

하천유량 측정기법에 관한 연구

김성원 · 지흥기
영남대학교 토목공학과
(1998년 7월 29일 접수)

A Study on the River Discharge Measurement Techniques

Sung-Won Kim and Hong-Kee Jee

Dept. of Civil Engineering, Yeungnam University, Kyeongsan 712-749, Korea

(Manuscript received 29 July 1998)

In this study, the Dilution Method is used to measure river discharge through the hydraulic model test. the dilution method is divided into Constant-Rate-Injection Method and Slug-Injection Method in the river discharge measurement techniques. When the dilution method is applied in the hydraulic model flume, it is analyzed that the estimated error of constant-rate-injection method is less than that of the slug-injection method, and the result shows that floodflow analysis is more efficient than lowflow analysis as compared observed discharge with calculated discharge. The result of statistical error analysis shows that the constant-rate-injection method is appropriate technique for the measurement of the river discharge.

Therefore, the dilution method among the river discharge measurement techniques can be applied for the river basin which can't be measured with current meter or unsteady-flow regime in the urban-small drainage or hydraulic structure equipment area and can be obtained more exact results than any other discharge measurement techniques.

Key words : Dilution Method, Constant-Rate-Injection Method, Slug-Injection Method, hydraulic similitude law, mixing length, hydraulic model test

1. 서론

현대사회에 있어서 물은 생활용수는 물론 모든 형태의 공업용수와 농업용수, 에너지 생산 그리고 레크레이션 등에 필요 불가결한 자연자원으로서 부동의 위치를 차지하고 있으며, 홍수피해예방등과 같은 방재의 대상이 되어 있기도 하다. 따라서 수자원의 효율적인 관리와 배분 및 강우-유출관계 등의 수리·수문학적 연구를 위하여 정확하고 신뢰성 있는 유량측정은 매우 중요한 내용으로 인식하게 되었다. 이수적인 면에서의 유량관측은 댐계획, 하천개수, 하천내 수공구조물의 시공계획, 용수의 취수계획수립 등에 필수적이고, 치수면에서는 제방축조 및 홍수 예정보 시스템설계 등에 기본자료로 사용되고 있다.

유량을 정확히 측정하고자 하는 인간의 노력은 16C 초 Leonard da Vinci(1452~1519)가 하천의 흐름 측정에 부자를 사용한 이래로 Guglielmini(1692)와 Reinhard Woltman(1790)이 유속계를 이용한 유량측정의 원리를 제안한 바 있고, 미국인 Daniel Farrand Henry(1867)에 의해 유속계가 전파되므로써 체계적인 유량측정이 시작되었다. 유량측정방법을 대별하면 하천

의 유속을 측정하여 수위에 따른 유량을 환산하는 직접적인 방법과 유속을 직접적으로 측정하지 않고 두 지점 사이의 표고차 또는 홍수흔적, 조도계수등에 의한 간접적인 유량측정 방법으로 구분할 수 있다. 그러나 이들 측정방법에는 여러가지 측정기구들이 사용되고 있어서 측정장비의 특성, 측정방법, 유량환산방법등에 대한 정확한 이해가 필요하므로 체계적인 측정방법을 수립할 필요가 있다.

먼저, 하천유량측정기법에 관한 외국의 연구로는 직접적인 유량측정방법과 간접적인 유량측정방법으로 구분할 수 있다. 직접적인 유량측정방법에 대한 연구중에서 Tracer를 이용한 희석법(Dilution Method)에 관한 연구로는 Rimmar(1952), Spencer(1958), 영국표준협회(British Standard Institution, 1964) 및 Kilpatrick(1989)에 의해 연구된 바 있으며, 그 외에 Smoot & Novak(1977)에 의한 이동보트를 이용한 유량측정법과 Laenen(1985)에 의한 음향장치를 이용한 유량측정기법이 있다. 또한 간접적인 유량측정방법에 대한 연구로는 Matthai(1976)의 단면축소법에 의한 유량측정, Bodhaine(1976)에 의한 암거를 이용한 유량측정법 및

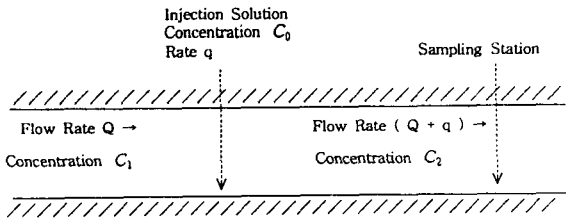


Fig. 1. Diagram of the Dilution Method in the discharge measurement techniques.

Benson & Dalrymple(1984)에 의한 수문곡선-단면적법을 이용한 유량측정기법의 연구가 있었다. 국내의 연구로는 이순탁(1969)의 회석법에 의한 하천유량측정 연구와 건설기술연구원(1992)에서 유량측정방법에 대한 사용자 지침을 제시하여 정리하였고, 김성원 외(1997)는 수리모형실험을 통한 회석법의 적용에 관한 검토가 있었으며, 건설교통부(1995)에서 유량관측 개선방안 연구조사에서 공간적으로 합리적인 자료수집을 위하여 기존의 유량관측망을 검토하여 홍수량과 갈수량을 함께 측정할 수 있는 새로운 유량관측망을 제시하기도 했으나 아직까지 활발한 연구가 진행되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 회석법을 실제 하천에 적용하기 위하여 낙동강 본류하도에 대한 수리모형을 제작하여 수리모형실험을 통한 유량측정을 실시하고, 실험수조에서 유량측정에 필요한 측정방법의 개발, 유량환산 방법 및 오차의 변동분석에 관하여 확립하여, 실제하천 유역에서 회석법의 적용을 위한 기본자료를 제공하는 것이 본 연구의 목적으로 한다.

2. 유량측정 이론

지금까지 연구된 유량측정기법은 크게 직접유량측정과 간접유량측정기법으로 대별할 수 있다. 직접측정기법으로는 최근에 이르러 각광을 받고있는 염료추적법(Dye Tracing Method)과 유속계(프로펠러식, 프라이스식)와 부자에 의한 측정법, 웨어에 의한 측정법 및 이동보-트법 등이 있으며, 간접유량측정의 경우 수문곡선-단면적법, 단면축소법, 암거 등의 소규모 수공구조물을 이용하는 법, 한계수심법, 통수능-수면곡선법 등에 대하여 연구되어 왔다. 특히 염료추적법은 일반적으로 시료분석 등 유량측정에 소요되는 비용이 많기 때문에 유속계에 의한 결과의 검증이나 측정상 문제가 있는 지점들에 제한적으로 이용하고 있으며, 크게 회석법과 유속법(Velocity Method)가 있다. 본 연구에서는 낙동강본류의 일정구간을 모형으로 제작하여 회석법을 모형에 적용하여, 그 결과치를 비교·분석하였다. 회석법에 의한 유량측정기법을 정리하면 다음과 같다.

2.1 회석법

회석법은 염료를 하천에 주입하고 추적하여 회석농도에 의해 유량을 측정하는 방법으로 염료와 농도분석기의 개발로 회석농도가 낮은 하천수를 분석할 수 있게

되었으며, 색소물질의 용해정도와 회석정도에 따라 그 정확성이 달라지며, 이 방법에 의한 유량측정은 1863년 이후에 알려졌다. 이 방법은 유속계나 부자 혹은 수공구조물에 의한 유량측정이 불가능한 지역 즉, 유속이 크고 난류이며, 바위와 같은 파편이나 쇠석때문에 유속계 사용이 어렵고 횡단면이 정확하게 측정되지 않는 지역이나 유량측정시 단면의 변화가 심한 지역, 도시나 소유역에서의 강우-유출현상과 같은 부정류 흐름이 일어나는 곳, 흐름에 접근하기 어렵고 위험한 곳에서의 유량측정에 적합한 방법으로서 최근에 널리 이용되고 있는 방법이다.

회석법에 의한 유량측정의 원리는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 화학물질이나 다른 Tracer를 상류의 한 지점에서 주입하고 이 물질이 유하하면서 물과 완전히 혼합되었다고 생각되는 하류지점에서 시료수를 채취·분석하여 유량을 구하거나 직접 현지에서 전기전도도(Conductivity)를 측정해서 유량을 구한다. 그러나 회석법에 의한 유량측정에서 좋은 결과를 얻기 위해서는 시료의 채취에서 분석까지 체계적이어야 하며 염료의 손실이 없어야 한다. 회석법은 염료를 주입하는 방법에 따라 농도를 알고있는 염료를 짧은 시간에 많이 투입하는 급속주입법(Slug-Injection Method)과 용해된 염료를 일정한 시간간격으로 주입하고 하류에 평형이 이루어진 후의 농도를 측정하는 일정률주입법(Constant-Rate-Injection Method)으로 나눌 수 있다. 회석법의 원리는 단순하지만 효과적으로 적용하려면 확산의 원리를 충분히 이해하여야 한다.

2.1.1 일정률주입법

일정률주입법은 용해된 주입물질을 일정비로 주입하여 하류에서 평형이 이루어진 후의 농도만을 측정하여 유량을 측정하는 방법으로서, 동일한 양의 용해된 물질이 연속적으로 주입되면 각 응답곡선은 같아지므로 시료채취지점에서 화학물질의 농도가 일정할 때까지 일정량으로 염화나트륨(NaCl, Sodium Chloride), 염화칼륨(KCl, Potassium Chloride)등의 용액이나 방사성동위원소인 라디오 아이소토프(RI, Radioisotope) 등을 주입하여 유량을 측정한다.

또한, 일정률주입법에 의한 하천유량 $Q(m^3/sec)$ 는 단위시간당 용액 주입량을 $q(m^3/sec)$, 주입액의 화학물질의 농도를 C_0 , 하천수의 화학물질의 농도를 C_1 , 시료채취 지점에서의 화학물질의 농도를 C_2 , 표준농도비(Standard Dilution Ratio)를 N , 표준농도액의 화학물질의 농도를 C_3 , 주입용액의 용적을 V 라 할 때 식(1)~(2)과 같은 관계식으로 정의할 수 있다.

$$q \cdot C_0 + Q \cdot C_1 = (Q + q) C_2 \tag{1}$$

$$Q = \frac{C_0 - C_2}{C_2 - C_1} \cdot q \tag{2}$$

○ 식(1) 및 (2)에서 주입용액의 화학물질 농도는 시료채취지점에서의 채취수에 대한 화학물질 농도 보다 훨씬 크므로($C_0 \gg C_2$) 식(2)는 다음 식(3)과 같이 간략화시킬 수 있다.

Table 1. Scale factors for model

Characteristic	Symbol	Scale Ratio	Calculation Process
Length	L_H	400	
Depth	L_V	100	
Area	A_r	40,000	$L_H \cdot L_V = 400 \cdot 100$
Volume	V_r	16,000,000	$L_H^2 \cdot L_V = 400^2 \cdot 100$
Discharge	Q_r	400,000	$L_H \cdot L_V^{3/2} = 400 \cdot (100)^{3/2}$
Velocity	V_r	10	$L_V^{1/2} = 100^{1/2}$
Energy Slope	I_r	0.25	$L_H^{-1} \cdot L_V = 400^{-1} \cdot 100$
Roughness	n_r	1.078	$L_H^{-1/2} \cdot L_V^{2/3} = 400^{-1/2} \cdot 100^{2/3}$

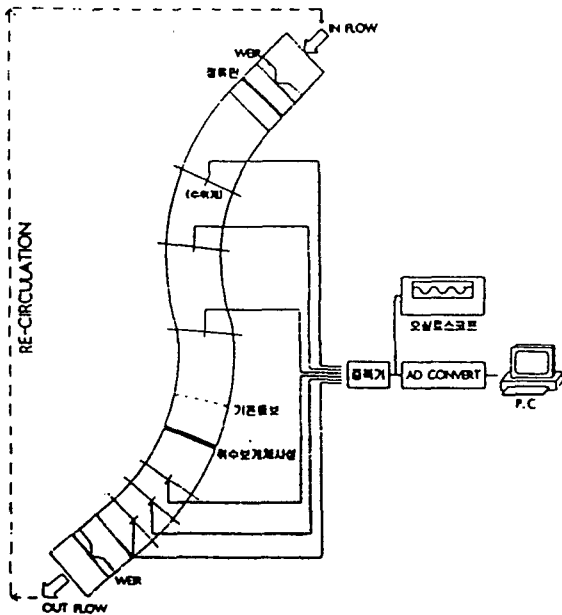


Fig. 2. Plan view of the hydraulic model test laboratory.

$$Q = \frac{C_0}{C_2 - C_1} \cdot q \quad (3)$$

그러나, 저농도를 측정하는 방법이 주입용액과 같은 고농도에 대해서는 적합하지 않기 때문에 실험실에서 기지의 표준농도액의 화학물질 농도 C_3 인 용액을 만들기 위하여 표준농도비를 이용하여 주입용액을 물계 만든 후에 대상지점에 주입하여 유량을 관측하는 것이 일반적이다. 즉, $N \cdot C_3 = C_0$ 이므로 하천유량 계측을 위한 식(3)은 다음 식(4)와 같이 정의할 수 있다.

$$Q = \frac{N \cdot C_3}{C_2 - C_1} \cdot q \quad (4)$$

일정물주입법은 완전한 응답곡선을 측정할 필요가 없고 다만 평형상태의 농도만을 측정하면 된다. 그리고 적은 양의 염료를 일정한 비율로 주입하며 여러 가지

장치들이 필요하다.

2.1.2 급속주입법

급속주입법에 의한 하천유량계측은 기지용적 V 의 진한 용액을 가능한 한 빨리 하천에 주입하는 것으로 시료채취 지점에서의 농도가 급히 첨두에 도달하고 그 후에는 서서히 감소하므로, 시료는 일정한 간격을 두고 채취하여야 하며 화학물질의 농도(Chemical Concentration)를 구하여 농도-시간곡선(Concentration-Time Curve)을 작성한다. 즉, 화학물질 주입으로 인한 농도의 변화량과 주입용액의 용적은 식(5)과 같이 정의할 수 있으며, 급속주입시에는 주입용액의 농도가 하천수의 농도보다 훨씬 크므로($C_0 \gg C_1$) 유량 Q 는 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$(C_0 - C_1) \cdot V = Q \cdot \int_0^T (C_2 - C_1) dt \quad (5)$$

$$Q = V \cdot \frac{C_0}{\int_0^T (C_2 - C_1) dt} \quad (6)$$

식(6)에서 분모는 농도-시간곡선 아래의 면적과 같은 값이므로 이 곡선으로부터 쉽게 유량을 구할 수 있다. 이때 주입용액, 시료수등의 농도를 측정하는에는 정량 분석을 하여 구하거나 열량계(Calorimeter)나 불꽃분석을 위한 불꽃광도계(Flame Photometer)를 사용하여 구한다. 그리고 현장에서 직접농도가 전기전도도에 상사한다는 원리를 이용하여 휴대용 전기전도도계(Portable Conductivity Bridge와 Conductivity Cell) 등을 사용하여 물의 전기전도도를 측정하여 유량을 측정할 수 있다.

3. 혼합거리의 산정

주입한 용액이 하천수와 완전히 혼합할 수 있도록 충분한 거리의 하류지점에서 시료수를 채취하는 것이 가장 중요하다. 이 때 혼합이 거의 완전하게 되는 지점까지의 거리를 혼합거리라 하는데 이에 대해서는 다음과 같은 몇가지 실험식이 연구되었다.

Rimmar(1952)는 연직방향의 혼합이 횡방향의 혼합보다 더 빨리 이루어진다는 즉 2차원의 가정하에 다음 식(7)과 같은 결과를 얻었다.

Table 2. The testing equipment characteristics

Testing Equipment	Scale		For Use
Low Level Water Tank	B4.0m x L4.0m x H1.5m = 24.3 m ³	2 set	Collect testing water
Low Level Water Tank	B4.0m x L4.0m x H2.0m = 32.0 m ³	1 set	Collect testing water
High Level Water Tank	B4.0m x L4.0m x H1.2m = 19.2 m ³	1 set	Supply constant discharge
Motor Pump	15 HP	2 set	Pumping the water
Flume	B0.5m x L4.0m x L84m	1 set	Connect The L.L.W.T.
Discharge Controller	D250mm x L12.0m	1 set	Supply the discharge
Sediment Controller	B1.8m(contacting to the water tank)	1 set	Supply the sediment
Upstream Weir	Triangular (θ = 90°), H = 0.5m	1 set	Control the discharge
Downstream Weir	Rectangular, W = 1.0m, H = 0.5m	1 set	Control the discharge

Table 3. Hydraulic characteristics of the weir flow

Prototype Discharge $Q_p (cms)$	Model Discharge $Q_m (cms)$	Discharge Ratio $Q_r = Q_p \cdot Q_m^{-1}$	Overflow Depth $h_m (m)$
13,420	0.03355	400.000	0.196
12,000	0.03000	400.000	0.188
10,000	0.02500	400.000	0.175
7,000	0.01750	400.000	0.151
5,000	0.01250	400.000	0.132
2,000	0.00500	400.000	0.092
1,000	0.00250	400.000	0.070
500	0.00125	400.000	0.053
100	0.00025	400.000	0.028

$$L = \frac{b^2}{h(0.00286C^2 + 0.0442C)} \quad (7)$$

여기서, L은 혼합거리(ft), b는 하천의 평균폭(ft), h는 하천의 평균수심(ft)이고 C는 Chezy의 계수이다. 그리고 Hull(1962)은 방사선동위원소를 사용하여 California의 하천들에 대하여 실험을 행하였는데, 여기서 하천폭을 b(ft), 유하시간을 t(sec), 평균유속을 v(ft/sec), 확산계수(Disperson Coefficient) D라고 할 때, 농도-시간곡선의 형(Pulse Shape)이 $e^{-x/4Dt}$ 로 표시되는 Gaussian Error Function이라 하였으며 하천의 한측에서 진한 용액이 주입될 때 혼합거리는 다음 식(8)과 같은 식을 얻었다.

$$L = \frac{100 \cdot b^2 \cdot v}{4D} ft \quad (8)$$

여기서, $D = 2.5(Q_v)^{0.2}$ 이고 하천중앙에서 주입될 때는 이 값의 1/4이 된다고 하였다.

Schuster(1965)도 역시 방사선 동위원소를 사용하여 실험을 행하여 보다 좋은 결과를 얻었다. 즉 다음과 같은 식(8)에 의하여 혼합도(Degree of Mixing) Ms %를 구하고, (100-Ms)%와 주입지점으로 부터의 거리와의 관계곡선에서 혼합거리를 구한다.

$$M_s(\%) = \left(1 - \frac{|N_1 - N| + |N_2 - N| + \dots + |N_x - N|}{N \cdot X} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

여기서, Ms 는 혼합도이고, N_1, N_2, \dots, N_x 는 하천의 한단면에서의 농도(Conductivity), X 는 하천면에서의

시료의 수이고 N 은 평균농도이다.

이상과 같은 방법에 의하여 혼합거리를 대략 산정하며 시료채취점의 위치를 결정 할 수 있으나, 측정을 행하기에 앞서 현장에서 직접 완전혼합의 여부를 확인해 보는 것이 요망된다. 그리고 혼합이 용이한 하천구간 즉 폭이 좁고 만곡되어 있거나 낙수(Waterfall)등으로 난류가 생기는 부분을 포함하는 구간을 택하는 것이 좋으며 폭이 넓거나 분지수로 및 유입하는 수로가 있는 구간은 피해야 한다.

4. 실험수로의 수리학적 상사법칙

4.1 모형의 수리학적 상사조건

모형과 실물간의 수리량을 정량적으로 환산하는 데는 상사이론이 적용되고 있다. 즉 현재 하천에서 발생하는 각종 수리현상을 상사율이 적용되도록 모형상에서 재현시켰을 경우, 그 실험에서 얻어진 수리량을 상사이론에 입각하여 실물의 값으로 환산함으로써 계산안에 대한 타당성 여부를 검사할 수 있다. 상사이론에는 유체가 받는 여러 힘의 비에 따라 Froude, Reynold, Weber, Mach, Euler 수 등이 있으나, 그 흐름을 지배하는 가장 큰 요소만을 주로 고려하며 다른 요소는 그 영향이 적은 것으로 보는 것이 일반적이다.

본 실험수로는 자연하천에서 흐름현상을 재현시켜 수위와 유속, 하도의 침식과 퇴적 그리고 구조물 상·하류의 유수특성과 토사의 수리특성을 파악하기 위한 개수로 모형수로이므로, 자유수면을 갖는 하천의 흐름때문

Table 4. The value of conductivity meter(model discharge 0.01750m³/sec)

Division		Conductivity			Mixing Ms(%)	(100-Ms)%
		Left Bank	Channel	Right Bank		
From the injection point 15 m	Conductivity	126.8	128.3	127.5	95.8	4.2
	Increment	9.8	11.3	10.5		
From the injection point 18 m	Conductivity	127.1	129.8	128.6	98.5	1.5
	Increment	11.9	14.6	13.4		

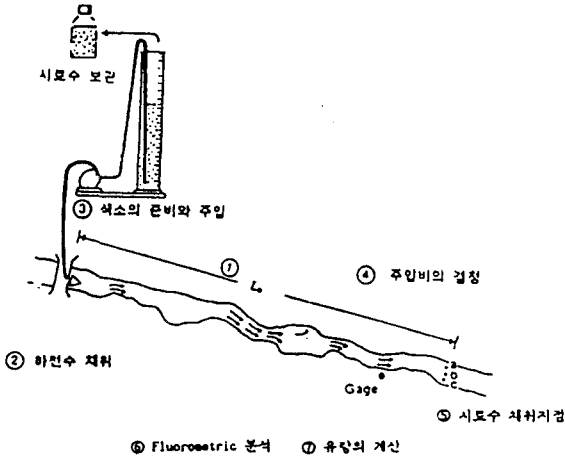


Fig. 3(a). Discharge measurement by the Constant-Rate-Injection method.

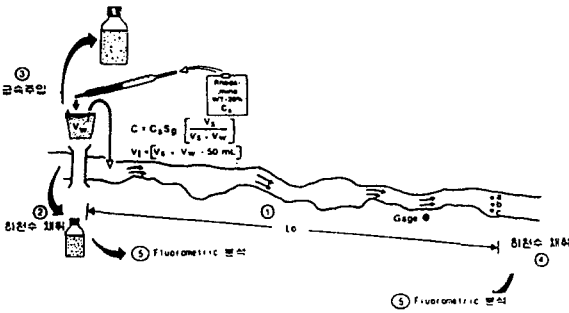


Fig. 3(b). Discharge measurement by the Slug-Injection method.

에 흐름특성의 변화는 중력의 영향이 지배적이다. 따라서 모형축척은 Froude상사법칙에 따르는 것을 원칙으로 하며, 유체의 다른특성(압력, 점성력, 표면장력, 탄성력 등)들에 의한 영향은 무시하도록 하였다. Froude상사법칙은 원형과 모형에서 Froude수가 같다는 가정에서 출발한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$(Fr)_R = 1 \quad (10)$$

$$\frac{(Fr)_M}{(Fr)_P} = \frac{\frac{V_M}{(g_M L_M)^{1/2}}}{\frac{V_P}{(g_P L_P)^{1/2}}} = 1 \quad (11)$$

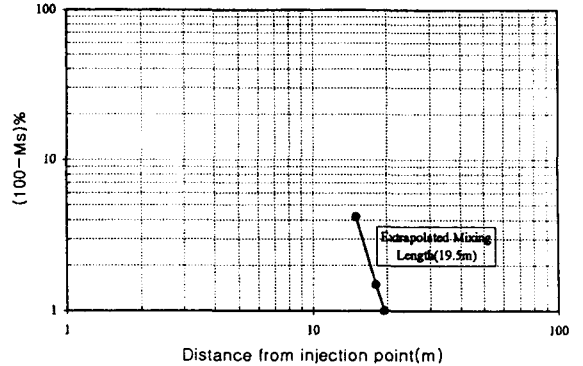


Fig. 4. The relationship of optimal mixing degree-distance curve.

여기서, $(Fr)_R$ 은 Froude수의 축척, L_M 은 모형의 길이, L_P 는 원형의 길이, V_M 은 모형의 유속, V_P 은 원형의 유속, g_M 은 모형의 중력가속도이고 g_P 는 원형의 중력가속도이다. 식 (11)에서 원형과 모형에서의 중력가속도는 동일하다고 볼 수 있으므로 식 (11)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_R = \frac{V_M}{V_P} = \left[\frac{L_M}{L_P} \right]^{1/2} = L_R^{1/2} \quad (12)$$

여기서, V_R 은 속도의 축척이고 L_R 은 길이의 축척이다.

흐름의 연속방정식으로부터 유량의 축척 Q_R 을 유도하면 다음과 같다.

$$Q_R = A_R \cdot V_R = (L_R)^2 \cdot (L_R)^{1/2} = L_R^{5/2} \quad (13)$$

여기서, A_R 은 통수단면적의 축척이다.

시간축척 T_R 은 다음과 같다.

$$T_R = \frac{L_R}{V_R} = \frac{L_R}{L_R^{1/2}} = L_R^{1/2} \quad (14)$$

식 (12), (13), (14)는 비왜곡 정상모형의 경우의 Froude상사율에 의한 모형축척에 대한 관계식이며 왜곡모형(Distorted Model)일 경우 다음의 관계가 성립한다.

$$V_R = L_V^{1/2} \quad (15)$$

$$T_R = L_H \cdot V_R = L_H \cdot L_V^{1/2} \quad (16)$$

$$Q_R = V_R \cdot L_H \cdot L_V = L_H \cdot L_V^{3/2} \quad (17)$$

$$n_R = \frac{L_V^{2/3}}{L_H^{1/2}} \quad (18)$$

Table 5(a). The result of sampling collection(Constant-Rate-Injection, model discharge 0.01750m³/sec)

Sampling	Sampling Number	Time (sec.)	Concentration (μs)	Sampling	Sampling Number	Time (sec.)	Concentration (μs)
River	1	10	123.3	River	10	20	125.2
Concentration	2	20	124.4	Concentration	11	90	127.5
before	3	30	122.7	after	12	120	345.2
Solution	4	40	123.6	Solution	13	160	482.4
Injection	5	50	122.3	Injection	14	230	480.5
(C ₁)	6	60	123.5	(C ₂)	15	350	460.2
	7	70	122.6		16	430	268.3

Table 5(b). The result of sampling collection(Slug-Injection, model discharge 0.01750m³/sec)

Sampling	Sampling Number	Time (sec.)	Concentration (μs)	Sampling	Sampling Number	Time (sec.)	Concentration (μs)
River	21	10	121.3	River	30	40	127.2
Concentration	22	20	122.5	Concentration	31	70	126.5
before	23	30	123.2	after Solution	32	100	292.2
Solution	24	40	121.4	Injection	33	120	481.3
Injection	25	50	122.3	(C ₂)	34	160	689.4
(C ₁)	26	60	122.3		35	230	474.2
	27	70	122.1		36	300	248.3

여기서, L_H 은 수평축척, L_v 는 수직축척, T_r 은 시간축척이고 n_r 은 조도(Manning계수)축척이다. 또한 본 실험수로는 유사이동이라는 수리학적으로 복잡한 문제에 직면하고 있으며, 실제 모형축척을 결정하기 위하여 Manning식으로 대표되는 Froude상사법칙외에도 유사의 초기운동 문제에 대하여 Shields 매개변수로 알려진 쇄굴기준(scour criterion)이 있으며 식(19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{(\tau_{0c})}{d \cdot (\gamma_s - \gamma)} = fct \left(\frac{d \cdot U_*}{v} \right) \quad (19)$$

여기서, (τ_{0c}) 은 하상에서 유사이동 시점에서의 한계전단응력이고, d 는 유사입경, γ_s 와 γ 는 각각 유사와 물의 단위중량, v 는 물의 동점성계수, $U_* = (\tau_0 / \rho)^{1/2}$ 는 마찰속도이다. 식(19)의 좌변은 무차원 한계 전단응력이고, 우변은 입자 Reynolds수이다. 또한 조도계수 n 과 하상의 입자직경과의 관계를 나타내는 Strickler의 실험식($n=d^{1/6}$)을 Manning식에 대입하면 다음 식(20)의 관계식을 얻을 수 있다.

$$(d^{1/6})_R = n_R = (R_R)^{2/3} = \left[\frac{1}{L_H^{1/2}} \right]_R \quad (20)$$

여기서, $(\cdot)_R = (\cdot)_p / (\cdot)_m$, 아래첨자 p 와 m 은 각각 원형과 모형을 의미하고 있으며, R 은 동수반경, L_H 는 수평길이를 나타낸다.

4.2 실험수로의 기하학적조건

본 연구에서 회석법을 적용할 모형의 실제범위의 상류경계는 달성군 하빈면 봉촌리에서부터 하류측 고령군 다사면 호촌리 성산수문까지로 결정하였으며, 계획 총연장은 11.8km로서 동서방향으로 10km, 남북방향으로 6km에 이르고 있다. 본 수리실험장의 규모는 45x

12.5m이나 계측시스템과 배수로 시설을 위한 여유공간 확보를 위하여 수평축척비는 400으로 결정하였다. 또한 실험은 실외에서는 기상의 영향을 받으므로 실내에서 수행하였으며, 수직축척은 수평축척과 동일할 경우 모형에서는 수심이 너무 작아져, 먼흐름(Sheet Flow)이 발생하여서 수리학적 특성의 정확한 재현이 어렵다. 즉 모형하상바닥의 영향이 너무 커지고, 표면장력의 영향도 받게된다. 그러한 관계로 수직축척비를 100으로 결정하였다. 이에 따른 모형의 왜곡비(Distortion Ratio)는 4인 왜곡모형(Distorted Model)의 형태가 되었다. Fig. 2는 수리모형실험실의 평면도를 나타낸 것이고, Froude상사법칙을 이용하여 구한 모형과 실물과의 제랑비는 다음 Table 1과 같으며, 본 실험을 위하여 제작 및 구입된 수리실험장비는 다음 Table 2와 같다.

5. 유량측정

5.1 실험수로의 유량공급시스템

본 연구에서는 수리모형실험구간의 상류한계부의 단위시간당 일정유량을 공급하기 위하여 직각삼각형 웨어를 설치하였으며, 직각삼각형 웨어를 통해 유출되는 유량은 다음 (21)식과 같이 결정되었다.

$$Q = \frac{8}{15} \cdot C \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan \frac{\theta}{2} \cdot h^{2.5} \quad (21)$$

여기서, θ 는 90°이고 유량계수 C 는 0.831이다.

Froude상사법칙에 의하여 원형에서의 유출량, 수리모형실험에 적용될 웨어유출량과 해당유량에 대한 웨어의 율류수심은 Table 3과 같이 결정된다.

5.2 회석법에 의한 유량관측

5.2.1 용액의 주입방법

회석법에 주로 사용되는 주입용 용액은 여러가지가

Table 6. The concentration of C_0 (model discharge $0.01750m^3/sec$)

Sampling Number	Time(sec)	Concentration(μs)
1	10	3,660.700
2	20	3,645.000
3	30	3,651.000
4	40	3,664.000
5	50	3,655.000
6	60	3,644.000
7	70	3,658.000
8	80	3,662.000
Mean		3,654,962

Table 7. (C_2-C_1) value from the Fig. 5(a), (b) (model discharge $0.01750m^3/sec$)

Time(sec)	Concentration(μs)	
	Constant-Rate -Injection	Slug-Injection
20	1.7	5.5
50	3.0	4.6
100	223.8	172.0
130	358.8	363.9
180	358.2	567.1
270	336.7	351.9
320	149.7	127.2
Mean	184.5	221.9

있으나 본 연구에서는 NaCl을 사용하였다. 또한 용액의 주입 용구는 일정률 주입법의 경우에는 마리오프용기(Mariotte-Vessels)를 이용하여 다음 Fig. 3(a)와 같이 용기에 연결된 노즐을 통해 주입량을 측정하였으며, 급속주입법의 경우에는 Fig. 3(b)와 같이 계량된 바킷을 이용하여 유수의 중심부에서 용액을 주입하였다.

5.2.2 최적혼합구간의 결정

회석법에 의한 하천유량관측에서 주입용액의 완전한 회석은 중요한 인자이므로 본 연구에서는 실험대상 하도구간에 대한 최적 혼합거리 결정을 위하여, Schuster가 제안한 최적 혼합거리 결정법을 사용하였으며 각 실험유량중 홍수유량에 해당되는 $0.01750m^3/sec$ 에 대해 NaCl을 예비적으로 주입한 후 주입지점에서 하류의 두 지점(15 m, 18 m)에서 휴대용 전기전도계를 이용하여 전기전도도를 측정하였으며, 그 결과는 Table 4와 같았다. 이 결과를 이용하여 (100- Ms)%를 주입지점으로부터의 거리에 대하여 플롯트한 결과 Fig. 4와 같았으며, Fig. 4의 두 점을 연결한 직선이 수평축과 만나는 점인 19.5 m를 본 연구 대상하도구간의 최적혼합거리로 결정하였다.

5.2.3 회석법에 의한 유량관측 결과

회석법에 의한 실험 하도구간의 유량관측을 위하여

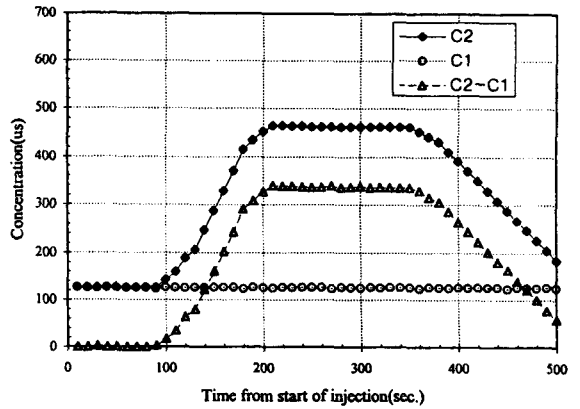


Fig. 5(a). The concentration-time curve by the Constant-Rate-Injection. (model discharge $0.01750m^3/sec$)

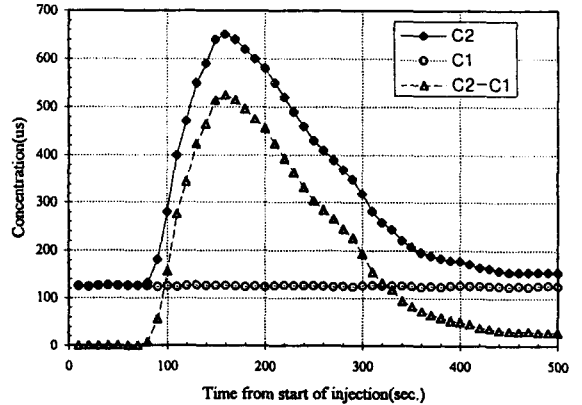


Fig. 5(b). The concentration-time curve by the Slug-Injection. (model discharge $0.01750m^3/sec$)

용액 주입후에 Fig. 3(a)(b)와 같이 시료수를 채취하였으며, 채취된 시료수를 이용하여 측정단위가 μs 인 휴대용 전기전도계와 전기형광분석(Fluorometric Analysis, 螢光分析)을 실시하여 농도-시간곡선을 작성한 결과 Fig. 5(a)-(b)와 같았으며, 시료수 채취결과는 Table 5(a)-(b)와 같다. 또한, 이 때의 주입용액의 농도와 Fig. 4(a)-(b)로부터 계산된 (C_2-C_1)의 값은 각각 Table 6 및 Table 7과 같았다. 시료수 채취시에는 먼저, 일정률주입법의 경우 색소의 주입은 충분한 시간을 가지고 횡단면 전체에 완벽하게 평형상태의 농도가 나타나도록 실시하였으며, 시료수 채취는 주입이 끝나는 경부터 시작하여 주입이 완전히 끝나기 전에 종료토록 하였다. 또한 시료수의 샘플을 채취할 때 최소한 단면의 세지점에서 회석된 색소를 포함한 하천수를 채취하여, 모든 시료수를 봉인하고 하천명과 레벨을 붙이고 채취한 장소와 시간을 기록하고 직사광선을 피하도록 하였다. 다음으로, 급속주입법의 경우 주입한 색소가 완전히 통과할 때까지 관측을 실시하고, 시료수의 채취는 색소가 관측지점에 도달하

Table 8. The result of discharge measurement by the Dilution Method

Model Discharge (m ³ /sec)	Constant-Rate-Injection		Slug-Injection	
	Measuring Discharge (m ³ /sec)	Conversion Discharge (m ³ /sec)	Measuring Discharge (m ³ /sec)	Conversion Discharge (m ³ /sec)
0.00025	0.00028	112	0.00023	92
0.00125	0.00124	486	0.00145	580
0.00250	0.00270	1,080	0.00280	1,120
0.00500	0.00480	1,920	0.00514	2,056
0.01250	0.01280	5,120	0.01310	5,240
0.01750	0.01680	6,720	0.01640	6,560
0.02500	0.02800	10,200	0.02840	10,360
0.03000	0.03200	12,800	0.03100	12,400
0.03355	0.03450	13,800	0.03350	13,400

Table 9. The comparison of discharge measurement result in the experimental flume

Discharge(m ³ /sec)		Model(m ³ /sec)		Prototype(m ³ /sec)		Error Variation(%)	
Model	Prototype	CASE 1	CASE 2	CASE 1	CASE 2	CASE 1	CASE 2
0.00025	100	0.00028	0.00023	112	92	±12.00	±8.00
0.00125	500	0.00122	0.00145	486	580	±2.80	±16.00
0.00125	1,000	0.00270	0.00280	1,080	1,120	±8.00	±12.00
0.00500	2,000	0.00480	0.00514	1,920	2,056	±16.00	±4.00
0.01250	5,000	0.01280	0.01310	5,120	5,240	±2.40	±4.80
0.01750	7,000	0.01680	0.01640	6,720	6,560	±4.00	±6.29
0.02500	10,000	0.02550	0.02590	10,200	10,360	±2.00	±5.14
0.03000	12,000	0.03200	0.03275	12,800	13,100	±6.67	±9.17
0.03355	13,420	0.03450	0.03600	13,800	14,400	±2.83	±7.30

기 전부터 실시하여 완전히 통과할 때까지 연속적으로 실시하였다.

이상과 같은 과정을 실험유량을 변화시키면서 수차례 반복하여 각각의 유량을 계산하였으며 그 결과 Table 8과 같았다.

5.2.4 유량관측 결과의 비교 검토

실험수로에서의 유량관측을 위하여 본 연구에서는 특수제작된 모형수로에서 염료추적법중에서 회석법을 이용하여 유량측정을 실시하여 실제유량으로 환산하였으며, 그 결과 Table 9와 같이 비교 검토 되었다. Table 9에서 CASE 1은 일정률주입법, CASE 2는 급속주입법에 의하여 계산된 모형에서의 유량, 원형에서의 유량 및 오차의 변동량을 나타낸 것이며, 본 실험에서는 원형에서의 유량이 5,000 cms 이상을 홍수유량, 5,000 cms 이하를 저수유량으로 분류하여 오차의 변동량을 홍수유량과 저수유량으로 나누어서 검토하였으며, 홍수유량의 경우 CASE 1이 ±6.67~±2.00%, CASE 2에서는 ±9.17~±4.80%로 분석되었고, 저수유량의 경우에는 CASE 1이 ±16.00~±2.00%, CASE 2에서는 ±16.00~±4.00%로 분석되어서 일정률주입법이 급속주입법보다 오차의 변동량이 적은 것으로 분석되었고, 홍수시의 유량이 저수시보다 오차의 변동량이 적은 것으로 나타났다.

6. 결 론

지금까지 본 연구에서는 하천유량측정기법중에서 회석법을 실험수로에 적용·분석하여, 실제 하천구간의 효과적인 적용성을 연구하였으며, 회석법을 낙동강본류 하도구간(No.357~No.379지점, 낙동강하천정비기본계획(보완조사Ⅲ, 참조)의 수리모형(수평축척비 400, 수직축척비 100, 왜곡도 4인 왜곡모형)에 적용하고자 모형을 제작하고 실험유량을 단계별로 적용하였다. 실험수로에서는 회석법중에서 일정률주입법과 급속주입법을 이용한 유량측정을 실시하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서의 회석법에 의한 하천유량측정기법은 일정률주입법과 급속주입법으로 구분하여 적용하였으며, 본 수리모형실험에서는 일정률주입법이 급속주입법보다 정도가 높고 적용성이 높은 것으로 나타났다.

(2) 회석법에 의한 하천유량측정을 수리모형실험실의 환산유량 $Q_p=5,000cms$ 를 기준으로 홍수유량과 저수유량으로 나누어서 분석하였으며, 홍수유량측정이 저수유량측정시보다 오차가 적고 효율성이 뛰어난 것으로 분석되었다.

(3) 회석법을 실험수로에 적용하여 실시할 경우 실제 유량값을 거의 정확하게 유도할 수 있으므로 유속계나 부자 혹은 수공구조물(Weir)에 의한 유량측정이 불가능한 지역 및 유량측정시 단면의 변화가 심한 지역, 흐름에 접근하기 어렵고 위험한 곳에서의 유량측정에 회석법을 적용하는 것이 유리하리라 사료된다.

그러나 본 연구에 사용된 수리모형은 왜곡모형이고,

유사이동이라는 수리학적해석에 있어서 난점이 많으므로 유량관측에 있어서의 오차발생의 가능성이 높은 것으로 분석되며, 실제 하천에서 홍수시의 회석법의 적용은 시료의 주입, 혼합거리의 선정, 농도측정 및 샘플채취에 있어서 많은 어려움이 있으므로 실제하천에의 적용성에 있어서는 많은 주의를 요하는 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 영남대학교 자유공모과제 학술연구비의 지원에 의해서 이루어진 것으로 지원해 준 학교 당국에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부, 1993, 낙동강하천정비기본계획(보완조사 III).
 건설교통부, 1995, 유량관측개선방안 연구 조사.
 김성원, 지홍기, 이순탁, 1997, 개수로 수리모형을 이용한 회석법의 적용에 관한 연구, 97 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp. 69~72.
 대구광역시, 1996, 낙동강 취수보 시설개체 수리모형실험 보고서.
 이순탁, 1969, Dilution Method에 의한 하천유량측정에 관한 연구, 한국수문학회지 제 2권 제 2호, pp 52~58.
 한국건설기술연구원, 1985, 수리모형실험실 실태조사.
 한국건설기술연구원, 1992, 유량측정방법의 적용에 관한 연구.
 Antonius Launen, 1985, Acoustic velocity meter systems, USGS Techniques Water Resources Inv.
 Benson, M. A, and Dalrymple. T., 1984, General field and office procedures for indirect discharge measurement, U. S. Geol., Survey Technique Water-Resources Inv., Book3, Chap. A1.
 Bodhaine, G. L., 1976, Measurement of peak

discharge at culverts by indirect methods, U. S. Geol., Survey Techniques Water-Resources Inv., Book 3, Chap A3.
 British Standards Institution, 1964, Methods of measurement of liquid flow in open channels, Part 2, Dilution Methods, B. S. 3680.
 Hull, D. E., 1962, Dispersion and persistence of tracers in river flow measurement, International Journal of Applied Radiation and Isotopes, 13, pp. 63-73.
 Kilpatrick, F. A., 1989, Measurement of time of travel in streams by dye tracing, USGS Techniques Water Resources Inv.
 Mattai, H. F., 1976, Measurement of peak discharge at width contractions by indirect methods, U. S. Geol., Survey Techniques Water-Resources Inv., Book 3. Chap. A4.
 Rimmer, G. M., 1952, Use of electrical conductivity for measuring discharge by the dilution method, National Engineering Lab., Translation No. 749.
 Schuster, J. C., 1965, Canal discharge measurement with radioisotopes, Proc. Am. Soc. Civ. Engrs., J. of Hyd. Div., 91. HY2, pp. 101-124
 Smoot, G. F., and Novak, C. E., 1977, Measurement of discharge by the moving-boat method, U. S. Geol., Survey Techniques Water-Resources Inv., Book 3, Chap. A11.
 Spencer, E. A., and Tudhope, J. S., 1958, A Literature survey of the salt dilution method of flow measurement, J. Instn. Wat. Engrs.. Vol. 12, 2.
 University of New Castle Upon Tyne : Dept. of Civil Engineering, 1964, Dilution techniques for flow measurement; New Castle, The Dept., Bull No. 31.