

방화벽 설치 환경에 따른 초고압변압기 온도상승 영향 연구

김철숙*, 이승호*, 김중경*
(주)효성 중공업연구소*

A Study of the Temperature-Rise effects according to Firewall Installation in a Power Transformer

Chul-Sook Kim*, Seung-Ho Lee*, Joong-Kyoung Kim*
Power & Industrial Systems R&D Center, Hyosung Corporation*

Abstract - 방화벽은 변압기 폭발, 과열 사고 이후 주변 주/보조변압 기로의 2차 사고를 방지하는 목적으로 설치되고 있다. 변압기는 열교환기(방열기 또는 쿨러)를 통해 외부 대기와 열교환을 하므로 방화벽의 설치로 인하여 주위 대기의 흐름이 저하되어 냉각 성능에 악영향을 미칠 수 있다. 본 연구는 방화벽 설치 위치 및 변압기 주위 설치 환경에 따른 공기 온도상승 효과가 변압기의 온도상승에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 시험과 해석을 수행한 결과 방화벽을 2면으로 설치 할 경우 방화벽의 설치 거리는 방열기에서 1m 이상, 방화벽을 3면으로 설치 할 경우 변압기 본체에서 2.5m 이상으로 유지하였을 때 변압기의 온도상승에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였으며, 방화벽의 높이는 본체의 높이를 고려하여 설치하여야 한다.

1. 서 론

최근 지구온난화와 이상기후, 생활수준의 향상으로 인한 전자제품의 수요가 급증하고 있으며 국민 1인당 전력소비량도 2006년 이후로 평균 5% 이상의 증가를 가져왔다.[1] 이에 따라 전력계통에서 가장 중요하게 사용되는 변압기의 부하율이 증가하고 있는 실정이다. 변압기의 부하율의 증가는 권선의 과열점 온도상승과 권선 내에서의 절연파괴 등을 야기하여 아크가 발생하고 절연유에 이르러 변압기 과열에 이르는 고장 및 사고의 원인이 되고 있다. 이러한 변압기 화재 및 과열 사고 발생시 대도시에 인접한 경우 화재로 인한 인명피해와 절연유 유출로 인한 환경오염이 발생할 수 있기 때문에 대비책으로 방화벽 설치를 기준으로 고시하여 규제하고 있다.[2] 하지만 변압기의 냉각은 열교환기(방열기 또는 쿨러)를 사용하여 주위 공기와 열교환을 통해 이루어지기 때문에 주위 공기 온도에 따라 변압기 온도상승에 직접적인 영향을 줄 수 있다. 방화벽 설치로 인하여 변압기 외부 공기 유동이 영향을 받아 주위 온도가 상승하게 되면 열교환기의 성능에 악영향을 미칠 수 있으며, 이는 절연유의 온도상승을 초래하여 절연물의 성능 저하, 수명 단축으로 이어져 또 다른 변압기 사고로 이어질 수 있는 가능성이 있다. 이미 이전 연구를 통하여 ONAN (Oil Natural Air Natural) 냉각방식의 변압기를 대상으로 방화벽 설치거리에 따른 온도상승 영향을 분석하는 연구가 수행되었다.[3] 하지만 현재까지 방화벽의 설치에 따른 온도상승 연관성이 규명되지 않았고, 낮은 부하율을 사용하는 변압기의 온도상승에 대한 문제가 발생되지 않았기 때문에 온도상승을 고려한 방화벽 설치 기준이 마련되지 않았다.

본 연구에서는 변압기 설치 거리 및 주위 환경에 따라서 초고압변압기의 온도상승에 미치는 영향을 분석하였다. 실제 주위 방화벽 거리와 설치 환경에 차이가 있는 ODAF(Oil Direct Air Forced) 냉각방식의 초고압 변압기를 대상으로 주위 대기 온도를 측정하는 실험을 실시하였으며, 이를 개선할 수 있는 방안을 모색하기 위해 해석적인 접근방법을 사용하여 설치 기준을 정립하고자 한다.

2. 본 론

2.1 지배방정식

변압기 주위의 외기는 열교환기(방열기, 쿨러)에 의하여 온도가 상승하고 이에 따라 공기의 밀도차 및 부력으로 인한 흐름과 외부의 기압차로 인하여 발생하는 흐름이 동시에 존재하게 되고 이러한 복잡한 유체의 동특성을 정확하게 예측하기 위해서는 열, 유체의 물리적 현상을 나타내는 연속방정식, 에너지방정식, 운동량방정식의 편미분방정식과 공기에 흐름에 의해서 발생하는 대류열전달 현상을 고려해야 한다. 유체의 흐름의 연속성을 증명하는 정상상태에서 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

난류 유동에 대한 운동량방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[u_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i (\rho_0 - \rho) \quad (2)$$

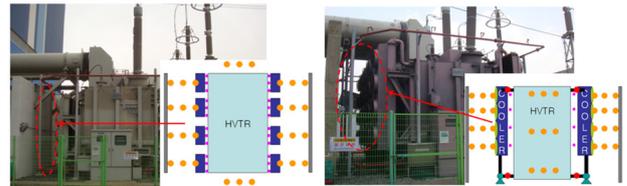
에너지방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{u}{Pr} + \frac{u_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] + S_h \quad (3)$$

지배방정식을 수치해석하기 위해 검사체적에 기초한 유한체적법을 사용하였으며, 복잡한 유동장을 고려하기 위해서 본 해석에서는 압력을 가정하여 운동량방정식을 해석한 후에 연속방정식을 만족하도록 압력과 속도를 보정해주는 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 사용하여 이산화방정식의 해를 구한다. 연립 이산화방정식의 종속변수들은 TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm)를 적용하여 해를 구한다.

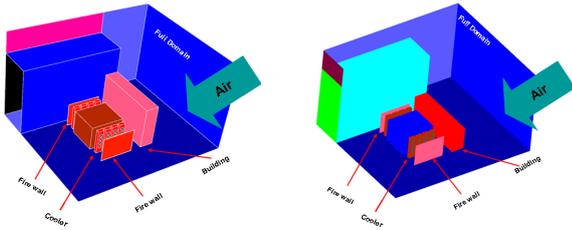
2.2 연구모델

본 연구의 실험과 해석에 사용된 두 대의 변압기는 동일한 345kV급으로 방화벽과 주위 건물 설치 환경에 차이가 있다. TR1은 750MVA로 쿨러는 8조 설치되어 있으며, 방화벽 사이 거리는 저압 북상층 1m, 고압 북상층 2.5m 거리로 설치되어 있고, 주위 건물 사이 거리는 5.5m, 건물의 높이는 9.4m이다. TR2는 790MVA로 쿨러는 10조 설치되어 있고 방화벽사이 거리와 주위 건물 사이 거리는 1호기와 동일하지만 건물의 높이는 5m로 주위 건물 높이에 차이가 있다. 실험은 방화벽 및 주위 건물과 변압기 사이의 온도를 측정하였으며, 그림 1은 실험을 수행한 대상 변압기와 측정지점을 보여준다.



<A> TR1 변압기 및 측정지점 TR2 변압기 및 측정지점
<그림 1> 345kV급 시험 대상 변압기

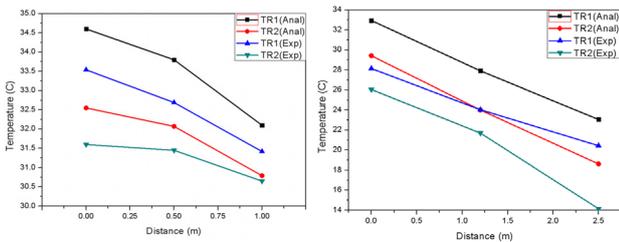
실험은 각 변압기 당 120개의 측정 지점을 가지며 측정 방법은 쿨러의 팬 블레이드에서 동일한 세 지점의 온도와 유속을 측정하였으며, 결과 확인은 평균치를 사용하였다. 측정에 사용된 계측기는 온도와 풍속을 동시에 측정할 수 있는 다기능 측정기로 온도 측정범위는 - 0~1760℃, 정확도는 ± 0.4℃이며, 풍속 측정범위는 0~20%, 정확도 ±0.04% 이내이다. 측정시 주위 대기환경은 1호 변압기 측정시 주위 대기온도 20℃, 풍황 1.745%, 2호 변압기 측정시 주위 대기온도는 10℃, 풍황은 1.155%로 대기환경에 차이가 있었다. 해석모델은 실험 모델과 동일한 조건을 가진 모델과 기준을 제시 할 수 있는 방화벽 거리별 모델, 주위 건물 모델로 구성되어 해석을 통해 비교검증을 수행하였다. 본 연구의 해석 영역은 변압기를 주위로 50m×30m×30m의 공기영역을 구성하여 충분히 발달할 수 있도록 특성길이를 감안하여 해석을 수행하였다. 또한 해석의 경계조건은 실험에서 측정된 값과 동일한 대기환경이라 가정하여 사용하였으며 전체 격자수는 약 800만개이다. 입구 난류유동에너지 및 난류 소멸율은 난류의 특성길이 및 난류강도를 이용하여 계산 할 수 있다.



<A> TR1 해석 모델 TR2 해석 모델
 <그림 2> CFD 해석 모델

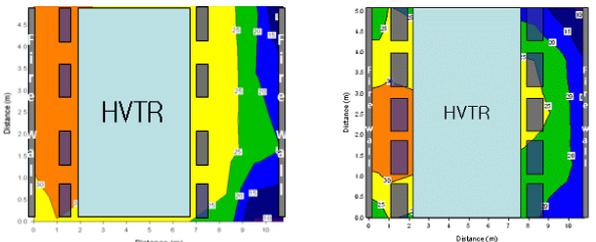
2.1.1 실험결과

TR1과 TR2의 주위 공기 온도상승 계산은 측정시 대기환경에 차이가 있기 때문에 상승(Rise)온도를 계산하여 결과를 비교하였다. 그림3을 통해 확인 할 수 있는 바와 같이 저압 붓싱측 방화벽 사이의 온도는 TR1과 TR2의 경우 약 2°C의 온도차이를 가지며, 고압측 방화벽 사이의 온도는 TR1과 TR2의 경우 동일한 1m 거리에서 약 4°C의 온도차이를 가지는 것으로 확인되었다. 이는 변압기와 방화벽 사이의 거리가 1m인 저압측의 공기 순환이 외기와 잘 혼합되지 않아 공기의 냉각효과가 저감되는 것을 의미한다. 이러한 실험 결과는 펌프를 사용하여 절연유 유속을 빠르게 가져가는 ODAF 냉각방식의 특성상 상하부 오일 온도차이가 일반적으로 약 5°C인 것을 감안한다면 ONAN과 ONAF(Oil Natural Air Forced) 냉각방식의 변압기에서는 더 크게 영향을 받을 것으로 판단된다. 또한 TR1과 TR2의 풍황 조건상 TR1 측정시 TR2보다 공기의 유속이 약 1.5배 높은 점을 고려한다면 동일한 풍황 조건시라고 가정한다면 온도차이는 더 커질 것이다.

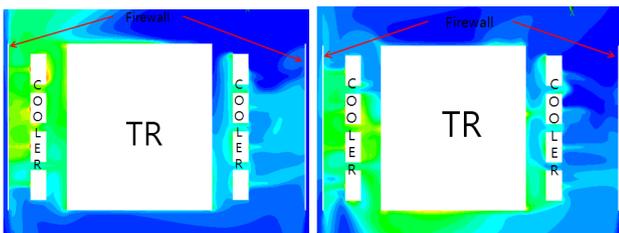


<A> 저압 붓싱측 고압 붓싱측
 <그림 3> 방화벽 사이 온도상승

그림 4 <A>, 는 TR1과 TR2의 실험 결과를 온도분포로 나타내었다. TR1의 경우 저압 붓싱측의 온도분포가 전체적으로 높은 경향이 있는 것을 확인 할 수 있다. 이는 주위 높은 건물의 영향으로 외부 공기가 변압기 주변으로 유입되지 못하여 발생하는 현상이다. 이와 같은 현상은 변압기 주위 바람이 적고 복사열이 강한 여름철 날씨에는 변압기 권선과 절연유의 온도상승에 악영향을 미칠 수 있다.



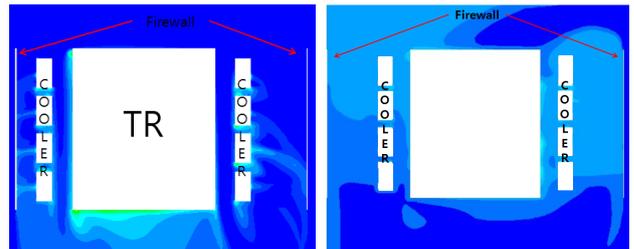
<A> TR1 수평평면 실험결과 TR2 수평평면 실험결과



<C> TR1 수평평면 해석 <D> TR2 수평평면 해석
 <그림 4> 방화벽 사이 온도분포

반면 TR1에 비하여 주위 건물의 높이가 낮은 상태인 TR2의 경우 상대적으로 저압 붓싱측의 온도분포가 전체적으로 낮은 경향이 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 4 <C>, <D>는 TR1과 TR2의 온도분포 해석결과를 보여주며, 실험과 유사한 경향을 나타냄을 확인하였다. TR1과 주위 건물사이로 차가운 외기가 쉽게 유입되지 못하는 정체 현상이 확인 되었으며, TR2와 비교했을 때 상대적으로 높은 온도를 가지는 공기가 저압 붓싱과 방화벽사이 공간으로 유입이 되는 현상이 나타난다. TR2의 경우 주위 건물이 낮아 저압 붓싱측 방화벽 사이뿐만 아니라 고압 붓싱측도 낮게 온도가 형성되는 것을 확인할 수 있다.

실험과 해석을 통하여 확인 된 결과를 기준으로 개선 및 설치 기준을 확립하기 위해 해석을 통해 TR1 모델에서 주위 건물이 없는 모델(TR3)과 저압 붓싱측 방화벽의 거리를 고압 붓싱측과 동일하게 2.5m로 변경한 모델(TR4)의 온도 및 유속 특성을 확인하는 해석을 실시하였다. 그림 5는 온도분포 결과이며, 경계조건은 TR1과 동일한 조건으로 해석을 수행하였다.



<A> TR3 주위 건물이 없는 모델 TR4 고압붓싱 방화벽 2.5m
 <그림 5> 방화벽 사이 온도분포

해석결과 TR3의 경우 주위 건물이 없기 때문에 저압 붓싱측의 온도분포가 고압 붓싱측과 유사해졌으며, TR1과 비교하여 방화벽 사이의 평균온도는 약 10°C 낮아졌으며, 최고온도는 약 16°C 낮아졌다. TR4의 경우 온도저감 효과는 TR3에 비하여 떨어지지만 TR1에 비하여 방화벽 사이의 평균온도는 약 7°C, 최고온도는 약 12°C 낮아지는 것을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 방화벽 설치거리 및 설치환경이 초고압변압기 온도상승에 미치는 영향에 대하여 i) 방화벽 설치거리가 좌, 우측 1m, 2.5m으로 동일하지만 주위 건물의 높이가 차이가 있는 2가지 모델에 대해 실험을 수행 한 후 해석을 통하여 이를 검증하였고, ii) 방화벽 설치거리는 동일하고 주위 건물이 없는 경우, iii)방화벽 설치거리를 2.5m로 증가시킨 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 총 4가지 모델에 대한 실험과 해석을 통한 변압기 온도상승 영향을 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 방열기 주변의 외기 온도상승에 미치는 영향은 방화벽 설치거리 및 설치환경에 영향을 받으며, 정해진 거리 내에서 가열된 공기가 외부로 원활히 빠져나가지 못하고 외부의 차가운 공기도 유입되지 못하는 상황이 발생되어 변압기 온도상승에 악영향을 미칠 수 있다.
- (2) 방화벽을 2면으로 설치할 경우 변압기와 방화벽의 거리를 1m로 설치하여도 변압기 주변의 공기의 온도상승에는 영향을 주지 않고, 변압기에도 큰 영향을 주지 않는다.
- (3) 본 연구와 같이 변압기 주위 한 쪽으로 높은 건물이 있는 경우 또는 방화벽이 3면 이상으로 존재할 경우에는 방화벽의 설치거리를 2.5m이상으로 설치하면 주위 공기 온도상승에는 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.
- (4) 본 연구결과는 방화벽의 설치거리와 주위 건축물 배치에 대한 기초 자료로 활용할 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] KEPCO, "KEPCO in brief", pp,33Page, 2011
 [2] KEPCO, "Design Rule-2930(Fire Protection)"
 [3] C.H Cha, C.S Kim, W.S Kim, K.Y Kweon, "An Investigation of the temperature-rise effects according to firewall location in a power transformer", Transformer working group, 2008