

도시 소하천 합류부 수심변화에 대한 실험연구

Experimental Study on the Depth-Variations of Confluence Area in Small Urban Channel

심 기 오* · 이 길 춘**
Shim, Kee Oh · Lee, Kil Choon

Abstract

The runoff from an urban catchment is increased because of the gravitation of the population towards cities. For this reason, water level increment in confluence area makes it impossible to drain internal water and thus produces flood out in upstream areas. In this study, flow variations of main channel are measured which is caused by combining storm sewer into main channel in small watershed. Depth increment in main stream is analyzed due to flowrate and slope in main channel and flowrate, slope and degree of confluence in tributary channel. For main channel slope, as a result, the depth ratio increases as the channel slope is getting steeper, and also due to low flowrate in main stream and high flowrate in tributary channel. For the degree of confluence, depth ratio decreases when the degree is getting small. As mentioned above, main factors influencing the depth ratio increment of confluence channel are in the order of the degree of confluence, and the flowrate of tributary channel and main channel.

요 지

인구의 도시집중으로 인하여 유역의 유출용적이 증대하며 이로 인한 합류부의 수위상승으로 내수배제가 불가능하게 되어 침수피해가 발생하고 있다. 본 실험연구에서는 소유역 하천에서 우수거의 합류로 인한 본류하천의 흐름변화를 실험하였으며, 하천의 수위상승을 소하천(본류)의 유량과 경사, 우수거(지류)의 유량과 경사 및 합류각에 따른 본류의 수위상승을 분석하였다. 실험결과 본류하천의 경사에 대해서는 경사가 급할수록 수심비가 증대하는 것으로 나타났으며, 본류의 유량은 적을수록, 지류의 유량은 많을수록 수심비는 크게 나타났다. 합류각에 대해서는 합류각이 작을수록 수심비가 작은값을 나타내고 있다. 이와 같이 도시 소하천의 합류시 수심비의 상승영향을 보면 합류각, 지류유량 및 본류유량 등의 순으로 상승영향이 밀접하게 나타났다.

1. 서 론

도시가 발달함에 따라 하천이 정비되어 소유역의

* 단국대학교 대학원 토목공학과 박사과정
** 단국대학교 공과대학 토목공학과 교수

우수거가 소하천에 합류되므로써 합류부의 흐름특성에는 많은 변화를 가져오게 된다. 하천의 소통능력 향상을 위한 하천정비 계획 수립시에도 합류부의 수심변화 양상을 파악하는것은 대단히 중요한 문제이다. 도시 소하천의 우수거는 대부분 복개가 되어 있으며 조도계수가 작고 하상경사가 급하여 일반적으로 유속이 빠르다. 이러한 유속이 빠른 흐름이 유속이 느린 본류하천에 합류될 때 합류부 상류에서 균일하게 유하되는 유체입자는 합류의 영향으로 입자가 교란되며 합류부 하상 표고차로 인한 에너지의 감소, 유속과 유황의 불균일, 유량의 차이, 본류와 지류와의 하상경사 불일치 등으로 인해 합류시 본류하천의 유속 감소는 수위의 상승과 지류 유량의 내수배제 불가능을 야기시켜 저지대 지역 주민에게 많은 재산상의 피해를 주기도 한다. (한국 수문학회, 1988)

따라서 많은 학자들은 하천의 합류로 인한 수위의 상승을 예측하기 위하여 본류와 지류의 유량비 및 합류각을 고려한 실험연구가 진행되어 왔다. Best와 Reid(1985)는 분리구역의 폭과 길이는 합류각의 증가와 전체유량에 대한 지류유량의 비율에 따라 증가한다는 것을 연구하였으며, Ramamurthy et al.(1988)은 지류가 휘어지는 경우에 유량비에 대한 지류의 모멘트 변화를 무차원화 하였다. Hager(1989)는 폭이 같은 하천의 합류시 한계수심에 대한 합류각에 따른 상류부의 수심비의 변화와 수축계수의 변화에 대해 연구하였으며, 박상길 등(1977)은 중규모 하천의 선형을 직선으로 일반화하여 합류시의 흐름특성을 실험 연구하였다. 안의선 등(1988)은 하천 합류부에 도류제를 설치함에 있어 도류제의 길이를 달리하여 그에 따른 수리적인 특성을 실험하였고, 유성현 등(1993)은 도시 소유역의 본류하천과 지류하천의 단면이 각각 균일한 경우에 합류로 인한 흐름특성을 실험 연구하였다.

이러한 대부분의 연구는 하천의 경사가 거의 수평인 경우에 대한 것으로 도시 소하천의 경우에는 본류와 지류의 하상경사, 합류각 및 합류점의 하상 표고차 등으로 인하여 그 영향이 다를것이다. 지금까지 연구 발표된 합류부의 실험연구는 하천과 하천의 합류에 있어서의 수위상승 예측은 가능할것이다

나, 도시 소하천 합류의 적용에는 많은 문제점이 있다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 도시 소하천(본류)과 우수거(지류)의 합류시 흐름특성을 지배하는 주요 인자들이 수심변화에 미치는 영향을 실험을 통하여 검토한 것이다.

2. 소유역 하천 현황

도시 소하천과 우수거 합류부를 모형화하기 위하여 서울시의 소하천(준용하천) 현황을 조사하였으며 그 결과는 표 1과 같다(이원환 등, 1991, 김광목 등, 1991, 한국종합 기술개발공사, 1992).

서울시 31개 준용하천에 대한 수리학적 특성을 살펴보면 하폭은 7~90m로서 평균하폭은 약 36m이며, 하상의 경사는 1/50~1/5000로서 평균은 대략 1/340이다. 또한, 계획홍수량의 크기를 보면 50~680CMS이며, 형상계수의 분포는 0.11~0.67로서 평균은 약 0.32이다. 소하천에 합류되는 많은 무명천들에 있어서는 하천과의 하상표고차는 일반적으로 0.5~1.5m이다.

3. 수리 모형실험

도시하천의 수리 모형실험을 위하여 하천의 본류와 지류구간은 직선구간이며 각 단면에 대한 조도계수는 동일하고, 본류와 지류하천 합류부의 하상 표고차로 인하여 에너지의 급격한 손실이 예상되지만 합류시의 수위상승으로 상류의 흐름이 된다.

하천의 흐름은 중력에 의하여 지배되므로 Froude 상사법칙이 적용된다. 그러므로 상사법칙에 따라 흐름에 대한 원형(Prototype)과 모형(Model)의 Froude 수(F)가 동일하여야 하며, 다음과 같이 원형과 모형사이에 Froude의 상사율이 적용된다.

$$F_r = \frac{V_r}{\sqrt{g_r \cdot Y_r}} = 1 \quad (1)$$

여기서, 아래첨자 r은 원형과 모형의 비를 나타내며 F는 Froude수, V는 유속, g는 중력가속도이

표 1. 서울시 소하천(준용하천) 현황

하 천 명	유역면적 (km ²)	유로연장 (km)	하폭 (m)	하 상 경 사	유 출 계 수	형 상 계 수	계획홍수 량(CMS)	설계빈도 (년)
도봉천	7.51	4.00	40	1/200	0.61	0.47	150	50
방학천	5.23	3.48	15	1/600	0.67	0.43	110	50
당현천	10.94	6.50	44	1/850	0.63	0.26	170	50
우이천	27.67	11.75	60	1/1560	0.64	0.20	320	50
화계천	4.19	3.61	20	1/330	0.68	0.32	85	50
가오천	2.24	2.50	15	1/130	0.61	0.36	50	50
대동천	2.58	2.75	10	1/50	0.61	0.34	55	50
묵동천	9.94	6.00	35	1/450	0.65	0.28	160	50
면목천	8.56	5.58	40	1/350	0.67	0.27	155	50
전농천	6.19	5.54	15	1/1100	0.70	0.20	120	50
청계천	50.96	13.75	84	1/1000	0.69	0.27	590	50
성북천	7.41	5.45	20	1/330	0.67	0.25	125	50
정능천	19.32	10.85	40	1/800	0.66	0.17	240	50
월곡천	4.06	3.75	25	1/300	0.69	0.29	80	50
개화천	52.09	14.70	57	1/835	0.65	0.24	680	100
오류천	6.63	4.67	7	1/148	0.66	0.30	95	20
도림천	43.65	14.20	58	1/587	0.68	0.21	460	50
대방천	7.65	6.70	30	1/3600	0.69	0.17	130	50
봉천천	9.13	6.20	27	1/340	0.67	0.23	150	50
시흥천	4.52	2.60	10	1/5000	0.67	0.67	110	50
홍제천	39.76	12.30	50	1/2000	0.66	0.26	490	50
불광천	20.72	9.20	60	1/2000	0.67	0.24	290	50
녹번천	5.75	3.75	20	1/310	0.66	0.41	120	50
봉원천	6.30	3.58	10	1/216	0.69	0.49	101	50
반포천	29.10	8.10	30	1/2700	0.67	0.59	415	50
사당천	13.70	6.50	35	1/450	0.67	0.32	230	50
양재천	56.80	15.60	90	1/700	0.63	0.11	560	50
여의천	11.84	5.80	20	1/160	0.63	0.35	165	50
세곡천	13.17	5.75	25	1/340	0.64	0.41	160	50
성내천	33.56	9.77	70	1/1300	0.68	0.35	555	50
고덕천	18.52	6.83	55	1/600	0.67	0.40	250	50
평 균	-	-	36	1/340	-	0.32	238	-

고 Y는 수심을 나타낸다.

원형하천의 흐름은 일반적으로 난류이고 Manning 공식을 사용하여 상사식을 표현하면 다음과 같다.

$$V_r = \frac{1}{n_r} R_r^{2/3} S_r^{1/2} \quad (2)$$

식 (1)을 정리하면

$$V_r = Y_r^{1/2} \quad (3)$$

식 (2)에 식 (3)을 대입하고 정리하면

$$n_r = Y_r^{2/3} X_r^{-1/2} \quad (4)$$

그러므로,

$$Q_r = A_r V_r = X_r Y_r^{3/2} \quad (5)$$

$$S_r = Y_r / X_r \quad (6)$$

여기서, Q_r , S_r 및 n_r 은 각각 유량 축척비, 하상경사 축척비 및 조도계수 축척비를 나타내며, X_r , Y_r 은 각각 길이 축척비, 수심 축척비를 나타낸다.

소하천이 많은 서울시 준용하천의 자료(표 1)를 이용하여 모형의 크기 및 형상은 이들 값을 고려하여 모형 실험의 값들을 결정하였다. 합류부 하천을 모형 실험하기 위한 흐름특성 변화의 주요인자들은 표 1과 현장조사를 통하여 본류와 지류의 하폭, 유량, 하상경사, 조도, 지류의 합류시 하상의 표고차 및 합류각으로 결정하였다.

원형하천의 평균하폭은 36m이나 본 연구에서는 30m로 하였으며, 본류하천의 하상경사는 1/500과 1/750로 결정하였다. 본류유량은 대부분의 하천이 설계빈도를 50년을 택하고 있으므로 본류하천의 홍수량으로는 200 CMS와 350 CMS를 택하였다.

지류(우수거)의 유량과 하상경사는 본류의 유량과 하상경사를 고려하여 20 CMS, 50 CMS, 70 CMS 및 1/200과 1/400을 선택하였으며, 직사각형 수로로 하폭 6.25m로 하였다. 실험실 모형에서 본류하천의 길이는 14m, 지류하천의 길이는 2.4m로 하였으며 원형과 모형과의 축척비(왜곡도=1)는 다음과 같이 결정하였다.

$$L_r = Y_r = 1/25 \quad (7)$$

원형하천의 하폭(30m와 6.25m)을 식 (7)에 대입하면 모형의 본류하천의 하폭은 1.2m가 되며, 지류하천의 하폭은 0.25m가 된다. 모형은 도시하천 합류부의 수심변화를 파악하기 위한 것으로, 본류와 지류의 합류각은 30° 와 60° 및 90° 의 3가지 경우를 선택하였다. 본류와 지류의 하상 표고차는 도시 소하천 합류부의 현지조사를 실시하여 대표될 수 있다고 판단되는 값으로서 원형하천에서 1m를 택하였으며, 이 값을 식 (7)에 적용하여 모형하천에서는 4cm의 하상 표고차를 적용하였다.

표 2. 원형과 모형의 관계

		원 형	모 형
수 로 길 이	본 류	350m	14.0m
	지 류	60m	2.4m
수 로 폭	본 류	30m	1.20m
	지 류	6.25m	0.25m
수 로 조 도		0.021	0.012
본류와 지류의 하상 표고차		1.0m	0.04m
경 사	본 류	1/500	1/500
		1/750	1/750
	지 류	1/200	1/200
		1/400	1/400
합 류 각		90°	90°
		60°	60°
		30°	30°
유 량	본 류	200CMS	64 ℓ /sec
		350CMS	112 ℓ /sec
	지 류	20CMS	6.4 ℓ /sec
		50CMS	16 ℓ /sec
		70CMS	22.4 ℓ /sec

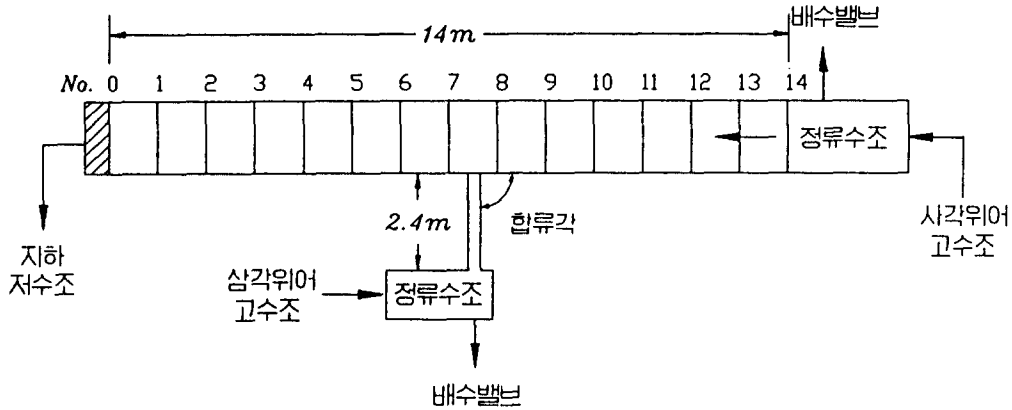


그림 1. 합류부 하천 모형도와 측정단면위치

하천의 조도에 있어서는 도시 소하천이므로 완전히 개수된 직선수로 구간이며 하천의 단면이 균일한 단면을 갖는 이상적인 하천구간으로 가정하였으며 원형에서의 조도계수를 $n=0.021$ 로 가정하였고, 이를 식 (4)에 적용하여 모형하천에 이용하였다. 실험에 이용된 원형과 모형의 제원은 표 2와 같다.

본류 하천구간의 길이 14m를 각 1m씩 분할하여 15개의 관측단면을 선정하였으며 이들 관측단면들의 중간 하류부분에 지류하천을 합류시켰다. 본류구간 15개의 관측단면을 각각 5개 대표구역으로 분할하여 각 관측점에서의 수위와 유속을 측정하였다. 본류유량의 공급은 사각형 위어로부터 일정한 유량이 공급되고 지류유량은 삼각형 위어로부터 일정한 유량이 공급되도록 하였다. 모형수로 하류부분에는 월류수문을 설치하여 수류의 자유낙하로 인한 수위강하를 배제하므로서 수심측정을 정확히 하였다. 그림 1은 하천 모형도와 측정단면의 위치를 나타낸 것이다.

실험에 있어서 본류 및 지류의 유량에 따른 관측점에서의 측정시 0.01mm의 정도를 갖는 수위계(일본, KENEK사, 포인트 게이시)와 0.01cm/sec의 정도를 갖는 유속계(일본, KENEK사, 모델 VOT2-200-20)를 사용하여 각 관측점에서의 수위와 유속을 관측하였다. 수위의 관측은 각 단면의 5개 관측점에서의 수위계에 의한 수면과 저면(바닥면)의 차이를 측정하여 관측점의 수위로 하였으며,

한 단면의 5개 관측점의 수위 관측값을 평균하여 그 단면의 수위로 하였다. 유속은 각 관측점에서 1점법($V_m = V_{0.6}$)을 사용하여 유속을 측정하였다.

도시 소하천 합류부의 실험을 위하여 합류각을 3가지, 본류의 하상경사를 2가지, 지류의 하상경사를 2가지, 본류유량을 2가지, 지류유량을 3가지 그리고 하상 표고차는 1가지를 선택하여 총 72가지의 실험자료(수위, 유속)를 획득하였다. 또한, 지류 유량이 없는 본류 흐름의 수위와 유속을 측정하여 기준자료로 하였다.

4. 실험 결과 및 분석

도시 소하천 합류부의 각 관측단면에서 측정된 72가지의 수위(h)를 기본자료로하여, 지류 유량이 없는 본류의 기준자료인 수심(H)과 수심비(h/H)를 계산하였으며, 각 경우(72가지)에 대한 관측단면에서의 최고수심비(h/H)는 표 3과 같다.

합류부 하천의 실험결과 본류의 유량과 하상경사, 지류의 유량과 경사 및 합류각에 따라서 수심비(h/H)의 값이 6.6~65.2% 까지 민감하게 변화하고 있는 것을 알 수 있었다. 합류각이 90°의 경우에 있어서 수심비의 값이 9.6~65.2% 로써 가장 크게 나타나 변동계수(Cv : coefficient of variation)가 12.6%이며, 60°의 경우에는 수심비의 값이 7.7~51.5% 로써 변동계수가 9.9%로 나타났고, 30°의 경우에는 수심비의 값은 6.6~37.9%이

표 3. 합류부 관측단면에서의 최고수심비(h/H)

본 류		지 류		합 류 각		
경 사	유 량	경 사	유 량	90°	60°	30°
1/500	200 CMS	1/400	20CMS	1.205	1.180	1.165
			50CMS	1.469	1.382	1.299
			70CMS	1.624	1.505	1.364
		1/200	20CMS	1.219	1.201	1.182
			50CMS	1.489	1.394	1.306
			70CMS	1.652	1.515	1.379
	350 CMS	1/400	20CMS	1.143	1.135	1.116
			50CMS	1.303	1.254	1.237
			70CMS	1.402	1.342	1.277
		1/200	20CMS	1.148	1.138	1.123
			50CMS	1.324	1.285	1.242
			70CMS	1.422	1.359	1.282
1/750	200 CMS	1/400	20CMS	1.155	1.137	1.125
			50CMS	1.393	1.298	1.225
			70CMS	1.550	1.415	1.288
		1/200	20CMS	1.164	1.145	1.131
			50CMS	1.400	1.308	1.235
			70CMS	1.561	1.424	1.293
	350 CMS	1/400	20CMS	1.096	1.077	1.066
			50CMS	1.187	1.169	1.141
			70CMS	1.277	1.226	1.186
		1/200	20CMS	1.106	1.092	1.081
			50CMS	1.192	1.172	1.144
			70CMS	1.281	1.236	1.190

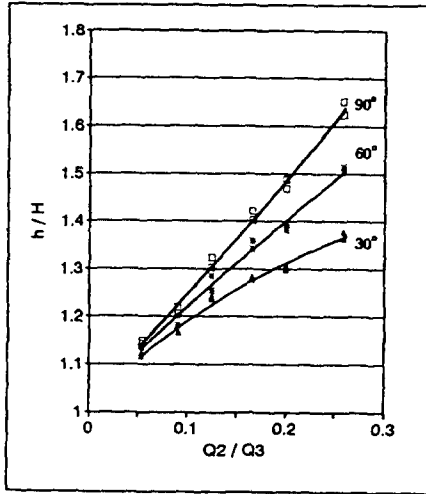
고 변동계수는 7.0%로 가장 작게 나타났다. 그러나, 지류의 경사에 대해서는 합류각 90°의 경우 0.5~2.8%, 합류각 60°의 경우 0.3~2.1% 이며, 합류각 30°의 경우에는 0.3~1.7% 로서 매우 작은 변화를 보였다.

본류의 경사가 1/500인 경우에는 본류 유량이 200 CMS일때 지류의 유량이 가장 큰 70 CMS인 경우 합류각이 변화함에 따라 수심비의 변화가 36.4~65.2% 로써 28.8%의 차이로 가장 컸고, 본류 유량이 350 CMS인 경우에는 지류 유량이 70 CMS일때 합류각에 따라 27.7~42.2% 로써 14.5%의 차이로 가장 크게 나타났다.

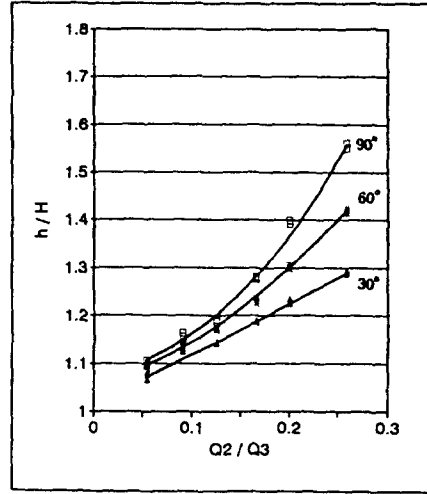
본류의 경사가 1/750인 경우 본류 유량이 200 CMS일때 지류의 유량이 70 CMS인 경우 합류각

에 따라 수심비의 변화가 28.8~56.1%로써 27.3%의 차이로 가장 컸고, 본류 유량이 350 CMS인 경우에도 지류 유량이 70 CMS일때 합류각에 따라 18.6~28.1%로 9.5%의 변동폭을 갖는 것으로 나타났다.

표 3의 실험 결과에서 본류의 경사에 대해서는 경사가 급할수록, 지류의 유량과 합류각이 커질수록 수심비의 값이 점차적으로 큰 증가를 나타내고 있다. 이와 같이 본류하천의 하상경사, 유량, 지류의 유량과 합류각에 따른 도시 소하천 합류부의 수심 영향을 파악하기 위하여 합류각과 유량비에 따른 수심비의 변화를 무차원화 시키면 그림 2와 같다. 여기서, Q2, Q3는 각각 지류의 유량과 합류후의 유량이다.



(a) 하상경사가 1/500인 경우 수심비



(b) 하상경사가 1/750인 경우 수심비

그림 2. 본류의 하상경사에 따른 수심비

본류의 하상경사가 1/500 이며 유량비가 26% 인 경우 수심비는 합류각 90°에서 63.8%, 60°에서 51.0%, 30°에서 37.2%의 증가를 나타내고 있다. 즉, 합류각 90°의 경우에는 30°와 60°의 경우에 각각 26.6%, 13.8%의 수심비가 더 증가된 것으로 나타났다.

또한, 본류의 하상경사가 1/750인 경우 합류각에 따른 수심비의 크기를 비교해 보면 유량비가 26%인 경우 합류각 90°에서는 55.6%, 60°에서는 42.0%, 30°에서는 29.1%의 증가를 나타내고 있다. 즉, 합류각 90°의 경우에는 30°의 경우보다 26.5%의 수심비가 증가됐으며, 60°의 경우에는 12.9%의 수심비가 더 증가 되었으며, 표 4에 나타났다.

표 4. 하상경사와 합류각에 따른 수심비

	90°	60°	30°
1/500	1.638	1.510	1.372
1/750	1.556	1.420	1.291

또한, 합류각과 본류의 하상경사에 따른 수심비의 차이는 유량비가 작은 5%의 경우 1/500에서는 11.4~14.8%, 1/750에서는 6.6~10.6%로써 합류각에 따른 변화의 폭이 매우 작았으나, 유량비

가 점점 커짐에 따라서 합류각에 따른 수심비의 차이가 커지는 것으로 나타났다.

5. 결 론

도시 소유역 하천에서 우수거(지류)의 합류시 표본 하상 표고차가 1m인 경우를 택하여 소하천의 수심변화를 실험 관측하였다. 본 실험은 도시 소하천 합류부의 수위상승을 파악하기 위한 기초 연구로서 본류의 유량과 하상경사, 지류의 유량과 하상경사 및 합류각에 따른 수위상승을 실험하였으며 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 본류하천의 하상경사에 대해서는 하상경사가 급할수록 수심비가 최대 1.65로 지류가 없는 경우보다 수심이 65% 증가되는 것으로 나타났다.

2) 도시 소하천 지류(우수거)의 유량에 대해서는 유량비가 클수록 수심비가 크게 변화하는 것으로 나타났으며, 경사에 대해서는 수심비의 영향이 극히 적었다.

3) 하상경사와 유량비에 따른 합류각에 의한 수심비의 차이는 최대 26.6%로 나타났다.

4) 유량비에 따른 수심비는 하상경사가 급한 경우보다 하상경사가 완만한 경우에 빠른 증가를 나타내었다.

참 고 문 헌

- 김광목 등 (1991). “도시하천의 치수대책 및 관리방안 연구:서울시를 중심으로.”, 국토연 91-26, 국토개발 연구원.
- 박상길 등 (1977). “하천합류부에 대한 수리실험연구.” 연구보고서, 건설연구소 자료 No. 372, 건설부 국립건설연구소.
- 안의선 등 (1988). “하천합류부의 도류제설치에 따른 수리특성 실험연구 보고서.” 연구보고서, 건설자료 No. 486, 수리실험 No. 159, 건설부 국립건설시험소.
- 유성현 등 (1993). “도시 소유역 강우 처리법 조사연구 (도시하천의 설계강우분포 및 합류부의 흐름특성 실험연구).” 연구보고서, 37016-58050-57-9312 수리실험 No. 193, 건설부 국립건설시험소.
- 이원환 등 (1991). “하천 연안 수공구조물 안전진단 및 관리대책 조사연구 보고서.” 서울특별시.
- 한국수문학회 (1988). “'87 수해백서 보고서.” 서울특별시.
- 한국종합 기술개발공사 (1992). “서울시 관내 하천제방 안전도 검토 및 치수 종합대책수립 기본계획 보고서.” 서울특별시.
- Best, J.L. and Reid, I. (1985). “Separation zone at open-channel junctions”, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, No. 11, pp. 1588-1594.
- Hager, W.H. (1989). “Transitional flow in channel junctions.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 115, No. 2, pp. 243-259.
- Ramamurthy, A.S., Carballada, L.B. and Tran, D. M. (1988). “Combining open channel flow at right angled junctions.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 12, pp. 1449-1460.
- 〈접수: 1995년 4월 12일〉