

온라인 유증가스 측정기에 대한 절연유 유동해석

진상범\*, 권동진\*, 심응보\*, 우정욱\*, 어수영\*\*, 최광범\*\*, 김수태\*\*\*, 김주신\*\*\*  
 \* 전력연구원, \*\* 태광이앤씨, \*\*\* 창원대학교

Simulation of Transformer Oil Streaming for On-Line Gas in Oil Detector

S.B. Chin\*, D.J. Kweon\*, E.B. Shim\*, J.W. Woo\*, S.Y. Eo\*\*, G.B. Choi\*\*, S.T. Kim\*\*\*, J.S. Kim\*\*\*  
 \* KEPRI, \*\* TGE&C, \*\*\* Changwon Univ.

**Abstract** - 변압기의 이상 징후를 조기에 검출하여 사고를 미연에 방지하기 위해 설치된 예방진단시스템은 현재 국내 9개 변전소에서 운영되고 있다. 이러한 예방진단시스템의 적극적인 활용을 위해서는 시스템을 구성하는 각 요소에 대한 신뢰성 검증과 주기적인 점검, 축적된 데이터의 분석을 통한 사고예방 검출 사례의 축적이 요구되고 있다. 변압기 예방진단시스템의 가장 중요한 항목인 유증가스 측정기는 변압기 드레인 밸브에 설치됨에 따라, 변압기 내부 절연유가 유증가스 측정기로 유동되는지에 대한 의문이 존재하여 왔다.

본 논문에서는 유동해석 프로그램인 Fluent 5.3과 Gambit 프로그램을 이용하여, 변압기 내부의 열에 의한 대류현상에 의해 순환하는 절연유가 좁은 파이프를 통하여 유증가스 측정기의 삼투막까지 도달하는 유동현상을 해석하였다. 유동해석 결과 절연유가 삼투막과 만나는 지점에서도 절연유의 유동에 의한 순환이 발생하여, 용존가스의 검출이 가능함을 알 수 있었다.

1. 서 론

전력설비들의 신뢰성은 전력공급의 안정화와 신뢰성면에서 매우 중요한 사항이다. 전력설비는 사고가 발생하기 전, 대부분 전구현상으로 물성의 변화가 나타나고, 이것을 외부에서 상시 측정하고, 이상이 치명적이기 이전에 처리하는 예방진단 기술이 적용되고 있다.<sup>[1]</sup>

국내에서 예방진단시스템은 1989년 이래로 점진적으로 도입되었다. 현재 한국전력공사에서는 9개 변전소에 예방진단시스템을 설치하여 운전중에 있으며, 각 센서에서 측정되는 데이터들을 집중적으로 분석하고 있으며, 주기적인 시스템의 점검을 통하여 측정 데이터의 신뢰성을 확보해 나가고 있다.

예방진단시스템의 활용을 위해서는 시스템을 구성하는 각 요소에 대한 신뢰성 검증과 사고예방 검출사례의 축적이 요구된다. 현재 한전에서 운전중인 예방진단시스템에는 유증가스를 온라인으로 감시하기 위하여 GE Syprotec Co.의 Hydran 201i 센서를 적용하고 있다.<sup>[2]</sup>

그림 1은 345kV 변압기에 설치한 Hydran 201i이다. 그림 1과 같이, 온라인 유증가스 측정기는 변압기 하부의 드레인 밸브에 설치되며, 변압기 내부 열에 의한 대류현상에 의하여 절연유가 센서(삼투막)까지 순환하게 된다. 이때 삼투막으로부터 용존가스가 추출된다.

그러나, 드레인 밸브가 변압기의 말단에 있으며, 절연유를 강제 순환시키는 것이 아니고, 자연대류에 의하여 절연유가 순환되어야 하므로, 변압기 내부의 절연유와 삼투막에서의 절연유 성분이 같은지에 대한 의문이 현장 실무자들에 의해 제기되면서, 그 신뢰성의 검증이 요구되었다.

따라서 본 논문에서는 유증가스 측정기에 의해 검출된 데이터의 신뢰성을 확보하기 위하여, 절연유가 좁은 배관을 통해 자연대류에 의하여 센서까지 도달하는 것을, 유동해석 프로그램인 Fluent 5.3과 Gambit 프로그램을 이용하여 해석하였다.

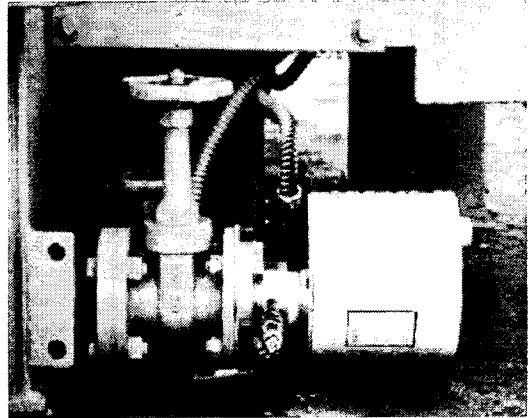


그림 1. 345kV 변압기에 설치한 Hydran 201i

2. 본 론

예방진단시스템에 적용되는 온라인 유증가스 분석장치는 경제성의 관점에서 특정가스를 상시 감시하고, 이상 검출시에 다성분 가스분석장치를 이용하여 정밀 진단하는 방법을 주로 사용하고 있으며, 절연유 용존가스 중 특정가스로 수소가스를 주 감시가스로 측정하는 경우가 많다.

그림 2와 같이 한전의 예방진단시스템에 적용된 Hydran 201i 센서는 가스 선택 투과 고분자막(membrane)을 이용하여 유증가스의 양을 측정하는 것으로, 4 종류의 가스 H<sub>2</sub>(100%), CO(18%), C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>(8%), C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>(1.5%)를 측정하여 단일신호로 출력한다. 즉 Hydran 201Ti는 수소가스 측정기로 볼 수 있다. Hydran 201i는 센서부, CPU 및 I/O 모듈부, 가스농도를 전기적 신호(4~20mA) 및 Serial Signal(0~1,999ppm)로 송신할 수 있는 제어부로 구성된다.

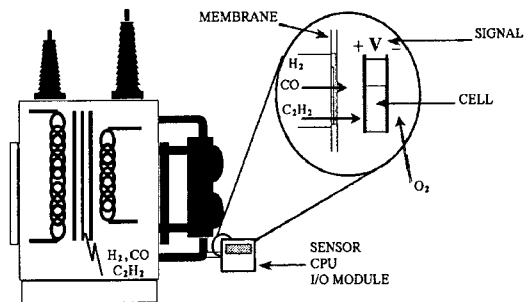


그림 2. Hydran 201i의 센싱 원리

## 2.1 유동해석 방정식

절연유류의 유동은 권선 및 철심의 발열에 의하여 유온도가 증가함에 따라 생긴 밀도의 변화가 부력으로 작용하여 상승류를 발생시키는 것에 의해 일어난다. 이것은 목욕탕의 온수나 공조된 실내의 공기 유동 등의 예에서 찾아 볼 수 있다.

본 연구에서는 절연유류의 유동을 해석하기 위하여, navier-stokes 2차원 연속방정식과 체적력(중력, body force)을 포함시킨 유체흐름의 운동량 계산 방정식을 사용하였다.

이때, 절연유류의 유동은 온도변화에 의한 밀도변화는 부력항만 작용한다고 가정하는 boussinesq 근사법을 적용하였다. 이때, boussinesq 근사는 절연유류의 유동속도가 느리고, 밀도가 일정하여 비압축성 유동을 조건으로 한다.

체적력은  $-\rho g$ 를 취하고, 압력 P는 유체가 받는 중력에 의한 압력분포, 온도차에 의한 밀도변화 부분으로 분리된다. 따라서 부력항은  $(\rho_0 - \rho)g = \rho_0 g \beta (T - T_0)$ 로 나타나며, 방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_0)$$

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + S$$

여기서,  $\rho_0$ 는  $T_0$ 에서의 초기밀도,  $\beta$ 는 체적팽창계수이다.

수치해석에 사용한 변압기 절연유류의 물성치는 표 1과 같으며, 온도변화에 의한 물성치의 변화는 일정하다고 가정하였다. 또한 발열원 부분과 냉각 부분에서 일정한 온도로 열의 출입이 있다고 고려하여, 대류 열전달 이외의 열전달은 무시하였고, 자연대류에서의 유동형태를 나타내는 무차원수는 다음과 같이 결정하였다.

- Heat source : constant Temperature = 330 K
- Cooling : constant Temperature = 300 K
- 3-Dimensional Modelling
- x 방향 ; 길이 방향, y 방향 ; 직경방향, z 방향 ; 중력방향

표 1. 변압기 절연유류의 물성치

밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	비열 (J/kg)	열전도도 (W/m)	점성 (kg/m)	체적팽창계수 (1/K)		
910	1880	0.145	0.012	0.0006		
중력가속도 (m/s <sup>2</sup> )	온도차 (K)	특성 길이 (m)	Gr 수	Pr수	Ra수	
9.8	30	2.4	$1.4 \times 10^{10}$	155	$1.59 \times 10^{12}$	

### ■ Grashof number

$$Gr = \frac{\rho^2 g \beta \Delta T L^3}{\mu^2}$$

Grashof number는 자연대류에서 유체유동이 층류인지, 난류인지를 결정하는 주요 판단기준이 된다. 수직판

의 경우 임계 Gr 수는 약  $10^9$ 이 된다. 따라서 수직판에서 유동형태는  $10^9$ 보다 큰 Gr 수에서는 난류가 된다. 변압기 절연유류의 Grashof number는  $1.4 \times 10^{10}$ 으로 조사되어, 난류형태로 나타났다.

### ■ Prandtl number

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

Prandtl number는 점성과 열전도도의 비를 나타내는 무차원수로, 점성에 따른 대류의 발생 및 형태를 볼 수 있다. 변압기 절연유류의 Prandtl number는 155로 나타났다.

### ■ Rayleigh number

$$Ra = \frac{\rho^2 g \beta \Delta T L^3 C_p}{k \mu} = Gr * Pr$$

Rayleigh number는 유체 중에 있어서 부력과 온도 구배의 곱과 점성과 열전도도의 곱의 비를 나타낸 무차원수로, 열적 불안정도의 이론에 있어서 임계값에 관한 파라미터이다. 변압기 절연유류의 Rayleigh number는  $1.59 \times 10^{12}$ 로 나타났다.

## 2.2 수치해석 결과

절연유류의 유동을 이해하기 위하여 연결 파이프 부분의 절연유류의 속도를 해석하였고, 특히 센서의 삼투막과 만나는 말단에서의 유동 분포를 모의하였다.

실 변압기와 유사하게 모의하기 위하여, 변압기와 센서의 연결 파이프의 길이는 330mm, 지름은 80mm로 적용하였고, 변압기 내부 발열원의 온도는 330K, 외부 온도는 300K로 적용하였다.

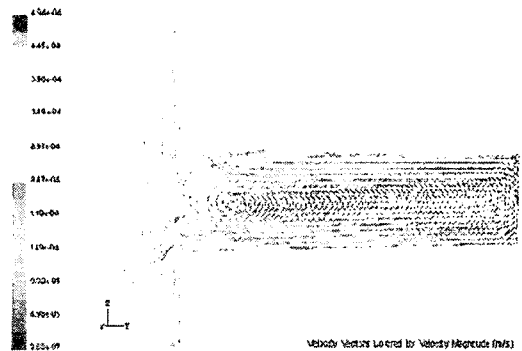


그림 3. 파이프 연결 부위의 속도 분포(대칭면)

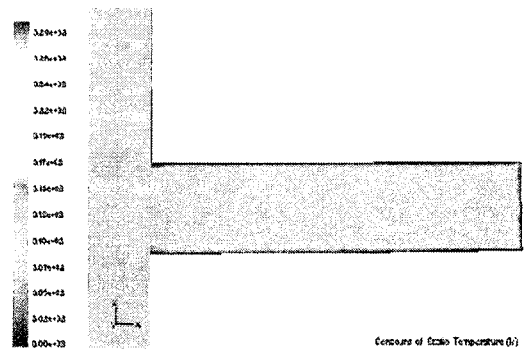


그림 4. 파이프 연결 부위의 온도 분포 (대칭면)

그림 3과 4는 연결 파이프 부위의 속도를 나타낸 3차원 유동해석의 결과이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, 절연유의 속도는 변압기와의 접합 부위에서 맴돌이를 하고, 상대적으로 파이프의 표면부위에서 빠르게 나타났다. 또한, 절연유가 membrane 쪽으로 근접하는, 변압기로부터 멀어질수록 유속이 감소하는 것을 보여준다.

또한 그림 4의 온도 분포에서 볼 수 있듯이, 파이프의 표면을 제외하고는 대체적으로 비슷한 온도 분포를 나타내나, 말단으로 갈수록 온도가 떨어짐을 알 수 있다.

절연유 내부 용존 가스의 분석을 위해서는, 절연유가 유증가스 측정기의 membrane에 도달하여야만 한다. 이것을 증명하기 위하여, 연결부위인 파이프 내에서의 x, y, z축에 대한 속도를 계산하였다.

그림 5, 6 및 7은 파이프 연결부위의 x, y, z축별 속도 분포를 나타낸 것이다. 여기서 x는 연결 파이프의 길이 방향이고, z는 변압기 상하 방향을 나타낸다.

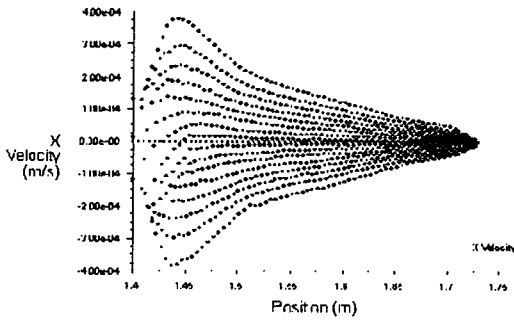


그림 5. 파이프 내부 x축 방향 속도분포

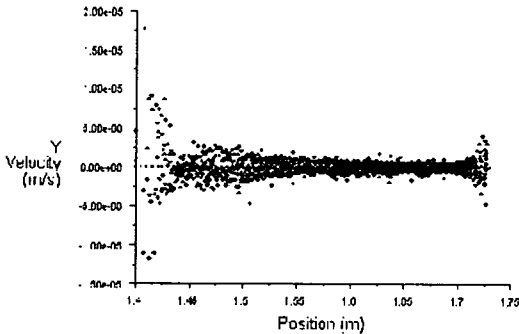


그림 6. 파이프 내부 y축 방향 속도분포

그림 3의 결과와 마찬가지로 그림 5, 6 및 7의 결과는 변압기와 파이프의 연결 부위에서 x와 z의 속도가 최대로 나타났으며, membrane에 도달할수록 속도가 감소하는 것을 나타내었다.

변압기의 내부에서 발생한 열로 인하여 상승한 절연유는 온도가 어느 정도 내려간 후 변압기의 벽면을 타고 하강하며 순환한다. 하강유는 파이프 부근에 도달하였을 때, -z 방향으로의 속도가 +x 방향의 속도로 바뀌는 것을 알 수 있다. 파이프 부근과 내부의 유동의 크기는 x, z 방향, 속도를 통해 알 수 있다.

내부의 유동 속도는 파이프 입구 부근에서 x축 방향으로 최대 약 0.4[mm/s]로 나타났다. 이는 파이프 입구 부근에서는 -z 방향의 하강유가 파이프 내부로 유입되고 내부로 갈수록 파이프 외부와의 온도차가 적어지고 점성의 영향으로 유동속도가 떨어지게 되는 것으로 해석된다. 유동 속도가 떨어지므로 고온의 유체와 파이프내의 저온 유체가 잘 섞이지 않게 되어서 파이프 내의 유체는

끝단으로 갈수록 온도가 떨어지는 것을 알 수 있다. 이것은 파이프에서의 온도분포로 확인할 수 있다. 하지만, 센서쪽 말단에 근접하였을 때 x축 방향의 속도가 줄어드는 대신에, -z축 방향으로 하강 속도가 발생하게 된다.

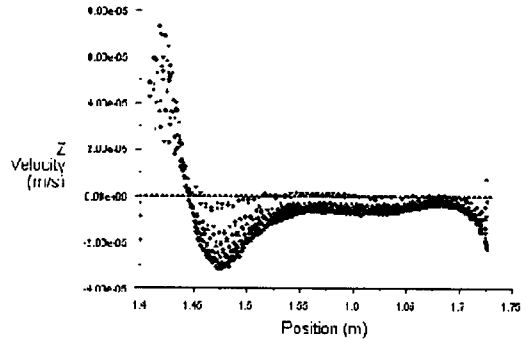


그림 7. 파이프 내부 z축 방향 속도분포

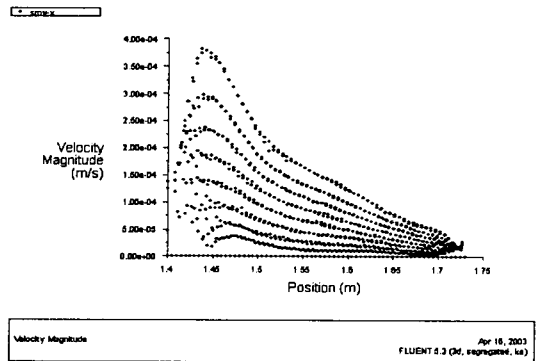


그림 8. 파이프 내부 x, y, z축 벡터 합 속도분포

그림 8은 파이프 내의 유속을 나타내는 x, y, z의 벡터 합을 보여준다. 파이프내의 전체적인 벡터합을 고려했을 때, 절연유가 센서의 membrane과 만나는 지점에서도 역시 절연유의 유동이 일어나 약 0.025[mm/s]의 절연유의 순환이 일어남을 알 수 있다.

### 3. 결 론

온라인 유증가스 측정기의 신뢰성을 확보하기 위하여 본 논문에서는 유동해석 프로그램인 Fluent 5.3과 Gambit 프로그램을 이용하여, 변압기 내부의 열에 의한 대류현상에 의해 순환하는 절연유가 좁은 파이프를 통하여 유증가스 측정기의 삼투막까지 도달하는 유동현상을 해석하였다. 모의 결과, 자연대류에 의한 절연유는 비록 파이프를 통과함에 따라 유동 속도가 감소하기는 하였으나, 연결 파이프를 통하여 유증가스 측정기의 membrane까지 도달함을 알 수 있었고, 그 속도는 약 0.025[mm/s]임을 알 수 있었다. 이것은 일정한 외부 조건과 파이프의 길이 조건이 성립된다면 유증가스 측정의 신뢰성을 보장하는 것이다. 앞으로 예방진단시스템의 신뢰성 확보에 많은 도움을 줄 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 권 동진 외, "765kV 변전기치 예방진단시스템 개발", 한전 전력연구원 최종보고서, pp.1-128, 2001.
- [2] "Hydran 201i 사용설명서", GE Syprotec, 1999