

유중 가스 검출장치의 수소 가스 감지 특성에 관한 연구

황규현, 서호준, 이동희
수원대학교 전기공학과

Study on H₂ Sensing Characteristics of Gas Extractor for Dissolved Gas in Oil

Kyu-Hyun Hwang, Ho-Joon Seo, and Dong-Hee Rhie
Dept. of Electrical Eng., Suwon University

Abstract

In oil-filled equipment such as transformers, partial discharge or local overheating will precede a final shutdown. Accompanied with such problems is a decomposition of insulating material into gases, which are dissolved into the transformer oil. The gases dissolved in oil can be separated with some membranes based on the differences in permeability of membranes to different gases. This paper discuss the permeability characteristics of several membranes for separation hydrogen gas in oil. With result of this paper, it may become possible to detect fault-related gases from transformer oil and predict incipient failures in the future.

Key Words : transformer, dissolved gas, permeability, membrane

1. 서론

대전력용 변압기로 사용되는 유입변압기 내부에서의 절연파괴현상이나 국부과열현상과 같은 이상 현상은 반드시 발열이 수반되어 발생한다. 이와 같은 발열원에 접촉된 절연유, 절연지, 프레스보드 또는 베이크라이트 등의 절연재료는 그 열에 의한 영향으로 분해 반응을 일으켜, 이산화탄소, 일산화탄소, 수소나 메탄, 에탄 등의 탄화수소계 가스를 발생시킨다. 이와 같은 분해가스의 대부분은 절연유 중에 용해되므로, 예전부터 이들 유중용해가스를 추출, 분석하여 그 가스량 및 조성으로부터 변압기의 내부이상 유무 및 그 정도를 추정하는 유중가스분석법^[1]이 적용되어 왔다. 이 유중가스분석은 분석시료인 절연유를 변압기의 배유변으로부터 간단히 채취할 수 있으므로 변압기를 정지시킬 필요 없이, 아울러 극히 미소한 이상까지도 조기에 감지할 수 있는 장점이 있어 현재까지도 세계 각국에서 변압기 보수관리에 기본적으로 적용되고 있는 실정이다. 구체적으로는 유중가스 분석결과를 근거로 하여 내부이상 유무 판정, 내부이상 양상 진단(이상 개소, 이상 정도, 이상 진전속도), 운전계속 여부 판단, 수리 여부 판단 등을 할 수 있으나, 보다 정확한 판단 및 진단을 하기 위해서는 적당한 간격을 두고 수회의 추적조사를 실시하든지, 경우에 따라서는 유중가스분석 이외의 다른 적당한 시험을 병행해야 할 필요도 있다^[2]. 이 유중가스분석은 우선 대상변압기로부터의 채유, 시료유로부터의 유중가스 추출, GC(gas chromatography) 분석 장치에 의한 추출가스의 분석, 그리고 분석결과 해석 순으로 수행된다. 그러나

이와 같은 유중가스분석법은 변압기로부터 절연유를 추출한 후, 실험실 내의 가스성분 분석 장치에 의해 용존가스를 분석, 변압기 열화상태를 진단하므로 실시간 열화진단이 불가능하다는 단점을 지니고 있다. 따라서, 최근에는 가스센서를 이용하여 현장(on-site)에서 이상상태의 즉시 진단이 가능한 장치가 개발되고 있다.^[3-6] 이들 장치는 용도 및 경제성을 고려하여 대상 사고와 추출, 감지원리를 취사 선택하고 있다. 예를 들면, GC를 자동화한 장치, 이상 징후를 검출하기 위해 대표가스로 가연성 가스 총량 또는 수소만을 전자동으로 검출하는 장치, 채유한 절연유를 폐기하는 휴대형 장치 등이 제안되고 있다. 어느 방식이든 이들 장치는 단시간에 자동 계측이 가능한 구조로 개발되고 있다. 언급한 것과 같이 국내에서도 변압기 이상 징후를 현장에서 직접 진단하기 위해 대표 가스로 가연성가스인 수소를 자동으로 감지하는 휴대형 진단장치의 기술 개발이 시급히 필요하다고 사료된다.

본 논문에서는 유입 변압기의 절연유에 용해되어 있는 가스 성분을 추출하기 위하여 멤브레인을 이용한 유중 수소 가스 농도 감지 시스템을 구성하여 멤브레인 종류에 따른 유중 수소 가스 투과 특성을 조사하였다. 제작한 유중 수소 가스 농도 감지 시스템은 기름 중에 용해되어 있는 가스를 추출하기 위하여 멤브레인을 이용하였으며 가스 농도 검출부는 여러 종류의 가스들 중에서 수소 가스에 민감하게 반응하는 화학 센서를 이용하여 가스 농도를 측정하였다. 멤브레인의 종류에 따른 유중 수소 가스 투과 특성을 조사하기 위하여 정밀여과막, 한외여과막 그리고 역삼투막 멤브레인에 대하여 실험을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 유중 가스 농도 검지장치

유입 변압기의 절연유에 용해되어 있는 가스 성분을 추출하여 추출된 가스들로부터 수소 가스 농도를 측정하기 위한 유중 가스 농도 검지 시스템의 구성은 그림 1과 같다.

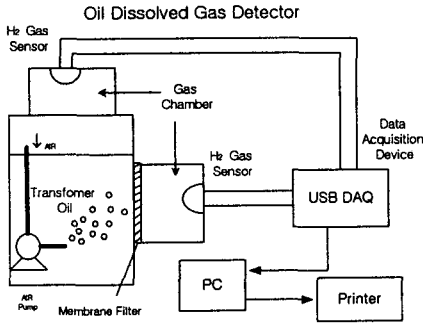


그림 1. 유중 가스 검출 장치.

실험에 사용한 유중 가스 농도 검지 시스템은 절연유 샘플 보관 용기와 유중 가스 추출부와 수소 가스 농도 검출부와 데이터 처리부로 나뉘어져 있다. 절연유 샘플 보관 용기는 직육면체의 아크릴 재질로써 고전압 방전 실험시 절연유 용기 파괴 방지 및 절연 특성을 개선도록 제작하였다. 보관 용기의 부피는 1200 cm³(cc)이며 방전 실험을 수행하기 위하여 제작한 고전압 실험 장치 양단 전극의 중앙부에 위치하도록 설계하였다.

유중 가스 추출부는 절연유 보관 용기 측면부에 각각 가스 포집부로 구성되어 있다. 측면부의 가스 추출부는 절연유에 용해되어 있는 가스 성분들이 멤브레인을 투과한 가스를 포획하는 가스 포집부로 구성하였다. 측면부 가스 포집부는 원통형의 폴리프로필렌 재질로써 부피는 27cm³(cc)로써 멤브레인 필터를 투과한 가스를 포집하는 기능을 수행한다. 수소 가스 농도 검출부는 상단과 측면에 각각 동일한 특성을 갖는 수소 반응 가스 센서를 설치하여 추출된 가스들 중에서 수소 가스의 농도를 센싱하는 기능을 수행한다. 유중 가스 농도 검지 시스템에 사용한 수소 가스 센서는 여러 종류의 가스들 중에서 수소 가스에 민감하게 반응하는 화학 센서로써 유중 수소 가스 농도 측정에 적합한 센서를 선정하였다.

2.2 유중 가스 추출 장치

본 논문에서 제작한 유중 가스 추출 장치는 기존의 가스 투과 멤브레인을 이용한 유중 가스 추출 방식^[10]의 효율을 개선하기 위하여 멤브레인의 가스 추출부에 압력 장치를 추가하였으며 제작한 장치의 대략적인 구성도는 그림 2와 같다.

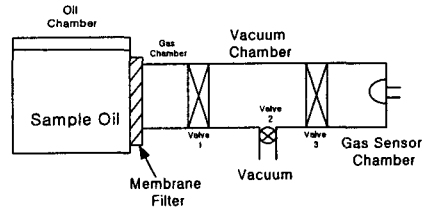


그림 2. 가스 추출 장치의 구성도.

본 연구과정에서 제작한 유중 가스 추출 장치는 크게 여섯 부분으로 구성되어 있다. 절연유를 보관하는 절연유 보관 용기(오일 챔버), 가스 투과 멤브레인, 멤브레인을 투과한 가스가 유입되는 가스 챔버, 멤브레인의 투과 속도 개선을 위한 진공 챔버, 수소 가스 농도를 측정하는 가스 센서 챔버 그리고 수소 가스 반응 센서로 구성되어 있다.

가스 투과 멤브레인 부분은 멤브레인의 자연적인 여과기능을 이용하여 절연유는 차단하고 유중 가스만을 투과시켜 절연유 중에 용해되어 있는 가스를 추출할 수 있는 기능을 수행한다. 멤브레인 선정 과정과 실험 결과에 대한 자세한 설명은 다음 절에 수록하였다. 멤브레인을 투과한 가스가 유입되는 가스 챔버는 폴리프로필렌 재질로써 부피는 27cm³(cc)로써 멤브레인 필터를 투과한 가스를 포집하는 기능을 수행한다. 진공 챔버는 기존의 가스 투과 멤브레인을 이용한 유중 가스 추출 방식의 효율을 개선하기 위하여 멤브레인의 가스 추출부에 압력 장치를 추가한 것이며 폴리프로필렌 재질로 부피는 72cm³(cc)이다. 멤브레인 필터를 투과한 가스를 포집하는 기능을 수행한다. 제작한 진공 챔버의 대략적인 구성도는 그림 3과 같다. 진공 챔버는 진공 발생기를 이용하여 저진공 상태(약 0.8기압)를 유지하도록 설계하였다. 이러한 저진공 상태는 멤브레인을 투과하는 가스의 속도를 증가시키기 위하여 고안하였다.

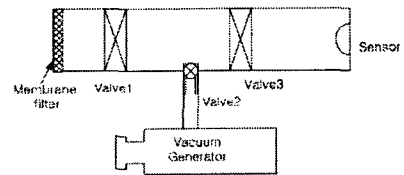


그림 3. 진공 챔버 구성도.

수소 가스 농도를 측정하는 가스 센서 챔버는 폴리프로필렌 재질로써 부피는 27cm³(cc)로써 절연유로부터 추출된 가스 성분이 즉시 수소 반응 가스 센서와 반응하지 않도록 가스 포획부와 가스 센서를 분리하는 기능을 담당하며 가스 센서 챔버의 밸브는 일정 시간

이 경과하여 멤브레인을 투과한 절연유중 용해 가스의 양이 측정 가능 시점이 되었다고 판단되는 시점에 열린다. 수소 가스 반응 센서는 멤브레인을 투과한 기체가 자연확산에 의하여 가스 센서챔버까지 도달하였을 경우 수소 가스와 반응하여 수소 가스 농도를 검출하는 기능을 담당한다.

3. 실험

3.1 멤브레인 에 의한 가스 투과 특성 실험

본 논문의 유중 가스 추출 장치에 사용한 멤브레인 필터는 정밀여과막, 한외여과막 그리고 역삼투막의 세 종류이며 각각의 실험 결과를 표 1에 나타내었으며 실험 결과는 다음과 같다.

표 1. 멤브레인의 종류와 가스 투과 실험 결과.

	기공 크기	실험결과	비 고
정밀여과막 (MF막)	0.1 μ m	기름유출	실험 부적합
	0.2 μ m		
	0.45 μ m		
한외여과막 (UF막)	0.01 μ m 이하	가스투과	실험적합 투과속도 해결요망
역삼투막 (RO막)	20Å 이하	정상운전 조건부족	실험 어려움

정밀여과막(MF막)의 경우 현재 실험에 사용한 표준 2종 2호의 절연유에 대하여 기공 크기 0.1 μ m 0.2 μ m 0.45 μ m Cellulose acetate재질의 정밀여과막을 적용한 결과 다른 여과막에 비하여 막의 기공 크기가 커서 절연유가 누출되는 결과를 확인하였다.

한외여과막(UF막)의 경우 실험에 사용한 표준 2종 2호의 절연유에 대하여 실험한 결과 현재 수행중인 연구 과제의 유중 가스 추출부로서 적합하다는 결론을 얻었다. 그러나, 투과 속도를 개선시키기 위하여 UF막의 추출부에 부압(약0.8atm)을 인가한 결과 절연유가 유출되었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 막 분리공정 전문가에게 자문을 구하는 중이며 현재까지 자문받은 결과로는 현재 사용중인 재질 이외의 UF막을 사용할 것과 여러 종류의 기공 크기에 해당하는 다수의 UF막을 구입하여 실험할 것을 제안받았다.

역삼투막(RO막)의 경우 실험에 사용한 표준 2종 2호의 절연유에 대하여 실험한 결과 현재 수행중인 연구 과제에서 제작한 유중 가스 추출부로서 부적합하다는 결론을 얻었다. 그 이유는 표 3에 나타난 역삼투막의 동작 조건을 고려할 때 역삼투막을 정상적으로 동작시키기 위하여 절연유 보관 용기를 고압 상태에 견디도록 스텝 재질로 특수 제작하여야 하지만, 제작에 따른 어려움과 스텝리스 스텝 재질의 실험 용기는 현재 진행 중인 부분 방전 실험에 방해 요인이 된

다고 사료된다.

3.2 유중 가스 농도 검지 시스템 실험 결과

본 논문에서 수행한 실험 절차는 다음과 같다. 먼저, 절연유(신유)에 충분한 양의 수소 가스가 용해되도록 하기 위하여 각각 50ppm H₂/Air, 100ppm H₂/Air, 500ppm H₂/Air를 각각 20시간씩 버블링 작업을 수행하여 수소 가스 반응 센서의 기준치를 설정하는 데 용이한 가스 농도로써 이들 가스를 충분한 시간에 걸쳐 절연유에 주입함으로써 절연유에 용해되도록 실험 예비 작업을 진행하였다. 50ppm H₂/Air, 100ppm H₂/Air, 500ppm H₂/Air를 버블링시킨 후 측정된 센서 출력 전압과 센서 저항의 시간에 대한 변화를 그림 4-5에 나타내었다.

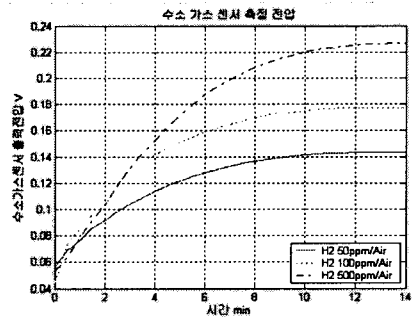


그림 4. H₂ 가스 센서의 측정 전압.

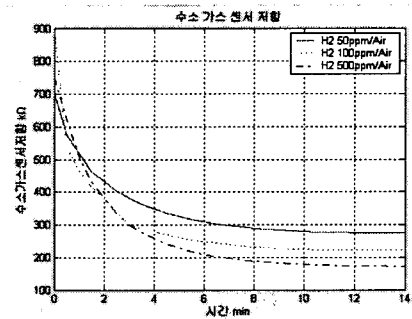


그림 5. H₂ 가스 센서 저항.

그림 6은 현재 실험을 통하여 얻은 유중 수소 가스 농도를 가스 센서 제작회사의 수소 가스 농도 특성 곡선과 비교하였다. 그림 6의 실험 데이터로부터 유중 수소 가스 농도를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

실험 결과는 현재 연구 수행중인 유중 가스 추출부에 사용한 멤브레인은 압력을 인가하지 않은 경우 대략 10분 정도면 센서 출력이 포화됨을 알 수 있었다. 또한, 멤브레인을 투과하는 가스 속도를 개선시키기

위하여 압력을 인가하는 경우 멤브레인을 통하여 절연유 보관 용기로부터 절연유가 유출되는 현상을 관찰하였으며 실험실에서 보유중인 멤브레인으로는 부압력을 인가하여 가스 투과 속도를 향상시키는 실험에는 부족하다는 것을 확인하였다. 이러한 현상을 개선하기 위하여 멤브레인의 재질 및 기공 크기가 다른 여러 가지 한외여과막을 이용하여 향후 실험을 계속할 예정이다.

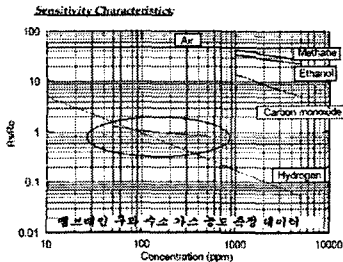


그림 6. 멤브레인 투과 수소 가스 농도 특성 곡선.

4. 결 론

본 논문에서는 유입 변압기의 절연유에 용해되어 있는 가스 성분을 추출하여 추출된 가스들로부터 수소 가스 농도를 측정하기 위한 유중 가스 농도 검지 시스템을 구성하였다. 유중 가스 농도 검지 시스템에 사용한 수소 가스 센서는 여러 종류의 가스들 중에서 수소 가스에 민감하게 반응하는 화학 센서로써 유중 수소 가스 농도 측정에 적합한 센서를 선정하였다. 가스 추출부에 이용한 멤브레인의 특징은 다음과 같다. 정밀여과막을 이용하여 가스 추출 실험을 수행한 결과, 멤브레인의 기공 크기가 커져 절연유가 누출되는 실험 결과를 확인하였으며, 유중 가스 추출을 위하여 정밀여과막의 사용이 불가함을 확인하였다. 이는 정밀여과막의 재질에 관련한 문제보다는 기공 크기가 크므로 인하여 발생하는 현상으로 사료된다. 한외여과막의 경우 절연유에 대하여 가스 추출 실험을 수행한 결과 현재 수행중인 연구 과제의 유중 가스 추출부로서 적합하다는 결론을 얻었다. 그러나, 절연유로부터 투과되는 가스 속도를 개선시키기 위하여 한외여과막의 추출부에 압력을 인가한 결과 절연유가 유출되었으며, 이러한 문제를 해결하기 위하여 현재 사용중인 재질 이외의 한외여과막을 사용하는 방안과 다른 기공 크기를 갖는 다수의 한외여과막에 대하여 실험할 예정이다. 역삼투막의 경우 절연유중 가스 추출 실험을 수행한 결과 현재 연구 수행중인 논문에서 제작한 유중 가스 추출부로서 부적합하다는 결론을 얻었다. 그 이유는 앞서 언급한 역삼투막의 동작 조건을 고려할 때 역삼투막을 정상적으로 동작시키기 위하여 약

20atm 이상의 압력을 인가하여야 하는데 현재 연구 수행중에 아크릴 재질로 제작한 절연유 보관 용기의 경우 그와 같은 높은 압력 상태를 유지할 수 없다는 것이다. 유중 가스 추출부에 역삼투막을 사용하기 위하여는 절연유 보관 용기를 스테인레스 스틸 재질로 고압 상태에 견디도록 특수 제작하여야 하지만, 제작에 따른 어려움과 스테인레스 스틸 재질의 실험 용기는 현재 진행 중인 부분 방전 실험에 방해 요인이 된다고 사료된다.

향후 연구 과제로써는 실험 조건에 일치하는 멤브레인을 선정하여 압력차를 이용한 멤브레인 가스 추출 장치를 완성하여 부분 방전 실험에 적용하면 유중 가스 농도 검지 시스템의 역할을 원활히 수행하도록 계획하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] 電氣協同研究會 : '油中ガス分析による 油入器機保守管理', 電氣協同研究, 第36卷, 第1號, 1979
- [2] 日本ガス協會 : '變壓器油中水素檢出裝置', 第44卷 10號 p.46-49, 1991
- [3] '油中溶存酸素監視裝置', 電氣學會全國大會講演論文集, 1991, 8, p.77, (1991)
- [4] IEEE Transformer Committee (1988). "Guide For Failure Investigation, Documentation and analysis for power Transformers and shunt reactors"
- [5] ANSI/IEEE Std C57. 104 (1977). "Guide for the Detection and Determination of Generated Gasses in Oil-Immersed Transformer and their Relation for the Serviceability of the Equipment"
- [6] 張替, 後藤, 太田, 月岡 : "フルフルールによる油入變壓器の經年劣化度診斷研究" 電氣學會論文誌A, 112卷, 6號, p.589, 1992
- [7] 電氣學會技術報告, 第502號 : '電力設備絶縁余壽命推定法', p.61, 1994
- [8] "IT화 대응 변압기 유지보수지원시스템", 전기저널, 2001.11
- [9] 김태성 외 : "전력변압기의 열화진단 및 진단시스템 개발 기초연구(최종보고서)", 기초전력공동연구소, 1999.10
- [10] H.Tsukioka, K.Sugawara, "Apparatus for Continuously Monitoring Hydrogen Gas Dissolved in Transformer Oil", IEEE Tans. on Elec. Insulation, Vol. EI-16, No.6, pp502-509, 1981.12