

추적자를 이용한 월성 1호기 증기발생기 주급수 유량 측정

정백순, 이선기

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

화학 추적자 방법에 의한 정밀 유량 측정기술을 개발하여, 원자력 발전소 주급수 계통의 유량 측정에 사용되고 있는 차압식 유량계의 유량검증에 활용함으로써 발전소의 안전성을 유지하면서 동시에 출력을 극대화하는 것을 목표로 추적자 이용 유량 측정법을 개발하였으며 그 정확도와 유효성에 대한 실험적인 검토를 하여왔다. 본 논문에서는 월성 1호기 증기발생기 주급수 유량측정에 동 방법을 적용한 결과를 통하여 추적자 방법의 유효성에 대하여 검토하였다.

1. 서 론

현재 원자력 발전소에서는 벤츄리(venturi), 노즐(nozzle), 오리피스(orifice) 등의 차압식 유량계가 사용되고 있으며, 벤츄리 유량계의 경우, 장시간 사용시 파울링(fouling) 현상에 의한 압력차의 증가로 인해, 실제의 유량보다 측정 유량이 크게 나타날 가능성이 있다. 미국의 여러 발전소에서 이와 같은 파울링 현상에 의한 주급수 유량의 과다 지시로 출력 결손이 발생한 사례가 발표되고 있다. 그러므로 상기와 같은 이유로 축소형 유량계를 사용할 때에는 정기적으로 유량계수(discharge coefficient)의 보정이 필요하며, 국내 원자력 발전소의 경우에도 별도의 기준 유량측정 시스템으로 유량계수를 보정할 필요가 있다.

발전소 설비를 설계변경하지 않고 사용이 가능한 유량계로서 초음파 유량계(ultrasonic flow meter)와 전자기 유량계(magnetic flow meter) 같은 비접촉식 유량계가 개발되어 사용되고 있다. 초음파 유량계는 설치의 간단하나, 정확도가 비교적 낮고 재현성이 부족하다. 또한 압력손실이 없고 응답성이 우수하며 정확도($\pm 1.0\%$)가 높은 전자기 유량계는 대상유체의 온도가 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하에서 사용이 가능하며 원자력 발전소에서 사용하는 전기전도도가 낮은 탈염수(demineralized water)에 적용할 수 없는 단점이 있다.

추적자 방법은 지난 수십년간 여러 연구기관들이 확립한 유량 측정법으로 개발된 것으로써 관내에 식염수를 정상유량(steady flowrate)으로 주입하여 그 관내에 설치한 전극 또는 샘플링 등의 방법으로 식염수의 통과 시간을 측정하여 유량을 측정하는 것^(1,2)으로 국제표준기구(ISO) 등의 관련규격으로 발표되어 있으나, 원자력발전소의 주급수 유량측정과 같은 실용적 적용 사례의 경우는 물론 정확도에 관한 보고도 거의 발표된 바 없는 실정이다. 최근 미국에서 ABB-CE 사가 추적자 방법으로 원자력 발전소 주급수 유량 측정 시스템을 개발하여 전세계 발전소의 주급수 유량

을 정확도 $\pm 0.5\%$ 로 측정 할 수 있다고 관련 기술의 상업화⁽³⁾를 하고 있으나, 상세한 기술내용에 대해서는 대외비로 하고 있다. 우리 나라의 발전소에서도 ABB-CE 사에 유량 측정 용역을 의뢰할 수 있으나 경제적 측면은 물론 국내 원전의 운용기술 자립 측면에서 주급수 유량검증 기술의 국내 개발이 크게 요구되고 있다.

본 논문에서는 저자들이 개발한 화학 추적자를 이용한 유량 측정기법⁽⁴⁾⁽⁵⁾을 월성 1호기 증기발생기 주급수 유량 측정에 적용한 결과에 대하여 보고한다.

2. 화학 추적자법

Fig. 1의 주 배관에 유체가 유량 Q_0 로 흐르고 있을 때, 이 배관의 주입 장소에서 농도 C_{in} 인 시료 용액을 유량 Q_{in} 으로 주입하면, 하류에서의 배관내 혼합 유량은 (Q_0+Q_{in}) 으로 나타난다. 여기에서 주입한 시료 용액의 농도가 하류 배관 단면에서 완전히 혼합되어 균일한 농도 분포를 나타낸다고 가정한다.

하류 배관 단면에서의 시료 농도와 유량을 각각 C_1 과 Q_1 이라고 하고, 질량보존의 법칙으로부터 다음의 식이 성립한다.

$$C_0 Q_0 + C_{in} Q_{in} = C_1 Q_1 \quad (1)$$

$$Q_0 + Q_{in} = Q_1 \quad (2)$$

식(2)을 식(1)에 대입하여 Q_0 에 관하여 정리하면 다음과 같은 식이 된다.

$$Q_0 = \frac{C_1 - C_{in}}{C_0 - C_1} \times Q_{in} \quad (3)$$

단, 주입 장소보다 상류측에서 시료 성분이 검출되지 않을 경우에는 C_0 는 0이다. 즉, 식(3)으로부터 배관내의 유량 Q_0 는 주입하는 시료의 유량 Q_{in} 과 각 장소에서의 시료 농도 C_0, C_{in}, C_1 을 알면 구할 수 있음을 나타내고 있다. 여기에서, C_0 는 상류측에서 검출되는 주입 시료 성분의 농도(ppm)이며 Q_0 는 배관내의 상류측 유량(m^3/min), C_{in} 는 주입하는 시료의 농도(ppm), Q_{in} 는 주입하는 시료 용액의 유량(m^3/min), C_1 는 하류 샘플링 용액에서 검출되는 주입 시료 성분의 농도(ppm), Q_1 는 하류의 혼합 유량(m^3/min)이다.

추적자 방법은 상류에서 주입한 추적자가 하류 배관단면에서 균일하게 혼합된 곳에서 샘플링하는 것이 중요하므로 균일하게 분포되기까지의 거리 및 시간을 수치적으로 계산하였다.

유체의 유동이 있는 영역에서의 물질(추적자) 확산은 다음의 확산방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + Q \quad (4)$$

여기에서, C : 물질의 농도(ppb), u : x방향(유동방향) 유속(m/s), v : y방향(반경방향) 유속(m/s), D : 확산계수 (m^2/s), Q : 단위 시간당 물질방출 강도($kg/m^3/s$)이다.

식(4)의 각항을 Taylor의 전개를 이용하여 정리하면 다음의 차분방정식이 얻어진다.

$$C^{n+1}_{i,j} = C^n_{i,j} - \frac{u\Delta t}{2\Delta x} (C^n_{i+1,j} - C^n_{i,j}) - \frac{v\Delta t}{2\Delta y} (C^n_{i+1,j} - C^n_{i,j}) + \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} (C^n_{i+1,j} + C^n_{i-1,j} - 2C^n_{i,j}) + \frac{D\Delta t}{\Delta y^2} (C^n_{i,j+1} + C^n_{i,j-1} - 2C^n_{i,j}) \quad (5)$$

초기조건으로는 직경 100 mm의 관에 20℃ 물이 유속 2.0 m/s로 흐르고 있으며 추적자는 배관 벽면에서 1.0 kg/m³/s의 방출강도로 연속적으로 주입되고 있다. 또한 경계조건은 다음과 같다.

$$\left. \frac{\partial C}{\partial n} \right|_R = 0 \quad (\text{관벽}) \quad (6)$$

$$-D \left. \frac{\partial C}{\partial n} \right|_R = q \quad (\text{하류경계}) \quad (7)$$

계산결과를 Fig. 2에 나타낸다. 가로축은 배관 길이를 배관직경으로 나누어 나타내고 있으며, 세로축은 농도를 나타낸다. 정상상태에 이르기까지 걸리는 시간은 추적자 주입 후 약 35초이며, 주입한 추적자가 하류 배관 단면에서 편차 0.2% 이내로 분포하기에는 배관 길이방향으로 배관직경의 약 300배가 필요하다. 한편, Fig.로 나타내지는 않았지만 같은 조건에서 추적자 주입을 배관 중앙에서 할 경우에는 배관직경의 약 96배가 필요하며 이때까지 걸리는 시간은 약 15초이었다. 또한 Reynolds수의 증가와 더불어 혼합에 필요한 길이도 증가한다.

3. 월성 1호기 증기발생기 주급수 유량 측정

월성 1호기는 4 Loop(4대의 증기발생기) 발전소로서 각 계통마다 1대의 노즐형 유량계가 설치되어 있으며, 배관 직경은 12 inch, 계통압력 60 bar, 온도 188 ℃로 운전되고 있다.

본 실험은 현장 여건상 3Loop에 대해서 수행하였으며 추적자의 주입은 계통에 설치되어 있는 주급수 조절밸브 전단의 배수 배관 Line을 이용하였다. 주입 추적자로는 LiOH-H₂O(Lithium Hydroxides Monohydrate, Natural)를 농도 1500 ppm, 유량 100 ml/min로 주입하였다. 하류 샘플링은 발전소 2차측 샘플링 Line을 이용하여 각 계통당 40개의 샘플링을 취했다. 시험은 ISO 2975(Measurement of Water Flow in Closed Conduit-Tracer Method)의 시험방법에 따라 수행하였으며 추적자 주입 시점에서부터 샘플링 지점까지의 거리는 발전소 현장 여건상 배관직경의 약 125배로써 상기의 수치계산 결과보다 상당히 짧은 거리에서 행해졌다.

측정결과를 Fig. 3 및 Table 1로 나타내었다. Fig.에는 가로축에 샘플링 횟수를 세로축에 측정 유량을 취했으며, Table에는 추적자 방법으로 측정된 유량 평균값, 표준편차, 95% 신뢰구간에서의 우연오차 및 현장 설치 유량계와의 편차를 나타낸다. 추적자 방법과 현장 유량계와의 편차는 최고 0.44%이며, 95% 신뢰구간에서의 추적자 방법의 우연오차는 최고 2.14%를 나타내고 있다. 한편, 추적자 방법의 표준편차가 비교적 큰 값을 보이고 있는 것은 시험기간 동안 증기발생기 수위제어를 위하여 주급수 유량 조절 밸브를 자동 Mode로 운전함에 따른 계통 유량의 변동과 하류에서의 혼합길이를 현장 여건상 충분히 확보치 못한 것에 기인한다고 여겨진다. 따라서 현장 조건을 변경하지 않고 높은 정확도를 얻기 위하여는 추적자의 주입과 샘플링 방법의 개선이 요구된다. 그러나 추적자 방법은 현장 배관의 설계변경 없이도 비교적 정확한 유량측정이 가능하여 향후 활발한 적용이 기대된다.

4. 결 론

추적자 방법을 월성 1호기 증기발생기 주급수 유량측정에 적용한 결과, 추적자 방법은 현장 배관의 설계변경 없이도 비교적 정확한 유량측정이 가능하며, 현장 유량계의 정확도 확인을 위하여 활용할 수 있으며, 더 나아가 주급수 유량계의 정확한 측정을 통하여 발전소 전기출력의 복구도 가능하리라 판단되어 향후 활발한 적용이 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) Miller, R.W., 1983, "Flow measurement engineering handbook", McGraw-Hill.
- (2) 川田裕郎, 1979, "流量計測ハンドブック", 日刊工業新聞社.
- (3) French, C.T., 1988, "Feedwater flow rate determination test results for northwest utilities co.", *Combustion Engineering technical report*.
- (4) 이선기, 정백순, 한정란, 이철언, 1997. 12., "추적자 방법에 의한 유량측정법", 한국원자력학회 논문집, Vol.29, No.6, pp1~7.
- (5) 이선기, 정백순, 1997. 5., "추적자를 이용한 원전 주급수 계통유량 측정법", '97 원자력학회 춘계학술대회논문집, Vol. pp257~263.

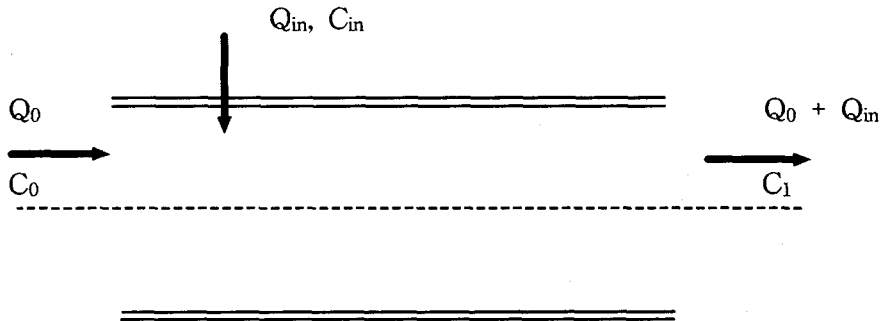


Fig. 1 화학 추적자법

Table 1. 유량측정 결과

측정 Loop No.	추적자 방법 유량측정 평균값(A) kg/sec	표준편차 kg/sec	95% 신뢰구간 우연오차 %	현장 유량계 지시값 평균(B) kg/sec	(A-B) / B * 100 %
Loop 1	244.44	15.90	2.14	243.36	0.44
Loop 2	243.85	12.63	1.66	242.80	0.43
Loop 3	244.51	9.72	1.34	243.87	0.26

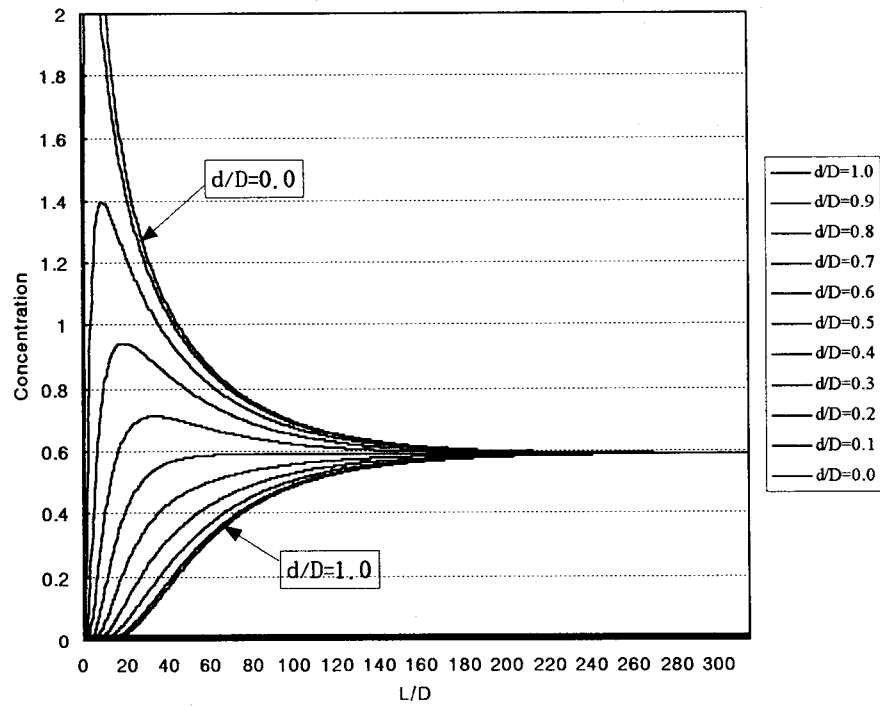
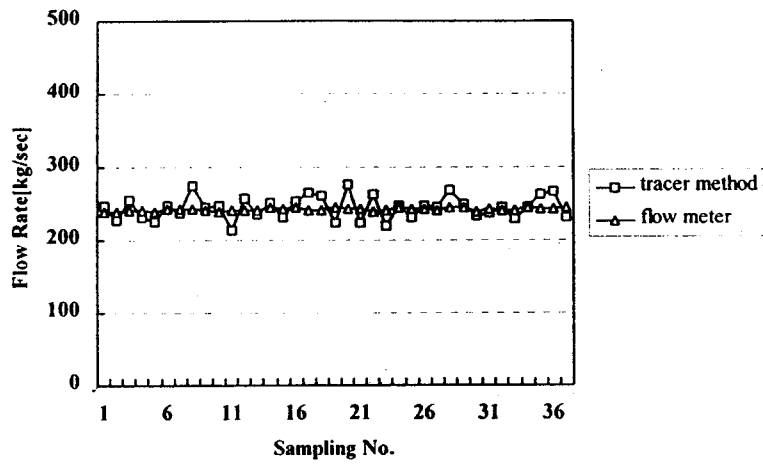
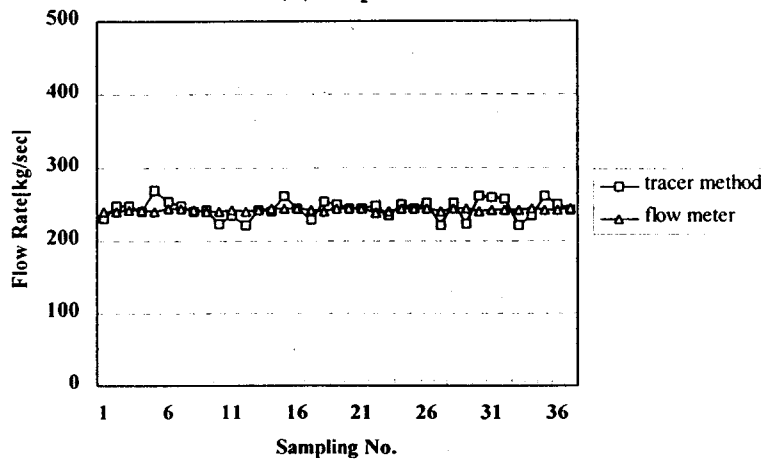


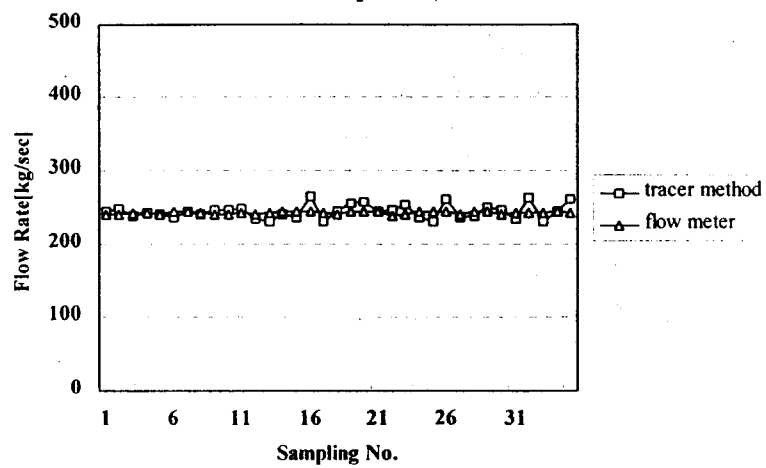
Fig. 2 배관단면 길이방향 농도분포 계산결과



(a) Loop 1



(b) Loop 2



(c) Loop 3

Fig. 3 유량측정 결과