

서울시 관내 하천의 유역특성에 따른 침투 홍수유량 산정공식의 결정

유 오 식 (서울특별시 치수과장)
윤 수 길 (서울특별시 치수팀장)
이 재 현 (제일엔지니어링 전무)
노 진 수 (제일엔지니어링 이사)

1. 서론

홍수량은 수공구조물의 계획, 설계에 있어서 가장 주요한 요소이다.

이러한 홍수량의 해석은 하천에서의 실측유량 자료를 이용하여 분석하는 것이 원칙이나 미계측 유역이 많은 국내의 실정상 대부분은 하천의 유역특성, 강우 및 기상특성 등을 이용한 수문학적 방법에 의하여 홍수량을 산정하고 있다.

그러나 이러한 수문학적 홍수량 산정은 전문가가 아니고서는 수행할 수가 없으며, 또한 전문가가 수행한다고 하더라도 개인적인 성향 등에 따라 그 결과가 크게 달라질 수도 있다. 수공시설물의 계획특성에 따라, 특히 하천개수, 수로계획 등 침투홍수량만을 필요로 하는 경우 등에서는 비전문가일지라도 보다 더 간편하게 홍수량을 산정 할 수 있는 기법이 현실적으로 필요하다.

따라서 본 연구에서는 하천치수 방재분야에서 수고하는 관련 공무원 등 실무자들이 하천정비 기본계획이 미수립된 하천에서 하천의 유역특성만 파악하면 쉽게 침투홍수량을 구할 수 있도록 하였다. 또한 하천정비 기본계획 등의 수립과정에서 수문학적인 방법으로 산정한 홍수량의 적정성을 판단하는데 도움이 되도록 하였다. 단, 여기서는 하천의 유역특성중 유역면적, 형상계수를 인자로 한 경험식을 서울시 관내 하천을 대상으로 작성하고자 한다.

2. 침투홍수량 산정공식 검토

수공구조물중 저수지, 유수지, 홍수조절지 등의 계획과 같이 수문곡선(홍수유출곡선)이 요구되는 시설물이 있으나 제방계획, 하도계획 처럼 침투홍수유량만 필요한 시설도 있다. 이러한 과정에서 침투 홍수량을 보다 정도가 높으면서 간편하게 구할 수 있는 기법을 개발하기 위한 노력이 꾸준히 이어져 오고 있다.

이러한 기법은 경험적으로 얻은 단순 홍수량공식(simple flood formula)에 의하여 유역으로부터 설계홍수량(침투유량)을 산정하는 방법으로 홍수량을 유역면적, 유로연장, 혹은 유역경사 등의 항으로 표시하는 것이다. 가장 대표적인 공식은 1879년에 처음 발표된 Meyer공식이며, 일반적으로 다음과 같이 표시된다.

$$Q = CA^n$$

국내에서 주로 이용되고 있는 경험공식으로는 가지야마의 극대홍수량 산정공식을 비롯하여 고재용의 경험공식등 다수가 있으며 이들을 요약하면 다음과 같다.

가. 가지야마 공식

조선총독부 간행 '조선의 홍수' (1925)에서 가지야마는 다음과 같은 침투홍수량을 산정 할 수 있는 공

식을 발표하였다.

$$Q = CA^{(0.877-0.041\log A)}$$

$$C = F(310 + R) \left(4 + \frac{A}{L^2}\right)$$

여기서 Q는 침투홍수량(m³/s), A는 유역면적(km²), R은 유역의 최대 일강우량(mm), L은 유로연장(km), F는 유역의 경사 및 임상에 따른 계수로 다음에 준한다.

Kajiyama공식의 F값

F 값		유역경사와 임상
Kajiyama	수정Kajiyama	
0.0079	0.0104	경사가 급하고 임야가 적으며 유출이 많은 지역
0.0075	0.0096	유출이 비교적 많은 지역
0.0071	0.0088	유출이 보통인 지역
0.0067	0.0080	비교적 유출이 적은 지역
0.0063	0.0072	유출이 가장 적은 지역

수정 가지야마 공식

$$A < 42.91 \text{ km}^2$$

$$Q = CA^{1.016-0.1135\log A}$$

$$A < 42.91 \text{ km}^2$$

$$Q = 1.886CA^{0.67847-0.0101\log A}$$

나. 한장회 공식

한장회가 대한토목회지 (1966. Vol 13 No 4)에서 발표한 침투홍수량을 산정하기 위한 공식이다.

$$Q = AS^{0.5} \left(0.169 - 0.0065 \frac{A}{L^2}\right) R$$

여기서 R은 일최대강우량(mm), S는 하상경사이며 다른 변수는 가지야마 공식에서와 같다.

본 식의 특징은 유역특성중 하상경사(S)를 도입시킨 것이다.

다. 홍영하식

홍영하는 유역면적 200 km² ~ 10,000 km²의 국내하천에 대하여 이미 결정된 각 지점의 기본 홍수량을 정리하여 다음의 공식을 제안하였다.

$$\log Q = 0.622 \log A + F$$

$$\text{여기서 } F = 1.81 \sim 1.54$$

상기 공식은 대한토목회지 (1981. Vol 29 No 3)를 통하여 발표되었다.

라. 고재웅식

고재웅은 1981년 대한토목회지(1981. Vol 14 No 3)에서 확률년별 침투홍수량을 유역면적을 독립변수로 하는 지수형의 단순회귀식으로 산정 할 수 있는 공식을 제안하였다.

$$Q_{100} = 40.87 \cdot A^{0.640}$$

$$Q_{50} = 36.51 \cdot A^{0.639}$$

$$Q_{25} = 29.66 \cdot A^{0.649}$$

이어서 1988년에는 확률년과 유역면적을 각기 독립변수로 하는 단순 회귀식을 다음과 같이 제안 하였다.

$$Q_T = 15.5 T^{0.22} \cdot A^{0.64}$$

마. 기존식에 대한 고찰

지금까지 대표적인 국내 경험공식은 공식산정시 대표지점을 전국을 대상으로 하였으며 유역면적 또한 홍영하식의 경우 200 km², 고재웅식의 경우에는 551 km²을 최소 면적으로 하였기 때문에 서울지역 하천처

■ 학술기사

서울시 관내 하천의 유역특성에 따른 침투 홍수량 산정공식의 결정

럼 유역면적이 50.0 km² 이하의 소유역 하천에는 적용하기가 곤란한다.

또한 상기식들은 작성된 시점이 지금으로부터 20년 이상이 경과되었으며, 그 중 최근에 개발된 홍영하식이나 고채용식의 경우에는 유역지형인자는 유역면적 한가지만 고려된 것으로 유역의 특성이 제대로 반영되었다고 할 수가 없다.

따라서 현시점에서 지방 2급 하천 규모의 소유역 하천을 대상으로 하여 유역의 지형특성이 보다 더 반영될 수 있도록 유역면적 외에 다른 지형인자도 고려된 공식의 산정이 필요하다.

3. 침투홍수량과 유역특성과의 관계

침투홍수량의 크기는 유역의 외적요소인 강우량, 유역의 개발상황 등과 내적요소인 유역의 기하학적인 특성인 유역면적(A), 유로연장(L), 유역경사(S) 등의 지형인자에 좌우된다.

침투홍수량과 유역특성과의 상관관계를 표시하면 식(1)과 같다.

$$Q_p = f(R \cdot C \cdot A \cdot F \cdot S) \quad (1)$$

여기서 Q_p : 침투홍수량

R : 강우량

C : 유출계수

A : 유역면적

F : 형상계수 $(\frac{A}{L^2})$

S : 유역경사

상기식에서 강우량(R)과 유출계수(C)는 유역외적 요소로써 강우량과 유출계수가 동일한 조건이라면 침투홍수량은 식(2)와 같이 된다.

$$Q_p = R \cdot C f(A \cdot F \cdot S) \quad (2)$$

상기와 같이 침투홍수량에 영향을 주는 유역의 지형인자는 유역면적, 형상계수, 유역경사로 대표 될 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 각각의 지형인자를 독립 변수로 하는 다중상관 회귀분석 방법에 의하여 침투홍수량을 산정하는 공식을 작성기로 하되 독립변수로 사용한 지형인자는 유역경사를 제외한 평면특성인 유역면적과 형상계수만을 대상으로 하였다.

그 이유는 국내 하천의 지형 및 지세가 대부분 유사하며 또한 유역경사의 산정이 복잡하고, 산정방법에 따라 그 차이가 많아 일관성 및 보편성을 가지기가 어렵다. 그러나 유역면적 및 형상계수는 쉽게 산정 할 수가 있으며, 또한 산정에 있어서도 개인 차이를 크게 나타내지 않기 때문이다.

4. 분석에 사용된 자료

본 연구에서 사용된 자료는 현재 서울특별시에서 용역발주하여 수행중에 있는 반포천을 포함한 10개 하천의 “하천정비기본계획”에서 계산하여 결정된 홍수량으로써 대상지점은 19개 지점으로써 <표 1>과 같다.

5. 다중상관분석

5.1 자료의 조정

<표1>에서의 침투홍수량은 대상지점 유역의 강우특성 및 유출계수 등이 모두 고려된 홍수량으로써 일강우량의 크기는 최대값과 최소값의 비가 22%, 유출계수에 관계되는 시가화율은 9%~90%까지 많은 편차를 주고 있는 바 이러한 유역의 외적인 특성차이로 인하여 순수한 지형인자와의 상관관계를 얻기가 어렵다.

따라서 유역외적인 조건을 동일하게 만들어야만 홍수량과 지형인자와의 상관관계를 파악 할 수 있기 때문에 본 연구에서는 다음과 같이 침투홍수량을 조정하였다.

○ 조정의 기준

- 강우영향조정 : 모든 대상지점의 일강우량을

표 1. 하천 및 지점별 유역특성 및 홍수량

순위	하천	지점	유역의 지형인자			일강우량 (R:mm)	시가화율 (%)	첨두홍수량 (m³/sec)
			유역면적 (A:km²)	유로연장 (L:km)	형상계수 (F=A/L²)			
1	반포천	하구	29.10	8.10	0.444	316.4	66	473
2		사당천 합류후	27.46	7.35	0.508	316.4	66	454
3	교덕천	하구	18.52	6.83	0.397	310.6	34	259
4	개화천	하구	52.09	15.50	0.217	327.6	37	574
5		오류천 합류전	42.09	15.00	0.187	327.6	37	470
6		육길교지점	38.53	11.90	0.272	327.6	37	451
7	여의천	하구	11.84	5.80	0.352	378.7	9	169
8		염곡지천합류전	8.81	3.90	0.579	378.7	9	140
9		염곡천합류점	5.17	3.10	0.538	378.7	9	90
10	성북천	하구	7.41	5.45	0.249	316.3	88	155
11	정릉천	하구	19.32	10.25	0.184	316.3	72	280
12	월곡천	하구	4.06	3.75	0.289	316.3	90	105
13	방학천	하구	5.23	3.48	0.432	336.3	80	129
14	도림천	하구	41.93	14.20	0.208	319.6	62	500
15		신대방천합류전	23.72	10.04	0.235	319.6	43	320
16		봉천천합류전	13.12	8.31	0.190	319.6	45	170
17		서울대 입구	7.21	3.92	0.469	319.6	15	92
18	성내천	하구	34.11	9.85	0.352	368.0	70	640
19		성내교배수문하류	28.66	8.97	0.356	368.0	68	575

주 : 첨두홍수량은 유역추적법의 단위도법으로 산정되었음

319.6mm로 가정하여 산정된 홍수량에 (319.6/당해유역 일강우량)을 곱함

- 시가화율 영향조정 : 시가화율에 따른 유출계수를 시가화지역 0.80, 비시가화지역 0.35로 하여 "f = 0.35 + 0.45 × 시가화비"로 환산 후 유출계수 1.0의 상태로 조정함.

5.2 회귀분석

첨두홍수량과 지형인자간의 회귀식은 다음과 같은 3개형을 대상으로 하였다.

○ 제 1 형 : $\hat{Q}_p = \alpha A^m$

○ 제 2 형 : $\hat{Q}_p = \alpha (P+F)A^m$

○ 제 3 형 : $\hat{Q}_p = \alpha (P+F)^n \cdot A^m$

가. $\hat{Q}_p = \alpha A^m$

첨두유량에 가장 결정적인 지형인자는 유역면적으로 가장 대표적인 공식은 "2.0 첨두홍수량 산정공식 검토"에서와 같이 1879년에 발표한 Meyer공식으로 유역면적 "A"의 역지수식인 $\hat{Q}_p = \alpha A^m$ 으로 표시되었다.

본 연구에서도 Meyer공식을 기본으로 하여 19개 지점의 유역면적과 첨두홍수량을 단상관 회귀분석한 결과 상관계수 $r_{QA} = 0.981$ 로 매우 높은 상관 관계

■ 약술기사

서울시 관내 하천의 유역특성에 따른 침투 홍수량 산정공식의 결정

표 2. 지점별 침투홍수량 조정

순위	A(km ²)	L(km)	F(A/L ²)	침투홍수량(m ³ /sec)	홍수량조정			
					강우영향조정		시가확용영향조정	
					조정비	홍수량(m ³ /sec)	조정비	홍수량(m ³ /sec)
1	29.10	8.10	0.444	473	1.0101	478	1.5456	739
2	27.46	7.35	0.508	454	1.0101	459	1.5456	709
3	18.52	6.83	0.397	259	1.0290	267	1.9881	531
4	52.09	15.50	0.217	574	0.9756	560	1.9361	1084
5	42.09	15.00	0.187	470	0.9756	459	1.9361	889
6	38.53	11.90	0.272	451	0.9756	440	1.9361	852
7	11.84	5.80	0.352	169	0.8439	143	2.5608	366
8	8.81	3.90	0.579	140	0.8439	118	2.5608	302
9	5.17	3.10	0.538	90	0.8439	76	2.5608	195
10	7.41	5.45	0.249	155	1.0104	156	1.3405	209
11	19.32	10.25	0.184	280	1.0104	283	1.4837	420
12	4.06	3.75	0.289	105	1.0104	106	1.3245	140
13	5.23	3.48	0.432	129	0.9503	123	1.4085	173
14	41.93	14.20	0.208	500	1.0000	500	1.5898	795
15	23.72	10.04	0.235	320	1.0000	320	1.8399	589
16	13.12	8.31	0.190	171	1.0000	171	2.1834	373
17	7.21	3.92	0.469	92	1.0000	92	2.3952	220
18	34.11	9.85	0.352	640	0.8685	556	1.5038	863
19	28.66	8.97	0.356	575	0.8685	499	1.5244	761

주 : 침투홍수량은 유역추적법의 단위도법으로 산정되었음

가 있음을 알 수 있으며 회귀식은 식(3)과 같이 계산 되었다.

$$\hat{Q}_p = 48.847A^{0.787} \quad (3)$$

여기서 \hat{Q}_p : 추정침투홍수량(m³/sec)
A : 유역면적 (km²)

$$\text{나. } \hat{Q}_p = \alpha(P+F)Am$$

식(3)으로 추정된 침투유량 (\hat{Q}_p)과 실침투홍수량 (Q_p)에는 차이가 있다.

이러한 차이는 회귀식에 의한 추정값과 실값과의 오차로써 이 오차는 궁극적으로 형상계수(F)가 반영

되지 않음으로써 발생되는 원인이라고 할 수 있다. 따라서 식(3)은 다음과 같이 변경될 수 있다.

$$Q_p = \hat{Q}_p \times Q_p / \hat{Q}_p = \hat{Q}_p \cdot q_i = \hat{Q}_p f(F) \quad (4)$$

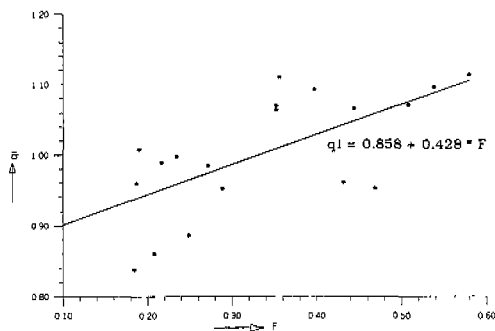
따라서 $q_i (= Q_p / \hat{Q}_p)$ 와 $F (= \frac{A}{L^2})$ 의 상관관계

를 분석함과 아울러 q_i 와 F의 회귀식을 구하여 본 식 을 만들 수 있다.

상기와 같이 q_i 와 F와의 상관계수를 계산하면 $r_{q_i F} = 0.65$ 로써 비교적 높은 선형관계가 있음을 알 수 으며 회귀분석의 결과 $q_i = 0.858 + 0.428F$ 로 계산 되었다.

표 3. q_i 와 F 의 상관계수

순위	Q_p (m^3/sec)	\hat{Q}_p (m^3/sec)	q_i	F	$q_i - \bar{q}_i$	$F - \bar{F}$	$(q_i - \bar{q}_i)^2$	$(F - \bar{F})^2$	$(q_i - \bar{q}_i) \times (F - \bar{F})$
1	739	639	1.066	0.444	0.062	0.104	0.004	0.011	0.006
2	709	662	1.071	0.508	0.067	0.168	0.004	0.028	0.011
3	531	486	1.093	0.397	0.089	0.057	0.008	0.003	0.005
4	1084	1096	0.989	0.217	-0.015	-0.123	0.000	0.015	0.002
5	889	927	0.959	0.187	-0.045	-0.153	0.002	0.023	0.004
6	852	865	0.985	0.272	-0.019	-0.068	0.000	0.005	0.001
7	6366	342	1.070	0.352	0.066	0.012	0.004	0.000	0.001
8	302	271	1.114	0.579	0.110	0.239	0.012	0.057	0.026
9	195	178	1.096	0.538	0.092	0.198	0.008	0.039	0.018
10	209	236	0.886	0.249	-0.118	-0.091	0.014	0.008	0.011
11	420	502	0.837	0.184	-0.167	-0.156	0.028	0.024	0.026
12	140	147	0.952	0.289	-0.052	-0.051	0.003	0.003	0.003
13	173	180	0.961	0.432	-0.043	0.092	0.002	0.008	-0.004
14	795	924	0.860	0.208	-0.144	-0.132	0.021	0.017	0.019
15	589	590	0.998	0.235	-0.006	-0.105	0.000	0.011	0.001
16	373	370	1.008	0.190	0.004	-0.150	0.000	0.023	-0.001
17	220	231	0.952	0.469	-0.052	0.129	0.003	0.017	-0.007
18	836	786	1.064	0.352	0.060	0.012	0.004	0.000	0.001
19	761	685	1.111	0.356	0.107	0.016	0.011	0.000	0.002
계			19.072	6.458			0.128	0.292	0.125
평균			1.004	0.340					



$$= 20.91(2.00 + F)A^{0.787} \quad (5)$$

과 같이 되었다.

다. $\hat{Q}_p = \alpha(P+F)^n \cdot A^m$

형상계수 F 에 일정상수를 더한 $P+F$ 와 유역면적 A 의 2개 독립변수를 가진 다중상관 회귀분석을 시행 하였으며 P 값에 따른 동 회귀식의 상수 및 지수값과 표준오차는 <표 4>와 같다.

<표 4>에서 보는 바와 같이 표준오차는 P 값이 0일 때 가장 적다.

따라서 다중회귀식의 침투유량산정 공식은

따라서 침투홍수량 산정식은

$$\hat{Q}_p = 48.847A^{0.787} \times (0.858 + 0.428F)$$

$$\hat{Q}_p = 54.45 F^{0.183} A^{0.823} \quad (6)$$

■ 학술기사

서울시 관내 하천의 유역특성에 따른 침투 홍수량 산정공식의 결정

표 4. 다중회귀식의 P값에 따른 제상수, 지수 및 표준오차

P	상수 및 지수			표준오차	비 고
	α	n	m		
0	54.45	0.183	0.823	32.95	표준오차 : $S_e = \sqrt{\frac{\sum e^2}{n-k-1}}$
1	35.89	0.730	0.822	34.46	
2	15.07	1.269	0.822	34.93	
3	5.08	1.797	0.822	34.88	

와 같이 된다.

라. 적정 회귀식의 선정

산정된 각 회귀식별 결정계수, 표준오차 등을 상호 비교하여 서울지역 하천에서 유역의 지형인자를 인자로 한 침투유량을 산정 할 수 있는 적정회귀식을 선정한다.

각 회귀식별 결정계수, 표준오차는 <표 5>와 같다.

6. 서울지역 하천 홍수량 산정공식

서울지역 하천에 적합한 침투홍수량 산정공식은 <표 5>에서와 같이 식(6)인 $Q_p = 54.45 F^{0.183} A^{0.823}$ 로 선정되었다.

그러나 동식은 유역우량을 일정화 하였고 전량유출로 한 상태이므로 강우량의 크기 및 유역의 시가화율 등에 따른 보정을 하여야 한다. 이와 같은 보정을 거쳐 서울지역 하천에 적용 할 수 있는 공식은 식 (7)과 같이 최종 정리되었다.

$$\begin{aligned}
 Q_p &= 54.45 F^{0.183} A^{0.823} \times \left\{ \frac{R}{(0.35+0.45n)} \times 319.6 \right\} \\
 &= 0.170(0.35+0.45n) \cdot R \cdot F^{0.183} \cdot A^{0.823} \quad (7)
 \end{aligned}$$

여기서 Q_p : 침투홍수량 (m^3/sec)

R : 일강우량(mm)

n : 유역의 시가화비

A : 유역면적(km^2)

F : 유역형상계수 ($F = \frac{A}{L^2}$)

확정된 침투홍수량 산정 공식에 의한 추정홍수량과 하천정비기본계획에서 분석한 수문학적 방법에 의한 홍수량과의 비교 내용은 <표 6>과 같다.

이상 비교 표에서 보아 최대 오차율은 도립천 하구에서 11.0%를 보이고 있으나 대부분은 10%이내의 오차율을 보이고 있다.

이러한 오차율은 수문사상 그 자체가 많은 변수를 포함하고 있는 실정을 고려할 때 오차율 10%이내는 실무에서 적용하기에 큰 무리가 없는 범위이다.

7. 결론

지금까지 서울지역 하천에서 침투홍수량을 간단하게 산정 할 수 있는 경험공식을 유도하였다.

따라서 치수·방재분야에 근무하는 공무원 또는 관련기술자들이 계획홍수량이 결정되지 않은 지점의 홍수량을 구하고자 할 때 쉽게 이용할 수 있었으면 하는 바람이다.

표 5. 회귀식별 결정계수, 표준오차

회귀식	$\hat{Q}_p = 48.85A^{0.787}$	$\hat{Q}_p = 20.91(2.0 + F)A^{0.787}$	$\hat{Q}_p = 54.45 F^{0.183} A^{0.823}$
구 분			
결정계수	0.972	0.986	0.989
표준오차	48.6	35.1	32.95

표 6. 홍수량 산정 기법에 따른 비교

하천명	지 점	유역지형인자			일강우량 (R:mm)	시가확률 (%)	홍수량비교			
		유역면적 (A:km ²)	유로연장 (L:km)	형상계수 (F)			첨두홍수량(m ³ /sec)		오차 (m ³ /sec)	오차율 (%)
							수문학적 방법	회귀식법		
반포천	하구	29.10	8.1	0.444	316.4	66	473	481	8	1.7
	사당천합류후	27.46	7.35	0.508	316.4	66	454	470	16	3.5
고덕천	하구	18.52	6.83	0.397	310.6	34	259	248	-11	-4.2
개화천	하구	52.09	15.51	0.217	327.6	37	574	563	-11	-1.9
	오류천합류전	42.09	15.00	0.187	327.6	37	470	460	-10	-2.1
	육길교지점	38.53	11.90	0.272	327.6	37	451	458	7	1.6
여의천	하구	11.84	5.80	0.352	378.7	9	169	159	-10	-5.9
	염곡지천합류전	8.81	3.90	0.579	378.7	9	140	136	-4	-2.9
	염곡천합류전	5.17	3.10	0.538	378.7	9	90	87	-3	-3.3
성북천	하구	7.41	5.45	0.249	316.3	88	155	162	7	4.5
정릉천	하구	19.32	10.25	0.184	316.3	72	280	304	24	8.6
월곡천	하구	40.06	3.75	0.289	316.3	90	105	102	-3	-2.9
방학천	하구	5.23	3.48	0.432	336.3	80	129	136	7	5.4
도림천	하구	41.93	14.20	0.208	319.6	62	500	555	55	11.0
	신대방천합류전	23.72	10.04	0.235	319.6	43	320	307	-13	-4.1
	봉천천합류전	13.12	8.31	0.190	319.6	24	171	153	-18	-10.5
	서울대입구	7.21	3.92	0.469	319.6	15	92	100	8	8.7
성내천	성내천하구	34.11	9.85	0.352	368.0	70	640	627	-13	-2.0
	성내교배수문하류	28.66	8.97	0.356	368.0	68	575	538	-37	-6.4

그러나 이와 같이 구한 홍수량은 어느 하천지점의 계획홍수량을 결정하기 위함이 아니므로 계획홍수량 결정시에는 반드시 “하천정비 기본계획”을 수립하여 이 기본계획에서 산정한 홍수량을 계획홍수량으로 하

여야 할 것이며 이 과정에서 금회 제시된 경험공식과 비교하여 봄으로써 수문학적인 홍수량산정 결과를 채택함에 있어 한 기준이 되기를 바란다. ●