

추적자를 이용한 원전 주급수 계통유량 측정법

이선기, 정백순, 이철언, 이현

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

김창호

표준과학연구원

대전광역시 유성구 도룡동 1

요 약

원자력 발전소의 주급수 유량은 원자로 열출력 산출에 사용되는 중요한 변수로서, 노심관리 뿐만 아니라 원자로 안전 운전에도 중요하며, 발전소 출력에 직접적인 영향을 미친다. 원자력발전소의 주급수 유량은 1%의 허용오차로 설계되어 있으나, 사용년수의 증가 및 운전조건의 영향 등으로 정확도의 유지가 어려운 실정이다. 주급수 유량을 정확도 $\pm 0.5\%$ 이내로 측정한다면 1000 MW 급 원자력 발전소에서 최대 10 MW의 전기출력 복구가 가능하며, 이를 위해 주급수 유량 측정 설비의 정확도 검증과 보정을 할 수 있는 정확한 유량 측정법의 개발이 절실하다. 본 연구에서는 화학 추적자 방법에 의한 정밀 유량 측정기술을 개발하여, 원자력 발전소 주급수 계통의 유량 측정에 사용되고 있는 벤츄리(venturi), 노즐(nozzle), 오리피스(orifice) 등의 유량 검증에 활용함으로써 발전소의 안전성을 유지하면서 동시에 출력을 극대화하는 것을 목표로 하여 추적자 이용 유량 검증을 설계 제작하였으며 그 정확도와 유효성에 대한 실험적 검토를 하였다. 본 연구에서 사용한 추적자 방법은 유량 변동에 좋은 응답성을 보이고 있으며, 유량 측정에 있어서도 정확도 $\pm 0.5\%$ 이내의 매우 신뢰성있는 측정이 가능하다.

1. 서 론

원자력 발전소의 주급수 유량은 원자로 열출력 산출에 사용되는 중요한 변수로서, 노심 관리 뿐만 아니라 원자로 안전 운전에도 중요하며, 발전소 출력에 직접적인 영향을 미친다. 그러므로 현재 사용되고 있는 주급수 유량측정 설비의 정확도 검증 및 보정을 위하여 정확한 유량 측정법의 개발이 필요한 실정이다.

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 이와같은 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.

한편, 별도로 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 설치하는 간단하나, 스케일 등이 부착된 배관이나 80 ℃ 이상의 고온유체에는 적용하기 곤란하고 정확도도 ± 2.0 % 에서 ± 5.0 % 사이로 비교적 낮아 재현성에 관한 정기적인 검증이 필요하다. 또한 압력손실이 없으며 응답성이 우수하며 정확도가 ± 0.5 % 에서 ± 1.0 % 사이로 높은 전자기 유량계는 대상유체의 온도가 180 ℃ 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 유량을 정확도 ± 0.5 %로 측정 할 수 있다고 관련 기술의 상업화⁽³⁾를 하고 있으나, 상세한 기술내용에 대해서는 대외비로 하고 있다. 우리나라의 발전소에서도 ABB-CE 사에 유량 측정 용역을 의뢰할 경우 발전소 1기당 약 \$ 300,000 (2억 4천만원)로 국내 발전소 10기를 대상으로 한다면 약 24 억원의 기술료가 소요된다. 이러한 경제적 측면은 물론 국내 원전의 운용기술 자립 측면에서 주급수 유량검증 기술의 국내 개발이 크게 요구되고 있다.

본 연구에서는 원자력 발전소 주급수 계통유량 측정용으로 사용하고 있는 벤츄리, 노즐, 오리피스 등의 유량계에 대한 검증목적으로 화학 추적자를 이용한 유량 측정기법을 개발하고 그 실용성과 정확도에 대하여 검토하였다.

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.

$$C_0Q_0 + C_{in}Q_{in} = C_1Q_1 \quad (1)$$

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

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 주입하

는 시료 용액의 유량(m^3/min), C_i 는 하류 샘플링 용액에서 검출되는 주입 시료 성분의 농도(ppm), Q_i 는 하류의 혼합 유량(m^3/min)이다.

추적자 선정시 고려한 사항은, 물에 잘 혼합될 것, 중금속이나 방사성 물질이 아니며 취급이 용이할 것, 저농도의 주입으로도 농도가 정확하게 분석될 수 있을 것, 추적자의 주입으로 배관에 부식을 일으키지 않을 것, 추적자의 주입으로 배관내의 유체와 화학 반응을 일으키지 않을 것 등이다.

상기의 조건을 비교적 잘 만족시키는 추적자로써, 나트륨(Sodium), 붕소(Boron), 리튬(Lithium), 망간(Manganese) 등을 들 수 있으나, 본 시스템은 발전소 현장에의 적용을 고려하여, 현장의 수질 관리 규정상 비교적 덜 까다로운 리튬 수용액(Lithium Hydroxide Monohydrate 99.95 %, Aldrich Chemical Company)을 시료 용액으로 채택하였다.

3. 유량 검증 실험장치 및 방법

화학 추적자 방법에 의한 유량 측정의 정확도 검증을 위하여 (주)하이트롤의 유량 검증 시스템을 이용하여 유량 검증 실험을 실시하였으며 화학 분석과 유량측정 결과의 평가는 한국표준과학연구원에 의뢰하였다.

Fig. 1에 (주)하이트롤 유량 검증 시스템의 개략도를 나타낸다. 실험 장치는 수조, 원심펌프, 터빈 유량계 및 주입 시료의 혼합을 위하여 시료 주입점 직후에 Cone Orifice가 설치되어 있으며 주배관의 직경은 8인치이다.

실험은 설정 유량 2.0 ton/min ($Re=2.1 \times 10^5$)에서 2회, 1.5 ton/min ($Re=1.6 \times 10^5$)에서 1회의 합계 3회를 행하였다. 주입 시료의 농도는 설정 유량 2.0 ton/min 일때 200 ppm, 설정 유량 1.5 ton/min일때 150 ppm을 주입 유량 100 ml/min으로 probe를 사용하여 배관 중앙에서 주입하였으며, 각 시료의 샘플링은 시료 주입점으로부터 약 $92D$ 의 곳에서 시료 주입 개시 1분 30초 후에 연속적으로 5초에 1개(약 50 ml)씩 각 설정 유량마다 32개의 샘플을 채취했다.

주입 시료의 샘플링은 하류 배관 단면내에서 완전히 혼합된 곳에서 행하여야 한다. 배관내에서의 물질 확산에 관해서는 실험 및 수치계산을 이용한 몇몇의 연구 논문이 발표되고 있으며^(4,5,6), BS 5857⁽⁷⁾ 및 국제표준기구의 ISO 2975⁽⁸⁾에 의하면 곧은 배관의 관 중앙에서 시료를 주입할 경우, 혼합 거리와 배관 단면의 농도 분포 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$\frac{L}{D} = 1.18 \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \times \left(2.94 - \frac{\ln x}{2.30} \right) \quad (4)$$

여기에서, L 은 시료 주입점으로부터 하류 배관까지의 거리(m)이며 D 는 배관의 지름(m), λ 는 관 마찰 계수, x 는 배관 단면내에서의 농도의 최대 편차(%) 이다.

상기의 식에 의하면 시료 주입점으로부터 하류 배관 단면에서 x 가 0.1 % 이내의 균일한 농도 분포를 얻기 위한 필요한 배관 길이(L)는 관 지름(D)의 약 100배이다. 한편, 레이놀즈수 증가와 더불어 혼합 길이도 증가함이 제시되어 있다(레이놀즈수가 1.0×10^5 에서 1.0×10^6 으로 증가할 경우 혼합길이는 약 25 % 증가).

본 실험에서는 샘플링 장소 상류에 Cone Orifice 설치로 인한 혼합효과에 의해 이론적 혼합거리는 상당히 단축되며^(7,8) 시료의 부분혼합 등 샘플링 거리상의 문제는 없다고 생각된다.

기저농도 샘플링으로는 저수조에서 6개 시료 샘플링하여 평균한 농도값을 채택하였으며 주입 펌프의 유량 교정은 실험 직전과 직후에 행하여 평균값을 주입 유량으로 취했다. 이때 95% 신뢰 구간에서 계산한 불확도는 ± 0.15 % 이내이다.

본 실험에서 기준 유량계로 사용한 터빈 유량계((주)하이트롤사, HFT 300 형)는 중량식 유량

표준 장치로 교정하였으며 $\pm 0.25\%$ 이내의 불확도를 가진다. 터빈 유량계 지시치는 캠코더로 촬영하여 기록하고, 시료 샘플링 시간 중에 지시되는 유량계 지시치의 평균을 기준유량으로 취했다. 샘플링 시료의 분석은 현장에서의 적용을 고려하여 동위원소희석법(isotope dilution ICP-MS 방법)을 채택하였다.

4. 검증 실험 결과

Fig. 2과 Table 1에 실험 결과를 나타낸다. Table 1에는 각 실험의 레이놀즈수, 표준 유량계와의 오차, 표준편차 및 95% 신뢰구간에서의 우연오차(random error) 등을 나타내고 있다. 모든 경우에 있어서 기준 유량계를 기준으로 한 오차가 $\pm 0.38\%$ 이내의 값을 나타내고 있으며, 95% 신뢰구간에서의 우연오차는 $\pm 0.31\%$ 이내이며, 유량 검증 장치의 시스템 오차 $\pm 0.25\%$ 를 고려한 전체 오차는 $\pm 0.55\%$ 이내이다. 여기에서, 95% 신뢰구간에서의 우연오차 및 전체 오차는 다음 식으로 구해진다^(9,10)

$$I_{95} = t_{95} \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

$$E_{random} = \frac{I_{95}}{Q_i} \times 100 \quad (6)$$

$$E_{total} = \sqrt{E_{sys}^2(\%) + E_{bias}^2(\%) + E_{random}^2(\%)} \quad (7)$$

여기에서, I_{95} 는 측정값의 95% 신뢰수준을 나타내며, t_{95} 는 측정 데이터의 자유도에 따라 정해진 계수로서 $n \geq 30$ 에서 2.0이다. 또한 σ 는 측정 데이터의 표준편차, n 은 데이터의 자유도, Q_i 는 추적자로 측정된 평균 유량값을 나타낸다. E_{sys} 는 유량 검증장치의 시스템 오차(%)이며, 본 시스템에서는 0.25%이다. E_{bias} 는 본 유량 검증 실험에서의 표준 유량계와 추적자 방법과의 편차(%), E_{random} 는 우연오차(%)로서 95% 신뢰수준에서의 오차이다.

상기의 식에 의하여 본 시스템의 전체 오차를 계산하여 Table 2에 나타낸다. 현재 시판되고 있는 유량계의 정확도가 $\pm 1.0\%$ (차압식유량계) ~ $\pm 5.0\%$ (초음파유량계)인 점을 고려하면 본 화학 추적자 방법에 의한 유량 측정 시스템은 매우 정밀한 유량 측정이 가능한 시스템임을 알 수 있다. 또한 이동성에서도 뛰어나 현장 배관의 설계 변경없이도 정확한 유량 측정이 가능하다.

5. 결론

화학 추적자 방법에 의한 정밀 유량 측정 기술을 개발하여, 원자력 발전소 주급수 계통의 유량 측정에 사용되고 있는 벤츄리, 노즐, 오리피스 등의 유량계에 관한 검증용으로 활용함으로써 발전소의 안전성을 유지하는 범위에서 출력을 극대화시킨다는 목적으로 예비 실험 장치를 설계 제작하고 유량측정 실험을 통해 본 방법의 유효성에 대해서 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에 사용한 추적자 방법은 유량 변동에도 좋은 응답성을 보이고 있으며, 유량 측정에 있어서도 신뢰성있는 측정이 가능하다.
- (2) 개발된 유량검증 시스템의 95% 신뢰구간에서의 우연오차는 $\pm 0.31\%$ 이내이며 전체 불확도는 $\pm 0.55\%$ 이내로서 정확한 유량 측정이 가능하다.

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) 中村 育雄, 酒井 康彦, 三輪 昌隆, 角田 博之, 1995, "壁面せん断流中の物質拡散の研究", 日本機械學會論文集B編, 第61巻 585號, pp.1592~1599.
- (5) 酒井 康彦, 中村 育雄, 角田 博之, 英 孝太, 1995, "確率モデルによる管内亂流擴散に関する研究", 日本機械學會論文集B編, 第61巻 583號, pp.853~860.
- (6) 松田 安弘, 邵 長城, 1993, "二次元移流擴散方程式の有限要素法および差分法の新しい陽的定式化", 日本機械學會論文集B編, 第59巻 559號, pp.833 ~839.
- (7) BS 5857, 1980, "Fluid flow in closed conduits - PART 1. Measurement of water flow", *British Standards*.
- (8) ISO 2975, 1976-08-15, "Measurement of water flow in closed conduits", *International Standard Organization*.
- (9) Ronald H. Dieck, "Measurement Uncertainty(Method and Applications)", *Instrument Society of America*.
- (10) ANSI/ASME PTC 19.1-1985, "Measurement Uncertainty(Instruments and Apparatus)", *ASME Performance Code*.

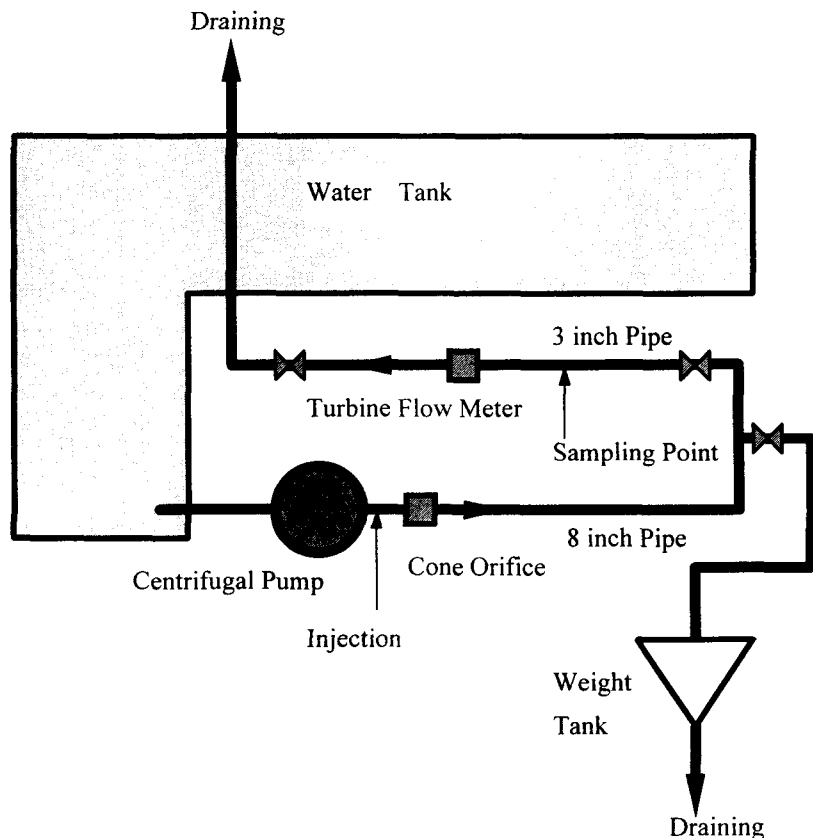
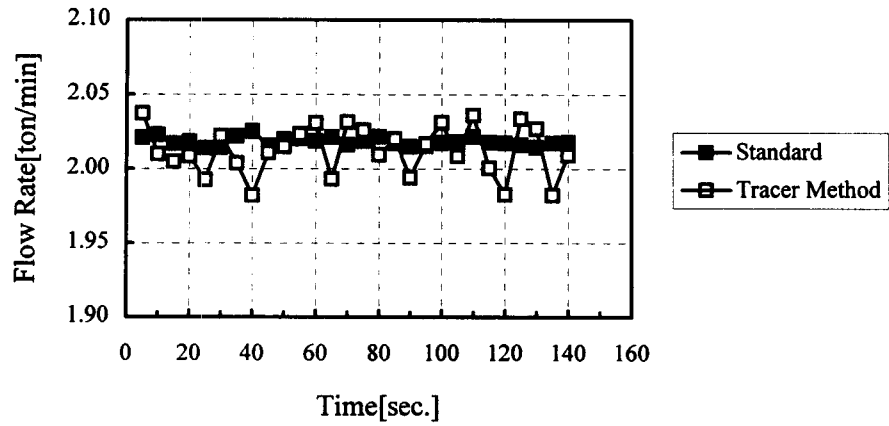
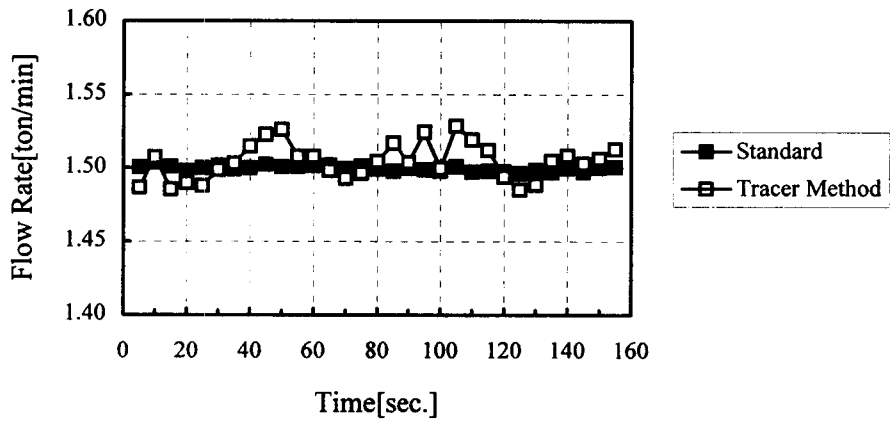


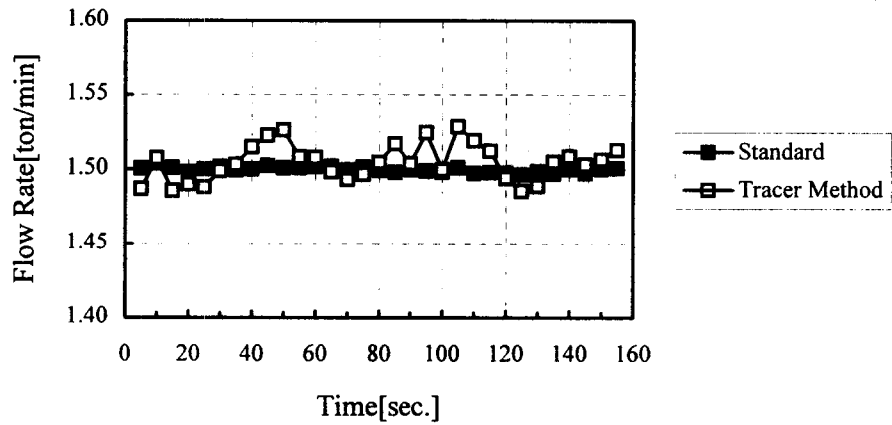
Fig. 1 Schematic diagram of flow verification test loop



(a) Test A, $Re=2.1 \times 10^5$



(b) Test B, $Re=1.6 \times 10^5$



(c) Test C, $Re=2.1 \times 10^5$

Fig. 2 Flow verification test result

Table 1 Flow verification test result

	Test A	Test B	Test C
Q_s : Standard Flow Meter [ton/min]	2.01745	1.49887	2.00950
Q_t : Tracer Method Flow Rate [ton/min]	2.01110	1.50360	2.00580
Reynolds Number	2.1×10^5	1.6×10^5	2.1×10^5
$\frac{(Q_t - Q_s)}{Q_s} \times 100$ [%]	0.317	0.318	0.308
Standard Deviation of Tracer Flow Rate	0.01638	0.01222	0.01653
95% Confidence Interval of Tracer Flow Rate [%]	0.3093	0.2918	0.2955

Table 2 Systematic error in tracer method

	E_{sys} [%]	E_{bias} [%]	E_{random} [%]	Total [%]
Test A	±0.250	±0.317	±0.310	±0.509
Test B	±0.250	±0.315	±0.292	±0.497
Test C	±0.250	±0.380	±0.300	±0.542