

온천천 유역의 유출특성 변화

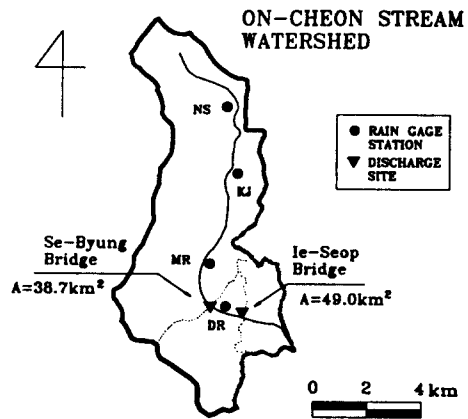
Change of Runoff Characteristics around On-Cheon Stream Watershed

○김태희* 강인식** 정연태*** 강주복****

1. 서론

유역은 마치 살아있는 유기체와 마찬가지로 시간에 따라 그 유출특성이 변화한다. 따라서 보다 적절한 수방대책을 수립하기 위해서는 어떠한 유역의 유출특성 변화를 고려해야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 1993년부터 온천천 유역([그림 1]참조)을 대상으로 실측한 유출량자료로부터 각종 수문매개변수를 산정하고, 선형저수지 모형에 의해 홍수수문곡선을 재현함으로써 모형의 적용 타당성을 입증한다. 검정된 모형의 매개변수를 1972년 측정자료에 적용하여 홍수수문곡선을 계산한다. 이와 같이 최근의 홍수자료로부터 결정된 매개변수를 사용하여 계산된 수문곡선과 측정 당시의 수문곡선을 비교함으로써 대상유역의 유출 특성 변화를 조사해보고자 한다.



[그림 1] 유역도

2. 선형저수지 모형(Nash 모형)

2.1 선형저수지

선형저수지는 저류량 S 가 유출량 Q 의 선형함수가 되는 저수지로서 저류량과 유출량의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = k \cdot Q \tag{1}$$

여기서 k 는 시간의 차원을 갖는 저류상수이다.

또한 유역에 대한 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \tag{2}$$

* 부산대학교 대학원 토목공학과 석사과정
** 부산대학교 생산기술연구소 특별연구원
*** 부산전문대학 토목과 조교수
**** 부산대학교 공과대학 토목공학과 교수

식(1)과 (2)로부터 다음과 같은 선형 미분방정식을 구할 수 있다.

$$I - Q = k \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (3)$$

미분연산자 $D = d/dt$ 를 도입하면 식(3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = \frac{1}{1+kD} I(t) \quad (4)$$

여기서 연산자 $1/(1+kD)$ 는 유입량에 대한 선형저수지의 영향을 나타내며, 저류량 연산자 (storage operator)라고 한다. 식(4)는 수학적으로 다음 식과 동가이다.

$$Q = e^{-t/k} \frac{1}{k} \int e^{t/k} I(t) dt \quad (5)$$

식(5)에서 $I(t)$ 를 Dirac delta 함수 $\delta(t)$ 로 치환하면 식(6)과 같은 선형저수지의 순간단위유량도 (instantaneous unit hydrograph; IUH)가 구해진다.

$$h(t) = \frac{1}{k} \cdot e^{-t/k} \quad (6)$$

2.2 Nash 모형

Nash는 n 개의 균등한 선형저수지를 계단식으로 나열하여 유역의 IUH를 저류상수 k 의 함수로 나타내었다. 첫번째 저수지로 순간 단위유효강우 $\delta(t)$ 가 공급된다면 식(3)은 다음과 같이 된다.

$$\delta(t) = h + k \frac{dh}{dt} \quad (7)$$

식(7)의 Laplace 변환을 취하면 다음과 같이 된다.

$$L \left[h + k \frac{dh}{dt} \right] = L [\delta(t)]$$

$$h(s) + ksh(s) = 1$$

$$h(s) = \frac{1}{1+ks} = \frac{1}{k\left(\frac{1}{k} + s\right)}$$

결국 순간 유입량으로 인한 첫번째 저수지로부터의 유출량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$h_1(s) = \frac{1}{k\left(\frac{1}{k} + s\right)} \quad (8)$$

h_1 을 식(3)의 입력으로 한다면 두번째 저수지로부터의 유출량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$h_2(s) = \frac{1}{k^2\left(\frac{1}{k} + s\right)^2} \quad (9)$$

동일한 방법으로 n 번째 저수지에 대해서는 다음과 같이 된다.

$$h_n(s) = \frac{1}{k^n\left(\frac{1}{k} + s\right)^n} \quad (10)$$

식(10)에 대해서 Laplace 역변환을 하면 다음과 같은 n 번째 저수지로부터의 IUH가 된다.

$$h_n(t) = \frac{1}{k} \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} \frac{e^{-t/k}}{\Gamma(n)} \quad (11)$$

3. 수문곡선의 재현을 통한 대상 유역의 매개변수 산정

3.1 유효강우의 산정

유효강우나 초과강우의 산정법에는 많은 방법이 제시되어 있으나 본 연구에서는 저류함수법의 매개변수를 이용한 방법, Φ -index법 및 일정비손실법(constant percentage method) 등의 세 가지 방법에 의해 직접유출을 유발하는 유효강우를 산정한다.

3.2 선형저수지 모형에 의한 홍수수문곡선의 재현

단일 선형저수지의 경우 저류상수 k 는 시간의 차원을 갖는 매개변수로서 유역의 평균 지체시간 t_L 과 동일하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k = t_L \quad (12)$$

또한 균등한 n 개의 선형저수지를 직렬로 연결한 Nash 모형의 경우에는 n 개 저수지 각각의 지체시간의 합이 유역의 평균 지체시간과 동일해야 하므로 n 개 저수지 각각의 저류상수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k_n = \frac{t_L}{n} \quad (13)$$

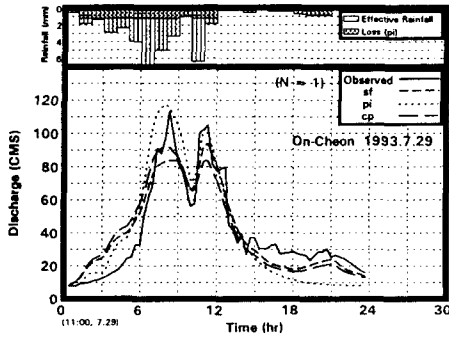
여기서 n 은 직렬로 연결된 선형저수지의 갯수이며, k_n 은 n 개 선형저수지 각각의 저류상수이다.

한편 유역의 지체시간에 대해서는 많은 연구자에 의한 여러가지 정의가 있지만, 유효강우와 직접유출수문곡선의 질량중심 간의 시간차와 유효강우 질량중심에서 직접유출 첨두까지의 시간이 가장 널리 사용되는 지체시간의 정의이다. 본 연구에서는 지체시간이 입력과 출력 간의 전체적인 효과의 지체라고 하는 개념이 보다 논리적이고 합당하다고 판단되어 유효강우와 직접유출수문곡선의 질량중심 간의 시간차를 유역의 지체시간으로 채택하였으며, 분석에 사용한 유역평균 강우주상도와 홍수수문곡선으로부터 유효강우 산정법별로 추정된 연구대상유역의 지체시간은 [표 1]에 나타내었다.

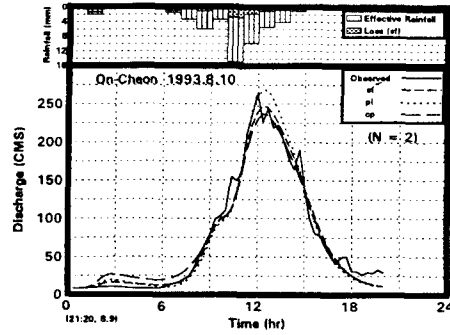
[표 1] 유효강우량 추정법에 따른 지체시간

Watershed	Event	Lag (min)			
		sf	pi	cp	Mean Value
On-Cheon	93.6.12	-	144.8	113.3	129.1
	93.6.29	137.4	170.4	188.4	165.4
	93.7.14	65.9	114.9	100.3	93.7
	93.7.29	166.5	240.8	196.9	201.4
	93.8.10	119.1	121.5	142.3	127.6
	93.8.26	134.1	165.9	142.4	147.5
	94.8.01	-	104.0	93.4	98.7

[표 1]에서 알 수 있는 바와 같이 온천천 세병교 상류유역에 대한 지체시간의 평균은 137.6분으로 나타났지만, 1993년 8월 10일의 홍수수문곡선이 가장 단순수문곡선에 가깝고 유효강우량을 저류함수법 매개변수에 의해 산정했을 때와 Φ -index법으로 산정했을 때 재현성이 가장 높은 것으로 나타났기 때문에 이들 두 값을 평균한 120.0분을 평균 지체시간으로 결정하였다. 결정된 저류상수 $k=120.0$ 분을 사용하여 재현한 1993년 7월 29일과 8월 10일의 홍수사상은 [그림 2]와 [그림 3]에 각각 나타내었다.



[그림 2] 수문곡선의 재현(1993. 7. 29)



[그림 3] 수문곡선의 재현(1993. 8. 10)

[그림 2]는 $n = 1$ 일 때 1993년 7월 29일의 경우로서, 첫번째 첨두유량의 경우 저류함수법 매개변수를 사용했을 때는 26.0% 작게, Φ -index법을 사용했을 때는 3.7% 크게, 또 일정비손실법을 사용했을 때는 18.2% 정도 작은 값을 보이고 있다. 두번째 첨두의 경우에는 실측치에 비해 각각 10.6%, 2.5% 및 20.3% 정도 작은 값을 나타내고 있지만, 첨두발생시각은 잘 일치하고 있다.

[그림 3]은 1993년 8월 10일 홍수사상으로서 $n = 2$ 인 경우의 계산결과이다. 첨두발생시각은 유효강우의 산정방법에 관계없이 실측치보다 20분 늦게 나타나고 있으며, 최대홍수량은 저류함수법 매개변수와 일정비손실법을 사용한 경우 실측치에 비해 각각 7.0%와 10.8% 정도 작은 값을 나타내지만 Φ -index법의 경우에는 1.3%의 미소한 차이만을 나타낸다. 또 수문곡선 상승부와 하강부도 실측수문곡선과 잘 일치하고 있어 상당히 만족스러운 재현결과임을 알 수 있다.

한편 선형저수지의 갯수인 n 값에 대해서는 [표 1]에 나타난 홍수사상을 재현시켜 본 결과 비교적 큰 홍수에 대해서는 $n = 2$ 일 때 재현성이 가장 높은 것으로 나타났으므로 $n = 2$ 로 결정하였다.

4. 과거 유량기록에의 적용

4.1 유출해석 조건(선형저수지 모형)

온천천 유역의 유출특성 변화를 살펴보기 위해서 채택한 PEB의 1972년 측정자료는 그 측정지점의 본 연구의 측정지점(세병교 지점)과 달리 이섭교 지점이므로, 이 지점에서의 저류상수는 세병교 지점에서의 지체시간과 세병교~이섭교 간의 유하시간의 합으로 가정하였다. 1993년 측정 당시 세병교 지점 부근에서 비교적 큰 홍수를 나타내었을 때의 평균유하유속이 1.5m/sec이므로 세병교~이섭교 간의 유하시간은 $1.3\text{km}/(1.5\text{m/sec})=14.4\text{분} \approx 15.0\text{분}$ 이 된다. 따라서 이섭교 지점에서의 저류상수는 $k = 120.0 + 15.0 = 135.0\text{분}$ 으로 결정하였다. 또 선형저수지의 갯수는 세병교 상류유역과 마찬가지로 $n = 2$ 로 가정하였다.

온천천 유역의 유출특성 변화를 조사하기 위해서 다음의 두 가지 경우에 대한 유출해석을 수행하였다.

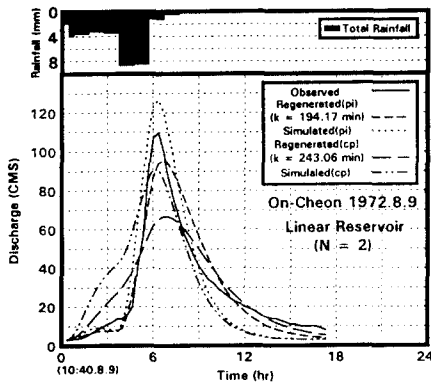
- i) 완전한 재현
- ii) 현재의 저류상수 k 로 고정

i) 완전한 재현에서는 PEB의 측정 수문곡선과 강우추상도로부터 결정된 지체시간과 유효강우량을 사용한 경우이며, ii) 저류상수 k 를 현재의 값으로 고정한 경우는 이섭교 지점의 평균 지체시간 $k = 135.0\text{분}$ 을 사용하고 유효강우량은 실측치로부터 산정한 경우이다.

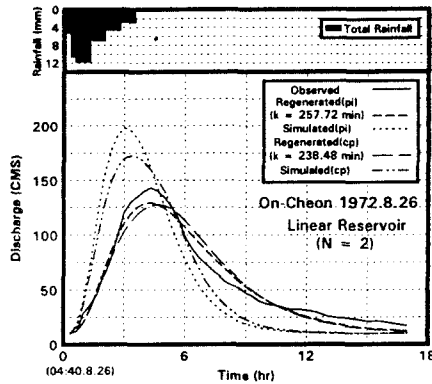
완전한 재현은 유출해석 모형의 적용타당성을 확인하기 위한 것이며, 현재의 저류상수 값을 사용한다는 것은 1972년 PEB 측정 당시에 내렸던 강우가 현재 발생할 경우 수문곡선이 어떻게 될 것인가를 알아보기 위한 것이다. 결국 실측 수문곡선(혹은 재현 수문곡선)과 저류상수를 현재의 값으로 고정한 경우의 수문곡선을 비교함으로써 온천천 유역의 유출특성이 어떻게 변화했는가를 추정할 수 있다.

4.2 유출해석 결과 및 고찰

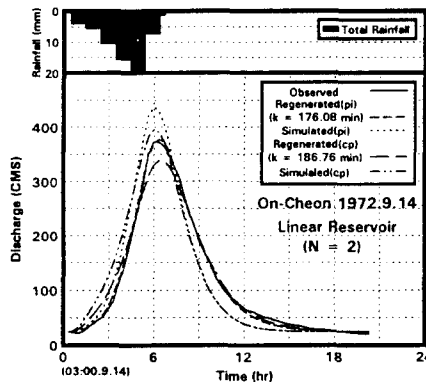
선형저수지 모형을 사용하여 1972년 PEB에 의해 측정된 1972년 8월 9일 홍수에 대한 유출해석 결과는 [그림 4]에, 1972년 8월 26일 홍수에 대해서는 [그림 5]에, 1972년 9월 14일 홍수에 대한 것은 [그림 6]에 각각 나타내었다.



[그림 4] 유출해석 결과(1972. 8. 9)



[그림 5] 유출해석 결과(1972. 8. 26)



[그림 6] 유출해석 결과(1972. 9. 14)

유역의 유출의 특성에는 여러가지가 있을 수 있으나 본 연구에서는 대상유역에 대한 유출의 시간특성과 최대홍수량의 변화를 살펴본다.

[표 2]에서 알 수 있는 바와 같이 이섭교 지점의 지체시간은 현재의 135.0분에 비해 25분~100분 정도 더 큰 값을 나타낸다. 이는 유역이 도시화됨에 따라 도시가 보다 고도로 개발되고 포장면적이 넓어졌을 뿐만 아니라 하수도의 정비와 하천의 개수 등에 따라 유하시간이 급격히 감소했다는 사실을 잘 나타내고 있는 것으로 생각된다.

다음에는 온천천 유역의 최대홍수량의 변화를 살펴본다. 저류상수 k 를 현재의 값으로 고정시킨 경우와 측정치(재현 결과)를 비교해보면, 세 홍수사상 모두 측정치에 비해 15~38%(평균 15%) 정

도 큰 값을 나타내고 있다. 이것은 만일 1972년 당시에 내렸던 강우가 지금 현재 발생한다면 평균적으로 최대홍수량이 측정 당시에 비해 약 15% 정도 큰 값을 나타내리라는 것을 의미한다.

[표 2] PEB 측정 수문곡선에서 구한 지체시간

Event	Lag (min)		
	pi	cp	Mean Value
1972. 8. 9	194.2	243.1	218.6
1972. 8. 26	238.5	238.5	238.5
1972. 9. 14	135.0	186.8	160.9

[표 3] 유출해석 결과에 따른 최대홍수량의 비교

Event	Observed	Regenerated		Current k value	
		pi	cp	pi	cp
1972. 8. 9	110.0	95.9(-13.0)	66.8(-39.0)	126.8(15.0)	90.9(-17.0)
1972. 8. 26	143.0	129.3(-10.0)	127.5(-11.0)	197.8(38.0)	172.8(21.0)
1972. 9. 14	373.0	377.5(1.0)	338.1(-9.0)	437.6(17.0)	395.3(6.0)

* () 내의 숫자는 실측치에 대한 상대오차를 나타냄.

5. 결론

본 연구에서는 온천천 유역을 대상으로 1993년부터 세병교 지점에서 유출량을 측정하였으며, 측정 자료를 이용하여 선형저수지 모형의 매개변수를 산정하였다. 결정된 매개변수를 1972년 PEB의 자료에 적용하여 유출해석을 수행하였다. 이상의 연구로부터 얻은 주된 결론은 다음과 같다.

1. 온천천 유역(세병교 지점)에 대한 선형저수지 모형의 매개변수는 저류상수는 $k=120.0 \text{ min}$, 저수지 갯수는 $n=2$ 로 결정되었다.
2. 선형저수지 모형은 1993년의 실측수문곡선을 비교적 잘 재현하고 있다. 따라서 대상유역에 대한 이 모형의 적용이 가능하다는 것을 알 수 있었다.
3. 현재의 매개변수를 1972년 PEB의 자료에 적용하여 유출해석을 수행한 결과 온천천 유역의 유출특성은 지체시간이 약 70분 정도 빨라지고, 최대홍수량은 약 15% 정도 증가했다는 사실을 확인할 수 있었다.

6. 참고문헌

1. Pedersen, J. T., J. C. Peters, and O. J. Helweg, "Hydrographs by Single Linear Reservoir Model", J. of the Hydraulics Divison, ASCE, Vol. 106, No. HY5, pp. 837-852, 1980.
2. Nash, J. E., "The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph", IASH, Pub. 45, Vol. 3, pp. 114-121, 1957.
3. Chow, V. T., Runoff, Section 14 in Handbook of Applied Hydrology, Mc-Graw Hill, 1964.
4. 尹龍男, 工業水文學, 淸文閣, 1994.
5. Singh, V. P., "Derivation of Surface Water Lag Time for Converging Overland Flow", Water Resources Bulletin, Vol. 11, No. 3, pp. 505-513, 1975.
6. Planungsgruppe Entwässerung Busan, Sewerage and Drainage Study for Busan City, Vol. 5, Appendix Part 1, 1974.