

《기술보고》

추적자 방법에 의한 유량측정법

이선기 · 정백순 · 한정란 · 이철언

한국전력공사

대전광역시 유성구 문지동 103-16

(1995. 8. 21)

요 약

원자력 발전소의 주급수 유량은 원자로 열출력 산출에 사용되는 중요한 변수로서, 노심관리 뿐만 아니라 원자로 안전운전에도 중요하며, 발전소 출력에 직접적인 영향을 미친다. 그러므로 현재 사용되고 있는 주급수 유량 측정설비의 정확도 검증 및 보정을 위하여 정확한 유량측정법의 개발이 필요한 실정이다.

본 연구는 화학 추적자 방법에 의한 고정밀 유량측정 기술을 개발하여, 원자력 발전소 주급수 계통의 유량측정에 사용되고 있는 벤츄리(Venturi), 노즐(Nozzle), 오리피스(Orifice) 등의 유량계에 관한 검증용으로 활용함으로써 발전소의 안전성을 유지하는 범위에서 출력을 극대화시킨다는 목적으로 예비 실험장치를 설계 설치하여, 본 방법의 유효성에 대해서 검토하였다. 그 결과, 본 연구에 사용한 추적자 방법은 유량변동에도 좋은 응답성을 보이고 있으며, 유량측정에 있어서는 매우 신뢰성있는 측정이 가능하다.

1. 서 론

원자력 발전소의 주급수 유량은 원자로 열출력 산출에 사용되는 중요한 변수로서, 노심관리뿐만 아니라 원자로 안전운전에도 중요하며, 발전소 출력에 직접적인 영향을 미친다. 그러므로 현재 사용되고 있는 주급수 유량 측정설비의 정확도 검증 및 보정을 위하여 정확한 유량측정법의 개발이 필요한 실정이다.

현재, 원자력 발전소에서는 벤츄리(Venturi), 노즐(Nozzle), 오리피스(Orifice)형의 차압식 유량계가 사용되고 있으며, 벤츄리 유량계의 경우, 장시간 사용시 이물질의 축적(Fouling 현상)에 의한 압력차의 증가로 인해, 실제의 유량보다 측정유량이 크게 나타날 가능성이 있으며, 미국의 여러 발전소에서 Fouling 현상에 의한 주급수 유량의 과다지시로 인한 출력결손을 경험한 사례가 발표되고 있다. 그러므로 상기와 같은 유로축소형 유량계를 사용할 때에는 정기적으로

유량계수의 보정이 요구되어지고 있으며, 국내 원자력 발전소의 경우에도 별도의 유량측정 시스템으로 유량 측정을 하여, 과다 지시되고 있는 경우에는 유량계수를 보정하여 출력을 만회할 필요가 있다.

한편, 별도의 발전소 설비의 설계 변경없이 사용이 가능한 유량계로서, 초음파유량계(Ultrasonic Flow Meter), 전자기유량계(Magnetic Flow Meter) 등의 비접촉 유량계가 개발되어 사용되고 있지만, 초음파 유량계는 설치가 간단하나 재현성에 관한 정기적인 검증이 필요하고, 압력손실이 없고 응답성이 우수하여 높은 정확도를 나타내는 전자기유량계는 전기 전도도가 낮은 탈염수(Demineralized Water)에는 사용할 수 없다는 약점이 있다.

본 연구는 원자력 발전소 주급수 계통 유량 측정용으로 사용되고 있는 벤츄리(Venturi), 노즐(Nozzle), 오리피스(Orifice) 등의 유량계에 대한 검증용으로 활용하기 위하여 화학 추적자를 이용한 유량 측정 시스템

템을 개발하여 그 유효성에 대하여 검토하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1. 실험 장치

실험 장치의 전체도를 그림 1에 표시하였다. 현장에의 적용을 고려할 때, 예비실험 장치의 레이놀즈수 $(Re)_M$ 과 원자력 발전소 주급수 계통의 레이놀즈수 $(Re)_R$ 이 거의 동일하도록 설계하는 것이 이상적이지만, 주급수 계통(관직경 약 45 cm)의 고온(약 230°C), 고압(약 90기압)의 유체유동(유속 약 3 m/s)을 실험실 규모에서 성립시키기는 쉽지 않아, 본 시스템의 특징(주입 추적자 농도의 희석율에 의한 유량측정법)상 레이놀즈수의 영향은 무시하였다.

예비 실험 장치의 구성은 펌프, 모-터, 유량계, 수조로 구성되어 있으며, 상류측에 화학 추적자 주입을 위한 주입장소 1개소와 하류측에 시료 채취점 3개소가 설치되어 있으며, 유량계의 하류측에는 가시화 실험을 대비하여 투명한 아크릴관도 설치되어 있다.

한편, 주입장소 상류측에 1개소의 Back Ground Sampling Point가 설치되어 있으며, 주계통의 관직경

은 100 mm이다.

펌프는 정격유량 1.0 m³/min, 수두(Head) 11.5 m, 입구경 및 출구경 80 mm의 원심펌프이며, 3.7 kW의 3상 유도전동기로 구동되고, 인버터와 연결되어 회전수의 조절에 의해 펌프 유량 조절이 가능하다.

유량계는 고감도이며 넓은 유량 및 온도범위에서 비교적 고정밀도의 유량검출이 가능한 Vortex 유량계를 사용하였으며, 누적유량 및 순간유량 표시가 가능한 지시계와 연결되어 있다.

수조는 지름 2.8 m 높이 2.5 m인 원통형으로, 펌프를 정격운전시(유량 1.0 m³/min) 별도의 물 공급없이 약 15분간 운전할 수 있는 양을 저장할 수 있으며, 재질은 FRP이다.

주입 시료의 샘플링은 하류 배관단면내에서 완전히 혼합된 곳에서 행하여야 한다. 배관내에서의 물질 확산에 관해서는 실험 및 수치계산을 이용한 몇몇의 연구논문이 발표되고 있으며[1~6], International Standard 2975 및 British Standard 5857에 의하면 끝은 배관의 관 중앙에서 시료를 주입할 경우, 혼합거리와 배관 단면의 농도분포 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$\frac{L}{D} = 1.18 \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \left(2.94 - \frac{\ln x}{2.30} \right) \quad (2-1)$$

여기에서,

L : 시료 주입점으로부터 하류 배관까지의 거리 (m)

D : 배관의 지름(m)

λ : 관마찰계수

x : 배관 단면내에서의 농도의 최대 편차(%) 이다.

상기의 식에 의하면 시료 주입점으로부터 하류 배관 단면에서 균일한 농도분포($x=0.1\%$ 이내)를 얻기 위한 필요한 배관 길이(L)는 관 지름(D)의 약100배이다. 한편, 레이놀즈 수의 증가와 더불어 혼합길이도 증가함이 제시되어 있다($Re=1 \times 10^5$ 에서 $Re=1 \times 10^6$ 으로 증가시 혼합길이는 약 25% 증가함).

본 실험장치에는 그림1에서 표시한 바와 같이 3곳에 시료채취점이 설치되어, 시료채취점 1은 주입장소로부터 하류 6.7 m(배관 직경의 67D, D : 배관의 직경), 시료채취점 2, 3은 각각 8.4 m(84D), 10.2 m(102D)의 곳에 위치하고 있다. 그러나 각 장소의

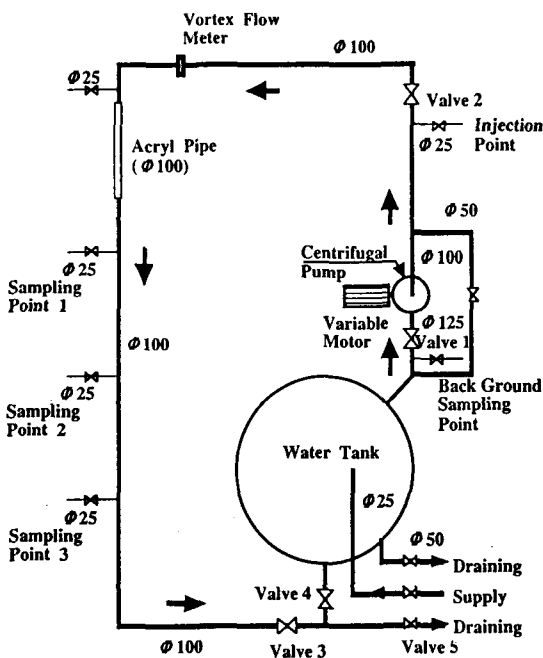


그림 1. 실험장치 전체도

상류에는 글로브밸브와 90도 벤드 및 Vortex 유량계 등의 설치에 의해 혼합거리가 상당히 단축됨[7, 8]으로 시료채취에는 큰 문제는 없다고 생각된다.

한편, 주입펌프는 미국 GILSON사의 제품으로, 고압(약 30 MPa)으로 시료주입이 가능하며, 주입시 맥동을 제거하기 위한 Dampener와 연결되어 사용된다. 용량은 유량 10.0 ~ 50.0 ml/min의 임의의 설정유량으로 주입가능하다. 한편, 주입펌프의 시료 흡입구 전단에는 시료용액내의 불순물 제거를 위한 필터가 설치되어 있다.

주입펌프의 유량 및 Vortex 유량계는 한국표준연구원의 검교정후 설치 및 사용하였으며, 본 실험에서의 레이놀즈수는 계통유량 설정에 따라 $Re=0.85 \times 10^6 \sim 2 \times 10^5$ 사이이다.

2.2. 화학 추적자법

그림 1의 주 배관에 유체가 유량 Q_0 로 흐르고 있을 때, 이 배관의 주입장소에서 농도 C_{in} 인 시료용액을 유량 Q_{in} 으로 주입하면, 하류에서의 배관내 혼합 유량은 (Q_0+Q_{in}) 으로 나타난다. 여기에서 주입한 시료용액의 농도가 하류 배관 단면에서 완전히 혼합되어 균일한 농도 분포를 나타낸다면, 하류 배관 단면에서의 시료농도와 유량을 각각 C_1 , Q_1 이라 하고, 질량보존의 법칙으로부터 다음의 식이 성립한다.

$$C_0 Q_0 + C_{in} Q_{in} = C_1 Q_1 \quad (2-2)$$

$$Q_0 + Q_{in} = Q_1 \quad (2-3)$$

식(2-3)를 식(2-2)에 대입하여 Q_0 에 관하여 정리하면,

$$Q_0 = \frac{(C_1 - C_{in})}{(C_0 - C_1)} \times Q_{in} \quad (2-4)$$

으로 나타낼 수 있다. 단, 주입장소보다 상류측에서 주입하는 시료성분이 검출되지 않을 경우에는 $C_0=0$ 이다.

즉, 식(2-4)는 구하고자하는 배관내의 유량 Q_0 는 주입하는 시료의 유량 Q_{in} 과 각 장소에서의 시료농도 C_0 , C_{in} , C_1 을 알면 구할 수 있음을 나타내고 있다.

여기에서, C_1 : 상류측에서 검출되는 주입시료성분

의 농도(ppm)

Q_0 : 배관내의 상류측 유량(m^3/min)

C_{in} : 주입하는 시료의 농도(ppm)

Q_{in} : 주입하는 시료용액의 유량(m^3/min)

C_1 : 하류 샘플링 용액에서 검출되는 주입시료성분의 농도(ppm)

Q_1 : 하류의 혼합유량(m^3/min)이다.

2.3. 주입 추적자의 선정

추적자 선정시, 고려한 사항으로는

- (1) 물에 잘 혼합될 것
- (2) 중금속이나 방사성물질이 아니며 취급이 용이할 것
- (3) 저농도의 주입으로도 농도가 정확하게 분석될 수 있을 것
- (4) 추적자의 주입으로 배관에 부식을 일으키지 않을 것
- (5) 추적자의 주입으로 배관내의 유체와 화학반응을 일으키지 않을 것 등 이다.

상기의 조건을 비교적 잘 만족시키는 추적자로써, Na(Sodium), B(Boron), Li(Lithium), Mn(Manganese) 등을 들 수 있으나, 본 시스템은 발전소 현장에의 적용을 고려하여, 현장의 수질관리 규정상 비교적 덜 까다로운 Lithium 수용액(Lithium hydroxide monohydrate 99.95%, Aldrich Chemical Company, 특

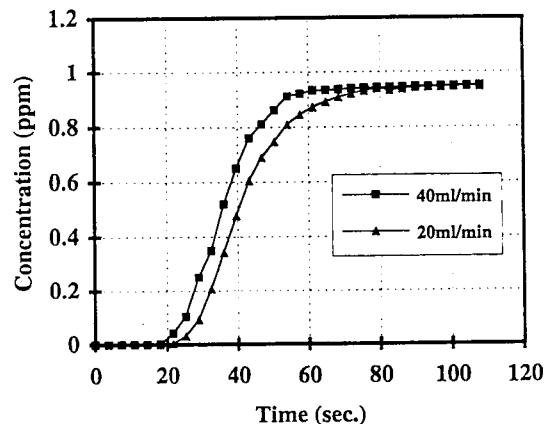


그림 2. 시료주입후 하류 시료채취점에서의 농도의 시간에 따른 변화(주입유량의 영향)

급 시약)을 시료용액으로 채택하였다.

한편, 현장 적용시에는 수질관리 규정상 저농도의 Lithium 수용액을 주입하여야 하고, 또한 하류에서 채취한 회석된 시료의 정확한 농도분석은 ICP-MS(동위원소 회석법)으로 하여야 하나, 실험실 규모의 실험에서는 고농도의 시료주입이 가능하고, 본 연구원에서 보유하고 있는 ICP-AES를 이용하여 농도 분석시, 정확한 농도분석치를 얻기에는 비교적 고농도의 시료가 유리함으로 본 실험에서는 37500 ppm의 Lithium 수용액을 제조하여 사용하기로 하였다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1. 시료주입후 샘플링 개시까지의 시간간격

그림 2에는, 본 실험장치(그림 1 참조)의 계통유량을 $0.75 \text{ m}^3/\text{min}$ (Vortex 유량계의 지시치)로 설정후, 주입장소에서 농도 37500 ppm의 Lithium수용액을 유량 20 ml/min와 40 ml/min로 관 중앙에서 주입을 개시했을때, 하류 시료채취점 1에서 샘플링한 시료의 분석결과를 횡축에 시간(s), 종축에는 시료의 농도(ppm)를 취해서 나타낸다.

그림으로부터 유량 20 ml/min로 시료주입시에는

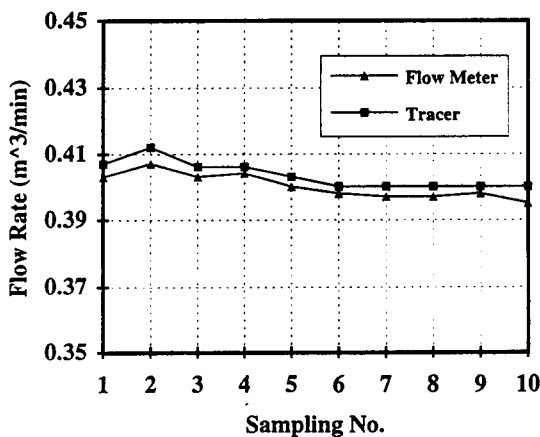


그림 3. 추적자방법과 계통 Vortex 유량계 지시치와의 비교

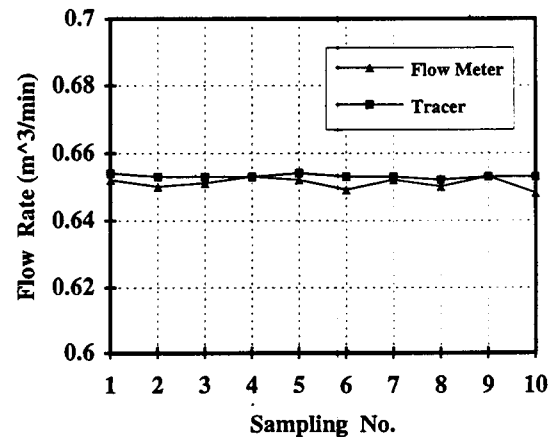


그림 5. 추적자방법과 계통 Vortex 유량계 지시치와의 비교

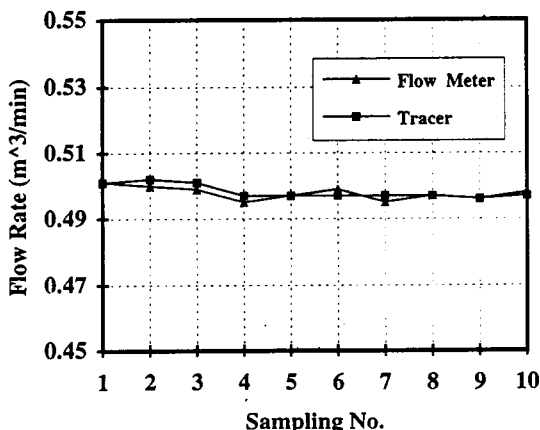


그림 4. 추적자방법과 계통 Vortex 유량계 지시치와의 비교

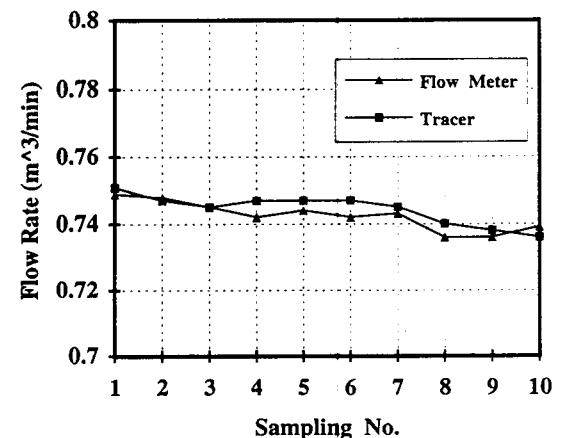


그림 6. 추적자방법과 계통 Vortex 유량계 지시치와의 비교

주입장소에서 주입개시후 약 80초후에 하류 시료채취점 1에서 관내에서 완전히 혼합된 유효한 시료가 얻어짐을 알 수 있다.

한편, 유량 40 ml/min로 주입시에는 약 60초후에 하류에서 유효한 시료가 얻어지며, 20 ml/min로 주입시보다 약 20초가 단축된다. 이것은 주입펌프의 입구측에서 토출측까지의 배관 Volume, 주입펌프 및 Dampener에서의 Dead Volume 등이 상대적으로 단축되기 때문이며, 향후의 실험에서는 시료주입후 2분 경과후에 하류에서 시료채취를 개시하기로 하였다.

3.2. 유량측정 결과

그림 3 ~ 그림 6에는 시료채취점 1에서 시료채취하여 추적자(Tracer)방법으로 측정된 유량과 주계통에 설치된 Vortex 유량계의 지시치와의 비교를 나타낸다. 각 그림의 횡축은 시료의 샘플링 번호, 종축은 유량을 나타내고 있으며, 샘플링은 10초간 시료 채취 후 15초 간격을 두고 다음 시료의 샘플링을 행하였다. 즉, 샘플링과 샘플링 간격은 25초를 나타내고 있다.

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

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

한편, 그림 7에는 주 배관에 설치된 Vortex 유량계의 지시치와 추적자 방법(그림 1의 시료채취점 1에서 시료채취)에 의해서 계산한 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 표준편차등을 구하여 표 1에 나타낸다.

본 실험의 주 배관에 설치된 Vortex 유량계는 비교

적 높은 정확도를 나타내는 유량계로서, 실험실 조건내(배관내의 유체 온도 섭씨 200도 이하)에서 $\pm 1\%$ 이내의 오차를 포함하고 있다.

한편, 본 실험에서 행한 추적자를 이용한 방법은, Vortex 유량계를 기준으로한 오차가 모두 $\pm 1\%$ 이내의 값을 나타내고 있으며, 표준편차등으로 판단하여 매우 신뢰성있는 유량측정이 가능함을 알 수 있다.

3.3. 샘플링 위치의 영향

본 실험장치에는 그림 1에서 나타낸 바와같이 3곳에 시료채취점이 설치되어 있다. 시료채취점 1은 주

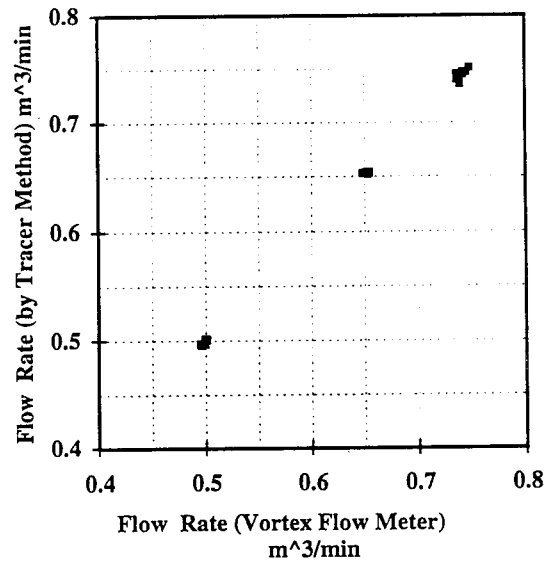


그림 7. 추적자방법에 의한 유량과 유량계 지시치와의 상관

표 1. 추적자법을 이용한 유량측정 결과

Qv : Average Flow Rate by Vortex Flow Meter Reading(m ³ /min)	0.400	0.498	0.651	0.742
Qt : Average Flow Rate by Tracer Method(m ³ /min)	0.403	0.501	0.653	0.748
Relative Error(%) (Qt - Qv)/Qv *100	0.750	0.602	0.307	0.809
Standard Deviation	0.004	0.001	0.001	0.004

입장소로부터 하류 6.7 m(배관 직경의 67D, D: 배관의 직경), 시료채취점 2, 3은 각각 8.4 m(84D), 10.2 m(102D)의 곳에 위치하고 있다.

그림 8에는 계통유량 0.75 m³/min, 0.50 m³/min, 0.40 m³/min의 경우에 대하여, 상기의 3곳에서 시료채취한 결과로부터 측정한 유량의 Vortex 유량계에 대한 상대오차를 각각의 시료채취점에 대하여 나타낸다.

그림으로부터 모든 시료채취점에서 오차는 Vortex 유량계의 정확도인 1%이내의 값을 나타내고 있으나, 계통유량 0.75 m³/min의 경우에는 시료채취점 1에서의 오차가 가장크고 시료채취점 3에서의 오차가 적으며, 계통유량 0.50 m³/min의 경우에는 시료채취점 1, 2에서의 오차가 크나 시료채취점 3에서는 작은 값을 나타내고 있다. 한편, 계통유량 0.40 m³/min에서는 시료채취점에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 즉, 비교적 대유량일 경우에는 시료채취점이 하류측에서 오차가 적어지고 있다. 이러한 현상은 2-1절에서 기술한 바와 같이 레이놀즈수와 혼합거리와의 상관에 의한 것으로서, 추적자 방법으로 유량 측정시는 가능한 한 하류측에서 시료를 채취하는 것이 유리하다.

4. 결 론

화학 추적자 방법에 의한 고정밀 유량측정 기술을 개발하여, 원자력 발전소 주급수 계통의 유량측정에 사용되고 있는 벤추리(Venturi), 노즐(Nozzle), 오리피스(Orifice)등의 유량계에 관한 검증용으로 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 좋은 응답성을 보이고 있으며, 유량측정에 있어 서도 신뢰성있는 측정이 가능하다.
- (2) 본 방법은 본 연구에서 실험한 유량 범위인 0.40 m³/min ~ 0.75 m³/min에서 정확한 유량측정이 가능하며, 이 유량 범위에서 Vortex 유량계를 기준으로 한 상대오차는 Vortex 유량계의 정확도인 $\pm 1\%$ 이내의 값을 나타낸다.

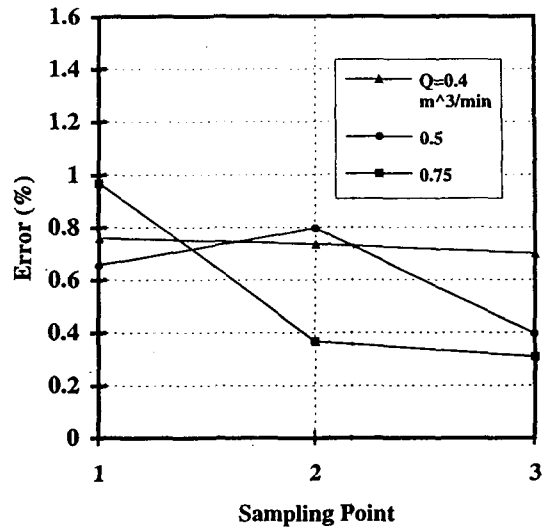


그림 8. 시료채취점이 측정치의 상대오차에 미치는 영향

- (3) 유량의 증가(레이놀즈수의 증가)와 더불어 혼합 길이도 증가함에 따라 시료채취시에는 충분한 하류(본 실험 장치의 경우 관 지름의 100배 이상의 곳)에서 행하는 것이 유리하다.

참고문헌

1. J. Andreopoulos and W. Rodi, "Experimental investigation of jets in a crossflow", *J. Fluid Mech.* Vol.138, pp93-pp127.
2. D.E. Metzger and R.J. Korstad, "Effects of Cross-flow on Impingement Heat Transfer", *Journal of Engineering for Power*, TRANSE, ASME, Series A, Vol.94, No.1, Jan. 1972, pp35-pp42.
3. R.L. Stoy and Y. Ben-Haim, "Turbulent Jets in a Confined Crossflow", *Journal of Fluids Engineering*, TRANSE, ASME, December 1973, pp551-pp553.
4. H. Ziegler and P.T. Wooler, "Multiple Jets Exhausting into a Crossflow", *J. Aircraft*, Vol.8, No. 6, June 1971, pp414-pp420.
5. 中村 育雄, 酒井 康彦, 三輪 昌隆, 角田 博之, "壁面せん断流中の物質擴散の研究", 日本機械學會論文集B編, 第61卷 585號(1995년5월), pp1592-pp1599.

6. 酒井 康彦, 中村 育雄, 角田 博之, 英 孝太, “確率モデルによる管内亂流擴散に 關する研究”, 日本機械學會論文集B編, 第61卷 583號(1995년3월), pp853-pp860.
7. ISO(International Standard Organization) 2975
8. BS(British Standards) 5857 PART 1