

# 원자력발전소의 증기발생기 수위계측 오차 원인분석

## Cause Analysis of Level Measurement Error in Steam Generator of Nuclear Power Plant

이광대\*, 오응세\*\*, 양승옥\*\*\*  
(Kwang-Dae Lee, Eung-Se Oh, Seung-Ok Yang)

**Abstract** - The differential pressure method has been used in the level measurement of steam generator in nuclear power plant. Two sensing lines from a steam generator to a pressure transmitter are needed to measure the high pressure and low pressure. The fluid conditions in the sensing line require the uniform phase with no bubbles and the slope of sensing line should be installed with forward slope. The expansion of the bubble volume according to the upper pressure and the reverse slope of sensing lines explain how the level errors took place.

**Key Words** : level, measurement, differential pressure, measurement error, steam generator

### 1. 서론

원자력발전소의 증기발생기는 원자로의 핵연료로부터 열을 전달받은 약 330℃의 냉각제를 1차 열원으로 하는 수직 원통형의 열교환기이다. 여기에서 발생한 2차 증기는 터빈을 회전시켜 발전기로부터 전기를 생산하게 된다. 증기발생기는 원자로 냉각제의 중요한 냉각원인으로 안전상 냉각원 유지의 보증을 위하여 수위 제어는 매우 중요하다.

제어를 위한 수위 계측방법으로는 차압식을 사용하고 있으며 설정값은 1차 원자로냉각제의 온도에 연동하여 프로그램화 되어있다.

본 논문에서는 최근에 운전중 관찰되고 있는 증기발생기 수위 신호의 ±20cm 계단 변동 현상의 원인을 분석하였다. 이를 위하여 계측 루프의 센싱라인 점검, 센싱라인 내부의 유체 거동 시나리오 개발과 유체 거동 시험을 하였으며, 부적절한 센싱라인 설치와 내부 기포에 의하여 유발됨을 확인하였다.

#### 1.1 증기발생기 수위계측 원리

원자력발전소의 증기발생기 수위는 그림 1 과 같이 차압식을 사용하고 있다. 측정하고자하는 범위를 중심으로 상부 제한치 위치에 상부 탭, 하부 제한치 위치에 하부 탭이 설치되어있다. 증기발생기는 수위를 중심으로 아래 영역에서는 물과 증기의 혼합유체, 상부 영역에서는 증기로 구성된다.

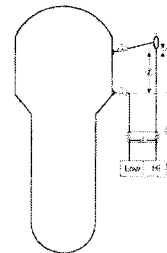


그림 1. 증기발생기 수위 계측도

수위는 하부 탭과 상부 탭 사이의 유체 압력 차이를 측정하여 계측한다. 순수한 증기 압력을 계측하기 위하여, 증기 압력을 측정하는 상부 탭의 약 25cm 상부에 콘덴싱 포트가 설치되어있으며 기준 압력으로 사용한다. 수위 계측 범위(상부 탭과 하부 탭 사이)는 약 3.7m, 하부 탭에서 차압 전송기까지는 약 1.7m 정도이다.

정확한 차압식 수위계측을 위해서는 다음이 만족되어야한다.

- (1) 상부 및 하부 탭과 차압 전송기사이의 센싱라인은 동일한 유체조건일 것.
- (2) 센싱라인 내에는 기포가 없는 순수 액체로 채워져 있을 것.
- (3) 센싱라인이 적절한 기울기로 설치되어 내부 기포의 배출이 용이할 것.

다음의 운전 조건을 고려하여 전송기의 고압 탭에서의 압력을 계산하면 603 g/cm<sup>3</sup> (591 mbar)이다.

- (1) 센싱라인 높이(①+②+③) : 606cm
- (2) 정상 운전 압력 : 56.8 bar
- (3) 센싱라인 주변 온도 : 40℃
- (4) 센싱라인 내의 유체 밀도 : 0.99473 g/cm<sup>3</sup>

#### 저자 소개

- \* 이광대: 한국전력공사 전력연구원 I&C그룹
- \*\* 오응세: 한국전력공사 전력연구원 I&C그룹
- \*\*\* 양승옥: 한국전력공사 전력연구원 I&C그룹

## 1.2 수위 신호 변동 현상

발전소 운전중 수위 신호에서 오차가 발생한 현상은 그림 2 와 같다.

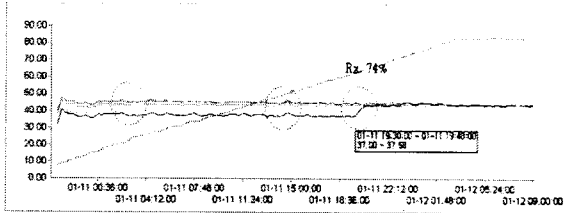


그림 2. 수위 계측 오차 발생 현상

원자로 출력이 상승하는 동안에 3개의 증기발생기 수위 신호가 약 20cm 정도로 계단 상승하는 현상을 보여준다. 증기 발생기 상부 압력 제어 설정값이 원자로 출력으로부터 프로그램 됨으로 수위 오차는 상부 압력 변화로부터 유발됨을 알 수 있다.

## 2. 수위 오차 원인 분석

수위 오차 원인 분석을 위하여 현장 센싱라인의 설치 현황 조사와 이를 바탕으로 한 센싱라인 내부 유체 거동 시나리오를 만들고 시험을 통하여 원인을 확인하였다.

### 2.1 현장 센싱라인 조사

증기발생기 센싱라인의 설치 모습은 사진 1, 설치도는 그림 3 과 같다.

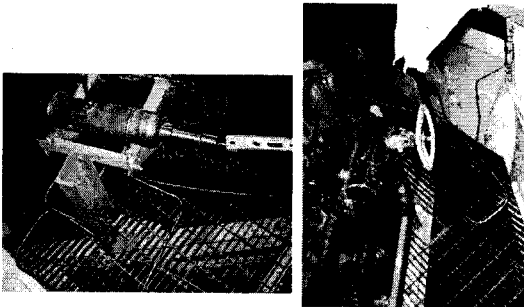


사진 1. 증기발생기 센싱라인 설치 모습(상부, 하부)

상부 및 하부 탭과 차압 전송기 사이의 센싱라인은 증기발생기의 수직 열팽창을 고려하여 중간 부분에서 곡관부가 있다.

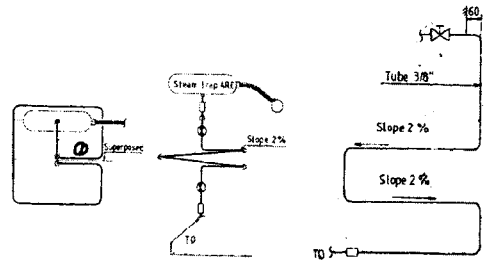


그림 3. 센싱라인 설치 도면(상부, 하부)

### 2.2 센싱라인 내부 유체 거동 시나리오 작성

차압식 수위계측에서 고압 측과 저압 측 센싱라인 내부는 기포가 없는 순수한 유체로 채워져야 한다. 일반적으로 차압 전송기를 교정할 때에는 센싱라인을 전송기로부터 분리한 후, 연결하기 때문에 이 과정에서 센싱라인 내에 기포가 유입된다. 작업을 종료한 후에는 전송기의 드레인 포트를 이용하여 센싱라인의 충수와 여분의 기포를 배출하게 되는데, 이때 기포가 많은 유체로 충수할 경우에는 기포가 도리어 유입되게 된다.

그림 4 에서는 센싱라인 내부의 기포들이 센싱라인의 역슬로프 지역으로 모이고 기포 수직부 길이 만큼의 수위 오차를 발생시킬 수 있음 보여준다.

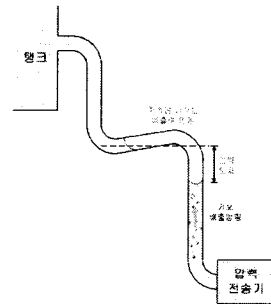


그림 4. 역슬로프 센싱라인 내부에서의 유동

그림 5 는 하부 센싱라인의 □ 곡관부의 수직부에 기포가 모여 있고, 상부 수평부가 역슬로프인 경우, 증기발생기 상부 압력에 따른 유동을 나타낸다. 상부 압력이 작을 경우, 수직부의 기포는 팽창하면서 상부 역슬로프 영역으로 일부 혹은 전부가 이동하게 된다. 상부 압력이 클 경우, 수직부의 기포는 수축하면서 수직부로 이동하고 수직부를 대부분 차지하게 된다. 따라서 센싱라인 내부의 기포가 수직부를 얼마나 차지하는가에 따라서 수위 오차는 다르다.

그림 6 은 상부 센싱라인의 □ 곡관부에 기포가 있을 경우의 증기발생기 상부 압력에 따른 유동을 나타낸다. 상부 센싱라인의 □ 곡관부는 총 길이가 약 2m 정도로 기포는 대부분 수평부에서 유동을 하게 되고 수위 오차는 발생하지 않는다.

실제 발전소에서 관찰되는 수위 오차는 원자로 출력(혹은

증기발생기 상부 압력)에 따라서 최대 20cm 가 발생하고 출력 증가 시에는 수위 증가, 출력 감소 시에는 수위 감소 현상을 나타내므로 위의 유동 시나리오의 가정은 적절하다고 판단된다.

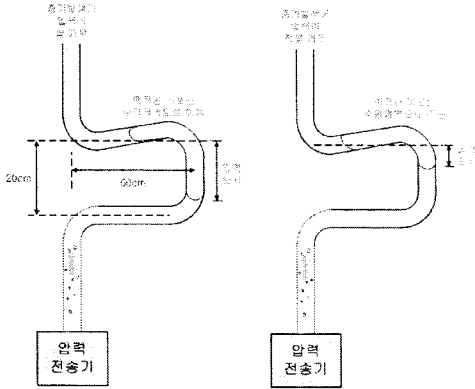


그림 5. 하부 센싱라인에서 □ 곡관부의 유동

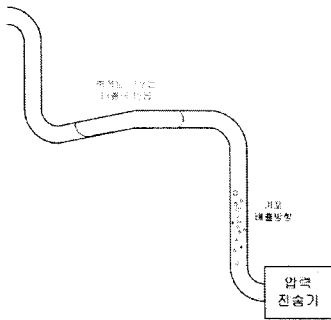


그림 6. 상부 센싱라인에서 □ 곡관부의 유동

### 2.3 센싱라인 내부 유동 시험

유동 시나리오를 확인하기 위하여, 유사한 압력 변화 조건에서 센싱라인 내부의 유동을 확인할 수 있도록 사진 2와 같이, 유동 실험을 수행하였다.



사진 2. 센싱라인 내 유동 확인 시험

실험은 발전소의 운전 압력의 1/10인 약 5기압에서 수행하였으며, 상부 기체압력에 따라 □곡관부의 수직부와 역슬로프 수평부의 기포 유동이 가정한 시나리오와 동일하게 발생함을 확인하였다. 사진 2의 적색 화살표는 상부 기체 압력을 증가시켰을 때, 기포가 축소하면서 수직부로 이동하는 것을 보여준다.

### 3. 결론

원자력발전소의 증기발생기 수위 계측에는 차압식이 사용되며 센싱라인의 설치 및 내부 유체 조건에 따라서 계측 오차를 유발할 수 있다. 실제 발전소에서 발생하는 수위 오차 원인을 규명하기 위하여 센싱라인의 설치 조건을 확인하고 센싱라인 내부의 유동 시나리오를 만들어 원인을 분석하였다. 이 시나리오를 통하여 수위 오차는 하부 센싱라인 내부의 기포 유동에 의하여 발생할 수 있음을 규명하였다. 또한, 센싱라인 유동 실험을 통하여, 증기발생기 압력에 따라서 하부 센싱라인 내부에 있는 기포 유동으로 인하여 수위 오차가 발생할 수 있음을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] Bela G. Liptak, "Process Measurement and Analysis", The Instrumentation, Systems, and Automation Society, pp. 454-464, 2003.
- [2] ANSI/ISA-67.02.01-1999, "Nuclear Safety-Related Instrument-Sensing Line Piping and Tubing Standard for Use in Nuclear power Plants", ANSI, pp. 22-24, 1999.
- [3] AECL, "Requirements for the Installation of Stainless Steel Tubing", Atomic Energy of Canada Limited, pp. 8-10, 1995.
- [4] FRAMATOME, "Operation and Maintenance Manual of Steam Generator", pp. 8-19, 1989.