

원전 주급수 유량측정용 오리피스스의 차압 비정상 고찰

이우광*† · 김계연* · 고우식*

Investigation of Orifice delta pressure abnormal condition for measuring Main Feed Water Flow in Nuclear Power Plant

Lee, Woo Kwang*†, Kim, Kye Yun*, Ko, Woo Sig*

Key Words : Orifice(오리피스), Feedwater(주급수), Reverse Plate(역설치), Flow calculation(유량 계산), Venturi(벤투리)

ABSTRACT

The orifice establishment which is improper does to change the entity differential pressure and occurs an error in flow measurement data. Because of this, the thermal power of nuclear power plant could be evaluated excessively and the safety margin could be decreased. In this paper, characters of orifice which is established abnormally was investigated. Specially, the orifice plate which is established in opposition case was modeled and analyzed. Finally, 14.4% was lowly measured differential pressure, when being established in the resultant opposition. And this result with EPRI and NRC experiences was similar.

1. 서 론

국내 원자력발전소는 전체 전력설비에서 설비용량의 30%를 차지하고 연간 전력생산량의 약 40%를 차지하고 있다. 원자력 발전소는 원자로에서 핵분열 시 발생하는 열로 1차측 냉각수를 가열하고, 가열된 냉각수는 증기발생기로 이송되어 증기발생기에서 2차측 주급수에 열을 전달하고 다시 원자로 내부로 이송된다. 증기발생기에서 2차측 주급수는 가열되어 고온고압의 포화증기가 되며, 이 증기를 이용하여 터빈을 회전시키고, 회전력을 이용하여 전기를 생산하게 된다.

원자로 출력은 원자로에서 누설되는 중성자의 수량을 검출하여 나타내는 원리이므로 연료의 장전패턴, 노심초기 혹은 말기, 봉산농도 등의 운전조건에 따라 누설되는 중성자 수량이 변화하므로 정확한 측정이 되지 않는다. 이러한 이유로 2차 계통에서 주증기 및 주급수의 온도 및 압력, 주급수 유량을 측정하여 열출력을 측정하고 이를 기준으로 원자로 출력을 주기적으로 보정한다.

주급수 유량은 Venturi 혹은 Orifice를 이용하는 것이 일반적이며, 최근 미국에서 초음파 유량측정설비를 도입하여 정확한 측정을 하기 위한 연구가 진행 중이다.⁽¹⁾ 또한 국내에

서는 초음파 유량측정 설비 도입과 기존의 Venturi 및 Orifice의 관리방안에 대한 연구가 진행 중이다.

대부분의 발전소에서는 주급수 유량측정 시 Venturi를 사용하고 있으나, 프랑스형 발전소는 Orifice를 사용하고 있다. Orifice는 가격이 저렴하고 설치 및 정비가 용이한 장점이 있으나, Orifice의 변형, 마모, 반대방향설치 등의 비정상 상태가 발생할 수 있다.

만일 Orifice의 비정상 상태에서 주급수 유량이 실제보다 많은 것으로 측정되면, 정격출력운전 시 100%보다 낮은 전기출력을 생산함에 따라 경제적 손실이 발생하며 반대로 유량이 실제보다 적게 측정되는 경우에는 과출력을 유발하여 원자로 안전여유가 감소된다.

본 논문에서는 원자력 발전소의 안전성 저해방지 및 경제적 손실을 방지하고자 주급수 유량측정에 사용되는 Orifice의 비정상적인 상태에 대한 영향을 고찰하고자 한다.

2. 주급수 유량 측정

2.1 열출력 계산

원자로 열출력 계산에 필요한 변수는 Fig. 1과 같이 주급수 및 취출수 유량과 주급수, 주증기 및 취출수 엔탈피의 값이 필요하며 다음 식과 같이 계산된다.

* 한국전력공사 전력연구원

† 교신저자, E-mail : ab850401@kepco.co.kr

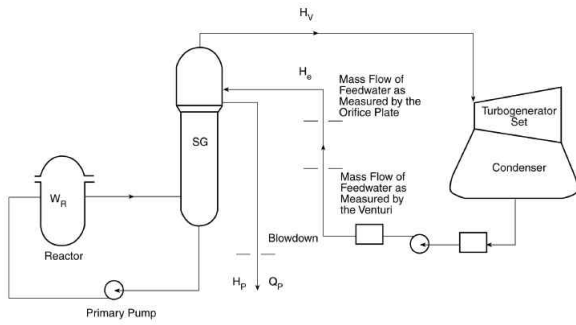


Fig. 1 Thermal Power Measuring Point

$$W_R = \sum_{i=1}^n (Q_{ARE}^i (H_v^i - H_e^i) - \frac{Q_p}{n} (H_v^i - H_p^i)) - W_k nk \quad (1)$$

W_R = thermal power

n = number of loops

Q_{ARE} = feedwater flow

H_v = feedwater enthalpy at the SG outlet

H_e = feedwater enthalpy at the SG inlet

Q_p = blowdown flow

H_p = blowdown enthalpy at the SG outlet

W_k = primary power not coming from the core

위와 같이 계산된 원자로 출력은 원전연료의 안전성을 확보하기 위해 정격열출력 대비 허용오차를 2% 이내로 제한한다. 이 오차의 대부분은 주급수 유량을 측정하는 과정에서 발생하므로 주급수 유량측정의 정확성이 중요하다.

2.2 주급수 유량 측정방법

프랑스형 $\Delta\Delta$ 발전소는 Fig. 1과 같이 각 증기발생기 Loop 마다 두 개의 유량측정장치를 사용한다. 첫 번째는 증기발생기 수위제어 등의 제어를 위해 Venturi를 사용하며, 두 번째는 성능시험을 위해 ISO 표준 Orifice를 활용하고 있다. 제어용 Venturi는 시험용 Orifice로 교정을 수행하므로 많은 정확성이 요구되지 않는다.

프랑스형 $\Delta\Delta$ 발전소에 활용하는 Orifice plate는 Fig. 2와 같은 형태이다.⁽²⁾

Orifice는 전 후단의 차압(Δp)을 측정하여 유량을 계산하는 방식으로, 전단 및 후단 Tap 사이의 에너지 평형을 이용하는 베르누이 공식을 적용한다.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2gc} + \frac{g_L}{gc} z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2gc} + \frac{g_L}{gc} z_2 \quad (2)$$

상기 식과

$$q_m = \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2$$

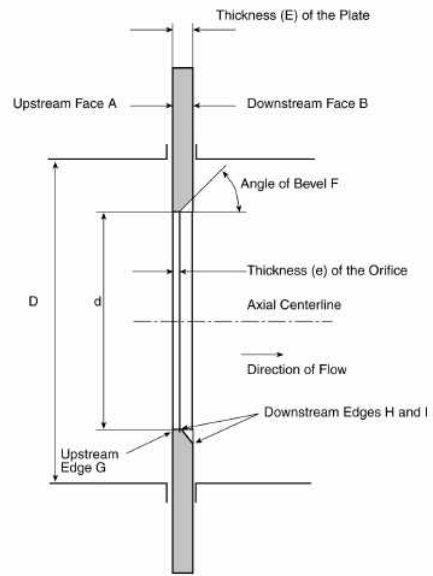


Fig. 2 Orifice Plate

(3)

을 이용하여 질량유량 공식을 유도하면 다음과 같다.

$$q_m = \frac{\pi}{4} C A_f d^2 \epsilon \sqrt{2(\Delta p)\rho}$$

(4)

q_m : mass flow

C : discharge coefficient

A_f : $1/\sqrt{1-\beta^4}$ velocity of approach factor

ϵ : expansion factor

Δp : differential pressure

ρ : fluid density

β : d/D beta ratio

d : diameter of orifice

D : diameter of pipe

일반적으로 전단 압력을 측정하는 Tap과 Orifice에서의 거리는 직경(D)와 같은 길이를 적용하고, 후단압력을 측정하는 Tap은 D/2를 적용하나, Fig. 3과 같이 차압이 100%인 Vena Contractor 점에 Tap이 위치하기도 한다. ASME Code

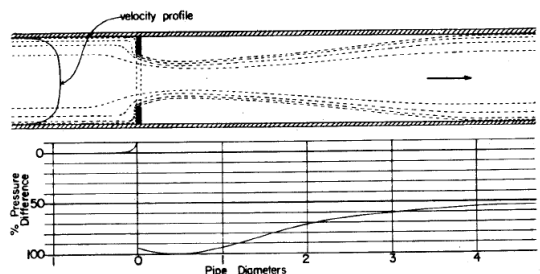


Fig. 3 Flowing through orifice plate

에서는 β (d/D)을 $0.20 < \beta < 0.75$ 로 제한하며, 발전소에서 는 압력손실을 감소하기 위해 β 를 $0.64 < \beta < 0.75$ 범위에서 활용하고 있으며, 이 값은 압력감소가 약 1 bar 정도이다.⁽³⁾

2.3 주급수 유량 계산

$\Delta\Delta$ 원자력 발전소의 실제 유량계산은 질량유량 계산공식 에 실험식을 이용하며 다음과 같이 표현한다.

$$Ad1 = \frac{\pi}{4} Doff^2 \cdot Fac \cdot \sqrt{2\Delta P\rho} \quad (5)$$

$$Fac = Xo + Bo \cdot \sqrt{\frac{10^6}{ReD}} \quad (6)$$

$$Xo = 0.5922 + 0.4252 \left(\frac{0.3871}{Dpff1^2 \beta^2 + 0.254 Dpff1} + \beta^4 + 1.25\beta^{16} \right) \quad (7)$$

$$Bo = 0.00025 + 0.002325 \cdot (\beta + 1.75\beta^4 + 10\beta^{12} + 0.07874 \cdot Dpff1 \cdot \beta^6) \quad (8)$$

$$ReD = \frac{4 \cdot Ado}{\pi \cdot visco \cdot Dpff} \quad (9)$$

Ad1 : Corrected final feed water flow(kg/s)

Dof : Orifice inside diameter(m)

Doff : Orifice Inside Diameter 보정값(m)

Dpff : Pipe Inside Diameter 보정값(mm)

β : Ratio of Diameter (Doff/Dpff)

Fac : Corrected Flow Coefficient

Xo : Flow Coefficient를 구하는 변수

Bo : Flow Coefficient를 구하는 변수

ReD : Reynolds Number

위 계산식에서 Xo 및 Bo는 실험식을 활용한 변수이며, 유 량계산에 오차를 유발할 수 있는 요인은 Dof, Dpff, Doff, β , visco, Den이다. 특히 Dof, Dpff, Doff, β 는 Orifice 및 배관의 내경 측정당시의 기준온도에 따라 달라지므로 치수 측정 시 온도관리에 유의하여야 한다.⁽⁴⁾

3. Orifice 차압 비정상 지시

3.1 Orifice 성능관련 인자

Orifice의 성능은 Orifice가 설치된 배관과 Orifice plate 의 상태에 따라 달라진다.

3.1.1 배관의 영향

배관내부의 거칠기, 배관 연결부의 Misalignment 및 Poor designed installations는 유체에 소용돌이를 발생하 여 차압에 영향을 줄 수 있다.

3.1.2 Plate의 영향

Orifice plate의 성능에 영향을 줄 수 있는 것은 다음과 같다.

- 상, 하류 Tap의 Blockage 혹은 Obstructions
- Orifice plate Edge의 Dull 혹은 Nicked
- Bent 혹은 Deformed plate : Orifice의 크기변화와 Beta ratio(β)의 변경
- Orifice의 중심과 배관의 중심 불일치
- Flexing plate
- Pulsing flow
- Reversed plate

3.1.3 Orifice의 관리방안

Orifice의 정확한 차압측정을 위해서 배관과 Orifice plate는 초기설치 및 분해점검 시 다음과 같은 항목에 대해 적정 주기로 관리할 필요가 있다.

- Overall flatness
- Overall surface smoothness
- Sharpness of the upstream orifice edge
- Diameter of the orifice bore
- Thickness of the orifice edge
- Cleanliness of the orifice plate surface

3.2 Orifice 차압 비정상 원인

3.2.1 Orifice Bore edge sharpness

Orifice가 제작오차 혹은 운전상 마모 및 찢긴 자국으로 인하여 Orifice 전단 Edge가 현저하게 둥글게(Roundness) 되면 차압의 변화로 유량을 작게 측정할 수 있다.⁽⁵⁾ Roundness에 의한 영향을 Spenser에 의한 실험식으로 유량 오차를 계산하면 다음과 같다.

$$DCd(\%) = 5.5 \times 1.3 \times \left(\frac{rEdge}{d} \right) \quad (10)$$

D Cd(%) : 유량오차

d: orifice bore diameter

rEdge : bore edge sharpness

rEdge값을 0.025mm로 가정하고 $\Delta\Delta$ 발전소의 Orifice 내 경(254.78mm)을 입력하여 계산한 결과 유량오차는 0.07%로 매우 작음을 알 수 있다.

3.2.2 Orifice Bent 혹은 Deformed plate

정상적인 Orifice는 유로방향에 1° 이내로 편평해야하나, 전 후단 차압이 과다할 경우에는 Orifice가 Bent되는 경우가 있다. Bent로 인한 처짐 량이 작을 경우에는 Orifice 보어의 직경이 감소하여 유량이 실제보다 크게 지시하지만, Bent로 인한 처짐 량이 클 경우에는 Orifice 보어의 직경이 증가하

여 실제유량보다 적게 지시 한다. 탄성변형의 경우에는 실제 유량보다 0.5%정도 크게 지시하며, 정상위치에서 1°이상 변화되는 영구변형의 경우에는 실제유량보다 5~6%작게 지시 하게 된다.

3.2.3 Orifice 중심일치 불량

Orifice plate의 중심이 배관의 중심과 일치하지 못하는 경우 약 2%의 유량오차를 유발할 수 있다.

3.2.4 Orifice Flexing

Orifice가 설계조건을 초과하여 운전되는 경우 plate가 Flexing되며 Flex되는 양에 따라 유량을 작게 지시할 수도 있다.

3.2.5 Orifice Reverse plate

Orifice가 방향이 바뀌어 설치되는 경우 차압의 변화로 인해 유량 지시값이 변화된다.

4. Orifice Reverse plate 고찰

4.1 Reverse plate의 실험식

Orifice plate의 방향이 바뀌어 조립된 경우 Bevel측이 Upstream이 되고 Bevel은 깔때기 역할을 하게 된다. 이는 보다 쉽게 유체를 통과하도록 하여 동일한 유량에 대하여 정상보다 더 작은 차압을 형성하게 된다. 즉 Reverse plate는 측정오차를 유발하며, 측정오차는 아래와 같이 Morrow 와 George에 의한 실험식을 활용하여 계산할 수 있다.

$$\%DQ = -18.93 + 12.91\beta - 34.04\frac{E}{D} - 8.9\frac{e}{E} + 13.64\left(\frac{e}{E}\right)^2 \quad (11)$$

%DQ= 유량측정오차 (%)

e/E = Orifice bore to plate thickness ratio

E/D = Orifice plate thickness to meter tube diameter ratio

상기 식에 △△발전소의 Orifice제원을 입력하면 Reverse plate로 인한 유량편차는 -10.3%로 나타난다. 이 실험식은 천연가스를 기준으로 개발된 식으로 발전소 주급수 유량측정에 적용하기에는 정확성이 부족하다.

4.2 Reverse plate의 해석

실제 발전소의 유량측정에 있어 Reverse plate의 영향을 확인하기 위해 모델링을 수행하여 해석하기로 하였다. Fig 4. 와 같이 배관과 오리피스 제작도면을 사용하여 총 2250mm의

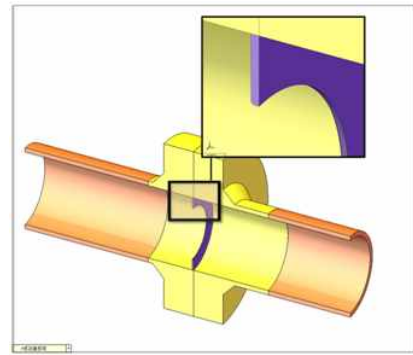


Fig. 4 Orifice Modeling

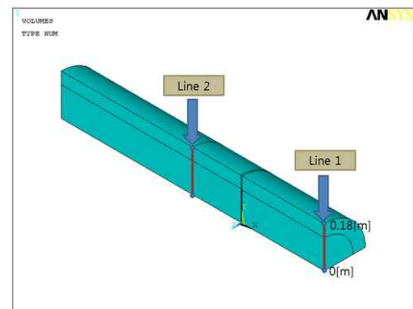


Fig. 5 Pressure measuring point of Orifice

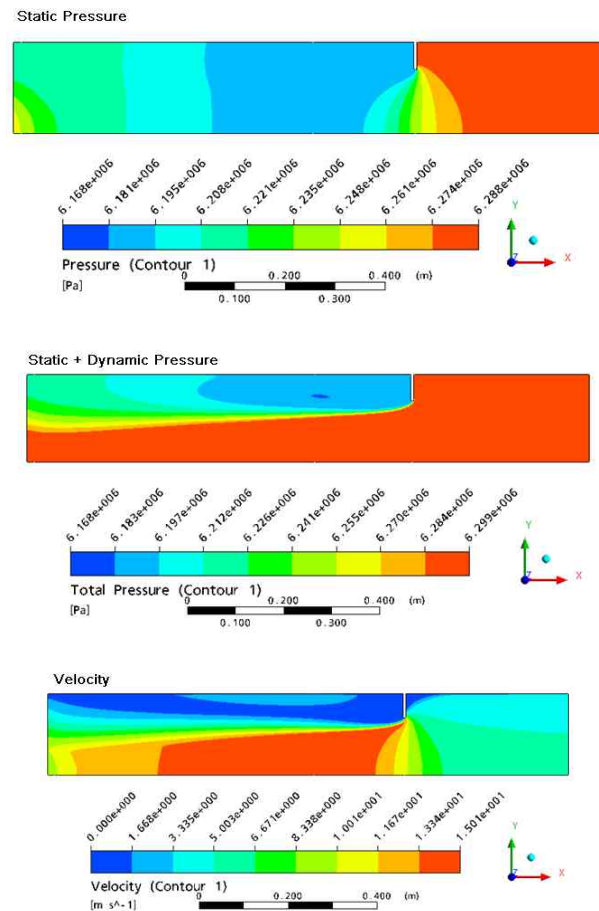


Fig. 6 Analysis result of normal Orifice

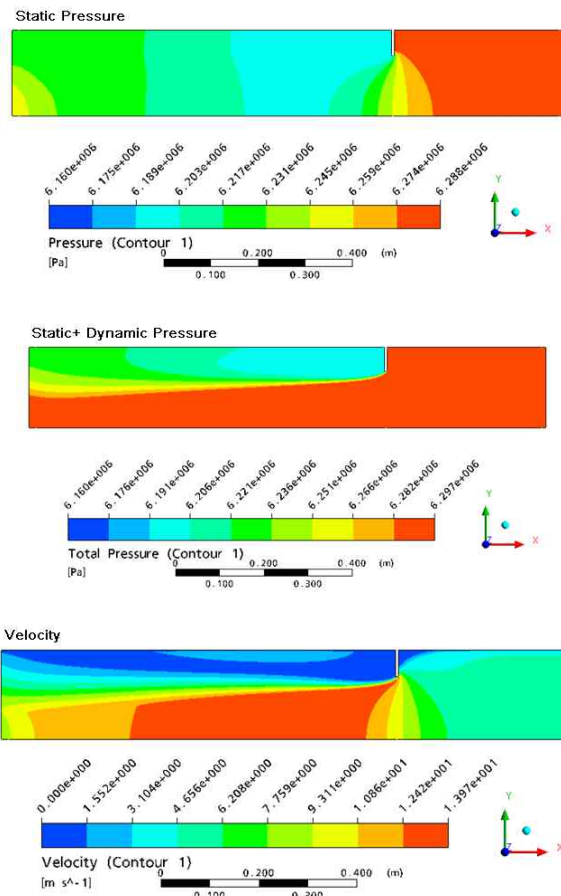


Fig. 7. Analysis result of reverse Orifice

길이를 하고 출구 측을 2/3정도 길이로 한 90° 유체 모델을 구성하였다. 정격출력에서의 유량 504.332kg/s, 압력 62.82 bar, 단상조건을 경계조건으로 입력하였으며, Turbulence option을 5%로 가정하였다. 해석의 정확성을 위해 오리피스 부위의 유체모델의 Mesh를 조밀하게 설정하였으며, 총 요소 수는 366,400개로 하였다. 또한 Orifice가 정상적으로 설치된 경우와 반대로 설치된 경우의 두 가지 모델을 상용해석프로그램(Ansys CFX)을 이용하여 해석하였다.

Fig. 5에서 Line 1은 Orifice 전단 압력을 측정하는 선이며, Line 2는 후단 압력을 측정하는 선이다. Orifice가 정상적으로 설치된 경우에 Fig.6에서 보는 바와 같이 Line 1에서 6,282,180Pa이며 Line 2에서 6,182,610Pa로 차압이 99,570Pa로 나타났다. Fig. 6과 동일한 조건에서 Orifice Plate를 반대로 설치한 경우 Fig. 7에서 보는 바와 같이 Line 1에서 6,282,180Pa, Line 2에서 6,197,080Pa로 차압이 약 85,100Pa로 나타나 정상적인 조건에 비해 차압이 약 14.5%가 감소하였다.

Fig.6과 7에서 정압과 동압을 같이 표시한 그림에서 오리피스가 정상적인 경우 파란색이 진하여 출구측 압력이 더 낮음을 알 수 있다.

정상조건인 주급수 배관 평균유속은 5.73 m/s이며, Orifice

Plate 후단에서의 정상상태 최대유속은 15.01 m/s이나 Orifice Plate가 반대방향으로 설치된 경우 흐름이 원활하게 되어 최대유속이 13.97m/s로 6.9%가 감소하였다.

4.3 Orifice 비정상 사례

4.3.1 해외사례

EPRI에 의하면 발전소 정비 기간에 Orifice를 재설치하는 경우 인적실수로 인해 문제점이 발생하는 경우가 대부분이며, 어떤 발전소는 작업자가 Orifice plate를 반대로 설치한 경우가 있어 이를 방지하기 위해 감독을 강화하거나 Plate에 방향을 표시하도록 하였다.

미국 NRC 보고서에 의하면 최근 Orifice plate의 문제점은 방향이 반대로 설치된 경우와 변형된 경우이며, XX발전소는 Orifice를 반대로 설치하여 실제원자로 출력을 4%이상 낮게 운전한 경우가 있었으며 급수가 아닌 다른 계통에서는 지시유량이 실제유량보다 15% 감소한 경우도 있었다.

4.3.2 △△원자력 발전소 사례

△△원자력 발전소 XX년도 계획예방정비 이후 증기발생기 A의 주급수 유량을 측정하는 Orifice 차압이 Table 1과 같이 다른 증기발생기 보다 약 14.40% 작게 지시하는 현상이 나타났다.

이때 총 열출력은 97.78%를 지시하는 상태에서 Venturi로 측정한 유량은 100%를 나타내었으며, Orifice로 측정된 증기발생기 A의 유량은 다른 증기발생기보다 -7.64%가 적게 나타났다.

△△발전소의 주급수 Orifice 차압이 비정상 지시를 나타낸 원인은 다음과 같이 진단할 수 있다.

- Orifice bore edge sharpness는 eEdge값을 0.025mm로 예상하여 계산한 결과 유량오차가 0.07%로 -7.64%와는 차이가 크므로 가능성이 거의 없다.

- XX년도 계획예방정비 기간 중에 Orifice plate가 변형되었을 경우 유량이 5~6% 적게 지시할 수 있으나, 20년 운영기간 동안 Orifice에 문제가 없었으므로 가능성이 희박하다. 또한 Orifice의 중심은 배관중심에 정확하게 안착되는 구조이며, 운전 중 설계차압을 초과한 비정상 상태가 없었으므로 Orifice plate의 중심 불일치 및 Flex가능성은 없다.

Table 1 Trend of Orifice ΔP & Flow

구분	차압(Pa)	유량(kg/s)	열출력(MWt)	총출력(MWt)
설계	117,455	504.33	928.25	2785.0
SG A	100,529	465.80	854.55	2723.2 (97.78%)
SG B	120,890	510.52	934.36	
SG C	119,820	508.71	934.31	
편차(%)	-14.40	-7.64	-7.94	-2.22

- 차압 비정상 현상은 정비기간 이후 나타난 증상으로 EPRI와 NRC 사례와 유사하며, 4.2항의 Reverse plate 해석 결과의 차압편차 14.5%와 Table 1의 실제 측정 차압편차 14.40%가 일치하므로 Reverse plate의 가능성이 높은 것으로 판단된다.

5. 결 론

주급수 유량측정을 위한 Orifice 차압측정에서 비정상적인 현상은 Orifice plate와 배관의 상태에 따라 측정값에 영향을 미치고 있으며, 실험식 혹은 해석에 의한 방법을 활용하여 비정상 상태의 원인을 진단할 수 있었다. 특히 △△발전소의 사례와 같이 14.5%의 차압편차는 실험식에 의한 진단결과와 차이가 있어, 모델링에 의한 해석방법을 적용한 결과 계산된 차압 편차와 실제 측정차압의 편차가 일치하여 해석에 의한 Orifice 비정상 상태의 원인분석 방법이 유용한 것으로 나타났다.

또한 급수배관의 유속이 정상상태에서 15.01 m/s이나 Orifice Plate가 반대방향으로 설치된 경우에는 유속이 13.97m/s로 감소하는 것으로 나타났다.

향후 Orifice의 비정상 지시를 방지하기 위해서는 설치 후

은 분해점검 시 Orifice plate의 형상과 치수에 대한 관리가 중요하며 Overall flatness, Overall surface smoothness, Sharpness of the upstream orifice edge, Diameter of the orifice bore, Thickness of the orifice edge, Cleanliness of the orifice plate Surface에 대한 관리가 필요하다.

참고문헌

- (1) 안용관, 2009, '초음파 유량계의 기술동향', 한국소음진동 공학회, Vol.19, No.5.
- (2) R.Shankar and T.Ekert, 2001, "Application of Orifice plates for measurement of feedwater flow EDF Plant", EPRI Report, 9-1.
- (3) 김계연 이우광, 2009, '주급수 유량측정 비정상 원인분석 보고서', 한국전력공사 전력연구원, 대전.
- (4) Howard S. Bean, 1971, "Fluid Meters, Their theory and Application", 58page, The American Society of Mechanical Engineers, New York.
- (5) "ASME PTC 19.5 Flow Measurement", An American National Standard, The American Society of Mechanical Engineers, New York (2004).