

## 추적자를 이용한 유량 측정

이선기\* · 정백순\* · 김창호\*\*

### Measurement of Water Flow in Closed Conduits by Chemical Tracer Method

Sun-Ki Lee\*, Bag-Soon Chung\*, Chang-Ho Kim\*\*

Key Words: Flow Measurement(유량측정), Tracer(추적자), Flow Verification(유량실증), Nuclear Power Plant(원자력발전소), Feed Water(주급수), Flow Meter(유량계)

#### ABSTRACT

Thermal output in a nuclear power plant is verified with calorimetric heat balance on the secondary plant. The calorimetry involves the precise measurement of the feedwater flow rate. However, the correct indication of feedwater flow rate obtained by a pressure-difference measurement across a venturi can be affected by instrument errors, fouling or a poorly developed velocity profile. This can result in an inaccurate mass flow rate and consequently an inaccurate estimate of power. The purpose of this study is to develop verification methods with accuracy better than 0.5% for high precision flow measurement to be used for measuring feedwater flow rate. This chemical tracer method is a testing process that uses tracers which can be applied to quantify losses in electrical output due to the incorrect measurements of feedwater flow rate. And this system has good response to the variation of the flow rate. Accuracy of better than 0.5 percent can be expected for feedwater flow measurement, providing that the system can be stabilized during the test. This methodology is applicable to other flow systems well.

#### 1. 서론

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

현재 원자력 발전소에서는 벤투리, 노즐, 오리피스 등

의 차압식 유량계가 사용되고 있으며 벤투리 유량계의 경우, 장시간 사용시 파울링(fouling) 현상에 의한 압력차의 증가로 인해, 실제의 유량보다 측정유량이 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 유로 축소형 유량계를 사용할 때에는 정기적으로 유량계수의 보정이 필요하며, 국내 원자력 발전소의 경우에도 별도의 유량측정 시스템으로 유량계수를 보정할 필요가 있다.

한편, 별도로 발전소 설비를 설계변경하지 않고 사용이 가능한 유량계로서 초음파 유량계와 전자기 유량계 같은 비접촉식 유량계가 개발되어 사용되고 있다. 초

\* 한국전력공사 전력연구원

\*\* 한국표준과학연구원

음과 유량계는 설치하는 간단하나 스케일 등이 부착된 배관이나 80℃ 이상의 고온유체에는 적용하기 곤란하고 정확도도 ±2.0%에서 ±5.0% 사이로 비교적 낮아 재현성에 관한 정기적인 실증이 필요하다. 또한 압력손실이 없고 응답성이 우수하며 정확도가 ±0.5%에서 ±1.0% 사이로 높은 전자기 유량계는 대상유체의 온도가 180℃ 이하에서 사용이 가능하며 전기전도도가 낮은 탈염수(demineralized water)에는 사용할 수 없다는 약점이 있다.

최근 미국의 ABB-CE사는 원자력 발전소 주급수 유량측정 시스템을 개발하여 전세계 발전소의 주급수 유량을 정확도 ±0.5%로 측정 가능하다고 선전하고 있으나<sup>(1)</sup> 상세한 기술내용에 대해서는 비밀로 하고 있다. 우리 발전소에서도 ABB-CE사에 유량측정 용역을 의뢰할 경우 발전소 1기당 약 \$300,000(약 4억원)로 발전소 10기를 대상으로 한다면 약 40억원의 기술료가 소요된다. 이러한 경제적 측면 외에도 국내 원전의 운용기술 자립 측면에서도 자체 개발이 절실히 요구되어 왔다.

본 연구는 원자력 발전소 주급수 계통유량 측정용으로 사용되고 있는 벤투리, 노즐, 오리피스 등의 유량계에 대한 검증용으로 활용하기 위하여 화학 추적자를 이용한 유량 측정법을 개발하여 그 유효성에 대하여 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 화학 추적자법

Fig. 1과 같은 배관에 유체가 유량  $Q_0$ 로 흐르고 있을 때, 이 배관의 주입 장소에서 농도  $C_{in}$ 인 시료용액을 유량  $Q_{in}$ 으로 주입하면 하류에서의 배관내 혼합유량은  $(Q_0+Q_{in})$ 으로 나타난다. 여기에서 주입한 시료용액의 농도가 하류 배관 단면에서 완전히 혼합되어 균일한 농도분포를 나타낸다고 가정한다.

하류 배관 단면에서의 시료농도와 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)를 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, 주입장소보다 상류측에서 시료성분이 검출되지 않을 경우에는  $C_0$ 는 0이다. 즉, 식 (3)은 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 시료성분의 농도(ppm)이며  $Q_0$ 는 배관내의 상류측 유량( $m^3/min$ ),  $C_{in}$ 는 주입하는 시료의 농도(ppm),  $Q_{in}$ 는 주입하는 시료용액의 유량( $m^3/min$ ),  $C_1$ 는 하류 샘플링 용액에서 검출되는 주입시료 성분의 농도(ppm),  $Q_1$ 은 하류의 혼합유량( $m^3/min$ )이다.

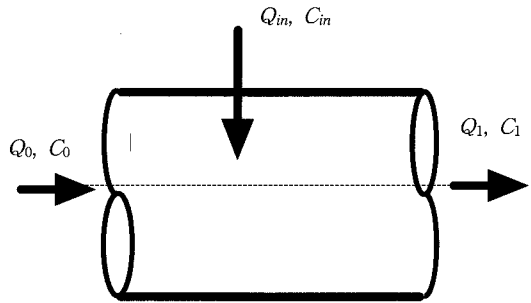


Fig. 1 Tracer Method

### Vortex Flow Meter

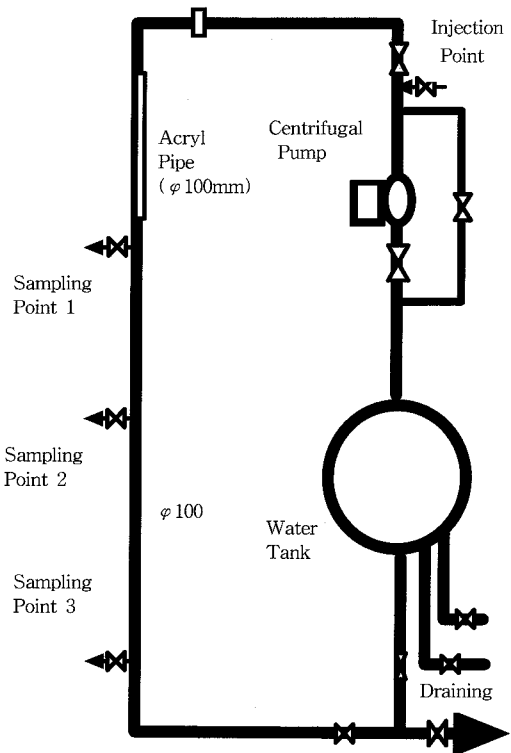


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

## 2.2 실험장치

실험장치의 전체 개략도를 Fig. 2에 표시하였다. 실험장치는 펌프, 모터, 유량계, 수조 등으로 구성되며 상류에 화학 추적자 주입을 위한 주입장소 1개소와 하류측에는 시료 채취점 3개소가 설치되어 있고 유량계의 하류측에는 가시화 실험을 대비하여 투명한 아크릴관도 설치되어 있다. 한편, 주입장소 상류에 1개소의 background 채취점이 설치되어 있으며 예비 실험장치 주계통의 관직경은 100 mm이다.

펌프는 정격유량이 1.0 m<sup>3</sup>/min이고 수두는 11.5 m이며 입구직경과 출구직경 모두 80 mm인 원심펌프로써 3.7 kW의 3상 유도전동기로 구동되고 인버터를 통해 펌프의 유량조절이 가능하다.

본 연구에서는 vortex 유량계를 사용하였으며, 적산유량 및 순간유량 표시가 가능한 지시계와 연결되어 있다. 한국표준과학연구원에 의뢰하여 vortex 유량계의 교정을 실시한 결과, 본 실험에서의 유량범위인 0.5 m<sup>3</sup>/min에서 1.0 m<sup>3</sup>/min 사이에서의 오차는 ±0.5% 이내이며 실험실 조건에서는 ±1.0% 이내이다.

수조는 지름이 2.8 m이고 높이가 2.5 m인 원통형으로 펌프를 정격유량(1.0 m<sup>3</sup>/min)으로 운전시 별도의 물 공급 없이 약 15분간 운전할 수 있는 양을 저장할 수 있으며 재질은 FRP이다.

현장에의 적용을 고려할 때, 예비 실험장치의 레이놀즈수  $Re_m$ 과 원자력 발전소 주급수 계통의 레이놀즈수  $Re_R$ 이 동일하게 설계하는 것이 이상적이다. 그러나 대표적인 원자력 발전소의 주급수 계통은 배관직경이 450 mm 정도이고 그 온도와 압력은 각각 230 °C와 90 기압 정도이므로 실험실에서 이 조건을 성립시키는 것은 불가능하다. 본 측정 시스템은 주입 추적자 농도의 희석률에 의한 유량 측정법으로 레이놀즈수의 영향은 주입 추적자가 하류에서 충분히 혼합하기까지 필요한 배관길이에 영향을 미친다.

추적자 방법은 상류에서 주입한 추적자가 하류 배관 단면에서 균일하게 혼합된 곳에서 샘플링하는 것이 중요하므로 균일하게 분포되기까지의 거리 및 시간을 다음과 같이 수치적으로 계산하여 샘플링 Point를 설정하였다.

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<sup>2</sup>/s),  $Q$  : 단위 시간당 물질방출 강도(kg/m<sup>3</sup>/s)이다.

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

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

경계조건은 다음과 같다.

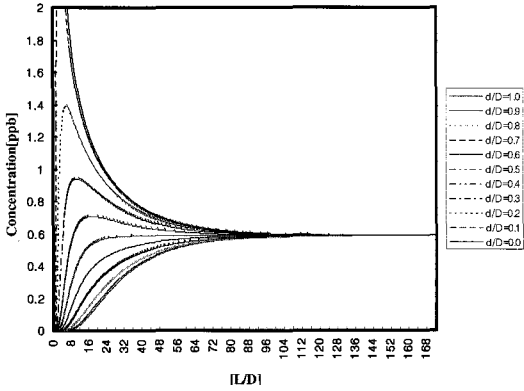
$$\left. \frac{\partial C}{\partial n} \right|_B = 0 \quad (\text{관벽}) \quad (6)$$

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

초기조건으로는 직경 100 mm의 관에 20 °C 물이 각각 유속 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s로 흐르고 있으며 추적자는 배관벽면 및 배관중앙에서 1.0 kg/m<sup>3</sup>/s의 방출강도로 연속적으로 주입되고 있는 경우를 가정하였다.

Fig. 3에는 유속 1.0 m/s에서 추적자를 배관벽면에서 주입하였을 경우의 배관 길이방향에 대한 배관 내부 농도분포를 나타낸다. 가로축은 배관길이를 배관직경으로 나누어 나타내고 있으며, 세로축은 농도를 나타낸다. 정상상태에 이르기까지 걸리는 시간은 추적자 주입 후 약 20초이며, 주입한 추적자가 하류 배관단면에서 편차 0.2% 이내로 분포하기에는 배관 길이방향으로 배관직경의 약 170배가 필요하다. 한편, 그림에는 나타나지 않았지만 배관중앙에서 추적자를 주입할 경우에는 배관직경의 약 44배가 필요하다.

Fig. 4에는 유속(레이놀즈수)의 변화에 따른 추적자 혼합길이의 변화를 배관 중앙 주입시와 배관 벽면 주입시의 경우에서 나타낸다. 두 경우 모두 유속의 증가와 더불어 혼합길이가 증가하고 있으나 배관벽면에서 추적자 주입시 혼합길이가 현저히 증가하고 있음을 알 수 있다.



(flow velocity 1.0 m/sec, wall side injection)

Fig. 3 Concentration distribution in the pipe

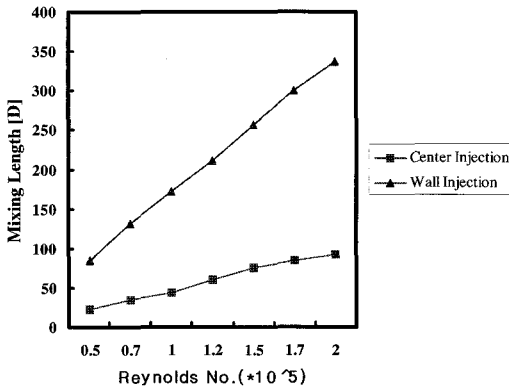


Fig. 4 Relation to flow velocity and mixing length

본 실험장치에는 Fig. 2에 표시한 바와 같이 3곳에 시료 채취점이 설치되어 있다. 시료 채취점 1은 주입 장소로부터 하류로 6.7m(67D), 시료 채취점 2와 3은 각각 8.4m(84D), 10.2m(102D)의 곳에 위치하고 있으며 실험은 상기의 해석결과를 반영하여 배관 중앙에서 probe를 제작하여 추적자를 주입하기로 하였다.

주입펌프는 프랑스 GILSON 사의 제품으로, 약 30 MPa의 고압으로 시료주입이 가능하며 주입시 맥동을 제거하기 위한 dampener와 연결되어 사용된다. 주입유량은 10.0 ml/min로부터 50.0 ml/min 사이에서 주입 가능하다. 또한, 주입펌프의 시료 흡입구 전단에는 시료 용액내의 불순물 제거를 위한 필터가 설치되어 있다.

주입펌프의 유량 및 vortex 유량계는 한국표준과학 연구원에서 교정후 사용하였다. 주입펌프의 교정은 본 실험에서 사용한 주입유량 50.0 ml/min과 100.0 ml/min

의 두 유량에 대해서 시행하였다.

각 설정 유량당 100회의 유량을 시료 채취하여 전자 저울로 무게를 측정하였으며, 그 평균값을 주입유량으로 취했다. 결과는 설정유량 50.0 ml/min일 때 49.653 ml/min 이고, 100 ml/min일 때 99.32 ml/min이며 편차는 각각 0.15%와 0.13%이다. 본 실험에서의 레이놀즈수는 계통 유량 설정에 따라 Re가  $0.85 \times 10^5$ 에서  $2.0 \times 10^5$  사이이다.

### 2.3 주입 추적자의 선정

추적자 선정시 고려한 사항은, 물에 잘 혼합될 것, 증기 속이나 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 화학반응을 일으키지 않을 것 등이다.

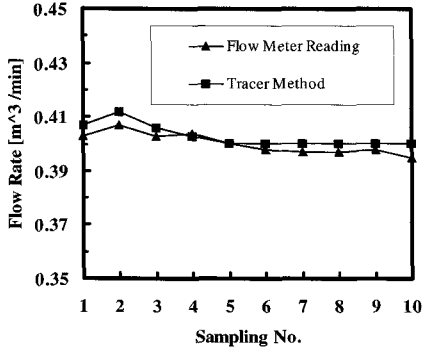
상기의 조건을 비교적 잘 만족시키는 추적자로서, 나트륨, 붕소, 리튬, 망간 등을 들 수 있으나 본 시스템은 발전소 현장에의 적용을 고려하여 현장의 수질관리 규정상 비교적 덜 까다로운 리튬 수용액(Lithium hydroxide monohydrate 99.95%, Aldrich Chemical Company)을 시료용액으로 채택하였다.

한편, 현장 적용시에는 수질관리 규정상 저농도의 리튬 수용액을 주입하여야 하고 또한 하류에서 채취한 희석된 시료의 정확한 농도분석은 isotope dilution ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry, 동위원소희석법)으로 하여야 한다. 그러나 실험실 규모의 실험에서는 비교적 고농도의 시료주입이 가능하고, 본 연구원에서 보유하고 있는 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy)를 이용하여 농도 분석시에는 비교적 고농도의 시료가 유리함으로 본 실험에서는 37500 ppm의 리튬 수용액을 제조하여 사용하기로 하였다.

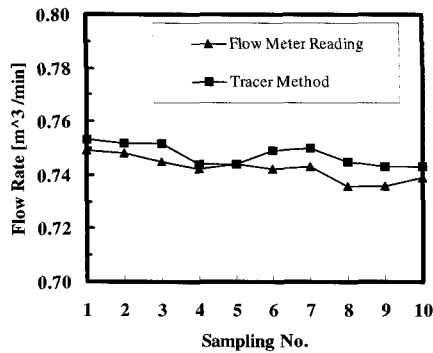
## 3. 실험결과 및 검토

### 3.1 유량측정 결과

Fig. 5(a)와 (b)는 시료 채취점 3에서 시료를 채취하여 추적자 방법으로 측정된 유량과 주계통에 설치된 vortex 유량계의 지시치와의 비교를 대표로 나타낸 것이다. 각 그림의 횡축은 시료의 샘플링 번호, 종축은 유량을 나타내고 있으며 샘플링은 10초간 시료 채취 후 15초 간격을 두고 다음 시료의 샘플링을 행하였다. 따라서 샘플링 번호 사이의 시간 간격은 25초이다.



(a) Setting flow rate 0.40 m<sup>3</sup>/min



(b) Setting flow rate 0.75 m<sup>3</sup>/min

Fig. 5 Flow measuring results

Vortex 유량계의 지시치는 1초에 1회의 출력을 표시하므로 본 실험 중에는 컴퓨터로 유량계의 지시치를 촬영 후, vortex 유량계 설치점으로부터 시료 채취점까지의 거리와 배관내의 평균유속을 고려한 시간차를 포함하여 시료의 샘플링 시간 10초에 해당하는 유량계 지시치의 평균을 취했다.

각각의 그림으로부터 추적자 방법이 vortex 유량계보다 대부분 약간 큰 값을 나타내고 있으나, vortex 유량계의 유량변동과 추적자 방법에 의한 유량과는 거의 같은 경향을 나타내고 있으므로 추적자 방법에 의한 유량측정은 배관내 유량의 변동에도 상당히 좋은 응답성을 보여주고 있다.

Fig. 6에는 주 배관에 설치된 vortex 유량계의 지시치와 추적자 방법으로 채취점 1에서 구한 유량과의 관계를 나타낸다. 그림으로부터 유량계의 지시치와 추적자의 유량과는 선형적인 상관관계가 있음을 알 수 있다. 또한 각각의 측정 데이터로부터 평균, vortex 유량계 기준 상대오차, 추적자 데이터의 표준편차 등을

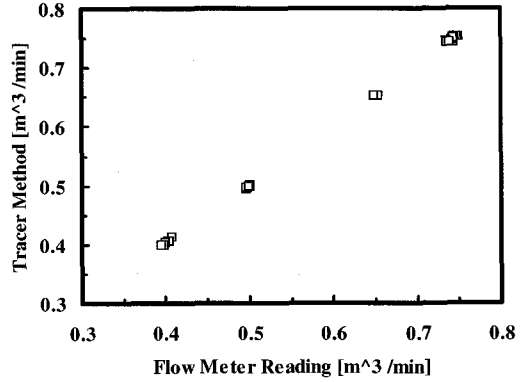


Fig. 6 Relationship between tracer method and flow meter reading

Table 1 Flow measuring results by tracer method

Flow rate by vortex flow meter reading [m <sup>3</sup> /min]	0.400	0.498	0.651	0.742
Flow rate by tracer method[m <sup>3</sup> /min]	0.403	0.501	0.653	0.748
Relative error[%]	0.780	0.753	0.371	0.698
Standard deviation of tracer flow rate	0.004	0.001	0.001	0.004
95 % Confidence interval of tracer flow rate[%]	0.658	0.116	0.06	0.320

구하여 Table 1에 나타내었다.

본 실험의 주 배관에 설치된 vortex 유량계는 비교적 높은 정확도를 나타내는 유량계로서, 실험실 조건내(배관내의 유체온도 섭씨 20도 이하)에서는 ±1.0% 이내의 오차를 포함하고 있다. 본 실험에서 행한 추적자를 이용한 방법은 vortex 유량계 기준 오차가 모두 ±1.0% 이내의 값을 나타내고 있으며 표준편차 등으로 판단하여 매우 신뢰성 있는 유량측정이 가능함을 알 수 있다.

### 3.2 샘플링 위치의 영향

Fig. 7은 계통유량이 0.75 m<sup>3</sup>/min, 0.50 m<sup>3</sup>/min, 0.40 m<sup>3</sup>/min 동일 경우에 대하여, Fig. 2의 세 채취점에서 측정된 결과로 측정유량의 vortex 유량계에 대한 상대오차를 나타낸다. Fig. 7로부터 모든 시료 채취점에서 오차는 vortex 유량계의 정확도인 ±1.0% 이내의 값을 나타내고 있으나 계통유량 0.75 m<sup>3</sup>/min의 경우에는 시료 채취점 1에서의 오차가 가장 크고 시료 채취점 3에서의 오차가 적으며, 계통유량

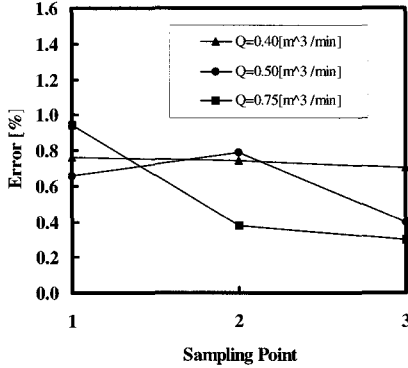


Fig. 7 Error at each sampling point

0.50 m<sup>3</sup>/min의 경우에는 시료 채취점 1과 2에서의 오차가 크나 시료 채취점 3에서는 작은 값을 나타내고 있다.

한편, 계통유량 0.40 m<sup>3</sup>/min에서는 시료 채취점에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 즉, 비교적 유량이 클 경우에는 시료 채취점이 하류측에서 오차가 적어지고 있다. 이러한 현상은 2-2절에서 기술한 바와 같이 유속과 혼합거리와의 상관에 의한 것으로서, 추적자 방법으로 유량 측정시는 가능한 한 하류측에서 시료를 채취하는 것이 유리하다.

#### 4. 유량 실증실험

##### 4.1 유량실증 장치 및 방법

화학 추적자 방법에 의한 유량측정의 정확도 실증을 위하여 (주)하이트롤의 유량 실증 시스템을 이용하

여 유량 실증실험을 실시하였으며 화학분석과 유량 실증은 한국표준과학연구원에 의뢰하였다.

Fig. 8에 유량 실증 시스템의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 수조, 원심펌프, 터빈 유량계 및 주입시료의 혼합을 위하여 시료 주입점 직후에 Cone Orifice가 설치되어 있으며 주배관의 직경은 8인치이다.

실험은 설정유량 2.0 m<sup>3</sup>/min(Re=2.1×105)에서 2회, 1.5 m<sup>3</sup>/min(Re=1.6×105)에서 1회의 합계 3회를 행하였다. 주입시료의 농도는 설정유량 2.0 m<sup>3</sup>/min일 때 200 ppm, 설정유량 1.5 m<sup>3</sup>/min일 때 150 ppm을 주입유량 100 ml/min으로 probe를 사용하여 배관 중앙에서 주입하였으며, 각 시료의 샘플링은 시료 주입점으로부터 약 92D의 곳에서 시료 주입 개시 1분 30초 후에 연속적으로 5초에 1개(약 50 ml)씩 각 설정 유량당 32개를 취했다.

Background 샘플링으로는 저수조에서 6개 시료 채취하여 평균한 농도값을 채택하였으며 주입펌프의 유량교정은 실험 직전과 직후에 행하여 평균값을 주입유량으로 취했다. 이때 95% 신뢰구간(confidence level)으로 계산한 오차는 ±0.15% 이내이다.

본 실험에서 기준 유량계로 사용한 터빈 유량계(주)하이트롤사, HFT300)는 본 실험 장치에 설치되어 있는 weight tank에 의하여 미리 검교정이 행하여졌으며 실험중에는 캠코더로 기준 유량계인 터빈 유량계 지시치를 촬영 후, 시료 샘플링 시간분에 해당하는 유량계 지시치의 평균을 취했다.

본 유량 검정 시스템은 검교정 결과 ±0.25% 이내의 정확도를 나타내는 상당히 신뢰할 수 있는 장치이다.

샘플링 시료의 분석은 현장적용을 고려하여 isotope dilution ICP-MS 방법을 채택하였다.

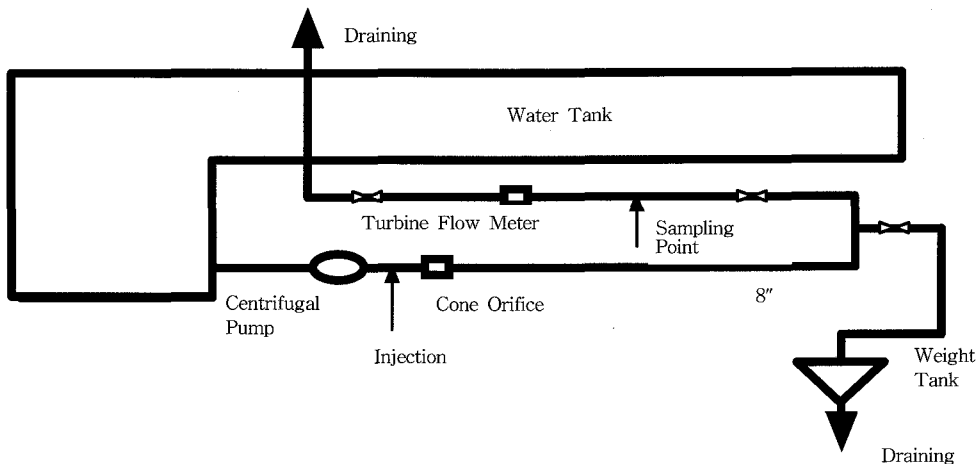


Fig. 8 Schematic diagram of flow verification test loop

## 4.2 실증실험 결과

Fig. 9와 Table 2에 실험결과를 나타낸다. Table 2에는 각 실험의 레이놀즈수, 표준 유량계의 오차, 표준편차 및 95% 신뢰구간에서의 우연오차(random error) 등을 나타내고 있다. 모든 경우에 있어서 기

준 유량계를 기준으로 한 오차가  $\pm 0.38\%$  이내의 값을 나타내고 있으며, 95% 신뢰구간에서의 우연오차는  $\pm 0.309\%$  이내이며, 유량 실증장치의 시스템 오차  $\pm 0.25\%$ 를 고려한 전체오차는  $\pm 0.55\%$  이내이다.

여기에서, 95% 신뢰구간에서의 우연오차 및 전체오차는 다음 식으로 구해진다<sup>(2,3)</sup>.

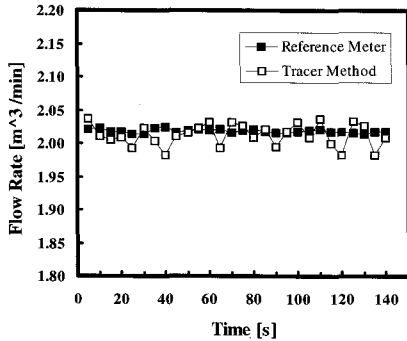
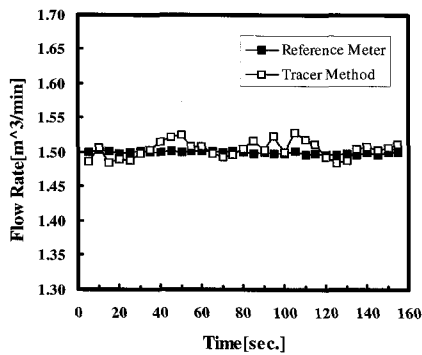
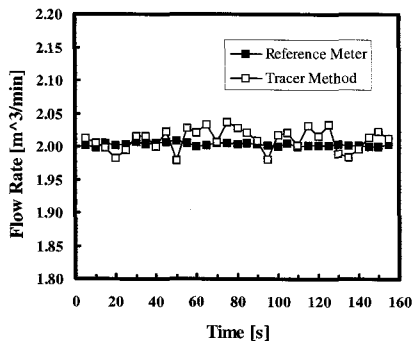
(a) Test A.  $Re=2.1 \times 10^5$ (b) Test B.  $Re=1.6 \times 10^5$ (c) Test C.  $Re=2.1 \times 10^5$ 

Fig. 9 Flow verification test result

$$I_{95} = t_{95} \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

$$E_{random} = \frac{I_{95}}{Q_t} \times 100 \quad (9)$$

$$E_{total}(\%) = \sqrt{E_{sys}(\%)^2 + E_{bias}(\%)^2 + E_{random}(\%)^2} \quad (10)$$

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

상기의 식에 의하여 본 시스템의 전체오차를 계산하여 Table 3에 나타낸다. 현재 시판되고 있는 유량계의 정확도가  $\pm 1.0\%$ (차압식유량계) ~  $\pm 5.0\%$ (초음파유량계)인 점을 고려하면 본 화학 추적자 방법에 의한 유량측정 시스템은 매우 정밀한 유량측정이 가능한 시스템임을 알 수 있다. 또한 이동성에서도 뛰어나 현장 배관의 설계변경 없이도 정확한 유량측정이 가능하다.

Table 2 Flow verification test result

	Test A	Test B	Test C
Standard flow meter $Q_s$ [ton/min]	2.017	1.499	2.010
Tracer method flow rate $Q_t$ [ton/min]	2.011	1.504	2.006
Reynolds Number	$2.1 \times 10^5$	$1.6 \times 10^5$	$2.1 \times 10^5$
$(Q_t - Q_s)/Q_s \times 100$ [%]	0.317	0.318	0.308
Standard deviation of tracer flow rate	0.016	0.012	0.017
95% Confidence interval of tracer flow rate[%]	0.309	0.292	0.296

Table 3 Elemental error in tracer method

	$E_{sys}[\%]$	$E_{bias}[\%]$	$E_{random}[\%]$	Total [%]
Test A	$\pm 0.250$	$\pm 0.317$	$\pm 0.309$	$\pm 0.508$
Test B	$\pm 0.250$	$\pm 0.315$	$\pm 0.292$	$\pm 0.497$
Test C	$\pm 0.250$	$\pm 0.308$	$\pm 0.296$	$\pm 0.495$

## 5. 결 론

화학 추적자 방법에 의한 정밀 유량측정 기술을 개발하여, 원자력 발전소 주급수 계통의 유량측정에 사용되고 있는 벤투리, 노즐, 오리피스 등의 유량계에 관한 실증용으로 활용함으로써 발전소의 안전성을 유지하는 범위에서 출력을 극대화시킨다는 목적으로 예비 실험장치를 설계 설치하여 본 방법의 유효성에 대해서 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에 사용한 추적자 방법은 유량변동에도 좋

은 응답성을 보이고 있으며, 유량측정에 있어서도 신뢰성있는 측정이 가능하다.

- (2) 표준 유량계와의 오차는  $\pm 0.35\%$  이내의 정확도를 나타내고 있으며 95% 신뢰구간에서의 우연 오차는  $\pm 0.309\%$  이내이다. 본 시스템의 전체 오차는  $\pm 0.55\%$  이내로서 정확한 유량측정이 가능하다.

## 참고문헌

- (1) French, C. T., 1988, Feedwater Flow Rate Determination Test Results for Northwest Utilities Co., Combustion Engineering Technical Report.
- (2) Dieck, R. H., 1992, Measurement Uncertainty (Method and Applications), Instrument Society of America.
- (3) ANSI/ASME PTC 19.1-1985, Measurement Uncertainty (Instruments and Apparatus), ASME Performance Code.