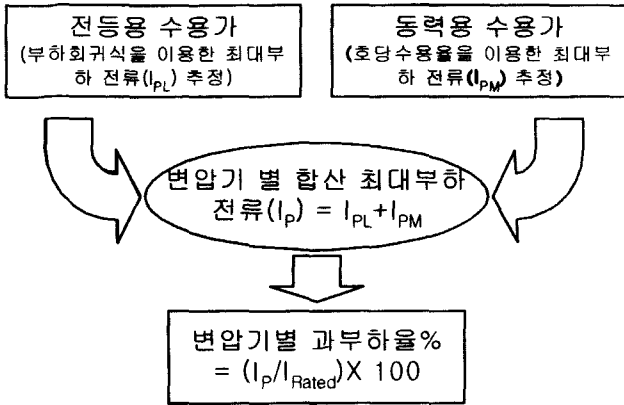


그림 1 개별 배전용 변압기의 과부하율 계산

Fig. 1 Calculation of overload rate for individual distribution transformer

표 1 국내 배전용 변압기의 결선별 과부하 판정기준

Table 1 Overload criterion of distribution transformer for each connection types in Korea

결선방식	과부하율(%)
1상 2선식 220V	130
1상 3선식 220/110V	110
3상 3선식 200V(△)	130
3상 4선식 220/110V	공용: 110 전용: 130
3상 4선식 220/380V	110(동일용량 변대)

은 전등 및 동력 수용가로 구분되어지며 이 구분근거는 한국전력공사와 각 수용가간의 계약전력, 공급방식 등에 따른다. 그림 1에서 보는 바와 같이 1개 배전용 변압기는 전등과 동력 수용가로 구성되며 전등용 수용가들의 경우 모든 수용가의 월간 사용전력량을 합산하여 월간 사용전력량(kWh)과 월간 최대부하전류(A) 간의 부하회귀식(load regression equation)에 대입하여 최대부하 전류를 추정하며 [4] 동력용 수용가들은 수용가 호수를 기준하여 작성된 호당 수용율을 이용하여 해당 월의 최대부하 전류를 추정한다 [5]. 결과적으로, 해당 변압기의 예상 최대부하 전류는 전등용 수용가 및 동력용 수용가들의 추정된 최대부하를 합산하여 계산한다.

그림 1과 같이 계산된 과부하율은 표 1의 변압기 결선별 기준에 따라 과부하 여부를 판단하는데 이용된다. 국내의 과부하 판정기준의 경우 표 1에 보는 바와 같이 130%를 기준으로 하여 100-130%를 결선 및 공급방식별로 차등 적용하고 있다. 130%의 기준 설정은 ANSI/IEEE C57.91-1981 규격 [6]의 실험 결과를 참조하여 작성된 것이다.

표 2는 국내 배전용 변압기 과부하 판정기준의 근거 자료로 사용된 ANSI/IEEE Std. C57.91-1981 규격의 실험결과 중 일부를 정리한 것이다. ANSI/IEEE Std. C57.91-1981 규격의 실험결과는 변압기의 수명손실 범위를 설정하기 위한 것으로 표 2에서 보는 바와 같이 과부하 지속시간 4시간을

표 2 ANSI/IEEE Std. C57.91-1981의 실험 결과

Table 2 Experiment results of ANSI/IEEE Std. C57.91-1981

과부하율 (%)	과부하 75%	
	시험횟수	지속시간
139	4	133
		154
165	2	
171	8	
229		169
		222
	2	8
		2

기준으로 대략 130% 수준으로 운전 시 정상수명을 유지할 수 있는 점을 들어 국내의 과부하 판정기준의 기준치는 130%로 선정되었다. 그러나, 이러한 과부하율의 선정이 변압기 수명 손실을 추정하는데 사용된 것은 아니며, 다만, 배전용 변압기의 과부하 여부만을 가름하는 기준으로 이용되었다.

2.2. 현행 과부하 판정기준의 문제점 고찰 및 개선점 모색

표 2의 실험결과는 정상수명 유지범위의 과부하율 및 지속시간 내에서의 운전은 변압기의 급작스런 온도 상승으로 인한 비정상적인(정상적인 경년열화가 아닌) 수명손실을 초래하지 않는 운전범위라는 것을 나타낸다. 즉, 이러한 기준 내에서 변압기를 운전할 경우 원래 변압기의 수명을 유지시킬 수 있다는 가정을 하고 있는 것이다. 그러나, 현행 국내 배전용 변압기 과부하 판정기준은 다음과 같은 몇 가지 문제점을 포함하고 있다.

- ① 과부하 기준인 130% 4시간은 구체적으로 변압기에 가해지는 영향의 검증 없이 사용되고 있는 규격이다. 즉, 이 기준은 변압기 제작 측면에서 제정된 규격이 아닌, 변압기 운용 측면에서 제정된 것이므로 진정한 과부하 기준이라 보기는 힘들다.
- ② 과부하 기준인 130% 과부하율은 외국의 규격을 인용한 것으로 이미 20여년 전의 기록이며 따라서, 현재 국내에 사용되는 변압기와 규격이 발표될 때 실험용으로 사용한 변압기는 특성이 많은 차이를 보일 수 있다.
- ③ 현재의 배전용 변압기 과부하 판정기준은 하계와 동계에 동일하게 적용되고 있다. 그러나 주변온도의 경우, 전세기적으로도 국내의 경우는 매우 극단적인 차이를 보이는 지역이며 변압기 온도에 많은 영향을 미치게 될 것이다. 따라서 이러한 주변온도 차이를 반영해야만 한다.

따라서, 본 논문에서는 다음과 같은 개선 목표를 설정하였다.

- 국내에 사용되는 주상변압기 규격인 100kVA 이하급 유입식 배전용 변압기의 특성과 부하 사용 패턴의 다양함을 고려한 새로운 과부하 판정 기준을 제시한다.

일반적으로 과부하에 의한 변압기 영향은 다음과 같으며 이러한 영향들이 계속되어 누적되면 수명이 단축되어 소손이 발생할 수 있다.

- ① 권선, 지지물, 리드선, 절연물 및 절연유의 온도가 허용치 이상으로 상승할 수 있다.
- ② 누설 자속 밀도의 증가로 금속 부분에 와전류가 흘러 급속부가 가열된다.
- ③ 온도 변화에 따라 절연물이나 절연유 내의 수분이나 가스량이 변한다.
- ④ 부상, 탭 절환기, 케이블 종단 접속부 및 변류기에 보다 높은 스트레스가 가해져서 설계 및 운용의 여유가 감소한다.

변압기 과부하 판정기준의 개선을 위해 과부하에 의한 변압기 충격의 매개요소 즉, 과부하에 의한 비정상적인 수명손실의 매개요소를 선정하여야 한다. 일반적으로 과부하에 의한 변압기 수명손실의 범위 및 그 정도를 판단하는 요소로 사용되는 것은 변압기 내부의 온도이며, 다음의 세 가지 온도를 기준한다 [7].

- ① 최고 온점온도(hottest spot temperature): 변압기 권선 내부의 최고 온점을 의미하며 실질적으로 변압기 수명손실에 대한 모든 규정은 이 온도를 기준으로 작성되었다. 그러나 실질적인 현장에서 계측은 현실적으로 불가능하며 연구 단위에서의 계측만이 가능할 뿐이다. 따라서 변압기 과부하 판정기준 등의 실질적 결정 수단으로 사용되기는 현실적으로 불가능하다.
- ② 평균 권선온도(average winding temperature): 변압기 권선내부의 평균온도를 의미하며 최고 온점온도와의 편차가 일정값으로 정해지므로 이 온도를 알 수 있으면 최고 온점온도를 추정할 수 있다. 하지만 실질적인 현장에서 계측하기는 현실적으로 어렵다.
- ③ 최상부 유온(top oil temperature): 현실적으로 계측할 수 있는 요소이나 이 온도만으로는 직접적인 변압기 수명손실을 추정할 수는 없다. 그러나, 정격 부하에서의 유온 상승치는 일반적으로 정해지므로 변압기 과부하 판정 기준을 정하는 데는 사용가능 하다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 매개요소로 최상부 유온을 선정하였다. 현재 변압기의 최상부 유온의 상승제한치는 50℃로 설정되어 있다. 이것은 절연물의 최고 허용온도에 의해 결정된 것으로 절연물의 최고 허용온도란, 변압기의 수명과 관련하여 절연물의 종류에 따라 그 사용온도의 한도가 정해져 있는 것을 의미한다. 표 3에는 절연물의 최고 허용 온도를 각 규격별로 나타내었다 [7].

변압기의 최상부 유온 상승 한도는 절연물의 최고 허용온도와 변압기 규격에 적용된 장소의 등가 주위온도(냉매온도)를 기초로, 변압기가 정격용량으로 운전될 경우 30년 정도의 수명을 기대 가능한 것을 전제로 정해져 있다. 변압기 각부의 온도와 냉각매체인 공기의 온도(주위온도)와의 차를 온도상승이라 하며 국내의 경우 유-온도계법에 따라 외기와 직접 절연유가 접촉할 경우(주상변압기와 같은 경우) 절연유 최상부 온도의 상승 제한치를 정격부하(100% 부하)에 대

표 3 절연물의 최고 허용온도(℃)

Table 3 Maximum permissible temperature of insulations(℃)

종류	IEC-2000	ANSI C57.12	IEG 76
A	105	105	105
B	120	-	120
C	130	150	130
D	155	185	155
E	180	220	180
F	180을 초과	220을 초과	180을 초과

해 50℃로 규정하고 있다 [7]. 이것은 표 3의 A종 절연물의 최고 허용 온도인 105℃를 기준으로 한 것이며 이 최고 허용 온도는 변압기의 최고 온점 온도(hottest spot temperature)를 기준으로 한다. 여기서, 주변온도는 가정된 최악의 경우인 40℃를 가정하고, 정격부하에서 최상부 유온과 권선 평균온도와의 편차를 약 10℃로 가정하며 권선의 평균온도와 최고 온점 온도와의 편차를 역시 5℃정도로 가정하여 최상부 유온의 절대 온도상승 제한치를 50℃로 결정(105℃-40℃-10℃-5℃= 50℃)한 것이다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같은 접근 방식으로 현행 배전용 변압기 과부하 판정기준을 개선하려 하였다.

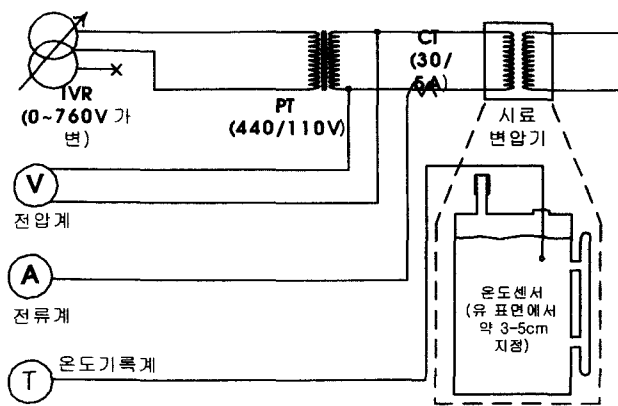
- ① 임의의 과부하율 및 그 지속시간에 따른 변압기 최상부 유온의 상승값이 기준 온도 상승값인 50℃를 초과하는 경우를 해당 변압기의 “과부하된 상태”라고 정의한다.
- ② 실증실험을 통해 국내 배전용 변압기의 과부하율 및 지속시간에 따른 최상부 유온 상승값을 조사한다.

3. 변압기의 과부하 시험

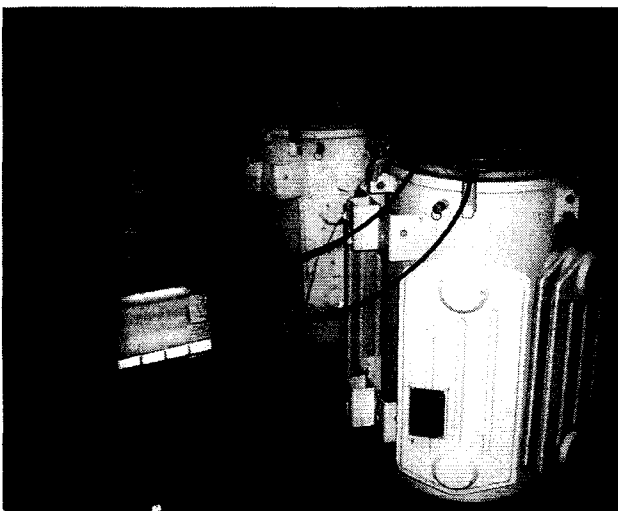
일반적으로 변압기 온도상승 시험이란 변압기를 정격부하에서 운전했을 때 유온 및 권선 온도 상승이 규격이 정하는 일정 한도 내에 있는가를 검증하는 시험으로 변압기 실용량을 검증 받는 시험이라 할 수 있다. 그러나, 본 논문에서는 정격부하는 물론 과부하 상태까지 모두 실험하며 또한, 가해지는 과부하 크기를 가변하면서 변압기의 최상부 유온 상승 특성을 시간별로 계측하는 것을 실험의 목적으로 하였다.

온도 상승 시험 방법에는 실 부하법, 반환부하법 및 단락 시험법(등가부하법) 등이 있으며 실험실에서 유입변압기의 정격상태 및 과부하 온도상승 측정을 위해서는 일반적으로 단락회로를 이용한 등가부하법을 이용한다 [7]. 부하가변 시험에 앞서 우선 부하 및 무부하 시험을 통해 동손 및 철손을 각각 측정하였다. 단락 시험법의 일반적인 순서는 다음과 같다.

- ① 2차 권선을 단락하고 1차 권선에 전손실분에 해당하는 임피던스를 공급한다.
- ② 시간당 온도변화가 1℃ 이상 상승하지 않을 때 해당 부하 크기에서 온도는 포화된 것으로 간주한다.



(a) 결선도



(b) 실제 시험모습

그림 2 배전용 변압기 최상부 유온상승 시험
Fig. 2 Top-oil temperature rising test for distribution transformer

③ 부하를 인가하기 전 주위온도와 온도 포화 후 유온과의 차이를 유온 상승값을 산출한다.

온도상승 시험은 한국전기연구원 전력시험소의 변압기 시험 설비를 가지고 시행되었으며, 시험의 결선도 및 실제 시험 모습을 그림 2(a) 및 2(b)에 각각 나타내었다. 그림 2(b)의 경우는 변압기 손실 특성이 유사한 2대를 병렬로 동시 시험하는 모습이다. 그림 2(a)에서 유온의 계측은 유 표면으로부터 3-5cm 깊이에 센서를 함침하여 측정하였으며 이는 본 논문에서 실험한 변압기가 모두 유입자냉식 변압기이므로 문제가 없다고 판단하였다.

변압기의 과부하 여부는 변압기에 가해지는 일일 부하곡선에 의해 결정된다. 변압기가 하루의 최대 부하 시간대역에서 과부하 상태가 되어 최상부 유온의 상승이 기준치를 초과했다 할지라도 변압기의 일일 기저 부하 시간대역에 진입하면 다시 유온의 냉각과정이 이루어지므로 변압기의 과부하 주기는 일일 부하 곡선의 주기와 같아진다. 따라서 일 부하 곡선상의 기저 부하 대역과 최대 부하 대역을 변압기

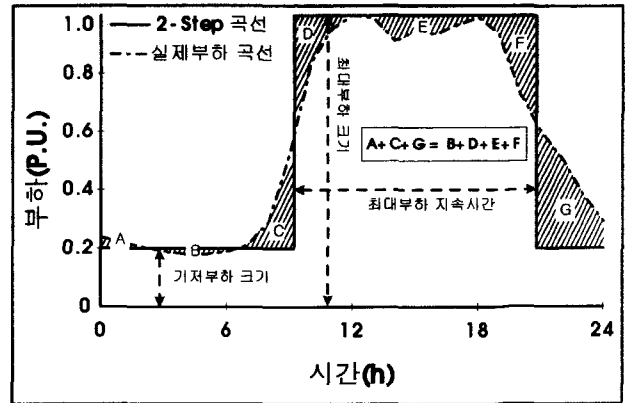


그림 3 실제 부하곡선의 2-Step 곡선
Fig. 3 2-Step curve for actual load curve

온도 상승 특성시험에 반영할 수 있는 변압기 일일 부하곡선의 정량화 작업이 필요하다. 본 논문에서는 IEC Std. 354(1971) 및 IEEE C57.91(1981) 규격에 언급되어 있는 2-Step 부하 곡선을 사용하여 실험하였다 [6,8].

그림 3은 실제 부하패턴을 2-Step 부하 곡선형태로 표현하는 방법을 도시한 것이다. 2-Step 부하 곡선의 개념은 그림 3에서 보는 바와 같이 실제 부하곡선과 에너지 측면에서 동일한 곡선이다. 따라서 빗금친 부분 중 에너지가 원래의 일 부하 곡선에서 삭감되는 A, C, G 부분과 에너지가 원래 일 부하 곡선에 추가되는 B, D, E, F 부분의 면적이 동일해야 하는 조건을 가진다. 2-Step 부하 곡선에서 변압기 온도 상승을 결정짓는 요소는 다음의 3가지이다.

- ① 변압기에 가해질 최대부하의 크기이며 '최대부하 크기'라 한다.
- ② 최대부하의 지속시간이며 '최대부하 지속시간'이라 한다.
- ③ 변압기에 가해질 기저부하의 크기이며 '기저부하 크기'라 한다.

최대부하와 기저부하의 크기를 실효치로 나타내는 등가식은 식 (1)과 같이 정의된다 [6].

$$\text{등가부하값} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}} \quad (1)$$

여기서, M_1, M_2, M_3 등은 변화하는 부하값이며 그 단위는 %, P.U., 실제 kVA, 전류값 등이 가능하다. 또한, t_1, t_2, t_3 등은 변화하는 부하값들 각각의 지속시간을 의미한다. 따라서 본 실험에서도 2-Step 부하 곡선의 특성 요소들에 따라 기저부하를 먼저 가해서 온도를 포화시킨 후 과부하의 크기 및 지속시간을 가변하며 가하는 형태로 실시되었으며 다음과 같은 실험 조건이 설정되었다.

- ① 변압기 과부하 시험은 각 시료별로 정격부하에 대한 온도상승시험을 우선 실시하며 시험의 지속시간에 대한 규정은 온도가 포화상태에 도달할 때까지로 하며, 주변은

도 및 정격부하에 대한 온도 포화 시험시의 기준은 시간 당 온도 변화가 1℃ 이하일때를 기준한다.

- ② 변압기 정격 대비 기저 부하 25%, 50% 및 75%에 대해 각각 온도 포화 후 과부하를 가한다.
- ③ 과부하는 변압기 정격 대비 100%에서 10%씩 상승시키며 160%를 최대치로 제한한다. 이것은 시료의 안전조건에 따른 조치이다.
- ④ 시험시 최상부 유온의 최대 허용치는 A종 절연물의 허용치인 105℃에 준하여 110℃로 하며 110℃에 도달할 경우 즉시 시험을 중단한다. 이것은 시료의 안전조건에 따른 조치이다.
- ⑤ 압력 팽창으로 변압기 방압변에서 절연유가 분출될 경우 즉시 시험을 중단한다. 이것은 실험실 및 시료의 안전조건에 따른 조치이다.

시험에 이용된 시료 변압기는 총 20대이며 시험결과의 현장적용을 위해 시험 시료 추출 당시 한국전력공사의 운전중인 변압기를 대상으로 하였다. 변압기는 30, 50, 75 및 100kVA 용량별로 각 5대씩 추출하였으며 추출된 변압기의 일반적 특징은 표 4와 같다. 표 4에서 볼 수 있듯이 모든 시료 변압기들은 정격 부하에서의 최상부 유온의 온도상승 기준치인 50℃를 만족하고 있다. 용량별로 5대씩 추출된 변압기는 그 제조년도 별로 1-2년된 신품부터 7-8년된 경년품까지 다양하게 추출하였으며, 동일 용량 변압기에 대해서는 각기 다른 제조업체를 선정하였다.

시험결과 중 30kVA 변압기에 대한 결과만을 표 5에 나타내었다. 표 5의 실험결과는 각 시료 변압기에 대한 시간대별 온도 상승값을 기록한 것이다. 표 5의 실험결과는 전반적으로 과부하율이 높아질수록 시간대별 온도상승율이 높아지는 경향을 보이고 있으며 이것은 직전부하가 높을수록 또한 빠른 상승률을 보인다. 즉, 직전부하 50%일때보다 75%일때가 온도상승율이 높으며 50%일때보다 25%일때가 온도상승율은 낮음을 볼 수 있다.

실험결과 중 몇 가지 경우가 전술한 전반적인 실험결과에서 벗어나고 있으며 그 원인을 다음과 같이 분석하였다.

- ① 시료 #1의 과부하율 120% 및 130%의 경우가 1시간 과부하 시 일반적인 경향을 벗어나고 있는 이유: 실험 시 실험원 및 계측기에 의한 측정오차 내지 시료특성에 의한 결과라고 생각되며 2시간 이후부터 나머지 시간대에서는 전술한 일반적 경향을 유지하고 있다.
- ② 시료 #3의 130% 과부하와 시료 #4의 140% 과부하의 경우 그 특성이 일반적인 경향을 벗어나고 있는 이유: 두 시료의 용량은 동일한 30kVA이지만, 표 4에서도 볼 수 있듯이 100% 포화시험 결과 최상부 유온의 온도상승 특성상에 차이가 존재하며 이것이 원인이 되는 것으로 판단된다. 그러나 표 9의 궁극적인 과부하 기준은 직전부하와 과부하율이 같은 것끼리의 실험결과의 평균값에 기초하여 도출된 것이므로 전반적인 경향을 유지하는데 큰 문제는 없을 것이라 판단하였다.

표 4 시험에 이용된 시료 변압기 구성

Table 4 Composition of test transformers using the experiments

번호	용량(kVA)	시료번호	제조회사	1차전압정격	2차전압정격	철심 Type	극성	100% 포화시험 결과 (최상부유온 상승치℃)
1	30	#1	D1사	12600	230/115	권철심	감극성	45.7
2	30	#2	S1사	12600	230/115	권철심	감극성	39.6
3	30	#3	J1사	12600	460/230	권철심	감극성	43.5
4	30	#4	D2사	12600	230/115	권철심	감극성	39.7
5	30	#5	W사	12600	460/230	권철심	감극성	41.9
6	50	#1	H사	12600	460/230	권철심	감극성	44.6
7	50	#2	S2사	12600	230/115	권철심	감극성	43.6
8	50	#3	P사	12600	230/115	권철심	감극성	42.9
9	50	#4	D2사	12600	460/230	권철심	감극성	40.1
10	50	#5	S2사	12600	460/230	권철심	감극성	44.1
11	75	#1	S3사	12600	460/230	권철심	감극성	45.6
12	75	#2	S4사	12600	460/230	권철심	감극성	46.3
13	75	#3	S5사	12600	230/115	권철심	감극성	45.8
14	75	#4	J2사	12600	230/115	권철심	감극성	44.2
15	75	#5	D3사	12600	230/115	권철심	감극성	48.5
16	100	#1	H사	12600	230/115	권철심	감극성	49.2
17	100	#2	J1사	12600	460/230	권철심	감극성	45.7
18	100	#3	S1사	12600	230/115	권철심	감극성	50.0
19	100	#4	S2사	12600	230/115	권철심	감극성	49.4
20	100	#5	D4사	12600	230/115	권철심	감극성	48.0

표 5 30kVA 변압기의 실험 결과

Table 5 Test results of 30kVA transformer

시료번호	적전부하 (%)	과부하 지속시간 과부하율(%)	1시간	2시간	3시간	4시간	5시간	6시간	7시간	8시간
			#1	50	100	20.0	26.0	30.0	34.1	35.8
#1	50	110	22.5	32.4	40.4	45.4	49.6	53.4	55.2	57.4
#1	50	120	29.4	36.5	43.0	46.8	49.9	52.6	54.4	55.9
#1	50	130	27.8	38.5	45.7	51.3	54.6	58.4	60.4	62.5
#1	50	140	31.4	44.4	53.6	59.8	65.3	69.1	72.6	74.3
#1	50	150	33.1	44.6	59.4	67.1	73.3	78.9	80.7	83.1
#1	50	160	39.6	55.1	67.1	73.6	81.3	85.0	87.8	88.6
#2	50	100	21.1	25.8	30.1	32.6	34.3	36.0	37.8	38.5
#2	50	110	24.4	32.9	39.1	43.5	46.7	48.6	50.5	52.3
#3	50	120	30.5	40.0	47.6	51.6	55.2	58.1	60.1	60.4
#3	50	130	34.3	44.8	53.1	58.1	62.3	65.0	67.2	69.1
#4	50	140	29.2	41.0	48.7	53.7	59.1	62.8	65.7	67.7
#4	50	150	31.5	44.0	52.7	58.6	62.7	65.4	68.3	71.3
#5	50	160	39.2	55.8	66.6	72.6	77.9	79.6	82.4	83.7
#2	25	100	14.2	21.8	26.6	29.7	32.4	34.1	36.0	37.3
#1	25	130	24.1	36.1	45.7	51.1	56.2	60.0	61.9	63.7
#5	25	160	36.3	51.7	61.5	70.1	77.6	82.3	86.2	88.0
#1	75	100	32.6	35.7	37.7	39.7	41.1	41.9	42.3	42.5
#3	75	130	43.8	52.6	59.2	63.6	66.7	69.6	70.5	71.6
#1	75	160	49.7	62.9	72.4	78.4	81.4	86.9	89.2	91.1

4. 주변온도 변화 문제에 대한 실험결과와 보완

실험에서의 주변온도는 각각의 실험 경우별로는 실험 시작에서 종료까지 일정한 값이 유지되도록 하였으나 실험이 경과함에 따라 전체 실험의 경우들에 대해 10-20℃의 주변온도 변화요인이 발생한다는 문제점이 발생하였다. 또한 급변 실험이 동계에 실시됨에 따라 하계의 예상되는 주변온도 상승을 고려하면 하계에도 본 실험의 결과를 그대로 적용할 수 있는지 여부를 검증할 필요성이 제기되었다. 따라서 본 연구에서는 이러한 주변온도 문제점을 IEEE Std. C57.92(1981) 규격의 실험결과를 토대로 보완하였다. 즉, 다음과 같은 목적을 가지고 IEEE Std. C57.92(1981) 규격을 검토하였다.

- 동일한 과부하 조건(24시간, 8시간, 4시간 일정 크기의 과부하를 가압시)에서 각 주변온도가 변화함에 따라 유온상승특성이 달라지는가를 알아보기 위한 목적

IEEE Std. C57.92(1981) 규격의 실험결과는 동일 주변온도에 대해 동일한 부하(P.U.)값에 대한 최상부 유온의 상승치 데이터를 비교할 수 있도록 공개되지는 않고 있으며, 단지 동일한 주변온도 상황에서 서로 다른 부하값들에 대한 최상부 유온 상승치 자료만을 공개하고 있다. 표 6에는 이러한 공개된 실험 결과값들 중 24시간 과부하 인가시의 결과를 나타내었다.

표 6에서 보는 바와 같이 동일한 부하값에 대한 주변온도 변화시의 유온값을 공개하고 있지 않으므로 주변온도 변화시의 동일 과부하에 의한 유온상승의 비교가 불가능하다.

표 6 IEEE Std. C57.92(1981) 규격의 실험결과(24시간 과부하 가압시)

Table 6 Experiment results of IEEE Std. C57.92(1981)(24 hour)

주변온도 0℃		주변온도 10℃		주변온도 20℃		주변온도 30℃		주변온도 40℃	
부하	유온	부하	유온	부하	유온	부하	유온	부하	유온
1.28	76	1.20	79	1.11	83	1.02	87	0.92	90
1.44	88	1.36	92	1.28	96	1.20	99	1.11	103
1.48	93	1.41	96	1.34	100	1.25	103	1.17	107
1.54	97	1.46	101	1.39	105	1.31	108	1.23	111
1.59	102	1.52	106	1.45	109	1.37	113		
1.65	107	1.58	111	1.50	114				

따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해, 본 논문에서는 이 규격의 실험결과를 각 주변온도(0℃, 10℃, 20℃, 30℃, 40℃)에 대해 식 (2)의 선형 회귀식을 이용하여 부하값과 최상부유온의 관계식을 만들어 우선 선형 회귀식에 의해 임의의 부하값에 대한 온도 상승값을 추정하는 것이 가능한지를 검토하였다.

$$\theta_t = ax + b \tag{2}$$

여기서, θ_t 는 회귀식에 의해 추정된 최상부 유온값을 의미하며 x 는 과부하율이며 단위법(P.U.)을 사용한다. 또한, a 와 b 는 각각 회귀계수를 나타낸다. 선형 회귀식의 사용이유는 다양한 회귀식(선형, 2차, 로그(log), 지수 등)의 적용결과 최고의 적합도(good-of-fitness: r^2)를 가지고 있었기 때문

이다. 회귀식 선택의 지표인 적합도 수식은 식 (3)에 나타내었다.

$$r^2 = \frac{\sum(\theta_i - \bar{\theta}_i)^2}{\sum(\theta_i - \bar{\theta}_i)^2 + \sum(\hat{\theta}_i - \theta_i)^2} \quad (3)$$

여기서, θ_i , $\bar{\theta}_i$, $\hat{\theta}_i$ 는 각각 선택된 회귀식에 의해 추정된 최상부 유온값, 실제 최상부 유온값의 평균 및 실제값을 나타낸다. IEEE Std.의 실험결과 중 24시간 일정부하를 가했을 때의 온도값들에 대한 선택된 상관식을 주변온도에 따라 표 7에 나타내었다. 표 7에서 보는바와 같이 과부하 크기와 유온 상승값과의 선택 회귀식의 사용은 적합도상(99% 이상) 문제가 없는 것을 나타냈다.

선형 회귀식을 이용하여, 각 주변온도에 대해 24, 8, 4시간 일정 크기의 과부하를 가할때의 각 과부하 크기별 유온을 추정하는 것이 가능해졌으므로, 최종적으로 24, 8, 4시간 일정부하를 가할때의 각 주변온도(0℃, 10℃, 20℃, 30℃, 40℃)에서의 최상부 유온의 상승값들을 선형 회귀식을 이용하여 추정하였으며 그 결과를 표 8에 나타내었다. 표 8을 통해 각 시간대의 부하에 대해 주변온도 변화에 따른 영향은 최대 약 5% 정도이며 주변온도 변화에 따른 오차이기보다는 회귀식 형태로 추정한 오차가 생긴것이라 판단되었다. 따라서, 어느 주변온도에서 실험한 결과이든 유온의 상승값만 알면 그 주변온도 대역의 최상부하 유온의 온도는 유추해 낼 수 있다는 것을 알 수 있으며 다음과 같은 예를 가정할 수 있다.

주변온도 10℃에서 30kVA 변압기가 130% 부하에 대해 4시간 지속될 경우 유온 상승치 70℃(유온은 80℃)가 된다 면, 동일한 조건을 주변온도 30℃에 적용하면 유온 상승치는 약 70℃가 될 것이며 따라서 유온은 100℃로 추정할 수 있다.

결과적으로 주변온도의 변화값 만큼 유온에 더해지나, 유온의 상승치에는 큰 영향을 주지 못하며 주변온도에 관계없이 일정한 유온 상승값을 가진다는 결론을 얻을 수 있었다. 따라서 본 논문의 실험결과 중 최상부 유온의 상승값들은 주변온도의 변화에 관계없이 사용 가능하다는 것을 알 수 있으며, 어느 주변온도에서도 실험결과와 동일한 온도상승요인(최대부하 크기, 최대부하 지속시간 및 기저부하 크기)이 발생되면 본 논문의 실험결과와 유사한 최상부 유온의 상승이 발생한다는 것을 예상할 수 있다.

표 7 최상부 유온 추정을 위한 회귀식(24시간 일정 부하)
Table 7 Regression equation for estimation of top-oil temperature (24 hour fixed load)

주변온도(℃)	회귀식	적합도(%)
0	$\theta_t = 84.3x - 32.3$	99.6%
10	$\theta_t = 84.7x - 22.9$	99.9%
20	$\theta_t = 78.6x - 4.63$	99.7%
30	$\theta_t = 79.3x + 11.0$	99.6%
40	$\theta_t = 67.8x + 27.6$	99.9%

표 8 IEEE 규정의 실험결과 비교

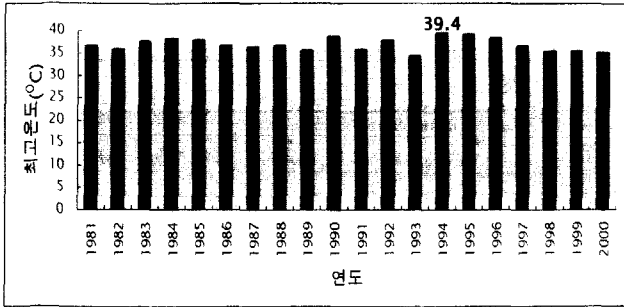
Table 8 Comparison of test results of IEEE Standard C57.92 (1981)

시간 (시간)	주변온도 (℃)	부하(%)					최대 오차 (%)
		0	10	20	30	40	
24 시간	1.0	52	51	54	54	55	6.7
	1.3	77	77	77	77	75	1.8
	1.5	94	94	93	91	89	5.0
	1.6	102	102	101	99	96	6.2
	평균 최대오차(%)						4.9
8 시간	1.0	45	48	51	51		12.7
	1.3	71	73	74	73		3.4
	1.5	89	89	89	89		0.5
	1.6	97	97	97	96		0.9
	평균 최대오차(%)						4.4
4 시간	1.0	40	41	42			4.7
	1.3	61	62	62			1.6
	1.5	75	76	76			0.6
	1.6	82	83	83			0.2
	평균 최대오차(%)						1.8

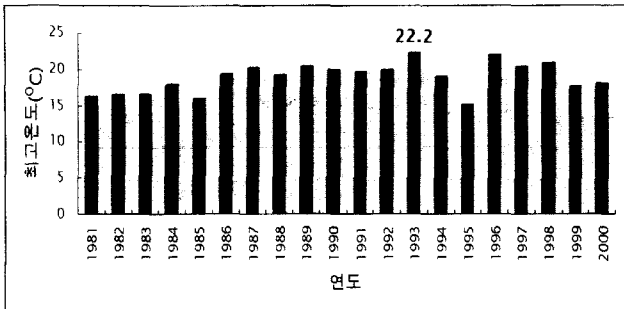
5. 최상부 유온 상승값에 따른 배전용 변압기 과부하 판정 기준

현재의 배전용 변압기 과부하 기준은 본 논문의 제 2 장에서 언급한 것처럼, 주변온도 40℃일때의 최상부 유온 상승치 50℃에 기준하고 있다. 이러한 기준은 절연물의 최고 허용온도를 기준하여 이 온도를 초과할때는 변압기의 정상적인 수명 손실이 아닌 부가적인 손실이 발생한다는 것 때문이다. 이러한 기준은 하계의 높은 주변온도시를 감안하여 만들어진 것이며, 따라서 동계의 경우 많은 차이가 발생할 수 있다. 동계 및 하계의 주변온도 변화를 확인하기 위해 그림 4(a) 및 그림 4(b)에 전국 주요도시의 1981년에서 2000년까지 20년간의 하계(6-8월) 및 동계(12-2)의 최고 온도를 도시하였다 [9].

그림 4(a)의 하계의 경우 20년간 최고 온도를 기록한 것은 1994년 대구의 39.4℃이며 그림 4(b)의 동계의 경우 1993년 역시 대구의 22.2℃이다. 따라서 주변온도의 경우 하계는 현행 과부하 기준과 같이 40℃가 적정하며 동계의 경우는 약 20℃가 적정한 것으로 나타났다. 즉 하계의 경우 최상부 유온의 상승 기준치는 현행과 같은 50℃로하고 동계의 경우는 여기에 20℃를 부가한 70℃로 하는 것이 적정할 것이다. 본 논문의 실험결과에 따라 하계 및 동계의 과부하 판정기준을 표 9에 나타내었다. 표 9 내부의 시간값들은 하계의 경우 기저부하, 최대부하 크기 및 변압기 용량별 각 조건에서 최상부 유온의 상승치가 50℃인 시점을 나타내고 있으며 동계의 경우 70℃인 시점을 나타내고 있다. 즉, 이 시간을 기준으로 변압기의 비정상적인 수명손실이 시작되는 과부하 상태로 진입한다는 것을 의미한다. 표 8에서 볼 수 있는 것처럼 변압기 용량별로 30kVA 급에 비해 50kVA가 과부하 도달시간이 전반적으로 길어진다. 또한 30 및 50kVA급에 비해 75 및 100kVA 급 변압기의 과부하 도달시간은 같은



(a) 하계



(b) 동계

그림 4 주요 도시의 동계 및 하계의 최고 온도
 Fig. 4 Maximum temperatures of major cities for summer and winter seasons

표 9 배전용 변압기 과부하 기준
 Table 9 Overload criteria of distribution transformer

(단위: 시간, -: 24시간내에 과부하 위험 없음)

용량 (kVA)	과부하		100%	110%	120%	130%	140%	150%	160%
	작전부하								
30	25%	하계	-	10	5	4	3	3	2
		동계	-	-	19	11	7	5	4
	50%	하계	-	6	4	3	3	3	2
		동계	-	-	18	10	8	5	4
	75%	하계	-	5	3	2	1	1	1
		동계	-	-	14	6	4	4	3
50	25%	하계	-	10	6	4	4	3	3
		동계	-	-	-	15	8	6	5
	50%	하계	-	10	5	4	3	2	2
		동계	-	-	23	13	8	6	4
	75%	하계	-	9	4	3	2	1	1
		동계	-	-	21	10	6	4	3
75	25%	하계	11	5	4	3	2	2	1
		동계	-	-	12	6	4	3	3
	50%	하계	9	5	3	2	2	1	1
		동계	-	-	9	5	4	2	2
	75%	하계	5	3	2	1	1/2	1/5	1/5
		동계	-	-	8	5	3	2	1
100	25%	하계	11	5	3	2	2	2	1
		동계	-	-	10	5	4	2	2
	50%	하계	10	4	3	2	1	1	1
		동계	-	-	11	5	4	2	2
	75%	하계	6	3	2	1	1/2	1/5	1/5
		동계	-	-	10	5	3	2	1

조건하에서 짧아진다. 이것은 변압기 내면적에 의한 것이라 판단된다. 예를 들어, 30kVA 급에 비해 100kVA 급 변압기는 그 용적이 3배 이상이 되어야 하지만 실제적으로 변압기 크기는 그 정도 차이가 나지 않는다. 따라서 이것이 최상부 유온의 상승특성에 영향을 주고 있는 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 논문에서는 국내 100kVA 이하급 유입식 배전용 변압기의 과부하 판정을 위한 기준을 제시하였다. 이를 위해, 실제 사용중인 배전용 변압기 20대에 대한 실험을 실시하였으며 이를 통해 각 용량별 최상부 유온의 상승 특성을 분석하였다. 실험을 통해, 용량이 커질수록 유온 상승의 속도가 빨라짐을 알 수 있었으며, 기저부하율에 의해 많은 영향 차이를 보임을 알 수 있었다. 실험 결과의 현장 적용에 가장 큰 난점인 주변온도의 변화문제는 국제 규격의 실험결과를 통해 보완하였다. 동계 및 하계의 누적된 온도 데이터를 이용하여 동계 및 하계 각각에 대한 각 용량별 배전용 변압기의 과부하 판정 기준을 제시하였다. 본 논문에서 얻어진 결과는 이전에 국외 규격에 근거하여 설정된 국내 100kVA 이하급 유입식 배전용 변압기의 과부하 판정기준을 국내 배전용 변압기의 특성에 부합하도록 수정함으로써 향후 국내 배전용 변압기 과부하 판정기준의 조정 시 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 박창호 외, 주상변압기 부하관리 개선에 관한 연구 (최종보고서), 한국전력공사, 1999년.
- [2] J. A. Jardini, H. P. Schmidt, C. M. V. Tahan, C. C. B. De Oliveira and S. U. Ahn, "Distribution transformer loss of life evaluation: a novel approach based on daily load profiles," IEEE Trans. on PWRD, Vol. 15, No. 1, pp. 361-366, Jan. 2000.
- [3] 김재철, 박창호, 배전용 변압기 최적 부하관리 방안 연구 (중간보고서), 한국전력공사, 2001년 8월.
- [4] 윤상윤, 김재철, 김기현, 임진순, "수용가 냉방부하를 고려한 하절기 주상변압기 최대부하 추정," 대한전기학회 논문지, 제 50A권, 제 1호, pp. 20-27, 2001년 1월.
- [5] 한국전력공사 배전처, 저압부하관리 업무편람, 한국전력공사, 1999년.
- [6] IEEE guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers rated 500 kVA and less with 65 degrees C or 55 degrees C average winding rise, ANSI/IEEE Std. C57.91-1981.
- [7] 한국전기연구소 출판부, '99 변압기 실무기술, 한국전기연구소, 1999년.
- [8] Loading guide for oil-immersed power transformers, IEC Std. 354(1971).
- [9] 기상청 홈페이지, <http://www.kma.go.kr>.

저 자 소 개



윤상윤 (尹尙潤)

1970년 8월 28일생. 1996년 숭실대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국전력공사 전력연구원 배전기술센터 위촉연구원.
Tel : 042-865-5913, Fax : 042-865-5804
E-mail : drk9034@hanmail.net



김재철 (金載哲)

1955년 7월 22일 생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988~현재 숭실대 공대 전기공학과 교수.
Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780
E-mail : jckim@ee.ssu.ac.kr



박창호 (朴昌浩)

1956년 1월 28일생. 1979년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1982년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 배전기술센터 책임연구원.
Tel : 042-865-5911, Fax : 042-865-5804
E-mail : chpark@kepri.re.kr