

유효강우강도를 고려한 저류상수의 적용성 검토

An Examination for Application of Storage Constant Considered the Effective Rainfall Intensity

박상우*, 장석환**, 오경두***, 전병호****

요 지

본 연구에서는 자연하천유역에 적합한 저류상수 산정공식을 개발하기 위하여 섬진강 유역에 대한 유역특성인자 및 강우특성인자를 분석하고, 이의 단계별 회귀분석으로부터 유역면적, 하도연장, 하도경사의 유역특성인자뿐만 아니라 강우특성인자인 유효강우강도를 설명변수로 갖는 저류상수 산정공식을 개발하였다. 그리고 개발된 공식의 적용성을 검토하고자 Clark의 단위도 모형에 기존의 경험공식 및 본 연구에서 개발된 공식을 이용하여 섬진강 유역의 실제 호우사상에 대한 유출수문곡선을 분석하여 관측수문곡선과 비교 검토한 결과, 본 연구에서 개발된 공식에 의한 유출수문곡선이 관측치에 가장 적합하였다. 또한, 남한강의 지류인 섬강 유역에 대한 빈도별 설계강우량을 적용하여 저류상수 및 설계홍수량을 산정하고 기존에 분석된 저류상수 및 홍수량과 비교 검토한 결과 빈도별 유효강우강도의 변화를 고려한 저류상수의 적용 가능성 및 그 타당성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 저류상수, 유효강우강도, Clark 모형

1. 서론

각종 수공구조물의 설계시 매우 중요한 사항인 설계홍수량의 산정에는 일반적으로 강우-유출 모형이 이용되며, 그 중 주로 많이 이용되는 모형이 Clark의 유역추적모형이라 할 수 있다. Clark 모형은 강우로 인한 유출량의 전이와 저류효과를 고려한 모형으로써 시간매개변수인 저류상수가 매우 중요한 요소로 작용한다. 그러나 저류상수의 산정을 위한 대부분의 공식은 외국에서 개발된 경험공식이며, 이런 공식의 적용에 있어서 계수나 식의 적용범위를 고려하지만 국내의 유역특성과의 차이와 계수의 주관적 선정 등에 의하여 첨두홍수량이나 유출수문곡선 등이 부정확하거나 신뢰성이 떨어지는 경우가 자주 발생한다.

본 연구에서는 국내 자연하천유역에 적합한 저류상수 산정공식을 개발하기 위하여 섬진강 유역에서 관측된 강우-유출수문곡선들로부터 저류상수를 분석하고, 이를 유역특성인자 및 강우특성인자와의 단계별 회귀분석(stepwise regression)을 통하여 유역면적, 하도연장, 하도경사의 유역특성인자뿐만 아니라 강우특성인자인 유효강우강도를 설명변수로 갖는 저류상수 산정공식을 개발하였다. 따라서 본 연구에서는 기존의 경험공식과 달리 유효강우강도를 설명변수를 갖는 저류상수 산정공식의 적용 가능성을 검토하고자 Clark 모형에 기존의 경험공식 및 본 연구에서 개발된 공식을 이용하여 섬진강 유역의 실제 호우사상에 대한 유출수문곡선을 분석하여 관측수문곡선과 비교 분석하는 한편, 섬진강 유역과 유사한 유역특성을 갖는 남한강의 지류인 섬강 유역에 대한 빈도별 설계강우량을 적용하여 기존 경험공식에 의한 저류상수 및 첨두홍수량의 관계 등을 비교 분석하였다.

* 정회원 · 서남대학교 토목공학과 교수 · E-mail: psw0232@seonam.ac.kr

** 정회원 · 대진대학교 토목공학과 교수 · E-mail: drjang@daejin.ac.kr

*** 정회원 · 육군사관학교 토목공학과 교수 · E-mail: okd0629@kma.ac.kr

**** 정회원 · 육군사관학교 토목공학과 교수 · E-mail: bhjun@kma.ac.kr

2. 자료분석 및 공식 개발

2.1 유역 및 강우 특성 분석

본 연구에서 저류상수 산정공식의 개발을 위한 유역은 섬진강 유역이며, 개발된 공식의 적용성 검토는 섬진강 유역 및 남한강의 지류인 섬강 유역을 그 대상으로 하였다.

섬진강 유역에서는 표 1과 같이 T/M 수위관측소로써 수위-유량곡선식이 개발되었고 비교적 양호한 수위자료를 보유하고 있는 9개의 수위관측소를 선정하여 각각의 소유역으로 분할하여 유역면적, 하도연장, 하도경사, 형상계수 등의 유역특성인자를 분석하였으며, 이때 강우-유출해석시댐의 방류나 저류 등의 영향을 배제시키고자 댐 하류에 대한 소유역은 댐 상류유역을 제외하여 분석하였다. 또한 섬강 유역의 소유역 구분 및 소유역별 유역특성인자는 표 2와 같이 건설교통부에서 1999년도에 발간한 ‘사회기반시설 홍수방어능력 평가기법 개발’ 보고서 자료 이용하였다.

표 1. 섬진강 유역의 소유역별 유역특성

주요지점	유역면적(km ²)	하도연장(km)	하도경사	형상계수
관촌	297.26	39.74	0.01809	0.19
쌍치	118.13	26.69	0.01502	0.17
오수	360.04	33.60	0.01122	0.32
적성	626.41	41.17	0.01766	0.37
곡성	1036.98	65.95	0.01133	0.24
남원	271.57	39.94	0.01766	0.17
죽곡	242.53	31.10	0.02171	0.25
구례	2035.83	92.02	0.00838	0.24
송정	2481.27	105.95	0.00744	0.22

표 2. 섬강 유역의 소유역별 유역특성

주요지점	유역면적(km ²)	하도연장(km)	하도경사	형상계수
대관대천합류후	269.07	37.0	0.01268	0.20
금계천 합류후	439.79	41.0	0.01181	0.26
전천 합류후	629.39	46.6	0.01060	0.29
원주천 합류후	869.88	62.1	0.00820	0.23
일리천 합류후	929.07	64.2	0.00801	0.23
이리천 합류후	1033.08	67.9	0.00772	0.22
삼산천 합류후	1191.04	77.8	0.00686	0.20
서곡천 합류후	1303.90	80.3	0.00670	0.20
문막수위표	1350.36	86.5	0.00631	0.18

한편, 섬진강 유역의 강우자료 분석을 위한 강우관측소는 분할된 각 소유역에 영향을 주는 21개의 T/M 강우관측소를 선정하여 1997년에서 2002년까지의 호우자료 중 비교적 양호한 15개의 호우사상을 선택하였다. 그리고 각 소유역별 Thiessen가중치에 의해 소유역별 평균강우량을 산정하고, 각 호우사상별 소유역별 강우-유출수문곡선에 대한 직접유출수문곡선을 작성하여 총강우량, 총강우지속기간, 총강우강도, 유효강우량, 유효강우강도 등의 강우특성인자를 산출하였으며, 이렇게 각 소유역별로 15개의 호우사상에 대해 구한 도달시간 및 저류상수의 평균값은 표 3과 같다.

표 3. 소유역별 평균 도달시간 및 평균 저류상수

평균 도달 시간 (hr)				평균 저류 상수 (hr)			
관측소	도달시간	관측소	도달시간	관측소	저류상수	관측소	저류상수
관촌	5.86	곡성	9.64	관촌	5.57	곡성	9.29
쌍치	4.79	죽곡	4.67	쌍치	4.71	죽곡	5.05
오수	5.85	구례	13.00	오수	5.50	구례	9.73
적성	7.00	송정	14.17	적성	6.91	송정	12.00
남원	6.40	소계 9개		남원	5.84	소계 9개	

2.2 저류상수 공식 개발

본 연구에서는 저류상수 산정공식을 개발하기 위하여 각 소유역에 호우별 저류상수를 종속변수로 하고, 유역특성인자 및 강우특성인자를 설명변수로 하여 단계별 회귀분석을 실시하였다. 그 결과 저류상수 공식은 표 4와 같이 유로연장 및 유효강우강도, 유역면적, 하도경사가 단계적으로 가장 적합한 설명변수로 선택되어 결정계수가 가장 큰 3단계의 모형을 최적 산정공식으로 도출할 수 있었다.

표 4. 저류상수의 공식화

단계	저류상수 모형	결정계수	비고
1	$K = 0.720 I_e^{-0.156} L^{0.651}$	0.8513	K : 저류상수(hr) L : 하도연장(km) I_e : 유효강우강도(mm/hr) A : 유역면적(km ²) S : 하도경사
2	$K = 0.739 I_e^{-0.154} A^{0.017} L^{0.615}$	0.8910	
3	$K = 0.650 I_e^{-0.204} A^{0.011} L^{0.598} S^{-0.055}$	0.9220	

3. 공식의 적용 및 검토

3.1 실제 호우사상에 대한 적용 및 검토

본 연구에서 개발된 저류상수 공식을 사용하여 섬진강 유역의 각 소유별 및 호우별로 산정된 저류상수를 소유별로 평균저류상수를 산정하여 표 5와 같이 실무 수문분석에서 많이 사용되는 기존 경험공식과 비교 하였다. 그 결과 표 6과 같이 Clark식은 본 연구의 공식과 작은 유역에서는 비교적 비슷하였으나, 유역면적이 상대적으로 큰 구례와 송정에서는 상당히 큰 값이 산정되었고, Linsley식은 유역면적이 작은 유역에서는 본 공식에 비해 작은 값이 산정 되었으나, 유역면적이 큰 구례 및 송정지점에서는 저류상수가 크게 산정 되었다. 또한 Sabol 공식은 모든 유역에서 본 연구의 공식과 다소의 차이는 있지만 그 차이는 Clark 및 Linsley식에 비해 비교적 본 연구의 공식과 비슷한 값을 나타내었다.

표 5. 저류상수의 경험공식

공식명	공식	적용범위	비고
Clark	$K = CL/S$	C = 0.5 ~ 1.4	L : 하도연장(km) S : 하도경사 A : 유역면적(km ²) T_c : 도달시간(hr)
Linsley	$K = bL\sqrt{A}/\sqrt{S}$	b=0.01 ~ 0.03	
Sabol	$K = T_c / (1.46 - 0.0867L^2/A)$	-	

표 6. 저류상수 비교

(단위 : hr)

구분	저류상수										비고
	관촌	쌍치	오수	적성	남원	곡성	죽곡	구례	송정		
Clark	4.7	3.4	5.0	4.9	4.8	9.8	3.3	15.9	19.5	상수 c : 0.95	
Linsley	1.7	0.8	2.0	2.6	1.6	6.7	1.1	15.1	20.4	상수 b : 0.02	
Sabol	6.0	5.1	4.9	5.7	6.7	8.8	4.2	10.9	13.1	-	
개발공식	4.9	4.3	4.9	6.2	5.3	8.0	4.9	10.2	11.2	I_e : 유효강우강도	

본 논문에서는 개발된 저류상수 공식과 기존의 경험공식을 실제 호우사상 및 Clark 모형에 적용하여 각 소유별로 계산된 유출수문곡선을 그림 1과 같이 관측수문곡선과 비교하여 그 적합 정도를 검토하였다. 그 결과 본 연구의 공식이 첨두유출량에서 평균 9.17%의 오차를, 첨두발생시간에서 평균 1.92시간의 오차를 보였으며, 타 공식들은 첨두유출량의 오차가 평균 20.31~53.83%, 첨두발생시간의 오차가 평균 2.17~2.52시간으로 나타나 본 연구공식이 타 공식에 비교적 우수한 결과를 보였다.

3.2 설계강우에 대한 적용 및 검토

본 연구에서는 섬진강 유역과 유역특성이 유사한 섬강 유역의 설계강우량과 유역특성인자를

본 연구에서 개발된 저류상수 공식을 적용하여 Clark 모형으로 강우-유출분석을 수행하고, 이를 기존의 분석 결과와 비교 검토하였다. 기존 분석에서는 유역특성인자, 도달시간(Kraven공식), 저류상수(Sabol공식), 빈도별 강우강도공식 및 강우의 시간분포(Huff의 3분위), SCS 유효우량 산정방법 등을 이용하였으며, 본 연구에서는 저류상수를 제외한 모든 조건을 동일 조건으로 하고 Sabol공식과 본 연구에서 개발한 공식의 저류상수만 교체하여 분석하였다. 그 결과 섬강 유역중 이리천 합류후 지점에 대한 저류상수 및 단위도 침투종거 등은 표 7과 같으며, Sabol공식에 의한 저류상수는 유역특성 및 도달시간의 관계로 결정되어지므로 섬강의 각 소유역별로 빈도에 관계없이 동일하고 따라서 단위도 역시 동일한 결과를 보인다. 반면에 본 연구의 결과는 표 7 및 그림 2와 같이 빈도별 설계강우량의 유효강우량 변화에 따른 빈도별 저류상수 및 단위도 종거의 변화, 즉 유효강우강도의 증가에 따라 저류상수의 감소와 단위도 침투종거의 증가를 보인다. 이러한 양상은 표 8 및 그림 3에서와 같이 빈도별 유효강우량 주상도와 단위도를 이용한 빈도별 침투홍수량에서도 똑같이 나타난다.

한편, 본 연구에서 개발된 저류상수 산정공식의 적용성을 검토하고자 빈도별 유효강우강도에 대한 유출률의 기울기와 각 저류상수 산정방법에 의한 침투홍수량의 대한 빈도별 유출계수의 기울기를 그림 3과 같이 비교하여 보았다. 이때 유출률은 기존 분석이나 본 연구에서 동일한 값을

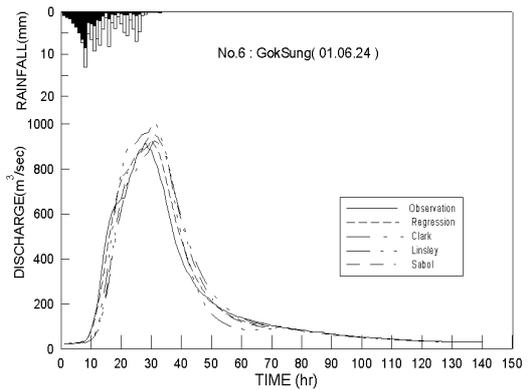


그림 1. 유출수문곡선의 비교(곡성)

표 7. 섬강 이리천 합류후 지점의 저류상수 및 단위도 비교

빈도	구분				건교부 보고서			개발공식		
	총 강우량	유효 강우량	유효 강우강도	도달시간	저류상수 (hr)	침투 단위도종거	발생시간 (hr)	저류상수 (hr)	침투 단위도종거	발생시간 (hr)
10년	153.7	105.1	21.0	6.15	5.73	301.7	6	6.40	283.4	6
25년	191.1	140.3	28.1	6.15	5.73	301.7	6	6.04	293.6	6
50년	220.0	167.9	33.6	6.15	5.73	301.7	6	5.82	300.0	6
80년	239.9	187.1	37.4	6.15	5.73	301.7	6	5.69	303.7	6
100년	249.5	196.4	39.3	6.15	5.73	301.7	6	5.64	305.4	6
250년	289.4	235.1	47.0	6.15	5.73	301.7	6	5.43	311.8	6

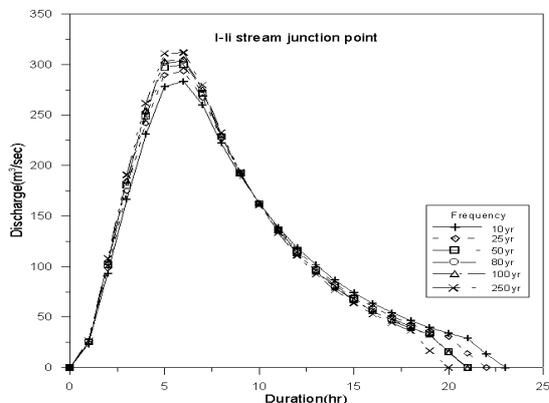


그림 2. 빈도별 단위도의 비교

표 8. 이리천 합류후의 홍수량 비교

빈도	건교부 보고서		회귀공식	
	침투 홍수량	침투 시간(hr)	침투 홍수량	침투 시간(hr)
10년	3033.4	9	2840.7	9
25년	4037.2	9	3924.5	9
50년	4823.4	9	4794.6	9
80년	5368.5	9	5405.2	9
100년	5630.5	9	5701.7	9
250년	6727.7	9	6957.6	9

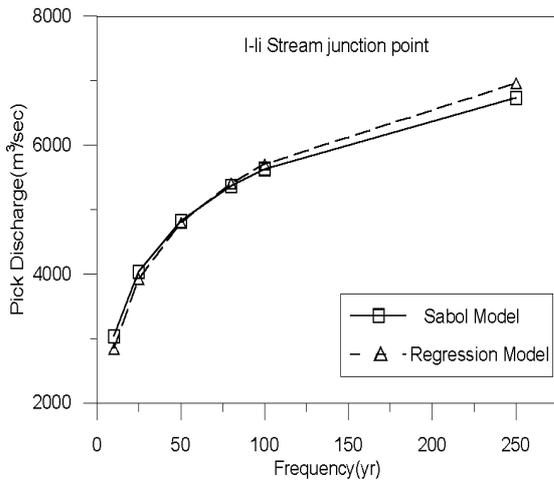


그림 3. 빈도별 홍수량 비교

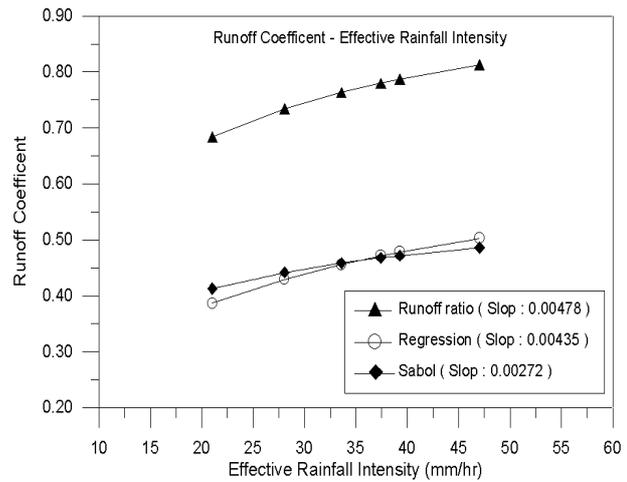


그림 4. 유효강우강도와 유출율과의 관계

가지며, 첨두홍수량에 대한 유출계수는 합리식의 이론을 적용하여 산정하였다. 그 결과 본 연구의 빈도별 유효강우강도에 의한 유출계수의 기울기가 기존 분석에서 보다 유효강우강도의 증가에 대한 유출률의 증가 기울기에 더욱 접근하였으며, 이는 홍수량의 산정에 있어서 기존 경험공식의 고정 저류상수를 이용하는 것보다 유효강우강도의 영향을 고려한 저류상수를 이용하는 것이 더 타당함을 나타내는 것이라 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 자연하천유역에 적합한 저류상수 산정공식을 개발하기 위하여 섬진강 유역에 대한 유역특성인자 및 강우특성인자를 분석하고, 이의 단계별 회귀분석으로부터 유역면적, 하도연장, 하도경사의 유역특성인자뿐만 아니라 강우특성인자인 유효강우강도를 설명변수로 갖는 저류상수 산정공식을 개발하였으며, 개발된 공식의 적용성을 검토하고자 Clark의 단위도 모형과 섬진강 유역의 실제 호우사상 및 남한강 지류인 섬강 유역의 설계강우량에 대한 기존의 경험공식 및 본 연구에서 개발된 공식의 저류상수를 적용하여 첨두홍수량 및 유출수문곡선 등을 비교분석하였다.

그 결과 실제 호우사상에 대한 비교 분석에서 본 연구에서 개발된 저류상수 공식이 기존의 경험공식에 비해 계산된 유출수문곡선과 관측수문곡선의 상관성 매우 높았으며, 첨두홍수량 및 첨두 발생시간의 오차도 매우 작게 발생하였다. 또한 설계강우량의 분석에서는 단위도의 첨두종거 및 첨두홍수량에서 본 연구의 개발공식과 기존 경험공식 사이에 다소의 차이를 보이고 있으나, 빈도별 유출율과 유출계수의 비교에서 본 연구의 개발공식이 기존의 경험공식보다 그 타당성이 우수함을 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1999), 사회기반시설 홍수방어능력 평가기법 개발.
2. 성기원(1997), 유역의 상사성을 이용한 Clark공식의 매개변수 해석, 한국수자원학회 논문집, 제 32권, 제 4호, 한국수자원학회 pp. 427~435.
3. 윤태훈, 박진원(2002), Clark 단위도의 저류상수산정방법의 개선, 2002 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 제 2권, 한국수자원학회, pp. 1334~1339.
4. Bell, F.C.(1969), Characteristic Response Time in Design Flood Estimation, Journal of Hydrology, Vol. 8, pp. 173~196.
5. Soil G.V(1988), Clark Unit Hydrograph and R-parameter estimation, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, NO.1, pp.103~111.