

변압기 내부 결함 모의시험장치를 통한 유증가스 분석/진단 시스템 개발(Ⅰ)

김성직, 서황동, 김영민, 정재룡, 양항준
(주)효성 중공업연구소

Development of Dissolved Gas Analysis/Diagnosis System with Transformer Fault Test Chamber (Ⅰ)

Sung-Jik Kim, Hwang-Dong Seo, Young-Min Kim, Jae-Ryong Jung, Hang-Jun Yang
HYOSUNG CORPORATION Power & Industrial System R&D Center

Abstract - 안정적인 전력공급을 위해 전력설비 진단이 중요시 되고 있고 이를 위해 변전기기인 변압기의 초기고장 검출을 통한 예방진단 기술을 필요로 하고 있다. 변압기 예방진단 기술 중에서도 유증가스진단은 가장 오래되고 신뢰성이 입증된 기술이다. 기존의 유증가스진단법은 가스비분석법을 이용하고 있는데 대상 가스들이 절연유에의 열화에 의해 발생하는 가스들이고 주위 운전환경에 대한 고려가 부족하여 진단이 불가능하거나 진단오류가 발생한다. 본 연구에서는 절연유뿐만 아니라 고체절연물에 대한 열화를 고려하기 위하여 변압기 내부 결함 모의 시험 챔버를 제작하고 시험 결과를 바탕으로 진단 알고리즘을 개발하고자 한다.

1. 서 론

산업의 발달에 따라 전력수요가 날로 증가함에 따라 전력용 변압기가 고압화 및 대형화되는 추세에 있으며, 수요자의 안정된 전력공급 욕구도 커져가고 있다. 전력용 변압기의 예방진단은 안정적인 전력공급, 정전에 따른 재산적 피해 그리고 전기안전을 실현하는데 매우 중요한 기술 중 하나이다. 현재까지 국내외적으로 개발된 변압기 예방진단 방법 중에서도 유증가스진단은 가장 오래되고 신뢰성이 입증된 기술이다. 유입식 변압기의 주절연물로서 사용되고 있는 절연유와 셀룰로오스 절연지는 다양한 탄화수소화합물로 구성되어 있다. 이러한 화합물에 어느 정도 이상의 온도나 혹은 부분방전, 아크방전 등이 일어나면 이 때 가해진 에너지와 화합물을 구성하고 있는 각 분자들의 결합에너지 혹은 분해에너지 등에 따라서 여러 가지 가스들이 형성되는데, 가스의 종류나 구성비 등을 측정하면 고장의 원인을 알릴 수 있다. 이러한 성질을 이용하여 Dornenburg, Rogers, Duval 등은 유증가스분석을 통하여 변압기의 초기 이상을 진단하기 위한 가스비분석법을 발표한바 있고, IEEE, IEC 등에서도 가스비분석법을 이용한 유증가스진단법을 채택하여 사용하고 있다. 그러나 이러한 진단법들은 절연유에만 관련되는 진단법으로서 절연지가 고장에 개입되거나 두 가지 이상의 고장이 동시에 복합적으로 일어날 때에 대해서는 판정이 불가능하거나 잘못 판정내릴 수 있게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 현재 사용되고 있는 진단법에서 판정이 어려운 경우에 대한 유증가스 분포를 모의시험을 통하여 고찰하였다. 열화실험을 하기 위한 챔버를 제작하였으며 열열화 실험과 부분방전실험을 하여 절연지유무에 대한 가스분포차를 고찰하였다.

2. 본 론

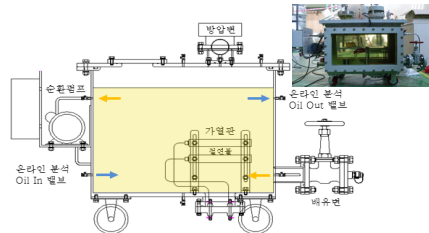
2.1 모의시험 챔버

변압기 내부에서 비정상적인 높은 에너지가 소비되는 결함이 발생되면 가스가 발생된다. 이러한 가스는 절연물의 화학적 열화에 의해 발생하며 가스의 종류는 CH계 분자 결합과 CO, CO₂ 등이 있다. 변압기의 결함 종류별 모의를 위해서 열적 결함과 전기적 결함으로 구분하여 각각의 챔버를 제작하여 내부 결함 모의시험을 실시하였다.

2.1.1 열적 결함 모의시험 챔버

그림 1은 열적결함 모의시험을 위한 챔버의 내부 구조도 및 실제 챔버의 외형을 나타낸다. 시험챔버의 내부는 직육면체로 구성되어 체적이 총 145리터이다. 열적결함을 위한 가열판이 2개 설치되어 있고, 상하부 가열판의 간격을 조절할 수 있다. 가열판 사이에 고체절연물을 삽입하여 가열할 수 있도록 하였다. 가열판은 상온에서 300℃까지 가열할 수 있다. 절연유 가열에 따른 압력상승을 측정하기 위해 진공으로부터 7kgf/cm²까지 측정할 수 있는 압력계를 설치하였고 과도한 압력상승을 막기 위해 배전용 변압기의 방압변(임계값=1.7kgf/cm²)을 설치하였다. 또한 가열된 절연유의 상하부 강제순환을 위해 오일 순환펌프를 설치하여 4.8ℓ/min의 유량으로 순환시킬 수 있도록 하였다. 열적결함 모의 후 절연유 분석을 위해 온라인 유증가스 분석장치를 설치하였고 비교를 위해 배유변을 설치하여 오일샘플링을 가능하게 하였다. 또한 절연유를 주입하기

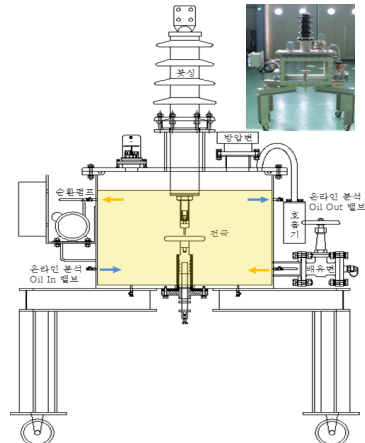
위하여 챔버 상단에 진공밸브를 설치하였고 챔버 하단에 절연유 유입/유출을 위한 밸브를 설치하였다. 최대 6.8×10⁻⁶ kgf/cm² 까지 진공을 잡을 수 있는 진공펌프를 진공밸브에 연결하여 진공을 잡고 절연유를 주입하였다.



〈그림 1〉 열적 결함 모의시험 챔버

2.1.2 전기적 결함 모의시험 챔버

열적결함 모의시험 챔버와는 달리 전기적결함 모의시험 챔버는 전압 인가시 기중방전을 방지하기 위해 그림 2와 같이 전압인가부에 봉싱을 설치하였다. 봉싱은 상용전압 36kV용으로 뇌임펄스 충격 시험이 200kV까지 가능하고 AC내전압 시험은 1분간 70kV까지 허용된다. 모의시험 챔버 내부에는 봉싱 끝단에 전극을 연결하고 전극은 침 대 평판, 평판 대 평판, 구 대 구 전극 등으로 교체할 수 있다. 챔버하단에 전극 간격을 조절할 수 있게 제작하였고 최대 0.1mm까지 조절할 수 있다. 모의시험 챔버의 제작 및 방압변, 배유변, 오일순환펌프의 경우 열적 결함 모의시험 챔버와 동일하다. 추가적으로 호흡기를 설치하여 수소와 수분이 모의시험 챔버 내부로 들어가는 것을 방지하였다. 또한 일정한 절연유 주입과 봉싱이 절연유에 잠기도록 하기 위하여 유면계를 설치하였다.



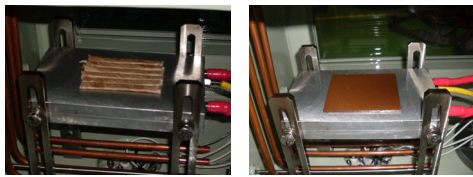
〈그림 2〉 전기적 결함 모의시험 챔버

2.2 시험방법

두 가지 모의시험 챔버 모두 동일한 내부 체적을 가지고 있고 총 145ℓ의 절연유를 채울 수 있다. 그 중 상부에 20ℓ 정도의 헤드스페이스 공간을 남기고 125ℓ의 1종 4호 팽물성 절연유를 주입한다. 절연유 주입을 위해 진공펌프를 이용하여 모의시험 챔버 내부를 진공상태로 만들어주고 절연유 파이프를 연결해서 절연유를 주입한다. 절연유 주입 후 약 6시간이상 진공을 유지하여 절연유 내의 가스들을 탈기한다. 시험조건이 달라질 때마다 절연유를 교체하고, 절연유 교체시 챔버내에 이물질 제거하고 고체 절연물 또한 교체한다. 전극의 경우 탄화 흔적을 제거하거나 여분의 전극으로 교체한다.

2.2.1 열적 결합 모의시험

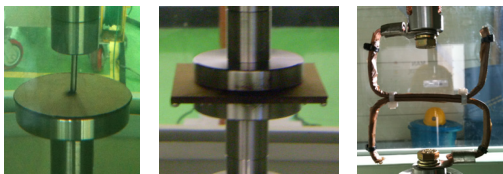
열적 결합을 모의하기 위해 챔버내의 가열판에 전원을 인가하고 온도를 설정한다. 각 조건에서 가열판 사이의 온도를 80, 110, 150, 220℃로 선정하였다. 일반적인 변압기의 정상운전상태에서 온도를 80℃로 보고, 고체 절연물의 열화가 시작되는 110℃, 절연유의 인화점에 해당하는 150℃, 열화가 많이 진행되는 220℃를 기준으로 온도를 선정하였다. 최초 가열판내의 온도센서를 기준으로 설정온도까지 가열시키며 가열시간에 따른 가스발생량을 확인하기 위해 조건별로 가열시간을 달리했다. 열적 결합 모의후 순환펌프를 가동하여 챔버 상하부의 절연유를 순환시켜준다. 절연유를 계속 순환시키며 온라인 유증가스 분석장치(GE社 Transfix)의 광음향분광법을 이용하여 2시간마다 절연유를 분석하고 비교 데이터로 배유변을 통해 IEC 60567에 따라 채취한 절연유를 오프라인 유증가스 분석장치(Agilent 社 HP6890)의 가스크레마토그래피방식으로 분석하였다. 분석가스로 H₂, CO, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, CO₂, O₂, N₂ 와 H₂O를 측정한다. 또한 시험조건으로 절연유만을 가열할 때와 가열판 사이에 그림 3과 같이 절연지가 감긴 권선 시편, 프레스보드 등을 삽입하고 고체절연물과의 복합적인 열적결합 모의시험을 진행하였다. 권선시편(DWL= 3.2*11.6*100mm)은 0.06mm 두께의 Dennison paper가 6겹으로 감겨있다. 6개의 권선시편을 삽입하였다. 프레스보드(DWL= 3.2*100*100mm)는 1개를 삽입하였다.



〈그림 3〉 열적 결합용 고체 절연물

2.2.2 전기적 결합 모의시험

전기적 결합을 모의하기 위해 그림 4와 같이 침 대 평판, 평판 대 평판, 권선 대 권선 전극을 사용하였다. 먼저 전극의 특성시험을 위해 침 대 평판 전극으로 절연유의 너임펄스 시험을 진행하였다. 전극 간격이 10mm는 24kV, 15mm는 32kV, 20mm는 39kV에서 아크가 발생하였다. 각 시험조건별로 전극사이에 고체 절연물(프레스보드)을 삽입하였다. 침 대 평판은 3.2mm 두께를 직경 75mm로 가공하여 삽입하였고, 평판 대 평판 전극에는 동일 두께의 100*100mm를 삽입하였다. 권선 대 권선 전극은 열적 결합 모의시험에 사용한 권선시편과 동일한 권선을 사용하였다. 100kV 까지 전압인가가 가능한 AC내전압기를 이용하여 절연파괴시까지 전압을 인가하였다. 절연파괴 후 순환펌프를 가동하며 열적 결합 모의시험과 동일한 온/오프라인 유증가스 분석장치를 이용하여 발생된 유증가스를 측정하였다.



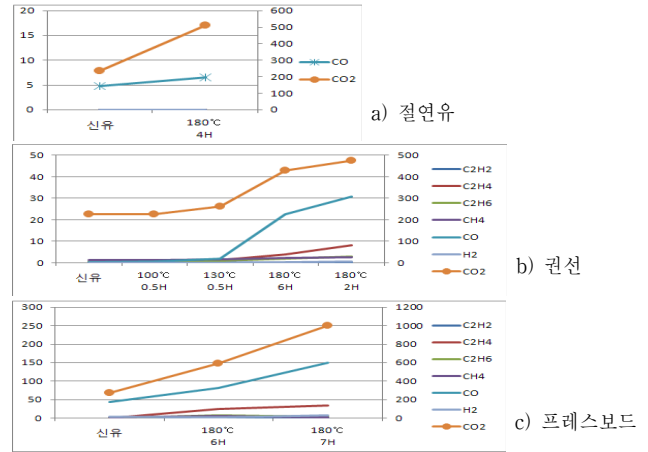
〈그림 4〉 전기적 결합용 전극

2.3 시험결과

2.3.1 열적 결합 모의시험 결과

열적 결합 모의시험은 가열판의 설정온도를 앞서 선정한 온도들로 맞추고 시험을 진행하였다. 그런데 가열판의 온도센서는 가열판 내부에 설치되어 있어서 가열판 사이의 정확한 반응온도와는 차이가 있어서 각 시험조건에서 절연물의 열화온도를 정확하게 측정하기 위하여 가열판 사이에 온도센서를 추가적으로 삽입하여 직접 측정하였다. 가열판 사이의 Hotspot 온도는 가열판 내부 온도보다 31℃가 높았다. 그리고 최대 설정온도인 220℃는 가열판의 열이 주변의 절연유에 열을 빼앗기고 이로 인해 절연유의 온도가 동반상승되는데 계속 가열하여도 가열판 내부 온도가 175℃에서 온도평형을 이루고 더 이상 상승하지 않았다. 즉 모든 시험결과에서 이를 반영하면 110, 140, 180, 205℃의 가열판 사이 온도에서 열화된 것이다. 그림 4의 a) 와 같이 절연유만의 열적 결합 모의시험에서 가열판 사이 온도를 180℃이상으로 4시간을 유지한 결과, CO₂와 CO 성분이 크게 증가하였고 다른 CH계열 가스는 발생하지 않았다. 이 그래프에서 CO₂의 성분만이 그래프의 우측 기준을 따르고 나머지 가스들은 좌측의 기준을 따르며 이후의 결과들에도 동일하게 적용된다. b)의 경우 가열판 사이 권선시편을 삽입하고 가열판 사이온도를 가로축의 표시된 온도 이상으로, 그 시간만큼 누적 가열 시험을 진행하였다. 그 결과 절연지의 절연파괴가 일어나는 110℃부근에서는 가스량 증가가 크지 않다가 180℃이상에서 CO₂와 CO의 가스량이 크게 증가하였고

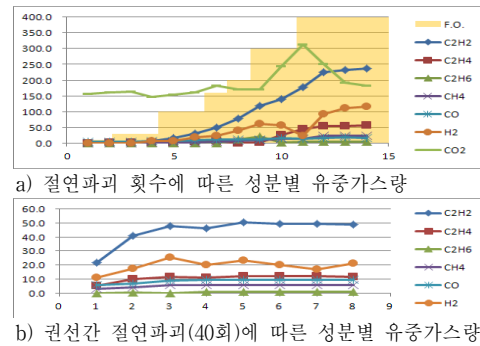
CH계열 가스도 소량 발생하였다. 가스발생량은 가열온도와 가열시간에 따라 증가량이 달라진다. c)는 가열판 사이에 프레스보드를 삽입하고 시험하였다. 다른 시험조건에서와 동일하게 CO₂와 CO 성분이 가열시간에 따라 증가한다. 권선시편을 삽입했을 때와 비교하여 프레스보드의 결합 모의시험에서 비교적 많은 가스량이 발생한 것은 권선을 감싼 절연지보다 프레스보드의 셀룰로오스 성분이 양적으로 더 많은 것이 상관관계가 있는 것으로 판단된다. 추가적으로 가열판의 온도가 200℃이상이 되면 H₂와 CH계열(특히 CH₄, C₂H₆)가스량이 크게 증가하는 경향을 보인다. 차후 200℃이상에서의 열적 결합 모의시험을 통해 H₂와 CH계열 가스발생에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.



〈그림 5〉 열적 결합 시험결과

2.3.2 전기적 결합 모의시험 결과

전기적 결합 모의시험은 침 대 평판 전극 사이에 3.2mm 두께의 프레스 보드를 삽입하여 절연파괴가 일어날 때까지 시험을 반복하였다. 그림 6의 a)와 같이 노란색 음영의 누적 플레쉬 오버 (F.O) 횟수에 따라 발생하는 가스성분을 나타낸다. b)에서는 권선 대 권선 전극에서 총 40회의 절연파괴 후 발생하는 가스성분을 나타낸다.



〈그림 6〉 전기적 결합 시험결과

3. 결 론

열적 결합 모의시험을 통해 CO 및 CO₂가 주로 발생하며, 열적 결합의 지속시간과 온도에 따라 발생하는 유증가스량이 비례하는 것을 확인하였다. 또한 절연물의 종류에 따라 가스발생량이 차이를 나타낸다. 절연유만의 열적결합보다 고체절연물이 포함되면 유증가스발생량이 증가한다. 전기적 결합 모의시험을 통해서도 절연파괴 횟수가 증가할수록 유증가스량이 발생량이 증가하는데 주로 CH계열 가스들이 발생한다. 추가적인 모의시험(200℃이상의 열적 결합 모의시험, 전극별 전기적 결합의 반복 시험)을 통해 발생한 가스들의 성분비를 이용하여 기존 진단법의 정확도를 검증하고 진단 알고리즘의 개선을 통해 유증가스 분석/진단 시스템을 개발할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 선중호, “유침 절연에서 전기적 및 열적 열화에 따른 유증가스분포 특성”, Journal of KIIEE, Vol.18 No6, pp.136-144, November 2004
- [2] “전력용 유압변압기 보수관리”, 대한전기학회 전력용변압기위킹그룹, 2004
- [3] DUVAL et al., CIGRE Symposium Berlin, Paper 110-14, 1993