

수문학적 한계유출량 평가

김운태*, 김진훈**, 배덕효***

1. 서론

돌발홍수를 사전에 예측할 수 있는 돌발홍수예경보 시스템은 크게 수문학적인 부분과 기상학적인 부분으로 구성되어 있다. 기상학적인 부분은 기상예보 수치모형, 레이더 및 인공위성 영상으로부터 향후 1, 3, 6시간 등 특정 단위시간 동안의 강우량을 예측하는 부분이고, 수문학적인 부분은 이들 특정 단위시간 동안 특정 유역의 소하천에 홍수가 발생하기까지 요구되는 강우량인 돌발홍수능(Flash Flood Guidance, FFG)을 계산하는 과정과 돌발홍수능을 산정하는데 결정적인 역할을 하는 한계유출량(Threshold Runoff, TR)을 산정하는 과정을 포함하고 있다. 한계유출량은 돌발홍수예경보 시스템에서 돌발홍수능을 결정할 수 있는 기준 값이며, 토양수분의 조건에 따라 돌발홍수능과 비선형 관계를 가진다. 한계유출량은 맨닝의 홍수유량인 제방유통유량과 대표단위도의 침투유량으로부터 산정할 수 있으며, 일반적으로 5km² 크기 정도의 미소유역에서와 같이 대표단위도가 존재하지 않는 지역에서의 한계유출량 산정은 GIS의 ArcView/Avenue를 이용하여 제방유통유량과 Snyder 합성단위도를 내부 알고리즘에 포함하는 GUI(Graphic User Interface)를 구축하여 산정할 수 있다. 따라서, 이러한 GUI를 이용하여 계산한 한계유출량이 가지는 오차의 크기를 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 각 적용대상 유역에서 선정된 비교지점을 기준으로 제방유통유량과 단위도의 침투유량을 이용하여 개념적인 한계유출량을 산정하고, GUI를 이용하여 계산한 한계유출량과 비교하여 각 제방요소인 제방유통유량과 단위도의 침투유량 크기의 변화가 한계유출량에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 또한, 과거에 제방을 유통하여 홍수가 발생했던 적용대상 유역의 관측된 유량기록과 개념적인 한계유출량을 정량적으로 비교하여 돌발홍수능의 적용성을 평가하고자 한다.

2. 한계유출량 개념 및 산정방법

한계유출량은 토양이 완전 포화된 상태에서 소하천의 제방을 유통하기 시작하여 홍수를 일으키기 시작할 때의 유효우량으로 정의되며, 이는 유역과 하천의 특성에 따라 좌우된다. 따라서 한계유출량은 식 (1)에서와 같이 단위도의 침투유량 q_{pR} (cfs/mi²/in)에 유역면적 A (mi²)와 유효우량 R (in)을 곱한 값이 유역 출구에서의 제방유통유량 Q_p (cfs)와 동일하다는데 근거하여 산정될 수 있다. 즉 단위도의 기본개념이 특정 단위시간 동안 균일한 강도로 유역전반에 걸쳐 균등하게 내리는 단위 유효우량으로 인해 발생하는 직접유출 수문곡선이므로 유효우량 R 은 식 (1)에서 한계유출량에 해당한다.

$$Q_p = q_{pR}RA \quad (1)$$

$$Q_p = Q_{bf} = \frac{1.486 S_c^{0.5} B_b}{n} \left[\frac{Y_b}{m+1} \right]^{5/3}, \quad n = 0.39 S_c^{0.38} / \left[\frac{Y_b}{m+1} \right]^{0.16} \quad (2)$$

여기서, 제방유통유량 Q_p 는 식 (2)와 같이 하도단면의 특성을 이용한 맨닝 공식으로부터 산정할 수 있으며, n 은 맨닝의 조도계수이고 $n \geq 0.035$ 일 때 n 은 하도경사, 수심 및 형상계수의 함수로 표현된다(Jarrett, 1984). 단위도의 침투유량 q_{pR} 은 실측 강우 및 유량자료가 존재하는 경우 대표단위도를 유도하여 결정할 수 있다. 그러나, 대부분의 소하천 유역은 미계측 지역이므로 유역특성인자와 상관관계를 갖는 Snyder 합성단위도와 제방유통유량식을 내부 알고리즘에 포함시킨 그림 1의 GUI를 이용하여 산정할 수 있다. 본 연구에서의 GUI 시스템은 ArcView/Avenue를 이용하여 미소유역 및 격자단위의 한계유출량을 산정할 수 있도록 총 9 단계로 구성되었으며, GUI 시스템에 포함된 Snyder 합성단위도는 건기연(2000)에서 제시한 식 (3), (4)의 한강유역 Snyder 합성단위도이며, 제방유통유량식은 각 적용대상 유역별로 맨닝 홍수유량과 유역특성인자간의 상관관계로부터 통계모형 SPSS를 이용하여 식 (5)~(7)과 같이 추정하였다.

* 삼안건설기술공사 수력부

** 세종대학교 토목환경공학과 박사과정

***세종대학교 수문연구소·토목환경공학과 부교수

$$T_p = 0.8365A^{0.185} L^{0.231} S_c^{-0.064}, R^2 = 0.9323 \quad (3)$$

$$Q_p = 0.2395 T_p^{-0.637} \quad (4)$$

$$Q_{bf} = 91.833 AREA^{1.254} CHLN^{-0.829} CHCN^{-0.453} \quad (\text{평창강유역}) \quad (5)$$

$$Q_{bf} = 10^{1.113} AREA^{0.127} CHLN^{1.062} \quad (\text{왕숙천유역}) \quad (6)$$

$$Q_{bf} = 73.114 AREA^{0.233} CHLN^{0.302} \quad (\text{설마천유역}) \quad (7)$$

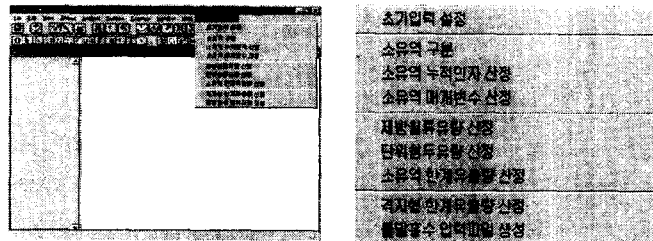


그림 1. 한계유출량 산정 GUI 시스템

3. 대상유역의 수문특성인자 산정

본 연구에서는 그림 2와 같이 우리나라 3대 IHP 유역 중에서 한강유역의 제 1 지류인 평창강 유역을 선정하였고 과거에 제방월류 때문에 홍수가 발생했던 한강권유역의 중랑천, 한천, 설마천 및 왕숙천 유역 중에서 왕숙천 유역과 설마천 유역을 선정하여 본 연구를 수행하였다. 한계유출량 산정에 필요한 유역의 수문특성인자에는 유역누가면적(ARM), 유로연장(CHLN), 유로중심연장(CHCN) 및 하도경사(CHSL) 등이 있는데, 본 연구에서 구축된 한계유출량 산정 GUI의 전처리 과정인 GIS 작업과정 단계에서 각 적용대상 유역에서 대표단위도가 존재하는 지점별로 수문특성인자를 산정한 결과는 표 1과 같다.

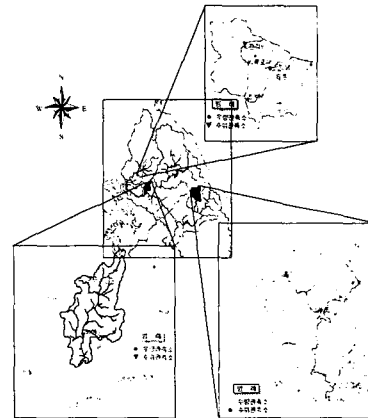


그림 2. 적용대상 유역도

표 1. 적용대상 유역의 수문특성인자

유역명	구분	Basin No.	AREA (km ²)	ARM (km ²)	CHLN (km)	CHCN (km)	CHSL (무차원)
평창강	1	(이목정)	59.70	59.70	18.42	9.06	0.02150
	2	(장 평)	46.7	106.40	26.63	16.57	0.01874
	3	(백옥포)	147.04	147.04	26.93	13.73	0.01270
	4	(상안미)	143.73	397.17	48.15	23.04	0.01337
	5	(하반정)	86.51	86.51	18.71	8.60	0.01737
	6	(방 립)	41.05	524.73	52.60	22.68	0.01259
왕숙천	7	(퇴계원)	3.97	202.70	33.87	14.77	0.00753
설마천	8	(사방댐)	6.11	6.11	4.43	1.53	0.03460
	9	(전적비교)	2.36	8.47	6.09	2.81	0.03170

4. 한계유출량 산정 및 수문학적 평가

각 적용대상 유역별 한계유출량은 제방월류회귀식과 한강유역 Snyder 합성단위도가 미치는 영향을 검토하기 위하여 다음과 같은 4가지 방법으로 산정하였다.

- 1) 방법 1. 맨닝 홍수유량 & 소유역 대표단위도
- 2) 방법 2. 맨닝 홍수유량 & 한강유역 Snyder 합성단위도
- 3) 방법 3. 제방월류 회귀식 & 소유역 대표단위도
- 4) 방법 4. 제방월류 회귀식 & 한강유역 Snyder 합성단위도

여기서, 방법 1은 개념적인 한계유출량을 의미하며, 방법 4는 미소유역 단위의 한계유출량을 산정할 수 있는 GUI를 이용하여 계산한 한계유출량이다. 또한, 방법 2는 한강유역 Snyder 합성단위도가 개념적인 한계유출량에 미치는 영향을 검토하고, 방법 3은 제방월류회귀식이 개념적인 한계유출량에 미치는 영향을 검토하기 위한 것이다. 그림 3은 방법 4인 GUI를 이용하여 산정한 한계유출량을 도시한 것이며, 표 2는 적용대상 유역

의 지점별, 산정방법별 한계유출량을 계산하여 나타낸 것이다.

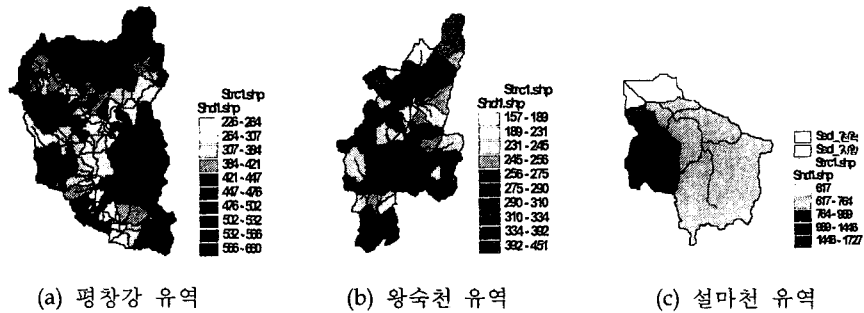


그림 3. GUI를 이용한 한계유출량 산정

표 2. 적용대상 유역별 한계유출량 비교 제시

산정방법	유역구분	평창강						왕숙천	설마천	
		이목정	장평	백옥포	상안미	하반정	밭립	퇴계원	사방댐	전적비교
1hr TR (mm/hr)	방법 1	407.0	322.1	301.6	235.8	535.4	248.3	163.5	866.8	981.4
	방법 2	315.8	258.3	242.7	231.8	431.6	239.0	266.9	722.1	632.8
	방법 3	492.1	307.2	375.4	234.4	489.9	251.7	166.3	1183.7	1335.3
	방법 4	381.5	246.4	302.2	230.4	394.9	242.4	271.6	764.0	987.3
3hr TR (mm/3hr)	방법 1	458.1	352.0	327.4	253.2	589.7	265.4	190.3	357.1	398.0
	방법 2	351.5	282.5	263.6	246.5	476.5	253.1	286.8	296.3	254.0
	방법 3	561.8	335.2	406.9	251.3	538.6	268.7	192.9	467.6	546.8
	방법 4	430.2	268.9	327.6	244.8	435.2	256.4	291.5	299.1	403.7
6hr TR (mm/6hr)	방법 1	534.6	396.9	366.0	279.2	671.3	291.0	230.4	229.7	252.2
	방법 2	405.0	318.7	294.9	268.6	543.9	274.2	316.7	189.8	159.3
	방법 3	666.3	377.1	454.0	276.7	611.8	294.2	233.0	288.6	349.7
	방법 4	503.3	302.8	365.8	266.3	495.7	277.4	321.3	182.8	257.8

이와 같이 산정한 한계유출량을 물리적·정량적으로 검토하였다. 그림 4는 평창강 유역에서 각 지속시간별 한계유출량을 계산하여 도시한 것으로, 2번 방법의 한강유역 Snyder 합성단위도를 이용하여 한계유출량을 산정한 결과는 1번 방법의 개념적 한계유출량보다 모두 작게 나타났으며, 3번 방법의 제방월류회귀식의 영향은 개념적 한계유출량보다 크거나 작았다. 또한, 이목정(1), 장평(2), 백옥포(3), 하반정(5)유역 보다 상대적으로 유역면적이 큰 상안미(4)나 방립(6)유역에서의 한계유출량은 각 방법에 따라 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 그리고 이목정, 장평, 백옥포, 및 하반정유역에서 각 방법에 따른 한계유출량의 크기 변화가 많이 차이 나진 않지만 유역면적이 작을수록 한계유출량의 변화가 큰 것을 알 수 있다. 마지막으로, 평창강 유역에서 방법 4의 GUI로부터 산정된 한계유출량은 소유역의 특성에 따라 두 제반요소로 인한 오차가 서로 상쇄되거나 더해졌음을 알 수 있다. 그러나 전체적으로 보면, 한계유출량 산정 GUI를 활용하여 산정된 결과들이 모두 기준 한계유출량보다 작음을 알 수 있다.

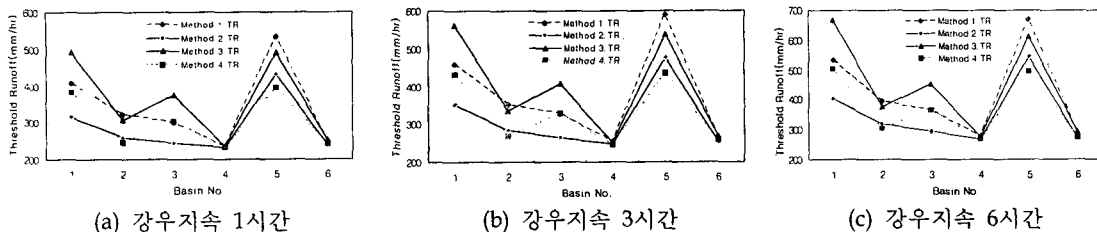
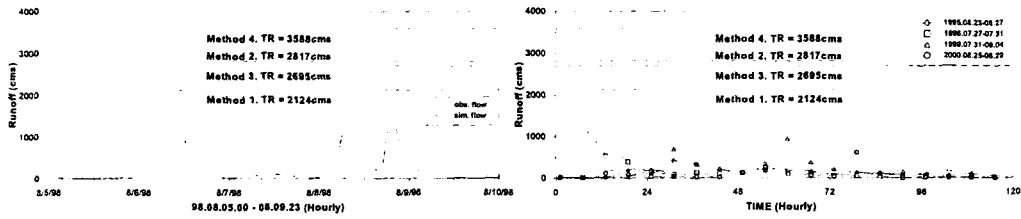


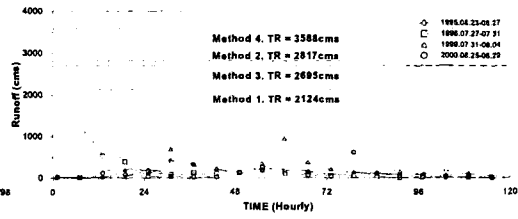
그림 4. Q_{br} 와 q_{pR} 이 한계유출량에 미치는 영향(평창강 유역)

그림 5와 6은 왕숙천의 지류인 음현천 유역에서 강우의 각 지속시간별 산정된 한계유출량, 관측된 유량 및 강우-유출 연속모형인 NWS-PC로부터 모의된 모의유량을 비교한 것이다. 그림 5와 같이 강우지속 시간이 3시간 일 때 관측유량은 한계유출량을 넘었으며, 모의유량은 한계유출량을 넘지 않았다. 또한, 강우지속 시간이 6 시간일 때는 관측유량, 모의유량 모두 한계유출량을 넘었지만 양적인 차이가 크다. 따라서, 홍수발생 당

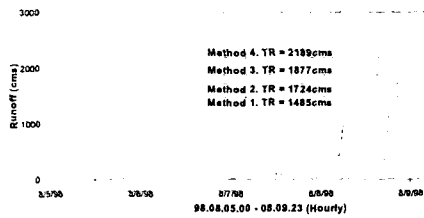
시의 관측자료를 검증하기 위하여 호우사상, 관측유량 및 모의유량을 비교할 필요가 있어 단일 호우사상의 시작 시간인 '98. 8. 5. 19:00부터 다른 호우사상으로 관측유량이 상승할 때까지인 '98. 8. 6. 22:00 동안의 각 자료를 정량적으로 비교하였다. 그 결과, 이 기간동안 내린 총강우량은 238 mm인데 반하여 총관측유량은 279.28 mm이고 총모의유량은 199.93 mm이다. 여기서, 총모의유량은 총강우량보다 작음을 알 수 있고 유출률은 84 %이므로 어느 정도 신뢰도를 가지고 있으며, 총모의유량과 한계유출량을 비교하였다. 따라서, '98년 왕숙천 유역의 음현천 지류에서 발생한 홍수는 6 시간 동안의 지속적인 강우에 의해서 홍수가 발생했음을 알 수 있고, 홍수가 발생했던 사실을 증명하고 있다. 그림 6은 각 강우지속 시간별 한계유출량과 홍수가 발생하지 않았던 타 년도의 호우사상으로 인한 관측유량과 비교한 결과인데, 어느 해에도 관측유량이 한계유출량보다 크지 않음을 알 수 있다. 보다 상세한 연구 결과들은 지면관계상 발표회 때 제시하고자 한다.



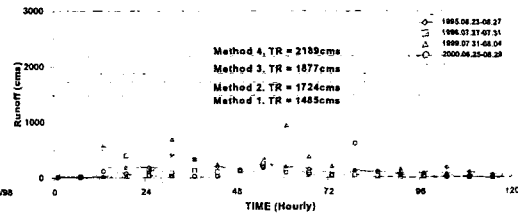
(a) 강우지속 3시간 한계유출량



(a) 강우지속 3시간 한계유출량



(b) 강우지속 6시간 한계유출량



(b) 강우지속 6시간 한계유출량

그림 5. '98년 홍수시 한계유출량 검증

그림 6. 매년 관측유량 비교

5. 결 론

본 연구에서는 GUI를 이용하여 계산한 한계유출량과 개념적인 한계유출량을 비교하여 GUI의 제방율류회귀식과 Snyder 합성단위도의 침투유량이 미치는 영향을 검토하였으며, 홍수시의 관측유량과 비교하여 한계유출량의 정량적인 평가를 한 결과는 다음과 같다.

1. Snyder 합성단위도의 영향은 대표단위도로부터 산정된 한계유출량보다 작게 한계유출량을 산정하였다.
2. 제방율류회귀식의 영향은 맨닝의 홍수유량으로부터 산정된 한계유출량보다 크거나 작게 산정하였다.
3. 대체적으로 GUI를 이용하여 계산된 한계유출량은 개념적 한계유출량보다 작았다.
4. 과거 제방을 율류하여 홍수가 발생했던 왕숙천 유역과 설마천 유역에서 한계유출량과 홍수 당시의 관측유량을 비교한 결과, 왕숙천 유역은 홍수발생 사실을 증명하였다.

이와 같이 미소유역의 한계유출량을 산정하기 위한 한계유출량 산정 GUI 시스템은 누적된 오차를 포함하고 있으며, 그 크기는 상쇠되거나 배가될 수 있다. 따라서, 한계유출량 산정 GUI 시스템에서 한계유출량 산정에 필요한 제반 요소인 제방율류회귀식과 Snyder의 합성단위도의 정확도를 높이는데 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

6. 감사의 글

이 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사업의 세부과제 한반도 악기상(집중호우) 감시 및 예측 기술개발로 수행된 것이며 지원에 감사드립니다.

7. 참고문헌

- 건기연 (2000). 시험유역의 운영 및 수문특성조사·연구, 연구보고서.
- Jarret, R.D. (1984). "Hydraulics of High Gradient Streams." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 11, pp. 1519~1539.