

# 설마천 시험구역의 홍수유출특성

○이동률\*, 홍일표\*, 김승\*\*

## 1. 서론

수공구조물 설계 및 홍수관리 등에 필요한 홍수도달시간, 유출계수 및 홍수유출을 등 홍수유출 특성은 수문학 연구에서 많은 비중을 차지하고 있다. 그러나 우리나라의 경우 신뢰성 있는 수문자료의 부족으로 이들 특성의 해석에 어려움을 겪어 왔다. 또한 연구 결과의 부족으로 외국의 수문 지형학적 환경에서 유도된 경험식을 많이 이용하고 있는 실정이다. 이러한 신뢰성 있는 자료부족 문제를 해결하고 보다 정확한 수문해석을 위하여 한국건설기술연구원에서는 1995년부터 설마천 시험구역운영을 계획하여 현재 수위, 유량 및 강우량과 각종 기상자료를 측정하고 있다.

본 연구에서는 설마천 시험구역에서 홍수로 인한 하상변동에 의해 발생하는 수위-유량관계의 변동을 제시하였고, 홍수시 유량을 이용하여 홍수유출율과 현재 국내에서 많이 이용되고 있는 합리식에 필요한 홍수도달시간, 유출계수의 특성을 분석하였다. 또한, 본 연구에서 분석된 홍수도달시간의 연구결과와 현재 외국의 경험식을 대부분 이용하고 있는 홍수도달시간의 비교 분석과 함께 하천시설기준(건설부, 1993)에 제시되고 있는 유출계수에 대한 비교를 수행하였다.

## 2. 하상변동에 따른 수위-유량 관계 변동

설마천 시험구역에서 상시 운영되고 있는 수위관측소는 사방댐과 전적비교 수위관측소이나 본 연구에서는 시험구역의 출구인 전적비교를 대상으로 하였다. 전적비교에는 음파 및 기포식 수위계가 설치되어 있고, 부자식 수위계를 병설하여 기존 수위관측 기기의 낙뢰 또는 전원장치의 고장으로 자료를 측정하지 못할 경우 보완하고 있다. 시험구역의 유량측정은 갈수기에는 수시로 측정하고, 동절기에는 결빙에 의한 갈수량 파악의 어려움을 해소하기 위하여 매주 측정하고 있다. 또한 홍수시에는 상주하면서 측정한다. 본 시험구역에서 이용하고 있는 유속계는 디지털식 마그네틱 및 프로펠러 유속계를 이용하고 있다.

그림 1은 1998년 6월부터 8월의 홍수까지 측정한 유량과 홍수 후인 10월부터 1999년 3월까지 측정한 유량을 각각 도시하고 강우에 의해 수위가 상승한 고수위 유량(high flow)과 강우의 영향이 없었던 수위의 감수기간에 측정한 저수위 유량(low flow)으로 구분하여 나타냈다. 그림 4의 0.6~0.8m 수위 구간에서 강우의 영향으로 수위가 상승했을 때의 고수위 유량은 같은 수위의 저수위 유량보다 상당히 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉 홍수시의 고수유량과 홍수 후의 저수유량의 수위가 분리되는 결과를 보여준다. 이와 같은 결과는 전적비교를 기준으로 상류보다 하류의 하상경사가 완만하여 홍수에 의한 토석류가 전적비교의 교각과 홍수량 측정 구조물의 영향으로 수위계가 설치되어 있는 지점에 퇴적되면서 하천흐름에 저항을 유발하여 전적비교의 하부 하상에 약간의 웅덩이(pool)가 생겼기 때문이다.

\* 한국건설기술연구원 수자원환경부 선임연구원

\*\* 한국건설기술연구원 수자원환경부장

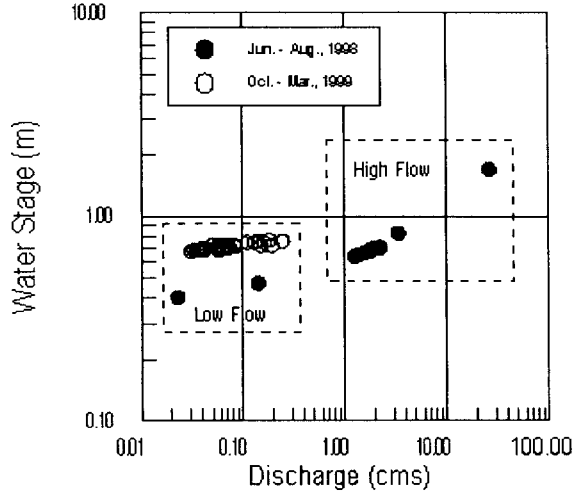


그림 1. 저수위와 고수위의 유량측정 결과

#### 4. 홍수유출율

홍수유출율,  $C$ 는 식 (1)과 같이 총직접유출고  $Q_t$ 와 총강우량  $R_t$ 의 비로 나타낸다.

$$C = \frac{Q_t}{R_t} \quad (1)$$

총직접유출고는 유출수문곡선에서 기저유량(base flow)을 뺀 부분이다. 본 연구에서는 1998년도에 수집된 21개 홍수사상에 대하여 기저유량을 분리하고 총직접유출고를 산정하였다.

21개 홍수사상을 이용한 홍수유출율의 결과는 그림 2와 같으며 0.5~0.7의 범위에 8개 사상으로 가장 많이 포함되어 있으며 최대치는 0.87이고, 16개 사상이 0.4 이상을 보여주고 있다.

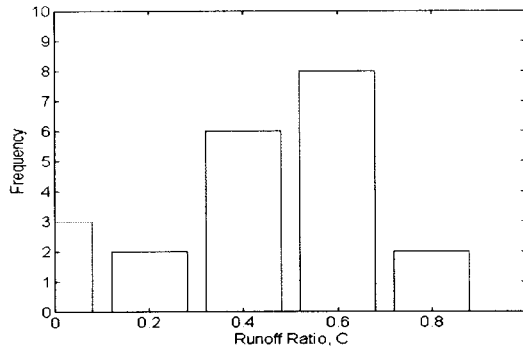


그림 2. 홍수유출율의 빈도분포

#### 5. 홍수도달시간과 유출계수

유출계수,  $C_p$ 는 유역에서 유출하는 홍수의 첨두유량을 추정하기 위하여 사용되고 있는 식 (2)의 합리식에서 가장 중요하지만 결정이 어려운 계수이다.

$$Q_p = 0.2778 C_p I A \quad (2)$$

여기서  $Q_p(m^3/sec)$ 는 첨두유량이며,  $I(mm/hr)$ 는 홍수도달시간내의 강우강도,  $A(km^2)$ 는 유역면적이다.

첨두유량을 식 (3)과 같이 산정하기 위해서는 지표면으로 유출하는 홍수파가 유역내 각 점에서 등분포로 도달해야 한다. 그러나 도달시간은 유역의 형상, 강우강도 등에 의해 대부분 지역에서 등분포를 가지지 않으므로 실제로 식 (2)의 적용은 불합리하다. 따라서 식 (2)에서 유출계수,  $C_p$ 는 단순한 유효강우비율인 홍수유출율( $C$ ) 뿐만 아니라 도달시간이 등분포해야 한다는 가정에서 오는 오차를 포함하여 하나의 식으로 나타낸 실용치이다(일본건설성 토목연구소, 1991).

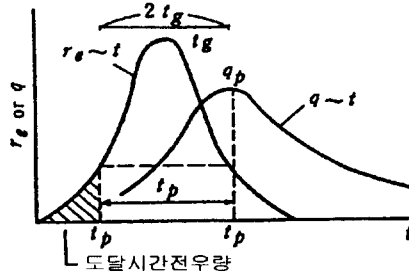


그림 3. 홍수도달시간 추정법

### 5.1 도달시간 산정방법 및 분석 결과

유출계수를 구할 때는 홍수도달시간내의 평균강우강도 ( $I$ , mm/hr)을 구해야 한다. 홍수도달시간은 유역의 최원점에서 유량관측 지점까지의 홍수유하시간으로 정의된다. 그러나 도달시간을 이런 정의에 따라 정확히 결정하는 것은 어렵고, 대부분 실용적인 방법에 의해 홍수도달시간을 구하고 있다(건설성 토목연구소, 1991). 본 연구에서는 시험유역의 유역특성의 조건에서 개발되었고, 국내에서 많이 이용하고 있는 식 (4)의 Kirpich 공식, 식 (5)의 Rizha 공식에 의한 홍수도달시간( $t_c$ )(윤용남, 1986)과 그림 3과 같이 유역의 유효강우의 첨두와 첨두유량의 시차인 홍수지체시간( $t_g$ )의 2배를 홍수도달시간으로 하는  $2t_g$ 방법을 이용하였다(일본건설성 토목연구소, 1991). 그림 3에서  $r_e$ ,  $q$ 는 각각 유효유량과 직접유출량을 말한다.

$$t_c = 3.796 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (4)$$

$$t_c = 0.833 \frac{L}{S^{0.6}} \quad (5)$$

식 (4), (5)에서  $t_c$ 는 도달시간(min) 이며,  $L$ 은 유역의 주 유로를 따라 측정한 유로연장(km),  $S$ 는 유역 출구점과 주 유로를 따른 최원점의 표고차를 유로연장으로 나눈 유역의 개략적인 평균경사이다.

홍수도달시간을 산정하기 위하여 21개 강우-유출사상을 대상으로 기저유량을 분리하여 직접유출수 문곡선을 작성하고,  $\phi$ -지수법에 의해 유효강우량을 산정하였으며,  $2t_g$  법에 의한 홍수도달시간의 빈도 분포는 그림 4와 같다.

$2t_g$ 법에 의한 홍수도달시간의 범위는 40~860분의 범위로서 그림 4와 같이 100~300분사이의 도달시간이 21개 사상 중 9개로 가장 많다. Rizha와 Kirpich 식에 의한 홍수도달 시간은 각각 80분 및 130

분이다.

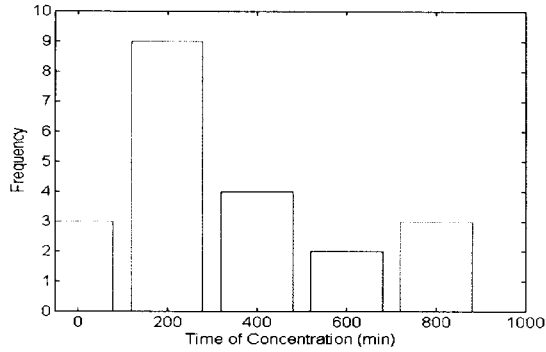


그림 4. 홍수도달시간의 빈도분포

표 1. 홍수도달시간 및 유출계수

홍수 사상	직접 유출 (mm)	총강 우량 (mm)	$2t_g$ 법			Rizha 식			Kirpich 식		
			$t_c$ (min)	강우 강도	유출계수 ( $C_p$ )	$t_c$ (min)	강우 강도	유출계수 ( $C_p$ )	$t_c$ (min)	강우 강도	유출계수 ( $C_p$ )
03:19:06:20 - 03:22:19:40	9.58	23.58	840	0.63	0.87	80	*	*	130	*	*
04:22:18:40 - 04:25:07:10	1.06	23.45	220	0.26	0.32	80	0.27	0.31	130	0.10	0.84
05:02:01:50 - 05:06:15:30	42.93	74.00	860	2.99	0.65	80	0.42	4.63	130	0.72	2.70
05:16:01:00 - 05:23:12:50	0.79	26.00	260	0.18	0.07	80	*	*	130	*	*
06:30:16:00 - 07:08:04:50	60.13	84.80	680	1.32	0.95	80	*	*	130	*	*
07:08:04:40 - 07:14:13:20	97.23	141.83	820	3.72	0.55	80	3.45	0.60	130	2.70	0.76
07:15:21:00 - 07:18:19:00	53.49	61.67	360	7.17	0.49	80	1.37	2.58	130	4.23	0.84
07:31:10:50 - 08:03:00:50	26.20	84.50	340	3.42	0.33	80	0.83	1.37	130	2.29	0.49
08:03:23:40 - 08:05:16:50	35.07	74.25	140	6.12	0.60	80	6.62	0.55	130	6.40	0.57
08:05:17:10 - 08:07:01:30	117.22	186.67	120	11.00	0.96	80	14.70	0.72	130	11.90	0.89
08:07:01:30 - 08:07:21:20	15.55	42.67	40	4.95	0.43	80	1.67	1.28	130	1.56	1.37
08:07:21:20 - 08:10:10:50	118.97	195.50	120	10.10	0.96	80	15.17	0.64	130	9.50	1.03
08:10:10:50 - 08:12:14:00	79.20	118.83	80	20.6	0.38	80	20.60	0.38	130	12.70	0.62
08:14:23:30 - 08:18:14:40	38.99	62.50	200	11.13	0.26	80	0.15	19.45	130	1.42	2.05
08:23:03:10 - 08:24:13:50	1.61	17.33	260	0.26	0.90	80	*	*	130	0.22	1.06
09:01:17:00 - 09:01:22:00	1.75	2.83	120	0.88	0.91	80	1.31	0.61	130	0.80	1.01
09:05:07:00 - 09:09:12:50	12.98	26.33	80	9.15	0.10	80	9.15	0.10	130	5.63	0.16
09:20:13:50 - 09:25:14:30	65.89	103.67	360	10.98	0.29	80	*	*	130	4.43	0.71
09:30:05:50 - 10:03:15:20	5.87	19.17	620	0.55	0.34	80	*	*	130	0.35	0.54
10:13:14:40 - 10:16:15:00	2.54	23.50	340	0.39	0.53	80	*	*	130	*	*
11:16:04:30 - 11:18:13:40	8.81	46.50	240	0.51	0.91	80	*	*	130	0.73	0.64

\* : 홍수첨두유량과  $t_c$  사이에 강우량이 없는 사상

## 5.2 유출계수 산정 및 특성 분석

표 1에  $2t_g$ 법, Rizha와 Kirpich 식에 의한 유출계수를 제시하였다. Rizha와 Kirpich 식에 의해 산정한 도달시간에 의해서 평균강우강도를 산정시 적용 유효우량-직접유출 관계에서 첨두유량 시간에서 홍수도달시간 전에 강우가 없는 사상이 있어 이들은 제외하였다. 표 1에서 계산이 안된 부분은 이런 사상들이다. 이것은 Rizha와 Kirpich 식에 의한 홍수도달시간의 적용이 시험유역에서는 불합리함을 나타

내준다. 또한 이들 식에 의한 유출계수는 1.0보다 큰 물리적으로 불합리한 결과를 얻은 것도 있는데 이는 강수량과 유출량의 관계를 고려하지 않고 지형학적인 인자만을 고려하여 홍수도달시간을 고정된 값으로 이용하기 때문에 유출계수에 오차가 집중된 결과이다. Kipich식이 Rizha식에 의한 유출계수의 산정결과 보다  $2t_g$ 법에 의한 결과와 비슷하나, 전반적으로 작은 유출계수를 보이고 있다.  $2t_g$ 법에 의한 유출계수는 0.07~0.96의 범위를 보이고 있고 빈도분포는 그림 5와 같다. 하천시설기준(건설부, 1993)기준에서는 중소하천 유역에서 합리식을 이용하여 홍수량을 추정할 경우 일반적인 산지지역의 유출계수는 0.75~0.80을 표준으로 하고 있으나 본 시험유역과 같은 급경사 산지의 경우는 최대 범위는 0.95까지 발생할 수 있고, 또한 0.75이하도 발생할 수 있음을 보여준다. 대체로 시험유역의 유출계수는 0.30~0.95의 범위로 추정된다. 그림 2의 홍수유출율의 빈도분포와 비교할 때 그림 5의 유출계수가 대체적으로 더 큰 값을 보이고 있다.

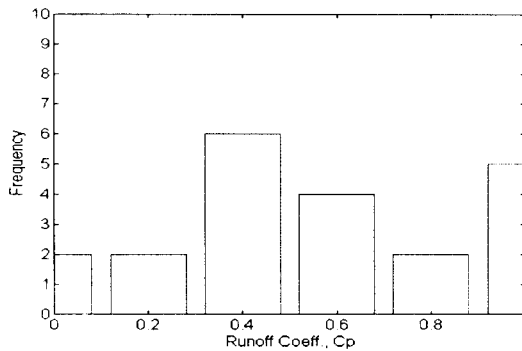


그림 5. 유출계수의 빈도분포

## 6. 결론 및 토의

본 연구에서는 설마천 시험유역에서 1998년 측정된 유량을 이용하여 하상변동에 따른 수위-유량관계의 변동상황을 분석하고, 21개 강우-유출 사상을 이용하여 홍수유출율과 합리식에 적용되는 도달시간, 유출계수에 대한 분석을 수행하였다. 이로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 유량측정으로 얻은 수위-유량 관계에서 동일한 수위에서의 유량이 홍수 전·후에 많은 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 이는 홍수로 인한 토사의 퇴적에 의한 것으로 하상이 불안정한 수위관측지점은 홍수 전·후를 구분하여 수위-유량 관계를 작성해야 함과 이러한 지형적인 특성을 가지고 있는 지점에서는 수위관측소의 설치를 피해야 할 것이다.

2) 21개 강우-유출 사상에서 기저유출량을 제거하고 총강우량에 대한 홍수유출(직접유출)에 대한 홍수유출율을 산정하였다. 이때 기저유량 분리는 변곡점법을 사용하였고, 대부분의 변곡점은 지표면 유출이 끝나는 지점에서 발생하였다. 홍수유출율의 범위는 0.04~0.87로 나타났다. 총강우량과 직접유출량은 높은 선형상관성을 가지고 있는 것으로 나타났으나 총강우량과 홍수유출율의 관계는 비선형 상관성을 가지고 있는 것으로 나타났다.

3) 합리식에서 적용되는 유출계수를 산정하기 위하여 홍수지체시간( $t_g$ )을 2배로 하는 홍수도달시간을 산정하였으며, 기존 도달시간 공식인 Rizha 및 Kirpich 공식에 의한 도달시간도 이용하였다.  $2t_g$ 에 의한 도달시간은 40~860분의 범위로 나타났으며, 21개 사상 중 100~300분의 범위가 9개로 가장 많았다. Rizha와 Kirpich식에 의한 도달시간은 80분과 130분으로 산정되었다. 홍수도달시간을 이용하여 홍수도달시간내 도달하는 평균강우강도를 산정하여 유출계수를 분석하였다. 평균강우강도 산정과정에서 Rizha와 Kirpich식에 의한 도달

시간의 경우 일부 홍수사상의 경우 홍수도달시간내 강우가 없는 경우도 있어 적용에 불합리한 경우도 있었다.

4)  $2t_g$ 법에 의한 유출계수의 범위는 0.07~0.96의 높은 편차를 보였다. Rizha와 Kirpich 식에 의한 유출계수는 1보다 큰 경우가 많이 있는데 이는 지형학적 인자이자 만을 고려하여 홍수도달시간을 고정된 값으로 이용했기 때문이다. 전반적으로 Rizha와 Kirpich 식에 의한 도달시간은 설마천 시험유역에 적합하지 않은 것으로 판단된다.

본 연구에서는 급경사를 가진 산지 하천인 설마천 시험유역에서의 유출계수 및 도달시간 분석 결과이지만 이들 결과를 하천시설기준(건설부, 1993)에서 이용하고 있는 도달시간 산정공식, 산지하천의 유출계수와 개략적인 비교·검토를 할 수 있다. 하천시설기준에서 유출계수는 유역의 형상, 지표면의 피복상태 및 개발상황 등 유역특성을 감안하여 결정한다고 하고 있으나 일반적으로 산지에서는 0.75~0.80을 제시하고 있다. 본 연구에서의 결과는 이들 범위를 포함하고 있지만 시험유역의 유출계수는 대체적으로 0.30~0.95로 판단된다. 이와 같은 차이는 유역 및 강우 특성에서 오는 것으로 이들에 대한 구체적인 기술이 하천시설기준에 필요하다고 사료된다. 일반적인 산지하천에서 이용하고 있는 Rizha와 Kirpich의 도달시간 산정공식 공식은 본 시험유역에서는 적합치 않은 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 우리나라의 유역 및 강우특성에서 개발되지 않은 식을 적용한 당연한 결과 일 것이다. 따라서 이와 같은 연구가 여러 유역 특성을 가진 지역에서 수행됨으로써 보다 합리적인 결과를 얻을 것이다. 끝으로 본 연구에서 제시된 결과는 1998년도에 관측된 자료의 결과로서 이의 신뢰성을 확인하기 위해서는 축적된 자료를 이용하여 추가적인 분석이 수행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

건설부 (1993). 하천시설기준. 건설부

윤용남 (1986). 공업수문학. 청문각.

한국건설기술연구원 (1995). 시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구. 건기연 95-WR- 1102-1.

한국건설기술연구원 (1998). 시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구. 건기연 98-077.

日本建設省土木研究所 (1991). 裏筑波流出試驗地調査成果報告書. 土木研究所 資料 第2959号.

Chow, V.T. (1964). Runoff. *Handbook of Hydrology*, edited by Chow,V.T., McGraw Hill, New York.

Linsley, R. K., Kohler, Jr, M.A. and Paulhus, Joseph L.H. (1949). *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, Kogakusha, pp. 387-404.

Nathan, R.J., and McMahan, T.A. (1990). "Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 7, pp. 1465-1473.

Singh, V.P., and Stall J.B. (1971). "Derivation of base flow recession curves and parameters." *Water Resources Research*, Vol. 7, No 2, pp. 292-303.